

2026년 한국대기환경학회 발표논문집

제69회 정기학술대회

KOSAE 69th Annual Conference 2026

AI와 첨단감시로 여는 통합 대기관리의 미래

Transforming Air Quality Management with AI and Smart Surveillance

2026년 10월 28일(수) ~ 30일(금)

대구EXCO

주최 · 주관 | 사단법인 한국대기환경학회 Korean Society for Atmospheric Environment

후원 | KOFST 한국과학기술단체총연합회 · exco · SK 하이닉스 · 한국환경공단 Korea Environment Corporation · LG전자

Particle and Gas Measurement
입자상 및 가스상 물질 실시간 분석 솔루션!

☑ 대기오염 측정



광대역 분광법
미세먼지 측정기
OPX 1025



미세먼지(연속)채취기
LAS-1/LAS-16



미세먼지 측정기
BAM-1020



대기오염측정소
AQMS



대기오염 이동측정차량
Mobile lab

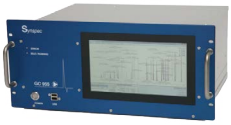
☑ 유해대기물질 측정



실시간 비행시간차
질량분석기
PTR-TOF MS



총탄화수소(THC) 분석기
Nutech 3000



BTEX 분석기
GC955-601



온실가스 분석기
GLA331-GGA



휴대용 **FT-IR**
AFT-100

☑ 입자 에어로졸 측정



나노 에어로졸 입경분포 측정기
3938E57



공기역학적 입경분포 측정기
3321



휴대용 미세먼지 측정기
8530/8532

APM
Since 1994
Measuring the Environment
(주)에이피엠엔지니어링
경기도 부천시 원미구 송내대로 388 부천테크노파크 202-808
Tel. 032-219-7700 **E-mail.** sales@apm.co.kr **Web.** www.apm.co.kr

발 표 논 문 집

2026년 10월 28일(수) ~ 30일(금)
대구EXCO

사단법인 한국대기환경학회
Korean Society for Atmospheric Environment

본 사업은 기획예산처의 복권기금 및 과학기술정보통신부의 과학기술진흥기금으로 추진되어 공익 및 사회적 가치 실현과 국가 과학기술 발전에 기여합니다.

(사)한국대기환경학회
2026년 정기학술대회 및 정기총회

발행일 : 2026년 10월 1일
발행인 : 송지현
편집인 : 전기준
발행처 : (사)한국대기환경학회
03169 서울특별시 종로구 사직로 102(필운동)
광화문의 꿈 204호
Tel. 02-2038-2772 Fax. 02-387-1881
E-mail : kosae@kosae.or.kr
Homepage : http://www.kosae.or.kr
인 쇄 : 정행사(Tel. 02-2232-3281, Fax. 02-2232-5874)

발표논문집 및 학술대회와 관련된 문의사항은 ……

학술이사 가톨릭대학교 에너지환경공학과 윤종상 교수(jsyoun@catholic.ac.kr)
Tel. 02-2164-4370
학술담당 한국대기환경학회 김현주 간사(kosae@kosae.or.kr)
Tel. 02-2038-2772 Fax. 02-387-1881

발표논문집 차례

초청의 글 ····· 5
정기총회 식순 ····· 6
정기학술대회 일정 ····· 7
Plenary Session ····· 10
발표일정표(구두발표) ····· 17
발표일정표(포스터발표) ····· 77
Plenary Session Transforming Air Quality Management with AI and Smart Surveillance ····· 94
Session 1A 신진과학자 ····· 100
Session 1B [교육프로그램] 라이다 시스템 개요와 데이터 해석 및 분석법 실습 ····· 103
Session 1C [특별세션] 2026 YES-BAM 캠페인을 통한 에어로졸 특성 분석 ····· 104
Session 1D 대기환경연구 공모전 ····· 107
Session 1E [특별세션] (Closed Session)한국형 BVOCs 배출계수 DB 구축과 국가 대기배출목록 고도화술 ····· 110
Session 1F [특별세션] 고농도 오존 관리를 위한 정책 방안 ····· 113
Session 1G [특별세션] (Closed Session) 입자상/가스상/응축성 대기오염물질 동시저감 기술 개발 ····· 116
Session 1H [특별세션] 미세먼지연구·관리센터 협의체 ····· 119
Session 1I [Korea-China-Japan Joint Workshop] For a Better Understanding of Air Pollution in East Asia (5th) ····· 122
Session 2B [교육프로그램] 대기오염 방지기술의 현장과 실무 ····· 127
Session 2C [기후탄소위원회 특별세션] 자동차 전과정 배출의 이슈와 미래 ····· 128
Session 2D 대기환경연구 공모전 ····· 130
Session 2E [특별세션] 한반도 동아시아 배경대기 관측 연구의 현황과 미래 방향 ····· 134
Session 2F [특별세션] 환경위성 활용 공동 워크숍 ····· 137
Session 2G [원격탐사·센서분과회 특별세션] 대기관리를 위한 첨단모니터링 기술 ····· 139
Session 2H [특별세션] 국내 대기·실내 미세플라스틱 연구의 현황과 미래 ····· 142
Session 3A 신진과학자 ····· 147
Session 3B 측정·분석 ····· 149
Session 3C 방지기술 ····· 151
Session 3D 대기환경연구 공모전 ····· 153
Session 3E [학생세션] ····· 156
Session 3F [학생세션] ····· 159
Session 3G [학생세션] ····· 161
Session 3H [학생세션] ····· 164
Session 3I 실태·배출관리 ····· 166
Session 4A 측정·분석 ····· 171
Session 4B 측정·분석 ····· 173
Session 4C 대기환경모델링·AI ····· 176
Session 4D 측정·분석 ····· 178
Session 4E [학생세션] ····· 181
Session 4F [학생세션] ····· 183
Session 4G [학생세션] ····· 186
Session 4H [학생세션] ····· 188

발표논문집 차례

Session 5A 측정·분석 ····· 193
Session 5B 측정·분석 ····· 195
Session 5C 대기환경모델링·AI ····· 198
Session 5D 원격탐사·센서 ····· 200
Session 5E 기후변화·에너지 ····· 203
Session 5F 실태·배출관리 ····· 205
Session 5G [대기위해성분과회 특별세션]빅데이터 및 AI 기반 기후변화-대기오염의 건강영향 연구 ····· 207
Session 5H [특별세션] (Closed Session) 대기배출원의 정밀측정·추적을 위한 통합 플랫폼 기술 개발 ····· 209
Session 5I [특별세션] 고농도 오존 hot-spot 관리 I ····· 211
Session 6A 측정·분석 ····· 217
Session 6B 측정·분석 ····· 220
Session 6C 대기환경모델링·AI ····· 222
Session 6D 방지기술 ····· 225
Session 6F 대기위해성 ····· 227
Session 6G [특별세션] (Closed Session) 비산배출원 규명을 위한 NH_3-PM 측정 라이다 및 모니터링 기술 ····· 230
Session 6H [측정·분석분과회 특별세션] 첨단 대기측정분석기술과 AI 기반 데이터 활용 ····· 232
Session 6I [특별세션] 고농도 오존 hot-spot 관리 II ····· 235
Session 7A 측정·분석 ····· 239
Session 7B 측정·분석 ····· 241
Session 7C 대기환경모델링·A술 ····· 244
Session 7D 방지기술 ····· 246
Session 7E 기후변화·에너지 ····· 248
Session 7F [특별세션] (Closed Session) 응축성 먼지 관리체계 방향성: 측정 현황과 산정 영향-응축성 먼지 ····· 250
Session 7H 실내공기질 ····· 251
Session 7I 실내공기질 ····· 252
Session PA 실내공기질 ····· 256
Session PB 기후변화·에너지 ····· 260
Session PC 대기환경모델링·AI ····· 264
Session PD 측정·분석 ····· 279
Session PE 실태·배출관리 ····· 310
Session PF 대기위해성 ····· 318
Session PG 방지기술 ····· 324
Session PH 원격탐사·센서 ····· 332
Session PI 미래연구자 ····· 340
발표자 색인 ····· 352
기기(기술)전시 업체 안내 ····· 360

초청의 글



존경하는 한국대기환경학회 회원 여러분,
한국대기환경학회에 보내주시는 변함없는 관심과 성원에 깊이 감사드립니다.

2026년 한국대기환경학회 제69회 정기학술대회 및 정기총회가 10월 28일(수)부터 30일(금)까지 3일간 대구 EXCO에서 개최됩니다. 올해 학술대회의 주제는 “AI와 첨단감시로 여는 통합 대기관리의 미래”입니다. 급변하는 대기환경 여건 속에서 AI와 첨단 관측·감시기술을 활용하여 대기오염을 보다 정확하게 진단하고 예측하며, 효과적으로 관리하기 위한 미래의 방향을 함께 모색하고자 합니다.

이번 학술대회에서는 AI와 첨단감시기술을 비롯하여 미세먼지·오존 등 주요 대기오염물질, 대기질 모델링과 예측, 환경위성, 기후변화와 대기환경, 대기오염 저감기술 및 정책 등 다양한 분야의 최신 연구성과가 공유될 예정입니다. 또한 학계·연구기관·정부·공공기관·산업계가 함께 참여하여 과학적 연구성과를 실제 정책과 기술로 연결하고, 미래 대기환경 관리의 새로운 방향을 논의하는 자리가 될 것입니다.

한국대기환경학회는 지난 43년간 우리나라 대기환경 연구와 정책의 발전을 함께해 왔습니다. 이제 그 성과와 경험을 바탕으로 한 걸음 더 나아가고자 합니다. 대기과학과 기후, 보건, 데이터과학 등 인접 분야와의 융합 연구를 넓히고, 차세대 연구자들이 역량을 마음껏 펼칠 수 있는 기반을 다지며, 국제 협력을 통해 동아시아 대기환경 연구를 선도하는 학회로 성장해 가겠습니다. 아울러 과학적 근거에 기반한 정책 제언과 국민과의 소통을 강화하여, 국민의 건강과 지속가능한 미래를 위한 신뢰받는 과학적 해법을 제시하는 학회가 되도록 노력하겠습니다.

이번 학술대회가 최신 연구성과를 나누는 자리를 넘어, 학회의 다음 도약을 함께 설계하는 논의의 장이 되기를 바랍니다. 회원 여러분과 대기환경 분야에 관심 있는 모든 분들의 적극적인 참여와 다양한 의견을 부탁드립니다.

대구 EXCO에서 회원 여러분을 만나 뵙겠습니다.
감사합니다.

2026년 10월

사단법인 한국대기환경학회장 송 지 현 배상

정기총회 식순

(2026년 10월 29일(목) 오후 5시, 대구EXCO 그랜드볼룸B)

1	17:00~17:05	개 회 선 언
2	17:05~17:10	국 민 의 례
3	17:10~17:15	개 회 사
4	17:15~17:30	축 사
5	17:30~18:30	주요업무 및 결산보고
		감 사 보 고
		토의 안건 및 심의
		시 상
		경 품 행 사
		폐 회 선 언

정기학술대회 일정

(2026년 10월 28일(수)~30일(금) 대구EXCO)

◈ 10월 28일 수요일 일정표

시간	행 사 일 정								
	1발표장 (320A)	2발표장 (320B)	3발표장 (321A)	4발표장 (321B)	5발표장 (322B)	6발표장 (323A)	7발표장 (323B)	8발표장 (324A)	9발표장 (324B)
13:30~15:30	1A 신진과학자	1B 교육프로그램	1C 특별세션	1D 대기환경연구 공모전	1E 특별세션 (Closed Session)	1F 특별세션	1G 특별세션 (Closed Session)	1H 특별세션	1I Korea-China -Japan Joint Workshop
15:30~16:00	Break-Time								
16:00~18:00	2A 취업특강	2B 교육프로그램	2C 특별세션 (기후탄소위원회)	2D 대기환경연구 공모전	2E 특별세션	2F 특별세션	2G 특별세션 (원격탐사·센서분과회)	2H 특별세션	

1B [교육프로그램] 라이다 시스템 개요와 데이터 해석 및 분석법 실습
1C [특별세션] 2026 YES-BAM 캠페인을 통한 에어로졸 특성 분석
1E [특별세션] (Closed Session) 한국형 BVOCs 배출계수 DB 구축과 국가 대기배출목록 고도화
1F [특별세션] 고농도 오존 관리를 위한 정책 방안
1G [특별세션] (Closed Session) 입자상/가스상/응축성 대기오염물질 동시저감 기술 개발
1H [특별세션] 미세먼지연구·관리센터 협의체
1I [Korea-China-Japan Joint Workshop]
For a Better Understanding of Air Pollution in East Asia (5th)

2B [교육프로그램] 대기오염 방지기술의 현장과 실무
2C [특별세션] (기후탄소위원회) 자동차 전과정 배출의 이슈와 미래
2E [특별세션] 한반도 동아시아 배경대기 관측 연구의 현황과 미래 방향
2F [특별세션] 환경위성 활용 공동 워크숍
2G [특별세션] (원격탐사·센서분과회) 대기관리를 위한 첨단모니터링 기술
2H [특별세션] 국내 대기·실내 미세플라스틱 연구의 현황과 미래

◈ 10월 29일 목요일 일정표

시간	행 사 일 정									
	1발표장 (320A)	2발표장 (320B)	3발표장 (321A)	4발표장 (321B)	5발표장 (322B)	6발표장 (323A)	7발표장 (323B)	8발표장 (324A)	9발표장 (324B)	10발표장 (그랜드볼룸B)
09:00~10:40	3A 신진과학자	3B 측정·분석	3C 방지기술	3D 대기환경연구 공모전	3E 학생세션	3F 학생세션	3G 학생세션	3H 학생세션	3I 실태·배출관리	
10:40~11:00	Break-Time									
11:00~12:40	4A 측정·분석	4B 측정·분석	4C 대기환경모델링·AI	4D 측정·분석	4E 학생세션	4F 학생세션	4G 학생세션	4H 학생세션	**평의원회** (11:00~12:20)	
	점 심 - 엑스코 소담, 다담뜰 한식뷔페 (2F)									
13:00~14:30	포스터 부착 (11:00~12:40), 포스터발표 (13:00~14:30), 기기(기술)전시 - 그랜드볼룸A (3F)									
14:30~16:20										**Plenary Session** (14:30~16:20)
16:20~17:00										Break-Time
17:00~18:30										**정기총회** (17:00~18:30)
18:30~19:30	다과 및 경품행사(그랜드볼룸B)									

◈ 10월 30일 금요일 일정표

시간	행 사 일 정								
	1발표장 (320A)	2발표장 (320B)	3발표장 (321A)	4발표장 (321B)	5발표장 (322B)	6발표장 (323A)	7발표장 (323B)	8발표장 (324A)	9발표장 (324B)
09:00~10:40	5A 측정·분석	5B 측정·분석	5C 대기환경모델링·AI	5D 원격탐사·센서	5E 기후변화·에너지	5F 실태·배출관리	5G 특별세션 (대기위해성분과회)	5H 특별세션 (Closed Session)	5I 특별세션
10:40~11:00	Break-Time								
11:00~13:00	6A 측정·분석	6B 측정·분석	6C 대기환경모델링·AI	6D 방지기술		6F 대기위해성	6G 특별세션 (Closed Session)	6H 특별세션 (측정·분석분과회)	6I 특별세션
	점 심 - 엑스코 소담, 다담뜰 한식뷔페 (2F)								
13:30~15:10	포스터발표 및 평가 (13:30~15:10), 기기(기술)전시 - 그랜드볼룸A (3F)								
15:10~16:50	7A 측정·분석	7B 측정·분석	7C 대기환경모델링·AI	7D 방지기술	7E 기후변화·에너지	7F 특별세션 (Closed Session)		7H 실내공기질	7I 실내공기질
17:00~	**시상 및 경품행사 - 그랜드볼룸A**								

5G [특별세션] (대기위해성분과회) 빅데이터 및 AI 기반 기후변화-대기오염의 건강영향 연구
5H [특별세션] (Closed Session) 대기배출원의 정밀측정·추적을 위한 통합 플랫폼 기술 개발
5I [특별세션] 고농도 오존 hot-spot 관리 I
6G [특별세션] (Closed Session) 비산배출원 규명을 위한 NH_3-PM 측정 라이다 및 모니터링 기술
6H [특별세션] (측정·분석분과회) 첨단 대기측정분석기술과 AI 기반 데이터 활용
6I [특별세션] 고농도 오존 hot-spot 관리 II
7F [특별세션] (Closed Session) 응축성 먼지 관리체계 방향성 : 측정 현황과 산정 영향-응축성 먼지

Plenary Session

- Transforming Air Quality Management with AI and Smart Surveillance

◈ Date : 2026 October 29, Thursday, 14:30–16:20
◈ Venue : Grand Ballroom B, 3F
◈ Chair : Prof. Jong-sang Youn [The Catholic University of Korea]

Time	Title	Speaker (Affiliation)
14:30~15:00	Ground Level Ozone and $PM_{2.5}$ in the Greater Los Angeles Metropolitan Area: Characteristics and Control Strategy	Dr. Sang-Mi Lee (South Coast AQMD)
15:00~15:30	The Evolving Air Quality Landscape in China: Interactions with a Changing Climate and the Path to Win-Win Solutions	Dr. Hong Liao (Nanjing University of Information Science & Technology)
15:30~16:00	AI-Augmented System for Epidemiological Investigation of Occupational and Environmental Diseases: Molecule RAG and Human-in-the-Loop (HITL) Framework	Dr. Jin Ha Yoon (Yonsei University College of Medicine)
16:00~16:20	AI and Advanced Technology-Driven Transformation in Atmospheric Environmental Policy	Jiwon Seong (National Institute of Environmental Research)

발표일정표 (구두) ▶ 2026년 10월 28일(수) 오후

발표장	1발표장 (320A)	2발표장 (320B)	3발표장 (321A)	4발표장 (321B)	5발표장 (322B)	6발표장 (323A)	7발표장 (323B)	8발표장 (324A)	9발표장 (324B)
세 션	1A 신진과학자	1B 교육프로그램	1C 특별세션	1D 대기환경연구 공모전	1E 특별세션 (Closed Session)	1F 특별세션	1G 특별세션 (Closed Session)	1H 특별세션	1I Korea-China -Japan Joint Workshop
좌 장	노철언		김영아	신혜정	손윤석	심창섭	박대훈	송창근	Young-Ji Han
13:30~13:50	강석원	신동호 (13:30~14:10)	유희정	윤창동 (13:30~13:45)	손윤석	서정빈	김승재	최나래	Kazuhide Matsuda (13:35~14:00)
13:50~14:10	최현영	노영민 (14:10~14:50)	최시영	장예진 (13:45~14:00)	오용환	한지현	조윤행	한범순	Hong Li (14:00~14:25)
14:10~14:30	심주현	Break-Time	성민영	곽한주 (14:00~14:15)	정민찬	김정	변영철	김종호	Kyung Hwan Kim (14:25~14:50)
14:30~14:50	이용찬	신주선 (15:00~15:30)	박민수	한승희 (14:15~14:30)	김조천	이승민	김연진	한경만	Break-Time
14:50~15:10	천지민	* 데이터 분석 실습에 한해 노트북 필수 지참(matlab 실행 환경 권장)	이민서	장권 (14:30~14:45)	윤종상	송민영	이광택	이종재	Syuichi Itahashi (15:05~15:30)
15:10~15:30	김연욱		종합토론	신민영 (14:45~15:00)	이형주	조현영		이종태	
15:30~16:00	Break-Time				제선미				Di Wang (15:30~15:55)
세 션	2A 취업특강	2B 교육프로그램	2C 특별세션 (기후탄소위원회)	2D 대기환경연구 공모전	2E 특별세션	2F 특별세션	2G 특별세션 (원격탐사·센서분과회)	2H 특별세션	Na Rae Choi (15:55~16:20)
좌 장	김종범	양재환	문난경	신혜정	이미혜	강경희	김덕현	전기준	
16:00~16:20	김석범 (16:10~16:45)	장현섭 (16:00~16:40)	박준홍	권은별 (16:00~16:15)	정진용	이윤곤 (16:00~16:15)	신동호	전기준	
16:20~16:40	이건왕 (16:45~17:20)		윤영중	박준현 (16:15~16:30)	김수민	강은진 (16:15~16:30)	최용주	이재웅	
16:40~17:00		김재혁 (16:40~17:20)	박용성	전지원 (16:30~16:45)	윤창동	박상서 (16:30~16:45)	강영웅	이석환	
17:00~17:20	조경일 (17:20~17:55)		이규진	김태윤 (16:45~17:00)	강성구	이효정 (16:45~17:00)	이한림	김영민	
17:20~17:40	젊은과학자 교류회[2부] (조이스치킨, 18:10~20:00)	이승욱 (17:00~18:00)	[토론] 유 철, 한진석	유종원 (17:00~17:15) 김성영 (17:15~17:30)	김주애	김병길 (17:00~18:00)	이유선	유한진	
17:40~18:00				김준영(안양대) (17:30~17:45)	최용주				

▶ 2026년 10월 29일(목) 오전

발표장	1발표장 (320A)	2발표장 (320B)	3발표장 (321A)	4발표장 (321B)	5발표장 (322B)	6발표장 (323A)	7발표장 (323B)	8발표장 (324A)	9발표장 (324B)
세 션	3A 신진과학자	3B 측정·분석	3C 방지기술	3D 대기환경연구 공모전	3E 학생세션	3F 학생세션	3G 학생세션	3H 학생세션	3I 실태·배출관리
좌 장	이강웅	윤종상	정용원	강경희	배민석	서지훈	권형안	최용주	이우근
09:00~09:20	이호영	주태규	김준엽	김나경 (09:00~09:15)	윤준혁	김찬수	최효정	이상림	김종범
09:20~09:40	이상진	이우정	서서희	임상현 (09:15~09:30)	이수정	김주한	김석준	천소현	이동은
09:40~10:00	신주선	이지우	박준희	박채원 (09:30~09:45)	민희성	전현수	김민호	정선기	정성은
10:00~10:20	김태희	박은하	박재현	김예진 (09:45~10:00)	임하늘	박세은	강형모	신규성	김진식
10:20~10:40	최연규			박정현 (10:00~10:15)	김하정	이헌영	장재화		
10:40~11:00	Break-Time			김준영(연세대) (10:15~10:30)					
세 션	4A 측정·분석	4B 측정·분석	4C 대기환경모델링·AI	4D 측정·분석	4E 학생세션	4F 학생세션	4G 학생세션	4H 학생세션	
좌 장	백성옥	김신도	선우 영	김조천	주태규	서서희	김은혜	옥유진	
11:00~11:20	황규철	강차오름	김병연	김환동	김우준	박지영	정준영	김민선	평의원회 (11:00~12:20)
11:20~11:40	김연후	주정태	이성빈	남우희	서지영	박성민	정다운	이수현	
11:40~12:00	박현영	옥수민	김동휘	권수진	이재진	사공누리	손현민	윤찬호	
12:00~12:20	김해연	노해민	이예림	임유락	김주영	박아린	이창주	서성민	
12:20~12:40	김정빈	이지선	조혜은	우서라	나은상	김희진	조민준	홍준영	

▶ 2026년 10월 29일(목) 오후

발표장	1발표장 (320A)	2발표장 (320B)	3발표장 (321A)	4발표장 (321B)	5발표장 (322B)	6발표장 (323A)	7발표장 (323B)	8발표장 (324A)	9발표장 (324B)	10발표장 (그랜드볼룸B)
13:00~14:30	포스터 부착 (11:00~12:40), 포스터발표 (13:00~14:30), 기기(기술)전시 - 그랜드볼룸A (3F)									
세 션										Plenary Session (14:30~16:20)
좌 장										Chair : Jong-sang Youn
14:30~15:00										Sang-Mi Lee
15:00~15:30										Hong Liao
15:30~16:00										Jin Ha Yoon
16:00~16:20										Jiwon Seong
16:20~17:00										Break-Time
17:00~18:30										정기총회 (17:00~18:30)
18:30~19:30	다과 및 경품행사(그랜드볼룸B)									

▶ 2026년 10월 30일(금) 오전

발표장	1발표장 (320A)	2발표장 (320B)	3발표장 (321A)	4발표장 (321B)	5발표장 (322B)	6발표장 (323A)	7발표장 (323B)	8발표장 (324A)	9발표장 (324B)
세 션	5A 측정·분석	5B 측정·분석	5C 대기환경모델링·AI	5D 원격탐사·센서	5E 기후변화·에너지	5F 실태·배출관리	5G 특별세션 (대기위해성분과회)	5H 특별세션 (Closed Session)	5I 특별세션
좌 장	김성준	박풍모	이형주	신동호	여민주	이임학	김세라	전기준	최용주
09:00~09:20	손지훈	고민지	정필수	윤지현	조면성	전예지	유은진	전기준	최용주
09:20~09:40	미슈라 샬리니	홍천상	김동진	성해창	원수란	이경빈	안소진	이건희	배민석
09:40~10:00	이유선	한슈디	마예진	김성영	강성민	한세현	오종민	박은하	강현규
10:00~10:20	Nguyen Dat	이현민	강보경	김지석	곽재혁	김민영	정경준	남형석	최나래
10:20~10:40	남일권	김선웅	이정범	김치영			최하연		윤치성
10:40~11:00	Break-Time								
세 션	6A 측정·분석	6B 측정·분석	6C 대기환경모델링·AI	6D 방지기술		6F 대기위해성	6G 특별세션 (Closed Session)	6H 특별세션 (측정·분석분과회)	6I 특별세션
좌 장	김경환	유한진	김민중	양재환		정경준	노영민	이지이	곽경환
11:00~11:20	박종현	유성지	배세정	문소은		이용성	신동호	이태형	곽경환
11:20~11:40	레티황이엔	박유경	이윤구	이윤경		Balasubramanian Prithiviraj	송미정	최성득	김순태
11:40~12:00	이석현	김정호	김진승	전진수		서재원	신주선	김관철	강윤희
12:00~12:20	이지민	한수빈	황수민	김범식		박성원	노영민	이영로	김현서
12:20~12:40	정석한	강천웅	정지민	정현수		박채형		길준수	
12:40~13:00	김기애							신지원	지정 토론

▶ 2026년 10월 30일(금) 오후

발표장	1발표장 (320A)	2발표장 (320B)	3발표장 (321A)	4발표장 (321B)	5발표장 (322B)	6발표장 (323A)	7발표장 (323B)	8발표장 (324A)	9발표장 (324B)
13:30~15:10	포스터발표 및 평가 (13:30~15:10), 기기(기술)전시 - 그랜드볼룸A (3F)								
세 션	7A 측정·분석	7B 측정·분석	7C 대기환경모델링·AI	7D 방지기술	7E 기후변화·에너지	7F 특별세션 (Closed Session)		7H 실내공기질	7I 실내공기질
좌 장	**송영철**	**최용주**	**박승부**	**장현섭**	**나하나**	**윤종상**		**원수란**	**김용현**
15:10~15:30	고찬주	부준오	김지민	김정호	박인홍	전기준		오승관	루연
15:30~15:50	박지원	조나래	황혜민	문병현	노준영	한세현		김정민	오용환
15:50~16:10	정라니	서범근	고용국	김재헌	배기남			은천	이진근
16:10~16:30	김규보	정진주	이소진	김신동	트란민녹	토론			이철승
16:30~16:50	이기열	박용미							
17:00~	시상 및 경품행사 - 그랜드볼룸A								

발표일정표 - 포스터

▶ **포스터 부착 : 10월 29일(목) 11:00~12:40**
▶ **포스터 1차 발표 : 10월 29일(목) 13:00~14:30**
▶ **포스터 2차 발표 및 평가 : 10월 30일(금) 13:30~15:10**
▶ **포스터 발표장 : 그랜드볼룸A(3F)**

평가위원[PA~PH] : 김용현(전북대학교), 김은혜(국립군산대학교), 김주애(고려대학교), 박대훈(한국기계연구원), 박은하((재)포항산업과학연구원), 박풍모(안산미래연구원), 송영철(한국화학연구원), 오용환(국립부경대학교), 이현정(제주대학교), 정경준(연세대학교), 최나래(강원대학교), 최용주(한국외국어대학교)

평 가 위 원 [PI] : 김민중(명지대학교), 김종범(충남연구원), 나하나(인제대학교), 박승부(서울시립대학교), 이영로(고려대학교)

구분	이름	구분	이름	구분	이름	구분	이름	구분	이름
PA1	이혜연	PD1	장지호	PD32	정수린	PE5	최상	PH5	박경
PA2	김나혜	PD2	신성균	PD33	연바다	PE6	손종렬	PH6	박선영
PA3	송영철	PD3	최서영	PD34	서상덕	PE7	김정희	PH7	박정현
PB1	서유정	PD4	고동훈	PD35	성민경	PE8	신은지	PH8	유이슬
PB2	김준서	PD5	송명기	PD36	윤현준	PE9	최예지	PH9	오세호
PB3	나하나	PD6	박희선	PD37	윤현준	PE10	김재원	PH10	이동희
PC1	강은진	PD7	최영재	PD38	윤현준	PE11	한세현	PH11	이승재
PC2	김지훈	PD8	이상탁	PD39	윤현준	PE12	김승원	PI1	김채은
PC3	김지훈	PD9	강병욱	PD40	장정연	PF1	최은화	PI2	허재범
PC4	이상균	PD10	유나기	PD41	임희연	PF2	김성동	PI3	이한빛
PC5	WINT THIRI MARN	PD11	김상준	PD42	김주영	PF3	안영진	PI4	정희성
PC6	김나현	PD12	최예덕	PD43	김연지	PF4	조성빈	PI5	정지운
PC7	박재형	PD13	마창진	PD44	박종현	PF5	아밀라	PI6	이가은
PC8	김우진	PD14	변진영	PD45	권정희	PF6	서지영	PI7	이어진
PC9	채다은	PD15	박영일	PD46	안준건	PF7	여민주	PI8	백승재
PC10	김지선	PD16	김채은	PD47	최승진	PG1	조상희	PI9	이유경
PC11	유정우	PD17	강혜진	PD48	김수경	PG2	이재은	PI10	박소현
PC12	최현식	PD18	Tran Phuoc Tan	PD49	김동현	PG3	최정해	PI11	김수민
PC13	장예진	PD19	란즈바란 마흐샤드	PD50	정수진	PG4	김민서	PI12	김보연
PC14	최동원	PD20	함수한	PD51	이효원	PG5	김현빈	PI13	신원범
PC15	권민지	PD21	이은아	PD52	나하나	PG6	조준표	PI14	강희찬
PC16	나세르	PD22	배효정	PD53	나하나	PG7	김현준	PI15	이의진
PC17	최진녕	PD23	오승미	PD54	장지혜	PG8	정락영	PI16	김혜연
PC18	안효빈	PD24	고원석	PD55	우지윤	PG9	윤원근	PI17	고민서
PC19	정가빈	PD25	조범기	PD56	배성현	PG10	김동우	PI18	선여진
PC20	서예빈	PD26	오승주	PD57	백정덕	PG11	박병규	PI19	김나현
PC21	신혜진	PD27	박선호	PD58	박일건	PG12	엄준업	PI20	박지영
PC22	채찬병	PD28	박도현	PE1	박일건	PH1	박호성	PI21	이채린
PC23	박유정	PD29	윤문상	PE2	마창진	PH2	박지민	PI22	김경석
PC24	한세현	PD30	이혜지	PE3	강윤희	PH3	홍유지	PI23	최예준
PC25	장지호	PD31	이상훈	PE4	박성규	PH4	김준희	PI24	정동영

발표일정표 - 구두발표

Session 1A 신진과학자

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

13:30-15:30	1발표장 [320A] | 좌장 노철언 [한국대기환경학회 고문]
1A1 13:30-13:50	연속산화흐름반응기를 활용한 산업단지 VOCs의 배출 특성과 2차 유기에어로졸 생성 잠재력 평가 강석원, 손지훈, Amila Weerasinghe, 김경훈, 김승범[1], 정 혁[2], 류승한[3], 한주은[3], 이태형 한국외국어대학교 환경학과, [1]한국항공우주연구원, [2](주)에이알티플러스, [3]다이텍연구원
1A2 13:50-14:10	고해상도 대기질 산출을 위한 딥러닝 기반 GEMS-GOCI-II 초분광 자료 융합 최현영, 이시현, 김예진, 임정호 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
1A3 14:10-14:30	이미지 분석법의 야간 확장 – 과도한 광원 제거와 광원 인근 타겟 밝기 분석을 이용 심주현, 신주선, 문윤기, 박민경, 김인엽, 백승재, 김덕현[1], 노영민 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, [1]국립한밭대학교 기초과학부
1A4 14:30-14:50	AIS 기반 선박 대기오염물질 배출량 상향식 산정 방법론의 적용에 관한 연구 이용찬[1),2)], 유지예[1),2)], 장지호[1),2),3)], 박영일[1),2),3)], 이희관[1),2),3)] [1)]인천대학교 환경융합기술연구원, [2)]인천대학교 아시아환경에너지연구원, [3)]인천대학교 환경에너지공학과
1A5 14:50-15:10	연안 산업도시의 인공열 배출에 따른 대기경계층 구조 및 하층 열환경 변화 분석 천지민, 이명인 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
1A6 15:10-15:30	도시 수목의 냉각, 공기역학, 건식 침적 및 BVOC 배출 효과가 도심 오존 농도에 미치는 영향 김연욱, 우주완[1),2)], 이상현[1),2)], 강 건[3)], 김재진[4)], 곽경환[5)] 강원대학교 환경연구소, [1)]국립공주대학교 대기과학과, [2)]중부권 미세먼지연구·관리센터, [3)]국립부경대학교 SEED 연구소, [4)]국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [5)]강원대학교 환경학과

Session 1B [교육프로그램] 라이다 시스템 개요와 데이터 해석 및 분석법 실습

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

13:30-15:30	2발표장 [320B]
1B1 13:30-14:10	탄성산란(미세먼지) 라이다의 주요 구성 신동호 한국에너지기술연구원
1B2 14:10-14:50	라이다 신호 해석과 에어로졸 유형 분류를 통한 대기질 분석 노영민 국립부경대학교 지구환경시스템과학부
	Break Time
1B3 15:00-15:30	스캐닝 라이다 관측자료를 이용한 대기 에어로졸 공간분포 분석 신주선, 노영민 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공

공지사항

- 데이터 분석 실습(1B3)에 한해 노트북 필수 지참(matlab 실행 환경 권장)

Session 1C [특별세션] 2026 YES-BAM 캠페인을 통한 에어로졸 특성 분석

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

13:30-15:30	3발표장 [321A] | 좌장 김영아 [국립기상과학원]
1C1 13:30-13:50	2026 YES-BAM 결과와 이를 통한 에어로졸 복사강제력 산출 기반 연구 유희정, 오상민, 유나기, 고희정, 김영아 국립기상과학원 지구대기감시연구과
1C2 13:50-14:10	2026 YES-BAM 기간에 측정한 서해상 블랙카본과 브라운카본의 종합 특성 최시영, 임하늘, 유나기[2], 오상민[2], 김주영, Mishra Shalini, 이은아, 유희정[2], 고희정[2], 성민영[3], 이그림[3], 박진수[3], 임세희[1] 충남대학교 환경IT융합공학과, [1]충남대학교 환경공학과, [2]국립기상과학원 지구대기감시연구과, [3]국립환경과학원 대기환경연구부
1C3 14:10-14:30	2026 YES-BAM 기간 서해상 에어로졸 화학성분 특성 성민영, 이태훈, 정지윤, 조용한, 정라니, 이그림, 박진수, 유희정[1], 최시영[2], 임세희[2], 강대일, 성지원 국립환경과학원 대기환경연구과, [1]국립기상과학원 지구대기감시연구과, [2]충남대학교 환경IT융합공학과
1C4 14:30-14:50	2026 YES-BAM 결과와 장기 자료 분석: 서해상 에어로졸과 구름응결핵의 장기 변동이 갖는 의의 박민수, 서표석, 안찬우, 유희정[1], 오상민[1], 김영아[1] 박진수[2], 성민영[2] 연세대학교 대기과학과, [1]국립기상과학원 지구대기감시연구과, [2]국립환경과학원 대기환경연구과
1C5 14:50-15:10	2026 YES-BAM 기간 $PM_{2.5}$의 광학·화학적 특성 분석 이민서, 유희정[1], 박진수[2], 성민영[2], 이그림[2], 최용주 한국외국어대학교 환경학과, [1]국립기상과학원 지구대기감시연구과, [2]국립환경과학원 대기환경연구과
1C6 15:10-15:30	[종합토론]

Session 1D 대기환경연구 공모전

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

13:30-15:00	4발표장 [321B] | 좌장 신혜정 [국립환경과학원]
1D1 13:30-13:45	동아시아 도시 배출 특성 간 탄소성 SLCFs가 유도하는 오존 대기질 - 기후 영향의 차별적 특성 윤창동, 김혜림[1], 백민우[2] 고려대학교 지구환경과학과, [1]Department of Chemical and Biochemical Engineering, The University of Iowa, [2]인하대학교 고분자환경융합전공
1D2 13:45-14:00	VOCs 광화학적 초기 농도 추정을 통한 오존 생성 기여도 규명: PINN 대리모델과 PMF-SHAP 통합 분석 장예진 가톨릭대학교 에너지환경공학과
1D3 14:00-14:15	폭염에 따른 국내 오존 생성 레짐 변화와 오존·미세먼지 복합 건강 영향 평가 곽한주, 김지안 고려대학교 지구환경과학과
1D4 14:15-14:30	CMAQ-Aging 모의를 활용한 제5차 미세먼지 계절관리제 기간 $PM_{2.5}$ 성분 및 대기 연령 특성 분석 한승희, 강진구 안양대학교 환경공학과
1D5 14:30-14:45	$PM_{2.5}$ 성분자료와 상대 독성계수를 활용한 권역별 독성가중 초미세먼지 평가 장 권 안양대학교 환경공학과
1D6 14:45-15:00	해안 지역의 야간 오존 고농도 현상과 원인 분석 신민영, 강차오름 포항공과대학교 환경공학부

Session 1E [특별세션] (Closed Session)
한국형 BVOCs 배출계수 DB 구축과 국가 대기배출목록 고도화

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

13:30-15:30	5발표장 [322B]	좌장 손윤석 [국립부경대학교]
1E1 13:30-13:47	한국형 BVOCs 성분 배출 분포 추적기술 개발 손윤석, 오용환, 김대현, 정민찬, Mahshad Ranjbaran, 천소현, 김나현, 김서현, 김조천[1)], 윤종상[2)], 이형주[3)], 제선미[4)], 최기철[5)] 국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [1)]건국대학교 사회환경공학부, [2)]가톨릭대학교 에너지환경공학과, [3)]포항공과대학교 환경공학부, [4)]국립산림과학원 생활권도시숲연구센터, [5)]한국환경연구원 대기환경연구실	
1E2 13:47-14:04	BVOCs 현장 시료채취를 위한 표준 시스템 구축 및 운영체계 마련 오용환, 정민찬, 천소현, 김대현, Mahshad Ranjbaran, 김서현, 김나현, 손윤석 국립부경대학교 지구환경시스템과학부	
1E3 14:04-14:21	현장 시료채취를 통한 BVOCs 성분분포 및 배출특성 비교 정민찬, 천소현, Mahshad Ranjbaran, 오용환, 김대현, 김나현, 김서현, 손윤석 국립부경대학교 지구환경시스템과학부	
1E4 14:21-14:38	한국형 BVOCs 배출계수 DB 구축을 위한 주요 수종의 현장 배출특성 측정 최인영, Dinh Trieu Vuong, 민지홍[1)], 이다연[1)], 박병규, 임수길, 김조천 건국대학교 실내환경관리센터, [1)]건국대학교 사회환경공학부	
1E5 14:38-14:55	국내 주요 수종별 BVOCs 배출계수 개발을 위한 중복 측정 기반 현장 배출특성 분석체계 구축 윤종상 가톨릭대학교 에너지환경공학과	
1E6 14:55-15:12	한국형 BVOCs 배출량 산정모델 개발을 위한 고해상도 입력자료 구축 및 적용성 평가 이형주, 신민영, 김나래 포항공과대학교 환경공학부	
1E7 15:12-15:30	숲의 수관층 및 수관층 외부의 계절·이벤트별 BVOCs와 오존 농도 특성 분석 제선미, 정찬식, 김채완 국립산림과학원 생활권도시숲연구센터	

Session 1F [특별세션] 고농도 오존 관리를 위한 정책 방안

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

13:30-15:30	6발표장 [323A]	좌장 심창섭 [한국환경연구원]
1F1 13:30~13:50	지역 맞춤형 관리방안 도출을 위한 우리나라 지표 오존의 장기 추세 및 고농도 지역의 시공간 특성 분석 서정빈, 한지현, 이승민 한국환경연구원	
1F2 13:50~14:10	오존 전구물질(NOx·VOCs)의 지역별 배출 특성과 관리 방향 한지현, 윤혜상, 나건수, 이승민 한국환경연구원	
1F3 14:10~14:30	고농도 오존 대응을 위한 지역별 오존생성 기여도 비교 김 정, 한지현[1], 이승민[1], 송승주[2], 김형천[2], 유 철[2] ㈜이아이랩, [1]한국환경연구원, [2]기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터	
1F4 14:30~14:50	오존 저감을 위한 유기용제 VOCs 배출 관리 개선 방안 이승민, 한지현, 정은혜, 나건수, 서정빈 한국환경연구원 기후대기전략연구본부 대기환경연구실	
1F5 14:50~15:10	서울시 자치구 유형별 특성을 반영한 오존 관리 방안 송민영, 신성균, 조가영, 전혜준, 함수한 서울연구원 지속가능연구실	
1F6 15:10~15:30	창원특례시 오존 농도 특성 분석 및 관리방안 조현영, 이자성, 윤재봉, 정우석 창원시정연구원	

Session 1G [특별세션] (Closed Session) 입자상/가스상/응축성 대기오염물질 동시저감 기술 개발

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

13:30-15:10	7발표장 [323B] | 좌장 박대훈 [한국기계연구원]
1G1 13:30-13:50	희석법 기반 여과성-응축성 미세먼지 동시측정장비 개발 김승재, 안정언, 강천웅[1], 전기준[1] ㈜파코코리아인더스, [1]인하대학교 환경공학과
1G2 13:50-14:10	대형사업장 배출 CPM 저감을 위한 습식 전기집진기 개발 신동호, 허지은, 조윤행 한국에너지기술연구원 대기청정연구실
1G3 14:10-14:30	제철공정에서의 대기오염물질 저감기술 개발 현황 변영철, 민정기, 권화빈, 서승완, 김환기 포항산업과학연구원 광양환경연구그룹
1G4 14:30-14:50	중소형 사업장 응축성 미세먼지 저감을 위한 배가스 냉각 특성 평가 김연진[1),2)], 안상권[1)], 박대훈[1)], 한방우[1),3)] [1)]한국기계연구원 도시환경연구실, [2)]연세대학교 기계공학과, [3)]과학기술연합대학원대학교 융합기계시스템
1G5 14:50-15:10	산화/환원 기반 배기가스 내 질소산화물 습식 흡수 저감 기술 이광택, 임채영, 한방우, 김학준 한국기계연구원 도시환경연구실

Session 1H [특별세션] 미세먼지연구·관리센터 협의체

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

13:30-15:30	8발표장 [324A] | 좌장 송창근 [동남권 미세먼지연구·관리센터]
1H1 13:30-13:50	**춘천 대기의 유해 유기성분 특성 규명을 위한 유기질소화합물과 광흡수 유기탄소 관측** 최나래[1], 정원근, 정영상, 양소연, 양지혜, 박상훈 강원대학교 환경공학과, [1]강원권 미세먼지연구관리센터(강원대학교)
1H2 13:50-14:10	**초고해상도 모델링 시스템 개발을 통한 인천 대기질 분석** 한범순[1),2)], 손현민[1),2)], 김동휘[1),2)] [1]수도권 미세먼지 연구·관리센터, [2]인하대학교 환경공학과
1H3 14:10-14:30	**대산 석유화학산단 VOCs 화학종별 배출량 산정** 김종호, 유정훈[1)], 이미선[2)], 김종현[1)], 서범근[1)] 한서대학교 환경·토목·건축학과, [1]한서대학교 환경연구소, [2]중부권 미세먼지연구·관리센터
1H4 14:30-14:50	**남부권 대기오염물질 배출량에 대한 오존 민감도 분석** 한경만, 이도경, Madalipay Jasper, 최태후, 김지호, 김재희, 송철한 광주과학기술원 환경에너지공학과
1H5 14:50-15:10	**동남권 고농도 오존의 지역별 발생 특성과 집중관측 전략** 이종재[1),2)], 최성득[1)], 김기애[1)], 최원식[3)], 한수빈[3)], 송창근[1),4)] [1]울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, [2]동남권 미세먼지연구·관리센터, [3]부경대학교 환경대기과학전공, [4]울산과학기술원 탄소중립대학원
1H6 15:10-15:30	**대기 권역별 미세먼지 건강영향평가** 이종태[1),2)] [1]고려대학교 보건과학대학 보건정책관리학부, [2]건강영향 특성화 미세먼지연구·관리센터

Session 1I [Korea-China-Japan Joint Workshop]
For a Better Understanding of Air Pollution in East Asia (5th)

▸ 2026 October 28, Wednesday

13:30-16:20	Session Room 9 [324B] | Chair Young-Ji Han [Kangwon National University]
13:30-13:35	Welcome remarks JiHyeon Song (President of KOSAE)
1I1 13:35-14:00	Long-term Trends of Atmospheric Deposition of Sulfur and Nitrogen in Japanese Remote Areas Kazuhide Matsuda Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan
1I2 14:00-14:25	Control of $PM_{2.5}$ and Ozone Complex Pollution in China: Progress and Prospect Hong Li[1)], Yan Nie[1),2)], Qi Jiang[1)], Shudan Wei[1),3)], Junling Li[1)], Fahe Chai[1)] [1)]State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, China, 100012, [2)]The School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin, China, 300072, [3)]Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, China, 100124
1I3 14:25-14:50	Simultaneous Determination of Particulate-phase Amines and Amino Acids in Urban Aerosols: Development of a Rapid LC-MS/MS Method and Application to Seoul $PM_{2.5}$ Joosung Oh, Jun-Hyeok Jang[1)], Youngmin Hong[2)], Dae-Woon Jeong, Kyung Hwan Kim[3)] Global Institute for Nanoscience & Technology (GIANT), Changwon National University, [1)]Division of Environmental and Energy Engineering, Yonsei University, [2)]Technical Research Center, Shimadzu Scientific Korea, [3)]Center for Climate and Carbon Cycle Research, Korea Institute of Science and Technology
	Break-Time
1I4 15:05-15:30	Different Dynamics in Ozone and $PM_{2.5}$ Concentration between Fukuoka Tower (130 m) and Surface Level: Measurement Campaign and Modeling Application in 2025 Spring Syuichi Itahashi, Keiya Yumimoto Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Fukuoka, Japan
1I5 15:30-15:55	Emission Profile of Reactive Organic Carbon from Industrial Sector: Diaparity between Mass and Health Threat Di Wang, Xiaoyang Yang, Zhihao Zhang Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, China

116 15:55-16:20	Quantification of Particulate Organic Nitrogen Compounds and Their Inhalation Health Risk in Urban and Background Atmospheres Na Rae Choi, Yong Pyo Kim[1)], Ji Yi Lee[2)], Eun Hye Kim[3)], Soontae Kim[4)], Hye Jung Shin[5)] Department of Environmental Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea, [1)]Graduate School of Particulate Matter Specialization, Seoul National University, Seoul, Korea, [2)]Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea, [3)]Department of Environmental Engineering, Kunsan National University, Gunsan, Korea, [4)]Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Korea, [5)]Environmental Satellite Center, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

Session 2A [1부-취업특강] 실무자가 들려주는 진로와 취업, [2부-젊은과학자 교류회]

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

16:00-18:00	1발표장 [320A]	좌장 김종범 [충남연구원]
2A1 16:10-16:45	한국환경공단 취업 전략 알려드림 한국환경공단 김석범 대리	
2A2 16:45-17:20	LG전자 공기환경 제어 기술 소개와 연구원의 역할 LG전자 이건왕 책임연구원	
2A3 17:20-17:55	교수지원 경험 및 전략 조선대학교 조경일 교수	
17:55-18:00	기념촬영	

18:10-20:00	조이스치킨 (외부행사장)	좌장 나하나 (인제대학교)
18:10-20:00	젊은과학자 교류회 (장소 : 조이스치킨, 대구 북구 유통단지로 8길 78, 2층)	

Session 2B [교육프로그램] 대기오염 방지기술의 현장과 실무

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

16:00-18:00	2발표장 [320B]	좌장 양재환 [충남대학교]
2B1 16:00-16:40	대기오염방지시설의 현장 적용사례 연구 장현섭 성균관대학교 환경포렌식연구소	
2B2 16:40-17:20	대기오염방지시설의 현장과 실무: 인허가에서 설계·운전·유지관리 및 데이터 기반 성능관리까지 김재혁 예스이앤씨(주)	
2B3 17:20-18:00	ISO 29463 방전 조건에서 안정적 성능을 유지하는 일렉트렛·나노섬유 하이브리드 다층 필터의 모델 기반 최적화 이승욱, 이정현 뉴라이즌	

Session 2C [기후탄소위원회 특별세션] 자동차 전과정 배출의 이슈와 미래

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

16:00-18:00	3발표장 [321A] | 좌장 문난경 [한국환경연구원]
2C1 16:00-16:20	교통부문 대기오염물질 저감정책의 성과와 향후과제 박준홍 국립환경과학원 모빌리티환경연구센터
2C2 16:20-16:40	전과정 평가(LCA)를 고려한 도로부문 중·장기 온실가스 감축 잠재량 분석 연구 윤영중, 방종철 온실가스종합정보센터 감축목표팀
2C3 16:40-17:00	전기차 제조·운행 단계 배출 진단과 사용후 배터리(SLB) 기반 전과정 감축전략 박용성 전남대학교 미래모빌리티학과 미래차인재양성부트캠프사업단
2C4 17:00-17:20	도로부문 기후·에너지·환경의 통합평가체계 이규진 아주대학교 TOD기반 지속가능도시교통연구센터
17:20-18:00	[토 론] 유 철(국가미세먼지정보센터), 한진석(한국환경연구원)

Session 2D 대기환경연구 공모전

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

16:00-17:45	4발표장 [321B] | 좌장 신혜정 [국립환경과학원]
2D1 16:00-16:15	오존 생성 민감도별 기상 기여도 산정을 통한 고농도 오존 발생 배경 규명 및 건강영향 평가 권은별, 김승미[1)] 울산과학기술원 탄소중립대학원, [1)]한국과학기술원 녹생성장지속가능대학원
2D2 16:15-16:30	2024년 ASIA-AQ 캠페인 기간 백령도 $PM_{2.5}$의 고해상도 배출원 분석 및 국경 간 이동 경로 분석 박준현 국립환경과학원 대기환경연구과
2D3 16:30-16:45	O_3 농도 증가에 따른 대기 에어로졸 pH의 변화와 $PM_{2.5}$ 산화잠재력 영향 평가 전지원, 박성원 강원대학교 환경학과
2D4 16:45-17:00	수도권과 연안·산업지역의 야간 잔류 오존 특성 비교를 통한 다음날 고농도 오존 선제 예측 지표 개발 김태윤, 차성현, 홍현승 명지대학교 환경시스템공학전공
2D5 17:00-17:15	정지궤도 환경위성 GEMS 에어로졸 유효고도의 경사광로 의존 계통오차: 위성·지상 라이다 검증과 보정 유종원 충남대학교 지구환경·우주융합과학과
2D6 17:15-17:30	위성 관측 이산화질소·암모니아와 지상관측자료를 활용한 한반도 초미세먼지 질산염(NO_3^-)의 시공간 특징 및 영향요인 분석 김성영, 이수빈 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공
2D7 17:30-17:45	GEMS와 CALPUFF를 활용한 수도권 서부-동부 NO_2 잠재 수송 특성 및 관측 적용성 평가 김준영, 문현상, 박성현 안양대학교 환경에너지공학과

Session 2E [특별세션] 한반도 동아시아 배경대기 관측 연구의 현황과 미래 방향

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

16:00-18:00	5발표장 [322B] | 좌장 이미혜 [고려대학교]
2E1 16:00-16:20	해양과학기지의 배경대기 관측 현황과 계획 정진용, 민인기, 정종민, 이재익, 김고운, 이승우, 민용침, 이수찬 한국해양과학기술원
2E2 16:20-16:40	우리나라 지구대기감시의 현황과 계획 김수민, 이선란, 부준오, 신대근, 김박사, 양세환, 유희정, 고희정, 김영아, 김상백 국립기상과학원
2E3 16:40-17:00	서해상 배경대기의 기후변화유발물질 장기변동 특성: 배출원과 해양대기 중 거동 변화 윤창동, 이미혜, 길준수, 정진용[1)] 고려대학교 지구환경과학과, [1)]한국해양과학기술원 해양재난연구부
2E4 17:00-17:20	극저온 농축기-GC/MS 기반 할로겐화 온실가스 분석 시스템 구축 및 안면도 대기 중 농도 특성 강성구, 김주애[1)], 임유락, 박선영[2)], 김수민[3)], 권도현[4)] 고려대학교 지구환경과학과, [1)]고려대학교 기초과학연구원, [2)]경북대학교 지구시스템과학부, [3)]국립기상과학원 지구대기감시연구과, [4)]한국표준과학연구원
2E5 17:20-17:40	겨울철 종관기상에 따른 서울-안면도 에어로졸 연계 특성 김주애[1),2)], 이현민[1)], 박현민[1)], 이미혜[1)], 김화진[3)], 김수민[4)] 백승훈[5)], 손명희[5),6)] [1)]고려대학교 지구환경과학과, [2)]고려대학교 기초과학연구원, [3)]서울대학교 환경보건학과, [4)]국립기상과학원 지구대기감시연구과, [5)]㈜공감센서, [6)]한국전자통신연구원
2E6 17:40-18:00	황해 청정 해양 대기 에어로졸의 광학적 특성 및 장기 변화 추이: 소청초 해양과학기지 AERONET 관측 자료 활용 최용주, 정진용[1)], 김고운[1)], 이승우[1)], 정종민[1)] 한국외국어대학교 환경학과, [1)]한국해양과학기술원

Session 2F [특별세션] 환경위성 활용 공동 워크숍

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

16:00-18:00	6발표장 [323A] | 좌장 강경희 [국립환경과학원]
2F1 16:00-16:15	GEMS 자료 기반의 시간대별 FNR 임계값 산출 및 오존생성민감도 체제 분석 이윤곤, 정다희, 이창석[1], 강경희[1], 신혜정[1] 충남대학교 지구환경·우주융합과학과 대기과학전공, [1]국립환경과학원 환경위성센터
2F2 16:15-16:30	딥러닝 기반 다종 대기오염물질 동시 산출 알고리즘 개발 및 복합오염 분석 강은진, 정시훈, 임정호 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
2F3 16:30-16:45	환경위성을 통한 지표오존 생성률 추정방법론 박상서, 조예슬, 이창석[1], 강경희[1], 신혜정[1] 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, [1]국립환경과학원 환경위성센터
2F4 16:45-17:00	대기화학모델 민감도 실험을 활용한 FNR 기반 지역규모 오존 생성 메커니즘 분석 이효정[1),2)], 백승희[3)], 정승현[3)], 이창석[4)], 강경희[4)], 신혜정[4)] [1)]부산대학교 대기환경과학과, [2)]부산대학교 환경연구원, [3)]부산대학교 지구환경시스템학부 대기과학전공, [4)]국립환경과학원 환경위성센터
2F5 17:00-18:00	GEMSAT을 활용한 정지궤도 환경위성(GEMS) 데이터 분석 및 대기환경 연구·모니터링 활용성 증대 김병길[1),2)], 안창진[1)], 이창석[3)], 강경희[3)] [1)]문소프트(주), [2)]경북대학교 융복합시스템공학부, [3)]국립환경과학원 환경위성센터

Session 2G [원격탐사·센서분과회 특별세션] 대기관리를 위한 첨단모니터링 기술

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

16:00-17:40	7발표장 [323B] | 좌장 김덕현 [국립한밭대학교]
2G1 16:00-16:20	탄성산란(미세먼지) 라이다의 기초와 대기관리 활용 - 현장 측정사례를 중심으로 - 신동호, 최호경 한국에너지기술연구원
2G2 16:20-16:40	한반도 미량기체 지표원격관측 장비 Pandora/MAX-DOAS를 활용한 산단지역 NO_2 및 HCHO 농도 거동 파악 및 향후 관리 방안 최용주, Yugo Kanaya[1], 이기열, 윤치성, 이채린 한국외국어대학교 환경학과, [1]Research Institute for Global Change, JAMSTEC, Japan
2G3 16:40-17:00	대기 온실기체 및 독성 화학물질 누출 및 배출량 원거리 측정용 적외선 분광시스템 개발 강영웅, 이강함[1], 정원석[2], 김정훈[2], 홍석영[2], 이한림[3] 부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공, [1]국립기상과학원 지구대기감시연구과, [2]국립환경과학원 대기공학연구과, [3]부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공
2G4 17:00-17:20	메탄 및 이산화탄소 배출 혼합비 및 배출량 원거리 측정 라만라이다 이한림[1),2)], 계관욱[1], 박선호[2], 최인영[2], 장재화[1], 김지석[1], 최원이[3], 신성균[4] [1]부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공, [2]노바스콥(주), [3]NASA Goddard Space Flight Center, [4]서울연구원 탄소중립연구센터
2G5 17:20-17:40	가스상 대기오염물질 모니터링을 위한 DIAL의 현장 적용과 활용방안 이유선, 김덕현[1], 김석준, 김인엽, 노영민 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, [1]국립한밭대학교 기초과학부

Session 2H [특별세션] 국내 대기·실내 미세플라스틱 연구의 현황과 미래

▸ 2026. 10. 28. Wednesday

16:00-17:40	8발표장 [324A] | 좌장 전기준 [인하대학교]
2H1 16:00-16:20	대기 미세플라스틱의 국내 연구 현황 및 전국 공동연구 추진 현황 유한진, 최예덕[1], 김효원[1], 금선우[1], 이진화[2], 팽다슬[2], 전휘서[3], 유휘선[3], 채민영[4], 고관영[4], 이헌영[5], 박세은[5], 전기준[5,6] 국립한국교통대학교 환경공학전공, [1]서울특별시 보건환경연구원 생활환경연구부, [2]경상남도 보건환경연구원 대기환경연구부, [3]전남광주통합특별시 전남보건환경연구원 대기질 관리과, [4](주)세스코 이물분석센터, [5]인하대학교 환경공학과, [6]수도권 미세먼지 연구·관리센터
2H2 16:20-16:40	OECD 나노플라스틱 프로젝트 추진 현황 및 비정형 나노플라스틱 시험 물질 개발 연구 이재웅, 서도연, 김정연, 이주희, 박병용, 이우미, 이상희, 김수진[1] 국립환경과학원 환경건강연구부 환경위해성연구과, [1]국립환경과학원 환경건강연구부
2H3 16:40-17:00	환경노화 및 극저온 파쇄를 이용한 타이어 마모 미세입자 제조 이석환, 우상희, 김우영, 조완섭[1] 한국기계연구원 친환경에너지연구본부, [1]동아대학교 의약생명공학과
2H4 17:00-17:20	열분해-GC/MS를 이용한 실내대기 중 미세플라스틱 분석기술 및 적용방안 김영민 대구대학교 바이오환경에너지학과
2H5 17:20-17:40	대기 미세플라스틱 분석법 및 표준물질 합성법 개발 유한진, 박세은[1], 박종현[1], 이경은[2], 송영철[3], 노철언[4], 전기준[1,5] 국립한국교통대학교 환경공학전공, [1]인하대학교 환경공학과, [2]한국화학연구원 신뢰성평가센터, [3]한국화학연구원 화학분석센터, [4]인하대학교 화학과, [5]수도권 미세먼지 연구·관리센터

Session 3A 신진과학자

▸ 2026. 10. 29. Thursday

09:00-10:40	1발표장 [320A] | 좌장 이강웅 [한국대기환경학회 고문]
3A1 09:00-09:20	울산의 미세먼지 장거리 이동: 화학적 특성, 오염원 추정, 비표적 분석 이호영, 최성득 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
3A2 09:20-09:40	도시 규모의 차량 배출 기반 초고해상도 대기오염 모델링 프레임워크: 미국 디트로이트 사례와 한국 도시 적용성 이상진[1),2)], Stuart Batterman[2)] [1)]경북대학교 환경공학과, [2)]미시간대학교 환경보건과학과
3A3 09:40-10:00	PM 자료와 수평 스캐닝 라이다를 활용한 에어로졸 입경분포 및 흡습성의 머신러닝 기반 추정 신주선, 심주현, 윤지현, 김덕현[1)], 노영민 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, [1)]한밭대학교 기초과학부
3A4 10:00-10:20	한반도 중부지역의 고농도 오존 발생에 기여하는 지역 간 수송 및 광화학 생성 특성 분석 김태희, 곽경환[1)] 강원대학교 산학협력단, [1)]강원대학교 환경학과
3A5 10:20-10:40	기체-고체 계면 반응을 이용한 전기화학적 가스상 오염물질 제어공정 개발 최연규, 김대근 서울과학기술대학교 환경공학과

Session 3B 측정·분석

▸ 2026. 10. 29. Thursday

09:00-10:20	2발표장 [320B]	좌장 윤종상 [가톨릭대학교]
3B1 09:00-09:20	스모그챔버를 활용한 고농도 질소산화물 조건에서의 푸란류 광화학반응 및 이차오염물질 생성 메커니즘 규명 연구 주태규, Nga Lee Ng[1)], Matthew Alvarado[2)], Drew Gentner[3)], Jean Rivera-Rios[4)], David Pando[5)], Jo Machesky[2)], Tori Hass-Mitchell[2)] 고려대학교 지구환경과학과, [1)]California Institute of Technology, [2)]JANUS Research Group, [3)]Yale University, [4)]Rutgers University, [5)]Georgia Institute of Technology	
3B2 09:20-09:40	니코틴의 기원이 전자담배 에어로졸의 전달 동역학과 인체 노출 위험에 미치는 영향 이우정, 김기현 한양대학교 공학대학원 건설환경공학과	
3B3 09:40-10:00	위성 에어로졸 산출물 기후값 생산을 위한 딥러닝 기술 개발 이지우, 김 준, 김민석[1)], 오승주 연세대학교 대기과학과, [1)]울산과학기술원 지구환경도시건설공학과	
3B4 10:00-10:20	영주지역 $PM_{2.5}$의 화학조성 특성 및 PMF 기반 발생원 기여도 평가 김지영, 손영훈, 정영석[1)], 김자현, 이병근, 김효순[2)], 박은하[3)] 경상북도보건환경연구원 대기질평가과, [1)]경상북도보건환경연구원 북부지원 환경분석과, [2)]경상북도보건환경연구원 산업폐수과, [3)]RIST 환경연구소 환경보건연구그룹	

Session 3C 방지기술

▸ 2026. 10. 29. Thursday

09:00-10:20	3발표장 [321A] | 좌장 정용원 [한국대기환경학회 고문]
3C1 09:00-09:20	**액적 크기분포가 습식 스크러버의 집진효율에 미치는 영향** 김준엽[1], 이명화[1),2)] [1)]강원대학교 미세먼지통합관리학과, [2)]강원대학교 환경공학과
3C2 09:20-09:40	**전자선-흡수 공정 배가스 처리 중 2차 입자 생성 특성 및 정전분무 기반 제어** 서서희[1),2)], 오용환[3)], 조상희[4)], 김태훈[4)], 강기원[2)], 손윤석[3)], 김창혁[1),2),5)] [1)]부산대학교 에너지융합기술연구소, [2)]부산대학교 사회환경시스템공학과, [3)]국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [4)]한국원자력연구원, [5)]부산대학교 환경에너지연구소
3C3 09:40-10:00	**비침지 전극-겔 고분자 전해질 계면에서 기체상 아세트알데히드의 양극-음극 동시 전기화학적 전환** 박준희, Muthuraman Govindan, 김대근 서울과학기술대학교 환경공학과
3C4 10:00-10:20	**무대전 섬유상 필터에 대한 단일섬유집진효율 모델조합의 비교 및 평가** 박재현[1)], 권민선[2)], 이명화[1),3)] [1)]강원대학교 미세먼지통합관리학과, [2)]강원대학교 환경연구소, [3)]강원대학교 환경공학과

Session 3D 대기환경연구 공모전

▸ 2026. 10. 29. Thursday

09:00-10:30	4발표장 [321B] | 좌장 강경희 [국립환경과학원]
3D1 09:00-09:15	사회취약성과 GEMS 기반 오존 생성 민감도를 연계한 오존 관리 우선지역 선정 및 관리 방향 제시 김나경, 이정범[1)] 안양대학교 환경에너지공학과, [1)]안양대학교 환경공학과
3D2 09:15-09:30	환경위성(GEMS) 시계열 자료를 활용한 오존 생성 체제 변화 및 지역별 저감 전략 연구 임상현 경북대학교 환경공학과
3D3 09:30-09:45	GEMS 시간별 순수관측을 활용한 산업-농업 인접 해안지역의 광화학 오존 일주기 구조 규명과 농작물 노출 재평가 박채원 경희대학교 국제학과
3D4 09:45-10:00	정지궤도 환경위성-MoE 기반 동아시아 고농도 오존 발생 지역 진단 및 저감 방향성 분석 김예진, 최현영, 배세정 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
3D5 10:00-10:15	정지궤도 환경위성 HCHO 및 NO_2 자료를 활용한 고농도 오존 발생 시 전구물질 일변화 특성 분석 박정현, 박 경 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공
3D6 10:15-10:30	GEMS 환경위성·집중측정망·대기역학 자료 3원 융합 기반 머신러닝을 활용한 $PM_{2.5}$ 고농도 에피소드 선제적 감지 연구 김준영, 강지명[1)] 연세대학교 융합의학과, [1)]인하대학교 기계공학과

Session 3E [학생세션]

▸ 2026. 10. 29. Thursday

09:00-10:40	5발표장 [322B] | 좌장 배민석 [국립목포대학교]
3E1 09:00-09:20	**화목난로 연소 시 목재 함수율에 따른 1차 입자상 물질의 물리화학적 특성 비교 연구** 윤준혁[1),2)], 이헌영[1),2)], 강천웅[1),2)], 레티황이엔[2)], 김민선[3)], 윤종상[3)], 전기준[1),2)] [1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [3)]가톨릭대학교 에너지환경공학과
3E2 09:20-09:40	**2026년 서산의 계절별 1차 및 2차 탄소계 에어로졸 기여도 분석** 이수정, 김덕래[1)], 이원진[1)], 서석준[1)], 전용석[2)], 최용주 한국외국어대학교 환경학과, [1)]국립환경과학원, [2)]APM 엔지니어링
3E3 09:40-10:00	**겨울철 뉴욕시 브라운 카본의 조성과 배출원 분석** 민희성, Mitchell J. Rogers[1)], Tori Hass-Michell[1),2)], Lijin Zhang[1)], Drew R. Gentner[1)], 주태규 고려대학교 지구환경과학과, [1)]Yale University, [2)]City of Boston
3E4 10:00-10:20	**산화 및 이차유기에어로졸 코팅에 따른 블랙카본의 물리·광학적 특성 변화** 임하늘[1)], 최시영[1)], 조이슬[1)], 김태현[2)], 임호진[2)], 이정훈[3)], Fawad Ashraf[1)], 임세희[1),4)] [1)]충남대학교 환경IT융합공학과, [2)]경북대학교 환경공학과, [3)]한국기술교육대학교 기계공학부, [4)]충남대학교 환경공학과
3E5 10:20-10:40	**2023년~2025년 PMF 모델을 이용한 포스코타워-송도 상층 및 지표 $PM_{2.5}$의 오염원 기여도 추정 및 비교** 김하정, 우서라, 정지윤[1)], 장지희[1)], 박종성[1)], 허국영[1)], 최용주 한국외국어대학교 환경학과, [1)]국립환경과학원

Session 3F [학생세션]

▸ 2026. 10. 29. Thursday

09:00-10:40	6발표장 [323A]	좌장 서지훈 [전남대학교]
3F1 09:00-09:20	과수(배·사과·포도·복숭아) 농업잔재물 소각에 의한 SLCFs 배출계수 개발 김찬수, 박민성, 우지윤[1], 김민욱[2], 김승진[3], 노준영[3], 전의찬 세종대학교 기후에너지융합학과, [1]세종대학교 기후환경융합센터, [2]농촌진흥청 국립농업과학원, [3]㈜휴엔릭스 첨단기술연구소	
3F2 09:20-09:40	농업잔재물 노천소각 시 배출되는 입자상·가스상 대기오염물질의 화학적 특성 분석 및 배출계수 산정 김주한, 김경훈, 안준영[1], 박진수[1], 임용재[1], 남일권[1], 정소영[1], 이재윤[1], 박성규[2], 최진수[1], 이태형 한국외국어대학교 환경학과, [1]국립환경과학원 대기환경연구과, [2](주)케이에프 코퍼스트 R&D센터	
3F3 09:40-10:00	실외 바비큐 조리 시 발생하는 응축성 미세먼지 특성 연구 전현수, 강기원, 장수강, 김정빈, 서서희, 김창혁 부산대학교 사회환경시스템공학과	
3F4 10:00-10:20	대기 중 비정형 마이크로 나노 플라스틱 입자 합성 기술 개발 및 분석 박세은[1,3], 유한진[2], 레티황이엔[3], 전기준[1,3] [1]인하대학교 환경공학과, [2]국립한국교통대학교 환경공학전공, [3]수도권 미세먼지 연구·관리센터	
3F5 10:20-10:40	대기 미세플라스틱의 배출원 규명 및 물리화학적 특성 분석: 시멘트 제조시설을 중심으로 이헌영[1,2], 박종현[1,2], 유한진[3], 송영철[4], 이경은[5], 전기준[1,2] [1]인하대학교 환경공학과, [2]수도권미세먼지연구·관리센터, [3]국립한국교통대학교 환경공학전공, [4]한국화학연구원 화학분석센터, [5]한국화학연구원 신뢰성분석센터	

Session 3G [학생세션]

▸ 2026. 10. 29. Thursday

09:00-10:40	7발표장 [323B] | 좌장 권형안 [국립공주대학교]
3G1 09:00-09:20	대기 중 유기에어로졸의 형광특성 측정을 위한 다채널 형광 라이다 시스템 구축 및 기초 특성 평가 최효정, 신동호[1], 노영민 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, [1]한국에너지기술연구원
3G2 09:20-09:40	통제방출실험(CRF) 기준 2-파장 DIAL 비산배출량 산정의 현장 관측 변인 민감도 평가 김석준, 이유선, 김덕현[1], 홍석영[2], 김정훈[2], 조성환[2], 정원석[2], 노영민 국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [1]국립한밭대학교 기초과학부, [2]국립환경과학원 대기환경연구부 대기공학연구과
3G3 09:40-10:00	AERONET 컬럼 에어로졸 광학적 특성을 활용한 국내 에어로졸 화학 조성 추정 및 검증 김민호, 이승하[1], 박승명[1], 허국영[1], 최용주 한국외국어대학교 환경학과, [1]국립환경과학원 대기환경과
3G4 10:00-10:20	항공관측을 활용한 안면도 CO_2와 CH_4의 연직 분포 특성 및 플럭스 산출 강형모, 최용주, 이선란[1], 김수민[1] 한국외국어대학교 환경학과, [1]국립기상과학원 지구대기감시연구과
3G5 10:20-10:40	대류권 수증기 연직 분포 관측을 위한 지상 DIAL 시스템 시뮬레이션 기반 설계 장재화, 박선호[1], 김덕현[2], 김지석, 계관욱[1], 노영민[3], 이한림[1),4)] 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공, [1]노바스콥(주), [2]국립한밭대학교 기초과학부, [3]국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, [4]국립부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공

Session 3H [학생세션]

▸ 2026. 10. 29. Thursday

09:00-10:20	8발표장 [324A]	좌장 최용주 [한국외국어대학교]
3H1 09:00-09:20	광양만 연안 산업지역에서 바람장 고도가 위성 기반 NO_x 배출량 추정에 미치는 영향 이상림, 정준영[1], 정선기, 김채은, 신규성, 장지이 전남대학교 환경시스템공학과, [1]전남대학교 건설·환경공학과	
3H2 09:20-09:40	식물 스트레스 유형에 따른 녹색잎휘발성물질(GLVs) 배출 특성 및 생물기원 휘발성유기화합물(BVOCs)과의 상관성 분석 천소현, 오용환, 김대현, 정민찬, 김나현, 손윤석 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공	
3H3 09:40-10:00	여수 국가산단 연안의 바이오에어로졸: 기단 기원에 따른 미생물 군집 변동 정선기, 이상림, 정준영[1], 김채은, 신규성, 장지이 전남대학교 환경시스템공학과, [1]전남대학교 건설·환경공학과	
3H4 10:00-10:20	여수 해안산업지역 대기 에어로졸 수용성 유기물질의 계절별 형광 특성 및 고형광강도 사례 신규성, 정준영[1], 정선기, 이상림, 김채은, 장지이 전남대학교 환경시스템공학과, [1]전남대학교 건설환경공학과	

Session 3I 실태·배출관리

▸ 2026. 10. 29. Thursday

09:00-10:20	9발표장 [324B] | 좌장 이우근 [한국대기환경학회 고문]
3I1 09:00-09:20	**주유소 유증기 회수설비에 대한 고찰과 향후 관리 방향** 김종범, 황규철, 이혜연, 김동호[1], 송민영[2], 윤영욱[3], 김정호[4] 충남연구원 서해안기후환경연구소, [1]강원대 미세먼지통합관리학과, [2]서울연구원 지속가능연구실, [3]APM엔지니어링, [4]열린공간
3I2 09:20-09:40	**산업 현장 IoT 센서 네트워크 기반 대기질 시공간 예측 및 결측보간 방법론 비교 연구** 이동은, 노준영, 김성동, 박종건, 김승진 휴엔릭스 첨단기술연구소
3I3 09:40-10:00	**상향식 및 하향식 배출목록을 이용한 O_3과 $PM_{2.5}$ 농도의 배출 저감 효과 비교** 정성은, 이소정, 김정욱, 배병규, 강윤희[1], 김순태[2] 아주대학교 환경공학과, [1]아주대학교 환경연구소, [2]아주대학교 환경안전공학과
3I4 10:00-10:20	**체계적인 사업장 관리를 위한 한국형 사업장 대기 정보 통합플랫폼 구축 방향** 김진식, 김형천, 강 별, 조현정, 김성준[1], 오승일[1], 유 철 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터, [1]알씨에어(주)

Session 4A 측정·분석

▸ 2026. 10. 29. Thursday

11:00-12:40	1발표장 [320A] | 좌장 백성옥 [한국대기환경학회 고문]
4A1 11:00-11:20	충청남도 오존 관리를 위한 정책지표 비교와 공간적 특성 분석 황규철[1),2)], 이혜연[1)], 최원식[2)], 김종범[1)] [1)]충남연구원 서해안기후환경연구소 [2)]국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공
4A2 11:20-11:40	현대식 양돈축사 대상 Top-down 암모니아 배출량 산정 연구: 국가 암모니아 배출량 인벤토리 개선을 위한 시사점 김연후[1)], 나은상[1)], Avinash Shastri[1)], 조범기[1)], 서범근[2)], 김종호[2),3)], 홍세운[4)], 함지영[5)], 송형도[5)], 유 철[5)], 송미정[1),6)] [1)]전북대학교 환경에너지융합학과, [2)]한서대학교 환경연구소, [3)]한서대학교 항공우주공학부 환경·토목·건축학과, [4)]전남대학교 농업생명과학대학 지역바이오시스템공학과, [5)]기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀, [6)]전북대학교 지구환경과학과
4A3 11:40-12:00	2012~2023년 백령도 대기환경연구소 $PM_{2.5}$ 농도 분석과 측정소 운영 방안 제언 박현영, 문보경 인천연구원 환경안전연구부
4A4 12:00-12:20	ASIA-AQ 기간 DC-8에서 관측된 동아시아 탄소성 에어로졸의 배출원 및 광학 특성 Haiyan Jin, Jack Dibb[1)], 이미혜, 주태규, 이영로, 김민섭[2)], 박희선, Jose L. Jimenez[3)], 김주애, 장임석[4)] 고려대학교 지구환경과학과, [1)]Earth Systems Research Center, University of New Hampshire, [2)]국립환경과학원 환경표준연구과, [3)]CIRES & Department of Chemistry, University of Colorado Boulder, [4)]국립환경과학원 환경위성센터
4A5 12:20-12:40	실시간 HTDMA 측정결과 PMF 적용 초미세먼지 입자 흡습성 분석 연구 김정빈, 하윤경, 강기원, 서서희, 전현수, 장수강, 김창혁 부산대학교 사회환경시스템공학과

Session 4B 측정·분석

▸ 2026. 10. 29. Thursday

11:00-12:40	2발표장 [320B] | 좌장 김신도 [한국대기환경학회 고문]
4B1 11:00-11:20	산불로 유발된 soil NO_x 배출 증가와 장기적 대기질 영향 강차오름, 이형주 포항공과대학교 환경공학부
4B2 11:20-11:40	전국 $PM_{2.5}$ 고농도 사례의 지역별 오염원 특성과 독성 기여도 비교 주정태, 이상진, 고민지, 최성득 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
4B3 11:40-12:00	서울 여름철 고농도 오존 발생 시 VOCs의 광화학적 변화와 오존 생성 특성 평가 옥수민[1),2)], 이지이[2)], 정진상[1)] [1)]한국표준과학연구원 가스측정그룹, [2)]이화여자대학교 환경공학과
4B4 12:00-12:20	국내 주요 수종의 현장 실측 기반 BVOCs 배출계수 산정 및 환경요인 영향 평가 노해민, 이창주, 이수현, 김민선, 장예진, 신원범, 윤종상 가톨릭대학교 에너지환경공학과
4B5 12:20-12:40	IBBCEAS 측정 불확도 개선을 위한 O_2 γ-band 흡수를 활용한 실시간 유효 광경로 동적 추정 및 유효성 평가 이지선, 김정환[1)], 최용주, 이강웅 한국외국어대학교 환경공학과, [1)]일본 국립해양연구개발기구(JAMSTEC) 지구시스템연구센터

Session 4C 대기환경모델링·AI

▸ 2026. 10. 29. Thursday

11:00-12:40	3발표장 [321A] | 좌장 선우 영 [한국대기환경학회 고문]
4C1 11:00-11:20	대구 서구에서 UM-LDAPS 예측시간별 기상장 성능과 동일 유효시각 내부 일관성 분석 김병연, 류승한, 오한나, 한주은 다이텍연구원 기반혁신본부
4C2 11:20-11:40	대기-해양 결합모델 기반 약결합자료동화와 딥러닝 하이브리드 초기장 개선에 따른 태풍 예측성능 비교·평가 이성빈, 송상근[1], 문수환, 허기영[2] 제주대학교 지구해양융합학부 지구해양과학전공, [1]제주대학교 지구해양과학과, [2]한국해양과학기술원 해양재난연구부
4C3 11:40-12:00	복사 강제 조건의 건물 배열 위에서 진폭 변조 방법을 이용한 큰 규모 난류와 작은 규모 변동 사이의 상관성 분석: 주·야간 차이와 오염물질 수송 특성 김동휘[1], 한범순[1,2] [1]수도권 미세먼지 연구·관리센터, [2]인하대학교 환경공학과
4C4 12:00-12:20	에어로졸 건식 침적 모수화가 $PM_{2.5}$ 농도 모의에 미치는 영향 이예림[1], 김민중[1,2], 최대련[3], 홍진규[4], 홍성철[5], 이재범[5], 박지훈[5], 반수진[5] [1]명지대학교 환경에너지공학과, [2]명지대학교 스마트인프라공학부 환경시스템공학과, [3]안양대학교 환경에너지공학과, [4]연세대학교 대기과학과, [5]국립환경과학원 대기질통합예보센터
4C5 12:20-12:40	관측 기반 갈색탄소 광학특성 및 노화과정 민감도에 따른 한반도 에어로졸 광흡수 평가 조혜은, 김민중[1], 양서희[2], 최용주[3], 이민서[3] 명지대학교 환경에너지공학과, [1]명지대학교 스마트인프라공학부 환경시스템공학과, [2]서울대학교 기초과학연구원, [3]한국외국어대학교 환경학과

Session 4D 측정·분석

▸ 2026. 10. 29. Thursday

11:00-12:40	4발표장 [321B]	좌장 김조천 [한국대기환경학회 고문]
4D1 11:00-11:20	VOC/NOx 농도비에 따른 α-pinene/NOx 혼합가스의 광화학 반응에 의한 오존 생성 특성 연구 김환동[1),2)], 김지민[1)], 이석현[1),3)], 김경환[1)], 표수열[1)], 이지원[1)], 김준태[1)], 이미혜[3)], 주태규[3)], 이승복[1),2)] [1)]한국과학기술연구원(KIST), [2)]고려대학교 에너지환경대학원(그린스쿨), [3)]고려대학교	
4D2 11:20-11:40	다양한 대기 환경에서의 $ClNO_2$ 농도 지배 기작 규명 남우희, 조창민[1)], 이가현, 박정후[2)], 정선아[2)], Bin Yuan[3)], Xiaoxiao Zhang[3)], Hendrik Fuchs[4),5)], Andreas Hofzumahaus[4)], Zhaofeng Tan[6)], Roberto Sommariva[7)], Paul S. Monks[7)], Steven S. Brown[8),9)], Michael A. Robinson[8),10)], 민경은 광주과학기술원 환경에너지공학부, [1)]NCAR Atmospheric Chemistry Observations & Modeling Lab, [2)]국립환경과학원 대기환경연구과, [3)]College of Environment and Climate, Jinan University, [4)]Institute of Climate and Energy Systems, ICE-3: Troposphere, Forschungszentrum Jülich, [5)]Department of Physics, University of Cologne, [6)]College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, [7)]School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Birmingham, [8)]NOAA Chemical Sciences Laboratory, [9)]Department of Chemistry, University of Colorado Boulder, [10)]Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder	
4D3 11:40-12:00	도심-산림 인접 대기에서 수용성 유기 에어로졸의 특성과 유기 황산염(Organosulfate) 형성에 관여하는 입자상 조건 권수진, 김화진 서울대학교 보건대학원 환경보건학과	
4D4 12:00-12:20	태국 치앙마이 대기 중 VOCs의 배출원 특성과 OH 반응성 임유락, 길준수[1)], 김주애[1)], 이지선[2)], 이미혜 고려대학교 지구환경과학과, [1)]고려대학교 기초과학연구원, [2)]한국외국어대학교 환경학과	
4D5 12:20-12:40	시흥 여름철 휘발성유기화합물의 시간적 변동 특성 및 오존생성잠재력 평가 우서라, 이지이[1)], 권정희[1)], 임문순[2)], 원수란[3)], 최용주 한국외국어대학교 환경공학과, [1)]이화여자대학교 환경공학과, [2)]시흥녹색환경연구센터, [3)]시흥시정연구원	

Session 4E [학생세션]

▸ 2026. 10. 29. Thursday

11:00-12:40	5발표장 [322B] | 좌장 주태규 [고려대학교]
4E1 11:00-11:20	**부안 지역의 장기 관측 기반 암모니아(NH_3)에 의한 초미세먼지($PM_{2.5}$) 2차 생성 잠재력** 김우준, 전하정[1], 박채형, 최서영, 고동훈, 박재환, 백성옥, 송명기, 배민석 국립목포대학교, [1]직업환경연구소
4E2 11:20-11:40	**휘발성유기화합물의 광화학적 노화에 따른 블랙카본의 물리화학적 및 광학적 특성 변화** 서지영[1),2)], 레티황이엔[2)], 유한진[3)], Weijun Li[4)], 전기준[1),2)] [1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [3)]국립한국교통대학교 환경공학전공, [4)]Department of Atmospheric Sciences, Zhejiang University
4E3 11:40-12:00	**서울 여름철 질소 함유 유기에어로졸의 화학적 특성과 입자 수분 의존성** 이재진, 문지혜, 권수진, 김화진 서울대학교 보건대학원
4E4 12:00-12:20	**질량 변화 기반 겨울철 도심 $PM_{2.5}$ 고농도 사례 시 에어로졸 흡습성 평가** 김주영[1)], 이은아[1)], 이정훈[2)], 임세희[1),3)] [1)]충남대학교 환경IT융합공학과, [2)]한국기술교육대학교 기계공학부, [3)]충남대학교 환경공학과
4E5 12:20-12:40	**겨울철 $PM_{2.5}$ pH와 변동 요인의 정량적 분해: E-AIM IV를 이용한 군산 축산지역과 안산 도심 비교** 나은상[1)], 김연후[1)], Avinash Shastri[1)], 조범기[1)], 함지영[2)], 송형도[2)], 유 철[2)], 이광열[3)], 송미정[1),4)] [1)]전북대학교 기후환경에너지융합학과, [2)]기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀, [3)]국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과, [4)]전북대학교 지구환경과학과

Session 4F [학생세션]

▸ 2026. 10. 29. Thursday

11:00-12:40	6발표장 [323A] | 좌장 서서희 [부산대학교]
4F1 11:00-11:20	폐 PET 기반 질소 도핑 및 망간-세륨 결합 촉매의 톨루엔 산화 특성 비교 박지영, 사공누리, 양재환 충남대학교 환경IT융합공학과
4F2 11:20-11:40	원자력 시설 폐활성탄 처리 과정에서 발생하는 TEDA의 촉매 산화 특성 박성민, 박지영, 사공누리, 손나현, 양재환 충남대학교 환경IT융합공학과
4F3 11:40-12:00	폐 PET 기반 질소 도핑 다공성 탄소의 구조 제어 및 황화수소(H_2S)의 선택적 산화 특성 사공누리, 박지영, 양재환 충남대학교 환경IT융합공학과
4F4 12:00-12:20	제올라이트 개질을 통한 구조 변화 및 활성 금속 분산 특성 연구 박아린, 정현수, 김재헌, 문병현, 김희진, 김재진[1)], 심유진[1)], 김서현[1)], 박시언[1)], 한희선[1)], 김민지[1)], 김성수[1)] 경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, [1)]경기대학교 사회에너지시스템공학과
4F5 12:20-12:40	조촉매 첨가가 Ru/TiO_2 촉매의 NH_3-SCO 반응활성에 미치는 영향 김희진, 정현수, 김재헌, 문병현, 박아린, 김재진[1)], 심유진[1)], 박시언[1)], 한희선[1)], 김서현[1)], 김민지[1)], 김성수[1)] 경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, [1)]경기대학교 사회에너지시스템공학과

Session 4G [학생세션]

▸ 2026. 10. 29. Thursday

11:00-12:40	7발표장 [323B] | 좌장 김은혜 [국립군산대학교]
4G1 11:00-11:20	여수-순천-광양 연안 산업지역 배출 인벤토리의 오염물질별 검출 가능성 진단 정준영, 정선기[1], 이상림[1], 신규성[1], 김채은[1], 표종철[2], 장지이[1] 전남대학교 건설환경공학과, [1]전남대학교 환경시스템공학과, [2]부산대학교 환경공학과
4G2 11:20-11:40	Pd 황화 처리 기반 MoS_2 상 제어를 통한 알칼라인 수소 발생 반응 향상을 위한 연구 정다운[1),2)], 트란민녹[1)], 배기남[1),2)], 전기준[1),2)] [1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터
4G3 11:40-12:00	서울 도시열섬현상에서 인공열과 쿨루프의 상호작용에 따른 냉각 효과 및 시너지 분석 손현민[1)], 한범순[1),2)] [1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터
4G4 12:00-12:20	머신러닝 기반 VOCs 반응성 지수(MIR·SOAP) 예측 모델 개발 및 활용 연구 이창주, 장예진, 레띠황옌[1)], 전기준[1),2)], 윤종상 가톨릭대학교 에너지환경공학과, [1)]수도권 미세먼지 연구·관리센터, [2)]인하대학교 환경공학과
4G5 12:20-12:40	전북특별자치도 배출원별 암모니아의 잉여 특성과 초미세먼지 생성 기여 가능성 평가 조민준[1)], 최예빈[1)], 김용현[1),2),3)] [1)]전북대학교 기후환경에너지융합학과, [2)]전북대학교 환경공학과, [3)]전북특별자치도 환경보건센터

Session 4H [학생세션]

▸ 2026. 10. 29. Thursday

11:00-12:40	8발표장 [324A] | 좌장 옥유진 [울산과학기술원]
4H1 11:00-11:20	향 연소 시 나노입자 및 VOCs 배출 특성과 건강영향 평가 김민선, 레티황이엔[1], 윤준혁[2], 박세은[2], 전기준[1,2], 윤종상 가톨릭대학교 에너지환경공학과, [1]수도권 미세먼지 연구·관리센터, [2]인하대학교 환경공학과
4H2 11:20-11:40	AVOCs 노출에 따른 실내식물의 BVOCs 배출 특성 및 화학적 스트레스 반응 분석 이수현, 윤종상 가톨릭대학교 에너지환경공학과
4H3 11:40-12:00	학교 인근 악취 유발물질 탐색을 위한 기체상 오염물질 모니터링 및 특성 분석 윤찬호, 이태윤, 채석병 한국기술교육대학교 기계공학부
4H4 12:00-12:20	수관 내 조도 차이를 이용한 도심 수목의 나노미세먼지(Ultrafine Particles) 저감 특성 서성민, 최원식 부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공
4H5 12:20-12:40	SP-AMS를 활용한 서울 겨울-초봄 대기 중 유기 에어로졸 및 refractory black carbon의 발생원별 특성 규명 홍준영, 권수진, 문지혜, 김화진 서울대학교 보건대학원

Session 5A 측정·분석

▸ 2026. 10. 30. Friday

09:00-10:40	1발표장 [320A] | 좌장 김성준 [국립창원대학교]
5A1 09:00-09:20	**국내 항공관측을 이용한 겨울철 서해 및 수도권 상공의 메탄 분포 특성** 손지훈, 강석원, 김주한, Amila, 김민석, 이준석, 박진수[1], 김종호[2], 서범근[2], 이미선[3], 김정호[4], 조재호[5], 이태형 한국외국어대학교, [1]국립환경과학원, [2]한서대학교, [3]국립공주대학교, [4]㈜열린공간, [5]㈜에이알티플러스
5A2 09:20-09:40	**방콕 지역 에어로졸 화학·광학 특성의 지상 기반 규명 및 위성 관측에 대한 시사점** 미슈라 샬리니[1], 이은아[1], 김주영[1], 최시영[1], 임하늘[1], 이기열[3], 우설아[3], 최용주[3], 권형안[4], 이재형[5], 이상현[5], 장임석[6], Nuntikorn Kitratporn[7], Natdanai Punsin[7], Budsaba Uamkasem[7], Parkpoom Choomanee[8], Surat Bualert[8], 임세희[1,2] [1]충남대학교 환경IT융합공학과, [2]충남대학교 환경공학과, [3]한국외국어대학교 환경학과, [4]수원대학교 환경에너지공학과, [5]공주대학교 대기과학과, [6]국립환경과학원 대기환경연구과, [7]Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (GISTDA), [8]Department of Environmental Science, Kasetsart University
5A3 09:40-10:00	**AE-DP 시뮬레이션을 이용한 스캐닝 라이다 관측의 물입자 영향 보정 연구** 이유선, 신주선, 김덕현[1], 노영민 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, [1]국립한밭대학교 기초과학부
5A4 10:00-10:20	**Seasonal Variations of Planetary Boundary Layer Height and Their Association with the Characteristics of High-$PM_{2.5}$ Episodes in Ulsan, Korea** Dat Nguyen, 주정태, 최성득 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
5A5 10:20-10:40	**화학물질배출이동량과 유해대기물질측정망 자료를 연계한 XGBoost 기반 전국 VOCs 공간 농도 추정** 남일권[1,2], 정소영[1], 서석준[1], 임용재[1], 안준영[1], 강대일[1], 성지원[1], 류승훈[3], 정승국[4], 최용주[2] [1]국립환경과학원 대기환경연구부, [2]한국외국어대학교 환경공학과, [3]수도권대기환경청 조사분석과, [4]한국환경공단 대기측정망부

Session 5B 측정·분석

▸ 2026. 10. 30. Friday

09:00-10:40	2발표장 [320B] | 좌장 박풍모 [안산미래연구원]
5B1 09:00-09:20	국내 주요 산업항만 대기 중 다환방향족탄화수소 유도체의 오염특성과 2차 생성 기여 고민지, 이호영, 주정태, 김영남[1)], 홍성진[1)], 최성득 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, [1)]충남대학교 지구환경우주융합과학과
5B2 09:20-09:40	실시간 대기관측을 위한 저전력 소형 LED 라이다 개발 홍천상, 이권호[1)] 강원대학교 복사위성연구소, [1)]강원대학교 대기환경과학과
5B3 09:40-10:00	토양, 수피, 솔잎 중 38종 과불화화합물의 동시 분석을 위한 LC-MS/MS 분석법 최적화 Shudi Han, 조인규, 최성득 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
5B4 10:00-10:20	ASIA-AQ 겨울 캠페인 중 서울의 입자상 질산염 생성 특성 이현민, 이미혜, 김주애, 길준수, 최용주[1)], 이강웅[1)], 이지선[1)], 손지환[2)], 박문수[3)], 김철희[4)], 신선아[5)], 안소이[5)], 장임석[5)] 고려대학교 지구환경과학과, [1)]한국외국어대학교 환경학과, [2)]서울특별시보건환경연구원 대기환경연구부, [3)]세종대학교 기후테크융합학과, [4)]부산대학교 대기환경과학과, [5)]국립환경과학원 환경위성센터
5B5 10:20-10:40	전류측정식 가스센서를 이용한 고층 오존 농도 관측 김선웅, 김용규, 김성훈, 이영석, 이상욱 한국표준과학연구원 물리측정본부 열유체측정그룹

Session 5C 대기환경모델링·AI

▸ 2026. 10. 30. Friday

09:00-10:40	3발표장 [321A] | 좌장 이형주 [포항공과대학교]
5C1 09:00-09:20	다중 규모 이종 그래프 기반 고해상도 대기질 추론: 잠재 공간 융합과 명시적 스케일 분해의 비교 정필수, 윤희영[1)] 주식회사 건화 환경평가부, [1)]안양대학교 환경에너지공학과
5C2 09:20-09:40	산불 배출에 따른 풍하 지역의 인위적 황산염 생성 억제 김동진[1)], 전원배[1),2)], 박재형[1)], 문정혁[3)], 최현식[4)], 양채영[4)], 허 민[4)] [1)]부산대학교 환경연구원, [2)]부산대학교 대기환경과학과, [3)]서울대학교 환경대학원, [4)]부산대학교 지구환경시스템학부
5C3 09:40-10:00	다중 환경변수 기반 N_2O_5 비균질 반응 모수화의 지역 간 전이성 평가 마예진, 김민중, 이태형[1)], 송정인[1)], 최대련[2)], 홍성철[3)], 이재범[3)], 이용희[3)], 박지훈[3)], 반수진[3)] 명지대학교 환경에너지공학과, [1)]한국외국어대학교 환경학과, [2)]안양대학교 환경에너지공학과, [3)]국립환경과학원 대기질통합예보센터
5C4 10:00-10:20	지역 특성 기반 대기오염물빌 배출 유형화와 유형별 배출량 예측 강보경 서울과학기술대학교 환경공학과
5C5 10:20-10:40	딥러닝 기반 다운스케일링을 적용한 시간별 1km 지표 대기 오염물질 농도 추정: 한국을 중심으로 이정범, 강진구, 한승희, 김나경[1)], 최대련 안양대학교 환경공학과, [1)]안양대학교 환경에너지공학과

Session 5D 원격탐사·센서

▸ 2026. 10. 30. Friday

09:00-10:40	4발표장 [321B] | 좌장 신동호 [한국에너지기술연구원]
5D1 09:00-09:20	**스캐닝 라이다 기반 입자크기별 질량소산효율과 질량·광학 입경특성의 지역적 비교** 윤지현, 신주선, 주소희[1], 이유선, 김덕현[2], 노영민 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, [1]Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (LACy), Université de La Réunion, [2]국립한밭대학교 노마드칼리지 기초과학부
5D2 09:20-09:40	**산업단지 내 악취성 VOCs 추적감시를 위한 원격감시 및 AI 융합 기반 예측모델 개발(1단계)** 성해창, 김상철, 장현섭, 허재희, 김관철[1], 이재영[2] 성균관대학교 환경포렌식연구소, [1]차세대융합기술연구원 첨단환경감시센터, [2]아주대학교 환경안전공학과
5D3 09:40-10:00	**AERONET 관측자료 기반 도시 대기오염 입자의 미세·조대 모드별 광학 특성 분석** 김성영, 정욱교 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공
5D4 10:00-10:20	**에어로졸 스캐닝 라이다를 이용한 항만 및 도시 지역의 고해상도 미세먼지 공간분포** 김지석[1], 최원이[3], 계관욱[1], 박선호[2], 이철용[5], 신성균[4], 이한림[1,2] [1]부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공, [2]노바스콥(주), [3]NASA Goddard Space Flight Center, [4]서울연구원 탄소중립연구센터, [5]한국해양과학기술원 해양빅테이터 AI센터
5D5 10:20-10:40	**대류권계면 기반 오존 기후값을 사전정보로 활용한 IASI 오존 연직분포 산출 개선** 김치영, Anne Boynard[1,2], Cathy Clerbaux[1,3], Daniel Hurtmans[3], Pierre-François Coheur[3], 박주선[4], 김주완[5], 구자호[6], 박민준[7], 이효정[4,7], 박상서 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, [1]Sorbonne Université, [2]SPASCIA, [3]Université libre de Bruxelles, [4]부산대학교 환경연구원, [5]공주대학교 대기과학과, [6]연세대학교 대기과학과, [7]부산대학교 대기환경과학과

Session 5E 기후변화·에너지

▸ 2026. 10. 30. Friday

09:00-10:20	5발표장 [322B] | 좌장 여민주 [연세대학교]
5E1 09:00-09:20	Ni(111) 결정면과 산소 결함의 시너지 조율을 통한 구연산 개질 Ni/CeO_2 촉매의 CO_2 메탄화 성능 향상 조면성, 김기현 한양대학교 공학대학원 건설환경공학과
5E2 09:20-09:40	시흥시 온실가스 배출 특성 및 변화 요인 분석 원수란 시흥시정연구원 연구부
5E3 09:40-10:00	도시의 단기체류성 기후변화 유발물질 및 온실가스 통합 인벤토리 구축: 환경산업연관분석을 적용한 서울시 소비기반 접근 강성민, 차주원, 이소진 서울연구원 탄소중립센터
5E4 10:00-10:20	국내 친환경선박 보급·인증 동향 및 소형 전기추진선박 해상실증 사례 곽재혁, 김낙현[1)] 한국해양교통안전공단 해양모빌리티실, [1)]한국조선해양기자재연구원 중소형미래선박본부

Session 5F 실태·배출관리

▸ 2026. 10. 30. Friday

09:00-10:20	6발표장 [323A] | 좌장 이임학 [서울시립대학교]
5F1 09:00-09:20	2023년 국내 간접온실가스 전구체 물질 배출량 산정 및 분석 전예지, 이강산, 한은미, 박민, 송형도, 유 철 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터
5F2 09:20-09:40	2023년도 국가 대기오염물질 배출량 산정 및 분석 이경빈, 한은미, 김태형, 김형천, 이향경, 김진식, 송승주, 주종민, 이강산, 함지영, 송형도, 유 철 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터
5F3 09:40-10:00	배출량 저감 관점에서의 권역별 대기환경관리 계획 진단과 정책적 시사점 한세현, 김정숙 주식회사 랩솔레미스
5F4 10:00-10:20	대기오염도검사 결과를 이용한 대기오염물질 배출특성 연구 김민영, 김영환, 장철민 (재)FITI시험연구원 기후환경팀

Session 5G [대기위해성분과회 특별세션]
빅데이터 및 AI 기반 기후변화-대기오염의 건강영향 연구

▸ 2026. 10. 30. Friday

09:00-10:40	7발표장 [323B] | 좌장 김세라 [한국환경연구원]
5G1 09:00-09:20	사전학습 기반 딥러닝을 이용한 전국 $PM_{2.5}$ 측정소의 일별 화학조성 추정 유은진, 이형주 포항공과대학교 환경공학부
5G2 09:20-09:40	웨어러블 및 환경자료와 대규모 언어모형을 연계한 장애인 맞춤형 기후보건 연구 안소진, 이환희[1)] 부산대학교 정보의생명공학대학, [1)]고려대학교 보건과학대학 보건정책관리학부
5G3 09:40-10:00	대기오염 장기노출과 파킨슨병 연관성 오종민[1),2),3)], 명지선[4)], 이동욱[5)], 한창우[6)], 홍윤철[7)], 김순태[8)], 강윤희[9)], 배현주[10)], 임연희[11)] [1)]이화여자대학교 의과대학 직업환경의학교실, [2)]이화여자대학교 의과대학 이화-SCL 환경건강 연구센터, [3)]이화여자대학교 의과학연구소, [4)]서울대학교 의학연구원, [5)]서울대학교 의과대학 예방의학교실, [6)]충남대학교 의과대학 예방의학교실, [7)]서울대학교 의학연구원 환경의학연구소, [8)]아주대학교 환경안전공학과, [9)]아주대학교 환경연구소, [10)]한국환경연구원, [11)]코펜하겐대학교 보건학과
5G4 10:00-10:20	미세먼지 노출과 소아·청소년 알레르기질환의 관련성: 아토피피부염과 천식을 중심으로 정경준[1),2)], 이용진[1)], 양지연[1)], 김창수[1),2)] [1)]연세대학교 의과대학 기후환경건강 시스템과학연구소, [2)]연세대학교 의과대학 예방의학교실
5G5 10:20-10:40	임신 전/중/후 초미세먼지 노출과 아동의 사회적 반응성의 연관성 최하연, Bethsaida Cardona[1)], Kristen Lyall[2)], Jaime E. Hart[1)], Marc G. Weisskopf[1)] 카이스트 녹색성장지속가능대학원, [1)]Harvard TH Chan School of Public Health, [2)]Drexel Autism Institute

Session 5H [특별세션] (Closed Session) 대기배출원의 정밀측정·추적을 위한 통합 플랫폼 기술 개발

▸ 2026. 10. 30. Friday

09:00-10:20	8발표장 [324A] | 좌장 전기준 [인하대학교]
5H1 09:00-09:20	산단 일반대기 정밀측정용 측정 차량 설계 및 고해상도 시각화 플랫폼 개발 Le Thi Hoang Yen[1)], 강천웅[1),2)], 박종현[1),2)], 윤준혁[1),2)], 박세은[1),2)], 서지영[1),2)], 이헌영[1),2)], 유한진[3)], 전기준[1),2)] [1)]수도권 미세먼지 연구·관리센터, [2)]인하대학교 환경공학과, [3)]국립한국교통대학교 환경공학과
5H2 09:20-09:40	고온 배출원 배출물질 정밀 측정을 위한 전처리 장치 소형화 기술 개발 이건희, Pham Viet Hoang, 조채연, 박예지, 한방우 한국기계연구원 도시환경연구실
5H3 09:40-10:00	SIFT-MS 기반 산업단지 이동측정 데이터 표준화 및 QA/QC 체계 구축 방안 연구 박은하, 조용선, 이광민, 이호승 RIST 환경연구소 환경보건연구그룹
5H4 10:00-10:20	대기배출원 데이터베이스 구축 및 이동차를 활용한 배출원 분석 시각화 방안 남형석, 강혜선, 이철환, 박태웅 에코데이터

Session 5I [특별세션] 고농도 오존 hot-spot 관리 I

▸ 2026. 10. 30. Friday

09:00-10:40	9발표장 [324B]	좌장 최용주 [한국외국어대학교]
5I1 09:00-09:20	다양한 관측 플랫폼을 활용한 오존 입체 감시 최용주, 이기열, 우서라, 김민호, 강형모, 윤치성 한국외국어대학교 환경학과	
5I2 09:20-09:40	온·오프라인 GC-FID/MS 측정 기반 여수 산업지역 C_2-C_5 VOCs의 오존 생성 잠재력 평가 배민석, 송명기, 최서영, 박채형, 고동훈, 김우준, 박재환, 백성옥 국립목포대학교	
5I3 09:40-10:00	ECC 오존존데 기반의 대기 오존 프로파일링 및 활용 연구 강현규, 김주완, 안상현, 오수빈, 최용주[1], 이기열[1], 김민호[1], 강형모[1], 신선아[2] 국립공주대학교 대기과학과, [1]한국외국어대학교 환경공학과, [2]국립환경과학원 환경위성센터	
5I4 10:00-10:20	오존 생성과 위해 유기성분 발생의 상호연관성 최나래[1),2)], 김용표[3)], 이지이[4)], 김은혜[5)], 김순태[6)], 신혜정[7)] [1)]강원대학교 환경공학과, [2)]강원권 미세먼지연구관리센터(강원대학교), [3)]서울대학교 미세먼지특성화대학원, [4)]이화여자대학교 환경공학과, [5)]국립군산대학교 환경공학과, [6)]아주대학교 환경안전공학과, [7)]국립환경과학원 환경위성센터	
5I5 10:20-10:40	지표원격관측을 통한 오존 생성 전구물질의 연직 분포 파악 윤치성, 이기열, 최용주 한국외국어대학교 환경학과	

Session 6A 측정·분석

▸ 2026. 10. 30. Friday

11:00-13:00	1발표장 [320A] | 좌장 김경환 [한국과학기술연구원]
6A1 11:00-11:20	블랙카본의 산화 수준과 이차 무기 에어로졸의 혼합 조건에 따른 입자의 물리화학적 특성 및 광학적 특성 변화 규명 박종현[1),2)], 레티황이엔[2)], 유한진[3)], 송영철[4)], 윤준혁[1),2)], 서지영[1),2)], Weijun Li[5)], 전기준[1),2)] [1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지 연구·관리센터, [3)]국립한국교통대학교 환경공학과, [4)]한국화학연구원 화학분석센터, [5)]저장대학교 대기과학과
6A2 11:20-11:40	아스팔트 배출물질의 2차 유기 에어로졸 생성: 블랙카본 공존 영향 레티황이엔[1)], 서지영[2)], 이창주[3)], 윤종상[3)], 정용원[1),2)], 전기준[1),2)] [1)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [2)]인하대학교 환경공학과, [3)]가톨릭대학교 에너지환경공학과
6A3 11:40-12:00	SP-AMS 및 Aethalometer 측정을 통한 서울대기 PM_1의 계절적 특성과 배출원 특성 분석 이석현[1),2)], 이혜지[1),2)], 김경환[1)] [1)]한국과학기술연구원 기후탄소순환연구단, [2)]고려대학교 지구환경과학과
6A4 12:00-12:20	EANET VOC 관측 도입을 위한 울란바토르 passive sampling 파일럿 연구 이지민, Minggun Huo[1)], Yujiro Ichikawa[2)], Gantuya Ganbat[3)], Barkhasragchaa Baldorj[4)], 이미혜 고려대학교 지구환경과학과, [1)]Asia Center for Air Pollution Research (ACAP), Japan, [2)]Center for Environmental Science in Saitama (CESS), Japan, [3)]German-Mongolia Institute for Resources and Technology (GMIT), Mongolia, [4)]Central Laboratory of Environment and Meteorology (CLEM), Mongolia
6A5 12:20-12:40	기상관측선을 활용한 2026년 상반기 한반도 주변 해상 온실가스 관측 결과 정석한, 이선란, 김수민 국립기상과학원 지구대기감시연구과
6A6 12:40-13:00	울산지역 VOCs의 공간분포 특성과 이차 생성 잠재력 평가 김기애[1)], 김상화[1)], 이종재[1),2)], 송창근[1),2)], 최성득[1),2)] [1)]울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, [2)]동남권 미세먼지연구관리센터

Session 6B 측정·분석

▸ 2026. 10. 30. Friday

11:00-12:40	2발표장 [320B] | 좌장 유한진 [국립한국교통대학교]
6B1 11:00-11:20	CRM 기반 총 OH 반응성 측정 시스템의 순천 지역 지상 관측 적용 유성지, 남우희, 이수진, 이경환, 민경은 광주과학기술원 환경·에너지공학과
6B2 11:20-11:40	에디 공분산 관측을 통한 울산 도심의 오존플럭스 및 건성침적속도: 여름과 겨울 측정 비교 박유경, 박용미[1], 한수빈[1], 서성민[1], 최원식[1] 국립부경대학교 SEED 연구소, [1]국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공
6B3 11:40-12:00	PTR-ToF-MS 기반 BVOCs 정도관리 및 일변동 특성: Isoprene과 α-Pinene 김정호, 박승명[1], 안수경[1], 김현웅[1], 김유정[1], 허국영[1] 열린공간, [1]국립환경과학원 기후대기연구부
6B4 12:00-12:20	이동측정 기반 산업단지 hotspot의 입경분포 특성 분석 한수빈[1),2)], 최원식[1),2)] [1)]국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [2)]동남권 미세먼지 연구·관리센터
6B5 12:20-12:40	실시간 다항목 이동관측에 기반한 배출원 밀집 지역 내 오존 및 전구물질의 공간적 불균일성 규명 강천웅[1),2)], 신현준[3)], 서현정[3)], 전기준[1),2)] [1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권미세먼지연구·관리센터, [3)]수도권대기환경청

Session 6C 대기환경모델링·AI

▸ 2026. 10. 30. Friday

11:00-12:40	3발표장 [321A] | 좌장 김민중 [명지대학교]
6C1 11:00-11:20	다중 위성 자료와 인공지능을 융합한 시공간 연속적 전천(All-sky) 시간별 총일차생산량 모델링 배세정, 손보경, 성태준, 김예진, 김영석, 임정호 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
6C2 11:20-11:40	CAPSS 배출량 처리를 위한 시간·공간·화학종 DB 개선 방안 검토 및 대기질 모사 농도(PM-2.5, Ozone) 영향 분석 이윤구, 최동원, 김성준, 한은미[1], 김태형[1], 이경빈[1], 송형도[1], 유철[1], 우정헌[2], 배창한[3] 알씨에어(주), [1]기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터, [2]서울대학교 환경관리학과, [3]리켐프로(주)
6C3 11:40-12:00	남한 주변 해역 해양기원 자연배출의 대기환경 영향과 에어로졸-복사-기상 결합 효과 김진승, 송상근[1], 조성빈[2], 권오경 제주대학교 지구해양융합학부 지구해양과학전공, [1]제주대학교 지구해양과학과, [2]국립기상과학원 기상응용연구부
6C4 12:00-12:20	딥러닝을 활용한 위성 기반 인위적 CO_2 배출 모니터링 향상 황수민, 최현영, 양세영, 배세정, 임정호 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
6C5 12:20-12:40	동아시아 식생기능형(PFT) 자료 변화가 생물기원 휘발성유기화합물(BVOCs) 배출 및 오존 농도에 미치는 영향 정지민, 김민중[1], 최대련[2], 이재범[3], 홍성철[3], 박지훈[3], 반수진[3] 명지대학교 환경에너지공학과, [1]명지대학교 환경시스템공학과, [2]안양대학교 환경에너지공학과, [3]국립환경과학원 대기질통합예보센터

Session 6D 방지기술

▸ 2026. 10. 30. Friday

11:00-12:40	4발표장 [321B]	좌장 양재환 [충남대학교]
6D1 11:00-11:20	머신러닝 기반 건조·습윤 조건에서의 바이오차 CO_2 흡착 특성 비교 문소은, 고상원[1], 김경훈[1], 허재석[1] 박덕신[1], 이재영[2,3] 아주대학교 환경공학과, [1]한국철도기술연구원 교통환경연구실, [2]아주대학교 환경안전공학과, [3]아주대학교 인공지능학과	
6D2 11:20-11:40	Mg/Al 조성비가 층상이중수산화물(LDH)의 기체상 HCl 흡착 및 CO_2 배출에 미치는 영향 이윤경, 송지현 세종대학교 건설환경공학과	
6D3 11:40-12:00	지지체별 수분흡수 특성이 알칼리 첨착 흡착제의 H_2S 제거성능에 미치는 영향 전진수, 안해영, 송지현 세종대학교 건설환경공학과	
6D4 12:00-12:20	무탄소 연료(수소, 암모니아) 연소 배가스 제어를 위한 탈질 촉매 기술 동향 김범식 건국대학교 사회환경공학부	
6D5 12:20-12:40	SO_2 흡수제 선정을 위한 알칼리 흡수제의 pH 변화 및 흡수 특성 비교 정현수, 김재헌, 문병현, 박아린, 김희진, 김재진[1], 심유진[1], 박시언[1], 김서현[1], 한희선[1], 김민지[1], 김성수[1] 경기대학교 환경에너지공학과, [1]경기대학교 사회에너지시스템공학과	

Session 6F 대기위해성

▸ 2026. 10. 30. Friday

11:00-12:40	6발표장 [323A] | 좌장 정경준 [연세대학교]
6F1 11:00-11:20	수소 환원 기반 결함 생성 및 계면 제어를 통한 $NiOx/TiO_2$ 광촉매 필터의 개발과 폼알데하이드와 황화수소 제거 성능 향상 이용성, 김기현 한양대학교 공학대학원 건설환경공학과
6F2 11:20-11:40	Statistical Treatment of Uncertainties in the Estimation of Cumulative Cancer Risk Due to Atmospheric Dioxin-Like Compounds Balasubramanian Prithiviraj, Tuyet Nam Thi Nguyen, 고민지, 주정태, 최성득 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
6F3 11:40-12:00	대기 $PM_{2.5}$의 시간에 따른 ·OH 생성과 화학조성의 연계: 금속과 유기성분의 역할 서재원, 문지혜, 김화진 서울대학교 보건대학원 환경보건학과
6F4 12:00-12:20	미세먼지 질량농도와 산화잠재력 기반의 배출원 기여도 통합 평가 박성원, 전지원, 한영지[1], 이광열[2], 허국영[2], 조미라[2], 강대일[2] 강원대학교 환경학과, [1]강원대학교 생명·환경융합학부, [2]국립환경과학원 대기환경연구과
6F5 12:20-12:40	2025~2026년 안산 지역 $PM_{1.0}$ 중 PFAS 배출 규명 및 인체 위해성 평가 박채형, 최서영, 고동훈, 김우준, 박재환, 백성옥, 송명기, 배민석 국립목포대학교

Session 6G [특별세션] (Closed Session) 비산배출원 규명을 위한 NH_3-PM 측정 라이다 및 모니터링 기술

▸ 2026. 10. 30. Friday

11:00-12:20	7발표장 [323B] | 좌장 노영민 [국립부경대학교]
6G1 11:00-11:20	대기 중 암모니아 측정을 위한 라이다 개발 신동호, 최호경, 노영민[1], 신주선[1] 한국에너지기술연구원, [1]부경대학교
6G2 11:20-11:40	암모니아 유래 에어로졸의 온습도별 점성도 측정 송미정[1),2)] [1)]전북대학교 지구환경과학과, [2)]전북대학교 기후환경에너지융합학과
6G3 11:40-12:00	비산배출원 관측을 위한 NH_3-PM 라이다 기술의 현황과 과제 신주선, 윤지현, 노영민 부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공
6G4 12:00-12:20	대기 관리를 위한 라이다 기술 개발 현황 노영민 부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공

Session 6H [측정·분석분과회 특별세션]
첨단 대기측정분석기술과 AI 기반 데이터 활용

▸ 2026. 10. 30. Friday

11:00-13:00	8발표장 [324A] | 좌장 이지이 [이화여자대학교]
6H1 11:00-11:20	I-CIMS를 활용한 겨울철 질산염의 야간 생성반응 이해 이태형, 송정인, 김경훈, 강석원, 홍성철[1], 이재범[1] 한국외국어대학교 환경학과, [1]국립환경과학원 대기환경연구과
6H2 11:20-11:40	인공지능을 이용한 유해대기오염물질의 고해상도 지도 제작 최성득, 주정태 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
6H3 11:40-12:00	스캐닝 라이다 기반 경기도 미세먼지 배출사업장 단속 기법 및 효율 향상 김관철, 이동희, 오세호, 성민경, 박정민, 김성조[1], 이권호[2], 홍천상[2], 최성철[3], 최창기[3], 최우석[4] 차세대융합기술연구원 첨단환경감시센터, [1]천안과학산업진흥원 전략기획부, [2]강원대학교 강릉캠퍼스 복사위성연구실, [3]삼우티시에스(주), [4]세종대학교 인공지능데이터사이언스학과
6H4 12:00-12:20	정밀 분광분석과 질량분석을 통한 저감된 NOx 조건에서의 국내 반응성 질소 화학 및 조성 연구 이영로[1,2], 이미혜[1], 주태규[1], 정선제[1], 신지원[1], L. Gregory Huey[2], David Tanner[2], Christine Harper[2], the ASIA-AQ Science Team [1]고려대학교 지구환경과학과, [2]Georgia Institute of Technology School of Earth and Atmospheric Sciences
6H5 12:20-12:40	MAX-DOAS 관측 기반 서울 도심 HONO, HCHO, CHOCHO의 연직 분포 특성 길준수[1,2], 이미혜[1], 최용주[3], 이현민[1] [1]고려대학교 지구환경과학과, [2]고려대학교 기초과학연구원, [3]한국외국어대학교 환경학과
6H6 12:40-13:00	대기중 반응성 질소의 질소·산소 안정동위원소비 분석시스템 구축 신지원, Haiyan Jin, 강정옥, 김주애, 이미혜 고려대학교 지구환경과학과

Session 6I [특별세션] 고농도 오존 hot-spot 관리 II

▸ 2026. 10. 30. Friday

11:00-13:00	9발표장 [324B] | 좌장 곽경환 [강원대학교]
6I1 11:00-11:20	**전구물질 배출 hot-spot과 고농도 오존 hot-spot의 유형 분류 기법** 곽경환, 김태희[1)], 김지민, 이현서, 도현석 강원대학교 환경학과, [1)]강원대학교 산학협력단
6I2 11:20-11:40	**지역 맞춤형 대기질 정책 지원을 위한 통합 분석 플랫폼의 현재와 미래** 김순태, 강윤희[1)], 정성은[2)], 김은혜[3)] 아주대학교 환경안전공학과, [1)]아주대학교 환경연구소, [2)]아주대학교 환경공학과, [3)]군산대학교 환경공학과
6I3 11:40-12:00	**2026년 여름철 고농도 오존의 발생 특성과 시사점 — 수도권과 광양만을 중심으로** 김순태, 강윤희[1)], 정성은[2)], 김은혜[3)], 이소정[2)], 김정욱[2)], 배병규[2)] 아주대학교 환경안전공학과, [1)]아주대학교 환경연구소, [2)]아주대학교 환경공학과, [3)]군산대학교 환경공학과
6I4 12:00-12:20	**CTM 기반 AI를 활용한 위성 관측 기반 지표 대기질 추정** 김현서, 김은혜[1)], 강윤희[2)], 정성은[3)], 김순태[3)], 김현철[4),5)], 손락훈 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공, [1)]국립군산대학교 환경공학과, [2)]아주대학교 환경연구소, [3)]아주대학교 환경안전공학과, [4)]미국 국립해양대기청 대기자원연구소, [5)]메릴랜드대학교 위성 지구시스템 연구 협력연구소
12:20-13:00	[지정토론]

Session 7A 측정·분석

▸ 2026. 10. 30. Friday

15:10-16:50	1발표장 [320A] | 좌장 송영철 [한국화학연구원]
7A1 15:10-15:30	**머신러닝 기반 고속도로 톨게이트 대기오염물질 농도 영향요인 분석** 고찬주, 김소연[1], 정무현[1),2)], 강혜진[3)], 이재영[4),5)] 아주대학교 환경공학과, [1)]한국화학융합시험연구원 환경화학연구소 대기환경센터, [2)]고려대학교 보건안전융합과학과, [3)]한국도로공사 도로교통연구원, [4)]아주대학교 환경안전공학과, [5)]아주대학교 인공지능학과
7A2 15:30-15:50	**대기 중 유·무기 모사 에어로졸 입자의 점도와 상 변화 연구** 박지원[1),2)], 이정민[1),3)], 유한진[4)], 구자호[2)], 송영철[1)] [1)]한국화학연구원 화학분석센터, [2)]연세대학교 대기과학과, [3)]UST 화학소재 및 공정학과, [4)]국립한국교통대학교 환경공학과
7A3 15:50-16:10	**PM-2.5 수분 함량이 비균질 화학반응에 미치는 영향에 관한 기초 연구** 정라니, 성민영, 정지윤, 이태훈, 조용한, 이그림, 박진수, 강대일, 성지원 국립환경과학원 대기환경연구과
7A4 16:10-16:30	**고온풍동시스템에서 주위온도에 의한 열선식유속계의 정확도 영향** 김규보, 임 호, 박영도, 김준희, 정상진, 허정기, 임재휴, 양성재[1)], 류현준[1)] 포항산업과학연구원, [1)]POSCO
7A5 16:30-16:50	**테더드 존데와 원격탐사 플랫폼 관측을 통한 NO_2 연직분포 비교 연구** 이기열, 최용주, 장임석[1)], 김덕래[1)], 이원진[1)], 신혜정[1)], Yugo Kanaya[2)], Thomas Hanisco[3)], 박종욱[3)], Bryan Place[3),4)], Apoorva Pandey[3),5)], 최형석, 김민호 한국외국어대학교 환경학과, [1)]국립환경과학원, [2)]Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, [3)]NASA Goddard Space Flight Center, [4)]Sciglob Instruments and Services LLC, [5)]University of Maryland

Session 7B 측정·분석

▸ 2026. 10. 30. Friday

15:10-16:50	2발표장 [320B]	좌장 최용주 [한국외국어대학교]
7B1 15:10-15:30	안면도 지구대기감시소 에어로졸 및 반응가스의 고농도 특성 분석: 2025년 11월 사례 부준오, 한종헌, 오상민, 김상백 국립기상과학원 지구대기감시연구과	
7B2 15:30-15:50	PAC-알지네이트 생물활성 흡착제의 황화수소 수착 및 생물학적 산화 잠재성 조나래, 김대근 서울과학기술대학교 환경공학과	
7B3 15:50-16:10	항공관측을 활용한 전북 자연환기식(재래식) 돈사·우사 지역 상공의 입체적인 암모니아 분포 분석과 배출량 산정 서범근[1], 이미선[1], 유정훈[1], 송미정[3], 유지성[3], 김연후[3], 홍세운[4], 이향경[5], 함지영[5], 유 철[5], 김종호[1,2] [1]한서대학교 환경연구소, [2]한서대학교 환경·토목·건축학과, [3]전북대학교 환경에너지융합학과, [4]전남대학교 지역·바이오시스템공학과, [5]국가미세먼지정보센터	
7B4 16:10-16:30	권역별 대기환경연구소 측정자료 기반 탄소성 에어로졸 광흡수 특성 평가 및 광흡수 증강 해석 정진주[1,2], 오승미[2], 송인호[1], 박종성[1], 임용재[1], 허국영[1], 강대일[1], 성지원[3], 이지이[2] [1]국립환경과학원 대기환경연구과, [2]이화여자대학교 환경공학과, [3]국립환경과학원 대기환경연구부	
7B5 16:30-16:50	부산 연안지역 계절별 입자상 질산염 생성 특성 연구 박용미[1], 한수빈[1,2], 최원식[1,2] [1]국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [2]동남권 미세먼지 연구·관리센터	

Session 7C 대기환경모델링·AI

▸ 2026. 10. 30. Friday

15:10-16:30	3발표장 [321A]	좌장 박승부 [서울시립대학교]
7C1 15:10-15:30	딥러닝 기반 CMAQ 에뮬레이터를 활용한 국내 전구물질 배출 저감에 따른 지역별 오존 민감도 평가 김지민, 김태희[1], 도현석, 곽경환, 백복행[2], 이상덕[3], 김수민[4], 박정후[4] 강원대학교 환경학과, [1]강원대학교 산학협력단, [2]George Mason University, [3]강원대학교 산림환경보호학과, [4]국립환경과학원 대기환경연구과	
7C2 15:30-15:50	머신러닝 기반 천식 응급실 스테로이드 처방 예측 및 꽃가루·기상·대기오염 요인의 상대적 중요도 평가 황혜민, 장재혁[1], 이은영[2], 박해심[1], 이재영[3,4] 아주대학교 환경공학과, [1]아주대학교 의과대학 알레르기내과학교실, [2]Department of Neurology, McGovern Medical School, The University of Texas Health Science Center at Houston, [3]아주대학교 환경안전공학과, [4]아주대학교 인공지능학과	
7C3 15:50-16:10	랜덤포레스트 기반 머신러닝을 이용한 제주 지역 양돈시설의 NH_3 농도 예측 및 검증에 관한 연구 고용국[1,2], 전 진[1], 이현정[1] [1]제주대학교 환경공학과, [2]제주녹색환경지원센터(제주악취관리센터)	
7C4 16:10-16:30	차량번호인식장치(ANPR)와 View-T 자료 및 COPERT 모델을 활용한 서울시 자동차 기후·대기 통합 배출량 산정 방법론 도출 이소진[1,2], 강성민[1,2], 차주원[1,2] [1]수서울연구원 탄소중립센터, [2]서울시 탄소중립지원센터	

Session 7D 방지기술

▸ 2026. 10. 30. Friday

15:10-16:30	4발표장 [321B] | 좌장 장현섭 [성균관대학교]
7D1 15:10-15:30	섬유염색 사업장 복합 대기오염방지시설의 오염물질 저감 및 비용효과 분석 김정호, 김현수[1], 문혜식[1], 편도철[2] 열린공간, [1]대구녹색환경지원센터, [2]대구정책연구원
7D2 15:30-15:50	P 첨가를 통한 Zr-Al 흡착제의 암모니아 흡착 성능 증진 연구 문병현, 정현수, 김재헌, 박아린, 김희진, 김성수[1] 경기대학교 환경에너지공학과, [1]경기대학교 사회에너지시스템공학과
7D3 15:50-16:10	활성금속 첨가 방법이 CF_4 분해 촉매의 활성 및 내구성 영향 인자 규명 연구 김재헌, 정현수, 문병현, 박아린, 김희진, 김성수[1] 경기대학교 환경에너지공학과, [1]경기대학교 사회에너지시스템공학과
7D4 16:10-16:30	고내수성 수산화철계 탈황제를 적용한 50CMM 건식악취제거설비의 공공 폐수처리시설 현장 실증 김신동, 이재명, 강민현 ㈜이앤켐솔루션 에너지·환경연구소

Session 7E 기후변화·에너지

▸ 2026. 10. 30. Friday

15:10-16:30	5발표장 [322B] | 좌장 나하나 [인제대학교]
7E1 15:10-15:30	대기오염물질 저감에 따른 재생에너지 공급 및 에너지 수요의 변화 박인홍 건국대학교 사회환경공학부
7E2 15:30-15:50	폐기물 부문 온실가스 배출 인벤토리의 불확도 평가 및 민감도 분석 노준영, 이동은, 김성동, 김승진, 이한결[1], 노용국[1] ㈜휴엔릭스 첨단기술연구소, [1]한국환경공단 기후정책지원부
7E3 15:50-16:10	Pt-Ni 합금 나노촉매를 이용한 저함량 Pt 알칼라인 수소 발생 반응 성능 향상 연구 배기남[1),2)], 트란민녹[1)], 정다운[1)], 오민희[1)], 전기준[1),2)] [1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지 연구·관리 센터
7E4 16:10-16:30	알칼리성 수소 발생 성능 향상을 위한 코발트 칼코게나이드의 이종 계면으로의 표면 재구성 트란민녹[1)], 정다운[1),2)], 배기남[1),2)], 전기준[1),2)] [1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지 연구·관리 센터

Session 7F [특별세션] (Closed Session) 응축성 먼지 관리체계 방향성 : 측정 현황과 산정 영향-응축성 먼지

▸ 2026. 10. 30. Friday

15:10-16:50	6발표장 [323A] | 좌장 윤종상 [가톨릭대학교]
7F1 15:10-15:30	대기배출시설 응축성 먼지 관리체계 구축을 위한 업종별 배출계수 개발 현황 전기준[1),2)], 윤종상[3)], 이주희[4)], 정관영[5)] [1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권미세먼지연구·관리센터, [3)]가톨릭대학교 에너지환경공학과, [4)](재)한국화학융합시험연구원, [5)](재)포항산업과학연구원
7F2 15:30-15:50	인벤토리 관점에서 응축성 미세먼지 배출량 산정의 영향 검토 한세현 주식회사 랩솔레미스
15:50-16:50	[토론]

Session 7H 실내공기질

▸ 2026. 10. 30. Friday

15:10-16:10	8발표장 [324A] | 좌장 원수란 [시흥시정연구원]
7H1 15:10-15:30	하이브리드 전자담배 가동 모드 및 전용 스틱 종류에 따른 에어로졸 내 유해대기오염물질 발생 특성 오승관[1], 김진섭[1], 이현아[1], 최예빈[1], 김용현[1),2),3)] [1)]전북대학교 기후환경에너지융합학과, [2)]전북대학교 환경공학과, [3)]전북특별자치도 환경보건센터
7H2 15:30-15:50	UV-가시광 응답형 Bi_2MoO_6/NH_2-UiO-66 나노복합체 기반 흡착-광촉매의 시너지를 이용한 실내공기 중 폼알데하이드의 산화기술 김정민, 김기현 한양대학교 공학대학원 건설환경공학과
7H3 15:50-16:10	Bandgap-adjusted Bismuth Tungstate-titanium Dioxide S-scheme Heterojunctions: Optimizing Interfacial Electronic Structure for Rapid VOC Mineralization Yin Qian, Ki-Hyun Kim 한양대학교 건설환경공학과

Session 7I 실내공기질

▸ 2026. 10. 30. Friday

15:10-16:30	9발표장 [324B]	좌장 김용현 [전북대학교]
7I1 15:10-15:30	매개체 보조 혼성 계단형(MAH-S) 전하 배치를 갖는 은 도핑 금속산화물/MOF 이종구조에서의 기상 폼알데하이드 광촉매 완전 산화 Lu Yan, Ki-Hyun Kim 한양대학교 건설환경공학과	
7I2 15:30-15:50	배양 및 형광 기반 측정을 통한 응급실 바이오에어로졸과 실내공기질의 시·공간적 특성 오용환, 정희봄[1], 조영민[1], 조상희[2], 김태훈[2], 손윤석 국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [1]경희대학교 환경학 및 환경공학과 [2]한국원자력연구원 첨단방사선연구소	
7I3 15:50-16:10	차세대 저농도 가스 청정성능(c-CADR) 평가를 위한 SIFT-MS 의 적합성 및 한계 검토 이진근, 최병현, 손채은, 구영선[1] 영인에이스(주), [1]에너지인증연구소	
7I4 16:10-16:30	Cu 개질 TiO_2/WO_3 S-scheme 광촉매를 이용한 방향족 및 황 함유 휘발성유기화합물의 기상 제거 이철승, 김기현 한양대학교 공학대학원 건설환경공학과	

발표일정표 - 포스터발표

▶ 포스터 부착 : 2026년 10월 29일(목) 11:00~12:40
▶ 포스터 1차 발표 : 2026년 10월 29일(목) 13:00~14:30
▶ 포스터 2차 발표 및 평가 : 2026년 10월 30일(금) 13:30~15:10
▶ 포스터 발표장 : 대구EXCO 그랜드볼룸A(3F)

평가위원[PA~PH] : 김용현(전북대학교), 김은혜(국립군산대학교), 김주애(고려대학교), 박대훈(한국기계연구원), 박은하((재)포항산업과학연구원), 박풍모(안산미래연구원), 송영철(한국화학연구원), 오용환(국립부경대학교), 이현정(제주대학교), 정경준(연세대학교), 최나래(강원대학교), 최용주(한국외국어대학교),

평 가 위 원 [PI] : 김민중(명지대학교), 김종범(충남연구원), 나하나(인제대학교), 박승부(서울시립대학교), 이영로(고려대학교)

Session PA 실내공기질

PA1	충청남도 다중이용시설의 세부시설 및 지역별 실내공기질 고농도 특성 분석 이혜연, 황규철[1], 윤희원, 김종범 충남연구원 서해안기후환경연구소 [1]국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공
PA2	PVA 기반 산화환원 반응을 이용한 MnO_2 촉매 필터 제조 및 상온 HCHO 제거 김나혜, 허대영, 김태오 국립금오공과대학교 환경공학과
PA3	생체유체 모사 에어로졸 입자의 대기환경 조건에 따른 물리화학적 특성 변화 이정민[1),2)], 박지원[1),3)], 송영철[1),2)] [1)]한국화학연구원 화학분석센터, [2)]UST 화학소재 및 공정학과, [3)]연세대학교 대기과학과

Session PB 기후변화·에너지

PB1	전과정 기반 연료 유형별 도로이동오염원 온실가스 배출량 산정 서유정, 한세현, 박상준[1)] ㈜랩솔레미스, [1)]한국교통연구원
PB2	타이타네이트 나노튜브/TiO_2 이중층 광전극을 이용한 고성능 염료감응형 태양전지 김준서, 김태오 국립금오공과대학교 환경공학과
PB3	극한기상-대기질 상호작용: 태풍 영향에 따른 서울 대기오염물질 변화와 기상 민감도 나하나[1),2),3)], 정우식[1),2),3)] [1)]인제대학교 대기환경정보공학과, [2)]태풍사전방재선도연구센터, [3)]대기환경정보연구센터

Session PC 대기환경모델링·AI

PC1	인공지능 기반 격주 암모니아 농도의 일 단위 시간 상세화 및 공간 전이성 평가 강은진, Saman Malik, 강유진, 황수민, 임정호 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
PC2	환경 측정·분석 데이터의 표준화 기반 환경 Big DATA 통합 관리시스템 구축 및 활용 사례 김지훈, 이상균, 김희진, 이훈하 포항산업과학연구원 환경보건연구그룹
PC3	수리물리-대기 결합 모델을 이용한 야적 분체 및 토사의 시간·깊이별 함수율 예측 연구 김지훈, 이상균, 최영재, 정관영, 김희진 포항산업과학연구원 환경보건연구그룹
PC4	SCR 전단 NOx 예측 및 강화학습(PPO) 기반 암모니아 주입 최적화 이상균, 김희진, 윤원근, 김지훈 포항산업과학연구원 환경보건연구그룹
PC5	Analyzing Long-Range Transport and Local Sources of $PM_{2.5}$ in Yangon Using Integrated Receptor Modeling and Machine Learning Deweathering Wint Thiri Marn, 주정태, 최성득 UNIST
PC6	대기화학모델 적용을 위한 니트로페놀 유래 주간 HONO 생성 관측 기반 모수화 방안 개발 김나현, 김민중 명지대학교 환경에너지공학과
PC7	인공지능 기반 결측 보정 기법 선택이 생태계 연간 탄소수지 추정에 미치는 영향: 다층 플럭스 타워 자료를 이용한 갭 이식 실험 박창현, 박재형, 김동진, 전원배[1], 김철희[1], 이순환[2] 부산대학교 환경연구원, [1]부산대학교 대기환경과학과, [2]부산대학교 지구과학교육과
PC8	도시숲이 국지 기상환경에 미치는 영향: 서울숲 사례의 WRF-UCM 수치 모의 김우진, 전원배[1),2)], 박재형[1)], 김동진[1)], 허 민 부산대학교 지구환경시스템학부, [1)]부산대학교 환경연구원, [2)]부산대학교 대기환경과학과
PC9	겨울철 한반도 $PM_{2.5}$ 종관 패턴 분류를 위한 대표 기압면 평가: 기압면별 특성과 연직 연계성 채다은, 박순영[1)], 이순환[2),3)] 부산대학교 지구과학과, [1)]대구교육대학교 과학교육과, [2)]부산대학교 지구과학교육과, [3)]부산대학교 환경연구원
PC10	도시 특성 세분화를 고려한 LCZ 적용에 따른 부산의 열환경 및 하층대기 모의 특성 김지선, 박순영[1)], 이순환[2),3)] 부산대학교 지구과학과, [1)]대구교육대학교 과학교육과, [2)]부산대학교 지구과학교육과, [3)]부산대학교 환경연구원
PC11	도시 산악 관측지점에서 나타나는 야간 고농도 오존의 발생 및 수송 특성 유정우[1)], 이순환[1),2)] [1)]부산대학교 환경연구원, [2)]부산대학교 지구과학교육과

PC12	**초기 배출 인벤토리에 따른 아시아 NH_3 모의 성능의 차이와 위성 기반 배출 보정 효과** 최현식, 전원배[1),2)], 양채영, 이다은, 황소민 부산대학교 지구환경시스템학부, [1)]부산대학교 환경연구원, [2)]부산대학교 대기환경과학과
PC13	**배출원별 VOCs 저감에 따른 오존 변화 예측: 머신러닝과 광화학 박스모델의 상호 검증** 장예진, 이창주, 윤종상 가톨릭대학교 에너지환경공학과
PC14	**2022년 국내·외 인벤토리 현행화에 따른 초미세먼지(PM-2.5) 모사 농도 및 배출 기여도 변화 분석** 최동원, 이윤구, 김성준, 한은미[1)], 김태형[1)], 이경빈[1)], 송형도[1)], 유 철[1)], 우정헌[2)], 배창한[3)] 알씨에어(주), [1)]기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터, [2)]서울대학교 환경관리학과, [3)]리켐프로(주)
PC15	**최소 난류 확산계수 설정에 따른 오존 농도 모의 특성** 권민지, 이순환[1),2)] 부산대학교 지구과학과, [1)]부산대학교 지구과학교육과, [2)]부산대학교 환경연구원
PC16	**Improving $PM_{2.5}$ and PM_{10} Analysis and Forecasting over East Asia Using Data Assimilation in WRF-Chem with MOZART-GOCART** Naser Mohammadzadeh, Myong-In Lee Department of Civil Urban Earth and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology
PC17	**성층권 메탄 편향에 대한 동아시아 지표 메탄 농도의 반응** 최진녕, 김민중, 이승하[1)] 명지대학교 환경에너지공학과, [1)]국립환경과학원 대기환경연구과
PC18	**도시 건물 및 지형을 고려한 전산유체역학-딥러닝 모델 기반 이산화탄소 배출원 역추적 모델 개발** 안효빈, 박승부 서울시립대학교 환경공학과
PC19	**수평 스캐닝 LiDAR 기반 산업단지 PM 공간분포의 딥러닝 단기예측** 정가빈[1)], 성민경[2)], 김관철[2)], 이재영[1),3)] [1)]아주대학교 인공지능학과, [2)]차세대융합기술연구원 첨단환경감시센터, [3)]아주대학교 환경안전공학과
PC20	**한반도 지역을 대상으로 한 WRF-Chem 지표 오존 모의 성능 및 오존 생성 특성 평가** 서예빈, 이명인 울산과학기술원(UNIST)
PC21	**PMF-CBPF 기반 대기오염 잠재 배출원 탐색을 위한 AI 기반 연구지원 시스템 개발** 신혜진, 류지원, 박수빈, 유일한, 이승묵 서울대학교 보건대학원 환경보건학과
PC22	**서울시 7차 미세먼지 계절관리제의 초미세먼지 개선 효과 평가** 채찬병, 오달영, 배일상, 성지혜, 김영준, 최용석 서울시 보건환경연구원 대기환경연구부
PC23	**딥러닝을 이용한 용인시 초미세먼지($PM_{2.5}$) 단기예측 모델 비교 연구** 박유정, 최찬우[1)], 최효준[1)], 정경이[1)], 조영민 경희대학교 환경학 및 환경공학과, [1)]㈜엔이알

PC24	AI 기반 대기환경정보 융합·통합 활용의 국내외 동향과 시사점 한세현, 서유정, 유화성, 김정숙, 김정훈[1)] 주식회사 랩솔레미스, [1)]국립환경과학원
PC25	권역 및 오염물질 특성을 고려한 머신러닝 기반 고해상도 대기오염 공간보간 프레임워크 장지호[1),2),3)], 유지예[1),2),3)], 이용찬[1),2),3)], 박영일[1),2),3)], 이희관[1),2),3)] [1)]인천대학교 환경에너지공학과, [2)]인천대학교 환경융합기술연구원, [3)]인천대학교 아시아환경에너지연구원

Session PD 측정·분석

PD1	COVID-19 팬데믹 전·중·후 인천 지역 대기질 변화 및 $PM_{2.5}$ 고농도 발생 특성 장지호[1),2),3)], 선우광[1)], 황지원[1)], 이희관[1),2),3)] [1)]인천대학교 환경에너지공학과, [2)]인천대학교 환경융합기술연구원, [3)]인천대학교 아시아환경에너지연구원
PD2	위성자료를 활용한 서울지역 대기 중 이산화탄소의 시공간적 변동 특성 분석 신성균, 이소진, 송민영, 최예진, 이권호[1),2)] 서울연구원 지속가능연구실 탄소중립센터, [1)]강원대학교 대기환경과학과, [2)]복사-위성연구소
PD3	2026년 여수지역 온·오프라인 GC-FID/MS 측정 기반 VOC 특성 및 오존 생성 잠재력 최서영, 박채형, 고동훈, 김우준, 박재환, 백성옥, 송명기, 배민석 국립목포대학교
PD4	항공측정 offline TD-GC/MS를 이용한 PAM 성분 고도별 농도 및 장거리 이동 고동훈, 오세호[1)], 최서영, 박채형, 김우준, 박재환, 백성옥, 송명기, 배민석 국립목포대학교, [1)]첨단환경감시센터
PD5	Deans Switch-GC-MS/FID 이중검출 기반 PAMS-VOCs 분석법 개발 및 대기 중 오존 전구물질 모니터링 송명기, 최서영, 박채형, 고동훈, 김우준, 박재환, 백성옥, 배민석 국립목포대학교
PD6	탄소동위원소 분석을 활용한 서울 브라운카본의 변동성 및 배출원 특성 규명 박희선, Haiyan Jin, 임희연, 김효민, 정선제, 곽한주, 이정훈[1)], 임세희[2)], 김주애, 이미혜, Claudia I. Czimczik[3)], Xiaomei Xu[3)], 주태규 고려대학교 지구환경과학과, [1)]한국기술교육대학교 기계공학부, [2)]충남대학교 환경공학과, [3)]Department of Earth System Science, University of California, Irvine, CA, USA
PD7	풍동실험을 이용한 사프로라이트 광석 야적시 비산먼지 발생 특성 연구 최영재, 이상균, 김희진, 김지훈, 강성곤, 김태형 (재)포항산업과학연구원(RIST) 환경연구소 환경보건연구그룹
PD8	ZIF-8/MWCNT 복합 센서의 방향족 가스 흡착 거동 해석 및 QSPR 기반 응답 예측 이상탁, 김대근 서울과학기술대학교 환경공학과
PD9	산업단지 대기 중 6가 크롬 농도의 연도별 변화 강병욱, 김기홍[1)], 공부주[1)], 강대일[1)], 전준민[2)] 한국교통대학교 환경공학과, [1)]국립환경과학원 기후대기연구부, [2)]그린환경종합센터

PD10	2026년 설날 기간 제주 대기 에어로졸 특성: 불꽃놀이 및 황사 영향 유나기, 고희정, 오상민, 김건윤, 정지영 국립기상과학원 지구대기감시연구과
PD11	풍향에 따른 2025년 8월 한반도 대류권 오존 감소 사례 분석 김상준, 김주완[1)], 박진수[2)], 구자호 연세대학교 대기과학과, [1)]공주대학교 대기과학과, [2)]국립환경과학원 대기과학연구과
PD12	도심공원의 계절별 대기 미세플라스틱 현황 최예덕, 김효원, 금선우, 김지희, 장수현, 양마란, 박창민, 권승미, 박주성 서울특별시 보건환경연구원
PD13	A Study on the Chemical Properties of Atmospheric Particles Collected in The Wanju Industrial Park and Its Surrounding Areas Fuka Segawa, Gong-Unn Kang[1)], Seohyun Park[2)], Chang-Jin Ma Department of Environmental Science, Fukuoka Women's University, Fukuoka, Japan, [1)]Department of Health Administration, Wonkwang University, Iksan, Korea, [2)]Jeonbuk-State Environmental Health Center, Korea
PD14	오존존데 관측 기반 서산지역 8월 오존 연직분포 특성 분석 변진영, 김상준, 박상서[1)], 구자호 연세대학교 대기과학과, [1)]울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
PD15	AIS 기반 선박 배출량 인벤토리와 확산모델링을 활용한 항만 도시 인근 선박 대기오염물질의 시공간 분포 및 육상 확산 특성 분석 박영일[1),2),3)], 유지예[1),2),3)], 이용찬[1),2),3)], 장지호[1),2),3)], 이희관[1),2),3)] [1)]인천대학교 환경에너지공학과, [2)]인천대학교 환경융합기술연구원, [3)]인천대학교 아시아환경에너지연구원
PD16	GC/MS를 이용한 대기 중 26종 현용 농약류의 분석법 최적화 김채은, 이호영, 고민지, 최성득 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
PD17	지하고속도로 내 발생 대기오염물질의 외부 영향 평가를 위한 고속도로 터널 내부와 외부 대기오염물질 농도의 상관성 및 영향 분석 강혜진 한국도로공사 도로교통연구원 기후에너지환경연구실
PD18	Development and Application of Local-Source-Adjusted CWT Methods in a Coastal Industrial City Phuoc Tan Tran, 주정태, 최성득 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
PD19	Emission Rates and Composition Emitted from Pinus Densiflora by PM Exposure Mahshad Ranjbaran, 정민찬, 천소현, 오용환, 김대현, 김나현, 김서현, 손윤석 국립부경대학교 지구환경시스템과학부
PD20	서울시 자치구별 오존농도와 시공간 이동 특성 분석 함수한, 전혜준, 신성균, 조가영, 송민영 서울연구원 지속가능연구실

PD21	**산불 배출이 배경대기농도에 미치는 영향: 안면도 지구대기감시소 관측자료 분석을 바탕으로** 이은아, 한종헌[1)], 오상민[1)], 유희정[1)], 김영아[1)], 임세희 충남대학교 환경IT융합공학과, [1)]국립기상과학원 지구대기감시연구과
PD22	**부산항 대기 중 PCBs와 PAHs의 여름·가을철 오염 특성과 잠재적 오염원 파악** 배효정, 고민지, 이호영, 최성득 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
PD23	**남극 세종과학기지에서 관측된 대기 중 암모니아 연간 변동 특성** 오승미[1),2)], 김연태[2)], 장은호[2)], 박지연[2)], 윤영준[2)], 정창훈[3)], 김용표[4)], 이지이[1)] [1)]이화여자대학교 환경공학과, [2)]극지연구소 해양대기연구본부, [3)]경인여자대학교 보건의료행정학과, [4)]서울대학교 보건환경연구소
PD24	**이동식 측정을 활용한 여수국가산업단지 내 오존 전구물질 Hot-spot 파악 및 배출원 기여도 분석** 고원석, 이현서, 이남혁[1)], 도현석, 김지민, 최순혁, 김동현, 곽경환 강원대학교 환경학과, [1)]강원대학교 생명·환경융합학부
PD25	**교통 특성과 기상 조건에 따른 서울시 암모니아 농도 변화 및 추정 모델 개발** 조범기[1)], 허국영[3)], 박승명[3)], 송미정[1),2)] [1)]전북대학교 기후환경에너지융합학과, [2)]전북대학교 지구환경과학과, [3)]국립환경과학원 대기환경연구과
PD26	**GEMS와 Optical Flow 기법을 이용한 화산 SO_2 플룸 이동장 및 유효 수송 고도 추정** 오승주[1)], 김 준[1),2)], 이원진[3)], 신선아[3)], 차혜지[1)], 강 욱[1)] [1)]연세대학교 대기과학과, [2)]연세 이윤재 펠로우, [3)]국립환경과학원 환경위성센터
PD27	**라만 라이다를 이용한 사업장 굴뚝 배출 메탄 및 이산화탄소 배출량 측정** 박선호[1)], 이한림[1),2)], 윤문상[1)] [1)]노바스콥(주), [2)]부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공
PD28	**ASIA-AQ 캠페인 기간 동아시아 지역에서 관측된 질산염에 의한 광물 먼지 빙핵화 효율 저하** 박도현, 이승복, 김경환, Ottmar Möhler[1)], Tian Ping[2)], 김지환, 김나진 한국과학기술연구원 기후탄소순환연구단, [1)]Karlsruhe Institute of Technology, [2)]Beijing Weather Modification Center
PD29	**원거리 메탄 및 이산화탄소 혼합비 측정 라만 라이다 개발 및 성능평가** 윤문상[1)], 이한림[1),2)], 박선호[1)] [1)]노바스콥(주), [2)]부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공
PD30	**온도와 오존의 개별·복합 스트레스에 따른 식생 탄소순환 변화와 biogenic SOA 생성 변화 연구** 이혜지[1),2)], 예익주[1)], 이석현[1),2)], 이지원[1)], 박도현[1)], 김나진[1)], 이승복[1)], 김경환[1)] [1)]한국과학기술연구원 기후탄소순환연구단, [2)]고려대학교 지구환경과학과
PD31	**VOCs 함유량 및 오존생성잠재력을 고려한 생활소비재 품목군별 우선관리 대상 선정 프로그램 개발** 이상훈, 이동은, 노준영, 박종건, 김승진 주식회사 휴엔릭스 첨단기술연구소

PD32	**도심과 배경 지역 대기 중 입자상 니트로소화합물의 계절별 농도 특성 및 생성 기여인자 분석** 정수린, 송미정[1], 이태형[2], 신혜정[3], 허국영[4], 최나래 강원대학교 환경공학과, [1]전북대학교 지구환경과학과, [2]한국외국어대학교 환경학과, [3]국립환경과학원 위성센터, [4]국립환경과학원 대기환경연구과
PD33	**다양한 평가지표를 활용한 2019-2025년 서울 지역 초미세먼지 단기예보 정확도 분석** 연바다, 박승부 서울시립대학교 환경공학과
PD34	**UAV 대기질 모니터링의 정확도 향상을 위한 AI 기반 하강기류 영향 보정** 서상덕, 고찬주, 김소연[1], 정무현[1),2)], 이재영[3),4)] 아주대학교 환경공학과, [1]한국화학융합시험연구원 환경화학연구소 대기환경센터, [2]고려대학교 보건안전융합과학과, [3]아주대학교 환경안전공학과, [4]아주대학교 인공지능학과
PD35	**스캐닝 라이다 시스템을 활용한 소규모 사업장 고농도 지역 선별** 성민경, 오세호, 이동휘, 박정민, 김관철 차세대융합기술연구원 첨단환경감시센터
PD36	**GPS 결측 조건에서 보정 모델에 따른 분류 성능 비교** 윤현준, 정애란 한국전자기술연구원 AI융합가전연구센터,
PD37	**휴대용 간이측정기를 이용한 프랑스 리옹 지역의 미세먼지 농도 특성 평가** 윤현준, 정애란, 손성관 한국전자기술연구원 AI융합가전연구센터,
PD38	**외부 대기환경이 운송 중 화물 공간의 미세먼지 및 온·습도에 미치는 영향** 윤현준, 이경일, 최철준 한국전자기술연구원 AI융합가전연구센터,
PD39	**도시 및 연안 지역의 계절별 AI 모델에 따른 $PM_{2.5}$ 예측 특성 비교** 윤현준, 정애란, 최철준 한국전자기술연구원 AI융합가전연구센터
PD40	**국내 다지점 $PM_{2.5}$ 산화잠재력 비교: 2025년 봄철과 2026년 여름철** 장정연, 이윤서, 한영지[1], 이지이[2], 이광열[3], 윤도영[3], 박정민[3], 조미라[3], 허국영[3], 강대일[3] 강원대학교 지오에코시스템융합학과, [1]강원대학교 생명·환경융합학부, [2]이화여자대학교 환경공학과, [3]국립환경과학원
PD41	**서울 대기 중 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 산화 잠재력 장기 변동 특성 및 화학종과의 연관성 분석에 기반한 영향 요인 규명** 임희연, 박희선, 이미혜, 김주애, 주태규 고려대학교 지구환경과학과
PD42	**PTR-ToF-MS 관측을 통한 여름철 수도권 대기 중 OVOCs의 분자 조성 및 농도 변화 특성** 김주영, 김정호[1], Wang Zhe[2], 김용표[4], 이지이 이화여자대학교 환경공학과, [1]열린공간, [2]Division of Environment and Sustainability, HKUST, [3]서울대학교 보건환경연구소

PD43	**수동대기채취기를 이용한 여수·광양 국가산업단지와 인근 지역의 VOCs 계절별 공간 분포와 배출 특성 분석** 김연지, 김상화, 김승혜[1)], 최성득 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, [1)]국립환경과학원 환경보건연구과
PD44	**다중 분광학적 분석법 기반 호흡성 대기 중 미세플라스틱 입자의 물리화학적 특성 규명** 박종현[1),2)], 유한진[3)], 송영철[4)], 이경은[5)], 노철언[6)], 전기준[1),2)] [1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지 연구·관리센터, [3)]국립한국교통대학교 환경공학과, [4)]한국화학연구원 화학분석센터, [5)]한국화학연구원 신뢰성평가센터, [6)]인하대학교 화학과
PD45	**여름철 서울 대기 중 휘발성유기화합물(VOC) 전구물질과 이차 유기에로졸(SOA) 형성 특성** 권정희, 김주영, 서혜빈, 김정호[1)], 김용표[2)], 이지이 이화여자대학교 환경공학과, [1)](주)열린공간, [2)]서울대학교 보건환경연구소
PD46	**실시간 VOCs 관측과 머신러닝을 활용한 울산지역 오존 생성 특성 분석** 안준건, Andrew Loh, 김동휘, 원종천, 임운혁[1)] 한국해양과학기술원 생태위해성연구부, [1)]과학기술연합대학원대학교 KIOST스쿨
PD47	**미분탄 연소 가스상 전구물질과 응축성 미세먼지의 성분 특성 비교** 최승진, 장준혁, 이상섭 충북대학교 환경공학과
PD48	**장기 관측을 통한 대기 중 메탄 및 탄소 동위원소의 상관관계 분석** 김수경, 장지혜, 윤재근, 박선영 경북대학교 해양학과
PD49	**회전익 UAV를 이용한 CO_2와 블랙카본의 연직 분포 및 국지적 수송 특성 분석** 김동현, 박찬호, 구민주[1)], 고원석, 이현서, 최민서, 도현석, 김지민, 최순혁, 이남혁[1)], 김연욱[2)], 곽경환 강원대학교 환경학과, [1)]강원대학교 생명·환경융합학부, [2)]강원대학교 환경연구소,
PD50	**춘천시 여름철 오존 생성 특성 및 라디칼 생성·소멸 경로의 오전-오후 변화** 정수진, 이효원, 한영지[1)], 강대일[2)], 정현구[2)], 차승환[2)], 정하윤[2)], 이광열[2)] 강원대학교 지오에코시스템융합학과, [1)]강원대학교 생명·환경융합학부, [2)]국립환경과학원 대기환경연구과
PD51	**서울과 춘천의 $PM_{2.5}$ 극성 유기성분 특성 및 수용모델 기반 배출원 비교** 이효원, 한영지[1)], 이상덕[2)], 김명주[3)], 이지이[4)], 서혜빈[4)], 허국영[5)], 임용재[5)], 강대일[5)] 강원대학교 지오에코시스템융합학과, [1)]강원대학교 생명·환경융합학부, [2)]강원대학교 산림과학부, [3)]강원대학교 산림환경시스템학과, [4)]이화여자대학교 환경공학과, [5)]국립환경과학원 대기환경연구과
PD52	**필리핀 마닐라 지역의 $PM_{2.5}$ 농도 시간변동 특성** 나하나[1),2),3)], 정우식[1),2),3)], Guevarra, Kaye Jelyn[1),2),3)] [1)]인제대학교 대기환경정보공학과, [2)]태풍사전방재선도센터, [3)]대기환경정보연구센터
PD53	**방글라데시 다카 지역의 계절 전환에 따른 입자상 대기오염 특성** 나하나[1),2),3)], 정우식[1),2),3)] [1)]인제대학교 대기환경정보공학과, [2)]태풍사전방재선도센터, [3)]대기환경정보연구센터

PD54	연속 현장(in situ) CRDS 관측을 위한 isotopologue-based CO_2 보정의 실용적 구현 장지혜, 김수경, 윤재근, 박선영 경북대학교 해양학과
PD55	특용작물 영농부산물 연소에 따른 단기체류기후변화유발물질 배출특성 연구 우지윤, 박민성[1], 김찬수[1], 김민욱[2], 노준영[3], 김승진[3], 전의찬[1] 세종대학교 기후환경융합센터, [1]세종대학교 기후에너지융합학과, [2]국립농업과학원, [3](주)휴엔릭스
PD56	농업지역 암모니아의 시기별 변동 특성과 도시지역 입자상물질과의 연계성 분석 배성현, 백정덕, 주흥수 안양대학교 환경공학과
PD57	부하속도 기반 분석을 이용한 국내 농업지역 $PM_{2.5}$와 암모니아 등 기체상 전구물질 간의 관계 백정덕, 배성현, 주흥수 안양대학교 환경공학과
PD58	지하고속도로 내 유해물질 저감을 위한 흡착소재 성능평가 및 최적화에 관한 연구 박일건, 김범석, 여경우 영진기술 주식회사 탄소중립센터

Session PE 실태·배출관리

PE1	국내 시멘트 산업 온실가스 감축량 평가를 위한 생산공정 대표기술 DB 구축 박일건, 김범석, 여경우, 윤덕근 영진기술 주식회사
PE2	A Study on the Air Pollution Status and Health Effects in Tokyo Chang-Jin Ma, Gong-Unn Kang[1], Fuka Segawa, Miharu Uto, Mai Shimokawa, Kanna Fujimoto Department of Environmental Science, Fukuoka Women's University, Fukuoka, Japan, [1]Department of Health Administration, Wonkwang University, Iksan, Korea
PE3	인구가중농도를 이용한 국내 $PM_{2.5}$-O_3-NO_2 장기 통합 노출 변화와 지역별 전환 특성 강윤희, 정성은[1], 김순태[2] 아주대학교 환경연구소, [1]아주대학교 환경공학과, [2]아주대학교 환경안전공학과
PE4	전북 대기질에 대한 배출부문별 기여도 및 배출저감 영향 비교 박성규, 김은혜 국립군산대학교 환경공학과
PE5	기온 상승에 따른 생물기원 VOC 배출 변화가 지표 오존 농도에 미치는 영향 최 상, 박성규, 김은혜 국립군산대학교 환경공학과
PE6	한국의 대기환경측정망을 통한 광화학오염물질과 유해대기 휘발성유기화합물 감시 결과 분석 손종렬, 신새미, 곽호찬[1] 고려대학교 보건과학연구소, [1](주)에코이엔오

PE7	**야적장(원료 등) 비산먼지 배출량 산정방법 연구** 김정희, 장유리, 이동재, 한세현[1], 신동호[2], 주종민, 송형도, 유 철 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터, [1](주)랩솔레미스, [3]한국에너지기술연구원
PE8	**국내 자동차 비배기계 배출량 산정 및 추이 분석** 신은지, 최권희, 함지영, 송형도, 유 철 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터
PE9	**도장시설 배출량 정확도 향상을 위한 산정방법론 개선에 관한 연구** 최예지, 임주용, 이향경, 송형도, 유 철 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터
PE10	**대기배출사업장 정보 통합관리 효과 분석 연구** 김재원, 오승일, 최성우, 김민송, 김성준, 김진식[1], 김형천[1], 강 별[1], 조현정[1], 유 철[1] 알씨에어(주), [1]기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터
PE11	**친환경자동차 보급에 따른 타이어 마모 미세먼지 배출 영향 분석** 한세현, 서유정, 유화성, 김정숙 주식회사 랩솔레미스
PE12	**국내 제빙부문 VOC배출량 산정을 위한 활동도 자료 조사** 김승원, 김 정, 김도연 ㈜이아이랩

Session PF 대기위해성

PF1	**최근 대기 중 비소 농도 증가와 특성** 최은화, 류근우, 박서인[1], 이명훈 (재)포항산업과학연구원 환경연구소, [1]한화에어로스페이스 PGM연구소
PF2	**국내 친환경 인쇄잉크의 MSDS 기반 VOC 함량 및 노출 잠재 특성 평가** 김성동, 노준영, 이동은, 김승진 ㈜휴엔릭스
PF3	**위치정보 기반 화학사고 개인 위해도 산정 및 사고규모 예측 알고리즘 개발** 안영진, 이동은, 노준영, 박종건, 김승진 주식회사 휴엔릭스 첨단기술연구소
PF4	**장기관측자료를 활용한 국내 지표 오존 및 기상요소의 변동과 오존 노출에 따른 건강·경제적 영향 평가** 조성빈, 김진승[1], 송상근[1,2], 김규랑 국립기상과학원 기상응용연구부, [1]제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공, [2]제주대학교 지구해양과학과

PF5	Environmental Risk Assessment of Health Relevant VOCs and Organic Aerosols in Daegu, South Korea S.D.N.A.M. Amila Madhushanka Weerasinghe, Seokwon Kang, Jihoon Son, Kyunghoon Kim, Seung bum Kim[1)], Hyeok Chung[2)], Seung Han Ryu[3)], Jooeun Han[3)], Taehyoung Lee Department of Environment Science Hankuk University of Foreign Studies, [1)]Korea Aerospace Research Institute (KARI), [2)]ART Plus Co., Ltd, [3)]DYETEC Research Institute
PF6	대기 중 나노플라스틱의 흡입 노출 통합 플랫폼 개발: 열적 발생 입자의 폐 및 초기 전신 영향 평가 서지영[1),2)], 레티황이엔[2)], 권정택[3)], 유한진[4)], 박선영[1)], 조민송[1)], 서도연[3)], 이다은[3)], 이재웅[3)], 전기준[1),2)] [1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [3)]국립환경과학원 환경건강연구부, [4)]국립한국교통대학교 환경공학전공
PF7	고농도 $PM_{2.5}$ 발생에 따른 인플루엔자 활동의 지연 연관성 분석 여민주, 구자호, 이현정[1)], 박진수[2)] 연세대학교 대기과학과, [1)]제주대학교 환경공학과, [2)]국립환경과학원 대기환경연구과

Session PG 방지기술

PG1	전자선 유도 환원 라디칼에 의한 메탄 및 아산화질소의 분해 효율 평가 조상희, 김동우[1)], 김탁현, 김태훈, 박종석 한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [1)]고려대학교 지구환경과학과
PG2	저함량 루테늄 개질 TiO_2를 이용한 기상 VOC 제거 성능 향상: 촉매의 조성과 이성분 VOC의 상호작용 연구 이재은, 김기현 한양대학교 건설환경공학과
PG3	유기용매의 특성이 정전필터 중화에 미치는 영향 최정해[1)], 권민선[2)], 김준엽[3)], 박재현[3)], 이명화[1),3)] [1)]강원대학교 환경공학과, [2)]강원대학교 환경연구소, [3)]강원대학교 미세먼지통합관리학과
PG4	폴리에틸렌 글리콜 기공형성제가 흡착 비드의 구조와 아세트알데하이드 제거에 미치는 영향 김민서, 김대근 서울과학기술대학교 환경공학과
PG5	장기 연속 질산염 환원을 위한 Ti지지 $ZnCoO_x$ 나노박막 전극 개발 김현빈, 전소희, 김태오 국립금오공과대학교 환경공학과
PG6	촉매 스크러버의 안정적 운전을 위한 전처리 시스템의 SiH_4 산화 반응 특성 평가 조준표, 신승규, 최은경, 김남형, 이근환, 박준동, 고선용, 박이은, 김준오, 조인아, 김승곤[1)], 배경권[2)], 김성수[3)] (주)에프에스티, [1)]한국에너지기술연구원, [2)]탑에코에너지 주식회사, [3)]경기대학교 환경에너지공학과
PG7	운전조건에 따른 가스상 암모니아의 전기화학적 제거 및 질소 산화생성물로의 전환 특성 김현준, Govindan Muthraman, 김대근 서울과학기술대학교 환경공학과

PG8	**톨루엔 제거를 위한 생물활성 흡착제의 장기운전 메커니즘 분석 및 평가** 정락영 서울과학기술대학교 환경공학과
PG9	**운전 변동성을 고려한 SCR 탈질공정의 예측-제어 연계 모델 개발** 윤원근, 김희진, 이상균, 김태형 (재)포항산업과학연구원 환경연구소
PG10	**전자선을 이용한 암모니아, 황화수소 동시 제거** 김동우[1),2)], 조상희[1)], 김태훈[1)], 이미혜[2)], 김탁현[1)], 박종석[1)] [1)]한국원자력연구원 첨단방사선연구소 방사선융합연구부, [2)]고려대학교 지구환경과학과
PG11	**산업공정에서 배출되는 에어로졸 제거를 위한 하이브리드 필터 시스템 개발** 박병규, 최인영, 임수길, 이다연[1)], 민지홍[1)], 김대옥, 김조천, 한진석[1)], 딘브엉 건국대학교 실내환경관리센터, [1)]건국대학교 사회환경공학부
PG12	**저배압 세정노즐을 적용한 미세폭기방식 습식세정시스템의 유동해석 평가** 엄준업, 박문례, 노학재, 박현진 (주)벨이앤씨

Session PH 원격탐사·센서

PH1	**항공원격측정 장비 EMSA를 활용한 주성분 분석 방법 기반 이산화질소 연직적분농도 산출** 박호성, 최회준, 신선아[1)], 홍현기[1)], 이원진[1)], 정욱교 부경대학교 공간정보시스템공학과, [1)]국립환경과학원 환경위성센터
PH2	**에어로졸의 광학특성과 시정자료 기반 Aerosol Scale Height 산출** 박지민, 홍진규, 김상우[1)], 유정아[2)], 구자호 연세대학교 대기과학과, [1)]서울대학교 대기과학과, [2)]환경위성센터
PH3	**기상 및 위성자료를 활용한 머신러닝 기반 태국 지표 오존 농도 추정** 홍유지, 나성균, 이주희, 구자호 연세대학교 대기과학과
PH4	**천리안 위성 2B호 에어로졸 광학 두께 산출물의 구름 제거 전처리 체계 개발 및 오차 특성 진단** 김준희, 강다현, 권형안[1)], 정욱교[2)], 이상무 서울대학교 지구환경과학부, [1)]수원대학교 환경에너지공학과, [2)]부경대학교 지구환경시스템과학부
PH5	**초소형 온실가스 관측 위성의 온실가스 농도 산출을 위한 Optimal Estimation 기반 Full-Physics 알고리즘 개발** 박 경, 정연진[1)], 이한림, 홍현기[2)] 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공, [1)]국립부경대학교 SEED연구소, [2)]국립환경과학원 환경위성센터
PH6	**온실가스 위성 산출물 검증을 위한 소형 지상 관측 원격장비 개발** 박선영[1)], 이한림[1),2)], 박선호[1)], 박주선[3)], 홍현기[4)] [1)]노바스콥(주), [2)]부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공, [3)]부산대학교 환경연구원, [4)]국립환경과학원 환경위성센터

PH7	**NO_2 연직분포 자료에 따른 GEMS 대류권 NO_2 산출 영향 조사와 TROPOMI와의 비교** 박정현, 이한림, 정연진[1], 홍현기[2], 이원진[2], 신선아[2] 부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공, [1]부경대학교 SEED연구소, [2]국립환경과학원 환경위성센터
PH8	**지상 기반 O_2 A-band Multi-Axis 관측을 이용한 에어로졸 연직 프로파일 산출** 유이슬, 강영웅[1], 최원이[2], 홍현기[3], 이한림[4,5] 국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [1]부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공, [2]NASA Goddard Space Flight Center, [3]국립환경과학원 환경위성센터, [4]국립부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공, [5]노바스콥(주)
PH9	**산불감시 스캐닝 LiDAR를 활용한 연소 에어로졸의 광학특성 분석** 오세호, 이동희, 김관철, 박정민, 성민경 차세대융합기술연구원 첨단환경감시센터
PH10	**지표부터 상층대류권까지 위성자료 및 재분석자료를 이용한 2025년 한국 산불 대기질 평가** 이동희[1,2], 이주희[1], 김상준[1], 김 준[1], 여민주[1], 유정아[3], 임현광[4], 송환진[5], 김관철[2], 구자호[1] [1]연세대학교 대기과학과, [2]서울대학교 차세대융합기술연구원, [3]국립환경과학원 환경위성센터, [4]일본 국립환경연구소, [5]경북대학교 대기과학과
PH11	**ASIA-AQ 기간 중 HSRL-2 에어로졸 소광계수 프로파일 유형별 GEMS AEH 산출 편향 분석** 이승재, 이수완, 박상서 UNIST 지구환경도시건설공학과

Session PI 미래연구자

PI1	**광양만권 오존 단기예측에서 공간정보의 기여도 평가: 권역평균과 그래프 구조의 비교** 김채은, 정선기, 이상림, 정준영[1], 신규성, 장지이 전남대학교 환경시스템공학과, [1]전남대학교 건설환경공학과
PI2	**여름철 정읍 한우사 지역과 전주 도심 지역 암모니아의 가스-입자상 분배에 따른 $PM_{2.5}$ 수용성 무기 이온의 농도 및 특성 비교** 허재범[1], 김민서[1], 나은상[2], 김연후[2], 조범기[2], 정희성[1], 임푸름[1], 송미정[1,2] [1]전북대학교 지구환경과학과, [2]전북대학교 기후환경에너지융합학과
PI3	**항공관측 자료를 활용한 산업지역 CO_2 배출량 산정 및 불확도 평가** 이한빛, 권형안 수원대학교 환경에너지공학과
PI4	**2026년 여름철 한우사 인근 대기 중 암모니아(NH_3) 농도의 시간적 변화 분석** 정희성[1], 임푸름[1], 김연후[2], Avinash Shastri[2], 나은상[2], 조범기[2], 허재범[1], 김민서[1], 이향경[3], 송형도[3], 유 철[3], 송미정[1,2] [1]전북대학교 지구환경과학과, [2]전북대학교 환경에너지융합학과, [3]기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀
PI5	**GEOS-Chem과 GREET 모델을 이용한 전기차 보급률 증가에 따른 대기질 및 전과정 오염물질 배출 변화 분석** 윤성욱[1,2], 조정우[1,2], 김경준[1,2], 정지운[1,2], 한범순[1,2] [1]인하대학교 미세먼지연구·관리센터, [2]인하대학교 환경공학과

PI6	KCP 하이브리드 인벤토리 적용에 따른 한반도 지역 CO_2모의 특성 평가 이가은, 옥유진, 권형안[1], 김수민[1], 정수종[2] 울산과학기술원, [1]수원대학교, [2]서울대학교
PI7	천식 외래진료 자료를 활용한 울산 지역 대기오염물질의 건강영향 평가 이어진, 김원빈[1], 주정태, 고민지, 최성득 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, [1]울산대학교 산업경영공학부
PI8	구름 및 대기경계층의 영향을 고려한 RHI 라이다 에어로졸 소산계수 산출 백승재, 김인엽, 심주현, 신주선, 김덕현[1], 노영민 국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [1]국립한밭대학교 기초과학부
PI9	운고계 자료를 활용한 얕은 적운 제거 기법 개발 및 에어로졸 연직 분포 변화 분석 이유경, 박민경, 주소희[1], 심주현, 신주선, 김덕현[2], 노영민 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, [1]Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (LACy), Université de La Réunion, [2]국립한밭대학교 기초과학부
PI10	MAX-DOAS 관측 자료를 이용한 대류권 오존 산출 박소현, 권형안 수원대학교 환경에너지공학과
PI11	생태계 CO_2 순교환 플럭스의 일주기에 따른 한반도 지상 CO_2 농도 모의 민감도 평가 김수민, 권형안, 옥유진[1], 이가은[1] 수원대학교 환경에너지공학과, [1]울산과학기술원 지구환경도시건설공학과
PI12	머신러닝을 활용한 서울 지역 $PM_{2.5}$ 농도 및 성분 과거 자료 복원 김보연, 권형안, 최우석[1] 수원대학교 환경에너지환경공학과, [1]세종대학교 인공지능데이터사이언스학과
PI13	수종별 BVOCs 배출량 평가를 위한 측정 및 분석 방법 고찰 신원범, 노해민, 이수현, 윤종상 가톨릭대학교 에너지환경공학과
PI14	망간과 코발트가 담지된 폐맥주박 유래 활성탄 촉매의 제조와 톨루엔 산화 성능 평가 강희찬[1], 손나현[2], 양재환[1),2)] [1]충남대학교 환경공학과, [2]충남대학교 환경IT융합공학과
PI15	3차원 몬테카를로 모델과 상용 카메라의 태양 주변부 이미지를 이용한 에어로졸 광학 두께 산출 이의진, 문윤기, 김덕현[1], 신주선, 심주현, 노영민 국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [1]국립한밭대학교 기초과학부
PI16	폐 PET 기반 이종 원소 도핑 활성탄 촉매를 이용한 황화수소(H_2S)의 선택적 산화 김혜연[1], 안유정[1], 사공누리[2], 양재환[1),2)] [1]충남대학교 환경공학과, [2]충남대학교 환경IT융합공학과
PI17	UAV 기반 산업단지·항만 배출원의 대기질 연직 영향 비교 고민서[1], 고찬주[2], 서상덕[2], 이재영[1),3)] [1]아주대학교 환경안전공학과, [2]아주대학교 환경공학과, [3]아주대학교 인공지능학과

PI18	**국가 산업단지와 내륙도심의 야간 오존농도 고농도 특성 비교** 선여진[1], 황혜민[2], 이재영[1),3)] [1)]아주대학교 환경안전공학과, [2)]아주대학교 환경공학과, [3)]아주대학교 인공지능학과
PI19	**자연적 휘발성유기화합물 배출량 도출을 위한 엽면적 산정 방법 간 비교 분석** 김나현, 오용환, 천소현, 김대현, 정민찬, 김서현, 손윤석 국립부경대학교 지구환경시스템과학부
PI20	**경기도 광주시 태화산학술림에서 오존 및 전구물질의 거동 분석** 박지영, 최용주, 김하정, 홍정현[1], 김현석[1], 김수민[2], 장지희[2], 조강남[2] 한국외국어대학교 환경학과, [1)]서울대학교 산림환경학전공, [2)]국립환경과학원
PI21	**대기 중 미량기체 관측을 위한 지상 기반 MAX-DOAS 시스템 구축 및 관측 프로토콜 확립** 이채린, 최용주 한국외국어대학교 환경학과
PI22	**도시대기 측정소에서 측정한 지표 오존 농도 장기 추세 및 NO_2-O_3 관계 분석** 김경석, 최원식 국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공
PI23	**$MAPbI_3$ 페로브스카이트 단결정을 이용한 자가발전형 NO_2 가스 센서에 관한 연구** 최예준, 이수민, 윤정호 경희대학교 대기환경에너지융합연구실
PI24	**다기능 구름챔버의 균일한 벽면 냉각을 위한 열전달유체 유로 설계에 대한 연구** 정동영[1),5)], 한남규[1)], 옥정수[2)], 김성곤[3)], 박경렬[4)], 강경민[4)], 하효식[4)], 김경환[1)], 김나진[1)], 박도현[1)], 염성수[1)], 최 선[1)], 이승복[1)] [1)]한국과학기술연구원(KIST), [2)]고려대학교, [3)]성균관대학교, [4)]MTES, [5)]서울과학기술대학교

Plenary Session

- Transforming Air Quality Management with AI and Smart Surveillance

Chair : Prof. Jong-sang Youn [The Catholic University of Korea]

1) Ground Level Ozone and $PM_{2.5}$ in the Greater Los Angeles Metropolitan Area: Characteristics and Control Strategy
2) The Evolving Air Quality Landscape in China: Interactions with a Changing Climate and the Path to Win-Win Solutions
3) AI-Augmented System for Epidemiological Investigation of Occupational and Environmental Diseases: Molecule RAG and Human-in-the-Loop (HITL) Framework
4) AI and Advanced Technology-Driven Transformation in Atmospheric Environmental Policy

PLENARY SESSION 1

Ground Level Ozone and $PM_{2.5}$ in the Greater Los Angeles Metropolitan Area: Characteristics and Control Strategy

Sang-Mi Lee

South Coast Air Quality Management District, Diamond Bar, California, USA

The South Coast Air Basin (Basin), which includes the greater Los Angeles metropolitan area and its surrounding mountains, experiences the worst ozone air quality and is among the highest $PM_{2.5}$ levels in the Unites States. The activities of 17 million residents, combined with the nation's largest containerized seaport complex, generate substantial emissions of ozone and $PM_{2.5}$ precursors. The region's unique meteorology and topography further exacerbate air pollution. A persistent North Pacific high-pressure system located off the California coast produces predominantly could-free conditions throughout a year, promoting photochemical formation of ozone. Ozone formation in the Basin has been VOC-limited, where abundant NOx emissions suppressed ozone formation through titration. However, decades of NOx emissions reductions are shifting the ozone chemistry to NOx-limited. South coast AQMD periodically develops an Air Quality Management Plan (AQMP), a blueprint to attain National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). The 2022 AQMP, the latest version of such effort, is a comprehensive roadmap to attain the latest ozone NAAQS. This plan calls for economy-wide transition to zero emission technologies wherever feasible to reduce NOx emissions, which is the only viable strategy to lower ozone sufficiently to meet NAAQS and concurrently improve $PM_{2.5}$.

PLENARY SESSION 2

The Evolving Air Quality Landscape in China: Interactions with a Changing Climate and the Path to Win-Win Solutions

Hong Liao, **Ke Li, Yang Yang, Xu Yue, Jiandong Li**

School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, China

Air pollution control and climate change mitigation are closely intertwined. Atmospheric pollutants are the second most important anthropogenic driver of climate change, after long-lived greenhouse gases. The substantial reduction of atmospheric particulate matter resulting from air pollution control measures can lead to an unintended warming, which is counterproductive from the perspective of climate change mitigation. This presentation quantitatively assesses the climate impacts (including changes in mean climate, extreme heat events, and extreme precipitation) since the implementation of China's Clean Air Action Plan, and discusses emission reduction strategies that can achieve co-benefits for both air quality improvement and climate change mitigation. We pay special attention to the climate impacts of spatially optimized sulfur dioxide (SO_2) emission reduction under a carbon-neutral pathway. Owing to the nonlinear aerosol-cloud interaction, the optimized emission reduction strategy limits the regional average increase in ERFaci of more than $0.89\,W\,m^{-2}$ to less than $0.13\,W\,m^{-2}$ in the short-term future during 2020-2040 and weakens the ERFaci increase by two-thirds in 2060. These findings demonstrate the critical role of targeted emission control in mitigating short-term climate risks while pursuing air quality goals.

Keywords: air quality, Clean Air Action, climate change, China

PLENARY SESSION 3

직업환경성 질환 역학조사를 위한 AI 증강 시스템: 분자 단위(Molecule) RAG와 인간 중심(HITL) 프레임워크

AI-Augmented System for Epidemiological Investigation of Occupational and Environmental Diseases: Molecule RAG and Human-in-the-Loop (HITL) Framework

윤진하

연세대학교 의과대학 예방의학교실

직업환경성 질환 역학조사는 대규모 집단의 확률적 상관관계를 다루는 일반 역학 연구와 달리, 개별 근로자의 작업 환경 노출과 질병 간 개별 인과관계를 입증해야 하는 특수성을 가진다. 그러나 직력 진술서, 현장 측정치, 행정 서류 등 비정형 데이터의 파편화로 인해 국내 역학조사 처리 기간은 평균 640일에 달한다. 본 연구는 이러한 조사의 병목을 해결하고자 AI 기반 비정형 데이터 분석 파이프라인과 인간 중심의 검증 체계를 구축하였다. 기존 거대언어모델(LLM)과 Naive RAG 시스템은 긴 컨텍스트 처리 시 발생하는 '중간 정보 손실(Lost in the Middle)' 현상과 환각 문제로 인해 복잡한 역학적 인과관계를 정확히 판정하는 데 한계가 있었다. 이를 극복하기 위해 본 연구는 단순 토큰 단위 분절이 아닌, 산업위생(Hygienic)·의학(Medical)·법적 논리(Logical) 층위를 통합한 지식 분자 단위(Molecule) RAG를 적용하여 검색 정확도를 확보하였다. 또한, 전문 탐색을 자율 수행하는 Multi-Agent Orchestration 구조를 도입하여 조사관의 지휘 아래 각 에이전트가 팩트를 종합 조립하도록 설계하였다. 기술 고도화와 더불어, 시스템 전체에는 Human-in- the-Loop 프레임워크를 적용하였다. 기계적 자율 처리(Atom)는 AI에 위임하되, 의미 단위(Molecule) 경계마다 역학조사관이 판단을 수정·승인하는 검증 지점을 의무화하였다.

PLENARY SESSION 4

AI, 첨단 과학기술 기반의 대기환경 정책 전환

AI and Advanced Technology-Driven Transformation in Atmospheric Environmental Policy

성지원

국립환경과학원 대기환경연구부

정부의 대기질 개선 대책 추진으로 국내 대기오염도는 전반적으로 개선되는 추세에 있다. 그러나 최근 기후변화에 따른 기온 상승과 빈번한 대기 정체 등 기상 여건의 변동성이 증대됨에 따라, 고농도 미세먼지($PM_{2.5}$)의 발생 가능성과 오존 농도의 증가가 지속적으로 우려된다. 이에 따라 대기질 관리에서 기후변화의 영향을 반영하여 대기오염물질과 온실가스를 통합적인 관점에서 평가하고, 이에 적합한 관리 대책을 마련하는 것이 필요하다. 특히, 광역적 범위에서 발생하는 복잡한 대기현상을 규명하고 이를 정책적으로 뒷받침하기 위해서는 기존의 해석 방식을 넘어선 새로운 방법론이 필수적이다. 인공지능(AI)은 대규모 데이터의 융합과 비선형적 현상의 해석 및 예측 정확도 개선 등에 장점이 크므로 기존 정책의 한계를 극복할 수 있는 중요한 연구 방법론이 된다. 또한, 현행 굴뚝 배출구 중심의 측정 체계가 가진 실시간 대응의 한계와 비산배출 관리의 구조적 제약을 해결하기 위해, 지상-위성을 연계한 입체 관측과 이동형 원격측정 장비를 활용한 실시간 데이터 기반의 접근이 필요하다. 이러한 첨단 관측 데이터와 배출사업장 정보를 융합하여 가상공간에 대기오염물질의 이동과 영향을 구현하고 배출 영향을 사전 탐지할 수 있는 디지털 플랫폼을 구축함으로써, 배출 특성을 고려한 과학적이고 효율적인 배출원 관리를 실현하고자 한다. 본 연구는 정부가 추진하는 대기오염물질과 온실가스의 통합적 관리로 전환하기 위한 핵심적인 과학적 기반으로서 인공지능 도입과 첨단 배출원 감시 체계를 제시하였다.

Session 1A 신진과학자

좌장 : 노철언 [한국대기환경학회 고문]

1A1) 연속산화흐름반응기를 활용한 산업단지 VOCs의 배출 특성과 2차 유기에어로졸 생성 잠재력 평가
1A2) 고해상도 대기질 산출을 위한 딥러닝 기반 GEMS-GOCI-II 초분광 자료 융합
1A3) 이미지 분석법의 야간 확장 – 과도한 광원 제거와 광원 인근 타겟 밝기 분석을 이용
1A4) AIS 기반 선박 대기오염물질 배출량 상향식 산정 방법론의 적용에 관한 연구
1A5) 연안 산업도시의 인공열 배출에 따른 대기경계층 구조 및 하층 열환경 변화 분석
1A6) 도시 수목의 냉각, 공기역학, 건식 침적 및 BVOC 배출 효과가 도심 오존 농도에 미치는 영향

Session 1B [교육프로그램] 라이다 시스템 개요와 데이터 해석 및 분석법 실습

1B1) 탄성산란(미세먼지) 라이다의 주요 구성
1B2) 라이다 신호 해석과 에어로졸 유형 분류를 통한 대기질 분석
1B3) 스캐닝 라이다 관측자료를 이용한 대기 에어로졸 공간분포 분석

Session 1C [특별세션] 2026 YES-BAM 캠페인을 통한 에어로졸 특성 분석

좌장 : 김영아 [국립기상과학원]

1C1) 2026 YES-BAM 결과와 이를 통한 에어로졸 복사강제력 산출 기반 연구
1C2) 2026 YES-BAM 기간에 측정한 서해상 블랙카본과 브라운카본의 종합 특성
1C3) 2026 YES-BAM 기간 서해상 에어로졸 화학성분 특성
1C4) 2026 YES-BAM 결과와 장기 자료 분석: 서해상 에어로졸과 구름응결핵의 장기 변동이 갖는 의의
1C5) 2026 YES-BAM 기간 $PM_{2.5}$의 광학·화학적 특성 분석

Session 1D 대기환경연구 공모전

좌장 : 신혜정 [국립환경과학원]

1D1) 동아시아 도시 배출 특성 간 탄소성 SLCFs가 유도하는 오존 대기질 – 기후 영향의 차별적 특성
1D2) VOCs 광화학적 초기 농도 추정을 통한 오존 생성 기여도 규명: PINN 대리모델과 PMF-SHAP 통합 분석
1D3) 폭염에 따른 국내 오존 생성 레짐 변화와 오존·미세먼지 복합 건강 영향 평가
1D4) CMAQ-Aging 모의를 활용한 제5차 미세먼지 계절관리제 기간 $PM_{2.5}$ 성분 및 대기 연령 특성 분석
1D5) $PM_{2.5}$ 성분자료와 상대 독성계수를 활용한 권역별 독성가중 초미세먼지 평가
1D6) 해안 지역의 야간 오존 고농도 현상과 원인 분석

Session 1E [특별세션] (Closed Session) 한국형 BVOCs 배출계수 DB 구축과 국가 대기배출목록 고도화

좌장 : 손윤석 [국립부경대학교]

1E1) 한국형 BVOCs 성분 배출 분포 추적기술 개발
1E2) BVOCs 현장 시료채취를 위한 표준 시스템 구축 및 운영체계 마련
1E3) 현장 시료채취를 통한 BVOCs 성분분포 및 배출특성 비교
1E4) 한국형 BVOCs 배출계수 DB 구축을 위한 주요 수종의 현장 배출특성 측정
1E5) 국내 주요 수종별 BVOCs 배출계수 개발을 위한 중복 측정 기반 현장 배출특성 분석체계 구축
1E6) 한국형 BVOCs 배출량 산정모델 개발을 위한 고해상도 입력자료 구축 및 적용성 평가
1E7) 숲의 수관층 및 수관층 외부의 계절·이벤트별 BVOCs와 오존 농도 특성 분석

Session 1F [특별세션] 고농도 오존 관리를 위한 정책 방안

좌장 : 심창섭 [한국환경연구원]

1F1) 지역 맞춤형 관리방안 도출을 위한 우리나라 지표 오존의 장기 추세 및 고농도 지역의 시공간 특성 분석
1F2) 오존 전구물질(NOx·VOCs)의 지역별 배출 특성과 관리 방향
1F3) 고농도 오존 대응을 위한 지역별 오존생성 기여도 비교
1F4) 오존 저감을 위한 유기용제 VOCs 배출 관리 개선 방안
1F5) 서울시 자치구 유형별 특성을 반영한 오존 관리 방안
1F6) 창원특례시 오존 농도 특성 분석 및 관리방안

Session 1G [특별세션] (Closed Session) 입자상/가스상/응축성 대기오염물질 동시저감 기술 개발

좌장 : 박대훈 [한국기계연구원]

1G1) 희석법 기반 여과성-응축성 미세먼지 동시측정장비 개발
1G2) 대형사업장 배출 CPM 저감을 위한 습식 전기집진기 개발
1G3) 제철공정에서의 대기오염물질 저감기술 개발 현황
1G4) 중소형 사업장 응축성 미세먼지 저감을 위한 배가스 냉각 특성 평가
1G5) 산화/환원 기반 배기가스 내 질소산화물 습식 흡수 저감 기술

Session 1H [특별세션] 미세먼지연구·관리센터 협의체

좌장 : 송창근 [동남권 미세먼지연구·관리센터]

1H1) 춘천 대기의 유해 유기성분 특성 규명을 위한 유기질소화합물과 광흡수 유기탄소 관측
1H2) 초고해상도 모델링 시스템 개발을 통한 인천 대기질 분석
1H3) 대산 석유화학산단 VOCs 화학종별 배출량 산정
1H4) 남부권 대기오염물질 배출량에 대한 오존 민감도 분석
1H5) 동남권 고농도 오존의 지역별 발생 특성과 집중관측 전략
1H6) 대기 권역별 미세먼지 건강영향평가

Session 1I [Korea-China-Japan Joint Workshop] For a Better Understanding of Air Pollution in East Asia (5th)

Chair : Young-Ji Han [Kangwon National University]

1I1) Long-term Trends of Atmospheric Deposition of Sulfur and Nitrogen in Japanese Remote Areas
1I2) Control of $PM_{2.5}$ and Ozone Complex Pollution in China: Progress and Prospect
1I3) Simultaneous Determination of Particulate-phase Amines and Amino Acids in Urban Aerosols: Development of a Rapid LC-MS/MS Method and Application to Seoul $PM_{2.5}$
1I4) Different Dynamics in Ozone and $PM_{2.5}$ Concentration between Fukuoka Tower (130 m) and Surface Level: Measurement Campaign and Modeling Application in 2025 Spring
1I5) Emission Profile of Reactive Organic Carbon from Industrial Sector: Diaparity between Mass and Health Threat
1I6) Quantification of Particulate Organic Nitrogen Compounds and Their Inhalation Health Risk in Urban and Background Atmospheres

1A1

연속산화흐름반응기를 활용한 산업단지 VOCs의 배출 특성과 2차 유기에어로졸 생성 잠재력 평가

Assesment of VOCs Emission Characteristics and Formation of Potential Secondary Organic Aerosol in an Industrial Complex using an Oxidation Flow Reactor (OFR)

강석원, 손지훈, Amila Weerasinghe, 김경훈, 김승범[1], 정 혁[2], 류승한[3], 한주은[3], 이태형

한국외국어대학교 환경학과, [1]한국항공우주연구원, [2](주)에이알티플러스, [3]다이텍연구원

산업단지에서 배출되는 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 대기 중 OH radical과의 산화 반응을 통해 오존과 2차유기에어로졸(Secondary Organic Aerosol, SOA)을 생성하는 주요 전구물질로 작용한다. 특히 산업단지는 다양한 유기용제의 사용과 연소 및 배출 시설 운영으로 인해 다양한 VOCs 성분과 대기오염물질이 배출되며 개별 VOCs의 배출 특성과 광화학적 반응성을 함께 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 산업단지를 대상으로 VOCs의 배출 특성을 파악하고, 이들 성분이 2차 유기에어로졸 생성에 미치는 잠재적 영향을 평가하고자 한다. 이를 위해 산업단지 내에서 집중관측 기간 동안 Proton Transfer Reaction Time of Flight Mass Spectrometer (PTR-ToF-MS)를 이용하여 개별 VOCs를 실시간 측정하고 High Resolution Time of Flight Aerosol Mass Spectrometer (HR-ToF-AMS)를 이용하여 비내화성 입자상 성분을 관측하였다. 또한 2차 유기에어로졸 생성 잠재력을 평가하기 위해 연속산화흐름반응기(Oxidation Flow Reactor) 이용하여 다양한 광화학적 산화조건을 모사하고, photochemical age에 따른 SOA 생성량과 VOCs 전구물질의 기여도를 분석함으로써 산업단지 대기에서의 잠재적 2차 유기에어로졸 생성 특성을 종합적으로 평가하고자 한다.

사사 본 연구는 환경부 사업으로 수행 중인 '대기환경무인기 One-stop 플랫폼 기술개발 사업'(과제번호: RS-2025-02213909)의 지원을 받아 수행되었음.

1A2

고해상도 대기질 산출을 위한 딥러닝 기반 GEMS-GOCI-II 초분광 자료 융합

Deep Learning-Based GEMS-GOCI-II Hyperspectral Data Fusion for High-Resolution Air Quality Monitoring

최현영, 이시현, 김예진, 임정호

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

정지궤도 초분광 위성자료는 에어로졸과 미량기체의 분광 특성을 관측할 수 있어 대기질 감시에 유용하다. 정지궤도 환경위성(Geostationary Environment Monitoring Spectrometer; GEMS)은 아시아·태평양 지역을 높은 시간해상도로 관측하지만, 상대적으로 낮은 공간해상도로 인해 도시 규모의 세부적인 대기오염 분포를 파악하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 GEMS 초분광 복사휘도와 천리안 해양위성 2호(Geostationary Ocean Color Imager-II; GOCI-II)의 고해상도 다중분광 자료를 융합하는 딥러닝 기반 고해상도화 프레임워크를 개발하였다. GOCI-II의 세밀한 공간정보를 활용하고 자기지도학습(self-supervised learning)을 적용함으로써 고해상도 초분광 참값 자료 없이 GEMS의 Level-1C (L1C) 복사휘도의 공간해상도를 향상하였다. 원본 GEMS L1C 자료를 활용하여 검증한 결과 고해상도화된 복사휘도는 공간적·시간적으로 높은 일관성을 보였으며, 상관계수(R)는 0.95 이상, 정규화 평균제곱근오차(nRMSE)는 10% 이하로 나타났다. 또한 GEMS의 분광정보를 안정적으로 보존하면서 기존 자료보다 세밀한 공간정보를 제공하였다. 나아가 인공지능 기반 모델을 활용하여 고해상도 초분광 복사휘도와 지상 PM_{10}, $PM_{2.5}$ 및 NO_2 농도 간의 관계를 분석하고, 고해상도 대기질 산출 및 모니터링 활용 가능성을 평가하였다. 본 연구는 다중 위성자료와 딥러닝의 융합이 도시 규모의 상세 대기질 분석에 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다.

1A3

이미지 분석법의 야간 확장 - 과도한 광원 제거와 광원 인근 타겟 밝기 분석을 이용

Extending Image Analysis to Nighttime - Through Light Source Exclusion and Target Brightness Analysis

심주현, 신주선, 문윤기, 박민경, 김인엽, 백승재, 김덕현[1], 노영민

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, [1]국립한밭대학교 기초과학부

이미지 기반 대기 소산계수 산출법은 저비용 카메라 한 대로 넓은 영역의 대기질을 감시할 수 있어, 고가의 관측 장비를 대체할 수단으로 연구되어왔다. 기존 이미지 분석법은 반사특성이 유사한 4개 이상의 타겟의 거리별 밝기 차이를 피팅해 소산계수를 산출한다. 하지만 이는 모든 타겟에 빛이 균일하게 들어오는 조건에서만 적용할 수 있다. 따라서 야간이나 일출, 일몰과 같은 불균일한 조명 조건에서는 타겟별 밝기 차이가 실제 대기 소산이 아닌 광원 분포에 의해 왜곡되고, 소산계수 산출 오차가 커진다. 본 연구는 두가지 방법으로 이 한계를 해결해 관측 시간대를 확대하였다. RAW 신호가 JPEG로 변환되는 과정에서 과도한 광원이 있으면 화소값이 비선형적으로 왜곡된다. 이를 막기 위해 과도한 광원을 촬영 시야에서 배제하는 선택적 시야 영상기법(SFI)을 제안한다. 노출시간을 달리한 실험에서 JPEG 기반 소산계수는 노출 변화에 민감했으나(CV = 60.93%), RAW 기반 소산계수는 안정적이었다(CV = 2.68%). SFI를 적용하자 소산계수는 야간과 일출 구간에서도 안정적으로 유지되었다. 동시에 안개, 강설 같은 실제 기상 변화에는 민감하게 반응하였다. 둘째, 조명이 안정적으로 유지되는 근거리 타겟의 밝기를 $PM_{2.5}$ 질량농도와 비교했다. 2025년 11월 한 달간 관측한 결과, 주간(12시~17시)과 심야(23시~04시)에 타겟 밝기는 $PM_{2.5}$ 농도와 높은 상관성을 보였다($R^2 \geq 0.73$). 두 방법은 광원 조건이 일정하지 않은 야간과 새벽에도 대기질 분석을 가능하게 하며, 별도 장비 설치 없이 기존에 설치된 카메라를 대기질 모니터링에 활용할 가능성을 보여준다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR(비산배출원 규명을 위한 저감·모니터링 기술) 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 RS-2026-25501396).

1A4

AIS 기반 선박 대기오염물질 배출량 상향식 산정 방법론의 적용에 관한 연구

Study on the Application of an AIS-Based Bottom-up Methodology for Ship Air Emission Estimation

이용찬[1),2)], 유지예[1),2)], 장지호[1),2),3)], 박영일[1),2),3)], 이희관[1),2),3)]

[1)]인천대학교 환경융합기술연구원, [2)]인천대학교 아시아환경에너지연구원, [3)]인천대학교 환경에너지공학과

선박 배출은 항만 인접 도시 대기질에 직접 영향을 미치지만, 연료 판매량 기반의 집계형 인벤토리는 배출이 언제 어디에서 어떤 운항 조건으로 발생하는지 직접적으로 보여주기에 어려움이 있다. 이에 본 연구는 인천대학교 PAQman© 시스템으로 수집한 인천 해상교통관제(VTS) 해역 AIS 자료에 4th IMO GHG Study와 U.S. EPA 지침 기반 activity-based 방법론을 적용하여, 전처리부터 확산모델 입력까지 산정 전 과정의 적용 가능성을 검증하였다. 먼저 통합 전처리 알고리즘 AI-PRE는 위치 도약 등의 오류가 항차별 연료소비량을 자릿수 단위로 왜곡함을 보여, 전처리를 부수적 정제가 아니라 산정 신뢰성을 좌우하는 방법론의 구성요소로 정립하였다. 정제한 자료로 구축한 2023~2025년 500 m × 500 m 격자, 1시간 해상도 인벤토리는 08시, 19시 이중 배출 피크와 일요일 최저, 상위 5% 격자에 $PM_{2.5}$의 49.9%가 집중되는 핫스팟, 오염물질별로 다른 지배 배출원을 한 체계 안에서 읽어내어, 집계형 인벤토리가 담지 못하는 배출의 시공간·운항 구조를 드러냈다. 나아가 상세 배출량을 선급 및 운항 유형별 항차당 값으로 요약한 컨테이너선 항차 기반 $PM_{2.5}$ 배출계수는, AIS 분석이 어려운 항만에서도 입출항 기록만으로 운항 특성이 반영된 인벤토리를 구성할 틀이 된다. 마지막으로 시간별 인벤토리를 GRAL 확산모델에 적용한 96시간 비교에서는 입력의 시간해상도가 단기 피크의 강도와 위치를 좌우함을 확인하여, 배출량 산정이 농도·노출 평가로 이어지는 연결 고리를 보였다. 본 연구의 의의는 AIS 활동자료가 전처리, 인벤토리, 배출계수, 확산모델 입력의 전 과정을 한 체계로 관통함을 실제 항만 해역에서 확인하고, 무엇을 언제 어디에서 관리할지 판단할 정량적 기반을 마련한 데 있다.

1A5

연안 산업도시의 인공열 배출에 따른 대기경계층 구조 및 하층 열환경 변화 분석

Effects of Anthropogenic Heat in a Coastal Industrial City

천지민, 이명인

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

최근 고밀도 에너지 소비시설의 증가와 함께 인공열이 도시 대기환경과 열환경에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 기존 도시 인공열 연구는 주로 도시 전반에 균질하게 분포한 열배출을 가정해 왔으며, 연안도시에서 열원과 해륙풍, 대기경계층 발달 간의 상호작용은 충분히 규명되지 않았다. 본 연구는 연안 산업도시를 대상으로 고해상도 중규모 기상모형을 활용하여 인공열 배출에 대한 민감도 실험을 수행하고, 계절 및 바람 조건에 따른 대기경계층과 하풍 지역 열환경의 반응을 분석하였다. 인공열은 지표면 에너지수지에 추가되는 현열 플럭스로 설정하였으며, 열배출 유무와 강도를 달리한 수치실험을 구성하였다. 분석에서는 지상기온, 부력 생성, 연직 혼합, 대기경계층고 및 하풍 방향 열수송의 변화를 비교하였다. 그 결과, 인공열 배출은 발생지 주변의 지상기온뿐 아니라 대기경계층의 열적·역학적 구조와 하풍 지역의 열환경에도 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 약풍 및 안정한 대기 조건에서는 열 이상이 지표 부근에 축적되는 경향을 보였으며, 혼합이 활발하거나 해풍이 발달한 조건에서는 열적 교란이 연직 및 수평 방향으로 재분배되었다. 본 연구는 연안 산업도시의 열배출 영향을 평가할 때 지상기온 변화뿐 아니라 풍계와 대기경계층 구조의 변화를 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다.

사사 본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 「신기후체제 대응 기후변화 R&D 사업」의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: 2022003560002).

1A6

도시 수목의 냉각, 공기역학, 건식 침적 및 BVOC 배출 효과가 도심 오존 농도에 미치는 영향

Effects of Urban Tree Cooling, Aerodynamics, Dry Deposition, and BVOC Emissions on Downtown Ozone Concentrations

김연욱, 우주완[1),2)], 이상현[1),2)], 강 건[3)], 김재진[4)], 곽경환[5)]

강원대학교 환경연구소, [1)]국립공주대학교 대기과학과, [2)]중부권 미세먼지연구·관리센터, [3)]국립부경대학교 SEED 연구소, [4)]국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [5)]강원대학교 환경학과

도심의 수목은 열 환경을 완화하고 대기오염물질을 제거하는 한편, 공기의 흐름을 변화시키고 생물 기원 휘발성유기화합물(BVOC)을 배출하여 도심 대기질에 복합적인 영향을 미친다. 이러한 수목의 물리적·화학적 효과는 서로 다른 과정을 통해 도심 오존(O_3) 농도와 분포에 영향을 미칠 수 있으므로, 이를 종합적으로 평가할 필요가 있다. 따라서, 도시 수목이 O_3 대기질에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 이러한 효과를 통합적으로 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 전산유체역학(CFD) 모델과 SAPRC 화학 메커니즘을 결합한 SAPRC-CFD 모델을 이용하여 서울 중구 약 1.6 × 1.6 km 지역을 대상으로 수목의 영향을 분석하였다. 기상 및 농도 경계 자료는 각각 WRF와 CMAQ 모델 결과를 사용하였다. 인위적 배출량은 객체 기반 배출 모델(SOME) 자료를 적용하고 BVOC 배출량은 MEGAN 모델을 이용하여 산정하였다. 수목의 냉각, 공기역학, 건식 침적 및 BVOC 배출 효과를 구분하여 모의 시나리오를 구성했다. 모의 결과, 수목의 공기역학적 효과와 BVOC 배출 효과는 O_3 농도를 각각 평균 약 0.5%와 2% 증가시켰지만, 냉각 효과는 약 2% 감소시켰으며, 건식 침적 또한 O_3 농도를 감소시켰다. 이러한 과정들은 상호 연관되어 작용하므로, 고밀도 시가지의 도시 녹화가 대기질에 미치는 영향을 평가할 때는 수목의 냉각 효과, 공기역학적 효과, 건식 침적 효과, 그리고 BVOC 배출 효과를 종합적으로 고려해야 한다.

사사 본 연구는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 국립환경과학원의 지원과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-SP2017-366, RS-2024-00356913).

1B1

탄성산란(미세먼지) 라이다의 주요 구성

Key Hardware Components of an Elastic Backscatter LiDAR System for Atmospheric Particulate Matter Monitoring

신동호

한국에너지기술연구원

대기 중 미세먼지는 배출원, 기상조건 및 대기경계층의 변화에 따라 농도와 공간분포가 빠르게 변하므로, 고정식 지점 측정만으로는 입자의 고도별 분포, 이동 경로 및 국지적 배출 플룸을 충분히 파악하기 어렵다. 공간정보 획득을 위해 라이다(LiDAR)는 펄스 레이저를 대기 중으로 조사하고 공기분자와 에어로졸 입자에서 발생한 후방산란광을 시간분해 방식으로 수신하여 거리별 대기 정보를 획득하는 능동형 원격탐사 기술이다. 그러나 라이다 장비에서 획득되는 원시신호는 미세먼지 농도를 직접 나타내는 값이 아니며, 시스템 특성에 대한 이해와 단계적인 신호 보정, 광학계수 역산 및 품질관리가 선행되어야 한다. 먼저 라이다 시스템을 레이저 송신부, 수신망원경과 분광·편광 광학부, 광검출기, 자료수집장치, 스캐닝 구동부 및 통합제어부로 구분하여 각 구성요소의 기능을 설명한다. 이와 함께 라이다 장치에 대한 이해를 돕기위해 현장에서 라이다를 설치 및 구동하여 방위각과 고도각을 변화시키는 PPI, RHI 및 체적 스캔의 개념을 소개하고, 스캔 범위, 각도 간격 및 신호 누적시간의 설정이 공간해상도와 시간해상도에 미치는 영향을 설명한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 RS-2026-25501396).

1B2

라이다 신호 해석과 에어로졸 유형 분류를 통한 대기질 분석

Lidar Signal Interpretation and Aerosol Type Classfication for Air Quality Applications

노영민

국립부경대학교 지구환경시스템과학부

대기 중 에어로졸은 발생원과 생성·변환 과정에 따라 입자의 크기, 형태 및 광학적 특성이 다르며, 이러한 차이는 대기질과 기후에 미치는 영향 측면에서 중요하다. 지상 측정망은 지표 부근의 농도 변화를 정량적으로 파악하는 데 유용하지만, 상층에 존재하는 오염층의 유입과 이동 및 대기경계층 내 혼합 과정을 입체적으로 관측하는 데에는 한계가 있다. 라이다는 대기 중 에어로졸과 구름의 연직·수평 분포를 높은 시공간 해상도로 관측할 수 있으나, 수신 신호에는 분자와 입자의 후방산란, 대기 감쇠, 관측거리, 배경광, 시스템 중첩함수 및 신호대잡음비의 영향이 함께 포함되므로 원시신호의 크기만으로 에어로졸의 농도와 특성을 판단하기 어렵다. 본 발표에서는 라이다 신호의 특성과 광학 파라미터를 이용하여 에어로졸층, 대기경계층 및 구름을 구분하는 방법을 소개한다. 다중파장 라이다에서 산출되는 후방산란계수, 소산계수, 옹스트롬 지수와 편광소멸도를 이용하여 입자의 상대적인 크기와 비구형성을 해석하는 원리를 설명한다. 이러한 광학적 특성을 종합하여 황사, 연무, 연기, 해염 및 도시 오염입자 등 주요 에어로졸 유형을 분류하고 대기질 분석에 활용한 사례를 제시한다. 아울러 혼합 에어로졸, 상대습도에 따른 입자 성장, 라이다비의 가정 및 낮은 신호대잡음비가 분석 결과에 미치는 영향을 살펴보고, 기상자료와 지상관측 및 역궤적 자료를 함께 활용하여 분류 결과의 신뢰성을 평가하는 방법을 논의한다. 이를 통해 라이다 관측 신호의 물리적 의미를 이해하고, 에어로졸 유형 분류 결과를 대기오염의 발생·수송·확산 과정 해석에 활용할 수 있도록 한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 RS-2026-25501396).

1B3

스캐닝 라이다 관측자료를 이용한 대기 에어로졸 공간분포 분석

Analysis of Atmospheric Aerosol Spatial Distributions Using Scanning Lidar Observations

신주선, 노영민

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공

대기 중 미세먼지는 배출원의 위치, 기상 조건 및 지형의 영향에 따라 불균일한 공간분포를 나타내지만, 지상 측정망은 관측지점 부근의 농도만을 제공하므로 오염물질의 이동과 확산 과정을 연속적으로 파악하는 데 한계가 있다. 스캐닝 라이다는 레이저의 방위각과 고도각을 변화시키며 대기를 관측함으로써 에어로졸의 수평·연직 분포를 높은 시공간 해상도로 파악할 수 있다. 그러나 관측된 원시신호에는 거리 증가에 따른 신호 감소, 배경광, 시스템 잡음, 송·수신 광학계의 중첩 및 대기 감쇠의 영향이 포함되므로 정량적인 공간분포를 산출하기 위해서는 단계적인 신호처리와 역산 과정이 필요하다. 본 교육에서는 실제 스캐닝 라이다 관측자료와 MATLAB 기반 분석 코드를 이용하여 원시자료의 구조를 확인하고, 배경신호 제거, 거리제곱 보정 및 신호대잡음비를 이용한 유효 관측구간 설정 과정을 실습한다. 이후 탄성산란 라이다 방정식과 Klett 역산법의 기본 원리를 설명하고, 기준거리와 경계조건 및 라이다비를 설정하여 에어로졸 후방산란계수와 소산계수를 산출하는 과정을 단계별로 수행한다. 또한 관측 거리와 스캔각도를 공간좌표로 변환하고, 산출된 소산계수를 이용하여 에어로졸의 이차원 공간분포를 시각화하고 해석하는 방법을 다룬다. Klett 역산 결과는 기준거리, 라이다비 및 분자산란 조건의 설정에 따라 달라질 수 있으므로 입력변수의 변화에 따른 결과의 민감도와 불확실성도 함께 살펴본다. 아울러 낮은 신호대잡음비, 구름에 의한 강한 감쇠, 근거리 중첩영역 및 상대습도에 따른 입자 성장 등 실제 관측자료 해석에서 고려해야 할 요인을 설명한다. 이를 통해 스캐닝 라이다 자료의 전처리부터 광학변수 산출과 공간분포 시각화까지의 전체 분석과정을 논의하고, 라이다 분석 결과를 미세먼지의 분포와 이동 특성 해석에 활용할 수 있도록 하고자 한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 RS-2026-25501396).

1C1

2026 YES-BAM 결과와 이를 통한 에어로졸 복사강제력 산출 기반 연구

2026 YES-BAM Campaign: Results and a Research Framework for Aerosol Radiative Forcing Estimation

유희정, 오상민, 유나기, 고희정, 김영아

국립기상과학원 지구대기감시연구과

IPCC 제5차 평가보고서는 에어로졸이 음(negative)과 양(positive)의 복사강제력을 동시에 유발하며, 특히 Black Carbon (BC)의 복사강제력이 CO_2에 이어 두 번째로 큰 복사강제력으로 평가된다고 제시하였다(IPCC, 2014). 그러나 IPCC 제6차 평가보고서에서는 BC 복사강제력이 이전 평가에 비해 크게 낮아졌으며, 에어로졸 복사강제력의 불확도는 1.63 W/㎡로 CO_2 (0.51 W/㎡)와 CH_4 (0.22 W/㎡)에 비해 높게 평가되었다(IPCC, 2023). 이러한 추정값은 22개의 전 지구 기후모델 결과를 기반으로 산출된 것으로 실지 관측(in-situ)자료가 직접 반영된 결과가 아니다. 국립기상과학원에서 3개의 전 지구 모델을 이용하여 동아시아지역의 BC 복사강제력을 추정한 결과, 1.14 W/㎡로 전 지구 평균값인 0.13 W/㎡보다 약 8.8배 높게 나타났다. 따라서 한반도 지역 특성을 반영한 BC 복사강제력 산출을 위해서는 실지 관측자료를 활용한 정량화가 필요하다. 이를 위해 국립기상과학원은 안면도 지구대기감시소, 기상관측선, 기상항공기 등을 활용하여 관련 기관과 공동으로 서해상 탄소에어로졸 집중관측(Yellow Sea-Black Carbon Aerosol Measurement, YES-BAM) 캠페인을 2025년부터 수행하고 있다. 본 연구에서는 실지 관측자료를 활용한 BC 복사강제력 산출 방법을 검토하고, 2026 YES-BAM 캠페인(3월 27일~4월 22일) 기간 중 미세입자 농도가 증가한 4월 2~3일과 4월 15~16일의 두 사례를 대상으로 에어로졸의 물리·광학·화학적 특성을 분석하였다. 이를 통해 BC 복사강제력 산출을 위한 관측자료의 활용 가능성을 제시하고자 한다.

사사 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구」 "황사·연무 감시 및 예보기술 개발(KMA2018-00521)"의 지원으로 수행되었습니다.

1C2

2026 YES-BAM 기간에 측정한 서해상 블랙카본과 브라운카본의 종합 특성

Comprehensive Characteristics of Black Carbon and Brown Carbon Measured over the Yellow Sea during the 2026 YES-BAM Campaign

최시영, 임하늘, 유나기[2], 오상민[2], 김주영, Mishra Shalini, 이은아, 유희정[2], 고희정[2], 성민영[3], 이그림[3], 박진수[3], 임세희[1]

충남대학교 환경IT융합공학과, [1]충남대학교 환경공학과, [2]국립기상과학원 지구대기감시연구과, [3]국립환경과학원 대기환경연구부

본 연구는 2026년 3월과 4월에 서해상에서 수행된 YES-BAM (Yellow Sea – Blackcarbon Aerosol Measurements)은 탄소에어로졸의 집중관측을 위해 Aethalometer, Thermodenuder – Carbonaceous Aerosol Speciation System, Single Particle Soot Photometer를 활용하여 블랙카본(BC)과 브라운카본(BrC)의 질량농도, 미세 물리적 특성 및 광흡수 특성을 관측했다. 이를 바탕으로 공기궤에 따른 광학·물리화학적 특성 변동을 규명하고자 고농도 $PM_{2.5}$ 사례(연무)와 고농도 PM_{10} 사례(황사)를 분석하였다. 유입 경로별 세부 특성을 살펴보면, 중국 연안 및 서해에서 정체되며 유입된 고농도 $PM_{2.5}$ 사례들에서는 내화성 블랙카본 질량(M_{rBC}) 중앙값이 310.1~701.0 ng m^{-3}, 질량중앙입경(MMD)은 150.4~153.8 nm, F_{thick}는 56.4~61.2%였으며, 코팅된 rBC의 두께는 주로 질산염의 영향을 크게 받았다. $b_{abs365,BrC}$은 8.2 Mm^{-1}, 광흡수계수($b_{abs,\ 550nm}$) 및 광흡수 증강 계수($E_{abs,TD,550nm}$)는 가장 높았으며, $E_{abs,TD}$ 중앙값은 1.6~1.7로 사례 중에서 가장 높았다. 이는 2차 무기·유기 성분 코팅에 의한 렌징 효과(Lensing effect)가 광흡수를 주도한 것으로 분석되었다. 반면, 시베리아 및 몽골 지역으로부터 유입된 고농도 PM_{10} 사례에서는 M_{rBC} 중앙값이 90.2 ng m^{-3}, MMD는 155.0 nm, F_{thick}는 26.1%, $b_{abs365,BrC}$은 3.7 Mm^{-1}으로 낮았다. 이때 $E_{abs,TD}$ 중앙값은 약 1.0으로 코팅에 의한 흡수 증폭이 거의 없는 전형적인 황사 시 BC 관측 특성과 일치했으며, 코팅 두께는 상대적으로 작은 입경의 BC에서 황산염의 영향을 크게 보였다. 본 연구 결과는 서해상으로 유입되는 기단의 이송 경로와 기상 정체 여부에 따라 탄소성 에어로졸의 혼합상태, 코팅 성분 및 광흡수 특성이 차별화됨을 시사한다.

사사 본 연구는 2026년도 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구」 "황사·연무 감시 및 예보기술 개발(KMA2018-00521)"의 지원으로 생산되었으며, 국립환경과학원 「항공관측 기반 입체관측 고도화 연구」 "국외 유입 대기오염물질의 입체관측 고도화 연구(Ⅱ)" 와교육부의 재원으로 한국연구재단의 4단계 BK21 사업 지원을 받아 수행됨(NIER-2026-01-01-003).

1C3

2026 YES-BAM 기간 서해상 에어로졸 화학성분 특성

Characteristics of the Chemical Composition of Aerosols in the West Sea during the YES-BAM Period in 2026

성민영, 이태훈, 정지윤, 조용한, 정라니, 이그림, 박진수, 유희정[1], 최시영[2], 임세희[2], 강대일, 성지원

국립환경과학원 대기환경연구과, [1]국립기상과학원 지구대기감시연구과, [2]충남대학교 환경IT융합공학과

국립환경과학원은 매년 고농도 미세먼지가 발생하는 겨울과 봄철 계절관리제 기간동안 서해 상공에서 항공관측을 통해 국외 유입 대기오염물질을 감시하고 있으며, 이와 유사한 시기에 국립기상과학원과 협업하여 서해상에서 선박 관측을 진행하고 있다. 본 연구에서는 2026년 YES-BAM (YEllow Sea-Black carbon Aerosol Measurement campaign)에 참여하여 서해상 에어로졸 화학성분 특성을 파악하였다. 1항차(3/27~4/5), 2항차(4/13~4/22) 동안 에어로졸 화학성분 분석기(ToF-ACSM, Time of Flight-Aerosol Chemical Species Monitor), 베타선 연속측정기(BAM1020), PM-2.5 시료채취기(E-FRM) 2대를 탑재하여 PM-2.5 화학성분과 질량농도를 측정하였고, 4/4 오후에는 항공기와 선박 동시 측정을 수행하였다. PM-2.5 질량농도는 1항차 평균 34 $\mu g/m^3$, 2항차 평균 25 $\mu g/m^3$로 나타났다. 측정기간 중 미세먼지 고농도 사례(4/1~4/3)가 관찰되었고 4/2 오후 5시경 최대 115 $\mu g/m^3$를 나타냈으며, 이때 질산염 비중이 증가하였다. 해당 사례 시 주요화학성분 특성과 함께 광흡수물질로 기후변화에 영향을 미치는 물질로 알려진 rBC (refractory black carbon) 농도 특성을 종합적으로 분석하고, 또한 2022년부터 2026년까지의 다년간 측정 자료를 분석하여 장기 변동을 파악하고자 한다.

사사 본 연구는 2026년도 국립환경과학원의 "국외 유입 대기오염물질의 입체관측 고도화 연구(Ⅱ)" 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2026-01-01-003).

1C4

2026 YES-BAM 결과와 장기 자료 분석: 서해상 에어로졸과 구름응결핵의 장기 변동이 갖는 의의

2026 YES-BAM Campaign Results and Long-Term Data Analysis: Implications of Long-Term Variations in Aerosols and Cloud Condensation Nuclei over the Yellow Sea

박민수, 서표석, 안찬우, 유희정[1)], 오상민[1)], 김영아[1)] 박진수[2)], 성민영[2)]

연세대학교 대기과학과, [1)]국립기상과학원 지구대기감시연구과, [2)]국립환경과학원 대기환경연구과

최근 동아시아에서 배출 저감 정책의 영향으로 에어로졸 질량 및 수농도가 크게 감소하였다. 에어로졸 중 일부는 구름응결핵으로 작용하여 대기 복사에 영향을 미치기 때문에, 기후 예측의 최대 불확실성 요인 중 하나인 에어로졸-구름 상호작용의 규명 측면에서도 이러한 변화를 이해하는 것이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 2026 Yellow Sea-Black carbon Aerosol Measurement (YES-BAM) 캠페인에 참가하였고, 2026년 3~4월 국립기상과학원의 기상관측선 기상 1호에 탑승해 서해에서 관측을 수행하였다. 2026년 캠페인 기간 동안에는 전체 항차 평균 에어로졸 및 구름응결핵 수농도가 2025년 캠페인 기간에 비해 증가하였음을 확인하였다. 또한 2026년에도 중국으로부터 고농도 $PM_{2.5}$가 유입되는 사례가 빈번하였으며, 해당 사례 동안 구름응결핵으로 활성화될 수 있는 에어로졸이 다량 유입되었다. 그러나 서해에서 다년간 축적된 과거 자료를 분석한 결과 에어로졸 및 구름응결핵 수농도의 장기적인 감소 경향이 확인되었다. 이러한 감소는 에어로졸 흡습성의 변화가 아닌 크기분포의 변화에서 기인하였고, 동아시아의 급격한 배출 환경 변화 속에서 에어로졸-구름 상호작용으로 인한 지구 복사 강제력이 변화할 수 있음을 시사한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2026-01-01-003).

1C5

2026 YES-BAM 기간 $PM_{2.5}$의 광학·화학적 특성 분석

Optical and Chemical Characteristics of $PM_{2.5}$ during 2026 YES-BAM

이민서, 유희정[1)], 박진수[2)] ,성민영[2)], 이그림[2)], 최용주

한국외국어대학교 환경학과, [1)]국립기상과학원 지구대기감시연구과, [2)]국립환경과학원 대기환경연구과

서해는 국외 대기오염물질이 우리나라로 유입되는 주요 경로로, 해상 대기 중 $PM_{2.5}$의 화학조성과 광학적 특성을 파악하기 위한 중요한 관측 지역이다. 본 연구는 2026년 3~4월 YES-BAM (YEllow Sea-Black carbon Aerosol Measurement) 캠페인 기간 서해상 $PM_{2.5}$의 광학·화학적 특성을 파악하고자 하였으며, 선상에서 채취한 $PM_{2.5}$ 시료(N = 21)의 수용성 이온, OC (Organic Carbon), EC (Elemental Carbon), WSOC (Water-Soluble Organic Carbon) 및 초순수·메탄올 추출액의 BrC (Brown Carbon) 광흡수 특성을 분석하였다. 전체 관측기간 동안 OC, EC 및 WSOC의 평균 농도는 각각 4.62±2.22, 0.43±0.28 및 3.19±1.76 $\mu g\ m^{-3}$였으며, 수용성 이온 중 NH_4^+, NO_3^- 및 SO_4^{2-}의 평균 농도는 각각 9.01±9.13, 3.65±1.64 및 3.62±2.97 $\mu g\ m^{-3}$로 나타났다. WSOC는 2차 무기이온들과 양의 상관을 보여 수용성 유기성분과 2차 생성 성분 간 관련성을 나타냈다. BrC의 Abs_{365} (Absorption coefficient)는 초순수와 메탄올 추출액에서 각각 1.74±0.81 및 1.86±1.17 Mm^{-1}로 메탄올 추출액이 약 6% 높았다. $AAE_{365/500}$ (Absorption Ångström Exponent) 또한 메탄올 추출액에서 높게 나타나 추출 용매에 따른 BrC의 파장 의존적 광흡수 특성 차이가 확인되었다. 두 추출액의 Abs_{365}는 OC 및 EC와 양의 상관을 보여 BrC 광흡수가 탄소성 에어로졸 농도 변화와 연관됨을 나타냈다. 향후 BrC의 복사강제력을 추정하고 과거 서해 선박관측 자료와 비교하여 서해상 $PM_{2.5}$의 광학·화학적 특성과 복사 효과를 종합적으로 평가하고자 한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부 국립환경과학원(NIER)의 지원을 받아 수행되었음(NIER-2026-01-01-003).

1D1

동아시아 도시 배출 특성 간 탄소성 SLCFs가 유도하는 오존 대기질 – 기후 영향의 차별적 특성

Carbonaceous Short Lived Climate Forcers (SLCFs) Drive Divergent Ozone Air-Quality – Climate Effects across East Asian Urban Archetypes

윤창동, 김혜림[1], 백민우[2]

고려대학교 지구환경과학과, [1]Department of Chemical and Biochemical Engineering, The University of Iowa,
[2]인하대학교 고분자환경융합전공

탄소성 에어로졸(BC, OC/SOA)과 대류권 오존은 대표적인 단수명기후강제물질(SLCF)로서 대기질과 기후에 동시 영향을 미치나, 도시 배출구조의 차이가 이들의 광학특성과 오존 레짐을 어떻게 차별적으로 지배하는지는 체계적으로 규명되지 않았다. 본 연구는 국내 $PM_{2.5}$ 성분측정망(93개소, OC/EC)·광화학대기오염물질측정망(VOC 56종)·집중측정망(시간분해 OC/EC·이온) 자료를 활용하여, 교통 우세·산업 우세·혼합·배경 등 배출구조가 상이한 도시 아키타입별로 탄소성 에어로졸 조성(EC/OC 비, SOA 기여)과 오존 생성레짐(VOC-limited vs. NOx-limited)의 시공간 변동을 진단한다. PMF 배출원 기여도 분석, MIR 스케일 VOC별 오존 생성 기여 정량화, EC/OC 비 기반 에어로졸 흡수-산란 특성 평가, 24년 기상-오존 회귀에 의한 기후패널티(dO_3/dT) 산출을 수행한다. 나아가 GEMS 위성 $HCHO/NO_2$ 비와 AOD·SSA를 활용하여 오존 레짐 및 에어로졸 광학특성 분석을 동아시아로 확장하고, 배출구조가 에어로졸 직접 복사강제(BC 온난화 vs. OC 냉각)와 오존 복사강제에 동시에 미치는 영향을 정량화함으로써, 도시 유형별 건강-기후 공편익 저감 전략의 과학적 근거를 제공하고자 한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-03-02-008).

1D2

VOCs 광화학적 초기 농도 추정을 통한 오존 생성 기여도 규명: PINN 대리모델과 PMF-SHAP 통합 분석

A PINN-Based OBM Surrogated Model Estimating Photochemical Initial VOC Concentaration: Integration with PMF-SHAP Analysis to Quantify Ozone Formation Contributions

장예진

가톨릭대학교 에너지환경공학과

VOCs는 NOx와의 광화학 반응을 통해 대류권 오존을 생성하는 주요 전구물질이며, 국내 오존 농도는 2000년 관측 이래 지속적으로 증가하고 있어 전구물질에 대한 체계적 관리가 요구된다. 그러나 대기 측정망에서 관측되는 VOCs는 이미 광화학 반응을 거친 잔류 농도이므로, 이를 그대로 활용할 경우 배출원 식별과 오존 생성 기여도 평가에서 실제 배출 특성이 왜곡될 수 있다. 기존의 반응성 비율 기반의 보정법은 기상 조건의 무시와 과도한 단순화하는 한계가 있으며, 관측기반모델(OBM)을 통한 정밀 모의는 막대한 연산 비용으로 대규모 자료 적용이 비효율적이다. 이에 본 연구는 PINN (Phhysics-Informed Neural Network)기반 OBM 대리모델로 VOCs의 광화학적 초기 농도를 추정하고, 이를 PMF-SHAP 통합 분석과 연계하여 배출원별·물질별 오존 생성 기여도를 규명하고자 한다, 먼저 1시간 단위 고해상도 연속 측정 자료가 확보된 인천 논현동 광화학 측정망 자료로 시계열 복원 모델을 구축하고, 일 평균값만이 존재하는 기간의 자료를 1시간 단위로 다운스케일링한다. 다음으로 상미분방정식 기반 대기 화학 매커니즘과 기상 인자를 물리적 손실 함수로 통합한 PINN 대리모델을 구축하여 OH 라디칼 농도를 신속히 모의하고 화학 반응 전 초기 농도를 추정한다. 마지막으로 산정된 초기 농도로 PMF 분석을 수행하여 배출원을 도출하고, 머신러닝 오존 예측 모델에 SHAP 분석을 적용하여 오존 생성 기여도를 정량 평가하고자 한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-03-02-008).

1D3

폭염에 따른 국내 오존 생성 레짐 변화와 오존·미세먼지 복합 건강 영향 평가

Changes in Ozone Formation Regimes during Heatwaves and Combined Assessment of the Health Impacts of Ozone and $PM_{2.5}$ in South Korea

곽한주, 김지안

고려대학교 지구환경과학과

지속적인 NOx 배출 저감에도 국내 고농도 오존 사례 빈도는 증가하고 있으며, 이는 오존 생성이 전구물질 배출량 변화에 선형적으로 반응하지 않고, 지역 및 기상 조건에 따라 민감도가 달라질 수 있음을 시사한다. 특히 폭염은 생물기원 및 증발성 휘발성유기화합물(VOC) 배출을 촉진하고 광화학 반응을 강화함으로써 오존 농도뿐 아니라 VOC- 또는 NOx-민감도로 대표되는 오존 생성 레짐을 변화시킬 수 있다. 이러한 레짐 구분에는 HCHO/NO_2 비율(FNR)이 널리 활용되어 왔으나, 지상 관측만으로는 공간적 변동을 충분히 판단하기 어렵고, 기존 저궤도 위성은 관측 빈도가 제한되어 폭염기 시간별 레짐 변화를 포착하는 데 한계가 있다. 이에 본 연구는 정지궤도 환경위성 GEMS의 고빈도 관측 자료를 활용하여 폭염 시기 오존 생성 민감도의 시공간 변화를 규명하고자 한다. 2024년 여름철 GEMS NO_2·HCHO 컬럼과 지상·기상자료를 시공간 정합하고, CatBoost 기반 머신러닝을 통해 컬럼과 지표 농도 간 차이를 보정함으로써 지표 NO_2와 HCHO 농도를 추정한다. 이를 통해 지표 FNR을 산출하고, VOC-limited·전환·NOx-limited 레짐을 분류하여 폭염일과 비폭염일의 오존 생성 레짐 및 오존 농도 차이와 시간별 일변화를 비교한다. 또한 SHAP 분석을 통해 기온, 일사량 및 기타 폭염 관련 요인이 지표 FNR과 오존 농도 변화에 미치는 기여도를 정량화하여 폭염 강도에 따른 레짐 전환 특성을 규명한다. 나아가 폭염에 따른 오존 증가와 $PM_{2.5}$ 탄소성분(OC/EC) 변화를 활용하여 복합 건강 영향을 평가하고, 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 추정 결과의 불확실성을 신뢰구간으로 제시한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2026-03-02-008).

1D4

CMAQ-Aging 모의를 활용한 제5차 미세먼지 계절관리제 기간 $PM_{2.5}$ 성분 및 대기 연령 특성 분석

CMAQ-Aging Analysis of $PM_{2.5}$ Chemical Composition and Atmospheric age Characteristics during the 5th Seasonal PM Management Period in Korea

한승희, 강진구

안양대학교 환경공학과

겨울철 및 초봄의 $PM_{2.5}$ 화학조성은 지역의 배출 특성, 기상조건, 화학반응 및 광역수송의 영향을 복합적으로 받는다. 오염물질 농도와 성분관측자료만으로는 오염물질이 비교적 최근의 배출과 관련된 것인지, 배출 이후 장시간의 수송·화학변환 및 축적 과정을 거친 것인지 구분하기 어렵다. 본 연구에서는 제5차 미세먼지 계절관리제 기간을 대상으로 서해 배경지역인 백령도와 내륙 지역의 2차 무기 에어로졸((Sulfate (SO_4^{2-}), Nitrate (NO_3^-), Ammonium (NH_4^+)) 특성을 관측자료와 CMAQ-Aging 모의를 이용하여 분석한다. 특히 SO_2, NOx, HNO_3 및 NH_3 등 기체상 물질과 입자상 SNA의 농도 및 대기 연령 특성을 함께 분석하여, 이미 입자상으로 형성된 SNA의 광역수송과 기체상 물질의 수송 후 추가적인 입자상 전환 특성을 살펴보고자 한다. CMAQ-Aging은 오염물질과 전구물질을 배출 이후 경과시간에 따라 여러 age-bin으로 구분하여 추적하며, 화학반응으로 생성된 2차 물질은 전구물질의 대기 연령 정보를 계승한다. 이를 바탕으로 SO_2-sulfate, NOx/HNO_3-nitrate, NH_3-ammonium의 기체상·입자상 농도 변화와 대기 연령 분포를 비교하여, 백령도에서 내륙으로 이어지는 수송 및 기체-입자 전환 과정에서 SNA의 대기 연령 특성을 분석하고자 한다. 이를 통해 전구물질 또는 화학반응이 진행된 HNO_3, H_2SO_4, N_2O_5 등의 중간물질이 유입된 후 입자상으로 전환되는 경우와, 이미 형성된 입자상 SNA가 직접 유입되는 경우의 특성을 종합적으로 해석하고자 한다.

사사 이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 미세먼지관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

1D5

$PM_{2.5}$ 성분자료와 상대 독성계수를 활용한 권역별 독성가중 초미세먼지 평가

Regional Evaluation of Toxicity-Weighted $PM_{2.5}$ Using Chemical Composition Data and Relative Effect Potency

장 권

안양대학교 환경공학과

국내 초미세먼지($PM_{2.5}$) 질량농도는 감소 추세를 보이고 있으나, 동일한 질량농도에서도 화학조성에 따라 생물학적 영향이 달라질 수 있어 성분별 상대 독성을 고려한 보완적 평가가 필요하다. 본 연구에서는 2020~2024년 백령도, 수도권, 중부권, 호남권 및 영남권 대기환경연구소의 $PM_{2.5}$ 성분자료를 이용하여 측정지점별 화학조성과 금속성분 기반 독성잠재력을 비교한다. 결측 및 검출한계 미만 자료를 처리한 후 이온, 탄소 및 금속성분의 농도와 조성비를 권역·계절별로 분석한다. 본 연구에서 상대 독성계수는 Chen et al. (2025)이 세포 내 활성산소종 생성 반응에 기반해 제시한 산화스트레스 상대효력값(Relative Effect Potency, REP_OS)을 의미한다. V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn 및 Pb에 REP_OS를 적용하여 성분별 BaP 기준 등가농도(BEQ)를 산출하고, 이를 합산해 8개 금속성분의 상대적 산화스트레스 유발잠재력을 평가한다. 산화상태에 따라 REP가 크게 달라지는 원소는 민감도 분석을 수행한다. $PM_{2.5}$ 질량농도와 합산 BEQ의 상관성 및 권역별 순위 차이를 평가하고, 8개 금속 내 질량기여율과 BEQ 기여율을 비교하여 상대적으로 BEQ 기여율이 높은 성분을 도출한다. 또한 기온, 상대습도 및 풍속과 합산 BEQ의 상관성을 계절별로 분석한다. 본 연구는 인체 건강위험을 직접 정량화하는 것이 아닌 in vitro REP_OS 기반 스크리닝 평가로서, 질량농도 중심의 $PM_{2.5}$ 평가를 보완하고 권역별 대기질 관리에서 우선 검토할 금속성분을 선별하기 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

사사 이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 미세먼지관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

1D6

해안 지역의 야간 오존 고농도 현상과 원인 분석

High Nocturnal Ozone Concentrations in Coastal Areas: Characteristics and Contributing Factors

신민영, 강차오름

포항공과대학교 환경공학부

오존(O_3)은 광화학적 생성으로 인해 일반적으로 주간에 높은 농도를 보이는 대기오염물질이지만, 야간까지 고농도 현상이 지속되기도 하며, 국내에서는 이러한 현상이 특히 해안 지역에서 빈번하게 관측되고 있다. 이에 본 연구에서는 국내 야간 고농도 오존의 전국적인 발생 특성을 파악하고, 통계 모델을 활용하여 해안 및 내륙 지역의 주야간 오존 지속성을 정량화하였다. 전국적으로 해안 지역의 야간 오존 농도는 내륙 지역보다 평균 3.3 ppb 높았으며($p<0.001$), 야간 오존이 주간 오존보다 높은 날 역시 해안 지역에서 평균 12%로 전국 평균인 9%에 비해 높았다. 해안 지역의 주야간 오존 지속성은 내륙 지역보다 높았으며, 이는 해안 지역의 높은 야간 오존 농도에 기여하는 것으로 나타났다. 특히 오존 고농도 기간(4~10월) 해안 지역의 주야간 오존 지속성은 0.291 (95% CI: 0.270~0.313)로 내륙 지역의 0.208 (95% CI: 0.198~0.217)보다 뚜렷하게 높았다. 메타 회귀 분석은 전구물질 및 기상 조건이 지역에 따른 주야간 오존 지속성 차이를 설명할 수 있음을 보였으며, 해안-내륙 간 차이를 설명하는 요인을 구체화하였다. GEOS-Chem 모델은 통계적으로 확인된 주야간 오존 지속성 결과를 뒷받침하며, 해안 지역에서 높은 주야간 오존 지속성이 나타나는 물리적 근거를 제공하였다. 본 연구는 해안-내륙 간 주야간 오존 지속성 차이와 이와 관련된 전구물질 및 기상 조건을 규명함으로써 지역적 특성을 고려한 오존 관리전략 수립에 기초자료를 제공하며, 야간까지 이어지는 장시간 오존 노출이 국내 오존 노출 및 건강영향 평가에 미치는 영향을 재평가할 필요성을 제시한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-03-02-008).

1E1

한국형 BVOCs 성분 배출 분포 추적기술 개발

Development of a Korea-specific BVOCs Emission Inventory and Tracking Technology

손윤석, 오용환, 김대현, 정민찬, Mahshad Ranjbaran, 천소현, 김나현, 김서현, 김조천[1], 윤종상[2], 이형주[3], 제선미[4], 최기철[5]

국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [1]건국대학교 사회환경공학부, [2]가톨릭대학교 에너지환경공학과, [3]포항공과대학교 환경공학부, [4]국립산림과학원 생활권도시숲연구센터, [5]한국환경연구원 대기환경연구실

생물기원 휘발성유기화합물(BVOCs)은 대기 중 오존 및 에어로졸 형성에 기여하지만 국내 배출량 산정에는 해외 배출계수와 모델 자료가 주로 활용되어 국내 수종과 기후 특성이 충분히 반영되지 못한 실정이다. 또한 연 단위 중심의 기존 배출목록은 BVOCs 배출의 계절, 기상 변동성과 화학종별 차이를 구체적으로 제시하는 데 한계가 있다. 본 연구는 국내 환경을 반영한 BVOCs 실측자료를 생산하고 수종·성분별 배출계수 데이터베이스와 한국형 배출량 산정 및 분포추적체계를 구축하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 4개 권역과 4계절을 대상으로 12종 이상의 대표 수종과 20종 이상의 BVOCs 성분을 조사하고 표준화된 현장 시료채취 및 분석체계를 바탕으로 배출속도, 성분분포 및 환경영향 자료를 확보한다. 실측자료는 생체량 밀도와 엽면적지수(LAI) 등 식생정보 및 기상인자와 연계하여 수종, 지역, 계절별 배출특성을 데이터베이스화하고 국내 환경변수를 반영한 배출량 산정모델의 입력자료로 활용한다. 구축된 모델은 전국 격자 배출지도와 기초지자체 단위 배출목록 산정에 적용하며 관측자료 및 화학수송모델을 활용하여 화학종별 기여도를 검증한다. 연구 전 과정에는 기관 간 교차검증과 품질관리를 적용하고 현장조사부터 배출량 산정까지 활용할 수 있는 운영지침을 마련한다. 최종적으로 산출자료의 구조와 필수정보를 CAPSS-NEAS 요구체계에 맞추어 국가 대기오염물질 배출정보와 연계 가능한 통합관리 기반을 마련하고자 한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 「CLEAN-AIR 기술개발」 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RS-2026-25502680).

1E2

BVOCs 현장 시료채취를 위한 표준 시스템 구축 및 운영체계 마련

Development of a Standardized Field Sampling System and Operational Framework for BVOCs

오용환, 정민찬, 천소현, 김대현, Mahshad Ranjbaran, 김서현, 김나현, 손윤석

국립부경대학교 지구환경시스템과학부

국내 BVOCs 배출특성을 지속적으로 조사하기 위해서는 지역과 계절이 달라져도 동일한 방식으로 설치하고 운영할 수 있는 현장 측정시스템이 필요하다. 기존 현장 측정은 장비별 구성과 설치조건이 달라 조사 때마다 운전환경을 재구성해야 하며 이동과 설치 과정에서 유량 변화, 외부공기 유입 및 시료 오염 등이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 현장에서 반복적으로 운용할 수 있는 BVOCs 측정시스템을 설계·제작하고 이를 안정적으로 운영하기 위한 표준화 기반을 마련하였다. 개발 시스템은 식생 챔버, 정제공기 공급, 유량제어, 환경조건 측정 및 시료채취 기능이 하나의 운전 흐름으로 연계되도록 구성하였으며 현장 이동성, 조립 편의성, 운전 안정성 및 유지관리성을 고려하였다. 또한 다양한 수종과 조사환경에 대응할 수 있도록 주요 구성부를 모듈화하고 설치 후 시스템 점검부터 안정화, 시료채취 및 종료까지의 운전 순서를 체계화하였다. 측정자가 현장에서 시스템의 운전상태를 쉽게 확인하고 이상 발생 시 구성부별로 점검할 수 있도록 전체 구조와 운전방식을 단순화하였다. 제작된 시스템은 실제 현장에 적용하여 설치와 운전 가능성을 확인하고 반복 운전 과정에서 나타난 문제점을 바탕으로 구성과 운영방법을 보완하였다. 본 발표에서는 측정시스템의 설계 방향, 제작된 시스템의 구성, 현장 설치 및 운전 과정과 적용 사례를 제시하고자 한다. 구축된 시스템은 향후 여러 지역과 계절에 걸친 BVOCs 조사를 일관된 절차로 수행하고 국내 수종별 배출계수 자료를 안정적으로 생산하기 위한 기반으로 활용될 수 있다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 「CLEAN-AIR 기술개발」 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RS-2026-25502680).

1E3

현장 시료채취를 통한 BVOCs 성분분포 및 배출특성 비교

Field-based Comparison of BVOCs Composition Profiles and Emission Characteristics

정민찬, 천소현, Mahshad Ranjbaran, 오용환, 김대현, 김나현, 김서현, 손윤석

국립부경대학교 지구환경시스템과학부

BVOCs 배출 특성은 수종 고유의 생리적 특성과 현장 환경이 함께 반영되며, 주요 성분과 구성비는 수종에 따라 다르게 나타난다. 따라서 수종별 배출성분을 구분하고 배출수준을 비교하기 위해서는 동일한 조건에서 확보된 현장 시료와 성분 프로파일이 필요하다. 본 연구에서는 영남권 조사대상지의 철쭉, 삼나무, 느티나무 및 편백을 대상으로 시료를 채취하고 수종별 BVOCs의 성분분포와 배출특성을 비교하고자 하였다. 대상 식생을 enclosure chamber안에 위치하고 정제공기를 일정하게 공급한 후 챔버 유출공기 중 BVOCs를 흡착관에 포집하였다. 시료채취는 수종별로 동일한 운전조건에서 반복 수행하였으며 현장 공시료를 함께 확보하여 채취와 운반 과정에서 발생할 수 있는 영향을 확인하였다. 시료채취 중에는 챔버 내부의 온도, 상대습도, 이산화탄소 및 광합성유효복사를 측정하여 배출특성 해석을 위한 환경자료로 활용하였다. 포집시료는 TD-GC/MS로 분석하여 이소프렌, 모노테르펜 및 세스퀴테르펜을 포함한 주요 BVOCs를 정성, 정량하였다. 시료채취 종료 후에는 대상 잎의 투영엽면적과 건중량을 측정하고 챔버 유입·유출 농도와 운전유량을 바탕으로 산정된 배출속도의 정규화에 활용하였다. 본 연구에서는 네 수종의 주요 검출성분, 화학종별 구성비 및 배출수준을 제시하고 침엽 수종과 활엽 수종의 배출특성을 비교하였다. 이를 통하여 환경조건에 따른 주요 성분의 변화양상을 검토하고 국내 주요 수종의 배출특성 자료와 배출계수 데이터베이스 구축을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의「CLEAN-AIR 기술개발」사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RS-2026-25502680).

1E4

한국형 BVOCs 배출계수 DB 구축을 위한 주요 수종의 현장 배출특성 측정

Field Measurement of BVOC Emissions from Major Tree Species for Developing a Korean Emission Factor Database

최인영, Dinh Trieu Vuong, 민지홍[1)], 이다연[1)], 박병규, 임수길, 김조천

건국대학교 실내환경관리센터, [1)]건국대학교 사회환경공학부

본 연구는 현재 국내 주요 수종에서 배출되는 생물기원 휘발성유기화합물(Biogenic Volatile Organic Compounds, BVOCs)의 배출 특성을 정량적으로 평가하고, 한국형 BVOCs 배출계수 데이터베이스 구축을 위한 기초자료를 확보하기 위한 것이다. 주요 대상 수종을 중심으로 현장 적용형 enclosure chamber 기반 BVOCs 측정 시스템을 구축하였으며, 챔버 내부에서 방출되는 BVOCs는 흡착 트랩을 이용하여 채취하였다. 분석 대상 물질은 isoprene, monoterpenes 및 sesquiterpenes를 포함한 주요 BVOCs로 설정하였으며, GC/MS/TD를 활용한 정성·정량 분석 조건을 확립하기 위한 연구도 동시에 진행되고 있다. 특히 다양한 물리·화학적 특성을 갖는 BVOCs의 효율적인 분리 및 분석을 위해 서로 다른 선택성을 갖는 세 종류의 GC 컬럼(DB-1, DB-624, DB-35ms)을 적용하여 최적 분석 조건을 검토하고 있다. 또한 현장 샘플링 과정에서 채취 유량 및 총 채취량 등 주요 운전 조건을 최적화하고 있으며, 온도, 광량 및 토양 수분 등 BVOCs 배출에 영향을 미치는 주요 환경 인자를 함께 측정하여 수종별 배출 특성과 환경 조건 간의 상관성을 평가하는 작업이 진행 중이다. 향후 계절별 반복 측정을 통해 수종별 BVOCs의 조성 및 배출 속도를 산정하고, 이를 기반으로 국내 식생 특성을 반영한 배출계수를 도출할 예정이다. 본 연구를 통해 구축하고자 하는 현장 측정 및 분석 체계는 향후 한국형 BVOCs 배출계수 데이터베이스 구축과 국가 대기오염물질 배출목록의 정확도 향상에 기여할 수 있는 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의「CLEAN-AIR 기술개발」사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RS-2026-25502680).

1E5

국내 주요 수종별 BVOCs 배출계수 개발을 위한 중복 측정 기반 현장 배출특성 분석체계 구축

Establishment of a Duplicate-Sampling-Based Field Analytical Framework for BVOCs Emission Factor Development and Characterization of Emissions in Korea

윤종상

가톨릭대학교 에너지환경공학과

생물기원 휘발성유기화합물(BVOCs)은 대기 중 오존 및 이차유기에어로졸 형성에 관여하며, 지역별 식생 분포와 기상·환경 조건에 따라 배출 특성이 크게 달라질 수 있다. 그러나 국내 주요 수종에 대한 현장 실측 기반의 BVOCs 배출계수 자료는 제한적이며, 국가 대기배출목록 고도화를 위해서는 국내 식생 및 환경 특성을 반영한 신뢰도 높은 배출계수 데이터베이스 구축이 요구된다. 본 연구는 한국형 BVOCs 배출계수 DB 구축을 위한 기반 연구로서, 국내 수종에서 배출되는 주요 BVOCs 성분 20종 이상을 정량·정성 분석할 수 있는 현장 시료채취 및 분석시스템을 구축하고, 분석과정에 대한 표준 운용 절차를 마련하고자 하였다. 현장 실측은 기온대, 기후 조건, 토지피복 및 식생 유형 등 환경요인을 고려하여 구분한 A 권역(충정도·경기도)을 대상으로 수행하였다. 측정에는 독립적으로 운용 가능한 2대의 시료채취 시스템을 구축하였으며, 모든 실측에서 2대의 측정 시스템을 동시 운용하는 Duplication 체계를 적용하였다. 이를 통해 동일 수종 및 동일 측정 조건에서 확보된 시료의 재현성을 검토하고, 측정·시료채취·운반·전처리·분석 단계에서 발생할 수 있는 불확실성을 관리하고자 하였다. 각 수종은 최소 3일 이상, 약 1주 내외의 기간 동안 실측하여 일변동 및 측정일 간 변동성을 고려한 배출 특성 자료를 확보하였으며, TD-GC/MS를 활용한 BVOCs 성분 분석, 표준물질 기반 검량 및 자료 검증 절차를 포함하는 분석 절차를 정립하고자 하였다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 「CLEAN-AIR 기술개발」 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RS-2026-25502680).

1E6

한국형 BVOCs 배출량 산정모델 개발을 위한 고해상도 입력자료 구축 및 적용성 평가

Development of a Korea-specific BVOCs Emission Model: Construction and Evaluation of High-resolution Input Datasets

이형주, 신민영, 김나래

포항공과대학교 환경공학부

본 연구는 국내 기후·식생·토지피복 특성을 반영한 한국형 BVOCs(biogenic volatile organic compounds) 배출량 산정 모델을 위한 기반을 구축하는 것을 목적으로 한다. 기존 BVOCs 배출량 산정에는 MEGAN 및 BEIS와 같은 국외 모델이 널리 활용되고 있으나, 국내 식생의 공간적 이질성과 수종 구성 특성을 충분히 반영하기에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 국외 BVOCs 배출량 산정모델의 입력자료 체계를 검토하고, 국내 환경에 적합한 고해상도 입력자료 구축 및 활용 가능성을 평가하였다. MEGAN 및 BEIS의 주요 입력자료와 산정 구조를 분석하고, 기존에 활용되는 MODIS 기반 PFT 및 LAI 자료와 국내 고해상도 식생자료 간의 차이를 검토하였다. 특히 국내 산림지역은 다양한 수종이 혼재하여 분포하므로, 500~1,000 m 해상도 자료에서는 하나의 격자 내 수종별 점유율이 실제 분포와 다르게 나타날 가능성이 있다. 이에 환경공간정보서비스의 토지피복도와 산림청 임상도 정보를 구축하고, Sentinel-2 등의 위성 자료를 활용하여 고해상도 공간 규모에서의 식생 입력자료 구축을 수행하였다. 이를 기반으로 고해상도 자료에서 나타나는 수종 구성과 식생 분포를 기존 중·저해상도 자료와 비교하고, 격자 해상도에 따른 차이를 검토하였다. 또한 기상 입력자료는 기상청 관측 및 격자자료와 ERA5-Land 재분석자료를 활용하여 주요 기상변수의 시·공간적 입력체계를 구축하였다. 식생·기상자료 등은 공통 격자체계로 정합하여 국내 환경에 적합한 BVOCs 배출량 산정을 위한 입력자료 체계를 구성하였다. 향후 국내 주요 수종의 실측 기반 배출계수와 연계하여 고해상도 식생정보를 반영한 한국형 BVOCs 배출량 산정 모델로 확장하고자 한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 「CLEAN-AIR 기술개발」 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RS-2026-25502680).

1E7

숲의 수관층 및 수관층 외부의 계절·이벤트별 BVOCs와 오존 농도 특성 분석

Analysis of Seasonal and Event-Based Characteristics of BVOCs and Ozone Concentrations within and above Forest Canopies

제선미, 정찬식, 김채완

국립산림과학원 생활권도시숲연구센터

대기화학 모델들에서 숲의 BVOCs 방출량이 높게 추정되면서, BVOCs가 미치는 긍정적 또는 부정적 영향에 대한 관심도가 증가하고 있다. 숲은 BVOCs 방출원이기도 하지만, 대기오염물질을 흡수 또는 흡착하여 정화할 수 있는 기능 또한 가지고 있다. 따라서 숲에 의한 대기오염물질 생성 및 저감의 두 가지 기능 모두를 고려한 평가가 필요하다. 도시숲을 이루고 있는 수목은 종별 BVOCs 방출 특성이 다르다. 또한, 온도와 빛뿐만 아니라 가뭄, 토양 영양 상태, 대기오염물질(오존, 질소산화물 등), 병충해 등 수많은 환경 요인과 상호작용에 따라 BVOCs 방출 특성은 달라질 수 있다. 실험실 환경에서의 단편적 연구만으로는 실제 숲의 복잡한 환경에서의 방출량을 예측하는 데 한계가 있으며, 다양한 환경 조건 및 숲의 유형에 따른 BVOCs 방출 특성에 대한 장기적인 데이터가 아직은 부족한 상황이다. 본 연구에서는 국립산림과학원 산림미세먼지측정넷의 관측자료를 기반으로 2024년부터 현재까지의 숲의 수관층(5 m), 수관층 외부(15 m) 지점에서의 계절별 및 특정 이벤트(폭염, 건조 등)에 따른 BVOCs 방출특성을 분석하고 숲 내부(2 m) 지점에서의 오존(O_3) 등의 대기오염물질 수준과 비교·분석하였다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 「CLEAN-AIR 기술개발」 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RS-2026-25502680).

1F1

지역 맞춤형 관리방안 도출을 위한 우리나라 지표 오존의 장기 추세 및 고농도 지역의 시공간 특성 분석

Long-Term Trends and Spatiotemporal Characteristics of High-Ozone Areas in South Korea, 2001-2025: Toward Spatially Differentiated Ozone Management

서정빈, 한지현, 이승민

한국환경연구원

미세먼지 중심 정책으로 우리나라의 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도는 꾸준히 감소한 반면, 호흡기·심혈관 질환 등 인체 피해를 유발하는 지표 오존 농도는 지속적으로 증가하고 있다. 오존 8시간 대기환경기준 달성률 또한 1% 미만 수준으로 적극적인 관리가 필요한 시점이나, 구체적인 이행 수단이 충분하지 않은 상황이다. 이에 본 연구에서는 우리나라 지표 오존의 장기 변화 추세와 고농도 오존 지역의 특성 분석을 바탕으로 지역별 오존 관리를 위한 방안을 제시하고자 한다. 2001~2025년 도시대기측정망 오존 1시간 자료를 활용하였으며, 장기 변화 추세 분석을 위해 Mann-Kendall과 Theil-Sen 방법을 적용하였다. 고농도 오존 사례는 우리나라 대기환경기준(1시간 0.1 ppm, 8시간 0.06 ppm)을 기준으로 선별하였으며, 국가 대기오염물질 배출량 인벤토리(CAPSS)를 활용한 배출특성 및 농도 자료를 활용한 오존 생성 민감도를 분석하였다. 전구물질인 NO_2 배출 감소에도 지표 오존 농도는 연평균 0.62 ppb/yr 추세로 증가해 비선형적 NO_x-O_3 관계를 보였으며, 광화학 반응이 활발한 4~6월에 가장 강한 증가 추세를 보였다(0.78~0.91 ppb/yr). 1시간 평균 100 ppb 초과 시간은 2001년 대비 2025년 3배 이상 늘었으며, 서울은 2024년 관측소당 초과시간이 최대치를 기록하였다. 2025년 사례에서는 대도시뿐 아니라 NO_x, VOCs 배출이 많은 지역의 풍하지역에서도 고농도가 빈번하게 발생하였다. 이는 오존 생성이 전구물질의 배출뿐만 아니라 광화학 반응 및 기상학적 수송의 영향을 받음을 보여주었으며, 이러한 결과는 배출관리와 고농도 오존 노출관리를 구분하여 접근할 필요가 있음을 시사한다. 이에 본 연구에서는 배출량과 농도를 함께 고려해 지역을 네 가지 유형으로 구분하여 제시하였다.

사사 본 논문은 한국환경연구원의 2026년도 일반사업 「Post 미세먼지·기후위기 시대의 딜레마, 고농도 오존 대응 전략(GP2026-11)」의 지원으로 수행되었습니다.

1F2

오존 전구물질(NOx·VOCs)의 지역별 배출 특성과 관리 방향

Regional Emission Characteristics of Ozone Precursors (NOx and VOCs) and Management Implications

한지현, 윤혜상, 나건수, 이승민

한국환경연구원

고농도 오존의 관리를 위해서는 오존의 주요 전구물질인 NOx와 휘발성유기화합물(이하, VOCs)의 배출 특성에 대한 이해가 선행되어야 한다. 이에 본 연구에서는 국가미세먼지정보센터에서 공표한 2023년 대기오염물질 배출량 인벤토리(이하, CAPSS) 자료를 이용하여 NOx와 VOCs의 주요 배출원과 지역별 배출 특성을 분석하고자 하였다. 먼저 부문별 배출량을 바탕으로 두 물질의 주요 배출원 구성을 비교하고, NOx는 도로·비도로 등 이동오염원과 연소 부문을, VOCs는 유기용제 사용과 생산공정을 중심으로 배출원별 기여 특성을 파악하고자 하였다. 다음으로 광역 및 시군 단위에서 배출량의 공간 분포를 분석하고자 하였다. 광역 단위에서는 NOx와 VOCs 모두 배출량이 가장 큰 경기도를 대상으로 그 특성을 검토하고, 시군 단위에서는 161개 시군의 배출량 상위 지역을 분석하여 이들 지역에 배출이 집중되는 정도를 정량적으로 파악하고자 하였다. 그 결과 전체의 약 9%에 해당하는 상위 15개 시군이 전국 배출량의 절반 이상을 차지하는 집중 구조에 주목하여, 이들 다배출 지역의 주요 배출원을 규명하고 배출 특성에 따라 지역을 유형화하고자 하였다. 아울러 2016년부터 2023년까지의 재산정 CAPSS 자료를 이용하여 다배출 지역의 장기적인 변동성을 분석하고자 하였다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 배출 집중 지역에 대한 관리지역 지정, 지역 유형별 주요 배출원 관리 등 오존 전구물질의 지역 맞춤형 관리 방안을 제시하고자 하였다.

사사 본 논문은 한국환경연구원의 2026년도 일반과제 「Post 미세먼지·기후위기 시대의 딜레마, 고농도 오존 대응 전략(GP2026-11)」의 지원을 받아 수행된 연구임.

1F3

고농도 오존 대응을 위한 지역별 오존생성 기여도 비교

A Comparative Study on Regional Ozone Formation Contributions for High-Concentration Ozone Management

김 정, 한지현[1], 이승민[1], 송승주[2], 김형천[2], 유 철[2]

㈜이아이랩, [1]한국환경연구원, [2]기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터

오존 원인물질로 알려져 있는 휘발성유기화학물질(VOCs)과 미세먼지는 단일 물질이 아닌 복합 물질이며, VOCs 배출량만으로는 오존생성 기여도를 정확히 평가하기 어렵다. 또한 배출원별 배출 특성 자료가 부족한 실정이다. 따라서 제3차 대기환경개선 종합계획의 목표 달성과 효과적인 오존 제어를 위해서는 인벤토리 구축 및 국내 대기오염물질 배출원별 오존생성 유발물질 배출 특성 파악이 필요하다. 오존생성 유발물질 배출 특성 파악을 위하여 국내·외 VOCs 화학종 자료 조사 및 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터에서 다년간 연구를 통해 구축한 한국형 화학종(K-Speciate) 자료, CAPSS 배출원별 VOC 배출량을 활용하여 57개 오존생성 유발물질 배출량을 추정하고자 한다. 지역별 오존생성 기여도 추정은 POCP와 MIR 계수를 적용한 지역별 오존생성 가중치 배출량을 활용하여 기여도를 분석하고자 한다. 오존생성 유발물질 배출 특성 파악을 위한 대상 지역은 17개 광역시도, 고농도 오존 특성 지역, VOCs 배출이 많은 주요 지역을 선정하여 지역별 오존 농도와 오존생성 기여도를 비교하고자 한다.

사사 본 논문은 한국환경연구원의 2026년도 일반과제 「Post 미세먼지·기후위기 시대의 딜레마, 고농도 오존 대응 전략(GP2026-11)」의 지원을 받아 수행된 연구임.

1F4

오존 저감을 위한 유기용제 VOCs 배출 관리 개선 방안

Improvement of VOCs Emission Management for Organic Solvent Use to Reduce Ozone

이승민, 한지현, 정은혜, 나건수, 서정빈

한국환경연구원 기후대기전략연구본부 대기환경연구실

고농도 오존 관리를 위해서는 주요 전구물질인 휘발성유기화합물(VOCs)의 배출 관리가 중요하다. 2023년 기준, 국내 VOCs 배출 부문 가운데 유기용제 사용 부문이 전체 배출량의 약 59%로 가장 큰 비중을 차지했다. 그러나 현행 유기용제 VOCs 관리 제도는 도료 등 일부 제품의 함유기준과 사용시설의 설비기준을 중심으로 구성되어 있어 관리 대상과 수단의 보완이 필요하다. 본 연구에서는 국내 유기용제 제품과 사용시설의 주요 관리 제도와 정책을 분석하고, 국외 사례와 비교하여 개선 방향을 검토하였다. 검토 결과, 제품 관리에서는 VOCs 함유기준이 도료 등 일부 제품에만 적용되고 있어 다양한 유기용제 제품에서 발생하는 VOCs를 관리하는 데 한계가 있는 것으로 파악되었다. 이에 희석제, 접착제, 세척제 등 다른 유기용제 제품에도 VOCs 함유기준을 마련하여 관리 대상을 확대하고, 제품별 판매량과 화학조성 정보를 축적하여 배출 인벤토리 산정과 관리 우선순위 설정에 활용할 필요가 있다. 시설 관리에서는 설비 규모를 중심으로 VOCs 배출 수준을 파악하고 관리하고 있으나, 동일한 규모의 시설도 가동률과 용제의 종류·사용량에 따라 실제 배출량이 달라질 수 있어 이러한 차이를 반영하기 어려운 것으로 파악되었다. 이에 배출시설 신고 항목에 용제 종류와 예상 사용량을 추가하고, 구매량에 기초한 연간 실사용량 자료를 구축하여 국가 배출량 산정과 시설 관리에 활용할 필요가 있다. 이러한 제품의 함량·유통 정보와 시설의 용제 사용정보 구축을 통해 VOCs 배출 특성과 오존 생성 기여도를 고려한 배출 관리가 가능할 것으로 기대한다.

사사 본 논문은 한국환경연구원의 2026년도 일반과제 「Post 미세먼지·기후위기 시대의 딜레마, 고농도 오존 대응 전략」의 지원을 받아 수행된 연구임(GP2026-11).

1F5

서울시 자치구 유형별 특성을 반영한 오존 관리 방안

Ozone Management Strategies for Seoul Reflecting District-Type Characteristics

송민영, 신성균, 조가영, 전혜준, 함수한

서울연구원 지속가능연구실

서울의 오존 농도는 지속적인 상승 추세를 보이고 있으며, 고농도 오존 노출에 따른 시민 건강 피해가 우려됨에 따라 서울의 시·공간적 오존 발생 여건을 반영한 정책의 실효성 제고가 필요하다. 서울의 오존 농도는 연평균 기준으로는 전국 평균을 밑돌지만, 6~9월 여름철에는 오히려 전국 평균을 상회하는 경향을 보인다. 그러나 현행 오존 관리 대책은 고농도 오존이 실제로 발생하는 시간대와 지역적 특성을 충분히 반영하지 못해 대응의 적시성과 공간적 정합성이 확보되지 못하는 구조적 한계를 지닌다. 특히 고농도 오존이 빈번한 도심 및 주거 밀집 지역에 대한 정밀 대응이 어렵고, 일부 저감 대책은 시민 체감도와 인식 수준이 낮아 실질적인 행동 변화로 이어지지 못하고 있다. 서울은 높은 인구밀도, 밀집된 교통량, 광범위한 비산배출, 분지 지형에 따른 대기 정체 등 복합적 도시 특성으로 인해 오존 노출에 따른 건강 리스크가 상대적으로 크다. 따라서 기존의 일률적 관리 체계에서 벗어나 지역 특성을 반영한 맞춤형 집중 특화 관리 전략으로의 전환이 요구되며, 정밀 분석 기반의 대응 전략, 고농도 발생 지역에 대한 선제적 저감 조치, 시민 체감도를 높이는 정보 제공 및 행동 유도 방안이 함께 마련되어야 한다. 이 연구는 서울시의 고농도 오존 발생 특성과 기존 정책의 효과성을 종합적으로 분석하고, 실효성을 높일 수 있는 특화 정책 방향과 실행 전략을 제시함으로써 시민 건강권 보호와 도시 대기환경 개선에 기여하고자 한다.

사사 본 논문은 서울특별시 및 서울연구원 지원을 받아 수행된 연구임.

1F6

창원특례시 오존 농도 특성 분석 및 관리방안

Analysis of Ozone Concentration Characteristics and Management Strategies in Changwon

조현영, 이자성, 윤재봉, 정우석

창원시정연구원

본 연구는 최근 고농도 오존 발생과 오존 노출에 따른 건강영향에 대한 우려가 증가함에 따라 창원특례시의 오존 농도 특성과 주요 영향요인을 분석하고 지역 특성을 반영한 맞춤형 오존 관리방안을 마련하는 것을 목적으로 수행하였다. 이를 위해 대기오염측정망 자료를 활용하여 오존 및 주요 대기오염물질의 장기 변화와 계절·시간·공간적 특성을 분석하고 휘발성 유기화합물(VOCs) 측정자료와 배출량 자료, 위성자료 등을 종합적으로 검토하였다. 분석 결과, 창원특례시의 오존 농도는 봄철부터 증가하여 5~6월에 높은 수준을 보였으며, 연안과 내륙 간 농도 및 일변화 특성에도 차이가 나타났다. 또한 오존 전구물질인 NO_2는 장기적으로 감소하는 반면, VOCs의 영향은 상대적으로 중요해지고 있는 것으로 분석되었다. 특히 창원지역 VOCs 배출은 코일 코팅, 가정 및 상업용 유기용제 사용, 선박제조 등 지역의 산업구조와 생활권 활동 특성이 복합적으로 반영되어 있으며 주요 배출원과 연관된 대기배출사업장의 대부분이 중·소규모 사업장으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 산업단지 VOCs 집중관리, 생활계 VOCs 저감, 고농도 오존 발생시기 집중관리, 과학적 관측·예측 기반 강화 등을 주요 관리방향으로 제시하였다. 이러한 결과는 일률적인 오존 농도 관리에서 벗어나 창원의 산업·공간·계절적 특성을 고려한 예방 중심의 지역 맞춤형 오존 관리체계를 구축하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

1G1

희석법 기반 여과성-응축성 미세먼지 동시측정장비 개발

Development of a Dilution-Based Filterable-Condensable Fine Dust Simultaneous Instruments

김승재, 안정언, 강천웅[1], 전기준[1]

㈜파코코리아인더스, [1]인하대학교 환경공학과

국내 대기 배출 관리가 여과성 미세먼지(FPM)에 편중되어 응축성 미세먼지(CPM)가 관리 사각지대에 놓임에 따라, 국가 배출량 통계와 실제 대기질 간의 괴리가 발생하고 있다. 이에 2023년 대기오염공정시험기준(ES 01320.1) 제정 및 2025년 관련 법령 강화 등 규제 기반이 마련되었다. 그러나 현행 기준은 FPM과 CPM 동시 측정을 위해 2개 이상의 측정공(Sampling port)을 요구하여, 단일 측정공만을 보유한 대다수의 산업 현장에는 즉각적으로 적용하기 어려운 물리적 한계가 존재한다. 본 연구는 이러한 현장의 제약을 극복하기 위해, 하나의 측정공에서도 FPM과 CPM을 동시에 측정할 수 있는 '단일공 동시 시료 채취 시스템' 개발을 목적으로 한다. 기존 표준측정법인 희석법(Dilution method)의 측정 원리와 핵심 성능(희석 배수, 체류 시간 등)은 안정적으로 유지하되, 시스템을 획기적으로 소형·경량화하여 이동성 및 운용 편의성을 높였다. 이를 통해 현장 적용성을 극대화하고, 향후 본격화될 CPM 배출 규제 및 저감 기술 연구에 신뢰성 있는 기초 데이터를 제공하고자 한다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25500877).

1G2

대형사업장 배출 CPM 저감을 위한 습식 전기집진기 개발

Development of a Wet Electrostatic Precipitator for Reducing Condensable Particulate Matter (CPM) Emissions from Large-Scale Industrial Facilities

신동호, 허지은, 조윤행

한국에너지기술연구원 대기청정연구실

응축성 미세먼지(CPM)는 굴뚝 배출 조건에서는 가스 상태로 존재하다가 배기가스가 하류에서 냉각됨에 따라 미세·초미세 입자로 응축되며, 이로 인해 기존 건식 입자 포집장치로는 대부분 포집되지 못하고 대기 중으로 배출된다. 배출된 CPM은 대기 중에서 $PM_{2.5}$와 2차 생성 에어로졸의 주요 원인 물질로 작용한다. 특히 기존 연구에 따르면 대형 사업장에서 배출되는 응축성 미세먼지의 양이 여과성 미세먼지(FPM)에 필적하거나 이를 초과하는 경우도 보고되고 있으나, 현재까지 이에 대한 효과적인 저감 대책은 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 발전, 제철, 화학, 소각 등 대형 사업장에서 배출되는 응축성 미세먼지를 저감하기 위한 습식 전기집진기를 개발하고자 한다. 제안하는 습식 전기집진기는 기존 방식과 달리 충전식 기술을 도입하여 에너지 저감과 장치 안정성 향상에 중점을 두었다. 본 장치는 전기 습윤(electro-wetting) 현상을 활용하여 고전압이 인가된 전극을 가스 상에 직접 노출시키지 않고도 오염 입자가 부유하는 가스 상에 강한 전계를 생성·유지할 수 있다. 기존 전기집진기는 고수분 조건에서 스파크 발생으로 인해 일정 강도 이상의 전계를 형성하기 어려운 반면, 제안 기술은 절연체로 코팅된 전극을 사용함으로써 고수분 조건에서도 절연체의 절연파괴전압에 이르기까지 전계 강도를 높일 수 있어, 전계 강도 증가에 따른 입자 포집 효율의 극대화가 가능하다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25500878).

1G3

제철공정에서의 대기오염물질 저감기술 개발 현황

Recent Developments in Air Pollution Control Technologies for Steelmaking Processes

변영철, 민정기, 권화빈, 서승완, 김환기

포항산업과학연구원 광양환경연구그룹

미세먼지 저감, 지구 온난화, ESG 경영 등의 화두에 따라 산업계, 특히 제철산업에 대한 환경 관리는 오랫동안 핵심적인 과제로 인식되어 왔으며 최근 그 중요성이 더욱 부각되고 있다. 제철산업의 환경 관리에서 대기오염물질의 배출 저감은 가장 중요한 과제 중 하나이며, 대표적인 관리 대상 물질로 질소산화물, 황산화물 및 입자상 먼지를 들 수 있다. 본원은 이들 대기오염물질의 배출 저감을 위한 기술 개발과 현장 실증을 꾸준히 수행해 왔으며, 최근에는 기존 저감기술에 AI를 접목하여 대기오염 방지설비의 운전·제어를 최적화하고 의사결정을 지원하기 위한 연구를 추진하고 있다. 이번 발표에서는 이러한 사례를 중심으로 제철산업의 미세먼지 배출 저감을 위한 기술개발 및 현장 실증 사례를 소개하고자 한다. 특히 개별 기술의 개발 성과뿐만 아니라, 변화하는 산업계의 환경관리 여건과 이에 대한 대응 전략을 함께 살펴보고, 그 과정에서 연구개발자로서 경험하고 느낀 점을 허심탄회하게 공유하고자 한다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25500878).

1G4

중소형 사업장 응축성 미세먼지 저감을 위한 배가스 냉각 특성 평가

Evaluation of Flue Gas Cooling Characteristics for Condensable Particulate Matter Abatement in Small- and Medium-Sized Industrial Facilities

김연진[1),2)], 안상권[1)], 박대훈[1)], 한방우[1),3)]

[1)]한국기계연구원 도시환경연구실, [2)]연세대학교 기계공학과, [3)]과학기술연합대학원대학교 융합기계시스템

응축성 미세먼지(condensable particulate matter, CPM)는 굴뚝 내부에서는 기체 상태로 존재하다가 대기로 배출된 직후 냉각·희석되면서 응축하여 입자를 형성하는 물질이다. 현행 배출 관리와 측정은 여과성 미세먼지(FPM)를 중심으로 이루어져 CPM은 상당 부분 누락되고 있으며, 굴뚝을 벗어난 뒤 생성되므로 사후 포집이 불가능하다는 점에서 관리의 사각지대에 있다. 특히 중소형 사업장은 방지시설이 상대적으로 단순하고 배가스가 고온으로 배출되는 경우가 많아 CPM 배출 기여가 클 것으로 예상된다. CPM을 저감하는 가장 직접적인 방법은 배출 이전에 배가스를 충분히 냉각시켜 응축시킨 뒤 포집하는 것이며, 따라서 응축기의 냉각 성능이 저감 효율을 좌우한다. 미세 액적 분무에 의한 증발 냉각은 넓은 열교환 면적 없이도 급속 냉각이 가능하여 설치 공간이 제한적인 중소형 사업장에 적합하다. 이때 액적의 크기와 분무량은 증발 속도와 잠열 흡수량을 결정하여 도달 온도와 온도 분포를 좌우하나, 이러한 액적 조건이 응축기 내 냉각 특성에 미치는 영향을 체계적으로 평가한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 전산유체역학(CFD) 해석을 이용하여 응축기 내부의 유동과 온도 분포를 모사하고, 배가스 조건과 냉각 조건을 변화시키며 냉각 특성이 어떤 경향으로 달라지는지를 살펴보았다. 이를 통해 CPM 응축에 요구되는 냉각 조건을 도출하고, 중소형 사업장에 적용 가능한 응축기 설계의 기초 자료를 제시하고자 하였다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25500876).

1G5

산화/환원 기반 배기가스 내 질소산화물 습식 흡수 저감 기술

NOx Absorption and Removal Technology from Exhaust Gas via Oxidation and Reduction Process

이광택, 임채영, 한방우, 김학준

한국기계연구원 도시환경연구실

배기가스 내 질소산화물(NOx)은 대기오염을 유발하는 주요 물질로, 미세먼지 및 광화학 스모그 형성 등에 영향을 미치기 때문에 효과적인 배출 저감이 필요하다. 일반적으로 배기가스 내 NOx는 선택적 촉매 환원법(SCR) 등의 기술을 이용하여 처리하고 있으나, 높은 제거 효율을 확보하기 위해서는 적정 반응 온도 유지가 필요하며 저온의 배기가스를 처리할 경우 추가적인 가열에 따른 에너지 소비가 발생할 수 있다. 따라서, 비교적 낮은 온도에서도 적용할 수 있는 NOx 처리 기술에 대한 연구가 요구되고 있다. 한편, 배기가스 내 NOx의 대부분을 차지하는 NO는 물에 대한 용해도가 낮아 습식 공정을 통한 직접적인 제거가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 산화 및 환원 반응을 연계한 습식 흡수 기반의 NOx 저감 기술을 개발하였다. 먼저 용해도가 낮은 NO를 산화반응을 통해 상대적으로 흡수가 용이한 NO_2로 전환하고, 생성된 NO_2를 액상 흡수제에 흡수하여 제거하였다. 이 과정에서 흡수된 NO_2는 흡수제와의 환원반응을 통해 안정적으로 처리될 수 있으며, 흡수제의 반응 특성은 NOx 제거 효율과 화학물질 사용량을 결정하는 주요 요인으로 작용한다. 이에 산화 과정에서의 NO 전환과 환원 기반의 NO_2 흡수 및 제거 특성을 분석하고, 각 반응의 연계를 통한 NOx 처리 가능성을 평가하였다. 이를 통해 별도의 고온 반응 조건에 대한 의존도를 낮추면서 배기가스 내 NOx를 효과적으로 처리할 수 있는 산화·환원 기반 습식 흡수 기술을 제시하고자 하였다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25500876).

1H1

춘천 대기의 유해 유기성분 특성 규명을 위한 유기질소화합물과 광흡수 유기탄소 관측

Observations of Organic Nitrogen Compounds and Brown Carbon for Characterizing Hazardous Organic Components in the Chuncheon Atmosphere

최나래[1], 정원근, 정영상, 양소연, 양지혜, 박상훈

강원대학교 환경공학과, [1]강원권 미세먼지연구관리센터(강원대학교)

춘천은 분지 지형으로 대기 정체가 잦고 겨울철 연소 영향과 수도권으로부터의 유입이 함께 작용하는 지역으로 유해 유기성분 연구의 배경지역으로서 의의를 가진다. 겨울철 춘천에서 다파장 광흡수 측정을 수행하여 370 nm 광흡수계수(b_abs, 370)와 흡수 옹스트롬 지수(absorption Angstrom exponent, AAE)를 일 단위로 산출하였으며 측정기간 평균 b_abs, 370은 2.57 Mm^{-1}이었다. 니트로소기(N-NO)와 니트로기(N-NO_2)를 포함하는 니트로사민과 니트라민은 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)가 발암물질로 분류한 유기질소화합물이다. 입자상에 대한 연구와 달리 시료 채취와 분석이 까다로운 가스상 연구는 상대적으로 부족하다. 본 연구에서는 가스상 니트로사민 7종과 니트라민 2종을 정량하기 위해 속슬렛 추출을 이용한 가스크로마토그래피/질량분석법을 고안하고 추출 용매 조성과 추출 온도 및 시간을 조정하여 분석 조건을 최적화하였으며 직선성, 회수율, 검출한계를 포함한 정도관리 결과를 함께 제시한다. 향후 춘천에서 가스상과 입자상 유기질소화합물을 광흡수 유기탄소와 동시에 관측하여 연소 기원 유해 유기성분의 배출과 대기 중 거동을 규명하고자 한다.

사사 본 연구는 '기후에너지환경부'의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2024-03-03-002)을 받아 수행하였습니다.

1H2

초고해상도 모델링 시스템 개발을 통한 인천 대기질 분석

Analysis of Air Quality in Incheon Using High-Resolution Modeling System

한범순[1),2)], 손현민[1),2)], 김동휘[1),2)]

[1)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [2)]인하대학교 환경공학과

수도권은 세계에서 손꼽히는 도시 인구 밀집 지역이며, 다양한 배출원과 지형이 존재한다. 이러한 요소들이 대기질에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위해서는 해상도 1 km 이하의 초고해상도 대기환경 수치 모델링이 필요하다. 본 연구에서는 기존의 WRF (Weather Research and Forecasting) 기반 대기질 모형인 GMAF (Global to Meso scale Air Quality Forecast and Analysis System) 모형을 기반으로 LES (Large Eddy Simulation)를 사용할 수 있는 초고해상도 수치 모델링 시스템 개발하고 이를 이용해 인천 지역의 상세 대기질을 예측 및 분석했다. 개발 과정에서 모델의 공간 해상도보다 소용돌이 확산계수가 오염물질 농도에 더 큰 영향을 미친다는 사실을 확인했다. 해륙풍이 강하게 불면서 바다의 NO_2 농도가 낮고 O_3 농도가 상대적으로 높은 공기가 유입되었으며, 대류 구조의 상승, 하강 운동으로 인해 경계층 높이가 높아지고 오염물질이 상층으로 수송되었다. 이러한 과정에서 O_3를 파괴하는 NO 농도가 감소하며, 햇빛이 강해져 O_3 생성 화학반응이 활발해져 O_3 농도가 높아졌다. 또한 대류 구조로 인한 강한 상승기류가 지표의 대기오염물질을 경계층 높이 위로 수송했으며, 이로 인해 경계층 근처의 오염물질 농도가 변하는 모습을 보였다. 이러한 결과는 작은 규모의 흐름이 대기질에 크게 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

사사 본 연구는 '기후에너지환경부'의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2024-03-03-002)을 받아 수행하였습니다.

1H3

대산 석유화학산단 VOCs 화학종별 배출량 산정

VOCs emissions by Chemical Species in Daesan Petrochemical Industrial Complex

김종호, 유정훈[1], 이미선[2], 김종현[1], 서범근[1]

한서대학교 환경·토목·건축학과, [1]한서대학교 환경연구소, [2]중부권 미세먼지연구·관리센터

휘발성유기화합물(VOCs)은 벤젠, 1,3-부타디엔 등과 같은 그 자체로도 매우 독성이 강한 오염물질과 에틸벤젠, 톨루엔 등 등 2차생성 유기먼지를 발생하는 물질, 또한 에틸렌, 프로필렌 등, 오존 전구물질의 역할을 하는 물질들이 포함되어 있다. 충남 북서쪽에 위치한 대산석유화학산업단지는 석유정제, 석유화학산업 업종이 대부분을 차지하고 있어 인근지역의 대기질에 영향을 주고 있으며, 최근 대기 중 오존 농도가 높아지면서 대산 석유화학산업단지에서 배출된 광화학스모그의 원인물질이 대산과 그 인근지역은 물론 수도권 대기질에 영향을 줄 수 있다는 우려가 있다. 본 연구는 국가 대기오염물질배출량 중 VOCs에 대해 화학종별로 구분하여 배출량을 산정하였다. 배출량 산정방법은 국가미세먼지정보센터(2022)의 점오염원 자료(CAPSS)의 배출체계를 EPA Speciate v5.3의 배출체계와 연계하였다. 또한, 연계된 배출체계 별로 U.S EPA Speciate v5.3의 TOG (총유기탄소)/VOC비와 화학종별 배출량 비율자료를 적용하여 화학종별 배출량을 산정하였다. 배출량(2022년 기준)은 에틸렌, 프로판, 프로필렌 순으로 각각 4,119톤, 2,691톤, 2,081톤으로 산출되었으며, 벤젠과 톨루엔는 각각 844톤, 836톤, 에틸벤젠과 1,3-부타디엔은 각각 186톤, 31톤으로 산정되었다.

사사 본 연구는 '기후에너지환경부'의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2024-03-03-002)을 받아 수행하였습니다.

1H4

남부권 대기오염물질 배출량에 대한 오존 민감도 분석

Sensitivity Analysis of Ozone Responses to NO_x and VOC Emission Reductions in Jeonnam Province Using a GMAQ model

한경만, 이도경, Madalipay Jasper, 최태후, 김지호, 김재희, 송철한

광주과학기술원 환경에너지공학과

전남 지역에서는 미세먼지 농도가 지속적으로 개선되고 있는 반면, 오존은 꾸준히 증가하여 효과적인 관리 전략 수립이 요구되고 있다. 본 연구에서는 WRF-GMAQ 기반 3차원 대기질 모델을 이용하여 전남 지역을 대상으로 인위적 NO_x와 VOC 배출량 변화에 따른 오존 민감도를 분석하였다. 2023년 5~6월을 대상으로 5 km 공간 해상도에서 여수, 광양 등 주요 지역의 NO_x 및 VOC 10종 배출량을 각각 0~40% 저감하는 시나리오를 수행하였다. 모델 성능은 지상관측자료와 TROPOMI 위성센서에서 관측된 NO_2 및 HCHO 층적분 자료를 이용하여 평가하였으며, 전반적으로 관측 특성을 양호하게 재현하였다. 민감도 분석 결과, NO_x 저감 시, 오존은 최대 약 4% 증가한 반면, VOC 저감에 따른 오존 감소는 1% 이내로 제한적이었다. 또한 NO_x와 VOC를 동시에 저감한 경우에도 오존 변화는 NO_x 저감 효과가 지배적으로 나타났다. VOC 저감에도 오존의 미미한 감소는 배경 오존의 지속적인 유입과 다량의 생물기원 VOC의 산화반응을 통한 오존의 생성 기여 등 복합적인 요인이 함께 작용한 결과로 추정된다. 본 연구는 남부권 오존 생성 특성을 정량적으로 이해하고 지역 맞춤형 오존 저감 전략 수립을 위한 기초자료를 제공할 것으로 기대된다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2024-03-03-002)을 받아 수행하였습니다.

1H5

동남권 고농도 오존의 지역별 발생 특성과 집중관측 전략

Regional Characteristics of High-Ozone Episodes and Intensive Observation Strategies in Southeastern Korea

이종재[1),2)], 최성득[1)], 김기애[1)], 최원식[3)], 한수빈[3)], 송창근[1),4)]

[1)]울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, [2)]동남권 미세먼지연구·관리센터, [3)]부경대학교 환경대기과학전공,
[4)]울산과학기술원 탄소중립대학원

최근 동남권에서는 고농도 오존 발생이 지속적으로 관측되고 있으며, 지역별 배출원 구조와 기상조건에 따른 오존 생성 및 수송 특성을 규명할 필요가 있다. 본 연구에서는 울산, 부산, 대구, 경북 및 경남지역의 2012~2026년 오존주의보 발령자료를 이용하여 지역별 고농도 오존 발생 특성을 비교하고, 부산과 경남 창녕을 대상으로 집중관측 전략을 검토하였다. 부산은 최근 10년간 연평균 약 15회의 오존주의보가 발생하였으며, 국가산업단지가 밀집한 서부권에서 최근 오존 발생횟수가 증가하는 경향을 보였다. 또한 2024년 오존 농도 공간분포에서 남부권과 서부산권의 농도가 상대적으로 높게 나타나 VOCs의 점·선·면오염원별 배출량과 인구밀도 분포를 고려하여 관측지점을 선정하였다. 창녕은 2025년 오존주의보 기준인 1시간 평균 120 ppb 이상 사례가 5일 발생하였고, 주로 늦은 오후에 고농도 현상이 나타났다. 인접한 대구 달성지역과 비교할 때 오존 농도 변동성이 크게 나타났으며, 풍향·풍속과 오존 농도를 함께 분석한 결과 풍속이 강할 때 오존 농도가 증가하는 경향이 확인되어 외부 유입 영향 가능성을 시사하였다. 이러한 사전분석을 바탕으로 2026년 하계 부산과 창녕에서 VOCs를 포함한 집중관측을 계획하였으며, 향후 관측자료와 배출량 및 기상자료를 종합적으로 분석하여 지역별 오존 생성·수송 특성을 규명하고 지역별 오존 발생 특성을 반영한 동남권 맞춤형 오존 관리정책 수립을 위한 과학적 기초자료를 제공하고자 한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2024-03-03-002).

1H6

대기 권역별 미세먼지 건강영향평가

Health Impact Assessment of Particulate Matter by Air Control Zones

이종태[1),2)]

[1)]고려대학교 보건과학대학 보건정책관리학부, [2)]건강영향 특성화 미세먼지연구·관리센터

건강영향 특성화 미세먼지연구·관리센터는 환경정의 실현을 위한 미세먼지 관리정책으로의 도약을 목표로 1) 맥락 기반 미세먼지 건강영향평가, 2) 권역별 미세먼지 건강영향평가 및 시책 수립 지원 3) 건강 위해성 기반 미세먼지 관리 정책 효과평가, 4) 미세먼지 빅데이터 및 웹 플랫폼 고도화 5) 미세먼지 건강피해 예방·관리 교육 및 홍보 사업을 수행하고 있다. 본 센터는 대기 권역별(동남권, 남부권, 강원권, 중부권, 수도권) 미세먼지 건강영향평가를 수행하였다. 2015~2019년 전국을 대상으로 인공위성 자료 및 머신러닝 기반 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도 모델링 데이터, 통계청 사망원인통계, 미세먼지 구성성분 및 인구집단 취약성 데이터를 연계하여 각 권역 및 시군구별 $PM_{2.5}$ 단기 노출에 따른 사망 위험을 산출하였다. 분석결과, 대기 권역 중 중부권에서 $PM_{2.5}$ 단기 노출에 따른 사망 위험이 가장 크게 나타났으며 (상대위험도: 1.006 [95% 신뢰구간: 1.001, 1.012]), 각 대기 권역 및 시군구 단위에서도 상이한 사망 위험이 관찰되었다. 이러한 $PM_{2.5}$ 단기 노출에 따른 지역별 사망 위험의 격차를 설명하는 주요 요인은 지역별 고령인구 비율과 노후주택 비율이었으며, 각 대기 권역별로 생물성 연소 등 사망 위험과 밀접한 미세먼지 배출원들이 확인되었다. 이처럼 본 센터는 주요 미세먼지 배출원 특성 및 인구집단 취약성을 고려함으로써 각 권역별 건강 위해성 기반 취약지역 클러스터를 발굴하고, 미세먼지 질병부담 저감을 위한 권역 맞춤형 정책을 제언하고자 한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2024-03-03-002)을 받아 수행하였습니다.

1I1

Long-term Trends of Atmospheric Deposition of Sulfur and Nitrogen in Japanese Remote Areas

Kazuhide Matsuda

Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan

Atmospheric deposition of sulfur and nitrogen has long been recognized as a key driver of ecosystem acidification and nutrient enrichment. Although emissions of sulfur dioxide have substantially declined in East Asia over recent decades, changes in nitrogen deposition and their implications for remote ecosystems remain less clear. Understanding long-term deposition trends in areas minimally affected by local sources is therefore essential for evaluating the effectiveness of emission controls and identifying emerging environmental challenges. The Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET), formally launched in 2001 following a preparatory phase that began in 1998, is an intergovernmental initiative promoting regional cooperation in atmospheric deposition monitoring. Through its long-term monitoring program, EANET has accumulated more than two decades of measurements of sulfur and nitrogen compounds in air and precipitation. In this study, long-term trends of sulfur and nitrogen wet and dry deposition at remote Japanese EANET sites were examined using monitoring data collected from 2000 to 2024. In non-sea-salt sulfate wet deposition, a statistically significant decreasing trend is observed at many sites. Although nitrate wet deposition also showed significant decreasing trend, the rate of the decrease was relatively moderate. Ammonium wet deposition remained relatively stable or showed only weak downward trends over the study period. Total nitrogen deposition (wet + dry), including oxidized and reduced nitrogen, was estimated. At many sites, the annual nitrogen deposition exceeded 10 kg N/ha/year, and reduced nitrogen deposition accounted for more than 50% of the total. These results indicate that sulfur deposition has declined markedly in remote areas of Japan, whereas reductions in nitrogen deposition have been more limited, with reduced nitrogen accounting for a large proportion of total nitrogen deposition.

Keywords: wet and dry deposition, ammonia, EANET

1I2

Control of $PM_{2.5}$ and Ozone Complex Pollution in China: Progress and Prospect

Hong Li[1)], Yan Nie[1),2)], Qi Jiang[1)], Shudan Wei[1),3)], Junling Li[1)], Fahe Chai[1)]

[1)]State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, China, [2)]The School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin, China,
[3)]Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, China

The combined pollution of $PM_{2.5}$ and ground-level ozone (O_3) has become a core challenge in China's atmospheric governance. Although clean air actions have driven sustained declines in $PM_{2.5}$, O_3 pollution remains inadequately controlled. Through shared precursors and complex atmospheric chemistry, the two pollutants form an intricate coupling that poses significant scientific and policy dilemmas for coordinated control. In-depth research on integrated $PM_{2.5}$ and O_3 control is therefore not only a practical necessity for improving air quality and protecting public health and ecosystems, but also a strategic imperative for advancing China's air quality management from single-pollutant to multi-pollutant coordinated control and for supporting the "Beautiful China" and "dual carbon" goals. After reviewing the latest research on the health hazards of combined $PM_{2.5}$ and O_3 pollution, the study examines the history and practical experience of China's air pollution management, focusing on the achievements and shortcomings of its coordinated $PM_{2.5}$ and O_3 control, and summarizes the mature experience in other countries in coordinated $PM_{2.5}$ and O_3 control regarding scientific foundations, regulatory policies, and regional coordination mechanisms. Drawing on this experience, five governance insights are proposed for China: establishing an institutional framework through legislative upgrading; consolidating the cognitive foundation through scientific source apportionment; innovating implementation pathways through policy instruments; building society-wide co-governance through multi-stakeholder collaboration; and exploring a development-stage-appropriate pathway through national-context adaptation. These recommendations aim to provide scientific references for sustaining air quality improvement and building a Beautiful China.

Keywords: complex air pollution, governance, status, perspectives, China

1I3

Simultaneous Determination of Particulate-phase Amines and Amino Acids in Urban Aerosols: Development of a Rapid LC-MS/MS Method and Application to Seoul $PM_{2.5}$

Joosung Oh, Jun-Hyeok Jang[1)], Youngmin Hong[2)], Dae-Woon Jeong, Kyung Hwan Kim[3)]

Global Institute for Nanoscience & Technology (GIANT), Changwon National University,
[1)]Division of Environmental and Energy Engineering, Yonsei University, [2)]Technical Research Center, Shimadzu Scientific Korea,
[3)]Center for Climate and Carbon Cycle Research, Korea Institute of Science and Technology

Organic nitrogen species such as alkyl amines (AAs) and free amino acids (FAAs) are increasingly recognized as important contributors to urban aerosol chemistry and potential health risks, yet their concentrations, sources, and seasonal behaviors remain poorly understood. In this study, we developed a rapid liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) method for the simultaneous determination of 17 AAs and 25 FAAs in $PM_{2.5}$, employing simplified pretreatment and isotope-labeled internal standards. Application to $PM_{2.5}$ samples collected in Seoul during winter and spring revealed pronounced seasonal contrasts: AAs were elevated in winter and strongly associated with secondary inorganic species and combustion-related pollutants, while FAAs were more abundant in spring, reflecting enhanced biological activity. Correlation analysis with co-pollutants and meteorological parameters highlighted distinct seasonal emission processes and atmospheric transformations. These findings demonstrate the diverse sources and behaviors of nitrogen-containing organics in urban $PM_{2.5}$ and underline their implications not only for nitrogen cycling but also for particulate toxicity, air quality management.

Keywords: 17 alkyl amines, 25 free amino acids, Water-soluble organic nitrogen, Urban air quality, Health implications

1I4

Different Dynamics in Ozone and $PM_{2.5}$ Concentration between Fukuoka Tower (130 m) and Surface Level: Measurement Campaign and Modeling Application in 2025 Spring

Syuichi Itahashi, Keiya Yumimoto

Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Fukuoka, Japan

Measurements of the atmospheric environment above the surface level remain limited, despite their importance for understanding regional air quality. To enhance our understanding of the behavior of air pollutants, particularly focusing on long-range transboundary transport across East Asia, we conducted a comprehensive observation campaign at Fukuoka Tower (130.35°E, 33.59°N; height: 234 m) during spring 2025. Monitoring equipment was installed at an altitude of 130 m to continuously measure concentrations of nitrogen dioxide (NO_2), ozone (O_3), and particulate matter ($PM_{2.5}$). The observational results revealed distinct vertical variations among the measured pollutants. NO_2 exhibited similar temporal dynamics between the surface and the elevated tower site. In contrast, O_3 showed a significantly weaker diurnal variation at the tower altitude than at the surface, likely reflecting reduced surface deposition and suppressed nocturnal titration aloft. While baseline $PM_{2.5}$ concentrations were generally lower at the tower compared to the surface level, this vertical gradient was distinctly reversed during three major high-concentration $PM_{2.5}$ episodes observed during the spring season. A dust forecasting model indicated that all three high-concentration events were closely associated with Asian dust transport events originating from upwind continental regions. These contrasting characteristics provide crucial insights into the vertical structure and atmospheric dynamics that distinguish surface and aloft air pollutant behavior. To further clarify the three-dimensional spatial distribution and key transport mechanisms, numerical air quality modeling simulations are currently underway. At the conference, we will present detailed analyses of both the observational dataset and the simulation results.

Keywords: Tower measurement, Long-range transport, Air quality modeling

1I5

Emission Profile of Reactive Organic Carbon from Industrial Sector: Diaparity between Mass and Health Threat

Di Wang, Xiaoyang Yang, Zhihao Zhang

Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, China

Industrial volatile chemical products (VCPs), particularly those used in industrial coating applications, have emerged as major sources of reactive organic carbon (ROC) emissions with implications for atmospheric chemistry and human health. However, coating-related ROC emissions remain poorly constrained, limiting assessment of their environmental and health impacts. Here, we characterized full-volatility ROC emissions from representative industrial coating processes across gas and particle phases and estimated China's national ROC emissions from downstream coating processes at approximately 5.31 Tg yr^{-1} in 2019. Volatile organic compounds (VOCs) dominated the characterized ROC mass in the high-volatility range, with aromatics (35.6%) and cyclic alkanes (20.4%) as major hydrocarbon groups, whereas oxygenated and functionalized organics increased at lower volatility ranges. However, emission mass alone did not reflect health relevance. Species prioritized by quantitative lifetime cancer risk (LCR) and hazard index (HI) assessment represented approximately 22.6% of the characterized ROC mass but dominated the calculated risk indicators. The top two cancer-risk contributors, 1,2-dichloroethane and trichloroethylene, accounted for 96.3% of the summed LCR while representing only 5.07% of the characterized ROC mass. In addition, a recurrently detected emerging-pollutant subset, including polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), phthalates, phenolic antioxidants, and cyclic siloxanes, represented only ~0.22% of the characterized ROC mass but was prioritized by complementary toxicity screening. These findings indicate a pronounced mismatch between emission mass and health hazard in coating-related ROC emissions, suggesting that conventional mass-based VOC metrics may underestimate health-relevant risks. A hazard-prioritized, tiered management framework is therefore proposed to support risk-oriented mitigation and more comprehensive full- volatility ROC regulation.

Keywords: reactive organic carbon, industrial emission, industrial solvent utilization, health risk

1I6

Quantification of Particulate Organic Nitrogen Compounds and Their Inhalation Health Risk in Urban and Background Atmospheres

Na Rae Choi, Yong Pyo Kim[1)], Ji Yi Lee[2)], Eun Hye Kim[3)], Soontae Kim[4)], Hye Jung Shin[5)]

Department of Environmental Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea,
[1)]Graduate School of Particulate Matter Specialization, Seoul National University, Seoul, Korea,
[2)]Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea,
[3)]Department of Environmental Engineering, Kunsan National University, Gunsan, Korea,
[4)]Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Korea,
[5)]Environmental Satellite Center, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

Nitrosamines and nitramines are carcinogenic particulate organic nitrogen compounds that are both directly emitted and secondarily formed in the atmosphere. Seven nitrosamines and two nitramines were quantified in fine particulate matter ($PM_{2.5}$) collected in February 2024 at an urban site in the Seoul Metropolitan Area (Ansan) and at a background site (Baengnyeong Island), and their inhalation carcinogenic risk was assessed. The total nitrosamine concentration was higher at the background site (4.26 ± 2.21 ng/m^3) than at the urban site (2.86 ± 1.85 ng/m^3), reflecting an increase of nitrosodibutylamine (NDBA) from local combustion-related emissions. Box model estimates of nitrosodimethylamine agreed with measurements at the background site ($R = 0.44$) but not at the urban site ($R = -0.13$), indicating that secondary formation contributes differently between the sites. Lifetime carcinogenic risks from Monte Carlo simulation ranged from 3.08×10^{-7} to 2.65×10^{-6} at the urban site and from 1.92×10^{-7} to 1.62×10^{-6} at the background site, remaining within the acceptable range.

Keywords: nitrosamines, nitramines, carcinogen, particulate organic nitrogen, inhalation risk

Session 2B [교육프로그램] 대기오염 방지기술의 현장과 실무

좌장 : 양재환 [충남대학교]

2B1) 대기오염방지시설의 현장 적용사례 연구
2B2) 대기오염방지시설의 현장과 실무: 인허가에서 설계·운전·유지관리 및 데이터 기반 성능관리까지
2B3) ISO 29463 방전 조건에서 안정적 성능을 유지하는 일렉트렛·나노섬유 하이브리드 다층 필터의 모델 기반 최적화

Session 2C [기후탄소위원회 특별세션] 자동차 전과정 배출의 이슈와 미래

좌장 : 문난경 [한국환경연구원]

2C1) 교통부문 대기오염물질 저감정책의 성과와 향후과제
2C2) 전과정 평가(LCA)를 고려한 도로부문 중·장기 온실가스 감축 잠재량 분석 연구
2C3) 전기차 제조·운행 단계 배출 진단과 사용후 배터리(SLB) 기반 전과정 감축전략
2C4) 도로부문 기후·에너지·환경의 통합평가체계

Session 2D 대기환경연구 공모전

좌장 : 신혜정 [국립환경과학원]

2D1) 오존 생성 민감도별 기상 기여도 산정을 통한 고농도 오존 발생 배경 규명 및 건강영향 평가
2D2) 2024년 ASIA-AQ 캠페인 기간 백령도 $PM_{2.5}$의 고해상도 배출원 분석 및 국경 간 이동 경로 분석
2D3) O_3 농도 증가에 따른 대기 에어로졸 pH의 변화와 $PM_{2.5}$ 산화잠재력 영향 평가
2D4) 수도권과 연안·산업지역의 야간 잔류 오존 특성 비교를 통한 다음날 고농도 오존 선제 예측 지표 개발
2D5) 정지궤도 환경위성 GEMS 에어로졸 유효고도의 경사광로 의존 계통오차: 위성·지상 라이다 검증과 보정
2D6) 위성 관측 이산화질소·암모니아와 지상관측자료를 활용한 한반도 초미세먼지 질산염(NO_3^-)의 시공간 특징 및 영향요인 분석
2D7) GEMS와 CALPUFF를 활용한 수도권 서부-동부 NO_2 잠재 수송 특성 및 관측 적용성 평가

Session 2E [특별세션] 한반도 동아시아 배경대기 관측 연구의 현황과 미래 방향

좌장 : 이미혜 [고려대학교]

2E1) 해양과학기지의 배경대기 관측 현황과 계획
2E2) 우리나라 지구대기감시의 현황과 계획
2E3) 서해상 배경대기의 기후변화유발물질 장기변동 특성: 배출원과 해양대기 중 거동 변화
2E4) 극저온 농축기-GC/MS 기반 할로겐화 온실가스 분석 시스템 구축 및 안면도 대기 중 농도 특성
2E5) 겨울철 종관기상에 따른 서울-안면도 에어로졸 연계 특성
2E6) 황해 청정 해양 대기 에어로졸의 광학적 특성 및 장기 변화 추이: 소청초 해양과학기지 AERONET 관측 자료 활용

Session 2F [특별세션] 환경위성 활용 공동 워크숍

좌장 : 강경희 [국립환경과학원]

2F1) GEMS 자료 기반의 시간대별 FNR 임계값 산출 및 오존생성민감도 체제 분석
2F2) 딥러닝 기반 다종 대기오염물질 동시 산출 알고리즘 개발 및 복합오염 분석
2F3) 환경위성을 통한 지표오존 생성률 추정방법론
2F4) 대기화학모델 민감도 실험을 활용한 FNR 기반 지역규모 오존 생성 메커니즘 분석
2F5) GEMSAT을 활용한 정지궤도 환경위성(GEMS) 데이터 분석 및 대기환경 연구·모니터링 활용성 증대

Session 2G [원격탐사·센서분과회 특별세션] 대기관리를 위한 첨단모니터링 기술

좌장 : 김덕현 [국립한밭대학교]

2G1) 탄성산란(미세먼지) 라이다의 기초와 대기관리 활용 – 현장 측정사례를 중심으로 –
2G2) 한반도 미량기체 지표원격관측 장비 Pandora/MAX-DOAS를 활용한 산단지역 NO_2 및 HCHO 농도 거동 파악 및 향후 관리 방안
2G3) 대기 온실기체 및 독성 화학물질 누출 및 배출량 원거리 측정용 적외선 분광시스템 개발
2G4) 메탄 및 이산화탄소 배출 혼합비 및 배출량 원거리 측정 라만라이다
2G5) 가스상 대기오염물질 모니터링을 위한 DIAL의 현장 적용과 활용방안

Session 2H [특별세션] 국내 대기·실내 미세플라스틱 연구의 현황과 미래

좌장 : 전기준 [인하대학교]

2H1) 대기 미세플라스틱의 국내 연구 현황 및 전국 공동연구 추진 현황
2H2) OECD 나노플라스틱 프로젝트 추진 현황 및 비정형 나노플라스틱 시험 물질 개발 연구
2H3) 환경노화 및 극저온 파쇄를 이용한 타이어 마모 미세입자 제조
2H4) 열분해-GC/MS를 이용한 실내대기 중 미세플라스틱 분석기술 및 적용방안
2H5) 대기 미세플라스틱 분석법 및 표준물질 합성법 개발

2B1

대기오염방지시설의 현장 적용사례 연구

A Study on Field Applications of Air Pollution Control Systems

장현섭

성균관대학교 환경포렌식연구소

산업시설에서 발생하는 대기오염물질은 입자상물질과 가스상물질이 동시에 배출되는 경우가 많으며, 악취를 포함한 오염물질의 농도와 배출특성은 공정 및 운전조건에 따라 크게 변화한다. 따라서 대기오염방지시설은 개별 오염물질의 처리효율뿐만 아니라 발생원의 특성, 배출가스의 온·습도, 입자상물질의 물성, 가스상물질의 반응성, 풍량 및 부하변동 등을 종합적으로 고려하여 설계할 필요가 있다. 본 발표에서는 입자상물질과 가스상물질 및 악취를 동시에 처리한 대기오염방지시설의 현장 적용사례를 중심으로 기본적인 설계방법과 실제 현장조건을 반영한 설계·운영 사례를 비교하였다. 특히 집진, 세정, 화학적 흡수·산화 및 흡착 등의 처리공정 선정과 조합 과정에서 고려해야 할 주요 설계인자를 검토하고, 시설 설치 및 운영과정에서 나타난 유입부하 변동, 입자상물질의 퇴적과 점착, 세정수 오염, 압력손실 증가 및 처리효율 변화 등의 문제와 개선사례를 제시하였다. 이를 통해 방지시설의 실제 성능은 개별 장치의 이론적 처리효율뿐만 아니라 전·후단 공정의 연계, 현장 운전조건 및 유지관리 수준에 의해 크게 좌우됨을 확인하였다. 따라서 안정적인 처리성능 확보를 위해서는 기본설계를 바탕으로 현장 특성을 반영한 공정 구성과 설계 최적화, 설치 이후의 지속적인 운전관리 및 성능개선이 필요하다.

2B2

대기오염방지시설의 현장과 실무: 인허가에서 설계·운전·유지관리 및 데이터 기반 성능관리까지

Field Practices of Air Pollution Control Facilities: From Permitting to Design, Operation, Maintenance, and Data-Driven Performance Management

김재혁

예스이앤씨(주)

대기오염방지시설은 사업장에서 발생하는 대기오염물질을 저감하고 배출허용기준 및 허가조건을 준수하기 위한 핵심 환경설비이다. 그러나 실제 사업장에서는 인허가 단계에서 검토·제시된 방지시설의 설계조건과 실제 설치·운영 조건 사이에 차이가 발생하거나, 공정 및 운전조건의 변화가 방지시설의 성능과 적정 운영에 충분히 반영되지 않는 사례가 발생하고 있다. 특히 통합환경관리체계로 전환되면서 대기오염물질의 배출 및 방지시설 관리가 개별 시설 중심의 인허가에서 사업장 전체의 환경관리체계를 고려하는 방식으로 변화하고 있어, 인허가 단계에서 작성되는 자료와 실제 현장 운영 간의 연계성이 더욱 중요해지고 있다. 본 발표에서는 대기오염방지시설의 인허가–설계–설치–운전–유지관리–사후관리 전 과정에서 발생할 수 있는 주요 현장 이슈를 중심으로 실무적 관리방안을 살펴본다. 특히 통합환경관리 인허가 과정에서 제시되는 배출시설 및 방지시설의 구성, 설계조건, 처리용량, 오염물질 저감방식 및 운전조건 등이 실제 현장시설과 적정하게 연계·관리되어야 할 필요성을 검토한다. 또한 변경된 공정 및 시설조건이 인허가 사항에 적절히 반영되지 않거나, 허가·신고사항과 실제 운영조건 간 불일치가 발생하는 경우의 현장관리상 문제점도 함께 논의한다. 방지시설의 운영단계에서는 처리풍량, 압력손실 및 차압, 약품주입량, 순환수 조건, 촉매 활성도 등 주요 운전·관리인자가 방지시설 성능에 미치는 영향을 살펴보고, 설계성능과 실제 운전성능의 차이를 최소화하기 위한 유지관리 및 성능관리 방향을 제시한다. 아울러 굴뚝자동측정기기(TMS), 자가측정 및 공정·방지시설 운전데이터를 연계하여 배출농도뿐만 아니라 방지시설의 이상징후를 사전에 파악하고 대응하는 데이터 기반 환경관리의 필요성을 검토한다. 궁극적으로 대기오염방지시설의 효과적인 관리는 “시설을 설치하고 기준을 준수하는 것”을 넘어, 인허가 단계에서 설정된 환경관리 조건이 실제 현장 운영과 지속적으로 연계되고, 운전·유지관리 및 데이터를 통해 방지시설의 성능을 지속적으로 관리하는 체계로 발전할 필요가 있다. 본 발표에서는 이러한 관점에서 통합환경관리체계하의 인허가와 현장관리의 연계방안 및 향후 데이터 기반·예측형 방지시설 성능관리 방향을 제안하고자 한다.

2B3

ISO 29463 방전 조건에서 안정적 성능을 유지하는 일렉트렛·나노섬유 하이브리드 다층 필터의 모델 기반 최적화

Model-Based Optimization of Electret–Nanofiber Hybrid Multilayer Filters with Stable Performance Under ISO 29463 Discharge Conditions

이승욱, 이정현

뉴라이즌

반도체 및 이차전지 등 첨단 제조산업의 성장과 공정 미세화에 따라 클린룸 내 나노스케일 입자 제어 요구가 강화되는 동시에, 대규모 공조 시스템 운영에 따른 에너지 효율 확보가 핵심 과제로 대두되고 있다. 그러나 기존 멜트블로운(MB) 일렉트렛 필터는 ISO 29463 방전 조건에서 여과 효율이 크게 저하되고, 유리섬유 필터는 과도한 압력손실로 에너지 측면에서 불리하여 성능 안정성과 에너지 효율 간 구조적 상충 관계가 존재한다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위하여 일렉트렛·나노섬유 하이브리드 다층 필터를 제안하고, 기계적 효율과 정전기적 효율을 분리하여 기술하는 이중효율 모델 기반의 최적화 프레임워크를 구축하였다. 제안 모델은 나노섬유 층의 슬립류(slip flow) 효과를 반영하여 압력손실 예측 정확도를 개선하였으며, 초음파 접합 공정에서 발생하는 구조적 저항 계수($\beta = 0.125$)를 도출하여 모델에 통합하였다. 실험 검증 결과 모델은 전체 면풍속 범위에서 높은 예측 정확도($R^2 = 0.99$)를 나타내었고, 최적화된 하이브리드 필터는 ISO 29463-5:2022 방전 시험 이후에도 98.1% 이상의 여과 효율을 유지하여 기존 상용 MB 필터(41.4%)를 크게 상회하였다. 또한 품질계수(QF) 0.117을 달성하여 상용 유리섬유 필터 대비 4배 수준의 성능을 확인하였으며, 압력손실 저감에 따른 팬필터유닛(FFU) 소비전력 절감 잠재력을 제시하였다. 본 결과는 첨단 제조산업이 요구하는 청정도와 에너지 효율을 나노기술 기반 소재 설계로 동시에 달성한 사례로서, 국제 표준을 충족하는 차세대 고효율 공기여과 시스템 설계에 실용적 지침을 제공한다.

사사 이 연구는 2026년도 산업통상부 및 한국산업기술기획평가원 연구비 지원에 의한 연구임(2410018396).

2C1

교통부문 대기오염물질 저감정책의 성과와 향후과제

Achievement and Future Challenge of Air Pollutant Reduction Policies in Transport Sector

박준홍

국립환경과학원 모빌리티환경연구센터

교통부문은 대도시 대기오염물질의 주요 배출원으로서 주로 $PM_{2.5}$와 NOx에 대한 기여율이 높은 것으로 알려져 있다. 정부는 2000년대 이후 수도권 대기질 개선 특별대책을 시행하면서 자동차와 건설기계의 대기오염물질 저감대책을 집중적으로 추진해 왔다. 서울의 $PM_{2.5}$와 NOx 농도는 지속적으로 감소되는 추세를 보이고 있는데, 도로부문의 PM_{10}과 NOx 배출량의 급격한 감소와도 상관관계가 있을 것으로 예상된다. 이는 세계 최고 수준으로 제작차 배출허용기준을 강화하고, 경유차에 대한 실제 도로주행 배출가스 관리제도 도입, 적극적인 노후 경유차 배출가스 저감정책 추진 등의 성과가 나타난 것으로 볼 수 있다. 정부는 미세먼지 저감대책의 일환으로 추진되었던 무공해차 보급을 수송부문의 중요 탄소중립 이행수단으로 시행하고 있는데, 이를 통해 향후 대기오염물질 저감효과도 극대화될 것으로 기대된다. 그간 자동차의 타이어와 브레이크 마모로 인해 발생되는 미세입자는 관리의 사각지대에 있었으나, UN WP29에서 국제표준으로 평가방법이 제정되고, 유럽의 차기 배출기준은 Euro7에 규제안이 포함됨에 따라 국내에서도 도입을 준비하고 있다.

2C2

전과정 평가(LCA)를 고려한 도로부문 중·장기 온실가스 감축 잠재량 분석 연구

Life Cycle Assessment of Mid- and Long-Term GHG Mitigation Potential in the Road Transport Sector

윤영중, 방종철

온실가스종합정보센터 감축목표팀

수송부문 온실가스 감축정책은 그동안 차량 운행단계의 직접배출을 중심으로 평가되어 왔다. 하지만 전기차 등 무공해차 보급 확대에 따라 전력·연료 생산과 차량 제조·폐기 단계의 배출 중요성이 커지고 있다. 최근 자동차 온실가스 전과정평가의 제도적 기반이 마련되고 국제적 방법론 논의가 구체화됨에 따라, 차량의 감축효과를 전과정 관점에서 평가할 분석체계가 요구된다. 본 연구는 국내 도로부문에 적합한 전과정평가(LCA) 분석체계를 구축하고, GREET 모형을 활용하여 주요 차종의 전과정 온실가스 배출량과 중·장기 감축 잠재량을 분석하였다. 평가범위는 연료주기(Fuel Cycle)와 차량주기(Vehicle Cycle)를 포함하며, 용도·차종·연료별 특성을 반영한 LCI (Life Cycle Inventory) DB를 구축하였다. 더불어 차종별·평가단계별 배출량을 비교하여 국내 적용을 위한 분석체계와 데이터 구축 방향을 검토하였다. 이를 바탕으로 중장기 국가 온실가스 감축목표(NDC)와 2050 탄소중립 시나리오를 고려한 친환경차 전환 경로별 감축 잠재량을 평가하고, 도로부문 중·장기 온실가스 감축정책의 시사점을 제시하고자 하였다.

2C3

전기차 제조·운행 단계 배출 진단과 사용후 배터리(SLB) 기반 전과정 감축전략

Diagnosis of EV Emissions in Manufacturing and Operation Stages and Life Cycle Reduction Strategies Based on Second-Life Batteries (SLB)

박용성

전남대학교 미래모빌리티학과 미래차인재양성부트캠프사업단

본 발표에서는 전기차의 전과정 평가(LCA) 관점에서 제조 및 운행 단계의 배출 특성을 실증적으로 진단하고, 이를 상쇄하기 위한 핵심 솔루션으로 사용후 배터리(Second Life Battery, SLB)의 재사용 및 사업화 전략을 제시한다. 첫째, 배터리 제조 단계 분석 결과, 양극 활물질 공정 및 에너지 집약적 전극 건조 공정으로 인해 1 kWh당 약 97~109 kg의 온실가스가 발생하며, 70 kWh급 전기차 1대 제조 시 약 7.3~7.6톤에 달하는 온실가스가 배출되는 '탄소 부채(Carbon Debt)'를 확인하였다. 둘째, 화력발전 비중이 약 75%에 달하고 발전 배출계수가 약 450~460 g CO_2/kWh 수준인 국내 전력망 조건에서 코나·니로 등 실제 차종의 주행거리당 배출량을 분석한 결과, 전기차의 운행 단계 실질 온실가스 배출량(약 80 g/km 내외)은 동급 하이브리드차(HEV, 82~92 g/km)와 유사한 수준으로 나타나 발전 믹스 청정화 이전의 즉각적인 배출 저감 효과는 제한적임을 도출하였다. 셋째, 이러한 제조 및 운행 단계의 한계를 극복하기 위해, 차량 퇴역 배터리를 에너지저장장치(BESS) 등으로 2차 활용(SLB)하여 신품 배터리 대비 온실가스 배출을 최대 75% 저감시키는 전주기 수명 연장 메커니즘을 제안한다. 이를 통해 전기차 보급 중심의 수송 부문 탄소 감축 정책을 제조·운행·순환경제를 포괄하는 통합적 전과정(LCA) 감축 체계로 확장하고, 실질적인 대기환경 개선과 국가 온실가스 감축 목표(NDC) 달성을 견인하는 제도적 기틀을 마련하고자 한다.

2C4

도로부문 기후·에너지·환경의 통합평가체계

Integrated Assessment Framework for Climate, Energy, and Environment in the Road Transport Sector

이규진

아주대학교 TOD기반 지속가능도시교통연구센터

도로교통은 주요 에너지 소비 및 온실가스·대기오염 배출원으로, 그동안 환경영향 평가는 주로 운행 중 배기가스와 온실가스의 직접배출을 중심으로 이루어져 왔다. 그러나 무공해차 보급 확대와 에너지원의 다변화에 따라 타이어마모 등 비배기 배출, 전력 생산에 따른 간접배출, 차종·동력원별 에너지 소비 및 사회적 비용을 종합적으로 고려하는 평가체계가 요구되고 있다. 본 연구에서는 아주대학교 UTEAS (Urban Transportation Emission Assessment System)를 활용하여 실도로 운행조건을 기반으로 차종·동력원별 에너지 소비와 온실가스 및 대기오염물질 배출, 이에 따른 환경적 외부비용을 통합적으로 분석하였다. 또한 직접·비배기·간접배출을 포괄하는 통합평가 결과를 바탕으로 교통사업의 경제성 평가, 환경비용의 내재화 및 차종별 기후·에너지·대기환경 정책 수립에 활용할 수 있는 평가체계의 적용 방향을 제시하였다. 이를 통해 도로교통의 환경영향을 직접배출 관리에 한정하지 않고, 에너지-기후-대기환경을 연계한 통합적 관점에서 평가하고, 탄소중립 교통체계 전환을 지원하는 과학적 정책평가 기반을 제시하고자 한다.

사사 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(과제번호 RS-2023-00245871)의 지원을 받아 수행하였습니다.

2D1

오존 생성 민감도별 기상 기여도 산정을 통한 고농도 오존 발생 배경 규명 및 건강영향 평가

Ozone Formation Sensitivity in Korea: Meteorological Drivers and Health Impacts of High Ozone Episodes

권은별, 김승미[1)]

울산과학기술원 탄소중립대학원, [1)]한국과학기술원 녹생성장지속가능대학원

지표 오존은 NOx와 VOC의 광화학 반응으로 생성되며, 기온·습도·풍속 등 기상 조건에 의해 크게 좌우된다. 특히 VOC-limited, transition, NOx-limited로 구분되는 오존 생성 민감도 유형에 따라 고농도 오존을 유발하는 기상 요인의 상대적 중요도와 영향 방향이 달라질 수 있다. 또한 각 유형은 전구물질의 구성과 비율이 상이하므로, 동일한 오존 농도에서도 생성 환경에 따른 건강영향 차이가 나타날 가능성이 있다. 이에 본 연구는 오존 생성 민감도를 중심으로 지역별 고농도 오존의 화학적 배경과 기상학적 촉발 요인을 규명하고, 이를 건강영향과 연계하고자 한다. 먼저 한국 17개 시도의 2021~2024년 5~6월을 대상으로 GEMS HCHO·NO_2 컬럼으로부터 FNR을 산출하여 오존 생성 민감도 유형을 분류하였다. 또한 기상 변수를 이용한 지상 오존 예측 머신러닝 모델을 구축하고 SHAP 분석을 통해 기상 요인의 기여도를 정량화하였다. 분석 결과, 고농도 오존은 전반적으로 맑고 건조하며 기온이 높은 조건에서 강화되었으나, 주요 기상 요인의 기여도는 민감도 유형에 따라 차이를 보였다. VOC-limited 지역에서는 기온의 영향이 두드러진 반면, NOx-limited 지역에서는 습도와 운량 등 여러 요인이 비교적 유사하게 기여하였다. 향후 유형별 오존 노출을 호흡기계 질환 및 알츠하이머병 자료와 연계하여 건강영향 차이를 평가할 예정이다. 본 연구는 위성 기반 오존 생성 민감도와 기상 기여도 분석을 연계함으로써 지역별 고농도 오존의 발생 특성의 상이함을 제시하고, 지역 맞춤형 대기질 관리 및 건강영향 평가를 위한 과학적 근거를 제공할 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 신기후체제 대응 환경기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2022003560002).

2D2

2024년 ASIA-AQ 캠페인 기간 백령도 $PM_{2.5}$의 고해상도 배출원 분석 및 국경 간 이동 경로 분석

High-Resolution Source Apportionment and Transboundary Transport Pathways of $PM_{2.5}$ at Baengnyeongdo Island during the 2024 ASIA-AQ Campaign

박준현

국립환경과학원 대기환경연구과

지난 10년간 한국과 중국은 미세먼지($PM_{2.5}$) 저감을 위한 강도 높은 환경정책을 추진해 왔으나, 정책의 구조적 성공 여부를 온전히 평가하기 위해서는 산업 석탄 연소, 차량 배출, 2차 질산염 대 황산염 생성 등 세부 오염원별 배출 특성이 시간에 따라 실제로 어떻게 변화해 왔는지에 대한 규명이 필요하다. 백령도는 국내 배출원과 혼합되기 이전의 국경 간 장거리 이동 오염물질을 포착할 수 있는 국가 배경 관측 지점이나, 24시간 필터 기반 시료 채취만으로는 일변화, 급속한 대기 노화, 특정 정책 변화의 즉각적 영향을 평가하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 2024년 ASIA-AQ 캠페인 기간(1~3월) 백령도 측정망에서 확보된 시간 단위 고해상도 성분 자료(OC, EC, 무기이온, 미량·지각 원소)에 EPA Positive Matrix Factorization (PMF 5.0) 모델을 적용하여 산업 석탄 연소, 생물성 연소, 금속 가공, 노화된 석탄/장거리 이동, 광물·지각 먼지, 차량 배출, 해염 입자, 2차 에어로졸 및 화석연료, 중유·선박 연소 등 오염원별 질량 기여도를 정량화하였다. 또한, Conditional Probability Function (CPF)로 각 인자의 풍향·풍속을 분석하고, HYSPLIT 역궤적 기반 Potential Source Contribution Function (PSCF)로 오염원의 지리적 기원과 국경 간 장거리 이동 경로를 공간적으로 매핑하였다. 산출된 2024년 결과를 백령도 대기환경연구소의 지난 10년간의 과거 오염원 분배 자료와 비교·연계 분석함으로써, 한·중 양국의 배출 저감 정책이 실제 대기 중 오염원 구성 변화에 미친 영향을 통계적으로 평가하였다. 본 연구는 2차 에어로졸 저감을 위한 국가 정책 최적화, 한·중 양자 청정대기 협력의 실증적 성과 검증, 화학수송모델 및 위성 기반 예보 모델의 정확도 향상에 기여할 것으로 기대된다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-03-02-008).

2D3

O_3 농도 증가에 따른 대기 에어로졸 pH의 변화와 $PM_{2.5}$ 산화잠재력 영향 평가

Assessment of Changes in Atmospheric Aerosol pH with Increasing O_3 Concentrations and Their Effects on $PM_{2.5}$ Oxidative Potential

전지원, 박성원

강원대학교 환경학과

대기 중 에어로졸 pH는 무기 에어로졸의 형성 경로, SOA 생성 및 유기 에어로졸의 aging, 금속 성분의 용출, 산화잠재력 및 생태계, 광학적 영향과 밀접하게 관련된 핵심 화학 지표이다. 지난 수년간의 SO_2 농도 감소에도 불구하고 aerosol pH 변화가 뚜렷하게 감소하지 않은 사례가 보고되고 있으며, 이는 대기 중 산화제 증가에 따른 황산염 및 질산염 생성 변화와 관련될 가능성이 있다. 본 연구는 춘천시를 대상으로 장기간의 측정망 자료를 활용하여 에어로졸 pH와 ALWC의 변화 특성을 산정하고, O_3 증가 및 에어로졸 조성과의 관계를 평가하고자 한다. 또한, 에어로졸 pH를 산화잠재력 자료와 연계하여 에어로졸 산성도가 인체 위해성에 미칠 수 있는 영향을 파악하고자 한다. 연구기간 동안 춘천의 $PM_{2.5}$ mass-normalized OP (OPm)은 AA와 DTT 서로 다른 특징을 나타내었다. AA의 경우 2022년 평균 2.98에서 2023년 2.48 pmol min^{-1} μg^{-1}으로 감소하였으며, DTT는 2022년 평균 9.57에서 2023년 10.39 pmol min^{-1} μg^{-1}으로 증가하였다. 해당 기간 에어로졸의 pH는 연구 기간 동안 큰 변화를 보이지 않았으며 이러한 결과를 바탕으로 추후 연구에서는 O_3 증가에 따른 에어로졸 조성 변화가 산화잠재력에 미치는 영향을 통합적으로 규명하고자 한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-03-02-008).

2D4

수도권과 연안·산업지역의 야간 잔류 오존 특성 비교를 통한 다음날 고농도 오존 선제 예측 지표 개발

Development of an Early-Warning Index for Next-Day High Ozone Episodes through Comparative Analysis of Nighttime Residual Ozone Characteristics in the Seoul Metropolitan and Coastal-Industrial

김태윤, 차성현, 홍현승

명지대학교 환경시스템공학전공

대류권 오존(O_3)은 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOCs)이 일사 조건에서 광화학 반응을 통해 생성되는 대표적인 2차 대기오염물질로, 고농도 오존의 발생은 전구물질의 배출뿐만 아니라 기상조건과 지역적 수송 등 다양한 요인의 영향을 받는다. 일반적으로 야간에는 광화학적 오존 생성이 제한되고 NO에 의한 적정 및 지표면 침적 등으로 오존 농도가 감소하지만, 특정 조건에서는 높은 농도의 오존이 야간까지 잔류할 수 있다. 이러한 야간 잔류 오존은 다음날 광화학 반응 시작 전 초기 대기상태를 반영하므로 다음날 고농도 오존 발생 가능성 판단의 자료로 활용될 수 있다. 그러나 기존 연구는 주로 당일 기상조건, 전구물질 및 광화학적 생성 특성을 중심으로 이루어져 왔으며, 전날 야간의 잔류오존 특성을 바탕으로 다음날 고농도 오존 발생을 선제적으로 예측한 연구는 상대적으로 부족하다. 본 연구에서는 수도권과 연안·산업지역을 대상으로 야간 오존 농도 및 잔존 특성과 다음날 최대 오존 농도 및 고농도 발생 관계를 비교·분석하고자 한다. 이를 위해 일반대기오염측정망의 시간별 O_3, NO_2 및 기상자료를 활용하고, 환경위성 GEMS의 NO_2, HCHO 등 전구물질 분포자료를 보조적으로 활용하여 대표 고농도 사례의 광역적 특성을 분석하고자 한다. 최종적으로 지역별 차이를 고려한 야간 잔류오존의 예측력을 평가하여 전날 밤 기준 다음날 고농도 오존 발생 위험을 사전에 판단할 수 있는 선제예측지표를 제시하고자 한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-03-02-008).

2D5

정지궤도 환경위성 GEMS 에어로졸 유효고도의 경사광로 의존 계통오차: 위성·지상 라이다 검증과 보정

Slant-Path Dependent Systematic Error in the GEMS Aerosol Effective Height: Validation against Spaceborne and Ground-Based Lidars and a Correction

유종원

충남대학교 지구환경·우주융합과학과

정지궤도 환경위성 GEMS의 에어로졸 유효고도(AEH)는 기둥 적분량인 위성 관측을 지표 미세먼지 농도로 환산하거나 고농도 사례의 수송 고도를 추적하는 데 직접 쓰이는 화소 단위 정보이나, 화소 수준에서 어느 조건에서 얼마나 신뢰할 수 있는지는 충분히 규명되지 않았다. 본 연구는 2020년 11월부터 2026년 8월까지의 AEH를 EarthCARE/ATLID (355 nm), CALIPSO/CALIOP (532 nm), AD-Net 지상 라이다망(532 nm) 및 GEMS 자체의 두 번째 고도 산출물 등 네 개의 독립 기준으로 검증하였다. 평균 편차(+0.47~+0.75 km)와 표준편차(1.31~1.65 km)는 선행 보고와 부합하였으나 화소 수준 상관은 0.13~0.17에 그쳤다. 라이다 공간 구조함수로 산정한 100 km 평균화 규모의 대표성 오차는 0.96 km로, 대표성만이 오차원이라 가정해도 상관 상한은 0.74여서 시공간 불일치만으로는 낮은 상관을 설명할 수 없었다. 지배적 오차는 경사광로에 연동된 계통오차로, 03~07 UTC만 관측하는 위성 라이다에서는 위성천정각 편향(+1.2~−1.0 km)으로, 관측 기하가 고정된 지상망에서는 진폭 1.5 km의 가짜 일변화로 나타나 그동안 별개 현상으로 오인되어 왔다. 편차의 sec (SZA) 기울기는 세 기준에서 각각 −1.26, −1.65, −0.91 km로 일치한 반면 라이다 실측 고도에 같은 회귀를 적용하면 모두 0을 포함하였고, 계층 전이 검정에서는 태양천정각만이 전이에 성공하여 주사 일정이나 위상함수에 의한 설명은 배제되었다. 태양광로 항을 포함한 보정식을 03~07 UTC 자료로만 적합한 뒤 독립된 지상망에 적용한 결과 00~07 UTC 가짜 일변화 진폭의 68%가 제거되었다. 적용 한계를 명시한 선별 규칙과 보정 패키지를 함께 제시한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-03-02-008).

2D6

위성 관측 이산화질소·암모니아와 지상관측자료를 활용한 한반도 초미세먼지 질산염(NO_3^-)의 시공간 특징 및 영향요인 분석

Spatiotemporal Characteristics and Contributing Factors of Particulate Nitrate (NO_3^-) over the Korean Peninsula Using Satellite-Derived Nitrogen Dioxide and Ammonia with In Situ Observations

김성영, 이수빈

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공

초미세먼지($PM_{2.5}$)의 주요 이온 성분 중 질산염(NO_3^-)은 질소산화물(NO_x)과 암모니아(NH_3)로부터 2차 생성되며, 전구물질 농도뿐만 아니라 기상 조건에 민감하게 반응한다. 따라서 2차 생성 미세먼지 저감 대책을 위해서는 질산염의 시공간 분포와 생성 기여 인자에 대한 이해가 선행되어야 한다. 국내에서는 $PM_{2.5}$의 이온 성분을 측정하는 지상 집중측정망이 운영되고 있으나, 관측 지점이 제한적이어서 한반도 전역의 질산염 분포와 지역 간 차이를 연속적으로 파악하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 공간적 한계를 보완하기 위하여, 지상 집중측정망 자료, 정지궤도 환경위성 GEMS의 NO_2 연직 컬럼 농도와 IASI NH_3 산출물, 그리고 모델 기상 변수를 입력자료로 하는 머신러닝 기반 질산염 월평균 공간 추정 모델을 구축한다. 2021-2024 기간의 격자 기반 월 자료를 대상으로 머신러닝 모형을 적용하여 전구물질과 기상 인자, 질산염 농도 간의 비선형 관계를 학습시켰다. 교차검증을 통해 비선형 관계를 가장 효과적으로 학습하는 모형을 선정하였으며, 선정된 모형으로 산출한 한반도 질산염 공간 분포와 계절적 특징을 분석하였다. 추가적으로 변수 중요도를 제시함으로써 질산염 농도가 민감하게 반응하는 환경 조건을 분석하였다. 본 연구에서 수행된 결과는 지역별 2차 미세먼지 정책 수립의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-03-02-008).

2D7

GEMS와 CALPUFF를 활용한 수도권 서부-동부 NO_2 잠재 수송 특성 및 관측 적용성 평가

Evaluation of Potential NO_2 Transport Characteristics from West to East in the Seoul Metropolitan Area and Observational Applicability Using GEMS and CALPUFF

김준영, 문현상, 박성현

안양대학교 환경에너지공학과

수도권은 대규모 배출원이 밀집한 서부 산업 권역과 오염물질 정체로 인한 고농도 현상이 잦은 동부 주거 권역 간의 대기질 불균형이 뚜렷하게 나타난다. 특히 서풍 계열의 기상 조건이나 낮 시간대 해륙풍 침투 시 발생하는 오염물질의 광역 수송은 대도시권 대기질 관리에 있어 핵심적인 요소로 작용한다. 최근 정지궤도 환경 위성(GEMS)의 도입으로 대기 오염물질 농도의 시공간적 감시가 가능해졌으나, 복합적인 오염원이 혼재된 도심 환경에서 세밀한 수송 경로와 위성 관측 자료 간의 정합성을 실증적으로 평가한 연구는 여전히 부족한 실정이다. 또한, 기존의 점 단위 지상 측정망만으로는 입체적인 이동 궤적 규명에 한계가 있으며, 확산 모델링 결과의 공간적 신뢰도 검증 또한 미비한 상태이다. 본 연구에서는 GEMS 위성 자료, CALPUFF 대기확산모델 및 지상 대기오염 측정망 자료를 상호 비교·대조하고자 한다. 이를 통해 수도권 서부-동부 간 NO_2 잠재 수송 특성 및 관측 적용성을 다각적으로 평가할 계획이다. 먼저 기상 및 대기질 자료를 분석하여 서풍계 고농도 사례일을 선정하고, 실제 관측 기상장 기반의 CALMET-CALPUFF 시스템을 활용하여 가상 점오염원으로부터의 단위배출 확산 궤적을 독립적으로 추적할 예정이다. 이후 도출된 확산 플룸(Plume)의 시공간 변동성을 GEMS의 수직컬럼 농도 및 지상 측정소의 실제 농도 변화와 대조·검증함으로써 권역 간 수송 효율과 도달 시간을 산출하고자 한다. 본 연구 결과는 도심 지역 수송 분석에 있어 GEMS 위성의 공간 해상도 한계와 적용 가능성을 정량적으로 제시할 것이다. 이는 고농도 사례 발생 시 광역적 유입과 국지적 배출의 영향을 명확히 구분하여 지자체 간 효율적인 대기환경 관리 정책 및 공동 대응 체계를 수립하기 위한 과학적 근거로 활용될 것으로 기대된다.

사사 이 성과는 기후에너지환경부(한국환경산업기술원)의 환경분야 특성화 선도대학 육성사업과 고용노동부의 K-디지털 트레이닝 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

2E1

해양과학기지의 배경대기 관측 현황과 계획

Background Atmospheric Observations at Korea Ocean Research Stations (K-ORS): Current Status and Future Plans

정진용, 민인기, 정종민, 이재익, 김고운, 이승우, 민용침, 이수찬

한국해양과학기술원

해양과학기지는 한반도 주변 해역의 해양, 기상 및 대기환경에 대한 장기 관측을 수행하는 해상 플랫폼이다. 이들 기지에서는 미세먼지, 오존, 블랙카본, 온실가스 등 대기환경 관측과 함께 일사, 자외복사, 가시거리, 운고 등의 복사 및 광학 관측이 수행되고 있으며, 주변 해역의 배경대기 특성을 이해하는 데 활용될 수 있는 장기 자료가 축적되고 있다. 본 발표에서는 해양과학기지의 배경대기 관측 현황과 장기 시계열 자료의 생산 및 관리 현황을 소개하고, 향후 관측 운영과 자료 활용 방향을 논의하고자 한다. 해양과학기지 관측자료는 한반도와 동아시아 주변 해역의 배경대기 특성 이해와 해양 경계층 대기 연구 등을 위한 기반자료로 활용될 것으로 기대된다.

사사 본 논문은 해양수산부의 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2021-KS211502).

2E2

우리나라 지구대기감시의 현황과 계획

Current Status and Future pkan of Global Atmospheric Watch in Korea

김수민, 이선란, 부준오, 신대근, 김박사, 양세환, 유희정, 고희정, 김영아, 김상백

국립기상과학원

기후변화의 원인과 진행 상황을 과학적으로 진단하기 위해서는 기후변화 원인물질에 대한 장기간의 정확하고 지속적인 관측이 필요하다. 기상청은 세계기상기구(WMO) 지구대기감시프로그램(GAW)의 국내 대표기관으로서 안면도, 제주고산, 울릉도독도, 포항에서 온실가스, 반응가스, 에어로졸, 성층권오존, 대기복사 등을 관측하고 있다. 2025년 우리나라 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 및 육불화황의 배경농도는 관측 이래 최고치를 기록하였다. 특히 이산화탄소는 432.7 ppm으로 전년보다 3.2 ppm 증가하여 최근 10년 중 두 번째로 큰 증가폭을 보였으며, 전지구 평균보다 7.1 ppm 높았다. 반면 메탄의 연간 증가폭은 최근 10년 평균보다 낮아졌으며, 오존층 파괴물질인 염화불화탄소와 에어로졸은 장기적으로 감소하는 특성을 보였다. 향후에는 지상 중심의 장기 관측을 기반으로 항공기·선박·위성 등 다양한 관측플랫폼을 연계하여 기후변화 원인물질의 입체적인 감시를 강화하고, 국제적으로 비교 가능한 고품질 관측자료 생산과 활용을 확대하고자 한다. 이를 통해 우리나라와 동아시아의 기후변화 원인물질 변화를 보다 정확하게 진단하고 기후위기 대응을 위한 과학적 근거를 제공하고자 한다.

사사 본 논문은 국립기상과학원의 재원으로 수행된 연구임.

2E3

서해상 배경대기의 기후변화유발물질 장기변동 특성: 배출원과 해양대기 중 거동 변화

Long-term Variability of Climate Forcers at Regional Background Site of Yellow Sea: Changes in Outflow Emissions and Their Behavior in the Marine Atmosphere

윤창동, 이미혜, 길준수, 정진용[1)]

고려대학교 지구환경과학과, [1)]한국해양과학기술원 해양재난연구부

본 연구는 소청초 해양과학기지에서 서해 중앙부에 위치하여 대륙에서 유출된 대기가 한반도에 도달하기 전 서해상 배경대기의 기후변화유발물질을 2015~2023년간 연속 관측하였다. $PM_{2.5}$ 연간 중앙값은 20에서 12 $\mu g\ m^{-3}$로, eBC는 0.92에서 0.40 $\mu g\ m^{-3}$로 감소하였다. 대륙 기류에 한정하여 연소효율 지표 $\Delta CO/\Delta CO_2$는 2015년 23.0에서 2022년 8.3 ppb ppm^{-1}로 감소하여(-1.30 ppb $ppm^{-1}\ yr^{-1}$, -40%) 배출원 지역에서의 선행연구와 부합하였다. 반면 $\Delta BC/\Delta CO$와 $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$는 유의한 추세를 보이지 않았다. CO_2는 3.18 ppm yr^{-1}로 증가하는 한편, 이 해역 특유의 해무는 3~7월 관측 시간의 11.5%를 차지하는데, 같은 CO 농도 조건에서 해무 시간의 CO_2는 해무가 없는 시간보다 4~6 ppm, CH_4는 21~30 ppb 높은 반면, eBC와 $PM_{2.5}$는 각각 최대 0.48 및 8 $\mu g\ m^{-3}$ 낮았다. 위성의 온실기체 산출은 구름과 안개가 없는 조건에 한정되므로 이 조건의 대기 상태는 관측되지 않는다. 또한 해무 시간의 BC 감소분은 기단에 따라 최대 0.38까지 나타난 반면, 배출된 블랙카본의 80%를 소수성으로 두고 e-folding 1.15일을 적용하는 대표적 모델 모의는 동일 조건에서 농도과 무관한 0.47~0.71을 준다. 본 장기 자료는 배경대기 변화의 기록에 더하여 해양지역 위성관측 온실기체 산출물과 모델의 에어로졸 모사 과정을 점검하는 자료로 활용될 수 있다.

사사 이 논문은 2026년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2021-KS211502, 관할해역 첨단 해양과학기지 구축 및 융합연구).

2E4

극저온 농축기-GC/MS 기반 할로겐화 온실가스 분석 시스템 구축 및 안면도 대기 중 농도 특성

Development of a Cryogenic Preconcentrator-GC/MS System for Halogenated Greenhouse Gas Analysis and Characterization of Ambient Concentrations at Anmyeon-do

강성구, 김주애[1)], 임유락, 박선영[2)], 김수민[3)], 권도현[4)]

고려대학교 지구환경과학과, [1)]고려대학교 기초과학연구원, [2)]경북대학교 지구시스템과학부, [3)]국립기상과학원 지구대기감시연구과, [4)]한국표준과학연구원

할로겐화 온실기체는 높은 지구온난화지수와 긴 대기수명을 가지며, 특히 최근에는 HFCs와 PFCs 등 불소계 온실기체의 배출 변화와 대기 중 농도 추세를 파악하기 위한 관측이 요구되고 있다. 동아시아는 이들의 주요 배출지역 중 하나이며, 동아시아 배출과 해양 배경 대기의 영향을 함께 받는 한반도에서 관측지점의 확대는 지역 규모의 농도 변화와 배출 영향을 이해하는 데 중요하다. 본 연구에서는 국내 기술로 개발한 극저온 농축기를 GC/MS와 연계하여 할로겐화 온실기체 분석 시스템을 구축하고, 이를 안면도 지구대기감시소에서 채취한 대기 시료에 적용하였다. 수분이 제거된 안면도 공기 4 L를 −170℃까지 냉각 가능한 극저온 농축기에 농축하고 pre-column을 이용하여 CO_2, Xe 등을 제거한 후 GC/MS로 분석하였다. 그 결과, 안면도 대기에서 CFC-12, HCFC-22, HFC-134a, HCFC-142b, CFC-11 및 CFC-113 등 약 10여 종의 할로겐화 온실기체가 검출되었으며 제주도 고산에서 MEDUSA로 분석되고 있는 작업표준가스를 이용하여 정량하였다. 농도 환산 결과 안면도 할로겐화 온실기체는 제주도에 비해 5~10%가량 높은 수준을 보였고 RSD는 물질에 따라 5~25% 수준으로 다소 높았으나 분석조건 최적화를 통해 개선할 계획이다. 본 연구를 통해 안면도의 할로겐화 온실기체 측정 기반을 마련하였으며, 향후 분석대상 물질의 확대와 지속적인 관측을 통해 한반도 배경 대기의 장기 농도 변화와 동아시아 지역 배출 영향을 파악하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2E5

겨울철 종관기상에 따른 서울-안면도 에어로졸 연계 특성

Synoptic Modulation of Urban-Costal Aerosol Coupling between Seoul and Anmyeondo during Winter

김주애[1),2)], 이현민[1)], 박현민[1)], 이미혜[1)], 김화진[3)], 김수민[4)] 백승훈[5)], 손명희[5),6)]

[1)]고려대학교 지구환경과학과, [2)]고려대학교 기초과학연구원, [3)]서울대학교 환경보건학과, [4)]국립기상과학원 지구대기감시연구과, [5)]㈜공감센서, [6)]한국전자통신연구원

한반도 서해안에 위치한 안면도 GAW 관측소는 동아시아 광역수송과 대기 조성 변화를 지속적으로 감시하는 주요 관측지점이다. 이러한 배경대기 관측 자료를 해석하기 위해서는 대기오염물질의 수송과 축적을 조절하는 종관 및 지역 기상 조건을 함께 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 2024년 겨울철 ASIA-AQ 집중관측 기간 동안 서울과 안면도에서 동시 측정된 $PM_{2.5}$, PM_1, NR-PM_1 화학조성 및 VOCs를 이용하여 종관기상에 따른 도시-연안 대기의 연계 특성을 분석하였다. 광역수송이 우세한 조건에서는 서울과 안면도의 PM 농도가 동시에 증가하고 NR-PM_1 조성도 유사한 특성을 보였으며, 이를 두 지역의 에어로졸 특성이 연계되는 regional coupling으로 해석하였다. 반면 대기 정체와 해륙풍을 포함한 중규모 순환의 영향이 커지는 조건에서는 두 지점의 PM 농도와 NR-PM_1 조성 및 VOC 특성에서 차이가 나타났다. 특히 3월 3~5일은 광역수송에 의해 초기에 두 지점의 특성이 유사하게 나타났으나 이후 종관기상 변화에 따라 두 지점의 에어로졸 특성이 서로 다른 양상으로 변화하는 과정을 보였다. 이러한 결과는 안면도가 다양한 규모의 대기 영향을 반영하는 동적인 연안 수용지로 기능하며, 장기 관측자료의 해석에서도 이러한 특성을 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다.

2E6

황해 청정 해양 대기 에어로졸의 광학적 특성 및 장기 변화 추이: 소청초 해양과학기지 AERONET 관측 자료 활용

Optical Properties and Long-Term Trends of Pristine Marine Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea: AERONET Observations at Socheongcho Ocean Research Station

최용주, 정진용[1)], 김고운[1)], 이승우[1)], 정종민[1)]

한국외국어대학교 환경학과, [1)]한국해양과학기술원

황해는 동아시아 대륙 인위적 배출원과 서태평양 해양 대기가 만나는 접경 지역으로, 대기 에어로졸의 조성·광학 특성 및 시간 변동성을 이해하는 데 있어 매우 중요한 관측 거점이다. 소청초 해양과학기지(37.42°N, 124.74°E)는 인천항에서 약 200 km 떨어진 한반도 서쪽 해상에 위치한 대표적 배경 대기 관측 지점으로, 육상 관측소가 포착하기 어려운 황해 상공의 순수 해양 대기 및 대륙 유출 대기의 특성을 동시에 감지할 수 있는 유일무이한 플랫폼이다. 본 연구는 소청초 해양과학기지에 설치된 AERONET (Aerosol Robotic Network) 관측 자료를 활용하여, 해양 대기 에어로졸의 광학적 특성과 장기 변화 추이를 종합적으로 분석하였다. 분석 대상은 에어로졸 광학두께(AOT), 옹스트롬 지수(Angstrom Exponent, AE), 단산란 알베도(SSA), 부피 크기 분포(Volume Size Distribution) 등 핵심 광학 변수이며, 이를 통해 입자 크기, 광흡수 특성, 조성 변동을 정량적으로 규명하였다. 또한 계절별, 연도별 추이 변화와 함께, HYSPLIT 역궤적 분석을 수행하여 대륙의 풍하 영향과 청정 해양 대기의 광학 특성 차이를 규명하고, 중국 배출 저감 정책 등 주요 기여 요인의 장기적 영향을 평가하였다. 본 연구는 비교적 자료획득이 용이한 소청초 AERONET 관측 자료가 주요 오염물질의 거동 및 해양-대기 상호작용 연구뿐만 아니라 정지궤도 환경위성 시대의 지상 검증 네트워크 강화에 기여할 것으로 기대된다.

2F1

GEMS 자료 기반의 시간대별 FNR 임계값 산출 및 오존생성민감도 체제 분석

Diurnal FNR Threshold calculation and Ozone Formation Sensitivity Regime Analysis Based on GEMS Data

이윤곤, 정다희, 이창석[1], 강경희[1], 신혜정[1]

충남대학교 지구환경·우주융합과학과 대기과학전공, [1]국립환경과학원 환경위성센터

대류권 오존은 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOCs)의 광화학 반응으로 생성되며, 전구물질 농도에 대해 비선형적으로 반응한다. 위성에서 관측되는 포름알데히드(HCHO)와 이산화질소(NO_2)의 비율인 FNR (HCHO/NO_2)은 오존생성민감도(Ozone Formation Sensitivity, OFS)를 VOC-limited, Transitional, NOx-limited 체제로 구분하는 지표로 활용된다. 그러나 체제의 기준이 되는 FNR 임계값은 지역의 배출 특성과 기상·광화학 조건에 따라 달라질 수 있어 지역별 임계값 산정이 필요하며, 시간해상도가 높은 정지궤도 위성자료를 활용한 일중 변동 분석도 중요하다. 본 연구에서는 정지궤도 환경위성 GEMS의 HCHO 및 NO_2 자료와 지상 오존 관측자료를 이용하여 시간대별 FNR 임계값을 산출하고, 국내 주요 지역의 오존생성민감도 체제를 분석하였다. 특히 석유화학 및 제철 산업시설이 밀집한 여수·순천·광양 지역을 중심으로 시간대별 FNR 임계값과 오존 생성 체제의 일중 변화를 평가하고, 서울-인천 및 경기 지역과 비교하였다. 이를 통해 산업지역과 수도권에서 나타나는 FNR 임계값, 체제 전환 시각 및 체제 지속 특성의 차이를 파악하고자 하였다. 본 연구는 단일 임계값을 적용한 기존 분석에서 나아가 지역 및 시간대별 FNR 임계값을 적용함으로써 오존 생성 민감도의 시공간적 변동성을 제시하며, 향후 지역별·시간대별 오존 전구물질 관리 전략 수립을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2026-04-02-076).

2F2

딥러닝 기반 다종 대기오염물질 동시 산출 알고리즘 개발 및 복합오염 분석

DeepMAP: Simultaneous Mapping of Multiple Air Pollutants Using Deep Learning for Compound Pollution Analysis

강은진, 정시훈, 임정호

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

다종 대기오염물질을 동시에 모니터링하는 것은 공간 분포와 복합적인 노출 영향을 이해하는 데 필수적이다. 그러나 지상 관측망의 산발적 분포, 정지궤도 위성 관측 시 구름으로 인한 결측, 대기화학수송모델의 낮은 공간 해상도 등 기존 산출물의 시·공간적 한계로 인해 정확한 다종 오염물질 모니터링에는 여전히 어려움이 따른다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 딥러닝 기반 다종 대기오염물질 분석 알고리즘인 DeepMAP (Deep learning for Multiple Air Pollutant analysis)을 개발하였다. DeepMAP은 멀티브랜치, 멀티태스킹 및 이미지 융합 구조를 활용하여 다양한 자료원의 강점을 결합하고, 공간적으로 연속적인 6종 대기오염물질($PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$, NO_2, O_3, CO, SO_2) 분포를 산출하였다. DeepMAP은 2021~2023년 동안 검증용 관측소에서 각각 R = 0.91, 0.89, 0.81, 0.91, 0.74, 0.57과 nRMSE = 0.48, 0.46, 0.44, 0.24, 0.41, 0.73을 보여 전반적으로 높은 보였으며, 황사와 지역 배출이 동시에 발생한 고농도 사례도 효과적으로 포착하였다. WHO 가이드라인을 적용한 다종 오염물질 동시 초과 분석에서는, 2종 오염물질 조합에서는 $PM_{1.0}$-$PM_{2.5}$ (76%), 3종 오염물질 조합에서는 $PM_{1.0}$-$PM_{2.5}$-NO_2 (91%)가 가장 높은 비율을 차지하였다. 이는 동아시아에서 미세먼지를 중심으로 여러 오염물질이 동시에 고농도로 나타나는 복합오염 특성을 보여주며, 복합 대기오염의 목표 지향적 저감 전략 수립을 위한 과학적 근거로 활용될 수 있다.

2F3

환경위성을 통한 지표오존 생성률 추정방법론

Estimation of Surface Ozone Production Rate Using GEMS Observation

박상서, 조예슬, 이창석[1], 강경희[1], 신혜정[1]

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, [1]국립환경과학원 환경위성센터

대류권에 존재하는 오존은 질소산화물과 휘발성유기화합물의 광화학 반응으로 생성되며, 최근 들어 중요한 고농도 대류권 오존 현상의 원인 규명을 위해 매우 중요한 기체이다. 이 과정에서 천리안위성2B호에 탑재된 정지궤도환경위성(GEMS)은 자외선-가시광선 관측을 통해 오존전량과 대류권오존을 포함하여 대표적인 인위적 오염물질인 이산화질소와 포름알데하이드 등을 산출하게 된다. 그러나 고농도 오존 현상의 원인 규명을 위해서는 광화학 반응에 의한 오존생성률에 대한 정량적 평가가 필요하다. 본 연우게서는 GEMS 위성으로부터 시공간적으로 고해상도로 나오는 이산화질소와 포름알데하이드, 오존 자료를 이용하여 대기 중 오존 생성률을 추정하는 방법론을 제시하고자 한다. 이를 통해 본 연구에서는 환경위성 자료를 활용한 오존 생성과정의 정량적 이해 및 고농도 오존 저감정책 수립에 활용 가능한 관측 기반 분석 체계를 제시하고자 한다.

사사 본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2026-04-02-076).

2F4

대기화학모델 민감도 실험을 활용한 FNR 기반 지역규모 오존 생성 메커니즘 분석

FNR-Based Analysis of Regional-Scale Ozone Production Regimes Using Air Quality Model Sensitivity Simulations

이효정[1),2)], 백승희[3)], 정승현[3)], 이창석[4)], 강경희[4)], 신혜정[4)]

[1)]부산대학교 대기환경과학과, [2)]부산대학교 환경연구원, [3)]부산대학교 지구환경시스템학부 대기과학전공, [4)]국립환경과학원 환경위성센터

동아시아에서는 지속적인 대기오염물질 배출 저감에도 불구하고 오존(O_3) 농도가 증가하면서, 관측과 대기화학모델을 활용한 오존 생성 메커니즘 연구가 활발히 수행되고 있다. 특히, 위성에서 관측된 포름알데히드(HCHO)와 이산화질소(NO_2)의 컬럼 농도비인 HCHO-to-NO_2 ratio (FNR)는 오존 생성 체계 진단에 널리 활용되고 있다. 그러나 동아시아를 높은 시간 해상도로 관측하는 정지궤도 환경위성 GEMS의 FNR 기반 진단을 고해상도 대기화학모델의 배출량 민감도 실험과 직접 비교·평가한 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 한반도 주요 대도시와 산업 지역을 대상으로 GEMS FNR 기반 오존 생성 체계를 진단하고, NO_x 및 VOC 배출량 저감에 따른 모델의 O_3 농도 변화를 통해 그 신뢰성을 평가하였다. 여름철 중 기상장 모의 성능이 우수한 기간을 선정하여 기준 및 배출량 저감 실험을 수행하고, O_3 농도 변화로 판별한 생성 체계를 GEMS FNR 결과와 비교하였다. 모델 결과, 수도권을 중심으로 GEMS FNR에서 VOC-limited regime으로 진단된 지역에서는 VOC 감소 시 O_3가 감소한 반면, NO_x 감소 시에는 O_3가 증가하였다. 이는 VOC-limited 조건의 광화학적 특성과 일치하며, GEMS FNR과 모델 기반 오존 생성 체계가 전반적으로 높은 일관성을 보였다. 시·군·구 단위에서도 일부 교외 지역을 제외한 대부분의 대도시와 산업 지역에서 두 방법의 공간적 분포가 대체로 일치하였다. 이러한 결과는 GEMS FNR이 한반도 주요 대도시와 산업 지역의 오존 생성 체계를 진단하는 유용한 지표이며, 지역별 NO_x 및 VOC 배출 저감 전략 수립을 위한 과학적 근거로 활용될 수 있음을 보여준다.

사사 본 연구는 국립환경과학원의 연구용역과제 「환경위성 기반 활용산출물 개발 및 자료 생산(Ⅲ)」과 한국연구재단 중견연구지원사업(RS-2022-NR069425)의 지원을 받아 수행되었습니다.

2F5

GEMSAT을 활용한 정지궤도 환경위성(GEMS) 데이터 분석 및 대기환경 연구·모니터링 활용성 증대

Enhancing the Utilization of Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS) Data for Atmospheric Environmental Research and Monitoring Using GEMSAT

김병길[1),2)], 안창진[1)], 이창석[3)], 강경희[3)]

[1)]문소프트(주), [2)]경북대학교 융복합시스템공학부, [3)]국립환경과학원 환경위성센터

정지궤도 환경위성(GEMS)은 아시아 지역의 미세먼지($PM_{2.5}$, PM_{10}), 이산화질소(NO_2), 오존(O_3), 이산화황(SO_2) 등 주요 대기오염물질을 주간 매시간 고해상도로 관측하여, 광역 대기오염 이동 및 대기질 변화 분석에 핵심적인 데이터를 제공하고 있다. 환경위성센터에서는 이러한 고품질 위성 산출물의 대국민 및 연구자 저변 확대를 위해 환경위성 데이터를 무상으로 배포하고 있으며, 데이터 접근성과 분석 편의성을 높이기 위한 전용 영상처리 도구인 GEMSAT (환경위성영상활용도구)을 개발하여 배포하고 있다. GEMSAT은 대기환경 연구자와 실무자가 복잡한 위성 데이터 처리 절차 없이도 GEMS 관측 자료를 직관적으로 표출하고 분석할 수 있도록 지원하는 소프트웨어이다. GEMS뿐만 아니라 기상(AMI), 해양(GOCI-II) 등 국내 정지궤도 위성 데이터와 netCDF, HDF, GeoTIFF 등 대기/원격탐사 표준 파일 포맷을 폭넓게 수용한다. 주요 기능으로는 대기오염물질 농도 공간 표출, 다종 영상 중첩, 채널 연산 및 필터링, 시계열 비교·정밀 분석, 대기질 이동 패턴 분석을 위한 타임랩스 영상 생성, 분석 결과 저장 기능 등을 제공한다. 본 발표에서는 대기환경 분야 연구자 및 실무자를 대상으로 GEMSAT의 주요 기능과 GEMS 대기질 산출물 활용 워크플로우를 소개하고, 대기질 모니터링, 오염원 추적 및 대기환경 정책 연구 등 다양한 분야에서의 위성 데이터 융합 활용 방안을 제시하고자 한다. 이를 통해 GEMS 자료의 활용 장벽을 낮추고, 국내 대기환경 감시 및 연구 생태계 확장에 기여하고자 한다.

사사 본 연구는 2026년도 환경과학원 재원으로 "환경위성(GEMS) 검증 기반 활용정보 생산 확대 및 고도화" 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

2G1

탄성산란(미세먼지) 라이다의 기초와 대기관리 활용 - 현장 측정사례를 중심으로 -

Fundamentals of Elastic Backscatter Lidar for Particulate Matter and Its Applications in Air Quality Management

신동호, 최호경

한국에너지기술연구원

대기오염 관리를 위한 기존 지점식 측정망은 장기간의 농도 추세와 환경기준 준수 여부를 평가하는 데 필수적이지만, 오염물질의 발생 위치, 공간적 확산, 이동 경로 및 고도별 분포를 연속적으로 파악하는 데에는 한계가 있다. 특히 사업장 내부 또는 부지경계에서 발생하는 국지적·간헐적 배출은 측정소의 위치와 풍향에 따라 포착되지 않을 수 있으며, 위성관측도 관측시간과 고도분포 정보에 제약이 있다. 이에, 한국에너지기술연구원은 산업지역의 미세먼지 배출과 이동을 원격으로 측정할 수 있는 이동형 라이다를 개발하였다. 개발 장비는 다파장 후방산란신호와 편광정보를 활용하는 $3\beta+1\delta$ 구성으로, 5 km 이상의 측정거리, 2 m의 거리분해능, 방위각 0~360° 및 고도각 -30~70°의 스캔 범위를 갖고, 이동성을 확보하도록 설계하였다. 이를 공단, 도심, 대형사업장, 발전사 사업장, 항만 및 채석장 등 다양한 환경에 적용하여 공단의 복합 배출원, 도심의 국지적 오염과 재비산, 대형사업장과 발전사의 굴뚝·야적장, 항만의 하역·운반시설, 채석장의 파쇄·운반·적치 과정에서 형성되는 먼지 플룸을 관측하였다. 현장사례에서는 지상 농도계만으로 확인하기 어려운 배출원의 위치와 발생 시점, 플룸의 상승·확산 높이, 풍하측 이동 경로, 배경농도와 국지 배출의 공간적 차이를 영상으로 파악함에 따라 배출원 탐지와 확산 감시를 위한 첨단모니터링 수단으로 활용 가능성 확인함으로써 지점측정 중심의 기존 대기관리 체계를 공간기반의 능동형 감시체계로 확장하는 핵심 기술로 활용될 것으로 기대할 수 있다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 RS-2026-25501396).

2G2

한반도 미량기체 지표원격관측 장비 Pandora/MAX-DOAS를 활용한 산단지역 NO_2 및 HCHO 농도 거동 파악 및 향후 관리 방안

최용주, Yugo Kanaya[1)], 이기열, 윤치성, 이채린

한국외국어대학교 환경학과, [1)]Research Institute for Global Change, JAMSTEC, Japan

국내 대형 석유화학, 정유 산업단지는 NO_2, SO_2, 그리고 벤젠·톨루엔·자일렌 등 방향족 VOCs의 주요 배출원으로, 지역 대기질 악화 및 광화학 오존 생성에 미치는 영향이 매우 크다. 그러나 기존의 지상 *in-situ* 상시 측정망은 단일 지점의 지표 농도만을 제공하고, 측정소 수도 제한적이라, 산단 배출원의 실질적 배출 특성 규명, 연직 분포 감시, 2차 생성물질 형성 과정 이해에 근본적 한계를 지닌다. 이러한 배경에서 오염물질의 총 컬럼 밀도 및 연직 분포를 산출할 수 있는 지표 원격 관측 장비의 활용이 필수적으로 요구된다. 본 연구는 Pandora 및 MAX-DOAS 지표 원격 관측 장비를 국내 대표 산업단지 인근에 배치하여, NO_2 및 포름알데히드(HCHO)의 대류권 컬럼 밀도와 연직 분포 및 지표 농도를 종합적으로 측정하였다. Pandora와 MAX-DOAS는 다각도 산란광 분석을 통해 경계층 내 연직 프로파일 정보를 제공하여 감시 목적의 가능성을 평가하였다. 이를 통해 Pandora/MAX-DOAS 기반 산단 배출원 상시 감시 네트워크 구축의 실효성을 입증하는 동시에, 배출 인벤토리 검증, 연직 대표성 확보, 오존 저감 정책 수립에 실질적으로 기여할 것으로 기대됨. 향후 국가 배출원 관리 체계에 지표 원격 관측 자료를 통합하는 것이 산단 지역 대기질 개선의 핵심 방향으로 판단된다.

사사 본 연구는 2026년도 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 지역맞춤형 오존 관리 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25505137).

2G3

대기 온실기체 및 독성 화학물질 누출 및 배출량 원거리 측정용 적외선 분광시스템 개발

Development of an Infrared Spectroscopic System for Remote Detection and Measurement of Atmospheric Greenhouse Gas and Toxic Chemical Leaks and Emissions

강영웅, 이강함[1)], 정원석[2)], 김정훈[2)], 홍석영[2)], 이한림[3)]

부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공, [1)]국립기상과학원 지구대기감시연구과, [2)]국립환경과학원 대기공학연구과, [3)]부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)는 산업 현장에서 배출되거나 누출되는 다양한 기체를 원격으로 탐지하고 정량하는 데 널리 활용되어 왔다. 정확한 기체 누출 탐지, 누출량 및 배출량 정량화를 위해서는 충분한 분광해상도와 높은 신호대잡음비를 갖춘 고성능 관측 장비뿐만 아니라, 정확도 높은 기체 산출 알고리즘이 필요하다. 본 연구에서는 Open-Path FTIR 장비인 Versatile Spectroradiometer (VSR)를 이용하여 쓰레기 소각장 및 LNG 발전소의 산업 굴뚝에서 배출되는 다종 기체(N_2O, CH_4, CO)를 야간 관측하였다. 온도 의존적인 기체 흡수단면적을 장비의 기기함수로 컨볼루션한 후 선형 최소제곱법과 비선형 최소제곱법을 결합한 광학두께 피팅 기법을 이용하여 대상 기체의 혼합비를 산출하였다. 쓰레기 소각장에서는 N_2O와 CO에 해당하는 분광 구조가 확인되었다. 산출된 CO 혼합비를 굴뚝원격감시체계 측정값과 비교한 결과, 두 측정값은 높은 상관관계를 나타냈다. LNG 발전소에서는 N_2O, CH_4 및 CO에 해당하는 분광 구조가 확인되었으며, CH_4의 혼합비는 라만 라이다 측정 결과와 비교하였을 때 유사한 수준을 나타냈다. 이러한 결과를 통해 지상기반 FTIR 관측을 이용한 다종 기체 혼합비 산출 가능성을 확인하였다. 향후 더 높은 분광해상도와 신호대잡음비를 갖는 적외선 분광시스템을 개발하여 본 산출 기법을 적용할 경우 기체 탐지 및 산출 성능이 향상될 것으로 기대된다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2025-01-12-004).

2G4

메탄 및 이산화탄소 배출 혼합비 및 배출량 원거리 측정 라만라이다

Remote Raman Lidar Measurements of CH_4 and CO_2 Mixing Ratios and Emission Rates

이한림[1),2)], 계관욱[1)], 박선호[2)], 최인영[2)], 장재화[1)], 김지석[1)], 최원이[3)], 신성균[4)]

[1)]부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공, [2)]노바스콥(주), [3)]NASA Goddard Space Flight Center, [4)]서울연구원 탄소중립연구센터

메탄(CH_4)과 이산화탄소(CO_2) 배출량의 정확한 정량화는 온실가스 감축 정책과 배출권거래제의 신뢰성 확보에 필수적이다. 그러나 기존 상향식(bottom-up) 배출량 산정은 활동자료와 배출계수 등 간접 자료에 의존해 불확실성이 큰 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 CH_4와 CO_2의 체적 혼합비(VMR)와 배출량을 원격으로 동시에 측정할 수 있는 라만 라이다를 개발하였다. 본 라이다는 355 nm Nd:YAG 레이저 펄스를 송신하고, Rayleigh-Mie 신호와 CH_4, CO_2, N_2의 라만 산란 신호를 동시에 검출하는 4채널 시스템이다. 현장 관측은 함안 소각시설, 서울 LNG 발전소, 여수 산업단지에서 수행하였다. 함안과 서울에서는 배출원으로부터 각각 430 m와 1,000 m 거리에서 거리별 VMR과 굴뚝 배출량을 산출하였다. 서울에서 CH_4의 평균 배출량은 72±27 kg h^{-1}로 나타났다. CO_2의 최대 배출량은 함안에서 1,709 kg h^{-1}, 서울에서 3,708 kg h^{-1}였다. 2026년 5~6월 여수산단에서는 라이다로부터 각각 1.1 km와 1.4 km 떨어진 플라스틱 생산공장, 나프타 처리공장의 CH_4 배출량을 측정하였다. 해당 공장들은 중동 지역으로부터 원유를 공급받아 가동되며, 관측기간 에 호르무즈 해협이 봉쇄로 원유 공급 차질이 발생한 것으로 알려졌다. 이에 따라 6월 3일 이후 메탄 배출량이 현저히 감소하였으며, 이는 해당 기간 원유 공급 차질로 인해 공장의 정상적인 가동이 이루어지지 않았음을 시사한다.

사사 본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2026-05-02-005).

2G5

가스상 대기오염물질 모니터링을 위한 DIAL의 현장 적용과 활용방안

Field Application and Utilization of DIAL for Monitoring Gaseous Air Pollutants

이유선, 김덕현[1)], 김석준, 김인엽, 노영민

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, [1)]국립한밭대학교 기초과학부

가스상 대기오염물질은 다양한 배출원으로부터 배출된 후 기상조건에 따라 수송·확산되므로 시·공간적으로 불균질한 분포를 나타낸다. 따라서 효과적인 대기환경 관리를 위해서는 개별 지점의 농도뿐만 아니라 오염물질의 발생 위치와 공간분포, 이동 특성을 함께 파악할 필요가 있다. 그러나 기존의 지점 기반 측정은 공간적 대표성에 한계가 있어, 이를 보완할 수 있는 원격측정기술의 활용이 요구된다. 차등흡수라이다(Differential Absorption Lidar, DIAL)는 대상 기체의 분광학적 흡수 특성을 이용하여 농도를 원격으로 측정하는 능동형 광학 원격측정기술이다. 목표 기체의 흡수가 강한 흡수 파장(on)과 상대적으로 약한 비흡수 파장(off)의 거리별 후방산란 신호 차이를 분석함으로써 특정 기체를 선택적으로 검출하고, 광경로상의 농도를 거리분해된 형태로 산출할 수 있다. 특히 스캐닝 방식을 적용하면 거리별 농도정보를 공간적으로 확장하여 가스상 대기오염물질의 분포와 플룸의 이동·확산 과정을 관측할 수 있다. 본 연구에서는 스캐닝 DIAL을 활용하여 특정 배출원에서 발생한 가스상 대기오염물질 플룸의 3차원 공간분포와 이동 특성을 파악하였다. 관측된 농도 공간분포와 풍향·풍속 자료를 결합하여 플룸 단면을 통과하는 배출량을 산정하였다. DIAL의 현장 적용을 위해서는 안개, 습도 및 에어로졸 등 대기조건에 따른 신호 영향과 함께, 건물 및 지형에 의한 관측경로의 차폐를 고려하여 충분한 관측 시야(line of sight)를 확보해야 한다. 또한 공존 기체의 간섭을 최소화하기 위한 정밀한 파장 선정과 신호처리가 요구된다. 향후 지상·이동 관측, 위성·항공 원격탐사 및 대기확산 모델 등과의 연계를 통해 관측 신뢰성과 활용 범위를 확대할 수 있다. 특히 산업단지에서는 배출원 탐지, 배출량 정량화 및 공정·방지시설 운영에 따른 배출 특성 평가 등 현장 기술지원에 활용될 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 RS-2026-25501396).

2H1

대기 미세플라스틱의 국내 연구 현황 및 전국 공동연구 추진 현황

Airborne Microplastic Research in Korea: Current Status and Progress of a Nationwide Collaborative Study

유한진, 최예덕[1], 김효원[1], 금선우[1], 이진화[2], 팽다슬[2], 전휘서[3], 유휘선[3], 채민영[4], 고관영[4], 이헌영[5], 박세은[5], 전기준[5,6]

국립한국교통대학교 환경공학전공, [1]서울특별시 보건환경연구원 생활환경연구부, [2]경상남도 보건환경연구원 대기환경연구부, [3]전남광주통합특별시 전남보건환경연구원 대기질 관리과, [4](주)세스코 이물분석센터, [5]인하대학교 환경공학과, [6]수도권 미세먼지연구·관리센터

최근 미세플라스틱은 해양, 토양 및 수환경을 넘어 대기환경에서도 중요한 신종 오염물질로 주목받고 있다. 특히 대기 중 미세플라스틱은 장거리 이동을 통해 광범위하게 확산될 수 있으며, 호흡을 통한 직접적인 인체 노출 가능성으로 인해 그 중요성이 증가하고 있다. 국내에서도 최근 대기 미세플라스틱의 시료채취 및 분석방법 개발을 비롯하여 도시 및 실내 환경에서의 농도와 입경분포, 물리화학적 특성, 배출원 및 인체 위해성 등에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 그러나 연구별 시료채취 및 분석방법의 차이로 인해 측정 결과의 직접적인 비교에는 여전히 한계가 있으며, 국내 지역별 분포와 특성을 종합적으로 파악하기 위한 연구도 부족한 실정이다. 이에 국내 연구기관 및 시·도 보건환경연구원이 참여하는 전국 단위 대기 미세플라스틱 공동연구를 추진하고 있으며, 동일한 시료채취 및 분석 체계를 적용하여 지역별 농도, 입경분포 및 고분자 종류 등 주요 특성을 비교하고자 한다. 본 발표에서는 국내 대기 미세플라스틱 연구의 주요 현황을 소개하고, 전국 공동연구의 추진 배경과 연구체계, 초기 연구 결과 및 향후 연구 방향을 논의하고자 한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2024-03-03-002)과 2026년도 산업통상부 및 한국산업기술기획평가원 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2026-25549859).

2H2

OECD 나노플라스틱 프로젝트 추진 현황 및 비정형 나노플라스틱 시험 물질 개발 연구

Current Progress of the OECD Nanoplastic Project and Development of Non-spherical Nanoplastic Test Materials

이재웅, 서도연, 김정연, 이주희, 박병용, 이우미, 이상희, 김수진[1]

국립환경과학원 환경건강연구부 환경위해성연구과, [1]국립환경과학원 환경건강연구부

전 세계적으로 플라스틱 사용량의 급격한 증가로 환경 모든 매체(해양, 담수, 토양, 대기 등) 중으로 플라스틱 입자 물질(미세플라스틱: 5 mm 이하 입자)의 배출로 인해 인체 및 생태계 건강의 위협이 우려되는 상황이다. 특히, 환경 중 존재하는 다양한 미세플라스틱의 대부분은 비정형의 파편 형태의 미세플라스틱이지만, 이에 대한 분포 및 유해성 연구 자료가 부족한 현실이다. 이러한 배경하에, 국립환경과학원에서는 관련 연구를 OECD에 국제 연구사업으로 제안하여 OECD CBC (화학생명공학위원회) EHS (환경·보건·안전) 프로그램 내 프로젝트로 승인('24.11)되어 추진되는 한국 주도로 수행되는 첫 미세(나노)플라스틱 국제 공동연구를 수행 중이다. 해당 연구는 3단계로 구성되어 있고, 1단계('25~'26)에서는 비정형 미세(나노)플라스틱 선정 및 시험/표준물질 개발, 2단계('27)에서는 환경 노화에 의한 비정형 미세(나노)플라스틱 물리화학적 특성 평가, 3단계('27~'28)에서는 비정형 미세(나노)플라스틱 대상 독성(비동물, 동물) 시험평가이다. 현재, 1단계 연구 주제와 관련하여 연구 대상 폴리머(PET) 중심으로 비정형 나노플라스틱 시험(표준) 물질 제조 방법 마련 연구를 수행 중이다. PET 시험(표준) 물질 제조와 관련하여 시험(표준) 물질의 재현성과 적용성(균질성, 안정성)을 확보하는 것이다. 이를 고려하여 다양한 제조 방법을 적용 평가 후 최적의 물리적 단계별 제조 방법(Cutting → Grinding → Ultrasonication → Filtering → Concentration)을 통해 220±16.3 ppm (건조 중량법 적용) 비정형 PET 나노플라스틱 시험 물질을 확보하였다. 특히, 제조된 시험(표준) 물질의 적용성(균질성, 안정성) 평가가 17일 동안 실험실 조건 온도에서 조사되었으며, 입자 평균 크기(DLS 분석, 452.8±30.6 nm)와 분포도(9.3×10^{9}~8.3×10^{10})를 확인하였고, 라만 분광기와 TEM 분석을 통해 제조된 비정형 PET 시험(표준) 물질의 형태를 확인하여 입자 크기를 확인하였다. 향후, 제조 방법을 적용한 다양한 폴리머의 미세(나노)플라스틱 시험(표준) 물질 제조 연구 확대와 제조 물질을 적용한 독성 연구를 추진할 계획이다.

사사 이 성과는 기후에너지환경부 국립환경과학원 R&D 연구 사업임(No. NIER-2026-01-01-038).

2H3

환경노화 및 극저온 파쇄를 이용한 타이어 마모 미세입자 제조

Preparation of Fine Tire Wear Particles by Environmental Aging and Cryogenic Grinding

이석환, 우상희, 김우영, 조완섭[1)]

한국기계연구원 친환경에너지연구본부, [1)]동아대학교 의약생명공학과

타이어 마모 입자(Tire Wear Particles, TWPs)는 차량 주행 중 타이어와 노면의 마찰에 의해 발생하며, 최근 환경 및 인체 위해성 측면에서 관심이 높아지고 있다. 기존 연구는 주로 타이어 첨가제와 변환 생성물의 수계 용출 및 생태 위해성 평가에 집중되어 왔으며, 흡입 노출을 고려한 독성 평가용 시험입자 제조에 관한 연구는 상대적으로 부족하다. 특히 실제 마찰에 의해 발생하는 TWPs는 대부분 수십~수백 μm 이상의 조대입자로 존재하므로, 동물 흡입독성 평가를 위해서는 $PM_{2.5}$ 수준의 미세입자를 안정적으로 제조할 수 있는 기술이 필요하다. 본 연구에서는 한국기계연구원(KIMM)이 보유한 타이어 마모 시뮬레이터를 이용하여 실제 마찰 조건에서 수백 μm 크기의 타이어 마모 입자를 생성한 후, 이를 극저온 파쇄하여 수 μm 수준의 미세입자로 제조하는 방법을 적용하였다. 극저온 조건에서 고무의 탄성 변형을 억제하고 취성 파괴를 유도함으로써 일반적인 기계적 분쇄의 한계를 극복하고자 하였다. 또한 실제 환경에서의 노화 영향을 고려하기 위하여 60℃ 조건에서 UVA 가속노화를 수행하고, 노화에 따른 고무의 취화가 극저온 파쇄 및 미세화 특성에 미치는 영향을 함께 평가하였다. 제조된 입자는 hydrodynamic diameter 측정과 SEM 분석을 통해 입도 및 형상을 확인하였다. 본 연구는 실제 마모로 생성된 TWP를 대상으로 극저온 파쇄를 적용하여 흡입독성 평가가 가능한 수 μm급 시험입자를 제조하는 접근으로서, 향후 타이어 마모 미세입자의 표준화된 흡입독성 시험물질 제조기술 확립에 활용될 수 있다.

사사 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00282244).

2H4

열분해-GC/MS를 이용한 실내대기 중 미세플라스틱 분석기술 및 적용방안

Analytical Approach for Microplastics in Indoor Air Using Pyrolysis-GC/MS

김영민

대구대학교 바이오환경에너지학과

미세플라스틱은 다양한 환경매체에서 검출되는 신종오염물질로서 정확한 정성·정량 분석기술의 확립이 요구되고 있다. 본 연구에서는 미세플라스틱의 열분석 기술을 검토하고 이를 실내대기 중 미세플라스틱 연구에 적용하기 위한 분석적 접근방법을 고찰하였다. Py-GC/MS는 고분자별 특이적인 열분해 생성물을 이용하여 미세플라스틱을 질량 기준으로 정성·정량할 수 있으며, 미세입자 분석에도 적용할 수 있다는 장점이 있다. 특히 실내대기 중 부유먼지 및 침적먼지에 존재하는 미세플라스틱의 분석에는 다양한 입자상 물질에 의한 간섭을 최소화하기 위한 시료채취 및 전처리 과정의 최적화가 중요하다. 향후 Py-GC/MS를 이용한 고분자별 질량 정량과 FT-IR 및 Raman 분석을 통한 입자 크기와 형태 분석을 상호 보완적으로 적용할 필요가 있다. 이러한 통합 분석방법은 실내대기 중 미세플라스틱의 발생특성 및 인체 노출을 평가하기 위한 기초자료 확보에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2H5

대기 미세플라스틱 분석법 및 표준물질 합성법 개발

Development of Analytical Methods and Reference Materials for Airborne Microplastics

윤한진, 박세은[1)], 박종현[1)], 이경은[2)], 송영철[3)], 노철언[4)], 전기준[1),5)]

국립한국교통대학교 환경공학전공, [1)]인하대학교 환경공학과, [2)]한국화학연구원 신뢰성평가센터, [3)]한국화학연구원 화학분석센터, [4)]인하대학교 화학과, [5)]수도권 미세먼지연구·관리센터

최근 대기환경에 존재하는 미세플라스틱에 대한 관심이 증가하면서 다양한 환경에서의 분포와 특성을 규명하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다. 그러나 대기 미세플라스틱은 기존 수환경이나 토양의 미세플라스틱과 비교하여 상대적으로 크기가 작은 입자가 주요 분석 대상이며, 대기 중 낮은 농도와 복잡한 입자 조성으로 인해 시료 채취부터 전처리, 검출 및 동정에 이르는 분석 전 과정에서 다양한 불확실성이 존재한다. 또한, 연구마다 서로 다른 분석방법과 기준이 적용되고 있어 연구 결과의 직접적인 비교와 신뢰성 확보에도 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 대기환경의 특성을 고려한 분석방법의 정립과 함께 분석 성능을 객관적으로 평가할 수 있는 표준물질의 개발이 필요하다. 특히 실제 대기 중 미세플라스틱의 크기와 물리화학적 특성을 반영할 수 있는 표준물질은 분석법의 회수율, 검출성능 및 재현성을 평가하고 연구기관 간 결과의 비교 가능성을 확보하기 위한 중요한 기반이 될 수 있다. 본 발표에서는 대기 미세플라스틱 분석이 갖는 주요 기술적 한계와 고려사항을 살펴보고, 신뢰성 있는 분석체계 구축을 위한 분석법 및 표준물질 개발 현황과 향후 표준화 방향을 논의하고자 한다.

사사 본 연구는 2026년 국립한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음.

Session 3A 신진과학자

좌장 : 이강웅 [한국대기환경학회 고문]

3A1) 울산의 미세먼지 장거리 이동: 화학적 특성, 오염원 추정, 비표적 분석
3A2) 도시 규모의 차량 배출 기반 초고해상도 대기오염 모델링 프레임워크: 미국 디트로이트 사례와 한국 도시 적용성
3A3) PM 자료와 수평 스캐닝 라이다를 활용한 에어로졸 입경분포 및 흡습성의 머신러닝 기반 추정
3A4) 한반도 중부지역의 고농도 오존 발생에 기여하는 지역 간 수송 및 광화학 생성 특성 분석
3A5) 기체-고체 계면 반응을 이용한 전기화학적 가스상 오염물질 제어공정 개발

Session 3B 측정·분석

좌장 : 윤종상 [가톨릭대학교]

3B1) 스모그챔버를 활용한 고농도 질소산화물 조건에서의 푸란류 광화학반응 및 이차오염물질 생성 메커니즘 규명 연구
3B2) 니코틴의 기원이 전자담배 에어로졸의 전달 동역학과 인체 노출 위험에 미치는 영향
3B3) 위성 에어로졸 산출물 기후값 생산을 위한 딥러닝 기술 개발
3B4) 영주지역 $PM_{2.5}$의 화학조성 특성 및 PMF 기반 발생원 기여도 평가

Session 3C 방지기술

좌장 : 정용원 [한국대기환경학회 고문]

3C1) 액적 크기분포가 습식 스크러버의 집진효율에 미치는 영향
3C2) 전자선-흡수 공정 배가스 처리 중 2차 입자 생성 특성 및 정전분무 기반 제어
3C3) 비침지 전극–겔 고분자 전해질 계면에서 기체상 아세트알데히드의 양극 – 음극 동시 전기화학적 전환
3C4) 무대전 섬유상 필터에 대한 단일섬유집진효율 모델조합의 비교 및 평가

Session 3D 대기환경연구 공모전

좌장 : 강경희 [국립환경과학원]

3D1) 사회취약성과 GEMS 기반 오존 생성 민감도를 연계한 오존 관리 우선지역 선정 및 관리 방향 제시
3D2) 환경위성(GEMS) 시계열 자료를 활용한 오존 생성 체제 변화 및 지역별 저감 전략 연구
3D3) GEMS 시간별 순수관측을 활용한 산업-농업 인접 해안지역의 광화학 오존 일주기 구조 규명과 농작물 노출 재평가
3D4) 정지궤도 환경위성-MoE 기반 동아시아 고농도 오존 발생 지역 진단 및 저감 방향성 분석
3D5) 정지궤도 환경위성 HCHO 및 NO_2 자료를 활용한 고농도 오존 발생 시 전구물질 일변화 특성 분석
3D6) GEMS 환경위성·집중측정망·대기역학 자료 3원 융합 기반 머신러닝을 활용한 $PM_{2.5}$ 고농도 에피소드 선제적 감지 연구

Session 3E [학생세션]

좌장 : 배민석 [국립목포대학교]

3E1) 화목난로 연소 시 목재 함수율에 따른 1차 입자상 물질의 물리화학적 특성 비교 연구
3E2) 2026년 서산의 계절별 1차 및 2차 탄소계 에어로졸 기여도 분석
3E3) 겨울철 뉴욕시 브라운 카본의 조성과 배출원 분석
3E4) 산화 및 이차유기에어로졸 코팅에 따른 블랙카본의 물리·광학적 특성 변화
3E5) 2023년~2025년 PMF 모델을 이용한 포스코타워-송도 상층 및 지표 $PM_{2.5}$의 오염원 기여도 추정 및 비교

Session 3F [학생세션]

좌장 : 서지훈 [전남대학교]

3F1) 과수(배·사과·포도·복숭아) 농업잔재물 소각에 의한 SLCFs 배출계수 개발
3F2) 농업잔재물 노천소각 시 배출되는 입자상·가스상 대기오염물질의 화학적 특성 분석 및 배출계수 산정
3F3) 실외 바비큐 조리 시 발생하는 응축성 미세먼지 특성 연구
3F4) 대기 중 비정형 마이크로 나노 플라스틱 입자 합성 기술 개발 및 분석
3F5) 대기 미세플라스틱의 배출원 규명 및 물리화학적 특성 분석: 시멘트 제조시설을 중심으로

Session 3G [학생세션]

좌장 : 권형안 [국립공주대학교]

3G1) 대기 중 유기에어로졸의 형광특성 측정을 위한 다채널 형광 라이다 시스템 구축 및 기초 특성 평가
3G2) 통제방출실험(CRF) 기준 2-파장 DIAL 비산배출량 산정의 현장 관측 변인 민감도 평가
3G3) AERONET 컬럼 에어로졸 광학적 특성을 활용한 국내 에어로졸 화학 조성 추정 및 검증
3G4) 항공관측을 활용한 안면도 CO_2와 CH_4의 연직 분포 특성 및 플럭스 산출
3G5) 대류권 수증기 연직 분포 관측을 위한 지상 DIAL 시스템 시뮬레이션 기반 설계

Session 3H [학생세션]

좌장 : 최용주 [한국외국어대학교]

3H1) 광양만 연안 산업지역에서 바람장 고도가 위성 기반 NOx 배출량 추정에 미치는 영향
3H2) 식물 스트레스 유형에 따른 녹색잎휘발성물질(GLVs) 배출 특성 및 생물기원 휘발성유기화합물(BVOCs)과의 상관성 분석
3H3) 여수 국가산단 연안의 바이오에어로졸: 기단 기원에 따른 미생물 군집 변동
3H4) 여수 해안산업지역 대기 에어로졸 수용성 유기물질의 계절별 형광 특성 및 고형광강도 사례

Session 3I 실태·배출관리

좌장 : 이우근 [한국대기환경학회 고문]

3I1) 주유소 유증기 회수설비에 대한 고찰과 향후 관리 방향
3I2) 산업 현장 IoT 센서 네트워크 기반 대기질 시공간 예측 및 결측보간 방법론 비교 연구
3I3) 상향식 및 하향식 배출목록을 이용한 O_3과 $PM_{2.5}$ 농도의 배출 저감 효과 비교
3I4) 체계적인 사업장 관리를 위한 한국형 사업장 대기 정보 통합플랫폼 구축 방향

3A1

울산의 미세먼지 장거리 이동: 화학적 특성, 오염원 추정, 비표적 분석

Long-range Atmospheric Transport of $PM_{2.5}$ in Ulsan, South Korea: Chemical Characterization, Source Identification, and Non-target Screenig

이호영, 최성득

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

중국으로부터의 장거리 이동은 국내 미세먼지($PM_{2.5}$) 농도에 중요한 영향을 미치지만, $PM_{2.5}$ 구성성분과 유기화합물의 장거리 이동 특성과 이를 반영하는 지표물질에 관한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 울산 $PM_{2.5}$의 장거리 이동 영향을 정성적·정량적으로 파악하기 위해 장기 추세 분석, 유기 지표 기반 배출원 기여도 산정, 비표적 분석을 수행하였다. 울산의 연평균 $PM_{2.5}$ 농도는 2014년부터 2023년까지 꾸준히 감소하였으며($p < 0.01$), 이는 국내 배출 저감 정책의 효과를 반영한 결과로 판단된다. 영향인자기여함수(PSCF) 분석 결과, NO_3^-, NH_4^+, OC는 겨울철 장거리 이동 영향이 뚜렷하였다. 중국 동부와 북부 지역이 주요 오염원 지역이었으며, 최근 해당 지역으로부터의 장거리 이동 기여도가 증가하였다. 울산에서 채취한 $PM_{2.5}$ 시료를 전처리하여 유기성분을 분석하였다. 이러한 유기성분 자료를 활용하여 PMF 모델링을 수행하여 $PM_{2.5}$ 오염원을 세분화하였고, 장거리 이동에 의한 생물연소와 산업활동의 기여도를 파악하였다. 장거리 이동의 신규 지시자를 발굴하기 위해 비표적 분석을 수행하였으며, $PM_{2.5}$의 오염 특성별 유기화합물 목록을 선정하였다. 장거리 이동 영향이 큰 $PM_{2.5}$ 시료에서는 질소화·산화 화합물의 농도가 증가하였으며, 이는 활발한 광화학반응의 영향으로 판단된다. 본 연구를 통해 $PM_{2.5}$의 화학적 특성과 장거리 이동 영향을 종합적으로 파악하고 새로운 지표물질을 제안하였으며, 향후 $PM_{2.5}$ 오염원 규명과 대기질 개선을 위한 기초자료를 마련하였다.

사사 본 연구는 한국연구재단의 지원으로 수행된 연구임(RS-2023-00209329, 2020R1A6A1A03040570).

3A2

도시 규모의 차량 배출 기반 초고해상도 대기오염 모델링 프레임워크: 미국 디트로이트 사례와 한국 도시 적용성

Vehicle Emission Modeling in Metropolitan City Using a New High-resolution Framework: Detroit Case Study and Applicability to Korean Cities

이상진[1),2)], Stuart Batterman[2)]

[1)]경북대학교 환경공학과, [2)]미시간대학교 환경보건과학과

한국은 지역 배출과 장거리 이동의 영향 등으로 인해 지속적으로 대기오염 문제를 겪어 왔다. 특히, 차량에서는 배기가스와 타이어 마모 등을 통해 $PM_{2.5}$와 NO_X 뿐만 아니라 black carbon, benzene, benzo[a]pyrene과 같은 유해대기오염물질도 배출된다. 차량 배출에 의한 대기오염 영향을 평가하기 위해 대기확산모델이 주로 이용되고 있으나, 높은 계산 부하로 인해 대도시의 수만 개 도로 구간에서 발생하는 차량 배출의 영향을 고해상도로 모사하는 데에는 현실적인 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 기존 대기확산모델의 성능을 유지하면서 계산 부하를 크게 감소시켜 대도시의 도로 배출 영향을 시공간적으로 고해상도로 모사할 수 있는 축소형 대기확산모델(Reduced-form air dispersion model, RFM)을 개발하였다. RFM은 기존 도로 대기확산모델인 RLINE과 결합하여 RLINE-RFM (R-RFM)으로 구축하였으며, 미국 미시간주 디트로이트 지역에 적용하였다. 디트로이트의 총 9,701개 도로 링크(총 길이 2,972.8 km)에서 차량으로부터 배출되는 $PM_{2.5}$의 영향을 모사하였으며, 차량 배출에 의해 생성되는 2차 $PM_{2.5}$ 성분인 질산염과 건식침적까지 고려할 수 있도록 모델링 기법을 확장하였다. 한편, 한국에서는 도로 배출에 의한 대기오염 영향을 고해상도로 모사하기 위한 차량 배출량 자료가 충분한 시공간 해상도로 구축되어 있지 않다. 이에 배출량 모델인 MOVES5와 국내 국가 대기오염물질 배출량 자료인 CAPSS를 결합하여 차량 및 도로별 배출량을 시간 단위 해상도로 구축하였으며, RFM 개념을 적용한 한국형 도로 배출 대기확산모델의 개발 가능성을 평가하였다. 이를 통해 향후 한국형 차량 배출-대기오염-위해성 통합 관리시스템 구축을 위한 프레임워크를 제시하고, 도시 규모의 고해상도 대기질 관리에 대한 활용 가능성을 논의하였다.

사사 본 연구는 미국 국립보건원(National Institutes of Health, NIH) 산하 국립환경보건과학연구소(National Institute of Environmental Health Sciences, NIEHS)의 지원을 받아 수행되었음(P30ES017885, R01ES032389).

3A3

PM 자료와 수평 스캐닝 라이다를 활용한 에어로졸 입경분포 및 흡습성의 머신러닝 기반 추정

Machine Learning-based Retrieval of Aerosol Size Distribution and Hygroscopicity Using Combined PM and Horizontal Scanning Lidar Data

신주선, 심주현, 윤지현, 김덕현[1], 노영민

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, [1]한밭대학교 기초과학부

에어로졸의 광학 특성은 크기, 화학조성 및 상대습도에 따라 크게 달라진다. 그러나 국가 대기질 측정망에서 제공되는 PM 질량농도는 주로 건조 조건에서 측정되는 반면, 라이다는 실제 대기 습도 조건에서 관측하므로 두 자료 사이에 차이가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 PM 질량농도와 라이다 관측자료를 결합하여 에어로졸의 건조 부피크기분포와 흡습성을 추정하고, 이를 기반으로 에어로졸 유형을 분류하였다. 분석에는 2021년 10월부터 2024년 9월까지 부산 항만지역에서 관측된 AirKorea PM 농도 및 지상기상자료, 광학입자계수기(OPC)와 라이다 관측자료 사용하였다. PM 농도와 질량비, 상대습도를 입력변수로 사용하여 bimodal 로그 정규 분포를 추정하였다. 여러 머신러닝 회귀모델 중 XGBoost가 가장 우수한 성능을 나타냈으며, 결정계수(R^2)는 0.984, 평균절대오차(MAE)는 0.054였다. 추정된 건조 부피크기분포에 Mie 이론을 적용하여 건조 소산계수(α_{dry})를 계산하고, 라이다에서 산출한 습윤소산계수(α_{wet})와의 비로 흡습성장계수 f(RH)를 산출하였다. 에어로졸을 청정, 황사, 미세 친수성, 미세 소수성, 조대 친수성 및 조대 소수성의 여섯 유형으로 분류한 결과, Random Forest가 83.44%의 정확도와 0.83의 가중 F1-score를 나타냈다. 전체 사례 중 조대모드 에어로졸은 60.1%, 친수성 에어로졸은 38.4%를 차지하였으며, 조대 친수성 유형에서 가장 높은 f(RH)가 관찰되었다. 또한 청정 사례에서도 낮은 PM 농도와 함께 높은 α_{wet}이 간헐적으로 나타나, 질량농도만으로는 습도에 따른 에어로졸의 광학적 변화를 충분히 설명하기 어려움을 확인하였다. 본 연구는 PM 질량농도, 부피크기분포 및 라이다 광학자료의 통합이 습윤 대기조건에서의 에어로졸 특성 평가와 대기질 감시를 개선할 수 있음을 보여준다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 RS-2026-25501396).

3A4

한반도 중부지역의 고농도 오존 발생에 기여하는 지역 간 수송 및 광화학 생성 특성 분석

Analysis of Inter-Provincial Transport and Photochemical Formation Characteristics during High-Ozone Episodes in the Seoul Metropolitan Area and Downwind Regions

김태희, 곽경환[1]

강원대학교 산학협력단, [1]강원대학교 환경학과

지표 오존은 전구물질의 광화학 반응으로 생성되는 2차 오염물질로, 전구물질 배출량이 높은 지역뿐만 아니라 인접한 저배출 지역에서도 지역 간 수송의 영향으로 고농도 오존이 발생할 수 있다. 따라서 고농도 오존의 원인을 이해하기 위해서는 지역 자체의 생성과 주변 지역으로부터의 유입 기여를 구분하여 정량적으로 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 2022년 4~7월 한반도 중부지역을 대상으로 WRF-CMAQ 모의를 수행하고, 통합 배출원 기여도 분석 기법(Integrated Source Apportionment Method, ISAM)을 이용하여 수도권(인천, 서울, 경기)과 풍하 지역인 강원 영서·영동의 오존 기여도를 분석하였다. 지역 내 기여(Local)와 다른 지역으로부터의 유입 기여(External)를 구분한 결과, 수도권에서는 지역 내 기여와 지역 간 상호 기여가 함께 나타났으며, 강원 영서에서는 고농도 오존 발생 시 자체 기여보다 서울·경기 지역의 기여도가 상대적으로 높게 나타났다. 특히 6월 8~11일에는 강원 영서 지역에 대한 수도권 기원 오존의 기여도는 시간의 경과에 따라 점차 증가하였다. 또한 CMAQ 과정 분석(Process Analysis)의 통합 반응률(Integrated Reaction Rate, IRR)을 이용하여 지역별 광화학 반응 특성을 비교하고, ISAM 결과와 연계하여 지역 내 생성과 외부 유입의 상대적 중요성을 진단하였다. 본 연구는 고농도 오존 발생 시 지역별 생성과 수송의 역할을 정량적으로 평가하고 지역 간 연계 관리의 필요성을 제시한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지역맞춤형오존관리기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25505137).

3A5

기체-고체 계면 반응을 이용한 전기화학적 가스상 오염물질 제어공정 개발

Development of Electrochemical Gaseous Pollutant Control Process Based on Gas-Solid Interface Reaction

최연규, 김대근

서울과학기술대학교 환경공학과

기존 전기화학적 가스 처리 공정은 오염물질의 액상 흡수 및 용해 과정으로 인해 기-액 물질전달의 영향을 받는다. 본 연구에서는 가스상 오염물질을 전극 계면에서 직접 반응시키기 위해 반고체 전해질을 적용한 기체-고체 계면 전기화학 반응계를 구축하고 그 적용 가능성을 평가하였다. Agar, sodium silicate 및 polyvinyl alcohol 기반 전해질의 이온전도 특성을 비교하였으며, 선정된 전해질을 이온교환막 및 전극과 결합하여 가스가 전극-전해질 계면으로 직접 공급되는 반응계를 구성하였다. 이 반응계를 이용해 휘발성유기화합물의 전기화학적 산화와 저농도 CO_2의 환원 반응을 평가하였다. $Ni(OH)_2$ 전극을 이용한 500 ppmv acetaldehyde 산화에서는 5 mA/cm^2의 전류밀도에서 90% 이상의 제거효율을 나타냈으며, 전기화학 및 표면분석 결과 Ni 산화·환원 반응이 acetaldehyde 산화와 직접 연관되는 것으로 나타났다. CuZn 기반 전극을 이용한 500 ppmv CO_2 환원에서는 -1.4 V vs Hg/HgO에서 93% 이상의 제거효율을 보였고, 반응 후 전극에서 formate가 생성물로 검출되었다. 반고체 전해질은 액체 전해질이 없는 조건에서도 이온전달과 전극 계면 접촉을 유지함으로써 가스상 반응물의 직접적인 전기화학 반응을 가능하게 하였다. 대상 물질의 특성과 촉매전극 조합에 따라 간접 산화, 직접 산화 및 환원 반응이 각각 유도되었으며, 이는 기존 액상 전기화학 시스템의 기-액 물질전달 한계를 완화할 수 있는 가스상 오염물질 제어공정의 가능성을 보여준다.

사사 본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2023R1A2C2003796; NRF-2020R1A6A1A03042742).

3B1

스모그챔버를 활용한 고농도 질소산화물 조건에서의 푸란류 광화학반응 및 이차오염물질 생성 메커니즘 규명 연구

Elucidation of Secondary Pollutant Formation Mechanisms during Photooxidation of Furan Compounds under High-NOx Conditions in a Smog Chamber

주태규, Nga Lee Ng[1], Matthew Alvarado[2], Drew Gentner[3], Jean Rivera-Rios[4], David Pando[5], Jo Machesky[2], Tori Hass-Mitchell[2]

고려대학교 지구환경과학과, [1]California Institute of Technology, [2]JANUS Research Group, [3]Yale University, [4]Rutgers University, [5]Georgia Institute of Technology

푸란류는 바이오매스 소각으로 발생하는 주요 휘발성유기화합물질(VOCs)이며, OH 라디칼과의 반응성이 높아 오존 및 이차유기에어로졸(SOA) 등의 이차오염물질 생성 잠재력이 큰 물질이다. 이러한 특성을 가짐에도, 푸란류의 광화학적 산화 메커니즘 및 이차오염물질 생성에 관한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 2-푸란알데히드, 2-메틸푸란, 3-메틸푸란의 고농도 질소산화물(NOx) 조건에서의 광화학반응을 스모그 챔버에서 모사하여 이차오염물질의 생성 메커니즘을 이해하고자 하였다. 실험 결과, 2-메틸푸란과 3-메틸푸란의 광산화 과정에서는 일산화질소(NO)의 빠른 감소가 관측되었으며, 퍼옥시라디칼(RO_2)이 NO와 반응하여 알콕시라디칼(RO)을 형성하는 전형적인 고농도 NOx 조건에의 반응이 나타났다. 반면, 2-푸란알데히드에서는 오히려 NO의 생성이 관측되어 다른 라디칼 화학이 일어나고 있음을 암시하였다. 또한, 이산화질소(NO_2)의 감소가 관측되어 알킬라디칼(R)이 NO_2와 반응함으로써 RO_2를 거치지 않는 반응 경로가 진행되고 있음을 암시하였다. 이로 인해 2-푸란알데히드 시스템의 오존 및 SOA 생성 패턴이 2-메틸푸란 및 3-메틸푸란 시스템과 현저히 다른 것으로 관측되었다. 이러한 라디칼 반응 경로의 차이는 나아가 질소 함유 유기물의 생성에도 영향을 주어 유기질산염의 생성량 차이를 가져왔다. 유기질산염은 NOx의 임시 저장 물질로서 오존 생성에도 영향을 줄 수 있으므로, 바이오매스 소각에서 배출되는 VOCs의 종류를 명확히 구분할 필요가 있음을 시사한다.

3B2

니코틴의 기원이 전자담배 에어로졸의 전달 동역학과 인체 노출 위험에 미치는 영향

Impact of Nicotine Origin on e-Cigarette Aerosol Transfer Dynamics and Human Exposure Risks

이우정, 김기현

한양대학교 공학대학원 건설환경공학과

전자담배(electronic cigarette, EC)에서 합성 니코틴(synthetic nicotine, S)의 사용이 빠르게 늘고 있으나, 천연 니코틴(natural nicotine, N)과의 기화 거동 차이는 충분히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 니코틴 기원이 EC 액상의 기화 거동과 인체 노출 위험에 미치는 영향을 평가했다. 동일 표기 농도(0.9~0.98%)의 무향 액상 4종에 대해 3가지 출력 (15, 21, 25 W)과 2가지 퍼프 부피(35, 55 mL)를 조합한 24가지 조건에서 액상 소비율(e-liquid consumption rate, ECR), 전달 효율(transfer efficiency, TE), 니코틴 수율을 비교했다. 질량 수지 폐합(mass balance closure)으로 직렬 임핀저 시스템이 기화 니코틴을 정량 포집함을 검증했다(N 83.5%, S 51.8%). 동일 표기 농도에도 S는 N보다 ECR이 3.5~5.6배 높았으나 TE는 낮았고(48.9~53.9% vs 80.1~86.6%), 이는 S의 더 낮은 pH (6.48~6.87, N은 7.63~7.81)에서 비롯된 낮은 유리염기 분율(free-base fraction, 2.93~6.90% vs 29.9~39.2%)을 반영했다. S의 높은 ECR은 낮은 TE를 상쇄해 S 대 N 니코틴 수율 비를 2.2~3.4로 나타냈으며, ECR 격차(5.12~5.21배)는 물리적 매질 효과(점도 약 18% 차이)를 크게 상회했다. 55 mL 퍼프 부피에서 0.98% S의 니코틴 플럭스(33.6 $\mu g\ s^{-1}$)는 6배 낮은 농도에도 고농도 상용 팟형 시스템(JUUL, 34.5 $\mu g\ s^{-1}$)에 필적했으며, 일일 추정 섭취량(estimated daily intake, EDI)도 최대 13.5 mg day^{-1}로 N 최저 조건의 6.5배에 달했다. 종합적으로, 표기 농도가 같더라도 합성 니코틴을 천연 니코틴과 동등하게 취급하면 실제 노출 위험을 과소평가하게 됨을 시사한다.

3B3

위성 에어로졸 산출물 기후값 생산을 위한 딥러닝 기술 개발

Development of Neural Network-based Climate Record Algorithm for Satellite Aerosol Retrievals

이지우, 김 준, 김민석[1], 오승주

연세대학교 대기과학과, [1]울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

장기간의 고해상도 정지궤도 위성 에어로졸 기후자료는 동아시아 지역의 일변화 특성과 대기질-기후 상호작용을 이해하는 데 중요하다. 그러나 서로 다른 위성 임무에 걸쳐 관측자료를 장기간 연계하기 위해서는 센서 특성, 산출 알고리즘, 관측 샘플링 조건의 차이로 인해 발생하는 인위적인 불연속성을 해결할 필요가 있다. 본 연구에서는 Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)와 후속 센서인 GOCI-II에서 산출된 에어로졸 광학두께(Aerosol Optical Depth, AOD) 자료를 일관된 장기자료로 구축하기 위해 신경망 기반 보정 기법을 개발하였다. 보정된 자료를 이용하여 2011년부터 현재까지 동아시아 지역을 포괄하는 고해상도 정지궤도 위성 에어로졸 장기자료를 구축하였다. Aerosol Robotic Network (AERONET) 지상관측자료를 이용한 검증 결과, 제안된 보정 방법은 센서 간 차이에 따른 체계적인 편향을 감소시키고 AERONET 관측과의 일치도를 향상시키는 것으로 나타났다. 본 연구에서 구축한 자료는 인위적 배출원이 집중되어 있고 황사 영향이 빈번한 동아시아 지역에서 에어로졸의 장기 변동성, 일변화, 지역 간 수송뿐만 아니라 에어로졸과 구름 및 복사 간 상호작용을 분석하는 데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00346149).

3B4

영주지역 $PM_{2.5}$의 화학조성 특성 및 PMF 기반 발생원 기여도 평가

Chemical Characterization of $PM_{2.5}$ and Source Apportionment Using PMF in Yeongju

김지영, 손영훈, 정영석[1], 김자현, 이병근, 김효순[2], 박은하[3]

경상북도보건환경연구원 대기질평가과, [1]경상북도보건환경연구원 북부지원 환경분석과, [2]경상북도보건환경연구원 산업폐수과, [3]RIST 환경연구소 환경보건연구그룹

영주지역은 대규모 산업단지가 밀집한 지역은 아니지만 가을·겨울철 $PM_{2.5}$ 고농도 사례가 반복적으로 발생하며, 단위 면적당 암모니아 배출량이 높아 질산암모늄·황산암모늄 등 2차 무기이온 생성에 유리한 전구물질 조건을 갖는 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 주거지역 대기질을 대표하는 영주동 측정소에서 2024년 3월부터 2025년 8월까지 채취한 $PM_{2.5}$ 시료를 대상으로 화학조성을 분석하고, EPA PMF 5.0 수용모델과 CPF, HYSPLIT 역궤적 분석을 종합 적용하여 발생원 기여도와 고농도 발생의 구조적 메커니즘을 규명하고자 하였다. $PM_{2.5}$ 평균 농도는 15.5 $\mu g/m^3$였으며, 상대농도 지수는 겨울철 심야~오전에 높게 지속되는 축적형 패턴을 보였다. 성분은 이온(54.5%)과 탄소(38.2%)가 주를 이루었고 고농도일에는 NO_3^-와 NH_4^+가 각각 6.9배, 3.5배 증가하였다. PMF 결과 6개 오염원(2차 황산염 23.9%, 산업활동 9.6%, 2차 질산염 30.1%, 이동오염원 9.8%, 생물 연소 21.8%, 토양 4.8%)이 도출되었으며, 2차 무기이온이 전체의 약 54%를 차지하였다. CPF 분석에서 산업활동은 서풍 계열에서 뚜렷한 영향을 보였으나, 2차 질산염을 포함한 대부분의 요인은 특정 풍향에 집중되지 않아 광역적 유입 특성을 시사하였다. HYSPLIT 분석에서는 고농도일마다 중국 동부 연안과 서해를 경유하는 서풍·북서풍 기류가 반복 확인되었다. 결과적으로 영주지역 $PM_{2.5}$ 고농도는 광역적 오염물질 유입, 분지 지형에 의한 정체, 겨울철 2차 생성이 결합된 축적형 구조로 설명된다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2025-01-03-002)을 받아 수행하였습니다.

3C1

액적 크기분포가 습식 스크러버의 집진효율에 미치는 영향

Effects of Droplet Size Distribution on Collection Efficiency of a Wet Scrubber

김준엽[1], 이명화[1),2)]

[1]강원대학교 미세먼지통합관리학과, [2]강원대학교 환경공학과

가스상 및 입자상 오염물질을 액적과 접촉시켜 제거하는 습식 스크러버는 부식성 및 폭발성 물질까지 안정적으로 처리할 수 있어 다양한 산업시설에서 이용되고 있다. 그러나 습식 스크러버에서의 집진은 액적과 입자의 충돌에 기반하므로 1 μm 이하의 미세입자에 대한 집진효율이 낮다는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 구조적 개선이나 추가 집진설비 도입 연구가 이루어져 왔으나, 습식 스크러버 단독으로 높은 집진성능을 달성할 수 있다면 처리공정 단순화와 운전비용 절감이 가능하다. 스크러버의 집진성능을 평가하기 위해서는 입경별 집진효율을 정확하게 예측하는 것이 필요하나, 기존 예측방법은 평균직경이나 Sauter 평균직경과 같은 대표직경을 사용하여 단분산으로 예측해 왔으며, 이러한 가정은 실측 집진효율과의 차이를 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 분무되는 액적의 크기분포를 측정하고, 이를 예측식에 반영하여 예측 정확도를 개선하고자 하였다. 또한 서로 다른 액적 크기분포 조건에서 스크러버의 집진효율을 측정하여 액적 크기분포가 집진효율에 미치는 영향을 분석하였다. 각 운전조건에서의 액적 크기분포를 측정하기 위해 광학현미경 분석과 OPC 등의 입자계측장비를 활용하였으며, 아크릴 원통형 스크러버에 A2 dust를 유입시킨 뒤 APS를 이용하여 먼지 입경별 집진효율을 측정하였다. 또한 대표직경과 실측 크기분포를 적용한 예측결과를 실험결과와 비교하여 예측 정확도를 평가하였으며, 액적 크기분포에 따른 집진효율 변화를 분석하였다.

사사 본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00219242).

3C2

전자선-흡수 공정 배가스 처리 중 2차 입자 생성 특성 및 정전분무 기반 제어

Formation Characteristics and Electrostatic Spray Control of Secondary Particles Formed through Electron Beam-Absorption Treatment

서서희[1),2)], 오용환[3)], 조상희[4)], 김태훈[4)], 강기원[2)], 손윤석[3)], 김창혁[1),2),5)]

[1)]부산대학교 에너지융합기술연구소, [2)]부산대학교 사회환경시스템공학과, [3)]국립부경대학교 지구환경시스템과학부,
[4)]한국원자력연구원, [5)]부산대학교 환경에너지연구소

전자선-흡수 공정을 사용한 배가스 내 NOx와 SO_2를 제거하는 과정에서 2차 입자가 생성될 수 있다. 2차 입자는 배가스 처리 후에도 미세먼지 배출량을 증가시킬 수 있어 2차 입자 발생을 제어해야 한다. 본 연구에서는 전자선-흡수 공정 부산물로 생성된 2차 입자의 특성을 분석하고, 정전분무(Electrostatic spray, ES)를 이용하여 2차입자를 제거하는 기술의 효과를 평가하고, 2차 생성 입자 대기 배출량 변화로 인한 잠재적 호흡기 침착 특성 변화를 함께 평가하였다. NaOH와 NH_4OH를 전자선-흡수공정 첨가제로 한 배가스-첨가제 반응비를 1:2, 1:5, 1:10으로 조절하면서, NO, NO_2 및 SO_2 처리 성능과 2차 생성 입자 수농도와 크기분포 변화를 비교하였다. 2차 생성 입자의 크기는 주로 150~250 nm였으며, 가스-첨가제 반응비가 증가할수록 입자 수농도와 부피농도가 증가하는 경향을 보였다. 특히, NH_4OH 조건에서는 휘발된 NH_3가 기상 중화반응에 참여하면서 NaOH에 비해 입자 생성과 성장이 크게 나타났으며, NOx 처리 시 입자 크기가 약 400 nm 이상으로 증가하였다. 후단에 ES를 적용한 경우 입자 수농도가 뚜렷하게 감소하였으며, 1:10 조건에서 10 kV를 인가했을 때 NO, NO_2 및 SO_2 유래 입자는 각각 97.5%, 81.5%, 76.2% 감소하였다. 또한 MPPD 모델을 이용한 잠재적 호흡기 침착 특성 분석 결과, ES 적용 후 호흡기 내 예상 입자 침착량이 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 전자선-흡수 공정을 사용하여 배가스를 처리하는 과정에서 첨가제 종류와 운전조건에 따라 2차 생성 입자의 물리적 특성이 변하며, 후단에 ES를 적용함으로써, 2차 입자 배출 저감을 효과적으로 달성할 수 있음을 보여준다.

사사 본 논문은 과학기술정보통신부(RS-2022-NR071930) 및 교육부(RS-2025-25415557) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

3C3

비침지 전극-겔 고분자 전해질 계면에서 기체상 아세트알데히드의 양극 - 음극 동시 전기화학적 전환

Paired Electrochemical Conversion of Gaseous Acetaldehyde at a Non-Immersed Electrode – Gel Polymer Electrolyte Interface

박준희, Muthuraman Govindan, 김대근

서울과학기술대학교 환경공학과

휘발성유기화합물(VOCs)의 전기화학적 전환은 일반적으로 기체 오염물질의 액상 전해질 선흡수 또는 전극 침지가 필요하므로 기-액 물질전달과 전해질 운전에 제약이 있다. 본 연구에서는 1 M KOH로 수화된 겔 고분자 전해질(gel polymer electrolyte, GPE)을 사이에 두고 두 개의 비침지 기체 노출 전극을 이온적으로 연결하여, 기체상 아세트알데히드의 양극 산화와 음극 환원을 동시에 수행하는 paired electrolysis 시스템을 개발하였다. 양극에는 $CoMn_2O_4$, 음극에는 Cu-Mo oxide를 적용하여 가스 유량과 전류밀도에 따른 전환 성능을 평가하고, 24 h 연속 운전과 GPE 수화상태에 따른 성능 변화를 분석하였다. $CoMn_2O_4$ 양극은 50~250 mL min^{-1} 및 1~4 mA cm^{-2}에서 유입 아세트알데히드를 >99% 이상(유입농도 100 ppm) 제거하였다. Cu-Mo oxide 음극은 100 mL min^{-1}, 4 mA cm^{-2} 및 동일한 아세트알데히드 유입 조건에서 제거된 아세트알데히드의 약 91%를 에탄올로 전환하였다. 이러한 양쪽 전극의 성능은 24 h 연속 운전에서도 유지되었다. GPE의 수분 부족 시 계면 분극저항이 증가하고 성능이 저하되었으나, KOH 보충 후 회복되었다. 본 연구는 별도의 기체-액체 선흡수 없이 비침지 전극-GPE 계면에서 기체상 아세트알데히드의 양극·음극 동시 전기화학적 전환이 가능함을 확인하였으며, 안정적인 장기 운전을 위한 계면 수화 관리의 중요성을 제시하였다.

사사 본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2023R1A2C2003796; NRF-2020R1A6A1A03042742).

3C4

무대전 섬유상 필터에 대한 단일섬유집진효율 모델조합의 비교 및 평가

Comparison and Evaluation of Single-Fiber Collection Efficiency Model Combinations for Uncharged Fibrous Filters

박재현[1], 권민선[2], 이명화[1),3)]

[1)]강원대학교 미세먼지통합관리학과, [2)]강원대학교 환경연구소, [3)]강원대학교 환경공학과

섬유상 필터는 표면 및 내부에 원기둥 형상의 섬유가 불규칙하게 배열된 구조로 제조된다. 불규칙하게 배열된 섬유 구조는 무작위 운동을 하는 나노입자의 집진에 유리하다. 또한, 필터 내부의 불균일한 충진율은 하나의 시편 내에서도 통과하는 에어로졸의 흐름 특성에 영향을 미친다. 이에 따라, 에어로졸 여과 시 다양한 기계적 집진메커니즘(확산, 차단, 관성 등)이 동시에 작용하므로 가스 내에 부유하는 입자를 제거 및 집진하기 위한 목적으로 널리 사용되고 있다. 섬유상 필터의 여과 특성과 구조 최적화를 통한 성능 향상을 위하여, 예전부터 여러 연구자들이 집진효율 예측 방법론을 제안하여 왔다. 예측식은 섬유 한 가닥에 입자가 100% 집진되는 상류측 유체 흐름의 높이와 섬유의 대표 길이의 비율로서 정의되는 단일섬유 집진효율과 물질수지 기반의 대수통과법칙을 기반으로 도출되었다. 그러나, 연구에 사용된 필터들의 물리적 특성이 서로 상이하며, 동일하더라도 불규칙한 섬유의 배열로 인해 발생하는 시편간의 편차 등이 발생할 수 있다. 그 결과, 다양한 형태의 단일섬유집진효율 모델들이 제안되었으며, 동일한 조건에서도 적용가능한 서로 다른 모델이 다수 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 현재까지 제안된 단일섬유집진효율 모델을 조합하여 무대전 섬유상 필터의 집진효율을 예측하고, 상용 공기청정 및 마스크용 정전필터를 ISO 16890-4 기준으로 제전한 여과체의 집진효율을 실험적으로 도출하여, 단일섬유집진효율 모델의 조합을 비교 및 평가하였다.

사사 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NO. RS-2026-25491649).

3D1

사회취약성과 GEMS 기반 오존 생성 민감도를 연계한 오존 관리 우선지역 선정 및 관리 방향 제시

Integrating Social Vulnerability and Satellite-Based Ozone Formation Sensitivity to Prioritize Ozone Management Areas

김나경, 이정범[1)]

안양대학교 환경에너지공학과, [1)]안양대학교 환경공학과

대류권 오존(O_3)은 전구물질인 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOCs)의 비선형적 광화학 반응으로 생성되며, 고농도 노출은 호흡기 건강에 영향을 미친다. 오존 관리에서는 고농도 발생지역을 파악하는 것과 함께 사회취약성을 고려한 관리 우선순위 설정이 필요하다. 동일한 오존 수준에서도 인구집단의 민감성과 지역의 대응능력에 따라 피해 가능성이 달라질 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 오존 고농도 노출과 사회적 취약성을 함께 고려하여 시군구 단위의 관리 우선지역을 선정한다. 이후 우선관리지역의 오존 생성 민감도를 진단하여 지역별 관리 방향성을 제시하고자 한다. 사회취약성지수는 2022~2024년 도시대기측정망의 일 최대 8시간 평균(Maximum Daily 8-hour Average, MDA8) O_3 고농도 발생빈도를 반영한 노출지수와 사회통계자료를 기반으로 한 민감도지수 및 적응능력지수를 결합하여 산정한다. 이를 통해 선정된 우선관리지역을 대상으로 Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS)의 HCHO와 NO_2 관측자료로 산출한 Formaldehyde-to-NO_2 Ratio (FNR)를 분석하여 오존 생성 민감도를 진단한다. 이후 Clean Air Policy Support System (CAPSS)의 NOx 및 VOCs 배출량을 연계하여 지역별 배출특성과 주요 관리대상을 보조적으로 해석한다. 이를 통해 우선관리 대상과 해당 지역의 전구물질 관리 방향성을 제시하고자 한다.

사사 이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 미세먼지관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

3D2

환경위성(GEMS) 시계열 자료를 활용한 오존 생성 체제 변화 및 지역별 저감 전략 연구

Spatiotemporal Analysis of Ozone Formation Regime Changes Using GEMS Time-Series Data and Region-Specific Mitigation Strategies

임상현

경북대학교 환경공학과

오존(O_3)은 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOCs)의 광화학 반응으로 생성되는 대표적인 2차 대기오염물질로, 전구물질의 농도와 배출 특성 및 기상조건에 따라 생성 민감도가 달라진다. 특히 동일한 지역에서도 계절과 시간대에 따라 VOC-limited와 NOx-limited 체제가 달라질 수 있어, 오존 농도만을 기준으로 한 일률적인 전구물질 저감에는 한계가 있다. 따라서 오존 고농도 발생의 시공간적 특성과 생성 체제 변화를 파악하고, 지역별 저감 방향을 설정할 필요가 있다. 본 연구에서는 정지궤도 환경위성(GEMS)의 NO_2 및 HCHO 자료를 중심으로 AirKorea 대기오염측정망과 광화학 대기오염물질 측정망의 VOC 자료를 연계하여 지역별·시간별 오존 생성 특성을 분석한다. GEMS 자료의 품질정보와 운량 등을 이용해 관측자료를 선별하고, HCHO/NO_2 ratio와 지상 오존 농도의 변화를 함께 분석하여 오존 생성 민감도의 변화를 구분한다. 또한 CAPSS의 NOx 및 VOC 배출량과 ASOS 및 ERA5의 기상자료를 결합하여 배출 특성과 기상조건이 오존 생성에 미치는 영향을 함께 고려한다. 통합자료를 바탕으로 XGBoost를 적용해 오존 농도와 전구물질·기상요인 간의 비선형적 관계를 모델링하고, SHAP을 이용하여 각 변수의 영향 방향과 상대적 중요도를 정량적으로 평가한다. 이를 통해 계절, 시간대 및 지역에 따른 오존 생성 체제의 전환 특성과 주요 영향요인을 파악하고, VOC 및 NOx 저감 수준에 따른 오존 변화 가능성을 비교하여 지역별 저감 우선순위를 도출한다. 궁극적으로 GEMS의 시공간 관측정보와 지상·배출·기상자료를 결합하여 오존 생성 체제에 기반한 지역 맞춤형 전구물질 관리방안을 제시하고, 환경위성 자료를 활용한 고농도 오존 관리체계의 적용 가능성을 평가하고자 한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-03-02-008).

3D3

GEMS 시간별 순수관측을 활용한 산업-농업 인접 해안지역의 광화학 오존 일주기 구조 규명과 농작물 노출 재평가

Characterizing the Diurnal Structure of Photochemical Ozone and Reassessing Crop Exposure in Coastal Industrial-Agricultural Areas Using Hourly GEMS Observations

박채원

경희대학교 국제학과

산업단지와 농경지가 인접한 서해안 지역에서는 휘발성유기화합물(VOCs)과 질소산화물(NOx)의 배출, 강한 일사, 해륙풍 순환이 복합적으로 작용하여 고농도 오존이 형성될 가능성이 높다. 그러나 기존 지상측정망 중심의 분석은 관측지점의 공간적 한계와 일중 변화 포착의 제약으로 인해 산업지역에서 농경지로 이어지는 광화학 오존의 이동과 노출을 충분히 설명하기 어렵다. 본 연구는 대산석유화학단지와 서산·당진 인접 농경지를 중심으로, GEMS의 시간별 대류권 NO_2와 HCHO 관측자료를 지상 O_3·NO_2 자료, 유해대기물질 측정망의 VOCs 자료 및 기상자료와 결합하여 광화학 오존의 일주기 구조를 규명하고자 한다. 우선 HCHO/NO_2 공간분포와 풍향·풍속 변화를 함께 분석하여 오전 배출 및 축적, 정오 이후 광화학 생성, 오후 하풍측 이동으로 이어지는 시간대별 패턴을 식별하고 산업지역과 비산업 해안지역의 차이를 비교한다. 이어 지상측정망만을 이용한 공간추정과 GEMS 정보를 결합한 추정결과를 독립 측정소에서 비교하여 위성자료 결합이 지상 오존의 공간대표성을 개선하는지 검증한다. 또한 농경지별 오존 노출을 AOT40 등 누적노출지표로 산정하고 지상측정망만을 이용했을 때의 노출량과 비교함으로써 기존 평가의 과소추정 가능성을 검토한다. 본 연구는 정지궤도 환경위성의 시간해상도를 활용하여 산업 배출, 해안 기상, 농업 노출을 하나의 분석틀로 연결하고 산업·농업 인접지역의 오존 관리와 농작물 피해평가를 위한 관측기반 근거를 제시하고자 한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-03-02-008).

3D4

정지궤도 환경위성-MoE 기반 동아시아 고농도 오존 발생 지역 진단 및 저감 방향성 분석

Diagnosing Ground-level Ozone Hotspots and Assessing Mitigation Strategies in East Asia Using Geostationary Environment Monitoring Spectrometer and a Mixture-of-Experts Model

김예진, 최현영, 배세정

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

동아시아는 국가별 배출 구조와 기상·기후 조건이 다르고 지상 관측망의 공간 분포, 관측 항목 및 자료 연속성도 상이하여, 지상관측만으로 지표면 오존의 공간 분포와 생성 특성을 일관되게 진단하기 어렵다. 본 연구는 2023~2025년 정지궤도 환경위성(Geostationary Environment Monitoring Spectrometer, GEMS) 자료와 Mixture-of-Experts (MoE) 모델을 활용해 동아시아의 시간별 지표면 오존 농도를 추정하고, 고농도 발생 지역의 오존 생성 민감도와 저감 방향을 분석하고자 한다. 모델의 입력변수로 GEMS L2 대류권 O_3, NO_2, HCHO, CHOCHO, 자외선지수 및 ERA5 재분석자료와 식생·도시화·인구·지형 자료를 사용하고, AirKorea, CNEMC, OpenAQ 관측자료를 학습·검증에 활용하였다. MoE의 각 expert는 전구물질과 기상 조건의 상이한 패턴을 구분하여 학습하며, gating network는 expert별 기여도를 조정한다. Random hold-out 검증 결과, MoE는 R^2 0.794, RMSE 17.69 $\mu g/m^3$로 single-expert (R^2 0.775)와 Random Forest (R^2 0.781)보다 우수했으며, 고농도 구간에서 RF 대비 bias를 약 38% 완화시켰다. 모델 추정 결과를 기반으로 고농도 오존 지역을 선별하고, HCHO/NO_2, CHOCHO/NO_2 등의 비율 지표를 종합하여 NOx-limited, VOC-limited 및 transition regime의 공간적 차이를 해석하고자 한다. 연구 결과는 관측소가 희소한 지역까지 포괄하는 공간적으로 연속된 지표면 오존 분포를 제시하고, 지역별 우선 관리 전구물질 후보와 오존 저감 방향 및 관측망 보완 지점을 제안하는 데 기여할 것으로 기대된다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-03-02-008).

3D5

정지궤도 환경위성 HCHO 및 NO_2 자료를 활용한 고농도 오존 발생 시 전구물질 일변화 특성 분석

Diurnal Variations of Ozone Precursors during High-Ozone Episodes Using GEMS HCHO and NO_2 Observations

박정현, 박 경

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공

오존(O_3)는 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOCs)의 광화학 반응에 의해 생성되는 2차 대기오염물질로, 고농도 오존 발생 특성을 이해하기 위해서는 오존 농도뿐만 아니라 전구물질의 시간적 변화를 함께 파악할 필요가 있다. 본연구에서는 정지궤도 환경위성 GEMS (Geostationary Environment Monitoring Spectrometer)의 시간별 이산화질소(NO_2) 및 포름알데히드(HCHO) 칼럼농도 자료와 지상대기질 관측망의 O_3 자료를 활용하여 고농도 오존 발생일의 전구물질 일변화 특성을 분석하였다. 지상 관측 O_3 농도를 기준으로 고농도 오존 발생일과 일반일을 구분하고, 오전 O_3 농도와 일 최대 O_3 농도의 차이를 이용하여 일중 O_3 증가량을 계산하였다. GEMS 자료는 품질 플래그와 구름 영향 등을 고려하여 전처리하였으며, NO_2와 HCHO가 동일한 시공간에서 유효한 공통 픽셀을 추출하여 관측소별 NO_2, HCHO 및 FNR 값을 산출하고, 오전, 정오, 오후 시간대별 농도와 변화량을 분석하였다. 이를 바탕으로 고농도 오존 발생일과 일반일의 전구물질 일변화 패턴을 비교하고, 오전 및 정오 시간대의 GEMS 기반 전구물질 지표와 오후 O_3 증가량 간의 관련성을 조사하였다. 추가적으로 Random Forest 또는 XGBoost 기반 변수 중요도 및 SHAP 분석을 적용하여 일중 O_3 증가량과 관련성이 높은 시간대와 전구물질 지표를 평가하였다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-03-02-008).

3D6

GEMS 환경위성·집중측정망·대기역학 자료 3원 융합 기반 머신러닝을 활용한 $PM_{2.5}$ 고농도 에피소드 선제적 감지 연구

Machine Learning-Based Early Detection of $PM_{2.5}$ High-Concentration Episodes Using Trilateral Fusion of GEMS Satellite, Intensive Monitoring Network, and Atmospheric Dynamics Data

김준영, 강지명[1)]

연세대학교 융합의학과, [1)]인하대학교 기계공학과

초미세먼지($PM_{2.5}$) 고농도 에피소드는 봄·겨울철을 중심으로 반복 발생하며 심혈관·호흡기 건강에 직접적 영향을 미친다. 현행 수치예보모델은 기상 입력 오차의 증폭과 높은 계산 비용으로 인해 고농도 발생 전 충분한 선행 시간을 확보하기 어렵고, 비상저감조치 발령이 전일 오후에 결정되는 실무 절차를 고려하면 T+6h~T+24h 구간의 예측 성능 개선이 정책 대응의 실효성과 직결된다. 본 연구는 정지궤도 환경위성 GEMS 산출물, 대기오염집중측정망 성분 자료, ERA5 대기역학 재분석 자료를 3원 융합하여 고농도 에피소드를 선제적으로 감지하는 머신러닝 모델을 개발한다. 위성 입력 변수로는 에어로졸 광학두께와 대류권 이산화질소를 활용하며, 지상 초미세먼지 추정농도 산출물은 학습에 사용하지 않은 독립 구간의 전향적 검증 자료로 활용한다. 구름 및 주간 관측 특성에 따른 결측에는 계층적 보완 절차를 적용하고, 예측 기준 시각을 비상저감조치 실무 절차에 맞추어 오후 시간대로 고정함으로써 위성 관측 가용 시간대와 정책 의사결정 시점을 정합시킨다. 지상 변수로는 전국 11개 집중측정소의 시간 단위 탄소·이온·금속 성분 및 기상 자료를, 대기역학 변수로는 혼합층 고도와 역전층 강도를 포함하여 수직 확산 제한 조건을 반영한다. 목표 변수는 리드타임별 고농도 발생 여부의 이진 분류로 설정하고, 계절·권역 층화 사례-대조 표본을 구성하여 앙상블 기반 머신러닝 모델을 시계열 분할 교차검증으로 비교한다. 아울러 SHAP 기반 해석을 통해 에피소드 발생 직전 성분별 기여도의 시간 변화와 권역별 화학 지문을 분석함으로써, 어떤 성분이 고농도를 주도하는지에 근거한 배출원 관리 의사결정 지원을 목표로 한다. 본 접근은 기존 수치예보모델을 대체하기보다 단기 선제 감지 영역에서 상호보완적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-03-02-008).

3E1

화목난로 연소 시 목재 함수율에 따른 1차 입자상 물질의 물리화학적 특성 비교 연구

Fuel Moisture Governs the Physicochemical Characteristics of Primary Particulate Matter Formation of Wood-Stove Combustion

윤준혁[1),2)], 이헌영[1),2)], 강천웅[1),2)], 레티황이엔[2)], 김민선[3)], 윤종상[3)], 전기준[1),2)]

[1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [3)]가톨릭대학교 에너지환경공학과

응축성 먼지는 고온의 배출가스가 냉각·희석되는 과정에서 기체상에서 입자상으로 전환되는 물질로, 배출원 및 연료 종류에 따라 물리화학적 특성이 상이하다. 국내 응축성 먼지 연구는 화석연료 기반 고정오염원에 집중되어 있고 바이오매스 연소 관련 연구는 부족하며, 별도 오염물질 제어장치가 없는 화목난로는 고농도 미세먼지를 직접 배출하거나 실내오염을 유발할 수 있어 연구가 긴요하다. 본 연구는 화목난로 연소 시 1차 입자상물질의 물리화학적 특성을 목재 함수율에 따라 비교분석하였다. 실험에서 연소과정을 Start-up, Flaming, Smoldering 3단계로 구분하고, 이중 희석 시스템으로 단계별 여과성 먼지와 응축성 먼지를 동시 측정하였다. 전 연소단계에서 응축성 먼지는 총 입자상물질의 58~88%를 차지해 큰 비중을 보였다. 수농도 측면에서 함수율 영향은 주로 Start-up 단계에서 뚜렷했는데, 건조 조건은 균일핵생성이, 습윤 조건은 초기 수분 증발에 의해 0.1 μm 부근 입자가 지배적이었다. Flaming과 Smoldering 단계는 함수율과 무관하게 각각 불균일 응축(수농도 최빈경 0.09→0.11 μm 이동)과 균일핵생성에 의해 응축성 먼지가 형성되었다. 질량농도는 Start-up·Smoldering 단계에서 함수율 증가에 따라 늘었으나 Flaming 단계에서는 오히려 감소하였다. 특히 Start-up 단계는 불완전연소에 의한 가스상 전구체 응집으로 응축성 먼지 비중이 높게 나타났다. 투과전자현미경 분석에서도 Flaming·Smoldering 단계 모두 블랙 카본-유기물 내부혼합 구조가 공통적으로 관찰되었으며, 특히 Smoldering에서는 이와 별개로 독립적으로 균일핵생성된 유기물 입자가 함께 관찰되어 입경분포를 형태학적으로 뒷받침하였다. 본 연구 결과는 향후 화목난로 배출계수 산정 및 관리정책 수립을 위한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 CLEAN-AIR 기술개발사업(RS-2026-25500877) 및 국립환경과학원(NIER-2026-04-02-069)의 지원을 받아 연구되었습니다.

3E2

2026년 서산의 계절별 1차 및 2차 탄소계 에어로졸 기여도 분석

Seasonal Apportionment of Primary and Secondary Carbonaceous Aerosols in Seosan during 2026

이수정, 김덕래[1)], 이원진[1)], 서석준[1)], 전용석[2)], 최용주

한국외국어대학교 환경학과, [1)]국립환경과학원, [2)]APM 엔지니어링

탄소계 에어로졸(CA)은 미세먼지($PM_{2.5}$)의 주요 구성 성분 중 하나로, 인체 건강과 기후변화에 영향을 미치는 중요한 대기오염물질이다. 그러나 블랙카본(BC)은 강한 빛 흡수 특성을 보이는 반면, OA (Organic Aerosol)는 대기 중 다양한 화학반응을 거치며 복잡한 화학적·물리적 특성을 나타낸다. 특히, 빛을 흡수하는 갈색탄소(BrC)와 비광흡수성 OA가 공존하여 CA의 특성을 정량적으로 파악하는 데 어려움이 있다. 또한 CA의 발생원과 광학적 특성을 동시에 파악할 수 있는 실시간 관측자료가 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 서산시에 위치한 충청권 대기환경연구소(36.77°N, 126.49°E)에서 총탄소 분석기(TCA08; Magee Scientific)와 에쌀로미터(AE36s; Magee Scientific)로 구성된 탄소성 에어로졸 분석 시스템(Carbonaceous Aerosol Speciation System, CASS)을 이용하여 TC와 BC를 실시간으로 측정하였다. TC-BC 분류법을 이용하여 CA를 BC_{ff} (Fossil Fuel BC), BC_{bb} (Biomass Burning BC), $POA_{non-abs}$ (Primary non-light-absorbing OA), POA_{BrC} (Primary BrC), $SOA_{non-abs}$ (Secondary non-light-absorbing OA), SOA_{BrC} (Secondary BrC)의 6개 성분으로 분류하고, 이를 바탕으로 각 성분의 시간적, 계절적 변동 특성과 주요 영향요인을 분석하였다. 본 연구는 서산 지역 CA를 발생원과 광흡수 특성에 따라 세분화하고, 각 성분의 시간적 변동과 주요 영향요인을 규명함으로써 지역 대기질 개선과 기후변화 대응을 위한 CA 관리 및 저감 대책 수립에 필요한 과학적 근거를 제공한다.

사사 본 연구는 2026년 대한민국 국립환경과학원 연구용역과제 "아시아 환경위성 기반 대기질 공동 조사(II) (NIER-2026-04-02-017)"의 지원을 받아 수행되었습니다.

3E3

겨울철 뉴욕시 브라운 카본의 조성과 배출원 분석

Elucidating Composition and Source of Wintertime Brown Carbon in New York City

민희성, Mitchell J. Rogers[1)], Tori Hass-Michell[1),2)], Lijin Zhang[1)], Drew R. Gentner[1)], 주태규

고려대학교 지구환경과학과, [1)]Yale University, [2)]City of Boston

유기 에어로졸(OA)은 다양한 물리/화학적 과정을 통해 대기 중에서 생성・변환・소멸이 되며, 그 성분 조성에 따라 건강 영향과 기후 영향력을 동시에 갖춘다. 이러한 OA의 중요성은 최근 일부 대도시에서 $PM_{2.5}$ 내 무기 에어로졸의 비율이 감소하면서 점차 대두되는 추세이다. 특히 OA 중 브라운 카본(BrC)은 근자외선-가시광선 영역의 빛을 흡수하며 블랙 카본(BC)과 더불어 기후적인 중요성이 크다. 서구권의 대도시인 뉴욕시에서도 동아시아 지역과 마찬가지로 대기 중 OA의 중요성이 대두되고 있으며, 이는 여름철 관측 자료를 기반으로 한 기존 연구에서도 보고된 바 있다. 그러나 최근 뉴욕시의 겨울철 에어로졸의 조성과 배출원을 중점적으로 연구한 사례는 부족하며, 에어로졸의 광학적 성질에 관한 연구 또한 제한적이다. 본 연구에서는 실시간 에어로졸 화학 조성 분석기(ACSM)에서 측정된 데이터들을 분석하여 겨울철 뉴욕시의 대기 조성에서 OA의 기여도가 증가하는 추세임을 확인하였으며, PMF 모델을 이용해 OA의 주요 배출원 또한 규명하였다. 또한, 실시간 에어로졸 흡광 분석기(Aethalometer)의 자료를 바탕으로 BrC의 광흡수 특성을 분석하였다. 그 결과, 뉴욕시에서 BrC가 유의미한 복사강제력을 가지며, BrC 증가는 바이오매스 연소(BB)와 매우 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 특히 대형 산불에 의한 간헐적 BB 외에도 주거 난방에 의한 지속적인 BB가 중요한 BrC 공급원이 될 수 있음을 확인하였다.

사사 이 성과는 미국 National Science Foundation (AGS-2131914), New York State Research and Development Authority (NYSERDA; Agreement No. 183866)와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2026-25471981).

3E4

산화 및 이차유기에어로졸 코팅에 따른 블랙카본의 물리·광학적 특성 변화

Effects of Oxidation and Secondary Organic Aerosol Coating on the Physical and Optical Properties of Black Carbon

임하늘[1], 최시영[1], 조이슬[1], 김태현[2], 임호진[2], 이정훈[3], Fawad Ashraf[1], 임세희[1),4)]

[1)]충남대학교 환경IT융합공학과, [2)]경북대학교 환경공학과, [3)]한국기술교육대학교 기계공학부, [4)]충남대학교 환경공학과

블랙카본(Black Carbon, BC)은 대기 중 양의 복사강제력을 갖는 단기체류 기후변화 유발물질로, 대기 노화 과정에서 변화되는 입자의 혼합상태에 따라 광흡수효율이 달라져 복사강제력 추정의 불확실성이 크다. 본 연구에서는 서로 다른 유형의 BC가 포함된 입자에 톨루엔 산화로 생성된 이차유기에어로졸(Secondary Organic Aerosol, SOA)을 코팅하여, BC 종류에 따른 물리·광학 특성 변화와 기체-입자 상호작용을 평가하고자 하였다. 상용 표준 BC, KCl 및 페놀 혼합 BC, 에틸렌 연소 BC를 산화흐름반응기(OFR)에 주입하고, 톨루엔을 3·5·8일 상당의 OH 노출 조건에서 산화하여 SOA 코팅을 형성한 뒤, 에어로졸 입경분포, refractory BC (rBC)의 코어·코팅 특성 및 광흡수계수를 분석하였다. SOA 생성 조건에서 코팅 두께는 OH 노출에 따라 증가하였으며, 8일 조건에서 상용 표준 BC 11.8 nm, 페놀 혼합 BC 22.1 nm, KCl 혼합 BC 27.0 nm, 에틸렌 연소 BC 35.2 nm로 나타났다. 같은 조건에서 산화 전 대비 $AAE_{365/880}$ (Absorption Ångström Exponent) 변화량은 각각 +0.09, +0.25, +0.73, +2.29로 모두 단파장 광흡수가 강화되어, 브라운카본 형성 가능성을 보였다. 톨루엔 손실을 BC 표면적으로 정규화한 uptake coefficient는 8.0×10^{-4}~2.3×10^{-3}로 선행연구 범위(3.4×10^{-4} ~ 1.2×10^{-3})와 유사하였다. 향후 톨루엔 산화생성물 모델링을 통해 각 생성물의 BC 표면 uptake와 SOA 코팅 특성을 연계 분석할 예정이다.

사사 본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2026-25475619314820926400001), 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 산업혁신인재성장지원사업 지원(RS-2025-02263037), 그리고 교육부의 재원으로 한국연구재단의 4단계 BK21 사업 지원을 받아 수행됨.

3E5

2023년~2025년 PMF 모델을 이용한 포스코타워-송도 상층 및 지표 $PM_{2.5}$의 오염원 기여도 추정 및 비교

Source Apportionment and Comparison of $PM_{2.5}$ between Upper and Ground Levels Using the PMF Model at the Tall tower in Incheon, Korea

김하정, 우서라, 정지윤[1], 장지희[1], 박종성[1], 허국영[1], 최용주

한국외국어대학교 환경학과, [1)]국립환경과학원

공기역학적 직경이 2.5 μm 이하인 초미세먼지($PM_{2.5}$)는 난방, 자동차, 산업 등 인위적 오염원에서 발생하거나, 전구물질의 광화학 반응을 통한 대기 중 2차 생성 등 다양한 기작을 통해 생성된다. 하지만 $PM_{2.5}$의 화학적 조성이나 생성 기작에 관한 연구는 대부분 지표 부근 에어로졸에 집중되어 있어, 도시 상층 대기의 상세한 화학적 정보는 상대적으로 제한적이다. 도시 상층의 오염물질은 대기경계층의 발달과 연직 혼합에 따라 지표로 하향 수송되어 대기질에 영향을 미칠 수 있어, $PM_{2.5}$ 오염원 기여도의 연직적 차이를 정량화하는 것은 국지적/광역적 이류가 두드러지는 우리나라 특성상 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 PMF (Positive Matrix Factorization) 모델을 활용하여 도시 상층과 지표간 $PM_{2.5}$ 오염원 기여도의 계절별 연직 차이를 확인하였다. 2023~2025년 겨울철, 봄철 및 가을철을 중심으로 인천광역시 POSCO-송도 옥상(37.39°N, 126.64°E; 305 m a.g.l)과 지표에서 $PM_{2.5}$ 시료를 채취하였다. 대기 중 $PM_{2.5}$는 저유량 연속채취기(16.7 L/min)로 24시간 동안 포집하였다. PMF 분석에는 총 690개 시료를 사용하였으며, 입력성분은 수용성 무기이온 7종, 유기탄소와 원소탄소, 그리고 미량원소 13종으로 구성하였다. PMF 분석 결과 총 9개의 오염원이 확인되었으며, 관측기간 동안 2차 황산염과 2차 질산염은 지표와 상층 지점 모두에서 기여도가 높게 나타났다. 이를 통해 POSCO 타워-송도 상층과 지표의 계절별 $PM_{2.5}$의 배출원 기여도의 차이를 분석하고자 한다.

사사 본 연구는 국립환경과학원 연구용역과제(NIER-2026-01-02-021) "미세먼지 및 오존 생성 원인 파악을 위한 도심 상공 대기오염 원인물질 분포측성파악(V)"의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

3F1

과수(배·사과·포도·복숭아) 농업잔재물 소각에 의한 SLCFs 배출계수 개발

Development of Emission Factors for Short-Lived Climate Forcers from Open Burning of Fruit Tree (Pear, Apple, Grape, and Peach) Agricultural Residues

김찬수, 박민성, 우지윤[1], 김민욱[2], 김승진[3], 노준영[3], 전의찬

세종대학교 기후에너지융합학과, [1]세종대학교 기후환경융합센터, [2]농촌진흥청 국립농업과학원, [3]㈜휴엔릭스 첨단기술연구소

농업잔재물 노천 소각은 불완전연소를 통해 단기체류기후변화원인물질(Short-Lived Climate Forcers, SLCFs)을 배출하는 주요 생물성 연소 배출원이다. 2027년 IPCC SLCFs 방법론 보고서 발간이 예정되면서 배출원별로 자국 특성을 반영한 배출계수 확보가 요구되고 있다. 과수(배·사과·포도·복숭아)는 2019년 기준 국내 농업잔재물 소각 부문 배출량의 PM-2.5 36%, CO 31%, NOx 44%, NH_3 42%를 차지하였으나, 2023년 산정에서는 98.4% 감소하였다. 본 연구는 이러한 감소가 소각 행태 변화가 아닌 활동자료 산정 방법 개정에 기인하며, 배출계수는 2014년 단일 실험값이 유지되고 있음을 확인하였다(KEITI, 2014). 이에 배·사과·포도·복숭아 잔재물을 주산지에서 수확 후~파종 전에 수집하고, U.S.EPA-600/R-96-128과 U.S.EPA Method 5G를 참고해 노천 소각을 모사한 연소실험 시스템에서 등속흡인 조건으로 작물별 20회씩 소각하였다. PM-2.5는 중량농도법, CO·NOx는 정전위전해법, NH_3는 인도페놀법으로 분석하였다. 평균 배출계수는 PM-2.5 0.00222~0.00457 kg/kg, CO 0.09552~0.14428 kg/kg, NOx 0.00291~0.00776 kg/kg, NH_3 0.00061~0.00116 kg/kg이었다. 현행값(CAPSS) 대비 PM-2.5, CO, NOx는 1.2~76.6% 낮은 반면, NH_3는 6,000~11,500% 높아 4개 작물에 단일값을 적용하는 현행 체계가 NH_3 배출을 과소평가하고 있음을 확인하였다. 불확도는 몬테카를로 시뮬레이션으로 평가하였으며, 본 연구의 과수(배·사과·포도·복숭아) 배출계수는 생물성 연소 인벤토리의 완전성과 신뢰도 제고에 기여할 것으로 판단된다.

사사 본 연구는 농촌진흥청 「농업잔재물 소각에 의한 미세먼지 배출특성 및 배출계수 개발(RS-2002-RD010228)」, 기후에너지환경부 「기후변화특성화대학원사업」의 지원으로 수행된 연구임.

3F2

농업잔재물 노천소각 시 배출되는 입자상·가스상 대기오염물질의 화학적 특성 분석 및 배출계수 산정

Chemical Composition and Emission Factor Estimation of Particulate and Gaseous Air Pollutants from Biomass Burning of Agricultural Residues

김주한, 김경훈, 안준영[1], 박진수[1], 임용재[1], 남일권[1], 정소영[1], 이재윤[1], 박성규[2], 최진수[1], 이태형

한국외국어대학교 환경학과, [1]국립환경과학원 대기환경연구과, [2](주)케이에프 코퍼스트 R&D센터

생물성 연소는 유기물이 자연적(10%) 또는 인위적(90%) 요인으로 연소 되는 과정으로, 대기질과 기후변화에 영향을 미친다. 인위적 요인에는 농업잔재물 노천소각 등이 포함되며, 노천소각은 $PM_{1.0}$, BC, VOCs, CO 등을 방출해 광역적 오염을 유발한다. 국내에서는 노천소각이 생물성 연소 전체 배출량의 약 68%를 차지하는 주요 비점오염원이다. 배출 물질은 $PM_{1.0}$, BC, CO, CO_2, CH_4, SO_2, NO, NO_2, O_3, VOCs 등이며, 연소 특성과 온도에 따라 입자상·가스상 오염물질의 배출량과 조성은 크게 달라진다. 이와같이 연소 및 연소 조건에 따라 변화되는 배출량과 조성을 분석하기 위해서는 연소되는 과정과 연소 된 후 배출되는 대기오염물질을 즉각적으로 관측하여 이에 대한 변화를 파악하고 정밀한 배출계수를 산정하는 것이 필요하다. 국내에서는 농업잔재물 노천소각으로부터 배출되는 대기오염물질에 대하여 필터·가스상 분석을 통한 조성 연구와 배출량 산정이 활발하나, 실시간 분석 연구는 상대적으로 부족하다. 본 연구는 일반 대기 중 자연 건조 시킨 국내 농업잔재물 9종을 대상으로 노천소각 시 배출되는 입자상 및 가스상 오염물질의 화학적 특성을 실시간으로 분석하고, 시료별 배출계수를 도출하고자 하였다.

사사 본 연구는 국립환경과학원의 “생물성 연소에 의한 극미세먼지 및 가스상 전구물질 배출 특성 연구(I)”(NIER-2024-01-02-018)에서 지원받아 수행되었으며, 국가연구시설장비진흥센터의 연구장비 지원(2019R1A6C1020041)을 받아 수행됨.

3F3

실외 바비큐 조리 시 발생하는 응축성 미세먼지 특성 연구

Characteristics of Condensable Particulate Matter Emissions from Outdoor Barbecue Cooking

전현수, 강기원, 장수강, 김정빈, 서서희, 김창혁

부산대학교 사회환경시스템공학과

레져생활에 대한 관심이 높고 캠핑 및 야외활동 빈도가 증가함에 따라 숯과 같은 고체연료를 이용한 바비큐 조리가 빈번하게 이루어지고 있다. 바비큐 조리는 연료의 연소와 육류 등 식재료의 고온 가열이 동시에 이루어지는 조리 방식으로, 조리 과정에서 고농도의 미세입자와 다양한 가스상 오염물질이 단시간에 배출될 수 있다. 특히 석쇠를 이용한 바비큐 조리에서는 식재료가 직접 고온에 노출될 뿐만 아니라, 조리 중 용출된 지방 등의 유기성 물질이 고온의 열원과 접촉하면서 열분해 및 불완전연소가 발생할 수 있어 팬이나 철판을 이용한 조리와는 다른 입자 배출 특성이 나타날 수 있다. 이 과정에서 발생하는 휘발성 및 반휘발성 물질의 일부는 배출 후 주변 공기와 혼합되면서 냉각 및 희석되고, 핵생성 및 응축 과정을 통해 응축성 미세먼지(Condensable Particulate Matter, CPM)를 형성할 수 있다. 기존 조리 발생 미세먼지 연구는 주로 팬이나 철판 등을 이용한 조리 조건에서 발생하는 입자의 농도와 크기분포 및 가스상 오염물질의 배출 특성을 중심으로 수행되어 왔으며, 숯과 같은 고체연료와 석쇠를 이용한 바비큐 조리에서 발생하는 CPM의 배출 특성에 관한 연구는 상대적으로 제한적이다. 이에 본 연구에서는 숯을 이용한 석쇠 조리 조건에서 지방 함량이 다른 돈육(삼겹살 및 안심)을 조리하여 발생하는 입자를 비교하였다. 이를 통해 바비큐 형태의 조리 과정에서 발생하는 CPM의 입경별 농도 분포 및 배출 특성을 파악하고, 연료 연소 및 식재료 특성에 따른 CPM의 생성 특성을 평가하였다.

사사 본 논문은 과학기술정보통신부(RS-2022-NR071930) 및 교육부(RS-2025-25415557) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

3F4

대기 중 비정형 마이크로 나노 플라스틱 입자 합성 기술 개발 및 분석

Synthesis and Characterization of Atmospheric Irregularly shaped Micro- and Nano-Plastic Particles

박세은[1),3)], 유한진[2)], 레티황이엔[3)], 전기준[1),3)]

[1)]인하대학교 환경공학과, [2)]국립한국교통대학교 환경공학전공, [3)]수도권 미세먼지연구·관리센터

대기 중 미세 나노 플라스틱(Atmospheric Micro- and Nano-Plastics, AMNPs)는 장거리 수송 가능성과 인체·기후에 미치는 잠재적 영향으로 최근 주목받고 있는 대기오염물질이다. 특히 나노 플라스틱은 크기가 작아 대기 중에서 장기간 부유하며, 노화 과정에서 물리·화학적 특성이 변화해 독성 및 대기 중 거동 특성이 달라질 수 있다. 이러한 이유로 AMNPs의 특성 및 거동에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 현재 AMNPs의 채취, 전처리 및 분석 과정에 대한 표준화된 절차가 확립되어 있지 않아 연구 결과 간 직접적인 비교가 어려운 실정이다. 또한 분석 과정의 신뢰성 검증에 필수적인 표준물질 또한 부재하다. 이에 본 연구에서는 AMNPs 표준물질로 활용 가능한 입자를 실험실 규모에서 합성하는 방법을 개발하였다. 본 합성법은 0.1 μm~1.6 μm 범위에서 다양한 형태와 크기의 입자를 생성할 수 있으며, 특히 환경 중에서 빈번하게 관찰되는 film 형태의 AMNPs를 일정하게 생성할 수 있는 최초의 방법임에 의의가 크다. 생성된 입자를 전기적 저압 임팩터를 통해 크기별 분리·분석한 결과, 현미경상 1차 직경과 공기역학적 직경이 상이하였다. 이는 불규칙한 형태 및 낮은 밀도로 인해 AMNPs가 실제 크기보다 공기역학적으로 더 미세한 크기의 입자처럼 거동할 수 있음을 시사한다. 더불어 라만 분광 분석 결과, 합성된 입자에서 플라스틱 원재료 특유의 화학 결합이 확인되어, 본 방법으로 원재료와 화학적 특성이 유사한 AMNPs 입자를 합성할 수 있음을 입증하였다. 나아가 합성된 입자는 추가적인 크기 분급을 거쳐 특정 크기 범위로 실험 시스템에 적용할 수 있으며, 향후 AMNPs의 물리·화학적 거동 및 독성 연구에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

사사 이 연구는 2026년도 산업통상부 및 한국산업기술기획평가원 연구비 지원과(RS-2026-25549859), 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행되었습니다(NIER-2024-03-03-002).

3F5

대기 미세플라스틱의 배출원 규명 및 물리화학적 특성 분석: 시멘트 제조시설을 중심으로

Investigation of Emission Sources and Physicochemical Characterization of Airborne Microplastic Particles: Focusing on Cement Manufacturing Plants

이헌영[1),2)], 박종현[1),2)], 유한진[3)], 송영철[4)], 이경은[5)], 전기준[1),2)]

[1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [3)]국립한국교통대학교 환경공학전공, [4)]한국화학연구원 화학분석센터, [5)]한국화학연구원 신뢰성분석센터

대기 중 미세플라스틱(Airborne Microplastics, AMPs)의 주요 발생원으로는 교통 관련 배출, 해염 입자, 매립지 침식 등이 알려져 있다. 특히 산업 연소 시설에서의 배출도 주요 요인 중 하나로 지목되지만, 현재 직접적인 연구는 미흡한 실정이다. 그중 시멘트 제조시설은 폐플라스틱, 폐타이어 등의 폐기물을 대체 연료로 활용하기에 AMP의 잠재적 배출원으로 작용할 가능성이 높다. 본 연구는 시멘트 소성 시설 4개소(A-D)를 대상으로 굴뚝에서 배출되는 AMP의 수농도 및 물리화학적 특성을 분석하였다. 희석 기반 채취법을 이용하여 배출가스 내 $PM_{2.5}$ 입자를 포집하였으며, 형광현미경, 라만분광법, O-PTIR, SEM/EDX를 통합한 단일입자 분석법을 적용하였다. 배출된 AMP의 평균 수농도는 기존 보고된 일반 대기 중 미세플라스틱의 농도인 수십~수백 개/m^3 수준보다 현저히 높은 것으로 나타났다. 또한, 전체 미세플라스틱의 상당 비율이 광학적 직경 10 μm 및 2.5 μm 미만으로, 인체 호흡기 침투 가능 범위에 존재함을 확인하였다. 주요 미세플라스틱 유형은 PET, Nylon, PS, 고무류 등으로 확인되었다. 일반 대기에서 행하여진 다른 연구와 비교하여, Nylon과 고무류가 우세한 비율로 나타난 것은 대체연료인 폐타이어의 불완전연소에 기인한 것으로 판단된다. 본 연구는 배출원 AMP 시료에 대한 시료 채취 및 단일입자 분석법의 적용 가능성을 확인함과 동시에, 시멘트 제조시설이 AMP의 유의미한 배출원으로 기능할 수 있음을 제시한다. 이는 향후 AMP의 잠재적 산업 연소 배출원 규명을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 2026년도 산업통상부 및 한국산업기술기획평가원 연구비 지원(RS-2026-25549859)과 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 탈플라스틱 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

3G1

대기 중 유기에어로졸의 형광특성 측정을 위한 다채널 형광 라이다 시스템 구축 및 기초 특성 평가

Development and Preliminary Characterization of a Multichannel Fluorescence LiDAR System for Measuring the Fluorescence Properties of Atmospheric Organic Aerosols

최효정, 신동호[1)], 노영민

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, [1)]한국에너지기술연구원

대기 중에는 광물성 먼지, 연소 기원 유기 에어로졸, 꽃가루를 비롯한 생물입자 등 다양한 종류의 에어로졸이 존재한다. 이 중 일부 유기 및 생물기원 입자는 특정 파장의 자외선을 흡수한 후 입자의 화학적 조성과 구조에 따라 서로 다른 파장대의 형광을 방출한다. 이러한 형광 스펙트럼은 에어로졸의 유형과 기원을 판별하기 위한 유용한 광학정보로 활용될 수 있다. 기존 탄성산란 라이다는 에어로졸의 거리별 공간분포와 후방산란 특성을 연속적으로 관측할 수 있으나, 동일한 파장에서 수신되는 산란 신호를 이용하므로 입자의 화학적 조성이나 형광 특성을 직접적으로 구분하는 데에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 대기 에어로졸에서 발생하는 형광 신호를 파장별로 측정하기 위해 Nd:YAG 레이저, 분광기 및 32채널 광전자증배관으로 구성된 다채널 형광 라이다 시스템을 구축하였다. 현장 측정에 앞서, 탄성산란 신호를 이용하여 분광기 설정 파장과 광전자증배관 채널 간의 파장 보정을 수행하고, 레이저 비조사 조건에서 배경 신호를 측정하여 분광 신호의 보정 및 분석을 위한 기초자료를 확보하였다. 이를 바탕으로 다양한 측정 조건에서 수신되는 파장별 신호를 분석하여 구축된 시스템의 형광 신호 검출 가능성을 평가하고자 한다. 본 연구를 통해 형광 라이다 시스템의 측정 및 분석 기반을 마련하고, 향후 대기 중 생물입자를 포함한 다양한 에어로졸의 형광 신호 관측에 활용하고자 한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 RS-2026-25501396).

3G2

통제방출실험(CRF) 기준 2-파장 DIAL 비산배출량 산정의 현장 관측 변인 민감도 평가

Sensitivity Analysis of Field Measurement Variables in 2-Wavelength DIAL Fugitive Emission Estimation Based on Controlled Release Facility (CRF)

김석준, 이유선, 김덕현[1], 홍석영[2], 김정훈[2], 조성환[2], 정원석[2], 노영민

국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [1]국립한밭대학교 기초과학부, [2]국립환경과학원 대기환경연구부 대기공학연구과

석유화학단지와 같은 대규모 복합 산업시설의 비산배출량 정량화를 위해 차분흡수라이다(DIAL) 기반 광학 원격탐사 기술이 활용되고 있다. 통제방출실험(CRF)에서 DIAL 시스템은 약 4% 미만의 기기 오차를 보이지만, 실제 산업 현장에서는 복잡한 시설 구조와 역동적인 대기 경계층으로 인해 기상·화학·광학적 불확도가 추가될 수 있다. 본 연구는 2-파장 Mobile DIAL을 활용하여 현장에서 적용되는 주요 가정이 최종 질량 배출량에 미치는 민감도와 오차 증폭을 정량적으로 평가하고자 하였다. 기상학적 변인으로 저고도(3~12 m) 윈드 센서 자료를 외삽한 고고도 풍속과 도플러 윈드 라이다로 실측한 30~150 m 상공 풍속의 RMSE를 비교하였다. 화학적 변인은 범용 TVOC 흡수단면적과 현장 캐니스터 GC-MS 분석을 통해 도출한 성분비 가중 유효 흡수단면적의 차이를 평가하였다. 광학적 변인은 HITRAN, PNNL 등의 분광 데이터베이스와 실제 레이저 선폭을 convolution하여 산출한 흡수단면적의 농도 왜곡률을 분석하였다. 이를 통해 연직 풍속 시어, 혼합 VOCs의 성분 차이 및 레이저 선폭이 배출량 산정에 미치는 영향을 정량화하고, 각 변인의 오차 기여도와 민감도 범위를 도출하고자 한다. 본 연구 결과는 향후 스마트 LDAR (Leak Detection and Repair) 및 원격탐사 기반 배출량 정량화의 신뢰성 향상과 기상·화학·광학 보정 프로토콜 구축을 위한 과학적 근거를 제공할 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 RS-2026-25501396).

3G3

AERONET 컬럼 에어로졸 광학적 특성을 활용한 국내 에어로졸 화학 조성 추정 및 검증

Estimation, Validation, and Regional Variation of Column-Integrated Aerosol Chemical Composition over South Korea Using AERONET Observations

김민호, 이승하[1], 박승명[1], 허국영[1], 최용주

한국외국어대학교 환경학과, [1]국립환경과학원 대기환경과

대기 중 에어로졸은 태양복사를 흡수·산란하여 기후에 영향을 미치며, 그 영향은 화학 조성과 입자 크기에 따라 달라진다. 따라서 지역별 에어로졸의 화학 조성과 시간적 변동을 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 국내 11개 Aerosol Robotic Network (AERONET) 관측지점의 장기간 관측자료를 이용하여 fine-mode 에어로졸의 화학 성분별 농도를 추정하였다. 성분별 굴절률과 입자 크기분포의 차이를 이용하여 블랙카본(BC), 광물성 먼지(MD), 비수용성 유기탄소(WIOC) 등의 비수용성 성분과 물, 황산암모늄(AS), 수용성 유기탄소(WSOC) 등의 수용성 성분을 구분하였다. 혼합 상태를 고려하기 위해 수용성 성분에는 부피평균 혼합법칙을, 비수용성 성분에는 Maxwell-Garnett 혼합법칙을 적용한 하이브리드 혼합법칙을 사용하였다. 이를 통해 BC, MD, WIOC, AS 및 WSOC의 질량농도를 산출하고, 월별 변화와 장기 관측자료를 바탕으로 결과를 분석하였다. 또한 수도권 대기환경연구소에서 측정한 화학 조성의 현장 관측자료와 비교하여 산출 방법의 타당성을 검증하고, 관측지점과 계절에 따른 주요 에어로졸 성분의 분포 및 기여도 차이를 평가하였다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부 국립환경과학원의 지원을 받아 수행되었습니다(NIER-2026-04-02-058).

3G4

항공관측을 활용한 안면도 CO_2와 CH_4의 연직 분포 특성 및 플럭스 산출

Vertical Profile and Flux Estimation of CO_2 and CH_4 over Anmyeondo from Aircraft Measurement

강형모, 최용주, 이선란[1], 김수민[1]

한국외국어대학교 환경학과, [1]국립기상과학원 지구대기감시연구과

CO_2와 CH_4는 지구온난화에 큰 영향을 미치는 주요 온실가스로, 대기 중 농도는 지표의 배출·흡수와 대기 수송 및 경계층 혼합의 영향을 받는다. 국내 위성·지상 관측망은 장기 농도 변화 파악에는 유용하나, 배출·흡수와 대기 수송이 복합적으로 작용하는 지역 규모의 농도 특성을 정량화하는 데에는 한계가 있다. 항공 연직관측은 대기경계층 내 CO_2와 CH_4의 연직 구조와 지역적 배출·흡수 영향을 평가하는 데 유용하다. 본 연구는 기상청 국립기상과학원 기상항공기(King Air 350HW)를 이용하여 2018~2022년 및 2025~2026년 안면도 상공에서 수행된 나선형 비행 자료를 활용하였다. 공동감쇠분광기(Cavity Ring-Down Spectroscopy, CRDS)로 CO_2와 CH_4 농도를 측정하고, AIMMS-20의 기온과 기압 자료로 대기경계층 고도를 산출하였다. 경계층 상단 농도를 기준으로 고도별 농도 편차를 연직 적분하여 CO_2와 CH_4의 연직 컬럼 증감량(ΔVCO_2, ΔVCH_4)을 산출하였다. STILT (Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport) 모델을 이용하여 나선형 비행 중심점을 수용지로 설정하고 지표 플럭스 민감도(footprint)를 산출하였다. 단위 지표 플럭스를 가정한 모델로 모사한 컬럼 증감량과 관측 컬럼 증감량의 비로 지표 플럭스를 산정하고, 지표 플럭스 민감도로 가중 평균하여 CO_2와 CH_4의 지역 평균 플럭스 변동성을 평가하고자 한다. 이를 통해 항공관측 자료의 공간적 대표성을 평가하고 온실가스 배출량의 시공간적 불확실성을 검증하기 위한 기반 자료로 활용하고자 한다.

사사 본 연구는 기상청 국립기상과학원「기상업무지원기술개발연구」"기후변화 입체 감시 기술개발연구(KMA2018-00324)"의 지원으로 수행되었습니다.

3G5

대류권 수증기 연직 분포 관측을 위한 지상 DIAL 시스템 시뮬레이션 기반 설계

Simulation-Based Determination of DIAL Optical System Requirements for Ground-Based Tropospheric Water Vapor Vertical Profile

장재화, 박선호[1], 김덕현[2], 김지석, 계관욱[1], 노영민[3], 이한림[1),4]

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공, [1]노바스콥(주), [2]국립한밭대학교 기초과학부,
[3]국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, [4]국립부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공

약 10 km 고도까지의 고해상도 실시간 수증기 연직분포 관측은 대기 중 수증기 수송을 이해하고 위험기상 예측 성능을 향상하는 데 중요하다. 라디오존데는 연속 관측에 한계가 있으며, 기존 원격측정 기술 역시 사계절 주·야간에 걸쳐 약 10 km까지 높은 연직해상도로 관측하는 데 제약이 있다. 본 연구에서는 지상기반 DIAL 시스템 개발을 위한 광학 요구사항을 도출하였다. 계절별 수증기 연직 분포를 고려하여 온라인·오프라인 후보 파장의 대기 투과도와 신호 감쇠를 수치 모의하고, 에어로졸에 의한 산출 오차 저감을 위한 HSRL 적용 가능성을 검토하였다. 분석 결과, 935 nm 대역은 큰 수증기 흡수단면적으로 인해 습윤한 경계층에서 신호 감쇠가 크게 증가하여 10 km 고도까지 충분한 SNR 확보가 어려웠다. 반면 852 nm 대역은 여름철 고습 환경과 겨울철 건조 환경에서도 약 10 km까지 안정적인 유효신호 확보가 가능하였다. 다만 매우 건조한 조건에서는 작은 흡수단면적으로 인해 수증기 감도가 감소하여 대기 조건에 따른 최적 파장 선정이 필요하다. 또한 852 nm 대역은 세슘 증기셀 기반 HSRL 적용이 가능하여 에어로졸 영향 저감에 유리하였다. 송신부는 저반복률·고펄스에너지 Nd:YAG 기반 광원이, 수신부는 16인치 이상의 망원경이 10 km 관측에 적합한 것으로 분석되었다. 본 연구 결과는 약 10 km 연직 수증기 관측을 위한 최적 운용 파장과 주요 광학 설계 기준을 제시함으로써, 지상기반 수증기 DIAL 시스템의 광학 설계 타당성을 향상시키는데 기여할 수 있다.

사사 이 연구는 기상청「미래수요 대응 기상장비 및 활용기술 개발 사업」RS-2026-25531119의 지원으로 수행되었습니다.

3H1

광양만 연안 산업지역에서 바람장 고도가 위성 기반 NO_x 배출량 추정에 미치는 영향

Effect of the Altitude of Wind Fields on Satellite-based Top-down NO_x Emission Estimates over the Gwangyang Bay Coastal Industrial Region

이상림, 정준영[1)], 정선기, 김채은, 신규성, 장지이

전남대학교 환경시스템공학과, [1)]전남대학교 건설·환경공학과

산업단지 배출량의 정확한 파악은 대기질 관리의 전제이지만, 지상 측정망의 농도 자료만으로는 개별 산업지역의 배출량을 추정하기 어렵다. 본 연구에서는 겨울철 TROPOMI 위성의 대류권 이산화질소(NO_2) 연직컬럼 자료로 광양만 연안 산업지역의 질소산화물(NO_x) 배출량을 하향식으로 추정하고, 굴뚝 원격감시체계(CleanSYS)의 자동측정 자료 및 국가 대기오염물질 배출량 자료(CAPSS)와 비교하였다. 위성 NO_2 컬럼과 경계층 바람장을 결합한 플럭스 발산(flux-divergence) 방법을 적용하고, 유효수명과 배경농도, 적분반경 가정에 따른 강건성을 평가하였다. 겨울철 이 지역에서는 지표풍과 경계층 평균 바람의 방향이 크게 다르게 나타났으며, 지표풍만으로는 플룸 구조가 재현되지 않아 연안에서는 경계층 바람의 적용이 필수적임을 확인하였다. 위성 기반 추정값은 동일한 공간범위 내 CleanSYS 자동측정 자료보다 높게 나타났으며, 이는 자동측정이 포착하지 않는 면오염원과 이동오염원의 기여를 위성이 함께 관측하기 때문으로 해석된다. CAPSS는 행정구역 단위로 집계되어 위성 적분 영역보다 넓은 범위를 포함하므로, 값의 대소가 아니라 산정 범위의 차이로 대조하였다. 본 연구는 연안 산업지역에서 바람장 고도의 선택이 위성 기반 NO_x 배출량 추정 결과를 좌우함을 보인다. 개별 배출원의 위치와 조업 정보가 확보되면 국가 배출목록의 독립적 평가와 미관리 배출원 탐지를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

사사 본 연구는 2026년도 교육부 및 전라남도의 재원으로 전라남도RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계의 결과입니다(RISE, 2026-RISE-14-007). 기술 자문과 협조를 제공해 주신 (주)송림에 감사드립니다.

3H2

식물 스트레스 유형에 따른 녹색잎휘발성물질(GLVs) 배출 특성 및 생물기원 휘발성유기화합물(BVOCs)과의 상관성 분석

Emission Characteristics of Green Leaf Volatiles (GLVs) by Plant Stress Type and Correlation Analysis with Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs)

천소현, 오용환, 김대현, 정민찬, 김나현, 손윤석

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공

식물은 기후변화 및 자연적·인위적 요인 등으로 인해 지속적인 스트레스에 노출되며, 이로 인해 다양한 녹색잎휘발성물질(GLVs) 및 생물기원 휘발성유기화합물(BVOCs)이 발생할 가능성이 높은 환경이다. 그러나 복합적인 스트레스 요인이 작용하는 실제 식물 생육환경에서 GLVs의 배출 특성 및 BVOCs와의 상관관계에 대한 정량적 평가는 제한적이다. 본 연구는 다양한 식물 스트레스 요인을 대상으로 GLVs 배출 특성 및 전체 BVOCs와의 상관성을 분석하고자 수행하였다. 실험은 예비실험 데이터를 바탕으로 대표적인 GLV 지표 물질의 검출 가능성을 확인한 후 수행되었으며, 대상 식물에 스트레스 조건을 부여한 후 시료 채취 및 분석을 통해 스트레스 조건에 따른 GLV 배출량 변화를 평가하였다. GC-MS 장비를 활용하여 주요 BVOCs의 배출량을 측정하고 GLVs 배출 경향성 및 상관분석을 수행하였다. 삼나무 두 개체(A, B)를 대상으로 실험을 수행한 결과, 삼나무 A에서는 Hexanal과 Hexanol이, 삼나무 B에서는 Hexanal, Hexanol, z-3-Hexenol이 각각 검출되었다. 삼나무 B에서 공통 지표 물질 외에 z-3-Hexenol이 특이적으로 높은 배출량을 나타냈으며, 동시에 모노테르펜류의 배출량도 삼나무 A보다 높게 나타났다. 이는 식물이 스트레스 환경에 직면할 때 방어 기작의 일환으로 특정 GLV 합성을 유도하며, 이러한 특이적 GLV의 배출이 전체 BVOCs의 배출 특성과 연관될 수 있음을 시사한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 「CLEAN-AIR 기술개발」 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RS-2026-25502680).

3H3

여수 국가산단 연안의 바이오에어로졸: 기단 기원에 따른 미생물 군집 변동

Bioaerosols in the Coastal Zone of the Yeosu Industrial Complex: Microbial Community Variation with Air Mass Origin

정선기, 이상림, 정준영[1)], 김채은, 신규성, 장지이

전남대학교 환경시스템공학과, [1)]전남대학교 건설 · 환경공학과

바이오에어로졸은 구름응결핵 및 빙정핵으로 작용하여 기후에 영향을 미칠 뿐 아니라, 알레르기 및 감염성 질환 등 인체 건강과도 밀접한 관련이 있다. 특히 해양과 육상, 산업 기원이 공존하는 연안 산업도시는 다양한 기원의 미생물이 혼재할 가능성이 높다. 본 연구에서는 여수국가산업단지 인근 전남대학교 옥상에서 고용량시료채취기(HVS)를 이용하여 2026년 4월 16일~5월 24일, 매일 23시간, 약 1,000 L min^{-1}의 유량으로 대기 시료를 채취하였다. 채취 필터에서 DNA를 추출하고 농축한 후 nested PCR을 통해 16S rRNA 유전자 앰플리콘을 제작하여 Illumina 플랫폼으로 시퀀싱하였으며, 저바이오매스 시료의 오염을 확인하기 위해 필드블랭크와 음성대조군을 함께 처리하였다. 생성 서열은 QIIME2의 DADA2를 이용하여 전처리 및 정제한 후 SILVA 데이터베이스를 기반으로 분류군을 동정하였다. 또한 HYSPLIT 후방궤적과 기상 및 대기오염물질 자료를 활용하여 대기 이동 경로를 파악하고, 해양 기원과 육상 기원 등 기단 유입 특성 및 산업단지 통과 여부와 미생물 군집 조성 간 관계를 비교하였다. 아울러 기온, 상대습도, 풍향, 풍속과 주요 대기오염물질의 변화가 군집의 시간적 변동에 미치는 영향을 함께 검토하였다. 이를 통해, 향후 국내외 연안 및 산업지역과의 비교 연구를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

사사 본 과제는 2026년도 교육부 및 전라남도의 재원으로 전라남도RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2026-RISE-14-007). 또한 본 연구와 관련하여 (주)송림의 기술적 자문과 협조에 감사드립니다.

3H4

여수 해안산업지역 대기 에어로졸 수용성 유기물질의 계절별 형광 특성 및 고형광강도 사례

Seasonal Fluorescence Characteristics and High-intensity Episodes of Atmospheric Water-Soluble Organic Matter in the Yeosu Coastal Industrial Area

신규성, 정준영[1)], 정선기, 이상림, 김채은, 장지이

전남학교 환경시스템공학과, [1)]전남대학교 건설환경공학과

수용성 유기물질(Water-Soluble Organic Matter, WSOM)은 대기 에어로졸 유기 성분의 상당 부분을 차지하며, 그 광학적, 화학적 특성은 복사 수지와 인체 건강에 영향을 미칠 수 있다. 형광 분광 기법은 수계 용존유기물(Dissolved Organic Matter, DOM) 연구를 중심으로 발전해 왔으며, 대기 WSOM의 계절 변화와 대기 중 변환을 함께 다룬 연구는 아직 드물다. 이에 본 연구는 여수 해안산업지역 대기 에어로졸 WSOM의 계절별 형광 특성을 분석하였다. 시료는 전남대학교 여수캠퍼스에서 8시간 간격으로 채취하였으며, 봄철 63개(2025년 4월 13일~5월 4일)와 가을철 58개(9월 13일~10월 2일), 총 121개를 대상으로 하였다. 여기-방출 행렬(Excitation-Emission Matrix, EEM)을 측정한 뒤 두 계절을 하나의 병렬인자분석(Parallel Factor Analysis, PARAFAC) 모델로 분해하고, 형광지수(FI, BIX, HIX)로 조성 변화를 평가하였다. 형광강도 극값은 중앙값 절대편차(MAD)로 이상치를 판별하였으며, HYSPLIT 48시간 역궤적과 농도 가중 궤적(CWT) 및 잠재 소스 기여 함수(PSCF)로 유입 경로를 검토하였다. 본 연구는 해안산업지역 WSOM의 계절적 변환 특성을 제시하고, 형광강도 극값 사례에 기반한 해석이 대기 형광 자료 분석에 유효한 접근인지 검토하고자 한다.

사사 본 논문은 2026년도 교육부 및 전라남도의 재원으로 전라남도RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2026-RISE-14-007). 본 연구와 관련하여 (주)송림의 기술적 자문과 협조에 감사드립니다.

3I1

주유소 유증기 회수설비에 대한 고찰과 향후 관리 방향

A Study on Vapor Recovery Systems (VRS) at Gas Stations and Future Management Strategie

김종범, 황규철, 이혜연, 김동호[1], 송민영[2], 윤영욱[3], 김정호[4]

충남연구원 서해안기후환경연구소, [1]강원대 미세먼지통합관리학과, [2]서울연구원 지속가능연구실, [3]APM엔지니어링, [4]열린공간

정부는 한반도 전역의 대기질 개선과 미세먼지 관리를 위해 2020년 대기권역법을 신설하였고, 해당 법령에 따라 전국은 수도권을 포함한 4개 권역으로 구분되어 대개질 개선을 위한 5개년 기본계획을 수립·추진해오고 있다. 관리 물질은 $PM_{2.5}$를 비롯하여, PM_{10}, SO_2, NO_2, VOCs 등 5개 물질이고, 각 물질에 대해 연단위 기존 계획대비 이행평가를 수행하고 있는데 매년 전국적으로 VOCs 항목에 대해 목표 미달성이 확인되면서 이에 대한 대책 마련이 요구되고 있다. VOCs 관리 대책으로는 친환경자동차 전환, 도장시설 수성도료 전환, 생황 VOCs 배출시설(도장, 인쇄, 세탁소 등)에 대한 배출저감 시설 설치, 사업장 배출허용기준 강화, 주요소 유증기 회수시설 설치(VRS) 등이 있다. 그 중 VRS는 권역 내 모든 주유소에 의무 설치를 명령하면서 지역 VOCs 주요 저감정책으로 추진 중에 있다. 본 연구에서는 VRS 설치에 대한 정책적 쟁점과 관리 현황을 검토하고, 1개 사업장을 대상으로 현장 조사를 통해 주유소의 대기오염물질 배출 특성을 검토하였다. VRS의 경우 현행 배출량 산정체계상 90%의 저감효율을 가지는 것으로 산정하고 있으며, 환경공단에서 일부를 대상으로 현장 평가 진행결과 82.1~94.4%로 대체로 부합하는 것으로 확인되었다. 현장 조사는 충남 홍성에 위치한 VRS를 설치한 주유소를 대상으로 진행하였고, 전반적인 평균 농도는 낮은 수준으로 확인되었지만 순간 순간 원인을 알 수 없는 고농도 피크가 확인되어 유증기 회수설비 운영과 별개로 관련 사업 종사자와 이용자가 순간적으로 높은 농도에 노출되고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 점은 감안했을때 주유소를 대상으로 향후 대기배출관리 관점 외에 근로자 및 이용자의 노출피해 저감을 위한 개선대책 수립과 추진이 필요할 것으로 판단된다.

사사 본 연구는 충청남도의 재원으로 충남연구원에서 수행한 정책지원과제의 결과입니다(25DE0014).

3I2

산업 현장 IoT 센서 네트워크 기반 대기질 시공간 예측 및 결측보간 방법론 비교 연구

Comparative Study of Spatiotemporal Air Quality Prediction and Missing Data Interpolation Methodologies Based on Industrial Site IoT Sensor Networks

이동은, 노준영, 김성동, 박종건, 김승진

휴엔릭스 첨단기술연구소

산업현장에서는 다수의 저비용 IoT 센서를 배치해 대기질을 실시간 모니터링하는 사례가 늘고 있다. 그러나 센서가 설치되지 않은 위치·시점의 대기질을 어떻게 예측할 것인지, 통신 장애로 발생하는 결측값을 어떻게 보간할 것인지는 여전히 실무적 과제로 남아있다. 본 연구는 실제 운영 중인 산업현장 IoT 센서 네트워크의 데이터를 이용해 두 문제에 대한 방법론을 비교·검증하였다. 먼저 시공간 예측에 관해서는 특정 센서 위치의 $PM_{2.5}$값을 0~60분 후 예측하기 위해, 해당 센서를 제외한 나머지 센서들의 현재 측정값을 입력특징으로 사용하였다. 단순 공간평균, 선형회귀, Random Forest, Gradient Boosting, 단순평균·스태킹 앙상블 등 7개 모델을 시간 기준 train/test 분할로 비교하였다. 결측 보간에 대해서는 원본 관측치만으로 구성한 1분 단위 센서×시간 그리드에서 관측값의 10/20/30%를 완전 무작위로 선정하여, 선형보간, 이동평균 방법과 KNN·RandomForest 방법의 복원 정확도(RMSE)를 비교하였다. $PM_{2.5}$는 RandomForest 계열이 단기 예측(0~10분)에서 우수했으나, 예측 시야가 길어질수록(20분 이상) Gradient Boosting이 이를 역전하였다. 단순 공간평균은 세 모델 중 가장 낮은 성능을 보여, $PM_{2.5}$ 예측에는 비선형 모델이 필요한 것으로 나타났다. $PM_{2.5}$ 결측보간에서는 선형보간이 가장 우수했고, 공간정보를 활용하는 방법(KNN, Random Forest)은 오히려 단변량 시간축 방법보다 낮은 정확도를 보였다. 예측 시야가 길어질수록 최적 모델이 Random Forest에서 Gradient Boosting으로 바뀌는 것을 확인하였는데 이는 모델을 복잡하게 만들수록 성능이 향상된다는 일반적 고찰과 달리, 문제 유형과 예측 시야에 맞는 모델 선택이 필요함을 시사한다.

사사 본 연구는 중소벤처기업부 스마트 제조혁신 기술개발사업(R&D)의 재원으로 「스마트센서 기반 사용자 맞춤형 인체위험 예측 안전관리 시스템 개발 및 실증」(과제번호: RS-2025-25442617) 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

3I3

상향식 및 하향식 배출목록을 이용한 O_3과 $PM_{2.5}$ 농도의 배출 저감 효과 비교

Comparison of O_3 and $PM_{2.5}$ Responses to Emission Reductions Using Bottom-Up and Top-Down Emission Inventories

정성은, 이소정, 김정욱, 배병규, 강윤희[1], 김순태[2]

아주대학교 환경공학과, [1]아주대학교 환경연구소, [2]아주대학교 환경안전공학과

오존(O_3)과 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도 관리를 위해서는 전구물질 배출 저감에 따른 농도 변화를 정량적으로 평가하는 것이 중요하며, 이를 위해 대기화학모델이 활용되고 있다. O_3과 $PM_{2.5}$ 농도는 NOx, VOCs 등 전구물질의 배출수준과 대기화학 조건에 따라 생성과 소멸이 비선형적으로 달라지므로, 저감 대책 수립을 위한 대기질 모사에는 실제 대기의 배출 및 농도 조건을 반영하는 것이 중요하다. 특히 특정 전구물질의 저감이 O_3과 $PM_{2.5}$를 동시에 개선하는 co-benefit 또는 한 오염물질의 개선과 다른 오염물질의 악화가 나타나는 trade-off로 이어질 수 있어, 현재의 배출수준과 화학적 반응을 정확히 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 2026년 오존 시즌 동안 상향식 및 하향식 배출목록을 이용한 대기질 모사를 수행하고, NOx 및 VOC 배출 저감에 따른 농도 변화를 비교하였다. 고농도 오존이 관측된 2026년 4월 19일 서울 25개 측정소 평균을 대상으로 국내 NOx 배출량을 50% 저감한 결과, MDA1 O_3 농도는 상향식 배출목록에서 21.3 ppb 증가한 반면, 하향식 배출목록에서는 5.6 ppb 증가하였다. 같은 배출 변화에 대해 $PM_{2.5}$ 농도는 상향식에서 1.7 $\mu g/m^3$ 증가한 반면, 하향식에서는 1.6 $\mu g/m^3$ 감소하였다. 이는 동일한 배출 저감률에서도 모사에 입력되는 배출량에 따라 정책효과의 크기와 방향이 달라질 수 있음을 보여준다. 향후 O_3과 $PM_{2.5}$의 통합관리를 고려한다면, 실제 대기의 현재 배출조건을 관측자료를 통해 지속적으로 진단·개선하고 이를 대기질 모사에 반영하여 전구물질 저감에 따른 대기화학적 반응을 현실적으로 평가하는 과정이 중요함을 시사한다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지역맞춤형 오존 관리 기술개발사업(RS-2026-25505137)과 국립환경과학원(NIER-2026-01-02-017)의 지원을 받아 연구되었습니다.

3I4

체계적인 사업장 관리를 위한 한국형 사업장 대기 정보 통합플랫폼 구축 방향

Approach to Establishing a Korean Integrated Platform for Systematic Management of Industrial Emission Facilities

김진식, 김형천, 강 별, 조현정, 김성준[1], 오승일[1], 유 철

기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터, [1]알씨에어(주)

국내에 약 5.5만 개의 대기 배출 사업장이 존재하고 있으며 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터는 주로 1~3종 대형 사업장 중심으로 배출·방지시설 운영 현황, 자가측정 결과, 연료 사용량 등 약 150개 항목을 대기배출원관리시스템(SEMS)을 통해 수집하고 있다. 그러나, SEMS 외에도 통합환경허가시스템(IEPS), 사업장 대기오염물질 관리시스템(Stacknsky), 소규모 대기배출시설 관리시스템(Greenlink), 환경측정분석 정보관리시스템(측정인) 등 기후에너지환경부의 여러 시스템이 각각의 목적에 따라 사업장의 정보를 수집·관리하고 있어 사업장은 동일한 자료를 여러 시스템에 중복으로 제출하게 되어 업무 부담과 부실 입력이 발생하고 있다. 또한, 중앙정부, 지자체 및 사업장에서 관리하는 시설 번호가 서로 다르고, 수집된 자료가 표준화되지 않아 시스템 간 연계가 어려워 사업장 관련 국가 통계 마련 및 정책 활용성에 문제가 발생한다. 정부는 이러한 문제를 해결하기 위해 사업장 대기 정보를 수집·관리하는 각 시스템 기능을 통합하는 계획을 수립하고 있다. 본 연구에서는 각 시스템의 운영 목적, 관리범위, 관리정보, 자료입력 및 검증방법 등을 분석하여 사업장 대기 정보 통합플랫폼의 구축 방향 및 목표모델을 제시하였다. 또한 통합플랫폼을 통한 체계적 사업장 관리를 위해 배출·방지·굴뚝 시설에 대한 고유 식별 번호(ID) 부여 체계, 시스템에서 수집되는 자료의 명칭·단위 표준화 방법, 법령 정비 방안을 제안하였다. 이를 통해 성공적인 “사업장 대기 정보 통합플랫폼” 구축을 기대하고 있다.

Session 4A 측정·분석

좌장 : 백성옥 [한국대기환경학회 고문]

4A1) 충청남도 오존 관리를 위한 정책지표 비교와 공간적 특성 분석
4A2) 현대식 양돈축사 대상 Top-down 암모니아 배출량 산정 연구: 국가 암모니아 배출량 인벤토리 개선을 위한 시사점
4A3) 2012~2023년 백령도 대기환경연구소 $PM_{2.5}$ 농도 분석과 측정소 운영 방안 제언
4A4) ASIA-AQ 기간 DC-8에서 관측된 동아시아 탄소성 에어로졸의 배출원 및 광학 특성
4A5) 실시간 HTDMA 측정결과 PMF 적용 초미세먼지 입자 흡습성 분석 연구

Session 4B 측정·분석

좌장 : 김신도 [한국대기환경학회 고문]

4B1) 산불로 유발된 soil NO_x 배출 증가와 장기적 대기질 영향
4B2) 전국 $PM_{2.5}$ 고농도 사례의 지역별 오염원 특성과 독성 기여도 비교
4B3) 서울 여름철 고농도 오존 발생 시 VOCs의 광화학적 변화와 오존 생성 특성 평가
4B4) 국내 주요 수종의 현장 실측 기반 BVOCs 배출계수 산정 및 환경요인 영향 평가
4B5) IBBCEAS 측정 불확도 개선을 위한 O_2 γ-band 흡수를 활용한 실시간 유효 광경로 동적 추정 및 유효성 평가

Session 4C 대기환경모델링·AI

좌장 : 선우 영 [한국대기환경학회 고문]

4C1) 대구 서구에서 UM-LDAPS 예측시간별 기상장 성능과 동일 유효시각 내부 일관성 분석
4C2) 대기-해양 결합모델 기반 약결합자료동화와 딥러닝 하이브리드 초기장 개선에 따른 태풍 예측성능 비교·평가
4C3) 복사 강제 조건의 건물 배열 위에서 진폭 변조 방법을 이용한 큰 규모 난류와 작은 규모 변동 사이의 상관성 분석: 주·야간 차이와 오염물질 수송 특성
4C4) 에어로졸 건식 침적 모수화가 $PM_{2.5}$ 농도 모의에 미치는 영향
4C5) 관측 기반 갈색탄소 광학특성 및 노화과정 민감도에 따른 한반도 에어로졸 광흡수 평가

Session 4D 측정·분석

좌장 : 김조천 [한국대기환경학회 고문]

4D1) VOC/NOx 농도비에 따른 α-pinene/NOx 혼합가스의 광화학 반응에 의한 오존 생성 특성 연구
4D2) 다양한 대기 환경에서의 $ClNO_2$ 농도 지배 기작 규명
4D3) 도심-산림 인접 대기에서 수용성 유기 에어로졸의 특성과 유기 황산염(Organosulfate) 형성에 관여하는 입자상 조건
4D4) 태국 치앙마이 대기 중 VOCs의 배출원 특성과 OH 반응성
4D5) 시흥 여름철 휘발성유기화합물의 시간적 변동 특성 및 오존생성잠재력 평가

Session 4E [학생세션]

좌장 : 주태규 [고려대학교]

4E1) 부안 지역의 장기 관측 기반 암모니아(NH_3)에 의한 초미세먼지($PM_{2.5}$) 2차 생성 잠재력
4E2) 휘발성유기화합물의 광화학적 노화에 따른 블랙카본의 물리화학적 및 광학적 특성 변화
4E3) 서울 여름철 질소 함유 유기에어로졸의 화학적 특성과 입자 수분 의존성
4E4) 질량 변화 기반 겨울철 도심 $PM_{2.5}$ 고농도 사례 시 에어로졸 흡습성 평가
4E5) 겨울철 $PM_{2.5}$ pH와 변동 요인의 정량적 분해: E-AIM IV를 이용한 군산 축산지역과 안산 도심 비교

Session 4F [학생세션]

좌장 : 서서희 [부산대학교]

4F1) 폐 PET 기반 질소 도핑 및 망간-세륨 결합 촉매의 톨루엔 산화 특성 비교
4F2) 원자력 시설 폐활성탄 처리 과정에서 발생하는 TEDA의 촉매 산화 특성
4F3) 폐 PET 기반 질소 도핑 다공성 탄소의 구조 제어 및 황화수소(H_2S)의 선택적 산화 특성
4F4) 제올라이트 개질을 통한 구조 변화 및 활성 금속 분산 특성 연구
4F5) 조촉매 첨가가 Ru/TiO_2 촉매의 NH_3-SCO 반응활성에 미치는 영향

Session 4G [학생세션]

좌장 : 김은혜 [국립군산대학교]

4G1) 여수-순천-광양 연안 산업지역 배출 인벤토리의 오염물질별 검출 가능성 진단
4G2) Pd 황화 처리 기반 MoS_2 상 제어를 통한 알칼라인 수소 발생 반응 향상을 위한 연구
4G3) 서울 도시열섬현상에서 인공열과 쿨루프의 상호작용에 따른 냉각 효과 및 시너지 분석
4G4) 머신러닝 기반 VOCs 반응성 지수(MIR·SOAP) 예측 모델 개발 및 활용 연구
4G5) 전북특별자치도 배출원별 암모니아의 잉여 특성과 초미세먼지 생성 기여 가능성 평가

Session 4H [학생세션]

좌장 : 옥유진 [울산과학기술원]

4H1) 향 연소 시 나노입자 및 VOCs 배출 특성과 건강영향 평가
4H2) AVOCs 노출에 따른 실내식물의 BVOCs 배출 특성 및 화학적 스트레스 반응 분석
4H3) 학교 인근 악취 유발물질 탐색을 위한 기체상 오염물질 모니터링 및 특성 분석
4H4) 수관 내 조도 차이를 이용한 도심 수목의 나노미세먼지(Ultrafine Particles) 저감 특성
4H5) SP-AMS를 활용한 서울 겨울-초봄 대기 중 유기 에어로졸 및 refractory black carbon의 발생원별 특성 규명

4A1

충청남도 오존 관리를 위한 정책지표 비교와 공간적 특성 분석

Comparing Policy Metrics and Spatial Characteristics for Ozone Management in Chungcheongnam-do, South Korea

황규철[1),2)], 이혜연[1)], 최원식[2)], 김종범[1)]

[1)]충남연구원 서해안기후환경연구소, [2)]국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공

충청남도는 내륙과 해안을 모두 포함하는 지리적 특성과 다수의 오존 전구물질 배출시설로 인해 오존(O_3) 농도 관리에 어려움이 큰 지역이다. 본 연구는 2018~2024년 충청남도에 위치한 15개 시군, 29개 대기환경측정소의 자료를 이용하여 오존 농도의 시공간적 분포와 기상 반응 특성을 분석하였다. 공간적 군집 정도를 나타내는 Global Moran's I는 봄·여름철에는 유의하지 않았으나 가을·겨울철에는 뚜렷하게 나타나(I = 0.31-0.34), 계절에 따라 오존 농도의 공간적 군집 양상이 상이했다. Getis-Ord Gi 분석 결과 서해안 인근 지점은 고농도 군집(Hot spot)으로, 내륙 지점은 저농도 군집(Cold spot)으로 뚜렷하게 구분되어, 지리적 위치에 따른 공간적 격차가 통계적으로도 유의함을 확인하였다. 측정소별 로지스틱 회귀분석 결과, 온도와 일사량이 높고 풍속이 낮을수록 일 최대 8시간 평균 오존 농도(MDA8)가 60 ppb를 초과할 가능성이 유의미하게 증가하였으며, 이러한 고온·저풍속 조건에서는 평상시 대비 초과 오즈비(odds ratio)가 약 2.1배 상승하였다. 특히 천안, 아산 지역에서 기상조건에 따른 초과 경향이 가장 뚜렷하게 나타났다. 여러 정책지표의 비교를 위해 연평균, MDA8 백분위수, 초과일수 등 서로 다른 지표를 기준으로 지역 순위를 비교한 결과, 지표 선택에 따라 오존 관리 우선지역이 달라질 수 있음이 확인되어 단일 지표에만 의존한 관리 방식의 한계를 시사하였다. 본 연구는 향후 기상조건과 정책지표를 고려한 조건부 예보 체계 수립과 지역 맞춤형 오존 관리 정책 마련에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

사사 본 연구는 충청남도의 재원으로 충남연구원 전략연구과제 "시군별 O_3 농도분석을 통한 관리방안 제시(25JU0003)"의 일환으로 수행되었음.

4A2

현대식 양돈축사 대상 Top-down 암모니아 배출량 산정 연구: 국가 암모니아 배출량 인벤토리 개선을 위한 시사점

Top-down Ammonia Emission in a Modernized Swine Farming Region: Implications for National Inventory Refinement

김연호[1)], 나은상[1)], Avinash Shastri[1)], 조범기[1)], 서범근[2)], 김종호[2),3)], 홍세운[4)], 함지영[5)], 송형도[5)], 유 철[5)], 송미정[1),6)]

[1)]전북대학교 환경에너지융합학과, [2)]한서대학교 환경연구소, [3)]한서대학교 항공우주공학부 환경·토목·건축학과,
[4)]전남대학교 농업생명과학대학 지역바이오시스템공학과, [5)]기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀,
[6)]전북대학교 지구환경과학과

암모니아(NH_3)는 기후에너지환경부 지정 악취물질로, 대기 중 산성 성분과 반응하여 초미세먼지의 주요 무기 성분인 암모늄염을 생성한다. 국내 암모니아 배출량 가운데 약 83.9%가 농축산 활동에서 기인하며, 해당 부문의 세부 배출원 중에서는 양돈의 기여율이 38.7%로 가장 높다. 국가 배출량 인벤토리는 사육두수에 연간 배출계수를 곱하는 상향식 방법을 사용하지만, 돈사의 경우 환기 형태나 분뇨 처리 등 운영 방식이 매우 다양해 일관적으로 배출계수를 적용하기엔 과소 혹은 과대평가의 위험이 있다. 본 연구에서는 시설 전체의 NH_3 배출량을 하향식으로 산정하기 위해 약 22,000두 규모의 현대식 양돈단지를 대상으로 2025년 여름철과 겨울철 집중관측을 수행하였다. 양돈 단지 주변으로 2개 측정지점을 구축하여 대기 중 NH_3 농도와 기상자료를 관측하고, WindTrax bLS 모델을 통해 하향식 양돈 NH_3 배출량을 산정하였다. 단지 전체의 총 배출량은 여름철 3.36±4.68 kg h^{-1}, 겨울철 2.98±3.28 kg h^{-1}이었으며, 이는 단지내 돼지 사육두수에 CAPSS 축종별 배출계수를 적용한 상향식 배출량의 43%, 38% 수준이었다. 본 연구는 양돈 단지 전체의 관측 기반 하향식 배출량 산정체계를 제시하며, 시설 유형을 고려한 축산 배출계수 세분화의 필요성을 제시한다.

4A3

2012~2023년 백령도 대기환경연구소 $PM_{2.5}$ 농도 분석과 측정소 운영 방안 제언

Analysis of $PM_{2.5}$ Concentrations Monitored at the Baengnyeong Supersite from 2012 to 2023 and Suggestions for Operating Monitoring Stations

박현영, 문보경

인천연구원 환경안전연구부

최근 대기오염 대응을 위해 위성·화학수송모델과 연계한 AI 기반 이상탐지, 준실시간 자료 제공, 적응형 관측 확대 등 첨단 감시체계로의 전환 필요성이 확대되고 있다. 백령도 대기환경연구소는 2007년 설치 이래 국가배경농도 측정 및 장거리 대기오염물질 감시의 전초기지 역할을 수행해왔으며, 장거리 이동 가능성이 높은 특정대기유해물질 23종과 미세먼지 성분을 실시간으로 측정하고 있다. 본 연구는 2012~2023년 백령도에서 측정된 $PM_{2.5}$ 및 성분 농도의 분석을 통해 국외 배출·정책 변화와 국내 배경농도의 연계 가능성을 조기에 포착할 수 있는 장기 연속관측 기반의 상시 감시체계 필요성을 살펴보고자 하였다. 대표 사례로, 바나듐의 연평균 농도는 2020년부터 0.7~1.0 ng/m^3 수준으로 급감하였으며 통계 검정 결과 2018년 8월을 기점으로 구조적 변화가 확인되었다. CWT 분석에서도 화동 연안 및 인근 해역 방향의 기여도가 뚜렷하게 감소하여 중국 및 국제 선박연료 규제 강화 시기와 대체로 부합하였다. 다만 배출량 변화, 연료 전환 및 기상조건 등 교란요인을 고려한 정책 효과의 정량적 확인에는 수년의 시차가 발생하였으며, 이는 사후적 검증 방식만으로 배출·규제 변화 및 기상 조건 변화에 따른 농도·성분조성 이상 신호를 신속하게 탐지하기 어렵다는 점을 시사한다. 이에 본 연구는 백령도 등 서해 도서지역 국가배경농도측정망의 상시 감시 기능을 유지하고, 위성·화학수송모델과 연계한 AI 기반의 이상탐지 체계 구축과 고농도 사례 시 관측을 자동 확대하는 적응형 감시체계로의 전환을 제안하고자 한다.

사사 본 연구는 국립환경과학원으로부터 백령도 대기환경연구소 측정 자료를 제공받아 수행되었음(NIER-2021-03-03-001).

4A4

ASIA-AQ 기간 DC-8에서 관측된 동아시아 탄소성 에어로졸의 배출원 및 광학 특성

Sources and Optical Properties of Carbonaceous Aerosols Observed aboard the DC-8 over East Asia during the ASIA-AQ Campaign

Haiyan Jin, Jack Dibb[1], 이미혜, 주태규, 이영로, 김민섭[2], 박희선, Jose L. Jimenez[3], 김주애, 장임석[4]

고려대학교 지구환경과학과, [1]Earth Systems Research Center, University of New Hampshire, [2]국립환경과학원 환경표준연구과, [3]CIRES & Department of Chemistry, University of Colorado Boulder, [4]국립환경과학원 환경위성센터

2024년 겨울 ASIA-AQ 기간 NASA DC-8 항공기에서 한국, 태국, 필리핀 및 대만 상공의 $PM_{2.5}$ 필터 시료를 채취하고, 수용성 무기이온, 수용성 유기탄소, 브라운 카본(BrC) 흡광계수 및 안정탄소동위원소비($\delta^{13}C$)를 분석하였다. 한국에서는 5회의 비행에서 주요 화학 조성의 변동이 전반적으로 크지 않았다. 그러나 Flight 4에서는 내륙 상공의 $PM_{2.5}$ 농도가 수도권 상공보다 높았으며, 질산염이 $PM_{2.5}$ 질량의 41%를 차지하였다. Flight 2의 황해 상공에서는 높은 $PM_{2.5}$ 농도가 관측되었으며, 유기 에어로졸 분율이 42%로 높았다. 같은 비행에서 K^+ 농도와 BrC의 365 nm 흡광계수(ABS_{365})가 모두 높게 나타나 바이오매스 연소의 영향을 시사하였다. 태국에서는 뚜렷한 남북 농도 차이가 관측되었으며, 북부 비행에서 K^+ 농도는 최대 2.44 ㎍ m^{-3}에 달했다. 태국 비행에서 ABS_{365}는 HCN, levoglucosan 및 K^+와 같은 바이오매스 연소 추적자와 강한 상관관계($r > 0.7$)를 보였다. 항공 시료의 $\delta^{13}C$는 지상 시료보다 전반적으로 가벼웠으며, 특히 한국에서 −30‰ 이하의 값이 자주 나타나 이차 생성 에어로졸과 연관될 가능성을 시사하였다. 본 연구는 겨울철 동아시아 탄소성 에어로졸의 조성과 광학 특성이 배출원, 기상 조건 및 지역 수송의 복합적인 영향을 받음을 보여준다.

4A5

실시간 HTDMA 측정결과 PMF 적용 초미세먼지 입자 흡습성 분석 연구

Analysis of Fine Particle Hygroscopicity Deploying PMF model to Real-Time HTDMA Measurement Results

김정빈, 하윤경, 강기원, 서서희, 전현수, 장수강, 김창혁

부산대학교 사회환경시스템공학과

대기 중 초미세먼지 입자의 크기, 화학조성, 혼합상태 및 흡습성과 같은 물리화학적 특성은 입자의 대기 중 거동과 환경·기후·건강 영향을 결정하는 주요 요인이다. 특히, 입자 흡습성은 상대습도 변화에 따른 입자의 수분 흡수 및 크기 성장 특성을 나타내며, 입자를 구성하는 무기 및 유기 성분과 이들의 혼합상태에 따라 달라진다. 또한, 입자의 화학적 조성 분포의 변화나 노화에도 영향을 미치는 물성이다. 따라서, 초미세먼지의 흡습성 분석은 입자의 화학적 특성과 대기 중 생성·변환 과정을 이해하는 데에 활용될 수 있다. Hygroscopic Tandem Differential Mobility Analyzer (HTDMA)는 대기 에어로졸의 크기별 흡습성과 흡습성 분포를 실시간 분석하는 데 널리 활용되고 있다. 그러나, 기존 HTDMA 자료는 성장계수 분포, 평균 흡습성 또는 흡습성에 따른 입자군 분류 분석 등에 사용하고 있었으며, 입자의 실시간 흡습 특성을 화학성분 자료와 정량적으로 결합함으로써, 배출원별 영향과 특성을 해석하는 것은 상대적으로 제한적이었다. 본 연구에서는 실시간 입자 흡습성 변화와 주요 오염원 및 대기 중 2차 생성 과정 등의 연관성을 분석하기 위해 HTDMA 실시간 측정결과에 Positive Matrix Factorization (PMF) 모델을 도입하였다. 실시간 대기 초미세먼지 측정은 2021년 여름철과 2022년 봄철 서울 및 충남 서산 지역에서 수행되었으며, HTDMA를 이용한 입경별 흡습성, 입자상 화학성분 농도, 휘발성유기화합물(VOCs) 농도 및 $PM_{2.5}$ 질량농도 등의 실시간 자료를 확보하였다. 연구 결과, 기존 화학성분 중심 PMF 분석에 입자의 실시간 물리적 특성 정보를 추가함으로써, 초미세먼지의 배출원별 화학조성뿐만 아니라 각 배출원 및 생성 과정과 연관된 흡습 특성을 함께 해석할 수 있었다.

사사 본 논문은 과학기술정보통신부(RS-2022-NR071930) 및 교육부(RS-2025-25415557) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

4B1

산불로 유발된 soil NO_x 배출 증가와 장기적 대기질 영향

Long-Lasting Wildfire Impacts on Air Quality through Intensified Soil NO_x Emissions

강차오름, 이형주

포항공과대학교 환경공학부

산불은 대기 중 질소산화물(NO_x)의 주요 자연 배출원 중 하나로 알려져 있으나, 산불 연기에 의한 단기적 영향 이외에 장기적인 대기질 영향은 현재까지 잘 알려지지 않았다. 본 연구에서는 지상 및 위성 관측 자료를 바탕으로 2025년 3월 경북 북부 지역에서 발생한 대형 산불을 조사하여, 산불 이후에도 이산화질소(NO_2) 농도가 장기간 높은 수준을 유지함을 확인하였다. 산불 종료 후 6개월 동안 산불 피해지역의 지표 NO_2 농도는 산불이 발생하지 않았을 경우의 예상 수준보다 평균적으로 3.8% 높았으며, 이러한 증가는 산불 피해지역에서 일관적으로 확인되었다. 산불 피해 밀도가 높은 지역일수록 산불 이후의 NO_2 증가량 역시 뚜렷하게 증가하였으며(Spearman's correlation = 0.74), 이는 관측된 NO_2 증가가 산불로 유발된 soil NO_x 배출 증가에 기인했음을 시사한다. 산불 이후 증가한 soil NO_x 배출이 산불 피해지역의 NO_2 농도에 미친 누적 영향은 산불 연기에 의한 영향과 비슷한 수준이었으며, 산불 연기 영향을 추정하는 방법에 따라 전체 산불 관련 NO_2 증가분의 39.5–71.0%를 차지하였다. 이러한 결과는 산불에 의한 대기질 영향이 바이오매스 연소와 산불 연기가 지속되는 기간에 국한되지 않으며, 그동안 과소평가되었던 산불에 의한 생지화학적(biogeochemical) 변화를 통해 수개월 이상 지속될 수 있음을 보여준다.

사사 이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25537812).

4B2

전국 $PM_{2.5}$ 고농도 사례의 지역별 오염원 특성과 독성 기여도 비교

Regional Source Characteristics and Contrasting Mass- and Toxicity-Based Source Priorities During Nationwide High-$PM_{2.5}$ Episodes in South Korea

주정태, 이상진, 고민지, 최성득

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

전국적으로 $PM_{2.5}$ 고농도 현상이 발생하더라도 지역별 배출 특성이 달라 주요 오염원은 서로 다를 수 있다. 또한, $PM_{2.5}$ 질량 기여도가 높은 오염원과 독성 기여도가 높은 오염원은 서로 다를 수 있다. 본 연구에서는 전국 8개 대기환경연구소의 2020~2023년 $PM_{2.5}$ 성분농도를 이용하여 양행렬인자분해(Positive Matrix Factorization, PMF)를 수행하고 지역별 오염원 특성을 비교하였다. 권역별로 9~10개의 오염원을 도출하였으며, 평균 기여도는 수도권, 경기권, 중부권에서 2차 질산염이, 호남권, 영남권, 백령도, 제주도에서 2차 황산염이, 강원권에서 난방 오염원이 가장 높았다. 권역별 오염원을 5개 유형으로 분류하여 비교한 결과, 전국적으로 $PM_{2.5}$ 고농도가 발생한 171일 중 모든 권역에서 동일한 유형의 오염원이 가장 높은 기여도를 나타낸 날은 6.4%에 불과하였다. 군집분석에서 확인된 1월과 3월 고농도 사례에서도 권역별로 주요 오염원이 달랐으나, 황사 사례에서는 모든 권역에서 토양 오염원 기여도가 우세하였다. 독성을 기준으로 주요 오염원을 비교하기 위해 단위위해도와 독성참고치를 이용하여 발암·비발암 독성가중지수를 산정하였다. 8개 권역 모두에서 $PM_{2.5}$ 질량 기여도가 가장 높은 오염원과 발암·비발암 독성가중 기여도가 가장 높은 오염원은 서로 달랐다. 특히 석탄연소 오염원의 $PM_{2.5}$ 기여율은 0.3~8.1%였으나 발암 독성가중지수 기여율은 4.6~76.6%였다. 따라서 $PM_{2.5}$ 저감 대책을 수립할 때 지역별 주요 오염원뿐 아니라 독성 측면에서 중요한 오염원도 함께 고려할 필요가 있다.

사사 본 연구는 국립환경과학원의 지원을 받아 수행되었습니다(NIER-2024-04-02-008).

4B3

서울 여름철 고농도 오존 발생 시 VOCs의 광화학적 변화와 오존 생성 특성 평가

Photochemical Evolution of VOCs and Ozone Formation Characteristics during Summer High-Ozone Episodes in Seoul

옥수민[1),2)], 이지이[2)], 정진상[1)]

[1)]한국표준과학연구원 가스측정그룹, [2)]이화여자대학교 환경공학과

최근 국내 대도시 지역에서는 NOx 배출 저감에도 불구하고 여름철 고농도 오존(O_3) 발생이 지속되고 있으며, 오존 저감을 위해서는 VOCs-NOx 관계 및 광화학 과정에서 중요한 VOC 특성에 대한 이해가 필요하다. 기존 연구에서는 VOC 농도와 최대 증분 반응성(MIR)을 기반으로 오존 생성 잠재력(OFP)을 평가해 왔으나, 대기 중 VOCs는 배출 이후 광화학 반응에 의해 변화하기 때문에 관측 농도만으로 실제 오존 생성 특성을 설명하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 2024년 6월 서울 지역에서 측정된 시간별 VOCs, O_3, NO_2 및 기상자료를 활용하여 여름철 오존 에피소드 동안 VOCs의 반응 특성과 오존 생성 관련성을 평가하였다. 측정된 VOCs를 기반으로 MIR을 적용한 OFP와 OH radical loss rate (L_{OH})를 산정하였으며, 광화학 반응이 활발한 주간 시간대를 대상으로 고농도 O_3 조건과 일반 조건에서 VOC 조성 및 반응성 변화를 비교하였다. 기간 동안 O_3 증가와 NO_2 감소가 동반되는 광화학 오존 생성 사례가 확인되었으며, VOC 농도 기반 조성과 OFP 및 L_{OH} 기반 반응성 특성 사이에는 차이를 보였다. 특히 고농도 O_3 조건에서는 단순 농도 증가뿐만 아니라 광화학 반응성이 높은 VOC 성분의 상대적 중요성이 증가하는 경향을 보여, 오존 생성 과정에서 VOC의 화학적 반응성과 광화학적 변화 과정이 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다. 본 연구는 서울 여름철 오존 에피소드 동안 VOCs의 변화와 오존 생성 특성을 통합적으로 평가하여, 도시 오존 관리를 위한 VOC 우선 관리 전략 수립에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

사사 본연구는 한국표준과학연구원 기본사업(26011043)의 연구비 지원을 받아 수행됨.

4B4

국내 주요 수종의 현장 실측 기반 BVOCs 배출계수 산정 및 환경요인 영향 평가

Field Measurement-based Estimation of BVOC Emission Factors and Evaluation of Environmental Effects in Korea

노해민, 이창주, 이수현, 김민선, 장예진, 신원범, 윤종상

가톨릭대학교 에너지환경공학과

생물기원 휘발성유기화합물(BVOCs)은 대기 중 오존 및 이차유기에어로졸 생성에 관여하는 주요 전구물질로서, 수종 특성 뿐 아니라 온도, 습도 및 광량과 같은 환경요인에 따라 배출량과 화학적 조성이 달라질 수 있다. 이에 BVOCs 배출량을 산정하고 국가 대기배출목록을 고도화하기 위해서는 국내 주요 수종을 대상으로 실측 기반 배출계수 자료가 필요하다. 본 연구에서는 현장 조건에서 국내 주요 수종인 은행나무, 이팝나무, 왕벚나무 및 측백나무를 대상으로 배출된 BVOC를 측정하고, 환경요인에 따른 배출계수 산정을 위한 기초자료를 마련하고자 하였다. 현장 측정은 동적 챔버 시스템을 구성하였으며, 2-bed 흡착관(Tenax TA + Carbopack X)으로 샘플링을 수행하였다. 포집된 시료는 TD-GC/MS를 이용하여 분석하였으며, 온·습도, PAR, 배경 CO_2 농도, 잎 건중량 및 잎 면적 자료를 통합하여 수종별 BVOCs 배출계수를 산정하였다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 「CLEAN-AIR 기술개발」 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RS-2026-25502680).

4B5

IBBCEAS 측정 불확도 개선을 위한 O_2 γ-band 흡수를 활용한 실시간 유효 광경로 동적 추정 및 유효성 평가

Estimation and Evaluation of Effective Path Length Using O_2 γ-band Absorption for Reducing IBBCEAS Measurement Uncertainty

이지선, 김정환[1)], 최용주, 이강웅

한국외국어대학교 환경공학과, [1)]일본 국립해양연구개발기구(JAMSTEC) 지구시스템연구센터

야간 화학 메커니즘의 핵심 물질인 NO_3 라디칼(NO_3)과 N_2O_5는 야간 NOx 수지와 질산염 및 2차 유기 에어로졸(SOA) 생성에 관여하는 핵심 물질이나, 높은 반응성으로 대기 중 수 ppt 수준으로 존재해 이를 측정하기 위해 고감도의 높은 시간분해능의 측정 기술이 요구된다. 본 연구에서는 두 물질의 동시 측정을 위한 2채널 IBBCEAS (Incoherent Broad-Band Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy) 시스템을 개발하고 현장 적용을 위한 성능을 평가하였다. 특히, IBBCEAS 측정 자료의 정량성과 기기 성능에 중요한 요소인 유효 광경로(Effective path length)는 일반적으로 교정 가스의 Rayleigh 산란을 이용해 산정하지만, 교정가스 주입과 신호 안정화가 필요해 현장 관측 중 반복적인 평가가 어렵다. 이에 대기 중 일정한 혼합비로 존재하는 O_2의 γ-band (약 628 nm) 흡수를 이용하여 별도의 교정 가스 없이 유효 광경로를 산정하는 방법을 제안하였다. 실험은 2024년 ASIA-AQ 기간 동안 서울 고려대학교 캠퍼스 내에서 운영된 고정 광경로 LP-DOAS 자료로부터 O_2 γ-band 기준 적분 흡광도를 산정하고, 이를 IBBCEAS의 O_2 γ-band에 적용하여 시간 동적 유효 광경로를 산정하였다. 2026년 1월 동일 지점에서 IBBCEAS와 LP-DOAS의 동시 관측을 수행하였다. 이때 IBBCEAS의 O_2 γ-band 흡수 신호를 이용해 산정한 유효 광경로는 야간 동안 약 5% 범위에서 변동하였으며, 이는 고정 광경로 적용 시 유사한 수준의 농도 산정 불확도를 유발할 수 있음을 시사한다. 이에 고정 및 동적 유효 광경로를 각각 적용하여 산정한 IBBCEAS 측정값을 LP-DOAS 측정값과 비교함으로써, O_2 γ-band 기반 동적 유효 광경로 산정법의 유효성과 측정 불확도 저감 가능성을 평가하고자 한다.

사사 본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2026-04-02-056).

4C1

대구 서구에서 UM-LDAPS 예측시간별 기상장 성능과 동일 유효시각 내부 일관성 분석

Forecast-Lead Dependence of UM-LDAPS Meteorological Performance and Same-Valid-Time Internal Consistency over Daegu Seo-gu, South Korea

김병연, 류승한, 오한나, 한주은

다이텍연구원 기반혁신본부

지역 대기환경 연구에 수치예보자료를 활용하려면 예측시간에 따른 성능 변화와 서로 다른 초기시각에서 생산된 예보 간 일관성을 함께 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 2023년 1월부터 2026년 3월까지 대구 서구를 대상으로 UM-LDAPS의 h000~h048 중 33개 예측시간을 분석하였다. 기온, 상대습도, 풍속 및 기압은 AWS 관측과 비교하였고, 경계층고는 ERA5와 상호비교하였다. 지상기상 비교에는 AWS 위치 양선형 보간을 주 방법으로 적용하였으며, 서구 행정경계와 교차하는 14개 격자의 면적가중값을 이용하여 서로 다른 초기시각에서 생산된 동일 유효시각 예보의 내부 일관성도 평가하였다. 대표 예측시간 h000, h024, h048에서 기온 RMSE는 1.27℃에서 1.88℃로, 상대습도 RMSE는 9.75%p에서 13.19%p로 증가하였다. 풍속은 +0.99 ~ +1.34 m s^{-1}의 양의 편향을 보였으며, AWS 정온비율이 약 16.6%인 데 비해 UM의 정온비율은 2.4~3.0%, 정온 재현율은 3.9~6.5%에 그쳤다. ERA5 대비 면적가중 경계층고 RMSE는 약 278~286 m로 예측시간에 따른 단조 증가가 나타나지 않았다. 반면 동일 유효시각 내부 비교에서 h000 대비 RMSE는 h006에서 h048로 갈수록 기온 0.77~1.55℃, 상대습도 4.84~9.27%p, 풍속 0.84~1.28 m s^{-1}, 경계층고 163~249 m로 증가하였다. 이는 UM-LDAPS 활용 시 예측시간과 초기시각에 따른 변동성을 함께 고려해야 하며, 특히 국지적인 약풍·정온조건의 과소재현에 유의해야 함을 보여준다.

사사 동 연구는 환경부사업으로 수행중인 '대기환경무인기 One-stop 플랫폼 기술개발 사업'(과제번호: RS-2025-02213907) 연구결과 중 일부임.

4C2

대기-해양 결합모델 기반 약결합자료동화와 딥러닝 하이브리드 초기장 개선에 따른 태풍 예측성능 비교·평가

Evaluation of Typhoon Forecast Performance Using Initial Conditions Improved by Weakly Coupled Data Assimilation and a Deep Learning Hybrid Approach in a Coupled Atmosphere-ocean Model

이성빈, 송상근[1], 문수환, 허기영[2]

제주대학교 지구해양융합학부 지구해양과학전공, [1]제주대학교 지구해양과학과, [2]한국해양과학기술원 해양재난연구부

태풍은 강풍, 집중호우, 폭풍해일 등을 동반하여 연안 지역에 큰 피해를 유발하므로, 정확한 경로와 강도 예측을 위해서는 대기-해양 상호작용을 현실적으로 모의하고 신뢰도 높은 초기조건을 구축하는 것이 중요하다. 특히 대기와 해양 초기상태에 포함된 오차는 이후 태풍의 발달 과정과 강도 변화에 지속적인 영향을 미칠 수 있다. 이에 본 연구에서는 이례적인 이동경로를 보이며 우리나라에 큰 피해를 초래한 2022년 태풍 힌남노를 대상으로, 약결합자료동화(WCDA)와 딥러닝 하이브리드(U-Net+LSTM) 기법을 각각 적용하여 개선된 초기장을 산출하고 대기-해양 결합모델의 예측성능을 비교·분석하였다. WCDA는 결합모델에서 생성된 배경장에 관측정보를 반영하여 대기와 해양 간 초기 열플럭스 불균형을 완화하고자 하였으며, 딥러닝 모델은 최근 20년간 한반도에 상륙한 태풍 사례의 ERA5 재분석자료를 학습하여 대기 및 해양 초기장을 산출하였다. 분석 결과, U-Net+LSTM으로 산출된 초기장은 WCDA에 비해 SST, 풍속, 기압 등 주요 기상·해양 요소를 관측에 가깝게 모의하였다. 또한 힌남노 발생 이전 기간의 예측에서도, 저층 상대와도 및 수렴, 연직 바람시어 등 태풍의 형성과 강화에 중요한 대기·해양 환경장의 공간분포와 시간적 변화를 보다 효과적으로 재현하였다. 이러한 초기장 개선은 태풍의 이동을 결정하는 주변 바람장과 기압 배치를 보다 정확하게 모의하여 힌남노의 이동경로 예측을 향상시켰으며, 해양으로부터의 열과 수증기 공급을 적절하게 재현함으로써 최대 강도 모의 또한 개선하였다.

사사 본 논문은 2025년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-02217872, 한국형 연안재해 정밀예측 기술개발). 또한 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25478568).

4C3

복사 강제 조건의 건물 배열 위에서 진폭 변조 방법을 이용한 큰 규모 난류와 작은 규모 변동 사이의 상관성 분석: 주·야간 차이와 오염물질 수송 특성

Analysis of Correlations between Large-Scale Turbulence and Small-Scale Fluctuations Using Amplitude Modulation Method over a Radiatively Forced Building Array: Daytime and Nighttime Differences and Pollutant Transport Characteristics

김동휘[1], 한범순[1),2)]

[1)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [2)]인하대학교 환경공학과

서로 다른 규모의 난류 운동과 상호작용은 도시 표면 위 오염물질 확산에 중요한 역할을 하지만, 복사 강제에 따른 주·야간 차이는 충분히 밝혀지지 않았다. 본 연구에서는 복사 전달 모형과 결합된 큰 에디 모의 모형 PALM을 이용하여 정육면체 건물 배열 위에서 큰 규모 난류와 작은 규모 변동 사이의 상관관계 및 관련 오염물질 수송을 분석하였다. 이를 위해 파워 스펙트럼 분석, 단일 지점 및 두 지점 진폭 변조 분석, 조건부 평균 분석을 수행하였다. 진폭 변조 분석은 작은 규모 변동의 진폭이 큰 규모 난류에 따라 변하는 정도를 정량화하며, 단일 지점과 두 지점 분석은 각각 동일 고도와 서로 다른 고도 사이의 상관관계를 평가한다. 주간에는 복사 가열로 난류, 상향 열 수송, 큰 규모 연직 운동이 강화되었고, 야간에는 복사 냉각으로 지표 부근 온위 역전, 하향 열 수송, 얕은 안정 경계층이 형성되었다. 주간에는 큰 규모 상향 열 수송과 작은 규모 온위 및 오염물질 농도 변동의 진폭 사이에 양의 상관관계가 나타났다. 야간에는 이러한 상관관계가 약화되거나 음의 상관관계로 전환되었으며, 그 관계가 얕은 안정 경계층에 제한되었다. 조건부 평균 결과, 주간에는 큰 규모 연직 난류 열 플럭스의 양의 편차가 큰 조건에서 넓은 연직 범위의 상향 오염물질 수송이 나타나는 경향이 있었고, 야간에는 음의 편차가 큰 조건에서 상향 수송이 국지적으로 강화되는 경향이 나타났다. 이 결과는 도시 표면 위 다중 규모 난류 상호작용과 오염물질 수송의 주·야간 변화를 해석할 때 복사 과정에 따른 대기 안정도 차이를 고려해야 함을 보여준다.

사사 이 성과는 한국연구재단의 지원(RS-2025-00562044)과 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2024-03-03-002)을 받아 수행된 연구임.

4C4

에어로졸 건식 침적 모수화가 $PM_{2.5}$ 농도 모의에 미치는 영향

Impact of Aerosol Dry Deposition Parameterization on $PM_{2.5}$ Concentration Simulations

이예림[1], 김민중[1),2)], 최대련[3)], 홍진규[4)], 홍성철[5)], 이재범[5)], 박지훈[5)], 반수진[5)]

[1)]명지대학교 환경에너지공학과, [2)]명지대학교 스마트인프라공학부 환경시스템공학과, [3)]안양대학교 환경에너지공학과, [4)]연세대학교 대기과학과, [5)]국립환경과학원 대기질통합예보센터

3차원 화학수송모델에서 건식 및 습식 침적은 대기오염물질을 제거하는 주요 과정이다. 대부분의 기체 및 에어로졸 건식 침적은 Wesely and Hicks (1977)와 Wesely (1989)의 저항 기반 접근법을 바탕으로 계산되지만, 실제 구현 방식과 모수화는 모델에 따라 차이가 있다. 본 연구에서는 CMAQ v5.3의 m3dry 모듈을 이용한 에어로졸 건식 침적 속도를 관측 자료와 비교하였다. 그 결과, 기존 모수화는 에어로졸 건식 침적 속도를 전반적으로 과소모의하였으며, 이러한 경향은 선행 연구에서 보고된 결과와 일관되게 나타났다. 선행 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 식생의 미세구조에 따른 충돌 효율, 도시의 건물 표면적 및 해양의 백파 효과 등을 추가하였으며, 관련 개선 사항은 CMAQ v5.4에 반영되었다. 이에 본 연구에서는 기존의 m3dry와 개선된 건식 침적 모수화를 비교하여, 건식 침적 과정의 변화가 에어로졸 침적 속도와 $PM_{2.5}$ 농도 및 모의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과, 개선된 모수화는 기존 방식에 비해 대부분 지역에서 에어로졸 건식 침적 속도를 증가시켰으며, 이에 따라 $PM_{2.5}$ 농도가 감소하였다. AirKorea 관측 자료와 비교한 결과, 기존에 $PM_{2.5}$를 과대모의한 지점에서는 오차가 감소한 반면, 과소모의한 지점에서는 음의 편향이 심화되었다. 또한 RMSE 감소는 도시, 혼합림 및 농경지에서 상대적으로 뚜렷하게 나타나, 건식 침적 모수화의 영향이 토지이용 특성에 따라 상이함을 확인하였다. 이는 건식 침적 과정의 물리적 개선이 $PM_{2.5}$ 모의 성능의 일률적인 향상으로 이어지는 것은 아니며, 기존 모델의 편향과 토지이용 및 식생 특성을 함께 고려하여 그 영향을 평가할 필요가 있음을 시사한다.

사사 이 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행되었습니다(NIER-2026-04-02-058).

4C5

관측 기반 갈색탄소 광학특성 및 노화과정 민감도에 따른 한반도 에어로졸 광흡수 평가

Observation-Constrained Brown Carbon Optical Properties and Aging Sensitivity for Aerosol Light Absorption Assessment over the Korean Peninsula

조혜은, 김민중[1], 양서희[2], 최용주[3], 이민서[3]

명지대학교 환경에너지공학과, [1]명지대학교 스마트인프라공학부 환경시스템공학과, [2]서울대학교 기초과학연구원, [3]한국외국어대학교 환경학과

갈색탄소(brown carbon, BrC)는 자외선 및 가시광 단파장 영역의 태양복사를 흡수하여 흡수광학두께(AAOD) 및 직접복사효과에 영향을 미치는 유기성 에어로졸이다. BrC의 광흡수 특성은 배출원, 화학 조성 및 대기 중 노화에 따른 갈변(browning)과 표백(bleaching)에 의해 변화하지만, 이를 국내 관측과 연계하여 지역 규모 모형에 적용한 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 한반도 BrC의 광학특성을 국내 관측자료로 제약하고, 광학특성 및 노화 가정이 에어로졸 광흡수와 직접복사효과에 미치는 영향을 평가하였다. WRF-GC에 바이오매스·바이오연료 연소에 따른 1차 BrC 배출과 전구물질 산화·응축에 따른 2차 BrC 생성을 반영하였다. 관측 기반 파장별 광학특성을 WRF-GC 내부 Mie 광학계산에 적용하여 AOD, AAOD 및 단일산란알베도(SSA)를 산정하고, 문헌 기반 갈변·표백 조건의 민감도실험을 수행하였다. 또한 RRTMG를 이용하여 대기 상단 및 지표 단파복사플럭스 변화를 분석하였다. BrC 광학특성 적용은 단파장 영역에서 AAOD와 SSA를 변화시켰으며, 그 영향은 1차 배출 및 2차 생성의 상대적 기여에 따라 지역별로 달랐다. 본 연구는 BrC 직접복사효과 평가 시 배출·생성 과정과 함께 노화에 따른 광학특성 변화 및 불확실성을 고려할 필요성을 제시한다.

사사 이 연구는 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-04-02-058).

4D1

VOC/NOx 농도비에 따른 α-pinene/NOx 혼합가스의 광화학 반응에 의한 오존 생성 특성 연구

Formation Characteristics of Particles and Ozone through Photooxidation of a-Pinene/NOx Mixture Depending on VOC/NOx Ratio

김환동[1,2], 김지민[1], 이석현[1,3], 김경환[1], 표수열[1], 이지원[1], 김준태[1], 이미혜[3], 주태규[3], 이승복[1,2]

[1]한국과학기술연구원(KIST), [2]고려대학교 에너지환경대학원(그린스쿨), [3]고려대학교

대류권 오존은 휘발성유기화합물(VOCs)과 질소산화물(NOx)의 광화학 반응으로 생성되는 대표적인 2차 대기오염물질이며, 전구체의 조성비(VOCs/NOx)에 따라 비선형적인 오존 생성 특성때문에 VOC-limited 또는 NOx-limited regime으로 구분된다는 점에서 저감 정책 수립의 핵심 변수로 작용한다. 그러나 국내 스모그 챔버 실험은 주로 2차생성유기물질(SOA)의 관점에서 다뤄져 왔고, 오존을 독립적인 정량화 대상으로 삼아 규명한 연구는 상대적으로 드물다. 이에 본 연구에서는 K-CAPS (KIST Chamber for Atmospheric Processes Simulation) 챔버를 활용하여 α-pinene/NOx 광화학 반응 실험을 VOC/NOx 비율을 다르게 조절한 조건에서 각각 수행함으로써, 오존 생성 속도와 생성량에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 아울러 실험 결과를 한국형 대기질 상자모델(KAB)의 모사 결과와 비교하여, 조성비 및 입자 존재 조건 변화에 따른 모델의 오존 예측 성능을 평가하고자 한다. 본 연구는 VOCs 저감과 NOx 저감 정책의 상대적 효과를 판단하는데 필요한 실험적 근거를 제공함과 동시에, 대기질 관리 모델의 예측 정확도 향상에 기여할 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 - the Fine Particle Research Initiative in East Asia Considering National Differences (FRIEND) project (2020M3G1A1114556)와 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지역맞춤형 오존 관리 기술개발사업과 KIST 기관고유사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25501457).

4D2

다양한 대기 환경에서의 $ClNO_2$ 농도 지배 기작 규명

Diagnosing the Dominant Mechanisms Governing Nitryl Chloride Variability

남우희, 조창민[1], 이가현, 박정후[2], 정선아[2], Bin Yuan[3], Xiaoxiao Zhang[3], Hendrik Fuchs[4,5], Andreas Hofzumahaus[4], Zhaofeng Tan[6], Roberto Sommariva[7], Paul S. Monks[7], Steven S. Brown[8,9], Michael A. Robinson[8,10], 민경은

광주과학기술원 환경에너지공학부, [1]NCAR Atmospheric Chemistry Observations & Modeling Lab, [2]국립환경과학원 대기환경연구과, [3]College of Environment and Climate, Jinan University, [4]Institute of Climate and Energy Systems, ICE-3: Troposphere, Forschungszentrum Jülich, [5]Department of Physics, University of Cologne, [6]College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, [7]School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Birmingham, [8]NOAA Chemical Sciences Laboratory, [9]Department of Chemistry, University of Colorado Boulder, [10]Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder

염화니트릴($ClNO_2$)은 주로 야간에 형성되어 익일 광분해를 통해 Cl 라디칼과 NO_2를 제공함으로써 대류권 오존 생성을 촉진하는 반응성 화합물이다. 그러나 $ClNO_2$ 생성은 가스상 NO_3 및 N_2O_5 형성과 입자상 불균일 반응이 복합적으로 얽혀 있어, 관측 데이터만으로 지배 기작을 명확히 규명하기 어려운 실정이다. 본 연구에서는 집중 관측 캠페인에서 통상 관측되는 대기오염물질과 기상인자 자료만을 이용하여 국지적 $ClNO_2$ 생성 속도를 추정할 수 있는 새로운 해석적 진단법을 개발하고, 북미, 유럽, 동아시아의 6개 필드 캠페인에 적용하여 다양한 대기 환경에서의 적용 가능성을 검증하였다. 캠페인 전반에서 추정된 $ClNO_2$ 생성 속도는 관측된 $ClNO_2$ 농도 증가율과 일치하였다. 반면 기상학적 수송 영향이 커질 때 두 값의 편차가 확대되는 특성을 통해, 국지 화학적 생성만으로 설명하기 어려운 사례를 식별하였다. 더 나아가, $ClNO_2$ 생성 기작에 대해 NO_3 라디칼 공급과 NO_3의 $ClNO_2$ 전환을 구분하여 진단함으로써, 캠페인별 주요 지배 기작이 상이함을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 진단법은 NO_3와 N_2O_5의 직접 관측 없이도 기존 및 향후 관측 자료에서 야간 할로겐 화학의 특성을 파악하는 데 쉽게 활용될 것으로 기대된다.

사사 본 논문은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25501444).

4D3

도심-산림 인접 대기에서 수용성 유기 에어로졸의 특성과 유기 황산염(Organosulfate) 형성에 관여하는 입자상 조건

Characteristics of Water-Soluble Organic Aerosol and Particle-Phase Factors Associated with Organosulfates at an Urban-Forest Interface

권수진, 김화진

서울대학교 보건대학원 환경보건학과

도심-산림 인접 대기에서는 산림 기원 BVOCs와 도심 기원의 대기오염물질이 혼재하며 유기 에어로졸(OA)의 이차 생성이 활발히 일어날 수 있다. 유기황산염(organosulfate, OS)은 BVOC 산화 생성물과 산성 황산염 입자 간의 다상 반응으로 생성되는 성분으로, 생성을 조절하는 조건은 충분히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 서울 관악산에서 2022년 10월 14일부터 11월 26일까지 실시간 ToF-ACSM 측정, 필터 추출 수용성 유기 에어로졸(WSOA)에 대한 HR-ToF-AMS 고분해능 분석, 비표적 Orbitrap LC-MS/MS 분석을 결합하여 OA의 이차 생성 및 산화 과정과 OS의 분자 수준 특성을 분석하였다. OA는 5개 요인(일차 배출 OA, 아민 함유 OA, 생물 기원 SOA, 두 종류의 산화 OA)으로 분리되었다. 가장 산화된 OA는 황산염과 강한 상관관계($r = 0.99$)를 보였다. 이는 해당 이차 생성 OA가 황산염 관련 입자 생성과정과 연관된 경로를 통해 형성되었음을 시사한다. WSOA는 전체 OA 질량의 86%를 차지하였다. WSOA에서 분리된 가장 산화된 OA도 황산염과 높은 상관관계($r = 0.88$)와 높은 CHOS 계열 이온 신호를 나타냈으며, OS의 지시 이온인 $CH_3SO_2^+$와도 유의한 상관관계($r = 0.54$)를 보였다. 비표적 Orbitrap 분석에서는 68종의 OS 추정 화학종이 검출되었으며, 이는 황산염과 함께 변화한 산화 OA에 다양한 유기황 성분이 포함되어 있음을 뒷받침한다. 입자는 지속적으로 강한 산성도($pH = 1.32 \pm 0.73$)를 유지하였으나, 가장 산화된 OA와 OS 추정값의 시간적 변화는 pH 변동보다 ALW와 연관되었다. 이는 충분한 산성도가 유지될 때, 입자 내 수분의 가용성이 OS의 형성에 더 중요하게 작용할 수 있음을 시사한다. 본 연구는 도심-산림 인접 대기에서 인위적 기원의 황산염이 산성도와 액상 수분이 유지되는 입자상 반응 환경을 제공함으로써 생물 기원 SOA의 다상 산화 과정과 OS 성분의 형성에 관여할 가능성을 제시한다.

사사 이 연구는 서울대학교 창의선도 신진 연구자 지원 사업(대기-기후변화 대응을 위한 SMaRT기반의 에어로졸 분석 예측 모듈 시스템 개발)의 지원을 받았습니다(900-20250086).

4D4

태국 치앙마이 대기 중 VOCs의 배출원 특성과 OH 반응성

Source Characteristics and OH Reactivity of Ambient VOCs in Chiang Mai, Thailand

임유락, 길준수[1], 김주애[1], 이지선[2], 이미혜

고려대학교 지구환경과학과, [1]고려대학교 기초과학연구원, [2]한국외국어대학교 환경학과

태국 북부 치앙마이는 바이오매스 연소와 다양한 도시 배출원의 복합적인 영향을 받는 지역으로, 대기 중 VOCs의 조성, 배출원 및 OH 반응성을 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 2024년 3월 ASIA-AQ 캠페인 기간 치앙마이 라차팟 대학교에서 4시간 간격으로 PAMS VOCs 56종을 Sampling 후 TD-GC-FID로 분석하였다. VOC의 농도 특성과 OH reactivity (OHR)를 평가하고, EPA PMF 5.0을 이용하여 배출원 특성 및 Factor별 OHR 기여도를 분석하였다. 전체 관측기간의 평균 농도는 Aromatic 41.15±17.16 ppbv, Alkane 24.30±13.39 ppbv, Alkene 5.03±5.40 ppbv였으며, 평균 OHR은 각각 10.78±5.61, 3.90±2.17, 4.27±3.95 s^{-1}였다. 특히 Alkene은 Alkane보다 농도가 낮았음에도 더 높은 OHR을 보였다. PMF 분석에서는 Traffic emissions (32.2%), Paint/Coating solvent emissions (23.6%), Diesel Vehicle exhaust (20.6%), LPG emissions (8.53%), Gasoline evaporation (8.42%), Combustion (6.70%) 6개의 factor로 해석되었다. Bootstrap mapping rate는 80% 이상이었으며, DISP에서 factor swap이 발생하지 않아 최종 PMF 결과의 안정성을 뒷받침하였다. Factor별 OHR 기여도는 Diesel Vehicle exhaust (27.64%)가 가장 높았으며, Gasoline evaporation (20.58%), Traffic emissions (18.37%), Combustion (17.70%), LPG emissions (10.96%), Paint/Coating solvent emissions (4.75%)이었다. 농도 기반 PMF 기여도와 factor별 OHR 기여도의 순위가 서로 다르게 나타났으며, 이는 VOC 배출원의 대기화학적 중요도를 평가할 때 농도 기여도뿐만 아니라 배출원별 VOC 조성과 OH 반응성을 함께 고려할 필요가 있음을 보여준다.

4D5

시흥 여름철 휘발성유기화합물의 시간적 변동 특성 및 오존생성잠재력 평가

Temporal Variations and Ozone Formation Potential of Volatile Organic Compounds during Summertime in Siheung, Korea

우서라, 이지이[1], 권정희[1], 임문순[2], 원수란[3], 최용주

한국외국어대학교 환경공학과, [1]이화여자대학교 환경공학과, [2]시흥녹색환경연구센터, [3]시흥시정연구원

휘발성유기화합물(VOCs)은 질소산화물(NOx)과의 광화학 반응을 통해 오존(O_3) 생성에 관여하는 주요 전구물질로, 농도와 조성은 배출원 및 기상조건에 따라 달라질 수 있다. 시흥지역은 시화·반월 산업단지와 인접하고 산업시설, 주거지역이 혼재되어 다양한 배출원의 영향을 받을 수 있다. 본 연구에서는 시흥지역 VOCs의 농도 특성과 오존 생성 기여도를 평가하기 위해 2026년 5월 13일부터 7월 14일까지 시흥녹색환경지원센터(37.04°N, 126.73°E)에서 실시간 오존 전구물질 측정기(GC955 611 Ozone Precursor Analyser)를 이용하여 33종의 VOCs를 1시간간격으로 측정하였다. 측정 기반 개별 VOC와 총 VOCs의 농도 수준 및 시간적 변동을 분석하고, 주요 성분 간 비율과 기상요소, O_3 및 NO_2 농도와의 관계를 통해 산업, 교통 등 주변 배출원의 영향과 광화학적 변화 특성을 평가할 예정이다. 또한 개별 VOC 농도에 최대증분반응성(Maximum Incremental Reactivity, MIR) 계수를 적용하여 오존생성잠재력(Ozone Formation Potential, OFP)을 산정하고, 농도와 반응성을 종합적으로 고려하여 오존 생성에 기여도가 높은 주요 VOC 성분을 도출하고자 한다. 이를 통해 시흥지역의 VOC 오염 및 오존 생성 특성을 파악하고 지역 특성을 고려한 VOC 및 오존 관리방안 마련을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

사사 이 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2026-25505137).

4E1

부안 지역의 장기 관측 기반 암모니아(NH_3)에 의한 초미세먼지($PM_{2.5}$) 2차 생성 잠재력

Secondary $PM_{2.5}$ Formation Potential and Contribution Driven by Atmospheric Ammonia Based on Long-Term Observations in Buan

김우준, 전하정[1], 박채형, 최서영, 고동훈, 박재환, 백성옥, 송명기, 배민석

국립목포대학교, [1]직업환경연구소

농업지역에서 배출되는 암모니아(NH_3)는 초미세먼지($PM_{2.5}$) 내 2차 무기 에어로졸(Secondary Inorganic Aerosol, SIA) 생성에 관여하는 주요 전구물질이지만, 국내 농촌지역을 대상으로 장기간의 실측자료를 활용하여 그 기여도를 정량적으로 평가한 연구는 제한적이다. 이에 본 연구에서는 장기 관측자료를 기반으로 농업지역에서 배출되는 NH_3의 입자상 전환 특성과 $PM_{2.5}$ 생성 기여도를 정량적으로 평가하고자 하였다. 연구는 2022년 6월부터 2026년 8월까지 전북 부안에서 수행하였으며, 연구 기간 동안 가스상 전구물질(NH_3, NOx, SO_2)과 $PM_{2.5}$ 농도 및 화학성분을 측정하였다. 관측자료를 바탕으로 가스상 전구물질과 2차 무기이온(SO_4^{2-},NO_3^-,NH_4^+) 간의 상관성 및 기체-입자 분배 특성을 분석하고, 암모늄 전환율(Ammonium conversion ratio, NHR)과 질산염 산화율(Nitrate oxidation ratio, NOR)을 산출하여 NH_3와 NOx의 입자상 전환 특성을 평가하였다. 또한, 화학평형모델을 통해 NHR, NOR 결과와 비교검증 하여, 기여도를 정량적으로 평가하였다. 관측 결과, 부안 지역은 대부분 암모늄 풍부(ammonium-rich) 상태를 유지하였으며, 동절기 저온 조건에서 기체-입자 전환이 활발해지면서 [NO_3^-]/[SO_4^{2-}] 비율과 입자상 질산암모늄(NH_4NO_3) 농도가 크게 증가하였다. 장거리 수송(Long-Range Transport, LRT)의 영향을 제외한 국지 전환율은 NHR 9%, NOR 20%로 산출되었으며, 두 전환율이 동시에 증가하는 조건에서 고농도 $PM_{2.5}$가 집중적으로 발생하였다. 가스상 NH_3의 입자상 전환에 따른 $PM_{2.5}$ 질량 기여도는 약 12%로 평가되었다. 본 연구는 국내 대표적 논 농업지역의 장기 관측자료를 기반으로 농업 기원 NH_3의 입자상 전환과 $PM_{2.5}$ 2차 생성 기여도를 정량적으로 규명하였다는 데 의의가 있다. 연구 결과는 향후 영농 시기별 비료 관리 및 농경지 NH_3 배출 저감 대책 수립과 관측 기반 대기질 모델 검증을 위한 과학적 기초자료로 활용될 수 있다.

사사 This work was supported by the Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (NIER-2024-03-03-002 & RS-2026-25505137) and by a grant (RS-2026-25519883) of the National Research Foundation (NRF) of Republic of Korea.

4E2

휘발성유기화합물의 광화학적 노화에 따른 블랙카본의 물리화학적 및 광학적 특성 변화

Modifications in Physicochemical and Optical Properties of Black Carbon during Photochemical Aging with VOCs

서지영[1),2)], 레티황이엔[2)], 유한진[3)], Weijun Li[4)], 전기준[1),2)]

[1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [3)]국립한국교통대학교 환경공학전공,
[4)]Department of Atmospheric Sciences, Zhejiang University

불완전 연소로 생성되는 블랙카본(black carbon, BC)은 강한 광흡수 특성으로 인해 단기체류 기후변화 유발물질(Short-Lived Climate Pollutants, SLCP)로 알려져 있다. 배출된 BC는 휘발성유기화합물(VOCs), 질소산화물 및 2차 유기 에어로졸(SOA)과 복잡한 노화 과정을 겪으며, 특히 SOA 코팅은 BC의 물리화학적 및 광학적 특성을 변화시킨다. 현장 및 모델링 연구에서는 SOA 코팅과의 내부 혼합이 BC 코어에 태양 복사를 유도하는 렌즈 효과(lensing effect)를 유발하여 BC의 광흡수(E_{abs})를 증가시킨다. 그러나 보고된 값은 지역과 방법론에 따라 편차가 크다. 또한, SOA로 코팅된 BC의 광학적 특성이 입자 구조 및 표면 화학적 변화와 동시에 고려된 연구는 부족하다. 본 연구는 연속 산화 흐름 반응기(Oxidation Flow Reactor)를 사용하여 대기 조건(오존 농도, 상대습도, UV 조도)에서 톨루엔과 BC의 광화학 반응을 모사하였다. 톨루엔은 대기 중 비중이 높으며 OH 라디칼과의 높은 반응성으로 주요 SOA 전구물질이다. 실험 결과, VOCs와 BC의 상호작용으로 10~100 nm 범위에서 입자 크기와 유효밀도 증가, 형상계수 감소를 확인하며, TEM 분석에서도 이에 상응하는 형태학적 변화를 관찰하였다. XPS 분석에서는 노화 시간에 따른 입자의 표면 산소 함유 작용기 분율의 변화를 확인하였다. SOA 코팅이 E_{abs}을 향상시키나 노화 시간에 따라 상이하였다. 이는 BC의 대기 수명과 구름 응축 핵 활동에 영향을 미치며, BC의 에어로졸-기체 상호작용을 반영한 대기질 모델링 개선을 위한 기초 자료를 제공한다.

사사 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. RS-2024-00416902)과 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2024-03-03-002)을 받아 수행하였습니다.

4E3

서울 여름철 질소 함유 유기에어로졸의 화학적 특성과 입자 수분 의존성

Chemical Characteristics and Aerosol-Water Dependence of Nitrogen-Containing Organic Aerosol in Summertime Seoul

이재진, 문지혜, 권수진, 김화진

서울대학교 보건대학원

대기 중 질소 함유 유기에어로졸(Nitrogen-Containing Organic Aerosol, NOA)은 광흡수와 독성 측면에서 중요성이 부각되고 있으나, 도시 여름철 대기에서의 화학적 조성과 생성 경로는 거의 규명되지 않았다. 본 연구에서는 2020년 여름 서울에서 HR-ToF-AMS로 측정한 PM_1 유기에어로졸에 Positive Matrix Factorization (PMF)을 적용하여 5개의 factor를 분리하고, 그중 NOA factor의 화학적 특성과 증가 조건을 분석하였다. NOA는 전체 유기에어로졸의 약 19%(평균 0.59 $\mu g/m^3$, 유기질소 기준 0.05 $\mu gN/m^3$)를 차지하였으며, N/C는 0.130으로 도시 대기 OA 전체에 대해 보고된 값(0.015~0.03)을 크게 상회하였다. 질량 스펙트럼에서는 $CH4N^+$ (m/z 30), $C2H6N^+$ (m/z 44), $C3H8N^+$ (m/z 58) 등 산소를 포함하지 않는 CHN 계열 fragment가 두드러졌으며, 이는 환원형 질소 화학종의 기여를 시사한다. 다만 저분자 지방족 amine의 N/C가 0.167 이상인 점을 고려하면 관측된 N/C 0.130은 amine만으로는 설명되지 않아, amide 및 N-헤테로고리 등 다른 환원 질소 화학종의 기여 가능성도 함께 검토하였다. ISORROPIA-II를 이용해 계산한 aerosol liquid water(ALW)는 NOA와 양의 상관($r = 0.787$)을 보였다. NOA 상위 10% 기간의 평균 ALW는 28.4 $\mu g/m^3$로 그 외 기간(5.46 $\mu g/m^3$)의 약 5.2배였다. 동일 기간 NOA/OA 분율 또한 ALW 증가와 함께 높아져, 혼합고 변화에 따른 전체 농도의 동반 상승만으로는 설명되지 않는 수분 의존성이 나타났다. 이러한 결과는 서울 여름철 NOA가 겨울철 서울에서 보고된 저온 조건에서의 반휘발성 아민 분배(Kim et al., 2026)와 달리, 높은 입자 수분 조건에서의 기체-입자 분배 및 수상 반응 등 입자상 처리과정과 연관될 가능성을 시사한다. 향후 오프라인 고분해능 질량분석을 통해 이를 분자 수준에서 규명할 예정이다.

사사 본 연구는 서울대학교 신진연구자 창의·도전 연구지원사업 '기후변화 및 건강위해성 평가를 위한 SMaRT 기반 에어로졸 측정 및 분석 시스템 개발'의 지원을 받아 수행되었습니다(900-20250086).

4E4

질량 변화 기반 겨울철 도심 $PM_{2.5}$ 고농도 사례 시 에어로졸 흡습성 평가

Mass-Based Assessment of Aerosol Hygroscopicity during Wintertime Urban $PM_{2.5}$ Episode

김주영[1], 이은아[1], 이정훈[2], 임세희[1,3]

[1]충남대학교 환경IT융합공학과, [2]한국기술교육대학교 기계공학부, [3]충남대학교 환경공학과

대기 에어로졸은 그 물리화학적 특성에 따라 상대습도가 증가함에 따라 수분을 흡수하여 성장한다. 이러한 흡습성은 입자의 크기와 질량, 광학적 특성 및 구름 형성에 영향을 미쳐 대기질과 기후에 영향을 주는 중요한 특성이다. 겨울철 도심에서는 $PM_{2.5}$ 고농도 사례의 형성, 발달 및 소멸 과정에 따라 흡습성이 복잡하게 변화할 수 있어 실제 대기 에어로졸의 특성을 반영한 평가가 필요하다. 입자의 크기 변화를 이용하는 보편적인 흡습성 측정 방식은 제한된 입경 범위를 대상으로 하므로 복합적인 대기 에어로졸의 특성을 반영하는 데 한계가 있으며, 특히 90%를 초과하는 높은 상대습도 조건에서는 안정적인 측정이 어렵다. 이에 본 연구에서는 2024년과 2025년 겨울철 도심에서 발생한 두 차례의 $PM_{2.5}$ 고농도 사례의 진행 과정을 조사할 수 있도록 총 16개의 필터 시료를 포집하고, 약 84%, 90%, 97% 상대습도 조건에서 상대습도 변화에 따른 질량 변화를 이용하여 흡습성을 평가하고 화학 조성과의 연계성을 분석하였다. 산정된 흡습성 파라미터는 높은 상대습도 조건일수록 증가했으며, 2024-02-23 ~ 03-08 시료에 비해 상대적으로 $PM_{2.5}$ 질량농도와 무기이온 질량분율이 높은 반면 유기탄소 질량분율이 낮은 2025-01-19 ~ 23 시료에서 더 높게 나타났다. 또한 기존 보편적인 측정법을 이용한 선행연구의 보고 범위에 포함되어, 질량 변화 기반 측정법이 실제 대기 에어로졸의 흡습성을 평가하는 데 적용 가능함을 확인하였다.

사사 본 연구는 2025년도 정부(환경부, YL-WE-22-002, 폐자원에너지화 전문인력 양성사업)의 재원으로 수도권매립지관리공사의 지원, 2025년도 정부(산업통상자원부, RS-2025-02263037, 산업혁신인재성장지원사업)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원, 정부(과학기술정보통신부, RS-2026-25475619314820926400001)의 재원으로 한국연구재단의 지원, 그리고 교육부의 재원으로 한국연구재단의 4단계 BK21 사업의 지원을 받아 수행됨.

4E5

겨울철 $PM_{2.5}$ pH와 변동 요인의 정량적 분해: E-AIM IV를 이용한 군산 축산지역과 안산 도심 비교

Quantitative Decomposition of the Drivers of Wintertime $PM_{2.5}$ pH Variability: An E-AIM IV-Based Comparison of a Livestock-Influenced Site in Gunsan and an Urban Site in Ansan

나은상[1], 김연후[1], Avinash Shastri[1], 조범기[1], 함지영[2], 송형도[2], 유철[2], 이광열[3], 송미정[1,4]

[1]전북대학교 기후환경에너지융합학과, [2]기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀,
[3]국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과, [4]전북대학교 지구환경과학과

$PM_{2.5}$의 pH는 무기성분의 기체-입자 분배와 2차 무기입자 생성을 조절하는 핵심 열역학 변수이다. 본 연구에서는 2025년 11월 20일부터 12월 20일까지 겨울철 군산 축산 지역에서 시간별 NH_3, 수용성 무기이온, $PM_{2.5}$ 및 기상요소를 측정하였으며, 비교를 위해 2024년 1월 31일부터 2월 29일까지 안산 도심지역에서 측정된 동일 항목의 시간별 관측자료를 활용하였다. 두 지역의 관측자료를 열역학 모델 E-AIM IV에 적용하여 $PM_{2.5}$ pH를 산정하고 NH_3-NH_4^+ 분배평형 프레임워크를 적용하여 각 시점의 pH가 각 지점의 관측기간 평균에서 벗어난 편차(ΔpH)를 NH_3, 입자 특성, 상대습도, 온도 및 비휘발성 양이온 항으로 분해하여 비교하였다. 평균 $PM_{2.5}$ pH는 군산 4.0±0.4, 안산 3.7±0.4로 계산되었으며, 두 지역에서 공통적으로 상대습도, 온도 및 NH_3가 pH 변동의 주요 요인으로 나타났다. 두 지점 모두 주간에는 온도 상승과 상대습도 감소가 pH를 평균보다 낮추는 데 기여했으며, 야간에는 반대 양상이 나타났다. 축산지역에서는 오전 NH_3 증가가 반복적으로 pH를 평균보다 높인 반면, 도심에서는 관측기간 전체에서 NH_3의 기여도가 컸음에도 그 발생 시각과 기여 양상이 날짜별로 달라 일변화에서는 뚜렷한 패턴이 나타나지 않았다. 따라서 지역별 $PM_{2.5}$ pH의 변동 양상과 주요 영향요인의 특성을 파악하기 위해서는 각 인자의 전체 기여도뿐 아니라 기여가 나타나는 시간대와 반복성을 함께 고려할 필요가 있다.

4F1

폐 PET 기반 질소 도핑 및 망간-세륨 결합 촉매의 톨루엔 산화 특성 비교

Comparison of Toluene Oxidation Characteristics of Nitrogen-Doped and Mn-Ce-Doped Catalysts Based on Waste PET

박지영, 사공누리, 양재환

충남대학교 환경IT융합공학과

휘발성유기화합물(VOCs)은 오존 및 2차 유기에어로졸 생성에 관여하는 주요 대기오염물질이며, 특히 톨루엔은 자동차 배출가스와 다양한 산업 공정에서 배출되는 대표적인 VOC이다. 촉매 산화는 300~400℃의 비교적 낮은 온도에서 VOC를 효과적으로 제거할 수 있으나, 귀금속 촉매는 높은 비용으로 인해 경제적인 대체 촉매 개발이 요구된다. 한편, 폐 PET는 높은 탄소 함량과 우수한 안정성을 갖고 있어 다공성 탄소 소재로 전환할 경우 촉매 지지체로 활용 가능성이 높으며, 폐플라스틱의 자원화와 대기오염 저감을 동시에 기대할 수 있다. 본 연구에서는 폐 PET를 $ZnCl_2$로 활성화하여 다공성 탄소를 제조한 후, 멜라민을 질소 전구체로 사용한 질소 도핑 촉매와 질산망간 및 질산세륨을 금속 전구체로 사용한 Mn-Ce 복합 산화물 촉매를 각각 제조하였다. Mn-Ce 촉매의 경우 습식 함침법, 침전법 및 수열 합성법을 적용하여 담지 방법에 따른 촉매 특성과 톨루엔 산화 성능을 비교하였다. 제조된 촉매는 고정층 반응기에서 250 ppm 톨루엔을 주입하여 100~360℃ 범위에서 산화 성능을 평가하였다. 그 결과, 질소 도핑 및 Mn-Ce 복합 산화물의 도입에 따라 촉매의 표면 특성과 활성점 특성이 변화하였다. 이러한 구조적 특성의 차이는 톨루엔의 산화 활성에 영향을 미쳤으며, 폐 PET 유래 다공성 탄소의 VOC 산화용 촉매 지지체로서의 활용 가능성을 확인하였다.

사사 본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부, RS-2025-02263037, 산업혁신 인재 성장 지원사업)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원과 2025년도 정부(환경부, YL-WE-22-002, 폐자원에너지화 전문인력 양성사업)의 재원으로 수도권매립지관리공사의 지원과 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경공단의 통합환경관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

4F2

원자력 시설 폐활성탄 처리 과정에서 발생하는 TEDA의 촉매 산화 특성

Catalyst Oxidation Characteristics of TEDA Released during Spent Activated Carbon Treatment in Nuclear Facilities

박성민, 박지영, 사공누리, 손나현, 양재환

충남대학교 환경IT융합공학과

원자력 발전소에서는 방사성 요오드 제거를 위해 TEDA (triethylenediamine, $C_6H_{12}N_2$) 첨착 활성탄이 사용되며, 사용 후 활성탄은 원자력법상 중저준위 방사성 폐기물로 취급된다. 폐활성탄은 적절한 처리 기술의 부재로 인해 원자력 발전소에 일정 기간 보관 후 중저준위 방사성 폐기물 처분장에 장기 처분하는 것이 현재로서는 유일한 대책이나 이 과정에서 발생하는 과도한 처분 비용과 장기 보관에 따른 화재 위험이 심각한 문제라 할 수 있다. 또한 처리 과정에서 휘발되는 TEDA는 인체와 환경에 유해하므로 효과적인 제거 기술이 요구된다. 본 연구에서는 촉매를 이용하여 TEDA를 산화시켜 제거하는 방법을 적용하였다. 촉매의 제조를 위해 위해 HZSM-5를 지지체로 사용하고, Mn과 Ce의 담지 비율을 달리한 5종의 촉매를 습식 함침법으로 제조한 후 공기 분위기에서 400℃로 소성하였다. 제조된 촉매의 TEDA 제거 성능은 FT-IR 가스 분석기를 이용하여 비교하였으며, TEDA와 CO_2의 특성 피크를 분석하여 제거율과 CO_2 선택도를 평가하였다. 실험 결과, 최적의 촉매는 300℃에서 95% 이상의 높은 TEDA 제거율과 90% 이상의 CO_2 선택도를 나타냈으며 72시간의 연속 운전에서도 우수한 제거 성능을 유지하였다. 이러한 촉매 활성은 HZSM-5의 산성점에 의한 TEDA의 흡착과 Mn-Ce 담지에 따른 산화·환원 특성 및 산소 이동성 향상이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

사사 본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부, RS-2025-02263037, 산업혁신 인재 성장 지원사업)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원과 2025년도 정부(환경부, YL-WE-22-002, 폐자원에너지화 전문인력 양성사업)의 재원으로 수도권매립지관리공사의 지원과 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경공단의 통합환경관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

4F3

폐 PET 기반 질소 도핑 다공성 탄소의 구조 제어 및 황화수소(H_2S)의 선택적 산화 특성

Structural Control of Waste PET-Derived Nitrogen-Doped Porous Carbon for Selective H_2S Oxidation

사공누리, 박지영, 양재환

충남대학교 환경IT융합공학과

황화수소(H_2S)는 매립가스, 석유 정제, 바이오가스 및 화학 공정에서 발생하는 유해·부식성 가스로, 인체에 노출 시 치명적인 위해를 끼치고 장비와 시설을 쉽게 부식시킬 수 있어서 효과적인 처리가 요구된다. 기존 Claus 공정은 고농도 처리에는 효과적이나 저농도 H_2S 처리에는 적용에 한계가 있으며, 이에 따라 H_2S를 원소 황(S^0)으로 직접 전환하는 선택적 촉매 산화(Selective Catalytic Oxidation, SCO) 기술이 주목받고 있다. 특히 탄소 기반 촉매는 높은 비표면적을 지니고 제조 조건의 변화를 통한 구조 설계가 용이하며, 탄소 골격 내 질소 도입을 통해 표면 활성점을 조절할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 폐 PET와 $ZnCl_2$의 용융염 탄화를 통해 다공성 탄소 구조를 형성하고, 멜라민($C_3H_6N_6$)을 이용한 질소 도입과 KOH 또는 K_2CO_3를 이용한 이중 활성화를 통해 기공 및 표면 특성을 조절하였다. 물리화학적 특성 분석 및 성능평가 결과, KOH 및 K_2CO_3 활성화 촉매는 높은 비표면적과 발달된 기공 구조를 나타냈으며, 특히 K_2CO_3 활성화 촉매는 150℃에서도 높은 H_2S 전환율을 보여 우수한 저온 활성을 나타냈다. 또한 기체공간속도(WHSV), O_2/H_2S 비 및 수분에 따른 반응 특성을 평가하였으며, 장시간 테스트 결과 최적 촉매는 170℃에서 72시간 동안 높은 H_2S 전환율을 안정적으로 유지할 수 있음을 보여주었다. 이러한 결과는 폐 PET 유래 탄소 촉매의 기공 및 표면 특성 제어가 저온 H_2S 선택적 산화에 효과적임을 보여주며, 폐플라스틱 업사이클링과 H_2S 제거 및 황 자원화를 위한 촉매로 활용될 수 있음을 보여준다.

사사 본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부, RS-2025-02263037, 산업혁신 인재 성장 지원사업)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원과 2025년도 정부(환경부, YL-WE-22-002, 폐자원에너지화 전문인력 양성사업)의 재원으로 수도권매립지관리공사의 지원과 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경공단의 통합환경관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

4F4

제올라이트 개질을 통한 구조 변화 및 활성 금속 분산 특성 연구

Effect of Zeolite Modification on Structural Evolution and Active Metal Dispersion

박아린, 정현수, 김재헌, 문병현, 김희진, 김재진[1)], 심유진[1)], 김서현[1)], 박시언[1)], 한희선[1)], 김민지[1)], 김성수[1)]

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, [1)]경기대학교 사회에너지시스템공학과

제올라이트는 규칙적인 미세기공, 높은 비표면적, 우수한 열적 안정성 및 조절 가능한 산점 특성을 지닌 소재로 기체 흡착과 촉매 반응에 널리 활용되고 있다. 특히 실제 배출가스에는 수분이 공존하므로, 제올라이트의 친수성에 따른 경쟁 흡착과 활성점 차단을 억제하는 것이 안정적인 성능 확보에 중요하다. 이때 골격 내 Si/Al 비와 Al 분포는 표면의 친·소수성, 산점의 밀도와 세기, 기공 내 확산 및 활성 금속과의 상호작용을 결정하는 핵심 인자이다. Si/Al 비의 증가는 표면 소수성을 향상시켜 수분과 대상 기체 간 경쟁 흡착을 완화할 수 있으며, 기공 접근성과 활성 금속의 담지·분산 환경에도 영향을 미친다. 이러한 특성을 조절하기 위한 대표적인 개질법으로 산처리 방식이 활용되고 있으며, 이 과정에서 골격 및 비골격 Al이 제거되어 제올라이트의 조성, 산 특성 및 기공 구조가 변화한다. 적절한 산처리는 기공 접근성을 개선하고 금속–지지체 상호작용을 조절하여 활성 금속의 균일한 분산에 기여할 수 있다. 반면 과도한 탈알루미늄화는 결정성 저하, 기공 구조 손상, 산점 감소 및 금속 종 응집을 유발하여 성능을 저하시킬 수 있으므로 개질 조건의 최적화가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 산처리 조건에 따른 제올라이트의 결정구조, 기공 특성, 표면 산점 및 활성 금속의 분산 거동을 분석하고, 수분 존재 조건에서의 흡착 특성을 비교하였다. 이를 바탕으로 구조적 안정성과 금속 분산성을 유지하면서 수분 경쟁 흡착을 억제할 수 있는 최적 제올라이트 개질 조건을 도출하고자 하였다.

4F5

조촉매 첨가가 Ru/TiO_2 촉매의 NH_3-SCO 반응활성에 미치는 영향

Effect of Promoter Addition on the NH_3-SCO Activity of Ru/TiO_2 Catalysts

김희진, 정현수, 김재헌, 문병현, 박아린, 김재진[1)], 심유진[1)], 박시언[1)], 한희선[1)], 김서현[1)], 김민지[1)], 김성수[1)]

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, [1)]경기대학교 사회에너지시스템공학과

질소산화물(NO_x)은 연소공정에서 배출되는 대표적인 대기오염물질로, 대기 중 오존과 질산염계 초미세먼지 형성에 관여하여 관리가 필요하다. NO_x 저감을 위해서는 암모니아(NH_3)를 환원제로 사용하는 선택적 촉매 환원법(SCR)이 널리 적용되고 있다. 그러나 실제 공정에서는 배가스 온도와 부하 변동, NH_3/NO_x 주입비 불균형 및 촉매 활성 저하로 인해 미반응 NH_3가 후단으로 배출되는 NH_3 slip이 발생할 수 있다. 잔류 NH_3는 악취를 유발하고 산성 성분과 반응하여 암모늄염 입자를 형성하며, 이는 2차 초미세먼지 생성과 후단 설비의 침적 및 압력손실을 초래할 수 있다. 이에 SCR 후단의 NH_3를 N_2와 H_2O로 선택적으로 전환하는 NH_3 선택적 촉매 산화법(NH_3-SCO)이 효과적인 후처리 기술로 주목받고 있다. 그러나 저온에서는 충분한 반응 활성을 확보하기 어려우며, 과도한 산화반응은 NO, NO_2 및 N_2O와 같은 질소계 부산물이 생성될 수 있다. 본 연구에서는 NH_3-SCO 반응의 저온 활성과 N_2 선택도를 동시에 향상시키기 위해 서로 다른 조촉매가 첨가된 Ru/TiO_2 촉매를 제조하였으며, 조촉매 첨가에 따른 물리·화학적 특성과 NH_3-SCO 반응성을 분석하였다. 그 결과, 조촉매 첨가는 촉매의 산화·환원 특성을 변화시켰으며, 저온 NH_3 전환율과 N_2 선택도가 증진된 것을 확인하였다. 따라서, 본 연구를 통해 조촉매가 첨가된 Ru/TiO_2 촉매는 SCR 후단의 잔류 NH_3 저감을 위한 효과적인 후처리 촉매로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

사사 본 논문은 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경공단의 통합환경관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

4G1

여수-순천-광양 연안 산업지역 배출 인벤토리의 오염물질별 검출 가능성 진단

Diagnosing Emission Inventory Detectability by Pollutant in Yeosu-Suncheon-Gwangyang, Korea

정준영, 정선기[1)], 이상림[1)], 신규성[1)], 김채은[1)], 표종철[2)], 장지이[1)]

전남대학교 건설환경공학과, [1)]전남대학교 환경시스템공학과, [2)]부산대학교 환경공학과

연안 산업지역의 대기질 관리에서는 배출 저감의 효과와 기상 변동에 따른 농도 변화를 구분해야 하나, 배출량과 관측 농도를 단순 비교하면 기상 변동이 그 관계를 교란하여 정책 효과를 판단하기 어렵다. 여수, 순천, 광양(YSG)은 석유화학 단지(여수), 제철소와 항만(광양), 비산업 수용지(순천)가 인접하고 해륙풍 수송이 빈번하여 이러한 교란이 특히 크다. 본 연구는 2015년부터 2023년까지 국가 대기오염물질 배출량 자료(CAPSS)와 에어코리아(AirKorea) 도시대기측정소 관측 농도를 대상으로, 기상 영향을 통제한 뒤에도 배출량이 농도 변동을 추가로 설명하는지 평가하였다. 주성분분석(PCA)과 월별 랜덤포레스트(RF)로 기상이 지배하는 변동 구조를 파악한 뒤, 중첩 LOOCV 기반 연간 릿지회귀로 기상 변수만 포함한 모형과 배출량을 함께 포함한 모형의 예측 성능을 NO_2, SO_2, CO, $PM_{2.5}$, PM_{10} 및 O_3에 대해 비교하였다. 배출량의 추가 설명력은 일부 1차 오염물질과 도시 조합에서만 확인되었고, 배출원과 측정소가 해륙풍 경로상 정렬되지 않는 조합에서는 오히려 예측 성능이 낮아졌다. $PM_{2.5}$, PM_{10} 및 O_3는 대부분의 도시에서 추가 설명력이 없었다. 또한 광양의 CO에서는 배출량 보고 체계가 확대된 시점을 전후로 배출량과 관측 농도가 반대 방향으로 변화하여, 인벤토리 자체의 불연속이 배출량과 농도의 관계 해석을 왜곡할 수 있음을 확인하였다. 이는 배출 인벤토리의 신호의 검출 가능성이 배출량 규모가 아니라 기상에 의해 조절되는 배출원과 수용지의 결합 정도에 의존함을 시사한다.

사사 본 논문은 2026년도 교육부 및 전라남도의 재원으로 전라남도RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2026-RISE-14-007). 기술 자문과 협조를 제공해 주신 (주)송림에 감사드립니다.

4G2

Pd 황화 처리 기반 MoS_2 상 제어를 통한 알칼라인 수소 발생 반응 향상을 위한 연구

Pd Sulfidation-Induced Phase Engineering of MoS_2 for Enhanced Alkaline Hydrogen Evolution Reaction

정다운[1),2)], 트란민녹[1)], 배기남[1),2)], 전기준[1),2)]

[1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터

기후변화 대응을 위한 그린수소 생산 확대로, 수전해 기반 비귀금속 수소 발생 반응(hydrogen evolution reaction, HER) 촉매 개발이 핵심 과제로 대두되고 있다. 이중 이황화몰리브덴(molybdenum disulfide, MoS_2)은 이론적으로 기저면 전체가 활성점이 될 수 있는 비귀금속 HER 촉매로 주목받고 있다. MoS_2는 결정상에 따라 반도체성 2H 상과 금속성 1T 상으로 구분되며, 전기전도도가 높은 1T 상이 HER에서 유리하지만 2H→1T 상전이 유도가 어렵고 형성된 1T 상은 열역학적으로 불안정하다는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 3차원 지지체에 MoS_2를 직접 성장시킨 후 팔라듐(Pd) 황화 처리로 1T 상 분율을 높여, 활성과 안정성·전도도를 동시에 확보하고자 하였다. 이를 위해 니켈폼(nickel foam, NF)에 그래핀(graphene) 중간층 형성 후 MoS_2를 수열합성하여 MoS_2/G/NF 구조를 합성하고, Pd 황화 처리로 2H→1T 상전이를 유도하였다. Pd 황화 진행에 따라 표면에 Pd_xS_y 나노클러스터가 형성되며 1T/2H 상비가 증가했고, 이는 원자 재배열에 기인한 것으로 보이며 다층 구조에서도 기저면 활성점 밀도를 높일 수 있음을 시사한다. 적절한 황 주입 조건의 최적 시료는 알칼라인 HER에서 146 mV의 과전압(10 mA cm^{-2})과 80 mV dec^{-1}의 Tafel 기울기를 나타냈으며, 장기 안정성도 향상되었다. 본 연구는 Pd 황화 유도 상전이가 MoS_2 기저면을 활성화하는 상 제어 전략으로 활용될 수 있음을 제시한다.

사사 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. RS-2024-00416902)과 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2024-03-03-002)을 받아 수행하였습니다.

4G3

서울 도시열섬현상에서 인공열과 쿨루프의 상호작용에 따른 냉각 효과 및 시너지 분석

Impact of Anthropogenic Heat and Cool Roof Interactions on the Atmospheric Environment in Seoul, South Korea

손현민[1], 한범순[1,2]

[1]인하대학교 환경공학과, [2]수도권 미세먼지연구·관리센터

본 연구에서는 Weather Research and Forecasting (WRF) 모델을 이용하여 2018년 7월 20일부터 8월 21일까지 서울을 대상으로 인공열(Anthropogenic Heat, AH)과 쿨루프(Cool Roof)의 상호작용이 도시 열섬에 미치는 영향을 분석하였다. AH과 Cool Roof 적용 여부에 따라 4가지 수치 모의를 수행하였다. 분석 결과 AH 효과는 주로 야간 및 오전에 강하게 나타났으며, planetary boundary height가 낮은 조건에서는 AH가 sensible heat flux에 큰 영향을 미치면서 2-m 기온을 상승시키고 도시풍을 강화시키는 경향을 보였다. 반면 Pure Cool Roof 효과는 주간 시간대에 강하게 나타났으며, Sensible heat flux와 2-m 기온을 감소시키는 동시에 도시풍을 약화시켰다. 또한 시너지 효과는 주간 시간대에 강했으며 특히 17:00 LST에서 두드러졌다. 이는 해당 시간대의 AH 효과의 기여도가 감소하면서 sensible heat flux가 감소했기 때문이다. 일평균 기준 2-m 기온의 변화량은 AH 효과, Pure Cool Roof 효과, 그리고 시너지 효과에 대해 각각 약 +0.5℃, -0.8℃, +0.04℃로 나타났다. AH와 Cool Roof 및 시너지 효과가 지표면 온도와 바람 조건에 미치는 영향은 플라스틱 제조 및 재활용 시설과 같이 대기오염물질이 배출되는 산업시설에서의 대기오염물질 거동을 이해하는 데 활용될 수 있다.

사사 이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 탈플라스틱 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

4G4

머신러닝 기반 VOCs 반응성 지수(MIR·SOAP) 예측 모델 개발 및 활용 연구

Development of Machine Learning Models for VOCs Reactivity Indices (MIR and SOAP) and Their Use in OFP and SOAP Assessment of Industrial Emission Sources

이창주, 장예진, 레띠황옌[1], 전기준[1,2], 윤종상

가톨릭대학교 에너지환경공학과, [1]수도권 미세먼지연구·관리센터, [2]인하대학교 환경공학과

휘발성유기화합물(VOCs)의 오존생성기여도(OFP)와 2차 유기에어로졸 형성 잠재력(SOAP) 산정에는 화학종별 반응성 지수(MIR_i, $SOAP_i$)가 필요하다. 그러나 PAMS·TO-11A·TO-14A·TO-15A 체계로 정량되는 화학종 중 $SOAP_i$ 31종, MIR_i 16종은 문헌값이 부재하여, 농도가 확보되더라도 반응성 평가에서 제외되어왔다. 이는 배출원 프로파일이 구축되더라도 반응성 평가가 측정 범위의 일부에만 국한된다는 구조적 한계를 의미한다. 본 연구는 분자 구조 정보로부터 반응성 지수를 추정하는 머신러닝 모델을 개발하여 이러한 자료 공백을 보간하고자 하였다. $SOAP_i$ 예측에는 Derwent (2010)의 109종 데이터셋을 기반으로 화합물군, 분자량, 원소 조성, 불포화도(DBE), 분지도, 방향족성 등 10개 분자 구조 기술자를 입력변수로 하는 SVR 모델(R^2 = 0.886)을, MIR_i 예측에는 Carter (2010)의 794종 데이터셋에 Morgan Fingerprint와 물리화학적 특성 5종을 결합한 XGBoost 모델(R^2 = 0.718)을 각각 구축하였다. 개발한 모델은 배출원의 굴뚝 실측 자료에 적용하여, 문헌값이 부재한 화학종까지 포함한 OFP·SOAP 기여도를 재산정하였으며, 이를 통해 자료 공백이 각 지표의 산정 결과에 미치는 영향을 정량적으로 비교하였다. 본 연구는 반응성 지수가 부재한 화학종을 평가 불가에서 추정 가능 영역으로 전환하는 방법론을 제시하며, 산출된 반응성 지수는 여타 산업 배출원의 OFP·SOAP 평가에도 그대로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25501461).

4G5

전북특별자치도 배출원별 암모니아의 잉여 특성과 초미세먼지 생성 기여 가능성 평가

Ammonia Excess by Emission Source and Its Potential Contribution to PM-2.5 Formation in Jeonbuk State, Republic of Korea

조민준[1], 최예빈[1], 김용현[1),2),3)]

[1)]전북대학교 기후환경에너지융합학과, [2)]전북대학교 환경공학과, [3)]전북특별자치도 환경보건센터

암모니아(NH_3)는 대기 중 질소산화물 및 황산화물과 반응하여 2차 무기에어로졸을 생성하는 초미세먼지(PM-2.5)의 주요 전구물질이다. 본 연구에서는 전북특별자치도의 배출원별 대기 중 NH_3 농도와 PM-2.5의 시공간적 분포를 규명하고, 대기 중 농도와 배출량 자료를 함께 이용하여 NH_3 잉여도와 PM-2.5 생성 기여 가능성을 평가하였다. 선행연구(2025년: 1차 연도)를 통해 도출된 고농도 배출원인 축사(완주)와 산업단지(전주) 및 배경지역(전주)에서 2026년 1월부터 7월까지 총 28주간 겨울·봄·여름철 NH_3와 PM-2.5를 동시 측정하였다. NH_3는 패시브 샘플러로 주 단위 누적 채취 후 이온크로마토그래피로 정량하였고, NH_3/PM-2.5 상대농도의 지수회귀분석과 국가 대기오염물질 배출량 자료(CAPSS) 기반 NH_3/산성가스 몰비 산출을 병행하였다. 평균 NH_3 농도는 축사 29.7 ppb, 산업단지 14.4 ppb 및 배경지역 11.6 ppb로 지점 간 차이가 유의하였으나($p<0.001$), PM-2.5는 18.2~20.6 $\mu g\ m^{-3}$ 범위에서 유의한 차이가 없어($p = 0.646$) NH_3는 국소적으로, PM-2.5는 광역적으로 분포함이 확인되었다. 계절적으로 축사 NH_3는 겨울 23.8 ppb에서 봄 31.5 ppb로 증가한 후 여름에도 유지된 반면 PM-2.5는 겨울 대비 51~55% 감소하여 상반된 거동을 보였다. 회귀식에서 산출한 NH_3 최대점(apex)은 축사 약 35.0 ppb로 고농도 시기에 잉여 조건에 도달하였으며, CAPSS 몰비 역시 완주군 1.43(잉여), 전주시 덕진구 0.29(제한)로 대비되어 농도와 배출량이라는 독립적인 두 경로에서 동일한 결론이 도출되었다. 따라서 전북지역 PM-2.5 관리에는 NH_3의 배출량과 잉여도가 모두 높은 축산지역의 우선 관리와 권역 단위 접근이 요구된다.

사사 본 연구는 2026년도 전북녹색환경지원센터의 연구사업비 지원을 받아 연구되었음(Project No. 26-JB-02).

4H1

향 연소 시 나노입자 및 VOCs 배출 특성과 건강영향 평가

Characteristics of Nanoparticle and VOCs Emissions from Incense Combustion and Health Impact Assessment

김민선, 레티황이엔[1], 윤준혁[2], 박세은[2], 전기준[1),2)], 윤종상

가톨릭대학교 에너지환경공학과, [1)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [2)]인하대학교 환경공학과

향은 생활화학제품으로 관리되고 있으나, 실제 사용 과정에서 배출되는 나노입자 및 VOCs (Volatile Organic Compounds)의 배출 특성과 건강영향에 대한 정보는 충분하지 않다. 향 연소 과정에서는 입자뿐만 아니라 Benzene, Toluene, Ethyl Benzene, Xylene (BTEX) 및 1,3-Butadiene 등 연소·열분해로 인해 유해 VOCs가 발생할 수 있다. 특히 Benzene과 1,3-Butadiene은 International Agency for Research on Cancer (IARC) Group 1 발암물질로 분류되므로 실제 사용 조건에서의 배출 특성, 호흡기 침착 및 인체 위해성을 통해 건강영향을 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 스틱 형태 및 콘 형태의 향 연소 시 발생하는 나노입자와 VOCs를 동시 측정하고, 입경별로 호흡기 침착 및 잠재적 건강영향을 평가하였다. 약 247.37 L 챔버에서 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)를 이용하여 향 연소 중 및 연소 후의 입자 수농도와 입경 분포를 측정하였다. 유효밀도를 적용하여 공기역학적 직경으로 산정하고, 연령별 호흡기 침착계수를 이용하여 부위별 Lung-Deposited Surface Area (LDSA)를 추정하였다. VOCs와 카보닐류는 각각 흡착관 및 DNPH cartridge로 포집하여 TD-GC/MS와 HPLC로 분석하였다. 검출된 주요 VOCs를 대상으로 발암성 분류 및 독성참고치를 적용하여 흡입 노출에 따른 위해성평가를 수행하였다.

4H2

AVOCs 노출에 따른 실내식물의 BVOCs 배출 특성 및 화학적 스트레스 반응 분석

Analysis of BVOCs Emission Characteristics and Chemical Stress Responess of Indoor Plants Exposed to AVOCs

이수현, 윤종상

가톨릭대학교 에너지환경공학과

실내환경에서 식물은 다양한 생물기원 휘발성유기화합물(BVOCs)을 배출하며, 이들의 배출 특성은 광량, 온도, 습도 등의 환경조건뿐 아니라 외부 스트레스 요인에 의해 변화할 수 있다. BVOCs는 이소프렌, 모노테르펜, 세스퀴테르펜 등을 포함하며, 대기 중 산화반응을 통해 오존 및 2차 유기 에어로졸(SOA) 형성에 관여한다. 한편, 인위적 휘발성유기화합물(AVOCs)은 실내 환경의 주요 오염물질로 존재하며, 선행 연구에서는 일부 AVOCs가 식물의 생리적·생화학적 변화를 유발하여 화학적 스트레스 요인으로 작용될 수 있음이 보고되어왔다. 그러나 기존의 실내식물 관련 연구는 주로 실내 식물의 공기정화 능력과 오염물질 제거 효율에 초점을 두어 왔으며, AVOCs 노출 연구 또한 단일 물질을 중심으로 수행되어 왔다. 따라서 다양한 AVOCs가 복합적으로 존재하는 조건에서 식물의 스트레스 반응이 BVOCs의 조성 및 배출량 변화에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 상대적으로 미비한 실정이다. 본 연구에서는 다양한 광량 조건에서 실내 식물로부터 자연적으로 배출되는 BVOCs의 배출 특성을 확인하고, 복합 AVOCs 작용될 수 있음이 보고되어왔다(PAMS, TO-14 등). 노출 전·후의 BVOCs 조성 및 배출량 변화 비교를 통해 AVOCs 노출에 따른 화학적 스트레스 반응을 분석하고자 하였다. 이를 위해 dynamic chamber을 제작하여 측정 환경을 구축하였고, 국내에서 널리 이용되는 실내 공기정화식물을 대상으로 광 조건 변화에 따른 VOC 배출 특성을 분석하였다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 「CLEAN-AIR 기술개발」 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RS-2026-25502680).

4H3

학교 인근 악취 유발물질 탐색을 위한 기체상 오염물질 모니터링 및 특성 분석

Monitoring and Characterization of Gaseous Pollutants for the Identification ofOdor-Causing Compounds near School

윤찬호, 이태윤, 채석병

한국기술교육대학교 기계공학부

대기 오염물질들은 사람의 육안으로 식별이 가능하지만 악취물질은 후각에 의해서만 식별이 가능한 경우가 많다. 특히 악취가 많이 발생되는 업종으로는 농·축산업, 화학공장, 하수 및 분뇨 처리장 등이 있으며 공장의 굴뚝과 같은 단일 배출장소에서 배출되는 등 발생원이 다양하다. 악취 오염물질들은 황화수소, 알데히드, 아민류 및 암모니아와 같이 자극성이 있는 기체상 물질들이 사람의 후각을 자극하여 냄새가 나는 물질들이다. 악취 물질은 많은 종류의 물질들이 대기에 방출됨으로써 발생되는 환경오염으로 여러 측면에서 복잡한 특성을 지니고 있고, 단일물질에 의한다기보다는 많은 종류의 화합물들이 복합적으로 나타난다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 학교 인근에서 국지적으로 발생하는 악취의 잠재적 배출원을 규명하고, 기상 조건에 따른 기체상 오염물질의 농도 및 거동 특성을 파악하기 위해 광이온화(PID) 및 전기화학(EC) 센서 기반의 in-house 모니터링 시스템을 구축하였다. 구축된 시스템을 활용하여 악취 발생 시 동반 유입될 수 있는 대표적인 기체상 지표물질인 휘발성 유기화합물(VOCs), 이산화황(SO_2) 및 이산화질소(NO_2)의 농도 변화를 1분 단위로 장기간 연속 측정하였다. 또한, 측정된 오염물질의 농도 변화와 기상 조건을 종합적으로 분석하여 인근에 위치한 자동차 부품 제조시설, 폐기물 처리시설 및 농·축산 시설 등 잠재적 배출원과 악취 발생 간의 연관성을 파악하고자 하였다.

사사 본 연구는 한국기술교육대학교 학술연구진흥과제의 지원을 받아 수행된 연구임.

4H4

수관 내 조도 차이를 이용한 도심 수목의 나노미세먼지(Ultrafine Particles) 저감 특성

Characterizing the Effects of Urban Tree on Ultrafine Particles (UFPs) Concentrations Using Lux Measurement

서성민, 최원식

부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공

도시 환경에서의 나노미세먼지(Ultrafine particles, UFPs; <100 nm)는 화석연료 연소, 특히 차량 연료 연소에 의해 발생한다. 나노미세먼지는 입자 질량 농도에는 거의 기여하지 않지만, 도시 대기 중 입자 수 농도(Particle Number Concentration, PNC)의 대부분을 차지할 수 있다. 또한 나노미세먼지는 크기가 매우 작아, 브라운 운동과 식생 표면으로의 침적을 포함한 확산 지배 과정의 영향을 크게 받는다. 다만, 개별 수목 내 잎의 분포가 나노미세먼지 농도에 미치는 영향은 아직 충분히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 도심 수목의 수관 내부에서 잎의 분포에 따른 광환경 차이가 나노미세먼지 농도 저감에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 수목에서 잎이 분포하는 수관층과 수목에서 약 1 m 떨어진 가로등에서 나노미세먼지의 수 농도와 입자 크기를 동시에 측정하였다. 나노미세먼지 수 농도와 입자 크기 측정에는 DiSCmini (Diffusion Size Classifier Miniature, Testo, Germany)를 사용하였다. 각 측정 지점의 광환경은 BH1750 조도 센서를 이용하여 lux 단위로 정량화하며, 수목 내 지점과 수목 인접 비수관 지점간의 상대적인 조도 차이를 잎의 피복 정도와 수관 밀도를 간접적으로 나타내는 지표로 활용하였다. 두 측정 높이에서 관측된 수 농도의 차이를 이용하여 나노미세먼지 저감률을 산출하고, 이를 조도 차이와 비교 및 분석함으로써 수관 내 잎 밀도가 나노미세먼지 저감에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

사사 이 논문은 2026년도 국립환경과학원(NIER-2026-01-02-019)의 지원을 받아 수행하였습니다.

4H5

SP-AMS를 활용한 서울 겨울-초봄 대기 중 유기 에어로졸 및 refractory black carbon의 발생원별 특성 규명

Source-Resolved Characterization of Organic Aerosol and Refractory Black Carbon in Seoul during Late Winter and Early Spring Using SP-AMS

홍준영, 권수진, 문지혜, 김화진

서울대학교 보건대학원

화석연료 연소 및 biomass burning은 primary organic aerosol (POA)과 refractory black carbon (rBC)의 중요한 배출원이며, 이들 성분의 발생원별 연계 특성은 탄소성 에어로졸의 배출 특성 및 대기 중 변환 과정을 이해하는 데 중요하다. 그러나 일반적인 aerosol mass spectrometer (AMS) 기반 PMF는 non-refractory OA fragment에 기반하므로, 개별 OA factor에 대한 rBC의 기여와 연계 특성을 정량적으로 평가하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 2025년 2월부터 3월까지 서울대학교 관악 캠퍼스에서 SP-AMS를 이용하여 초미세입자의 화학 조성 및 연소 배출 특성을 분석하였다. SP-AMS는 텅스텐 vaporizer만을 작동한 laser-off mode와 텅스텐 및 intracavity laser vaporizer를 동시에 작동한 laser-on mode를 교대로 운전하였다. rBC 정량을 위해 Regal Black 표준입자를 이용한 검량을 수행하였다. Laser-off mode에서 획득한 고분해능 OA 질량스펙트럼 PMF 분석 결과, 차량 기반 OA (HOA), 요리 기반 OA (COA), 바이오매스 연소 OA (BBOA), 및 두 개의 oxygenated OA를 포함한 총 5개 오염원이 도출되었다. 오염원별 기여율은 HOA 17%, COA 19%, BBOA 14%, OOAs 50%로 나타났다. 본 연구에서는 NR-PM1.0의 유기 에어로졸 오염원 분석과 rBC를 포함한 PM1.0 유기 에어로졸 오염원을 비교·분석한다. 이를 통해 HOA 및 BBOA와 같은 POA뿐 아니라 OOA와 연계된 rBC의 특성을 해석하여, 서울 겨울-초봄 대기 중 탄소성 에어로졸의 발생원별 특성 및 대기 중 변환 과정을 규명하고자 한다.

사사 본 연구는 과학기술정보통신부(MSIT)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2025-00514570).

Session 5A 측정·분석

좌장 : 김성준 [국립창원대학교]

5A1) 국내 항공관측을 이용한 겨울철 서해 및 수도권 상공의 메탄 분포 특성
5A2) 방콕 지역 에어로졸 화학·광학 특성의 지상 기반 규명 및 위성 관측에 대한 시사점
5A3) AE-DP 시뮬레이션을 이용한 스캐닝 라이다 관측의 물입자 영향 보정 연구
5A4) Seasonal Variations of Planetary Boundary Layer Height and Their Association with the Characteristics of High-$PM_{2.5}$ Episodes in Ulsan, Korea
5A5) 화학물질배출이동량과 유해대기물질측정망 자료를 연계한 XGBoost 기반 전국 VOCs 공간 농도 추정

Session 5B 측정·분석

좌장 : 박풍모 [안산미래연구원]

5B1) 국내 주요 산업항만 대기 중 다환방향족탄화수소 유도체의 오염특성과 2차 생성 기여
5B2) 실시간 대기관측을 위한 저전력 소형 LED 라이다 개발
5B3) 토양, 수피, 솔잎 중 38종 과불화화합물의 동시 분석을 위한 LC-MS/MS 분석법 최적화
5B4) ASIA-AQ 겨울 캠페인 중 서울의 입자상 질산염 생성 특성
5B5) 전류측정식 가스센서를 이용한 고층 오존 농도 관측

Session 5C 대기환경모델링·AI

좌장 : 이형주 [포항공과대학교]

5C1) 다중 규모 이종 그래프 기반 고해상도 대기질 추론: 잠재 공간 융합과 명시적 스케일 분해의 비교
5C2) 산불 배출에 따른 풍하 지역의 인위적 황산염 생성 억제
5C3) 다중 환경변수 기반 N_2O_5 비균질 반응 모수화의 지역 간 전이성 평가
5C4) 지역 특성 기반 대기오염물빌 배출 유형화와 유형별 배출량 예측
5C5) 딥러닝 기반 다운스케일링을 적용한 시간별 1km 지표 대기 오염물질 농도 추정: 한국을 중심으로

Session 5D 원격탐사·센서

좌장 : 신동호 [한국에너지기술연구원]

5D1) 스캐닝 라이다 기반 입자크기별 질량소산효율과 질량·광학 입경특성의 지역적 비교
5D2) 산업단지 내 악취성 VOCs 추적감시를 위한 원격감시 및 AI 융합 기반 예측모델 개발(1단계)
5D3) AERONET 관측자료 기반 도시 대기오염 입자의 미세·조대 모드별 광학 특성 분석
5D4) 에어로졸 스캐닝 라이다를 이용한 항만 및 도시 지역의 고해상도 미세먼지 공간분포
5D5) 대류권계면 기반 오존 기후값을 사전정보로 활용한 IASI 오존 연직분포 산출 개선

Session 5E 기후변화·에너지

좌장 : 여민주 [연세대학교]

5E1) Ni(111) 결정면과 산소 결함의 시너지 조율을 통한 구연산 개질 Ni/CeO_2 촉매의 CO_2 메탄화 성능 향상
5E2) 시흥시 온실가스 배출 특성 및 변화 요인 분석
5E3) 도시의 단기체류성 기후변화 유발물질 및 온실가스 통합 인벤토리 구축: 환경산업연관분석을 적용한 서울시 소비기반 접근
5E4) 국내 친환경선박 보급·인증 동향 및 소형 전기추진선박 해상실증 사례

Session 5F 실태·배출관리

좌장 : 이임학 [서울시립대학교]

5F1) 2023년 국내 간접온실가스 전구체 물질 배출량 산정 및 분석
5F2) 2023년도 국가 대기오염물질 배출량 산정 및 분석
5F3) 배출량 저감 관점에서의 권역별 대기환경관리 계획 진단과 정책적 시사점
5F4) 대기오염도검사 결과를 이용한 대기오염물질 배출특성 연구

Session 5G [대기위해성분과회 특별세션] 빅데이터 및 AI 기반 기후변화-대기오염의 건강영향 연구

좌장 : 김세라 [한국환경연구원]

5G1) 사전학습 기반 딥러닝을 이용한 전국 $PM_{2.5}$ 측정소의 일별 화학조성 추정
5G2) 웨어러블 및 환경자료와 대규모 언어모형을 연계한 장애인 맞춤형 기후보건 연구
5G3) 대기오염 장기노출과 파킨슨병 연관성
5G4) 미세먼지 노출과 소아·청소년 알레르기질환의 관련성: 아토피피부염과 천식을 중심으로
5G5) 임신 전/중/후 초미세먼지 노출과 아동의 사회적 반응성의 연관성

Session 5H [특별세션] (Closed Session) 대기배출원의 정밀측정·추적을 위한 통합 플랫폼 기술 개발

좌장 : 전기준 [인하대학교]

5H1) 산단 일반대기 정밀측정용 측정 차량 설계 및 고해상도 시각화 플랫폼 개발
5H2) 고온 배출원 배출물질 정밀 측정을 위한 전처리 장치 소형화 기술 개발
5H3) SIFT-MS 기반 산업단지 이동측정 데이터 표준화 및 QA/QC 체계 구축 방안 연구
5H4) 대기배출원 데이터베이스 구축 및 이동차를 활용한 배출원 분석 시각화 방안

Session 5I [특별세션] 고농도 오존 hot-spot 관리 I

좌장 : 최용주 [한국외국어대학교]

5I1) 다양한 관측 플랫폼을 활용한 오존 입체 감시
5I2) 온·오프라인 GC-FID/MS 측정 기반 여수 산업지역 C_2-C_5 VOCs의 오존 생성 잠재력 평가
5I3) ECC 오존존데 기반의 대기 오존 프로파일링 및 활용 연구
5I4) 오존 생성과 위해 유기성분 발생의 상호연관성
5I5) 지표원격관측을 통한 오존 생성 전구물질의 연직 분포 파악

5A1

국내 항공관측을 이용한 겨울철 서해 및 수도권 상공의 메탄 분포 특성

Characteristics of Wintertime Atmospheric Methane Distributions over the West Sea and the Seoul Metropolitan Area Based on Aircraft Observations

손지훈, 강석원, 김주한, Amila, 김민석, 이준석, 박진수[1], 김종호[2], 서범근[2], 이미선[3], 김정호[4], 조재호[5], 이태형

한국외국어대학교, [1]국립환경과학원, [2]한서대학교, [3]국립공주대학교, [4](주)열린공간, [5](주)에이알티플러스

대기 중 메탄(CH_4)은 높은 온난화 효과를 지닌 주요 온실가스로, 화석연료 사용, 농축산 활동 및 폐기물 처리 등 다양한 배출원에서 발생한다. 한반도는 국내 배출과 계절풍을 통한 국외 기단의 영향을 함께 받을 수 있어 메탄의 공간적·연직적 분포를 파악할 필요가 있다. 그러나 지상관측만으로는 상층의 농도 변화와 수송 고도를 확인하는 데 한계가 있어 항공관측을 통한 입체적인 분석이 요구된다. 본 연구에서는 국내 항공관측 자료를 이용하여 겨울철 서해 유입권역과 수도권 상공의 메탄 분포 특성을 조사하였다. 이를 통해 외부 유입 공기의 주요 이동 경로인 서해와 다양한 인위적 배출원의 영향을 받을 수 있는 수도권의 지역적 차이를 비교하고자 하였다. 2022년부터 2025년까지 수행된 세 차례 겨울철 관측자료를 대상으로 비행 구간별 자료를 평균화하고, 지역 및 시즌에 따른 메탄 농도의 빈도분포를 비교하였다. 또한 고도에 따른 연직 프로파일을 확인하고, 고농도 사례에서 나타난 메탄의 수평·연직 분포 특성을 함께 살펴보았다. 분석 결과, 메탄의 주요 농도 분포 구간과 변동 폭은 관측지역과 시즌에 따라 차이를 보였으며, 연직 분포에서도 고도에 따른 농도 변화가 확인되었다. 일부 비행에서는 특정 구간과 고도에서 상대적으로 높은 메탄 농도가 관측되어, 지역 배출과 외부 유입 및 대기 혼합 과정이 복합적으로 작용할 가능성을 보여주었다. 본 연구는 국내 겨울철 메탄의 공간적·연직적 분포 현황을 제시하고, 향후 고농도 발생 원인과 배출원 영향을 규명하기 위한 기초자료를 제공한다.

사사 본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2026-01-01-003).

5A2

방콕 지역 에어로졸 화학·광학 특성의 지상 기반 규명 및 위성 관측에 대한 시사점

Ground-Based Characterization of Aerosol Chemical and Optical Properties and Their Implications for Satellite Observations over Bangkok

미슈라 샬리니[1], 이은아[1], 김주영[1], 최시영[1], 임하늘[1], 이기열[3], 우설아[3], 최용주[3], 권형안[4], 이재형[5], 이상헌[5], 장임석[6], Nuntikorn Kitratporn[7], Natdanai Punsin[7], Budsaba Uamkasem[7], Parkpoom Choomanee[8], Surat Bualert[8], 임세희[1),2)]

[1)]충남대학교 환경IT융합공학과, [2)]충남대학교 환경공학과, [3)]한국외국어대학교 환경학과, [4)]수원대학교 환경에너지공학과,
[5)]공주대학교 대기과학과, [6)]국립환경과학원 대기환경연구과, [7)]Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (GISTDA),
[8)]Department of Environmental Science, Kasetsart University

Particulate matter (PM) pollution in Southeast Asia is strongly influenced by light-absorbing aerosols, including black carbon (BC) and brown carbon (BrC). However, source and processing-dependent variability leaves the relationship between ground-level absorption (b_{abs}) and enhancement (E_{abs}) and column optical observations poorly constrained. Ground-based measurements were conducted in Bangkok, during February-March 2026, with size-resolved PM sampling for chemical and optical analysis with in-situ BC and E_{abs} measurements using an Aethalometer-Thermodenuder. Fine particles (0.49-1.5 μm) dominated, averaging 27.9±12.1 $\mu g\ m^{-3}$, with equivalent BC (eBC) accounting for 14.7±8.9%. Back-trajectory clustering identified four air-mass regimes. Continental transport showed elevated eBC (~29% of fine-PM mass) and E_{abs} of 1.34. Aged local air exhibited the highest water-soluble organic carbon (WSOC – 1.1 $\mu g\ m^{-3}$) and BrC absorption with equivalent contribution (~1:1 ratio) from WSOC and water insoluble organic carbon (WInSOC). Coastal mixed and marine air masses showed comparatively cleaner characteristics. Column optical properties from AERONET and GEMS were examined with the ground-based chemical and optical measurements. These observations provide insight into how aerosol composition and atmospheric processing may influence the interpretation of column optical properties.

사사 This research was supported by Geostationary Environment Monitoring Spectrometer – Air Quality (GEMS-AQ) under grant NIER-2025-04-02-114 and by BK21 FOUR program of the National Research Foundation of Korea (NRF).

5A3

AE-DP 시뮬레이션을 이용한 스캐닝 라이다 관측의 물입자 영향 보정 연구

Correction of Water Droplet Effects in Scanning LiDAR Observations Using AE-DP-Based Simulations

이유선, 신주선, 김덕현[1], 노영민

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, [1]국립한밭대학교 기초과학부

스캐닝 라이다(LiDAR)는 대기 중 에어로졸의 시·공간적 분포를 원격으로 관측할 수 있어 넓은 영역에서 에어로졸의 분포 특성을 파악하고 시각화하는 데 효과적으로 활용되고 있다. 그러나 대기 중 물입자는 강한 산란 신호를 발생시켜 고농도 에어로졸 신호처럼 나타날 수 있다. 이러한 물입자에 의한 과잉 신호는 라이다를 이용한 에어로졸 공간분포 해석 과정에서 불확실성을 증가시킬 수 있으므로, 입자의 광학적 특성을 이용하여 물입자를 구분하고 그 영향을 보정하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 이중 파장 스캐닝 라이다 관측에서 물입자에 의해 발생하는 신호를 보정하기 위한 시뮬레이션 기반 방법을 제안하였다. 입자의 크기 특성을 나타내는 옹스트롬 지수(Ångström exponent, AE)는 532 nm와 1064 nm에서 산출된 소산계수를 이용하여 계산하였으며, 입자의 비구형성을 나타내는 편광소멸도(Depolarization ratio, DP)는 532 nm의 편광 후방산란 신호를 이용하여 산출하였다. 다양한 입자 크기분포에서의 물 분율(water fraction)을 가정하여, 이에 따른 AE, DP 및 파장별 소산계수의 변화를 수치적으로 모의하고, 이를 기반으로 AE-DP 특성 공간을 구축하였다. 이후 실제 라이다 관측에서 산출된 AE와 DP를 시뮬레이션 결과와 비교하여 각 지점에 대한 물 분율을 추정하였다. 추정된 물 분율을 바탕으로 물입자가 소산계수에 미치는 영향을 제거하고, 보정 전·후의 에어로졸 공간분포를 비교하였다. 분석 결과, 물입자의 영향을 받은 구간에서 나타난 높은 소산계수가 보정 후 효과적으로 감소하였으며, 물입자의 영향이 상대적으로 작은 에어로졸 영역의 공간적 신호 특성은 유지되는 것을 확인하였다. 또한 AE와 DP를 동시에 활용하면 입자의 크기와 형상에 대한 정보를 함께 고려할 수 있어 물입자와 에어로졸을 효과적으로 구분할 수 있음을 확인하였다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 RS-2026-25501396).

5A4

Seasonal Variations of Planetary Boundary Layer Height and Their Association with the Characteristics of High-$PM_{2.5}$ Episodes in Ulsan, Korea

Dat Nguyen, 주정태, 최성득

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

Planetary boundary layer height (PBLH) affects atmospheric mixing and pollutant accumulation, but its seasonal patterns in coastal areas may differ from those in inland regions. In this study, seasonal variations in PBLH were characterized, and high-$PM_{2.5}$ episodes occurring under different mixing and ventilation conditions were compared in Ulsan, South Korea. PBLH derived from ERA5 reanalysis data was higher in spring and winter and lower in summer near the coast, in contrast to findings from previous studies conducted in inland regions of Korea. Two high-$PM_{2.5}$ episodes in winter were classified into a normal-ventilation event (E1) and a low-PBLH, weak-ventilation event (E2). Although E2 had a lower PBLH and weaker ventilation, the mean $PM_{2.5}$ concentration was higher in E1 (47.3 $\mu g/m^3$ vs. 39.9 $\mu g/m^3$). In both episodes, nitrate was the dominant ionic species, with sulfate, nitrate, and ammonium (SNA) accounting for about 95% of the inorganic ions. Trace element profiles suggested a stronger influence of crustal or resuspended dust in E1 and a greater contribution from industrial or combustion sources in E2. Backward trajectories indicated mainly continental transport from the west and northwest in E1 and marine transport pathways in E2. CBPF suggested potential source areas to the west and northwest in E1 and industrial influence from the north and northwest in E2. These results indicate that PBLH, ventilation conditions, source characteristics, and transport pathways should all be considered when interpreting high-$PM_{2.5}$ episodes in coastal areas.

5A5

화학물질배출이동량과 유해대기물질측정망 자료를 연계한 XGBoost 기반 전국 VOCs 공간 농도 추정

Nationwide Spatial Concentration Estimation of VOCs Using XGBoost Integrated with Pollutant Release and Transfer Register (PRTR) and HAPs Monitoring Network Data

남일권[1),2)], 정소영[1)], 서석준[1)], 임용재[1)], 안준영[1)], 강대일[1)], 성지원[1)], 류승훈[3)], 정승국[4)], 최용주[2)]

[1)]국립환경과학원 대기환경연구부, [2)]한국외국어대학교 환경공학과, [3)]수도권대기환경청 조사분석과, [4)]한국환경공단 대기측정망부

전국 64개소에 불과한 유해대기물질측정망은 공간적 제약으로 인해 전국 단위의 세밀한 휘발성유기화합물(VOCs) 공간 분포를 파악하고 국지적 고농도 사각지대를 감시하는 데 한계가 있으며 회귀분석시 과대 혹은 과소평가되는 경우가 있다. 또한 화학물질 배출·이동량(PRTR) 정보는 상세한 점오염원 좌표를 제공하지만 도심지 내 교통 및 생활계 비점오염원을 포괄하지 못하는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 64개 유해대기물질측정망의 시간 단위 실측 자료와 PRTR 점오염원 배출량, 기상 인자, 기준성 대기오염물질 그리고 전국 일반대기측정망의 2 km 반경 토지피복 데이터를 결합한 XGBoost 머신러닝 모델을 구축하여 전국 VOCs 공간 농도를 정밀 추정하였다. 모델 학습 시 2 km 버퍼 내 점오염원 배출량과 토지피복 특성, 실시간 대기 환경 인자 간의 비선형적 상호작용을 통합적으로 학습시켰다. 미측정 지점에 대한 예측 성능을 객관적으로 평가하기 위해 지점 배제 10-fold 교차검증을 수행하였으며, SHAP 알고리즘을 적용하여 오염원별 국지적 기여도를 평가하였다. 분석 결과, 산업 특화 물질(1,3부타디엔, 트리클로로에틸렌 등)은 PRTR 점배출량의 영향이 지배적인 반면, BTEX 등 방향족화합물은 공업지역뿐만 아니라 도로 및 상업 면적비의 복합 영향이 뚜렷하게 도출되었다. 학습된 모델을 전국 일반대기측정망으로 확장 적용한 결과, 유해대기물질측정망이 부재하지만 산업 및 교통 배출 부하가 중첩되는 지역에서 높은 예측 농도가 나타나는 공간적 모니터링 사각지대를 식별하였다. 본 연구는 최신 PRTR 점배출 자료와 도시 환경 대리변수를 기계학습으로 융합하여 미측정 지역의 VOCs 공간 분포를 고해상도로 재현할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 전국 단위 유해대기오염물질의 노출 평가 기반을 강화하고, 향후 대기 모니터링 체계의 공간적 대표성을 진단하기 위한 기초 자료로 활용할 수 있다.

5B1

국내 주요 산업항만 대기 중 다환방향족탄화수소 유도체의 오염특성과 2차 생성 기여

Pollution Characteristics and Secondary Formation of Atmospheric PAH Derivatives in Major Industrial Ports in South Korea

고민지, 이호영, 주정태, 김영남[1)], 홍성진[1)], 최성득

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, [1)]충남대학교 지구환경우주융합과학과

산업항에서는 화물 처리, 선박 정박, 대형 선박과 특수 차량의 운항과 운행이 활발하여 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: PAHs)가 다량으로 배출될 수 있다. 대기 중 PAHs는 일사에 의해 촉진되는 광화학 반응 과정에서 생성된 산화제 등의 영향을 받아 Nitrated PAHs (NPAHs), Oxygenated PAHs (OPAHs), Chlorinated PAHs (ClPAHs), Brominated PAHs (BrPAHs) 등의 유도체로 2차 생성될 수 있다. 본 연구에서는 옥포항(거제), 부산항, 온산항(울산)의 세 산업항을 대상으로 대기 중 PAHs와 PAHs 유도체의 농도 수준과 지역별 오염 특성을 비교하고, 일사량 등 기상 조건과 O_3과 NO_2의 농도 분포에 따른 PAHs 유도체의 2차 생성 기여를 평가하였다. 수동대기채취기(Passive Air Sampler: PAS)를 이용해 시료를 채취하고, 21종 PAHs, 17종 NPAHs, 9종 OPAHs, 13종 ClPAHs, 12종 BrPAHs를 분석하였다. PAHs와 OPAHs 농도는 부산항에서, NPAHs, ClPAHs, BrPAHs 농도는 온산항에서 가장 높았다. 부산항과 온산항에서는 여러 PAHs 유도체와 모분자 PAHs 간 유의한 양의 상관관계가 나타났으며, 부산항의 높은 일사량과 O_3 농도, 온산항의 높은 NO_2 농도를 종합적으로 고려할 때, PAHs 유도체의 2차 생성 영향은 옥포항보다 부산항과 온산항에서 상대적으로 큰 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 산업항에서 PAHs와 PAHs 유도체의 오염 특성이 지역별로 상이함을 확인하였으며, 지역별 배출 특성과 기상 조건을 고려한 PAHs 유도체의 2차 생성 평가가 필요함을 시사한다.

사사 본 연구는 해양수산부의 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(KIMST-20220534).

5B2

실시간 대기관측을 위한 저전력 소형 LED 라이다 개발

Development of a Low-Power Compact LED Lidar for Real-Time Atmospheric Monitoring

홍천상, 이권호[1)]

강원대학교 복사위성연구소, [1)]강원대학교 대기환경과학과

대기 에어로졸의 실시간 공간분포 관측은 미세먼지의 이동·확산 특성을 파악하고 대기오염 현상을 이해하는 데 중요하다. 기존 레이저 기반 라이다는 원격으로 대기 에어로졸의 연직 및 수평 분포를 관측할 수 있는 장점이 있으나, 장비의 크기와 높은 구축비용, 전력소모 및 유지관리 등의 제약으로 인해 다양한 지점에서 상시 관측망을 구축하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 개선하기 위하여 265 nm 심자외선(DUV) LED를 광원으로 이용한 저전력·소형 미니 LED 라이다 시스템을 개발하였다. 개발 시스템은 265 nm 펄스 LED 송신부, 광학 송·수신부, PMT (Photomultiplier Tube) 및 광자계수(Photon Counting) 기반 신호검출부로 구성하였다. 낮은 LED 출력에서 발생하는 미약한 대기 후방산란 신호를 효과적으로 검출하기 위해 고반복률 펄스광과 광자계수 및 신호누적 방식을 적용하였으며, 거리보정신호를 이용하여 에어로졸의 공간적 분포와 시간적 변화를 분석할 수 있도록 하였다. 또한 송·수신 광학계의 중첩 특성, 배경광 영향 및 거리별 신호대잡음비를 평가하여 근거리 대기관측 성능을 검토하였다. 개발된 미니 LED 라이다는 기존 레이저 라이다에 비해 소형화와 저전력 운용이 가능하며, 현장 설치 및 이동 관측이 용이하다는 장점을 갖는다. 향후 장기간 현장관측과 기존 대기측정장비와의 비교·검증을 통해 성능을 고도화하고, 산업단지, 도로변 및 대기오염 배출원 주변에서 미세먼지와 오염 플룸의 실시간 이동·확산을 감시하는 다지점 대기환경 관측시스템으로 활용하고자 한다.

5B3

토양, 수피, 솔잎 중 38종 과불화화합물의 동시 분석을 위한 LC-MS/MS 분석법 최적화

Optimization of an LC-MS/MS Method for Simultaneous Analysis of 38 PFASs in Soil, Tree Bark, and Pine Needles

Shudi Han, 조인규, 최성득

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

The environmental persistence, structural diversity, and distinct physicochemical properties of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) lead to different distributions across environmental matrices, thereby complicating their multimedia monitoring. This complexity poses a substantial analytical challenge, requiring reliable methods for the simultaneous quantification of multiple PFAS congeners. In this study, a liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) method was developed for the analysis of 38 PFASs. Target compounds were quantified using an isotope-labeled internal standard strategy to ensure accuracy. The chromatographic gradient elution conditions and mass spectrometry parameters, specifically collision energy (CE) and cone voltage (CV), were optimized to improve chromatographic separation and mass spectrometric response for individual analytes. The method was further applied to soil, tree bark, and pine needle samples, demonstrating matrix-dependent analytical performance. Of the 38 PFASs, 23, 11, and 10 compounds were detected in soil, tree bark, and pine needles, respectively. These results suggest the applicability of the method as a practical screening platform for multi-matrix PFASs analysis.

5B4

ASIA-AQ 겨울 캠페인 중 서울의 입자상 질산염 생성 특성

Characteristics of Particulate Nitrate Formation in Seoul during the ASIA-AQ Campaign

이현민, 이미혜, 김주애, 길준수, 최용주[1], 이강웅[1], 이지선[1], 손지환[2], 박문수[3], 김철희[4], 신선아[5], 안소이[5], 장임석[5]

고려대학교 지구환경과학과, [1]한국외국어대학교 환경학과, [2]서울특별시보건환경연구원 대기환경연구부,
[3]세종대학교 기후테크융합학과, [4]부산대학교 대기환경과학과, [5]국립환경과학원 환경위성센터

2024년 ASIA-AQ 캠페인 중 서울의 입자상 질산염 생성 특성과 농도 변화를 파악하기 위해 고려대학교 서울캠퍼스에서 지상 집중관측을 수행하였다. 관측은 1월 25일부터 3월 31일까지 수행되었으며, PM_1 및 $PM_{2.5}$ 화학조성과 HONO, HNO_3, NH_3, NO_3, N_2O_5 등 질산염 생성과 관련된 기체상 성분 및 입경분포를 분석하였다. 관측기간에는 장기간 지속되는 고농도보다 짧은 $PM_{2.5}$ 증가 사례가 반복적으로 나타났으며, 종관기상 조건에 따라 Local, Transport 및 Dust 사례로 구분되었다. Local과 Transport 조건 모두 $PM_{2.5}$ 증가와 관련되었으나, 상대적으로 높은 $PM_{2.5}$ 농도는 Transport 조건에서 주로 관측되었다. $PM_{2.5}$ 농도가 증가할수록 유기에어로졸의 상대적 기여는 감소하고 질산염의 기여가 뚜렷하게 증가하였으며, 암모늄도 함께 증가하여 고농도 조건에서 축적된 질산염이 주로 질산암모늄과 관련되어 있음을 보여주었다. 또한 PM_1과 $PM_{2.5}$ 질산염의 차이는 질산염이 PM_1 이하의 입자뿐만 아니라 더 큰 입경에도 분포할 수 있음을 시사하였다. 열역학적으로는 야간부터 오전까지 질산암모늄의 입자상 분배에 유리한 조건이 지속되었지만, 입자상 질산염은 반복적으로 늦은 오전에 최대 농도를 보여 열역학적 분배만으로 시간 변화를 설명하기 어려웠다. 측정된 HONO를 반영한 광화학 계산에서는 오전 OH가 증가하는 것으로 나타나 OH와 NO_2의 반응을 통한 HNO_3 생성 가능성을 뒷받침하였다. 반면 야간 NO_3-N_2O_5 chemistry의 영향은 사례별로 다르게 나타나 모든 고농도 기간을 공통적으로 설명하지 못하였다. 이러한 결과는 서울의 겨울철 입자상 질산염의 농도 변화가 지역 수송, 전구물질의 화학적 전환, 기체-입자 분배 및 기상 조건이 복합적으로 작용한 결과임을 보여준다.

5B5

전류측정식 가스센서를 이용한 고층 오존 농도 관측

Upper Air Ozone Concentration Monitoring Using Amperometric Gas Sensors

김선웅, 김용규, 김성훈, 이영석, 이상욱

한국표준과학연구원 물리측정본부 열유체측정그룹

성층권에 분포하는 오존은 지표에 도달하는 유해 자외선을 차단해 생태계를 보호한다. '오존구멍' 관측 이후 몬트리올 의정서 등 전 지구적인 오존층 회복 노력이 진행 중이며, 이를 위해 고층 오존 농도의 지속적인 감시가 필수적이다. 현재 표준 관측법으로는 기상풍선에 전기화학셀(ECC)을 직접 묶어 비양하는 방식이 활용된다. 1960년대 개발된 이 방식은 요오드화칼륨(KI) 수용액과 오존의 산화환원반응 시 발생하는 전류를 측정한다. 이 방식은 지표면 및 위성 관측 결과를 비교할 수 있는 정확한 기준값을 제공하지만, 관측 준비 과정이 길고 수용액 제조 조건에 따라 오차가 발생할 수 있다. 따라서 운용이 간편한 보조 관측 기법의 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다. 본 연구는 전류측정식 가스센서를 활용한 고층 오존 농도 측정 기법을 제시한다. 해당 센서는 오존이 내부로 확산해 전극에서 환원될 때 발생하는 전류를 측정하는 원리로 작동한다. 상용 센서는 주로 상압 환경의 오존 부피분율 측정용으로 제작되지만, 본 연구에서는 이를 대류권부터 약 30 km 고도까지 적용할 수 있도록 측정 시스템을 구성하였다. 나아가 센서를 최소 압력 10 hPa, 최고 농도 9 ppm의 환경 조건에서 교정하고, 확산 이론에 기초한 모델을 제시해 지시값을 오존 분압으로 환산할 수 있는 방법을 마련하였다. 이를 적용해 영덕 및 용인 지역에서 고층 오존 분압 측정을 수행하였다.

5C1

다중 규모 이종 그래프 기반 고해상도 대기질 추론: 잠재 공간 융합과 명시적 스케일 분해의 비교

Multi-Scale Heterogeneous Graph-Based High-Resolution Air Quality Inference: Comparison of Latent Fusion and Explicit Scale Decomposition

정필수, 윤희영[1)]

주식회사 건화 환경평가부, [1)]안양대학교 환경에너지공학과

대기오염물질 농도장은 수백 km 규모의 종관 수송에서 1 km 규모의 국지 배출 및 지표 특성에 이르는 다중 규모 과정의 중첩으로 형성된다. 그러나 지상 관측망은 공간적으로 희소하고 비균질하여 미측정 지역의 고해상도 농도장을 관측만으로 규명하기 어렵다. 본 연구에서는 남한 전역의 $PM_{2.5}$, PM_{10}, NO_2 및 O_3 농도를 1 km 해상도로 시간별 추론하는 다중 규모 이종 그래프 신경망을 구축하고, 대기장의 스케일 정보를 처리하는 두 아키텍처를 비교하였다. 해상도별 공간장을 계층적 그래프로 구성하고, 공간 대표성과 분포 특성이 다른 측정소와 격자를 서로 다른 노드 유형으로 두어 하나의 이종 그래프로 결합하였다. 첫 번째 아키텍처는 관측·기상·배출·화학수송모델 정보를 공통 잠재공간에서 융합하고, 두 번째 아키텍처는 광역 배경장을 먼저 추정한 뒤 1 km 국지 잔차를 명시적으로 분리하여 학습하였다. 추론 성능은 시간 및 공간 독립 검증으로 평가하고, 관측망이 희소한 지역의 대기화학 정합성은 위성 연직 칼럼과 지표 산화제 분배의 공간적 대응으로 교차 검토하였다. 두 아키텍처는 검증 항목 전반에서 정량적 차이는 있으나 일관된 정합성을 보였고, 도심에서 산림으로 이어지는 산화제 분배의 공간 전이를 공통적으로 재현하였다. 이는 대기의 다중 규모 구조를 잠재공간에서 암묵적으로 융합하는 접근과 배경장-잔차로 명시적으로 분해하는 접근이 모두 미관측 지역의 농도장 추론에 활용될 수 있음을 뒷받침한다.

사사 이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 미세먼지관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

5C2

산불 배출에 따른 풍하 지역의 인위적 황산염 생성 억제

Wildfire-induced Suppression of Anthropogenic Sulfate Formation in Downwind Regions

김동진[1)], 전원배[1),2)], 박재형[1)], 문정혁[3)], 최현식[4)], 양채영[4)], 허 민[4)]

[1)]부산대학교 환경연구원, [2)]부산대학교 대기환경과학과, [3)]서울대학교 환경대학원, [4)]부산대학교 지구환경시스템학부

산불은 주변 지역이나 풍하 지역까지 널리 수송되어 미세먼지 농도를 증가시켜 대기질 악화에 기여하는 것으로 널리 알려져 있다. 하지만, 산불에서 배출된 오염물질이 풍하 지역의 인위적 배출과 반응해 오히려 미세먼지 농도를 감소시킬 수 있는 현상은 정확히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 3차원 광화학 모델인 Community Multi-Scale Air Quality (CMAQ)과 산불 배출량 인벤토리인 Fire INventory from NCAR (FINN)을 활용해 시베리아 산불에 의한 풍하 지역의 인위적 황산염 생성이 억제되는 현상을 분석하였다. 시베리아 산불은 다량의 오염물질을 배출해 동북아시아 지역으로 수송되어 미세먼지 농도를 증가시켰다. 하지만, 중국 북동부, 산둥 반도, 황해 지역에서는 황산염 농도가 이례적으로 감소하는 현상이 발견되었다. 이 지역은 일반적으로 인위적인 SO_2가 다량 배출되며 이러한 SO_2가 OH 라디칼에 의해 산화되어 황산염이 생성될 수 있는 지역이다. 하지만, 산불에 의해 수송된 CO와 VOCs가 풍하 지역에 존재하는 OH 라디칼과 반응해 대기 중 가용한 OH 라디칼을 제거하였고, 그로 인해 황산염의 생성이 억제되는 현상을 초래하였다. 이러한 결과는 산불 배출물이 인위적 오염물질과의 반응을 통해 2차 무기 에어로졸의 생성을 억제할 수 있음을 보여준다. 특히, 무기 에어로졸이 미세먼지 조성에 중요한 부분을 차지하는 동북아시아 지역에서는 산불 배출물의 장거리 수송과 그에 따른 화학적 전환 과정을 함께 고려하는 것이 대기질 변화를 평가하는 데 중요하다.

사사 본 연구는 2026년 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-NR076349).

5C3

다중 환경변수 기반 N_2O_5 비균질 반응 모수화의 지역 간 전이성 평가

Cross-Site Transferability of an N_2O_5 Heterogeneous Reaction Parameterization Incorporating Multiple Environmental Variables

마예진, 김민중, 이태형[1], 송정인[1], 최대련[2], 홍성철[3], 이재범[3], 이용희[3], 박지훈[3], 반수진[3]

명지대학교 환경에너지공학과, [1]한국외국어대학교 환경학과, [2]안양대학교 환경에너지공학과, [3]국립환경과학원 대기질통합예보센터

겨울철 야간 N_2O_5 비균질 반응은 입자상 질산염과 $ClNO_2$ 생성을 조절하는 주요 과정이지만, 관측자료를 기반으로 개발된 반응 모수화가 서로 다른 대기환경에서도 일관되게 적용될 수 있는지는 충분히 평가되지 않았다. 본 연구에서는 경기권 대기환경연구소(ANS)의 관측자료와 한국형 대기질 박스모델(KAB)을 이용하여 기존 N_2O_5 흡수계수(γN_2O_5)와 $ClNO_2$ 수율($\phi ClNO_2$)의 편차를 분석하고, 관측 기반 선형 보정(LR)과 에어로졸 Cl^-, 기온 및 상대습도를 추가로 고려한 다중선형회귀 보정(MLR)을 개발하였다. 모수화의 지역 간 전이성을 평가하기 위해 Base, LR 및 MLR을 CMAQ에 적용하고, ANS와 독립적인 관측지점인 백령도 대기환경연구소(BYI)에서 $PM_{2.5}$, NO_3^- 및 N_2O_5의 반응을 비교하였다. ANS에서 MLR은 LR에 비해 $PM_{2.5}$와 야간 NO_3^-의 편향을 소폭 감소시켰으나, 그 개선 폭은 1%p 이내로 제한적이었다. 반면 BYI에서는 $PM_{2.5}$ 모의성능의 변화가 미미하였으며, 야간 NO_3^-의 편향은 오히려 증가하였다. 농도 편향의 변화가 작았던 것과 달리, MLR 적용에 따른 야간 N_2O_5 농도는 ANS에서 3.38% 감소한 반면, BYI에서는 20.92% 증가하여 지점 간 상반된 반응을 보였다. 이에 따라 야간 NO_3^-는 ANS에서 증가하고 BYI에서 감소하였으며, N_2O_5와 NO_3^- 변화량 사이에는 각각 R = -0.77과 -0.52의 음의 상관관계가 나타났다. 이러한 결과는 환경변수를 추가한 모수화가 모든 지역에서 일관된 성능 개선을 보장하는 것이 아니라, 각 지점의 입력 환경조건에 따라 N_2O_5의 잔존 농도와 질산염 생성 반응을 서로 다른 방향으로 변화시킬 수 있음을 보여준다. 특히 $PM_{2.5}$와 NO_3^-의 편향 변화가 작더라도 N_2O_5 화학 반응은 크게 달라질 수 있으므로, N_2O_5 비균질 반응 모수화의 적용성을 평가할 때에는 최종 농도의 모의성능뿐만 아니라 전구물질과 생성물 사이의 과정 수준 반응 및 지역 간 전이성을 함께 검토해야 한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-04-02-058).

5C4

지역 특성 기반 대기오염물빌 배출 유형화와 유형별 배출량 예측

Classification of Air Pollutant Emission Patterns Based on Regional Characteristics and Cluster-Specific Prediction of Emission Levels

강보경

서울과학기술대학교 환경공학과

대도시권 내 지방자치단체는 토지이용, 산업 구조 및 교통 인프라의 차이로 인해 다양한 대기오염물질 배출 구조를 보이지만, 현행 대기환경 관리 정책은 이러한 지역별 배출 특성을 충분히 반영하지 못한 채 총량 중심의 감축 목표를 적용하고 있다. 특히 NOx·$PM_{2.5}$·VOC 및 NH_3 등 주요 대기오염물질은 지역의 산업, 교통, 토지이용 구조와 배출원에 따라 상이한 배출 특성을 보일 수 있으며, 개별 오염물질 중심의 접근만으로는 지역별 복합적인 배출구조를 파악하기 어렵다. 본 연구는 지역 구조적 특성과 주요 대기오염물질 간의 관계를 규명하고, 이를 기반으로 지역의 배출 유형을 분류하여 유형별 오염물질 배출량을 예측함으로써 지역 맞춤형 대기환경 관리 전략 수립을 위한 과학적 근거를 제시하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 서울·경기도 57개 시·군·구의 2019~2023년 NOx, SOx, $PM_{2.5}$, VOC, 및 NH_3 배출량 자료와 토지이용, 교통, 인구, 경제 및 산업 종사자 수 등 19개 지역 특성 변수를 수집하였다. 지역 특성과 다중 대기오염물질 배출량 간의 관계 구조를 파악하기 위해 중복성 분석(redundancy analysis, RDA)을 수행하고, 도출된 관계 구조를 기반으로 k-평균 군집분석을 실시하여 지역을 유형화하였다. 또한 계층적 군집분석을 통해 지역 특성 기반 군집과 배출량 기반 군집 간의 구조적 대응성을 교차 검증하였다. 이후 지역 유형별 랜덤 포레스트(random forest, RF) 회귀모형을 구축하여 지역 특성에 따른 오염물질별 배출량을 예측하고 주요 예측 변수의 차이를 분석하였다.

사사 본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경보건 빅데이터 기반 환경유해인자 건강영향 예측기술 개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-02183090).

5C5

딥러닝 기반 다운스케일링을 적용한 시간별 1km 지표 대기 오염물질 농도 추정: 한국을 중심으로

Hourly 1-km Surface Air Pollutant Concentration Estimation over South Korea Using Deep Learning-Based Downscaling

이정범, 강진구, 한승희, 김나경[1], 최대련

안양대학교 환경공학과, [1]안양대학교 환경에너지공학과

고해상도의 지표 대기오염물질 농도를 추정하는 것은 건강영향평가의 위해성 평가 단계에서 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 딥러닝 기반의 다운스케일링 접근법을 적용하여 1 km 공간 해상도와 1시간 간격 시간 해상도를 가지는 한국의 지표 대기오염물질 농도를 추정하였다. 딥러닝 학습에는 CMAQ 모델의 27 km, 9 km 농도장과 ECMWF에서 제공하는 ERA5 기상 데이터, 토지피복 데이터를 사용하였다. 모델 아키텍처는 공간적 관계를 노드와 엣지로 구성한 그래프에서 학습하는 Graph Neural Network와 이미지 데이터의 공간적 패턴 학습에 효과적인 U-Net을 결합하여 구성하였다. 결합 모델의 대기 오염물질 농도 추정에 대한 검증은 학습 및 평가에 사용되지 않은 69개의 독립된 측정소의 2024년 여름철과 겨울철의 지표 농도 측정값을 활용하여 수행하였다. 또한, 정지궤도위성인 GEMS를 활용하여 상관성을 분석하였다. 본 연구는 개발한 결합 모델의 성능이 CMAQ 모델의 성능보다 개선되는 것을 정량적 목표하며, 측정소가 부재한 지역에 정확도가 높은 농도를 추정하는 것을 정성적 목표로 한다. 이를 통해 노인 및 아동과 같은 취약계층에게 상세한 농도 정보를 전달하고, 상세한 노출 농도를 제공함으로써 대기오염 취약지역 분석, 정책 및 규제 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

사사 이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 미세먼지관리특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

5D1

스캐닝 라이다 기반 입자크기별 질량소산효율과 질량·광학 입경특성의 지역적 비교

Regional Comparison of Size-Resolved Mass Extinction Efficiency and Aerosol Mass-Optical Size Characteristics Using Scanning Lidar

윤지현, 신주선, 주소희[1], 이유선, 김덕현[2], 노영민

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공,
[1]Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (LACy), Université de La Réunion, [2]국립한밭대학교 노마드칼리지 기초과학부

원격탐사 기반 대기질 관측에서 에어로졸의 광학적 농도인 소산계수를 질량농도로 변환하기 위해 질량소산효율(Mass Extinction Efficiency, MEE)이 이용되나, MEE는 입자의 크기와 조성에 따라 달라지므로 단일한 고정값을 적용할 경우 질량농도 산출의 불확실성을 증가시킬 수 있다. 본 연구에서는 산업단지 환경의 시흥 시화국가산업단지와 항만·연안 환경의 부산 감만항에서 2022년 7월부터 2024년 11월까지 수행된 532 nm 및 1064 nm 스캐닝 라이다 관측 자료로부터 옹스트롬 지수를 산출하고, 이를 이용해 소산계수를 미세 및 조대입자 성분으로 분리한 뒤 인근 대기오염측정망의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 질량농도와 결합하여 입자크기별 MEE를 산출하였다. 관측 기간 동안 질량농도 기준 미세입자 분율($PM_{2.5}/PM_{10}$)은 시흥 0.49, 부산 0.52로 부산에서 더 높게 나타났다. 반면 관측 기간 평균 옹스트롬 지수는 시흥 1.25, 부산 1.11로 시흥에서 미세입자의 광학적 기여가 우세하여 질량 기준과 상반된 지역별 순위를 보였다. 입자크기별 MEE에서도 미세입자 MEE는 시흥 7.01 m^2/g, 부산 6.13 m^2/g으로 시흥이, 조대입자 MEE는 부산 4.61 m^2/g, 시흥 3.41 m^2/g으로 부산이 높게 나타나 옹스트롬 지수에서 확인된 경향과 일치하였으며, 두 지역의 광학특성을 주도하는 입경이 상이함을 보여주었다. 이러한 결과는 질량농도 관측만으로는 파악하기 어려운 지역별 에어로졸 광학특성의 차이를 정량적으로 보여주며, 원격탐사 기반 대기질 해석에서 입자크기별 MEE를 고려할 필요성을 제시한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 RS-2026-25501396).

5D2

산업단지 내 악취성 VOCs 추적감시를 위한 원격감시 및 AI 융합 기반 예측모델 개발(1단계)

Development of Remote Monitoring and AI-based Prediction Model for Tracking Odorous VOCs in Industrial Complexes (Phase 1)

성해창, 김상철, 장현섭, 허재희, 김관철[1], 이재영[2]

성균관대학교 환경포렌식연구소, [1]차세대융합기술연구원 첨단환경감시센터, [2]아주대학교 환경안전공학과

시화국가산업단지는 다양한 업종이 밀집되어 악취성 휘발성유기화합물(VOCs)과 입자상물질(PM)이 복합적으로 발생하며, 기상조건에 따라 오염물질의 이동 및 수용지점 영향이 빠르게 변화한다. 본 연구는 2026년 5월 19일부터 8월 3일까지 77일간 시화산단 내 수용지점과 4개 배출원 대표지점들의 PID (Photoionization Detector) 기반 VOCs 연속측정자료, OPC (Optical Particle Counter) 기반 입경 구간별 Particle Count에 대한 연속측정자료를 이용하여 VOCs와 입경별 Particle Count의 동시·시간지연 상관성을 분석하고, Scanning LiDAR PM 공간분포자료, 현장 VOCs 성분 분석자료, 드론 기반 저고도 VOCs, PM 수직 분포자료 및 풍향·풍속 자료를 통합하여 악취성 VOCs의 발생 및 수용지점 영향 가능성을 분석하였다. PID 및 OPC 연속측정자료 분석 결과, VOCs와 입경 구간별 입자 수의 관계가 상이하게 나타났다. 0.253~0.298 ㎛ 구간 입자 수는 VOCs 고농도 이후 후속 증가 신호가 뚜렷하지 않은 반면 2.530~2.980 ㎛ 구간의 입자 수는 일부 배출원 지점에서 PID로 측정된 VOCs 값이 비교적 높은 상관성을 보여, VOCs와 입자상 물질이 동일 하거나 유사한 배출활동 및 기상 조건의 영향을 받아 함께 변동했을 가능성을 짐작할 수 있었다. 현장 악취성 VOCs 샘플링에서는 톨루엔(Toluene)이 주요 검출성분 중 상대적으로 높게 확인되어 PID의 VOCs 농도 상승에 대한 성분적 배경을 보완적으로 해석할 수 있었다. 드론 측정자료는 절대농도 평가 보다는 저고도 수직분포, 수직 희석 경향 및 영향 가능성 검증에 유용하였다. 본 연구는 원격감시, 지상 연속측정, 현장실측, 드론 수직분포 및 기상 자료를 AI 분석체계로 융합하여 산업단지 악취성 VOCs 예측·관리 기술의 적용 가능성을 제시하고자 한다.

사사 이 연구는 환경부와 경기도의 재원으로 시흥녹색환경지원센터의 지원을 받아 수행하였음(26-SH-02).

5D3

AERONET 관측자료 기반 도시 대기오염 입자의 미세·조대 모드별 광학 특성 분석

Analysis of Fine- and Coarse-Mode Optical Properties of Urban Atmospheric Aerosols Based on AERONET Measurements

김성영, 정욱교

지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공

AERONET (AErosol RObotic NETwork)은 직달일사와 산란복사휘도 관측자료를 이용하여 에어로졸 광학두께(AOD), 입자크기분포, 단산란알베도(single-scattering albedo) 및 복소굴절률(complex refractive index) 등 대기 에어로졸의 특성을 제공한다. 본 연구에서는 대기오염도가 높은 도시 지역의 AERONET 직달일사 및 산란복사휘도 관측자료를 활용하여 에어로졸의 광학적 특성을 산출하고 분석하였다. AERONET의 표준 inversion이 수행되는 440, 675, 870 및 1020 nm 뿐만 아니라, 표준 inversion 산출물에 포함되지 않는 380, 500 및 1640 nm에서도 에어로졸 광학 특성을 추가로 산출하여 분석함으로써 자외선·가시광선 영역부터 근적외선 영역까지 더욱 넓은 파장 범위에서 에어로졸의 분광 특성을 평가하였다. 또한 AERONET 표준 inversion에서는 복소굴절률이 미세입자와 조대입자로 구분되지 않고 전체 에어로졸의 통합 특성으로 제공되는 반면, 본 연구에서는 이를 미세입자와 조대입자로 분리하여 산출한 결과를 제시한다. 이를 통해 입자크기분포와 미세·조대 입자별 복소굴절률 및 전체 에어로졸의 단산란알베도를 함께 평가하여 도시 대기오염 입자의 광학 특성을 더욱 세밀하게 분석할 수 있다.

사사 본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2025-04-02-083).

5D4

에어로졸 스캐닝 라이다를 이용한 항만 및 도시 지역의 고해상도 미세먼지 공간분포

Highly Resoluved Particulate Matter Spatial Distributions in Port and Urban Areas Using Aerosol Scanning Lidar

김지석[1], 최원이[3], 계관욱[1], 박선호[2], 이철용[5], 신성균[4], 이한림[1,2]

[1]부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공, [2]노바스콥(주), [3]NASA Goddard Space Flight Center,
[4]서울연구원 탄소중립연구센터, [5]한국해양과학기술원 해양빅데이터 AI센터

항만 및 대도시와 같이 다양한 배출원이 존재하는 지역에서는 in-situ 장비만으로 PM_{10}의 공간 분포를 파악하기 어려워 광역 원격측정 기술이 필요하다. 에어로졸 스캐닝 라이다(Aerosol Scanning Lidar, ASL)는 1064 nm 탄성산란 신호를 이용하여 PM_{10} 공간분포를 7m 공간해상도와 1시간 간격으로 측정한다. 서울 공사장 인근 에서 PM_{10} 농도가 주거지역보다 최대 47 $\mu g/m^3$ (약 80%) 높게 관측되었다. 본 연구는 XGBoost와 SHAP을 활용하여 PM_{10} 공간 분포와 의료기간 방문 건수 간의 비선형 관계를 조사하였다. PM_{10} 농도는 호흡기 질환 관련 의료기관 방문 건수와 유의한 양의 상관관계를 보였다($R = 0.204$, $p < 0.001$) 부산항 감만·신선대 컨테이너터미널과 제강소에서 각각 43 $\mu g/m^3$, 41 $\mu g/m^3$, 37 $\mu g/m^3$로 평균 PM_{10} 농도가 관측되었다. 특히 12월 5일 07~11시 신선대 컨테이너터미널에서는 PM_{10}이 최대 130 $\mu g/m^3$로 인근 주거지보다 535% 높았다. ASL 산출값과 AirKorea 지상측정값을 비교하였다. 지표 부근 배출과 관련된 미세먼지 변화를 보다 잘 포착하기 위해 관측 장비 위치를 해발고도 79 m에서 22 m로 낮추었을 때 상관계수가 0.77에서 0.95로 크게 향상하였다. 적외선 라이다 원격측정 기술은 고해상도 미세먼지 분포 측정을 통해 복잡한 배출원 지역에서 효과적인 미세먼지 저감 정책을 수립할 수 있는 자료를 제공할 수 있음을 시사한다.

사사 이 연구는 기상청「미래수요 대응 기상장비 및 활용기술 개발 사업」RS-2026-25531119의 지원으로 수행되었습니다.

5D5

대류권계면 기반 오존 기후값을 사전정보로 활용한 IASI 오존 연직분포 산출 개선

Improving IASI Ozone Profile Retrievals Using a Tropopause-Based Ozone Climatology as A Priori Information

김치영, Anne Boynard[1,2], Cathy Clerbaux[1,3], Daniel Hurtmans[3], Pierre-François Coheur[3], 박주선[4],
김주완[5], 구자호[6], 박민준[7], 이효정[4,7], 박상서

[1]울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, [1]Sorbonne Université, [2]SPASCIA, [3]Université libre de Bruxelles,
[4]부산대학교 환경연구원, [5]공주대학교 대기과학과, [6]연세대학교 대기과학과, [7]부산대학교 대기환경과학과

IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)는 적외선 복사 관측을 이용하여 전 지구 규모의 오존 연직분포 정보를 제공하며, 대류권 상부, 성층권 하부(upper troposphere-lower stratosphere, UTLS)의 오존 변동을 분석하는 데 활용되고 있다. 그러나 기존 Fast Optimal Retrievals on Layers for IASI (FORLI) 오존 산출물에 대한 검증 연구에서는 오존존데 관측과 비교하여 UTLS 영역에서 양의 편향이 보고된 바 있으며, 이는 해당 고도에서 오존 산출에 사용되는 사전정보(a priori)의 영향을 평가할 필요성을 제기한다. 특히 위성 nadir-viewing 기반 적외선 오존 산출물은 오존의 연직 구배가 큰 UTLS 영역에서 사전정보의 영향을 크게 받을 수 있다. 본 연구에서는 Optimal Estimation Method (OEM)에 기반한 산출 알고리즘을 이용하여 IASI-FORLI 오존 연직분포에 대한 사전정보의 영향을 분석하였다. 이를 위해 기존 IASI-FORLI 산출물에 적용된 사전 오존 연직분포를 사용한 실험과 대류권계면 고도를 기준으로 오존의 연직 구조와 변동성을 고려한 tropopause-based (TB) 기후값을 적용한 실험을 수행하였다. 두 실험에는 동일한 산출 조건을 적용하여 사전정보의 변화에 따른 영향만을 비교하였으며, 대기 역학적 변동과 UTLS 오존 구배가 뚜렷한 한반도 지역의 두 여름철 기간에 대해 오존존데 관측자료를 이용하여 검증하였다. 분석 결과, TB 사전정보를 적용한 경우 대류권과 UTLS에서 관측된 오존 변동성이 보다 효과적으로 재현되었으며, 특히 UTLS 영역에서 개선 효과가 크게 나타났다. 또한 대류권 오존에 대한 산출 민감도가 향상되고 대류권계면을 가로지르는 오존의 연직 구배가 보다 현실적으로 표현되었으며, 기존 기후학적 사전정보를 적용한 산출에서 나타나는 연직 방향의 진동성 편향도 감소하였다. 이러한 결과는 IASI 오존 연직분포 산출에서 사전정보의 선택이 오존의 연직 구조와 변동성 재현에 중요한 영향을 미침을 보여준다.

사사 이 연구는 기상청「기상위성 융합 활용 기술개발 사업」(RS-2025-02219688)의 지원으로 수행되었습니다.

5E1

Ni(111) 결정면과 산소 결함의 시너지 조율을 통한 구연산 개질 Ni/CeO_2 촉매의 CO_2 메탄화 성능 향상

Synergistic Tuning of Ni(111) Facets and Oxygen Vacancy on Citric Acid-Modified Ni/CeO_2 for Enhanced CO_2 Methanation

조면성, 김기현

한양대학교 공학대학원 건설환경공학과

본 연구에서는 구연산(citric acid) 개질이 Ni/CeO_2 촉매(NC-x, x는 Ni:CeO_2 몰비)의 계면 구조와 금속-지지체 상호작용(MSI)에 미치는 영향을 규명하고, Ni(111) 결정면의 선택적 노출과 산소 결함 형성을 통해 CO_2 메탄화 성능을 향상시키고자 하였다. 구연산 처리 조건과 Ni 함량을 조절하여 촉매를 제조한 결과, NC-10이 가장 우수한 활성을 나타냈다. NC-10은 350°C와 60,000 mL g^{-1} h^{-1}의 높은 공간속도에서 10 vol% CO_2 전환율 83.8%와 CH_4 선택도 99.9%를 달성하였으며, 미처리 촉매보다 약 5배 높은 성능을 보였다. 또한 100시간 이상의 장기 반응에서도 뚜렷한 활성 저하 없이 안정적인 성능을 유지하였다. 구조 및 표면 분석 결과, 구연산 개질은 Ni 입자의 응집을 억제하여 분산도를 높이고, Ni(111) 결정면의 노출을 효과적으로 조절하는 동시에 CeO_2 표면의 산소 결함 농도를 증가시켰다. 이러한 구조 변화는 Ni와 CeO_2 사이의 전자적 상호작용을 강화하고 반응물의 계면 이동을 촉진하였다. 적절히 노출된 Ni(111) 면은 H_2의 흡착과 해리를 촉진하였고, 풍부한 산소 결함은 CO_2의 흡착과 활성화를 강화하여 후속 수소화 반응을 용이하게 하였다. In situ DRIFTS 분석에서는 포름산염(formate)과 탄산염(carbonate) 종이 주요 표면 중간체로 관찰되어 CO_2 메탄화 반응 경로를 뒷받침하였다. 종합적으로, 구연산 처리는 Ni 분산도, 결정면 노출, 산소 결함 및 MSI를 동시에 제어함으로써 촉매의 활성과 장기 안정성을 향상시키는 효과적인 개질 전략임을 확인하였다.

5E2

시흥시 온실가스 배출 특성 및 변화 요인 분석

Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Driving Factors in Siheung City

원수란

시흥시정연구원 연구부

국가 온실가스 배출량은 2018년 이후 2023년까지 약 9% 감소하였으나, 지자체 배출량은 국가 전력배출계수 개선과 지역 내 에너지 소비, 산업활동 변화가 복합적으로 작용하기에 감축량을 지역 자체 성과로 해석하는 데 주의가 필요하다. 본 연구에서는 국가 온실가스 인벤토리와 국가 온실가스 종합정보시스템의 기초지자체 배출량 통계를 활용하여 산업단지가 위치한 시흥시 온실가스 배출 특성을 국가 배출 추이와 비교하고, 배출 변화를 활동량과 배출계수 효과로 구분하여 분석하였다. 시흥시의 온실가스 종합 배출량은 2018년 4,308 Gg CO_2eq에서 2023년 4,115 Gg CO_2eq으로 4.5% 감소하여 국가 배출량 감소율의 절반 수준에 그쳤다. 2023년 산업 부문은 전체 배출량의 37% 정도를 차지하였으며, 2018년 대비 산업 연료연소에 따른 직접배출은 18% 증가한 반면 산업 전력의 간접배출은 20%가 감소하는 상반된 양상을 보였다. 한국전력 판매전력량과 국가 전력배출계수를 이용한 요인 분해 결과 전체 전력 사용량 증가에 따른 배출 증가 효과는 +207 Gg CO_2eq인 반면, 전력배출계수 감소에 따른 효과는 -486 Gg CO_2eq으로 나타나 전력 부문 배출량은 279 Gg CO_2eq 감소하였다. 제조업 전력 사용량은 2018년 대비 약 2% 감소하여 사실상 정체된 수준이었으며, 산업 전력 간접배출 감소량(288 Gg CO_2eq)의 약 91%가 배출계수 감소 효과로 설명되었다. 업종별 연료연소 배출 변화에서 비철금속 증가와 철강 감소 등 산업단지 내 배출 구조 변화가 확인되었다. 이는 지자체 온실가스 배출량 감소가 지역 내 에너지 소비 및 산업활동의 실질적 감축을 의미하지 않을 수 있으며, 산업단지 도시의 탄소중립 이행성과 평가에서는 활동량과 배출계수 효과를 분리하여 진단할 필요가 있음을 시사한다.

사사 본 연구는 시흥시정연구원의 지원을 받아 수행된 정책과제(26정책07)의 일부임.

5E3

도시의 단기체류성 기후변화 유발물질 및 온실가스 통합 인벤토리 구축: 환경산업연관분석을 적용한 서울시 소비기반 접근

Development of an Integrated Urban Inventory for Short-Lived Climate Forcers and Greenhouse Gases: A Consumption-Based Approach for Seoul Using Environmentally Extended Input-Output Analysis

강성민, 차주원, 이소진

서울연구원 탄소중립센터

도시는 인구와 경제활동이 집중된 온실가스 및 대기오염물질의 주요 배출원이자 기후변화에 취약한 공간이다. 최근 기후위기가 심화됨에 따라 도시 차원에서도 국가 수준의 탄소중립 계획 수립과 온실가스 관리의 중요성이 대두되고 있다. 특히 파리협정 출범 이후, 기존 대기오염물질 중 단기체류성 기후변화 유발물질을 온실가스와 통합하여 인벤토리를 구축하고 배출량을 보고하는 관리 체계의 필요성이 강조되고 있다. 도시의 온실가스는 국가 단위와 달리 온실가스 프로토콜에 따라 조직 및 행정 경계를 기준으로 구분하여 관리된다. 직접 배출과 구매 에너지 사용 간접 배출은 비교적 원활하게 산정되나, 가치사슬 내 기타 간접 배출인 공급망 유발 배출은 방대한 활동 데이터 수집의 한계가 존재한다. 이를 극복하기 위해 산업연관표와 배출계수를 결합하여 간접 산정하는 환경확장 산업연관분석 방법론이 국제적으로 확산 중이다. 최근 도시 정책은 단순 직접 배출 관리를 넘어 소비기반의 온실가스 관리로 그 범위를 확장하고 있다. 이에 본 연구는 소비기반 온실가스와 단기체류성 기후변화 유발물질을 결합하여 관리 및 활용 방안을 분석하였다. 구체적으로 산업연관표에 온실가스 및 대기오염물질 배출원 매칭 체계를 연계하여, 2023년 서울시를 대상으로 단기체류성 기후변화 유발물질과 온실가스를 포괄하는 통합 소비기반 인벤토리를 구축하였으며, 이를 바탕으로 도시 차원의 배출 특성을 분석하고 통합 관리 방안을 모색하였다.

사사 본 논문은 서울연구원 "2026 서울시 온실가스 배출량 인벤토리 산정 및 고도화(2026-AR-01)" 과제의 지원을 받아 수행되었음.

5E4

국내 친환경선박 보급·인증 동향 및 소형 전기추진선박 해상실증 사례

Green Ship Deployment and Certification Trends in Korea and Maritime Demonstration of a Small Electric Propulsion Ship

곽재혁, 김낙현[1)]

한국해양교통안전공단 해양모빌리티실, [1)]한국조선해양기자재연구원 중소형미래선박본부

국제사회는 IMO 2020을 시작으로 선박의 온실가스 및 대기오염물질 배출규제를 강화하고 있으며, IMO의 2050년 넷제로(Net-Zero) 목표에 따라 국제해운의 탈탄소화가 가속화되고 있다. 특히 EEXI와 CII 등 에너지효율 및 탄소집약도 규제가 시행되고 있으며, 최근에는 연료의 전 생애주기 배출을 고려하는 GFI와 ZNZ 연료·기술의 확대를 포함한 규제체계가 논의되고 있다. 이에 따라 국제항해 선박에서는 LNG, 암모니아, 메탄올, 선상 탄소포집 등 다양한 저·무탄소 기술이 개발되고 있는 반면, 국내 연근해 선박은 국제협약의 직접적인 규제 적용이 상대적으로 제한적인 가운데 「환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률」을 기반으로 공공선박 전환과 민간선박 보조금 지원 등을 통한 친환경선박 보급이 추진되고 있다. 또한 DPF 등 배출가스 저감 중심에서 전기추진·연료전지 시스템으로 기술 적용 범위가 확대되면서 실선 적용성과 성능 검증을 위한 해상실증의 중요성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 국내 친환경선박의 보급·인증 동향을 살펴보고, 4.8 GT급 소형 전기추진선박의 해상실증 사례를 분석하였다. 실증선박은 92 kWh 배터리와 100 kW 전동기 2기를 탑재하고 실해역에서 최대출력 및 부하별 항속시험을 수행하였다. 실증 결과 최대 약 12 kn의 선속을 확인하고 부하조건에 따른 운항 특성을 분석하여 전기추진시스템의 안정적인 운항 가능성을 확인하였다. 이를 통해 친환경선박의 보급 확대를 위해서는 기술개발과 함께 해상실증을 통한 성능확인, 운용실적 확보 및 인증·제도와의 연계가 중요함을 제시하였다.

사사 본 논문은 2026년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2022-KS221680, 친환경선박 보급확산을 위한 한국형 친환경선박(그린쉽-K) 해상실증 기술개발).

5F1

2023년 국내 간접온실가스 전구체 물질 배출량 산정 및 분석

Estimation and Analysis of 2023 Indirect Greenhouse Gas Precursor Emissions in Republic of Korea

전예지, 이강산, 한은미, 박민, 송형도, 유 철

기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터

대기오염물질이 대기 산화, 침적 등으로 인해 생성되는 온실가스를 간접온실가스(indirect CO_2·N_2O)라고 한다. 파리협정 이행 지침 제51조에서는 이러한 간접온실가스를 생성하는 전구체 물질(NOx, CO, NMVOCs, SOx)의 배출량을 보고하도록 권고하고 있다. 국가미세먼지정보센터에서는 매년 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침에 따라 간접온실가스 전구체 물질 배출량을 국가 대기 배출량을 기반으로 산정하고 있다. 다만, 대기오염물질과 온실가스의 배출원 분류체계가 상이하여 온실가스 배출원 분류체계에 맞게 이를 맵핑하였고, TVOC 배출량의 경우 국가미세먼지정보센터에서 구축한 한국형 화학성분비(K-SPECIATE ver 1.1)를 기반으로 배출원별 메탄 분율을 제외하여 NMVOCs 배출량을 산정하였다. 2023년 간접온실가스 전구체 물질 배출량 산정 결과, NOx 760,215톤, CO 796,136톤, NMVOCs 878,028톤, SOx 124,598톤으로 나타났다. 배출원별로 NOx, CO, SOx는 에너지 부문, NMVOCs는 산업공정 및 제품생산 부문의 배출량이 가장 높았다. 해외 주요 국가들과의 배출량을 비교한 결과, 우리나라는 일본과 배출 특성이 가장 유사하게 나타났다. 오염물질별로 살펴보면, NOx는 모든 국가에서 에너지 부문의 배출량이 가장 높았다. CO와 SOx는 호주에서 각각 LULUCF, 산업공정 및 제품생산 부문의 비중이 가장 높았고, 일본, 영국, 독일에서는 에너지 부문의 비중이 가장 높았다. NMVOCs는 일본, 영국, 독일에서 산업공정 및 제품생산 부문, 호주에서는 에너지 부문의 비중이 가장 높게 나타났다.

5F2

2023년도 국가 대기오염물질 배출량 산정 및 분석

Estimation and Analysis of National Air Pollutant Emissions in 2023

이경빈, 한은미, 김태형, 김형천, 이향경, 김진식, 송승주, 주종민, 이강산, 함지영, 송형도, 유 철

기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터

국가 대기오염물질 배출량 통계는 국가데이터처 승인통계(제106033호)로 13개 배출원(에너지산업 연소, 제조업 연소, 도로·비도로이동오염원, 유기용제 사용, 농업 등)에서 생성하는 9개 대기오염물질(PM-2.5, SOx, NOx, VOCs, NH_3, CO, PM-10, TSP, BC)의 시군구 단위의 배출량 정보가 포함되어 있다. 대기오염물질 배출량 통계 자료는 계절관리제 등 다양한 대기환경 정책(대기환경개선 종합계획, 미세먼지 관리 종합계획 등)의 실효성을 평가하고 향후 전략을 수립하는데 핵심적인 지표로 활용 중이다. 최근 노후 경유차 감축 강화 및 저공해차 보급 확대, 석탄 발전 미세먼지 저감, 사업장 배출총량제 전국 확대 등 적극적인 감축 정책이 이행됨에 따라, 정책 효과가 반영된 정확하고 시의적절한 배출량 분석이 요구되고 있다. 2023년 배출량은 PM-2.5 47,957톤, SOx 126,259톤, NOx 808,233톤, VOCs 899,456톤, NH_3 242,523톤으로 산정되었다. 세부적으로 PM-2.5는 생활 > 수송 > 산업 순, SOx는 산업 > 발전 > 생활 순, NOx 수송 > 산업 > 생활 순, VOCs는 생활 > 산업 > 수송 순, NH3는 생활)산업)발전 순으로 배출되었다. 주요 물질별 배출량 전년 대비 증감 원인을 살펴보면, PM-2.5, VOCs, CO는 생물성 연소 배출원에서 노천소각, 농업잔재물 소각 산정방법 개선 영향으로 각각 5,386톤(44.0%), 54,834톤(63.7%), 84,141톤(38.0%) 감소하였으며, SOx, NH_3는 생산공정 배출원 내 제철제강업의 전기로 조강량 감소로 각각 3,582톤(8.9%), 702톤(3.6%) 감소하였다. NOx는 노후 연식 차량 등록대수 감소 및 친환경차 보급 증가 등 감축 정책 효과로 도로이동오염원에서 28,435톤(11.1%) 감소하였다.

5F3

배출량 저감 관점에서의 권역별 대기환경관리 계획 진단과 정책적 시사점

Assessment of Regional Air Quality Management Plans for Emission Reduction and Policy Implications

한세현, 김정숙

주식회사 랩솔레미스

대기관리권역의 대기질 개선을 위해 수립되는 기본계획 및 시행계획은 권역별 및 지역별(시·도) 배출허용총량을 설정하고 부문별 삭감대책을 이행함으로써 대기오염물질 배출량을 관리하는 핵심 정책수단이다. 본 연구에서는 배출량 저감 관점에서 제1차 권역별 대기환경관리 기본계획(2020~2024) 및 시행계획의 이행성과를 검토하고, 제2차 기본계획(2025~2029)의 배출량 전망(BAU)과 삭감계획을 비교·분석하여 권역별 계획의 성과와 평가체계를 진단하였다. 이를 위해 국가 대기오염물질 배출량(CAPSS) 자료를 활용하여 권역별·오염물질별 배출량 변화 추이를 분석하고, 제1차 기본계획의 BAU, 계획 삭감량, 삭감 후 배출량 및 지역별 배출허용총량을 실제 배출량 변화와 비교하여 계획의 이행성과를 검토하였다. 또한 제2차 기본계획의 BAU, 삭감계획 및 지역별 배출허용총량을 제1차 계획과 비교하여 삭감목표와 관리수준의 변화를 분석하였다. 아울러 계획 삭감량 산정 및 실적 평가방법을 중심으로 기준배출량 설정, 활동도 및 배출계수 변화, 정책 효과의 중복, 부문별 삭감 기여도와 배출량 산정 불확실성 등의 영향을 진단하였다. 이를 토대로 실제 배출량 변화와 정책 이행에 따른 삭감 효과를 보다 합리적으로 구분·평가하고, 최신 CAPSS와의 정합성 및 삭감량 산정·평가방법의 일관성을 제고하기 위한 정책적 시사점을 제시하였다.

사사 본 논문은 수도권대기환경청의 지원(대기환경관리 기본계획(4개권역) 추진실적 평가 연구)과 낙동강유역환경청의 지원('25년 대기환경관리 시행계획(4개 권역) 추진실적 평가 연구)을 받아 수행된 연구임.

5F4

대기오염도검사 결과를 이용한 대기오염물질 배출특성 연구

A Study on Air Pollutant Emission Characteristics Using Air Pollution Level Inspection Results

김민영, 김영환, 장철민

(재)FITI시험연구원 기후환경팀

기후에너지환경부에서는 대기오염도검사기관을 지정해 두고 매년 약 500회 이상 대기오염물질 배출사업장을 대상으로 대기오염도검사를 진행하고 있다. 이때 대기오염도검사기관의 역할은 사업장 배출구에서 배출되는 대기오염물질의 시료채취 및 분석 업무이다. 해당 검사결과는 불법배출시설에 대한 형사처벌 및 행정처분 등의 근거자료로 활용되기 때문에 기관의 운영이나 장비관리 등 엄격하게 관리되고 있다. 검사의 종류에는 가동개시검사, 정기검사, 수시검사가 있다. 가동개시검사는 배출시설 및 방지시설의 가동개시 신고내용과 일치여부를 확인하는 검사이고, 정기검사는 통합허가를 받은 사업장에서 서류·서설 및 장비 등을 정기적으로 출입·검사하는 것이다. 수시검사는 가동개시 검사와 정기검사를 제외한 별도 사유로 진행되는 검사로 사업장에서 환경오염사고 또는 환경오염피해가 발생할 우려가 높다고 인정되는 경우, 점검이 필요하다고 인정되는 객관적인 사실이 있는 경우, 자가측정 결과의 기록이 누락된 경우, 배출부과금의 부과 또는 오염물질 등의 배출원 및 배출량을 조사하는 경우, 다른 행정기관의 정당한 요청이 있거나 민원이 발생하는 경우 등에 의해서 검사하는 것을 말한다. 본 연구에서는 본 기관에서 다년간 수행했던 신뢰도가 높은 대기오염도검사 결과를 기반으로 업종별, 배출시설별, 방지시설별로 대기오염물질 배출특성에 대해 정리하였다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부 지원을 받아 수행된 연구임.

5G1

사전학습 기반 딥러닝을 이용한 전국 $PM_{2.5}$ 측정소의 일별 화학조성 추정

Daily Estimation of $PM_{2.5}$ Chemical Composition at Routine $PM_{2.5}$ Monitoring Sites across South Korea Using a Pretraining-Based Deep Learning Framework

윤은진, 이형주

포항공과대학교 환경공학부

초미세먼지($PM_{2.5}$)는 다양한 화학성분으로 구성되며, 성분별 배출원과 건강 및 기후 영향이 다르다. 그러나 국내 화학조성 측정자료는 $PM_{2.5}$ 총질량농도 측정자료에 비해 시공간적으로 제한적이다. 이에 2015~2022년 국내 약 500개 $PM_{2.5}$ 측정소를 대상으로, 주요 $PM_{2.5}$ 성분 5종인 질산염(NO_3^-), 황산염(SO_4^{2-}), 암모늄(NH_4^+), 유기탄소(OC), 원소탄소(EC)의 일별 농도를 추정하는 사전학습 기반 딥러닝 모델을 구축하였다. 입력자료로 대기오염물질 농도 변수(NO_2, SO_2, CO, O_3), 기상변수(온도, 습도, 풍속 등)와 공간 특성 변수(인구밀도, 토지피복 등)를 활용하였다. 장기 대기환경연구소 측정소 5곳 중 입력자료를 확보할 수 있는 4곳만 모델 학습에 활용할 수 있어, 제한된 자료에 따른 과적합과 공간 일반화 문제를 완화하고자 전국 $PM_{2.5}$ 측정자료로 모델을 사전학습하였다. 이때 $PM_{2.5}$의 장기 추세와 계절성을 제거한 변동을 예측하도록 하여 대기오염물질과 기상조건에 따른 변동 특성을 학습하였다. 이후 사전학습된 인코더를 전이학습하여 성분별 예측모델을 구축하였다. 각 측정소를 학습에서 제외한 후 평가하는 측정소 단위 교차검증 방식으로 공간 일반화 성능을 평가하고, 동일한 검증 조건에서 4개 측정소 자료만으로 처음부터 학습한 모델과 비교하여 사전학습의 효과를 확인하였다. 사전학습 기반 모델은 학습에서 제외된 검증 측정소에서도 안정적인 공간 일반화 성능을 보였다(측정소 단위 교차검증 R^2: NO_3^- 0.75, SO_4^{2-} 0.68, NH_4^+ 0.81, OC 0.66, EC 0.68). 전국 측정소 추정 결과 전국 평균 추세는 NO_3^- −0.24, SO_4^{2-} −0.32, NH_4^+ −0.20, OC −0.20, EC −0.06 $\mu g/m^3/yr$로, 2015~2022년 모든 성분이 감소하였으나 성분별 감소 추세의 크기는 지역에 따라 달랐다. 본 연구에서 구축한 전국 단위 $PM_{2.5}$ 화학조성 추정자료는 지역 맞춤형 배출저감 정책 수립과 인구노출 및 건강영향 연구를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

5G2

웨어러블 및 환경자료와 대규모 언어모형을 연계한 장애인 맞춤형 기후보건 연구

Personalized Climate-Health Research for People with Disabilities Integrating Wearable and Environmental Data with a Large Language Model

안소진, 이환희[1)]

부산대학교 정보의생명공학대학, [1)]고려대학교 보건과학대학 보건정책관리학부

기후변화에 따른 고온 노출은 심혈관계 건강에 영향을 미칠 수 있으며, 장애인은 기저질환, 약물 복용 및 활동 제약 등으로 인해 기후 관련 건강위험에 더욱 취약할 가능성이 있다. 본 연구는 웨어러블 생체정보와 시공간 환경자료를 이용하여 장애인의 온도 관련 생리반응을 평가하고, 이를 개인맞춤형 기후건강 알림으로 연계하는 연구체계를 구축하고자 하였다. 2025년 7월부터 10월까지 부산지역 장애인 성인을 대상으로 심박변이도와 활동량을 반복 측정하고, 위치정보를 기반으로 천리안위성 2A호의 지표면온도 자료를 연계하였다. 품질관리 후 33명의 79,173건 관측자료를 이용하여 분산시차 비선형 모형으로 온도와 RMSSD 간의 비선형 관계 및 단기 지연효과를 분석하였다. 전체 자료 통합분석에서는 기준 온도 20.64°C 대비 고온 구간에서 RMSSD가 감소했으며, 28.35°C에서 3.58 ms 감소하였다. 모형 자유도, 시간 해상도 및 대체 심박변이도 지표를 이용한 민감도 분석에서도 전반적으로 유사한 방향성이 관찰되었다. 반면 참여자별 결과를 결합한 2단계 분석에서는 통계적으로 유의한 연관성이 확인되지 않았으며 개인 간 반응의 이질성이 나타났다. 또한 참여자의 기본·건강정보, 설문결과와 환경정보를 반영하여 폭염·한파 위험에 따른 건강정보와 행동수칙을 생성하고 앱으로 제공하는 대규모 언어모형 기반 맞춤형 알림체계를 도입하여 적용하고 있다. 본 연구는 웨어러블 기반 생체반응 분석과 대규모 언어모형을 연계한 장애인 맞춤형 기후건강 관리의 가능성을 제시한다.

사사 본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(과제번호: 202406190001).

5G3

대기오염 장기노출과 파킨슨병 연관성

Association between Long-term Exposure to Air Pollution and Parkinson's Disease: Administrative Cohort of Older Adults in South Korea

오종민[1),2),3)], 명지선[4)], 이동욱[5)], 한창우[6)], 홍윤철[7)], 김순태[8)], 강윤희[9)], 배현주[10)], 임연희[11)]

[1)]이화여자대학교 의과대학 직업환경의학교실, [2)]이화여자대학교 의과대학 이화-SCL 환경건강 연구센터,
[3)]이화여자대학교 의과학연구소, [4)]서울대학교 의학연구원, [5)]서울대학교 의과대학 예방의학교실,
[6)]충남대학교 의과대학 예방의학교실, [7)]서울대학교 의학연구원 환경의학연구소, [8)]아주대학교 환경안전공학과,
[9)]아주대학교 환경연구소, [10)]한국환경연구원, [11)]코펜하겐대학교 보건학과

대기오염 장기노출과 파킨슨병(Parkinson's disease, PD)의 연관성에 대한 근거는 일관되지 않으며, 특히 아시아 고령인구를 대상으로 한 연구는 제한적이다. 본 연구는 국민건강보험자료를 이용하여 2010~2019년 65세 이상 성인 약 530만 명을 대상으로 대기오염 장기노출과 PD 발생의 연관성을 평가하였다. PD는 입원 또는 3회 이상의 외래 진단을 기준으로 정의하였으며, Community Multiscale Air Quality 모형을 이용하여 시군구별 초미세먼지($PM_{2.5}$), 이산화질소(NO_2), 오존(O_3) 농도를 추정하였다. 1년 이동평균 노출의 사분위범위(IQR) 증가에 따른 PD 발생 위험비(HR)를 시간가변 콕스비례위험모형으로 산출하였으며, 성별, 소득수준, 보험유형, 동반질환 등의 개인수준 요인과 시군구 수준의 인구·사회적 특성 대리지표(인구수, 고령인구 비율, 교육수준, 흡연율, 의료자원) 및 기상요인을 보정하고, 지역에 따라 층화하였다. 추적기간 중 143,557건의 PD가 발생하였다. 모든 공변량을 보정한 모형에서 $PM_{2.5}$ (IQR = 4.3 $\mu g/m^3$)와 O_3 (IQR = 7.3 ppb)는 PD 발생 위험 증가와 관련이 있었다($PM_{2.5}$: HR 1.018, 95% CI 1.008~1.028; O_3: HR 1.019, 95% CI 1.006~1.033). 반면 NO_2는 보정 후 역의 연관성을 보였으며, 인구학적·임상적 특성에 따른 유의한 효과변경은 관찰되지 않았다. 본 연구에서 $PM_{2.5}$와 O_3 장기노출은 국내 고령인구의 PD 발생 위험 증가와 관련이 있었으나, 효과 크기가 작아 신중한 해석이 필요하다.

사사 본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 「환경보건 디지털 조사기반 구축 기술개발사업」의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2021-KE0001615).

5G4

미세먼지 노출과 소아·청소년 알레르기질환의 관련성: 아토피피부염과 천식을 중심으로

Particulate Matter Exposure and Allergic Diseases among Children and Adolescents: A Focus on Atopic Dermatitis and Asthma

정경준[1),2)], 이용진[1)], 양지연[1)], 김창수[1),2)]

[1)]연세대학교 의과대학 기후환경건강 시스템과학연구소, [2)]연세대학교 의과대학 예방의학교실

미세먼지는 전신 염증반응을 유발하고, 면역학적으로 취약한 조직이나 장기에서 증상 또는 질환의 발생·악화에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 건강영향은 개인의 감수성과 노출 기간에 따라 달라질 수 있으며, 소아·청소년에서는 미세먼지 노출과 알레르기질환 간의 관련성이 지속적으로 보고되고 있다. 그러나 기존 연구의 대부분은 국외 인구집단을 대상으로 수행되어, 국내 자료를 활용한 역학적 근거는 여전히 제한적이다. 이에 본 연구에서는 국내 소아·청소년을 대상으로 미세먼지 노출과 알레르기질환 간의 관련성을 평가하였다. 2002년부터 2019년까지 에어코리아의 미세먼지 측정자료와 국민건강보험공단 자료를 연계하여 분석하였으며, 세종특별자치시를 제외한 전국 16개 시·도의 광역단위 자료를 활용하였다. 대상 알레르기질환은 아토피피부염과 천식으로 선정하였다. 질환 사례는 동일 대상자가 해당 질환으로 1년 동안 1회 이상 입원하거나 2회 이상 응급실을 방문한 경우로 정의하였다. 미세먼지 노출과 알레르기질환 발생 간의 관련성은 일반화가법모형(generalized additive model, GAM)을 이용하여 분석하였다. 성별, 연령, 기온 및 습도 등의 잠재적 교란요인을 보정하였으며, 지역·연도별 인구 규모의 차이를 고려하기 위해 해당 연도와 집단의 총인구수를 오프셋(offset)으로 적용하였다. 또한 미세먼지의 누적 및 지연 건강영향을 평가하기 위해 시차효과(lag effect)를 고려하였다. 각 시·도별로 산출한 상대위험도(relative risk, RR)는 메타분석을 통해 통합하여 국내 대표 RR을 도출하였다. 아울러 연령 및 성별 층화분석을 수행하여 잠재적인 효과수정 여부를 평가하였다. 분석 결과, PM_{10}과 $PM_{2.5}$ 노출은 모두 아토피피부염 및 천식 위험을 통계적으로 유의하게 증가시키는 경향을 보였다. 성별 및 연령별 효과 추정치의 크기에는 차이가 있었으나, 성별과 연령에 따른 효과수정은 통계적으로 유의하지 않았다.

5G5

임신 전/중/후 초미세먼지 노출과 아동 사회적 반응성의 연관성

Association between Perinatal Fine Particulate Matter and Social Responsiveness in Children

최하연, Bethsaida Cardona[1], Kristen Lyall[2], Jaime E. Hart[1], Marc G. Weisskopf[1]

카이스트 녹색성장지속가능대학원, [1]Harvard TH Chan School of Public Health, [2]Drexel Autism Institute

임신 중 대기오염 노출은 태아의 신경발달에 영향을 미쳐 자폐스펙트럼장애(autism spectrum disorder, ASD)를 비롯한 다양한 신경행동 발달에 영향을 줄 수 있다. 기존 연구에서는 주로 ASD 진단 여부를 중심으로 대기오염과의 연관성을 평가해왔으나, 자폐 관련 행동 특성을 연속적인 지표로 정량적으로 평가한 연구는 상대적으로 부족하다. 본 연구에서는 임신 중 초미세먼지($PM_{2.5}$) 노출이 아동의 자폐 관련 행동 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 연구 대상자는 Nurses' Health Study II 참여자의 자녀로, ASD 진단을 받은 사례군과 ASD 진단을 받지 않은 대조군을 포함하였다. 노출 수준은 임신 전체 기간뿐만 아니라 임신 삼분기 및 월별로 산출하여 시기별 노출 영향을 평가하였다. 아동의 자폐 관련 행동 특성은 어머니가 보고한 사회적 반응성 척도(Social Responsiveness Scale, SRS)를 이용하여 평가하였으며, 사례 여부 및 주요 공변량을 보정한 선형회귀모형을 적용하여 $PM_{2.5}$ 노출과 SRS 점수 간의 연관성을 분석하였다. 본 연구는 임신 중 초미세먼지 노출과 아동의 자폐 관련 행동 특성 간의 관계를 정량적으로 평가함으로써 대기오염이 아동 신경발달에 미치는 잠재적 영향을 규명하고, 임신 중 대기오염 노출 저감의 중요성을 제시하였다.

5H1

산단 일반대기 정밀측정용 측정 차량 설계 및 고해상도 시각화 플랫폼 개발

Development of a Precision Measurement Vehicle and High-Resolution Visualization Platform for Ambient Air Monitoring in Industrial Complexes

Le Thi Hoang Yen[1], 강천웅[1,2], 박종현[1,2], 윤준혁[1,2], 박세은[1,2], 서지영[1,2], 이헌영[1,2], 유한진[3], 전기준[1,2]

[1]수도권 미세먼지연구·관리센터, [2]인하대학교 환경공학과, [3]국립한국교통대학교 환경공학과

소규모 사업장이 밀집된 산업단지에서는 개별 배출원의 특성이 다양하고 배출 양상이 수시로 변화하여, 고정형 측정만으로는 대기배출원을 효율적으로 통합관리하는데 한계가 있다. 이에 본 연구는 산단 일반대기 및 고온 대기배출원을 정밀측정하고 배출원을 추적하며, 측정 데이터를 고해상도로 출력할 수 있는 고정/이동형 통합 플랫폼을 개발하고자 한다. 현재 추진 중인 1단계 연구에서는 산단 일반대기 정밀 측정용 차량을 설계하고 입자상/가스상 측정 기술의 차량 적용성을 검토하여 장비를 구축하고 있다. 차량은 측정 데이터 자체의 오염 가능성을 최소화하기 위해 배기가스를 배출하지 않는 친환경 전기차를 기반으로 하여, 측정 장비의 전원을 현장에서 자체 공급할 수 있는 구조로 설계할 예정이다. 이와 더불어 포집된 입자상 시료의 형상·원소조성·결정구조 등 물리화학적 특성을 분석하는 기술을 개발하여 배출원별 입자상 물질의 생성 및 노화 특성을 규명하고, 이를 배출원 추적의 기초 자료로 활용하고자 한다. 또한 GPS 및 지형정보와 연계하여 배출원의 시공간 분포를 고해상도로 표출하는 데이터 처리·출력 플랫폼을 설계하고 있다. 본 연구는 총 2단계로 구성되며, 1단계에서는 플랫폼 개발 및 사전 실증을 통해 소규모 산업단지 수준의 운용·관리 체계 기초를 마련하고, 2단계에서는 현장 실증을 바탕으로 배출원 추적 시스템의 적용성을 평가·보완하여 운용 매뉴얼을 완성할 예정이다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25501461).

5H2

고온 배출원 배출물질 정밀 측정을 위한 전처리 장치 소형화 기술 개발

Development of a Compact Pretreatment System for Precise Measurement of Emissions from High-Temperature Sources

이건희, Pham Viet Hoang, 조채연, 박예지, 한방우

한국기계연구원 도시환경연구실

고정오염원의 실시간 배출 관리는 굴뚝원격감시체계가 설치된 대형사업장에 집중되어 있어 중소규모 사업장은 상대적으로 감시의 사각지대에 놓여 있다. 이들 사업장의 배출량은 주로 신고자료나 배출계수로 산정되어 실제 가동 상태를 충분히 반영하기 어렵고, 직접 측정 또한 현장 접근성과 장비 설치의 제약이 크다. 특히 고온 배출원은 온·습도와 오염물질 농도가 높고, 운전 조건에 따라 굴뚝 유속이 변동하여 샘플링 유속과 차이가 발생할 경우 미세먼지 관점에서 입자 농도 측정에 편향이 발생할 수 있다. 따라서 다양한 배출 조건에서도 정확한 미세먼지 측정이 가능한 소형 전처리 시스템이 필요하다. 본 연구에서는 별도의 유량 제어 없이 넓은 유속 범위에서 등속흡입 효과를 구현할 수 있는 정체공기 샘플러의 소형화 기술을 개발하였다. 정체공기샘플러는 노즐 전단에 정체공기 영역을 형성하여 유속 불일치에 따른 입자 농도 왜곡을 최소화한다. 현장 접근성과 장비 설치 여건이 제한적인 중소규모 사업장에 대한 적용성을 확보하기 위해서는 전처리 장치의 휴대성과 운용 편의성을 고려한 소형화가 필요하다. 이에 기존 중소규모 사업장 배출원의 현황 및 관련 통계자료를 기반으로 주요 운전 및 배출 조건을 검토하고, 이를 반영하여 전처리 장치와 정체공기샘플러의 소형화 설계 및 제작을 수행하였다. 또한 다양한 굴뚝 유속 조건을 모사할 수 있는 시험 덕트를 구축하고, 유속 변화에 따른 정체공기샘플러의 입자 채취 특성 및 성능을 평가하였다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25501461).

5H3

SIFT-MS 기반 산업단지 이동측정 데이터 표준화 및 QA/QC 체계 구축 방안 연구

Development of a Data Standardization and QA/QC Framework for SIFT-MS-Based Mobile Measurements in Industrial Complexes

박은하, 조용선, 이광민, 이호승

RIST 환경연구소 환경보건연구그룹

산업단지 주변 대기오염물질의 노출 특성을 파악하기 위해 고정식 측정망을 보완하는 이동측정 기법의 활용이 증가하고 있으며, SIFT-MS (Selected Ion Flow Tube Mass Spectrometry)는 실시간 다성분 VOCs 분석이 가능하여 오염물질의 공간분포 및 고농도 지점 특성화에 유용하게 활용될 수 있다. 그러나 이동측정은 차량 속도와 정차에 따른 체류시간 및 자료 밀도의 불균일, 순간 고농도와 기기 이상치의 구분, 배경농도 설정에 따른 불확실성 등 고정식 측정과는 다른 품질관리 이슈가 존재하며, 이를 고려한 표준화된 데이터 처리 및 QA/QC 절차는 충분히 정립되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 산업단지 SIFT-MS 이동측정에 적용할 수 있는 데이터 표준화 및 QA/QC 체계(안)를 설계하고, 예비 이동측정을 통해 적용 가능성을 검토하고자 한다. 표준가스를 활용하여 주요 VOCs의 직선성, 정밀도, 검출한계, 반복성 및 시간 안정성 등 기본 분석 성능을 검토하고, 차량 속도와 정차 여부에 따른 자료 특성을 분석하여 데이터 처리기준을 검토하고자 한다. 또한 이상치 판별 및 배경농도 보정방법에 따른 차이를 비교하고, 동일 경로의 반복 이동측정을 통해 공간적 농도분포의 일치도와 변동성을 분석하여 재현성 평가를 위한 QA/QC 지표를 검토하고자 한다. 본 연구를 통해 SIFT-MS 기반 산업단지 이동측정 자료의 품질에 영향을 미치는 주요 요인을 파악하고 데이터 처리 및 QA/QC 프레임워크(안)를 제시함으로써, 향후 이동측정 체계 고도화와 산업단지 VOCs의 공간분포 및 고농도 지점 특성화 연구의 기초자료로 활용하고자 한다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25501461).

5H4

대기배출원 데이터베이스 구축 및 이동차를 활용한 배출원 분석 시각화 방안

Development of an Air Emission Source Database and Visualization of Emission Source Analysis Using Mobile Monitoring Vehicles

남형석, 강혜선, 이철환, 박태웅

에코데이터

대기오염물질을 배출하는 사업장은 약 6만여 개소에 달하며, 소규모 4, 5종 대기배출사업장은 현장의 관리감시체계가 미흡하여 사업장의 관리가 어렵고 실효성의 문제가 있다. 대기배출원 조사 및 대기배출원관리시스템, 화학물질배출량조사 시스템의 대기배출원의 사업장정보, 오염물질발생정보, 자가측정신고정보, 화학물질배출량 조사정보를 데이터베이스로 구축하고, 이동측정차량에서 측정된 오염물질 농도정보, 위경도 위치정보, 시간정보와 기상정보에서 수집된 풍향, 풍속, 온도 정보를 데이터베이스로 구축하여 이를 위성지도에 사업장의 위치, 이동측정차량의 위치 및 농도를 표시하여 산단 등 집중 대기배출 사업장이 있는 곳에서 오염물질을 배출하는 사업장을 인지할 수 있도록 시각화한다. 이동측정차량이 이동측정시에 고농도의 오염물질이 측정되었을 때 해당위치에서 오염물질을 배출한 사업장을 대기확산모델링을 근거로 풍향정보와 사업장오염물질 배출 데이터베이스를 통해 예측할 수 있는 시각화 방안이다. 이동측정차의 오염물질 측정정보는 격자형태와 8단계 색상정보로 지도위에 해당위치에 농도를 표시하고,바람의 풍향을 지도위에 표시하고, 사업장의 위치를 지도에 표시한다. 대기배출원 데이터베이스 구축과 이동측정차의 측정값을 시각하 하여 대기배출 사업장을 관리할 수 있도록 한다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25501461).

5I1

다양한 관측 플랫폼을 활용한 오존 입체 감시

Three-Dimensional Ozone Monitoring Using Multi-Platform Observations

최용주, 이기열, 우서라, 김민호, 강형모, 윤치성

한국외국어대학교 환경학과

오존은 NOx와 VOCs 등 전구물질의 광화학 반응으로 생성되는 이차 오염물질로, 배출원 특성·기상 조건·수송 이력에 따라 그 시공간 분포가 크게 달라진다. 특히 한반도는 국내 자체 배출과 함께 대륙 기원 월경성 오염의 영향을 동시에 받는 지역으로, 단일 관측만으로는 오존 및 전구물질의 거동을 정확히 진단하기 어렵다. 본 연구는 지표·패시브·위성·지표 광학·항공 관측을 결합한 입체관측 프레임워크를 통해 오존 전구물질의 다차원 거동을 종합 분석에 대한 필요성을 알아보고자 한다. 도시대기측정망은 NO_2와 O_3의 시간적/공간적 고해상도 자료를 통해 광화학 반응성 진단의 기초를 제공하고, 수동 채취기(PAS)는 저비용·다지점 동시 채취를 통해 측정망이 존재하지 않는 권역의 VOC 조성별 공간 분포를 확보한다. 정지궤도 환경위성 GEMS 및 TROPOMI는 NO_2, HCHO 컬럼 농도의 광역적인 시공간 자료를 제공하며, HCHO/NO_2 비(FNR) 기반 광화학 레짐 진단의 핵심 지표로 활용될 수 있다. 지표 광학관측 Pandora/MAX-DOAS는 국제 표준 네트워크와 연계하여 통합 연직 분석과 위성 검증을 가능케 하며, 항공관측(C90GT)은 대형 배출원 상공의 연직 분포 관측과 하향식 배출량 재추정을 통해 오존 생성 실체를 규명하는 데 사용된다. 이들 관측 정보를 유기적으로 통합함으로써 오존 생성 원인물질별 역학관계 규명, 권역별/연직별 오존 생성 기여율 진단이 가능해질 수 있다. 본 발표에서는 입체관측 기반 통합 분석의 방법론과 초기 결과를 소개하고, 향후 지역맞춤형 오존 관리 기술개발을 통한 정책지원형 전략 도출 방향을 논의한다.

사사 본 연구는 2026년도 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 지역맞춤형 오존 관리 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25505137).

5I2

온·오프라인 GC-FID/MS 측정 기반 여수 산업지역 C_2-C_5 VOCs의 오존 생성 잠재력 평가

Ozone Production Potential of C_2-C_5 VOCs in the Yeosu Industrial Area Based on Online and Offline GC-FID/MS Measurements

배민석, 송명기, 최서영, 박채형, 고동훈, 김우준, 박재환, 백성옥

국립목포대학교

여수국가산업단지는 대규모 석유화학 및 화학제품 제조시설이 밀집되어 있어 다양한 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)이 배출되며, 이들 전구물질에 의한 광화학적 오존 생성 가능성이 높은 지역이다. 특히 ethane, ethylene, propane, propylene 및 butenes 등 C_2-C_5 저분자 탄화수소는 산업공정 및 연소과정에서 직접 배출되며, 일부 불포화 탄화수소는 높은 OH 반응성으로 인해 오존 생성에 중요한 역할을 할 수 있다. 본 연구에서는 2026년 여수지역에서 온·오프라인 GC-FID/MS 측정을 수행하여 C_2-C_5 VOCs의 농도, 조성 및 시간적 변화를 파악하고 이들의 오존 생성 기여 특성을 평가하였다. 오프라인 VOCs는 thermal desorption tube에 3시간 동안 포집한 후 Deans switch가 장착된 GC-MS/FID를 이용하여 분석하였다. Deans switch를 통해 저분자 VOCs를 선택적으로 분배하고, DB-1 및 Al_2O_3 column이 직렬로 연결된 FID 경로에서 C_2-C_5 탄화수소를 정량하였다. 동시에 온라인 GC 자료와 비교하여 주요 C_2-C_5 성분의 농도 수준과 시간적 변동 특성을 평가하였다. VOCs 자료는 NOx, O_3 및 기상 관측자료와 시간적으로 일치시켰으며, VOC 반응성과 HO_2 및 RO_2 라디칼에 의한 NO 산화반응을 기반으로 오존 생성률 및 성분별 오존 생성 기여도를 평가하였다. 특히 ethylene과 propylene을 포함한 불포화 C_2-C_5 탄화수소의 농도와 광화학 반응성을 함께 고려하여 오존 생성에 미치는 영향을 중점적으로 분석하였다. 본 연구는 기존 C_5 이상 방향족 VOCs 중심의 오존 연구에서 상대적으로 제한적으로 평가되어 온 C_2-C_5 고휘발성 탄화수소의 역할을 규명하고, 여수 산업지역의 주요 오존 전구물질 선정과 효율적인 VOCs 관리방안 수립을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

사사 This work was supported by the Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (NIER-2024-03-03-002 & RS-2026-25505137) and by a grant (RS-2026-25519883) of the National Research Foundation (NRF) of Republic of Korea.

5I3

ECC 오존존데 기반의 대기 오존 프로파일링 및 활용 연구

Atmospheric Ozone Profiling Based on ECC Ozonesonde Observations and Its Applications

강현규, 김주완, 안상현, 오수빈, 최용주[1], 이기열[1], 김민호[1], 강형모[1], 신선아[2]

국립공주대학교 대기과학과, [1]한국외국어대학교 환경공학과, [2]국립환경과학원 환경위성센터

대류권 오존은 광화학 산화반응으로 생성되는 2차 오염물질로, 강한 산화력을 지녀 인체 건강에 유해하다. 또한 오존은 장파 복사를 흡수하는 온실기체로서 대기 온도 상승에도 기여하므로, 지속적인 관측이 요구된다. 국내에서는 조밀한 지상 관측망을 통해 지표 오존의 시공간 변동이 안정적으로 감시되고 있다. 그러나 한반도에서 오존의 연직 분포를 관측한 사례는 제한적이어서, 경계층 상부와 자유대류권에서의 변동은 충분히 파악되지 않고 있다. 본 연구는 ECC (Electrochemical Concentration Cell) 오존존데를 이용하여 오존의 연직 분포를 관측하고, 이를 활용할 수 있는 연구 분야를 소개하고자 한다. 오존존데는 지표에서 성층권 하부(~30 km)까지 약 100 m의 연직 분해능으로 오존 분압을 직접 측정한다. 관측된 프로파일은 혼합층 발달, 장거리 수송, 성층권-대류권 교환 등 다양한 기상 현상에 수반된 오존 연직 분포의 변화를 분석하는 데 유용하다. 또한 이는 GEMS 등 위성 오존 산출물, 화학수송모델, 재분석 자료의 연직 구조를 검증하는 기준 자료로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 집중관측 기간 동안 일 단위 연속 관측을 수행하여 오존 연직 분포의 변화를 추적하였다. 특히 주간과 야간 하루 2회 관측을 통해 대류권 하층 오존의 일변화(diurnal cycle)를 분석하였다. 이러한 연직 관측은 지상 관측만으로는 설명하기 어려운 고농도 오존 사례의 형성 기작을 규명하는 데 기여할 것으로 기대된다.

사사 본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2024-0555-01).

5I4

오존 생성과 위해 유기성분 발생의 상호연관성

Interrelationship between Ozone Production and the Formation of Hazardous Organic Compounds

최나래[1),2)], 김용표[3)], 이지이[4)], 김은혜[5)], 김순태[6)], 신혜정[7)]

[1)]강원대학교 환경공학과, [2)]강원권 미세먼지연구관리센터(강원대학교), [3)]서울대학교 미세먼지특성화대학원,
[4)]이화여자대학교 환경공학과, [5)]국립군산대학교 환경공학과, [6)]아주대학교 환경안전공학과, [7)]국립환경과학원 환경위성센터

니트로소디메틸아민(nitrosodimethylamine, NDMA)은 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)가 인체발암 추정물질인 2A군으로 분류한 물질이며 서울의 측정농도는 5.93 ± 11.63 ng/m^{3}로 권고 수준을 크게 상회한다. 본 연구는 증가하는 오존(O_3)에 의한 오존화(ozonation)가 입자상 니트로소화합물의 생성경로가 될 수 있는지를 2018년 서울 측정자료와 박스모델로 검증하였다. 박스모델 모의 결과 액상 에어로졸 반응의 연간 기여율은 35.3%였으며 기상에서 입자상으로의 분배 기여는 무시할 수 있는 수준이었다. NDMA 농도는 O_3/디메틸아민(dimethylamine, DMA) 비와 음의 상관을 보였고 pH 3~4 구간에서 높게 나타나 니트로화(nitrosation)가 주된 경로임을 시사하였다. 오존화 메커니즘을 포함한 결과 측정농도 대비 추정농도의 비는 33.8%에서 41.1%로 향상되었으며 오존화 기여율은 여름철(10.0 ± 0.77%)과 겨울철(7.9 ± 3.8%)에 높았다. 여름철의 높은 기여는 O_3/NO_x 비가 1.63 ± 0.69로 높고 pH가 2.2 ± 0.4로 낮아 니트로화가 억제되는 조건에 기인한다. 오존 농도 증가가 인체 위해성이 큰 유기성분의 이차 생성에 기여할 수 있음을 정량적으로 보여주며 오존 저감 정책과 유해 유기성분 관리의 연계 검토가 필요함을 시사한다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지역맞춤형 오존 관리 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25505137).

5I5

지표원격관측을 통한 오존 생성 전구물질의 연직 분포 파악

Characterization of Ozone Precursor Vertical Behavior Using Ground-based Remote Sensing Measurements

윤치성, 이기열, 최용주

한국외국어대학교 환경학과

대류권 오존(O_3)은 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOCs)의 광화학 반응으로 생성되는 대표적인 2차 대기오염물질이다. 오존 생성은 NOx와 VOCs의 상대적 수준에 따라 비선형적으로 변화하므로 효과적인 저감전략 수립을 위해서는 전구물질의 분포와 오존 생성 민감도를 파악하는 것이 중요하다. 포름알데하이드(HCHO)는 VOCs의 산화과정을 반영하고, 이산화질소(NO_2)는 NOx의 주요 관측 지표로 활용되며, HCHO/NO_2는 오존 생성 민감도를 진단하는 지표로 이용되어왔다. 그러나 이들의 분포와 오존 생성 민감도는 지역과 시기뿐만 아니라 고도에 따라서도 달라질 수 있어, 기존의 지표·컬럼밀도 기반 분석만으로는 대기 경계층 내 연직적 비균질성을 반영하는 데 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 국내 PGN (Pandonia Global Network)의 Pandora와 MAX-DOAS (Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy)를 활용하여 HCHO와 NO_2의 연직 특성을 분석하고자 한다. 각 장비의 산란광 스펙트럼으로부터 HCHO, NO_2 및 O_4의 차등경사컬럼농도를 산출하고, Mexican MAX-DOAS Fit (MMF) 알고리즘을 적용하여 연직분포를 복원한다. 이후 averaging kernel과 DOF (Degrees of freedom)를 이용해 복원 민감도를 평가하고, 두 물질의 공통 유효 고도 범위에서 HCHO/NO_2를 산출한다. 이를 바탕으로 HCHO와 NO_2의 고도별 분포 및 HCHO/NO_2의 연직 변화를 지역 및 시기별로 비교하여, 오존 생성 민감도의 고도별 변화 양상을 파악한다. 본 연구를 통해 국내 대기경계층 내 오존 전구물질의 연직적 거동을 제시하고, 오존 생성 특성에 대한 입체적인 이해를 확장하고자 한다.

사사 본 연구는 2026년도 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 지역맞춤형 오존 관리 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25505137).

Session 6A 측정·분석

좌장 : 김경환 [한국과학기술연구원]

6A1) 블랙카본의 산화 수준과 이차 무기 에어로졸의 혼합 조건에 따른 입자의 물리화학적 특성 및 광학적 특성 변화 규명
6A2) 아스팔트 배출물질의 2차 유기 에어로졸 생성: 블랙카본 공존 영향
6A3) SP-AMS 및 Aethalometer 측정을 통한 서울대기 PM_1의 계절적 특성과 배출원 특성 분석
6A4) EANET VOC 관측 도입을 위한 울란바토르 passive sampling 파일럿 연구
6A5) 기상관측선을 활용한 2026년 상반기 한반도 주변 해상 온실가스 관측 결과
6A6) 울산지역 VOCs의 공간분포 특성과 이차 생성 잠재력 평가

Session 6B 측정·분석

좌장 : 유한진 [국립한국교통대학교]

6B1) CRM 기반 총 OH 반응성 측정 시스템의 순천 지역 지상 관측 적용
6B2) 에디 공분산 관측을 통한 울산 도심의 오존플럭스 및 건성침적속도: 여름과 겨울 측정 비교
6B3) PTR-ToF-MS 기반 BVOCs 정도관리 및 일변동 특성: Isoprene과 α-Pinene
6B4) 이동측정 기반 산업단지 hotspot의 입경분포 특성 분석
6B5) 실시간 다항목 이동관측에 기반한 배출원 밀집 지역 내 오존 및 전구물질의 공간적 불균일성 규명

Session 6C 대기환경모델링·AI

좌장 : 김민중 [명지대학교]

6C1) 다중 위성 자료와 인공지능을 융합한 시공간 연속적 전천(All-sky) 시간별 총일차생산량 모델링
6C2) CAPSS 배출량 처리를 위한 시간·공간·화학종 DB 개선 방안 검토 및 대기질 모사 농도(PM-2.5, Ozone) 영향 분석
6C3) 남한 주변 해역 해양기원 자연배출의 대기환경 영향과 에어로졸-복사-기상 결합 효과
6C4) 딥러닝을 활용한 위성 기반 인위적 CO_2 배출 모니터링 향상
6C5) 동아시아 식생기능형(PFT) 자료 변화가 생물기원 휘발성유기화합물(BVOCs) 배출 및 오존 농도에 미치는 영향

Session 6D 방지기술

좌장 : 양재환 [충남대학교]

6D1) 머신러닝 기반 건조·습윤 조건에서의 바이오차 CO_2 흡착 특성 비교
6D2) Mg/Al 조성비가 층상이중수산화물(LDH)의 기체상 HCl 흡착 및 CO_2 배출에 미치는 영향
6D3) 지지체별 수분흡수 특성이 알칼리 첨착 흡착제의 H_2S 제거성능에 미치는 영향
6D4) 무탄소 연료(수소, 암모니아) 연소 배가스 제어를 위한 탈질 촉매 기술 동향
6D5) SO_2 흡수제 선정을 위한 알칼리 흡수제의 pH 변화 및 흡수 특성 비교

Session 6F 대기위해성

좌장 : 정경준 [연세대학교]

6F1) 수소 환원 기반 결함 생성 및 계면 제어를 통한 $NiOx/TiO_2$ 광촉매 필터의 개발과 폼알데하이드와 황화수소 제거 성능 향상
6F2) Statistical Treatment of Uncertainties in the Estimation of Cumulative Cancer Risk Due to Atmospheric Dioxin-Like Compounds
6F3) 대기 $PM_{2.5}$의 시간에 따른 ·OH 생성과 화학조성의 연계: 금속과 유기성분의 역할
6F4) 미세먼지 질량농도와 산화잠재력 기반의 배출원 기여도 통합 평가
6F5) 2025~2026년 안산 지역 $PM_{1.0}$ 중 PFAS 배출 규명 및 인체 위해성 평가

Session 6G [특별세션] (Closed Session) 비산배출원 규명을 위한 NH_3-PM 측정 라이다 및 모니터링 기술

좌장 : 노영민 [국립부경대학교]

6G1) 대기 중 암모니아 측정을 위한 라이다 개발
6G2) 암모니아 유래 에어로졸의 온습도별 점성도 측정
6G3) 비산배출원 관측을 위한 NH_3-PM 라이다 기술의 현황과 과제
6G4) 대기 관리를 위한 라이다 기술 개발 현황

Session 6H [측정·분석분과회 특별세션] 첨단 대기측정분석기술과 AI 기반 데이터 활용

좌장 : 이지이 [이화여자대학교]

6H1) I-CIMS를 활용한 겨울철 질산염의 야간 생성반응 이해
6H2) 인공지능을 이용한 유해대기오염물질의 고해상도 지도 제작
6H3) 스캐닝 라이다 기반 경기도 미세먼지 배출사업장 단속 기법 및 효율 향상
6H4) 정밀 분광분석과 질량분석을 통한 저감된 NOx 조건에서의 국내 반응성 질소 화학 및 조성 연구
6H5) MAX-DOAS 관측 기반 서울 도심 HONO, HCHO, CHOCHO의 연직 분포 특성
6H6) 대기중 반응성 질소의 질소·산소 안정동위원소비 분석시스템 구축

Session 6I [특별세션] 고농도 오존 hot-spot 관리 II

좌장 : 곽경환 [강원대학교]

6I1) 전구물질 배출 hot-spot과 고농도 오존 hot-spot의 유형 분류 기법
6I2) 지역 맞춤형 대기질 정책 지원을 위한 통합 분석 플랫폼의 현재와 미래
6I3) 2026년 여름철 고농도 오존의 발생 특성과 시사점 - 수도권과 광양만을 중심으로
6I4) CTM 기반 AI를 활용한 위성 관측 기반 지표 대기질 추정

6A1

블랙카본의 산화 수준과 이차 무기 에어로졸의 혼합 조건에 따른 입자의 물리화학적 특성 및 광학적 특성 변화 규명

Effects of Surface Oxidation and Secondary Inorganic Aerosol Coating on the Physicochemical and Optical Properties of Black Carbon Particles

박종현[1),2)], 레티황이엔[2)], 유한진[3)], 송영철[4)], 윤준혁[1),2)], 서지영[1),2)], Weijun Li[5)], 전기준[1),2)]

[1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [3)]국립한국교통대학교 환경공학과,
[4)]한국화학연구원 화학분석센터, [5)]저장대학교 대기과학과

블랙카본(Black carbon, BC)은 불완전 연소 과정에서 발생하며, 광흡수 효율이 높아 기후변화의 주요 원인 물질로 간주된다. BC는 대기 중 체류시간이 며칠에 불과한 단수명 기후오염물질로, 배출량 변화에 따라 기후 시스템이 신속히 반응하여 단기간에 기후변화를 늦출 수 있는 핵심 기후완화 요인으로 주목받고 있다. 대기 중 BC는 이차 무기 에어로졸(Secondary Inorganic Aerosol, SIA)과 혼합되는 노화과정에서 형태 및 광흡수 특성이 달라지나, 현행 기후모델은 이를 지나치게 단순화하고 있어 BC의 복사강제력 추정에 상당한 불확실성이 존재한다. 특히 BC 표면의 산화 수준은 SIA와의 혼합 정도 및 구조 변화에 결정적인 영향을 미치나, 산화 여부에 따른 체계적인 비교 연구는 아직 충분하지 않다. 본 연구에서는 BC의 산화 수준과 SIA와의 내부 혼합이 BC의 물리화학적 특성 및 광흡수 효율에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 이를 위해 산화된 BC(BC1)와 산화되지 않은 BC(BC0) 각각에 대해 BC 단독조건과 황산암모늄(AS), 질산암모늄(AN), AS-AN 혼합(ASAN) 조건을 적용하고, 조건별 유효밀도와 형상계수를 산출하였으며, 광흡수 효율 및 형태 특성을 분석하였다. 연구 결과, SIA 혼합 조건에 따라 응집체의 구조변화가 상이하게 나타났으며, SEM·TEM을 통해 유의미한 형태변화를 관찰하였다. BC1은 BC0보다 유효밀도가 높고 형상계수가 구형에 가까운 구조를 보였으며, AN이 AS보다 더 조밀한 구조를 유도하였다. MAE는 단독 조건에서 BC0와 BC1이 유사했으나, AN 코팅 시 두 산화조건 모두에서 증강효과가 나타나 BC1AN이 최고값을 보인 반면 AS 코팅의 증강효과는 미미하였다. ASAN 조건은 AS와 유효밀도와 형상계수가 서로 유사하였음에도 MAE는 뚜렷히 높아, 입자 구조와 광흡수 효율 간 디커플링이 확인되었다. 본 연구 결과는 BC 노화 과정의 이해와 광흡수 파라미터 개선을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00416902).

6A2

아스팔트 배출물질의 2차 유기 에어로졸 생성: 블랙카본 공존 영향

Secondary Organic Aerosol Formation from Asphalt Emissions in the Presence of Black Carbon

레티황이엔[1)], 서지영[2)], 이창주[3)], 윤종상[3)], 정용원[1),2)], 전기준[1),2)]

[1)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [2)]인하대학교 환경공학과, [3)]가톨릭대학교 에너지환경공학과

Asphalt pavement is increasingly recognized as a major non-combustion source of urban organic emissions, yet its climate relevance remains largely unquantified, in part because asphalt-derived secondary organic aerosol (SOA) does not evolve in isolation from co-emitted black carbon (BC). Here, we combined high-resolution ambient observations from a real-world summertime field campaign with systematic oxidation flow reactor (OFR) experiments to track the daytime aging of fresh and in-service asphalt binder emissions, both alone and in the presence of BC seed particles. Field measurements revealed pronounced midday enhancements of oxygenated organic aerosol, with distinct aging signatures across different atmospheric processing periods. OFR experiments confirmed efficient formation of ultrafine SOA driven by rapid oxidation. When BC seeds were present, condensation of asphalt-derived oxidation products shifted particles from external to internal mixing within 7-day of equivalent photochemical age, increasing the mass absorption cross-section at 640 nm by 37%. Ambient SOA production yield exhibited an increase of 35% while co-emission with BC, implicating asphalt-derived semi-volatile organic compounds as important contributors to the urban background aerosol pool. Asphalt emissions should therefore be treated not only as an SOA source, but as a modifier of urban BC radiative forcing.

사사 This work was supported by the National Institute of Environmental Research (NIER) funded by the 'Ministry of Climate, Energy and Environment' (MCEE) of the Republic of Korea (NIER-2024-03-03-002), this work also was funded by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (No. RS-2024-00416902).

6A3

SP-AMS 및 Aethalometer 측정을 통한 서울대기 PM_1의 계절적 특성과 배출원 특성 분석

Seasonal Variability and Source Characteristics of PM_1 in Seoul Using SP-AMS and Aethalometer Measurements

이석현[1),2)], 이혜지[1),2)], 김경환[1)]

[1)]한국과학기술연구원 기후탄소순환연구단, [2)]고려대학교 지구환경과학과

블랙카본(black carbon, BC)은 화석연료 및 바이오매스 불완전 연소 과정에서 배출되는 주요 에어로졸 성분으로, 대기질과 기후에 중요한 영향을 미친다. 하지만 BC는 다양한 연소원에서 배출되며 이후 유기 및 무기 에어로졸 성분과 내부혼합되거나 다른 성분에 의해 코팅되면서 물리화학적 특성이 변화하기 때문에 BC 농도만으로 배출원을 구분하고 대기 중 변화를 이해하는 데에는 한계가 있다. 특히 서울은 다양한 도시 배출원의 영향을 받는 동시에 동아시아 지역으로부터의 장거리 수송의 영향을 받을 수 있어, BC 및 관련 에어로졸의 특성이 복합적으로 나타날 수 있다. 따라서 본 연구에서는 서울 도심에서 2024년 1월과 4월에 soot particle aerosol mass spectrometer (SP-AMS)와 7파장 Aethalometer (AE-33)를 이용하여 비내화성 PM_1 성분, refractory black carbon (rBC) 및 equivalent black carbon (eBC)을 관측하였다. SP-AMS의 유기 에어로졸에 대한 positive matrix factorization (PMF) 결과를 기상자료와 함께 분석하여 겨울철과 봄철의 배출원 특성과 그 기원 지역의 차이를 파악하고, AE-33의 광흡수 기반 배출원 분석을 통해 이러한 계절적 배출원 변화가 광학적 특성에서도 일관되게 나타나는지 평가하였다. 이러한 분석은 서울 대기 중 BC 및 관련 에어로졸의 계절별 배출 특성과 대기 중 수송 및 노화 과정을 종합적으로 이해하는 데 기여할 수 있다.

사사 이 연구는 기후에너지환경부(MCEE)의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 지역 맞춤형 오존 관리 사업(RS-2026-25501457)과 KIST 기관고유사업(No. 26E0111)의 지원을 받아 수행되었습니다.

6A4

EANET VOC 관측 도입을 위한 울란바토르 passive sampling 파일럿 연구

Pilot Study of Passive Sampling for EANET VOC Monitoring in Ulaanbaatar

이지민, Minggun Huo[1)], Yujiro Ichikawa[2)], Gantuya Ganbat[3)], Barkhasragchaa Baldorj[4)], 이미혜

고려대학교 지구환경과학과, [1)]Asia Center for Air Pollution Research (ACAP), Japan,
[2)]Center for Environmental Science in Saitama (CESS), Japan,
[3)]German-Mongolia Institute for Resources and Technology (GMIT), Mongolia,
[4)]Central Laboratory of Environment and Meteorology (CLEM), Mongolia

동아시아 산성강하물 모니터링 네트워크(EANET)는 대기오염 개선을 위한 관측의 범위를 확대하고 있다. 특히 휘발성유기화합물(VOCs)은 관측의 필요성이 증가하고 있으나, 실시간 연속관측을 통한 고품질 VOC 자료 생산에는 경제적·기술적 한계가 있다. 본 연구에서는 EANET VOC 관측에 적용 가능한 보완적 방법으로 passive sampler의 활용 가능성을 평가하기 위해, 2026년 3월 몽골 울란바토르 내 18개 지점에서 4주간 Carbopack X passive sampling을 수행하였다. Passive sampling의 정량적 적용성을 비교하기 위해 한 지점에서 2주간 Air Toxics sorbent tube를 이용한 active sampling을 병행하였다. 정량된 PAMS VOC 52종의 4주간 TVOC 평균 농도는 47.5 $\mu g\ m^{-3}$였으며, 종별로는 cyclopentane, n-butane, toluene 순으로 높았다. 겨울철 도시 내에서는 뚜렷한 VOC 공간 변동성이 관찰되었으며, 일부 방향족 VOC는 도심 중앙부에서 상대적으로 높은 반면, C4-C5 탄화수소, benzene 및 C11-C12 n-alkane은 서로 다른 지역에서 높았다. 주요 방향족 VOC는 active sampling 결과와 대체로 유사한 농도 수준을 보였으며, toluene은 특히 두 방법에서 각각 4.47과 4.34 $\mu g\ m^{-3}$로 잘 일치하였다. 이러한 결과는 passive sampling이 EANET 관측망에서 VOC의 공간적 변동성과 배출원 영향을 효율적으로 파악하기 위한 보완적 관측수단으로 활용될 수 있음을 보여준다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2026-25501457).

6A5

기상관측선을 활용한 2026년 상반기 한반도 주변 해상 온실가스 관측 결과

Observational Results of Oceanic Greenhouse Gases around the Korean Peninsula in the First Half of 2026 Using a Meteorological Research Vessel Gisang 1

정석한, 이선란, 김수민

국립기상과학원 지구대기감시연구과

대기 중 주요 온실가스인 이산화탄소와 메탄은 지구 온난화 및 전 지구적 기후변화를 유발하는 핵심 물질로 작용한다. 온실가스 농도의 지속적인 증가로 인해 기후시스템의 복잡성이 커짐에 따라, 전 지구 및 지역단위의 탄소수지를 명확히 평가하고 기후변화 예측을 위한 온실가스 관측의 중요성은 날로 강조되고 있다. 온실가스 관측을 위해 다양한 지역 환경에서 관측망을 구축하여 장기관측을 수행해왔으며, 수집된 자료는 기후 및 탄소순환 모델의 고도화를 위한 입력자료로 활용되고 있다. 다만, 장기간의 지상관측자료에 비해 온실가스의 주 흡수원인 해상 온실가스 관측데이터는 매우 부족한 실정이다. 삼면이 바다로 둘러싸인 한반도의 특성을 고려할 때, 해상 관측자료의 확보는 대륙성기단의 영향을 받는 풍상 지역으로부터의 유입과 국내 산업 및 인간활동으로 인해 생성되는 내부 유출을 구분하기 위한 기초자료를 확보한다는 점에서 의미가 있다. 기상청 국립기상과학원에서는 해상 기상관측을 위한 '기상1호'를 2011년에 구축하였으며 한반도 주변 해양의 온실가스 장기 특성을 분석하고자 2026년부터 온실가스 연속관측을 시작하였다. 본 연구에서는 2026년 상반기에 측정한 우리나라 해상 온실가스의 변동특성을 분석하고 해상에서의 관측공백을 해소하기 위한 자료로서의 활용성을 평가하고자 한다.

사사 본 내용은 기상청 국립기상과학원의 기상업무지원기술개발연구 '기후변화 입체감시 기술개발'의 지원을 받아 수행된 연구임(KMA2018-00324).

6A6

울산지역 VOCs의 공간분포 특성과 이차 생성 잠재력 평가

Spatial Distribution and Secondary Formation Potential of VOCs in Ulsan

김기애[1], 김상화[1], 이종재[1),2)], 송창근[1),2)], 최성득[1),2)]

[1)]울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, [2)]동남권 미세먼지연구관리센터

휘발성유기화합물(VOCs)은 산업활동, 교통, 식생 등 다양한 발생원에서 배출되며, 광화학 반응을 통해 오존과 이차 유기에어로졸(SOA)을 생성하는 주요 전구물질이다. 특히 산업단지가 밀집한 울산에서는 대기질 관리를 위해 VOCs의 공간분포 특성을 파악하고 이차 생성 잠재력을 규명할 필요가 있다. 본 연구에서는 2026년 겨울(2월 23일~3월 5일) 기간에 울산지역 22개 지점에 수동대기채취기를 설치하여 VOCs 시료를 채취하고, 24종의 VOCs를 TD-GC/MS로 분석하였다. 울산지역 총 VOCs의 평균 농도는 20 $\mu g/m^3$였으며, 주요 성분은 toluene이 7.0 $\mu g/m^3$로 가장 높았다. 역거리 가중 보간법을 이용하여 공간분포를 평가한 결과, 총 VOCs와 BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes) 농도는 울산미포국가산업단지, 특히 석유화학산단과 조선중공업산단에서 높았으며, 광화학 반응성 지표 역시 산업단지를 중심으로 높아 산업활동에 따른 VOCs 배출 특성을 반영하는 것으로 판단된다. 광화학 반응성 지표에 따라 이차생성에 대한 주요 기여 물질은 상이하였으며, 프로필렌 등가 농도는 trimethylbenzene, 오존 생성 잠재력은 xylene, SOA 생성 잠재력은 benzene이 가장 높았다. 본 연구에서는 울산지역 VOCs의 공간분포 특성과 광화학 반응성을 평가하고, 지표별 주요 기여 물질의 차이를 확인하였다. 이러한 결과는 울산지역의 산업활동에 따른 VOCs 오염 특성을 이해하고, VOCs 관리와 오존 및 SOA 생성 특성을 평가하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2024-03-03-002).

6B1

CRM 기반 총 OH 반응성 측정 시스템의 순천 지역 지상 관측 적용

Ground-Based Field Application of a CRM-Based Total OH Reactivity Measurement System in Suncheon, South Korea

윤성지, 남우희, 이수진, 이경환, 민경은

광주과학기술원 환경·에너지공학과

OH 라디칼(hydroxyl radical)은 대기 중 휘발성유기화합물(VOCs), 일산화탄소(CO) 등 다양한 미량기체를 산화시키는 주요 산화제이다. OH 라디칼의 총 손실빈도를 나타내는 OH 반응성(OH reactivity, OHR)은 대기 중 반응성 물질의 영향을 종합적으로 평가하는 지표이다. OHR은 각 화학종의 농도와 OH 반응속도상수의 곱을 합하여 산정할 수 있지만, 실제 대기에 존재하는 모든 반응성 화학종을 개별적으로 정량하는 데에는 한계가 있다. 따라서 총 OHR을 직접 측정하면 대기 중 반응성 물질에 의한 전체 OH 손실을 파악하고, 관측된 화학종만으로 설명되지 않는 반응성을 평가하는 데 활용할 수 있다. 이에 본 연구에서는 기준물질인 파이롤(pyrrole)과 대기 시료 간의 OH 경쟁반응을 이용하는 기존 CRM (Comparative Reactivity Method) 기반 총 OHR 측정 시스템을 지상 현장 관측에 적합하도록 보완하고, 이를 순천 지역 집중관측에 적용하였다. 파이롤 농도는 PTR-ToF-MS (Proton Transfer Reaction-Time of Flight Mass Spectrometry)를 이용하여 정량하였으며, 이를 바탕으로 대기 중 총 OHR을 연속 측정하였다. 본 발표에서는 측정 시스템의 구성과 운용 원리를 소개하고, 순천 지역에서 관측된 총 OHR의 시간 변동과 동시 측정된 VOCs의 기여 특성을 제시한다. 또한 습도 변화, 시료 희석 및 NO에 의한 OH 재생반응 등 CRM 측정에 영향을 미치는 주요 간섭요인을 검토하여 시스템의 현장 적용성과 향후 미측정 반응성 평가를 위한 활용 가능성을 논의한다.

사사 이 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-04-02-60).

6B2

에디 공분산 관측을 통한 울산 도심의 오존플럭스 및 건성침적속도: 여름과 겨울 측정 비교

Ozone Flux and Dry Deposition Velocity in Urban Ulsan Using Eddy Covariance Measurements: A Comparison between Summer and Winter Campaigns

박유경, 박용미[1)], 한수빈[1)], 서성민[1)], 최원식[1)]

국립부경대학교 SEED 연구소, [1)]국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공

한국의 오존(O_3) 농도 증가 원인을 과학적으로 규명하기 위해서는 오존의 화학 균형 방정식에 대한 정량적인 이해가 필수적이다. 특히 소멸항에 해당하는 건성침적속도는 지표 환경과 난류 특성에 따라 큰 변동성을 보인다. 이에 본 연구에서는 울산 도심을 대상으로 여러 해에 걸쳐 각각 2주간의 에디 공분산(EC) 관측을 수행하고, 측정된 오존 플럭스를 이용하여 건성침적속도($V_d(O_3)$)를 산출하였다. 캠페인이 거듭됨에 따라 시간 지연(Time lag) 보정과 정상성 및 난류 특성(ITC) 검정 등 자료 처리 기법을 고도화하여 플럭스 자료의 신뢰도를 향상시켰다. 특히 오존 코스펙트럼 분석을 통해 인렛 및 기기 응답 특성에 따른 고주파 감쇠를 확인하고, 전달함수를 적용하여 플럭스의 과소평가를 보정하였다. 관측결과, 여름철 오존 플럭스와 $V_d(O_3)$는 겨울철과 뚜렷한 차이를 보였다. 여름철 오존 플럭스는 주간에 음의 값을 보이고 야간에는 0에 가까워지는 일변동을 나타낸 반면, 겨울철에는 야간에도 작은 음의 플럭스가 지속되었다. 또한 출근 시간대에는 신규 NO 배출로 오존 농도가 감소함에도 $V_d(O_3)$와 플럭스의 크기가 오히려 증가하여, 도심에서의 오존 침적이 물리적 난류 수송뿐만 아니라 화학적 과정의 영향도 받을 수 있음을 보여주었다. 본 연구는 다양한 지면환경과 뚜렷한 사계절을 가진 한국의 오존 수지에 대한 이해를 높이고, 나아가 대기화학모델의 건성침적 모수화를 개선하기 위해서는 다양한 환경에서의 장기 오존 플럭스 모니터링이 필요함을 제시한다.

사사 이 연구는 2026년도 국립환경과학원(NIER-2026-01-02-019)의 지원을 받아 수행하였습니다.

6B3

PTR-ToF-MS 기반 BVOCs 정도관리 및 일변동 특성: Isoprene과 α-Pinene

QA/QC and Diurnal Characteristics of BVOCs Measured by PTR-ToF-MS: Isoprene and α-Pinene

김정호, 박승명[1], 안수경[1], 김현웅[1], 김유정[1], 허국영[1]

열린공간, [1]국립환경과학원 기후대기연구부

본 연구는 수도권대기환경연구소에서 2026년 봄-여름 PTR-ToF-MS를 운영하여, isoprene과 α-pinene의 parent-fragment ion pattern을 평가하고 일 변동 특성을 분석하였다. QA/QC는 질량 교정과 baseline 보정, H_3O^+ 반응 이온과 수분 클러스터, zero air, 1.6~50 ppb의 5단계 표준가스 교정 및 sensitivity를 점검하고 교정·blank 구간을 제외한 후 1시간 자료로 확정하는 절차로 수행하였다. 실시간 관측 조건에서 zero와 교정작업은 자동 시퀀스를 이용하여 주기적으로 수행하였다. Isoprene과 α-pinene의 parent-fragment ion pattern을 평가하고 최종 확정자료의 일변동 특성을 분석하였다. Isoprene은 m/z 69.070 ($C_5H_9^+$), 조각이온은 m/z 41.039 ($C_3H_5^+$)이었고, α-Pinene은 m/z 137.132 ($C_{10}H_{17}^+$), 조각이온은 m/z 81.070 ($C_6H_9^+$)이었다. 여름철(8월) isoprene과 α-pinene-equivalent 농도는 각각 0.93±0.66 및 0.14±0.15 ppb였으며, 두 성분의 합은 1.07±0.72 ppb로 전체 VOCs의 약 6.0%를 차지하였다. Isoprene은 주간에 peak를 나타냈고, α-pinene은 야간 시간에 최대를 나타냈다. 이러한 상반된 일변동은 isoprene의 광·온도 의존적 식생 배출과 α-pinene 계열의 저장조 방출, 주간 산화 제거, 야간 대기경계층 축적이 복합적으로 작용한 결과일 가능성을 보여준다.

사사 본 연구는 국립환경과학원의 지원을 받아 수행한 과제(수도권지역 이차유기탄소(SOC) 기여도 평가 및 주요 생성 요인분석(II))의 일부입니다.

6B4

이동측정 기반 산업단지 hotspot의 입경분포 특성 분석

Characterization of Particle Size Distributions at Pollution Hotspots in an Industrial Complex Using Mobile Measurements

한수빈[1),2)], 최원식[1),2)]

[1)]국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [2)]동남권 미세먼지연구·관리센터

산업단지는 다양한 배출원이 밀집되어 있어 입자 농도가 국지적으로 높게 나타날 수 있으며, 배출 환경에 따라 입자의 물리적 특성 또한 다르게 나타날 수 있다. 이동측정은 이러한 고농도 구간(hotspot)의 공간적 분포를 파악하는 데 효과적이지만, 농도 수준만을 이용할 경우 개별 hotspot의 배출 특성을 구체적으로 해석하는 데 한계가 있다. 입자의 입경분포는 배출 및 대기 중 변화 과정에 대한 정보를 포함하므로, 이를 이동측정과 함께 활용하면 hotspot별 오염 특성을 보다 세부적으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 울산 온산산업단지에서 수행한 이동측정을 통해 주요 입자상 오염 hotspot을 확인하고, 각 hotspot에서 관측된 입경분포의 특성을 비교하였다. 입경별 측정자료로부터 표면적 농도 분포를 산정하였으며, 다중 로그정규분포 피팅을 적용하여 입경분포를 4개의 주요 모드로 구분하였다. 또한 각 모드의 공간적·배출환경별 특성을 PMF 분석 결과와 비교하여 입경분포에 나타난 구조적 차이를 분석하였다. 그 결과, 화학 공정, 금속 제조 및 항만·물류 활동의 영향을 받는 주요 hotspot에서 서로 다른 표면적 입경분포 특성이 관찰되었다. 특히 4개의 입경 모드 가운데 우세하게 나타나는 모드와 각 모드의 기여 정도가 배출 환경에 따라 차이를 보였으며, 이러한 입경분포의 특징은 PMF 분석에서도 일관된 형태로 확인되었다. 이는 산업단지 이동측정에서 관찰되는 hotspot이 단순한 농도 증가뿐만 아니라 배출 환경에 따른 입경분포의 구조적 차이를 동반하고 있음을 보여준다. 이동측정 시 입자의 질량농도와 입경분포를 함께 고려하는 것은 산업단지 내 hotspot을 식별하고 주요 배출 특성을 해석하는 데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사사 본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2024-03-03-002, NIER-2026-01-02-019).

6B5

실시간 다항목 이동관측에 기반한 배출원 밀집 지역 내 오존 및 전구물질의 공간적 불균일성 규명

Characterizing the Spatial Heterogeneity of Ozone and Its Precursors in a Industrial Area Using Real-Time Multi-Species Mobile Monitoring

강천웅[1),2)], 신현준[3)], 서현정[3)], 전기준[1),2)]

[1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [3)]수도권대기환경청

본 연구에서는 대기오염물질 배출원이 밀집한 산업단지에서 오존(O_3)이 국지 규모의 변동성을 나타내는지 확인하기 위하여, 휘발성유기화합물(VOCs), 질소산화물(NOx), 오존을 동시에 관측하는 이동측정을 수행하였다. 일반적으로 오존은 직접 배출원이 존재하지 않고 VOCs와 NOx의 광화학 반응으로 생성되는 2차 오염물질이며, 그 생성은 VOCs/NOx 비와 VOCs의 반응성 차이, 기상 조건 등에 따라 비선형적으로 결정된다. 이러한 특성으로 인해 오존은 광역 규모의 관리 대상으로 다루어져 왔고, 고정식 측정망의 시간 평균 자료에 근거하여 평가되어 왔다. 그러나 산업단지 내부는 반응성이 높은 VOCs와 NOx가 국지적으로 고농도로 배출되는 환경으로, 배출원 인근에서는 NO에 의한 오존 소모와 반응성 VOCs에 의한 생성이 동시에 작용할 수 있어 수십에서 수백 m 규모의 농도 구배가 형성될 가능성이 있다. 이러한 국지적 거동은 기존 고정식 측정망만으로는 확인하기 어려운 실정이다. 본 연구에서는 VOCs 배출이 예상되는 산업단지 일부 구역을 대상으로, 광화학 반응이 활발한 하계 중 6월 18일, 6월 19일, 6월 20일, 7월 24일, 8월 1일 총 5일간 이동측정을 수행하였다. VOCs는 SIFT-MS (Selected Ion Flow Tube Mass Spectrometry)를 이용하여 다성분 실시간 정량하였고, 오존은 Teledyne T400, NOx는 Acoem Serinus 40을 이용하여 측정하였으며, GPS 데이터와 동기화하여 공간 정보를 확보하였다. 본 연구는 오존을 광역 규모의 현상으로만 다루어온 기존 접근과 달리, 배출원 밀집 지역에서 실시간 다항목 이동측정을 통해 국지 오존과 전구물질의 국지 분포를 동시에 확인하고, 배출 지점에서 전구물질의 공간 구조를 규명하는 접근을 시도한다. 이는 산업단지 대기질 관리에서 VOCs 저감이 오존 관리와 연계되며, 배출 지점의 공간 해상도에서 논의될 필요가 있음을 시사한다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었으며(RS-2026-25501461), 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2024-03-03-002).

6C1

다중 위성 자료와 인공지능을 융합한 시공간 연속적 전천(All-sky) 시간별 총일차생산량 모델링

Spatiotemporally Continuous All-Sky Hourly Gross Primary Productivity Modeling Using Multi-Source Satellite Data and Artificial Intelligence

배세정, 손보경, 성태준, 김예진, 김영석, 임정호

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

원격탐사 기술의 고도화로 정지궤도위성을 활용한 육상 생태계 및 식생의 동적 변화 모니터링 연구가 부상하고 있다. 육상 탄소 순환의 핵심 요소인 식생의 광합성 작용은 외부 환경 변화에 즉각적이고 민감하게 반응하므로, 이러한 미세 변화 패턴을 정밀하게 포착하기 위해서는 고시간 해상도의 위성 관측 자료가 필수적이다. 하지만 기존 광학 센서 기반의 관측은 구름 등 기상 조건의 제약을 받아 데이터의 시공간적 연속성을 확보하는 데 뚜렷한 한계가 존재했다. 본 연구는 이러한 한계를 극복하고자 Himawari-8 정지궤도위성 자료와 다종 기상 및 환경 자료를 인공지능 알고리즘과 융합하여, 구름이 존재하는 조건에서도 결측 없는 시간별 총일차생산량(Gross Primary Productivity, GPP)을 산출하는 프레임워크를 제안한다. 구축된 전천(all-sky) GPP 예측 모델을 검증한 결과, 지상 실측 데이터와 매우 높은 일치도(결정계수 $R^2 = 0.81$, 평균 제곱근 오차 RMSE = 2.7 μmol $CO_2/m^2/s$)를 나타내어 기존에 발표된 시간 단위 GPP 산출물들에 비해 높은 정확도를 보였다. 또한, 모델 내부의 예측 인자 기여도를 해석하기 위해 설명가능한 인공지능(explainable artificial intelligence, XAI) 분석을 수행한 결과, Himawari-8에서 도출된 변수들이 GPP 추정에 가장 지배적인 역할을 수행하는 것으로 입증되었다. 본 연구는 정지궤도위성 자료가 고빈도 GPP 매핑에 강력한 잠재력을 지니고 있음을 실증한다. 맑은 날씨뿐만 아니라 구름 아래 가려진 식생의 광합성 활동까지 연속적으로 파악할 수 있는 방법론을 제공함으로써, 향후 육상 생태계의 탄소 순환 매커니즘을 보다 심층적으로 규명하는 데 크게 기여할 것으로 전망된다.

사사 본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2025-04-02-083).

6C2

CAPSS 배출량 처리를 위한 시간·공간·화학종 DB 개선 방안 검토 및 대기질 모사 농도(PM-2.5, Ozone) 영향 분석

Assessment of Temporal, Spatial, and Chemical Speciation Profile Updates in CAPSS Emissions Processing and Their Effects on Simulated PM and Ozone Concentrations

이윤구, 최동원, 김성준, 한은미[1], 김태형[1], 이경빈[1], 송형도[1], 유 철[1], 우정헌[2], 배창한[3]

알씨에어(주), [1]기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터, [2]서울대학교 환경관리학과, [3]리켐프로(주)

대기질 모사에 사용되는 배출량 입력자료는 배출목록을 시간/공간/화학종으로 배분하는 배출량 처리 과정을 거치며, 이때 사용되는 DB의 정확도는 대기질 모사 정확도에 주요한 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 국가 대기환경 정책수립(종합계획)에 사용된 SMOKE 기초 DB를 기준으로, 국외 자료에 기인한 시간·화학종 Profile의 국내화, 공간할당 자료의 최신화를 수행하였다. 시간 분배의 경우 CAPSS 배출량 산정시 입수 가능한 활동도의 월간 변동 반영, 화학종 분배의 경우 미세먼지정보센터의 K-Speciate v1.1 적용, 공간 할당의 경우 총 41개의 공간할당 대리인자를 '23년 자료 기준으로 검토·현행화하였다. 기초 DB 업데이트에 따라 동절기에 할당된 대기오염물질 배출량은 CO 17.0%, SO_x 11.8%, NO_x 8.6% 증가하였다. VOC 배출은 방향족(ARO1·ARO2) 성분이 27.1만 톤에서 5.7만 톤으로 79% 감소, 13.9만톤 가량이 톨루엔·자일렌·벤젠 등 개별 물질로 할당되었다. 이는 CAPSS 배출 총량의 변동 없이 배출량 처리 과정에 사용된 DB 업데이트만으로도 모사 농도에 유의미한 영향을 미칠 수 있음을 보여주며, 특히 오존의 경우 배출원별 민감도, 주요 기여 배출원 등에도 변동이 있을 수 있음을 시사한다.

사사 본 연구는 2026년 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터의 지원을 받아 수행된 연구("2026년 국가 대기오염물질 배출량 산정 및 분석('24년 기준), R26BK01381897-000)"임.

6C3

남한 주변 해역 해양기원 자연배출의 대기환경 영향과 에어로졸-복사-기상 결합 효과

Impacts of Marine Natural Emissions on the Atmospheric Environment and Aerosol-Radiation-Meteorology Coupling Effects around South Korea

김진승, 송상근[1], 조성빈[2], 권오경

제주대학교 지구해양융합학부 지구해양과학전공, [1]제주대학교 지구해양과학과, [2]국립기상과학원 기상응용연구부

해양에서 배출되는 해염 에어로졸(Sea-salt aerosol, SSA)은 해수면에서 직접 배출되는 1차 에어로졸로서 입자상 물질 농도에 기여하며, Dimethyl sulfide (DMS)는 대기 중 산화 과정을 거쳐 황산염 에어로졸의 생성에 기여한다. 이러한 해양기원 자연배출은 대기 중 에어로졸 농도 및 복사 특성에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 2019년 5월을 대상으로 WRF-CMAQ 양방향 결합모델을 이용하여 해양기원 자연배출이 대기환경(황 화합물, PM, 복사 등)에 미치는 영향과 에어로졸-복사-기상 결합 효과를 정량적으로 분석하였다. 해양-대기 DMS flux는 혼합층 깊이(Mixed layer depth, MLD), 클로로필-a 농도, 풍속 및 해수면 온도(SST)를 이용하여 산정하였다. 도메인 1 (동아시아)과 2 (한반도)에서는 CMAQ 내부에서 산정된 DMS 배출량을 적용하였으며, 도메인 3(남한)에서는 산정된 해양-대기 DMS flux를 직접 DMS 배출량으로 변환하여 모델에 적용하였다. SSA 배출량은 모든 도메인에서 CMAQ 내부 산정 방식을 적용하였다. 해양기원 자연배출은 SO_2, 황산염, $PM_{2.5}$ 농도에 대해 연안/외해에서 각각 평균 13.0/11.9%, 2.8/5.0%, 1.2/2.7%의 기여율을 나타냈다. 또한 해양기원 자연배출에 따른 AOD와 지표 단파복사의 변화도 확인되었다. 특히, 양방향 Online 결합모의와 Offline 모의 간 해양기원 자연배출 효과를 비교한 결과, 두 모의에서 대기환경에 미치는 영향에 차이가 나타났으며, 이는 에어로졸의 변화가 복사 및 기상장에 영향을 미치고, 변화된 기상장이 다시 에어로졸의 분포와 농도에 영향을 미치는 에어로졸-복사-기상 결합효과에 기인하는 것으로 사료된다.

사사 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25478568).

6C4

딥러닝을 활용한 위성 기반 인위적 CO_2 배출 모니터링 향상

Improving Satellite-Based Monitoring of Anthropogenic CO_2 Emissions via Deep Learning

황수민, 최현영, 양세영, 배세정, 임정호

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

대기 중 체류 시간이 길어 지구온난화를 지속해서 가중시키는 이산화탄소(CO_2)의 효과적인 관리를 위해서는 인위적 배출원에 대한 정밀한 모니터링이 필요하다. 위성 기반 연직 컬럼 농도(XCO_2) 관측이 인위적 배출 신호(XCO_{2en}) 분석에 유용함이 입증되었지만, 시공간적 결측과 장기간 누적된 배경 농도(XCO_{2bg}) 분리의 어려움으로 정량적 해석에 한계가 존재한다. 특히 기존의 단순 통계 기반 XCO_{2bg} 산정 방식은 결측 문제를 해결하지 못하며 지역적·시공간적 환경 변동성을 충분히 반영하기 어렵다. 본 연구에서는 다종 위성 자료와 환경 변수를 통합한 딥러닝 기반 프레임워크를 구축하여, 2 km 해상도의 일별 시공간 연속 XCO_2 자료를 재구성하고 XCO_{2en}을 정량화하였다. XCO_2 결측 복원에 적용된 TabM 모델은 무작위 교차검증에서 R^2 = 0.96, RMSE = 0.86 ppm의 우수한 정확도를 달성하였으며 시공간 검증 및 지상 관측망과의 비교(R^2 = 0.86, RMSE = 0.91 ppm)에서도 안정적인 성능을 보였다. 특히, 완벽히 복원된 고해상도 XCO_2 지도를 기반으로 바람장 등 주요 환경 변수를 종합적으로 고려하는 XCO_{2bg} 산정 기법을 도입함으로써, 기존 접근보다 강건하고 물리적으로 일관된 XCO_{2bg}를 추정하였다. 이를 기반으로 XCO_{2en}의 공간적 분포와 배출원 주변의 농도 증가 신호를 보다 정밀하게 재현하였다. 본 연구는 위성 관측의 결측 복원과 환경 변동성을 반영한 배경 농도 산정을 결합함으로써 고해상도 인위적 CO_2 배출 모니터링의 신뢰성을 향상시키는 기반을 제시한다.

사사 본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-04-02-067).

6C5

동아시아 식생기능형(PFT) 자료 변화가 생물기원 휘발성유기화합물(BVOCs) 배출 및 오존 농도에 미치는 영향

Impact of Plant Functional Type (PFT) Changes on BVOC Emissions and Ozone Simulations in East Asia

정지민, 김민중[1], 최대련[2], 이재범[3], 홍성철[3], 박지훈[3], 반수진[3]

명지대학교 환경에너지공학과, [1]명지대학교 환경시스템공학과, [2]안양대학교 환경에너지공학과, [3]국립환경과학원 대기질통합예보센터

생물기원 휘발성유기화합물(BVOCs)은 광화학 반응을 통해 대류권 오존 생성에 기여하는 주요 전구물질이며, 이들의 배출량은 식생 분포와 식생별 배출 특성에 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 동아시아 지역의 식생기능형(Plant Functional Type, PFT) 자료와 BVOC의 빛 의존적 배출 특성을 개선하여 MEGAN 기반 BVOC 배출량과 이에 따른 오존 농도 변화를 분석하였다. 기존 위성 기반 PFT 자료의 한계를 보완하기 위해 한반도 실측 기반 자료와 높은 일치를 보이는 재분석 PFT 산출물을 MEGAN Emission Factor Processor (EFP)에 적용하여 격자별 식생 변화가 화학종별 배출계수(Emission Factor, EF)에 반영되도록 하였다. 또한 MEGAN 기본 Light Dependent Fraction(LDF) 적용 시 성능 저하가 나타난 일부 BVOC 화학종에 대해 관측 기반 선행연구의 LDF 값을 적용하였다. 산정된 BVOC 배출량은 CMAQ에 적용하여 식생 자료 변화에 따른 대기화학적 영향과 오존 모의 성능 변화를 평가하였다. PFT 자료 개선에 따라 식생의 공간적 분포와 구성 비율이 보다 현실적으로 반영되었으며, 수목 분포 변화가 큰 지역을 중심으로 주요 BVOC 배출량 변화가 두드러졌다. BVOC 배출이 증가한 지역에서는 가용 NOx가 감소하는 경향이 나타났으며, 이는 오존 농도 변화와 유사한 공간적 분포를 보였다. 한반도 고해상도 모의에서는 수도권을 중심으로 관측 오존에 대한 모의 성능 개선이 뚜렷하게 나타나 동아시아 영역 모의보다 식생 자료 개선 효과가 명확하였다. 이러한 결과는 현실적인 식생 분포와 화학종별 배출 특성의 반영이 BVOC 배출량과 BVOC-NO_x 화학을 변화시키며, 동아시아 및 한반도 오존 모의의 불확실성을 줄이는 데 중요함을 시사한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-04-02-058).

6D1

머신러닝 기반 건조·습윤 조건에서의 바이오차 CO_2 흡착 특성 비교

Comparison of Biochar CO_2 Adsorption Charateristics Under Dry and Humid Conditions Using Machine Learning

문소은, 고상원[1], 김경훈[1], 허재석[1] 박덕신[1], 이재영[2,3]

아주대학교 환경공학과, [1]한국철도기술연구원 교통환경연구실, [2]아주대학교 환경안전공학과, [3]아주대학교 인공지능학과

이산화탄소(CO_2)는 지구온난화와 기후 변화를 심화시키는 주요 온실가스 중 하나이다. CO_2를 경제적이고 효율적으로 포집할 수 있는 방법 중 하나로 흡착이 있으며, 특히 바이오차는 유망한 CO_2 흡착제로 주목받고 있다. 바이오차 CO_2 흡착 성능은 온도, 압력, 습도 등의 흡착 조건에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 습도 조건에 초점을 맞추어, 건조·습윤 조건에서 바이오차의 CO_2 흡착 특성을 비교하고자 머신러닝 알고리즘 기반의 CO_2 흡착 성능 예측 모델을 구축하였다. 선행 논문으로부터 바이오차의 제조 조건(개질 방법, 열분해 온도·시간), 물리화학적 특성(원소 조성, 기공 특성), 흡착 조건(온도, 압력, 습도) 등을 수집하였다. XGB (eXtreme Gradient Boosting), CTB (Categorical Boosting) 등의 머신러닝 알고리즘을 기반으로 CO_2 흡착 성능을 예측하였고, SHAP 분석을 통해 건조·습윤 조건별 주요 인자의 예측 기여도를 비교하였다. 본 연구 결과는 건조·습윤 조건에 따른 바이오차 CO_2 흡착 특성 차이를 이해하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(이동형 이산화탄소 직접 포집 기술 개발, PK26612B0)의 연구비 지원과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2026-25480268).

6D2

Mg/Al 조성비가 층상이중수산화물(LDH)의 기체상 HCl 흡착 및 CO_2 배출에 미치는 영향

Effects of Mg/Al Molar Ratios on Gas-Phase HCl Adsorption and CO_2 Emission of LDH

이윤경, 송지현

세종대학교 건설환경공학과

반도체 및 소각 공정에서 배출되는 염화수소(HCl)는 대표적인 산성가스로, 건식 스크러버용 흡착 소재의 성능 향상이 요구되고 있다. Mg-Al 층상이중수산화물(LDH)은 층간 탄산이온(CO_3^{2-})과 HCl 간의 이온교환 반응을 통해 HCl을 제거하는 것으로 알려져 있으나 Mg/Al 조성비가 HCl 흡착 성능 및 세부 반응 경로에 미치는 영향에 대한 정량적 연구는 여전히 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 공침법을 이용하여 Mg:Al:CO_3 조성비를 4:2:1(421) 및 6:2:1(621)로 제어한 LDH를 합성하였다. 합성된 시료를 고정층 반응기에 충진하고, 상온·무가습 조건에서 HCl 500 ppm (유량 0.5 L/min & GHSV 약 40,000 hr^{-1})을 주입하는 흡착 실험을 수행하였다. 반응 과정 중 반응기 입·출구의 HCl 및 CO_2 농도를 동시 측정하여 흡착 및 기체 배출 특성을 분석하였다. 실험 결과 최종 파과점($C/C_0 = 0.95$) 기준 HCl 흡착량은 621 시료가 203.8 mg/g으로 421 시료(167.7 mg/g) 대비 약 21% 향상된 성능을 보였다. 반면 반응 중 CO_2 최대 배출 농도는 421 시료(약 185 ppm)가 621 시료(약 105 ppm)보다 높게 나타나는 상반된 경향을 나타냈다. 반응 정상 상태 구간(60~180분)에서 단위 HCl 제거량당 CO_2 배출 몰비($\Delta n_{CO2}/\Delta n_{HCl}$)는 421과 621 시료에서 각각 0.37~0.41 및 0.21~0.23으로 약 1.8배의 차이를 보였다. Mg/Al 조성비의 증가는 전체 HCl 흡착량을 증대시켰으나, 단위 HCl 제거당 발생되는 CO_2 배출량은 오히려 감소시켰다. 이러한 결과는 Mg/Al 조성비 변화에 따라 지배적인 HCl 제거 메커니즘이 전환됨을 의미한다. Mg/Al 조성비가 높은 621 시료에서는 탄산염 이온교환 외에 경로가 50% 이상 기여하는 것으로 추정된다. Mg/Al 조성비 증가에 따른 LDH 수산화물 층의 염기도가 증가하는 점을 고려하면 층상 수산기와의 산 중화 반응이 주된 추가 흡착 경로로 판단된다. 향후 DRIFTS 분석을 통해 이를 확인하고자 한다.

사사 본 연구는 2025년도 중소벤처기업부의 재원으로 중소기업기술정보진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-02221963).

6D3

지지체별 수분흡수 특성이 알칼리 첨착 흡착제의 H_2S 제거성능에 미치는 영향

Effects of Support Water Uptake Characteristics on the H_2S Removal Performance of Alkali-Impregnated Adsorbents

전진수, 안해영, 송지현

세종대학교 건설환경공학과

황화수소(H_2S)는 하수관거·배수구 등 생활환경에서 발생하여 악취와 부식을 유발하는 대표적인 유해 물질로, 활성탄 흡착탑을 이용한 처리 방식은 습윤조건에서 성능이 저하되는 한계가 있다. 이에 습윤조건에서도 활용할 수 있는 흡착제를 개발하기 위해, 선행연구에서는 지지체 및 알칼리 첨가제의 종류, 상대습도, 첨가제 함량에 따른 H_2S 제거성능을 비교하였다. 그 결과, 활성탄 계열 지지체는 우수한 H_2S 제거성능을 나타낸 반면, 제올라이트 계열 지지체에서는 제거성능이 낮아지는 경향이 확인되었다. 본 연구에서는 H_2S 제거 반응이 수분을 매개로 한 산-염기 중화 반응이라는 점에 착안하여, 지지체별 수분 흡수 특성이 이러한 H_2S 제거성능 차이에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 첨가제의 종류와 함량 및 측정조건을 동일하게 고정하고, 활성탄, 13X, ZSM-5를 지지체로 사용하여 고정층 컬럼 실험을 통해 수분 흡수 포화곡선을 측정하였다. 측정 결과, 수분 흡수량은 활성탄 > 13X > ZSM-5 순으로 나타났다. 친수성이 높은 13X는 초기 수분 흡수 속도가 빠른 반면, 과도한 수분흡수로 인해 단시간에 포화되는 현상이 나타났으며, 상대적으로 소수성이 높은 ZSM-5는 수분 흡수량이 매우 낮게 나타났다. 이러한 지지체별 수분흡수 특성은 선행연구에서 확인된 H_2S 제거성능의 경향과 일치하였으며, 활성탄과 같이 적정 수준의 수분을 흡수·유지할 수 있는 지지체가 H_2S 제거에 유리한 것으로 판단된다. 본 연구 결과를 토대로 향후 수분 흡수량과 H_2S 제거성능 간의 상관관계를 정량적으로 분석하여 그 연관성을 규명하고자 한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터의 2026년도 연구용역과제 지원으로 수행되었습니다.

6D4

무탄소 연료(수소, 암모니아) 연소 배가스 제어를 위한 탈질 촉매 기술 동향

Catalytic De-NO_x Technologies for Exhuast Gas Control in Carbon-Free Fuel Combustion Systems

김범식

건국대학교 사회환경공학부

최근 온실가스 감축을 위해 수소(H_2) 및 암모니아(NH_3) 기반의 무탄소 연소 기술이 핵심 대안으로 부상하고 있으나, 기존 화석연료와는 다른 연소 특성으로 인해 고농도 질소산화물(NO_x) 배출 제어라는 새로운 과제에 직면해 있다. 암모니아가 포함된 연료를 연소할 경우 Fuel-NO_x 전환에 의해 막대한 양의 NO_x와 N_2O가 생성될 수 있다. 또한, 연료 내 수소로 인하여 많은 양의 수증기가 발생할 수 있으며, 이는 탈질 촉매 공정의 내구성에 상당한 부담이 될 수 있다. 그러나 현재 수소/암모니아 전소 및 혼소 기술의 미성숙으로 인해 실공정에서의 정확한 배가스 조성 예측이 제한적이며, 이는 기존 탈질 시스템의 고부하 NO_x 처리 능력에 대한 의문으로 이어진다. 이에 본 연구(발표)에서는 체계적인 문헌 조사를 통해 여러 수소 및 암모니아 혼소 조건에서의 예상 배가스 특성을 도출하고, 고농도 질소산화물을 안정적으로 처리할 수 있는 차세대 촉매 기술의 최신 개발 동향과 향후 적용 방안을 고찰하고자 한다.

6D5

SO_2 흡수제 선정을 위한 알칼리 흡수제의 pH 변화 및 흡수 특성 비교

Comparative Evaluation of pH Variation and SO_2 Absorption Characteristics of Alkaline Absorbents

정현수, 김재헌, 문병현, 박아린, 김희진, 김재진[1], 심유진[1], 박시언[1], 김서현[1], 한희선[1], 김민지[1], 김성수[1]

경기대학교 환경에너지공학과, [1]경기대학교 사회에너지시스템공학과

본 연구에서는 다양한 알칼리성 흡수제를 대상으로 흡수제 종류에 따른 pH 변화와 SO_2 흡수 특성을 비교하고, SO_2 습식 흡수공정에 적합한 흡수제를 선정하고자 하였다. SO_2 흡수 특성은 기-액 반응 방식의 bubble reactor를 이용하여 평가하였으며, NaOH, $NaHCO_3$, Na_2CO_3 및 CaO계 흡수제를 대상으로 흡수성능과 pH 변화를 분석하였다. 실험 결과, 흡수제의 SO_2 제거성능은 단순한 초기 pH보다 흡수반응이 진행되는 동안 알칼리 조건을 얼마나 안정적으로 유지하는지와 밀접한 관계를 나타냈다. 특히 Na_2CO_3는 Na계 흡수제 중 장시간 높은 SO_2 제거성능을 유지하였으며, pH ≥ 7 유지시간 또한 상대적으로 길게 나타나 우수한 pH 지속성을 보였다. CaO의 경우 $Ca(OH)_2$ 형성을 통해 OH^-를 지속적으로 공급함으로써 높은 SO_2 흡수성능과 pH 안정성을 나타냈다. CaO는 낮은 용해도와 반응생성물 침전에 따른 공정상의 한계가 존재하는 반면, Na계 흡수제는 수용액 상태에서 비교적 안정적인 운전이 가능하였다. 따라서 SO_2 습식 흡수공정에서 흡수제 선정 시 초기 알칼리도뿐 아니라 pH 지속성, SO_2 제거성능 및 실제 공정 운전특성을 종합적으로 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다.

사사 본 연구는 2026년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00432417, 소재부품기술개발(R&D)).

6F1

수소 환원 기반 결함생성 및 계면 제어를 통한 NiO_x/TiO_2 광촉매 필터의 개발과 폼알데하이드와 황화수소 제거성능 향상

Development of NiO_x/TiO_2 Photo Catalysts through H_2 Reduction Induced Defect and Interface Engineering for Enhanced Removal of Formaldehyde and Hydrogen Sulfide

이용성, 김기현

한양대학교 공학대학원 건설환경공학과

본 연구에서는 수소(hydrogen, H_2) 환원을 이용해 산화니켈/이산화티타늄(nickel oxide/titanium dioxide, NiO_x/TiO_2) 광촉매의 결함 구조와 계면 전자 특성을 조절하고, 폼알데하이드(formaldehyde, FA)와 황화수소(hydrogen sulfide, H_2S) 제거 성능을 평가했다. 습식 함침법으로 1 wt% Ni가 담지된 NiO_x/TiO_2를 제조한 후, 3차원 허니컴 세라믹 지지체에 코팅해 23 L 모사 실내 챔버와 저전력 자외선 발광다이오드(ultraviolet light-emitting diode, UV-LED; 365 nm, 약 0.9 W) 기반 공기청정기 시스템에서 시험했다. 환원 조건별 성능을 비교한 결과, 400°C에서 5시간 환원한 TN_R-400, 5가 가장 우수한 활성을 나타냈다. 이 필터는 건조 조건에서 5 ppm FA와 H_2S를 모두 완전히 제거했으며, 청정공기공급률(clean air delivery rate, CADR)은 각각 16.5와 21.5 L min^{-1}로 나타났다. 이는 상용 TiO_2보다 각각 1.28배와 4.81배 높은 값이다. 구조 및 분광 분석 결과, H_2 환원은 Ti^{3+}와 산소 결함(oxygen vacancy)을 형성하고 NiO_x/TiO_2 계면의 전하 분리와 이동을 촉진했다. 전자 상자성 공명 분광법(electron paramagnetic resonance spectroscopy, EPR)과 반응 중 X선 광전자 분광법(in situ X-ray photoelectron spectroscopy, in situ XPS)을 통해 초과산화물 라디칼(superoxide radical, $\bullet O_2^-$)과 하이드록실 라디칼(hydroxyl radical, •OH)의 생성 증가도 확인했다. 상대습도(relative humidity, RH)가 80%로 증가하면 과량의 수분이 활성점을 경쟁적으로 점유해 FA 제거 성능이 감소했다. 또한 반응 중 확산반사 적외선 푸리에 변환 분광법(in situ diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy, in situ DRIFTS)을 통해 FA가 다이옥시메틸렌과 포름산염 중간체를 거쳐 이산화탄소(carbon dioxide, CO_2)로 산화되는 경로를 제시했다. 종합적으로, H_2 환원 기반 결함 및 계면 제어는 FA와 H_2S 제거용 NiO_x/TiO_2 광촉매 필터의 효과적인 설계 전략으로 작용했다.

6F2

Statistical Treatment of Uncertainties in the Estimation of Cumulative Cancer Risk Due to Atmospheric Dioxin-Like Compounds

Balasubramanian Prithiviraj, Tuyet Nam Thi Nguyen, 고민지, 주정태, 최성득

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

Cumulative inhalation cancer risk from atmospheric dioxin-like compounds is estimated using a deterministic TEQ approach, although uncertainty arises from both exposure assumptions and toxic potency estimates. PUF-PAS concentrations of PCDD/Fs, DL-PCBs, and PCNs from 19 sites in Ulsan were used to quantify these uncertainties through sequential Monte Carlo simulations. A deterministic baseline based on TEFs and PCN relative potency factors was progressively expanded to incorporate exposure-parameter variability, potency uncertainty, and receptor-level efficacy using generalized concentration addition. PCDD/Fs accounted for 73% of cumulative TEQ, followed by PCNs at 21%. Relative potency factors for individual PCN congeners varied by several orders of magnitude across published studies, but potency uncertainty contributed only 3% of total risk variance. This limited contribution resulted from the dominance of PCDD/Fs in cumulative TEQ. Exposure parameters, particularly exposure duration and outdoor exposure time, accounted for the remaining 97% of total variance. Generalized concentration addition produced risk estimates only 5% lower than linear TEQ summation, supporting the conventional additivity assumption. Uncertainty in cumulative dioxin-like cancer risk was therefore governed primarily by exposure characterization rather than by uncertainty in PCN relative potency factors.

6F3

대기 $PM_{2.5}$의 시간에 따른 ·OH 생성과 화학조성의 연계: 금속과 유기성분의 역할

Time-Resolved Hydroxyl Radical Generation by Ambient $PM_{2.5}$ and Its Linkage to Chemical Composition: Phase-Specific Contributions of Metal and Organic Compounds

서재원, 문지혜, 김화진

서울대학교 보건대학원 환경보건학과

대기 미세입자의 산화잠재력(oxidative potential, OP)은 입자 노출에 따른 산화스트레스 및 건강 영향을 설명하는 주요 지표이며, 최근에는 금속의 단독 기여뿐 아니라 유기성분과의 상호작용, 그리고 반응 시간에 따른 거동을 함께 고려해야 한다는 점이 제기되고 있다. 본 연구에서는 서울에서 2025년 여름(9~10월)과 2025/26년 겨울(12~1월)에 채취한 $PM_{2.5}$를 대상으로 surrogate lung fluid(SLF) 기반 terephthalate 형광 프로브(TAOH) assay를 이용하여 24시간 동안의 hydroxyl radical (·OH) 생성을 8개 시점에서 측정하고, ICP-MS 및 HR-ToF-AMS로 측정한 화학조성과의 관계를 분석하였다. ·OH 생성은 초기(0~4 h)와 후기(4~24 h)로 구분하고, 대기부피 기준(OPv)과 PM 질량 기준(OPm)을 함께 비교하였다. $PM_{2.5}$ 질량 농도는 두 계절 간 유의한 차이가 없었으나(중앙값 14.2 vs 15.5 $\mu g\ m^{-3}$), 24시간 누적 ·OH 생성은 겨울이 여름의 3.5배로 유의하게 높았다(16.7 vs 58.4 ng μg^{-1} PM). OPv에서는 PM loading의 영향이 함께 반영된 반면, OPm에서는 입자 고유의 조성-반응성 관계가 보다 뚜렷하게 나타났으며, 질량당으로 환산하는 과정에서 여름 Fe의 상관이 크게 감소하는 등(Spearman $\rho = 0.84 \rightarrow 0.05$) 환산 기준에 따라 해석이 달라졌다. 또한 여러 금속이 서로 강하게 공변하여(여름 Zn-Cu $\rho = 0.94$) 개별 금속의 상관을 독립적인 ·OH 생성 기여로 해석하기에는 한계가 있었고, 겨울에는 FDR 보정 후 유의성을 유지한 개별 금속이 없었다. 이는 단일 금속의 기여보다 입자 매트릭스 전반의 영향이 시간 의존적 ·OH 생성을 좌우함을 시사한다. 이에 AMS 기반 유기성분 조성 및 산화도(f44, O:C) 특성을 함께 분석하여 금속의 생체이용가능성, 유기성분 및 금속-유기 상호작용이 시간 의존적 ·OH 생성에 미치는 영향을 본 발표에서 제시하고자 한다.

사사 본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2025-00514570).

6F4

미세먼지 질량농도와 산화잠재력 기반의 배출원 기여도 통합 평가

An Integrated Assessment of Source Contributions to Particulate Matter Based on Mass Concentration and Oxidative Potential

박성원, 전지원, 한영지[1], 이광열[2], 허국영[2], 조미라[2], 강대일[2]

강원대학교 환경학과, [1]강원대학교 생명·환경융합학부, [2]국립환경과학원 대기환경연구과

초미세먼지($PM_{2.5}$)의 건강 유해성은 질량농도뿐 아니라 입자의 화학조성과 산화반응성에 따라 달라질 수 있어 질량농도만으로 평가하기 어렵다. 산화잠재력(Oxidative Potential, OP)은 입자의 활성산소종 생성 및 항산화물질 소모 능력을 반영하는 지표로, $PM_{2.5}$의 산화스트레스 유발 가능성과 배출원별 유해성을 평가하는 데 활용될 수 있다. 본 연구는 춘천 지역 $PM_{2.5}$를 대상으로 AA, GSH 및 DTT 기반 OP 분석과 45종의 유기성분을 포함한 $PM_{2.5}$의 화학종 분석을 수행하였다. 질량표준화 OP (OPm)와 부피표준화 OP(OPv)를 활용하여 입자의 고유 산화반응성과 대기 중 산화부하를 구분하고, PLS 및 BKMR 기반 분자 특성 분석과 DN-PMF 및 WLS 기반 배출원별 기여도 평가를 통합하였다. 장기 관측에서 $PM_{2.5}$ 질량농도와 달리 AA 및 DTT 기반 OP는 유의하게 감소하였으며, 고농도 $PM_{2.5}$는 이차 무기이온 축적과 관련되었으나 고농도 OPm은 상이한 화학적 특성을 보였다. OPm^{AA}는 금속, 원소탄소 및 연소기원 유기성분과, OPm^{DTT}는 생물기원 이차유기에어로졸 지표물질과 밀접하게 관련되었다. 또한 OP는 유기성분의 농도뿐 아니라 분자량, 산화도 및 작용기 특성에 영향을 받았다. 배출원별 분석에서는 이차 질산염의 높은 질량 기여도와 달리 oil combustion은 낮은 질량 기여도에도 높은 OP를 나타냈으며, 자동차 배출원은 실제 대기 중 산화부하에 크게 기여하였다. 따라서 질량농도와 OP를 통합한 평가가 건강 유해성이 높은 배출원을 식별하는 데 중요함을 시사한다.

사사 This work was supported by a grant from the National Institute of Environmental Research (NIER), funded by the Ministry of Environment (ME) of the Republic of Korea (NIER-2026-04-02-059).

6F5

2025~2026년 안산 지역 $PM_{1.0}$ 중 PFAS 배출 규명 및 인체 위해성 평가

Characterization of PFAS Emissions in $PM_{1.0}$ and Human Health Risk Assessment in the Ansan Area during 2025-2026

박채형, 최서영, 고동훈, 김우준, 박재환, 백성옥, 송명기, 배민석

국립목포대학교

과불화화합물(per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS)은 높은 화학적 안정성과 환경 잔류성으로 인해 다양한 환경매체에서 지속적으로 검출되고 있으며, 일부 PFAS는 인체 건강에 잠재적인 위해성을 나타내는 것으로 보고되고 있다. 대기 중 PFAS는 입자상 물질에 존재할 수 있으며, 호흡을 통한 인체 노출의 잠재적 경로가 될 수 있다. 특히 $PM_{1.0}$은 미세한 입자 크기로 인해 호흡기 깊숙한 영역까지 침투할 가능성이 있어, $PM_{1.0}$에 포함된 입자상 PFAS의 농도 및 분포 특성과 인체 노출 가능성을 파악할 필요가 있다. 그러나 국내 대기환경에서 $PM_{1.0}$ 중 PFAS의 농도 특성과 위해성에 관한 연구는 상대적으로 제한적인 실정이다. 본 연구에서는 2025년부터 2026년까지 경기도 안산 지역에서 High vol. 포집기를 이용하여 3시간 간격 $PM_{1.0}$ 시료를 대상으로 PFAS의 일 중 주성분 분석 및 배출원 규명과 더불어, 산화잠재력(DTT)과의 상관성 분석을 하였다. 포집된 필터 시료는 전처리 및 PFAS · 선택-농축(elution) 과정을 거친 후 LC-MS/MS 분석을 이용하여 PFAS를 정성 및 정량 분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 개별 PFAS의 농도와 검출빈도 및 종합 PFAS의 농도를 산출하고, 측정 시기별 농도 및 조성 특성을 비교하여 안산 지역 $PM_{1.0}$ 중 PFAS의 분포 특성을 평가하였다. 분석된 PFAS가 전체 위해성에 미치는 상대적인 기여 특성을 분석하여 국내 대기환경에서 $PM_{1.0}$ 중 PFAS의 농도 및 조성 특성을 파악하고, 입자상 PFAS의 잠재적 인체 위해성을 평가함으로써 향후 대기 중 PFAS의 환경관리 및 위해성 평가를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

사사 This work was supported by the Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (NIER-2024-03-03-002 & RS-2026-25505137) and by a grant (RS-2026-25519883) of the National Research Foundation (NRF) of Republic of Korea.

6G1

대기 중 암모니아 측정을 위한 라이다 개발

Development of a Lidar System for Atmospheric Ammonia Measurement

신동호, 최호경, 노영민[1], 신주선[1]

한국에너지기술연구원, [1]부경대학교

암모니아(NH_3)는 대기 중 질소산화물 및 황산화물과 반응하여 질산암모늄과 황산암모늄을 형성하는 대표적인 이차 미세먼지 전구물질로써 굴뚝과 같은 일정한 배출구뿐 아니라 축사, 퇴비화시설, 농경지, 도로 및 산업시설 주변에서 넓고 불규칙하게 비산 배출되므로, 기존 지점식 측정만으로는 배출 위치, 플룸의 이동 경로, 고도별 농도 분포와 시간적 변화를 파악하기 어렵다. 본 연구를 통해 이러한 측정 공백을 해소하기 위해 대기 중 암모니아의 시공간 농도 분포를 비접촉식으로 측정하기 위한 차등 흡수를 이용하는 Lidar 시스템을 개발하여, 축산 밀집지역, 도로 주변 및 산업시설 등 암모니아 우심지역에 적용하고, CRDS 기반 지상 측정기와의 동시 관측을 통해 농도 정확도와 장기 운용성을 검증할 계획이다. 이후 미세먼지 스캐닝 라이다 및 도플러 라이다의 농도장·바람장 자료와 융합하여 암모니아 플룸의 발생 위치와 확산 특성을 시각화하고, 풍상·풍하 농도 차와 플룸 단면을 이용한 배출 플럭스 및 고해상도 배출지도 산정으로 확장하고자 한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 RS-2026-25501396).

6G2

암모니아 유래 에어로졸의 온습도별 점성도 측정

Temperature- and Humidity-Dependent Viscosity of Ammonia-Derived Aerosols

송미정[1),2)]

[1)]전북대학교 지구환경과학과, [2)]전북대학교 기후환경에너지융합학과

대기 에어로졸의 점성도는 입자의 상(phase) 상태를 결정하며, 이는 불균질 화학반응, 수분 흡습, 구름 응결핵 활성 등 대기 물리·화학 과정에 직접적인 영향을 미친다. 특히 암모늄 질산염(ammonium nitrate)은 대기 중 주요 2차 무기 에어로졸 성분으로, 유기물과 혼합된 상태에서의 점성 거동은 아직 충분히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 유기물과 암모늄 질산염 혼합 에어로졸 액적을 대상으로, 273-303 K의 온도 범위와 다양한 상대습도 조건에서 점성도를 측정하여 온·습도가 입자 상태에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 측정 결과, 273 K의 저온 및 저습 조건에서 유기물-암모늄 질산염 혼합 액적의 점성도가 크게 증가하여 반고체(semi-solid) 및 무유동(no-flow) 상태로 전환됨을 확인하였으며, 유기물 대 무기물 혼합비(OIR)가 높을수록 점성도가 더 높게 나타났다. 본 발표에서는 이러한 온·습도 및 조성에 따른 암모니아 유래 혼합 에어로졸의 점성도 측정 결과를 발표하고자 한다.

6G3

비산배출원 관측을 위한 NH_3-PM 라이다 기술의 현황과 과제

Recent Developments and Future Perspectives in NH_3-PM Lidar Technology for Monitoring Fugitive Emission Sources

신주선, 윤지현, 노영민

부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공

암모니아(NH_3)와 입자상물질(PM)은 농업시설, 산업시설 및 야적장 등 다양한 비산배출원에서 배출되며, NH_3는 대기 중 산성 물질과 반응하여 미세먼지의 전구물질로 작용한다. 그러나 기존의 지점 측정만으로는 배출원의 비정상적이고 불균일한 배출 특성과 오염물질의 공간적 확산을 파악하는 데 한계가 있다. 라이다는 대기오염물질의 연직 및 수평 분포를 원격으로 관측할 수 있어 비산배출원의 배출 특성을 파악하기 위한 유용한 수단으로 활용될 수 있다. 본 발표에서는 비산배출원에서 NH_3와 PM을 관측하기 위한 라이다 기술의 원리와 적용 현황을 정리하고, 현장 적용을 위해 고려해야 할 기술적 과제를 살펴본다. NH_3는 차등흡수라이다(DIAL)를 이용하여 농도를 산출할 수 있으나, 적절한 흡수파장 선정, 수증기 등 간섭기체의 영향, 레이저와 검출기의 성능 및 거리별 신호대잡음비가 주요 제한 요인으로 작용한다. PM의 경우 다파장·편광 라이다를 통해 입자의 공간분포와 크기 및 비구형성에 관한 정보를 얻을 수 있지만, 라이다 광학신호를 질량농도로 변환하는 과정에서 입자 종류와 상대습도의 영향을 고려해야 한다. 또한 라이다로 관측한 농도분포를 바람장과 결합하면 배출량을 추정할 수 있으나, 배경농도의 설정, 관측 단면의 위치, 풍향·풍속의 변화 및 대기 난류에 따른 불확실성이 존재한다. 향후에는 NH_3와 PM의 동시 관측 체계를 구축하고 지상 관측자료와의 비교를 통해 산출 결과를 검증할 필요가 있다. 이러한 기술적 검토는 비산배출원의 공간적 감시와 배출량 평가를 위한 NH_3-PM 통합 라이다 관측 체계의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 RS-2026-25501396).

6G4

대기 관리를 위한 라이다 기술 개발 현황

Recent Advances in Lidar Technology for Air Quality Management

노영민

부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공

대기오염은 배출원의 변화, 대기경계층 내 혼합, 장거리 수송 및 이차 생성이 복합적으로 작용하는 현상으로, 지상 측정만으로는 오염물질의 입체적인 분포와 이동 과정을 파악하기 어렵다. 라이다는 에어로졸과 기체상 물질의 연직·수평 분포를 높은 시공간 해상도로 관측할 수 있어 대기질 진단과 배출원 감시에 활용되고 있다. 최근에는 탄성산란 라이다를 넘어 라만, 고분광해상도, 다파장·편광 및 차등흡수 기술이 개발되면서 에어로졸의 광학적 특성, 입자 크기와 형태, 기체상 오염물질의 농도까지 관측 범위가 확대되고 있다. 또한 스캐닝 라이다를 이용한 오염물질의 공간분포 관측과 바람장을 결합한 배출 플룸의 이동 및 배출량 추정 기술도 발전하고 있다. 이러한 라이다 기술은 기존 지상 측정망을 보완하고 대기오염의 발생·수송·확산 과정을 입체적으로 파악하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 특히 대기경계층의 발달과 소멸, 상층 잔류 오염층의 재유입은 지상 농도의 급격한 변화를 유발할 수 있으므로 연속적인 연직 관측이 필요하다. 다지점 라이다 관측망을 위성자료 및 대기질 모델과 연계하면 국지 배출과 장거리 수송의 영향을 구분하고 고농도 오염 사례의 발생 원인을 보다 정확하게 해석할 수 있다. 인공지능 기반 자료처리 기술의 발전은 대용량 라이다 자료의 자동 분석과 에어로졸 유형 분류 가능성을 확대하고 있으나, 산출 결과의 물리적 타당성과 불확실성에 대한 검증이 병행되어야 한다. 향후에는 단순한 오염층 탐지를 넘어 오염물질의 정량적 농도 산출, 기체상·입자상 물질의 동시 관측, 배출 플룸 추적 및 배출량 평가가 가능한 통합 대기관리 기술로 발전할 필요가 있다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 RS-2026-25501396).

6H1

I-CIMS를 활용한 겨울철 질산염의 야간 생성반응 이해

Study of Nighttime Chemistray and the Formation Mechanism of Nitrate Aerosol Using Iodine-Chemical Ionization Mass Spectrometer (I-CIMS)

이태형, 송정인, 김경훈, 강석원, 홍성철[1], 이재범[1]

한국외국어대학교 환경학과, [1]국립환경과학원 대기환경연구과

우리나라는 질산염에 의한 초미세먼지 고농도 사례가 빈번하게 발생하며, 초미세먼지의 농도가 증가함에 따라 초미세먼지 성분 중 질산염의 비율이 증가하는 현상이 관측되고 있다. 따라서 대기질 개선을 위해선 질산염 생성 메커니즘을 정확하게 이해하는 것이 필요하다. 질산염의 생성은 크게 주간 생성반응과 야간 생성반응으로 구분할 수 있다. 그 중 야간 생성반응은 저녁 시간에 햇빛이 없는 상태에서 NO_2와 NO_3 라디칼의 반응으로 생성된 N_2O_5가 입자의 표면에서 heterogeneous reaction에 의해 HNO_3와 $ClNO_2$를 생성하고, HNO_3가 NH_3를 생성하여 질산염을 생성하는 반응이다. 이 과정에서 생성된 $ClNO_2$는 일출 이후 Cl과 NO_2로 광분해 되는데, 이는 오전 시간에 대기 중에 NO_2가 추가로 공급되는 경로이다. 질산염의 생성에 있어 야간 생성반응은 중요한 경로이지만, 국내에서는 측정 기술이 부족하여 아직 연구 결과가 보고되고 있지 않다. 해외에서는 N_2O_5 등을 측정하기 위하여 Chemical Ionization Mass Spectrometer (CIMS), Cavity ring down spectroscopy (CRDS), Cavity enhanced absorption spectrometer (CEAS) 등을 활용하고 있다. 또한, 선행연구에 따르면 계절 및 지역별로 질산염 오염의 주요 인자에 차이가 있는 것으로 보고되고 있어, 겨울철 질산염 오염이 심각한 국내에서 질산염의 주·야간 생성에 관한 연구는 매우 중요할 것으로 생각된다. 이에 본 연구에서는 질산염의 야간 생성반응을 연구하고자 VOCUS-CIMS를 활용하여 N_2O_5, $ClNO_2$, HONO, HNO_3를 측정 및 정량화하였다. 또한, 이를 활용하여 미세먼지 계절관리제 기간 수도권(안산)지역의 N_2O_5, $ClNO_2$, HONO, HNO_3 농도 분포를 확인하고, 질산염의 야간 생성반응의 메커니즘을 이해하기 위하여 $P(NO_3)$, $\tau(NO_3)$, $\tau(N2O_5)$ 등을 산출하였다.

사사 본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행됨(NIER-2024-04-02-022).

6H2

인공지능을 이용한 유해대기오염물질의 고해상도 지도 제작

High-Resolution Mapping of Hazardous Air Pollutants Using Artificial Intelligence

최성득, 주정태

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

최근 환경 모니터링 자료는 위성, 재분석, 지상관측, 배출량 등 대규모·다차원·장기 시계열 형태로 축적되고 있으나, 전통적인 통계 기법만으로는 이러한 복잡한 비선형 관계를 충분히 해석하기 어렵다. 본 발표에서는 먼저 데이터 사이언스와 인공지능(AI)의 기본 개념과 대기환경 연구에서 AI가 필요한 이유를 소개한다. Random Forest, XGBoost, LightGBM 등 머신러닝 기법과 LSTM, CNN, Transformer 등 딥러닝 기법의 특징을 비교하고, 이러한 기법이 시계열·공간자료 분석에 어떻게 적용될 수 있는지 설명한다. 이어서 울산시를 대상으로 한 사례연구를 통해 AI 기반 데이터 사이언스 접근법의 실제 적용 사례를 제시한다. 울산은 국내 주요 도시 중 유해화학물질 배출량이 가장 높은 지역으로, 유해대기오염물질(HAPs)에 대한 건강영향 우려가 크다. 본 연구팀은 대기환경측정망 자료, 배출량, 위성·재분석 자료, 토지이용도 등을 입력변수로 활용하여 XGBoost 기반 1 km × 1 km 격자 단위 고해상도 HAPs 농도 추정 모델을 개발하였으며, 수동대기채취기 실측자료를 이용한 공간분포 보정을 통해 지도의 정확도를 향상시켰다. 이를 바탕으로 연도별 HAPs 분포지도를 작성하고, 몬테카를로 시뮬레이션 기반 확률론적 위해성 평가를 수행하여 인구가중 발암위해도 지도를 산출하였다. 이러한 사례를 통해 대기환경 연구에서 다양한 자료를 통합하고 AI 모델을 활용하는 과정을 소개하고, 모델 결과를 현업에 어떻게 적용할 수 있는지 제시하고자 한다.

사사 본 연구는 울산녹색환경지원센터의 지원으로 수행됨.

6H3

스캐닝 라이다 기반 경기도 미세먼지 배출사업장 단속 기법 및 효율 향상

Scanning LiDAR-Based Enforcement of Particulate Matter Emission Sources and Enhanced Inspection Efficiency in Gyeonggi Province

김관철, 이동희, 오세호, 성민경, 박정민, 김성조[1], 이권호[2], 홍천상[2], 최성철[3], 최창기[3], 최우석[4]

차세대융합기술연구원 첨단환경감시센터, [1]천안과학산업진흥원 전략기획부, [2]강원대학교 강릉캠퍼스 복사위성연구실, [3]삼우티시에스(주), [4]세종대학교 인공지능데이터사이언스학과

산업단지는 다양한 대기배출시설이 밀집되어 있어 오염물질의 공간적·시간적 변동성이 크며, 기존 고정식 대기측정망만으로는 국지적 배출 특성과 우심지역을 파악하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 스캐닝 라이다를 활용하여 산업단지 미세먼지를 실시간 공간 관측하고, 우심지역(Heat Map) 분석을 기반으로 데이터 중심의 대기환경 관리 및 현장 단속기법을 제시하였다. 2025년 시흥·안산, 평택, 동두천 산업단지를 대상으로 24시간 상시 관측을 수행하였으며, 시간대별 농도 및 공간분포와 기상자료를 통합 분석하였다. 벡터-레스터 기반 공간 필터링, 지적도 매핑 및 풍향자료를 연계하여 반복적으로 발생하는 우심지역을 도출하고 배출원과의 공간적 연관성을 분석하였다. 분석 결과, 야간 및 심야 시간대에 고농도 영역이 확대되는 경향이 나타났으며, 대기 안정도 증가와 혼합고 하강에 따른 오염물질 축적 특성과 일치하였다. 또한 대형 사업장뿐만 아니라 소규모 사업장 밀집지역에서도 반복적인 고농도 반응이 확인되었다. 2025년에는 시흥·안산 104회, 평택 76회, 동두천 40회 등 총 220회의 우심지역을 식별하였으며, 발생 빈도와 지속성을 기반으로 관리 우선순위를 설정하여 현장점검 및 단속 대상 선정에 활용하였다. 본 연구는 첨단환경 감시 관측자료를 행정 의사결정 및 배출사업장 단속에 활용할 수 있는 분석체계를 제시하였으며, 데이터 기반 우심지역 분석을 통해 산업단지 대기환경 관리의 과학화와 현장 단속 효율 향상에 기여할 수 있음을 확인하였다.

사사 본 연구는 경기도 기후환경관리과 '대기오염원 감시 스캐닝 라이다 운영' 사업의 일환으로 수행된 연구임.

6H4

정밀 분광분석과 질량분석을 통한 저감된 NOx 조건에서의 국내 반응성 질소 화학 및 조성 연구

Reactive Nitrogen Chemistry and Speciation under Reduced NOx Conditions in South Korea Using Advanced Spectroscopic and Mass Spectrometric Observations

이영로[1),2)], 이미혜[1)], 주태규[1)], 정선제[1)], 신지원[1)], L. Gregory Huey[2)], David Tanner[2)], Christine Harper[2)], the ASIA-AQ Science Team

[1)]고려대학교 지구환경과학과, [2)]Georgia Institute of Technology School of Earth and Atmospheric Sciences

대기 중 총 반응성 질소(NOy)의 농도와 조성을 규명하는 것은 질소산화물(NOx = NO + NO_2)의 산화 및 제거 과정과 오존 광화학을 이해하는 데 중요하다. 지난 10년간 국내 NOx 배출 저감과 함께 대기 중 NO_2 농도는 약 30% 감소하였으며, 이에 따라 낮은 농도로 존재하는 미량 반응성 질소 성분의 상대적 중요성이 커질 수 있다. 선행 국내 항공관측에서도 개별 측정 성분의 합만으로 총 NOx 산화생성물(NOz = NOy − NOx)을 완전히 설명하지 못해 미측정 반응성 질소 성분의 존재 가능성이 제시된 바 있다. 본 연구에서는 서울 지역에서 화학발광법으로 측정한 총 NOy와 공동감쇠분광법(cavity attenuated phase shift spectroscopy, CAPS)을 이용한 선택적 NO_2 측정 및 다양한 반응성 질소 성분의 개별 관측을 통해 NOy와 NOz의 특성을 분석하였다. 이러한 지상관측에서 개별적으로 규명하기 어려운 미량 반응성 질소 성분의 사례로, 2024년 ASIA-AQ 항공관측에서 동아시아 최초로 항공 측정된 이소시안산(HNCO)의 분포를 고분해능 비행시간형 화학이온화질량분석법(high-resolution time-of-flight chemical ionization mass spectrometry, HR-ToF-CIMS)을 이용하여 규명하였다. 또한 상세한 휘발성유기화합물(VOCs) 측정을 활용하여 HNCO의 배출원과 대기화학적 특성을 분석하였다. HNCO와 같은 미량 반응성 질소 성분은 지역 배경 농도에 기여할 수 있으며, 배출원 특성, 광화학적 변환 과정 및 잠재적 유해성 측면에서도 중요하다. 본 연구는 NOx 수준이 낮아진 동아시아 대기에서 총 NOy와 함께 미량 반응성 질소 성분에 대한 정밀 관측이 반응성 질소의 화학적 특성과 조성을 이해하는 데 중요함을 시사한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25501457).

6H5

MAX-DOAS 관측 기반 서울 도심 HONO, HCHO, CHOCHO의 연직 분포 특성

Vertical Distribution of HONO, HCHO, and CHOCHO in Urban Seoul Based on MAX-DOAS Observations

길준수[1),2)], 이미혜[1)], 최용주[3)], 이현민[1)]

[1)]고려대학교 지구환경과학과, [2)]고려대학교 기초과학연구원, [3)]한국외국어대학교 환경학과

도시에서 대기오염물질은 배출 및 대기 중 화학 반응, 대기경계층 발달과 연직 혼합에 의해 고도별 농도와 화학적 특성이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 2024년 겨울(1~3월) 및 2026년 여름(5~8월) 서울시 성북구에 위치한 고려대학교 메디힐 지구환경관 옥상(37.5855N, 127.0256E)에서 MAX-DOAS를 활용한 연직관측을 수행하였다. 전체 관측 기간 HONO와 HCHO, CHOCHO의 평균 연직컬럼밀도(VCD)는 각각 5.2×10^{14}, 1.1×10^{16}, 3.9×10^{14} molecules cm^{-2}이었으며, HONO는 겨울, HCHO는 여름 관측기간에 상대적으로 높게 나타났다. NO_2와 HONO의 근지표농도(NSC)는 지표에서 관측한 NO_2 및 HONO 농도와 양의 상관관계(r^2 = 0.60~0.75, 0.32~0.58)를 보였다. 두 물질 모두 이른 오전시간에 높은 농도를 보인 반면, CHOCHO와 HCHO의 최고 농도 관측 시간은 계절에 따라 차이를 보였다. NO_2와 HONO, HCHO의 dSCD는 모두 낮은 고도각에서 상대적으로 크게 나타났으나, 고도각별 일변화 패턴은 비교적 상이하였다. 이러한 연직관측 결과는 향후 서울 도심 대기오염물질 고농도 발생 특성 분석 및 위성 자료 검증 등에 활용될 수 있다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25501457).

6H6

대기중 반응성 질소의 질소·산소 안정동위원소비 분석시스템 구축

Development of a Stable Isotope Measurement System for Gaseous NO_2 and $PM_{2.5}$ Nitrate

신지원, Haiyan Jin, 강정옥, 김주애, 이미혜

고려대학교 지구환경과학과

NO_2와 입자상 질산염(NO_3^-)의 질소와 산소의 안정동위원소비는 반응성 질소의 배출원과 산화·변환 과정을 추적하는데 유용한 지표이다. O_3은 ^{17}O의 큰 anomaly ($\Delta^{17}O$)를 가지므로, 대기중에서 산화반응이 진행되며 NO_x 산화 생성물에 이 특성이 전달된다. 본 연구에서는 대기 중 NO_2와 $PM_{2.5}$ 질산염의 $\delta^{15}N$, $\delta^{18}O$ 및 $\Delta^{17}O$ 분석을 위한 시료 포집과 전처리 및 isotope ratio mass spectrometry (IRMS) 분석 시스템을 구축하였다. 고려대학교 메디힐-에이스 첨단기기센터에 위치한 IRMS는 EA-IRMS와 gas-bench-IRMS로 구성되며 전자는 포집된 필터 중 total carbon과 total nitrogen중 $\delta^{13}C$과 $\delta^{15}N$을 분석하는데, 2024년 ASIA-AQ 기간 고려대학교 샘플을 분석한 결과는 기존 외부기관 분석 결과와 양호한 일치도를 보였다. $PM_{2.5}$ 질산염은 필터에서 수용액으로 추출된 후 denitrifier 박테리아를 이용하여 N_2O로 전환시킨다. 기체상 NO_2는 guaiacol-coated honeycomb denuder를 이용해 NO_2^-로 포집한 후 azide method를 통해 N_2O로 전환시킨다. 전환된 N_2O는 equilibration 후 -196℃에서 액체 질소를 사용해 preconcentration 되고 최종적으로 ^{15}N과 ^{18}O로 검출된다. ^{17}O 분리를 위해서는 추가적으로 N_2와 O_2를 열분해하고 분리하는 장치가 필요하여 구축하고 있다. 최종적으로 구축된 분석시스템은 대기 중 NO_x의 배출원과 산화 과정 및 입자상 질산염의 생성 경로를 동위원소 수준에서 규명하는 데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

6I1

전구물질 배출 hot-spot과 고농도 오존 hot-spot의 유형 분류 기법

Classification Method for Precursor Emission Hotspots and High-Ozone Hotspots

곽경환, 김태희[1], 김지민, 이현서, 도현석

강원대학교 환경학과, [1]강원대학교 산학협력단

오존은 전구물질의 배출뿐만 아니라 광화학적 생성과 수송, 기상 및 지형 조건의 영향을 복합적으로 받기 때문에 전구물질 배출이 많은 지역과 고농도 오존이 발생하는 지역이 공간적으로 일치하지 않을 수 있다. 따라서 효과적인 오존 관리를 위해서는 전구물질 배출과 고농도 오존 발생 특성을 함께 고려하여 지역별 hot-spot을 유형화할 필요가 있다. 본 연구에서는 전국 대기오염측정망을 대상으로 전구물질 배출 특성과 O_3-NO_2 농도 특성을 이용하여 배출 hot-spot과 고농도 오존 hot-spot을 유형별로 분류하는 기법을 제안하였다. 배출 hot-spot 분류에는 2024~2025년 5~8월 전국 도시대기측정망 자료와 2021년 CAPSS NOx 및 VOCs 배출량을 이용하였다. 측정소별 전구물질 배출량과 도시·비도시 여부, 지형·기상 특성을 입력변수로 구성하고 K-means 군집분석을 적용하였다. 군집분석 결과, 전국 측정소의 배출 특성은 공업, 내륙, 연안, 생태계 등 네 가지 유형으로 구분되었다. 한편, 고농도 오존 hot-spot은 O_3-NO_2 일변화 궤적을 이용하여 네 가지 유형으로 분류하였다. 또한 고농도 오존 집중 지역은 수도권역, 울산권역, 여수-순천-광양권역을 중심으로 나타났다. 본 연구에서 제안한 유형 분류 기법은 전구물질 배출 특성과 실제 고농도 오존 발생 특성을 함께 고려함으로써 지역별 오존 생성 특성을 진단하고, 향후 우선 관리지역 및 중점 관리대상을 선정하기 위한 기초 방법론으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지역맞춤형오존관리기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25505137).

6I2

지역 맞춤형 대기질 정책 지원을 위한 통합 분석 플랫폼의 현재와 미래

An Integrated Analysis Platform for Region-Specific Air Quality Policy Support: Current Status and Future Directions

김순태, 강윤희[1], 정성은[2], 김은혜[3]

아주대학교 환경안전공학과, [1]아주대학교 환경연구소, [2]아주대학교 환경공학과, [3]군산대학교 환경공학과

오존과 $PM_{2.5}$ 농도 결정에는 배출, 기상, 화학반응 및 장거리 이동 영향이 복합적으로 작용하며, 효과적인 대기질 개선을 위해서는 고농도 발생에 대한 과학적 이해가 우선되어야 한다. 이를 위해서는 관측을 통해 실제 대기질 현상과 변화를 파악하고, 배출 현황과 기상자료를 토대로 원인을 추정하며, 대기질 모사를 통해 배출-기상-화학-농도 간의 관계를 정량화하는 유기적인 연계가 필요하다. 또한 관측과 모사의 차이를 배출, 기상 및 화학과정의 개선으로 환류시키는 상호 검증 과정이 중요하다. 이러한 관측-배출-모사 연계는 지역별 고농도 발생 원인과 국외·국내 영향을 진단하고, 정책적으로 제어 가능한 부분과 단기간에 제어하기 어려운 부분을 구분하여 현실적인 관리 목표를 설정하는 기반이 된다. 본 발표에서는 이러한 과학적 이해와 Conceptual Model을 기반으로 관측-배출-기상-모사를 연계한 지역 맞춤형 통합 대기질 분석 플랫폼의 현재 수준과 발전 방향을 제시한다. 특히 국토 면적이 좁고 지역 간 대기오염물질 이동 영향이 큰 우리나라는 독립적인 airshed를 구분하기 어려우므로, 17개 시·도의 배출 저감과 상호 영향을 함께 고려할 수 있는 emission-reduction response database를 구축하고 이를 AI/ML 기반 emulator로 연계하는 방안이 강구될 수 있다. 이를 통해 3차원 광화학 모델 수행의 반복적인 부담을 줄이고, 지역별 저감 노력과 주변 지역에 대한 co-benefit 차원의 대기질 관리 체계를 구축할 수 있다. 향후 관측, 배출 개선, 대기질 예보 및 오존 원인 규명 연구와 연계하여 플랫폼을 지속적으로 검증·개선하고, 과학적이고 신속한 정책 시나리오 평가와 지역 맞춤형 의사결정 지원으로 확장하기 위한 연구를 모색한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 국가미세먼지정보센터의 지원을 받아 수행하였습니다.

6I3

2026년 여름철 고농도 오존의 발생 특성과 시사점 - 수도권과 광양만을 중심으로

Characteristics and Implications of High-Ozone Episodes in Summer 2026: A Focus on the Seoul Metropolitan Area and Gwangyang Bay

김순태, 강윤희[1], 정성은[2], 김은혜[3], 이소정[2], 김정욱[2], 배병규[2]

아주대학교 환경안전공학과, [1]아주대학교 환경연구소, [2]아주대학교 환경공학과, [3]군산대학교 환경공학과

2026년 봄·여름철 수도권과 광양만에서는 고농도 오존이 반복적으로 관측되었으나, 발생 시기와 지속시간, 농도 수준 및 빈도는 지역과 사례에 따라 차이를 보였다. 본 연구에서는 2026년 4~9월 주요 고농도 사례를 대상으로 관측자료를 이용하여 1시간 및 8시간 오존의 농도 수준과 고농도 발생 빈도를 함께 분석하고, CMAQ와 CAMx 모사를 이용하여 사례별 발생 원인과 배출 저감 가능성을 진단한다. 지역·배출원별 기여도 분석과 NOx 및 VOC 배출 변화에 대한 민감도 분석을 병행하여, 각 고농도 사례에서 어떤 지역의 어떤 전구물질 배출을 제어하는 것이 효과적인지를 평가하고, 현재 분석체계의 한계를 함께 살펴본다. 특히 CMAQ와 CAMx에서 활용 가능한 민감도 및 source attribution 기법을 상호 보완적으로 적용하여, 고농도 오존 hotspot에 영향을 미치는 배출지역·배출원·전구물질을 구분하고 그 영향 범위를 공간적으로 진단한다. 이를 통해 동일 지역에서도 사례에 따라 NOx 및 VOC 저감 효과가 어떻게 달라지는지를 살펴보고, 지역별 오존 관리 방향을 모색한다. 한편 관측과 모사 간 차이를 통해 배출량과 대기질 모사에서 우선적으로 개선해야 할 부분을 진단한다. 향후 VOC 집중관측과 머신러닝을 활용한 VOC 배출량 추정, 중국을 포함한 국외 배출량의 관측 기반 개선을 통해 주요 불확실성을 줄이고, 고농도 오존의 발생 빈도와 강도를 함께 고려하는 지역 맞춤형 진단 및 관리체계로 발전시키기 위한 연구 방향을 제시한다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지역맞춤형 오존 관리 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25505137).

6I4

CTM 기반 AI를 활용한 위성 관측 기반 지표 대기질 추정

Bridging Satellite Observations and Surface Air Quality with CTM-Guided AI

김현서, 김은혜[1], 강윤희[2], 정성은[3], 김순태[3], 김현철[4,5], 손락훈

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공, [1]국립군산대학교 환경공학과, [2]아주대학교 환경연구소,
[3]아주대학교 환경안전공학과, [4]미국 국립해양대기청 대기자원연구소, [5]메릴랜드대학교 위성 지구시스템 연구 협력연구소

대기오염물질의 지표면 농도를 시공간적으로 연속 모니터링하는 것은 인구 노출 평가와 오염물질의 발생 및 수송 특성 규명, 그리고 효과적인 대기질 관리를 위한 핵심 기반이다. 기존에는 위성 관측을 활용하여 지표면 대기오염물질 농도를 추정하려는 다양한 연구가 수행되어 왔으나, 주간 관측에 의존하는 위성자료의 특성으로 인해 일변동을 반영한 시간 단위의 연속적인 농도장을 산출하는 데에는 한계가 있다. 본 연구에서는 정지궤도 환경위성 GEMS 관측자료를 활용하여 한반도 전역에서 9km 공간 해상도와 1시간 시간 해상도를 갖는 24시간 full-coverage 지표면 대기오염 농도장을 생산하는 인공지능 모델을 개발하였다. 대상 오염물질은 NO_2, $PM_{2.5}$, SO_2 및 CO이며, 오염물질별 개별 모델이 아닌 4개 물질을 동시에 추정하는 multi-pollutant AI framework를 구축하였다. GEMS 미관측 시간대를 보완하기 위해 인접한 두 일자의 GEMS 자료를 시간 거리에 따라 가중하여 시간별 입력자료를 구성하고, 기온, 풍속, 일사량 및 대기경계층 높이 등 오염물질의 일변동을 지배하는 기상요소를 함께 학습함으로써 24시간 연속 농도장을 추정하였다. 지상 관측 자료를 이용한 검증 결과, AI 기반 추정치는 전반적으로 CMAQ보다 높은 정확도를 보였으며, 특히 NO_2와 SO_2에서 뚜렷한 성능 향상이 나타났다. 구축된 자료는 향후 북한 지역 배출량의 하향식 추정과 장거리 수송 특성 분석에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 나아가 대상물질을 O_3 및 VOC 등으로 확대함으로써 광화학적 대기오염 과정과 월경성 오염이 국내 대기질에 미치는 영향을 평가할 수 있는 고해상도·고빈도 대기환경 자료를 구축하고자 한다.

사사 본 연구는 대한민국 국가미세먼지정보센터(National Air Emission Inventory and Research Center, NAIR)와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00343921).

Session 7A 측정·분석

좌장 : 송영철 [한국화학연구원]

7A1) 머신러닝 기반 고속도로 톨게이트 대기오염물질 농도 영향요인 분석
7A2) 대기 중 유·무기 모사 에어로졸 입자의 점도와 상 변화 연구
7A3) PM-2.5 수분 함량이 비균질 화학반응에 미치는 영향에 관한 기초 연구
7A4) 고온풍동시스템에서 주위온도에 의한 열선식유속계의 정확도 영향
7A5) 테더드 존데와 원격탐사 플랫폼 관측을 통한 NO_2 연직분포 비교 연구

Session 7B 측정·분석

좌장 : 최용주 [한국외국어대학교]

7B1) 안면도 지구대기감시소 에어로졸 및 반응가스의 고농도 특성 분석: 2025년 11월 사례
7B2) PAC-알지네이트 생물활성 흡착제의 황화수소 수착 및 생물학적 산화 잠재성
7B3) 항공관측을 활용한 전북 자연환기식(재래식) 돈사·우사 지역 상공의 입체적인 암모니아 분포 분석과 배출량 산정
7B4) 권역별 대기환경연구소 측정자료 기반 탄소성 에어로졸 광흡수 특성 평가 및 광흡수 증강 해석
7B5) 부산 연안지역 계절별 입자상 질산염 생성 특성 연구

Session 7C 대기환경모델링·AI

좌장 : 박승부 [서울시립대학교]

7C1) 딥러닝 기반 CMAQ 에뮬레이터를 활용한 국내 전구물질 배출 저감에 따른 지역별 오존 민감도 평가
7C2) 머신러닝 기반 천식 응급실 스테로이드 처방 예측 및 꽃가루·기상·대기오염 요인의 상대적 중요도 평가
7C3) 랜덤포레스트 기반 머신러닝을 이용한 제주 지역 양돈시설의 NH_3 농도 예측 및 검증에 관한 연구
7C4) 차량번호인식장치(ANPR)와 View-T 자료 및 COPERT 모델을 활용한 서울시 자동차 기후·대기 통합 배출량 산정 방법론 도출

Session 7D 방지기술

좌장 : 장현섭 [성균관대학교]

7D1) 섬유염색 사업장 복합 대기오염방지시설의 오염물질 저감 및 비용효과 분석
7D2) P 첨가를 통한 Zr-Al 흡착제의 암모니아 흡착 성능 증진 연구
7D3) 활성금속 첨가 방법이 CF_4 분해 촉매의 활성 및 내구성 영향 인자 규명 연구
7D4) 고내수성 수산화철계 탈황제를 적용한 50CMM 건식악취제거설비의 공공 폐수처리시설 현장 실증

Session 7E 기후변화·에너지

좌장 : 나하나 [인제대학교]

7E1) 대기오염물질 저감에 따른 재생에너지 공급 및 에너지 수요의 변화
7E2) 폐기물 부문 온실가스 배출 인벤토리의 불확도 평가 및 민감도 분석
7E3) Pt-Ni 합금 나노촉매를 이용한 저함량 Pt 알칼라인 수소 발생 반응 성능 향상 연구
7E4) 알칼리성 수소 발생 성능 향상을 위한 코발트 칼코게나이드의 이종 계면으로의 표면 재구성

Session 7F [특별세션] (Closed Session) 응축성 먼지 관리체계 방향성: 측정 현황과 산정 영향-응축성 먼지

좌장 : 윤종상 [가톨릭대학교]

7F1) 대기배출시설 응축성 먼지 관리체계 구축을 위한 업종별 배출계수 개발 현황
7F2) 인벤토리 관점에서 응축성 미세먼지 배출량 산정의 영향 검토

Session 7H 실내공기질

좌장 : 원수란 [시흥시정연구원]

7H1) 하이브리드 전자담배 가동 모드 및 전용 스틱 종류에 따른 에어로졸 내 유해대기오염물질 발생 특성
7H2) UV-가시광 응답형 Bi_2MoO_6/NH_2-UiO-66 나노복합체 기반 흡착-광촉매의 시너지를 이용한 실내공기 중 폼알데하이드의 산화기술
7H3) Bandgap-adjusted Bismuth Tungstate-titanium Dioxide S-scheme Heterojunctions: Optimizing Interfacial Electronic Structure for Rapid VOC Mineralization

Session 7I 실내공기질

좌장 : 김용현 [전북대학교]

7I1) 매개체 보조 혼성 계단형(MAH-S) 전하 배치를 갖는 은 도핑 금속산화물/MOF 이종구조에서의 기상 폼알데하이드 광촉매 완전 산화
7I2) 배양 및 형광 기반 측정을 통한 응급실 바이오에어로졸과 실내공기질의 시·공간적 특성
7I3) 차세대 저농도 가스 청정성능(c-CADR) 평가를 위한 SIFT-MS의 적합성 및 한계 검토
7I4) Cu 개질 TiO_2/WO_3 S-scheme 광촉매를 이용한 방향족 및 황 함유 휘발성유기화합물의 기상 제거

7A1

머신러닝 기반 고속도로 톨게이트 대기오염물질 농도 영향요인 분석

Machine Learning-Based Analysis of Air Pollutant Variability at Highway Toll Plazas

고찬주, 김소연[1], 정무현[1),2)], 강혜진[3)], 이재영[4),5)]

아주대학교 환경공학과, [1)]한국화학융합시험연구원 환경화학연구소 대기환경센터, [2)]고려대학교 보건안전융합과학과, [3)]한국도로공사 도로교통연구원, [4)]아주대학교 환경안전공학과, [5)]아주대학교 인공지능학과

고속도로 톨게이트는 차량의 감속, 정체, 가속이 반복적으로 발생하는 지점으로, 이러한 주행 특성은 대기오염물질의 농도 및 변동성에 영향을 미친다. 본 연구는 수도권 내 두 고속도로 톨게이트를 대상으로 대기오염물질의 시간적 변동 특성을 분석하고, 머신러닝 기반 분석을 통해 각 입력변수가 오염물질 농도에 미치는 상대적 기여도와 변수 간 상호작용을 평가하였다. 2025년 7월부터 10월까지 경부고속도로의 서울 톨게이트와 수도권제1순환고속도로의 시흥 톨게이트 각 3개 차로에 OA200M (ArimAir, 한국)을 설치하여 대기오염물질(CO, NO_2, $PM_{2.5}$, O_3)을 측정하였다. 이후 동일한 기간의 교통자료(교통량, 교통속도 등), 기상자료(온도, 습도 등)를 수집하여 1시간 단위로 통합한 뒤 머신러닝 모델의 입력 변수로 활용하였다. 예측 모델 개발에는 Random Forest, LightGBM, XGBoost, CatBoost 등의 머신러닝 알고리즘을 활용하였으며, 개발된 모델의 예측 성능을 R^2와 RMSE 등의 평가 지표를 통해 최적 모델을 선정하였다. 이후 SHapley Additive exPlanations (SHAP) 기반 변수 중요도 분석을 통해 입력변수의 상대적 기여도를 확인하였으며, SHAP dependence 및 interaction 분석을 통해 주요 변수의 개별 효과와 변수 간 상호작용을 평가하였다. 본 연구 결과는 고속도로 톨게이트와 같은 국지적 교통 오염원의 관리 및 저감 정책 수립에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지역맞춤형 오존 관리 기술개발사업의 지원(RS-2026-25505137)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25480268).

7A2

대기 중 유·무기 모사 에어로졸 입자의 점도와 상 변화 연구

Investigation of Aerosol Viscosity and Phase State Composed of Atmospheric Relevant Species

박지원[1),2)], 이정민[1),3)], 유한진[4)], 구자호[2)], 송영철[1)]

[1)]한국화학연구원 화학분석센터, [2)]연세대학교 대기과학과, [3)]UST 화학소재 및 공정학과, [4)]국립한국교통대학교 환경공학과

에어로졸 입자는 대기질과 기후에 중요한 영향을 미치므로, 입자의 물리적 상태와 대기 중에서 일어나는 변화를 이해하는 것은 중요하다. 에어로졸의 상 상태는 heterogeneous reaction, mass transfer, water uptake, gas-particle partitioning 등 다양한 대기화학적 과정에 영향을 미친다. 특히 점도는 에어로졸의 상 상태를 결정하는 주요 인자로, 높은 점도의 입자는 고체 또는 준고체상으로, 낮은 점도의 입자는 액체상으로 존재할 수 있다. 또한 점도는 입자 내 물질의 diffusivity, light scattering, reactive uptake 등에도 영향을 미친다. 따라서 대기질 및 에어로졸 농도의 정확한 예측과 모델링을 위해 에어로졸의 점도와 상 상태를 고려해야 하나, 아직 이에 대한 연구는 부족하다. 본 연구에서는 대기 중 유·무기 성분을 모사한 유기물질과 무기염을 혼합하여 에어로졸 입자를 제조하고, 상대습도에 따른 입자의 점도를 측정하였다. 준고체상 입자는 poke-and-flow 방법을, 액체상 입자는 bead-mobility 방법을 이용하였다. 측정된 점도의 상대습도 의존성을 바탕으로 에어로졸 입자의 상 상태를 결정하고, 유·무기 성분으로 구성된 에어로졸의 물리적 특성을 평가하였다.

7A3

PM-2.5 수분 함량이 비균질 화학반응에 미치는 영향에 관한 기초 연구

A Basic Study on the Effect of Aerosol Water Content on Heterogeneous Chemical Reactions

정라니, 성민영, 정지윤, 이태훈, 조용한, 이그림, 박진수, 강대일, 성지원

국립환경과학원 대기환경연구과

대기 중 초미세먼지(PM-2.5)에 포함된 수분, 즉 에어로졸 수분 함량(aerosol water content, AWC)은 입자의 광학적 특성 및 비균질 화학반응에 의한 2차 에어로졸 생성반응 등에 밀접한 영향을 미치는 주요 인자이다(Guo et al., 2015). AWC는 입자의 화학조성, 특히 흡습성 무기이온(SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+ 등)의 농도와 대기 중 온도 및 상대 습도에 따라 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다(Seinfeld and Pandis, 2016). 그러나 AWC는 직접 측정이 상대적으로 어려워 관련 실측자료가 매우 부족한 실정이며, 이에 에어로졸 내 주요 무기이온과 수분 간의 열역학적 평형을 계산하여 AWC를 추정하는 ISORROPIA-Ⅱ가 주로 활용되어 왔다(Fountoukis and Nenes, 2007). 이에 본 연구에서는 Low-volume sampler를 이용해 PM-2.5 시료를 채취하여 질량농도, 이온성분, 탄소성분 및 AWC를 분석하였다. 이 중 AWC는 수분과 요오드(I_2)의 정량적 반응에 소요되는 전기량을 측정하여 수분 함량을 직접 산출하는 Karl Fischer 전량 적정법(Coulometric Titration; 831 KF Coulometer + 874 Oven Sample Processor, Metrohm)으로 측정하였다. 아울러 동일 시료의 화학 조성 및 대기 조건을 기반으로 ISORROPIA-Ⅱ를 이용하여 산출한 AWC와 비교함으로써, 직접 측정값과 모델 추정값 간의 정합성을 평가하고자 하였다.

사사 본 연구는 2026년도 국립환경과학원의 “항공관측 기반 입체관측 고도화 연구 - 국외 유입 대기오염물질의 입체관측 고도화 연구(Ⅱ)” 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2026-01-01-003).

7A4

고온풍동시스템에서 주위온도에 의한 열선식유속계의 정확도 영향

Effect of Ambient Temperature on the Accuracy of Hot-Wire Anemometers in High-Temperature Wind Tunnel

김규보, 임호, 박영도, 김준희, 정상진, 허정기, 임재휴, 양성재[1], 류현준[1]

포항산업과학연구원, [1]POSCO

최근 대기오염물질 관리 강화에 따라 산업단지 굴뚝(Stack)에서 배출되는 가스의 유량 및 농도 측정의 정확성이 엄격히 요구되고 있다. 굴뚝 배출가스 유량 측정에는 Pitot tube, 열선 유속계, 초음파 유속계 등이 적용되고 있으며, 저유속 및 먼지 환경에서는 열선식 유속계의 활용도가 높다. 굴뚝과 같은 고온의 배출가스가 흐르는 환경에서 측정 기기의 신뢰성을 확보하기 위해서는 실제 현장 조건과 유사한 고온 상태에서의 성능평가가 필수적이다. 본 연구에서는 산업 현장의 고온 배출 환경을 모사할 수 있는 고온 풍동 시험계(High-Temperature Wind Tunnel System)를 설계·제작하고, 이를 활용하여 온도가 열선식 유속계의 측정 정확도에 미치는 영향을 분석하였다. 고온 풍동 시스템은 유속 10 m/s에서 최대 200℃까지 가열이 가능하도록 설계하였다. 구축된 시스템을 기반으로 상온부터 고온(최대 200℃) 영역까지 온도 변화에 따른 열선식 유속계의 측정 특성을 실험적으로 평가하였다. 실험 결과, 유체 온도가 상승함에 따라 센서와 유체 간의 유속 측정 오차가 증가하는 경향을 확인하였다. 본 연구를 통해 고온 배출가스 유량 측정용 열선식 유속계의 경우, 고온환경에서 성능평가의 필요성을 확인하였다.

7A5

테더드 존데와 원격탐사 플랫폼 관측을 통한 NO_2 연직분포 비교 연구

Comparison of NO_2 Vertical Profiles between Tethered Sonde and Remote Sensing Platforms

이기열, 최용주, 장임석[1], 김덕래[1], 이원진[1], 신혜정[1], Yugo Kanaya[2], Thomas Hanisco[3], 박종욱[3], Bryan Place[3,4], Apoorva Pandey[3,5], 최형석, 김민호

한국외국어대학교 환경학과, [1]국립환경과학원, [2]Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, [3]NASA Goddard Space Flight Center, [4]Sciglob Instruments and Services LLC, [5]University of Maryland

대류권 NO_2 수직컬럼밀도를 위성 기반 원격탐사로 복원하는 과정에는 연직분포를 포함한 여러 가정으로 인한 산출 불확실성이 내재한다. NO_2 연직분포의 검증은 일반적으로 지상 기반 Pandora 관측을 활용하여 수행된다. 그러나 *in-situ* 관측을 병행하지 않을 경우 연직분포에는 여전히 상당한 불확실성이 남는다. 따라서 본 연구에서는 서울의 풍하지역인 춘천에서 테더드 존데 관측을 이용하여 Pandora로부터 산출된 NO_2 연직분포를 검증하고자 하였다. 테더드 존데 관측은 2026년 4월과 7월에 8일 동안 일출부터 일몰까지 수행되었으며, 반복적인 상승 및 하강 관측을 통해 혼합층 내 NO_2 연직분포의 일변화를 조사하였다. NO_2 연직분포는 incoherent broadband cavity-enhanced absorption spectroscopy (IBB-CEAS) 기반 소형 장비(~1.1 kg) PANDA (Portable cavity-enhanced Absorption of Nitrogen Dioxide Analyzer)를 이용하여 최대 1.2 km 고도까지 측정하였고 동일 지점에서 Pandora 관측을 동시에 수행하였다. Pandora 복원 연직분포와 테더드 존데 관측값을 비교하였을 때, Pandora와 PANDA 간 상관계수는 0.69~0.84의 범위를 보여 비교적 양호한 일치도를 나타냈으며, 관측된 NO_2 연직분포 또한 전반적으로 Pandora에서 잘 재현되었다. 최적합치선의 기울기는 0.44~0.81의 범위로 나타나, Pandora가 PANDA에 비해 NO_2 농도를 전반적으로 과소모의하는 경향을 보였다. 특히 이른 아침과 일몰 시간대 지표 부근에서 큰 차이가 관측되었으며, Pandora는 NO_2를 최대 73%까지 과소평가하였다. 동일한 분석은 향후 GEMS 선험 프로파일에도 적용할 예정이다. 이러한 다중 플랫폼 관측은 Pandora NO_2 산출물 복원 성능을 향상시키고 사전 연직분포의 개선을 통해 궁극적으로 GEMS 산출물의 정확도 향상에 기여할 것으로 기대한다.

사사 본 연구는 2026년 대한민국 국립환경과학원 연구용역과제 "아시아 환경위성 기반 대기질 공동 조사(II) (NIER-2026-04-02-017)"의 지원을 받아 수행되었습니다.

7B1

안면도 지구대기감시소 에어로졸 및 반응가스의 고농도 특성 분석: 2025년 11월 사례

Characteristics of High Air Pollution Episodes of Aerosols and Reactive Gases at Anmyeon-do Global Atmosphere Watch Station: A Case Study of November 2025

부준오, 한종헌, 오상민, 김상백

국립기상과학원 지구대기감시연구과

본 연구는 2025년 11월 안면도 지구대기감시소에서 관측된 에어로졸 및 반응가스 자료를 활용하여, 고농도 대기오염 발생 시의 사례별 특성과 오염원 유입 경로를 분석하였다. 관측 기간 중 대기오염 현상을 황사, 연무, 고농도 미세먼지(황사·연무 복합), 산불 영향으로 분류하고, 이를 비현상일의 농도와 비교하였다. 분석 결과, 황사 발생 시 PM_{10} 농도는 비현상일 대비 2.7배 급증하였다. 연무 발생 시에는 PM_{10}, NOx, SO_2 농도가 각각 2.0, 2.0, 1.4배씩 증가하였으며, 광흡수계수 역시 동반 상승하는 특징을 보였다. 황사와 연무가 동시에 작용한 고농도 미세먼지 사례에서는 PM_{10} 농도가 2.7배 증가하며 광산란 및 광흡수계수 모두에 유의미한 영향을 미쳤다. 산불 영향권에 놓였을 때는 PM_{10} 농도가 2.2배, 일산화탄소(CO) 농도가 약 1.8배 증가하였으며, 블랙카본(BC) 농도도 뚜렷한 상승세를 나타냈다. 역궤적 분석을 통한 기류 확인 결과, 11월의 고농도 사례들은 중국 대륙에서 유입된 기류의 영향이 강하게 작용하였다. 특히 연무 및 고농도 미세먼지 현상은 중국 동부 산업지역에서 배출된 오염물질이 정체 기류를 따라 서해안으로 장거리 수송되면서 심화된 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 한반도 배경대기 지역으로의 외부 오염물질 유입 메커니즘을 상세히 규명하는 데 기여할 것으로 기대된다.

사사 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구」 "황사·연무 감시 및 예보기술 개발(KMA2018-00521)"의 지원으로 수행되었습니다.

7B2

PAC-알지네이트 생물활성 흡착제의 황화수소 수착 및 생물학적 산화 잠재성

Hydrogen Sulfide Sorption and Biological Oxidation Potential of PAC-Alginate Bioactive Adsorbents

조나래, 김대근

서울과학기술대학교 환경공학과

황화수소(H_2S)는 하·폐수처리시설, 축산시설 및 산업공정에서 발생하는 대표적인 오염물질로, 안정적인 지속적인 저감기술이 요구된다. 황화수소 제거기술 중 습식 세정은 높은 제거효율을 나타내지만 흡수액의 처리와 2차 오염의 우려가 있다. 활성탄 흡착은 높은 제거성능을 나타내지만 포화에 따른 교체 및 재생이 필요하며, 생물학적 처리는 미생물 활성 유지와 안정적인 운전에 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 개별 처리기술의 한계를 보완하기 위해 흡착과 생물학적 산화를 결합한 처리기술을 개발하고자 하였다. 분말활성탄(powdered activated carbon, PAC)과 알지네이트를 이용하여 비드를 제조하고, 제조 pH에 따른 H_2S 수착성능을 회분식 실험으로 평가하였다. 알지네이트 용액의 pH를 조절한 비드는 pH 7과 10에서 각각 3.99 및 5.32 mg g^{-1}의 수착용량을 나타냈으며, 겔화 용액의 pH를 조절한 비드는 pH 4~10에서 2.60~3.83 mg g^{-1}로 상대적으로 낮은 수착용량을 보였다. 이에 따라 알지네이트 용액 pH 10을 최적 제조조건으로 선정하고, 황산화세균(sulfur-oxidizing bacteria, SOB)을 고정화하여 비드 내 생존과 활성을 확인하였다. IC 분석 결과, 비생물학적 pA 10에서는 SO_4^{2-}가 검출되지 않은 반면, Bio-pA 10에서는 0.0276 mg g^{-1}의 SO_4^{2-}가 검출되어 고정화된 SOB에 의한 생물학적 황산화가 이루어졌음을 확인하였다. 본 연구는 제조조건 조절을 통한 PAC-알지네이트 비드의 H_2S 수착성능 향상과 SOB 고정화를 통한 생물학적 황산화를 확인하였으며, 수착과 생물학적 산화를 결합한 지속적인 H_2S 처리기술 개발을 위한 기초자료를 제공한다.

사사 본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2023R1A2C2003796; NRF-2020R1A6A1A03042742).

7B3

항공관측을 활용한 전북 자연환기식(재래식) 돈사·우사 지역 상공의 입체적인 암모니아 분포 분석과 배출량 산정

Ammonia Distribution Analysis and Top-Down Emission Rate Estimation over Naturally Ventilated Livestock Farms Using Airborne Measurements

서범근[1], 이미선[1], 유정훈[1], 송미정[3], 유지성[3], 김연후[3], 홍세운[4], 이향경[5], 함지영[5], 유 철[5], 김종호[1,2]

[1]한서대학교 환경연구소, [2]한서대학교 환경·토목·건축학과, [3]전북대학교 환경에너지융합학과,
[4]전남대학교 지역·바이오시스템공학과, [5]국가미세먼지정보센터

축산 시설에서 배출되는 암모니아(NH_3)는 미세먼지 2차 생성의 주요 전구물질이며 악취 유발하는 대기오염물질이다. 특히, 돼지와 소는 사육두수 대비 축사 면적이 넓으며 농업(분뇨관리) 부문 암모니아 총 배출량의 69.8%를 차지한다. 본 연구는 대기질 항공관측 소형항공기(Beechcraft KingAir-C90GT; C90GT)에 1초(1 Hz) 주기로 고속 측정이 가능한 암모니아 측정장비(EAA-911, ABB-LGR)를 탑재하여 전북의 자연환기식 돈사(김제) 및 우사(정읍) 지역 상공에서 각각 3차원 입체 항공관측을 수행하였다. 두 대상 지역은 모두 항공관측에 용이한 평지 지형으로 암모니아의 연직 및 수평 분포를 측정하기 위해 고도 별 나선형 비행(Sprial flight)과 비행가능한 최저고도에서 지그재그 비행(Zigzag flight)을 수행하였다. 암모니아 항공관측 결과로부터 분석된 암모니아의 연직 농도 분포는 측정당일의 행성경계층(PBL) 높이와 연관을 보였다. 측정된 고도별 암모니아 자료를 질량수지법(Mass balance) 기법의 TERRA 알고리즘을 적용하여 각 대상 지역의 하향식(Top-down) 배출량을 산정하였다. 또한, 지그재그 비행으로 측정된 자료를 활용하여 각 축사 주변의 수평적 분포를 분석하고 비행 영역 내 활동도(사육두수) 자료와 연계하여 실측 기반의 암모니아 배출계수를 산정하였다. 측정 당일의 기상 조건이 축사 환경에 따라 암모니아의 배출량은 변동될 수 있으나 입체적인 항공관측을 통해 지역 맞춤형 배출량 및 배출계수(활동도 자료 수집 시)를 산정할 수 있었다.

사사 이 연구는 2026년 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터의 지원을 받아 수행된 연구(대기 배출원별 암모니아 배출량 평가 및 개선 연구(IV))임.

7B4

권역별 대기환경연구소 측정자료 기반 탄소성 에어로졸 광흡수 특성 평가 및 광흡수 증강 해석

Light Absorption Characteristics and Absorption Enhancement of Carbonaceous Aerosols Based on Measurements from Regional Air Quality Research Centers

정진주[1),2)], 오승미[2)], 송인호[1)], 박종성[1)], 임용재[1)], 허국영[1)], 강대일[1)], 성지원[3)], 이지이[2)]

[1)]국립환경과학원 대기환경연구과, [2)]이화여자대학교 환경공학과, [3)]국립환경과학원 대기환경연구부

본 연구에서는 2022~2024년 전국 11개 대기환경연구소의 1시간 연속 관측자료를 활용하여 지역별 탄소성 에어로졸의 파장별 광흡수 특성과 흡수증강 특성을 해석하였다. 광흡수계수(b_{abs})를 EC 농도로 정규화하여 질량흡수효율(MAE)을 산정하였으며, EC를 1차 배출 추적자로 적용한 minimum R-squared (MRS) 방법으로 1차 발생 에어로졸의 MAE (MAE_{pri})를 추정하였다. 이를 바탕으로 겉보기 흡수증강계수($E_{abs,app}$)를 산정하고, CatBoost-SHAP 분석을 통해 지역별 흡수증강 예측에 기여하는 요인을 해석하였다. 광흡수계수의 파장의존성과 일중변화는 지역별로 뚜렷한 차이를 보인 반면, EC로 정규화한 MAE와 $E_{abs,app}$의 지역 간 차이는 상대적으로 작았다. 대부분의 측정소에서 MAE가 MAE_{pri}보다 높게 나타났으며, $E_{abs,app}$는 약 1.5~3.0 범위로 나타나 대기 중 노화 및 내부혼합에 따른 광흡수 증강 가능성을 확인하였다. 한편, 흡수증강에 기여하는 주요 변수는 2차 에어로졸 생성, 광화학반응, 기상 및 수송 관련 요인 등 지역별로 상이하게 나타났다. 이는 유사한 수준의 BC 광흡수증강이 지역별로 서로 다른 대기과정과 연관될 수 있음을 시사하며, BC의 광학적 특성과 기후효과를 평가할 때 지역별 배출 및 대기환경 특성을 함께 고려할 필요가 있음을 보여준다.

사사 본 성과는 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원(NIER-2021-03-03-001, 권역별대기환경연구소 운영) 및 한국환경산업기술원(미세먼지관리 특성화대학원 사업)의 지원을 받아 수행된 연구임.

7B5

부산 연안지역 계절별 입자상 질산염 생성 특성 연구

Seasonal Variation in Particulate Nitrate Formation at a Coastal Site in Busan, Korea

박용미[1)], 한수빈[1),2)], 최원식[1),2)]

[1)]국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [2)]동남권 미세먼지연구·관리센터

$PM_{2.5}$는 다양한 화학성분으로 구성되어 있으나, 황산염, 질산염, 암모늄 등 2차 무기 에어로졸(secondary inorganic aerosols, SIA)이 큰 비중을 차지한다. 이 중 질산염은 고농도 사례 시 기여도가 크며, 주간과 야간에 서로 다른 대기 화학 과정을 통해 생성되는 것으로 알려져 있다. 국내외 여러 지역에서 질산염 생성 경로에 관한 연구가 수행되었으며, 부산 연안지역에서도 고농도 $PM_{2.5}$ 사례에서 질산염의 중요성이 확인된 바 있다. 본 연구에서는 계절별 집중측정 자료를 바탕으로 부산 연안지역의 $PM_{2.5}$ 화학적 특성과 질산염 생성 과정을 분석하였다. 2021년 1월부터 2022년 6월까지 부경대학교 용당캠퍼스에서 계절별로 총 5회의 집중측정을 수행하였다. 수용성 무기이온은 PILS-IC (Metrohm Eco IC 883)로, 가스상 물질 및 입경분포는 병행 관측 자료를 활용하였으며, 기상 자료를 함께 확보하였다. 에어로졸 액상 수분량(ALWC)과 입자 pH는 ISORROPIA-II 열역학 평형모델로 산출하였다. 계절별 질산염 농도의 시간 변화 특성을 주·야간으로 구분하여 분석하였으며, 광화학 지표 및 습도·액상 관련 인자와의 관계를 비교하였다. 또한 해염의 영향이 뚜렷한 연안 환경의 특성을 고려하여, 해염 성분이 질산염 생성에 미치는 영향을 함께 살펴보았다. 본 연구를 통해 부산 연안지역의 계절별 질산염 생성 특성을 이해하고, 향후 연안 도시 지역의 $PM_{2.5}$ 저감 대책 수립을 위한 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

사사 이 논문은 2026년도 국립환경과학원(NIER-2026-01-02-019)의 지원을 받아 수행하였습니다.

7C1

딥러닝 기반 CMAQ 에뮬레이터를 활용한 국내 전구물질 배출 저감에 따른 지역별 오존 민감도 평가

Assessment of Regional Ozone Sensitivity to Precursor Emission Reductions in South Korea Using a Deep Learning-Based CMAQ Emulator

김지민, 김태희[1], 도현석, 곽경환, 백복행[2], 이상덕[3], 김수민[4], 박정후[4]

강원대학교 환경학과, [1]강원대학교 산학협력단, [2]George Mason University,
[3]강원대학교 산림환경보호학과, [4]국립환경과학원 대기환경연구과

오존(O_3)은 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOCs)의 광화학 반응을 통해 생성되는 대표적인 이차 대기오염물질이다. 효과적인 오존 관리를 위해서는 전구물질 배출 저감에 따른 오존 농도 변화를 정량적으로 평가할 필요가 있으며, 이를 위해 화학수송모델(CTM)이 널리 활용되고 있다. 그러나 CTM은 높은 계산 비용을 필요로 하기 때문에 광범위한 배출 시나리오 분석에 적용하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 딥러닝 기반 CTM 에뮬레이터(DeepCTM)를 개발하고, 지역별 NOx 및 VOC 배출 저감 시나리오에 따른 오존 농도 반응을 정량적으로 분석하고자 한다. DeepCTM 모델은 2023년 4월 1일부터 10월 1일까지 7가지 배출 시나리오에 대한 WRF-CMAQ 모델링 결과를 이용하여 구축하였다. 연구 대상 지역은 수도권 및 강원 영서지방이며, 배출지역과 영향지역을 구분하였다. 배출지역의 전구물질 저감에 따른 영향지역 O_3 변화를 평가하기 위해, 배출 및 영향지역의 NOx 및 VOCs 배출량을 함께 조정하는 SCEN1과 배출지역의 NOx 및 VOCs 배출량만 조정하는 SCEN2를 설정하였다. O_3 등 농도선 분석 결과 배출지역과 영향지역 모두 VOCs-limited 특성을 보였으며, 배출지역의 전구물질 감축이 영향지역의 오존 농도를 감소시켰다. 일부 지역은 전구물질 100% 저감에도 기준을 충족하지 못해 전구물질의 광역적 관리의 필요성이 확인되었다. 이러한 결과는 여름철 오존을 효과적으로 저감하기 위해 지역별 오존 생성 특성과 전구물질 민감도를 고려한 차별화된 배출 저감 전략이 필요함을 나타낸다.

사사 본 연구는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2025-01-02-020).

7C2

머신러닝 기반 천식 응급실 스테로이드 처방 예측 및 꽃가루·기상·대기오염 요인의 상대적 중요도 평가

Machine Learning for Predicting Emergency Department Steroid Prescriptions for Asthma and Assessing the Relative Importance of Pollen, Meteorological, and Air Pollution Factors

황혜민, 장재혁[1], 이은영[2], 박해심[1], 이재영[3,4]

아주대학교 환경공학과, [1]아주대학교 의과대학 알레르기내과학교실,
[2]Department of Neurology, McGovern Medical School, The University of Texas Health Science Center at Houston,
[3]아주대학교 환경안전공학과, [4]아주대학교 인공지능학과

대기 중 꽃가루는 천식 악화를 유발할 수 있는 주요 생물학적 대기오염 인자로, 그 건강영향은 기상조건과 대기오염물질에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 국내 주요 꽃가루 분류군을 포함한 다양한 대기환경 요인을 통합한 예측모델을 구축하고, 천식 악화에 기여하는 주요 환경인자를 평가하고자 하였다. 2015년부터 2020년까지 국내에서 천식으로 응급실에 내원하여 스테로이드를 처방받은 환자 수를 천식 악화 지표로 활용하였다. 노출 변수에는 국내 주요 11개 꽃가루 분류군의 농도와 함께 기온, 상대습도, 풍속, 강수량, 일사량 등의 기상요인 및 CO, NO_2, O_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$의 대기오염물질 농도를 포함하였다. 꽃가루가 주로 관찰되는 3월부터 10월까지의 자료를 주 단위로 통합하여 분석하였다. 환경요인과 천식 악화 간의 복합적인 관계를 반영하고 예측성능을 평가하기 위해 Elastic Net, Random Forest, XGBoost 및 CatBoost의 네 가지 머신러닝 알고리즘을 적용하고 모델별 예측 성능을 비교하였다. 또한, 변수 중요도와 SHAP (SHapley Additive exPlanations) 분석을 이용하여 모델 예측에 대한 개별 환경변수의 상대적 중요도와 영향 방향을 평가하였다. 본 연구는 향후 복합 대기환경 정보를 활용한 천식 악화 위험 예측 및 환경보건 경보체계 구축을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

사사 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었으며(RS-2026-25480268), 연구에 사용된 꽃가루 데이터는 한국꽃가루알레르기연구협회(KoPAIF)로부터 제공받아 수행된 연구임.

7C3

랜덤포레스트 기반 머신러닝을 이용한 제주 지역 양돈시설의 NH_3 농도 예측 및 검증에 관한 연구

Prediction and Field Validation of NH_3 Concentrations in Swine Facility in Jeju Island Using Random Forest-Based Machine Learning

고용국[1),2)], 전 진[1)], 이현정[1)]

[1)]제주대학교 환경공학과, [2)]제주녹색환경지원센터(제주악취관리센터)

제주도 내 양돈산업은 청정한 환경을 바탕으로 지역 경제 활성화와 식량 공급에 기여하는 주요 산업으로 자리잡고 있는 반면, 사육 시설의 대형화, 밀집화로 인해 악취와 같은 환경 문제가 지속되고 있다. 특히, 암모니아(NH_3)는 양돈시설에서 발생하는 대표적인 악취 물질로, 시설 내부의 환경과 기상 조건 등에 따라 농도가 크게 변화하여 지속적인 모니터링과 농도 변화 예측이 필요하다. 이에 본 연구에서는 제주 지역 양돈시설 밀집 시설 내 대표 농가를 대상으로 ICT 센서와 바람장 모델(CALMET) 데이터를 활용하여 Random Forest 기반 농도 예측 모델을 구축하고, 현장 실측 자료와 비교하여 예측 성능 및 농도 변동 경향의 재현성을 평가하였다. 제주 한림읍 소재 내 선정된 양돈시설에서 2024~2025년간 수집된 ICT 센서 및 대상 지역 CALMET 바람장 모델 데이터를 전처리한 후 Random Forest 기반으로 머신러닝을 수행하였다. 2024년부터 2025년 상반기까지의 데이터로 모델을 학습시킨 후 2025년 하반기 센서 데이터를 이용하여 모델의 예측 성능을 검증하였다. 또한 2025년 7월 26일과 8월 3일 대상 농가 비육돈사에서 측정한 NH_3 농도와 비교하여 절대 농도의 일치도와 시간에 따른 변동 경향을 평가하였다. 모델 검증 결과 NH_3 농도 예측은 R^2=0.58로 나타나 일정 수준의 예측 성능을 보인 것으로 나타났다. 실측 자료와의 비교 결과, 절대 농도의 일치도는 전반적으로 낮게 나타난 반면, 농도 변동 경향성에서는 Pearson r=0.594, 증감 방향 일치율 80%로 나타나 일정 수준의 재현성을 보였다.

사사 본 연구는 제주녹색환경지원센터에서 수행하는 제주악취관리센터 사업의 결과임. 또한 2026년도 교육부 및 제주특별자치도의 재원으로 제주RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커)의 결과(2026-앵커-17-001)이며, 환경부의 폐자원에너지화 재활용 전문인력양성사업(YL-WE-22-001)의 결과임.

7C4

차량번호인식장치(ANPR)와 View-T 자료 및 COPERT 모델을 활용한 서울시 자동차 기후·대기 통합 배출량 산정 방법론 도출

Development of an Integrated Greenhouse Gas and Air Pollutant Emission Estimation Methodology for On-Road Vehicles in Seoul Using ANPR, View-T Data, and the COPERT Model

이소진[1),2)], 강성민[1),2)], 차주원[1),2)]

[1)]수서울연구원 탄소중립센터, [2)]서울시 탄소중립지원센터

도로이동오염원의 배출 지역과 발생 시간을 현실에 가깝게 반영하는 고해상도 배출 인벤토리 개발을 위해서는 행정구역별 자동차 등록대수와 일평균 주행거리(VKT) 등 거시적 통계에 의존한 등록지 중심의 공간 배분 방식과 기존 사용되고 있는 배출계수에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 서울시의 실제 통행 특성을 반영하여 기후(온실가스) 및 대기질(대기오염물질)을 아우르는 자동차 통합 배출량 산정 방법론을 제안한다. 첫째, 서울시 녹색교통지역 및 5등급 차량 운행제한 체계의 차량번호인식장치(ANPR, Automatic Number Plate Recognizer) 빅데이터를 활용하여 실제 도로를 주행하는 차량의 차종, 유종, 연식, 배출가스 등급 등 세부 속성을 추적하고 실통행 차량 구성비를 도출하였다. 둘째, 한국교통연구원의 View-T 데이터를 연계하여 등록지 기준 배분을 탈피하고 도로 링크별·시간대별 주행거리(VKT)와 통행속도 등 시공간 통행 특성을 정밀하게 반영하였다. 셋째, 유럽 배출가스 기준 및 세부 차량 제원을 상세히 모사할 수 있는 COPERT (Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport) 모델을 적용하여 국내 배출가스 등급 및 세부 차종별 배출계수를 산출하고, 온실가스와 대기오염물질 배출량을 통합 산정하였다.

7D1

섬유염색 사업장 복합 대기오염방지시설의 오염물질 저감 및 비용효과 분석

Analysis of Pollutant Removal Efficiency and Cost-Effectiveness of Improved Integrated Air Pollution Control Systems in Textile Dyeing Facilities

김정호, 김현수[1], 문혜식[1], 편도철[2]

열린공간, [1]대구녹색환경지원센터, [2]대구정책연구원

섬유염색 사업장의 텐터(다림질) 및 코팅 공정에서는 원단의 열처리·건조를 위해 LNG, LPG 등의 연료를 사용하고 가공유 및 코팅제 등을 취급하며, 이 과정에서 입자상 및 가스상 대기오염물질이 복합적으로 발생한다. 해당 공정의 주요 관리대상 오염물질은 먼지, 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx) 및 총탄화수소(THC)이며, 기존에는 입자상 및 가스상 오염물질을 처리하기 위해 세정, 흡수 및 흡착 방식의 대기오염방지시설이 주로 적용되어 왔다. 그러나 환경관리 기준의 강화와 더불어 벤젠 및 폼알데하이드(HCHO) 등 유해대기오염물질의 배출, 백연 및 악취 발생, 관련 환경민원의 증가로 인해 섬유염색 공정에 설치된 방지시설의 성능 개선 필요성이 지속적으로 제기되어 왔다. 본 연구에서는 이러한 배경에서 추진된 정부의 「소규모사업장 방지시설 설치지원사업」을 통해 방지시설을 개선한 섬유염색 사업장을 대상으로 대기오염물질의 저감효과를 평가하였다. 연구대상은 텐터 및 코팅시설을 주요 배출시설로 운영하는 약 20개 섬유염색 사업장이며, 이들 사업장에서는 기존의 흡수-흡착 조합 또는 단일 흡착 방식의 방지시설을 대부분 흡수-응축-전기집진 또는 흡수-전기집진-응축 계통의 복합 방지시설로 개선하였다. 실제 공정 운전조건에서 확보된 방지시설 전·후단 자가측정기록의 배출가스 유량과 오염물질 농도를 이용하여 전·후단의 질량배출량을 산정하였으며, 이를 기반으로 오염물질별 제거량과 제거효율을 평가하였다. 또한 방지시설의 구성과 배열에 따른 오염물질 저감성능을 비교하고, 시설별 설치·교체비용을 저감량 및 제거효율과 연계하여 복합 방지시설의 비용효과를 분석하였다.

사사 본 연구는 대구녹색환경지원센터에서 수행한 「소규모사업장방지시설설치지원사업」의 일환이며, 사업장과 시공사의 협조에 감사드립니다.

7D2

P 첨가를 통한 Zr-Al 흡착제의 암모니아 흡착 성능 증진 연구

Enhancement of Ammonia Adsorption Performance of Zr-Al Adsorbents through Phosphorus Addition

문병현, 정현수, 김재헌, 박아린, 김희진, 김성수[1]

경기대학교 환경에너지공학과, [1]경기대학교 사회에너지시스템공학과

암모니아(NH_3)는 대표적인 악취 유발 물질일 뿐만 아니라 대기 중 산성 성분과 반응하여 2차 미세먼지를 형성하는 주요 전구물질로서, 축산시설, 폐수처리시설 및 다양한 산업공정에서 지속적으로 배출된다. 실제 배출가스에는 수분이 함께 존재하는 경우가 많으며, 물 분자는 흡착제의 기공과 표면 활성점을 선점하여 NH_3 흡착을 저해할 수 있다. 활성탄, 제올라이트 및 금속산화물 기반 흡착제는 높은 비표면적과 산점 특성을 이용해 NH_3 제거에 활용되어 왔으나, 다습 조건에서는 성능이 감소할 가능성이 있다. 본 연구에서는 수분 공존 환경에서도 NH_3와 강한 화학적 상호작용을 형성할 수 있는 소재를 개발하기 위해 졸-겔법으로 Zr-Al 기반 흡착제를 제조하고, 인(P) 첨가에 따른 표면 산 특성과 NH_3 흡착 거동을 조사하였다. 성능 평가 결과, 20%P-10%Zr-Al 흡착제는 24.10 mg/g의 가장 높은 NH_3 흡착량을 나타냈으며, 이는 P가 첨가되지 않은 10%Zr-Al 소재보다 약 24배 향상된 값이었다. NH_3-TPD 분석에서는 P 첨가에 따른 산점의 증가와 특성 변화가 확인되었으며, Py-FT-IR 분석을 통해 Brønsted 산점의 발달을 확인하였다. 또한 표면에 형성된 P-OH 작용기는 NH_3와의 산-염기 상호작용을 강화하여 수분에 의한 경쟁 흡착을 완화하는 데 기여한 것으로 해석된다. 이상의 결과는 P 첨가가 Zr-Al 소재의 표면 산성을 효과적으로 조절하고, 다습 조건에서 NH_3 흡착 성능을 향상시키는 유효한 방법임을 보여준다. 따라서 P-Zr-Al 소재는 고습 배출가스 내 NH_3 및 악취 저감을 위한 유망한 흡착제로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사사 이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경공단의 통합환경관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

7D3

활성금속 첨가 방법이 CF_4 분해 촉매의 활성 및 내구성 영향 인자 규명 연구

Effect of Active Metal Addition Method on the CF_4 Decomposition Activity and Durability of Catalysts

김재헌, 정현수, 문병현, 박아린, 김희진, 김성수[1)]

경기대학교 환경에너지공학과, [1)]경기대학교 사회에너지시스템공학과

본 연구에서는 CF 분해 성능 증진을 위한 sol-gel법을 적용한 ZrO -Al O 계 촉매의 Ni 및 Zr 함량 최적화를 진행하였으며, Ni 첨가 방법에 따른 촉매(함침법을 이용한 담지 촉매 및 합성방식을 적용한 합성 촉매)의 분해 특성을 조사하였다. 제조된 촉매의 활성 실험을 통해, 동일한 Ni 및 Zr 함량으로 제조된 촉매라도 활성금속 첨가 방법에 따라 700℃에서 5~10%의 서로 다른 분해 성능을 나타내었으며, 합성 촉매의 우수한 분해 성능을 확인할 수 있었다. XRD 분석과 피리딘을 활용한 in situ DRIFT 분석 결과를 통해 활성 금속 첨가 방법에 따른 결정 구조의 차이를 관찰하였으며, 이러 한 구조적 차이에 따라 활성점으로 작용하는 산점이 더 풍부해지는 결과를 확인할 수 있었다. 최적 함량의 담지 및 합성 촉매의 내구성 평가를 수행하였으며, 담지 촉매의 내구성이 더 우수함을 확인하였다. 내구성 실험 전/후 촉매의 조성 및 화학적 결합상태 확인을 위하여 XPS 분석을 수행하였다. 그 결과 OAds/OTot의 비율의 증가가 촉매의 내구성에 긍정적 영향 미치는 결과를 확인할 수 있었다.

사사 이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경공단의 통합환경관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

7D4

고내수성 수산화철계 탈황제를 적용한 50CMM 건식악취제거설비의 공공 폐수처리시설 현장 실증

Field Demonstration of a 50CMM Dry Type Odor Removal System with High Water Resistant Iron Hydroxide based Desulfurization Agent at a Public Wastewater Treatment Facility

김신동, 이재명, 강민현

㈜이앤켐솔루션 에너지·환경연구소

하·폐수처리장 등 환경기초시설에서 발생하는 황화수소(H_2S)는 대표적인 악취 유발물질로, 작업환경 및 주변 생활환경에 영향을 미칠 수 있어 적절한 관리와 처리가 필요하다. 기존의 습식 약액세정 방식은 약품 사용에 따른 폐수 발생, 동절기 운전 시 동파 가능성 및 화학물질 관리에 따른 운영 부담 등의 한계가 있다. 본 연구에서는 광산배수슬러지를 원료로 제조한 고내수성 수산화철계 탈황제를 적용한 50 CMM급 건식 악취제거설비(ENCS-OPSD-050)를 제작하고, 강릉시 주문진 농공단지 폐수종말처리시설의 가압부상조에서 발생하는 고농도 황화수소 함유 악취를 대상으로 현장 실증을 수행하였다. 대상 시설의 가압부상조 상부에서는 최대 1,000 ppm 이상의 황화수소가 측정되어 작업환경 및 기존 후단 악취처리시설에 대한 부하 저감이 필요한 것으로 나타났다. 실증설비는 1단계 부직포 필터를 이용한 분진 제거, 2단계 고내수성 수산화철계 탈황제에 의한 황화수소 화학적 흡착, 3단계 활성탄에 의한 잔류 악취물질의 물리적 흡착으로 구성하였다. 탈황제의 황화수소 제거는 수산화철과 황화수소의 반응에 의한 황화철 생성 반응을 기반으로 하며, 높은 상대습도 조건에서도 흡착성능을 유지하도록 설계하였다. 현장 연속운전 결과, 3개월 동안 황화수소 제거율은 99% 이상으로 유지되었으며, 최종 배출구의 복합악취 희석배수는 300배 이하로 나타났다. 이상의 결과는 고농도 황화수소가 발생하는 공공 폐수처리시설에서 고내수성 수산화철계 탈황제를 적용한 건식 악취제거기술의 실규모 적용 가능성을 확인한 것이다. 또한 사용 후 탈황제에 포함된 황화철계 물질의 후속 자원화 가능성을 검토함으로써 폐탈황제의 순환이용 및 자원순환 측면에서의 활용 가능성을 제시하였다.

사사 본 연구는 중소벤처기업부 기술개발제품 공공기관 실증지원 사업의 지원을 받아 수행되었음.

7E1

대기오염물질 저감에 따른 재생에너지 공급 및 에너지 수요의 변화

Changes in Renewable Energy Supply and Energy Demand Induced by Air-Pollution Mitigation

박인홍

건국대학교 사회환경공학부

대기오염물질 저감은 복사수지와 기온, 대기순환을 변화시켜 재생에너지 공급과 에너지 수요에 동시에 영향을 줄 수 있으나, 이러한 효과를 공급-수요 관점에서 정량화한 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 9개 CMIP6 모델의 SSP3-7.0 및 SSP3-7.0-lowNTCF 실험을 이용하여 단기기후강제인자(NTCF) 저감이 태양광·풍력 발전 잠재력이 기온 관련 에너지 수요에 미치는 영향을 분석하였다. 일별 지표면 일사량, 10 m 풍속 및 기온으로부터 태양광과 풍력 발전 잠재력, 고민감도 에너지 수요를 산정하고 2035~2054년 평균을 비교하였다. 또한 1985~2014년 historical 기후값 대비 SSP3-7.0 변화를 통해 배경 기후변화의 영향을 함께 평가하였다. 분석 결과, NTCF 저감은 대부분의 육지에서 태양광 발전 잠재력을 증가시켰으며, 특히 남아시아와 동아시아 등 대기오염의 영향이 큰 지역에서 차이가 크게 나타났다. 에너지 수요는 추가적인 온난화에 따라 저위도에서는 냉방 수요 증가로 커지는 반면, 고위도에서는 난방 수요 감소로 줄어드는 위도별 대비를 보였다. 풍력 발전 잠재력은 대기순환 변화의 영향으로 지역적으로 비균질한 반응을 나타냈다. 이러한 결과는 대기오염 저감이 재생에너지 공급과 수요를 서로 다른 메커니즘으로 재편할 수 있음을 의미한다. 향후 일별 공급-수요 일치도와 불일치 빈도를 분석하여 NTCF 저감에 따른 에너지 시스템의 지역별 편익과 위험을 정량화하고자 한다.

사사 본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00335725).

7E2

폐기물 부문 온실가스 배출 인벤토리의 불확도 평가 및 민감도 분석

Uncertainty Assessment and Sensitivity Analysis of Greenhouse Gas Emission Inventories in the Waste Sector

노준영, 이동은, 김성동, 김승진, 이한결[1], 노용국[1]

㈜휴엔릭스 첨단기술연구소, [1]한국환경공단 기후정책지원부

국가 온실가스 인벤토리의 신뢰도 향상을 위해서는 배출량 산정에 사용되는 활동자료, 배출계수 및 주요 매개변수의 불확도를 정량적으로 평가하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 폐기물 부문 온실가스 배출을 대상으로 IPCC에서 제시하는 IPCC Approach 2 방법(Monte Carlo Simulation)을 활용하여 배출계수 및 배출량의 불확도를 정량화하였다. 생물학적 처리, 매립, 폐기물 소각 및 하·폐수 처리 부문의 활동자료와 배출계수에 대해 자료 특성에 따라 확률분포를 설정하고 반복 모의를 수행하였으며, 각 입력인자가 최종 배출량 불확도에 미치는 영향을 평가하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 분석 결과, 폐기물 부문 전체 및 세부 배출원별로 서로 다른 수준의 불확도가 나타났으며, 특히 일부 하·폐수 처리 및 생물학적 처리 배출원에서 상대적으로 큰 불확도가 확인되었다. 또한, 민감도 분석을 통해 배출량 불확도에 상대적으로 큰 영향을 미치는 주요 입력인자를 확인하였다. 본 연구에서는 폐기물 부문을 대상으로 배출 인벤토리의 불확도 평가를 진행하였으며, 향후 에너지, 산업공정, 농업 등 다른 배출 부문에서도 활동자료와 배출계수의 특성을 고려한 체계적인 불확도 평가 및 관리가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 최근 단기체류 기후대기오염물질(Short-Lived Climate Forcers, SLCFs)에 대한 관리 중요성이 확대되고 있는 만큼, 향후 대기오염물질 배출 인벤토리에 대해서도 불확도 정량화 및 민감도 기반의 자료 품질관리가 필요할 것으로 판단된다.

사사 본 성과는 2025년도 한국환경공단의 재원으로「폐기물 부문 활동자료 배출계수 불확도 산정 방안 마련」사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

7E3

Pt-Ni 합금 나노촉매를 이용한 저함량 Pt 알칼라인 수소 발생 반응 성능 향상 연구

Enhanced Alkaline Hydrogen Evolution Reaction with Low Pt Loading Pt-Ni Alloy Nanocatalysts

배기남[1),2)], 트란민녹[1)], 정다운[1)], 오민희[1)], 전기준[1),2)]

[1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터

수전해는 물 전기분해 기반 수소 생산 기술로, 탄소 배출이 없는 청정 기술로 주목받고 있다. 알칼라인 조건에서의 수소 발생 반응(Hydrogen Evolution Reaction, HER)은 안정성, 경제성 측면에서 유리하나 산성 조건 대비 추가적인 물 분해 단계가 요구되어 느린 반응 속도를 보이며, 이를 극복하기 위한 고활성 촉매 개발이 중요하다. 대표적인 HER 촉매인 백금(Pt)은 우수한 활성을 나타내지만, 높은 비용과 제한적인 자원성으로 인해 실용화에 한계가 존재한다. 이에 따라 Pt 사용량을 저감하면서도 알칼라인 HER 성능을 향상시킬 수 있는 촉매의 연구가 요구되고 있으며, 본 연구에서는 저함량 Pt 기반 알칼라인 HER 촉매 개발을 위해 Pt와 Ni를 활용한 합금 구조를 설계하였다. Pt-Ni 기반 촉매는 볼 밀링(ball milling)과 열처리를 통해 합성하였으며, XRD, XPS, TEM 분석을 통해 Pt와 Ni가 합금을 형성하며 균일하게 분포된 나노 입자 형태로 존재함을 확인하였다. 전기화학적 성능 평가 결과, 합성된 Pt-Ni 촉매는 Pt 함량이 0.42 wt.%에 불과함에도 불구하고 상용 Pt/C (10 wt.%) 대비 우수한 Pt 질량 활성(mass activity)을 나타내었다. 또한 in situ Raman 분석을 통해 알칼라인 HER 반응 과정에서 형성되는 중간체 거동을 관찰하고 반응 메커니즘을 분석하였다.

사사 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. RS-2024-00416902)과 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2024-03-03-002)을 받아 수행하였습니다.

7E4

알칼리성 수소 발생 성능 향상을 위한 코발트 칼코게나이드의 이종 계면으로의 표면 재구성

Surface Reconstruction of Cobalt Chalcogenide into a Heterointerface for Enhanced Alkaline Hydrogen Evolution

트란민녹[1)], 정다운[1),2)], 배기남[1),2)], 전기준[1),2)]

[1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터

The development of highly active and durable electrocatalysts is essential for efficient hydrogen production and sustainable energy conversion. Understanding the evolution of catalytic active sites under operating conditions is therefore critical for establishing reliable structure–activity relationships. In this work, we report the self-induced surface reconstruction of a superstructural electrocatalyst consisting of metallic Co/hexagonal CoSe nanoparticles confined within an N-doped carbon nanocage (*h*-CoSe@Co) during alkaline hydrogen evolution. Upon electrochemical activation, the surface of *h*-CoSe@Co undergoes spontaneous reconstruction to form an *h*-CoSe/CoOOH heterointerface, which serves as the catalytically active structure by promoting water adsorption and facilitating water dissociation. *In situ* Raman spectroscopy directly captures this surface reconstruction and the associated interfacial water enrichment under HER conditions. As a result of the reconstructed interface and the intrinsic structural features of the superstructure, *h*-CoSe@Co exhibits higher HER activity and improved durability than the corresponding orthorhombic and cubic $CoSe_2$ catalysts. Density functional theory calculations further reveal that the *h*-CoSe/CoOOH heterostructure induces electronic-state redistribution near the Fermi level and provides a near-thermoneutral hydrogen adsorption free energy, favoring the HER kinetics. These findings establish a direct link between surface reconstruction, interfacial structure, and catalytic activity, and demonstrate that controlled reconstruction can be an effective approach for tuning the adsorption energetics of cobalt-based chalcogenide electrocatalysts.

사사 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00416902).

7F1

대기배출시설 응축성 먼지 관리체계 구축을 위한 업종별 배출계수 개발 현황

Sector-Specific Emission Factor Development for Condensable Particulate Matter from Stationary Emission Sources in Korea

전기준[1),2)], 윤종상[3)], 이주희[4)], 정관영[5)]

[1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [3)]가톨릭대학교 에너지환경공학과,
[4)](재)한국화학융합시험연구원, [5)](재)포항산업과학연구원

응축성 먼지(CPM)는 굴뚝 내부에서 가스상으로 존재하다가 배출 직후 냉각·희석 과정을 거쳐 입자화 되는 미세먼지로, 여과성 먼지(FPM)와 함께 1차 미세먼지(Primary PM)를 구성한다. 여과법 중심의 기존 관리체계는 FPM만을 고려하므로 고온 연소 공정의 1차 미세먼지 기여도가 과소 평가될 수 있으며, 미국 EPA는 1999년 국가배출목록에 CPM을 포함시킨 이후 발전 부문 1차 PM-2.5 배출량이 전년 대비 약 4.8배 증가한 바 있다. 국내에서는 국립환경과학원이 2014년부터의 단계적 연구를 거쳐 2023년 대기오염공정시험기준 ES 01320.1이 제정되었고, 2025년 2월 대기환경보전법 개정으로 먼지의 정의가 여과성과 응축성으로 세분화되며 배출기준 및 측정 방법·절차 마련의 법적 근거가 확보되었다. 이에 따라 업종별 배출계수 개발과 국가 배출량 산정체계 반영, 위해성 평가 및 배출허용기준 검토, 저감기술 및 관리체계 구축이 순차적으로 요구된다. 국가 배출량 산정이 공표된 배출계수를 우선 적용하는 원칙으로 운영되는 만큼, 국내 공정·방지시설 특성을 반영한 자체 배출계수의 확보가 시급하다. 본 연구는 ES 01320.1 희석측정법으로 Primary PM과 FPM을 동시 측정하여 그 차이로 CPM을 산정하였다. 2024년부터 석탄화력발전, 2025년 시멘트 제조시설을 측정하였으며, 2026년 현재 석탄화력발전 및 시멘트 제조시설 추가 측정과 철강업 소결로를 추가 측정하였다. 또한, 배출계수 개발을 위하여 측정 물량과 시설 대표성 확보를 위해 한국화학융합시험연구원 및 포항산업과학연구원과 협업 체계를 구축하였다. 동일 사양 장비 구비, QA/QC 교육, 입자 발생기를 이용한 희석배수 검증을 통해 기관 간 측정 동등성을 확보하였으며, 도출된 배출계수는 국가 배출량 산정 및 응축성 먼지 관리방안 마련의 기초자료로 활용될 것이다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-04-02-069).

7F2

인벤토리 관점에서 응축성 미세먼지 배출량 산정의 영향 검토

Assessment of the Impact of Condensable Particulate Matter Emission Estimation on Air Pollutant Emission Inventories

한세현

주식회사 랩솔레미스

응축성 미세먼지(Condensable Particulate Matter, CPM)는 배출시설의 굴뚝 조건에서는 기체 상태로 존재하지만, 대기 중으로 배출된 후 냉각 및 희석 과정에서 응축 또는 반응하여 입자상 물질로 전환되는 물질이다. 최근 국내에서도 CPM 측정 및 배출계수 개발이 진행됨에 따라 향후 국가 대기오염물질 배출량 인벤토리에 CPM 배출량을 반영하기 위한 검토가 필요하다. 그러나 CPM은 SOx, NOx, NH_3, VOCs 등 다양한 가스상 물질에서 기원할 수 있으므로, CPM 배출량을 별도의 입자상 물질 배출량으로 산정할 경우 기존에 산정되고 있는 가스상 오염물질(SOx, NOx 등) 배출량과의 중복 산정 가능성이 제기된다. 본 연구에서는 이러한 배출량 중복 산정(double counting) 가능성을 중심으로 CPM 배출량 산정이 기존 배출량 인벤토리에 미치는 영향을 검토하였다. 국내외 CPM 배출량 산정 및 인벤토리 구축 사례를 조사하고, 주요 고정연소 배출시설의 배출가스 조건과 CPM 측정·화학조성 자료를 이용하여 CPM 주요 구성성분과 가스상 기원물질 간의 관계를 분석하였다. 특히 물질수지 관점에서 굴뚝에서 배출되는 주요 가스상 물질의 질량과 이들 물질에서 기원할 수 있는 CPM 구성성분의 질량을 비교하여 배출량 중복 가능성과 그 상대적 영향을 평가하였으며, 관련 선행연구 결과들을 함께 검토하였다. 분석 결과, 검토 대상 주요 가스상 물질 중 SOx와 NOx의 경우 CPM으로의 전환에 따른 배출량 중복 영향은 전반적으로 제한적인 수준으로 평가되었으며, CPM 배출량을 추가적으로 산정하더라도 기존 가스상 오염물질 배출량 산정체계에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다. 다만 일부 물질은 배출조건과 CPM 화학조성에 따라 불확실성이 존재하므로 추가적인 실측자료 축적과 검토가 필요하다.

사사 본 논문은 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(응축성 미세먼지 생성에 미치는 배출 영향 평가 연구).

7H1

하이브리드 전자담배 가동 모드 및 전용 스틱 종류에 따른 에어로졸 내 유해대기오염물질 발생 특성

Emission Characteristics of Hazardous Air Pollutants in Aerosol from a Hybrid Electronic Cigarette by Operation Mode and Dedicated Tobacco Stick Type

오승관[1)], 김진섭[1)], 이현아[1)], 최예빈[1)], 김용현[1),2),3)]

[1)]전북대학교 기후환경에너지융합학과, [2)]전북대학교 환경공학과, [3)]전북특별자치도 환경보건센터

전자담배에서 배출되는 에어로졸은 카르보닐화합물 등 유해대기오염물질을 포함하는 실내 인위적 오염원으로, 실내 공기질 측면의 평가가 요구된다. 하이브리드 전자담배(hybrid electronic cigarette, hybrid EC)는 액상을 기화시키는 EC와 전용 스틱을 가열시키는 heated tobacco product (HTP)의 원리를 결합한 장치로, 액상 유래 성분(propylene glycol, vegetable glycerin)과 스틱 유래 tobacco 성분이 동일 에어로졸 내에서 함께 거동하므로 기존 단일 방식 기기와 상이한 배출 특성을 나타낼 수 있다. 가열 온도를 결정하는 가동 모드와 전용 스틱 조성은 유해물질 생성에 직접 관여하는 인자임에도 이를 구분한 평가 자료는 부족하다. 이에 본 연구에서는 hybrid EC 전용 에어로졸 발생 및 채취 시스템을 구축하고 (1) 가동 모드 3종(액상 과소모/표준/고온)과 (2) 전용 스틱 10종을 교차 적용하여 배출 유해화학물질을 정량 평가하였다. 그 결과 acetaldehyde (AA)는 스틱 종류와 무관하게 액상 과소모 모드 대비 표준 및 고온 모드에서 각각 1.70배, 2.46배 증가한 반면, IARC Group 1 발암물질인 formaldehyde (FA)는 각각 0.38배, 0.46배 수준으로 감소하여 상반된 거동을 나타내었다. 이는 두 화합물의 주된 생성 경로가 상이함을 시사한다. 한편 총 카르보닐화합물 배출량은 스틱 종류 간 최대 편차가 약 1.4배에 그친 반면 FA는 약 2.7배, acrolein은 16배 이상의 차이를 보여, 배출 변화의 방향은 가동 모드가, 배출 수준과 조성은 스틱 종류가 결정하는 것으로 나타났다. 따라서 총량 기반 단일 지표만으로는 hybrid EC의 유해성을 판단하기 어려우며, 본 결과는 신종 담배 제품의 실내 배출 특성 규명과 안전 사용·관리 가이드라인 마련의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

사사 본 논문은 정부(식품의약품안전처)의 재원으로 식품의약품안전평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(25212MFDS002).

7H2

UV-가시광 응답형 Bi_2MoO_6/NH_2-UiO-66 나노복합체 기반 흡착-광촉매의 시너지를 이용한 실내공기 중 폼알데하이드의 산화기술

Synergistic Adsorption-Photocatalytic Oxidation of Indoor Formaldehyde Using UV-Visible-Responsive Bi_2MoO_6/NH_2-UiO-66 Nanocomposite-Based Air Purifier Filter

김정민, 김기현

한양대학교 공학대학원 건설환경공학과

밀폐된 실내 공간에서 지속적으로 발생하는 폼알데하이드(FA)는 인체 호흡기 건강에 심각하고 광범위한 위협을 가한다. 본 연구에서는 비스무트 몰리브데이트와 아민기화 금속-유기 골격체 기반의 Z-스킴 이종접합체(Bi_2MoO_6/NH_2-UiO-66, 이하 U6N-BM으로 명명)를 3차원 허니컴(HC) 코디에라이트 기재에 균일하게 코팅한 기능성 광촉매 필터 개발을 다룬다. 본 3D HC 기반 U6N-BM 필터는 소형 이동식 공기청정기 시스템과 결합되었으며, 23 L 용량의 실내 챔버 내부에서 암조건 및 1 W 출력의 UV-LED 광조사 환경을 조성하여 FA 광물화 제거 성능을 정밀하게 평가하였다. 특히 실내 환경 변수와 U6N-BM 필터의 열후처리 기법 간 시너지 상호작용이 FA 광물화 반응 속도론을 제어하는 메커니즘을 종합적으로 평가하고 최적화하였다. 연구 결과, 180°C 조건에서 열후처리된 U6N-BM 필터는 열활성화 과정을 거치지 않은 대조군 필터와 비교하여 이종접합 계면 구조를 획기적으로 최적화하였으며, 두 오염물질 모두에 대한 광물화 성능을 대폭 향상시키는 데 기여하였다. 열활성화된 U6N-BM 필터는 가장 높은 공기청정화능력(CADR)인 13.8 L/min을 달성하였다. 이러한 연구 결과는 열활성화 기법이 Bi_2MoO_6/NH_2-UiO-66 이종접합 계면을 최적화하는 혁신적 전략임을 입증하며, 실내 FA를 최종 무해 물질로 완전 광물화하는 데 필요한 전하 운반체 동역학을 현저히 가속화함을 명확히 보여준다.

사사 본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2021R1A3B1068304).

7H3

Bandgap-adjusted Bismuth Tungstate-titanium Dioxide S-scheme Heterojunctions: Optimizing Interfacial Electronic Structure for Rapid VOC Mineralization

Yin Qian, Ki-Hyun Kim

한양대학교 건설환경공학과

To strategically overcome the shortcomings of conventional photocatalysts, particularly inadequate redox potentials, a series of precisely engineered TiO_2-Bi_2WO_6 heterojunction photocatalysts, coded as TB-x (x represents the molar ratio% of Bi:Ti), has been designed and synthesized through deliberate bandgap adjustment. An optimal interfacial electronic structure, formed by coupling wide-bandgap TiO_2 (3.0-3.2 eV) with narrower-bandgap Bi_2WO_6 (2.6-2.9 eV), enables efficient charge dynamics under low-intensity UV irradiation (~1 W). The optimized TB-5 demonstrates complete removal of 5 ppm formaldehyde (FA: 100% X_{FA}) within 600 seconds, achieving a clean air delivery rate of 10.37 L min^{-1} and apparent quantum yield of 2.68E-01%. The exceptional activity is supported by the formation of a robust S-scheme heterojunction, as confirmed both experimentally and theoretically via density functional theory calculations. This charge preservation mechanism is remarkably robust, converting 81.6% of FA (initial concentration: 100 ppm) into CO_2 within 2 hours. In-situ DRIFTS analysis further suggests that FA oxidation proceeds sequentially through dioxymethylene and formate intermediates. This work thus establishes a foundational strategy for practical indoor air purification by integrating advanced S-scheme design with atomic-level mechanistic insight, charting a clear path from lab-scale discovery to real-world application.

사사 본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2025-04-02-083).

7I1

매개체 보조 혼성 계단형(MAH-S) 전하 배치를 갖는 은 도핑 금속산화물/MOF 이종구조에서의 기상 폼알데하이드 광촉매 완전 산화

Photocatalytic Mineralization of Gaseous Formaldehyde over Silver-doped Metal Oxide/MOF Heterostructure with a Mediator-assisted Hybridized Step (MAH-S)-scheme Charge Configuration

Lu Yan, Ki-Hyun Kim

한양대학교 건설환경공학과

A novel mediator-assisted hybridized step (MAH-S)-scheme heterojunction has been developed by combining silver-doped tungsten trioxide (Ag-WO_3, denoted as AW) with an amine-functionalized metal-organic framework (NH_2-MIL-125, labeled as M). This heterostructure, coded as AWM-x (where 'x' indicates the AW/M weight ratios), serves as a photocatalytic filter within a portable air purifier to facilitate the synergistic adsorption- photocatalytic oxidation of formaldehyde (FA) in dry and humidified indoor air settings. AWM-10, with a prolonged charge-carrier lifetime (4.86 ns), a high photocurrent density (177.7 μA), and a low charge-transfer resistance (206.6 Ω), achieves 100% removal of 5 ppm FA, with a clean air delivery rate of 11.48 L·min^{-1} and an apparent quantum yield of 0.238% (1 W UV light and 160 L·min^{-1} flow). In situ diffuse reflectance infrared Fourier-transform spectroscopy and gas chromatography confirm the complete mineralization of FA (HCHO) to CO_2 via multiple intermediates (e.g., CH_2O_2, $HCOO^-$, and CO_3^{2-}). The AWM-10 functions as an MAH-S scheme catalyst primarily due to the two-fold role of its Ag mediator. The Ag first act s as a conductive bridge that facilitates the rapid recombination ofl ow-energy charges for efficient directional charge separation (relative to a conventional S-scheme). Second, it serves a s a plasmonic photosensitizer to boost photocatalysis by generating high-energy "hot electrons" and extending light absorption.

사사 본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2025-04-02-083).

7I2

배양 및 형광 기반 측정을 통한 응급실 바이오에어로졸과 실내공기질의 시·공간적 특성

Spatial and Temporal Characteristics of Bioaerosols and Indoor Air Quality in an Emergency Department Based on Culture and Fluorescence Measurements

오용환, 정희봄[1)], 조영민[1)], 조상희[2)], 김태훈[2)], 손윤석

국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [1)]경희대학교 환경학 및 환경공학과, [2)]한국원자력연구원 첨단방사선연구소

응급실은 환자와 보호자의 유입, 의료진의 활동, 진료·소독 및 환기조건이 복합적으로 작용하므로 기능공간에 따라 실내공기질 특성이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 대학병원 응급실의 주요 기능공간을 대상으로 단기 공간조사와 연속 모니터링을 수행하였다. 미생물학적 공기질은 공기 시료를 배지에 포집·배양하여 배양 가능한 세균과 진균을 정량하는 방법과, 입자의 자가형광 신호를 이용하여 생물학적 유래로 추정되는 형광 바이오에어로졸을 실시간 계수하는 방법으로 평가하였다. 이와 함께 입자상물질과 주요 가스상 오염물질을 측정하였다. 배양 결과, 보호자 대기공간과 이동공간의 세균 및 진균 농도가 통제된 임상공간보다 전반적으로 높았으며 연속 측정에서는 로비와 대기공간에서 간헐적인 농도 증가가 확인되었다. 형광 기반 측정에서는 배기구와 일부 임상공간의 형광 바이오에어로졸이 상대적으로 높았으며, 배양 미생물 농도보다 총입자 농도의 변화와 더 유사한 경향을 보였다. 관찰구역은 배양 미생물 농도가 낮은 반면 총휘발성유기화합물이 높아 공간별 주요 오염원이 서로 다름을 나타냈다. 배양 결과와 형광 측정 결과의 시·공간적 분포가 일치하지 않은 것은 두 방법이 서로 다른 생물학적 입자 특성을 반영하기 때문으로 판단된다. 따라서 형광 기반 측정은 실시간 변화를 파악하는 데 유용하지만 배양법을 대체하기에는 한계가 있으며, 응급실 실내공기질 평가에는 두 방법의 상호보완적 적용이 필요하다. 본 결과는 우선 관리가 필요한 공간과 시간대를 선정하고 향후 환기 운영 개선 또는 공기처리 적용 전후의 변화를 평가하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

사사 This research was supported by the Mid-career Researcher Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) (Grant No. RS-2023-00276730).

7I3

차세대 저농도 가스 청정성능(c-CADR) 평가를 위한 SIFT-MS의 적합성 및 한계 검토

Suitability and Limitations of SIFT-MS for Next-Generation Low-Concentration Gas Clean Air Delivery Rate (c-CADR) Evaluation

이진근, 최병현, 손채은, 구영선[1)]

영인에이스(주), [1)]에너지인증연구소

실내공기질 규제가 강화되면서 공기청정기의 가스상 오염물 제거성능을 저농도(μg/m³) 조건에서 평가하는 청정화능력(c-CADR) 시험법이(SPS-C KACA002-0132:2025, IEC 63086-2-2) 새롭게 도입되고 있다. 본 연구에서는 이러한 저농도 평가법에 대해 선택이온 흐름관 질량분석법(SIFT-MS)의 적합성을 검토하고 기존 분석법과 장단점을 비교하였다. SIFT-MS 는 연질 화학적 이온화를 통해 전구 이온들을(H_3O^+·NO^+·O_2^+) 생성하고 특정한 전구 이온만을 선택하여 흐름관 내로 주입된 시료와 반응시킴으로써 분리 과정 없이 시료의 농도를 최대 약 1 Hz 주기로 ppb 이하의 저농도까지 절대 정량할 수 있는 분석법으로 기존 FT-IR 장비가 저농도 가스 c-CADR 시험에서 보이는 감도 부족과 감쇠곡선 추적의 한계를 극복할 수 있음을 확인하였고 암모니아와 같은 흡착성 가스의 시료 도입부 지연 등의 한계도 함께 확인할 수 있었다. 이를 통해 SIFT-MS 가 차세대 저농도 가스 c-CADR 평가의 방법적 대안이 될 수 있음을 제시하고, 추적가스를 이용한 자연·희석 감쇠의 분리와 시료 도입부 가열 및 불활성화, 습도·배경 관리 등 시험소 도입을 위한 시용적 방법을 제안한다.

7I4

Cu 개질 TiO_2/WO_3 S-scheme 광촉매를 이용한 방향족 및 황 함유 휘발성유기화합물의 기상 제거

Gas-phase Removal of Aromatic and Sulfur-containing Volatile Organic Compounds Using a Cu-modified TiO_2/WO_3 S-scheme Photocatalyst

이철승, 김기현

한양대학교 공학대학원 건설환경공학과

방향족 및 황 함유 휘발성유기화합물은 높은 화학적 안정성과 경쟁 흡착 및 황계 중간생성물의 축적으로 인해 광촉매 산화 효율을 제한한다. 본 연구는 기상 톨루엔과 디메틸설파이드(dimethyl sulfide, DMS)를 효과적으로 제거하기 위해 Cu로 개질한 TiO_2/WO_3 S-scheme 광촉매를 제조하고, 조성 및 운전조건에 따른 광촉매 성능을 평가하였다. WO_3 몰분율을 조절한 TiO_2/WO_3 복합체 중 TW-2는 2 ppm 톨루엔, 100 mL min^{-1}, 0% 상대습도 조건에서 86.3%의 제거효율을 나타내어 TiO_2 (43.2%)와 WO_3 (14.1%)보다 우수한 성능을 보였다. 20% 상대습도와 100 mL min^{-1} 조건에서 TW-2의 톨루엔 제거효율은 유입 농도 1, 2 및 3 ppm에서 각각 100, 94.4 및 69.5%로 나타났다. 이후 N-TiO_2, black TiO_2 및 Cu-TiO_2를 이용하여 TW-2의 TiO_2 측을 개질하였다. Cu-TW-2는 5 ppm DMS 조건에서도 100%의 제거효율을 유지하였으며, 최대 반응속도와 단위질량당 청정공기공급률은 각각 122.7 μmol g^{-1} h^{-1} 및 600 L g^{-1} h^{-1}로 나타냈다. 톨루엔과 DMS가 각각 5 ppm으로 공존하는 혼합조건에서 TW-2의 제거효율은 각각 19.4 및 44.5%였으나, Cu-TW-2에서는 각각 38.0 및 56.5%의 제거효율을 확인했다. XRD와 SEM 분석에서는 Cu 개질 후에도 TiO_2/WO_3의 결정구조와 입자 형태 유지를 확인했고, XPS 분석을 통해 표면 Cu 종의 도입을 확인하였다. 또한 in-situ XPS에서는 광조사 후 흡착 산소종의 비율이 3.48%에서 4.83%로 증가하고 Cu 주변의 전자밀도가 미세하게 변화하였다. 이러한 결과는 Cu 종이 광유도 표면 전하 재분배와 산소 활성화에 관여하여 방향족 및 황 함유 VOC가 공존하는 조건에서 광촉매 산화 성능을 개선하였음을 시사한다.

Session PA 실내공기질

평가위원[PA~PH] : 김용현(전북대학교), 김은혜(국립군산대학교), 김주애(고려대학교), 박대훈(한국기계연구원), 박은하((재)포항산업과학연구원), 박풍모(안산미래연구원), 송영철(한국화학연구원), 오용환(국립부경대학교), 이현정(제주대학교), 정경준(연세대학교), 최나래(강원대학교), 최용주(한국외국어대학교)

평 가 위 원 [P I] : 김민중(명지대학교), 김종범(충남연구원), 나하나(인제대학교), 박승부(서울시립대학교), 이영로(고려대학교)

PA1) 충청남도 다중이용시설의 세부시설 및 지역별 실내공기질 고농도 특성 분석
PA2) PVA 기반 산화환원 반응을 이용한 MnO_2 촉매 필터 제조 및 상온 HCHO 제거
PA3) 생체유체 모사 에어로졸 입자의 대기환경 조건에 따른 물리화학적 특성 변화

PA1

충청남도 다중이용시설의 세부시설 및 지역별 실내공기질 고농도 특성 분석

Analysis of High-Concentration Characteristics of Indoor Air Quality across Facility Types and Regions in Chungcheongnam-do

이혜연, 황규철[1)], 윤희원, 김종범

충남연구원 서해안기후환경연구소, [1)]국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공

최근 실내에서 생활하는 시간이 증가하면서 불특정 다수가 이용하는 다중이용시설의 실내공기질 관리 필요성이 높아지고 있다. 다중이용시설의 실내공기질은 시설의 용도, 이용자 특성 및 환기조건 등에 따라 차이가 발생할 수 있어, 시설군별 평균농도만으로는 개별 시설 및 지역에서 나타나는 상대적으로 높은 농도 특성을 파악하는 데 한계가 있다. 충청남도는 대기오염물질 대량 배출시설이 다수 위치한 지역으로, 대기오염물질 배출시설 인근 지역을 중심으로 실내공기질 관리 및 지원이 추진되고 있으나 다중이용시설에 대한 연구 및 지원은 상대적으로 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 충청남도 다중이용시설의 측정자료를 활용하여 세부시설 및 지역별 고농도 특성을 분석하고 상대적으로 관리가 필요한 시설 및 지역을 파악하고자 하였다. 2022~2025년을 대상으로 분석한 결과, 시설군별 평균농도는 전반적으로 국가 및 충청남도 유지기준을 만족하는 것으로 나타났으나, 물질 및 시설 유형에 따라 농도 편차가 확인되었다. 세부시설별로 상위 10%의 평균농도를 분석한 결과, $PM_{2.5}$, CO_2 및 CO는 일부 시설에서 유지기준 대비 상대적으로 높은 수준을 나타냈으며, HCHO와 총부유세균(TSB)은 전반적으로 양호한 수준이나 일부 세부시설에서는 상위 10% 측정자료의 평균농도가 유지기준을 초과하는 수준으로 나타나 시설군 단위의 일률적인 관리뿐만 아니라 시설 특성을 고려한 차등적인 관리가 필요한 것으로 나타났다. 또한 지역별 상위 10% 측정자료의 평균농도를 분석한 결과, CO_2는 전 지역에서, CO는 다수 지역에서 유지기준을 초과하는 수준으로 나타났으며, 계룡시, 청양군, 예산군 및 서천군에서는 일부 물질의 농도가 다른 지역에 비해 상대적으로 높은 것으로 확인되었다. 현재 다중이용시설에 대한 관리는 유지 및 관리기준 중심의 관리가 이루어지고 있으나 본 연구결과 지역별, 시설별로 다양한 농도 분포를 가지는 것으로 확인되어, 향후 이들 시설에 대한 관리를 위해서는 지역별, 시설별 특성을 고려한 맞춤형 개선대책 마련이 필요할 것으로 보인다.

사사 본 연구는 충청남도의 재원으로 충남연구원 전략연구과제 "충청남도의 실내공기질 관리 기반 마련을 위한 정책 연구(26JU0010)"의 일환으로 수행되었음.

PA2

PVA 기반 산화환원 반응을 이용한 MnO_2 촉매 필터 제조 및 상온 HCHO 제거

Preparation of a MnO_2 Catalytic Filter via PVA-Based Redox Reaction for Room-Temperature HCHO Removal

김나혜, 허대영, 김태오

국립금오공과대학교 환경공학과

포름알데히드(HCHO)는 건축자재, 가구, 접착제 등에서 방출되는 대표적인 실내 휘발성유기화합물(VOCs)로, 장기 노출 시 인체 위해성을 유발할 수 있어 상온에서 효과적으로 제거할 수 있는 기술 개발이 요구된다. 본 연구에서는 PVA (polyvinyl alcohol)를 활용한 in-situ 합성 전략을 통해 polyester filter 표면에 MnO_2를 직접 성장시켜 HCHO 제거용 촉매 필터(PVA-MnO_2/F)를 제조하였다. PVA 코팅 횟수에 따라 MnO_2의 성장 정도, 표면 분포, 접착 안정성 및 제거 성능이 달라졌으며, 5회 코팅된 PVA-MnO_2/F@c5가 가장 우수한 HCHO 제거 효율과 CO_2 생성율을 나타냈다. 이는 적절한 MnO_2 담지량과 균일한 촉매 분포로 HCHO와 활성점 간 접촉이 효과적으로 이루어졌기 때문으로 판단된다. 반면 과도한 코팅 조건에서는 기공 막힘과 물질 전달 제한으로 성능 향상에 한계가 나타났다. 또한 PVA-MnO_2/F@c5는 낮은 중량 손실과 제한적인 Mn 용출을 보여 우수한 접착 안정성과 내구성을 나타냈으며, 풍부한 산소 결함과 표면 활성 산소종을 통해 HCHO 산화 반응에 유리한 표면 특성을 보였다. 따라서 PVA 기반 in-situ 합성 전략은 상온 실내 공기 정화를 위한 HCHO 제거용 촉매 필터 제조에 효과적인 방법으로 활용될 수 있다.

사사 본 연구는 한국기계연구원 기관 기본사업(Project ID: NK262C)의 지원을 받아 수행되었음.

PA3

생체유체 모사 에어로졸 입자의 대기환경 조건에 따른 물리화학적 특성 변화

Physicochemical Changes of Biofluid-Mimicking Particles under Airborne Conditions

이정민[1),2)], 박지원[1),3)], 송영철[1),2)]

[1)]한국화학연구원 화학분석센터, [2)]UST 화학소재 및 공정학과, [3)]연세대학교 대기과학과

인체에서 기원한 다양한 생체유체는 액적 또는 미세입자 형태로 주변 환경에 방출될 수 있으며, 공기 중에서 다양한 화학 반응을 경험하게 된다. 이러한 과정은 입자의 크기, 점도, 수분 함량 및 상 상태와 같은 물리화학적 특성을 변화시키며, 궁극적으로 에어로졸 입자의 이동성과 잔류 특성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 인체 유래 입자의 대기 중 거동을 이해하기 위해서는 공기 중 환경 변화에 따른 물리화학적 특성 변화를 체계적으로 연구할 필요가 있다. 본 연구에서는 서로 다른 생리환경을 모사한 생체유체 모사액을 제조하고, 초기 용액의 점도를 포함한 주요 물리화학적 특성을 분석하였다. 또한 공기 중 방출 이후 발생할 수 있는 수분 변화 및 화학적 변화를 고려하여, 이에 따른 생체유체 모사 입자의 물성 변화를 분석하였다. 온도 및 상대습도와 같은 환경조건에 따른 변화를 비교함으로써 생체유체 모사 입자의 물리적 상태와 물성 변화 특성을 규명하고자 하였다. 이는 생체유체 유래 입자가 공기 중에서 경험하는 물리화학적 변화를 이해하고, 향후 인체 유래 에어로졸의 생성, 변화 및 대기 중 거동을 해석하기 위한 기초 자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.

Session PB 기후변화·에너지

평가위원[PA~PH] : 김용현(전북대학교), 김은혜(국립군산대학교), 김주애(고려대학교), 박대훈(한국기계연구원), 박은하((재)포항산업과학연구원), 박풍모(안산미래연구원), 송영철(한국화학연구원), 오용환(국립부경대학교), 이현정(제주대학교), 정경준(연세대학교), 최나래(강원대학교), 최용주(한국외국어대학교)

평 가 위 원 [P I] : 김민중(명지대학교), 김종범(충남연구원), 나하나(인제대학교), 박승부(서울시립대학교), 이영로(고려대학교)

PB1) 전과정 기반 연료 유형별 도로이동오염원 온실가스 배출량 산정
PB2) 타이타네이트 나노튜브/TiO_2 이중층 광전극을 이용한 고성능 염료감응형 태양전지
PB3) 극한기상-대기질 상호작용: 태풍 영향에 따른 서울 대기오염물질 변화와 기상 민감도

PB1

전과정 기반 연료 유형별 도로이동오염원 온실가스 배출량 산정

Life Cycle-Based Estimation of Greenhouse Gas Emissions from Road Mobile Sources by Fuel Type in Korea

서유정, 한세현, 박상준[1)]

㈜랩솔레미스, [1)]한국교통연구원

운송 부문 탈탄소화 요구가 확대됨에 따라 전기차와 수소차 등 친환경 차량으로의 모빌리티 전환이 주요 대안으로 부상하고 있다. 친환경 차량은 주행 중 직접적인 온실가스를 배출하지 않는 것으로 알려져 있으나, 전기와 수소를 생산 및 수송하는 공정에서의 온실가스 배출을 고려할 필요가 있다. 이에 따라 운행 단계뿐만 아니라 연료 및 에너지 생산단계부터 고려한 전과정 관점의 평가와 기존 내연기관차 대비 온실가스 감축 효과에 대한 객관적 분석이 요구된다. 본 연구의 목적은 차량의 대표적인 석유기반 연료인 휘발유, 경유, CNG (Compressed Natural Gas), LPG (Liquefied Petroleum Gas)와 친환경 차량의 대표적인 에너지원인 전기 및 생산 방식별 수소를 대상으로 전과정 기반 온실가스 배출량을 산정하여, 연료 및 에너지원별 배출 특성과 감축 효과를 분석하는 것이다. 본 연구에서는 자동차 사용단계(운행단계)에서의 온실가스 배출량 평가를 위해 미국 자동차 전과정평가 도구인 아르곤 연구소의 GREET 모델을 기반으로 휘발유, 경유, CNG, LPG, 전기, 생산 방식별 수소의 Well-to-Wheel (WTW) 관점의 온실가스 배출량을 산정하였다. 온실가스 배출량은 IPCC AR6의 지구온난화지수(GWP)를 적용하여 CO_2, CH_4, N_2O를 CO_2 환산량으로 산정하였다. 연료 및 에너지원별 단위 에너지당 온실가스 배출량(kg CO_2 eq./GJ)을 산정하고, 차량 1대의 단위 주행거리(km)당 온실가스 배출량을 비교하였다.

사사 본 연구는 2026년도 한국교통연구원의 지원으로 수행된 연구(수소 상용 모빌리티 환경성 분석을 위한 조사)임.

PB2

타이타네이트 나노튜브/TiO_2 이중층 광전극을 이용한 고성능 염료감응형 태양전지

Enhanced Dye-Sensitized Solar Cells with Titanate Nanotube/TiO_2 Bilayer Photoelectrodes

김준서, 김태오

국립금오공과대학교 환경공학과

염료감응형 태양전지(Dye-Sensitized Solar Cell, DSSC)는 친환경적이며 비교적 간단한 제조 공정과 낮은 생산 비용 등의 장점으로 인해 차세대 태양전지로 주목받고 있다. 그러나 실질적인 에너지 변환 성능을 향상시키기 위해서는 광전극의 구조 및 전하 전달 특성을 개선할 필요가 있다. 본 연구에서는 타이타네이트 나노튜브와 초음파 처리된 TiO_2를 이용하여 이중층 광전극을 제조하고, 이에 따른 구조적·전기화학적 특성 및 광전 변환 성능을 평가하였다. 초음파 처리를 통해 TiO_2 입자의 응집을 완화하고 균일한 분산을 유도하였으며, 타이타네이트 나노튜브의 발달된 나노구조는 넓은 비표면적을 확보하여 염료가 효과적으로 흡착될 수 있는 조건을 제공하였다. 또한 TiO_2와 타이타네이트 나노튜브로 구성된 이중층 구조는 광생성 전자의 이동 경로를 개선하고 전하 재결합을 감소시켜 전하 전달 특성을 향상시켰다. 이러한 구조적·전기화학적 특성의 개선은 광전류 생성과 전자 수송 효율의 증가로 이어졌으며, 단일층 광전극과 비교하여 향상된 광전 변환 성능을 나타냈다. 따라서 본 연구는 초음파 처리를 통한 TiO_2의 분산 제어와 타이타네이트 나노튜브 기반 이중층 구조의 도입이 DSSC 광전극의 성능을 향상시키는 효과적인 방법임을 보여주며, 고효율 DSSC 광전극 설계를 위한 활용 가능성을 제시한다.

사사 본 연구는 한국기계연구원 기관 기본사업(Project ID: NK262C)의 지원을 받아 수행되었음.

PB3

극한기상-대기질 상호작용: 태풍 영향에 따른 서울 대기오염물질 변화와 기상 민감도

Extreme Weather–Air Quality Interactions: Pollutant-Specific Responses and Meteorological Sensitivity to Typhoon Influence in Seoul

나하나[1),2),3)], 정우식[1),2),3)]

[1)]인제대학교 대기환경정보공학과, [2)]태풍사전방재선도연구센터, [3)]대기환경정보연구센터

태풍은 강풍과 강수뿐 아니라 대기 혼합, 운량, 일사 및 기단 특성의 변화를 동반하여 도시 대기질을 단기간에 크게 변화시킬 수 있다. 본 연구에서는 2014~2023년 서울의 $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$, NO_2, CO, SO_2 및 O_3 일평균 농도자료와 동일 기간 우리나라에 영향을 미친 38개 태풍 사례, 그리고 서울의 지상기상관측자료를 이용하여 태풍 영향 전·중·후의 오염물질별 변화와 기상 민감도를 분석하였다. 태풍 영향 중 $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$, NO_2 및 CO는 태풍 전 대비 중앙값 기준 각각 29.6%, 24.5%, 19.4% 및 10.4% 감소하였으며, 특히 NO_2는 대부분의 태풍 사례에서 일관된 감소를 나타냈다. 반면 SO_2와 O_3는 통계적으로 유의한 일관된 변화가 나타나지 않아 오염물질별 반응 차이가 확인되었다. 이러한 사례 간 차이를 서울에서 실제 관측된 기상변화와 비교한 결과, NO_2와 CO는 풍속 변화에 상대적으로 민감하였고, O_3는 일사 및 운량 변화와 밀접한 관련을 보이는 등 오염물질별로 서로 다른 기상 민감도가 나타났다. 또한 태풍 종료 후 일부 사례에서는 오염물질 농도가 다시 계절적 고농도 수준으로 진입하였으며, 이러한 고농도 재출현은 태풍 후 강수가 적은 조건에서 상대적으로 빈번하게 나타났다. 본 연구는 태풍에 따른 도시 대기질 변화가 단순한 일괄적 정화효과가 아니라, 국지 기상교란에 대한 오염물질별 민감도와 태풍 후 고농도 위험의 재출현이 결합된 복합적인 대기환경 반응임을 보여준다.

Session PC 대기환경모델링·AI

평가위원[PA~PH] : 김용현(전북대학교), 김은혜(국립군산대학교), 김주애(고려대학교), 박대훈(한국기계연구원), 박은하((재)포항산업과학연구원), 박풍모(안산미래연구원), 송영철(한국화학연구원), 오용환(국립부경대학교), 이현정(제주대학교), 정경준(연세대학교), 최나래(강원대학교), 최용주(한국외국어대학교)

평 가 위 원 [P I] : 김민중(명지대학교), 김종범(충남연구원), 나하나(인제대학교), 박승부(서울시립대학교), 이영로(고려대학교)

PC1) 인공지능 기반 격주 암모니아 농도의 일 단위 시간 상세화 및 공간 전이성 평가
PC2) 환경 측정·분석 데이터의 표준화 기반 환경 Big DATA 통합 관리시스템 구축 및 활용 사례
PC3) 수리물리-대기 결합 모델을 이용한 야적 분체 및 토사의 시간·깊이별 함수율 예측 연구
PC4) SCR 전단 NOx 예측 및 강화학습(PPO) 기반 암모니아 주입 최적화
PC5) Analyzing Long-Range Transport and Local Sources of $PM_{2.5}$ in Yangon Using Integrated Receptor Modeling and Machine Learning Deweathering
PC6) 대기화학모델 적용을 위한 니트로페놀 유래 주간 HONO 생성 관측 기반 모수화 방안 개발
PC7) 인공지능 기반 결측 보정 기법 선택이 생태계 연간 탄소수지 추정에 미치는 영향: 다층 플럭스 타워 자료를 이용한 갭 이식 실험
PC8) 도시숲이 국지 기상환경에 미치는 영향: 서울숲 사례의 WRF-UCM 수치 모의
PC9) 겨울철 한반도 $PM_{2.5}$ 종관 패턴 분류를 위한 대표 기압면 평가: 기압면별 특성과 연직 연계성
PC10) 도시 특성 세분화를 고려한 LCZ 적용에 따른 부산의 열환경 및 하층대기 모의 특성
PC11) 도시 산악 관측지점에서 나타나는 야간 고농도 오존의 발생 및 수송 특성
PC12) 초기 배출 인벤토리에 따른 아시아 NH_3 모의 성능의 차이와 위성 기반 배출 보정 효과
PC13) 배출원별 VOCs 저감에 따른 오존 변화 예측: 머신러닝과 광화학 박스모델의 상호 검증
PC14) 2022년 국내·외 인벤토리 현행화에 따른 초미세먼지(PM-2.5) 모사 농도 및 배출 기여도 변화 분석
PC15) 최소 난류 확산계수 설정에 따른 오존 농도 모의 특성
PC16) Improving $PM_{2.5}$ and PM_{10} Analysis and Forecasting over East Asia Using Data Assimilation in WRF-Chem with MOZART-GOCART
PC17) 성층권 메탄 편향에 대한 동아시아 지표 메탄 농도의 반응
PC18) 도시 건물 및 지형을 고려한 전산유체역학-딥러닝 모델 기반 이산화탄소 배출원 역추적 모델 개발
PC19) 수평 스캐닝 LiDAR 기반 산업단지 PM 공간분포의 딥러닝 단기예측
PC20) 한반도 지역을 대상으로 한 WRF-Chem 지표 오존 모의 성능 및 오존 생성 특성 평가
PC21) PMF-CBPF 기반 대기오염 잠재 배출원 탐색을 위한 AI 기반 연구지원 시스템 개발
PC22) 서울시 7차 미세먼지 계절관리제의 초미세먼지 개선 효과 평가
PC23) 딥러닝을 이용한 용인시 초미세먼지($PM_{2.5}$) 단기예측 모델 비교 연구
PC24) AI 기반 대기환경정보 융합·통합 활용의 국내외 동향과 시사점
PC25) 권역 및 오염물질 특성을 고려한 머신러닝 기반 고해상도 대기오염 공간보간 프레임워크

PC1

인공지능 기반 격주 암모니아 농도의 일 단위 시간 상세화 및 공간 전이성 평가

Bridging Temporal Gaps: AI-based Temporal Downscaling of Biweekly NH_3 to Daily Scale with Spatial Transferability

강은진, Saman Malik, 강유진, 황수민, 임정호

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

암모니아(NH_3)는 농업 활동과 산업화의 영향으로 대기 중 농도가 증가하고 있으며, 환경 및 공중보건 측면에서 고해상도 모니터링의 중요성이 커지고 있다. 그러나 미국 Ammonia Monitoring Network (AMoN)의 지상관측은 격주 단위로 제공되어 연속적인 시공간 분석과 일별 변동성 파악에 한계가 있다. 본 연구에서는 심층신경망(DNN), 랜덤포레스트 및 LightGBM을 활용하여 미국 전역의 격주 NH_3 농도를 추정하고 이를 일 단위로 시간 상세화하는 인공지능 기반 프레임워크를 개발하였다. 모델은 위성 기반 NH_3 컬럼 농도, 기상변수, 토지피복, 가축 밀도 및 AMoN 지상관측자료를 통합하였으며, 2017~2022년 미국 본토를 대상으로 적용하였다. 세 모델 중 DNN이 공간 교차검증과 독립 검증에서 가장 우수한 성능을 보여 상관계수 0.79, RMSE 0.98 $\mu g\ m^{-3}$, 일치도지수 0.83을 나타냈다. 또한 9 km 공간해상도에서 일별 NH_3 농도의 세밀한 공간 변동성을 효과적으로 재현하였다. SHAP 분석 결과, 시간 변수와 기상조건이 주요 예측인자로 나타났으며 토지피복과 가축 밀도 역시 중요한 기여를 보였다. 공간 전이성을 평가하기 위해 영국의 일별 지상관측망에 프레임워크를 추가 적용한 결과, 관측소 제외 및 연도 제외 교차검증에서도 안정적인 성능을 확인하였다. 본 연구는 인공지능 기반 시간 상세화를 통해 희소한 격주 NH_3 관측의 시간적 공백을 보완하고, 지역 간 적용 가능성을 갖는 고해상도 일별 NH_3 농도 자료 생산 가능성을 제시한다.

PC2

환경 측정·분석 데이터의 표준화 기반 환경 Big DATA 통합 관리시스템 구축 및 활용 사례

Development of an Integrated Environmental Big Data Management System Based on Standardization of Measurement and Analysis Data and Its Application Cases

김지훈, 이상균, 김희진, 이훈하

포항산업과학연구원 환경보건연구그룹

환경 분야 연구과제 수행 과정에서 생성되는 측정·분석 데이터는 매체(대기·수질·악취·부산물 등)와 장비/시험성적서 유형별로 형식이 상이하고, 저장 위치가 분산되어 목적에 맞는 조회·추출에 한계가 있다. 이에 다양한 환경 데이터를 표준 형식으로 통합·관리하고, AI 분석에 즉시 활용 가능한(AI-ready) 데이터 자산을 확보하기 위해 환경 Big DATA 통합 관리 시스템 구축을 추진하였다. 본 과제는 (1) 다양한 시험성적서를 수집하여 데이터 항목·구조를 분석하고, 채취/측정일자·좌표·매체·장비사양·분석법 코드·분석항목/결과·접근권한 등 핵심 메타 데이터를 포함하는 표준 DB form을 정의하였다. (2) PDF 및 장비 raw data를 표준 DB form으로 자동 변환하는 전처리 App을 개발하여, GPT CODEX 및 Antigravity 등 AI 기반 코드생성/자동인식 기능을 활용하여 성적서별 변환 모듈을 구현하였다. (3) 데이터 수집·저장을 위한 서버-NAS 및 네트워크 인프라를 구성하고, 사용자별 접근권한 및 접근 로그 기반 운영체계를 설계하였다. 구축된 Big DATA 적용 사례를 도출하여 환경정책 지원과 과제 기획·연구 생산성 향상에 기여하고자 한다.

PC3

수리물리-대기 결합 모델을 이용한 야적 분체 및 토사의 시간·깊이별 함수율 예측 연구

Numerical Simulation of Time- and Depth-Dependent Moisture Content in Stockpiled Powders for Smart Dust Suppression

김지훈, 이상균, 최영재, 정관영, 김희진

포항산업과학연구원 환경보건연구그룹

야적 분체 및 공사장 토사는 지표 함수율이 먼지 발생 임계 함수율(Dust Extinction Moisture, DEM) 이하로 떨어질 때 비산먼지가 급격히 발생하므로 정밀한 함수율 예측이 필수적이다. 본 연구에서는 비산먼지 억제와 효율적인 살수 용수 관리를 위해 1차원 수리물리-대기 결합 수치모델을 수립하였다. 비포화 매질 내 모세관 수분 이동과 중력 배수를 지배하는 Richards 방정식 및 van Genuchten-Mualem 보수특성 함수를 적용하고, 상부 경계조건으로 기상 변수(풍속, 온도, 습도, 복사량)를 반영한 Penman-Monteith 증발 모델과 외부 살수 Flux를 결합하였다. 이를 유한차분법으로 이산화하여 깊이 0~15 cm 구간에 대해 분 단위 수분 유동을 모사하였다. 기상 조건 및 분체 특성에 따른 함수율 거동 분석을 통해 지표 증발과 중력 배수의 복합 작용에 의한 최표면 건조 특성을 확인하였다. 본 모델은 최표면 함수율이 DEM 이하로 저하되는 임계 시간을 사전에 추정하여 적기 살수를 통한 비산먼지 저감을 가능하게 하며, 지능형 자동 살수 제어 시스템 구축을 위한 이론적 근거를 제공한다.

PC4

SCR 전단 NOx 예측 및 강화학습(PPO) 기반 암모니아 주입 최적화

Prediction of Upstream SCR NOx and PPO-Based Optimization of Ammonia Injection

이상균, 김희진, 윤원근, 김지훈

포항산업과학연구원 환경보건연구그룹

본 연구는 SCR (Selective Catalytic Reduction) 설비의 전·후단 NOx 측정 데이터를 활용하여 전단 NOx를 예측하고, 예측값과 실측 TMS NOx를 결합해 암모니아(NH_3) 주입량을 최적화하는 강화학습 제어 전략을 제안한다. 전단 NOx 가상 센서는 운전 변수(유량·온도·압력 등)와 공정 운전 정보를 기반으로 Random Forest 및 DNN으로 구축하였으며, 5분 단위 데이터 정합과 결측 처리 등 전처리를 통해 현장 적용성을 확보하였다. 제어 에이전트는 PPO (Proximal Policy Optimization)를 적용하였고, 배출 기준 준수와 약품 절감을 동시에 달성하기 위해 제거율 기반 보상, NOx 기준 초과 패널티, NH_3 사용량 패널티를 포함한 다목적 보상함수를 설계하였다. 제안 방법은 배출 기준을 만족하는 범위에서 NH_3 주입을 절감하는 방향으로 정책을 학습했으며, 설비 운영 제약과 반응 지연을 고려한 보상함수 개선을 통해 안정적 제어 가능성을 확인하였다.

PC5

Analyzing Long-Range Transport and Local Sources of $PM_{2.5}$ in Yangon Using Integrated Receptor Modeling and Machine Learning Deweathering

Wint Thiri Marn, 주정태, 최성득

UNIST

Yangon, Myanmar, has experienced substantial variations in $PM_{2.5}$ concentrations, but the relative influences of meteorological conditions, local emissions, and regional transport remain unclear. $PM_{2.5}$ data (2019–2023) were obtained from the Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET) and analyzed using conditional bivariate probability function (CBPF), backward trajectory, and concentration-weighted trajectory (CWT) analyses to identify potential sources and transport pathways. A machine learning-based deweathering method was applied to assess the influence of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ concentrations. Satellite and reanalysis data were used to support source and transport analyses. The most severe episode occurred from February 14 to 22, 2021, when the maximum hourly $PM_{2.5}$ concentration reached 316 $\mu g/m^3$. CBPF, CWT, and backward trajectory results collectively suggested regional transport from the northwest through the Bangladesh-Rakhine coastal corridor. Satellite-detected fire hotspots were mainly distributed north and east-southeast of Yangon. Deweathering analysis showed that $PM_{2.5}$ concentrations during the high-pollution episode remained elevated even after meteorological normalization. These findings suggest that both local sources and regional transport should be considered in $PM_{2.5}$ management strategies for Yangon.

PC6

대기화학모델 적용을 위한 니트로페놀 유래 주간 HONO 생성 관측 기반 모수화 방안 개발

An Observation-Based Parameterization of Daytime HONO Production via Aqueous-Phase OH Oxidation of Nitrophenols for Atmospheric Chemistry Models

김나현, 김민중

명지대학교 환경에너지공학과

대기 중 아질산(HONO)은 주간 광분해를 통해 전체 OH 라디칼 생성의 20~80%에 기여하며, 다른 질소산화물(NO_y)과의 상호 전환을 통해 대기 산화능과 광화학 반응을 조절한다. 이에 따라 HONO는 수도권 오존 생성뿐만 아니라 HNO_3 및 질산염 에어로졸 형성에도 중요한 영향을 미친다. 그러나 현재 대기화학수송모델은 HONO 농도를 크게 과소 모의하며, 일부 선행 연구에서는 관측값의 약 10%만 재현하는 것으로 보고되는 등 HONO 모의에는 여전히 상당한 불확실성이 존재한다. 최근 기존 모델에서 고려되지 않았던 HONO 생성 반응을 대기화학수송모델에 추가함으로써 일평균 농도의 모의 성능은 일부 개선되었으나, 야간 HONO는 과대 모의되는 반면 오후에는 관측보다 수배 낮게 나타나 주간 HONO 생성 과정이 여전히 충분히 반영되지 않는 것으로 평가된다. 최근 챔버 실험과 양자화학 연구를 통해 수용액상의 니트로페놀이 OH 라디칼에 의해 산화·탈질소화되는 과정에서 HONO가 빠르게 생성될 가능성이 제시되었다. 특히 이 반응은 기존 광분해 경로보다 수백 배 빠르게 진행될 가능성이 있는 것으로 추정되지만, 이러한 반응의 실제 대기 중 기여도와 대기화학수송모델 적용 가능성은 아직 충분히 평가되지 않았다. 본 연구에서는 선행 관측자료 분석에서 제시된 갈색탄소 및 니트로페놀과 주간 HONO 생성 간의 관계를 바탕으로 해당 생성 과정을 대기화학모델에 적용하기 위한 관측 기반 모수화 방안을 개발한다. 주요 기상·화학 인자와 HONO 생성량 간의 관계를 이용하여 고정 생성률과 선형 및 비선형 회귀 기반의 후보 모수화 식을 구축하고, 각 방식의 HONO 생성량 재현성, 민감도 및 불확실성을 비교한다. 이를 통해 기존 대기화학모델에서 충분히 고려되지 않았던 니트로페놀 유래 주간 HONO 생성과정을 효과적으로 반영할 수 있는 모수화 방안을 제시하고자 한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-04-02-058).

PC7

인공지능 기반 결측 보정 기법 선택이 생태계 연간 탄소수지 추정에 미치는 영향: 다층 플럭스 타워 자료를 이용한 갭 이식 실험

Impact of Artificial Intelligence-Based Gap-Filling Methods on Estimating Annual Ecosystem Carbon Balance: A Gap Insertion Experiment Using Multi-Level Flux Tower Data

박창현, 박재형, 김동진, 전원배[1)], 김철희[1)], 이순환[2)]

부산대학교 환경연구원, [1)]부산대학교 대기환경과학과, [2)]부산대학교 지구과학교육과

에디공분산(EC) 관측에서 결측은 불가피하며, 인공지능 기반 결측 보정의 성능은 통상 MAE·RMSE·R^2로만 평가되어 왔다. 그러나 이들 지표가 유사하더라도 복원된 시계열의 진폭이 압축되면 누적 탄소수지는 크게 달라질 수 있다. 본 연구는 기계학습 갭 보정 기법의 선택이 생태계 연간 순생태계생산량(NEP)에 미치는 영향을 정량화하고자 한다. 보성 표준기상관측소에서 2015~2022년 30분 간격 자료를 지상 및 3개 상층(60·140·300 m)에서 수집하였다. 품질관리 결과 NEE 결측률은 41.6%였으며, 특히 7개의 장기 결측(최장 93일)이 전체 결측의 37.8%를 차지하였고 대부분 벼 생육 최성기에 집중되었다. 예측 변수의 출처를 재구성한 결과(포화수증기압차 재계산, 다층 단파복사 합성), 결측 시점의 예측 변수 완전관측률이 0.20에서 0.92로 향상되었다. 이는 인공지능 모형의 진폭 왜곡이 알고리즘의 한계보다 입력 자료 준비 단계에서 상당 부분 기인함을 시사한다. 이를 바탕으로 5종의 앙상블 기계학습 모형(Extra Trees, XGBoost, LightGBM, Voting, Stacking)에 다층 관측 및 연직·시간 경사 파생 변수를 투입하고 표준기법(REddyProc MDS)과 비교하였다. 검증은 실제 관측된 결측 형상을 온전한 연도에 그대로 옮겨 심는 갭 이식 실험으로 수행하며, 전통적 지표와 함께 사분위수 범위 기반 시계열 일관성 및 누적 NEP 오차를 동시에 평가하였다. 본 연구는 상층 관측이 지상 플럭스 복원에 기여하는 정도를 정량화하고, 인공지능 기법 선택이 연간 탄소수지 불확실성에 미치는 기여도를 제시하며, 현재까지 보고된 경년 감소 추세의 통계적 신뢰도 재검토에 적용할 수 있다.

사사 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00243861).

PC8

도시숲이 국지 기상환경에 미치는 영향: 서울숲 사례의 WRF-UCM 수치 모의

Effects of Urban Forests on Local Meteorology: A WRF-UCM Simulation of Seoul Forest

김우진, 전원배[1),2)], 박재형[1)], 김동진[1)], 허 민

부산대학교 지구환경시스템학부, [1)]부산대학교 환경연구원, [2)]부산대학교 대기환경과학과

도시화에 따른 건물의 고층화와 지표 특성 변화는 지표면 에너지 수지와 대기 흐름을 변화시켜 도시 열섬을 강화하고 환기 환경을 악화시킬 수 있다. 반면, 도시숲은 식생에 의한 증발산과 차광 효과를 통해 기온을 낮추고 바람길 형성에 기여하여 시민에게 보다 쾌적한 휴식 공간을 제공할 수 있다. 이러한 도시숲의 기상학적 영향을 정량적으로 살펴보기 위해서는 도시 공간에서 나타나는 건물 높이와 지표 특성에 따른 기온 및 바람장의 변화를 함께 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 서울 내 대표적인 도시숲인 서울숲을 대상으로 Weather Research and Forecasting model (WRF v4.1.1)과 건물 높이 및 도시 표면 특성에 따른 지표-대기 상호작용을 고려할 수 있는 Urban Canopy Model (UCM)을 이용하여 고해상도 수치모의를 수행하였다. 현재의 도시숲 조건을 나타내는 FOREST 실험과 동일 지역을 각각 저층 및 고층 건물 지역으로 가정한 LOW 및 HIGH 실험을 구성하고, 세 실험 간 기온과 풍속 차이를 비교하여 도시숲이 국지 기상환경에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과, FOREST 실험은 LOW 및 HIGH 실험에 비해 낮은 기온과 높은 풍속을 나타냈으며, 이는 도시숲이 도심의 기온 저감과 풍속 증가에 기여할 수 있음을 보여준다. 반면, HIGH 실험에서 기온과 풍속 차이가 가장 뚜렷하게 나타났는데, 이는 도시화가 진행되어 고층 건물이 증가할수록 도심의 열환경과 환기 조건이 악화될 수 있음을 보여준다. 본 연구 결과는 도시숲이 도시지역의 국지 기상환경을 개선하는 데 중요한 역할을 할 수 있음을 시사한다.

사사 본 연구는 2026년 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-NR076349).

PC9

겨울철 한반도 $PM_{2.5}$ 종관 패턴 분류를 위한 대표 기압면 평가: 기압면별 특성과 연직 연계성

Evaluation of a Representative Pressure Level for Classifying Wintertime $PM_{2.5}$-Related Synoptic Patterns over the Korean Peninsula: Characteristics and Vertical Linkages across Pressure Levels

채다은, 박순영[1], 이순환[2),3)]

부산대학교 지구과학과, [1)]대구교육대학교 과학교육과, [2)]부산대학교 지구과학교육과, [3)]부산대학교 환경연구원

동아시아의 고농도 $PM_{2.5}$ 발생은 오염물질의 장거리 수송과 대기 정체 및 환기 조건을 결정하는 종관 규모의 기상장과 밀접하게 관련되어 있다. 본 연구에서는 2015~2019년 계절관리제 기간의 서울 $PM_{2.5}$를 대상으로 1000, 925, 850, 700 및 500 hPa 지위고도장에 대해 K-means 군집분석을 수행하고, 기압면별 종관 패턴과 연직적 연계성을 비교하였다. 분석 결과, 주요 종관 유형은 대기 정체형, 수송-정체 혼합형, 환기 우세형으로 구분되었으며, 기압면에 따라 $PM_{2.5}$ 변동에 대한 설명력과 공간적 특성에 차이가 나타났다. 하층 기압면에서는 지표 부근의 정체와 오염물질 축적 조건이 상대적으로 잘 나타난 반면, 중·상층으로 갈수록 광역적인 대기순환 구조가보다 뚜렷하게 반영되었다. 특히 850 hPa 기압면은 하층의 정체 특성과 대규모 순환 신호를 동시에 반영하였으며, 다른 기압면과의 연계성도 높게 나타났다. 또한 하층-중층 간 연직 연결성이 중층-상층 간 연결성보다 뚜렷하게 나타났다. 이러한 결과는 서울의 고농도 $PM_{2.5}$가 연직적으로 연결된 종관 환경의 영향을 받으며, 850 hPa가 $PM_{2.5}$ 관련 종관 패턴을 대표하는 데 적합한 기압면임을 시사한다.

사사 이 연구는 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2020-NR049592). 또한 이 연구는 2022년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-NR070051).

PC10

도시 특성 세분화를 고려한 LCZ 적용에 따른 부산의 열환경 및 하층대기 모의 특성

Simulation Characteristics of the Urban Thermal Environment and Lower Atmosphere in Busan with LCZ-Based Urban Refinement

김지선, 박순영[1], 이순환[2),3)]

부산대학교 지구과학과, [1)]대구교육대학교 과학교육과, [2)]부산대학교 지구과학교육과, [3)]부산대학교 환경연구원

도시의 건물 형태와 밀도는 지표의 열 교환과 대기 흐름에 영향을 미치므로, 도시 기상 모의에서는 이러한 도시 특성을 적절히 반영하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 부산 지역의 실제 건물 높이와 밀도, 세분류 토지피복 자료를 이용하여 건물 높이 기반 LCZ 자료를 구축하고 WRF 모델에 적용하였다. 기준 실험(BASE), 기존 도시 유형에 도시 캐노피 모수화를 적용한 실험(UCM), LCZ를 이용해 도시 특성을 세분화한 실험(LCZ)을 구성하여 폭염 기간을 모의하였으며, 지상 관측자료와 위성 관측 지표면온도를 이용해 모의 성능을 평가하였다. 분석 결과, 모든 실험에서 2 m 기온의 시간 변화는 대체로 유사하게 나타났으나 UCM과 LCZ 실험에서는 기준 실험에 비해 10 m 풍속의 과대모의가 감소하였다. 또한 주간 지표면온도의 공간 분포는 UCM과 LCZ에서 기준 실험보다 잘 나타났으며, 특히 LCZ 적용 시 도시 내부의 열적 공간 이질성이 더욱 뚜렷하게 모의되었다. 지표 에너지수지와 바람 및 난류 구조에서도 LCZ 적용에 따른 차이가 나타나, LCZ 기반 도시 세분화가 도시 내부의 열적·역학적 특성을 보다 상세하게 표현하는 데 기여함을 확인하였다.

사사 이 연구는 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2020-NR049592). 또한 이 연구는 2022년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-NR070051).

PC11

도시 산악 관측지점에서 나타나는 야간 고농도 오존의 발생 및 수송 특성

Nighttime High Ozone and Transport Processes at an Urban Mountain Site

윤정우[1], 이순환[1,2]

[1]부산대학교 환경연구원, [2]부산대학교 지구과학교육과

야간 도시 지표에서는 오존 농도가 감소하는 반면, 산악지역과 상층에서는 상대적으로 높은 오존 농도가 유지되거나 증가할 수 있다. 이러한 상층의 고농도 오존은 일출 이후 대기경계층 발달과 함께 지표 오존 변화 및 고농도 발생에도 영향을 미칠 수 있어 도시 고농도 오존을 이해하는 데 중요하다. 본 연구에서는 서울 관악산의 야간 고농도 오존 발생 특성과 수송 메커니즘을 규명하기 위해 관측자료와 WRF 및 CMAQ 수치모의를 이용하였다. 2015~2024년 장기 관측 결과, 관악산에서는 야간에 고농도 오존이 지속되는 유형과 농도가 급격히 증가하는 유형이 나타났으며, 이러한 유형은 서울의 주간 고농도 오존 발생과도 연관성을 보였다. 수치모의를 이용한 대표 사례 분석에서 고농도 지속 사례는 풍상측 지역의 고농도 오존이 비교적 낮은 고도에서 수평 수송되어 관악산의 야간 고농도 유지에 기여한 반면, 농도 급증 사례는 상층으로의 고농도 오존 유입과 하층으로의 연직 수송이 오존 농도 증가에 기여하였다. 또한 일출 후 대기경계층이 발달하면서 서울 지표에서 연직확산의 기여가 증가하였으며, 이는 야간 관악산에서 관측된 고농도 오존과 관련된 상층 오존이 지표 오존 증가에 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 이러한 결과는 도시 고농도 오존을 이해하기 위해 지표 관측뿐만 아니라 야간 상층 오존과 고도별 수송과정을 함께 고려할 필요가 있음을 보여준다.

사사 이 연구는 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2020-NR049592). 또한 이 연구는 2022년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-NR070051).

PC12

초기 배출 인벤토리에 따른 아시아 NH_3 모의 성능의 차이와 위성 기반 배출 보정 효과

Differences in NH_3 Simulation Performance by Prior Emission Inventory and the Effect of Satellite-based Emission Correction over Asia

최현식, 전원배[1,2], 양채영, 이다은, 황소민

부산대학교 지구환경시스템학부, [1]부산대학교 환경연구원, [2]부산대학교 대기환경과학과

아시아 지역의 인위적 NH_3 배출량은 인벤토리에 따라 총량과 공간 분포의 차이가 크며, 이러한 불확실성을 줄이기 위해 위성 관측을 이용한 배출량 보정이 활발히 수행되고 있다. 그러나 대부분의 연구는 하나의 배출 인벤토리만을 보정하였기 때문에, 보정 이후의 배출량이 초기 인벤토리에 얼마나 의존하는지는 충분히 고려되지 못하였다. 이에 본 연구에서는 전 지구 배출 인벤토리인 EDGAR v8.1과 지역 배출 인벤토리인 HTAP v3.2를 각각 초기 배출로 적용한 수치모의 실험을 구성하였다. 초기 배출의 차이가 위성 기반 배출 보정 결과에 미치는 영향을 파악하기 위해, IASI NH_3 vertical column density (VCD)를 이용하여 2018년 여름철 배출량을 보정하고 그 결과를 비교·검증하였다. 보정 전 IASI NH_3 VCD와의 일치도는 지역 배출 인벤토리인 HTAP을 활용하였을 때 더 높은 수준을 보였으나, 배출 보정 이후 실험간 모의 성능의 차이는 크게 감소하였으며, IASI와의 일치도(IOA)는 두 실험 모두 0.91, 편차(NMB)는 −10% 수준으로 서로 유사해졌다. 그러나 두 실험의 NH_3 VCD가 수렴한 것과 달리, 보정 이후의 배출량은 여전히 서로 다른 공간 분포를 보였으며 권역에 따라 최대 26.6 %의 편차가 나타났다. 이러한 결과는 위성 관측 기반 배출 보정이 모의된 NH_3 VCD를 서로 유사하게 만들더라도, 산정되는 배출량까지 같아지는 것은 아님을 의미한다. 따라서 동일한 관측을 이용하였음에도 권역에 따라 서로 다른 배출량이 산정된 이유를 밝히기 위한 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

사사 본 연구는 2026년 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-NR076349).

PC13

배출원별 VOCs 저감에 따른 오존 변화 예측: 머신러닝과 광화학 박스모델의 상호 검증

Predicting Ozone Changes from Source-Specific VOC Reductions: Cross-Validation between Machine Learning and a Photochemical Box Model

장예진, 이창주, 윤종상

가톨릭대학교 에너지환경공학과

오존(O_3)은 대기 중으로 직접 배출되지 않고, 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOCs)의 광화학 반응을 통해 생성되는 2차 오염물질로, 농도 관리는 전구물질 저감에 의존한다. 그러나 O_3-NOx-VOCs 관계는 강한 비선형성을 가져 광화학 레짐(VOC/NOx-limited)에 따라 동일한 저감이 오히려 오존 증가로 이어질 수 있으며, VOCs는 배출원별로 화학종 구성과 오존 생성 반응성이 상이하므로, 배출원 단위의 정량적 저감 평가가 필요하다. 이에 본 연구는 PMF로 식별한 배출원 기여도를 머신러닝 기반 오존 예측 모델과 결합하여 배출원별 저감 시나리오에 따른 오존 변화를 예측하고, 이를 박스모델로 교차검증함으로써 오존 저감 정책에 활용 가능한 정량적 도구를 구축하고자 한다. 본 연구는 인천 남동구 논현동 측정소에서 2021년 4월~9월에 측정된 VOCs 자료를 대상으로 하였다. 광화학적 노화를 고려한 VOCs 초기 농도 보정을 수행한 후, PMF 분석으로 배출원을 분리하고 기여도를 산정하였다. 보정된 초기 농도와 배출원 기여도를 입력으로 머신러닝 오존 예측 모델을 학습하고, SHAP 분석을 통해 고농도 오존에 기여가 큰 배출원 및 화학종을 식별하였다. 이후 관측 기반 박스모델(OBM)을 이용하여 대상 지역의 광화학 레짐을 판별하고, 이를 바탕으로 배출원별 VOCs 저감 시나리오를 수립하였다. 각 시나리오에 대한 오존 농도 변화량($P(O_3)$)을 머신러닝 모델로 예측한 후, 예측 결과를 OBM 시뮬레이션과 비교 및 교차검증하여 광화학적 타당성을 평가하였다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 환경산업기술원의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25501461).

PC14

2022년 국내·외 인벤토리 현행화에 따른 초미세먼지(PM-2.5) 모사 농도 및 배출 기여도 변화 분석

Impact of Domestic and Foreign Emission Inventory Updates on Simulated PM-2.5 Concentrations and Emission Contributions in 2022

최동원, 이윤구, 김성준, 한은미[1], 김태형[1], 이경빈[1], 송형도[1], 유 철[1], 우정헌[2], 배창한[3]

알씨에어(주), [1]기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터, [2]서울대학교 환경관리학과, [3]리켐프로(주)

실효성 있는 대기환경 정책 수립을 위해 대기질 모델링을 이용한 미세먼지 발생원인 분석이 활용되고 있으며, 정량적 수치의 신뢰성은 배출량 인벤토리의 정확도에 상당한 영향을 받는다. 특히 배출량 입력자료는 시간에 따른 활동도 변화, 산정 체계 및 방법론 개선 등에 의해 유동적인 특성이 있어 시의성 있는 자료 활용이 필요하다. 최근 발표된 '22년 CAPSS는 산정방법 변화 등으로 SOx 배출이 전년대비 21% 감소하였으며, 동북아시아 배출량 CREATEv4 (2022)은 미세먼지 종합계획에 사용된 SIJAQv2 (2018) 대비 중국 동부에서 SOx 73%, NOx 38% 감소된 것으로 보고되었다. 이는 국내 PM-2.5 농도에 대한 국내·외 기여도의 상대적 크기가 기존(미세먼지 종합계획)에 대비 변동될 수 있으므로, 최신 국내외 인벤토리를 반영한 조건에서 기여도 재평가 필요성을 의미한다. 이에 본 연구는 국내·외 인벤토리를 '22년 기준으로 산정된 CREATEv4 (2022), CAPSS 2022로 현행화하여, 국내 PM-2.5 모사 농도 및 국내·외 배출 기여도 변화를 분석하였다. 모사 기간은 '22년이며, 국내·외 배출 기여도는 국내·외 배출량을 각각 50%를 감축하는 BFM 방법으로 산정하였다. 배출량 현행화 이전(SIJAQv2, CAPSS 2021) 연평균 PM-2.5 농도에 대한 국외 기여도 63.2%, 국내 기여도 36.8%로 모사 되었다. 국외 배출량 현행화 시 국내 PM-2.5 모사 농도는 전국 연평균 2.2 $\mu g/m^3$ 감소, 국내 배출량 현행화 시는 0.6 $\mu g/m^3$ 감소하였으며, 그 결과 국내·외 배출 현행화에 따른 국외 기여도는 10%가량 감소하는 것으로 모사되었다. 국내 배출 부분별 상대적 기여도는 수송·발전·산업 부문의 기여도가 감소하고 생활 부문의 비중이 증가하였다.

사사 본 연구는 2026년 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터의 지원을 받아 수행된 연구("2026년 국가 대기오염물질 배출량 산정 및 분석('24년 기준), R26BK01381897-000)"임.

PC15

최소 난류 확산계수 설정에 따른 오존 농도 모의 특성

Impacts of Minimum Eddy Diffusivity on Simulated Surface Ozone Concentrations

권민지, 이순환[1),2)]

부산대학교 지구과학과, [1)]부산대학교 지구과학교육과, [2)]부산대학교 환경연구원

대기질 수치모델에서 지표 오존 농도는 대기 중 화학반응뿐만 아니라 대기경계층 내 연직 확산 과정에 의해 크게 영향을 받는다. 특히 야간과 같이 대기가 안정한 조건에서는 연직 난류가 약화되어 연직 확산이 매우 작게 모의될 수 있으며, 이에 따라 모델에서는 일정 수준의 연직 혼합을 유지하기 위한 최소 난류 확산계수(Kzmin)를 적용한다. 이때 Kzmin의 값에 따라 지표 부근의 NO 적정과 잔류층 오존의 지표 유입 정도가 달라질 수 있다. 따라서 Kzmin의 설정은 야간 지표 오존 농도의 모의 결과에 영향을 미칠 수 있으며, 그 영향은 지형 특성 및 기상 조건에 따라 다르게 나타날 수 있다. 이에 본 연구에서는 CMAQ을 이용하여 Kzmin 설정에 따른 지표 오존의 시·공간적 분포 변화를 분석하였다.

사사 이 연구는 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2020-NR049592). 또한 이 연구는 2022년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-NR070051).

PC16

Improving $PM_{2.5}$ and PM_{10} Analysis and Forecasting over East Asia Using Data Assimilation in WRF-Chem with MOZART-GOCART

Naser Mohammadzadeh, Myong-In Lee

Department of Civil Urban Earth and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology

Accurate simulation and forecasting of particulate matter (PM) remain challenging because of uncertainties in emissions, chemistry, and initial conditions. In this study, the Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry (WRF-Chem) using the MOZART-GOCART chemical mechanism was applied to evaluate the impact of data assimilation (DA) on $PM_{2.5}$ and PM_{10} over East Asia and South Korea. Simulations with and without DA were compared against surface observations using 6-hourly analyses, spatial distributions, nationwide averages, and forecasts up to 24 hours. Data assimilation substantially improved model performance. Across all stations, $PM_{2.5}$ correlation increased from 0.08 to 0.89, while RMSE decreased from 12.67 to 5.23 $\mu g\ m^{-3}$. For PM_{10}, correlation improved from −0.16 to 0.83 and RMSE decreased from 25.04 to 9.72 $\mu g\ m^{-3}$. Nationwide-average performance showed even stronger improvements, with $PM_{2.5}$ correlation increasing from −0.02 to 0.97 and PM_{10} from −0.31 to 0.94. Spatial evaluation also showed improved agreement with observations over both East Asia and South Korea. The benefits of DA persisted during short-range forecasts, with high correlations maintained during the first 6 hours. However, forecast skill gradually decreased with lead time, accompanied by increasing RMSE and positive bias, particularly for PM_{10}. These results demonstrate that DA markedly improves PM initial conditions and short-range forecasts in WRF-Chem, while further improvements in emissions and model processes are needed to sustain forecast accuracy at longer lead times.

Keywords: WRF-Chem, MOZART-GOCART, Data Assimilation, $PM_{2.5}$, PM_{10}, Air Quality Forecasting, East Asia

PC17

성층권 메탄 편향에 대한 동아시아 지표 메탄 농도의 반응

Response of Surface Methane over East Asia to Stratospheric Methane Bias

최진녕, 김민중, 이승하[1)]

명지대학교 환경에너지공학과, [1)]국립환경과학원 대기환경연구과

대기 중 메탄 농도는 지표 배출과 화학적 소멸뿐만 아니라 전지구적 수송과 성층권-대류권 교환의 영향을 받는다. 그러나 지역모델은 제한된 계산 영역과 상부 경계조건으로 인해 대류권계면과 하부 성층권의 메탄 분포를 충분히 재현하지 못할 수 있으며, 이러한 오차는 대류권과 지표 메탄 농도의 모의에도 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 WRF-GC를 이용하여 한반도를 포함한 동아시아 지역의 메탄을 모의하고, 성층권 메탄 편향에 대한 대류권 및 지표 메탄 농도의 반응을 분석하였다. GOSAT/GOSAT-2의 전 대기 평균 메탄 몰분율(XCH_4)과 ACE-FTS의 연직 관측자료를 이용하여 모델의 고도별 편향을 평가하였으며, 성층권 메탄의 과소모의를 완화한 민감도 실험을 수행하였다. 기준 실험에서는 대류권계면과 하부 성층권에서 뚜렷한 음의 편향이 나타났다. 성층권 메탄 편향을 완화한 실험에서는 성층권-대류권 교환에 따른 대류권 메탄의 순손실이 감소하면서 대류권과 지표 부근의 메탄 농도가 증가하였으며, 이러한 반응은 여름철에 상대적으로 크게 나타났다. 이는 지역규모 모델에서 성층권 메탄과 상부 경계조건의 오차가 상층 대기에만 국한되지 않고 동아시아 지표 메탄 농도의 계절적 변화에도 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-04-02-058).

PC18

도시 건물 및 지형을 고려한 전산유체역학-딥러닝 모델 기반 이산화탄소 배출원 역추적 모델 개발

Development of CO_2 Source Inverse Models Considering Urban Buildings and Terrain Using Computational Fluid Dynamics and Deep Learning Models

안효빈, 박승부

서울시립대학교 환경공학과

기후변화가 심각해짐에 따라 탄소배출을 관리하고 저감하기 위한 지속적인 노력이 요구되고 있다. 효과적인 탄소배출 관리 및 저감 전략을 수립하기 위해서는 이산화탄소(CO_2) 배출원의 위치를 파악하는 것이 중요하다. 이에 따라 최근에는 CO_2 플럭스 자료와 기상자료 등을 기반으로 배출원의 위치를 역추적하려는 다양한 연구가 수행되고 있다. 그러나 도시지역에서는 다양한 형태의 건물과 복잡한 지형에 의해 국지적인 유동이 형성되며, 이로 인해 CO_2의 확산 양상이 복잡하게 나타나 배출원의 위치를 추정하는 데 어려움이 있다. 따라서 도시지역의 건물과 지형에 따른 유동 및 CO_2 확산 특성을 고려한 배출원 역추적 모델의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 고해상도 전산유체역학 모델과 딥러닝 모델을 활용하여 도시 건물과 지형의 영향을 고려한 CO_2 배출원 역추적 모델을 개발하고자 한다. 먼저 전산유체역학 모델을 이용하여 건물을 포함한 평지 조건에서 풍속 등의 기상조건과 CO_2 배출원 위치에 따른 CO_2 확산을 모의하고, 생성된 모의자료를 학습하여 CO_2 배출원의 위치를 추정하는 딥러닝 기반 역추적 모델을 개발한다. 이후 동일한 방법을 건물을 포함한 비평지 조건에 적용하여 건물과 지형이 CO_2 확산 및 배출원 역추적에 미치는 영향을 분석한다. 본 연구는 다양하고 복잡한 도시환경에서 CO_2 배출원의 위치를 파악하기 위한 기반을 마련함으로써, 향후 도시지역의 탄소배출 감시 및 관리 전략 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 2026년도 과학기술정보통신부 한국연구재단(NRF) 지원사업(과제번호 추후 추가 예정)의 지원을 받아 수행되었습니다.

PC19

수평 스캐닝 LiDAR 기반 산업단지 PM 공간분포의 딥러닝 단기예측

Deep Learning-Based Short-Term Prediction of PM Spatial Distribution in an Industrial Complex Using Horizontal Scanning LiDAR

정가빈[1], 성민경[2], 김관철[2], 이재영[1,3]

[1]아주대학교 인공지능학과, [2]차세대융합기술연구원 첨단환경감시센터, [3]아주대학교 환경안전공학과

산업단지 내 미세먼지(Particulate Matter, PM) 농도는 배출원과 기상 조건 변화에 따라 시공간적으로 크게 변동하며, 특정 지역에서 일시적으로 고농도가 발생할 수 있다. 그러나 기존 고정식 측정망은 제한된 지점의 농도만 제공하여 단시간 변화를 파악하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 시화·반월 국가산업단지에서 수평 스캐닝 LiDAR (Light Detection and Ranging)로 관측된 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 공간 농도 자료를 활용하여 딥러닝 기반 예측을 수행하고, 모델의 성능과 고농도 영역 재현성을 평가하였다. 분석에는 SMART LIDAR MK-II로 30분 간격으로 스캔한 자료를 사용하였으며, 각 스캔은 약 13만 개 지점으로 구성되어 있으며, 2025년 8월부터 2026년 8월까지의 자료를 사용하였다. LiDAR 자료는 공간 격자로 변환하여 인근 도시대기측정망 및 공공기관 기상관측 자료와 시간적으로 정합하였다. PM 농도 분포 예측에는 CNN 기반 encoder-decoder와 ConvLSTM 기반 encoder-decoder를 적용하여 성능을 비교하였다. 예측 정확도는 RMSE, MAE, R^2 및 격자별 오차분포로 평가하였으며, 기준 농도 초과 영역을 추출해 Intersection over Union (IoU)으로 재현성을 평가하였다. 본 연구는 고해상도 LiDAR 기반 PM 단기 예측을 통해 고농도 지역의 사전 파악과 공간 기반 대기질 관리에 기여할 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25480268). 본 연구는 2026년도 시흥녹색환경지원센터의 지원을 받아 수행된 연구임. 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 인공지능융합혁신인재양성사업 연구 결과로 수행되었음(IITP-2026-RS-2023-00255968).

PC20

한반도 지역을 대상으로 한 WRF-Chem 지표 오존 모의 성능 및 오존 생성 특성 평가

Evaluation of WRF-Chem Performance for Surface Ozone Simulation and Ozone Formation Characteristics over South Korea

서예빈, 이명인

울산과학기술원(UNIST)

한국의 지표 오존(O_3)은 전구물질 배출과 기상 조건의 복잡한 상호작용에 의해 결정되며, 특히 고온 환경에서는 광화학 반응과 오존 생성 민감도가 크게 변화할 수 있다. 따라서 미래 기후변화에 따른 오존 변동을 전망하기에 앞서, 현재기후에서 수치모델이 고온 조건에 따른 오존 및 관련 화학 과정을 얼마나 신뢰성 있게 재현하는지 평가하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 WRF-Chem (v4.6.0)을 활용하여 한국 전역의 지표 오존 모의 성능을 평가하고, 고온 조건을 중심으로 기상·화학적 특성 변화를 분석한다. 지상 관측자료를 이용하여 기온과 오존의 재현성을 평가하고, 기온, 대기경계층 높이(PBLH), 일사량, 전구물질 농도 및 식생기원 휘발성유기화합물(BVOC) 배출 변화를 통해 고온 조건에서의 오존 생성 메커니즘을 진단한다. 또한 $HCHO/NO_2$ 비율(FNR)을 이용하여 수도권, 산업지역, 산림지역 및 배경지역의 오존 생성 레짐(VOC-limited, transitional, NO_x-limited)을 분류하고, 기온 조건에 따른 지역별 오존 생성 민감도 변화를 비교한다. 본 연구는 현재기후의 고온 환경에서 지표 오존과 오존 생성 화학에 대한 WRF-Chem의 모사 신뢰도를 평가하고, 향후 미래기후에서의 오존 생성 민감도 변화를 분석하기 위한 과학적 기초자료를 제공한다.

사사 This work was supported by Korea Environment Institute & Technology Institute (KEITI) through "Climate Change R&D Project for New Climate Regime", funded by Korea Ministry of Environment (MOE) (2022003560002).

PC21

PMF-CBPF 기반 대기오염 잠재 배출원 탐색을 위한 AI 기반 연구지원 시스템 개발

Development of an AI-Assisted Research Support System for Potential Air Pollution Source Investigation Based on PMF-CBPF Analysis

신혜진, 류지원, 박수빈, 유일한, 이승묵

서울대학교 보건대학원 환경보건학과

대기오염의 효과적인 관리를 위해서는 주요 배출원의 종류와 잠재적 위치를 파악하는 것이 중요하다. PMF는 오염원을 분류하고 기여도를 추정하며, CBPF는 풍향, 풍속에 따른 고농도 확률로 잠재적 오염원의 방향을 추정한다. 그러나 실제 배출원 후보 탐색에는 공간정보와 문헌 조사에 많은 시간이 소요되며 연구자의 주관이 개입될 수 있다. 본 연구에서는 이를 체계화하기 위해 PMF-CBPF 분석 결과와 공간, 문헌정보를 연계한 CBPF AI Source Investigator를 개발하였다. 먼저 CBPF 결과에서 고확률 영역을 자동 그룹화하고, PMF factor별 잠재 배출원 유형과 탐색 방법을 연결하였다. 이후 CBPF의 방향 및 거리 조건을 기반으로 도로, 교통, 시설 등 공간 및 장소검색 자료에서 잠재 배출원 후보를 탐색하고 거리, 방위각 및 방향 일치 여부를 산출하였다. 탐색된 후보를 표준화하고, 관련 문헌에서 factor 및 배출원 유형에 대한 근거를 검색해 후보별 검토 정보(RAG)로 연계하였다. 최종적으로 dashboard에서 후보와 근거를 확인하고, 연구자가 retain, reject 또는 needs review를 선택해 판단 근거를 기록하도록 구성하였다. 서울지역 사례에 적용한 결과, CBPF hotspot별 잠재 배출원 후보와 공간, 문헌정보를 통합적으로 제시할 수 있었다. 본 시스템을 통해 기존의 CBPF 해석과 배출원 조사 과정을 재현 가능한 workflow로 체계화하여, 잠재 배출원 탐색의 효율성과 객관성을 높이고 연구자의 최종 판단을 지원할 수 있을 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 2026년도 정부(환경부)의 재원으로 4단계('26~'28) 한·중 대기질 공동연구(I)의 지원을 받아 수행함 (NIER-2026-01-01-003).

이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 미세먼지관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

PC22

서울시 7차 미세먼지 계절관리제의 초미세먼지 개선 효과 평가

$PM_{2.5}$ Reduction Effects of Seoul's 7th Seasonal PM Management System Using CMAQ

채찬병, 오달영, 배일상, 성지혜, 김영준, 최용석

서울시 보건환경연구원 대기환경연구부

고농도 미세먼지가 집중되는 겨울철의 대기질 개선을 위해 수도권과 6대 특·광역시에서는 매년 12월부터 이듬해 3월까지 미세먼지 계절관리제를 시행하고 있다. 본 연구에서는 서울시 7차 미세먼지 계절관리제 기간을 대상으로 기상 및 국외 영향과 정책 시행에 따른 효과를 구분하고, 초미세먼지 농도 개선 효과를 정량적으로 평가하고자 하였다. 7차 계절관리제의 세부 정책과 추진실적을 조사하여 $PM_{2.5}$, SOx, NOx 및 VOC의 배출 삭감량을 산정하였다. 노후 경유차 조기 폐차 및 저공해화와 같이 효과가 지속되는 정책의 특성을 반영하기 위해 7차 계절관리제 보급물량과 1~7차 누적 보급물량 적용 결과의 평균을 서울시 7차 계절관리제 정책 시나리오의 최종 배출 삭감량으로 설정하였다. 계절관리제 시행기간 동안의 배출 삭감량은 $PM_{2.5}$ 160.0톤, SOx 6.0톤, NOx 3,933.2톤 및 VOC 289.6톤으로 산정되었다. 정책별 삭감량은 CAPSS 배출량 인벤토리에 적용하기 위해 도로이동오염원, 비도로이동오염원, 비산먼지, 비산업연소, 생물성연소 및 사업장으로 재분류하였다 대기질 모사는 국가미세먼지정보센터에서 제공하는 L-NEAS를 활용하여 수행하였으며, 관측자료와의 비교를 통해 모델성능평가(MPE)를 진행하였다. 시나리오별 모사 결과를 비교하여 기상 및 국외 영향과 정책효과를 분리하고, 서울시 계절관리제의 초미세먼지 개선 효과를 정량적으로 평가하였다. 연구 결과는 계절관리제의 실질적인 성과를 검증하고 향후 배출 저감 대책을 고도화하기 위한 과학적 근거로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

PC23

딥러닝을 이용한 용인시 초미세먼지($PM_{2.5}$) 단기예측 모델 비교 연구

Deep Learning Models for Short-term $PM_{2.5}$ Prediction in Yongin City

박윤정, 최찬우[1], 최효준[1], 정경이[1], 조영민

경희대학교 환경학 및 환경공학과, [1](주)엔이알

초미세먼지($PM_{2.5}$)에 관한 국가 대기질 예보는 권역 단위에 대한 등급 예보에 머물러 있어 기초지자체 내부에서 발현되는 국지적 농도 변화를 반영하기 어렵다. 또한 관측 자료 측면에서도 국가에서 운영하는 도시대기측정망(AQMS)의 신뢰도는 높으나 지역별로 관측 지점 수가 제한적인 실정으로 시 단위 내부의 변동을 세밀하게 포착하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 경기도 용인특례시를 대상으로 국가 도시대기측정망과 용인시가 자체적으로 운영하는 지역 측정소 자료를 결합한 관측 데이터 기반의 $PM_{2.5}$ 단기예측 딥러닝 모델 각각의 성능을 비교해 봄으로써 보다 정밀한 $PM_{2.5}$ 변동성을 추적할 수 있는 방안을 모색해 보았다. 2025년 04월부터 2026년 06월까지 시간 단위 자료를 사용하였으며, 입력변수로 대기오염물질(PM_{10}, SO_2, NO_2, O_3, CO)과 기상인자(기온, 풍속, 풍향, 습도 등)를 활용하였다. 결측치는 선형보간으로 처리하였으며, 자료를 정규화한 후 과거 24시간 자료를 바탕으로 1시간 후 농도를 예측하도록 구성하였다. 예측 모델은 시간 정보의 활용 방식이 다른 MLP, LSTM, CNN 세 모델을 동일 조건에서 학습시켜 RMSE, MAE, 결정계수(R^2)로 성능을 평가하였다. 분석 결과, 시계열 데이터의 복잡한 패턴을 예측하는 데 효과적인 LSTM이 RMSE 2.848, MAE 2.138, R^2 0.897로 가장 우수한 예측 성능을 보였다. 본 연구는 기초지자체의 관측 데이터 기반 딥러닝 예측 가능성을 제시하여, 향후 지자체 맞춤형 대기질 예측 서비스 및 고해상도 예측 지도 개발의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

사사 본 연구는 2026년도 경기녹색환경지원센터의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: 26-GG-04).

PC24

AI 기반 대기환경정보 융합·통합 활용의 국내외 동향과 시사점

Domestic and International Trends and Implications of AI-Based Integration and Utilization of Air Quality Information

한세현, 서유정, 유화성, 김정숙, 김정훈[1]

주식회사 랩솔레미스, [1]국립환경과학원

기후변화의 영향과 대기오염의 복합화·광역화로 단일 관측 또는 모델 자료만으로는 오염 원인 규명과 과학적 정책 의사결정에 한계가 나타나고 있으며, 이에 환경위성, 지상측정망, 배출원·사업장 정보, 기상 및 모델자료 등 이종 데이터를 통합하고 인공지능(AI)을 활용하여 새로운 정보를 생산·활용하려는 시도가 국내외에서 확대되고 있다. 본 연구에서는 국내외 대기환경정보의 통합·융합 및 AI 활용 동향을 조사하고 국내 적용 방향과 시사점을 검토하였다. 최근 데이터 표준화와 상호운용성을 기반으로 위성·지상관측·기상·수치모델 자료를 연계하고, 기존 자료동화 및 다중모델 앙상블과 함께 머신러닝·딥러닝 기반 예측 보정, 고해상도 대기질 추정 및 AI-수치모델 하이브리드 예측 등으로 활용 범위가 확대되고 있다. 또한 산업단지·도시 등 국지 규모에서는 디지털트윈과 AI를 활용한 오염확산 분석, 배출원 추적 및 시뮬레이션 관련 연구와 적용 사례가 점차 증가하는 추세이다. 국내의 경우 환경위성(GEMS), 대기환경측정망, 대기질 예보, TMS·SEMS 및 첨단감시 등 분야별 정보체계가 고도화되고 AI 활용도 예보·이상자료 탐지·배출량 추정 등으로 확대되고 있으나, 기관·시스템별 데이터 분산과 시공간 해상도 및 표준체계 차이로 시스템 간 융합 활용에는 한계가 있다. 향후에는 개별 시스템의 부분적 고도화를 넘어 데이터 표준화와 통합 데이터 허브를 기반으로 기존 시스템을 유기적으로 연계하고, AI·디지털트윈 기반 분석·예측·정책 시뮬레이션 및 의사결정 지원으로 단계적으로 확장할 필요가 있다. 이를 통해 감시-분석·평가-예측-정책·사업장 관리가 연계되는 데이터·AI 기반 전주기 대기환경 관리체계로의 전환이 가능할 것으로 판단된다.

사사 본 논문은 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구(대기분야 융합정보 활용성 제고를 위한 연구)임.

PC25

권역 및 오염물질 특성을 고려한 머신러닝 기반 고해상도 대기오염 공간보간 프레임워크

A Regional and Pollutant-Specific Machine Learning Framework for High-Resolution Air Pollution Spatial Interpolation

장지호[1),2),3)], 유지예[1),2),3)], 이용찬[1),2),3)], 박영일[1),2),3)], 이희관[1),2),3)]

[1)]인천대학교 환경에너지공학과, [2)]인천대학교 환경융합기술연구원, [3)]인천대학교 아시아환경에너지연구원

대기오염 측정망의 불균등한 공간분포는 관측 공백 지역의 농도 분포와 변동을 연속적으로 평가하는데 어려움을 줄 수 있다. 본 연구에서는 기존 전국 단일 도메인 모델의 지역 특성 반영 한계와 일부 가스상 물질의 낮은 일반화 성능을 보완하고자 시간별 1 km 농도장을 재구성하는 머신러닝 공간보간 프레임워크를 권역별로 구축하였다. 분석영역은 수도권과 충남북부 서해안권을 포함하는 중서부권과 부산·김해·창원권을 포함하는 동남권으로 구분하였다. 프레임워크에는 AirKorea 장기 관측자료(2001~2024년)에 ECMWF ERA5/ERA5-Land 재분석 기상자료와 지형, 토지피복, 인구, 도로망, 산업단지 등 지리공간 정보를 통합하였다. 예측시점 전후 주변 측정소 관측값으로 시공간적 배경 농도장을 구성하고, LightGBM으로 기상·공간 조건에 따른 배경장과 관측농도의 차이를 학습하였으며, 가스상 물질에는 권역·물질별 보정 구조를 적용하였다. 검증은 공간 버퍼 교차검증과 연도별 순차 검증으로 수행하고 R^2, RMSE, slope, 표준편차비, 고농도 재현성 및 잔차 공간자기상관을 평가하였다. 이전 전국 단일모델 대비 PM_{10}과 $PM_{2.5}$는 두 권역에서 높은 공간 재현성을 유지하였고, O_3, NO_2 및 CO는 권역 분리와 물질별 보정 이후 다년도 일반화 성능이 개선되는 경향을 보였다. SO_2는 두 권역에서 일반화 성능이 개선되는 경향을 보였으며, 특히 동남권에서는 연도별 성능 변동이 완화되었으나 고농도 변동의 재현에는 일부 한계가 남았다. 본 결과는 권역과 오염물질 특성을 반영한 모델링의 유효성을 보여준다.

사사 본 논문은 과학기술정보통신부 사업 한-EU 공동연구지원사업(한국연구재단)과, 기후에너지환경부의 재원으로 수도권매립지관리공사의 환경에너지분야 특성화대학원 육성사업과 한국환경산업기술원의 환경분야 특성화 선도대학 육성사업 및 고용노동부의 K-디지털 트레이닝 사업의 지원을 받아 수행되었음.

Session PD 측정·분석

평가위원[PA~PH] : 김용현(전북대학교), 김은혜(국립군산대학교), 김주애(고려대학교), 박대훈(한국기계연구원), 박은하((재)포항산업과학연구원), 박풍모(안산미래연구원), 송영철(한국화학연구원), 오용환(국립부경대학교), 이현정(제주대학교), 정경준(연세대학교), 최나래(강원대학교), 최용주(한국외국어대학교)

평 가 위 원 [P I] : 김민중(명지대학교), 김종범(충남연구원), 나하나(인제대학교), 박승부(서울시립대학교), 이영로(고려대학교)

PD1) COVID-19 팬데믹 전·중·후 인천 지역 대기질 변화 및 $PM_{2.5}$ 고농도 발생 특성
PD2) 위성자료를 활용한 서울지역 대기 중 이산화탄소의 시공간적 변동 특성 분석
PD3) 2026년 여수지역 온·오프라인 GC-FID/MS 측정 기반 VOC 특성 및 오존 생성 잠재력
PD4) 항공측정 offline TD-GC/MS를 이용한 PAM 성분 고도별 농도 및 장거리 이동
PD5) Deans Switch-GC-MS/FID 이중검출 기반 PAMS-VOCs 분석법 개발 및 대기 중 오존 전구물질 모니터링
PD6) 탄소동위원소 분석을 활용한 서울 브라운카본의 변동성 및 배출원 특성 규명
PD7) 풍동실험을 이용한 사프로라이트 광석 야적시 비산먼지 발생 특성 연구
PD8) ZIF-8/MWCNT 복합 센서의 방향족 가스 흡착 거동 해석 및 QSPR 기반 응답 예측
PD9) 산업단지 대기 중 6가 크롬 농도의 연도별 변화
PD10) 2026년 설날 기간 제주 대기 에어로졸 특성: 불꽃놀이 및 황사 영향
PD11) 풍향에 따른 2025년 8월 한반도 대류권 오존 감소 사례 분석
PD12) 도심공원의 계절별 대기 미세플라스틱 현황
PD13) A Study on the Chemical Properties of Atmospheric Particles Collected in The Wanju Industrial Park and Its Surrounding Areas
PD14) 오존존데 관측 기반 서산지역 8월 오존 연직분포 특성 분석
PD15) AIS 기반 선박 배출량 인벤토리와 확산모델링을 활용한 항만 도시 인근 선박 대기오염물질의 시공간 분포 및 육상 확산 특성 분석
PD16) GC/MS를 이용한 대기 중 26종 현용 농약류의 분석법 최적화
PD17) 지하고속도로 내 발생 대기오염물질의 외부 영향 평가를 위한 고속도로 터널 내부와 외부 대기오염물질 농도의 상관성 및 영향 분석
PD18) Development and Application of Local-Source-Adjusted CWT Methods in a Coastal Industrial City
PD19) Emission Rates and Composition Emitted from Pinus Densiflora by PM Exposure
PD20) 서울시 자치구별 오존농도와 시공간 이동 특성 분석
PD21) 산불 배출이 배경대기농도에 미치는 영향: 안면도 지구대기감시소 관측자료 분석을 바탕으로
PD22) 부산항 대기 중 PCBs와 PAHs의 여름·가을철 오염 특성과 잠재적 오염원 파악
PD23) 남극 세종과학기지에서 관측된 대기 중 암모니아 연간 변동 특성
PD24) 이동식 측정을 활용한 여수국가산업단지 내 오존 전구물질 Hot-spot 파악 및 배출원 기여도 분석
PD25) 교통 특성과 기상 조건에 따른 서울시 암모니아 농도 변화 및 추정 모델 개발
PD26) GEMS와 Optical Flow 기법을 이용한 화산 SO_2 플룸 이동장 및 유효 수송 고도 추정
PD27) 라만 라이다를 이용한 사업장 굴뚝 배출 메탄 및 이산화탄소 배출량 측정
PD28) ASIA-AQ 캠페인 기간 동아시아 지역에서 관측된 질산염에 의한 광물 먼지 빙핵화 효율 저하
PD29) 원거리 메탄 및 이산화탄소 혼합비 측정 라만 라이다 개발 및 성능평가
PD30) 온도와 오존의 개별·복합 스트레스에 따른 식생 탄소순환 변화와 biogenic SOA 생성 변화 연구
PD31) VOCs 함유량 및 오존생성잠재력을 고려한 생활소비재 품목군별 우선관리 대상 선정 프로그램 개발
PD32) 도심과 배경 지역 대기 중 입자상 니트로소화합물의 계절별 농도 특성 및 생성 기여인자 분석

PD33) 다양한 평가지표를 활용한 2019~2025년 서울 지역 초미세먼지 단기예보 정확도 분석
PD34) UAV 대기질 모니터링의 정확도 향상을 위한 AI 기반 하강기류 영향 보정
PD35) 스캐닝 라이다 시스템을 활용한 소규모 사업장 고농도 지역 선별
PD36) GPS 결측 조건에서 보정 모델에 따른 분류 성능 비교
PD37) 휴대용 간이측정기를 이용한 프랑스 리옹 지역의 미세먼지 농도 특성 평가
PD38) 외부 대기환경이 운송 중 화물 공간의 미세먼지 및 온·습도에 미치는 영향
PD39) 도시 및 연안 지역의 계절별 AI 모델에 따른 $PM_{2.5}$ 예측 특성 비교
PD40) 국내 다지점 $PM_{2.5}$ 산화잠재력 비교: 2025년 봄철과 2026년 여름철
PD41) 서울 대기 중 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 산화 잠재력 장기 변동 특성 및 화학종과의 연관성 분석에 기반한 영향 요인 규명
PD42) PTR-ToF-MS 관측을 통한 여름철 수도권 대기 중 OVOCs의 분자 조성 및 농도 변화 특성
PD43) 수동대기채취기를 이용한 여수·광양 국가산업단지와 인근 지역의 VOCs 계절별 공간 분포와 배출 특성 분석
PD44) 다중 분광학적 분석법 기반 호흡성 대기 중 미세플라스틱 입자의 물리화학적 특성 규명
PD45) 여름철 서울 대기 중 휘발성유기화합물(VOC) 전구물질과 이차 유기에로졸(SOA) 형성 특성
PD46) 실시간 VOCs 관측과 머신러닝을 활용한 울산지역 오존 생성 특성 분석
PD47) 미분탄 연소 가스상 전구물질과 응축성 미세먼지의 성분 특성 비교
PD48) 장기 관측을 통한 대기 중 메탄 및 탄소 동위원소의 상관관계 분석
PD49) 회전익 UAV를 이용한 CO_2와 블랙카본의 연직 분포 및 국지적 수송 특성 분석
PD50) 춘천시 여름철 오존 생성 특성 및 라디칼 생성·소멸 경로의 오전-오후 변화
PD51) 서울과 춘천의 $PM_{2.5}$ 극성 유기성분 특성 및 수용모델 기반 배출원 비교
PD52) 필리핀 마닐라 지역의 $PM_{2.5}$ 농도 시간변동 특성
PD53) 방글라데시 다카 지역의 계절 전환에 따른 입자상 대기오염 특성
PD54) 연속 현장(in situ) CRDS 관측을 위한 isotopologue-based CO_2 보정의 실용적 구현
PD55) 특용작물 영농부산물 연소에 따른 단기체류기후변화유발물질 배출특성 연구
PD56) 농업지역 암모니아의 시기별 변동 특성과 도시지역 입자상물질과의 연계성 분석
PD57) 부하속도 기반 분석을 이용한 국내 농업지역 $PM_{2.5}$와 암모니아 등 기체상 전구물질 간의 관계
PD58) 지하고속도로 내 유해물질 저감을 위한 흡착소재 성능평가 및 최적화에 관한 연구

PD1

COVID-19 팬데믹 전·중·후 인천 지역 대기질 변화 및 $PM_{2.5}$ 고농도 발생 특성

Changes in Air Quality and Characteristics of $PM_{2.5}$ Pollution Episodes in Incheon before, during, and after the COVID-19 Pandemic

장지호[1),2),3)], 선우광[1)], 황지원[1)], 이희관[1),2),3)]

[1)]인천대학교 환경에너지공학과, [2)]인천대학교 환경융합기술연구원, [3)]인천대학교 아시아환경에너지연구원

COVID-19 팬데믹은 사회활동과 인위적 배출이 급변한 시기로 대기질 반응을 평가할 수 있는 자연실험적 조건으로 볼 수 있다. 본 연구는 에어코리아 자료로 인천의 $PM_{2.5}$, PM10, NO_2, SO_2, O_3 및 CO 농도를 전(2018~2019)·중(2020~2022)·후(2023~2024)로 구분하고, 기상·계절 변수 기반 Random Forest로 반사실적 농도를 추정하였다. 일평균 $PM_{2.5}$ 상위 10%(n = 256)를 고농도일로 정의하고, SO_2·NO_2의 시기·계절별 배경 대비 1.15배 상승 여부에 따라 4개 유형으로 분류하여 기상 및 HYSPLIT 48시간 역궤적을 분석하였다. SO_2·NO_2·CO는 감소했고 PM_{10}·$PM_{2.5}$는 팬데믹 중 감소 후 일부 반등했으며, O_3는 전 대비 중 12.5%, 후 20.4% 증가하였다. 월평균 R^2는 0.60-0.92였고, 관측-예측 상대차는 NO_2가 -7.0%에서 -17.8%, -25.0%로 감소한 반면 O_3는 -3.4%에서 +4.5%, +9.8%로 전환되어 NOx 감소에 따른 NO 적정효과 약화를 시사하였다. 연평균 고농도일은 전 48.0일에서 중 31.0일로 감소한 뒤 후에도 30.5일로 유지되었다. 고농도일의 82.8%는 겨울·봄에 집중되었고 SO_2·NO_2 동시 상승형이 86.3%였으며, 54%에서 O_3가 동반 상승하였다. 저풍속·다습 조건이 우세했고, 역궤적은 22%가 정체형, 78%가 서풍·북서풍계 외부 유입형이었다. 종합하면 인천 $PM_{2.5}$ 고농도에는 국지 축적, 광화학적 2차 생성 가능성 및 장거리 수송이 복합적으로 작용한 것으로 해석된다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 수도권매립지관리공사의 환경에너지분야 특성화대학원 육성사업과 한국환경산업기술원의 환경분야 특성화 선도대학 육성사업 및 고용노동부의 K-디지털 트레이닝 사업의 지원을 받아 수행되었음.

PD2

위성자료를 활용한 서울지역 대기 중 이산화탄소의 시공간적 변동 특성 분석

Spatiotemporal Variability of Atmospheric Carbon Dioxide over Seoul Using OCO-2 Satellite Observation

신성균, 이소진, 송민영, 최예진, 이권호[1),2)]

서울연구원 지속가능연구실 탄소중립센터, [1)]강원대학교 대기환경과학과, [2)]복사-위성연구소

도시 단위 온실가스 모니터링은 탄소중립 정책의 이행상황을 진단하고 배출량 인벤토리를 보완하기 위한 핵심 수단이다. 본 연구에서는 NASA OCO-2 위성 자료를 활용하여 2014년 9월부터 2025년 12월까지 서울지역 대기 연주기둥(Atmospheric Column) 평균 이산화탄소 농도(XCO_2)의 시공간적 변동 특성을 분석하였다. 품질이 양호한 관측자료를 선별하여 서울시 경계 주변 50 km 범위의 자료를 추출하고 역거리 가중법(Inverse Distance Weighted, IDW)을 통해 2 ㎞ 격자로 재구성 하였다. 또한 월별 서울지역 유효격자 중 하위 15%의 평균을 배경농도로 설정하고 각 격자의 XCO_2에서 이를 차감하여 도시지역 상대농도인 △XCO_2를 산정하였다. 분석결과 서울지역 XCO_2는 관측기관 동안 지속적으로 증가하였으며 봄과 겨울에 상대적으로 높고 가을에 낮은 계절적 변동이 확인되었다. 여름철에는 장마와 구름의 영향으로 분석가능 자료가 제한적으로 불확실성이 크게 나타난다. 장기평균 △XCO_2는 서울시 대부분 지역에서 배경농도보다 약 0.5~2.0 ppm 높은 양의 편차를 보였으며, 일부 녹지 인접지역에서는 음의 편차가 확인되었다. OCO-2 자료는 관측주기와 공간적 피복 범위의 한계로 개별 감축사업의 단기효과를 직접평가하기에는 제한적이나 도시 대기 중 CO_2의 장기 변화와 공간적 차이를 파악하는 참고자료로 활용될 수 있다. 향후 고해상도 위성, 지상관측, 기상자료 및 배출활동 자료를 결합한 자료융합 및 고도화를 통해 도시 온실가스 모니터링과 탄소중립 정책 평가에 활용될 수 있을 것이다.

사사 본 논문은 서울특별시의 지원을 받아 서울연구원 연구과제(2026-AR-02, 2026-OR-07)로 수행됨.

PD3

2026년 여수지역 온·오프라인 GC-FID/MS 측정 기반 VOC 특성 및 오존 생성 잠재력

Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Yeosu Based on Online and Offline GC-FID/MS Measurements

최서영, 박채형, 고동훈, 김우준, 박재환, 백성옥, 송명기, 배민석

국립목포대학교

여수국가산업단지는 석유화학 관련 산업시설이 밀집해 있어 다양한 휘발성유기화합물(VOCs)과 질소산화물(NOx)이 배출되며, 광화학적 오존 생성 가능성이 높은 지역이다. 본 연구에서는 2026년 여수지역에서 온·오프라인 GC-FID/MS를 이용하여 대기 중 PAM 대상 VOCs의 농도와 조성 특성을 분석하였다. 오프라인 시료는 열탈착용 흡착관(TD)에 50 mL min^{-1}의 유량으로 3시간 동안 포집한 후, Deans switch가 적용된 GC-FID/MS로 분석하였다. C_2–C_4 성분은 FID, C_5 이상의 성분은 MS로 분리 및 분석하였으며, 온·오프라인 자료에서 공통으로 측정된 성분의 농도 수준, 조성 분포 및 시간적 변화를 비교하여 상호 보완적 활용 가능성과 현장 측정자료로서의 적용성을 검토하고자 하였다. 또한, VOCs, NOx, O_3 및 기상 관측 자료를 동일한 시간 해상도로 일치시키고, NO와 과산화 라디칼(HO_2 및 RO_2)의 반응을 기반으로 오존 생성률($p(O_3)$)을 산정하여 관측 O_3과 비교하였다. PAM 대상 VOCs의 농도와 조성 변화에 따른 $p(O_3)$의 시간적 특성을 비교함으로써 오존 생성에 영향을 미치는 주요 전구물질과 광화학적 특성을 파악하고자 하였다. 이를 통해 여수 산업 지역의 VOCs 분포와 오존 생성 특성에 대한 이해를 높이고, 향후 산업 지역의 효율적인 VOCs 및 오존 관리방안 수립을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

사사 This work was supported by the Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (NIER-2024-03-03-002 & RS-2026-25505137) and by a grant (RS-2026-25519883) of the National Research Foundation (NRF) of Republic of Korea.

PD4

항공측정 offline TD-GC/MS를 이용한 PAM 성분 고도별 농도 및 장거리 이동

Altitude-Specific Concentrations and Long-Range Trans of PAM Components Using Airborne Off-line TD-GC/MS

고동훈, 오세호[1)], 최서영, 박채형, 김우준, 박재환, 백성옥, 송명기, 배민석

국립목포대학교, [1)]첨단환경감시센터

휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 오존(O_3) 및 2차 미세먼지($PM_{2.5}$) 생성에 관여하는 주요 전구물질로, 국지 배출원뿐만 아니라 서해상을 통한 국외 오염물질의 장거리 수송에 복합적인 영향을 받는다. 선행 연구는 주로 지표 관측을 중심으로 수행되어 왔으며, 상층 대기에서 VOCs의 성분별 수직 분포와 고도에 따른 농도 변화, 장거리 수송에 의한 유입 특성을 직접 관측한 연구는 상대적으로 부족하다. 이에 본 연구에서는 항공 관측을 이용하여 상층 대기 중 주요 VOCs의 고도별 농도 분포 및 수직 구배를 파악하고, 국지 배출과 국외 장거리 수송에 따른 VOCs의 유입 특성을 규명하고자 하였다. 연구를 위해 Beechcraft 1900D 항공기를 이용하여 수도권 및 서해상 상공에서 고도별 대기 시료를 포집하고, TD-GC/MS를 이용하여 주요 VOCs를 분석하였다. 또한 PTR-ToF-MS를 이용한 실시간 관측자료와 비교하여 측정자료의 신뢰성을 평가하고 장거리 수송에 따른 유입 특성을 분석하였다. 그 결과, PTR-ToF-MS와 TD-GC/MS 간 상관성 분석을 통해 보정계수를 산출하고 상공 VOCs 농도 자료의 신뢰도를 확보하였다. 고도별 분포에서는 톨루엔과 같이 반응성이 높고 국지 배출원의 영향을 크게 받는 성분이 저고도 및 지표 인접 대기에서 상대적으로 높은 농도를 나타냈으며, 고도 증가에 따른 뚜렷한 농도 증가는 관찰되지 않았다. 이는 해당 성분의 농도 분포가 장거리 수송보다는 수도권을 포함한 국지 배출원의 영향을 상대적으로 크게 받고 있음을 시사한다. 반면, 벤젠과 아세톤 및 메탄올 등의 OVOCs는 장거리 수송의 영향을 받은 서해상에서 약 1,000~2,000 m 고도까지 높은 농도를 나타내어, 국외 기원의 VOCs가 상층 대기를 통해 우리나라로 유입될 가능성을 확인하였다. 이러한 결과는 향후 국내 배출원 제어와 장거리 수송을 고려한 대기질 모델링 및 통합 관리 정책 수립에 중요한 기초 근거로 활용될 수 있다.

사사 This work was supported by the Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (NIER-2024-03-03-002 & RS-2026-25505137) and by a grant (RS-2026-25519883) of the National Research Foundation (NRF) of Republic of Korea.

PD5

Deans Switch-GC-MS/FID 이중검출 기반 PAMS-VOCs 분석법 개발 및 대기 중 오존 전구물질 모니터링

Development of a Deans Switch-GC-MS/FID Dual-Detection Method for PAMS VOCs and Monitoring of Atmospheric Ozone Precursors

송명기, 최서영, 박채형, 고동훈, 김우준, 박재환, 백성옥, 배민석

국립목포대학교

본 연구에서는 대기 중 오존 생성과 관련된 PAMS 및 TO-14A VOCs를 오프라인으로 포집하고, GC 내 Deans switch를 이용하여 휘발성에 따라 성분을 분배한 후, (1) C_2-C_6 성분 분석을 위한 DB-1-Al_2O_3 column 기반 FID 경로와 (2) C_6-C_{12} 및 TO-14A 성분 분석을 위한 DB-1-0.5 m blank column 기반 MS 경로로 분리하여 분석하였다. 이를 통해 광화학 대기오염 평가에 활용되는 탄화수소류를 중심으로 약 70종의 저분자 및 고분자 VOCs를 동시에 분석할 수 있는 Deans switch-GC-MS/FID 이중 검출 분석법을 확립하였다. FID 경로에서는 Ethane, Ethylene, Propane, Propylene 등 C_2-C_6의 고휘발성 탄화수소를 분석하였으며, MS 경로에서는 Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene 등 C_6-C_{12} VOCs와 Dichloromethane, Chloroform, Trichloroethylene 등 주요 TO-14A 할로겐계 VOCs를 분석하였다. 분석법의 성능은 VOCs 표준물질을 이용하여 성분별 머무름시간, 피크 분리도, 검량특성 및 재현성을 평가하였다. 그 결과, C_2 저분자 탄화수소부터 C_{12} 수준의 VOCs까지 넓은 휘발성 범위의 성분을 한 번의 TD-GC 분석으로 정성·정량할 수 있는 분석조건을 확립하였다. 본 연구에서 확립한 Deans switch 기반 GC-MS/FID 분석법은 다양한 물리·화학적 특성을 갖는 PAMS 및 TO-14A VOCs를 단일 분석 시스템에서 효율적으로 분리·정량할 수 있으며, 대기 중 VOCs 모니터링과 오존 생성기여도 평가 및 주요 VOCs의 우선관리 대상 도출을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

사사 This work was supported by the Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (NIER-2024-03-03-002 & RS-2026-25505137) and by a grant (RS-2026-25519883) of the National Research Foundation (NRF) of Republic of Korea.

PD6

탄소동위원소 분석을 활용한 서울 브라운카본의 변동성 및 배출원 특성 규명

Characterization of Brown Carbon Variability and Sources in Seoul Using Carbon Isotope Analysis

박희선, Haiyan Jin, 임희연, 김효민, 정선제, 곽한주, 이정훈[1)], 임세희[2)], 김주애, 이미혜, Claudia I. Czimczik[3)], Xiaomei Xu[3)], 주태규

고려대학교 지구환경과학과, [1)]한국기술교육대학교 기계공학부, [2)]충남대학교 환경공학과,
[3)]Department of Earth System Science, University of California, Irvine, CA, USA

브라운카본(Brown carbon, BrC)은 근자외선 및 가시광선 영역에서 빛을 흡수하여 대기 복사 강제력에 영향을 미치는 유기 에어로졸로, 바이오매스 및 화석연료 연소와 이차 생성 등 다양한 기원을 갖는다. 본 연구에서는 2019~2023년 서울 고려대학교에서 포집한 $PM_{2.5}$ 시료를 물과 메탄올로 연속 추출하여 수용성 BrC (WS-BrC)와 불용성 BrC (WIS-BrC)로 구분하고 광흡수 특성을 분석하였다. 또한 동일한 $PM_{2.5}$ 필터 시료의 안정탄소 및 질소동위원소($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$)와 방사성탄소(^{14}C)의 fraction modern ($F^{14}C$)을 활용하여 BrC의 광흡수 특성과 배출원 간의 연관성을 파악하였다. 관측기간 중 BrC 광흡수는 겨울철에 증가하여 연소 배출원의 계절적 영향을 시사하였다. $F^{14}C$는 대체로 0.4~0.8 범위로 나타나 화석 및 비화석 연료 탄소 기원이 함께 기여했음을 보였다. 특히 2022년 10~12월에는 $F^{14}C$가 약 0.9까지 증가하였으며, 동시에 총 추출성 BrC (TS-BrC)의 질량흡수효율(MAE)도 1.5 m^2 g^{-1}으로 증가하였다. 그러나 해당 기간 국내 및 인접 지역에서 뚜렷한 산불 활동은 확인되지 않아, 위성 산불 관측만으로는 파악하기 어려운 복합적인 연소 배출원이 BrC의 광흡수를 강화했을 가능성을 시사하였다.

사사 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2026-25471981).

PD7

풍동실험을 이용한 사프로라이트 광석 야적시 비산먼지 발생 특성 연구

Wind Tunnel Study on Fugitive Dust Emission Characteristics from Saprolite Ore Stockpiles

최영재, 이상균, 김희진, 김지훈, 강성곤, 김태형

(재)포항산업과학연구원(RIST) 환경연구소 환경보건연구그룹

니켈 산화광인 라테라이트(Laterite)는 열대 및 아열대 기후에서 초고철질(Ultramafic) 암석이 장기간 풍화작용을 거쳐 형성된 토양 형태의 광석으로, 주로 니켈, 철, 알루미늄, 크롬 등을 함유하며 점토 광물 및 수산화물 형태로 존재한다. 라테라이트의 주요 유형은 리모나이트(Limonite)와 사프로라이트(Saprolite)로 구분되며, 사프로라이트는 리모나이트에 비해 함수율과 점토 함량이 상대적으로 낮은 특성을 지닌다. 본 연구에서는 사프로라이트 광석 야적 시 풍식(Wind erosion) 개시 임계풍속 및 비산먼지 발생 함수율을 규명하기 위하여 풍동장치를 제작하고 풍동실험을 수행하였다. 풍동장치는 송풍기, 확산부, 정류실, 수축부 및 시험부로 구성하였으며, 시험부 단면은 50×50 cm이고 최대 풍속 약 20 m/s까지 실험이 가능하도록 설계하였다. 실험 대상은 사프로라이트 광석 3종이며, 야적지역의 최근 10년간 1분 간격 풍속 측정자료를 분석한 결과, 풍속 10 m/s 이하의 빈도가 99.9%로 나타났다. 이를 근거로 실험풍속은 2~18 m/s 범위에서 2 m/s 간격으로 단계적으로 증가시키며 사프로라이트 광석 퇴적물(Pile)의 중량 변화 및 비산먼지 농도를 측정하였다. 실험 결과, 사프로라이트 광석 3종 모두 통상적인 야적 조건의 함수율보다 현저히 낮은 함수율에서도 고풍속 구간에서 비산먼지 농도가 급격히 증가하는 임계풍속은 관측되지 않았다. 그러나 풍속 증가에 따라 광석 시료 표면이 건조되면서 표면 경화(Surface crusting) 현상이 확인되었으며, 이는 광석의 건조 상태 또는 물리적 충격이 가해지는 조건에서 비산먼지 발생 가능성이 증가할 수 있음을 시사한다. 따라서 사프로라이트 광석 야적장 관리 시 건조 및 물리적 교란 상황에 대비한 비산먼지 저감 대책 수립이 필요할 것으로 판단된다.

PD8

ZIF-8/MWCNT 복합 센서의 방향족 가스 흡착 거동 해석 및 QSPR 기반 응답 예측

Analysis of Aromatic Gas Adsorption Behavior on a ZIF-8/MWCNT Composite Sensor and QSPR-Based Response Prediction

이상탁, 김대근

서울과학기술대학교 환경공학과

최근 인공지능 기반 가스 센싱 기술이 발전하고 있으나, 학습되지 않은 가스가 유입될 경우 기존 학습정보만으로 정확하게 식별하기 어렵다는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 실험되지 않은 물질에 대해서도 분자 고유의 물리화학적 특성으로 센서 응답을 예측할 수 있는 정량적 구조-물성 관계(Quantitative Structure-Property Relationship, QSPR)의 활용이 요구된다. 본 연구에서는 소수성 ZIF-8과 다중벽탄소나노튜브(MWCNT) 복합체를 적용한 센서를 이용하여 총 5종의 방향족 휘발성 유기화합물(아닐린, 톨루엔, 벤젠, 클로로벤젠, 나이트로벤젠)의 흡착 거동을 분석하고, 분자 특성에 기반한 센서 응답 예측 모델을 개발하였다. Quartz crystal microbalance (QCM)를 이용하여 가스 흡착에 따른 주파수 변화(Δf)를 측정한 결과, 벤젠 고리의 전자적 특성을 나타내는 하메트 상수(σ_p)가 음수일수록 최대 흡착량이 증가하여 센서 표면에서의 π-π 상호작용과의 연관성이 확인되었다. 또한 분자의 소수성 지표인 분배계수(LogP)는 ZIF-8 미세기공 내 흡착 거동과 밀접한 관계를 나타냈다. 하메트상수와 분배계수를 독립변수로 다중선형회귀분석을 수행한 결과, QSPR 모델은 R^2=0.96의 높은 설명력을 나타냈다. 본 연구는 방향족 화합물의 전자적 특성과 소수성이 ZIF-8/MWCNT 복합 센서의 흡착응답을 설명하는 주요 분자 지표임을 제시하였으며, 이를 기반으로 미학습 방향족 가스의 센서 응답을 예측하기 위한 QSPR 접근법의 적용 가능성을 확인하였다.

사사 본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2020R1A6A1A03042742).

PD9

산업단지 대기 중 6가 크롬 농도의 연도별 변화

Yearly Variations in Hexavalent Chromium Concentrations in the Air of Industrial Complexes

강병욱, 김기홍[1], 공부주[1], 강대일[1], 전준민[2]

한국교통대학교 환경공학과, [1]국립환경과학원 기후대기연구부, [2]그린환경종합센터

크롬은 산화상태에 따라 3가크롬과 6가크롬으로 존재한다. 3가크롬이 자연적으로 발생하는 비교적 안정한 형태인 반면, 6가 크롬은 금속 도금, 염료 및 안료제조, 자동차 부품세정작업, 제철산업, 용접공정, 연료 연소, 냉각탑 운영 등 인위적 산업활동을 통해 주로 배출되는 것으로 알려져 있다. 6가 크롬은 국제암연구소(IARC)에 의해 인체발암물질(Group 1)로 분류되어 있으며, 호흡기 노출 시 폐암 등 호흡기계 질환과 밀접히 관련되어 있다(IARC, 2012). 이러한 유해성에도 불구하고 국내 환경정책기본법 시행령에는 아직 6가 크롬에 대한 별도의 대기환경기준이 마련되어 있지 않아 산업단지 및 인근 지역의 농도수준과 시·공간적 변동 특성을 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 국내 대표적 산업단지인 광양, 온산, 울산, 포항 등 4개 지점을 대상으로, 각 지역별로 서로 다른 조사시기에 계절별로 측정된 6가 크롬 농도 자료를 이용하여 지점 간 농도 수준 차이, 조사기간 간 변화 양상, 계절별 변동 특성을 정량적으로 비교·분석하여 그 결과가 갖은 환경적인 함의를 고찰하고자 한다.

사사 본 연구는 2026년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음.

PD10

2026년 설날 기간 제주 대기 에어로졸 특성: 불꽃놀이 및 황사 영향

Characteristics of Atmospheric Aerosols over Jeju during the 2026 Lunar New Year: Impact of Fireworks and Asian Dust

유나기, 고희정, 오상민, 김건윤, 정지영

국립기상과학원 지구대기감시연구과

불꽃놀이는 짧은 시간 동안 다량의 입자상 물질과 다양한 무기성분을 대기로 방출하며, 배출 입자는 기상조건과 공기괴 이동에 따라 발생지역으로부터 장거리 수송될 수 있다. 본 연구에서는 2026년 설날 전후인 2월 14~23일 제주 서귀포시에 위치한 국립기상과학원 연구실험동 옥상에서 수용성 이온성분, 탄소성 에어로졸 및 PM 질량농도를 관측하고, 입경분포 자료와 HYSPLIT 역궤적을 이용하여 불꽃놀이 영향 에어로졸의 제주 유입 가능성을 평가하였다. 설날 당일인 2월 17일 K^+ 농도는 0.09±0.04 $\mu g/m^3$으로 낮았으나, 다음 날부터 급격히 증가하여 두 차례의 K^+ 고농도 사례가 확인되었다. 두 사례의 평균 K^+ 농도는 각각 2.59±1.44 및 1.50±0.66 $\mu g/m^3$이었으며, 전체 수용성 이온 중 K^+ 기여율은 각각 14.5 및 8.2%였다. Na^+를 이용한 해염 보정 결과, non-sea-salt K^+는 두 사례에서 총 K^+의 약 99%를 차지하여 해염의 기여는 제한적인 것으로 나타났다. 반면 관측 후반의 황사 사례에서는 Ca^{2+}와 PM_{10}이 급격히 증가하였고, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비는 0.135까지 감소하여 앞선 K^+ 고농도 사례와 뚜렷하게 구분되었다. HYSPLIT 역궤적 분석에서 불꽃놀이 영향 기간의 공기괴는 중국 동부를 지나 제주로 유입된 반면, 황사 사례의 공기괴는 몽골과 중국 북부 내륙지역을 통과한 것으로 나타났다. 이러한 에어로졸 성분과 공기괴 이동경로의 변화는 2026년 설날 기간 제주에서 불꽃놀이 영향 에어로졸과 황사의 서로 다른 특성이 관측되었음을 보여준다.

사사 본 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구」 "황사·연무 감시 및 예보기술 개발(KMA2018-00521, 2360000249)"의 지원으로 수행되었습니다.

PD11

풍향에 따른 2025년 8월 한반도 대류권 오존 감소 사례 분석

Analysis of a Tropospheric Ozone Decrease Event over the Korean Peninsula in August 2025 Associated with Wind Direction

김상준, 김주완[1], 박진수[2], 구자호

연세대학교 대기과학과, [1]공주대학교 대기과학과, [2]국립환경과학원 대기과학연구과

성층권 오존은 해로운 자외선을 흡수하여 인간에게 이로운 역할을 하지만, 대류권 오존은 그 자체로 호흡기 질환을 유발하는 대기오염물질이다. 최근 연구에 따르면 대한민국을 포함한 동아시아 지역에서 80 ppbv 수준의 매우 높은 배경 오존량이 모의된다는 모델 결과가 있으며, 서울 지역 자유대류권 오존량이 매우 높게 관측된 결과 역시 존재한다. 하지만 이러한 오존 증가 추세에도 불구하고 기상학적 요인으로 인해 일시적인 오존 감소 효과가 나타날 수 있다. 본 연구에서는 2025년 8월에 서산 지역에서 관측된 오존존데 데이터 및 HYSPLIT 역궤적 모델을 이용하여 한반도 상공의 여름철 오존 연직 분포 특성을 비교했다. 첫 번째로 오존 연직 분포 상에서는 한반도가 저기압의 영향을 받은 이후 오존 농도가 크게 감소하는 현상이 관측되었다. 두 번째로 오존존데 비양 시점에서 HYSPLIT 역궤적 모델을 확인한 결과 풍향이 저기압이 접근함에 따라 풍향이 서풍에서 남풍으로 바뀌면서 자유대류권 오존이 감소했다. 이에 따라 남풍이 부는 시기에는 서풍에 비해 깨끗한 해양성 공기의 유입으로 인해 일시적인 대류권 오존 감소가 일어났음을 알 수 있다. 이러한 분석 과정을 통해 대류권 오존의 변화 추이를 이해하고 나아가 기상학적 요인에 따라서 관련된 정책의 방향을 결정하는 데에 도움을 줄 수 있다.

사사 본 연구는 국립기상과학원「지구대기감시자료 품질관리 기술 개발」연구용역 사업의 지원으로 수행되었습니다.
본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 "신기후체제 대응 환경기술개발사업"의 연구개발을 통해 창출되었습니다(2022003560006).

PD12

도심공원의 계절별 대기 미세플라스틱 현황

Seasonal Variation of Airborne Microplastics in Urban Parks

최예덕, 김효원, 금선우, 김지희, 장수현, 양마란, 박창민, 권승미, 박주성

서울특별시 보건환경연구원

일반적으로 대기에 포함된 미세플라스틱은 우리가 일상생활에서 사용하는 일회용 플라스틱 용기, 비닐 포장재, 자동차 타이어 등에서 주로 발생한다. 미세플라스틱(Microplastics)은 크기 5 mm 이하의 고체 형태 플라스틱으로 수질, 대기, 토양 등 다양한 환경 매체에 존재하여 인간과 생태계에 악영향을 미치는 실정이다. 문헌에 의하면 보통 도심 속 1 μm 이상 대기 미세플라스틱(AMPs) 개수는 대략 150~250개/m^3 수준인 것으로 알려졌다. 보통 도심공원은 공기 정화, 열섬현상 완화와 같은 환경적 가치와 시민의 휴식, 커뮤니티 공간 등의 다양한 사회적 가치를 제공한다. 본 연구에서 도심공원의 환경적 가치를 확인하기 위해 대기 미세플라스틱을 계절별로 분석하였다. 먼저 서울대공원(도심공원)과 광진구 대기측정소(도심)에서 저용량 에어 샘플러를 활용하여 24시간 시료를 채취한 후 초음파 조사와 과산화수소를 활용한 시료 전처리 과정을 거쳐 라만(Raman) 분광기로 미세플라스틱 개수와 종류를 분석하였다. 도심공원의 대기 미세플라스틱 평균 개수는 104개/m^3로 도심(255개/m^3)의 40% 수준으로 나타났다. 이는 공원이 대기질 정화, 플라스틱 오염원과 거리 및 저온 다습한 미기후(Micro climate) 효과 등에 기인한 것으로 추정된다. 또한 폴리에틸렌(PE)과 폴리스타이렌(PS)의 비율이 70% 이상으로 높고, 대부분 폴리에틸렌(PE)과 폴리스타이렌(PS)의 크기는 5 μm 이하로 나타났다. 본 연구는 서울대공원과 도심의 계절별 대기 미세플라스틱 분포 현황과 특성을 파악하여 도심공원의 환경적 가치를 과학적으로 분석하였다.

PD13

A Study on the Chemical Properties of Atmospheric Particles Collected in the Wanju Industrial Park and Its Surrounding Areas

Fuka Segawa, Gong-Unn Kang[1)], Seohyun Park[2)], Chang-Jin Ma

Department of Environmental Science, Fukuoka Women's University, Fukuoka, Japan,
[1)]Department of Health Administration, Wonkwang University, Iksan, Korea,
[2)]Jeonbuk-State Environmental Health Center, Korea

In Industrial Parks, due to their proximity to residential and agricultural areas, as well as its relatively small environmental carrying capacity, pollution countermeasures and impact assessments on surrounding areas are being emphasized. Wanju Industrial Complex is an industrial complex located in Bongdong, Wanju-gun, North Jeolla Province, and its scale is growing. It is adjacent to a large residential area, which has increased concern over air quality and residents' health problems caused by exposure to hazardous air pollutants emitted from the industrial complex. In this study, particulate matters were collected at the Wanju industrial parks and their surrounding areas, and their chemical properties were clarified. Furthermore, we evaluated the interrelationships of the elemental composition of atmospheric particulate matter in both regions using statistical analysis. The amount of heavy metals detected in the particles was trace. However, because these harmful heavy metals have the ability to accumulate in the body, even low-level exposure may lead to health effects if it continues over a long period. Statistical analysis revealed similarities in the sources of elemental composition among the particles at both locations. Additionally, for some elements, an impact from the Wanju Industrial Park to the surrounding area was suggested.

Acknowledgements This study was conducted with funding from the Jeonbuk-State Environmental Health Center.

PD14

오존존데 관측 기반 서산지역 8월 오존 연직분포 특성 분석

Analysis of the Characteristics of the Vertical Ozone Distribution over Seosan in August Based on Ozonesonde Observations

변진영, 김상준, 박상서[1)], 구자호

연세대학교 대기과학과, [1)]울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

대기 중 오존은 성층권에 존재할 때 자외선을 흡수하여 지상의 생명체를 보호하지만, 대류권에서는 인간의 호흡기에 악영향을 미치는 대표적인 온실기체이자 대기오염물질이다. 최근 기후변화로 인해 대류권의 오존량 추세가 변화하고 있으며, 현재 한반도의 대기환경에서도 이는 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 특히 여러 대기화학 모델링 실험에서는 인위적 배출량을 제외한 조건에서도 동아시아 및 한반도 지역의 오존 농도가 여전히 높게 나타나는 특징이 보고된 바 있다. 그러나 이러한 현상의 원인은 아직 명확히 이해되지 못한 상황으로 관측 자료를 기반으로 한 지속적인 오존 동향 파악이 필수적인 상황이다. 따라서 본 연구는 대류권 오존의 가장 근원이 되는 성층권 오존의 침투현상이 한반도 지역 오존의 고농도에 영향을 줄 수 있는 가능성에 초점을 두고 서산지역의 오존존데 관측자료를 분석하였다. 연구에 사용된 자료는 2023년~2026년 8월에 서산 지역에서 관측된 오존존데 자료이며 연도별 오존 연직 분포가 보이는 특징을 살펴보고, 이를 대류권계면 높이의 변화, 상부 대류권 내 성층권 기원 공기의 비율을 나타내는 지표인 Stratospheric Fraction, 그리고 대류권계면 부근 고도의 오존과 각 고도별 오존 농도 간의 상관관계와 연관하여 성층권 공기가 대류권에 미치는 영향을 확인했다. 이러한 이해를 바탕으로 성층권 오존이 대류권 오존농도에 미치는 영향을 파악하는 데 기여할 수 있으며, 나아가 대류권 오존 증가가 기후변화에 따른 배경농도 상승인지 기타 원인에 의한 현상인지를 파악하여 대응방안을 마련할 수 있다.

사사 본 연구는 국립기상과학원 지구대기감시자료 품질관리 기술 개발 연구용역 사업의 지원으로 수행되었습니다.

PD15

AIS 기반 선박 배출량 인벤토리와 확산모델링을 활용한 항만 도시 인근 선박 대기오염물질의 시공간 분포 및 육상 확산 특성 분석

Spatiotemporal Distribution and Landward Dispersion of Ship Emissions near Port Cities: An AIS-Based Inventory and Modeling Study

박영일[1),2),3)], 유지예[1),2),3)], 이용찬[1),2),3)], 장지호[1),2),3)], 이희관[1),2),3)]

[1)]인천대학교 환경에너지공학과, [2)]인천대학교 환경융합기술연구원, [3)]인천대학교 아시아환경에너지연구원

배출량 평가에 흔히 사용되는 하향식 선박 배출량 인벤토리는 통계와 평균 운항패턴을 기반으로 연단위 배출량을 산정하는 특성상 선박의 실제 위치와 운항 상태에 따른 단기 배출 구조 재현에 한계가 있다. 본 연구에서는 48개월에 걸쳐 인천 일대 해상에서 수집한 AIS 기반 선박 배출량 인벤토리를 이용해 선종, 기관, 운항 상태, 오염물질별 시공간 분포를 분석하고, 일, 월, 연평균 배출량이 시간단위 원자료의 배출 특성을 어떻게 변화시키는지 살펴보았으며, 국지 기상장과 지형을 반영한 GRAL 확산모델로 항만 배출 물질의 육상 이동 특성을 모사하였다. 그 결과, 시간 단위 원자료가 지닌 뚜렷한 시공간적 배출 특성과 국소적 피크는 일, 월, 연평균 자료에서 크게 희석되었으며, GRAL 모델을 이용해 각각의 확산 양상을 비교한 결과 시간단위 원자료의 확산 결과에서 나타난 국소 피크와 육상 핫스팟이 기간 평균 배출량의 결과에서는 거의 보존되지 않았다. 이는 배출량 총량이 동일하다 하더라도 긴 기간의 배출량을 합산한 뒤에 시간분배계수로 재분배하는 선박 배출량 평가 방식은 항만 도시에 대한 선박의 단기적·국지적 영향을 충분히 설명하기 어렵다는 것을 시사한다. 따라서 항만 도시의 효과적인 대기질 관리를 위해서는 평균 배출량 인벤토리가 아닌 선종, 기관, 운항 상태, 배출 시점, 위치를 반영한 고해상도 인벤토리를 활용해 선박 배출량의 육상 유입 가능성이 큰 시간대와 공간, 운항 조건을 고려할 필요가 있다.

PD16

GC/MS를 이용한 대기 중 26종 현용 농약류의 분석법 최적화

Optimization of a Method for Analysis of 26 Current-Use Pesticides in the Ambient Air Using GC/MS

김채은, 이호영, 고민지, 최성득

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

유기염소계 농약류(OCPs)를 포함한 일부 농약은 잔류성유기오염물질(POPs)로 지정되어 규제되고 있으나, 현용 농약류(CUPs)는 농업 활동에서 지속적으로 사용되고 있으며, 사용 중 휘발과 비산 등을 통해 대기로 유입될 수 있다. 특히 대기 중 CUPs는 입자상으로 존재하거나 침적과 재휘발 과정을 거치면서 예상보다 장기간 잔류하거나 장거리 이동할 가능성이 있어 지속적인 모니터링이 필요하다. 본 연구에서는 국내외에서 대기 중 검출 빈도가 높거나 장거리 이동 가능성이 보고된 농약류를 중심으로 26종 CUPs을 선정하고, 기체크로마토그래프/질량분석기(GC/MS)를 이용한 분석법을 확립하였다. DB-5MS 컬럼을 이용하여 오븐 온도 조건과 질량분석 조건을 최적화하여 대상 물질별 분석 감도를 향상시켰다. 국내에서 보고된 대기 중 농약류의 검출 농도 수준을 고려하여 0.01~1 μg/mL 범위에서 검량선을 작성하였으며, 26종 CUPs 모두 R^2 값이 0.99 이상으로 우수한 직선성을 나타냈다. 시료 전처리 조건을 확립하기 위해 석영섬유필터(QFF)와 폴리우레탄폼(PUF)에 속슬렛 추출법을 적용하였으며, 실리카와 플로리실 컬럼의 조건별 회수율을 비교하여 최적의 정제 조건을 확립하였다. 또한, 전처리 방법에 따른 방법검출한계(MDL), 대체표준물질 회수율, 정밀도를 평가한 결과 안정적인 값을 확인하였으며, 이를 통해 분석법의 신뢰성을 검토하였다. 향후 본 분석법을 실제 대기시료에 적용하여 CUPs의 대기 중 농도와 분포 특성을 파악할 수 있으며, 농업지역과 인근 지역의 대기 중 농약류 오염 특성을 평가하는 데 활용할 수 있다.

PD17

지하고속도로 내 발생 대기오염물질의 외부 영향 평가를 위한 고속도로 터널 내부와 외부 대기오염물질 농도의 상관성 및 영향 분석

Correlation and Impact Analysis of Concentrations of Air Pollutants Inside and Outside Highway Tunnels for External Impact Assessment of Air Pollutants Generated within Underground Expressways

강혜진

한국도로공사 도로교통연구원 기후에너지환경연구실

증가하고 있는 자동차로 인한 교통 혼잡의 해결을 위하여 도로의 신설과 확장을 지속적으로 계획 실행하고 있으나 수평적인 확장은 점차 한계에 다다르고 있다. 최근에는 이러한 한계를 지하공간을 활용한 지하도로 사업 추진으로 해결하려는 시도가 이루어지고 있다. 지하도로란 국토의 효율적인 활용 차원에서 지상부 도로의 교통체증 문제 해소, 대기오염·소음 저감 등 환경개선 및 도시재생 등을 목적으로 지하공간에 건설되는 도로로 정의된다. 국토교통부는 「제2차 고속도로 건설계획(2021~2025)」을 통해 경부고속도로(서울 한남-화성 동탄), 수도권제1순환고속도로(경기 퇴계원-성남 판교), 경인고속도로(인천 남청라-서울 신월) 등을 지하화하는 방안을 발표한 바 있다. 계획 중인 지하고속도로는 도심부나 인근을 지나가고 도로연장이 19~32 km의 초장대 길이로 구간별 IC가 존재하며 환기를 위한 배출구가 계획됨에 따라 지하도로 내부 및 외부의 대기환경 관리 방안이 터널보다 더 중요한 사항이다. 따라서 본 연구에서는 고속도로에서 운영되고 있는 1 km 이상 장대터널을 대상으로 하여 발생되는 대기오염물질의 농도를 내부와 외부에서 측정하여 내외부 농도의 상관성 및 영향 분석을 통하여 건설되는 초장대 지하도로 내부에서 발생할 수 있는 대기오염물질로 인한 외부지역에 미치는 영향을 파악하고 평가하는데 기초 자료를 활용하며, 적용되는 환기시설 및 대기오염물질 저감 시설의 적정성을 평가할 수 있는 자료로 사용하고자 하였다.

사사 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었음(과제명: 초장대 K-지하고속도로 인프라 안전 및 효율 향상 기술 개발. 과제번호 RS-2024-00416524).

PD18

Development and Application of Local-Source-Adjusted CWT Methods in a Coastal Industrial City

Phuoc Tan Tran, 주정태, 최성득

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

Conventional concentration-weighted trajectory (CWT) analysis is used to identify potential source regions associated with long-range transport, but local concentration enhancements can distort regional source patterns. Local-source-adjusted CWT (LSA-CWT) methods were applied to SO_2 and CO concentrations measured at five air quality monitoring stations in Pohang in 2025, as both pollutants are strongly influenced by industrial emissions. Local influences and their directions were identified using the conditional bivariate probability function (CBPF) and ⊿CBPF. Two LSA-CWT approaches were applied: trajectory exclusion (TE), which removed locally influenced trajectories, and residual adjustment (RA), which corrected local enhancements. CBPF showed the strongest local influence at Daesong-myeon, southwest of the POSCO Pohang Steelworks, under northeasterly winds. Local influence was also observed at Daedo-dong and Songdo-dong, west of the steelworks, and at Ocheon-eup, south of the steelworks. For both SO_2 and CO, conventional CWT showed different local directional patterns depending on station location. After TE and RA, these differences decreased, spatial patterns became more consistent among stations, and far-field patterns were maintained. LSA-CWT reduced the effects of local sources on CWT results and more clearly identified regional transport patterns.

PD19

Emission Rates and Composition Emitted from Pinus Densiflora by PM Exposure

Mahshad Ranjbaran, 정민찬, 천소현, 오용환, 김대현, 김나현, 김서현, 손윤석

국립부경대학교 지구환경시스템과학부

Trees are well-known for their capacity to mitigate air pollution, a potential that varies significantly among different species. Conversely, trees emit biogenic volatile organic compounds (BVOCs) that can react with ozone and other atmospheric constituents to form secondary pollutants, ultimately impacting human health. Particulate matter (PM) pollution has become a major environmental challenge globally, prompting many governments to implement tree-planting campaigns as a mitigation strategy. Although trees act as sinks for air pollutants, their BVOC emission patterns and chemical composition can be significantly altered under high PM conditions. While previous studies have investigated the effects of high PM concentrations on BVOC profiles, critical knowledge gaps remain regarding concentration-dependent responses. To address these limitations, this study investigates the effects of varying concentrations of simulated PM on Pinus densiflora. We evaluated changes in BVOC emission rates and composition across different PM levels. In the experimental setup, a Tedlar bag chamber was used for PM treatment, exposing plants to low, medium, and high PM concentrations generated via aerosol generator. Post-treatment sampling was conducted using a dynamic enclosure chamber, followed by analysis via Thermal Desorption-Gas Chromatography-Mass Spectrometry (TD-GC-MS) to determine emission rates and BVOC composition.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 「CLEAN-AIR 기술개발」 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RS-2026-25502680).

PD20

서울시 자치구별 오존농도와 시공간 이동 특성 분석

Analysis of Ozone Concentration and Spatiotemporal Transport Characteristics in Seoul Districts

함수한, 전혜준, 신성균, 조가영, 송민영

서울연구원 지속가능연구실

최근 서울의 미세먼지 농도는 지속적으로 개선되어 감소 추세를 보이는 반면, 오존(O_3) 농도는 지속적으로 상승하고 있다. 오존은 전구물질인 휘발성유기화합물(VOCs)과 질소산화물(NO_X)이 대기 중에서 광화학 반응하여 생성되는 물질로 전구물질의 농도, 일사량, 기상 및 지형 등 복합적인 요인의 영향을 받는다. 서울은 자치구별 전구물질 배출사업장 개수가 최소 29개소에서 최대 382개소로 약 13배의 편차를 보이며, 최근 3년 평균 오존농도 역시 최소 39.7 ppb에서 최대 47.4 ppb로 지역적 편차가 나타난다. 그러나 기존 연구들은 주로 서울 전체나 수도권 단위의 광역적 분석으로 진행되어, 자치구별 세부 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 최근 3년(2021~2023년) 에어코리아의 측정 자료와 국가 미세먼지 정보센터 배출량 통계(CAPSS), 서울시 열린 데이터 광장의 데이터를 활용하여 서울시의 25개 자치구별 오존농도와 전구물질 배출량 등을 확인하였다. 첫째, 자치구별 전구물질 배출량은 중구, 금천구, 강남구 등에서 높게 나타났으나 평균 오존농도는 강북구, 도봉구, 종로구 등에서 높게 나타났다. 둘째, 고농도 오존 발생일의 자치구별·시간대별 오존농도 분석을 통해 오존농도가 서쪽 자치구에서 동쪽 자치구로 이동하는 시공간적 패턴을 확인하였다. 셋째, 오존농도는 기온과 양의 상관관계로 나타났으며, 풍향 및 풍속 조건에 따라 오존농도 분포와 이동에 영향이 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 향후 서울시의 오존 관리가 자치구별 맞춤형 관리로 진행되어야 함을 시사한다.

PD21

산불 배출이 배경대기농도에 미치는 영향: 안면도 지구대기감시소 관측자료 분석을 바탕으로

Impact of Wildfire Emissions on Background Concentrations: Analysis Based on Observations from the Anmyeondo Global Atmosphere Watch (GAW) Regional Station

이은아, 한종헌[1)], 오상민[1)], 유희정[1)], 김영아[1)], 임세희

충남대학교 환경IT융합공학과, [1)]국립기상과학원 지구대기감시연구과

산불은 짧은 시간에 다량으로 온실기체 및 에어로졸 등을 대기 중으로 배출한다. 그중에서 블랙카본(black carbon, BC)은 태양복사를 흡수하여 양의 복사강제력을 가진 에어로졸로 분류되고 있다. 본 연구에서는 안면도 지구대기감시소에서 관측한 7년간의 대기오염물질 자료를 활용하여 산불이 배경지역에 미치는 영향을 정량화하고 평가하였다. 발생한 산불 중 안면도에 영향을 준 산불은 NOAA HYSPLIT 모델링을 통해 통계적으로 선정하였다. 2017년부터 2023년까지 피해면적이 0.1 ha을 초과하는 전국 산불 중에서 안면도에 영향을 준 산불은 총 113개이며, 대체로 지역 배출물질과 혼합되어 8시간 이내로 안면도에 도달하였다. 비산불영향 대비 산불영향의 에어로졸 농도 증가율은 산란특성(OC, $b_{scat,550}$)이 51~90%, 흡수특성(eBC, $b_{abs,550}$)이 34~41%로, 산란 특성의 기여도가 더 높았다. 산불로 인한 광흡수 유기탄소(갈색탄소, Brown Carbon) 배출과 혼합상태 변화에 따른 BC의 광흡수특성 변화는 지역적 및 국지적 온난화를 야기할 수 있다. 또한, 산불 영향의 광흡수성 에어로졸은 75퍼센타일 이상인 구간에서 증가하는 추세가 뚜렷하여, 산불 증가가 국가의 배경농도에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

사사 이 자료는 기상청 국립기상과학원「기상업무지원기술개발연구」"황사·연무 감시 및 예보기술 개발(KMA2018-00521)"의 지원으로 생산되었으며, 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2026-25475619314820926400001), 교육부의 재원으로 한국연구재단의 4단계 BK21 사업 지원, 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경공단의 통합환경관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

PD22

부산항 대기 중 PCBs와 PAHs의 여름·가을철 오염 특성과 잠재적 오염원 파악

Contamination Characteristics and Potential Source Identification of Atmospheric PCBs and PAHs in Busan Port during Summer and Fall

배효정, 고민지, 이호영, 최성득

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

폴리염화비페닐(PCBs)은 과거에 상업적인 용도로 사용된 이후 환경에 잔류하다가 휘발되거나 연소 과정을 통해 대기로 유입될 수 있다. 한편, 다환방향족탄화수소(PAHs)는 주로 화석연료의 불완전연소 과정에서 배출된다. 이러한 PCBs와 PAHs는 항만에서도 많이 배출될 것으로 예상되지만, 이와 관련한 대기 모니터링은 부족한 실정이다. 부산항은 선박수리시설이 밀집한 지역으로, 용접, 도장, 선박 운항 등으로 인해 PCBs와 PAHs가 배출될 수 있다. 본 연구에서는 부산항 16개 지점에 수동대기채취기(Passive Air Sampler: PAS)를 설치하여 2025년 여름철과 가을철 시료를 채취하였으며, 20종 PAHs와 36종 PCBs를 분석하였다. PAH 총 농도는 4.4~354 ng/m^3로, phenanthrene (Phe), fluoranthene (Flt), pyrene (Pyr) 순으로 저분자량 PAHs가 높은 비중을 차지하였다. PCB 총 농도는 20.8~143 pg/m^3로, 두 계절 모두 염소 4개가 치환된 동족체(TeCB)가 총 PCB 농도의 약 40%를 차지하였다. 주성분 분석 결과, 선박수리소 내부 지점에서는 고분자량 PAHs의 기여가 높았으며, 연소 기원 성분의 기여가 높았다. 진단비 분석 결과에서도 연료 연소가 주요 배출원으로 나타났고, 특히 수리소 내부 지점에서 그 영향이 크게 나타났다. 본 연구에서는 부산항 내 PCBs와 PAHs의 공간적 오염 특성을 파악하였으며, 항만의 배출 특성을 고려한 오염물질 관리의 필요성을 제시하였다.

사사 본 연구는 해양수산부의 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(KIMST-20220534).

PD23

남극 세종과학기지에서 관측된 대기 중 암모니아 연간 변동 특성

Annual Variability of Atmospheric Ammonia Concentration at King Sejong Station, Antarctica

오승미[1),2)], 김연태[2)], 장은호[2)], 박지연[2)], 윤영준[2)], 정창훈[3)], 김용표[4)], 이지이[1)]

[1)]이화여자대학교 환경공학과, [2)]극지연구소 해양대기연구본부, [3)]경인여자대학교 보건의료행정학과, [4)]서울대학교 보건환경연구소

남극과 같은 청정 대기에서 가스상 암모니아(NH_3)는 대기 중 황산과 결합하여 새로운 입자 형성(New particle formation, NPF)을 촉진하고, 구름응결핵(Cloud condensation nuclei, CCN) 생성에 관여하는 주요 염기성 전구 물질로 알려져 있다. 그러나 기존 남극 암모니아 관측 연구는 1~2개월 이내 단기 집중 관측에 국한되어 있으며, 계절성 등을 포괄하는 연간 변동 특성에 대해서는 아직 보고된 바가 없다. 본 연구에서는 2025년 1월부터 남극 세종과학기지에서 Off-Axis Integrated-Cavity Output Spectroscopy (ICOS) 방식의 암모니아 분석기를 이용하여 대기 중 NH_3 농도를 1초 해상도로 1년간 연속 관측하였다. 관측 결과, 월평균 NH_3 농도는 동계기간(5월~8월)에 감소하고 하계기간(12월~3월)에 증가하는 뚜렷한 계절적 변동을 보였으며, 특히 하계기간에는 간헐적으로 수십 ppb를 초과하는 고농도 사례가 다수 관측되었다. 고농도 사례는 주로 풍속이 낮은(~4 m/s) 남풍 계열 바람이 유입될 때 발생하였으며, 이는 세종기지 남동쪽에 위치한 남극 특별 보호구역(Narebski Point, ASPA 171)의 펭귄 번식지 방향과 일치하여 해당 지역이 주요 국지 배출원일 가능성을 시사한다. 향후 Dimethyl sulfide(DMS), 에어로졸 수농도 및 CCN 자료를 연계한 NPF 이벤트 분석을 통해 암모니아가 남극 연안 대기 입자 생성에 미치는 영향을 정량화 할 계획이다.

사사 본 논문은 한국연구재단의 재원으로 과학기술정보통신부의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-24683148).

PD24

이동식 측정을 활용한 여수국가산업단지 내 오존 전구물질 Hot-spot 파악 및 배출원 기여도 분석

Mobile Measurement-Based Identification of Ozone Precursor Hot-Spots and Source Contribution Analysis in the Yeosu National Industrial Complex

고원석, 이현서, 이남혁[1)], 도현석, 김지민, 최순혁, 김동현, 곽경환

강원대학교 환경학과, [1)]강원대학교 생명·환경융합학부

오존(O_3)은 대기 중에서 O_3 전구물질인 휘발성유기화합물(VOCs)과 질소산화물(NOx)이 햇빛과 반응하여 생성되는 2차 오염물질이다. 최근 O_3 전구물질의 배출량은 감소하는 추세이지만, O_3 농도는 지속적으로 증가하는 추세를 보인다. 이는 O_3의 생성 과정의 비선형적 특성에 기인하며, 배출 특성에 따라 그 생성률이 크게 달라지기 때문이다. 이러한 점을 고려할 때 오존 생성 전구물질의 배출 지역 식별 및 배출원 기여도를 정량적으로 산정하여 관리할 필요가 있다. 연구 대상 지역은 여수국가산업단지이며, 산업단지 및 화물 트럭 등의 배출원이 존재한다. 연구 대상 기간은 2026년 8월 10일~8월 20일이며, 차량에 O_3, VOCs, NOx 센서를 탑재하여 일정한 경로를 따라 반복적으로 이동식 측정을 수행하였다. 측정자료는 10 m 단위로 격자화하여, 배출 지역 선정 및 기계학습 입력변수로 활용하였다. 산업단지 내 업종별 O_3 전구물질 배출 기여도는 기계학습 기반 SHAP (Shapley additive exPlanations) 기법을 통해 계산하였다. 본 연구 결과, 산업단지 내 석유화학 시설이 VOCs 배출 지역으로 식별되었으며, 배출 기여도는 석유화학 시설에서 VOCs가, 도로에서 NOx가 높게 나타났다. 해당 결과를 통해 이동식 측정을 활용한 O_3 전구물질 배출 지역 특성을 파악할 수 있는 방법론을 구축하였으며, 배출 지역과 배출원 기여도를 제시하였다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지역맞춤형오존관리기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25505137).

PD25

교통 특성과 기상 조건에 따른 서울시 암모니아 농도 변화 및 추정 모델 개발

Variations in Ammonia Concentration with Traffic and Meteorological Conditions in Seoul and Development of an Estimation Model

조범기[1], 허국영[3], 박승명[3], 송미정[1,2]

[1]전북대학교 기후환경에너지융합학과, [2]전북대학교 지구환경과학과, [3]국립환경과학원 대기환경연구과

차량에서 발생하는 암모니아는 휘발유 및 LPG 차량의 삼원촉매(TWC)와 경유 차량의 선택적촉매환원장치(SCR)에서 주로 배출되며, 대기 중에서 황산 및 질산과 반응하여 2차 무기 에어로졸을 생성하는 주요 원인으로 작용한다. 특히 도로변에서는 배경 농도보다 높은 농도가 나타날 수 있어 실측 자료를 이용한 평가가 필요하며, 이를 통해 교통 특성과 기상 조건이 암모니아 농도에 미치는 영향을 비교 및 구분하여 제시할 수 있다. 또한, 상시 관측이 어려운 지역의 농도 추정 및 평가에 사용할 수 있다. 이에 본 연구에서는 서울 도심의 암모니아 농도와 도로교통 및 기상 특성의 관계를 분석하고, 농도 추정 모델을 구축하여 최적 모델을 선정하였다. 2022년 01월부터 2025년 03월까지 서울 은평구에서 측정된 시간별 암모니아 농도와 측정 지점 인근 기상자료 및 도로의 교통 특성 자료를 사용하였다. 교통량 및 주행속도와 암모니아 농도의 관계는 시간별, 일별, 요일별 변화 및 농도 구간 분할을 통해 비교하였다. 이어 기계학습 기법(XGBoost, LightGBM)과 딥러닝 기법(LSTM, TabNet, TabICL)을 활용하여 추정 모델을 구축하였다. 자료는 시간 순으로 분할하여 학습 및 검증에 사용하였으며, 각 모델 평가는 결정계수(R^2)와 RMSE를 이용하였다. 최종 선정된 모델에는 SHAP 분석을 적용해 인자별 기여도를 산출하였다. 개발된 모델은 도로교통과 기상 조건이 암모니아 농도에 미치는 영향을 정량적으로 구분하는 데 활용될 수 있으며, 도시 대기질 관리를 위한 기초 자료를 제공한다.

PD26

GEMS와 Optical Flow 기법을 이용한 화산 SO_2 플룸 이동장 및 유효 수송 고도 추정

Estimating SO_2 Volcanic Plume Motion and Effective Layer Height from GEMS Optical Flow

오승주[1], 김 준[1,2], 이원진[3], 신선아[3], 차혜지[1], 강 욱[1]

[1]연세대학교 대기과학과, [2]연세 이윤재 펠로우, [3]국립환경과학원 환경위성센터

화산 분화로 방출된 SO_2 플룸은 장거리 이동을 통해 넓은 지역의 대기질에 영향을 줄 수 있어, 이동 특성과 유효 수송 고도의 정량적 파악이 중요하다. 천리안위성 2B호에 탑재된 정지궤도 환경위성탑재체 GEMS는 동아시아 지역의 SO_2 컬럼 농도를 1시간 간격으로 관측할 수 있어 화산 플룸이 수송되는 과정을 높은 해상도로 모니터링할 수 있다. 기존에는 위성 관측과 외부 바람장을 함께 이용해 플룸의 이동을 해석하는 경우가 많았지만, 이러한 방법은 플룸 고도에 대한 가정이나 기상장 자체의 불확실성에 영향을 받을 수 있다. 본 연구에서는 연속된 영상으로부터 픽셀 단위로 움직임을 추적하는 'Optical Flow' 기법을 GEMS SO_2 컬럼 농도 데이터에 적용하여 화산으로부터 방출된 SO_2 플룸의 이동장을 정량적으로 산출한다. 또한, 이를 ERA5 기압면별 바람장과 비교하여 플룸의 유효 수송 고도를 추정한다. 추정된 수송 고도는 IASI 또는 TROPOMI 등 다른 위성에서 산출된 SO_2 플룸 고도 자료와 비교하여 평가할 수 있다. 본 연구는 GEMS를 이용하여 SO_2 플룸의 이동 특성을 정량화하고 수송 고도를 추정할 수 있는 방법을 제시하며, 향후 다른 오염물질의 수송 고도 추정에도 활용될 수 있다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-01-02-029).

PD27

라만 라이다를 이용한 사업장 굴뚝 배출 메탄 및 이산화탄소 배출량 측정

Measurement of Methane and Carbon Dioxide Emissions from Industrial Stacks Using Raman Lidar

박선호[1], 이한림[1),2)], 윤문상[1)]

[1)]노바스콥(주), [2)]부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공

메탄(CH_4)과 이산화탄소(CO_2)의 정확한 배출량 산정은 온실가스 감축 정책과 탄소 배출량 거래제의 신뢰성을 확보하는 데 필수적이다. 그러나 기존의 상향식 배출량 산정 방식은 활동자료와 배출계수 등의 간접 지표에 크게 영향을 받아 불확실성이 높은 것으로 알려져 있으며, 지점측정 장비는 광범위한 지역에 분포한 다수의 배출원을 효율적으로 감시하는데 높은 비용이 요구된다. 본 연구에서는 CH_4와 CO_2를 원거리에서 동시에 측정할 수 있는 라만 라이다를 이용하여 다양한 산업시설에서 배출되는 CH_4와 CO_2의 배출량을 측정해 보았다. 본 연구에서 개발된 라만 라이다는 355 nm의 ND:YAG 레이저를 송신하고 Rayleigh-Mie 산란 신호와 CH_4, CO_2, N_2의 라만산란 신호를 동시에 수집하는 4채널 시스템으로 구성된다. 현장 관측은 Haman Incineration facility, Seoul LNG power plant, Yeosu Industrial Complex에서 수행하였다. Haman Incineration facility와 Seoul LNG power plant는 배출원으로부터 각각 약 430 m와 1000 m 떨어진 지점에 라이다를 설치하여 거리별 혼합비와 굴뚝 위치에서의 배출량을 산출하였다. 관측된 CH_4 배출량은 서울 LNG 발전소에서 평균 72±27 kg h^{-1}이었으며, CO_2 배출량은 함안 소각시설과 서울 LNG 발전소에서 각각 최대 1709 kg h^{-1}, 3708 kg h^{-1}이었다. Yeosu Industrial Complex에서는 스캐닝 관측을 통해 서로 다른 두 사업장의 Flare stack에서 배출되는 CH_4 및 CO_2의 배출 혼합비와 배출량을 측정하였으며, 두 플레어 스택에서 나타난 배출 특성의 차이는 각 사업장의 공정 특성과 부합하는 것으로 확인되었다. 본 연구는 라만 라이다를 이용해 다수의 배출원에서 CH_4와 CO_2를 동시에 원격 측정하고 배출량을 높은 정확도로 정량화할 수 있음을 보여준다.

사사 본 연구는 2025년도 중소벤처기업부의 창업성장기술개발사업 지원에 의한 연구임(RS-2025-23323846).

PD28

ASIA-AQ 캠페인 기간 동아시아 지역에서 관측된 질산염에 의한 광물 먼지 빙핵화 효율 저하

Nitrate-driven Loss of Ice-nucleating Efficiency of Mineral Dust in the Asian Continental Outflow during the ASIA-AQ Campaign

박도현, 이승복, 김경환, Ottmar Möhler[1)], Tian Ping[2)], 김지환, 김나진

한국과학기술연구원 기후탄소순환연구단, [1)]Karlsruhe Institute of Technology, [2)]Beijing Weather Modification Center

빙정핵입자(INP)는 혼합상 구름에서 1차 빙정 생성을 개시하여 구름 수명과 강수, 복사강제력에 영향을 미친다. 동아시아 지역에서는 수송된 광물 먼지가 INP를 지배하는 것으로 알려져 있으나, 수송 중 인위적 2차 무기 에어로졸에 의한 광물 먼지 표면 노화가 빙핵화 효율에 미치는 영향에 대한 관측 기반 근거는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 ASIA-AQ 캠페인(2024년 2~3월) 기간 서울에서 PINE으로 혼합상 구름 온도 범위의 INP 수농도를 연속 측정하였으며, 이는 한반도 도시대기 최초의 체계적 고시간분해능 INP 관측이다. 온라인 XRF(원소성분), SP-AMS(화학조성), SMPS-APS(입경별 수농도) 관측을 병행하였다. INP 수농도는 캠페인 기간 100배 이상 변동하였고, 먼지 추적자 Fe와는 유의한 상관(r = 0.50 (−21℃))을 보인 반면 오염 추적자 Pb와는 낮은 상관을 보여(r=0.05), 수송된 먼지량에 의해 지배됨을 확인하였다. Fe는 조대입자 수농도와 강한 상관(r = 0.84)을 보여 먼지 지표로 검증되었다. Fe를 통제한 회귀분석 결과, 질산염 농도가 높을수록 단위 먼지당 빙핵화 효율이 −18 ~ −27℃에서 유의하게 낮았고(log-log 기울기 −0.10 ~ −0.16), 황산염은 일관된 효과를 보이지 않았다. 즉 먼지 수송량은 INP 개수를, 질산염 중심의 노화는 단위 먼지당 효율을 각각 조절하였다. 황산화물 배출 감소로 질산염 비중이 커지는 최근 동아시아 대기에서, 이러한 노화는 먼지당 빙정 생성을 줄여 혼합상 구름의 과냉각 액적 유지와 빙정 강수 억제로 이어질 수 있다.

사사 이 성과는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국과학기술연구원의 지원을 받아 수행된 연구임(26E0111).

PD29

원거리 메탄 및 이산화탄소 혼합비 측정 라만 라이다 개발 및 성능평가

Development and Performance Evaluation of Raman Lidar for CH_4 and CO_2 Mixing Ratio Measurements

윤문상[1], 이한림[1),2)], 박선호[1]

[1]노바스콥(주), [2]부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공

본 연구에서는 주요 온실가스인 메탄 및 이산화탄소의 혼합비를 원거리에서 동시에 측정할 수 있는 라만 라이다를 개발하고 셀 실험과 지점측정장비와의 동시 관측을 통하여 측정 성능 평가를 수행하였다. 추가적으로 현장 관측을 수행하여 굴뚝에서 배출되는 메탄과 이산화탄소의 혼합비를 측정하였다. 본 연구에서 개발된 라만 라이다는 송신부로 355 nm의 ND:YAG 레이저를 채택하였으며, 수신부로는 직경 150 mm의 Schmit-Cassegrain식 망원경과 광 수신을 위한 Photomultiplier tube (PMT)를 채택하였다. 가스 셀 실험에서 라만 라이다로 측정한 CH_4와 CO_2 라만 신호는 셀 내부의 실제 농도 변화에 높은 상관(R = 0.99~1.00)을 보이는 것을 확인하였다. 라만 라이다와 지점측정장비로 측정된 혼합비 자료 간의 상대오차가 CH_4에서 6.76%, CO_2에서 0.06%로 라이다와 지점측정장비 사이에 높은 측정 일치도를 보였다. 현장 관측은 소각장과 LNG 발전소를 대상으로 관측을 수행하였다. 각 사업장의 굴뚝으로부터 430 m와 1000 m 떨어진 위치에 라만 라이다를 설치하여 거리별 혼합비를 측정하고, 굴뚝에서 배출되는 메탄과 이산화탄소를 정확한 위치에서 탐지하였다. 소각장 배출 이산화탄소의 최대 혼합비는 856.05±551.70 ppm이었으며 LNG 발전소에서 배출된 이산화탄소 및 메탄의 최대 혼합비는 각각 47.18 ppm과 329.33 ppm이였다. 추가적으로 이산화탄소 인공 누출 사이트에서 관측을 수행하였을 때, 200 m 지점에서 배출되는 이산화탄소 누출을 정확히 탐지하였다. 본 연구는 라만 라이다를 이용하여 원거리에서 메탄 및 이산화탄소의 혼합비를 높은 정확도로 측정할 수 있음을 보여주며, 굴뚝 배출량 산출의 핵심 변수인 배출농도 정보를 측정을 기반으로 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

사사 본 연구는 2025년도 중소벤처기업부의 창업성장기술개발사업 지원에 의한 연구임(RS-2025-23323846).

PD30

온도와 오존의 개별·복합 스트레스에 따른 식생 탄소순환 변화와 biogenic SOA 생성 변화 연구

Changes in Plant Carbon Cycling and Biogenic Secondary Organic Aerosol Formation under Individual and Combined Temperature and Ozone Stress

이혜지[1),2)], 예익주[1)], 이석현[1),2)], 이지원[1)], 박도현[1)], 김나진[1)], 이승복[1)], 김경환[1)]

[1]한국과학기술연구원 기후탄소순환연구단, [2]고려대학교 지구환경과학과

기후변화와 대기오염은 식물에 복합적인 환경 스트레스를 유발하여 CO_2 흡수 및 생물기원 휘발성 유기화합물(biogenic volatile organic compounds, BVOCs) 배출을 변화시킬 수 있다. 식물에서 배출된 BVOCs는 대기 중 산화반응을 통해 생물기원 2차 유기에어로졸(biogenic secondary organic aerosol, BSOA)을 생성하며, BSOA는 대기질과 구름 형성 및 기후피드백에 큰 영향을 끼칠 수 있다. 본 연구에서는 온도와 오존(O_3)의 개별 및 복합 스트레스 조건에서 식물의 CO_2 및 BVOC 플럭스를 측정하고, 이를 탄소 질량으로 환산하여 식물의 탄소 흡수와 방출 변화를 평가하고자 한다. 예비 온도 상승 실험에서는 온도가 증가함에 따라 식물 상단부의 순 CO_2 흡수가 감소하였으며, 약 34°C 이상의 고온 조건에서 BVOC 배출 증가가 뚜렷하게 나타났다. 특히 monoterpenes, isoprene 및 sesquiterpenes가 주요 증가 성분으로 확인되었다. 향후 식물챔버에서 배출된 BVOCs를 potential aerosol mass-oxidation flow reactor (PAM-OFR)에 도입하고, 산화 노출량을 단계적으로 변화시켜 BSOA의 생성과 산화 노화 과정을 평가할 예정이다. 또한 7파장 Aethalometer를 이용하여 BSOA의 파장 의존적 광흡수 특성을 분석하고, INSEKT 기반 액적 동결 분석을 통해 산화 노화에 따른 빙정핵 활성을 평가할 계획이다. 본 연구는 고온 및 O_3 스트레스에 의한 식물 탄소 교환과 BVOCs 배출 변화가 BSOA 생성 및 기후 관련 특성에 미치는 영향을 이해하기 위한 실험적 기반을 제공할 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 한국과학기술연구원 주요 사업의 지원을 받아 수행됨(대기환경복합대응연구사업 과제번호: 26E0071).

PD31

VOCs 함유량 및 오존생성잠재력을 고려한 생활소비재 품목군별 우선관리 대상 선정 프로그램 개발

Development of a Prioritization Program for Consumer Product Categories Based on VOC Content and Ozone Formation Potential

이상훈, 이동은, 노준영, 박종건, 김승진

주식회사 휴엔릭스 첨단기술연구소

국내에서는 대기질 개선을 위한 다양한 정책이 추진되고 있으나, 오존의 경우 계절적·지역적 특성과 전구물질 간 복합적인 광화학 반응으로 인해 관리에 어려움이 있다. 이러한 오존의 생성에 관여하는 VOCs는 화학종별 반응성이 상이하여 동일한 양이 배출되더라도 기여도가 달라질 수 있으므로, VOCs 함유량과 성분별 생성 반응성을 함께 고려한 평가가 필요하다. 특히 생활소비재는 일상적으로 널리 사용되며 다양한 VOCs를 함유하고 있어 오존 생성에 영향을 미칠 수 있고, 제품 유형과 용도에 따라 VOCs 성분과 함유량이 상이하므로 품목군 및 제품별 오존 생성 기여도를 정량적으로 분석할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 선행연구를 통해 확보된 생활소비재 품목별 VOCs 배출량 기초자료를 바탕으로 우선관리 품목군을 선정하고, 해당 품목군의 제품을 대상으로 물질안전보건자료(MSDS)를 활용한 제품별 구성물질 데이터베이스를 구축하였다. 또한 구축된 데이터베이스를 기반으로 제품 및 품목군별 VOCs 성분과 함유량을 분석하고, California Air Resources Board (CARB)의 물질별 Maximum Incremental Reactivity (MIR)를 적용하여 품목군 및 제품의 오존생성잠재력(OFP)을 산정하는 프로그램을 개발하였다. 이를 통해 제품별 VOCs 함유량 및 MIR을 연계하여 품목군 및 제품 OFP를 비교·평가하고, 오존 생성 기여도가 높은 품목군 및 제품을 우선관리 대상으로 식별하도록 하였다.

사사 본 연구는 2025년도 중소벤처기업부 스마트 제조혁신 기술개발사업(R&D)의 재원으로 「스마트센서 기반 사용자 맞춤형 인체위험 예측 안전관리 시스템 개발 및 실증」 사업(과제번호: RS-2025-25442617)의 지원을 받아 수행된 연구임.

PD32

도심과 배경 지역 대기 중 입자상 니트로소화합물의 계절별 농도 특성 및 생성 기여인자 분석

Seasonal Characteristics and Source Contribution Analysis of Particulate Nitrosamines at Urban and Background Sites

정수린, 송미정[1], 이태형[2], 신혜정[3], 허국영[4], 최나래

강원대학교 환경공학과, [1]전북대학교 지구환경과학과, [2]한국외국어대학교 환경학과, [3]국립환경과학원 위성센터, [4]국립환경과학원 대기환경연구과

초미세먼지($PM_{2.5}$) 내 니트로소화합물은 발암성이 있어 대기환경 및 공중보건상 중요한 오염물질이다. 니트로소화합물은 대기 중 아민의 니트로소화 및 니트로화 반응으로 생성되기도 하고, 산업 공정 및 연소 과정 등의 1차 배출을 통해서 직접 배출되기도 한다. 본 연구는 2024~2025년 안산(도심 산업지역)과 백령도(배경지역)의 $PM_{2.5}$ 시료에서 니트로사민 7종과 니트라민 2종의 계절별 농도 특성을 분석하고, 특히 니트로사민에 해당하는 N-nitrosodibutylamine (NDBA)의 생성 기여인자를 추정하고자 하였다. 안산의 총 농도는 봄철(2.77±1.73 ng/m^3)이 가장 높았으며 여름철(2.73±2.60 ng/m^3), 가을철(2.51±1.40 ng/m^3)순이었고, 백령도에서는 봄철(2.46±2.15 ng/m^3), 가을철(2.35±1.37 ng/m^3), 여름철(1.82±0.72 ng/m^3) 순이었다. 두 지점 모두 NDBA의 농도가 가장 높았다. NDBA와 다른 대기오염물질의 농도를 활용한 회귀트리(Classification And Regression Tree, CART) 분석 결과, 안산에서는 SO_2 (82.9%), 백령도에서는 OC (48.2%), RH (26.4%), NO (25.4%)가 NDBA의 농도 변동을 우선적으로 설명하였다. 반면 에어로졸 pH와 수분함량(Aerosol Liquid Water Content, ALWC)은 두 지점 모두 기여가 나타나지 않았으며(중요도 0~1.2%), 편회귀 분석에서도 pH는 유의하지 않았다. 이는 안산의 니트로소화합물 농도가 1차 배출의 영향을 주로 받았고 백령도에서는 2차 생성의 기여가 상대적으로 컸을 것을 시사한다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 고농도 오존 생성 원인 규명 고도화 사업의 지원을 받아 연구되었음(RS-2026-25505137).

PD33

다양한 평가지표를 활용한 2019-2025년 서울 지역 초미세먼지 단기예보 정확도 분석

Analysis of Short-term $PM_{2.5}$ Forecast Accuracy in Seoul during 2019-2025 Using Multiple Evaluation Metrics

연바다, 박승부

서울시립대학교 환경공학과

초미세먼지($PM_{2.5}$)는 인체 건강에 유해한 주요 대기오염물질로, 고농도 발생에 따른 피해를 최소화하기 위해서는 지속적인 농도 관리와 신뢰도 높은 대기질 예보가 중요하다. 우리나라에서는 국립환경과학원 대기질통합예보센터에서 미세먼지(PM_{10}), 초미세먼지($PM_{2.5}$), 오존(O_3)의 농도를 '좋음', '보통', '나쁨', '매우 나쁨'의 4개 등급으로 구분하여 단기예보를 제공하고 있다. 특히 $PM_{2.5}$ 예보는 오늘(D+0), 내일(D+1), 모레(D+2)를 대상으로 제공되며, 이러한 대기질 예보는 고농도 초미세먼지 발생에 대한 선제적 대응과 국민의 의사결정을 위한 중요한 정보로 활용된다. 그러나 예보정확도는 평가 기준과 방법에 따라 다르게 해석될 수 있으므로 다양한 평가지표를 활용하여 이를 종합적으로 평가할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 2019~2025년 서울 지역의 $PM_{2.5}$ 단기예보 자료와 도시대기질측정망 관측자료를 이용하여 예보정확도를 평가하였다. 정확도(accuracy), 고농도 탐지확률(probability of detection), 오경보율(false alarm rate) 및 F1-score를 산출하고, 예보 등급별 정확도의 연도별 변화를 분석하였다. 또한 D+0, D+1, D+2 예보의 정확도를 비교하여 예보 시간에 따른 성능을 평가하고, 예보 등급과 관측 등급 간 혼동행렬(confusion matrix)을 분석하여 예보 등급별 오차 특성을 파악하였다. 이를 통해 2019~2025년 서울 지역 $PM_{2.5}$ 단기예보의 정확도를 예보 등급 및 예보 시간에 따라 종합적으로 평가하고자 하였다.

사사 본 연구는 환경부 "폐자원에너지화 재활용 전문인력 양성사업(YL-WE-22-001)"에서 지원받았으며 이에 감사드립니다.

PD34

UAV 대기질 모니터링의 정확도 향상을 위한 AI 기반 하강기류 영향 보정

AI-Based Calibration of Downwash Effects for Improving the Accuracy of UAV Air Quality Monitoring

서상덕, 고찬주, 김소연[1], 정무현[1),2)], 이재영[3),4)]

아주대학교 환경공학과, [1)]한국화학융합시험연구원 환경화학연구소 대기환경센터, [2)]고려대학교 보건안전융합과학과, [3)]아주대학교 환경안전공학과, [4)]아주대학교 인공지능학과

고해상도 대기질 모니터링을 위해 무인항공기(UAV)와 저비용 센서를 결합한 3차원 측정 시스템이 주목받고 있다. 그러나 탑재된 센서는 호버링 시 발생하는 하강기류 및 난류로 인해 측정 오차가 발생하며, 기상 조건에 따른 센서 드리프트 한계가 있다. 기존의 센서 위치 최적화나 단순 회귀식은 이러한 복잡한 비선형적 상호작용을 반영하기 어렵다. 이에 본 연구는 UAV 기반 대기질 측정 데이터의 신뢰성 향상을 위해 인공지능(AI)을 활용하여 하강기류 영향 보정 모델을 개발하였다. Matrice 300 RTK (DJI, China) 기체와 OA200M (ArimScience, Korea) 센서를 결합해 수집한 데이터를 기반으로 하강기류 영향을 정량적으로 평가하고, 최적의 보정 성능을 도출하고자 7개 머신러닝 모델(MLR, Lasso, Ridge, Random Forest, XGBoost, CatBoost, SVR)을 비교·평가하였다. 성능 평가는 coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), normalized mean error (NME) 지표를 활용했으며, SHapley Additive exPlanations (SHAP) 분석으로 센서 정확도에 영향을 미치는 주요 기상 변수를 규명하였다. AI 기반 보정 모델은 하강기류 오차를 효과적으로 저감함으로써, 향후 UAV 대기질 모니터링의 측정 정확도 및 신뢰성을 향상하는 데 기여할 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지역맞춤형 오존 관리 기술개발사업의 지원(RS-2026-25505137)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25480268).

PD35

스캐닝 라이다 시스템을 활용한 소규모 사업장 고농도 지역 선별

Identification of PM Hotspots in Small-Scale Industrial Facilities Using Scanning LiDAR System

성민경, 오세호, 이동휘, 박정민, 김관철

차세대융합기술연구원 첨단환경감시센터

굴뚝원격감시체계(TMS)는 1~3종 대규모 사업장에 주로 설치되어 소규모 사업장의 실시간 대기오염 배출 모니터링에는 한계가 있다. 본 연구는 대기 입자에 의한 빛의 후방산란 신호를 이용하는 원격측정 장비인 스캐닝 라이다를 활용하여 시흥·안산 산업단지의 고농도 지역과 소규모 사업장 배출 의심지역을 선별하고자 하였다. 2026년 4~5월 $PM_{2.5}$를 관측반경 5 km, 공간해상도 30 m로 연속 관측하고, 월평균 농도 분포, 지역별 바람장미 및 인근 사업장의 업종·배출시설 정보를 종합적으로 분석하였다. 국가대기측정망의 $PM_{2.5}$ 평균농도는 4월 27.3 $\mu g/m^3$에서 5월 19.4 $\mu g/m^3$로 28.9% 감소하였고, 스캐닝 라이다 기반 평균농도도 24.0 $\mu g/m^3$에서 20.1 $\mu g/m^3$로 16.3% 감소하였다. 그러나 4월에 도출된 8개 우심지역 중 7개 지역이 5월에도 유지되어, 전반적인 농도 감소에도 특정 지역의 반복적 고농도 배출 가능성을 확인하였다. 또한 고농도 그리드 기반으로 후보구역을 도출한 후, 지역별 바람장미를 참고하여 평균 풍향에 따른 배출 영향 가능 방향을 검토하고 인근 사업장의 업종 및 배출시설 유형을 종합하여 4월 12개, 5월 9개의 영세사업장을 월별 배출 의심 대상으로 선별하였다. 본 연구는 스캐닝 라이다가 지속 우심지역 관리와 소규모 사업장 현장점검 대상 선정의 근거자료로 활용될 수 있음을 제시한다.

사사 본 연구는 경기도 기후환경관리과 '대기오염원 감시 스캐닝 라이다 운영' 사업의 일환으로 수행된 연구임.

PD36

GPS 결측 조건에서 보정 모델에 따른 분류 성능 비교

Comparison of Correction Models for Measurement Environment Classification under GPS Data Gaps

윤현준, 정애란

한국전자기술연구원 AI융합가전연구센터

휴대용 환경센서와 GPS를 결합한 이동형 측정은 생활환경에서 개인의 오염물질 노출 변화를 파악하는 데 유용하지만, 지하공간과 건물 밀집지역에서는 GPS 결측·오차로 인해 위치 복원과 교통시설 분류의 정확도가 저하될 수 있다. 본 연구는 2025년 10월 13~17일 프랑스 리옹에서 약 30초 간격으로 수집한 1,423건의 자료(도보, 버스, 지하철, 트램; 51개 구간)를 대상으로 GPS 결측 보정 및 시설 분류모델의 성능을 비교하였다. GPS 좌표의 약 20%를 0.5, 1.5, 2.5, 5.0분 결측으로 생성하고, 선형보간과 Kalman Rauch-Tung-Striebel smoother로 위치를 복원하였다. 시설 분류에는 kNN, HMM 및 Random Forest를 적용하고 위치·이동·환경·시간 변수를 활용하였다. 2.5분 결측에서 Kalman smoother의 MAE와 RMSE는 43.5 m와 97.7 m로 선형보간(49.2 m, 114.5 m)보다 낮았다. 분류 정확도는 Random Forest가 71.5%로 가장 높았으며, 전체 결측시간의 평균 정확도도 70.9±3.8%로 다른 모델(48.5~50.9%)보다 우수하였다. 따라서 위치 복원에는 Kalman smoother가, 측정시설 재분류에는 다양한 변수를 함께 학습하는 Random Forest가 효과적인 것으로 나타났다.

PD37

휴대용 간이측정기를 이용한 프랑스 리옹 지역의 미세먼지 농도 특성 평가

Characterization of Particulate Matter Concentrations in Lyon, France, Using a Portable Low-Cost Sensor

윤현준, 정애란, 손성관

한국전자기술연구원 AI융합가전연구센터

대기환경측정망은 도시 배경농도 파악에 유용하지만 개인별 활동공간의 오염물질 노출을 평가하는 데 한계가 있다. 본 연구는 국내와 유사한 중위도 온대기후이며 지하철·트램·버스가 발달한 프랑스 리옹에서 2025년 10월 13~17일 교통환경별 미세먼지 특성을 분석하였다. 측정에는 β-ray 연속측정기와 비교하여 정확도 80% 이상으로 확인된 1등급 간이측정기와 GPS 모듈을 사용하였으며, 외기·도보·버스·지하철·트램에서 PM_{10}, $PM_{2.5}$, 온도, 습도 및 위치정보를 수집하였다. PM_{10}과 $PM_{2.5}$ 평균농도는 외기 15.5±5.1과 13.4±4.5 $\mu g/m^3$, 도보 13.1±10.7과 9.8±8.1 $\mu g/m^3$, 버스 7.1±9.9와 5.1±7.5 $\mu g/m^3$, 지하철 19.6±16.4와 14.8±12.1 $\mu g/m^3$, 트램 17.3±12.9와 13.5±10.9 $\mu g/m^3$로 지하철에서 가장 높았다. 지하역사별 PM_{10}은 Guillotière가 32.66±21.07 $\mu g/m^3$로 가장 높았고, Vieux Lyon 22.73±17.70 $\mu g/m^3$, Bellecour 20.43±18.51 $\mu g/m^3$ 순이었다. 본 결과는 국내 대기질과의 국가 간 비교 및 측정망을 보완하는 GPS 기반 이동측정 자료로서 향후 개인노출 평가기준 마련에 활용될 수 있다.

PD38

외부 대기환경이 운송 중 화물 공간의 미세먼지 및 온·습도에 미치는 영향

Effects of Outdoor Atmospheric Conditions on Particulate Matter Concentrations and Temperature-Humidity Characteristics in Cargo Compartments during Transport

윤현준, 이경일, 최철준

한국전자기술연구원 AI융합가전연구센터

외부 대기환경은 운송 중 화물 공간으로 유입되어 내부 미세먼지와 온·습도에 영향을 줄 수 있으나, 기존 운송환경 평가는 온도·진동·충격 중심으로 수행되어 내·외부 환경의 연계 특성에 관한 현장 연구가 부족하다. 본 연구에서는 일반 화물차의 외부, 운전석, 화물 공간 전·후방에 센서를 설치하고 3일간 $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$, 온도, 상대습도 및 3축 가속도를 실시간 측정하였다. 자료는 1분 중앙값으로 집계하여 내·외부 상관관계, 농도비(I/O ratio) 및 위치별 차이를 분석하였다. 외부와 화물 공간 전·후방 $PM_{2.5}$의 Spearman 상관계수는 각각 0.737과 0.721로, 외부 대기질이 내부 입자 농도의 주요 영향요인으로 나타났다. $PM_{2.5}$ I/O ratio는 전방 0.77~1.08, 후방 0.93~1.33이었으며, 후방의 $PM_{2.5}$와 $PM_{1.0}$은 모든 측정일에서 전방보다 높았다. 후방 상대습도도 전방보다 약 16~18%p 높아 위치별 환경 불균일성이 확인되었다. 이는 외부 대기 유입과 내부 온·습도 분포가 입자 환경 형성에 복합적으로 작용함을 보여준다. 따라서 단일 지점 측정만으로 화물 공간을 대표하기 어려우며, 외부와 화물 공간 전·후방의 미세먼지 및 온·습도를 통합적으로 모니터링할 필요가 있다.

사사 이 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00433255).

PD39

도시 및 연안 지역의 계절별 AI 모델에 따른 $PM_{2.5}$ 예측 특성 비교

Comparison of $PM_{2.5}$ Prediction Characteristics Across Seasonal AI Models in Urban and Coastal Areas

윤현준, 정애란, 최철준

한국전자기술연구원 AI융합가전연구센터

$PM_{2.5}$ 농도는 배출원, 지형 및 기상조건에 따라 지역별 변화 특성이 달라 동일한 예측모델에서도 성능 차이가 발생할 수 있다. 본 연구는 서울과 농도 분포가 유사한 광주, 농도와 변동성이 낮은 여수를 대상으로 지역 특성이 AI 모델의 예측성능에 미치는 영향을 분석하였다. 2015년 1월~2022년 12월 자료를 학습하고, 2023년 1월~2025년 4월 자료를 예측에 사용하였다. 전일 $PM_{2.5}$ 농도와 지역별 최대·최소값, 기온, 풍속, 상대습도 및 기압을 입력하여 계절별 LASSO, XGBoost, SVR, KNN, AdaBoost 및 Random Forest 모델을 구축하였다. $PM_{2.5}$ 평균은 서울 21.85±13.65, 광주 20.69±13.06, 여수 17.03±9.80 $\mu g/m^3$였다. 통합 평가에서 서울과 광주는 SVR이 각각 R^2 0.4816 및 0.5152, RMSE 8.8695 및 6.8841 $\mu g/m^3$로 가장 우수했고, 여수는 KNN이 R^2 0.4607, RMSE 6.3532 $\mu g/m^3$로 가장 양호하였다. 계절별 최고 R^2는 0.5015~0.5292로 유사했으나, 최적 모델과 계절은 지역별로 달랐다. 따라서 $PM_{2.5}$ 예측에는 전국 공통모델보다 지역별 농도 분포와 계절 특성을 반영한 모델 선정이 필요하다.

사사 이 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00433255).

PD40

국내 다지점 $PM_{2.5}$ 산화잠재력 비교: 2025년 봄철과 2026년 여름철

Multi-site Comparison of $PM_{2.5}$ Oxidative Potential in South Korea: Spring 2025 and Summer 2026

장정연, 이윤서, 한영지[1], 이지이[2], 이광열[3], 윤도영[3], 박정민[3], 조미라[3], 허국영[3], 강대일[3]

강원대학교 지오에코시스템융합학과, [1]강원대학교 생명·환경융합학부,
[2]이화여자대학교 환경공학과, [3]국립환경과학원

대기 중 초미세먼지($PM_{2.5}$)가 호흡기를 통해 체내로 유입되면 입자 성분의 산화환원 반응으로 활성산소종(reactive oxygen species, ROS)의 생성이 촉진된다. 이 과정에서 체내 항산화물질이 소모되면 산화스트레스가 발생하고 염증 반응과 세포 손상으로 이어질 수 있다. 따라서 $PM_{2.5}$의 건강위해성을 평가할 때에는 질량농도와 함께 입자의 산화 반응성을 고려할 필요가 있다. 산화잠재력(oxidative potential, OP)은 $PM_{2.5}$가 ROS를 생성하거나 항산화물질을 소모시키는 능력을 나타내는 지표이다. 본 연구에서는 호흡기 내벽액의 주요 항산화물질인 ascorbic acid(AA)와 glutathione(GSH), 산화환원 활성 성분과 반응하는 dithiothreitol (DTT)의 소모율을 이용하여 OP를 평가하였다. 2025년 4~5월에는 강원권(춘천), 경기권(안산), 수도권(서울)에서 시료를 채취하였고, 2026년 7~8월에는 동일한 세 권역과 배경지역인 백령도에서 시료를 채취하였다. 분석 결과는 공기부피 정규화 값(OPv)과 질량 정규화 값(OPm)으로 나타내었다. 2025년 봄철에는 $PM_{2.5}$ 질량농도와 OP가 경기권, 수도권, 강원권 순으로 높게 나타났다. 2026년 여름철 자료를 추가하여 공통 세 권역의 시기별 OP와 분석법별 반응 양상을 비교하고, 백령도를 포함한 여름철 지점 간 차이를 분석하였다. 본 연구는 $PM_{2.5}$의 산화잠재력 특성을 파악하고, 질량농도 중심의 건강위해성 평가를 보완하는 기초자료로 활용될 수 있다.

사사 This work is supported by the National Institute of Environmental Research (NIER), funded by the Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) of the Republic of Korea (202608570001).

PD41

서울 대기 중 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 산화 잠재력 장기 변동 특성 및 화학종과의 연관성 분석에 기반한 영향 요인 규명

Long-term Variability of $PM_{2.5}$ Oxidative Potential (OP) in Seoul and Identification of Influencing Factors Based on Correlations with Chemical Species

임희연, 박희선, 이미혜, 김주애, 주태규

고려대학교 지구환경과학과

대기 중 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 산화 잠재력(Oxidative Potential, OP)은 $PM_{2.5}$의 인체 내 산화 스트레스 유발 가능성을 평가하는 지표이다. 본 연구에서는 DTT (dithiothreitol) assay를 이용해 서울 도심 $PM_{2.5}$의 부피 기준(DTTv) 산화 활성을 측정하여 장기적 산화 잠재력의 변동 특성을 살펴보고, 이를 견인하는 화학적 성분과 상관성 분석을 통해 대기 독성에 영향을 미치는 주요 물질을 규명하고자 하였다. DTT assay는 $PM_{2.5}$ 채취 필터를 초순수로 추출한 후 DTT(dithiothreitol) 시약과 반응시켜 잔여물의 흡광도 변화로 산화 잠재력을 측정하였으며, 수용성 무기 이온 및 유기탄소(WSOC, water-soluble organic carbon), 수용성 광흡수성 물질에 대한 분석을 진행하였다. 2023년 DTTv는 평균 1.60±0.80 nmol・min^{-1}・m^{-3}로, 2019~2020년 분석된 이전 필터 샘플에서 0.58±0.48 nmol・min^{-1}・m^{-3}로 측정된 것에 비해 높은 값을 보였다. 본 연구결과 DTTv는 $PM_{2.5}$와 좋은 상관관계를 보였으며(r = 0.47). 특히, $PM_{2.5}$ 내 함량이 높은 NO_3^-, NH_4^+ 등의 수용성 무기 이온 성분과 상관성이(r = 0.550, r = 0.518) 좋았다. WSOC와는 0.340의 약한 상관성을 보였으나 WSON (WSTN-inorganic nitrogen)과는 0.594로 분석된 $PM_{2.5}$ 성분 중에 가장 높은 상관성을 보였다. 이와 동시에, 수용성 브라운 카본 흡광계수(Abs_{365})와도 높은 상관성(r=0.594)을 보였다. 이러한 결과는 브라운 카본이 높은 시기 산화 포텐셜도 함께 상승하며 $PM_{2.5}$의 기후 및 건강 영향이 동반될 수 있음을 의미하며, $PM_{2.5}$의 기후 및 건강 영향은 질소 함유 유기물질의 존재 유무와 관련성이 있을 수 있음을 시사한다.

PD42

PTR-ToF-MS 관측을 통한 여름철 수도권 대기 중 OVOCs의 분자 조성 및 농도 변화 특성

Molecular Composition and Temporal Variations of Oxygenated VOCs (OVOCs) in the Seoul Metropolitan Area during Summer based on PTR-ToF-MS Observations

김주영, 김정호[1], Wang Zhe[2], 김용표[3], 이지이

이화여자대학교 환경공학과, [1]열린공간, [2]Division of Environment and Sustainability, HKUST, [3]서울대학교 보건환경연구소

휘발성유기화합물(VOCs) 중 CxHyOz의 원소 조성을 갖는 산소화된 VOCs (OVOCs)는 총 VOC 농도의 상당 부분을 차지하며, 오존 및 이차유기에어로졸(SOA) 생성과 대기 중 라디칼 수지에 주요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. OVOCs는 자연 및 인위적 기원으로 직접 배출될 뿐 아니라, 비메탄계탄화수소(NMHC)의 광화학 산화를 통해 이차적으로 생성된다. 그러나 국내에서는 표적 분석 중심의 VOC 연구가 주를 이루어 왔으며, 도심 지역에서 다수의 개별 OVOCs를 동정·정량한 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 광화학 활성이 높은 2026년 7월~8월 약 한 달간 국립환경과학원 수도권 대기환경연구소에서 PTR-ToF-MS (PTR-TOF 6000 X2, Ionicon)를 이용해 대기 중 VOCs를 실시간 측정하였다. 고분해능 질량분석 기반의 준(準)비표적 분석을 통해 VOC 90여 종을 분석하였으며, 이 중 표준가스로 검량한 16종은 정량, 나머지는 이온 통과효율 곡선과 가정 반응상수를 적용해 준정량하였다. 검출된 성분은 원소 조성에 따라 CxHy, $CxHyO_{1-3}$, N-함유 화합물로 분류하여 그룹별 기여도를 산정하였다. 이와 함께 OVOCs 그룹 및 주요 개별 성분의 시계열과 일변화 패턴을 분석하고, 이를 O_3, NOx 및 기상 인자의 변동과 비교함으로써 수도권 도심에서 나타나는 OVOC의 농도 변화 특성과 광화학적 이차생성의 영향을 파악하고자 하였다. 향후 OH 반응성 및 오존생성기여도(OFP) 정량, 발생원 기여도 해석을 통해 수도권 OVOCs의 광화학적 역할을 규명할 예정이다.

사사 이 성과는 환경부 사업으로 수행중인 '대기환경무인기 One-stop 플랫폼 기술개발 사업'(과제번호: RS-2025-02213909) 연구결과 중 일부임.

PD43

수동대기채취기를 이용한 여수·광양 국가산업단지와 인근 지역의 VOCs 계절별 공간 분포와 배출 특성 분석

Analysis of Seasonal Spatial Distribution and Emission Characteristics of VOCs in the Yeosu-Gwangyang Industrial Area Using Passive Air Samplers

김연지, 김상화, 김승혜[1], 최성득

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, [1]국립환경과학원 환경보건연구과

휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds: VOCs)은 유해대기오염물질로서, 산업 시설과 차량 등 다양한 배출원에서 발생하며, 일부 물질은 독성과 발암성을 나타낸다. 특히 여수·광양 지역은 석유화학 및 제철 산업 시설이 밀집해 있어 VOCs 배출 영향이 크므로, 산업활동에 따른 VOCs 배출 특성과 공간 분포를 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 여수·광양 지역 30개 지점에 수동대기채취기(Passive air sampler: PAS)를 설치하여 봄과 가을에 각각 1개월간 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 이황화탄소(CS_2) 용매로 추출한 후 가스크로마토그래프/질량분석기(GC/MS)로 53종 VOCs를 분석하였다. 진단비 분석을 통해 VOCs 배출 특성을 확인하였으며, 인체 발암 위해도를 산정하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션 기반 확률론적 위해성 평가를 수행하였다. 두 계절 모두 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylenes) 농도가 총 VOCs 농도의 약 70%를 차지하였으며, 총 VOCs 농도는 봄철 석유화학 산단에서 66 $\mu g/m^3$, 가을철 중흥부두에서 181 $\mu g/m^3$로 가장 높았다. 발암 위해도도 석유화학 산단 인근에서 높았으며, 봄철에는 BTEX의 위해도 기여가 컸고 가을철에는 지점 간 농도 편차가 커 일부 지점의 발암 위해도가 높은 경향을 보였다. 진단비 분석 결과, 봄과 가을에 유사한 배출 특성이 나타나 지역 내 산업과 교통 배출의 영향이 큰 것으로 파악하였다. 본 연구에서는 PAS를 활용하여 산업단지 내 VOCs 농도의 고해상도 공간 분포와 계절별 배출 특성을 파악하였으며, 이 결과는 향후 산단 지역의 대기질 관리와 주민 건강 영향 평가를 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

사사 본 연구는 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2025-01-01-002).

PD44

다중 분광학적 분석법 기반 호흡성 대기 중 미세플라스틱 입자의 물리화학적 특성 규명

Multimodal Single-Particle Characterization of Airborne Microplastics Reveals Physicochemical Heterogeneity and Aging-Related Features

박종현[1),2)], 유한진[3)], 송영철[4)], 이경은[5)], 노철언[6)], 전기준[1),2)]

[1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [3)]국립한국교통대학교 환경공학과,
[4)]한국화학연구원 화학분석센터, [5)]한국화학연구원 신뢰성평가센터, [6)]인하대학교 화학과

대기 중 미세플라스틱(AMPs)은 주요 환경오염 물질로 주목받고 있다. 특히 PM_{10} 이하의 AMPs는 대기 중 체류시간이 길어 장거리 수송이 가능하며, 호흡을 통해 기관지 및 폐포 영역까지 침투할 수 있어 호흡기 노출 위해성 측면에서도 주요 관심 대상이다. 그러나 PM10 내 AMPs의 물리화학적 특성은 이를 효과적으로 규명할 수 있는 분석법의 부재로 충분히 규명되지 않았다. 이에 본 연구에서는 형광현미경, 라만분광법(RMS), O-PTIR, SEM을 통합한 단일입자 분석법을 통해 호흡성(<10 μm) AMPs의 종류와 형태, 노화 상태 및 첨가제 조성을 조사하였다. 형광현미경은 효율적인 입자 선별을, RMS와 O-PTIR은 화학적 특성을, SEM은 형태적 특성에 대한 정보를 제공하며, 각 기법의 한계를 상호 보완함으로써 AMPs의 복합적 물리화학적 특성을 상세히 규명할 수 있었다. 도로변 대기 시료를 분석한 결과, PP, PS, PET, PE, Nylon 등 7종의 AMPs가 확인되었으며, 이 중 94%가 PM10 이하의 크기 범위에 해당하였다. 또한 86%의 입자에서 노화 특성이 확인되었고, 13.6%의 입자에서 TiO_2 및 프탈로시아닌 등의 첨가제가 검출되어 원재료의 특성을 반영함을 확인하였다. 본 연구는 AMPs의 노화가 대기 거동 및 인체 노출 위해성에 유의미한 영향을 미칠 수 있음을 시사하며, 향후 AMPs의 환경 및 노출 평가에서 노화 상태, 형태, 첨가제 조성을 함께 고려할 필요가 있음을 제시한다.

사사 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00463576). 이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 탈플라스틱 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

PD45

여름철 서울 대기 중 휘발성유기화합물(VOC) 전구물질과 이차 유기에로졸(SOA) 형성 특성

Characteristics of VOC Precursors and Secondary Organic Aerosol Formation in Seoul during Summer

권정희, 김주영, 서혜빈, 김정호[1], 김용표[2], 이지이

이화여자대학교 환경공학과, [1](주)열린공간, [2]서울대학교 보건환경연구소

서울은 교통, 용제 사용 및 산업활동 등 다양한 인위적 배출원의 영향을 받는 대도시이며 대기 중 휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)은 광화학적 산화과정을 거쳐 이차 유기에어로졸(secondary organic aerosol, SOA)을 형성하는 주요 전구물질이다. 기존 서울 지역 연구에서는 방향족 VOC가 SOA 형성 잠재력에 중요하게 기여하는 것으로 보고되었으나 VOC 전구물질과 입자상 유기에어로졸의 생성 특성을 동시간대의 고분해능 자료를 이용하여 연계한 연구는 상대적으로 제한적이다. 본 연구에서는 2026년 7월 20일부터 8월 24일까지 수도권 대기환경측정소에서 online gas chromatography (GC955-611, Synspec)를 이용하여 alkanes 18종, aromatics 16종 및 terpenes 2종 등 총 36종의 VOC를 30분 간격으로 측정하고 High-Resolution Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer (HR-ToF-AMS; Aerodyne Research Inc., USA)를 이용하여 입자상 성분을 측정하였다. 측정된 VOC의 농도 및 화학종별 조성을 평가하고 물질별 SOA yield를 적용하여 SOA formation potential (SOAFP)을 산정였다. 또한 xylene/ethylbenzene 비를 이용하여 광화학적 노화 특성을 평가하고 HR-ToF-AMS의 질량스펙트럼을 positive matrix factorization (PMF)를 이용해 1차 및 산화유기에어로졸 요인을 분리한 후 VOC 전구물질 특성과 연계하고자 한다. 연구기간 동안의 총 VOC 농도는 평균 3.6 ppb였으며 alkanes, aromatics 및 terpenes는 각각 2.01, 1.55 및 0.05 ppb로 전체 VOC의 55.7%, 42.9%, 1.4%를 차지하였다.

사사 본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2026-04-02-066).

PD46

실시간 VOCs 관측과 머신러닝을 활용한 울산지역 오존 생성 특성 분석

Analysis of Ozone Formation Characteristics in Ulsan Using Real-Time VOC Measurements and Machine Learning

안준건, Andrew Loh, 김동휘, 원종천, 임운혁[1]

한국해양과학기술원 생태위해성연구부, [1]과학기술연합대학원대학교 KIOST스쿨

휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)은 질소산화물(NOx)과의 광화학 반응을 통해 오존(O_3) 및 이차유기에어로졸(SOA)을 생성하는 주요 전구물질이다. 울산지역은 석유화학, 조선, 자동차 등 다양한 산업시설이 밀집해 있어 배출원 특성과 기상조건에 따라 VOCs 조성 및 O_3 생성 특성이 복합적으로 나타날 수 있다. 본 연구에서는 2023년 4월 12일부터 5월 2일까지 울산지역에서 SIFT-MS를 이용하여 60여 종의 VOCs를 실시간으로 관측하였으며, NO, NO_2, NOx, SO_2, O_3, CO 및 기상요소를 함께 분석하였다. 시계열, 일변화 및 CBPF 분석을 통해 풍향별 주요 영향지역을 파악하였으며, 오존생성잠재력(OFP)과 SOA생성잠재력(SOAFP)을 산정하였다. 또한 머신러닝 기법과 SHAP 분석을 적용하여 개별 VOCs, 기상인자 및 대기화학 인자가 O_3 농도 변화에 미치는 상대적 중요도와 영향 방향을 평가하였다. 분석 결과, 풍향에 따라 산업단지별 VOCs 조성 차이가 뚜렷하게 나타났으며, 방향족 화합물과 일부 반응성 VOCs가 O_3 및 SOA 생성에 높은 기여를 보였다. 머신러닝 분석에서는 VOCs뿐 아니라 기온, 일사량, 풍향·풍속 등 기상요인이 O_3 농도 변화에 중요한 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 본 연구는 실시간 VOCs 관측과 머신러닝 기법을 결합하여 울산지역 O_3 생성 영향요인을 정량적으로 규명하고, 산업도시 맞춤형 VOCs 및 오존 관리전략 수립을 위한 기초자료를 제공한다.

사사 본 연구는 해양수산부의 재원으로 해양수산과학기술진흥원-'해양유해물질 오염원 추적기법 개발' 사업 지원을 받아 수행됨(RS-2022-KS221655).

PD47

미분탄 연소 가스상 전구물질과 응축성 미세먼지의 성분 특성 비교

Comparison of Gaseous Precursors and Condensable Particulate Matter Components during Pulverized Coal Combustion

최승진, 장준혁, 이상섭

충북대학교 환경공학과

응축성 미세먼지(condensable particulate matter, CPM)는 고정연소원 배기가스에서 주로 기체상으로 존재하다가 배출 후 냉각 및 희석 과정에서 입자상으로 전환되는 물질이다. 따라서 CPM의 생성과 거동을 이해하기 위해서는 최종적으로 포집된 성분뿐만 아니라 배기가스 중 존재하는 가스상 물질과의 관계를 함께 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 실험실 규모의 미분탄 연소 시스템을 이용하여 배기가스와 CPM에서 대응되는 무기 및 유기성분을 동시에 분석하였다. CPM은 EPA Method 202에 따라 포집하였다. 무기성분의 경우, 배기가스 중 HF, HCl 및 SO_3 성분과 CPM 내 F^-, Cl^- 및 SO_4^{2-}를 각각 정량하여 비교하였으며, CPM 내 수용성 이온은 이온크로마토그래피를 이용하여 분석하였다. 유기성분의 경우, 배기가스와 CPM에서 공통적으로 정량 가능한 방향족 휘발성유기화합물과 n-alkanes를 가스크로마토그래피를 이용하여 분석하고, 두 시료에서의 농도 특성을 비교하였다. 이를 통해 미분탄 연소 과정에서 무기 전구물질과 CPM 내 대응 이온의 관계를 평가하고, 유기화합물의 배기가스 및 CPM 내 농도 특성을 비교하여 CPM의 주요 성분 특성을 파악하고자 하였다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 「폐자원에너지·재활용 전문인력양성사업」의 지원을 받아 수행된 연구임(YL-WE-23-001).

PD48

장기 관측을 통한 대기 중 메탄 및 탄소 동위원소의 상관관계 분석

Long Term Trends and Correlation of Atmospheric CH_4 Concentration and $\delta^{13}C$-CH_4

김수경, 장지혜, 윤재근, 박선영

경북대학교 해양학과

메탄(CH_4)은 이산화탄소에 이어 인위적 복사강제력의 기여도가 두 번째로 큰 온실가스로, 2020년 이후 대기 중 농도가 급격히 상승하고 있어, 전 지구적 순환 및 배출 특성을 정확히 규명할 필요성이 커지고 있다. 메탄의 탄소 동위원소비($\delta^{13}C$-CH_4)는 생물, 열분해, 연소 기원 등 서로 다른 생성 기작과 대기 중 소멸 과정에 따라 고유한 값을 지닌다. 이에 $\delta^{13}C$-CH_4는 대기 중 메탄의 기원과 변화를 추적할 수 있는 핵심적인 지표로 활용된다. 다만 이러한 미세한 변화를 정밀하게 포착하기 위해서는 연속적인 고정밀 장기 관측이 필수적이다. 본 연구의 관측 지점인 제주 고산 관측소는 동아시아 계절풍의 영향을 직접적으로 받으며, 청정한 태평양 배경 대기와 아시아 대륙에서 유입되는 오염 기단을 동시에 관측할 수 있는 동아시아 대표 관측 지점이다. 본 연구에서는 2018년부터 2025년까지 8년간 고산 관측소에서 수집한 CH_4 농도와 $\delta^{13}C$-CH_4의 연속 관측 자료를 대상으로, 배경 대기와 오염 이벤트를 분리하고 각각의 장기 변동 특성을 분석하였다. 그 결과 CH_4 배경 농도는 관측 기간 동안 지속적으로 상승한 반면, $\delta^{13}C$-CH_4는 점차 가벼워지는 장기 경향성이 확인되었다. 또한 오염 이벤트 발생 시 나타나는 농도 증가량과 $\delta^{13}C$-CH_4 사이의 상관관계를 시기별로 분석한 결과, 계절에 따라 그 상관 양상이 뚜렷하게 달라짐을 확인하였다. 이는 계절별로 대기 중 메탄 농도 변화에 주로 영향을 미치는 요인이 서로 달라질 수 있음을 시사한다.

PD49

회전익 UAV를 이용한 CO_2와 블랙카본의 연직 분포 및 국지적 수송 특성 분석

Analysis of the Vertical Distribution and Local Transport Characteristics of CO_2 and Black Carbon Using Rotary-wing UAVs

김동현, 박찬호, 구민주[1], 고원석, 이현서, 최민서, 도현석, 김지민, 최순혁, 이남혁[1], 김연욱[2], 곽경환

강원대학교 환경학과, [1]강원대학교 생명·환경융합학부, [2]강원대학교 환경연구소

산업지역에서 배출된 CO_2와 블랙카본(black carbon, BC)은 대기 난류에 의한 혼합 및 수송 과정에 따라 고도별 농도분포가 달라질 수 있다. 특히 지상 관측만으로는 대기 하층에서 나타나는 오염물질의 연직 구조와 수송 특성을 파악하는 데 한계가 있어 고도별 기상 및 대기질 관측이 필요하다. 본 연구에서는 여름철 여수산업단지 인근 대기 하층에서 CO_2와 BC의 연직 농도 분포와 플럭스 특성을 분석하기 위해 드론을 활용한 고도별 관측을 수행하였다. 관측지점은 산업단지 주변의 비행 여건과 해풍에 따른 대기 수송 방향을 고려하여 전라남도 순천시로 선정하였다. 두 대의 드론을 이용하여 각각 기상과 대기질을 동시 관측하였으며, 풍향·풍속계(FT742)와 온·습도 센서(iMet-X4)를 이용하여 기온, 습도, 풍향 및 풍속을 측정하고, CO_2 센서(GMP252)와 BC 관측장비(MA200)를 이용하여 CO_2와 BC 농도를 측정하였다. 드론은 지상에서 300 m까지 50 m 간격으로 각 고도에서 2분 10초간 호버링하여 연직 관측자료를 수집하였다. 관측된 바람자료를 이용하여 난류 확산계수와 수평 이류를 산정하고, 고도에 따른 CO_2와 BC의 농도 분포를 이용하여 수평 및 연직 플럭스를 계산하였다. 이를 통해 산업지역의 지상에서 배출된 오염물질이 대기 하층에서 연직 혼합 및 수평 수송되는 과정을 정량적으로 분석하였다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지역맞춤형오존관리기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25505137). 또한, 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2023-00232066).

PD50

춘천시 여름철 오존 생성 특성 및 라디칼 생성·소멸 경로의 오전-오후 변화

Morning-to-Afternoon Changes in Ozone Formation and Radical Production-Loss Pathways during Summer in Chuncheon, Korea

정수진, 이효원, 한영지[1], 강대일[2], 정현구[2], 차승환[2], 정하윤[2], 이광열[2]

강원대학교 지오에코시스템융합학과, [1]강원대학교 생명·환경융합학부, [2]국립환경과학원 대기환경연구과

대류권 오존(O_3)은 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds; VOCs)과 질소산화물(NO_x)의 광화학 반응을 통해 생성되는 대표적인 2차 대기오염물질임. 이 과정에서 RO_x 라디칼은 VOCs의 산화와 NO-NO_2 전환을 매개하여 오존 생성에 중요한 역할을 함. 따라서 오존 생성 메커니즘을 이해하기 위해서는 전구물질 농도뿐만 아니라 라디칼의 생성-전환-소멸 과정에 대한 분석이 필요함. 국내 오존 농도가 지속적으로 증가하는 가운데, 기존 분석에서 정오를 전후로 오전과 오후의 오존 생성 민감도가 다르게 나타남에 따라 시간대별 광화학 특성에 대한 이해가 요구됨. 이에 본 연구에서는 여름철 춘천을 대상으로 오전과 오후의 오존 생성 특성과 라디칼 생성·소멸 경로를 비교하고자 하였음. 강원특별자치도 춘천시에서 온라인 가스크로마토그래피를 이용하여 54종의 PAMS VOCs를 측정함. 오존 생성 특성과 전구물질 민감도, RO_x 라디칼의 생성 및 소멸 경로를 분석하기 위해 MCM을 기반으로 한 0차원 광화학 박스모델(F0AM-MCM)을 적용하였으며, 여름철 낮 시간대를 오전(08:00-12:00)과 오후(13:00-18:00)로 구분하여 비교함. 본 연구를 통해 오전과 오후의 오존 생성 민감도와 RO_x 반응 경로의 차이를 규명하고, 시간대별 광화학적 특성이 오존 생성에 미치는 영향을 파악하고자 함으로써 춘천 지역의 오존 생성 메커니즘에 대한 이해를 높이고자 함.

사사 This work is supported by the National Institute of Environmental Research (NIER), funded by the Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) of the Republic of Korea (NIER-2026-03-02-004).

PD51

서울과 춘천의 $PM_{2.5}$ 극성 유기성분 특성 및 수용모델 기반 배출원 비교

Characteristics and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ Polar Organic Markers in Seoul and Downwind Chuncheon

이효원, 한영지[1], 이상덕[2], 김명주[3], 이지이[4], 서혜빈[4], 허국영[5], 임용재[5], 강대일[5]

강원대학교 지오에코시스템융합학과, [1]강원대학교 생명·환경융합학부, [2]강원대학교 산림과학부,
[3]강원대학교 산림환경시스템학과, [4]이화여자대학교 환경공학과, [5]국립환경과학원 대기환경연구과

유기에어로졸(OA)은 1차 오염원에서 직접 배출되거나 대기 중 휘발성유기화합물(VOCs)의 산화 반응을 통해 이차적으로 생성된다. 본 연구에서는 대도시 배출 특성을 갖는 서울과 풍하측 분지 지형인 춘천에서 $PM_{2.5}$ 내 유기성분을 동시 측정 및 분석하여 두 지역 간 OA의 시공간적 변동 특성 및 배출원을 규명하고자 하였다. 시료 채취는 2025년 비난방기(4월 21일~5월 21일)와 난방기(10월 20일~11월 9일, 12월 1일~12월 14일)로 나누어 수행하였으며, GC-MS 등을 활용해 총 32종의 분자 수준 극성 유기성분을 정량 분석하였다. 연구 기간 동안 $PM_{2.5}$ 평균 농도는 서울에서 더 높게 관측되었으나, $PM_{2.5}$ 내 유기탄소(OC)의 농도 및 질량분율은 춘천에서 더 높게 나타났다. 정량화된 극성 유기성분의 총합(qOM) 또한 서울 대비 춘천에서 약 1.5배 높은 수준을 보였다. 두 지역에서 측정된 극성 유기성분을 입력 자료로 활용하여 PMF 모델링을 수행한 결과, 총 8개의 배출원(factor)으로 분리되었다. 서울의 경우 춘천 대비 연소 배출원(combustion sources)과 고산화 2차 유기에어로졸(more oxidized SOA)의 기여도가 지배적인 반면, 춘천은 생물성 연소(biomass burning) 및 인위적 VOCs 유래 2차 유기에어로졸(AVOCs-derived SOA)의 기여도가 서울에 비해 뚜렷하게 높았다. 따라서 본 연구를 통해 대규모 1차 배출원이 제한적인 풍하지역(춘천)의 인위적 SOA 생성이 국지적 영향에 의한 것인지, 혹은 수도권으로부터 유입된 전구물질의 수송 및 광화학적 산화 과정에 기인한 것인지를 규명하고자 한다.

사사 This work is supported by the National Institute of Environmental Research (NIER), funded by the Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) of the Republic of Korea (NIER-2026-03-02-004).

PD52

필리핀 마닐라 지역의 $PM_{2.5}$ 농도 시간변동 특성

Temporal Variability of $PM_{2.5}$ Concentrations in Manila, Philippines

나하나[1),2),3)], 정우식[1),2),3)], Guevarra, Kaye Jelyn[1),2),3)]

[1)]인제대학교 대기환경정보공학과, [2)]태풍사전방재선도센터, [3)]대기환경정보연구센터

필리핀 마닐라는 높은 인구밀도와 활발한 교통 및 산업활동이 집중된 대도시권으로, 미세먼지를 포함한 도시 대기오염 문제가 지속적으로 관심의 대상이 되어 왔다. 특히 초미세먼지($PM_{2.5}$)는 인체 건강과 밀접한 관련이 있는 주요 대기오염물질로, 배출 특성뿐만 아니라 기상조건과 계절적 변화에 따라 농도 변동이 나타날 수 있다. 본 연구에서는 마닐라 수도권 북부에 위치한 Navotas 지역의 관측지점에서 수집된 $PM_{2.5}$ 자료를 이용하여 도시지역 $PM_{2.5}$ 농도의 시간변동 특성을 분석하고자 하였다. 분석자료는 2025년 6월부터 2026년 8월까지의 일별 $PM_{2.5}$ 자료이며, 일 최소값, 최대값, 중앙값, 제1·제3사분위수, 표준편차 및 관측개수 등의 통계정보를 포함한다. $PM_{2.5}$ 농도의 일별 변화를 바탕으로 월별 및 계절별 농도 특성을 비교하고, 일중 농도범위와 변동성을 함께 분석하였다. 또한 상대적으로 높은 농도와 낮은 농도가 나타나는 기간의 발생시기와 지속 특성을 검토하여 마닐라 도시지역에서 나타나는 $PM_{2.5}$의 시간적 변동 양상을 파악하고자 하였다. 향후 기온, 상대습도, 강수 및 풍속 등의 기상자료와 연계하여 $PM_{2.5}$ 농도 변동에 영향을 미치는 기상학적 요인을 추가적으로 분석할 예정이다. 본 연구는 마닐라 도시지역의 $PM_{2.5}$ 시간변동 특성을 파악하고, 향후 필리핀 도시 대기질 변동과 기상조건 간의 관계를 분석하기 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

PD53

방글라데시 다카 지역의 계절 전환에 따른 입자상 대기오염 특성

Seasonal Transition of Particulate Air Pollution, Dhaka, Bangladesh

나하나[1),2),3)], 정우식[1),2),3)]

[1)]인제대학교 대기환경정보공학과, [2)]태풍사전방재선도센터, [3)]대기환경정보연구센터

방글라데시의 수도 다카는 급격한 도시화와 인구 증가, 교통량 증가, 산업 및 건설 활동 등 다양한 인위적 배출원의 영향으로 높은 수준의 입자상 대기오염이 지속적으로 보고되고 있는 지역이다. 특히 다카와 인근 지역은 도시·산업 활동에 따른 배출과 더불어 건기와 몬순이 뚜렷하게 구분되는 기후적 특성을 가지고 있어, 대기오염물질의 축적과 제거 과정이 계절에 따라 크게 달라질 가능성이 있다. 이러한 특성에도 불구하고 다카 외곽 및 도시 확장지역에서 장기간 관측된 다양한 입경의 입자상 물질을 이용하여 계절 전환에 따른 대기오염 변화를 살펴본 연구는 상대적으로 제한적이다. 따라서 다카 지역의 대기오염 특성을 계절적 관점에서 파악하는 것은 고농도 미세먼지 발생과 지속 특성을 이해하고 향후 대기질 관리방안을 마련하기 위해 중요하다. 본 연구에서는 방글라데시 다카의 Savar 지역에서 2024년 10월 이후 관측된 PM_1, $PM_{2.5}$ 및 $PM_{1.0}$ 자료를 이용하여 계절 전환에 따른 입자상 대기오염 특성을 분석하였다. 계절은 Winter (12~2월), Pre-monsoon (3~5월), Monsoon (6~9월), Post-monsoon (10~11월)으로 구분하였으며, 관측자료의 결측과 일별 자료 확보 수준을 고려하여 자료의 품질과 연속성을 검토하였다. 이를 바탕으로 계절별 입자상 물질의 농도 수준과 변동 특성, 그리고 고농도 오염의 발생 및 지속 양상을 종합적으로 살펴보았다. 초기 분석에서는 Winter에 상대적으로 높은 입자상 물질 농도가 나타난 반면, Pre-monsoon부터 농도가 감소하기 시작하여 Monsoon에는 비교적 낮은 수준이 유지되는 뚜렷한 계절적 변화가 확인되었다. 이러한 결과는 다카 지역의 입자상 대기오염이 단순한 계절평균의 차이가 아니라 계절 전환 과정에 따라 축적과 감소 양상이 변화할 가능성을 보여준다. 본 연구는 다카 Savar 지역의 계절별 입자상 대기오염 특성을 이해하고, 향후 기상조건과 연계한 고농도 미세먼지의 발생 및 지속 메커니즘을 규명하기 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

PD54

연속 현장(in situ) CRDS 관측을 위한 isotopologue-based CO_2 보정의 실용적 구현

An Isotopologue-Based Calibration Approach for Continuous In Situ CRDS CO_2 Observation

장지혜, 김수경, 윤재근, 박선영

경북대학교 해양학과

대기 CO_2의 $\delta^{13}C$를 모니터링하기 위해 isotopologue-specific 광학 측정 기법이 최근 활용되면서, 기존의 총 CO_2 몰분율 중심 관측 기법과는 다른 보정법의 필요성이 인식되고 있다. 본 연구에서는 연속 현장(in situ) 관측 조건에서 이를 구현하는 데 필요한 변수 정의, 정규화 항 및 보정 절차를 명시적으로 제시하고, 경북대학교 제주 고산 관측소에서 연속 운용 중인 Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS) 분석기(Picarro G2131-i)를 이용하여 isotopologue-based CO_2 보정 시스템을 구현하였다. 이 과정에서 delta-based, isotopologue-based, ^{13}r-based 및 Rsum-based의 네 가지 보정식의 성능을 비교·평가하였다. 보정 절차는 세 단계로 구성하였으며, 기기 반응 안정화, 실험실 기준기체를 이용한 시간에 따른 drift 보정, 그리고 주 동위원소체와 부 동위원소체에 각각 비율 기반 및 편차 기반 전달함수를 적용한 비선형성 보정을 순차적으로 수행하였다. 이 절차를 통해 산출된 네 가지 보정식은 WMO X2019 및 VPDB-CO_2 척도에 소급 가능한 독립적인 검증가스를 이용하여 평가하였다. 총 CO_2 몰분율의 경우 모든 보정식이 확장된 WMO 정합성 목표(±0.2 ppm)를 충족하였다. 계통오차는 delta-based에서 −0.068 ppm, isotopologue-based에서 0.161 ppm, ^{13}r-based 및 Rsum-based에서 각각 0.111 ppm이었으며, 이에 대응하는 측정 정밀도는 delta-based와 isotopologue-based에서 0.083 ppm, ^{13}r-based 및 Rsum-based에서 각각 0.048 ppm이었다. Delta-based 보정식은 더 작은 계통오차를 보인 반면, $\delta^{13}C$의 경우 isotopologue-based 보정식은 더 작은 측정값의 표준편차(0.0053~0.0054‰; delta-based: 0.435~0.496‰)를 보였으며, ^{13}r-based 및 Rsum-based 보정식은 0.0247~0.1072‰ 범위의 표준편차를 보였다. 본 연구에서는 네 가지 보정식의 비교 결과를 바탕으로 연속 현장 관측 조건에 적용 가능한 isotopologue-based CO_2 보정 시스템을 실용적으로 구현하였다. 이 보정 절차는 장기 CRDS-based CO_2 동위원소 모니터링뿐만 아니라 다른 광학 기기 및 대기 화합물의 보정 프로토콜 구축에도 활용될 수 있다.

사사 이 연구는 기상청「기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술개발 사업」과제번호(RS-2025-02313790)의 지원으로 수행되었습니다.

PD55

특용작물 영농부산물 연소에 따른 단기체류기후변화유발물질 배출특성 연구

Emission Characteristics of Short-lived Climate Forcers from Industrial Crop Residue Burning

우지윤, 박민성[1], 김찬수[1], 김민욱[2], 노준영[3], 김승진[3], 전의찬[1]

세종대학교 기후환경융합센터, [1]세종대학교 기후에너지융합학과, [2]국립농업과학원, [3](주)휴엔릭스

농업활동에서 발생하는 영농부산물은 소각시, 미세먼지와 다양한 오염물질을 동시에 배출하는 주요 생물성연소 배출원 중 하나이다. 특히 영농부산물은 작물의 종류와 부산물의 수분함량, 연소조건 등에 따라 연소 특성이 달라질 수 있으며, 이에 따라 배출되는 대기오염물질의 종류와 배출량에도 차이가 발생한다. 따라서 국가 배출량 산정의 정확도를 높이고 효과적인 배출관리를 위해서는 작물별 영농부산물의 실제 연소 특성을 반영한 배출계수 확보가 필요하다. 국내 대기오염물질 배출량 산정 결과, 특용작물 영농부산물 소각은 PM-2.5와 CO 배출량에서 두 번째로 높은 비중을 차지하며, NOx, VOCs 및 NH_3 배출량에서는 가장 높은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 이는 특용작물 영농부산물 소각이 생물성연소 분야의 대기오염물질 및 단기체류기후변화유발물질(Short-lived Climate Forcers, SLCFs) 배출 관리에 있어 중요한 배출원임을 의미한다. 본 연구에서는 국내 주요 특용작물인 들깨, 참깨 및 땅콩의 영농부산물을 대상으로 연소실험을 수행하여 SLCFs (PM-2.5, CO, NOx, VOCs, NH_3)의 배출특성을 분석하였다. 작물별 연소과정에서 발생하는 SLCFs의 배출농도와 배출계수를 산정하고, 작물 종류에 따른 배출특성의 차이를 비교·분석하였다. 본 연구 결과는 특용작물 영농부산물 소각에 대한 배출계수 개선과 국가 대기오염물질 및 단기체류기후변화유발물질 배출량 산정의 정확도 향상을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 농촌진흥청 「영농부산물 소각에 의한 미세먼지 배출특성 및 배출계수 개발(RS-2022-RD010226)」과 환경부 「기후변화특성화대학원사업」의 지원을 받아 수행된 연구임.

PD56

농업지역 암모니아의 시기별 변동 특성과 도시지역 입자상물질과의 연계성 분석

Temporal Variations of Ammonia in Agricultural Areas and Its Association with Particulate Matter in Urban Areas

배성현, 백정덕, 주흥수

안양대학교 환경공학과

암모니아(ammonia, NH_3)는 농업부문에서 주로 배출되는 대표적인 가스상 대기오염물질로, 대기 중 산성물질과 반응하여 입자상물질의 2차 생성에 관여한다. 그러나 국내에서는 실제 영농활동이 이루어지는 농업지역을 대상으로 NH_3와 입자상물질을 장기간 연속 관측한 자료가 부족하다. 본 연구에서는 2023년 3월부터 2026년 5월까지 전국 8개 논·밭 중심 농업지역에서 관측된 NH_3, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 자료를 이용하여 농업지역 NH_3의 월별·계절별 및 시간대별 변동 특성을 분석하였다. 또한 도시대기측정망 자료를 이용하여 농업지역과 도시지역의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도 변화를 비교하고, 농업지역 NH_3와 도시지역 입자상물질 간의 상관성을 평가하였다. 분석 결과, 농업지역과 도시지역의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$는 전반적으로 유사한 농도 변화를 보였으며 겨울철과 봄철에 상대적으로 높은 농도를 나타냈다. 반면 농업지역 NH_3는 여름철과 초가을에도 상대적으로 높은 농도를 보였고, 시간대별로는 모든 계절에서 오전 8~9시경 높은 농도를 나타낸 후 감소하였다. 농업지역 NH_3와 도시지역 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$의 상관성은 영농기간보다 비영농기간에서 높았으며, 계절별로는 겨울철에 가장 높게 나타났다. 이는 농업지역 NH_3의 농도가 높은 시기와 도시지역 입자상물질과의 관련성이 높은 시기가 반드시 일치하지 않으며, 두 물질의 관계가 계절에 따라 달라질 수 있음을 보여준다.

사사 본 연구는 2026년도 환경부(국립환경과학원)의 연구 용역사업으로 지원을 받아 수행된 연구임.

PD57

부하속도 기반 분석을 이용한 국내 농업지역 $PM_{2.5}$와 암모니아 등 기체상 전구물질 간의 관계

Relationships between $PM_{2.5}$ and Gaseous Precursors, Including Ammonia, in Agricultural Areas of South Korea Using a Loading-Rate-Based Analysis

백정덕, 배성현, 주흥수

안양대학교 환경공학과

농업지역의 초미세먼지($PM_{2.5}$)는 NH_3, NO_2 및 SO_2와 같은 기체상 전구물질로부터 2차 생성될 수 있으나, 개방된 농업지역에서는 풍속에 따른 희석 영향으로 농도가 크게 변동하여 전구물질과 $PM_{2.5}$ 간의 관계가 명확하게 나타나지 않을 수 있다. 이에 본 연구에서는 농도에 풍속 기반 공기교환율을 반영한 부하속도(Loading rate)를 적용하여 두 지표의 해석 차이를 비교하였다. 2024년 1월부터 2025년 6월까지 국내 8개 농업지역의 547일 자료를 이용하였으며, 전체기간, 여름철, 비여름철 및 $PM_{2.5}$ 고농도 기간으로 구분하여 Pearson 상관분석, 주성분분석(PCA) 및 다중선형회귀분석을 수행하였다. 농도 기준 $PM_{2.5}$와 전구물질 간 상관관계는 전반적으로 낮고 기간별 차이가 컸으나, 부하속도 기준에서는 높은 상관관계($r \geq 0.816$)가 나타났다. 이는 부하속도 산정에 공통적으로 포함된 풍속의 영향이 크게 반영된 결과로 해석된다. 일변화에서도 농도는 주간에 감소하는 이봉형 패턴, 부하속도는 주간에 증가하는 단봉형 패턴을 보여 농도 감소가 반드시 오염물질 부하 감소를 의미하지 않음을 확인하였다. 또한 NH_3는 여름철에 상대적으로 높고 $PM_{2.5}$보다 이른 시간대에 최대값을 보여 시간지연 관계 가능성을 시사하였다. 다중선형회귀분석에서는 높은 공변동성($R = 0.977-0.997$)이 확인되었으나 다중공선성으로 개별 전구물질의 기여도 해석에는 한계가 있었다. 따라서 부하속도는 농도를 대체하기보다 풍속에 따른 농도 변화와 오염물질 부하 특성을 함께 해석하기 위한 보완적 지표로 활용할 수 있다.

사사 본 연구는 2026년도 환경부(국립환경과학원)의 연구 용역사업으로 지원을 받아 수행된 연구임.

PD58

지하고속도로 내 유해물질 저감을 위한 흡착소재 성능평가 및 최적화에 관한 연구

A Study on Performance Evaluation and Optimization of Adsorbent Materials for Hazardous Substance Reduction in Underground Expressways

박일건, 김범석, 여경우

영진기술 주식회사 탄소중립센터

도시지역의 교통정체 해소와 지상공간의 효율적 활용을 위해 지하고속도로 등 지하 교통인프라의 활용이 증가하고 있다. 그러나 지하공간은 폐쇄적인 구조 특성으로 인해 차량 배출가스에 의한 내부 공기질 악화와 유해물질 노출 가능성이 높아 효과적인 오염물질 저감기술이 요구된다. 본 연구에서는 지하고속도로 내 휘발성유기화합물(VOCs) 저감을 위해 제올라이트, 활성탄(AC), 활성탄소섬유(ACF) 등 다양한 흡착소재의 물성과 벤젠 및 톨루엔 흡착성능을 비교·평가하였다. 분석 결과, Zeolite 5A와 ACF는 Langmuir형 흡착 거동을, Zeolite 13X와 AC는 Freundlich형 흡착 거동을 나타냈다. Zeolite 5A는 높은 비표면적에도 불구하고 좁은 미세공과 극성 표면 특성으로 인해 방향족 VOCs의 유효 흡착량이 제한되는 것으로 나타났다. 또한 제올라이트계 소재는 기공구조 특성으로 벤젠 흡착에, 탄소계 소재는 π-π 상호작용으로 톨루엔 흡착에 상대적으로 유리하였다. 특히 KOH 개질 활성탄은 미세기공 형성과 표면 특성 개선을 통해 흡착성능이 향상되는 것으로 조사되었다. 본 연구 결과는 지하고속도로 내 유해물질 저감을 위한 흡착소재 선정과 처리장치 설계 및 최적화의 기초자료로 활용될 수 있다.

사사 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제명: 초장대 K-지하고속도로 인프라 안전 및 효율 향상 기술 개발, 과제번호 RS-2024-00416524).

Session PE 실태·배출관리

평가위원[PA~PH] : 김용현(전북대학교), 김은혜(국립군산대학교), 김주애(고려대학교), 박대훈(한국기계연구원), 박은하((재)포항산업과학연구원), 박풍모(안산미래연구원), 송영철(한국화학연구원), 오용환(국립부경대학교), 이현정(제주대학교), 정경준(연세대학교), 최나래(강원대학교), 최용주(한국외국어대학교)

평 가 위 원 [P I] : 김민중(명지대학교), 김종범(충남연구원), 나하나(인제대학교), 박승부(서울시립대학교), 이영로(고려대학교)

PE1) 국내 시멘트 산업 온실가스 감축량 평가를 위한 생산공정 대표기술 DB 구축
PE2) A Study on the Air Pollution Status and Health Effects in Tokyo
PE3) 인구가중농도를 이용한 국내 $PM_{2.5}$-O_3-NO_2 장기 통합 노출 변화와 지역별 전환 특성
PE4) 전북 대기질에 대한 배출부문별 기여도 및 배출저감 영향 비교
PE5) 기온 상승에 따른 생물기원 VOC 배출 변화가 지표 오존 농도에 미치는 영향
PE6) 한국의 대기환경측정망을 통한 광화학오염물질과 유해대기 휘발성유기화합물 감시 결과 분석
PE7) 야적장(원료 등) 비산먼지 배출량 산정방법 연구
PE8) 국내 자동차 비배기계 배출량 산정 및 추이 분석
PE9) 도장시설 배출량 정확도 향상을 위한 산정방법론 개선에 관한 연구
PE10) 대기배출사업장 정보 통합관리 효과 분석 연구
PE11) 친환경자동차 보급에 따른 타이어 마모 미세먼지 배출 영향 분석
PE12) 국내 제빵부문 VOC배출량 산정을 위한 활동도 자료 조사

PE1

국내 시멘트 산업 온실가스 감축량 평가를 위한 생산공정 대표기술 DB 구축

Development of a Representative Technology Database for Cement Production Processes to Assess Greenhouse Gas Reduction in the Korean Cement Industry

박일건, 김범석, 여경우, 윤덕근

영진기술 주식회사

국내 시멘트 산업의 탄소중립 및 온실가스 감축목표 달성을 위해서는 현행 생산공정의 기술 수준과 에너지 사용 특성을 정량적으로 파악하고, 향후 감축기술 적용 효과를 평가할 수 있는 기준자료 구축이 필요하다. 그러나 기존 자료는 산업 또는 사업장 단위의 통계 중심으로 구성되어 있어 실제 시멘트 생산공정을 구성하는 세부 공정 및 설비별 생산량, 원료 및 에너지 사용량을 동일한 기준으로 비교·활용하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 국내 시멘트 산업의 온실가스 감축량 평가를 위한 기반자료를 구축하고자 국내 주요 6개 시멘트사의 현장자료를 수집하고, 회사별로 상이한 공정 및 설비 체계를 표준 공정과 기술 단위로 재분류하여 기존기술 DB를 구축하였다. 자료는 시멘트사 현장자료를 우선 활용하고 국내 통계·문헌 및 공정모사 자료를 보완적으로 적용하였으며, 공정·설비별 생산량과 원료 투입량, 전력 및 연료 사용량 등을 공통 기준으로 환산하여 대표 원단위를 도출하였다. 또한 기술 정의, 공정 적용 위치 및 주요 기술특성과 온실가스 배출 특성을 함께 구조화함으로써 국내 시멘트 산업의 현행 생산기술과 에너지 소비수준을 나타내는 대표기술 DB를 구축하였다. 구축된 DB는 국내 시멘트 생산공정의 기준선으로 활용되며, 향후 혁신감축기술 적용에 따른 에너지 절감 및 온실가스 감축효과 비교, LCI DB 및 LCA 구축, 온실가스 감축잠재량 평가를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

사사 본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2025-02213129).

PE2

A Study on the Air Pollution Status and Health Effects in Tokyo

Chang-Jin Ma, Gong-Unn Kang[1)], Fuka Segawa, Miharu Uto, Mai Shimokawa, Kanna Fujimoto

Department of Environmental Science, Fukuoka Women's University, Fukuoka, Japan,
[1)]Department of Health Administration, Wonkwang University, Iksan, Korea

This study introduces the current status of air pollutants and health effects in Tokyo, Japan. The medical cost support system for air pollution-related diseases implemented by local governments in Tokyo was also introduced. Through a correlation analysis between the annual concentration of air pollutants ($PM_{2.5}$ SO_2, NO_2) and the number of deaths from major cardiopulmonary diseases, it was proved that the higher air pollutant concentration, the more people died from acute myocardial infarction, cerebral infarction, cerebrovascular disease, and pneumonia. As a result of calculating the relative health risk of $PM_{2.5}$ in three regions (Ogasawara, Shinjuku and Tamashi) in Tokyo, compared Ogasawara (a remote island with clean air), Shinjuku and Tamashi have a relatively high risk of respiratory diseases caused by air pollution. Finally, the results of this study are expected to contribute to efforts to reduce air pollutants such as $PM_{2.5}$ in other metropolitan areas and to formulate policies to improve citizens' health.

PE3

인구가중농도를 이용한 국내 $PM_{2.5}$-O_3-NO_2 장기 통합 노출 변화와 지역별 전환 특성

Long-Term Changes in Integrated Population-Weighted Exposure to $PM_{2.5}$, O_3, and NO_2 and Regional Transition Patterns in South Korea

강윤희, 정성은[1], 김순태[2]

아주대학교 환경연구소, [1]아주대학교 환경공학과, [2]아주대학교 환경안전공학과

국내 대기질은 지난 20년간 전반적으로 개선되어 왔으나, 오염물질별 변화 방향과 개선 정도는 서로 다르게 나타난다. 특히 $PM_{2.5}$와 NO_2 농도는 배출 저감정책의 시행과 함께 감소한 반면, O_3는 여러 지역에서 증가하여 개별 오염물질 중심의 평가만으로는 대기질 개선에 따른 전체 인구의 노출 변화를 충분히 설명하기 어렵다. 본 연구에서는 2006~2025년 관측자료와 WRF-SMOKE-CMAQ 모사결과를 결합한 고해상도 농도장에 SGIS 격자인구 자료를 적용하여 $PM_{2.5}$, O_3 및 NO_2의 인구가중농도(population-weighted concentration)를 산정하였다. 전국 장기 변화는 2006~2008년 평균을 기준으로 정규화하여 비교하였으며, 17개 시도별로 기준기간과 각 연도의 노출 변화를 분석하였다. 또한 전체 인구와 65세 이상 인구의 공간분포를 각각 적용하여 연령집단별 노출 차이와 인구 고령화의 의미를 살펴보았다. 분석 결과, 대부분 지역에서 $PM_{2.5}$ 인구가중농도는 뚜렷하게 감소한 반면 O_3는 증가하여, $PM_{2.5}$ 개선과 O_3 악화가 동시에 나타나는 노출 전환(exposure transition)이 지배적으로 관찰되었다. 다만 변화 폭은 시도별로 상당한 차이를 보였으며, 이는 배출구조, 인구분포, 장거리 이동 및 지역별 광화학 조건의 차이를 반영하는 것으로 판단된다. NO_2 변화와 고령인구 가중 노출을 함께 고려하면, 전국 평균 농도의 변화만으로는 지역별·인구집단별 대기오염 노출의 개선 정도를 충분히 평가하기 어렵다. 향후 $PM_{2.5}$와 O_3의 동시 개선을 위해서는 두 오염물질에 공통으로 영향을 미치는 NOx, VOCs 등 전구물질의 배출과 비선형 대기화학 조건을 지역별로 진단하고, 이에 기반한 차별화된 저감전략을 마련해야 한다. 아울러 장기 통합 노출자료를 연령별 기초사망률과 농도-반응함수에 연계함으로써, 다중 대기오염물질의 건강영향과 정책 편익을 함께 평가하는 방향으로 확장할 필요가 있다.

사사 본 연구는 국가미세먼지정보센터의 지원으로 수행되었습니다.

PE4

전북 대기질에 대한 배출부문별 기여도 및 배출저감 영향 비교

Comparison of Sectoral Source Contributions and Emission-Reduction Impacts on Air Quality in Jeonbuk, South Korea

박성규, 김은혜

국립군산대학교 환경공학과

$PM_{2.5}$, O_3 등 대기 중 2차 오염물질은 전구물질의 비선형 대기화학 반응에 의해 생성되므로, 특정 배출원의 농도 기여도와 실제 배출저감에 따른 농도 영향은 서로 다르게 나타날 수 있다. 특히 지역별 배출 특성과 대기화학 조건이 상이한 만큼, 효과적인 대기질 관리를 위해서는 지역 단위에서 배출부문별 기여도와 저감 영향을 함께 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 2024년 전북지역을 대상으로 CAMx를 이용하여 대기질을 모사하고, 발전, 산업, 수송, 생활(농업)의 4개 배출부문에 대해 PSAT/OSAT을 이용한 source apportionment (SA) 기여도와 BFM을 이용한 배출저감 영향을 비교하였다. 겨울철 $PM_{2.5}$의 경우 PSAT 기여도가 BFM 기반 영향보다 전반적으로 크게 나타났으며, 특히 생활 부문에서 두 방법 간 차이가 가장 크게 나타났다. 성분별로는 NH_4^+에서 PSAT과 BFM의 차이가 가장 컸으며, 이는 주로 생활 부문에서 기인하였다. 또한 날짜별 분석에서도 PSAT과 BFM에 따른 1순위 관리대상 배출부문이 빈번하게 다르게 나타났다. 여름철 O_3의 경우에도 OSAT 기여도와 BFM 기반 배출저감 영향 간 차이가 나타났으며, 이러한 차이는 전북뿐만 아니라 인접한 충남과 전남 등 주변지역에서도 확인되었다. 이러한 결과는 $PM_{2.5}$와 O_3의 효과적인 관리를 위해 배출원별 기여도뿐만 아니라 실제 배출저감에 따른 농도 영향과 지역 간 영향을 함께 고려하여 관리 우선순위를 설정할 필요가 있음을 보여준다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지역맞춤형 오존 관리 기술개발 사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25505137).

PE5

기온 상승에 따른 생물기원 VOC 배출 변화가 지표 오존 농도에 미치는 영향

Impacts of Temperature-Driven Changes in Biogenic VOC Emissions on Surface Ozone and the Effectiveness of NOx Emission Reductions

최 상, 박성규, 김은혜

국립군산대학교 환경공학과

대류권 오존은 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOCs)의 광화학 반응으로 생성되며, 기온과 일사량 등의 기상조건에 큰 영향을 받는다. 특히 식생에서 배출되는 생물기원 휘발성유기화합물(BVOCs)은 오존 생성에 중요한 전구물질이며, 기온 상승에 따라 배출량이 증가할 수 있다. 최근 기후변화에 따른 여름철 고온 현상의 증가는 BVOCs 배출과 오존 생성 환경을 변화시키고, 나아가 인위적 배출 저감정책의 효과에도 영향을 미칠 가능성이 있다. 본 연구에서는 2024년 여름철을 대상으로 MEGAN의 기온 입력자료를 기준조건 대비 각각 2℃, 4℃, 6℃ 상승시켜 BVOC 배출량을 산정하고, 이를 CMAQ에 적용하여 지표 오존 농도 변화를 분석하였다. 모든 실험에서 동일한 기상장을 사용하여 기온 상승에 따른 BVOC 배출 변화의 영향만을 분리하였다. 또한 각 BVOCs 조건에서 국내 NOx 배출량을 저감한 민감도 실험을 수행하여 오존 저감 효과의 변화를 비교하였다. 분석 결과, T+6℃ 조건에서 BVOCs 중 이소프렌 배출량은 BASE 대비 약 2배 증가하였으며, 국내 MDA1 오존은 기간 평균 약 3ppb, 서울에서는 약 8 ppb 증가하였다. 또한 BVOCs 배출 수준에 따라 동일한 NOx 저감에 대한 오존 반응도 다르게 나타났다. 이는 기온 상승에 따른 자연기원 배출 변화가 향후 오존 농도뿐 아니라 배출 저감정책의 효과에도 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지역맞춤형 오존 관리 기술개발 사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25505137).

PE6

한국의 대기환경측정망을 통한 광화학오염물질과 유해대기 휘발성유기화합물 감시 결과 분석

Analysis of Monitoring Results Photochemical Assessment Monitoring Stations and Hazardous Air Pollutants via Korea's Ambient Air Quality Monitoring Network

손종렬, 신새미, 곽호찬[1)]

고려대학교 보건과학연구소, [1)]㈜에코이엔오

한국 기후에너지환경부(MoCEE)는 대기환경측정망(Ambient Air Quality Monitoring Network)을 구축하여 광화학오염물질감시체계(Photochemical Assessment Monitoring Stations)를 가동하고 유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutants)을 감시하고 있다. 감시하고 있는 광화학오염물질(Photochemical)은 56종, 감시하고 있는 유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutants) 중 유기화합물은 16종이다. 직독식 측정 방법을 사용하여 현시성이 높은 (입자상 물질, 황산화물, 질소산화물) 등과 달리, 유기화합물은 연속 자동측정을 실시하고 있어 측정 시점과 결과 도출 시점 간에 간격이 존재한다. 한국 Ambient Air Quality Monitoring Network에서 측정하는 유기화합물의 현시성을 높이기 위한 fast 가스크로마토그래피의 개발을 위해, 현재 감시 네트워크의 측정 장소, 월별 농도 등 측정 현황을 파악하고자 한다. 대기환경월보에 공개된 2025년 1월~12월 측정 결과의 최대, 최소, 평균(불검출 포함, 불검출 제외) 등의 기술통계를 산출하였다. 그 결과 연평균 대표 범위는 톨루엔 0.4~3.8 ppb, 벤젠 0.1~0.7 ppb, m,p-자일렌 0.1~1.0 ppb, 트리클로로에틸렌 0.01~0.6 ppb, 메틸렌클로라이드 0.05~2.0 ppb, 클로로포름 0.01~0.16 ppb, 사염화탄소 0.04~0.11 ppb, 1,3-부타디엔 불검출~0.1 ppb의 분포를 보였다. 그 외 대다수 물질이 sub-ppb 수준이며 상당수 항목이 불검출(N.D.)로 나타난다. 이를 통해 가스 크로마토그래피를 통해 검출한계 이상의 값을 도출하기 위한 농축계수를 추정할 수 있다.

사사 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 Advanced technology development project for predicting and preventing chemical accidents 사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2022-KE002224).

PE7

야적장(원료 등) 비산먼지 배출량 산정방법 연구

Development of an Emission Estimation Method for Fugitive Dust from Raw Material and Fuel Storage Yards

김정희, 장유리, 이동재, 한세현[1], 신동호[2], 주종민, 송형도, 유 철

기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터, [1](주)랩솔레미스, [2]한국에너지기술연구원

현행 CAPSS의 '하역 및 야적' 배출원은 하역부두, 매립지, 폐기물 발생 지역만을 대상으로 하고 있어 2023년 배출량이 TSP 17.9톤, PM-10 6.2톤, PM-2.5 0.6톤에 그치며, 사업장 내 옥외 야적장은 산정 대상에서 누락되어 있다. 이에 본 연구에서는 야적장 비산먼지 발생과정을 야적물질의 취급(상·하차, 이송 등)과 야적더미의 풍식으로 구분하고, 과정별 국외 산정식을 바탕으로 발전, 제철, 시멘트업의 입력변수(수분함량, 풍속, 임계마찰속도 등)를 비교 검토하여 국내 배출량 산정 가능성을 평가하였다. 또한 SEMS 등 기존 자료를 대상으로 야적물질의 종류·저장량·취급량 등 활동도 입수체계를 조사하고, 옥내화·살수·방진망 등 저감시설의 적용 실태와 저감효율 반영 방안을 함께 검토하여 배출량 산정체계(안)을 도출하였다. 도출한 산정체계(안)을 국내 주요 사업장에 시범 적용하여 산정방법별 배출량 결과를 비교·분석하고, 방법 간 차이를 유발하는 주요 인자를 확인하였다. 본 연구 결과는 향후 CAPSS 내 사업장 야적장 배출원 신설 및 배출량 산정의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

PE8

국내 자동차 비배기계 배출량 산정 및 추이 분석

Estimation and Trend Analysis of Non-exhaust Particulate Matter Emissions from Vehicles

신은지, 최권희, 함지영, 송형도, 유 철

기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터

자동차에 의한 대기오염물질 배출을 관리하기 위해 '제2차 미세먼지 관리 종합계획(2025~2029년)'을 기반으로 제작·운행차의 배출허용기준 강화와 전기·수소차의 친환경 자동차 보급 확대 등의 저감대책이 확대되고 있다. 이에 연료 연소에 의한 자동차 배기계 배출과 함께 타이어 및 브레이크 패드 마모 등 비배기계에 의한 대기오염물질(TSP, PM-10, PM-2.5 등) 배출의 관심 또한 높아지고 있다. EU는 Euro-7을 통해 자동차의 배기관 배출가스뿐만 아니라 타이어 및 브레이크 패드 마모에 의한 비배기 입자상물질을 규제 대상으로 포함하고, 관련 기준을 단계적으로 적용하고 있다. 그러나 국내의 경우 브레이크 또는 타이어에 대해 안전, 에너지효율 및 소음을 고려한 기준은 있으나, 대기오염물질 배출 규제 등 환경 규제는 미흡한 상황이다. 또한 국내 대기오염물질 배출량 통계의 경우 자동차 배기계에 의한 오염물질만 고려되고 있으며, 비배기계 배출량은 누락 되어있는 실정이다. 본 연구에서는 국외(미국, 유럽) 타이어·브레이크 마모 배출량 산정방법을 활용하여 국내 적용 가능한 자동차 타이어·브레이크 마모 배출량 산정방법론을 마련하였으며, 미세먼지 배출량을 2018년부터 2023년까지 산정하고, 그 변화 추이를 분석하였다.

PE9

도장시설 배출량 정확도 향상을 위한 산정방법론 개선에 관한 연구

A Study on the Improvement of Emission Estimation Methodologies for Enhanced Accuracy in Painting Facilities

최예지, 임주용, 이향경, 송형도, 유 철

기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터

도장시설은 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)의 주요 배출원으로 자동차 및 선박 제조, 자동차 수리 등의 배출원이 포함된다. 도장시설 VOCs 배출량은 318,500 ton('23년 기준)으로 전체 배출량의 35.4%을 차지하고 있다. 「도료에 대한 휘발성유기화합물의 함유기준」(대기환경보전법 시행규칙 제61조의2)으로 도료의 VOCs 함유량 기준을 점진적으로 강화하고 있으나, CAPSS에서는 '96년 US EPA 배출계수를 용도 구분 없이 일괄 적용하고 있다. 또한, 자동차 제조 및 수리를 제외한 타 도장시설은 방지효율이 적용되지 않고, 일부 도료와 수성도료는 산정되고 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 도장시설에 VOCs 배출량의 정확성 제고를 위해 누락 배출원 발굴, 국내 실정에 맞는 배출계수 도입, 방지효율·공간배분지표 개선 등 산정방법론을 고도화하였다. 현재 도장시설 배출원 분류체계에서 누락된 중방식 도료 및 수성도료를 신규 배출원으로 추가하고, '20~'25년 연구용역을 통해서 개발된 도료 용도별 VOCs 배출계수 및 시설별 방지효율·공간배분지표를 적용하였다. 개선된 산정방법론 적용결과 도장시설 VOCs 배출량은 256,054 ton으로 CAPSS 대비 19.7% (62,851 ton) 감소하였으며, 용도별로는 -79,492 ton에서 32,449 ton의 변동을 나타냈다. 본 연구를 통해 도장시설 VOCs 배출량 산정방법론을 개선함으로써 신뢰성 있는 배출량 통계를 구축하고, 미세먼지 정책 수립을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터의 재원으로 수행된 연구임.

PE10

대기배출사업장 정보 통합관리 효과 분석 연구

A Study on the Effectiveness of Integrated Information Management for Industrial Air Emission Facilities

김재원, 오승일, 최성우, 김민송, 김성준, 김진식[1], 김형천[1], 강 별[1], 조현정[1], 유 철[1]

알씨에어(주), [1]기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터

국내 대기오염물질 배출 사업장을 관리하기 위해 기후에너지환경부는 대기배출원관리시스템(SEMS), 사업장 대기오염물질 관리시스템(stacknsky), 소규모 대기배출시설 관리시스템(GreenLink), 환경측정분석 정보관리시스템(측정인) 및 통합환경허가시스템(IEPS)을 운영하고 있다. 각 시스템들은 대기환경보전법, 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법, 대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법, 환경오염시설의 통합관리에 관한 법률 등에 따라 운영·활용되고 있으며 개별 시스템들의 정보를 연계하기 위한 노력이 시작되었다. 이에 본 연구에서는 국내외 시스템 통합 사례를 조사하여 시스템 통합을 위한 절차 및 개선 효과를 분석하였다. 또한 현행 굴뚝 중심의 DB를 배출시설로 재편성하여 사업장에 부여되는 배출허용기준, 최적방지시설, 허가배출기준 종합 DB를 생성하였다. 이를 통해 업종별, 지역별 관리대상 물질의 종류 및 규제수준을 파악할 수 있었다. 향후 연차별 자료가 누적되고 배출농도 정보가 추가될 경우 관리제도 강화에 따른 정책효과 규명에 도움이 될 것으로 예상된다.

사사 본 연구는 2026년 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터의 지원을 받아 수행된 연구("사업장 대기배출정보 통합플랫폼 마련을 위한 표준화 정보 관리 체계 구축(Ⅱ), R26TA01828423-00)"임.

PE11

친환경자동차 보급에 따른 타이어 마모 미세먼지 배출 영향 분석

Impact of Eco-Friendly Vehicle Deployment on Tire-Wear Particulate Matter Emissions

한세현, 서유정, 유화성, 김정숙

주식회사 랩솔레미스

자동차 배출가스 규제 강화와 전기·수소차 등 친환경자동차의 보급 확대로 도로이동오염원에서 배기관 배출의 중요성은 감소하는 반면, 타이어 및 브레이크 마모 등 비배기계 입자상물질의 상대적 중요성은 증가하고 있다. 특히 전기자동차는 배터리 탑재에 따른 차량중량 증가와 구동 특성 등의 영향으로 내연기관차와 다른 타이어 마모 특성을 나타낼 수 있어, 자동차 전동화가 비배기 미세먼지 배출에 미치는 영향에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 선행연구에서 EMEP/EEA 방법론 및 미국 EPA MOVES 방법론을 적용하여 마련한 국내 타이어 마모 배출량 산정체계를 기반으로, 전기차 등 친환경차 보급 확대에 따른 타이어 마모 미세먼지 배출 영향을 분석하였다. 국내 자동차 등록현황과 차종·연료별 주행거리 등 활동도 자료를 활용하여 전기·수소차, 하이브리드차 및 내연기관차의 보급 현황에 따른 타이어 마모 미세먼지(PM-10, PM-2.5) 배출량 변화를 산정하였다. 또한 향후 무공해차(전기·수소차) 보급 전망 및 시나리오에 따른 배출량 변화를 분석하고, 차량중량 보정 및 배출계수 적용에 따른 불확실성과 민감도 등을 검토하였다. 이를 통해 자동차 전동화 과정에서 나타나는 타이어 마모 미세먼지의 배출구조 변화를 검토하고, 향후 국내 도로이동오염원 배출량 산정체계의 고도화와 비배기 미세먼지 관리정책 마련을 위한 시사점을 제시하고자 한다.

PE12

국내 제빵부문 VOC배출량 산정을 위한 활동도 자료 조사

Survey of Activity Data for Calculating VOC Emissions in the Domestic Baking Sector

김승원, 김 정, 김도연

㈜이아이랩

미국 EPA에서는 제빵 과정에서 에탄올을 포함한 휘발성유기화합물(VOC)이 배출되는 것으로 조사하였으며, 제빵 과정에서 사용하는 효모의 양과 발효 시간을 활용하여 배출계수 식을 제시하고 있다. 유럽 EEA 또한 EMEP/EEA 배출량 가이드북에서 배출계수와 산정방법을 제시하고 있다. 국가 대기오염물질 배출량(CAPSS)에서는 생산공정/식음료 가공/제빵 부문으로 구분하고 배출계수를 제시하고 있으나 배출량을 산정하고 있지 않다. 본 연구에서는 제빵 부문 배출량 산정을 위한 활동도를 통해 제빵 부문 배출량을 추정하고자 하였으며 EMEP/EEA (2023)에서 제시하는 배출계수와 국내 통계자료를 활용하여 제빵 제품의 생산량을 추정하여 국내 제빵 공정의 VOC 배출량을 산정하였다. 활동도 자료는 국내 통계자료 중 밀가루 사용량과 원재료비, 제품군 비율을 활용하여 조사하였다. VOC 배출량은 약 1,251 ton으로 나타났으며, 생산공정 식음료 가공 위스키 등 독주 부문과 설탕 부문 다음으로 높은 것으로 나타났다. 다만, 대형 공장은 대기 중으로 직접 배출하는 것이 아닌 방지시설을 통해 대기 중으로 배출되나 방지시설에 대한 정보가 부족하여 정확한 배출량 산정에서 한계가 있었다.

Session PF 대기위해성

평가위원[PA~PH] : 김용현(전북대학교), 김은혜(국립군산대학교), 김주애(고려대학교), 박대훈(한국기계연구원), 박은하((재)포항산업과학연구원), 박풍모(안산미래연구원), 송영철(한국화학연구원), 오용환(국립부경대학교), 이현정(제주대학교), 정경준(연세대학교), 최나래(강원대학교), 최용주(한국외국어대학교)

평 가 위 원 [P I] : 김민중(명지대학교), 김종범(충남연구원), 나하나(인제대학교), 박승부(서울시립대학교), 이영로(고려대학교)

PF1) 최근 대기 중 비소 농도 증가와 특성
PF2) 국내 친환경 인쇄잉크의 MSDS 기반 VOC 함량 및 노출 잠재 특성 평가
PF3) 위치정보 기반 화학사고 개인 위해도 산정 및 사고규모 예측 알고리즘 개발
PF4) 장기관측자료를 활용한 국내 지표 오존 및 기상요소의 변동과 오존 노출에 따른 건강·경제적 영향 평가
PF5) Environmental Risk Assessment of Health Relevant VOCs and Organic Aerosols in Daegu, South Korea
PF6) 대기 중 나노플라스틱의 흡입 노출 통합 플랫폼 개발: 열적 발생 입자의 폐 및 초기 전신 영향 평가
PF7) 고농도 $PM_{2.5}$ 발생에 따른 인플루엔자 활동의 지연 연관성 분석

PF1

최근 대기 중 비소 농도 증가와 특성

Recent Increase and Characteristics of Atmospheric Arsenic Concentration

최은화, 류근우, 박서인[1], 이명훈

(재)포항산업과학연구원 환경연구소, [1]한화에어로스페이스 PGM연구소

모든 중금속은 고농도일 때 독성 영향이 있지만 중금속 중 비소, 납, 카드뮴, 니켈, 수은, 6가 크롬은 역치가 없는 중금속이다. ATSDR은 빈도, 독성, 노출의 잠재성을 조합하여 미국내 국가적 유해물질 우선순위 목록(SPL)에서 2025년 기준 납, 비소, 카드뮴, 니켈을 각각 1, 2, 3, 6위로 분류하였다. 중금속측정소에서 매월 모니터링되고 있는 12종의 중금속 중 이 4종은 타 중금속과 달리 2017~2025년간 꾸준한 증가 추세다. 특히 우리나라 대기 중 전국의 연평균 비소 농도는 '23년 EU기준치인 6.0 ng/m^3을 초과하였으며 '24년 8.1 ng/m^3, '25년 8.5 ng/m^3을 기록하였다. 2025년 대기환경월보 기준 전국 광역 지자체 중 EU 연평균 기준치를 초과하는 지자체는 6곳(울산(30), 인천(20), 충남(12), 서울(11), 경기(9.7), 세종(7.0))이며, 38개 측정소에서 EU기준치를 초과하였다. 환경의질목표수준(12 ng/m^3) 이상인 측정소는 15곳이었고 울산의 온산산단은 '25년 평균값이 138 ng/m^3으로 전년 61 ng/m^3에 비해 125% 증가하였다. 대기 중 비소의 주요 배출원은 석탄연소, 비철금속 제련, 제철/제강, 난방연소 등이다. 전국 연평균 비소 농도는 코로나 펜데믹 기간인 '21년에 전년 대비 약 21% 감소하였으나 '23년에는 약 63% 증가하였다. 중국의 영향을 비교적 직접적으로 받는 서울과 인천에서 중국 난방기간(12월~2월) 비소 농도는 비난방기간에 비해 2020년 한 해를 제외한 2017~2025년 동안 계속 높았고 통계적으로도 유의한 반면(Wilcoxon singed-rank test, $p<0.05$), 비철금속 단지가 위치한 울산은 난방기간 중 비소의 농도가 더 높다고 할 수 없었다($p>0.05$).

PF2

국내 친환경 인쇄잉크의 MSDS 기반 VOC 함량 및 노출 잠재 특성 평가

MSDS-Based Assessment of VOC Content and Exposure Potential of Environmentally Friendly Printing Inks in Korea

김성동, 노준영, 이동은, 김승진

㈜휴엔릭스

인쇄공정에서 배출되는 휘발성유기화합물(VOC)은 대기 중 광화학반응을 통해 오존과 2차 생성물질을 형성할 뿐만 아니라, 작업환경에서는 작업자의 주요 노출원이 될 수 있다. 인쇄공정에서 작업자의 휘발성유기화합물(VOC) 노출위험은 사용하는 잉크와 용제에 함유된 VOC 성분, 작업시간, 환기상태 및 경화조건에 따라 달라진다. 사용자 맞춤형 인체위험 예측을 위해서는 실시간 농도자료와 함께 제품별 VOC 함유특성 및 주요 노출원에 대한 기초정보가 필요하다. 본 연구에서는 인쇄공정 위험예측 시스템의 노출원 데이터베이스 구축을 위해 국내에서 유통되는 친환경 인쇄잉크의 VOC 함량을 파악하고, 제품 유형별 노출 잠재 특성을 평가하였다. 국내 주요 잉크 제조사 3곳의 식물성 잉크 31개와 UV 경화형 잉크 11개 등 총 42개 제품의 물질안전보건자료(MSDS)를 분석하였으며, 성분별 최소·최대 함량의 중간값을 제품별로 정규화하여 VOC 함유율을 산정하였다. 분석 결과, 휘발성분은 39개 제품에서 확인되었으며 CAS 번호 기준 5종의 물질로 구성되었다. 전체 제품의 추정 VOC 함유율은 0.0~30.0 wt%였으며 평균 12.1 wt%, 중앙값 10.6 wt%였다. 유형별 범위는 식물성 잉크 0.0~30.0 wt%, UV 잉크 0.0~15.9 wt%였다. UV 잉크의 VOC는 주로 아크릴레이트계 반응성 희석제와 관련되었으며, 해당 물질이 대기중으로 배출되지 않는다고 가정할 경우 해당 제품의 계산상 VOC 함유율이 크게 감소한다. 본 연구의 제품별 VOC 함유율과 성분정보는 인쇄공정별 노출위험 예측을 위한 사전 입력자료로 활용될 수 있으며, UV 잉크 사용 시 작업자의 인체 노출위험은 잉크에 포함된 반응성 희석제의 실제 공정 배출률에 따라 크게 달라질 수 있음을 보여준다.

사사 본 논문은 중소벤처기업부 2025년도 스마트 제조혁신 기술개발사업(R&D)의 재원으로 「스마트센서 기반 사용자 맞춤형 인체위험 예측 안전관리 시스템 개발 및 실증」 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-25442617).

PF3

위치정보 기반 화학사고 개인 위해도 산정 및 사고규모 예측 알고리즘 개발

Development of Location-Based Algorithms for Estimating Individual Risk and Predicting Chemical Accident Severity

안영진, 이동은, 노준영, 박종건, 김승진

주식회사 휴엔릭스 첨단기술연구소

화학사고로 누출된 유해 화학물질의 인체 영향은 사고 물질의 농도와 개인의 이동 경로 및 체류 시간에 따라 달라지므로, 개인 위해도와 사고 규모 산정을 위해 물질별 독성 기준과 개인 피해를 함께 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 먼저 급성 개인 피해 등급 산정식을 마련하였으며, US NRC의 AEGL, AIHA의 ERPG 및 US DOE의 PAC에서 제시한 급성 노출 기준과 개인별 노출 농도를 비교하여 급성 개인 위해도를 산정하였다. 만성 개인 피해 등급 산정식은 US EPA IRIS와 EU ECHA의 흡입 독성 참고치를 적용하여 구성하였으며, 개인 노출량과 독성 참고치를 비교하여 만성 위해도를 산정하였다. 마련된 산정식을 적용하여 급성 개인 피해 등급은 해당 없음, 저위험, 중위험 및 고위험으로 구분하고, 만성 개인 피해 등급은 만성 위해도의 유무에 따라 산정하였다. 사고 규모는 급성 개인 피해 등급의 분포, 피해 인원 수 및 개인별 급성 위해도의 합을 종합하여 산정하고, 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하여 각 등급을 상·중·하로 구분하였다. 위치 기반 노출 평가 모델과 개인별 노출량 및 위해도 산정 알고리즘을 개발하기 위해 가상 위치 시나리오를 사용하였으며, 성별·연령별 인구와 이동 특성, 10분 단위 위치 자료 및 사고 물질 농도 자료를 알고리즘에 반영하였다. 본 연구에서 마련한 급성·만성 개인 피해 등급 및 사고 규모 산정 기준과 위치 기반 노출 평가 알고리즘은 화학사고 피해 평가와 사고 대응 및 피해 조사를 위한 자료로 활용될 수 있다.

사사 본 연구는 환경부 한국환경산업기술원「위치정보 기반 화학사고 통합 위해성 평가 플랫폼 개발」(과제번호: RS-2022-KE002176)의 지원으로 수행된 연구임.

PF4

장기관측자료를 활용한 국내 지표 오존 및 기상요소의 변동과 오존 노출에 따른 건강·경제적 영향 평가

Assessment of Long-term Variability in Surface Ozone and Meteorological Variables and Ozone-related Health and Economic Impacts in South Korea

조성빈, 김진승[1], 송상근[1,2], 김규랑

국립기상과학원 기상응용연구부, [1]제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공, [2]제주대학교 지구해양과학과

최근 우리나라에서는 대기오염 저감 정책으로 주요 대기오염물질(PM 등)이 감소하는 반면, 지표 오존(O_3)은 지속적으로 증가하고 있으며, 이러한 변화에는 전구물질 배출과 기상조건의 장기적인 변화가 복합적으로 작용할 수 있다. 특히, 기상조건은 O_3의 생성과 축적·수송 과정에 영향을 미치므로, O_3 농도와 주요 기상요소의 변동성을 함께 고려할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 2005~2024년 국내에서 관측된 O_3, 기온, 풍속 및 상대습도 자료를 수집하여 최근 20년간의 장기 변동성을 분석하고, O_3 노출에 따른 연도별 건강·경제적 영향을 정량적으로 평가하였다. O_3과 각 기상요소는 전체 분석 기간의 평균값을 기준으로 연도별 아노말리를 산출하여 장기적인 변화 추세를 비교하였다. 건강·경제적 영향은 BenMAP v1.5.0.4를 활용하였으며, 통계청의 인구 및 사망원인통계와 국내 역학연구의 메타분석을 통해 추정한 β 계수(0.000342)를 적용하여 조기사망자 수와 사회경제적 비용을 산정하였다. 20년간 O_3 아노말리는 뚜렷한 상승 추세를 보였으며, 이에 따른 조기사망은 2014년 이후 꾸준히 증가하여 2024년에 최대치(731명)가 나타났다. 사회경제적 부담 역시 증가하여 O_3 아노말리에 따른 상대적 경제효과는 2024년 최대 약 2.8조 원 수준으로 가장 크게 나타났다. 또한, 기온, 풍속 및 상대습도의 연도별 아노말리를 통해 요소별 장기 추세를 분석함으로써, 최근 20년간 국내 지표 O_3와 주요 기상요소의 장기 변동 특성을 종합적으로 제시하였다.

사사 본 논문은 기상청 국립기상과학원 “기상업무지원 기술개발연구-생명기상 및 농림기상 기술개발(KMA2018- 00626)”의 지원으로 수행되었습니다. 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25478568).

PF5

Environmental Risk Assessment of Health Relevant VOCs and Organic Aerosols in Daegu, South Korea

S.D.N.A.M. Amila Madhushanka Weerasinghe, Seokwon Kang, Jihoon Son, Kyunghoon Kim, Seung bum Kim[1)], Hyeok Chung[2)], Seung Han Ryu[3)], Jooeun Han[3)], Taehyoung Lee

Department of Environment Science Hankuk University of Foreign Studies,
[1)]Korea Aerospace Research Institute (KARI), [2)]ART Plus Co., Ltd, [3)]DYETEC Research Institute

Urban air pollution contains health relevant VOCs and organic aerosol (OA), whose concentrations and chemical characteristics are influenced by emissions and atmospheric processing. This study investigated the temporal variability, atmospheric processing, and potential source influences of health relevant VOCs and OA in Daegu, South Korea, using high-time-resolution measurements conducted from April 8–27, 2026. Benzene, toluene, ethylbenzene+xylene, styrene, OVOCs, CO, NOx, O_3, and OA were analyzed with meteorological observations and conditional probability function (CPF) analysis. Observed concentrations of selected pollutants were evaluated against Korean ambient air quality standards and WHO health based guideline or risk reference values to provide exposure relevant context. Pronounced diurnal variability was observed. OVOCs and OA also increased during the evening period, while O:C, f_{44}, and OSc exhibited coherent temporal variability, indicating changes in OA oxidation state and atmospheric processing. CPF analysis revealed compound dependent directional influences, with benzene and styrene showing stronger associations with southern southeastern sectors and toluene with a southwestern sector.

Acknowledgments This work was supported by the "Air Environment Unmanned Aerial Vehicle One-stop Platform Technology Development Project" (RS-2025-02213909), funded by the Ministry of Environment, Republic of Korea.

PF6

대기 중 나노플라스틱의 흡입 노출 통합 플랫폼 개발: 열적 발생 입자의 폐 및 초기 전신 영향 평가

An Intergrated Inhalation Platform Reveals Pulmonary and Early Systemic Effects of Thermally Generated Airborne Nanoplastics

서지영[1),2)], 레티황이엔[2)], 권정택[3)], 유한진[4)], 박선영[1)], 조민송[1)], 서도연[3)], 이다은[3)], 이재웅[3)], 전기준[1),2)]

[1)]인하대학교 환경공학과, [2)]수도권 미세먼지연구·관리센터, [3)]국립환경과학원 환경건강연구부, [4)]국립한국교통대학교 환경공학전공

대기 중 나노플라스틱(nanoplastics, NPs)은 흡입 시 폐포까지 도달할 수 있으며, 모세혈관벽을 투과할 가능성이 있어 중요한 호흡기 위해 요인으로 주목받고 있다. 그러나 대부분의 독성 연구는 액상 배양액에 분산된 폴리스티렌 입자를 사용하여 흡입 노출 시 에어로졸이 기도로 전달되는 실제 노출 방식과 에어로졸 공기역학적 거동을 반영한 용량평가(aerosol-resolved dosimetry)가 충분히 반영하지 않았다. 또한, 열적으로 발생한 NPs를 연속적이고 재현가능한 시스템도 부족하다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위해 NPs를 열적 방식을 통해 연속 생성하고, 유효밀도 기반 용량평가와 상피세포와 대식세포로 구성된 기-액 계면(air-liquid interface, ALI) 공동배양 시스템(*In vitro*), 호흡기 노출 방식의 생체 내(*in vivo*) 실험을 결합한 통합 플랫폼을 구축하였다. 발생시킨 NPs의 전기이동도 및 공기역학적 직경을 실시간 측정하여 유효밀도를 산정한 결과 0.41 g/cm^{3}로, 세포 침착량이 단위밀도(1 g/cm^3)로 가정하였을 경우보다 약 2.44 배 과대평가됨을 확인하였다. 이후 폐 상피세포와 대식세포의 ALI 시스템을 통한 노출은 상피 장벽 및 세포막 손상과 함께 미토콘드리아 기능 저하가 나타났으며, 염증 반응을 유도하는 신호물질인 IL-6와 IL-8이 증가하였다. *In vivo* 실험 결과, NPs 급성 노출로 인한 염증 반응 증가와 혈당 상승이 나타났으며 이는 간 스트레스의 초기 징후의 가능성을 보여준다. 따라서 본 연구는 유효밀도를 반영한 용량평가가 필수적임을 보여주며, 이러한 통합 플랫폼이 다양한 흡입 노출 실험에 활용될 수 있음을 시사한다.

사사 본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 기초연구사업 지원(No. RS-2024-00463576)과 과학기술정보통신부(MSIT)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원(No. RS-2024-00416902), 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 탈플라스틱 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

PF7

고농도 $PM_{2.5}$ 발생에 따른 인플루엔자 활동의 지연 연관성 분석

Lagged Association between High $PM_{2.5}$ Episodes and Influenza Activity in South Korea

여민주, 구자호, 이현정[1], 박진수[2]

연세대학교 대기과학과, [1]제주대학교 환경공학과, [2]국립환경과학원 대기환경연구과

미세먼지 노출과 호흡기 감염질환 간의 관련성에 대한 관심이 증가하고 있으나, 기존 연구는 주로 수일 이내의 단기적 영향에 초점을 두어 고농도 $PM_{2.5}$ 발생 이후 수 주에 걸친 인플루엔자 활동의 변화는 충분히 평가되지 않았다. 본 연구에서는 우리나라의 장기간 대기질 및 인플루엔자 감시자료를 이용하여 고농도 $PM_{2.5}$ 발생과 인플루엔자 활동 간의 지연 연관성을 분석하였다. 2015~2025년 전국 도시대기 및 도로변대기 측정망의 $PM_{2.5}$ 농도와 실험실 감시 기반 인플루엔자 자료를 이용하였으며, 코로나19의 영향을 고려하여 2020~2022년은 분석에서 제외하였다. 역학주별 계절적 변동을 고려한 anomaly를 산정하고, single-lag 및 constrained distributed lag 분석을 통해 최대 6주의 시차를 평가하였다. 분석 결과, 연중 전체 기간에서는 일관된 지연 연관성이 확인되지 않았으나, 늦겨울부터 봄철에는 고농도 $PM_{2.5}$ 발생 이후 수 주가 경과함에 따라 인플루엔자 활동과의 양의 연관성이 증가하는 경향이 나타났다. 특히 2019년에는 이례적인 고농도 $PM_{2.5}$ 발생 이후 봄철 인플루엔자 활동이 다시 증가하는 뚜렷한 시계열적 특성이 관찰되었다. 이러한 결과는 고농도 $PM_{2.5}$ 발생이 특정 계절 및 기상 조건에서 이후 인플루엔자 활동을 이해하는 데 활용할 수 있는 보조적인 환경정보가 될 가능성을 시사한다.

Session PG 방지기술

평가위원[PA~PH] : 김용현(전북대학교), 김은혜(국립군산대학교), 김주애(고려대학교), 박대훈(한국기계연구원), 박은하((재)포항산업과학연구원), 박풍모(안산미래연구원), 송영철(한국화학연구원), 오용환(국립부경대학교), 이현정(제주대학교), 정경준(연세대학교), 최나래(강원대학교), 최용주(한국외국어대학교)

평 가 위 원 [P I] : 김민중(명지대학교), 김종범(충남연구원), 나하나(인제대학교), 박승부(서울시립대학교), 이영로(고려대학교)

PG1) 전자선 유도 환원 라디칼에 의한 메탄 및 아산화질소의 분해 효율 평가
PG2) 저함량 루테늄 개질 TiO_2를 이용한 기상 VOC 제거 성능 향상: 촉매의 조성과 이성분 VOC의 상호작용 연구
PG3) 유기용매의 특성이 정전필터 중화에 미치는 영향
PG4) 폴리에틸렌 글리콜 기공형성제가 흡착 비드의 구조와 아세트알데하이드 제거에 미치는 영향
PG5) 장기 연속 질산염 환원을 위한 Ti지지 $ZnCoO_x$ 나노박막 전극 개발
PG6) 촉매 스크러버의 안정적 운전을 위한 전처리 시스템의 SiH4 산화 반응 특성 평가
PG7) 운전조건에 따른 가스상 암모니아의 전기화학적 제거 및 질소 산화생성물로의 전환 특성
PG8) 톨루엔 제거를 위한 생물활성 흡착제의 장기운전 메커니즘 분석 및 평가
PG9) 운전 변동성을 고려한 SCR 탈질공정의 예측-제어 연계 모델 개발
PG10) 전자선을 이용한 암모니아, 황화수소 동시 제거
PG11) 산업공정에서 배출되는 에어로졸 제거를 위한 하이브리드 필터 시스템 개발
PG12) 저배압 세정노즐을 적용한 미세폭기방식 습식세정시스템의 유동해석 평가

PG1

전자선 유도 환원 라디칼에 의한 메탄 및 아산화질소의 분해 효율 평가

Evaluation of Methane and Nitrous Oxide Decomposition Efficiency Driven by Electron Beam-Induced Reducing Radicals

조상희, 김동우[1], 김탁현, 김태훈, 박종석

한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [1]고려대학교 지구환경과학과

메탄(CH_4)과 아산화질소(N_2O)는 지구온난화지수(GWP)가 CO_2 대비 각각 28배, 273배인 주요 온실가스로, 축산 및 산업 배출원에서 복합 가스 형태로 동시 배출된다. 본 연구에서는 CH_4와 N_2O가 단일(Single gas) 또는 혼합(Mixed gas) 가스 조건으로 존재할 때, 전자선(Electron beam) 조사로 유도된 환원 라디칼에 의한 분해 특성을 비교하고자 하였다. 전자선 유도 환원 라디칼을 생성하기 위하여 연속식 전자선 반응 시스템에 고순도 N_2를 배경가스로 공급하면서 초기농도(35, 100, 250 ppm) 및 흡수선량(0~200 kGy)을 다변화하여 실험을 수행하였다. 대상 가스가 단일(Single) 존재하는 조건(CH_4/N_2, N_2O/N_2)과 1:1로 혼합(Mixed)된 조건(CH_4+N_2O/N_2)에서 GC/MS로 농도를 정량분석 하였다. 두 가스 모두 초기농도가 낮고 흡수선량이 증가할수록 분해 효율이 상승하였다. CH_4의 경우, 농도와 관계없이 단일 조건과 혼합 가스 조건 간의 분해 효율 차이가 거의 없었다. 반면, N_2O는 CH_4와 달리 혼합 가스 조건에서 분해 효율이 눈에 띄게 저하(억제)되는 경향을 보였다. 혼합 가스 환경에서는 한정된 라디칼 pool을 두고 CH_4와 N_2O가 경쟁하게 되는데, N_2O 분해 반응이 CH_4 분해 메커니즘 또는 그 부산물(메틸 라디칼 등)에 의해 억제·간섭을 받거나 메틸 라디칼($\bullet CH_3$)이 질소 라디칼을 선점 소모하는 것으로 해석된다.

사사 본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국원자력연구원 주요사업(523330-26)의 지원을 받아 수행된 연구임.

PG2

저함량 루테늄 개질 TiO_2를 이용한 기상 VOC 제거 성능 향상: 촉매의 조성과 이성분 VOC의 상호작용 연구

Low-loading Ruthenium-modified TiO_2 for Enhanced Gas-phase VOC Removal: Effects of Catalyst Formulation and Binary VOC Interactions

이재은, 김기현

한양대학교 건설환경공학과

순수 TiO_2는 낮은 전하 분리 효율로 인해 휘발성유기화합물(VOCs) 제거 성능이 제한된다. 이를 개선하기 위해 본 연구에서는 저함량 Ru 개질 TiO_2 광촉매를 평가한다. 시료는 TR-x로 표기하며, T는 TiO_2, R은 Ru 개질을 의미하고, x는 명목상 Ru/Ti 몰비에 10^4을 곱한 값이다. 순수 TiO_2를 기준으로 서로 다른 명목상 Ru/Ti 몰비를 갖는 TR-x 시료의 성능을 비교해 최적 조성을 선정한다. 실험은 촉매 코팅량, 유입 톨루엔 농도, 가스 유량, 상대습도 및 가스 조성을 제어한 조건에서 수행한다. 톨루엔을 주요 대상 VOC로 선정하고, 폼알데하이드(FA)를 함께 주입해 공존 VOC의 영향을 평가한다. TR-x 촉매 중 최적 시료인 TR-8은 건조 조건에서 톨루엔 농도 1 ppm 및 유량 0.1 L min^{-1}일 때 99.2%의 가장 높은 톨루엔 제거 효율을 나타내며, 이는 순수 TiO_2의 80.7%보다 높다. 또한 TR-8은 9.92 L min^{-1} g^{-1}의 분해 청정공기 공급률(DCADR)과 24.4 μmol g^{-1} h^{-1}의 최대 반응 속도(r-max)를 나타낸다. 이성분 VOC 조건에서는 100 ppm의 폼알데하이드(FA)가 공존할 때 톨루엔 제거 효율이 99.2%에서 16.7%로 크게 감소한다. 이는 강한 경쟁 흡착, 전체 VOC 부하 증가 및 FA의 우선적 산화가 복합적으로 작용할 가능성을 시사한다. 종합적으로, 저함량 Ru 개질 TiO_2는 기상 VOC 산화 성능을 향상시켰으며, 촉매 조성, 운전 조건 및 이성분 VOC 간 상호작용이 광촉매 성능에 영향을 미치는 것을 확인한다.

PG3

유기용매의 특성이 정전필터 중화에 미치는 영향

Effect of Organic Solvents on Charge Neutralization of Electret Filters

최정해[1], 권민선[2], 김준엽[3], 박재현[3], 이명화[1),3)]

[1)]강원대학교 환경공학과, [2)]강원대학교 환경연구소, [3)]강원대학교 미세먼지통합관리학과

정전필터는 동일한 물성을 가지는 무대전 필터의 기계적인 집진메커니즘에 더해 정전기력이 작용하여 더욱 높은 집진효율을 나타내므로 입자상오염물질을 제거하는 데에 주로 활용되고 있다. 그러나 정전필터는 사용함에 따라 정전기력이 감소하여 집진효율이 감소하는 문제점이 발생한다. 따라서 ISO 16890에서는 이러한 문제점을 고려하여 필터의 집진효율을 평가하기 위하여, 인위적으로 정전필터를 포화 IPA 증기에 노출시켜 무대전화시키는 방법을 제시하고 있다. 필터를 중화시키는 용매로서 IPA를 결정한 이유를 선행연구들을 토대로 살펴보면, 정전필터를 중화시킬 때 사용하는 유기용매의 한센 솔루빌리티 파라미터(Hansen Solubility Parameter, HSP)가 정전필터의 소재의 HSP와 유사할수록 중화효율을 높이는 것으로 나타났기 때문이다. 이는 고분자와 용매 간의 HSP 차이가 작을수록 친화성이 커져 필터 깊숙이 침투할 수 있으며, 전하이동성을 증가시킨다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 HSP의 차이가 정전필터의 중화를 결정하는 주요인자인지를 확인하기 위하여 ISO 16890-4의 방법론을 토대로, 다양한 종류의 용매(MEK, IPA, 에탄올,메탄올, 물)에 폴리프로필렌(PP) 정전필터를 노출시켰다. 또한 노출된 필터의 집진효율을 측정하여 HSP의 차이와 집진효율 감소의 상관관계를 도출하고자 하였다.

사사 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NO. RS-2026-25491649).

PG4

폴리에틸렌 글리콜 기공형성제가 흡착 비드의 구조와 아세트알데하이드 제거에 미치는 영향

Effects of Polyethylene Glycol as a Pore-Forming Agent on Adsorption Bead Structure and Acetaldehyde Removal

김민서, 김대근

서울과학기술대학교 환경공학과

아세트알데하이드(Acetaldehyde, AA)는 저농도에서도 악취와 인체 위해성을 유발하는 휘발성유기화합물로 효과적인 제어가 필요하다. 본 연구에서는 분말활성탄, 알지네이트로 구성된 흡착 비드(Adsorption bead)에 폴리에틸렌 글리콜(Polyethylene glycol, PEG)을 기공형성제로 도입하여 PEG의 농도와 분자량에 따른 비드의 구조 변화와 그에 따른 AA 제거성능을 평가하였다. 기공형성제로 PEG400과 PEG3350을 도입하여 비드를 제조하였으며, AA 제거성능은 3L 테들러백 내에 AA 초기 농도를 200 ppm으로 조성한 회분식 실험을 통해 평가하고, SEM과 FTIR을 이용하여 기공 형성과 PEG 잔류 특성을 분석하였다. 실험 결과, PEG400 적용군은 1% 농도에서 가장 높은 제거성능을 보였고, 농도가 증가할수록 제거성능이 감소하였다. SEM 분석에서는 PEG 적용군의 기공 형성이 확인되었으며, 특히 1% 농도에서 가장 균일한 기공 분포가 관찰되었다. 그러나 PEG 적용군은 전반적으로 대조군에 비해 낮은 제거성능을 보였다. FTIR 분석에서 잔류 PEG가 확인되었으며, 이는 미처 용출되지 못한 잔류 PEG가 내부 기공을 차폐하여 가스 확산을 저해했을 가능성을 시사한다. 1% PEG3350 적용군은 동일 농도의 PEG400 적용군 대비 제거성능이 약 21% 향상되었다. 본 연구는 PEG의 농도와 분자량이 비드의 구조와 AA 제거성능에 영향을 미침을 확인하였으며, 최적 기공 분포 형성과 PEG 잔류를 고려한 제조 조건 최적화의 필요성을 제시하였다.

사사 본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NFR-2023R1A2C2003796; NFR-2020R1A6A03042742).

PG5

장기 연속 질산염 환원을 위한 Ti지지 $ZnCoO_x$ 나노박막 전극 개발

Ti-Supported $ZnCoO_x$ Nanofilm Electrode for Long-Term Continuous Nitrate Reduction

김현빈, 전소희, 김태오

국립금오공과대학교 환경공학과

질산염(NO_3^-)의 전기화학적 환원(NO_3RR)을 통한 암모니아(NH_3) 회수는 수질오염 저감과 질소 자원순환을 동시에 달성할 수 있는 기술로 주목받고 있다. 본 연구에서는 Ti 기판에 $ZnCoO_x$ 나노박막을 전착 및 소성 공정으로 제조하고, Co 조성비에 따른 전극의 NO_3RR 성능과 전기화학적 특성을 평가하였다. 그 결과, Co:Zn = 6:1.5 전극은 가장 낮은 전하전달저항을 나타내며 우수한 질산염 환원 및 암모니아 선택성을 보였다. 0.5 M Na_2SO_4 및 1000 mg·L^{-1} NO_3^-N 조건에서 93.7%의 질산염 제거율과 88.9%의 NH_3 생성효율(FE81.8%)을 달성하였으며, 암모니아에 대한 패러데이 효율(FE)은 81.8%, NH_3 생성속도는 0.945 mmol·h^{-1}·mg^{-1}로 확인되었다. 또한 30시간 연속 장기 반응에서도 안정적인 전압 특성을 유지하여 우수한 장기 안정성을 나타냈다. 이러한 결과는 $ZnCoO_x$/Ti 전극의 Co 조성 및 전기화학적 특성이 NO_3RR 성능과 암모니아 선택성에 중요한 영향을 미침을 보여준다. 본 연구는 $ZnCoO_x$/Ti 전극이 질산염을 효과적으로 제거하면서 암모니아를 선택적으로 회수할 수 있는 안정적인 전극 소재로 활용될 가능성을 제시한다.

사사 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-16068884).

PG6

촉매 스크러버의 안정적 운전을 위한 전처리 시스템의 SiH_4 산화 반응 특성 평가

Evaluation of SiH_4 Oxidation Characteristics in a Pretreatment System for Stable Operation of a Catalytic Scrubber

조준표, 신승규, 최은경, 김남형, 이근환, 박준동, 고선용, 박이은, 김준오, 조인아, 김승곤[1], 배경권[2], 김성수[3]

(주)에프에스티, [1]한국에너지기술연구원, [2]탑에코에너지 주식회사, [3]경기대학교 환경에너지공학과

반도체 공정에서 발생하는 복합오염물질을 처리하기 위해 촉매를 적용한 스크러버에 대한 연구가 수행되고 있다. 특히 유입가스 중 SiH_4은 높은 반응성과 가연성을 가지며, 공기와 접촉 시 자연발화 및 폭발의 위험이 있다. 또한 산소의 유무에 따라 Si 계열, SiO_2와 같은 입자상 물질(powder)을 생성하며, 이는 촉매의 활성 저하뿐만 아니라 배관 및 스크러버 내부에 축적되어 막힘과 운전 안정성 저하를 야기한다. 따라서 촉매 시스템의 안정적인 운전을 위해 SiH_4과 입자상 물질을 제거할 수 있는 전처리 시스템의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 SiH_4의 유입 농도와 온도를 주요 변수로 설정하여 반응 특성을 확인하였다. 반응 온도는 heater와 burner를 이용하여 각각 120℃와 300℃ 이상의 조건을 조성하였다. 그 결과, SiH_4 농도가 LEL (Lower Explosive Limit) 이상인 1.5% 수준에서는 heater 적용만으로 반응이 진행되었으며, LEL 미만의 저농도 영역에서는 burner를 이용한 고온 환경에서 반응하는 것을 확인하였다. 반응 과정에서 생성된 입자상 물질을 제거하기 위해 dry cyclone, wet cyclone 및 전기집진기를 연계하여 전처리 시스템을 구성하였다. 유입된 입자상 물질은 dry cyclone의 선회 기류에 의해 1차적으로 포집되고, wet cyclone 내부에 분무되는 순환수를 통해 2차적으로 제거된다. 최종적으로 코로나 방전을 이용한 전기집진기에 의해 미세한 입자까지 처리된다. 그 결과, 모든 실험 조건에서 99% 이상의 입자상 물질 제거효율을 확인하였다. 본 연구 결과를 통해 SiH_4의 안정적인 처리를 위해서는 유입 농도를 고려한 온도 설정이 중요한 것으로 판단된다. 또한 구축된 전처리 시스템은 입자상 물질을 효과적으로 제거함으로써 후단에 연계되는 촉매 시스템의 안정적인 운전에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

사사 본 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00432417, 디스플레이 공정 배출가스 2,000 LPM급 오염물질 전처리 제거 모듈 및 고성능 NOx 흡수 후처리 모듈 개발).

PG7

운전조건에 따른 가스상 암모니아의 전기화학적 제거 및 질소 산화생성물로의 전환 특성

Effects of Operating Conditions on Electrochemical Removal of Gaseous Ammonia and Its Conversion to Nitrogen Oxidation Products

김현준, Govindan Muthraman, 김대근

서울과학기술대학교 환경공학과

암모니아는 축산, 폐수처리 및 산업공정에서 배출되는 대표적인 악취물질로, 대기 중 2차 미세먼지 형성에도 기여한다. 기존의 흡착 및 습식 세정 공정은 가스상 암모니아를 효과적으로 포집할 수 있으나, 포집 후 재생 또는 추가 처리가 요구된다. 본 연구에서는 다공성 니켈폼에 구리·니켈 촉매를 전착한 습윤 전극을 이용하여 운전조건에 따른 가스상 암모니아의 전기화학적 제거와 질소 산화생성물로의 전환 특성을 평가하였다. XRD와 XPS를 이용하여 전극의 구조와 표면 화학상태를 분석하고, LSV, CV 및 EIS를 통해 암모니아 유입에 따른 전기화학적 거동을 평가하였다. 전해질 pH, 전류밀도 및 가스 유량을 변화시키며 암모니아 제거효율과 제거량, 전해질 내 잔류 암모니아 및 질소 산화생성물을 분석하였다. 또한 가스상 NOx와 N_2O의 생성 여부를 모니터링하고, 연속 운전에 따른 제거 성능과 산화생성물의 변화를 평가하였다. 실험 결과, 전류 인가는 가스상 암모니아 제거에 기여하였으며, 가스상 NOx와 N_2O는 검출되지 않았다. 전해질 pH에 따라 암모니아의 전기화학적 산화 및 질소 산화생성물로의 전환이 달라졌으나, 전류밀도 증가에 따른 뚜렷한 변화는 나타나지 않았다. 가스 유량이 증가할수록 제거효율은 감소하고 제거량은 증가한 반면, 제거된 암모니아 대비 산화생성물의 비율은 감소하였다. 본 연구는 운전조건에 따른 가스상 암모니아의 제거와 질소 산화생성물로의 전환을 규명함으로써 전기화학적 암모니아 처리공정의 운전조건 설정을 위한 기초자료를 제공한다.

사사 본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2023R1A2C2003796; NRF-2020R1A6A1A03042742).

PG8

톨루엔 제거를 위한 생물활성 흡착제의 장기운전 메커니즘 분석 및 평가

Long-Term Operational Mechanism of a Bioactive Adsorbent for Toluene Removal: Analysis and Evaluation

정락영

서울과학기술대학교 환경공학과

휘발성유기화합물(Volatile organic compounds, VOCs)는 유기용매 사용, 원료 가공 등 산업공정에서 전반적으로 발생하며, 지속적인 노출시 만성 질환을 유발할 수 있다. VOCs 제어 기술에는 농도 범위에 따라 제어기술이 다르며 특히 악취를 유발하는 정도인 저농도 제어에는 흡착제 사용과 생물학적 처리가 주로 사용된다. 하지만 각 제어 기술은 흡착제 재생 및 폐기 비용이 발생하고, 생물학적 처리는 물질전달 한계로 인해 소수성 물질 제거에는 비효율적이다. 이를 보완하기 위해 개발된 생물활성 흡착제(Bioactive adsorbent, BA)는 흡착제, 미생물을 사용하여 VOCs 흡착 후 생분해를 유도할 수 있도록 개발되었으며 이를 고정하기 위해 천연 하이드로겔인 알지네이트로 두 가지를 고정하였다. 또한 비드의 외부와 내부 기능을 분리하여 흡착과 생물학적 처리가 순차적으로 가능하였으며 200일 이상 운전이 가능하고, BA 1 kg당 소수성 VOCs 중 하나인 톨루엔을 40 g 제거할 수 있었다. 하지만, 미생물 성장의 정성적인 분석등 일부를 제외하고, BA의 톨루엔 소비 과정의 명확한 메커니즘은 불분명하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 본 연구는 BA의 VOCs 제거 장기운전 메커니즘을 정량적으로 분석하고자 하였다. BA의 톨루엔 제거 단계를 1. 비드 운전기간 중 발생한 CO_2, 2. 바이오매스의 증가, 3. 내부 포획된 톨루엔 및 CO_2, 4. 대사 중간체로 총 4단계로 분리하여 정량적인 분석을 진행하고자 하였다. 먼저, GC-Methanizer 분석 결과, 제거된 톨루엔 대비 CO_2 전환율은 65.5%로 가장 주요한 탄소 전환 방법으로 확인되었다. 생물활성흡착제의 명확한 매커니즘 분석은 저농도의 VOCs 제어뿐만 아니라 더 넓은 범위의 오염물질 제어 모듈 기술의 개발로 기대된다.

사사 본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2023R1A2C2003796; NRF-2020R1A6A1A03042742).

PG9

운전 변동성을 고려한 SCR 탈질공정의 예측-제어 연계 모델 개발

Development of an Integrated Prediction-Control Model for SCR De-NOx Processes under Operating Variability

윤원근, 김희진, 이상균, 김태형

(재)포항산업과학연구원 환경연구소

배가스 조성과 운전 부하는 원료 특성 및 조업 조건에 따라 지속적으로 변동하므로, 선택적 촉매 환원(Selective Catalytic Reduction, SCR) 설비에서 고정된 운전 조건으로 NOx 배출 규제 달성, 추가 오염 물질 억제 등 안정적 운영은 불가능하다. 본 연구에서는 실제 설비에서 수집한 조업 변수와 시계열 데이터를 이용하여 공정 변동에 대응하는 예측-제어 연계 방법을 개발하였다. 결측값과 이상값을 처리하고 공정변수와 NOx 농도 사이의 시간지연을 보정한 후, Random Forest 기반 soft sensor를 구축하여 SCR 전단 NOx 농도를 예측하였다. 구축된 모델은 결정계수 0.80과 RMSE 5.9의 성능을 나타냈으며, 예측값을 강화학습 제어기의 상태변수로 활용하였다. 제어기의 보상 함수에는 후단 NOx 농도 구간별 비대칭 페널티와 환원제 사용량 및 주입량 변동에 대한 제약을 반영하였다. 특히 배출기준에 근접할수록 페널티를 단계적으로 증가시켜 NOx 농도 초과를 예방하고, NH_3 슬립 방지를 위해 불필요한 과잉 주입과 급격한 제어 동작을 동시에 억제하도록 설계하였다. 실제 운전자료를 기반으로 기존 운전 방식과 비교한 결과, 제안 방법은 급격한 부하 변동에서도 후단 NOx 농도의 안정성을 유지하면서 환원제 사용량을 15% 이상 줄일 가능성을 보였다. 본 연구는 전단 농도의 직접 측정이 제한되거나 측정 시차가 존재하는 산업용 SCR 공정에서 데이터 기반 예측과 안전 제약 제어를 결합한 지능형 운전 지원 기술의 적용 가능성을 제시한다.

PG10

전자선을 이용한 암모니아, 황화수소 동시 제거

Simultaneous Removal of Ammonia and Hydrogen Sulfide Using Electron Beam

김동우[1),2)], 조상희[1)], 김태훈[1)], 이미혜[2)], 김탁현[1)], 박종석[1)]

[1)]한국원자력연구원 첨단방사선연구소 방사선융합연구부, [2)]고려대학교 지구환경과학과

악취는 다양한 원인에 의해서 발생한다. 특히, 악취로 인한 민원 중 축산업에 관련된 악취가 거의 50%로 가장 많은 비율을 차지한다. 일반적인 산업에서 발생하는 대기오염물질들과 다르게 가축의 대사활동으로 인해 축산악취가 발생하기 때문에 관리, 저감할 때 어려움이 있다. 본 연구에서는 악취물질로 가장 많이 측정되는 암모니아(NH_3), 황화수소(H_2S)에 대하여, 고도산화처리(AOPs) 기술의 하나인 전자선을 사용하여 축산악취가스 저감시 이들 두 가스물질이 혼합되어있을 때의 반응특성에 관한 연구를 수행하였다. 악취물질 초기농도는 암모니아, 황화수소 각각 25, 50, 75 ppm, 유속은 20 L/min, 전자선 흡수선량은 1~5 kGy로 설정하였다. 각각 단일, 혼합가스 상태일 때, 각각의 반응조건에서의 제거효율을 비교하였다. 그 결과, 단일가스 상태일 때, 황화수소가 암모니아보다 전자선 조사로 인한 제거효율이 상대적으로 더 높았다. 단일가스 상태에서 악취의 농도가 25, 50, 75 ppm일 때, 흡수선량 5 kGy 구간에서 암모니아 92.0, 88.0, 85.3%, 황화수소 98.6, 94.0, 80.0%의 제거효율을 보였다. 혼합가스 상태일 때, 황화수소는 단일가스일 때와 비교하여 비슷한 제거효율을 보였으나, 반면에 암모니아는 98.1, 99.0, 99.3%의 제거효율을 보여, 6~16% 정도 제거효율이 높아졌다. 이러한 현상은 황화수소가 분해되면서 나오는 SO_2, H_2SO_4 등의 물질들이 암모니아와 결합하여 염을 생성함으로써 암모니아 제거효율이 향상되는데 영향을 미침을 확인하였다.

사사 본 연구는 2026년도 한국원자력연구원 주요사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 523330-26).

PG11

산업공정에서 배출되는 에어로졸 제거를 위한 하이브리드 필터 시스템 개발

Development of a Hybrid Filter System to Remove Aerosol Emitted from Industrial Processes

박병규, 최인영, 임수길, 이다연[1], 민지홍[1], 김대옥, 김조천, 한진석[1], 딘브엉

건국대학교 실내환경관리센터, [1]건국대학교 사회환경공학부

인쇄, 도장, 조리 등의 산업공정에서는 다량의 에어로졸이 배출되며, 이러한 에어로졸은 일반적으로 고체 입자와 오일 성분으로 구성되어 높은 점착성을 나타낸다. 따라서 기존의 입자 제거 기술만으로는 에어로졸을 효과적으로 제거하는데 한계가 있다. 본 연구에서는 관성 충돌 및 계면 포집 메커니즘을 기반으로 한 하이브리드 필터 시스템을 개발하였으며, 입자 제어 성능을 향상시키기 위하여 필터 표면에 미세 오일층을 형성하여 적용하였다. 실험실 규모의 필터 모듈을 제작하고 DEHS 오일을 이용하여 에어로졸을 발생시킨 후 시스템의 성능을 평가하였다. 실험 결과, 300 m^3/h의 유량 조건에서 시스템의 압력손실은 2 mmH_2O 이하로 나타났으며, PM_{10}과 $PM_{2.5}$의 평균 제거효율은 각각 96.4%와 94.3%로 확인되었다. 필터 표면에 미세 오일층을 형성하여 적용한 경우 PM_{10}과 $PM_{2.5}$의 평균 제거효율은 각각 98.2%와 96.5%로 약간 더 향상됨을 알 수 있었다. 또한 미세 오일층의 휘발성유기화합물(VOCs) 제거 성능을 평가한 결과, 톨루엔의 평균 제거효율은 90% 이상으로 나타났다. 결과적으로 개발된 하이브리드 필터 시스템은 낮은 압력손실을 유지하면서 높은 입자상 물질 제거효율을 나타냈으며, 산업공정에서 배출되는 에어로졸을 효과적으로 제어하기 위한 기술로서의 적용 가능성을 입증하였다. 또한 공정에 따라서는 에어로졸과 함께 VOCs도 동시에 제거될 수 있음을 확인하였다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 CLEAN-AIR 기술개발 사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25504540).

PG12

저배압 세정노즐을 적용한 미세폭기방식 습식세정시스템의 유동해석 평가

Flow Analysis Evaluation of a Micro-Aeration Wet Cleaning System Using Low-Pressure Cleaning Nozzles

엄준업, 박문례, 노학재, 박현진

(주)벨이앤씨

일반적인 습식세정시스템은 반응기 내부에 충진물(Packing)을 적용하여 기·액 접촉면적을 확보하지만, 장기간 운전 시 충진물의 오염에 따른 압력손실 증가와 세척·교체 비용이 발생하며 부식 및 2차 오염의 우려가 있다. 본 연구에서는 이러한 기존 충진식 습식세정시스템의 한계를 개선하기 위해 저배압 세정노즐을 이용하여 흡수액 내부에 미세기포를 형성하고 기·액 접촉을 증대시키는 미세폭기 방식을 고안하였다. 미세폭기 방식은 배출가스가 저배압 세정노즐을 통과하는 과정에서 난류성 기·액 접촉과 미세기포 생성을 유도하고, 반응부 내에서 기포의 체류 및 분산을 통해 오염물질과 흡수액 간의 접촉면적과 반응시간을 증가시키는 방식이다. 선행연구에서 수행한 저배압 세정노즐의 유동해석 결과를 바탕으로 미세폭기 효과와 압력손실 특성을 개선하기 위해 반응부 및 세정노즐의 형상과 구조를 보완하였다. 개선된 구조에 대해 전산유체역학(CFD)을 이용하여 반응부 내부의 유동, 유속 및 압력분포와 기포 생성·분산 특성을 분석하였으며, 구조 개선 전·후의 유동 특성을 비교하여 미세폭기 방식의 적용 가능성을 평가하였다. 또한 CFD 해석 결과를 기반으로 반응부와 저배압 세정노즐의 설계조건을 도출하고 이를 반영한 시작품을 제작하였다. 본 연구를 통해 기존 충진물을 대체하면서 저압손실을 유지하고 기·액 접촉효율을 향상시킬 수 있는 미세폭기방식 습식세정시스템의 설계 기반을 마련하고자 한다.

사사 이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25500876).

Session PH 원격탐사·센서

평가위원[PA~PH] : 김용현(전북대학교), 김은혜(국립군산대학교), 김주애(고려대학교), 박대훈(한국기계연구원), 박은하((재)포항산업과학연구원), 박풍모(안산미래연구원), 송영철(한국화학연구원), 오용환(국립부경대학교), 이현정(제주대학교), 정경준(연세대학교), 최나래(강원대학교), 최용주(한국외국어대학교)

평 가 위 원 [P I] : 김민중(명지대학교), 김종범(충남연구원), 나하나(인제대학교), 박승부(서울시립대학교), 269 이영로(고려대학교)

PH1) 항공원격측정 장비 EMSA를 활용한 주성분 분석 방법 기반 이산화질소 연직적분농도 산출
PH2) 에어로졸의 광학특성과 시정자료 기반 Aerosol Scale Height 산출
PH3) 기상 및 위성자료를 활용한 머신러닝 기반 태국 지표 오존 농도 추정
PH4) 천리안 위성 2B호 에어로졸 광학 두께 산출물의 구름 제거 전처리 체계 개발 및 오차 특성 진단
PH5) 초소형 온실가스 관측 위성의 온실가스 농도 산출을 위한 Optimal Estimation 기반 Full-Physics 알고리즘 개발
PH6) 온실가스 위성 산출물 검증을 위한 소형 지상 관측 원격장비 개발
PH7) NO_2 연직분포 자료에 따른 GEMS 대류권 NO_2 산출 영향 조사와 TROPOMI와의 비교
PH8) 지상 기반 O_2 A-band Multi-Axis 관측을 이용한 에어로졸 연직 프로파일 산출
PH9) 산불감시 스캐닝 LiDAR를 활용한 연소 에어로졸의 광학특성 분석
PH10) 지표부터 상층대류권까지 위성자료 및 재분석자료를 이용한 2025년 한국 산불 대기질 평가
PH11) ASIA-AQ 기간 중 HSRL-2 에어로졸 소광계수 프로파일 유형별 GEMS AEH 산출 편향 분석

PH1

항공원격측정 장비 EMSA를 활용한 주성분 분석 방법 기반 이산화질소 연직적분농도 산출

Retrieval of Nitrogen Dioxide Vertical Column Density Based on Principal Component Analysis Using the EMSA Airborne Remote Sensing Instrument

박호성, 최회준, 신선아[1], 홍현기[1], 이원진[1], 정욱교

부경대학교 공간정보시스템공학과, [1]국립환경과학원 환경위성센터

EMSA (Environment Monitoring Spectrometer for Aircraft platform)는 정지궤도 환경위성 탑재체 GEMS (Geostationary Environment Monitoring Spectrometer)의 산출물 검증을 주요 목적으로 개발된 항공 원격측정 분광기이다. 측정 영역은 자외선(290~400 nm)과 가시광선(415~695 nm)으로, 고해상도 관측이 가능하여 GEMS 자료 검증뿐만 아니라 기체상 대기오염물질 및 미세먼지의 시공간 분포 관측에도 활용할 수 있다. 본 연구에서는 EMSA L1b 자료에 주성분 분석법(PCA, Principal Component Analysis)을 적용하여 이산화질소 경사적분농도(SCD, Slant Column Density)를 산출하고, 기하 대기질량인자(AMF, Air Mass Factor)를 이용하여 이산화질소 연직적분농도(VCD, Vertical Column Density)를 도출하였다. 이후 산출 결과를 기존 차등광학흡수분광법(DOAS, Differential Optical Absorption Spectroscopy) 기반 산출물 및 정지궤도 위성 GEMS, 지상 관측망 AirKorea 이산화질소 자료를 이용하여 두 방법의 고농도 플룸 탐지 성능과 배경 농도 산출 특성을 평가하였다. 평가 결과 두 방법의 고농도 플룸 공간 분포는 매우 유사하게 나타났다. 배경 영역에서는 두 방법의 특성이 뚜렷이 구분되었으며, 지상 관측망과의 공간 상관은 PCA 산출에서 더 높게 나타났다. 이는 PCA 기법이 항공 관측 자료만으로 고농도 플룸과 배경을 안정적으로 구분할 수 있음을 의미하며, 항공관측 기반 위성 산출물 검증에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 2025년도 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2025-04-02-035).

본 연구는 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 G-램프(LAMP) 사업 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00301702).

PH2

에어로졸의 광학특성과 시정자료 기반 Aerosol Scale Height 산출

Estimation of Aerosol Scale Height Based on Aerosol Optical Properties and Visibility Data

박지민, 홍진규, 김상우[1], 유정아[2], 구자호

연세대학교 대기과학과, [1]서울대학교 대기과학과, [2]환경위성센터

광학 특성 기반 유형분류는 에어로졸의 종류를 이해하는 데 효과적이다. 그러나 동일한 유형의 에어로졸이라고 하더라도 대기 중 수직 분포는 기상 조건 및 수송과정에 따라서 크게 달라질 수 있다. 이러한 에어로졸의 연직분포는 복사 효과, 대기질, 위성 관측 정확도 들에 직접적인 영향을 줄 수 있다. 따라서 에어로졸의 수직 분포 특성을 이해할 수 있는 지표가 필요하다. 현재 에어로졸의 수직 분포를 이해할 수 있는 지표로는 Planetary Boundary Layer Height (PBLH), Aerosol Layer Height (ALH), Aerosol Effective Height (AEH) 등 여러 가지가 존재한다. 하지만 같은 자료라도 산출되는 방식이나 기기가 다르고, 그에 따라서 가가 서로 다른 물리적 의미와 대기 특성을 반영한 결과값을 나타내게 된다. 그렇기 때문에 각 Height는 서로 다른 물리적 의미를 가지게 되고, 서로를 대체하기보다 상호 보완적인 자료로 사용되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 Koschmieder 방정식과 시정 자료, AOD 자료를 이용하여서 새로운 산출물인 Aerosol Scale Height (ASH)를 산출하고자 한다. 이 산출물은 크게 두 가지 가정이 들어가는데 첫 번째는 에어로졸이 대기경계층에 모두 깔려있다는 전제, 두 번째는 시정이 에어로졸의 영향에 의해서 변화한다는 전제가 들어간다. 결론적으로 ASH의 결과와 기존에 산출되던 Height들의 정보를 상호 비교함으로써 실제 대기 상황을 추정해 보고, ASH의 활용 가능성을 제시하고자 한다.

사사 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25492298).

PH3

기상 및 위성자료를 활용한 머신러닝 기반 태국 지표 오존 농도 추정

Machine Learning-Based Estimation of Surface Ozone Concentrations in Thailand Using Meteorological and Satellite Data

홍윤지, 나성균, 이주희, 구자호

연세대학교 대기과학과

동남아시아 지역은 저위도에 위치해 연중 강한 태양복사와 도시 및 산업활동, 생물연소 등에서 배출되는 오존 전구물질의 영향으로 광화학적 오존 생성이 활발하게 나타날 수 있는 환경이다. 지표 오존은 인체 건강에 악영향을 미칠 수 있어 지상 농도를 파악하는 것이 매우 중요함에도 불구하고 현재까지 동남아시아 지역은 지상 오존 관측망이 매우 제한적이며, 위성이 관측하는 오존 정보 역시 대류권·성층권 오존으로 지표 농도와는 차이가 있어 관측 공백 지역의 지표 오존 분포를 파악할 대체 방법이 필요하다. 본 연구는 ERA5 (ECMWF Reanalysis v5)의 기상 변수(풍속, 기온, 습도, 기압, 경계층고도 등)와 지표하향단파복사 SSRD (Surface Solar Radiation Downwards), GEMS 위성 기반, 자외선지수(UVI), 대류권 오존(O_3) 및 이산화질소(NO_2) 컬럼농도를 입력변수로 하고, 태국 내 100여 개 OpenAQ 지상관측소 자료로 CatBoost (Categorical Boosting) 기반 지표 오존 추정 모델을 학습하였다. 기상장만 사용한 기준모델에 일사량, 자외선지수(UVI), 위성 화학종 정보를 단일 및 조합으로 순차 추가하며 성능 변화를 비교했고, 10-fold CV (Cross-Validation)과 LOSO (Leave-One-Station-Out)를 함께 수행해 예측 성능과 공간 일반화 능력을 각각 평가했다. 변수 중요도는 SHAP (SHapley Additive exPlanations) 분석으로 해석했다. 10-fold CV 기준으로 기상장만 사용한 모델은 R^2 = 0.77, RMSE = 5.47 ppb였으나, 위성 대류권 O_3 및 NO_2를 포함한 전체 변수 모델에서는 R^2 = 0.95, RMSE = 3.16 ppb (rRMSE 14.4%)까지 개선되어, 위성 기반 대류권 화학종 정보가 지표 오존 추정 정확도를 높이는 데 기여함을 확인했다. 반면 LOSO 검증에서는 R^2가 0.42~0.44 수준에 머물러, 위성-지상 자료 간 공간 매칭 방식이 미관측 지점 예측 성능에 영향을 미칠 수 있음을 확인했다. 계절적으로는 겨울~봄철 태국 동부 지역에서 비교적 높은 지표 오존 농도가 모의되었다.

사사 본 연구는 국립기상과학원「지구대기감시자료 품질관리 기술 개발」연구용역 사업의 지원으로 수행되었습니다.

PH4

천리안 위성 2B호 에어로졸 광학 두께 산출물의 구름 제거 전처리 체계 개발 및 오차 특성 진단

A Cloud Screening Preprocessing Framework for GK-2B Aerosol Optical Depth: Development and Impact on Retrieval Errors

김준희, 강다현, 권형안[1], 정욱교[2], 이상무

서울대학교 지구환경과학부, [1]수원대학교 환경에너지공학과, [2]부경대학교 지구환경시스템과학부

천리안 위성 2B호(Geostationary Korea Multi Purpose Satellite-2B, GK-2B)에는 Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)-II와 Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer (GEMS) 센서가 함께 탑재되어 있다. 두 센서는 낮 시간 동안 동아시아 지역을 교대 관측하며 에어로졸 광학 두께(Aerosol Optical Depth, AOD)를 산출한다. 이러한 고빈도 위성 관측을 대기화학수송모델에 입력할 경우 초기장 개선에 기여할 수 있으나, 자료동화는 관측오차가 불편향된 정규분포를 따른다는 가정에 기반하므로 위성 관측 AOD를 모델에 동화하기 위해서는 해당 산출물의 계통적 편향에 대한 보정이 선행되어야 한다. GOCI-II 및 GEMS는 열적외 채널의 부재로 구름 오염에 취약하며, 구름 오염은 AOD의 계통적 과대 추정에 기여한다. 그러나 GOCI-II 및 GEMS AOD에 대한 기존 연구는 지상관측과의 비교검증에 집중되었으며, 자료동화를 위한 전처리 방법을 다룬 사례는 드물다. 따라서 본 연구에서는 GOCI-II 및 GEMS 550 nm AOD를 위한 구름 제거 전처리 체계를 개발하고, 전처리 이후 잔존하는 두 센서 AOD 산출물의 오차 구조를 비교하였다. 본 연구 결과는 GOCI-II 및 GEMS 550 nm AOD 동화 시 관측오차 설정 및 편향 보정의 근거로 활용될 수 있으며, 이를 통해 대기화학수송모델의 대기질 예측 성능 향상에 기여할 것으로 기대된다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2026-01-02-026). 본 연구는 기상청 국립기상과학원「위험기상 분석 및 예보기술 고도화」(KMA2018-00121)의 지원으로 수행되었음.

PH5

초소형 온실가스 관측 위성의 온실가스 농도 산출을 위한 Optimal Estimation 기반 Full-Physics 알고리즘 개발

Development of an Optimal Estimation-Based Full-Physics Retrieval Algorithm for the Korea Greenhouse Gas Monitoring CubeSat Mission

박 경, 정연진[1], 이한림, 홍현기[2]

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공, [1]국립부경대학교 SEED연구소, [2]국립환경과학원 환경위성센터

온실가스는 지표면에서 방출되는 적외선을 흡수하고 다시 방출하며 지구 온도를 따뜻하게 유지한다. 이러한 온실가스의 농도는 인간 활동으로 인해 급격히 증가하며 기후변화 등의 심각한 환경문제를 유발한다. 이에 따라 위성 등 다양한 플랫폼을 이용한 온실가스 배출원 및 배출량 감지와 검증 기술 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 국내 최초로 개발되는 초소형 온실가스 관측 위성을 기반으로 위성 자료 처리 및 활용을 위한 이산화탄소(Carbon dioxide, CO_2) 및 메탄(Methane, CH_4) 농도 산출 알고리즘을 개발하였다. 본 알고리즘은 약 0.2~0.3 nm의 분광 해상도를 갖는 초소형 위성 탑재 단파적외선(SWIR) 분광기의 관측 특성을 고려한 Optimal Estimation 방식의 Full-Physics 기반 구조로 개발되었다. Full-Physics 알고리즘은 복사전달모델을 이용하여 관측 스펙트럼을 모의하고, 관측값과 모의값의 차이를 최소화함으로써 온실가스 농도와 관련 대기 상태 변수를 동시에 추정할 수 있다. 또한 초소형 위성 센서의 분광기 특성과 관측 불확실성을 고려하여 산출 조건 및 주요 입력 변수를 최적화하였다. 본 연구는 향후 초소형 온실가스 관측 위성 자료로부터 신뢰도 높은 농도 자료 생산 기반 기술로 활용될 수 있고 국가 및 지역 차원의 탄소중립이행 및 감축 정책 효과 평가를 지원하기 위한 핵심 자료로 기여할 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2026-05-02-002).

PH6

온실가스 위성 산출물 검증을 위한 소형 지상 관측 원격장비 개발

Development of a Compact Ground-Based Remote Sensing Instrument for Validation of Greenhouse Gas Satellite

박선영[1], 이한림[1),2)], 박선호[1], 박주선[3], 홍현기[4]

[1]노바스콥(주), [2]부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공,
[3]부산대학교 환경연구원, [4]국립환경과학원 환경위성센터

정확한 온실가스 관측은 위성 관측자료 검증을 위한 기준 측정자료 확보에 필수적이다. Total Carbon Column Observing Network (TCCON) 및 COllaborative Carbon Column Observing Network (COCCON)과 같은 기존 검증 관측망은 고품질 자료를 제공하지만, 장치의 복잡성과 높은 설치·유지관리 비용으로 인해 공간적 확대에 한계가 있다. 이에 따라 새로운 위성 임무의 검증을 지원할 수 있는 소형·저비용 지상 관측기기의 필요성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 2028년까지 발사가 계획된 국립환경과학원의 온실가스 초소형 위성 군집을 포함한 지역 위성 임무의 검증을 지원하기 위해 소형 지상 원격탐사 관측기기를 개발하였다. 개발된 관측기기는 온실가스의 1.6 μm 흡수대역을 관측하는 회절격자 분광기를 적용하여 기존 푸리에 변환 분광기(FTS)보다 복잡하지 않고 이동성이 높은 시스템으로 설계하였다. 또한 최소제곱법 기반의 산출 알고리즘을 적용하여 건조공기 기준 연직기둥 평균 몰분율(Xgas)을 산출하고, 온실가스 흡수 민감도를 높이고 다른 대기 성분의 간섭을 최소화하도록 분광해상도를 최적화하였다. 정확한 태양추적을 위해 태양 중심 추적 알고리즘을 적용하고, 분광기와 제어 전자장치를 단일 소형 모듈로 통합하여 이동성, 설치 편의성 및 운영 안정성을 향상시켰다. 본 관측기기는 기존 FTS 기반 검증 시스템을 보완하는 실용적이고 경제적인 대안으로서, 대한민국 온실가스 큐브위성 임무의 검증과 온실가스 관측망 구축에 기여할 것으로 기대된다.

사사 본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2026-05-02-005).

PH7

NO_2 연직분포 자료에 따른 GEMS 대류권 NO_2 산출 영향 조사와 TROPOMI와의 비교

Impact of A Priori NO_2 Data on GEMS Operational Tropospheric NO_2 Retrievals and Comparison with TROPOMI

박정현, 이한림, 정연진[1], 홍현기[2], 이원진[2], 신선아[2]

부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공, [1]부경대학교 SEED연구소, [2]국립환경과학원 환경위성센터

위성 NO_2 산출에 사용되는 대기질량인자(AMF)는 관측 기하, 지표 반사도 및 구름 특성뿐만 아니라 NO_2의 연직 분포와 같은 모델 입력자료의 영향도 받는다. 모델 기반 NO_2 연직 프로파일은 배출량, 화학 및 수송 과정, 기상장, 그리고 모델의 시공간 해상도에 따라 달라질 수 있으며, 이에 따라 AMF 계산에 사용되는 모델 자료에 따라 산출된 NO_2 연직칼럼농도(VCD) 또한 달라질 수 있다. 본 연구에서는 TROPOMI NO_2 산출에 사용되는 TM5-MP 기반 a priori NO_2 연직 프로파일과 GEOS-Chem 기반 연직 프로파일을 각각 GEMS AMF 계산에 적용하고, 이에 따라 산출된 NO_2 VCD를 TROPOMI 관측자료와 비교하였다. GEMS와 TROPOMI 자료를 동일한 시공간 조건으로 일치 시킨 후, 총 NO_2 VCD와 대류권 NO_2 VCD에 대해 상관계수, 회귀기울기 및 절편을 분석하였다. TM5-MP 기반 연직 프로파일을 적용한 경우, GEOS-Chem 기반 프로파일을 사용한 결과와 비교하여 상관계수의 변화는 크지 않았다. 그러나 TROPOMI 대비 양의 회귀절편은 감소하였으며, 회귀기울기는 1:1 선에 가까워지는 경향을 보였다. 계절적으로는 겨울철에 GEMS NO_2 VCD가 TROPOMI보다 높게 나타나는 경향을 보인 반면, 여름철에는 상대적으로 낮게 나타났다. 이러한 결과는 AMF 계산에 사용되는 a priori NO_2 연직 프로파일의 차이가 GEMS NO_2 산출값과 TROPOMI 관측값 간의 일치도에 유의한 영향을 줄 수 있음을 보여준다.

사사 본 연구는 국립환경과학원 환경위성센터의 지원을 받아 수행되었습니다(NIER-2026-04-02-019).

PH8

지상 기반 O_2 A-band Multi-Axis 관측을 이용한 에어로졸 연직 프로파일 산출

Aerosol Vertical Profile Retrieval Using Ground-Based O_2 A-Band Multi-Axis Observations

윤이슬, 강영웅[1], 최원이[2], 홍현기[3], 이한림[4,5]

국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [1]부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공,
[2]NASA Goddard Space Flight Center, [3]국립환경과학원 환경위성센터,
[4]국립부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공, [5]노바스콥(주)

에어로졸의 연직 분포를 산출하기 위한 MAX-DOAS 관측에서는 일반적으로 360~630 nm 영역에 위치한 O_4 흡수 밴드가 활용되어 왔다. 한편, 765 nm 부근의 O_2 A-band는 O_4 밴드보다 강한 흡수 특성을 가지므로 낮은 AOD 조건이나 상대적으로 높은 고도에서 에어로졸 변화에 대해 더 높은 민감도를 가질 가능성이 있다. 본 연구에서는 280~795 nm의 관측 파장 범위와 0.54 nm의 분광해상도를 갖는 지상원격측정 장비 AQ-Profiler를 사용하였으며, 757.0~772.8 nm 파장 영역의 정규화 복사휘도를 이용하여 19개 고도층의 에어로졸 소산계수 프로파일을 산출하는 최적추정법(Optimal Estimation; OE) 기반 알고리즘을 구성하였다. 장비의 복사보정을 위해 적분구의 파장별 기준 복사휘도를 반복 관측하고, 반복 측정 결과로부터 측정오차를 산정하였다. 개발된 알고리즘은 2025년 11월 대한민국 부산 감만항에서 수행된 현장 관측자료에 적용되었으며 모든 관측 고도각에서 모의된 정규화 복사휘도가 측정 값을 전반적으로 잘 재현하는 것을 확인하였다. 산출된 소산계수의 시간에 따른 최대 편차는 최하층인 0.079~0.5 km에서 0.124 km^{-1}로 나타났으며 고도가 증가할수록 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 O_2 A-band 기반 Multi-Axis 관측이 에어로졸 연직 프로파일 산출에 활용될 수 있음을 보여준다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2025-01-12-004).

PH9

산불감시 스캐닝 LiDAR를 활용한 연소 에어로졸의 광학특성 분석

Analysis of the Optical Properties of Combustion Aerosols Using a Wildfire-Monitoring LiDAR

오세호, 이동희, 김관철, 박정민, 성민경

차세대융합기술연구원 첨단환경감시센터

스캐닝 LiDAR는 넓은 영역의 에어로졸 공간 분포를 측정하는 데 특화되어 있으며, 산업 배출원의 불법 배출 감시, 배출량 추정, 화재 감시 등에 활용되고 있다. 산불감시 스캐닝 LiDAR (Smart LiDAR Mk III, Samwoo TCS Co., Ltd.)는 기존 산불 감시 방법(카메라, 위성, 산불 감시 인력)에 비해 높은 시간해상도(30분)와 공간해상도(반경 5 km, 레이저 진행 방향 4.8 m)를 가진다. 본 연구에서는 LiDAR를 이용한 산불 조기감지 시스템을 구축하기 위하여 연소 실험을 통해 에어로졸의 광학 특성을 분석하였으며, 산업단지 배출 분포를 활용하여 연기 탐지 모델을 학습하였다. 산불감시 스캐닝 LiDAR는 multi section method에 기반하며, 532, 1064 nm 파장의 레이저를 사용한다. 산불 모의연소는 2025년 11월 27일과 2026년 2월 28일에 수행되었다. 산불감시 스캐닝 LiDAR는 연소원으로부터 2~2.3 km 떨어진 지점에서 관측을 수행하였다. 산불 모의연소에서 발생한 에어로졸은 소산계수와 옹스트롬지수는 증가하지만 편광소멸도는 감소하여, 일반적인 화재에서 관측되는 에어로졸과 다른 광학특성을 보인다. 에어로졸의 확산패턴을 학습하기 위하여 평택·당진항 서부두의 산업시설과 야적장에서 발생하는 재비산 먼지를 활용하였다. 모델의 학습은 합성곱 신경망(CNN)을 사용하였으며, 경기도 시흥에서 관측된 화재 사례를 활용하여 모델을 검증하였다.

사사 이 성과는 행정안전부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-KT224324).

PH10

지표부터 상층대류권까지 위성자료 및 재분석자료를 이용한 2025년 한국 산불 대기질 평가

Assessment of Air Quality from Surface to Upper Troposphere from 2025 Kroean Wildfire Using Satellites and Reanalysis Data

이동희[1),2)], 이주희[1)], 김상준[1)], 김 준[1)], 여민주[1)], 유정아[3)], 임현광[4)], 송환진[5)], 김관철[2)], 구자호[1)]

[1)]연세대학교 대기과학과, [2)]서울대학교 차세대융합기술연구원, [3)]국립환경과학원 환경위성센터,
[4)]일본 국립환경연구소, [5)]경북대학교 대기과학과

본 연구에서는 여러 위성과 재분석 자료를 결합하여 2025년 3월 한국에서 발생한 전례 없는 대형 산불을 분석했습니다. 이 산불은 최근 20년간 한국 산불 발생 양상에 큰 변화를 가져올 정도로 규모가 컸습니다. 저궤도 위성에 탑재된 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)는 성능이 다소 떨어지지만, 이 산불의 연기 기둥을 완벽하게 포착하지는 못했습니다. 그러나 정지궤도 위성에 탑재된 Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS)를 활용했을 때는 산불 발생 지역 상공에 고밀도 에어로졸을 함유한 연기 기둥을 명확하게 관측할 수 있었으며, 이는 정지궤도 위성의 높은 시간 해상도가 바이오매스 연소 연기 기둥을 더 잘 포착할 수 있게 해준다는 것을 보여줍니다. 또한, 여러 재분석 자료를 활용하면 2025년 3월 산불 발생 당시 연기 기둥의 영향 범위를 파악할 수 있지만, 특히 공간해상도 측면에서 재분석 자료의 질적 개선이 필요함을 확인했습니다. 이번 산불 발생 당시, 위성에서 관측한 Microwave Limb Sounder (MLS) 데이터를 이용하여 화재 지역 상공 약 10 km 고도에서도 일산화탄소 농도 증가를 추가적으로 확인했습니다. 이는 산불이 대류권 상층 대기 조성에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 시사합니다. 본 연구는 갑작스러운 산불 발생 시 대기 변화를 긴급히 진단해야 할 때, 기존 위성 및 재분석 데이터를 활용하는 유용한 참고 자료가 될 수 있습니다.

사사 This work was supported by the Ministry of the Interior and Safety (Joint Cooperation R&D Program, Project No. RS-2023-KT224324) and by the Advanced Institute of Convergence Technology (AICT), Seoul National University.

PH11

ASIA-AQ 기간 중 HSRL-2 에어로졸 소광계수 프로파일 유형별 GEMS AEH 산출 편향 분석

A Study of Aerosol Extinction Profile Dependence on GEMS AEH Retrieval Using HSRL-2 Data during ASIA-AQ Campaign

이승재, 이수완, 박상서

UNIST 지구환경도시건설공학과

ASIA-AQ 캠페인 기간 중 이루어진 HSRL 관측으로 얻어진 aerosol extinction profile 관측 데이터를 이용하여 환경위성 GEMS의 산출물 중 하나인 AEH에 대해 에어로졸 프로파일 유형에 따른 차이를 분석하였다. 관측된 프로파일을 피크의 고도에 따라 Low (2 km 미만), Medium (2 km 이상 3 km 미만), High (3 km 이상), 총 세 가지 유형으로 분류하였으며 AEH의 정의에 따라 aerosol extinction 값을 HSRL AEH로 변환하여 GEMS AEH와 비교하였다. 비교한 결과, Low, Medium 유형에서 양의 편향을 보였으며 지상 농도가 급격히 증가하는 경우 반대되는 결과를 보였다. High 유형에서는 편차가 유효범위 내에 들어오거나 음의 편향이 확인되었다. 이와 같이 유형에 따른 차이가 보이는 것은 GEMS AEH 알고리즘 상의 가정된 준가우시안 프로파일에 따라 실제 대기 프로파일의 하층과 상층의 모의하는 정도 차이에 의한 것으로 해석된다. 본 연구를 통해 GEMS AEH 산출 시 사용되는 프로파일의 한계를 확인하였으며 이후 형태에 따른 보정 및 산출 정확도 향상 연구에 기여할 수 있는 자료가 될 것으로 보여진다.

사사 본 연구는 국립환경과학원의 지원 및 울산과학기술원 수행 과제의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2026-04-02-019, No. 1.260004.01).

Session PI 미래연구자

평가위원[PA~PH] : 김용현(전북대학교), 김은혜(국립군산대학교), 김주애(고려대학교), 박대훈(한국기계연구원), 박은하((재)포항산업과학연구원), 박풍모(안산미래연구원), 송영철(한국화학연구원), 오용환(국립부경대학교), 이현정(제주대학교), 정경준(연세대학교), 최나래(강원대학교), 최용주(한국외국어대학교)

평 가 위 원 [P I] : 김민중(명지대학교), 김종범(충남연구원), 나하나(인제대학교), 박승부(서울시립대학교), 이영로(고려대학교)

PI1) 광양만권 오존 단기예측에서 공간정보의 기여도 평가: 권역평균과 그래프 구조의 비교
PI2) 여름철 정읍 한우사 지역과 전주 도심 지역 암모니아의 가스-입자상 분배에 따른 $PM_{2.5}$ 수용성 무기 이온의 농도 및 특성 비교
PI3) 항공관측 자료를 활용한 산업지역 CO_2 배출량 산정 및 불확도 평가
PI4) 2026년 여름철 한우사 인근 대기 중 암모니아(NH_3) 농도의 시간적 변화 분석
PI5) GEOS-Chem과 GREET 모델을 이용한 전기차 보급률 증가에 따른 대기질 및 전과정 오염물질 배출 변화 분석
PI6) KCP 하이브리드 인벤토리 적용에 따른 한반도 지역 CO_2 모의 특성 평가
PI7) 천식 외래진료 자료를 활용한 울산 지역 대기오염물질의 건강영향 평가
PI8) 구름 및 대기경계층의 영향을 고려한 RHI 라이다 에어로졸 소산계수 산출
PI9) 운고계 자료를 활용한 얕은 적운 제거 기법 개발 및 에어로졸 연직 분포 변화 분석
PI10) MAX-DOAS 관측 자료를 이용한 대류권 오존 산출
PI11) 생태계 CO_2 순교환 플럭스의 일주기에 따른 한반도 지상 CO_2 농도 모의 민감도 평가
PI12) 머신러닝을 활용한 서울 지역 $PM_{2.5}$ 농도 및 성분 과거 자료 복원
PI13) 수종별 BVOCs 배출량 평가를 위한 측정 및 분석 방법 고찰
PI14) 망간과 코발트가 담지된 폐맥주박 유래 활성탄 촉매의 제조와 톨루엔 산화 성능 평가
PI15) 3차원 몬테카를로 모델과 상용 카메라의 태양 주변부 이미지를 이용한 에어로졸 광학 두께 산출
PI16) 폐 PET 기반 이종 원소 도핑 활성탄 촉매를 이용한 황화수소(H_2S)의 선택적 산화
PI17) UAV 기반 산업단지·항만 배출원의 대기질 연직 영향 비교
PI18) 국가 산업단지와 내륙도심의 야간 오존농도 고농도 특성 비교
PI19) 자연적 휘발성유기화합물 배출량 도출을 위한 엽면적 산정 방법 간 비교 분석
PI20) 경기도 광주시 태화산학술림에서 오존 및 전구물질의 거동 분석
PI21) 대기 중 미량기체 관측을 위한 지상 기반 MAX-DOAS 시스템 구축 및 관측 프로토콜 확립
PI22) 도시대기 측정소에서 측정한 지표 오존 농도 장기 추세 및 NO_2-O_3 관계 분석
PI23) $MAPbI_3$ 페로브스카이트 단결정을 이용한 자가발전형 NO_2 가스 센서에 관한 연구
PI24) 다기능 구름챔버의 균일한 벽면 냉각을 위한 열전달유체 유로 설계에 대한 연구

PI1

광양만권 오존 단기예측에서 공간정보의 기여도 평가: 권역평균과 그래프 구조의 비교

Evaluating the Contribution of Spatial Information to Short-Term Ozone Prediction in the Gwangyang Bay Area: Regional Mean Versus Graph Structure

김채은, 정선기, 이상림, 정준영[1], 신규성, 장지이

전남대학교 환경시스템공학과, [1]전남대학교 건설환경공학과

광양만권은 국가산업단지가 밀집하고 해륙풍의 영향을 받아 오존 고농도가 반복되는 지역으로, 신뢰할 수 있는 단기예측이 요구된다. 최근 그래프 신경망(GNN) 기반 오존 예측 연구가 활발하나, 성능 향상 중 공간정보의 순수 기여는 확인되지 않았다. 본 연구에서는 16개 측정소의 2019~2025년 시간별 오존 자료와 인근 3개 지점 기상자료를 이용하여 타깃 해상도와 예측 선행시간, 공간정보 표현 방식을 통제하고 persistence, 계절·선형 기준선부터 LSTM과 시공간 그래프 합성곱 신경망(ST-GCN)까지 동일 표본에서 단계적으로 비교하였다. 공간정보의 기여는 일평균 해상도에서는 나타나지 않고 3시간 선행 예측에서 최대로 나타났으며, 풍향에 따라 측정소간 선후 관계가 반전되어 이 신호가 대기 이류에서 기원함을 확인하였다. 그러나 이러한 기여는 이웃 측정소의 단순 권역평균 하나로 설명되어, 개별 측정소 정보나 풍향 가중치를 적용해도 안정적인 추가 향상은 없었다. ST-GCN의 낮은 성능은 대상 측정소 자신의 관측값과 이웃 정보와 섞여 희석되는 구조적 한계에서 비롯됨을 확인하였으며, 이를 우회하는 경로를 추가한 모델은 성능이 회복되어 LSTM 기반 모델과 유사한 수준으로 수렴하였다. 아울러 치환(permutation) 기반 중요도는 재학습 기반 제거(ablation) 기여보다 크게 나타나, 그래프 구조의 필요성이 과대평가될 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 수십 km 규모의 연안 산업지역에 한정되나, 공간정보와 그래프 구조의 기여를 분리해 검증하는 절차는 지역 규모 대기질 예측 모델 설계에 활용될 수 있다.

사사 본 논문은 2026년도 교육부 및 전라남도의 재원으로 전라남도RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2026-RISE-14-007). 기술 자문과 협조를 제공해 주신 (주)송림에 감사드립니다.

PI2

여름철 정읍 한우사 지역과 전주 도심 지역 암모니아의 가스-입자상 분배에 따른 $PM_{2.5}$ 수용성 무기이온의 농도 및 특성 비교

Comparison of $PM_{2.5}$ Water-Soluble Inorganic Ion Concentrations and Characteristics Based on Gas-Particle Partitioning of Ammonia in a Summer Hanwoo Cattle Barn Area in Jeongeup and an Urban Area in Jeonju

허재범[1], 김민서[1], 나은상[2], 김연후[2], 조범기[2], 정희성[1], 임푸름[1], 송미정[1,2]

[1]전북대학교 지구환경과학과, [2]전북대학교 기후환경에너지융합학과

암모니아(NH_3)는 축산 활동에서 주요하게 배출되며, 대기 중 산성 성분과 반응하여 2차 무기 에어로졸(SNA)을 형성하며 $PM_{2.5}$ 농도에 관여한다. 특히 NH_3가 풍부한 환경에서는 기상조건에 따라 NH_3 전환과 $PM_{2.5}$ 무기이온 조성이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 2026년 5월 29일~6월 25일까지 정읍시 한우사 인근에서 NH_3, $PM_{2.5}$, 수용성 무기이온 및 기상자료를 측정하고, NH_3 전환율(NHR, $[NH_4^+]/([NH_3]+[NH_4^+])$)을 이용하여 기상조건에 따른 NH_3의 가용성과 가스-입자 분배, 그리고 $PM_{2.5}$ 무기성분의 변화 특성을 분석하였다. 또한, $PM_{2.5}$ 농도 수준을 고농도와 저농도로 구분하여 전주 도심지역의 2019년 5월-2020년 4월까지의 선행 관측자료와도 비교하였다. 정읍 한우사 인근의 NH_3 평균 농도는 16.69±11.28 $\mu g/m^3$로 나타났으며, 산성 성분의 중화에 필요한 NH_3 수준보다 높은 농도를 보여 NH_3-rich 환경임을 확인하였다. 또한, 기온이 낮으며 높은 상대습도 조건에서 NHR이 증가하는 경향이 나타났으며, NHR 증가와 함께 NH_4^+, NO_3^-, SO_4^{2-} 및 $PM_{2.5}$ 농도도 높아지는 것으로 확인되었다. 특히 NHR과 NO_3^- 사이에서 높은 연관성이 확인되었다. 전주 도심지역과 비교한 결과, 정읍 한우사 인근에서 NH_3 농도와 NHR이 높게 나타났으며, $PM_{2.5}$ 고농도 구간에서 NH_4^+ 조성비에서도 차이가 확인되었다. 이러한 결과는 여름철 한우사 인근의 높은 NH_3 농도와 입자상 전환 특성이 $PM_{2.5}$ 무기이온 조성 및 농도 변화와 함께 나타남을 보여준다.

PI3

항공관측 자료를 활용한 산업지역 CO_2 배출량 산정 및 불확도 평가

Estimation and Uncertainty Assessment of CO_2 Emissions in an Industrial Area Using Airborne Observations

이한빛, 권형안

수원대학교 환경에너지공학과

이산화탄소(carbon dioxide, CO_2)는 대표적인 온실가스로, 온실가스 감축과 기후변화 대응을 위해 지역별 이산화탄소 배출 특성을 파악하고 배출량을 산정하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 국내 대표적인 산업 단지 중 하나인 대산 석유화학 단지를 대상으로 KORUS-AQ (2016년 5월~6월) 기간 항공관측 자료를 활용하여 mass balance 방법을 통해 CO_2 배출량을 산정하였다. 배출 플룸이 뚜렷하게 확인된 2016년 6월 5일 항공 관측에서 CO_2의 배경농도는 400 ppmv였으며 배출 플룸 내에서 525 ppmv까지 증가하였다. 관측자료를 바탕으로 추정된 배출량은 3.21×10^5 g/s이었으며 EDGAR 및 CAMS 인벤토리의 월평균 배출량과 비교하여 산정된 배출량은 각각 261%, 290% 높고, ODIAC 인벤토리의 배출량보다 65% 낮은 것으로 평가되었다. EDGAR의 경우 배출원이 포함된 격자가 아닌 인접한 격자에서 높은 배출량(3.11×10^5 g/s)을 보였으며 산정된 배출량과 비교하여 3.2% 낮게 나타났다. 이 결과는 배출량 인벤토리 사이의 큰 차이가 있음을 보여주며 배출원의 위치에도 차이가 있다는 것을 나타낸다. 배출량 산정의 불확도 평가를 위해 불확도 전파를 적용한 결과, 산정된 배출량의 상대 불확도는 11%로 평가되었다. 이를 통해 항공관측자료를 활용한 산업지역 CO_2 배출량 산정 가능성을 보였으며 향후 항공관측 기반 배출량 평가의 활용 가능성을 제시하였다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2023-00232066).

PI4

2026년 여름철 한우사 인근 대기 중 암모니아(NH_3) 농도의 시간적 변화 분석

Temporal Variation of Atmospheric NH_3 near a Cattle farm

정희성[1], 임푸름[1], 김연후[2], Avinash Shastri[2], 나은상[2], 조범기[2], 허재범[1], 김민서[1], 이향경[3], 송형도[3], 유 철[3], 송미정[1,2]

[1]전북대학교 지구환경과학과, [2]전북대학교 환경에너지융합학과,
[3]기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀

암모니아(NH_3)는 축산 시설에서 배출되는 대표적인 대기오염물질로, 대기 중 산성가스와 반응하여 2차 무기 에어로졸을 생성함으로써 미세먼지 형성에 기여한다. 특히 축산시설 주변의 NH_3 농도는 배출원뿐만 아니라 풍향, 풍속, 시간대에 따라서도 달라지므로, 배출원과 기상조건을 함께 고려한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 개방형 한우사 주변 NH_3 농도의 시간적 변화를 알아보기 위해 전북특별자치도의 축산지역에 위치한 개방형 한우사를 대상으로 2026년 5월 29일부터 6월 25일까지 풍상측(Upwind) 및 풍하측(Downwind) 지점에서 NH_3 농도와 기상자료를 측정하였다. 측정 기간 동안 NH_3 농도의 시계열 및 일변화 특성을 분석하고, 두 지점의 농도 차이인 NH_3 Enhancement (Downwind − Upwind)를 산출하여 풍향과 기상조건에 따른 농도 변화를 분석하였다. 분석 결과, N-NW 계열의 풍향에서 NH_3 Enhancement가 양의 값을 나타냈으며, 이는 해당 풍향 조건에서 우사 배출이 풍하측 NH_3 농도에 국지적으로 기여했을 가능성을 시사한다. 또한 NH_3 농도는 밤과 이른 아침에 높고 낮 시간대에 낮아지는 일변화를 보였으며, 13~14시경 가장 낮은 농도를 보인 뒤 늦은 오후부터 다시 증가하였다. Upwind와 Downwind의 농도 차이는 시간대와 풍향에 따라 다르게 나타나, 한우사 주변 NH_3 농도가 배출원과 기상조건의 영향을 함께 받음을 보여준다.

PI5

GEOS-Chem과 GREET 모델을 이용한 전기차 보급률 증가에 따른 대기질 및 전과정 오염물질 배출 변화 분석

Analysis of Changes in Air Quality and Life Cycle Pollutant Emissions with Increasing Electric Vehicle Share Using the GEOS-Chem and GREET Models

윤성욱[1),2)], 조정우[1),2)], 김경준[1),2)], 정지운[1),2)], 한범순[1),2)]

[1)]인하대학교 미세먼지연구·관리센터, [2)]인하대학교 환경공학과

전기차(Electric Vehicle, EV)는 주행 중 배기가스를 직접 배출하지 않지만, 전력 공급과 차량·배터리의 제조 및 폐기 과정에서 간접배출이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 전과정평가와 대기화학수송모델을 활용하여 전기차 보급률 증가에 따른 전과정 배출량과 지역 대기질 변화를 종합적으로 평가하였다. 국내 전기차 보급률 3.6%를 기준으로 20%, 40%, 60%, 80%의 시나리오를 설정하고, 국내 전력 생산 구조와 차량 운행 조건을 반영한 GREET 모델을 통해 차종별 전과정 배출계수와 전국 일평균 배출량을 산정하였다. 전기차 보급률 80% 시나리오에서 기준 시나리오 대비 전과정 CO_2와 NO_x 배출량은 각각 17.3%, 48.4% 감소한 반면, SO_x와 $PM_{2.5}$ 배출량은 각각 148.6%, 43.1% 증가하였다. CO_2와 NO_x의 감소는 주로 운행단계 배출 감소에 기인하였으며, SO_x와 $PM_{2.5}$의 증가는 전과정에서 발생하는 간접배출과 관련되었다. 또한 시나리오별 도로수송 배출 조정계수를 산정하여 GEOS-Chem에 적용한 결과, 수도권의 지표 NO_x, O_3, $PM_{2.5}$ 및 SO_x 농도는 각각 38.8%, 5.8%, 3.5%, 0.7% 감소하였고, 강원 지역에서는 각각 47.5%, 9.0%, 3.6%, 2.0% 감소하였다. 다만 수도권 지역의 이른 아침에는 NO 배출 감소로 O_3 적정 반응이 약화되면서 전기차 보급률 증가에 따라 O_3 농도가 증가하였다. 본 연구 결과는 전기차 보급 확대가 도로수송 부문의 직접배출을 줄여 지역 대기질을 개선할 수 있으나, O_3의 영향은 시간대에 따라 다르게 나타날 수 있으며, 전과정 관점에서는 간접배출로 인해 오염물질별 환경영향이 다르게 나타날 수 있음을 보여준다.

사사 본 연구는 '기후에너지환경부'의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2024-03-002)을 받아 수행하였습니다.

PI6

KCP 하이브리드 인벤토리 적용에 따른 한반도 지역 CO_2 모의 특성 평가

Evaluation of Regional CO_2 Simulations over South Korea Using the KCP Hybrid Carbon Inventory

이가은, 옥유진, 권형안[1)], 김수민[1)], 정수종[2)]

울산과학기술원, [1)]수원대학교, [2)]서울대학교

2050 탄소중립 달성을 위해 탄소 배출·흡수량의 정확한 시공간적 이해가 필수적이다. Korea Carbon Project (KCP)는 국내 관측·모델 자료를 통합한 고해상도(0.01°) CO_2 인벤토리를 구축하였다. 본 연구는 이를 검증하기 위해 KCP와 전 지구 자료 ODIAC·MiCASA를 WRF-GC (WRF-GEOS-Chem)에 입력해 2022년 한반도 지표 CO_2 모의에 미치는 영향을 비교하였다. KCP 배출자료는 ODIAC보다 총량이 55% 많았고, KCP 흡수자료는 MiCASA보다 흡수량이 약 5.1배 컸으며 겨울철에는 MiCASA가 순배출인 반면 KCP는 순흡수로 반대였다. 모의 영역 평균 CO_2 농도는 KCP 배출·흡수를 각각 반영했을 때 0.5%와 1.9%, 함께 반영하면 2.4% 높아졌다. WDCGG 관측소 세 곳(안면도, 제주 고산, 울릉도)과 비교한 결과, KCP 배출·흡수를 함께 적용하면 배출원에서 떨어진 제주 고산·울릉도에서 절대편향이 최대 79% 줄었으나 배출원에 인접한 안면도에서는 오히려 편향이 커졌다(ODIAC·MiCASA 대비). 대기경계층(PBL) 혼합 영향을 보기 위해 비국지·완전혼합 스킴으로 민감도 실험을 한 결과, PBL 혼합 스킴 간 차이는 인벤토리 교체 효과보다 작고 관측소별로 상이했다. 일변화 분석 결과 월평균으로만 제공되는 KCP 흡수자료는 일중 변동을 재현하지 못했으며, PBL 스킴 조정만으로는 해소되지 않았다. 이는 고해상도 국가 인벤토리가 지역 CO_2 모의를 개선할 잠재력을 지니는 동시에, 흡수자료에 일중 변동성(일변화)을 반영할 필요가 있음을 시사한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 플랫폼 기술개발(0699-20260001) 연구의 지원을 받아 수행하였음.

PI7

천식 외래진료 자료를 활용한 울산 지역 대기오염물질의 건강영향 평가

Health Impact Assessment of Air Pollutants in Ulsan Using Asthma Outpatient Visit Data

이어진, 김원빈[1)], 주정태, 고민지, 최성득

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, [1)]울산대학교 산업경영공학부

대기오염물질은 배출원과 대기 중 생성·소멸 과정에 따라 도시 내에서도 시공간적 농도 차이를 나타낼 수 있으며, 인체 노출에 따른 건강영향도 달라질 수 있다. 특히 울산은 산업단지, 항만, 교통시설, 주거지역이 혼재되어 있어 지역별 대기오염 특성과 인체 위해성을 함께 고려한 건강영향 평가가 필요하다. 본 연구에서는 울산의 기준성 대기오염물질(O_3, PM_{10}, NO_2, $PM_{2.5}$, SO_2, CO)을 대상으로 구·군별 일일 대표농도를 산정하고 천식 외래진료와의 관련성을 평가하였다. 2014년 1월부터 2024년 8월까지 23개 대기환경측정소의 일평균 농도를 역거리가중법(IDW)으로 공간보간하여 5개 구·군의 대표농도를 산정하였으며, $PM_{2.5}$는 자료가 측정되기 시작한 2015년부터 분석하였다. 건강자료는 동일 기간의 구·군별 일일 천식 외래진료 건수를 이용하였으며, 지역과 날짜를 기준으로 대기오염 자료와 결합하여 지연노출(lag 0~7)과 최근 2일, 4일, 8일 이동평균 노출의 영향을 조건부 푸아송(Poisson) 회귀모형으로 평가하였다. 분석 결과, O_3는 최근 2일 평균농도가 0.01 ppm 증가할 때 천식 외래진료 건수가 1.09% 증가하였고, PM_{10}과 NO_2는 이동평균 기간이 길어질수록 양의 추정치가 증가하였다. 다만 모든 물질과 지연 기간에서 일관된 관련성이 나타나지는 않았으며, 다중비교 후 일부 결과의 통계적 근거가 약화되었다. 향후 다양한 노출평가 방법을 적용하고 대상 질환을 확대하여 울산의 대기오염 특성과 건강영향을 종합적으로 평가할 필요가 있다.

사사 본 연구는 울산대학교 글로컬대학추진단의 2026 BTS 실전문제연구팀 프로젝트 지원을 받아 수행된 연구임.

PI8

구름 및 대기경계층의 영향을 고려한 RHI 라이다 에어로졸 소산계수 산출

Aerosol Extinction Retrieval Accounting for Cloud and PBL Effects in RHI Lidar Observations

백승재, 김인엽, 심주현, 신주선, 김덕현[1)], 노영민

국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [1)]국립한밭대학교 기초과학부

해안·항만 지역에서는 선박·산업 배출입자와 해양 에어로졸이 혼재하고 높은 상대습도로 저층운이 빈번히 발생한다. 에어로졸은 주로 낮은 대기경계층(PBL) 내부에 분포하므로, 저층 에어로졸의 공간 구조를 정확히 산출하려면 PBL과 구름의 영향을 함께 고려해야 한다. 본 연구에서는 부산 북항에서 2025년 7월 16일부터 8월 3일까지 관측한 532 및 1064 nm RHI (Range Height Index) 스캔 라이다 자료 1,170세트를 이용하여 고도별 분자 소산계수와 저층운·PBL의 영향을 반영한 에어로졸 소산계수 산출 알고리즘을 개발하였다. 분자 소산계수는 ISA-1976 모델을 지상종관기상관측(ASOS)의 기온·기압으로 보정하여 산출하였다. PBL 상단과 구름 기저는 거리보정신호(RCS)의 피크, 거리 방향 음의 기울기 및 532/1064 nm RCS비를 종합하여 탐지하였다. PBL 사례에서는 탐지 경계를 기준으로 프로파일을 분할하여 구간별 참조거리를 적용하고, 구름 사례에서는 구름 이후의 신호 감쇠로 비정상적으로 산출된 소산계수 영역을 제거하였다. 탐지된 PBL 상단과 구름 기저의 평균 고도는 각각 1.16±0.44 km와 0.93±0.46 km였다. 알고리즘 적용에 따른 소산계수의 공간적 불연속 감소를 평가한 결과, 공간 기울기 RMS 중앙값은 전체 자료에서 11.3%, PBL 사례에서 15.1% 감소하였다. 이는 개선된 알고리즘이 고정 기준거리 방식에서 발생하는 역산 불연속과 과잉 신호를 완화하여 해안·항만 지역의 저층 에어로졸 분포를 보다 일관되게 산출할 수 있음을 보여준다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 RS-2026-25501396).

PI9

운고계 자료를 활용한 얕은 적운 제거 기법 개발 및 에어로졸 연직 분포 변화 분석

Development of a Shallow Cumulus Removal Method Using Ceilometer Data and Analysis of Aerosol Vertical Distribution Changes

이윤경, 박민경, 주소희[1], 심주현, 신주선, 김덕현[2], 노영민

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공,
[1]Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (LACy), Université de La Réunion, [2]국립한밭대학교 기초과학부

운고계에서 관측되는 후방산란계수 자료는 대기 중 입자의 연직 분포 정보를 포함하고 있어, 주 목적인 구름 기저 고도 산출뿐만 아니라 에어로졸의 연직 구조 분석에도 활용될 수 있다. 이때 대기 하층에서 수분 단위로 생성되고 소멸하는 얕은 적운(Shallow Cumulus)은 에어로졸에 비해 강한 신호를 나타내기 때문에 에어로졸 연직 분포 해석에 왜곡을 유발할 수 있다. 본 연구에서는 운고계 후방산란계수 자료를 기반으로 얕은 적운을 탐지하는 알고리즘을 구축하고, 구름 신호 제거 전후의 에어로졸 연직 분포 변화를 평가하고자 하였다. 이를 위해 후방산란 신호의 강도와 시공간적 분포 특성을 종합적으로 고려한 탐지 기준을 적용하였다. 1분 단위 후방산란계수 자료에서 탐지된 얕은 적운 신호를 제외한 후, 나머지 자료를 1시간 단위로 평균하여 에어로졸 연직 분포를 분석하였다. 또한 알고리즘 적용 효과를 평가하기 위해 구름 제거 전후의 에어로졸 광학적 두께(Aerosol Optical Depth, AOD)와 대기경계층(Planetary Boundary Layer, PBL) 고도를 산출하여 비교하였다. 알고리즘 적용 후 국지적으로 강하게 나타나는 구름 신호가 효과적으로 제거되었으며, 에어로졸 연직 분포가 대기 하층 중심의 분포로 개선되었다. AOD 및 PBL 고도 산출 결과에서도 외부 관측 자료와의 일치도가 향상되는 경향을 확인하였다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 RS-2026-25501396).

PI10

MAX-DOAS 관측 자료를 이용한 대류권 오존 산출

Tropospheric Ozone Retrieval Using MAX-DOAS Observations

박소현, 권형안

수원대학교 환경에너지공학과

대류권 오존은 지표 부근 호흡기 질환 유발 물질이자 온실가스로 연직 분포 관측이 필수적이다. 본 연구에서는 장비 동시 관측 및 비교 검증을 수행하는 국제 공동 캠페인인 CINDI-3 기간에 측정된 MAX-DOAS (Multi-AXis Differential Optical Absorption Spectroscopy) 자료로 대류권 오존 연직 분포 산출의 선행연구인 오존 산출 관련 민감도 분석을 수행했다. 하층 정보 반영이 중요한 낮은 고도각(1~3°)에서 325~335 nm는 320~430 nm 대비 높은 differential slant column density (dSCD) 경향을 보였다. 325~335 nm는 spectral fitting의 root mean square (RMS)가 낮으나 dSCD 불확실도가 높았고, 320~340 nm는 유사한 RMS에서 낮은 불확실도를 보였다. SZA 및 RMS 필터링 후 통과 비율(각 94.71%, 93.83%)도 유사하여 dSCD 불확실도를 고려해 320~340 nm를 적정 파장 영역으로 선정했다. 추가로 간섭기체 흡수계수와 온도 조건별 민감도 분석을 진행하고, 최적 파장 및 입력 자료로 dSCD를 산출해 CINDI-3 기간에 측정된 타 MAX-DOAS 자료와 비교할 예정이다. 이후 O_4 dSCD 기반 에어로졸 프로파일, 기상 및 성층권 오존 자료를 활용한 optimal estimation 역산으로 대류권 오존 연직 프로파일을 산출하며, 오존존데 등 독립 관측자료로 최종 검증하고자 한다.

PI11

생태계 CO_2 순교환 플럭스의 일주기에 따른 한반도 지상 CO_2 농도 모의 민감도 평가

Sensitivity of Simulated Surface CO_2 Concentrations over the Korean Peninsula to Diurnal Variation of Vegetation CO_2 Uptake Fluxes

김수민, 권형안, 옥유진[1], 이가은[1]

수원대학교 환경에너지공학과, [1]울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

대기 중 CO_2 농도는 인위적 배출, 광합성·생태계 호흡 및 대기경계층 혼합의 영향으로 뚜렷한 계절·일변동을 보인다. 정확한 모의를 위해 지역 배출·흡수 플럭스의 규모와 시공간적 변화를 반영해야 한다. 본 연구에서는 WRF와 GEOS-Chem이 결합된 WRF-GC를 이용하여 지역 배출·흡수 플럭스와 생태계 CO_2 순교환 플럭스의 시간적 적용 방식이 지상 CO_2 농도 모의에 미치는 영향을 분석하였다. 전 지구 인벤토리를 적용한 기준모의(Standard)와 Korean Carbon Project (KCP)의 월평균 인위적 배출·식생 흡수 플럭스를 적용한 KCP-MON을 구성하고, 연평균 농도와 계절별 평균 일변동을 World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG)의 안면도·고산·울릉도 관측자료와 비교하였다. KCP-MON은 Standard보다 세 관측소 평균 편향의 절댓값을 여름 55.3%, 가을 24.1% 줄이고 연간 평균 상관계수를 0.483에서 0.645로 높였으나, 일변동 진폭과 극값 시각은 관측과 달랐다. 이를 개선하기 위해 MiCASA의 3시간 간격 순생태계교환량(Net Ecosystem Exchange, NEE)으로 월별 생태계 CO_2 순교환 일주기 프로파일을 산출하였다. KCP-MON을 기준으로 MiCASA NEE의 월평균 프로파일(MiCASA-MON)과 3시간 간격(MiCASA-3H) 프로파일을 적용한 모의를 구성하고, 일변동 진폭·극값 시각, 시간대별 평균제곱근오차(RMSE), 편향(Bias) 및 상관계수를 성능 평가 항목으로 선정하였다.

사사 본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2023-00232066).

PI12

머신러닝을 활용한 서울 지역 $PM_{2.5}$ 농도 및 성분 과거 자료 복원

Reconstruction of Historical $PM_{2.5}$ Concentrations and Chemical Compositions in Seoul Using Machine Learning

김보연, 권형안, 최우석[1]

수원대학교 환경에너지환경공학과, [1]세종대학교 인공지능데이터사이언스학과

초미세먼지($PM_{2.5}$)는 인체 건강에 유해한 영향을 미칠 뿐만 아니라 대기 복사평형에도 영향을 미치는 주요 대기오염물질로, 보건 및 기후학적 측면에서 장기간의 농도 변화와 추세를 파악하는 것이 중요하다. 그러나 국내 $PM_{2.5}$ 관측자료는 2015년 이후에 집중되어 있어 그 이전의 장기간 농도 변화를 분석하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 자료의 한계를 보완하기 위해 2015년부터 2024년 서울 지역의 에어코리아 일반대기환경측정망 자료($PM_{2.5}$, PM_{10}, SO_2, CO, O_3, NO_2)와 기상 자료(기온, 풍속, 풍향, 강수량, 습도 등)를 활용하여 랜덤포레스트(Random Forest) 기반의 $PM_{2.5}$ 예측 모델을 구축하였다. 결정트리 개수에 따른 모델 성능을 비교한 결과 300개의 결정트리를 사용한 모델에서 가장 우수한 성능을 나타냈으며, 최종 모델을 이용하여 2001년부터 2014년까지의 서울 지역 $PM_{2.5}$ 농도를 복원하였다. 복원된 $PM_{2.5}$ 농도는 2001년 이후 2024년까지 연간 1.11 $\mu g/m^3$의 감소 추세를 나타냈으며, 서울시 대기오염 측정 데이터와의 비교에서도 상관계수 0.87로 높은 상관성을 보였다. 추가로 대기환경연구소 성분분석 자료와 복원된 $PM_{2.5}$, 기상 자료를 바탕으로 과거 기간 $PM_{2.5}$ 성분 분석 자료를 복원하였다. 본 연구를 통해 제한된 기간의 $PM_{2.5}$ 관측자료와 대기오염 및 기상 자료를 활용하여 과거 $PM_{2.5}$ 농도 및 성분을 복원할 수 있다는 것을 보였다. 이러한 자료는 장기간의 대기질 변화 분석과 함께 건강영향, 대기복사변화 평가 등 다양한 연구 분야에 활용 가능할 것으로 기대된다.

사사 본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2021-03-03-001, NIER-2026-01-02-026).

PI13

수종별 BVOCs 배출량 평가를 위한 측정 및 분석 방법 고찰

A Review of Sampling and Analytical Methods for Evaluating Species-specific BVOC Emissions

신원범, 노해민, 이수현, 윤종상

가톨릭대학교 에너지환경공학과

생물 기원 휘발성유기화합물(BVOCs)은 대기 중 광화학반응을 통해 오존 및 이차유기에어로졸 생성에 기여하는 주요 전구물질이다. 산림율이 높은 우리나라는 대기질 관리를 위해 정확한 BVOCs 배출량 측정이 필수적이다. BVOCs의 조성과 배출속도는 수종에 따라 크게 상이하므로, 신뢰성 있는 국가 배출량 인벤토리 구축을 위해서는 수종별 측정이 요구된다. 시료 채취에는 chamber 방식이 주로 사용되는데, enclosure chamber는 구조가 간단하나 내부의 CO_2 감소, 수증기 응축, 열 스트레스의 영향을 받고, dynamic flow-through chamber는 지속적인 공기 흐름으로 내부 환경을 유지할 수 있으나 완벽한 밀봉 상태를 유지하는데 어려움이 있다. 시료의 분석에는 PTR-MS 등을 이용한 온라인 분석과 흡착관 채취 후 GC를 이용하는 오프라인 분석으로 크게 구분된다. 전자는 실시간 측정이 가능하나 동일 질량의 이성질체를 분리하지 못하며, 후자는 정성·정량 분석이 가능하나 실시간 측정이 불가능하고 운반 과정에서 반응성 화합물이 손실될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 측정 및 분석 방법들의 원리와 장단점을 비교함으로써 수종별 BVOCs 배출량 측정에 적합한 방법을 검토하고자 하였다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 「CLEAN-AIR 기술개발」 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RS-2026-25502680).

PI14

망간과 코발트가 담지된 폐맥주박 유래 활성탄 촉매의 제조와 톨루엔 산화 성능 평가

Preparation of Mn- and Co-Loaded Activated Carbon Catalysts Derived from Waste Brewer's Spent Grain and Evaluation of Their Catalytic Performance for Toluene Oxidation

강희찬[1], 손나헌[2], 양재환[1),2)]

[1)]충남대학교 환경공학과, [2)]충남대학교 환경IT융합공학과

톨루엔은 자동차 배출가스 및 산업 활동에서 배출되는 대표적인 휘발성유기화합물(VOC)로, 인체에 유해하며 오존 및 2차 유기에어로졸 등의 생성에 기여하므로 효과적인 제거 기술 개발이 요구된다. 맥주박은 양조 과정에서 다량 발생하는 리그노셀룰로오스계 부산물로, 대형 양조장에서는 주로 가축 사료로 재활용되지만 높은 수분 함량으로 저장·운송이 어려워 소규모 양조장에서는 활용되지 못한 채 폐기되기도 한다. 맥주박의 리그닌은 열적으로 안정한 방향족 구조로 인해 탄화 과정에서 탄소 골격을 유지하고, 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스는 열분해 시 휘발성 물질을 방출하여 기공 형성에 기여하므로 활성탄 전구체로서 적합하다. 그러나 맥주박 유래 활성탄의 기상 VOC 흡착 연구는 거의 수행된 바 없으며, 이를 촉매 지지체로 활용한 기상 오염물질의 촉매 산화 연구는 아직까지 보고되지 않았다. 본 연구에서는 폐맥주박의 고부가가치 탄소 소재화를 위해 망간과 코발트가 담지된 활성탄을 제조하고 톨루엔 촉매 산화 성능을 평가하고자 하였다. 활성탄 제조를 위해 폐맥주박을 500℃에서 반탄화한 후, NaOH 혼합비를 달리하여 800℃에서 화학적 활성화 하였다. 톨루엔 제거 성능을 평가하기 위해 고정층 반응기에 시료를 충전하고, 250 ppm 농도의 톨루엔 가스를 공급하였으며, 200~400℃에서 50℃ 간격으로 검지관을 이용해 반응 전후 농도를 측정하여 제거율을 산정하였다. 이를 통해 폐맥주박의 고부가가치화 및 산업적 활용 가능성을 제시하고, 효과적인 VOC 저감 기술 개발에 기여할 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부, RS-2025-02263037, 산업혁신 인재 성장 지원사업)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원과 2025년도 정부(환경부, YL-WE-22-002, 폐자원에너지화 전문인력 양성사업)의 재원으로 수도권매립지관리공사의 지원과 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경공단의 통합환경관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

PI15

3차원 몬테카를로 모델과 상용 카메라의 태양 주변부 이미지를 이용한 에어로졸 광학 두께 산출

Aerosol Optical Depth Retrieval Using 3D Monte Carlo Model and Solar Aureole Images from a Commercial Camera

이의진, 문윤기, 김덕현[1)], 신주선, 심주현, 노영민

국립부경대학교 지구환경시스템과학부, [1)]국립한밭대학교 기초과학부

대기 중 에어로졸의 소산계수를 연직 방향으로 적분한 에어로졸 광학 두께(Aerosol Optical Depth, AOD)는 기후 모델링 및 대기 오염 분석을 위한 핵심적인 광학 인자이다. 현재 AOD의 측정은 주로 선포토미터 관측과 위성 원격탐사를 통해 이루어지지만, 기존 관측 장비의 비용 및 시공간적 해상도 한계를 보완할 수 있는 관측기술이 필요하다. 본 연구에서는 상용 카메라로 촬영한 태양 주변부 이미지를 이용하여 AOD를 산출하는 새로운 기법을 제안한다. 대기 중의 다중 산란을 모의하는 3차원 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 카메라 센서에 포착된 태양광의 유입 경로 및 대기 상태를 역추적하는 알고리즘을 적용하였다. 또한 연산의 효율성을 높이기 위해 태양천정각(SZA), PM_{10}, $PM_{2.5}$, 입자반경 및 입자의 굴절률을 변화시키면서 각 조건에 따른 이론적 RGB 신호와 AOD로 구성된 Lookup-Table (LUT)을 구축하였다. 이후 실제 카메라를 통해 관측된 태양과 태양 주변부 단일 행의 RGB 휘도 데이터와 LUT의 이론적 휘도를 최적화하여 AOD를 산출했다. 도출된 결과를 Microtops II Sunphotometer 데이터와 교차 검증한 결과, 에어로졸 AOD의 일변화 경향과 파장별 의존성이 전반적으로 일치하는 것을 확인하였다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 CLEAN-AIR 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 RS-2026-25501396).

PI16

폐 PET 기반 이종 원소 도핑 활성탄 촉매를 이용한 황화수소(H_2S)의 선택적 산화

Selective Catalytic Oxidation of Hydrogen Sulfide (H_2S) over Waste PET-Derived Heteroatom Co-Doped Activated Carbon Catalysts

김혜연[1)], 안유정[1)], 사공누리[2)], 양재환[1),2)]

[1)]충남대학교 환경공학과, [2)]충남대학교 환경IT융합공학과

황화수소(H_2S)는 화석연료 정제, 매립지, 축산업 등 다양한 산업 공정에서 발생하는 무색의 부식성 가스로, 약 2 ppm에서도 인체 자극을 유발하며 500 ppm 이상에서는 사망에 이를 수 있어 효과적인 저감이 필요하다. 현재까지 연구된 H_2S 저감 기술 중 촉매 산화법은 주로 금속 산화물을 촉매로 이용해 H_2S를 S로 선택적 산화시키는 기술이며, 우수한 저감 성능을 나타낸다. 그러나 금속 산화물 촉매는 반응 중 황화물 형성 및 강한 화학결합으로 활성이 저하되기 쉽다. 이에 피독 저항성, 경제성을 갖추고 다공성 구조의 넓은 비표면적, 표면 개질 용이성을 바탕으로 우수한 H_2S 제거 성능을 나타내는 비금속 탄소 촉매가 주목받고 있다. 본 연구에서는 폐 PET 기반 탄소 촉매를 제조하여, $ZnCl_2$를 이용한 화학적 활성화와 이종 원소(N, S) 도핑이 H_2S 산화 성능에 미치는 영향을 평가하였다. 질소공급원으로서는 Urea [$CO(NH_2)_2$] 및 Thiourea [$CS(NH_2)_2$]를 사용하였고, 촉매 성능은 130℃~210℃ 범위에서 20℃ 간격으로 평가해 H_2S 전환율, 원소 황 선택도 및 SO_2 생성량을 분석하였다. 또한, EA, BET, XPS, SEM 분석을 통해 원소 조성, 비표면적, 기공 특성 및 표면화학적 특성을 규명하였다. 본 연구는 폐 PET의 고부가가치 탄소 소재 전환 가능성과 산업 배출가스 탈황 공정에서 저비용·고효율 비금속 촉매 설계 방향에 기여할 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부, RS-2025-02263037, 산업혁신 인재 성장 지원사업)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원과 2025년도 정부(환경부, YL-WE-22-002, 폐자원에너지화 전문인력 양성사업)의 재원으로 수도권매립지관리공사의 지원과 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경공단의 통합환경관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

PI17

UAV 기반 산업단지·항만 배출원의 대기질 연직 영향 비교

UAV-based Comparison of Vertical Air Quality Impacts from Industrial and Port Emission Sources

고민서[1], 고찬주[2], 서상덕[2], 이재영[1,3]

[1]아주대학교 환경안전공학과, [2]아주대학교 환경공학과, [3]아주대학교 인공지능학과

여수 지역은 산업단지와 항만 등 배출 특성이 상이한 대기오염원이 복합적으로 존재한다. 산업단지에서는 고온 연소·화학 공정 기반 배출이 발생하는 반면, 항만에서는 선박·하역 작업에 따른 저고도 배출이 주로 발생한다. 이러한 배출 특성의 차이는 오염물질의 연직 농도 분포에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 단일 고도 자료만 제공하는 지상측정소로는 배출원별 영향을 구분하는 데 한계가 있다. 따라서 본 연구는 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)을 활용한 고도별 관측을 통해 산업단지와 항만의 영향에 따른 대기오염물질의 연직 분포 특성을 비교하고자 한다. 여수항 인근 남산 공원을 측정 지점으로 선정하였으며, 풍향에 따라 각 배출원의 영향이 우세한 시점을 구분하고 고도별 오염물질 농도 분포를 비교함으로써 배출원별 연직 확산 특성을 분석하였다. 측정에는 Matrice 300 RTK (DJI, 중국)에 OA200M (ArimAir, 한국)를 탑재하여 $PM_{2.5}$, NO_2, O_3을 측정하였다. 측정 기간은 2026년 8월 21일부터 26일까지로 설정하였으며, 07시, 08시, 15시, 16시에 각 2회씩 측정을 수행하였다. 측정 고도는 50 m 간격으로 최대 300 m까지 설정하였으며, 각 고도에서 2분 10초간 호버링하여 대기오염물질의 연직 프로파일을 관측하였다. 본 연구를 통해 풍향 조건에 따른 산업단지와 항만의 연직 영향 범위를 규명하고, UAV 기반 고도별 관측을 활용한 입체적 대기질 진단 및 통합적 대기관리 전략 수립에 기여하고자 한다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지역맞춤형 오존 관리 기술개발사업의 지원 (RS-2026-25505137)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25480268).

PI18

국가 산업단지와 내륙도심의 야간 오존농도 고농도 특성 비교

Comparison of High Nighttime Ozone Characteristics between Industrial and Urban Areas

선여진[1], 황혜민[2], 이재영[1,3]

[1]아주대학교 환경안전공학과, [2]아주대학교 환경공학과, [3]아주대학교 인공지능학과

일사량이 거의 없는 야간에는 광화학적 생성이 제한되고, 일반적으로 오존이 질소산화물(NOx)과의 화학적 적정 반응 등을 통해 감소하는 경향을 보인다. 그러나 최근에는 야간에도 상대적으로 높은 오존 농도가 빈번하게 나타나고 있다. 이러한 현상은 대기 화학적 소멸 과정의 약화, 주변 지역으로부터의 수평 이동, 상층 잔류층에 존재하는 오존의 수직 혼합 등 다양한 요인과 관련될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 배출 및 지역적 특성이 상이한 산업지역과 도심지역을 대상으로 야간 고농도 오존 발생 특성을 분석하고, 지역 간 차이를 비교하고자 하였다. O_3, NO_2, CO 등 대기오염물질 데이터를 활용하여 두 지역의 시간대별 농도 변화와 상호 연관성을 분석하고, 야간 오존의 대기화학적 특성을 비교하였다. 또한 풍향, 풍속 등의 기상 데이터를 활용하여 주변 지역으로부터의 오존 수평 수송 가능성을 확인하였으며, 혼합고 자료를 기반으로 상층 잔류층 오존의 수직 혼합과 지표 오존 농도 변화 간의 관련성을 분석하였다. 이를 통해 산업지역과 도심지역에서 나타나는 야간 고농도 오존의 특성을 대기화학적 소멸, 수평 수송 및 수직 혼합 측면에서 비교하고, 지역별 특성 차이를 파악하고자 하였다. 본 연구 결과는 지역 특성에 따른 야간 고농도 오존의 발생 특성을 확인하여 지역별 오존 관리방안을 마련하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25480268).

PI19

자연적 휘발성유기화합물 배출량 도출을 위한 엽면적 산정 방법 간 비교 분석

Comparative Analysis of Leaf Area Estimation Methods for Determining Biogenic Volatile Organic Compounds Emissions

김나현, 오용환, 천소현, 김대현, 정민찬, 김서현, 손윤석

국립부경대학교 지구환경시스템과학부

대기 중 자연적 휘발성유기화합물(Biogenic volatile organic compounds: BVOCs)의 전 지구적 방출량은 인위적 기원의 배출량을 초과하며, 타 오염물질과의 광화학 반응을 통해 오존 등 2차 대기오염물질을 생성하는 핵심 전구체로 작용한다. 그럼에도 불구하고 국내 수종별 BVOCs 배출 특성에 관한 기초 연구는 미비한 실정이다. BVOCs 방출량 산정에 필수적인 엽면적 데이터는 고가의 전용 측정 장비를 요하며 현장 접근성이 떨어진다는 한계점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 현장에서 신속하고 경제적으로 엽면적을 도출할 수 있는 대체 측정 방안을 고안 및 검증하고자 하였다. 이를 위하여 수종의 형태적 특성을 고려하여 활엽수와 침엽수 각각에 측정 방식을 교차검증 하였다. 단면적 측정이 용이한 활엽수를 대상으로 공인 엽면적 측정 기기의 산출값과 스캐너 및 ImageJ의 픽셀 단위 분석법과 자체 제작 고정 프레임 및 스마트폰의 카메라를 활용한 간이 촬영법의 측정값을 비교하였다. 3차원적 접근이 요구되는 침엽수의 경우에는 잎을 원기둥의 일부로 가정하여 침엽의 부피, 잎의 수, 누적 잎의 길이 변수를 통해 3D 표면적을 산출하는 Johnson (1984)의 방법론과 ImageJ를 통해 확보한 2D 길이 및 지름 기반의 표면적 추정 방식을 비교 분석하였다. 본 연구의 결과는 향후 삼나무, 편백나무 등 기존 원기둥 모델이 부합하지 않는 비정형 침엽수종을 대상으로 Micro-CT 기반의 정밀 3D 표면적 실측값을 확보하고, 이를 2차원 투영면적 데이터와 연계하여 고도화된 3D 표면적 예측 방식을 도출하는 후속 연구의 기초 자료로 활용될 예정이다.

사사 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 「CLEAN-AIR 기술개발」 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RS-2026-25502680).

PI20

경기도 광주시 태화산학술림에서 오존 및 전구물질의 거동 분석

Analysis of the Behavior of Ozone and Its Precursors at the Mt. Taehwa in Gwangju, Gyeonggi-do

박지영, 최용주, 김하정, 홍정현[1], 김현석[1], 김수민[2], 장지희[2], 조강남[2]

한국외국어대학교 환경학과, [1]서울대학교 산림환경학전공, [2]국립환경과학원

오존(O_3)은 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOCs)의 광화학 반응으로 생성되는 대표적인 2차 대기오염물질이다. 산림에서는 식생으로부터 생물기원 휘발성유기화합물(BVOCs)이 지속적으로 배출되며, 주변 지역에서 유입되는 인위적 기원 전구물질과 함께 대기 중 오존 생성에 영향을 줄 수 있다. 본 연구는 경기도 광주시에 위치한 태화산학술림 대기관측타워(37.31°N, 127.32°E, 39 m)에서 2025년 8월 6일부터 9월 3일까지 O_3, NO_2 및 VOCs를 관측하였다. O_3와 NO_2는 각각 Model 49C (Thermo Fisher Scientific Inc., USA)와 Model T500U (Teledyne Technologies Inc., USA)를 이용하여 측정하였으며, VOCs는 SIFT-MS (Voice200 ultra, Syft Technologies Inc., New Zealand)를 이용하여 총 42종을 분석하였다. 관측 결과, O_3 고농도 기간에는 NO_2와 VOCs 농도가 전반적으로 증가하였다. 한편 O_3와 전구물질의 최대 농도 발생 시간과 풍향·풍속에 따른 농도 분포가 서로 다르게 나타나, 산림지역의 O_3 고농도는 식생 및 인위적 기원 전구물질의 거동과 이에 따른 광화학 반응이 복합적으로 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 산림지역 오존의 생성 및 변동 특성을 이해하고, 자연 및 인위적 기원 전구물질의 영향을 함께 평가하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

사사 본 연구는 국립환경과학원 연구용역과제 「미세먼지 및 오존 생성 원인 파악을 위한 도심상공 대기오염 원인물질 분포 특성 파악(V)」의 지원을 받아 수행되었음(NIER-2026-01-02-021).

PI21

대기 중 미량기체 관측을 위한 지상 기반 MAX-DOAS 시스템 구축 및 관측 프로토콜 확립

Development of a Ground-Based MAX-DOAS System and Establishment of a Measurement Protocol for Atmospheric Trace Gases

이채린, 최용주

한국외국어대학교 환경학과

MAX-DOAS (Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy)는 여러 고도 각의 산란 태양광을 측정하여 지표에서부터 하부대류권까지 미량기체에 대한 농도 및 연직분포를 얻을 수 있고, 인공위성 자료 검증을 통한 정확도 개선에 활용된다. 본 연구는 한국외국어대학교 글로벌캠퍼스(37.34°N, 127.27°E)에서 자체 제작한 MAX-DOAS 시스템을 시범 운영하였다. 제작된 장비의 성능을 평가하기 위해 동일 지점에서 운용 중인 JAMSTEC MAX-DOAS와 NO_2 DSCD (Differential Slant Column Density)를 비교·검증하였다. 또한 구름 제거 알고리즘을 개발하기 위하여 MAX-DOAS의 O_4를 AERONET AOD (Aerosol Optical Depth)와 비교하고, AERONET 구름 제거 알고리즘과 유사한 성능을 보이는 적절한 CI (Color Index) 값을 도출하였다. 이러한 비교를 통해 제작한 MAX-DOAS의 관측 성능을 평가하고, 장비 간 일관된 미량기체 관측을 위한 운용 및 분광분석 조건을 바탕으로 관측 프로토콜의 기초를 마련하였다.

사사 본 연구는 2026년도 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2026-04-02-056).

PI22

도시대기 측정소에서 측정한 지표 오존 농도 장기 추세 및 NO_2-O_3 관계 분석

Long-Term Trends of Surface Ozone Concentrations and Analysis of NO_2-O_3 Relationships at Urban Air Monitoring Sites in Korea

김경석, 최원식

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공

기존의 오존 연구는 주로 특정 고농도 사례 또는 수년 규모의 관측자료를 이용한 발생 특성 분석에 집중되어 왔다. 본 연구는 오존 농도의 장기적인 변화와 다양한 시간 규모에서의 비선형 변동 특성에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 2001~2024년 순천의 도시대기 측정소에서 측정한 오존 농도를 시계열 분해 방법(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)을 사용하여 단기, 계절, 경년, 장기 변동성으로 분해하였고, 각 시간 규모의 변동 특성을 바탕으로 인위적 요인에 의한 오존농도와 장기적인 배경 오존농도로 구분하였다. EEMD를 통해 추출된 장기 변동 성분을 이용하여 순천지역 오존 농도의 장기적인 증가·감소 경향과 저주파 변동 특성을 분석하였다. 또한, 국지적 오존 농도의 변동을 대표하는 단기 변동성을 추출하여 NO_2-O_3 농도의 비선형 관계를 분석하였고, 이를 통해 인근 산단 지역에서 배출된 VOCs 농도의 변동 추이와 오존 생성 효율성을 간접적으로 평가할 수 있는 가능성을 제시하고자 한다. 궁극적으로 본 연구에서는 오존 농도의 장기적인 관측자료를 바탕으로 오존 농도의 변화를 다중 시간 규모에서 해석하고, 시간 규모별 변동 특성에 대한 이해를 확장하고자 하였다.

사사 이 연구는 2026년도 국립환경과학원(NIER-2026-01-02-019)의 지원을 받아 수행하였습니다.

PI23

$MAPbI_3$ 페로브스카이트 단결정을 이용한 자가발전형 NO_2 가스 센서에 관한 연구

Self-Powered NO_2 Gas Sensors Using $MAPbI_3$ Perovskite Single Crystals

최예준, 이수민, 윤정호

경희대학교 대기환경에너지융합연구실

이산화질소(NO_2)는 연소 및 산업 공정에서 배출되는 대표적인 대기오염물질로, 낮은 농도에서도 인체 건강과 주변 환경에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 이에 따라 산업 현장뿐만 아니라 도심 지역의 대기질을 실시간으로 감시할 수 있는 신뢰성 높은 NO_2 센서 기술의 개발이 요구되고 있다. 할라이드 페로브스카이트(halide perovskite)는 뛰어난 광전기적 특성과 우수한 표면 반응성을 바탕으로 차세대 화학 가스 센서 소재로 주목받고 있다. 특히 3차원(3D) 구조의 페로브스카이트 단결정(single crystal)은 기존의 다결정 박막(polycrystalline film)과 비교하여 결정립계(grain boundary)가 존재하지 않아 결함 밀도(defect density)가 낮고, 이에 따라 더 높은 전하 캐리어 이동도를 나타낸다. 이러한 구조적 장점은 효율적인 전하 수송을 가능하게 함으로써, 가스 센서의 전체적인 감응 성능 향상에 기여한다. 본 연구에서는 이러한 특성을 활용하여 $MAPbI_3$ single crystal 기반의 자가발전형(self-powered) NO_2 가스 센서를 제작하였다. 해당 센서는 별도의 외부 전원 공급 없이도, 결정 표면에서 NO_2 분자와의 화학적 상호작용에 의해 유도되는 광전류(photocurrent) 변화를 통해 가스 농도를 검출할 수 있다. 제작된 소자는 10 ppm의 NO_2 가스에 반복적으로 노출되었을 때 baseline 대비 뚜렷한 광전류 증가를 나타내었으며, 5회의 반복 이후에도 안정적인 가역성(reversibility)과 반복성(repeatability)을 나타내었다.

사사 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(RS-2024-00333809).

PI24

다기능 구름챔버의 균일한 벽면 냉각을 위한 열전달유체 유로 설계에 대한 연구

Design for Uniform Wall Cooling for a Multifunctional Cloud Chamber

정동영[1),5)], 한남규[1)], 옥정수[2)], 김성곤[3)], 박경렬[4)], 강경민[4)], 하효식[4)], 김경환[1)], 김나진[1)], 박도현[1)], 염성수[1)], 최 선[1)], 이승복[1)]

[1)]한국과학기술연구원(KIST), [2)]고려대학교, [3)]성균관대학교, [4)]MTES, [5)]서울과학기술대학교

구름챔버에서 내부 벽면의 온도 균일성은 실험공간의 온도·습도·압력 조건과 구름 입자의 생성 특성에 영향을 미치는 주요 설계요소이다. 특히 열전달유체가 각 유로에 불균일하게 분배되면 벽면에 국부적인 온도편차가 발생하고, 습윤 조건에서는 저온부에 수증기가 응결하여 초기 조건과 실험 재현성이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 KIST와 ㈜MTES가 설계한 다기능 구름챔버의 내부챔버 벽면 냉각용 열전달물질의 유로 형상에 따른 벽면 온도의 균일성을 평가하기 위해 Solidworks와 Fluent를 이용하여 전산유체역학 해석을 수행하였다. 해석대상은 내부챔버 벽면의 최소 unit에 해당하는 원형 모양의 1개 channel로 선정하였으며, 여기에는 2개의 inlet과 1개의 outlet이 있고, 그 사이에 유량이 분배되는 3개의 path로 구성되어 있다. 냉각유체 영역과 챔버 고체벽을 함께 고려한 steady-state 조건의 복합열전달 해석을 수행하고, 유량 보존과 국부 유동특성을 검토한 후, 각 path의 질량유량, 단면평균속도, 압력손실 및 벽면온도 분포를 비교하였다. 해석 결과, path 경로 중 flange 설치 여부에 따른 유동저항 차이에 따라 유량 분배 편차가 발생할 수 있으며, 이는 벽면 냉각의 불균일성으로 이어질 수 있음을 알 수 있었다. 예상되는 유량 분배 편차를 개선하기 위해 각 path별 오리피스 추가 설치 방안에 대해서도 검토할 예정이다. 연구 결과는 다기능 구름챔버의 열전달유체 유로 설계 최적화와 운전유량 선정을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

사사 본 연구는 KIST의 미래원천기후환경기술개발사업 “인공강수 기술 개발을 위한 다기능 구름챔버 및 기반 관측/측정기술 개발(26E0111)”으로 지원되었기에 감사드립니다.

발표자 색인

가

강 건 1A6
강 별 3I4, PE10
강 욱 PD26
강경민 PI24
강경희 2F1, 2F3, 2F4, 2F5
강기원 3C2, 3F3, 4A5
강다현 PH4
강대일 1C3, 5A5, 6F4, 7A3, 7B4, PD9, PD40, PD50, PD51
강민현 7D4
강병욱 PD9
강보경 5C4
강석원 1A1, 5A1, 6H1
강성곤 PD7
강성구 2E4
강성민 5E3, 7C4
강영웅 2G3, PH8
강유진 PC1
강윤희 3I3, 5G3, 6I2, 6I3, 6I4, PE3
강은진 2F2, PC1
강정욱 6H6
강지명 3D6
강진구 1D4, 5C5
강차오름 1D6, 4B1
강천웅 1G1, 3E1, 5H1, 6B5
강현규 5I3
강형모 3G4, 5I1, 5I3
강혜선 5H4
강혜진 7A1, PD17
강희찬 PI14
계관욱 2G4, 3G5, 5D4
고관영 2H1
고동훈 4E1, 5I2, 6F5, PD3, PD4, PD5
고민서 PI17
고민지 4B2, 5B1, 6F2, PD16, PD22, PI7
고상원 6D1
고선용 PG6
고용국 7C3
고원석 PD24, PD49
고찬주 7A1, PD34, PI17
고희정 1C1, 1C2, 2E2, PD10
공부주 PD9
곽경환 1A6, 3A4, 6I1, 7C1, PD24, PD49
곽재혁 5E4
곽한주 1D3, PD6
곽호찬 PE6
구민주 PD49
구영선 7I3
구자호 5D5, 7A2, PD11, PD14, PF7, PH2, PH3, PH10
권도현 2E4
권민선 3C4, PC15
권수진 4D3, 4E3, 4H5
권승미 PD12
권오경 6C3
권은별 2D1
권정택 PF6
권정희 4D4, PD45
권형안 5A2, PH4, PI3, PI6, PI10, PI12,
권화빈 1G3
금선우 2H1, PD12
길준수 2E3, 4D4, 5B4, 6H5
김 정 1F3, PE12
김 준 3B3, PD26, PH10
김건윤 PD10
김경석 PI22
김경준 PI5
김경환 4D1, 6A3, PD28, PD30, PI24
김경훈 1A1, 3F2, 6D1, 6H1
김고운 2E1, 2E6
김관철 5D2, 6H3, PC19, PD35, PH9
김규랑 PF4, PH10
김규보 7A4
김기애 1H5, 6A6
김기현 3B2, 5E1, 6F1, 7H2, 7I4, PG2
김기홍 PD9
김나경 3D1, 5C5
김나래 1E6
김나진 PD28, PD30, PI24
김나현 1E1, 1E2, 1E3, 3H2, PC6, PD19, PI19
김나혜 PA2
김낙현 5E4
김남형 PG6
김대근 3A5, 3C3, 7B2, PD8, PG4, PG7
김대옥 PG11
김대현 1E1, 1E2, 1E3, 3H2, PD19, PI19
김덕래 3E2, 7A5
김덕현 1A3, 2G5, 3A3, 3G2, 3G5, 5A3, 5D1, PI8, PI9, PI15
김도연 PE12
김동우 PG1, PG10
김동진 5C2, PC7, PC8
김동현 PD24, PD49
김동호 3I1
김동휘 1H2, 4C3, PD46
김명주 PD51
김민서A PG4
김민서B PI2, PI4
김민석 3B3, 5A1
김민선 3E1, 4B4, 4H1
김민섭 4A4
김민송 PE10
김민영 5F4, 5F4
김민욱 3F1, PD55
김민중 4C4, 4C5, 5C3, 6C5, PC6, PC17
김민지 4F4, 4F5, 6D5
김민호 3G3, 5I1, 5I3, 7A5
김박사 2E2
김범석 6D4, PD58, PE1
김병길 2F5
김병연 4C1
김보연 PI12
김상백 2E2, 7B1
김상우 PH2
김상준 PD11, PD14, PH10
김상철 5D2
김상화 6A6, PD43
김서현 1E1, 1E2, 1E3, 4F4, 4F5, 6D5, PD19, PI19
김석준 2G5, 3G2
김선웅 5B5
김성곤 PI24
김성동 3I2, 7E2, PF2
김성수 4F4, 4F5, 6D5, 7D2, 7D3, PG6
김성영 2D6, 5D3
김성조 6H3
김성준 3I4, 6C2, PC14, PE10
김성훈 5B5
김소연 7A1, PD34
김수경 PD48, PD54
김수민 3G4
김수민A PI6, PI11
김수민B 7C1, PI20
김수민C 2E2, 2E4, 2E5, 3G4, 6A5
김수진 2H2
김순태 3I3, 5G3, 5I4, 6I2, 6I3, 6I4, PE3

김승곤 PG6
김승미 2D1
김승범 1A1
김승원 PE12
김승재 1G1
김승진 3F1, 3I2, 7E2, PD31, PD55, PF2, PF3
김승혜 PD43
김신동 7D4
김연욱 1A6, PD49
김연지 PD43
김연진 1G4
김연태 PD23
김연후 4A2, 4E5, 7B3, PI2, PI4
김영남 5B1
김영민 2H4
김영석 6C1
김영아 1C1, 1C4, 2E2, PD21
김영준 PC22
김영환 5F4
김예진 1A2, 3D4, 6C1
김용규 5B5
김용표 5I4, PD23, PD42, PD45
김용현 4G5, 7H1
김우영 2H3
김우준 4E1, 5I2, 6F5, PD3, PD4, PD5
김우진 PC8
김원빈 PI7
김유정 6B3
김은혜 5I4, 6I2, 6I3, 6I4, PE4, PE5
김인엽 1A3, 2G5, PI8
김자현 3B4
김재원 PE10
김재진 1A6, 4F4, 4F5, 6D5
김재헌 4F4, 4F5, 6D5, 7D2, 7D3
김재혁 2B2
김재희 1H4
김정민 7H2
김정빈 3F3, 4A5
김정숙 5F3, PC24, PE11
김정연 2H2
김정욱 3I3, 6I3
김정호 3I1, 5A1, 6B3, 7D1, PD42, PD45
김정환 4B5
김정훈 2G3, 3G2, PC24
김정희 PE7
김조천 1E1, 1E4, PG11
김종범 3I1, 4A1, PA1
김종현 1H3
김종호 1H3, 4A2, 5A1, 7B3
김주애 2E4, 2E5, 4A4, 4D4, 5B4, 6H6, PD6, PD41
김주영A 1C2, 4E4, 5A2
김주영B PD42, PD45
김주완 5D5, 5I3, PD11
김주한 3F2, 5A1
김준서 PB2
김준엽 3C1, PG3
김준영 2D7, 3D6
김준오 PG6
김준태 4D1
김준희 7A4, PH4
김지민 4D1, 6I1, 7C1, PD24, PD49
김지석 2G4, 3G5, 5D4
김지선 PC10
김지안 1D3
김지영 3B4
김지호 1H4
김지환 PD28
김지훈 PC2, PC3, PC4, PD7
김지희 PD12
김진섭 7H1
김진승 6C3, PF4
김진식 3I4, PE10
김찬수 3F1, PD55
김창수 5G4
김창혁 3C2, 3F3, 4A5
김채완 1E7
김채은A 3H1, 3H3, 3H4, 4G1, PI1
김채은B PD16
김철희 5B4, PC7
김치영 5D5
김탁현 PG1, PG10
김태오 PA2, PB2, PG5
김태윤 2D4
김태형A 5F2, 6C2, PC14
김태형B PD7, PG9
김태훈 3C2, 7I2, PG1, PG10
김태희 3A4, 6I1, 7C1
김하정 PI20
김학준 1G5
김현빈 PG5
김현서 6I4
김현석 PI20
김현수 7D1
김현웅 6B3
김현준 PG7
김현철 6I4
김형천 1F3, PE10
김형천 3I4, 5F2
김혜림 1D1
김혜연 PI16
김화진 2E5, 4D3, 4E3, 4H5, 6F3
김환기 1G3
김환동 4D1
김효민 PD6
김효순 3B4
김효원 2H1, PD12
김희진 4F4, 4F5, 6D5, 7D2, 7D3, PC2, PC3, PC4, PD7, PG9

나

나건수 1F2, 1F4
나성균 PH3
나은상 4A2, 4E5, PI2, PI4
나하나 PB3, PD52, PD53
남우희 4D2, 6B1
남일권 3F2, 5A5
남형석 5H4
노영민 1A3, 1B2, 1B3, 2G5, 3A3, 3G1, 3G2, 3G5, 5A3, 5D1, 6G1, 6G3, 6G4, PI8, PI9, PI15,
노용국 7E2
노준영 3F1, 3I2, 7E2, PD31, PD55, PF2, PF3
노철언 2H5, PD44
노학재 PG12
노해민 4B4, PI13

다

도현석 6I1, 7C1, PD24, PD49
딘브엉 PG11

라

레띠황옌 4G4
레티황이엔 3E1, 3F4, 4E2, 4H1, 6A1, 6A2, PF6
류근우 PF1
류승한 1A1, 4C1
류승훈 5A5
류지원 PC21
류현준 7A4

마

마예진 5C3
명지선 5G3
문병현 4F4, 4F5, 6D5, 7D2, 7D3
문보경 4A3
문소은 6D1
문수환 4C2

문윤기 1A3, PI15
문정혁 5C2
문지혜 4E3, 4H5, 6F3
문현상 2D7
문혜식 7D1
미슈라 샬리니 5A2
민경은 4D2, 6B1
민용침 2E1
민인기 2E1
민정기 1G3
민지홍 1E4, PG11
민희성 3E3

바

박 경 3D5, PH5
박 민 5F1
박경렬 PI24
박대훈 1G4
박덕신 6D1
박도현 PD28, PD30, PI24
박문례 PG12
박문수 5B4
박민경 1A3, PI9
박민성 3F1, PD55
박민수 1C4
박민준 5D5
박병규 1E4, PG11
박병용 2H2
박상서 2F3, 5D5, PD14, PH11
박상준 PB1
박상훈 1H1
박서인 PF1
박선영 2E4, PD48, PD54, PF6, PH6
박선호 2G4, 3G5, 5D4, PD27, PD29, PH6
박성규 3F2, PE4, PE5
박성민 4F2
박성원 2D3, 6F4
박성현 2D7
박세은 2H1, 2H5, 3F4, 4H1, 5H1
박소현 PI10
박수빈 PC21
박순영 PC9, PC10
박승명 3G3, 6B3, PD25
박승부 PC18, PD33
박시언 4F4, 4F5, 6D5
박아린 4F4, 4F5, 6D5, 7D2, 7D3
박영도 7A4
박영일 1A4, PC25, PD15
박용미 6B2, 7B5
박예지 5H2
박용성 2C3
박유경 6B2
박유정 PC23
박은하 3B4, 5H3
박이은 PG6
박인홍 7E1
박일건 PD58, PE1
박재현 3C4, PG3
박재형 5C2, PC7, PC8
박재환 4E1, 5I2, 6F5, PD3, PD4, PD5
박정민 6H3, PD34, PD40, PH9
박정현 3D5, PH7
박정후 4D2, 7C1
박종건 3I2, PD31, PF3
박종석 PG1, PG10
박종성 7B4
박종욱 7A5
박종현 2H5, 3F5, 5H1, 6A1, PD44
박주선 5D5, PH6
박주성 PD12
박준동 PG6
박준현 2D2
박준홍 2C1
박준희 3C3
박지민 PH2
박지연 PD23
박지영A 4F1, 4F2, 4F3
박지영B PI20
박지원 7A2, PA3
박지훈 4C4, 5C3, 6C5
박진수 1C2, 1C3, 1C4, 1C5, 3F2, 5A1, 7A3, PD11, PF7
박찬호 PD49
박창민 PD12
박창현 PC7
박채원 3D3
박채형 4E1, 5I2, 6F5, PD3, PD4, PD5
박태웅 5H4
박해심 7C2
박현민 2E5
박현영 4A3
박현진 PG12
박호성 PH1
박희선 4A4, PD41, PD6
반수진 4C4, 5C3, 6C5
방종철 2C2
배경권 PG6
배기남 4G2, 7E3, 7E4
배민석 4E1, 5I2, 6F5, PD3, PD4, PD5
배병규 3I3, 6I3
배성현 PD56, PD57
배세정 3D4, 6C1, 6C4
배일상 PC22
배창한 6C2, PC14
배현주 5G3
배효정 PD22
백민우 1D1
백복행 7C1
백성옥 4E1, 5I2, 6F5, PD3, PD4, PD5
백승재 1A3, PI8
백승훈 2E5
백승희 2F4
백정덕 PD56, PD57
변영철 1G3
변진영 PD14
부준오 2E2, 7B1

사

사공누리 4F1, 4F2, 4F3, PI16
서도연 2H2, PF6
서범근 1H3, 4A2, 5A1, 7B3
서상덕 PD34, PI17
서서희 3C2, 3F3, 4A5
서석준 3E2, 5A5
서성민 4H4, 6B2
서승완 1G3
서예빈 PC20
서유정 PB1, PC24, PE11
서재원 6F3
서정빈 1F, 1F4
서지영 4E2, 5H1, 6A1, 6A2, PF6
서표석 1C4
서현정 6B5
서혜빈 PD45, PD51
선여진 PI18
선우광 PD1
성민경 6H3, PC19, PD34, PH9
성민영 1C2, 1C3, 1C4, 1C5, 7A3
성지원 1C3, 5A5, 7A3, 7B4
성지혜 PC22
성태준 6C1
성해창 5D2
손나현 4F2, PI14
손락훈 6I4
손명희 2E5
손보경 6C1
손성관 PD37
손영훈 3B4

손윤석 1E1, 1E2, 1E3, 3C2, 3H2, 7I2, PD19, PI19
손종렬 PE6
손지환 5B4
손지훈 1A1, 5A1
손채은 7I3
손현민 1H2, 4G3
송명기 4E1, 5I2, 6F5, PD3, PD4, PD5
송미정 4A2, 4E5, 6G2, 7B3, PD25, PD32, PI2, PI4
송민영 1F5, 3I1, PD2, PD20
송상근 4C2, 6C3, PF4
송승주 1F3, 5F2, 5F2
송영철 2H5, 3F5, 6A1, 7A2, PA3,PD44
송인호 7B4
송정인 5C3, 6H1
송지현 6D2, 6D3
송창근 1H5, 6A6
송철한 1H4
송형도 4A2, 4E5, 5F1, 5F2, 6C2, PC14, PE7, PE8, PE9, PI4
송환진 PH10
신규성 3H1, 3H3, 3H4, 4G1, PI1
신대근 2E2
신동호 1B1, 1G2, 2G1, 3G1, 6G1, PE7
신민영 1D6, 1E6
신새미 PE6
신선아 5B4, 5I3, PD26, PH1, PH7
신성균 1F5, 2G4, 5D4, PD2, PD20
신승규 PG6
신원범 4B4, PI13
신은지 PE8
신주선 1A3, 1B3, 3A3, 5A3, 5D1, 6G1, 6G3, PI15, PI8, PI9
신지원 6H4, 6H6
신현준 6B5
신혜정 2F1, 2F3, 2F4, 5I4, 7A5, PD32
신혜진 PC21
심유진 4F4, 4F5, 6D5
심주현 1A3, 3A3, PI8, PI9, PI15

아

안상권 1G4
안상현 5I3
안소이 5B4
안소진 5G2
안수경 6B3
안영진 PF3
안유정 PI16
안정언 1G1
안준건 PD46
안준영 3F2, 5A5
안찬우 1C4
안창진 2F5
안해영 6D3
안효빈 PC18
양마란 PD12
양서희 4C5
양성재 7A4
양세영 6C4
양세환 2E2
양소연 1H1
양재환 4F1, 4F2, 4F3, PI14, PI16
양지연 5G4
양지혜 1H1
양채영 5C2, PC12
엄준업 PG12
여경우 PD58, PE1
여민주 PF7, PH10
연바다 PD33
염성수 PI24
예익주 PD30
오달영 PC22
오민희 7E3
오상민 1C1, 1C2, 1C4, 7B1, PD10, PD21
오세호 6H3, PD4, PD34, PH9
오수빈 5I3
오승관 7H1
오승미 7B4, PD23
오승일 3I4, PE10
오승주 3B3, PD26
오용환 1E1, 1E2, 1E3, 3C2, 3H2, 7I2, PD19, PI19
오종민 5G3
오한나 4C1
옥수민 4B3
옥유진 PI11, PI6
옥정수 PI24
우상희 2H3
우서라 4D4, 5I1
우설아 5A2
우정헌 6C2, PC14
우주완 1A6
우지윤 3F1, PD55
원수란 4D4, 5E2
원종천 PD46
유 철 1F3, 3I4, 4A2, 4E5, 5F1, 5F2, 6C2, 7B3, PC14, PE7, PE8, PE9, PE10, PI4
유나기 1C1, 1C2, PD10
유성지 6B1
유은진 5G1
유이슬 PH8
유일한 PC21
유정아 PH2, PH10
유정우 PC11
유정훈 1H3, 7B3
유종원 2D5
유지성 7B3
유지예 1A4, PC25, PD15
유한진 2H1, 2H5, 3F4, 3F5, 4E2, 5H1, 6A1, 7A2, PD44, PF6
유화성 PC24, PE11
유휘선 2H1
유희정 1C1, 1C2, 1C3, 1C4, 1C5, 2E2, PD21
윤덕근 PE1
윤도영 PD40
윤문상 PD27, PD29
윤성욱 PI5
윤영욱 3I1
윤영준 PD23
윤영중 2C2
윤원근 PC4, PG9
윤재근 PD48, PD54
윤재봉 1F6
윤정호 PI23
윤종상 1E1, 1E5, 3E1, 4B4, 4G4, 4H1, 4H2, 6A2, 7F1, PC13, PI13
윤준혁 3E1, 4H1, 5H1, 6A1
윤지현 3A3, 5D1, 6G3
윤찬호 4H3
윤창동 1D1, 2E3
윤치성 2G2, 5I1, 5I5
윤현준 PD36, PD37, PD38, PD39
윤혜상 1F2
윤희영 5C1
윤희원 PA1
이가은 PI11, PI6
이가현 4D2
이강산 5F1, 5F2
이강웅 4B5, 5B4
이강함 2G3
이건희 5H2
이경빈 5F2, 6C2, PC14
이경은 2H5, 3F5, PD44
이경일 PD38
이경환 6B1
이광민 5H3

이광열 4E5, 6F4, PD40, PD50
이광택 1G5
이권호 5B2, 6H3, PD2
이규진 2C4
이그림 1C2, 1C3, 1C5, 7A3
이근환 PG6
이기열 2G2, 5A2, 5I1, 5I3, 5I5, 7A5
이남혁 PD24, PD49
이다연 1E4, PG11
이다은 PC12, PF6
이도경 1H4
이동욱 5G3
이동은 3I2, 7E2, PD31, PF2, PF3
이동재 PE7
이동휘 PD34
이동희 6H3, PH10, PH9
이명인 1A5, PC20
이명화 3C1, 3C4, PG3
이명훈 PF1
이미선 1H3, 5A1, 7B3
이미혜 6H6, 2E3, 2E5, 4A4, 4D1, 4D4, 5B4, 6A4, 6H4, 6H5, PD41, PD6, PG10
이민서 1C5, 4C5
이병근 3B4
이상균 PC2, PC3, PC4, PD7, PG9
이상덕 7C1, PD51
이상림 3H1, 3H3, 3H4, 4G1, PI1
이상무 PH4
이상섭 PD47
이상욱 5B5
이상진 3A2, 4B2
이상탁 PD8
이상현 1A6, 5A2
이상훈 PD31
이상희 2H2
이석현 4D1, 6A3, PD30
이석환 2H3
이선란 2E2, 3G4, 6A5
이성빈 4C2
이소정 3I3, 6I3
이소진 5E3, 7C4, PD2
이수민 PI23
이수빈 2D6
이수완 PH11
이수정 3E2
이수진 6B1
이수찬 2E1
이수현 4B4, 4H2, PI13
이순환 PC7, PC9, PC10, PC11, PC15
이승묵 PC21
이승민 1F1, 1F2, 1F3, 1F4
이승복 4D1, PD28, PD30, PI24
이승우 2E1, 2E6
이승욱 2B3
이승재 PH11
이승하 3G3, PC17
이시현 1A2
이어진 PI7
이영로 4A4, 6H4
이영석 5B5
이예림 4C4
이용성 6F1
이용진 5G4
이용찬 1A4, PC25, PD15
이용희 5C3
이우미 2H2
이우정 3B2
이원진 3E2, 7A5, PD26, PH1, PH7
이유경 PI9
이유선 2G5, 3G2, 5A3, 5D1
이윤경 6D2
이윤곤 2F1
이윤구 6C2, PC14
이윤서 PD40
이은아 1C2, PD21, 4E4, 5A2
이은영 7C2
이의진 PI15
이자성 1F6
이재명 7D4
이재범 4C4, 5C3, 6C5, 6H1
이재영 5D2
이재영 6D1, 7A1, 7C2, PC19, PD34, PI17, PI18
이재웅 2H2, PF6
이재윤 3F2
이재은 PG2
이재익 2E1
이재진 4E3
이재형 5A2
이정민 7A2, PA3
이정범 3D1, 5C5
이정현 2B3
이정훈 4E4, PD6
이종재 1H5, 6A6
이종태 1H6
이주희 2H2, 7F1, PH3, PH10
이준석 5A1
이지민 6A4
이지선 4B5, 4D4, 5B4
이지우 3B3
이지원 4D1, PD30
이지이 4B3, 4D4, 5I4, 7B4, PD23, PD40, PD42, PD45, PD51
이진근 7I3
이진화 2H1
이창석 2F1, 2F3, 2F4, 2F5
이창주 4B4, 4G4, 6A2, PC13
이채린 2G2, PI21
이철승 7I4
이철용 5D4
이철환 5H4
이태윤 4H3
이태형 1A1, 3F2, 5A1, 5C3, 6H1, PD32
이태훈 1C3, 7A3
이한결 7E2
이한림 2G3, 2G4, 3G5, 5D4, PD27, PD29, PH5, PH6, PH7, PH8
이한빛 PI3
이향경 5F2, 7B3, PE9, PI4
이헌영 2H1, 3E1, 3F5, 5H1
이현민 2E5, 5B4, 6H5
이현서 6I1, PD24, PD49
이현아 7H1
이현정 7C3, PF7
이형주 1E1, 1E6, 4B1, 5G1
이혜연 3I1, 4A1, PA1
이혜지 6A3, PD30
이호승 5H3
이호영 3A1, 5B1, PD16, PD22
이환희 5G2
이효원 PD50, PD51
이효정 2F4, 5D5
이훈하 PC2
이희관 1A4, PC25, PD1, PD15
임 호 7A4
임문순 4D4
임상현 3D2
임세희 1C2, 1C3, 4E4, 5A2, PD21, PD6
임수길 1E4, PG11
임연희 5G3
임용재 3F2, 5A5, 7B4, PD51
임운혁 PD46
임유락 2E4, 4D4
임재휴 7A4
임정호 1A2, 2F2, 6C1, 6C4, PC1
임주용 PE9
임채영 1G5
임푸름 PI2, PI4
임하늘 1C2, 5A2
임현광 PH10
임희연 PD6, PD41

자

장 권 1D5
장수강 3F3, 4A5
장수현 PD12
장예진 1D2, PC13
장예진 4B4, 4G4
장유리 PE7
장은호 PD23
장임석 4A4, 5A2, 5B4, 7A5
장재혁 7C2
장재화 2G4, 3G5
장정연 PD40
장준혁 PD47
장지이 3H1, 3H3, 3H4, 4G1, PI1
장지혜 PD48, PD54
장지호 1A4, PC25, PD1, PD15
장지희 PI20
장철민 5F4
장현섭 2B1, 5D2
전 진 7C3
전기준 1G1, 2H1, 2H5, 3E1, 3F4, 3F5, 4E2, 4G2, 4G4, 4H1, 5H1, 6A1, 6A2, 6B5, PD44, 7E3, 7E4, 7F1, PF6
전소희 PG5
전예지 5F1
전용석 3E2
전원배 5C2, PC7, PC8, PC12
전의찬 3F1, PD55
전준민 PD9
전지원 2D3, 6F4
전진수 6D3
전하정 4E1
전현수 3F3, 4A5
전혜준 1F5, PD20
전휘서 2H1
정 혁 1A1
정가빈 PC19
정경이 PC23
정경준 5G4
정관영 7F1, PC3
정다운 4G2, 7E3, 7E4
정다희 2F1
정동영 PI24
정라니 1C3,7A3
정락영 PG8
정무현 7A1, PD34
정민찬 1E1, 1E2, 1E3, 3H2, PD19, PI19
정상진 7A4
정석한 6A5
정선기 3H1, 3H3, 3H4, 4G1
정선기 PI1
정선아 4D2
정선제 6H4, PD6
정성은 3I3, 6I2, 6I3, 6I4, PE3
정소영 3F2, 5A5
정수린 PD32
정수종 PI6
정수진 PD50
정승국 5A5
정승현 2F4
정시훈 2F2
정애란 PD36, PD37, PD39
정연진 PH5, PH7
정영상 1H1
정영석 3B4
정용원 6A2
정우석 1F6, PB3, PD52, PD53
정욱교 5D3, PH1, PH4
정원근 1H1
정원석 2G3, 3G2
정은혜 1F4
정종민 2E1, 2E6
정준영 3H1, 3H3, 3H4, 4G1, PI1
정지민 6C5
정지영 PD10
정지운 PI5
정지윤 1C3, 7A3
정진상 4B3
정진용 2E1, 2E3, 2E6
정진주 7B4
정찬식 1E7
정창훈 PD23
정필수 5C1
정하윤 PD50
정현구 PD50
정현수 4F4, 4F5, 6D5, 7D2, 7D3
정희봄 7I2
정희성 PI2, PI4
제선미 1E1, 1E7
조가영 1F5, PD20
조강남 PI20
조나래 7B2
조면성 5E1
조미라 6F4, PD40
조민송 PF6
조민준 4G5
조범기 4A2, 4E5, PD25, PI2, PI4
조상희 3C2, 7I2, PG1, PG10
조성빈 6C3, PF4
조성환 3G2
조영민 7I2, PC23
조예슬 2F3
조완섭 2H3
조용선 5H3
조용한 1C3, 7A3
조윤행 1G2
조인규 5B3
조인아 PG6
조재호 5A1
조정우 PI5
조준표 PG6
조창민 4D2
조채연 5H2
조현영 1F6
조현정 3I4
조현정 PE10
조혜은 4C5
주소희 5D1, PI9
주정태 4B2, 5A4, 5B1, 6F2, 6H2, PC5, PD18, PI7
주종민 5F2, PE7
주태규 3B1, 4A4, 4D1, 6H4, PD41, PD6
주흥수 PD56, PD57

차

차성현 2D4
차승환 PD50
차주원 5E3, 7C4
차혜지 PD26
채다은 PC9
채민영 2H1
채석병 4H3
채찬병 PC22
천소현 1E1, 1E2, 1E3, 3H2, PD19, PI19
천지민 1A5
최 상 PE5
최 선 PI24
최권희 PE8
최기철 1E1
최나래 1H1, 5I4, PD32
최대련 4C4, 5C3, 5C5, 6C5
최동원 6C2, PC14
최민서 PD49
최병현 7I3
최서영 4E1, 5I2, 6F5, PD3, PD4, PD5
최성득 1H5, 3A1, 4B2, 5A4, 5B1, 5B3, 6A6, 6F2, 6H2, PC5, PD16, PD18, PD22, PD43, PI7

최성우 PE10
최성철 6H3
최순혁 PD24, PD49
최승진 PD47
최시영 1C2, 1C3, 5A2
최연규 3A5
최영재 PC3, PD7
최예덕 2H1, PD12
최예빈 4G5, 7H1
최예준 PI23
최예지 PE9
최예진 PD2
최용석 PC22
최용주 1C5, 2E6, 2G2, 3E2, 3G3, 3G4, 4B5, 4C5, 4D4, 5A2, 5A5, 5B4, 5I1, 5I3, 5I5, 6H5, 7A5, PI20, PI21
최우석 6H3, PI12
최원식 1H5, 4A1, 4H4, 6B2, 6B4, 7B5, PI22
최원이 2G4, 5D4, PH8
최은경 PG6
최은화 PF1
최인영 1E4, 2G4, PG11
최정해 PG3
최진녕 PC17
최진수 3F2
최찬우 PC23
최창기 6H3
최철준 PD38, PD39
최태후 1H4
최하연 5G5
최현식 5C2, PC12
최현영 1A2, 3D4, 6C4
최형석 7A5
최호경 2G1, 6G1
최회준 PH1
최효정 3G1
최효준 PC23
트란민녹 4G2, 7E3, 7E4
팽다슬 2H1
편도철 7D1
표수열 4D1
표종철 4G1

하

하윤경 4A5
하효식 PI24
한경만 1H4
한남규 PI24
한방우 1G4, 1G5, 5H2
한범순 1H2, 4C3, 4G3, PI5
한세현 5F3, 7F2, PB1, PC24, PE11, PE7
한수빈 1H5, 6B2, 6B4, 7B5
한승희 1D4, 5C5
한영지 6F4, PD40, PD50, PD51
한은미 5F1, 5F2, 6C2, PC14
한종헌 7B1, PD21
한주은 1A1, 4C1
한지현 1F1, 1F2, 1F3, 1F4
한진석 PG11
한창우 5G3
한희선 4F4, 4F5, 6D5
함수한 1F5, PD20
함지영 4A2, 4E5, 5F2, 5F2, 7B3, PE8
허 민 5C2, PC8
허국영 3G3, 6B3, 6F4, 7B4, PD25, PD32, PD40, PD51,
허기영 4C2
허대영 PA2
허재범 PI2, PI4
허재석 6D1
허재희 5D2
허정기 7A4
허지은 1G2
홍석영 2G3, 3G2
홍성진 5B1
홍성철 4C4, 5C3, 6C5, 6H1
홍세운 4A2, 7B3
홍유지 PH3
홍윤철 5G3
홍정현 PI20
홍준영 4H5
홍진규 4C4, PH2
홍천상 5B2, 6H3
홍현기 PH1, PH5, PH6, PH7, PH8
홍현승 2D4
황규철 3I1, 4A1, PA1
황소민 PC12
황수민 6C4, PC1
황지원 PD1
황혜민 7C2, PI18

A~Z

Amila Weerasinghe 1A1
Andreas Hofzumahaus 4D2
Andrew Loh PD46
Anne Boynard 5D5
Apoorva Pandey 7A5
Avinash Shastri 4A2, 4E5, PI4
Balasubramanian Prithiviraj 6F2
Barkhasragchaa Baldorj 6A4
Bethsaida Cardona 5G5
Bin Yuan 4D2
Bryan Place 7A5
Budsaba Uamkasem 5A2
Cathy Clerbaux 5D5
Chang-Jin Ma PD13, PE2
Christine Harper 6H4
Claudia I. Czimczik PD6
Dae-Woon Jeong 1I3
Daniel Hurtmans 5D5
Dat Nguyen 5A4
David Pando 3B1
David Tanner 6H4
Di Wang 1I5
Dinh Trieu Vuong 1E4
Drew Gentner 3B1
Eun Hye Kim 1I6
Fahe Chai 1I2
Fuka Segawa PD13, PE2
Gantuya Ganbat 6A4
Gong-Unn Kang PD13, PE2
Govindan Muthraman PG7
Guevarra Kaye Jelyn PD52
Haiyan Jin 4A4, 6H6, PD6
Hendrik Fuchs 4D2
Hong Li 1I2
Hye Jung Shin 1I6
Hyeok Chung PF5
Jack Dibb 4A4
Jaime E. Hart 5G5
Jean Rivera-Rios 3B1
Ji Yi Lee 1I6
Jihoon Son PF5
Jo Machesky 3B1
Jooeun Han PF5
Joosung Oh 1I3
Jose L. Jimenez 4A4
Jun-Hyeok Jang 1I3
Junling Li 1I2
Kanna Fujimoto PE2
Kazuhide Matsuda 1I1
Keiya Yumimoto 1I4
Ki-Hyun Kim 7H3, 7I1
Kristen Lyall 5G5
Kyung Hwan Kim 1I3
Kyunghoon Kim PF5
L. Gregory Huey 6H4
Le Thi Hoang Yen 5H1
Lijin Zhang 3E3
Lu Yan 7I1

Madalipay Jasper 1H4
Mahshad Ranjbaran 1E1, 1E2, 1E3, PD19
Mai Shimokawa PE2
Marc G. Weisskopf 5G5
Matthew Alvarado 3B1
Michael A. Robinson 4D2
Miharu Uto PE2
Minggun Huo 6A4
Mishra Shalini 1C2
Mitchell J. Rogers 3E3
Muthuraman Govindan 3C3
Muthuraman Govindan 3C3
Myong-In Lee PC16
Na Rae Choi 1I6
Naser Mohammadzadeh PC16
Natdanai Punsin 5A2
Nga Lee Ng 3B1
Nuntikorn Kitratporn 5A2
Ottmar Möhler PD28
Parkpoom Choomanee 5A2
Paul S. Monks 4D2
Pham Viet Hoang 5H2
Phuoc Tan Tran PD18
Pierre-François Coheur 5D5
Qi Jiang 1I2
Roberto Sommariva 4D2
S.D.N.A.M. Amila Madhushanka Weerasinghe PF5
Saman Malik PC1
Seohyun Park PD13
Seokwon Kang PF5
Seung bum Kim PF5
Seung Han Ryu PF5
Shudan Wei 1I2
Shudi Han 5B3
Soontae Kim, 1I6
Steven S. Brown 4D2
Stuart Batterman 3A2
Surat Bualert 5A2
Syuichi Itahashi 1I4
Taehyoung Lee PF5
Thomas Hanisco 7A5
Tian Ping PD28
Tori Hass-Mitchell 3B1, 3E3
Tuyet Nam Thi Nguyen 6F2
Wang Zhe PD42
Weijun Li 4E2, 6A1
Wint Thiri Marn PC5
Xiaomei Xu PD6
Xiaoxiao Zhang 4D2
Xiaoyang Yang 1I5
Yan Nie 1I2
Yin Qian 7H3
Yong Pyo Kim 1I6
Youngmin Hong 1I3
Yugo Kanaya 2G2, 7A5
Yujiro Ichikawa 6A4
Zhaofeng Tan 4D2
Zhihao Zhang 1I5

기기(기술)전시업체 안내

미세먼지관리 특성화대학원

1. 회사소개

미세먼지관리 특성화대학원 사업은 기후부와 한국환경산업기술원이 지원하는 환경분야 특성화대학원 육성사업의 일환으로, 미세먼지가 국민건강에 미치는 위해를 예방하고 대기환경을 적정하게 관리·보전하기 위해 산업현장이 요구하는 전문역량을 갖춘 인재를 양성하는 것을 목표로 한다.

본 사업은 현재 서울대학교(컨소시엄: 이화여자대학교)와 동아대학교가 참여하여, 각 대학의 강점을 반영한 전문 교육과정을 운영하고 있다.

서울대학교는 이화여자대학교 및 산업체와 Triangle 컨소시엄을 이루어 건강영향분야와 현상진단분야, 산업체 현장 실무를 함께 아우르며, 미세먼지 관리를 위한 빅데이터 기반 최적의 솔루션을 도출하는 'Global SMART (Global Solution by Multi-Application of Recent Technology for fine particles)' 인재 양성을 목표로 합니다. 또한, 산학연계 프로젝트, 현장실습 및 인턴십뿐 아니라, 국내외 저명 학자와의 연구·교육 교류를 통해 실무역량과 국제적 전문성을 함께 함양하고 있습니다.

동아대학교는 미세먼지의 측정(Measurement)·예측(Prediction)·저감(Control) 전 과정을 아우르는 교육을 기반으로 환경공학·기계공학·건설시스템공학을 연계한 융·복합 교육과 실무 중심 교육을 제공한다. 또한 AI 기반 대기질 예측기술, 나노다공성 소재를 활용한 미세먼지 저감기술, 산학협력 프로젝트 및 현장 인턴십을 통해 산업현장에서 요구하는 전문역량을 갖춘 고급 인재를 양성하고 있습니다.

이를 통해 과학적 이해와 분석 능력, 첨단기술 활용 능력, 현장 문제해결 능력 및 글로벌 역량을 갖춘 융·복합 전문인재를 양성하여 미래 대기환경 문제 해결과 관련 산업 발전에 기여하고자 한다.

2. 전시 품목

학교	인력양성분야(단기과정)	학위/전공 과정	문의처
서울대학교 (이화여자대학교)	미세먼지 스마트 통합 관리	보건대학원 환경보건학과 (일반대학원 환경공학과)/ 미세먼지관리전공	서울대 02-880-2776 이화여대 02-3277-6616
동아대학교	미세먼지 관리	일반대학원/ 미세먼지관리 전공	동아대 051-200-7674

홈페이지: www.snuglobalsmart.co.kr (서울대학교)
https://sites.google.com/view/daupm/%ED%99%88 (동아대학교)

기기(기술)전시 업체 안내

바이오타지코리아

1. 회사소개

Biotage는 분석 시료 전처리 및 정제 분야의 전문 솔루션을 제공하는 글로벌 기업으로, 환경, 식품, 제약, 임상 및 법과학 등 다양한 분석 분야에서 사용되는 시료 전처리 장비와 소모품을 공급하고 있습니다.

환경 분석 분야에서는 고체상 추출(SPE), 자동화 시료 전처리, 대용량 수질 시료 추출 및 용매 농축에 이르는 다양한 솔루션을 제공하고 있습니다. 특히 PFAS를 비롯한 다양한 환경오염물질 분석을 위해 전용 SPE 제품과 자동화 시스템을 제공하며, 분석 목적과 시료 특성에 적합한 시료 전처리 방법 및 Application Support를 지원합니다.

2. 전시 품목

- Biotage PrepXpert-8
  8개 시료를 병렬 처리할 수 있는 자동 SPE 시스템으로, PFAS 및 다양한 환경오염물질의 시료 전처리 자동화를 지원합니다.
- Horizon Technology DEX-5000
  대용량 수질 시료를 위한 자동 SPE 시스템으로, 환경 분석 실험실의 효율적인 시료 추출 및 전처리 표준화를 지원합니다.
- Biotage TurboVap LV / TurboVap II
  질소 가스를 이용한 용매 증발 및 농축 시스템으로, SPE 및 액액추출 후 추출액을 빠르고 재현성 있게 농축할 수 있습니다.
- Biotage SPE 및 Manual SPE Solutions
  다양한 환경오염물질의 추출 및 정제를 위한 SPE 카트리지와 수동 SPE 시스템을 제공하며, 시료 및 분석물질 특성에 맞는 전처리 구성이 가능합니다.
- PFAS Sample Preparation Solutions
  EVOLUTE PFAS+, EVOLUTE WAX/GCB 등 PFAS 분석용 SPE 제품과 자동화 시스템을 통해 수질 및 다양한 환경 시료의 PFAS 전처리 워크플로우를 지원합니다.



SPE 자동화 전처리 장비
PrepXpert-8



SPE(Disk) 자동화 전처리 장비
DEX-5000



질소 분사 농축기
TurboVap

홈페이지: www.biotage.com
E-MAIL: Korea_Sales@biotage.com TEL: 031-706-8500 FAX: 031-706-8510

기기(기술)전시 업체 안내

국가미세먼지정보센터

기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터

1. 회사소개

국가미세먼지정보센터는 국가 대기오염물질 배출량을 조사산정하고 이를 과학적으로 분석하여 대기환경 정책을 지원하는 기후에너지환경부 소속 전문기관입니다.

우리 센터는 대기정책지원시스템(CAPSS)을 통해 국가와 지역 단위의 배출량을 산정하고 있으며, 사업장 대기배출원관리시스템(SEMS)·수송부문 배출량 산정 시스템(TEMS) 운영과 대기영향예측시스템(NEAS)을 활용한 정책 분석을 통해 미세먼지 저감을 위한 과학적 기반을 제공하고 있습니다.

또한 대기오염물질 배출량 관리의 정확성과 정책 활용도를 높이기 위해 아래의 주요 과제들을 추진하고 있습니다.

- 휘발성유기화합물(VOCs) 및 유해대기오염물질(HAPs) 인벤토리 구축
- 사업장 대기정보 통합플랫폼 구축
- 지역 대기영향예측시스템(L-NEAS)을 활용한 정책 분석 강화
- 온실가스종합정보센터 등 관계기관과의 협력을 통한 대기와 기후 정책 간 연계 강화
- 국제 협력을 통한 동아시아 지역의 대기질 개선에 기여

국가미세먼지정보센터는 앞으로도 과학적 데이터와 분석을 기반으로 신뢰성 있는 대기 정보를 제공하고, 국민이 체감할 수 있는 깨끗한 대기환경 조성을 위해 최선을 다하겠습니다.

2. 전시 품목

- 국가 대기오염물질 新 배출원 분류체계
- HAPs 인벤토리 구축
- 한국형 화학성분비(K-SPECIATE)
- 사업장 대기정보 통합플랫폼
- 수송부문 배출량 산정 시스템(TEMS)

홈페이지: https://www.air.go.kr
E-MAIL: kslee0420@koea.kr TEL: 043-279-4574 FAX: 043-279-4529

기기(기술)전시 업체 안내

㈜디엑스지

1. 회사소개

(주)디엑스지는 37년 업력의 연소가스분석기 제조사로서 1998년 초정밀분광기기의 국산화 성공을 시작으로, 2007년 국내 최초로 Flue Gas Analyzer 개발에 성공하였습니다. 국내에서 유일하게 In-Situ와 Sampling 방식의 연소가스분석기를 자체 개발하여 공급하고 있으며 지난 10여 년간 5대 발전사를 포함하여 전국 각지의 소각장, 석유화학 공정 등의 산업 현장에 2,400sets 이상의 제품을 공급하였습니다.

발전소에서 사용하는 연소가스 분석기와 유중가스 분석기 외에도, 방지시설 IoT와 악취모니터링시스템까지 직접 개발·제조하며 산업 현장의 신뢰받는 파트너로 자리매김하고 있습니다.

2. 전시 품목

제 품 명	제 품 소 개
• DGA-X	UV 광원을 이용한 In-Situ 타입 분석기. NOx, SO2, NH3 3가지 성분을 동시측정 가능하며, 전국적으로 1,000sets 이상 납품 실적을 보유한 ㈜디엑스지의 대표 제품. TMS, SCR 및 FGD 등의 공정에 모두 적용 가능하며, 국내 형식 승인은 물론 독일 TUV, 중국 CCEP 등 국제인증 취득 완료.
• IoT	㈜디엑스지는 사물인터넷(IoT) 제조사로서 대기업, 관공서, 정미소 등 전국 다수 납품 실적 보유. 대기환경보전법에 따라 4·5종 대기오염물질 배출사업장의 배출 및 방지시설에 측정기기(전류계, 차압계, 온도계 등)를 부착하여 시설의 가동 여부를 그린링크로 전송하는 방지시설 IoT 시스템을 공급함. 현재는 IoT 장비 기반의 시설 전반 모니터링 프로그램을 자체 개발하여 1·2종 대형 사업장에도 제공 중.
• VMD-X	악취 모니터링 및 원격 시료 채취 기능을 통합한 시스템으로, 실시간 감지부터 규제 및 대응까지 일련의 과정을 효율적으로 수행할 수 있는 제품. 고정밀 센서를 통한 실시간 악취 모니터링으로 이상 징후를 즉시 탐지하며, 원격제어 기능을 통해 시료를 채취하고 분석함으로써 악취 규제 근거자료 및 발생원 분석을 수행함. 이를 바탕으로 민원에 대한 대응 체계를 구축하고 발생원에 대한 관리를 강화하여 문제가 심화되지 않도록 방지하는 것을 목적으로 함.



• DGA-X



• IoT



• VMD-X

홈페이지: https://dxg.kr/
TMS, 유중가스분석기, 악취모니터링시스템 문의 : opt@dxg.kr / IoT 문의 : iot@dxg.kr
TEL: 02-564-3772 FAX: 02-564-0222

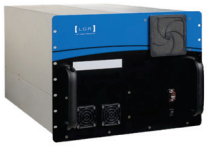
기기(기술)전시 업체 안내

ABB (에이비비)

1. 회사소개

ABB는 전기화 및 자동화 기술 선도 기업으로, 보다 지속 가능하고 더 효율적으로 자원이 이용되는 미래를 만들어가고 있다. ABB의 엔지니어링 및 디지털 전문 역량은 다양한 산업이 최고 수준으로 운영되는 동시에 보다 효율적이고 생산적이며, 지속 가능하도록 도와 궁극적으로 더 많은 성과를 내도록 지원한다. ABB는 이를 'Engineered to Outrun'이라 부른다. 140년 이상의 역사와 함께 전세계11만 명의 직원이 근무 중이다.
회사는 스위스 증권 거래소(ABBN)와 나스닥 스톡홀름(ABB)에 상장돼 있다. www.abb.com/kr

2. 전시 품목

사진	제품군	제품명	제품 소개
	가스 분석기 (Gas Analyzer)	GLA351-N2OCM	아산화질소(N_2O) 및 일산화탄소(CO) 분석기 OA-ICOS 및 Quantum Cascade Laser 기술 기반의 온실가스 분석장비, N_2O 및 CH_4를 초고감도로 측정 가능, 수분 자동 보정 기능을 통해 별도의 시료 전처리 없이 정확한 분석 가능, 농업·축산 분야의 온실가스 배출 연구, 대기환경 모니터링 및 탄소중립 실현을 위한 다양한 연구에 활용 가능
		GLA351-N2OM1	아산화질소(N_2O) 및 메탄(CH_4) 측정 분석기 N_2O와 CH_4를 초고감도로 동시 측정하는 온실가스 분석장비, OA-ICOS 및 Quantum Cascade Laser 기술 적용, 수분 자동 보정 기능 탑재로 별도의 시료 전처리 없이 정확한 측정 가능, 온실가스 배출 연구 및 대기환경 모니터링, 탄소중립 실현을 위한 다양한 연구 분야에 활용 가능
		GLA331-GGA	이산화탄소(CO_2) 및 메탄(CH_4) 분석기 OA-ICOS™ 레이저 기술을 적용한 고정밀 온실가스 분석기로, CO_2, CH_4 및 H_2O를 실시간 동시 측정 가능, 뛰어난 정확도와 장기 안정성을 바탕으로 국가 온실가스 관측망, 기후변화 연구, Eddy Flux 및 Soil Flux 연구, 탄소중립 모니터링 등 다양한 환경 분야에서 활용되는 솔루션
	가스 누출 감지 시스템 (Gas Leak Detection)	HoverGuard	드론에 분석기를 탑재하여비행 중 빠른 속도와 높은 정확성으로 천연가스 누출 감지 및 Mapping 가능, 특허받은 OA-ICOS™ 레이저 기술, GPS 센서, 데이터 분석을 결합하여 접근하기 어렵고 멀리 떨어진 누출을 감지
		MobileGuard	차량에 탑재하여 시속 최대 88km로 주행하며 배관 조사 가능, 메탄/에탄을 동시에 측정하며 천연가스 누출 탐지, MicroGuard와의 데이터 공유로 빠른 배출원 탐지 가능
		MicroGuard	휴대 가능한 Portable 가스 분석기 OA-ICOS™ 기반의 레이저 분석장비로, GPS가 탑재되어 실시간 누출 위치 확인 가능, 자체 개발한 독보적인 소프트웨어로 구성되어 빠르고 편리한 가스 누출 원천 탐지 가능

홈페이지: https://new.abb.com/kr E-MAIL: contact.center@kr.abb.com TEL: 1588-9907

기기(기술)전시 업체 안내

써모 피셔 사이언티픽

1. 회사소개

써모 피셔 사이언티픽(Thermo Fisher Scientific)은 '고객을 도와 세상을 더욱 건강하고 깨끗하며 안전하게 만든다'는 미션을 바탕으로, 전 세계 고객의 혁신을 가속화하고 생산성을 향상시키는 과학지원 분야의 글로벌 선도 기업입니다.

생명과학 연구부터 복잡한 분석 난제 해결, 진단 및 의약품 개발, 산업 및 응용과학에 이르기까지 폭넓은 분야에서 혁신적인 기술과 제품, 전문적인 서비스를 제공하고 있습니다.

특히 환경 분석 분야에서는 대기, 수질, 토양 등 다양한 환경 시료에서 발생하는 오염물질의 채취부터 분석, 정확한 결과 도출까지 아우르는 토탈 솔루션을 제공합니다. 크로마토그래피 및 질량분석을 비롯한 첨단 분석 기술과 다양한 제품 및 서비스를 기반으로 PFAS, 잔류성 유기오염물질(POPs), 휘발성 및 반휘발성 유기화합물(VOCs/SVOCs), 중금속, 무기 이온, 미세플라스틱 등 다양한 환경 오염물질의 정확하고 신뢰도 높은 분석을 지원합니다.

써모 피셔 사이언티픽은 뛰어난 제품과 기술력, 폭넓은 포트폴리오와 전문적인 고객 지원 역량을 바탕으로 연구 및 분석법 개발부터 환경 모니터링과 규제 대응에 이르기까지 고객의 다양한 분석 과제를 지원하며, 보다 깨끗하고 지속가능한 환경을 만들어가는 데 기여하고 있습니다.

2. 전시 품목

다이옥신 분석 솔루션 | Orbitrap Exploris™ GC S



- 다이옥신, 퓨란 및 잔류성 유기오염물질(POPs)의 극미량 분석에서 높은 선택성과 신뢰도 높은 결과 제공
- 복잡한 환경 시료에서도 분석 대상 물질을 정확하게 식별하고 정량하여 까다로운 환경 분석 및 규제 대응 지원
- 고분해능 정밀질량 데이터를 활용해 현재의 타깃 분석뿐 아니라 향후 추가 오염물질에 대한 데이터 재분석까지 가능, 분석 데이터의 활용 가치 확대

PFAS 분석 솔루션 | TSQ Certis™ LC-MS/MS



- PFAS 등 미량 환경 오염물질을 높은 감도와 신뢰도로 정량 분석하여 정확한 환경 모니터링 및 규제 대응 지원
- 다양한 환경 시료와 반복적인 분석에서도 안정적이고 재현성 높은 결과를 제공하여 분석 결과의 신뢰도 향상
- 효율적인 분석 워크플로우와 높은 장비 가동성을 통해 대량 시료 분석의 생산성을 높이고 실험실 운영 부담 최소화

홈페이지: www.thermofisher.com E-MAIL: Info.CMD.Korea@thermofisher.com TEL: 1661-9555

기기(기술)전시 업체 안내

한국환경공단

1. 회사소개

(기관 유형) 위탁집행형 준정부기관

(설립 목적) 환경오염방지·환경개선·자원순환촉진 및 기후위기대응을 위한 온실가스 감축사업 등 탄소중립 사회로의 이행을 효과적으로 추진
함으로써 환경친화적 국가발전에 이바지함(「한국환경공단법」 제1호)



(주요 기능)

- 대기·수질 등 환경측정망 및 관제센터 구축·운영
- 기후변화 대응 및 온실가스 배출 저감 등 환경 관련 국제협약 대응
- 화학물질 안전관리 및 환경 유해물질 검사·분석
- 수생태계 복원 및 토양·지하수 환경 조사·평가·정화
- 하·폐수처리시설 및 폐자원에너지시설 등 환경시설 설치·운영
- 폐기물 발생 억제·순환 이용 및 친환경 처리사업
- 환경오염 방지·환경개선 및 자원순환 관련 정책 수행

2. 전시 품목(홍보내용)

국가 대기환경 개선사업의 지속 발전 방향과 대국민 대기환경 측정정보 공개 시스템 “에어코리아”, 비산배출시설 점검 및 유증기회수설비 검사제도 등 홍보

홈페이지: www.keco.or.kr *에어코리아 홈페이지: www.airkorea.or.kr

기기(기술)전시 업체 안내

KNJ엔지니어링(주)

1. 회사소개

KNJ는 34년간의 기술축적으로 환경대기(AQMS), OC/EC, 배출가스(CEMS), 실내공기질(다중이용시설: IAQ), 기후변화 Greenhouse(CO2/CH4/H2O) 측정장비, 중금속자동측정망, BTEX Analyzer, 베타선(PM2.5/PM10) 측정장비를 공급 및 제조, 유지보수(A/S)하는 전문업체입니다.

- 미국 EPA 및 국내 공정시험방법에 적합한 최고의 납품실적을 가진 KNJ 대기오염측정장비.
- KNJ PM2.5 Sampler 형식승인 취득, KOSTEC(주) 정도검사기관 지정.

2. 전시 품목

- A.Q.M.S (O3/ CO/ SO_2/ NO/ PM)
- Stack Sampler (Dust, Gas, Dioxin)
- Portable VOC Analyzer
- Greenhouse (CO2/CH4/H2O)
- 탄소성분(OC/EC) 분석기
- BTEX Analyzer
- 중금속 자동현장 측정분석기 (Hg, Pb, As etc.)
- PM2.5 Sampler
- 베타선(PM2.5/PM10) 측정장비



홈페이지: www.knj-eng.co.kr
E-MAIL: knj@knj-eng.co.kr TEL: 031-451-7082 FAX: 031-459-7321

기기(기술)전시 업체 안내

㈜리가스

RIGAS 리가스
Research Institute of Gas Analytical Science

1. 회사소개



㈜리가스는 1998년 설립 이래 28년간 표준가스 전문 회사로 입지를 다지며 다양한 사양의 각종 기체 및 액체 표준물질을 연구개발, 제조, 보급하는 표준물질 생산 전문 기업입니다.

지속적인 실험과 검증된 연구 데이터를 통해 보다 더 정확한 특성값과 불확도를 제공합니다.

또한 국립환경과학원으로부터 검사기관으로 지정받아 기체상표준물질류에 대한 공인검정업무를 수행을 하고 있고, 국가기술표준원으로부터 KOLAS 공인표준물질생산기관으로 인정받아 KOLAS 신뢰도를 기반으로 29종의 인증표준물질(CRM)을 보급하고 있습니다.

저희 ㈜리가스는 이러한 기술력을 바탕으로 대기환경측정용, 석유화학공정용&천연가스, 독성가스 측정용, 악취측정용, 가스검지기용, 휘발성유기화합물, PAMS, TO-14A, HAPs 등을 제공합니다.

2. 전시 품목

- PAMS 57 Components mix (Ozone Precursor Mix) 1 μmol/mol, 5~10 nmol/mol
- TO-14A 43 Components mix (Toxic Organics Mix) 1 μmol/mol, 5~10 nmol/mol
- HAPs (Hazardous Air Pollutant) 18성분 1 mol/mol, 5~10 nmol/mol
- 특정대기유해물질 12종, 13종 1 μmol/mol





홈페이지: www.rigas.co.kr
E-MAIL: master@rigas.co.kr TEL: 042-934-6900 FAX: 042-935-8814

기기(기술)전시 업체 안내

싸토리우스코리아(유)

1. 회사 소개

Sartorius는 150여년 역사의 세계적인 첨단 바이오의약품 전문 소재•부품•장비 산업체로 생명과학 연구 및 제약•바이오 산업을 선도하는 글로벌 리딩 기업입니다.

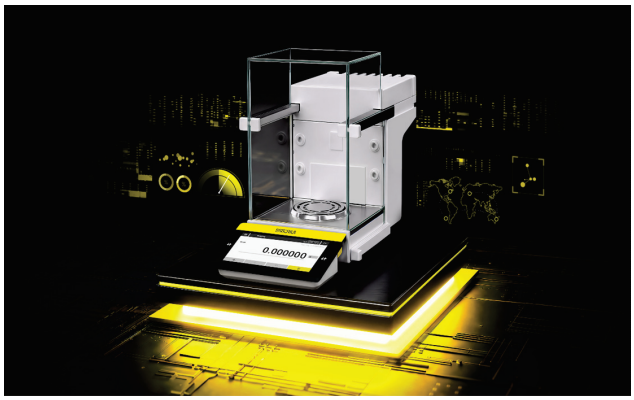
신약 개발부터 배양, 정제, 최종 제품 단계까지 기업이 요구하는 바이오의 약품을 생산하는 공정 전반에 필요한 모든 제품, 애플리케이션과 서비스를 제공하는 기업의 중요한 파트너 역할을 하고 있습니다.

2. 전시 품목

Digitalization를 위한 가장 스마트한
Premium Balance

새롭게 출시된 Cubis III는 고가의 미들웨어 없이 데이터의 수집_관리_보관이 가능하며, Regulation 규제 대응을 지원하여 신뢰성 높은 실험실 환경을 구현합니다.

- Compliance & Digitalization
- USP41 Compliance
- Built-in Ionizer
- Seamless Connectivity







홈페이지: www.sartorius.co.kr
E-mail : marketing@sartorius.co.kr
TEL : 031-622-5700
FAX : 031-622-5799

기기(기술)전시 업체 안내

삼우티시에스 주식회사

1. 회사소개

삼우티시에스㈜는 자동차 부품 및 첨단 센서 분야에서 축적한 기술력을 바탕으로 라이다(LiDAR) 기술의 국산화 및 사업화를 추진하고 있는 기업입니다. 특히 대기환경 분야의 라이다 기술개발에 집중하여 미세먼지 스캐닝 라이다와 윈드라이다를 개발하고 있으며, 다양한 현장 실증을 통해 대기환경 및 기상관측 분야의 활용성을 확대하고 있습니다.

특히 미세먼지 스캐닝 라이다를 주력 제품으로 개발하여 산업단지, 도시지역, 항만 및 산림지역 등에서 미세먼지의 공간적 분포와 이동을 실시간으로 관측하고, 산업단지 미세먼지 배출 감시, 불법소각 및 산불 연기 감시, 항만·선박 미세먼지 모니터링 등 다양한 대기환경 분야에 적용하고 있습니다. 시흥·평택·동두천 산업단지 등에서 실증을 수행하였으며, 부경대학교 및 국방과학연구소 등에 관련 라이다 시스템을 납품하고 신기술인증을 획득하는 등 기술력을 인정받고 있습니다.

아울러 지상기반 윈드라이다 및 풍력터빈용 나셀라이다의 국산화 개발과 성능평가를 추진하며 풍향·풍속 원격관측 기술의 고도화에도 노력하고 있습니다. 앞으로도 라이다 기술을 기반으로 대기환경을 보다 정밀하게 관측하고 관리할 수 있는 기술을 개발하여 깨끗한 대기환경 조성과 환경관측 기술 발전에 기여하는 기업으로 성장해 나가겠습니다.

2. 전시 품목



FLOVIS SL-F/W



FLOVIS WL-B

홈페이지: www.samwootcs.com
E-MAIL: smartlidar@swen.co.kr TEL: 053-593-8850 FAX: 053-593-8851

기기(기술)전시 업체 안내

영인에스티(주)

1. 회사소개

영인에스티(주)는 영인그룹의 계열사로서, 환경 및 산업 분야의 측정·분석 솔루션 전문기업으로, 수질·대기·방사능·환경 모니터링부터 첨단 분석장비까지 다양한 계측 솔루션을 제공하며 고객의 지속가능한 경영과 산업 경쟁력 향상을 지원하고 있습니다.

환경 분야에서는 사람이 마시는 물부터 초순수, 공정수, 하·폐수에 이르기까지 다양한 수질 분석 솔루션을 비롯해 실시간 온실가스·VOCs 분석 시스템, ICP-MS 및 Laser Ablation System, 휴대용 XRF/LIBS 등 첨단 정밀 분석 솔루션을 제공하고 있습니다. 이를 통해 신뢰성 높은 환경 데이터를 확보하고, 산업 현장의 환경관리 수준 향상과 공정 최적화에 기여하고 있습니다.

이러한 환경 분석 및 모니터링 기술을 기반으로 탄소중립 분야로 사업을 확대하여, AI-MRV 탄소중립 플랫폼을 중심으로 실시간 온실가스 측정, 배출량 분석 및 저감, AI 기반 MRV(측정·보고·검증), 자동 보고까지 통합 지원하는 탄소중립 솔루션을 제공하고 있습니다. 또한 고정밀 가스분석기와 환경 모니터링 장비를 연계해 산업 현장의 탄소배출 데이터를 신뢰성 있게 확보하고, 데이터 기반의 탄소관리 체계 구축과 ESG 경영을 지원합니다.

또한 해외 선진 기술을 국내에 소개하고 자체 기술 역량을 강화하여, 학계·산업계·공공기관을 아우르는 신뢰할 수 있는 파트너로 자리매김하고 있습니다.

영인에스티는 앞으로도 대기환경 모니터링, 방재안전 시스템 등으로 사업 영역을 지속적으로 확대하며, 환경 분석부터 탄소관리까지 아우르는 통합 환경 기술 파트너로서 산업의 지속가능한 미래를 만들어가겠습니다.

2. 전시 품목



1) ACE 1100 IMR-MS

ACE 1100 IMR-MS는 순수 국내 기술로 자체 개발 및 생산한 국산 IMR-MS로, 휘발성 유기 화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)의 정성 및 정량 분석에 최적화된 질량분석기입니다.

시료의 전처리나 분리과정을 배제한 직접적인 시료 도입을 통해 즉각적으로 실시간 분석 결과를 확인하고, 차량에 탑재하여 분석이 필요한 다양한 현장에서 바로 모니터링할 수 있습니다.

- High Sensitivity & Accuracy : ppt 수준의 미량 분석에서도 정밀한 결과 제공
- Versatile Applications : 환경 중 미량가스 분석, 반도체 공정 모니터링, 신소재 연구, 안정동위원소 추적 연구에 활용
- Innovative IMR Technology : 간섭 성분 제거(Interference-free) 기술 적용으로 신뢰도 높은 데이터 제공
- Operational Efficiency : 장시간 안정적 운용이 가능하며 유지보수가 간단

ACE 1100 IMR-MS는 환경·대기 분야에서의 정밀 분석뿐 아니라, 반도체 및 첨단 산업 연구에 필요한 고해상도 동위원소 분석 솔루션을 제공합니다.

2) VAISALA 이산화탄소, 메탄 측정 프로브

바이오가스 및 바이오가스 고질화 공정에서 메탄(CH_4), 이산화탄소(CO_2), 수분(H_2O) 등을 실시간으로 측정하는 다성분 가스 분석기입니다. 공정 상태와 가스 품질을 지속적으로 모니터링하고, 메탄 슬립 및 온실가스 배출 관리와 공정 최적화에 활용할 수 있습니다.

홈페이지: www.younginst.com　　E-MAIL: info@younginst.com
TEL: 02-6190-9800　　FAX: 02-6190-9878

기기(기술)전시 업체 안내

하림엔지니어링(주)

1. 회사소개

국가대기측정망 시장점유율 1위, 하림엔지니어링(주)은 대기환경 분야를 전문으로 하는 대기환경측정기 전문기업입니다. 세계 최고 수준의 측정기기와 기술력을 바탕으로 일반대기, 실내공기질, 미세먼지 측정기기 설치 및 유지보수 서비스를 제공하고 있으며, 끊임없는 기술개발과 정확하고 신속한 서비스를 통해 신뢰할 수 있는 국가간 대기측정데이터 생성에 최선을 다하고 있습니다.

하림엔지니어링(주)을 통해 세계적인 대기환경 측정기기를 만나보세요.

2. 전시 품목

- 가스상 자동측정기(SO_2, NOx, CO, O_3)
- 입자상 자동측정기(PM-10, PM-2.5)
- 미세먼지동시측정기(PM-10/PM-2.5/PM-1)
- (초)미세먼지 시료채취기(PM-10, PM-2.5)



가스상 자동측정기



미세먼지동시측정기





입자상 자동측정기



(초)미세먼지 시료채취기

홈페이지: www.harimeng.co.kr
E-MAIL: harimeng@harimeng.co.kr TEL: 02-477-9080 FAX: 031-5180-3020

기기(기술)전시 업체 안내

㈜비케이인스트루먼트

1. 회사소개

㈜비케이인스트루먼트는 25년 이상의 분석장비 경험을 바탕으로 분광 분석 및 대기환경 모니터링 솔루션을 제공합니다. 광학 원격 측정 및 적외선 분광 기술을 활용하여 산업현장의 배출량 측정, 오염물질 모니터링 및 대기 관측을 위한 다양한 솔루션을 공급하고 있습니다.

2. 전시 품목

제 품 명	제품 주요 성능
1 SOF (Solar Occultation Flux)	• 이동형 부지경계 오염물질 측정 시스템 • 산업단지 및 배출원 주변 이동 측정을 통해 대기오염물질의 실시간 배출량을 산정
2 DIAL (Differential Absorption Lidar)	• UV·IR 레이저 기반 원거리 배출 측정 • 원거리에서 UV·IR 레이저를 다양한 각도로 조사하고 되돌아오는 빛을 분석하여 바람 정보 및 배출량 측정
3 VSR (Versatile Spectro-Radiometer)	• Passive Open-path FT-IR 기반 원거리 분석 • 수 km 떨어진 배출가스의 복사에너지를 측정하여 오염물질을 정성·정량 분석 • 시료 채취 없이 원거리 대기 중 화학물질의 실시간 정량 분석 가능
4 ASSIST II (Atmospheric Sounder Spectrometer by Infrared Spectral Technology)	• 24시간 무인·원격 기상 측정 • 고도에 따른 온도, 수증기, O_3, CO_2, CO, CH_4, 질소산화물 등의 데이터를 매 2분마다 측정 • 온실가스 측정 등 분야에 활용



VSR



ASSIST II



SOF | FluxSense Mobile Lab

홈페이지: https://www.bkinstruments.co.kr E-MAIL: marketing@kinstruments.co.kr
TEL: 042-487-8240

기기(기술)전시 업체 안내

㈜에이피엠엔지니어링

APM Since 1994 Measuring the Environment (주)에이피엠엔지니어링

1. 회사소개

㈜에이피엠엔지니어링(APM Engineering Co., LTD.)은 국내 대기환경측정 및 분석 분야의 선진화에 일조하고자 1994년 3월 설립되었습니다. 30년 동안 해외 유수의 측정기기 제조사와의 기술교류와 독자적인 국내 기술개발로 국내 대기환경측정분야 발전을 위해 노력해오고 있습니다.

대기환경 측정분야의 연구발전을 촉진하기 위하여, TOF-AMS와 PTR-ToF-MS 등의 최첨단 장비를 국내에 보급 및 교육하고 있으며, 아울러 국내 최초로 $PM_{2.5}$ Sequential Sampler의 국산화 개발을 완료하여 전국적으로 보급하였습니다. 또한 국내외 광산란 미세먼지 측정기 수요에 부응하고자, 미세먼지 간이측정기 성능인증제 1등급에 해당하는 PM2.5 측정기를 개발하여 국내 미세먼지 측정 기술을 한 단계 끌어올리는 데에 기여했습니다.

아울러, 당사는 고객들의 믿음에 보답하기 위하여 고객 교육과 유지관리부분에 중점을 두고, 당사 엔지니어들의 정기적인 교육과 해외에서 습득한 선진 기술을 현장에 적용하기 위한 투자와 노력을 멈추지 않고 있습니다.

끊임없는 변화와 도전정신을 바탕으로 국내 대기환경측정분야의 주역으로 거듭나는 ㈜에이피엠엔지니어링이 될 수 있도록 아낌없는 응원과 격려 부탁드립니다. 환경과 사람을 위한, 환경과 국민건강지킴이의 역할을 충실히 해나가는 기업의 자세로 보답하겠습니다.

2. 전시 품목

- $PM_{10}/PM_{2.5}$ Sampler, $PM_{10}/PM_{2.5}$ Monitor, AQMS system, BAM-1020 등
- Filter Tester, SMPS, Aerodynamic Particle Sizer, QCM (140), Nanoscan SMPS, Optical Particle Sizer, Fit Tester (PortaCount Pro) 등
- H_2S/NH_3 Analyzer, CH_4/CO_2 Analyzer, 실시간 VOCs 비행시간차 분석기(PTR-TOF MS)


BAM-1020



LAS-1/16


Serinus Series


PTR-TOF-MS

홈페이지: www.apm.co.kr E-MAIL: sales@apm.co.kr TEL: 032-219-7700
FAX: 032-219-7707

기기(기술)전시 업체 안내

다이텍연구원(가상공학플랫폼)

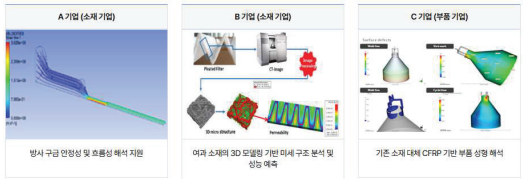
1. 회사소개

DYETEC연구원은 산업통상자원부 산하 전문생산기술연구소이자 4대 소재(섬유) 전문기관으로, 섬유소재·공정 분야의 연구개발 및 기업지원을 수행하고 있습니다. 염색·가공을 비롯하여 친환경 섬유, 나노섬유, 슈퍼섬유, 스마트섬유 및 첨단 복합소재 분야의 기술개발과 산업 현장 적용을 지원하고 있습니다.

특히 **가상공학플랫폼(VEPOTEX)**을 기반으로 전산모사·전산해석·전산정보 기술을 활용하여 소재·부품 및 적용 제품의 설계-해석-성능예측-평가-시제품 검증까지 전주기적인 기술지원을 제공합니다. 이를 통해 환경산업에 적용되는 필터 및 여과소재의 구조 설계와 성능예측, 대기오염 저감용 환경 소재 개발 등을 지원하고 있습니다.



〈지원대상 분야〉



〈지원사례 및 시뮬레이션 S/W 구축현황〉

2. 전시 품목

"섬유복합구조체 가상공학플랫폼 VEPOTEX"

① 산업환경용 친환경 필터·여과소재 개발
- 3D 모델링 기반 여재 구조 분석 및 여과효율 예측
- 대기오염 저감용 필터의 압력손실·여과효율·수명 예측
- 필터 구조 및 운전조건에 따른 성능 최적화
- 섬유구조체 기반 고효율·친환경 환경필터 소재 개발 지원

② 섬유복합소재 가상설계 및 성능예측
- 모델링 기반 섬유복합재료 물성 및 성능 예측
- 복합재료 적용 제품의 구조·성능 해석
- 섬유복합재료 성형·제조공정 설계 및 최적화

③ 가상공학 기반 기업지원
- 기업 R&D 및 현장 애로기술 해결을 위한 전산해석·시뮬레이션 지원
- 가상설계부터 시제품 검증까지 전주기 기술지원

홈페이지: https://www.vepotex.or.kr
E-MAIL: maxwell02@dyetec.or.kr TEL: 053-350-3853 FAX: 053-350-3737

기기(기술)전시 업체 안내

㈜랩코

LABCO

1. 회사소개

안녕하세요. ㈜랩코는 2006년 설립된 입자 센서 전문 제조기업으로, 레이저 기반의 공기 중 입자 측정 기술을 지속적으로 연구·개발해 왔습니다. 이러한 기술력을 바탕으로 대기 중 PM10과 PM2.5를 실시간으로 측정하는 미세먼지 측정기와 통합 모니터링 시스템을 자체 개발·생산하고 있습니다. 특히 장비 간 측정 편차를 최소화하는 기준채널 기반 자동 교정 기술을 적용하여 신기술 인증과 조달청 혁신제품 지정을 획득했으며, 안정적인 생산 및 유지관리 체계를 구축했습니다. ㈜랩코는 지속적인 기술개발과 제품 고도화를 통해 신뢰도 높은 기후환경 데이터를 제공하며, 국내 입자 측정기 시장의 선도 기업으로 자리매김하고 있습니다.

2. 전시 품목

LYS-125	LDU-125P	DP-125
		
실외용 정밀형 미세먼지측정기 환경부 인증 1등급 PM10, PM2.5, 온도, 습도 실시간 모니터링	실내용 정밀형 미세먼지측정기 환경부 인증 1등급 PM10, PM2.5, 온도, 습도 실시간 모니터링	실내용 미세먼지측정기 환경부 인증 1등급 PM10, PM2.5, 온도, 습도 실시간 모니터링

홈페이지: http://www.labco.co.kr/
E-MAIL: sales@labco.co.kr TEL: 062-384-5256 FAX: 062-373-0705

기기(기술)전시 업체 안내

노바스콥(주)

1. 회사소개
   - 노바스콥㈜은 2021년 설립된 환경·기후 원격계측 전문기업으로, 광학 분광·라이다(LiDAR) 및 위성·지상 원격탐사 기술을 기반으로 한 환경계측 장비 개발
   - 메탄 등 온실가스와 암모니아·아산화질소·불산·NOx 등 대기화학물질을 대상으로 원거리에서 누출·배출 위치를 탐지하고, 농도 및 누출·배출량을 신속하게 정량화하는 원격 모니터링 솔루션 개발
   - 정유·석유화학·반도체·제철·LNG 등 다양한 산업시설을 대상으로 한 대의 장비로 넓은 영역을 스캔하여 다중 누출·배출원의 위치와 배출량을 동시에 모니터링하는 원격계측 기술 개발
   - 탄소중립 및 배출권 거래제 확대에 대응하여 기존 배출계수 기반 산정방식을 보완하는 사업장 단위 온실가스 배출량 실측 및 정량화 기술 개발
   - 도시·항만 등의 미세먼지 및 대기오염 문제에 대응하여 고민감도·고해상도 공간분포 정보를 제공하고 시각적 간섭을 최소화하는 비가시광 기반 원격 모니터링 기술 개발

2. 전시 품목
   - 대기 누출·배출가스 원거리 탐지 적외선 분광 카메라(Novascope-FTIR)
   - 탄소 누출·배출량 원거리 측정 라이다(Novascope GHG LiDAR)
   - 미세먼지 공간분포 측정 라이다(Aerosol Scanning LiDAR)
   - UV-Vis-NIR 초분광 원거리 측정 센서(AQ-Profiler) 등.

		
NFTIR (Novascope-FTIR)	NGL (Novascope GHG LiDAR)	ASL (Aerosol Scanning LiDAR)

홈페이지: https://www.novascope.co.kr/
E-MAIL: ylee@novascope.co.kr TEL: 051-784-6680

기기(기술)전시 업체 안내

㈜파코코리아인더스

(주)파코코리아인더스
Parkor Korea Indus Co., Ltd.

1. 회사소개

21C는 정보와 생명 그리고 환경에 대한 관심과 비즈니스가 주류를 이루리라 많은 분들이 예측하고 있습니다. 저희 PARKOR KOREA INDUS(주)는 독일 GRIMM Aerosol Technik 사 PALAS 사, 핀란드 DEKATI 사, PEGASOR 사, 미국 Entanglement Technologies, 영국 Biral 사 등 여러 우수한 기술을 가지고 있는 에어로졸 전문기업들의 국내 대리점으로서 SMPS, ELPI, Aerosol Spectrometer, VOC CRDS 및 여러 측정장비를 기반으로 기존의 문제점 해결과 미래를 준비하는 솔루션으로 동 업계의 최고가 되기 위해 노력하고 있습니다.

나아가 항상 고객이 만족할 수 있는 서비스 제공을 목표로, 신개념의 환경 관련 서비스 구축과 최고 품질의 서비스 지원 위한, 혁신적인 솔루션 개발에 모든 정열을 쏟아 부을 것입니다.

저희 PARKOR KOREA INDUS(주)의 효율적인 시스템과 철저한 유지보수 서비스를 위한 전문 시스템에 고객의 관심이 있으시길 기대합니다.

2. 전시 품목

Aerosol Spectrometer, Nano SMPS, Dust Monitor (US-EPA 승인 PM_{10}, $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$)
이동형 나노입자모니터 및 각종 입자 Aerosol 측정장비 등

홈페이지: www.parkor.co.kr
E-MAIL: joyan@paran.com TEL: 02-2169-2500, FAX : 02-2169-2549

기기(기술)전시 업체 안내

시프트테크놀로지스코리아 유한회사

1. 회사소개

Syft Technologies는 뉴질랜드에 본사를 두고 화학분석 분야에서 급성장하고 있는 기업입니다. 전 세계 5개의 지사와 24개의 협력사를 운영하고 있습니다. 2018년 7월 한국지사인 시프트테크놀로지스코리아 유한회사를 설립하였습니다.

주력 제품인 다중이온선택형 질량분석기(SIFT-MS)는 환경, 반도체, 의료, 식품 분야에서 활용하고 있습니다. 악취물질 및 유해대기오염물질 분석, 클린룸 AMC 및 공정가스 모니터링 등 다양한 목적으로 사용 중입니다.

시프트테크놀로지스는 화학분석을 통한 고객 솔루션 제공을 위해 다양한 분야의 전문가를 보유하고 있으며 Gas trace-monitoring 분야의 세계적인 선두기업입니다.

2. 전시 품목

Selected Ion Flow Tube Mass Spectrometry (SIFT-MS)는 대기 중에 있는 휘발성 유기화합물(VOCs)을 실시간으로 정량, 정성 분석할 수 있는 질량분석기입니다. 수분의 영향을 받지 않아 시료의 전처리가 필요하지 않으며, 별도의 시료 농축 없이 pptv level까지 분석할 수 있습니다.



GC(Gas Chromatography)MS에서 사용하는 Column을 이용한 물리적 분리 대신, SIFT-MS는 장비에서 자체적으로 만들어지는 8가지 시약 이온(Reagent ion)의 화학적 이온화 방식을 통해 반응 메커니즘을 이용하여 분리합니다. 혼합시료를 별도의 분리 없이 동시에 초단위로 분석이 가능합니다.

SIFT-MS는 VOCs 실시간 분석에 가장 이상적인 장비입니다.

홈페이지: www.syft.com Blog: blog.naver.com/syftkorea
E-MAIL: rome.kim@syft.com TEL: 031-705-6701 FAX: 031-705-6704

기기(기술)전시 업체 안내

(주)동서라인텍

1. 회사소개

㈜동서라인텍은 2002년 창립 이래 국내외 현장에서 축적된 공정 분석 기술과 경험을 바탕으로 “무인 자동화 분석 시스템의 최고”를 목표로 공정 자동화와 수질·대기 분야의 분석 시스템을 개발 및 공급하고 있습니다.
전국적인 대리점 네트워크를 기반으로 장비의 안정적인 운영과 유지관리를 지원하며, 현장 실시간 분석을 위한 기술지원과 서비스를 제공하고 있습니다. 또한, 기업부설연구소를 통해 분석 장비의 국산화와 기술개발을 지속적으로 추진하고 있습니다.

앞으로도 ㈜동서라인텍은 우수한 분석 장비와 전문적인 기술지원을 바탕으로 대기환경 측정 및 분석 분야의 기술 발전과 안정적인 운영에 기여할 수 있도록 최선을 다하겠습니다.

2. 전시 품목

⊙ 강수 원격 채수 장치

강우 및 강설 시료를 다수의 용기로 자동 분배, 수집할 수 있는 원격 제어형 강수 채수 장치
- 다중 시료 자동 분배
- 원격 제어를 통한 자동 강우(강설) 시료 채수

⊙ 강수 모니터링 장치

강우(강설) 중 실시간으로 강수량 및 pH, 전도도, 온도를 측정하는 장비
- IC, TOC, 중금속 분석 장비와 연동 가능한 확장성
- 별도의 시료 채취 인력 및 시간 불필요
- 자동 세척 기능으로 유지보수 부담 최소화
- 측정 결과 저장 및 원격 전송 지원



강수 모니터링 장치



강수 원격 채수 장치

3. 인증 및 특허

⊙ 특허: 제 10-1300967호 산성우 분석장치
⊙ 특허: 제 10-1315575호 대기와 산성우의 선택적 분석 시스템
⊙ 특허: 제 10-1635321호 이동형 대기 용액화 장비
⊙ 특허: 제 10-2238838호 이동식 수질 분석 실험용 차량
⊙ 기업 부설 연구소 등록 (2010년)
⊙ ISO 9001 인증 취득 (2024년)

홈페이지: www.dslinetech.com E-MAIL: mail@dslinetech.com
TEL: 02-2219-4700 FAX: 02-2219-4705

기기(기술)전시 업체 안내

에이비씨 무역(ABC Trading)

1. 회사소개

안녕하십니까, 에이비씨무역입니다.

저희는 1988년 창립 이래로 세계적인 수준의 해외 파트너사들과 함께 계측 및 분석 장비를 제공해 드리고 있습니다.

특히 반세기 이상 세계 에어로졸 장비 시장을 선도해 오고 있는 미국 *TSI Incorporated* 사의 국내 대리점으로서, 지난 근 40년간 쌓아온 저희의 노하우는 고객 여러분이 직면하시는 어려움을 신속히 해결하는 데 큰 도움이 될 것이라 자부합니다. 또한 여기에서 그치지 않고 저희의 기술 지원 역량을 더욱 제고하기 위하여, 해외 엔지니어들과도 긴밀한 협력 관계를 유지하고 있습니다.

저희가 제공해 드리는 장비는 전 세계의 에어로졸 연구실에서 사용되는 Particle Counter, Particle Sizer, Particle Generator, 필터 및 원단 생산과 시험 업계에서 분진포집효율을 시험할 때 사용되는 Filter Tester 등 입니다.

보다 자세한 내용은 아래를 참조 부탁드립니다.

- Counter : 1㎚~수십㎛ 범위 에어로졸 농도 측정 〈하전/개수/표면적/질량 농도〉
- Sizer : 1㎚~수십㎛ 범위 에어로졸 입경분포와 농도를 동시 측정 〈입경별 개수/표면적/부피/질량 농도〉
- Generator : 2㎚~수백㎛ 범위의 다분산 또는 단분산 에어로졸 발생기 〈액체/고체/분말/매연 입자〉
- Filter Tester : Air Filter의 성능을 평가하는 필터 시험기 〈유량/차압/분진포집효율 검사〉
  다분산/단분산의 NaCl 또는 Oil 입자 이용, 분진포집효율은 최대 99.999999%
- Impactor : 10㎚~10㎛ 범위 에어로졸을 입경대별로 분리 포집하는 장비 〈샘플링용 다단 임펙터〉
- Catalytic Stripper, Catalytic Vapor Filter : 산화촉매방식의 휘발성분 제거, 부탄올 증기 제거 장치
- 기타 : 압축공기 정화장치, 에어로졸 건조기, 농도 희석장치, 입자하전 중화기, 가스 유량측정기 등

2. 전시 품목

- 3330 OPS (Optical Particle Sizer) : 0.3~10㎛ 범위에서 16개의 입경채널로 입경별 농도분포 측정
- 3910 NanoScan SMPS : 10~420㎚ 범위에서 13개의 입경채널로 입경별 농도분포 측정
- Mass Flowmeter : 최대 20 L/min, 200 L/min, 300 L/min, ±30 L/min, ±300 L/min 가스의 유량을 측정

홈페이지 : www.abctrd.com
E-MAIL : abc@abctrd.com
TEL : 02-2226-3161
FAX : 02-2226-7383

기기(기술)전시 업체 안내

미세먼지연구·관리센터

미세먼지연구·관리센터
Particle Pollution Research and Management Center

1. 회사소개

정부는 2019년 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」과 「대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법」을 제정하여 국민 건강 보호를 목표로 지역별 대기질 상황에 맞는 효과적인 미세먼지 개선 대책을 추진해 오고 있습니다. 또한 대기환경의 지역적 특성에 따른 차별화된 관리를 위해 각 권역의 전문성을 살려 지속 가능한 대기질 개선을 지원하고자 '미세먼지연구·관리센터' 설립을 법적으로 규정하고, 2021년부터 전국 6곳에 센터를 지정·운영하고 있습니다.

그 결과 2021년 수도권과 중부권에서 센터가 처음 문을 열었으며, 2022년에는 남부권과 동남권, 2023년에는 강원권과 건강영향특성화센터까지 확대되었습니다. 지금까지 6개 연구·관리센터는 권역별 대기오염 특성 조사·분석, 지역별 초미세먼지 고농도 발생 특성과 원인 규명, 고해상도 대기오염물질 배출량 목록 개선 등은 물론, 중앙정부·지자체의 대기개선정책 지원과 대국민 교육·홍보에도 매진해 왔습니다.

6개 센터는 협의회를 중심으로 유기적으로 협력하며 국가적 차원의 대기환경정책 발전에 기여하고 있습니다. 각 센터의 전문 연구개발 성과와 경험을 공유하는 동시에 센터 간 공동 연구 과제를 발굴하여 전국적 차원의 시너지 효과를 창출하고 있으며, 과학적 근거에 기반한 지역별 대기오염문제의 맞춤형 개선방안을 마련하기 위해 민간과 정부의 협력을 지속적으로 강화해 나가고 있습니다.

기기(기술)전시 업체 안내

㈜에스앤에스

1. 회사소개

㈜에스앤에스는 2010년 창립 이래, '미래는 환경이다'라는 비전을 바탕으로 사업을 이어 나가고 있습니다. 2019년 미국 CORNING社와 파트너십 체결하고, 서울시가 지하철 미세먼지 저감을 주제로 개최한 국제 연구개발 경진대회 '2019-2020 서울 글로벌 챌린지'에서 종합우승을 차지하였습니다. 이후 지하역사의 환기실 환경개선사업을 위해 설치되어 깨끗이 정화된 공기를 지하역사 곳곳으로 공급하고 있습니다. 지속적인 인재육성과 연구개발을 통하여 고객 맞춤형 제품을 제공하고자 최선을 다하고 있으며, 항상 고객과 소통하고 고객을 최우선으로 여기는 기업이 되기 위해 노력하고 있습니다.

2. 전시 품목

제 원	제품명	CAPS (Clean Air Purification System)
	규 격	441mm × 441mm × 132mm
	표준 풍량	488CMH@12mmAq
주요 성능	집진 효율	KS B 6141 형식1, 공인성적 기준 $PM_{0.3}$: 87.2% ISO16890 공인성적 기준 $PM_{1.0}$: 89%, $PM_{2.5}$: 92%, PM_{10} : 98% Ashrae 52.2 공인성적 기준 : MERV 15등급
	집진량	동일한 사용 면적의 HEPA 필터 대비 집진 면적 20배, 집진량 16배로 사용환경에 따라 2~5년 연속 사용 가능
	재사용 가능	ISO 16890 공인성적 기준 1~10회 세척 및 재코팅 시험 결과 ePM_1 85% 등급, $ePM_{2.5}$ 90% 이상 효율, 초기 성능 유지
	녹색인증	당사 제품은 장기간 사용과 세척·재사용성 및 집진 성능을 바탕으로 녹색인증을 취득하여 기술의 친환경성과 우수성을 공식적으로 인정받음



CAPS



CAPS 350*450



지하역사환기실 설치 모습

홈페이지: www.snsco.kr, E-MAIL: hjkim@snsco.kr TEL: 031-353-4392, FAX: 070-7614-2287

기기(기술)전시 업체 안내

㈜ 두일테크

1. 회사소개

㈜두일테크는 굴뚝원격감시체계(TMS)의 국내 도입 초기인 1999년에 설립하여 ISO 품질경영, ISO 환경경영, ISO 안전보건경영 체계를 기반으로 TMS 구성 시스템 중의 핵심 장비인 배출가스 유량 측정용 유속계와 유량 및 오염물질 농도 측정자료를 수집·저장·환산·보정하고 관제센터로 전송하는 Data Logger(대기환경·굴뚝·실내공기질·수질 등) 자체 개발을 시작으로 미세먼지(PM_{10}) 및 초미세먼지($PM_{2.5}$) 샘플러, 유량교정기, 스택샘플러, 환경IoT 소음측정기, 사물인터넷 측정기기(IoT) 및 자료수집기 등을 독자적인 기술로 개발 후 형식승인을 취득하여 소비자들께 공급하고 있습니다.

폐사의 제품들은 측정 장비 관리기관과 검사기관 등 사용자의 요구사항을 반영하여 기성 제품들에 비해 기능·성능은 물론 사용의 편의성을 대폭 개선하였으며, 자체 개발한 국산 장비이므로 문제 발생 시 신속하게 A/S를 해 드리고 있어 고객들의 높은 신뢰를 받고 있습니다.

2. 전시 품목

- 미세먼지(PM_{10}) 및 초미세먼지($PM_{2.5}$) 샘플러(FDS-210)
- 유량교정기(FC-100)
- 스택샘플러(가스상(DSP-817G), 입자상(DSP-817P/반자동), 입자상(DSP-817A/자동)
- 환경 IoT 소음측정기(SLM-320)



(FDS-210)



(FC-100)



(DSP-817P)



(SLM-320)

홈페이지: www.dooill.co.kr E-MAIL: biz@dooill.co.kr TEL: 032-327-3443 FAX: 032-327-3442

제18회

2026 대한민국

환경·자원·에너지 대상

주　　최 : 대한민국 환경·자원·에너지 대상 운영위원회
주　　관 : 투데이에너지, 한국에너지학회, 한국대기환경학회
후　　원 : 산업통상부, 기후에너지환경부, 과학기술정보통신부
특별후원 : DS단석, 단석장학회
시 상 식 : 2026년 11월 예정



산업통상부　기후에너지환경부　과학기술정보통신부　한국가스공사　한국지역난방공사
한국환경공단　한국가스안전공사　한국에너지공단　KEITI 한국환경산업기술원　DS단석·단석장학회

www.anytech.co.kr

ANYTECH

Air Purification and Sterilization System

for Public Transportation





Features of Air Purifier (Sterilizer)

Advanced Multi-Sterilization System
Combines a high-efficiency HEPA filter (H13 grade) with a UVC sterilization lamp to remove 99.9% of fine dust and eliminate bacteria and viruses.

Smart Automatic Control
Automatically adjusts airflow in 4 levels by detecting indoor air quality in real time.

Railway-Optimized Design
Designed specifically for railway environments, complying with vibration, shock resistance, and fire safety standards (EN45545, etc.).

Low Noise & High Efficiency
Operates at low noise levels below 58.7 dB, ensuring passenger comfort without disturbance.

Anytech (주)애니텍

본사 & 공장 : 경기도 평택시 진위면 진위2산단로 31-20 TEL. 031-374-6641 FAX. 031-374-6642 E-mail. anytech@anytech.co.kr
연구소 : 경기도 수원시 영통구 신원로88 디지털엠파이어2 101동 1301호 TEL. 031-426-5557 FAX. 031-273-5552

새로운 환경문화를 창조하는기업-

(주)엔바이온



HIECO
Highly Improved Eco-friendly Technology by enbion

더 효율적으로
더 경제적으로


축열연소


축열촉매 연소


농축시스템


바이오필터


환경 소재

진단부터 설치까지 엔바이온의
HIECO 기술이 최고의 제품을 만들어 갑니다.



축열 연소(촉매)시스템(RTO/RCO)

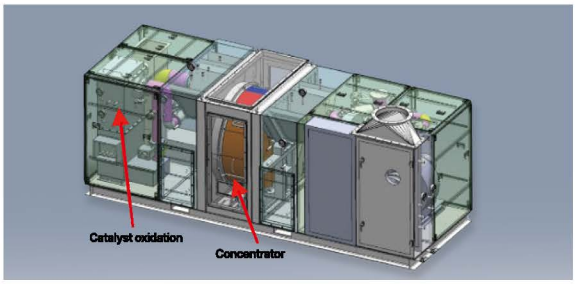
축열재를 이용한 에너지 절감형 연소기술로 800℃이상에서 연소하는 RTO system과 촉매를 사용하여 운전온도를350℃이하로 낮추는 RCO system이 있습니다.

축열 연소 시스템 특허
한국특허 10-0704639호
국제특허 US 7.762.808.B2, Japan 4149482, China ZL.200380110580, Germany 603.46.598.6



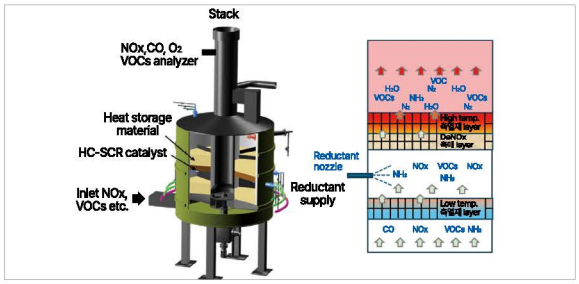
농축 시스템(Concentrator)

약취 및 VOCs 가스를 회전형 흡착 소재(Rotor)로 흡착하여 깨끗한 공기로 배출하고 흡착된 오염 물질은 소량의 가스로 탈착시켜, 후단의 연소설비(RTO/ RCO)로 완벽하게 처리하는 에너지절감형 시스템입니다.



RTO-Free 농축/촉매산화시스템(RF-CCO)

산업현장의 배출 VOC를 농축 로터에 흡착 후 탈착 재생하여 연속 사용하면서, 탈착된 고온 고농축 VOC는 후속 촉매 산화 설비의 에너지로 재활용되고 산화 처리되어, 별도의 RTO 산화설비가 없고, 낮은 농도에도 무연료 운전이 가능한 에너지 절감형VOC 처리 시스템으로, 모듈화 하여 장소에 구애받지 않고 이동 설치가 가능한 시스템입니다.



SCR+RTO hybrid deNOx 시스템(SCR-RTO)

VOCs와 NOx를 동시 처리하는 Hybrid system으로 환원제(NH_3 또는 Urea)를 사용하는 SCR과 SNCR 동시 적용 가능하며, 특히Hydrocarbon(VOCs)이 충분한 영역에서는 별도의 환원제 투입 없이 deNOx 처리가 가능한 HC-SCR + RTO hybrid deNOx 처리 시스템을 제공할 수 있습니다.

본사 34026 대전광역시 유성구 테크노 2로 275 TEL. 042-863-8675 FAX. 042-863-8677~8 E-mail. enbion@enbion.co.kr www. enbion.com

서울대학교 이화여자대학교 컨소시엄

미세먼지관리 특성화대학원

미세먼지관리 전문인력 양성을 위한 고도화 과정

서울대학교 SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

이화여자대학교 EWHA WOMANS UNIVERSITY

동아대학교 DONG-A UNIVERSITY

- 미세먼지 저감을 위한 측정·분석, 처리 기술, 모델링, 위해성평가, 경제성분석, 저감 대책 등을 수행할 수 있는 미세먼지관리 전문인력 양성
- 중앙·지방정부와 미세먼지 배출사업장 및 환경기술 산업체와의 소통을 통한 수요자 맞춤형 인재양성

지원항목

- 장학금 지원
- 미세먼지 연구프로젝트 수행 지원
- 산학연계 프로그램 지원
- 학회참가비 지원 및 논문 게재료 지원

문의처

서울대학교 ☎ 02-880-2776

이화여자대학교 ☎ 010-4636-3277

동아대학교 ☎ 051-200-7680

대기 및 소각 배출가스 내 휘발성 PFAS 분석

UNITY-ULTRA-Kori-CIA Advantage HL-xr

액체냉매(Cryogen) 없이 극휘발성 불소화합물(CF_4 포함 30종) 및 FTOHs 고감도 정량

통합 열탈착 TD-GC/MS 시스템

Markes International의 열탈착 기술집약체로, 캐니스터 (Canister) 및 농축 튜브 분석을 단일 시스템으로 자동 전환합니다.



<Tube>

<Canister>

UNITY-ULTRA-Kori-CIA Advantage system

최신 글로벌 환경 규제 및 표준 분석법 준수

US EPA OTM-50 미국 환경청 표준

고정오염원 PFAS 소각·파괴 효율 검증법

PFAS 열처리 및 소각 과정에서 발생하는 **30종의 휘발성 불소화합물(VFCs)**을 캐니스터로 채취하여 ultra-ppt 수준까지 농축· 분석하는 표준 시험법입니다.

ASTM D8591-24 ASTM 국제 표준

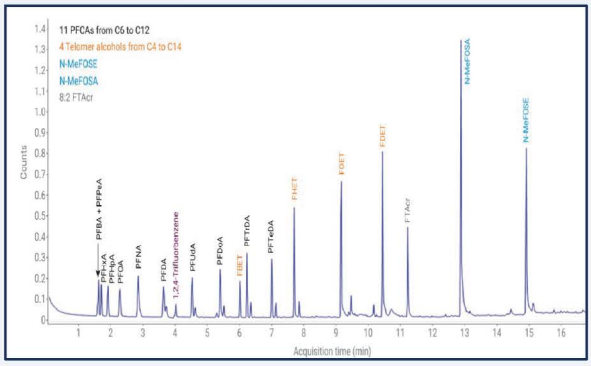
시험챔버 내 플루오로텔로머 알코올 정량법

실내 공기, 제품 방출가스 및 작업장 대기 중의 **FTOHs(4:2, 6:2, 8:2, 10:2 FTOH)**를 고체 흡착 튜브와 TD-GC-MS/MS로 분석하는 최근 기체상 PFAS 시험법입니다.

<US EPA OTM-50 적용>

Compound	R^2	Relative Response Factor (RRF)	Repeatability (5ppb) n = 10	MDL (0.5ppb)	Passes OTM 50 criteria
Tetrafluoromethane	0.9990	2.17%	2.03%	30ppt	Yes
Hexafluoroethane	0.9999	1.86%	0.48%	6ppt	Yes
Chlorotrifluoromethane	0.9977	2.52%	0.44%	8ppt	Yes
Trifluoromethane	0.9977	5.12%	1.13%	10ppt	Yes
Difluoromethane	0.9993	3.11%	0.64%	11ppt	Yes
Octafluoropropane	0.9996	7.64%	0.38%	14ppt	Yes
1,1,1-Trifluoroethane	0.9988	5.33%	0.76%	13ppt	Yes
Octafluorocyclobutane	0.9998	7.14%	0.26%	11ppt	Yes
Perfluorobutane	0.9995	4.00%	0.29%	9ppt	Yes
Dodecafluoropentane	0.9989	7.65%	0.43%	9ppt	Yes
Average	**0.9990**	**4.65%**	**0.60%**	**12ppt**	**Yes**

<ASTM D8591-24 적용>



Kori-xr™ 수분 제어

높은 습도의 대기 시료 샘플링 후, 분석 시 Ice blocking 없이 수분을 선택적으로 제거하여 극성 VFCs 손실 방지

> 30 ppt

CF_4 포함 극휘발성 물질 MDL

CIA Advantage™ Auto

최대 27개 샘플 채취 용기 (캐니스터/백) 자동 분석 및 내부 표준물질(IS) 정 자동 주입

R^2 > 0.999

검량선 선형성 (Linearity)

Cryogen-Free Trap

액체질소/CO_2 없이 전기 냉각 트랩만으로 초휘 발성 CF_4, C_2F_6까지 100% 포집 및 열탈착

> 5 % RSD

재현성 (Reproducibility)

Markes / 한국 공식 대리점 ITC21

대기·환경·소재 휘발성 유기화합물(VOCs & PFAS) 열탈착 시스템 전문 기업

기술 및 응용 문의 Tel 031-778-7405

E-mail itc21@itc2000.co.kr

홈페이지 http://www.itc2000.co.kr

SIBATA

실내공기질 / 악취

Mini Pump Air Sampler



VOCs, HCHO 채취기

Low Volume Sampler



식먼, 악취 채취기 (5~30L/Min)

Flowmeter



유량 보정계 (0~5L/Min)/(5~40L/Min)

Digital Dust Indicator



PM2.5, PM10, TSP 측정기

대기 측정

High Volume Air Sampler



TSP, Dioxin, PAHs, POPS, PM2.5, PM10

Low Volume PM 2.5 Sampler



PM 2.5, PM10

Realtime Dust Monitor



광산란 실시간 미세먼지 측정기

Andersen Sampler



8단 / 12단 샘플러

식품 / 수질

수분활성도 측정기



HACCP 인증에 사용

유리잔류염소 측정기



저농도 0.00~2.00mg/L

총잔류염소 측정기



고농도 0~300mg/L

POV, TBA, AV 시험지



과산화물가, 산패도 측정

산업환경 / 작업환경

마스크 밀착도 검사기



CNC / OPC TYPE

작업환경용 채취기



0.05~5.00L/Min

Charcoal Silica Gel Tube



DNPH, 유기가스 흡착튜브

Passive Sampler Tube



HCHO, Oxide, Carbon beads

흡입독성 / 환경챔버

비부노출 챔버



Nose Exposure Testing

미스트, 분진 발생장치



Mist Generator, Feeder

담배 연기 발생장비



Cigarette Smoke Generator

온습도, 분진 환경시험 챔버



Environmental Testing Sys.

TEL. 02-841-2270 | **FAX**. 02-841-2290 | **E-MAIL** : sales@taewonsibata.co.kr | http://www.sibata.co.kr

(주)에코코어기술

ECOCORE



ODOR TOTAL SOLUTION

악취 원인물질 진단과 해결방안을 제시하겠습니다.

에코코어만의 악취환경을 위한 대책 마련

대기가스 · 제품 소재 등에서 발생하는 악취를 제거하는 악취 전문 기업

사업 분야
BUSINESS AREA

악취원인분석	실내·건축자재 분석	친환경탈취제	대기방지시설
Odor Cause Analysis	Building Materials	Eco Deodorant	Air Pollution Control

악취 해결 프로세스
ODOR SOLUTION PROCESS

01 악취 원인물질 규명
원인물질 정성·정량 분석

02 기술진단 및 공정검토
발생원·공정 특성 진단

03 방지시설 설계 / 시공
맞춤형 탈취설비 엔지니어링

04 유지관리 방안 수립
운전 최적화 및 사후관리

악취로 인한 민원 및 개선방안 마련에 최선을 다하겠습니다.

십여 년간 환경 및 친환경 개발에 매진해온 경험을 바탕으로 정확한 솔루션을 제공합니다.

KOLAS 국제공인기관 · 악취분야 측정대행업 · 환경전문공사업

㈜에코코어기술

본사 부산광역시 기장군 기장읍 차성동로20번길 16, 지하2층
정관공장 부산광역시 기장군 정관읍 매학리 123-2 (매곡길 10)
인천영업점 인천광역시 계양구 아나지로418번길 14-2, 작전동 2층

T. 051-727-3161 F. 051-727-3181 ecocore3161@gmail.com

www.ecocore.co.kr

한국전자기술연구원 AI융합가전연구센터는

KOLAS 국제공인 시험·인증 기관으로 제품에 대한
시험, 평가, 분석 솔루션을 제공합니다.



한국전자기술연구원 AI융합가전연구센터

KOLAS 공인 시험·인증기관

- 실내공기청정기 시험인증(**CA 인증**) 지정 – '20.06
- 공기청정 에어컨디셔너 시험인증(**CAC 인증**) 지정 – '21.01
- 공기청정기 **효율관리시험기관** 지정 – '21.05
- **미세먼지 간이측정기 성능인증기관** 지정 – '24.02

에어가전 성능평가 공기청정 / 에어컨디셔너

시험서비스 항목

분류	시험규격	
공기청정기	효율관리기자재 운용규정 에너지소비효율 측정	
	KOLAS (KS C 9314) 미세먼지 제거능력 등 4개 항목	
	CA (SPS-KACA002-132) 청정화 능력 등 7개 항목	
	GB/T 18801-2015, 21551.3-2010 미립자 공기 정화량 등 4개 항목	비공인
	AHAM AC-1-2020 DUST 등 3개 항목(2026 예정)	
공기청정 에어컨디셔너	KACA-CAC-2011-03 청정화 능력 등	

에어가전 성능평가 전열교환 / 필터평가

시험서비스 항목

분류	시험규격	
전열교환 성능평가	KS B 6879:2020 풍량, 소비전력 시험 등 6개 항목	비공인
환기/공조 필터	KS B 6141:2020 형식 2, 3 Standard ASHRAE 52.2-2017	비공인
고성능 에어필터	KS B 6141:2020 형식 1	비공인
캐빈필터 (차량/승객실)	KS R ISO 11155-1:2001 SPS-KACA014-0144:2019	비공인

홈페이지 https://keti.re.kr/air/

에어가전 성능평가 저농도 탈취 / 바이오에어로졸(항균)

저농도 탈취 시험서비스 항목

분류	시험규격	
AHAM	AC-4(가스 저감 시험) 폼알데하이드, 톨루엔, n-헵탄, d-리모넨, 암모니아 시험 챔버 – 8 m^3, 30 m^3	비공인
CA	SPS-KACA 002-132 (저농도 유해가스 정화능력 시험) 폼알데하이드, 톨루엔, 암모니아 시험 챔버 – 30 m^3	예정

바이오에어로졸(항균) 시험서비스 항목

분류	시험규격	
AHAM	AC-5 휴대용 공기청정기의 주요 바이오에어로졸 감소율 평가	비공인
ISO (국제규격)	16000-36:2018 공기청정기, 살균기 등 부유미생물 제거 성능 평가	비공인
규격 외 시험	담당자 문의 (1.5 m^3, 30 m^3)	비공인

미세먼지 간이측정기 성능인증·점검

미세먼지 간이측정기 시험서비스 항목

관련법령	미세먼지 저감 및 관리에 대한 특별법 제24조
인증대상	형식승인이나 예비형식승인을 받지 아니한 미세먼지 측정기기
KETI 시험 범위	성능인증 초기 인증 후 5년 이내
	성능점검 최초 성능점검 후 2년 6개월마다 점검
	일반시험 성능인증 및 성능점검 프로세스 테스트 시험 가능

KETI 한국전자기술연구원
Korea Electronics Technology Institute

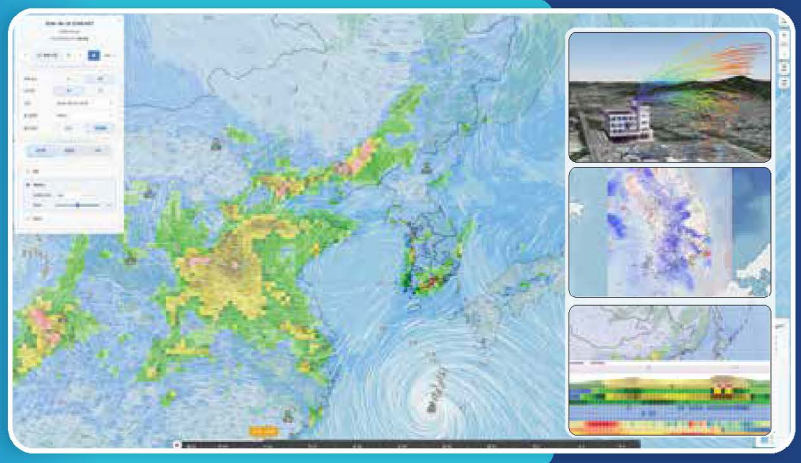
대기환경정보 연구개발 서비스

이투엠쓰리(주)

Web GIS Platform
모델링 공간 분석

대기질 및 기상 데이터를 기반으로
공간 정보 분석과 예측 정보를 제공하는
고정밀 공간 모델링·분석 플랫폼입니다.

- 기상 모델링 결과
- 배출량 모델링 결과
- 대기 측정망 자료
- 대기 측정망 자료 등농도
- 동아시아 모델링 결과
- 3D 오염물질 확산 경로
- 연직 모델링 결과
- 연직 단면 모델링 결과
- 측정망 분포도
- 모델링간의 배출량 비교





대기영향분석 모델링
실시간 기상·TMS 연계 대기질 영향예측
주변지역 대기질 공간분포 분석·시각화

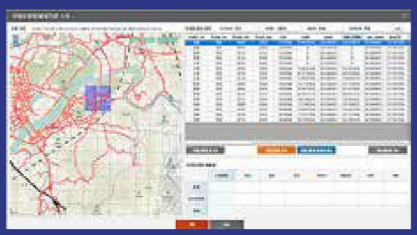
실시간 센서 모니터링
IoT 센서 기반 배출구·대기질 실시간 모니터링
AI 기반 데이터 최적화 및 Trend 분석

온실가스 모니터링
지구·도시대기 온실가스 모니터링 및 분석
측정자료 최적 분석 알고리즘 개발

대기배출원 추적 모니터링
3차원 기상자료 기반 역추적·정추적 모델링
누적자료와 AI를 활용한 배출원 추정

Integated Management Platform

환경정책 수립에 활용할 수 있도록 대기환경정보를 분석한 모니터링, 예측, 검증 플랫폼 개발



지역 맞춤형 대기질 모사 플랫폼



대기질 통합 관제시스템



스마트 광역 미세먼지 · 악취 종합관제센터

경기도 안양시 동안구 흥안대로 427번길 57-2, 401호, 402호 (평촌아이에스비즈타워)
031-365-3345 http://www.e2m3.com

이투엠쓰리(주)

SNS (주)에스앤에스

www.snsco.kr

CAPS :
CLEAN AIR PURIFICATION SYSTEM



깨끗**하고 **맑은세상
***에스앤에스**가 만들어갑니다.*

Capacity

일반 주름형 Filter와
비교하여 단위 부피당
집진면적 20배,
집진력 16배 많음
최소 2년 이상
교체 없이 사용 가능

Efficiency

ISO 16890 공인성적서
PM 1.0 : 98%
PM 2.5 : 92%
PM 10 : 98%

Reuse

10회 세척 & 재코팅 후
동일 집진 효율 등급 유지

Green

일반 Filter는 폐기 시
2차 오염 발생,
CAPS는 자연 친화적인
세라믹 소재를 사용

- 지하철 미세먼지 저감 기술대회 「2019~2020 서울 글로벌 챌린지」 종합우승
- 「서울시 지하철 환기실 환경개선사업」 10개 역사 내 환기실 설치 및 운영
- 강동역 환기시스템 중 OA 급기가 1차 필터로 57개월 현재 교체 및 세척 없이 운영 중
- SBS 일요 특선 다큐멘터리 339회, 목동역 환기시스템 개량 우수사례로 CAPS (세라믹 허니컴 필터) 방영
- 「녹색기술 인증」 취득, CAPS 친환경성과 기술적 가치 공식 인정 (2026.02.05)

● 본 사 경기도 화성시 팔탄면 3.1만세로 612-18 T 031-353-4392 F 070-7614-2287

2026년 제9회 한국공기청정 연차심포지움

The 9th Korea Air Cleaning Association Annual Symposium 2026

일시 2026년 12월 09일(수) 09:00 ~ 17:00
장소 한국과학기술회관 2관 중회의실 2/5/6 (B1F)

한국공기청정협회
KOREA AIR CLEANING ASSOCIATION

● 초대의 글

안녕하십니까.
한국공기청정협회는 오는 2026년 12월 09일, 공기산업의 미래 발전 방향과 최신 기술 동향을 공유하기 위한 「제9회 한국공기청정 연차심포지움」을 개최합니다.
최근 건강한 실내공기질에 대한 사회적 관심 증대와 함께 탄소중립, 첨단산업 확대, 에너지 효율 향상 등의 요구가 높아지면서 공기산업의 역할과 중요성은 더욱 커지고 있습니다. 특히 에어가전 산업의 기술 고도화, 반도체·디스플레이 바이오 산업을 중심으로 한 클린룸 및 에어필터 기술 발전, 그리고 국민 건강과 직결되는 실내환경 관리 분야는 미래 산업 경쟁력 확보를 위한 핵심 분야로 주목받고 있습니다. 이번 심포지움은 ▲ 에어가전 (Air Appliances) ▲ 실내환경 (Indoor Environment) ▲ 클린룸 및 에어필터(Cleanroom & Air Filter) 분야로 구성되어 산·학·연·관 전문가들이 한자리에 모여 최신 기술, 정책, 산업 현안을 공유하고 지속가능한 공기산업 발전 방향을 함께 논의하는 교류의 장으로 마련하였습니다. 특히 각 분야의 전문 발표와 토론을 통해 산업 간 협력 확대와 기술 경쟁력 강화 방안을 모색하고, 국민의 건강하고 쾌적한 생활환경 조성을 위한 다양한 의견을 나누고자 합니다.
바쁘신 가운데에도 참석하시어 귀중한 경험과 고견을 함께 나누어 주시고, 공기산업의 미래를 함께 만들어가는 뜻깊은 자리를 빛내 주시기 바랍니다. 감사합니다.

한국공기청정협회 회장 **오 세 기**

● 프로그램(안)

09:00~09:20	접수 및 등록
09:20~09:30	인사말
09:30~10:30	한국공기청정 연차심포지움 [초청강연 - I]
10:30~10:40	Break Time

오전(SESSION)	에어가전	실내환경	클린룸 및 에어필터
10:40~11:10	주제발표1	주제발표1	주제발표1
11:10~11:40	주제발표2	주제발표2	주제발표2
11:40~12:10	주제발표3	주제발표3	주제발표3

12:10~13:30	점심 시간
13:30~14:30	한국공기청정 연차심포지움 [초청강연 - II]
14:30~14:40	Break Time

오후(SESSION)	에어가전	실내환경	클린룸 및 에어필터
14:40~15:10	주제발표1	주제발표1	주제발표1
15:10~15:40	주제발표2	주제발표2	주제발표2
16:00~16:30	주제발표3	주제발표3	주제발표3
16:30~17:00	주제발표4	주제발표4	주제발표4

17:00~	심포지움 폐회

※ 등록비 : 일반 8만원 / 회원사 6만원 (온라인 등록 : www.kaca.or.kr, 10월 홈페이지 오픈 예정)
※ 문의처 : 02-553-4156 / kaca@kaca.or.kr / 한국공기청정협회 심포지움 담당자

KACA
KOREA AIR CLEANING ASSOCIATION

S-FAC Solution Factory



FTIR-based CEMS

TMS300-FTIR

FTIR 방식 굴뚝원격감시시스템

국내 최초 FTIR 방식 굴뚝원격감시시스템

푸리에 변환 적외선 분광법을 적용한
고정밀 다성분 연속 가스 분석 시스템

국립환경과학원장 **형식승인** 획득
산업통상자원부장관 **NEP(신제품)** 인증

국산 기술

해외 의존 FTIR 기술의
국산 상용화

다성분 동시 분석

6종 유해가스와 3종 온실가스 **동시 측정**

구매비용 절감

외산 장비 대비
약 50%

신속한 유지보수

장비 수리기간
5개월에서 **2일**로 단축

TMS300-FTIR은 에스팩(주)의 **독자적인 광학 분석 기술**을 기반으로 개발된 **국내 최초의 FTIR 방식 굴뚝원격감시시스템**입니다. **800~4,500 cm^{-1}의 광범위한 적외선 흡수 스펙트럼을 분석**하여 **다양한 가스를 동시에 측정**하며, **간섭가스의 영향을 효과적으로 배제**하여 기존 NDIR 방식 대비 높은 측정 안정성과 신뢰성을 제공합니다.

S-FAC Solution Factory 에스팩(주)

TEL 042-364-8132 | Fax 042-384-8133
Email: sales@s-fac.co.kr | Website: www.s-fac.co.kr
ADD: 대전광역시 유성구 테크노2로 187, B동 120호 (용산동, 미건테크노월드)

Air Pollution Sampling & Monitoring Equipments

KNJ ENGINEERING, INC.



KNJ
엔 지 니 어 링 (주)

경기도 의왕시 고래들길 49 KNJ빌딩 (오전동)
Tel : 031-451-7082(代) / Fax : 031-459-7321
Email : knj@knj-eng.co.kr / Web : www.knj-eng.co.kr

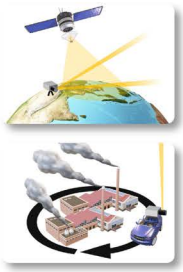
NOVEL GAS MEASUREMENT TECHNIQUES

기후변화유발물질 모니터링 / DOAS 측정기술 / 비접촉식 원격측정 / 배출량 측정

Airyx
DIFFERENT THINKING. BETTER MEASURING.

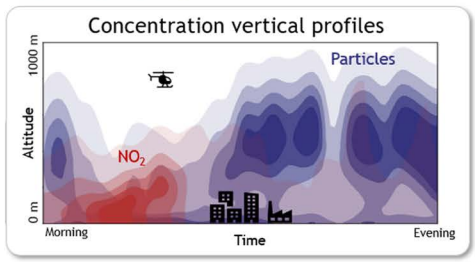
입체원격측정

Passive MAX-DOAS NO_2, SO_2, HCHO, CHOCHO, HONO, BrO, IO, O_4





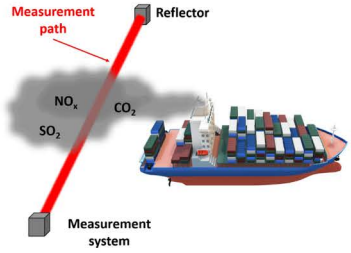




직선상 원격측정 / 선박 배출량 측정

Active open-path DOAS NH_3, NO, NO_2, SO_2, O_3, HCHO, HONO / 항만 선박별 NO_2, SO_2 배출량 측정

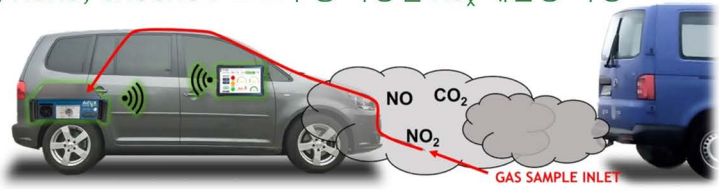




지점측정 / 차량 배출량 측정

Iterative-cavity DOAS NO_2, NO_x, HONO, CHOCHO / 도로주행 차량별 NO_x 배출량 측정





수처리시설 배출량 측정

NDIR N_2O, CO_2, CH_4 / 수처리시설 온실기체 배출량 연속측정



Aireet

주식회사 에어리트
기후변화유발물질 DOAS 측정기술
Airyx GmbH 독점대리점
www.aireet.co.kr / support@aireet.co.kr / 010-9350-8148