

총 설

국내 초등학교 내 입자상 물질 및 영향 요인 Particulate Matter and Influencing Factors in Domestic Elementary Schools

손윤석*

부경대학교 환경공학과

Youn-Suk Son*

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University,
Busan, Republic of Korea

접수일 2020년 3월 6일
수정일 2020년 4월 1일
채택일 2020년 4월 3일

Received 6 March 2020

Revised 1 April 2020

Accepted 3 April 2020

*Corresponding author

Tel : +82-(0)51-629-1943

E-mail : sonys@pknu.ac.kr

Abstract Children spend a lot of time of day in school and are more sensitive to contamination of indoor air than adults. This study reviewed the level of particulate matter (PM) and influencing factors in elementary schools in Korea (e.g., occupant density, classroom type, sampling height, building year and indoor and outdoor environment factors) and suggested methods and future research directions to reduce particulate matter. To this end, we reviewed domestic and international papers published since 2006. As a result, a coarse particle in a classroom ($PM_{2.5} - PM_{10}$) is mainly formed by internal sources, whereas $PM_{2.5}$ ($PM < 2.5 \mu m$ in aerodynamic diameter) is caused by external sources. The number and activities of student in a classroom were positively correlated with PM_{10} ($PM < 10 \mu m$ in aerodynamic diameter) levels, but $PM_{2.5}$ levels did not show a clear tendency. We found that general classrooms have a slightly higher PM concentration than the special rooms (computer room and laboratory). In addition, some studies showed that the humidity and CO_2 in the classroom had a positive correlation with $PM_{2.5}$. In addition, $PM_{2.5}$ was found to be more affected by the air quality around the school than PM_{10} . When compared previous studies measured at school-related facilities in Korea to date, the concentrations of PM_{10} were mostly satisfied with the criteria at the time of measurement. However, when compared with the newly revised concentration of "School Health Act" ($75 \mu g/m^3$), a significant number of schools were found to exceed the standard. Therefore, measures to improve indoor air quality in schools are urgently needed.

Key words: Particulate matter, Indoor air quality, Elementary school, PM_{10} , $PM_{2.5}$

1. 서 론

산업 및 주거 환경의 변화에 따라 사람이 실내에 거주하는 시간은 증가하고 있다(Klepeis *et al.*, 2001). 국내 연구진의 보고에 따르면 국내 10대 연령 학생 집단의 39.6%가 실내공간(학교 및 학원 등)에서 대부분의 시간을 보냈다(Yang *et al.*, 2009). 특히, 초등학생(주중: 14.0(주택실내)+8.0(기타 실내환경)시간)의 경우, 실내에서 머무르는 시간이 중학생(12.5+9.5시간)과는 비슷하고 고등학생(9.8+12.1시간) 및 대학생

(13.0+7.7시간)보다는 조금 더 길다(Yang, 2014). 이를 영국에서 조사된 결과와 비교해 보면 우리나라의 초등학생이 상대적으로 하루 중 학교 및 학원 등에서 거주하는 시간이 0.5~0.8시간 정도 많은 것을 의미한다(Briggs, 2003). 그리고 미국과 비교했을 때에도 하루 시간 중 11% 정도를 학교에서 더 머무르는 것으로 나타났다(Park *et al.*, 2020; USNCEs, 2019; OECD, 2018; Paek, 2013).

초등학생은 신체적으로 성장기에 있고 어른에 비해 상대적으로 단위체중당 호흡량이 많기 때문에 실내

공기오염에 대한 민감도가 크다고 알려져 있다(Park *et al.*, 2018; Faustman *et al.*, 2000; Landrigan, 1998). 게다가 실내 공기오염물질로 인한 실내공기질의 악화는 낮은 농도에서도 만성적으로 노출될 수 있기 때문에 대기오염물질보다 건강에 더 큰 피해를 끼칠 수 있다(Park *et al.*, 2017). 이와 더불어, 주요 오염물질의 농도는 실외보다 실내에서 더 높다는 연구 결과들이 보고되고 있다(Park *et al.*, 2019; Son *et al.*, 2013; Lee and Chang, 2000). 이는 에너지 절감 등의 이유에 따른 건물 밀폐 및 환기 부족 등에 의한 결과로 판단되고, 이로 인하여 실내공기질은 더욱 악화되어 건물병 증후군(sick building syndrome: SBS), 새집증후군(sick house syndrome: SHS), 복합화학물질과민증(multiple Chemical Sensitivity: MCS) 등을 유발시킨다(Oh *et al.*, 2014b; Harada *et al.*, 2010; Sohn *et al.*, 2006a). 그러나 조도 및 소음 등은 사람이 쉽게 감지할 수 있기 때문에 법적으로 적절히 잘 규제되고 있는 반면에, 실내공기질은 사람마다 느끼는 민감도가 다르기 때문에 사회적인 공감감이 부족하여 상대적으로 그 관리 및 기술 개발이 현재까지 부족한 실정이다(Bae and Ji, 2013). 최근 미세먼지(Particulate matter: PM)로 인하여 실외 대기질에 대한 관심은 대국민적으로 받고 있으나 이에 비해 상대적으로 실내공기질의 중요성에 대한 인식은 미비하다(Jung *et al.*, 2016).

실내 공기오염물질 중 PM, 오존(O₃), 이산화황(SO₂), 이산화질소(NO₂)는 산화스트레스와 활성산소 등을 생성하고, 알레르겐과 상호 작용 등을 통하여 천식의 유발과 악화에 깊게 관여하는 것으로 알려져 있다(Park *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2010). 이 중 독성, 알레르기성, 발암성 유·무기물질들이 혼재된 PM이 학교 내에서는 가장 위험한 오염물질이라고 볼 수 있고(Choi *et al.*, 2006; Jones, 1999; Maroni *et al.*, 1995), 그 성분들의 함량 변화에 따라 노출 시 인체에 미치는 영향은 다양할 것으로 판단된다(Son *et al.*, 2012).

미국 내 20개 대도시에서 대기오염물질과 건강 영향에 대한 평가를 수행한 결과, PM 농도가 증가할수록 사망률 및 심폐질환에 의한 사망이 유의하게 증가

하는 것으로 보고됐다(Samet *et al.*, 2000). 국내의 경우 2008년 인천과 제주지역 초등학교 학생 2974명을 대상으로 한 연구 결과에서 인천지역 학교에서 측정된 PM과 이산화탄소(CO₂) 농도가 제주지역 학교보다 높게 나타났고, 해당지역 학생들의 비염 증상 및 유병률이 유의하게 높았다(Yoo, 2016). 이는 높은 농도의 대기오염에 장시간 노출은 질병의 발생 또는 악화에 연관이 있음을 의미한다. 게다가, 실내에서 PM₁₀(공기역학적 직경이 10 μm보다 작은 먼지)과 PM_{2.5}(공기역학적 직경이 2.5 μm보다 작은 먼지) 농도의 증가는 천식을 앓고 있는 소아의 폐기능 저하를 유발하며, 특히 PM_{2.5}의 경우에는 기도의 염증반응을 의미하는 호기산화질소 증가와 관련이 있는 것으로 보고되고 있다(Park *et al.*, 2017; Koenig *et al.*, 2005; Delfino *et al.*, 2004). 이와 더불어 PM_{2.5}는 상대적으로 고농도의 발암성물질(다환방향족탄화수소의 74~94%가 PM_{2.5}에 집중)을 포함하는 것으로 알려져 있고, 실내 PM은 실내의 semi-VOCs와의 화학적인 반응을 일으켜 실외 PM보다 더 독성이 큰 것으로 알려져 있다(Park *et al.*, 2020; USNASEM, 2016; Oeder *et al.*, 2012).

학교 교실 내의 CO₂ 등 실내공기 오염물질의 농도가 증가하면 학생들의 결석률이 증가하고 학생들의 감각기능, 시험성적 등에 영향을 미친다고 보고된다(Jung *et al.*, 2014; Yang, 2014; Shendell *et al.*, 2004; Meininghaus *et al.*, 2003). 따라서, 학교 내 실내공기질을 관리하는 것은 교육 목표 달성을 위하여 매우 중요한 요소이며, 초등학교의 경우 앞에서 언급한 것처럼 환경취약 계층임으로 유해한 환경으로부터 보호해야 할 환경보건학적으로 매우 중요한 집단이다(Park *et al.*, 2018).

이와 같이 실내공기질은 학교 내의 재실자에게 상당한 악영향을 미침으로 미국 환경보호청(US Environmental Protection Agency, EPA)은 학교 실내공기질 관리의 중요성을 인식하고 관련 법적 규제도 엄격히 적용하고 있는 실정이다(Jung *et al.*, 2014; EPA, 2000). 이에 우리나라도 이러한 학교 내 공기 오염의

심각성을 인식하고 교육부에서 2002년에 관련 법규를 규정하였고 2006년부터 “학교 보건법 시행규칙”을 시행하였다(MOE, 2019; Kim, 2016).

대기 중의 PM은 입경별로 다른 발생기원을 가지고 있는데, 입경 1 μm 이하의 경우에는 다양한 연소과정이나 가스상 물질의 입자상 물질로 전환에 의해서 생성되고, 입경 1 μm 이상의 입자는 주로 토양, 해염, 꽃가루 등의 자연적인 발생원에서 기인하는 것으로 알려져 있다(Suh *et al.*, 2014; Sienfeld and Pandis, 1998; Willeke and Whitby, 1975). PM은 입경적인 측면에 있어서도 미세입자가 초대입자보다 더 강한 독성학적 약영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Donaldson *et al.*, 1998). 특히 입자의 크기가 0.1~1.0 μm 일 때 100% 폐포에 침착될 수 있기 때문에 PM₁₀보다 더욱 유해하다(Ormstad, 2000).

실내의 PM 기원은 1) 실외 PM의 실내 유입, 2) 실내에서 직접 발생, 3) 실내외에서 발생한 가스상 물질의 PM으로의 전환과 같이 크게 세 가지로 구분할 수 있다(Park, 2018; Uhde and Salthammer, 2007; Meng *et al.*, 2005). 그러나 실내 PM 오염에 미치는 기여도는 환기율, 주변 대기 오염도, 재실자의 활동 형태, PM의 공기역학적 직경 등 다양한 변수에 의해서 좌우된다(Jung *et al.*, 2017; Choi, 2008). 학교 교실의 경우에는 흡연, 난방기구 연소, 조리과 같은 실내 발생원이 없기 때문에 실내 미세먼지 농도는 거의 주변 대기 오염도 및 재실자의 활동 형태에 의존할 것으로 판단된다.

따라서 본 총설에서는 실내 PM으로부터 취약군인 초등학생의 건강 영향을 최소화하고자 현재까지 국내의 초등학교에서 측정된 PM 관련 논문들을 집중적으로 수집하여 그 결과들을 고찰하였다. 이를 위하여 DBpia, Earticle, Google scholar, KCI, Kiss, KMBASE, KOREASCHOLAR, KoreaScience, MDPI, NCBI, NDSL, PubMed, Researchgate, ScienceDirect, Semantic Scholar, Wiley Online Library 등을 통하여 2006년도 이후부터 국내외에서 발표된 논문들을 수집 및 정리하였다. 이때 주요 키워드는 “particulate matter (PM, 입자상 물질)”, “elementary school (초등학교)”, “indoor

air quality (실내공기질), “student (학생)”, “classroom (교실)” 등이었다. 본 총설 안에서는 실내공기질 관련 법규의 동향, 국내 학교 내 공기질의 실태, 학교 내 PM 농도에 영향을 줄 수 있는 인자(재실자, 교실용도 및 높이, 건축연도, 실내 환경 요인, 실외 환경 요인), 실내공기질의 개선 방안, 현재까지 연구들의 한계점 및 향후 연구 방향에 대하여 체계적으로 논하였다.

2. 실내공기질 관련 법규의 동향

국내에서도 1980년대 후반부터 다양한 분야(대기 환경, 기계설비, 작업환경, 건축환경)의 연구진들에 의하여 실내공기질에 대한 연구가 진행되기 시작했다(Bae and Ji, 2013; Lee and Kim, 2004; Sohn, 1994). 초기의 실내공기질에 대한 연구는 주로 지하공간에서 발생하는 물질에 대해서 관심이 집중되었고, 이에 따라 1989년 “지하공간 환경기준 권고치”가 설정되었고, 1996년에는 다중이용하는 지하역사, 지하도상가를 규제대상으로 하는 “지하생활공간 공기질 관리법”이 제정되었다(Bae and Ji, 2013). 이후 보다 체계적인 실내공기질을 관리하기 위하여 환경부에서는 17개 시설군을 관리대상으로 하는 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”을 2003년에 공포하고 2004년부터 시행하고 있다. 그리고 매 5년마다 “실내공기질 관리 기본계획”이 수립되고 있고, 현재 제명을 “실내공기질관리법”으로 변경해서 시행 중이다(Bae and Ji, 2013; Kim *et al.*, 2008). 그러나 이 법에서는 도서관, 지하역사, 의료기관 등의 25개 군 등을 대상으로 하고 있으나 한정된 공간에서 다수의 학생이 장시간 생활하는 학교시설은 배제되어 있다(Jang *et al.*, 2006).

현재 국내의 실내공기질 관련 규정은 위에서 언급한 환경부의 “실내공기질관리법” 이외에도, 보건복지부의 “공중이용시설 공중위생관리법”, 고용노동부의 “사무실 공기관리 지침”, 교육부의 “학교 보건법 시행규칙” 등이 있다. 이 중 “학교 보건법 시행규칙”은 1967년 “학교의 시설기준”을 시작으로 1997년 “고교

이하 각급 학교의 설립·운영에 관한 규정”에서 실내 온도, 냉방온도, 습도, 소음에 대한 관리 규정을 만들었고, 2002년에 상기 내용에 실내 공기 중의 이산화탄소 및 PM₁₀ 기준을 추가로 규정하였다(Kim, 2016). 이후 2006년 “학교 보건법 시행규칙”이 시행된 후 현재 PM (PM₁₀, PM_{2.5}), CO₂, 폼알데하이드 (HCHO), 총휘발성유기화합물 (TVOCs), 총부유세균 (TBC: total bacteria counter), 일산화탄소 (CO), 이산화질소 (NO₂), 라돈 (Radon), 오존 (O₃), 진드기 (Dust mite), 석면 (Asbestos) 등 총 17개 물질에 대한 기준을 적용하고 있다(MOE, 2019). 한편 대부분의 외국 국가들이 실내공기질 관련 기준을 지침(guideline)으로 하고 있는 반면 국내에서는 법(standard)으로 규정하고 있다. 게다가 학교 실내공기질 관련 법규를 가지고 있는 국가는 전 세계적으로 한국과 일본뿐인 것으로 알려져 있을 뿐만 아니라 “학교 보건법”은 다른 부처의 법규 및 일본의 법규에 비해서도 엄격한 기준으로 시행되고 있다(표 1)(Yang, 2014).

3. 국내 학교 내 실내공기질의 실태

학교 교실 내의 PM 농도를 평가하기 위하여 국내에서는 2005년부터 활발한 연구가 진행되었고, 현재까지 진행된 연구들의 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도 측정 결과

를 표 2에 제시하였다. 측정된 결과를 보면 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 평균 농도의 범위는 각각 4~60 µg/m³, 12~186 µg/m³였고, PM₁₀ 중 PM_{2.5}의 비율은 0.3~0.61이었다. 또한 동일한 학교 안에서도 측정된 PM 농도 범위도 상당히 넓다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 학교의 입지적인 특성, 외부환경, 실내환경, 재실자 수 및 활동도 등에 따라서 PM_{2.5} 및 PM₁₀의 농도 및 PM_{2.5}/PM₁₀비의 편차가 상당히 크다는 것을 의미한다.

Jung *et al.* (2014)은 2011년부터 2012년까지 2년 동안 수원지역에 있는 초등학교 110곳을 대상으로 PM₁₀의 연도별, 월별, 주변 환경적 특성에 따른 초등학교 내의 PM₁₀ 농도를 측정하였다. 그 결과 2년 동안 해당 학교의 평균 PM₁₀ 농도는 51 µg/m³로서 측정 당시의 기준이었던 100 µg/m³ (학교보건법)을 초과하는 학교는 없는 것으로 나타났다. 그러나 Jung *et al.* (2014)의 실험은 수업이 이루어지고 있는 시간 동안에만 샘플링이 진행되었으므로 인하여 재비산에 의한 PM₁₀의 농도의 영향이 적었을 것으로 판단된다. Kang *et al.* (2014)의 연구 결과에 따르면, 시화산단 및 인근지역에 위치한 학교 10군데에서 측정한 실내의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도 범위는 16~90 및 5~29 µg/m³로 나타났다. Park *et al.* (2018)이 영월군 소재의 초등학교 19곳을 대상으로 실내 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도를 측정한 결과, 대상 학교 교실 내의 농도는 12와 4 µg/m³였다. 그 논문 안에서 Park *et al.* (2018)은 측정된 농도를

Table 1. Indoor air quality standards in Korea.

| | Ministry of Education | Ministry of Environment | Ministry of Employment and Labor | Ministry of Health and Welfare |
|--|-----------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| PM _{2.5} (µg/m ³) | 35 | 35~50 | 50 | - |
| PM ₁₀ (µg/m ³) | 75 | 75~200 | 100 | 150 |
| CO ₂ (ppm) | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| HCHO (µg/m ³) | 80 | 80~100 | 100 | 120 |
| Total microbial count (CFU/m ³) | 800 | 800 | 800 | - |
| Airborne microorganism (CFU/m ³) | 10 | - | - | - |
| CO (ppm) | 10 | 10~25 | 10 | 25 |
| NO ₂ (ppm) | 0.05 | 0.05~0.3 | 0.1 | - |
| Radon (pCi/L) | 4 | 4 | 4 | - |
| VOCs (µg/m ³) | 400 | 400~1000 | 500 | - |
| Asbestos (ea/cc) | 0.01 | - | - | - |
| O ₃ (ppm) | 0.06 | - | - | - |
| Mite (CFU/m ³) | 100 | - | - | - |

Table 2. Concentrations and sampling methods of particulate matter in various schools.

| Sampling site | Number of school | Sampling period | School level | Target contents | Mean ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Range (SD) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | PM _{2.5} /PM ₁₀ | Sampling method | Ref. |
|------------------|------------------|-----------------|---------------|-------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------------|--|---------------------------|
| Suwon | 110 | 2011.03~2012.12 | ES | PM ₁₀ | 51 | 12~95 | | Indoor: AM510 (Light scattering) | Jung <i>et al.</i> , 2014 |
| Sihwa | 10 | 2013.03~2013.12 | ES, MS, HS, U | PM ₁₀ | 31 ^a | – | | IQ-610Xtra (Light scattering) | Kang <i>et al.</i> , 2014 |
| | | | | | 23 ^b | – | | | |
| Gyeongsangnam-do | 1 | 2014.03 | U | PM _{2.5} | 14 ^a | – | 0.45 | Indoor & outdoor: 8 stage non-viable cascade impactor (Gravimetry) | Suh <i>et al.</i> , 2014 |
| | | | | | 14 ^b | – | 0.61 | | |
| | | | | TSP | 96 | 10 | | | |
| Yeongwol | 19 | 2016.12 | ES | PM ₁₀ | 91 | – | | Indoor: METONE-831 (Light scattering) | Park <i>et al.</i> , 2018 |
| | | | | | 55 | – | 0.60 | | |
| | | | | PM _{2.5} | 12 | – | | | |
| Incheon | 10 | 2005.05~2005.06 | ES, MS, HS | PM _{2.5} | 4 | – | 0.33 | Indoor: Grimm aerosol monitor (Light scattering) | Choi, 2008 |
| | | | | | 184 | 113~287 | | | |
| | | | | PM ₁ | 56 | 25~124 | 0.30 | | |
| Incheon | 10 | – | ES, MS, HS | PM ₁₀ | 41 | 16~98 | | Indoor & outdoor: Grimm aerosol monitor (Light scattering) | Kim <i>et al.</i> , 2006b |
| | | | | | 186 | 119~287 | | | |
| | | | | PM _{2.5} | 60 | 25~124 | 0.32 | | |
| Ulsan | 155 | 2008.05~2008.12 | ES, MS, HS | PM ₁ | 43 | 17~98 | | Indoor: LD-3B (Light scattering) | Jung <i>et al.</i> , 2010 |
| | | | | | 74 | 0.4~219 (39) | | | |
| | | | | PM ₁₀ | | | | | |
| Gyeonggi-do | 440 | 2009.03~2012.11 | ES | PM ₁₀ | 57 | 12~163 (27) | | Indoor: AM510 (Light scattering) | Jung <i>et al.</i> , 2015 |
| | | | MS | | 60 | 11~170 (32) | | | |
| | | | HS | | 55 | 16~146 (26) | | | |
| Seoul | 116 | 2013.09~2013.11 | ES | PM ₁₀ | 44 | 20~69 (11) | | Indoor: MiniVol portable air sampler (Gravimetry) | Yang <i>et al.</i> , 2015 |
| – | 34 | 2017.11~2018.05 | ES | PM ₁₀ | 36 | 4~121 | | Indoor & outdoor: Grimm aerosol monitor (Light scattering), MiniVol, size-selective air sampler (Gravimetry) | Park <i>et al.</i> , 2020 |
| | | | | PM _{2.5} | 19 | 1~76 | 0.53 | | |
| – | 80 | 2006.10~2006.12 | ES | PM ₁₀ | 88 | 10~358 (54) | | – | Kim <i>et al.</i> , 2006a |
| – | 1 | 2004.07~2004.12 | KG | PM ₁₀ | 95 | 26~216 (50) | | Indoor: MiniVol portable air sampler (Gravimetry) | Yang <i>et al.</i> , 2009 |
| | 7 | | ES | | 78 | 7~294 (46) | | | |
| | 6 | | MS | | 83 | 16~270 (51) | | | |
| | 7 | | HS | | 86 | 26~221 (44) | | | |

KG: kindergarten; ES: elementary school; MS: middle school; HS: high school; U: university; SD: standard deviation; ^aIndustrial inside; ^bIndustrial outside

기준에 발표된 연구 결과들과 메타분석을 통하여 비교해 보았는데, 그 결과 기준에 다른 지역의 학교에서 측정된 결과에 비해서 PM_{10} 은 7배, $PM_{2.5}$ 는 12배 정도 낮은 농도를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이들은 이와 같이 실내의 미세먼지 농도가 이전에 다른 지역에서 조사된 결과와 비교했을 때 낮게 나온 이유를 조사 기간이 겨울철이어서 창문 등을 통한 외부 유입이 적었고 다른 지역의 학교에 비해 학급 인원수가 현저히 적었기 때문이라고 밝혔다. 그러나 Jung *et al.* (2015)에 의하여 경기도 지역의 440여 개 학교를 대상으로 한 연구 결과에서는 일부 학교의 PM_{10} 농도가 그 당시의 학교보건법의 교사안 유지기준 ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하는 것으로 나타났다. 그리고 전국에 있는 82개 초등학교를 대상으로 한 Kim *et al.* (2010)의 연구에서도 전체 대상 학교 중 27.2%가 동일 기준을 초과하는 것으로 보고됐다. 또한, Choi (2008)와 Kim *et al.* (2006)에 의해서 수행된 연구에서는 10개 대상 학교 중 7개가 측정 당시의 다중이용시설의 실내공기질 유지기준 (PM_{10} : $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하는 것으로 나타났고, 10개 학교 모두에서 학교보건법의 교사안 유지기준을 초과하는 것으로 나타났다. 또한, 이들 연구에서 $PM_{2.5}$ 의 경우 10개 학교 모두 미국 환경청(EPA)의 연평균 ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 기준을 초과하였으며, 그중 3개 학교는 일평균 ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 기준을 초과한 것으로 나타났고, 이는 흡입 시 폐와 혈중까지 침투가 가능하여 그 유해성이 매우 크다고 발표했다 (Kim *et al.*, 2006). 이와 더불어, Choi (2008)의 결과에 따르면 I/O ratio가 PM_{10} 의 경우 평균 2.7로 실내 PM_{10} 농도가 실외 농도보다 확연히 높았지만, $PM_{2.5}$ 와 PM_1 의 경우에는 각각 0.8~1.6 및 0.7~1.5로 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않는 것으로 보고했다. 또한, 대학 강의실에서 측정된 결과에서 강의실 내의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 농도는 각각 91 및 $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 이는 실외 농도와 비교할 때 대략적으로 1.3~1.5배 정도 높은 값이다 (Suh *et al.*, 2014).

위와 같이 실내 PM_{10} 의 농도가 실외보다 높았다는 것은 실내에 PM_{10} 발생원이 존재한다는 것을 의미한다.

다. 이는 교실 내 조대입자($PM_{2.5}$ - PM_{10})는 주로 내부 발생원에 의해서 형성되고, 반대로 미세입자 ($< PM_{2.5}$)는 외부 발생원에 의한 것임을 시사한다. 또한, 현재까지 국내의 학교 관련 시설에서 측정된 기준에 연구자료들을 비교해 볼 때, PM_{10} 의 농도들은 측정 당시의 기준에는 대부분 만족한 것으로 나타났지만, 새롭게 개정된 “학교보건법”의 농도 ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 비교했을 때는 상당수의 학교들에서 기준치를 초과하는 것을 볼 수 있었고, 이를 관리하기 위한 대책이 시급히 요구되는 실정이다.

4. 영향 인자

4.1 재실자

기존 연구들의 결과에 따르면 교실 내의 PM 농도와 학생 수는 유의한 상관관계가 있고 교실은 다른 실내 공간에 비해 동일면적당 재실 중인 학생 수가 많아 실내공기질이 열악한 상태이다 (Park *et al.*, 2018; Shaughnessy *et al.*, 2006; Braniš *et al.*, 2005). 영월 소재 초등학교에서 수행된 결과에 따르면, 측정된 PM 농도가 다른 지역에 비해 현저히 낮은 것을 볼 수 있는데, 실제로 영월 소재 전체 초등학교 중 50% 이상의 학교가 한 학급당 5명 이하로 이루어져 있어 학생들의 활동으로 인한 발생량이 매우 적기 때문이었고, 실제로 재실 학생 수와 PM 농도가 유의한 양의 상관관계를 띠는 것을 확인할 수 있었다 (Park *et al.*, 2018). 또한, 교실 내 CO_2 농도는 PM 또는 총부유세균과 통계적으로 유의한 양의 상관성을 갖는 것으로 잘 알려져 있다 (Jung *et al.*, 2016, 2010; Yang *et al.*, 2015; Fromme *et al.*, 2007). 이는 학생들의 활동도 및 수가 교실 내의 PM 농도에 영향을 미칠 수 있다는 것을 간접적으로 의미한다.

PM_{10} 에 영향을 미칠 가능성이 있는 환경적 요인 (건축연도, 학급평균인원, 온도, 습도 등)과의 단계선택 중회귀 분석을 수행한 결과를 보면 모델을 설명할 수 있는 설명력이 낮을 뿐만 아니라 통계적으로 유의

한 수준을 갖는 독립변수가 없는 것으로 나타났다 (Jung *et al.*, 2014). 이는 학교 내의 미세먼지에 영향을 미치는 주요인자는 환경적인 요인보다는 재실자(학생 등)의 생활 패턴과 같은 활동도가 학교 실내 PM₁₀에 더 많은 영향을 미친다는 것을 의미한다. 또한, 서울 안의 초등학교를 대상으로 조사한 결과에 따르면 PM₁₀의 실내외 농도비(indoor/outdoor concentration ratio: I/O ratio)는 1 이상으로 나왔고, 학교 실내외 PM₁₀의 결정계수(r^2)를 산정한 결과 0.53~0.67로 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다 (Yang *et al.*, 2015). 이는 학교 실내 PM₁₀은 외부 대기질과 내부 발생원에 모두 영향을 받지만 내부 발생원이 더 많은 영향을 미친다는 것을 의미한다.

실내외 미세먼지 농도의 변화 추이를 동시에 분석한 결과, 시간에 따른 실내 미세먼지 농도의 변화가 실외보다 더 시간의 변화에 따른 변동폭이 더 크다는 것을 밝혀냈고, 입자의 크기가 클수록 농도의 변이 차이는 더 큰 것을 확인할 수 있었다 (Choi, 2008). 게다가 학생들이 활발히 활동하는 쉬는 시간 및 청소 시간에는 미세먼지의 농도가 확연히 증가하다가 수업 시간에는 감소하는 반복적인 패턴을 볼 수 있었다. 게다가, 실내 PM_{2.5}/PM₁₀ 값을 학생들의 활동도로 비교해 본 결과, 활동도가 낮을 때 PM_{2.5}/PM₁₀ 값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다 (Choi, 2008). 이는 재실자의 활동도는 PM_{2.5}와 같은 미세입자(<PM_{2.5}) 보다는 거대입자(PM_{2.5} - PM₁₀)의 농도 증가에 더 큰 영향을 미친다는 것을 암시한다. 즉, 담배 연기 및 취사 등의 연소가 없는 학교 교실 내에서는 PM_{2.5} - PM₁₀ 영역의 거대입자는 재실자의 활동과 상관관계가 크다 (Braniš *et al.*, 2005; Luoma and Batterman, 2001). 이와 더불어 PM은 사람 자체에서도 발생된다 (Park, 2018; Fadeyi *et al.*, 2013). 사람의 피부는 분당 20만에서 60만 개의 피부 조직이 벗겨져 공기 중에 배출되는데, 이들 대부분은 비교적 큰 입자인 PM₁₀에 해당된다 (Park, 2018; NASEM, 2016; Pham *et al.*, 2015).

학교 실내의 PM 농도는 학생들의 활동 및 특성 등

에 따른 차이에서 발생된다. 외부에서 유입된 미세먼지는 재실자의 활동에 의해서 실내에서 재비산되는 것으로 보고된다 (Partti-Pellinen *et al.*, 2000). 실제로 학생들이 교실에 가득 차면 PM₁₀과 PM_{2.5}가 각각 9%와 7% 상승한다고 하였고 이는 실내 재실자가 많을수록 미세먼지 농도가 높아짐을 의미한다 (Park *et al.*, 2018). 이러한 결과는 다중이용시설에서도 확인할 수 있었는데, 미세먼지 농도는 다중이용시설의 이용자가 증가할수록 증가한다고 보고됐다 (Lee *et al.*, 2013). 게다가, 학교 내의 PM₁₀의 농도는 청소, 체육 활동, 등하교 시 외부로부터의 유입과 같은 학생들의 활동도에 따라서도 좌우되고, 수업을 받고 있는 학생들의 학년(Academic grade)에 따라서도 PM 농도가 달라지는 것으로 알려져 있다 (Sohn *et al.*, 2006a; Jung *et al.*, 2005; Poupard *et al.*, 2005). 또한, Yang *et al.* (2005)의 연구에 따르면 수업이 진행됨에 따라 PM₁₀의 농도는 줄어드는 경향을 나타내었고, 이는 학생들의 활동으로 인하여 재비산되는 PM₁₀의 농도가 줄어들기 때문이다. Jung *et al.* (2010)의 연구에 따르면 활동량이 많은 초등학교 (69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 21.9%) 교실 내의 미세먼지 농도 및 기준 초과율이 중학교 (67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 14.6%) 및 고등학교 (63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 16.6%)에 비해 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 게다가 일부 연구에서는 재실자의 수가 같아도 신체활동의 정도에 따라 거대입자의 기여도가 크다는 것을 확인할 수 있었고 (Choi *et al.*, 2006), 학년이 올라감에 따라 실내 PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도가 증가하는 것을 볼 수 있었다 (Park *et al.*, 2020). 이와 달리, Jung *et al.* (2014)은 수원지역 초등학교를 대상으로 학급 평균 인원과 실내 PM₁₀의 상관성 분석을 수행하였지만 특별한 상관성을 확인하지 못했다. 이와 같은 이유는 학교 실내외의 환경 조건이 동일한 상태에서 학급 인원수만을 변화시키면서 실험이 진행되어야만 그 상관성을 찾을 수 있지만, 이는 현실적으로 불가능한 조건이기 때문에 학급 인원수가 실내 PM₁₀의 농도에 미치는 영향보다 환기 및 주변 외기의 오염 수준 등이 상대적으로 더 크게 학교 내 실내 PM₁₀ 농도에 영향을 미쳤기 때문으로

판단된다. 선행 연구의 결과들을 종합적으로 보면 활동도가 높은 초등학교의 경우 농도와 초과율이 상대적으로 높기 때문에 청소 및 환기 등을 보다 적극적으로 활용하여 관리할 필요성이 있다.

청소의 경우, 청소 활동을 통하여 실내의 미세먼지를 줄일 수 있다고 보고되고 있으나(Suh *et al.*, 2014), 일부 연구에서는 청소 시 PM₁₀의 재비산으로 인하여 청소 활동이 진행되는 동안 실내의 PM₁₀ 농도가 증가되는 것으로 나타났는데, 이때 크게 영향을 받는 입자의 크기는 PM_{2.5} - PM₁₀ 영역의 거대입자이다(Choi *et al.*, 2006). 또한, 청소 활동으로 인해 비산 또는 감소되는 PM₁₀의 농도 수준은 청소하는 방법에 따라 그 차이가 있는 것으로 알려져 있다(Cha, 2011). 따라서 청소 활동을 하는 동안에는 환기가 필수적으로 수행되어야 하며, 실내에 존재하는 PM의 재비산을 최소화할 수 있는 청소 방법이 강구되고 실행되어야 한다.

4.2 교실 용도 및 높이

울산지역의 155개 학교 내의 일반 교실 및 특별실(과학실험실, 컴퓨터실)의 PM 농도를 측정된 결과, 학생들의 활동이 활발하게 이루어지는 일반 교실(71 µg/m³)이 특별실(57 µg/m³)에 비해 통계적으로 높은 PM 농도를 나타내는 것을 확인했다(Jung *et al.*, 2010). 이와 유사한 결과는 Yang *et al.* (2015)의 연구에서도 볼 수 있었는데, 일반 교실(44 µg/m³)에서 측정된 PM₁₀의 농도가 특별실(41 µg/m³)에서 측정된 값에 비해 다소 높게 나타났다. 그리고 교실과 특별실을 대상으로 PM₁₀의 농도를 비교한 다른 연구에서도 모든 등급의 학교 교실에서 농도가 유의한 차이를 보였고, 교실이 특별실보다 조금 높은 농도를 나타내는 것을 볼 수 있었다(Jung *et al.*, 2015). 이는 일반적으로 우리나라 학생들은 대부분의 수업을 일반교실에서 받고, 과학수업이나 컴퓨터 관련 수업을 받을 때만 특별실로 이동하여 수업을 받기 때문에 학생들의 사용빈도에 의한 것으로 판단된다. 대학건물 안에 다양한 장소에서 TSP의 평균 농도를 측정된 결과, 복

도(103 µg/m³), 강의실(96 µg/m³), 실험실(85 µg/m³), 식당(36 µg/m³) 순으로 높게 나타났다(Suh *et al.*, 2014). 이때 실외의 평균 농도는 65 µg/m³로서, I/O ratio를 계산하면 식당을 제외한 모든 대상 실내 장소에서 실내 TSP의 농도가 실외보다 높게 나오는 것을 볼 수 있었다. 그리고 동일한 대학 내의 장소에서 TSP를 측정하여도 각 지점의 입경범위별 최대 농도는 상당히 상이하게 나타났고, 입경분포 형태도 실외(일반적으로 대기 입자의 입경분포는 이산형(Bimodal) 분포를 띠)과 비교하였을 때 다소 상이한 것을 확인할 수 있었다. 이는 다양한 실내 PM 발생원과 환기 여부 및 청소 상태 등이 실내 PM 농도 및 입경분포에 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다.

일부 연구에서는 동일한 교실 내에서 측정 위치에 따른 PM 농도의 차이를 살펴보고 바닥에서 측정된 PM 농도가 1.7m 높이에서 측정된 PM 값보다 높게 나왔다(Park *et al.*, 2018). 이는 초등학교와 성인이 동일한 실내 공간 안에 머물러도 초등학교가 더 많은 피해를 받을 수 있다는 것을 시사한다. 따라서, 학교 교실 내에 존재하는 실내 공기오염물질의 종류 및 농도는 교실의 용도 및 물리적인 환경 조건에 의해서도 상이하게 달라질 수 있다. 이에 따라 학교 교실 내 공기질을 보다 효율적으로 관리하기 위해서는 교실의 용도에 따른 다양한 관리 방법 및 가이드라인 등의 제시가 필요하다. 그리고 학교 내의 환기를 보다 효율적으로 가동하기 위해서는 재질자수, 사용빈도, 교실 특성 등을 고려한 탄력적인 환기 및 저감방안의 수립 등이 요구된다(Jung *et al.*, 2015). 또한, 공기청정기를 설치하고 사용하는 데 있어서 설치 위치 및 높이 등이 그 효율성에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 관련 분야에 대한 연구를 보다 활발히 진행하여 저비용으로 고효율을 얻을 수 있는 설치 및 사용법 등에 대한 가이드라인의 제시가 요구된다.

4.3 건축연도

일반적으로 실내 공기오염물질 중 VOCs 및 aldehyde류는 오래된 건물보다 신축건물에서 더 많이 방

출되며 (Kang *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2015, 2009; Jeung and Choi, 2007), 이는 건축연도가 경과할수록 자재 및 가구 등에서 방출되는 양이 줄어들기 때문에 실내 공간에서의 그 농도가 감소한다. 그러나 미세먼지의 경우에는 건축연도에 따른 차이가 없거나 오히려 건물 및 가구의 노후화 등으로 인하여 건축연도가 경과할수록 증가할 것으로 보고되고 있다 (Kang *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2013, 2010; Son *et al.*, 2006b). 국내의 55개 보육시설, 초, 중, 고등학교를 대상으로 건축연도에 따른 CO, CO₂, PM₁₀, TBC, TVOCs, HCHO의 농도를 조사한 결과, CO, TVOCs, HCHO는 1년 내 재건축 및 리모델링된 건물에서 통계적으로 높은 농도가 나오는 것을 확인했지만, PM₁₀ 등은 건축연도에 따른 유의한 관계를 확인할 수 없었다 (Yang *et al.*, 2009). Jung *et al.* (2014)도 건축연도와 실내 PM₁₀ 농도와의 상관성 분석을 수행하였지만, 상관성이 없는 것으로 조사되었다. 이와 유사한 결과는 학교 건축물의 노후화에 따른 실내 공기 오염도를 비교한 결과에서도 볼 수 있었는데, 노후화에 따른 뚜렷한 실내 PM₁₀의 농도 차이는 확인할 수 없었다 (Sohn *et al.*, 2006a). 그러나 일부 논문에서 이와 다른 결과가 나타나기도 했다. Kang *et al.* (2014)이 학교 실내의 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도를 건축연도 3년을 기준으로 전후로 나누어 분석한 결과, 3년 이후가 3년 이내보다 PM₁₀의 경우 평균 46% 정도 높게 나타나는 것으로 보고하였다. 그러나 이 논문에서도 PM_{2.5}의 경우에는 그 차이를 확인할 수 없었다.

앞에서 설명한 것처럼 실내에 특별한 발생원이 없을 경우 재실자의 활동으로 인하여 거대입자(PM_{2.5}-PM₁₀)의 농도가 증가하는 반면, PM_{2.5}의 농도는 학교 주변 대기에 더 많은 영향을 받는다 (Choi, 2008). 따라서, 건물의 노후화 등으로 인한 창문과 벽의 틈으로 인하여 실내 PM_{2.5}의 농도는 거대입자에 비해 주변환경에 더 많은 영향을 받을 것으로 판단된다 (Liu *et al.*, 2003; Mosley *et al.*, 2001; Thornbyrg *et al.*, 2001). 그러나 이와 같은 건축연도에 따른 실내 PM_{2.5}와 PM₁₀의 기여 관계를 보다 명확하게 파악하기 위

해서는 보다 많은 학교를 대상으로 연구를 집중적으로 수행하여야만 할 것이다.

4.4 실내 환경 요인

미세먼지는 실내의 온도, 습도 등의 환경 요인에 통계적으로 유의하게 영향을 받는 것으로 보고되고 있다 (Jung *et al.*, 2010). 다중이용시설을 대상으로 수행한 연구 결과에 따르면, 온도와 습도에 대해서 PM은 음의 상관관계를 formaldehyde는 양의 상관관계를 나타냈다 (Lee *et al.*, 2013). 이는 추운 겨울에는 낮은 온도로 인하여 환기가 부족해지고 이로 인하여 실내 미세먼지 농도가 증가하는 것으로 사료된다. 그러나 이와 달리 유아교육기관에서 수행한 결과에 따르면 PM₁₀은 온도와 상관관계를 나타내지 않았지만, PM_{2.5} ($r=0.373$)와 PM₁ ($r=0.416$)의 경우 습도와의 다소 높은 상관관계를 확인할 수 있었다 (Choi *et al.*, 2006). 이와 더불어 PM₁₀은 CO₂와도 비교적 큰 상관성 ($r=0.67$)을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 독일 뮌헨의 64개 학교에서 진행된 연구에 따르면 상대습도와 CO₂가 10% 및 100 ppm 증가할 때마다 PM_{2.5}는 각각 1.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 2.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 증가하는 것으로 알려졌다 (Fromme *et al.*, 2007).

4.5 외부 환경 요인

기존에 수행된 다양한 연구 결과에 따르면 학교 내의 PM₁₀ 농도는 계절에 따라 통계적으로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다 (Jung *et al.*, 2015; Kang *et al.*, 2014, Yang *et al.*, 2009; Son *et al.*, 2008). 또한, 월별에 따른 초등학교 내의 PM₁₀ 농도를 분석하였지만, 계절에 따른 특이성은 없는 것으로 나타났다 (Jung *et al.*, 2014). 그러나 온도가 높은 여름철의 경우 I/O ratio가 높게 나타나는데, 이는 냉방기 작동으로 인하여 자연 환기가 활발히 이루어지지 않았기 때문인 것으로 보고하고 있다. 게다가 여름의 경우에는 온도와 습도를 조절하기 위하여 에어컨을 가동시키는데, 이를 효율적으로 작동시키기 위하여 창문 등을 모두 밀폐시킴으로 나타난 결과로 판단되고, 외부에서 유입된 미세

먼지가 재실자의 활동으로 인하여 재비산되어 나타 난 결과로 판단된다. 그러나 이와 반대로, Kang *et al.* (2014)의 결과에 따르면 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 봄 (1.26, 0.90), 가을철 (0.92, 0.85)의 I/O ratio가 여름철 (0.51, 0.37)보다 높은 것으로 보고되고 있다. 이는 학교가 위치한 지역적인 특성 및 일부 자료의 특이성(예, 연구 수행기간 중 여름철 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 실외 대기질 농도가 봄철과 가을철에 비해 약 두 배 가까이 높음)에 의한 것으로 판단된다. 또한, 대학도서관에서 수행된 연구 결과에 따르면 실내 PM 농도는 황사 시 외기의 유입에 의하여 크게 영향을 받는 것으로 나타났다 (Kim *et al.*, 2008). 미국의 32개 학교를 대상으로 진행한 연구에 따르면 학교 실내 $PM_{2.5}$ 에 영향을 미치는 주요 발생원의 공헌도는 계절에 따라 미치는 영향의 정도는 다르지만, 이차오염물질이(secondary pollutant)가 가장 크다고 발표했다(Carrion-Matta *et al.*, 2019).

산업단지 등의 주변환경이 학교 실내공기질에 미치는 영향을 평가하기 위하여, Kang *et al.* (2014)은 시화산단 내와 인근에 위치한 학교의 실내공기질을 평가하였다. 그 결과, 산단 내외의 대기 중 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도의 차이는 10% 내외로 비슷했지만, 산단 내에 위치한 교내의 PM_{10} 농도($31 \mu\text{g}/\text{m}^3$)는 산단 외에 위치한 교내의 PM_{10} 농도($23 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 약 30% 정도 높은 것으로 나타났다. 그러나 동일한 분석을 $PM_{2.5}$ 를 대상으로 수행했을 때는 그 차이를 발견할 수 없었다. 그러나 이와 비슷한 연구를 수행한 영월 지역의 초등학교의 경우에는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 모두에서 학교주변의 발생원 존재에 따른 학교 실내의 농도차이는 뚜렷하게 확인할 수 없었다(Park *et al.*, 2018). 그리고 이는 겨울철 영월의 경우에는 실외 발생원에 의한 영향보다는 실내 발생원 등의 다른 요인에 의한 영향이 크다고 언급했다. 게다가 이 논문에서는 실내 PM_{10} 중 $PM_{2.5}$ 의 비율을 산정했는데, 그 결과 외부 발생원의 존재 유무와 상관없이 $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio가 0.4 미만으로 나타났고, 이는 영월 초등학교 내의 미세먼지의 경우 그 발생원이 실내에 있다는 것을 의미

한다.

이와 상반되는 연구 결과들도 존재하는데, Choi (2008)에 따르면 학교 주변의 대기 오염원이 존재할 경우 교실 내부의 $PM_{2.5}$ 이하의 미세먼지 농도에 큰 영향을 미칠 수 있다고 발표했고, 이 경우 외부 오염원으로는 매립지와 공단지역을 주목했다. 게다가 이들의 연구에서는 PM의 크기에 따른 실내외 농도 사이의 r^2 를 산정했는데, 상대적으로 입자의 크기가 작은 $PM_{2.5}$ (0.903), PM_1 (0.924)이 흡입성먼지(0.213)와 PM_{10} (0.474)보다 회귀모델로 더 잘 설명되는 것을 볼 수 있었고, 입자의 크기가 작은 $PM_{2.5}$ 와 PM_1 이 실내외의 농도 차이가 더 적은 것을 알 수 있었다. 이와 유사한 결과는 유아교육기관에서 수행한 Choi *et al.* (2006)의 연구에서도 확인할 수 있었는데, 실내 PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 과 실외의 PM_{10} 농도를 비교한 결과 $PM_{2.5}$ ($r=0.95$)와 PM_1 ($r=0.94$)은 실외 PM_{10} 과 높은 상관관계를 가지지만 PM_{10} ($r=0.84$)은 상대적으로 더 낮은 상관관계를 갖는 것으로 밝혀졌다. 또한, Park *et al.* (2020)의 연구에서도 실내외 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 사이의 r 은 각각 0.51과 0.09로서 $PM_{2.5}$ 는 실내외 농도가 통계적으로 유의한 상관성을 가지고 있지만 PM_{10} 은 상관성이 없는 것으로 나타났다. 그리고 그들의 연구에서 이와 같이 상관성이 낮아지는 이유는 실험기간 동안의 공기청정기의 가동에 의한 것으로 확인됐다. 실제로 공기청정기 가동 시 ($PM_{2.5}$: $r=0.52$, PM_{10} : $r=0.06$)보다 미가동 시의 실내외 공기질의 상관성 ($PM_{2.5}$: 0.78, PM_{10} : 0.49)이 크게 향상되는 것을 확인할 수 있었고, 여전히 $PM_{2.5}$ 의 상관성이 PM_{10} 의 상관성보다는 높은 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 실내 $PM_{2.5}$ 와 PM_1 의 경우 대부분 학교 주변 대기 오염원에 의해 기인된 것으로 판단된다 (Kim *et al.*, 2006). 울산지역에서 측정된 연구에서도 이와 유사한 결과를 볼 수 있었는데, 공단지역 내 학교 내 미세먼지 농도($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 도심지에 위치한 학교 내 미세먼지($53 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 통계적으로 유의하게 높게 나오는 것을 확인할 수 있었고, 유지기준 초과율(23%)도 높아 학교 내 미세먼지 농도는 주변 공

단의 영향을 받는다고 보고하고 있다. 그리고 주거 지역에 위치한 학교 교실 내의 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도는 상업지역 내에 위치한 학교 교실 내의 농도에 비해 현저히 낮은 것으로 보고되고 있다(Park *et al.*, 2020). 또한, Roosbroeck *et al.* (2007)은 도로변과 인접한 학교와 멀리 떨어진 학교를 대상으로 학생들의 개인 노출평가를 수행했는데, 그 결과 도로변에 인접한 위치에 있는 학교들의 학생들의 개인 노출 농도(soot: 37%, NO_x: 37%)가 멀리 떨어진 학교의 학생들의 결과에 비해 높게 나타났다.

학교를 둘러싸고 있는 주변 환경을 빌딩, 산, 도로로 구분하여 초등학교 내 오염물질의 농도를 측정했을 때, 그 결과 도로변에 위치한 학교 교실 내 PM₁₀ 농도가 산이나 빌딩에 둘러싸인 학교 내 PM₁₀ 농도보다 낮게 나오는 것을 확인할 수 있었고, 이는 산이나 빌딩이 대기 오염물질 흐름의 장벽 역할을 해서 산이나 빌딩에 둘러싸인 학교의 외기 농도가 높기 때문이라고 보고했고, 이때 실제로 그들이 학교 외부에서 측정된 PM₁₀ 농도는 주변의 AQMS (air quality monitoring system)에서 측정된 결과보다 높았던 것으로 알려졌다(Yang *et al.*, 2015). 그러나 동일한 연구 그룹에 의해서 수행된 이전의 논문에서는 실내 PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도는 측정 장소 주변에 교통량이 많고 교통체증이 자주 생기는 도로가 존재하면 그 영향을 받아 증가하는 것으로 보고되고 있다(Oh *et al.*, 2014a). 즉, 도로는 대표적인 공기오염물질 배출원이지만 도로의 크기, 교통량, 개방성, 지형, 풍향 및 풍속 등에 따라서 주변 지역의 실내공기질에 미치는 영향은 상이하다는 것을 알 수 있다.

5. 저감 방안

실내 공기오염물질을 저감하기 위한 방법은 다음과 같이 크게 3가지로 구분된다. 1) 실내 공기오염물질 발생원을 원천적으로 제거하는 방법, 2) 배관이나 냉난방공조시스템 등의 구조적인 문제를 해결하는

방법, 3) high-efficiency particulate air (HEPA) filter와 같이 오염물질을 직접적으로 제거하는 방법이다(Park *et al.*, 2017; Cha, 2011). HEPA filter를 사용하면 실내 PM 농도가 약 25%~50% 감소된다고 알려져 있다(Butz *et al.*, 2011). HEPA filter의 경우, 공기를 통한 감염 관리에 효율적인 수단으로 평가되어 현재 전 세계의 병원에서 많이 사용되고 있다(Bae and Ji, 2013). 그러나 HEPA filter와 같은 고성능 필터의 경우 압력 손실로 인한 환기에너지 비용의 증가라는 근본적인 문제를 가지고 있고, 새로운 필터의 구입비용, 교체를 위한 인건비, 사용 기간이 끝난 필터에 대한 폐기 비용 및 방법 등의 문제점들을 함께 갖고 있다. 따라서, 보다 최근에는 이와 같은 문제점들을 최소화하기 위하여 정전필터, 플라즈마와 같은 기술들이 소개 및 사용되고 있고 이들에 장단점에 대한 자세한 설명은 기존 논문에서 찾을 수 있다(Bae and Ji, 2013). 특히, 다양한 연구 논문들에서 입자상 및 가스상 물질을 제거하기 위한 미래의 filter 기술의 발전 방향을 PM_{2.5} 및 나노입자를 줄이기 위한 고성능화와 운전에너지를 최소화하기 위한 저에너지 기술로 뽑고 있다(Son *et al.*, 2016; Bae and Ji, 2013). 또한, 실내에서 발생하는 거대입자의 경우에는 실내 활동도에 의한 기여도가 크므로 그 발생원을 직접적으로 저감시켜야 된다. 그 방법으로는 백묵 사용, 질판지우개의 청소 방법, 바닥 청소 상태, 청소 방식, dust mat 사용 등의 개선이 요구되어진다(Jung *et al.*, 2010; Choi, 2008).

실내 공기오염물질로부터 실내공기질을 개선하기 위해서는 환기와 공기청정기가 동시에 적절히 가동되는 것이 중요하다(Oh *et al.*, 2014a). 2017년 5월 기준으로 국내 초중고 교실 안의 공기청정기 설치율은 26%였고(Park, 2019), 현재 순차적으로 모든 교실에 공기청정기를 도입하기 위하여 교육부 및 지자체 등이 부단히 노력하고 있다. 환기는 신선한 외기를 도입하여 실내공기 중 오염물질의 농도를 낮추는 개념으로서 실내 CO₂ 농도 저감 측면에서 유리하다. 이에 반해 공기청정기는 실내공기 중에 포함되어 있는 오염물질을 필터 등을 활용하여 직접적으로 제거함으로

건물의 환기 에너지 측면에서는 유리하지만 CO₂ 농도를 줄이거나 신선한 산소를 공급하는 데 있어서는 그 한계점이다(Choi *et al.*, 2019). 게다가 공기청정기의 효율은 건물의 구조 및 필터의 성능에 따라 영향을 받는다. 또한, 실외에서 유입되는 오염물질의 농도가 높은 경우에는 환기만으로는 실내공기질을 효율적으로 개선할 수 없고, 학교 교실의 창문만을 이용한 자연 환기 방식으로는 일정량의 공기를 지속적으로 유입 및 유출시킬 수 없기 때문에 환기율은 상대적으로 부족할 수 있다(Oh *et al.*, 2014a; Yang, 2014). 따라서, 효율적인 실내공기질 관리를 위해서는 AQMS 등에서 제공하는 학교 주변의 대기질 상황을 모니터링하고 이에 맞는 개선 대책이 필요하다. 예를 들어, 미세먼지의 농도가 높은 날 장시간 창문 개방을 통한 자연환기를 수행할 경우, 건강에 오히려 악영향을 미칠 수 있다(Park *et al.*, 2018; Choi *et al.*, 2017). 게다가, 외부의 바람이 약할 때는 자연환기만으로 실내공기질을 개선하기에는 그 한계점을 가지고 있다(Park *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2008) 따라서, 학교 주변의 대기질이 기준치를 초과하거나 대기가 정체되어 있을 때는 창문 및 출입문 등을 닫고 공기청정기 등을 가동하는 것이 보다 효율적이다. 그러나 지속적인 밀폐로 인한 CO₂ 증가가 나타나는 실내에서는 공기청정기의 가동보다는 기계환기 또는 자연환기를 통한 실내공기의 외부 배출 및 교환이 보다 효율적일 것이다. 이와 더불어 최근에는 에너지 절감 및 실내공기질 개선을 동시에 이루기 위하여 실내의 공기질을 비교하여 환기시스템 및 공기청정기가 자율적으로 작동하는 인공지능 알고리즘 등에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다(Choi *et al.*, 2019; Son *et al.*, 2016).

이와 별개로, 노후화된 건물에 대해서는 리모델링을 실시하여 틈새 등을 통한 미세입자의 유입을 최소화해야 할 것이다(Choi, 2008). 또한, 실내 공기오염물질 중 VOCs 및 aldehyde류의 경우에는 “오염물질 다량 방출자재”에 포함되어 있지 않는 제품 또는 환경마크 인증을 받은 제품을 사용하는 것이 바람직하며, 지속적인 환기 및 베이크-아웃 등을 수행하고 기

계환기 설비를 갖추고 운영하는 것이 바람직하다(Lee *et al.*, 2013). 그리고 초등학교의 경우, 다른 등급의 학교(중학교, 고등학교)에 비해 총부유세균도 높게 나타나기 때문에 이를 해결하기 위한 적절한 방법도 제시되어야 한다(Jung *et al.*, 2010). 그러나 위에서 언급한 것처럼 실내공기질은 주변 환경, 재실자 및 건물 특성 등과 같은 다양한 요인들이 서로 상충하는 매우 복잡한 문제이다. 그리고 동일한 학교 내에 존재하는 교실과 특별실, 체육관 등도 장소에 따라 오염물질의 특성 및 농도가 상이하기 때문에 이에 따른 맞춤형 관리가 절실히 요구된다. 따라서 실내공기질을 개선시키기 위해서는 적절한 정책과 이를 뒷받침하기 위한 기술들의 개발이 상호 조화를 이루어야 될 것으로 판단된다.

6. 한계점 및 향후 연구 방향

기존에 진행된 대다수의 연구들은 물리적, 재원적인 한계로 인하여, 서로 다른 방식의 측정법, 측정 기간, 측정 시간 등을 사용하여 연구를 진행하였다. 특히, 동일한 연구 안에서도 각각의 학교 및 측정지점마다 서로 다른 시간 때에 측정된 연구도 많기 때문에 절대적으로 그 결과들을 분석하기에는 그 한계점들을 내포하고 있다. 또한, 일부 연구논문의 경우, 시료채취를 학생들의 하교 후에 진행함에 따라서 실내 미세먼지의 농도 값이 상대적으로 저평가되었을 가능성이 있다. 게다가 상당수의 많은 연구들이 물리적인 한계로 인하여 동일 시간 내에 많은 수의 데이터 확보를 위하여 광산란법을 주로 사용했는데, 광산란법의 경우에는 그 장비가 PM 농도를 산출하는 기본 원리의 특성상 시료채취 장소 및 위치에 따라 상이한 보정계수가 요구되므로 광산란법을 이용한 측정 시에는 항상 중량법 및 베타레이 등의 표준기기를 이용하여 적절한 보정이 함께 이루어져야 한다(Kim *et al.*, 2010b; Choi *et al.*, 2006). 그러나 이와 같은 보정을 걸쳐서 진행된 연구는 많지 않았고, 이에 따라 측

정된 결과 값이 사용된 장비 특성에 따라 고평가 또는 저평가되었을 가능성이 내포되어 있다.

현재까지 대부분의 학교 실내 미세먼지(PM)에 관한 연구는 PM₁₀을 대상으로 연구가 진행되었다(Jung *et al.*, 2014). 그러나 최근에는 PM₁₀보다는 직경이 작은 PM_{2.5}에 사회적인 관심이 더 모이고 있고 관련법들도 건강에 더 큰 영향을 미친다고 알려져 있는 PM_{2.5}에 집중되고 있다(Neuberger *et al.*, 2004; Schwartz *et al.*, 1996). 게다가 비록 가정집을 대상으로 한 연구이기는 하지만 전 세계 77개의 연구 논문을 총괄 요약한 논문에 따르면, 실내외의 PM 농도의 비율 및 침투율을 비교해 볼 때, 건축 구조물은 PM₁₀이나 UFP(Ultrafine particle, 공기역학적 직경이 0.1 μm 이하)에 비해 PM_{2.5}의 침투에 취약한 것을 알 수 있었다(Chen and Zhao, 2011). 따라서, 추후에는 PM_{2.5}에 대한 보다 많은 연구가 진행되어야 한다(Kim *et al.*, 2008). 그리고 기존의 연구들은 실내 및 실외 공기질을 구분하여 수행한 연구가 대부분이다. 그러나 실질적인 실내공기질의 개선은 실내외 공기질을 동시에 측정하고 상관성 등을 규명함으로써 실외 대기질이 실내공기질에 미치는 영향을 명확하게 파악함으로써 이를 수 있을 것이다.

비주거 실내 환경에 대한 PM 측정 및 노출에 대한 연구는 현재까지 전 세계적으로 많이 부족한 실정이다(Park, 2018). 우리나라의 경우에도 대부분의 연구들은 학교 실내외의 공기질 평가에 국한되어 있다(Yang, 2014). 게다가 외국에 비해 짧은 연구 기간 내에 많은 학교들을 대상으로 연구가 진행된다 보니 자료의 재현성과 같은 한계점 등에 노출되어 있다. 따라서, 동일한 학교들에 대한 지속적이고 집중적인 연구가 진행되어야 보다 명확한 실태 분석이 이루어질 것으로 판단된다. 그리고 보다 효율적으로 학교 실내공기질을 관리하기 위해서는 공기청정기 및 환기 조건 등에 따른 저감 효율을 고려한 연구가 추가적으로 진행되어야 보다 큰 효율성을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

7. 결 론

최근 들어 학교 내 미세먼지의 심각성을 인식하고 중앙부처 및 지방자치에서는 미세먼지에 의한 피해를 최소화하기 위해 공기청정기 및 미세먼지 측정기들을 전국적으로 설치하고 있는 실정이다. 그러나 현재까지 연구 결과들로서는 그들의 효율성 및 적절성 등을 과학적으로 입증하기에 그 한계가 있다. 비록 현재까지 측정된 많은 결과들이 기준치 이하를 나타내고 있으나 미세먼지는 그 특성상 유지 기준을 초과하지 않는다고 하더라도 초등학교와 같은 민감군에게 심각한 건강상 문제를 야기시킬 수 있다. 또한, 보육시설의 경우 환경부가 규정하고 있는 “실내공기질 관리법”이 적용되고 있는 시설은 전체 보육시설 중 약 2%에도 미치지 못하고 있는 실정이다(Park, 2014). 따라서, 관련법들에 의해 적용받지 못하고 있는 민감군이 활동하는 취약 시설에 대한 법의 확대 및 개정이 조속히 요구되고, 이와 더불어 국가적인 관심을 통한 지속적이고 체계적인 평가 및 관리 가이드라인의 도출이 절실히 필요하다.

감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT, MOE) and (No. 2019M3E7A1113103).

References

- Bae, G.N., Ji, J.H. (2013) Management policy and control technology for indoor air quality in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 378-389, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572.KOSAE.2013.29.4.378>
- Braniš, M., Řezáčová, P., Domasová, M. (2005) The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concen-

- trations of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ in a classroom, *Environmental Research*, 99(2), 143-149, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2004.12.001>
- Briggs, D.J., Denman, A.R., Gulliver, J., Marley, R.F., Kennedy, C.A., Philips, P.S., Field, K., Crockett, R.M. (2003) Time activity modelling of domestic exposures to radon, *Journal of Environmental Management*, 67(2), 107-120, [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(02\)00159-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(02)00159-7)
- Butz, A.M., Matsui, E.C., Breyse, P., Curtin-Brosnan, J., Eggleston, P., Diette, G., Williams, D., Yuan, J., Bernert, J.T., Rand, C. (2011) A randomized trial of air cleaners and a health coach to improve indoor air quality for inner-city children with asthma and secondhand smoke exposure, *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine*, 165(8), 741-748, <https://doi.org/10.1001/archpediatrics.2011.111>
- Carrion-Matta, A., Kang, C.M., Gaffin, J.M., Hauptman, M., Phipatanakul, W., Koutrakis, P., Gold, D.R. (2019) Classroom indoor PM_{2.5} sources and exposures in inner-city schools, *Environment International*, 131, 104968, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104968>
- Cha, W.J. (2011) The distribution characteristics of PM₁₀ and CO₂ for the soldier's activity in barracks, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 8(2), 117-126 (in Korean with English abstract).
- Chen, C., Zhao, B. (2011) Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor, *Atmospheric Environment*, 45(2), 275-288, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.048>
- Choi, S.J. (2008) The Effect of Outdoor Air and Indoor Human Activity on Mass Concentrations of Size-Selective Particulate in Classrooms, *Journal of Environmental Health and Science*, 34(2), 137-147 (in Korean with English abstract).
- Choi, Y.A., Lee, T.J., Kim, D.S. (2006) Investigation of indoor air quality and characteristics of particulate matters concentration followed by indoor activities in preschool, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 3(3), 237-284 classrooms (in Korean with English abstract).
- Choi, Y.H., Song, D.S. (2019) Control strategy of ventilation system with air filtration mode considering indoor and outdoor air quality in residential buildings, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 31(12), 568-575, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.6110/KJACR.2019.31.12.568>
- Choi, Y.J., Lee, G.Y., Baek, G.H., Kang, N.E. (2017) Difference analysis on indoor air quality by ventilation during sleeping time in University Housing, *Korean Journal of Human Ecology*, 26(6), 609-622, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5934/kjhe.2017.26.609>
- Delfino, R.J., Quintana, P.J.E., Floro, J., Gastañaga, V.M., Samimi, B.S., Kleinman, M.T., Liu, L-J.S., Bufalino, C., Wu, C.-F., McLaren, C.E. (2004) Association of FEV1 in asthmatic children with personal and microenvironmental exposure to airborne particulate matter, *Environmental Health Perspectives*, 112(8), 932-941, <https://doi.org/10.1289/ehp.6815>
- Donaldson, K., Li, X.Y., MacNee, W. (1998) Ultrafine (nanometre) particle mediated lung injury, *Journal of Aerosol Science*, 29(5-6), 553-560, [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(97\)00464-3](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(97)00464-3)
- Fadeyi, M.O., Weschler, C.J., Tham, K.W., Wu, W.Y., Sultan, Z.M. (2013) Impact of Human Presence on Secondary Organic Aerosols Derived from Ozone-Initiated Chemistry in a Simulated Office Environment, *Environmental Science & Technology*, 47(8), 3933-3941, <https://doi.org/10.1021/es3050828>
- Faustman, E.M., Silbernagel, S.M., Fenske, R.A., Burbacher, T.M., Ponce, R.A. (2000) Mechanisms underlying Children's susceptibility to environmental toxicants, *Environmental Health Perspectives*, 108(S1), 13-21, <https://doi.org/10.1289/ehp.00108s113>
- Fromme, H., Twardella, D., Dietrich, S., Heitmann, D., Schierl, R., Liebl, B., Rüden, H. (2007) Particulate matter in the indoor air of classrooms - exploratory results from Munich and surrounding area, *Atmospheric Environment*, 41(4), 854-866, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.053>
- Harada, K., Hasegawa, A., Wei, C.N., Minamoto, K., Noguchi, Y., Hara, K., Matsushita, O., Noda, K., Ueda, A. (2010) A Review of Indoor Air Pollution and Health Problems from the Viewpoint of Environmental Hygiene: Focusing on the Studies of Indoor Air Environment in Japan Compared to Those of Foreign Countries, *Journal of Health Science*, 56(5), 488-501, <https://doi.org/10.1248/jhs.56.488>
- Jang, C.S., Lee, T.J., Kim, D.S. (2006) Classification of pollution patterns in high school classrooms using disjoint principal component analysis, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(6), 808-820 (in Korean with English abstract).
- Jeung, Y.H., Choi, S.J. (2007) Assessment of formaldehyde concentration in indoor and outdoor environments of schools in Incheon, *Korean Journal of Environmental Health*, 33(5), 372-378 (in Korean with English abstract).

- ract).
- Jones, A.P. (1999) Indoor air quality and health, *Atmospheric Environment*, 33, 4539-4564, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00272-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00272-1)
- Jung, J.H., Seo, B.S., Ju, D.J., Park, M.C., Shon, B.H., Phee, Y.G. (2010) Assessment of the Indoor Air Quality at Schools in Ulsan, *Journal of Environmental Health and Science*, 36(6), 472-479 (in Korean with English abstract).
- Jung, J.S., Jeon, H.J., Lee, M.J., Song, H.S., Jung, H.S., Kim, S.M., Lee, W.S., Choi, S.H. (2014) A study on the PM₁₀ and TBC characteristics at elementary school rooms in Korea, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 13(4), 243-250, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.15250/joie.2014.13.4.243>
- Jung, J.S., Park, D.S., Jeon, H.J., Song, H.S., Lee, M.J. (2015) A study of indoor air quality of school classrooms, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 16(5), 3643-3652, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.5.3643>
- Jung, J.W., Lee, H.K. (2005) Improvement strategies for classroom IAQ in elementary schools, *Proceeding of the 39th Meeting of KOSAE, Korean Society for Atmospheric Environment*, 172-173.
- Jung, Y.S., Kwon, L.S., Kim, S.H. (2016) A study on the measurement of indoor air quality of Kindergartens located in Suwon-si, South Korea, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 16(4), 523-529 (in Korean with English abstract).
- Kang, H.J., Jung, G.H., Jung, K.C., Shin, C.H., Kim, D.H. (2014) An analysis of fine particles and aldehyde in air inside and outside the schools in Sihwa industrial complex and neighboring area, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 13(3), 192-199, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.15250/joie.2014.13.3.192>
- Kang, H.J., Jung, G.H., Jung, K.C., Shin, C.H., Kim, D.H. (2016) Comparative analysis of level of VOCs contamination in the indoor and outdoor of school classroom located close to Shihwa industrial complex, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 15(1), 6-13, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.15250/joie.2016.15.1.6>
- Kim, C.H., Moon, M.K., Jang, A.S. (2006) A ergonomic study of school environment and desk/chairs in Incheon metropolitan area, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 25(2), 173-179 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.H., Kim, C.S., Lim, Y.W., Suh, M.A., Shin, D.C. (2010a) Indoor and outdoor air quality and its relation to allergic disease among children: A case study at a primary school in Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 4(3), 157-165, <https://doi.org/10.5572/ajae.2010.4.3.157>
- Kim, J.H., Lee, T.J., Hwang, I.J., Kim, D.S. (2008) Investigation of indoor air quality and the characteristics of particulate matter distribution in a university library, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 5(1), 24-36 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.K. (2016) Seasonal distributions of total airborne bacteria in indoor air in university facilities, *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, 22(1), 1-8 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.J., Kang, H.S., Son, Y.S., Yoon, S.L., Kim, J.C., Kim, G.S., Kim, I.W. (2010b) Compensation of Light Scattering Method for Real-Time Monitoring of Particulate Matters in Subway Stations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(5), 533-542, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2010.26.5.533>
- Klepeis, N.E., Nelson, W.C., Ott, W.R., Robinson, J.P., Tsang, A.M., Switzer, P., Behar, J.V., Hern, S.C., Engelmann, W.H. (2001) The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 11(3), 231-252, <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>
- Koenig, J.Q., Mar, T.F., Allen, R.W., Jansen, K., Lumley, T., Sullivan, J.H., Trenga, C.A., Larson, T., Liu, L.J. (2005) Pulmonary effects of indoor- and outdoor-generated particles in children with asthma, *Environmental Health Perspectives*, 113(4), 499-503, <https://doi.org/10.1289/ehp.7511>
- Landrigan, P.J. (1998) Environmental hazards for children in USA, *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 11(2), 189-194.
- Lee, C.M., Kim, Y.S. (2004) Analysis of research trend for indoor air pollutants and health risk assessment in public facilities, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 1(1), 39-60 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.D., Son, B.S., Kim, Y.S. (2010) A study on indoor air quality in school, *Korean Society for Indoor Environment*, 7(2), 127-134 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.C., Chang, M. (2000) Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong, *Chemosphere*, 41(1-2), 109-113, [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00396-3](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00396-3)
- Lee, S.H., Jeong, S.K., Lee, K.S., Min, K.W., Kim, H.S., Kim, D.S., Kang, Y.J., Bae, S.J. (2013) A study on characteristics of

- indoor air pollutants using regression analysis in public facilities, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 16(2), 123-131 (in Korean with English abstract).
- Liu, D.L., Nazaroff, W.W. (2003) Particle penetration through building cracks, *Aerosol Science and Technology*, 37, 565-573.
- Luoma, M., Batterman, S.A. (2001) Characterization of particulate emissions from occupant activities in offices, *Indoor Air*, 11(1), 35-48, <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2001.011001035.x>
- Marino, M., Seifert, B., Lindvall, T. (1995) *Indoor Air Quality, A Comprehensive Reference Book, Air Quality Monographs, Vol 3*, Elsevier, Amsterdam.
- Meininghaus, R., Kouniali, A., Mandin, C., Cicolella, A. (2003) Risk assessment of sensory irritants in indoor air—a case study in a French school, *Environment International*, 28(7), 553-557, [https://doi.org/10.1016/s0160-4120\(02\)00063-6](https://doi.org/10.1016/s0160-4120(02)00063-6)
- Meng, Q.Y., Turpin, B.J., Korn, L., Weisel, C.P., Morandi, M., Colome, S., Zhang, J.J., Stock, T., Spektor, D., Winer, A., Zhang, L., Lee, J.H., Giovanetti, R., Cui, W., Kwon, J., Alimokhtari, S., Shendell, D., Jones, J., Farrar, C., Maberti, S. (2005) Influence of ambient (outdoor) sources on residential indoor and personal PM_{2.5} concentrations: analyses of RIOPA data, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 15(1), 17-28, <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500378>
- Ministry of Education (MOE) (2019) School Health Act Enforcement Rules, MOE, <http://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9%ED%95%99%EA%B5%90%EB%B3%B4%EA%B1%B4%EB%B2%95%20%EC%8B%9C%ED%96%89%EA%B7%9C%EC%B9%99>
- Mosley, R.B., Greenwell, D.J., Sparks, L.E., Guo, Z., Tucker, W.G., Fortman, R., Whitfield, C. (2001) Penetration of Ambient Fine Particles into the Indoor Environment, *Aerosol Science and Technology*, 34(1), 127-136.
- National Academics of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM) (2016) Health risks of indoor exposure to particulate matter: workshop summary. Ed., 7-58, National Academies Press, Washington D. C., USA.
- Neuberger, M., Schimek, M.G., Horak, Jr. F., Moshhammer, H., Kundli, M., Frischer, T., Gomisecek, B., Puxbaum, H., Hauck, H., AUPHEP-Team (2004) Acute effects of particulate matter on respiratory diseases, symptoms and functions: epidemiological results of the Austrian Project on Health Effects of Particulate Matter (AUPHEP), *Atmospheric Environment*, 38(24), 3971-3981, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.12.044>
- Oeder, S., Jorres, R.A., Weichenmeier, I., Pusch, G., Schober, W., Pfab, F., Behrendt, H., Schierl, R., Kronseder, A., Nowak, D., Dietrich, S., Fernandez-Caldas, E., Lintelmann, J., Zimmermann, R., Lang, R., Mages, J., Fromme, H., Butters, J.T. (2012) Airborne indoor particles from schools are more toxic than outdoor particles, *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, 47(5), 575-582, <https://doi.org/10.1165/rcmb.2012-0139OC>
- Oh, H.J., Nam, I.S., Yun, H., Kim, J., Yang, J. (2014a) Characterization of indoor air quality and efficiency of air purifier in childcare centers, Korea, *Building and Environment*, 82, 203-214, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.019>
- Oh, S.J., Woo, K.S., Lim, J.Y., Park, H.J., Hong, E.J., Son, B.S. (2014b) A study on the concentration of radon for elementary school in Chungnam area, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 13(3), 215-222, <https://doi.org/10.15250/joie.2014.13.3.215>
- Ormstad, H. (2000) Suspended particulate matter in indoor air: adjuvants and allergen carriers, *Toxicology*, 152(1-3), 53-68, [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(00\)00292-4](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(00)00292-4)
- Paek, K.S. (2013) Final Report on International Comparison of Educational Programs and Instruction Days and Hours, Ministry of Education, Seoul, Korea.
- Park, D.W., Kim, S.H., Yoon, H.J. (2017) The impact of indoor air pollution on asthma, *Allergy Asthma Respiratory Disease*, 5(6), 312-319, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.4168/aard.2017.5.6.312>
- Park, H., Wie, J., Kim, S., Song, Y., Ji, Y., Jang, S.Y., Kim, J., Moon, B.K. (2018) Assessment of indoor air pollution at school and home, *Journal of Science Education for the Gifted*, 10(1), 43-54, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.29306/jseg.2018.10.1.14>
- Park, J.E. (2019) Installation of air cleaners in Korean schools, <http://www.mdtoday.co.kr/mdtoday/index.html?no=348132>
- Park, J.H. (2018) Significance of indoor particulate matters, *KIC News*, 21(2), 1-8, <https://www.cheric.org/PDF/PIC/PC21/PC21-2-0001.pdf>
- Park, J.H., Lee, T.J., Park, M.J., Oh, H., Jo, Y.M. (2000) Effects of air cleaners and school characteristics on classroom concentrations of particulate matter in 34 elementary schools in Korea, *Building and Environment*, 167, 106437, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106437>
- Park, J.H., Son, Y.S., Kim, K.H. (2019) A review of traditional and advanced technologies for the removal of particulate

- matter in subway systems, *Indoor Air*, 29, 177-191, <https://doi.org/10.1111/ina.12532>
- Park, J.S. (2014) Indoor air quality in daycare facilities, *Korean Institute of Educational Facilities*, 21(6), 28-32 (in Korean with English abstract).
- Park, S., Park, T., Park, S. Kim, Y., Kwon, M., Jung, J., Lee, C. (2018) Levels of the concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} in elementary school classroom at Yeongwol county, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 17(1), 11-17, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.15250/joie2018.17.1.11>
- Partti-Pellinen, K., Marttila, O., Ahonen, A., Suominen, O., Haah-tela, T. (2000) Penetration of Nitrogen Oxides and Particles from Outdoor into Indoor Air and Removal of the Pollutants through Filtration of Incoming Air, *Indoor Air*, 10(2), 126-132, <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2000.010002126.x>
- Pham, D.M., Boussouira, B., Moyal, D., Nguyen, Q.L. (2015) Oxidization of squalene, a human skin lipid: a new and reliable marker of environmental pollution studies, *International Journal of Cosmetic Science*, 37, 357-365, <https://doi.org/10.1111/ics.12208>
- Poupard, O., Blondeau, P., lordache, V., Allard, F. (2005) Statistical analysis of parameters influencing the relationship between outdoor and indoor air quality in schools, *Atmospheric Environment*, 39(11), 2071-2080, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.12.016>
- Roosbroeck, S.V., Jacobs, J., Janssen, N.A.H., Oldenwening, M., Hoek, G., Brunekreef, B. (2007) Long-term personal exposure to PM_{2.5}, soot and NO_x in children attending schools located near busy roads, a validation study, *Atmospheric Environment*, 41(16), 3381-3394, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.12.023>
- Samet, J.M., Dominici, F., Curriero, F.C., Coursac, I., Zeger, S.L. (2000) Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987-1994, *New England Journal of Medicine*, 343(24), 1742-1749, <https://doi.org/10.1056/NEJM200012143432401>
- Schwartz, J., Dockery, D.W., Neas, L.M. (1996) Is daily mortality associated specifically with fine particles?, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 46(10), 927-939.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (1998) *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Shaughnessy, R.J., Haverinen-Shaughnessy, U., Nevalainen, A., Moschandreas, D. (2006) A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance, *Indoor Air*, 16(6), 465-468, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2006.00440.x>
- Shendell, D.G., Prill, R., Fisk, W.J., Apte, M.G., Blake, D., Faulkner, D. (2004) Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho, *Indoor Air*, 14(5), 333-341, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251x>
- Sohn, J.R., Kim, J.M., Oh, H.J., Nam, I.S., Yang, J.H., Lee, D.H., Lee, B.Y. (2014) Assessment of particles and bioaerosol concentrations at daycare centers in Seoul, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 13(1), 40-48, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.15250/joie.2014.13.1.40>
- Sohn, J.R., Roh, Y.M., Son, B.S. (2006a) The Assessment of Survey on the Indoor Air Quality at Schools in Korea, *Journal of Environmental Health Sciences*, 32(2), 140-148 (in Korean with English abstract).
- Sohn, J.R., Yoon, S.W., Kim, Y.S., Roh, Y.M., Lee, C.M., Son, B.S., Yang, W.H., Lee, Y.G., Choi, H.Y., Lee, J.S. (2006b) A Survey on the Indoor Air Quality of Some School Classrooms in Korea, *Korean Society for Indoor Environment*, 3(1), 54-63 (in Korean with English abstract).
- Sohn, J.Y. (1994) Thermal environment and indoor air quality, *Journal of the Korean Society of Living Environmental System*, 1(3), 171-180 (in Korean with English abstract).
- Son, B.S., Song, M.R., Kim, J.D., Cho, T.J., Yang, W.H., Chung, T.W. (2008) The Study on Concentration of PM₁₀ and Heavy Metal in Public Schools at Chung-Nam Area, *Journal of the Environmental Sciences*, 17(9), 1005-1013 (in Korean with English abstract).
- Son, J.Y., Lee, J.T., Kim, K.H., Jung, K., Bell, M.L. (2012) Characterization of fine particulate matter and associations between particulate chemical constituents and mortality in Seoul, Korea. *Environmental Health Perspectives*, 120(6), 872-878, <https://doi.org/10.1289/ehp.1104316>
- Son, Y.S., Jeong, J.H., Lee, H.J., Kim, J.C. (2016) A novel control system for nitrogen dioxide removal and energy saving from an underground subway stations, *Journal of Cleaner Production*, 133, 212-219, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.116>
- Son, Y.S., Salama, A., Jeong, H.S., Kim, S., Jeong, J.H., Lee, J., Sunwoo, Y., Kim, J.C. (2013) The effect of platform screen doors on PM₁₀ levels in a subway station and a trial to reduce PM₁₀ in tunnels, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 7(1), 38-37, <https://doi.org/10.5572/ajae.2013.7.1.038>
- Suh, J.M., Bin, W., Jang, S.H., Park, J.H., Choi, K.C. (2014) Characteristics of size-segregated mass concentrations of

- indoor aerosol particles in university buildings, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 24 (4), 453-461, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2014.24.4.453>
- The Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (2018) *Education at a Glance 2018*, OECD Publishing, Paris, France.
- Thornburg, J., Ensor, D.S., Rodes, C.E., Lawless, P.A., Spark, L.E., Mosley, R.B. (2001) Penetration of Particles into Buildings and Associated Physical Factors. Part I: Model Development and Computer Simulations, *Aerosol Science and Technology*, 34(3), 284-296.
- Uhde, E., Salthammer, T. (2007) Impact of reaction products from building materials and furnishings on indoor air quality - A review of recent advances in indoor chemistry, *Atmospheric Environment*, 41(15), 3111-3128, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.05.082>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2000) Indoor air quality (IAQ) tool for schools, IAQ coordinator's guide 2nd ed, EPA, http://widit.knu.ac.kr/epa/ebtpages/Air/Indoor_Air_Pollution/siteout/s1out25.html
- U.S. National Academies of Sciences Engineering and Medicine (USNAEM) (2016) *Health Risks of Indoor Exposure to Particulate Matter: Workshop Summary*, The National Academies Press, Washington, DC.
- U.S. National Center for Education Statistics (USNCES) (2019) *Schools and staffing survey*, https://nces.ed.gov/surveys/sass/tables/sass0708_035_s1s.asp
- Willeke, K., Whitby, K.T. (1975) Atmospheric Aerosols: Size Distribution Interpretation, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 25(5), 529-534, <https://doi.org/10.1080/00022470.1975.10470110>
- Yang, J., Nam, I., Yun, H., Kim, J., Oh, H.J., Lee, D., Jeon, S.M., Yoo, S.H., Sohn, J.R. (2015) Characteristics of indoor air quality at urban elementary schools in Seoul, Korea: Assessment of effect of surrounding environments, *Atmospheric Pollution Research*, 6, 1113-1122, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.06.009>
- Yang, W.H. (2014) Time-activity pattern of students and indoor air quality of school, *Korean Institute of Educational Facilities*, 21(6), 17-22 (in Korean with English abstract).
- Yang, W.H., Byeon, J.C., Kim, Y.H., Kim, D.W., Son, B.S., Lee, J.E. (2005) Assessment of Indoor Air Quality of Classroom in School by Means of Source Generation - Case Study, *Journal of Environmental Science International*, 14(10), 979-983, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5322/jes.2005.14.10.979>
- Yang, W.H., Sohn, J.R., Kim, J., Son, B.S., Park, J.C. (2009) Indoor air quality investigation according to age of the school buildings in Korea, *Journal of Environmental Management*, 90(1), 348-354, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.10.003>
- Yoo, Y. (2016) Air pollution and childhood allergic disease, *Allergy Asthma Respiratory Disease*, 4(4), 248-256, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.4168/aard.2016.4.4.248>

Authors Information

손윤석 (부경대학교 환경공학과 조교수)