

논문

도심 초등학교 교실 내 미세먼지 특성 연구

Characterization of Classroom Fine Dust in Urban Elementary Schools

허수정, 김도윤, 권예림, 이태정, 조영민*

경희대학교 환경응용과학과

Sujeong Heo, Do Yoon Kim, Yerim Kwoun, Tae Jung Lee, Young Min Jo*

Department of Applied Environmental Science, Kyung Hee University, Suwon,
Republic of Korea

접수일 2020년 11월 26일
수정일 2020년 12월 28일
채택일 2021년 1월 29일

Received 26 November 2020
Revised 28 December 2020
Accepted 29 January 2021

*Corresponding author
Tel : +82-(0)31-201-2485
E-mail : ymjo@khu.ac.kr

Abstract In this study, PM₁₀ and PM_{2.5} were collected in 20 indoor and outdoor spaces of 5 elementary schools in Seoul, and analyzed based on quantitative and qualitative characteristics. The concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} in the classrooms distributed from 31.0 to 96.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 14.5 to 40.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The I/O value of PM_{2.5} was 0.46 to 0.80, indicating that PM_{2.5} was less in indoors than outdoors. Since there were various sources in the classroom, the organic carbon contained in PM_{2.5} was 7.1~12.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, which was more than that of inorganic carbon (0.3~1.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) mainly originated from the outside. Among the metal components, Fe was the most found with an average of 0.226 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and the concentrations of Pb and As were 0.013 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 0.002 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. The ionic component, NO₃⁻, was the highest at 2.60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ compared to other ions. Despite the small number of samples (100 filters), this study can contribute to understanding the current school environment by investigating classrooms operating under normal conditions.

Key words: Indoor air quality, School environment, PM_{2.5}, Chemical composition

1. 서 론

입자상물질은 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(IARC)가 지정한 1군 발암 물질로, 국내 대기오염이 증가함에 따라 입자상물질에 대한 관심이 증가하고 있다(Santibáñez-Andrade *et al.*, 2020). 공기역학적 직경 2.5 μm 이하의 초미세먼지인 PM_{2.5}는 대기 중 제거가 어렵고, 입경이 작을수록 상대적으로 표면적이 넓어 각종 유해가스나 중금속 등 오염물질을 흡착해 호흡 시 폐포에 침투하여 인체에 피해를 주는 것으로 알려져 있다. 특히 성장기 아동의 경우 성인과 비교하여 상대적으로 단위 체중당 호흡량이 많기 때문에 미세먼지에 대한 민감도가 크다고 보고된 바 있다(Park *et al.*, 2018; Faustman *et al.*, 2000). 현재 국내의

미세먼지 오염도는 선진국 대비 높은 수준으로 2018년 기준 서울의 연평균 PM_{2.5} 농도는 23.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 영국 런던의 10.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 미국 LA의 13.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 두 배 정도 높은 것으로 보고된다(NIER, 2019). 정부는 이러한 미세먼지 관리를 위하여 2017년 “미세먼지 관리 종합대책”을 발표하였으며, 미세먼지 환경기준 및 예보 기준을 강화하여 어린이 등 건강 취약계층을 보호하도록 하고 있다.

교육부에서는 고농도 미세먼지가 발생하거나 발생 우려가 있는 경우, 학생의 미세먼지 영향을 최소화하기 위해 외부활동 및 실외 수업을 자제하도록 권고하고 있다. 학생들의 실내 활동 시간이 실외에 비해 많을 뿐 아니라, 고농도 미세먼지 발생 시 학생들의 실외 활동 제한 등으로 실내에서 활동하는 시간이 증가

하면서 교실 공기질의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 그러나 교실 내부의 미세먼지 농도는 실내에서 발생하는 미세먼지와 더불어 창호나 복도 등을 통하여 유입되는 실외 오염물질로 인하여 실내에서 오히려 축적될 수 있다. 특히 고농도 미세먼지 발생일의 경우 창문을 열지 못함에 따라 교실 내 공기질은 훨씬 악화될 수밖에 없다. 중국 베이징에서 실시된 연구에 따르면, 실내 $PM_{2.5}$ 에 대한 실외 유래 입자의 기여도는 창문을 닫았을 때 54~63%이지만, 창문을 열었을 때 92% 이상까지 상승하는 것으로 나타났다 (Ji *et al.*, 2015).

학교 미세먼지 및 공기질에 관한 관심이 증가함에 따라 다양한 연구가 수행되고 있지만, 학교 사회의 특성상 외부로부터의 접근이 용이하지 않으며, 장기간의 시험이 가능하지 않으므로 기존의 연구들은 학교 실내·외 오염 현황과 청정기 효능 조사에 대부분 머무를 수밖에 없었다 (Park *et al.*, 2020; Jung *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2011). 그러나 본 연구에서는 미세먼지에 대한 우려가 높아지는 사회적 관심에 편승하여 보다 심층적인 연구를 수행할 수 있었다.

본 연구의 목적은 도심에 위치한 초등학교의 교실과 운동장의 미세먼지를 채취하여 성분을 분석함으로써 공기질을 평가하고, 오염물질에 대한 학생들과 교사의 노출가능성을 파악하는 것이다. 이를 위해 서울시 지역 중 대기 $PM_{2.5}$ 의 5년('13~'17년) 평균농도가 상대적으로 높았던 서울 남부의 교통혼잡지역에 위치한 5개교를 연구 대상 학교로 선정하여 실내·외 미세먼지의 특성을 조사하였다. 교실 내·외의 조사현장은 '활동상황 미간섭' 상태를 유지함으로써 평소의 일과 상태에 대한 오염 정도를 파악하는 데 도움을 줄 수 있었다.

2. 실험 방법

2.1 연구 대상 학교

본 연구에서는 그림 1에 도시한 바와 같이 교통량

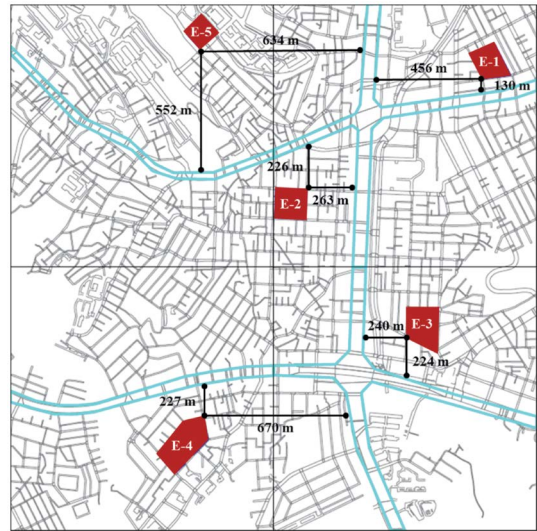


Fig. 1. Location of test schools.

과 유동인구가 많은 도심지역인 서울의 서초구와 동작구가 교차하는 지역의 대로변 인근 초등학교 5곳을 대상으로 실내·외 미세먼지 시료를 채취하고, 실시간 농도변화량을 측정하였다. 현장의 시료 채취 및 측정 기간은 2019년 10월부터 12월까지 총 3개월이며, 각 학교의 교실 및 실외(운동장) 미세먼지 농도를 4일 또는 7일간 연속적으로 측정하였다. 연구 대상 교실은 주로 저학년 교실을 위주로 선정하였으며, 일부 학교에서 특별교실이나 체육관 등에서도 측정을 진행하였다. 시료 채취와 측정을 진행하는 동안은 수업의 형태와 학생 움직임, 창문 여닫이, 환기 및 공기정화장치 가동 등의 활동을 자유롭게 운영하도록 하였다.

2.2 시료 채취

PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 샘플 채취는 mini volume air sampler (BMW-2500, 토탈엔지니어링, 한국)를 이용하였고, 실시간 농도는 광산란 모니터 (Grimm 11-A, Grimm, 독일)를 이용하였다. Mini volume air sampler의 유량은 5.7 L/min이며, 채취에 사용한 필터는 이온성분 분석 용으로는 Teflon 소재 ($0.45 \mu m$, Hyundai micro, 한국), 중금속과 탄소성분은 quartz 소재 ($2.0 \mu m$, Whatman,



Fig. 2. Pictures of field sampling at indoor and outdoor (school E-1).

영국)의 필터를 이용하였다. 시료 채취용 샘플러, 광산란 모니터 및 기타 측정장치들은 그림 2에서와 같이 학생들의 수업활동에 방해되지 않도록 교실의 후면에 설치하였다. 시험기간 동안 교실 내에서의 활동 상황과 창문 개방 및 청정기 가동 여부를 수시로 기록하여 학생활동이 실내공기질에 끼치는 영향을 고찰하는 데 참고하였다.

2.3 화학성분 분석

PM₁₀ 및 PM_{2.5}을 포함한 teflon 필터는 실내공기질 공정시험기준 (국립환경과학원고시 제2018-64호, 2018)에 준하여 데시게이터에서 48시간 동안 항온, 항습 후 전자저울(Dry active, Katestch, England)을 이용해 무게를 측정하여 미세먼지 농도를 산출하였다.

미세먼지 중 금속성분은 X-선 형광분광법(XRF, Thermo Inc., USA)을 이용하여 분석하였다. Thermo사의 ARL QUANT'X High Performance Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (ED-XRF)를 이용하였으며, 총 11종의 중금속 성분(Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Pb)을 분석하였다.

이온성분 분석을 위해 먼지입자가 포집된 filter를 바이알에 넣고 35 mL 초순수액을 넣은 후 초음파추출기에서 2시간 동안 전처리를 진행하였다. 전처리 샘플을 음이온 이온크로마토그래피(Metrohm 883, Switzerland), 양이온 이온크로마토그래피(Metrohm 930,

Switzerland)에 주입하여 각각의 전기전도도검출기로 측정하였다. 분석 항목은 총 8종의 이온성분(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)이며, 전체 시료의 10%는 재분석하여 정밀도를 확인하였고, 현장 공시료 분석을 통해 배경 농도를 보정하였다.

유기탄소(Organic Carbon, OC)와 원소탄소(Elemental Carbon, EC)는 미국의 National Institute of Occupational Safety & Health (NIOSH 5040) protocol을 사용한 TOT 분석기(Thermal/Optical Transmittance, Sunset Lab., USA)로 분석하였다. 단계별로 온도를 설정하여 필터가 소성될 때 발생하는 가스는 촉매를 이용하여 이산화탄소로 산화시키고 다시 메탄으로 환원시켜 FID (Flame Ionization Detector)로 분석하며, 산소 존재 유무하에 OC와 EC를 분리하여 측정하였다. OC는 헬륨만 존재하는 환경에서 단계별 온도(315°C~840°C)에서 측정하였으며, EC는 산소가 존재하는 환경에서 단계별 온도(550°C~870°C)에서 측정하였다(Lee *et al.*, 2018; Choi *et al.*, 2015; Heo *et al.*, 2009). 앞의 두 단계가 끝난 후, 무기탄소는 내부표준물질인 5%의 메탄가스(balance 95% He)을 사용하여 교정된다. Quartz filter를 1.5 cm²로 절단하여 당당(sucrose)을 이용한 외부 표준 물질 및 5% CH₄ 내부표준물질을 분석하며, 반복적인 분석을 통하여 100±5 이내의 정확도(target/actual)를 얻은 후, 참 농도로 산정하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

본 연구에서는 PM_{2.5}에 초점을 맞추어 학교 교실과 운동장에서 실시간으로 정량적 농도를 측정하고, 먼지 입자 시료를 채취하여 함유되어 있는 이온, 중금속, 탄소성분을 분석함으로써 교실 내에 부유하는 미세먼지의 위해성을 간접적으로 평가해보고자 하였다. 특히, 본 연구의 대상학교 인근 도로인 동작대로의 일평균 교통량은 약 89,000대로 서울시 내 상위 20% 정도의 높은 교통량을 보이며(Seoul TOPIS, 2020), 하루 평균 150,000명 이상(2019년 11월 기준)의 승객들이 이용하는 남부거점 지하철역 주변 지역에 위치한다(Seoul Metro, 2020).

3.1 학교 미세먼지 현황

3.1.1 교실 내·외 미세먼지 농도분포

연구 대상 학교들의 교실 학급 규모는 25명에서 30명이었으며, 평소의 일과표에 따라 수업, 휴식시간 및 식사 등의 활동 등을 제어하지 않은 채 관찰하였다.

표 1은 5개 학교의 실내(학교별 3~4개 교실) 및 실외에서 4일간 일과시간인 수업 시작 직전 오전 8시 30분부터 하교 직후인 오후 2시 30분까지 채취한 PM₁₀과 PM_{2.5} 시료의 중량농도를 분석한 결과이다. 학교보건법은 교실의 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 기준치를 각각 24시간 평균값으로서 75 µg/m³와 35 µg/m³ 이하로 유지할 것을 권고하고 있다. 4일간의 각 학교의 전체 교실 평균농도는 PM₁₀이 31.0~59.1 µg/m³, PM_{2.5}는 평균 15.3~32.2 µg/m³의 값을 보이므로 공기질 유지 기준치를 초과하지 않았다. 그러나 E-3의 특정 교실은 PM_{2.5}의 경우, 최고 40.2 µg/m³가 넘는 고농도 수준이 검출되기도 하였다. 즉, 실내교과가 진행 중일 때, 창문을 닫은 채, 청정기를 가동하지 않은 상태에서는 높은 농도의 미세먼지 수준을 보이므로, 수업 내용에 따른 학생 활동량과 창문의 개폐 상태, 청정기 가동 여부에 따라 상당한 편차를 보일 수 있음을 나타내고 있다. 한편, 측정 학교 전체의 교실 내 PM₁₀ 평균농도는 51.0 µg/m³이었고, PM_{2.5}는 24.1 ± 6.7 µg/m³로 나타났다.

Table 1. Concentrations of PM₁₀, PM_{2.5} in elementary schools.

		Mean ± S.D.	
		PM ₁₀	PM _{2.5}
E-1	Indoor	59.1	23.5 ± 4.7
	Outdoor	-	29.9 ± 3.7
	I/O Ratio	-	0.78
E-2	Indoor	58.3	24.1 ± 2.4
	Outdoor	-	30.2 ± 2.3
	I/O Ratio	-	0.80
E-3	Indoor	49.9	25.2 ± 8.2
	Outdoor	-	54.8 ± 5.0
	I/O Ratio	-	0.46
E-4	Indoor	31.0	15.3 ± 0.6
	Outdoor	-	27.6 ± 0.0
	I/O Ratio	-	0.56
E-5	Indoor	56.9	32.2 ± 4.7
	Outdoor	-	70.5 ± 0.0
	I/O Ratio	-	0.46
Mean	Indoor	51.0	24.1 ± 6.7
	Outdoor	-	42.6 ± 15.8
	I/O Ratio	-	0.56

실외공기질의 영향을 살펴보기 위하여 각 학교의 PM_{2.5}의 실내/실외 농도비(I/O, Indoor/Outdoor Ratio)를 산출하여 비교하였다. 우선 전체 학교의 I/O ratio 평균값은 0.56이었다. 전반적으로 실외보다 실내의 미세먼지 농도가 낮게 유지되고 있음을 알 수 있다. PM_{2.5}의 I/O ratio가 0.46에서 0.80까지 분포하면서 1을 넘지 않는 것으로 미루어 보아 내부에서 발생하는 양이 상대적으로 낮을 것으로 판단된다. 또한 E-5의 경우 외기 농도가 70.5 µg/m³의 고농도를 보이는 데 반해, 실내농도는 32.2 µg/m³의 수준이었다. 그러므로 고농도 외기 환경에서 교실의 창문을 닫고 청정기를 가동함으로써 실내공기질이 상대적으로 낮은 농도로 유지될 수 있음을 알 수 있다.

3.1.2 교실 조건에 따른 영향

교실 내·외의 미세먼지에 대한 농도분포를 보다 세부적으로 파악하기 위해 활동미간섭 상황에서 기록한 제반조건에 따라 창문과 청정기(유효 용량: 100 m²)

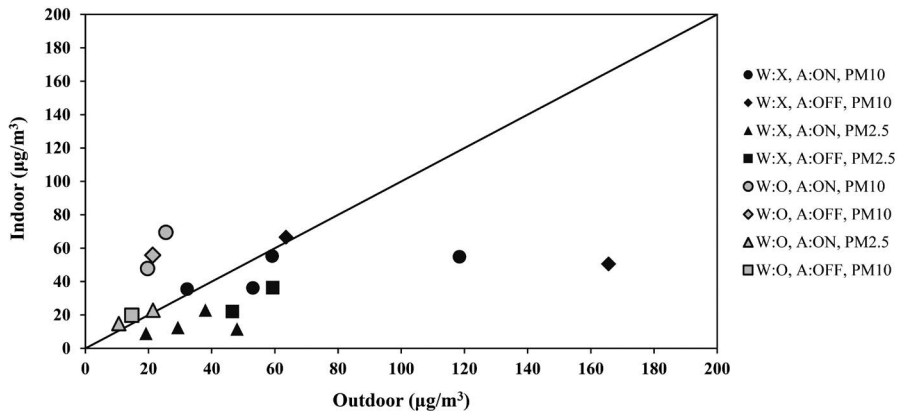


Fig. 3. I/O values of PM₁₀ and PM_{2.5} according to window opening and air cleaner operation (W-X : window closed, W-O : window open, A-ON : air cleaner ON, A-OFF : air cleaner OFF).

의 영향을 고찰해 보았다.

그림 3은 공기청정기 가동 및 창문 개방에 따른 전체 학교에서의 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 I/O 평균값이다. 쉽게 예상할 수 있듯이 창문이 열려있을 때, I/O는 높은 값을 나타낸다. PM₁₀은 전체 평균값인 0.98보다 3배 가까이 큰 2.58과 2.62를 보여주었고, PM_{2.5}는 약 1.5~2배 높은 1.24와 1.35의 평균값을 나타냈다. 이렇게 I/O 값이 1 이상이 되는 것은 실내 미세먼지 농도가 외부에 비하여 높은 상태이고, 특히 창문이 열려있는 상태에서 실내에서 발생하는 미세먼지가 외부로 유출되지 않고 내부에 지속적으로 축적되고 있음을 암시한다. 그리고, 축적되는 양은 PM₁₀이 PM_{2.5}에 비하여 2배 정도 높게 나타났다. 결국 더 높은 내부 발생량뿐만 아니라 창문을 통한 자연환기 효과도 PM₁₀에 보다 부정적으로 작용하는 것을 알 수 있다.

한편 실내 순환형 청정기의 가동이 미세먼지량에 끼치는 영향을 고찰해 본 결과, 청정기를 가동시켰을 때, 실내 미세먼지 농도가 낮아지고 있고, 창문이 닫혀있을 때, 그 효과는 2.58에서 0.8로 감소하는 PM₁₀에서 더 뚜렷하게 나타났다. 그러나 창문이 닫혀있는 상태에서 청정기를 사용하지 않았을 때, PM₁₀의 평균 I/O 값이 0.68로 나타난 것은 교실에 따라 학생들의 수업 활동이 매우 차이가 남으로써 오차범위가 넓어서 실제로는 최대 1.2까지 오르는 것을 볼 수 있다. 이에 대한

보다 신뢰성 있는 상관관계를 확보하기 위해서는 보다 더 많은 시험량이 필요할 것으로 사료된다. PM_{2.5}는 창문의 개폐와 청정기의 가동에 따른 영향이 예측할 수 있는 추세를 보여주었다. 유사한 연구 결과를 살펴보면, 기계 환기를 하는 미국 텍사스 주 (Bozlaker *et al.*, 2017)의 I/O ratio는 0.2로 매우 낮았으며, 자연 환기를 하는 중국 Beijing (Hou *et al.*, 2015)의 경우 I/O ratio는 문을 닫았을 때 0.6, 문을 열었을 때 0.9로 환기에 따라 외기의 영향이 다름을 확인하였다. 폴란드의 학교조사에서 계절별로 I/O를 비교한 결과, 겨울철은 2.0이었고, 여름철은 평균 4.1로 나타났다 (Zwozdziak *et al.*, 2013). 결국, 실내·외의 미세먼지 농도 차이는 외기 조건뿐만 아니라 교실 창문의 개폐, 청정기나 환기장치의 가동 여부 등에 따라 다양하였다.

3.1.3 학생 활동도 영향

학생들의 활동이 수업시간 동안 교실 공간에서 부유먼지에 어떠한 영향을 주는가를 실시간으로 고찰하였다. 그림 4는 초등학교(E-4) 1학년 교실(재실 학생: 30명)에서의 통상적인 수업이 진행되는 일과시간 동안 교실 내의 미세먼지 농도변화량이다. 창문은 닫혀있는 상태를 유지하였고, 공기청정기는 지속적으로 가동되고 있었다. 측정 당일 학교 외기의 PM₁₀은 오전보다 오후에 다소 높아지는 경향을 보여주며, 25

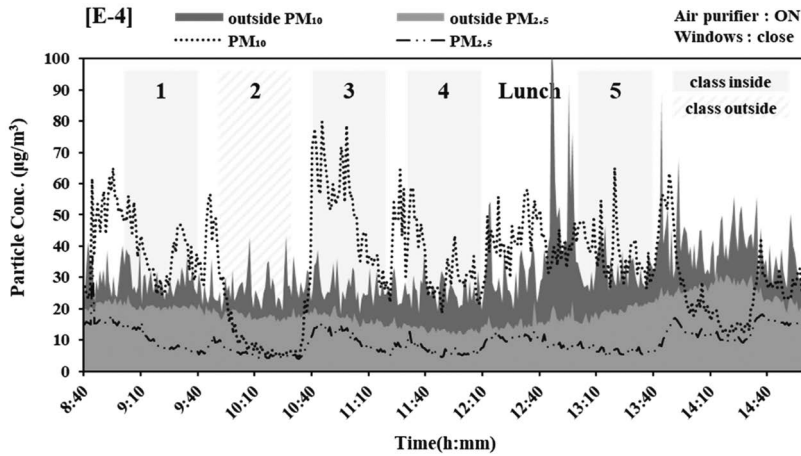


Fig. 4. Real-time variation of fine dust concentration in an elementary school classroom.

$\mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 20 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준을 유지하였고, $\text{PM}_{2.5}$ 는 $22 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 15 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 PM_{10} 의 88%에서 75% 수준을 나타내고 있었다. 개략적인 I/O 값을 보면 $\text{PM}_{2.5}$ 는 약 0.5에서 0.6 정도를 차지하는 반면에, PM_{10} 은 1.0 이상의 높은 값을 보여주고 있었다. 이 값은 표 1에서 관찰한 4일 평균값인 0.82보다 현저히 높은 수준이며, 시간에 따른 변화량도 매우 심하였다. 즉, 학생들이 등교하는 시간인 9시 10분 이전에 $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 상승한 후, 수업이 외부에서 진행되는 2교시에는 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 외기 농도보다도 훨씬 낮은 수준을 보여주었다. 그러나 다시 학생들이 교실에서 수업활동을 진행하는 3, 4교시에는 다시 높은 농도를 나타내고 있었다. 점심시간은 교실에서 배식이 진행되어 학생들이 실내에 체류하면서 배식이 진행되었지만 상대적으로 자유로운 움직임과 이동으로 인하여 교실 바닥의 먼지가 재비산하는 현상이 있었다. 그러나 점심시간이 종료되는 12시 30분을 지나면서 서서히 가라앉는 현상을 보여주고 있다. 학생들이 하교한 1시 40분 이후에는 급격히 낮아져서 외기보다 오히려 낮은 수준을 유지하였다.

$\text{PM}_{2.5}$ 는 PM_{10} 과 유사한 추세를 보이면서 학생들의 움직임이 일정하게 영향을 주는 것으로 보이지만 그 민감도는 PM_{10} 에 비하여는 낮게 나타났다. 또 창문이

닫힌 상태에서 가동되고 있는 공기청정기가 $\text{PM}_{2.5}$ 에 보다 더 효과적으로 작용하는 것으로 추측된다.

3.2 주요 금속성분 고찰

교실 내의 미세먼지에는 대체로 Fe, Ca, Cr, Mg, Zn 등의 금속 성분들이 발견되는 것으로 알려져 있다 (Son *et al.*, 2008). 성장기 어린이들의 건강에 치명적인 중금속 성분인 크롬(Cr), 망간(Mn), 니켈(Ni), 구리(Cu), 비소(As), 납(Pb) 등은 본 연구 대상 학교의 실내 먼지에서는 그다지 많이 포함되어 있지 않은 것으로 나타났다. 다만, Pb는 검출한계 이상의 양이 모든 교실에서 발견되었고, 학교 주변 외기에도 존재하였다. 연간 대기환경기준인 $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다는 적은 수준인 $0.02 \sim 0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 학교 운동장의 $\text{PM}_{2.5}$ 에 포함되어 있음을 알 수 있다. 2017년 서울시 외기 금속 성분 분석결과 Pb는 자동차 배기가스 및 생물연소와 관련이 있었으며, V 및 Ni는 2차 생성염 및 연소 연료와 관계가 있었다. 또한 칼슘(Ca), 바륨(Ba), Cu, 티타늄(Ti)은 토양기원 먼지와 관련이 있는 성분이다 (Lee *et al.*, 2018).

교실 내 $\text{PM}_{2.5}$ 에는 유해중금속인 Cr, Mn, Cu, As 등은 실내에서 검출되지 않거나 학교에 따라 극미량이 측정되었다. 금속성분 가운데 가장 높은 농도로 검출

Table 2. Metal concentration present in PM_{2.5}.

		Metal (µg/m ³)										
		Al	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Pb
E-1	Indoor	0.000	0.018	0.000	0.002	0.009	0.186	0.000	0.002	0.032	0.003	0.013
	Outdoor	0.136	0.037	0.001	0.001	0.020	0.462	0.000	0.000	0.050	0.010	0.020
	I/O	0.000	0.496	0.394	2.138	0.449	0.403	0.548	0.634	0.711	0.433	0.595
E-2	Indoor	0.027	0.028	0.001	0.002	0.017	0.363	0.000	0.003	0.047	0.003	0.015
	Outdoor	0.000	0.035	0.001	0.002	0.017	0.380	0.001	0.003	0.045	0.003	0.017
	I/O	0.000	0.799	1.255	1.100	0.980	0.954	0.221	0.998	1.038	1.002	0.893
E-3	Indoor	0.000	0.022	0.000	0.002	0.009	0.236	0.001	0.002	0.039	0.002	0.011
	Outdoor	0.202	0.038	0.001	0.003	0.019	0.483	0.000	0.003	0.056	0.003	0.016
	I/O	0.000	0.587	0.646	0.635	0.495	0.487	-	0.614	0.689	0.528	0.669
E-4	Indoor	0.000	0.014	0.001	0.002	0.007	0.150	0.000	0.004	0.027	0.001	0.009
	Outdoor	0.000	0.016	0.001	0.001	0.016	0.257	0.000	0.004	0.049	0.003	0.020
	I/O	-	0.912	1.229	1.640	0.461	0.585	-	1.070	0.563	0.396	0.461
E-5	Indoor	0.000	0.023	0.000	0.001	0.010	0.194	0.001	0.004	0.033	0.001	0.018
	Outdoor	0.000	0.019	0.000	0.003	0.024	0.379	0.001	0.004	0.071	0.007	0.037
	I/O	-	1.180	0.886	0.505	0.403	0.513	1.781	0.807	0.469	0.224	0.469
Mean	Indoor	0.005	0.021	0.000	0.002	0.010	0.226	0.000	0.003	0.036	0.002	0.013
	Outdoor	0.068	0.029	0.001	0.002	0.019	0.392	0.000	0.003	0.054	0.005	0.022
	I/O	0.080	0.724	0.500	0.900	0.542	0.576	1.000	1.071	0.657	0.385	0.600

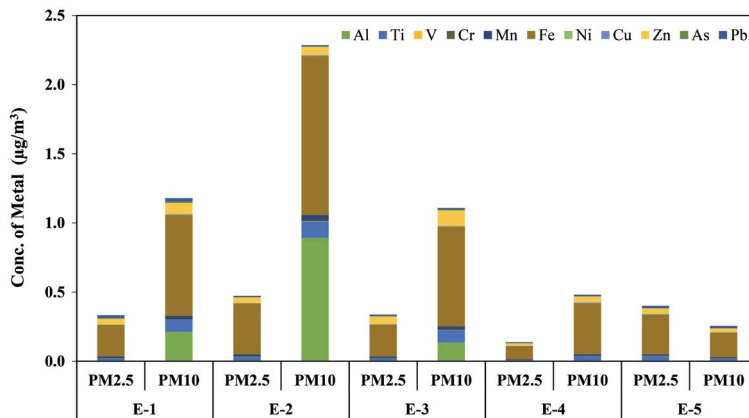


Fig. 5. Metal concentration in PM_{2.5} and PM₁₀ for test schools.

되는 성분은 도로교통 오염원으로부터 발생하는 것으로 알려진 아연(Zn)으로서 0.03 µg/m³에서 0.05 µg/m³ 정도가 교실 PM_{2.5}에서 발견되었다.

실내와 실외 PM_{2.5} 중의 성분(I/O)을 비교한 결과, 대부분의 성분은 실외 먼지에서 많이 발견되는 특성

을 보였지만, 중요한 중금속 성분 가운데 하나인 Cr이 학교 E-1 (2.138), E-2 (1.1), E-4 (1.64)의 실내에서 더 높은 농도로 발견되었다. E-1, E-2, E-4는 1970년대에 설립되었으며, 바닥 형태는 모두 강화마루로 이는 E-3 (목재), E-5 (테코타일)와의 차이를 보인다. 또한 바나

높(V)이 E-2와 E-4의 교실에서 운동장보다 더 많이 있는 것으로 나타났다. V은 주로 화석연료의 연소에서 발생하는 것으로서 다른 입자와의 결합이 가능하다. E-2와 E-4에서는 청정기를 가동하지 않은 교실이 다수였는데, 이로 인해 외기 미세먼지에 포함되어 있는 V이 다른 입자와 결합해 실내로 유입되어 축적된 것으로 판단된다.

그림 5는 동일한 교실에서 측정한 PM_{2.5}와 PM₁₀에서 각각 발견되고 있는 금속성분 농도이다. 실내 PM₁₀에는 PM_{2.5}보다는 많은 양의 금속성분이 검출되었는데, PM_{2.5}에서와 마찬가지로 Zn과 Fe 성분이 0.03~0.08 µg/m³와 0.18~1.15 µg/m³의 농도로 분포하고 있었다. 실내 PM₁₀과 PM_{2.5}에 포함되어 있는 금속류를 비교해 보면 상대적으로 위해도가 약한 토양기원의 성분인 Al이나 Fe는 분명하게 PM₁₀에 다량 함유되어 있고, Cr은 0.001~0.005 µg/m³이 포함되어 있는 바, 0.003 µg/m³ 이하로 존재하는 PM_{2.5}에 비해 약간 높은 수준이었다. Mn, Pb, As 등의 성분들도 PM₁₀에

서 더 많이 발견되는 것으로 미루어 보아 PM₁₀의 관리를 통하여 학생들에게 노출될 수 있는 중금속을 현저히 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 주요 이온성분 고찰

미세먼지 입자에 존재하는 이온성분 중 수용성 이온성분인 SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ 등은 구름의 응결핵으로 작용하므로 기후변화에 영향을 미친다. SO₄²⁻와 NO₃⁻같은 산성 물질은 생태계에 있어서 직접적인 피해 요인물질이며, 광화학 반응을 통하여 초미세먼지를 형성하기도 하므로 도심지역의 대기질을 결정하는 주요 인자로 간주한다. NO₃⁻는 화석연료의 연소 및 차량의 배기가스에서 배출된 NO_x의 산화로 인해 생성되므로 저온인 겨울철에 높은 농도를 보이는 것으로 알려져 있다(Kim, 2016).

표 3은 본 연구에서 채취한 실내·외 PM_{2.5}에 포함되어 있는 주요 이온성분들이다. 상대적으로 작은 크기의 입자들로 구성되어 있는 PM_{2.5}는 이온의 종류에

Table 3. Ions concentration of PM_{2.5}.

		Ion (µg/m ³)							
		Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
E-1	Indoor	0.17	1.32	1.54	0.29	0.38	0.11	0.06	0.57
	Outdoor	0.08	2.86	2.32	0.29	0.86	0.15	0.07	0.47
	I/O	2.16	0.46	0.66	1.01	0.44	0.71	0.92	1.22
E-2	Indoor	0.16	2.60	2.59	0.55	0.75	0.19	0.06	0.55
	Outdoor	0.10	5.44	2.11	0.30	1.58	0.20	0.06	0.59
	I/O	1.66	0.48	1.22	1.84	0.48	0.94	1.04	0.93
E-3	Indoor	0.27	1.64	1.30	0.34	0.35	0.12	0.06	0.49
	Outdoor	0.24	3.99	1.99	0.29	1.06	0.11	0.05	0.42
	I/O	1.14	0.41	0.65	1.15	0.33	1.03	1.16	1.17
E-4	Indoor	0.47	1.10	1.07	0.31	0.14	0.11	0.09	0.60
	Outdoor	0.29	3.75	1.99	0.24	1.43	0.11	0.04	0.30
	I/O	1.62	0.29	0.54	1.30	0.10	0.99	2.51	1.98
E-5	Indoor	0.22	5.11	2.67	0.33	1.77	0.15	0.05	0.44
	Outdoor	0.86	30.17	10.84	1.29	9.95	0.40	0.12	0.90
	I/O	0.26	0.17	0.25	0.25	0.18	0.38	0.40	0.49
Mean	Indoor	0.26	2.35	1.83	0.36	0.68	0.14	0.06	0.53
	Outdoor	0.31	9.24	3.85	0.48	2.98	0.19	0.07	0.54
	I/O	0.82	0.25	0.48	0.76	0.23	0.70	0.94	0.99

따라 실내·외 존재하는 양의 차이가 분명하였다. 즉, 불소, 염소, 인산은 실내에서 더 많이 검출된 반면, 질산(NO_3^-), 황산(SO_4^{2-}), 암모늄, 칼륨 등은 외기에 많이 존재하는 것으로 나타났다. 나트륨과 마그네슘, 칼슘 등은 학교에 따라 차이가 있었다. 특히 NO_3^- 의 발생원으로 자동차의 기여가 크며, 2019 서울시 초미세먼지 성분분석 보고서에도 서울시 NO_3^- 의 가장 큰 발생원은 자동차로 추정하고 있다(SIHE, 2020). 질산이온이나 암모늄이온은 학교 외부에서 발생하여 외기의 미세먼지에는 많이 흡착되어 있지만 반응성과 휘발성이 높기 때문에 실내에 체류하는 $\text{PM}_{2.5}$ 에 흡착되어 있는 양은 많지 않다는 의미이다. 실내에 존재하는 불소나 염소 성분은 산성물질로서 실내공기질 악화에 직접적인 영향을 줄 것으로 사료된다. 한편, E-5의 교실에서는 고농도의 외기입에도 모든 이온성분에서 타 학교들의 교실과 절대량은 유사하거나 다소 높은 수준이었지만 전체적으로 낮은 양이 발견되었다. E-5는 1970년대에 설립된 타 학교에 비해 비교적 최근에 설립된 학교이며, 측정 당시 공기 청정기가 대부분의 교실에서 학생 재실시간에 가동되고 있었으므로 낮은 농도 수준을 보이는 것으로 판단된다.

그림 6은 동일한 교실에서 측정한 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 중에 포함되어 있는 이온의 성분별 농도이다. 실내 PM_{10}

이온성분으로는 황산이온(SO_4^{2-})이 가장 많은 0.9~3.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 질산이온과 암모늄이온도 높은 농도로 확인되었다. PM_{10} 은 1개 교실에서만 시료를 채취하여 분석하였으므로 4개 교실에서 시료를 대상으로 시험한 $\text{PM}_{2.5}$ 와 상대비교는 할 수 없지만 일부 이온에서 절대량의 차이가 눈에 띄었다. 학교, E-4에서는 염소이온, 그리고 E-2에서는 질산이온이 $\text{PM}_{2.5}$ 에서 더 높은 농도로 발견되었는 바, 이온이 2.5 μm 이하의 먼지입자에 주로 존재하는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 이러한 초미세먼지가 다양한 화학성분으로 구성될 수 있음을 보여준다.

3.4 교실 내·외 탄소성분 고찰

유기탄소(Organic carbon, OC)와 원소탄소(Elemental carbon, EC)는 대기 중 미세먼지의 주요 구성요소 중 하나이다. 유기탄소는 1차 및 2차 오염원으로부터 발생되며, 다환방향족탄화수소 및 발암물질을 포함한다. EC는 주로 불완전 연소로부터 기인하며, 이와 함께 발생하는 그을음은 호흡기 질환을 유발한다(Ho *et al.*, 2004). 학교별로 실내 $\text{PM}_{2.5}$ 에 포함되어 있는 OC는 7.89에서 10.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 수준이었고, EC는 0.72에서 1.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 분포를 나타내고 있다. 따라서 실내 $\text{PM}_{2.5}$ 에는 OC가 EC보다 다소 높은 수준

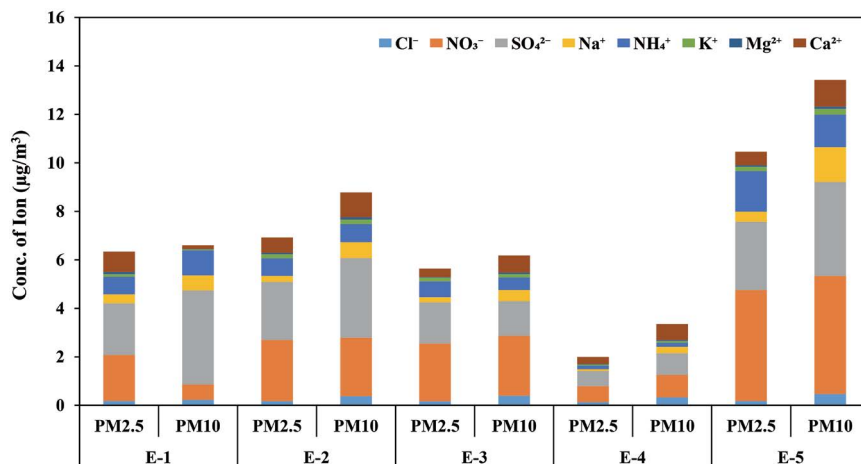


Fig. 6. Ion concentration of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} for test schools.

Table 4. OC and EC concentration of indoor and outdoor PM_{2.5}.

		OC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OC/EC
E-1	Indoor	10.21	0.92	11.10
	Outdoor	6.79	1.10	6.17
	I/O	1.50	0.84	1.79
E-2	Indoor	10.07	1.09	9.24
	Outdoor	5.95	1.21	4.92
	I/O	1.69	0.90	1.88
E-3	Indoor	8.95	0.72	12.43
	Outdoor	4.16	0.97	4.29
	I/O	2.15	0.75	2.87
E-4	Indoor	7.89	0.76	10.38
	Outdoor	4.39	0.62	7.08
	I/O	1.80	1.23	1.46
E-5	Indoor	9.60	1.04	9.23
	Outdoor	9.38	1.96	4.79
	I/O	1.02	0.53	1.92
Mean	Indoor	9.34	0.91	10.48
	Outdoor	6.13	1.17	5.45
	I/O	1.52	0.77	1.92

을 유지하였다. 또한 PM₁₀에 포함되어 있는 OC는 7.09에서 12.39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 수준이었고, EC는 0.32에서 1.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 분포를 나타내고 있다. 즉, 미세먼지 입자에 흡착되어 있는 탄소성분은 각 실내현장마다 PM₁₀에서 더 높은 수준의 다양한 농도분포를 보이고 있다.

OC는 자연 생태계로부터도 발생되므로, 일반적으로 EC보다 높은 농도를 보인다(Kim, 2016). 본 연구에서 조사한 교실 미세먼지에 함유되어 있는 OC의 I/O ratio는 1.02에서 2.15까지로서 1보다 큰 값을 보이는데, 이는 수업 중 사용되는 필기도구 및 미술용품 또는 청소용품과 같은 분자량이 작은 유기탄소의 영향에 기인하는 것으로 판단된다. 한편, EC의 실내·외 농도는 유사한 비율(I/O)을 보이는데, 실내 EC는 대부분 자동차와 같은 실외 발생원에서 생성되어 외기와 함께 교실 내로 유입되는 것으로 판단된다(Ham *et al.*, 2017). 따라서 초등학교 학습활동이 실내 EC 농도에 영향을 거의 주지 않을 것으로 사료된다(Cao *et al.*, 2012).

4. 결 론

본 연구에서는 교통량이 많은 지역의 초등학교에서 실내 PM_{2.5}의 농도 수준을 평가하고, 발생원 규명을 목적으로 하였다. 따라서 2019년 10월부터 12월까지 서울시 남부지역인 서초, 동작, 관악구에 위치한 5개의 초등학교에서 미세먼지 농도 실시간 모니터링 및 PM_{2.5} 샘플링을 진행하였으며, 채취한 PM_{2.5}에 함유되어 있는 금속, 이온, 탄소성분을 분석하였다. 미세먼지 농도 실시간 모니터링을 통하여 교실 실내의 창문 개방, 청정기 가동, 학생 활동도가 농도 변화에 미치는 영향을 고찰하였으며, PM_{2.5} 농도 및 성분분석 데이터를 기반으로 실내 미세먼지의 특성을 관찰하였다.

5개 학교의 교실 내 PM_{2.5} 농도는 15.3-32.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, PM_{2.5}의 중금속 가운데는 Fe가 0.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 많이 발견되었고, 유해성분인 As, Pb는 각각 0.002 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.013 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. Fe는 도로 차량의 브레이크 및 타이어 마모에 기인하는 것으로서 이온 및 금속 성분 결과를 바탕으로 교통량이 많은 지역 특성에 의해 차량 관련 오염원이 PM_{2.5} 농도에 높게 기인한다고 판단된다. 이온 성분으로는 자동차 배출원과 관련된 지표로 알려져 있는 NO₃⁻가 2.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 많이 포함되어 있었다. EC는 0.72~1.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, OC는 7.89~10.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위를 보였으며, 교실 내 저분자 유기탄소를 방출하는 물품이 많이 있었는 바, OC 농도가 더 높은 수준을 보였다.

측정 대상 초등학교는 도심지역에 위치하여 근거리 도로변이 존재하므로 자동차 오염원의 기여를 정확하게 추정하기 위해서는 외부 기상조건의 영향도 함께 살펴야 하지만 본 연구에서는 4일간 포집한 시료의 경향을 분석하여 수시로 변하는 외부 기류의 영향을 반영하지 않았기에 이는 연구의 한계로 존재한다. 또한 본 연구를 통하여 확보한 미세먼지 시료의 수는 100여 개로서 발생원을 정밀하게 추적하기에는 대표성이 부족하지만, ‘활동상황 미간섭’의 조건에서 학교 교실의 환경실태를 파악할 수 있는 중요한 접근으로 큰 의미가 있다. 향후 산업지역, 농업지역, 주거

지역 등 다양한 지역에 위치한 초등학교에 대한 연구를 통하여 학교현장의 실질적인 미세먼지 수준을 파악하고, 침기 및 확산모델링 등과 연계하여 실내공기질의 관리방안을 도출하는 포괄적인 연구가 지속될 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-에너지·환경 통합형 학교미세먼지관리 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019M3E7A1113077).

References

- Bozlaker, A., Peccia, J., Chellam, S. (2017) Indoor/Outdoor Relationships and Anthropogenic Elemental Signatures in Airborne PM_{2.5} at a High School: Impacts of Petroleum Refining Emissions on Lanthanoid Enrichment, *Environmental Science and Technology*, 51(9), 4851-4859. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06252>
- Cao, J.J., Huang, H., Lee, S.C., Chow, J.C., Zou, C.W., Ho, K.F., Watson, J.G. (2012) Indoor/Outdoor Relationships for Organic and Elemental Carbon in PM_{2.5} at Residential Homes in Guangzhou, China, *Aerosol and Air Quality Research*, 12, 902-910. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.02.0026>
- Choi, N.R., Lee, J.Y., Jung, C.H., Lee, S.Y., Yi, S.M., Kim, Y.P. (2015) Concentrations and Characteristics of Carbonaceous Compounds in PM₁₀ over Seoul: Measurement between 2006 and 2007, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(4), 345-355, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.4.345>
- 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>
- Ham, J., Lee, H.J., Cha, J.W., Ryoo, S.-B. (2017) Potential Source of PM₁₀, PM_{2.5}, and OC and EC in Seoul During Spring 2016, *Atmosphere Korean Meteorological Society*, 27(1), 41-54, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2017.27.1.041>
- Heo, J.B., Hopke, P., Yi, S.-M. (2009) Source apportionment of PM_{2.5} in Seoul, Korea, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 4957-4971. <https://doi.org/10.5194/acp-9-4957-2009>
- Ho, K.F., Cao, J.J., Harrison, R.M., Lee, S.C., Bau, K.K. (2004) Indoor/outdoor relationships of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM_{2.5} in roadside environment of Hong Kong, *Atmospheric Environment*, 38(37), 6327-6335. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.08.007>
- Hou, Y., Liu, J., Li, J. (2015) Investigation of Indoor Air Quality in Primary School Classrooms, *Procedia Engineering*, 121, 830-837. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.037>
- Ji, W., Zhao, B. (2015) Contribution of outdoor-originating particles, indoor-emitted particles and indoor secondary organic aerosol (SOA) to residential indoor PM_{2.5} concentration: A model-based estimation, *Building and Environment*, 90, 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.006>
- 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>
- Kim, D.S. (2016) *Atmospheric Environment*, Dongwa pub., Korea, 87-138.
- Lee, C.H., Lee, B.K., Kim, Y.H., Lee, J.H., Oh, I.B. (2011) Analysis of Indoor Air Pollutants from Elementary School Classrooms with Different Environment in Ulsan, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(1), 97-116, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.1.097>
- Lee, W.Y., Um, J.H., Sim, Y.M., Park, S.Y., Yang, H.R., Oh, S.R., Lee, M.H., Ou, S.M. (2018) Analysis of Atmospheric PM_{2.5} Components and Estimation of Source Contributions to the Particle Concentrations in Seoul, *Korean Society for Atmospheric Environment*, 170.
- Lee, Y., Kim, E., Ryu, C., Oh, S.-H., Joo, H., Bae, M.-S. (2018) Relationship between Cholesterol and Oxidative Potential from Meat Cooking, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(5), 639-650, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.5.639>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) Annual Report of Air Quality in Korea, 2018, National Institute of Environmental Research.

- 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. <https://doi.org/10.29306/jseg.2018.10.1.14>
- Park, J.-H., Lee, T.J., Park, M.J., Oh, H.N., Jo, Y.M. (2020) 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>
- Santibáñez-Andrade, M., Chirino, Y.I., González-Ramírez, I., Sánchez-Pérez, Y., García-Cuellar, C.M. (2020) Deciphering the Code between Air Pollution and Disease: The Effect of Particulate Matter on Cancer Hallmarks, *International Journal of Molecular Sciences*, 21(1), 1-15. <https://doi.org/10.3390/ijms21010136>
- Seoul Institute of Health & Environment (SIHE) (2020) Chemical Characteristics of fine dust (PM_{2.5}) at Seoul in 2019.
- Seoul Metro (2020) Number of people getting on and off by station and time zone from January to December 2019. www.seoulmetro.co.kr/kr/board.do?menuIdx=551&bbsIdx=2209125 (accessed on Dec. 28, 2020).
- Seoul Transport Operation & Information Service (Seoul TOPICS) (2020) 2019 Seoul traffic volume survey data. https://topis.seoul.go.kr/refRoom/openRefRoom_2.do (accessed on Dec. 28, 2020).
- 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. <https://doi.org/10.5322/JES.2008.17.9.1005>
- Zwoździak, A., Sówka, I., Krupińska, B., Zwoździak, J., Nych, A. (2013) Infiltration or indoor sources as determinants of the elemental composition of particulate matter inside a school in Wrocław, Poland?, *Building and Environment*, 66, 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.023>

Authors Information

허수정 (경희대학교 환경응용과학과 대학원생)
 김도윤 (경희대학교 환경응용과학과 대학원생)
 권예림 (경희대학교 환경응용과학과 대학원생)
 이태정 (경희대학교 환경응용과학과 연구원)
 조영민 (경희대학교 환경응용과학과 교수)