

서울 초등학교 교실의 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 제거를 위한 학교용 공기청정기 실증

한 방 우)^{*} · 홍 기 정)¹⁾ · 신 동 호)¹⁾ · 김 학 준)¹⁾ · 김 용 진)¹⁾ · 김 상 복)¹⁾ · 김 상 우)²⁾ · 황 청 하)²⁾ · 노 광 철)²⁾

¹⁾한국기계연구원 환경기계연구실, ²⁾에어랩

(2019년 6월 25일 투고, 2019년 6월 27일 수정, 2019년 6월 28일 게재확정)

Field tests of indoor air cleaners for removal of PM_{2.5} and PM₁₀ in elementary school's classrooms in Seoul, Korea

Bangwoo Han)^{*} · Keejung Hong)¹⁾ · Dongho Shin)¹⁾ · Hakjoon Kim)¹⁾ · Yongjin Kim)¹⁾

· Sangbok Kim)¹⁾ · Sangwoo Kim)²⁾ · Cheongha Hwang)²⁾ · Kwangchul Noh)²⁾

¹⁾Department of Environmental Machinery, Korea Institute of Machinery & Materials, ²⁾Air Lab

(Received 25 June 2019; Revised 27 June 2019; Accepted 28 June 2019)

Abstract

It is important to control fine particles in children care centers, elementary schools, elderly care facilities and so on where vulnerable children and the aged stay during most of their time. This study has investigated PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in two classrooms equipped with an air cleaner and two air cleaners, respectively and they were compared to those in a classroom without an air cleaner as well as those outdoors. Eight air cleaners which have various clean air delivery rates (CADRs) between 9.9 and 21.3 m³/min were tested in classrooms in two elementary schools in Seoul. Average PM_{2.5} and PM₁₀ were 7.3 ± 0.7 and 45.5 ± 4.1 μg/m³ in classrooms equipped with an air cleaner and 4.2 ± 0.6 and 24.6 ± 2.5 μg/m³ in classrooms with two air cleaners, whereas they were 22.1 ± 2.6 and 109.1 ± 9.6 μg/m³ in classrooms without an air cleaner and 36.9 ± 5.1 and 74.1 ± 10.6 μg/m³ outdoors, respectively. PM_{2.5} in classrooms could be reduced effectively by using an air cleaner or two air cleaners, because PM_{2.5} was mainly infiltrated from outdoors, however PM₁₀ could not because PM₁₀ was mainly caused indoors by students' activities. Air cleaners were more effective for removal of PM_{2.5} and PM₁₀ in classrooms with a high airtightness than those in classrooms with a relatively low one. Average CO₂ in classrooms was about 1500 to 2000 ppm for class hours dependent on the student number per a classroom, which was about 1.5 to 2 times higher than the standard, regardless of the use of air cleaner.

Keywords: Air cleaner, Field test, Classroom, School, PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂

* Corresponding author.

Tel : +82-42-868-7068

E-mail : bhan@kimm.re.kr

1. 서론

우리나라는 최근 해외유입과 자체발생 원인으로 인해 연평균 미세먼지 농도가 전세계적으로 매우 높은 수준에 있어 국민들에게 건강 상에 많은 우려를 주고 있다(Choi et al., 2019). 미세먼지는 호흡기나 심혈관 관련 질병에 큰 영향을 주고 있고(Pope et al., 2008; Anderson et al., 2012; Lippmann, 2013), 특히 영·유아 어린이와 노약자 등 건강 취약계층에게 더욱 위험성이 높은 것으로 보고되고 있다(Hajat et al., 2015). 한편 실내 공기오염에 의한 건강 위험성이 실외 공기오염으로 인한 것보다 훨씬 높다고 보고되고 있고(Bonjour et al. 2013) 대부분 사람들이 90% 가까운 시간을 실내에서 생활하고 있으므로(Klepeis et al., 2001) 실내 공기오염의 관리가 더욱 중요해지고 있다. 따라서 건강 취약계층이 장시간 생활하는 어린이집, 노인요양시설 등을 포함하여 학생들이 약 25-30% 시간을 보내는 학교 교실의 공기질 관리는 매우 중요하다고 할 수 있다(Chithra and Shiva, 2018).

하지만 학교 교실의 오염물질 농도는 일반 주거 빌딩이나 상용 시설의 농도에 비해 높은 것으로 보고되고 있다(Lee et al., 2002; Oeder et al., 2012). 또한 학교의 교실, 도서관, 행정실, 실험실 등에서 미세먼지 농도를 비교해 보았을 때 학생들이 주로 활동할 때 먼지가 비산되어 농도가 크게 증가하는 것으로 나타났다(Gaidajis and Angelakoglou, 2009; Diapouli et al., 2008). 학교 교실의 먼지 농도는 교실 높이에 따라서도 영향을 받았고 지상층에서 PM₁₀ 농도가 가장 높고, 층수가 높아질수록 낮아지는 것으로 나타났다(Agarwal and Nagendra, 2016). 우리나라 연구 사례를 보더라도 고등학교 교실 발생 먼지를 분석한 결과 대부분 지각원소와 분필 성분이 높은 영향을 주었고, 냉방기 가동 시에도 내부 오염원 영향이 증가하는 것으로 나타났다(Jang et al., 2006). 또한 초등학교 교실에서 먼지(PM₁₀) 농도는 등교 전에 낮은 수치를 보이나 등교 후 학생들의 활발한 활동에 따라 농도가 급격히 증가하였고 따라서 외부 유입보다는 내부 활동으로 인한 비산 침강의 영향이 많은 것으로 나타났다(Jeong and Lee, 2010). 따라서, 기존 연구사례를 살펴보면 학생들의 활동에 의해 발생하는 비산먼지가 학교 미세먼지에

큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 한편 미세먼지 관리를 위한 적극적인 공기정화장치 적용 사례는 거의 없는 것으로 나타났다.

우리나라에서는 미세먼지 취약계층이 많은 시간을 생활하는 학교 공기질 관리에 역점을 두고 있으며, 이의 일환으로 초·중·고 학교에 공기청정기나 환기장치 등의 공기정화장치를 설치 및 보급하는 지원사업을 진행하고 있다. 하지만 학교는 66 m² 크기의 교실에 20-30명이 단체로 생활하기 때문에 다량의 먼지가 내부적으로 발생하고 건물 기밀도가 떨어져 외부에서도 미세먼지 유입이 많을 수 있기 때문에 적절한 용량의 공기정화장치의 선정과 올바른 운전 및 관리방안 마련이 매우 중요하다. 하지만 현재 학교 미세먼지 대응 공기정화장치에 대한 기본적인 설치 및 운전 가이드라인이 부족한 상황이다. 한국의 교육부에서는 최근 공기청정기 용량으로 청정화능력(CADR, clean air delivery rate)이 13 m³/min 이상인 공기청정기를 사용하도록 하는 사용기준안을 만들었으나, 이러한 용량의 공기청정기가 실제 교실에서 미세먼지를 얼마나 줄일 수 있는지에 대한 실제 데이터는 전혀 없는 상황이다.

따라서 본 연구에서는 CADR 값이 9.9-21.3 m³/min 범위의 8개의 중대형 공기청정기를 건축 년도가 다른 서울의 2개 초등학교 교실에서 실제 학습 환경에 적용하여 공기청정기 유무에 따른 그리고 공기청정기 1대, 2대 사용에 따른 교실 미세먼지 저감 효과를 살펴보았다. 또한 학교 교실 내의 상황별 미세먼지 크기분포를 파악하고 미세먼지 크기에 따른 공기청정기의 적용 효과를 분석해 보았다. 그리고 공기청정기 사용에 따른 교실 CO₂ 농도 변화를 관찰하여 공기청정기 사용에 의한 교실 환기 저하 문제를 살펴보았다.

2. 시험 방법

표 1은 시험에 사용된 8대의 공기청정기 사양을 나타내고 있다. CADR값은 한국공기청정협회 규격인 SPS-KACA002-132 (KACA, 2018)에 따라 30 m³의 시험챔버에서 0.3 μm 크기의 염화칼륨(KCl) 시험입자의 시간에 따른 감소율 측정을 통해 구하였다. 보통의 4-6 m³/min 정도의 가정용 공기청정기 보

Table 1. Specification of the tested air cleaners.

Model	type	CADR (m ³ /min)	Noise (dB)	Power (W)	Size, W x D x H (mm x mm x mm)	Weight (kg)
A	Filter	9.9	44.8	33	370 x 370 x 795	14.0
B	Filter	13.5	50.7	75	445 x 450 x 875	27.0
C	Filter	13.9	50.4	70	∅373 x 1073	19.0
D	Filter	14.1	53.9	65	720 x 225 x 620	15.5
E	Filter	14.2	44.7	50	500 x 327 x 800	20.0
F	Filter	14.4	51.1	70	380 x 380 x 896	19.7
G	Filter	19.9	46.9	80	360 x 327 x 1890	32.2
H	Filter	21.3	43.9	100	590 x 320 x 1840	32.0

다 2배 이상 용량이 큰 CADR 9.9 ~21.3 m³/min 범위의 필터 방식의 공기청정기 8대로 진행하였고 1개 제품을 제외하고는 모두 교육부에서 권고하는 13 m³/min 이상을 만족하였다. 표 2는 실증 실험을 진행한 측정일과 온·습도, 풍속 조건을 나타내고 있다. 실증 실험은 서울에 위치한 2011년도에 설립된 A 학교의 1, 2학년 교실군(3개 교실 x 2개 학년), 2016년도에 설립된 B 학교의 2, 3학년의 교실군(3개 교실 x 2개 학년)의 총 4개의 실험대상 교실군에

대해 각 교실군에 2개 모델씩 적용하였고 각 모델별로 2회 반복하여 실험을 진행하였다. 교실군으로는 학년과 위치에 따른 먼지 농도 차이를 줄이기 위해 동일한 학년이 수업하고 동일한 층에 위치하여 서로 이웃하고 있는 3개의 교실을 선정하였고 공기청정기가 없는 교실, 공기청정기가 1대인 교실, 공기청정기가 2대인 교실로 설정하고 실험을 동시간에 진행하였다. 또한 3개의 교실을 측정하면서 교실 밖의 대기 농도도 동시에 측정하여 비교하였다. 미세

Table 2. Experimental data and weather information based on the average of class hours.

School	Date (YYYY-MM-DD)	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Wind velocity (m/s)
S school	2018-11-20	8.2	27.3	1.6
	2018-11-21	7.2	39.7	1.2
	2018-11-22	4.6	24.5	2.6
	2018-11-23	3.7	23.2	1.7
	2018-11-26	8.2	61.2	1.2
	2018-11-27	8.5	66.8	1.1
	2018-11-28	6.8	18.2	1.4
	2018-11-29	4.6	28.5	0.8
W school	2018-12-03	11.0	94.2	0.8
	2018-12-04	8.5	90.2	2.7
	2018-12-06	4.5	50.3	1.8
	2018-12-07	-7.0	23.3	4.5
	2018-12-10	-1.9	26.8	1.0
	2018-12-11	1.0	32.0	1.4
	2018-12-12	-0.8	28.5	1.8
	2018-12-13	-0.4	74.5	2.0

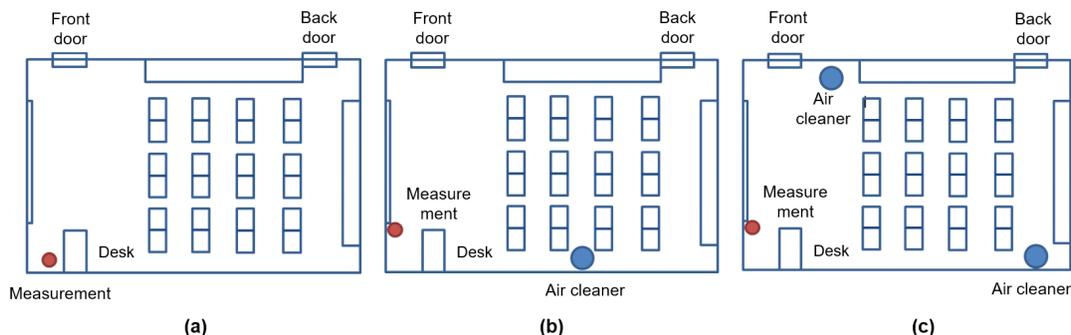


Fig. 1. The location of the air cleaner and measurement instruments in the classrooms (a) without an air cleaner, (b) with an air cleaner and (c) with two air cleaners.

먼지의 크기분포 및 농도 측정에는 광산란 방식의 계측기가 사용되었는데, 교실 내부는 실내 농도 측정을 위한 독일 Grimm사의 모델 1.109, 교실 밖의 대기 측정에는 수분 전처리 장치가 포함된 독일 Grimm사의 모델 180을 사용하였다. 상대적인 정확도를 높이기 위해 동일한 모델의 계측기는 실험 전에 교정을 통해 농도를 모두 일치시키고 사용하였다. 공기청정기 사용에 따라 교실 환기가 줄어들 수 있으므로 CO₂ 농도도 같이 측정하였고 교실 별로 4 회씩 반복하였다. 공기청정기와 측정기의 설치 위치는 그림 1과 같다. 공기청정기 1대 설치 교실의 경우 교실 창문 쪽 중앙에 위치시키고 사용하였고, 2대의 교실의 경우 교실 앞 쪽의 출입구 근처와 뒤 쪽의 창가 쪽 근처에 설치하였다. 측정기들은 그 위치에 따라 공기청정기 위치나 개수에 의해 영향을 미칠 가능성이 있어 여러 곳을 동시 측정할 필요가 있지만 현장에서는 학생들의 수업에 방해가 없도록 하고, 학생들의 호기심에 의한 계측기 접촉을 방지하기 위해 교실 앞 쪽의 선생님 교탁 근처에 교실 바닥으로부터 약 95 cm 높이의 보조테이블 위에 설치하여 측정하였다.

공기청정기는 모두 최대 풍량 조건에서 진행하였고, 대부분의 경우 학생들이 수업을 진행하는데 공기청정기의 소음으로 인한 문제는 거의 발생하지 않았다. 또한, 교실의 건물 기밀도가 실험결과에 영향을 줄 수 있으므로 학교별로 교실 건물 기밀도를 측정하였다.

3. 실험 결과

그림 2(a)는 서울 A 초등학교 2학년 교실에서의 수업시간 동안 발생하는 PM_{2.5}와 PM₁₀을 외기 농도와 함께 비교한 결과이다. 이 날의 외부 미세먼지 농도는 수업시간인 6시간 평균 기준으로 PM_{2.5} 78.4 μg/m³, PM₁₀ 99.5 μg/m³인 날로서 보통 일반적으로 도시 지역의 PM_{2.5}/PM₁₀이 0.5 근처를 나타냄에 반해 (Souza et al., 2014) 이날의 PM_{2.5}/PM₁₀은 0.79 정도로서 상대적으로 PM_{2.5} 농도가 매우 높은 날 중 하나였다. 하지만 교실 내 미세먼지 농도는 PM_{2.5}는 50.6 μg/m³, PM₁₀은 176.9 μg/m³로서 PM_{2.5}/PM₁₀이 0.29 정도를 나타내어 대기 미세먼지 상태와는 달리 PM₁₀ 중 2.5 μm 보다 큰 먼지의 비율이 매우 높은 것으로 나타났다. 특히 학생들의 활동량이 증가하는 중간 놀이시간이나 점심 시간에 PM₁₀ 값이 급격히 증가함에 반해 PM_{2.5}의 경우는 큰 변화가 없었다. 그림 2(b)는 수업 전 학생들이 없을 때, 학생들이 수업 중일 때, 점심 시간일 때의 교실 미세먼지의 크기분포를 보여주고 있다. 1 μm 이하의 작은 먼지는 학생들이 없을 때나 학생들이 활발히 움직이는 점심 시간이나 크기분포 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 1 μm 이하의 작은 먼지는 대부분 자동차(Janssen et al., 2001) 등에서 연료를 연소시킬 때 발생하는 미세한 먼지로 교실 외부에서 주로 발생하기 때문에 교실 내의 학생들 유무와는 상관이 없는 것으로 나타났다. 한편 1 μm 이상의 큰 먼지의 경우 학생들이 등교하기 전에는 거의 발생하지 않

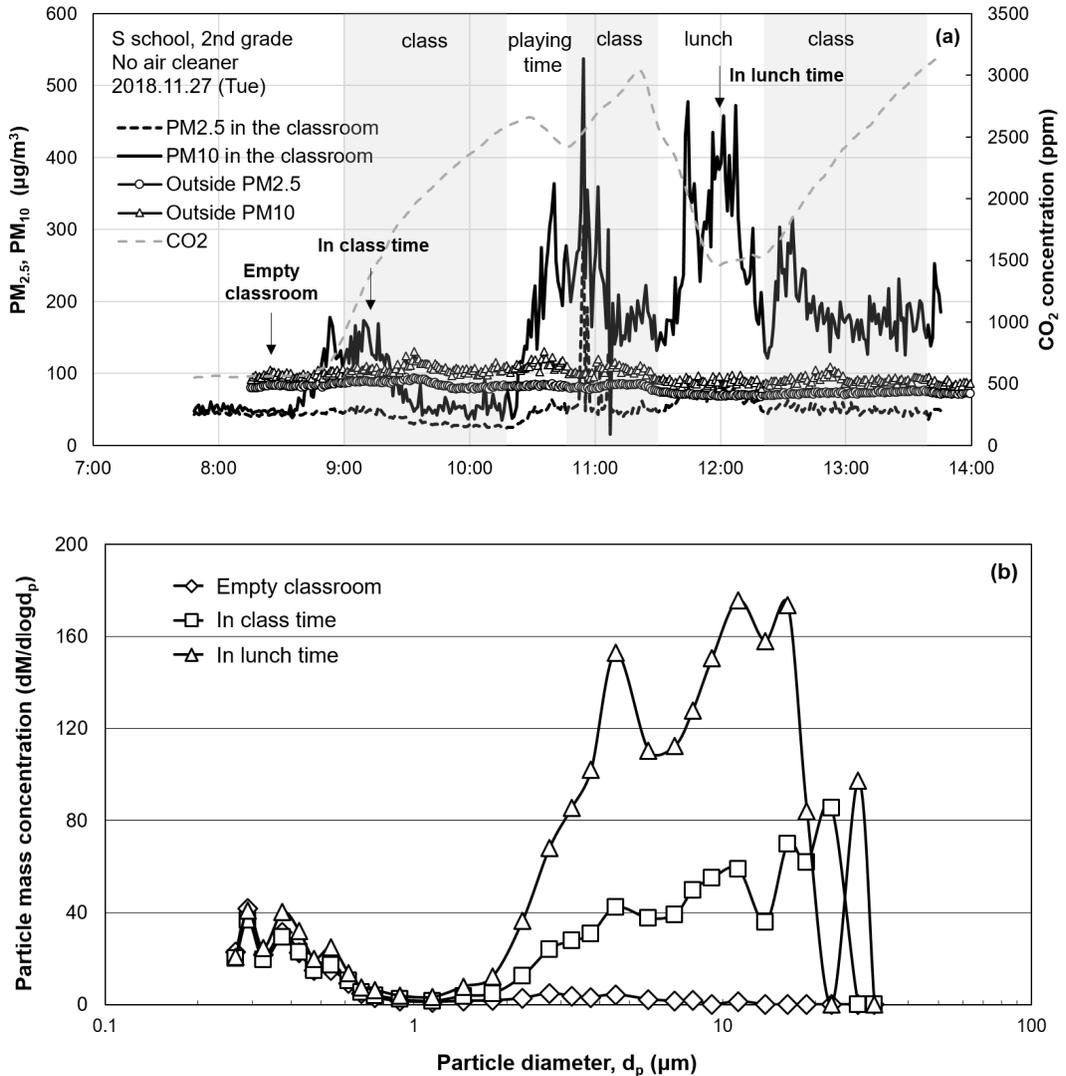


Fig. 2. (a) PM_{2.5} and PM₁₀ changes in a classroom of S elementary school and (b) the size distributions of particles in the empty and occupied classroom in class and lunch time.

다가 학생들의 활동에 의해 발생량이 크게 증가하는 특성을 나타내었다. 이는 이러한 큰 먼지는 대부분 학생들의 활동에 의해 옷이나 신발에 묻어 있던 먼지가 떨어져 발생하거나 바닥에 깔려있던 먼지가 학생들의 움직임으로 인해 비산되어 발생하는 것으로 판단된다(Agarwal and Nagendra, 2016; Chithra and Nagendra, 2012; Diapouli et al., 2008). 따라서 PM_{2.5}는 주로 교실 외부에서 발생하므로 외부에서

내부로의 유입을 막기 위한 교실 기밀도 관리가 중요하고, PM₁₀의 경우는 학생들의 움직임에 의한 비산먼지가 대부분이므로 출입구에서의 먼지떨이 발판 사용이나 학생들의 실내화 착용 준수, 주기적인 물청소 관리 등을 통해 비산먼지의 발생을 억제시킬 필요가 있다.

그림 3은 그림 2를 실험한 동일한 날에 CADR 14.5 m^3/min 의 F 공기청정기에 대해 공기청정기를

사용하지 않은 교실과 공기청정기를 1대 사용한 교실, 2대 사용한 교실의 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 농도를 외기 농도와 비교한 결과의 한 사례를 보여주고 있다. 그림 3(a)에서 알 수 있듯이 $PM_{2.5}$ 의 경우는 공기청정기를 사용하지 않는 교실의 경우도 평균 $50.6 \mu g/m^3$ 을 나타내어 외기 농도 대비 64.5% 정도로 외기 대비 농도가 낮게 나타났다. 환기가 없는 수업시간 동안에는 자연 감소에 의해 농도가 더욱 조금씩 감소하였으나 학생들이 출입이 잦은 중간 놀이시간이나 점심시간에는 농도가 증가하였고, 특히 점심시간에는 외기 농도와 거의 비슷한 수준까지 농도가 증가

하였다. CADR $14.5 m^3/min$ 공기청정기를 1대 사용할 경우에는 평균 $12.5 \mu g/m^3$ 을 나타내어 외기 농도 대비 15.9% 수준까지 감소시킬 수 있었다. 기밀한 환경의 수업시간에는 평균 $6.3 \mu g/m^3$ 수준까지도 농도를 줄일 수 있었으나 기밀도가 떨어지는 중간 놀이시간이나 점심시간에는 각각 평균 $30.8 \mu g/m^3$, $38.3 \mu g/m^3$ 정도를 나타내어 공기청정기의 효과가 많이 떨어지는 것을 알 수 있다. 한편, 공기청정기를 2대를 사용할 경우에는 평균적으로 외기농도 대비 12.3% 수준까지 감소시킬 수 있었고, 특히 이 경우 중간 놀이시간에도 평균 $11.6 \mu g/m^3$, 점심

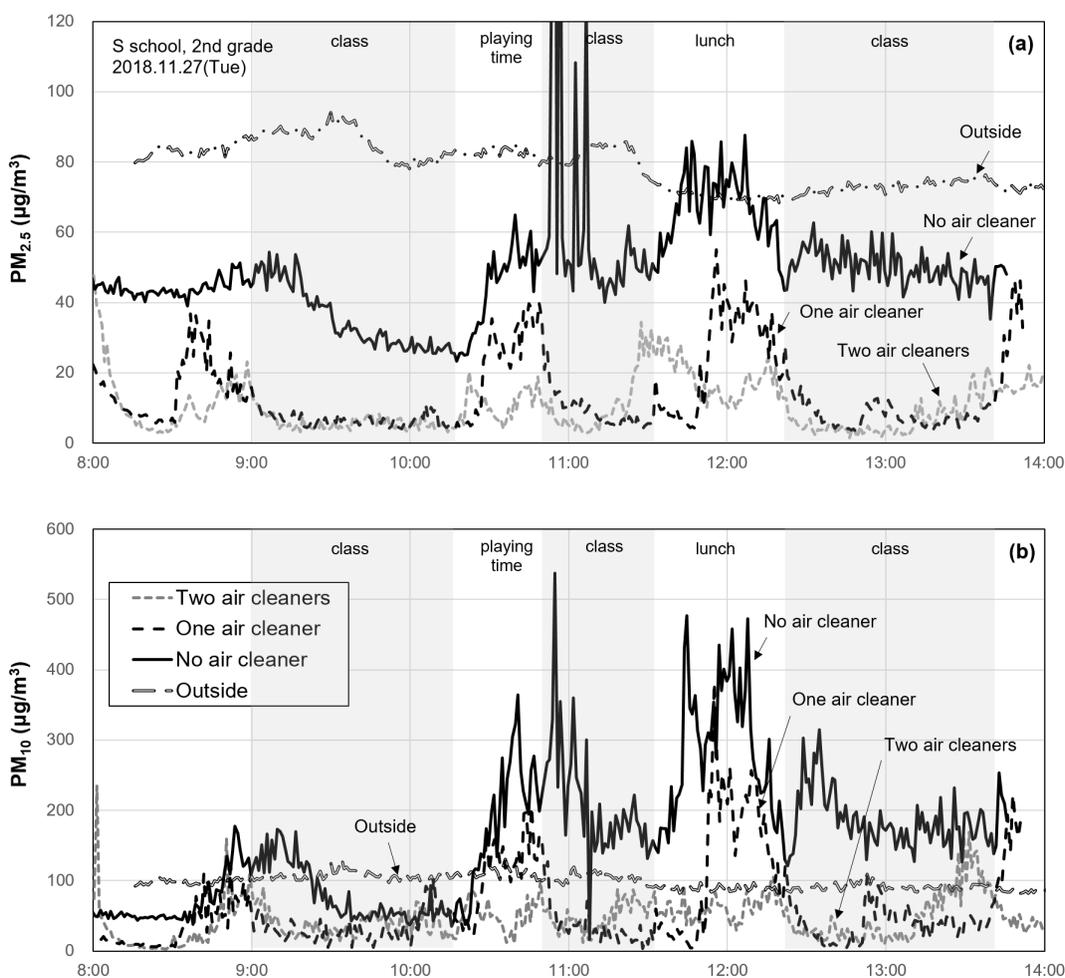


Fig. 3. (a) $PM_{2.5}$ and (b) PM_{10} changes with time in classrooms without an air cleaner, with an air cleaner and two air cleaners (F model).

시간에도 평균 18.8 μg/m³ 수준까지 농도를 저감시킬 수 있었다. 또한 그림 3(b)와 같이 PM₁₀의 경우는 공기청정기를 사용하지 않는 교실의 경우 평균 176.9 μg/m³을 나타내어 외기 농도인 99.5 μg/m³보다 약 1.8배 농도가 높게 나타났고, 특히 학생들의 활동량이 많은 중간 놀이시간이나 점심시간에는 각각 외기농도 대비 약 2.4배, 3.8배까지 증가하는 특성을 나타내었다. CADR 14.5 m³/min 공기청정기를 1대 사용할 경우에는 평균 PM₁₀ 60.8 μg/m³를 나타내어 외기 농도 대비 평균 61.1% 수준으로 감소시킬 수 있었으나 중간 놀이시간이나 점심시간에는 외기 농도보다 각각 약 1.3배, 2.1배로 농도가 높게 나타나 학생들의 활동량이 높은 중간 놀이시간이나

외기 농도 대비 각각 43.0%, 69.6%의 수준으로 농도를 감소시킬 수 있었다.

그림 4는 8대의 공기청정기에 대해 공기청정기 없는 교실과 1대인 교실, 2대인 교실의 PM_{2.5}와 PM₁₀ 미세먼지 농도를 평균적으로 외기 농도와 비교한 결과를 나타내고 있다. 공기청정기를 1대 사용한 교실의 경우 평균적으로 PM_{2.5}와 PM₁₀이 7.3 ± 0.7과 45.5 ± 4.1 μg/m³을 나타내었고, 2대인 교실의 경우 각각 4.2 ± 0.6과 24.6 ± 2.5 μg/m³을 나타내었다. 한편 공기청정기가 없는 교실에서는 22.1 ± 2.6과 109.1 ± 9.6 μg/m³을 나타내었고, 외기의 경우 각각 36.9 ± 5.1과 74.1 ± 10.6 μg/m³을 나타내었다. PM_{2.5}의 경우는 공기청정기가 없는 교실이라든

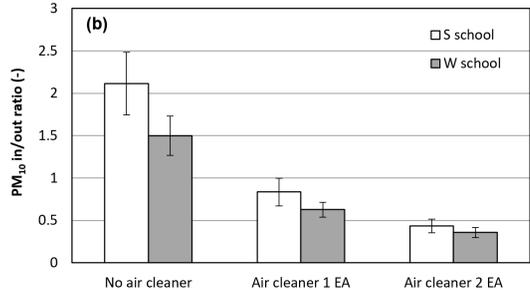
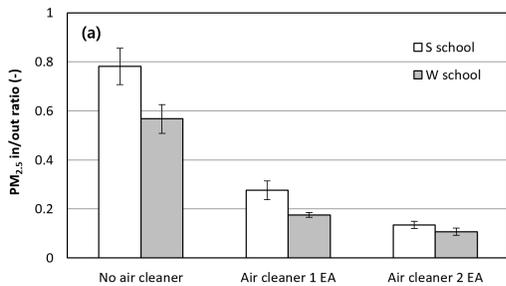


Fig. 6. (a) PM_{2.5} and (b) PM₁₀ in/out concentration ratio for classrooms without air cleaner, with one air cleaner and two air cleaners.

점심시간에는 공기청정기 1대로는 PM₁₀ 제어가 쉽지 않음을 알 수 있다. 한편 CADR 14.5 m³/min 공기청정기를 2대 사용할 경우에는 평균 PM₁₀ 48.6 μg/m³을 나타내어 외기 농도 대비 48.9% 수준으로 감소시킬 수 있었고, 중간 놀이시간이나 점심시간에도

외기에 비해 농도가 59.9% 수준으로 낮게 나타났다. 이는 내부 발생원이 없는 실내 공간이 바깥 대기 공간보다 농도가 낮게 나타나는 기존 연구사례들과 잘 일치한다(Guo et al., 2010; Madureira et al., 2012). 한편 공기청정기를 1대 사용할 경우 공기청정기가

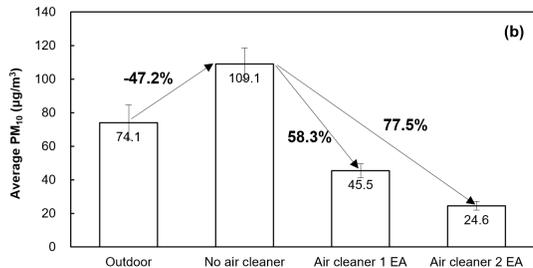
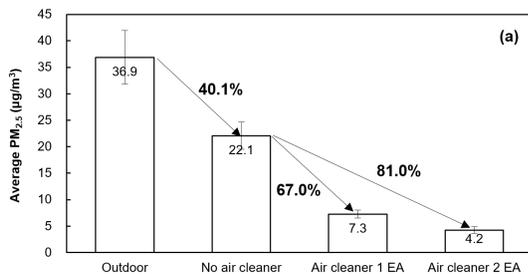


Fig. 4. (a) Average PM_{2.5} and (b) PM₁₀ in classrooms without an air cleaner, with an air cleaner and two air cleaners for eight air cleaners.

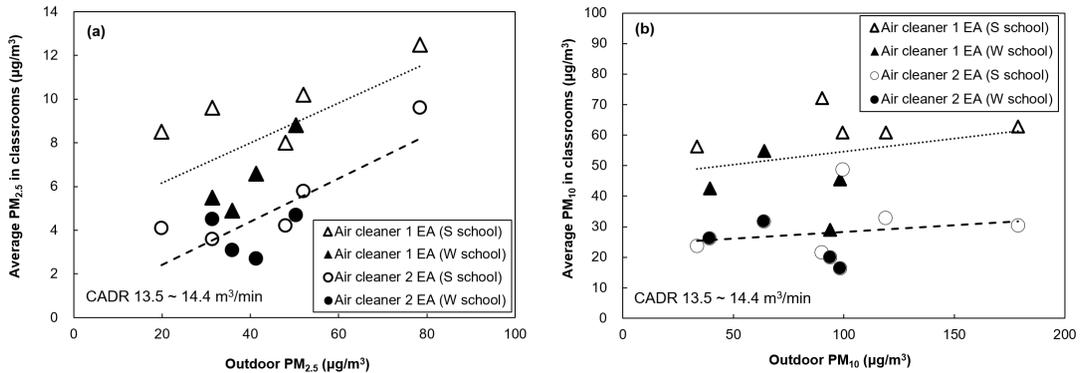


Fig. 5. Average (a) $PM_{2.5}$ and (b) PM_{10} in classrooms with 1 or 2 air cleaners at different outdoor $PM_{2.5}$ and PM_{10} for five air cleaners with CADRs between 13.5 and 14.4 m^3/min .

없는 교실 대비 67.0% 정도 $PM_{2.5}$ 농도를 낮출 수 있었고, 2대를 사용할 경우 약 81.0%까지 줄일 수 있었다. 외기농도와 비교해 보았을 때는 1대 일 때 80.2%, 2대일 때는 88.6%까지 줄이는 효과가 있으므로 외기농도가 높은 날 공기청정기가 설치된 실내 공간에서 생활하는 것은 미세먼지 노출을 줄이는데 효과가 매우 우수할 수 있음을 보여준다. 그러나 PM_{10} 의 경우는 학생들 활동에 의해 주로 발생하므로 공기청정기가 없는 교실에서 외기 농도 보다 1.47배 높게 나타났고, 공기청정기를 1대 사용할 경우 공기청정기가 없는 교실 대비 58.3%, 2대를 사용할 경우 77.5% 정도 줄일 수 있었다. 하지만 외기농도와 비교해 볼 때는 1대 일 때 38.6%, 2대 일 때 66.8% 줄이는 정도이므로 PM_{10} 농도를 줄이기 위해서는 공기청정기만으로는 해결이 쉽지 않음을 알 수 있다.

그림 5는 CADR값이 13.5~14.4 m^3/min 범위의 유사한 CADR값을 갖는 5대의 공기청정기에 대해 공기청정기를 1대 또는 2대 사용할 때 외기 농도 변화에 따른 6시간 수업시간 동안의 교실 평균 농도를 나타내고 있다. $PM_{2.5}$ 의 경우는 외기농도가 높을수록 유입되는 미세먼지 량이 증가하여 수업시간 중의 교실 내 평균농도가 높아지는 특성이 나타났다. 이를 통해서도 $PM_{2.5}$ 는 주로 외부 발생원임을 다시 한번 알 수 있다. 그렇지만 CADR 13.5~14.4 m^3/min 범위 공기청정기를 1대 사용할 때 교실의 $PM_{2.5}$ 농도는 외기가 아주 고농도일 때를 제외하고는 대부분 세계보건기구(WHO)의 연평균 기준치인 10 μ

g/m^3 수준으로 관리가 가능함을 알 수 있다. 한편 PM_{10} 의 경우는 내부 미세먼지 농도가 외기농도와는 큰 상관성을 갖지 않고 있었다. 이 또한 PM_{10} 은 주로 학생들의 활동에 따라 내부 요인에 의해 발생하는 것이기 때문에 외기농도에 의한 영향이 작은 것으로 해석될 수 있다. 그리고 CADR 13.5~14.4 m^3/min 공기청정기를 2대를 사용하더라도 세계보건기구(WHO)의 연평균 기준치인 20 $\mu g/m^3$ 수준을 만족시키기 쉽지 않음을 알 수 있었다. 상대적으로 신축학교인 W 학교 교실이 S 학교 교실에 비해 공기청정기를 사용할 때 교실 내 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 농도가 낮게 나타났고 특히 공기청정기를 1대 사용할 때 그 특징이 두드러지게 나타났다.

2개 학교 교실에 대해 건물 기밀도를 측정해 보았다. 2016년도에 설립된 W 학교의 경우 $ACH50 = 9.5 h^{-1}$ 인 반면에 2011년도에 설립된 S 학교의 경우 $ACH50 = 15.8 h^{-1}$ 로 기밀도가 상대적으로 다소 떨어졌다. 여기에서 $ACH50$ 은 건물 내부에 압력을 가해 외부 대비 50 Pa의 차이가 나도록 하고, 이 때의 환기량을 단위 시간당 환기 회수로 나타내는 값을 의미한다. 그림 6은 두 학교의 공기청정기가 없는 교실, 1대인 교실, 2대인 교실의 외기 농도 대비 교실 농도 비율인 in/out ratio (I/O)을 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 에 대해 보여주고 있다. 공기청정기가 없는 교실의 $PM_{2.5}$ I/O는 S 학교에서 0.78 ± 0.07 임에 반해 W 학교의 경우 0.58 ± 0.06 을 나타내어 기밀도가 높은 교실의 경우 공기청정기가 없더라도 교실 내의 $PM_{2.5}$ 농도가 상대적으로 낮게 나타났다. 또한 전체적으로도 기밀도

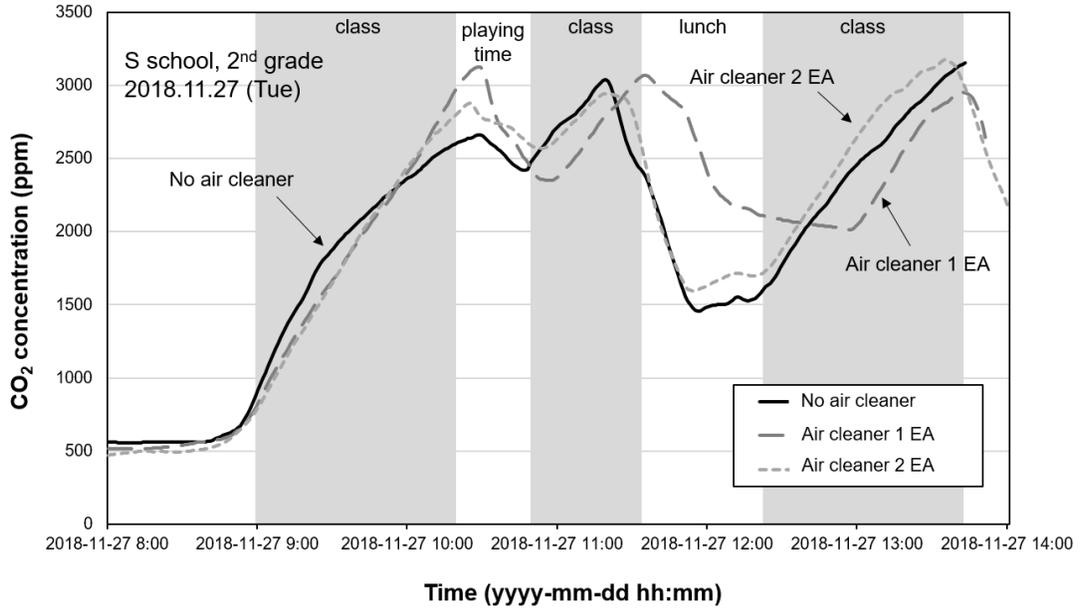


Fig. 7. CO₂ concentrations in classrooms without an air cleaner, with an air cleaner and two air cleaners (Model F).

가 높은 W 학교에서 공기청정기 사용에 따른 PM_{2.5}와 PM₁₀의 저감 효과가 기밀도가 떨어지는 S 학교에 비해 우수한 특성을 나타내었다. 측정일의 풍속을 살펴보다도 S 학교에서 측정할 때 보다 W 학교에서 측정할 때가 풍속이 높은 날이 많아서 침기에 의한 영향이 W 학교가 높을 수 있었으나 교실 기밀도가 우수한 W 학교에서 전체적으로 농도가 낮게 나타났다. 따라서 교실 미세먼지의 관리에는 적절한 용량의 공기청정기 사용과 함께 교실의 기밀도 향상이 매우 중요함을 알 수 있다.

그림 7은 서울 S 학교의 학생 27-28명 2학년 3개 교실에 대하여 공기청정기를 사용하지 않은 교실과 공기청정기를 1대 및 2대 사용한 교실의 시간별 CO₂ 농도 변화의 한 사례를 나타내고 있다. 공기청정기의 유무와는 관계없이 초기에 CO₂ 농도가 500 ppm 근처에서 시작하여 수업시간 동안에는 지속적으로 2,500-3,000 ppm까지 증가하다가 중간 놀이 시간에 약 100-700 ppm 정도 감소하였고, 다시 수업시간에 3,000 ppm까지 증가한 뒤 점심시간에 1,500-2,000 ppm 정도로 감소하고 난 뒤 오후 수업시간에 다시 3,000 ppm까지 증가하는 패턴을 나타

내었다. 다만 공기청정기 1대인 교실의 경우 점심시간에 출입량이 작아 상대적으로 환기가 덜 이루어져 농도 감소가 다른 교실에 비해 작게 나타난 것으로 보인다. 하지만 전체적으로 살펴보면 측정일이 초겨울에 해당하여 대부분의 교실이 밀폐 환경에서 수업을 진행하였고, 수업시간에는 환기가 부족하여 CO₂가 지속적으로 증가하다가 학생들이 중간놀이 때나 점심시간 때 출입문을 드나들면서 자연적으로 환기가 이루어지는 것으로 판단된다.

그림 8은 두 학교 2학년 교실의 학생 수와 공기청정기 유무에 따른 수업시간 동안의 평균 CO₂ 농도 값을 나타내고 있다. 같은 학년이라도 학생 수 27-28명인 S 학교 교실의 CO₂ 농도가 24명인 W 학교 교실 보다 높게 나타났고, 두 학교 모두 특별히 공기청정기를 사용하는 교실이 사용하지 않는 교실 보다 평균 CO₂ 농도가 상대적으로 높은 특성을 나타내지는 않았다. 한편 CO₂의 최대농도는 공기청정기 없는 교실에서 2,691~3,225 ppm, 공기청정기 1대인 교실에서 2,592~3,579 ppm, 공기청정기 2대인 교실에서 2,312~3,176 ppm을 나타내었다. 따라서 학교에서 공기청정기를 사용한다고 특별히 환기량이 줄

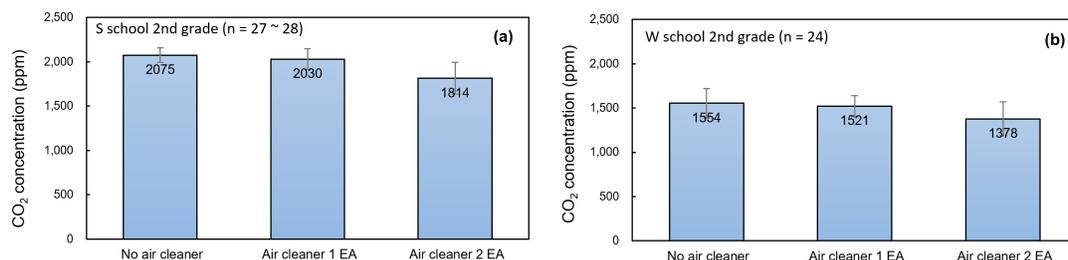


Fig. 8. Average CO₂ concentrations in classrooms of 2nd grade students without an air cleaner, with an air cleaner and two air cleaners in the (a) S school and (b) W school.

어들어 CO₂ 농도가 증가하는 것은 아닌 것으로 나타났다. 한편 전반적으로 교실 내의 CO₂ 농도는 기준치인 1000 ppm을 1.5-2배 정도 초과하고 있음을 알 수 있었고, 이러한 이산화탄소 기준치 초과는 우리나라뿐만 아니라 다른 나라의 교육 환경에서도 쉽게 관찰되는 것으로 보고되고 있다(Fromme et al., 2007; Godwin and Batterman, 2007; Pegas et al., 2012; Buonanno et al., 2013). 따라서 공기청정기 사용과는 별도로 환기장치를 설치하거나 주기적인 환기 시간을 갖는 등의 교실 CO₂ 관리를 위한 별도의 환기 대책 마련이 중요함을 확인할 수 있었다.

본 연구는 학생들이 실제로 수업하는 교실에서 외기 조건 변화에 따른 침기량이나 환기량 변화 등 변수 제어가 어려운 환경에서의 실증 측정 데이터를 분석한 결과로서 교실 기밀도만의 영향으로 결과를 해석하기에는 다소 한계가 있다. 따라서 교실 기밀도 이외의 환기량이나 침기량 변화 등에 따른 공기청정기 효과 분석도 추가적으로 파악할 필요가 있다. 또한 본 연구는 새 필터를 설치한 공기청정기로 최대 풍량 조건에서 진행한 실험 결과로서 공기청정기의 성능이 최대치일 때의 적용 가능성을 살펴본 결과이다. 공기청정기를 자동으로 운전할 때나 공기청정기를 장시간 사용할 때에 의한 성능 변화를 관찰할 필요가 있다. 특히 공기청정기를 관리하지 않고 오래 사용할 경우 전처리 필터 오염에 의한 풍량 저하나 HEPA필터의 정전기력 손실로 인한 성능 저하가 발생할 수 있다. 따라서, 공기청정기를 학교 교실에서 장시간 사용할 때의 실질적인 미세먼지 저감 효과 파악과 함께 성능 유지를 위한 전처리 필터의 청소 주기나 HEPA필터의 교체 주기에 대한 연구도 추가적으로 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 서울에 위치한 두 개의 초등학교에서 CADR 9.9 m³/min 이상의 8개의 공기청정기에 대해 공기청정기를 1대 또는 2대 설치한 교실의 미세먼지 농도를 공기청정기가 없는 교실 및 외기농도와 비교해 보았다. 공기청정기를 1대 및 2대 사용한 교실은 PM_{2.5}에 대해 평균적으로 공기청정기가 없는 교실보다 각각 67.0%, 81.0%의 저감 특성을 나타냈고, PM₁₀은 각각 58.3%, 77.5%의 저감 효과를 보였다. PM_{2.5}는 발생원이 거의 외부 요인에 있어서 기밀도 개선과 공기청정기 사용으로 세계보건기구(WHO) 기준치 수준으로 관리가 가능한 것으로 나타났다. 그러나 PM₁₀은 학생 활동에 따른 내부 발생이 주된 요인이어서 기밀도 개선이나 공기청정기 사용만으로는 한계가 있고 학생들 활동에 따른 비산먼지 발생을 근본적으로 줄이기 위한 다른 방안 마련이 필요함을 확인하였다. 또한 교실 내 이산화탄소 농도는 공기청정기 사용과 관계없이 기준치인 1000 ppm을 1.5-2배 정도 초과하여 학교의 이산화탄소 관리를 위한 환기방안 마련이 시급함을 확인할 수 있었다. 특히 자연환기 방식으로 적정한 환기량을 교실로 도입할 경우 공기청정기의 효과가 감소할 수 있으므로 필터가 설치된 환기장치를 같이 도입하는 방향도 고려해야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부)의 재원의 한국연구재단·미세먼지

국가전략프로젝트 사업과 한국공기청정협회 수탁사업의 지원을 받아 수행하였고 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- Agarwal, N., and Nagendra, S.S. (2016). Modelling of particulate matters distribution inside the multi-level urban classrooms in tropical climate for exposure assessment, *Building and Environment*, 102, 73-82.
- Anderson, J.O., Thundiyil, J.G., and Stolbach, A. (2012). Clearing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health, *Journal of Medical Toxicology*, 8(2), 166-175.
- Bonjour, S., Adair-Rohani, H., Wolf, J., Bruce, N.G., Mehta, S., Prüss-Ustün, A., Lahiff, M., Rehfuess, E.A., Mishra, V., and Smith, K.R. (2013). Solid fuel use for household cooking: country and regional estimates for 1980-2010, *Environmental Health Perspectives*, 121(7), 784-790.
- Buonanno, G., Fuoco, F.C., Morawska, L., and Stabile, L. (2013). Airborne particle concentrations at schools measured at different spatial scales, *Atmospheric Environment*, 67, 38-45.
- Chithra, V.S., and Nagendra, S.M.S. (2012). Indoor air quality investigations in a naturally ventilated school building located close to an urban roadway in Chennai, India, *Building and Environment*, 54, 159-167.
- Chithra V.S., and Shiva N.S.M. (2018). A review of scientific evidence on indoor air of school building: pollutants, sources, health effects and management, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 12(2), 87-108.
- Choi J., Park, R., Lee, H.M., Lee, S., Jo, D., Jeong, J., Henze, D.K., Woo, J.H., Ban, S.J., Lee, M.D., Lim, C.S., Park, M.K., Shin, H.J., Cho, S., Peterson, D., and Song, C.K. (2019). Impacts of local vs. trans-boundary emissions from different sectors on PM_{2.5} exposure in South Korea during the KORUS-AQ campaign, *Atmospheric Environment*, 203, 196-205.
- Diapouli, E., Chaloulakou, A., Mihalopoulos, N., and Spyrellis, N. (2008). Indoor and outdoor PM mass and number concentrations at schools in the Athens area, *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1-3), 13-20.
- Fromme, H., Twardella, D., Dietrich, S., Heitmann, D., Schierl, R., Liebl, B., and Rüdén, H. (2007). Particulate matter in the indoor air of classrooms-exploratory results from Munich and surrounding area, *Atmospheric Environment*, 41(4), 854-866.
- Gaidajis, G., and Angelakoglou, K. (2009). Indoor air quality in university classrooms and relative environment in terms of mass concentrations of particulate matter, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 44(12), 1227-1232.
- Godwin, C., and Batterman, S. (2007). Indoor air quality in Michigan schools, *Indoor Air*, 17(2), 109-121.
- Guo, H., Morawska, L., He, C., Zhang, Y.L., Ayoko, G., and Cao, M. (2010). Characterization of particle number concentrations and PM_{2.5} in a school: influence of outdoor air pollution on indoor air, *Environmental Science and Pollution Research*, 17(6), 1268-1278.
- Hajat, A., Hsia, C., and O'Neill, M.S. (2015). Socioeconomic disparities and air pollution exposure: a global review, *Current Environmental Health Reports*, 2(4), 440-450.
- Jang, C.S., Lee, T.J., and 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)
- Janssen, N.A., van Vliet, P.H., Aarts, F., Harssema, H., and Brunekreef, B. (2001). Assessment of exposure to traffic related air pollution of children attending schools near motorways, *Atmospheric Environment*, 35(22), 3875-3884.

- Jeong, J., and Lee, H. (2010). Study on the characteristics of air quality in the classroom of elementary school and its control methods, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 32(4), 311-322. (in Korean with English abstract)
- KACA (2018). Room Air Cleaner Standard, Seoul, Korea, Korea Air Cleaning Association (SPS-KACA002-132).
- Klepeis, N.E., Nelson, W.C., Ott, W.R., Robinson, J.P., Tsang, A.M., Switzer, P., Behar, J.V., Hern, S.C., and Engelmann, W.H. (2001). The national human activity pattern survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 11, 231-252.
- Lee, S.C., Guo, H., Li, W.M., and Chan, L.Y. (2002). Inter-comparison of air pollutant concentrations in different indoor environments in Hong Kong, *Atmospheric Environment*, 36(12), 1929-1940.
- Lippmann, M. (2013). Exposure science in the 21st century: a vision and a strategy, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 23(1), 1.
- Madureira, J., Paciencia, I., and Fernandes, E.O. (2012). Levels and indoor-outdoor relationships of size-specific particulate matter in naturally ventilated Portuguese schools, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 75(22-23), 1423-1436.
- Oeder, S., Dietrich, S., Weichenmeier, I., Schober, W., Pusch, G., Jörres, R.A., Schierl, R., Nowak, D., Fromme, H., Behrendt, H., and Buters, J.T.M. (2012). Toxicity and elemental composition of particulate matter from outdoor and indoor air of elementary schools in Munich, Germany, *Indoor Air*, 22(2), 148-158.
- Pegas, P.N., Nunes, T., Alves, C.A., Silva, J.R., Vieira, S.L.A., Caseiro, A., and Pio, C.A. (2012). Indoor and outdoor characterisation of organic and inorganic compounds in city centre and suburban elementary schools of Aveiro, Portugal, *Atmospheric Environment*, 55, 80-89.
- Pope, C.A. III, Renlund, D.G., Kfoury, A.G., May, H.T., and Home, B.D. (2008). Relation of heart failure hospitalization to exposure to fine particulate air pollution, *American Journal of Cardiology*, 102(9), 1230-1234.
- Souza, D.Z., Vasconcellos, P.C., Lee, H., Aurela, M., Saarnio, K., Teinilä, T., and Hillamo, R. (2014). Composition of PM_{2.5} and PM₁₀ collected at urban sites in Brazil, *Aerosol and Air Quality Research*, 14, 168-176.