Check for updates

Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 37, No. 5, October 2021, pp. 744-758
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.5.744
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

논 문

2019년 고농도 미세먼지 시즌의 서울 초등학교 교실의 공기청정기 효과 분석

Analysis on the Effect of an Air Cleaner in Elementary School Classrooms in Seoul, Korea for a Season of High Concentration Fine Particles in 2019

한방우*, 홍기정, 이건희, 김상복, 박인용, 박대훈, 김학준, 김용진, 이예완, 김진태, 정상현, 심성훈
한국기계연구원 환경기계연구실

Bangwoo Han*, Kee-Jung Hong, Gunhee Lee, Sang-Bok Kim, In-Yong Park, Dae-Hoon Park, Hak-Joon Kim, Yong-Jin Kim, Ye-Wan Lee, Jin-Tae Kim, Sang-Hyun Jeong, Sung-Hoon Shim
Department of Environmental Machinery, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, Republic of Korea

접수일 2021년 8월 12일
수정일 2021년 9월 3일
채택일 2021년 9월 6일

Received 12 August 2021
Revised 3 September 2021
Accepted 6 September 2021

***Corresponding author**
Tel : +82-(0)42-868-7068
E-mail : bhan@kimm.re.kr

Abstract School is one of the environments where vulnerable children can be greatly affected by outdoor fine particles. In this study, we has investigated the effect of reducing fine particles ($PM_{2.5}$) and coarse particle ($PM_{2.5-10}$) by using an air cleaner in the classrooms of two elementary schools in Seoul for a month March, 2019, which was a monthly season when air quality based on $PM_{2.5}$ was the worst since 2015 in Korea. The average outdoor $PM_{2.5}$ was 46.6~46.8 μg/m^3 during class hours around the two schools in March. Indoor $PM_{2.5}$ in the classrooms was significantly reduced to 15.4 μg/m^3 and 6.8 μg/m^3 respectively by operation of the air cleaner with a clean air delivery rate of 15.9 and 17.9 m^3/min. Indoor $PM_{2.5-10}$ in classrooms was nearly independent of outdoor $PM_{2.5-10}$ and the effect of air cleaners on $PM_{2.5-10}$ was weak compared to that on $PM_{2.5}$. In order to improve indoor air quality based on $PM_{2.5}$, it is necessary to keep a high CADR capability while continuously using an air cleaner and to improve the airtightness of classrooms. However, carbon dioxide may easily increase above the standard value in classrooms due to lack of ventilation, therefore it is necessary to come up with appropriate ventilation strategies at the same time as improving the airtightness of classrooms.

Key words: Air cleaner, Elementary school, Fine particles, Coarse particles, CO_2

1. 서 론

우리나라는 연평균 $PM_{2.5}$ 미세먼지 농도가 2015년 관측을 시작한 이래로 2015년 26 μg/m^{3}에서 2019년도 23 μg/m^{3}까지 조금씩 감소하고 있으나 (NIER, 2020), 아직도 세계보건기구 (World Health Organization)에서 권고하는 $PM_{2.5}$ 연평균 기준인 10 μg/m^3 (WHO, 2006) 대비 2배 이상 높은 수준을 나타내고 있다. 2019년 세계공기질보고서에 따르면 한국의 2019년 연평균 $PM_{2.5}$ 농도는 OECD 회원국 36개국 중 가장 나쁜 것으로 나타났고, 2016년도부터 2019년도까지 4년간 서울의 연간 $PM_{2.5}$ 농도를 살펴보더라도 '매우 나쁨'의 비율이 2016년 4.1%에서 2019년 6.5%까지 증가한 것으로 나타났다 (IQ Air, 2020). 특히 2019년 3월에는 3월 1일부터 7일까지 7일 연속으로 고농도 미세먼지 비상저감조치가 시행되었고, 3월 5일에는 서울 하루 평균 $PM_{2.5}$ 농도가 135 μg/m^{3}까지 이르는 등 환경부에서 2015년부터 $PM_{2.5}$를 관측하기

시작한 이래로 월평균 농도가 사상 최고치인 45 μg/m^{3}을 나타내어 최악의 미세먼지가 한반도를 덮쳤던 시기로 평가되고 있다. 따라서 우리나라의 연평균 미세먼지 농도가 지속적으로 감소하는 추세임에도 고농도 미세먼지 발생일 빈도는 오히려 증가하여 미세먼지로 인한 국민들의 건강에 대한 우려는 보다 증가하고 있다고 볼 수 있다.

학교는 미세먼지에 취약한 어린이들이 생활하는 대표적인 공간이므로 이러한 고농도 미세먼지로부터 학생들을 보호하기 위한 공기질 관리가 매우 중요하다 (Pacitto *et al.*, 2018). 교통량이 많은 도로 주변에 위치해 있을 때 외부에서 발생한 오염물질이 교실 내부로 직접적인 영향을 미치고 있어(Rivas *et al.*, 2015) 학교는 대기 오염물질에 매우 취약하다고 할 수 있다. 최근 한 설문 연구에 따르면 우리나라 초중고교 자녀를 둔 학부모들은 학교 교실의 공기질에 대해 상당히 부정적인 인식을 갖고 있는 것으로 나타났고, 학교 공기질 관리를 위해 측정장비와 공기정화장치의 적극적인 설치를 요구하는 것으로 나타났다(Yoo *et al.*, 2020). 이러한 배경에서 교육부에서는 2019년도 학교보건법을 통해 학교 교실에 환기설비 또는 공기청정기 등의 공기정화장치를 설치하도록 의무화하였다. 공기청정기를 설치할 때 공기청정화능력인 CADR (Clean air delivery rate) (AHAM, 2020)이 13 m^3/min 이상의 용량을 가지도록 하였고, 환기설비를 설치할 때 1인당 21.6 m^3/h 이상의 환기량을 확보하면서 필터 성능이 최소효율값(MERV, Minimum efficiency rating value) (ASHRAE, 2017)으로 12~15 범위 내의 등급을 사용하도록 하였다. 소음은 공기청정기와 환기설비 모두 55 dB (A) 이하 기준을 만족시키도록 하였다. 한편 공기정화장치의 효율을 유지시키기 위해 전처리필터는 1~2개월에 1회씩 청소하도록 하였고, 미디움필터는 3~6개월에 1회씩 점검하고 필요시 필터를 교환하도록 하였다.

하지만 전 세계적으로 학교에서 미세먼지 관리를 위해 적극적인 공기정화장치 적용에 따른 효과 분석 연구가 많이 부족하다. 따라서 교육부에서 제시한 공기정화장치의 설치 및 사용 기준에 따라 운영했을 때 아이들이 생활하는 실제 교실의 미세먼지를 얼마나 줄이고 지속적으로 유지시킬 수 있는지에 대한 의문이 많은 상황이다. 특히 3월 한 달은 아이들이 학교에 등교하여 생활하는 시기 중 가장 미세먼지 농도가 높은 기간이므로 이러한 미세먼지 고농도 시즌 동안 학교용 공기정화장치를 적용했을 때 미세먼지 감소 효과가 얼마나 있는지에 대한 데이터 확보가 매우 필요하다. 본 연구진은 이전 연구(Han *et al.*, 2019)에서 서울에 있는 두 개의 초등학교 대상으로 CADR 9.9 m^3/min 이상의 8 종류의 공기청정기를 교실당 1대 또는 2대 설치하여 공기청정기가 없는 교실과 동일 시간대에서 비교해 보았고, 이를 통해 공기청정기가 없는 교실 대비 $PM_{2.5}$ 기준으로 1대는 67.0%와 2대는 81.0%의 저감 효과가 있고, PM_{10} 기준으로 1대는 58.3%와 2대는 77.5%의 저감 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 8개 제품에 대해 2개 학교, 12개 교실에서 이틀간 농도를 측정하여 비교하였고, 고농도 시즌 동안 장시간 운영했을 때의 미세먼지 저감 효과는 살펴보지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 미세먼지 농도가 극심했던 2019년 3월 한 달간 교실 기밀도가 다른 서울의 2개 초등학교 저학년 교실의 실제 학습환경에서 CADR 13 m^3/min 이상의 공기청정기 사용에 따른 $PM_{2.5}$와 $PM_{2.5-10}$ 미세먼지의 저감 효과를 살펴보았다. 이를 아이들이 학습하는 주중 시간과 아이들이 없는 주말 시간으로 구분하고, 외기 $PM_{2.5}$ 농도가 50 μg/m^{3}보다 높을 때와 낮을 때로 구분하여 공기청정기의 적용 효과를 분석해 보았다. 또한 공기청정기의 소비전력과 교실 CO_2 농도 변화를 지속적으로 관찰하여 운전 조건별 공기청정기의 효용성과 교실 환기 저하 문제를 살펴보았다.

2. 연구 방법

학생들이 등교하는 3~7월, 9~12월 중 가장 미세먼

Table 1. Average outdoor $PM_{2.5}$ and PM_{10} for class hours (09:00~14:00) at S and W elementary schools during March 2019.

Date (YY-MM-DD)	S elementary school			W elementary school			Note
	$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	$PM_{2.5}/PM_{10}$ (–)	$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	$PM_{2.5}/PM_{10}$ (–)	
19-03-05	**146.1**	**212.8**	0.69	**142.3**	**194.8**	0.73	$PM_{2.5}$ very bad (warning)
19-03-06	**140.0**	**211.6**	0.66	**117.2**	**168.3**	0.70	$PM_{2.5}$ very bad (warning)
19-03-07	**50.3**	76.0	0.66	28.0	41.6	0.67	
19-03-08	**37.9**	72.2	0.52	34.1	55.5	0.61	
19-03-09	**42.4**	71.2	0.60	28.5	49.7	0.57	Weekend
19-03-10	**46.5**	70.8	0.66	25.2	39.5	0.64	Weekend
19-03-11	**58.5**	**97.8**	0.60	**53.7**	**81.6**	0.66	$PM_{2.5}$ bad
19-03-12	**84.8**	**116.5**	0.73	**82.2**	**106.0**	0.78	$PM_{2.5}$ very bad
19-03-13	10.8	72.7	0.15	8.1	52.8	0.15	
19-03-14	17.1	47.8	0.36	14.8	37.1	0.40	
19-03-15	**51.5**	**91.3**	0.56	**40.4**	69.9	0.58	$PM_{2.5}$ bad
19-03-16	**35.9**	59.0	0.61	33.0	44.9	0.73	Weekend
19-03-17	30.2	55.4	0.54	18.8	36.9	0.51	Weekend
19-03-18	21.7	42.9	0.50	18.8	35.8	0.53	
19-03-19	33.3	67.9	0.49	28.0	49.3	0.57	
19-03-20	**91.8**	**131.5**	0.70	**84.0**	**113.4**	0.74	$PM_{2.5}$ very bad
19-03-21	25.7	36.1	0.71	21.8	28.4	0.77	
19-03-22	20.3	68.6	0.30	21.7	43.9	0.49	
19-03-23	17.1	36.3	0.47	15.7	30.1	0.52	Weekend
19-03-24	14.7	43.7	0.34	12.3	33.3	0.37	Weekend
19-03-25	27.0	54.9	0.49	27.5	49.3	0.56	
19-03-26	**42.0**	76.9	0.55	**40.3**	68.4	0.59	$PM_{2.5}$ bad
19-03-27	**62.7**	**102.8**	0.6t1	**56.2**	**89.3**	0.63	$PM_{2.5}$ bad
19-03-28	**44.0**	**84.6**	0.52	**52.0**	**83.3**	0.62	$PM_{2.5}$ bad
19-03-29	16.2	43.2	0.37	18.3	36.1	0.51	
19-03-30	27.3	41.1	0.66	28.4	37.8	0.75	Weekend
19-03-31	**35.1**	78.3	0.45	34.3	67.9	0.5	Weekend
Average	45.6	80.2	0.54	40.2	64.6	0.59	

지 농도가 높은 시기가 3월이므로 2019년 3월을 집중 측정 기간으로 선정하였다. 특히 2019년 3월은 서울 지역의 월평균 $PM_{2.5}$ 농도가 44 $\mu g/m^3$를 나타내어 2015년 $PM_{2.5}$ 관측을 시작한 이래 가장 높은 서울 월평균 농도를 나타내었다. 표 1은 2019년 3월 오전 9시부터 오후 2시까지 수업 시간 동안의 S 초등학교와 W 초등학교 주변 대기 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 평균 농도를 나타내고 있다. 서울 양천구에 위치한 S 초등학교는 학교 주변 5개 지역의 에어코리아 정보를 취합하여 평균값을 사용하였고, 송파구에 위치한 W 초등학교는 학교 주변 4개 지역의 정보를 취합하여 평균값을 사용하였다. 표 1에서 굵은 글씨로 표현한 숫자는 $PM_{2.5}$가 75 $\mu g/m^3$ 및 PM_{10} 150 $\mu g/m^3$ 초과인 '매우나쁨' 수준과 $PM_{2.5}$가 35 $\mu g/m^3$ 및 PM_{10} 80 $\mu g/m^3$ 초과인 '나쁨' 수준을 나타내고 있다. 측정 시기 동안 S 초등학교 주변은 '매우나쁨'이 4일, '나쁨'이 11일이었고, W 초등학교 주변은 '매우나쁨'이 4일, '나쁨'이 5일이었다.

서울 S, W 두 초등학교의 학생 수가 각각 22명과 24명인 1, 2학년 저학년 교실에서 3월 한 달간 공기청정기를 설치하고 공기청정기 가동에 따른 $PM_{2.5}$ 미세먼지와 $PM_{2.5-10}$ 조대먼지의 농도를 외기 농도와 비교하였다. 2011년도에 설립된 S 초등학교는 교실 기밀도를 측정해본 결과 $ACH50 = 15.8\ h^{-1}$을 나타내었고, 2016년도에 설립된 W 초등학교는 $ACH50 = 9.5\ h^{-1}$를

Table 2. Information of air purifiers installed in S and W elementary schools.

School	S elementary school			W elementary school		
Model	A			B		
Type	Filter			Filter		
Size, W × D × H (mm × mm × mm)	380 × 380 × 896			590 × 320 × 1840		
Weight (kg)	19.7			32.0		
Flowrate mode	1	2	3	1	2	3
CADR (m^3/min)	4.3	11.1	15.9	10.7	14.2	17.9
Power (W)	12.1	24.4	53.1	27.4	47.2	70.7

나타내어 최근에 지은 W 초등학교가 S 초등학교보다 교실 기밀도가 우수하였다.

표 2는 두 초등학교에 사용한 공기청정기의 사양을 나타내고 있다. 두 모델 모두 필터 방식으로서 운전 모드별 CADR (Clean air delivery rate)은 한국공기청정협회 규격 SPS-KACA002-132 (KACA, 2018)의 시험방법을 통해 30 m^3의 시험챔버에서 측정하였다. S 초등학교에 설치한 A 모델의 경우 1단, 2단 및 3단(최대 풍량)에서의 CADR은 각각 4.3, 11.1 및 15.9 m^3/min이었고, 그 때의 소비전력은 12.1, 24.4 및 53.1 W이었다. 한편 W 초등학교에 설치한 B 모델의 경우 1, 2 및 3단(최대 풍량)의 CADR은 각각 10.7, 14.2 및 17.9 m^3/min이었고, 소비전력은 각각 27.4, 47.2 및 70.7 W이었다. 즉, 동일 공기청정기에서 소비전력이 높을 경우 높은 풍량으로 운전되고 있고 소비전력이 낮을 경우 낮은 풍량으로 운전되고 있다고 할 수 있다. A 모델은 최대 풍량 조건에서, B 모델은 2단 및 최대 풍량 조건에서 교육부에서 권고하는 CADR 13 m^3/min 이상을 나타내었다. 공기청정기는 교실 창문 쪽의 중앙에 위치시켜 사용하였고, 측정기는 아이들의 수업에 방해가 되지 않고 아이들의 활동에 의한 영향이 최소화되도록 교실 앞 쪽의 선생님 교탁 근처에 고정하여 측정하였다. 수업 시간 동안 교실 내부의 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 미세먼지 농도 측정에는 광산란 측정기(Aerosol Spectrometer, Model 1.109, GRIMM, Germany)를 사용하였고 실험하기 전에 모두 교정을 받고 실험을 진행하였다. 광산란 측정기의 보정계수로는 1.68을 사용하였고 창문을 최대한 열고 하루 정도 측정했을 때 외기 $PM_{2.5}$ 농도와의 In/out ratio (I/O)가 1에 가까운 값을 나타내어 교정받은 측정기의 질량 데이터가 잘 보정된 것으로 판단하였다. 공기청정기의 가동 여부 및 운전 조건은 공기청정기의 소비전력을 연속적으로 측정하여 확인하였다. 실험하는 동안 창문의 개폐 여부는 직접 파악하기가 어려워 이산화탄소를 연속적으로 측정하여 학생들의 재실 상태 및 환기 여부를 간접적으로 파악하였다.

3. 연구 결과

그림 1과 2는 각각 2019년 3월 서울을 비롯한 수도권에 고농도 비상저감조치가 최장기간인 7일 동안 연속으로 발령된 시기 중 하나인 3월 6일의 서울 S 초등학교와 W 초등학교의 교실에서 $PM_{2.5}$와 $PM_{2.5-10}$의 농도를 외기 농도와 비교한 결과를 보여주고 있다. 서울 S 초등학교 주변 외기 $PM_{2.5}$와 PM_{10}은 수업시간 내내 각각 133~150 μg/m^3와 202~230 μg/m^3을 유지하였고, W 초등학교 주변 역시 $PM_{2.5}$와 PM_{10}은 113~123 μg/m^3과 158~175 μg/m^3를 나타내어 이 날은 미세먼지 농도가 극심하게 높은 날이었다. 한편 이 날의 공기청정기 소비전력을 살펴보면 서울 S 초등학교와 W 초등학교 교실 모두 공기청정기를 각각 약 53 W와 70 W의 소비전력을 꾸준하게 유지하고 있어 공기청정기를 수업시간 내내 최대 풍량으로 운전시키고 있음을 알 수 있었다. 그림 1을 살펴보면 CADR 15.9 m^3/min의 공기청정기를 운영한 서울 S 초등학교의 경우 이 날 교실 내의 미세먼지 농도는 수업시간 6시간 평균으로 $PM_{2.5}$ 35.3 μg/m^3 , $PM_{2.5-10}$ 40.4 μg/m^3를 나타내었다. $PM_{2.5}$의 경우 외기 농도 대비 교실 농도 비율인 in/out ratio (I/O)가 0.25 정도였고, $PM_{2.5-10}$의 경우 I/O가 1.06이었다. 여기서 I/O 값은 실내 공간의 내부 농도를 외기 농도와 비교하여 상태적으로 나타낸 값으로서 I/O 값이 낮을수록 농도 관리가 잘 되고 있음을 의미하며 1보다 오히려 큰 경우에는 내부에 다른 발생원이 있음을 의미한다. $PM_{2.5}$는 공기청정기

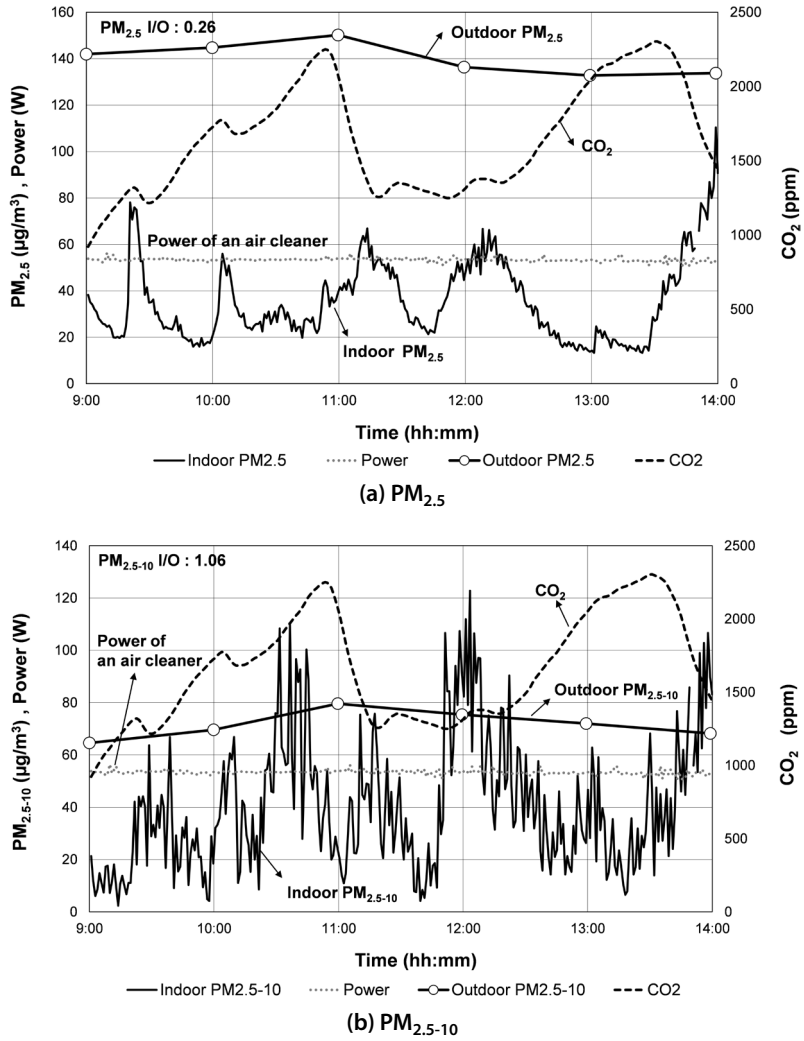

Fig. 1. Indoor and outdoor (a) $PM_{2.5}$ and (b) $PM_{2.5-10}$ concentrations in a classroom of S elementary school in class time (09:00~14:00) on March 06 2019, an extremely high $PM_{2.5}$ day.

운전을 통해 외기 농도 대비 1/4 수준으로 감소시킬 수 있었으나 $PM_{2.5-10}$의 경우는 외기 대비 농도 저감 효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 이산화탄소는 오전 수업시간 동안 920 ppm에서 2250 ppm까지 증가하다가 아이들이 부재 중인 점심시간 때 1270 ppm대로 감소하였고 오후 수업시간에 다시 2300 ppm까지 증가한 이후 수업 종료와 함께 급격히 감소하는 특성을 나타내었다.

그림 2를 살펴보면 CADR 17.9 m^3/min의 공기청정기를 운영한 서울 W 초등학교의 이 날 교실 내의 미세먼지 농도는 수업시간 동안 평균 $PM_{2.5}$ 8.2 μg/m^3, $PM_{2.5-10}$ 26.5 μg/m^3를 나타내어 $PM_{2.5}$의 I/O는 0.07이었고, $PM_{2.5-10}$의 I/O는 0.52였다. W 초등학교의 경우 $PM_{2.5}$에 대해 공기청정기 효과가 매우 큰 것으로 나타났다. 관측 이래 최악의 대기 미세먼지 농도 조건에서도 CADR 17.9 m^3/min의 공기청정기를 사용할 때 교실 내부의 미세먼지 농도를 평균 10 μg/m^3 이하까지도 관리가 가능함을 확인할 수 있었다. W 초등학교

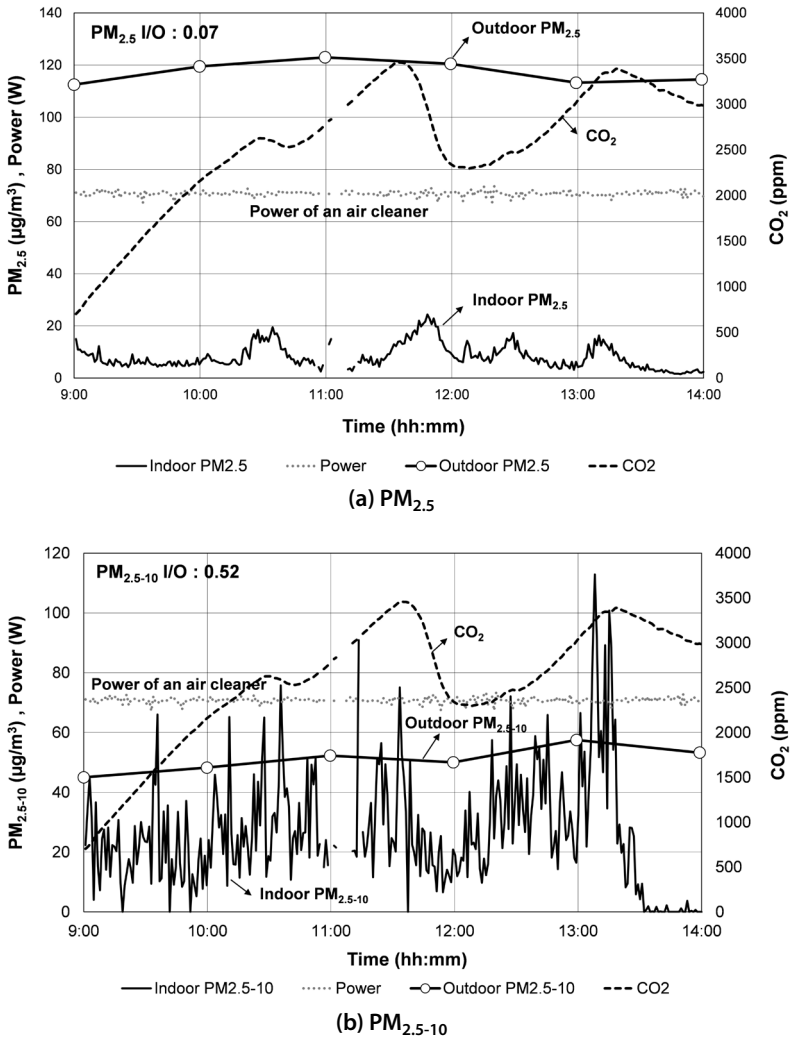

Fig. 2. Indoor and outdoor (a) $PM_{2.5}$ and (b) $PM_{2.5-10}$ concentrations in a classroom of W elementary school in class time (09:00~14:00) on March 06 2019, extremely high $PM_{2.5}$ day.

의 공기청정기 CADR 값이 S 초등학교의 것보다 1.1배 높은 것에 비해 W 초등학교에서 $PM_{2.5}$의 저감효과가 훨씬 우수하였는데 이는 W 초등학교 교실의 건물 기밀도가 S 초등학교보다 우수한 것이 어느 정도 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 건물 누기가 존재하면 실외 미세먼지가 누기 부위에서 지속적으로 침투하게 되므로 (Liu and Nazaroff, 2003) 공기청정기는 최대한 기밀한 환경에서 운전할 때 미세먼지 저감효과가 우수하기 때문이다. 한편 $PM_{2.5-10}$은 S 초등학교와 마찬가지로 공기청정기로 관리하기에는 한계가 있음을 확인할 수 있었다. W 초등학교의 이산화탄소는 오전 수업시간 동안 3460 ppm까지 증가하다가 점심시간에 2300 ppm대로 감소하였고 다시 오후 수업시간에 다시 3400 ppm까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다. S 초등학교 교실의 학생 수가 22명이고 W 초등학교 교실의 학생 수가 24명임을 감안하더라도 W 초등학교의 이산화탄소가 훨씬 높게 나타났다. 이 날은 외기 미세먼지 농도가 너무 높아 환기가 어려운 환경

이었으므로 창문 환기가 거의 없는 조건에서의 교실 이산화탄소 농도를 나타낸다고 볼 수 있다. 이것 역시 W 초등학교 교실의 건물 기밀도가 S 초등학교보다 우수하여 발생한 결과로 판단된다. 기밀도가 우수한 교실의 경우 외기 미세먼지 농도가 높아 환기를 거의 진행하지 못할 경우 교실 내 이산화탄소 농도가 3500 ppm까지도 증가할 수 있음을 알 수 있다.

한편 일반적인 도시 지역의 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비율이 0.50~0.55 정도임에 반해(Souza *et al.*, 2014; Kang *et al.*, 2012) 3월 6일의 $PM_{2.5}/PM_{10}$은 0.66~0.70을 나타내어 PM_{10}에 비해 $PM_{2.5}$가 상대적으로 높은 날이었다. $PM_{2.5}/PM_{10}$은 전체 PM_{10} 중 2.5 μm보다 작은 $PM_{2.5}$ 미세먼지가 차지하고 있는 비율로서 같은 PM_{10} 농도라고 하더라도 $PM_{2.5}$ 비율이 높을수록 인체에는 더 해로울 수 있다. 또한 평소 $PM_{2.5}/PM_{10}$가 0.5 근처라는 것은 $PM_{2.5}$와 $PM_{2.5-10}$의 비율이 유사하다는 것을 의미한다. 한편 S 초등학교와 W 초등학교의 교실 내의 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비율이 각각 0.46과 0.23을 나타내어 교실 내부에서는 $PM_{2.5}$보다는 $PM_{2.5-10}$ 비율이 높은 것으로 나타났다.

그림 3과 4는 각각 2019년 3월 한 달 동안 공기청정기를 운영한 서울 S 초등학교와 W 초등학교 교실에서 $PM_{2.5}$와 $PM_{2.5-10}$의 농도를 주변의 외기 농도와 비교한 결과를 보여주고 있다. 그림 3(a)를 살펴보면 S 초등학교의 경우 3월 한 달간 주말을 제외한 주중 기준으로 외부 $PM_{2.5}$의 평균 농도는 46.6 μg/m^{3}을 나타내었고, 공기청정기를 가동한 교실 내부의 $PM_{2.5}$ 농도는 15.4 μg/m^{3}을 나타내어 평균 I/O 값이 0.33을 나타내었다. 주말의 경우에는 공기청정기를 가동하지 않았고 이때 외부 $PM_{2.5}$의 평균 농도는 31.2 μg/m^3, 교실 내부의 $PM_{2.5}$ 농도는 15.1 μg/m^{3}을 나타내어 평균 I/O 값은 0.49를 나타내었다. 주중 기간 동안 S 초등학교 교실 내부 $PM_{2.5}$ 농도와 외부 $PM_{2.5}$ 농도의 상관계수 R 값은 0.85를 나타내어 내부 $PM_{2.5}$ 농도는 아이들의 활동에 의해 내부적으로 발생하기보다는 외기 $PM_{2.5}$ 농도에 의해 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 공기청정기를 가동하지 않았을 때 주말의 $PM_{2.5}$ I/O가 0.49였으나 공기청정기를 가동했을 때 주중의 I/O가 0.33으로 감소하는 것으로 보아 실제 교실환경에서 $PM_{2.5}$ 저감에 있어서 공기청정기 효과는 다소 있는 것으로 나타났다. 공기청정기의 효용도(effectiveness, ε)는 공기청정기를 사용하지 않았을 때의 실내 농도 대비 공기청정기를 사용할 때의 실내 농도 감소량으로서 아래 식과 같이 표현할 수 있다(Shaughnessy and Sextro, 2006).

$$\varepsilon = \frac{C_{wo_ac} - C_{w_ac}}{C_{wo_ac}} = \frac{(I/O)_{wo_ac} - (I/O)_{w_ac}}{(I/O)_{wo_ac}} \quad (1)$$

여기서, C_{wo_ac}와 $(I/O)_{wo_ac}$는 공기청정기를 사용하지 않을 때의 실내 농도(μg/m^3)와 I/O 값, C_{w_ac}와 $(I/O)_{w_ac}$는 공기청정기를 사용할 때의 실내 농도(μg/m^3)와 I/O 값을 의미한다. 따라서 3월 한 달간 S 초등학교 교실에서의 $PM_{2.5}$에 대한 A 모델의 공기청정기 효용도는 0.33을 나타내었다.

한편 그림 3(b)에서 알 수 있듯이 S 초등학교의 3월 한 달간 외부 $PM_{2.5-10}$의 농도는 주중 기준으로 36.6 μg/m^{3}을 나타내었고, 공기청정기를 가동한 교실 내부의 $PM_{2.5-10}$은 53.5 μg/m^{3}를 나타내어 I/O 값이 1.46을 나타내었다. 교실 내부 $PM_{2.5-10}$ 농도와 외부 $PM_{2.5-10}$ 농도의 상관계수 R 값은 0.21을 나타내어 내부 $PM_{2.5-10}$ 농도와 외기 $PM_{2.5-10}$ 농도의 상관성은 매우 떨어지는 것으로 나타났다. 특히, 공기청정기를 운전하지 않은 주말의 경우 외부 $PM_{2.5-10}$가 35.9 μg/m^{3}임에도 아이들이 없는 교실 내부의 $PM_{2.5-10}$가 1.5 μg/m^{3}을 나타내어 $PM_{2.5-10}$는 외부에서 유입되는 먼지가 아니라 아이들이 활동하면서 발생하는 먼지임을 확실하게 알 수 있었다. 이러한 이유로 주중에 아이들이 공부하는 교실에서는 공기청정기를 가동했음에도 불구하고 $PM_{2.5-10}$의 농도가 외기 농도와 비슷하거나 오히려 더 높게 나타나는 것으로 판단된다.

W 초등학교에서는 그림 4(a)에서 알 수 있듯이 3월 한 달간 주중 기준으로 외부 $PM_{2.5}$의 평균 농도는 46.8 μg/m^{3}을, 공기청정기를 가동한 교실 내부의 $PM_{2.5}$ 평균 농도는 6.8 μg/m^{3}을 나타내어 평균 I/O 값이 0.15을 나타내었다. W 초등학교 역시 내부 $PM_{2.5}$

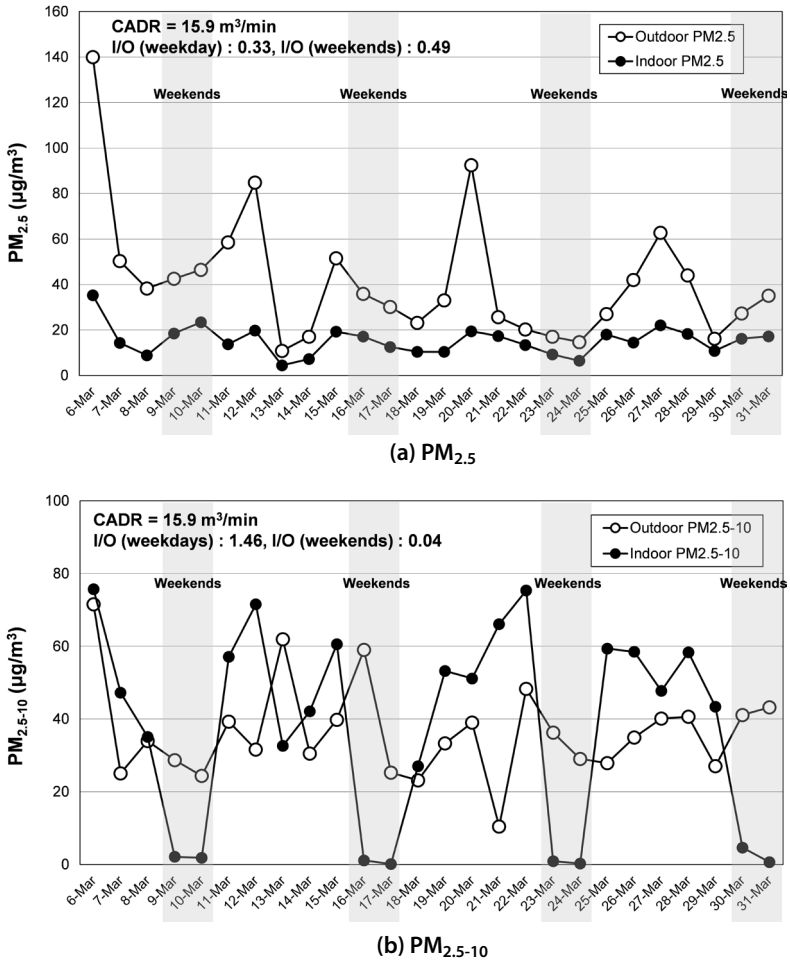

Fig. 3. Average indoor and outdoor (a) $PM_{2.5}$ and (b) $PM_{2.5-10}$ concentrations in a classroom of S elementary school in class time (09:00~14:00) for a month of March 2019.

농도와 외부 $PM_{2.5}$ 농도의 상관계수 R 값이 0.81를 나타내어 공기청정기를 가동했음에도 내부 $PM_{2.5}$ 농도는 외기 농도에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 한편 공기청정기를 가동하지 않은 주말의 외부 $PM_{2.5}$의 평균 농도는 24.5 μg/m^3, 교실 내부의 $PM_{2.5}$ 농도는 12.4 μg/m^{3}을 나타내어 주말의 $PM_{2.5}$ I/O 값은 0.51를 나타내었다. 따라서, 3월 한 달간 W 초등학교 교실에서의 $PM_{2.5}$에 대한 B 모델의 공기청정기 효용도 ε는 식 (1)에 따라 0.71을 나타내었다. W 초등학교와 같이 공기청정기의 효용도가 높을 때 즉, 기밀한 환경에서 충분한 용량의 공기청정기를 지속적으로 잘 사용할 경우에는 외기 미세먼지가 매우 극심했던 3월 한 달 동안에도 교실 내의 미세먼지 농도를 10 μg/m^3 이하로도 잘 관리할 수 있음을 보여주고 있다.

그림 4(b)에서와 같이 W 초등학교의 3월 한 달간 외부 $PM_{2.5-10}$는 주중 기준으로 27.1 μg/m^3, 공기청정기를 가동한 교실 내부의 $PM_{2.5-10}$은 30.3 μg/m^{3}로서 $PM_{2.5-10}$의 I/O 값이 1.11을 나타내어 $PM_{2.5}$를 잘 감소시키는 공기청정기를 사용했음에도 불구하고 $PM_{2.5-10}$ 저감에는 큰 효과를 보지 못했다. 이는 $PM_{2.5-10}$는 대

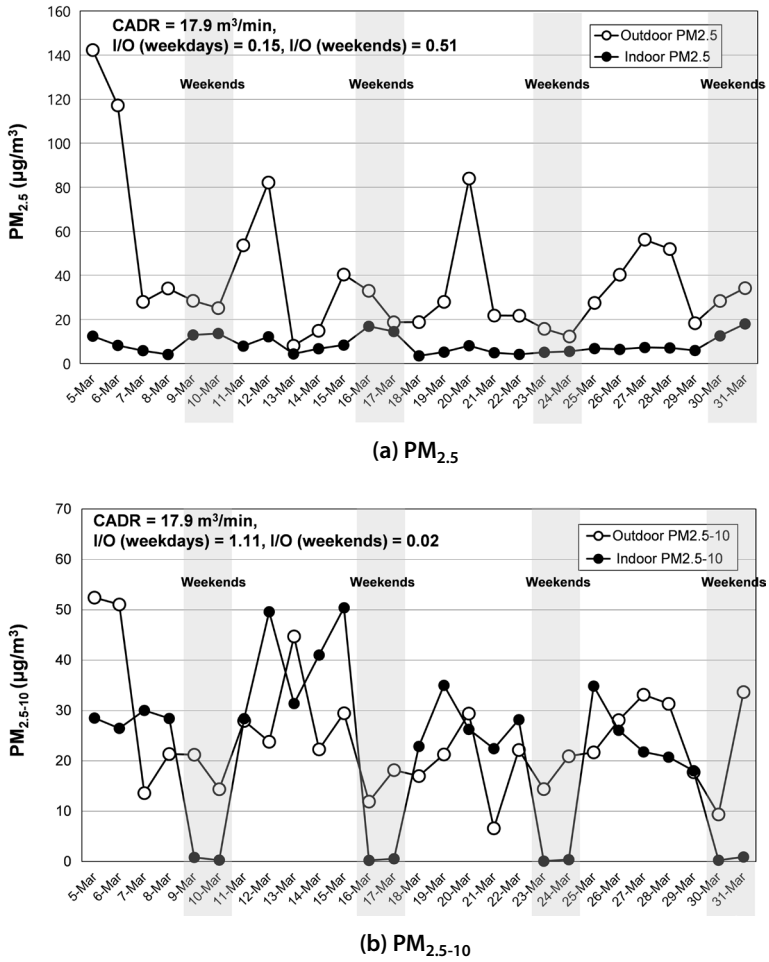

Fig. 4. Average indoor and outdoor (a) $PM_{2.5}$ and (b) $PM_{2.5-10}$ concentrations in a classroom of W elementary school in class time (09:00~14:00) for a month of March 2019.

부분 아이들의 활동에 의해 옷이나 신발에 묻어 있거나 바닥에 깔려있던 먼지가 비산되어 발생되고 $PM_{2.5}$보다 상대적으로 무거워서 공기청정기 유동에 의해 잘 이동되지 않고 쉽게 침강하는 것으로 판단된다(Agarwal and Nagendra, 2016; Chithra and Nagendra, 2012; Diapouli *et al.*, 2008). W 초등학교에서도 S 초등학교와 유사하게 공기청정기를 운전하지 않은 주말의 경우 외부 $PM_{2.5-10}$의 농도는 18.0 μg/m^3, 교실 내부의 $PM_{2.5-10}$는 0.45 μg/m^{3}로서 $PM_{2.5-10}$의 I/O 값이 0.02로 매우 낮게 나타났다.

그림 5와 6은 각각 2019년 3월 한 달 동안 공기청정기를 운영한 서울 S 초등학교와 W 초등학교 교실에서 공기청정기를 가동한 주중과 가동하지 않은 주말 및 외기 $PM_{2.5}$ 미세먼지 농도가 50 μg/m^{3}보다 높은 고농도 날과 그렇지 않은 저농도 날로 구분하여 $PM_{2.5}$와 $PM_{2.5-10}$의 I/O 값을 비교한 결과를 나타내고 있다. 그림 5(a)를 보았을 때 S 초등학교에서는 주중 외기 $PM_{2.5}$가 높은 날에는 $PM_{2.5}$의 평균 I/O 값이 0.27을 나타내고, 낮은 날에는 0.45로 증가하는 것을 알 수 있었다. 특히 외기 $PM_{2.5}$가 75 μg/m^{3}가 초과되는 주의보

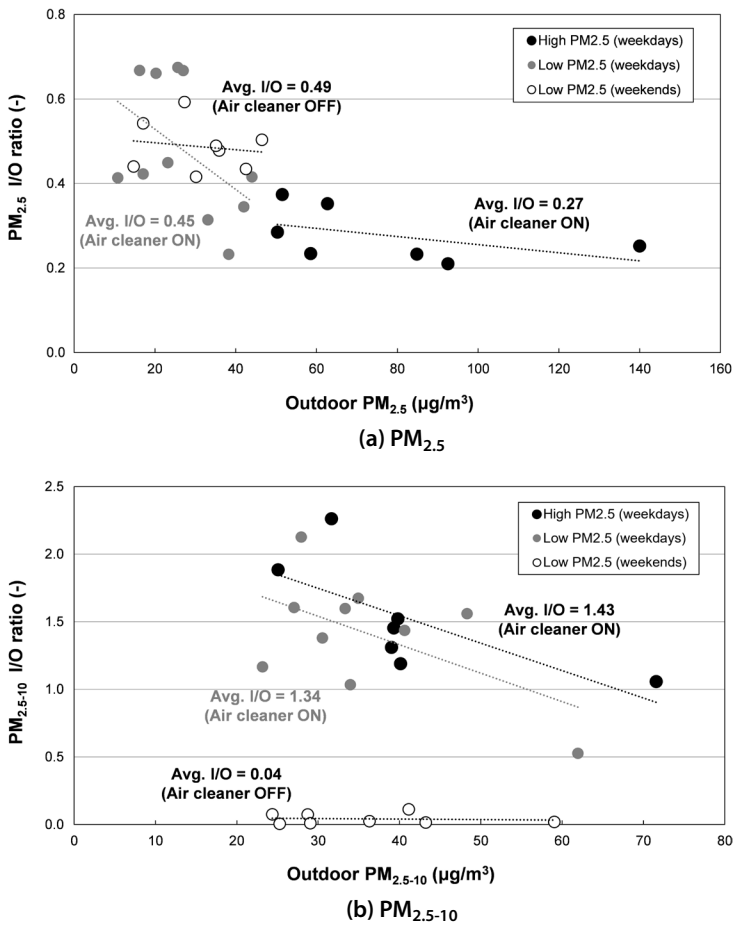

Fig. 5. In and out ratio (I/O) of (a) $PM_{2.5}$ and (b) $PM_{2.5-10}$ at different outdoor $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5-10}$ in a classroom of S elementary school for weekdays and weekends of March 2019.

날에는 평균 I/O 값이 0.23까지 감소하였다. 이는 외기 미세먼지가 높은 날에는 창문을 잘 닫고 공기청정기를 최대 풍량으로 열심히 가동하지만 그렇지 않은 날에는 창문을 잘 닫지 않거나 공기청정기를 최대 풍량으로 가동시키지 않은 것으로 보인다. 또한 외기 미세먼지가 낮은 날에는 아이들의 활동에 의해 발생하는 내부 $PM_{2.5}$ (주로 $PM_{1.0-2.5}$)가 발생량은 많지 않지만 분모가 작아짐에 따라 어느 정도 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 아이들이 등교하지 않은 주말의 경우에는 I/O 값이 0.4~0.6 범위 내에서 일정한 값을 나타내어 외기 농도 변화에 따라 내부 농도가 거의 일정하게 변화하는 것을 알 수 있다. 한편 그림 5(b)에서 보았을 때 외기 미세먼지 농도가 고농도일 때 $PM_{2.5-10}$의 I/O 값이 1.43, 저농도일 때 1.34를 나타내어 $PM_{2.5-10}$의 경우 외기 미세먼지 농도에 의한 영향은 거의 없었고, 내부 발생량에 크게 의존하므로 외기 $PM_{2.5-10}$ 농도가 낮아질 때 I/O 값이 증가하는 특성을 나타내었다. 주말에는 외기 $PM_{2.5-10}$ 농도와 관계없이 I/O 값이 0.02~0.1의 낮은 비율을 나타내었다.

W 초등학교에서는 그림 6(a)와 같이 주중 외기 $PM_{2.5}$가 높은 날에는 $PM_{2.5}$의 평균 I/O 값이 0.12, 낮은 날에는 0.21을 나타내었고 특히 외기 $PM_{2.5}$가 75

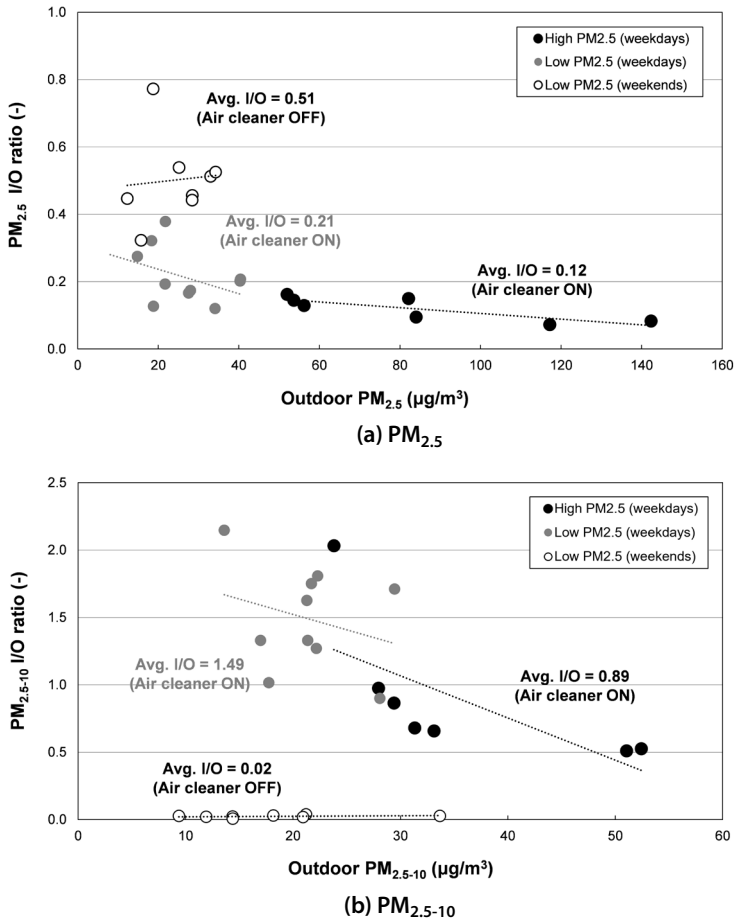

Fig. 6. In and out ratio (I/O) of (a) $PM_{2.5}$ and (b) $PM_{2.5-10}$ at different outdoor $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5-10}$ in a classroom of W elementary school for weekdays and weekends of March 2019.

μg/m^{3}가 초과되는 주의보 날에는 평균 I/O 값이 0.10까지 감소하였다. W 초등학교에서는 외기 $PM_{2.5}$ 농도가 20 μg/m^3 근처의 3일 정도를 제외하고는 미세먼지가 높은 날과 낮은 날 구분 없이 3월 한 달 동안 창문을 잘 닫고 공기청정기를 잘 가동시킨 것으로 보인다. 외기 미세먼지가 매우 낮은 날 일부 I/O 값이 0.3~0.4까지 증가하는 이유는 S 초등학교에서와 마찬가지로 공기청정기 가동과 환기 조건이 달라서일 수도 있고 아이들의 활동에 의해 발생하는 내부 $PM_{2.5}$가 일부 영향을 미쳤을 수도 있을 것으로 판단된다. W 초등학교에서도 그림 6(b)와 같이 $PM_{2.5-10}$는 외기 미세먼지 농도에 의한 영향보다는 내부 발생량에 의존하여 외기 $PM_{2.5-10}$ 농도가 낮아질 때 I/O 값이 증가하는 특성을 나타내었고, 주말에도 역시 외기 $PM_{2.5-10}$ 농도와 관계없이 I/O 0.01~0.04의 낮은 비율을 나타내었다. 고농도일 때 W 초등학교의 $PM_{2.5-10}$ I/O 값이 0.89로 S 초등학교의 1.43보다 상당히 낮게 나타났으나 저농도일 때에는 W 초등학교 I/O 값이 1.49로 S 초등학교의 1.34보다 오히려 다소 크게 나타나 $PM_{2.5-10}$의 I/O 값은 학교 건물 차이보다는 학생들의 활동 양상에 의해 임의적으로 높아지거나 낮아질 수 있는 것으로 판단된다.

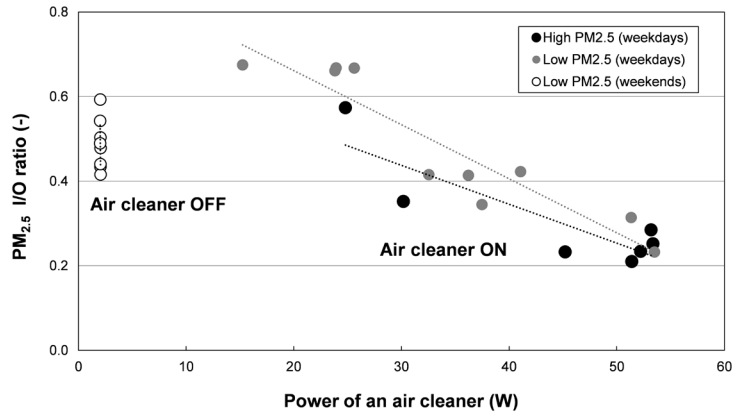

Fig. 7. In and out ratio (I/O) of $PM_{2.5}$ at different power of an air cleaner in a classroom of S elementary school for weekdays and weekends of March 2019.

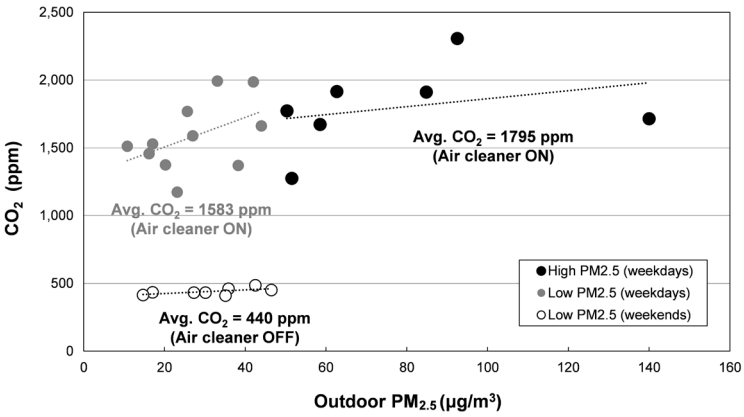

Fig. 8. CO_2 at different outdoor $PM_{2.5}$ concentrations in a classroom of S elementary school for weekdays and weekends of March 2019.

그림 7과 8은 각각 2019년 3월 한 달 동안 S 초등학교 교실에서 공기청정기를 가동한 주중과 가동하지 않은 주말 및 외기 $PM_{2.5}$ 미세먼지 농도가 50 μg/m^{3}보다 높은 고농도 날과 그렇지 않은 저농도 날로 구분하여 공기청정기 평균 소비전력 사용량에 따른 $PM_{2.5}$의 I/O 값과 외기 $PM_{2.5}$ 농도에 따른 교실 내 이산화탄소 농도를 비교한 결과이다. 그림 7과 같이 공기청정기 소비전력이 높은 조건, 즉 풍량 및 CADR이 높은 운전 모드로 운전할 경우 I/O 값이 낮아지는 특성을 나타내었다. S 초등학교의 3월 한 달간 공기청정기 효용도가 0.33으로 W 초등학교의 0.71보다 낮았던 이유는 사용했던 공기청정기 CADR 성능이 기본적으로 약 2 m^3/min 정도 작은 것도 있었지만 공기청정기를 최대 풍량 조건으로 사용한 경우는 6일에 불과하였고 나머지는 이보다 낮은 15~45 W의 운전 조건으로 운전하였기 때문으로 판단된다. 공기청정기를 50 W 이상의 최대 풍량으로 운전한 15.9 m^3/min의 CADR 조건에서는 I/O 평균값이 0.25를 나타내어 공기청정기 효용도를 0.49까지 올릴 수 있었다. 주중에 15~30 W의 소비전력으로 공기청정기를 사용했음에도 $PM_{2.5}$의 I/O

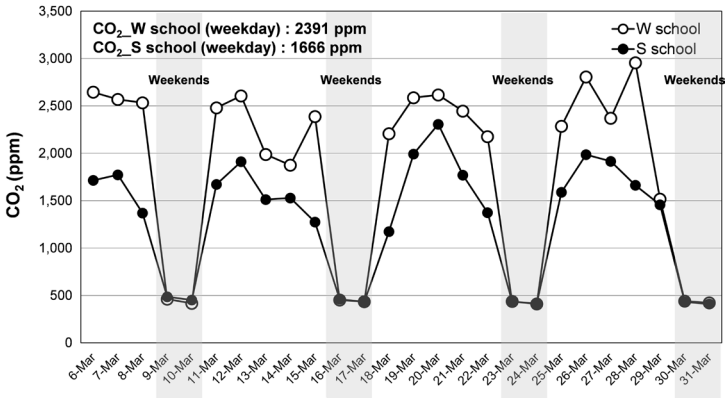

Fig. 9. Average CO_2 in classrooms of S and W elementary school in class time (09:00~14:00) for a month of March 2019.

값이 평균 0.65를 나타내어 공기청정기를 사용하지 않은 주말 때의 0.5보다 높은 이유는 학생들의 활동에 의해서 $PM_{2.5}$가 일부 발생하기 때문으로 판단된다. 아이들의 활동에 의해 발생하는 먼지는 주로 1.0~10 μm 범위의 먼지이므로(Han *et al.*, 2019) 이때 발생하는 1.0~2.5 μm 영역의 일부 먼지가 $PM_{2.5}$ 농도에 직접적으로 영향을 줄 수가 있기 때문이다. 또한 동일한 소비전력 조건에서 외부 $PM_{2.5}$ 농도가 낮은 날보다 높은 날에 I/O 값이 낮게 나타난 이유는 외부 미세먼지 농도가 나쁠 때 의식적으로 교실 환기를 줄여 좀더 기밀한 환경에서 공기청정기를 운전시켰기 때문으로 판단된다. 그림 8을 보면 외기 미세먼지 농도에 따라 교실 내의 이산화탄소 농도가 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 외기 미세먼지 농도가 높은 날 교실 내 이산화탄소 평균값이 1795 ppm, 외기 농도가 낮은 날은 평균 1583 ppm을 나타내어 실질적으로 외부 미세먼지 농도가 높은 날 의식적으로 교실 내의 환기를 줄여서 이산화탄소 농도가 높아진 것을 확인할 수 있다.

그림 9는 2019년 3월 한 달 동안 서울 S 초등학교와 W 초등학교 교실에서의 이산화탄소 농도를 비교한 결과를 보여주고 있다. 주중 기준으로 S 초등학교 교실의 3월 한 달간 평균 CO_2 농도는 1666 ppm을 나타내었고 W 초등학교는 2391 ppm을 나타내었다. 이는 학교 보건법에서 요구하는 이산화탄소 기준치인 1000 ppm에 비해 1.7배에서 2.4배 가까이 초과하는 것을 의미한다. 많은 아이들이 모여서 학습하는 학교 교실에서의 이산화탄소 기준치 초과는 우리나라뿐 아니라 외국에서도 자주 발생하는 것으로 보고되고 있다(Buonanno *et al.*, 2013; Pegas *et al.*, 2012; Fromme *et al.*, 2007; Godwin and Batterman, 2007). 측정 기간인 2019년 3월은 우리나라에서 가장 극심하게 미세먼지 농도가 높았던 시기이므로 평소 때보다도 환기를 진행하기 어려워 이산화탄소 농도가 평소보다 좀더 높았을 가능성은 있다.

3월 한 달간 CO_2 농도를 비교하더라도 교실 기밀도가 높은 W 초등학교의 교실의 이산화탄소 농도가 S 초등학교에 비해 훨씬 높은 것을 알 수 있다. 3월 한 달간 W 초등학교에서의 공기청정기 효용도가 S 초등학교보다 높았던 이유가 교실의 기밀도가 우수한 상태에서 최대한 기밀한 환경에서 공기청정기를 운전시킨 결과로 보인다. 미세먼지 관점에서는 기밀한 환경이 좋으나 이산화탄소 관점에서는 오히려 CO_2가 쌓여 악영향을 미칠 수 있으므로, 미세먼지 대응을 위해 교실의 기밀도를 개선하면서도 충분한 환기량 확보를 위한 대책 마련이 필요할 것으로 보인다.

다만 본 연구는 고농도 미세먼지가 극심한 3월 한 달간 학생들이 실제로 수업하는 교실 환경에서 외기 미세먼지 농도 변화와 공기청정기 운전에 따른 실내 농도 변화를 관찰한 결과로서 내부 농도 변화를 단순히 교실 기밀도나 I/O 비교만으로 해석하기에는 한계

가 있다. 교실 기밀도 이외의 실제 환기량이나 침기량 변화, 아이들의 수업 활동 특성에 따른 정밀한 효과 분석이 필요하고 이러한 정보를 얻기 위한 자동 측정 방안도 마련될 필요가 있다. 또한, 본 연구의 실험 대상 교실을 두 곳의 한정된 조건에서 수행하여 교실 기밀도와 공기청정기 효과에 대해 일반화된 결론을 도출하기는 통계적으로 어려운 면이 있다. 따라서 고농도 시즌의 공기청정기의 효과 분석을 위한 다수의 교실을 적용한 추가적인 연구도 필요할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 서울에 위치한 S, W 두 개의 초등학교에서 우리나라 미세먼지 농도가 가장 극심했던 2019년 3월 한 달간 공기청정기를 운전하였을 때 $PM_{2.5}$와 $PM_{2.5-10}$의 미세먼지 농도를 살펴보았다. 3월 한 달간 외부 $PM_{2.5}$ 농도가 평균 46.6~46.8 $\mu g/m^3$으로 매우 나빴지만 15.9 및 17.9 m^3/min CADR의 공기청정기 사용으로 수업시간 동안 교실 내의 $PM_{2.5}$ 농도를 S 초등학교의 경우 15.4 $\mu g/m^3$, W 초등학교의 경우 6.8 $\mu g/m^3$까지 줄일 수 있었다. 한편 $PM_{2.5-10}$의 경우 아이들이 교실에서 활동할 때 발생하는 상대적으로 큰 조대먼지로서 공기청정기를 가동하더라도 내부 농도를 외기 농도보다 크게 감소시키지 못하였다. S 초등학교의 $PM_{2.5}$에 대한 공기청정기 효용도가 0.33으로서 W 초등학교의 0.71 보다 낮았는데 이는 S 초등학교의 교실 기밀도가 상대적으로 떨어지고 공기청정기를 낮은 CADR 성능의 풍량 조건으로 자주 운전시킨 결과로 나타났다. 따라서 학교 교실에서의 공기청정기의 효용도를 높이기 위해서는 교실 기밀도를 개선하고 되도록 높은 CADR 성능의 풍량 조건으로 지속적으로 운전시키는 것이 필요하다. 다만 교실 기밀도를 개선할 경우 환기가 부족할 때 이산화탄소 농도가 기준치를 크게 초과할 수 있으므로 공기청정기를 사용할 때 적절한 필터가 설치된 환기장치를 같이 사용하는 방향으로 학교 공기질 개선 정책이 마련될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국기계연구원 주요사업(NK231A)과 한국공기청정협회 수탁사업(IN7440)의 지원을 받아 수행하였고 이에 감사를 드립니다.

References

Agarwal, N., Nagendra, S.S. (2016) Modelling of Particulate Matters Distribution inside the Multilevel Urban Classrooms in Tropical Climate for Exposure Assessment, Building and Environment, 102, 73-82. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.015

Association of Home Appliance Manufacturers (AHAM) (2020) ANSI/AHAM AC-1, Method for Measuring the Performance of Portable Household Electric Room Air Cleaners.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE) (2017) ANSI/ASHRAE Standard 52.2, Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size.

Buonanno, G., Fuoco, F.C., Morawska, L., Stabile, L. (2013) Airborne Particle Concentrations at Schools Measured at Different Spatial Scales, Atmospheric Environment, 67, 38-45. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.10.048

Chithra, V.S., 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. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.016

Diapouli, E., Chaloulakou, A., Mihalopoulos, N., 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. https://doi.org/10.1007/s10661-007-9724-0

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

Godwin, C., Batterman, S. (2007) Indoor Air Quality in Michigan Schools, Indoor Air, 17(2), 109-121. https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2006.00459.x

Han, B., Hong, K., Shin, D., Kim, H., Kim, Y., Kim, S., Kim, S., Hwang, C., Noh, K. (2019) Field Tests of Indoor Air Cleaners for Removal of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Elementary School's Classrooms in Seoul, Korea, Particle and Aerosol Research, 15(2), 79-90, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.11629/jpaar.2019.15.2.079

IQ Air (2020) 2019 World Air Quality Report. Region & City $PM_{2.5}$ Ranking. Available from: https://www.airvisual.com/world-most-polluted-cities/world-air-quality-report-2019-en.pdf

Kang, C.-M., Sunwoo, Y., Lee, H.S., Kang, B.-W., Lee, S.-K. (2012) Atmospheric Concentrations of $PM_{2.5}$ Trace Elements in the Seoul Urban Area of South Korea, Journal of the Air & Waste Management Association, 54, 432-439. https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470916

Korea Air Cleaning Association (KACA) (2018) SPS-KACA002-132, Indoor Air Cleaners.

Liu, D., Nazaroff, W.W. (2003) Particle Penetration through Building Cracks, Aerosol Science and Technology, 37, 565-573. https://doi.org/10.1080/02786820300927

National Institute of Environmental Research (NIER) (2020) 2019 Annual Report of Air Quality in Korea, NIER-GP2020-037.

Pacitto, A., Stabile, L., Viana, M., Scungio, M., Reche, C., Querol, X., Alastuey, A., Rivas, I., Álvarez-Pedrerol, M., Sunyer, J., van Drooge, B.L., Grimalt, J.O., Sozzi, R., Vigo, P., Buonanno, G. (2018) Particle-Related Exposure, Dose and Lung Cancer Risk of Primary School Children in Two European Countries, Science of The Total Environment, 616-617, 720-729. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.256

Pegas, P.N., Nunes, T., Alves, C.A., Silva, J.R., Vieira, S.L.A., Caseiro, A., 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. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.059

Rivas, I., Viana, M., Moreno, T., Bouso, L., Pandolfi, M., Alvarez-Pedrerol, M., Forns, J., Alastuey, A., Sunyer, J., Querol, X. (2015) Outdoor Infiltration and Indoor Contribution of UFP and BC, OC, Secondary Inorganic Ions and Metals in $PM_{2.5}$ in Schools, Atmospheric Environment, 106, 129-138. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.055

Shaughnessy, R.J., Sextro, R.G. (2006) What Is an Effective Portable Air Cleaning Devices? A Review, Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 3, 169-181. https://doi.org/10.1080/15459620600580129

Souza, D.Z., Vasconcellos, P.C., Lee, H., Aurela, M., Saarnio, K., Teinilä, T., Hillamo, R. (2014) Composition of $PM_{2.5}$ and PM_{10} Collected at Urban Sites in Brazil, Aerosol and Air Quality Research, 14, 168-176. https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.03.0071

World Health Organization (WHO) (2006) WHO Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide : Global Update 2005 : Summary of Risk Assessment.

Yoo, S., Seo, K.-Y., Oh, M.J., Song, K., Byun, Y.T. (2020) A study on Parents' Perception for School Classroom Air Quality, Indoor and Outdoor Particulate Matter, and Air Purification System, Journal of Odor and Indoor Environment, 19(4), 362-368, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.15250/joie.2020.19.4.362

Authors Information

한방우 (한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원)
홍기정 (한국기계연구원 환경기계연구실 선임기술원)
이건희 (한국기계연구원 환경기계연구실 선임연구원)
김상복 (한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원)
박인용 (한국기계연구원 환경기계연구실 선임연구원)
박대훈 (한국기계연구원 환경기계연구실 선임연구원)
김학준 (한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원)
김용진 (한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원)
이예완 (한국기계연구원 환경기계연구실 연구원)
김진태 (한국기계연구원 환경기계연구실 기술원)
정상현 (한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원)
심성훈 (한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원)