韓國環境保健學會誌
Journal of Environmental Health Sciences
Original Article

pISSN 1738-4087 eISSN 2233-8616
J Environ Health Sci. 2023; 49(4): 183-189
https://doi.org/10.5668/JEHS.2023.49.4.183

교실 내 벽면녹화를 통한 초미세먼지($PM_{2.5}$) 저감 효과 평가

최치구[1], 양호형[2], 김호현[2,3], 권혁구[1]*

[1]호서대학교 환경공학과, [2]서경대학교 생활 및 산업환경 연구소, [3]서경대학교 나노화학생명공학과

Evaluation of Particulate Matter ($PM_{2.5}$) Reduction through Greenwalls in Classrooms

Chi-Ku Choi[1], Ho-Hyeong Yang[2], Ho-Hyun Kim[2,3], and Hyuk-Ku Kwon[1]*

[1]Department of Environmental Engineering, Hoseo University, [2]Research Institute for Living and Industrial Environment in Seokyeong University, [3]Department of Nano-chemical, Biological and Environmental Engineering, Seokyeong University

ABSTRACT

Background: The indoor air quality of classrooms, in which the capacity per unit area is high and students spend time together, must be managed for safety and comfort. It is necessary to develop an eco-friendly indoor air quality reduction method rather than biased management that relies solely on air purifiers.

Objectives: In this study, plants and air purifiers were installed in middle school classrooms to evaluate the indoor $PM_{2.5}$ reduction.

Methods: Four middle school classrooms were selected as test beds. Air quality was monitored in real-time every one minute using IoT equipment installed in the classrooms, corridors, and rooftops. After measuring the background concentration, plants and air purifiers were installed in the classroom and the $PM_{2.5}$ reduction effect was analyzed through continuous monitoring.

Results: After installing the plants and air purifiers, the average $PM_{2.5}$ concentration was 33.7 μg/m^3 in the classrooms without plants and air purifiers, 25.6 μg/m^3 in classrooms with plants only, and 21.7 μg/m^3 in classrooms with air purifiers only. In the classroom where plants and air purifiers were installed together, it was 20.0 μg/m^3. The reduction rates before and after installation were 4.5% for classrooms with plants only, 16.5% for classrooms with air purifiers only, and 27.6% for classrooms with both plants and air purifiers. The I/O ratio, which compares the concentration of $PM_{2.5}$ in classrooms with corridors and outside air, also showed the lowest in the order of plants and air purifiers, air purifiers, and plant-only classrooms.

Conclusions: The $PM_{2.5}$ reduction effect of using plants was confirmed, and it is expected to be used as basic data for the development of environmentally-friendly indoor air quality improvement methods.

Key words: Classroom, indoor air quality (IAQ), plants, school, $PM_{2.5}$

Received August 18, 2023
Revised August 29, 2023
Accepted August 29, 2023

Highlights:
- The $PM_{2.5}$ reduction rate was the highest in classrooms where plants and air purifiers were installed together.
- The concentration of outdoor $PM_{2.5}$ in the period after installation decreased, but the I/O ratio in the classroom increased compared to the period before installation.
- Plants can act as a $PM_{2.5}$ reduction factor, and the effect can be maximized when used in parallel with an air purifier.

***Corresponding author:**
Department of Environmental Engineering, Hoseo University, 20 Hoseo-ro 79 beon-gil, Baebang-eup, Asan 31499, Republic of Korea
Tel: +82-41-540-9625
Fax: +82-41-540-9625
E-mail: hkkwon@hoseo.edu

I. 서 론

고농도 미세먼지 발생으로 인한 위해성이 알려지면서 실내 미세먼지 농도 저감, 미세먼지 모니터링 등과 관련된 기술 개발 및 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 희석률이 크고 자연적으로 정화가 되는 대기오염과는 달리 실내공기는 공기 순환 설비가 없는 밀폐된 공간 또는 한정된 공간에서의 인공적 설비를 통한 오염된 공기의 계속된 순환으로 인해 시간이 지날수록 오염물질이 점차 누적되며 농도가 증가한다.[1)] $PM_{2.5}$에 단기노출로 인한 심혈관계 초과사망위험이 통계적으로 유의하게 높은 것

Copyright © Korean Society of Environmental Health.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

으로 보고된 바 있다.[2] 현대인들의 생활양식 변화로 실내 활동 시간이 증가함에 따라 하루 중 약 90%를 실내에서 보내고 있어 실내공기오염으로 인한 건강위험은 외부오염물질에 대한 노출로 인한 위험보다 더 크다고 할 수 있다.[3-5]

우리나라 학생들은 주택실내 이외의 다른 실내환경에서 보내는 시간이 초등학생 8.06±1.63시간, 중학생 9.50±1.93시간, 고등학생 12.11±2.55시간으로 하루 중 상당 시간을 학교나 학원과 같은 실내공간에서 머무르는 것으로 보고된 바 있다.[6] 청소년들은 성인보다 활동량이 많아 단위체적당 호흡량이 많으며 신장이 작기 때문에 공기보다 무거운 오염물질에 노출될 위험이 크다.[7] 실내오염물질은 학생들의 학업성취도, 감각기능, 인지도 등에 영향을 미칠 수 있으며,[8-11] 성장과 발육이 활발한 학생들은 질병이나 환경유해물질 노출에 대한 상대적으로 민감하기 때문에 단위면적당 재실자 밀도가 높고 학생들이 공동생활을 하는 교실의 실내공기질은 안전하고 쾌적하게 관리되어야 한다.

Jung 등(2015)[12]은 우리나라 일부 초·중·고등학교를 대상으로 실내공기질 현황 조사를 통해 PM_{10} 농도가 중학교에서 가장 높았음을 보고한 바 있고, Park 등(2020)[13]은 공기청정기 사용 시 $PM_{2.5}$ 농도가 미사용 교실에 비해 약 35% 낮은 것으로 보고하였다. Noh 등(2021)[14]은 공기청정기 설치에 따른 교실 내 $PM_{2.5}/PM_{10}$비 비교를 통해 공기청정기가 설치된 교실에서 $PM_{2.5}$ 수준의 저감을 확인하였으나 환기부족으로 CO_2 농도는 높게 나타나 공기정화장치에 의존한 편향적인 관리가 아닌 개선대책 마련을 주장하였다.

쾌적한 실내공기질 관리를 위한 다양한 방법이 있으며, Martenies와 Batterman (2018)[15]은 교실에 미세먼지 저감 필터 설치를 통해 어린이 천식 발병률이 13~16% 감소했다고 보고하였다. 그러나 기계식 환기시스템 사용 시 화학물질로 인한 안전성 문제와 함께 지속가능한 공기정화방식에 대한 요구가 제기되었다.[16] 이에 대해 식물을 활용한 환경친화적이고 지속가능한 실내공기질 저감 방법 개발이 이루어지고 있다. 식물의 오염물질 저감 매커니즘 과정이 다양한 연구를 통해 규명되어 왔다. Choi 등(2021)[17]은 물을 주지 않는 조건에서는 $PM_{2.5}$가 기공 주변에 분산되어 있으나 물을 주는 조건에서는 $PM_{2.5}$가 열린 기공 근처에서 분포하는 것을 발견하였으며, 이를 통해 기공을 통한 흡수가 $PM_{2.5}$ 제거에 관여할 수 있음을 보고하였다. 또한, 실내공기 오염물질은 식물의 기공으로의 흡수가 잎 표면에서 수동적으로 흡수되는 양보다 30~100배 높은 것으로 보고되었으며,[18] 이러한 결과는 식물의 잎을 통해 흡수된 오염물질이 대사적으로 분해되거나 뿌리 또는 새싹 등으로 옮겨지는 것으로 볼 수 있다.[19] 이렇듯 실내공기질 개선을 위해 식물을 활용한 방법 뿐 아니라 공학적인 방법과 연계하여 식물의 공기정화 효율을 극대화하기 위한 여러 연구가 진행되어 왔으며, 이에 따른 저감 효율에 대한 관심도 증가하고 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 중학교를 대상으로 하여 교실과 복도 그리고 옥상 외기의 $PM_{2.5}$ 농도를 모니터링하고, 교실 내에 공기정화식물과 공기청정기를 설치하였을 때 교실 내 $PM_{2.5}$ 저감 효과를 평가하여 환경친화적인 교실 실내공기질 개선 방법의 기반으로 활용하는데 기여하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상 및 기간

본 연구는 2019년 5월부터 2021년 5월까지 약 2년간 경기도에 위치한 중학교 1곳을 선정하고, 동일한 건물에 위치한 동일 학년의 교실 4개를 선정하여 실내공기질 모니터링을 수행하였다. 모니터링 기간은 2019년 5월부터 2019년 7월까지 약 3개월간 배경 농도를 측정한 기간을 설치 이전(Before), 2019년 7월말 식물과 공기청정기를 설치하여 2021년 5월까지 약 1년 9개월간 측정한 기간을(After)로 분류하였으며, 측정 기기와 식물 및 공기청정기 설치일에 측정된 데이터는 통계분석에서 제외하였다.

각 교실은 건물 3층에 위치한 전용면적 63.45 m^2 크기로, 재실 인원은 25~26명이며, 동일한 조건에서의 실험을 위해 동일 학년이 사용하는 교실을 대상으로 하였다. 4개 교실을 대조군, 식물 설치 교실, 공기청정기 설치 교실, 식물 및 공기청정기 교실로 나누어 실내 $PM_{2.5}$ 농도를 측정하였다(Table 1). 외기와 복도 $PM_{2.5}$ 농도의 영향을 파악하기 위해 옥상과 복도에서도 함께 측정하였다.

Table 1. Characteristics of the classrooms to be measured

Classification	Classrooms				Outdoor	Hallway
	A	B	C	D		
Located floor	3F (1~5F)				Rooftop	3F
Classroom area	63.45 m^2				-	-
Number of students	25	26	26	26	-	-
Plants and air purifier*	w/o	w/plants	w/air purifier	w/plants+air purifier	-	-

*w/o: without, w/: with.

2. 측정 및 분석

측정물질은 $PM_{2.5}$를 대상으로 하였으며, IoT 기반 광산란 측정장비를 활용하여 1분 단위로 실시간 및 장기간 데이터를 측정하였다. 교실의 경우 측정장비의 위치에 따른 오차를 최소화하기 위하여 1개 교실 당 측정장비를 복도측과 창가측에 1대씩 총 2대를 설치하였으며, 두 기기에서 같은 시간에 측정된 데이터의 평균값을 통계 분석에 사용하였다. 외기와 복도에서의 $PM_{2.5}$ 농도의 교실 내 영향을 확인하기 위해 건물 옥상에 1대, 복도에 1대를 설치하여 함께 모니터링하였다.

장비는 학생들의 활동에 방해가 되지 않으면서 주변 시설 등으로 인한 측정 장애와 같은 영향이 없는 위치에 설치하였다. 본 연구에 활용한 장비(Smartaircok, Aircok Inc.,)는 미세먼지 간이측정 성능인증 평가에서 1등급을 받은 장비로(Table 2), 국가공인시험기관 인증을 받은 기준장비와 Grimm사 장비를 활용하여 기준장비와 사용장비간 동일한 공간에서 측정된 데이터가 일치하는지 확인하는 과정을 통해 데이터 교정을 완료한 상태로 설치되었다. 장기간 설치되어 측정을 수행하기 때문에 데이터 신뢰성 확보를 위해 1년에 1회 점검을 통해 Grimm사 장비 및 기준장비와의 오차를 점검하여 모니터링을 수행하였다.

3. 식물 및 공기청정기 설치

식물과 공기청정기를 설치하는 교실의 경우 2019년 5월부터 약 3달 동안 식물이나 공기청정기가 없는 상태에서 교실 내 $PM_{2.5}$ 농도를 측정한 후, 2019년 7월 말에 식물과 공기청정기를 설치하였다(Fig. 1, Table 3). 선행연구를 통해 미세먼지 저감효과가 있는 것으로 보고된 스킨답서스(Epipremnum aureum)[20,21]를 활용한 수동형 벽면 녹화 모델을 적용하였다. Gwak 등(2015)[22]을 통해 실내공기오염물질 농도 감소 효과를 관찰할 수 있는 것으로 보고된 공간대비 3% 내외의 식물이 적용될 수 있도록 총 200개의 스킨답서스로 구성된 벽면녹화 제품을 교실 뒤쪽과 복도측에 설치하였다. 공기청정기는 설치 대상 교실의 앞쪽 칠판 옆에 1대씩 설치하였으며, 공기청정기는 하교 후에도 가동할 수 있도록 하였다.

Table 2. Detailed specification of IoT measurement device

Measurement item	Method	Measurement range	Sensor precision*
$PM_{2.5}$	Laser light-scattering	0~1,000 μg/m^3	±15 μg/m^3 (≤100 μg/m^3), ±30% (≤100 μg/m^3)

*Precision according to the measuring range of the sensor.

Fig. 1. Installation of plants in classrooms

4. 통계 분석

연구기간동안 IoT 기반 측정장비를 통해 수집된 데이터를 바탕으로 SPSS Statistics (SPSS Inc., USA, Version 29.0)를 활용하여 통계 분석을 실시하였다. 대상 학교의 학사일정을 참고하여 학생들이 등교하지 않는 방학, 현장학습일, 수학여행 등의 기간은 분석에서 제외하였다. 각 교실별 식물 및 공기청정기를 통한 저감 효과를 평가하기 위해 측정된 데이터를 식물 및 공기청정기 설치 전(Before)과 후(After)로 나누어 비교하였으며, 시간에 따른 농도 변화는 측정기간 동안의 각 1분 단위 시간대별 농도의 평균값을 사용하여 나타내었다.

식물 및 공기청정기 설치 여부에 따른 교실 간 평균 농도에 차이가 있는지 확인하기 위해 일원배치 분산분석(one-way Anova)을 실시하고($p<0.05$), Scheffe 사후검정을 통해 집단 간 평균 차이를 확인하였다. 설치 전·후에 따라 평균 농도에 차이가 있는지 알아보기 위해서는 독립표본 t-test를 실시하였다($p<0.05$).

교실 내 $PM_{2.5}$ 농도가 외기 또는 복도 $PM_{2.5}$ 농도에 영향을 받았는지 평가하기 위한 지표로 실내·외 농도비를 직접적으로 표현하는 I/O ratio (Indoor-Outdoor concentration ratio)를 분석하였다. 교실 내 $PM_{2.5}$ 농도를 실내 농도로, 외기와 복도 $PM_{2.5}$ 농도를 각각 실외 농도로 하였다.

III. 결 과

1. 식물 및 공기청정기 설치 전·후 $PM_{2.5}$ 농도 변화 평가

전체 측정 기간 동안의 시간에 따른 $PM_{2.5}$ 농도변화를 시계

Table 3. Detailed specifications of the air purifier installed to the classroom

Item	Detail
(W)×(D)×(H) mm	500 × 327 × 800
Weight	20 kg
Recommended use area	100 m^2
Maximum flow rate	15 CMM

열 그래프로 나타내었다(Fig. 2). 교실에 따라 일과시간 중 변화 양상에 차이는 있었으나 모든 교실에서 학생들이 등교를 시작하는 오전 8시 전후로 농도가 점차 증가하고 일과시간 중 수업 및 쉬는 시간에 따라 증가와 감소를 반복하였다가 하교 시간인 오후 4시를 전후로 농도가 점차 감소하는 모습을 보였다. 복도에서는 학생들이 수업을 시작하기 직전인 오전 9시경 농도가 가장 높게 나타났으며, 교실과 마찬가지로 하교시간인 오후 4시를 전후로 점차 감소하였다.

대상 교실별 식물 및 공기청정기 설치 여부와 식물 및 공기청정기 설치 전·후에 따른 교실 내 $PM_{2.5}$ 평균 농도를 비교하였다(Table 4, Fig. 3).

식물 및 공기청정기 설치 여부에 따른 공간 간 평균 농도에 차이가 있는지 확인하기 위해 일원배치 분산분석(one-way Anova)을 실시한 결과, 공간 간 평균 농도 차는 유의수준 0.001을 기준으로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. Scheffe test 결과, 식물 및 공기청정기가 모두 설치되지 않은 대조군 교실과 복도의 평균 농도 사이에는 차이가 없었으며, 이외 다른 공간 간 평균 농도는 차이가 있는 것으로 나타났다.

설치 전·후에 따라 평균 농도에 차이가 있는지 알아보기 위해서는 독립표본 t검정을 실시하였으며 식물 설치 교실, 공기청정기 설치 교실, 식물 및 공기청정기 설치 교실 모두 유의수준 0.001을 기준으로 설치 전·후 평균 농도에 통계적으로 유의하게 차이가 있는 것으로 나타났다.

식물 및 공기청정기 설치에 따른 $PM_{2.5}$ 평균 농도는 식물과 공기청정기 모두 설치되지 않은 교실의 경우 설치 전 34.5 μg/m^3, 설치 후 33.7 μg/m^{3}으로 나타났다. 식물만 설치된 교실은 설치 전 26.8 μg/m^3, 설치 후 25.6 μg/m^{3}이었으며 공기청정기만 설치된 교실은 설치 전 26.0 μg/m^3, 설치 후 21.7 μg/m^{3}이었다. 식물과 공기청정기가 모두 설치된 교실에서는 설치 전 27.6 μg/m^3, 설치 후 20.0 μg/m^{3}으로 조사되었다. 외기와 복도의 경우 각각 설치 전 31.8 μg/m^3, 61.8 μg/m^{3}이었으며, 설치 후 18.8 μg/m^3, 30.4 μg/m^{3}으로 나타나 외기에 비해 건물 내 복도에서

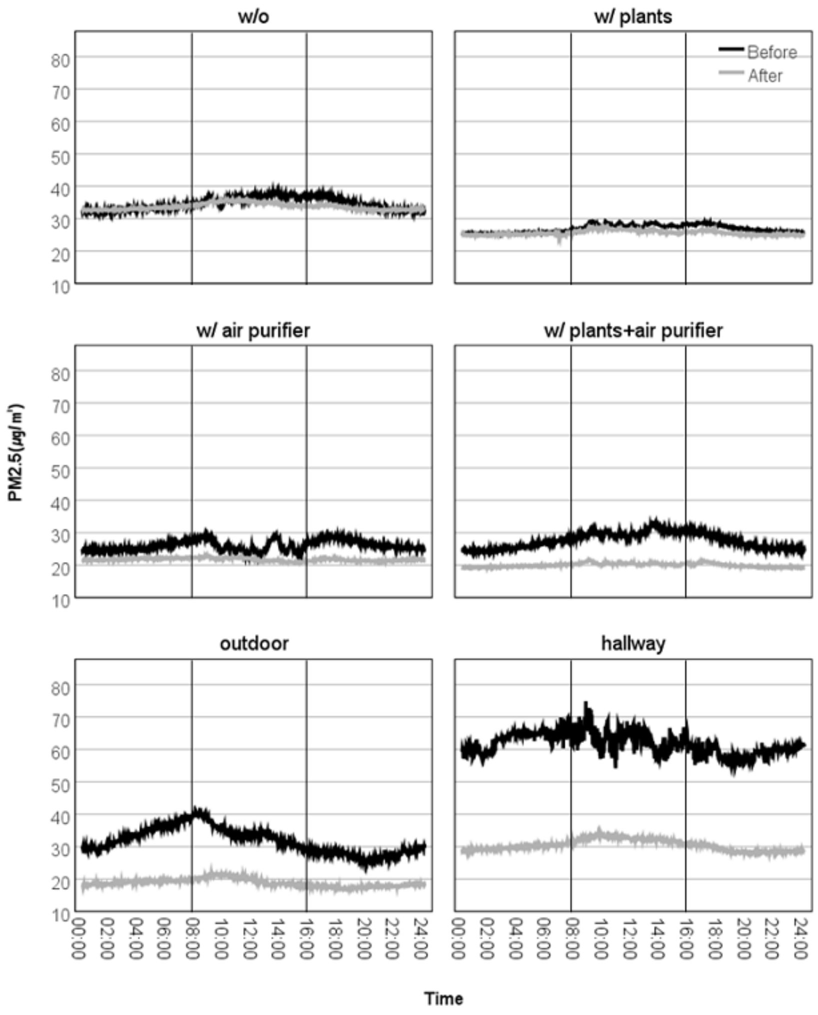

Fig. 2. Changes in $PM_{2.5}$ concentration by the classrooms according to before and after installation

https://doi.org/10.5668/JEHS.2023.49.4.183

Table 4. Differences in average concentrations of $PM_{2.5}$ in accordance with plants and air purifier installation

Division		$PM_{2.5}$ (μg/m³)			t(p)	F(p)	Scheffe
		N	Mean±SD	(Min~Max)			
w/o[a]	Before	183,952	34.5±22.7	(1~172.5)	14.176 (0.000)***	74,906.8171 (0.000)***	e<d<c<b<a,f
	After	886,732	33.7±22.2	(1.5~244)			
w/plants[b]	Before	157,676	26.8±20.9	(1~243)	40.88 (0.000)***		
	After	946,101	25.6±21.1	(1~213)			
w/air purifier[c]	Before	117,676	26.0±19.0	(1~123.5)	68.602 (0.000)***		
	After	954,371	21.7±20.3	(1~219.5)			
w/plants+air purifier[d]	Before	117,654	27.6±21.8	(1~157.5)	142.16 (0.000)***		
	After	951,726	20.0±16.7	(1~206)			
Outdoor[e]	Before	116,826	31.8±26.7	(1~173)	222.56 (0.000)***		
	After	939,805	18.8±17.6	(1~417)			
Hallway[f]	Before	114,888	61.8±69.5	(1~325)	272.75 (0.000)***		
	After	957,835	30.4±30.7	(1~325)			

***p<0.001.

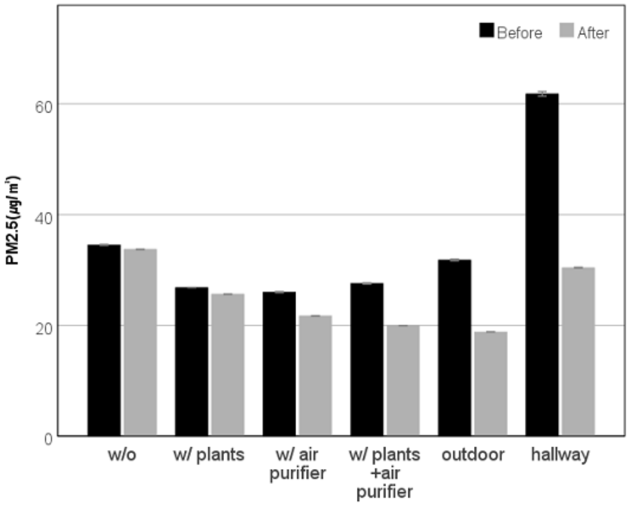

Fig. 3. Comparison of average concentrations of $PM_{2.5}$ in accordance with plants and air purifier installation

의 $PM_{2.5}$ 농도가 높은 것으로 조사되었다. 현행 학교보건법 상의 미세먼지 유지·관리 기준은 $PM_{2.5}$ 35 μg/m³으로, 4개 교실 모두 $PM_{2.5}$ 평균 농도가 기준치를 초과하지는 않았으나 측정기간 전체를 보았을 때 초과하는 사례도 있었으며, 복도 평균 농도는 기준치를 웃돌았다.

식물 및 공기청정기 설치에 따른 저감율을 비교하였을 때 식물만 설치된 교실은 4.5%, 공기청정기만 설치된 교실은 16.5%, 식물과 공기청정기가 모두 설치된 교실은 27.6%로, 식물 및 공기청정기가 모두 설치된 교실의 저감 효과가 가장 좋은 것으로 조사되었다(Table 5).

교실과 외기 및 복도간 I/O ratio는 설치 전의 경우 대조군 교

Table 5. Differences in average concentrations of $PM_{2.5}$ between before and after installation

Item	w/plants	w/air purifier	w/plants+ air purifier
Reduction ($\Delta PM_{2.5}$ (μg/m³))	1.21	4.28	7.60
Reduction rate	4.5%	16.5%	27.6%

실, 식물 및 공기청정기 설치 대상 교실, 식물 설치 대상 교실, 공기청정기 설치 대상 교실 순으로 높았으나, 설치 후에는 대조군 교실, 식물 설치 교실, 공기청정기 설치 교실, 식물 및 공기청정기 설치 교실 순으로 높게 나타났다. 또한 설치 후 기간동안 외기 평균 농도는 18.8 μg/m³으로 약 40% 감소하고 모든 교실에서 설치 이후 기간 평균 농도가 감소하였으나 오히려 I/O ratio는 설치 이후 기간 0.66~1.79 범위로 설치 전 0.42~1.09보다 높게 조사되었다(Table 6).

IV. 고 찰

본 연구에서 중학교 교실을 대상으로 실내 식물 및 공기청정기 설치에 따른 $PM_{2.5}$ 농도 변화를 평가한 결과, 시간의 흐름에 따라 4개 교실 모두 학생들이 등교를 시작한 오전 8시경부터 점차 농도가 증가하여 일과시간 중 활동에 따라 증감을 반복하다, 하교시간인 오후 4시경 농도가 점차 감소하는 양상을 보였다. 일과시간 중 $PM_{2.5}$ 농도의 증감은 학생들이 움직이는 쉬는시간과 점심시간 등에는 농도가 증가하다 활동이 없는 수업시간에는 다시 감소하기 때문이다.[1,23] 교실 간 일과시간 중 변화 양상과 교실별 기초농도에 차이가 있는 것은 동일한 건물의

Table 6. Comparison of I/O ratio between classrooms and outdoor and hallway

I/O ratio	Outdoor		Hallway	
	Before	After	Before	After
Classroom w/o	1.09	1.79	0.56	1.11
Classroom w/plants	0.84	1.36	0.43	0.84
Classroom w/air purifier	0.82	1.15	0.42	0.71
Classroom w/plants+air purifier	0.87	1.06	0.45	0.66

동일 층에 위치한 동일 학년의 교실임에도 교실의 분위기, 수업 과목, 담당 교사의 교실 내 행동지침 등에 따라 학생들의 활동에 차이가 있기 때문이다.

특히 식물과 공기청정기 설치 이후, 설치가 이루어지지 않은 대조군 교실에서는 설치 이후 기간에도 $PM_{2.5}$ 평균농도가 33.7 μg/m^{3}으로 현행 학교보건법의 미세먼지 유지기준인 35 μg/m^{3}와 유사하였으나 식물 및 공기청정기가 설치된 교실은 평균 20.0~26.0 μg/m^{3}으로 기준치보다 낮은 것으로 나타났다. 설치 이후 기간 동안의 4개 교실 $PM_{2.5}$ 평균 농도는 식물과 공기청정기가 모두 설치되지 않은 교실에서 가장 높고, 식물만 설치된 교실, 공기청정기만 설치된 교실, 식물과 공기청정기가 모두 설치된 교실 순으로 낮은 것을 확인하였다.

Shao 등(2021)[24]의 연구결과와 마찬가지로 본 연구에서도 실내 식물 적용에 따른 $PM_{2.5}$ 농도가 통계적으로 유의미한 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 식물 및 공기청정기 모두 실내 공기질 저감 효과가 있다는 것을 확인할 수 있었다. 식물 및 공기청정기 설치에 따른 저감율은 식물과 공기청정기가 모두 설치된 교실이 27.6%로 가장 높았으며, 공기청정기만 설치된 교실(16.5%), 식물만 설치된 교실(4.5%)이 그 뒤를 이었다. 식물의 생물학적 방법을 통한 실내공기질 개선 효과는 다양한 선행연구를 통해 확인된 바 있다.[25-27] 본 연구에서는 자연적으로 미세먼지가 식물의 대사를 통해 흡수되는 방법의 식물 모델을 적용하였으며, 이로 인해 식물만 설치된 교실에서의 $PM_{2.5}$ 저감율이 가장 낮은 것으로 판단된다. 잎 표면 침착과 기공에 의한 흡수 모두 $PM_{2.5}$ 제거 메커니즘이 될 수 있고,[17] 기류를 형성할 수 있는 공기청정기가 식물과 함께 설치된 교실에서는 공기청정기로 형성된 기류가 $PM_{2.5}$의 침착 또는 기공으로의 흡수를 도와 $PM_{2.5}$ 저감율이 가장 높게 나타난 것으로 판단된다.

설치 이후 기간의 외기 농도가 설치 전 기간에 비해 감소하여, 식물 및 공기청정기로 인한 저감 효과가 외기 및 복도 농도의 감소에 의한 영향이 있는지 확인하기 위해 I/O ratio를 비교하였으나, 설치 전 대조군, 식물 및 공기청정기, 식물, 공기청정기 순으로 높았던 것과 달리 설치 후 대조군, 식물, 공기청정기, 식물 및 공기청정기 순으로 높게 나타나 식물과 공기청정기가 교실 내 초미세먼지 저감에 영향인자로 작용했을 것으로 사료된다.

외기 농도가 설치 전 기간보다 설치 후 기간동안 낮은 평균 농도를 보이고 교실에서의 농도도 감소했으나 I/O ratio는 설치 전에 비해 설치 후 높게 나타나 학교 교실의 경우 선행 연구결과와 마찬가지로 외기에 의한 영향보다 교실 내 요인으로 인한 영향이 큰 것으로 보인다.[28] 그러나 본 연구에서는 교실 내 미세먼지 농도에 영향을 미칠 수 있는 직접적인 환기 형태 및 횟수 등의 요인을 조사하지 못하였고, 각 교실별 활동양상의 차이를 분석에 반영하지 못하였다. 이로 인해 식물과 공기청정기로 인한 영향 이외에 환기나 외기 미세먼지 농도 감소 등 다른 요인이 $PM_{2.5}$ 농도 차이에 영향을 미쳤을 수 있으나 이를 분석에서 완전히 배제할 수 없었다는 한계점이 있다. 또한 우리나라는 계절별 특성에 따라 교실 내에서의 활동에 차이가 있기 때문에 차후 계절별 요인을 반영한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구에서는 중학교 교실에 식물과 공기청정기를 활용하여 실내공기질 저감 효과를 평가하고, 이를 통해 환경친화적인 교실 실내공기질 개선 방법의 기반으로 활용하는데 기여하고자 하였다. 4개의 교실과 복도 및 옥상에 IoT 기반 측정장비를 설치하고 식물 및 공기청정기 적용 여부 및 설치 전·후에 따른 $PM_{2.5}$ 평균 농도 변화를 분석하였다. 식물 설치 이후 기간동안의 교실 내 $PM_{2.5}$ 평균 농도는 식물 및 공기청정기 설치 교실이 가장 낮았으며, 공기청정기 설치 교실, 식물 설치 교실, 대조군 교실 순으로 낮은 것으로 나타났다. 복도 및 외기와 교실과의 I/O ratio는 설치 전 대조군, 식물 및 공기청정기, 식물, 공기청정기 설치 교실 순으로 높았으나 설치 후에는 대조군, 식물, 공기청정기, 식물 및 공기청정기 설치 교실 순으로 높게 나타나 식물과 공기청정기가 교실 내 $PM_{2.5}$ 저감 영향인자로 작용했을 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 계절적 요인, 교실 내 환기 등 활동양상 차이 등으로 인한 교실 내 $PM_{2.5}$ 농도 영향을 반영하지 못했다는 한계점이 있으나 식물이 실내 $PM_{2.5}$ 저감 요인으로 작용할 수 있음을 확인하였고, 공기청정기와의 병행 설치 시 저감 효과를 극대화할 수 있음을 확인하였다. 추후 교실 내에 적용할 수 있

https://doi.org/10.5668/JEHS.2023.49.4.183

는 환경친화적 실내공기질 개선 방법 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. Yang HH, Kwak MJ, Jeong NR, Kim HH. Evaluation of indoor air quality improvement effect by using IoT-based green wall system in classrooms. *J Odor Indoor Environ.* 2020; 19(4): 400-413.
2. Bae H. Effects of short-term exposure to PM_{10} and $PM_{2.5}$ on mortality in Seoul. *J Environ Health Sci.* 2014; 40(5): 346-354.
3. Guieysse B, Hort C, Platel V, Munoz R, Ondarts M, Revah S. Biological treatment of indoor air for VOC removal: potential and challenges. *Biotechnol Adv.* 2008; 26(5): 398-410.
4. Shiotsu M, Yoshizawa S, Ikeda K, Nozaki A. Survey on human activity patterns according to time and place. Basic research on the exposure dose to indoor air pollutants part 1. *J Archit Plan Environ Eng.* 1998; 63(511): 45-52.
5. Cincinelli A, Martellini T. Indoor air quality and health. *Int J Environ Res Public Health.* 2017; 14(11): 1286.
6. Yang W. Time-activity pattern of students and indoor air quality of school. *J Korean Inst Educ Facil.* 2014; 21(6): 17-22.
7. Landrigan PJ. Environmental hazards for children in USA. *Int J Occup Med Environ Health.* 1998; 11(2): 189-194.
8. Lee MC, Mui KW, Wong LT, Chan WY, Lee E, Cheung CT. Student learning performance and indoor environmental quality (IEQ) in air-conditioned university teaching rooms. *Build Environ.* 2012; 49: 238-244.
9. Wargocki P, Wyon DP. Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork. *Build Environ.* 2017; 112: 359-366.
10. Meininghaus R, Kouniali A, Mandin C, Cicolella A. Risk assessment of sensory irritants in indoor air--a case study in a French school. *Environ Int.* 2003; 28(7): 553-557.
11. Shan X, Melina AN, Yang E. Impact of indoor environmental quality on students' wellbeing and performance in educational building through life cycle costing perspective. *J Clean Prod.* 2018; 204: 298-309.
12. Jung JS, Park DS, Jeon HJ, Song HS, Lee MJ. A study of indoor air quality of school classrooms. *J Korea Acad-Ind coop Soc.* 2015; 16(5): 3643-3652.
13. Park JH, Lee TJ, Park MJ, Oh HN, Jo YM. Effects of air cleaners and school characteristics on classroom concentrations of particulate matter in 34 elementary schools in Korea. *Build Environ.* 2020; 167: 106437.
14. Noh SJ, Yoon SH, Hwang EY, Lee SY, Lee SS, Kim JB. Proposal for improvement and management status of indoor air quality in school. *J Odor Indoor Environ.* 2021; 20(2): 166-177.
15. Martenies SE, Batterman SA. Effectiveness of using enhanced filters in schools and homes to reduce indoor exposures to $PM_{2.5}$ from outdoor sources and subsequent health benefits for children with asthma. *Environ Sci Technol.* 2018; 52(18): 10767-10776.
16. Ko D, Han J. A study on consumer perception of the risk of living chemicals using text analysis: focusing on the case of humidifier disinfectants accident. *Consum Policy Educ Rev.* 2018; 14(3): 141-167.
17. Choi YK, Song HJ, Jo JW, Bang SW, Park BH, Kim HH, et al. Morphological and chemical evaluations of leaf surface on particulate matter2.5 ($PM_{2.5}$) removal in a botanical plant-based biofilter system. *Plants (Basel).* 2021; 10(12): 2761.
18. Tani A, Tobe S, Shimizu S. Uptake of methacrolein and methyl vinyl ketone by tree saplings and implications for forest atmosphere. *Environ Sci Technol.* 2010; 44(18): 7096-7101.
19. Oikawa PY, Lerdau MT. Catabolism of volatile organic compounds influences plant survival. *Trends Plant Sci.* 2013; 18(12): 695-703.
20. Kim KJ, Kim HJ, Suh JN, Jung HH, Jang HS. Removal efficiency of particle matter by indoor plants. *Korean J Hortic Sci Technol.* 2016; 34(2): 184.
21. Cao Y, Li F, Wang Y, Yu Y, Wang Z, Liu X, et al. Assisted deposition of $PM_{2.5}$ from indoor air by ornamental potted plants. *Sustainability.* 2019; 11(9): 2546.
22. Gwak YK, Kim HH, Lee SE, Son HR, Kim KJ, Shin DC, et al. A study on the change of indoor air quality (IAQ) and health score measurement according to amount of indoor plants in the elementary school classrooms. *J Odor Indoor Environ.* 2015; 14(3): 190-198.
23. Choi SJ. The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of size-selective particulate in classrooms. *J Environ Health Sci.* 2008; 34(2): 137-147.
24. Shao Y, Li J, Zhou Z, Zhang F, Cui Y. The impact of indoor living wall system on air quality: a comparative monitoring test in building corridors. *Sustainability.* 2021; 13(14): 7884.
25. Pettit T, Irga PJ, Abdo P, Torpy FR. Do the plants in functional green walls contribute to their ability to filter particulate matter? *Build Environ.* 2017; 125: 299-307.
26. Torpy F, Zavattaro M. Bench-study of green-wall plants for indoor air pollution reduction. *J Living Archit.* 2018; 5(1): 1-15.
27. Ju J. Change in the concentration of fine particles, temperature, and relative humidity as affected by different volume ratios of interior greening in real indoor space. *J Korean Soc Environ Restor Technol.* 2010; 13(2): 1-7.
28. Stabile L, Dell'Isola M, Russi A, Massimo A, Buonanno G. The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools. *Sci Total Environ.* 2017; 595: 894-902.

〈저자정보〉

최치구(박사과정), 양호형(주임연구원), 김호현(교수), 권혁구(교수)