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(6): 295-304
https://doi.org/10.5668/JEHS.2023.49.6.295

교사 내 플랜트 모델 유형별 적용에 따른 공기질 변화

양호형[1], 김형주[2], 방성원[3], 조흔우[4], 이형석[5], 한승원[5], 김광진[5], 김호현[1,6]*

[1]서경대학교 생활 및 산업환경 연구소, [2]건국대학교 생물공학과, [3](주)가든포유, [4](주)에어콕, [5]국립원예특작과학원, [6]서경대학교 나노화학생명공학과

Changes in Air Quality through the Application of Three Types of Green-Wall Model within Classrooms

Ho-Hyeong Yang[1], Hyung-Joo Kim[2], Sung-Won Bang[3], Heun-Woo Cho[4], Hyeong-Seok Lee[5], Seung-Won Han[5], Kwang-Jin Kim[5], and Ho-Hyun Kim[1,6]*

[1]Research Institute for Living and Industrial Environment in Seokyeong University, [2]Department of Biological Engineering, Konkuk University, [3]Garden4u Co., Ltd., [4]Aircok Co., Ltd., [5]Department of Urban Agriculture, National Institute of Horticultural and Herbal Science , [6]Department of Nano-Chemical, Biological and Environmental Engineering, Seokyeong University

ABSTRACT

Background: Adolescents are relatively more sensitive than adults to exposure to indoor pollutants. The indoor air quality in classrooms where students spend time together must therefore be managed at a safe level because it can affect the health of students.

Objectives: In this study, three types of green-wall models were applied to classrooms where students spend a long time in a limited space, and the resulting effects on reducing PM were evaluated.

Methods: In the middle school classrooms which were selected as the experimental subjects, IoT-based indoor air quality monitoring equipment was installed for real-time monitoring. Three types of plant models (passive, active, and active+light) were installed in each classroom to evaluate the effects on improving indoor air quality.

Results: The concentration of PM in the classroom is influenced by outdoor air quality, but repeated increases and decreases in concentration were observed due to the influence of students' activities. There was a PM reduction effect by applying the green-wall model. There was a difference in PM reduction efficiency depending on the type of green-wall model, and the reduction efficiency of the active model was higher than the passive model.

Conclusions: The active green-wall model can be used as an efficient method of improving indoor air quality. Additionally, more research is needed to increase the efficiency of improving indoor air quality by setting conditions that can stimulate the growth of each type of plant.

Key words: Classroom, plants, school, $PM_{2.5}$, PM_{10}

Received December 11, 2023
Revised December 22, 2023
Accepted December 26, 2023

Highlights:

- The concentration of PM in classrooms is not only affected by outdoor air quality, but also by the activities of students in the classrooms.
- Active plant models can be used as a more efficient way to improve indoor air quality than passive plant models.
- In order to use a green wall as a method of improving indoor air quality, additional research is needed on appropriate conditions for the space such as suitable plants, light quantity, etc.

***Corresponding author:**
Research Institute for Living and Industrial Environment in Seokyeong University, 124 Seogyeong-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02713, Republic of Korea
Tel: +82-2-940-7414
Fax: +82-2-940-7616
E-mail: ho04sh@skuniv.ac.kr

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.

I. 서 론

현대인들은 생활 양식이 변화하면서 실내 활동시간이 점차 증가하여 하루 중 약 90%를 실내에서 보내고 있기 때문에 실내공기질은 현대인의 건강에 매우 중요한 요소라고 할 수 있다.[1] 고농도 미세먼지에 대한 노출은 심혈관계 질환과 호흡기계 질환으로 인한 사망률 증가와 관련이 있다.[2-4] 실내 미세먼지는 일반적으로 실외 환경으로부터 유입되며, 요리, 사무용 프린터 사용, 청소 등과 같은 활동으로 인해 실내 환경 내에서도 발생할 수 있다.[5,6] 실내 미세먼지는 전체 미세먼지 노출로 인한 질병 발생의 약 10~30%를 차지한다.[7]

특히, 우리나라 10대 학생 중 약 40%가 하루 중 상당시간을 학교나 학원과 같이 실내에서 머무르는 것으로 보고되었다.[8] 청소년들은 성장과 발육이 활발하며, 성인보다 활동량이 많아 단위체적당 호흡량이 많기 때문에 실내 오염물질 노출에 상대적으로 민감하다.[9] 선행연구에서는 교실 내 PM_{10} 농도 수준이 외부보다 높은 것으로 보고한 바 있다.[1] 단위면적당 재실자 밀도가 높고 공동생활을 하는 교실의 실내공기질은 학생들의 건강에 영향을 미칠 수 있기 때문에 안전하고 쾌적하게 관리되어야 한다.

실내공기질의 건강영향에 대한 관심이 커지면서 쾌적한 실내공기질 관리를 위해 다양한 방법의 실내공기질 개선 방법이 연구되고 있다. 실내공기에서 오염물질을 제거하기 위해 다양한 물리화학적 방법이 개발되었지만 모든 방법에는 유지 관리 비용이 많이 든다는 단점이 있다.[10] 이러한 단점을 극복할 수 있는 식물을 활용한 지속가능한 친환경적 실내공기 개선 방법에 대한 연구가 이루어지고 있다. 식물만을 독립적인 공기청정 방법으로 활용하기에는 현장 효율성이 낮다는 한계점이 있으나,[11] 최근 기술 발전으로 능동형 벽면녹화 등이 개발되어 더 효율적인 식물 활용 공기정화 방법이 연구되고 있다. 실내 환경에서 벽면녹화는 재실자에게 가장 심미적으로 영향이 크고, 활동에는 영향이 적은 영역에 적용되는 경우가 많다.[12] 이러한 위치는 식물에 적절한 자연광이 도달하기 어려운 위치인 경우가 많다.[13] 빛은 광합성의 기본 요구사항이기 때문에 식물의 건강을 유지하고 오염물질 제거를 촉진하려면 충분한 광이 필수적이다.[14-16]

본 연구에서는 학교 교실 내 미세먼지 저감을 위해 식물을 활용한 벽면녹화 방법을 적용하였다. 단순 수동형 벽면녹화 모델, 능동형 벽면녹화 모델 및 능동형 모델에 조명을 추가한 모델 등 총 3가지 유형의 벽면녹화를 적용하고 모델 유형에 따른 미세먼지 저감 효과를 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상 및 기간

본 연구는 부천시에 위치한 중학교 교실 6곳을 테스트베드로 선정하였다. 각 교실을 수동형(P), 능동형(A), 능동형 및 조명(A+L) 모델을 적용(실험군) 또는 미적용(대조군)하는 교실로 나누어 구분하고 공기질 모니터링을 수행하였다(Table 1). 수동형과 능동형 및 조명 모델이 적용된 교실은 중학교 1학년이 사용하는 교실이며, 능동형 모델이 적용된 교실은 2학년 교실이었다. 각 교실별 재실인원은 25~26명으로 큰 차이가 없으며, 면적 또한 약 63 m^2으로 동일한 교실을 대상으로 하였다. 각 교실별로 1년 이상 모니터링을 수행하였으며, 벽면녹화 모델 설치일을 기준으로 설치전(before)과 설치후(after)로 나누어 기간을 구분하였다.

Table 1. Information for each green-wall type

Classroom	Green-wall type	Floor	Measurement period	Green-wall installation
1	P	3F	2019.05~2021.05	2019.07
2				
3	A	2F	2020.02~2021.05	2020.08
4				
5	A+L	4F	2020.02~2021.05	2020.08
6				

Table 2. Detailed specification of IoT sensing device

Measurement item	Method	Measurement range	Precision	Testing institute
$PM_{2.5}$	Laser light-scattering	0~1,000 μg/m^3	±15 μg/m^3 (100 μg/m^3 or less), ±30% (100 μg/m^3 or more)	KEI
PM_{10}	Laser light-scattering	0~6,000 μg/m^3	±15 μg/m^3 (100 μg/m^3 or less), 10% (100 μg/m^3 or more)	KEI

https://doi.org/10.5668/JEHS.2023.49.6.295

2. 공기질 측정

각 교실별 창가측과 복도측에 IoT 기반 실내공기질 모니터링 장비를 1대씩 설치하였으며, 각 교실이 위치한 복도와 건물의 옥상에도 1대씩 설치하여 총 17대의 장비를 통해 공기질 데이터를 수집하였다. 장비는 학생들의 활동에 방해가 되지 않으면서 주변 시설 등으로 인한 측정 장애와 같은 영향이 없는 위치에 설치되었다. 공기질 데이터는 각 공간에서 1분 단위로 연속 측정되었다.

본 연구에 활용된 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 Grimm사 장비 및 기준장비와 동일 장소 내에서 측정한 데이터의 오차를 점검하고 R^2값이 0.98 이상이 되도록 교정 후 지속적으로 모니터링을 수행하였다.

3. 벽면녹화 모델 설치

각 교실에 설치된 수동형, 능동형, 능동형 및 조명 모델은 다음과 같다(Fig. 1). 벽면녹화 모델 설치는 학생들의 생활과 수업에 영향을 미치지 않는 위치를 고려하여 복도측과 교실 뒤쪽에 설치하였다. 공간대비 3% 내외의 식물을 적용할 경우 실내공기 오염물질의 농도가 감소하였음을 보고한 바 있는 선행연구 결과를 활용하여,[17] 본 연구에서도 교실별 식물의 면적이 약 3% 내외가 될 수 있도록 각 교실별로 동일한 면적으로 벽면녹화를 적용하였다.

수동형(passive) 벽면녹화 모델은 단순 벽면녹화 모델을 의미한다. 능동형(active) 벽면녹화 모델은 수동형 모델과 달리 벽면녹화에 팬이 추가된 형태로, 전면부에서 공기를 끌어당겨 식물의 잎, 뿌리, 토양을 통해 공기를 정화시켜 내보내는 모델을 의미한다. 능동형 및 조명 모델의 경우, 식물의 생육 활성화를 위해 능동형 모델에 조명을 추가한 유형이다. 능동형 모델의 광조건은 일과시간 내에만 적용하였다.

4. 통계 분석

측정장비의 위치에 따른 오차를 최소화하기 위하여 각 교실별 창가측과 복도측에 1대씩 총 2대를 설치하였으며, 두 기기에서 같은 시간에 측정된 데이터의 평균값을 통계 분석에 사용하였다.

측정된 데이터는 SPSS Statistics (SPSS Inc., USA, Version 29.0)를 활용하여 통계 분석을 실시하였으며, 통계적 유의성을 확인하기 위해 독립표본 t-test를 실시하였다. 방학, 수학여행, 주말 등과 같이 학생들이 등교하지 않는 일자의 데이터는 통계 분석에서 제외되었다. 또한, 본 연구가 수행된 기간은 코로나19의 유행기간으로 온라인 및 오프라인 수업이 병행되었으며, 학생들이 등교하지 않는 온라인 수업일의 데이터 또한 제외되었다. 측정기간동안 1개월 주기로 각 교실별 전체 측정 데이터를 확인하여 평이한 농도를 보이다가 단시간 내에 급격히 고농도를 보이는 경우, 이상값 등은 제외하였다.

시간에 따른 농도 변화는 측정기간 동안의 각 1분 단위 시간대별 농도의 평균값을 사용하였다. 외기 및 복도의 미세먼지 농도가 교실 내 미세먼지 농도에 영향을 미쳤는지를 확인하기 위하여 교실 내 미세먼지 농도를 실내 농도로, 외기와 복도 미세먼지 농도를 각각 실외 농도로 하여 실내외 농도비를 표현하는 I/O ratio로 나타내었다. I/O ratio는 각 공간 및 기간별 평균농도를 사용하여 산출하였다.

III. 결 과

1. 시간에 따른 교실 내 미세먼지 농도 변화

전체 측정 데이터를 학생 재실 여부에 따라 하루를 학생들이 교실 내에 재실하고 있는 '일과 중(during)'과 수업이 끝나 교실 내 재실인원이 없는 '방과 후(after)'로 나누어 각 공간 그룹별 미세먼지 평균 농도를 비교하였다(Fig. 2). 모든 교실군에서 '일과 중'에 비해 '방과 후' 평균 농도가 낮은 것으로 나타났다. 교실 그룹별로는 능동형(A), 수동형(P), 능동형 및 조명(A+L) 그

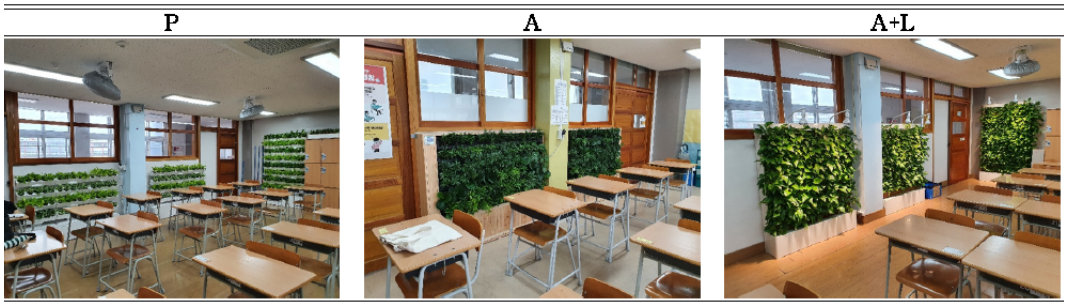

Fig. 1. Installation for each green-wall type. P: passive green-wall, A: active green-wall, A+L: active green-wall and light

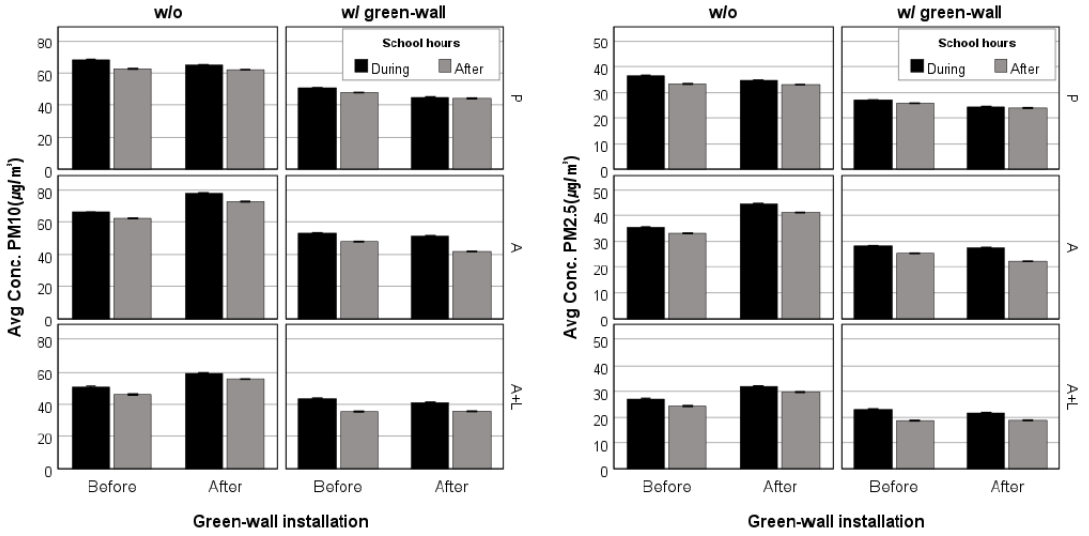

Fig. 2. Comparison of average concentration according to during and after school hours for each class

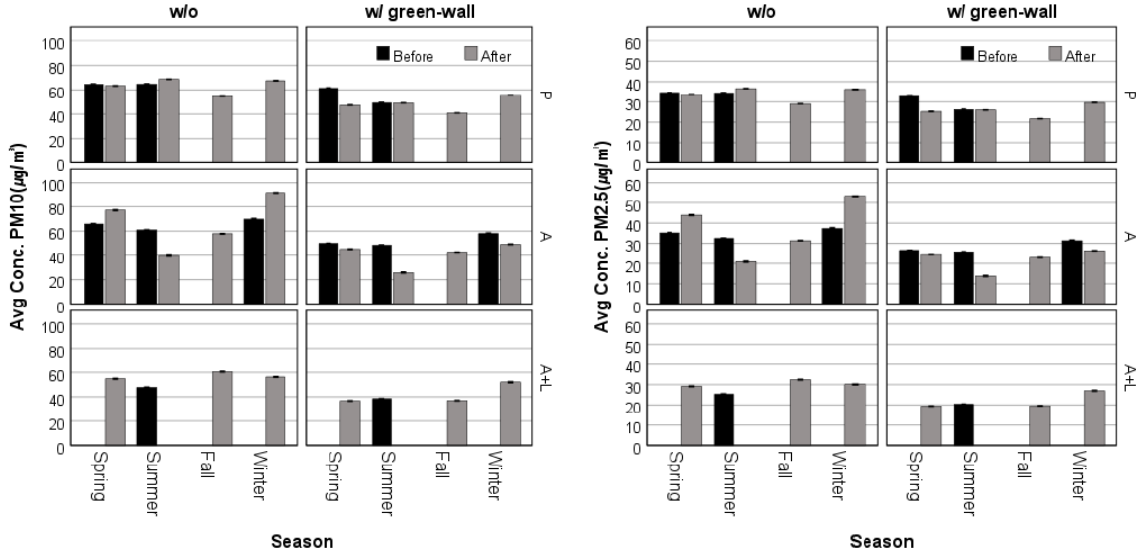

Fig. 3. Comparison of average concentration by season

룹 순으로 평균 농도가 높았다. 더불어, 벽면녹화 모델 설치 여부 및 교실별 계절에 따른 평균 농도를 비교하였으나(Fig. 3) 계절에 따른 농도 차이의 경향성을 확인할 수 없었다. 능동형 및 조명(A+L) 그룹의 경우 설치 전 기간에 겨울, 봄, 여름을 모두 포함하나, 코로나19의 영향으로 학생들이 등교한 날에 측정된 데이터만 분석에 사용하여 겨울과 봄에 측정된 데이터는 포함되지 않았다.

벽면녹화 모델이 설치된 교실 내 미세먼지의 시간에 따른 농도 변화를 시계열 그래프로 나타내었다(Fig. 4). 교실 및 설치 전/후 기간에 따라 농도 수준에는 차이가 있으나 모든 교실에서 학생들이 등교를 시작하는 오전 8시를 기준으로 PM_{10}과 $PM_{2.5}$ 농도가 점차 증가하는 양상을 보였다. 1교시 수업이 시작되는 오전 9시 10분 농도가 높아졌다가, 수업이 진행되는 동안(45분)에는 농도가 일시적으로 감소하였으며 쉬는시간(10분)에는 농도가 다시 증가하였다. 모든 교실에서 수업, 쉬는시간, 점심시간이 반복됨에 따라 PM_{10}과 $PM_{2.5}$ 농도의 증감이 반복되는 것을 확인하였다. 학생들이 하교하여 교실이 비는 시간인 오후 4시 이후로는 다시 농도가 감소하였다.

「학교보건법」에 의해 학교 내 PM_{10}과 $PM_{2.5}$에 대한 교사 내 유지기준은 각각 75 μg/m³ 이하, 35 μg/m³ 이하로 관리되고 있다. 시간에 따른 PM_{10} 평균 농도 변화의 경우 능동형 모델의 대조군(미설치 교실)의 설치 후(after) 기간을 제외한 모든 경우

https://doi.org/10.5668/JEHS.2023.49.6.295

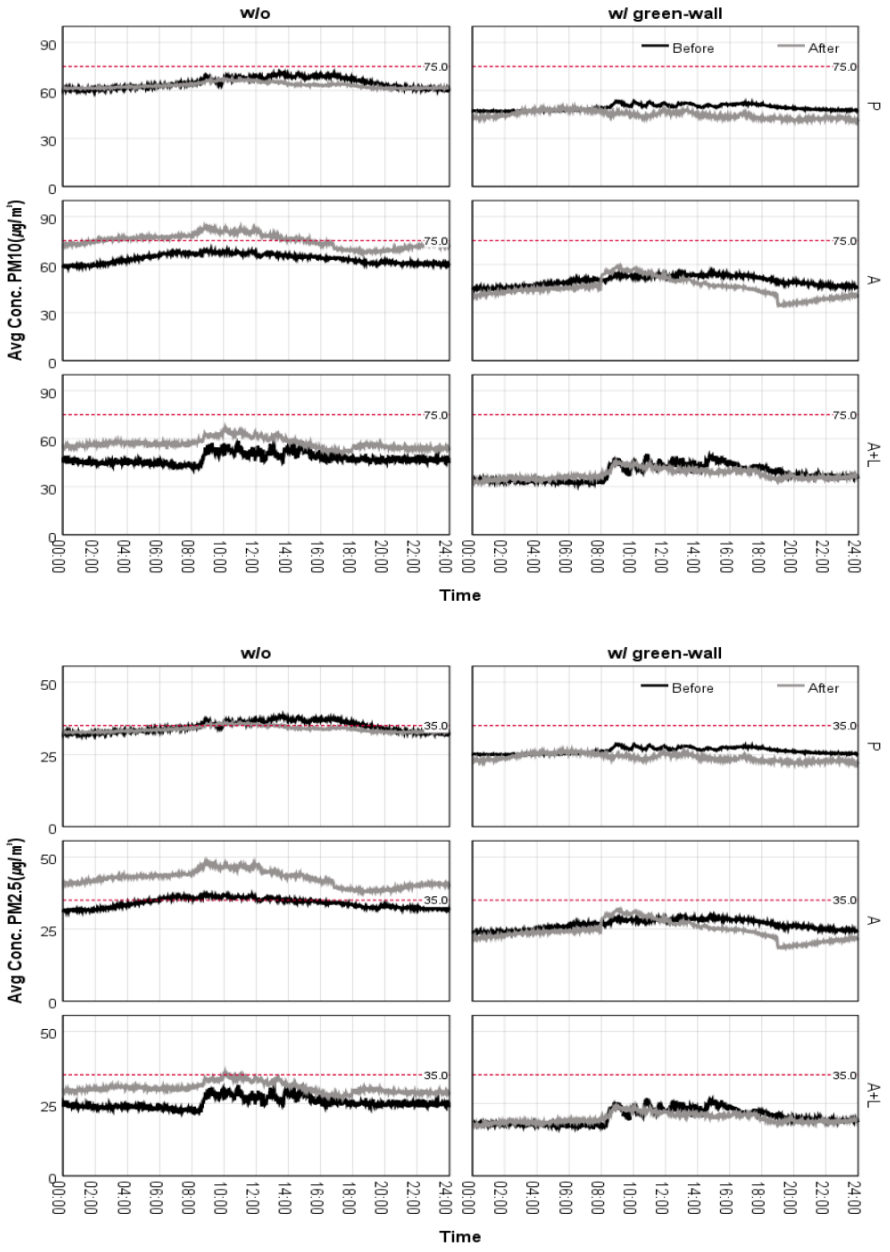

Fig. 4. Time-series plot of PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations in classrooms by green-wall type

에서 기준을 초과하지 않았다. $PM_{2.5}$의 경우 벽면녹화 모델 설치 대상 교실에서는 설치 전과 후 모두 기준치를 초과하는 사례가 없었다. 수동형 모델과 수동형 모델의 대조군 교실에서는 일과시간 중 평균 농도가 기준치를 초과하였다. 능동형 및 조명 모델의 대조군 교실에서도 설치 후 기간동안의 일과시간 중 일부 기준치를 초과하는 경우가 있었다.

2. 벽면녹화에 따른 미세먼지 저감 효과 평가

공간별, 벽면녹화 모델 유형별 및 설치 전/후에 따른 PM_{10}과 $PM_{2.5}$ 데이터를 표로 나타내었다(Table 3, 4).

수동형 모델 설치 교실의 경우 설치 전 PM_{10} 49.20 μg/m^3, $PM_{2.5}$ 26.20 μg/m^{3}이었으며, 설치 후 PM_{10} 44.77 μg/m^3, $PM_{2.5}$ 23.91 μg/m^{3}로 나타났다. 대조군 교실에서는 설치 전 PM_{10} 64.64 μg/m^3, $PM_{2.5}$ 34.53 μg/m^{3}이었으며, 설치 후 PM_{10} 63.16 μg/m^3, $PM_{2.5}$ 33.72 μg/m^{3}이었다.

능동형 모델 설치 교실의 경우 설치 전 PM_{10} 49.87 μg/m^3, $PM_{2.5}$ 26.53 μg/m^{3}이었으며, 설치 후 PM_{10} 45.43 μg/m^3, $PM_{2.5}$ 24.38 μg/m^{3}이었다. 대조군 교실에서는 설치 전 PM_{10} 63.66

https://doi.org/10.5668/JEHS.2023.49.6.295

Table 3. The concentration of PM_{10} according to before/after installation, location, and green-wall type

PM_{10}	Classroom (w/o)			Classroom (w/green-wall)			Hallway			Outdoor		
	Before	After	p-value	Before	After	p-value	Before	After	p-value	Before	After	p-value
P	64.64±40.78 (1.00~289.50) (n=183,952)	63.16±39.58 (1.50~408.00) (n=886,732)	<0.001	49.20±36.33 (1.00~350.50) (n=187,786)	44.77±37.69 (1.00~276.50) (n=867,529)	<0.001	108.10±112.18 (1.00~499.00) (n=114,888)	56.24±53.53 (1.00~495.00) (n=957,835)	<0.001	42.48±34.6 (1.00~207.00) (n=116,826)	25.46±23.17 (1.00~458.00) (n=939,805)	<0.001
A	63.66±38.84 (1.00~365.00) (n=242,358)	74.93±57.26 (1.00~513.00) (n=392,151)	<0.001	49.87±33.93 (1.00~312.00) (n=243,531)	45.43±41.13 (1.00~369.00) (n=393,953)	<0.001	49.21±34.71 (2.00~271.00) (n=279,217)	48.27±43.64 (2.00~299.00) (n=392,460)	<0.001	22.26±16.23 (1.00~120.00) (n=136,951)	22.76±21.87 (1.00~134.00) (n=206,586)	<0.001
A+L	47.67±32.05 (2.00~173.00) (n=38,793)	57.08±33.25 (2.00~177.00) (n=101,397)	<0.001	38.49±26.32 (2.00~147.00) (n=47,973)	37.74±24.11 (2.00~119.00) (n=97,527)	<0.001	50.02±33.94 (1.00~249.00) (n=197,788)	52.32±47.33 (1.00~344.00) (n=395,576)	<0.001	42.48±34.6 (1.00~207.00) (n=116,826)	25.46±23.17 (1.00~458.00) (n=939,805)	<0.001

Table 4. The concentration of $PM_{2.5}$ according to before/after installation, location, and green-wall type

$PM_{2.5}$	Classroom (w/o)			Classroom (w/green-wall)			Hallway			Outdoor		
	Before	After	p-value	Before	After	p-value	Before	After	p-value	Before	After	p-value
P	34.53±22.70 (1.00~172.50) (n=183,952)	33.72±22.20 (1.50~244.00) (n=886,732)	<0.001	26.20±20.00 (1.00~209.00) (n=187,786)	23.91±20.81 (1.00~159.50) (n=867,529)	<0.001	61.79±69.48 (1.00~325.00) (n=114,888)	30.41±30.70 (1.00~322.00) (n=957,835)	<0.001	31.79±26.74 (1.00~173.00) (n=116,826)	18.82±17.55 (1.00~417.00) (n=939,805)	<0.001
A	33.98±21.59 (1.00~218.00) (n=242,358)	42.47±35.02 (1.00~334.00) (n=392,151)	<0.001	26.53±18.44 (1.00~186.00) (n=243,531)	24.38±22.74 (1.00~224.50) (n=393,953)	<0.001	26.21±18.93 (1.00~162.00) (n=279,217)	25.89±24.04 (2.00~179.00) (n=392,460)	<0.001	15.81±11.58 (1.00~92.00) (n=136,951)	16.21±15.66 (1.00~103.00) (n=206,586)	<0.001
A+L	25.33±17.24 (2.00~96.00) (n=38,793)	30.50±18.40 (2.00~98.00) (n=101,397)	<0.001	20.38±13.90 (2.00~81.00) (n=47,973)	19.95±12.67 (2.00~66.00) (n=97,527)	<0.001	26.58±18.40 (1.00~137.00) (n=197,788)	28.11±26.22 (1.00~205.00) (n=395,576)	<0.001	31.79±26.74 (1.00~173.00) (n=116,826)	18.82±17.55 (1.00~417.00) (n=939,805)	<0.001

$\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 33.98 $\mu g/m^3$이었으며, 설치 후 PM_{10} 74.93 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 42.47 $\mu g/m^3$로 나타났다.

능동형 및 조명 모델 설치 교실의 경우 설치 전 PM_{10} 38.49 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 20.38 $\mu g/m^3$이었으며, 설치 후 PM_{10} 37.74 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 19.95 $\mu g/m^3$으로 조사되었다. 대조군 교실에서는 설치 전 PM_{10} 47.67 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 25.33 $\mu g/m^3$이었으며, 설치 후 PM_{10} 57.08 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 30.50 $\mu g/m^3$이었다.

각 벽면녹화 모델 유형 및 교실별 설치 전과 후 미세먼지 농도를 비교하여 저감율을 산출하였다(Table 5). 벽면녹화 모델이 설치된 교실만을 비교하였을 때, 유형별로 수동형(PM_{10} 9.00%, $PM_{2.5}$ 8.74%), 능동형(PM_{10} 8.90%, $PM_{2.5}$ 8.10%), 능동형 및 조명 모델(PM_{10} 1.95%, $PM_{2.5}$ 2.11%) 순으로 저감율이 높은 것으로 나타났다. 그러나 벽면녹화 모델이 설치되지 않는 대조군 교실에서의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 저감율이 수동형 대조군의 경우 2.29%와 2.35%, 능동형의 경우 –17.70% 및 –24.99%, 능동형 및 조명 모델의 경우 –19.74% 및 –20.41%로 나타났다. 대조군 교실의 저감율을 고려하면, 벽면녹화 모델 유형별 미세먼지 저감율은 능동형, 능동형 및 조명, 수동형 모델 순으로 높다고 할 수 있다.

교실 내 미세먼지 농도에 대한 외기 또는 복도 미세먼지의 영향을 확인하기 위해 실내외 농도비를 산출하였다(Table 6, 7). 각 교실별 실내 미세먼지 농도를 실내 농도로 하고, 외기와 복도에서 측정된 미세먼지 농도를 각각 실외 농도로 하였다.

모든 교실에서 설치 전과 후 모두 복도 미세먼지 농도를 외기로 한 I/O ratio에 비해 외기 미세먼지 농도를 외기로 한 I/O ratio가 더 큰 것으로 나타났다. 벽면녹화 모델이 설치 이후 기간의 I/O ratio는 대조군 교실(PM_{10} 1.09~3.29, $PM_{2.5}$ 1.09~2.62)에 비해 벽면녹화 모델이 설치된 교실(PM_{10} 0.72~2.00, $PM_{2.5}$ 0.71~1.50)에서 낮은 것으로 조사되어 벽면녹화에 따른 미세먼지 저감 효과를 확인할 수 있었다.

Table 5. Reduction rates before and after installation according to green-wall type

	PM_{10}		$PM_{2.5}$	
	w/o	w/plants	w/o	w/plants
P	2.29%	9.00%	2.35%	8.74%
A	–17.70%	8.90%	–24.99%	8.10%
A+L	–19.74%	1.95%	–20.41%	2.11%

Table 6. PM_{10} I/O ratio of classroom-hallway and classroom-outdoor

PM_{10}	w/o I/O ratio				w/plants I/O ratio			
	Hallway		Outdoor		Hallway		Outdoor	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
P	0.60	1.12	1.52	2.48	0.46	0.80	1.16	1.76
A	1.29	1.55	2.86	3.29	1.01	0.94	2.24	2.00
A+L	0.95	1.09	1.12	2.24	0.77	0.72	0.91	1.48

Table 7. $PM_{2.5}$ I/O ratio of classroom-hallway and classroom-outdoor

PM_{10}	w/o I/O ratio				w/plants I/O ratio			
	Hallway		Outdoor		Hallway		Outdoor	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
P	0.56	1.11	1.09	1.79	0.42	0.79	0.82	1.27
A	1.30	1.64	2.15	2.62	1.01	0.94	1.68	1.50
A+L	0.95	1.09	0.80	1.62	0.77	0.71	0.64	1.06

IV. 고 찰

교실 그룹별 미세먼지 평균 농도는 2학년 학생들이 이용하는 능동형 설치 그룹(대조군, 실험군)에서 가장 높게 나타나 이는 학년이 올라감에 따라 실내 PM_{10}과 $PM_{2.5}$의 농도가 증가하는 것으로 나타난 선행 연구결과[18]와 동일한 양상을 보였으며, 학년이 올라갈수록 학생들의 활동량이 증가하기 때문으로 판단된다. 학생들의 재실 여부에 따른 농도 비교 결과, 모든 교실군에서 '일과 중'에 비해 '방과 후' 평균 농도가 낮게 나타난 것은 학생들의 활동으로 인한 영향으로 판단된다. 벽면녹화 모델 설치 여부 및 교실별 계절에 따른 평균 농도 차이의 경향성을 확인할 수 없었으며, 이는 교실 내 미세먼지 농도가 외부 농도에 의한 영향보다는 교실별 활동량, 환기 횟수 등 내부 영향이 더 크기 때문으로 판단된다.

교실 내와 외기 미세먼지 농도비를 비교한 I/O ratio는 모두 1 이상이었으며, 모든 교실에서 설치 전과 후 모두 복도 미세먼지 농도를 외기로 한 I/O ratio에 비해 외기 미세먼지 농도를 외기로 한 I/O ratio가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 학교 내 미세먼지 농도는 외기와 내부 발생원에 모두 영향을 받으나 내부 발생원으로 인한 영향이 더 크다는 것을 의미한다.[19]

또한 시간의 흐름에 따른 미세먼지 농도 변화 양상은 수업 시작 전 등교와 자율학습으로 인해 농도가 증가하고, 수업시간에는 감소하였다가 쉬는시간, 점심시간 등에 다시 증가하고 하교 이후 농도가 감소하는 모습을 보였다. 이러한 미세먼지 농도 변화 양상은 내부에서 미세먼지가 발생하거나 외부에서 유입되는 것이 아닌, 내부 미세먼지가 학생들의 활동에 영향을 받아 비산되거나 침전되기 때문이다.[20,21] 더불어, 교실에 따라 차이가 있으나 전체 측정기간 동안의 시계열 그래프에서 일과시간 중 PM_{10}과 $PM_{2.5}$의 「학교보건법」상 교사 내 기준치를 초과하는 교실이 있는 것으로 나타나 교실 내 실내공기질 개선을 위한 방안 마련이 필요할 것으로 생각된다.

모든 벽면녹화 모델 유형 그룹에서 PM_{10}과 $PM_{2.5}$ 농도가 벽

면녹화 모델이 설치되지 않은 대조군 교실에 비해 설치된 실험군 교실에서 낮은 것으로 나타났다. 실내 벽면녹화 시스템이 있는 공간이 없는 공간에 비해 미세먼지 농도가 낮은 것으로 보고된 바 있으며,[22] 외부보다 높은 교실 내 PM_{10} 농도 수준이 교실 내 화분을 추가하였을 때 약 30% 감소하는 것으로 보고된 바 있다.[1] 이러한 연구결과는 본 연구결과와 동일하게 식물을 활용한 벽면녹화 모델이 실내 미세먼지를 저감시키는 효과가 있다는 것을 의미한다.

벽면녹화 모델이 설치되지 않은 대조군 교실의 경우, 설치 전 기간에 비해 설치 후 기간의 미세먼지 평균 농도가 증가한 경우도 있으나, 벽면녹화 모델이 설치된 교실에서는 설치 후에 미세먼지 평균 농도가 모두 감소하였다. 각 벽면녹화 모델 유형별 미세먼지 저감 효율은 능동형, 능동형 및 조명, 수동형 모델 순으로 높았다. 능동형과 능동형 및 조명 모델이 수동형 벽면녹화 모델에 비해 높은 미세먼지 저감효율을 보인 것은 기류가 형성되지 않는 수동형에 비해 능동형 모델은 팬을 통해 오염된 공기를 흡수하고 정화된 공기를 배출하여 기류를 형성하기 때문에 그 저감 효율이 높기 때문으로 판단된다.[23]

식물의 잎의 미세구조 형태가 미세먼지 흡착량과 상관관계를 보이며, 미세먼지 흡착량이 높은 경우 잎의 하부 표피 구조가 거칠고, 잎 당 기공 밀도와 기공의 길이가 가장 크고 흡착량이 낮은 경우 잎의 하부 표피 구조가 매끄럽고 기공길이가 가장 작은 것으로 조사된 바 있다.[24] 이처럼 각 벽면녹화 모델에 적용된 식물의 종류에 따라 잎 특성에 차이가 있어 저감효율에 영향이 있었을 것으로 판단된다.

선행연구에서는 광조건에 있는 식물에서 어두운 조건의 식물보다 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 저감율이 높은 것으로 보고한 바 있다.[25] 식물은 기공을 통해 미세먼지를 흡수하는 것으로 알려져 있으며,[26,27] 식물의 광합성과 기공전도도가 높은 양의 상관관계가 있는 것으로 보고된 바 있어[28] 기공의 흡수로 인한 미세먼지 제거는 광합성율과 관련이 있다고 할 수 있다.[29] 그러나 식물의 종류에 따라 광량에 따른 미세먼지 제거능에는 차이가 있으며, 식물의 수분 상태가 광합성 속도와 미세먼지 저감율에 영향을 미칠 수 있다.[25,30]

능동형 벽면녹화 모델이 능동형 및 조명 모델에 비해 높은 미세먼지 저감효율을 보인 것은 각 벽면녹화 모델에 식재된 식물의 종류의 차이와 적정한 광도와 광량이 설정되지 못하여 광조건으로 인한 광합성량 증가를 통한 높은 미세먼지 저감효율을 이끌어내지 못했기 때문으로 판단된다.

본 연구에서는 학교 교실 내 식물을 활용한 벽면녹화 적용을 통해 미세먼지 저감 효과와 벽면녹화 모델 유형별 저감효율 차이를 확인할 수 있었다. 그러나 흡연, 난방기구 연소, 조리와 같은 실내 발생원이 없어 외부 대기질과 재실자의 활동에 의해 가장 영향을 크게 받을 수 있는 교실 내 미세먼지 특성을 고려하기 위한 교실별 실내 활동 양상을 조사하지 못하여 교실별 생활습관(환기 여부, 횟수, 활동양상 등) 차이로 인한 영향을 고려하지 못했다는 한계점이 있다. 또한, 각 벽면녹화 모델에 동일한 종류의 식물을 적용하지 못하였으며, 광조건을 적용한 벽면녹화의 경우 식재된 식물의 생육을 최대로 활성화할 수 있는 광조건이 고려되지 못하였다.

식물을 활용한 공기정화방법은 잠재적으로 먼지, 미생물, 물 등을 방출할 수 있으며,[23] 식물로 인한 습도 상승으로 곰팡이의 과도한 성장을 유발하거나[31] 총부유포자의 농도가 증가할 수 있다.[32] 그러나 이러한 영향은 아직까지 불확실한 것으로 보고되었고,[33,34] 선행 연구 결과에서는 식물 적용 사무실에서는 식물 도입 전후에 따른 유의한 습도 차이가 없었으나 대조군 사무실에서는 유의하게 증가하였으며,[35] 실내식물이 실내 습도 조절 역할을 하는 것으로 보고된 바 있다.[36] 향후, 실내에 벽면녹화 모델을 적용할 경우 미생물이 방출될 가능성에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

V. 결 론

본 연구에서는 한정된 공간에 다수의 학생들이 머무는 학교 교실의 실내공기질 개선을 위한 방법으로 식물을 활용한 벽면녹화 모델을 유형별로 3가지 설치하고 교실, 복도, 외기 미세먼지 농도 분석을 통해 벽면녹화 모델 유형별 미세먼지 저감 효과를 평가하고자 하였다.

교실 내 미세먼지 농도 변화는 수업시간과 쉬는시간에 따라 증감을 반복하고, 학생들이 교실 내 재실하지 않는 방과 후에 농도가 낮게 나타나는 등 학생들의 활동으로 인한 영향이 큰 것으로 나타났다.

벽면녹화 모델이 설치된 경우 설치되지 않은 교실에 비해 미세먼지 농도가 낮아, 선행연구결과와 마찬가지로 식물의 실내 미세먼지 저감효과를 확인할 수 있었다. 기류를 형성하지 않는 수동형 모델에 비해 기류를 형성하는 능동형 모델의 미세먼지 저감 효율이 높았던 결과를 통해 식물을 활용한 실내공기질 개선 방법을 적용할 경우 단순히 식물만을 활용하는 것이 아닌 능동형 벽면녹화 모델을 활용하여 더 효율적인 실내공기질 관리가 가능할 것으로 기대된다.

그러나 벽면녹화 모델에 적용된 식물의 종류에 차이가 있고 적정 광조건을 고려하지 못하였기 때문에 그 효과를 극대화할 수 없었다. 보다 현장적용성이 높은 실내공기질 관리 방법으로의 발전을 위해 능동형 벽면녹화에 식재되는 식물의 종류에 따라 저감효율을 극대화할 수 있는 광량, 광도 등 조건에 따른 실내공기질 저감 효과에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 벽면녹화 모델 운용에는 설치비용과 유지관리 비용 등이 소요되기 때문에 기계적인 환기 또는 공기청정기 사용과 비교해 비용-편익 측면에서 투입 비용대비 실내공기질 저감 효과에 대한 분석이 이루어져야 한다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(과제번호RS-2021-RD009728)과 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(2022431C10-2324-0802)의 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

Conflict of Interest

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

References

1. Pegas PN, Alves CA, Nunes T, Bate-Epey EF, Evtyugina M, Pio CA. Could houseplants improve indoor air quality in schools? *J Toxicol Environ Health A.* 2012; 75(22-23): 1371-1380.
2. Crouse DL, Peters PA, van Donkelaar A, Goldberg MS, Villeneuve PJ, Brion O, et al. Risk of nonaccidental and cardiovascular mortality in relation to long-term exposure to low concentrations of fine particulate matter: a Canadian national-level cohort study. *Environ Health Perspect.* 2012; 120(5): 708-714.
3. Wang Y, Kloog I, Coull BA, Kosheleva A, Zanobetti A, Schwartz JD. Estimating causal effects of long-term $PM_{2.5}$ exposure on mortality in New Jersey. *Environ Health Perspect.* 2016; 124(8): 1182-1188.
4. Bari MA, MacNeill M, Kindzierski WB, Wallace L, Héroux ME, Wheeler AJ. Predictors of coarse particulate matter and associated endotoxin concentrations in residential environments. *Atmos Environ.* 2014; 92: 221-230.
5. He C, Morawska L, Taplin L. Particle emission characteristics of office printers. *Environ Sci Technol.* 2007; 41(17): 6039-6045.
6. Buonanno G, Morawska L, Stabile L. Particle emission factors during cooking activities. *Atmos Environ.* 2009; 43(20): 3235-3242.
7. Morawska L, Afshari A, Bae GN, Buonanno G, Chao CY, Hänninen O, et al. Indoor aerosols: from personal exposure to risk assessment. *Indoor Air.* 2013; 23(6): 462-487.
8. Yang WH. Time-activity pattern of students and indoor air quality of school. *J Korean Inst Educ Facil.* 2014; 21(6): 17-22.
9. Landrigan PJ. Environmental hazards for children in USA. *Int J Occup Med Environ Health.* 1998; 11(2): 189-194.
10. Irga PJ, Pettit TJ, Torpy FR. The phytoremediation of indoor air pollution: a review on the technology development from the potted plant through to functional green wall biofilters. *Rev Environ Sci Biotechnol.* 2018; 17(2): 395-415.
11. Llewellyn D, Dixon M. 4.26 - Can plants really improve indoor air quality? In: Moo-Young M. editor. Comprehensive biotechnology. 2nd ed. Vol. 4, Agricultural and related biotechnologies. Amsterdam: Elsevier; 2011. p.331-338.
12. Dominici L, Fleck R, Gill RL, Pettit TJ, Irga PJ, Comino E, et al. Analysis of lighting conditions of indoor living walls: effects on CO_2 removal. *J Build Eng.* 2021; 44: 102961.
13. Tan CL, Wong NH, Tan PY, Ismail M, Wee LY. Growth light provision for indoor greenery: a case study. *Energy Build.* 2017; 144: 207-217.
14. Pennisi SV, van Iersel MW. Quantification of carbon assimilation of plants in simulated and in situ interiorscapes. *HortScience.* 2012; 47(4): 468-476.
15. Kim J, Kang SW, Pak CH, Kim MS. Changes in leaf variegation and coloration of English ivy and polka dot plant under various indoor light intensities. *HortTechnology.* 2012; 22(1): 49-55.
16. Jang BK, Park K, Lee HM, Lee CH, Oh CJ, Lee SY, et al. The effects of the light intensity on the growth and chlorophyll fluorescence parameters of three evergreen fern species native to Korea. Paper presented at: 3rd International Symposium on Germplasm of Ornamentals; 2020 Oct 25-28; Incheon, Korea. Leuven: International Society for Horticultural Science, 2020. p. 131-138.
17. 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.
18. 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.
19. Son YS. Particulate matter and influencing factors in domestic elementary schools. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2020; 36(2): 153-170.
20. Mullen NA, Bhangar S, Hering SV, Kreisberg NM, Nazaroff WW. Ultrafine particle concentrations and exposures in six elementary school classrooms in northern California. *Indoor Air.* 2011; 21(1): 77-87.
21. Yang W, Sohn J, Kim J, Son B, Park J. Indoor air quality investigation according to age of the school buildings in Korea. *J Environ Manag.* 2009; 90(1): 348-354.
22. 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.
23. Moya TA, van den Dobbelsteen A, Ottelé M, Bluyssen PM. A review of green systems within the indoor environment. *Indoor Built Environ.* 2019; 28(3): 298-309.
24. Jin EJ, Yoon JH. Analysis of particulate matter absorption and leaf microstructure of 7 evergreen broad-leaved species. Paper presented at: 2020 Society for people, plants, and environment fall conference; 2020 Nov 19-20; Buan, Korea. Wanju: Society For People, Plants, And Environment, 2020. p. 234.
25. Treesubsuntorn C, Setiawan GD, Permana BH, Citra Y, Krobthong S, Yingchutrakul Y, et al. Particulate matter and volatile organic compound phytoremediation by perennial plants: affecting factors and plant stress response. *Sci Total Environ.* 2021; 794: 148779.
26. 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.
27. 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.
28. Bunce JA. Does transpiration control stomatal responses to water vapour pressure deficit? *Plant Cell Environ.* 1997; 20(1): 131-135.
29. Kwon KJ, Park BJ. Particulate matter removal of indoor plants, Dieffenbachia amoena 'Marianne' and Spathiphyllum spp. according to light intensity. *J Korean Inst Landsc Archit.* 2018; 46(2): 62-68.
30. Jang BK, Park K, Lee SY, Lee H, Yeon SH, Ji B, et al. Screening of particulate matter reduction ability of 21 indigenous Korean evergreen species for indoor use. *Int J Environ Res Public Health.* 2021; 18(18): 9803.
31. Schleibinger H, Keller R, Rüden H. Indoor air pollution by microorganisms and their metabolites. In: Pluschke P. editor. Indoor air pollution. Berlin: Springer; 2004. p.149-177.
32. Darlington AB, Dat JF, Dixon MA. The biofiltration of indoor air: air flux and temperature influences the removal of toluene, ethylbenzene, and xylene. *Environ Sci Technol.* 2001; 35(1): 240-246.
33. Pasanen AL. A review: fungal exposure assessment in indoor environments. *Indoor Air.* 2001; 11(2): 87-98.
34. Robbins CA, Swenson LJ, Nealley ML, Gots RE, Kelman BJ. Health effects of mycotoxins in indoor air: a critical review. *Appl Occup Environ Hyg.* 2000; 15(10): 773-784.
35. Lee YW, Lim YW, Kim KJ, Kim HH. Impact of indoor plants on indoor air quality and occupational health in newly built public building offices - focusing on allergic conjunctivitis and stress-related symptom questionnaires -. *J Environ Health Sci.* 2017; 43(4): 334-348.
36. Lohr VI. The contribution of interior plants to relative humidity in an office. Paper presented at: The Role of Horticulture in Human Well-being and Social Development: A National Symposium; 1990 Apr 19-21; Arlington, VA, USA. Portland (OR): Timber Press, 1992. p. 117-119.

〈저자정보〉

양호형(주임연구원), 김형주(교수), 방성원(대표),
조흔우(대표), 이형석(연구사), 한승원(연구사),
김광진(연구관), 김호현(교수)