

# 다중이용시설 내 식생바이오필터 시스템의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 저감효과 및 측정방법에 대한 연구<sup>†</sup>

김태한\* · 최부현\*\*

\*상명대학교 환경조경학과 교수 · \*\*상명대학교 대학원 환경자원학과 대학원생

## Study on PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> Reduction Effects and Measurement Method of Vegetation Bio-Filters System in Multi-Use Facility

Kim, Tae-Han\* · Choi, Boo-Hun\*\*

\*Professor, Dept. of Environmental Landscape Architecture, Sangmyung University

\*\*Graduate Student, Dept. of Environmental Landscape Architecture, Graduate School, Sangmyung University

### ABSTRACT

With the issuance of one-week fine dust emergency reduction measures in March 2019, the public's anxiety about fine dust is increasingly growing. In order to assess the application of air purifying plant-based bio-filters to public facilities, this study presented a method for measuring pollutant reduction effects by creating an indoor environment for continuous discharge of particle pollutants and conducted basic studies to verify whether indoor air quality has improved through the system. In this study conducted in a lecture room in spring, the background concentration was created by using mosquito repellent incense as a pollutant one hour before monitoring. Then, according to the schedule, the fine dust reduction capacity was monitored by irrigating for two hours and venting air for one hour. PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and temperature & humidity sensors were installed two meters front of the bio-filters, and velocity probes were installed at the center of the three air vents to conduct time-series monitoring. The average face velocity of three air vents set up in the bio-filter was  $0.38 \pm 0.16$  m/s. Total air-conditioning air volume was calculated at  $776.89 \pm 320.16$  m<sup>3</sup>/h by applying an air vent area of  $0.29\text{m} \times 0.65\text{m}$  after deducing damper area. With the system in operation, average temperature and average relative humidity were maintained at  $21.5\text{--}22.3^\circ\text{C}$ , and  $63.79\text{--}73.6\%$ , respectively, which indicates that it satisfies temperature and humidity range of various conditions of preceding studies. When the effects of raising relatively humidity rapidly by operating system's air-conditioning function are used efficiently, it would be possible to reduce indoor fine dust and maintain appropriate relative humidity seasonally. Concentration of fine dust increased the same in all cycles before operating the bio-filter system. After operating the system, in cycle 1 blast section (C-1,  $\beta = -3.83$ ,  $\beta = -2.45$ ), particulate matters (PM<sub>10</sub>) were lowered by up to 28.8% or  $560.3\mu\text{g}/\text{m}^3$  and fine particulate matters (PM<sub>2.5</sub>) were reduced by up to 28.0% or  $350.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Then, the concentration of find dust (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) was reduced by up to 32.6% or  $647.0\mu\text{g}/\text{m}^3$  and 32.4% or  $401.3\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectively through reduction in cycle 2 blast section (C-2,  $\beta = -5.50$ ,  $\beta = -3.30$ ) and up to 30.8% or  $732.7\mu\text{g}/\text{m}^3$  and 31.0% or  $459.3\mu\text{g}/\text{m}^3$

<sup>†</sup>: 본 성과물(논문, 산업재산권, 품종보호권 등)은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ014270042020)의 지원에 의해 이루어진 것임.

**Corresponding author:** Tae-Han Kim, Professor, Dept. of Environmental Landscape Architecture, Sangmyung University, Cheonan 31066, Korea, Tel.: +82-41-550-5303, E-mail: taehankim@smu.ac.kr

respectively through reduction in cycle 3 blast section (C-3,  $\beta=5.48$ ,  $\beta=-3.51$ ). By referring to standards and regulations related to the installation of vegetation bio-filters in public facilities, this study provided plans on how to set up objective performance evaluation environment. By doing so, it was possible to create monitoring infrastructure more objective than a regular lecture room environment and secure relatively reliable data.

*Key Words: Particulate Matter, Temperature and Humidity Change, Required Ventilation Volume, Standard Test Method, Air-Purifying Plant*

## 국문초록

2019년 3월 미세먼지 비상저감조치가 일주일 동안 발령되면서, 미세먼지로 인한 국민의 불안감은 점차 가중되고 있다. 본 연구는 공기정화식물이 적용된 바이오필터의 다중이용시설 내 적용성 평가를 위해 입자상 오염원의 실내 연속방출환경을 조성하여 오염원 저감효과에 대한 측정방법을 제안하고, 시스템의 실내공기질 개선 여부를 확인할 수 있는 기초연구를 진행하였다. 강의실을 대상으로 춘절기에 모니터링 1시간 전 모기향을 오염원으로 배경농도를 조성한 후, 스케줄에 따라 2시간 관수, 1시간 송풍하여 미세먼지의 저감능을 확인하였으며, 바이오필터 2m 전방에  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  및 온습도 센서를 설치하고, 3개 송풍구 중 중앙에 풍속 프로브를 설치하여 시계열 모니터링을 수행하였다. 바이오필터에 구비된 총 3개소의 송풍구 평균 면풍속은  $0.38 \pm 0.16$  m/s로 댐퍼 면적이 제외된 송풍구별 면적  $0.29m \times 0.65m$ 을 적용한 총 공조풍량이  $776.89 \pm 320.16 m^3/h$ 로 산출되었다. 시스템 가동으로 평균온도  $21.5 \sim 22.3^\circ C$ , 평균상대습도  $63.79 \sim 73.6\%$ 를 유지하여, 선행연구의 다양한 조건별 온습도 범위에 부합하는 것으로 판단된다. 시스템 공조부 구동을 통해 급격하게 상대습도를 상승시키는 효과를 효율적으로 운용할 경우, 계절에 따른 실내 미세먼지 저감과 적절한 상대습도 확보도 가능할 것으로 판단된다. 미세먼지 농도는 바이오필터 시스템 가동 전의 모든 주기에서 상승 현상이 동일하게 집계되었으며, 시스템 가동 후 1주기 송풍구간(B-1,  $\beta=-3.83$ ,  $\beta=-2.45$ )에서 미세먼지( $PM_{10}$ )는 최대 28.8% 수준인  $560.3 \mu g/m^3$ , 초미세먼지( $PM_{2.5}$ )는 최대 28.0% 수준인  $350.0 \mu g/m^3$ 까지 저감되었다. 이후 미세먼지( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ )의 농도는 2주기 송풍구간 감소(B-2,  $\beta=-5.50$ ,  $\beta=-3.30$ )로 각각 최대 32.6% 수준인  $647.0 \mu g/m^3$ , 32.4% 수준인  $401.3 \mu g/m^3$ 까지 저감되었고, 3주기 송풍구간 감소(B-3,  $\beta=5.48$ ,  $\beta=-3.51$ )로 최대 30.8% 수준인  $732.7 \mu g/m^3$ , 31.0% 수준인  $459.3 \mu g/m^3$ 까지 저감된 것으로 확인되었다. 본 연구는 식생 바이오필터의 다중이용시설 내 설치와 관련한 관련 표준 및 규정을 참조하여, 객관적인 성능평가환경의 구축 방안을 제시할 수 있었다. 이를 통해 일반 강의실 환경 내에 보다 객관화된 모니터링 인프라를 조성하여, 상대적으로 신뢰성 있는 데이터 확보가 가능했던 것으로 판단된다.

주제어: 미세먼지, 온습도 변화, 필요 환기량, 표준 시험방법, 공기정화식물

## 1. 서론

2019년 3월 미세먼지 비상저감조치가 일주일 동안 발령되면서, 미세먼지로 인한 국민의 불안감은 점차 가중되고 있다. 환경부는 국가적 대기환경재난에 대응하기 위해, 2019년 2월 15일부로 '미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(미세먼지법)'을 시행하는 한편, 서울시는 2024년까지  $PM_{2.5}$  기준을  $25 \mu g/m^3$ 에서  $18 \mu g/m^3$ 로 강화하는 저감 목표를 제시하고 있다. 이러한 중앙정부와 지자체의 대응정책 기조는 미세먼지의 인체 유해성에 기인하고 있다. 서울시의 대기오염, 기상, 사망 관련 자료로  $PM_{10}$  및  $PM_{2.5}$ 에 대한 단기 노출과 심혈관계 사망 발생위험에 대한 높은 통계적 유의성을 확인한 연구(Bae, 2014), 『2015년

국민건강영양조사』, 『2012년 대기오염물질 배출량 연보』분석으로  $PM_{2.5}$  1톤 당 2,136억 원의 호흡기계 질환 편익을 추정한 연구(Choi and Lee, 2015) 등이 보고되면서, 미세먼지의 인체 유해성과 이로 인한 경제적 손실이 강조되는 상황이다.

이와 같이 사회·보건적 측면의 미세먼지 영향에 따라 대기 질에 대한 일반시민의 관심은 공기청정기, 가습기 등의 관련 수요를 진작시키게 되었다. 반면, 향균필터, 가습기 살균제 등의 화학적 조성물질에 의한 유해성 문제는 친환경적인 공기정화방법에 대한 사회적 수요를 유발하게 되는데, 이에 대한 대안으로 공기정화식물 연구가 다양하게 진행되고 있다. 단일 공기정화식물의 공기질 개선 연구는 공기정화 식물 화분의 실내 부피 점유율에 따른 공기질 개선효율(Kim et al., 2009), 생활

공간별 기능에 따른 적절한 실내 공기정화 식물 배치방법(Kim *et al.*, 2014), 음이온 및 습도 발생이 우수한 공기정화용 식물 종과 공기청정기를 연계한 실내정원 시스템 개발([http://www.bio-wall.co.kr/garden4u\\_2013/](http://www.bio-wall.co.kr/garden4u_2013/)) 등이 보고되고 있다. 공기정화식물에 의한 직접적인 미세먼지 저감 성능을 개량화한 연구도 보고되었는데, 광 환경에 따른 공기정화 식물별 미세먼지의 시계열 저감효율(Kwon and Park, 2018), 벽면녹화 설치 유무에 따른 미세먼지 잔존율(Kwon and Park, 2017) 등의 연구결과가 확인되고 있다. 반면, 공기정화 식물의 흡착에 의한 미세먼지 저감기작 규명(Sæbø *et al.*, 2012), 지속적인 미세먼지 제거를 위한 잎 세척의 필요성 제시(Wang *et al.*, 2015) 등에 의하면 공기정화 식물에만 의존한 실내공기질 개선은 제한적인 것으로 확인되고 있다.

이를 보완하기 위해 공기정화식물을 공조설비와 연계하여 미세먼지 제거효율을 증진하는 바이오필터 시스템이 주목받고 있는데, 순간 오염원 방출에 따른 토양기반 바이오필터의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 제거효율(Lee *et al.*, 2015), 디젤연료 연소 후 식생바이오필터에 의한 입자상 오염물질의 제거효율(Pettit *et al.*, 2017), 식생바이오필터에 의한 미세먼지, 이산화탄소 및 실내쾌적지수 분석(Kim *et al.*, 2018a) 등의 연구가 진행되고 있다. 바이오필터는 공기정화 식물만을 사용하는 경우에 비해 높은 실내공기질 개선효과를 기대할 수 있지만, 공조설비에 소요되는 추가비용과 운영효율이 고려되어야 한다. 이러한 경제성은 불특정다수가 이용하는 다중이용시설과 같이 공간규모와 사용빈도가 높은 공간에서 요구될 수 있지만, 다양한 오염원에 의해 연속적으로 배출되는 미세먼지에 대한 시스템의 지속적인 정화능이 확보되어야 한다. 더불어 환경부, 국토교통부, 보건복지부는 환기설비의 설계, 설치 및 유지관리에 관련된 기준을 제시하고 있어, 실내 미세먼지 대응을 위한 보다 구체적인 성능도 요구된다. 식생을 기반으로 한 바이오필터 시스템의 경우, 산업적 확산을 위해 이러한 실내공간특성 및 관련 기준들을

충족할 수 있는 신뢰성 확보가 우선되어야 할 것이다. 여기서, 입자상 오염원의 지속방출환경 내 시스템의 공기정화 성능에 대한 성능평가는 해당 시스템의 보다 현실적인 현장 적용성을 판단할 수 있는 의사결정 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

따라서, 본 연구는 관련 시험기준 및 표준을 참조하여 입자상 오염원의 실내 연속방출환경으로 조성된 미세먼지 저감효과에 대한 측정방법을 제안하고, 다중이용시설 내 실내공기질 개선을 위해 식생기반 바이오필터의 적용 가능성을 가늠할 수 있는 기초연구를 진행하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 식생기반 바이오필터

본 연구에서 사용된 식생기반 바이오필터 시스템은 수직형 수경배배구조로 구성된 12개의 패널로 구성되어, 약 6m<sup>2</sup>의 공기정화면적을 확보하도록 설계하였다(Figure 1 참조). 개별 바이오필터 패널은 50mm의 조건용 필터 3겹이 적용된 다층형 구조로 선행연구(Kim *et al.*, 2018a)를 통해 선정된 *Hoya carnosa*, *Ficus elastica*, *Epipremnum aureum* 등의 공기정화 식물 21종을 식재하여, 시스템에 총 285본을 적용하였다(Table 1 참조). 해당 패널에 식재된 식물은 2018년 9월에 식재하여, 현재까지 건전한 생육상태를 유지하고 있다. 바이오필터 하단에는 관수용 저류탱크를 구비하여 가압식 인버터 펌프에 의해 패널 상단부로 55.80L/min의 관개용수를 공급하고, 관수주기 설정이 가능한 통제부를 연결하였다. 바이오필터 상단에는 최대 2,000m<sup>3</sup>/h, 정압 200Pa의 공조성능을 가진 저소음 EC 모터(단상/220V, 1,850rpm, 0.5kW)가 적용된 팬으로 패널 여과풍속 0.1~0.3m/s를 유지하여, 식생 안정성이 확보된 여과풍량을 2,160~6,480 m<sup>3</sup>/h의 범위로 공급할 수 있도록 설계하였다.

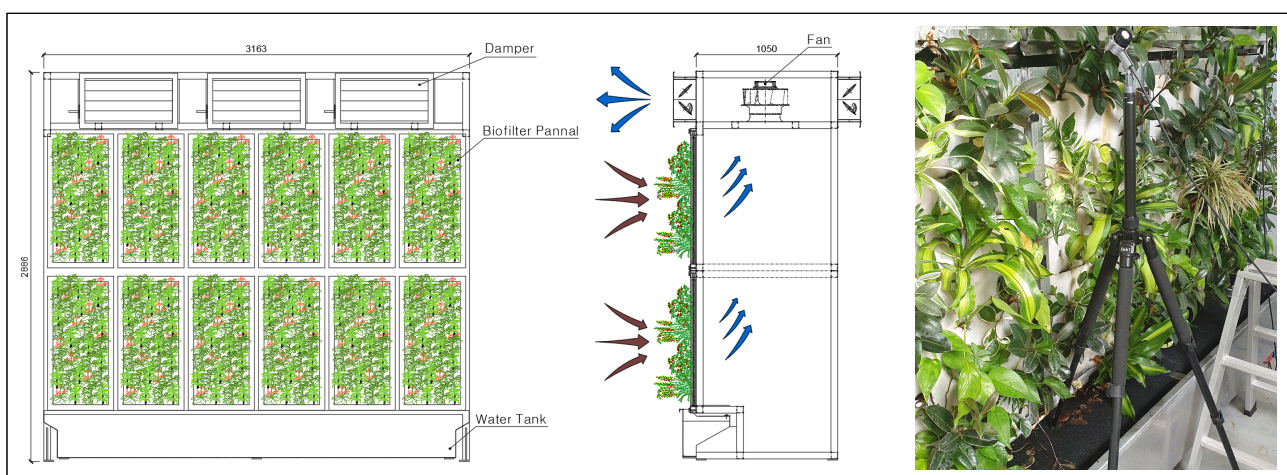


Figure 1. Drawing of vegetation biofilter system mockup

Table 1. Vegetation model planted on the biofilter panel

Species	Quantity	Species	Quantity	Species	Quantity
<i>Asplenium nidus</i> L.	1	<i>Rhapis excelsa</i>	4	<i>Ficus benghalensis</i>	1
<i>Dracaena marginata</i>	1	<i>Dracaena fragrans</i> var. <i>massangeana</i>	15	<i>Syngonium podophyllum</i>	24
<i>Chamaedorea elegans</i>	10	<i>Euonymus japonicus</i> Thunb.	7	<i>Epipremnum aureum</i>	35
<i>Ficus elastica</i> 'Robusta'	43	<i>Spathiphyllum wallisii</i>	19	<i>Euonymus japonica</i> 'Albomarginata'	7
<i>Dracaena concinna</i> 'Tricolor Rainbow'	2	<i>Hoya carnosa</i>	66	<i>Ardisia japonica</i>	11
<i>Dracaena sanderiana</i> 'Victoria'	24	<i>Nephrolepis exaltata</i>	1	<i>Columnnea gloriosa</i>	2
<i>Podocarpus macrophyllus</i>	4	<i>Schefflera arboricola</i>	1	<i>Ardisia pusilla</i>	7

## 2. 실험방법

식생기반 바이오필터의 미세먼지 저감효과를 평가하기 위해 충남 소재 S 대학교 환경실습실에 강의실 환경을 모사하고, 입자상 오염원의 실내 연속방출환경을 구축하였다. 실험모의용 강의실은 바닥면적 62.8m<sup>2</sup>, 체적 332.73m<sup>3</sup>의 박공지붕으로 처리된 공간에 20석이 구비되었으며, 바이오필터 목업은 동편을 마주 보도록 우측 상단에 설치되었다(Figure 2 참조). 모니터링은 바이오필터 성능, 실내공기질, 오염원 방출 부문으로 구분하였으며, 유형에 따른 인프라별 계측장비를 구축하였다(Table 2 참조). 바이오필터 성능 모니터링은 공조풍량 산출을 위한 풍속과 입자상 오염물질 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 및 실내 온습도에 대한 시계열 변화량을 수집하였다. 오염원 방출을 위해 모기향 3개를 동시에 연소하였으며, 서큐레이터 2기를 실 좌우에 구비하여, 연속 방출되는 입자상 오염원의 실내 대기상 균질한 농도를 유지할 수 있는 환경을 조성하였다. 오염원 계측기 및 교반기의 높이는 1.5m로 공기청정기 국가표준(KS C 9314:2013)을 참조하여 조정하였다.

본 실험은 2019년 4월 11일부터 23일까지 13일간 진행되었다. 상기 기술된 모니터링 인프라에서 입자상 오염원을 실험 시작 1시간 전부터 실험 종료 시까지 연속 방출하고, 서큐레이

터로 실내공기를 교반하여 미세먼지 농도를 균질하게 하였다(KS C 9314:2013 참조). 공조기 구동 여부에 따라 대조구, 실험구로 구분하였으며, 대조구는 관수 제어장치를 통해 2시간 동안 관수하고, 실험구는 관수를 중지한 후 공조기를 구동하여 1시간 동안 송풍하였다. 대조구와 실험구에 소요되는 3시간을 한 주기로 3회 반복하여 9시간을 단위 모니터링으로 설정하였다. 이는 관수 중인 일반 벽면녹화와 바이오필터 시스템의 공조기 구동조건을 상호 비교하기 위해 설정한 것이며, 3주기로 구분된 시계열 모니터링의 실험과정은 다음과 같다.

- 모니터링 인프라 중앙에 구비된 1, 2열 책상 위에 입자 계수기(SidePak Personal Aerosol Monitor, TSI AM520) 2대를 각각 PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>으로 초기 세팅한다.
- 식생 바이오필터 목업 중앙에서 입자 계수기와 온습도 센서(Temperature and Humidity, ALMEMO)를 각각 2m 이격하고, 측정 센서부를 지면에서 1.5m 높이에 고정한다(KS C 9314:2013).
- 온습도 센서를 입자 계수기와와의 간섭을 최소화하여, 데이터 로거(Multifunction Measuring Instrument 2, ALMEMO 2890-9)에 연결한다.
- 열선형 프로브(Air Flow Probe, TESTO Comfort Probe

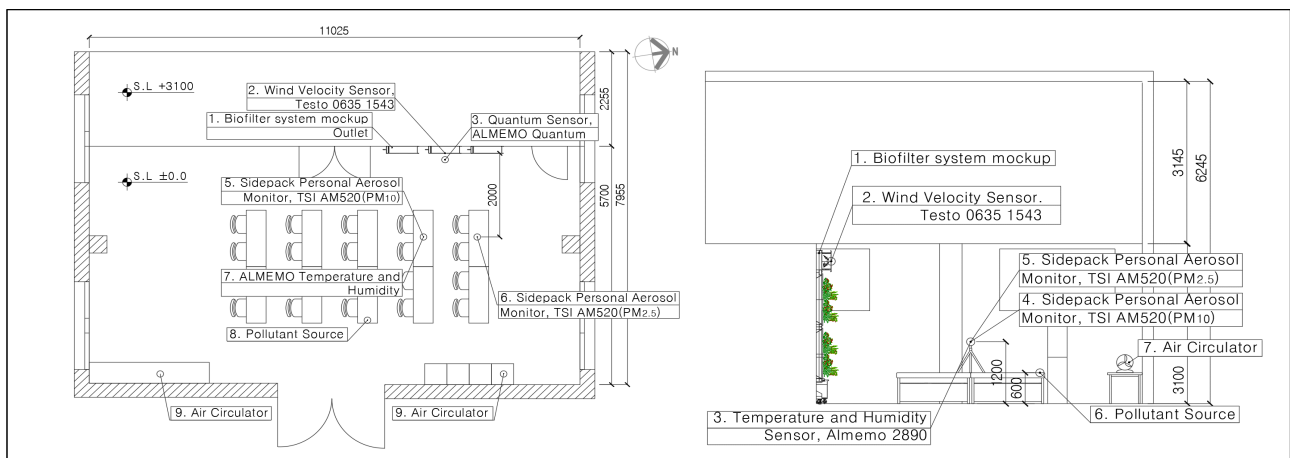







Figure 2. Performance evaluation testing room for vegetation biofilter system

Table 2. Specifications of the monitoring system

	Multifunction measuring instrument 1	Air flow probe	Personal aerosol monitor	Multifunction measuring instrument 2	Temperature and humidity
Image					
Model	TESTO 480	TESTO Comfort Probe 0628 0143	TSI AM520	ALMEMO 2890-9	ALMEMO Temperature and Humidity
Range	-100 - +100hPa	0 - +5 m/s	0.001 to 100 mg/m <sup>3</sup>	9 input socket 512kb memory	Temperature: -20 to +80°C, Humidity: 5~98%RH

0628 0143)를 대수선형 분할법에 준한 측정지점을 반영하여, 송풍구 중앙에 거치한다(SAREK A101-2011).

- e) 송풍구 중앙에 고정된 열선형 프로브를 데이터 로거(Multifunction Measuring Instrument 1, TESTO 480)에 연결한다.
- f) 실험 시작 1시간 전에 모기향을 점화하여 입자상 오염원을 방출하고, 서큐레이터를 최고 속도로 가동하여 실내공기를 강제 순환시킨다(KS C 9314:2013 참조).
- g) 입자상 오염물질 방출과 동시에 모니터링 인프라를 구동하여 시계열 데이터 수집을 시작하고, 실험은 사전 설계된 스케줄(Table 3 참조)에 따라 순차적으로 관수펌프와 바이오필터 공조팬을 구동한다.
- h) 총 9시간의 단위 모니터링이 종료된 후 15시간 동안 1시간 관수, 2시간 건조를 반복하고, 동일한 시간에 단일 모니터링을 3회 연속한 후 실험을 종료한다.
- i) 실험 종료 후, 24시간 동안 시스템 작동을 중지하여 필터의 안정화 및 세척을 진행하고, 기간 중 수집된 데이터 중 센서 및 시스템 오작동으로 인한 오류를 제외한 3회 반복 데이터를 통계 분석한다.

공조풍량은 단위 시간당 필터를 통과하여 처리되는 정화공기의 체적을 의미하며, 공조풍량과 시스템의 사용 가능한 면적은 비례한다. 바이오필터의 공조풍량은 중앙 송풍구에 고정된 풍속 센서로 집계된 데이터를 덕트풍량 측정방법(SAREK A101-2011)에서 제공하는 다음 산출식에 반영하여, 단일 송풍구에서 발생하는 풍량을 산출하였다. 이를 시스템에 구비된 총 3구의 송풍구로 환산하여, 총 공조풍량을 도출하였다.

$$Q = V \times A \times 1,000 \quad (\text{식 1})$$

여기서,  $Q$  = Air flow rate(ℓ/s)

$V$  = Average wind speed(m/s)

$A$  = Duct cross section(m<sup>2</sup>)

온습도 및 미세먼지 모니터링을 통해 도출된 실험결과와 증감추이는 다중선형회귀모형을 적용하여 분석하였다. 이는 객관적 자료를 바탕으로 독립변수와 종속변수 간의 상호관계를 분석하는 기법으로, 다음과 같이 정의할 수 있다(Choi *et al.*, 2012).

$$Y = \beta X + \epsilon \quad (\text{식 2})$$

여기서,  $Y$  = Dependent variable

$X$  = Independent variable

$\beta$  = Regression coefficient

$\epsilon$  = Error term

$\beta$ 는 독립변수  $x$ 의 회귀계수이며,  $X$ 가 한 단위 증가할 때 종속변수  $Y$ 의 평균 변화량을 의미한다. 회귀계수  $\beta$ 는 회귀모형의 기울기를 뜻하며, 회귀모형에 온습도 및 오염물질 농도의 시계열 변화량을 반영할 경우,  $\beta$ 에 따른 상대적 저감추이를 도출할 수 있어 모니터링 결과 분석에 활용하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 풍속 및 풍량

바이오필터의 공조풍량은 단위 모니터링별로 송풍구의 토출 풍

Table 3. Operation time table of the vegetation biofilter mockup

Operation condition	9:00~10:00	10:00~11:00	11:00~12:00	12:00~13:00	13:00~14:00	14:00~15:00	15:00~16:00	16:00~17:00	17:00~18:00
Pump	On		Off	On		Off	On		Off
Fan	Off		On	Off		On	Off		On

속을 시계열 계속하였다. 1주기는 최대 0.63 m/s, 최소 0.17m/s, 평균  $0.57 \pm 0.17$  m/s, 2주기는 최대 0.66 m/s, 최소 0.14 m/s, 평균  $0.39 \pm 0.18$  m/s로 집계되었고, 3주기 최대 0.43 m/s, 최소 0.18 m/s, 평균  $0.29 \pm 0.11$ 로 계속되었다(Figure 3 참조). 바이오필터에 총 3개소가 구비된 송풍구의 평균 면풍속은  $0.38 \pm 0.16$  m/s로 댐퍼 면적이 제외된 송풍구별 면적  $0.29\text{m} \times 0.65\text{m}$ 을 적용한 총 공조 풍량은  $776.89 \pm 320.16\text{m}^3/\text{h}$ 로 산출되었다. 단위 모니터링에서 풍속의 주기별 편차가 발생하였다. 이는 실험 주기가 반복되면서 바이오필터의 식생 뿌리와 배지를 통과하는 풍동특성이 정상류를 확보하여 1, 2차 주기보다 3차 주기에서 적은 편차의 풍속이 집계된 것으로 판단된다. 한편으로 실시간 풍동 변화를 모니터링하기 위해 대수선형 분할법에 따른 측정 지점 중 송풍구 중앙지점(Figure 3 참조)을 선정한 점도 모든 측정지점을 고려한 공조풍량 산정에 비해 1, 2차 주기의 큰 편차에 기여한 것으로 판단되었다. 해당 바이오필터 시스템에 의한 공조 풍량은 다중이용시설 중 교육연구 및 복지시설의 필요 환기량  $36\text{m}^3/\text{인} \cdot \text{h}$ (건축물설비기준규칙 제11조 제4항, 2013)를 적용할 경우, 21명 기준  $756\text{m}^3/\text{h}$ 를 만족하는 수준으로 해석된다.

## 2. 온도 및 습도

바이오필터에 의한 온도 및 습도 변화는 온습도 센서를 통해 시계열 모니터링하고, 1차 회귀계수( $\beta$ )를 산출하여 구간별로 분석하였다. 1주기의 온도는 바이오필터 시스템 가동 전, 1단계 관수 구간 증가(A-1,  $\beta=0.01$ )를 거쳐 최대  $22.9^\circ\text{C}$ 까지 증가했고, 시스템 가동 후, 송풍구간 감소(B-1,  $\beta=-0.01$ )로 최대  $7.0\%$  수준인  $21.3^\circ\text{C}$ 까지 근소하게 저감하였다. 이는 동쪽으로 식재면이 시공된 식생바이오필터 시스템에 일사가 유입되어 1단계 관수구간(A-1)의 PPFD 급증( $21.67\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ )을 유발하

면서 발생한 실내온도 상승으로 해석할 수 있었다. 2, 3주기의 온도는 바이오필터 시스템 가동 유무와 무관하게 일정하였으며, 관련 표준범위( $21 \pm 3^\circ\text{C}$ , KS C 9314:2013)를 만족하는 수준으로 집계되었다(Figure 4 참조).

1주기의 상대습도는 바이오필터 시스템 가동 전, 1단계 관수 구간 증가(A-1,  $\beta=0.02$ )를 거쳐 최대  $61.2\%$ 까지 증가했고, 시스템 가동 후, 송풍구간 증가(B-1,  $\beta=0.16$ )로 최대  $12.7\%$  수준인  $70.1\%$ 까지 현저하게 상승하였다. 이는 밀폐된 실험공간에 바이오필터 시스템의 송풍 기작( $933.1\text{m}^3/\text{h}$ )이 관수로 습윤해진 필터를 기화시키면서 상대습도를 상승시킨 것으로 해석할 수 있었다. 2주기의 상대습도는 관수 구간(A-2,  $\beta=-0.04$ )에서 완만하게 감소하였으나, 2주기 송풍구간(C-2,  $\beta=0.15$ )에서 다시 급증하였다. 3주기의 상대습도는 최대  $77.0\%$ 까지 상승하였으며, 이렇게 상승한 상대습도는 대기 중 부유한 입자상 오염물질을 침강시켜 미세먼지 농도 저감에 기여한 것으로 해석된다. 다만, 기밀한 실험환경의 상대습도가 쾌적범위  $50\%$ (Lee, 2017)와 시스템 및 건물 열화에 영향을 미치는 상한선  $65\%$ (Soreanu *et al.*, 2013)를 모두 초과하여, 실내 쾌적범위 및 구조적 영향 상한선을 만족하는 시스템의 상대습도 조성이 고려되어야 할 것으로 판단된다(Figure 5 참조).

식생시스템은 실내 온습도 변화에도 영향을 미치는데, 일반적으로 침기현상에 따른 외기영향이 발생되는 일반 건물대상의 연구는 계절적 영향을 감안하여야 한다. 우선, 하절기 사무실에서 식물적용유형에 따른 온습도 변화를 확인한 연구(Kwon and Park, 2017)는 벽천과 벽면녹화 적용방법에 따라 평균온도  $31.1^\circ\text{C}$ 를 최대  $1.0^\circ\text{C}$  저감시키고, 평균 상대습도  $55.2\%$ 를 최대  $5.2 \sim 18.4\%$  상승시킨 것으로 보고하고 있다. 기온이 높은 추절기에 냉방기를 가동하여 설정온도  $26.0^\circ\text{C}$ 로 실내공간을 조성하여 토양기반 식물 바이오필터의 관수 주기별 온습도 변화를 확

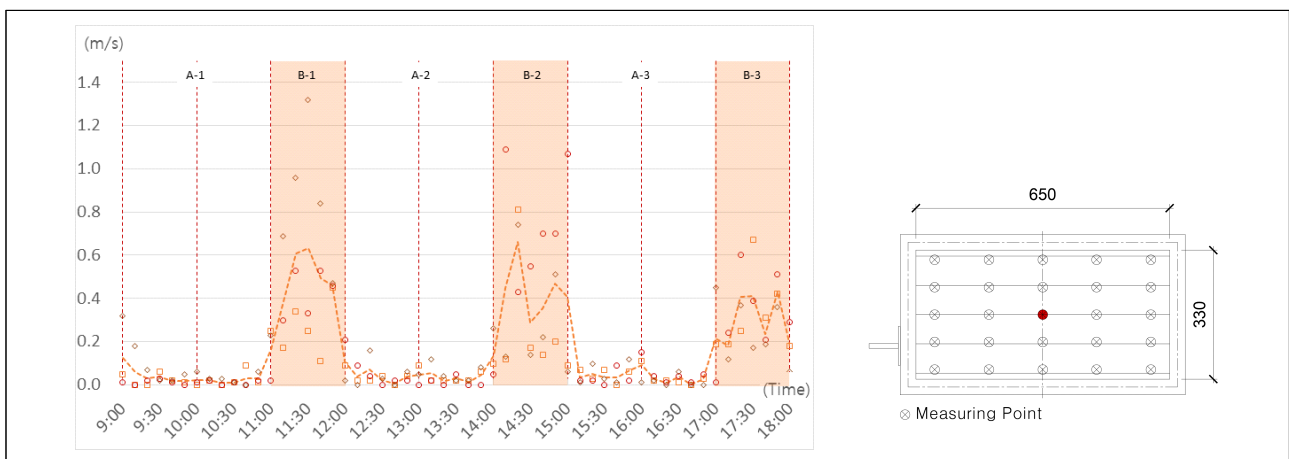


Figure 3. Variation monitoring of exhaust air velocity during system operation

Legend: □ 1st ○ 2nd ◇ 3rd --- Average

A-1, A-2 and A-3 are not operating biofilters, B-1, B-2 and B-3 are operating biofilters.

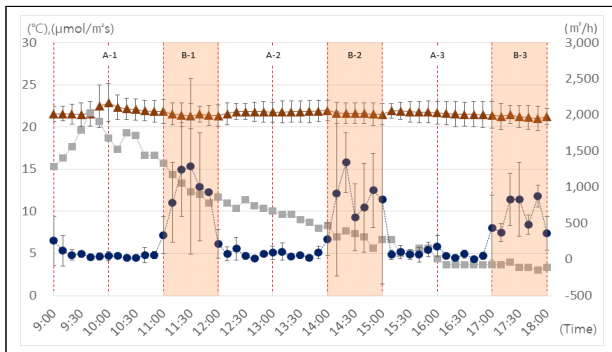


Figure 4. Temperature variation monitoring in testing room

Legend: —▲— Temperature —●— Air flow rate —■— PPFD  
 Operation point of vegetation biofilter fan

A-1, A-2 and A-3 are not operating biofilters, B-1, B-2 and B-3 are operating biofilters.

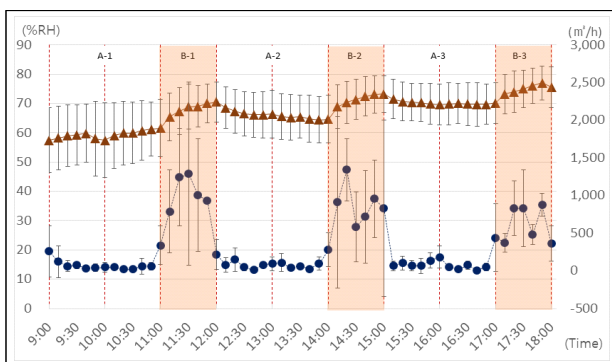


Figure 5. Relative humidity variation monitoring in testing room

Legend: —▲— Humidity —●— Air flow rate  
 Operation point of vegetation biofilter fan

A-1, A-2 and A-3 are not operating biofilters, B-1, B-2 and B-3 are operating biofilters.

인한 연구(Lee *et al.*, 2015)에서도 바이오필터를 작동하여 온도 25.7~27.1℃, 상대습도 51.3~73.1% 수준을 기록한 것으로 집계하고 있다. 외기와 무관하게 CADR 규격으로 환경이 통제되는 4.84m×3.63m×3.05m 챔버에서 활성탄기반 식물공기여과 시스템을 구동한 연구(Wang and Zhang, 2011)는 송풍량 930 m³/h로 설정 온도 23℃를 1℃ 감소시키고, 상대습도 60%를 최대 13.5% 증가시킨 연구결과를 발표하기도 하였다. 반면, 강의 실을 대상으로 춘절기에 진행된 본 연구는 시스템 가동으로 평균온도 21.5~22.3℃, 평균 상대습도 63.79~73.6%를 유지하여, 선행연구의 다양한 조건별 온습도 범위에 부합하는 것으로 판단된다. 시스템 공조부 구동을 통해 급격하게 상대습도를 상승시키는 효과를 효율적으로 운용할 경우, 계절에 따른 실내 미세먼지 저감과 적절한 상대습도 확보도 가능할 것으로 판단된다.

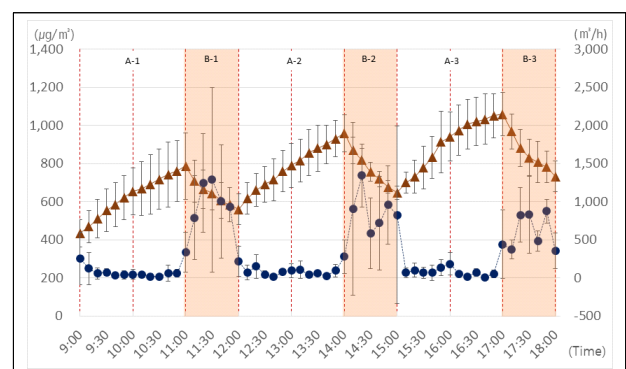
### 3. 미세먼지(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>)

바이오필터에 의한 미세먼지 농도 변화는 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>을 시

계열 모니터링하고, 1차 회귀계수( $\beta$ )를 산출하여 구간별로 분석하였다. 1주기의 PM<sub>10</sub> 농도는 바이오필터 시스템 가동 전, 1단계 관수 구간 증가(A-1,  $\beta=3.01$ )를 거쳐 최대 786.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 급격하게 상승했고, 시스템 가동 후, PM<sub>10</sub> 농도는 송풍구간 감소(B-1,  $\beta=-3.83$ )로 최대 28.8% 수준인 560.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 현저하게 저감되었다. 2, 3주기에 바이오필터 시스템 가동 전의 PM<sub>10</sub> 농도 상승 현상은 동일하게 집계되었다. 시스템 가동 후, PM<sub>10</sub> 농도는 2주기 송풍구간 감소(B-2,  $\beta=-5.50$ )로 최대 32.6% 수준인 647.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 감소되고, 3주기 송풍구간 감소(B-3,  $\beta=5.48$ )로 최대 30.8% 수준인 732.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 저감되었다(Figure 6 참조).

1주기의 PM<sub>2.5</sub> 농도는 바이오필터 시스템 가동 전, 1단계 관수 구간 증가(A-1,  $\beta=1.87$ )를 거쳐 최대 486.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 급격하게 상승했고, 시스템 가동 후, PM<sub>2.5</sub> 농도는 송풍구간 감소(B-1,  $\beta=-2.45$ )로 최대 28.0% 수준인 350.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 현저하게 저감되었다. 2, 3주기에 바이오필터 시스템 가동 전의 PM<sub>2.5</sub> 농도 증가 현상은 동일하게 집계되었다. 시스템 가동 후, PM<sub>2.5</sub> 농도는 2주기 송풍구간 감소(B-2,  $\beta=-3.30$ )로 최대 32.4% 수준인 401.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 감소되고, 3주기 송풍구간 감소(B-3,  $\beta=-3.51$ )로 최대 31.0% 수준인 459.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 저감되었다(Figure 7 참조).

다중이용시설에 적용되는 식생 바이오필터는 해당 공간에 대한 필요 환기량 검토가 필수적인 사항이며, 이는 현장을 고려한 실험환경 조성이 후속되어야 한다. 반면, 관련 선행연구는 단위 식생모듈의 성능평가를 위해 챔버기반의 소규모 실험(Kwon and Park, 2018; Kim *et al.*, 2018b; Pettit *et al.*, 2017)을 중심으로 진행되고 있다. 현장을 고려한 연구는 제한적인 상황이며, 5.2m×3.8m×2.6m 규모의 사무실 환경에서 300분간 진행된 벽면녹화의 PM<sub>10</sub> 저감연구(Kwon and Park, 2017)는 자연저감 대비 개선 효과가 4.6%p에 불과하여, 다중이용시설에서 정화

Figure 6. PM<sub>10</sub> variation monitoring in testing room

Legend: —▲— PM<sub>10</sub> —●— Air flow rate  
 Operation point of vegetation biofilter fan

A-1, A-2 and A-3 are not operating biofilters, B-1, B-2 and B-3 are operating biofilters.

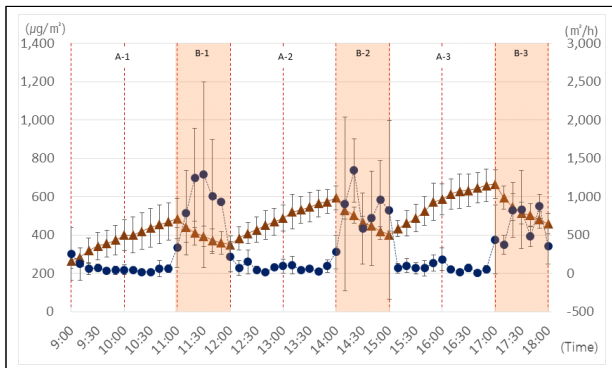


Figure 7. PM<sub>2.5</sub> variation monitoring in testing room

Legend: —▲— PM<sub>2.5</sub> —●— Air flow rate

Operation point of vegetation biofilter fan

A-1, A-2 and A-3 are not operating biofilters, B-1, B-2 and B-3 are operating biofilters.

식물만으로 미세먼지를 저감하기 어려운 것으로 보고하고 있다. 단일 정화식물의 한계를 보완하는 공조시스템과 연계된 바이오필터 관련 연구도 진행되고 있는데, 객관적인 현장 적용성을 확인하기 위해 제실 인원이 고려된 필요 환기량이 반영되어야 한다. 10m×7m×3m 규모의 실험실에서 진행된 토양기반 식생 바이오필터의 미세먼지 저감연구(Lee *et al.*, 2015)는 송풍량 90.72m³/h의 입자상 오염물질 단일 방출조건에서 1시간 동안 PM<sub>10</sub> 89.77%, PM<sub>2.5</sub> 73.0% 저감한 것으로 보고하고 있다. 다만, 오염물질의 단일 방출조건에 따른 초기농도가 제시되지 않고, 동시간 자연저감효과의 반영 여부가 명확하지 않아 객관적인 저감량 분석이 제한적인 것으로 판단된다. 이에 반해 본 연구는 단위 모니터링 별 초기 오염농도 제시는 물론 입자상 오염물질의 연속 방출조건을 조성하여, 미세먼지가 지속적으로 발생하는 다중이용시설의 공간특성을 모사하고자 하였다. 이를 통해 PM<sub>10</sub> 786.7~1,058.3μg/m³, PM<sub>2.5</sub> 486.0~665.3μg/m³의 고농도 미세먼지 환경을 확보했으며, 송풍구간(B-1, B-2, B-3)에서 PM<sub>10</sub> 28.8~32.6%, PM<sub>2.5</sub> 28.0~32.4%의 저감율과 더불어 급격한 저감 추이( $\beta = -4.94$ ,  $\beta = -3.08$ )가 집계되었다. 또한, 식생 바이오필터를 통해 정화된 공기의 평균 토출풍량을 776.89±320.16m³/h로 산출하여, 실험환경의 수용인원인 교수자 1인, 학습자 20인에게 요구되는 필요 환기량 756m³/h의 수준을 만족하는 것으로 해석되었다.

반면, 바이오필터의 토출풍속은 시스템 가동에 따라 1주기 송풍구간(B-1, 0.57±0.17m/s), 2주기 송풍구간(B-2, 0.39±0.18m/s), 3주기 송풍구간(B-3, 0.29±0.11m/s)으로 각각 집계되었다. 평균풍속이 가장 낮지만, 정상류가 확보된 3주기 송풍구간(B-3)에서 상대적으로 높은 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 농도 저감 추이( $\beta = -5.48$ ,  $\beta = -3.51$ )가 확인되어, 안정적인 입자상 오염물질 저감을 위해 바이오필터에 일정한 유속의 정상류 확보가 우선되어야 할 것으로 판단된다.

## IV. 요약 및 결론

본 연구는 식생 바이오필터의 다중이용시설 내 적용 가능 여부를 확인하기 위해 관련 표준 및 규정을 참조하여 입자상 오염물질의 실내 연속방출환경을 구축하고, 공조풍량, 온습도, 미세먼지 부문의 기초 데이터를 확보할 수 있었다. 미세먼지는 입자상 오염물질과, 2차 미세먼지 생성에 기여하는 전구물질로 구분할 수 있는데, 주로 입자상 오염물질을 중심으로 관련 연구가 진행되고 있다.

제한된 실험실 공간의 입자상 미세먼지 연구는 Arizona fine dust 또는 염화칼륨(KCl) 등의 표준 오염원이 주로 사용된다. 반면, 실험방법이 다양화되면서 0.6m×0.6m×1.2m 규모의 챔버에 담배연기로 배출된 PM<sub>10</sub>, PM<sub>1</sub>에 대한 스킨답서스와 디펜바키아의 광도별 저감연구(Kwon and Park, 2018), 0.6m×0.6m×0.6 m 규모의 챔버에 디젤연료 1cm²의 연소로 배출된 미세먼지에 대한 식생 7종의 근권부 압력손실 및 미세먼지 저감연구(Pettit *et al.*, 2017) 등과 같이 표준 입자상 오염원을 담배연기, 디젤연소 등으로 대체하는 연구가 보고되고 있다. 실험공간이 상대적으로 큰 경우, 5.2m×3.8m×2.6m 규모의 사무실 내 배출된 미세먼지에 대한 벽면녹화시스템 및 벽천의 저감연구(Kwon and Park, 2017), 10m×7m×3m 규모의 실험실 내 배출된 미세먼지에 대한 능동형 식생 바이오필터의 저감연구(Lee *et al.*, 2015) 등은 모기향을 입자상 오염원으로 채택한 바 있다. 본 연구에서도 체적 332.73m³의 실험공간에 확산이 용이한 입자상 오염원으로 모기향을 선정하여, 미세먼지 저감효과에 대한 모니터링을 수행하였다.

모니터링 중 동일한 공조기 출력조건에서 평균풍속이 가장 낮지만, 정상류가 확보된 3주기 송풍구간(B-3)이 상대적으로 높은 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 농도 저감 추이( $\beta = -5.48$ ,  $\beta = -3.51$ )를 확인할 수 있었다. 이는 식생바이오필터 내 공극, 근권부, 수분분포 등의 다양한 형상 변수 기반의 유체흐름을 상시 유지할 수 있는 공조풍량과 주기가 요구되며, 안정적인 미세먼지 저감효과를 확보하기 위해 추가적인 운용방안 연구가 후속되어야 할 것으로 판단된다.

또한, 본 연구는 식생 바이오필터를 다중이용시설 내 설치할 경우, 현행화할 수 있도록 공기청정기 국가표준(KS C 9314:2013), 덕트풍량 측정방법(SAREK A101-2011), 건축물설비기준규칙 등의 관련 표준 및 규정을 참조하여, 객관적인 성능평가환경의 구축 방안을 제시할 수 있었다. 이를 통해 대학 강의실 환경 내에 객관화된 모니터링 인프라를 조성하고, 상대적으로 신뢰성 있는 데이터 확보가 가능했던 것으로 판단된다. 다만, 비균질한 유체 흐름이 발생하는 송풍구에 단일 풍속 센서로 공조풍량을 산출한 점과 재현되기 어려운 고농도 입자상 오염 환경에서 모니터링이 수행된 부분은 시스템의 표준 시험방법에 관한 논의와 더불어 연구의 현실성 제고 측면에서 보완되

어야 할 것이다.

## References

1. Bae, H. J.(2014) Effects of short-term exposure to PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> on mortality in Seoul. *Journal of Environmental Health Sciences* 40(5): 346-354.
2. Choi, J. I. and Y. S. Lee(2015) A study on the impact of PM<sub>2.5</sub> emissions on respiratory diseases. *Journal of Environmental Policy and Administration* 23(4): 155-172.
3. Choi, S. Y., K. Y. Han and B. H. Kim(2012) Comparison of different multiple linear regression models for real-time flood stage forecasting. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 32(18): 9-20.
4. Kim, K. J., H. H. Jung, J. H. Kim, and H. J. Kim(2014) Indoor Air Purifying Plants. *National Institute of Horticultural and Herbal Science*.
5. Kim, K. J., M. J. Kil, M. I. Jeong, H. D. Kim, E. H. Yoo, S. J. Jeong, C. H. Pak and K. C. Son(2009) Determination of the efficiency of formaldehyde removal according to the percentage volume of pot plants occupying a room. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 27(2): 305-311.
6. Kim, T. H., B. H. Choi, N. H. Choi and E. S. Jang(2018a) Particulate matter and CO<sub>2</sub> improvement effects by vegetation-based bio-filters and the indoor comfort index analysis. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 37(4): 268-276.
7. Kim, T. H., J. M. Park and S. C. Kim(2018b) The indoor air purification system using LED and fan for *epipremnum aureum*. *Journal of the Institute of Convergence Signal Processing* 19(4): 167-173.
8. KS C 9314:2013 Air cleaners.
9. Kwon, K. J. and B. J. Park(2017) Effects of indoor greening method on temperature, relative humidity and particulate matter concentration. *Journal of Korean Institute of Landscape Architecture* 45(4): 1-10.
10. Kwon, K. J. and B. J. Park(2018) Particulate matter removal of indoor plants, *dieffenbachia amoena* 'Marianne' and *spathiphyllum* spp. according to light intensity. *Journal of Korean Institute of Landscape Architecture* 46(2): 62-68.
11. Lee, C. H., B. Choi and M. Y. Chun(2015) Stabilizing soil moisture and indoor air quality purification in a wall-typed botanical biofiltration system controlled by hidifying cycle. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology* 33(4): 605-617.
12. Lee, Y. J.(2017) Designing Space for Improvement of Age-specific Concentration and Comfort by CFD Interpretation of Temperature and Humidity Change in Apartment. Master's Thesis, Gachon Univ.
13. Pettit, T., P. J. Irga, P. Abdo, F. R. Torpy(2017) Do the plants in functional green walls contribute to their ability to filter particulate matter?. *Building and Environment* 125: 299-307.
14. Sæbø, A., R. Popek, B. Nawrot, H. M. Hanslin, H. Gawronska and S. W. Gawronski(2012) Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of The Total Environment*, 427-428: 347-354.
15. SAREK A101-2011 Duct Airflow Measuring Method.
16. Soreanu, G. M. Dixon and A. Darlington(2013) Botanical biofiltration of indoor gaseous pollutants - A mini-review -. *Chem. Eng. J.* 229: 585-594.
17. Wang, Z. and J. S. Zhang(2011) Characterization and performance evaluation of a full scale activated carbon-based dynamic botanical air filtration system for improving indoor air quality. *Build. Environ.* 46:758-768.
18. Wang, L., H. Gong, W. Liao and Z. Wang(2015) Accumulation of particles on the surface of leaves during leaf expansion. *The Science of the Total Environment* 532: 420 - 434.
19. 건축물설비기준규칙 제11조 제4항 (2013).
20. [http://www.bio-wall.co.kr/garden4u\\_2013/](http://www.bio-wall.co.kr/garden4u_2013/)

Received : 10 August, 2020

Revised : 02 September, 2020 (1st)

08 October, 2020 (2nd)

Accepted : 08 October, 2020

3인익명 심사필