

공조풍량별 식생바이오필터의 입자상 오염물질 저감효과 연구

최부현*·김태한**†

*상명대학교 환경자원학과, **†상명대학교 그린스마트시티학과

A Study on Particulate Matter Reduction Effects of Vegetation Bio-Filters by Airflow Volume

Boo Hun Choi* and Tae Han Kim**†

*Dept. of Department of Environmental Resources, Sangmyung University,

**†Dept. of Green Smart City, Sangmyung University

ABSTRACT

As the influence of fine dust on society spreads gradually, the public's interest in indoor air is increasingly rising. Air-purifying plants are drawing keen attention due to their natural purifying function enabled by plant physiology. However, as their fine dust reduction mechanism is limited to adsorption only, vegetation bio-filters that optimize purification effects through integration with air-conditioning systems is rising as an alternative. In accordance with the relevant standard test methods, this study looked into the fine dust reduction assessment method by air-conditioning airflow volume that can be used for the industrial spread of vegetation bio-filters. In the case of PM₁₀ at 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, it was in the order of EG-B(3,500CMH, 29 min.) < EG-A (2,500CMH, 37 min.) < CG(0CMH, 64 min.) for reaching the maintenance level (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) of publicly used facilities. For reaching the WHO Guideline(50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) requirement, it was in the order of EG-B (51 min.) < EG-A (160 min.) < CG (170 min.). In the case of PM_{2.5}, it was in the order of EG-B (26 min.) < EG-A (33 min.) < CG (57 min.) for reaching the maintenance level (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) of publicly used facilities. It was in the order of EG-B (48 min) < EG-A (140 min) < CG (158 min) for reaching the WHO Guideline (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) requirement. The findings from the analysis showed that fine dust can be reduced most efficiently when the system is operated at 3,500CMH level.

The limitation of this study is that due to the absence of a way of assessing the stress of plants in vegetation bio-filters, generating optimal air-conditioning air flow of the relevant system and economics analysis against the existing facility-type air purification system have been clarified, which should be explored further though follow-up studies.

Key Words : Biofilter, Air conditioning volume, Particulate matter, Indoor air purification, Standard test method

1. 서 론

미세먼지를 비롯한 입자상 오염물질은 인체에 심각한 건강문제를 일으키며, 특히 미세먼지와 사망자 수는 깊은 연관성이 있는 것으로 확인되고 있다[1,2]. 중국 월경성 미

세먼지와 국내에서 발생하는 미세먼지로 인해 국민들의 건강에 대한 우려는 점차 심화됨에 따라 정부는 전국적으로 미세먼지 관리 정책들을 시행하고 있다. 환경부는 수도권 내 PM_{2.5} 기준 평균 농도 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하고, 익일 24시간 평균 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과가 예상되는 경우, 「미세먼지 저감 관리 및 관리에 관한 특별법」을 통해 미세먼지 비상저감조치를 발령하고 있다.

†E-mail: taehankim@smu.ac.kr

정부대책과 더불어 일반인들의 미세먼지에 대한 우려로 공기정화 가전제품의 수요가 증가하는 가운데 발생된 항균필터와 살균제 문제는 기존 공기정화수단의 인체 유해성 논란을 유발하였다. 반면, 공기정화식물은 장식적, 심리적, 치료적 기능 등을 통해 현대인의 정서적 건강의 증진이 가능[3]하여, 기존 공기정화수단의 보완 여부에 대한 관심이 높아지고 있다. 이는 우선 식물에 의한 실내 공기정화효과의 정량화가 선행되어야 한다. 식물의 공기정화 관련연구로 홍콩야자와 벵골보리수는 톨루엔 및 자일렌을 대기에서 흡수하여 줄기를 통해 근권부로 이동시켜 저감[4]시키고, 스킨답서스와 디펜바키아는 챔버 내 주입된 담배연기를 일정 광 환경 조건에서 유의미하게 저감[5]시킬 수 있는 것으로 보고된 바 있다.

식물에 의한 실내공기 정화는 효율적인 측면에서 한계가 있는데, 공조설비와 식물을 연계하여 정화효과를 최적화하려는 방안이 시도되고 있다. 대표적인 사례가 식생바이오필터로서 이와 관련된 연구는 주로 가스상 오염물질을 중심으로 벽면녹화 시스템에 의한 MEK(methyl ethyl ketone)의 저감효율 연구[6], 스킨답서스와 드라세나가 식재된 토양기반 바이오필터의 식물생육 및 TVOCs 저감 효과에 대한 연구[7] 등이 폭넓게 진행되고 있다. 반면, 입자상 오염물질을 대상으로 한 연구는 수직수경재배기반 바이오필터의 미세먼지, 이산화탄소 및 실내패적지수를 분석한 연구[8] 등에서 제한적으로 진행되고 있다.

공조설비가 연계된 식생바이오필터는 정화성능, 경제성 등을 평가하기 위해 공조풍량의 정량화가 중요한 요인이 된다. [9]는 식생바이오필터의 코코넛 섬유소재 필터의 압력손실과 여과풍속을 연구하였다. 필터의 습도와 여과공기는 비례하였고, 식물의 근권부는 수분함유량이 많아 식재하지 않은 필터에 비해 최대 50%의 공조풍량 증가를 발견하였다. [10]은 AHU(air handling unit)와 풍동관을 연계한 풍량 시험 시스템에서 1m² 면적의 식생바이오필터에 공조풍량 600CMH를 공급하여, 평균 7.6m/s의 면풍속을 확인하였다.

공조 풍량에 따른 식생바이오필터의 오염물질 저감은 시스템 성능 기준이 된다. 공조설비와 연계한 코코넛 섬유기반의 식생바이오필터는 50CMH의 공조 풍량 조건에서 MEK를 15% 저감한 것으로 보고된 바 있다[6]. 식생바이오필터의 필터부 소재에 따라 면풍속은 상이하다. 토양기반의 식생바이오필터는 면풍속 0.03m/s조건으로 실험[11]된 반면, 수직수경재배형 식생바이오필터는 0.69m/s의 면풍속 조건으로 실험[8]되어 23배 차이를 확인할 수 있다.

식생바이오필터는 식물생육을 위해 관수가 필수적이며, 이는 실내 상대습도에 영향을 준다. 일반적으로 입자상 오염물질은 입자간 응집을 촉진하는 습도가 높을수록

높은 저감효과를 확인[12,13]할 수 있다. 실내 상대습도에 영향을 미치는 식생바이오필터 설치로 미 설치 구간에 비해 16% 높은 미세먼지 저감효과가 보고[7]된 바 있다.

미세먼지 문제가 심화되면서 공조설비가 연계된 식생바이오필터는 친환경 소재 기반의 저감방안으로 검토가 가능하다. 이는 해당 시스템의 성능 정량화와 계측환경의 신뢰성이 선행되어야 할 것이다. 식생바이오필터의 선행 연구를 통해 미세먼지 저감성능에 영향을 미치는 요인 중에서 정량화 가능한 주요요인으로 공조풍량과 상대습도가 확인되고 있지만, 관련 연구는 미비한 상황이다. 따라서, 본 연구는 식생바이오필터의 미세먼지 저감성능 정량화를 위해 유관 표준시험방법에 따른 공조풍량과 상대습도 계측으로 시스템의 효율적 운용에 요구되는 기초 데이터를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 식생기반 바이오필터






본 연구는 선행연구[8]를 통해 구축된 식생바이오필터 목업의 공조풍량과 온 습도 조건에 따른 미세먼지 저감 추이를 모니터링하였다. 해당 시스템은 공기정화식물이 식재된 필터부와 실내공기를 흡입하여 정화된 공기를 공급하기 위한 공조 팬을 포함한 송풍부, 식재된 식물에 지속적인 용수를 공급하기 위해 구비된 수조, 수질정화장치 및 펌프 등의 관수부로 구성되어 있다. 식생바이오필터에는 총 11종 228본의 식생을 식재하였고, 주요 식생모델은 섬모, 왁스층이 발달하여 미세먼지의 흡착이 용이한 식물[14] 및 VOCs 등의 실내공기 오염원 저감성능이 우수한 식생종을 선발하였다[15].

2.2 실험설계

식생바이오필터 목업의 공조 풍량, 온 습도 및 미세먼지 변화에 대한 시계열 모니터링을 위해 상기 표 1에서 제시된 측정장비를 강의실의 모사한 실험실에 구축하였다(Fig. 1)

관련 표준시험방법(KS C 9314:2013)을 준용하여, 입자상 오염물질(PM₁₀, PM_{2.5})의 시계열 측정을 위해 입자계수기(TSI AM520)를 지면에서 120cm 이격된 실험실 중앙에 설치하였다. 동일 위치에 온습도 측정장치(ALMEMO temperature and humidity sensor)를 구비하여, 모니터링을 진행하였다. 입자상 오염원은 모기향으로 선정하였고, 이를 연소시켜 발생하는 입자상 물질을 균질하게 실내로 확산시키기 위해 서큘레이터를 사용하여 실내공기를 교반하였다. 또한, 21±3℃ 수준의 배경온도가 유지되도록 온풍기를 가동하였다.

Table 1. Measuring instruments of vegetation biofilter system

	Multi-function measuring instrument 1	Air flow probe	Particulate matter	Multi-function measuring instrument 2	Temperature and Humidity
Image					
Model	Testo 480	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 ³	9 input socket 512kb memory	Temperature: -20 - 80°C Humidity: 5 - 98%

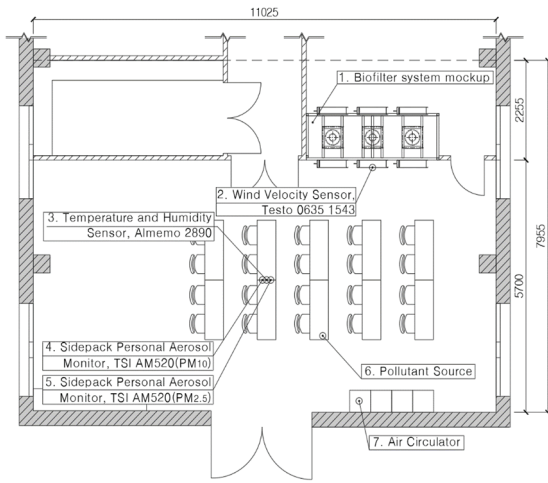


Fig. 1. Measuring instruments installation of the test bed.

식생바이오필터의 송풍량은 열선형 프로브(Testo 0635 15430)를 시스템 중앙에 위치한 송풍구 중앙에 설치하고, 이를 다기능 종합환경 측정기(Testo 480)에 연결하여 실시간 모니터링하였다. 송풍구의 면적은 2cm 두께의 담퍼 면적을 제외하여 산정하였으며, 측정된 풍속을 풍량으로 환산하였다[16].

실험은 식생바이오필터의 공조 팬 전력사용량을 기반으로 미세먼지 저감효율이 반영된 기준 공조 풍량을 선정하는 예비실험과 선정된 공조 풍량별 식생바이오필터의 미세먼지 저감 시계열 변화를 확인하는 본실험으로 구분하여 진행하였다. 예비실험과 본 실험의 절차는 다음과 같고, 관련 국가표준[17] 및 선행연구[5]를 참조하여, 예비실험 후 본 실험을 3회 반복하였다.

- a) 실험실 중앙에 입자계수기 2기를 바닥면에서 120cm 이격된 위치에 설치하고, 식생바이오필터 중앙 송풍

- 구의 가운데 지점에 열선형 프로브를 위치한다.
- b) 오염원(모기향)을 연소시켜 발생된 입자상물질을 서클레이터를 사용하여, 실험실 내에 균질하게 확산시킨다.
- c) 실험실의 PM10 배경농도가 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 도달하면, 서클레이터를 정지하고, 식생바이오필터를 가동한다.
- d) 예비실험은 가동 후 초기농도의 절반수치인 PM10 이 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 도달할 때까지 가동하여 1차 분석을 수행하고, 본 실험은 1차분석을 통해 설정된 조건으로 공조 팬 작동 및 관수펌프 정지(cycle-a), 공조 팬 정지 및 관수펌프 작동(cycle-b), 휴지기(cycle-c)를 각각 1시간씩 반복하여 한 주기(cycle)로 설정한다.
- e) 실험은 4 주기, 총 12시간동안 진행되며, 면풍속, 온도 습도 및 미세먼지의 시계열 모니터링을 실시한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 면풍속 및 공조풍량

예비실험은 식생바이오필터의 미세먼지 저감 한계풍속을 확인하기 위해 진행하였다. 예비실험은 PM10 기준 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도에서 시작하여, 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 도달하기까지 500CMH 단위로 2,500 ~ 4,000CMH 범위에서 시계열 모니터링하였다.

공조 풍량 중 배경농도가 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 수렴하는데 2,500CMH가 20분으로 가장 오랜 시간이 소요되었다. 3,000CMH 조건은 2,500CMH에 비해 근소하게 빠른 미세먼지 저감속도를 기록한 반면, 3,500CMH와 4,000CMH 조건은 유의미한 차이가 기록되었지만, 동일한 저감경향이 확인되었다. 이와 같은 저감경향은 PM10과 PM25 유사하게 집계되었다. 따라서, 조성된 미세먼지 배경농도 환경에서 해당 시스템의 미세먼지 저감 한계 공조 풍량은 3,500

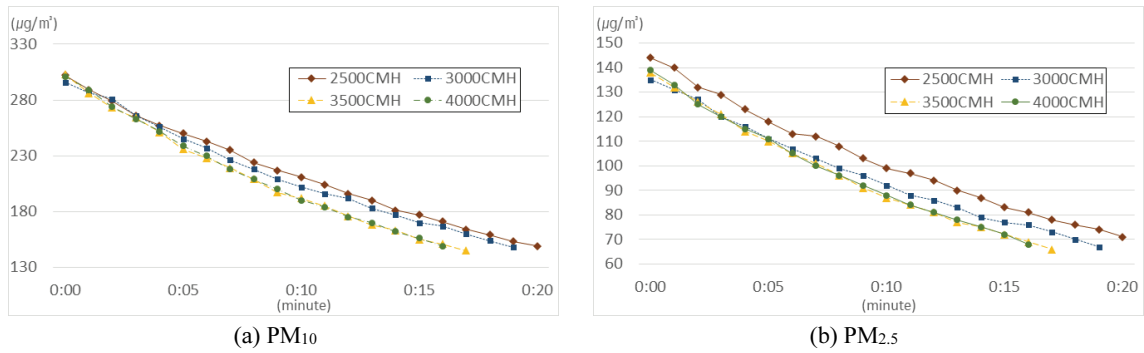


Fig. 2. Preliminary experiment on the limitation of particulate matter(PM₁₀, PM_{2.5}) reduction.

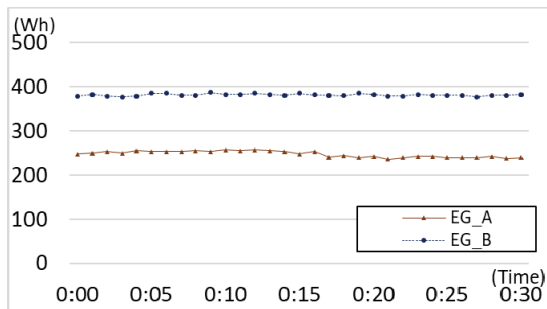


Fig. 3. Power consumption to maintain air flow rate.

CMH로 판단되었다. 이를 기준으로 본 실험의 공조 풍량 조건을 0CMH, 2,500CMH, 3,500CMH로 구분하여, CG (control group), EG(experimental group)-A, EG-B로 설정하였다.

해당 조건을 재현하기 위해 공조 팬을 구동시킨 상황에서 공조 풍량과 사용 전력량의 연속성을 확인하였다. EG-A 조건을 수렴하기 위해 평균 277.3Wh가 소요되어, 2,247.2CMH의 평균 공조 풍량이 확보되었다. EG-B조건을 수렴하기 위해 평균 380.9Wh가 소요되어, 3,484.7CMH의 평균 공조 풍량이 확보되었다. 사용 전력량으로 재현되는 면풍속을 풍량 산정방법(SAREK A101-2011)을 준용하여 공조 풍량으로 산정하였다.

송풍구별로 산출된 풍량은 다음 Table 2와 같고, 측정지점별 면풍속에 기반한 공조 풍량 부하를 MATLAB (MathWorks, USA)을 사용하여 표현하였다(Fig. 4). EG-A, EG-B의 공조 풍량 조건에서 모두 유사한 풍량 부하 유형이 확인되었다. 가장 높은 풍량 부하가 형성된 지점은 왼쪽 송풍구 우측 상단이었으며, 가장 낮은 풍량 부하는 중앙과 오른쪽 송풍구 상단으로 확인되었다. 이와 같은 일정한 풍량 부하가 재현되는 것은 필터, 식생 등 시스템을 구성하는 요소들이 안정화되어 송풍 과정에서 정상류를 형성한 것으로 판단되었다.

Table 2. The result of air flow rate by supply air (Unit: CMH)

air flow rate	supply air 1	supply air 2	supply air 3	Mean
EG-A(2,500)	3,016.4	2,307.8	2,367.2	2,563.8
EG-B(3,000)	3,780.4	2,618.9	3,124.8	3,174.7

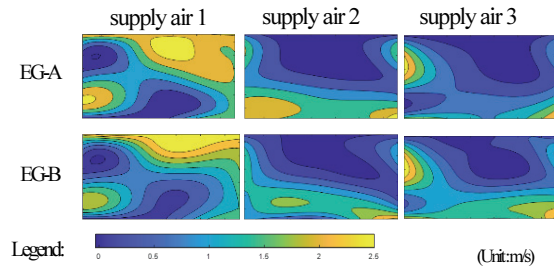


Fig. 4. The graph of the measured contour line based on the wind speed of the face.

3.2 상대습도

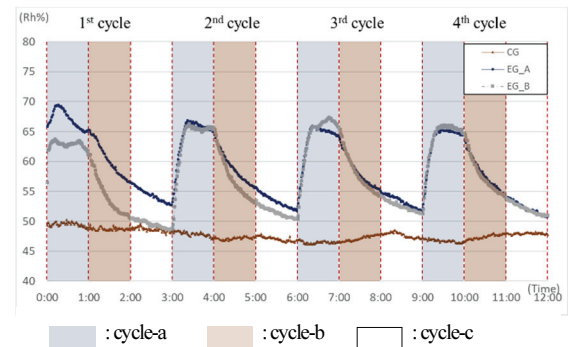


Fig. 4. Relative humidity changes according to biofilter operation conditions.

본 실험의 식생바이오필터 구동조건에 따른 상대습도 변화는 다음 Table 3과 같이 집계되었다. EG-A와 EG-B 모두 동일하게 공조 팬 가동구간에서 상대습도가 급격하게 상승하고, 펌프 가동구간부터 완만하게 하락하는 경향을 보였다(Fig. 4). 반면, 시스템 미 가동 조건(CG)에서는 실험 조건에 비해 10% 이상 낮은 상대습도 환경에서 공조 팬과 펌프의 가동 여부로 인한 유의미한 변화는 확인되지 않았다. 평균 상대습도는 CG(47.8±0.3%), EG-A(58.1±5.0%), EG-B(58.0± 5.6%)로 집계되어, 시스템이 가동된 실험조건에서는 평균 상대습도의 큰 차이는 확인되지 않았다.

Table 3. Result of relative humidity of control group and experimental group by test cycles

relative humidity by test cycles (Rh%)		CG (0CMH)	EG-A (2,500CMH)	EG-B (3,000CMH)
<cycle-a> fan: on pump: off	avg.	48.0	63.3	63.8
	max	48.4	65.6	66.5
	min	47.4	52.3	50.8
	sd	0.2	3.5	4.0
<cycle-b> fan: off pump: on	avg.	47.7	58.0	57.7
	max	48.4	65.6	66.5
	min	47.2	51.3	50.8
	sd	0.3	5.0	5.6
<cycle-c> fan: off pump: off	avg.	47.8	52.8	52.3
	max	48.4	54.4	54.0
	min	47.2	51.3	51.1
	sd	0.3	1.0	0.8

EG-B의 평균 상대습도는 EG-A와 1st cycle을 제외하고 유의미한 차이가 집계되지 않았다. 출입을 제한한 공간에 벽면녹화와 벽천을 통해 식물 용적비가 1.4%를 만족할 경우, 실내 상대습도가 최대 14.8-21.9% 증가한 연구[18]가 보고된 바 있다. 반면, 본 연구는 수동적 녹화 외에 공조기를 연계하여, 15.3~15.8%의 평균 상대습도를 증가시켜, 실내 미기상 조절범위를 더욱 확장한 것으로 판단되었다. 이는 토양기반 식생바이오필터를 작동시켜 실험공간의 상대습도를 6.9% 증가시킨 Jung et al.의 연구결과[7]에 비해 2.2-2.3배 더 증가하였다.

3.3 공조 풍량 별 저감시간 분석

3.3.1 PM₁₀

본 실험의 식생바이오필터 구동조건에 따른PM₁₀ 저감은 다음 Table 4와 같이 집계되었다. 다중이용시설의 유지기준인 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만에 수렴되는 시점을 기준으로 시스

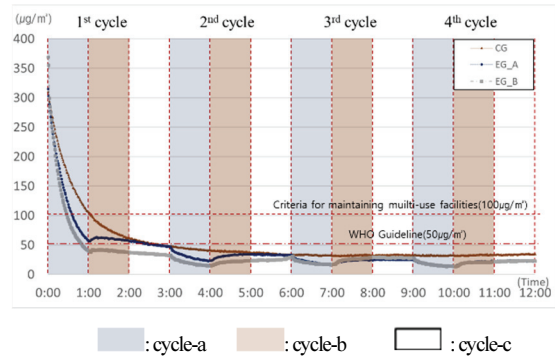


Fig. 5. Monitoring of time series changes PM₁₀ concentration according to vegetation biofilter operation.

Table 4. Results of PM₁₀ reduction by control group and experimental group according to vegetation biofilter operation

		CG (0CMH)	EG-A (2,500CMH)	EG-B (3,000CMH)
initial concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		310.3	314.7	369.0
criteria for maintaining multi-use facilities (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	arrival time(min)	64	37	29
	time difference (min)	-	27	35
	reduction rate(%)	-	42.2%	54.7%
WHO guideline (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	arrival time(min)	170	160	51
	time difference (min)	-	10	119
	reduction rate(%)	-	5.9%	70.0%

템 미 가동 조건인 CG는 64분이 소요되었다. 시스템 가동 조건인 EG-A는 42.2% 단축된 37분이 소요되었고, EG-B는 54.7% 단축된 29분으로 집계되었다. 반면, WHO Guideline 기준인 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만에 수렴되는 시점을 기준으로 시스템 미 가동 조건인 CG는 170분이 소요되었다. 시스템 가동 조건인 EG-A는 5.9% 단축된 160분이 소요되었고, EG-B는 70.0% 단축된 51분으로 집계되었다(Fig. 5). 식생바이오필터의 미세먼지 저감에 대한 선행연구[8]는 재실자 환경을 조성하여, 시스템의 송풍량 1,411.2 CMH 조건에서 PM₁₀ 배경농도 36.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 저감시켜 58.9%의 저감율을 확인한 바 있다. 해당 연구는 재실자 외에 별도의 오염원 없이 실험한 반면, 본 연구는 다중이용시설 유지기준의 3배에 해당하는 배경농도로 실험을 진행하였다. 본 실험은 선행연구에 비해 송풍량을 1.8~2.2배 높게 설정하였으며, 다중이용시설 유지기준까지 29~37분까지 빠른 PM₁₀ 제거효과를 가져올 수 있었다.

[11]은 토양기반 식생바이오필터의 송풍구 15cm 전면에서 미세먼지 저감농도를 측정한 바 있다. 토양기반 식생바이오필터의 토양수분별 미세먼지 제거율을 검증한 연구[19]에서도 공조 팬을 작동면서 관수주기별 미세먼지 저감능을 분석하였는데, 흡입부와 송풍구의 미세먼지 농도차로 저감량 산정방법을 제시하고 있다. 이는 단위 필터 성능에 국한된 것으로 실내공간 내 전반적인 미세먼지 농도 변화 평가에는 제한적인 것으로 판단된다. 반면, 본 연구는 관련 표준시험방법[17]을 통해 실험실 중앙에 입자계수기를 설치하여, 식생바이오필터의 공기정화능 규명을 위한 객관적인 측정자료를 확보할 수 있었다. 재실자 환경에서 해당 표준시험방법을 준용하여 식생바이오필터의 PM₁₀의 저감효율을 분석한 선행연구[20]에서도 식생바이오필터를 가동함과 동시에 급격한 PM₁₀의 농도 저감이 확인된 바 있다.

3.3.2 PM_{2.5}

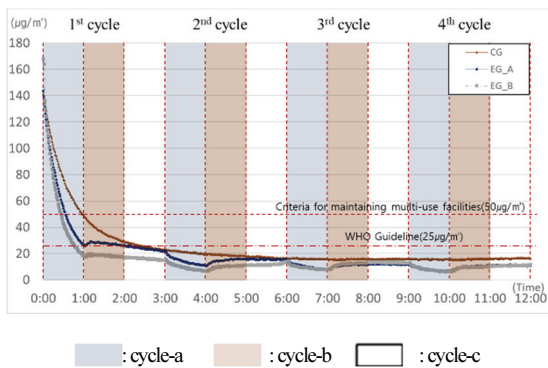


Fig. 6. Monitoring of time series changes PM_{2.5} concentration according to vegetation biofilter operation

Table 5. Results of PM_{2.5} reduction by control group and experimental group according to vegetation biofilter operation

		CG	EG-A	EG-B
initial concentration (µg/m ³)		141.0	143.6	168.0
criteria for maintaining multi-use facilities (50µg/m ³)	arrival time(min)	57	33	26
	time difference (min)	-	24	31
	reduction rate(%)	-	42.1%	93.9%
WHO guideline (25µg/m ³)	arrival time(min)	158	140	48
	time difference (min)	-	18	110
	reduction rate(%)	-	11.4%	78.6%

본 실험의 식생바이오필터 구동조건에 따른PM₁₀ 저감은 다음 Table 4와 같이 집계되었다. 다중이용시설의 유지기준인 50µg/m³ 미만에 수렴되는 시점을 기준으로 시스템 미가동 조건인 CG는 57분이 소요되었다. 시스템 가동 조건인 EG-A는 42.1% 단축된 33분이 소요되었고, EG-B는 54.4% 단축된 26분으로 집계되었다. 반면, WHO Guideline 기준인 25µg/m³ 미만에 수렴되는 시점을 기준으로 시스템 미가동 조건인 CG는 158분이 소요되었다. 시스템 가동 조건인 EG-A는 11.4% 단축된 140분이 소요되었고, EG-B는 69.6% 단축된 48분으로 집계되었다(Fig. 6).

[11]은 토양기반 식생바이오필터의 PM_{2.5} 저감율이 2~4%에 머물러, 30~40%에 달하는 PM₁₀에 비해 상대적으로 적은 저감율을 기록한 것으로 보고하고 있다. 반면, 수직수경재배형 구조의 식생바이오필터를 사용한 본 연구는 PM_{2.5}에서도 PM₁₀와 유의한 저감효율을 확인할 수 있어, 해당 시스템이 공기역학적 지름이 작은 입자상 오염물질에도 효과적인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 식생바이오필터의 미세먼지 저감성능 정량화를 위해 표준시험방법에 따른 공조 풍량과 상대습도를 시계열 측정하여, 시스템의 효율적 운용에 요구되는 성능 평가방법과 기초자료를 확보할 수 있었다. 국내 다중이용 시설 내 실내대기질 유지기준과 더불어 WHO Guideline을 동시에 검토하여, 해당 시스템을 3,500CMH 수준에서 운용할 때 가장 효율적인 미세먼지 저감이 가능할 것으로 분석되었다.

본 연구의 한계는 식생바이오필터에 식재된 식물 스트레스 평가방안의 부재로 인하여, 해당시스템의 최적 공조 풍량 도출과 기존 설비형 공기정화시스템 간의 경제성 분석이 명확하게 정리되지 못하였다. 이는 후속연구를 통해 보완되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2020학년도 상명대학교 교내연구과제지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

1. Y.J. Lee, Acute mortality and damage cost due to particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Seoul. Yonsei University, 2007.
2. Y.J. Choi, (An) analysis on the characteristics of Fine

- Particulate Matter concentration distribution and relationship between death from Asthma in Seoul, Korea. Master's thesis., Inje University Graduate School, 2016.
3. Y.S. Lee, "A Study on the Psychological Perception Characteristics of Air Purifying Plants According to Visual Perception Preference", *Design Research*, Vol. 5, no. 3, pp.94-104, 2020.
 4. K.J. Kim, et al., "Removal ratio of gaseous toluene and xylene transported from air to root zone via the stem by indoor plants", *Environ Sci Pollut Res Int*, Vol. 23, no. 7, pp.6149-6158, 2016.
 5. K.J. Kwon and B.J. Park, "Particulate Matter Removal of Indoor Plants, *Dieffenbachia amoena* 'Marianne' and *Spathiphyllum* spp. according to Light Intensity", *Journal of Korean institute of landscape architecture*, Vol. 46, no. 2, pp.62-68, 2018.
 6. F. Torpy, et al., "Testing the single-pass VOC removal efficiency of an active green wall using methyl ethyl ketone (MEK)", *Air Quality, Atmosphere & Health*, Vol. 11, no. 2, pp.163-170, 2018.
 7. S.K. Jung, et al., "Plant Growth Responses and Indoor Air Quality Purification in a Wall-typed Botanical Biofiltration System", *Korean journal of plant resources*, Vol. 28, no. 5, pp.665-674, 2015.
 8. T.H. Kim, et al., "Particulate Matter and CO₂ Improvement Effects by Vegetation-based Bio-filters and the Indoor Comfort Index Analysis", *Korean journal of environmental agriculture*, Vol. 37, no. 4, pp.268-276, 2018.
 9. P. Abdo, et al., "Evaluation of air flow through an active green wall biofilter", *Urban Forestry & Urban Greening*, Vol. 41, pp.75-84, 2019.
 10. T.H. Kim, et al., "Analysis of Growth Indicators of Applied Plants by AHU(Air Handling Unit)-linking with Artificial Soil-based Vegetation Bio-filters", *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, Vol. 21, no. 3, pp.99-110, 2018.
 11. C.H. Lee, et al., "Stabilization of Soil Moisture and Improvement of Indoor Air Quality by a Plant-Biofilter Integration System", *Korean journal of horticultural science & technology*, Vol. 33, no. 5, pp.751-762, 2015.
 12. J.J. Kim, et al., "Effect of flow and humidity on indoor deposition of particulate matter", *Environmental pollution*, Vol. 255, no. 2, pp.113263, 2019.
 13. J.G. Ryu, et al., "Removal of fine particulate matter (PM_{2.5}) via atmospheric humidity caused by evapotranspiration", *Environmental pollution (1987)*, Vol. 245, pp.253-259, 2019.
 14. A. Sæbø, et al., "Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces", *Sci Total Environ*, Vol. 427-428, pp.347-354, 2012.
 15. National Institute of Horticultural and Herbal Science Indoor air purification plant for eco-healing, 2014.
 16. SAREK, "SAREK A101-2011 Duct Airflow Measuring Method", 2011.
 17. Korean Standards Association, "KS C 9314 Air purifier", 2019.
 18. K. Kwon and B. Park, "Effects of Indoor Greening Method on Temperature, Relative Humidity and Particulate Matter Concentration", *Journal of Korean institute of landscape architecture*, Vol. 45, no. 4, pp.1-10, 2017.
 19. C.H. Lee, et al., "Stabilizing Soil Moisture and Indoor Air Quality Purification in a Wall-typed Botanical Biofiltration System Controlled by Humidifying Cycle", *Korean journal of horticultural science & technology*, Vol. 33, no. 4, pp.605-617, 2015.
 20. T.H. Kim, et al., "A Pilot Study of Improving the Atmospheric Environment of Classroom for Students' Learning Activities", *Journal of People, Plants, and Environment*, Vol. 24, no. 2, pp.179-194, 2021.

접수일: 2021년 11월 15일, 심사일: 2021년 12월 13일,
 게재확정일: 2021년 12월 14일