

Research Article



CrossMark

Open Access

식생기반 바이오필터의 미세먼지, 이산화탄소 개선효과와 실내쾌적지수 분석

김태한^{1*}, 최부현², 최나현², 장은숙³

¹상명대학교 융합기술대학 환경조경학과, ²상명대학교 일반대학원 환경조경학과, ³농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과

Particulate Matter and CO₂ Improvement Effects by Vegetation-based Bio-filters and the Indoor Comfort Index Analysis

Tae-Han Kim^{1*}, Boo-Hun Choi², Na-Hyun Choi² and Eun-Suk Jang³ (¹Department of Environment and Landscaping, College of Industry, Sangmyung University, Cheonan 31066, Korea, ²Department of Environment and Landscaping, Graduate School, Sangmyung University, Cheonan 31066, Korea, ³Climate Change & Agroecology Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

Received: 1 October 2018/ Revised: 7 November 2018/ Accepted: 15 November 2018

Copyright © 2018 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Tae-Han Kim

<http://orcid.org/0000-0001-8881-8429>

Boo-Hun Choi

<http://orcid.org/0000-0002-0604-8035>

Na-Hyun Choi

<http://orcid.org/0000-0001-7007-2411>

Eun-Suk Jang

<http://orcid.org/0000-0003-2145-1962>

Abstract

BACKGROUND: In the month of January 2018, fine dust alerts and warnings were issued 36 times for PM₁₀ and 81 times for PM_{2.5}. Air quality is becoming a serious issue nation-wide. Although interest in air-purifying plants is growing due to the controversy over the risk of chemical substances of regular air-purifying solutions, industrial spread of the plants has been limited due to their efficiency in air-conditioning perspective.

METHODS AND RESULTS: This study aims to propose a vegetation-based bio-filter system that can assure total indoor air volume for the efficient application of air-purifying plants. In order to evaluate the quantitative performance of the system, time-series analysis was conducted on air-conditioning performance, indoor air

quality, and comfort index improvement effects in a lecture room-style laboratory with 16 persons present in the room. The system provided 4.24 ACH ventilation rate and reduced indoor temperature by 1.6°C and black bulb temperature by 1.0°C. Relative humidity increased by 24.4% and deteriorated comfort index. However, this seemed to be offset by turbulent flow created from the operation of air blowers. While PM₁₀ was reduced by 39.5% to 22.11 μg/m³, CO₂ increased up to 1,329ppm. It is interpreted that released CO₂ could not be processed because light compensation point was not reached. As for the indoor comfort index, PMV was reduced by 83.6 % and PPD was reduced by 47.0% on average, indicating that indoor space in a comfort range could be created by operating vegetation-based bio-filters.

CONCLUSION: The study confirmed that the vegetation-based bio-filter system is effective in lowering indoor temperature and PM₁₀ and has positive effects on creating comfortable indoor space in terms of PMV and PPD.

*Corresponding author: Tae-Han Kim

Phone: +82-41-550-5303; Fax: +82-41-550-5305;

E-mail: taehankim@smu.ac.kr

Key words: AHU (air handling unit), IAQ (indoor air quality), Phytoremediation, PMV (predicted mean vote index), PPD (predicted percentage of dissatisfied)

서 론

2018년 1월 한 달간 미세먼지(PM₁₀) 농도에 대한 주의보 및 경보는 전국적으로 36회, 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도에 대한 주의보 및 경보는 81회가 발령되어, 초미세먼지의 경우 전년 대비 68.8% 증가한 것으로 집계되고 있다. 미세먼지 문제는 1995년 환경 기준(50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 도입과 더불어 다양한 대기 환경 정책수립을 통해 2012년까지 개선되는 추세였으나, 2013년부터 다시 악화, 정체되고 있는 실정이다(Lee, S. H. 2018). 이에 따라 정부는 호흡량이 성인의 3배 수준인 어린이와 노인 등의 민감계층을 위한 실내 미세먼지 기준을 신설하고, 교육시설 인근 미세먼지 측정망을 확충하여 보호기반을 강화하는 정책을 마련하고 있다 (Joint ministry, 2017).

실내 미세먼지는 보다 심각한 건강문제를 유발하며 실외 미세먼지에 비해 강한 독성으로 염증 반응에 취약하다는 연구결과(Long, C. M., et al., 2001)가 보고되고 있다. 이러한 실내공기를 개선하는 방안 중에서 공기정화식물은 일반인들이 상대적으로 안전하게 인식하는 방안의 하나이다. 식물기반의 공기질 개선연구는 VOCs 기반의 가스상 관련연구가 주를 이루고 있으며, 그 유형 또한 Potted-Plants(PPs)위주로 보고되고 있다(Aydogan, A., et al., 2011; Irga, P. I., et al., 2013). 식물에 의한 미세먼지 제거효율에 관한 연구는 벽면녹화와 벽천시스템의 4가지 조합조건에 따른 PM₁, PM₁₀ 제거효과를 구명한 연구 (Kwon, K. J., et al., 2017), 실내식물 디펜바키아와 스파티필럼을 0, 30, 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 의 PPF(photosynthetic photon flux density) 조건에서 PM₁, PM₁₀ 제거효율을 확인한 연구 (Kwon, K. J., et al., 2018) 등이 보고되고 있다. 현재 식물에 의한 미세먼지 제거 메커니즘은 명확히 구명되지 않았으며, 향후 많은 논의가 필요한 상황이다.

또한, 실내공기질은 재실자의 쾌적도와 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 쾌적정도는 열적환경에 기인하며, 정량화 가능한 쾌적지표 (thermal comfort index) 중 다수의 쾌적 반응도를 평균수치로 표현한 예상평균 온열량 (PMV: predicted mean vote index)은 불특정 재실자의 쾌적정도를 평가하는데 적합한 방법으로 활용되고 있다. PMV 기준의 실내공간 내 쾌적지표 평가연구로는 ISO 7730 기준의 PMV 방정식을 적용한 Matlab / Simulink 기반의 PMV 제어 알고리즘으로 오픈 플랜 사무실 공간을 해석한 연구 (Mo P. H., et al., 2008), EnergyPlus 7.0 기반의 에너지해석을 통해 단수 PMV 회귀모델 제어와 Fanger PMV 모델 제어 간의 냉·난방 에너지 사용량을 비교한 연구 (Kim S. H., et al., 2015) 등의 PMV 기반의 실내온열환경 제어에 관련된 연구가 주로 보고되고 있다. 반면, 쾌적정도에 대한 식물의 영향을 다룬 연구로는 단위 PPs 기반 실내식물 8종의 PMV와

PPD를 산출하여, 온열환경 중심의 쾌적정도를 구명한 연구 (Han S. W., et al., 2005)가 제시되었다.

한편으로 공기정화식물의 실내공기질 개선효과를 최적화하기 위해 공조설비와 연계한 바이오필터 연구도 보고되고 있다(Llewellyn et al., 2008; Irga et al., 2017). 해당 유형의 시스템은 주로 벽면녹화의 형태를 지니며, PPs에 비해 높은 식물밀도, 수직배열 및 체적 확보가 가능한 식물생육환경을 제공할 수 있다(Torpy et al., 2018). 이와 관련된 상용화 제품도 출시되고 있지만, 단위 면적당 공기오염원 제거효과와 같은 경제성 부분의 제고가 필요한 상황이다. 일반적으로 바이오필터의 제거효율은 단위시간당 처리 가능한 총풍량과 관련된다. 최대총풍량 확보를 위해 바이오필터의 공조기(AHU: air handling unit) 연계가 고려될 수 있으며, 최근 이와 관련된 식생기반 바이오필터 연구가 진행되고 있다(Kim et al., 2017).

본 연구는 총풍량 처리효율 조절이 가능한 공조시스템연계 바이오필터 목업의 성능평가를 통해 실내공기질 개선을 위한 정화식물의 효율적 사용방안을 제시하고자 한다. 이를 위해, 시스템의 공조적 특성을 해석하고, 미세먼지, 이산화탄소의 실내공기질 개선효과와 대표적인 쾌적지표인 PMV, PPD를 산출하여 식생기반 바이오필터가 실내 쾌적도에 미치는 효과를 구명하고자 한다.

재료 및 방법

실내 쾌적지표: PMV, PPD

실내 재실자의 쾌적정도를 정량적으로 표현하는 쾌적지표로는 작용온도(OT: operative temperature), 유효온도(ET: effective temperature), 수정유효온도 (CET: corrected effective temperature), PMV, PPD 등이 있다. 이중 PMV는 DTU(Danmarks Tekniske Universitet)의 P. O. Fanger 교수에 의해 정의된 대표적인 쾌적지표로서 인간의 온열감을 7점(hot, warm, slightly warm, neutral, slightly cool, cool, cold)으로 분할하여 평가한다. 중립 온열감으로 정의되는 PMV = 0의 조건에서는 통계적으로 재실자의 95%가 열적 만족감을 나타내며, 다수 재실자의 열적 쾌적정도를 표현하는 지표로 활용할 수 있다. 여기서 적용되는 환경조건은 온도, 습도, 기류속도, 평균복사온도, 활동량, 착의량의 총 6가지 인자로 이루어지며, 다음과 같이 정리할 수 있다(ISO 7730: 2005(E)).

$$PMV = \frac{0.303 \cdot \exp(-0.036 \cdot M) + 0.028 \cdot \left\{ \begin{aligned} &(M - W) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - p_a - 0.42 \cdot (M - W) - 58.15] \\ &- 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M(5867 - p_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ &- 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} + t_a) \end{aligned} \right\}}{3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - p_a - 0.42 \cdot (M - W) - 58.15] - 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M(5867 - p_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} + t_a)} \quad (식1)$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \left\{ \begin{aligned} &3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \right\} \quad (식2)$$

$$h_c = \begin{cases} 0.028 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} & \text{for } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} > 12.1 \sqrt{V_{ar}} \\ 12.1 \cdot \sqrt{V_{ar}} & \text{for } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} < 12.1 \sqrt{V_{ar}} \end{cases} \quad (식3)$$



Fig. 1. Vegetation biofilter system and characteristics of fan blower.

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290I_{cl} & \text{for } I_{cl} \leq 0.078m^2 \cdot K/W \\ 1.05 + 0.645I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0.078m^2 \cdot K/W \end{cases} \quad (\text{식4})$$

M is the metabolic rate, in watts per square metre (W/m^2)

W is the effective mechanical power, in watts per square metre (W/m^2)

I_{cl} is the clothing insulation, in square metres kelvin per watt ($m^2 \cdot K/W$)

f_{cl} is the clothing surface area factor

t_a is the air temperature, in degrees Celsius ($^{\circ}C$)

\bar{t}_r is the mean radiant temperature, in degrees Celsius ($^{\circ}C$)

V_{ar} is the relative air velocity, in metres per second (m/s)

P_a is the water vapour particle pressure, in pascals (Pa)

h_c is the convective heat transfer coefficient, in watts per square metre kelvin (W/m^2K)

t_{cl} is the clothing surface temperature, in degrees Celsius ($^{\circ}C$)

여기서, 활동량은 1 metabolic unit (1 met)로 표현하며, $58.2 W/m^2$ 로 환산할 수 있다. 착의량은 1 clothing unit (1 clo)로 표현되며, $0.155 m^2C/W$ 의 환산량으로 정의할 수 있다.

PMV는 동일한 환경에 노출된 대규모 피험자들의 온열감을 평균으로 예측하여 냉·온열 불쾌감을 느끼는 총 인원을 산출하는 방법이지만, 이 평균 내에는 개인의 온열감이 산재하므로 개별적인 불쾌감 산정은 제한적인 방법이다. 반면, PPD는 냉·온열 불쾌감에 대한 피험자 분포의 정량적 예측이 가능

한 지표로서, 해당 국제표준은 열적 불만족감 측정을 위해 PMV에 사용되는 7점 온열감 척도를 공유한다. PMV 산출과 연계하여 PPD는 다음과 같이 정리할 수 있다(ISO 7730: 2005(E)).









$$PPD = 100 - 91 \cdot \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2)$$

식생기반 바이오필터 시스템

본 연구에서 사용된 식생기반 바이오필터 목업은 stand alone형 수직수경재배 형태의 바이오필터 시스템이며, 식생 바이오필터, 후드형 집진구, 덕트 일체형 프레임, 급기부, 순환형 관수 탱크로 구성되어 있다. 총 12개의 바이오필터가 개별 후드형 집진구에 체결되며, 약 $6 m^2$ 의 공기정화면적을 확보하고 있다(Fig. 1). 식생바이오필터는 $492 mm \times 994 mm \times 40 mm$ 의 크기로 프레임 내에 총 3겹의 50 mm 다층형 필터가 삽입된다. 이 필터층에 Hoya carnosa, Schefflera arboricola, Ficus elastica 등 총 331본의 공기정화식물이 식재되었다. 식재된 식물의 생육환경을 제공하기 위해 프레임 상부에 점적 관수파이프가 설치되고, 관수용수는 내부 카본코팅필터 층을 통과하여 근권부에 $55.80 L/min$ 가 공급되었다. 하부로 유출된 관수용수는 가압식 원심 인버터 펌프로 상부 관수파이프로 재공급되는 구조로 설계되었다.

송풍기는 덕트 일체형 프레임 상부에 구비되어 있으며, 정밀한 풍량제어가 가능한 저소음, 고효율 EC 모터(단상/220 V, 1,850 rpm, 0.5 kW)가 적용된 고성능 팬이 사용되었다. 바이오필터 송풍기의 공조성능은 최대 풍량 $2,000 m^3/h$ 이며, 정압 200 Pa까지 운전이 가능하다. 송풍기는 1개당 4개의 바이오필터가 연결되며, 필터 전방 여과풍속 $0.1-0.3 m/s$ 구간에서 $2,160-6,480 m^3/h$ 의 총풍량을 제공할 수 있도록 설계되었다.

Table 1. specification of monitoring system

	Multi-function measuring instrument	Particulate matter	IAQ meters	Turbulence probe
Image				
Model	Testo 480	TSI AM520	Graywolf IQ-610	comfort probe 0628 0143
Range	-100 - +100 hPa	0.001 to 100 mg/m ³	CO ₂ : 0-5,000 ppm VOCs : 5-20,000 ppb	0 - +5 m/s
	Temperature-humidity sensor	Radiation temperature	Air flow probe	PAR probe
Image				
Model	Humidity and temperature probe 0636 9743	The globe thermometer 0602 0743	Thermal air flow measuring head and humidity probe 0635 1543	PAR-BTA
Range	-20 -+70°C / 0 - 100 %RH	0 - +120°C	0 - +20 m/s	0-2,000 μmol/m ² s

실험설계

식생기반 바이오필터 시스템 목업의 환경개선성능을 평가하기 위해 시스템 구동에 따른 실내 미세먼지, 이산화탄소 저감효과 및 실내 쾌적지표를 시계열 모니터링을 통해 도출하였다. 우선 시험환경을 강의실로 설정하고, 시스템에서 발생하는 면풍속 및 토출풍속을 확보하기 위해 SAREK A101-2011: 덕트풍량 측정 방법을 참조하여 바이오필터는 35개, 송풍기는 25개의 측정 지점을 설정하였다.

목업에서 발생하는 면풍속 및 토출풍속은 열선프로브 (Testo 0635 15430, Testo, Lenzkirch, Germany)를 다기능 종합환경 측정기(Testo 480 Testo, Lenzkirch, Germany)와 연계하여 측정하였다.

실내환경평가를 위한 계측요소는 실내공기질과 PMV/PPD 산출을 위해 미세먼지(PM10), CO₂, 흑구온도, 실내기류속도, 온습도로 설정하였다. 시계열 모니터링을 위해 미세먼지를 측정하는 입자상 오염원 측정에는 광산란법(light scattering method) 650 nm LD (laser diode)방식이 적용되었고, 가스상 오염원 측정은 비분산 적외선 (NDIR: non-dispersive infra-red)방식의 CO₂ 센서가 탑재된 모델이 사용되었다. 다음 Table 1과 같이 가스상 오염원 측정기(Graywolf IQ610Xtra), PMV/PPD 및 WBGT 측정세트(Testo 480 probe set), 입자상 오염원 측정기(TSI AM520)가 구비되었고, Fig. 2와 같이 설치되었다.

실험은 2018년 5월 9일 17시에 진행되었으며, 참여 총 16

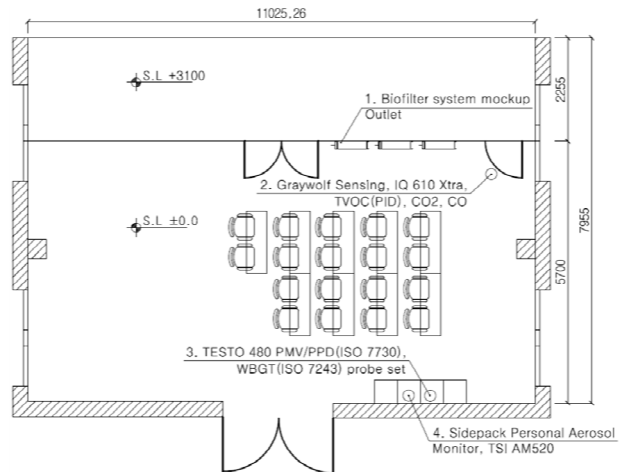


Fig. 2. performance evaluation testing room for vegetation biofilter system.

명의 학생에게 2시간 동안 정적인 활동량 (met=1.0)과 춘절기 일반복장의 착의량 (clo=1.0)이 적용되었다. 시스템 목업의 운전스케줄은 송풍기와 관수부문으로 구분되며, 다음 Table 2와 같다. 관수는 1일 총 4회 4시간 동안 공급되었으며, 송풍기는 1일 총 4회 8시간 동안 작동되었다.

상기 모니터링 설계와 실험환경설정을 통해 다음과 같이 시험이 진행되었다.

Table 2. operation time table of biofilter mockup system

Operation condition	Time (hour)												
	00:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	
	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	
Pump	55.80 L/min	<on>						<on>					
Fan	144.1 W	< on >						< on >					

- a) 시험대상 실내공간의 체적 및 시스템의 면풍속, 토출풍속을 측정하여, 총풍량을 산출한다.
- b) 시험대상지에 입자상·가스상 오염원 측정기, PMV/PPD 측정기를 설치하고, 시스템 목업 구동환경 설정 등 모니터링 인프라를 구축한다.
- c) 시험대상지 내 피험자 재실여부 및 외기 기밀상태 확인 후 시험을 실시한다.
- d) 시험개시 후 1시간을 기점으로 식생기반 바이오필터 시스템 목업의 송풍기를 작동하고, 구동 전후의 PM₁₀, CO₂, 흑구온도, 실내기류속도, 온습도 변화를 모니터링 한다.
- e) 시험 종료 후 PM₁₀, CO₂, 흑구온도, 실내기류속도, 온습도 모니터링 DB를 백업하여 분석한다.
- f) ISO 7730:2005(E) 계산식을 기반으로 PMV, PPD 등의 실내 쾌적지표를 산출한다.

결과 및 고찰

목업 시스템의 총풍량 산출

식생기반 바이오필터 목업은 총 12개의 바이오필터로 구성되어있으며, 상·하단 개별 바이오필터의 면풍속 측정을 위한 35개 측정지점은 Fig. 3, 측정지점의 면풍속은 Fig. 4. (a-b)와 같다. 바이오필터 상단부는 측정오류를 제외하고 최소 0.03 m/s, 최대 0.14 m/s로 계측되어, 면풍속 평균 0.086 m/s, 697.19 m³/h의 유입 총풍량이 확인되었다. 바이오필터 하단부의 경우 측정오류는 발생하지 않았고, 최소 0.00 m/s, 최대 0.16 m/s로 계측되어, 면풍속 평균 0.066 m/s, 538.77 m³/h의 유입 총풍량이 확인되었다. 바이오필터 상·하단부로 유입된 풍량은 총 1,235.96 m³/h가 기록되었다.

반면, 송풍구의 면풍속은 25개 측정지점의 면풍속 빈도와 평균을 다음 Fig. 4. (c)와 같이 정리하였다. 송풍구는 측정오류를 제외하고 최소 0.06 m/s, 최대 2.14 m/s로 계측되었으며, 면풍속 평균 0.69 m/s, 1,411.22 m³/h의 유출 총풍량을 기록하였다. 실험 대상공간의 체적은 332.73 m³로 4.24 ACH의 환기율을 확보할 수 있었다.

실내환경변화 분석

식생기반 바이오필터 시스템 목업으로 인한 실내환경변화는 흑구온도, 실내기류속도, 온습도의 시계열 모니터링을 통

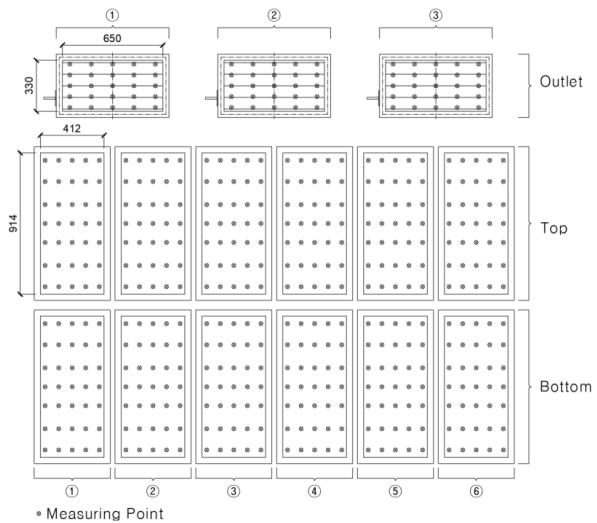


Fig. 3. measuring point of face velocity on vegetation biofilter system.

해 다음 Fig. 5(a)와 같이 분석하였다. 실험 개시 후 실내온도는 최대 24.7℃를 기록하였으나, 목업 구동으로 인하여 최저 23.1℃, 1.6℃가 저감되었다. 흑구온도는 실험 개시 후 최대 24.8℃에서 목업 구동으로 최소 23.8℃, 1.0℃가 저감되었다. 상대습도는 실험 개시 후 최소 57.6%에서 목업 구동으로 최대 82.0%까지 상승하여, 24.4% 증가하였다.

송풍기 구동에 따라 발생하는 실내기류는 상기 실내환경 인자의 물리적 변화요인으로 작용하며, 상기 Fig. 5(b)와 같이 정리하였다.

Han S. W., et al., (2005)은 8종의 식물의 열환경 개선효과를 측정하기위해 인공환경조절실을 조성하여 실험하였다. 대상식생 중에서 *Spathiphyllum cannifolium*이 식재 유무에 따라 4.9℃의 열환경 개선 효과가 발생하였다. 해당 연구는 열적변수를 중점으로 분석하여, 열쾌적성의 주요인자인 상대습도와 난류 부문에 대한 해석이 제한적이었다. 본 연구에서는 시스템 작동 전·후의 상대습도와 난류 분석을 통해 재실자의 실내쾌적도 변화를 보다 객관적으로 예측할 수 있었다. 특히, 상대습도는 식물의 증산작용 등에 의해 증가하며, 쾌적 지표에 부정적인 영향을 미치게 된다. Im Y. B., et al., (2010)은 하절기 남향인 사무공간의 창호 전면에 식물을 배치하여 300-350 W/m의 일사부하와 11℃의 흑구온도의 저감효과를 확인하고, 식물도입이 하절기 열적 쾌적성 증진에

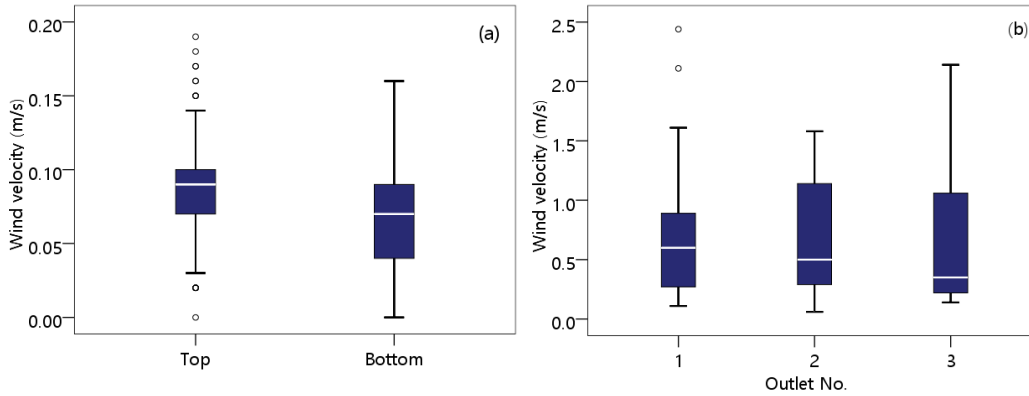


Fig. 4. Face velocity and air flow rate on vegetation biofilter (a), top part and bottom part (n=210); (b), outlet (n=25).

긍정적이라고 분석하였다. 반면, 상대습도는 20% 증가한 57.1-71.9%를 기록하여 식물도입에 따른 쾌적도 증진의 부정적 요인으로 해석하고 있다. Son K. C., et al., (1998)은 식물배치로 인한 열환경조절은 미비했으나, 실내공간의 2.4%에 해당하는 식물조성으로 인하여 3-5%의 상대습도 조절효과를 구명하였으며, 이는 계절과 무관한 동일효과로 보고하고 있다. 본 연구에서는 식생기반 바이오필터 목업 시스템에 총 6 m²의 입면녹화면적이 조성되고, 송풍기 구동에 의해 습윤공기가 공급되어 작동 전 상대습도가 평균 59.73%에서 79.86%로 증가하였다. 이는 춘절기 상대습도 쾌적범위(50%, 환경부·국립환경과학원, 주택 실내공기질 관리를 위한 매뉴얼, 2012)를 59.7% 상회하여 이에 대한 개선이 요구되며, 실내기류는 공간의 열적대류에 기여하여 상대습도로 인한 쾌적도 저감요인을 상쇄할 수 있게 된다. 상단 Fig. 5는 시스템 작동 후 평균 기온 24.48°C조건으로 PPD 5%와 PPD 35%의 쾌적범위에서 실내기류 0.09-1.25 m/s가 형성되는 것을 확인할 수 있다.

실내공기질 분석

현재 다중이용시설의 실내공기질 유지기준에서 미세먼지 (PM₁₀)은 일반영업시설에 준하여 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 이산화탄소(CO₂)는 공간유형 구분없이 1,000 ppm 이하로 규정하고 있다(ministry of environment, 2018). 본 연구에서는 실험 개시 후 PM₁₀ 평균 농도는 36.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 유지기준의 24.36%에 해당하는 청정한 실내공기질로 해석할 수 있지만, WHO에서 지정하고 있는 공기질 가이드라인(AQG: air quality guideline) 연간기준 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 기준 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이를 만족하는 수준이었다(WHO, 2015). 식생기반 바이오필터 목업 시스템을 가동한 후에는 평균 농도 22.11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 기록하였고, 최저 농도는 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 지속적인 감소가 예상되었다(Fig. 6).

Pettit T., et al., (2017)은 7종의 공기정화식물이 적용된 바이오필터의 SPRE (single pass removal efficiency)를 측정하여, *Nephrolepis exaltata bostoniensis*와 같은 양치식물이 모든 입경의 미세먼지에 대한 제거효율(PM_{0.3-0.5}: 45.78%, PM₅₋₁₀: 92.46%)이 가장 높은 것으로 확인하였다. 또한, 연구진은 이에 대한 원인으로 바이오필터의 압력강하

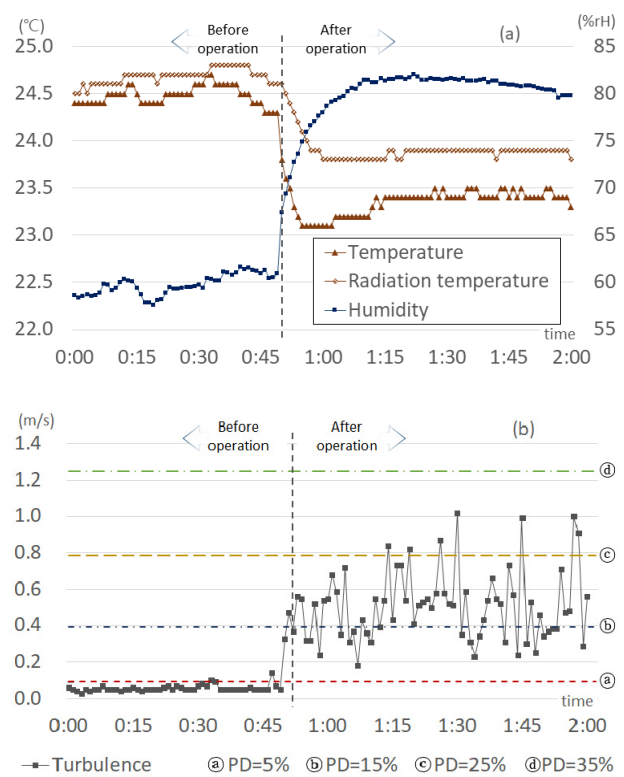


Fig. 5. indoor environment change by vegetation biofilter system. (a), temperature, radiation temperature and humidity; (b), turbulence.

및 근권부 구조가 바이오필터의 미세먼지 SPRE에 영향을 미치는 것으로 해석하였다. 본 연구에서는 하단의 바이오필터 면풍속이 상단에 비해 불연속적이며 22.7%가 낮게 기록되었는데, 이는 하단 적용식생의 상부와 근권부 생육상태가 상부에 비해 양호하여 발생한 것으로 이해된다. Kwon, K. J., et al., (2017)은 벽면녹화 형태의 바이오필터에 적용되는 식물 용적에 따라 실내온도와 PM₁, PM₁₀의 저감효과가 큰 것으로 보고하고 있다. 또한, 상대습도가 높을수록 PM₁, PM₁₀이 보다 빨리 제거되며, 벽면녹화 2개소, 벽천 1개소가 통합된 시스템에서 PM₁은 17.3-28.9%, PM₁₀은 9.2-14.8%의 잔존비

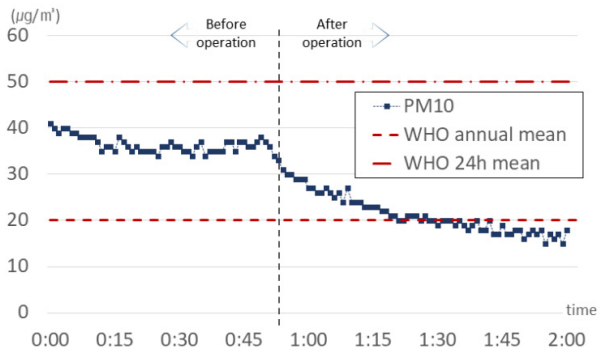


Fig.6. PM10 monitoring in testing room.

율이 기록되었다고 보고하고 있다. 다만, 오염원 초기농도가 제시되지 않아 현실적 저감여부 확인에 제한적인 것으로 이해된다. 본 연구는 수직수경재배형태인 식생기반 바이오필터의 습윤한 다층필터부에서 높은 입자성 오염원 제거효율을 기록한 것으로 판단된다. 또한, 예상되는 재실자 활동으로 자연발생되는 PM₁₀에 대한 저감효과를 확인하였으며, 시스템 작동 전 최고점 대비 39.5%의 제거효율을 기록하여 미세먼지의 실질적 저감량을 제시할 수 있었다.

반면, 실험 전 945 ppm에서 시작된 CO₂는 1206 ppm까지 증가하고, 식생기반 바이오필터 목업시스템 가동 후 20분까지 1,072 ppm으로 하강한 후 최대 1,329 ppm까지 지속적으로 농도가 상승하였다(Fig. 7). Park S. A., et al., (2010)은 실내 이용도가 높은 8종의 식물을 대상으로 CO₂ 농도별 광합성률이 증가하는 PPFd 영역을 규명하였다. 저광도 영역(PPFD: 0- 100 µmol/m²s)에서는 광도가 높아질수록 모든 종의 광합성률이 증가한 반면, 고광도 영역(PPFD: 200-600 µmol/m²s)에서는 특정 지점부터 추가적인 광합성률 증가가 없었다고 기술했다. 여기서 식물 호흡에 의해 CO₂ 배출량과 흡수량이 동일해지는 광보상점은 중요한 물리적 환경요인이며, PPFd를 광보상점에서 광포화점까지 유지해주는 것이 CO₂ 농도 저감에 필수적인 요인으로 작용한다.

본 연구에서 총 12개의 바이오필터 입면의 PPFd를 목업 가동시점에 측정한 결과, 상단의 PPFd는 평균 13.28 µmol/m²s, 하단의 PPFd는 평균 12.17 µmol/m²s를 기록하였다. 따라서, 광합성광량자속밀도를 의미하는 PPFd가 상·하단 모두 광보상점에 도달하지 못한 것으로 판단되며, 이로인하여 광합성에 사용되는 CO₂ 보다 호흡으로 방출되는 CO₂가 많아 실험기간 동안 CO₂의 농도가 지속적으로 증가한 것으로 해석된다.

실내쾌적지수 분석

ISO 7730:2005(E)의 PMV 계산식에 의해 쾌적지수를 산출한 결과, 같이 실험 개시 후 평균 0.499를 기록하여, 실험실내 PMV는 쾌적범위(-0.5~+0.5) 상단의 고온 불쾌적 경계에 수렴하는 것으로 확인되었다(Fig. 8(a)). 실험 50분 경과하여 식생기반 바이오필터 목업 시스템 구동 후에는 PMV가 평균

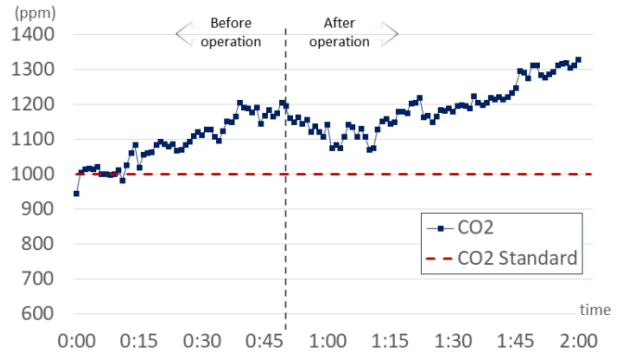


Fig. 7. CO₂ computation in testing room.

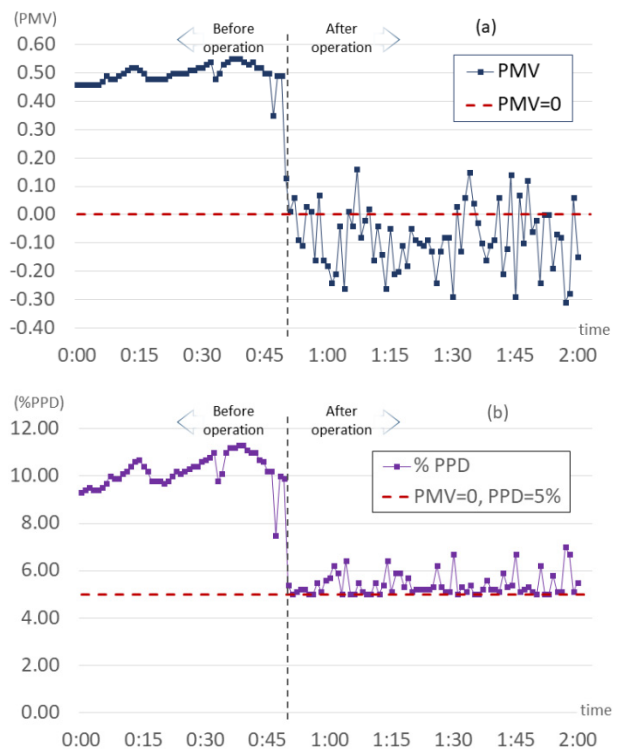


Fig. 8. Measuring Indoor Thermal Environment of Testing Room. (a), PMV; (b), PPD.

-0.082로 유지되고, 0에 수렴하는 쾌적한 실내환경이 조성된 것으로 해석되었다.

PPD는 PMV가 0인 경우에 5%가 기록되는데, 실험개시 후 평균 10.21%를 보여 불만족 경계범위에 실내환경이 조성된 것으로 판단되었다(Fig. 8(b)). Han 등(2005)은 실험에 사용된 8종의 모든 식재공간에서의 PPD가 10%를 넘지 않아 식재공간조성을 통해 실내공간의 쾌적도 유지가 가능한 것으로 해석하였다. 본 연구에서도 식생기반 바이오필터 목업을 구동하기 전 10%를 상회하던 PPD가 시스템 구동을 통해 바로 5.40%로 저감되고, 평균 47.0% 감소된 5.41%에 수렴하여 높은 쾌적범위의 실내공간조성이 가능한 것으로 판단되었다.

요 약

본 연구는 일반인에게 안전한 실내공기질 개선수단으로 인식되는 공기정화식물의 효율적 적용을 위해 실내공조에 요구되는 총풍량 확보가 가능한 식생기반 바이오필터 시스템을 제안하고자 했다. 시스템의 정량적 성능평가는 강의실형태의 실험실 체적 332.73 m³ 내 16명의 재실자 조건에서 목업단위 시스템의 공조 성능, 실내공기질 및 쾌적지표 개선효과에 대한 시계열 분석으로 진행되었다.

우선, 시스템 구동을 통해 총 1,411.22 m³/h의 유출 총풍량을 확보하여, 4.24 ACH의 환기율을 제공할 수 있었다. 실내온도는 1.6°C, 흑구온도는 1.0°C 감소가 확인되었으며, 상대습도는 24.4% 상승한 최대 82.0%까지 증가하였다. 상대습도 급증에 따른 쾌적도 감소현상은 송풍기 구동에 따라 발생하는 실내기류로 상쇄되는 것으로 판단된다. 또한, 시스템 구동에 따른 공기질 개선지표 중 PM₁₀은 39.5% 감소한 평균 22.11 µg/m³을 기록하였다. 반면, CO₂는 최대 1,329 ppm까지 지속적으로 농도가 상승했는데, 이는 광도조건이 광보상점을 만족하지 못해 적용 식물과 재실자에서 방출되는 CO₂가 처리되지 못한 것으로 해석된다. 실내쾌적지표의 경우 PMV는 평균 83.6% 감소된 -0.082, PPD는 평균 47.0% 감소된 5.41%에 수렴하여 식생기반 바이오필터 구동에 의해 높은 쾌적범위의 실내공간조성이 가능한 것으로 판단되었다. 본 연구의 한계는 소수 참여인원과 단기간 실험으로 인하여 시스템의 성능 규명이 제한적인 부분이었으며, 보다 장기간의 실험을 통해 바이오필터에 도입된 식생의 생육상태에 따른 압력손실 변화, 미세먼지 저감에 대한 구체적인 메커니즘 규명 등의 후속연구가 진행되어야 할 것이다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. PJ01391001)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Aydogan, A., & Montoya, L. D. (2011). Formaldehyde removal by common indoor plant species and various growing media. *Atmos Environ*, 45(16), 2675-2682.
- Han, S. W., & Sohn, J. Y. (2005). Influence of indoor thermal comfort on foliage plants. *Journal of the Korean institute of interior landscape architecture*, 7(1), 9-16.
- Im, Y. B., Jung, G. J., Seo, M. H., & Oh, G. S. (2010). Characteristics of Indoor Solar Irradiance and Temperature with Potted Plants Positioned Nearby Window in Room during Summer day, *The Regional Association of Architectural Institute of Korea*, 12(4), 253-260.
- Irga, P. J., Torpy, F. R., & Burchett, M. D. (2013). Can hydroculture be used to enhance the performance of indoor plants for the removal of air pollutants? *Atmospheric Environment*, 77, 267-271.
- Irga, P. J., Paull, N. J., Abdo, P., & Torpy, F. R. (2017). An assessment of the atmospheric particle removal efficiency of an inroom botanical biofilter system, *Building and Environment*, 115, 281-290.
- Joint ministry (2017) Comprehensive plan for particle matter control.
- Kim, S. H., Sung, J. Y., & Chung, K. S. (2015). A Study on the application of simulation-based simplified PMV regression model for indoor thermal comfort control. *Korean Society for Energy*, 24(1), 69-77.
- Kim, T. H., Lee, S. D., & Park, S. E., (2017). A study on pressure loss by the material of AHU-linked vegetation Bio-filter and its operational energy efficiency, *Journal of People Plants and Environment*, 20(5), 485-494.
- Kwon, K. J., & Park, B. J. (2017). Effects of indoor greening method on temperature, relative humidity and particulate matter concentration, *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 45(4), 1-10.
- Kwon, K. J., & Park, B. J. (2018). Particulate matter removal of indoor plants, *dieffenbachia amoena* 'marianne' and *spathiphyllum* spp. according to light intensity, *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 46(2), 62-68.
- Llewellyn, D., Darlington, A., van Ras, N., Kraakman, B., & Dixon, M. (2008). A hybridized membrane- botanical biofilter for improving air quality in occupied spaces, 37h COSPAR Scientific Assembly, 13-20 July, Montreal, 2008, 1813.
- Long, C. M., Suh, H. H., Kobzik, L., Catalano, P. J., Ning, Y. Y., & Koutarakis, P. (2001). A pilot investigation of the relative toxicity of indoor and outdoor fine particles: in vitro effects of endotoxin and other particulate properties. *Environ Health Perspect*, 109(10), 1019-1026.
- Mo, P. H., Kang, D. H., Choi, D. H., Sun, J. M., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2008). Study on thermal comfort and energy consumption characteristic in PMV controlled space. *Korea Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 2008(10), 70-73.
- Park, S. A., Kim, M. G., Yoo, M. H., Oh, M. M., & Son, K. C. (2010). Plant Physiological Responses in Relation

- to Temperature, Light Intensity, and CO₂ Concentration for the Selection of Efficient Foliage Plants on the Improvement of Indoor Environment. *Korean journal of horticultural science & technology*, 28(6), 928-936.
- Park, S. J., Kim, J. H., Joe, G. S., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2015). Analysis of Size-resolved Indoor and Outdoor Particle Sources to Indoor Particles in a Child-care Center. *The Architectural Institute of Korea*, 31(12), 215-222.
- Pettit, T., Irga, P. J., Abdo, P., & Torpy, F. R. (2017). Do the plants in functional green walls contribute to their ability to filter particulate matter? *Building and Environment*, 125, 299-307.
- Son, K. C., Kim, M. K., Park, S. H., Chang, M. K. (1998). Effect of Foliage Plant *Pachira aquatica* on the Change of Indoor Temperature and Humidity. *Korean journal of horticultural science & technology*, 16(3) 377-380.
- Torpy, F., Clements, N., Pollinger, M., Dengel, A., Mulvihill, I., He, C., & Irga, P., (2018) Testing the single-pass VOC removal efficiency of an active green wall using methyl ethyl ketone (MEK), *Air Quality, Atmosphere & Health*, 11(2), 163-170.