

## Research Report

## 식물-바이오필터에 의한 토양수분 안정화 및 실내 공기질 향상

이창희<sup>1,2\*</sup>, 최 봄<sup>1</sup>, 천만영<sup>3</sup><sup>1</sup>환경대학교 원예학과<sup>2</sup>국제농업기술정보연구소<sup>3</sup>환경대학교 환경공학과

## Stabilization of Soil Moisture and Improvement of Indoor Air Quality by a Plant-Biofilter Integration System

Chang Hee Lee<sup>1,2\*</sup>, Bom Choi<sup>1</sup>, and Man Young Chun<sup>3</sup><sup>1</sup>Dept. of Horticulture, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea<sup>2</sup>Research Institute of International Agriculture, Technology, and Information, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea<sup>3</sup>Dept. of Environmental Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

**Abstract:** This study was performed to investigate the stability of soil moisture in controlling air ventilation rate within a horizontal biofilter, and to compare removal efficiency (RE) of indoor air pollutants including fine dust, volatile organic compounds (VOCs), and formaldehyde (HCHO), depending on whether *Diffenbachias* (*Diffenbachia amoena*) were planted in the biofilter. The relative humidity, air temperature, and soil moisture contents showed stable values, regardless of the presence of *D. amoena*, and the plants grew normally in the biofilter. REs for number of fine dust particles (PM10 and PM2.5) within the biofilter filled with only soil were at least 30% and 2%, respectively. REs for number of fine dust particles (PM10 and PM2.5) within the biofilter including the plants were above 40% and 4%, respectively. RE for fine dust (PM10) weight was above 4% and 20%, respectively, in the biofilter containing only soil or soil together with plants. In the case of the biofilter filled with only soil, REs for xylene, ethylbenzene, toluene or total VOC (T-VOC) were each more than 63%; however, REs for benzene and formaldehyde (HCHO) were above 22% and 38%, respectively. In the biofilter with the plants, REs for xylene, ethylbenzene, toluene, and T-VOC were each above 72%, and REs for benzene and HCHO were above 39%. Thus, RE of the biofilter integrated with plants was found to be higher for volatile organic compounds than for fine dust. Hence, the biofilter was very effective for indoor air quality improvement and the effect was higher when integrated with plants.

**Additional key words:** air ventilation rate, *Diffenbachia amoena*, fine dust, green interior, volatile organic compounds

## 서 언

실내 공기 오염이 심각해짐에 따라 실내공기질(indoor air quality, IAQ)은 현대인의 건강보호 측면에서 중요성이 커지고 있다. 이에 환경부는 다중이용시설의 실내 공기질을 알맞게 유지하고 관리하여 그 시설을 이용하는 국민의 건강을 보호하고 환경상의 피해를 예방함을 목적으로 '실내공기질

법'을 시행하고 있다(MOE, 2014). 실내 공기질 문제를 해결하기 위해 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs), 포름알데히드(HCHO) 등 가스상 오염원과 미세먼지의 입자상 오염원을 소공간에서는 공기청정기를 사용하고, 상업용 공간의 경우에는 중앙 공조장치를 적용하여 제어하고 있다(Bea and Ji, 2013). 또 다른 방법으로는 2차 오염원 발생이 없고 환경적으로 안전한 미생물을 이용해 오염

\*Corresponding author: changheelee@hknu.ac.kr

※ Received 24 February 2015; Revised 16 April 2015; Accepted 22 May 2015. 본 연구는 농촌진흥청 농업과학기술개발 공동연구사업(과제번호: PJ008495022014)의 지원에 의해 이루어진 것이며, 본 연구 과정에 열심히 참여한 환경대학교 원예학과 김유나 학생에게도 감사에 뜻을 전한다.

© 2015 Korean Society for Horticultural Science

물질의 흡착 및 흡수, 분해 등 생물학적으로 실내공기질을 제어하는 바이오필터(biofilter) 기술이 다양하게 개발되고 있다(Delhoméie and Heitz, 2005). 또한 실내식물은 사람들이 가장 일반적으로 실내 공기정화를 위해 사용하는 방법으로 실내 공기오염 물질인 HCHO, VOCs 등을 제거하는 효과가 있는 것으로 보고되고 있다(Hong et al., 2005; Kil et al., 2008a; Park et al., 2010). 자연물이 주는 심리적 회복 효과에 대한 이론 중 하나인 ‘주의회복이론’에 근거하여 실내 녹화된 사무실이 생산성에 미치는 영향을 연구한 결과 사무공간의 만족도, 공기의 질에 대한 지각, 업무 집중도 등이 높은 수치로 나타나 업무의 질이 향상되고 생산성이 15% 향상되는 것으로 나타났다(Nieuwenhuis et al., 2014). 이로써 공간의 특성을 고려한 실내 녹화의 도입이 활성화되어야 한다.

실내식물의 오염물질 제거는 지상부와 지하부 모두에서 일어나는데 지상부를 제거하였을 경우도 제거율이 높게 나타나 근권부 미생물이 큰 기여를 한 것으로 보고되었다(Kil et al., 2008b; Kim et al., 2008). 또한 식물의 뿌리에 의한 흡착 또는 토양입자 및 토양 박테리아에 의해서도 흡수 및 흡착되고 토양 박테리아는 병원균을 멸균시키는 것으로 알려져 있다(Lee, 2006). 토양미생물인 *Pseudomonas putida* F1을 토양에 주입한 바이오필터가 토양 중의 toluene을 90% 제거할 수 있다고 하였으며(Sohn et al., 2004), *Phanerochaete chrysosporium*는 BTX(benzene, toluene, xylene)를 분해하고(Oh et al., 1998), *Bacillus* sp.와 *Pseudomonas* sp.는 TEX(toluene, ethylbenzene, xylene)를 분해한다고 보고하였다(Veiga et al., 1999). Jang et al.(2006)은 *Pseudomona* ssp. TDB4균주를 통해 VOCs의 분해능을 평가한 결과 단일 기질인 경우 toluene, benzene, styrene, *p*-xylene 순으로 분해능이 뛰어나다고 보고하였다. 이처럼 토양은 오염물질 제거가 가능한 다양한 미생물을 가지고 있으며 안전하고 낮은 비용으로 악취제거용 바이오필터에 흔히 이용되고 있다(Swanson and Loehr, 1997).

최근 실내 녹화기술로 식물에 의한 공기정화가 가능한 ‘Bio Green Wall System’과 식물을 이용한 실내공기질 개선용 바이오필터의 생물학적 방법을 통한 공기정화장치가 연구되고 있으나(Bang et al., 2013; Lee and Joe, 2008), 실내의 공간과 인원에 따라 용량 설계에 근거하여 환기량을 조절하면서 실내공기질을 향상시킬 수 있는 식물 녹화와 바이오필터를 통합한 시스템에 대한 연구는 아직 초기 단계이다. 식물과 결합한 바이오필터 시스템 개발 시 공기정화량

에 대한 용량 설계에 중요한 영향을 주는 압력손실량과 토양수분 함량과 같은 여러 가지 요인이 있으며, 바이오필터의 토양 내 균일한 분포를 갖는 토양수분과 압력손실량을 유지하여 정상적인 식물 생장을 조장하고, 특히 바람에 의한 근권부 스트레스가 없도록 풍속을 적절히 조절해야 한다고 하였다(Choi et al., 2014; Kennes and Thalasso, 1998; Ottengraf, 1986). 따라서 본 연구는 제작된 평면형 바이오필터에 실내 식물인 디펜바키아를 식재하고 토양수분 안정화에 따른 정상적인 식물 성장 여부와 식물 식재 유무에 따른 바이오필터의 실질적인 공기정화 효율을 알아보려고 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 평면형 바이오필터 시스템의 제작

토양수분 안정화 정도와 식물 생육 및 실내공기질 개선 효과를 알아보기 위하여 식재용 바이오필터(Fig. 1A)는 두께 10mm의 투명 아크릴을 사용하여 폭과 길이 각 500mm, 높이 700mm로 제작하고, 이 중 하부 공기 주입부와 상부의 식재 토양층(담체층)의 높이는 각 200mm와 500mm로 두었다. 상부의 토양이 하부로 흘러내리는 것을 방지하기 위해 10mm두께의 투명아크릴 유공판( $\varnothing 10\text{mm} \times 576\text{구}$ )을 제작하여 하부와 상부를 격리하고 유공판 위에 5mm 두께의 다목적 수세미[녹색, (주)한국쓰리엠]를 설치하였다. 가슴장치는 상부의 원통형 흡수탑(Fig. 1B)과 하부의 정사면체 수조(Fig. 1C) 그리고 물 펌프로 제작하였으며, 상부의 흡수탑은 두께 5mm의 투명아크릴을 사용하여 내경 200mm, 높이 1,450mm로 제작하였고, 흡수탑의 위쪽(높이 350mm)은 물이 직접 바이오필터로 들어가는 것을 방지하기 위한 디미스터(demister)와 그 아래에 물분사 노즐(nozzle)을 장착하였다. 아래 1,100mm의 공간은 물과 공기의 혼합시 표면적을 넓히기 위한 충전재(pall ring,  $\varnothing 25.4 \times H25.4\text{mm}$ , 재질 PP, 조일환경, 서울, 한국)로 채우고 아래에 유공판으로 막아 하부의 수조로 공기와 물이 이동할 수 있도록 하였다. 흡수탑 하부의 물탱크(Fig. 1C)는 두께 10mm의 투명아크릴을 사용하여 길이, 폭, 높이를 모두 500mm로 된 정육면체 수조로 제작하고, 수조 아랫부분에 정량펌프[*metering pump*; PH-100WM, 신한일전기(주), 부천, 한국; 최대양수량:  $18\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ , 압상높이: 12m, 300W; Fig. 1D]를 연결하여 수조의 물이 흡수탑 상층부의 노즐로 이동하여 충전재가 들어있는 아래로 분사(물분사량  $14.4\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )되도록 하였다. 송풍기(ring blower;

HRB-201, 황해전기, 인천, 한국; 최대송풍량  $2.9\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ , 풍압 1,200mmAq, Fig. 1E)는 흡입구를 통해 실내공기를 빨아들인 후, 송풍기의 토출구에서 흡수탑 하부까지 송풍관 ( $\varnothing 35\text{mm}$ )으로 연결하여 흡수탑 상층부 노즐에서 분사되는 물과 아래쪽에서 올라오는 송풍된 공기가 만나게 하여 공기를 가습하고, 가습된 공기는 흡수탑 상층부를 통해 바이오필터 용기의 하부에 있는 공기 주입부로 들어가서 위쪽에 배치된 토양 식재층과 식물을 통과하여 정화된 공기가 실내로 배출되는 방식으로 설계하였다. 소비전력량 감소를 위하여 하나의 정량펌프에 두 대의 평면형 바이오필터를 연결하여 작동하도록 하였고, 송풍기에 인버터 장치(rpm controller, 인성테크, 용인, 한국)를 전원과 연결하고 토출구에 중간 밸브와 레버를 부착하여 흡수탑으로 들어가는 풍속을 조절하였다. 본 연구에서 제작된 평면형 바이오필터 화분의 기본 원리는 ‘바이오필터화분 수분공급장치’로 2013년 특허 출원(2013-0049272)하여 2014년에 특허 등록하였다(Patent serial

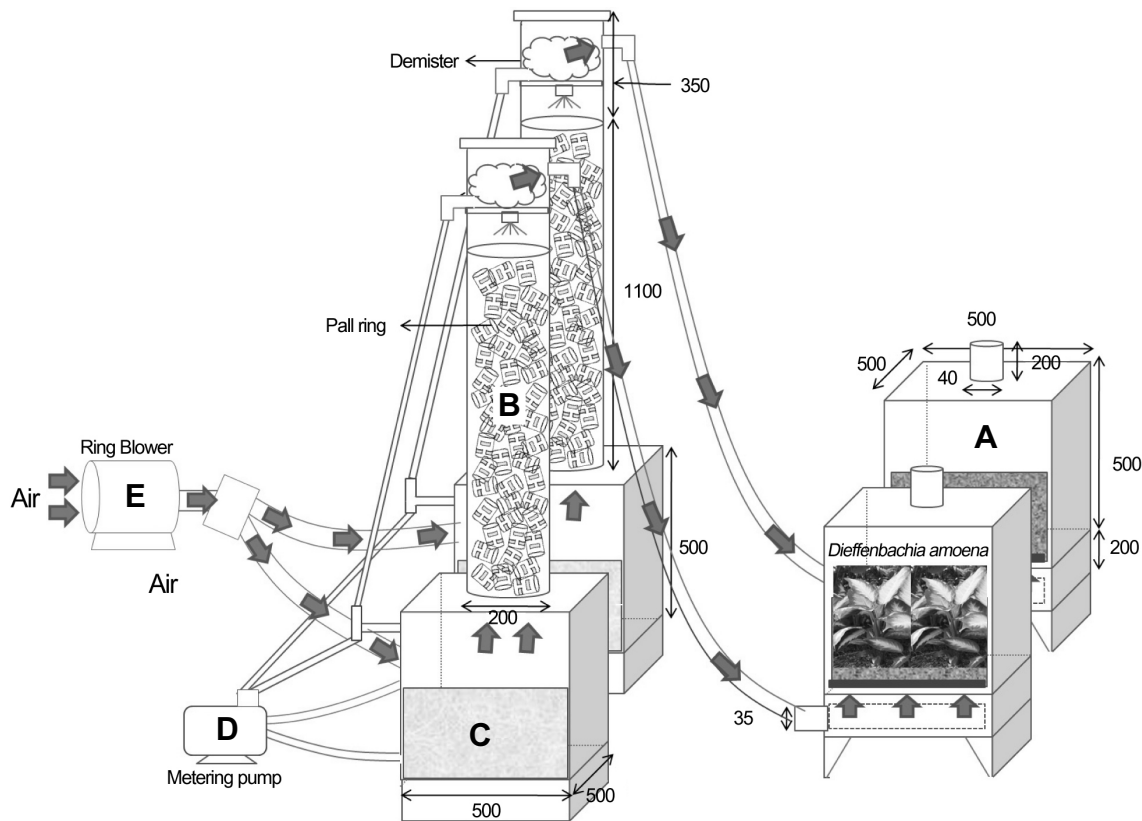
No. 10-1418679; Chun and Lee, 2014).

**평면형 바이오필터의 풍속 조절**

바이오필터의 풍속 조절은 바이오필터 상부에 밀폐가 가능한 뚜껑(Fig. 1A)을 제작하고 뚜껑 가운데 원통형의 토출구(두께 5mm의 투명아크릴 재질, 내경 40mm, 높이 200mm)를 부착하여 디지털풍속계[TPI556, (주)서미트, 서울, 한국]로 측정된 풍속(wind speed:  $v$ )을 식물 식재층의 표면적( $2,500\text{cm}^2$ ) 대비 원통형의 토출구 표면적( $12.56\text{cm}^2$ )으로 나

**Table 1.** Physical and environmental parameters of air flow characteristics.

Wind speed ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	3
Air-liquid ration ( $\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$ ) <sup>z</sup>	32.0
Air residence time (s) <sup>z</sup>	6.7
Air ventilation rate ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ) <sup>z</sup>	0.45



**Fig. 1.** Diagram of the horizontal biofilter system used in this experiment. The movement path of the internalized indoor air is as follows: indoor air sucked into the ring blower (E) → air is passed through the upper space of the water tank (C) → air is passed through the pall ring in moving upward in the cylindrical humidifier and then converted to humidified air in contact with the water to fall (B) → the humidified air is passed through the demister into the lower space of the biofilter and flows out to the upper surface of the soil in the biofilter (A).

누어 실제 풍속을 환산하여  $3\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 이 되도록 조정하였고, 이에 따른 기액비, 공기체류시간, 공기정화량의 산출값은 선행 연구(Choi et al., 2014)의 결과와 같게 하였다(Table 1).

### 평면형 바이오필터 내 식물 생육 평가

평면형 바이오필터 내 식물 생육 평가와 토양수분 안정성을 확인하기 위해 토양층의 조성은 화훼용 배양토[한판승, (주)삼화그린텍, 청양, 한국], 피트모스, 버미큘라이트의 혼합 토양(한판승:피트모스:버미큘라이트 = 2:1:1, v/v/v)을 건조시켜 물을 혼합하여 초기 토양 수분함량을 24.5%로 조절 한 후 두 대의 바이오필터(Fig. 1A)에 각각 토심 20cm로 채워 넣었다.

초기 토양수분함량을 조절한 바이오필터에 디펜바키아(*Dieffenbachia amoena* 'Marianne')를 한 대의 바이오필터에만 9개체를 식재하여 8월 20일부터 10월 2일 까지 총 42일간 키웠고, 생장특성으로 초장, 초폭, 엽수, 체적, 생체중, 건물중을 조사하였다. 바이오필터 내 디펜바키아 생육 시 광량은 LED등(20 red emitting diodes + 48 white emitting diodes, Plantium, Suwon, Korea)를 이용하여 PPFD  $105.2 \pm 18.8\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 조절하여 16시간 명기와 8시간의 암기를 주었으며, 광도 측정은 바이오필터 내 식물 상단부 높이의 세 군데 위치에서 각 5반복으로 광도측정기(Quantum light sensor, Spectrum Technologies, Inc., IL, USA)를 사용하였다. 식재 전과 식재 42일 후의 생육조사 자료의 두 처리 간 평균 차이는 T-test에 의하여 유의성을 검정하였고, 통계 분석은 SAS 프로그램(Statistical Analysis System, V9.1, Cary, NC, USA)을 이용하였다.

### 평면형 바이오필터의 토양수분, 온도, 상대습도 측정

토양수분함량은 자료수집장치(data logger; Mini logger MSTL, STA코퍼레이션, 안양, 한국)에 토양수분측정센서(moisture sensor; ECH2O, EC-5, Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA)를 연결하여 30분 간격으로 실험 기간 동안 각 바이오필터 세 부분의 토양표면에서 깊이 10cm 지점에 45도 각도로 사선으로 꽂아 측정하였다. 식재부의 상대습도와 온도는 온습도센서(temperature and humidity sensor; STL-STH, STA코퍼레이션, 안양, 한국)를 이용하여 자료수집장치에 30분 간격으로 식물체 상단부의 10cm 높이에서 측정하였다. 압력손실량(pressure drop,  $\text{mmH}_2\text{O}$ )은 유량계(U-manometer; M400W/M, DWYER Instruments Inc., Michigan, USA)를 사용하여 바이오필터의 공기가 토양을 통과하기 전

과 통과한 후의 두 출구에 실리콘 튜브를 유량계에 연결하여 수두의 차로 측정하였다.

### 평면형 바이오필터의 미세먼지 제거율 측정

평면형 바이오필터의 미세먼지 제거 능력을 조사하기 위하여 미세먼지(PM10) 측정기(air quality monitor, 3432, KANOMAX, Tokyo, Japan)와 초미세먼지(PM2.5) 측정기(fine dust measuring machine, GT-521S, Met One Instruments, Grants Pass, OR, USA)를 사용하여 실험실(L 10m × W 7m × H 3m, 210m<sup>3</sup>)인 실내공간에서 2014년 8월 27일부터 9월 5일까지 8일간 측정하였다. 본 실험에 사용한 미세먼지(PM10) 측정기는 대기 중의 미세먼지를 연속으로 자동 채취하여 무게( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )를 측정하는 기기로 측정검출한계는  $10\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 이고, 초미세먼지(PM2.5) 측정기는 2채널의 입자수를 0.3-10.0  $\mu\text{m}$  범위 내에서 측정하여 초미세먼지(0.3-2.0 $\mu\text{m}$ )와 미세먼지(2.0-10.0 $\mu\text{m}$ )의 입자수를 측정할 수 있었다. 평면형 바이오필터의 실내공간 미세먼지 제거 능력을 조사하기 위하여 실내공기를 빨아들이는 송풍기의 흡입구로부터 20cm 떨어진 지점에서 미세먼지의 유입량을 측정하고, 디펜바키아를 식재한 바이오필터와 식재하지 않은 바이오필터에서 각각 식물체 상부로부터 10cm 위에서 측정하여 식물의 유무에 따른 제거율을 비교하였다. 측정 시간은 공기가 바이오필터를 통과하여 나오는 시간을 고려하여 실내공기 유입구, 식재한 바이오필터, 식재하지 않은 바이오필터 순으로 20초 내 신속히 각각 5반복 측정된 평균값의 8일간 자료를 사용하였다. 또한 실험실 공간 내 미세먼지 분포( $10\text{-}20\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )가 미량으로 측정되어 미세먼지 제거능에 대한 실험을 위해 실험실을 밀폐시킨 후 인위적인 미세먼지 발생원으로 모기향( $137 \pm 1.7\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )을 피워 실내공간에 고루 분산시킨 후 2시간 이내에 측정하였다.

### 평면형 바이오필터의 휘발성 유기화합물 제거율

평면형 바이오필터의 휘발성 유기화합물(VOCs) 제거율을 측정하기 위해서 실험실(210m<sup>3</sup>) 내 VOCs와 HCHO가 일정 농도 이상의 조건에서 3주 이상의 자연발생적인 토양미생물의 순화(배양) 기간(Myung et al., 2003)이 필요하였으나, 실험실의 경우 장기간의 바이오필터 작동으로 대기 중의 오염물질(VOCs, HCHO) 농도가 너무 낮아 인위적인 실내 공기질 오염을 발생시키기 위하여 실험실을 밀폐하고 오염원으로 에폭시도료 희석제(에폭시신너, 바이캠, 안산, 한국)를 실험실 내에 휘발되도록 하였다. 오염 기간 동안 TVOCs

**Table 2.** Analytical conditions of GC/MS for determination of total volatile organic compounds including benzene, toluene, ethyl benzene, and xylene.

Instrument		Analysis conditions		
TD	Purge	Prepurge time (mL·min <sup>-1</sup> )	3	
		Trap prepurge time (mL·min <sup>-1</sup> )	0.2	
	Sample flow	Sample flow rate (mL·min <sup>-1</sup> )	50	
		Trap low temp. (°C)	-10	
	Trap desorb	Trap high temp. (°C)	300	
		Trap hold time (min)	5	
		Split flow (mL·min <sup>-1</sup> )	10	
Model		Varian CP-3800 / Saturn 2200		
Column		DB-1 (60 m × 0.32 mm × 5.00 μm)		
GC/MS	Column Temp.	Temp. (°C)	Rate (°C·min <sup>-1</sup> )	Hold (min)
		35	0	8
		180	4	12
	220	8	6	
	Total run time	67.25 min		
Column flow	1 mL·min <sup>-1</sup>			
MS scan range	45-350 amu			

와 HCHO가 분석 기기로 측정 가능한 적정 농도(TVOCs 1,000ppb 이상, HCHO 2.0ppm 이상)로 유지되고 있는지 확인하기 위해 휴대용 실내공기질 측정기(Indoor Air IQ-610Xtra Quality Probe, Graywolf Sensing Solutions, Trumbull, CT, Ireland)와 휴대용 HCHO 측정기(formaldehydemeter, HAL-HFX205, HAL Technology, LLC, CA, USA)를 사용하여 TVOCs와 HCHO의 농도를 30일간 측정하였다. 30일간의 오염원 처리 후 토양미생물이 충분히 활성화되었을 것으로 판단하고, 실내공기를 흡입하는 유입구에서 20cm 떨어진 지점과 바이오필터 내 토양을 통과하여 가습 공기가 나오는 바이오필터의 토양 표면 및 식물체 상부로부터 10cm 위의 지점에서 각각 VOCs를 포집하였다. HCHO를 제외한 VOCs (BTEX; benzene, toluene, ethylbenzene, xylene)의 포집은 휴대용 대기시료 포집장치(AVS-550, ASCN, Suwon, Korea)로 테들러백(Tedlar sample bag, 5L, SKC)을 이용하여 진공을 걸어 가스를 포집한 후 가스크로마토그래피(GC-MS, CP-3800/Saturn 2200, Varian, CA, USA; Table 2)로 분석하였고, HCHO는 유입구, 식물 처리구, 비식재 처리구에서 3개의 세팍카트리지(Sep-Pak® DNPH-Silica cartridges, Waters Ltd., Ireland)를 테프론 튜브(PFA tube)와 유량계를 흡입모터에 연결하여 각 지점에서 분당 500mL씩 30분(총 15L)

**Table 3.** The analytical conditions of HPLC for determination of formaldehyde (HCHO).

Parameter	Condition
Model	Shimadzu SIL-10ADvp
Column	ACE 5 C-18 (150 mm × 4.6 mm × 5 μm)
Detector	UV-VIS detector, Shimadzu
Mobile phase	Water/tetrahydrofuran (8:2, v/v) (A) acetonitrile (B)
Gradient elution	0-20 min : A/B = 80/20 → 40/60 20-22 min : A/B = 40/60 → 80/20 22-30 min : A/B = 80/20 hold
Detection	Absorbance at 360 nm
Flow rate	1.2 mL·min <sup>-1</sup>
Injection volume	20 μL
Oven Temp.	40°C

동안 3반복으로 포집하고, 고속액체크로마토그래피(HPLC, Shimadzu SIL-10ADvp, USA; Table 3)로 분석하였다. 실험 중 실험실(210m<sup>3</sup>) 환경은 냉난방기를 이용하여 실내온도를 26°C로 설정하여 실험기간 동안 실험실 내 평균 실내온도를 26.6 ± 3.0°C로 유지하였고, 평균 상대습도는 62 ± 3.0%였다.

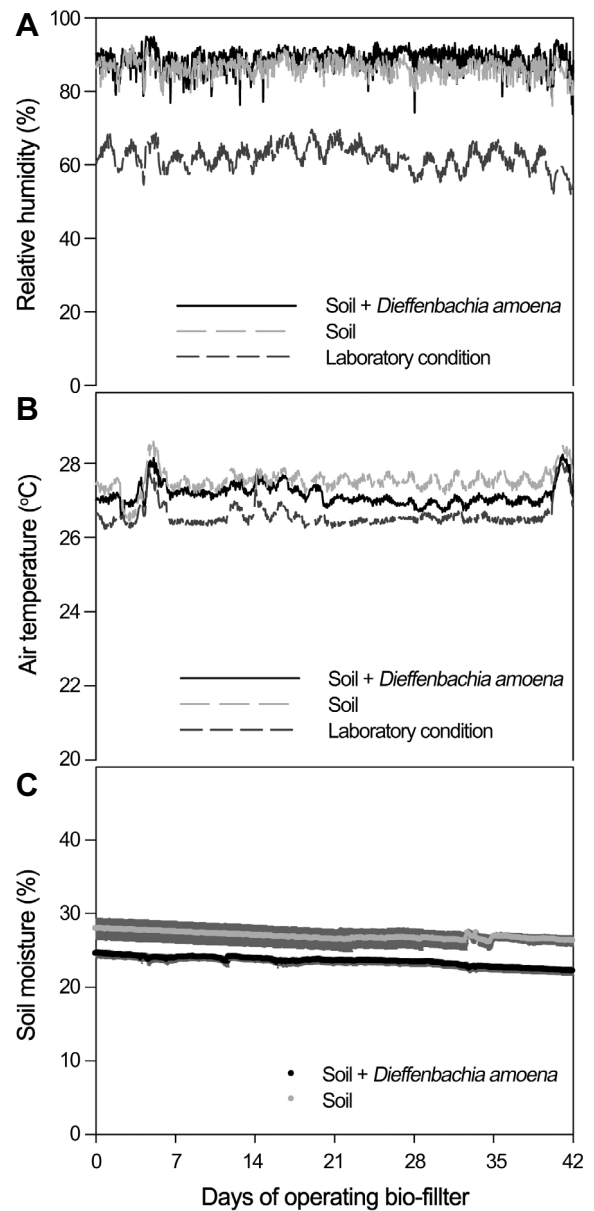
## 평면형 바이오필터의 공기정화량 산출

제작된 평면형 바이오필터의 용량에 따른 1일 적정 공기정화량을 확인하기 위해 54m<sup>3</sup>의 사무실 공간과 210m<sup>3</sup>의 실험실 두 공간에서 공기정화량을 산출하였다. 일반적 공조시스템의 1일 적정 공기정화량을 15회 기준으로 하여 평면형 바이오필터의 일일 공기정화 횟수를 선행 연구의 공식(Choi et al., 2014)에 의해 산출하였다.

## 결과 및 고찰

### 평면형 바이오필터 내 식물 성장 평가

설계된 평면형 바이오필터에서의 정상적인 식물 생장이 가능한지를 평가하기 위해 식재된 디펜바키아의 성장 특성을 분석한 결과, 바이오필터 내에 식재 전 초기값에 비해 초장, 초폭, 체적, 엽수에서 확연히 증가하였고 통계적 유의성이 나타나 평면형 바이오필터에서 정상적으로 식물 생장이 가능한 것으로 나타났다(Table 4). 또한 지상부의 생장에 있어서는 식재 전에 비해 식재 후에 생체중과 건물중이 모두 약 3배로 증가하였던 반면에 뿌리의 생체중과 건물중은 생육 전후의 차이가 적어 통계적 유의성이 없었다(Table 4). 본 바이오필터 내 토양에 대한 관수는 토양 위에서 아래로 중력에 의해 수분이 공급되는 방식이 아니라 가습된 공기가 일정하게 토양 하부에서 상부로 통과하면서 토양에 수분을 공급하는 일종의 저면 자동관수법(‘바이오필터화분 수분공급장치’, 특허번호 10-1418679; Chun and Lee, 2014)으로 토양 수분을 전체적으로 균일하게 하여 분포시키는 방식이기 때문에 디펜바키아의 경우, 충분한 토양 수분(24.5-22.1%)이 안정적으로 공급되어 뿌리보다는 지상부의 발달이 우선적으로 이루어진 것으로 판단되었다(Fig. 2C). 위와 같은 수분공급 방식을 도입하였던 바이오필터 내 식물 생육반응에 대한 선행 연구(Choi et al., 2014)에서도 관엽식물인 더피고사리(*Nephrolepis cordifolia* cv. *Duffii*)와 상록넉줄고사리(*Humata*



**Fig. 2.** Changing patterns of relative humidity (A), air temperature (B), and soil moisture (C) in a horizontal biofilter system depending on whether *Dieffenbachia amoena* was planted in the biofilter. Error bars represent SE.

**Table 4.** Growth characteristics of *Dieffenbachia amoena* ‘Mariane’ before and after planting within a horizontal biofilter.

Measurement time	Width (cm)	Height (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	No. of leaves	Fresh weight (g)		Dry weight (g)	
					Shoot	root	shoot	root
Before planting	15.6 ± 3.6 <sup>z</sup>	25.9 ± 2.4	6,610 ± 3,191	6.0 ± 2.0	31.1 ± 7.6	22.0 ± 11.6	1.8 ± 0.9	2.2 ± 1.4
42 days after planting	34.1 ± 4.4	39.4 ± 4.1	46,558 ± 14,012	11.4 ± 3.4	99.7 ± 11.4	20.8 ± 6.0	6.4 ± 0.7	2.2 ± 0.3
Significance	***	***	***	**	***	ns	***	ns

<sup>z</sup>Mean ± SD.

ns, \*\*, \*\*\* Non-significant or significant by t-test at  $p = 0.01$  or  $0.001$ , respectively.

*tyermani*)를 저수분 조건( $18.5 \pm 1.1\%$ )과 고수분 조건( $28.7 \pm 1.4\%$ )에 재배하여 뿌리 생체중과 건물중 모두 바이오필터 처리구와 일반 관수 처리구의 통계적 유의성이 없었던 결과와 일치하였으며, 같은 천남성과의 *Aglaonema commutatum* cv. *Treubii*와 *Epiprenum aureum* cv. *Marble*에서도 토양재배와 순수 수정재배에서 근권부의 차이가 크게 없는 것으로 보고하였다(Baik et al., 2003). 관수 방향을 두상관수나 점적 관수처럼 중력 방향으로 공급하거나 저면관수처럼 중력의 역방향으로 공급하더라도 기존의 모든 관수법은 토양 수분이 중력 방향인 아래로 이동하여 토양 내 수분의 분포가 균일하지 않았다(Kim et al., 2009). 그러나, 본 바이오필터에서도 도입한 차별된 관수법은 바이오필터의 특성상 토양의 일정한 압력손실량과 공기 흐름의 확보가 중요(Cardenas-Gonzalez, 1999; Morales et al., 1996)하므로 가슴 공기를 이용하여 중력의 역방향으로 수분을 공급하여 토양층 전체에 수분을 균일하게 유지하는 방식이기 때문에 물을 찾아 이동하는 뿌리의 발달이 적어 일반적인 관수에 의한 근권부 발달과는 큰 차이를 나타내는 것으로 판단되었다.

#### 평면형 바이오필터의 상대습도, 온도, 토양수분함량

바이오필터를 통과한 공기의 상대습도의 경우 토양만 있는 바이오필터( $86.6 \pm 2.4\%$ , mean $\pm$ SD)보다 식물이 식재된 바이오필터( $88.6 \pm 3.0\%$ )에서 약간 높은 값을 나타내었지만(Fig. 2A) 두 경우 모두 실험 기간 동안 80% 이상의 값으로 측정되었고 실험실 내 평균 습도( $62 \pm 3.0\%$ )보다 높은 값을 나타내어 실내습도 유지 및 가슴에 도움이 되는 것으로 판단되었다. 온도의 경우 토양만 있는 바이오필터( $27.5 \pm 0.3^\circ\text{C}$ ), 식물이 식재된 바이오필터( $27.2 \pm 0.3^\circ\text{C}$ ), 실내 온도( $26.6 \pm 0.3^\circ\text{C}$ ) 순으로 높은 값이 나타났지만(Fig. 2B) 모두  $26.6\text{--}27.5^\circ\text{C}$  범위의 값으로 차이가 적어 당시 냉난방기를  $26^\circ\text{C}$ 로 설정하여 실내 온도를 조절한 것에 비하면 이러한 차이는 식물 유무에 따른 결과라기보다는 바이오필터 내 송풍기와 물펌프 작동에 기인한 발열에 의한 것으로 판단하였다. 본 연구에서 제작된 평면형 바이오필터의 규모는 소형( $Q: 0.45\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )이었으나, 적합한 소형 송풍기와 소형 물펌프를 시중에서 구하지 못하여 중형 이상을 사용하였기 때문에 발열량 및 소비전력량이 다소 높았지만 중형 이상의 바이오필터 제작 시에는 적합한 용량의 송풍기와 물펌프를 결합할 수 있기 때문에 발열과 소비전력량 문제는 해결할 수 있을 것으로 판단되었다. 미생물 활성은 바이오필터의 작동 온도와 관계가 있으며 대부분의 배지 내 미생물 집단은 중온성으로  $20^\circ\text{C}$

에서  $40^\circ\text{C}$  범위가 최적 온도로 알려져 있다(Kennes and Thalasso, 1998). 또한 주요 휘발성 유기화합물인 BTEX(benzene, toluene, ethylbenzene, xylene)와 styrene은 각각  $30\text{--}35^\circ\text{C}$ 와  $20\text{--}23^\circ\text{C}$  조건에서 미생물에 의한 최적 분해율을 나타내었다(Arnold et al., 1997; Lee et al., 2002; Park et al., 2002). 따라서 식물 성장과 토양 내 미생물 활성 모두를 충족시킬 수 있는 온도 조건으로 본 실험의 결과는 무리가 없을 것으로 판단하였다.

식물이 식재된 바이오필터의 토양수분함량은 평균  $23.4 \pm 0.6\%$ 로 초기값( $24.5\%$ )에서 42일 후 최종값( $22.1\%$ )으로 갈수록 미세하게 감소하는 경향( $y = -0.0489x + 24.45$ )을 나타내었고, 토양만 있는 바이오필터의 토양수분함량도 평균  $26.9 \pm 0.5\%$ 로 초기값( $27.9\%$ )에서 최종값( $26.3\%$ )로 감소하는 경향( $y = -0.0331x + 27.56$ )을 나타내어 두 경우 모두에서 바이오필터 작동 시 토양 수분함량이 서서히 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 2C). 식물이 식재된 바이오필터와 식재하지 않은 바이오필터의 수분 함량 변화에 대한 일차회귀식의 기울기 값 차이는 식물 생육에 따른 뿌리의 수분 흡수에 의한 것으로 판단되었다. 생물학적 관점에서 바이오필터 내 배지의 수분함량은 미생물 활동에 가장 중요한 요인으로 바이오필터의 오작동 원인 중 75%가 수분 조절의 실패에 있으며(Morales et al., 1996), 너무 낮은 수분은 바이오필터층의 건조와 편류 현상(gas flow channeling)을 유발하여 미생물 성장에 부정적인 영향을 미친다고 보고되고 있다(Delhoménie and Heitz, 2005). 더욱이 장기간 건조가 지속되면 초기에는 친수성인 피트나 퇴비가 점차 소수성으로 변화되면서 수분을 함유하기 어려워지는 문제를 야기하기도 한다(Thompson et al., 1996; Sabo et al., 1993). 반대로 바이오필터 내 배지의 너무 높은 수분 함량은 가스 및 필터층의 접촉 면적을 감소시켜 필터층의 답압으로 인한 압력손실의 증가와 혐기성 조건을 유발할 수 있기 때문에 필터층의 적정 수분 함량은 20-30%로 제시하고 있다(Ottengraf, 1986). 본 연구의 경우 가슴장치를 이용한 저면 자동관수법을 도입하여 일정한 수분 함량(23-27%)을 유지함으로써 바이오필터층의 수분 함량에 영향을 미치는 공기의 습도, 바이오필터층의 수분보유력, 필터층을 통과하는 공기 유량의 조건(Cardenas-Gonzalez, 1999) 등을 대부분 충족하여 실내공기 정화를 위한 미생물 성장에 이상이 없을 것으로 판단된다. 그러나 향후 식물과 바이오필터의 통합 시스템 개발 시 더욱 안정화된 토양 수분을 유지하기 위한 시스템의 기술적 보완이 필요하였다.

### 평면형 바이오필터의 식물 유무에 따른 미세먼지 제거

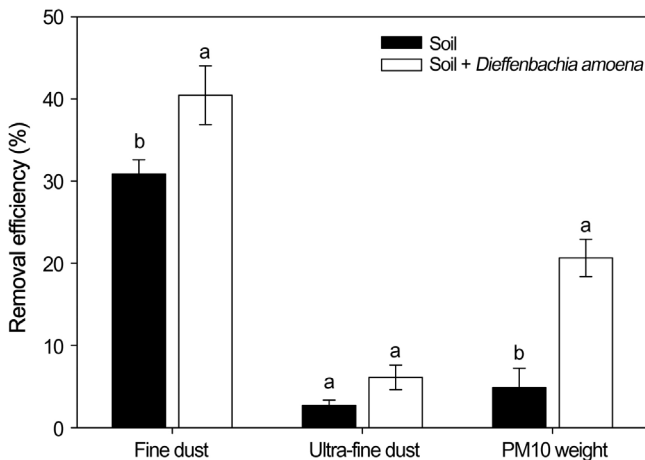
평면형 바이오필터의 식물 유무에 따른 미세먼지 제거율을 조사한 결과 입자의 수에 따른 제거율은 미세먼지(PM10, 2.0-10.0 $\mu\text{m}$ )의 경우 토양만 있는 바이오필터는 30% 이상의 제거율을 나타내었고 식물이 식재된 경우에는 40% 이상의 제거율을 나타내었고 두 평균간의 통계적 유의성이 나타났다(Fig. 3). 초미세먼지(PM2.5, 0.3-2.0 $\mu\text{m}$ )의 경우 토양만 있는 바이오필터는 2% 이상, 식물이 식재된 경우도 4% 이상으로 비교적 낮은 제거율을 나타냈지만 통계적 유의성은 없었다. 미세먼지 입자 무게(PM10,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )에 따른 제거율의 경우는 토양만 있는 경우 4% 이상, 식물이 식재된 경우 20% 이상으로 두 평균간의 통계적 유의성이 나타났다(Fig. 3). 미세먼지에 대한 각각의 제거율이 큰 차이를 나타내었지만 모두에서 토양만 있는 경우에 비해 식물이 식재된 바이오필터에서 제거율이 높은 것으로 나타났다.

식물 자체의 미세먼지 제거 효과에 대한 선행 연구는 실내·외 식물에서 보고되고 있는데, 벽면 녹화된 사무실에서 일반 사무실에 비해 미세먼지의 제거 효과가 62% 높게 나타났다(Bang et al., 2013), 실내 인테리어로 관엽식물 화분을 투입했을 때도 투입되지 않은 사무실에 비해 약 20%의 미세먼지 제거 효과가 입증되었다(Lohr and Pearson-Mims, 1996). 노르웨이와 폴란드의 야외에서 22종의 교목과 25종의 관목을 대상으로 잎에 축적되는 미세먼지의 양은 각 식물의 잎에 위치한 섬모와 왁스층의 차이에 따라 10-15배의

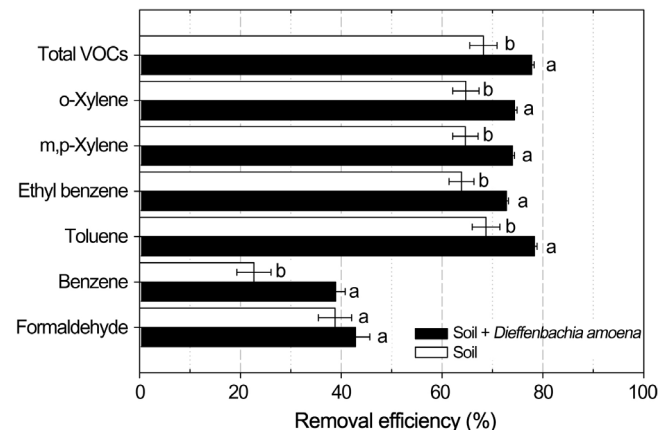
차이가 있었고(Sæbø et al., 2012), 도심 지역의 교목은 잎의 면적, 섬모뿐만 아니라 교목에 서식하는 균사체에 의해서도 미세먼지를 흡착하는 것으로 알려졌다(Smith and Staskawicz, 1977). 미세먼지 입자의 크기(3-180 $\mu\text{m}$ )별로 6등급을 나누어 실시된 잔디 등의 야외 초본식물에 대한 미세먼지 축적량 조사에서도 식물별로 차이는 있지만 상당량의 미세먼지를 흡착하는 것으로 보고되었다(Weber et al., 2014). 따라서 식물-바이오필터의 결합 시스템은 각각의 독립된 형태보다 융합 시 미세먼지 제거 효과가 뛰어나다고 판단되었다.

### 평면형 바이오필터의 식물 유무에 따른 휘발성 유기 화합물 제거율

평면형 바이오필터의 VOCs 제거율은 토양만 있는 바이오필터의 경우 T-VOC, o-xylene, m,p-xylene, ethylbenzene, toluene의 경우 63.9-68.7%의 제거율을 보였으며 benzene은 22.7%, HCHO는 38.8%의 제거율을 보였다(Fig. 4). 식물이 식재된 바이오필터의 경우 T-VOC, xylene, ethylbenzene, toluene의 경우 72.8-78.3%의 제거율을 나타내었으며 benzene은 42.8%, HCHO는 38.9%의 제거율을 보였다. 식물의 식재 유무에 따른 각 VOCs의 두 평균간 차이는 모두 통계적 차이를 확인하였다(Fig. 4). 따라서 식물이 식재된 바이오필터가 토양만 있는 처리구에 비해 휘발성 유기화합물의 제거 효과가 높은 것으로 나타났다. 그러나 본 실험 결과, 전체 VOCs 제거율 중에서 T-VOC, o-xylene, m,p-xylene, ethylbenzene,



**Fig. 3.** Removal efficiency of fine dust (2-10  $\mu\text{m}$ ) and ultra-fine dust (0.3-2  $\mu\text{m}$ ) particle numbers and PM10 weight ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) in a horizontal biofilter system depending on whether *Dieffenbachia amoena* was planted in the biofilter. Error bars represent SE and different letters indicate significant differences based on t-test at  $p = 0.05$ .



**Fig. 4.** Removal efficiency of total volatile organic compounds (T-VOCs), aromatic hydrocarbons (benzene, ethyl benzene, toluene, and xylene), and formaldehyde in a horizontal biofilter system depending on whether *Dieffenbachia amoena* was planted in the biofilter. Error bars represent SE and different letters indicate significant differences based on t-test at  $p = 0.05$ .



toluene의 경우 87% 이상이 식물이 없는 상태에서 이루어졌으며, HCHO와 benzene도 각각 90%와 58% 이상이 바이오필터층에서 제거되었다는 점을 미루어 볼 때, 바이오필터 내 미생물의 역할은 매우 크다고 할 수 있었다.

미생물은 대기오염물질을 생물학적으로 분해하는 필수적인 요소로 종속영양 미생물(heterotrophic microorganism)에 속하는 박테리아와 곰팡이가 대부분의 VOC 제거 과정에 관여한다(Delhoméie and Heitz, 2005). 바이오필터층에 분포하는 미생물의 양은 필터층의 재료와 VOC 생분해능에 따라 달라지는데 많은 연구에서 자연발생적인 토착미생물의 생태계 시스템이 선호되며, 이러한 미생물은 실내오염물질을 먹이로 필터층에 서식하게 되고 충분한 순화기간이 주어지면 가장 저항성이 뛰어난 미생물 집단이 필터층을 우점하지만, 낮은 미생물 밀도, 까다로운 VOC, 부족한 순화기간 등으로 미생물 활성이 낮을 경우에는 하수 슬러지나 이전에 사용했던 바이오필터층에서 균주를 추출하여 인공적으로 필터층에 배양하기도 한다(Delhoméie et al., 2001; Delhoméie et al., 2002; Mohseni and Allen, 2000). 또한 Pedersen et al.(1997)은 바이오필터층에 분포하는 미생물 중 1-15%만이 VOC 분해능을 가진 집단이라고 보고하였다. 본 실험에서도 인공배양토를 사용하였기 때문에 30일 동안 실내공기 오염원을 처리하여 미생물이 자연발생적으로 바이오필터 내에서 충분한 자랄 수 있는 순화기간을 제공하였고 미생물에 의한 VOC제거 효과를 얻을 수 있었다.

또한 VOC의 종류에 따라 제거율의 차이가 나타났으며 toluene, xylene, ethylbenzene, HCHO, benzene 순으로 높은 제거 효과를 나타냈다(Fig. 4). Delhoméie and Heitz(2005)는 휘발성 유기화합물의 종류에 따른 미생물의 분해능에 대한 차이가 있으며, 산화된 탄화수소(oxygenated hydrocarbons; alcohols > aldehydes, ketones > ethers), 알칸족 탄화수소(linear alkanes), 방향족 탄화수소(aromatic hydrocarbons) 순으로 분해능이 높다고 하였으나, 본 실험에서는 산화된 탄화수소(HCHO)보다 방향족 탄화수소(toluene, xylene, ethylbenzene)의 제거율이 더 높게 나타났으며, 같은 방향족 탄화수소인 benzene의 분해능도 낮게 나타났다. Deshusses et al.(1999)은 공기 흐름 속에 ethylacetate가 존재할 때 toluene 분해능이 억제된다고 보고하였고, Oh et al.(1994)는 BTEX의 혼합가스 상태에서 benzene과 toluene이 상호간의 경쟁적 억제 현상이 발생하며, benzene과 toluene의 분해능은 p-xylene의 공대사(cometabolism) 과정에 의해서도 분해가 억제된다고 하였다.

Yang et al.(2009)은 28종의 실내 식물에 대해 5종류의 VOCs(benzene, toluene, octane, trichloroethylene,  $\alpha$ -pinene) 제거율을 평가하여 *Hemigraphis alternata*, *Hedera helix*, *Hoya carnosa*, *Asparagus densiflorus*가 모든 VOCs를 가장 잘 제거한 식물로 보고하였다. VOCs의 종류별 제거율도  $\alpha$ -pinene, toluene, trichloroethylene, octane, benzene 순으로 제거율이 높으나 식물 종에 따라 제거하는 VOCs 종류별 제거율이 다르다고 하였다. 반면, Darlington et al.(2001)은 개발한 바이오필터에 TEX(toluene, ethylbenzene, o-xylene) 가스를 혼합하여 처리 시 VOCs별 제거율이 모두 유사하다고 하였다.

따라서 benzene의 낮은 제거율은 상대적으로 높은 제거율을 보인 toluene과 p-xylene에 의한 영향이었을 것으로 추정하였다. 그러나 단순히 VOC의 종류뿐만 아니라 실제 우점하는 미생물의 종류에 따라서도 다양한 결과가 나올 수 있기 때문에 향후 이러한 부분에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 바이오필터의 식물과 식재용 토양층의 수분 안정화에 따른 미생물 활성화 조건이 미세먼지와 휘발성 유기화합물의 제거율 증가에 영향을 준 것으로 생각되며, 실내 식물로 주로 이용되고 있는 고무나무, 아글라오네마, 스킨답서스, 아이비, 칼라코예, 산세베리아 등이 VOCs와 HCHO 제거에 효과가 있다는 보고(Song et al., 2005)에 따라 바이오필터에 다양한 종류의 실내 식물을 적용할 경우 실내 공기오염물질 제거효과가 더 높게 나타날 것으로 판단되었다.

#### 평면형 바이오필터의 공간별 공기정화량 산출

본 실험에서 제작된 소형 평면형 바이오필터의 환기 용량(air ventilation rate, Q:  $0.45\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )에 따른 공간별 공기정화 횟수를 산출한 결과(Table 5), 일반 공조시스템의 하루 적정 공기정화횟수를 15회 기준으로 하였을 때 소형 사무실( $54\text{m}^3$ )의 경우 설계된 바이오필터(1일 환기량,  $0.45\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \times 60\text{min} \times 24\text{h} = 648\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )로 하루 12회의 공기정화( $648\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1} / 54\text{m}^3 = 12\text{times/d}$ )가 가능하였고, 실험실( $210\text{m}^3$ )의 경우 하루 3.1회의 공기정화( $648\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} / 210\text{m}^3 = 3.1\text{times/d}$ )가 가능하였다. 따라서 소형 사무실과 실험실의 경우 설계된 바이오필터는 각각 약 1.5배와 4.8배의 환기 용량 증대가 필요한 것으로 나타났다(Table 5). 따라서 향후 바이오필터 설계 시 공간 규모와 근무 인원에 따른 용량 설계에 대한 연구를 추가적으로 보완할 필요가 있었다.

**Table 5.** Calculated values for indoor air purification of the office and laboratory by the horizontal biofilter used in this experiment.

Horizontal biofilter	Office (54 m <sup>3</sup> )	Laboratory (210 m <sup>3</sup> )
Air ventilation rate (m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	0.45	0.45
Air ventilation frequency per day (times per day)	12.0	3.1
Additional increment (%) <sup>z</sup>	25	484

<sup>z</sup>Additional increment based on general indoor air ventilation frequency (15 times per day).

## 초 록

본 연구는 평면형 바이오필터를 설계하여 제작하고 이 바이오필터에 디펜바키아(*Dieffenbachia amoena* ‘Marianne’)의 식재 여부에 따라 환기 용량을 제어할 수 있는 토양 수분 안정화 정도를 측정하고 미세먼지, 휘발성 유기화합물 및 포름알데히드(HCHO)와 같은 실내공기 오염물질에 대한 바이오필터의 제거율을 비교하였다. 실험 결과 디펜바키아의 식재 여부에 관계없이 모두 일정한 상대습도, 온도 및 토양 수분 함량을 나타내었고 이 바이오필터에 식재한 디펜바키아도 정상적으로 생육하였다. 바이오필터에 의한 미세먼지 제거율을 보면, 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5)의 입자 수는 토양만 있는 경우 각각 30%와 2% 이상 제거되었고, 디펜바키아를 식재한 경우도 각각 40%와 4% 이상 제거되었다. 미세먼지(PM10) 무게에 따른 제거율은 토양만 있는 경우 4% 이상, 디펜바키아를 식재한 경우 20% 이상으로 나타났다. 토양만 채운 바이오필터는 xylene, ethylbenzene, toluene, total volatile organic compounds(T-VOCs)를 63% 이상 제거하였으나 benzene은 22% 이상, HCHO는 38% 이상을 제거하였다. 디펜바키아를 식재한 바이오필터는 xylene, ethylbenzene, toluene, T-VOCs를 72% 이상 제거하였고 benzene과 HCHO도 39% 이상 제거하였다. 따라서 식물과 바이오필터를 결합한 시스템은 미세먼지의 제거보다 휘발성 유기화합물의 제거에 대한 효과가 더 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서 제작한 평면형 바이오필터는 실내 공기질 정화에 매우 효과가 있는 것으로 나타났으며, 식물과 바이오필터를 결합하였을 때 그 효과는 더욱 큰 것으로 확인하였다.

**추가 주요어 :** 환기량, *Dieffenbachia amoena*, 미세먼지, 그린 인테리어, 휘발성 유기화합물

## 인용문헌

Arnold, M., A. Reittu, A. Von Wright, P.J. Martikainen, and

- M.L. Suikho. 1997. Bacterial degradation of styrene in waste gases using a peat filter. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 48:738-744.
- Baik, J., E.J. Jang, and C.H. Pak. 2003. Plant stresses of two Araceae foliage plants cultured by hydroculture and plant activity compared with soil culture. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 21:341-345.
- Bang, S.W., J.Y. Kim, J.E. Song, K.J. Kim, and D.H. Kim. 2013. Effect of the bio green wall system for the improvement of indoor environment. *J. Korean Soc. People Plants Environ.* 16:415-420.
- Bea, G.N. and J.H. Ji. 2013. Management policy and control technology for indoor air quality in Korea. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* 29:378-389.
- Cardenas-Gonzalez, B. 1999. Characterization of compost biofilter media. Ph.D. Diss., Department of Civil and Environmental Engineering. Univ. of Massachusetts, Amherst, Massachusetts, USA.
- Choi, B., M.Y. Chun, and C.H. Lee. 2014. Evaluation for soil moisture stabilization and plant growth response in horizontal biofiltration system depending on wind speed and initial soil moisture. *Korean J. Plant Res.* 27:546-555.
- Chun, M.Y. and C.H. Lee. 2014. Water supply system for biofilter flowerpot. Patent serial No. 10-1418679.
- Darlington, A.B., J.F. Dat, and M.A. Dixon. 2001. The biofiltration of indoor air: air flux and temperature influences the removal of toluene, ethylbenzene and xylene. *Environ. Sci. Technol.* 35:240-246.
- Delhoménie, M.C. and M. Heitz. 2005. Biofiltration of air: a review. *Crit. Rev. Biotechnol.* 25:53-72.
- Delhoménie, M.C., L. Bibeau, J. Gendron, R. Brzezinski, and M. Heitz. 2001. Influence of nitrogen on the degradation of toluene in a compost-based biofilter. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 76:997-1006.
- Delhoménie, M.C., L. Bibeau, N. Bredin, S. Roy, S. Brousseau, J.L. Kugelmass, R. Brzezinski, and M. Heitz. 2002. Biofiltration of air contaminated with toluene on a compost-based bed. *Adv. Environ. Res.* 6:239-244.
- Deshusses, M.A., C.T. Johnson, and G. Leson. 1999. Biofiltration

- of high loads of ethyl acetate in the presence of toluene. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 49:973-979.
- Hong, J., J.S. Lee, and C.H. Pak. 2005. Selection of indigenous plants tolerant to volatile organic compounds and their purifying mechanisms in indoor environment. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 23:97-103.
- Jang, H.S., S.K. Shin, J.H. Song, and S.J. Hwang. 2006. Biodegradation of VOC mixtures using a bioactive foam reactor II. *Ksce J. Civ. Eng.* 26:695-701.
- Kennes, C. and F. Thalasso. 1998. Waste gas biotreatment technology. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 72:303-319.
- Kil, M.J., K.J. Kim, J.K. Cho, and C.H. Park. 2008a. Formaldehyde gas removal effects and physiological responses of *Fatsia japonica* and *Epipremnum aureum* according to various light intensity. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 26:189-196.
- Kil, M.J., K.J. Kim, C.H. Pak, H.H. Kim, and Y.W. Lim. 2008b. Effects of growing media and exposure frequency on the volatile formaldehyde removal in potted *Epipremnum aureum*. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 26:325-330.
- Kim, K.J., M.I. Jung, D.W. Lee, H.D. Kim, E.H. Yoo, S.J. Jung, S.W. Han, and S.Y. Lee. 2009. Water absorption and water diffusion by irrigation system in the planters for indoor plants. *J. Korean Soc. People Plant Environ.* 12:57-63.
- Kim, K.J., M.J. Kil, J.S. Song, and E.H. Yoo. 2008. Efficiency of volatile formaldehyde removal by indoor plants: Contribution of aerial plant parts versus the root zone. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 133:521-526.
- Lee, E.Y., Y.S. Jun, K.S. Cho, and H.W. Ryu. 2002. Degradation characteristics of toluene, benzene, ethylbenzene, and xylene by *Stenotrophomonas maltophilia* T3-c. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 52:400-406.
- Lee, J.H. 2006. System of phyto-filter for removing indoor air pollutants. *J. Korean Inst. Inter. Landsc. Archit.* 8:9-16.
- Lee, J.H. and I.S. Joe. 2008. A study on development of biofilter system for removing indoor air pollution used by plants. *J. Korean Soc. People Plants Environ.* 11:33-46.
- Lohr, V.I. and C.H. Pearson-Mims. 1996. Particulate matter accumulation on horizontal surfaces in interiors: Influence of foliage plants. *Atmos. Environ.* 30:2565-2568.
- Ministry of Environment (MOE). 2014. Environment white paper. Ministry of Environment, Korea.
- Mohseni, M. and D.G. Allen. 2000. Biofiltration of mixtures of hydrophilic and hydrophobic volatile organic compounds. *Chem. Eng. Sci.* 55:1545-1558.
- Morales, M., G. Frere, M.E. Acuna, F. Perez, S. Revah, and R. Auria. 1996. Influence of mixing on the removal rate of toluene vapors by biofiltration. In: Proceedings of the 89th Annual Meeting & Exhibition of the Air & Waste Management Association. June 23-26, 1996. Nashville. Air & Waste Manag. Assoc. Pittsburgh, PA, USA.
- Myung, S.W., Y.S. Nam, Y.W. Lee, and H.S. Choi. 2003. Removal characteristics of toluene in biofilters packed with reticulated-PU-foams of different porosities. *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* 18:448-454.
- Nieuwenhuis, M., K. Craig, P. Tom, and S.H. Alexander. 2014. The relative benefits of green versus lean office space: three field experiments. *J. Exp. Psychol.* 20:119-214.
- Oh, Y.S., S.C. Choi, and Y.K. Kim. 1998. Degradation of gaseous BTX by biofiltration with *Phanerochaete chrysosporium*. *J. Microbiol.* 36:34-38.
- Oh, Y.S., Z. Shareefdeen, B.C. Baltzis, and R. Bartha. 1994. Interactions between benzene, toluene and p-xylene (BTX) during their biodegradation. *Biotechnol. Bioeng.* 44:533-538.
- Ottengraf, S.P.P. 1986. Exhaust gas purification, p. 426-452. In: *Biotechnology, a Comprehensive Treatise in 8 Volumes*. Rehm, H.J. and G. Reed (eds.). Verlag Chemie. Weinheim, Germany.
- Park, D.W., S.S. Kim, S. Haam, I.S. Ahn, E.B. Kim, and W.S. Kim. 2002. Biodegradation of toluene by a lab-scale biofilter inoculated with *Pseudomonas putida* DK-1. *Environ. Technol.* 23:309-318.
- Park, S.A., M.G. Kim, M.H. Yoo, M.M. Oh, and K.C. Son. 2010. Comparison of indoor CO<sub>2</sub> removal capability of five foliage plants by photosynthesis. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 28:864-870.
- Pedersen, A.R., S. Moller, S. Molin, and E. Arvin. 1997. Activity of toluene-degrading *Pseudomonas putida* in the early growth phase of a biofilm for waste gas treatment. *Biotechnol. Bioeng.* 54:131-142.
- Sabo, F., U. Motz, and K. Fisher. 1993. Development and testing of high efficiency biofilters. In: Proceedings of the 89th Annual Meeting & Exhibition of the Air & Waste Management Association. June 13-18, 1993. Denver. Air & Waste Manag. Assoc. Pittsburgh, PA, USA.
- 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. *Sci. Total Environ.* 427:347-354.
- Smith W.H. and B.J. Staskawicz. 1977. Removal of atmospheric particles by leaves and twigs of urban trees: some preliminary observations and assessment of research needs. *Environ. Manage.* 1:317-330.
- Sohn, J.R., M.B. Jang, and K.M. Cho. 2004. The characteristics

- of biodegradation for VOCs in unsaturated soil by bio-filter. Korean J. Sanit. 19:19-24.
- Song, J.E., S.W. Han, Y.S. Kim, and J.Y. Sohn. 2005. The effect of phytofiltration system on the improvement of indoor air quality. Kieae J. 5:3-8.
- Swanson, W.J. and R.C. Loehr. 1997. Biofiltration: fundamentals, design and operations principles, and applications. J. Environ. Eng. 123:538-546.
- Thompson, D., L. Sterne, J. Bell, W. Parker, and A. Lye. 1996. Pilot scale investigation of sustainable BTEX removal with a compost biofilter. In: Proceedings of the 89th Annual Meeting & Exhibition of the Air & Waste Management Association. June 23-26, 1996. Nashville. Air & Waste Manag. Assoc. Pittsburgh, PA, USA.
- Weber, F., I. Kowarik, and I. Säumel. 2014. Herbaceous plants as filters: Immobilization of particulates along urban street corridors. Environ. Pollut. 186:234-240.
- Veiga, M.C., M. Fraga, L. Amor, and C. Kennes. 1999. Biofilter performance and characterization of a biocatalyst degrading alkyl benzene gases. Biodegradation 10:169-176.
- Yang, D.S., S.V. Pennisi, K.C. Son, and S.J. Kays. 2009. Screening indoor plants for volatile organic pollutant removal efficiency. HortScience 44:1377-1381.