

심지형 가습장치를 이용한 식물바이오필터의 토양수분 및 식물 생육의 안정성

김유나¹, 천만영², 이창희^{1,3*}

¹한경대학교 원예생명과학과, ²한경대학교 환경공학과, ³한경대학교 국제농업기술정보연구소

Stabilization of Soil Moisture and Plant Growth on a Botanical Biofilter with a Wick-Typed Humidifying Apparatus

You Na Kim¹, Man Young Chun² and Chang Hee Lee^{1,3*}

¹Department of Horticultural Life Science, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea

²Department of Environmental Engineering, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea

³Research Institute of International Agriculture, Technology, and Information, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea

Abstract - The final goal of this research is to develop a miniaturized botanical biofilter using a wick-typed automatic humidifier for stabilizing soil moisture content (SMC) and purifying indoor air pollutants by the biofilter. This new biofilter equipped with wick-typed automatic humidifier was manufactured as more compacted design removing an absorption tower-typed humidifier compared with the previous big-sized biofilter made in 2015. This study was performed to compare changes of SMCs among floors depending on the number of wicks installed on the humidifier within the novel biofilter, and to compare changes of SMCs and plant growth parameters before and after planting *Spathiphyllum wallisii* 'Mauna Loa' on the biofilter. SMCs among floors depending on the number of wicks were similar, and all regression lines of SMCs showed almost horizontal lines because of long-term stability on SMCs. Comparing plant growth parameters of *S. wallisii* 'Mauna Loa' before planting and at 30 days after planting on the biofilter, all growth parameters were not statistically significant. Thus, SMCs of the biofilter were more stabilized using this humidifying apparatus regardless of the number of wicks than the previous biofilter using absorption tower-typed humidifying apparatus.

Key words - Botanical biofilter, Indoor air quality, Soil moisture content, *Spathiphyllum wallisii*, Wick

서 언

최근 실내공기질은 냉난방 설비에 따른 건축물의 밀폐와 건축자재에서 발생하는 유해 물질로 인해 악화되고 있으며, 실내 생활을 위주로 하는 현대인의 건강을 위협하는 중요한 원인이 되고 있다. 특히 실내 오염물질은 실외보다 약 100배 이상 오염되어 있는 것으로 조사되었다(Yoo, 2005). 실내공기는 최근 신종 플루와 같은 인플루엔자와 함께 실내공간의 공기질에 관한 많은 관심과 더불어 2004년 5월 환경부에서 발표한 '다중이용 시설' 등의 실내 공기질 관리법은 실내공기 오염문제에 관한 시

급한 현황과 대책마련에 관심을 집중하게 만들었다(Cho and Sohn, 2010). 실내공기는 인체의 감각만으로 쾌적성 정도 및 오염 정도를 쉽게 판단하기 어렵기 때문에 실내공기질의 심각성이 간과되기 쉬우며, 대부분의 오염원인 물질들이 ppb 단위의 낮은 농도에서도 건강을 해칠 수 있기 때문에 이에 대한 연구의 중요성이 더욱 크다고 여겨진다(Kim, 1993).

바이오필터(biofilter)는 농도는 낮으나 배출 유량이 많은 기상 오염물 처리에 매우 효과적인 처리기술로 보고되고 있다(Burgess *et al.*, 2001; Smet *et al.*, 1998; Zilli *et al.*, 2001). 물리화학적 처리방법과 비교하여 친환경적인 생물학적 처리법 중의 하나인 바이오필터는 처리효율이 높으면서 경제성의 장점으로 미국과 유럽에서는 1970년부터 연구가 활발하게 이루어지

*교신저자: changheelee@hknu.ac.kr
Tel. +82-31-670-5102

고 있다(Bohn and Bohn, 1999). 식물바이오필터는 바이오필터와 식물정화능(phytoremediation)의 복합체이며, 오염물질이 높은 생물학적 활성 필터층을 통해 중화되는 생물반응기라고 할 수 있다(Soreanu *et al.*, 2013). 식물바이오필터에 대한 시스템 개발 시 공기정화량을 결정짓는 용량 설계는 낮은 압력손실과 안정화된 토양수분 유지가 매우 중요하며(Kennes and Thalasso, 1998; Ottengraf, 1986), 식물 생육 시 풍속에 의한 근권부 스트레스를 받지 않도록 적절히 조절해야 한다(Choi *et al.*, 2014). 본 연구에서 제작된 벽면형 식물바이오필터 화분의 기본 원리 및 설계 내용은 '바이오필터화분 수분 공급 장치'로 2013년 특허 출원(10-2013-0123096)하여 2015년에 특허로 등록하였으나(Patent No. 10-1488108; Lee and Chun, 2015), 기존의 흡수탑을 이용한 가습방식과는 다른 새로운 심지가습장치를 도입하여 가습공간을 소형화한 점에서 기존의 특허와 차이가 있다. 따라서 본 연구는 제작된 식물바이오필터의 심지가습방법을 통해 용량 설계에 근간이 되는 토양수분 안정화와 정상적인 식물 성장 여부를 알아보려고 수행하였다.

재료 및 방법

식물바이오필터의 시스템과 심지가습장치의 구성

바이오필터 내 식물 생육 환경 및 공기 흐름의 안정화를 알아보기 위해 설계된 벽면형 식물바이오필터 시스템의 내부(L 500 mm × W 210 mm × H 1500 mm)는 도면 설계 후 두께 10 mm의 투명아크릴 재질을 사용하여 제작하였다(Fig. 1). 전면부는 식물 식재용 토양층, 후면부는 분배기구 그리고 하단부는 물탱크로 내부에 수족관용 소형물펌프(aquatic pump), 수위차단 볼탑으로 구성되었으며, 송풍기(Ring Blower: TB-8, Innotech, 인천, 한국; 최대 송풍량 198 m³/h, 정압 66 mmAq)는 외부에 설치하여 바이오필터 물탱크 측면에 연결시켰다. 실내에 설치하기 위해 수직형으로 구성된 일체형 식물 바이오필터를 설계하여 벽면형 바이오필터의 부피를 최소화했다.

토양 식재층은 총 5층으로 구성되었으며 각 층에 10 cm 포트의 식물을 최대 5개 심을 수 있도록 제작하였다. 화훼용 배양토(한관승, ㈜삼화그린텍, 청양, 한국)를 토양층에 채워 후면 분배기구로부터 공기가 유입되어 토양층을 통과하기까지 경로를 220 mm가 되도록 설계하였으며, 이를 식물 식재공간뿐만 아니라 미생물 배양공간으로도 사용하였다. 또한 전면 식재부를 45° 각도로 설계하여 식물바이오필터의 후면부에서부터 유입된 공기가 후면 토양층에서 전면 토양층으로 통과할 때 가습된 공기

가 균일하게 분포되어 외부로 방출될 수 있도록 하였다(Fig. 1B). 물탱크를 제외한 벽면형 분배기구 역시 내부(L 500 mm × W 210 mm × H 1200 mm) 두께 10 mm의 투명아크릴 재질을 사용하여 제작하고 후면부 벽 방향에 배치하였다. 물탱크 하단부의 물탱크(L 500 mm × W 210 mm × H 300 mm)에 연결된 물펌프(aquatic pump: HJ-750, Zhejiang Sensen Industry Co. Ltd., 중국; 배수량 800 L/h, 전압 220 V/60 Hz)로부터 바이오필터 외부에 펌프 주입구인 원통형 아크릴 관(∅ 10 mm)을 통해 물이 위로 이동하여 심지에 수분을 머금도록 하였으며, 수위차단 볼탑을 설치하여 물이 적정선까지 차오르면 부레가 물의 표면위로 뜨게 되면서 물의 공급을 멈추게 하여 항상 일정한 수위를 유지하도록 하였다(Fig. 1C). 수분을 충분히 흡수한 심지(L 480 mm × W 300 mm)는 토양층 최상부에 30 mm만 묻어있는 상태로 토양에 수분을 유지시키도록 하였다. 심지는 4장, 3장, 2장의 순으로 한 장씩 감소시키면서 토양의 수분함량과 안정성을 살펴보고 있다.

심지로부터 물이 토양층에 흡수되게 하고 흡수된 물은 하단의 물탱크로 낙하한 후 물펌프에 의해 다시 상부의 심지장치로 공급되도록 하여 물 순환이 이루어지도록 하였다. 또한 정화되지 않은 실내의 오염된 공기가 송풍기의 흡입구로 통하여 빨려 들어오게 설계 및 제작하였다. 이후 흡입된 공기는 송풍기의 토출구를 통과하여 분배기구 하부를 통해 분배기구 상부로 올라와 분배기구 상층부 심지에서 공급되는 물과 아래쪽에서 올라오는 송풍된 공기가 만나 토양 내 공기를 가습하고, 가습된 공기는 분배기구 전면의 유공판으로 토양 식재층을 통과하면서 정화되어 다시 실내로 배출되어 순환하는 방식으로 제작하였다. 본 실험에서 제작된 식물바이오필터는 산업용 대형 바이오필터

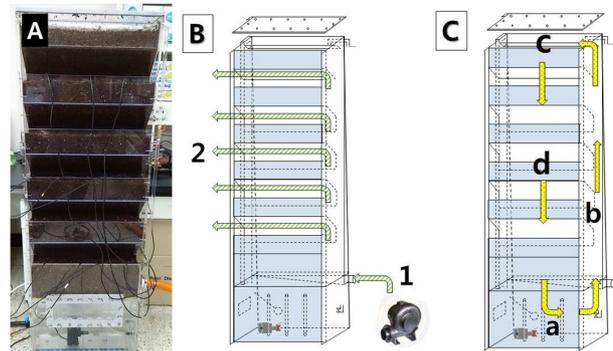


Fig. 1. The photography (A), diagram of air flow (B), and water movement (C) within the botanical biofilter with wick-typed humidifying apparatus used in this work (direction of air flow: 1→2, direction of water movement: a → b → c → d).

처럼 생물학적 여과장치로서의 기능만 필요한 것이 아니라 사무 공간에서 식물 식재 벽면으로서의 기능도 수행해야 하기 때문에 공간내 단면적을 적게 설계하였다. 필터의 체적 중 특히 두께를 줄였다. 따라서 높이 1500 mm, 두께(토양 필터층)를 150 mm로 설계하여 전체 체적을 0.158 m³으로 소형화하였다. 본 연구에서 층별 토양수분 안정화와 식물 생육 평가 기간 동안 송풍기와 가슴을 위한 수증모터는 연속 가동하였다. 실험 중 실험실(141 m³) 환경은 냉난방기를 이용하여 실내온도를 28°C로 설정하여 실험기간 동안 실내온도(28.5 ± 4.0°C)를 유지하도록 하였다.

식물바이오필터의 풍속 조절

적정 풍속을 결정하기 위해 송풍기의 출구에 밸브를 달아서 식물바이오필터의 분배기구로 들어가는 송풍량을 인위적으로 조절하였다. 식물바이오필터를 통과하는 실제 풍속은 각 식재층의 토출구를 밀폐할 수 있는 직사각형의 판(두께 10 mm의 투명 아크릴 재질, L 480 mm × W 120 mm)을 제작하여, 이 판의 중앙에 원통형의 토출구(두께 10 mm의 투명 아크릴 재질, Ø 40 mm, H 100 mm)를 부착하고, 디지털풍속계(TPI556, (주)서미트, 서울, 한국)로 측정된 풍속(wind speed: v)을 각 식물 식재층의 표면적(2,400 cm²) 대비 토출구 표면적(12.6 cm²)으로 나누어 실제 풍속을 환산하여 3 cm·s⁻¹이 되도록 조정하였다. 이에 따른 공기체류시간(ART: air residence time, sec)과 공기정화량(VR: air ventilation rate, m³·min⁻¹)은 선행 연구(Choi *et al.*, 2014)의 공식을 이용하였다.

식물바이오필터의 토양수분 측정

토양수분 함량(SMC, soil moisture content, %)의 측정은 식물바이오필터의 1~5층의 각 층별에 자료 수집 장치(data logger: Mini Logger MSTL, STA Corporation Co. Ltd., Anyang, Korea)에 연결된 토양수분센서(moisture sensor: ECH2O, EC-5, Deacon Devices Inc., Pullman, WA, USA)를 2반복으로 2개씩 45° 각도로 10 cm 깊이로 꼽아 2016년 5월 31일부터 8월 4일까지 15분 간격으로 64일간 측정하였다. 최종 토양수분 함량은 1~5층의 각 층별 3반복으로 반복당 토양 200 g씩 드라이오븐(105°C, 48시간)에 건조시킨 후 미세저울로 무게를 측정하는 토양수분증량법을 이용하여 토양수분센서의 데이터와 토양수분증량법의 데이터를 통하여 토양수분함량을 비교하였으며, 각 층별 값의 차이는 SAS 프로그램(Statistical Analysis System, V9.1, Cary, NC, USA)을 이용하고 Duncan's multiple range

test(DMRT)에 의하여 유의성을 검정하였다. 토양중량수분 함량(W/W)은 토양시료를 건조 전 후의 무게차이로 직접 수분함량을 측정 단위토양 무게이며 공식은 다음과 같다.

$$W/W = (\text{젖은 토양 무게} - \text{말린 토양 무게}) \times 100 / \text{말린 토양 무게}$$

식물바이오필터 내 식물 생육평가

벽면형 바이오필터내 식물 생육을 알아보기 위한 실험에서는 심지가슴장치에 2장의 심지를 설치하여 가동하였고, 식재층의 토양은 화훼용배양토(한관승, (주)삼화그린텍, 청양, 한국)를 사용하여 벽면형 바이오필터 식재층에 각각 토심 20 cm로 채워 넣었다. 식물 소재는 10 cm 화분 규격의 스파티필름(*Spathiphyllum wallisii* 'Mauna Loa')을 선정하여 벽면형 바이오필터의 1~5층에 각각 4주씩 식재하여 2016년 7월 7일부터 8월 7일까지 총 30일간 생육을 관찰하였다. 생장 특성으로는 식재 직전과 식재 30일 후에 초장, 초폭, 엽수, 체적, 생체중을 조사한 후 *S. wallisii* 'Mauna Loa'을 dry oven에 65°C에 72시간 건조시켜 건물중을 측정하였다.

식재 전과 식재 30일 후의 특성 조사 자료에 통계분석은 SAS 프로그램(statistical analysis system, V9.1)을 이용하였고, 각 층별 차이는 DMRT에 의하여 유의성을 검정하였다.

결과 및 고찰

심지가슴장치를 적용한 식물바이오필터의 물리 환경적 특성

식물바이오필터는 필터층인 인공배양토의 깊이와 넓이를 줄이는 동시에 식물의 근권부에 스트레스가 적도록 설계하였다(Fig. 1). 본 실험에서 사용한 필터층은 화훼용 인공배양토(한관승)를 사용하였기에 일반 토양과 퇴비보다는 입자가 크므로 적절한 수분 함량을 안정적으로 유지할 수 있었다. 제작된 식물바이오필터의 공기체류시간은 22cm의 토양층을 공기의 이동거리로 하고 초당 3 cm의 풍속으로 제어하여 공탑체류시간(EBRT: empty bed residence time)이 약 7.3초로 하였으며 공기정화량(VR)은 바이오필터의 출구 단면적(A, 0.24m²)과 실제 풍속(v , 3 cm·s⁻¹)으로 계산한 결과 분당 0.432 m³로 산출되었다. 실험 환경적 측면에서 온습도는 온도 최소값과 최대값의 범위가 27.9~33.5°C로 실험기간인 6~7월의 여름철이었기에 최대값이 높게 나왔으며, 실내습도는 48.3~69.3%로 비교적 일정하였다. 벽면형 식물바이오필터의 층별 토양수분 함량은 최소값과 최대

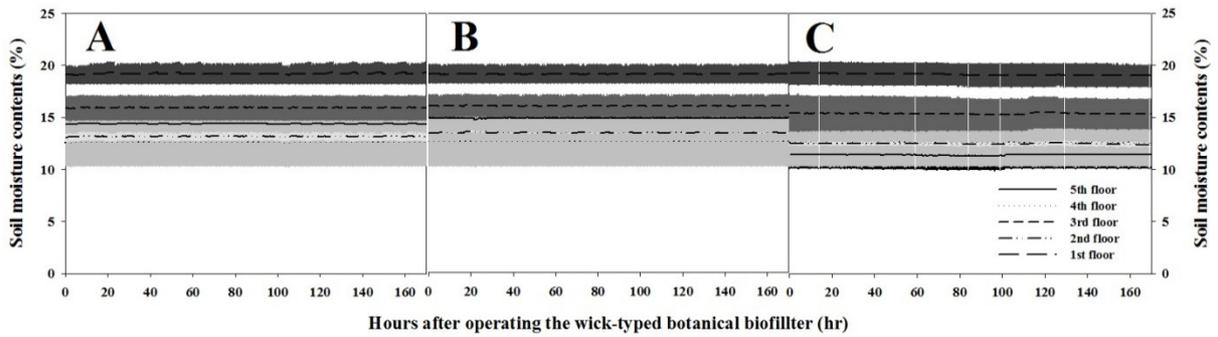


Fig. 2. Stabilization of soil moisture contents (SMCs) depending on each stair on the botanical biofilter and the number of wicks installed on the humidifying apparatus (A, 4 wicks; B, 3 wicks; C, 2 wicks). Error bars of SMCs present standard error (SE).

Table 1. Soil moisture contents (SMCs) and their linear regressions depending on each stair on the botanical biofilter and the number of wicks installed on the humidifying apparatus

The number of wicks	Stair	Average ± SE (%)	Linear regression (y = a*x + b)
4	1 st floor	19.1 ± 0.9	y = 0.0000414x + 19.187, p < 0.001
	2 nd floor	13.1 ± 0.4	y = 0.00000054x + 13.166, p < 0.001
	3 rd floor	15.9 ± 1.2	y = -0.00000199x + 15.922, p < 0.001
	4 th floor	12.6 ± 2.3	y = 0.0000047x + 12.596, p < 0.001
	5 th floor	14.4 ± 0.8	y = -0.00000611x + 14.382, p < 0.001
3	1 st floor	19.2 ± 1.0	y = -0.0007x + 19.178, p < 0.0001
	2 nd floor	13.5 ± 0.1	y = -0.0003x + 13.545, p < 0.0001
	3 rd floor	16.0 ± 1.1	y = -0.0002x + 16.068, p < 0.0001
	4 th floor	12.7 ± 2.4	y = -0.0000195x + 0.0046, p < 0.0001
	5 th floor	14.9 ± 0.5	y = -0.0016x + 14.955, p < 0.0001
2	1 st floor	19.3 ± 1.2	y = -0.0004x + 19.2236, p < 0.0001
	2 nd floor	12.5 ± 0.2	y = -0.0004x + 12.543, p < 0.0001
	3 rd floor	15.4 ± 1.8	y = -0.0002x + 15.4019, p < 0.0001
	4 th floor	12.6 ± 2.3	y = -0.00000134x + 12.5713, p < 0.0001
	5 th floor	11.4 ± 1.4	y = 0.0000773x + 11.3928, p < 0.0001

값의 범위가 11.4~19.3%로 비교적 일정하게 유지되는 것으로 나타났다(Fig. 2). 시간 경과에 따른 심지의 수 및 층별 토양 수분변화는 선형회귀식으로 나타내었다(Table 1). 심지가 4장의 경우, 각 층의 평균 토양수분 함량은 12.6~19.1%의 범위에 있었고, 토양수분 안정화를 나타내는 선형회귀식은 거의 수평을 이루어 기울기값(0.00000054~0.0000414)이 0에 가까웠다. 따라서 완벽한 토양수분 안정화가 이루어진 것으로 판단하였다(Fig. 2A). 심지 3장의 경우도 각 층의 평균 토양수분 함량이 12.7~19.2%의 범위에 있었고, 토양수분 안정화를 나타내는 선

형회귀식 또한 거의 수평의 기울기값(-0.0000195~-0.0016)을 보였다(Fig. 2B). 2장의 심지를 사용한 경우도 각 층의 평균 토양수분 함량이 11.4~19.3%의 범위에 있었고 토양수분의 기울기(-0.00000134~-0.0004)가 수평에 가깝게 유지되어 토양수분이 필터층 내에서 안정화 되었음을 알 수 있었다(Fig. 2C).

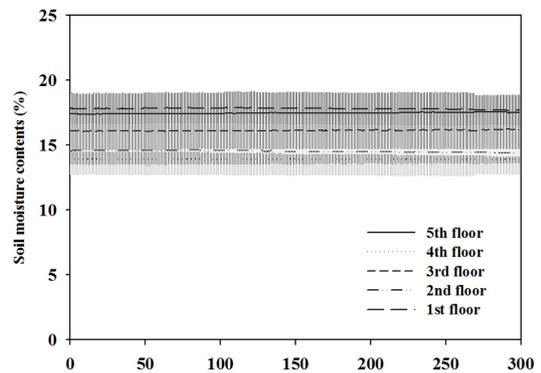
심지의 수에 따른 토양수분의 안정성은 4장의 심지처리가 가장 우수하였으나, 심지의 수에 따른 토양수분의 안정화 관점에서는 큰 차이가 없었다(Table 1). 설치한 심지의 수에 관계없이 가장 아래층인 1층의 토양수분 함량이 공통적으로 약간 높았던

이유는 벽면형 바이오필터의 구조상 심지가습장치에 의해 심지가 상부에 설치되어 있어 아래층으로 갈수록 중력에 의해 하층부에 토양수분이 집적되는 경우로 판단되었다. 1층 하부로 중력수가 빠져나갈 수 있는 배수공을 3개 설치하였으나 추가적인 배수공이 필요한 것으로 나타났다. 이러한 층별 토양수분 차이에 대한 경향은 2층의 토양수분 함량이 6층보다 약 2%가 높았던 이전 연구(Jung *et al.*, 2015)와도 일치하였다. 바이오필터 내 배지의 수분 함량은 미생물 활동에 매우 중요한 요인이며, 바이오필터 오작동의 75%가 수분 조절의 실패를 원인으로 보고하고 있으며(Morales *et al.*, 1996), 부족한 배지의 수분은 바이오필터 층의 건조와 편류 현상을 일으켜 미생물 활동에 부정적인 영향을 준다고 하였다(Delhoménie and Heitz, 2005).

선행 연구(Lee *et al.*, 2015b)에서는 흡수탑 방식을 사용한 식물바이오필터의 토양수분 기울기값(0.0008~0.0159)이 본 연구에서 채택한 심지가습 방식의 토양수분 기울기보다 훨씬 크게 나타났다(Table 1). 따라서 심지가습방식을 적용한 식물바이오필터 모델은 기존의 흡수탑 방식을 적용한 모델보다 월등히 우수한 토양수분에 대한 안정성을 확보하여 장기간 작동에도 일정한 토양수분을 유지함으로써 토양층을 통과하는 공기의 정확한 용량 설계가 가능하다고 판단되었다. 또한 기존의 흡수탑 방식은 식물 식재층 후면에 추가적인 공간이 필요하였으나, 심지가습장치는 이러한 공간이 필요가 없도록 설계되어 있어 식물바이오필터의 부피를 보다 소형화할 수 있는 장점이 있다. 전력소모량이 있어도 흡수탑 가습방식은 고압 분사노즐이 사용되어 500W급의 물펌프가 필요하지만 심지가습장식은 압상 높이만 확보되는 수족관용 물펌프(10~50W)로 충분하기 때문에 획기적으로 소비전력을 줄일 수 있는 장점을 갖추었다고 볼 수 있다.

앞선 심지의 수에 따른 토양수분의 안정성을 확인 후, 심지 2개를 사용한 식물바이오필터에 스파티필름을 식재 후 식물이 생장 하는 동안 토양수분의 변화를 관찰한 결과, 각 층의 평균

토양수분 함량은 13.9~17.8%의 범위에 있었고(Fig. 3), 토양수분 안정화를 나타내는 선형회귀식은 거의 수평을 이루어 기울기값(-1.25E-18~±0.0005)이 0에 가까웠다(Table 2). 따라서 식물 식재 이후에도 토양 수분은 안정적으로 유지되는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 식물이 자람에 따라 식물이 흡수하는 수분량이 증가함에도 불구하고 식물바이오필터의 토양수분 함량은 증감을 거의 보이지 않았다. 그러나, 이전 연구에서는 디펜바키아(*Dieffenbachia amoena* 'Marianne') 식재 시 바이오필터의 토양수분 변화는 초기값(24.5%)에서 42일 후 최종값(22.1%)으로 갈수록 미세하게 감소하는 기울기(-0.0489)를 나타내었고(Lee *et al.*, 2015a), 또한 상록낙죽고사리(*Humata tyermani*) 식재시 바이오필터의 토양수분 변화에 관한 연구(Choi *et al.*, 2014)에서도 초기값(18.5%)에서 3주후 최종값(17.6%)으로 역시 감소하는 기울기(-0.0053)를 나타내었다. Jung *et al.* (2015)은 흡수탑 방식의 식물바이오필터에 드라세나(*Dracaena sanderiana* 'Vitoria')와 스킨답서스(*Epipremnum*



Hours after *Spathiphyllum wallisii* 'Peace lily' planting on wick-typed botanical biofilter (hr)

Fig. 3. Soil moisture contents (SMCs) of each stair after *Spathiphyllum wallisii* 'Mauna Loa' planting on the botanical biofilter with 2 wicks installed on the humidifying apparatus. Error bars of SMCs present standard error (SE).

Table 2. Soil moisture contents (SMCs) and their linear regressions depending on each stair after *Spathiphyllum wallisii* 'Mauna Loa' planting on the botanical biofilter with 2 wicks installed on the humidifying apparatus

The number of wicks	Stair	Average ± SE (%)	Linear regression (y = a*x + b)
2	1 st floor	17.8 ± 1.2	y = -0.0004x + 17.8730, p < 0.0001
	2 nd floor	14.5 ± 0.1	y = -0.0005x + 14.5888, p < 0.0001
	3 rd floor	16.1 ± 2.5	y = 0.0004x + 16.0783, p < 0.0001
	4 th floor	13.9 ± 1.2	y = -1.25E-018x + 13.8512, p < 0.0001
	5 th floor	17.4 ± 1.2	y = 0.0005x + 17.3704, p < 0.0001

aureum 'N Joy')를 6단의 식재층에 식재 후 2층부터 6층까지의 토양수분 함량 변화에 대한 선형회귀식의 기울기값(-0.0065)이 식물이 자람에 따라 서서히 감소한다고 보고하였다.

본 실험에서 심지가습형 식물바이오필터의 물 펌프를 연속 가동시 스파티필름을 30일간 생육 후 최종 토양수분 함량을 토양수분센서(ECH2O, FDR방식)로 측정된 값과 토양중량수분법(w/w)으로 비교한 결과(Fig. 4), 1층~5층 평균의 최대값과 최소값의 범위가 13.9~17.7%로 층간 토양수분 함량의 차이가 약간 나타났으나, 토양중량수분법을 이용하여 측정된 1층~5층 최대

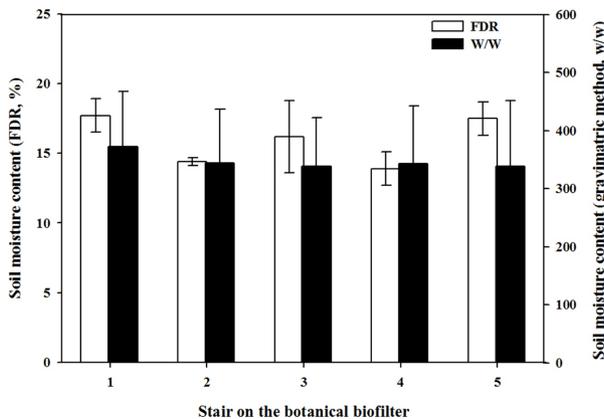


Fig. 4. Final soil moisture contents (FDR %, left) and soil moisture contents (gravimetric method, w/w, right) on each stair after *Spathiphyllum wallisii* 'Mauna Loa' planting on the botanical biofilter with 2 wicks installed on the humidifying apparatus. Error bars of SMCs present standard error (SE).

값과 최소값의 범위는 342.9~372.8 w/w으로 각 층의 토양수분이 모두 오차 범위 안의 수치를 나타내었다. 따라서 FDR센서를 이용한 토양수분 측정은 토양의 답압 및 토양과의 접촉 정도에 따라 안정성에 차이가 있었지만 토양수분중량법을 이용한 실제 최종 토양수분은 층별 차이가 없었음을 알 수 있었다. 결과적으로 FDR센서를 이용한 토양수분의 측정은 시간 경과에 따른 토양수분의 변화 패턴을 관찰하기에 적합한 방식이었고, 토양수분중량법은 층간 실제 토양수분의 정도를 판단하기에 적합하였다. 이러한 실험 결과는 새로 고안한 심지형 가습장치를 식물바이오필터에 적용함으로써 규모화된 수직 벽면형 식물바이오필터의 층별 토양수분을 모두 동일하게 유지할 수 있는 기초 기술을 개발하였다는 점에서 중요한 의미가 있다.

본 연구에서는 식물바이오필터의 문제점인 장기간 가동시 토양수분함량이 감소하거나 증가하는 부분을 심지가습법을 고안하여 크게 개선함으로써 식물을 식재 후에도 토양수분 함량이 일정하게 유지되는 것으로 판단하였으며, 식물의 종류와 생육에 따라 토양수분량의 조절이 충분히 가능하다는 점에서 본 연구 결과는 성공적이라는 것을 알 수 있었다.

벽면형 식물바이오필터 내 식물 생육평가

식물바이오필터내 식재한 스파티필름을 식재 후 30일째 수확하여 각 층별로 생육 상태를 조사한 결과, 스파티필름은 식재 전과 식재 후 그리고 층별에 따른 초장, 초폭, 체적, 엽수, 뿌리 길이에 있어 통계적 차이가 없었다(Table 3). 지상부 생체중, 총

Table 3. Growth characteristics of *Spathiphyllum wallisii* 'Mauna Loa' before and after planting on wick-typed botanical biofilter depending on each stair

Stair	Plant height (cm)	Plant width (cm)	Plant volume (cm ³)	No. of leaves	Root length (cm)
Before planting					
	43.3a ^z	23.2a	23,321a	24.7a	17.7a
30 days after planting in a biofilter (wind speed: 3cm·s ⁻¹)					
5 th floor	43.5a	22.1a	21,752a	22.5a	18.3a
4 th floor	45.0a	24.6a	27,321a	22.8a	20.3a
3 rd floor	46.5a	23.8a	27,168a	25.0a	19.0a
2 nd floor	48.0a	25.3a	30,551a	23.3a	22.0a
1 st floor	45.8a	22.9a	23,866a	22.3a	21.8a
Significance	ns	ns	ns	ns	ns

^zMean separation within columns using Duncan's multiple range test, 5% level.

^{ns}Non-significant.

Table 4. Fresh and dry weights of of *Spathiphyllum wallisii* ‘Mauna Loa’ before and after planting on wick-typed botanical biofilter depending on each stair

Stair	Fresh weight (g)			Dry weight (g)		
	Shoots	Roots	Total	Shoots	Roots	Total
	Before planting					
	28.6az	20.9a	49.6a	2.5a	1.8a	4.3a
	30 days after planting in a biofilter (wind speed: 3cm·s ⁻¹)					
5 th floor	35.3a	24.5a	59.8a	2.9a	2.1a	5.1a
4 th floor	38.6a	19.8a	58.4a	3.2a	1.6a	4.8a
3 rd floor	38.3a	25.3a	63.5a	3.3a	2.0a	5.3a
2 nd floor	35.5a	25.2a	60.7a	2.9a	2.2a	5.1a
1 st floor	32.9a	25.0a	57.9a	2.7a	2.1a	4.7a
Significance	ns	ns	ns	ns	ns	ns

^aMean separation within columns using Duncan’s multiple range test, 5% level.

^{ns}Non-significant.

생체중, 지상부 건물중, 총건물중은 식재 전에 비해 약간 증가하였다(Table 4). 또한 지하부 생체중과 건물중은 거의 비슷하여 지하부보다는 지상부가 조금 자란 것으로 판단하였다. 그러나 식재 전후 및 층간 스파티필름의 생체중과 건물중은 모두 통계적인 유의차가 없었다. 따라서 식물바이오필터에서의 스파티필름의 생장은 최소한으로 이루어졌음을 알 수 있었다. 그러나 흡수탑 방식을 적용한 식물바이오필터의 선행 연구(Jung *et al.*, 2015)에서는 식재 전에 비해 식재 후의 스킨답서스(*E. aureum* ‘N Joy’)의 지상부 생체중과 건물중은 모두 증가하였고, 지하부 건물중은 차이가 없었다. 또한 드라세나(*D. sanderiana* ‘Vitoria’)의 경우, 지하부의 생체중과 건물중만이 증가한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 식재된 스파티필름은 식재 전과 식재 후의 지상부 및 지하부의 생체중과 건물중의 통계적 차이는 없었으나, 지상부의 생체중과 건물중이 식재 후에 약간 증가한 것으로 나타나 스킨답서스의 경우와 비슷한 양상을 보였다(Table 4). 스킨답서스와 드라세나의 실험(Jung *et al.*, 2015)의 경우, LED로 조명을 설치하여 층별 광도가 9.9~36.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었으나 본 연구에서는 특별한 조명을 설치하지 않고 기존의 실내 형광등에 의존하였기에 식물바이오필터의 전층에 조사된 광도는 측정 시 0.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 나타났다. 따라서 스파티필름의 식재 전과 후의 차이가 적은 이유는 최저광도 조건인 실내에서 스파티필름의 생육이 진행되었던 결과로 추정되었다. 벽면형 식물바이오필터시스템은 생활 공간이나 사무 공간 혹은 대형건물의 로비와 같은 장소에 수직 벽면 공간



Fig. 5. The photography of *Spathiphyllum wallisii* ‘Mauna Loa’ on the wick-typed botanical biofilter.

을 활용하여 설치할 수 있으며, 기능적으로는 실내공기질을 개선하고 식물벽면을 조성하는 그린인테리어(green interior) 기술이다(Darlington *et al.*, 2000). 따라서 부적절한 식물 생장, 즉 너무 잘 자라거나 생육이 나빠지는 상태가 아닌 항상 일정한 식물의 성상을 유지시키는 것이 주된 목적이기 때문에 본 연구에서 식물바이오필터에 식재한 스파티필름의 생육은 매우 안정적인임을 확인할 수 있었다(Fig. 5).

결론적으로 선행 연구(Jung *et al.*, 2015; Lee and Chun, 2015; Lee *et al.*, 2015a; Lee *et al.*, 2015b)에서 개발되었던 기존의 벽면형 식물바이오필터에 장착된 흡수탑 가슴장치를 대체

할 수 있는 새로운 심지가습장치를 고안하여 식물바이오필터에 장착한 결과, 수직으로 구성된 다단 식재층의 토양수분 함량은 층간 차이가 적어 적절한 범위 내에 있었고, 장시간 경과한 후에도 토양수분의 변동이 거의 없었으며, 식물의 식재 후에도 토양수분의 변동은 나타나지 않아 토양수분의 안정성을 확보하였다. 또한 식재 전후 및 층별 식물 생장도 매우 안정적인 상태를 유지하였다. 따라서 이러한 기초 연구 결과를 바탕으로 향후 다양한 식물 종류와 식물바이오필터의 규모를 확장하여 토양수분 조절의 안정성을 검증하고 상용화를 위한 디자인 개발을 추진하여야 할 것으로 판단하였다.

적 요

본 연구의 최종 목표는 심지가습장치를 이용하여 소형화된 식물바이오필터를 개발함으로써 토양수분을 안정화하고, 이 바이오필터에 의해 실내공기의 오염 물질을 정화하는 것이다. 심지가습장치가 장착된 신규 식물바이오필터는 2015년에 만든 대형바이오필터에서 흡수탑 가습장치를 제거하여 더 소형화된 디자인으로 제작하였다. 본 연구는 신규 바이오필터 내부의 가습장치에 심지의 수를 조절함에 따른 식재층간의 토양수분 변화를 비교하고, 이 바이오필터의 식재층에 스파티필름 (*Spathiphyllum wallisii* 'Mauna Loa')을 식재하기 전과 후의 토양수분 변화와 식물 생육을 비교하였다. 심지의 개수에 따른 식재층간 토양수분은 비슷하게 나타났으며, 모든 토양수분의 선형회귀선은 장기간 토양수분이 안정화되었기 때문에 거의 수평의 선을 나타내었다. *S. wallisii* 'Mauna Loa'의 식재 전과 식재 후 30일째의 생육 지표를 비교한 결과, 모든 생육 지표에 있어 통계적 유의성이 없었다. 따라서, 식물바이오필터의 토양수분 함량은 흡수탑 가습장치를 사용한 이전의 바이오필터보다 심지의 개수에 관계없이 심지가습장치를 적용하였을 때 보다 안정화 되었다.

사 사

본 연구는 한경대학교 2016년도 학술연구구성비의 지원에 의한 것임.

References

Bohn, H.L. and K.H. Bohn. 1999. Development of a “second

generation” biofiltration system. 92nd Annual Meeting & Exhibition of AWMA, St. Louis, USA. 99-106.

Burgess, J.A., S.A. Parsons and R.M. Stuetz. 2001. Developments in odor control and waste gas treatment biotechnology: a review. *Biotechnol. Advances* 19:35-63.

Cho, H. and J.Y. Sohn. 2010. Assessment of indoor volatile organic compounds & formaldehyde emission characteristics in new apartments with the effectuation of the air quality law. *J. Korean Soc. Living Environ. Sys.* 17:206-213 (in Korean).

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 (in Korean).

Darlington, A., M. Chan, D. Malloch, C. Pilger and M.A. Dixon. 2000. The biofiltration of indoor air: implications for air quality. *Indoor Air* 10:39-46.

Delhoménie, M.C. and M. Heitz. 2005. Biofiltration of air: a review. *Crit. Rev. Biotechnol.* 25:53-72.

Jung, S.K., M.Y. Chun and C.H. Lee. 2015. Plant growth responses and indoor air quality purification in a wall-typed botanical biofiltration system. *Korean J. Plant Res.* 28:665-674 (in Korean).

Kennes, C. and F. Thalasso. 1998. Waste gas biotreatment technology. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 72:303-319.

Kim Y.S. 1993. A perspective on indoor air pollution. *J. KAPRA.* 9:33-43 (in Korean).

Lee, C.H. and M.Y. Chun. 2015. Water supply system for biofilter flowerpot. Republic of Korea Patent 10-1488108 (in Korean).

Lee, C.H., B. Choi and M.Y. Chun. 2015a. Stabilization of soil moisture and improvement of indoor air quality by a plant-biofilter integration system. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 33:751-762 (in Korean).

_____. 2015b. Stabilizing soil moisture and indoor air quality purification in a wall-typed botanical biofiltration system controlled by humidifying cycle. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 33:605-617 (in Korean).

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. J. Air Waste Manag. Assoc. Pittsburgh, PA (USA).

- Ottengraf, S.P.P. 1986. Exhaust gas purification: *In* Biotechnology, a Comprehensive Treatise in 8 Volumes, Rehm, H.J. and G. Reed (eds.), Verlag Chemie. Weinheim, Germany. pp. 426-452.
- Smet, E., P. Lens and H. Langenhove. 1998. Treatment of waste gases contaminated with odorous sulfur compounds. *Critical Rev. Environ. Sci. Technol.* 28:89-117.
- Soreanu, G., M. Dixon and A. Darlington. 2013. Botanical biofiltration of indoor gaseous pollutants - A mini-review. *Chem. Eng. J.* 229:585-594.
- Yoo, M.H. 2005. Effects of foliage plants, media, soil microorganism, and purification system on the improvement of indoor air quality. Ph.D Thesis, Konkuk Univ., Korea (in Korean).
- Zilli, M., E. Palazzi, L. Sene, A. Converti and M.D. Borghi. 2001. Toluene and styrene removal from air in biofilters. *Process Biochemistry* 37:423-429.

(Received 20 September 2016 ; Revised 28 September 2016 ; Accepted 5 October 2016)