

## 풍속과 초기 토양수분에 따른 평면형 바이오필터 내 토양수분 안정화 및 식물 생육반응 평가

최 봄<sup>1</sup>, 천만영<sup>2</sup>, 이창희<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>한경대학교 원예학과, <sup>2</sup>한경대학교 환경공학과, <sup>3</sup>국제농업기술정보연구소

## Evaluation for Soil Moisture Stabilization and Plant Growth Response in Horizontal Biofiltration System Depending on Wind Speed and Initial Soil Moisture

Bom Choi<sup>1</sup>, Man Young Chun<sup>2</sup> and Chang Hee Lee<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Horticulture, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

<sup>3</sup>Research Institute of International Agriculture, Technology, and Information, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

**Abstract** - The final aim of this study is to develop a biofiltration system integrated with plant vegetation for improving indoor air quality effectively depending on indoor space and characteristics. However, to approach this final goal, several requirements such as constant pressure drops (PDs) and soil moisture contents (SMCs), which influence the capacity design for a proper ventilation rate of biofiltration system, should be satisfied. Thus, this fundamental experiment was carried out to adjust a proper wind speed and to ensure a stabilization of initial SMCs within biofilter for uniform distribution of SMCs and PDs, and for normal plant growth, especially avoiding root stress by wind. Therefore, we designed horizontal biofilter models and manufactured them, and then calculated the ventilation rate, air residence time, and air-liquid ration based on the biofilter depending on three levels of wind speed (1, 2, and 3 cm·s<sup>-1</sup>). The relative humidity (RH) and PD of the humidified air coming out through the soil within the biofilter, and SMC of the soil and plant growth parameters of lettuce and duffy fern grown within biofilter were measured depending on the three levels of wind speed. As a result of wind speed test, 3·sec<sup>-1</sup> was suitable to keep up a proper RH, SMC, and plant growth. Thus, the next experiment was set up to be two levels of initial SMCs (low and high initial SMC, 18.5 and 28.7%) within each biofilter operated and a non-biofiltered control (initial SMC, 29.7%) on the same wind speed (3 cm·sec<sup>-1</sup>), and measured on the RH and PD of the air coming out through the soil within the biofilter, and SMC of the soil and plant growth parameters of *Humata tyermani* grown within biofilter. This result was similar to the first results on RHs, SMCs, and PDs keeping up with constant levels, and three SMCs did not show any significant difference on plant growth parameters. However, two biofiltered SMCs enhanced dry weights of the plants slightly than non-biofiltered SMC. Thus, the stability of this biofilter system keeping up major physical factors (SMC and PD) deserved to be adopted for designing an advanced integrated biofilter model in the near future.

**Key words** - Air residence time, Biofilter, *Humata tyermani*, Indoor air quality, Pressure drop, Ventilation rate

### 서 언

도시화 진행에 따라 오늘날 도시민들은 대기오염의 피해를 피할 수 없게 되었다. 도심지역의 대기 오염 조사결과 교통량,

상업업무시설, 건축물이 대기 오염에 영향을 끼치는 것으로 나타났다(Oh *et al.*, 2005). 일반 주거용 건축물에서 실내공기 오염의 경우 일반적인 환기만으로 실내 이산화탄소의 농도를 감소시켜 쾌적성을 확보할 수 있다(Lee and Pack, 2006). 이처럼 충분한 환기를 통해 일부 오염공기의 배출이 가능하지만 최근

\*교신저자(E-mail) : changheele@hknu.ac.kr

우리나라 대기의 경우 NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM10 등, 소위 선진국형 오염물질은 환경기준을 만족시키지 못하고 있는 실정(MOE, 2012) 이와 같은 대기오염은 환기를 통해 정화되는 실내 공기 오염에도 영향을 미치게 되어 실질적인 환기의 의미가 사라지게 된다. 이에 따라 근본적인 오염 원인을 해결하는 것이 아닌 실내 공기질 개선을 위한 공기정화 기술의 개발이 필요한 시점으로 환경적으로 안전하고 2차 오염원 발생이 없는 실내 녹화기술로 식물에 의한 공기정화와 탄소봉에 의한 2차 공기정화가 가능한 'Bio Green Wall System'과 식물을 이용한 실내공기질 개선용 바이오필터 시스템 등의 생물학적 방법을 통한 공기정화장치가 개발되고 있다(Bang *et al.*, 2013; Lee and Joe, 2008). 일반적으로 흔히 이용되고 있는 실내 식물은 매우 효과적인 공기정화 기능을 가지고 있어 실내공기오염물질인 이산화탄소, 포름알데히드, 휘발성유기화합물 제거효과가 다양한 연구를 통해 입증되어 공간별 실내 녹화에 다양한 방법으로 이용되고 있다(Hong *et al.*, 2005; Kill *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2010).

또한 식물의 뿌리에 의한 흡착 또는 토양입자 및 토양 박테리아에 의해서도 흡수 및 흡착되고 토양 박테리아 세균은 병원균을 멸균시키는 것으로 알려지고 있다(Lee, 2006). 토양미생물인 *Pseudomonas putida* F1을 토양에 주입한 바이오필터가 토양 중의 Toluene을 90% 제거할 수 있다고 하였으며(Sohn *et al.*, 2004), *Pseudomonas* sp. TDB4 균주를 통해 VOC의 분해능을 평가한 결과 단일기질인 경우 toluene, benzene, styrene, *p*-xylene 순으로 분해능이 뛰어났으며 VOCs 혼합물의 경우 styrene, toluene, benzene, *p*-xylene의 순서로 분해능이 좋은 것으로 나타났다(Jang *et al.*, 2006). 이러한 연구에 따라 식물과 함께 배양토 내 토양미생물도 공기 정화에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

실내 녹화는 조사 결과 심리적 안정감과 실내 온습도 조절, 장식적인 효과의 이유로 이용자의 선호도가 높은 것으로 밝혀져(Shin *et al.*, 2012) 공간의 특성을 고려한 실내 녹화의 도입이 활성화 되어져야 함이 확인되었다. 이러한 건물 실내녹화 조성의 경우 관수방법 또한 다양한 방법으로 시도되고 있는데 국외 사례 조사 결과 소규모 실내녹화의 경우는 인력관수를 사용하였으며 설비관수는 주로 대형 플랜터형 실내녹화 방식, 대형 화단형 실내녹화 방식, 공간형 실내녹화 방식 등과 같이 대규모로 실내녹화를 실시한 건물에서 두상관수, 점적관수, 심지관수, 저면관수 등의 형태로 실시되고 있다(Bae *et al.*, 2012). 이와 같은 실내조경용 화분에서 사용되는 관수방법별 화분내 수분분포 및 수분흡수 특성을 조사한 결과 심지관수의 경우 수분 흡수 지

대가 배양토로 물이 공급되는 부분과 공급되지 않는 부분으로 나뉘었고 물뿌리개를 이용한 두상관수와 점적관수의 경우도 물이 공급되지 않는 공간이 형성되어 토양수분 분포가 불균일하게 나타났다(Kim *et al.*, 2009).

본 연구의 최종목표는 식재용 토양 내 수분 분포를 균일하게 유지하도록 하여 일정한 공기 정화량, 압력 손실량, 송풍기 용량, 공기체류시간 등을 산출하고 실내 식물의 공기정화능력과 토양에 존재하는 미생물을 활성화시켜 실내 대기오염물질 제거 능력이 강화된 바이오필터 시스템을 개발해 실내공간의 규모, 특성에 적합한 실내녹화용 공기정화 시스템의 용량을 설계하는 것이다. 본 실험에서 사용한 바이오필터 시스템의 기본 구조는 가습된 공기를 배지의 지하부로 공급하는 자동관수 방법이며, 송풍기를 통하여 들어온 외부공기가 가습하는 장치(흡수탑)로 흡입된 후 바이오필터의 미생물 배양공간인 식물 식재용 토양 하부에서 토양 상부로 통과하면서 식물체의 지하부와 지상부에 수분과 습도를 공급하는 방식을 적용하였다(Chun and Lee, 2014; Fig. 1).

본 실험의 목적은 제작된 바이오필터 용기 내 식물을 식재하고, 풍속을 달리하여 식물 생육기간 동안의 용기 내 식물 생육, 공중습도, 토양수분 함량 그리고 압력손실량을 조사하여 바이오필터의 기능과 식물 생육에 적절한 바이오필터 풍속을 구명하고 초기 토양수분을 달리 하여 바이오필터의 수분 안정화를 확인하고자 실시하였다.

## 재료 및 방법

### 평면형 바이오필터 시스템

토양수분 안정화 정도를 알아보기 위하여 바이오필터(Fig. 1A)는 두께 10 mm의 투명아크릴 재질을 사용하여 폭과 길이 각 500 mm, 높이 700 mm로 제작하고, 이 중 하부 공기 주입부와 상부의 식재 토양층(담체층)의 높이는 각 200 mm와 500 mm로 두었다. 상부의 토양이 하부로 흘러내림을 방지하기 위해 10 mm 두께의 투명아크릴 유공판(Ø10 mm × 576구)를 제작하여 하부와 상부를 격리하고 유공판 위에 5mm 두께의 다목적 수세미(녹색, (주)한국쓰리엠)를 배치하였다. 가습장치는 상부의 원통형 흡수탑(Fig. 1B)과 하부의 정사면체 수조(Fig. 1C) 그리고 물펌프로 구성되었으며, 상부의 흡수탑은 두께 5 mm의 투명아크릴 재질을 사용하여 내경 200 mm, 높이 1450 mm로 제작하였고, 흡수탑의 위쪽(높이 350 mm)은 물이 직접 바이오필터로 들어가는 것을 방지하기 위한 디미스터(demister)와 그 아래에 물분사 노즐

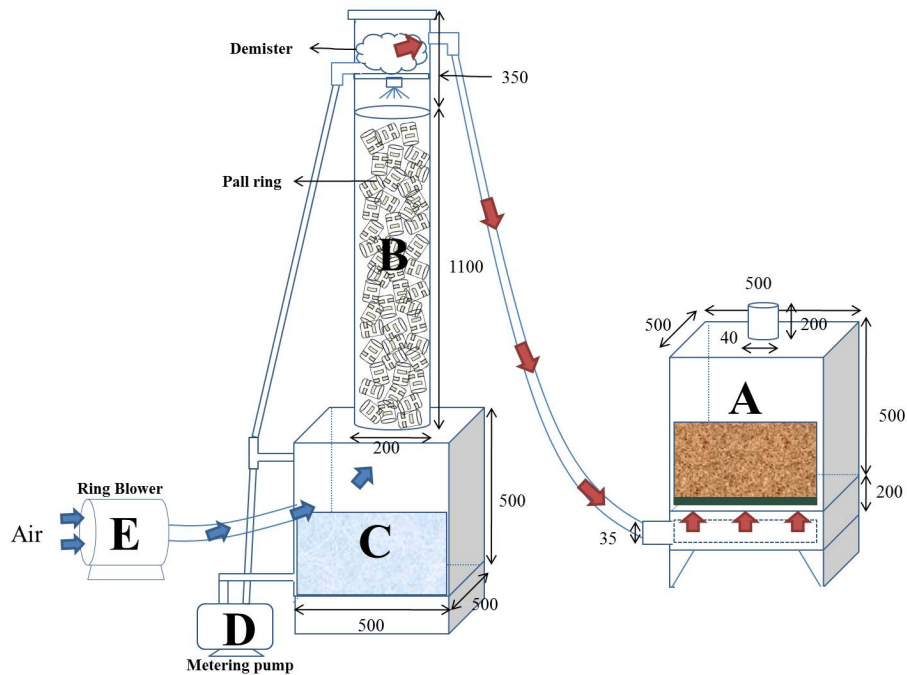


Fig. 1. Diagram of horizontal biofilter system used in this experiment (Direction of air movement: E → C → B → A).

(nozzle)을 장착하였다. 아래 1100 mm의 공간은 물과 공기의 혼합시 표면적을 넓히기 위한 충전재(pall ring,  $\varnothing 25.4 \times H25.4$  mm, 재질 PP, 조일환경, 서울, 한국)로 채우고 아래에 유공판으로 막아 하부의 수조로 공기와 물이 이동할 수 있도록 하였다. 흡수탑 하부의 물탱크는 두께 10 mm의 투명아크릴 재질을 사용하여 길이, 폭, 높이를 모두 500 mm로 된 정사면체 수조로 제작하고, 수조 아랫부분에 정량펌프(metering pump; PH-100WM, 신한일전기(주), 부천, 한국; 최대양수량:  $18 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , 12 m, 300 W)을 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; 최대 송풍량  $2.9 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ , 풍압 1200 mmAq, Fig. 1E)의 흡입구를 통해 실내공기를 빨아들인 후, 송풍기의 토출구에서 흡수탑 하부까지 송풍관( $\varnothing 35$  mm)으로 연결하여 흡수탑 상층부 노즐에서 분사되는 물과 아래쪽에서 올라오는 송풍된 공기가 만나게 하여 공기를 가습시키고, 가습된 공기는 흡수탑 상층부를 통해 바이오필터 용기의 하부 공기 주입부로 들어가서 위쪽에 배치된 토양 식재층과 식물을 통과하여 정화된 공기가 실내로 배출되는 방식으로 설계하였다. 본 연구에서 개발된 평면형 바이오필터 화분은 ‘바이오필터화분 수분공급장치’로 특허등록 하였다 (Chun and Lee, 2014; Fig. 1).

### 풍속 및 초기 토양수분 안정화 실험

바이오필터의 풍속 조절은 바이오필터 상부에 밀폐가 가능한 뚜껑을 제작하고 뚜껑 가운데 원통형의 토출구(두께 5 mm의 투명아크릴 재질, 내경 40 mm, 높이 200 mm)를 부착하여 디지털 풍속계(TPI556, (주)서미트, 서울, 한국)로 측정된 속도를 토양층의 표면적( $2,500 \text{ cm}^2$ ) 대비 원통형 토출구 표면적( $12.56 \text{ cm}^2$ )으로 나누어 실제 속도를 환산하였다. 송풍기의 토출구에 중간 밸브와 레버를 부착하여 흡수탑으로 들어가는 풍속을 조절하였다.

풍속 처리별 토양수분 안정성 실험에 사용한 토양층은 화훼용 배양토(한판승, (주)삼화그린텍, 청양, 한국)와 톱밥의 혼합 토양(한판승: 톱밥 = 3:1, v/v)을 건조시켜 사용하였으며, 토심 20 cm로 바이오필터 내에 채워 넣었다. 이 때 토양 하부에서 상부로 통과해 나오는 가습된 공기의 풍속(wind speed:  $u$ )은 각 1, 2, 3  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 조절하였다.

초기 토양수분 함량(% SMC, soil moisture content) 안정성 실험의 경우 토양층은 화훼용 배양토(한판승, (주)삼화그린텍, 청양, 한국) 단용으로 초기 토양 수분함량을 저수분상태(초기 SMC, 18.5%), 고수분상태(초기 SMC, 28.7%)의 2수준으로 맞추고 토심 20 cm로 고정하였다. 풍속은 앞 실험의 결과를 토대로 하여 3  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 조절하여 실시하였다. 대조구는 풍속 0  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 송풍기와 물펌프를 가동하지 않고 토양수분 함량을 고수분상태(초기 SMC, 29.7%)로 하고 토심 20 cm로 맞추어 실시하였다.

토양수분함량, 대기습도와 온도는 자료수집장치(data Logger: Mini logger MSTL, STA Corporation Co. Ltd., Anyang, Korea)에 연결하여 일정 간격으로 저장하였으며, 풍속별 실험의 경우, 토양수분측정기(moisture sensor; ECH<sub>2</sub>O, EC-5, Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA)는 1시간 간격으로 2주간 측정하고 측정시 각 바이오필터의 세 부분(유입구로부터 전면, 중간, 후면)에 깊이 10 cm 지점에 사선으로 꽃아 측정하였다. 온습도센서(temperature and humidity sensor; STL-STH, STA Corporation Co. Ltd., Anyang, Korea)를 이용하여 15분 간격으로 저장하고 토양에서 15cm 높이에서 측정하였다. 초기 토양수분 함량(ISMC)별 실험에서는 토양수분과 온습도를 1시간 간격으로 식물의 생육 후기에 1주간 측정하였다. 차압계(U-manometer; M400W/M, DWYER Instruments Inc., Michigan, USA)를 바이오필터의 공기가 토양을 통과하기 전부분과 통과한 후의 부분에 실리콘 튜브를 연결하여 물기둥 높이의 차로 측정하였다.

본 실험에 사용한 바이오필터 시스템의 공기정화량(ventilation rate: VR), 공기체류시간(air residence time: ART), 기액비(air-liquid ration: ALR)의 산출식은 다음과 같다.

$$[VR = A \cdot v]$$

VR: 공기정화량( $\text{cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ ), v: 바이오필터내 풍속( $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ ), A: 바이오필터의 단면적( $\text{cm}^2$ )

$$[ART = L \cdot v^{-1}]$$

ART: 공기체류시간(sec), L: 식재토양의 깊이(cm), v: 바이오필터내 풍속( $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ )

$$[ALR = PQ \cdot VR^{-1}]$$

ALR: 기액비( $\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$ ), PQ: 양수량(water-pumped quantity,  $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ ), VR: 공기정화량( $\text{cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ )

## 식물 생육 평가

평면형 바이오필터 내 풍속 변화에 따른 식물 성장 반응을 알아보기 위한 실험에서는 상추(*Lactuca sativa* L., ‘청치마’, (주)코레콘, 안성, 한국) 모종과 더피고사리(*Nephrolepis cordifolia* cv. Duffii)를 풍속별로 각각의 바이오필터에 9개체씩을 식재하였다. 풍속별 상추는 바이오필터로 기습하여 식재 후 2주째, 더피고사리는 식재 후 3주째 생육 반응을 조사하였다.

대조구의 관수는 바이오필터로 기습하지 않고 타이머를 이용하여 하루에 한번 15분간 스프링클러를 이용한 두상관수(물 8.4 L)로 9개체를 같은 기간 동안 재배하여 같은 방법으로 생육 반응을 조사하였다. 생육 조사 항목은 초장, 초폭, 뿌리길이, 엽수, 생체중, 건물중을 조사하였다.

바이오필터 초기 토양수분의 양(SMC)에 따른 식물 성장 반응을 알아보기 위한 실험에서는 상록늪줄고사리(*Humata tyermani*)를 토양의 초기 수분에 따라 바이오필터로 기습 후 9개체씩 식재하여 3주째 초장, 초폭, 생체중, 건물중을 조사하였으며, 대조구의 관수는 타이머를 이용하여 하루에 한번 15분간 스프링클러를 이용한 두상관수(물 8.4 L)로 9개체를 같은 기간 동안 재배하여 같은 방법으로 생육 반응을 조사하였다.

통계분석은 SAS 프로그램(Statistical Analysis System, V9.1, Cary, NC, USA)을 이용하였고, 처리 평균간 차이는 Duncan’s multiple range test (DMRT)에 의하여 유의성을 검정하여 작성하였다.

## 결과 및 고찰

### 풍속별 평면형 바이오필터의 물리적 특성

식물 생육시 알맞은 토양수분과 대기 습도값을 나타내는 풍속을 알아보기 위한 풍속별 성능시험의 결과는 Fig. 2A에서 보

Table 1. Physical and environmental parameters of air flow characteristics influenced by wind speed

Wind speed ( $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ )	1	2	3
Air-liquid ration ( $\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$ ) <sup>z</sup>	96.0	48.0	32.0
Air residence time (sec) <sup>z</sup>	20.0	10.0	6.7
Ventilation rate ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ) <sup>z</sup>	0.15	0.30	0.45
Aerial relative humidity (%) <sup>y</sup>	44.8 ± 3.9	55.3 ± 4.3	67.1 ± 5.7
Soil moisture (%) <sup>yx</sup>	11.9 ± 0.1	12.8 ± 0.1	14.9 ± 0.6
Pressure drop ( $\text{mmH}_2\text{O}$ ) <sup>y</sup>	4.9 ± 1.0	9.2 ± 2.0	15.2 ± 3.0

<sup>z</sup>Calculated values.

<sup>y</sup>Actual values.

<sup>x</sup>Soil used in this table was mixed growing medium (Hanpanseung:sawdust = 3:1) within biofilter system.

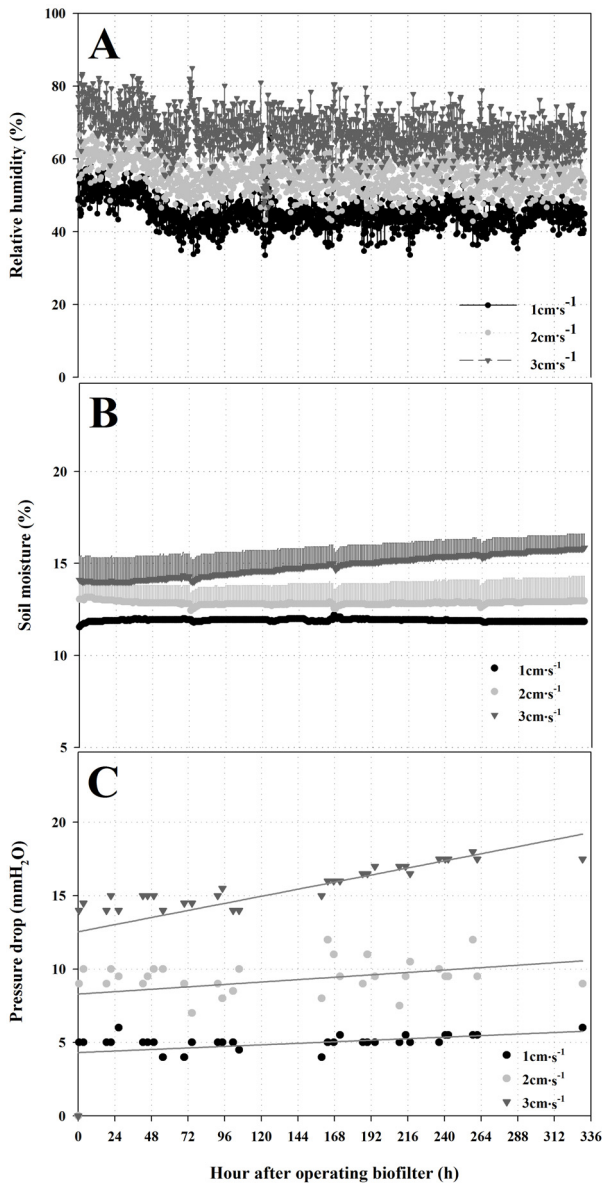


Fig. 2. Changing patterns of relative humidity (A), soil moisture (B), and pressure drop (C) within horizontal biofilter system depending on wind speed at 20 cm soil depth (Hanpanseung: sawdust = 3:1) using a cylindrical humidifier (HI 10 × D20 cm, 14.4L water·min<sup>-1</sup>).

는 바와 같이 대기습도는 풍속 3, 2, 1 cm·sec<sup>-1</sup> 순으로 높았다. 이전 실험에서 바이오필터 용기 상부 뚜껑을 장착한 밀폐식의 경우 용기 내부 대기습도가 100%에 가깝게 측정되었다. 본 실험의 경우 바이오필터 상부의 뚜껑을 제거한 평면형 바이오필터에 식물을 식재한 뒤 진행되어 바이오필터 출구의 공중습도가 밀폐식에 비해 낮게 측정되었지만 풍속이 증가할수록 높게 나타났으며, 풍속 3 cm·sec<sup>-1</sup> 인 경우 공중습도가 67.1 ± 5.7%로

풍속별로 뚜렷한 차이를 나타내었다(Table 1).

토양수분함량은 풍속 3, 2, 1 cm·sec<sup>-1</sup> 순으로 높아 풍속별로 미세한 차이를 나타내었다(Fig. 2B). 측정 시작점과 2주후의 토양수분함량 측정값은 풍속 3, 2, 1 cm·sec<sup>-1</sup> 순으로 각 14.1, 13.1, 11.6%에서 15.8, 12.9, 11.8%로 변화하였다. 풍속 3 cm·sec<sup>-1</sup>의 1차 회귀식의 경우, 미세하게 상승하는 경향을 나타내었고( $y = 0.0061x + 13.9, p < 0.0001$ ), 풍속 2 cm·sec<sup>-1</sup> ( $y = -0.0005x + 12.8, p = 0.3028$ )와 풍속 1 cm·sec<sup>-1</sup> ( $y = -0.0002x + 11.9, p < 0.0001$ )는 기울기가 거의 없는 안정된 값을 초기부터 측정 종료까지 유지하였다. 압력손실량(pressure drop, mmH<sub>2</sub>O)은 각 풍속에서 큰 차이를 나타내어 풍속이 증가함에 따라 압력손실량은 높아지는 것을 볼 수 있었고(Fig. 2C), 토양수분함량이 증가함에 따라 압력손실량도 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있었다(Table 1). 따라서 토양습도와 공중습도, 압력손실량의 결과를 종합해 볼 때 충분한 토양습도 유지와 적정 공중습도를 고려하여 풍속 3 cm·sec<sup>-1</sup>가 적절할 것으로 판단되었다. 이에 풍속을 3 cm·sec<sup>-1</sup> 맞추어 진행할 경우 향후 추가실험을 통하여 보다 안정한 토양수분 유지와 압력손실량을 줄일 수 있는 방법이 필요할 것으로 판단되었다.

바이오필터내 기습 공기의 기액비(ALR)는 풍속 1, 2, 3 cm·sec<sup>-1</sup>의 순서에 따라 각각 96, 48, 32 L·m<sup>-3</sup>으로 나타났으며, 공기 체류 시간(ART)은 풍속 1, 2, 3 cm·sec<sup>-1</sup>에 따라 각각 20.0, 10.0, 6.7 sec 순으로 풍속이 증가할수록 줄어들었다(Table 1). 반면 공기정화량(VR)의 경우, 풍속 1, 2, 3 cm·sec<sup>-1</sup>에 따라 각각 0.15, 0.3, 0.45 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>순으로 증가하였다. 예비실험에서 송풍량(풍속)이 증가할수록 압력손실량은 비례적으로 증가하는 양상을 나타냈으며, 풍속 4와 5 cm·sec<sup>-1</sup>를 적용하였을 때 압력손실량이 크게 증가하게 되는데(Lee *et al.*, 2012), 이는 현실적으로 바이오 필터 시스템의 송풍기 풍압 용량이 커지는 부담과 공기체류시간 감소에 따른 토양내 미생물의 공기정화능력 또한 줄어들게 되어 높은 풍속보다는 적절한 공기정화량과 식물 근권부 스트레스 내성 범위에 드는 조건인 풍속 3 cm·sec<sup>-1</sup>로 설정함이 적합할 것으로 판단되었다.

### 평면형 바이오필터의 풍속에 따른 식물 생육 평가

식재된 식물의 각 풍속에 따른 지상부, 지하부 스트레스 여부와 식물 생육 변화를 관찰하기 위하여 상추(*Lactuca sativa* L.)와 더피고사리(*Nephrolepis cordifolia* cv. Duffii)의 생육 조사를 실시한 결과, 풍속별 상추의 초장, 뿌리길이는 통계적 유의성이 나타나지 않았으며, 엽수, 생체중은 통계적 유의성을 나

Table 2. Growth responses of *Lactuca sativa* seedlings as influenced by wind speed within biofilter system

Wind speed (cm·s <sup>-1</sup> )	Height (cm)	Root length (cm)	No. of leaves (ea)	Fresh weight (mg)		
				Total	Leaves	Roots
Control	6.0 a <sup>z</sup>	4.6 a	4.0 b	1299.1 a	992.7 a	306.4 a
1	3.2 a	4.7 a	4.3 b	507.7 b	438.0 b	69.8 c
2	5.8 a	5.3 a	6.8 a	1251.3 a	1014.5 a	236.8 b
3	6.1 a	4.9 a	7.0 a	1337.4 a	1017.4 a	320.0 a
Significance	ns	ns	***	***	***	***

<sup>z</sup>Mean separation within columns using Duncan's multiple range test, 5% level.

ns,\*\*\* Non-significant or significant at P=0.001, respectively.

Table 3. Dry weights of *Lactuca sativa* seedlings as influenced by wind speed within biofilter system

Wind speed (cm·s <sup>-1</sup> )	Dry weight (mg)		
	Total	Leaves	Roots
Control	65.4 bc <sup>z</sup>	45.7 a	19.7 b
1	56.6 c	47.4 a	9.3 c
2	71.8 ab	47.9 a	23.9 b
3	82.1 a	50.2 a	31.9 a
Significance	**	ns	***

<sup>z</sup>Mean separation within columns using Duncan's multiple range test, 5% level.

ns,\*\*,\*\*\* Non-significant or significant at P = 0.01 or 0.001, respectively.

Table 4. Growth responses of duffy fern (*Nephrolepis cordifolia* cv. Duffii) as influenced by wind speed within biofilter system

Wind speed (cm·s <sup>-1</sup> )	Height (cm)	Width (cm)	No. of leaves (ea)	Fresh weight (g)		
				Total	Leaves	Roots
Control	12.6 a <sup>z</sup>	23.9 a	21.0 a	16.9 a	6.6 a	10.4 a
1	14.8 a	25.8 a	21.3 a	12.6 a	5.0 a	7.6 a
2	14.0 a	26.6 a	28.5 a	18.1 a	9.2 a	9.0 a
3	14.8 a	25.3 a	25.3 a	18.9 a	10.3 a	8.7 a
Significance	ns	ns	ns	ns	ns	ns

<sup>z</sup>Mean separation within columns using Duncan's multiple range test, 5% level.

ns Non-significant.

타내었다(Table 2).

상추의 건물중값은 풍속 1, 2, 3 cm·sec<sup>-1</sup>의 순서에 따라 높은 값을 나타내었다. 총 건물중과 뿌리 건물중의 경우 유의성이 나타나는데 잎 건물중은 유의성이 나타나지 않아 총 건물중의 차이는 풍속별 토양습도에 따른 뿌리의 생장의 영향으로 판단된다(Table 3). 상추의 생육이 1 cm·sec<sup>-1</sup>에서 가장 낮게 나타난 것은 낮은 토양 수분함량과 대기습도의 영향을 받은 것으로 판단된다. 풍속2, 3 cm·sec<sup>-1</sup>의 생육 상태는 대조구인 스프링클러에 의한 두상관수에 의한 결과보다 나은 생육을 보여 식물 생장에

알맞은 풍속으로 판단되었다.

더피고사리는 초장, 초폭, 엽수, 생체중, 건물중 모두 통계적으로 유의성이 인정되지 않았다(Table 4 and 5). 대조구와 풍속에 따른 바이오필터 처리구 모두 전체적인 생육 상태에는 차이가 없는 것으로 보아 풍속 1, 2, 3 cm·sec<sup>-1</sup>에 따른 차이 없이 생육에 적절한 토양수분과 대기습도를 공급 받고 있는 것으로 판단된다. 따라서 식물의 종류에 따라 풍속 및 토양수분에 대한 민감도가 다른 것을 알 수 있었다.



Table 5. Dry weights of duffy fern (*Nephrolepis cordifolia* cv. Duffii) as influenced by wind speed within biofilter system

Wind speed (cm·s <sup>-1</sup> )	Dry weight (g)		
	Total	Leaves	Roots
Control	3.1 a <sup>z</sup>	1.5 a	1.5 a
1	2.9 a	1.4 a	1.5 a
2	3.1 a	1.6 a	1.5 a
3	3.1 a	1.6 a	1.5 a
Significance	ns	ns	ns

<sup>z</sup>Mean separation within columns using Duncan's multiple range test, 5% level.

<sup>ns</sup>Non-significant.

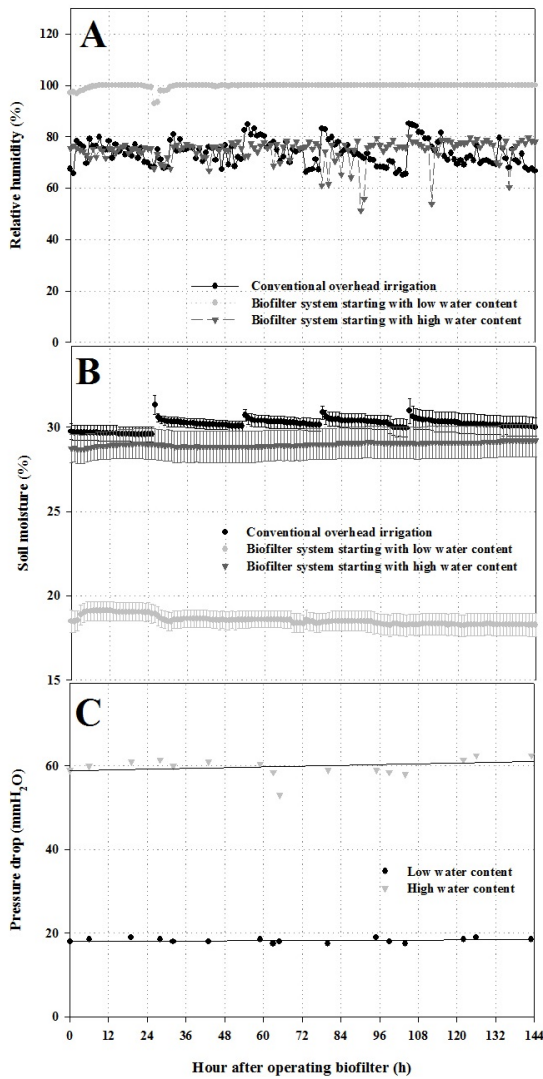


Fig. 3. Soil moisture (A), relative humidity (B), and pressure drop (C) depending on irrigation system at 20 cm soil depth using a cylindrical humidifier (HI 10 × D20 cm, 14.4 L water·min<sup>-1</sup>) and 3 cm·s<sup>-1</sup> wind speed.

**평면형 바이오필터 초기 토양수분의 양에 따른 토양수분 안정화**

앞의 실험으로 토양수분과 대기습도를 고려하여 가장 적합한 풍속으로 판단되는 3 cm·sec<sup>-1</sup> 풍속을 적용하고 추가실험을 실시하여 초기 토양 수분함량(SMC)이 다를 경우 일정 시간 경과 후에도 토양수분값이 일정하게 유지되는지 알아 보고자 하였다.

대기 상대습도(RH, %)의 경우 저수분 조건에서 가장 높은 값 (=100%)을 유지하는 것으로 나타났고, 고수분 조건과 대조구에서는 다소 변동폭을 나타내지만 60~80% 범위 내에서 유지하는 것으로 나타났다. 저수분 조건의 경우 다른 조건에 비해 대기 상대습도를 높게 나타내는 이유는 초기 토양수분이 비슷한 대조구(초기SMC, 29.7%)와 고수분(초기SMC, 28.7%)의 경우보다 저수분 조건(초기SMC, 18.5%)에서 토양공극률이 높아 가습한 공기가 대기로 많은 양이 배출되어 높은 상대습도를 나타내는 것으로 판단된다(Fig. 3A).

최종 토양수분은 초기 토양수분이 가장 높았던 대조구에서 가장 높았고 그 다음으로 고수분, 저수분 조건 순으로 나타났다(Fig. 3B). 대조구, 고수분, 저수분의 토양수분 초기값과 최종값은 각 29.7, 28.7, 18.5%에서 30.0, 29.2, 17.6%로 변동되었으며, 각 토양수분 변화에 관한 1차 회귀식은 대조구의 경우,  $y = 0.003x + 29.9$  ( $p < 0.0001$ ), 고수분은  $y = 0.0025x + 28.8$  ( $p < 0.0001$ ), 저수분은  $y = -0.0053 + 18.9$  ( $p < 0.0001$ ) 이었다. 또한 대조구의 간헐적인 토양수분 변동은 두상관수에 의해 24시간 주기로 관수될 때마다 토양수분 함량이 일시적으로 증가 후 감소하면서 안정적인 수분을 유지하는 양상을 나타내었다. 위 세 가지 토양수분 조건에서 토양수분의 미세한 변동폭이 나타났지만 일정 시간이 지나도 초기 토양수분에 가까운 안정적인 수분 환경이 유지되는 것을 알 수 있었다. 압력손실량은 저수분

에 비해 고수분 조건에서 월등히 높은 값(약 3배)을 나타내었다 (Fig. 3C). 고수분 조건의 경우, 기습된 공기가 공극률이 낮아진 토양층을 통과하면서 대기로 배출될 때 통기저항이 증가하여 이러한 차이를 나타내는 것으로 판단된다. 이 결과는 앞의 풍속 별 물리적 특성에서의 값과 마찬가지로 토양수분 함량이 증가함에 따라 압력손실량도 비례하여 증가하는 것을 다시 확인할 수 있었다.

결과적으로 바이오필터 시스템내 토양층의 초기 수분 함량에 따른 토양수분 함량, 압력손실량, 대기습도는 일정기간이 경과하여도 미세한 변화만을 나타내어 본 시스템의 안정성이 유지되는 것으로 나타났다. 따라서 식재 식물의 수분 요구도에 따라 초기 토양수분을 맞추어 바이오필터를 작동시킬 경우 안정된 토양수분 함량을 유지할 수 있어 식물 재배시 토양수분 관리가 용이하고, 시스템의 규모별 송풍기 및 물펌프 등의 적정 용량을 설정할 수 있는 기초 자료로 활용될 것으로 판단된다.

**평면형 바이오필터의 초기 토양수분에 따른 식물 생육 평가**

위의 바이오필터 내 초기 토양수분 함량별 실험에서 상록넉 줄고사리(*Humata tyermani*)를 식재하여 생육을 평가한 결과, 저수분 및 고수분 조건, 대조구 모두 초장, 초폭, 부위별 생체중, 건물중의 모든 생육 지표에 대해 통계적 유의성이 나타나지 않았다(Table 6, Table 7). 그러나 저수분과 고수분 조건의 바이오필터에서 생육한 상록넉줄고사리의 평균 건물중이 두상관수에 의한 대조구보다 상대적으로 높은 값을 나타낸 것을 알 수 있었다. 이것으로 바이오필터 내에서의 식물 생육이 토양수분함량의 차이에도 불구하고 대조구에 비해 양호한 것은 토양 하부를 통과하여 토양 상부로 배출되는 외부 기습공기에 의해 충분한 수분과 용존산소가 공급되었기 때문으로 추정된다. 이러한 방식은 과습에 의한 토양내 용존산소 부족현상 또한 방지할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 풍속  $3 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ 에서 초기 토양수분 조절은 일반적인 식물의 경우 생장에 영향이 없을 것으로 보여

Table 6. Growth responses of *Humata tyermani* as compared with two biofilter systems and non-biofilter depending on amount of initial soil moisture

Initial soil moisture (%)	Final soil moisture (%)	Plant height (cm)	Plant width (cm)	Total FW (g)	FW of leaves (g)	FW of roots (g)	FW of rhizomes (g)
Biofilter (wind speed: $3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )							
Low ( $18.5 \pm 1.1$ )	$18.3 \pm 1.2$	$17.1a^z$	$29.7a$	$86.5a$	$15.3a$	$50.3a$	$21.1a$
High ( $28.7 \pm 1.4$ )	$29.2 \pm 1.7$	$19.3a$	$27.9a$	$105.5a$	$14.1a$	$70.3a$	$21.1a$
Non-biofilter (wind speed: $0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ and overhead irrigation)							
High ( $29.7 \pm 0.8$ )	$30.0 \pm 1.0$	$17.1a$	$29.4a$	$84.8a$	$14.4a$	$52.5a$	$17.9a$
Significance		ns	ns	ns	ns	ns	ns

<sup>z</sup>Mean separation within columns using Duncan's multiple range test, 5% level.

<sup>ns</sup>Non-significant.

Table 7. Dry weights (DW) of *Humata tyermani* as compared with two biofilter systems and non-biofilter depending on amount of initial soil moisture

Initial soil moisture (%)	Final soil moisture (%)	Total DW (g)	DW of rhizomes (g)	DW of roots (g)	DW of leaves (g)
Biofilter (wind speed: $3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )					
Low ( $18.5 \pm 1.1$ )	$18.3 \pm 1.2$	$8.63a^z$	$2.92a$	$2.50a$	$3.21a$
High ( $28.7 \pm 1.4$ )	$29.2 \pm 1.7$	$9.16a$	$2.98a$	$3.13a$	$3.05a$
Non-biofilter (wind speed: $0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ and overhead irrigation)					
High ( $29.7 \pm 0.8$ )	$30.0 \pm 1.0$	$7.50a$	$2.41a$	$2.10a$	$2.98a$
Significance		ns	ns	ns	ns

<sup>z</sup>Mean separation within columns using Duncan's multiple range test, 5% level.

<sup>ns</sup>Non-significant.



건생, 중생, 습생 식물의 모든 경우에 초기 토양수분을 조절하여 자동 관수 관리가 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 실내공간의 규모, 특성에 적합한 효과적인 실내 공기질 개선을 위한 식물 녹화용 바이오필터 시스템 개발을 목적으로 하였다. 이러한 연구의 기초로 필요한 부분이 일정한 압력 손실량과 토양수분 함량이기엔 안정된 바이오필터의 토양 내 수분 분포를 균일하게 유지하면서 풍속에 의한 식물 성장 저해가 일어나지 않도록 개발해야 하는 문제점을 해결해야 한다. 이를 해결하고자 용기 내 식물을 식재하고 풍속과 초기 수분양을 달리하여 토양수분함량과 대기습도, 압력손실량을 측정하고 이와 함께 식물 생육조사를 실시하였다. 식물 식재에 적합한 풍속은  $3 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ 로 설정한 경우 생육에 적합한 토양수분 함량과 실내 습도를 가지는 것을 알 수 있었으며 식물의 수분 요구도에 맞추어 초기 토양수분을 조절하여 식물을 식재할 경우 식물 성장과 관리에 무리가 없을 것으로 확인되었다. 이러한 연구결과를 다양한 공간에 따른 바이오필터 시스템의 용량 설계의 기초로 활용하고 추후 추가적인 실험으로 다양한 식물 식재를 통한 생육반응 실험과 바이오필터를 이용한 실내 공기 정화 효율 조사, 실내 적용 가능한 다양한 디자인의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

## 적 요

본 연구의 최종 목표는 실내의 공간과 특성에 따라 효율적으로 실내공기질을 향상시킬 수 있는 식물 녹화와 바이오필터를 통합한 시스템의 개발이다. 그러나 이러한 목표를 달성하기 위해서는 바이오필터 시스템의 적절한 공기정화량에 대한 용량 설계에 중요한 영향을 주는 일정한 압력손실량과 토양수분 함량과 같은 여러 가지 요구사항들이 충족되어야 한다. 따라서 본 기초 연구는 바이오필터의 토양 내 균일한 분포를 갖는 토양수분 함량과 압력손실량을 유지하고 정상적인 식물 성장 특히 바람에 의한 근권부 스트레스를 받지 않도록 풍속을 적절히 조절하고, 바이오필터 내 초기 토양수분 함량이 일정하게 유지되어 안정성을 확보하기 위해 수행되었다. 본 실험에서는 평면형 바이오필터 모델을 설계하여 제작하고 세 가지 풍속(1, 2,  $3 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ )에 따른 바이오필터의 공기정화량, 공기체류시간, 기액비를 산출하였다. 또한 세가지 풍속에 따라 바이오필터 내 토양층을 통과하여 배출된 기습공기의 상대습도, 압력손실량, 토양수분 함량을 측정하고, 이 바이오필터 내에서 자란 상추와 더 피고사리의 생육을 평가하였다. 풍속 실험의 결과, 풍속  $3$

$\text{cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ 가 상대습도, 토양수분 함량, 식물생육을 유지하기에 가장 적절하였다. 따라서 다음 실험에서는 풍속을  $3 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ 로 고정하고 두 가지 수준의 초기 토양수분 함량(저수준 18.5%, 고수준 28.7%) 조건에서 바이오필터를 가동한 처리구와 바이오필터를 가동하지 않은 대조구(초기 토양수분 함량 29.7%)를 설정하고, 바이오필터 내 토양층을 통과하여 배출된 가습공기의 상대습도, 압력손실량, 토양수분 함량과 바이오필터 내에서 자란 상록떡줄고사리의 생육을 평가하였다. 이 실험 결과는 첫 번째 실험 결과와 유사하였으며 상대습도, 토양수분 함량, 압력손실량이 일정한 수준을 유지하였다. 또한 세 가지 초기 토양수분 함량에 따른 상록떡줄고사리의 생육도 유의성 있는 차이를 나타내지 않았다. 그러나 두 가지의 바이오필터 처리구는 대조구에 비해 건물중이 다소 증가된 것을 알 수 있었다. 따라서 주요 물리적 요소인 토양수분 함량과 압력손실량을 유지할 수 있는 본 바이오필터 시스템의 안정성은 가까운 미래에 보다 발전된 일체형 바이오필터 모델 설계에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 농촌진흥청 농업과학기술개발 공동연구사업(과제번호: PJ008495022013)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## References

- Bae, Y.M., E.J. Jung., Y.S. Kim and J.D. Chang. 2012. Case studies and analysis of indoor landscaping methods in foreign buildings. J. KIAEBS. 6:151-158 (in Korean).
- Bang, S.W. 2013. Development of the 'Bio green wall system' for air purification and improvement of indoor environment. MS Thesis, Konkuk Univ., Korea.
- 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 (in Korean).
- Chun, M.Y, and C.H. Lee. 2014. Water supply system for biofilter flowerpot. Patent serial No. 10-1418679.
- 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. Korean J. Hort. Sci. Technol. 23:97-103 (in Korean).
- Jang, H.S., S.K. Shin, J.H. Song and S.J. Hwang. 2006. Biodegradation of VOC mixtures using a bioactive foam

- reactor II. J. KSCE. 26(6B):695-701 (in Korean).
- Kill, M.J., K.J. Kim, J.K. Cho and C.H. Park. 2008. Formaldehyde gas removal effects and physiological responses of *Fatsia japonica* and *Epipremnum aureum* according to various light intensity. Korean J. Hort. Sci. Technol. 26:189-196 (in Korean).
- 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 (in Korean).
- Lee, B.S. and J.K. Pack. 2006. Comparison about time serial change of carbon dioxide's concentration and ventilation at apartment room. J. Korean Soc. Environ. Administration 12:27-36 (in Korean).
- Lee, C.H., M.Y. Chun, M.K. Kim, H.J. Lim, H.D. Shim and H.S. Lee. 2012. Pressure drop pattern of floricultural media for biofiltration system. Korean J. Hort. Sci. Technol. 30 (SUPPL. II):164-164 (in Korean).
- Lee, J.H. 2006. System of phyto-filter for removing indoor air pollutants. Interior Landscape 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 (in Korean).
- Ministry of Environment. 2012. Environment white paper. Ministry of Environment.
- Oh, K.S., J.H. Koo and C.J. Cho. 2005. The effects of urban spatial elements on local air pollution. J. Korean Planners Association 40:159-170 (in Korean).
- 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. Korean J. Hort. Sci. Technol. 28:864-870 (in Korean).
- Shin, S.H., M. Yoo and Y.M. Kim. 2012. A proposal for indoor greening standard type, through a survey of the users preferences in working space. J. Korean Soc. People Plants Environ. 15:477-483 (in Korean).
- 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. Sanitation 19:19-24 (in Korean).

(Received 12 August 2014 ; Revised 27 August 2014 ; Accepted 29 August 2014)