

Research Report

가습 주기에 따른 벽면형 식물바이오필터의 토양 수분 안정화 및 실내공기질 정화

이창희^{1,2*}, 최 봄¹, 천만영³¹한경대학교 원예학과²국제농업기술정보연구소³한경대학교 환경공학과

Stabilizing Soil Moisture and Indoor Air Quality Purification in a Wall-typed Botanical Biofiltration System Controlled by Humidifying Cycle

Chang Hee Lee^{1,2*}, Bom Choi¹, and Man Young Chun³¹Department of Horticulture, Hankyong National University, Anseong, 456-749, Korea²Research Institute of International Agriculture, Technology, and Information, Hankyong National University, Anseong, 456-749, Korea³Department of Environmental Engineering, Hankyong National University, Anseong, 456-749, Korea

Abstract: The ultimate goal of this research is to develop a botanical biofiltration system that combines a green interior, biofiltering, and automatic irrigation to purify indoor air pollutants according to indoor space and the size of biofilter. This study was performed to compare the stability of air flow characteristics and removal efficiency (RE) of fine dust within a wall-typed (vertical) botanical biofilter depending on humidifying cycle and to investigate RE of volatile organic compounds (VOCs) by the biofilter. The biofilter used in this experiment was designed as an integral form of water metering pump, water tank, blower, humidifier, and multi-level planting space in order to be suitable for indoor space utilization. As a result, relative humidity, air temperature, and soil moisture content (SMC) within the biofilter showed stable values regardless of three different humidifying cycles operated by the metering pump. In particular, SMCs were consistently maintained in the range of 27.1-29.7% during all humidifying cycles; moreover, a humidifying cycle of operating for 15 min and pausing for 45 min showed the best horizontal linear regression ($y = 0.0008x + 29.09$) on SMC ($29.0 \pm 0.2\%$) during 120 hour. REs for number of fine dust (PM10) and ultra-fine dust (PM2.5) particles passed through the biofilter were in the range of 82.7-89.7% and 65.4-73.0%, respectively. RE for weight of PM10 passed through the biofilter was in the range of 58.1-78.9%, depending on humidifying cycle. REs of xylene, ethyl benzene, total VOCs (TVOCs), and toluene passed through the biofilter were in the range of 71.3-75.5%, while REs of benzene and formaldehyde (HCHO) passed through the biofilter were 39.7% and 44.9%, respectively. Hence, it was confirmed that the wall-typed botanical biofilter suitable for indoor plants was very effective for indoor air purification.

Additional key words: biofilter, formaldehyde, green interior, PM10, volatile organic compounds

서 언

실내 공기질과 공중보건 위험간의 직접적인 상관관계를 설명할 수 있는 주거 공간 및 공공 장소인 실내에서 도시민들은 85-90%의 시간을 보내고 있으며(Yu et al., 2009), 실내

공기질(IAQ)은 미국환경보호당국의 공중보건 관심사의 상위 5위에 들고 있다(EPA, 2009). 미세 먼지 및 입자, 가스상 화합물과 같은 실내 공기 오염원은 가정과 다양한 산업 현장에서 공기질을 오염시키는 주요 원인이며, 불쾌감, 급성 및 만성 질환 등의 인간 건강을 위협한다. 특히 눈, 코, 피부

*Corresponding author: changheelee@hknu.ac.kr

※ Received 16 March 2015; Revised 8 April 2015; Accepted 10 April 2015. 본 연구는 농촌진흥청 농업과학기술개발 공동연구사업(과제번호: PJ008495022014)의 지원에 의해 이루어진 것이며, 본 연구 과정에 열심히 참여한 한경대학교 원예학과 김유나와 김은혜 학생에게도 감사에 뜻을 전한다.

© 2015 Korean Society for Horticultural Science

자극, 알레르기, 호흡기 장애, 두통, 피로 등을 유발하는 빌딩증후군(Sick building syndrome)은 불량한 실내공기질의 가장 전형적인 지표 중 하나이다(Wargocki et al., 2000). 특히, 지방족 및 방향족 탄화수소, 알코올, 알데히드와 염소계 화합물로 구성된 수백 종류의 휘발성유기화합물(VOCs)은 가구, 카펫, 건축 자재, 스프레이, 택배원, 청소 및 복구 활동 혹은 주변의 각종 공장과 자동차 매연으로부터 실내 공기로 유입된다(EPA, 2008). 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 질소 산화물(NO_x)과 이산화황(SO₂) 등의 무기기체화합물(ICs)은 등유 히터, 석유보일러(스토브 및 오븐), 나무 난로, 온수 히터 등의 각종 연소 과정에서 생성될 뿐만 아니라 흡연, 기타 오염 발생원(자동차, 발전소, 정유소 등)에서도 발생한다(Brauer et al., 2002).

최근에 와서 실내공기 오염 방지를 위해 IAQ 표준 및 배기 가스 규제, 공공 교육 등과 지속 가능한 공기정화 시스템의 개발을 위해 전 세계적인 노력을 기울이고 있으나, 일반적인 실내 공기 청정 시스템은 기체 화합물보다는 오히려 입자 제거(기계적 필터, 전기 집진기 등)를 위주로 설계되어 있다(Soreanu et al., 2013). 그러므로 식물 기반 시스템을 이용한 생물학적 여과법은 먼지, 휘발성 무기 및 유기화합물과 같은 실내 오염 물질의 대부분을 제거하는 잠재력을 가지고 있어 일반적인 공기 청정 시스템에 대한 유망한 대안이 될 것으로 보인다(Liu et al., 2007). 따라서 이러한 다른 기술들을 조합하고 최적화하여 공기 청정 시스템의 단점을 극복할 수 있을 것이다(Yu et al., 2009).

식물바이오필터(botanical biofiltration)는 바이오필터와 식물정화능(phytoremediation)의 복합체(hybrid)이고, 바이오필터는 오염물질이 높은 생물학적 활성 필터층을 통과하면서 능동적으로 중화되는 생물반응기이다(Soreanu et al., 2013). 1980년대 미 항공 우주국(NASA)의 과학자들은 정적인 조건에서 실내 공기로부터 화분에 심은 몇몇 식물에서 VOCs를 제거하는 능력을 증명하였다(Wolverton et al., 1989). 이후 2000년대 초반까지 캐나다의 Ghelph대학, 호주의 Sydney대학, 그리고 미국의 Georgia대학의 공동연구팀은 식물과 근권부 미생물을 이용하여 실내 공기 정화 분야에 대한 여러 가지 대형 연구 프로그램을 시작하였고, ICs(inorganic gaseous compounds)를 제외한 VOCs에 초점을 맞추어 연구하여 특별히 설계된 식물바이오필터의 실내 VOCs 제거능력을 증명하였다(Darlington, 2000; Darlington et al., 2001). 많은 산업용 바이오필터는 공기오염물질 제거에 이용되고 있으나 필터층의 미생물에게 필요한 유기영양분의 소모로 수명

에 한계가 있기 때문에(Deviny et al., 1999), 식물 근권부의 미생물에 대한 유기영양분 공급 기능과 식물 지상부의 실내오염물질 제거능력을 기존의 바이오필터에 결합시킨 식물바이오필터에 대한 연구는 미래 도시환경의 실내 공기질 개선과 친환경 건축 분야에 핵심 기술로 발전할 것으로 판단된다. 현재까지의 식물바이오필터 시스템은 크게 PPs(potted-plants)와 PBTFs(plant-assisted biotrickling filters)로 구분되며, PPs는 화분의 내부 구조의 변화가 없는 가장 단순하고 비용이 적게 드는 수동적인 식물바이오필터의 하나이며, PBTFs는 더 많은 공기순환과 생물학적 여과를 거치는 장치로 실내 공기 오염 물질을 PPs보다 빨리 제거하는 특징이 있다. 따라서 PPs와 PBTFs모두 낮은 오염 물질 농도에서 사용할 수 있지만 PBTFs는 높은 공기 유량을 처리할 필요가 있을 때 더욱 적합하고 예측 가능한 제거가 이루어지는 시스템이라고 할 수 있다(Soreanu et al., 2013). 캐나다 Guelph대학의 Darlington 교수는 유동적인 조건에서 실내 VOCs를 제거하기 위한 PBTFs 방식의 “botanical biotrickling filtration” 기술을 개발하여 2004년에 미국 특허(Patent No. US672791B2)를 등록하고 현재 상용화하였다(Darlington, 2004). 국내에서도 공기 흐름의 제어를 통한 식물과 바이오필터를 결합한 연구가 진행되고 있으나(Choi et al., 2014), 실내의 공간과 인원에 따라 용량 설계에 근거하여 공기정화량을 조절하면서 실내공기질을 향상시킬 수 있는 식물 녹화와 바이오필터를 통합한 벽면형 시스템에 대한 연구는 아직 초기 단계이다. 식물과 결합한 바이오필터 시스템 개발시 공기정화량에 대한 용량 설계에 중요한 영향을 주는 요인으로 낮은 압력 손실량과 균일한 토양수분 함량 등이 있으며(Kennes and Thalasso, 1998; Ottengraf, 1986), 정상적인 식물 생장은 바람에 의한 근권부 스트레스를 받지 않도록 풍속을 적절히 조절해야 한다고 하였다(Choi et al., 2014). 따라서 본 연구는 제작된 벽면형 식물바이오필터의 가습 주기에 따른 공기 흐름의 안정성과 미세먼지의 제거율을 비교하고, 휘발성 유기화합물 제거율을 조사하여 본 식물바이오필터의 실질적인 공기정화 효율을 알아보고자 수행하였다.

재료 및 방법

벽면형 식물바이오필터 시스템의 제작

공기 흐름 및 토양수분 안정화와 실내공기질 개선 효과를 알아보기 위한 벽면형 식물바이오필터 시스템의 내부(L 1200mm × W 500mm × H 1750mm)는 도면 설계 후 두께

10mm의 투명아크릴 재질을 사용하여 제작하였다. 벽면형 (수직형) 식물바이오필터 내부의 구성은 다음과 같다(Fig. 1). 전면부는 식물 식재용 토양층, 후면부는 가습 장치(흡수탑) 그리고 하단부는 물펌프(metering pump), 물탱크(water tank), 송풍기(ring blower), 송풍구로 구성되었으며, 실내 공간을 적게 차지하는 일체형 식물바이오필터로 설계하였다. 식재용 토양층은 총 7층으로 각 층(L 1200mm × W 100mm × H 200mm)에 10cm포트의 식물 9-10개를 심을 수 있도록 제작하였다(Fig. 1A). 이 공간에 건조시킨 화훼용 배양토(한 판승, (주)삼화그린텍, 청양, 한국)를 채워 유입된 가습 공기의 토양층 통과 경로를 200mm가 되도록 설계하여 식물 식재 및 미생물 배양 공간으로 사용하였다. 또한 식물바이오필터 후면부에서 가습공기가 들어와 후면 토양층에서 전면 토양층으로 통과할 때의 가습공기가 균일하게 분포되어 대기로 방출될 수 있도록 각 층의 전면 식재부를 45도 각도로 설계하였다(Fig. 1A). 벽면형 흡수탑(L 1200mm × W 150mm

× H 1400mm)도 두께 10mm의 투명아크릴 재질을 사용하여 제작하고 후면부 벽면 쪽으로 배치하였다(Fig. 1B). 흡수탑의 위쪽(높이 1100-1400mm)에는 물이 직접 식물바이오필터로 들어가는 것을 방지하기 위한 디미스터(demister)와 물분사 장치를 장착하였다. 물분사 장치는 흡수탑 폭에 맞는 막대형 아크릴관(L 1180mm × W 20mm × H 35mm)에 물분사 노즐 4개를 일정 간격으로 설치하고, 하단부의 물탱크(L 1200mm × W 460mm × H 32mm)에 연결된 물펌프(metering pump: HB-305A, 신한일전기(주), 부천, 한국; 최대양수량: 80L·min⁻¹, 압상높이 20m, 전력소모량 500W, Fig. 1C)로부터 원통형 아크릴 관(∅ 15mm)을 통하여 상단부의 물분사 장치에 연결하였다. 이 물분사 장치는 상부의 노즐로부터 물을 아래쪽 흡수탑으로 분사하도록 하고, 흡수탑으로 분사된 물은 하부의 물탱크로 낙하한 후 물펌프에 의해 다시 물분사 장치로 공급되어 물순환이 이루어지도록 하였다. 또한 실내 공기는 송풍기(Ring Blower: KJB1-280, 기전사, 인천, 한국; 최대송풍량 1.8m³·min⁻¹, 풍압 600mmAq, Fig. 1C)의 흡입구로 통하여 빨려 들어와, 송풍기의 토출구에서 공기의 편류현상을 방지하기 위한 분기구를 통과하여 흡수탑 상부에 올라와 흡수탑 상층부 노즐에서 분사되는 물과 아래쪽에서 올라오는 송풍된 공기가 만나 공기를 가습하고, 가습한 공기는 흡수탑 상층부의 유공판으로 토양 및 식재층을 통과하여 다시 실내로 순환하는 방식으로 설계하였다. 본 연구에서 제작된 벽면형 식물바이오필터 화분의 자세한 원리 및 각 부분별 설계 내용은 ‘바이오필터화분 수분공급장치’로 2013년 특허 출원(10-2013-0123096)하여 2015년에 특허로 등록하였다(Patent No. 10-1488108; Lee and Chun, 2015).

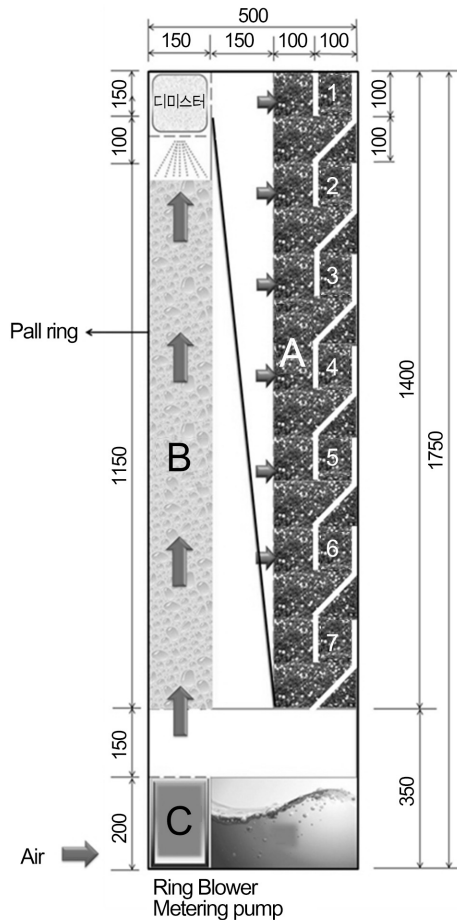


Fig. 1. Diagram of the wall-typed botanical biofiltration system used in this work (Direction of air movement: C → B → A).

벽면형 식물바이오필터의 풍속 조절

식물바이오필터로 유입되는 풍속의 조절은 송풍기에 인버터 장치(rpm inverter, Insung Tech., Yongin, Korea)를 전원과 연결하여 흡수탑으로 들어가는 송풍량을 조절하고, 식물바이오필터를 통과하는 실제 풍속은 식물바이오필터 각 식재층의 토출구를 밀폐할 수 있는 직사각형의 판을 제작 (두께 10mm의 투명아크릴 재질, L 1220mm × W 120mm) 하여 직사각형의 판 가운데 원통형의 토출구(두께 10mm의 투명아크릴 재질, ∅ 50mm, H 70mm)를 부착하고, 디지털 풍속계(TPI556, (주)서미트, 서울, 한국)로 측정한 풍속(wind speed: v)을 각 식물 식재층의 표면적(1180cm²) 대비 토출구 표면적(12.56cm²)으로 나누어 풍속을 환산하여 약 3 cm·s⁻¹ 이 되도록 조정하였다. 이에 따른 공기체류시간(ART: air

residence time, sec)과 공기정화량(VR: air ventilation rate, $m^3 \cdot min^{-1}$)은 선행 연구(Choi et al., 2014)의 공식을 이용하였고 산출식은 다음과 같다.

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

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

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

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

벽면형 식물바이오필터의 압력손실량, 토양수분, 온도, 상대습도 측정

압력손실량(pressure drop, mmH₂O)은 유량계(U-manometer: M400W/M, DWYER Instruments Inc., Michigan, USA)를 사용하여 식물바이오필터의 공기가 토양을 통과하기 전과 통과한 후의 두 출구에 실리콘 튜브를 연결하고 수두(water height)의 차로 측정하였다. 토양 수분 함량(soil moisture content, %)은 자료수집장치(data Logger: Mini logger MSTL, STA Corporation Co. Ltd., Anyang, Korea)에 토양수분측정 센서(moisture sensor: ECH₂O, EC-5, Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA)를 연결하여 30분 간격으로 실험 기간 동안 측정하고, 측정시 각 식물바이오필터의 2, 4, 6층의 각 층별 세 부분(왼쪽, 중간, 오른쪽)에 깊이 10cm 지점에 45도 각도로 사선으로 꽃아 측정하였다. 식재부의 상대습도와 온도는 온습도센서(temperature and humidity sensor: STL-STH, STA Corporation Co. Ltd., Anyang, Korea)를 이용하여 자료수집장치에 30분 간격으로 저장하고 토양 표면으로부터 5cm 높이에서 측정하였다.

벽면형 식물바이오필터의 가습 주기 조절

식물 식재용 토양의 수분 안정화와 소비전력량을 줄일 수 있는 지를 검토하기 위하여 식물바이오필터로 유입된 실내 공기를 가습하기 위해 작동하는 물펌프의 작동 주기를 조절하였다. 예비실험 결과, 송풍기와 물펌프를 항상 켜두었을 경우 시간이 지남에 따라 토양 수분 함량이 소폭 상승하는 것으로 나타났다. 따라서 물펌프의 연속 작동 시간이 길어 질수록 토양 수분의 일차회귀식 기울기값이 상승할 우려가 있다고 판단되어 공기 순환을 위한 송풍기는 항상 작동하되, 가습을 위한 물펌프의 작동 시간은 연속 가동하도록 한 것(continuous)과 타이머를 사용하여 15분 작동/45분 작동 중

지(15 min on - 45 min off), 12시간 작동/12시간 작동 중지(12hrs on - 45hrs off)의 순서로 총 세 가지 작동 주기를 2014년 9월 18일부터 10월 3일까지 각 5일씩 연속 처리하여 총 15일 동안 토양 수분 함량, 상대습도, 온도를 조사하였고, 각 작동 주기별로 미세먼지 및 휘발성 유기화합물 제거 효과를 조사하였다. 물펌프의 작동 주기 조절은 연속 가동에 비해 15분 작동의 경우 하루 1/4의 소비전력량을 소비하게 되고, 12시간 작동의 경우 하루 1/2의 소비전력량을 나타내므로 전체 소비전력량 감소에도 기여할 것으로 판단하였다.

벽면형 식물바이오필터의 미세먼지 측정

대기 중의 미세먼지(PM10)를 연속으로 자동 채취하여 무게($mg \cdot m^{-3}$)를 측정하는 기기로 미세먼지 측정기(air quality monitor, 3432, KANOMAX, Tokyo, Japan; 측정검출한계 $10 \mu g \cdot m^{-3}$)와 2채널의 입자수를 0.3-10.0 μm 범위 내에서 측정하여 초미세먼지(0.3-2.0 μm)와 미세먼지(2.0-10.0 μm)의 입자수를 측정할 수 있는 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, 210m³)인 실내공간에서 물펌프의 작동 주기 처리별로 3일씩 측정하였다. 벽면형 식물바이오필터의 실내 공간 미세먼지 제거 능력을 조사하기 위하여 실내공기를 빨아들이는 송풍기의 흡입구로부터 20cm 떨어진 지점에서 미세먼지의 유입량을 측정하고, 식물바이오필터를 통과한 실내공기가 식물 식재 공간인 각 층의 토양 표면으로 빠져 나오는 공기를 10cm 떨어진 지점에서 측정하여 유입량과 토출량의 차이를 백분율(%)로 환산하여 제거율을 비교하였다. 측정 시간은 공기가 식물바이오필터를 통과하여 나오는 시간을 고려하여 실내 공기 유입구, 2층, 4층, 6층 순으로 측정 지점간에 20초 내 신속히 이동하여 1일 5반복으로 3일간 측정값을 사용하였다. 특히, 15분 작동/45분 작동 중지 주기와 12시간 작동/12시간 작동 중지 주기의 경우, 물펌프의 작동 상태일 때와 작동 중지 상태일 때를 별도로 나누어 측정하고 측정값의 평균값을 사용하였다. 인위적인 미세먼지 발생원으로는 실험실을 밀폐시킨 후 모기향 1개를 피워 2시간 동안 실내공간에 고루 분산시킨 후 모기향을 끄고 1시간 이후에 측정하였다.

벽면형 식물바이오필터의 휘발성 유기화합물 측정

벽면형 식물바이오필터의 휘발성 유기화합물(VOCs) 제거율은 가습 주기별 처리의 압력손실량, 토양수분, 온도, 상대습도에 대한 안정성 결과를 토대로 물펌프 작동 주기를 15

분 작동/45분 작동 중지 주기로 고정하고 측정하였다. VOCs를 측정하기 위해서는 실험실(210m³)내 VOCs와 HCHO가 일정농도 이상의 조건에서 3주 이상의 자연발생적인 토양미생물의 순화(배양) 기간(Myung et al., 2003)이 필요하였으나, 실험실의 경우 장기간의 식물바이오필터 작동으로 대기 중의 오염물질(VOCs, HCHO) 농도가 너무 낮아 인위적인 실내 공기질 오염을 발생시키기 위하여 실험실을 밀폐하고 오염원으로 에폭시도료 희석제(에폭시신너, 바이켄, 안산, 한국)를 실험실내에 휘발되도록 하였다. 오염 기간 동안 TVOCs와 HCHO가 분석 기기로 측정 가능한 적정 농도(TVOCs 1000ppb 이상, HCHO 2.0ppm 이상)로 유지되고 있는지 확인하기 위해 휴대용 실내 공기질 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 식물바이오필터 내 토양을 통과하여 가슴 공기가 나오는 식물바이오필터의 2, 4, 6층 토양 표면 상부로부터 10cm 위의 지점에서 각각 VOCs와 HCHO를 포집하였다. HCHO

를 제외한 VOCs(BTEX; benzene, toluene, ethyl benzene, xylene)의 포집은 휴대용 대기시료 포집장치(AVS-550, ASCN, Suwon, Korea)로 테들러백(Tedlar sample bag, 5L, SKC)을 이용하여 진공을 걸어 가스를 포집 후 가스크로마토그래피(GC-MS: CP-3800/Saturn 2200, Varian, CA, USA; Table 1)로 분석하였고, HCHO는 실내공기 유입구와 벽면형 식물바이오필터의 2, 4, 6층의 토양 표면에서 4개의 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) 동안 3회 반복으로 포집하고 고속액체크로마토그래피(HPLC: Shimadzu SIL-10ADvp, USA; Table 2)로 분석하였다. 실험 중 실험실(210m³)환경은 냉난방기를 이용하여 실내온도를 26°C로 설정하여 실험기간 동안 실내온도(26.6 ± 3.0°C)를 유지하도록 하였다. VOCs의 제거율(RE: removal efficiency, %)은 Yang et al.(2009)의 바이오필터 시스템 성능 지표[RE = (C₀-C_f)/C₀ × 100, C₀: 초기 오염물질의 농도; C_f: 최종 오염물질의 농도]에 따라 산출하였다.

벽면형 식물바이오필터의 공간별 공기정화량 산출

제작된 벽면형 식물바이오필터의 용량에 따른 1일 적정

Table 1. Analytical conditions of GC/MS for determination of T-VOCs^z including BTEX^y.

Instrument		Analysis conditions		
TD	Purge	Prepurge time (mL·min ⁻¹)	3	
		Trap prepurge time (mL·min ⁻¹)	0.2	
	Sample flow	Sample flow rate (mL·min ⁻¹)	50	
		Trap low Temp. (°C)	-10	
	Trap desorb	Trap high Temp. (°C)	300	
		Trap hold time (min)	5	
		Split flow (mL·min ⁻¹)	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 ⁻¹)	Hold (min)
		35	0	8
		180	4	12
	220	8	6	
	Total run time	67.25 min		
	Column flow	1 mL·min ⁻¹		
MS scan range	45-350 amu			

^zT-VOCs (total volatile organic compounds).

^yBTEX (benzene, toluene, ethyl benzene, and xylene).

Table 2. 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 ⁻¹
Injection volume	20 μL
Oven Temp.	40°C

Table 3. Physical and environmental parameters of air flow characteristics in a wall-typed botanical biofilter influenced by three humidifying cycles (water metering pump controlled by timer).

	Continuous	15 min on - 45 min off	12 h on - 12 h off
Wind speed (cm·s ⁻¹) ^z	3	3	3
Air residence time (s) ^z	6.7	6.7	6.7
Air ventilation rate (m ³ ·min ⁻¹) ^z	1.512	1.512	1.512
Aerial relative humidity (% ± SD) ^y	59.1 ± 3.7	68.0 ± 2.3	65.1 ± 4.1
Aerial temperature (°C ± SD) ^y	26.6 ± 0.1	26.6 ± 0.3	26.3 ± 0.2
Soil moisture (% ± SD) ^y	28.4 ± 3.0	29.0 ± 2.1	28.3 ± 2.7
Pressure drop (mmH ₂ O ± SD) ^y	8.0 ± 0.1	8.0 ± 0.1	8.0 ± 0.1

^zCalculated values.^yMeasured values.

공기정화량을 확인하기 위해 54m³의 사무실 공간과 210m³의 실험실 두 공간을 기준으로 적정 공기정화량을 산출하였다. 일반적인 공조시스템의 일일 적정 공기정화 횟수를 15회 기준으로 하여 벽면형 식물바이오필터의 일일 공기정화 횟수를 산출하였다.

결과 및 고찰

가습 주기에 따른 벽면형 식물바이오필터의 물리 환경적 특성

제작된 벽면형 식물바이오필터의 공기체류시간은 20cm의 토양층을 공기의 이동거리로 하고 초당 3cm의 풍속으로 제어하였기에 토양층과 빈 공간을 통과하는 속도를 공탑체류시간(EBRT: empty bed residence time)을 약 6.7-7초로 하였고, 이 바이오필터의 공기정화량(VR = A·v)은 바이오필터층의 단면적(A, 0.84m²)과 실제 풍속(v, 3cm·s⁻¹)으로 계

산한 결과 분당 1.512m³로 계산되었다(Table 3). 가습 장치(흡수탑) 작동 주기 조절에 따른 공탑체류시간과 공기정화량은 동일하며, 측정한 압력손실량도 가습 주기에 관계없이 8.0 ± 0.1mmH₂O로 같게 나타났다(Table 3).

식물바이오필터층의 토양 수분 함량은 가습 장치의 물펌프를 연속 가동, 15분 작동/45분 중지 주기, 12시간 작동/12시간 중지 주기의 세 조건 모두에서 최소값과 최대값의 범위가 27.1-29.7%로 비교적 일정하게 유지되는 것으로 나타났다(Table 3). 각 가습 주기의 시간 경과에 따른 토양 수분 변화의 회귀식(Fig. 2A)을 보면 연속 가동의 경우 기울기가 미세한 상승하는 경향(28.4 ± 3.0%, y = 0.0159x + 27.49, p < 0.001)이었고, 15분 작동/ 45분 중지 주기는 시간 경과에도 불구하고 기울기가 수평에 가깝게 유지되어 토양 수분이 필터층 내에서 안정화되는 경향(29.0 ± 2.1%, y = 0.0008x + 29.09, p = 0.0078)을 보여주었다. 또한 12시간 작동/ 12시

간 중지 주기는 기울기가 미세한 하강 경향($28.3 \pm 2.7\%$, $y = -0.0128x + 29.11$, $p < 0.001$)을 나타내었다.

식물바이오필터를 통과하여 토양 표면으로 토출되는 온도의 경우, 모든 가습 주기 조건에서 최소값과 최대값의 범위가 $25.7\text{--}27.1^\circ\text{C}$ 로 실험실내 냉난방기 설정온도인 26°C 에 근사한 범위에 있어 일정하게 유지되는 것으로 나타났다 (Table 3, Fig. 2B). 그러나 평균 온도를 비교하면 연속 가동 ($26.6 \pm 0.1^\circ\text{C}$)과 15분 작동/45분 중지($26.6 \pm 0.3^\circ\text{C}$)에 비해 12시간 작동/12시간 중지($26.3 \pm 0.2^\circ\text{C}$)가 상대적으로 낮았다. 식물바이오필터를 통과하여 토양 표면으로 토출되는 상대습도의 경우는 처리간 차이가 있었으며, 전체 처리

의 최소값과 최대값 범위는 $51.3\text{--}73.1\%$ 였고 평균 상대습도는 15분 작동/45분 중지($68.0 \pm 0.2\%$), 12시간 작동/12시간 중지($65.1 \pm 4.1\%$), 연속 가동($59.1 \pm 3.7\%$) 순으로 높았다 (Table 3, Fig. 2C). Darlington et al.(2000)은 식물을 이용한 공기오염 물질 제거용 바이오필터가 주로 여름철 실내에서 높은 상대습도를 나타내는 것에 대한 문제점을 제기하였고, 효율적인 식물바이오필터를 장착한 실내 공간에서도 18%까지 실내 상대습도가 증가하여(Wang and Zhang, 2011), 높은 상대습도에 의한 실내 부유성 균의 증식과 건물 내구성의 감소를 피하기 위해서는 상대습도를 65% 이하로 유지하여야 한다고 하였다(Soreanu et al., 2013). 그러나 본 실험

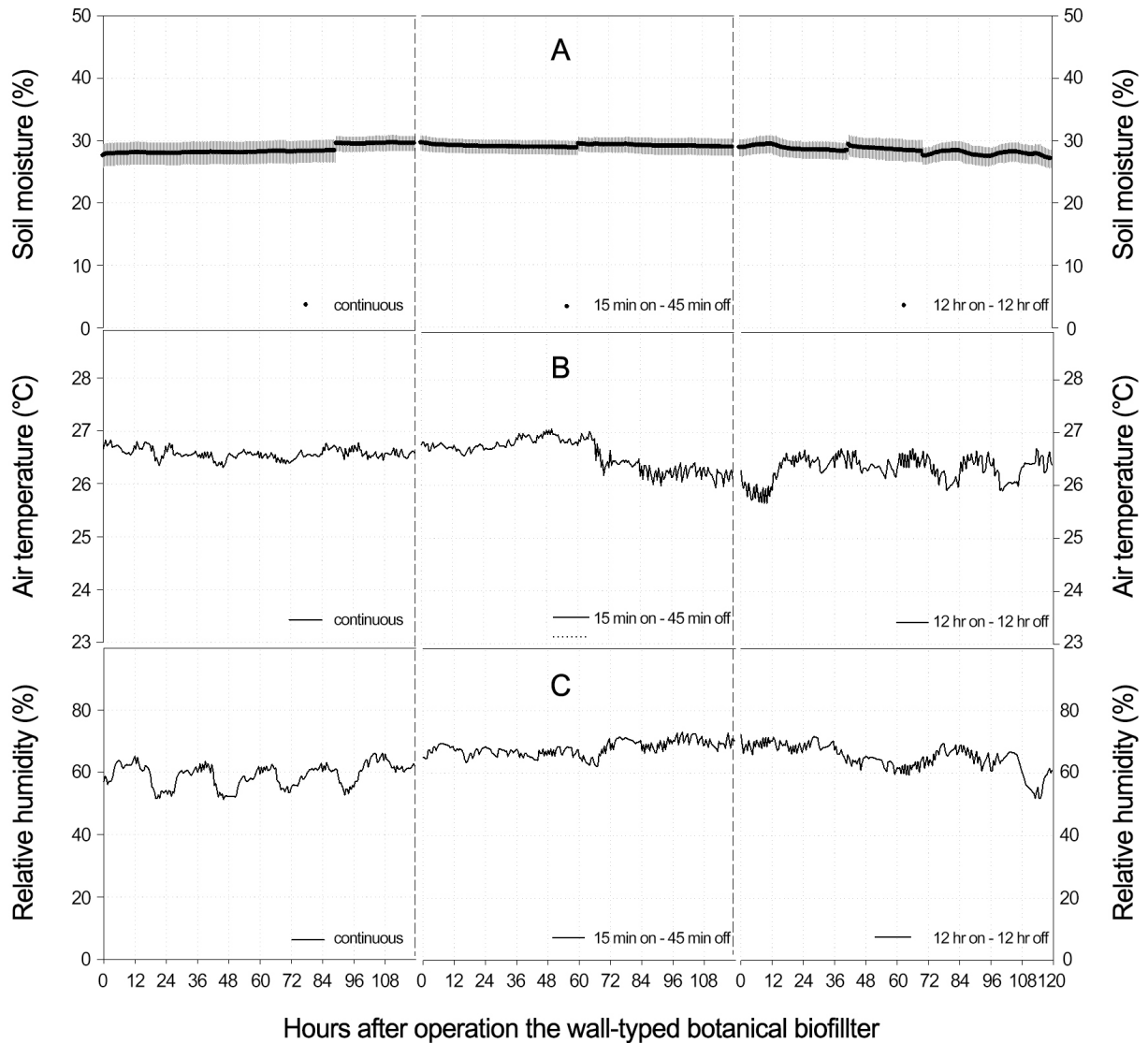


Fig. 2. Stability of soil moisture (A), relative humidity (B), and air temperature (C) within the wall-typed botanical biofilter depending on three humidifying cycles. Error bars of the soil moisture present SE.

결과에서 제시된 상대습도는 바이오필터를 통과한 토양 표면으로부터 5cm 거리에서 측정된 값이고, 바이오필터의 운전 기간 동안의 실험실내 평균 상대습도는 $62 \pm 3.0\%$ 로 Soreanu et al.(2013)이 제시한 한계 상대습도보다 낮게 유지되어 적합한 습도 조건을 갖추었다고 판단하였다.

공기의 흐름(VR)과 공탑체류시간(EBRT)은 바이오필터의 생분해능에 매우 중요한 요소이므로(Elmrini et al., 2004), 본 연구 결과에서 산출된 공기정화량과 공탑체류시간이 바이오필터의 성능에 적합한지를 평가하는 것은 매우 중요하다. 바이오필터의 성능을 향상시키기 위해 공기 흐름이 늦을 경우, 공기의 확산 과정에 필요한 시간보다는 반드시 EBRT가 길어야 하며(Delhoméie and Heitz, 2005), 대부분의 연구에서 EBTR가 길수록 VOCs 제거율 또한 높아진다고 확인되었다(Christen et al., 2002; Delhoméie et al., 2002a; Jorio et al., 1999; Martin et al., 2002; Yoon and Park, 2002). 그러나 EBRT를 길게 적용하면 보다 큰 바이오필터의 체적을 요구하게 되고, 반대로 유속이 빨라지면 미생물과 가스의 접촉이 줄어들어 생분해 과정이 불완전해지는 단점이 있다. 특히 유입되는 풍속이 너무 높을 경우 필터층 내 수분이 유속에 의해 빠져나가게 되어 필터층을 탈수시키는 경향을 보이기 때문에 대부분의 바이오필터에는 EBRT를 15초에서 수 분사이의 범위에서 작동시킨다고 하였다(Delhoméie and Heitz, 2005). 그러나 본 바이오필터의 연구 목적은 실내 사무 공간이나 생활공간에서 공기정화 기능 이외에도 식물이 자랄 수 있는 배지로서의 기능도 수행해야 하기 때문에 공간을 적게 차지하는 벽면형으로 설계하였고 이에 따라 필터층인 인공배양토의 깊이를 충분히 줄 수 없는 부분과 식물의 근권부에 적은 스트레스를 주기 위한 느린 풍속을 사용해야 하기에 선행 연구(Choi et al., 2014)에서 구명된 적정 풍속($3\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) 조건에서 토양층(20cm)을 통과하는 공탑체류시간이 6.7-7초로 나타나 산업용 바이오필터의 EBRT보다는 짧았다. Delhoméie and Heitz(2005)도 EBRT 값은 VOCs 농도, VOCs의 생분해능(biodegradability), 가용 베드의 체적 등과 같은 작동 조건에 따라 달리 적용해야 한다고 보고하였다.

바이오필터 내 압력손실은 작동 비용과 관련하여 바이오필터 시스템에서 중요한 요소이며, 압력손실이 4cm에서 25cm로 증가하면 6개월 이내에 7kW에서 27kW로 사용되는 에너지가 증가(Leson et al., 1995)하기 때문에 대부분의 바이오필터 시스템은 압력손실량이 물기둥의 높이가 수 cm 이상 증가하지 않도록 운영하며, 본 연구 결과에서도 낮은 압력손실($8.0 \pm 0.1\text{mmH}_2\text{O}$)이 측정되어 비교적 바이오필터의 구

조 설계가 적합한 것으로 판단되었다. 필터층의 압력손실은 필터층의 특성, 유속, 토양수분, 미생물 밀도 등에 영향을 받으며, 필터층의 유기물 재료 중 일반 토양이 통기성이 적어 가장 압력손실이 높고 그 다음으로 퇴비, 피트, 우드칩 순이라고 하였다(Kennes and Thalasso, 1998). 본 실험에서 사용한 필터층은 화훼용 인공배양토 (한판승)를 사용하였기에 주로 피트와 펄라이트의 조합으로 구성되어 있으므로 일반 토양과 퇴비보다는 입자가 크며 우드칩보다 작다고 볼 수 있으며 적절한 수분 함량을 안정적으로 유지하여 적은 압력손실이 측정된 것으로 판단된다. 입자의 크기로 보면 작은 입자는 높은 표면적을 제공하여 미생물 활성이 높아지지만(Kent et al., 2000; Oude Luttighuis, 1998) 공기 저항이 커지고(Allen and Yang, 1991; Bailey and Ollis, 1986), 큰 입자는 원활한 공기의 흐름을 제공하지만 적은 표면적으로 인해 생분해능이 저하되므로(Delhoméie et al., 2002b), 산업용 바이오필터에서는 4mm 이상의 지름을 가진 입자를 적어도 60% 이상 필터층에 넣어야 한다고 하였으며(Williams and Miller, 1992), 대부분의 연구자들도 4mm를 한계 기준으로 삼고 그 이상의 입자를 이용하고 있다(Cardenas-Gonzalez et al., 1999; Corsi and Seed, 1995; Delhoméie et al., 2001; Eitner and Gethke, 1987; Ortiz, 1998; Oude Luttighuis, 1998). 바이오필터의 전체적인 체적도 압력손실에 영향을 주므로 일반적인 바이오필터의 체적은 10m^3 에서 $3,000\text{m}^3$ 그리고 높이를 0.5m에서 2m의 범위가 적절하다고 하였는데(Delhoméie and Heitz, 2005), 본 실험에서 제작된 식물바이오필터는 산업용 대형 바이오필터처럼 생물학적 여과장치로서의 기능만 필요한 것이 아니라 사무 공간에서 식물 식재 벽면으로서의 기능도 수행해야 하기 때문에 공간 내 단면적을 적게 설계할 필요가 있었으며, 필터의 체적 중 특히 두께를 줄여야 하였다. 따라서 높이(1.4m)는 높게 하고 두께(토양 필터층)를 0.2m로 설계하여 전체 체적을 0.336m^3 으로 조정하였다. 이는 일반 공기여과장치인 바이오필터($10\text{--}3,000\text{m}^3$)보다 소형이라고 볼 수 있다. 또한 바이오필터의 높이가 증가할수록 중첩된 필터층의 무게로 인해 필터 재료의 입자가 부서지고 답압되어 공기 흐름을 방해하기 때문에(Delhoméie and Heitz, 2005), 본 바이오필터층의 높이를 1.4m로 설계하는 대신 가습된 공기의 편류 현상을 방지하도록 가습부와 토양 필터층 사이에 구배 조절부(W 0.15m)를 삽입하고 식재대를 유선형으로 설계(Fig. 1A)하여 각 층으로 균일하게 가습 공기가 통과되도록 유도하여 필터층의 토양 수분에 의한 하중을 줄일 수 있도록 하였다. 따라서 하층부로 갈수록

토양 수분 함량은 약간씩 증가하는 경향이었지만 전체 식재 층의 평균 토양 수분 함량에 대한 표준편차는 가습 주기에 따라 2.1-3.0%의 범위로 한정되었고 낮은 압력손실($8.0 \pm 0.1 \text{ mmHg}$)을 나타내어 본 바이오필터에 대한 설계의 타당성을 확인하였다(Table 3).

가습 장치(흡수탑)의 용량은 가습량을 결정하는 주된 요인으로 이는 필터층인 토양 수분에 큰 영향을 미친다. 공기 체류시간을 7초로 가정하였을 때, 공기정화량($1.512 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} = 25,200 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)에 공기체류시간을 곱하면 가습장치 중 실제 가습부인 흡수탑의 체적이 $176,400 \text{ cm}^3$ 가 된다. 따라서 설계된 흡수탑(L 1.2m, H 1.4m)의 폭은 10.5cm가 적절하지만 필터층 소재와 흡수탑의 충전재(pall ring)에 따른 가습 효과가 달라질 수 있으므로 흡수탑의 폭에 여유를 두어 15cm로 제작하여 본 실험에 사용하였다(Fig. 1B). 가습 주기에 따른 토양 수분 변화를 보았을 때(Fig. 2A), 연속 가동시 토양 수분 함량의 일차회귀식 기울기가 약간의 상승세를 보이는 것은 제작된 흡수탑의 가습 용량이 약간 크다는 것으로 판단할 수 있으며, 12시간 작동/12시간 중지 주기의 일차회귀식 기울기가 점차적인 감소세를 나타내는 것은 작동 중지 기간 동안 충전재 표면 수분이 바람에 의해 건조되기 때문인 것으로 판단되었다. 또한 15분 작동/45분 중지 주기가 45분간의 중지 기간 동안 충전재 표면의 수분이 어느 정도 유지되었기 때문에 안정적 가습이 이루어진 것으로 볼 수 있었다. 생물학적 관점에서 바이오필터내 배지의 수분 함량은 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(Delhomnie and Heitz, 2005). 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 40-60%로 제시하고 있으나(Ottengraf, 1986), 본 실험에서 사용한 토양 수분 센서의 측정값으로 해석하면 20-30%에 해당하는 범위가 된다. 본 연구의 경우, 저면 자동 가습에 의한 관수 방법(Patent No. 10-1488108; Lee and Chun, 2015)을 발명하여 평균 수분 함량(28.3-29.0%)을 일정하게 유지함으로써 바이오필터층의 수분 함량, 압력손실, 온도도, 필터층을 통과하는 공기 유량의 조건 등을 대부분 충족하였다. 따라서 본 연구는 가습 장치의 작동 주기를 조절하여 소비전력량을 절감하고 적정 토양 수분을 일정하

게 유지시킬 수 있는 조건을 구명하였다고 볼 수 있다.

벽면형 식물바이오필터의 미세먼지 제거율

벽면형 식물바이오필터의 가습 주기에 따른 미세먼지 입자 수의 제거율(Fig. 3)은 미세먼지(PM10: $2.0\text{-}10.0 \mu\text{m}$)의 경우, 물펌프의 연속 가동, 15분 작동/45분 작동 중지, 12시간 작동/12시간 작동 중지 처리에서 평균 제거율과 표준편차는 각각 $89.1 \pm 4.5\%$, $89.7 \pm 1.4\%$, $82.7 \pm 1.1\%$ 이었고, 초미세먼지(PM2.5: $0.3\text{-}2.0 \mu\text{m}$)의 경우, 물펌프의 연속 가동, 15분 작동/45분 작동 중지, 12시간 작동/12시간 작동 중지 처리에서 평균 제거율과 표준편차는 각각 $65.4 \pm 3.7\%$, $71.6 \pm 2.2\%$, $73.0 \pm 3.0\%$ 이었다. 따라서 입자 수에 있어서는 미세먼지(PM10) 제거율이 초미세먼지(PM2.5) 제거율보다 높게 나타났다. 미세먼지 입자 무게(PM10, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)에 따른 제거율(Fig. 3)은 12시간 작동/12시간 작동 중지의 경우 평균 제거율과 표준편차는 $58.1 \pm 10.5\%$ 이었으나, 연속 가동과 15분 작동/45분 작동 중지의 평균 제거율과 표준편차는 $78.9 \pm 1.1\%$ 와 $77.7 \pm 4.4\%$ 로 12시간 작동/12시간 작동 중지의 경우보다 높게 나타났다. 본 바이오필터 장치는 실내공기를 흡입하여 가습 장치(흡수탑)를 통과해 토양층으로 빠져나가는 방식으로 많은 미세먼지가 일차적으로 물에 용해되어 침전되고 일부가 토양 필터층에 쌓이게 된다고 볼 수 있다. 그러므로 가습 능력이 떨어지는 12시간 작동/12시간 작동 중지 주기의 제거율이 낮았다고 판단된다. 그러나 초미세먼지 입자 수에 대한 제거율에 대한 차이는 아직까지 명확한 해석을 할 수 없었다. 일반적인 환경부의 미세먼지 측정 기준은

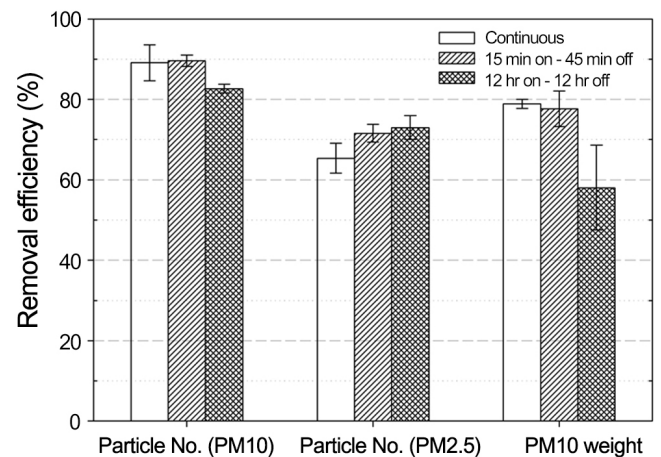


Fig. 3. Removal efficiency of particle numbers of fine dust (2-10 μm) and ultra-fine dust (0.3-2 μm), and of PM10 weight ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) in the wall-typed botanical biofilter depending on three humidifying cycles. Error bars present SE.

입자의 무게(PM_{10} , $\mu g \cdot m^{-3}$)를 기준으로 평가되며, 본 실험 조건은 미세먼지가 지속적으로 발생하는 조건에서 수 분간 측정된 값의 제거율이므로 만일 일시적인 미세먼지 발생원만 있다면 적어도 3분내에 70% 이상씩 제거되므로 일정 시간이 지나면 기하급수적으로 제거되어 미세먼지가 $10\mu g \cdot m^{-3}$ 혹은 그 이하로 떨어지게 된다. 따라서 본 실험에서는 실제로 일시적인 미세먼지 발생원(모기향)을 처리하고 바이오필터를 하루 정도 가동하면 미세먼지 측정기의 검출한계 이하로 떨어졌다. Bang et al.(2013)은 세 가지 사무실의 조건에서 미세먼지(PM_{10}) 무게를 근무 시간(8hrs) 동안 매시간 별로 측정하고 두 달간 지속하여 시간대별 평균값을 구한 결과, 식물이 없는 일반 사무실(대조구)에 비해 벽면 녹화된 사무실에서 62%, 팬을 장착한 벽면 녹화시스템 'Bio Wall System'에서 72%의 미세먼지(PM_{10}) 감소를 보였으며, 이는 단순 식물 식재와 'Bio Wall System'의 차이가 10% 수준에 불과한 것으로 보고되었다. 본 실험에서 제작된 바이오필터 시스템은 식물을 심지 않은 화훼용 인공배양토 조건에서 측정된 미세먼지의 제거율로 식물의 지상부와 근권부 미생물을 제외한 순수한 바이오필터의 미세먼지 제거율이라는 점에서 그 성능을 확인하였다. 또한 가습 주기의 조절에 따른 미세먼지와 초미세먼지 제거에 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

벽면형 식물바이오필터의 휘발성 유기 화합물 제거

벽면형 식물바이오필터에 의한 휘발성 유기화합물의 평균 제거율(RE)은 TVOCs, o-xylene, m,p-xylene, ethyl benzene, toluene의 경우 각각 75, 71.5, 71.3, 71.6, 75.5%로 모두 70% 이상의 제거율을 나타내었으며, benzene과 HCHO는 각각 39.7%와 44.9%의 평균 제거율을 보였다(Fig. 4).

미생물은 대기오염물질을 생물학적으로 분해하는 필수적인 요소로 종속영양 미생물에 속하는 박테리아와 곰팡이가 대부분의 VOCs 제거 과정에 관여하며(Delhoméie and Heitz, 2005), Pedersen et al.(1997)은 바이오필터층에 분포하는 미생물 중 1-15%만이 VOCs 분해능을 가진 집단이라고 보고하였다. 바이오필터층에 분포하는 미생물의 양은 필터층의 재료와 VOCs 생분해능에 따라 달라지며, 대기 중이나 필터층에 자연발생적인 토착미생물이 실내오염물질을 먹이로 필터층에 서식하게 되고 충분한 순화기간이 주어지면 가장 저항성이 뛰어난 미생물 집단이 필터층을 우점하지만, 낮은 미생물 밀도, 까다로운 VOCs, 부족한 순화기간 등으로 미생물 활성이 낮을 경우에는 인공적으로 필터층에 미

생물을 배양하기도 한다고 하였다(Delhoméie et al., 2001a; Delhoméie et al., 2002b; Mohseni and Allen, 2000).

본 실험에서도 화훼용 인공배양토(한판승)를 사용하였기 때문에 30일 동안 실내공기 오염원(에폭시신나)을 처리하여 미생물이 자연발생적으로 바이오필터 내에서 충분한 자랄 수 있는 순화기간을 제공하였고 미생물에 의한 VOCs 제거 효과를 얻을 수 있었다. 또한 VOCs의 종류에 따라 제거율의 차이가 나타났으며, toluene, ethyl benzene, xylene, HCHO, benzene 순으로 높은 제거 효과를 나타냈다(Fig. 4). 평균 제거율에 있어 toluene, ethyl benzene, xylene간의 통계적 차이는 없었으나, 같은 방향족 탄화수소(aromatic hydrocarbon)인 benzene과 산화된 탄화수소(oxygenated hydrocarbons)인 HCHO는 비교적 낮은 제거율을 보였다. Delhoméie and Heitz(2005)는 VOCs종류에 따른 미생물의 분해능에 대한 차이가 있으며, 산화된 탄화수소(alcohols > aldehydes, ketones > ethers), 알칸족탄화수소, 방향족탄화수소 순으로 분해능이 높다고 하였으나, 본 실험에서는 산화된 탄화수소(HCHO)보다 방향족탄화수소(toluene, xylene, ethyl benzene)의 제거율이 더 높게 나타났으며, 같은 방향족탄화수소인 benzene의 분해능도 낮게 나타났다. Deshusses et al.(1999)은 공기 흐름 속에 ethyl acetate가 존재할 때 toluene분해능이 억제된다고 보고하였고, Oh et al.(1994)는 BTEX의 혼합 가스 상태에서 benzene과 toluene이 상호간의 경쟁적 억제 현상이 발생하며, benzene과 toluene의 분해능은 p-xylene의 공대사(cometabolism) 과정에 의해서도 분해가 억제된다고 하였다. 따라서 benzene의 낮은 제거율은 상대적으로 높은 제거율을 보인 toluene과 p-xylene에 의한 영향이었을 것으로 추

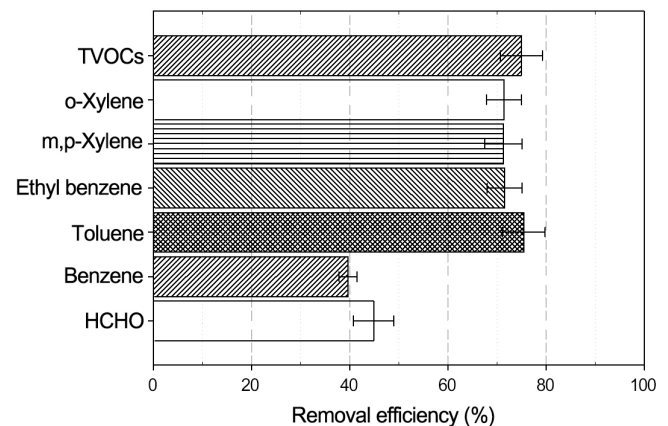


Fig. 4. Removal efficiency of VOCs and HCHO in the wall-typed botanical biofilter under the humidifying cycle (15 minutes on and 45 minutes off). Error bars present SE.

정하였다. 그러나 단순히 VOCs의 종류뿐만 아니라 실제 우점하는 미생물의 종류에 따라서도 다양한 결과가 나올 수 있기 때문에 향후 이러한 부분에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

식물 중에 따른 VOCs 제거능에 대한 연구를 보면, Yang et al.(2009)은 28종의 실내 식물에 대해 5종류의 VOCs(benzene, toluene, octane, trichloroethylene, α -pinene) 제거율을 평가하여 *Hemigraphis alternata*, *Hedera helix*, *Hoya carnosia*, *Asparagus densiflorus*가 모든 VOCs를 가장 잘 제거한 식물로 보고하였으며, VOCs의 종류별 제거율도 α -pinene, toluene, trichloroethylene, octane, benzene 순으로 제거율이 높으나 식물 중에 따라 제거하는 VOCs 종류별 제거율이 다르다고 하였다. Darlington et al.(2001)은 개발한 식물바이오필터(botanical biofilter)에 TEX(toluene, ethylbenzene, *o*-xylene) 가스를 혼합하여 처리시 VOC별 제거율이 모두 유사하다고 하였고, 위와 같은 벽면형 식물바이오필터(PBTF방식, 표면적 20m²)에 150종(예, English Ivy, *Dracaena godseffiana*, *Spathiphyllum* “Mauna Loa”, *Adiantum raddianum*, *Rhododendron obtusum*, *Marraya* sp., *Vriesea splendens*, *Dieffenbachia picta*, *Plagiomnium cuspidatum*, *Taxiphyllum deplantanum* 등)을 혼합한 수경재배용 식물들을 식재하여 10-75%의 RE값을 얻었다고 보고하였다(Darlington and Dixon, 2000). 본 실험에서는 화훼용 인공배양토를 필터층으로 사용한 벽면형 식물바이오필터의 VOC 제거효율에 대해 연구하였지만, 앞으로 식재 가능한 다양한 필터층에 대한 바이오필터의 성능 평가와 함께 식재 식물 종류에 따른 평가도 수행할 예정이다. 참고로 본 실험에서 제작된 벽면형 식물바이오필터를 15분 작동/45분 작동 중지 주기로 가습하고 *Epipremnum aureum* ‘N Joy’와 *Dracaena sanderiana* ‘Vitoria’를 바이오필터의 토양층에 심어 식재 전과 식재 후 75일째 생육을 비교한 결과, 식물체의 체적에서 *E. aureum* ‘N Joy’는 29.9% 그리고 *D. sanderiana* ‘Vitoria’는 127.7%의 증가를 나타내어 본 벽면형 식물바이오필터는 뛰어난 실내공기 정화 효과뿐만 아니라 식물 식재용 벽면체로서의 기능도 잘 수행할

수 있는 것으로 판단되었다.

벽면형 식물바이오필터의 공간별 공기정화량 및 공기정화횟수 산출

본 실험에서 제작된 벽면형 식물바이오필터의 공기정화량(air ventilation rate, Q: 1.512m³·min⁻¹)에 따른 공간별 공기정화횟수를 산출한 결과, 일반 공조시스템의 하루 적정 공기정화횟수를 15회 기준으로 하였을 때 소형 사무실(54m³)의 경우 설계된 바이오필터(일일 환기량, 1.512m³·min⁻¹ × 60min × 24hrs = 2,177.3m³·day⁻¹)로 하루 40.3회의 공기정화(2,177.3m³·day⁻¹/54m³ = 40.3times·day⁻¹)가 가능하여 적정 공기정화횟수(일15회)를 초과하는 용량이었고, 실험실(210m³)의 경우 하루 10.4회의 공기정화(2,177.3m³·day⁻¹/210m³ = 10.4times·day⁻¹)가 가능하여 적정 공기정화횟수에 부족한 용량으로 나타났다(Table 4). 따라서 본 실험에서 설계 제작된 벽면형 식물바이오필터는 145m³정도(2,177.3m³·day⁻¹/145m³ = 15.0times·day⁻¹)의 체적을 가진 사무실(단면적 53.7m², 층고 2.7m 기준시)에 적합한 용량을 가진 규모라고 판단하였다. 또한 이 벽면형 식물바이오필터 설계 용량을 근무 인원 에 따른 환기량(25m³/hr per person) 기준에 적용한다면 약 3.7명이 근무하는 사무실에 적합한 용량으로 계산되었다. 따라서 향후 식물바이오필터 설계시 공간의 규모뿐만 아니라 근무 인원 에 따른 용량 설계에 대한 연구도 추가적으로 보완할 필요가 있었다.

초 록

본 연구의 최종 목표는 실내의 공간과 식물바이오필터의 규모에 따라 실내공기 오염물질을 정화할 수 있는 식물 녹화와 자동관수 그리고 생물학적 여과 기능을 통합한 식물바이오필터 시스템의 개발이다. 본 연구는 가습 주기에 따른 벽면형(수직형) 식물바이오필터내 공기 흐름의 특성에 대한 안정성과 미세먼지 제거율을 비교하고, 이 식물바이오필터에 의한 휘발성 유기화합물의 제거율을 조사하기 위해 수행하

Table 4. Calculating air ventilation frequency of indoor air purification using the wall-typed botanical biofilter designed by authors.

Wall-typed botanical biofilter	Office (54 m ³)	Laboratory (210 m ³)
Air ventilation rate (m ³ ·min ⁻¹)	1.512	1.512
Air ventilation frequency per day (times)	40.3	10.4
Additional increment (%) ²	none	44

²Additional increment based on general indoor air ventilation frequency (15 times per day).

였다. 본 실험에 사용된 식물바이오필터는 실내 공간 활용에 적합하도록 물펌프, 물탱크, 송풍기, 가습장치, 그리고 다층 구조의 식물 식재 공간을 일체형으로 설계하였다. 실험 결과, 물펌프에 의해 작동하는 세 가지 다른 가습 주기 처리에 관계없이 식물바이오필터의 상대습도, 온도, 그리고 토양 수분 함량은 안정된 값을 나타내었다. 토양 수분 함량은 모든 가습 주기 처리에서 27.1-29.7%의 범위에서 안정적으로 유지하였으며, 특히 15분 작동 45분 작동 중지의 가습 주기를 120 시간 동안 처리하여 $29.0 \pm 0.2\%$ 의 평균 토양 수분 함량을 유지하면서 가장 수평적인 일차회귀식($y = 0.0008x + 29.09$)을 보여주었다. 가습 주기에 따라 식물바이오필터를 통과한 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5) 입자 수에 대한 제거율(RE)은 각각 82.7-89.7%와 65.4-73.0% 범위에 있었고, PM10의 무게에 대한 RE는 58.1-78.9%의 범위에 있었다. 식물바이오필터를 통과한 자일렌, 에틸벤젠, 총 휘발성 유기화합물, 톨루엔의 RE는 71.3-75.5%의 범위에 있었으나, 벤젠과 포름알데히드의 RE는 각각 39.7%와 44.9%로 나타났다. 따라서 실내식물을 식재할 수 있는 본 벽면형 식물바이오필터는 실내 공기 정화에 매우 효과가 있는 것으로 확인하였다.

추가 주요어 : 바이오필터, 포름알데히드, 그린인테리어, 미세먼지, 휘발성유기화합물

인용문헌

- Allen, E. R. and Y. Yang. 1991. Biofiltration control of hydrogen sulfide emissions. In: Proceedings of the 84th Annual Meeting & Exhibition of the Air & Waste Management Association. June 16-21, Vancouver. J. Air Waste Manag. Assoc. Pittsburgh, PA, USA.
- Bailey, J. E. and D.F. Ollis. 1986. Biochemical Engineering Fundamentals. 2nd ed. McGraw-Hill, Singapore.
- 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. Kor. Soc. People Plants Environ. 16: 415-420.
- Brauer, M., S. Henderson, T. Kirkham, K.S. Lee, K. Rich, and K. Teschke. 2002. Review of the Health Risks Associated with Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide in Indoor Air. Rep. Health Canada p.72.
- Cardenas-Gonzalez, B., S.J. Ergas, and M.S. Switzenbaum. 1999. Characterization of compost biofiltration media. J. Air Waste Manag. Assoc. 49:784-793.
- 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. Kor. J. Plant Res. 27:546-555.
- Christen, P., F. Domenech, G. Michelena, R. Auria, and S. Revah. 2002. Biofiltration of volatile ethanol using sugar cane bagasse inoculated with *Candida utilis*. J. Hazard. Mater. 89:253-265.
- Corsi, R. L. and L. Seed. 1995. Biofiltration of BTEX: Media, substrate, and loadings effects. Environ. Progress 14:151-158.
- Darlington, A. 2000. The biofiltration of indoor air: implications for air quality, Indoor Air 10:39-46.
- Darlington, A. 2004. Room Air Cleansing Using Hydroponic Plants, United States Patent No. US672791B2.
- Darlington, A., 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.
- 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.
- Darlington, A. and M. Dixon. 2000. The biofiltration of indoor air III: air flux temperature and removal of VOCs, in: Proceedings of the 2000 USC-TRG Conference, Biofiltration for Air Pollution Control, Los Angeles, California, October 19-20, p. 269-276.
- Delhoménie, M.C., L. Bibeau, J. Gendron, R. Brzezinski, and M. Heitz. 2001. Air treatment by biofiltration: Influence of nitrogen concentration on operational parameters. Indust. Eng. Chem. Res. 40:5405-5414.
- Delhoménie, M.C., L. Bibeau, and M. Heitz. 2002a. A study of the impact of particle size and adsorption phenomena in a compost based biological filter. Chem. Eng. Sci. 57:4999-5010.
- Delhoménie, M.C., L. Bibeau, N. Bredin, S. Roy, S. Brousseau, J.L. Kugelmass, R. Brzezinski, and M. Heitz. 2002b. Biofiltration of air contaminated with toluene on a compost-based bed. Adv. Environ. Res. 6:239-244.
- Delhoménie, M.C. and M. Heitz. 2005. Biofiltration of air: a review. Crit. Rev. Biotechnol. 25:53-72.
- 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.
- Deviny, J.S., M.A. Deshusses, and T.S. Webster. 1999. Biofiltration for Air Pollution Control. CRC Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA.
- Eitner, D. and H.G. Gethke. 1987. Design, construction and operation of biofilters for odor control in sewage treatment plants. In: Proceedings of the 80th Annual Meeting of APCA. June 21-26.

- New York. J. Air Waste Manag. Assoc. Pittsburgh, PA, USA.
- Elmrini, H., N. Bredin, Z. Shareefdeen, and M. Heitz. 2004. Biofiltration of xylene emissions: Bioreactor response to variations in the pollutant inlet concentration and gas flow rate. *Chem. Eng. J.* 100:149-158.
- Jorio, H., L. Bibeau, G. Viel, and M. Heitz. 1999. Effects of gas flow rate and inlet concentration on xylene vapors biofiltration performances. *Chem. Eng. J.* 76:209-221.
- Kennes, C. and F. Thalasso. 1998. Waste gas biotreatment technology. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 72:303-319.
- Kent, T.D., S.C. Williams, and C.S.B. Fitzpatrick. 2000. Ammoniacal nitrogen removal in biological aerated filters: The effect of media size. *J. Chartered Inst. Water Environ. J.* 14:409-414.
- Lee, C.H. and M.Y. Chun. 2015. Water Supply System For Biofilter Flowerpot. Republic of Korea Patent No. 10-1488108.
- Leson, G., R. Chavira, A. Winer, and D. Hodge. 1995. Experiences with a full-scale biofilter for control of ethanol emissions. In: *Proceedings of the 88th Annual Meeting & Exhibition of the Air & Waste Management Association.* June 18-23. San Diego. J. Air Waste Manag. Assoc. Pittsburgh, PA, USA.
- Liu, Y.J., Y.J. Mu, Y.G. Zhu, H. Ding, and N.C. Arens. 2007. Which ornamental plants species effectively remove benzene from indoor air?. *Atmos. Environ.* 41:650-654.
- Martin, R.W., H. Li, J.R. Mihelcic, J.C. Crittenden, D.R. Lueking, C.R. Hatch, and P. Ball. 2002. Optimization of biofiltration for odor control: Model calibration, validation and applications. *Water Environ. Res.* 74:17-27.
- 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. J. 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. *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.* 18:448-454.
- 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.
- Ortiz, I. 1998. Biofiltration of gasoline VOCs with different support media. In: *Proceedings of the 91st Annual Meeting & Exhibition of the Air & Waste Management Association.* June 14-18. San Diego. J. Air Waste Manag. Assoc. Pittsburgh, PA, USA.
- Ottengraf, S.P.P. 1986. Exhaust gas purification. In: *Biotechnology, a Comprehensive Treatise in 8 Volumes*, p. 426-452. Vol. 8. Rehm, H.J. and G. Reed. (eds.). Verlag Chemie. Weinheim, Germany.
- Oude Luttighuis, H.H. 1998. Improvement of biofilter-technology by a new type of packing material, In: *Proceedings of the 91st Annual Meeting & Exhibition of the Air & Waste Management Association.* June 14-18. San Diego. J. Air Waste Manag. Assoc. Pittsburgh, PA, USA.
- 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.
- Soreanu, G., M. Dixon, and A. Darlington. 2013. Botanical biofiltration of indoor gaseous pollutants - A mini-review. *Chem. Eng. J.* 229:585-594.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). 2008. Guide to Air Cleaners in the Home. EPA-402-F-08-004.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). 2009. Residential Air Cleaners, second ed., A Summary of Available Information. EPA 402-F-09-002.
- Wang, Z. and J.S. Zhang. 2011. Characterization and performance evaluation of a full scale activated carbon-based dynamic botanical air filtration system for improving indoor air quality. *Build. Environ.* 46:758-768.
- Wargocki, P., D.P. Wyon, J. Sundell, G. Clausen, and P.O. Fanger. 2000. The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity. *Indoor Air* 10:222-236.
- Williams, T.O. and F.C. Miller. 1992. Biofilters and facility operations Part II. *Biocycle* 33:75-79.
- Wolverton, B.C., A. Johnson, and K. Bounds. 1989. Interior Landscape Plants for Indoor Air Pollution Abatement, Final Report NASA (NASA-TM-101760), National Aeronautics and Space Administration.
- 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.
- Yoon, I.K. and C.H. Park. 2002. Effects of gas flow rate, inlet concentration and temperature on biofiltration of volatile organic compounds in a peat-packed biofilter. *J. Biosci. Bioeng.* 93: 165-169.
- Yu, B.F., Z.B. Hu, M. Liu, H.L. Yang, Q.X. Kong, and Y.H. Liu. 2009. Review of research on air conditioning systems and indoor air quality control for human health. *Int. J. Refrig.* 32:3-20.