실내공기 바이오필터용 첨가배지의 포름알데히드 정화특성

정현환 · 유은하 · 장혜숙 · 김광진*

국립원예특작과학원 도시농업과

Formaldehyde Filtration Characteristics of Additional Filter Media for Indoor Air Biofilter System

Hyun Hwan Jung, Eun Ha Yoo, Hye Sook Jang and Kwang Jin Kim*

National Institute of Horticultural and Herbal Science, RDA, 55365, Wanjugun, Korea

Abstract

This study was carried out to investigate the formaldehyde (FA) filtration pattern of additional media for indoor biofilter system. Dry pellet type activated carbon (PAC), activated clay (ACL), zeolite, diatomite, pumice and loess ceramic ball were tested. In the case of dry filter media, formaldehyde purification efficiency was the most excellent with activated clay and then was good with the activated carbon, diatomite, zeolite, and pumice order. PAC and ACL decreased the FA concentration with exponential pattern resulted from dynamic balance between emission and purification. Zeolite, diatomite, pumice, and loess ceramic ball showed high filtration rate at initial time and then increased FA concentration result from breakthrough. PAC, zeolite and diatomite could be recommended as additional filter media for biofilter system considering FA filtration and breakthrough characteristics. FA filtration and breakthrough characteristics were improved with wet media except PAC and ACL. In particular, purification performance improvement and breakthrough mitigation were higher in pumice and loess ceramic balls. PAC+ZEO mixing showed the most high purification performance and breakthrough mitigation in all mixing methods. Thus mixture of PAC with zeolite and vertical mixing could be recommended as additional filter media to improve the FA purification ability and pressure drop with indoor air biofilter system.

Key words : Activated carbon, Activated clay, Ceramic loess, Diatomite, Zeolite

I. 서론

자연환기가 부족한 상황에서 벤젠, 포름알데히드와 같은 휘발성유기화합물(VOC)을 포함한 유해화학물질이 실내에 축적되며(Allen and Miguel, 1995; Miguel et al., 1995; Spengler and Sexton, 1983), 이들의 농도는 공간의 부피, 오염물질의 발생 및 제거율, 환기량, 외부의 기상상황, 그리고 실외의 오염물질의 농도 등에 따라 민감하게 영향을 받는다(Guieysse et al., 2008). 새집증후군이 나타나는 신축건물에서는 VOC나 포름알데히드의 농도가 높게 유지되는 것으로 조사되었으며(Cho and Sohn, 2010; Lee and Chung, 2011; Jones, 1999; Jung et al., 2007; Sekine, 2005), 오염물질은 환기를 통해 효과적으로 제거할 수 있으나 에너지 소비와

외부환경조건에 따른 환기불가 등의 문제도 발생한다(Ekberg, 1994).

실내식물은 VOC와 포름알데히드를 효과적으로 정화할 수 있으며(Wolverton et al., 1989), 배양토와 근권부의 미생물이 VOC 정화에 주된 역할을 하는 것으로 밝혀져 있다(Orwell et al., 2004; Son et al., 2000). 근권부에 공기를 통과시켜 식물과 미생물의 정화능을 활용하는 바이오필터는 물리-화학적 방법보다 에너지 소비가 적고 유해한 부산물이 발생하지 않는 친환경적인 방법으로 포름알데하이드, 벤젠, 톨루엔 등의 저농도 VOC 정화에 이용할 수 있다(Wani et al., 1997; Wood et al., 2006), 건물 벽면에 수직정원 형태로 설치한 바이오필터를 공기조시스템과의 연계하여 건물내 공기정화에 활용된 바 있다(Darlington et al., 2001).

바이오필터에 사용되는 배지는 보수력이 좋고 공극률이 많으며 표면적이 넓어 미생물의 생장에 유리하고 공기흐름에 따른 압력손실이 적으며 단가가 낮은 퇴비, 우드칩, 바크, 피트모스, 펄라이트, 질석, 부석 등이 사용되고 있다(Iranpour et al., 2005; Rezaei et

Received on October 1, 2015. Revised on October 13, 2015.

Accepted on October 13, 2015.

*Corresponding author: baramdosa@korea.kr

연구는 농촌진흥청 공동연구사업(PJ00849501)의 연구비 지원으로 수행되었음

al., 2015; Son, 2004). 그러나 바이오필터를 지속적으로 운영할 때 미생물의 증가로 배지내 공극량 감소, 압력손실 증가, 영양소 결핍, pH와 수분함량 저하 등의 문제가 발생하는데 이는 흡수탑 활용, 석회혼합, 비료사용 등의 방법으로 해결하기도 한다(Detchanamurthy and Gostomski, 2012).

전통적인 바이오필터의 정화용량과 효율을 높일 수 있도록 활성탄, 활성 슬러지, 규조토, 폴리우레탄 폼과 같은 첨가배지를 혼합하여 사용하고 있다(Aydogan and Montoya, 2011; Zhu et al., 1998). 식물생장에 해를 주지 않으면서 정화능을 향상시킬 수 있는 첨가배지로는 피트모스(Kil et al., 2008), 특수물질질을 함유한 하이드로볼(Yoo et al., 2004), 질석, 펄라이트, 피트모스 혼합토양(Lee and Joe, 2008) 등이 사용되었으며, 활성탄이 가장 많이 사용되고 있다(Aydogan and Montoya, 2011; Guieysse et al., 2008; Wang et al., 2012). 그러나 활성탄은 단가가 높고 재활용을 위한 재처리가 필요하여(Kim et al., 2008) 이를 대체하거나 보완할 수 있는 첨가배지에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 다양한 첨가배지의 포름알데히드 정화패턴과 효율을 파악하여 바이오필터 시스템에 사용할 수 있는 적절한 첨가배지를 탐색하고자 수행되었다.

II. 연구방법

1. 사무실 mock-up 및 바이오필터 순환 시스템

포름알데히드가 발생하는 합판으로 사무실 mock-up을 2층으로 제작하였으며 공기의 이동과 균일한 혼합을 위하여 층간 환기구와 소형팬을 설치하였다(Fig. 1). 바이오필터는 원통형 아크릴을 이용하여 제작한 후 실외에 장시간 방치하여 발생하는 냄새를 완전히 제거한 후에 실험에 사용하였다.

바이오필터에는 공기순환을 위한 밸브를 달았으며, 바이오필터 하부에서 10cm 높이에 배양토 지지 및 배수와 통기를 위한 통기관을 설치하여 첨가배지 및 배지를 충진할 수 있도록 하였으며 mock-up 내부의 오염된 공기를 바이오필터에서 정화하여 mock-up으로 순환시켜 내부의 오염물질의 농도를 낮추도록 설계하였다.

바이오필터와 mock-up 연결은 VOC가 발생하지 않는 테프론관을 사용하였으며 오일을 사용하지 않는 피스톤식 진공펌프(VP 0940, Korea Medo Co., Seoul)와 유량계(Dwyer, Michigan, USA)를 이용하여 송풍량을 50L/min(배지내 풍속, 0.92cm/sec)으로 조절하여 순환시켰으며 진공펌프내의 스폰지 필터는 제거하였다.

Fig. 1. Schematic diagram of the office mock-up and biofilter air circulation system, additional filter media (PAC: pellet activated carbon; ACL: activated clay; ZEO: zeolite; DIA: diatomite) and mixing methods (Simple mixing: evenly mixing of the additional filter media; Layered mixing: stacking the additional filter media with layers; Vertical mixing: filling the additional filter media in the vertical).

2. 첨가배지 종류 및 처리

바이오필터 기본배지 이외에 첨가제로 사용되거나 정화능이 우수한 것으로 알려지거나 추정되는 조립활성탄(PAC, Jeil Activated Carbon Industrial Co., Yongin), 활성백토(ACL, Donghae Chemicals Industrial Co., Pohang), 제올라이트(ZEO, Rex Material Co., Pohang), 규조토(DIA, Rex Material Co., Pohang), 부석(Pumice, Hyundai NCC, Ansong), 황토세라믹볼(Loess, Sejin, Seoul) 등 6종을 사용하였으며, 건조한 첨가배지와 수분 공급 후 24시간 이상 방치하여 중력수가 빠져나간 습한 첨가배지를 단용으로 바이오필터에 20cm 높이로 충진하여 포름알데히드 정화특성을 분석하였다.

또한 조립활성탄 단용에 비해 효과가 비슷하거나 우수한 조합을 찾기 위해 습윤 조립활성탄+활성백토, 조립활성탄+제올라이트, 조립활성탄+규조토, 제올라이트+규조토를 50:50(v:v) 비율로 단순히 혼합하는 단순혼합(Simple mixing), 두 재료를 섞지 않고 층으로 쌓는 수평혼합(Layered mixing)과 활성백토, 제올라이트, 규조토를 70% 채운 공간에 조립활성탄을 수직형태로 30%를 채운 수직혼합(Vertical mixing) 처리구를 활성탄 단용 구의 정화능과 비교하였다(Fig. 1).

환기 후 mock-up내 포름알데히드의 농도는 초기에는 포름알데히드의 농도가 급격히 상승하다가 시간이 지남에 따라 서서히 증가폭이 감소하여 6시간 이후에는 농도 증가량이 적어져 mock-up의 방출량, 재흡수량, 그리고 자연환기에 의한 감소량 등이 동적평형을 이루는 것을 확인할 수 있었으며(자료 미제시), 실험에는 환기

후 밀폐하여 포름알데히드 농도가 $3.66\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 로 되었을 때 바이오필터를 작동시켜 첨가배지의 정화특성을 검정하였다.

3. 측정항목

휴대용 다중가스검출기(Z-300XP, Environmental Sensors Co., Boca Raton, FL)를 이용하여 mock-up 2층 내부의 가시적인 포름알데히드 농도 변화를 측정하였으며, U자관 압력계로 바이오필터 통과시의 압력손실 값을 측정하였으며, 첨가배지의 수분함량은 80°C 에서 3일간 건조시킨 후 무게를 측정하였으며 습윤중량법으로 계산하였다. 모든 실험은 약 25°C 로 유지되는 실험실에서 수행되었으며, 3개의 mock-up을 이용하여 수일에 걸쳐 3반복 수행하였고 시간에 따른 포름알데히드 농도변화를 측정하여 그래프로

작성하였으며(Sigmaplot 10, Systat Software Inc., USA), 처리 간 차이는 표준오차로 표시하였다.

III. 결과

1. 첨가배지의 수분함유에 따른 정화특성

대조구는 mock-up내 포름알데히드 농도가 지속적으로 상승하였으나 처리구에서 황토세라믹볼을 제외하고 농도가 낮아지는 것을 관찰 할 수 있었다. 건조 첨가배지의 경우 포름알데히드 최종농도를 기준으로 판단하였을 때 활성백토의 정화능이 가장 우수하였으며 다음으로 조립활성탄, 규조토, 제올라이트, 부석 순으로 나타났다(Fig. 2). 황토세라믹볼은 오히려 포름알데히드 농도가 상승하

Fig. 2. Changes of apparent formaldehyde concentration in mock-up affected by additional filter media and wet condition (mean $\pm$ standard error).

Fig. 3. Water contents and pressure drop of additional filter media affected by dry and wet condition (mean $\pm$ standard error).

여 정화능이 없는 것처럼 보였으나 대조구의 포름알데히드 상승속도나 최종농도에 비해 낮게 유지되고 있었다.

황토세라믹볼과 부석을 제외하고 목업내의 공기가 1회 교체되는 약 48분까지 포름알데히드의 농도가 급격히 감소하다가 이후에는 감소폭이 둔화되었으며, 조립활성탄과 활성백토는 정화량과 발생량이 동적평형을 지속적으로 유지하는 지수형 감소곡선을 나타내는 반면 규조토, 제올라이트, 부석은 정화능이 감소하는 파과현상을 나타내었다. 다만 제올라이트와 규조토는 부석에 비해 정화능도 높고 파과현상이 발생하는 시간이나 포름알데히드 농도가 재생 상승하는 속도가 느려 바이오필터용 첨가배지로 사용가능한 것으로 생각되었다.

습윤첨가배지는 조립활성탄에서 가장 정화능이 우수하였으며, 제올라이트와 규조토도 조립활성탄과 비슷한 정화능을 보였으나 시간이 지나면서 정화능이 떨어지는 파과현상이 나타났고, 그 다음

으로 부석, 황토세라믹볼 순이었고 건조시에 정화능이 가장 우수했던 활성백토는 가장 낮은 정화능을 나타내었다.

조립활성탄과 활성백토를 제외한 모든 첨가배지에서 습윤시에 포름알데히드 정화능이 향상되면서 파과현상도 완화되었는데 특히 부석과 황토세라믹볼에서 정화능 향상 및 파과현상 완화효과가 높은 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 부석과 황토세라믹볼은 조립활성탄, 규조토, 제올라이트에 비해 정화능이 떨어져 바이오필터용 첨가배지로는 적합하지 않은 것으로 판단되었다.

첨가배지의 함수율은 조립활성탄과 활성백토가 가장 높았으며, 다음으로 규조토, 제올라이트, 부석, 황토세라믹볼 순으로 나타났다(Fig. 3). 바이오필터 작동에 따른 압력손실은 활성백토가 가장 높았으며 습윤시 $12 \pm 0.3 \text{ mmH}_2\text{O}$ 로 높아졌다. 조립활성탄, 제올라이트, 부석, 황토세라믹볼은 압력손실이 나타나지 않았으며 규조토는 압력손실이 $2 \text{ mmH}_2\text{O}$ 로 낮게 나타났으며 활성백토를 제외하면 압력손실 값은 수분함유 여부에 무관하여 공기정화용 바이오필터에 첨가배지로 활용하면 바이오필터의 압력손실을 줄일 수 있을 것으로 판단되었다.

2. 첨가배지의 혼합에 따른 정화특성

단순혼합시 조립활성탄 단용에 비해 조립활성탄+제올라이트는 정화능이 좋고 파과현상도 나타나지 않았으며, 조립활성탄+규조토, 제올라이트+규조토는 활성탄 단용과 유사하였으며 파과현상도 완화되었으나 조립활성탄+활성백토는 정화능력이 가장 낮은 것으로 나타났다(Fig. 4).

수평혼합시 제올라이트+규조토가 정화능이 가장 우수하였으나 파과현상이 발생하였고 조립활성탄+제올라이트는 정화능도 좋고 파과현상도 발생하지 않았으며, 조립활성탄+규조토와 조립활성탄+활성백토도 정화능이 활성탄 단용과 비슷하였다.

수직혼합시 조립활성탄+제올라이트가 정화능이 좋고 파과현상도 발생하지 않았으며 조립활성탄+규조토, 제올라이트+규조토가 그 뒤를 이어 활성탄 단용보다도 정화효과가 좋은 것으로 나타났다.

조립활성탄+규조토에서는 파과현상이 거의 관찰되지 않은 반면 제올라이트+규조토 조합은 파과현상이 발생하여 장시간 사용시에는 활성탄 단용보다 정화능이 떨어질 것으로 예상되었다. 활성백토+활성탄은 활성탄 단용보다도 정화능이 떨어지고 파과현상도 발생하였다.

모든 혼합방식에서 조립활성탄+활성백토의 정화능은 활성탄 단용과 비슷하거나 떨어져 첨가배지로 사용하기에 부적합하며, 조립활성탄+제올라이트는 정화능이 우수하고 파과현상이 완화되어 첨가배지로 적합한 것으로 판단되었다. 조립활성탄+규조토는 활성탄 단용에 비해 정화능이 비슷하거나 우수하였고 파과현상이 완

Fig. 4. Changes of apparent formaldehyde concentration in mock-up affected by additional media mixing type (mean $\pm$ standard error).

Fig. 5. Pressure drop affected by additional media mixing type (mean $\pm$ standard error).

화되는 긍정적인 효과를 나타내어 첨가배지로 사용하기에 적합한 것으로 판단되었다. 제올라이트와 규조토 혼합도 조립활성탄과 유사하거나 우수한 정화능을 보이지만 파과현상이 발생하여 장기간 사용시에는 조립활성탄보다 정화능이 떨어질 것으로 예상되므로

파과현상을 완화시킬 수 있는 추가적인 대책이 필요할 것이다.

혼합방식별 정화능은 제올라이트+규조토를 제외하고 모두 수직혼합 방식에서 정화능이 높았으며(Fig. 4), 이는 조립활성탄이 수직으로 세워져 일종의 통로가 형성되어 압력손실을 줄이면서 오염된 공기가 통과하는 층이 상대적으로 두꺼워져 첨가배지와 접촉할 수 있는 시간이 더 길어졌기 때문으로 판단되었다(Fig. 5).

수평혼합방식은 조립활성탄+활성백토, 제올라이트+규조토에서는 단순혼합보다 정화능이 좋은 것으로 나타났으나 조립활성탄+활성백토는 압력손실이 많아져 바이오필터 첨가배지로는 적합하지 않았다. 전반적으로 첨가배지를 혼합하였을 때 단용에 비해 정화능은 높아지면서 압력손실이 감소하였다(Fig. 3, 5).

IV. 고찰

활성탄보다 정화능이 가장 우수했던 활성백토(Fig. 2)는 활성탄의 기능을 강화시킨 첨착활성탄의 정화능과 거의 차이가 없는 것으로 보고된 바 있어(Song and Rhee, 2012) 본 실험의 결과와 일치하였다. 그러나 습윤시 다른 첨가배지들과 달리 정화능이 감소한 것은 입자가 2.0mm 이하로 작고 수분에 의해 달라붙어 입자간 공

극을 막아 정화능이 감소하는 것으로 추정되는데 이는 습윤시의 압력손실이 건조시보다 높아지는 것을 통해 간접적으로 확인할 수 있었다(Fig. 3). 또한 활성백토는 강한 산성을 띄므로 식물-바이오필터 첨가배지용으로는 적합하지 않은 것으로 판단되었다.

입자상 활성탄은 분자크기의 미세공극이 많고 내부표면적이 넓어 각종 유해물질과 가스상 오염물질을 제거하는 흡착제와 공기청정 시스템의 필터로 많이 사용되며(Bastani et al., 2010; Haghighat et al., 2008), 포름알데히드와 톨루엔 제거효율이 높은 것으로 알려져 있다(Guieysse et al., 2008). 또한 바이오필터의 오염물질 정화능을 향상시키며 친수성 및 소수성 화합물을 제거하고 송풍량이나 VOC의 농도변화에 대한 완충능력을 지니고 있다(Aizpuru et al., 2010; Delhomenie and Heitz, 2005).

Haghighat et al.(2008)은 상대습도가 높아지면 소수성의 톨루엔과 사이클로헥산은 활성탄에 의한 제거량이 감소하지만, 친수성의 에틸아세테이트는 제거효율이 높아진다고 보고하였으며, Jo and Chun(2014)은 상대습도가 높아질수록 활성탄에 의한 BTEX의 흡착력이 감소한다고 하였다. Pei and Zhang(2011)은 70~80%의 높은 상대습도에서 VOC의 흡착력이 약화되는 것은 수분이 미세공극을 막아버리기 때문이라고 고찰하였으며, Lee et al.(2010)은 상대습도가 높은 환경에서 활성탄 섬유의 포름알데히드 흡착력이 급격히 감소하는 것은 활성탄과 수분간의 경쟁에 의한 것으로 보고하였다.

따라서 습윤활성탄의 수분함량이 40% 이하였고 압력손실이 없었던 것을 고려하면(Fig. 3), 친수성 그룹이 있는 미세공극(Qi et al., 2006)이 수분으로 포화되지는 않고 미세공극 표면 일부에 수분이 결합하여 포름알데히드가 흡착될 수 있는 미세공극의 표면적이 줄었지만 동시에 표면에 결합되어 있는 수분에 의해 포름알데히드가 흡수되고(Wang et al., 2012) 또한 나머지 수분이 결합되지 않은 미세공극에 흡착되므로 건조첨가배지에서 전체 미세공극에 의해서 정화된 것과 유사한 결과를 나타낸 것으로 판단된다(Fig. 2).

제올라이트는 분자크기의 일정한 미세기공을 지니고 있는 다공성 무기화합물로 천연적으로 존재하는 광물질 중에서 양이온교환능력이 가장 높고 결정 구조와 원자에 따라 이온을 선택적으로 교환할 수 있어 이온교환제, 촉매제, 흡착제, 탈수제 등으로 활용되고 있으며(Chang et al., 2002; Park et al., 2011), 열이나 산을 처리하여 정화능을 높이거나 VOC를 효과적으로 제거하기 위해 제올라이트 멤브레인을 활용하기도 하였다(Aguado et al., 2004; Chang et al., 2009). 규조토는 규조류의 퇴적암으로 미세공극이 많고 80%가 규산질로 화학적 안정성을 가지고 있어 흡수와 흡착에 의한 여과재로 사용된다(Johan and Matsue, 2014).

제올라이트와 규조토도 미세기공에 의한 흡착과 건조한 첨가배

지에 내재되어 있는 수분에 의한 용해로 포름알데히드가 정화되다가 파과현상을 나타내는 것으로 판단되며 습윤시에는 수분함량이 증가된 반면 압력손실에는 변화가 없어(Fig. 3) 미세기공 양에는 변화가 없으나, 습윤활성탄과 같이 미세기공 표면에 흡착되어 있는 수분함량이 증가하면서 포름알데히드의 정화량이 높아지고 파과현상도 완화된 것으로 판단된다(Fig. 4). 파과현상은 미세공극의 양이나 표면적이 적거나 오염물질의 농도가 높을수록 빨리 발생하므로 흡착제의 정화능력을 판단하는 기준으로 사용하며(Huang et al., 2003), 입자상 활성탄 정화능력이 제올라이트에 비해 좋고 파과현상이 나타나지 않는 것은 제올라이트의 약 3배정도의 표면적을 지닌 것에 기인된 것으로 추정된다(Chang et al., 2009).

조립활성탄은 정화능이 우수하고 파과현상이 관찰되지 않아 우수한 재료이나 제조과정에 막대한 에너지가 소모되면서(Park and Lee, 2000) 재생이 어렵고 가격이 비싼 단점이 있고(Kim et al., 2008), 제올라이트와 규조토는 일반적으로 토양개량제로 사용되며 식물생장에 해를 주지 않고, 정화능이 우수하고 천연물질로 단가가 낮아 실용적이나 파과현상의 발생이 문제라 할 수 있다. 다만 파과현상으로 재방출되는 속도가 느리고 방출되는 물질은 다시 식물과 미생물에 의해 정화되므로(Wang et al., 2012), 조립활성탄과 제올라이트 및 규조토를 혼합하였을 때 정화능을 향상시키며(Kim et al., 2010), 압력손실이 줄어들고(Fig. 3, 5) 파과현상이 완화되므로 바이오필터용 첨가배지로 적합할 것으로 생각된다.

V. 적요

본 연구는 조립활성탄, 활성백토, 제올라이트, 규조토, 부석 및 세라믹 황토볼 등의 포름알데히드 정화특성과 효율을 파악하여 실내공기정화용 바이오필터 시스템에 사용할 수 있는 적절한 첨가배지를 탐색하고자 수행되었다. 건조 첨가배지의 경우 활성백토의 정화능이 가장 우수하였으며 다음으로 조립활성탄, 규조토, 제올라이트, 부석 순으로 나타났다. 조립활성탄과 활성백토는 정화량과 발생량이 동적평형을 지속적으로 유지하는 지수형 감소곡선을 나타내는 반면 규조토, 제올라이트, 부석은 정화능이 감소하는 파과현상을 나타냈다. 다만 제올라이트와 규조토는 부석에 비해 정화능도 높고 파과현상이 발생하는 시간이나 포름알데히드 농도가 재생하는 속도가 느려 바이오필터용 첨가배지로 사용가능한 것으로 생각되었다. 조립활성탄과 활성백토를 제외한 모든 첨가배지에서 습윤시에 포름알데히드 정화능이 향상되면서 파과현상도 완화된었는데 특히 부석과 황토세라믹볼에서 정화능 향상 및 파과현상 완화효과가 높게 나타났다. 모든 혼합방식에서 조립활성탄+제올라이트에서 정화능이 가장 좋고, 파과현상이 나타나지 않았으며 혼합

방법 중에는 수직혼합이 가장 우수한 것으로 판단되어 바이오필터의 정화능 향상과 압력손실 감소를 위해서는 조립활성탄과 제올라이트를 혼합하되 수직혼합 방식을 활용하는 것이 좋을 것으로 판단되었다.

V. References

- Aguado, S., A.C. Polo, M.P. Bernal, J. Coronas, and J. Santamaria. 2004. Removal of pollutants from indoor air using zeolite membranes. *J. Membrane Sci.* 240:159-166.
- Aizpuru, A., L. Malhautier, J.C. Roux, and J.L. Fanlo. 2003. Biofiltration of a mixture of volatile organic compounds on granular activated carbon. *Biotech. Bioengin.* 83:479-488.
- Allen, A.G. and A.H. Miguel. 1995. Indoor organic and inorganic pollutants; in situ formation and dry deposition in southeastern Brazil. *Atmospheric Environ.* 29:3519-3226.
- Aydogan, A. and L.D. Montoya. 2011. Formaldehyde removal by common indoor plants species and various growing media. *Atmospheric Environ.* 45:2675-2682.
- Bastani, A., C.S. Lee, F. Haghighat, C. Flaherty, and N. Lakdawala. 2010. Assessing the performance of air cleaning devices - A full scale test method. *Build. Environ.* 45:143-149.
- Chang, W.S., S.W. Hong, and J.K. Park. 2002. Effect of zeolite media for the treatment of textile wastewater in a biological aerated filter. *Process Biochem.* 37:693-698.
- Chang, W.S., H.T. Tran, D.H. Park, R.H. Zhang, and D.H. Ahn. 2009. Ammonium nitrogen removal characteristics of zeolite media in a biological aerated filter (BAF) for the treatment of textile wastewater. *J. Ind. Eng. Chem.* 15:524-528.
- Cho, H. and J.Y. Sohn. 2010. Assessment of indoor volatile organic compounds formaldehyde emission characteristics in new apartments with the effectuation on the indoor air quality law. *J. Kor. Soc. Living Environ. Sys.* 17(2):206-213.
- 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.
- Delhomenie, M.C. and M. Heitz. 2005. Biofiltration of air: A review. *Critical Rev. Biotechnol.* 25:53-72.
- Detchanamurthy, S. and P.A. Gostomski. 2012. Biofiltration for treating VOCs: An overview. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 11:231-241.
- Ekberg, L.E. 1994. Volatile organic compounds in office buildings. *Atmos. Environ.* 28:3571-3575.
- Guieysse, B., C. Hort, V. Platel, R. Munoz, M. Ondarts, and S. Revah. 2008. Biological treatment of indoor air for VOC removal: Potential and challenges. *Biotech. Adv.* 26:398-410.
- Haghighat, F., C.S. Lee, B. Plant, G. Bolourani, N. Lakdawala, and A. Bastani. 2008. Evaluation of various activated carbons for air cleaning - Towards design of immune and sustainable buildings. *Atmos. Environ.* 42:8176-8184.
- Huang, Z.H., F. Kang, K.M. Liang, and J. Hao. 2003. Breakthrough of methylethylketone and benzene vapors in activated carbon fiber beds. *J. Hazardous Materials B98*:107-115.
- Iranpour, R., H.J. H.H.J. Cox, M.A. Deshusses, and E.D. Schroeder. 2005. Literature review of air pollution control biofilters and biotrickling filters for odor and volatile organic compound removal. *Environ. Prog.* 24:254-267.
- Jo, W.K. and H.H. Chun. 2014. Application of fibrous activated carbon filter in continuous flow unit for removal of volatile organic compounds under simulated indoor conditions. *Aerosol Air Quality Res.* 14:314-354.
- Johan, E. and N. Matsue. 2014. Synthesis of mordenite from diatomite and its application for VOCs adsorption. *Trans. Mat. Res. Soc. Japan.* 39:23-26.
- Jones, A.P. 1999. Indoor air quality and health. *Atmospheric Environ.* 33:535-4564.
- Jung, S.W., W.H. Yang, and B.S. Son. 2007. Health risk assessment by potential exposure of NO₂ and VOCs in apartemtns. *Kor. J. Environ. Heath* 33:242-249.
- Kil, M.J., K.J. Kim, C.H. Pak, H.H. Kim, and Y.W. Lim. 2008. 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, B.J., Y.K. Kim, and H.G. An. 2008. A study on regeneration characteristics for activated carbon by microwave heating property. *J. Kor. Soc. Environ. Admin.* 14:35-44.
- Kim, M.H., Y.K. Kim, K.N. Han, S.J. Kim, N.S. Kim, S.Y. Hong, and H.C. Han. 2010. Effect of activated carbon and diatomite on deodorant efficiency of recycled fly ash panel. *J. Kor. Soc. Environ. Eng.* 32:625-630.
- Lee, D.H. and J.D. Chung. 2011. Relevance between total volatile organic compound(TVOC) exposure level and environmental diseases within residential environments. *J. Environ. Health Sci.* 37:193-200.
- Lee, J.H. and I.S. Joe. 2008. A study on development of biofilter system for removing indoor air pollution used by plants. *J. Kor. Soc. People Plants Environ.* 11:33-46.
- Lee, K.J., N. Shiratori, G.H. Lee, J. Miyawaki, I. Mochida, S.H. Yoon, J.S. Jang. 2010. Activated carbon nanofiber produced from electrospun polyacrylonitrile nanofiber as highly efficient formaldehyde adsorbent. *Carbon* 48:4248-4255.
- Miguel, A.H., F.R.D. Neto, J.N. Cardoso, P.D. Vasconcellos, A.S. Pereira, and K.S.G. Marquez. 1995. Characterization of indoor air quality in the cities of Sao Paulo and Rio de Janeiro, Brazil. *Environ. Sci. Technol.* 29:338-345.
- Orwell, R.L., R.L. Wood, W.J. Tarran, F. Torpy, and M.D. Burchett. 2004. Removal of benzene by the indoor plant/substrate microcosm and implications for air quality. *Water Air Soil Pollut.* 157:193-207.
- Park, J.L. and S.H. Lee. 2000. Investigation of manufacturing the activated carbon from domestic rice hulls. *J. Kor. Soc. Environ. Admin.* 6:179-186.
- Park, C.J., K.M. Lee, J.K. Lee, and M.Y. Ha. 2011. Synthesis of zeolite

- from waste fly ash for adsorption of CO₂. J. Kor. Soc. Indoor Environ. 8:188-198.
- Pei, J. and J.S. Zhang. 2011. On the performance and mechanisms of formaldehyde removal by chemi-sorbents. Chem. Eng. J. 167: 59-66.
- Qi, N., Appel, S., LeVan, M.D., Finn, J.E., 2006. Adsorption dynamics of organic compounds and water vapour in activated carbon beds. Industrial & Eng. Chem. Research 45:2303-2314.
- Rezaei, M., M. Fazlzadehdavil, and Y. Hajizadeh. 2015. Formaldehyde removal from airstream using a biofilter with a mixture of compost and woodchips medium. Water Air Soil Pollut. 226: 2242-2251.
- Sekine, Y. 2005. Sick house/building syndrome in JAPAN - current status and practical research on indoor air quality -. Kor. J. Environ. Health. 31:207-214.
- Son, H.K. 2004. The treatment of volatile organic compounds using a pilot scale biofilter. Kor. J. Environ. Health 30:245-252.
- Son, K.C., S.H. Lee, S.G. Seo, and J.E. Song. 2000. Effects of foliage plants and potting soil on the absorption and adsorption of indoor air pollutants. J. Kor. Soc. Hort. Sci. 41:305-310.
- Song, Y.W. and S.K. Rhee. 2012. An experiment evaluation of clay minerals to removal non-point sources of contaminants in the urban runoff. International J. Highway Engineering. 14:55-61.
- Spengler, J.D. and K. Sexton. 1983. Indoor air pollution: A public health perspective. Science, New Series 221:4605.
- Wang, Z., J. Pei, and J.S. Zhang. 2012. Modeling and simulation of an activated carbon based botanical air filtration system for improving indoor air quality. Build. Environ. 54:109-115.
- Wani, A. H., R.M.R. Branion, and A.K. Lau. 1997. Biofiltration: A promising and cost effective control technology for odors, VOCs and air toxics. J. Environ. Sci. Health. 32:2027-2055.
- Wolverton, B.C., A. Johnson, and K. Bounds. 1989. Interior landscape plants for indoor air pollution abatement. NASA pp.1-22.
- Wood, R.A., M.A. Burchett, R. Alquezar, R.L. Orwell, J. Tarran, and F. Torpy. 2006. The potted-plant microcosm substantially reduces indoor air VOC pollution: 1. Office field-study. Water Air Soil Pollut. 175:163-180.
- Yoo, M.H., Y.J. Kwon, J.W. Yoon, and K.C. Son. 2004. Removal of efficiency of BTX as affected by indoor plant species and media in air purification system using plant/medium/soil microorganism. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 22:85(Abstract).
- Zhu, L., R.J. Abumaizar, and W.M. Kocher. 1998. Biofiltration of benzen contaminated air streams using compost activated carbon filter media. Environ. Progress 17:168-172.