

Compost, Peatmoss, GAC의 복합 미디어로 충전된 Biofilter의 Toluene 제어특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Toluene Control Characteristics of Biofilter Packed with Compost, Peatmoss and GAC

엄 윤 성 · 한 세 현 · 정 용 원*

인하대학교 환경공학과

(2006년 8월 28일 접수, 2007년 6월 1일 채택)

Yun-Sung Eom, Sehyun Han and Yong-Won Jung*
Department of Environmental Engineering, Inha University

(Received 28 August 2006, accepted 1 June 2007)

Abstract

The primary objective of this study is to investigate the effect of media on the performance of biofilters. Two types of experiments were carried out in this study. The first type of experiment used a biofilter with the media composed of three different packing materials of compost, peatmoss and GAC (granular activated carbon), whereas the second type used a biofilter with the media composed of compost only.

It was found from the two experiments that the biofilter composed of compost, peatmoss and GAC showed better performance than the one composed of compost only with the higher toluene removal efficiency, lower pressure drop, and more uniform media moisture content. In particular, no appreciable media compression occurred for the biofilter composed of compost, peatmoss and GAC, whereas significant media compression took place in the biofilter composed of compost only. As suggested by the other researchers, it is likely that GAC may be responsible for the higher toluene removal efficiency in the case of the biofilter composed of mixed media especially for the early stage of biofiltration due to its adsorption capability of toluene of such high concentration as 300 ppm. It was also regarded that GAC may play a major role in maintaining lower media pressure drop in the case of the mixed media than the media with compost only because of its mechanical strength resisting to the compression. Nonetheless, further refined experiments may need to draw more accurate conclusion.

The results of the additional test run using the same mixed media showed that the biofilter system using the mixed media can be consistently operated for more than 100 days very stably despite sudden change in operating conditions of temperature and flow rate.

Key words : Biofilter, VOC, Toluene, Compost, Removal efficiency

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-860-7508, E-mail : jungyw@inha.ac.kr

1. 서 론

휘발성 유기 화합물(VOC: Volatile Organic Compound)은 대기 중에 방출되어 광화학반응을 일으켜 오존문제, 시정장애 문제 등을 일으키는 물질로 잘 알려져 있다. VOC의 대기 중으로의 무분별한 방출과 이로 인한 대기질의 저하를 막기 위해서는 VOC 물질들의 체계적인 관리가 필요하다. 이와 같은 목적으로 현재 국내의 많은 사업장에서도 VOC 배출을 억제하기 위한 각종 VOC 제어설비를 사용하고 있거나 사용할 예정으로 있어, VOC의 배출을 억제하고자 하는 구체적인 노력들이 국내에서도 점차적으로 진행되고 있다.

기존의 VOC 제어기술로는 소각, 흡수, 흡착공정 등이 많이 쓰이고 있는데, 최근에는 미생물의 분해능력을 이용한 biofiltration 공정이 국내·외적으로 관심의 대상이 되고 있다. Biofiltration 공정은 상온에서 운전이 가능하고 유지관리비가 저렴하다는 측면에서 최근의 주 관심사가 되고 있으며, biofiltration 공정은 흔히 biofilter라고 부른다(Delhomenie and Heitz, 2005; 이석조 등, 2000; Devinny *et al.*, 1999). 국내의 경우 다공성 세라믹 biofilter의 toluene 제거(임재신 등, 1998), 활성탄을 충전재로 사용한 biofilter의 벤젠과 에틸렌 처리실험(김종오와 이우범, 2003) 등이 소개된 바 있다.

Biofilter는 VOC 또는 유해가스를 미생물이 서식하고 있는 filter 층을 통과시켜, 이들이 filter 층에 체류하고 있는 동안 미생물과의 반응을 통해 무해한 물질로 전환시키는 원리에 의해 운전이 되며, 특히 고유량, 저농도의 VOC 또는 악취 등을 처리하고자 할 경우 기존공정에 비교하여 우수한 공정이다(Delhomenie and Heitz, 2005; Devinny *et al.*, 1999). 또한 최종 생성물로 CO₂, H₂O 등의 무해한 물질과 유해가스의 생분해를 통해 성장한 biomass 등을 생성하여 기존 공정에 비해 2차 오염물처리 문제가 최소화된다.

Biofilter가 효율적이기 위해서는 biofilter media가 미생물을 안정적으로 부착시키고 성장시킬 수 있어야 하며, 또한 초기의 biofilter media를 통한 통기성(air permeability)이 크고 성장된 biomass로 인한 biofilter의 막힘 현상을 최소화할 수 있는 최적의 fil-

ter media 선정 및 운전조건의 선택이 매우 중요한 요소가 된다(Delhomenie and Heitz, 2005; Devinny *et al.*, 1999).

일반적으로 많이 사용되는 biofilter media로는 주로 이용되는 compost, peat와 충전재인 나무조각, 활성탄, 합성물질 등이 있다. 가장 일반적으로 사용되는 compost는 미생물적 측면에서는 유리하나, 공극 매움으로 인한 과도한 압력손실 등으로 인해 다른 media 충전제보다 수명이 짧으며, 특히 미생물의 초기 순응기간동안 오염물의 제거가 어려운 것으로 연구결과가 보고되고 있다(Abumaizar *et al.*, 1998). Abumaizar *et al.* (1998)은 compost만으로 충전된 biofilter와 무기형 충전재인 GAC(Granular Activated carbon)를 compost에 일정 비율로 섞은 이성분 복합 media로 충전된 biofilter와의 비교 실험을 수행하여 이 같은 현상을 보고한 바 있다.

본 연구의 목적은 Abumaizar *et al.* (1998)의 연구의 연장으로서 compost, peatmoss, GAC의 세 가지의 물질로 구성된 복합 media로 충전된 biofilter의 VOC 제거 성능을 조사하고, compost만의 단일 media로 충전된 biofilter와의 비교 실험을 통해, 보다 개선된 biofilter의 개발을 위한 초기 단계의 운전 자료를 구하고자 함에 있다. VOC 모의가스로는 인쇄업 등에 많이 사용되는 toluene을 사용하였는데, 미생물에 의한 생분해가 우수한 것으로 알려져 있다(서성규, 1999; Devinny *et al.*, 1999). 복합 media의 성분구성은 이론적으로 수많은 경우의 수가 존재하나, 본 연구에서는 세 가지 물질로 구성된 복합 media의 성능을 확인할 목적으로 우선 하나의 조건만을 대상으로 시간의 경과에 따른 toluene 제거효율 및 biofilter의 압력강하 및 수분함유량 변화를 조사하고 이를 compost만의 단일 media로 구성된 biofilter의 성능과 비교하였다.

또한 장시간 운전에 따른 biofilter의 운전특성 변화와 급격한 운전조건의 변화에 따른 biofilter의 동특성을 조사하기 위하여 별도의 실험을 107일간 수행하였다. 장시간 운전 실험에서 수행한 조사 사항으로는 온도, 유량(또는 EBRT: Empty Bed Retention Time) 및 mass loading rate의 변화에 따른 toluene의 제거효율 변화와 biofilter 침출액의 pH, 압력강하 및 수분 함유량 변화 등을 고려하였다.

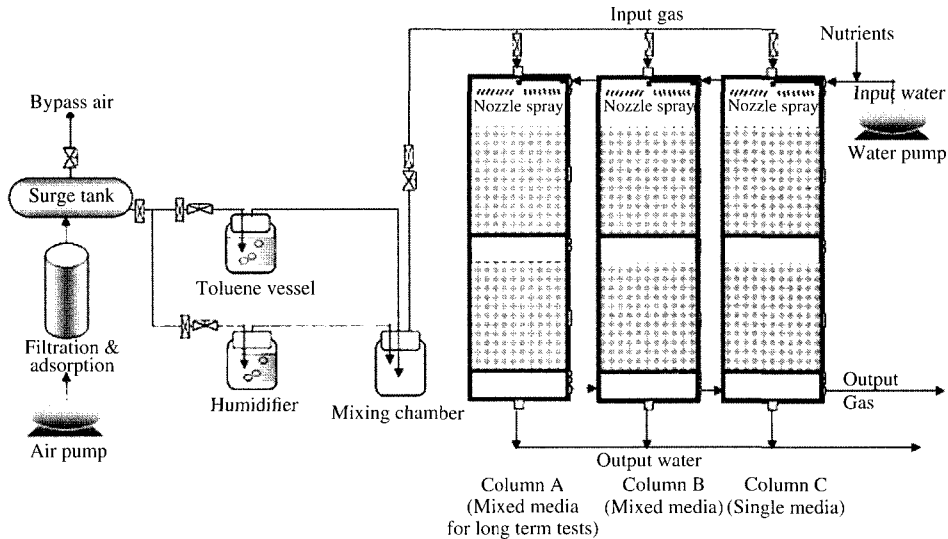


Fig. 1. Schematic of the three column biofilter system (column A: mixed media for long term tests, column B: mixed media, column C: single media).

2. 실험방법

2.1 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 biofilter 시스템의 개략도를 그림 1에 나타내었다. Biofilter column의 규격은 내경이 5.0 cm, 높이가 90 cm이고, 재질은 PMMA (Poly Methyl Metha Acrylate)를 사용하였다.

편의상, 3개의 biofilter column을 각각 column A, B, C로 명명하였다. 주 실험장치인 column A는 장시간 연속실험용으로 compost, peatmoss, GAC 등이 각각 2 : 1 : 1의 비율(부피기준)로 구성된 복합 media를 충전제로 사용하였다. 장기간 연속실험은 순응기간 10일 이후부터 107일간 진행되었고, 이 과정에서 유량(또는 mass loading의 변화)과 온도를 간헐적으로 변화시켜가면서 이에 따른 biofilter의 운전특성변화로 toluene 제거효율, biofilter의 압력강하, 수분함유량 변화, 침출액의 pH 변화 등을 조사하였다.

복합 media와 단일 media의 차이점을 비교하기 위하여 column B에는 column A에서 사용한 compost, peatmoss, GAC를 균일하게 섞은 복합 media를 사용하였고, column C에는 compost만을 충전한 단일 media를 사용하여 비교실험을 설계하였다. Column B와 C를 사용한 동시 실험은 column A의 실험과는

Table 1. Physical properties of the biofiltration columns used in this study.

Physical property	Column A and B (mixed media)	Column C (single media)
Volume of compost (mL)	625.0	1250.0
Volume of peatmoss (mL)	312.5	-
Volume of GAC (mL)	312.5	-
Compost weight (g)	269.8	539.6
Peatmoss weight (g)	48.1	-
GAC weight (g)	191.5	-
Dry compost weight (g)	177.7	355.3
Dry peatmoss weight (g)	36.8	-
Dry GAC weight (g)	178.4	-
Size of peatmoss (diameter, mm)	3~4	-
Size of GAC (diameter, mm)	3~4	-
Height of media in column (cm)	63.4	63.4
Diameter of column (cm)	5.0	5.0
Density (g/mL)	0.87	0.42

별로도 순응기간 10일 이후부터 약 40일 간 수행되었다.

본 연구에서 사용된 각 biofilter column별 media의 물성 및 구성은 표 1에 정리되어 있다. 특히, 본 연구에서 사용된 peatmoss는 높은 표면적과 공기 투과성 뿐만 아니라 미생물 및 영양분을 가지고 있기 때문에, 기존의 media와 비교하여 압력손실 및 미생물 부

Table 2. Operating conditions of the column A.

Step	Operation time (days)	Flow rate (L/min)	EBRT (min)	Temp. (°C)
1	1~50	1.0	1.2	23
2	51~60	0.5	2.5	23
3	61~74	1.5	0.8	23
4	75~91	1.0	1.2	33
5	92~107	1.0	1.2	39

착능에서 개선효과가 있을 것으로 판단된다.

Column A에서는 107일 간의 운전기간을 표 2에 제시된 바와 같이 5단계의 조건으로 나누어 각기 다른 조건의 실험을 수행하였으며, column B와 C는 column A의 1단계와 같은 조건으로 실험을 수행하였다. 따라서 column A의 1단계 조건 하의 실험과 column B의 실험 조건은 동일한 것으로 간주되며, 이를 통해 실제 운전에서 매우 중요한 재현성을 확인할 수 있다.

처리대상 가스인 toluene은 다음과 같은 과정을 통해 일정한 농도로 column의 상부에 공급이 된다. 즉, biofilter의 유량을 조절하기 위해 설치된 에어펌프로부터 유입된 공기 중의 먼지 및 기타 VOC를 활성탄 column 및 여과 filter를 통해 제거한 다음, 이를 toluene vessel과 수분 공급기(humidifier)를 통과시키고 혼합 용기(mixing chamber)를 통과시키면 일정농도의 toluene 공급가스가 제조가 된다. 수분은 공급가스에 어느 정도 포함이 되어 있으나 충전 media 내의 부족한 수분은 반응기 최상부에 설치한 노즐을 통해 간헐적으로 추가 공급하였다.

각각의 반응기의 균주는 compost와 peatmoss에 자연 서식하는 미생물을 사용하였는데, VOC 모의가스인 toluene과 함께 약 10일 가량 순응시켜 배양하였다. Biofilter column은 물을 이용하여 역세정이 가능하도록 설계하였으며, 영양분(nutrient)을 반응기 내에 고르게 공급하기 위해 시린지 펌프를 이용하여 충전 media 상부에 설치된 노즐에서 물과 함께 영양분이 연속적으로 주입되도록 설계하였다. Nutrient 용액의 구성성분은 표 3에 제시되어 있다(Zilli *et al.*, 2000; Parvatiyar *et al.*, 1996).

Biofilter column 내부의 온도는 각 column 외부에 water jacket을 설치하고 물을 순환시켜 22~26°C로 유지하였는데, 온도의 영향을 조사할 목적으로 약 40°C까지 온도를 상승시킨 경우도 있었다.

Table 3. Components of the nutrient solution.

Component	Concentration (mg/L)
KH ₂ PO ₄	8.5
K ₂ HPO ₄	217.5
Na ₂ HPO ₄	266.4
NH ₄ Cl	25.0
MgSO ₄ · 7H ₂ O	22.5
CaCl ₂	27.5
FeCl ₃ · 6H ₂ O	0.25

Toluene의 농도 측정을 위한 시료는 column 상·하단 및 column 각 부분에 설치된 시료 채취구(septum으로 막혀있음)에서 gas tight syringe를 사용하여 채취하였고, media 함수율(media moisture content) 측정을 위한 시료는 biofilter column 상·하단 column의 중간부분의 media 채취구(media sampling port)에서 채취하였다. 압력손실은 biofilter column 상·하단 부분에 마노미터를 설치하여 하루 세 번의 빈도로 측정하여 이를 산술평균하였으며, biofilter column 내 부온도는 열전대(SDT62, Summit Inc.)를 이용하여 측정하였다. 유량은 니들밸브가 장착된 유량계(Dwyer Inc.)를 사용하여 조절하였으며, pH는 biofilter media의 침출액을 pH meter(250A+, Thermo Orion Inc.)로 측정하였다.

본 연구에서는 미생물증식에 따른 biofilter의 과도 거동과 운전조건 변화에 따른 동특성 파악 및 막힘과 압밀현상을 단기간에 파악하기 위해 비교적 고농도(300 ppm, 또는 대략 1.14 g/m³)의 toluene (mass loading rate로 환산하면 대략 20~70 g/m³·h)을 의도적으로 사용하였다. 참고로 대기오염방지기술 중에 biotechnology가 적용 가능한 한계는 VOC의 농도가 대략 2.5 g/m³ 이하인 경우로 제시되고 있다(Del-homenie and Heitz, 2005).

2.2 Toluene 분석 방법

Toluene의 농도분석을 위해 본 연구에서는 길이 300 mm, 직경 0.32 mm, film 두께가 4.0 μm인 capillary column (HP-1 film)과 FID (Flame Ionization Detector)가 장착된 GC (Gas Chromatograph: HP 4850, Hewlett Packard Inc.)를 사용하였다. 또한 미량의 가스상 시료의 안정적인 분석을 위해 purge & trap concentrator (Hewlett Packard Inc.)를 사용하였다. 오븐 온도는 승온법을 이용하여 초기 온도를 40°C로 2분

간 유지한 다음 분당 10°C씩 승온하여 최종 온도 160°C에서 1분간 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단일 media와 복합 media로 충전한 biofilter의 성능 비교 연구

복합 media로 충전한 biofilter (column B: 그림 1 참조)와 단일 media로 충전한 biofilter (column C: 그림 1 참조)를 순유기간 10일 이후부터 약 40일간 동시 비교 실험을 수행하였다. 비교실험 시에 기체유량은 1 L/min (EBRT=1.2 min), 반응기 온도는 24~27°C로 유지하였다.

Column B, C에 유입되는 toluene의 mass loading rate는 대략 40.0 g/m³-h로 일정하게 유지하였다. 따라서 비교실험에서는 mass loading rate에 따른 biofilter의 운전특성변화는 무시할 수 있도록 실험이 의도적으로 설계되었다.

3.1.1 Toluene 제거 효율 비교

그림 2는 약 40일의 운전기간 동안 column B와 column C의 toluene 유입, 유출 농도와 제거 효율을 비교하기 위하여 나타낸 그래프이다.

그림 2에 나타난 바와 같이 복합 media로 충전된 column B의 경우는 최초에는 90% 정도의 toluene 제거효율을 가지며 10일 이후에 95% 정도를 보이다 20일 후에는 거의 100%에 가까운 toluene 제거효율을 가지는 것으로 나타났다. 반면에 단일 media로 충전된 column C의 경우 최초에는 약 80% 정도의 toluene 제거효율을 보이다 운전 기간 15일에 약 90% 정도로 점차적으로 증가를 하며, 95% 정도의 정상 효율에 도달하는 시간이 복합 media로 충전된 column B에 비해 다소 긴 것으로 나타났다.

한편 Column B의 초기 단계의 toluene 처리효율이 column C의 초기효율 보다 확연하게 높은 이유는 Abumaizar *et al.* (1998)이 주장하는 바와 같이 GAC의 toluene 흡착능력에 의한 것으로 판단된다. 이는 시간이 경과함에 따라 미생물의 성장으로 인한 효과가 GAC의 흡착효과를 능가하게 되어 결과적으로 toluene 제거효율이 거의 같아지는 것을 통해 유추할 수 있다.

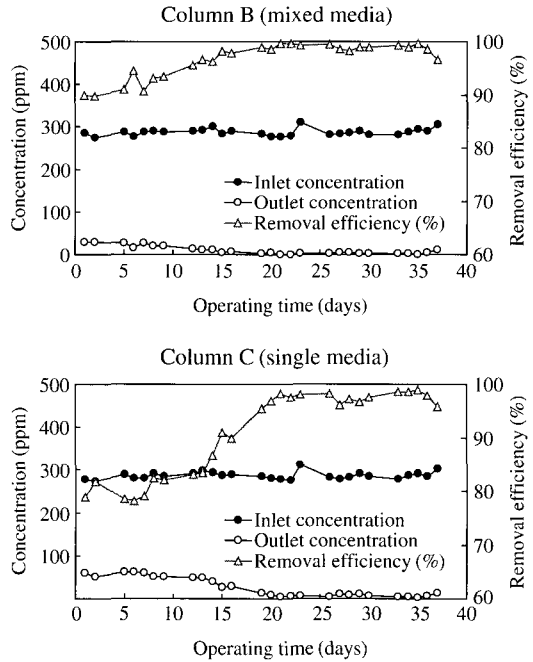


Fig. 2. Influent and effluent concentrations of toluene and the corresponding removal efficiencies of columns B and C.

3.1.2 Media 내 압력손실 비교

Biofilter 내 압력손실에 관여하는 변수는 충전 media의 크기, 유량, 미생물의 과다 증식, media의 압밀, 배수성 등 여러 요인들이 있다 (Deviny *et al.*, 1999).

즉, media의 수분함유량이 크고, 표면이 거칠고 다공성이면 미생물은 media의 공극이나 불규칙적인 표면에 서식하게 된다. 따라서 이러한 미생물 성장형태로 인해 성장된 미생물집단이 media의 큰 공극을 채우기 보다는 media 자체의 내부공극이나 표면의 biofilm에 서식하게 되며, 이로 인해 media의 큰 공극을 막지 않아 급격한 압력손실 증가의 가능성은 크지 않은 것으로 알려져 있다 (Mohseni *et al.*, 2000; Deviny *et al.*, 1999; Abumaizar *et al.*, 1998).

만약, media의 재질이 유연한 경우에는 기체에 의한 drag와 media 자체의 무게로 인해 media 간의 압밀이 일어날 수 있다. 일단 media의 압밀현상이 발생하면 압력손실은 비선형적으로 급격하게 증가되며 이로 인해 운전비용이 증가하고 media의 수명이 급

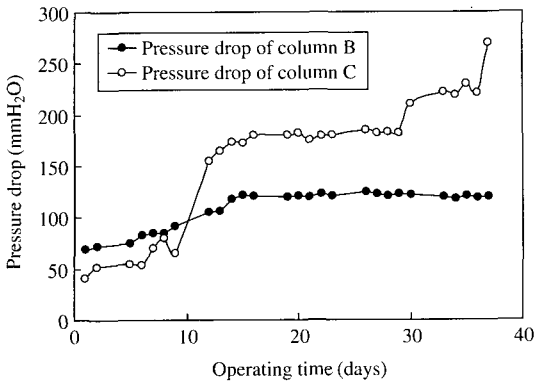


Fig. 3. Pressure drop of columns B and C.

속하게 단축될 수 있다(Devinny *et al.*, 1999).

그림 3은 column B와 column C의 약 40일간 압력 손실 변화를 나타낸 그래프이다.

그림 3에 나타난 바와 같이 복합 media의 압력 손실은 biofilm이 형성됨에 따라 초기에 비해 증가되어 운전기간 15일 후부터는 정상상태의 압력손실을 유지하였다. 반면에 compost만의 단일 media로 충전된 biofilter의 경우는 초기의 압력손실이 복합 media로 구성된 biofilter 보다 낮지만, 정상상태의 압력손실은 거의 1.5배 수준으로 높았고 또한 실험 후 30일이 경과한 다음에는 더욱 급격히 증가됨을 확인하였다. 이러한 급격한 압력손실의 증가의 원인은 전술한 media의 압밀현상에 기인한 것으로 판단된다.

참고로, 실험 시 관찰한 바로는 초기의 media 높이는 두 column 모두 63.4 cm의 같은 높이로 충전하였으나, 운전기간 말기인 약 40일 후에 column B의 media 높이는 61.2 cm로 거의 일정하게 유지되는 반면에 column C의 media 높이는 46.8 cm로 약 16.6 cm 줄어든 것을 확인하였다. 이러한 관찰 결과는 column C에서 압력손실의 증가가 결국 media의 압밀현상 때문임을 입증하는 결정적인 증거로 사료된다.

또 다른 증거로는 다음과 같은 것을 제시할 수 있다. 즉, 각각의 column에서 media를 채취해 성상을 확인한 결과, column B의 경우는 GAC와 peatmoss의 표면에 액상의 biofilm을 형성하여 media의 공극이 막히지 않았으나, column C의 경우는 media인 compost가 진흙이나 슬러지 같이 압착이 되어있는 것을 확인한 바 있다.

따라서 column B의 peatmoss 및 GAC가 bulking agent로서 media의 압밀의 가능성을 줄이고, 미생물을 filter 내부의 넓은 표면적에 균일하게 서식하게 하여, 그 결과 column B의 압력손실이 급격하게 증가하지 않고 비교적 일정하게 유지되고 있는 것으로 판단된다.

한편 Song and Kinney (2002)는 압밀현상이 일어나면 미생물의 서식 공간 축소 및 환경이 열악하게 되어 toluene 제거효율이 저하할 가능성이 있는 것으로 지적한 바가 있다. 그러나 본 연구에서는 그림 2에 나타난 바와 같이 toluene의 제거효율은 단일 media (column C)의 경우 압밀이 일어난 15일 이후에도 오히려 증가하고 있는 것을 보여 주고 있는데, 그 이유는 다음과 같이 추측된다. 즉, 15일 이후에 압밀에 의해 filter media 층이 실험초기 상태보다 전체적으로 미생물 성장에 열악한 상태가 조성되었지만, filter 층 전체에 걸친 미생물의 증식으로 인해 toluene 제거효율은 정상상태에 도달하기 전까지 증가하는 것으로 사료된다. 참고로 Delhomenie *et al.* (2003)의 실험결과는 본 논문과 유사한 경향을 나타내고 있다. 따라서 특수한 실험조건에서는 압력손실이 증가하더라도 toluene 제거효율이 증가할 수도 있음을 보여주고 있는데, 결국 보다 정확한 해석은 biofilter의 과도거동(dynamic behavior)을 묘사할 수 있는 수학적 모델과 이를 확인하는 정교한 실험을 통해 이루어질 수 있을 것으로 사료된다.

3. 1. 3 pH 비교

Biofilter의 안정적인 운전과 미생물 번식에 적절한 환경을 조성하기 위해 media는 pH 6~8 사이의 중성을 유지해야 하며, 외부요인 변화에 대한 완충능력이 있어야 한다. 본 연구에서는 column B와 column C가 모두 운전기간 동안 대체적으로 중성영역을 유지하였다. 그림 4는 column B와 column C에서 40일 동안의 pH의 변화를 나타낸 것이다.

그림 4에 나타난 바와 같이 column B와 C 모두 운전기간동안 nutrient와 함께 주입된 media의 pH가 8.1~8.4로 중성범위에서 일정하게 유지되는 것을 관찰할 수 있었다. 한편 이와 같은 중성영역에서 pH의 조그만 차이가 미생물의 성장속도의 차이를 유발하지는 않을 것으로 판단되며, 이러한 이유로 본 연구의 pH 범위에서는 pH가 toluene 제거효율에 큰 차

이를 초래하지 않은 것으로 사료된다.

3.1.4 Media 수분 함유량 비교

표 4는 column B와 column C의 수분함유량 변화를 나타낸 도표이다.

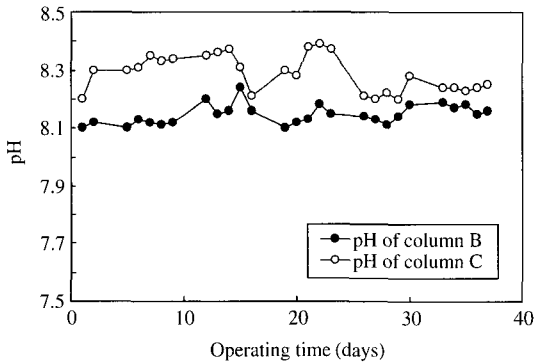


Fig. 4. pH of columns B and C.

Table 4. Moisture contents (% dry weight basis) of column B and C.

	Column B (mixed media)	Column C (single media)
Top section of the media	60.1	58.1
Bottom section of the media	61.3	72.0

표 4에 나타난 바와 같이 복합 media로 구성된 column B의 경우보다 단일 media로 구성된 column C의 경우 전체적으로 수분 함유량이 더 많고, 특히 column 상·하부 수분 함유량의 차이가 컸다.

Biofilter media의 수분은 미생물의 먹이가 되는 VOC의 흡수속도에 영향을 주며 이로 인해 액상으로 된 biofilm 생성에 영향을 미치고, 또한 미생물은 biofilm에 집중적으로 서식하게 되므로 매우 중요한 인자라 할 수 있다. Biofilter의 효과적인 운전 에 필요한 media의 최저 수분 함유량은 약 50% 정도인 것으로 알려져 있다(Deviny *et al.*, 1999). 본 연구에서 column B의 경우 media의 수분함유량은 상부와 하부 모두 약 60% 정도로 Deviny *et al.* (1999)의 결과에 접근하지만, column C의 경우 하부는 약 72% 정도로 최적 조건이 아님을 시사하고 있다.

3.2 복합 미디어로 충전한 biofilter의 장시간 운전 시 운전조건 변화에 따른 동특성

본 절에서는 복합 media로 충전한 biofilter (column A: 그림 1 참조)를 순운시간 10일 이후부터 107일 동안 장기간 연속 운전하여 연속 운전 시에 발생하는 성능 상의 문제점과 온도 및 유량의 변화에 따른 운전 인자 및 toluene의 제거 특성변화를 제시하였다.

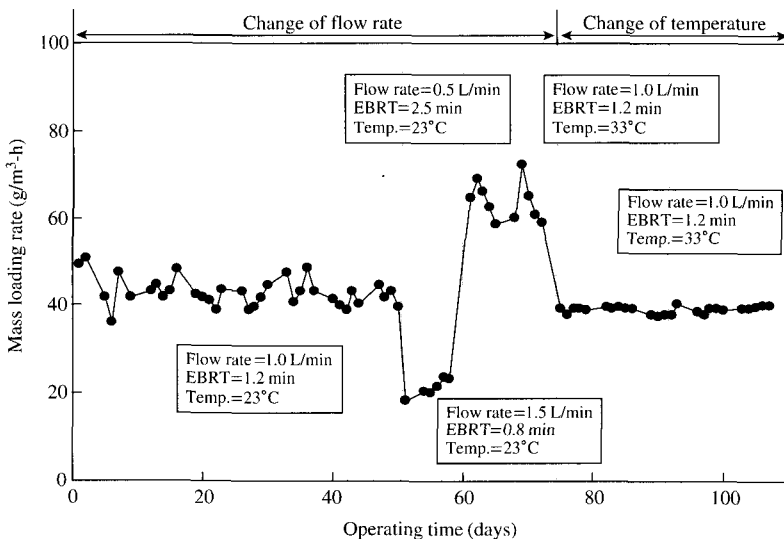


Fig. 5. Mass loading rate in column A.

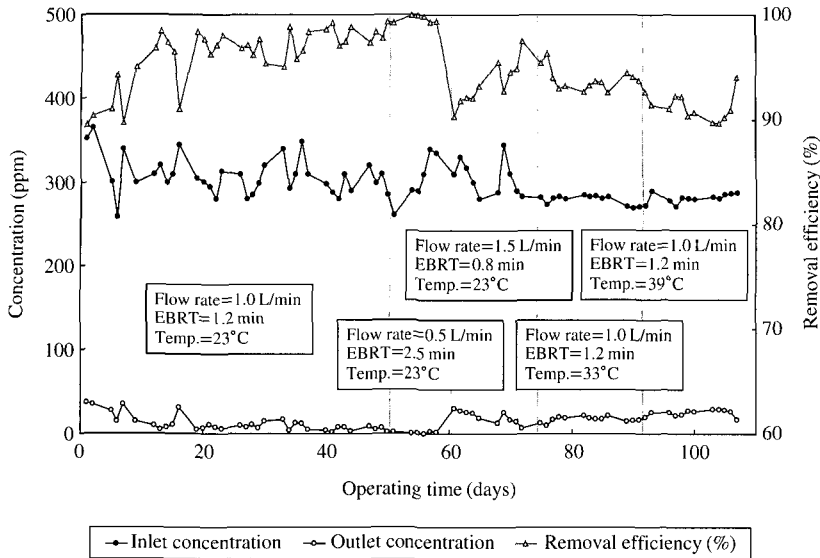


Fig. 6. Influent and effluent concentrations of toluene and the corresponding removal efficiencies of column A.

3. 2. 1 체류시간 및 온도변화에 따른 toluene

제거 효율 평가

그림 5와 6은 복합 media로 충전된 column A의 유량과 온도 변화에 따른 107일 동안의 toluene의 mass loading rate와 처리 전·후 농도, 제거 효율을 나타낸 것이다.

그림 6에 나타난 바와 같이 각 기간별 유량 변화에 따른 효율 변화를 살펴보면, 유량이 증가할수록 toluene의 처리효율은 낮아지는 결과를 보이고 있다. 이러한 제거효율의 감소의 원인은 유량이 증가함에 따라 체류시간인 EBRT 값은 감소하는 반면에 toluene의 mass loading rate는 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

기간별 온도 변화에 따른 toluene 제거효율 변화를 살펴보면, 온도가 23°C에서 39°C로 상승함에 따라 biofilter의 toluene 제거효율은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 현상은 크게 두 가지 측면을 고려하여 그 원인을 분석해야 하는데, 첫 번째는 온도가 상승함에 따른 biofilm에서의 toluene 흡수속도의 저하 가능성과 그로 인한 toluene 제거효율 저하 가능성, 두 번째는 toluene을 분해하는 중온균에 해당하는 미생물들이 온도가 상승함에 따라 활성이 저하될 가능성을 고려해야 할 필요가 있다. 따라서 이에 대한 명확한 결론은 보다 정교한 실험을 통해 결론을

도출해야 할 것으로 사료된다.

일반적인 biofilter에서 미생물의 순응기간은 대략 30일이 소요되지만, 본 연구에서는 순응기간 약 10일 이후부터 안정적인 처리 효율을 보이고 있다. 그 이유는 일반적으로 media의 bulking agent로 쓰이는 GAC에 의한 흡착작용으로 biofilm의 성장에 필요한 toluene이 실험 초기에 GAC에서 biofilm으로의 확산을 통해 원활하게 공급이 되어 결과적으로 toluene의 초기제거효율을 상승시킨 것으로 사료된다. 이러한 해석은 전술한 GAC가 포함되지 않은 biofilter와의 비교실험에서 이미 밝힌 바가 있는데 장기 운전 실험에서도 같은 해석이 가능하다. 즉, 초기에는 GAC가 흡착에 의해 toluene을 보관하는 reservoir 역할을 하고 있는 것으로 사료된다. 또한 이는 Abumaizar *et al.*(1998)의 실험 결과에 의한 해석과 동일한 해석이다.

한편 시간이 지나 GAC의 흡착능력이 저하되는 경우에 GAC가 media로서의 역할을 하며, GAC의 다공성과 넓은 표면적은 미생물이 서식하기에 좋은 환경을 제공하여 미생물은 증가하게 된다. 이로 인해 toluene의 제거효율은 저하되지 않으며 안정적으로 유지되는 것으로 해석된다.

요약하면, 복합 media로 구성된 biofilter column A의 경우 본 연구의 실험조건에서 유량 및 온도 상승

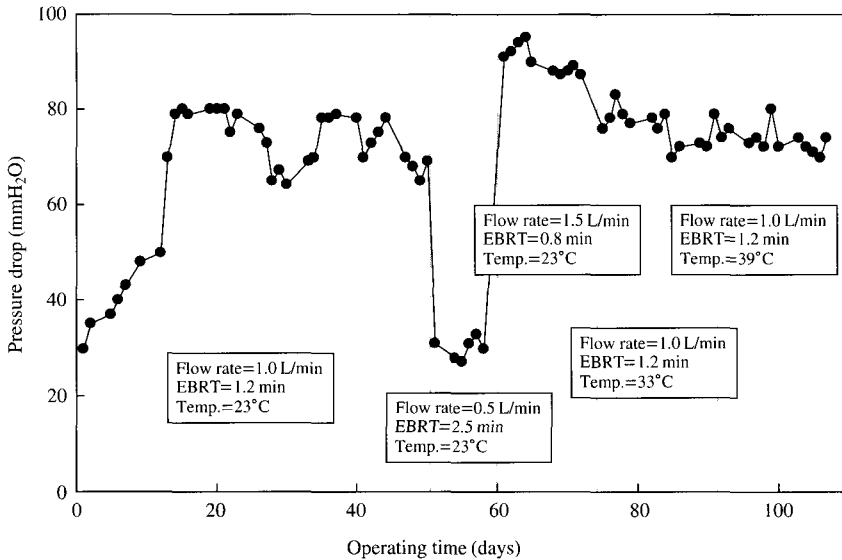


Fig. 7. Pressure drop of column A as a function of flow rate and temperature.

에 의해 toluene 제거량 및 효율은 최대 9% 감소하였으나, 대체적으로 실험기간동안 평균 90% 이상의 toluene 제거효율을 보여 안정적인 운전이 가능한 것으로 나타났다.

결론적으로 toluene의 제거효율 측면에서 복합 media로 충전한 biofilter의 경우, 장기간에 걸친 유량과 온도의 급격한 변화에도 불구하고 안정적인 운전 특성을 보이고 있으며, 특히 미생물의 순응과 성장이 필요한 운전 초기에도 비교적 안정적인 운전이 가능한 것으로 판단되었다.

3.2.2 Media 내 압력손실의 변화

그림 7은 column A에서 유량과 온도에 따른 압력손실 변화를 나타낸 것이다.

그림 7에서 각 단계별 유량 및 온도 변화에 의한 압력손실을 살펴보면, 운전초기 압력손실은 media에서 biomass의 생성, 용해성 유기물 및 수분의 영향으로 증가하며 대략 20여 일 경과 후에 biofilter가 정상상태로 안정화되면 압력손실은 80 mmH₂O로 일정하게 유지되었다. 그러나 30일 정도 경과 후에 압력손실이 63 mmH₂O로 급격히 감소하였다가 미생물의 성장으로 다시 증가되는 현상을 보이기도 하는데, 이러한 현상이 일어나는 이유는 media의 공극을 막고 있는 biofilm의 간헐적인 탈리에 의한 것으로 판단되

며 이러한 패턴은 40일 경과 후에도 관찰이 된다. 이들을 종합적으로 분석하면 이는 어느 정도 성장한 biofilm이 증가된 drag로 인해 간헐적으로 media로부터 탈리되기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 탈리된 biofilm은 media에 다시 부착될 가능성도 있고 일부는 외부로 유출될 가능성도 있을 것으로 판단된다.

50일 경과 후에 유량을 0.5 L/min로 감소 시켰을 때, 압력손실은 30 mmH₂O로 감소함을 알 수 있었다. 반대로 60일 경과 후에 유량을 1.5 L/min로 증가 시켰을 때에는 압력손실은 90 mmH₂O로 증가하였고, 그 후 15일 간 천천히 감소하는 것으로 관찰되었다. 이 경우 역시 증가된 기체유속으로 인해, 미생물 층이 서서히 탈리되어 media층 하부에 재부착되거나 media층에서 유출되기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 이 결과는 이와 같은 높은 유속에서 본 연구의 biofilter를 운전하는 것은 바람직하지 않음을 시사한다. 그러나 중요한 점은 이러한 고속운전 시 발생할 가능성이 매우 큰 media의 압밀현상이 복합 media를 사용한 실험에서는 일어나지 않고 있음을 확인할 수 있었다.

한편, 압력손실의 급격한 하락현상은 column B의 실험에서는 확인되지 않고 있는데, 초기압력손실 값이 두 경우에 각각 30 mmH₂O (column A), 65 mmH₂O

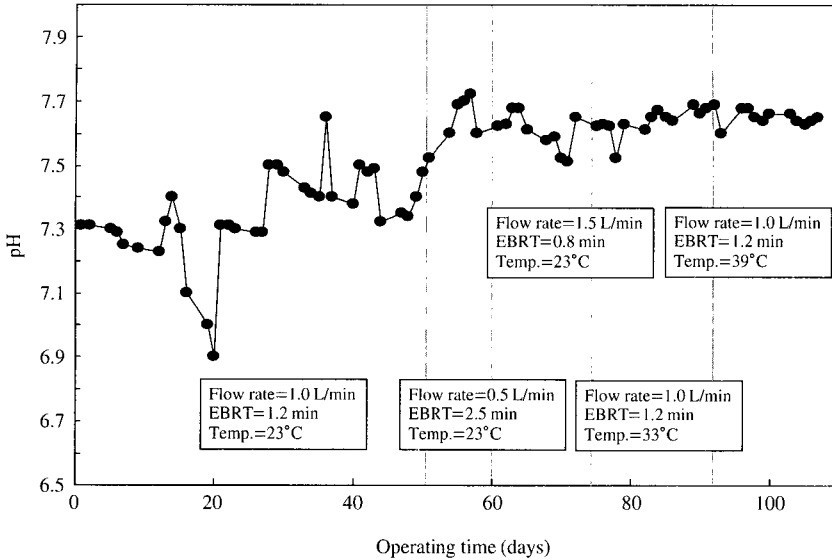


Fig. 8. pH of column A as a function of flow rate and temperature.

(column B)로 크게 달라 직접 비교는 어려우나, 한 가지 분명한 것은 column B의 경우 초기 공극률이 상대적으로 작았던 것으로 판단된다. 따라서 이 부분은 향후 differential pressure transducer로 filter bed의 여러 층을 층별로 scan하여 층 별 압력손실을 측정하고, 이로부터 층 별 공극률과 압밀이 심한 부분을 파악하는 방법과 같은 보다 정교한 실험을 통해 정확한 원인을 구명해야 할 사항으로 판단된다.

3. 2. 3 pH 변화

그림 8은 실험기간동안 column A 내부의 pH 변화를 나타낸 그림이다.

그림 8에서 전체적으로 실험기간동안 pH가 최소 6.9에서 최대 7.7로 큰 변동이 없이 거의 중성영역 범위를 유지하는 원인은 nutrient 인산성분과 media 내 염기 치환능력 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 사용한 nutrient를 사용한 복합 media는 미생물 서식에 적합한 pH를 제공할 뿐만 아니라, 미생물의 유기물 분해 시 생성되는 산 성분을 효과적으로 중화할 수 있는 정도로 완충능력이 우수한 것으로 판단된다.

3. 2. 4 Media 수분 함유량

표 5에 복합 media로 충전된 column A(그림 1 참

Table 5. Moisture contents (% , dry weight basis) of column A as a function of flow rate.

	Flow rate (L/min)		
	0.5	1.0	1.5
Top section of the media	66.3	60.2	56.2
Bottom section of the media	67.5	62.4	59.6

조)에서의 기체유량에 따른 수분 함유량의 변화를 나타내었다. 전체적으로 예상한대로 기체유량이 증가함에 따라 media의 수분함유량도 저하됨을 알 수 있다.

주목할 만한 점은 표 5에서 biofilter 상·하부의 수분 함유량이 모두 50%보다 크고, 상·하부의 수분 함유량이 기체유량이 큰 경우(즉, 고속운전)에 차이가 다소 커지지만, 그 차이는 무시할 만한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 사용한 복합 media는 수분 함유 능력이 매우 우수한 것으로 판단된다.

한편, 온도 변화에 따른 수분 함유량 변화를 조사한 결과, 온도가 39°C인 경우 column A에서 상·하부 수분 함유량은 각각 48%와 57%였다. 이 결과는 온도가 23°C인 경우보다 수분함유량이 column 상부에서는 12%가 낮아졌고 하부에서는 2~3%가 낮은 결과이다.

3.2.5 재현성

전술한 바와 같이 column A의 1단계 조건 하의 실험과 column B의 실험 조건은 동일한 것으로 간주되며, 이를 통해 실제 운전에 있어 매우 중요한 재현성을 확인할 수 있다. 그러나 본 연구에서 column A와 column B의 실험 시에 mass loading rate, media의 압력손실, pH 등에 다소 차이가 있어 실험이 동일하게 재현되지 못한 것으로 사료된다. 이는 서로 실험 시기에 다소 차이가 있어 media의 상태가 조금 변화되었던 것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 column A와 column B의 toluene 제거효율은 그림 2와 그림 6에 도시한 바와 같이 거의 같은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 적어도 column A와 column B의 압력손실과 pH 조건의 범위에서는 toluene 제거효율이 재현성이 있다고 판단되나, 이 부분 역시 향후 많은 수의 실험을 통해 구명되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

Compost의 단일 media로 충전된 biofilter와 compost, peatmoss, GAC의 복합 media로 충전된 biofilter의 비교에서 복합 media로 충전한 biofilter가 단일 media로 충전된 biofilter보다 toluene의 초기 및 정상상태의 제거 효율이 더 높게 나타났다. 압력 손실의 경우 복합 media의 압력손실은 biofilm이 형성됨에 따라 초기에 비해 증가되어 정상상태의 압력손실을 유지하는 반면, compost만의 단일 media로 충전된 biofilter의 경우는 초기의 압력손실이 복합 media로 구성된 biofilter보다 낮게 나타났으나 정상상태의 압력손실은 거의 1.5배 수준으로 높았고 또한 이러한 높은 압력손실이 실험 후 30일이 경과한 다음에는 더욱 급격히 증가됨을 확인하였다.

한편 이러한 차이의 원인은 compost만으로 충전된 단일 media의 경우 초기에 충전한 높이에 비해 운전 말기의 높이는 1/3 정도가 낮아지는 압밀현상이 발생되었기 때문인데, 이로 인해 filter의 공극률이 감소하여 압력손실의 증가가 일어난 것으로 판단된다. 수분함유량 측면에서는 복합 media로 구성된 biofilter는 column 상·하부 수분 함유량의 차이가 거의 없이 균일한 반면 단일 media로 구성된 biofilter의

경우에는 biofilter의 하부의 수분함유량이 상부에 비해 대략 25% 정도 높은 것으로 나타났다. 따라서 toluene 제거효율의 측면, 압력손실의 측면, media의 수분함유량 측면에서 복합 media가 상대적으로 운전 성능이 우수한 것이 확인되었다.

복합 media로 충전된 biofilter의 장기간의 운전 결과 toluene 제거효율은 약 107일 동안 유입농도 평균 300 ppm에서 제거효율이 90% 이상으로 매우 안정적인 것을 확인할 수 있었다. 또한 가스 유량과 온도 변화의 영향을 조사한 결과, 유량과 온도가 올라간 경우, 제거효율 면에서 최대 9% 감소하였으나, 평균적으로 90% 이상의 효율로 유량이나 온도 변화에도 매우 안정적인 운전특성을 보였다. 압력손실의 경우에는 운전 30일 정도 경과 시에 순간적으로 감소하였다가 다시 증가하는 특성을 보였는데, 이는 biofilm의 간헐적인 탈리현상 때문인 것으로 판단된다. 수분함유량은 기체의 유량이 증가할수록 감소하고 온도가 상승하면 감소하는 특성을 보였는데, 전체적으로 상부와 하부의 차이는 크지 않았다. pH는 최소 6.9에서 최대 7.7로 큰 변동이 없이 거의 중성영역 범위를 유지하는 것으로 나타났다.

결론적으로 본 연구의 compost, peatmoss, GAC의 복합 media로 충전한 biofilter는 compost만으로 구성된 단일 media보다 전체적인 운전기간 중에 더욱 안정적인 toluene 제거효율을 보였으며, 압력손실 및 수분 함유량 등에서도 더욱 개선된 점을 확인할 수 있었다. 한편 복합 media가 우수한 성질을 보이는 주된 요인은 GAC의 biofilm 형성을 위한 충전제로서의 우수한 성질과 toluene 흡착체로서의 역할 때문인 것으로 추정된다.

감사의 글

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- 김종우, 이우범 (2003) 바이오 필터에 의한 벤젠과 에틸렌 처리실험에 대한 고찰, 한국대기환경학회지, 19(3), 325-331.

- 서성규 (1999) 화학공장에서 적용되는 VOCs 및 악취처리기술, 여수지역 환경기술개발 센터, pp. 5-8: 41.
- 이석조, 홍지형, 한화진, 노구해, 조성기, 전대진, 김형준, 유광수, 은정환, 전의찬, 허우영 (2000) 휘발성 유기화합물질 방지시설 설계지침 연구 보고서, 환경부, pp. 68-79.
- 임재신, 구자공, 박상진 (1998) 다공성 세라믹 biofilter를 이용한 Toluene 가스 제거, 한국대기보전학회지, 14(6), 599-606.
- Abumaizar, R.J., W. Kocher, and E.H. Smith (1998) Biofiltration of BTEX contaminated air streams using compost-activated carbon filter media, *Journal of Hazardous Materials*, 60(2), 111-126.
- Delhomenie, M.C., L. Bibeau, J. Gendron, R. Brzezinski, and M. Heitz (2003) A study of clogging in a biofilter treating toluene vapors, *Chemical Engineering Journal*, 94(3), 211-222.
- Delhomenie, M.C. and M. Heitz (2005) Biofiltration of air: a review, *Critical Reviews in Biotechnology*, 25(1-2), 53-72.
- Devinny, J.S., M.A. Deshusses, and T.S. Webster (1999) *Biofiltration for air pollution control*, Lewis Publishers, New York, pp. 1-110; 248-251.
- Mohseni, M. and D.G. Allen (2000) Biofiltration of mixtures of hydrophilic and hydrophobic volatile organic compounds, *Chemical Engineering Science*, 55(9), 1545-1538.
- Parvatiyar, M.G., R. Govind, and D.F. Bishop (1996) Biodegradation of toluene in a membrane biofilter, *Journal of Membrane Science*, 119(1), 17-24.
- Song, J. and K.A. Kenney (2002) A model to predict long-term performance of vapor-phase bioreactors: A cellular automaton approach, *Environmental Science & Technology*, 36(11), 2498-2507.
- Zilli, M., A. Del Borghi, and A. Converti (2000) Toluene vapour removal in a laboratory-scale biofilter, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 54(2), 248-254.