

서로 다른 공극률의 망상형 폴리우레탄들이 충전된 바이오필터에서 톨루엔 제거 특성

명성운 · 남윤수 · 이용우 · †최호석
충남대학교 공과대학 화학공학과,
(접수 : 2003. 8. 14. 게재승인 : 2003. 12. 24.)

Removal Characteristics of Toluene in Biofilters Packed with Reticulated-PU-Foams of Different Porosities

Sung-Woon Myung, Yeun-Su Nam, Yong-Woo Lee, and Ho-Suk Choi†
Department of Chemical Engineering, Chungnam National University,
220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea
(Received : 2003. 8. 14. Accepted : 2003. 12. 24.)

We studied on the removal of toluene vapors in a lab-scale biofilter. There are three biofilters packed with reticulated polyurethane foams of different porosities of 15, 25, 45 PPI (Pore Per Inch) as media. A toluene-degrading strain (*Pseudomonas putida* KCCM 11348, ATCC 12633) was naturally immobilized on the filter media by circulating the culture media. Three biofilters were operated under different sets of continuous experiments, varying both the design and operation parameters such as the inlet toluene concentration and the flow rate. Maximum elimination capacity of 115.5 g/m³hr of biofilter packed with foams of 25 PPI was obtained for toluene degradation. The effect of operating conditions such as flow rate, inlet toluene concentration and porosity on the performance of the biofilter was investigated.

Key Words : Biofilter, reticulated polyurethane foam, toluene, porosity, elimination capacity

서 론

경제 성장과 더불어 산업 발달은 각종 화학물질의 공급과 수요를 증대시키고 있다. 그 중 휘발성 유기화합물 (VOCs: Volatile Organic Compounds)의 사용이 급격히 증가하여 스모그, 오존층 파괴, 지구 온난화의 주범으로 유해성이 인식되고 사회문제로 대두되고 있다. 이에 VOCs의 대기 중 배출을 줄이고 억제하기 위하여 규제가 더욱 강화되고 이를 따르기 위한 산업시설, 특히 소규모 산업체의 부담 비용이 증대되어 중대한 관심거리가 되고 있다(1, 2). 우리나라는 배출억제기술 개발이 미흡하여 VOCs 배출사업장에 설치하고 있는 대부분의 시설은 선진국의 기술을 도입·사용하고 있는 실정이다. 또한 저효율 VOCs 배출·억제시설 설치 및 부적절 운영과 대다수의 배출업소가 효율성이 낮은 배출·억제시설을 설치하고 사후관리도 부실하다. 생물여과공법은 운전이 쉽고 경제적이기 때문에 낮은 농도의 VOCs를 함유하면서 큰 부피

로 방출하는 배출원에 매우 적합하여 그 적용성이 크다. 특히, 오염물이 낮은 온도에서 무해한 최종산물로 전환됨으로써 환경친화적이라는 장점도 가지고 있다(3, 4). 그래서 지난 20년간 폐가스를 생물학적으로 정화하기 위한 대체기술이 되고 있다. 주요한 장점은 공정이 낮은 온도 (15℃~30℃)에서 수행되고, 낮은 농도 (< 5 g/m³)의 유기 화합물을 2차 오염물질을 발생시키지 않고 제거할 수 있다는 것이다(5).

고정층막 바이오필터는 배기가스로부터 오염물질을 제거하는데 있어 기체와 액체 사이의 물질전달을 위한 넓은 표면적을 제공할 수 있고, 운전이 쉽고 간편해서 바이오스크러버나 바이오텀리클필터 같은 다른 생물학적 공정보다 불용성 화합물을 처리하는데 더욱 효과적이다(6). 바이오필터는 오염물질을 없애기 위해 흡수 (absorption), 흡착 (adsorption), 미생물 분해 (microbial degradation) 공정을 수반한다. 생물학적인 활성을 갖는 필터 층 (layer)으로 오염된 공기가 흐르게 됨으로써 층진층에 흡수·흡착된다. 특히 미생물분해는 유기물을 이산화탄소와 물로 산화시킨다. 오염물질은 기지상에서 퇴비, 이탄재 그리고 유·무기 담체와 같은 고체 입자 표면이나 표면에 고정되어있는 생물막으로 전달되고 확산되어 생물막 내의 미생물에 의하여 생물학적으로 산화된다. 담체는 주로 compost, peat 등의 자연 담체와 polystyrene bead,

† Corresponding Author : Department of Chemical Engineering,
Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea
Tel : +82-42-821-5689, Fax : +82-42-822-8995
E-mail : hchoi@cnu.ac.kr

polyurethane foam 등 인공 담체가 사용된다. 담체는 미생물이 고정화하여 서식할 수 있는 서식처로 그리고 성장에 필요한 영양요소와 유입 가스가 미생물과 최대한 접촉할 수 있도록 넓은 표면적을 제공한다(7). 바이오필터의 문제점 중에서 clogging은 장기 운전 시 성능 저하의 원인이 된다. 특히 천연 담체에서는 낮은 공극율로 인하여 압력강하가 크게 발생한다. 역세척을 통하여 압력강하를 감소시킬 수 있으나 활성 미생물의 손실과 재적용 기간이 필요하다.

본 연구의 목적은 폴리우레탄 담체의 공극율에 따른 제거 성능을 조사하는데 있다. 폴리우레탄 폼은 천연 담체와 함께 첨가제 (additive)로 주로 사용되었지만, Moe(8)는 신축성이 있는 폴리우레탄 폼을 합성하여 단일 담체로서의 우수성을 확인하였고, 최초로 바이오필터에 적용하였으나 공극이 너무 작아 clogging의 문제점을 지적한 바 있다(8). 따라서 본 연구에서는 바이오필터에서 기상의 톨루엔 농도와 유량에 따른 제거 특성을 알아봄으로써 서로 다른 공극률에 따른 망상형 폴리우레탄 폼의 담체로서의 성능을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

재료

실험에 사용한 미생물은 한국미생물협회로부터 분양받은 *Pseudomonas Putida* (KCCM 11348, ATCC 12633)을 이용하였다. *Pseudomonas putida*는 단세포, 극성 편모, 호기성, 그람-음성이고 25~30℃에서 잘 자라고 41℃ 이상에서 생장이 저해된다. 세포의 크기는 직경이 0.7~1.1 μm이고 길이가 2.0~4.0 μm이다(9). 미생물은 4℃ agar plate에서 보관하였으며, 증류수 1 리터당 glucose 1.1 g, NH₄Cl 0.1 g, MgSO₄·7H₂O 0.05 g, FeSO₄·7H₂O 0.005 g, MnSO₄·H₂O 0.005 g, CaCl₂ 0.00375 g, Yeast extract 1 g, 0.1 M phosphate buffer solution 18 ml를 혼합한 배양액으로 진탕 배양하였다. 배지는 121℃에서 15분간 고압 멸균하였다. 담체로 쓰이는 폴리우레탄 폼은 유렉셀테크놀로지(주)에서 제공받았다. 톨루엔 (99.5%, ORIENTAL CHEMICAL INDUSTRIES)을 단일 공기 오염원으로 시약급을 그대로 사용하였다. 톨루엔은 매우 휘발성이고 물에 대한 용해도 (Henry 상수 : 443.1 bar , 30℃, 용해도 : 0.67 g-toluene/ℓ H₂O, 23.5℃, Merck Index. 1989)가 낮은 대표적인 휘발성 유기 화합물이다.

분석방법

실험에 사용된 톨루엔의 농도는 portable Gas-TEC (Flame Ionization Monitor Type 47674. Telegan Gas Monitoring Ltd., West Sussex, England) 검출기를 사용하여 측정하였다. 미생물막은 광학현미경 (OLYMPUS BX 60)으로 관찰하였다. 바이오필터 층 내의 압력 강하는 n-pentane이 채워진 마노미터를 이용하여 측정하였다. 바이오매스량은 톨루엔 제거실험이 끝난 후 바이오필터 담체들을 48시간동안 60℃에서 건조시켜 실험 전과 후의 무게 차이를 측정하여 구하였다.

장치 및 실험방법

실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 바이오필터는 11 cm 직경에 그 높이가 40 cm인 아크릴 컬럼 세 개가 결

합되었다. 전체 바이오필터의 높이는 160 cm이며, 각 단에는 sampling port가 설치되어 있다. 각 컬럼의 내부에는 공극 크기 (15, 25, 45 PPI)가 다른 망상형 폴리우레탄 폼이 채워져 있으며, 폼의 크기는 직경 11 cm, 높이 10 cm인 원통형이다. 공극률이 서로 다른 폼 15, 25, 45 PPI를 채운 바이오필터를 각각 BF1, BF2, BF3로 칭하고 이에 따른 제거 성능을 비교하였다. 바이오필터에 충전 되어 있는 전체 충전층의 높이는 90 cm이며 그 부피는 8.55 × 10⁻³ m³이다. 각 단의 담체는 5 mm 직경의 구멍이 5 mm 간격으로 나 있는 판이 지탱하고 있다. 각 컬럼은 O-ring을 사이에 두고 8개의 나사로 조여 고정하였다. 압축공기는 압력조절기를 통과하고 유량계로 조절하였다. 유입되는 톨루엔의 농도를 조절하기 위하여 톨루엔이 채워져 있는 용기와 적당한 수분을 공급하기 위하여 물이 채워져 있는 용기를 통하여 공기가 흐르게 되고, 톨루엔 농도 변동을 줄이기 위한 혼합용 플라스크를 지나 바이오필터 내로 유입된다. 톨루엔과 공기는 범위가 각각 0~100 ccm, 0~10 ℓ/hr인 유량계로 조절하였다. 실험실 내부의 온도는 20~28℃로 겨울철에는 온풍기를 가동하여 유지하였다. 각 컬럼의 손실수두를 측정하기 위하여 마노미터를 설치하였다.

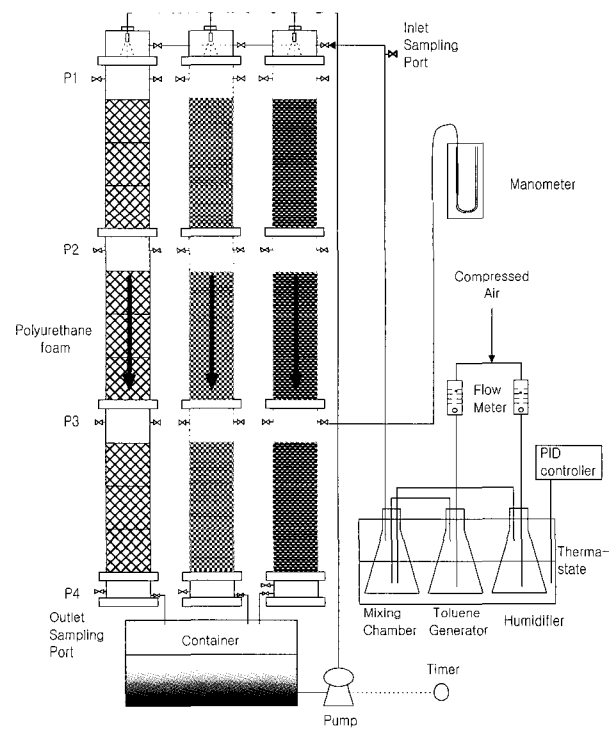


Figure 1. Schematic diagram of lab-scale biofilters.

본 실험에 사용된 바이오필터의 톨루엔 제거량을 조사하기 위하여 기상의 톨루엔 농도와 공기유량을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 우선 담체에 미생물을 충전하기 위하여 배양액을 컬럼 내로 순환시켰다. 오랜 시간 동안 배지를 순환시켜 미생물이 담체에 자연적으로 고정화하여 미생물막을 형성할 수 있도록 하였다. 배양액은 5일마다 10 ℓ 제조하여 30분 간격으로 바이오필터 내로 공급하였다. 배양액의 미생물 농도는 10 g/ℓ 정도이다. 고정화기간은 BF3이 10일, BF2가 18일, BF1이 30일이 된다.

결과 및 고찰

본 실험에서는 바이오필터를 이용하여 대기 환경오염 물질의 원천 제거를 위한 실험을 실시함과 동시에 폴리우레탄 폼(이하 담체)의 담체로써의 성능을 파악하였다. 최근 연구로는 장시간 운전에 따른 바이오필터의 문제점인 찌꺼기, 오랜 기간 운전과 과부하(overloaded)로 미생물이 많이 자라서 막히는(clogging) 현상이 발생하고, 둘째, 부적절한 수분 함량 조절로 인하여 제거 속도가 감소되게 되고, 셋째, 부적당한 pH 조절과 영양분 첨가 방법으로 제거 성능이 감소되는 것을 줄이는 것이다. 이는 기존에 유기 담체로 충전된 바이오필터에서 발생하는 문제점으로 이를 극복하기 위해서는 담체의 역할이 바이오필터 성능에 매우 중요하다. 담체들은 VOC들의 흡착제 역할을 하면서 동시에 미생물막이 형성되는 서식처의 역할을 하기 때문에 바이오필터의 장기운전이나 제거 효율에 중요한 역할을 한다. 이외에도 밀도, 기체 투과성 및 압력손실, 유기물 함량, 함수능, 토착 미생물의 양, pH, 가격 등이 고려되어야 한다(8, 10).

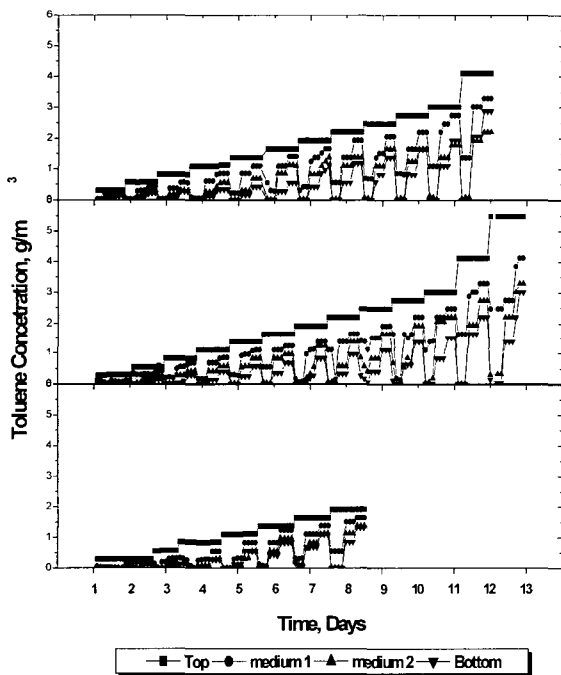


Figure 2. Experimental results of biofiltration.

Fig. 2는 15일 동안 실험한 입·출구 농도 및 중간단의 시간에 따른 농도 변화를 보여주고 있다. 입구 농도를 일정하게 유지하면서 공기 유량을 변화시켜 load를 증가시켰고, 농도를 단계적으로 증가시켜 톨루엔의 독성을 증가시켰다. 이때 각각의 공기 유량은 0.12, 0.36, 0.6 m³/hr (EBRT 62 s, 20 s, 12 s)이고 톨루엔 농도 범위는 0.27~5.5 g/m³이다. 담체의 건조로 제거 성능에 미치는 영향을 줄이고 접종한 상태에서 미생물이 활성을 유지하고 있을 때 급격한 환경 변화에 따른 제거를 알아보기 위하여 각 실험조건이 바뀔 때마다 약 2시간 정도 시간이 경과한 후에 유량을 증가시켰다. 미생물 배

양액은 10 ℓ를 제조하여 실험 전 30분 동안 접종하여 담체 표면에 활성을 가진 미생물이 부착될 수 있도록 하였다. 그리고 새로운 배지에 의한 영향을 없애기 위해 재순환하여 사용하였다.

톨루엔 제거효율 (removal efficiency)

단계적으로 농도를 증가시킬 경우 모두 동일한 초기 조건을 잡기 위해 배지를 공급하고 공기를 흘려보내 반응기 내의 잔류 톨루엔을 완전히 없앴다. 낮은 공기 유입량에서 초기에 톨루엔이 과다하게 수층 내로 흡수되는 것을 고려하여 6시간 이상 공정 시간을 제공하였다. 과도한 기질로 인한 미생물에 shock를 막기 위해 낮은 공기 유량 (0.12 m³/hr)과 낮은 톨루엔 농도 (0.27~0.3 g/m³)를 주입하였다. 이 기간 동안에는 100% 제거율을 보였는데, 초기에는 담체에 흡착이 주로 일어나고 미생물이 오염물에 적응이 된다. 6시간 후 유량을 높여 본격적인 실험을 실시하였는데, 수분에 의한 물질전달 저항과 흡수에 의한 제거 효과는 배제하였다. 왜냐하면 역세척 직후 수분에 의한 물질 전달 저항으로 미생물 분해속도가 감소하고 또한 활성 면에서 미순화된 미생물과 이의 손실에 기인하여 제거율이 떨어지지만 24시간 후 최적 상태에 도달한다고 보고 된 바 있기 때문이다(11). 담체의 건조가 상단부에서 많이 되는데 수분 조절에 있어 PU 담체는 peat, compost 같은 담체와 달리 보습력이 낮고 함수율이 기존 유기 담체보다 1/5 수준이기 때문에 급격한 건조현상으로 효율 저하에 대비해서 주기적인 수분 공급이 필요하다(8). 일정 농도 하에서 공기 유량이 증가됨에 따라 출구 농도가 증가되는데, 이는 체류시간이 감소되기 때문이다. 보다 활성이 우수한 미생물들이 바이오필터의 제거 성능을 향상시키고, 이는 미생물 수, 수분, 영양분등과 연관이 있다(7). 세 바이오필터의 제거 성능은 공극률에 따른 체류시간과 고정화된 미생물수의 차이와 밀접한 관계가 있다. 공극률이 작을수록 체류시간이 감소하여 미생물과의 접촉기회가 줄어들고 미생물 군이 많이 있을수록 그만큼 제거되는 양이 많기 때문이다. 공극률이 0.49인 BF3은 조업 8일 후 유량이 0.6 m³/hr인 경우 제거율이 30%로 감소하였고 이 때의 입구 농도는 1.9 g/m³이었다. 공극률이 0.90인 BF1은 조업 12일 후 제거율이 30%가 되었는데 이 때의 입구 농도는 4.1 g/m³이었다. 제거 성능이 높게 나타난 BF2는 공극률이 0.62이고 입구 농도 4.1 g/m³에서 45% 이상의 제거율을 보였다. 따라서 제거성능과 공극률의 관계에서 0.60 정도의 공극률에서 제거 성능이 우수한 것으로 판단된다. BF2의 경우 오염 공기와 처음 접촉되는 상단부에서 제거가 많이 일어나는 것을 볼 수 있는데 제거 성능과 연관되어 면적이 클수록 도움이 되지만 설치부지의 제약이 있기 때문에 여러 단으로 설계되어야 한다. 이 경우의 문제점은 압력강하의 발생이다. Table 1은 담체로 이용되는 충전제로 바이오필터의 중요한 구성 요소들을 보여준다. 보는 바와 같이 기존의 담체는 peat나 compost 같은 천연담체가 많이 사용되어지는데 최근 들어 압력 손실과 관련하여 고분자 담체를 직접 적용하려는 시도가 이루어지고 있다(8). 그 중 폴리우레탄 폼은 공극 크기를 조절하기가 용이하므로 bulking agent로 많이 사용되고 앞으로 단일 담체로 활용성이 높다.

Table 1. Comparison of filter media used in different biofilters

Filter media	Property	Microorganism	Reference
Raw compost and organic binder(90:10)	pH 6.8	microbes in raw compost	Delhomenie(12)
Compost and perlite(70:30)	Dillo Dirt™	microbes in compost	Neal(13)
Peat and styrene foam(50:50)	Clairtech Bioton®	freeze-dried bacterial	Serial(14)
Compost and activated carbon(3.6 %)	specific gravity; 1.9 particle density; 0.8 g/cm ³	mixture of yard waste and sewage sludge	Abumaizar(15)
Peat and glass bead(4:1)	sp. surface area; 1.6 m ² /g D 5 mm	<i>Acinetobacter</i> sp. NCIMB 9689	Zilli(19)
Polyurethane foam(PU)	porosity; 0.85 surface area; 620 m ² /m ³	activated sludge	Moe(8)
Reticulated PU	porosity BET area 15 ppi 90.15 % 6.31 m ² /g 25 ppi 61.64 % 10.44 m ² /g 45 ppi 48.48 % 12.17 m ² /g	<i>Pseudomonas. Putida</i> (KCCM 11348, ATCC 12633)	This study

Table 2. Some reported performances for removing toluene

Author	Reactor Size	EBRT or Residence time	Toluene Concentration	Elimination Capacity or Removal Efficiency	Days
Zilli et al.(19)	H 50 cm D 5 cm	7~110 s	1.99 g/m ³	242 g/m ³ hr	320일
Serial et al.(14)	H 120 cm D 14.6 cm	12 min(EBRT)	1.37 g/m ³	0.71 kg COD/m ³ 99 %	220일
Moe et al.(8)	H 100 cm D 10.5 cm	2~4 min(EBRT)	0.54 g/m ³	< 0.5 g/m ³ hr	200일
Abumaizar et al(15)	H 75 cm D 5.1 cm	2.6 min(EBRT)	0.82 g/m ³	< 90 %	82일
Delhomenie et al.(12)	H 33 cm D 15.3 cm	22 s	1.9 g/m ³	90~95 g/m ³ hr	45일
Neal et al(13)	H 53 cm D 7.62 cm	1~2 min(EBRT)	0.854 g/m ³	3.9~28.1g/m ³ hr	7~28일
Cox et al(16)	H 55 cm D 15.2 cm	36 s(EBRT)	2.2 g/m ³	70 g/m ³ hr	22일
This study	H 90 cm D 11 cm	12~60 s(EBRT)	0.27~5.5 g/m ³	115.5 g/m ³ hr	15일

톨루엔 농도와 유량의 영향

Fig. 3은 바이오필터에서 입구 농도와 유량 변화에 따른 제거율을 나타낸다. 유입 톨루엔 농도와 공기 유량은 바이오필터의 제거 성능에 영향을 주는 중요한 변수이다. 유량과 농도가 증가할수록 제거율이 감소하였다. 유량은 체류시간과 밀접한 관련이 있어 체류시간에 따라 물질전달 속도에 영향을 주기 때문에 제거율이 달라진다. 체류시간이 크면 클수록 수확효율이 높아지므로 높은 제거율을 얻을 수 있다. 유량의 증가가 load 증가의 역할을 하는데 유량이 적을 경우에는 입구 톨루엔 농도가 높아도 제거가 가능하다. Table 2에 톨루엔을 오염원으로 제거실험을 행한 바이오필터를 반응기 크기, EBRT, 농도에 따라 조업일 순으로 나타내었다. 톨루엔은 물에 대한 용해도와 반응기 조건 변화에 민감하기 때문에 모델 오염물질로 많이 사용된다. 대부분의 바이오필터가 2 min 이상의 EBRT를 갖는 반응기 크기에서 90% 이상의 제거율을 보여주고 있다. Zilli(19)는 EBRT가 110 s에서 242 g/m³hr라는 높은 제거량을 나타내었다. 이 경우 본 실험 조건의 톨루엔 농도 (5.5 g/m³)와 비교했을 때 농도가 상당히 낮다. Cox(16)와 Delhomenie(12)의 경우 체류시간이 각각 36 s, 22 s이고 2.2 g/m³와 1.9 g/m³의 농도에서 70 g/m³hr와 90-95

g/m³hr의 제거량을 나타내었다. 본 실험의 BF2의 제거량과 위의 세 경우와 비교했을 때 Zilli(19)의 결과보다 농도가 높기 때문에 제거량이 높고, Cox와 Delhomenie의 경우는 체류시간이 낮지만 제거량이 커서 비슷한 제거량을 갖는다고 할 수 있다. 대부분 낮은 농도와 낮은 유량 즉, 체류시간(EBRT)이 긴 조건에서 실험했을 때 높은 제거율을 보이고 있는데 이는 바이오필터의 운전 조건이 낮은 농도와 높은 유량에서 적합하기 때문이다.

압력 강하

Fig. 4는 미생물이 고정화되기 전 담체의 공극률에 따른 손실수두를 나타내며, 바이오필터의 입구와 출구의 압력을 측정하여 구하였다. 공극률이 낮은 BF3 (공극률 = 0.48)에서 손실수두가 가장 높았고, 유량이 증가함에 따라 손실수두가 증가하였다. 담체 내에 미생물이 축적되고 생장을 하면서 압력 강하 (pressure drop)가 증가된다. Fig. 5는 제거 실험 동안 각 바이오필터의 손실수두 변화를 보여준다. 유량이 0.6 m³/hr에서 BF1이 3.6 cm, BF2가 38 cm, BF3가 53 cm의 손실 수두를 보였는데 낮은 공극률의 BF3가 가장 높았다. BF1은 기공 크기가 커서 포획이 잘 이루어지지 않고, 주로

담체 표면에 고정화되었다. BF3은 공극 크기가 작기 때문에 미생물의 포획이 쉽게 이루어져 손실수두가 시간이 지남에 따라 가장 많이 증가되었고, 공극의 clogging으로 인하여 channelling, short-circuiting이 일어나서 BF3의 경우 제거 성능이 감소하는 것으로 판단된다. 손실두수의 증가는 제거율의 감소와 운전비용의 증가와 관련된다. 산소의 전달도 이루어지지 않기 때문에 미생물의 활성이 떨어진다. 활성이 떨어진 미생물을 주기적으로 제거해주기 위해서는 담체의 유동화나 역세척 같은 물리적인 방법이나 NaOH로 세척하는 화학적인 방법을 사용한다(17, 18).

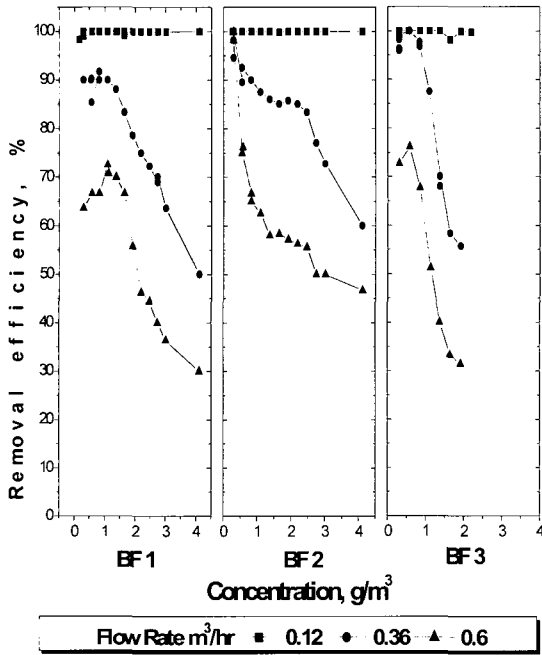


Figure 3. Removal efficiency with respect to inlet concentration.

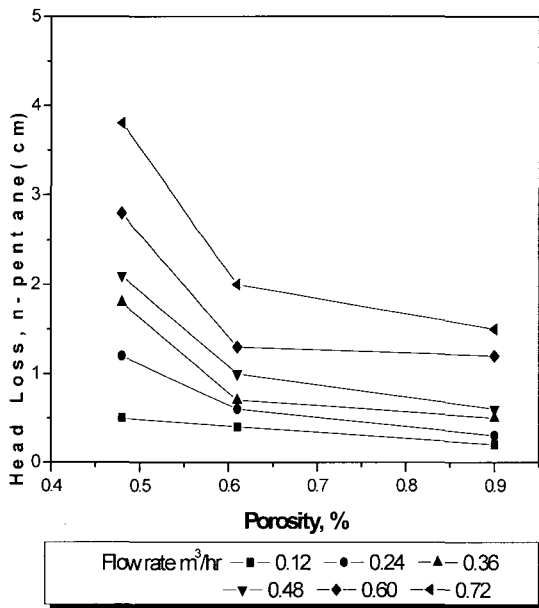


Figure 4. Head loss change with respect to porosity.

최대 제거량 (maximum elimination capacity)

Fig. 6은 각 반응기의 입력 부하량 (Inlet load)에 따른 제거량을 나타낸다.

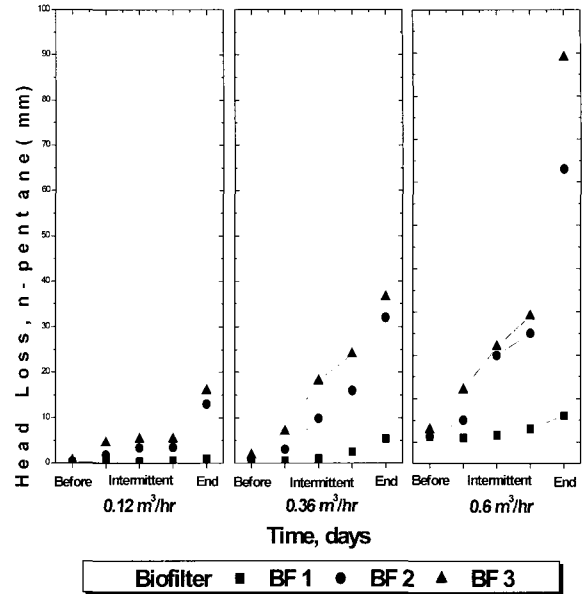


Figure 5. Head loss change with respect to time.

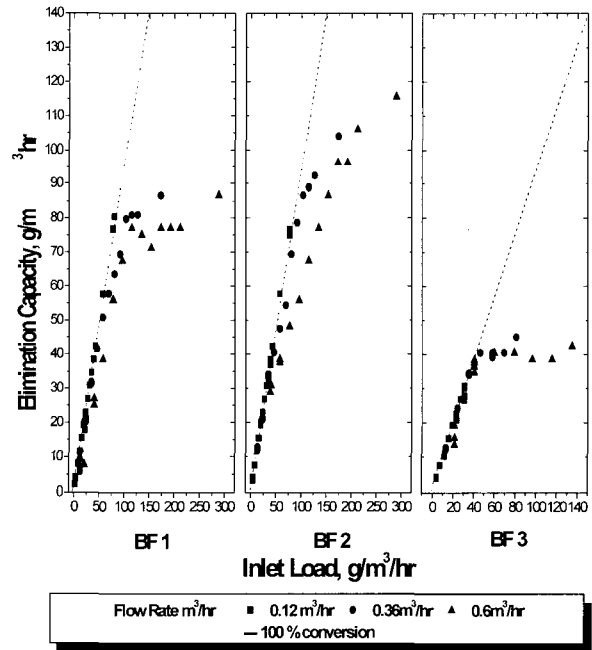


Figure 6. Elimination capacity with respect to Inlet load.

제거량 (elimination capacity, g/m³hr)은 바이오필터를 설계하는데 중요한 변수로써, $EC = (C_{in} - C_{out}) \times (\text{air flow}) / V_{\text{reactor}}$ 로 정의된다. 이 값은 유기 부하량 (organic load)이 증가함과 동시에 증가하는데 입구 농도의 증가와 공기 유량의 증가에 따른 미생물의 유기물 분해능과 관련이 있다. 그리고 체류시간의 감소, 농도와 시간에 따른 활성 저하, 영양분의 고갈이

Table 3. Weight of biomass and water

		BF1		BF2		BF3	
		biomass(g)	water (g)	biomass(g)	water (g)	biomass(g)	water(g)
T	t	2.3	52.3	14.8	144.6	6.1	76.6
	m	1.2	61.5	16.5	156.9	6.9	85.6
	b	1.3	76.3	16.9	276.9	8.4	169.2
M	t	4.4	83.8	7.3	132.5	5.3	95.8
	m	2.7	66.5	13.1	195.9	1.5	65.2
	b	14.8	151.9	13.4	176.7	1.3	62.3
B	t	5.4	89.9	13.4	137.8	4.3	103.1
	m	6.7	83.1	10.6	134.9	2.3	105.1
	b	6.9	82.7	7.6	131.0	2.1	187.4

T:top, M:medium, B:bottom

주 원인이 되어, 점차 일차적으로 증가하다가 임계 (critical) 부하량에서 이차적으로 증가하고 일정해지는 것을 볼 수 있다. 각 바이오필터의 최대 제거량은 BF1이 86.6 g/m³hr, BF2가 115.5 g/m³h, BF3가 45 g/m³hr이다. 부하율이 작을 때에는 제거 속도와 부하량 간에는 일차적 관계가 이루어지고 오염물은 미생물에 의해 완전하게 분해된다. 유기 부하량이 작은 이 영역에서는 시스템이 오염물의 확산에 제한을 받고, 유기 부하량이 더 증가되면 제거량은 최대 제거량에 도달하게 된다. 이 최대 단계에서 제한 반응은 미생물 분해반응이다. 제거 속도가 오염물 공급 속도보다 낮아지기 때문이다. 부하량이 더욱 증가하게 되면 오염물은 저해제가 되고 제거량은 떨어진다(5, 19).

바이오매스 및 수분의 량 (weight of biomass and water)

Table 3은 세 바이오필터의 각 단의 담체에 축적된 바이오매스 량을 나타낸 것이다. BF2, BF3, BF1 순으로 바이오매스 량이 많았는데 BF2의 경우가 BF3보다 많은 경향은 손실수두의 경향과는 반대적인 결과이다. 이는 공극 크기가 작은 원인으로 BF2가 바이오매스 량이나 손실수두 면에서 세 바이오필터 중에서 가장 유리하였다. 수분함량은 BF2가 가장 많이 포함하고 있었는데 이는 적당한 공극크기로 인하여 바이오매스 량이 증가하고 따라서 그만큼 수분을 많이 함유할 수 있었기 때문으로 사료된다. 제거량, 손실 수두, 바이오매스 량, 수분함량 등을 종합적으로 고려한 결과, BF2가 가장 효율적인 제거 성능을 가지고 있었

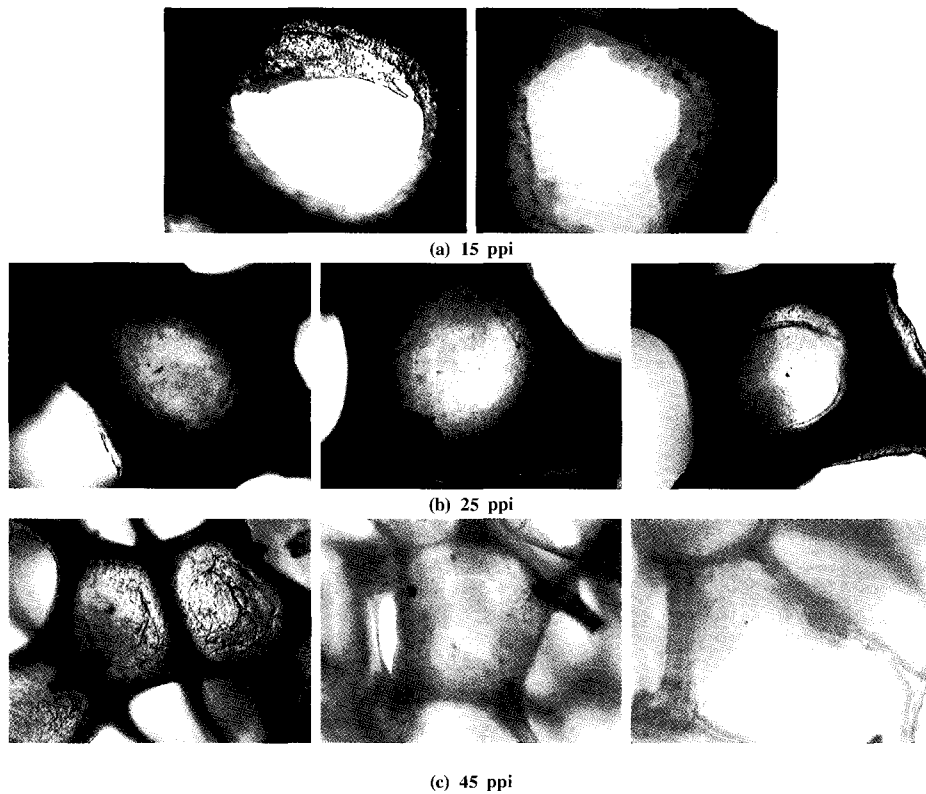


Figure 7. Microorganisms immobilized on the PU media.

다. Fig. 7은 담체 내에 고정화 및 정착되어 있는 미생물막 (biofilm)의 광학현미경 사진 (배율 $\times 10$)이다. 미생물막이 각 담체의 공극 사이에 형성되어 있음을 보여주고 있다. 담체 내에 미생물은 불균일하게 고정화되거나 포획되어 있었다.

요 약

세 가지 다른 공극률을 가진 담체를 충전한 바이오필터에서 기상의 톨루엔 제거실험을 수행하였다. 유입 유량과 유입 농도의 변화에 따른 바이오필터의 제거성능을 조사하고 공극률에 따른 영향을 알아보았다. 15일 동안 수행된 실험을 통해 빠른 환경변화에 대한 각 바이오필터의 동특성을 파악할 수 있었다. 바이오필터 설계에 중요한 변수인 제거량은 BF2 (25 PPI)가 $115 \text{ g/m}^3\text{h}$ 로 가장 큰 값을 나타내었다. 이는 제거량과 밀접한 관련이 있는 미생물 균체량이 초기 고정화 단계에서 각 바이오필터가 공극의 크기별로 각각 다른 부차 특성을 가져서 그 양과 수분 함량에 영향을 주었기 때문이다. 과도한 바이오매스의 축적은 바이오필터 성능을 저하시키는 요인임을 확인할 수 있었고 초기에 담체의 공극률이 장기적인 바이오필터 운전에 있어서 일정한 공기 흐름을 주기 위해서 매우 중요한 변수로 작용함을 알 수 있었다. 마지막으로 폴리우레탄 폼 담체는 균일하고 충분한 공극을 제공하므로 미생물의 흡탈착이 유리하고 충분한 미생물 서식공간을 제공함으로써 많은 미생물을 담지할 수 있어 단일 담체로 상업적 적용 가능성을 가지고 있다고 사료된다.

감 사

본 연구는 과학기술부 기술개발 용역과제 (환경99-5)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Devinny, J. S., M. A. Deshusses, and T. S. Webster (1999), Biofiltration for Air Pollution Control, pp1-3, Lewis Pub., New York.
2. Deshusses, M. A. (1997), Biological waste air treatment in biofilters, *Current Opinion in Biotechnol.* **8**, 335-339.
3. Wani, A. H., M. R. Rard, and A. K. Lau (1997), BIOFILTRATION: a promising and cost-effective control technology for odors, VOCs and air toxics, *J. Environ. Sci. Health A32(7)*, 2027-2055.
4. Dennis, M. and J. Barford (2000), Biofiltration as an odour abatement strategy, *Biochemical Eng. J.* **5**, 231-242.
5. Bibeau, L., K. Kiared, A. Leroux, R. Brzezinski, G. Viel, and M. Heitz (1997), Biological purification of exhaust air containing toluene vapor in a filter-bed reactor, *Canadian J. Chemical. Eng.* **75**, 921-929.
6. Michelsen, R. F. (1995), Biofiltration, pp375-393, CRC Press, Inc.
7. Acuna, M. E., F. Perez, R. Auria, and S. Revah (1999), Microbiological and kinetic aspects of a biofilter for the removal of toluene from waster gases, *Biotechnol. Bioeng.* **63**, 175-184.
8. Moe, W. M. and R. L. Irvine (2000), Polyurethane foam medium for biofiltration, *J. Environ. Eng.* **126**, 815-832.
9. Zilli, M., B. Fabiano, A. Ferraiolo, and A. Converti (1996), Macro-kinetic investigation on phenol uptake from air by biofiltration, *Biotechnol. Bioeng.* **49**, 391-398.
10. Sorial, G. A., F. L. Smith, M. T. Suidan, and P. Biswas (1995), Evaluation of trickle bed biofilter media for toluene removal, *J. Air Waste Management Assoc.* **45**, 801-810.
11. Zhu, X., C. Alonso, M. T. Suidan, H. Cao, B. J. Kim, and B. R. Kim (1998), The effect of liquid phase on VOC removal in trickle-bed biofilters, *Wat. Sci. Technol.* **38**, 315-322.
12. Delhomenie, M. C., L. Bibeau, and J. Gendron (2003), A study of clogging in a biofilter treating toluene vapors, *Chemical. Eng. J.* Article in press, 1-12.
13. Neal, A. B. and C. L. Raymond (2000), Use of biofilters and suspended-growth reactors to treat VOCs, *Waste Management* **20**, 59-68.
14. Sorial, G. A., F. L. Smith, M. T. Suidan, P. Iswas, and R. C. Brenner (1997), Performance of peat biofilter: impact of the empty bed residence time, temperature and toluene loading, *J. Haza. Mate.* **53**, 18-33.
15. Abumaizar, R. J., W. Kocher, and E. H. Smith (1998), Biofiltration of BTEX contaminated air streams using compost-activated carbon filter media, *J. Haza. Mate.* **60**, 111-126.
16. Cox, H. H. J. and M. A. Deshusses (2002), Co-treatment of H₂S and toluene in a biotrickling filter, *Chemical Eng. J.* **87**, 101-110.
17. Alonso, C., M. T. Suidan, G. A. Sorial, F. L. Smith, P. Biswas, P. J. Smith, and R. C. Brenner (1997), Gas treatment in trickle-bed biofilter: biomass, How much is enough?, *Biotechnol. Bioeng.* **54**, 583-594.
18. Weber, F. J. and S. Hartmans (1996), Prevention of clogging in a biological trickle-bed reactor removing toluene from contaminated air, *Biotechnol. Bioeng.* **50**, 91-97.
19. Zilli, M., E. Palazzi, L. Sene, A. Converti, and M. D. Borghi (2001), Toluene and styrene removal from air in biofilters, *Process Biochemistry* **37**, 423-429.