

톨루엔으로 오염된 공기의 생물학적 여과에 대한 필터용 담체의 영향

홍성도·한희동·명성운·*최호석·김인호
충남대학교 공과대학 화학공학과
(접수 : 2001. 11. 15., 게재승인 : 2001. 12. 21.)

The Effect of Filter Media on the Biofiltration of Air Contaminated by Toluene

Sung-Do Hong, Hee-Dong Han, Sung-Woon Myung, Ho-Suk Choi*, and In-Ho Kim
Dept. of Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, KOREA
(Received : 2001. 11. 15., Accepted : 2001. 12. 21.)

In this study, we studied on the removal of toluene vapors in a lab-scale biofilter. Biofiltration was performed in a column fed downflow with contaminated air at ambient conditions. The column was packed with mixture of Peat and Calstone(5:3 vol. Ratio), Synthesized media, Bark and Wood chip, which were inoculated with microbial population of selected stains(*Pseudomonas. putida*, KCCM 11348, ATCC 12633). The microorganisms were immobilized on the bed medium and then biofilm were formed. The biofilter was operated under the conditions of various inlet toluene concentrations for 180 days and treated up to the elimination capacity of maximum 40 g/m³hr at the inlet load of 30 g/m³ hr with percentage removals of 20~90% and gas retention times between 1 and 2 min. The pressure drop was very negligible through the biofilter columns because its value of 0.054 cmH₂O/m was much less than others. The effect of operating conditions such as flow rate, inlet toluene concentration and moisture contents on the performance of the biofilter was sequentially investigated in this study.

Key Words : biofilter, media, *Pseudomonas putida*

서 론

근세기 동안 환경오염물질의 생물학적 처리기술은 폐수 처리분야에서 주로 괄목할 만한 발전이 이루어져 왔다. 반면 대기오염물질 처리분야에서 생물학적 처리기술은 약 30년 전부터 악취물질 제거를 위하여 유럽에서부터 그 연구가 시작되었으며, 미국에서는 1990 Clean Air Act Amendments(CAAA)에 의하여 생물학적 오염공기 처리 방법에 관심을 보이기 시작하였다. 최근 90년대에 들어서는 악취뿐만 아니라 휘발성 유기화합물질을 처리하는데 있어서 혁신적인 방법으로 인식되어져 오고 있으며 악취물질과 휘발성 유기물질 제거를 위한 pollution prevention 혹은 green technology기법 중 가장 앞선 기술로 인정받고 있다(1). 생물학적인 오염공기 처리 방법은 낮은 농도 즉, 0~6 g/m³범위의 VOCs나 악취의 처리에 적합한 기술이다(2,3). 지금까지, 공기 속에 함유되어 있는 VOCs와 악취를 제거하기 위한 노력으로 여러 가지 방법들이

시도되고 있지만 이들 대부분의 공정은 조업비가 많이 소요되며, 저농도의 폐가스를 배출 허용치까지 감소시키는데 비경제적이며, 2차오염물질(SO_x, CO, NO_x)을 발생시키는 단점이 있다. 이러한 기술들과 비교하여 볼 때, 생물여과법은 낮은 동력비와 유지비를 요구하며 환경친화적이기 때문에 매우 경제적이고 효과적인 공정이라 할 수 있다. 그러므로 근래에는 생물학적 처리방법 중 기술적으로 제어가 용이하며 설치에 신속성이 있는 Biofilter와 Biowasher 또는 Trickle Filter 등 이들의 특징을 복합하여 변형시킨 장치에 대한 관심이 집중되고 있다. 그러나 현재 국내에서는 이러한 공정이 현장에 적용된 예는 드물며 지속적인 연구가 수행 중에 있다. 한편, 생물학적 처리방법 중 바이오필터 공정에 대한 장점이 부각되면서 유럽, 미국 등 여러 나라에서는 생물여과기술이 성공적으로 상업화되고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 바이오필터 기술의 장점으로는 물리화학적 처리하기에는 부적합한 낮은 농도의 생분해성 배출가스 처리에 효율적이며 2차 오염물질을 발생시키지 않고 운전비 또한 저렴하기 때문에 환경친화적이고 경제적인 이점을 가지고 있다는 것이다.

바이오필터의 구성은 미생물, 담체, 공정 시스템으로 나누어진다. 미생물은 활성 슬러지 등 여러 오염지역에서 자라고

*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@hanbat.chungnam.ac.kr

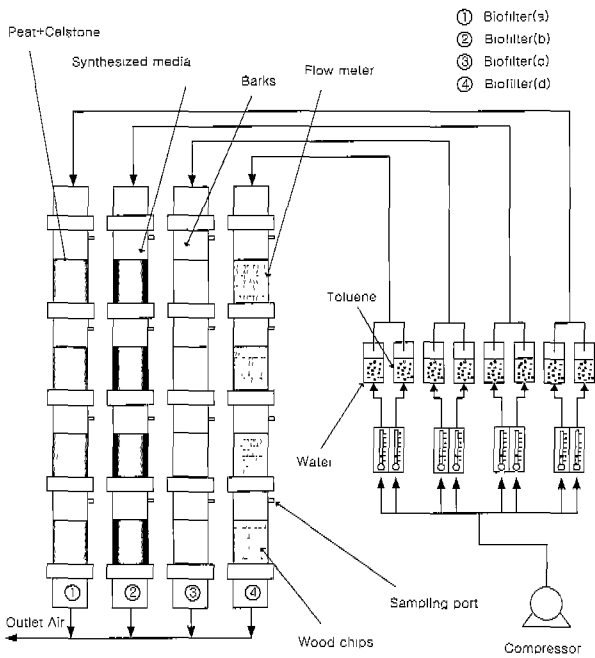


Figure 1. Schematic diagram of biofilter system.

순용된 미생물을 탐색하여 활성이 우수한 종을 반응기에 접종시킨 후, 접종된 단일 미생물과 혼합 균주에 의해서 오염 물질을 제거하는 역할을 한다. 또한 담체는 주로 compost, peat 등의 유기 담체와 polystyrene bead, polyurthane foam 등 합성유기담체를 사용하여 미생물을 고정화시켜 미생물이 서식할 수 있는 서식처를 제공하고 성장에 필요한 영양요소와 유입 가스가 잘 통과하도록 공극을 제공한다. 담체의 선정에 있어서는 담체의 종류, 표면의 화학적 성질, 입자크기, 농도, 거칠기, 공극 및 표면적 등을 고려할 필요가 있다. 그리고 높은 제거 효율을 유지하면서 바이오필터를 지속적으로 운전하기 위해서는 수분함량(4,5,6), 온도(7,8), 영양분공급(9,10), 그리고 충전재의 pH(11)와 같은 변수들의 조절이 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 바이오필터의 효율에 미치는 각종 담체들의 영향을 조사하기 위하여, 추가적인 영양분 및 수분의 공급이 없이 바이오필터를 운전하면서 4종의 담체를 충전한 바이오필터에서 VOCs의 제거 효율을 비교 분석하는데 주안점을 두고 실험을 실시하였다. 즉, 최악의 조건하에서 각 담체들이 바이오필터의 효율에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 추가적으로 바이오필터 효율에 영향을 미치는 각종 조업변수들(기체유속, 주입 유기물의 농도, 수분함량 등)의 효과를 각 담체 별로 관찰하였다.

재료 및 방법

실험장치

본 실험에 사용된 장치의 개략도를 Figure 1에 나타내었다. 장치의 반응기는 4부분으로 나누어져 있다. 각 column은 10.6 cm 직경에 그 높이가 40 cm인 아크릴로 제작되었다. 전체 바이오필터의 높이는 160 cm이며, 각 컬럼의 내부에는 peat와 calstone(부피비 5:3)혼합물, synthesized media, bark,

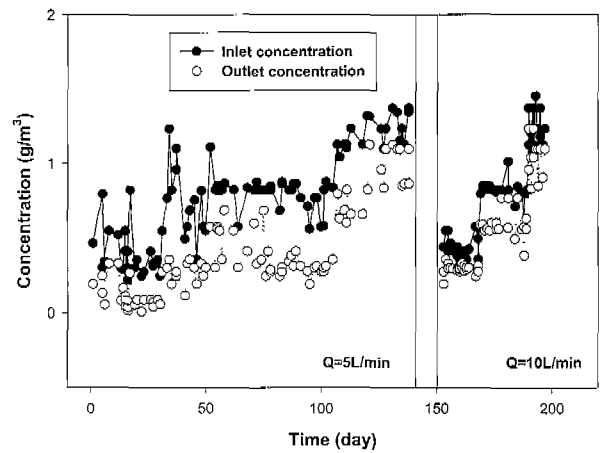


Figure 2. Overall inlet and outlet Toluene concentration.

wood chip이 충전되어 있으며, 시료를 채취할 수 있도록 sampling port가 설치되어있다. synthesized media는 (주)엔바이온에서 공급받았으며, compost(유기물)와 시멘트 폐기물(무기물)의 복합소재로써 수열합성법으로 제조되었다. 한편 바이오필터에 충전되어 있는 전체 충전층의 높이는 108 cm이며 그 부피는 $9.525 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 이다. 각 column의 하단은 5 mm 직경의 구멍이 5 mm 간격으로 만들어져 공기 분배기의 역할을 한다. 유입되는 톨루엔의 농도를 조절하기 위하여 톨루엔이 채워져 있는 용기와 적당한 수분을 공급하기 위하여 물이 채워져 있는 용기를 각각 통과하여 공기가 흐르게 하였고, 각 column의 압력을 측정하기 위하여 물이 채워져 있는 마노미터를 설치하였다.

실험방법

실험에 사용한 미생물은 *Pseudomonas. Putida*(KCCM 11348, ATCC 12633)를 이용하였다. 미생물은 4°C agar plate에서 보관하였으며, 종류수 1 L 당 glucose 1.1 g, NH_4Cl 0.1 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.05 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.005 g, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.005 g, CaCl_2 0.00375 g, Yeast extract 1 g, 0.1 M phosphate buffer solution 18 mL를 혼합한 배양액으로 진탕 배양하였다. 배양된 미생물은 충전담체 peat와 calstone(부피비 5:3), synthesized media, barks, wood chips에 잘 혼합하여 column에 충전하였으며, 초기 수분함량을 약 50%로 유지하였다. 공기는 반응기로 유입되기 전에 두개로 나누어지게 된다. 첫 번째 흐름은 반응기내에 적당한 수분을 유지할 수 있도록 습윤기를 통과하여 흐르고, 두 번째 흐름은 원하는 톨루엔 농도를 만들기 위하여 톨루엔이 채워져 있는 플라스크를 통하여 흐르게 된다. 최종적으로 두 공기흐름은 반응기에 주입되기 전에 완전히 혼합되어 반응기로 유입된다. 한편 각각의 공기흐름은 유량계를 사용하여 조절하였다. 농도는 Figure 2와 같이 일정한 유속에서 농도를 스텝 펄스로 주입하였고, 출구의 농도가 일정하게 되면 정상상태로 간주하여 다시 농도를 증가시키는 방식으로 실험을 수행하였다. 실험에 쓰인 변수는 Table 1과 같다.

분석방법

실험에 사용된 톨루엔의 농도는 portable Gas-TEC(Flame Ionization Monitor Type 47674, Telegan Gas Monitoring Ltd.,

Table 1. Design and operation condition

Parameters	Values
Height of packing	120 cm
Diameter of column	10.6 cm
Gas flow rate	0.3~0.6 m ³ /hr
Temperature	25~30°C
Toluene concentration	0.411~1.233 g/m ³
Pressure drop	0~1.06 cm of H ₂ O
Moisture content of packing material	20~80%

Table 2. Maximum elimination capacity of each biofilter

	Biofilter (a)	Biofilter (b)	Biofilter (c)	Biofilter (d)
Max. E.C.(g/m ³ hr)	20	10	30	18

0.1 mL를 0.9 mL 증류수가 채워져 있는 Effen tube에 혼합하여 희석하였다. 이러한 방법으로 희석된 용액 0.1 mL을 MB broth Agar plate에 도말 하여 배양기에서 약 3일간 배양한 후 그 미생물균의 숫자를 세어 미생물의 농도를 측정하였다. 한편 바이오필터 담체의 pH를 직접 측정할 수 없으므로 담체층에서 흘러내린 침출수의 pH를 측정하여 바이오필터 담체의 pH의 변화를 측정하였다.

결과 및 고찰

제거율

Figure 3은 유입유량 5 L/min에서 전체 바이오필터의 운전 시간에 따른 제거율을 나타냈다. 초기 운전기간 20일까지는 필터 매디아를 Peat+calstone을 사용한 바이오필터 (a)를 제외한 모든 바이오필터에서 제거율이 20일째 이후의 제거율보다 낮게 나타났다. 이 기간동안 바이오필터의 필터층은 눈으로 보아도 알 수 있을 정도로 건조되어 있는 것이 발견되었으며, 이에 수분함량을 측정한 결과(Table 2) 바이오필터 (a)를 제외한 모든 시스템에서 초기 50%보다 매우 낮은 수분함량을 보여 주었다. 따라서 각 바이오필터에 수분을 상단으로부터 500 mL 첨가한 후 제거율을 측정한 결과 모든 바이오필터 시스템에서 제거율이 상승하였다. 또한 바이오필터 (c),(d)의 100 ppm 영역의 정상상태 제거율과 200 ppm 영역의 정상상태 제거율이 거의 동일한 값을 유지하는 것을 볼 수 있다. 이는 100 ppm 영역에서 각 바이오필터의 미생물이 완전히 활성화되지 않았기 때문에 이와 같은 결과를 보인 것으로 사료된다. Figure 4는 농도에 따른 제거율을 나타낸 그림이다. 바이오필터 (a)의 5 L/min에서의 제거율이 일반적인 바이오필터의 제거율 거동을 보여주고 있다. 그러나 바이오필터 (c),(d)의 $C_{T,in}=0.42 \text{ g/m}^3$ (100 ppm)에서의 제거율이 $C_{T,in}=0.81 \text{ g/m}^3$ (200 ppm)에서의 제거율보다 낮게 나타나고 매우 불규칙한 형태를 이루는데, 이것은 앞에서 언급하였듯이 필터 층의 수분이 낮거나, 미생물의 활성이 완전하지 않기 때문에 나타나는 현상이라 사료된다. 한편 바이오필터 (b)를 제외한 모든 바이오필터에서, 유입유량이 10 L/min일 때, $C_{T,in}=0.42 \text{ g/m}^3$ (100 ppm)의 제거율이 $C_{T,in}=0.81 \text{ g/m}^3$ (200 ppm)에서의 제거율보다 낮거나 동일함을 보이고 있다. 이는 유량을 증가시킬 때, 바이오필터층의 수분함량이 더욱 빨리 낮아져 건조영역이 발생하게 되고, compaction에 의한 channeling이 발생하였기 때문에 나타난 결과라 사료된다. 즉 바이오필터 운전자가 수분함량의 감소를 감지하는 속도에 비하여 더욱 빠르게 수분함량이 감소하였기 때문에 미처 적당한 수분함량을 유지할 수 없었던 것으로 사료된다.

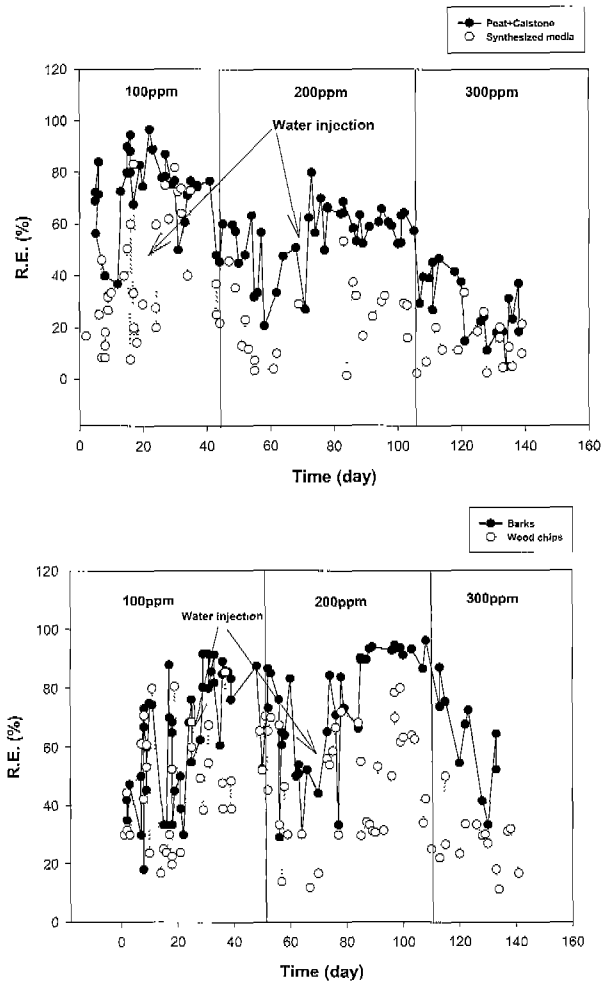


Figure 3. Removal efficiency versus time : Biofilter (a) Peat+calston, Biofilter (b) Synthesized media, Biofilter (c) Barks, Biofilter (d) Wood chips.

West Sussex, England) 검출기를 사용하여 측정하였다. 바이오필터의 온도는 높은 미생물활성을 유지하기 위하여 25°C~30°C를 유지하였으며, compaction에 의한 바이오필터의 압력강하를 피하기 위하여 전체 반응기의 column을 4개의 단으로 구성하였으며, 압력강하는 물이 채워진 마노미터를 이용하여 측정하였다. 충전물의 수분함량은 충전 담체를 sampling port로부터 채취하여 105°C 오븐에서 8시간 이상 건조 시켜 건조 전/후의 무게차를 퍼센트형태로 측정하였다. 미생물의 숫자를 측정하기 위하여 시료 1 g을 sampling port로부터 채취하고 9 mL 증류수에 혼합하여 불탁성한 후 균질화된 시료용액

제거량

모든 바이오필터 시스템에서 유입톨루엔량과 제거량 사이

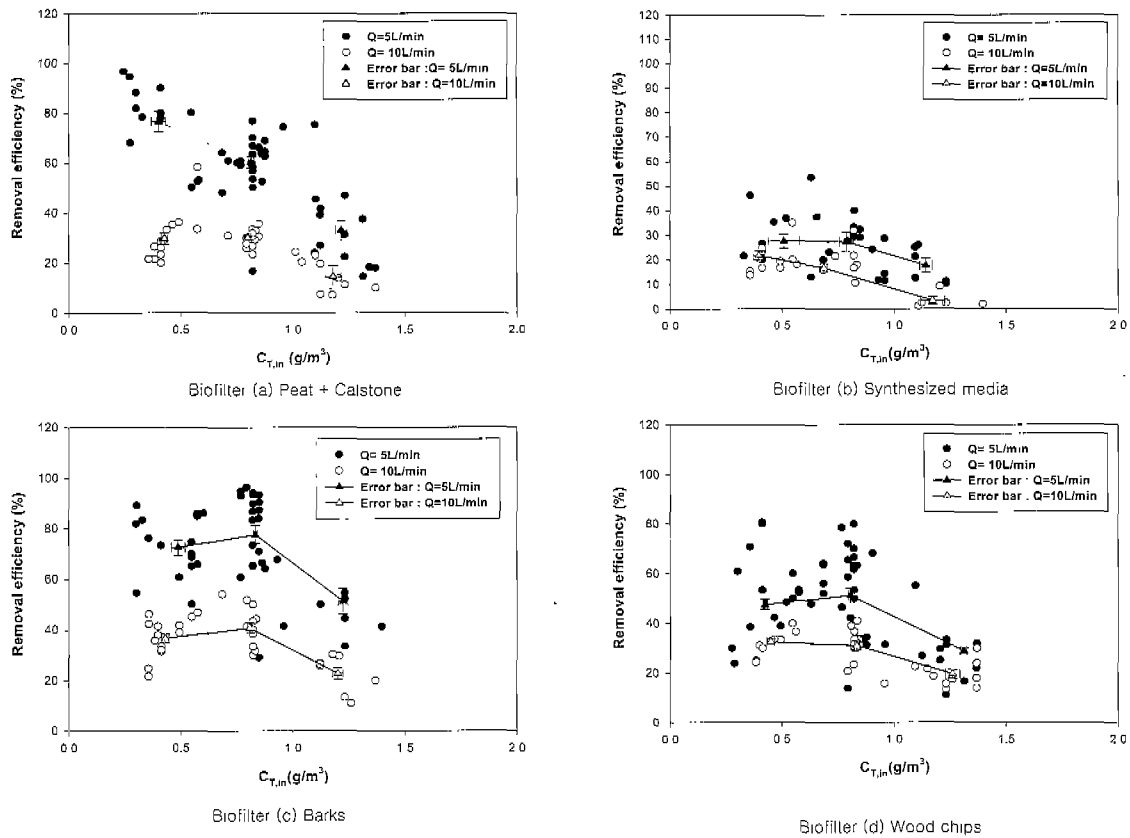


Figure 4. Removal efficiency versus inlet concentration of toluene.

의 상관관계를 Figure 5에 제시하였다. 제거량은 유입 톨루엔량이 증가함에 따라 함께 증가하게 되는 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 공기흐름에 존재하는 톨루엔의 농도구배가 증가하면서, 더욱 많은 양의 톨루엔이 생물막으로 전달되기 때문이다. 한편 모든 바이오필터 시스템에서 제거량은 매우 분산된 형태로 나타나게 되는데 이것은 바이오필터 거동이 여러 가지 환경변화에 따라 변화하기 때문에 정확하게 바이오필터의 거동을 제어할 수 없기 때문에 나타나는 현상이다. 일반적으로 바이오필터는 오염물질을 제거함에 있어 그 한계를 지니고 있는데 본 시스템의 최대 제거량을 Table 2에 나타냈다. 이러한 결과로부터 바이오필터 (c)의 제거량이 유입톨루엔량 40 g/m³hr에서 최대 30 g/m³hr임을 알 수 있었다.

한편, 각 담체별로 제거량의 변화를 살펴본 결과, 합성담체 (synthesized media)를 사용한 경우에 가장 나쁜 성능을 나타내었고, bark를 사용한 경우에 가장 좋은 성능을 나타내었다. 그러나, 이 결과만으로 bark가 가장 좋은 담체라고 단정하기는 어렵다. 왜냐하면, 본 실험에서는 수분 및 추가적인 영양분의 공급이 없는 최악의 조건하에서 각 담체의 VOCs 제거능력 및 완충능력을 살펴보고자 하였기 때문이다. 실제 공정에서는 주기적으로 수분 및 영양분의 공급을 통하여 각 바이오필터의 성능을 맑게는 수십배로 증가시킬 수 있다. 본 연구에서 합성담체의 경우 가장 낮은 제거량을 보여주었는데, 이는 합성담체의 큰 공극률로 인하여 수분의 보습효과가 다른 담체들에 비하여 떨어졌기 때문으로 사료된다. 반면에 합성담체의 경우에는 공정 최적화에 중요한 요소인 압력손실이

다른 담체에 비하여 매우 낮은 장점을 갖고 있었다.

Figure 5에서 보여준 각 담체별 제거량의 변화로부터 각 담체 별 완충능력을 비교해 볼 수 있다. 즉, 바이오필터의 조업 중에 갑작스런 사고로 바이오필터 내부의 수분 함량 및 미생물의 활성유지에 실패하였을 경우, 바이오필터 층 내부의 담체가 바이오필터 제거능을 유지할 수 있는 능력을 비교해 준다. Figure 5로부터 알 수 있듯이 bark, peat, wood chip 등의 자연소재 담체가 위기 상황에서의 완충능력은 합성담체에 비하여 더 뛰어난 것을 알 수 있었다.

수분함량

수분함량은 온도에 매우 민감하며 미생물의 활성에 지대한 영향은 미치게 된다. Table 3은 바이오필터 운전 중 필터층의 수분함량을 나타낸다. 본 실험의 운전 초기에 바이오필터의 수분함량은 50%로 유지하였다. 그러나 시스템에 수분을 공급해주기 위하여 습윤기를 설치하였음에도 불구하고 운전을 시작하면서 수분함량은 감소하여 최소 15%까지 이르렀다. Figure 3에서 알 수 있듯이 실험 20일째 70일째에 수분함량이 감소하면서 제거율이 감소하고 수분을 공급함에 따라 제거율이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이는 수분함량이 감소하면서 필터층에 불균일한 영역을 형성시키고, 이에 따른 불균일한 흐름분포와 생물학적인 활성의 감소를 야기하며 기체 오염물의 흡수량을 감소시키기는 등의 문제로 인해 나타난 결과이다. 일반적으로 적당한 수분함량을 유지하는 것은 높은 오염물량과 특정 오염물질을 처리하는데 있어 생물학적

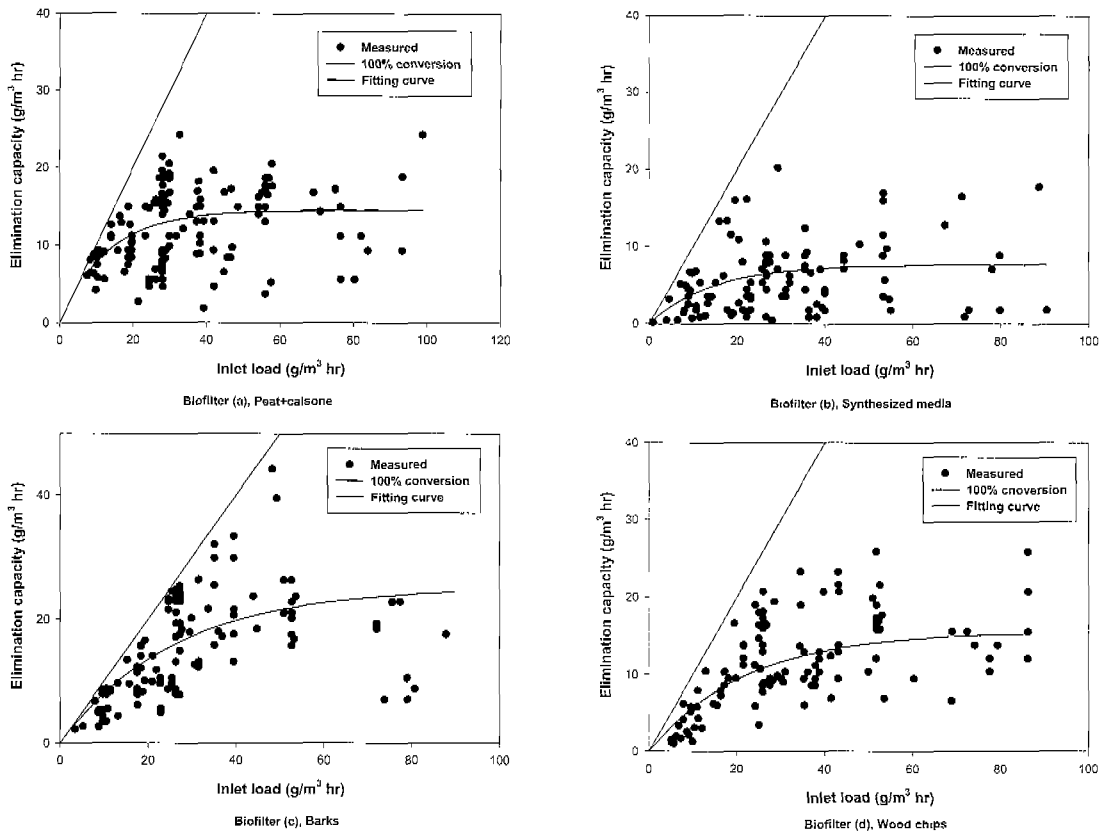


Figure 5. Elimination capacity versus inlet load in each biofilter.

Table 3. Moisture contents of biofilter in each biofilter media

	M.C. (%) Biofilter (a)	M.C. (%) Biofilter (b)	M.C. (%) Biofilter (c)	M.C. (%) Biofilter (d)
초기	52.34	47.65	48.13	48.23
20일 경과	32.43	15.45	25.32	29.34
25일 경과	71.05	48.35	68.52	60.00
60일 경과	54.63	34.17	36.7	39.45
70일 경과	48.07	21.22	32.72	35.35
75일 경과	63.45	44.54	56.66	60.08
140일 경과	60.38	44.56	47.65	50.71
190일 경과	58.09	38.78	27.17	31.62

분해 속도를 증가시킨다. 한편 반응기의 상단이 하단에 비하여 더욱 빠르게 건조되는 현상이 관찰되었는데, 이는 물이 담겨져 있는 병을 통과하는 공기가 완전히 포화되지 않은 상태로 바이오필터로 공급되고, 공기가 유입되는 바이오필터의 상단에서 오염물질을 제거하는 발열반응이 가장 격렬하게 발생함으로써 상단의 필터층이 하단에 비하여 더욱 빠르게 건조되는 것으로 사료된다. 따라서 바이오필터를 설계할 때에는 오염물질이 반응기로 유입되는 부분이 빠르게 건조된다는 것을 고려하여 설계할 필요가 있다.

압력강하

압력강하는 바이오필터를 산업현장에 응용할 때 간과할 수 없는 변수로서, 낮은 압력강하는 동력비를 감소시킴으로써 유지비를 절약할 수 있다. 바이오필터에서 발생하는 압력강

Table 4. Pressure drop

	Biofilter (a)	Biofilter (b)	Biofilter (c)	Biofilter (d)
Max. ΔP (cmH ₂ O/m)	0.054	0.0147	0.045	0.031
Max. ΔP (cmH ₂ O/m)	0.0092	0.007	0.0055	0.0083

하는 수분함량, biomass량, 그리고 compaction이 증가함에 따라 증가하게 된다. Table 4는 각 바이오필터의 압력강하를 나타냈으며 그 차이는 무시할 만큼 미비하다. 따라서 Lab-scale 바이오필터 실험에서 압력강하는 작은 장치크기로 인하여 무시할 만큼 작음을 알 수 있었다. 그러나, synthesized media의 경우에는 다른 담체들의 경우보다 압력강하가 약 1/3~1/2 정도로 작아서 대형 장치에 적용할 때 공정상의 장점을 갖고 있는 것으로 사료된다.

pH변화

담체내 pH의 변화는 미생물의 활성에 영향을 미친다. 일반적으로 미생물은 중성 pH에서 가장 높은 활성을 보이고 있다. 그러므로 오염물의 pH를 중성으로 유입시키거나, 충전필터의 pH를 7로 유지시키는 것이 중요하다. 본 시스템의 모든 바이오필터의 pH는 7~8 사이를 유지하였다.

요 약

낮은 농도 (0.41 g/m^3)에서 바이오필터 장치의 제거효율은 5 L/min과 10 L/min 에서 각각 30~70% 이상을 보여주는 반면에 고농도(1.23 g/m^3)에서의 효율은 10~60%이다. 그리고 Synthesized media를 담체로 사용한 바이오필터의 성능이 다른 바이오필터에 비하여 좋지 않았으며, barks를 사용한 바이오필터의 제거율이 입구농도 0.8 g/m^3 에서 약 70%로 가장 좋은 성능을 보였다. 이는 합성담체가 porous하여 그 보습능력이 다른 담체들에 비하여 떨어지기 때문임을 알 수 있었다. 바이오필터가 제거할 수 있는 공기중의 톨루엔양은 입구의 단위 시간당 농도를 증가시킴으로써 제거량이 증가함으로 알 수 있었으며, barks를 담체로 사용한 바이오필터의 제거량이 유입 부하량 40 g/m^3 에서 최대 30 g/m^3 으로 가장 우수한 것으로 나타나, 수분 및 활성의 유지가 안되는 최악의 조건 하에서의 바이오필터 적응능력 면에서는 bark를 사용하는 것이 가장 바람직함을 알 수 있었다. 한편 바이오필터의 우수한 거동을 위해서는 필터층의 적당한 수분함량 조절이 가장 필수적이며, 각 바이오필터의 pH변화는 7~8로써, 중성영역을 유지하는 것이 바람직하였다. 모든 바이오필터 시스템에서 압력강하는 $0.054 \text{ cmH}_2\text{O/m}$ 로서 무시할 만큼 낮았고, 특히 합성담체의 경우에 다른 담체들에 비하여 압력손실이 현저히 낮았다.

감 사

본 연구는 과학기술부 기술개발용역과제(환경 99-5)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Ottengraf, S. P., J. J. P. Meesters, A. H. C. van den Oever, and H. P. Rozema (1986), Biological elimination of volatile xenobiotic compounds in biofilters, *Bioprocess Eng.* **1**, 61-69.
- Leson, G. and A. M. Winer (1991), Biofiltration; an Innovative Air pollution Control technology for VOC Emissions, *J. Air. Waste Manage. Assoc.* **41**(8), 1045-1053.
- Auria, R., A. C. Aycaguer, and J. Deviny (1998), Influence of water content on the degradation capacity of ethanol in biofiltration, *J. Air Waste Manag. Assoc.* **48**, 65-70.
- Medina, V. F., J. S. Deviny, and M. Ramaratnam (1995), Treatment of toluene vapors using a GAC-based biofilter results of a controlled pilot scale study, *In situ and On site Bioremediation, Thrd symposium, Batelle, San Diego, CA.*
- Bohn, H. L. (1993), Biofiltration : Design principles and pitfalls," *Paper presented at the 86th AWMA Annual Meeting, Denver, CO.*
- Cox, H. H. j., H. J. Doddema, W. Harder, and F. J. Magielsen (1996), Influence of the water content and water activity on styrene degradation by *exophiala jeanselmei* in biofilter, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **45**, 851-856.
- Pinnette, J. R., Dwinal, C. A., Giggey, M. D. and Hendry, G. E (1995), Design implications of the biofilter heat and moisture balance, *In Proceedings of the 1995 Conference on Biofiltration, University of Southern California, Los Angeles, CA.*, 85-89.
- Van Lith, C., Leson, G., and Micheisen, R (1997), Evaluation design option for biofilters, *J. Air Waste Manag. Assoc.* **47**, 395-399.
- Kinney, K. A., Chang, D. P. Y., Schoeder, E. D. and Scow, K. M (1996), Performance of a directionally-switching biofilter treaton toluenc contaminated air, *Paper presented at the 89th AWMA Annual Meeting, Nashville, TN.*
- Morgenroth, E. Schroeder, E. D. Chang, D. P. Y., Scow, K. M (1996), Nutrient limitation in a compost biofilter degrading hexane, *J. Air and Waste Manage. Assoc.* **46**, 300-308.
- Williams, T. O. and Miller, F. C (1992), Biofilter and facility operations, *Biocycle Mag.*, **33**, 75-80.