

## 기상 톨루엔의 생물학적 여과에 관한 실험적 연구

홍성도·명성운·최호석·김인호·이현재·구본탁  
충남대학교 화학공학과, <sup>1</sup>엔바이온(주), <sup>2</sup>인바이오넷(주)  
(접수 : 2000. 8. 11., 게재승인 : 2000. 10. 10.)

## Experimental Study on the Biofiltration of Toluene Gas

Sung-Do Hong, Sung-Woon Myung, Ho-Suk Choi†, In-Ho Kim, Hyun-Jae Lee<sup>1</sup>, Bon-Tag Koo<sup>2</sup>  
Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea

<sup>1</sup>EnBion, Inc. 4102 Energy & Environment Research Center KAIST, Yousong-Ku Taejeon 305-701, Korea

<sup>2</sup>InBioNet, Inc. 1690-3 Shinil-Dong, Taeduk-Ku Taejeon 306-230 Korea

(Received : 2000. 8. 11., Accepted : 2000. 10. 10.)

We studied the removal of toluene vapors in a lab-scale biofilter. Biofiltration was performed in a column fed in a downflow manner with contaminated air at ambient conditions. The column was packed with a mixture of peat and calstone(5:3 vol. Ratio), which was inoculated with microbes of selected stains(*Pseudomonas putida* type A). The microorganisms were immobilized on the filter media and biofilms were formed. The biofilter was operated at various inlet toluene concentrations for 90 days, and treated up to a maximum elimination capacity of 20 g/m<sup>3</sup>hr at an inlet load of 30 g/m<sup>3</sup>hr, which corresponds to removal efficiencies in the range 20~90% and a gas retention time of 1 to 2 min. The pressure drop was almost negligible over the biofilter columns, amounting to only 1.062 cmH<sub>2</sub>O/m and appreciably smaller than other studies. The effects of operating conditions such as flow rate, inlet toluene concentration and moisture content on the performance of the biofilter were sequentially investigated.

**Key Words** : biofiltration, biofilter, toluene, elimination capacity, removal efficiency

### 서론

생물여과법은 산업현장이나 실험실에서 오염된 공기를 생물학적으로 처리하는데 많이 사용되고 있는 기술이다. 초기의 바이오필터는 H<sub>2</sub>S 또는 NH<sub>3</sub>와 같은 무기물이나 악취를 제거하는데 적용되어왔다(1). 그러나 최근의 연구보고서에 따르면, 생물여과법은 그 적용범위를 휘발성유기화합물(VOCs)을 감소시키거나 제거하는 데까지 성공적으로 적용되고 있다(2). 한편 환경문제가 지속적으로 대두되고, 각국의 환경관련 법규가 강화됨에 따라 그 적용범위는 더욱 더 확장되어 갈 것이다.

생물학적인 오염공기처리는 낮은 농도 즉, 0~6 g/m<sup>3</sup>범위의 VOCs나 악취가 발생하는 곳에 적합한 대기오염방지(Air Pollutant Control)기술이다(1-3). 지금까지 공기속에 함유되어 있는 VOCs와 악취를 제거하기 위한 노력으로 냉각응축법, 촉매연소법, 물리흡착법 및 세정법 등 다양한 종류의 물리

화학적 방법들이 사용되어 왔다. 그러나 물리/화학적 방법은 오염가스의 제거효율은 높지만 시설비 및 재료비, 약품비 등과 같은 조업비가 많이 소요되어, 저 농도의 폐가스를 배출 허용치까지 감소시키는데 비경제적이며, 2차오염물질(SO<sub>x</sub>, CO, NO<sub>x</sub>)을 발생시키는 단점이 있다. 이러한 기술들과 비교하여 볼 때, 생물여과법은 낮은 동력비와 유지비를 요구하며 환경친화적이기 때문에 매우 경제적이고 효과적인 공정이라 할 수 있다.

바이오필터는 생물학적인 활성을 갖는 필터 층으로 이루어져 있으며, 오염된 공기는 필터 층을 통하여 흐르게 됨으로써 처리된다. 오염물질은 peat, 퇴비 그리고 유/무기 담체와 같은 고체 입자 표면에 고정화 되어있는 미생물에 의하여 바이오필터내에서 생물학적으로 산화된다. 담체들은 바이오필터로 알려진 반응기 컬럼에 충전 되어 있으며 peat, 토양, 퇴비, 활성탄 그리고 polystyrene bead 등과 같은 물질이 일반적인 담체로 쓰이고 있다. 이러한 충전제는 미생물이 서식할 수 있는 장소를 제공하면서 부수적으로 영양분과 수분을 공급하는 역할을 하기 때문에 생물여과법에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러므로 충전제를 올바르게 선택하기 위해서 대상물질의 표면적, 흡수량 그리고 생물학적 적응성 등을 고려할 필요가 있다.

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

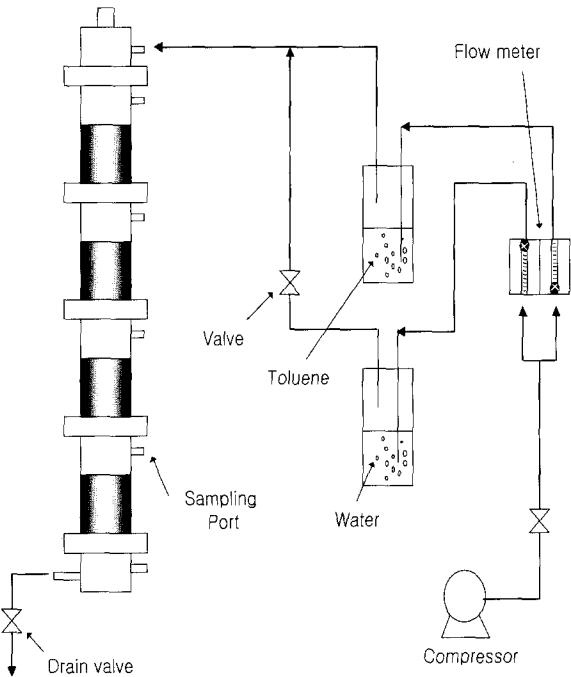


Figure 1. Schematic diagram of experimental setup.

공기중의 오염물질 (VOCs)이 바이오필터로 유입되게 되면, 오염물질은 바이오필터 층으로 전달되고, 실제적인 산화공정이 발생하는 생물막 내부로 확산하게 된다. 확산된 오염물질은 생물막내에서 호기성 생물분해로 인하여 산화하면서, 이산화탄소와 물 그리고 biomass를 생성하게 된다. 따라서, 바이오필터가 충분히 크게 되면, 배출되는 공기 중에 오염물질은 환경기준치에 충분히 만족하는 결과를 얻을 수 있게 된다.

높은 제거효율을 유지하면서 바이오필터를 지속적으로 운전하기 위해서는 담체의 수분함량, 온도, 영양분공급, 그리고 충전재의 pH와 같은 변수들의 조절이 매우 중요하다(3-12). 생물분해과정은 발열반응이기 때문에 필터 층의 온도를 상승시키게 되는데, 그로 인하여 충전재에 건조한 부분이 발생하게 된다. 이러한 현상은 필터층에 불균일한 영역을 형성시켜, 불균일한 흐름분포와 생물학적인 활성의 감소를 야기하여 기체오염물의 흡수량을 변화시키는 등 바이오필터 거동에 좋지 않은 영향을 미치게 된다(7-8). 일반적으로 적당한 수분함량을 유지하는 것은 높은 오염물량과 특정 오염물을 처리하는데 있어 생물학적 분해 속도를 증가 시킨다. Trickle bed 바이오필터의 경우에는 바이오필터 탑 상부에서 영양분을 규칙적으로 공급함으로써, 적당한 수분함량을 유지할 수 있다. 그러나 퇴비와 peat와 같은 물질은 바이오필터 내에서 액상의 균일한 분배를 향상시킬 수 없으며, 수분의 과잉공급으로 인한 혐기성 영역과 압력 손실이 발생하고 이러한 원인으로 인하여 기/액 접촉면적이 감소하게 된다.

위에서 언급한 다양한 조작변수들은 바이오필터 거동과 미생물활성에 많은 영향을 미치게 된다. 생물여과 공정은 확산, 흡착, 생물반응 등을 수반하는 복잡한 공정을 이루고 있으므로, 비록 많은 연구자들이 노력을 기울여 생물여과법에 대하여 연구하였으나 생물여과공정에 대하여 완전히 이해하기가 힘들었다. 따라서, 본 연구에서는 기본적인 운전조건 하에서

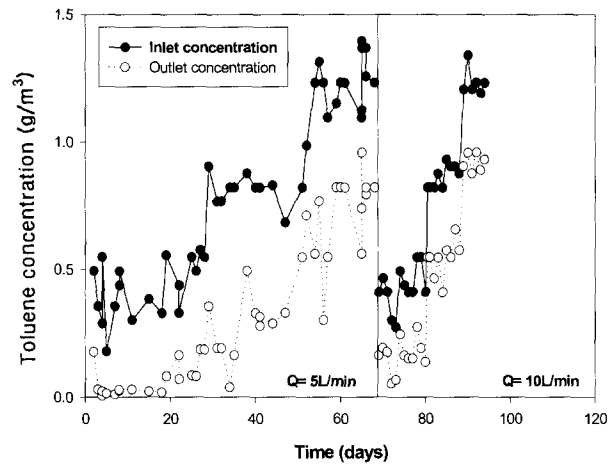


Figure 2. Inlet and outlet concentration versus time.

생물여과 현상을 이해하고, 바이오필터에 영향을 미치는 다양한 변수들의 특성을 고찰하고자 하였다.

### 재료 및 방법

#### 실험장치

본 실험에 사용된 장치의 개략도를 Figure 1에 나타내었다. 반응기는 4부분으로 나누어져 있다. 각 컬럼은 10.6 cm 직경에 그 높이가 40 cm인 아크릴로 제작되었다. 전체 바이오필터의 높이는 160 cm이며, 각 컬럼의 내부에는 peat와 calstone (부피비 5:3)혼합물이 충전 되어있으며, 시료를 채취할 수 있도록 sampling port가 설치되어있다. 바이오필터에 충전 되어 있는 전체 충전층의 높이는 120 cm이며 그 부피는  $10.59 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이다. 각 컬럼의 하단은 5 mm 직경의 구멍이 5 mm 간격으로 만들어져 있다. 유입되는 톨루엔의 농도를 조절하기 위하여 톨루엔이 채워져 있는 용기와 적당한 수분을 공급하기 위하여 물이 채워져 있는 용기를 통하여 공기가 흐르게 되고, 각 column의 압력을 측정하기 위하여 마노미터를 설치하였다.

#### 실험방법

실험에 사용한 미생물은 인바이오넷(주)로부터 제공받은 *Pseudomonas putida* type A을 이용하였다. 미생물은 4°C agar plate에 보관하였으며, 증류수 1리터 당 glucose 1.1 g,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  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,  $\text{CaCl}_2$  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)으로 잘 혼합하여 column에 충전 하였다. 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 각 각의 공기흐름은 유량계를 사용하여 조절하였다. 농도는 Figure 2에서와 같이

일정한 유속에서 농도를 스텝 펄스로 주입하였고, 출구의 농도가 일정하게 되면 정상상태로 간주하여 다시 농도를 증가시키는 방식으로 실험을 수행하였다.

본 실험은 유량 5~10 ℓ/min(0.3~0.6 m<sup>3</sup>/hr), 가스의 체류시간 1~2 min 그리고 입구 톨루엔 농도범위 0.4~1.2 g/m<sup>3</sup>에서 90일 이상 운전되었으며, Table 1에 실험에 사용된 운전조건을 요약하여 나타냈다.

Table 1. Design and Operation Parameters.

Parameters	Values
Height of the packing	120 cm
Diameter of column	10.6 cm
Gas flow rate	0.3~0.6 m <sup>3</sup> /hr
Temperature	25~30 ℃
Toluene concentration	0.411~1.233 g/m <sup>3</sup>
Pressure drop	0~1.06 cm of H <sub>2</sub> O
Moisture content of packing material	70~80%

**분석방법**

실험에 사용된 톨루엔의 농도는 portable Gas-TEC(Flame Ionization Monitor Type 47674 Telegan Gas Monitoring Ltd., West Sussex, England) 검출기를 사용하여 측정하였다. 바이오필터의 온도는 높은 미생물활성을 유지하기 위하여 25 ℃~30 ℃를 유지하였으며 compaction에 의한 바이오필터의 압력강하를 피하기 위하여 전체 반응기 컬럼을 4개의 단으로 구성하였다. 압력강하는 물이 채워진 마노미터를 이용하여 측정하였다. 충전물의 수분함량은 충전 담체를 sampling port로부터 채취하여 105 ℃ 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 불tek상한 후 균질화 된 시료용액 0.1 ml를 0.9 ml 증류수가 채워져 있는 Effen tube에 혼합하여 희석하였다. 이러한 방법으로 희석된 용액 0.1 ml을 MB broth agar plate에 도말하여 배양기에서 약 3일간 배양한 후 그 미생물군의 숫자를 세어 미생물의 농도를 측정하였다.

**결과 및 고찰**

**제거율**

Figure 3은 전체 운전시간에 대한 톨루엔 제거율을 나타낸 것이다. 제거율은 입/출구 톨루엔 농도차를 입구농도에 대한 퍼센티지로 정의하였다. 초기 입구농도는 0.411 g/m<sup>3</sup>로하여 반응기에 주입하였다. 그리고 운전시간 29일과 80일째에서 농도를 초기농도의 두 배로 그리고 54일과 89일째에서 초기농도의 3배로 입구농도를 높여 반응기로 주입하였다. 유량 5 ℓ/min에서 제거율은 유량 10 ℓ/min에서 보다 일반적으로 높았다. 이것은 톨루엔이 반응기에 체류하는 시간이 증가하기 때문이다. 동일한 농도에서 유속을 증가시키면 제거율이 감소하게 되는데, 이것은 유량을 증가함에 따라 오염물이 반응기에 체류하는 시간이 짧아지고 따라서 기/액 접촉시간의 단축으로 인하여 제거율이 감소하는 것으로 사료된다. 한편, 운전 시간 20일 까지 90% 이상을 유지하는 제거율이 같은

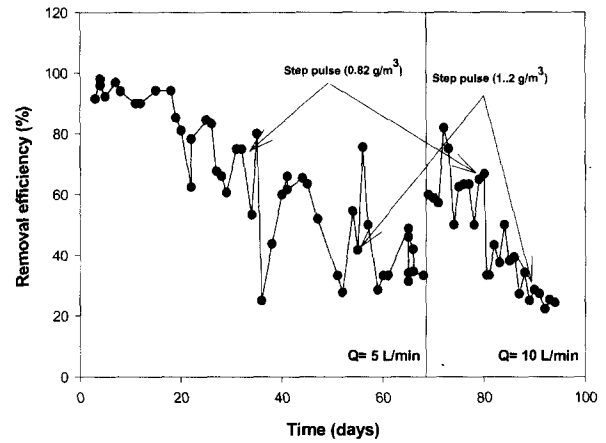


Figure 3. Toluene removal efficiency versus time.

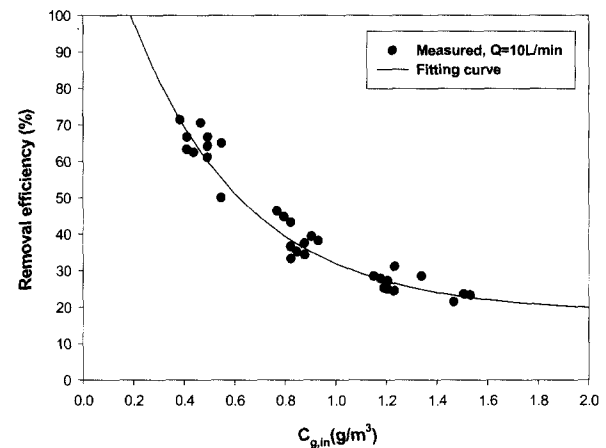


Figure 4. Conversion of toluene versus inlet concentration at the steady state.

농도에서 28일 쯤에는 약 65%까지 감소하는 것을 볼 수 있다. 운전초기 톨루엔이 반응기내의 충전물로 흡착되는 현상이 일어나는데, 시간이 지나면서 그 양이 감소하기 때문에 이러한 현상이 나타난다고 사료된다. Figure 4는 정상상태에서 톨루엔 농도에 대한 제거율을 나타내고 있다. 평균 톨루엔농도 0.411 g/m<sup>3</sup>에서 평균 제거율 90%는 유입 톨루엔농도가 0.811 g/m<sup>3</sup>까지 증가하면서 30%로 급격히 감소하게 되는데, 언급한 영역에서는 톨루엔이 생물막 깊숙이 침투할 만큼 농도가 높지 않기 때문에 반응기 전체 분해 속도는 톨루엔 농도에 의존하게 되는 현상이 발생한다. 한편 위와 같은 영역 이후의 톨루엔 농도에서는 톨루엔이 생물막 내부까지 확산될 수 있을 만큼 톨루엔 농도가 충분히 높기 때문에 생물학적 분해 속도가 톨루엔 농도에 독립적이게 되며, 전체 분해 속도는 미생물의 활성에 의하여 좌우된다.

**제거량**

제거량은 오염물의 유입량 및 제거율과 연관되어 있기 때문에 바이오필터 설계시 고려해야 할 가장 중요한 변수로 취급되고 있다(1). 바이오필터의 최대 제거량은 충전재에 존재하는 VOC-산화 미생물의 활성과 미생물의 밀도에 의존한다. 미생물의 숫자와 활성은 온도, 수분함량, 영양분 그리고 억제

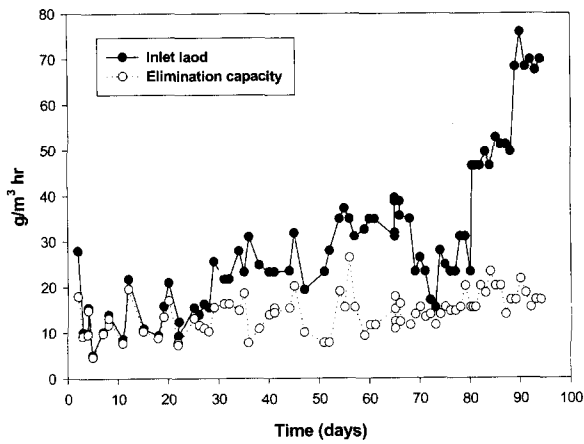


Figure 5. Overall performance of the biofilter for the Elimination capacity.

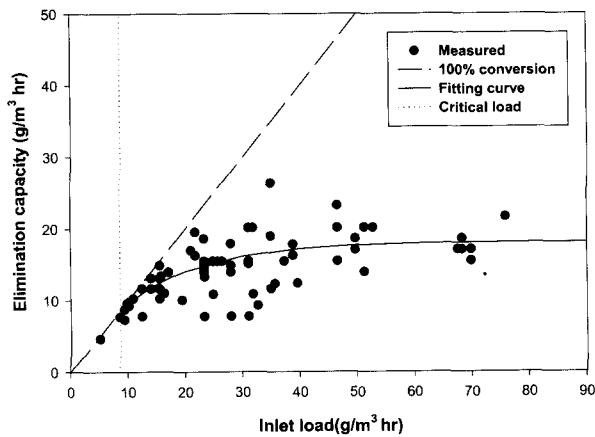


Figure 6. Elimination capacity versus inlet load.

기질과 같은 시스템의 운전조건과 밀접하게 연관되어 있다. Diks 와 Ottengraf에 의해 제거량을 표현할 수 있는 다양한 표현식이 보고된 바 있다(13). 따라서, 본 실험에서 사용한 제거량 정의를 아래의 식으로 표현하였다.

$$EC = \frac{(C_i - C_o) \times Q}{V_{bed}}$$

$V_{bed}$ 는 바이오필터 담체의 부피, 그리고  $Q$ 는 공기의 부피 유량이다.

Figure 5는 톨루엔 제거에 대한 바이오필터의 전체 거동을 보여주고 있다. 초기 운전시간 30일 까지는 유입 톨루엔량에 따라 제거율이 상승하였으나, 그 이후부터 제거량은 약간의

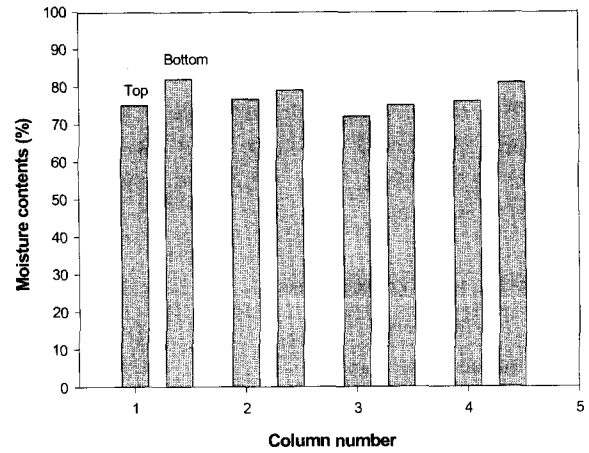


Figure 7. Column number versus moisture contents after finishing operation.

분산을 보이고 있지만, 대체로 유입 톨루엔량에 관계없이 일정한 양을 유지하였다. 이러한 유입톨루엔량과 제거량 사이의 상관관계를 Figure 6으로 제시해 볼 수 있다. 즉, 유입 톨루엔량이 증가함에 따라 제거량도 함께 증가하게 되는 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 공기흐름에 존재하는 톨루엔의 농도구배가 증가함으로 인하여 더욱 많은 양의 톨루엔이 생물막으로 전달되기 때문이다. 그러나 입구 톨루엔량이 30 g/m³ hr 이상에서 제거량은 더 이상 증가하지 않게 되는데, 이것은 생물막내의 미생물 활성이 최대에 도달했음을 보여준다. 그러므로, 본 시스템의 최대 제거량은 18 g/m³ hr 임을 알 수 있었다. 생물여과법에 관한 많은 연구에서 얻어진 일반적인 결과로써, 바이오필터의 제거량은 그 한계를 가지고 있다는 것이다. 따라서, 본 연구에서 도출한 최대 제거량은 미생물이 필요로하는 영양분의 지속적인 투입없이 얻어진 결과이므로 다른 여러 가지 연구의 최대 제거량과 비교할 만한 가치가 있으며, 그 결과를 Table 2에 나타냈다.

**수분함량**

수분함량은 온도에 매우 민감하며 미생물의 활성에 지대한 영향을 미친다. 본 시스템의 운전 초기에 수분함량은 69%였다. 그러나 운전이 종료된 후에는 그 함량이 80%까지 증가하였다. Figure 7은 실험이 종료된 후 각 컬럼의 수분함량을 나타낸 그림이다. 각 컬럼 충전층의 수분함량은 컬럼의 상부보다 하부가 더 높게 나타났다. 이것은 compaction, biomass의 성장, 중력 그리고 공기흐름이 상단에서 하단으로 내려가는 등의 영향에 의하여 이와 같은 결과를 보인 것으로 사료된다. 수분함량이 증가하게 되면, 바이오필터내의 압력도 함께 상승하고, 채널링이 발생하게 된다. 그러나 본 시스템의 압

Table 2. Selected elimination capacity values.

Contaminant	Biofilter medium	Max. E.C. (g/m³ hr)	Reference
Toluene	Peat	4~40	Aura et al. (15), 1996
Toluene	Compost	100	Don and Feenstra (16), 1985
Toluene	Compost-based	15	Johnsonand Deshusses (17), 1997
Toluene	Compost-based	20~25	Ottengraf et al (18), 1983
Toluene	Compost	45~55	Seed and Cori (19), 1994
Toluene	Peat-Calstone	20	This study

력강하는 초기 0.187 cmH<sub>2</sub>O/m에서 최종적으로 1.062 cmH<sub>2</sub>O/m로 증가하였는데, 이것은 biotrickling filter의 압력강하 (9.5 cmH<sub>2</sub>O/m)에 비하여 무시할 만큼 충분히 낮은 값이다(14). 수분함량이 높은 Trickle bed 바이오필터의 경우에 biomass가 증가함에 따라 압력강하가 크게 증가할 것이다. 수분함량은 본 연구에서 각 컬럼의 상부보다 하부가 더 높게 나타났다. 따라서 바이오필터 설계할 때, 이러한 현상을 고려하여 수분이 반응기 전체를 통하여 균일하게 분포할 수 있도록 설계하는 것이 필요하리라 사료된다.

## 요 약

본 연구는 실험실 규모의 biofilter를 이용하여 공기 중에 혼합되어 있는 대표적인 휘발성 유기화합물인 toluene기체를 제거하는 실험이다. 생물여과실험은 일반적인 조건하에서 오염된 공기를 바이오필터의 상단으로부터 하단으로 흐르게 하여 수행하였다. 반응기 컬럼의 내부는 peat와 calstone (부피비 5:3) 혼합물로 충전 되었으며, 충전재는 반응기에 채우기 전에 미생물 (*Pseudomonas putida* type A)과 잘 혼합하였다. 접종된 미생물은 충전 고체층에 고정화되어 생물막을 형성하게 된다. 바이오필터는 다양한 톨루엔 농도와 유속조건에서 약 90일 이상 운전 되었으며, 최대 제거량은 유입 toluene량 30 g/m<sup>3</sup>hr에서 20 g/m<sup>3</sup>hr 임을 알 수 있었다. 오염된 공기는 체류시간 1~2 min에서 제거율이 20~90%까지 변화하는 것을 보여 주었다. 한편 운전중에 발생하는 압력강하는 1.062 cmH<sub>2</sub>O/m 정도로서 반응기 전체를 통하여 무시할 수 있을 정도로 낮았다.

## 감 사

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

## REFERENCES

- 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
- 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.* 161-69.
- 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.
- 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., C. A. Dwinall, M. D. Giggey, and G. E. Hendry (1995) Design implications of the biofilter heat and moisture balance, In *Proceedings of the 1995 Conference on Biofiltration*, Eds., University of Southern California, Los Angeles, CA., 85-98.
- Van Lith, C., G. Leson, and R. Michelsen (1997) Evaluation design option for biofilters, *J. Air Waste Manag. Assoc.* **47**, 395-399.
- 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.*
- Kinney, K. A., D. P. Y. Chang, E. D. Schoeder, and K. M. Scow (1996), Performance of a directionally-switching biofilter treaton toluene contaminated air, *Paper presented at the 89th AWMA Annual Meeting*, Nashville, TN.
- Morgenroth, E. E., D.Schroeder, D. P. Y. Chang, and K. M. Scow (1996), Nutrient limitation in a compost biofilter degrading hexane, *J. Air and Waste Manage. Assoc.* **46**, 300-308.
- Weckhuysen, B., L. Vriens, and V. Hverachtert (1993), Effect of nutrient supplementation on the biofiltration removal of butanal in contaminated air, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **30**, 395-399.
- Williams, T. O. and F. C. Miller (1992), Biofilter and facility operations, *Biocycle Mag.* **33**, 75-80.
- Diks, R. M. M. and S. P. P. Ottengraf (1991), Verification studies of a simplified model for the removal of dichloromethane from waste gases using a biological trickling Filter, Part II, *Bioprocess Eng.* **6**(4), 131-140.
- Karim, Kiared, F. Bruno, B. Ryszard, V. Guy, and H. Michele (1997), Biofiltration of Air polluted with toluene under steady-state conditions: experimental observations *Ind. Eng. Chem. Res.* **36**, 4719-4725.
- Auria, R. M., M. Morales, E. Acuna, F. Perez, and S. Reva, (1996), Biofiltration of toluene vapors: start up and gaseous ammonia addition, In *proceedings of the 1996 conference on Biofiltration(an Air Pollution Control Technology)*, Reynolds, F.E., Eds., The Reynolds Group, Tustin, CA, p.134
- Don, J. A., and L. Feestra (1984), Odor abatement through biofiltration, in *Proceedings of Characterization and Control of Odouriferous Pollutants in Process Industries*, Le Neuve, Belgium.
- Johnson, C. T., and M. A., Deshusses (1997), Quantitative structure-activity relationships for VOC biodegradation in biofilters, In *Proceedings of the Fourth International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium*, Battelle Press, Columbus, OH, **5**, p. 175
- Ottengraf, S. P. P., and A. H. C. van den Oever (1983), Kinetics of organic compound removal from waste gases with a biological filter, *Biotechnol. Bioeng.* **25**(12), 3089-3095.
- Seed, L. P., and R. L. Corsi (1994), Biofiltration of BTEX contaminated streams: laboratory studies, In *Proceedings of 87th Annual Meeting and Exhibition of the Air and Waste Management Association*, Air and Waste Management Assoc., Pittsburgh, PA.