

## Pilot-scale 회전식 드럼 바이오필터를 이용한 Styrene 제거

<sup>1</sup>황재웅 · <sup>2</sup>임지성 · <sup>3</sup>장석진 · <sup>3,4</sup>이은열 · <sup>5</sup>최차용 · <sup>2,3\*</sup>박성훈  
<sup>1</sup>환경관리공단 기술진흥처, <sup>2</sup>부산대학교 화학생명공학과, <sup>3</sup>환경기술산업개발연구센터  
<sup>4</sup>경성대학교 식품공학과, <sup>5</sup>서울대학교 화학생명공학부  
(접수 : 2005. 12. 8., 게재승인 : 2006. 6. 18.)

## Removal of Gaseous Styrene using a Pilot-Scale Rotating Drum Biotrickling Filter

Jae Woong Hwang<sup>1</sup>, Ji Sung Lim<sup>2</sup>, Seok Jin Chang<sup>3</sup>, Eun Yul Lee<sup>3,4</sup>, Cha Yong Choi<sup>5</sup>, and Sunghoon Park<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Technology Promotion, Environmental Management Corporation, Incheon, 404-708, Korea,

<sup>2</sup>Department of Chemical and Biochemical Engineering, <sup>3</sup>Institute for Environmental Technology and Industry, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>4</sup>Department of Food Science and Technology, Kyungsoo University, Busan 608-736, Korea

<sup>5</sup>School of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received : 2005. 12. 8., Accepted : 2006. 6. 18.)

A new type of biofilter, a rotating drum biotrickling filter (RDBF), was developed and operated for the removal of styrene from industrial waste gas. The porous polyurethane foam sheet was used as a packing materials for the RDBF and a pure culture of Gram-positive bacterium *Brevibacillus sp.* SP1 was used as an inoculum. The reactor showed a short start-up period of 18 days, during which uniform biofilms were developed on the packing. During a steady operation at an incoming styrene concentration of 200 ppm<sub>v</sub> and a retention time of 0.5 min, a high and stable removal of styrene over 95% was observed. The maximum elimination capacity was estimated to be 125 g/m<sup>3</sup> · hr. The outstanding performance was attributed to an efficient gas-liquid mass transfer and the appropriate supply of nutrient solution to the biofilm microorganisms on the packing by the rotation of the drum.

**Key Words** : Biofilter, rotating drum biotrickling filter, polyurethane foam, styrene

### 서 론

생물여과법 (biofiltration)은 미생물을 이용하여 공기 중의 오염물질을 처리하는 방법으로 대풍량, 저농도 대기 오염물의 처리에 적합하다. 이 방법은 소각, 흡착, 흡수, 응축 등의 물리·화학적 방법에 비해 초기 설치비와 유지·관리비가 저렴하며, 2차 오염물질을 유발하지 않는 환경친화적인 방법으로 알려져 있다(1-3).

생물 여과법은 반응기 내 수분의 공급 방법과 미생물의 존재 방식에 따라서 바이오필터 (biofilter, BF), 바이오트리클링 필터 (biotrickling filter, BTF) 그리고 바이오스크러버

(bio-scrubber, BS)로 나뉘어진다(2-4). 이 중 BTF는 연속적으로 반응기 상단에서 영양원이 포함된 액상을 공급하기 때문에, 반응기내 pH, 온도, 영양분의 농도 조절이 용이하다. 또한 미생물이 고농도로 자랄 수 있기 때문에 반응기 부피당 오염물질 처리 효율이 높다. 뿐만 아니라 충전물로 활성탄 (activated carbon)(5), 세라믹 (ceramic)(6), 또는 발포 고분자 담체 (polymer foam)(7) 등의 비영양원 담체를 사용하기 때문에 충전물의 교체 없이도 반영구적 사용이 가능하다는 장점을 가진다. 이러한 이유로 BTF를 이용한 benzene, toluene, ethyl benzene, xylene, 및 styrene 등의 유기 화합물 분해에 대한 연구가 다양하게 진행되어왔다(8-10).

BTF의 효율은 사용하는 충전 담체와 운전 방법에 크게 의존한다. 특히 방향족 유기 화합물의 경우 물에 대한 용해도가 높지 않기 때문에 제거 효율의 증대를 위해서는 높은 기-액 물질전달속도를 유지하는 것이 중요하며, 따라서 단위 부피 당 비표면적이 높은 충전물을 선택하는 것이 유리하다. 이를 위해 최근에는 스펀지 형태의 폴리우레

\* Corresponding Author : Department of Chemical and Biochemical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Tel : +82-51-510-2395, Fax : +82-51-510-2716

E-mail : parksh@pusan.ac.kr

탄 폼 (polyurethane foam, PUF)과 같은 높은 다공성 담체에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 몇몇 그룹에서는 충전 물질로 PUF를 사용한 BTF가 악취제거(11) 및 다양한 유기화합물 처리(12)에 성공적으로 적용되었음을 보고한 바 있다.

효율적이고 안정적인 오염물의 처리를 위해서는 공기와 영양분의 균일한 공급 또한 매우 중요하다. 기존의 BTF 시스템은 대부분 작은 조각으로 되어있는 충전 담체를 관형 반응기에 채우고 반응기 상단에 위치한 spray nozzle을 통해 액상의 영양원을 뿌려주는 방법을 채택하고 있다. 이 경우 시스템으로 유입된 공기나 영양분이 균일하게 충전층을 통과하지 않는 편류 (channeling)현상이 종종 일어나며, 이로 인해 미생물의 불균일 성장과 반응기 성능의 저하가 초래된다.

최근, 기존의 BTF system의 불균일한 미생물 성장을 해결할 수 있는 새로운 반응기인 회전형 바이오필터 (Rotating Drum Biotrickling Filter, RDBF)가 개발되었다(13, 14). Kim 등은 PUF sheet를 충전 담체로 사용한 RDBF의 경우 공기와 영양분이 PUF의 기공을 통해 균일하게 공급되며, diethyl ether와 toluene이 동시에 성공적으로 제거되었다고 보고하였다. 또한 기존의 BTF에 비해 높고 안정적인 오염물 제거 효율을 얻을 수 있었다고 보고하였다. 하지만 연속 운전시 기존의 BTF 시스템과 마찬가지로 미생물이 과잉성장이 관찰되었으며, 이를 제거할 수 있는 방법이 필요하였다(14).

RDBF의 상업적 적용을 위해서는 다양한 휘발성 유기화합물 (Volatile Organic Compound, VOC)을 이용한 심화연구와 미생물과잉성장을 제어하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 본 연구는 RDBF를 대표적인 VOC인 styrene 제거에 적용하여, 여러 운전조건에서 시스템의 성능을 평가하는 것을 목표로 한다. 또한, 미생물 과다성장 문제를 해결하기 위하여 진공 흡입을 통한 미생물의 물리적인 제거를 시도하였다. 미생물 제거 효율성은 운전 종료 후 반응기 내부 충전층의 미생물 양을 정량적으로 측정하여 조사하였다.

### 재료 및 방법

#### Pilot-scale 회전형 바이오필터

실험에 사용한 RDBF의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. RDBF는 가로 1500 mm, 세로 900 mm 및 높이 1000 mm로 제작되었으며, 반응기는 내부 관찰과 실험을 용이하도록 하기 위해 전면에 유리문을 부착하였다. 본체는 stainless steel로 제작된 214 L 부피의 chamber와 충전 담체가 감겨있는 드럼, 공기 주입 펌프, 그리고 영양원 배지 순환을 위한 펌프로 구성되어 있다. 드럼은 바이오필터 본체와 동일하게 stainless steel로 제작되었으며, 지름 394 mm인 원통형으로 지름이 114 mm인 중심축에 PUF sheet을 감아서 미생물이 부착되도록 하였다. PUF sheet은 3단으로 설치하였으며, 각 단의 외부 지름은 각각 393, 293, 그리고 173 mm이고, 내부 지름은 313, 213, 그리고 133 mm이었다

(Fig. 2). 이때 각 충전 층의 부피는 17.8, 12.7, 그리고 3.9 L이었으며, 충전 담체와 드럼의 축 사이에 험기 조건이 형성되는 것을 방지하기 위하여 stainless steel 재질의 망을 축과 10 mm 간격이 되도록 감아 두었다.

공기 주입 펌프로부터 유입된 공기는 일부가 styrene 용액 분배기를 지나면서, 액상의 styrene을 기화시켜 공기와 혼합되어 적정농도로 조절된 다음 반응기 본체로 흘러들어가도록 하였다. 반응기 내부로 들어간 유입 공기는 드럼에 충전된 담체의 열린 기공을 통해서 드럼 축 방향으로 흘러들어가게 되고, 이때 미생물에 의해 분해가 일어나도록 하였다. 미생물에 의해 정화된 공기는 드럼의 축에 있는 관을 통해서 외부로 배출되도록 하였다.

미생물의 성장 배지는 chamber 하부에 65~70 L 부피로 넣어주었고, 드럼이 회전하는 동안 충전 담체를 적시면서 영양분을 공급하도록 하였다.

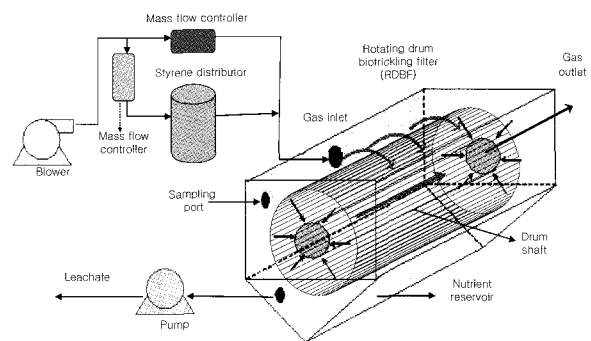


Figure 1. Schematic diagram of rotating drum biotrickling filter (RDBF).

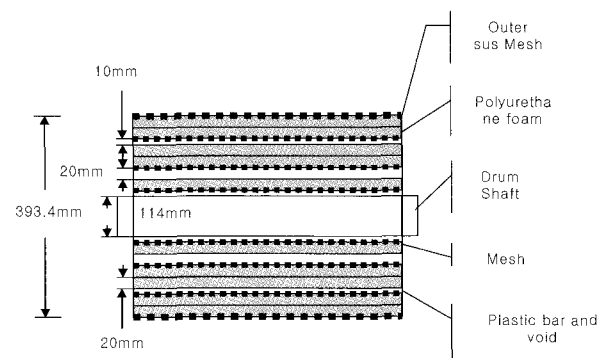


Figure 2. Schematic diagram of packing method.

#### 분해 균주 및 배양조건

Styrene 분해 미생물은 본 연구실에서 분리한 그람 양성 균인 *Brevibacillus sp.* SP1(15)을 사용하였다. 대량의 미생물을 얻기 위해 7 L 발효기를 사용하여 30°C, 250 rpm 조건에서 SP1을 배양하였고, 얻어진 고농도 (O.D. 10) SP1 배양액 10 L를 58 L의 신선한 LB 배지와 혼합하여 RDBF에 넣었다. 미생물 접종 후 14일 동안 RDBF에 신선한 공기만을 공급하며 드럼 표면에 미생물이 신속히 부착되도록 유도하였다. 이때 새로운 LB 배지로 3일에 한번씩 전체 RDBF 배양액의 1/3을 교체하였으며, 성장 온도는 30°C, pH는 7을 유지하였다. 접종 14일 후 충전 담체 층에 충분한 미생물막이 형성되었고, RDBF 내 미생물 현탁액을 모

두 제거하고 같은 부피의 최소영양원 배지를 넣은 후 styrene의 공급을 시작하였다. 실험에 사용한 최소영양원 배지와 LB 배지의 조성은 Table 1과 같다.

**Table 1.** Composition of Minimal medium and LB medium

Minimal medium		LB medium	
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.16 g/l		
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	1.4 g/l		
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.0 g/l		
NaOH	0.16g/l	Tryptone	5 g/l
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0.0025 g/l	Yeast extract	2.5 g/l
ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0.001 g/l	NaCl	5 g/l
FeSO <sub>4</sub> (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.0025 g/l		
MnSO <sub>4</sub> · 4-5H <sub>2</sub> O	0.001 g/l		
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	0.0002g/l		

**Table 2.** Procedure of RDBF operation

Phase	Purpose	Days of operation [d]	EBRT [min]	Inlet styrene [ppm <sub>v</sub> ]
I	Start-up	0-14		0
		15-17	0.5	70-200
II	Performance test	18-22	0.5-2	50-400
		22-25	0.5	200
III	Performance test	26-39	0.5	200
		40-45	1 - 2	50-400
IV	Biomass removal effect	46-50	0.5	200

### 회전형 바이오필터의 운전조건 및 순서

반응기 운전 중 유입되는 공기의 온도는 18~25℃ 범위에서 유지되었으며, 액상의 온도는 미생물이 최적 활성을 나타내는 30℃를 유지하였다. 미생물 부착 이후, styrene 분해 시 발생하는 산에 의한 pH 변화를 조절하기 위하여 2 M의 NaOH 수용액을 사용하였고, 배지는 3일 간격으로 전체를 새로운 배지 (최소영양원 배지)로 교환해 주었다. 또한 드럼의 회전속도는 0.6 rpm이었고, 기체의 체류시간은 30초가 되도록 하였다.

운전 순서는 Table 2에서와 같이 phase I, phase II, phase III 및 phase IV로 나뉘어 진다. 우선 phase I은 담체에 미생물을 부착시키기 위한 기간 (약 14일)과, LB 배지를 최소 영양원 배지로 교체한 이후 styrene의 농도를 70 ppm<sub>v</sub>에서 200 ppm<sub>v</sub>로 증가시키면서 styrene 분해를 유도하는 기간이다. Phase II는 start-up 이후 효율이 90% 이상 증가하여 높은 효율을 유지한 18일에서 25일 사이의 기간으로, 이 때 체류시간을 0.5분에서 2분까지 변화시키고, 농도를 50 ppm<sub>v</sub>에서 400 ppm<sub>v</sub>까지 변화시키면서 성능테스트를 수행하였다. Phase III는 미생물의 과잉 성장으로 인해 효율이 급감하여 효율이 60% 이하로 떨어진 26일에서 45일 사이의 기간이며, 성능 저하 이후 반응기 성능을 알아보기 위해 phase II과 동일한 조건으로 성능 테스트를 수행하였다. Phase IV는 진공 흡입에 이용한 과잉 성장 미생물을 제거한 46일에서 50일 사이의 기간이며, 유입농도 체류시간 0.5분, 유입 농도 200 ppm<sub>v</sub>에서 운전한 기간이다.

### 미생물량 측정

반응기 해체 후 충전 담체 내의 미생물 축적을 알아보기 위하여 5장의 PUF sheet의 일부를 잘라내어 무게 (A)를

측정하였다. 이후 80℃의 dry oven에서 48 hr 동안 건조시킨 다음 무게 (B)를 측정하였다. 무게를 측정한 PUF 조각은 따뜻한 물에서 깨끗이 씻어낸 후 다시 80℃의 dry oven에서 건조하여 무게 (C)를 측정하였다. 무게 A는 PUF와 미생물, 그리고 수분의 합이며, 무게 B는 PUF와 미생물 무게의 합, 그리고 무게 C는 PUF 자체의 무게이므로 수분 함량은 A와 B의 차이로, 미생물량은 B와 C의 차이에서 구하였다.

### 진공흡입

회전형 바이오필터의 과잉성장 미생물을 제거하기 위해 시중에서 판매되는 진공청소기 (Cycling, LG Electronics Ltd., Korea)를 사용하였다. 미생물이 충전 담체의 열린 기공을 막기 시작할 무렵 반응기를 멈추고 전면 유리문을 연 후, 진공청소기의 흡입구를 드럼 쪽으로 향하게 하여 PUF 표면에 접촉시켜 과잉 성장한 미생물을 제거하였다.

### 분석방법

기상의 styrene 농도는 불꽃 이온화 검출기 (FID)가 부착된 가스크로마토그래피 (HP 6890, Hewlett Packard Inc., USA)를 통해서 측정하였다. crosslink된 5% PH ME siloxane이 코팅된 캐필러리 칼럼 (0.53 mm ID ×15 m, HP 530, Hewlett Packard Inc., USA)을 사용하였으며, 기체 시료는 유입구와 유출구에서 2.0 L Tedlar bag (Omi, Japan)에 handy sampler (Kimoto Electric Co. LTD, Japan)를 이용하여 채취한 후 gas-tight syringe (Hamilton Co., Reno, NEv)로 100 µL를 취하여 GC로 분석하였다. carrier gas로는 유량 1 ml/min인 초고순도 질소가스를 사용하였고, 오븐, 주입구, 컬럼의 온도는 각각 65, 150, 그리고 300℃로 유지하였다.

## 결과 및 고찰

### RDBF의 운전

RDBF의 운전경과를 Fig. 3에 나타내었다. 운전 14일까지는 styrene을 주입하지 않는 상태에서 LB 배지로 충전 담체에 미생물 부착을 유도하였다. 운전 5일 만에 PUF 섬유위에 미생물이 부착되었고, 운전 14일에는 충전 담체 전체에 0.5~1 mm 정도의 균일한 생물막이 형성되었다. 이후 LB배지를 최소 영양원 배지로 교체하고, styrene을 주입한 지 2일 만에 95% 이상의 styrene 분해 효율을 보였다. 이때 styrene 유입 농도는 200 ppm<sub>v</sub>, 체류시간은 30 초였다. 효율이 안정적으로 유지되었기 때문에 start-up 기간이 완료된 것으로 간주하였다. 기존 BTF의 경우 start-up 기간이 30일에서 그 이상으로 소요되며, 또한 충전 담체에 생물막이 불균일하게 형성된다는 것으로 알려져 있으나(14, 16), 본 RDBF 시스템은 짧은 기간 동안 매우 균일한 생물막을 형성하였다.

18일과 22일 사이에는 유입되는 styrene의 농도와 체류시간은 변화시켜 가면서 회전형 바이오필터의 성능을 조사하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 유입농도에 따른 제거 효율과 제거용량에 대해 나타내었다. 체류시간이 1분일 때, 유입농

도가 200 ppm<sub>v</sub>일 경우 styrene의 분해 효율은 98%였으며, 유입농도 400 ppm<sub>v</sub>의 경우에도 96%의 높은 효율을 나타내었다. 반응기 유입 가스의 유속을 높여서 체류시간을 0.5 분으로 줄일 경우 유입농도가 200 ppm<sub>v</sub>까지 95%의 분해 효율을 보였으나, 450 ppm<sub>v</sub>로 증가하면 효율이 60%까지 저하되었다. 하지만 이때 styrene의 최대 제거 용량은 125 g/m<sup>3</sup>·h로, 이 값은 기존의 BTF를 통해 얻은 29 g/m<sup>3</sup>·h(17)와 44 g/m<sup>3</sup>·h(18) 등과 비교하여 매우 높은 결과임을 알 수 있다.

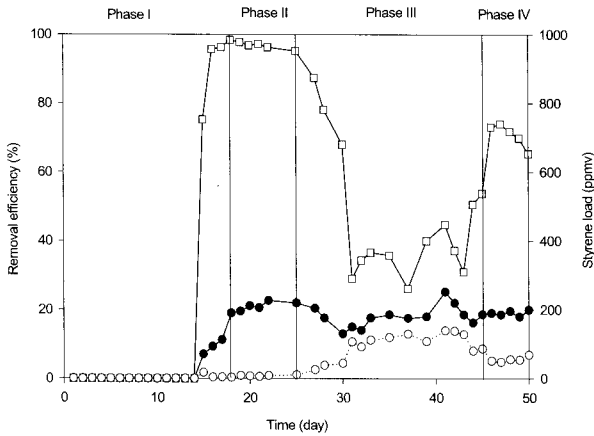


Figure 3. Time course profiles of the RDBF during the operation for 45 d; Removal efficiency (-□-), inlet styrene concentration (-●-), and outlet styrene concentration (-○-).

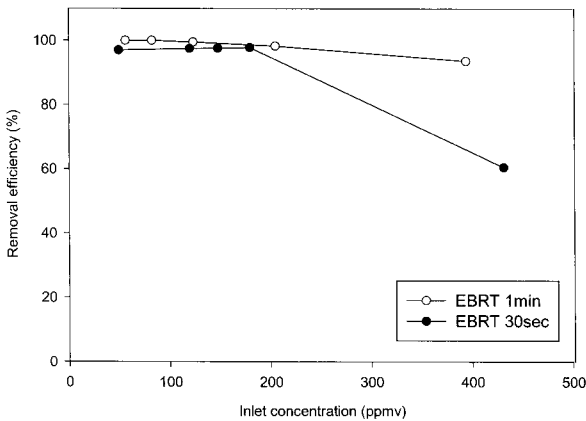


Figure 4. Removal efficiency profiles as a function of inlet load of styrene during the RDBF operation in Phase II.

장기 운전 안정성을 조사하기 위해 체류시간 0.5분, 유입 styrene 농도를 200 ppm<sub>v</sub>으로 조정 한 후 지속적인 운전을 시도하였다. 운전 25일까지 분해 효율은 98%로 유지되었으나 이후 급격한 분해 효율의 감소가 관찰되었다. 운전 31일에 효율은 초기와 비교하여 40%까지 감소하였다(Fig. 3). 이 때 반응기 내부를 관찰한 결과 충전 담체의 표면 형성된 두꺼운 미생물 막에 의해 열린 기공 (open pore)이 거의 관찰되지 않았다.

최적 운전 상태에서의 성능과 비교하기 위해 운전 35일과 40일 사이에 반응기 성능을 재차 조사하였다(Fig. 6, 7). 체류시간이 1분일 경우 처리 효율은 유입 농도 50 ~300

ppm<sub>v</sub>에서 85%로 측정되었으며, 특히 체류시간 0.5 분일 경우 유입 농도 증가에 따라 처리 효율은 급격히 감소하여 유입 농도 375 ppm<sub>v</sub>에서 처리 효율은 45%로 측정 되었다. 이때 최대 styrene 제거 용량은 처리 용량은 85 g/m<sup>3</sup>·h로 최적일 때와 비교하여 약 70% 수준이었다.

미생물 제거 실험

PUF 담체에 부착된 과다 성장 미생물을 제거하기 위해 진공흡입을 시도하였다. 운전 45일에 반응기 운전을 멈추고 진공청소기의 흡입구를 최대한 담체층에 접근시킨 후 드럼을 서서히 회전시키면서 최대한 많은 미생물이 제거 되도록 하였다. 반응기 표면의 기공을 막았던 미생물 막은 진공 흡입 후 대부분 제거되었고 기공이 선명하게 나타났으나(Fig. 8), 흡입으로 제거된 미생물 양을 정량적으로 측정할 수는 없었다. 처리 효율은 진공 흡입 후 일부 상승하였으나(Fig. 3, Phase IV), 초기의 높은 값으로 회복되지 않았다. PUF sheet가 여러 층으로 되어 있고 PUF sheet의 구조가 그물망 형태이므로 진공흡입을 통하여 sheet 내부에 존재하는 미생물을 제거하는 데는 한계가 있음을 알 수 있었다.

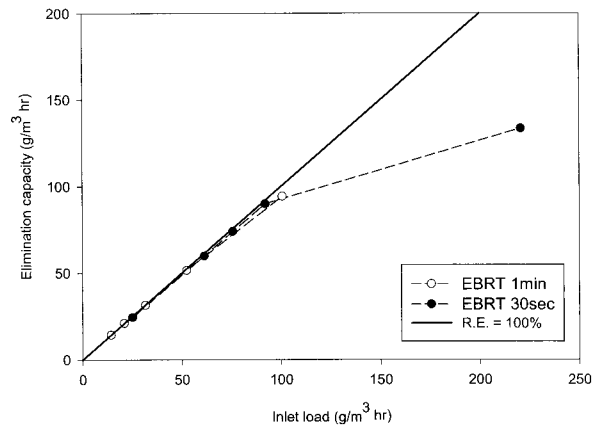


Figure 5. Elimination capacity as a function of inlet load of styrene during the RDBF operation in Phase II.

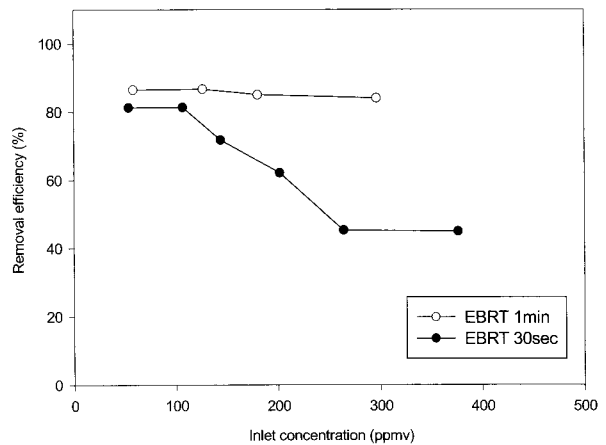


Figure 6. Removal efficiency profiles as a function of inlet load of styrene during the RDBF operation in Phase III.

**미생물량 정량**

진공 흡입 후 RDBF의 충전층을 완전히 분해한 후 각 충전층에 부착되어 있는 미생물 양을 측정하였다. 5장의 PUF sheet의 일부를 잘라내어 무게를 측정하였으며, 축적된 미생물 양은 Fig. 8에 나타내었다. 외부 (5번)에서 내부 (1번)까지 각 PUF 조각에 포함된 미생물 양은 0.92, 1.09, 1.00, 0.60, 0.11 g/g media이었다. 그리고 건조 전 각 층에 함유되어 있는 수분의 양은 각각 7.18, 8.31, 10.53, 4.18, 2.35 g/g media으로 나타났다. 본 연구에 사용한 RDBF는 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 3단의 드럼으로 구성되었으며, 외부의 두 단은 각각 두 장의 PUF sheet로 그리고 가장 내부의 한 단은 한 장의 PUF sheet로 이루어져 있다. 진공흡입 후 최외곽 층의 두 장의 PUF 중 외곽 층의 미생물 양이 더 작게 측정되었는데 이는 진공흡입을 통해 최외곽 층의 PUF에 있는 미생물이 제거되었음을 보여주는 결과이다. 이는 또한 진공흡입이 내부의 미생물을 제거하기에는 한계가 있는 방법임을 시사해 주는 것이다. 내부로 갈수록 미생물 양이 줄어드는 것은 외부, 즉 유입부의 미생물이 반응기 운전 중 보다 높은 유기탄소원과 산소기질에 노출되었기 때문으로 판단되었다.

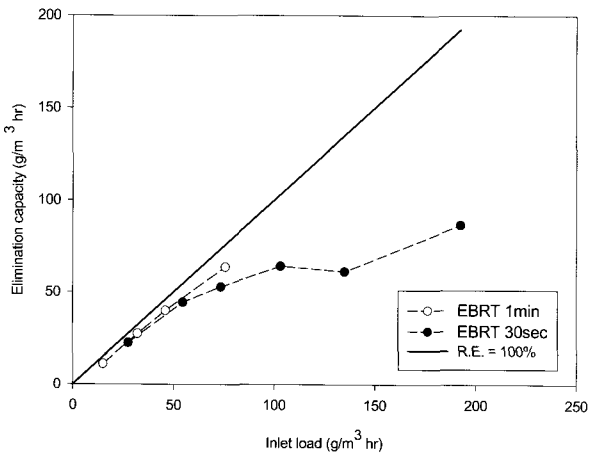


Figure 7. Elimination capacity as a function of inlet load of styrene during the RDBF operation in Phase III.

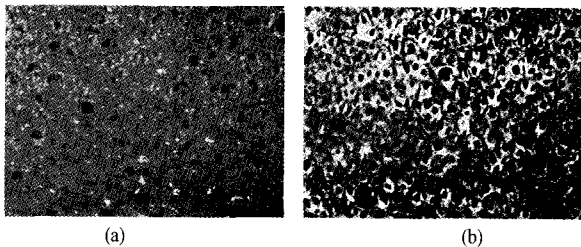


Figure 8. Photographs of biomass on the polyurethane foam sheet before(a) and after(b) vacuum suction at day 45.

**고찰**

기존의 BTF 경우 반응기에 입상 물질을 충전하여 반응기를 운전하기 때문에 유입된 공기의 대부분이 충전 담체의 열린 기공 내부를 통과하는 것이 아니라 담체와 담체 사이의 넓은 통로를 지나가게 된다. 하지만 본 연구에서

사용한 RDBF는 sheet 형태의 충전 담체를 그대로 사용하기 때문에 충전 담체 조각 사이의 여유 공간이 존재하지 않으며 외부로부터 들어온 모든 공기는 충전 담체에 존재하는 열린 기공을 반드시 통과하도록 설계되어 있다. 따라서 실제 기-액 접촉 면적이 기존의 반응기에 비해 월등히 크며, 이는 기상의 오염물의 액상으로의 전달속도를 증가시키므로 반응기의 효율을 증대시킨다. 공기와 영양분이 편중되지 않고 고르게 공급되므로 담체 위에 균일한 미생물 막이 형성된다는 점 또한 RDBF의 성능 향상요인으로 판단된다. 이로 인해 본 연구에서는 start-up 기간이 14일 정도로 짧았고, 최대 styrene 분해 용량도 125 g/m<sup>3</sup>·h로 기존의 BTF 반응기에 비해 월등히 높았다. 또한 유입가스의 농도가 넓은 범위에서 변화함에도 불구하고 안정적인 처리효율을 보여 주었다.

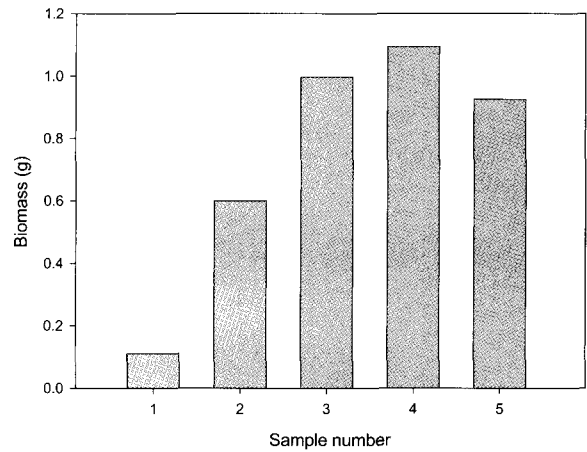


Figure 9. Biomass quantity developed on polyurethane foam sheet. Sample number represents the sheet from the innermost layer (number 1) to the outermost sheet (number 5).

하지만 유기화합물의 처리공정에서 이러한 높은 효율은 필연적으로 미생물의 빠른 성장을 초래하며 하여 반응기 효율의 급속한 하락을 가져온다. 본 실험에서도 styrene 처리에 대해 RDBF가 탁월한 성능을 나타내었지만 미생물의 과다 성장으로 인하여 이 성능은 오래 지속되지 않았다. 일반적으로 미생물의 과다성장을 제어하는 방법으로 물리적인 역세 (backwashing)나 화학적으로 낮은 pH나 높은 pH의 용액으로 씻어내는 방법이 많이 사용된다(19, 20). 또한 영양원의 제한적인 공급을 통해 미생물의 성장을 조절하기도 한다(21). 본 연구에서는 물리적인 방법으로 진공을 통해 과다성장 미생물을 흡입제거 하고자 하였다. 그 결과 최외곽 층의 미생물은 일정부분 제거되었고 진공흡입 후 반응기 활성화도 다소 회복되는 경향을 관찰할 수 있었다. 그러나 이 방법은 PUF sheet의 구조상 내부의 과다성장 미생물을 제거하는 데는 충분치 못하였으며, 따라서 RDBF 반응기에서의 미생물 제어 방법으로는 충분치 못했다. RDBF 반응기의 상업적 적용을 위해서는 이 반응기의 장점을 살리면서 미생물의 과다 성장을 제어할 수 있는 방법의 지속적 개발이 필요하다고 하겠다.

## 요 약

본 연구에서는 신 개념의 바이오필터 시스템인 RDBF를 이용하여 기상의 styrene을 제거하고자 하였다. 다양한 운전조건에서 시스템의 성능을 평가하고, 진공흡입을 통해 과다성장 미생물을 제어하고자 하였다. RDBF에서는 sheet 형태의 충전 담체를 사용하므로 영양원 및 공기의 균일한 공급이 가능하였고, 빠른 속도로 균일한 미생물 층을 담체 표면에 형성할 수 있었다. 또한 기-액 접촉면적을 증대 시켜 95% 이상의 안정적이고 높은 styrene 분해 효율과  $125 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ 의 높은 제거 용량을 가질 수 있게 해주었다. 하지만 우수한 성능은 미생물의 과다성장에 따른 기공의 폐쇄 현상 때문에 오래 지속되지 않았고 반응기의 성능과 안정성은 급속히 저하되었다. 이를 해결하기 위해 진공흡입을 통한 미생물 제거를 시도하였으나 제한적인 효과만을 확인하였다. 향후 RDBF 반응기의 상업화를 위해서는 보다 효율적인 미생물 제어 방법이 개발될 필요가 있다.

## 감 사

본 연구는 BK21 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Devinny, J. S., M. A. Deshusses, and T. S. Webster (1999), *Biofiltration for Air Pollution Control*, Lewis publishers, USA, 1999.
2. Ottengraf, S. P. P. (1987), *Biological Systems for Wastegas Elimination*. *Trends in Biotechnol.* **5**, 132-136.
3. van Groenestijn, J. W. and P. G. M. Hesselink (1993), *Biotechniques for Air Pollution Control*, *Biodegradation* **4**, 283-301.
4. Kennes, C. and F. Thalasso (1998), Waste Gas Biotreatment Technology, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **72**, 303-319.
5. Utgikar, V., R. Govind, Y. Shan, S. Safferman, and R. C. Brenner (1990), Biodegradation of volatile organic chemicals in a biofilter. In: *Emerging Technologies in Hazardous Waste Management II*. (TEDDER, D. W., POHLAND, F. G., eds.), *American Chemical Society Symposium Series*, p 468.
6. Ortiz, I., M. Morales, C. Gobbee, V. Guerrero, R. Auria, and S. Revah (1998), Biofiltration of gasoline VOCs with different support media. Proc. of the 91th Annual Meeting & Exhibition, Pittsburgh, USA: Air & Waste Management Association.
7. Myung, S. W., Y. S. Nam, Y. W. Lee, and S. H. Choi (2001), Removal Characteristics of toluene in biofilters packed with recirculated-PU-foams of different porosities. *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* **18**, 448 - 454.
8. Jang, J. H., M. Hirai, and M. Shoda (2004), Styrene Degradation by *Pseudomonas* sp. SR-5 in Biofilters with Organic and Inorganic Packing Materials, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **65**, 349-355.
9. Zhou, Q., Y. L. Huang, D. H. Tseng, H. Shim, and S. T. Yang (1998), Trickle-bed Fibrous-bed Bioreactor for Biofiltration of Benzene in Air, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **73**, 359-368.
10. Pol, A., F. J. J. Van Haren, H. J. M. Op den Camp, and C. van der Drift (1998), Styrene Removal from Waste Gas with a Bbacterial Biotrickling Filter, *Biotechnol. Lett.* **20**, 407-410.
11. Pol, A., H. J. M. Op den Camp, S. G. M. Mees, M. A. S. H. Kersten, and C. van der Drift (1994), Isolation of a Dimethylsulfide Utilizing *Hyphomicrobium* Species and Its Application in Biofiltration of Polluted Air, *Biodegradation* **5**, 105-112.
12. Moe, W. M. and R. L. Irvine (2001), Polyurethane Foam Based Biofilter Media for Toluene Removal, *Wat. Sci. Technol.* **43**, 35-43.
13. Yang, C., M. T. Suidan, X. Zhu, and B. J. Kim (2003), Biomass Accumulation Patterns for Removing Volatile Organic Compounds in Rotating Drum Biofilters, *Wat. Sci. Tech.* **48**, 89-96.
14. Yang, C. M. T. Suidan, X. Zhu, and B. J. Kim (2002), Removal of Diethyl Ether in a Rotating Drum Biofilter at High Organic Loading Rates, Proc. the AWMA's 95<sup>th</sup> Annual Meeting & Exhibition, Baltimore, Maryland, 2002.
15. Moon, C. H. (2003), High performance biotrickling filter for gaseous styrene removal, M.S. Thesis, Dept. of Chemical Engineering, Busan National University, Busan.
16. Moe, W. M. and R. L. Irvine (2000), Polyurethane Foam Medium for Biofiltration II : Operation and Performance, *J. environ. eng.* **126**, 826-832.
17. Lu, C. S., M. R. Lin, and J. C. Lin (2001), Removal of Styrene Vapor from Waste Gases by a Trickle-bed Air biofilter, *Hazard. Mat.* **82**, 233-245.
18. Lu, C. S. M. R. Lin, and I. Wey (2001), Removal of Pentane and Styrene Mixtures from Waste Gases by a Trickle-bed Air Biofilter, *Chemical Tech. Biotech.* **820**-826.
19. Smith, F. L., G. A. Sorial, M. T. Suidan, A. W. Breen, P. Biswas, and R. C. Brenner (1996), Development of two biomass control strategies for extended, stable operation of highly efficient biofilters with high toluene loadings, *Environ. Sci. Technol.* **30**, 1744-1751.
20. 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.
21. Holubar, P., C. Andorfer, and R. Braun (1995), Prevention of clogging in trickling filters for purification of hydrocarbon-contaminated air. In Conference on Biofiltration for 1995, 5-6 Oct., proc., University of Southern California, Los Angeles, CA, pp. 115-122.