

# 계면활성제 미생물반응기의(혼합 VOCs) 생분해 I: 반응기 거동평가

## Biodegradation of VOC Mixtures using a Bioactive Foam Reactor I: Reactor Performance

신승규\* · 장현섭\*\* · 황선진\*\*\* · 송지현\*\*\*\*

Shin, Shoung Kyu · Jang, Hyun Sup · Hwang, Sun Jin · Song, Ji Hyeon

### Abstract

The system performance of a bioactive foam reactor (BFR), that consists of a foam column using a surfactant and a biodegradation basin containing suspended bacteria, was investigated for the treatment of gaseous toluene or a mixture of four volatile organic compounds (VOCs, benzene, toluene, p-xylene, and styrene). Overall, the BFR achieved stable VOC removal efficiencies, indicating that it can be used as a potential alternative over conventional packed-bed biofilters. Furthermore, a dynamic loading test showed that relatively constant removal was maintained at the elevated loading due to a high mass transfer rate in the foam column. However, as the inlet concentration of VOCs increased, a portion of the VOCs mass-transferred to the liquid phase was stripped out from the biodegradation basin, resulting in a decrease in the overall removal efficiency. In the BFR, the removal efficiency of the individual VOC was mainly determined depending on the biodegradation rate (styrene > toluene > benzene > p-xylene), rather than the mass transfer rate. Consequently, increases in the microbial activity and the volume of the basin could improve the overall performance of the BFR system. Further investigation on microbial activity and community dynamics is required for the BFR when subjected to high loadings of VOC mixtures.

**Keywords :** *bioactive foam reactor, surfactant, volatile organic compounds, mass transfer*

### 요 지

계면활성제 거품과 부유미생물을 이용하여 휘발성유기화합물(VOCs)를 제어하는 새로운 방법인 계면활성제 미생물반응기(BFR)를 대상으로, 단일 VOC와 혼합 VOCs가 유입되는 조건에서 BFR의 반응특성을 확인하였다. 본 연구에서는 혼합 VOCs로는 benzene, toluene, p-xylene, styrene의 4가지 물질을, 단일 VOCs로는 toluene을 선정하였다. 전체적으로 BFR 시스템은 기체체류시간 40초 조건에서 안정적인 운전효율을 보여 기존 담체충진형 바이오필터의 대안기술로 적용 가능하다고 판단된다. 또한 동적부하 변동실험 결과 BFR 시스템은 높은 부하량 유입시 거품에 의한 물질전달율이 일정하게 유지되어 안정적인 처리효율을 얻을 수 있었다. 그러나 유입 VOCs 농도가 증가하면서 액상으로 전달된 VOCs 일부가 미생물 반응조에서 탈기 작용으로 기체상으로 역배출되어 최종 유출농도가 상승하는 현상이 발견되었다. Styrene 이외의 다른 VOCs는 물질전달을 면에서 큰 차이가 없었으며 생분해율(styrene, toluene, benzene, p-xylene) 순에 따라 최종 유출농도가 결정되었다. 따라서 본 연구의 BFR 시스템은 활성미생물 농도 또는 미생물 반응조 부피 증가 등의 방법으로 전체 운전효율을 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다. BFR 시스템에 대한 추가 연구 및 개량은 물질전달을 증가보다는 미생물 활성도, 혼합 VOCs에 의한 미생물 군집변동 등에 초점을 맞출 필요가 있다.

**핵심용어 :** 계면활성제 미생물반응기, 혼합 휘발성유기화합물, 물질전달, 생분해도

### 1. 서 론

휘발성유기화합물(volatile organic compound, VOCs)은 폐수처리업, 섬유염색, 금속제품제조, 화학제품제조 등의 고 정오염원에서 많이 발생 배출되고 있다. 이런 VOCs 배출

특성으로 우리나라 전역에 퍼져 있는 각종 산업체와 산업단지 그리고 인근 주택단지 등지의 대기중에 높은 농도로 유지되어 악취를 유발하고, 이에 따른 민원 발생 문제가 끊이지 않고 있다. 이처럼 다양한 배출원을 갖는 VOCs는 인체 유독성을 내포하고 있고, 대기 중의 질소산화물과 광화학 반

\*세종대학교 토목환경공학과 석사과정(E-mail : ssklio9@naver.com)

\*\*경희대학교 환경응용화학대학 박사과정(E-mail : jhyunsup@hotmail.com)

\*\*\*경희대학교 환경응용화학대학 환경공학전공, 환경연구센터 부교수(E-mail : sjhwang@khu.ac.kr)

\*\*\*\*정희원 · 교신저자 · 세종대학교 토목환경공학과 조교수(E-mail : songjh@sejong.ac.kr)

응하여 2차 오염물질인 오존이 생성된다. 또한 일부 VOCs는 유해대기오염물질로 분류되어 특별 관리 및 규제 대상이 되고 있다.

따라서 VOCs에 대한 배출규제가 하폐수 처리업체를 비롯한 대부분의 배출시설에 적용 강화되어야 할 필요성이 대두되고 있으며, 보다 효율적인 방지시설에 대한 산업체의 요구가 높은 실정이다. 산업현장에서 발생하는 VOCs처리 방법으로는 흡수법, 흡착법, 직접연소법 등이 있으나, 낮은 처리 효율, 높은 유지관리비 등이 문제점으로 지적된다.

생물학적 처리기술인 바이오필터와 바이오트리클링필터는 담체(packing materials)표면에 부착 성장하는 미생물을 이용하는 방법으로, 운전이 간편하고 다양한 오염원에 적용하기 용이해 많은 실용화 연구가 진행되어 왔다(이정구 등, 2003). 하지만 담체 표면에 고정된 미생물을 사용하는 처리 기술은 장기 운전시에 분해미생물의 활성이 떨어지거나 담체 사이에 비활성 미생물이 축적되는 막힘 현상이 발생한다(Deviny 등, 1999). 부착미생물 방식의 단점을 보완하기 위하여, 최근에는 부유미생물을 사용해 VOCs나 악취를 처리하는 기술이 등장하고 있다(Kennes and Veiga, 2001; Bielefeldt and Stensel, 1999).

최근 부유미생물과 거품을 사용하는 방법인 계면활성제 미생물반응기(bioactive foam reactor, BFR)가 제안되어 활발하게 연구되고 있다(Kang and Deshusses, 2003; Kang and Deshusses, 2005). BFR은 VOCs로 오염된 공기를 미생물과 계면활성제 혼합액에 산기시켜 형성된 거품을 이용하는 반응기이다. BFR 시스템의 특징은 계면활성제가 만들어낸 거품에 의해 물질전달계수가 증가하며, 따라서 기상의 VOCs가 빠른 속도로 미생물에 전달되어 미생물의 분해율도 함께 증가한다. BFR은 담체 대신 거품을 사용함으로써 장기 운전해도 막힘현상이 발생하지 않아 지속적으로 안정된 운전이 가능하다. 또한 BFR 장기 운전시의 장점은 미생물반응기에 축적되기 쉬운 비활성물질(예: dead cells, exopolymeric substances)을 쉽게 배출할 수 있어 운전성능의 저하를 방지할 수 있다.

산업체에서 배출되는 VOC의 경우 단일 VOC인 경우보다는, 대부분 혼합 VOCs 형태로 배출되게 된다. BFR은 거품에 의한 물질전달과 미생물 생분해가 순차적으로 일어나는 반응기로서 단일 VOC에 비해 혼합 VOCs에 의한 영향을 클 수 있다. 따라서 본 연구에서는 혼합 VOCs를 BFR에 유입시키면서 반응기 거동특성을 확인하고자 하였다. 혼합 VOCs로는 benzene, toluene, p-xylene, styrene을 선정하고 BFR의 장기운전 실험을 진행하였다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1. 실험장치 구성

본 연구에서 사용한 실험실 규모 BFR 시스템은 Fig. 1과 같으며, 거품이 발생되고 기·액간 물질전달이 일어나는 거품컬럼(foam column, 부피 3L), 미생물 반응조(cell reservoir, 부피 3.8L)로 이루어져 있다. 주사기펌프(Model 200, KD scientific, USA)로 주입된 VOCs는 산기석을 통해 BFR 내부로 유입된다. 유입된 공기는 거품형성기에서 계

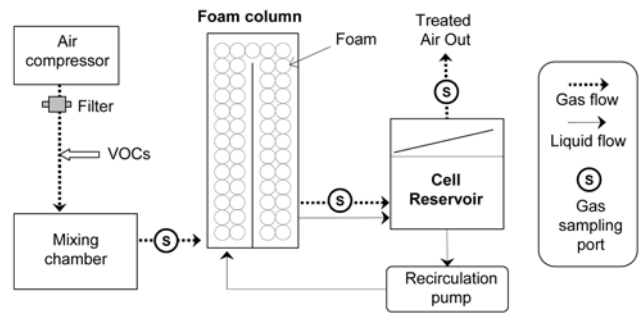


Fig. 1 Schematic of the Bioactive Foam Reactor

면활성제/미생물 혼합액에 산기되면서 거품을 발생시키며, 형성된 거품은 미생물 반응조를 거치면서 소멸된다. 미생물을 포함한 액상은 순환펌프에 의해 거품형성기로 이송되어 BFR 시스템을 연속적으로 구동하게 된다. 따라서 VOCs로 오염된 공기흐름은 거품컬럼과 미생물 반응조를 거쳐 외부로 배출되며, 미생물을 포함한 액상은 전체 시스템을 순환하게 된다.

### 2.2. 분해 미생물 배양과 계면활성제

미생물 배양은 하수처리장 활성슬러지를 채취하여 약 2년간 toluene을 유일한 탄소에너지원으로 연속 주입하여 계대배양한 혼합미생물을 이용하였다. 본 실험 시작전에 앞서 언급한 미생물을 분리하여 25개의 세균 집락을 분리하고, 이 세균들을 한천배지에서 순수 분리한 후 각각의 toluene 분해능을 관찰하였다. 이들 중 11종류의 미생물이 toluene 분해능을 나타내었고, 각각의 미생물의 염기서열 분석을 통해 모두 *pseudomonas* sp.로 나타났다. 이를 *pseudomonas* sp. TDB4라 명명하고, 2개월 이상 toluene만을 주입하여 계대배양 하였다. TDB4 배양시 영양염류용액(Nutrients solution)의 조성은 1.36 g/L  $KH_2PO_4$ , 1.42 g/L  $Na_2HPO_4$ , 3.03 g/L  $KNO_3$ , 0.5 g/L  $(NH_4)_2SO_4$ 와 미량원소 용액 1 mL/L이다(Ridgway 등, 1990).

BFR 운전은 전체 혼합미생물 배양액 0.5 L와 2개월간 배양한 TDB4 단일배양액 0.5 L, 그리고 계면 활성제가 포함된 영양염류 용액 1 L를 혼합하여 사용하였다. BFR 실험에 사용한 계면활성제는 TritonX-100(Sigma-Aldrich, USA)이며, BFR 내의 계면활성제 농도는 0.013%(v/v)으로 유지하였다. BFR 운전 중 액상 증발량을 고려하여 계면활성제가 포함된 영양염류 용액을 매일 0.25 L 씩 BFR 시스템에 공급하여, 시스템내 액상 부피가 항상 2 L로 유지되도록 하였다.

### 2.3. 단일 VOC와 혼합 VOCs의 BFR 운전

실험실 규모 BFR 실험은 toluene 단일 VOC를 대상으로 체류시간 40초 조건에서 유입부하량을 단계적으로 높이면서 23일간 수행하였다. 또 다른 BFR 시스템에서는 4종류 혼합 VOCs(benzene, toluene, p-xylene, styrene: BTXS)을 대상으로 동일한 체류시간 조건으로 유입부하량을 단계적으로 증가시키면서 25일간 수행하였다. 특히 혼합 VOCs를 대상으로 하는 반응기는 시스템의 안정성 유지를 위해 장기운전 시작 전에 toluene 만을 일주일간 유입시켜, TDB4와 여타 미생물의 활성도를 일정수준으로 올린 뒤 실험을 시작하였다. 또한 혼합 VOCs가 일정한 농도로 유입되어 안정적으로 운전되는 BFR 시스템에 갑작스러운 농도증가를 통해 충격

부하가 걸렸을 때 BFR의 거동특성을 확인하였다.

### 2.4 분석 방법

BFR 운전중 기체상 시료는 유입구(inlet)와 거품컬럼과 미생물반응조 사이(middle), 그리고 미생물반응조 후단(outlet)에 위치한 sampling port에서 gas-tight syringe로 채취하였다. 채취한 기상 시료는 GC/FID(HP 6890, Agilent, USA)에 주입하여 기상농도를 측정하였다. 운전 중 CO<sub>2</sub> 농도는 포집한 기체 시료를 CO<sub>2</sub> gas analyzer(LI-820, LI-Cor, USA)에 유입시켜 측정하였다.

BFR 시스템의 운전 과정에서 계면활성제 농도와 거품의 양은 VOCs 처리에 많은 영향을 준다. 미생물이 포함된 액상의 계면활성제 농도를 직접 측정하는데 어려움이 따르므로, 본 실험에서는 간접방법(80% drain time, Kang and Deshusses, 2005)으로 거품안정성(foam stability)을 측정하였다. 장기운전 실험동안 3일에 한번 씩 거품안정성을 측정하여 19~22초의 80% Drain time을 확보하며 운전하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 단일 VOC 제거특성

BFR 시스템에 toluene을 단일 VOC로 유입시키면서 유입 부하량 변화가 처리효율과 반응특성에 미치는 영향을 측정하였다(Fig. 2). 23일의 실험기간 동안 유입 toluene 농도를 약 88 ppm(Phase T1), 170 ppm(Phase T2), 270 ppm(Phase T3)으로 단계적으로 상승시켰다. 23일의 운전기간 동안 압력손실 증가 현상은 나타나지 않았으며, 안정적인 toluene 제거효율을 나타내었다. BFR과 대비되는 담체충진형 바이오필터는 고부하 상태에서 장기간 운전하면 비활성 미생물 축적 현상이 빈번하게 나타난다. 반면 본 BFR 시스템은 비활성 미생물 축적 현상 없이 안정적인 장기 운전이 가능하였으며, 따라서 기존 바이오필터법의 대안 기술로 적용 가능하다고 사료된다. 그러나 본 연구에서 제작 사용한 BFR 시스템은 Phase T2와 T3에서 toluene 제거효율이 50% 수준으로 떨어지는 문제점이 발생하였는데, 반응조 내의 미생물 농도나 미생물반응조의 용량을 증가시키는 방법으로 처리효율이 향상되도록 BFR 시스템을 최적화할 필요가 있다.

반응기 운전시작 후(Phase T1) 적응기간 없이 바로 70% 이상의 제거효율을 나타내었으며, 평균 430 ppm의 CO<sub>2</sub>가 발생하였다. 이론적으로 toluene이 100% 산화되었을 때(C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>+9O<sub>2</sub>→7CO<sub>2</sub>+4H<sub>2</sub>O) 1몰의 toluene은 7몰의 CO<sub>2</sub>를 발생시키므로, Phase T1 기간에는 유입 toluene의 99% 이상이 CO<sub>2</sub>로 완전분해(mineralization) 되었음을 알 수 있다. 또한 Fig. 2(a)와 (b)에 제시된 결과를 살펴보면, Phase T1 기간에는 거품컬럼을 통과한 후의 기상 농도와 최종 유출되는 기상 농도가 일치하였다. BFR 시스템은 전단 거품컬럼에서 기·액 접촉에 의한 물질전달이 일어나며 후단 미생물 반응조에서는 거품 소멸과 미생물의 생분해 반응이 일어나는 2단 구조로 되어 있다. 따라서 Phase T1의 정상상태에서는 거품컬럼에서의 기·액 사이 물질전달율과 미생물 반응조에서의 생분해율이 일치한다고 판단된다.

유입 toluene 농도를 증가시킨 Phase T2에서는 전체 제거

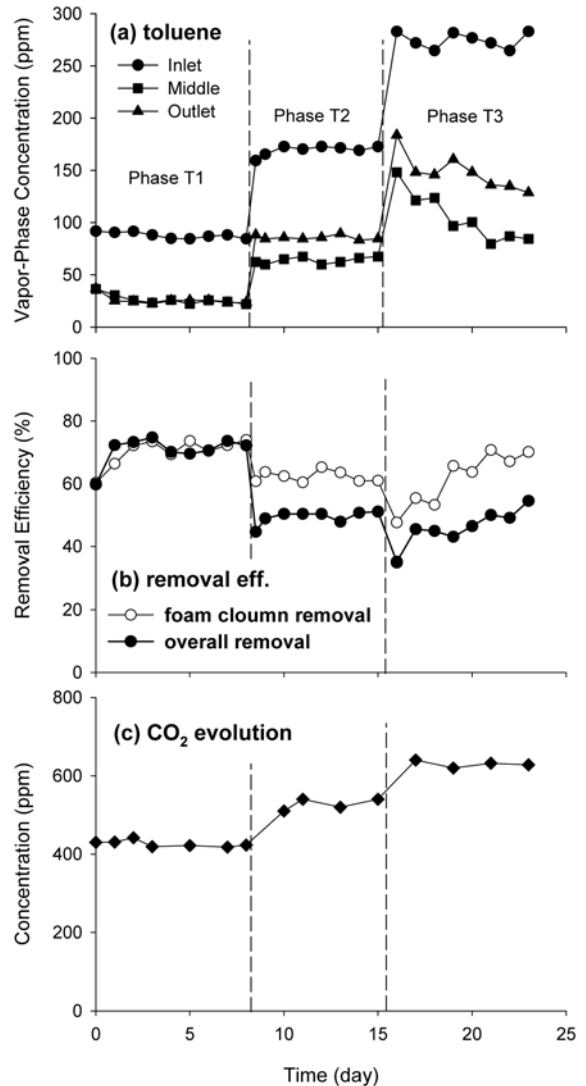


Fig. 2 Responses of the bioactive foam reactor (BFR) treating toluene as a single substrate, (a) changes of the gas phase toluene concentrations, (b) removal efficiencies, and (c) CO<sub>2</sub> evolutions

효율이 약 50% 수준으로 크게 감소하였으며, CO<sub>2</sub> 발생량은 약 518 ppm으로 증가하였다. 유입 농도를 상승시킨 후 나타난 현상은, 거품컬럼을 통과한 이후의 기상 toluene 농도(Fig. 2(a) ■)가 최종 배출되는 toluene 농도(Fig. 2(a) ▲)보다 낮았다. 즉, Phase T2 조건에서는 거품컬럼을 거치면서 액상으로 전달된 toluene의 일부가 미생물 반응조에서 거품이 소멸되면서 탈기(stripping) 작용으로 기체상으로 역배출되어 최종 유출농도가 상승한 것으로 판단된다. 결과적으로 본 연구에서 사용한 미생물의 toluene 제거능에 한계가 있으며 toluene 유입농도가 증가하였을 때 액상에 toluene이 축적된다고 추정된다.

유입 toluene 농도를 270 ppm으로 증가시킨 Phase T3 조건에서는 전체 제거효율이 46%를 나타내었으며, 미생물 반응조를 거치면서 역배출되는 toluene 농도가 더욱 증가하였다. 이 현상은 고농도 유입조건에서 미생물 반응조에서 생분해되지 못하고 축적되는 toluene 양이 늘어남을 의미한다. 결과적으로 물질전달과 미생물반응이 순차적으로 일어나는 BFR을 설계할 때에는 물질전달율과 생분해율이 일치하도록 하여야 하며, 또한 거품 소멸 및 액상 순환 과정에서 액상

의 VOCs가 탈기되지 않도록 반응기 구조의 최적화가 함께 고려되어야 할 것이다.

### 3.2. 혼합 VOCs 제거특성

4가지 VOCs(benzene, toluene, p-xylene, styrene, BTXS)를 동일한 비율로 혼합하여 BFR에 유입시키면서, toluene을 단일 VOC로 처리할 때 나타나는 현상과 비교 실험하였다. 단일 VOC 경우와 동일하게 25일간의 운전기간 동안 전체 유입농도를 4차례 증가시켰다. 초기에는 유입되는 VOCs의 농도 총합이 99 ppm(Phase M1)으로 시작하였으며, 209 ppm(Phase M2), 254 ppm(Phase M3), 394 ppm(Phase M4)으로 순차적으로 증가시켰다. 혼합 VOCs를 유입시킨 경우 BFR의 거품칼럼을 통해 물질전달되어 기체상에서 제거된 VOCs 비율이 80% 이상으로(Fig. 3(b) ○), toluene 단일 VOC를 대상으로 한 경우(Fig. 2(b) ○)보다 높았다. 헨리상수로 비교하면 대상 VOCs의 기·액간 물질전달은 toluene에 비해 큰 차이가 없으며(see Table 1), 오히려 styrene은 다른 물질들에 비해 용해도가 높아 혼합 VOCs 조건에서 거품을 통해 물질전달된 방향족 화합물 양이 늘어났음을 확

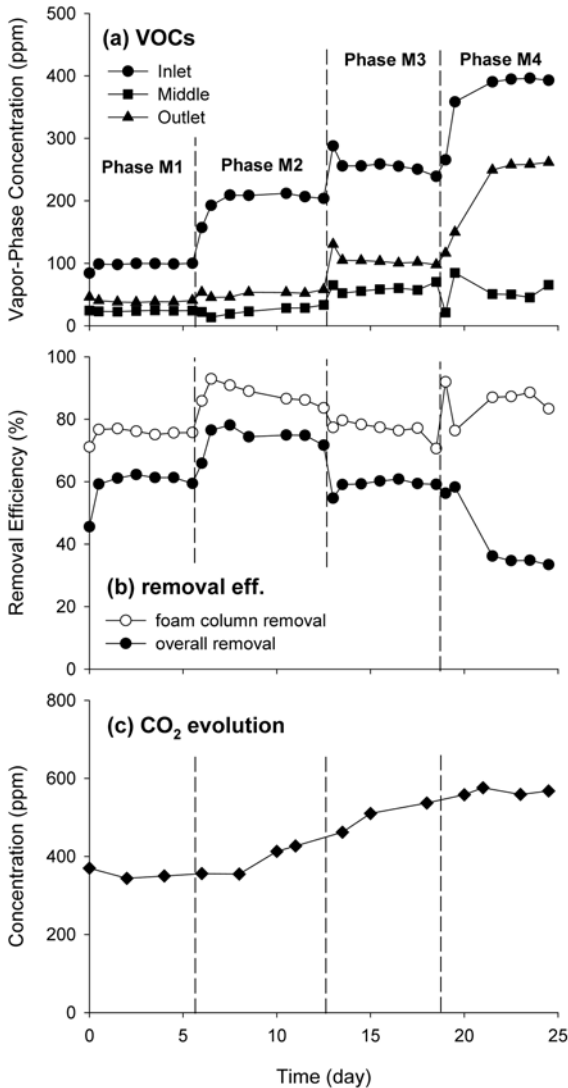


Fig. 3 Responses of the bioactive foam reactor (BFR) treating a mixture of VOCs, (a) changes of the gas phase toluene concentrations, (b) removal efficiencies, and (c) CO<sub>2</sub> evolutions

Table 1. Chemical properties of the VOCs used in this study, Henry's law constant at 30°C, liquid density and molecular weight

VOCs	H <sup>a)</sup> (M/atm)	Density (g/L)	MW (g/mol)
Benzene	0.18	0.879	78.1
Toluene	0.15	0.867	92.1
p-Xylene	0.16	0.861	106.1
Styrene	0.38	0.901	104.1

<sup>a)</sup>source: Rolf (1999)

인할 수 있다.

전체 처리효율 면에서는 초기 Phase M1 조건에서 약 60%의 유입 VOCs가 제거되어 toluene을 유일탄소원으로 하는 경우인 Phase T1보다 낮았으며, CO<sub>2</sub> 발생량도 355 ppm으로 낮았다. 따라서 toluene에 순응되어 있는 미생물에 혼합 VOCs를 공급하여 전체 미생물 생분해도가 낮아졌음을 알 수 있다. 특히 혼합 VOCs 유입농도가 가장 낮은 조건 (Phase M1)에서도 거품칼럼을 통과한 이후의 기상 toluene 농도(Fig. 3(a) ■)가 최종 배출되는 toluene 농도(Fig. 3(a) ▲)보다 낮았으며, 유입된 VOCs의 약 20% 정도가 미생물 반응조에서 탈기되어 배출되고 있다. 전술한바와 같이, 본 연구에 사용한 미생물반응조의 VOCs 제거능에 한계가 있으며 미생물에 의해 분해되지 못한 VOCs는 탈기되거나 액상에 축적되었다고 추정된다.

Phase M2, M3, M4를 거쳐 유입 VOCs 농도를 증가시키는 동안 전체 처리효율은 76%, 59%, 35%로 급격히 감소하였으나, 전체 제거된 분자량 면에서는 큰 차이가 없었다. 따라서 주어진 조건에서는 BFR 미생물의 VOCs 제거능이 유입 농도에 관계없이 일정하였다. 결과적으로 본 연구의 BFR에 대해서는 미생물 농도 증가, 활성도 높은 미생물 첨가, 또는 미생물반응조 부피 증가 등의 방법을 통해 전체 운전효율을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 혼합 VOCs가 유입되는 BFR에서 25일간의 운전기간 동안 각 VOC별 농도 변화를 분리하여 제시하고 있다. 각 물질의 농도변화 양상은 특성은 전체 농도변화 특성과 거의 흡사하다. 다만 styrene 농도가 증가하여도 거품칼럼을 통과한 이후의 기상농도(Fig. 4(d) ■)가 매우 낮으며, 특히 Phase M2와 M3에서 최종 배출되는 styrene 농도(Fig. 4(d) ▲)와 큰 차이가 없었다. 따라서 styrene은 물질 전달율이 높을 뿐만 아니라 미생물에 의한 생분해도도 높았다. 반면 p-xylene은 물질전달율에 비해 전체 처리효율이 매우 낮았으며, Phase M4에서는 11%의 제거효율을 나타내었다. 결과적으로 유입농도가 가장 높은 조건에서 BFR의 각 VOC 생분해도가 가장 극명하게 나타나며, styrene, toluene, benzene, p-xylene 순으로 생분해율이 낮아졌다.

### 3.3. 혼합 VOCs의 동적부하 변동실험

일반적으로 바이오필터는 담체표면에 부착된 미생물에 오염물질의 수동적 전달(passive diffusion)과 분해가 동시에 일어나게 되어 갑작스런 농도변화에 효과적으로 대처하기 어려우며, 결과적으로 충격부하 상태에서 처리효율이 급감한다.

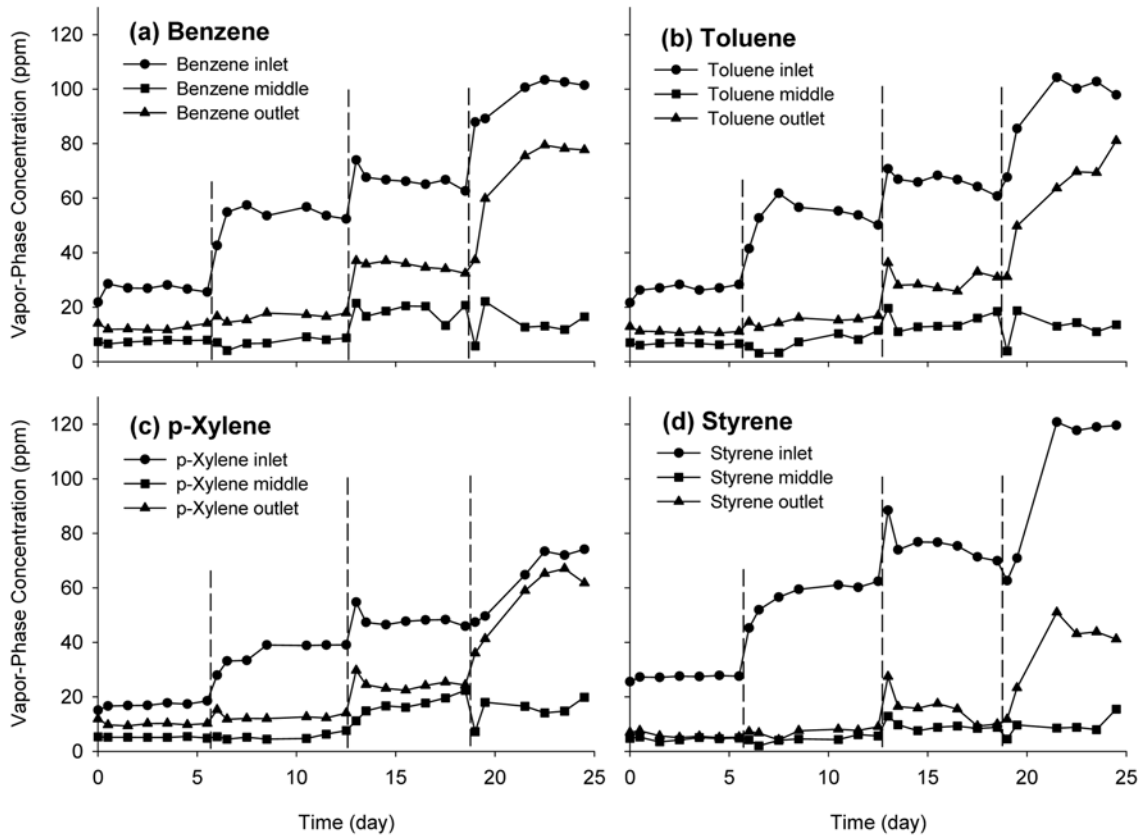


Fig. 4 Changes of the gas phase concentrations of each VOC during the BFR operation, (a) benzene, (b) toluene, (c) p-xylene, and (d) styrene

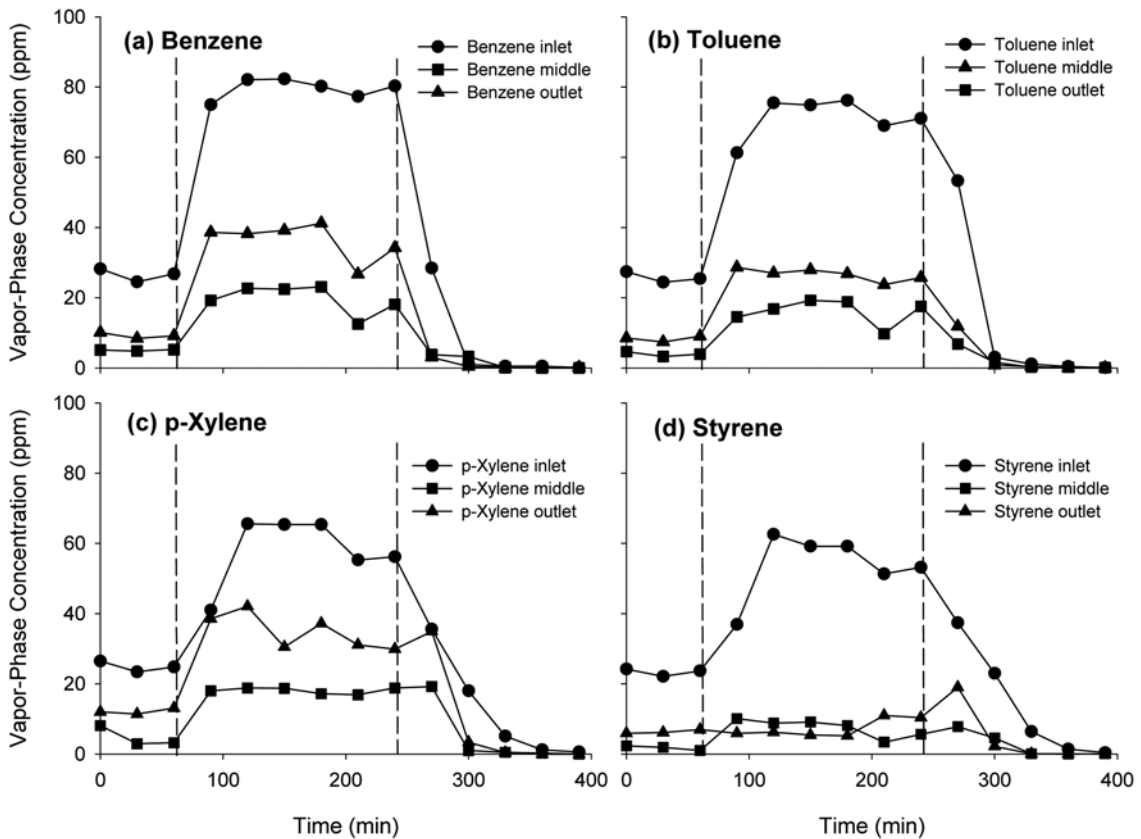


Fig. 5 Changes of the gas phase concentrations of each VOC during the short-term, dynamic loading test, (a) benzene, (b) toluene, (c) p-xylene, and (d) styrene

하지만 BFR의 경우 미생물이 기상의 오염물질에 직접적으로 접촉하는 것이 아니고, 거품이라는 매개체를 통해 기상의 오염물질을 액상으로 전달시키기 때문에 충격변화에 완충

(buffer) 역할을 하게 된다. 따라서 BFR은 기존 담체충진형 바이오필터에 비해 상대적으로 충격부하에 강할 것으로 예상된다.

혼합 VOCs가 일정한 농도(BTXS 각 27 ppm)로 유입되어 안정적으로 운전되는 BFR시스템에 유입농도를 각 70 ppm 수준으로 180분간 증가시킨 동적부하 변동실험을 수행하였다. Fig. 5에 제시된 동적부하 변동실험 결과를 살펴보면, BFR에서 유입농도 대비 액상으로 물질전달된 오염물질의 비율은 유입농도가 급격히 증가한 이후에도 75% 이상을 유지하여 큰 변화가 없었다. 또한 유입부하량이 급격히 증가한 이후에 전체 처리율 변동이 매우 적었다.

변동부하 실험에서 각 VOC 별 농도 변화 양상을 살펴보면, 유입농도 증가 이후 거품칼럼 통과 이후의 기상농도가 10~15 ppm 정도 증가하였으나, styrene의 경우에는 5 ppm 내외의 증가율을 보였다. 특히 p-xylene의 경우에는 다른 물질들과 비교하여 상대적으로 낮은 처리율을 유지하고 있지만, 물질전달율만큼은 일정 수준을 유지하였다. 변동부하 조건에서 각 물질의 전체 처리율은 styrene, toluene, benzene, p-xylene의 순서였으며, 정상상태의 장기운전 결과와 일치하였다. 이상의 결과를 종합하면, 유입부하량이 단기간 급격히 변동하는 상태에서도 BFR 시스템이 안정적으로 유지 운전될 수 있음을 보여준다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 계면활성제 미생물반응기(BFR)의 반응특성을 확인하기 위하여 단일 VOC와 혼합 VOCs를 대상 물질로 하여 BFR의 운전특성을 비교/분석하였다. 혼합 VOCs로는 benzene, toluene, p-xylene, styrene의 4가지 물질을, 단일 VOCs로는 toluene을 선정하고 각각의 BFR을 운전하였으며, 다음과 같은 결과는 얻었다.

1. 본 연구에서 적용한 BFR 시스템은 기체체류시간 40초 조건에서 안정적인 운전효율을 보였으며, toluene에 순응된 미생물에 혼합 VOCs를 유입시킨 경우에도 지체기간 없이 효율적인 물질전달과 생분해 기작을 나타내었다. 또한 25일의 운전기간에 미생물 축적이나 압력손실 증가 현상이 나타나지 않아, 기존 VOCs 저감기술인 담체충진형 바이오필터법의 대안 기술로 적용가능하다고 판단된다.
2. 낮은 toluene 유입농도 조건에서는 거품칼럼에서의 물질전달율과 미생물 반응조에서의 생분해율이 일치하였다. 반면 유입농도가 증가하면서는 거품칼럼을 거치면서 액상으로 전달된 VOCs 일부가 미생물 반응조에서 거품 소멸과 함께 탈기 작용으로 기체상으로 역배출되어 최종 유출농도가 상승하는 현상이 발견되었다.
3. 물질전달과 미생물반응이 순차적으로 일어나는 BFR은 물질전달율과 생분해율이 일치하도록 설계되어야 하며, 본 연구의 BFR 시스템은 미생물 농도 증가, 활성도 높은 미생물 첨가, 또는 미생물 반응조 부피 증가 등의 방법을

통해 전체 운전효율을 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다.

4. 각 VOC 별로는 styrene이 가장 큰 물질전달율과 생분해율을 동시에 나타내었으며, toluene, benzene, p-xylene 순으로 생분해율이 낮아졌다. Styrene 이외의 다른 VOCs는 물질전달율 면에서 큰 차이가 없었으나, 생분해율에 따라 최종 유출농도가 결정되었다. 따라서 BFR 시스템에 대한 추가 연구 및 개량은 물질전달율 증가보다는 미생물 활성도, 전체 미생물량, 혼합 VOCs에 의한 미생물 군집 변동 등에 초점을 맞출 필요가 있다.
5. 동적부하 변동실험 결과 BFR 시스템은 높은 부하량 유입시 거품에 의한 물질전달율이 일정하게 유지되어 안정적인 운전이 가능하였다. 또한 단기 동적변동 조건에서 미생물의 생분해도는 장기운전 결과와 일치하였으며, p-xylene의 처리율은 styrene의 절반 수준에 그쳤다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-10675-0)지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 이정구, 오동익, 송지현, 남경필, 김재영(2003) 콤포스트-페타이어로 구성된 다층여재를 통한 VOCs의 물질이동 및 제거, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제23권 제2B호, pp, 139-146.
- Bielefeldt, A.R. and Stensel, H.D. (1999) Treating VOC-contaminated gases in activated sludge: mechanistic model to evaluate design and performance, *Environ. Sci. Technol.* Vol. 33, pp. 3234-3240.
- Devinny, J.S. Deshusses, M.A., and Webster, T.S. (1999) Biofiltration for air pollution control, Lewis Publishers.
- Kang, E. and Deshusses, M.A. (2005) Continuous operation of foamed emulsion bioreactor treating toluene vapor, *Biotechnol. Bioeng.* Vol. 92, pp. 364-371.
- Kang, E. and Deshusses, M.A. (2003) Development of foamed emulsion bioreactor for air pollution control, *Biotechnol. Bioeng.* Vol. 84, pp. 240-244.
- Kennes, C. and Veiga, M.C. (2001) Bioreactors for waste gas treatment, Kluwer Academic Publishers.
- Ridgway, H.F. Safarik, J. Phioos, D. Carl, P., and Clark, D. (1990) Identification and catabolic activity of well-derived gasoline-degradation bacterial from a contaminated aquifer *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol. 56, pp. 3565-3575.
- Rolf, S. (1999) Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry. <http://www.mpch-mainz.mpg.de/~sander/res/henry.html>

(접수일: 2006.9.28/심사일: 2006.10.24/심사완료일: 2006.10.24)