

계면활성제 미생물반응기를 이용한 기체상 스타이렌 제어

신승규 · 송지현[†]

세종대학교 토목환경공학과

(2006년 4월 18일 접수, 2006년 8월 8일 채택)

Control of Gaseous Styrene Using a Bioactive Foam Reactor

Shoung-kyu Shin · JiHyeon Song[†]

Civil and Environmental Engineering, Sejong Unoversity

ABSTRACT : Biofilters packed with various materials commonly show problems such as low performance and clogging in a long-term operation. Recently, a bioactive foam reactor(BFR) using surfactants has been suggested to ensure efficient and stable VOCs removal performance. This study was mainly conducted to investigate the feasibility of the BFR system using styrene as a model compound. An abiotic and a biotic tests were conducted to estimate a mass transfer coefficient(K_La) and a specific substrate utilization coefficient(k) for the BFR, showing the rate of mass transfer was greater in the BFR than in other diffuser systems. A dynamic loading test also indicated that the performance of the BFR was stable under a shock loading condition. Furthermore, the maximum elimination capacity of the BFR was determined to be 109 g/m³/hr for styrene, which was much higher than those for biofilter systems generally reported in the literature. Overall, the experimental results suggest that the BFR be a potential alternative to the conventional packed-bed biofilters.

Key Words : Bioactive Foam Reactor, Surfactant, VOCs, Mass Transfer Rate

요약 : 휘발성 유기화합물 저감기술인 담체충진형 바이오필터법은 운전이 용이하고 처리비용이 낮다는 장점에도 불구하고, 낮은 운전성과 막힘현상 등의 문제를 안고 있다. 이에 대한 대안으로 계면활성제로 형성된 거품을 사용해 VOCs의 물질전달율과 분해효율을 향상시킨 미생물 반응기(Bioactive Foam Reactor, BFR)가 제안되었다. 본 연구에서는 VOCs 저감기술로서 BFR의 적용가능성을 확인하기 위하여 styrene를 대상으로 실험실 규모 반응기 실험을 수행하였다. 체류시간 30초에서 미생물이 포함되지 않은 abiotic 실험과 biotic 실험을 통해 BFR의 물질전달계수(K_La)와 기질분해율(k) 값을 선정하였으며, 여타 산기방식의 생물반응조에 비해 BFR 시스템의 물질전달율이 월등히 높음을 확인하였다. 동적부하 변동실험 결과 BFR 시스템은 유입 styrene 농도가 급변하는 상황에서도 안정적인 처리효율을 나타내었다. 또한 BFR의 최대분해능은 109 g/m³/hr으로 높게 나타나, 충전담체를 이용하는 전통적인 바이오필터의 대안 기술로 BFR 시스템을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 미생물반응기, 계면활성제, 휘발성유기화합물, 물질전달율

1. 서론

과거 대기환경규제는 먼지, 아황산가스 등 환경에 직접적인 피해를 주는 1차 오염물질의 규제에 초점을 맞추고 있었으나, 최근에는 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs), 악취 등의 보다 광범위한 물질에 대한 규제가 함께 강화되고 있는 추세에 있다. 따라서 산업체에서 배출되는 VOCs나 악취물질을 효과적으로 제어할 수 있는 방지기술에 대한 수요가 증가하고 있다.

배출되는 VOCs나 악취를 제어할 수 있는 방지기술 중에서, 생물학적 처리기술인 biofilter와 biotrickling filter는 담체(packing materials)표면에 부착 성장 미생물을 이용하는 방법으로, 운전이 간편하고 다양한 오염원에 적용하기 용이해 많

은 연구와 실용화가 진행되어 왔다.¹⁾ 하지만 담체 표면에 고정된 미생물을 사용하는 처리기술은 장기 운전시 비활성물질의 축적, 시스템 압력증가와 막힘(clogging) 현상이 발생하는 문제점을 안고 있다.²⁾ 이런 고정화된 부착미생물 방식의 단점을 보완하기 위하여, 최근에는 부유미생물(suspended microorganisms)을 사용해 VOCs나 악취를 처리하는 기술이 속속 등장하고 있다.³⁾

부유성장 미생물을 사용하는 기술 중에서, 계면활성제 거품을 이용한 미생물 반응기(bioactive foam reactor, BFR)는 VOCs로 오염된 공기를 영양염류, 미생물 그리고 계면활성제가 포함된 액상에 넣어 넣어줌으로써, 기상의 오염물질이 액상으로 쉽게 전달되게 한다.^{4,5)} BFR 시스템의 큰 특징은, 일반 산기식 부유성장 미생물 반응기와 다르게, 액상에 포함된 계면활성제가 만들어낸 거품이 기상과 액상의 비표면적을 크게 증가시켜 기상과 액상사이의 물질전달계수(K_La)를 증가시키며, 증가된 물질전달계수로 인해 기상의 VOCs가 액상으로 더욱 빠르게 용해된다.⁶⁾ 또한 계면활성제는 특정 농도 이상

[†] Corresponding author
E-mail: songjh@sejong.ac.kr
Tel: 02-3408-3819

Fax: 02-3408-3332

에서 마이셀(micelle)을 형성하고 VOCs와 같은 소수성 유기물의 용해도를 증가시킨다.⁷⁾ 결국 계면활성제의 이러한 특성에 의해 BFR 시스템에서는 기상의 VOCs가 더욱 많이 용해되며, 담체 대신 거품을 사용함으로써 막힘 현상이 없어지기 때문에 장시간 운전에도 더 유리하게 된다.^{4,5)} 더군다나 일반 바이오 필터의 장기운전은 필연적으로 비활성 물질(예: dead cells, exopolymeric substances)이 축적되면서 운전성능의 저하되는 문제를 가지고 있지만,⁸⁾ 부유성장 미생물을 이용하는 BFR시스템은 지속적인 활성도 유지와 비활성물질의 손쉬운 배출이 가능하여 비활성물질 축적 문제를 함께 해결할 수 있다.

본 연구에서는 VOCs의 효과적인 저감기술로서 계면활성제 미생물반응기(BFR)의 적용타당성을 검증하고자 한다. 본 연구에서는 대표적인 악취물질이며 대기 배출량이 많은 VOC인 styrene을 대상 오염물질로 선정하고, BFR 시스템의 물질전달률과 생분해율을 실험결과와 간단한 수치모델을 적용하여 추정하였다. 이를 바탕으로 유입 styrene 농도가 급변하는 상황에서 BFR 시스템의 반응특성을 고찰하였으며, 최대 분해능(elimination capacity)을 실험적으로 측정하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 실험장치 구성

본 연구에서 사용한 실험실 규모 BFR 시스템은 Fig. 1과 같으며, 거품이 발생하는 거품형성조(foam generating column, 부피 800 mL), 기·액간의 물질전달이 일어나는 거품접촉조(foam contacting column, 부피 2200 mL), 미생물 배양조(cell reservoir, 부피 3800 mL)로 구성되어 있다. Air pump를 이용해 BFR 내부로 공급되는 공기는 syringe pump(Model 200, KD scientific, USA)로 일정한 주입된 styrene에 의해 오염된 후, 산기석(aeration stone)을 통해 거품형성조로 유입된다. 유입된 공기는 미생물 배양조에서 공급되는 계면활성제/미생물 혼합액에 산기되면서 거품이 발생한다. 거품발생조에서 생성된 거품은 거품 접촉조를 통과하면서 기상과 접촉한 후 미생물 배양조를 거치며 거품은 자연스럽게 깨지게 된다. 그 중 일부는 다시 거품발생조로 순환되어 BFR 시스템을 구동하게 된다. 액상으로 전달된 오염물질은 활성미생물에 의해 연속적으로 처리된다. 따라서 기체상 styrene으로 오염된 공기흐

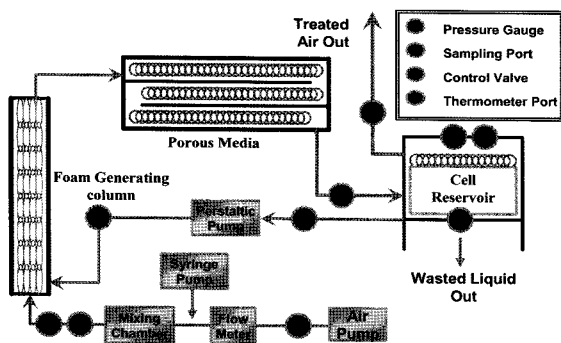


Fig. 1. Schematics of the bioactive foam reactor system.

름은 거품형성조, 거품접촉조, 미생물 배양조를 거쳐 배출되며, 미생물을 포함한 액상은 전체 반응조를 순환(closed-loop)하게 된다.

2.2. Styrene 분해 미생물 배양과 계면활성제

BFR 실험에 사용한 미생물은, toluene 처리용 바이오필터에서 채취한 toluene 분해 미생물 균주에 3개월 이상 styrene을 유일한 탄소/에너지원으로 주입하여 styrene에 순응되도록 배양하였다. BFR 실험 시작 직전에는 3일 간격으로 미생물 배양액 500 mL을 영양염류(nutrient solution)용액 4.5 L에 넣고 반복적으로 기체상 styrene을 주입하면서 배양하여 미생물의 활성도가 일정 수준을 유지하도록 하였다. 이때 사용된 영양염류용액의 조성은 1.36 g/L KH₂PO₄, 1.42 g/L Na₂HPO₄, 3.03 g/L KNO₃, 0.5 g/L(NH₄)₂SO₄와 미량원소 용액 1 mL/L이었다. 미량원소 용액의 조성은 50 g/L MgSO₄ · 7H₂O, 14.7 g/L CaCl₂ · 2H₂O, 2.86 g/L H₃BO₃, 1.54 g/L MnSO₄ · H₂O, 2.5 g/L FeSO₄ · 7H₂O, 0.027 g/L CuCl₂ · 2H₂O, 0.044 g/L ZnSO₄ · 7H₂O, 0.041 g/L CoCl₂ · 2H₂O, 0.025 g/L Na₂MoO₄ · 2H₂O, 0.02 g/L NiCl₂ · 6H₂O이었다.⁹⁾ 본 연구에서 사용한 계면활성제는 TritonX-100(Sigma-Aldrich, USA)이었으며, BFR 내의 계면활성제 농도는 0.014%(v/v)를 유지하였다.

2.3. BFR 운전

본 연구에서는 일차적으로 BFR 시스템의 styrene 물질전달률을 측정하는 실험을 미생물이 없는 상태에서 수행하였다(abiotic test). 물질전달률 측정실험은 반응기에 계면활성제가 포함된 영양염류 용액만을 첨가하고 styrene으로 오염된 공기(유입농도 100 ppm, 체류시간 30초)를 공급하면서 기체상 styrene 농도 변화를 측정하였다. 물질전달률 실험 후에 동일한 조건에서 미리 준비한 활성미생물 배양액을 첨가한 후(biotic test) BFR 시스템에서의 오염물질 생분해율을 측정하였다.

또한 단기간 수행된 부하변동실험(dynamic loading test)과 분해능실험(elimination capacity test)를 통해 BFR 시스템 전체의 styrene 분해특성을 고찰하였다. 부하변동실험은 유입되는 styrene의 농도가 급작스럽게 변할 때 VOCs처리 특성을 측정할 실험으로, styrene 유입농도를 200 → 400 → 0 → 200 ppm으로 2시간 간격으로 변화시키면서, 이에 따른 styrene 유출농도와 CO₂ 배출량 변화를 측정하였다. 분해능 실험은 유입되는 styrene 농도를 순차적으로 증가시킨 후, 각 유입부하량 조건에서 기질 분해율을 측정하여, 전체 BFR 시스템의 분해능을 확인하였다.

BFR 시스템의 운전 과정에서 계면활성제에 의한 거품의 양이 styrene의 처리에 많은 영향을 준다. 따라서 각 실험 전에 거품안정성(foam stability)을 측정하여 항상 동일한 조건에서 실험이 수행되도록 하였다. 거품안정성 측정 방법은 운전 중인 BFR 시스템에서 계면활성제가 포함된 미생물 배양액 100 mL을 확보하여 거품안정성 측정장치(높이 1 m, 직경 5 cm column)에 넣고 30초간 산기하여 모든 액상을 거품

상태로 만든다. 이후 장치 하단에 설치된 유출밸브를 열어 전체 거품 중 80 mL이 배출되는데 걸리는 시간을 측정하였다 (즉, 80% drain time).⁴⁾ 모든 실험조건에서 20~25초의 거품 안정성을 유지하였다.

2.4. 분석 방법

BFR 실험에서 기체 시료는 유입부, 거품 접촉조 후단, 유출부 3곳에 설치한 septa를 통해 gas-tight syringe로 채취하였다. 채취한 기상 시료는 즉시 불꽃이온검출기(FID)가 장착된 GC(HP 6890, USA, Carrier gas-He, FID)에 주입하여 styrene 농도를 측정하였다. BFR 시스템에서 미생물 분해작용으로 발생하는 CO₂ 농도는 CO₂ analyzer(BAISALA, M010139-C)를 이용하여 측정하였다.

3. 수치 모델 구성

BFR에서 계면활성제 거품에 의한 물질전달율과 미생물 기질분해율을 추정하기 위하여 물질수지 방정식을 구성하였다. BFR의 거품생성조, 거품접촉조 그리고 미생물 배양조에서는 VOCs의 물질전달과 분해가 동시에 일어난다고 가정하였으며, 반응조 자체는 하나의 완전혼합반응조(Continuous Flow Stirred Tank Reactor, CSTR)라고 설정하였다. 또한 수치모형을 단순화시키기 위하여 미생물 반응속도식으로 1차반응을 사용하였으며, 활성미생물은 BFR 내부 기체상에서 액체상으로 전달되는 styrene을 지체(lag) 없이 빠른 속도로 분해한다고 가정하였다. 이상의 가정을 바탕으로 시간에 따른 반응기 내부의 기상과 액상 styrene 농도변화는 다음과 같은 연립 미분방정식으로 표시할 수 있다.

- 반응조내 기상 styrene

$$\frac{dC_g}{dt} = \frac{C_{gin} - C_g}{\tau} + K_L a (C_l - \frac{C_g}{H}) \tag{1}$$

- 반응조내 액상 styrene

$$\frac{dC_l}{dt} = -K_L a (C_l - \frac{C_g}{H}) - kC_l \tag{2}$$

- 여기서 C_g : styrene 기상농도(mg/L)
- C_l : styrene 액상농도(mg/L)
- Q : 기상유입유량(L/min)
- τ : 기체체류시간(min)
- k : maximum specific rate of substrate utilization(1/min)
- K_{La} : styrene 물질전달계수(1/min)
- H : styrene의 헨리 상수(mg/L_{gas}/mg/L_{liquid})

물질전달계수 측정을 위한 abiotic test(미생물이 없는)의 경우에는 식(2)에서 미생물 생분해 항이 제거되어 다음 식(3)과 같이 된다.

$$\frac{dC_l}{dt} = -K_L a (C_l - \frac{C_g}{H}) \tag{3}$$

이상의 두 연립 미분방정식을 풀기 위하여 4차 Runge-Kutta 방법으로 수치모형을 구성하였다. 주어진 운전조건에서 BFR에서 배출되는 styrene 유출농도를 수치모형을 이용하여 예측하기 위해서는 물질전달계수(K_{La})와 1차 반응을 가정한 미생물의 기질분해율(k)을 먼저 추정하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 예측치와 실측치간의 오차 제곱합(Sum of normalized square errors)이 최소가 되도록 Microsoft Excel[®]에서 제공하는 “해찾기”(Solver) 기능으로 물질전달계수와 기질분해율을 결정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. Bioactive Foam Reactor의 물질전달 및 생분해도

BFR 시스템에서 styrene의 물질전달속도는, 활성미생물을 넣지 않고 단순히 영양염류와 계면활성제만을 첨가한 abiotic 실험을 통해 평가하였으며, 물질전달에 의한 기상 styrene 농도변화를 Fig. 2(a)에 나타내었다. Abiotic tests 시작 후 유입된 styrene은 계면활성제가 포함된 액상으로 전달되어 기체상으로부터 제거되었으며, 약 80분 이후에 완전히 포화되어 유입 농도와 유출농도가 동일해졌다. Fig. 2(a)에 제시된 유출부 styrene 농도변화(▲)는 완전혼합반응조에서 일반적

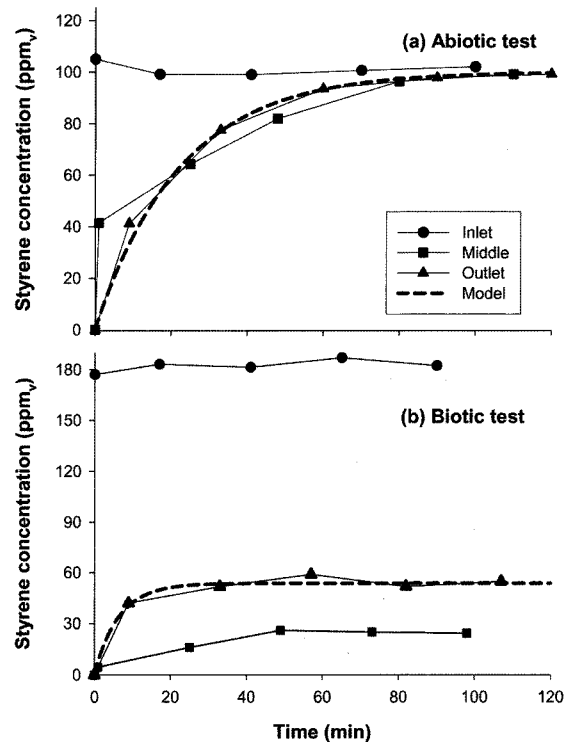


Fig. 2. Changes of gas-phase styrene concentrations (a) in the abiotic test performed to estimate the mass transfer coefficient and (b) in the biotic short-term test to estimate the microbial kinetic coefficient.

으로 나타나는 물질전달 곡선 형태를 나타내고 있으며, 따라서 거품형성조, 거품집축조, 미생물배양조로 구성된 전체 BFR 시스템을 하나의 큰 완전혼합반응조로 가정하여 해석하여도 큰 무리가 없음을 보여준다.

BFR시스템의 생분해도 측정 실험은 활성미생물 배양액을 첨가한 후 수행하였으며, 운전 조건은 물질전달을 실험(Abiotic test)과 유사하였다. Fig. 2(b)에 제시한 생분해도 실험 결과를 살펴보면, BFR 운전 시작 직후부터 활성미생물에 의한 styrene 분해가 빠르게 진행되었으며, 약 50분 이후에는 약 70% 처리효율에서 평형상태(pseudo-steady-state)를 나타내었다. 활성미생물 배양액을 첨가하고 진행한 biotic test 실험결과를 살펴보면, 거품집축조 후단에서 측정된 기체상 styrene 농도(Fig. 2(b) ■) 보다 미생물 배양조를 거쳐 기체가 최종 배출되는 유출부에서 측정된 styrene 농도(Fig. 2(b) ▲)가 더 높게 나타났다. 이러한 결과는 BFR 반응기에서 거품이 형성된 후 거품집축조를 거치면서 styrene이 빠른 속도로 액상으로 전달되며, 액상에 포화된 styrene이 미생물 배양조에서 거품이 소멸되는 과정에서 기체상으로 역배출되어 최종 농도가 약간 상승하는 것으로 추정된다.

앞에서 구성한 BFR 수치 모델에 물질전달을 실험과 생분해도 실험 결과를 대입하여 물질전달계수(K_{La})와 미생물의 기질분해율(k)을 추정하였다. 예측치와 실측치간의 오차제곱합이 최소가 되도록 하여 추정된 BFR의 styrene 물질전달계수(K_{La})는 14.2 min^{-1} 이었으며, 1차 반응을 가정한 미생물의 기질분해율(k)은 0.42 min^{-1} 이었다. Fig. 2(a)와 (b)에는 추정된 물질전달계수와 기질분해율을 적용한 모델예측치(점선)와 실제 측정치(▲)를 나타내고 있으며, 예측치가 실측 결과와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 실험결과와 수치모델을 적용하여 산정한 BFR의 styrene K_{La} 값은 일반 산기식 반응조의 VOCs 물질전달계수 범위($0.1 \sim 0.5 \text{ min}^{-1}$)¹⁰⁾에 비하여 약 30배 이상 큰 값이다. 따라서 BFR 시스템에서는 계면활성제 거품을 이용하여 일반 산기방식에 비해 월등히 높은 VOCs 물질전달율을 얻을 수 있었으며, 결과적으로 미생물에 의한 생분해 효율도 향상시켰다.

4.2. 동적 부하 실험(Dynamic loading test)

BFR시스템의 동적 부하 적용여부 판단을 위한 부하변동 실험을 수행하였다. Styrene 유입농도를 200 ppm으로 일정하게 유지하여 BFR 시스템이 정상상태에 이르렀다고 판단되는 시점(Fig. 3 60분)에서 유입농도를 2배로 상승시켰다. 퇴비 등을 담체로 사용하는 전통적인 biofilter의 경우 충격부하에 취약하여 유입농도가 급작스럽게 증가하면 전체 처리효율이 급격히 떨어지는 현상이 일반적으로 발생한다. 그러나 본 연구에서 실험한 BFR 시스템의 경우, 유입농도가 증가된 후 유출농도가 잠시 증가하였다가 점차 감소하여 약 80여분 후에는 70%의 styrene 제거효율을 보였다. 따라서 본 실험 결과 BFR 시스템이 충격부하에도 빠르게 적응할 수 있음을 확인하였다.

유입 styrene 농도를 급격히 증가시킨 후 BFR 시스템의 반

응을 살펴보면(Fig. 3(a) 60~210분 구간), 거품집축조 후단에서 측정된 기체상 styrene 농도(Fig. 3 ■)는 유입 부하량을 급격히 증가시킨 후에도 변화 없이 거의 일정하게 유지되었다. 이는 계면활성제 거품에 의해 물질전달이 빠르게 일어나, 증가된 유입 styrene이 효과적으로 기체상으로부터 액상으로 전달되었기 때문이라 판단된다. 그러나 미생물 배양조를 거쳐 최종 배출되는 기체상 styrene 농도(Fig. 3 ▲)는 유입농도 증가와 함께 상승하였다가 점차 감소하는 모습을 보였다. 즉, 미생물 반응조에서 활성미생물의 생분해율은 제한되어 있어 기체상에서 전달된 styrene을 효과적으로 분해하지 못하였으며, 급격히 변화된 농도 조건에 적응하는데 시간이 소요되었다. 이 실험결과를 종합적으로 해석해보면, 본 연구에서 제작 사용한 BFR 시스템의 VOC 물질전달율은 빠르지만 미생물 분해율은 제한되어 있는 상태이며(즉, bio-reaction limited), 전체 시스템의 운전효율을 증가시키기 위해서는 미생물 배양조 부피를 상대적으로 증가시킬 필요가 있다.

동적 부하 실험이 시작된 후 210분이 경과한 후에 styrene 유입을 중단시키고 BFR 시스템의 반응 특성을 관찰하였다. 유입 styrene 농도가 감소한 후에도 유출 농도는 짧은 기간이 지나 높게 유지되어, 전 단계에서 액체상에 전달된 styrene이 미생물에 의해 상대적으로 느린 속도로 분해되고 있음을 재확인할 수 있었다. 실험 시작 후 360분에는 유입 styrene 농도를 초기와 동일한 200 ppm 수준으로 증가시켰으며, 거품집축조 후단부와 최종 유출 styrene 농도는 빠른 속도로 실험 초기에 얻은 결과와 동일해졌다.

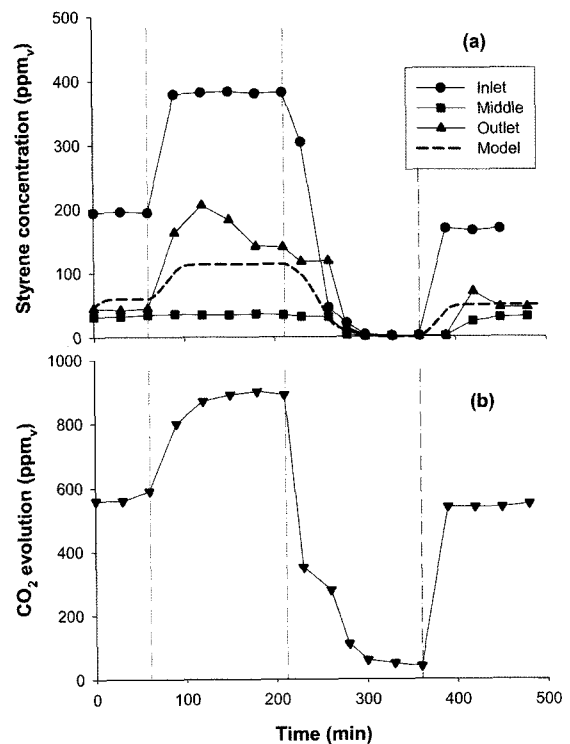


Fig. 3. Changes of the gas-phase (a) styrene and (b) CO₂ concentrations during the dynamic loading test.

Fig. 3(b)에 제시한 CO₂ 농도 변화 양상은 BFR 시스템의 미생물 생분해 효율을 잘 설명해 주고 있다. 실험 초기(0~60분)에 발생한 CO₂ 농도는 약 570 ppm으로 150 ppm의 styrene 분해 시 발생할 수 있는 이론적 최대 CO₂ 발생량 (C₈H₈ + 10O₂ → 8CO₂ + 4H₂O)의 약 47%를 나타낸다. 유입 styrene 농도가 증가된 후에는 CO₂ 발생량도 함께 증가하여 최종적으로 900 ppm의 CO₂ 발생량을 나타내었으며, 이는 이론적 최대 CO₂ 발생량의 약 46% 수준이었다. 따라서 정상상태(pseudo-steady-state)에 도달한 이후 활성미생물에 의한 CO₂ 발생량은 styrene 분해량과 정비례하였다. 유입 styrene 농도를 0 ppm으로 조절한 후에는 CO₂ 배출량도 함께 감소하였으며, 유출부의 styrene 농도곡선과 유사한 모양을 나타내었다. 그러나 유입 및 유출 styrene 농도가 0 ppm인 상태에서 약 40 ppm의 CO₂가 계속 발생하였으며, 미생물의 내생호흡(endogenous respiration)에 의해 것으로 추측된다.

앞에서 구성한 BFR 수치 모델에 추정된 물질전달계수(K_La)와 미생물의 기질분해율(k)을 적용하여, 동적부하 실험 과정의 유출 styrene 농도를 예측하였다. (Fig. 3(a) 점선) 모델 결과는 최종 유출 styrene 농도(Fig. 3 ▲)를 비교적 잘 예측하고 있으며, 따라서 본 연구에서 구성한 수치 모델의 타당성을 검증할 수 있었다. 물론 유입 농도가 급변한 직후에는 모델 예측치가 실측치에 비해 상대적으로 낮게 나와, 모델의 미생물 생분해 반응에 대한 보완이 필요하다고 판단된다.

4.3. BFR의 최대 분해능(elimination capacity)

일반적으로 바이오필터의 VOCs 제거능력은 분해능(elimination capacity, EC; g/m³/hr 단위) 실험으로 확인할 수 있으며, 본 연구에서도 BFR 시스템에 유입되는 styrene 농도를 단기간(2~3시간)에 걸쳐 단계적으로 증가시키면서 분해능(EC)을 측정하였다. Fig. 4의 실험 결과를 살펴보면, 유입 부하량이 증가하면서 BFR의 styrene 분해능도 함께 증가하였으며, 약 109 g/m³/hr에서 최대분해능(maximum EC)을 나타내었다. 본 연구에서 측정된 BFR의 최대분해능 값은, 일반적인 생물학적 VOCs 저감기술의 최대분해능 값에 비해 상당히 높은 편이다.

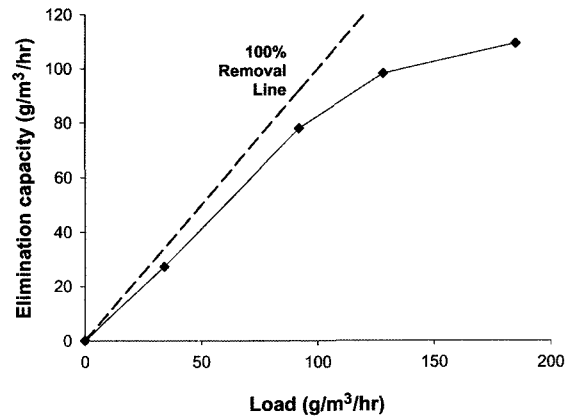


Fig. 4. Styrene elimination capacity curve determined in the bioactive foam reactor.

Table 1에 나타낸 바와 같이 일반적인 바이오필터(biofilter)와 바이오트리클링필터(biotrickling filter)의 최대분해능은 100 g/m³/h를 넘지 못하며, 최근 개발되고 있는 소수의 담체를 이용한 경우에만 최대분해능이 100 g/m³/h를 넘는 것으로 확인된다. 또한 다른 바이오필터와 비교해서 최대분해능(EC)뿐만 아니라 농도 부하량(g/m³)과 체류시간(sec)면에서도 BFR 시스템은 매우 효과적인 생물학적 VOC 저감 시스템임을 알 수 있다. 부유성장 미생물을 이용한 BFR 시스템의 장점은 막힘 현상이 없어 장기 운전에도 더 유리할 것이며, 비활성 물질(예: dead cells, exopolymeric substances)의 배출 또한 간편하여 미생물의 지속적인 활성도 유지를 통해 일반 바이오필터의 문제점들을 극복할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 계면활성제 거품과 부유성장 활성미생물을 이용하여 VOCs의 물질전달율과 생분해율을 향상시키기 위해 제안된 bioactive foam reactor(BFR)의 적용 타당성을 확인하기 위해 수행되었다. BFR 시스템은, 기존의 생물학적 VOCs 저감기술인 바이오필터와는 다르게 장기간 운전시에도 막힘(clogging)이 없고 상대적으로 활성도가 뛰어난 부유성장 미

Table 1. Bioreactor types, operating conditions and maximum elimination capacities for styrene-degrading biofiltration systems reported in the literature

Bioreactor Type	Empty Bed Gas Residence Time (sec)	Inlet Concentration (g/m ³)	Maximum Elimination Capacity(g/m ³ /h)	Packing Material	Reference
Biotrickling filter	90~360	0.65~2.6	32	Coal particles	(11)
Biotrickling filter	22.5~225	0.03~0.1	32	Lava stone	(12)
Biotrickling filter	40	0.7	57.5	Ceramic pellets	(13)
Biofilter	25~92	0.1~2.4	62	Perlite	(14)
Biofilter	58~108	0.05~1.2	30	Peat	(15)
Biofilter	6.5~26	0.2~1.0	140	Perlite	(16)
Biofilter	7.5~30	0.05~1.2	63	Peat with glass beads	(17)
Bioactive foam reactor system	30	0.4~1.7	109	Surfactant, microorganism	this study

생물을 이용했다는 점에서 더욱 효과적인 시스템이라 판단된다. 본 실험 결과를 바탕으로 도출한 결과는 다음과 같다.

본 연구에서 제작 운영한 BFR시스템은 정상상태에서 약 70% 수준의 기체상 styrene 제거 효율을 나타내었으며, 최대 분해능이 약 $109 \text{ g/m}^3/\text{hr}$ 으로 문헌에 제시된 담체 충전형 바이오필터의 최대분해능보다 높았다. 따라서 BFR 시스템은 기존 바이오필터의 대안 기술로 사용 가능하다고 판단된다.

동적부하변동 실험 결과, BFR 시스템은 유입 styrene 농도가 급변하는 조건에서도 상대적으로 안정한 운전효율을 나타내어 충격부하에도 빠르게 적응할 수 있음을 확인하였다.

BFR 시스템의 운전효율을 예측 평가하기 위한 단순 수치 모델을 구성하였으며, 실측 결과를 대입하여 물질전달계수 (K_La)와 미생물의 기질분해율(k)을 추정하였다. 본 BFR 시스템으로 추정한 styrene 물질전달계수(K_La)는 14.2 min^{-1} 으로 일반 산기식 반응조의 VOCs 물질전달계수 범위보다 약 30 배 이상 큰 값을 나타내어 계면활성제 거품을 이용함으로써 높은 VOCs 물질전달율을 얻을 수 있었다. 또한 수치 모델 예측치가 BFR의 유입농도 동적변화 상태를 비교적 잘 나타내고 있어 수치 모델의 타당성(validity)을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 이용한 BFR 시스템에서는 거품집축조 후단에서 측정된 기체상 styrene 농도가 미생물 배양조를 거쳐 최종 배출되는 styrene 농도보다 낮았다. 이는 미생물 배양조에서의 생분해 속도가 전체 반응의 율속단계(rate-limiting step)임을 의미하므로 미생물 배양조 부피를 증가시킨다면 전체 운전효율을 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다.

사 사

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

참고문헌

1. Van Groenestijin, J. W. and Hesselink, P. G. M., "Biotechniques for air pollution control", *Biodegradation*, **4**, 283~301(1993).
2. Devigny, J. S., Deshusses, M. A., and Webster, T. S., *Biofiltration for air pollution control*, Lewis Publishers (1999).
3. Kennes, C. and Veiga, M. C., *Bioreactors for waste gas treatment*, Kluwer Academic Publishers(2001).
4. Kang, E. and Deshusses, M. A., "Continuous operation of foamed emulsion bioreactor treating toluene vapor," *Biotechnol. Bioeng.*, **92**, 364~371(2005).
5. Kang, E. and Deshusses, M. A., "Development of foamed emulsion bioreactor for air pollution control," *Biotechnol. Bioeng.*, **84**, 240~244(2003).
6. Muligan, C. N., Yong, R. N., and Gibbs, B. F., "Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review," *Eng. Geol.*, **60**, 371~380(2001).
7. Huang, H. L. and Lee, G. Whei-May., "Enhanced naphthalene solubility in the presence of sodium dodecyl sulfate: effect of critical micelle concentration," *Chemosphere*, **44**, 963~972(2001).
8. Cherry, R. S. and Thomapson, D. N., "The shift from growth to nutrient-limited maintenance kinetics during acclimation of a biofilter," *Biotechnol. Bioeng.*, **56**, 330~339(1997).
9. Ridgway, H. F., Safarik, J., Phioos, D., Carl, P., and Clark, D., "Identification and catabolic activity of well-derived gasoline-degradation bacterial from a contaminated aquifer," *Appl. Environ. Microbiol.*, **56**, 3565~3575 (1990).
10. Bielefeldt, A. R. and Stensel, H. D., "Treating VOC-contaminated gases in activated sludge: mechanistic model to evaluate design and performance," **33**, 3234~3240 (1999).
11. Lu, C., Lin, M. R., and Lin, J., "Removal of Styrene Vapor from Waste Gases by a Trickle-Bed Air Biofilter," *J. Hazard. Materials.*, **82**, 233~245(2001).
12. Pol, A., FJJ V. H., HJM, O. C., and Drift, C., "Styrene Removal from Waste Gas with a Bacterial Biotrickling Filter," *Biotechnol. Letters.*, **20**, 407~410(1998).
13. Sorial, G. A., Smith, F. L., Suidan, M. T., Pandit, A., Biswas, P., and Brenner, R. C., "Evaluation of trickle-bed air biofilter performance for styrene removal," *Water Res.*, **32**, 1593~1603(1998).
14. Cox, H. H. J., Moerman, R. E., van Baalen, S., van Heiningen, W. N. M., Doddema, H. J., and Harder, W., "Performance of a styrene-degrading biofilter containing the yeast *Exophiala jeanselmei*," *Biotechnol. Bioeng.*, **53**, 259~266(1997).
15. Arnold, M., Reittu, A., von Wright, A., Martikainen, P. J., and Suihko, M-L., "Bacterial degradation of styrene in waste gases using a peat filter," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **48**, 738~744(1997).
16. Paca, J., Koutsky, B., Maryska, M., and Halecky, M., "Styrene degradation along the bed height of perlite biofilter," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **76**, 873~878(2001).
17. Zilli, M., Converti, A., and Felice, R. D., "Microkinetic and quantitative microbial investigation on a bench-scale biofilter treating styrene-polluted gaseous streams," *Biotechnol. Bioeng.*, **83**, 29~38(2003).