

## 중공사막 결합형 생물반응기를 이용한 기체상 톨루엔 제거 특성 검토

손영규\* · 김용식\* · 김지형\* · 송지현†

\*고려대학교 사회환경시스템공학과 · 세종대학교 토목환경공학과

(2005년 3월 7일 접수, 2005년 8월 22일 채택)

### Performance of a Hollow Fiber Membrane Bioreactor for the Treatment of Gaseous Toluene

Young-Gyu Son\* · Yong-Sik Kim\* · Jee-Hyeong Khim\* · Ji-Hyeon Song†

\*Department of Civil & Environmental Engineering, Korea University

Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University

**ABSTRACT** : In this study, a novel bioreactor system using a submerged hollow fiber membrane module (so called hollow fiber membrane bioreactor, HFMB) was applied to investigate feasibility and biodegradation capacity of the system for the treatment of gaseous toluene. First, an abiotic test was conducted to determine the mass transfer coefficient, showing the value was similar to that obtained from a diffuser system using fine bubbles. Second, in the presence of toluene-degrading microorganisms, the HFMB was operated at different inlet toluene loading rates of 50, 100, 500 g/m<sup>3</sup>/hr, and overall removal efficiencies were maintained in the range of 70~80%. In addition, elimination capacities (EC) were increased up to 800 g/m<sup>3</sup>/hr, which was substantially higher than maximum ECs for toluene reported in the biofiltration literature. Consequently, the HFMB was considered as an alternative method over other conventional VOC-treating technologies.

**Key Words** : Hollow Fiber Membrane Bioreactor, Toluene, Elimination Capacity, Mass Transfer

**요약** : 본 연구는 침지형태로 운전되는 중공사막 결합형 생물반응기(HFMB) 시스템의 VOC 처리능력 및 안정성을 평가하기 위하여 수행되었다. 일차적으로 미생물이 없는 조건에서 VOC의 물질전달을 알아보기 위한 abiotic test를 통해, 본 연구에서 사용한 HFMB는 미세기포를 이용한 산기관과 유사한 물질전달을 나타냄을 확인하였다. 그러나 HFMB는 일반 산기관 시스템과는 달리 기체 유속과 중공사막 개수를 증가시켜 물질전달을 더욱 증대시킬 수 있을 것으로 예측된다. 또한 반응조에 톨루엔 분해 미생물을 첨가하고 다양한 유입부하 조건에서의 기체상 톨루엔 제거 실험을 수행하였는데, 50, 100, 500 g/m<sup>3</sup>/hr의 유입부하 조건에서 70~80% 수준의 처리효율을 얻을 수 있었다. 추가적으로 수행된 분해능 실험에서는 최대 800 g/m<sup>3</sup>/hr 이상의 분해능을 실험적으로 확인하여, 문헌에 제시된 기존 생물여과공법의 최대분해능(50~100 g/m<sup>3</sup>/hr) 보다 월등히 높았다. 따라서 HFMB는 기존의 VOC 저감기술을 대체할 수 있는 친환경적인 기술이라고 판단된다.

**주제어** : 중공사막, 생물반응기, 톨루엔, 유입부하, 분해능, 물질전달

## 1. 서론

휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 대기 중에서 태양빛에 의해 질소산화물(NOx)과 광화학적 산화반응을 일으켜 지표면 오존농도 증가와 스모그현상을 일으키는 유기 화합물질을 총칭한다.<sup>1,2)</sup> 내연 기관에서 배출되는 NOx, SOx와 함께 대표적인 대기 환경오염의 주요인인 VOCs는 지구온난화, 성층권의 오존층 파괴, 대기중 악취 유발, 식물에 대한 악영향 등의 이유로 최근 그 처리문제가 중요시되고 있다.

VOCs를 처리하기 위한 공법으로 기존에는 흡수, 흡착, 열소각, 응축 등의 물리화학적공법이 많이 사용되었지만, 최근에는 보다 경제적이거나, 친환경적인 공법인 생물학적공법에

대한 연구 및 적용이 활발하게 이루어지고 있다. 대표적인 생물학적 처리공법으로는 biotrickling filters, bioscrubbers 등의 생물여과공법이 있는데, 이들 공법은 반응기 내부에 천연 혹은 합성 소재를 담체(media)로 충전하여 미생물이 그 여체에 부착성장하는 조건에서 유입되는 VOCs를 처리하는 시스템이다.<sup>3,4)</sup> 생물여과공법으로 대표되는 이러한 생물학적처리공법은 경제적이거나, 유해부산물의 생성이 적고, 2차 처리 공정이 불필요하다는 장점을 가지고 있지만, 높은 부하량 적용의 한계, 미생물의 과다성장으로 인한 막힘현상(clogging), 변동 유량에 대한 불안정성 등으로 인하여 실제 산업현장에 장기간 적용하기에는 아직 무리가 있는 것으로 판단된다.<sup>3)</sup>

최근 이러한 생물여과공법의 단점을 극복하기 위한 노력의 일환으로 멤브레인, 특히 중공사막을 이용한 생물반응기(hollow fiber membrane bioreactor, HFMB) 연구가 한창 진행 중이다. 멤브레인을 이용한 생물반응기를 이용하면 다음과 같은 이점을 고려할 수 있다.<sup>3)</sup>

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

Fax: 02-3408-3332

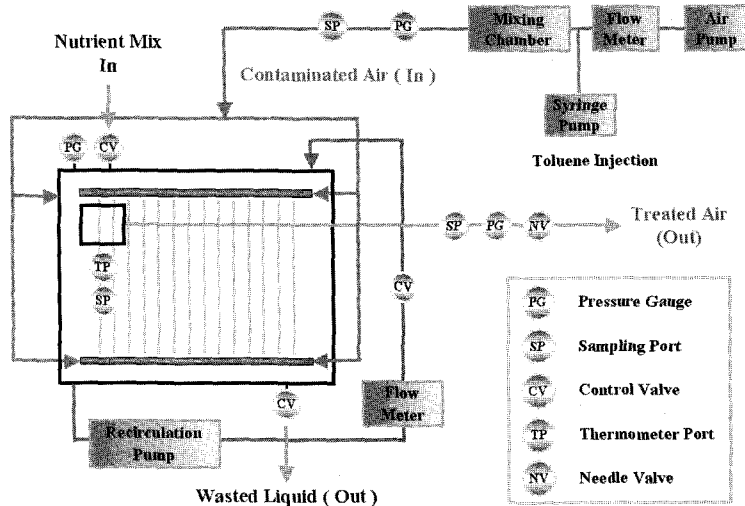


Fig. 1. Schematic of the Hollow-fiber membrane bioreactor system.

- (1) 멤브레인의 넓은 표면적(specific area)과 짧은 전달 거리(diffusion length)를 통하여 물질전달이 보다 효과적으로 이루어질 수 있다.
- (2) 반응기 내부의 미생물 농도를 높게 유지할 수 있어 높은 제거효율을 지속할 수 있다.
- (3) 미생물의 양적/질적 조절이 가능하여 막힘현상 등을 예방할 수 있다.
- (4) 주기적인 반응기 내부 액 배출을 통하여 대사부산물의 축적을 제어할 수 있다.

HFMB는 주로 membrane contactor type의 반응기가 주로 이용되고 있는데, 이는 중공사막 모듈 내부로 유입되는 오염공기가 물질전달에 의하여 중공사막 외부, 즉 반응기 내부로 전달되고, 물질전달 되지 못한 나머지 오염공기는 반응기 외부로 배출되는 형태이다. 이러한 contactor 형식의 반응기를 이용하여 Pressman 등은 TCE 처리,<sup>5)</sup> Ergas 등은 톨루엔 처리,<sup>6,7)</sup> Langenhove 등은 dimethyl sulphide와 톨루엔 처리<sup>8)</sup>에 멤브레인 생물반응기를 적용하였다.

Contactor 형식의 반응조 이외에도 산기관(diffuser) 형태로 멤브레인 반응조를 운전할 수 있는데, 이는 멤브레인 모듈 내부로 유입된 VOC 함유 공기가 멤브레인의 공극을 통하여 액상으로 확산되며, 이때 멤브레인 표면에 부착 성장하는 미생물과 반응기 내부의 액상에 부유 성장하는 미생물에 의하여 VOC 분해가 일어나게 되어 위에서 언급한 생물반응기의 장점을 극대화할 수 있다.

본 연구는 산기관 형태로 운전되는 중공사막 결합형 생물반응기(HFMB) 시스템의 VOC 처리능력 및 안정성을 평가하기 위하여 수행되었다. 우선 미생물이 없는 조건에서 VOC의 물질전달을 알아보기 위한 abiotic test를 수행하였다. 또한 다양한 VOC 유입부하 조건에서의 처리효율 및 분해능 실험을 통하여 기존 공법에 대한 비교 검토 및 대체 공법으로의 가능성 여부를 확인하였다. 본 실험에서는, 기존 VOCs 처리공법 연구에 대상 단일 오염물로 많이 선택되어 사용되고 있는 톨루엔을 선정하여 적용하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 실험 재료

#### 2.1.1. 반응기 구성

실험실 규모 중공사막 결합형 생물반응기(Hollow Fiber Membrane Bioreactor, HFMB)는 1단의 중공사막 모듈이 미생물 배양액이 담긴 반응조 하단에 설치된 침지형으로, 전체 구성은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 에어펌프에 의해 일정 유량으로 유입된 공기는 톨루엔 원액이 담긴 syringe pump에 의해 주입 (0.16~1.6 mL/hr)되는 톨루엔과 만나게 되고, 5 L의 부피를 갖는 mixing chamber를 거치면서 톨루엔은 기화되어 공기와 충분히 섞이게 된다. 톨루엔으로 오염된 공기는 반응기의 양쪽 유입부를 통해 중공사막 모듈로 유입되어 반응기 내부 액상으로 산기된다. 유입된 톨루엔은 1차적으로는 중공사막에 부착 성장하는 미생물에 의해, 2차적으로는 반응기 내부의 액상에서 부유 성장하는 미생물에 의해 분해·제거된다. 이상의 과정에 의해 처리된 공기는 반응기 상단에 위치한 유출부로 배출된다. 반응기 내부 액상은 전달된 오염물의 원활한 섞임을 유도하기 위하여 펌프를 통하여 일정 유량 (6 L/min)으로 순환시켜주었다. 또한 미생물에 의한 유기물 분해가 최적의 조건에서 이루어지도록 하기 위하여 반응기 내부 용액을 매일 일정량 (0.3 L/day) 교체하였다. 액상교체는 충분한 영양물질을 미생물에 공급한다는 의미 이외에도 필요 이상의 미생물 성장을 제어하며, 반응기 내부에 대사 부산물이 축적되어 생길 수 있는 여러 악영향을 예방하는 측면이 있다.

#### 2.1.2. 중공사막

사용한 중공사막은 본래 폐수처리용으로 개발 사용되는 제품을 본 실험에 적용하기 위하여 친수화 처리 공정을 생략, 표면이 소수성 특성을 갖도록 제작하였다. 중공사막의 자세한 사양은 Table 1과 같다.

**Table 1.** Specifications of the hollow fiber membrane used in this study

Items	Specification
Material	polyethylene
Nominal pore size	0.4micron
O.D. / I.D. / Wall thickness	650 / 410 / 120 micron
Fiber length	0.3 m
Number of fibers in a module	7 × 75

본 연구에서는 각 실험에서 동일한 멤브레인 조건을 유지하기 위하여 멤브레인을 세척한 후 사용하였다. 멤브레인 세척은 1차적으로 흐르는 물을 이용하여 멤브레인 표면의 이물질이나 미생물을 제거한 뒤, 2차적으로 NaOCl 수용액을 이용하여 공극사이에 끼어있는 잔존 미생물을 처리하였다. 이때 공극내부로 NaOCl 용액이 유입될 수 있도록 에탄올(ethanol)을 이용하여 표면을 친수화하는 단계를 거치도록 하였다.

### 2.1.3. 톨루엔 분해 미생물 배양 및 영양염류 조성

실험에 사용된 미생물은 하수처리장 반송슬러지를 채취하여 약 6개월간 폐놀을 유일 탄소원 및 에너지원으로 주입하여 배양한 후, 본 실험 2개월 전부터 톨루엔을 유일 탄소원 및 에너지원으로 바꾸어 20 L 용기에서 배양하였다. 본 실험에서 사용한 영양염류의 조성은 Ridgway(1990)<sup>9)</sup>의 조성을 일부 개선한 것으로 기본적으로 반응기 내에서 톨루엔을 분해하는데 필요한 질소, 인 등의 영양분의 고갈이 일어나지 않게 하는 것을 원칙으로 하였다. 주입되는 영양염류는  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  2.72 g/L,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  1.42 g/L,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  1.32 g/L,  $\text{KNO}_3$  3.03 g/L를 주 영양염류로 하고, 미량 영양염류 용액을 1 mL/L 주입하여 조제하였다.

## 2.2. 반응조 운전조건

### 2.2.1. 물질이동 실험 (Abiotic test)

본 반응조에서 미생물이 없는 조건에서 톨루엔의 물질이동 속도를 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 실험 시작 전에 유입유량 6 L/min, 유입농도 40 ppmv, 반응조내 온도 25~30°C의 조건으로 톨루엔을 5~6시간 정도 미리 주입하여 실험 시 반응기 및 기타 실험 재료로의 흡착으로 인한 영향을 최소화하였다. 이후 실험 시작과 함께 톨루엔 유입농도를 200, 400, 40 ppmv로 순차적으로 변화시키면서 유입부, 유출부의 기상 농도 및 반응기 내의 액상농도를 측정하여 톨루엔의 상간 이동현상을 분석하고, 각 단계에서의 물질전달계수를 구하였다.

### 2.2.2. 미생물을 이용한 반응기 운전 (Biotic test)

다양한 VOC 유입부하 조건에서 HFMB의 처리효율 및 분해능 등을 평가하기 위하여 6 L/min의 유입유량 조건(기체 체류시간 30초)에서 유입 톨루엔부하량을 50, 100, 500  $\text{g/m}^3\text{hr}$ 으로 하여 각각 5일간 운전하였다. 각 운전조건동안

**Table 2.** Operating conditions used in each experiment

Parameter	L-50	L-100	L-500
Reactor Volume (L)	3		
Inlet Toluene Loading Rate ( $\text{g/m}^3\text{hr}$ )	50	100	500
Inlet Gas Flow Rate (L/min)	6		
Gas Retention Time (sec)	30		
Liquid Medium Exchange Rate (L/day)	0.3		
Liquid Recirculation Flow Rate (L/min)	6		
Temperature in Reactor (°C)	25~30		

톨루엔 분해효율, 미생물 농도 등을 측정하였고, 5일 이후 각 조건에서의 HFMB 처리능을 알아보기 위하여 EC(Elimination Capacity) test를 수행하였다. 이상의 실험 운전조건을 Table 2에 정리하여 나타내었다.

## 2.3. 분석방법

톨루엔 분해 미생물의 반응기 내 성장 정도를 알아보기 위하여 내부 액상의 COD를 측정하였다. 반응기 내부의 액상에서 채취된 시료는 질소 가스를 이용하여 잔존 톨루엔을 날려버린 뒤 Standard Method of the closed reflux, colorimetric method를 이용하여 분석하였다.<sup>10)</sup>

기상의 톨루엔 유입농도 및 유출농도는 반응기의 유입부 및 유출부 sampling port에서 SampleLock Valve를 추가시킨 500  $\mu\text{L}$  Hamilton gas tight syringe를 이용하여 기상으로 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 FID 및 HP5 column이 장착된 HP6890 GC에 manual injection하여 톨루엔 농도를 측정하였다. 액상 톨루엔 농도는 0.1  $\mu\text{m}$  공극의 filter로 부유물질을 제거한 후, Purge & Trap (Tekmar)이 장착된 위와 동일한 사양의 HP6890N GC에 주입하여 분석하였다. GC는 캐리어 가스로 헬륨을 이용하였고, 오븐, 주입부, 검출부 온도를 각각 160, 160, 250°C로 하여 운전하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 물질전달 실험 (Abiotic test)

기상의 톨루엔이 증공사막을 통하여 액상으로 물질전달되는 속도를 측정하기 위하여 미생물이 없는 조건에서 톨루엔의 기상에서 액상으로, 액상에서 기상으로의 물질이동 실험을 수행하였다. 반응기 내부의 톨루엔 흡착으로 인한 영향을 최소화하기 위하여 실험 시작 전에 40 ppmv 농도의 톨루엔을 5~6시간 정도 미리 주입하였으며, 실험은 40→200 ppmv, 200→400 ppmv, 400→40 ppmv의 세 단계에 걸쳐 진행하였다. 각 단계별 유입부, 유출부 기상 톨루엔 농도 및 반응기 내부의 액상 톨루엔 농도의 측정결과를 Fig. 2에 나타내었다.

세 단계에 걸친 유입부의 톨루엔 농도 변화로 인하여 유출부의 농도 및 반응기 내부의 액상 농도는 유입부의 농도 변화와 같은 유형으로 증가 및 감소하였다. 이러한 실제 농

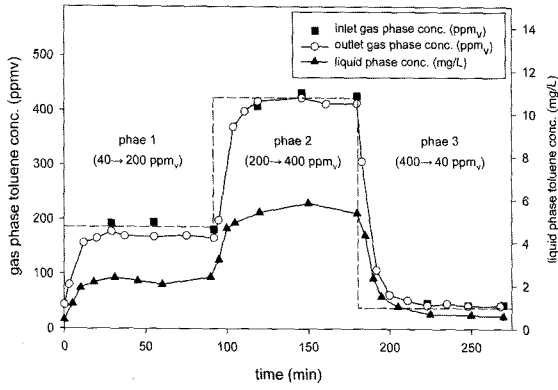


Fig. 2. Changes in toluene concentration in the gas and the liquid phase during the abiotic test.

도 변화를 바탕으로 기상의 톨루엔이 멤브레인을 거쳐 액상으로 물질전달되는 정도를 나타내는 톨루엔의 물질전달 계수( $K_La$ ) 값을 다음의 식을 이용하여 계산하였다.<sup>11)</sup>

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C) \quad (1)$$

여기서,  $K_La$ : overall mass transfer coefficient (1/s),  $C_s$ : liquid phase concentration in the equilibrium with gas (mg/L),  $C$ : liquid phase concentration (mg/L).

위 식을 선형화하고 실험결과에 대입하여 물질전달 계수를 계산한 결과, 톨루엔이 기상에서 액상으로 물질전달되는 phase 1, 2의 경우 0.19/min, 0.12/min의 물질전달계수를, 액상에서 기상으로 물질전달되는 phase 3의 경우 0.11/min의 물질전달계수를 얻었다. 따라서 이들을 전체 평균한 0.137/min를 대표 물질전달계수,  $K_La$ 로 산정하였으며, Fig. 3에 실제 측정된 반응기 내부의 액상 톨루엔 농도와 산정된 물질전달계수를 이용하여 예측된 톨루엔 액상 농도를 나타내었다.

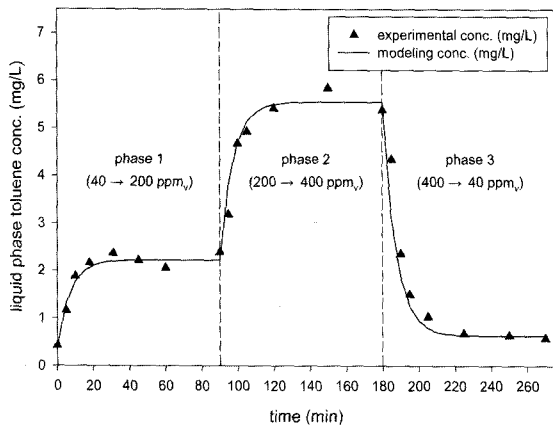


Fig. 3. Comparison of the liquid phase toluene concentrations measured in the HFMB system with the modeling results.

본 연구의 물질전달계수는 기존 연구의 생물학적 반응조 VOCs 물질전달계수와 비교가능하다. 활성슬러지 반응조에 오염된 공기를 미세 기포 형태로 주입하는 연구에서는 톨루엔 물질전달계수가 주입된 공기유량에 따라 23~30℃에서 0.084~0.237/min으로 보고되었으며,<sup>12)</sup> 본 연구에서 추정된 물질전달계수가 여기에 해당한다. 또한 bubbleless hollow fiber membrane을 이용하여 액상으로 산소전달을 목적으로 하는 반응조 연구에서 Ahmed와 Semmens<sup>13)</sup>는 다음과 같이 무차원 변수들을 이용하여 물질전달계수를 예측할 수 있는 경험식을 제시하였다.

$$S_h = 0.0184(R_e)^{0.83}(S_c)^{0.33} \quad (2)$$

여기서,  $S_h$ : Sherwood's number( $S_h = kd/D$ ),  $R_e$ : Reynold's number( $R_e = d_e u/v$ ),  $S_c$ : Schmidt's number( $S_c = \nu/D$ ). 물질전달계수( $k$ )는 Sherwood 관계에 의하여 구할 수 있는데, 이는 무차원 상수인 Reynold's number( $R_e$ )와 Schmidt's number( $S_c$ )의 조합으로 이루어져 있는 경험식을 이용한 것이다. 위의 경험식을 이용하여 얻어낸 물질전달계수( $K_La$ ) 값은 0.298/min으로, 본 실험 결과로 추정된 값보다 약 2배 크게 나타났다. 그러나 본 연구에서 추정된 물질전달계수 값은 기체의 유속이나 멤브레인 개수 등을 조절하지 않고 실험한 결과이므로, 기체 유속이나 전체 반응조에 첨가된 멤브레인 개수를 증가시키면 더 큰 물질전달계수를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

### 3.2. 미생물에 의한 VOC 제거실험 (Biotic test)

본 실험은 유입유량을 6 L/min(체류시간 30초)으로 고정하고, 톨루엔의 유입농도를 각각 100, 200, 1,000 ppmv (유입부하량 50, 100, 500 g/m<sup>3</sup>/hr)로 변화시키면서 수행하였으며, 유입부/유출부의 톨루엔 농도 측정을 통한 톨루엔 처리효율 분석, 반응기 내부의 미생물 양 파악을 위한 내부 액의 COD 측정, 톨루엔 최대 분해능 파악을 통해 HFMB의 톨루엔 분해 특성을 파악하였다. 각 실험 시작 전에 멤브레인 세척 및 반응조 내 청소를 동일하게 수행하여 항상 같은 조건에서 실험을 시작할 수 있게 하였다.

#### 3.2.1. HFMB의 톨루엔 제거효율 분석 및 미생물 농도 변화

다양한 유입부하 적용 조건에서의 톨루엔 제거효율 변화는 다음 Fig. 4에 나타내었다. 운전을 시작한 직후의 톨루엔 제거효율은 첨가된 미생물 배양액의 농도와 활성도에 따라 약 30~80% 정도로 나타났지만 운전 시작 후 2일 후에는 70% 이상의 높은 처리효율을 나타내었다. 특히, 운전 초기에는 각 반응조에서 유입부하의 차이에 따라 톨루엔 제거효율 차이를 확인할 수는 있었으나, 반응기가 안정화된 이후 L-50, L-100, L-500 실험 모두에서 톨루엔 처리효율이 70~80% 수준으로 거의 유사한 결과를 얻었다. 이는 낮은 부하 조건에서 더 높은 분해효율을 얻을 수 있을 것이라는 일반적인 예상과는 다른 결과인데, 반응조내 액상으

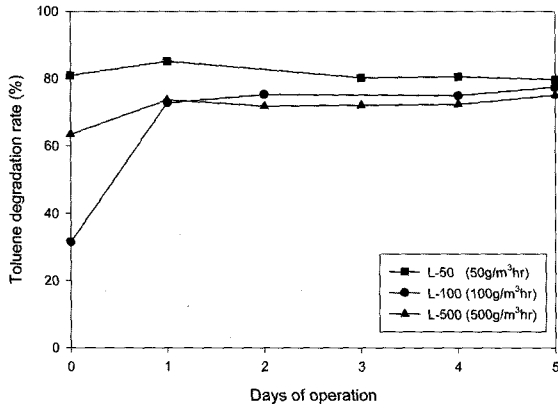


Fig. 4. Changes in toluene removal efficiency with time in the HFMB operated under various toluene loading rates.

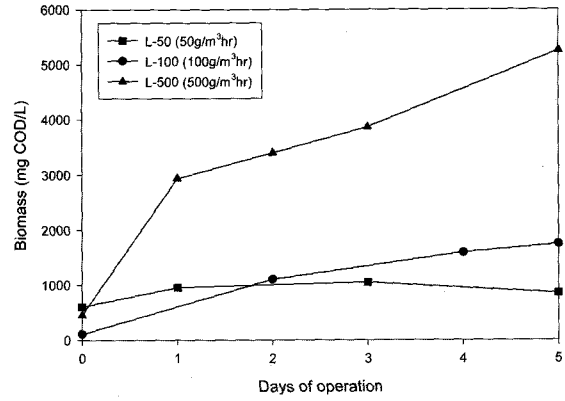


Fig. 5. Changes in biomass concentration in the HFMB operated under various loading rates.

로의 톨루엔 물질전달속도가 미생물에 의한 분해속도보다 느리기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 톨루엔 물질전달의 제한은 반응조내 톨루엔의 액상농도 수치가 거의 0에 가까운 값으로 측정되지만, 유출부에서 어느 정도 수준의 톨루엔 농도가 검출되는 것으로 확인할 수 있었다. 즉, 유입되는 톨루엔이 모두 액상으로 전달되지 않는 물질전달 제한이 일어나기 때문에 처리효율이 거의 일정하게 나오는 것이다.

액상에서의 미생물 농도는 유입되는 톨루엔 부하량에 따라 각기 다르게 나타났었다(Fig. 5). 가장 낮은 유입부하량 조건(L-50)에서는 운전기간동안 미생물 농도에 큰 변화가 없었는데, 이는 매일 일정량 교체되어 액상(0.3 L/day)으로 배출되는 미생물량과 반응조 내에서 성장하는 톨루엔 분해 미생물량이 거의 동일함을 의미한다. 그러나 톨루엔 유입부하량이 높은 L-100과 L-500 실험에서는 반응조 내 미생물 농도가 계속 증가하였으며, 증가율은 유입부하량에 비례하였다. 증가한 미생물 농도는 처리효율 증가로 이어졌으며, 따라서 운전 5일에 측정된 톨루엔 제거효율이 유입농도에 상관없이 모든 반응조에서 거의 비슷하게 나왔다. 본 연구에서는 모든 반응조에서 액상교체를 항상 일정하게 유지하였으나, 미생물 농도가 증가하는 반응조에서 액상교체를 증가시켜 부유성장 미생물농도를 조절하였다면 톨루엔 제거효율이 감소하였을 가능성이 높다. 따라서 HFMB의 톨루엔 분해 양상을 좀 더 명확하게 규명하기 위해서는 유입부, 유출부에서의 CO<sub>2</sub> 농도 측정 등의 탄소원 물질수지(carbon mass balance)에 관한 실험이 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

### 3.2.2. 분해능 실험 (Elimination capacity test)

분해능 실험은 HFMB의 각 운전조건에서 정상상태(pseudo steady-state)에 도달한 반응조에 톨루엔 유입농도를 단시간(본 실험에서는 2시간) 동안 급격히 증가시킨 후 제거되는 톨루엔 양을 측정하는 것으로, 이 결과를 이용하여 동적부하변동(dynamic loading condition)에서의 HFMB 운전특성을 알아볼 수 있으며 반응조의 주요 설계인자로 이용된다. Fig. 6.에는 각기 다른 유입부하 조건에서 측정된 HFMB의 분해능 곡선을 나타내었다.

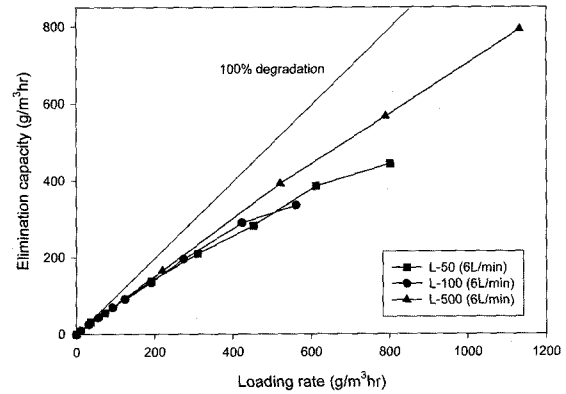


Fig. 6. Elimination capacity curves.

L-50, L-100 조건에서 분해능 실험 결과 600 g/m<sup>3</sup>/hr의 유입부하에서 300~400 g/m<sup>3</sup>/hr 수준의 분해능을 얻어냈으며, L-500 실험의 경우에는 1,100 g/m<sup>3</sup>/hr의 유입부하량 적용시 800 g/m<sup>3</sup>/hr 수준의 분해능 값을 얻었다. 이는 일반적인 생물여과공법에 의한 톨루엔 최대분해능 값인 50~100 g/m<sup>3</sup>/hr<sup>14)</sup> 수준보다 월등히 높은 수치라 할 수 있다.

특히 본 실험에서는 HFMB의 최대분해능(maximum elimination capacity)을 확인하지 않았으나, 800 g/m<sup>3</sup>/hr 이상의 톨루엔 유입부하량에서도 무난히 톨루엔 제거 반응을 수행할 수 있을 것으로 예측된다. 일반적으로 생물반응조에서 VOCs 분해능 실험은 유입부하량이 증가하여도 분해능이 더 이상 증가하지 않는 상태까지 진행하여 최대분해능을 측정한다.<sup>14)</sup> 그러나 본 실험에서는 Fig. 6과 같이 약 600 g/m<sup>3</sup>/hr 이상의 유입부하에서도 분해능이 계속 증가하고 있어 최대분해능을 확인할 수 없었다.

EC curve를 좀 더 살펴보면, L-500 실험의 분해능 실험 결과 기울기가 다른 실험들의 결과보다 좀 더 급하다는 것을 알 수 있다. 이는 같은 유입부하량에 대하여 L-500 조건에서의 반응기가 다른 조건인 경우보다 톨루엔 분해 정도가 보다 좋다는 것을 의미하는 것으로 내부 부유성장 미생물 농도가 다른 조건의 미생물 농도보다 높기 때문이다. 이상의 결과를 통하여 유입부하량이 높아 반응기 내의 미생물의 농도가 매우 높은 경우 유입부하량이 낮은 경우보

다 최대분해능이 증가될 수 있다는 것을 확인하였다. 유입 부하량과 최대분해능의 상관관계에 대하여 보다 정확한 이해를 위하여 향후 높은 부하에서의 추가적인 반응기 운전 실험이 요구된다.

#### 4. 요약 및 결론

VOCs 처리를 위한 중공사막 결합형 생물반응기(Hollow Fiber Membrane Bioreactor, HFMB)의 적용성 검토 및 다양한 조건에서의 운전 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) HFMB를 적용하면 기존 생물여과공법(Biofiltration)에서는 수행하기 어려운 반응기 내부 미생물의 양적, 질적 제어 및 축적되는 대사 부산물의 주기적 배출 등이 가능하여 높은 부하량 적용시에도 안정적인 처리효율을 얻어낼 수 있었다.

2) 동일한 유입유량 조건(체류시간 30초)에서 유입 부하량을 변동시켰을 경우 (50, 100, 500 g/m<sup>3</sup>/hr) 70~80% 수준의 처리효율을 얻었다. 이는 높은 부하량 적용시 반응기 내부 액상의 부유성장 미생물 성장률이 높아, 유입되는 톨루엔이 이에 비례하여 분해되기 때문이다.

3) 여러 운전조건에서 톨루엔 분해능 실험(Elimination Capacity Test)을 수행한 결과, 기존의 생물여과공법의 최대 분해능인 50~100 g/m<sup>3</sup>/hr을 월등히 능가하는 400 g/m<sup>3</sup>/hr 이상의 결과를 얻었으며, 높은 유입부하량 조건에서 운전되는 HFMB에서는 800 g/m<sup>3</sup>/hr 이상의 분해능을 나타내었다.

4) HFMB에서 abiotic test로 톨루엔의 물질전달계수(K<sub>L</sub>a) 값을 추정하였으며, 이는 기존 문헌의 경험식을 통하여 얻어낸 물질전달계수와 유사하였다. 그러나 기체 유속이나 전체 반응조에 첨가된 멤브레인 개수를 증가시키면 더 큰 물질전달계수를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

#### 참고문헌

1. U.S.EPA :Definition of VOC, 40 CFR Part 51.100(s) (2000).
2. 대기환경보전법 시행령 제39조 제1항, 환경부(2001).
3. Kennes, C. and Veiga, M. C., *Bioreactors for Waste Gas Treatment*, Kluwer Academic Publishers(2001).
4. Devinny, J. S., Deshusses, M. A., and Webster, T. S., *Biofiltration for Air Pollution Control*, Lewis Publishers (1999).
5. Pressman, J. G., Georgiou, G., and Speitel, Jr. G. E., "A Hollow-Fiber Membrane Bioreactor for the Removal of Trichloroethylene from the Vapor Phase," *Biotechnol. Bioeng.*, **68**, 548~556(2000).
6. Ergas, S. J. and McGrath, M. S., "Membrane Bioreactor Control of Volatile Organic Compound Emissions," *J. Environ. Eng.*, **123**, 593~598(1997).
7. Ergas, S. J., Shumway, L., Fitch, M. W., and Neemann, J. J., "Membrane Process for Biological Treatment of Contaminated Gas Streams," *Biotechnol. Bioeng.*, **63**, 431~441(1999).
8. Langenhove, H. V., Bo, I. D., Jacobs, P., Demeestere, K., and Dewulf, J., "A Membrane Bioreactor for the Removal of Dimethyl Sulphide and Toluene from Waste Air," *Water Sci. Technol.*, **50**, 215~224 (2004).
9. Ridgway, H. F., Safarik, J., Phipps, D., Carl, P., and Clark, D., "Identification and Catabolic Activity of Well-Derived Gasoline-Degradation Bacteria from a Contaminated Aquifer," *Appl. Environ. Microbiol.*, **56**, 3565~3575(1990).
10. APHA, AWWA. and WEF., *Standard Methods for Examinations of Water and Wastewater*, 20th ed., Washington D.C., USA(1998).
11. Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering*, 4th edition, McGraw-Hill, New York, pp. 425~428(2003).
12. Bielefeldt, A. R. and Stensel, H. D., "Treating VOC-Contaminated Gases in Activated Sludge: Mechanistic Model to Evaluate Design and Performance," *Environ. Sci. Technol.*, **33**, 3234~3240(1999).
13. Ahmed, T. and Semmens, M. J., "The Use of Independently Sealed Microporous Hollow Fiber Membranes for Oxygenation of Water: Model Development," *J. Membrane Sci.*, **69**, 11~20(1996).
14. Deshusses, M. A. and Johnson, C. T., "Development and Validation of a Simple Protocol To Rapidly Determine the Performance of Biofilters for VOC Treatment," *Environ. Sci. Technol.*, **34**, 461~467(2000).