

## *Candida tropicalis* 포괄고정 담체를 적용한 Airlift Loop Bioreactor에서의 복합 휘발성유기화합물 제거

### Removal of Volatile Organic Compounds using *Candida tropicalis* Immobilized on Polymer Gel Media in an Airlift Loop Bioreactor

남궁형규 · 하정협 · 황선진\* · 송지현 †

Hyeong-Kyu Namgung · Jeong-Hyub Ha · Sun-jin Hwang\* · JiHyeon Song †

세종대학교 토목환경공학과 · \*경희대학교 환경학 및 환경공학과

Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University

\*Department of Environmental Science & Engineering, Kyunghee University

(2009년 6월 9일 접수, 2009년 7월 14일 채택)

**ABSTRACT** : This research was performed to improve removal efficiency of toluene and methyl ethyl ketone (MEK) using *Candida tropicalis*, one of the yeast species. An airlift loop bioreactor (ALB) was employed to enhance the capability of mass transfer for toluene and MEK from the gas phase to the liquid, microbial phase. Polymer gel media made from PAC, alginate and PEG was applied for the effective immobilization of the yeast strain on the polymer gel media. The experimental results indicated that the mass transfer coefficient of toluene without polymer gel media was  $1.29 \text{ min}^{-1}$  at a gas retention time of 15 sec, whereas the  $K_{La}$  value for toluene was increased to  $4.07 \text{ min}^{-1}$  by adding the media, confirming the enhanced mass transfer of volatile organic compounds between the gas and liquid phases. The removal efficiency of toluene and MEK by using yeast-immobilized polymer gel media in the ALB was greater than 80% at different pollutant loading rates (5, 10, 19 and  $37 \text{ g/m}^3/\text{hr}$  for toluene, 4.5, 8.9, 17.8 and  $35.1 \text{ g/m}^3/\text{hr}$  for MEK). In addition, an elimination capacity test conducted by changing inlet loading rates stepwise demonstrated that maximum elimination capacities for toluene and MEK were  $70.4$  and  $56.4 \text{ g/m}^3/\text{hr}$ , respectively.

**Key words** : Volatile organic compounds, *Candida tropicalis*, Polymer gel media, Airlift loop bioreactor

**요약** : 본 연구는 휘발성유기화합물질의 분해능력을 가진 yeast인 *Candida tropicalis*를 이용하여, 대표적인 휘발성 유기화합물질인 톨루엔과 MEK의 제거효율을 향상시키기 위하여 수행되었다. 반응기는 가스상으로 유입되는 톨루엔과 MEK의 물질전달 능력을 향상시키기 위하여 airlift loop 형태로 선택하였고, yeast 미생물의 효과적인 포괄고정화를 위해 분말활성탄(PAC)과 알지네이트(Alginate), PEG로 고분자 담체를 형성하였다. Airlift loop bioreactor의 물질전달성능을 평가하기 위한 실험을 수행하였으며, 기체체류시간 15초에서 담체를 첨가하지 않은 액상의 톨루엔 물질전달계수( $K_{La}$ ) 값이  $1.29 \text{ min}^{-1}$ 이었으나, 고분자 담체를 첨가한 경우 톨루엔의  $K_{La}$ 는  $4.07 \text{ min}^{-1}$ 로 증가하였다. 따라서 고분자담체를 적용하는 것이 기상으로 유입되는 휘발성유기화합물의 물질전달을 향상시키는 것으로 확인되었다. 이러한 airlift loop bioreactor와 yeast 포괄고정 담체를 적용하여 체류시간을 60초, 30초, 15초에서 유입부하에 변화를 주며 실험을 진행한 결과, 톨루엔 5, 10, 19,  $37 \text{ g/m}^3/\text{hr}$ , MEK 4.5, 8.9, 17.8,  $35.1 \text{ g/m}^3/\text{hr}$ 의 유입부하 변화에도 전체 80% 이상의 안정적인 처리효율을 나타내었다. 또한 airlift loop bioreactor의 분해능을 확인하기 위하여 유입부하를 단기간 변화시켜 주며 실험한 결과, 톨루엔과 MEK의 최대분해능은 각각  $70.4 \text{ g/m}^3/\text{hr}$ ,  $56.4 \text{ g/m}^3/\text{hr}$ 로 확인되었다.

**주제어** : 휘발성 유기화합물, 효모, 고분자담체, Airlift loop bioreactor

## 1. 서론

최근 유기용매를 사용하는 도료, 잉크, 재생고무공장 등의 여러 사업장에서는 다양한 종류의 휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)이 동시에 발생하는 특징을 갖는다. 이러한 휘발성유기화합물은 대도시 광화학

대기오염의 원인물질로서, 악취가 매우 심하고 신경계에 독성물질로 작용하는 특징이 있다.<sup>1)</sup> 이러한 휘발성유기화합물의 유해성이 알려짐에 따라 국내뿐만 아니라 국제적으로 엄격한 규제가 시행되고 있다. 따라서 이러한 휘발성 유기화합물을 배출하는 사업장들은 크게, 흡착, 수세, 희석 등의 물리화학적 처리방법과, 약액흡수, 중화, 연소 등의 화학적 처

† Corresponding author : E-mail : songjh@sejong.ac.kr Tel : 02-3408-3819 Fax : 02-3408-4332

리방법, 그리고 바이오필터 등의 생물학적 처리방법 등을 이용하여 악취물질의 배출을 제어하고 있다.<sup>2)</sup>

생물학적 처리기술 중에서 대표적으로 사용되고 있는 충전 담체형 바이오필터(packed-bed biofilter) 방법은 운전이 용이하며, 처리비용이 낮고, 부산물에 의한 2차오염이 적다는 장점이 있다. 그러나 바이오필터에 고농도 유기물을 유입시키면서 장기간 운전하는 경우 미생물의 과다번식에 의한 막힘 현상과 압력손실이 급격하게 증가하는 문제점이 발생한다.<sup>1,3~5)</sup> 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근에는 액상 부유성장 미생물을 적용한 미생물반응기가 대안으로 제시되고 있어 다양한 연구가 진행되고 있다.<sup>6~9)</sup> 미생물반응기는 미생물 과다성장에 대한 압력손실이 발생하지 않으며, 여러 가지 반응기 내의 조건 조절이 유리하다는 장점이 있다.

또한 생물학적 처리 기술에 널리 사용되고 있는 미생물인 박테리아는 온도나 pH, 오염물질 유입농도 등의 갑작스런 환경변화에 대한 적응성이 떨어지는 단점을 보임으로써, 장기적이고 안정적인 운전이 어렵다. 박테리아의 단점을 보완하기 위하여 최근 곰팡이(fungus) 또는 효모(yeast)에 대한 연구가 이루어지고 있다. 효모는 넓은 pH 범위에서도 안정적인 생장이 가능하며, 갑작스런 온도 및 오염물질 유입부하의 변화에도 적응력이 좋은 장점을 갖고 있는 것으로 알려져 있다.<sup>10~12)</sup> 또한 이러한 생물학적 처리기술에 여러 가지 담체가 이용되고 있지만, 온도 및 pH, 오염물질 유입농도 등의 급격한 변화에도 액상에서의 미생물의 농도유지를 용이하게 하고, 소수성 악취물질의 물질전달을 높일 수 있게 하기 위하여 미생물을 포괄고정시킨 담체에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>13,14)</sup>

본 연구는 기존에 사용되어온 박테리아의 단점을 보완하고 대표적인 휘발성유기화합물질인 톨루엔과 MEK의 제거 효율을 향상시키기 위해서, 대상 오염물질의 분해능력을 가진 효모(yeast)인 *Candida tropicalis*를 이용하였다.<sup>15,16)</sup> 또한 일반 담체 충전형 바이오필터의 단점을 보완하기 위해 부유성장 미생물을 이용하여 휘발성유기화합물을 제거하는 생물반응기(bioreactor)를 선택하였으며, 반응기는 기상으로 유입되는 톨루엔과 MEK의 물질전달 능력을 향상시키기 위하여 airlift loop 형태를 선택하였다. 본 연구에서는 airlift loop bioreactor 내부에 휘발성유기화합물로 오염된 기체를 미세 공기방울 형태로 유입시키고, 액상 및 기상의 순환에 의한 오염물질의 물질전달 특성을 확인하였다.<sup>17~20)</sup> 또한 *C. tropicalis*로 포괄고정시킨 고분자 담체를 적용하여 미생물의 휘발성유기화합물 분해실험을 실시하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 airlift loop bioreactor와 전체 실험장치 모식도를 다음 Fig. 1에 나타내었다. 반응기는 전체부피 3 L의 직사각 기둥모형으로 제작되었으며, 유효부피는 2 L로 운전하였다. 공기는 에어펌프로부터 HEPA 필터를 통과한 후 실린지 펌프(KD-200, KD Scientific, USA)에 의해 주입되는 톨루엔과 MEK에 의해 일정한 농도로 오염되도록 하였다. 오염된 공기는 반응기 바닥에 있는 산기판을 통해서 유입되며,

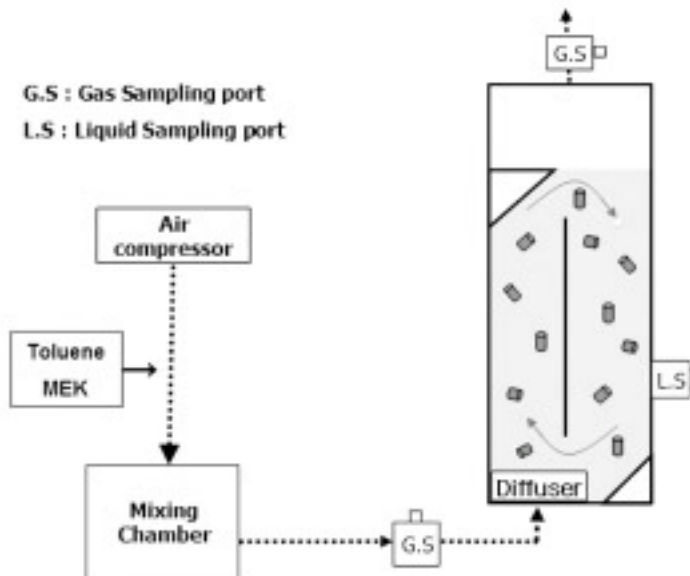


Fig. 1. Schematic diagram of the airlift loop bioreactor used in this study.

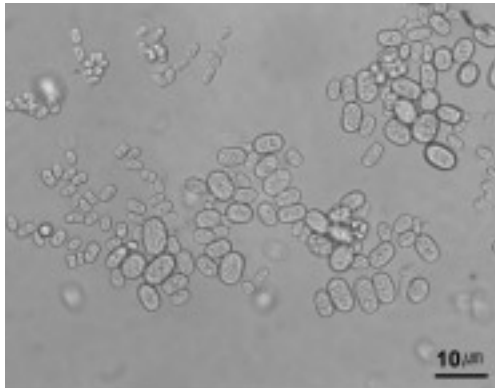


Fig. 2. A picture of a microscope for yeast cells.

미생물 배양액을 통과한 후 반응기 외부로 배출된다. Fig. 1에 서와 같이 유입부와 유출부에 가스 샘플링 포트를 만들어서 가스상 오염물질의 농도를 측정할 수 있게 하였고, 반응기의 액상 샘플링 포트를 통해서 액상 및 담체 시료를 채취하였다.

## 2.2. 실험 재료

### 2.2.1. 적용 균주 배양

본 연구에서 적용한 효모인 *C. tropicalis*는 한국미생물보존센터로부터 구입하여 배양하였다. 효모 균주는 YM agar 표면에서 성장시킨 후, 250 mL 크기의 유리병에 들어있는 50 mL의 멸균 배양액에 접종하고 톨루엔을 기상으로 공급하여 배양하였다. 사용한 배양액은 yeast의 생장에 필요한 각종 영양염류와 pH 완충용액이 포함되어 있다. 영양염류(mg/L)  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  1,420,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1,360,  $\text{KNO}_3$  3,030,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  500,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  1.5,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  3.3, 및 trace metals(mg/L) :  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.25,  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  0.18,  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.02,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.04,  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.04,  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.02,  $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.02,  $\text{H}_3\text{BO}_4$  0.02로 구성되었다.

### 2.2.2. 고분자 담체

고분자 담체의 제조과정과 첨가물질을 Fig. 3에 표시하였다. 고분자 담체는 인공 고분자 물질인 폴리에틸렌글리콜(Polyethylene Glycol, PEG)과 천연 고분자 물질인 소듐 알지네이트(Sodium Alginate)를 총 중량대비 18%, 1%의 비율로 첨가하였으며, 기상으로 유입되는 오염물질들의 물질전달 효율을 높이기 위해서 활성탄을 1% 첨가하였다. 활성탄은 고분자 물질들과 잘 혼합되고, 담체제작이 용이하게 하기 위해서 분말로 이루어진 활성탄(PAC, Calgon, USA)을 사용하였다. 담체의 강도를 높여주기 위하여 10% acetic acid와 potassium persulfate를 이용하여 pH를 조절하였으며, 미생물의 활성도에 영향을 최소화하기 위하여 가교제인 N-tetramethylethylenediamine (TMEDA)의 양을 최소화 하였다. 본 연구에서는 이와 같이 제작한 고분자 담체를 “PACY” (PEG+Alginate+PAC+Yeast)라 명명하였다.

### 2.3. Airlift Loop Bioreactor 물질 전달

Airlift loop 형태의 반응기는 공기나 기체흐름에 의하여 반응물이 교반되는 반응기로서, 이러한 기체흐름은 기상과 액상의 물질전달에 중요한 역할을 수행한다. 이러한 airlift loop bioreactor의 설계를 위해서는 기상체류량, 물질전달 계수, 액상순환속도, 액상의 혼합시간 등을 고려해야 하며, 본 연구에서는 체류시간별로 각 항목에 대한 측정을 실시하였다. 또한 측정된 값을 다음 식 (1)과 (2)에 대입하여 기상 체류량과 액상순환속도를 계산하였다.

$$\varepsilon = \frac{H_g \cdot H_L}{H_g} \quad (1)$$

여기서,  $\varepsilon$ 는 기상체류량(overall gas hold up),  $H_g$ 는 산기 액상높이(m),  $H_L$ 은 정지액상높이(m).

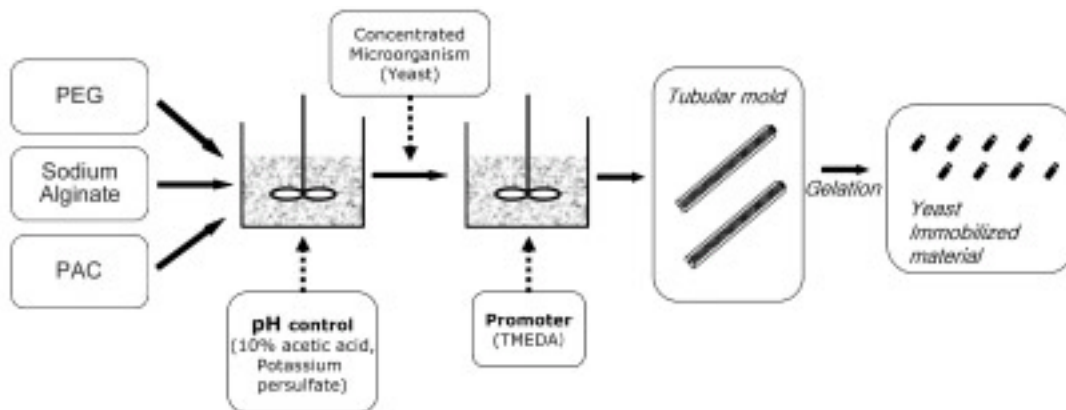


Fig. 3. A procedure to make yeast-immobilized polymer packing materials.

**Table 1.** Average concentrations and loadings of toluene and MEK in the airlift loop bioreactor at different empty bed retention times (EBRTs)

| Run  | Flow rate (m <sup>3</sup> /hr) | EBRT (sec) | Toluene             |                                | MEK                 |                                |
|------|--------------------------------|------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------------|
|      |                                |            | concentration (ppm) | loading (g/m <sup>3</sup> -hr) | concentration (ppm) | loading (g/m <sup>3</sup> -hr) |
| ACC. | 2                              | 60         | 22±1                | 5.02                           | 23.3±1              | 4.52                           |
| 1.   | 2                              | 60         | 42.5±2              | 9.56                           | 49.2±2              | 8.9                            |
| 2.   | 4                              | 30         | 42±2                | 19.1                           | 48.5±2              | 17.8                           |
| 3.   | 8                              | 15         | 41.2±3              | 37.2                           | 50.1±1              | 35.1                           |

$$U_L = \frac{2H_g}{T_c} \quad (2)$$

여기서,  $U_L$ 은 액상순환속도(m/s),  $T_c$ 는 액상순환시간(sec).

물질전달계수는 기-액간의 물질전달을 평가하는데 있어서 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 본 연구에서는 액상의 용존산소(DO) 측정법을 이용하였고, 측정된 값을 식(3)에 대입하여 airlift loop reactor에서의 용존산소 물질전달계수를 산정하였다.

$$(K_L a)_{oxygen} \cdot t = \ln \frac{(C^* - C_{L0})}{(C^* - C_L)} \quad (3)$$

여기서,  $(K_L a)_{oxygen}$ 은 용존산소 물질전달계수(min<sup>-1</sup>),  $C^*$ 는 용존산소 포화농도(mg/L),  $C_{L0}$ 는 초기 용존산소농도(mg/L),  $C_L$ 은 용존산소농도(mg/L).

용존산소의 변화로 추정된 물질전달계수는 다음 관계식을 이용하여 본 연구에서 적용한 대상 물질인 톨루엔의 물질전달로 환산하였다.

$$(K_L a)_{toluene} = \left( \frac{D_{toluene}}{D_{oxygen}} \right)^{0.5} \times (K_L a)_{oxygen} \quad (4)$$

여기서,  $D_{toluene}$ 는 톨루엔 확산계수(cm<sup>2</sup>/sec),  $D_{oxygen}$ 은 산소 확산계수(cm<sup>2</sup>/sec),  $(K_L a)_{toluene}$ 은 톨루엔 물질전달계수(min<sup>-1</sup>).

## 2.4. Airlift Loop Bioreactor 운전 조건

Airlift loop bioreactor는 체류시간을 60초, 30초, 15초로 변화시키고 유입농도는 동일하게 유지시킴에 따라, 각 체류시간별 유입부하의 변동에 따라서 세 단계로 운전하였다. 고분자 담체의 충전률은 전체 반응기 부피의 20% (400 g)으로 하였고, 각 단계별 운전조건은 Table 1에 나타내었다.

**Table 2.** Gas chromatography condition for the analyses of toluene and MEK

| Item                  | Condition                                 |
|-----------------------|---|
| Detector              | FID                                       |
| Carrier gas           | Helium                                    |
| Flow rate             | 35 mL/min                                 |
| Injection temperature | 150°C                                     |
| Detector temperature  | 250°C                                     |
| Oven temperature      | initial : 50°C increase 50°C/min to 250°C |

**Table 3.** Parameter values to obtain  $\epsilon$  and UL in airlift loop bioreactor

| EBRT (sec) | Qg (L/min) | HL (m) | Hg (m) | $\epsilon$ (-) | TC (sec) | UL (m/sec) | Tm (sec) |
|------------|------------|--------|--------|----------------|----------|------------|----------|
| 60         | 2          | 0.333  | 0.341  | 0.02348        | 4.255    | 0.160      | 6.3      |
| 30         | 4          | 0.333  | 0.350  | 0.04853        | 3.977    | 0.176      | 6.3      |
| 15         | 8          | 0.333  | 0.369  | 0.09747        | 3.755    | 0.197      | 5.4      |

## 2.5. 분석 방법

미생물반응기 유입부와 유출부 2곳에 설치된 샘플링포트를 통해 가스실린지(gas-tight syringe, Hamilton, USA)로 0.5 mL씩 기체시료를 채취하였으며, 채취한 즉시 불꽃이온검출기(FID)가 장착된 GC (HP 6890, USA)에 주입하여 톨루엔과 MEK 농도를 측정하였다. 두 가지 휘발성유기화합물의 GC standard는 0~500 ppm 범위를 증기압(vapor pressure) 방법을 이용하여 산정하였으며, GC의 운전조건은 Table 2에 나타내었다.

액상 미생물 농도는 Bradford 시약(Bio-Rad, USA)을 사용한 단백질 농도로 측정 분석하는 방법과 흡광도(Optical Density, OD @600 nm) 방법을 이용하여 측정하였다. 단백질 농도 측정에 앞서 시료 0.8 mL를 Sonic VibraCell (VCX130, Sonic and Materials Inc. USA)을 이용하여 30 W에서 6분간 초음파 분해를 통해 단백질을 추출하였으며, 16 배 희석한 시료 0.8 mL와 Bradford 시약 0.2 mL를 혼합한 후 5분간 발색시켜 595 nm 파장에서 흡광광도계(Simadzu, Japan)를 사용하여 농도를 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. Airlift Loop Bioreactor 물질전달 특성

각 체류시간별로 물리적인 특성에 대한 측정값들을 Table 3에 나타내었다. 먼저 기상체류량( $\epsilon$ )은 airlift loop bioreactor의 수력학적 특성을 나타내는 주요 변수중의 하나로, 기-액의 전체 부피중 기상의 부피분율로 표현된다. 높은 기상체류량은 기-액 간의 접촉면적을 증가시키므로 물질

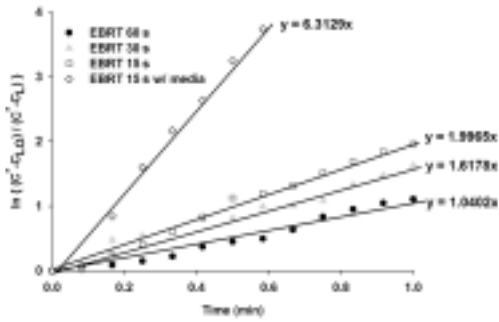


Fig. 4. Oxygen transfer with and without medias at different EBRTs.

전달 성능이 좋은 것을 의미하며, 체류시간별 기상체류량은 60초, 30초, 15초에서 각각 0.023, 0.048, 0.097 수준을 나타내었다. 이것은 체류시간이 짧아지면서 내부의 순환되어지는 기체의 양이 증가함에 따라, 액상내의 기상체류량이 증가하게 되는 것으로 판단되어지며, 이것은 액상 순환시간 ( $T_c$ )과 액상 순환속도( $U_L$ )의 결과를 통해서도 확인할 수 있었다. 체류시간이 짧아질수록 액상순환시간은 4.255초에서 3.755초로 감소하며, 그에 따라 액상순환속도는 0.160 m/s에서 0.197 m/s로 증가하였다.

위와 같은 실험 결과는 물질전달계수에도 영향을 주며, 물질전달계수의 값은 Fig. 4와 Table 4에 나타내었다. 60초, 30초, 15초로 체류시간이 변화함에 따라서 톨루엔의 물질전

Table 4.  $K_L a$  values of oxygen and toluene in the airlift loop bioreactor

| EBRT            | $K_L a_{\text{oxygen}}$ ( $\text{min}^{-1}$ ) | $K_L a_{\text{toluene}}$ ( $\text{min}^{-1}$ ) |
|-----------------|---|--|
| 60 s            | 1.0402  | 0.6699   |
| 30 s            | 1.6178  | 1.0420   |
| 15 s            | 1.9956  | 1.2853   |
| 15 s with media | 6.3129  | 4.0660   |

달계수 값은 각각 0.67, 1.04, 1.29  $\text{min}^{-1}$ 을 나타내 체류시간이 짧아질수록 물질전달이 빠르게 일어나는 결과를 보였다. 이것은 유량 증가에 따른 액상 내부의 순환속도 및 기상 체류량의 증가에 따른 결과로 판단된다. 또한 담체의 적용 여부에 따른 물질전달의 변화를 알아보기 위하여 체류시간 15초에서 고분자 담체를 넣고 동일한 실험을 진행한 결과, 4.07  $\text{min}^{-1}$ 의 물질전달계수 값을 보임으로써 담체를 적용하지 않았을 경우에 비하여 3배 이상 높은 수치를 나타내었다. 이 결과로 볼 때, 담체는 반응기 내부의 액상 및 기체상 물질의 순환에 도움을 주며, 그에 따라 유입되는 기상 물질의 액상으로의 물질전달에 큰 도움을 주는 것으로 판단된다. 기존 문헌에 제시된 유사한 결과를 살펴보면, poly-vinyl alcohol (PVA)로 제작된 담체를 이용한 암모니아 제거 연구에서 공기유입속도와 담체 충진율이 증가함에 따라 충분한 양의 산소가 액상에 공급되어 암모니아 제거속도 및 제거효율이 증가하는 결과를 보였다.<sup>21)</sup> 이러한 결과는 기존의 담체

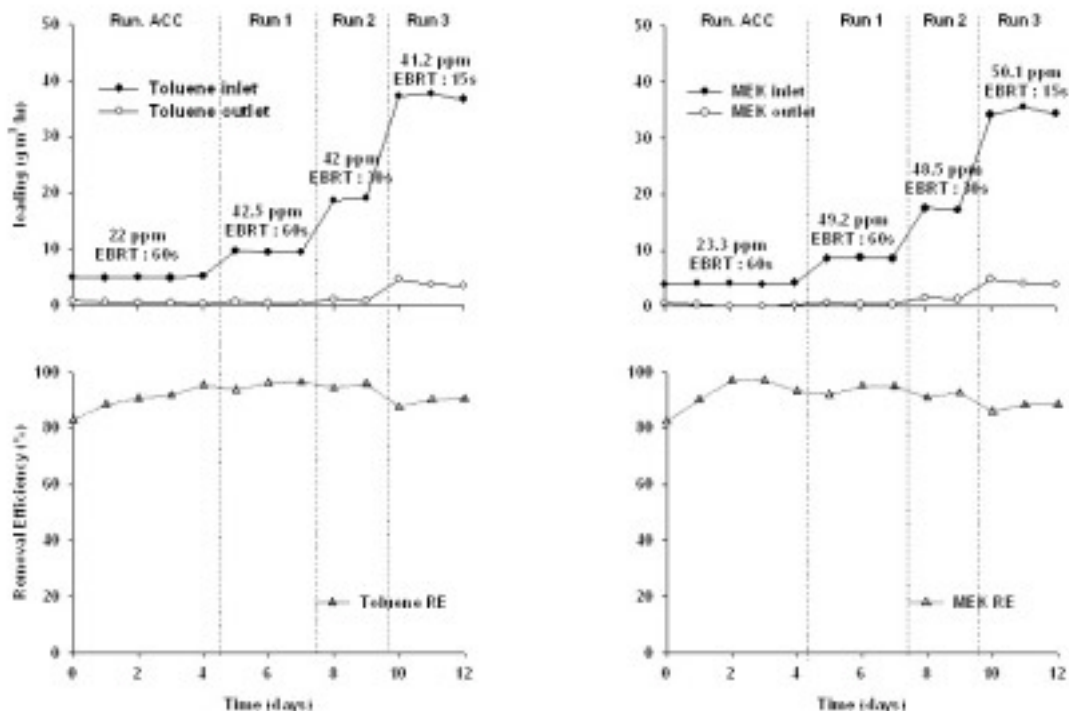


Fig. 5. Removal of toluene and MEK in airlift loop bioreactor.

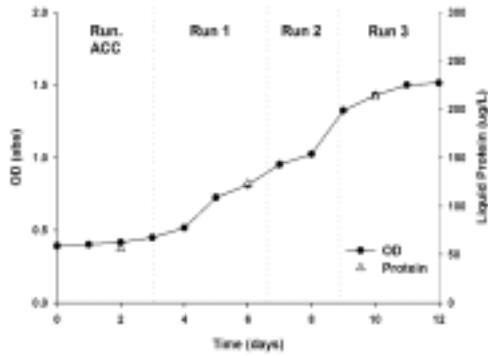


Fig. 6. Optical density and protein concentration during operation of airlift loop bioreactor.

충진형 반응기(packed-bed bioreactor)에서 체류시간이 짧아짐에 따라서 물질전달이 감소하는 것과는 차별되는 것으로서,<sup>22)</sup> 본 연구에서 사용하고자 하는 airlift loop bioreactor와 고분자 담체가 기상으로 유입되는 오염물질의 기-액 전달을 높여주어 휘발성유기화합물의 제거에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2. Airlift Loop Bioreactor의 복합 VOCs 제거특성

본 연구에서는 airlift loop bioreactor를 이용하여 복합 VOCs를 제거하고자 하였다. 톨루엔과 MEK의 동시 유입시의 각 체류시간별, 유입부하별 처리효율을 Fig. 5에 나타내었다. 체류시간 60초에서 톨루엔과 MEK의 유입농도를 22 ppm, 23.3 ppm 수준으로 유지하며 순응기간을 가졌으며, 순응기간 동안에 두 오염물질 모두 95% 이상의 처리효율을 보인 것을 확인할 수 있었다. 그 후 오염물질의 유입농도를 일정하게 유지시키며 체류시간을 짧게 함으로써 유입부하를 조절하였다. 체류시간이 짧아질수록 처리효율이 어느 정도 감소하는 경향을 보였지만, 두 오염물질 모두 체류시간 15초에서 80% 이상의 처리효율을 보인 것을 확인할 수 있다. 벤젠고리 구조를 갖는 톨루엔보다 MEK가 분해가 더 잘될 것으로 예상되었지만, 거의 비슷한 결과를 보였으며, 이것은 본 연구에서 적용한 미생물인 *C. tropicalis*를 배양시 톨루엔에 순응시켰기 때문인 것으로 판단된다.

복합 휘발성유기화합물이 동시에 유입되는 조건에서, 액상 미생물의 성장 여부를 간접적으로 판단할 수 있는 OD(optical density)와 단백질 농도를 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 연속적인 운전에 의해 시간이 지남에 따라 액상의 OD 및 단백질 농도가 꾸준히 증가하는 추세를 보였으며, 체류시간 15초인 3단계 운전에서는 OD 및 단백질 농도가 각각 1.5, 230 ug/L 수준에서 안정화되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 유입되는 오염물질 농도 및 교체되는 영양

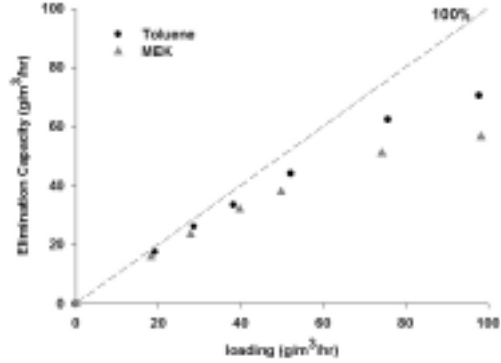


Fig. 7. ECreator of toluene and MEK in airlift loop bioreactor.

염류의 양이 일정하기 때문에 미생물 농도가 일정하게 유지되는 것으로 판단된다.

미생물 반응기의 운전효율을 비교 분석하기 위한 지표로 최대분해능(maximum elimination capacity, ECmax) 값이 많이 사용되며, 그 식은 (5)와 같다.

$$EC_{reactor} = \frac{Q(C_{in} - C_{out})}{V_w} \quad (5)$$

여기서,  $EC_{reactor}$ 는 분해능( $g/m^3/hr$ ),  $C_{in}$ 은 유입농도( $g/m^3$ ),  $C_{out}$ 은 유출농도( $g/m^3$ ),  $V_w$ 는 반응기 운전부피( $m^3$ ).

본 연구에서도 airlift 미생물반응기에 톨루엔과 MEK의 유입농도를 증가시키며 단기간의 최대분해능을 평가하였으며, Fig. 7에 나타내었다. 톨루엔과 MEK 모두 유입부하가 40  $g/m^3/hr$ 까지는 90% 이상의 분해능을 보였지만, 유입부하가 점점 증가함에 따라서 분해능이 떨어지는 것을 확인할 수 있었으며, 유입부하 100  $g/m^3/hr$ 에서의 톨루엔과 MEK의 최대분해능은 각각 70.4  $g/m^3/hr$ , 56.4  $g/m^3/hr$ 를 보였다. 이러한 결과는 단일 휘발성유기화합물만을 적용한 기존의 다른 생물학적 처리방법의 결과보다 더 높은 수치를 보임으로써, 본 연구에서 적용하고자 하는 airlift loop bioreactor를 이용하여 복합 휘발성유기화합물의 효율적인 제거가 가능함을 확인하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 생물학적 처리방법으로 효모인 *Candida tropicalis*를 적용한 airlift loop bioreactor를 이용하여, 복합 휘발성유기화합물의 제거에 관한 실험을 실시하였다. 또한 airlift loop bioreactor의 물리적인 특성 파악으로 미생물반응기의 운전시의 물질전달률 등의 특성을 확인하였으

며, 그 결론은 다음과 같다.

- 1) Airlift 반응기의 물리적인 특성 확인결과, 체류시간이 짧아질수록 액상의 순환시간( $T_c$ ) 및 확산시간( $T_m$ ) 짧아지고, 순환속도( $U_L$ )는 빨라지며, 기체정체계수는 증가하는 추세를 보였다. 또한 물질전달계수 역시 체류시간이 짧아짐에 따라 증가하며, 담체를 적용한 결과 매우 높아진 것을 확인할 수 있었고, 이로써 airlift loop bioreactor는 기상으로 유입되는 휘발성유기화합물의 기-액간 물질전달에 매우 유리하게 작용함을 확인하였다.
- 2) 본 연구에서 yeast인 *C. tropicalis*와 포괄고정 고분자 담체를 적용한 airlift loop bioreactor에서의 톨루엔과 MEK의 동시 유입시 80% 이상의 높은 처리효율을 얻었으며, 최대분해능은 각각 70.4 g/m<sup>3</sup>/hr, 56.4 g/m<sup>3</sup>/hr으로 확인되었다.
- 3) 결과적으로 *C. tropicalis*와 포괄고정담체를 적용한 airlift loop bioreactor는 다양한 복합 휘발성유기화합물의 유입이 잦은 여러 발생원에 유연한 적용이 가능할 것으로 사료되며, 기존 생물여과를 이용한 기상오염물질 처리의 효과적이 대처방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

#### KSEE

## 사 사

본 연구는 환경부의 "차세대핵심환경기술개발사업"(Eco-technopia 21 project)의 지원을 받아 수행한 과제입니다.

## 참고문헌

1. Kennes, C., and Veiga, M. C., "Bioreactors for waste gas treatment," Kluwer Academic Publishers(2001).
2. 김대승, "산업현장의 악취 제어기술과 최근동향," 한국공업화학회 환경기술심포지엄, pp. 111~134(2000).
3. Shareefdeen, Z., and Singh, A., "Biotechnology for odor and air pollution control," Springer(2005).
4. Kinney, K. A., Loehr, R. C., and Corsi R. L., "Vapor-phase bioreactors: avoiding problems through better design and operation," *Environ. Prog.*, **18**, 222~230(1999).
5. Xi, J., Hu, H. Y., and Qian, Y., "Effect of operating conditions on long-term performance of a biofilter treating gaseous toluene: Biomass accumulation and stable-run time estimation," *Biochem. Eng. J.*, **31**(2), 165~172(2006).
6. Ensley, B. D., and Kurisko, P. R., "A gas lift bioreactor for removal of contaminants from the vapor phase," *Appl. Environ. Microbiol.*, **60**(1), 285~290(1994).
7. Lee, S. B., Strand, S. E., and Stensel, H. D., "Sustained Degradation of Trichloroethylene in a Suspended Growth Gas Treatment Reactor by an Actinomycetes Enrichment," *Environ. Sci. Technol.*, **34**(15), 3261~3268(2000).
8. Weber, F. J., and Hartmans, S., "Prevention of clogging in a biological trickle-bed reactor removing toluene from contaminated air," *Biotechnol. Bioeng.*, **50**(1), 91~97(1995).
9. Neal, A. B., and Loehr, R. C., "Use of biofilters and suspended-growth reactors to treat VOCs," *Waste Manage.*, **20**(1), 59~68(2000).
10. van Groenestijn, J. W., van Heiningen, W. N. M., and Kraakman, N. J. R., "Biofilters based on the action of fungi," *Water Sci. Technol.*, **44**(9), 227~232(2001).
11. van Groenestijn, J. W., and Liu, J. X., "Removal of alpha-pinene from gases using biofilters containing fungi," *Atmos. Environ.*, **36**(35), 5501~5508(2002).
12. Woertz J. R., Kinney K. A., and McIntosh N. D. P. "Removal of toluene in a vapor-phase bioreactor containing a strain of the dimorphic black yeast *Exophiala lecanii-corni*," *Biotechnol. Bioeng.*, **75**(5), 550~558(2001).
13. Kim, T. Y., Jin, H. J., Park, S. S., Kim, S. J., and Cho, S. Y., "Adsorption equilibrium of copper ion and phenol by powdered activated carbon, alginate bead and alginate-activated carbon bead," *J. Industrial Eng. Chem.*, **14**, 714~719(2008).
14. 홍성호, 이충식, 이재근, "제올라이트/폴리에틸렌 복합 담체를 이용한 biotricking filter에서 톨루엔 제거 특성," *대한환경공학회지*, **27**(6), 573~580(2005).
15. Yan, J., Jianping, W., Hongmei, L., Suliang, Y., and Zongding, H., "The biodegradation of phenol at high initial concentration by the yeast *Candida tropicalis*," *Biochem. Eng. J.*, **24**(3), 243~247(2005).
16. Yan, J., Jianping, W., Jing, B., Daoquan, W., and Zongding, H., "Phenol biodegradation by the yeast *Candida tropicalis* in the presence of m-cresol," *Biochem. Eng. J.*, **29**(3), 227~234(2006).
17. Meng, L., Bando. Y., and Nakamura. M., "Development of rectangular airlift bubble column installed with support material for enhancement of nitrogen removal", *J. Biosci. Bioeng.*, **98**(4),

- 269~273(2004).
18. Lu, X., Ding, J., Wang, Y., and Shi, J., "Comparison of the hydrodynamics and mass transfer characteristics of a modified square airlift reactor with common airlift reactors," *Chem. Eng. Sci.*, **55**, 2257~2263(2000).
  19. Lo, C. S., and Hwang, S. J., "Dynamic behavior of an internal-loop airlift bioreactor for degradation of waste gas containing toluene," *Chem. Eng. Sci.*, **59**, 4517~4530(2004).
  20. 류희욱, 장용근, 김상돈, "Airlift 생물반응기," *한국생물공학회지*, **9**(4), 347~364(1994).
  21. 서근학, 김병진, 오창섭, "PVA에 고정화된 질화세균균에 의한 암모니아성 질소 제거 I. 총진률 및 공기 유입량이 암모니아성 질소제거에 미치는 영향," *한국생물공학회지*, **16**(3), 314~319 (2001).
  22. Demming, S., Gautier, A., Legallais, C., and Ould-Dris, A., "Solid-liquid mass transfers in an Airlift Reactor incorporating alginate beads for the application as a bioartificial liver," *Chem. Eng. Prog.*, **47**(12), 2370~2378 (2008).