

# 미생물 포괄고정화 담체를 이용한 이단 바이오필터에서의 오염부하량 동적 부하변동시 복합악취 제거효율 변화특성

## Transient Behaviors of a Two-Stage Biofilter Packed with Immobilized Microorganisms when Treating a Mixture of Odorous Compounds

남궁형규 · 신승규 · 황선진\* · 송지현<sup>†</sup>

Hyeong-Kyu Namgung · Seung-Kyu Shin · Sun-jin Hwang\* · JiHyeon Song<sup>†</sup>

세종대학교 토목환경공학과 · \*경희대학교 건설환경공학과

Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University

\*School of Architectural Civil & Environmental Engineering, Department of Environmental Science and Engineering, Center for Environmental Studies, Kyunghee University

(2010년 4월 21일 접수, 2010년 12월 16일 채택)

**Abstract :** A two-stage biofilter was constructed and utilized to determine the removal efficiency when treating dynamic loading of a mixture of odorous compounds including benzene, toluene, p-xylene, ammonia and hydrogen sulfide. A yeast strain, *Candida tropicalis*, and a sulfur oxidizing bacterial (SOB) strain, *Acidithiobacillus caldus sp.*, were immobilized in polyurethane media and packed in the two-stage biofilter. The experiment of dynamic loading variation was composed of (1) stepwise loading variation of all the odorous compounds (total EC test), (2) stepwise loading variation of each odorous compound, and (3) intermittent loading variation with 2-day-off and 3-day-on. The total EC test showed that the maximum elimination capacity was 61 g/m<sup>3</sup>/hr for total VOCs, and 5.2 and 9.1 g/m<sup>3</sup>/hr for ammonia and hydrogen, respectively. In addition, the inhibition between VOCs was observed when the loading of each individual VOC was varied. Especially the stepwise increase in toluene loading resulted in decreases of benzene and p-xylene removal efficiencies about 30% and 25%, respectively. However, the inhibition between organic and inorganic compounds was not observed. The intermittent loading variation with 2-day-off and 3-day-on showed that greater than 95% of the overall removal efficiency was restored in two days after the loading resumed. Consequently, the two-stage biofilter packed with immobilized microorganisms showed advantages over conventional biofilters for the simultaneous treatment of the mixture of organic and inorganic odorous compounds.

**Key Words :** Yeast, SOB, Two-stage Biofilter, Dynamic Loading Variation, Immobilization

**요약 :** 본 연구에서는 휘발성 유기화합물의 분해능력을 가진 *Candida tropicalis*와 황화수소 분해능력을 가진 황산화균을 적용하여 이단 바이오필터를 운전하였으며, 각각의 미생물은 스폰지형 담체에 포괄 고정시켜 사용되었다. 이단 바이오필터에는 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 암모니아, 황화수소 등의 복합악취를 유입하며 분해 특성을 파악하였고, 특히 오염부하량 단계변동에 대한 바이오필터의 분해능을 확인하였다. 오염부하량 단계변동은 총유입부하량 단계변동(total EC test), 개별 악취물질 유입부하량 단계변동(individual chemical EC test), 간헐 동적부하 변동(2 days off & 3 days on) 순으로 수행되었다. 총유입부하량 단계변동 실험결과 TVOC와 암모니아, 황화수소의 최대분해능은 각각 61, 5.2, 9.1 g/m<sup>3</sup>/hr로 확인되었으며, 개별악취물질 유입부하량 단계변동시에는 휘발성 유기화합물질 상호간의 분해능 간섭이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 벤젠 부하량 변동시 톨루엔과 p-자일렌 모두 제거효율에 영향을 받았으며, 톨루엔의 부하량 단계변동시에는 벤젠과 p-자일렌이 각각 30%와 25% 이상의 제거효율의 하락이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 무기악취와 유기악취간의 상호 분해능 간섭은 일어나지 않는 것을 확인할 수 있었다. 2일간 악취물질의 유입을 중단한 후 다시 악취물질의 유입을 재개하였을 때, 3일 이내에 95% 이상의 악취물질 제거능 회복율을 보였다. 이러한 부하변동 실험결과로 미생물 포괄고정 담체를 적용한 이단 바이오필터가 유·무기 악취의 동시제거에 많은 장점을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

**주제어 :** Yeast, 황산화균, 이단바이오필터, 동적부하변동, 포괄고정기술

### 1. 서론

다양한 유기용매를 사용하는 도료, 잉크 제조공장 등의 여러 사업장에서는 다양한 종류의 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)이 기상 및 액상으로 배출된다. 따라서, 이러한 사업장들이 밀집해 있는 지역의 하수처리장 유입부 등에서는 휘발성 유기화합물을 비롯한 다양한 유·무기 복합악취들이 동시에 발생하는 특성을 갖는다.<sup>1,2)</sup>

복합악취에 포함된 다양한 물질들은 다양한 특성의 악취를 유발하여 지역 주민들에게 불쾌함을 야기하며, 화합물의 종류에 따라서는 인체에 유해하고, 휘발성 유기화합물은 대도시 광화학 대기오염의 원인물질이 되기도 한다.<sup>3)</sup> 이러한 다양한 악취물질이 심각한 환경문제로 대두되면서 국내·외에서는 엄격한 규제가 시행되고 있다.

점오염원에서 기체상으로 배출되는 고농도 악취물질의 제거방법으로는 흡착, 수세, 희석 등의 물리·화학적 처리

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

방법과, 약액흡수, 중화, 연소 등의 화학적인 처리방법, 그리고 바이오필터 등의 생물학적 처리방법 등을 들 수 있다.<sup>4,5)</sup> 보편적으로 사용되어지고 있는 물리·화학적인 방법은 다량의 오염물질을 안정적으로 처리하는 장점을 갖고 있지만, 2차오염물질을 발생시키며 유지비가 많이 든다는 단점이 있다.<sup>6,7)</sup> 반면 생물학적 처리기술 중에서 대표적으로 사용되고 있는 충전담체형 바이오필터(packed-bed biofilter) 방법은 물리화학적 처리방법에 비해 운전이 용이하며 처리비용이 낮고 부산물에 의한 2차오염이 적다는 장점이 있어 다양한 악취제거에 사용되어지고 있다.<sup>8-10)</sup> 그러나 생물학적 처리기술에서는 보편적으로 온도나 pH, 오염물질 유입농도 등의 갑작스런 환경변화에 대한 적응성이 떨어지는 단점이 있는 박테리아를 사용함으로써, 갑작스런 악취물질의 고농도 유입시 바이오필터의 성능이 하락하는 결과를 보이기도 한다.

최근 충전 담체를 개량하여 바이오필터의 분해능을 증가시키려는 노력이 다양한 방법으로 진행되고 있으며, 담체의 보완/개선 및 특수 미생물의 적용 등이 활발하게 연구되고 있다. 미생물 포괄고정화법(microbial cell immobilization)을 이용한 복합고분자 담체는 기존 바이오 필터들의 문제점들을 보완하고 미생물에 의한 악취제거 효율을 증대시킬 수 있다. 미생물 고정화는 미생물이 고분자 물질 내부에 포괄고정 됨으로 미생물 유실의 우려가 적으며 반응기 내 미생물 농도를 높은 수준으로 유지할 수 있는 장점이 있다. 하지만 미생물 고정화 과정에서 고분자 물질 용액의 pH나 독성 등의 문제로 인해 미생물 활성이 저해되며, 그에 따른 미생물의 오염물질 적응기간 및 미생물의 활성기간이 증가되는 단점도 가지고 있다.<sup>11-13)</sup>

또한 기존 바이오필터에 주로 사용되고 있는 일반 혼합세균(mixed bacteria) 대신 오염물질 분해능이 뛰어나거나 현장상황에 특화된 미생물을 적용하여 악취 제거율과 반응기 성능을 개선할 수 있다. 박테리아를 적용한 바이오필터의 단점을 보완하기 위하여 최근 곰팡이(fungus) 또는 효모(yeast)에 대한 연구도 다각도로 이루어지고 있다. 효모는 넓은 pH 범위에서도 안정적인 생장이 가능하며, 갑작스런 온도 및 오염물질 유입부하의 변화에도 적응력이 좋은 장점을 갖고 있는 것으로 알려져 있다.<sup>14-16)</sup>

다양한 미생물의 적용과 충전 담체의 개량에도 불구하고, 생물학적 처리기술은 담체의 종류나 미생물의 구성에 따라 환경조건 변화에 쉽게 반응하여 복합악취들의 농도변화에도 민감할 수 있다. 유·무기 복합악취를 배출하는 사업장의 조업 정지시에 짧게는 1시간에서 길게는 24시간 이상 악취물질이 배출되지 않는 경우가 발생하기도 하고, 다양한 악취물질이 동시에 고농도로 발생하는 경우가 있다. 이러한 경우 악취물질을 제거하는 미생물에 악영향을 끼칠 수 있으며, 그에 따라 복합 악취물질 제거에 더욱 어려움을 주기도 한다. 또한 많은 기존 연구에서 단일 반응기를 이용한 악취의 제거는 다양한 복합악취물질의 충격부하시 악취물질 제거에 취약한 점을 보이는 것을 확인할 수 있다.<sup>17-19)</sup>

본 연구는 휘발성유기화합물질과 무기악취의 제거효율을 향상시키기 위해서, 유기성 오염물질의 분해능력을 가진 효모(yeast)인 *Candida tropicalis*와 황산화균(sulfur oxidizing bacteria, SOB)인 *Acidithiobacillus caldus sp.*를 적용한 이단 바이오필터를 구성하여 운전하였다.<sup>20)</sup> 담체는 각 미생물을 포괄고정시킨 스폰지 형태로 하였으며, 이단 바이오필터는 yeast 포괄고정 담체로 충전된 1단 바이오필터와 황산화균 포괄고정 담체로 충전된 2단 바이오필터를 직렬로 연결한 실험실 규모 반응기를 구성하였다. 실험 대상 악취물질은 벤젠, 톨루엔, 자이렌 등의 유기성분 VOCs와 무기성분 악취인 암모니아와 황화수소를 선택하였고, 이를 이단 바이오필터에 적용하여 다양한 충격부하 유입시의 복합악취 제거효율의 변화를 확인하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 실험 재료

#### 2.1.1. 적용 균주

본 연구에서는 복합 악취물질을 효과적으로 분해하기 위하여 특성이 다른 두 종류의 미생물을 이단 바이오필터의 전단과 후단에 각각 사용하였다. 전단에는 yeast를 적용하여 유기악취(VOCs) 제거에 활용하고자 하였으며, 본 연구에서 적용한 yeast인 *Candida 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. 후단에는 대표적인 무기악취인 황화수소를 제거하기 위하여 SOB를 적용하였으며, 본 연구에서는 하수처리장 슬러지에서 채취한 *Acidithiobacillus caldus sp.*를 분양받아 배양하였다. 분양받은 SOB는 액체배지에 접종하고, thiosulfate ( $S_2O_3^{2-}$ )를 에너지원으로 배양하였다.

#### 2.1.2. 담체 제조

본 연구에서는 스폰지 형태( $12 \times 12 \times 12 \text{ mm}^3$ )의 담체에 미생물 포괄고정화 방법을 이용하여 제작하였다. 먼저 PEGDA (Polyethylene glycol diacrylate) 10%, sodium alginate 1%, potassium persulfate 1%, TMEDA 0.02%와 약 1.5 OD (optical density @ 600 nm)를 갖는 각각의 미생물 농축액 50%를 증류수에 혼합한 후, 스폰지형 담체에 흡수시켜 경화한다. 제조된 스폰지형 미생물 포괄고정 담체는 yeast 포괄고정 담체와 SOB 포괄고정 담체 두 종류로 제작되었으며, 전단과 후단에 각 1 L씩 충전하여 반응기를 운전하였다.

### 2.2. 실험장치

본 연구에서 사용된 이단 바이오필터와 전체적인 실험장치 모식도를 다음 Fig. 1에 나타내었다. 각 반응기는 2 L 부피의 원통 모형으로 제작되었으며, 담체의 충전 부피는 1 L로 운전하였다. 공기는 에어펌프에 의해 유입되며, HEPA

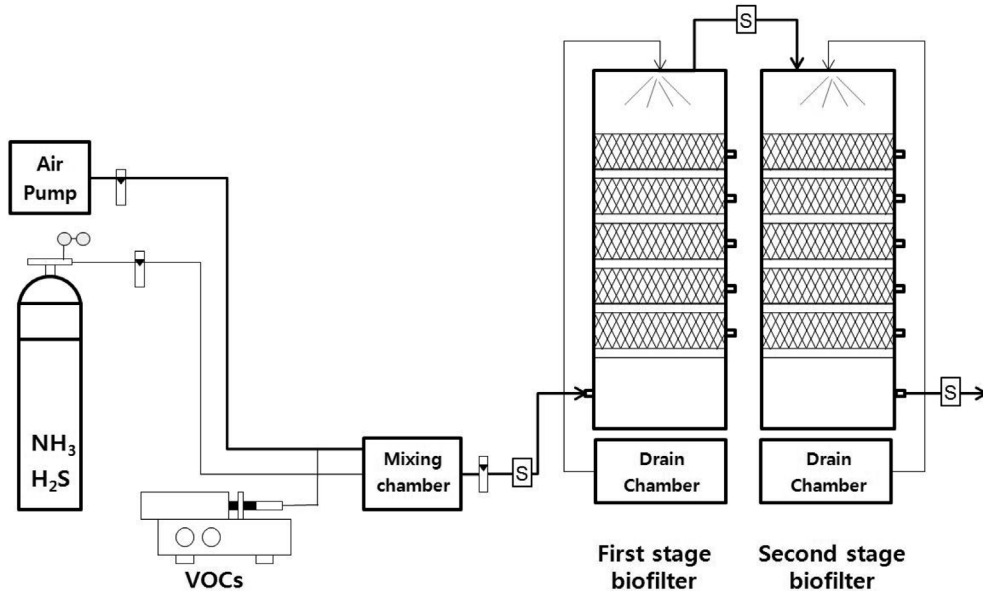


Fig. 1. Schematic diagram of the two-stage biofilter used in this study.

필터를 통과한 후 실린지 펌프(KD-200, KD Scientific, USA)에 의해 주입되는 VOCs와 암모니아 가스(0.5%), 황화수소 가스(0.5%)에 의해 일정한 농도로 오염되어진다. 오염된 공기는 1단 반응기 하단으로 유입되어 상단으로 유출되며, 1단에서 배출된 공기는 2단 반응기의 상단으로 유입되어 하단으로 최종 유출된다. 1단 반응기의 유입부와 2단 반응기의 유입부, 유출부 등의 세 곳에 시료 채취구를 만들어 가스상 오염물질 농도를 측정할 수 있도록 하였으며, 각 반응기의 담체가 마르지 않도록 2 L의 액상을 4 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/hr 유량으로 순환시켜 주었다. 순환용액의 조성(mg/L) Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 89, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 78, KNO<sub>3</sub> 101, CaCl<sub>2</sub> · 2H<sub>2</sub>O 1.5, MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 3.3, 및 trace metals (mg/L) : FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 0.25, MnCl<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O 0.18, CuCl<sub>2</sub> · 2H<sub>2</sub>O 0.02, ZnSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 0.04, CaCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O 0.04, NiCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O 0.02, NaMoO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O 0.02, H<sub>3</sub>BO<sub>4</sub> 0.02로 구성되었다.

### 2.3. 이단 바이오필터 운전 조건

이단 바이오필터의 운전 초기에는 미생물의 성장을 통한 안정적인 처리효율을 얻기 위하여 복합 악취물질로 오염된 유입기체의 체류시간(gas residence time)을 60초로 설정하여 20일간 안정화(acclimation) 기간을 가졌다. 이후 오염기체 체류시간을 30초, 15초로 낮춰가며 20일간 운전하였다.

각각 체류시간별로 60초에서는 9일, 30초에서는 5일, 15초에서는 6일 동안 일정 조건으로 유지하고, 이때의 유입유출 농도를 측정함으로써 유사정상상태(pseudo steady state)임을 확인하였다. 체류시간 15초에서는 벤젠, 톨루엔, 자이렌, 암모니아, 황화수소의 부하량이 각각 5.7, 8.0, 7.4, 2.0, 2.9 g/m<sup>3</sup>/hr이었으며, 안정적인 처리효율이 유지되는 것을 확인한 후 동적부하 변동실험을 실시하였다.

동적부하 변동조건에 따른 각 악취물질의 유입부하와 운전조건을 Table 1에 나타내었다. 총유입부하량 단계변동 실험(total elimination capacity test)은 각 악취물질의 초기 유입부하량(벤젠 6.0 g/m<sup>3</sup>/hr, 톨루엔 7.6 g/m<sup>3</sup>/hr, 자이렌 7.4 g/m<sup>3</sup>/hr, 암모니아 2.0 g/m<sup>3</sup>/hr, 황화수소 2.9 g/m<sup>3</sup>/hr)에서 2 시간마다 14시간 동안 7차례에 걸쳐 모든 악취물질의 부하량을 일정하게 높여가며 운전하였고, 그에 따른 분해능을 측정하였다. 개별 악취물질 유입부하량 단계변동 실험(individual chemical elimination capacity test)에서는 악취물질의 기본유입부하에서 각 한가지의 악취물질에만 유입동적부하를 4시간씩 유지시켜주며 한 물질의 동적부하변동이 다른 악취물질의 분해능에 끼치는 영향을 확인하였다. 한 가지 물질의 동적부하 실험이 끝나면 원래의 유입부하로 변화시켜주어 일정시간 유지하고 다음 물질의 동적부하실험을 실시하였다. 간헐동적부하 변동실험(intermittent on/off

Table 1. Operation and loading conditions of odor chemicals in the two-stage biofilter

Run	Operation	Odor chemical loading (g/m <sup>3</sup> /hr)					Time duration
		Benzene	Toluene	p-Xylene	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> S	
Total EC test	stepwise loading variation (all odor chemicals)	6.0 → 80.8	7.6 → 66.4	7.4 → 81.7	2.0 → 15.2	2.9 → 25.5	2 hr
Individual EC test	stepwise loading variation (each odor chemical)	7.3 → 68.7	8.6 → 85.3	7.0 → 73.1	2.0 → 16.7	3.1 → 30.4	4 hr
Intermittent on/off test	dynamic loading variation (all chemicals)	0 → 6	0 → 8	0 → 7.5	0 → 2	0 → 3	2 days off/ 3 days on

test)에서는 모든 악취물질의 유입을 동시에 차단한 후 48 시간이 지나고 유입부하를 다시 재개하였을 때, 악취물질 분해능이 회복되는 정도를 시간대별 제거효율 변화로 확인하였다.

### 2.4. 분석 방법

바이오필터 각 3곳에 설치된 기체 시료 채취구를 통해 gas-tight syringe (Hamilton, USA)로 0.5 mL씩 기체 시료를 채취하였으며, 채취한 즉시 불꽃이온검출기(FID)가 장착된 GC (HP 6890, USA)에 주입하여 벤젠, 톨루엔, 자일렌의 농도를 측정하였다. 휘발성유기화합물의 GC standard는 0~500 ppm 범위를 vapor pressure 방법을 이용하여 산정하였으며, GC의 운전조건은 다음과 같다. Carrier gas : Helium, Column : HP-5 capillary column (30 m × 0.32 mm), Flow rate : 35 mL/min, Injection temperature : 150°C, Detector temperature : 250°C

무기악취인 암모니아 가스는 각 샘플링 포트로부터 0.5% boric acid solution으로 채운 임핀저(impinger)에 3 L의 기상 암모니아를 통과시켜 포집하였다. boric acid solution에 포집된 암모니아는 인도페놀법을 이용하여 발색시켜 흡광광도계(UVmini-1240, Simadzu, Japan)를 이용하여 측정된 뒤 기체상 농도로 환산하였다. 황화수소 가스는 interchangeable

electrochemical sensor가 장착된 측정기(MultiRAE, RAESystems, USA)를 이용하여 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 바이오필터 기본 운전상태

이단 바이오필터는 유·무기 악취를 동시 제거하기 위하여 운전되었으며, 휘발성 유기화합물인 벤젠, 톨루엔, p-자일렌과 무기 악취성분인 암모니아, 황화수소를 혼합하여 유입시켰다. 농도를 일정하게 하고 체류시간을 60초, 30초, 15초로 변화시켜주며 20일 동안 운전하여 제거효율이 안정되는 것을 확인한 후에 유입부하 변동실험을 실시하였으며, 정상상태에 도달할 때까지의 제거효율을 Fig. 2에 표시하였다. 기체 체류시간 15초 조건에서 악취물질의 정상상태 부하량은 5.7, 8.0, 7.4, 2.0, 2.9 g/m<sup>3</sup>/hr로 유입되었으며, 각각의 제거효율은 평균 72, 81, 83, 100, 85%를 보였다. 이와 같은 체류시간 15초에서의 상태를 유사정상상태(pseudo steady state) 및 기본 운전상태로 정의하여 유입부하변동 실험을 실시하였다. 또한 개별적인 동적부하 변동실험 후에는 유사정상상태로 유지하여 각 부하 변동실험이 다음 실험 결과에 미치는 영향을 최소화하였다.

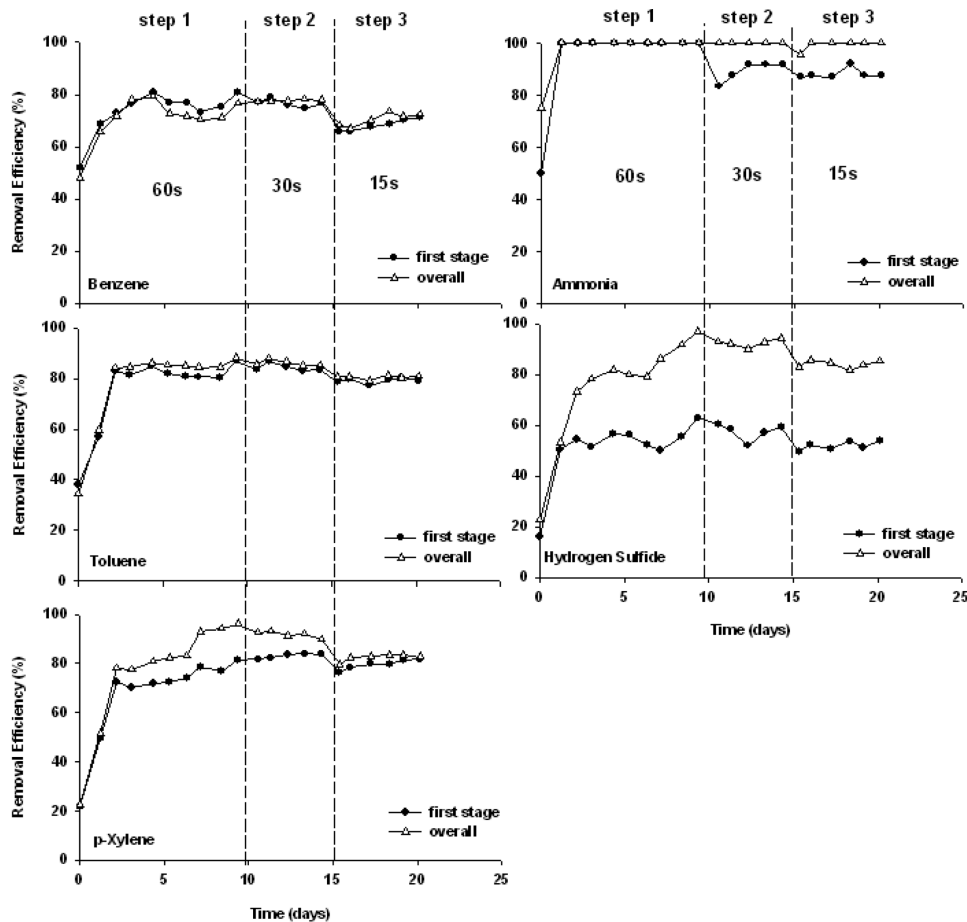


Fig. 2. Removal efficiencies of odorous compounds in the two-stage biofilter.

유기성 악취물질인 휘발성 유기화합물과 암모니아 제거는 거의 대부분 1단 바이오필터에서 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 1단 바이오필터에는 벤젠 고리를 갖는 방향족 유기물질 분해 능력이 높은 효모를 고정화하였기 때문에 휘발성 유기화합물의 분해가 주로 이루어졌다. 또한 1단 바이오필터의 담체 표면에 영양염류가 공급되고 pH가 일정 범위 내에서 유지되었기 때문에 용해도가 높은 암모니아는 대부분 1단에서 제거되었으며, 암모니아 유입 부하량이 높은 step-2와 step-3의 조건에서만 유입되는 암모니아의 일부가 2단으로 넘어가서 제거되었다. 황화수소는 1단 미생물 반응기에서 60% 정도의 양이 제거가 되었으며, 2단에서 나머지가 제거되어 전체적으로 약 85% 제거되는 것을 확인하였다. 이는 악취물질의 동시 유입시에 2단 바이오필터가 완충작용을 하여 단일 바이오필터만 운전하였을 때보다 악취 동시제거효율을 더 높일 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2. 총 유입부하량 단계변동에 따른 분해능 실험

총유입부하량 단계변동 실험은 모든 악취물질의 유입부하를 2시간마다 점차적으로 높여주고 그에 따른 분해능 (elimination capacity, EC)을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Total VOC의 유입부하를 230 g/m<sup>3</sup>/hr까지 변화시켜주며 분해능을 측정하였을 때, TVOC의 최대 분해능은 61 g/m<sup>3</sup>/hr로 확인되었다. 또한 암모니아와 황화수소의 최대 분해능은 각각 5.2와 9.1 g/m<sup>3</sup>/hr로 확인되었다. TVOC와 암모니아는 1단 반응기에서 거의 대부분의 악취물질 분해가 일어나는 것으로 확인되어 1단만의 분해능 결과와 2단까지 모두 통과한 후의 분해능 결과가 큰 차이가 없었다. 황화수소는 2단 반응기에서 전체 분해능의 약 25%가 제거됨으로써 2단 반응기가 충격부하시 황화수소 제거에 보완 역할을 하는 것을 확인하였다.

본 연구의 선형연구로서 동일한 이단 바이오필터를 구성하고 톨루엔과 암모니아 단일 물질을 개별적으로 유입시키는 실험을 실시하였으며, 같은 체류시간과 운전 상황에서 톨루엔과 암모니아가 단일 물질로 유입될 때의 최대 분해능은 약 100 g/m<sup>3</sup>/hr과 10 g/m<sup>3</sup>/hr이었다. 따라서 단일 악취물질이 유입되는 조건과 혼합 악취물질이 유입되는 실험조건을 비교하였을 때, 총 분해능이 톨루엔 40%, 암모니아 50% 정도 감소되는 것으로 나타났다. 이는 복합악취로 여러 물질이 동시 유입되면서 미생물의 분해능에 많은 악영향을 끼친 것으로 판단된다. 결과적으로 생물학적 악취 제어 시설을 실제 현장에 설계 설치하는 경우, 유입되는 악취 성분의 조성에 따라 분해능이 크게 변동할 수 있으므로 이에 대한 고려와 주의가 필요하다.

### 3.3. 개별 악취물질 유입부하량 단계변동에 따른 제거 효율 변화

위에 제시한 총오염부하량 단계변동에 따른 분해능 실험 결과에서 보면, 단일 악취물질이 유입될 때에 비하여 복합 악취물질이 유입되었을 경우에 분해능이 현저히 낮아지는

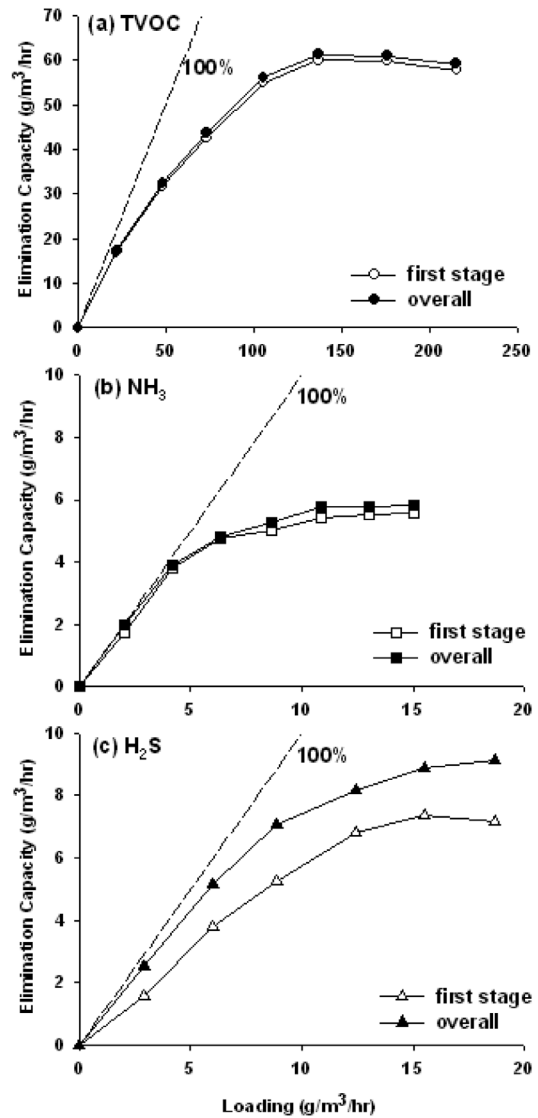


Fig. 3. Total elimination capacities of TVOC, ammonia and hydrogen sulfide in the two-stage biofilter.

것을 확인할 수 있었다. 이는 여러 가지 악취물질이 동시 유입되면 상호간의 작용에 의하여 분해능에 영향을 끼치는 것으로 판단되며, 각 악취물질들이 상호간에 주는 영향을 알아보기 위하여 개별 악취물질 유입부하량 단계변동 실험을 진행하였다.

Fig. 4에 제시한 실험결과는 바이오필터에 각 물질별로 하나씩 유입부하량 단계변동을 주었으며, 부하량 단계변동 시 다른 악취물질에 끼치는 영향을 확인해 보기 위하여 부하변동 전 제거효율(RE<sub>0</sub>)과 부하변동 후 제거효율(RE<sub>after</sub>)의 비율을 나타내었다. 한 물질에 부하량 단계변동이 주어졌을 때, 제거효율비가 1에 가까울수록 영향을 덜 받는 것이고, 낮을수록 그 물질의 제거효율에 영향을 많이 받는 것으로 해석할 수 있다. 벤젠 부하량 변동시 톨루엔과 p-자이렌 모두 제거효율에 영향을 받았으나, 20%에 가까운 제거효율 하락을 보임으로써 큰 손상은 받지 않는 것으로 확인되었다. 하지만 톨루엔의 부하량 단계 변동시에는 벤젠과 p-자

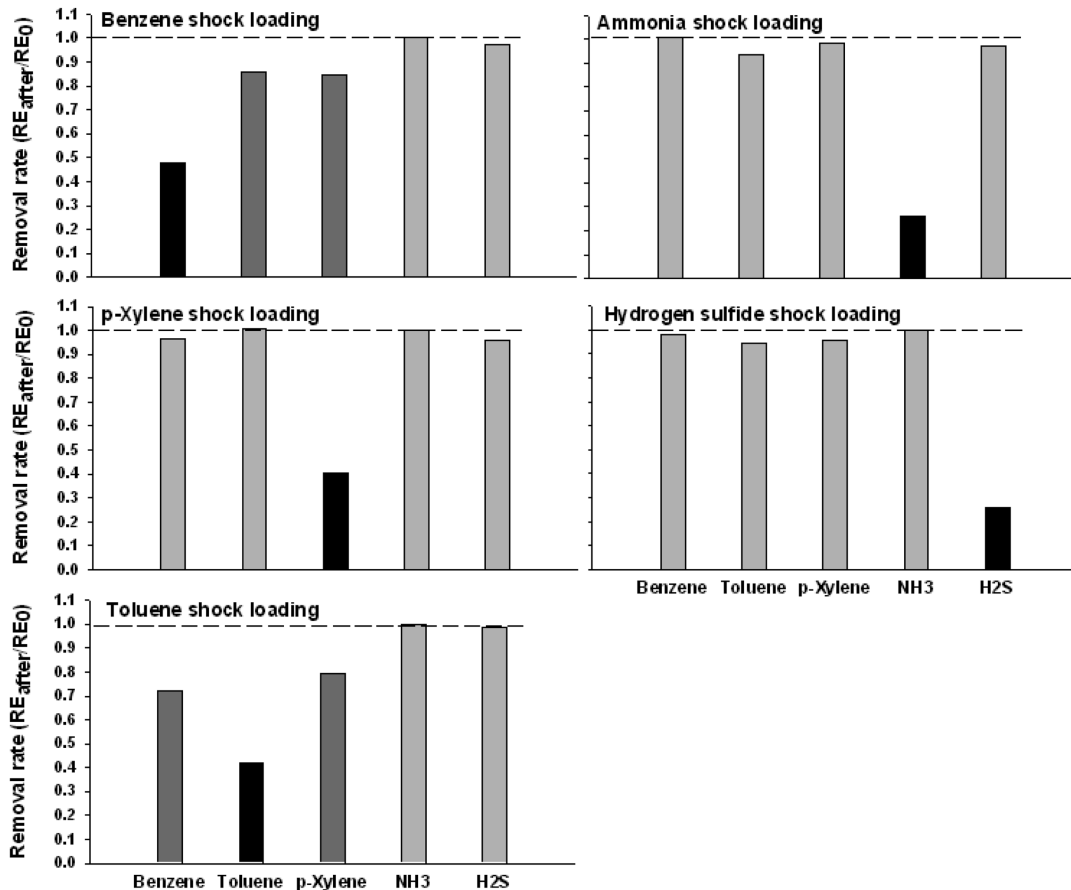


Fig. 4. Relative removal rate during the stepwise loading of each odor chemicals in the two-stage biofilter.

이렌이 각각 30%와 25%이상의 제거효율의 하락이 일어나는 것을 확인할 수 있었으며, 톨루엔이 벤젠과 p-자이렌의 분해능에 영향을 주기 때문에 판단된다. 반면 p-자이렌의 충격부하에는 벤젠과 톨루엔 모두 거의 영향을 받지 않았으며, 근소한 제거효율 상승을 보였다. 이와 같은 결과는 휘발성 유기화합물간의 상호작용에 대한 연구결과와 비교하였을 때,<sup>21,22)</sup> 벤젠과 톨루엔이 다른 악취물질의 제거에 저해요인이 되며, 자이렌은 톨루엔과 벤젠의 제거효율에 촉진의 영향을 끼친다는 결과와 유사하다.

유기악취의 부하량 변동에도 무기악취인 암모니아와 황화수소는 높은 제거효율을 유지하는 것으로 볼 때, 무기악취의 제거효율 유기악취의 부하량 변동에 거의 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 이와 마찬가지로 암모니아와 황화수소의 부하량 변동에도 유기악취의 제거효율 하락은 일어나지 않았으며, 무기악취와 유기악취는 서로의 제거효율에 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 또한 암모니아와 황화수소의 유입부하변동은 서로의 제거효율에 전혀 영향을 끼치지 않는 것으로 확인되었다. 이 결과는 악취물질에 따라 각각 다른 미생물을 이단 바이오필터에 적용하였기 때문에 판단된다. 따라서 단일 미생물이나 단일 반응기를 이용한 악취 제어설비 보다는 이단 바이오필터 시스템이 다양한 복합악취를 제거하는데 있어서 새로운 대안으로 적용될 수 있다.

### 3.4. 간헐 동적부하 변동

실제 현장에서는 악취물질의 강도와 종류는 연속적으로 고정된 것이 아니며 조업시간과 날씨, 온도 등 여러 가지 조건에 따라서 계속적으로 변화한다. 그 중에서도 악취 배출원의 조업시간에 따라, 짧게는 하루에서 길게는 3~4일까지 오염물질이 배출되지 않는 경우도 발생한다. 본 연구에서는 이러한 간헐 동적부하에 대한 이단 바이오필터의 성능을 확인하기 위하여, 48시간 동안 오염물질의 주입을 중지한 후(휴지 기간) 오염물질 주입을 재개하고 3일 동안의 오염물질 분해 활성도 회복상태를 관찰하였으며, 그 결과를 다음 Fig. 5에 나타내었다.

48시간 동안 오염물질이 유입되지 않았음에도 불구하고 오염물질 유입이 개시된 후에 암모니아는 거의 영향이 없이 이전의 제거효율을 유지하였다. 암모니아는 물에 대한 용해도가 높아 미생물이 활성화 되어 있고 pH가 유지되는 조건에서는 매우 기상으로부터 매우 빠른 속도로 제거되며, 따라서 휴지 기간의 영향이 거의 없었다. 황화수소와 톨루엔의 경우에도 다른 물질들에 비하여 처리효율의 회복속도가 매우 빠르고, 황화수소는 72시간 후에는 이전 제거효율에 비하여 더 높은 수준이 되는 것을 확인할 수 있었다. 반면 벤젠과 p-자이렌 등은 운전시작 직후에는 제거효율이 다소 많이 하락한 수준을 보였으며, 3일 경과 후에는 이전 처리효율 대비 95% 이상 수준의 회복율을 보였다.

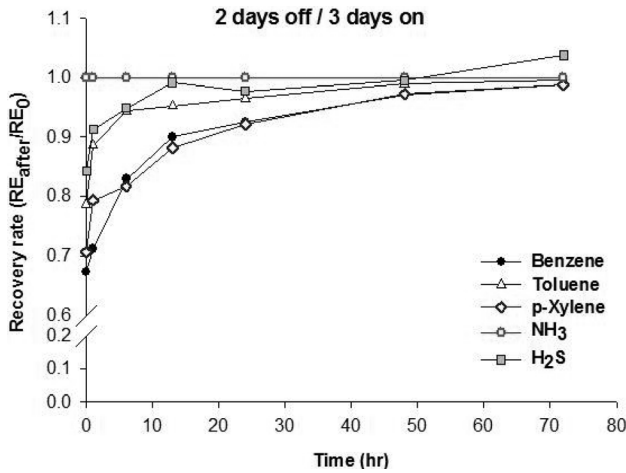


Fig. 5. Relative removal rate of 3 days after no more odor chemical 2 days off in two stage biofilter.

본 연구의 결과는 간헐적 주입에 따른 기존 연구결과에서 톨루엔이 8시간 만에 75%의 회복율을 보였던 것과 비교하였을 때,<sup>23)</sup> 톨루엔의 회복율이 6시간에 90% 이상을 보임으로써, 포괄고정담체를 이용한 이단바이오필터의 다양한 충격부하에 대한 적용성을 확인시켜 주었다. 그러나 2일의 휴지 기간 후 평균 90%의 효율 회복을 나타내는데 6시간 정도가 소요 되므로, 악취 규제가 강하거나 악취에 대한 민감도가 큰 지역에서는 바이오필터 설비의 추가 확충이나 부차적인 후처리 설비가 필요할 수도 있으며, 이에 대한 고려가 요구된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 yeast 및 SOB 포괄고정 스폰지형 담체를 적용한 이단 바이오필터를 이용하여, 복합악취 제거에 관한 실험을 실시하였다. 특히 충격부하에 관한 실험을 진행함으로써 복합악취 유입시 다양한 충격부하 상태에서의 악취제거 특성을 확인하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

1) 단기 충격부하 실험(EC test)의 결과로 악취물질이 복합적으로 유입이 될 때에는 단일 악취물질의 유입에 비하여 톨루엔과 암모니아의 분해능이 각각 40%, 50% 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과로 볼 때, 다양한 악취물질이 동시에 복합적으로 유입되면 서로의 분해능에 영향을 주는 것으로 판단된다.

2) 본 연구에서 각 물질별 충격부하 실험을 실시한 결과, 유기악취 상호간에 처리효율의 차이를 보임으로써 각 물질별로 미세한 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 유기악취와 무기악취는 서로의 처리효율에 아무 영향을 주지 않으므로 서로 독립적인 악취의 제거 작용이 일어나는 것으로 판단되어지며, 이와 같은 결과로 각 악취물질에 따라 미생물을 분리·적용시킨 이단 바이오필터가 복합악취의 제거에 많은 장점을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

3) 장기적인 악취물질의 부재 후 미생물의 악취물질 제거효율의 회복정도를 확인하기 위하여 2 days off & 3 days on 실험을 실시한 결과, 2일간 악취물질이 유입되지 않았음에도 3일 만에 95% 이상의 제거효율을 회복함으로써 매우 높은 회복상태를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

결과적으로 yeast와 SOB를 적용한 이단 바이오필터는 다양한 충격부하 조건에서 뛰어난 회복율과 분해능을 보였으며, 실제 다양한 충격부하가 주어지는 여러 악취발생원에 유연한 적용이 가능할 것으로 판단된다.

#### 사 사

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

KSEE

#### 참고문헌

- Byeon, S. H., Lee, J. G. and Kim, J. K., “Patterns of offensive odor compounds according to blocks in shiwha industrial complex,” *J. KSEE*, **31**(12), 1161~1168(2009).
- Pal, R., Kim, K. H., Hong, Y. J. and Jeon, E. C., “The pollution status of atmospheric carbonyls in a highly industrialized area,” *J. Hazard. Mater.*, **153**, 1122~1135(2008).
- Kennes, C. and Veiga, M. C., “Bioreactors for waste gas treatment,” Kluwer Academic Publishers(2001).
- 김대승, “산업현장의 악취 제거 기술과 최근동향,” 한국공업화학회 환경기술심포지엄, 111~134(2000).
- Won, Y. S., “Biotreatment technologies for air pollution control,” *Clean Technol.*, **13**(1), 1~15(2007).
- Auria, R., Aycaguer, A. C. and Devigny, J. S., “Influence of water content on degradation rates for ethanol in biofiltration,” *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **48**(1), 65~70(1998).
- Son, H. K., “The treatment of volatil eorganic compounds using a pilot-scale biofilter,” *J. Environ.l Health*, **30**(3), 245~252(2004).
- Shareefdeen, Z. and Singh, A., “Biotechnology for odor and air pollution control,” Springer(2005).
- 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).
- 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).
- Lee, H. S., Chu, D. S. and Jung, J. O., “Characteristics of biofilter support media for the odor control,” *J. Environ. Health Sci.*, **34**(1), 101~107(2008).
- Chang, Y. K. and Chu, L., “A simple method for cell disruption by immobilization of lysozyme on the extrudate-

- shaped NaY zeolite," *Biotechnol. Eng. J.*, **35**, 37~47(2007).
13. Lopez, A., Lazaro, N. and Marques, M., "The interphase technique : a simple method of cell immobilization in gel-beads," *J. Microbiol. Methods*, **30**, 231~234(1997).
  14. 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).
  15. 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).
  16. 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).
  17. Sawvel, R. A., Kim, B. and Alvarez, P. J. J., "Removal of volatile organic compounds at extreme shock loading using a scale-up pilot rotating drum biofilter," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **58**, 1407~1414(2008).
  18. Atoche, J. C. and Moe, W. M., "Treatment of MEK and toluene mixtures in biofilters: Effect of operating strategy on performance during transient loading," *Biotechnol. Bioengineer.*, **86**(4), 468~481(2004).
  19. Zarook, S. M., Shaikh, A. A., Ansar, Z. and Baltzis, B. C., "Biofiltration of volatile organic compound (VOC) mixtures under transient conditions," *Chem. Engineer. Sci.*, **52**(21,22), 4135~4142(1997).
  20. Park, S. J. and Cho, K. S., "Removal of hydrogen sulfide using porous ceramic biofilter inoculated with sulfur oxidizing bacteria," *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, **15**(5), 649~655(1999).
  21. Jang, H. S., Jeong, M. Y., Shin, S. K., Song, J. H. and Hwang, S. J., "Substrate interactions in the biodegradation of volatile organic compounds by a yeast strain," *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, **22**(2), 187~193(2008).
  22. Strauss, J. M., Riedel, K. J. and du Plessis, C. A., "Mesophilic and thermophilic BTEX substrate interactions for a toluene-acclimatized biofilter," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **64**, 855~861(2004).
  23. Moe, W. M. and Qi, B., "Performance of fungal biofilter treating gas-phase solvent mixtures during intermittent loading," *Water Res.*, **38**, 2259~2268(2004).