



미생물 포괄고정화 담체를 적용한 파일럿 스케일 바이오필터에서의 복합악취 제거 Complex odor removal in pilot-scale biofilter with microorganisms immobilized on polymer gel media

김선진¹ · 김태형¹ · 이윤희¹ · 장현섭² · 송지현³ · 황선진^{1*}

Sun-Jin Kim¹ · Tae-Hyeong Kim¹ · Yun-Hee Lee¹ · Hyun-Sup Jang² · Ji-Hyeon Song³ · Sun-Jin Hwang^{1*}

1 경희대학교 공과대학 환경학 및 환경공학과 · 환경연구센터, 2 (주)엑센, 3 세종대학교 건설환경공학과

(2011년 7월 20일 접수 ; 2011년 10월 10일 수정 , 2011년 10월 13일 채택)

Abstract

A pilot-scale biofilter was constructed to discover degradation characteristics of the complex odor discharged from Ansan wastewater treatment plant. *Candida tropicalis* for volatile organic compounds, sulfur oxidizing bacteria(SOB) for hydrogen sulfide, and bacteria extracted from feces soil were immobilized on a polymer gel media. According to this study, the EBCT was varied from 36 sec to 18 sec. Toluene was removed as 80% along the variations, but it was recovered as 100% within 1 week. All benzene and xylene were removed during the operation while the efficiency of hydrogen sulfur was temporary decreased at 18 sec of EBCT, thereafter it was recovered to 100% within a week. The maximum elimination capacities of the benzene, toluene, xylene, and hydrogen sulfur were 6.6 g/m³/hr, 31.7 g/m³/hr, 7.8 g/m³/hr, and 133.6 g/m³/hr, respectively. There were merits on removal both organic and inorganic complex odor using the pilot-scale biofilter embedded with microorganisms immobilized on polymer gel media.

Key words : Biofilter, Immobilized polymer gel media, Pilot plant, Sulfur oxidizing bacteria, Yeast

주제어 : 바이오필터, 포괄고정화 담체, 파일럿 플랜트, 황산화균, 효모

1. 서론

하수처리장이나 각종 산업시설 등지에서는 휘발성 유기 화합물(VOCs)과 무기화합물(H₂S, NH₃)이 기상 및 액상으로 배출된다(Singh *et al.*, 2006). 이러한 산업시설들은 인근 지역 주민들에게 복합악취에 포함된 다양한 특성에 의한 악취로 인해 불쾌함을 야기하며, 화합물의 종류에 따라서는 인체에 유해하고, 대도시 광화학 대기오염의 원인물질과 온실효과를 야기하기도 한다(Pal *et al.*, 2008 ; Kennes

et al., 2001). 국내에서도 2005년 2월 10일부터 악취방지법이 시행되면서 다양한 악취발생 시설에 적용 타당성이 높은 저감기술의 도입이 절실히 요구되고 있다.

악취를 제거하는 방법은 흡착, 세정, 냉각응축, 연소, 탈취제의 물리화학적 처리방법과 충전형 바이오필터 등의 생물학적 처리방법이 있다(Kim, 2000 ; Won, 2007). 물리화학적 방법은 다량의 오염물질을 안정적으로 처리하는 장점이 있지만, 유지비가 많이 들고, 2차 오염물질이 발생하는 단점이 있다(Auria *et al.*, 1998 ; Son *et al.*, 2004).

* Corresponding author Tel:+82-31-201-2497, Fax:+82-31-203-4589, E-mail: sjhwang@khu.ac.kr(Hwang, S.)

반면, 생물학적 처리기술 중 대표적인 충전 담체형 바이오필터(packed-bed biofilter) 방법은 물리화학적인 처리 방법에 비해 운전이 용이하며, 처리비용이 낮고, 부산물에 의한 2차오염이 적다는 장점이 있어 다양한 악취제거에 적용되고 있다(Shareefdeen *et al.*, 1994 ; Xi *et al.*, 2006). 그러나 생물학적 처리기술은 유·무기 복합악취를 처리하는 경우 단일 오염물질을 처리하는 경우 보다 처리효율이 저하되는 것으로 알려져 있다. 특히, 고농도의 오염물질을 장기간 처리할 경우, 담체표면에 미생물의 과다한 성장으로 인한 막힘현상(clogging)이 나타나 운전효율이 급격히 저하된다.

일반적으로 VOCs를 생물학적으로 처리하기 위해 다양한 세균들과 곰팡이류들이 이용되고 있다. 대표적인 톨루엔 또는 VOCs 생분해 세균으로는 *Pseudomonas putida*를 들 수 있으며(Shim *et al.*, 1999 ; Jung *et al.*, 2004), *Rhodococcus sp.*(Zilli *et al.*, 2001)나 *Acinetobacter sp.*(Alagappan *et al.*, 2004)등도 널리 이용되고 있다. 단일 세균은 온도나 습도, 산소농도 및 다양한 환경요인에 의해 생분해도에 크게 영향을 받아, 혼합균주(undefined mixed cultures)가 적용되는 경우가 많다(Van *et al.*, 2001).

최근에는 VOCs 분해세균들의 단점을 보완하기 위해 다양한 곰팡이류를 생물학적 처리공정에 적용하는 추세이다. 곰팡이류는 낮은 pH나 온도 및 습도 변화에 덜 민감하고, 곰팡이 균사가 넓게 퍼지면서 소수성 물질인 VOCs가 보다 쉽게 물질전달 될 수 있다고 알려져 있다(Van *et al.*, 2002). 그러나 곰팡이는 균사체로 성장하기 때문에 바이오필터 운전기간이 지속되면 막힘현상이 빠르게 나타나게 되고, 막힘현상이 나타난 후에는 회복되기 힘든 단점이 있다. 이에 세균과 곰팡이의 특성을 함께 나타내면서도 pH나 온도, 습도에 강한 효모(yeast)가 생물학적 VOCs 분해 미생물로 최근 급격히 대두되고 있다(Chen *et al.*, 2001).

충진형 바이오필터의 또 하나의 문제점은 담체에 부착된 미생물이 살수과정 등에 의해 쉽게 탈리되어 처리효율이 저감하는 것이다. 충전 담체를 개량하여 위의 문제를 해결하고 분해능을 증가시키려는 노력이 다양한 방법으로 진행되고 있고, 그 중 미생물 고정화기술이 활발하게 연구되고 있다. 미생물 고정화법은 결합고정화법, 자기고정화법, 포괄고정화법 등의 방법이 있다.

결합고정화법은 하천수에 오염물질이 유입될 경우 자갈 표면 등에 부착된 미생물들에 의하여 오염물질이 제거되는 현상에서 시작된 것으로, 접촉제 표면에 형성된 생물막을 이용하여 생물막과 하수 및 폐수의 접촉을 반복시킴으로써 오염물질을 생물학적으로 산화/분해시키는 방법이다. 자기

고정화법은 미생물이 적정한 수리조건 하에서 활성슬러지의 플러(floc)과 비교하여 아주 치밀하고 비중이 높은 직경 2~3 mm의 조립체(pellet)를 형성하게 하는 방법으로, 균체를 고농도로 보유시킬 수 있고, 고부하 운전이 가능하며, pellet의 활성이 매우 높은 특성을 지닌 새로운 처리방식 중의 하나이다. 포괄고정화법은 결합고정화법을 보완한 방법으로, 특정 미생물을 담체 내부에 고정시켜 고농도로 안정하게 유지할 수 있으며, 유기성 악취물질의 처리시간을 단축시킬 수 있다. 또한 특정 미생물을 선택적으로 고정시킴으로써 대상물질을 보다 효과적으로 처리할 수 있다는 큰 장점이 있다. 하지만 미생물 고정화 과정에서 고분자 물질의 pH나 독성 등의 문제로 인해 미생물 활성이 저해되며, 이에 따른 미생물의 오염물질에 대한 적응기간 및 미생물의 활성화 기간이 길어진다는 단점도 가지고 있다(Lee *et al.*, 2008 ; Chang *et al.*, 2007 ; Lopez *et al.*, 1997).

본 연구는 안산시 환경사업소에 유입되는 복합악취의 제거효율을 향상시키기 위해 미생물 활성 및 개체수 유지에 효율적인 폴리우레탄의 스펀지 담체에 유기성 악취에 높은 분해능을 갖는 효모인 *Candida tropicalis*와 무기성 악취인 황화수소에 대한 분해능을 갖는 황산화균(sulfur oxidizing bacteria, SOB)인 *Acidithiobacillus caldus sp.*, 분변토 추출액 미생물을 포괄고정하여 파일럿 스케일의 바이오필터에 적용하였다. 복합악취 중 유기악취물질로 벤젠, 톨루엔, 자일렌을 선정하였고, 무기악취물질로 황화수소를 선택하여 체류시간과 살수량 조절에 따른 복합악취 제거효율의 변화를 확인하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 적용균주

본 연구에서는 파일럿 플랜트에 복합적으로 유입되는 유/무기 악취를 효율적으로 분해하기 위해 특성이 다른 두 종류의 미생물을 사용하였다. 유기악취 제거를 위해 한국 미생물보존센터(Korean Culture Center of Microorganisms, KCCM)에서 분양받아 배양한 효모인 *Candida tropicalis*를 사용하였다. 효모 균주는 100 L 용량의 미생물 대량 배양기에 YM medium (yeast extract 3 g, malt extract 3 g, peptone 5 g, dextrose 10 g, agar 20 g, distilled water 1 L)에 접종하고, 톨루엔을 기상으로 공급하여 30°C에서 배양하였다.

무기악취 제거를 위해 하수처리장 슬러지에서 채취한 SOB인 *Acidithiobacillus caldus sp.*를 적용하였고, 분변토 미생물과 SOB를 100 L 용량의 미생물 대량 배양기에서 배양하였다. *A. caldus* 균주는 액상배지(K₂HPO₄ 2 g,

KH_2PO_4 2 g, NH_4Cl 0.4 g, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.18 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 2.47 g, distilled water 1 L)에 접종하여, thiosulfate를 에너지원으로 배양하였다. 초기 pH는 7.0~7.2이며, pH 4 이하가 되면 미생물 활성유지를 위해 계대배양을 실시했다.

분변도 미생물은 SOB와 동일한 배양액에 넣어 1시간 동안 180 rpm에서 교반한 후, 1000 μm sieve로 1차 여과시키고, 다시 100 μm sieve에서 2차 여과시켜 이물질을 제거한 후 배양하였다. 이후 pH 2.5 이하로 낮아진 분변도 미생물 10 L와 1.5 OD(optical density @ 600 nm) 값을 갖는 SOB 10 L를 액상배지 80 L에 혼합하여 호기성 조건에서 30°C, 180 rpm으로 교반하며 공배양하였다.

2.2 담체제조

본 연구에서 사용한 포괄고정 담체는 PEGDA(Polyethylene glycol diacrylate) 10%, sodium alginate 1%, potassium persulfate 1%, TMEDA 0.02%와 약 1.5 OD의 미생물 농축액 50%를 증류수에 혼합한 후, 큐빅-스핀지 형태(12X12X12)의 담체에 흡수시켜 상온에서 경화하여 제조하였다. 제조된 포괄고정화 담체는 *C. tropicalis* 포괄고정 담체와 SOB, 분변도 미생물 포괄고정 담체로 파일럿 스케일 바이오필터의 1단과 2단에 각각 충전되었다.

2.3 실험장치

본 연구에서 사용된 파일럿 스케일 바이오필터 모식도와 현장사진을 Fig. 1에 나타내었다. 파일럿 스케일 바이오필터는 총 용량이 10 m³로 전처리 스크리버단과 1단의 유기악취 처리부, 2단의 무기악취 처리부로 구성되었으며, 압력

에 의한 담체파손을 방지하기 위해 1단과 2단은 각각 4층의 서랍형태로 제작되었다. 이때 스크리버단은 pall ring을 충전하였고, 1단은 yeast 포괄고정 담체, 2단은 SOB, 분변도 미생물 포괄고정 담체를 충전하였다. 충전된 담체용량은 각 층마다 0.75 m³씩, 1단과 2단에 각각 3 m³가 충전되었다.

탈취관을 이용하여 발생된 악취를 기체 상태로 포집하여 바이오필터로 이송시켜 주었다. 시스템 내 기체흐름의 방향은 Fig. 1에서와 같이 스크리버단 하향류, 1단 상향류, 2단 하향류로 하였다. 처리효율 및 각 단별 제거량을 파악하기 위해 유입부와 1단 유입부, 2단 유입부, 유출부 등의 네 곳에서 시료를 채취하였고, 바이오필터 내부의 습도 유지 및 미생물에 무기염류를 공급해주기 위해 영양염류용액을 순환시켜 주었다.

2.3 파일럿 스케일 바이오필터 운전조건

파일럿 스케일 바이오필터의 처리용량은 20 m³/min이었고, 담체층 부피는 5.4 m³이었다. 스크리버단의 급수펌프는 10분에 2분씩 가동하게 설정하였고, 바이오필터의 급수펌프는 60분에 1분씩 가동하게 설정하였다.

바이오필터를 이용한 악취제거에 있어 가장 중요한 매개변수는 유량과 유입농도이다(Jorio *et al.*, 2000). 유량은 체류시간(empty bed contact time, EBCT)과 밀접한 관계가 있는데 체류시간에 따라 물질전달 속도가 달라지기 때문에 대상 기질의 제거량이 달라진다. 본 연구에서는 현장 특성상 악취성분의 유입농도를 임의로 조절할 수 없었기 때문에, 체류시간 조절을 통해 부하변동을 주어 그에 따른 제거효율을 분석하였다.

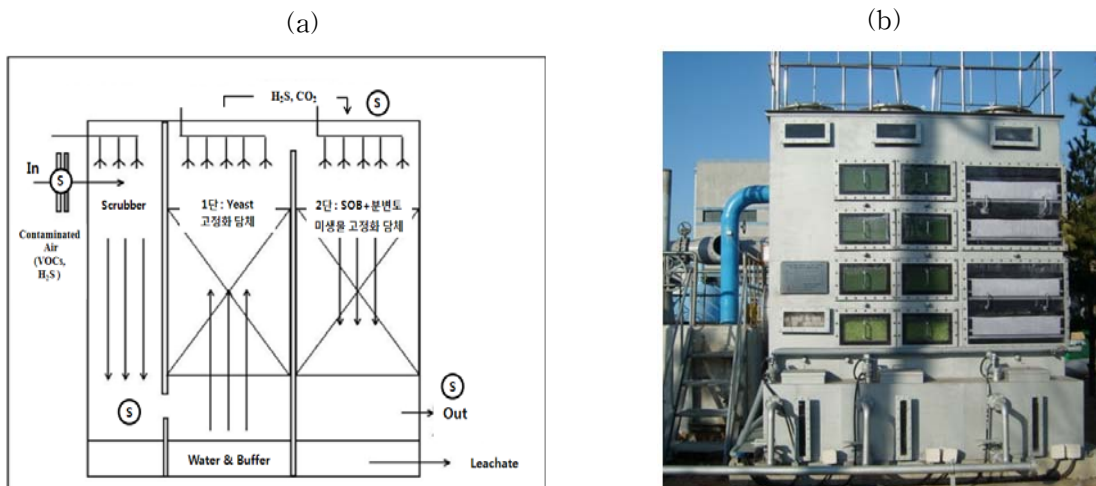


Fig. 1. (a) Schematic diagram of pilot-scale biofilter constructed (b) pilot-scale biofilter system in this study

유/무기 악취를 동시에 제거하기 위해 초기 EBCT를 36 초로 설정하여 한 달간의 안정화 기간을 가진 후, 30초, 24 초, 18초로 줄여가며 150일간 운전하였다.

또한, 스크러버단의 살수량을 변경하여, 전처리 단계의 살수량 변화가 시스템 전체 제거효율에 미치는 영향을 평가하였다. 각 단계별 운전조건을 Table 1에 나타내었다.

2.4 분석방법

바이오필터 4곳에 설치된 기체 시료 채취구를 통해 lung sampler를 이용하여 tedlar bag에 5 L씩 시료를 채취하였

으며, 채취한 즉시 FID가 장착된 가스크로마토그래피 (Acme 6000M GC, Young Lin Korea)를 사용하여 벤젠, 톨루엔, 자일렌을 분석하였다(Table 2). 벤젠, 톨루엔, 자일렌의 검량선은 vapor pressure 방법을 이용하여 0~300ppm 범위에서 작성하였다.

무기악취 중 황화수소의 농도는 FPD가 장착된 가스크로마토그래피 (GC 2010, Dong-il Shimadzu 社)를 이용하여 분석하였다(Table 3). 황화수소 가스의 검량선은 100 ppm 황화수소 표준가스(순도 99.999%)를 사용하여 작성하였다.

Table 1. Operating conditions in pilot scale biofilter

Step	Flow rate (m ³ /min)	EBCT (sec)	Water sprayed rate	
			Scrubber	1 st and 2 nd stage
I	5	36	2 min / every 10 min	1 min / every 60 min
II	6	30	2 min / every 10 min	1 min / every 60 min
III	7.5	24	2 min / every 10 min	1 min / every 60 min
IV	10	18	2 min / every 10 min	1 min / every 60 min
V	10	18	1 min / every 60 min	1 min / every 60 min

Table 2. Operating GC(FID) condition

Items	Condition
Detector	FID
Column packing material	Porapak Q
Column type	Capillary column
Oven temperature	150 °C
Detector temperature	200 °C
Injection temperature	200 °C
Carrier gas	Helium
Sample injection volume	1 mL
Flow rate	50 ml/min

Table 3. Operating GC(FPD) condition

Items	Condition
Detector	FPD
Column packing material	1,2,3-TECP
Column type	Packed column
Oven temperature	50~65 °C/min
Detector temperature	150 °C
Injection temperature	150 °C
Carrier gas	Helium
Sample injection volume	1 mL
Flow rate	50 ml/min

3. 결과 및 고찰

3.1 EBCT 변화에 따른 처리효율 평가

현장에 설치된 바이오필터로 유입되는 악취물질의 강도와 종류는 조업시간과 날씨, 온도 등 여러 조건에 따라 불규칙적으로 변한다. 이에 본 연구에서는 바이오필터로 유입되는 악취성상을 분석한 후, 유기악취는 벤젠, 톨루엔, 자일렌을 무기악취는 황화수소를 대상물질로 선정하였다.

벤젠, 톨루엔, 자일렌의 바이오필터로의 유입, 유출농도 및 제거효율을 Fig. 2에 나타내었다. 톨루엔은 0 ppmv에서 최대 25 ppmv까지 유입되었고, EBCT가 변화될 때마다 80%까지 제거효율이 감소되었다가 안정화되면서 100%에 가까운 제거효율을 나타내었다. 벤젠의 경우는 0~7 ppmv의 농도로 유입되었고, EBCT 24초까지는 100% 제거효율을 나타내었지만, EBCT 18초로 변경 후, 60%까지 제거효율이 감소하였다. 그러나 시간이 지나 안정화되면서 역시 100%에 가까운 제거효율을 나타내었다.

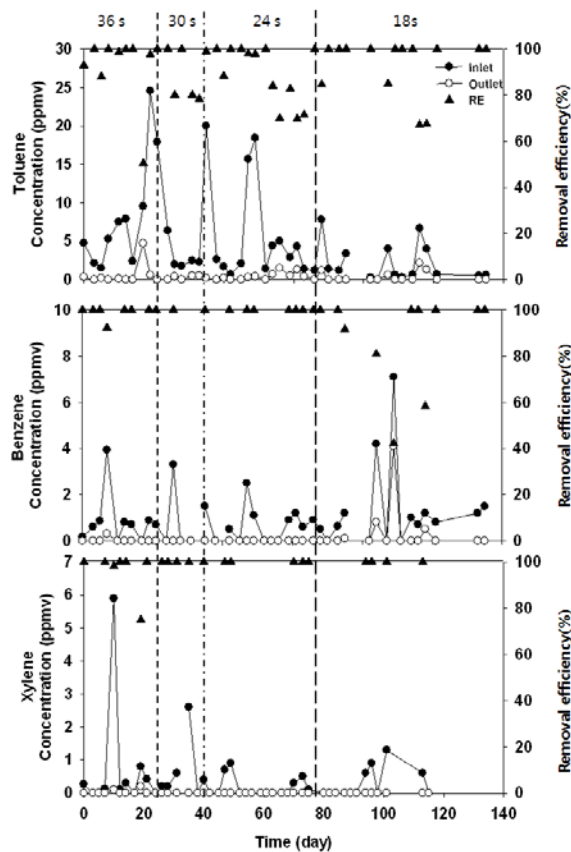


Fig. 2. Inlet and outlet VOCs (toluene, benzene, and xylene) concentrations and removal efficiencies depending on EBCT variations

자일렌의 경우에는 0~6 ppmv의 농도로 유입되었고, EBCT 변화에 관계없이 100%의 제거효율을 나타내 유입된 농도범위에 한해서는 EBCT의 감소가 자일렌의 제거율에 영향을 미치지 않은 것으로 확인되었다.

무기악취인 황화수소의 유입, 유출농도와 제거율에 대한 실험결과를 Fig. 3에 나타내었다. 운전기간 동안 최대 273 ppmv이 유입되었고, EBCT 24~36초에서 거의 100%의 황화수소가 제거되었다. 그러나 EBCT 18초에서 123 ppmv의 높은 농도의 황화수소가 유입되었을 때, 일시적으로 90% 수준으로 제거효율이 감소하였다. 그러나 수 일 이내에 97% 이상의 높은 제거효율을 회복하였다.

바이오필터는 EBCT가 짧아질수록 그에 비례하는 유입 부하를 받게 되어 시스템의 효율이 급격히 감소하고 제거량이 감소하는 경향을 나타내는데, 본 시스템에서는 상대적으로 EBCT가 50%까지 감소해도 제거효율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(Sorial *et al.*, 1997).

3.2 EBCT 변화에 따른 각 단별 제거능

바이오필터의 EBCT 변화에 따른 톨루엔, 벤젠, 자일렌의 각 단별 제거량을 Fig. 4에 나타냈다. 톨루엔의 경우

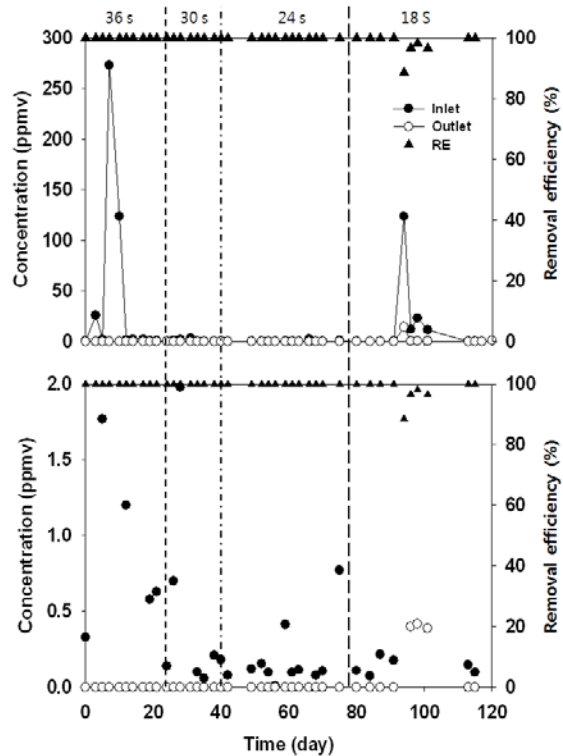


Fig. 3. Inlet and outlet concentrations of H₂S and removal efficiency depending on EBCT variations

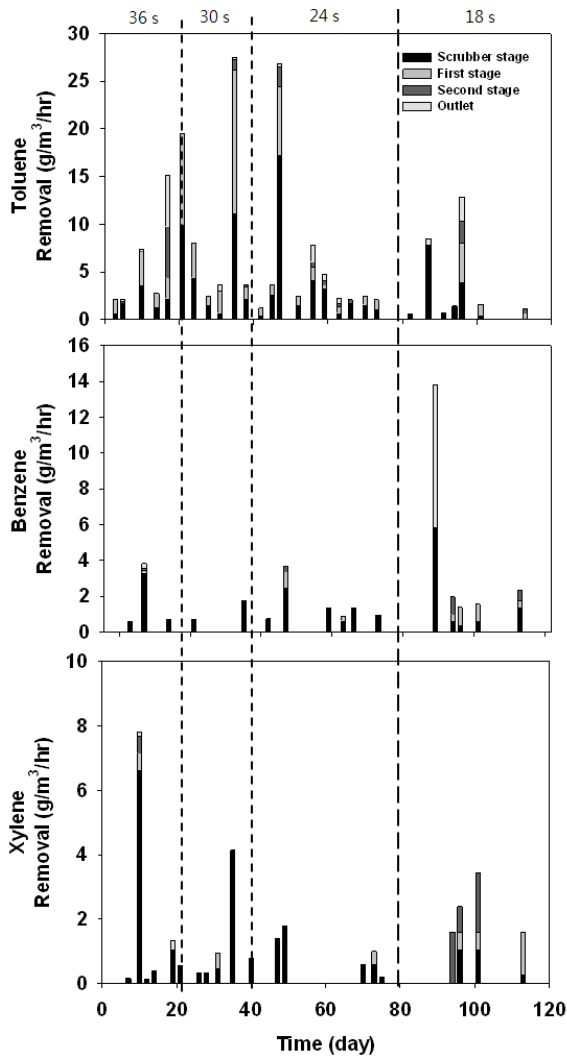


Fig. 4. VOCs(toluene, benzene, and xylene) removal according to the each stage with different EBCT

EBCT 30초까지는 전량 제거되는 것으로 나타났으나, 24초, 18초로 짧아지면서 미제거량이 증가하는 추세를 나타냈다.

반면, 벤젠과 자일렌의 경우는 EBCT의 감소와 상관없이 전량 제거되는 것으로 나타났다. VOCs의 용해도가 낮아 스크러버단에서의 제거량 보다 1단에서의 제거량이 많을 것이라 예상하였으나, 톨루엔, 벤젠, 자일렌 모두 스크러버단에서 가장 많은 양이 제거되었고, 미처리된 가스의 대부분이 1단에서 제거되었다.

스크러버단의 살수액을 현미경으로 관찰한 결과, 미생물이 성장한 것을 확인하였다. 이를 통해 스크러버단이 바이오 스크러버로서의 역할을 수행했고, 스크러버단에서 미처리된 가스를 1단에서 yeast가 분해한 것으로 사료된다.

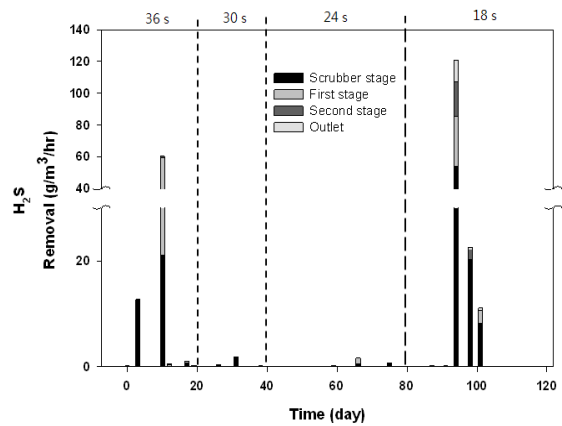


Fig. 5. H₂S removal according to the each stage with different EBCT

EBCT 변화에 따른 황화수소의 각 단별 제거량을 Fig. 5에 나타냈다. 각 단별 제거량을 살펴보면 스크러버단에서 가장 높은 황화수소 제거량을 나타냈고, 1단, 2단 순으로 제거되었다. 이는 황화수소의 용해도가 2.58 ml/g (20°C, 1 atm)으로 높아 물에 용해가 잘 되는 특성을 갖기 때문에 스크러버단에서 가장 많은 양이 제거된 것이라 판단된다.

EBCT 따라 각 단별 황화수소 제거율에 변화가 있을 것으로 예상했으나, 황화수소의 용해도가 높아 저농도(2 ppmv 이하)로 유입되었을 경우 스크러버단에서 전량 제거되어, 각 단이 황화수소 제거에 미치는 영향을 파악할 수 없었다.

그러나 고농도(50 ppmv 이상)의 황화수소가 유입되었을 때는 모든 단에서 황화수소가 제거되는 것으로 나타나, 고농도의 황화수소가 유입되어도 효과적으로 황화수소를 제거할 수 있음을 파악할 수 있었다.

3.3 살수량 변화에 따른 처리효율 평가

EBCT 따른 각 단별 제거율을 살펴본 결과, 저농도의 황화수소는 95% 이상, 벤젠, 톨루엔, 자일렌은 50% 이상이 스크러버단에서 제거되었다. 약취물질이 스크러버단에서 제거될 경우 1단과 2단에 빈영양 환경이 조성되어 미생물의 성장에 저해를 받을 수 있다. 이에 스크러버단의 살수량을 초기 2 min-on/10 min-off에서 1 min-on/60 min-off로 줄여 1단과 2단의 미생물 활성을 유지해주고자 하였다. 또한 스크러버단의 살수량이 줄어들면 물 사용량도 줄어들기 때문에 경제적인 것이라 판단되며, 본 연구에서는 황화수소가 95% 이상 제거된 체류시간 18초에서 스크러버단의 살수량을 변경하여 효율을 평가하였다.

살수량 변화에 따른 벤젠, 톨루엔, 자일렌 제거율 변화를

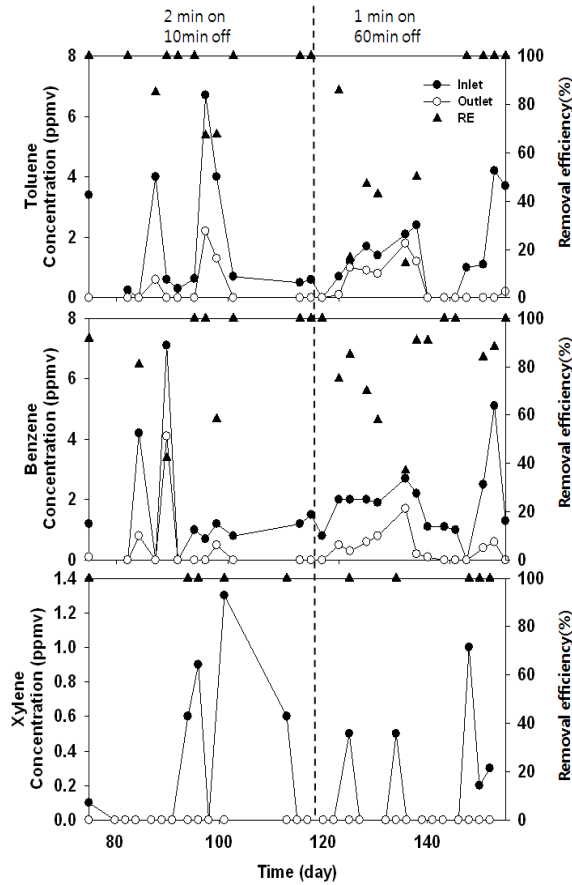


Fig. 6. VOCs(toluene, benzene, and xylene) removal efficiencies according to the watering amount

Fig. 6에 나타냈다. 톨루엔과 벤젠의 경우 스크리버단의 살수량을 변경했을 때 제거율이 40%까지 감소하였다가, 안정화되면서 전량 제거되었고, 자일렌은 스크리버단의 살수량에 상관없이 100% 제거되었다.

Fig. 7은 살수량 변화에 따른 황화수소의 제거율로 스크리버단의 살수량을 줄인 후 처리효율이 일부 감소하였으나, 운전 140일 이후 95% 이상의 높은 제거효율을 나타냈다. Fig. 3을 통해 약 120일간의 운전기간 동안 대부분의 황화수소가 2 ppm 이하의 저농도로 유입된 것을 알 수 있다. 이중 95% 이상이 스크리버단에서 제거되었고, 이로 인해 2단에서 성장하는 SOB의 활성 및 개체수가 감소하여 살수량을 줄인 후 초기 제거율이 감소한 것으로 판단된다.

그러나 살수량 변경 후 스크리버단에서 제거되지 않은 황화수소가 1단을 통해 2단으로 다량 유입됨에 따라 SOB의 개체수가 증가하여 살수량 조절 2주경과 후, 황화수소가 안정적으로 처리된 것으로 판단된다.

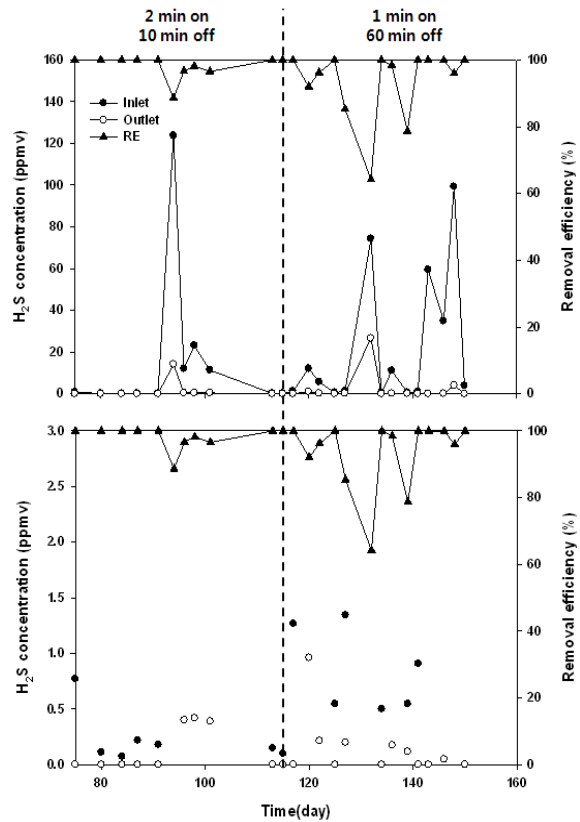


Fig. 7. H₂S removal efficiency according to the watering amount

이 결과를 통해 유입농도에 따른 살수량 조절 시스템을 적용한다면 보다 경제적이고, 처리효율이 높은 바이오필터가 가능할 것으로 보인다.

3.4 최대 분해능 산출

본 시스템을 운전함에 있어 현장특성상 악취성상이 균일하지 않고, 유입농도 또한 일정하지 않았다. 이에 본 연구에서는 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 황화수소를 대상으로 특정시간에 발생하는 유입부하량에 따른 처리율을 이용해 최대 분해능을 산출하여 바이오필터의 성능을 평가하였다. Fig. 8에 체류시간 변화에 따른 톨루엔, 벤젠, 자일렌의 제거량을 나타냈다. 운전기간 중 톨루엔의 최대 분해능은 31.7 g/m³/hr로 나타났고, 벤젠은 6.6 g/m³/hr, 자일렌은 7.8 g/m³/hr로 나타났다. 또한, 톨루엔의 경우 최대 유입부하 31.7 g/m³/hr에서 톨루엔이 100% 제거되었고, 자일렌 역시 최대 유입부하 7.8 g/m³/hr에서 100% 제거된 것으로 보아, 더 높은 유입부하에서도 안정적으로 제거할 수 있을 것이라 판단된다. 시스템의 운전기간 중 황화수소 최대 제거량은 Fig. 9에 나타낸 것과 같이 133.6 g/m³/hr로 나타났으며,

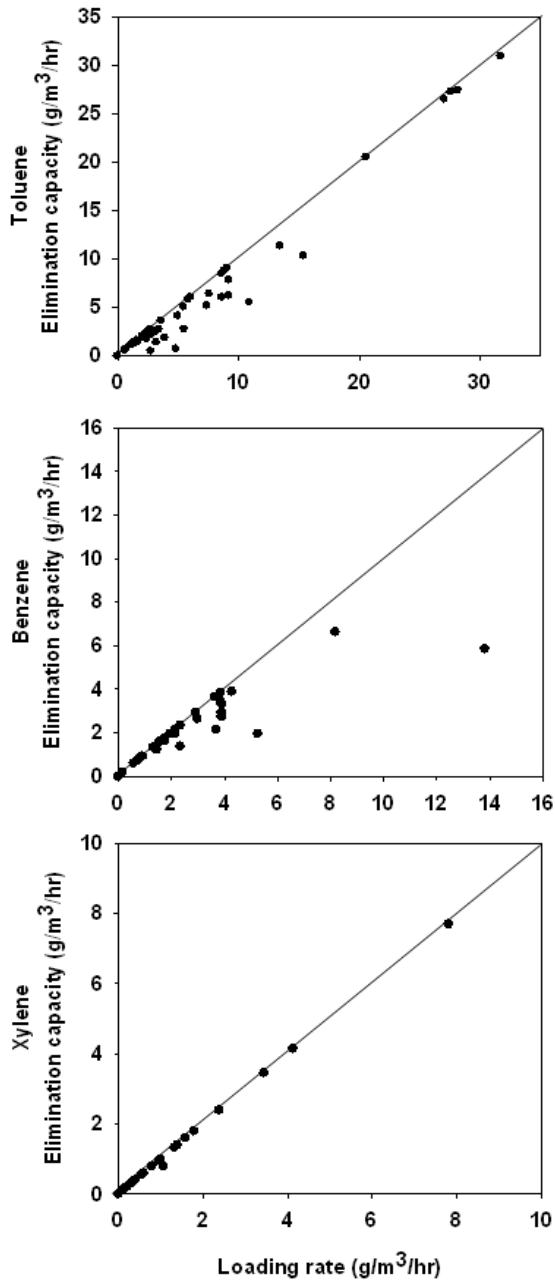


Fig. 8. The elimination capacities of VOCs(toluene, benzene, and xylene) with increased loading rate

최대 유입부하에서 100% 제거되었다.

(Park, 2008)에 의하면 zeocarbon을 충전한 바이오필터를 적용하여 톨루엔, 황화수소, 암모니아의 분해특성을 파악한 결과 톨루엔, 황화수소, 암모니아의 최대 분해능이 각각 15.2 g/m³/hr, 20.6 g/m³/hr, 9.3 g/m³/hr이라 보고하였다.

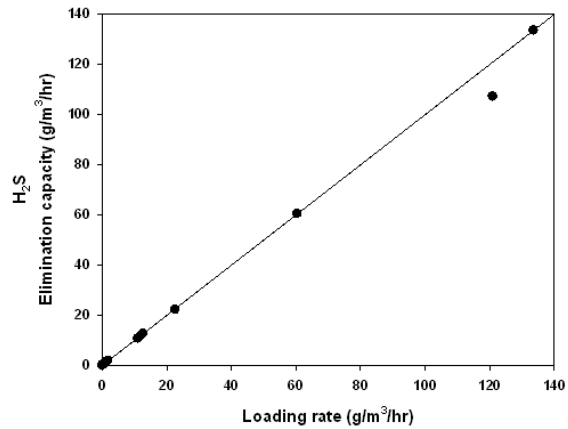


Fig. 9. H₂S elimination capacity with increased loading rate

또한 (Nangung, 2010)에 의하면 스폰지형 포괄고정화 담체를 충전한 바이오필터를 적용하여 TVOC와 황화수소, 암모니아의 분해특성을 파악한 결과, TVOC, 황화수소, 암모니아의 최대 분해능이 각각 61, 9.1, 5.2 g/m³/hr이라 보고하였다.

본 연구에서는 파일럿 현장의 낮은 유입부하로 인해 톨루엔과 벤젠, 자일렌은 다소 낮은 최대분해능을 나타냈지만, 황화수소의 경우 기존 바이오필터에 비해 10배 이상의 높은 최대분해능을 나타냈다. 이 결과는 물리/화학적 방법이 결합된 하이브리드 형태의 시스템과 악취물질에 따라 각각 다른 미생물을 포괄고정한 담체를 이단 바이오필터에 적용했기 때문이라고 판단된다. 따라서 단일 바이오필터 보다는 스크러버단과 목적 미생물이 포괄고정된 담체를 적용한 이단 바이오필터의 결합이 고농도 복합악취를 제거하는데 있어 새로운 대안으로 적용될 수 있을 것이라 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 yeast 및 SOB, 분변토 미생물 포괄고정 스폰지형 담체를 적용한 pilot scale의 바이오필터를 이용하여 현장에서 발생하는 복합악취 제거에 관한 성능평가 실험을 실시하였다. 체류시간 변화와 스크러버단의 살수량 변화에 따른 바이오필터의 유/무기 악취제거 특성을 확인한 결과들은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 본 연구에서 체류시간에 따른 각 물질별 제거효율을 평가한 결과, 체류시간이 36초에서 18초로 짧아짐에 따라 톨루엔, 벤젠, 자일렌, 황화수소 제거율이 다소 감소했지만, 수일 내로 100% 제거율을 나타내었다. 이에 따라 유/무기

악취 제거를 위한 미생물이 각각 적용된 바이오필터가 유입 부하에 따른 적용성이 우수하다고 판단된다.

2) 바이오필터의 살수량을 줄인 후 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 황화수소 제거율이 다소 감소했지만, 10일 이내에 안정화 되어 제거율을 회복하는 것으로 나타났다.

이는 스크러버단의 살수량이 줄어들어 따라 1단과 2단에서 성장하는 미생물의 활성 및 개체 수가 증가하여 제거율이 높아진 것으로 보인다. 따라서 유입농도에 따른 살수조절 시스템을 적용한다면 미생물의 활성을 유지시켜주면서, 경제적인 바이오필터 운전이 가능할 것으로 판단된다.

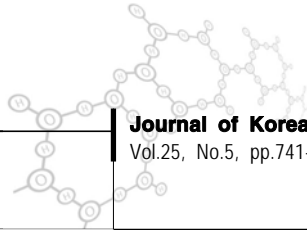
3) 본 시스템의 벤젠, 톨루엔, 자일렌 최대 분해능은 파일럿 현장의 낮은 유입부하로 인하여 다소 낮게 나타났지만, 황화수소의 경우 기존 바이오필터에 비해 높은 분해능을 나타내었다. 이는 스크러버단이 결합된 이단 바이오필터를 사용하였기 때문이라 사료되며, 이 시스템은 고농도의 악취 제거에 많은 장점을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

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

참고문헌

- 김대승 (2000) 산업현장의 악취 제거 기술과 최근동향, *한국공업화학회 환경기술심포지엄*, pp. 111-134.
- 남궁형규, 신승규, 황선진, 송지현 (2010) 미생물 포괄고정화 담체를 이용한 이단 바이오필터에서의 오염부하량 동적부하변동시 복합악취 제거효율 변화특성, *대한환경공학회지*, **32**(21) pp. 1126-1133.
- Alagappan, G. and R. M. Cowan (2004) Effect of temperature and dissolved oxygen on the growth kinetics of *Pseudomonas putida* F1 growing on benzene and toluene, *Chemosphere*, **54**(8), pp. 1255-1265.
- Auria, R., Aycaguer, A. C. and Devigny, J. S. (1998) Influence of water content on degradation rates for ethanol in biofiltration, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **48**(1), pp. 65-70.
- Byoung-Gi Park, Won Sik Shin, Yong Shik Jeong, Jong Shik Chung (2008) Simultaneous Removal of H₂S, NH₃ and Toluene in a Biofilter Packed with zeocarbon carrier, *J. the Environmental Sciences*, **17**(1), pp. 7-17.
- Chang, Y. K. and Chu, L. (2007) A simple method for cell disruption by immobilization of lysozyme on the extrudate shaped NaY zeolite, *Biotechnol. Eng. J.*, **35**, pp. 37-47.
- Chen, K.-D., Y.-H. Lin, et al. (2002) Degradation of phenol by PAA-immobilized *Candida tropicalis*, *Enzyme and Microbial Technology*, **31**(4), pp. 490-497.
- Jorio, H., Bibeau, L., Viel, G. and Heitz, M. (2000) Effects of gas flow rate and inlet concentration on xylene vapors biofiltration performance, *Chem. Eng. Sci.*, **76**, pp. 209-221.
- Jung, I.-G. and C.-H. Park (2004) Characteristics of *Rhodococcus pyridinovorans* PYJ-1 for the biodegradation of benzene, toluene, m-xylene (BTX), and their mixtures, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **97**(6), pp. 429-431.
- Kennes, C. and Veiga, M. C. (2001) Bioreactors for waste gas treatment, *Kluwer Academic Publishers*
- Lee, H. S., Chu, D. S. and Jung, J. O. (2008) Characteristics of biofilter support media for the odor control, *J. Environ. Health Sci.*, **34**(1), pp. 101-107.
- Lopez, A., Lazaro, N. and Marques, M. (1997) The interphase technique : a simple method of cell immobilization in gelbeads, *J. Microbiol. Methods*, **30**, pp. 231-234.
- Pal, R., Kim, K. H., Hong, Y. J. and Jeon, E. C. (2008) The pollution status of atmospheric carbonyls in a highly industrialized area, *J. Hazard. Mater.*, **153**, pp. 1122-1135.
- R.S.Singh, S.S.Agnihotri, S.N. Upadhyay (2006) Removal of toluene vapour using agro-waste as biofilter media, *Bioresource technology*, **97**, pp. 2296-2301.
- Shareefdeen, Z. and B. C. Baltzis (1994) Biofiltration of toluene vapor under steady-state and transient conditions : Theory and experimental results, *Chemical Engineering Science*, **49**(24, Supplement 1), pp. 4347-4360.
- Shim, H. and S.-T. Yang (1999) Biodegradation of benzene, toluene, ethylbenzene, and o-xylene by a coculture of *Pseudomonas putida* and *Pseudomonas fluorescens* immobilized in a fibrous-bed bioreactor, *Journal of Biotechnology*, **67**(2-3), pp. 99-112.
- Son, H. K. (2004) The treatment of volatil eorganic compounds using a pilot-scale biofilter, *J. Environ.*



- Health*, **30**(3), pp. 245–252.
- Sorial, G.A., Smith, F.L., Suidan, M.T., Biswas, P., Brenner, R.C. (1997) Performance of peat biofilter: impact of the empty bed residence time, temperature and toluene loading, *J. of hazardous materials*, **53**(1/3), pp. 19–33.
- Van Groenestijn, J. W., W. N. M. van Heiningen, *et al.* (2001) Biofilters based on the action of fungi, *Water Sci Technol*, **44**(9), pp. 222–232.
- Van Groenestijn, J. W. and J. X. Liu (2002) Removal of alpha-pinene from gases using biofilters containing fungi, *Atmospheric Environment*, **36**(35), pp. 5501–5508.
- Won, Y. S. (2007) Biotreatment technologies for air pollution control, *Clean Technol.*, **13**(1), pp. 1–15.
- Xi, J., Hu, H. Y. and Qian, Y. (2006) 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), pp. 165–172.
- Zilli, M., E. Palazzi, *et al.* (2001) Toluene and styrene removal from air in biofilters, *Process Biochemistry*, **37**(4), pp. 423–429.