

Elimination capacities of toluene and ammonia in the bio-filter system depending on type of media

담체 종류에 따른 바이오필터의 톨루엔과 암모니아 분해능 평가

Sunjin Kim · Tae-Hyeong Kim · Sun-Jin Hwang*

김선진 · 김태형 · 황선진*

경희대학교 공과대학 환경공학과 · 환경연구센터

Abstract : Contribution of immobilized media with bacteria to the odor removal was evaluated in a lab scale bio-filter compared to that with sponge or ceramic media without the immobilized bacteria. *Candida tropicalis* for volatile organic compounds and ammonium oxidizing bacteria (AOB) for inorganic compounds were used as seeds in lab-scale bio-reactors. Three different type of media in the bio-reactors that immobilized bioreactor (IBR), sponge bioreactor (SBR), and ceramic bioreactor (CBR) were examined, respectively. An empty bed contact time (EBCT) of the bio-filters was fixed as 60 seconds, and the inlet concentration of toluene was changed from 20 ppm to 200 ppm to observe the removal efficiency depending on the concentrations. As a result, the maximum elimination capacities of IBR, SBR, and CBR were 166 g/m³/hr, 138 g/m³/hr, and 138 g/m³/hr, respectively.

In addition, toluene as an organic compound and ammonia as an inorganic compound were applied together with different inlet concentrations varied from 80 ppm to 250 ppm of toluene and from 2.5 ppm to 40 ppm of ammonia. The toluene maximum elimination capacities in IBR, SBR, and CBR were 97.4 g/m³/hr, 59.5 g/m³/hr, and 81.9 g/m³/hr, respectively. The ammonia maximum elimination capacities were reached as 7.2 g/m³/hr in IBR, 6.6 g/m³/hr in SBR, and 7.0 g/m³/hr in CBR.

Key words : Bio-filter, Immobilized media, Ceramic media, Toluene, Ammonia

주제어: 바이오필터, 포괄고정 담체, 세라믹 담체, 톨루엔, 암모니아

1. 서론

다양한 산업시설에서 배출되는 톨루엔, 벤젠과 같은 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Carbon, VOCs)과 암모니아, 황화수소와 같은 휘발성 무기화합물(Volatile Inorganic Carbon, VICs)은 유해대기오염물질(Hazardous Air Pollut-

ants, HAPs)로 대표적인 악취유발물질이다(Qi and Moe, 2006). 악취는 여러 성분이 혼합된 상태로 존재하면서 인간의 후각을 자극하여 심리적, 정신적 피해를 야기하는 감각공해이다.

국내에서는 2005년 2월 10일부터 악취방지법이 시행됐으며, 이로 인해 악취발생 지역에 적용성이 높은 악취저감기술의 도입이 요구되고 있다.

악취를 저감하는 기술에는 흡착, 세정, 연소 등의 물리화학적 처리방법과 바이오필터 등의 생물학적 처리방법이 있으며, 그 중에서도 생물학적

* Received 6 November 2012, revised 3 December 2012, accepted 7 December 2012.

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

처리방법인 바이오필터는 악취를 분해하는 미생물을 물리적 충격에 강한 매개물질인 담체에 부착시켜 오염물질을 제거하는 방식으로 처리효율이 뛰어나다(Kim, 2000; Won, 2007). 특히, 하폐수 처리장과 제지공장 등의 산업시설에서 배출되는 저농도의 VOCs는 물리화학적 방법보다 생물학적 방법이 더욱 적합하다(Kim et al., 2005; Dorado et al., 2008).

생물학적 바이오필터에 사용되는 담체는 바이오필터의 분해능을 증가시키는 중요한 요소로써, 압력손실이 작고, 통기가 잘되어야 하며, 표면적이 크고, 미생물 부착 및 서식환경이 좋아야 한다. 또한 수분 보유력이 커야하고, 내구성이 좋고, 흡착능이 우수한 담체가 좋다.(Park, 2001)

바이오필터용 담체로는 다공질 세라믹, 목탄, 활성탄, 섬유상 스펀지 등의 무기재료나 합성재료가 많이 사용된다. 이 중 polyurethane 재질의 스펀지 담체는 높은 공극율과 표면적이 크고, 수분 흡착능력이 좋아 바이오필터의 담체로 널리 사용되고 있다(Moe and Irvine, 2000; Moe and Qi, 2004). 또한, 세라믹 담체 역시 압축강도와 다공성이 우수하여 미생물이 부착하여 성장하기 좋은 환경을 구성하기 때문에 바이오필터의 담체로 널리 사용되고 있다(Liao et al., 2008).

그러나 세라믹, 스펀지, 활성탄과 같은 담체는 미생물 과다성장으로 반응조내 공극을 막거나(clogging), 담체로부터 미생물이 탈리되어 운전효율이 급격히 감소하는 단점이 있으며, 미생물 개체수 및 활성유지의 어려움으로 인해 악취제거 효율이 안정적이지 못하다(Jang et al., 2004, Oh et al., 2000).

따라서 최근에는 기존 담체의 문제점을 보완하기 위해 담체의 강도와 내구성을 강화시켜 악취제거 효율을 극대화시킬 수 있는 포괄고정담체 개발에 대한 연구가 진행되고 있다(Kim 등, 2012). 포괄고정 담체는 미생물을 담체 내부에 고정시켜 미생물의 대량확보 및 유입부하, 온도,

pH 변화 등에 대한 미생물의 활성유지가 용이하여 안정적 운전이 가능하다고 보고되고 있다(Han 등, 2005; Kim 등, 2012).

본 연구에서는 선행연구를 통해 포괄고정 담체를 개발했으며(김 등, 2012), 자체 개발한 포괄고정 담체의 효능을 평가하기 위해 포괄고정 담체, 스펀지 담체, 세라믹 담체를 각각 충전한 바이오필터를 운전하여 유기악취 및 유·무기 복합악취에 대한 처리효율과 분해능을 평가하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 적용균주

2.1.1 톨루엔 분해균주

본 연구에서는 휘발성 유기화합물에 분해능이 높은 효모(yeast)인 *Candida tropicalis*를 대상균주로 하였으며, 한국미생물보존센터(Korea Culture Center of Microorganisms, KCCM)에서 분양받아 YM(yeast extrate 3 g, malt extract 3 g, peptone 5 g, dextrose 10 g, agar 20 g, distilled water 1 L) 한천배지에서 1차 배양하였다. 액상배양을 위해 탄소원으로 톨루엔을 첨가한 액체배지에 한천배지에서 배양된 *C. tropicalis* 균주를 접종하고, 30 °C, 180 rpm으로 2차 배양하였다. 이때 액체배지 조성은 Table 1과 같다.

Table 1. Composition of nutrient solution for *C. tropicalis*

Component	Concentration (mg/L)	Component	Concentration (mg/L)
NaH ₂ PO ₄	78	FeSO ₄ · 7H ₂ O	2.5
Na ₂ HPO ₄	89	MnCl ₂ · 4H ₂ O	1.8
KH ₂ PO ₄	1,360	CuCl ₂ · 2H ₂ O	0.2
KNO ₃	3,030	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	0.4
CaCl ₂ · 2H ₂ O	15	CoCl ₂ · 6H ₂ O	0.4
MgSO ₄ · 7H ₂ O	33	NiCl ₂ · 6H ₂ O	0.2
H ₃ BO ₄	0.2	-	-

2.1.2 암모니아 분해균주

본 연구에서는 무기악취 대표물질로 하수 처리장, 분뇨처리장 등 환경기초시설에서 많이 발생하는 암모니아를 대상기질로 선정하였다. 암모니아 분해균주인 ammonia oxidizing bacteria(AOB)를 분리배양하기 위해 S시 하수 처리장에서 활성슬러지를 샘플링하여 30 °C, 180 rpm에서 24시간 전배양하였다. 이후, 30 분간 방치 후, 멸균된 액체배지에 상등액을 주입하여 30 °C, 180 rpm에서 1차 배양 후, 동일한 방법으로 이를 간격으로 계대배양하였다. 이때 AOB 분리배양을 위해 이용한 액체배지 조성은 Table 2와 같다.

Table 2. Composition of nutrient solution for ammonia oxidizing bacteria

Component	Concentration (mg/L)
(NH ₄) ₂ SO ₄	470
MgSO ₄ · 7H ₂ O	510
NaH ₂ PO ₄	780
Na ₂ HPO ₄	890
NaHCO ₃	1,000
CaCl ₂ · 2H ₂ O	0.98
FeSO ₄ · 7H ₂ O	2.5
CuCl ₂ · 2H ₂ O	0.9

2.2 담체제조

담체종류에 따른 바이오필터의 유기악취와 유·무기 복합악취 제거능을 파악하기 위해 본 연구에서 개발한 포괄고정 담체 제조방법으로 제조한 포괄고정 담체와 스펀지 담체 그리고 세라믹 담체를 바이오필터에 충전하여 운전하였다. 이때 포괄고정 담체는 PEGDA(Polyethylene glycol diacrylate) 10 %, sodium alginate 1 %, potassium persulfate 1 %, TMEDA 0.02 %와 약 1.5 OD(optical density @ 600 nm) 미생물 농축액 50 %를 증류수에 혼합한 후, 스펀

지 형태(12×12×12)의 담체에 흡수시켜 상온에서 경화시켜 제조하였다.

2.3 실험장치 구성 및 운전방법

2.3.1 단일 유기악취 연속식 반응조

본 연구에서는 단일 유기악취로 톨루엔을 선정하여 3개의 반응조에 *C. tropicalis* 포괄고정 담체(immobilized bioreactor, IBR), 스펀지 담체(sponge bioreactor, SBR), 세라믹 담체(ceramic bioreactor, CBR)를 각각 충전하여 Fig. 1과 같이 구성하여 운전하였다.

반응조는 직경 9 cm, 높이 50 cm의 원통형 반응조로, 전체 부피 3.2 L, 충전된 담체 부피는 2 L로 운전하였다. 톨루엔은 실린지 펌프(KDS100, KD scientific, USA)로 주입해주었으며, mixing chamber에서 공기와 혼합되어 반응조로 유입되었다. EBCT(Empty bed contact time)를 1분으로 유지시키기 위해서 공기 유량은 3.2 L/min으로 설정했으며, 톨루엔 유입부하를 10 ~ 240 g/m³/hr로 단계적으로 증가시키면서 58일간 운전하였다.

영양염류는 40 mL/min의 유량으로 8시간마다 15분씩 살수되어, 총 2 L/day가 공급되도록 설정하였고, drain chamber에 pH controller를 설치하여 pH를 6.5 ~ 7.5로 유지하였다. 유입 및 유출되는 톨루엔 농도를 매일 측정했으며, 영양염류는 이틀마다 새로운 영양염류로 교체하였다.

2.3.2 유무기 복합악취용 연속식 반응조

산업현장에서 배출되는 악취는 단일 악취물질이 아닌 유기악취와 무기악취가 혼합된 복합악취로 배출된다. 이에 본 연구에서는 유기악취는 톨루엔, 무기악취는 암모니아를 선정하여 Fig. 1과 같이 바이오필터를 구성하고 운전을 실시하였다.

유기악취와 무기악취를 동시에 제거하기 위해 1층에는 yeast가 고정된 담체를 2층에는 AOB가 고정된 담체를 각각 1 L 씩 충전하여 유기악

취와 무기악취를 단계별로 처리하고자 하였다.

EBCT를 1분으로 유지시키기 위해서 공기유량은 톨루엔과 암모니아가 각각 1.6 L/min씩 총 3.2 L/min로 설정하였다. 톨루엔은 30 ~ 100 g/m³/h, 암모니아는 0.25 ~ 7.7 g/m³/h로 유입부하를 단계적으로 증가시켜 담체별 유입부하 변화에 따른 처리효율을 평가하였다.

영양염류는 40 mL/min의 유량으로 8시간마다 15분씩 살수되어 하루에 2 L가 공급되도록 설정하였고, drain chamber에 pH controller를 설치하여 pH를 6.5 ~ 7.5로 유지시켜 주었다. 또한 유입 및 유출되는 톨루엔과 암모니아 농도를 매일 측정했으며, 영양염류는 이틀마다 새로운 영양염류로 교체하였다.

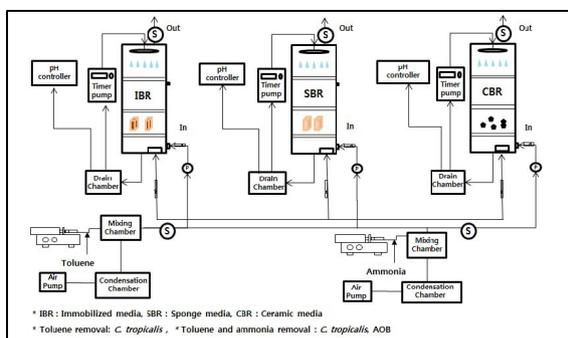


Fig. 1. Schematic diagram of IBR, SBR and CBR for toluene and ammonia removal

2.4 분석방법

톨루엔 분석은 FID(flame ionization detector)가 장착된 GC(Acme 6000M GC, Young Lin Korea)를 이용하였다. 톨루엔은 반응조 유입, 유출부의 샘플링 포트에서 1 L의 Tedlar bag을 이용하여 포집 후 측정하였다. GC 분석을 위한 톨루엔 standard는 0 ~ 300 ppm 범위에서 vapor pressure 방법을 이용하여 측정했으며, GC의 운전조건은 Table 3과 같다.

암모니아 분석은 1 L의 Tedlar bag을 이용하여 가스를 포집하여, 암모니아 검지관(GASTEC, detector, tube No.3L)을 이용하여 분석하였다.

Table 3. Gas chromatography condition for toluene analysis

Parameters	Condition
Detector	FID
Carrier gas	He
Column	80/100 Porapak Q
Flow rate	50 ml/min
Oven temperature	100 ℃
Detector temperature	200 ℃
Injector temperature	200 ℃
Injection volume	1 ml

3. 결과 및 고찰

3.1 담체종류에 따른 단일 톨루엔 제거능 평가

58일간의 운전기간 동안 톨루엔 유입농도를 20 ppm에서 200 ppm까지 단계적으로 증가시켰으며, 반응조별 톨루엔의 유입, 유출농도를 Fig. 2 (a)에 나타내었다.

톨루엔 주입은 micro syringe pump(MSP)를 사용하였는데, MSP 특성상 일정한 농도를 지속적으로 유지하지 못하고 간헐적으로 약 300 ppm까지 유입되기도 하였다.

반응조별 톨루엔의 제거효율을 Fig. 2 (b)에 나타내었다. 운전시작 후 15일까지는 세 반응조 모두 90 % 이상의 높은 제거율을 보였으나, 이후 SBR과 CBR의 제거율은 60 %까지 감소되었다. Park(2008)에 의하면 바이오필터 운전 초기에 나타나는 높은 제거효율은 미생물에 의한 분해가 아닌 바이오필터 시스템내의 흡착효과라고 보고하였다. 본 연구에서도 운전초기 90 % 이상의 높은 제거율을 나타내었으며, 이는 Park(2008)이 보고한 것과 같이 흡착효과에 의한 것으로 판단된다.

IBR의 경우 톨루엔 유입농도가 20 ppm에서 100 ppm, 200 ppm으로 단계적으로 증가함에도 90 % 이상의 높은 제거율을 보이며, 급격한 유입부하 변동에도 안정적인 처리가 가능한 것

으로 나타났다. SBR은 톨루엔 유입농도가 20 ppm에서는 최대 90 %, 100 ppm에서는 85 %, 200 ppm에서는 80 %의 제거율로 유입부하가 증가함에 따라 제거효율이 감소되었다. CBR 역시 톨루엔의 유입농도 20 ppm 일 때 최대 90 %의 제거율을 나타내었으나, 100 ppm, 200 ppm 으로 유입부하가 증가함에 따라 제거효율이 80 %로 감소되었다.

바이오필터 공정에서 중요한 두 가지 매개변수는 가스의 유입유량과 오염물질의 농도이다. 특히, 바이오필터 운전의 효율성은 오염물질의 유입부하에 의해 좌우된다(Jorio et al., 2000). 담체 표면에 미생물을 부착시켜 이용하는 바이오필터는 장기간 운전시 미생물의 활성이 떨어지거나 담체로부터 탈리되어 오염물질의 제거효율에 영향을 미친다.(Devinny et al., 1999).

SBR과 CBR의 경우 담체에서 탈리된 미생물이 drain chamber에서 성장하는 것이 관찰되었으며, 이러한 현상으로 인해 유입부하가 증가함에 따라 제거효율이 급격히 감소된 것으로 판단된다.

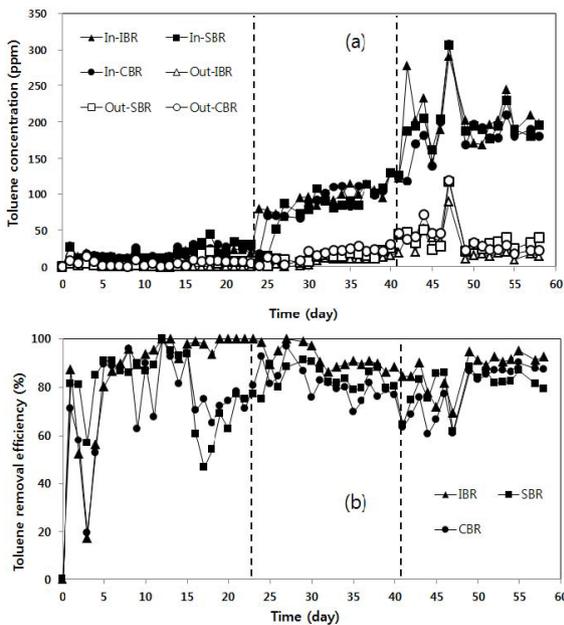


Fig. 2. Toluene concentrations at inlet and outlet of IBR, SBR and CBR(a) and removal efficiencies(b)

IBR의 경우 초기 운전시 IBR이 CBR과 SBR에 비해 안정화 되는 기간이 짧았는데, 이는 포괄고정 담체에 고정된 미생물이 담체 내에서 증가하고, 미생물이 탈리되는 현상을 방지하여 안정적인 미생물의 개체수가 안정적으로 유지되었기 때문으로 판단된다.

3.2 담체종류에 따른 톨루엔과 암모니아 제거능 비교평가

27일간의 운전기간 동안 톨루엔 유입농도는 80, 150, 200, 250 ppm, 암모니아 유입농도는 2.5, 10, 20, 30, 40 ppm으로 단계적으로 증가시켜 주었다.

각 반응조별 톨루엔의 유입, 유출농도 및 제거효율을 Fig. 3에 나타내었다. IBR은 톨루엔 유입농도가 250 ppm까지 증가해도 90 % 이상의 제거효율을 나타내었다.

반면, CBR과 SBR은 유입부하가 증가함에 따라 톨루엔 제거효율이 감소하는 경향을 나타내

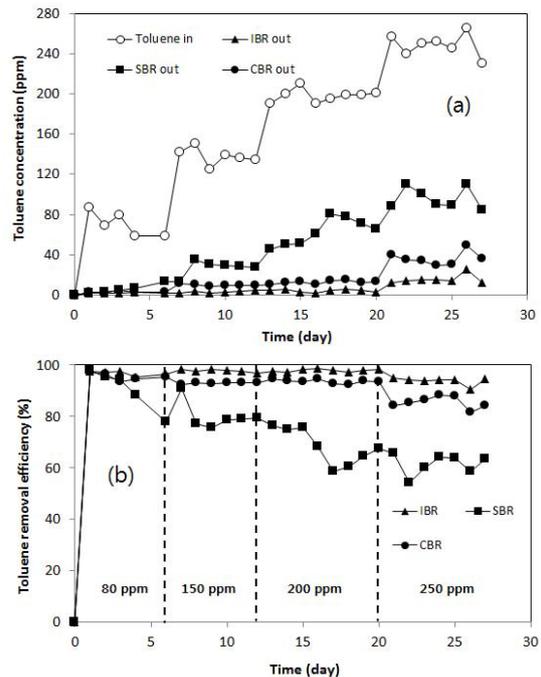


Fig. 3. Toluene concentrations(a) and removal efficiencies(b) of IBR, SBR and CBR during the complex injection with toluene and ammonia

었다. CBR의 경우 톨루엔 유입농도 200 ppm까지는 90 %의 제거효율을 나타냈으나, 톨루엔 유입농도가 250 ppm으로 증가함에 따라 제거율이 85%로 감소하였고, SBR의 경우 톨루엔 유입농도가 증가함에 따라 제거율이 85 %에서 60 %까지 감소하여 가장 낮은 제거율을 나타내었다.

암모니아의 유입농도에 따른 각 반응조별 유출농도 및 제거효율을 Fig. 4에 나타냈다. IBR의 경우, 암모니아 유입농도가 40 ppm까지 증가해도 98 % 이상의 높은 제거효율을 나타냈다. CBR의 경우 암모니아 유입농도 10 ppm에서는 80 %의 제거효율을 나타냈으나, 암모니아 유입농도가 30 ppm로 증가하자 제거효율이 98 %로 높아졌다. SBR 역시 유입부하가 증가함에 따라 제거효율이 80 %까지 감소하였으나, 수일 이내에 90 %로 회복하였다.

담체성능이 좋다고 알려진 스펀지와 세라믹을 포괄고정 담체와 비교한 결과, 포괄고정 담체의 톨루엔 제거능이 스펀지 담체에 비해 30 % 이상, 세라믹 담체에 비해 15 % 이상 높게 나타났다. 또한, 암모니아 제거에 있어, SBR과 CBR

은 유입부하가 증가함에 따라 큰 폭으로 제거효율이 감소하였으며, 특히 CBR은 초기 안정화되는데 시간이 오래 걸리는 단점을 나타내었다. 반면, IBR은 운전 초기부터 100 %의 제거효율을 나타내었으며, 유입부하 변동에도 안정적인 운전이 가능함을 보여주었다.

3.3 최대 분해능 산출

최대 분해능은 시스템의 운전조건 및 담체의 종류에 따라 달라지며, 실제 시스템의 설계 및 운전에 있어서 매우 중요한 인자이다(Bielefeldt, 1996). 유입부하의 증가로 제거율은 감소되고, 분해능은 일정한 값에 도달하게 되는데, 이때의 값을 최대 분해능이라 하며, 최대 분해능은 시스템이 미생물 활성에 대한 저해작용 없이 견딜 수 있는 최대부하를 말한다(이 등, 2003). 본 연구에서 최대 분해능과 유입 부하량은 식 (1)과 식 (2)을 통해 산출하였다.

$$\text{Elimination Capacity} = \frac{Q(C_i - C_o)}{V} \quad (1)$$

$$\text{Inlet Loading} = \frac{C_i \times Q}{V} \quad (2)$$

C_i = 유입가스 농도(g/m^3)

C_o = 유출가스 농도(g/m^3)

Q = 유입가스 유량(m^3/h)

V = 반응조 유효체적(m^3)

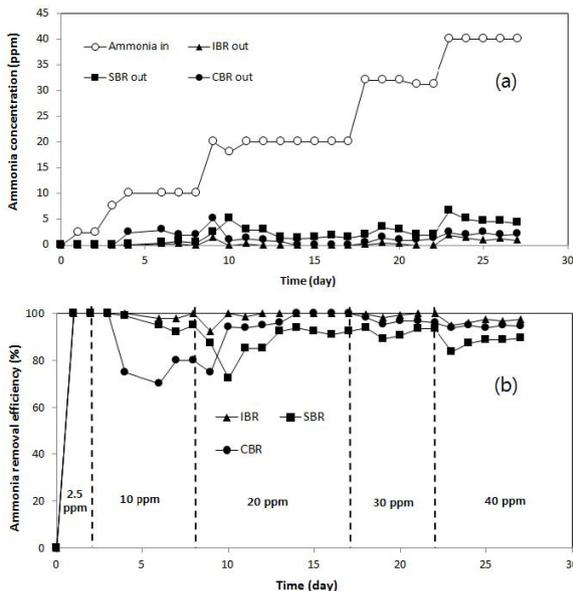


Fig. 4. Ammonia concentrations(a) and removal efficiencies(b) of IBR, SBR and CBR during the complex injection with toluene and ammonia

3.3.1 단일 톨루엔 유입부하에 따른 담체별 최대 분해능

Fig. 5은 톨루엔 유입부하에 따른 담체별 최대 분해능을 나타낸 것이다. IBR은 유입부하 215 $\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$ 에서 166 $\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$, SBR은 유입부하 224 $\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$ 에서 138 $\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$, CBR은 유입부하 225 $\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$ 에서 138 $\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$ 로 나타났다.

선행연구에 따르면 Lee et al., (2009)은

Rhodococcus sp.를 접종한 polyurethane 담체를 이용하여 바이오필터를 운전하여 톨루엔 최대 분해능이 150 g/m³/hr이었고, Singh and

Rai(2010)은 polyurethan을 충전한 바이오필터에서 톨루엔 최대 분해능을 90 g/m³/hr이었다고 보고하였다. 본 연구의 IBR은 선행연구 보다 높은 최대 분해능을 나타냈으며, SBR과 CBR은 비슷하거나 다소 낮은 최대 분해능을 나타내었다.

3.3.2 톨루엔과 암모니아 유입부하에 따른 담체별 최대 분해능

톨루엔과 암모니아 유입부하에 따른 담체별 최대 분해능을 Fig. 6에 나타내었다. 톨루엔의 경우 유입부하 100 g/m³/hr에서 IBR은 97.4 g/m³/hr, SBR은 59.5 g/m³/hr, CBR은 81.9 g/m³/hr로 IBR이 가장 높은 최대 분해능을 나타내었다.

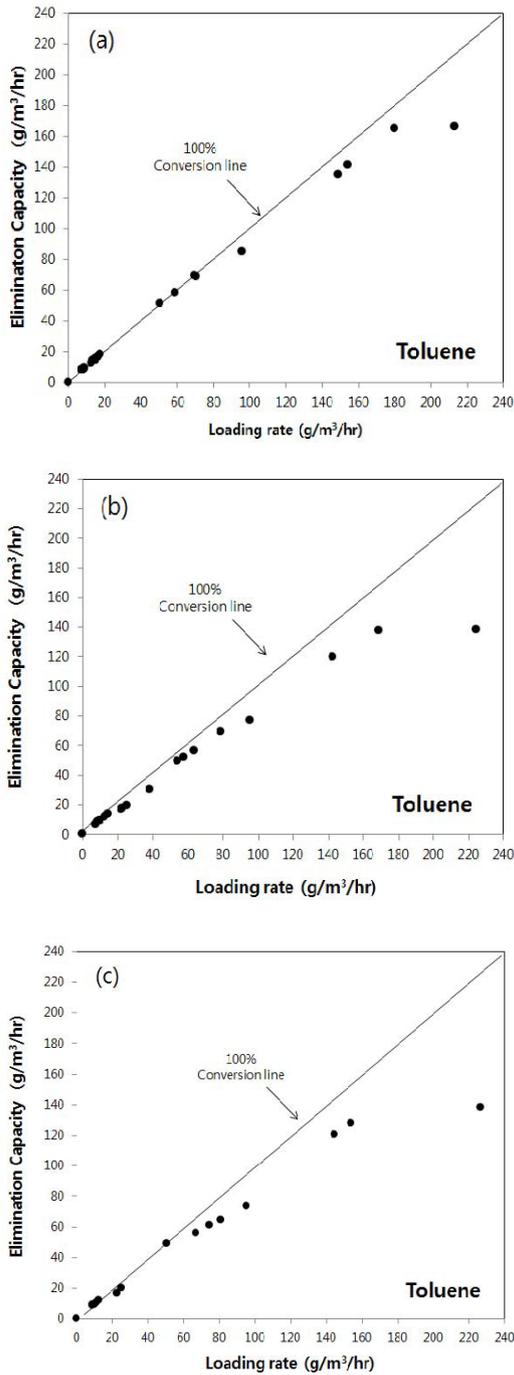


Fig. 5. Toluene elimination capacity of IBR(a), SBR(b) and CBR(c) versus toluene loading rate

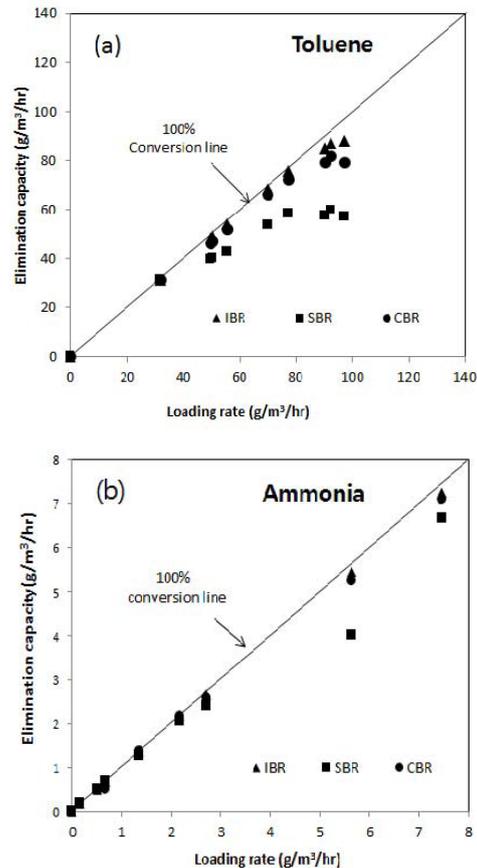


Fig. 6. Elimination capacity by loading rate of toluene(a) and ammonia(b)

암모니아의 경우 유입부하 7.7 g/m³/hr에서 IBR은 7.2 g/m³/hr, SBR 6.6 g/m³/hr, CBR 7.0 g/m³/hr로 암모니아 역시 IBR이 가장 높은 최대 분해능을 나타내었다.

Namgung(2010)에 의하면 혼합 악취물질이 유입되는 경우, 단일 악취물질이 유입되는 경우와 비교하여, 최대 분해능이 톨루엔은 40 %, 암모니아는 50 % 정도 감소한다고 보고하였다. 본 연구에서 톨루엔과 암모니아가 혼합되어 유입되었을 경우, 톨루엔만 유입되었을 경우와 비교하여 톨루엔 최대 분해능은 IBR 43 %, SBR 57 %, CBR 41 %가 감소되었다.

Park(2008)에 의하면 zeocarbon이 충전된 바이오필터에 암모니아만 유입시 암모니아 최대 분해능은 9.3 g/m³/hr으로 나타났다. 본 연구에서 암모니아 최대 분해능은 선행연구결과 보다 낮게 나타났는데 이는 톨루엔과 암모니아가 동시에 유입되어 암모니아 분해능이 감소되었기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 자체 개발한 포괄고정 담체의 악취 제거효능을 평가하기 위해 포괄고정 담체, 스펀지 담체, 세라믹 담체가 각각 충전된 반응조에 유기악취로 톨루엔, 무기악취로 암모니아를 유입시켜 포괄고정 담체의 성능을 평가하였다.

*C. tropicalis*를 이용하여 톨루엔만 유입시켰을 때의 최대 분해능을 산출한 결과, IBR은 166 g/m³/hr, SBR은 138 g/m³/hr, CBR은 138 g/m³/hr로 IBR이 가장 높게 나타났다.

톨루엔과 암모니아를 동시에 유입시켰을 때의 최대 분해능을 산출한 결과, 톨루엔의 경우 IBR은 97.4 g/m³/hr, SBR은 59.5 g/m³/hr, CBR은 81.9 g/m³/hr의 최대분해능을 나타내었고, 암모니아의 경우 IBR은 7.2 g/m³/hr, SBR은 6.6 g/m³/hr, CBR은 7.0 g/m³/hr의 최대 분해능으로 IBR이 가장 높았으며, CBR, SBR의 순으로 최대 분해능이 높게 나타났다.

담체별 특징을 살펴보면 IBR은 CBR과 SBR에 비해 안정화되는 기간이 짧고, 높은 분해능을 나타냈다. 이는 포괄고정 담체가 미생물을 고정 한 후 이용되기 때문에 운전초기에도 다량의 미생물을 확보할 수 있었기 때문이라 판단된다.

또한, IBR은 유입부하 변동에도 가장 안정적으로 톨루엔과 암모니아를 제거하여 세 종류의 담체 중에서 가장 우수한 성능을 나타낸 반면, CBR은 안정화되는 기간이 오래 걸렸지만, 안정화 후에는 유입부하 변동에도 SBR 보다 안정적인 제거효율을 보였다.

사 사

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

참고문헌

- Kim, D. S. (2000) Technology of odor elimination and recent trends in the industry, *The Korean Society of Industrial Engineering Chemistry, Symposium of Environmental Technology*, pp. 111-134.
- Kim, S. J., Kim, T. H., Lee, Y. H., Jang, H. S., Song, J. H., Hwang S. J. (2012) Development of optimal bio-encapsulated media for organic/inorganic odor reduction, *Journal of Korean society of water and wastewater*, 28(1), pp. 29-36.
- Namgung, H. K., Shin, S. K., Hwang, S. J., Song, J. H (2010) Transient behaviors of a two-Stage biofilter Packed with immobilized microorganisms when treating a mixture of odorous compounds, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 32(12), pp.1126-1133
- Park, S. J. (2001) Development of G-7 biofilter and commercialization for odor and VOCs elimination, *Hi-Tech Environmental Engineering*, 6, pp. 19-22.

- Han, D. K., Bae, W. G., Cho, Y. J., Won, H. S., Lee, Y. H. (2005) Treatment of refractory organics in dyeing wastewater by using cell immobilized pellets, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 27(9), pp. 917-922.
- Bielefeldt, A. R. (1996) Biotreatment of contaminated gases in a sparged suspended-growth reactor: Mass transfer and biodegradation model Ph.D.Dissertation, University of Washington, Washington, U.S.A., pp. 4-55.
- Devinny, J. S., Deshusses, M. A. and Webster, T. S. (1999) Biofiltration for air pollution control, Boca Raton, FL: Lewis Publishers, CRC Press LLC, pp. 7-13.
- Dorado, A.D., Baquerizo, G., Maestre, J.P., Gamisans, X., Gabriel D., Lafuente, J. (2008) Modeling of a bacterial and fungal biofilter applied to toluene abatement Kinetic parameters estimation and model validation, *Chemical Engineering Journal*, 140, pp.52-61.
- Jang, J. H., Hirai, M. and Shoda, M. (2004) Styrene degradation by *Pseudomonas* sp. SR-5 in biofilters with organic and inorganic packing materials, *Appl. Microbial. Biotechnol.*, 65, pp. 349-355
- 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.
- Kim, D.K., Cai, Z.i, Sorial, G.A. (2005) Impact of interchanging VOCs on the performance of trickle bed air biofilter, *Chemical Engineering Journal*, 113 pp. 153-160.
- Lee, E.H., Ryu, H.W., Cho, K.S. (2009) Removal of benzene and toluene in polyurethane biofilter immobilized with *Rhodococcus* sp. EH831 under transient loading, *Biore-source Technology*, 100, pp. 5656-5663.
- Liao, Q., Tian, X., Chen, R., Zhu, X., (2008) Mathematical model for gas-liquid two-phase flow and biodegradation of a low concentration volatile organic compound(VOC) in a trickling biofilter, *J. of Heat and Mass Transfer*, 51, pp. 1780-1792.
- Moe, W.M., Irvine, R.L. (2000) Polyurethane foam medium for biofiltration I: characterization, *J. Environ. Eng.*, 126, pp. 815-825.
- Moe, W.M., Qi, B. (2004) Performance of a fungal biofilter treating gas-phase solvent mixtures during intermittent loading, *Water Res.*, 38, pp. 2259-2268.
- Oh, Y-S. and Choi, S-C. (2000) Selection of suitable packing material for biofiltration of toluene, m- and p-xylene vapors, *J. Microbiol.*, 38, pp. 31-35
- Park B.G., Shin W.S., Jeong Y.S., Chung J.S. (2008) Simultaneous removal of H₂S, NH₃ and Toluene in a biofilter packed with zeocarbon carrier, *J.Environmental Sciences*, 17(1), pp. 7-17.
- Singh, R.S., Rai, B.N. and Upadhyay, S.N. (2010) Removal of toluene vapour from air stream using a biofilter packed with polurethane foam, *Process safety and environmental protection*, 88, pp. 366-371.
- Won, Y. S. (2007) Biotreatment technologies for air pollution control, *Clean Technol.*, 13(1), pp. 1-15.