

# Polyurethane Biofilter를 이용한 벤젠제거에 미치는 오염공기 유량의 영향

정동진 · 조경숙\* · 류희욱

승실대학교 환경·화학공학과 · \*이화여자대학교 환경공학과

## Effect of Flow Rates of the Contaminated Gases on Removal of Benzene by a Polyurethane Biofilter

Dong-Jin Jung · Kyung-Suk Cho\* · Hee Wook Ryu

Department of Chemical and Environmental Engineering, Soongsil University

\*Department of Environmental Engineering, Ewha Womans University

### 1. 서론

각종 환경기초시설과 산업시설들에서 발생하는 악취 또는 VOC를 제어하기 위한 방법으로 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 처리 방법들이 이용되고 있다. 특히, 생물학적 방법 중에서 biofiltration은 경제적으로 악취/VOC를 처리할 수 있는 효율적인 방법이다.<sup>1-5)</sup> Biofiltration은 악취/VOC를 제거하는 활성을 지닌 미생물을 고정화한 담체에 오염가스를 통과시켜 제거하는 기술이다.

일반 악취물질과 달리 hydrophobic한 VOC 물질들은 바이오필터에 의한 제거성능( $15 \sim 250 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ )이 낮은 단점이 있다.<sup>5-17)</sup> 이러한 이유로 인해 바이오필터의 체류시간이 길어지고(30~120분) 장치의 크기가 커서 경쟁력이 저하되는 문제점이 있다. 최근 들어, 상대적으로 제거성능이 낮은 VOC 물질들의 분해성능을 향상시키기 위해 membrane bioreactor나 silicon oil이나 hexadecane 등과 같은 흡수제를 이용한 2상 분배 반응기(two-phase partitioning reactors, TPPR) 등이 연구되고 있다.<sup>19-26)</sup> 이들 흡수제를 1~33% 첨가하여 교반 반응기나 biotrickling filter를 이용하여 벤젠, 톨루엔, 헥산, styrene 등을 처리할 경우 90~99% 제거하였고, 제거용량 또한  $130 \sim 1200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 로 획기적으로 증가하였다고 한다. 이러한 TPPR의 향상 효과에도 불구하고 흡수제의 안정성과 손실, 교반에 따른 고에너지 소비, 체계적인 data의 부족 등의 어려움이 있다.<sup>19)</sup>

본 연구에서는 기존의 바이오필터를 이용하여 일반적인 악취물질들인 암모니아, 아민류 등과 같은 질소계악취물질이나 황화수소, 머캅탄 등의 황화계 악취물질들 보다 상대적으로 용해도가 낮아 바이오필터로 제거가 어려운 VOC 성분 중 벤젠을 대상으로 미생물의 고정화량을 높게 유지할 수 있는 polyurethane 담체를 이용한 바이오필터를 이용하여 그 제

거성능을 높일 가능성을 연구하였다. 바이오필터의 주요 설계인자인 오염물질의 유입농도, 오염가스의 공간속도, 처리과정에서의 미생물 량의 변화 등을 조사하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

#### 2.1. Biofilter 장치

본 연구에서 사용한 biofilter의 장치도를 Fig. 1에 도시하였다. 바이오필터는 아크릴 재질로 제작하였다. 바이오필터는 담체 충전층(filter bed) 3단, 순환수의 저장 수조와 반응기 위부분에 살수할 수 있는 구조로 만들었다. 각 단의 담체의 충전 부피는  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 로 27 L로 담체의 총 충전부피는 81 L이다. 바이오필터 담체로 정육면체의 polyurethane( $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 세일스폰지, Korea)을 사용하였으며, 겉보기 밀도  $0.015 \text{ g/cm}^3$ , water holding capacity는  $57 \text{ g-H}_2\text{O/g}$ , porosity 98.8%, 평균 pore size 0.8 mm, 및 표면적  $76.81 \text{ m}^2/\text{g}$ 이었다.

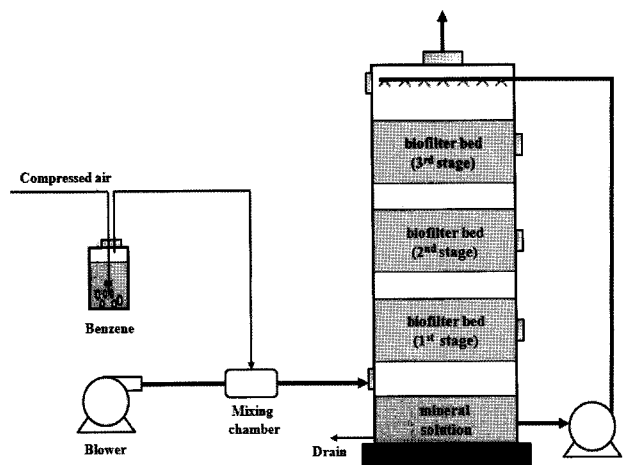


Fig. 1. Schematic diagram of a biofilter system.

E-mail: hwryu@ssu.ac.kr  
Tel: 02-820-0611

Fax: 02-820-5378

2.2. 접종원

바이오필터의 접종 미생물은 유류 오염토양을 증류수에 현탁하여 얻은 상등액과 하수처리장의 폭기조내에서 활성슬러지 혼합액을 접종원으로 사용하였다. 접종원을 바이오필터 장치에 접종시킨 후 벤젠 가스를 주입하여 안정화될 때까지 집식배양 하였다. 실험에 사용한 배지는 초기에는 미생물의 빠른 안정화를 위해 LB배지를 사용했고, 이후에는 무기염 배지를 사용했다. 무기염배지의 조성은  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $1.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ,  $9 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $0.01 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $\text{MgSO}_4$ ,  $0.15 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 이고, LB 배지의 조성은 tryptone  $19 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , yeast extract  $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , NaCl  $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$   $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$   $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 이다.

2.3. Biofilter의 운전

초기 균 접종은 반응기 수조에 접종원을 넣고 담체에 미생물이 흡착할 수 있도록 10분 정도 순환 펌프로 순환시킨 후 벤젠가스를 공급하면서 집식배양하였다. 담체에 고정화된 접종균의 벤젠 분해능을 파악하기 위해서 SV  $50 \text{ h}^{-1}$ 에서 30일 동안 운전하면서 벤젠의 제거 성능을 모니터링하여 초기의 안정화기간을 파악하였다.

벤젠가스는 벤젠 저장용기에 압축공기를 퍼지시켜 벤젠을 기상으로 휘발시킨 후 벤젠함유 가스를 송풍기를 통해 바이오필터에 공급되는 공기와 mixing chamber에서 혼합하여 반응기에 유입시켰다. 벤젠의 농도는 벤젠 저장 용기에 공급하는 공기의 유량을 변화시켜 조절하였고, 유입가스의 온도를 일정하게 하기위해서 heating band를 사용하였다.

벤젠을 함유한 오염가스를 biofilter의 하단으로 주입하였고, biofilter에 충전된 담체가 건조되는 것을 방지하고 미생물에 무기염을 공급하기 위하여 수조에 공급한 무기염 배지를 펌프를 이용하여 biofilter 상부에 설치한 스프레이를 사용하여 8~10시간 간격으로 약 2분간 살수하였다. 수조의 배지는 무기염배지를 사용하였고, 순환배지의 pH는 pH 제어기를 사용하여 6.0~7.5 영역으로 조절하였다.

바이오필터가 안정화 된 것을 확인한 후 유량변화에 대한 벤젠의 분해능을 파악하기 위해서 공간속도(space velocity(SV), 기체유속/담체 충전 부피)를 50, 100, 200, 300,  $400 \text{ h}^{-1}$ 으로 증가시키면서 제거효율을 분석했다. 유입가스 중 벤젠의 농도는 1~2일 간격으로 변화시켜 최대 3,000 ppmv까지 변화시키면서 바이오필터의 벤젠제거능을 조사하였다. 안정화된 바이오필터는 농도변화에 대해 빠르게 정상상태에 도달하므로 농도를 변화시킨 조건에서 30~60분 후에 분석을 하였다.

2.4. 분석방법

벤젠의 농도는 FID가 장착된 가스크로마토그래피(HP 5890 series II plus, Hewlett Packard Co., USA)를 이용하여 분석하였고, HP-1 column(Crosslinked Methyl Silicone Dum,  $30 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$ , USA)을 사용하였다. 분석조건은 가스크로마토그래피의 oven 온도를  $100^\circ\text{C}$ 에서 등온 분석하였다. 이동상으로 질소 가스( $1.5 \text{ mL min}^{-1}$ )를 사용하였고, 주입구

와 검출기의 온도는 각각  $230^\circ\text{C}$ 이었다. 벤젠의 검출한계는 0.1 ppm이다. 기상 바이오필터의 입구와 출구의 가스시료는 1 mL의 gas tight syringe를 사용하여 채취하였다.

바이오필터에 고정화된 미생물의 양은 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 바이오필터 각 단에서 샘플링한 담체의 무게를 측정 후  $60^\circ\text{C}$  오븐에 넣어 24시간 이상 건조시킨 후 건조 담체의 무게를 측정하였다. 건조담체를 2 N NaOH 용액에 담가 담체에 고정화된 미생물을 녹여내고, 초순수로 담체를 여러 번 세척하여 담체에 고정화된 미생물을 완전히 제거한 다음 다시  $60^\circ\text{C}$  오븐에 넣어 담체를 완전히 건조시켰다. 완전히 건조된 담체의 무게를 측정하여 각 담체의 무게 당 함수율과 담체에 고정화된 미생물의 건조세포증량을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 바이오필터의 안정화

접종원을 바이오필터에 접종한 후 SV  $50 \text{ h}^{-1}$ (체류시간 72s)에서 바이오필터의 안정화 과정을 모니터링 한 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 접종원을 바이오필터에 접종한 후 벤젠의 유입농도를 50 ppmv로 공급한 결과 약 6일 경과 후에 벤젠의 제거효율이 20~100%까지 증가하는 것이 확인할 수 있었다. 즉 약 6일간의 조업으로 바이오필터가 안정화 되었고, 접종원이 벤젠분해 균주들로 순치되었음을 알 수 있다. 바이오필터가 안정화 된 6일 경과 후 부터 단계적으로 벤젠의 주입 농도를 증가시켰다. 벤젠의 유입농도를 최고 2,000 ppmv까지 증가시켰을 때 벤젠의 제거효율은 약 80~95%를 유지하였다.

3.2. 벤젠의 유입농도변화에 따른 제거효율과 제거용량

바이오필터가 안정화 된 이후에 SV  $50\sim 400 \text{ h}^{-1}$ 의 영역에서 벤젠의 입구농도에 따른 제거용량과 제거효율을 Fig. 3에 도시하였다. SV가  $50 \text{ h}^{-1}$ 일 때 약 3,000 ppmv의 고농도에

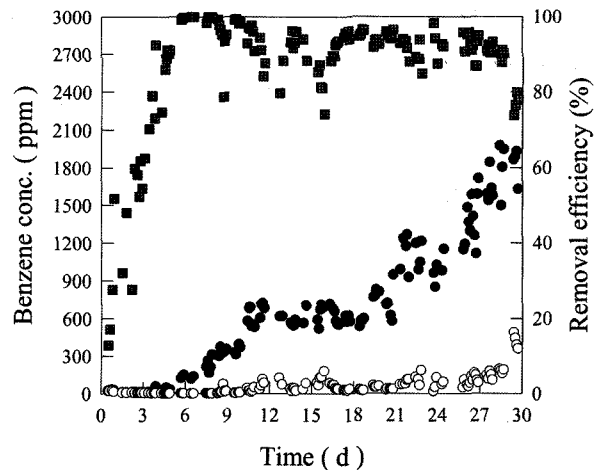


Fig. 2. Time profiles of concentration and removal efficiency of benzene at SV =  $50 \text{ h}^{-1}$ .

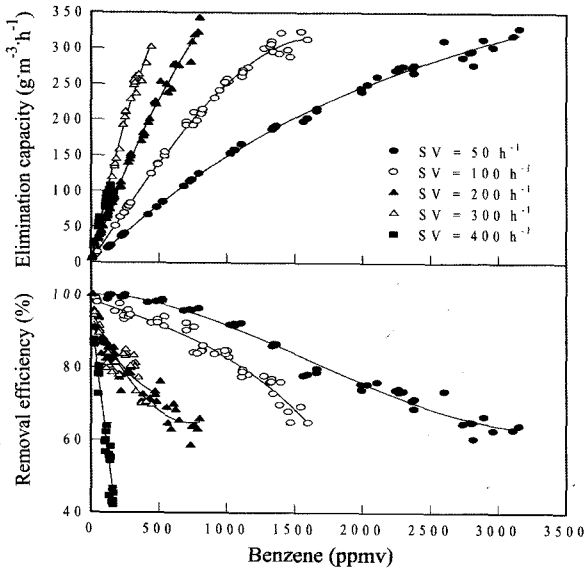


Fig. 3. Elimination capacity and removal efficiency as a function of space velocity.

서도 약 60%의 제거효율을 보인 반면 SV가 증가할수록 제거효율의 감소현상이 두드러졌다. 특히, SV 400 h<sup>-1</sup>에서는 유입농도 증가에 따라 거의 선형적으로 제거효율이 감소하였다. 한편, 벤젠의 제거용량은 오염가스의 SV와 관계없이 벤젠의 낮은 유입농도에서는 벤젠의 농도가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였으며, 유입농도가 증가함에 따라 월만하게 제거용량이 증가하였다(Fig. 3(a)). 벤젠의 제거효율은 벤젠의 유입농도가 증가함에 따라 감소하였고, 그러한 현상은 SV가 클수록 더욱 더 두드러지게 나타났다(Fig. 3(b)).

3.3. 오염가스의 공간속도변화와 제거용량과의 관계

벤젠의 유입부하량 변화에 따른 제거용량의 변화를 Fig. 4에 도시하였다. 벤젠의 유입부하량이 증가함에 따라 SV 50~300 h<sup>-1</sup>의 영역에서 유입부하량이 증가함에 따라 낮은 유입부하량에서는 제거용량이 거의 선형적으로 증가하였고, 유입부하량이 증가함에 따라 제거용량 증가가 서서히 둔화되었다. 반면에, SV 400 h<sup>-1</sup>에서는 유입부하량 80 g·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup> 이상에서는 제거용량이 거의 증가되지 않았다. 즉, SV 400 h<sup>-1</sup> 이상에서는 유속에 많은 영향을 받는다는 것을 의미한다.

현재 VOC 물질에 대한 규제는 배출시설의 출구에서 벤젠이 50 ppm 이하이다. 따라서 혼합균을 접종한 biofilter의 벤젠의 출구농도가 50 ppm 이하로 처리할 수 있는 임계입구농도와 20 ppm 또는 10 ppm까지 처리할 수 있는 바이오필터의 공간속도를 Fig. 5(a)에 도시하였다. SV가 증가할수록 출구농도를 일정한 농도 이하로 유지할 수 있는 유입농도가 급격하게 감소하였다. 현재 VOC의 규제치인 50 ppm 이하의 조건을 유지할 수 있는 유입농도가 SV가 50에서 400 h<sup>-1</sup>로 증가하면서 800 ppm에서 100 ppm으로 감소하였다. 출구농도가 20 ppm 이하를 만족시킬 수 있는 유입농도는 SV가 50에서 400 h<sup>-1</sup>로 증가하면서 500 ppm에서 60 ppm으로 감소하였고, 출구농도가 10 ppm 이하를 만족시킬 수 있는

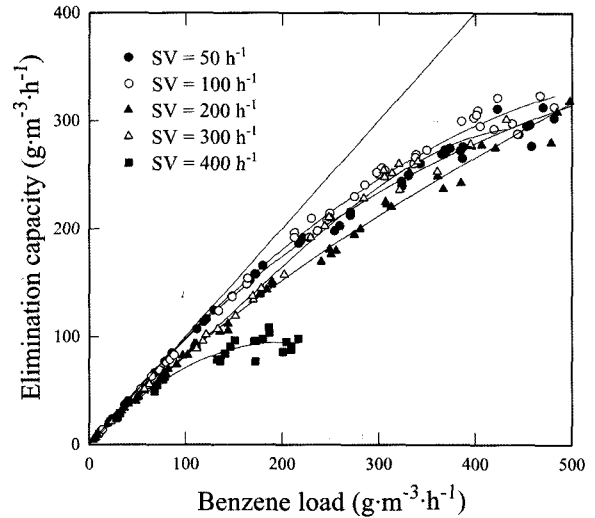


Fig. 4. Relationship between loading and elimination capacities as a function of space velocity.

유입농도는 SV가 50에서 400 h<sup>-1</sup>로 증가하면서 400 ppm에서 20 ppm으로 감소하였다. 이러한 결과는 배출허용 규제치 변화에 따라 대응할 수 있는 바이오필터의 조업조건을 의미한다.

각 SV에서 바이오필터의 최대 벤젠 제거용량과 95% 이상을 제거할 수 있는 임계제거 용량을 Fig. 5(b)에 도시하였다. 최대제거용량은 SV 300 h<sup>-1</sup>까지는 SV와 무관하게 약 300~320 g·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup>의 일정한 값을 유지하였고, SV 400 h<sup>-1</sup>에서

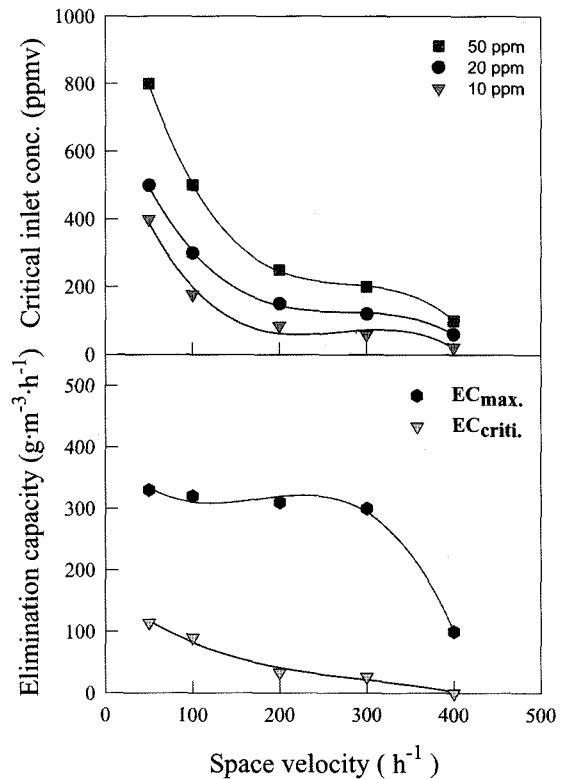


Fig. 5. Critical inlet concentration and elimination capacity at various space velocity.

는  $110 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ 로 감소하였다. 벤젠의 제거효율이 95% 이상인 임계제거용량은 SV가 50에서  $300 \text{ h}^{-1}$ 으로 증가함에 따라 114에서  $26 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ 으로 감소하였고,  $\text{SV} = 400 \text{ h}^{-1}$ 에서는 높은 유속 때문에 임계제거용량은 없었다.

이상의 결과를 살펴볼 때 바이오필터의 벤젠 제거능은 SV  $300 \text{ h}^{-1}$  이하 낮은 유속에서는 유입부하량이 증가하면서 제거용량은 계속 증가하나 최대제거용량  $300 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  이상에서는 증가함이 없으므로 혼합균의 벤젠의 분해능이 율속 단계(reaction limitation)로 작용하였으며, SV  $400 \text{ h}^{-1}$ 에서는 빠른 유속으로 제거용량의 급격한 감소를 나타내는데 이는 빠른 유속이 물질전달(diffusion limitation)이 율속단계로 작용했기 때문으로 사료된다. 한편, PU biofilter에서 얻은 임계제거 용량은 hexadecane을 흡수제로 사용하고 *Alcaligenes xylooxidans*를 이용하여 벤젠을 제거한 2상 분배 반응기(two-phase partitioning reactors)에서 얻은  $133 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ 에 근접하는 결과를 얻을 수 있었다.<sup>21)</sup>

3.4. 생물량의 증가 현상

약 55일 정도 조업하는 동안 바이오필터 담체의 미생물량 증식량 변화와 순환수의 pH, 순환수중 미생물 증식에 의한 흡광도의 변화를 Fig. 6에 도시하였다. 바이오필터 담체에 고정화되어 미생물 증식량은 운전 약 15일 경과 후부터 급격하게 증가하기 시작하여 약 55일 까지 거의 선형적으로 증가하였다. 55일 경과 후에는  $1 \text{ g DCW} \cdot \text{g PU filter}^{-1}$ 의 담체중량당 건조세포중량으로 약  $3.5 \text{ g DCW} \cdot \text{g PU filter}^{-1}$ 이 증식하였다. 순환수중 현탁 미생물의 농도는 초기 약 5일 경과 후부터 증가하기 시작하여 0.1~0.6 사이로 유지되었다. 순환수를 2일 간격으로 교환해주시기 때문에 순환수에서 미

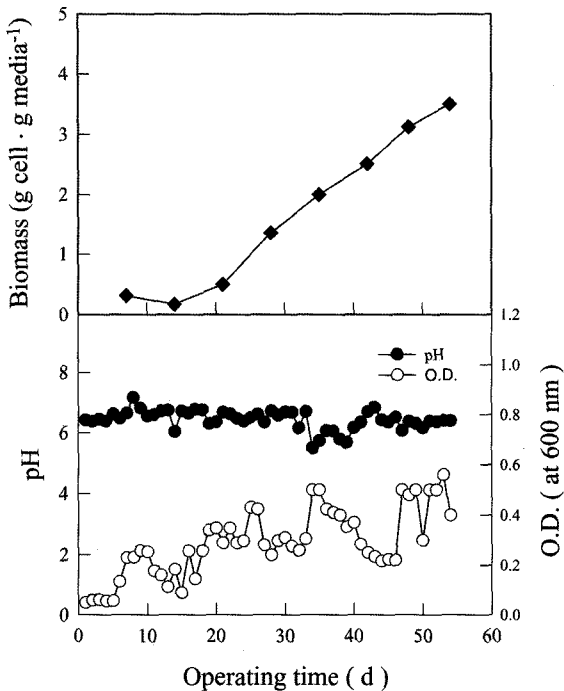


Fig. 6. Variation of biomass, pH and OD in biofilter.

생물의 농도가 급격하게 증가하지는 않았으며, 순환수의 pH는 5.5~6.5 수준의 영역에서 조절되었다. 이와 같이 벤젠을 처리하는 동안 미생물의 급격한 증식이 관찰된 것은 바이오필터의 압력손실이 급격하게 증가하게 되고, 바이오필터가 혐기상태가 되어 벤젠의 처리 효율이 급격하게 저감 될 것이라는 것을 알 수 있다. 실제로 바이오필터의 압력손실은 바이오필터 층 1 m 당 초기 0.5 mm H<sub>2</sub>O에서 약 30일 조업 후에 10 mm H<sub>2</sub>O으로 급격하게 증가하는 것이 관찰되었다(data not shown).

벤젠과 같이 탄소원이 많은 악취 또는 VOC 성 오염가스를 처리하는 과정에서 바이오필터의 가장 취약점 중 하나가 미생물의 과잉증식에 의한 담체층의 폐쇄 현상과 이로 인한 처리효율의 급감문제이다. 이러한 문제점들을 해소하기 위해 담체층의 역세척, NaOH와 같은 화학물질을 이용한 세포의 용해, 담체의 교체, 영양분 공급의 제한 등의 다양한 방법들이 연구되고 있으나 현장규모의 바이오필터에 적용할 만한 기술로는 적합하지 않은 것으로 평가되고 있다.

3.5. 속도론적 해석

바이오필터에 의한 벤젠의 최대제거속도를 구하기 위하여 속도론적 해석을 하였다. 바이오필터에서 기체가 plug flow로 흐른다고 가정하고 다음 식을 이용하여 해석하였다.<sup>6)</sup>

$$\frac{C_{in}}{R} = \frac{K_s}{V_m} + \frac{C_{in}}{V_m}$$

여기에서 R은 제거속도로  $\text{SV}(C_0 - C_e)$ 이고,  $C_{in}$ 은  $(C_0 - C_e) / \ln(C_0/C_e)$ ,  $C_0$ 는 유입벤젠의 농도( $\text{g m}^{-3}$ ),  $C_e$ 는 출구농도( $\text{g m}^{-3}$ ),  $V_m$ 은 최대제거속도( $\text{g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ), 및  $K_s$ 는 포화상수( $\text{g m}^{-3}$ )이다.  $C_{in}/R$ 과  $C_{in}$ 의 상관관계로부터 SV가 50~300  $\text{h}^{-1}$ 에서 벤젠의 최대 제거속도( $V_m$ )와 기질친화상수( $K_s$ )는 각각  $373 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  ( $25.63 \text{ g kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )와  $0.7135 \text{ g m}^{-3}$ 이다(Fig. 7).

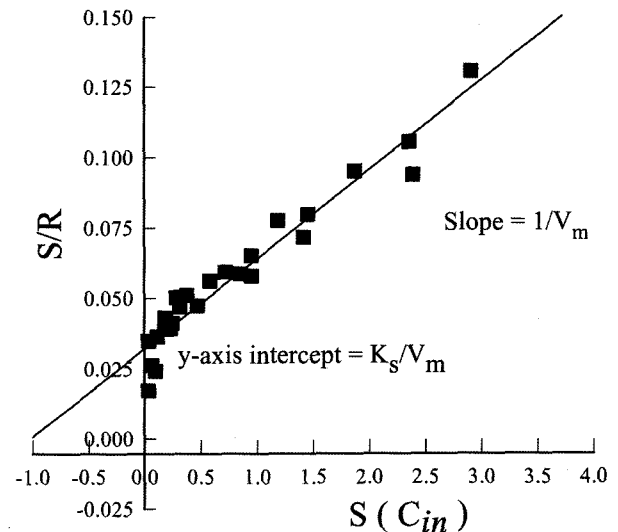


Fig. 7. Kinetic analysis of benzene removal.

바이오필터에 의한 벤젠의 제거에 대한 연구결과를 살펴 보면, Zilli et al.에 의하면 *Pseudomonas* sp.를 이용한 peat biofilter와 혼합균을 이용한 분말 compost 바이오필터에서 각각 제거용량은 20과 26  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 으로 제거용량이 낮다. 대표적인 VOC 물질인 toluene의 경우 compost, peat, agro-waste, compost와 GAC 혼합물, compost와 polystyrene beads 혼합물 등 다양한 종류의 담체들을 사용한 바이오필터에서 SV가 15.0~128.6  $\text{h}^{-1}$ (EBRT 28~240 s)의 영역에서 15~340  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 의 제거용량을 보이고 있다.<sup>6~16)</sup> 본 연구에서 사용한 PU biofilter에서는 톨루엔의 경우 체류시간 3.5 s에서 평균 제거효율 90% 이상으로 최대제거용량 3.8  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 까지 제거가 가능하였다. 마찬가지로 본 연구의 벤젠 제거량 또한 다른 문헌들에 비해 제거용량이 매우 높다. 이와 같이 PU 담체에 고정화된 미생물의 양이 약 3.5  $\text{g DCW}\cdot\text{g PU filter}^{-1}$ 로 매우 높기 때문인 것으로 보인다.<sup>9)</sup>

#### 4. 결론

본 연구는 미생물의 고정화량을 높게 유지할 수 있는 polyurethane 담체를 이용한 바이오필터를 이용하여 벤젠의 제거특성을 연구하였고, 연구결과로부터 도출한 결론은 다음과 같다.

- 1) 벤젠 제거효율은 벤젠의 유입농도가 증가함에 따라 급격하게 감소하였고, SV가 증가할수록 더욱 두드러졌다.
- 2) 벤젠 제거효율이 95% 이상인 임계제거용량은 SV가 50에서 300  $\text{h}^{-1}$ 으로 증가함에 따라 114에서 26  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 으로 감소하였고, 제거용량은 SV에 많은 영향을 받았다.
- 3) 벤젠의 제거용량은 SV 50~300  $\text{h}^{-1}$  영역에서 약 300~320  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 이었고, SV 400  $\text{h}^{-1}$  이상에서는 110  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 으로 급격하게 감소하였다.
- 4) Kinetic analysis를 통해 얻은 PU 바이오필터의 최대 벤젠 제거속도( $V_m$ )와 기질친화상수( $K_s$ )는 각각 373  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  (25.63  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )와 0.7135  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 로 기존의 바이오필터들보다 매우 우수하였다.
- 5) PU 바이오필터는 생물막의 생체량이 최대 3.5  $\text{g DCW}\cdot\text{g PU filter}^{-1}$ 로 높게 유지되었다.

#### 참고문헌

1. Devanny, J. S., Deshusses, M. A., and Webster, T. S., "Biofiltration for Air Pollution Control," Lewis Publishers, Boca Raton, FL. p. 299(1999).
2. Van Lith, C., Leson, G., and Michelsen, R., "Evaluating design options for biofilters," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **47**, 37~48(1997).
3. Lee, E. Y., Cho, K. S., and Ryu, H. W., "Simultaneous Removal of  $\text{H}_2\text{S}$  and  $\text{NH}_3$  in a Biofilter Inoculated with *Acidithiobacillus thiooxidans* TAS," *J. Biosci. Bioeng.*, **99**, 611~615(2005).
4. Lee, E. Y., Cho, K. S., Han, H. D., and Ryu, H. W., "Hydrogen sulfide effects on ammonia removal by a biofilter seeded with earthworm casts," *J. Environ. Qual.*, **31**, 1782~1788(2002).
5. Delhomenie, M. C., Bibeau, L., Gendron, J., Brzezinski, R., and Heitz, M., "A study of clogging in a biofilter treating toluene vapors," *Chem. Eng. J.*, **94**, 211~222(2003).
6. Delhomenie, M. C., Bibeau, L., Bredin, N., Roy, S., Broussau, S., Brzezinski, R., Kugelmass, J. K., and Heitz, M., "Biofiltration of air contaminated with toluene on a compost-based bed," *Adv. Environ. Res.*, **6**, 239~254(2002).
7. Jorio, H., Kiared, K., Brzezinski, R., Leroux, A., Viel, G., and Heitz, M., "Treatment of air polluted with high concentrations of toluene and xylene in a pilot-scale biofilter," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **73**, 183~196(1998).
8. Kim, J., Ryu, H. W., Jung, D. J., Lee, T. H., and Cho, K. S., "Styrene degradation in a polyurethane biofilter inoculated with *Pseudomonas* sp. IS-3," *J. Microbiol. Biotechnol.*, **15**, 1207~1213(2005).
9. Kwon, H. H., Lee, E. Y., Cho, K. S., and Ryu, H. W., "Benzene biodegradation using the polyurethane biofilter immobilized with *Stenotrophomonas maltophilia* T3-c," *J. Microbiol. Biotechnol.*, **13**, 70~76(2003).
10. Lee, E. Y., Jun, Y. S., Cho, K. S., and Ryu, H. W., "Degradation characteristics of toluene, benzene, ethylbenzene, and xylene by *Stenotrophomonas maltophilia* T3-c," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **52**, 400~406(2002).
11. Lu, C., Lin, M. R., and Lin, W. C., "Removal of BTEX vapor from waste gases by a trickle bed biofilter," *J. Air Wast. Manage. Assoc.*, **50**, 411~417(2000).
12. Rene, E. R., Murthy, D. V. S., and Swaminathan, T., "Performance evaluation of a compost biofilter treating toluene vapours," *Process Biochem.*, **40**, 2771~2779(2005).
13. Singh, R. S., Agnihotri, S. S., and Upadhyay, S. N., "Removal of toluene vapour using agro-waste as biofilter media," *Bioresour. Technol.*, **97**, 2296~2301(2006).
14. Tang, H. M., Hwang, S. J., and Hwang, S. C., "Dynamics of toluene degradation in biofilters," *Hazard Was. Hazard Mater.*, **12**, 207~219(1995).
15. Zilli, M., Borghi, A. D., and Converti, A., "Toluene vapour removal in a laboratory-scale biofilter," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **54**, 248~254(2000).
16. Zilli, M., Daffonchio, D., di Felice, R., Giordani, M., and Converti, A., "Treatment of benzene-contaminated

- airstreams in laboratory-scale biofilters packed with raw and sieved sugarcane bagasse and with peat," *Biodegradation*, **15**, 87~96(2004).
17. Zilli, M., Guarino, C., Daffonchio, D., Borin, D., and Converti, A., "Laboratoryscale experiments with a powdered compost biofilter treating benzene polluted air," *Process Biochem.*, **40**, 2035~43(2005).
  18. Zilli, M., Borghi, A. D., and Converti, A., "Toluene vapour removal in a laboratory-scale biofilter," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **54**, 248~254(2000).
  19. Muñoz, R., Villaverde, S., Guieysse, B., and Revah, S., "Two-phase partitioning bioreactors for treatment of volatile organic compounds," *Biotechnology Advances*, **25**(4), 410~422(2007).
  20. Arriaga, S., Muñoz, R., Hernandez, S., Guieysse, B., and Revah, S., "Gaseous hexane biodegradation by *Fusarium solani* in two liquid phase packed-bed and stirred tank bioreactors," *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 2390~2395(2006).
  21. Daugulis, A. J. and Boudreau, N. G., "Removal and destruction of high concentrations of gaseous toluene in a two-phase partitioning bioreactor by *Alcaligenes xylosoxidans*," *Biotechnol. Lett.*, **25**, 1421~1424(2003).
  22. Davison, C. T. and Daugulis, A. J., "The treatment of gaseous benzene by two phase partitioning bioreactors: a high performance alternative to the use of biofilters," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **62**, 297~301(2003b).
  23. Davison, C. T. and Daugulis, A. J., "Addressing biofilter limitations: a two phase partitioning bioreactor process for the treatment of benzene and toluene contaminated gas streams," *Biodegradation*, **14**, 415~421(2003a).
  24. Djeribi, R., Dezenclous, T., Pauss, A., Lebeault, J. M., "Removal of styrene from waste gas using a biological trickling filter," *Eng. Life Sci.*, **5**, 450~457(2005).
  25. Nielsen, D. R., Daugulis A. J., and McLellan P. J., "Transient performance of a two-phase partitioning bio-scrubber treating a benzene-contaminated gas stream," *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 8871~8977(2005).
  26. Van Groenestijn, J. W. and Lake, M. E., "Elimination of alkanes from off-gases using biotrickling filters containing two liquid phases," *Environ. Prog.*, **18**, 151~155(1999).