

망상구조 폴리우레탄 담체를 이용한 황화수소 제거

정귀택 · 이광연* · 차진명** · 박돈희***†

전남대학교 생명과학기술학부, 공업기술연구소
500-757 광주시 북구 용봉동 300

*동아인재대학 안광학과

526-705 전남 영암군 학산면 독천리 산 22-1

**비앤이테크(주)

519-831 전남 화순군 도곡면 대곡리 458

***전남대학교 생명과학기술학부, 기능성식품연구센터, 생물공학연구소, 축매연구소
500-757 광주시 북구 용봉동 300

(2007년 3월 6일 접수, 2007년 4월 10일 채택)

Removal of Hydrogen Sulfide using Reticulated Polyurethan Carrier in Biofilter

Gwi-Taek Jeong, Gwang-Yeon Lee*, Jin-Myoung Cha** and Don-Hee Park***†

*School of Biological Sciences and Technology, Engineering Research Institute, Chonnam National University,
300, Yongbong-dong, Buk-gu, Gwangju 500-757, Korea*

**Department Ophthalmic Optics, Dong-A College, San 22-1, Dokcheon-ri, Haksan-myeon, Youngam-gun, Chonnam 526-705, Korea*

***B & E Tech Co., Ltd., Jeonnam 458, Daegok-ri, Dogok-myeon, Hwasun-gun, Chonnam 519-831, Korea*

****School of Biological Sciences and Technology, Functional Food Research Center, Biotechnology Research Institute,
Research Institute for Catalysis, Chonnam National University, 300, Yongbong-dong, Buk-gu, Gwangju 500-757, Korea*

(Received 6 March 2007; accepted 10 April 2007)

요 약

본 연구에서는 생물학적 공정을 사용하여 황화수소를 제거하는데 있어 망상구조의 폴리우레탄 담체의 바이오필터 충전물로서의 특성을 유입가스농도와 유입가스량의 두 변수를 대상으로 조사하였다. 실험결과 망상구조의 폴리우레탄 담체를 적용한 바이오필터의 황화수소 최대제거용량은 488.3 g-H₂S/m³·h이었으며, 추정된 임계부하속도는 330.1 g-H₂S/m³·h이었다. 본 연구의 결과 망상구조의 폴리우레탄 담체를 황화수소의 생물학적 처리를 위한 바이오필터의 담체로서 적용가능성을 확인하였다.

Abstract – In order to assess its capability as biofilter bed material under variable conditions of two parameters (inlet gas concentration and inlet gas flow rate), reticulated polyurethan was applied to remove hydrogen sulfide via a biological process. We detected a maximal elimination capacity (critical loading rate) of 488.3 (330.1) g-H₂S/m³·hr, when reticulated polyurethane was employed as supporting material of biofilter. This study show that the application of reticulated polyurethane carrier might be a favorable choice as a packing material in biofilter for the biological removal of hydrogen sulfide.

Key words: Biological Treatment, Odor, Biofiltration, Reticulated Polyurethan Matrix

1. 서 론

화학공장, 하수처리장, 분뇨 및 축산폐수 처리장, 쓰레기 매립장, 음식물 재활용 처리시설 등을 중심으로 발생하는 악취가 사회적인 문제가 되고 있다. 이러한 악취 가운데에는 단순히 불쾌감이나 혐오감을 주는 물질 뿐만 아니라, 인체의 건강에 직·간접적으로 위해를 주는 유해 물질이 존재하게 된다. 황화합물을 포함하는 많은 악

취성분들 가운데 황화수소(H₂S), 메틸메칼탄(CH₃SH), 디메틸설파이드((CH₃)₂S), 디메틸디설파이드((CH₃)₂S₂)가 주로 대량으로 배출되고 있다. 특히, 황화수소는 극히 독성이 있고 부식성의 가스이며, 악취의 표준 표시자로서 적용되고 있다. 황화수소를 포함한 악취물질을 처리할 수 있는 기술에는 크게 물리적 방법, 화학적 방법, 그리고 생물학적 방법이 있다. 일반적으로 처리방법의 선택은 발생원에서 배출되는 성분의 조성 및 농도, 온도, 풍량, 습도, 작업시간, 공정변화, 작업동선, 설치면적, 2차 오염, 사용연료 등을 종합적으로 검토하여 선택하게 된다[1, 2].

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: dhpark@chonnam.ac.kr

각종 산업 현장에서 발생하는 악취가스 성분은 농도와 유량이 다양하다. 고농도의 저유량으로 발생하는 악취에 대해 물리·화학적인 처리방법도 안정된 처리효율과 경제성을 갖는다. 그러나 저농도의 고유량으로 발생하는 경우는 기존의 물리·화학적 방법으로 처리시에는 효율에 비해 비용의 급격한 증가를 초래한다. 바이오필터는 저농도, 고유량에 적합하며, 경제적으로 짧은 체류시간에도 안정된 제거효율을 유지한다[3].

바이오필터는 배가스 중의 오염물질을 생물학적으로 처리하는 방법 중의 하나로서, 미생물을 다공성의 담체에 부착시켜 미생물의 대사활동에 의해 오염물질(악취물질 등)을 물, 이산화탄소, 그리고 무해한 염으로 분해하는 환경 친화적이고, 경제적인 처리공법이다. 바이오필터는 혼합 미생물군의 화학물질 분해 능력을 이용하여 제거하는 방법이다. 알콜, 에테르, 알데히드, 케톤, 방향족, 아민류, 황화합물 등 다양한 유기성, 무기성 물질들이 바이오필터에 의해 처리되고 있다. 다만, 염소화합물의 처리효율이 낮다고 보고되고 있다[4, 5].

바이오필터의 주요 설계 및 운전 인자로는 미생물, 담체, 수분 함량, pH, 유입 가스 조건, 영양 물질의 영향, 그리고 반응기 내의 체류시간 등의 인자들에 의해 바이오필터의 성능이 좌우 된다[6]. 바이오필터 시스템에 있어서 담체는 적절한 체류시간의 유지와 미생물의 성장에 필요한 수분 및 기질의 보유, 담체층 내부구조의 유지를 위한 기계적인 지지체로서 역할을 한다. 일반적으로 담체는 큰 비표면적, 높은 흡수율과 기공율을 가진 생물친화성인 것이 바람직하다. 담체의 종류는 토양, 퇴비, 점토, 탄소입자, 불활성 합성 충전물질 또는 그것들의 결합물질 등이 있다[3, 6].

최근에는 합성 유, 무기 화합물질로서 제조된 담체를 많이 사용하고 있으며, 기존에 적용되었던 담체보다 층의 다공성 유지 및 미생물의 노화효과에 보다 안정적이며, 높은 처리효율을 가지고 있다. 다공성 담체로는 활성탄, 토탄 등의 천연재료와 플라스틱이나 셀룰로오스와 같은 유기재료, 그리고 세라믹과 같은 무기재료 등이 사용되고 있다. 활성탄이나 토탄을 사용하는 방법들은 담체 물질에 의한 초기 흡착에 의한 제거대상 물질의 제거효과는 우수하나, 바이오필터 내에 충전 후 사용(처리)시간이 경과함에 따라 탄화 및 압밀에 의한 압력손실이 증가하여 흡착 효율이 감소되는 단점이 있다. Yard waste compost 등은 미생물의 고정화능이 우수하나 장시간 사용시 담체의 분해로 인한 손실 및 압력손실이 크다. 유기재료의 경우에는 미세구조의 제거가 용이하고, 미생물의 고정화 특성이 우수한 반면 겔상으로 인한 압력손실이 크며, 장기간 사용시 담체 자체의 팽윤이나 자화에 의해 담체의 특성이 변질되는 경우가 있다[7]. 본 연구에서 사용한 것과 유사한 합성 고분자계 담체인 폴리우레탄 재질은 화학적, 기계적으로 매우 안정하고, 가공이 용이하여 다양한 공극구조를 가져 미생물 고정화 담체로서 많은 연구가 수행되고 있다[3, 8, 9]. 김 등[8]과 명 등[9]에 의하면 바이오필터에 망상 폴리우레탄 폼을 담체로 적용하여 미생물을 고정화하고, 바이오필터에서 톨루엔을 제거한 연구에서 미생물의 부착 특성 및 톨루엔의 제거능이 우수하였다고 보고하였다. 또한 폴리우레탄 폼 담체는 균일하고 충분한 공극을 제공하여 미생물의 흡·탈착이 용이하고 충분한 서식공간을 제공하므로 많은 미생물을 담지 할 수 있다고 보고하였다[8, 9]. 무기재료 특히, 세라믹스는 내화특성과 강도가 우수하여 장기간 사용에도 변질과 변형이 없으며, 큰 비표면적의 다공성 담체를 제조하기 용이한 장점을 가지고 있다. 최근에는 무기 담체 중

에 섬유상 담체도 바이오 필터의 새로운 미생물 고정화 담체의 대안으로 많이 이용되고 있다[9, 10].

본 연구에서는 망상구조의 폴리우레탄 담체를 이용한 바이오필터 시스템에서 유입농도, 유입유량의 변화에 따른 황화수소의 제거 특성을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2-1. 실험균주 및 배지

본 실험에 사용한 균주는 광주시 소재 전자공장의 하천 및 주변 토양 및 울산, 온산 등의 공업단지 오염 토양으로부터 분리한 균주 3종(*Pseudomonas* sp. TKC, *Pseudomonas* sp. AKC, 그리고 *Geotrichum* sp. MKC)[3]과 *Thiobacillus* sp. IW[11]를 혼합 배양하여 바이오필터 식중에 사용하였다. 균주의 배양에 사용한 배지는 NH₄Cl₄ 1.0 g/L, K₂HPO₄ 4.35 g/L, NaH₂PO₄ 3.9 g/L, MgSO₄·7H₂O 7.2 g/L, CaCl₂ 0.45 g/L, FeSO₄ 0.45 g/L, MnCl₂ 0.45 g/L, CuCl₂ 0.45 g/L, NaMoO₄ 0.45 g/L의 조성으로 배지를 조성하여 pH를 7.0으로 조정 한 뒤, 12l, 1.5 atm에서 20 분간 멸균하여 사용하였다. 또한, 바이오필터에 공급한 영양배지로는 minimal salt medium(MSM : KH₂PO₄ 1.50 g/L, Na₂HPO₄ 6.00 g/L, (NH₄)₂SO₄ 3.00 g/L, MgSO₄ 0.05 g/L, CaCl₂ 0.01 g/L; pH 7.0)을 사용하였다. 실험에 사용한 모든 시약은 시약급을 사용하였다.

2-2. 처리대상 악취가스

본 연구에서 처리하고자 하는 대상물질은 음식물 재활용 시설에서 발생하는 악취가스 중, 상대적으로 높은 농도인 황화수소를 처리 대상으로 하였다. 일정농도의 악취를 공급하기 위하여 공기발생기에서 발생된 공기는 가슴기를 통과시킨 후 반응에 적절한 온도로 조정되어 각각의 담체가 포함된 바이오필터에 공급해 주었다. 각 바이오필터 반응기의 체류시간(empty bed contact time, EBCT)은 생물막의 성장을 촉진하기 위해 60초에서 5초 사이로 조절하였으며, 유입유량(inlet loading, g/m³·h)를 조정하여 실험을 수행하였다.

2-3. 바이오필터 구성 및 운전

본 연구에서 사용된 바이오필터 반응기의 구조는 Fig. 1에 나타내었다. 바이오필터 반응기는 아크릴 재질(내경 9.4 cm, 충전층 높이 25 cm)로 담체 시료 채취를 위한 직경 2 cm의 시료채취구가 2곳이 설치되어 있으며, 상부에 시료채취구를 설치하였고, 하부에는 담체층의 지지를 위하여 다공판을 설치하였다. 바이오필터 반응기는 25~35 °C의 실온에서 운전하였다. 배출가스 중의 잔류 황화수소를 제거를 위하여 배출가스를 NaOH 흡수액에 통과시킨 후 최종 배출하였다. 바이오필터 반응기는 물을 이용하여 역세정이 가능하도록 장치하였다. 유입공기는 반응기 하부로 공급되어 반응기 상부로 배기되도록 구성하였다. 영양물질은 반응기 내에 고르게 공급되도록 담체층 상부에 설치된 노즐에서 분사하였다. 반응기는 2~4시간 마다 수분을 상부에서 공급하였다. 반응기는 하부에 침출수를 위한 배출구를 설치하였으며, 처리대상 황화수소 가스는 질량흐름조절기를 이용하여 원하는 황화수소의 농도로 조절하여 바이오필터 반응기에 공급하였다. 시료채취는 반응기 상부와 하부, 그리고 각 부분에 설치된 시료채취구에서 채취하여 분석하였다.

본 연구에서 사용된 담체는 망상구조의 폴리우레탄 담체를 사용

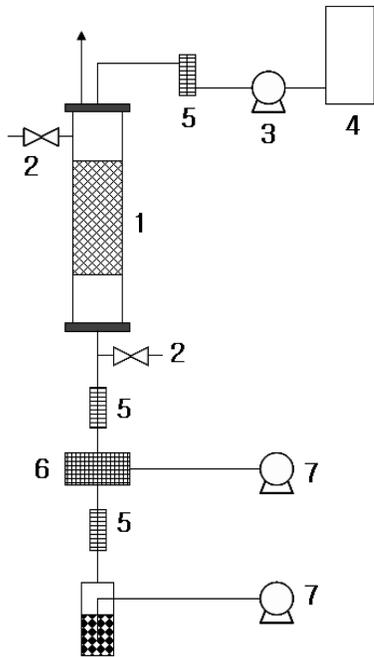


Fig. 1. Schematic diagram of biofilter system for hydrogen sulfide removal.

- | | |
|----------------------|-------------------------|
| 1. Biofilter reactor | 5. Mass flow controller |
| 2. Check valve | 6. Mixing chamber |
| 3. Water pump | 7. Air compressor |
| 4. Nutrient tank | 8. Target gas generator |

Table 1. Characteristics of experimental matrix of biofilter

Characteristics	Reticulated polyurethane foam
Chemical composition	C, O, N
Surface area (m ² /g)	367.5
Porosity (%)	80
Packing density (g/cm ³)	0.228

하였다. 바이오필터 실험용 담체의 특성은 Table 1에 나타내었고, 멸균된 담체에 각각의 미생물 접종균 500 mL씩을 접종한 후 실험을 수행하였다. 또한 담체의 pH를 중성으로 만들기 위해 1 M potassium phosphate buffer(pH 7.0)를 사용하였고, 60~90%의 함수율로 맞추어 사용하였다[12]. 반응기의 운전 조건은 Table 2에 나타내었다.

2-4. 분석방법

약취 농도는 각각의 시료채취구에서 10 mL의 기체시료를 Hamilton gas tight syringe로 채취 후, 실리콘 마감된 15 mL 유리 튜브에 포함된 1 mL의 메틸렌클로라이드에 주입하여 분석하였다. GC 분석조건은 DB-WAX(30 m × 0.53 mm × 1 mm) 칼럼을 사용하고, 시료의 양은 2 μL로 도입부 온도는 150 °C, 오븐 온도는 50 °C, 검출기의 온도는 200 °C로 설정하였다. 운반 기체로는 헬륨가스(99.9995%)를 검출기의 혼합공기와 수소는 각각 400, 40 mL/min으로 유지하였으며, 칼럼 유속은 8 mL/min으로 분석을 설정하여 수행하였다. 또한 입구농도는 Gas Teck 사의 검지관을 사용하였다.

2-5. 처리효율과 제거용량

처리효율(removal efficiency)과 제거용량(elimination capacity)은

Table 2. Operating conditions of biofilter

Operating parameter	Operating conditions
Bed volume (L)	0.8
Kind	Reticulated polyurethane foam
Weight (g)	103.1
Volume (cm ³)	452
Packing ratio (% v/v)	56.3
Particle size (cm × cm × cm)	1 × 1 × 1
SV* (1/h)	120~720
EBCT** (sec)	60~5
Inlet air flow rate (L/min)	1.6~4.8
Temperature in bed (°C)	25~35
Initial inlet H ₂ S concentration (ppm)	25
Maximum inlet H ₂ S concentration (ppm)	750~1,000

*SV: space velocity

**EBCT: empty bed contact time

바이오필터의 처리능력을 설명하는 값으로 처리효율은 바이오필터에 의해 제거되는 오염물질 비율이며, %로 나타낸다. 제거용량은 단위시간당 충전층 부피에 대한 오염물질의 제거량을 나타내는 값이다.

$$RE [\%] = (C_{Gi} - C_{Go}) / C_{Gi} \times 100$$

$$EC [g/m^3 \cdot h] = (C_{Gi} - C_{Go}) \times Q / V_f$$

여기에서 Q 는 가스 흐름속도(m³/h), V_f 는 담체의 부피(m³), C_{Gi} 는 유입가스농도(ppm; g/m³), 그리고 C_{Go} 는 유출가스농도(ppm; g/m³).

3. 결과 및 고찰

본 실험에서는 바이오필터를 이용하여 황화수소를 제거하기 위한 실험을 실시함에 있어서 망상구조의 폴리우레탄 담체와 4종의 균주를 혼합 배양하여 바이오필터를 운전하면서 황화수소의 제거와 망상구조의 폴리우레탄 담체가 담지된 바이오필터의 성능을 조사하였다. 일반적으로 바이오필터 시스템에서 가장 중요한 인자인 공급가스의 농도와 공급가스의 공급량을 기준으로 실험을 실시하였다[13]. 바이오필터 시스템에서의 공탑속도(space velocity, SV)는 EBCT의 역수로서 단위시간에 충전층의 부피에 상응하는 처리가스가 통과하는 회수로서 유량을 충전층의 부피로 나눈 값으로 정의하고 있다[3].

3-1. 유입농도 변화에 따른 황화수소 제거

망상구조의 폴리우레탄 바이오필터 담체에 의한 황화수소 제거를 위하여 먼저 황화수소를 10 ppm 미만의 저농도에서 3일 동안 공급하여 미생물을 적응시킨 후, 바이오필터의 유입유량을 4.8 L/min와 SV 360/h로 일정하게 유지하면서 초기 황화수소의 유입농도를 25 ppm으로 공급하였고, 단계적으로 1주일마다 황화수소의 유입농도를 25 ppm에서 최종적으로 1,000 ppm으로 증가하면서 반응 시간에 따른 유입, 유출 농도 및 제거효율의 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

망상구조의 폴리우레탄 바이오필터 담체는 750 ppm까지는 황화수소를 약 97% 이상 제거하였다. 그러나 황화수소 유입농도 1,000 ppm에서는 유출농도가 약 109 ppm으로 증가하여 제거효율은 89%

로 감소하였다. 다시 황화수소 유입농도를 낮추고 적응시간을 갖은 후 유입농도를 낮출 경우 바이오필터에 의해 유입된 황화수소의 제거효율이 다시 회복되었다. 이러한 결과는 바이오필터를 이용한 MEK의 제거 연구[3]에서 나타난 것과 유사한 결과를 보이는 것이다. 결과적으로 저농도 뿐만 아니라, 고농도까지 비교적 넓은 범위의 황화수소 유입조건에서 합성물질인 망상구조의 폴리우레탄 담체를 이용하면 황화수소를 효과적으로 처리할 수 있었다. 또한 실제 공정에서 발생할 수 있는 급격한 황화수소 유입농도 변동에 적용하여 바이오필터의 황화수소 제거능이 단기간 내에 회복됨으로써 어느 정도의 충격부하에 안정적으로 처리할 수 있을 것으로 사료된다 [3]. Yang과 Allen[14]은 yard waste compost 담체를 사용한 바이오필터에서 황화수소 제거 연구에서 5~2,650 ppm의 유입농도 조건에서 99.9% 이상의 황화수소 제거율을 나타내었다고 보고하였다. 또한, 이 등[15]은 제주도산 화산석을 담체로 사용한 바이오필터에서 EBCT 30초에서 황화수소 유입농도 1,100 ppm까지 99.9% 이상의 제거율을 나타내었다고 보고 하였다. 이러한 연구결과들은 본 연구에서 얻은 결과보다 제거율 측면에서는 다소 높은 것으로 판단되나, 본 연구에서 EBCT를 증가시키면 황화수소의 제거율이 다른 연구 결과들과 같이 높아지리라 판단된다. 이에 대해서는 보다 많은 연구가 필요하리라 생각된다.

3-2. 유입 유량 변화에 따른 황화수소 제거

유입부하량은 충전물질의 단위 부피당 단위시간당 시스템으로 유입되는 유해가스(g/m³·h)로 정의된다. 즉, 제거속도는 유입량과 제거효율에 따라 결정되어지는 것으로 바이오필터를 설계하는데 있어서 매우 중요한 인자이다[3, 14]. 유입유량 변화, 즉 체류시간 변화에 따른 황화수소의 제거 특성을 조사하기 위하여 망상구조의 폴리우레탄 담체와 4가지 혼합균주를 대상으로 일정 유입농도로 정하고 유입유량을 단계적으로 증가시키면서 연구를 수행하였다. 단계적인 유량변화 실험을 위해 황화수소 가스는 600 ppm의 농도로 바이오필터에 공급하였으며, 공급 유량은 체류시간으로 5~60 sec의 실험 조건으로 수행하였다.

Fig. 3은 단계적인 황화수소 유입부하 증가의 조건하에서 망상구

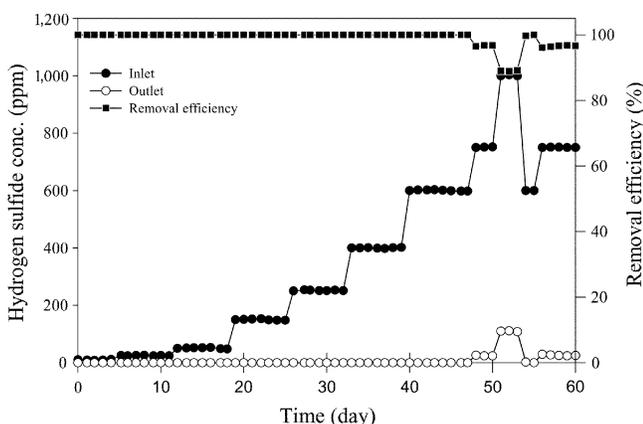


Fig. 2. Hydrogen sulfide removal pattern at constant air flow rate and varying inlet concentrations using three different packing materials. Inlet flow of 4.8 L/min and SV (space velocity) of 360/h, and then the inlet H₂S concentration was increased in weekly increments, from 25 ppm to a final value of 1,000 ppm.

조의 폴리우레탄 담체를 사용한 바이오필터의 유입/유출 황화수소 농도와 제거효율을 나타내었다. 망상구조의 폴리우레탄 담체를 사용한 바이오필터는 체류시간(EBCT) 8~60 초에서 99.2% 이상의 제거효율을 나타내었다. 그러나, 체류시간 5초에서는 94.6%의 제거효율과 32.4 ppm의 황화수소 유출농도를 나타내었다.

일반적으로 바이오필터에서 EBCT 값의 감소는 황화수소의 공급 유량과 유입부하의 증가를 나타낸다. 또한, 이러한 EBCT의 감소는 일정한 공급유량의 조건하에서 바이오필터 크기의 축소로도 나타낼 수 있다[3]. 망상구조의 폴리우레탄 담체를 적용한 바이오필터를 이용한 황화수소 제거실험에서 EBCT가 10초 이상인 실험조건에서는 99.5% 이상의 황화수소 제거효율을 나타내었다. Kam 등[16]은 활성탄/폴리우레탄 복합체를 담체로 하여 *Bacillus sp.*를 균주로 적용한 바이오필터 실험에서 300 ppm의 황화수소 공급농도하에서 15~60초의 EBCT에서 99% 이상의 황화수소 제거효율을 보고하였다. 또한, 이 등[15]은 제주도산 화산석을 바이오필터에 적용한 연구에서 유입농도 250 ppm에서 EBCT 8초까지는 98% 이상의 안정된 황화수소 제거율을 보고하였다. 이러한 결과들은 본 연구와 비교하면, 본 연구에서는 고농도(600 ppm)의 황화수소를 제거하는데 EBCT 10초 이상에서 제거효율이 우수하였으나, 다른 연구결과와 비교하면 상대적으로 낮은 농도(250~300 ppm)에서 높은 제거율을 보여 본 연구와 다소 차이를 나타내었다. 이는 바이오필터 시스템에 적용한 균주와 담체에 의한 차이로 판단된다.

3-3. 최대제거용량과 임계부하속도

최대제거용량과 임계부하(제거)속도는 바이오필터의 설계시 중요한 설계인자이며, 바이오필터의 성능을 평가하는 기준이 되기도 한다. 바이오필터에 대한 최대제거용량은 바이오필터에 존재하는 미생물의 활성도에 대한 저해작용 없이 견딜 수 있는 최대부하율이며, 오염물질의 유입부하율과 같은 단위를 사용한다. 임계부하속도(임계제거속도는 유입가스가 100% 제거되는 최대부하속도(최대제거속도)를 나타낸다[14, 16-19].

Fig. 4는 바이오필터의 유입부하율에 따른 황화수소 제거용량을 나타낸 것이다. 망상구조의 폴리우레탄 담체를 적용한 바이오필터

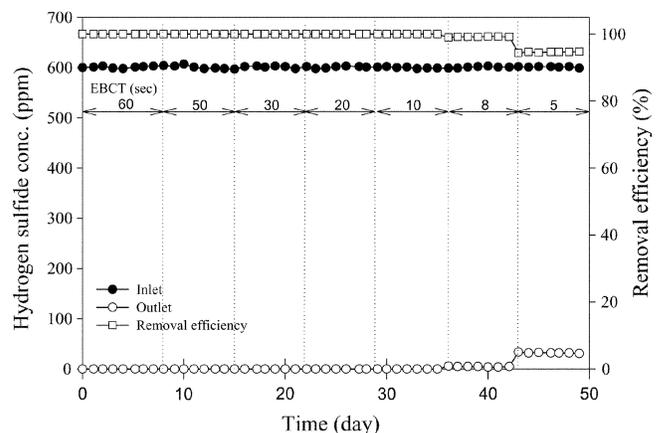


Fig. 3. Hydrogen sulfide removal pattern at a constant inlet concentration and a variable flow rate (EBCT). H₂S gas was introduced into the biofilters at a concentration of 600 ppm, via incremental changes in the inlet stream flow, at a 0~60 sec retention time for each packing material.

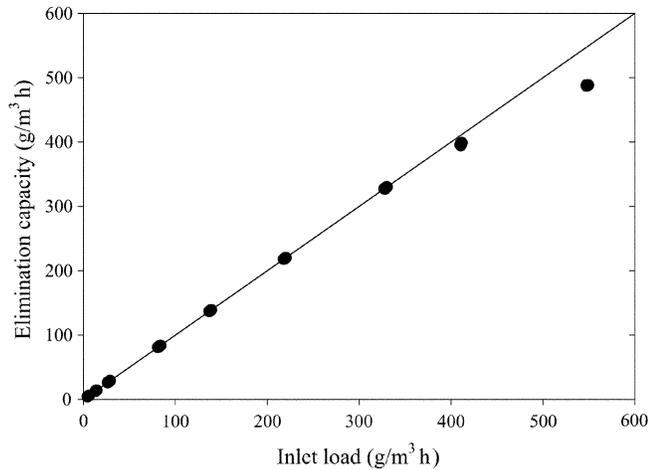


Fig. 4. Inlet load vs. elimination capacity of hydrogen sulfide in varying media.

의 황화수소 최대제거용량은 $488.3 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3\cdot\text{h}$ 으로 예측되었다. 이러한 결과는 다른 연구와 비교하여 보면, Kam 등[16]은 활성탄/폴리우레탄 복합체를 담체로 사용한 바이오필터 실험에서 $157 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3\cdot\text{h}$ 의 최대제거용량을 보고하였다. 또한, Eum 등[17]은 석면(rock wool)을 충전한 바이오필터를 이용하여 $1,115 \text{ g-S/m}^3_{\text{bed}}\cdot\text{day}$ ($49.4 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3\cdot\text{h}$)의 최대제거용량을 나타내었다고 보고하였다. 이러한 결과들은 본 연구에서 얻은 최대제거용량보다 낮은 값을 나타내고 있으나, 바이오필터에 사용한 담체와 균주의 상이함에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 4에서의 사선은 유입가스가 100% 제거되는 경우를 나타낸 것이다. 일반적으로 임계제거속도는 유입가스가 100% 제거되는 최대부하속도(최대제거속도)를 나타낸다[14, 16-19]. 본 연구에서 망상구조의 폴리우레탄 담체를 적용한 바이오필터를 이용한 황화수소 제거실험에서 확보한 제거용량 자료를 바탕으로 계산한 결과 임계부하속도는 약 $330.1 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3\cdot\text{h}$ 로 추정되었다. Yang과 Allen[14]은 yard waste compost 담체를 사용한 황화수소 제거 바이오필터 시스템에서 $100 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3\cdot\text{h}$ 의 임계부하속도를 보고하였다. 이는 본 연구의 결과와 비교하여 낮은 임계부하속도를 나타내었다.

4. 결 론

망상구조의 폴리우레탄 담체를 바이오필터에 적용하여 4종의 혼합균주를 이용하여 황화수소 제거를 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 황화수소를 750 ppm 농도까지 바이오필터에 유입한 결과 97% 이상의 제거율을 나타내었다. 망상구조의 폴리우레탄 담체를 적용한 바이오필터의 황화수소 최대제거용량은 $488.3 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3\cdot\text{h}$ 이었고, 임계부하속도는 약 $330.1 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3\cdot\text{h}$ 로 추정되었다.

감 사

본 연구는 산업자원부의 지역 석·박사 연구인력 양성사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다. 또한 2단계 BK21 사업의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Edwards, F. G. and Nirmalakjandan, N., "Biological Treatment of Airstreams Contaminated with VOCs: An Overview," *Water Science and Technology*, **34**(3-4), 565-571(1996).
2. Altaf Wani, H., Branion Richard, M. R. and Lau Anthony, K., "Biofiltration: A Promising and Cost-effective Control Technology for Odors, VOCs and Air Toxics," *J. Environ. Sci. Health*, **A32**(7), 2027-2055(1997).
3. Jeong, G. T., Lee, G. Y., Lee, K. M., Sunwoo, C. S., Lee, W. T., Jung, S. H., Cha, J. M., Jang, Y. S. and Park, D. H., "Selection of Biofilter Support for Removing MEK, Korean," *J. Biotechnol. Bioeng.*, **21**(1), 37-44(2006).
4. Devinny, J. S., Webster, T. S., Torres, E. and Basrai, S., "Biofiltration for Removal of PCE and TCE Vapors from Contaminated Air," *Hazardous Waste Hazardous Mater.*, **12**(3), 233-293 (1995).
5. Webster, T. S., Webster, J. S., Torres, E. and Basrai, S. S., "Microbial Ecosystems in Compost and Granular Activated Carbon Biofilters," *Biotechnol. Bioeng.*, **53**(3), 296-303(1997).
6. Yang, Y. and Allen, E. R., "Biofiltration Control of Hydrogen Sulfide: 1. Design and Operational Parameters," *J. Air Waste Manage.*, **44**(11), 863-868(1994).
7. Weber, F. J. and Hartmans, S., Dragt, A. J. and van Hameds, J. (Ed.), *Biotechniques for Air Pollution Abatement and Odour Control Policies*, Elsevier, Amsterdam, 125-130(1992).
8. Kim, S. W., Jang, Y. M., Myung, S. W. and Choi, H. S., "Physical Properties of Reticulated Polyurethane Foams and the Enhancement of Microbial Adhesion Through Their Surface Treatments," *Korean J. Biotechnol. Bioeng.*, **18**(5), 412-417(2003).
9. Myung, S. W., Nam, Y. S., Lee, Y. W. and Choi, H. S., "Removal Characteristics of Toluene in Biofilters Packed with Reticulated-PU-foams of Different Porosities," *Korean J. Biotechnol. Bioeng.*, **18**(6), 448-454(2003).
10. Jeong, G. T., Lee, G. W., Byun, K. Y., Lee, K. M., Sunwoo, C. S., Lee, W. T., Park, C. Y., Kim, D. H., Cha, J. M., Jang, Y. S. and Park, D. H., "Study of Operation Condition of Biofilter Using Fibril-form Matrix for Odor Gas Removal," *Korean J. Biotechnol. Bioeng.*, **20**(5), 341-344(2005).
11. Park, D. H., Cha, J. M., Ryn, H. W., Lee G. W., Yu, E. Y., Rhee, J. I., Park, J. J., Kim, S. W., Lee, I. W., Joo, Y. I., Ryu, Y. W., Hur, B. K., Park, J. K. and Park, K., "Hydrogen Sulfide Removal Utilizing Immobilized *Thiobacillus* sp. IW with Ca-alginate Bead," *Biochem. Eng. J.*, **11**, 167-173(2002).
12. Wright, D. F. and Schroede, E. D., "Performance of a Pilot-scale Compost Biofilter Treating Gasoline Vapor," *J. Environmental Engineering*, **123**(6), 547-555(1997).
13. Jung, I. G., Park, O. H., Woo, H. J. and Park, C. H., "Recovery of Trichloroethylene Removal Efficiency Through Short-term Toluene Feeding in a Biofilter Enriched with *Pseudomonas putida* F1," *Biotechnol. Bioprocess Eng.*, **10**(1), 34-39(2005).
14. Webster, T. S., Cox, H. H. J. and Deshusses, M. A., "Resolving Operational and Performance Problems Encountered in the Use of a Pilot/full-scale Biotrickling Fiber Reactor," *Environmental Progress*, **18**(3), 162-172(1999).
15. Lee, M. Y., Bin, J. I., Lee, B. H., Kim, J. K., Choi, H. and Kwon, S. H., "Removal Characteristics of Hydrogen Sulfide in the Biofil-

- ter Packed with Volcanic Rock (Scoria); *HWAHAK KONGHAK*, **39**(3), 379-382(2001).
16. Kam, S. K., Kang, K. H., Lim, J. K. and Lee, M. G., "Removal Characteristics of H₂S in the Biofilter Packed with Activated Carbon/polyurethane Composite Media;" *J. Environmental Sciences*, **13**(1), 47-53(2004).
17. Eun, N., Lam, D. V., Galera, M. M., Nisola, G. M., Son, S., Kim, S. H., Song, J. H. and Chung, W. J., "Hydrogen Sulfide Removal in Biofilters Using Rock Wool and Organic Media;" *J. Ind. Eng. Chem.*, **11**(5), 666-670(2005).
18. Oh, K. J., Cho, K. C., Choung, Y. H., Park, S. K., Cho, S. K. and Kim, D. K., "Removal of Hydrogen Sulfide, Benzene and Toluene by a Fluidized Bed Bioreactor;" *Korean J. Chem. Eng.*, **23**(1), 148-152(2006).
19. Kim, C. W., Park, J. S., Cho, S. K., Oh, K. J., Kim, Y. S. and Kim, D., "Removal of Hydrogen Sulfide, Ammonia, and Benzene by Fluidized Bed Reactor and Biofilter;" *J. Microbiol. Biotechnol.*, **13**(2), 301-304(2003).