

활성탄/폴리우레탄 복합담체를 충전한 바이오필터에서 H₂S의 제거특성

감 상 규 · 강 경 호 · 임 진 관 · 이 민 규
제주대학교 토목환경공학전공, *부경대학교 화학공학부
(2003년 10월 17일 접수; 2004년 1월 19일 채택)

Removal Characteristics of H₂S in the Biofilter Packed with Activated Carbon/Polyurethane Composite Media

Sang-Kyu Kam, Kyung-Ho Kang, Jin-Kwan Lim* and Min-Gyu Lee*

Division of Civil and Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

*Division of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Manuscript received 17 October, 2003; accepted 19 January, 2004)

A biofiltration system using activated carbon/polyurethane composite as solid support inoculated with *Bacillus* sp. was developed for treating a gaseous stream containing high concentrations of H₂S. The effects of operating condition such as the influent H₂S concentration and the empty bed contact time (EBCT) on the removal efficiency of H₂S were investigated. The biofilter showed the stable removal efficiencies of over 99 % under the EBCT range from 15 to 60 sec at the 300 ppmv of H₂S inlet concentration. When the inlet concentration of H₂S was increased, the removal efficiencies decreased, reaching 95 and 74%, at EBCTs of 10 and 7.5 sec, respectively. The maximum elimination capacity in the biofilter packed with activated carbon/polyurethane composite media was 157 g/m³/hr.

Key Words : Activated carbon, Polyurethane, Composite media, Biofilter Biofiltration, Hydrogen sulfide

1. 서 론

황화수소(H₂S)는 하·폐수처리장, 축산폐수 처리장과 같은 환경기초시설 뿐만 아니라 음식물 쓰레기, 제지공장, 인조견사(rayon) 제조공장, 석유 정제 공장 및 천연가스처리공장 등의 산업현장 주변에서 발생하는 대표적인 악취물질 중의 하나로 알려져 있다.¹⁾

황화수소는 부패된 계란 냄새가 나는 무색의 악취물질로서, 약 0.5 ppbv 정도의 낮은 농도에서도 그 냄새를 느낄 수 있을 정도로 자극적인 물질로 심미적인 거부감을 줄뿐만 아니라 하수처리계통에서 부식문제를 야기하는 물질이다.^{2,3)} 또한 농도가 100 ppmv에 이르면 냄새를 감지하지 못하고 흡입시에

는 두통, 현기증, 불규칙적인 보행, 호흡장애를 일으키며, 500 ppmv 이상의 고농도의 황화수소가스를 흡입시에는 의식불명, 경련, 호흡마비를 일으켜 사망에 이르게 하는 것으로 알려져 있다. 따라서 미국 작업안전보건당국(OSHA)에서는 작업장에서의 한계농도를 20 ppmv로, 최대농도 50 ppmv에서 10 min 이상 노출되지 않도록 정하였으며, 미국국립작업안전보건연구소(NIOSH)에서는 작업시 최대노출한계농도를 10 ppmv로 정하고 있다.⁴⁾

이러한 황화수소가스를 제거하기 위한 기존의 제거방법으로는 습식 세정, 흡착법, 직접 연소법, 촉매산화법, 마스크법 등과 같은 물리·화학적 방법들이 있다. 이들 방법은 비록 대상오염가스의 제거효율은 높지만 시설비 및 재료비, 약품비 등과 같은 운영비가 많이 소요되어 고유량의 저농도 폐가스를 배출 허용치까지 감소시키는데는 비경제적이며, 2차 오염물질을 발생하는 단점이 있다.^{5,6)} 그러나, 생물학적

Corresponding Author : Min-Gyu Lee, Division of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
Phone : +82-51-620-1468
E-mail : mglee@pknu.ac.kr

방법은 이들 공법에 비해 경제적이며,⁷⁾ 생물학적방법 중의 하나인 biofiltration은 산업공정에서 배출되는 악취 또는 VOC를 제거하는데 효과적이라는 것이 입증된 기술⁸⁻¹⁰⁾으로써, 특히 농도는 낮으나 배출 유량이 많은 기상 오염물 처리의 경우에 매우 효과적인 처리 방법이다.^{2,11)} Knauf¹²⁾는 석유 생산 공장에서 발생하는 황화수소가스를 크기가 340 m³인 biofilter(바이오필터)로 처리한 결과 20,000 m³/h의 가스를 89%의 제거효율로 처리할 수 있었다고 하였으며, Amirhor 등¹³⁾은 퇴비화 작업에서 발생하는 황화수소가스의 처리에 바이오필터를 적용한 결과, 크기가 500 m³인 바이오필터로 40,000 m³/h의 가스를 80%의 제거효율로 처리 할 수 있었다고 하였다.

일반적으로 바이오필터의 처리능은 사용하는 담체와 미생물에 의해 크게 좌우되는데, 바이오필터의 담체로는 주로 peat,^{14,16)} compost,^{12,17,18)} soil이나 bark chips^{19,20)} 등과 같은 유기성 담체가 널리 사용되고 있다. 그러나, 최근에는 peat와 compost를 bulking agents를 사용하여 혼합한 담체, 다공성세라믹과 같은 무기성 담체, 또는 이들을 복합한 담체를 사용하는 등 새로운 담체의 개발에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.^{13,21,22)}

활성탄은 그 자체로서도 흡착능이 우수하여 흡착제로 널리 사용되지만 폐수나 기상 유출물 중에 함유된 특정 물질을 제거하기 위한 생물학적 공정에서의 미생물 담체로도 널리 사용되고 있다.^{23,24)} 활성탄을 바이오필터 담체로 사용시 오염물질의 큰 부하에도 높은 제거율을 나타낼 뿐만 아니라 바이오필터의 초기 순차기간 동안의 낮은 제거율을 극복할 수 있는 장점을 갖고 있으나, 일반적인 천연담체에 비해 가격이 고가인 단점이 있다.²⁵⁻²⁷⁾ 또한 폴리우레탄(polyurethane)은 높은 공극률과 높은 비표면적, 적절한 기공크기, 낮은 밀도 및 친수성을 가지고 있어,²⁸⁾ 바이오필터의 담체로서의 물리적 특성이 우수한 것으로 보고 되고 있으며,²⁹⁾ Lee 등³⁰⁾은 폴리우레탄을 충전한 바이오필터를 이용하여 황화수소가스 제거 실험을 수행한 결과 157 g/m³/hr의 높은 최대제거용량을 나타내었다고 하였다.

따라서, 본 연구에서는 바이오필터의 담체로 널리 이용되고 있는 활성탄에다 물리적 특성이 우수한 폴리우레탄을 접목하여 활성탄/폴리우레탄 복합담체를 개발하고, 이를 바이오필터에 적용하여 황화수소가스에 대한 제거특성을 살펴보기 위하여 황화수소가스의 유입농도와 유입유량의 변화에 따른 제거

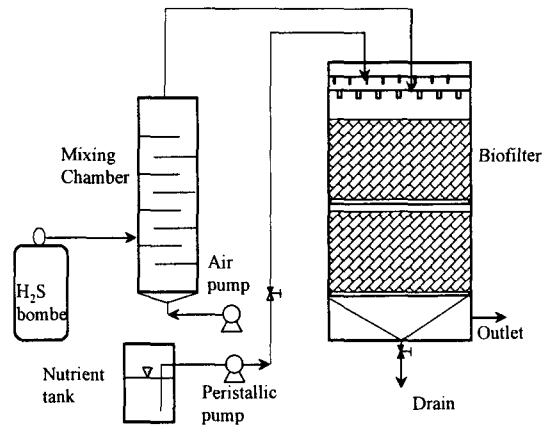


Fig. 1. Laboratory-scale experimental biofilter system.

효율의 영향을 조사하고 최대제거용량을 산정하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치는 바이오필터 컬럼, nutrient 순환부, 혼합기로 구성하였으며, 장치의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다.

장치의 크기 및 운전조건은 Table 1과 같으며, 바이오필터는 내경 4 cm, 높이 60 cm의 아크릴관으로 제작하였다. 바이오필터 컬럼은 2단으로 나누어 각 단에 담체를 0.25 L씩 충전하여 총 충전부피가 0.5 L가 되게 하였다. 황화수소가스는 bombe로 부터 유량조절기를 통해 혼합기로 넣고 여기서 air와 혼합시켜 일정 농도의 황화수소가스로 만든 다음 바이오필터 컬럼의 상부로 유입되도록 하였다.

또한 Table 2와 같은 조성의 nutrient를 Master-

Table 1. Design and operating parameters of the biofilter

Biofilter characteristics	Description
Pollutant	Hydrogen sulfide
Media	Activated carbon/polyurethane composite media
Mean diameter of media	5~7 mm
Height of filter bed	40 cm (2×20 cm)
Column diameter	4 cm
Inlet concentration of hydrogen sulfide	100~1,100 ppmv
Air flow rate	0.5~6 L/min (EBCT : 60~5 s)

Table 2. Composition of the nutrient solution

Components	Concentration
KH ₂ PO ₄	2 g/L
K ₂ HPO ₄	2 g/L
NH ₄ Cl	0.5 g/L
MgSO ₄ · 7H ₂ O	0.5 g/L
CaCl ₂ · 2H ₂ O	0.05 g/L
FeSO ₄ · 7H ₂ O	0.03 g/L
KNO ₃	1.5 g/L

flex pump(Model 7519-05, U.S.A)를 이용하여 바이오필터의 상부로 0.4 cc/min의 유량으로 공급하였으며, nutrient의 공급만으로 바이오필터 내의 수분을 유지하도록 하였다.

본 연구에서 충전담체로 사용한 활성탄/폴리우레탄 복합담체의 제조는 먼저 활성탄을 분쇄기(Kun Hung, KH-202)를 이용하여 100 mesh 이하의 크기로 분쇄한 후 분쇄한 활성탄과 폴리우레탄을 부피비로 4:1의 비율로 섞고 plate shaker(John Sam, JS-FS-2500)로 교반하면서 제조하였다. 제조된 활성탄/폴리우레탄 복합담체는 체분리하여 일정크기(5~7 mm)의 직경을 가지는 담체를 선별하여 사용하였으며, 제조된 복합담체의 밀도 및 함수율 등의 물리적 특성은 Table 3에 나타낸 바와 같다.

본 연구에서 사용한 미생물은 *Bacillus sp.*를 사용하고 있는 하수처리장의 반송 슬러지를 바이오필터 컬럼에 충전된 복합 담체에 접종하여 탈취미생물 균주로 사용하였다. 실험실 온도는 28~30 °C로 일정하게 유지하면서 운전하였다.

가스의 분석은 바이오필터 컬럼상에 일정간격으로 설치된 시료 채취구에서 검지관(GASTEC, Japan)을 이용하여 직접 분석하였다. 배출수의 pH 및 SO₄²⁻에 대한 분석은 각각 pH-meter (ORION, 420A)와 Ion Chromatography (DX-120, U.S.A.)를 이용하였으며, 압력손실은 Manometer(DWER, U.S.A.)를 이용하여 주기적으로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 공탑 접촉 시간(EBCT, empty bed contact time)을 30 sec로 일정하게 하고서 황화수소가스의 유입농도를 100~1,100 ppmv로 단계적으로 증가시키면서 그에 따른 제거특성을 살펴본 결과이다. 초기 미생물의 순응 및 활성을 위하여 황화수소의 유입농도를 100 ppmv로 공급하였을 때 제거효율은 70%로 낮게 나타났다. 그러나 미생물의 순응이 일어난 3일 이후부터는 100 ppmv의 유입농

Table 3. Physical properties of activated carbon/polyurethane composite media

Physical property	Value
Apparent density (g/cm ³)	0.34
Density (g/cm ³)	0.72
Bed void volume ratio	0.52
Water content (cm ³ /cm ³)	0.4
Media size (mm)	5~7

도에 대하여 제거효율이 100%로 얻어졌다. 3일간의 순응기간이 끝난 후부터 농도 변화에 대해서도 안정적인 제거효율을 얻을 수 있었고 유입농도를 단계적으로 700 ppmv 까지 증가시킨 경우에도 99% 이상의 제거효율을 나타내었다.

바이오필터에서 오염가스는 충전물질 표면과의 충분한 접촉이 있어야만 확산, 흡착/흡수 등이 일어나며, 이들은 생물학적 분해단계를 거치면서 분해된다. 따라서 EBCT가 감소할수록 유입속도는 증가하여 충전물질 표면과의 접촉이 이루어지지 않아 제거대상가스에 대한 제거효율의 감소를 초래할 수 있으므로 바이오필터의 운전조건에서 적절한 가스유입속도를 찾아내는 것도 중요한 연구인자가 된다. Fig. 3은 황화수소가스의 유입농도를 300 ppmv로 일정하게 하고서 EBCT를 60, 30, 15, 10, 7.5 및 5 sec로 감소시키면서 운전한 경우에 바이오필터의 제거효율을 살펴본 결과이다. 바이오필터에서 EBCT의 감소는 바이오필터에 유입되는 황화수소가스의 유입부하 및 유입유량이 증가하는 것을 의미하며, 유입유량이 일정할 경우에는 바이오필터의 크기가 작아짐을 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이 EBCT가 길어질수록 황화수소가스의 제거효율은 증가하였으며, EBCT가 15 sec이

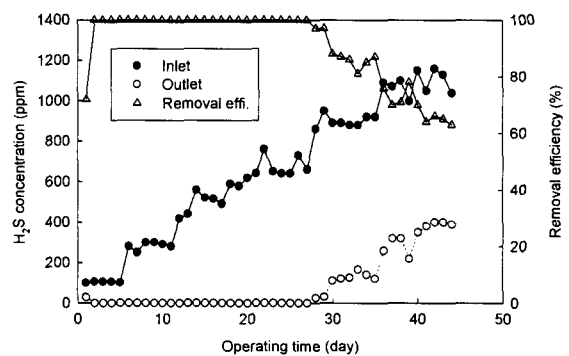


Fig 2. Inlet and outlet H₂S concentration of the biofilter as a function of operating time.

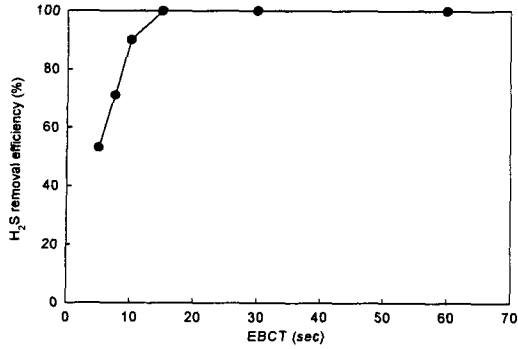


Fig. 3. Effect of EBCT on the removal efficiency of the biofilter at constant inlet H₂S concentration of 300 ppmv.

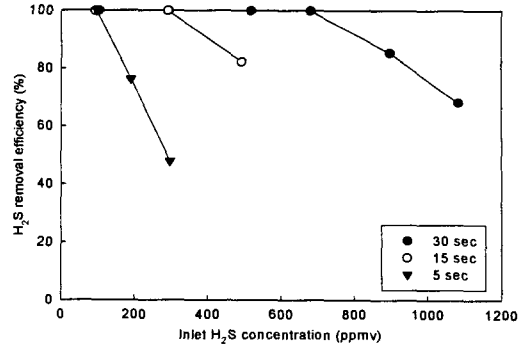


Fig. 4. Removal efficiency of the biofilter as a function of inlet H₂S concentration at different EBCT.

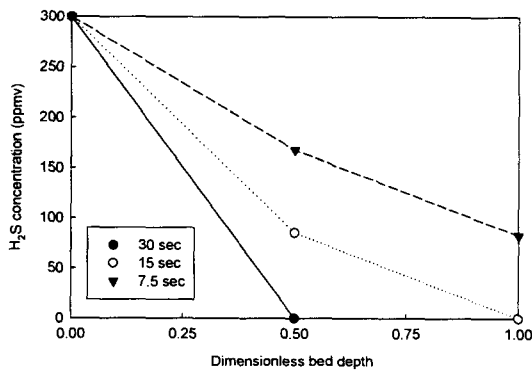


Fig. 5. Effluent H₂S concentration as a function of bed depth at different EBCT.

인 유량조건에서는 황화수소가스에 대해 100%의 안정적인 제거효율을 보였다. 이는 EBCT가 길어질수록 담체에 부착 성장하고 있는 미생물과 황화수소가스간의 접촉시간이 길어짐에 따라 황화수소의 분해가 원활히 일어나기 때문으로 사료된다. 또한 EBCT가 10 sec에서도 95%의 높은 제거효율을 나타내었으며, EBCT를 7.5 및 5 sec로 더욱 낮춤에 따라서는 제거효율이 74% 및 48%로 감소하였다. 이와 같이 EBCT를 낮춤에 따라 제거효율이 감소하는 것은 유입유량이 증가함으로써 미생물과 황화수소가스간의 접촉시간이 짧아짐에 따라 황화수소가 충분히 분해되지 못하기 때문으로 사료된다.

Fig. 4는 EBCT를 달리한 경우에 있어서 황화수소가스의 유입농도 변화에 따른 제거효율을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 제거효율이 100%가 되는 황화수소가스 유입농도는 EBCT가 30, 15 및 5 sec인 경우에 각각 700 ppmv, 300 ppmv 및 100 ppmv 이하로 운전하여야 함을 알 수 있다. 또한 이들 농도

이상으로 운전시에는 제거효율이 감소하며, 감소정도는 EBCT가 짧아질수록 즉, 유입공기유량이 증가할수록 커짐을 알 수 있다.

Fig. 5는 바이오필터에 유입되는 황화수소가스의 농도를 300 ppmv로 일정하게 하고서 EBCT를 각각 30, 15 및 7.5 sec로 달리한 경우에 입구, 중간부 및 출구에서의 황화수소가스의 농도변화를 살펴본 결과이다. EBCT가 30 sec일 때는 유입된 황화수소가스가 탑 중간부에서 완전 제거되는 것을 알 수 있으며, EBCT가 15 sec인 경우에는 탑의 출구에서 완전 제거되었다. 또한 EBCT가 15 sec보다 더 작아지게 되면, 완전 제거되지 않고 출구에서 황화수소가스가 유출됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 최대 제거용량을 산정하기 위하여 황화수소가스의 유입 부하량에 따른 제거용량의 변화를 살펴본 결과이다. 최대 제거용량의 산정은 동일 조건의 바이오필터의 성능을 알아보기 위한 필수적인 요소이기 때문에 바이오필터 설계시 고려해야 할 중요한 변수이다. 그림에서 보여 지듯이 유입부하가 130 g-H₂S/m³/hr 이하일 경우에 제거용량은 유입부하량과 선형적 관계를 가지며, 유입부하가 130 g-H₂S/m³/hr 이상일 경우에는 제거용량은 157 g-H₂S/m³/hr의 한계값에 도달하였다. 따라서 본 실험에서 사용한 활성탄/폴리우레탄 복합담체를 충전한 바이오필터에서의 황화수소가스의 최대제거용량은 157 g-H₂S/m³/hr로 산정되었다.

Fig. 7은 바이오필터의 연속 운전기간 동안 황화수소가스의 유입농도를 증가시키면서 pH 변화를 살펴본 결과이다. 바이오필터의 운전으로 처리대상가스가 생물학적으로 분해가 일어날 때 최종생성물에 의해 산성화가 이루어져 pH는 낮아지게 되던 미생물들의 활성에 영향을 끼치므로 pH 조절은 중요한 바이오필터의 운전인자로 알려져 있다.³¹⁾ 본 연구의

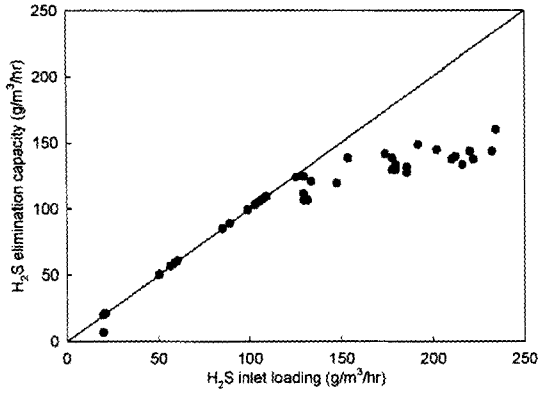


Fig 6. Elimination capacity of the biofilter as a function of H₂S inlet loading.

바이오필터에서 미생물에 의해 황화수소가스가 제거되는 기작은 다음과 같이 산화반응에 의해 황화수소는 최종생성물인 SO₄²⁻로 전환되며, 이로 인해 바이오필터내의 pH가 낮아지게 된다.³²⁾

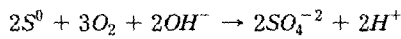


Fig. 7에서 보여 지듯이 연속 운전에 따라 황화수소가스의 유입농도가 증가하면서 SO₄²⁻ 이온의 생성이 증가함으로써 pH가 감소하였지만 제거효율은 감소하지 않았다. 이는 본 연구에서 *Bacillus. sp*를 탈취미생물로 사용하였기 때문에 낮은 pH 조건에서도 황화수소의 제거효율에 큰 영향을 주지 않은 것으로 사료되며, pH가 1 부근으로 유지되는 것은 nutrient에 함유된 phosphate buffer의 영향 때문으로 사료된다. 비록 대부분의 미생물의 경우 최적

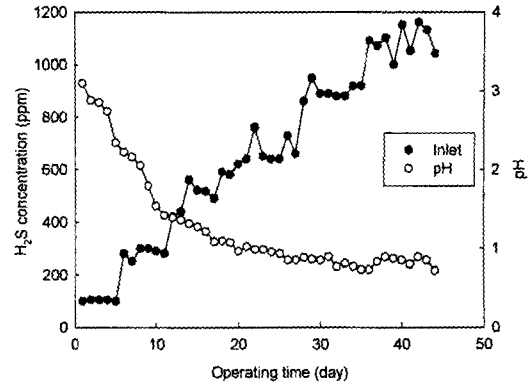


Fig 7. Relationship between inlet H₂S concentration and leachate pH during biofilter operation.

pH가 6~8범위이기 때문에 바이오필터의 운전에 따라 기질의 분해에 의해서 산성화가 이루어져 pH는 낮아지게 되면 제거효율이 감소하게 되지만 *Thiobacillus*와 같은 acidophilic 미생물은 sulfide 같은 물질들을 산화시키는 능력을 가지고 있기 때문에 낮은 pH 조건에서도 활성을 지니는 것으로 알려져 있다. Lee³³⁾는 호산성 균주인 *Thiobacillus thiooxidans*의 증식과 비 황산화속도에 미치는 pH의 영향을 검토한 결과 기질이 풍부할 경우에 pH 1.8~2.1 사이에서 최대 비 황산화속도를 가지며, pH 0.6~0.9 사이에서 최대 비 세포생장성을 가진다고 하였다. 또한, *Thiobacillus ferrooxidans*는 황화수소의 분해시 최적 pH가 1.7~3.2이라고 하였다.

Fig. 8과 9는 컬럼내에 충전된 활성탄/폴리우레탄 복합담체의 사진과 담체에 서식하는 미생물의 SEM (Scanning electron microscope)사진이다. Fig. 9에서 보여 지듯이 담체 표면에 부착된 미생물은

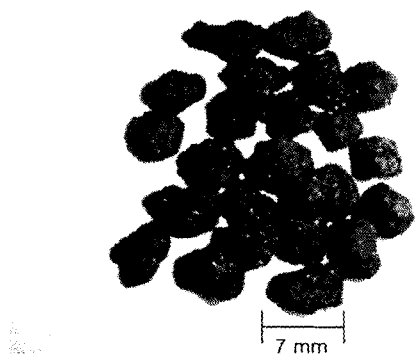


Fig. 8. Photograph of the activated carbon/polyurethane composite media used in this study.

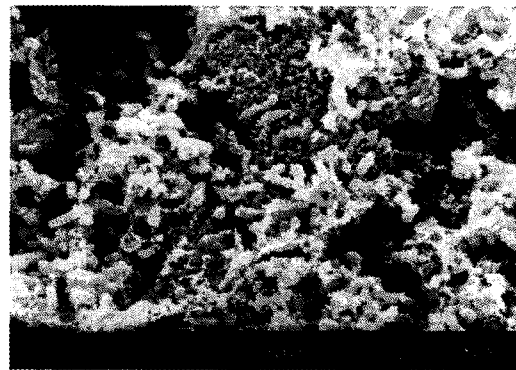


Fig. 9. Scanning electron micrograph (× 5,000) of the microbial grown on composite media packed in the biofilter.

*Bacillus. sp*로써 형태가 막대 모양을 이루고 있으며, 많은 양의 미생물들이 담체 표면에 서식하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 사용된 활성탄/폴리우레탄 복합담체의 표면은 많은 기공을 가지고 있어 미생물의 부착 및 성장에 적합한 환경을 제공하고 있는 우수한 담체로 사료되었다.

4. 결 론

활성탄/폴리우레탄 복합담체를 충전한 바이오필터에서 황화수소가스에 대한 제거특성에 대한 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) EBCT를 30 sec로 운전시에는 황화수소가스의 유입농도가 700 ppmv까지는 99% 이상의 제거 효율을 나타내었다. 황화수소가스의 유입농도를 300 ppmv로 운전한 경우에 EBCT가 15 sec이상에서는 황화수소가스에 대해 100%의 안정적인 제거효율을 보였다. 또한 EBCT가 10 sec에서도 95%의 높은 제거효율을 나타내었으며, EBCT를 7.5 및 5 sec로 더욱 낮춤에 따라서는 제거효율이 74% 및 48%로 감소하였다.
- 2) 바이오 필터의 연속 운전시 pH가 1까지 감소하지만 제거효율에는 크게 영향을 미치지 않았다.
- 3) 황화수소가스의 유입부하가 130 g-H₂S/m³/hr이하에서는 제거용량은 유입부하량과 선형적 관계를 가졌으며, 본 실험에서 사용한 활성탄/폴리우레탄 복합담체를 충전한 바이오필터에서의 황화수소가스의 최대제거용량은 157 g-H₂S/m³/hr로 산정되었다.

감사의 글

본 연구의 일부는 2003년도 제주대학교 두뇌 한국 21사업 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

- 1) Yang, Y. and E. R. Allen, 1994, Biofiltration control of hydrogen sulfide 1. Design and operation parameter, J. Air & Waste Manage. Assoc., 44, 863-868.
- 2) Smet, E., P. Lens and H. Langenhove, 1998, Treatment of waste gases contaminated with odorous sulfur compounds, Critical Rev. Environ. Sci. Technol., 28, 89-117.
- 3) Eikum, A. and S. Strohngang, 1986, Odour problems related to wastewater and sludge treatment, In odour prevention and control of organic sludge and livestock farming, Neilson, V. C., Voorburg, J. H., and Hermite, P. L.,

Eds., Elsevier, London, 690pp.

- 4) ATSDR, 2002, Web site: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp126.htm>.
- 5) Yoon, I. K., S. K. Park, S. J. Jung and C. H. Park, 2002, Effect of temperature and input rate on the removal of volatile organic compounds in a compost-biofilter, J. of Kor. Soc. Environ. Eng., 24(1), 89-97.
- 6) Yoon, I. K. and C. H. Park, 2000, Degradation of volatile organic compound mixtures using a biofiltration system, Kor. J. Biotechnol. Bioeng., 15(5), 501-506.
- 7) Vaith, K., M. Cannon, D. Milligan and J. Heydorn, 1996, Comparing scrubbing technology, Water Environ. and Technol., 8(6), 35-38.
- 8) Pearson, C. C., V. R. Phillips, G. Green and I. M. Scotford, 1992, A minimum-cost biofilter for reducing aerial emissions from a broiler chicken house, Biotechniques for Air Pollution Abatement and Odour Control Policies, 51, 245-254.
- 9) Goldstein, N., 1996, Odor control experiences : lessons from the biofilter, Biocycle, 37, 70-75.
- 10) Nicolai, R. and K. Janni, 2000, Designing biofilters for livestock facilities. In Proceedings of the 2nd International Conference on Air Pollution from Agricultural Operations, ASAE, St. Joseph, Bloomington, MN, USA, 376-383pp.
- 11) Burgess, J. A., S. A. Parsons and R. M. Stuetz, 2001, Developments in odour control and waste gas treatment biotechnology: a review, Biotechnol. Advances, 19, 35-63.
- 12) Knauf, S. A., 1995, Biofilter application with high concentrations of hydrogen sulfide in a waste water treatment plant and an oil mill, Proc. 88th Annual Meeting & Exhibition of the Air & Waste Manage. Assoc., Pittsburgh, Penna, paper 95-MP9A.03.
- 13) Amirhor, P., G. A. Kuter and M. D. Andrade, 1995, Biofilters and biosolids, Water Environ. Technol., 3, 44-48.
- 14) Hartikainen, T., P. J. Martikainen, M. Olkonen and J. Ruuskanen, 2002, Peat biofilters in long-term experiment for removing odorous sulphur compounds, Water, Air and Soil Pollut., 133, 335-348.

- 15) Furusawa, N., I. Togashi, M. Hirai, M. Shoda and H. Kubota, 1984, Removal of hydrogen sulfide by a biofilter with fibrous peat, *Int. J. Ferment. Technol.*, 62, 589-594.
- 16) Togashi, I., M. Suzuki, M. Hirai, M. Skodu and H. Kuboku, 1986, Removal of ammonia by a peat biofilter without and with nitrifier, *J. Ferment. Technol.*, 64, 425-432.
- 17) Bohn, H. L., 1975, Soil and compost filters of malodorant gases, *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 25, 953-955.
- 18) Rands, M. B., D. E. Cooper, C. Woo, G. C. Fletcher and K. A. Rolfe, 1981, Compost filters for hydrogen sulfide removal from anaerobic digestion and rendering exhausts, *J. Water Pollut. Control Fed.*, 53, 185-189.
- 19) Carlson, D. A. and C. P. Leiser, 1981, Soil beds for control of sewage odors, *J. Water Pollut. Control Fed.*, 38, 829-840.
- 20) Kurita, M. and O. Kamata, 1990, Deodorization systems used at sewage treatment plants in Nagoya city, *Sewage Works Japan*, 114-119pp.
- 21) Hirai, M., M. Kamamoto, M. Yani and M. Shoda, 2001, Comparison of the biological H₂S removal characteristics among four inorganic packing materials, *J. Biosci. and Bioeng.*, 91, 396-402.
- 22) Shinabe, K., S. Oketani, T. Ochi, S. Kanchanatawee and M. Matsumura, 2000, Characteristics of hydrogen sulfide removal in a carrier-packed biological deodorization system, *Biochem Eng. J.*, 5, 209-217.
- 23) Malhautier, L., J. R. Degorce-Dumas, V. Degrange, R. Bardin and P. Le Cloirec, 1997, Serological determination of *Nitrobacter* species in a deodorizing granular activated carbon filter, *Environ. Technol.*, 18, 275-283.
- 24) Malhautier, L., V. Degrange, R. Guay, J. R. Degorce-Dumas, R. Bardin and P. Le Cloirec, 1998, Estimating size and diversity of nitrifying communities in deodorizing filters using PCR and immunofluorescence, *J. Appl. Microbiol.*, 85, 255-262.
- 25) Victor, F. M. and T. Webster, 1995, Treatment of gasoline residuals by granular activated carbon based biological filtration, *J. Environ. Sci. Health.*, A30(2), 407-422.
- 26) Weber, W. J., M. Pirbazari and G. L. Melson, 1978, Biological growth on activated carbon: an investigation by scanning electron microscopy, *Environ. Sci. and Technol.*, 12(7), 817-819.
- 27) Pirbazari, M., T. C. Voice and W. J. Weber, 1990, Evaluation of biofilm development on various natural and synthetic media, *Hazard. Waste and Hazard. Material*, 7(2), 239-250.
- 28) Ergas, S. J., E. D. Schroeder and D. P. Chang, 1992, Biodegradation technology for volatile organic compound removal from air stream ; Phase I ; Performance verification, California Air Resources Board, Final Report under Contract No. AO, 32-137pp.
- 29) Moe, W. M. and R. L. Irvine, 2000, Polyurethane foam medium for biofiltration. I : Operation and performance, *J. Environ. Eng.*, 126(9), 815-825.
- 30) Lee, Y. O., C. K. Cho, H. W. Ryu and K. S. Cho, 2002, Removal of malodorous gases from swine manure by a polyurethane biofilter inoculated with heterotrophic and autotrophic bacteria, *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.*, 30(1), 91-97.
- 31) Mueller, J. C., 1988, Biofiltration of gases—a mature technology for control of a wide range of air pollutants, *British Columbia Res. Corp.*, Vancouver, B. C., Canada, 1-22pp.
- 32) Chung, Y. C., C. Huang and C. P. Tseng, 1996, Operation optimization of *Thiobacillus thiooparus CH11* biofilter for hydrogen sulfide removal, *J. Biotechnol.*, 52, 31-38.
- 33) Lee, E. Y., 1999, Isolation and deodorizing characteristics of sulfur oxidizing bacteria and ammonia oxidizing bacteria for the removal of sulfur containing malodorous compounds and ammonia, Ph. D Thesis, Ehwa Womans Univ., 1-230pp.