



생물학적 황화수소 제거에 미치는 담체의 영향에 관한 연구

장현섭*, 이태행*, 김춘이*, 조용범*, 오민환, 이은영[†]

*주식회사 엑센, 수원대학교 환경공학과

(2009년 6월 14일 접수일, 2009년 6월 24일 수정일, 2009년 6월 25일 채택일)

Effect of Media on the Biological Removal of Hydrogen Sulfide

Hyun Sup Jang*, Tae Haeng Lee*, Chun Lee Kim*, Yong Beom Cho*, Min Hwan Oh*, Eun Young Lee[†]

*EXEN Co, Department of Environmental Engineering, University of Suwon

ABSTRACT

Biofilters use porous solid media to support microorganisms and allow access to the contaminants in the airflow. The characteristics of media used in biofilters vary greatly, and therefore it is important to select the appropriate media in order to obtain a large enough surface attachment area and uniform pore. This study was performed to compare hydrogen sulfide (H₂S) removal efficiencies of three biofilter media; coconut fiber, ceramic, and polyurethane. The biofilter packed with coconut fiber showed stable removal activity when inlet loading was changeable, and was restored rapidly when the moisture content decreased. However, the coconut fiber suffered from low durability. To cope with this problem a media of fibrinous polypropylene was developed to strengthen the durability of the coconut fiber. Biofilter column experiments using the fibrinous polypropylene media demonstrated over 99% of removal efficiencies at pH as low as 3 and 6 seconds of EBRT (empty bed gas residence time). Due to its superior physical characteristics, it is expected that the H₂S treatment performance will increase when the new fibrinous polypropylene media is applied in commercial biofilter systems.

Keywords : Biofilters, Fibrinous media, Coconut, Hydrogen sulfide

[†]Corresponding author: ley@suwon.ac.kr

초록

바이오필터의 담체는 유입되는 악취를 제거할 수 있는 미생물이 서식하는 공간이다. 생물학적 악취제거에 있어서, 담체의 특성은 매우 다양하며 그 성장과 특징은 매우 중요하며 비표면적이 크고 균일한 공극을 갖는 담체의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 코코넛 섬유상 담체, 세라믹 담체, 폴리우레탄 담체를 이용한 생물학적 황화수소 제거능을 비교하였다. 그 결과 섬유상 코코넛담체는 나머지 두 개의 담체 보다 유입부하 변동과 수분 보유능 평가에서 안정적이고 높은 처리효율을 나타내었다. 그러나 수명이 짧은 단점이 있어 이를 보완하기 위해 폴리프로필렌 재질의 섬유상 담체를 제작하였고 이 담체의 황화수소 제거능을 평가한 결과, 3 이하의 낮은 pH와 6 초의 짧은 EBRT에서도 99% 이상의 높은 처리효율을 나타내었다. 따라서, 이러한 물리적 특성 때문에 황화수소의 제거에 폴리프로필렌 섬유상 담체를 이용하여 현장에 적용할 경우 효과적인 처리를 기대할 수 있다.

핵심용어 : 바이오필터, 섬유상 담체, 코코넛, 황화수소

1. 서론

최근 도시화가 가속되어 주거지역이 환경기초시설과 근접하게 조성되면서 하수처리장, 분뇨 및 축산폐수처리장, 쓰레기 매립장, 음식물 처리시설 등에서 발생하는 악취에 대한 민원이 사회적인 문제로 대두되고 있다. 악취는 단순히 불쾌감이나 혐오감을 주는 것뿐만 아니라, 인체에 적·간접적으로 위해를 주는 유해 물질을 포함하고 있다. 특히 하수처리장의 경우에는 황화수소(H_2S), 메틸머캅탄(CH_3SH), 디메틸설파이드($(CH_3)_2S$), 디메틸디설파이드($(CH_3)_2S_2$) 등의 황화합물이 주로 배출되고 있으며, 그 중 황화수소는 독성과 부식성이 강하여 악취의 표준 표시자로서 적용되고 있다. 이러한 악취물질을 처리하기 위해 다양한 물리화학적 방법들이 적용되어 왔는데, 최근에는 생물학적 방법인 바이오필터 기술이 효율적인 최적제어기술(BACT; Best Available Control Technology)로 대두되고 있다¹⁻⁴⁾. 바이오필터는 악취가스 중의 오염물질을 생물학적으로 처리하는 방법 중의 하나로, 미생물을 다공성 담체에 부착시켜 미생물의 대사활동에 의해 오염물질을 물, 이산화탄소, 그리고 무해한 염으로 분해하는 환경 친화적이고, 경제적인 처리공법이다¹⁾.

현재 가장 많이 사용되고 있는 담체 충전형(packed bed type) 바이오필터는 그 원리상 우점 미생물의 활성과 담체의 특성에 따라 처리효율이 결정되므로 미생물

의 탈취능력과 담체의 선정이 가장 중요한 인자라고 할 수 있다^{5,6)}. 이와 관련하여 황화수소를 분해하는 미생물인 황산화균은 독립영양세균으로서 온도, pH 등의 환경변화에 민감하여 반응기 내에 우점화하거나 지속적인 활성을 유지하는데 유리한 특성을 가지고 있다. 다만, 장기간에 걸친 운전에 따른 pH 저하는 활성저해로 이어질 수 있다⁷⁾. 특히 대부분의 미생물은 생육에 필요한 적정 pH 범위를 가지고 있기 때문에 pH 변화는 생물학적 탈취효율에 영향을 미치는 중요한 인자이다⁸⁾. 따라서 황화수소의 생물학적 분해과정에서 발생하는 pH 저하에 대한 대안 마련이 필요하다고 할 수 있다⁷⁾.

또한 미생물 담체는 흡착 효과뿐만 아니라 생물학적으로 대사하기에 충분한 체류시간을 제공하며 미생물이 서식할 공간과 기질을 제공하고 습도를 유지시키며 생물상을 유지할 수 있도록 지지하는 역할을 해야 한다^{5,9)}. 따라서 담체가 노화되거나 균질하지 않을 경우 압밀현상이 발생하여 담체 내부에 균일한 가스의 분포가 실현되기 어렵다. 또한 담체는 우수한 수분 보유능력과 통기성을 동시에 확보하여야 하며 생물학적인 산화과정에서 발생된 대사산물에 의한 pH 저하와 미생물 활성 저해에 완충능력을 가져야한다¹⁰⁾.

황화수소 제거를 위한 담체로는 섬유상 피트, 퇴비, 황성탄, 세라믹, 폴리우레탄 등이 있으며 이들을 이용한 다양한 연구가 시도된 바 있다^{11,12)}. 유 등¹³⁾은 바이오필터를 이용한 황화수소의 제거 시 고농도 황화수소에

의한 저해작용보다는 황화수소가 생물막으로의 물질 전달되는 과정이 율속단계로 작용한다고 보고하였다. 따라서 황화수소의 생물학적 처리에 있어 가장 적합한 담체의 성상과 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다고 판단된다. 이를 위해서는 먼저 미생물의 활성화에 악영향을 미치지 않으면서도 고농도의 미생물 집적이 가능한 물질의 선정이 필요하다. 또한 담체의 형태도 중요한데 대부분 현장에서는 1~5cm 크기의 정형 또는 부정형화된 충전물 형태로 사용하고 있어 비표면적이 높은 물질을 사용하더라도 공극의 극대화에 한계가 있거나 단회로 현상을 배제하지 못하고 있다. 섬유상 담체는 미생물의 부착 및 고정화가 유리하여 고농도의 악취 처리와 급격한 유입농도 변화에도 적합한 것으로 알려져 있으며¹⁰⁾, 입자형태의 기존 충전물에 비해 균일하면서도 다양한 공극을 형성할 수 있어 사영역(dead zone)을 최소화할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 효과적인 생물학적 악취 제어를 위해 대표적으로 사용되고 있는 다공성 세라믹 담체와 폴리우레탄 담체, 그리고 섬유상 코코넛 담체의 황화수소 제거능을 평가했으며 섬유상 담체의 최적화 방안

에 조사하였다.

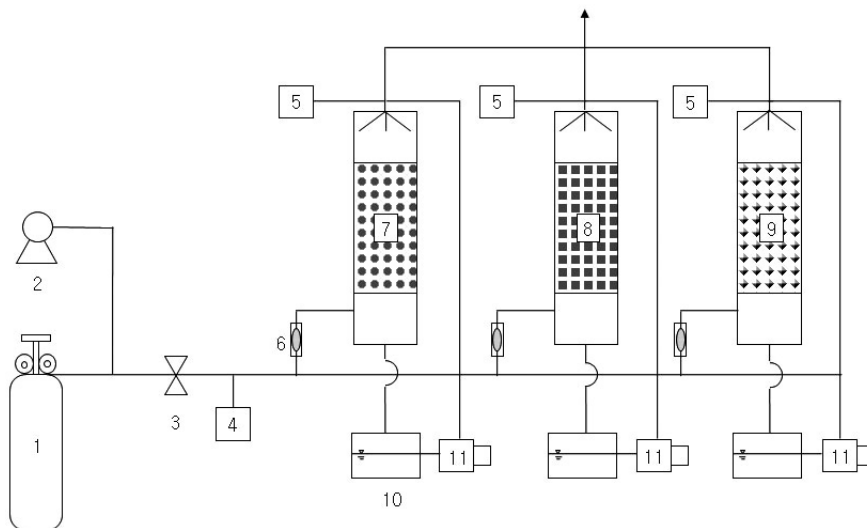
2. 실험방법

2.1 황화수소 제거능 평가

본 연구에서는 선행조사를 통하여 무기성 담체로 다공성 세라믹을 선택하였고, 유기성 담체로는 폴리우레탄, 천연 담체로는 코코넛 섬유를 선정하여 각 담체의 악취처리효율을 비교하였다. 또한 폴리프로필렌 재질의 인공 섬유상 담체를 천연 유기성 섬유상 담체인 코

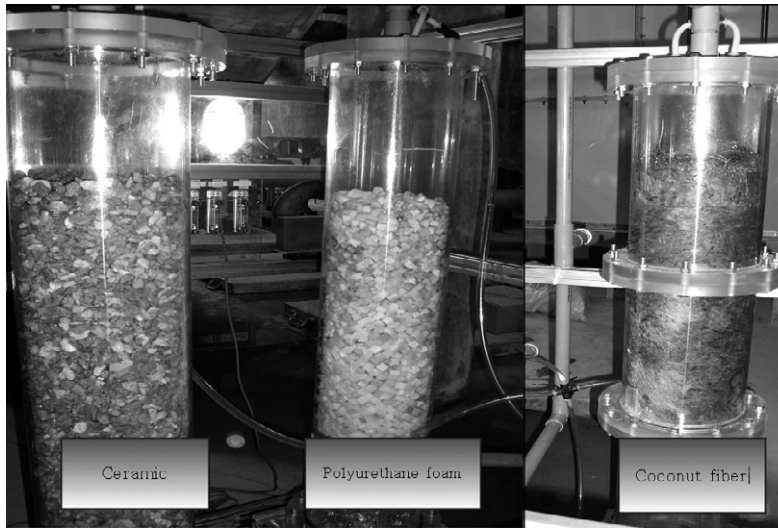
[Table 1] Operating Conditions of Biofilters

Parameter	Operation conditions
Total volume (L)	30
Bed volume (L)	16
Inlet air flowrate (L/min)	60~160
EBRT (sec)	6~16
Inlet loading rate (g/m ³ /hr)	1.5~10
Water supply (L/hr)	20



- 1. H₂S gas 2. Blower 3. Metering valve 4. Inlet gas sampling port 5. Outlet gas sampling port
- 6. Flow controller 7. Ceramic media 8. PU media 9. Coconut fiber media 10. Nutrient tank
- 11. Water pump

[Fig. 1] Schematic diagram of the biofilter systems.



[Fig. 2] Picture of biofilters packed with ceramic, polyurethane foam, and coconut fiber.

코넛 섬유와 비교하기 위한 실험도 진행하였다. 이렇게 선정된 담체들은 30 L 용량의 원통형 반응기를 제작하여 각각 16 L 씩 충전하였으며, 경기도 W 하수처리장 내 탈취배관에 연결하여 운전하였으며, 황화수소의 유입농도를 인위적으로 변화시키기 위하여 5% 황화수소 가스용기를 유입라인에 연결하여 조절하였다. [Fig. 1]에 전체적인 반응장치 모식도를 제시하였으며, 현장에 설치된 반응기 실제모습은 [Fig. 2]와 같다. 본 연구에 사용된 미생물은 황산화균인 *Acidithiobacillus caldus* sp.과 분변도 추출액을 1 : 1로 혼합하여 황산화 배지에 7일간 적응시킨 배양액을 사용하였다. 이때의 미생물 농도는 4,000 mg/L 정도였으며, 이렇게 제조한 배양액 20L를 48시간 동안 순환시켜 각 담체에 접종하였다. 황산화 배지의 조성은 KH_2PO_4 2 g/L, K_2HPO_4 2 g/L, NH_4Cl 0.4 g/L, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.18 g/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g/L, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 2.47 g/L 이며, 반응기에 주입할 경우에는 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 을 제외한 배양액을 사용하였다. 또한 배양액이 순환하는 과정에서 증발되거나 pH가 낮아지면 배양액을 보충하였으며, 약 50일 동안 운전하면서 황화수소의 유입과 유출 농도를 측정하였다. 실험이 종료된 후에는 각 담체를 샘플링하여 Bradford method를 통해 단백질량을 측정하여 최종적인 미생물

량을 분석하였다.

2.2 분석방법

황화수소 농도 분석은 FPD(Flame Photometric Detector)가 장착된 가스 크로마토그래피(GC2010, Dong-il Shimadzu 社)를 이용하여 분석하였다. 시료 주입부 150°C, 검출부 150°C, 오븐 50°C에서 1분간 유지, 65°C까지 5°C/min으로 승온시키고 65°C에서 1분간 분석하였고, column은 1,2,3-TCEP(2m × 2.6mm × 1 μ m)로 packed 칼럼을 사용하여 분석하였다. 황화수소 가스의 검량선 작성은 100ppm 황화수소 표준가스(순도 99.999%)를 사용하여 준비하였다. 단백질은 미생물이 집적된 담체 샘플이 들어있는 병에 2N NaOH 용액을 주입하고 100°C에서 30분간 중탕하여 cell debris를 용출시킨 후, 염색용액을 주입하고, 30분간 방치한 후 흡광도를 측정하였다. 공극률은 담체가 충전된 반응기에 물을 주입하여 일정부피가 되면 소요된 물의 양을 측정하여 계산하였다.

2.3 폴리프로필렌 담체의 성형

본연구에서는 범용 열가소성 고분자인 폴리프로필렌을 펠렛 형태로 M사에서 구입하였으며, 펠렛의 비중

은 0.91, 용융 온도는 약 160~165℃이다. 섬유상 폴리프로필렌 담체는 펠렛을 용융시켜 충분히 혼합하고 방사노즐을 통하여 방사한 후 연신과정을 통해 가는 섬유가 서로 뭉쳐있는 형태로 제조하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 코코넛 섬유상 담체의 황화수소 제거능

황화수소를 제거하는 황산화 미생물은 환경변화에 민감한 독립영양세균으로 일반적으로 중속영양세균에 비해 반응기 내에서 우점화되고, 지속적인 활성을 유지하기 어려운 문제가 있다. 이를 해결하기 위해서는 수분의 공급과 물질전달을 원활하게 하는 것이 중요하며, 이를 위해 섬유상 담체의 적용을 검토하였다. 섬유상 담체의 소재는 천연유기물인 코코넛 섬유를 적용하였

으며, 대조군으로는 일반적으로 사용되고 있는 폴리우레탄과 다공성 세라믹 재질의 담체를 사용하였다. [Fig. 3]에는 코코넛 섬유, 폴리우레탄, 세라믹 재질의 담체를 각각 투입한 3개의 반응조에 황화수소를 동시에 유입시킨 후 유출되는 황화수소를 측정한 결과와 처리효율을 제시하였다.

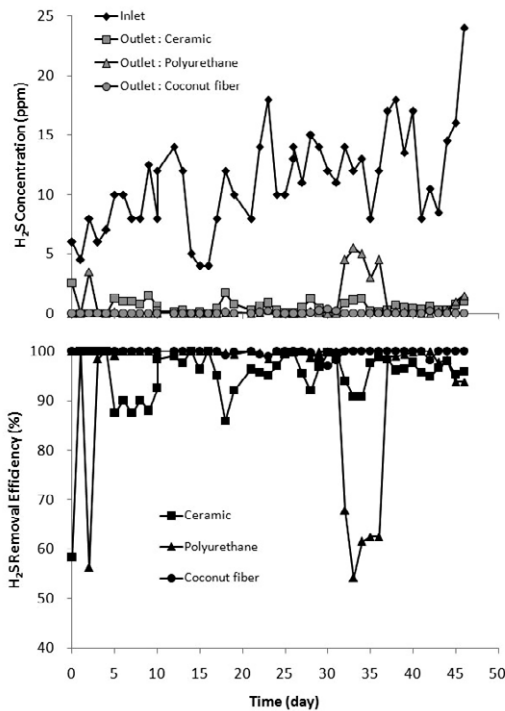
이때 각 반응조의 황화수소 농도는 0.4~24 ppm 범위에서 동일하게 유입시켰으며, 유량도 4.5~10 m³/hr로 변화시키면서 47일 동안 운전하였다.

세라믹 담체의 경우, 다른 담체를 적용한 반응기에 비해 처리효율이 낮았는데, 이는 코코넛 섬유와 폴리우레탄 담체보다 수분 보유능이 떨어지기 때문이라 판단된다. 실제로 세라믹 담체를 적용한 반응기에 배양액을 살수하면 가장 빠른 시간 안에 많은 양의 물이 반응기 하부로 떨어졌으며 식종된 미생물의 일부도 반응기 외부로 유실되는 현상이 발생하였다.

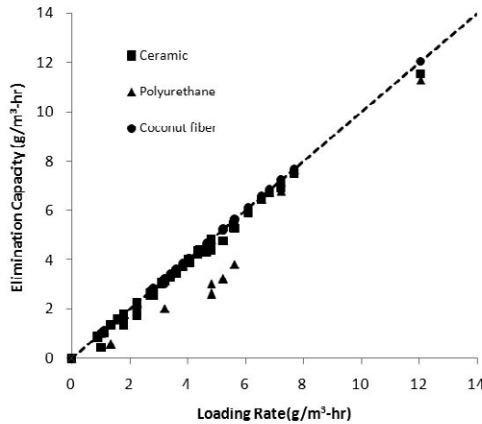
또한 부정형인 세라믹 담체의 특성상 담체 사이의 공극 크기가 균일하지 못해 유입가스가 특정부위로만 유입되는 단회로 현상이 발생함과 동시에 공급수가 상부에서 균일하게 살수되어도 하부에서는 물길이가 형성되어 일부분으로만 수분이 공급되기 때문에 담체층에 사영역이 발생한 것으로 사료된다.

한편, 각 담체의 수분 완충능력을 평가하기 위하여 반응시간 31일 시점에서 수분공급을 24시간 동안 일시적으로 정지시킨 후 황화수소 제거능을 평가하였다. 그 결과 폴리우레탄 담체의 경우, 황화수소 제거율이 약 50% 정도로 급격하게 감소하였으며 정상상태로 회복하는데 5일 정도 소요되었다. 그러나 섬유상의 코코넛 담체는 수분공급 정지의 영향이 거의 없는 것으로 나타나 수분 완충능력이 가장 우수한 것으로 판단된다. 결과적으로 섬유상의 코코넛 담체는 유입부하의 변동과 수분공급 정지에도 불구하고 거의 일정하게 99% 이상의 우수한 처리효율을 유지할 수 있음을 알 수 있다.

[Fig. 4]에는 각 담체별 황화수소 분해능 평가 결과를 나타내었다. 코코넛 섬유 담체를 투입한, 미생물 반응기의 분해능(elimination capacity; EC) 값은 100% conversion line과 거의 유사하게 나타났으며 이때의 최대 분해능은 12.05 g/m³-hr 이었으며, 이러한 경향



[Fig. 3] Removal of hydrogen sulfide in biofilters packed with ceramic, polyurethane foam, and coconut fiber, respectively.



[Fig. 4] Elimination capacity of hydrogen sulfide in biofilters packed with ceramic, polyurethane foam, and coconut fiber, respectively.

[Table 2] Protein Concentration in Different Biofilter Packing Materials

Packing material	Concentration of protein (mg-protein/g-Sample)
Ceramic	15.2
Polyurethane foam	18.4
Coconut fiber	68.5

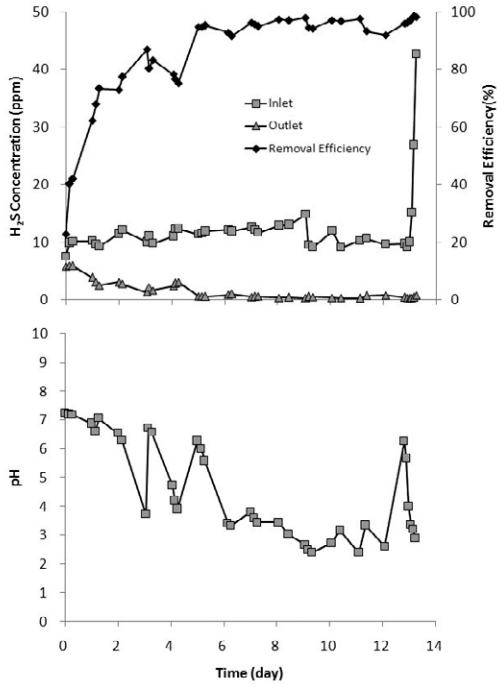
은 유입되는 황화수소의 농도 변화에도 불구하고 코코넛 섬유 미생물 반응기가 안정적으로 오염물질을 제거할 수 있음을 의미한다. 이는 물리적으로 코코넛 섬유가 갖는 넓은 비표면적과 수분 보유능 및 생물학적으로 미생물의 서식 및 활동이 용이하여 높은 미생물 집적으로 인한 결과라 판단된다. 폴리우레탄의 경우에는 낮은 유입부하에서 오히려 더 낮은 분해능을 나타내었는데 이는 미생물의 활성보다는 물질전달 과정에서 저해가 발생했기 때문으로 판단된다.

이러한 결과를 통해 섬유상의 코코넛 담체가 세라믹과 폴리우레탄 담체보다 담체로써의 성능이 월등함을 알 수 있다. 또한 실험을 완료한 후 각 담체를 채취하여 담체에 부착된 미생물량을 Bradford 방법을 이용한 단백질 측정법을 통해 평가하였으며 그 결과를 [Table

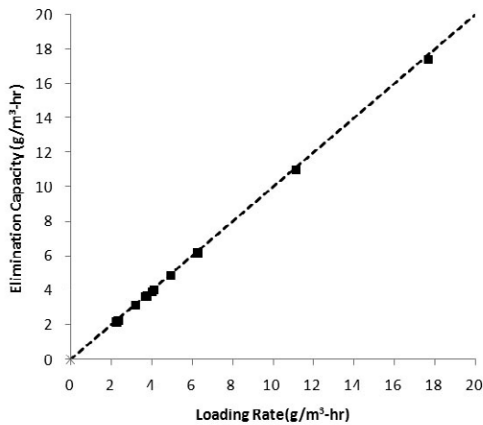
2]에 제시하였다. 단백질 측정 결과 각 담체에 부착된 단백질량은 섬유상 코코넛 > 폴리우레탄 > 세라믹의 순서로 나타났는데, 이것은 섬유상 코코넛 담체에 부착된 미생물이 3~4배 정도 많다는 의미이며 따라서 미생물의 집적이 용이하고 활성 유지가 우수한 담체라고 판단된다.

3.2 폴리프로필렌 섬유상 담체의 황화수소 제거능 평가

섬유상 코코넛 담체는 우수한 처리효율에도 불구하고 천연 유기성 물질이기 때문에 수명이 짧은 치명적인 단점을 가지고 있다. 따라서 코코넛 담체의 물리적인 특성을 개선하여 수명을 증진시키기 위한 전처리로 고분자 화합물을 코팅하여 앞서 제시한 방법과 동일하게 평가를 진행하였다. 전처리 코팅으로 인해 인장강도와 압축강도는 증가하였으나, 황화수소 처리효율은 급감하여 전처리 코팅은 적절한 방법이 아닌 것으로 판단되었다(data not shown). 따라서 섬유상 담체의 장점은 유지하면서 수명을 연장하기 위한 방안으로 폴리프로필렌 섬유상 담체를 제조하였다(data not shown, In printing). 이 섬유상 담체는 공극률이 60% 이상이며, 담체 사이에 형성되는 공극의 크기는 200~3,000 μm 범위로 매우 조밀하게 조성되어 있다. 또한 수분을 함유한 상태에서의 겉보기 비중은 0.3 정도로 매우 낮아 시공 및 운반이 용이한 장점이 있으며, 코코넛 담체에 비해 강도가 우수하여 담체 충전 과정에서 가루의 발생이 적은 특징을 가진 것으로 나타났다. [Fig. 5]에는 섬유상의 폴리프로필렌 담체의 pH 변동에 따른 황화수소 분해효율 평가 결과를 나타내었다. 실제 현장에서 황화수소를 생물학적으로 처리할 경우 황산이온이 증가하여 pH가 급격히 저하되어 처리효율이 급감하는 경우가 많은데^{15,16)}, 본 연구에서는 순환수에 포함된 완충용액의 양을 조절하여 pH 변동에 따른 황화수소 분해능을 평가하였다. 그 결과 반응초기 안정화에 소요되는 기간은 코코넛 담체에 비해 6일 정도 더 소요되는 결과를 나타내었다. 이는 미생물의 친화력이 천연담체에 비해 저하되는 인공담체의 특성을 반영한 결과라고 하겠다. pH에 대한 완충능 평가를 위해 생물학적 반응



[Fig. 5] Relationship between removal efficiency of hydrogen sulfide and pH in the biofilter packed with fibrinous polypropylene media.



[Fig. 6] Elimination capacity of hydrogen sulfide in biofilters packed with fibrinous polypropylene media.

이 안정화되었다고 판단된 6일 이후부터 12일까지 완충용액 투입을 중단하였는데, pH가 2.0까지 저하되어어도 처리효율에 미치는 영향은 거의 없었다. 또한 황화수소 충격부하의 영향을 파악하기 위해 황화수소의 유입농도를 10ppm에서 40ppm으로 급격하게 상승시켰으나, 마찬가지로 99% 이상의 높은 처리효율을 나타냈다.

[Fig. 6]에는 폴리프로필렌 섬유상 담체의 황화수소 분해능 평가 결과를 나타내었는데, 코코넛 섬유상 담체의 분해능 평가 결과와 동일하게 100% conversion line에 수렴함을 알 수 있다. 따라서 폴리프로필렌 섬유상 담체는 천연섬유인 코코넛 섬유상 담체의 황화수소 분해능은 유지하면서도 물리적 강도는 우수하여 수명이 짧은 치명적인 단점을 보완할 수 있는 고효율의 고분자 인공담체로 평가되었다.

4. 결론

1. 천연 물질인 코코넛 섬유상 담체를 대상으로 생물학적 황화수소 제거능을 평가한 결과, 세라믹과 폴리우레탄 담체보다 황화수소의 유입부하 변동과 수분 보유능 평가에서 안정적이고 높은 처리효율을 나타내었다. 이는 균일한 크기의 공극과 뛰어난 수분의 보유력 때문이며, 미생물의 부착 및 활성화에도 효과적인 것으로 나타났으나 수명이 짧은 단점을 보완할 필요가 있다.
2. 이를 보완하기 위해 폴리프로필렌 재질의 섬유상 담체를 제조하였으며, 이 담체의 황화수소 제거능을 평가한 결과, 코코넛 섬유상 담체의 황화수소 분해능과 유사하였으며, 3 이하의 낮은 pH에서도 99% 이상의 높은 처리효율을 나타내었다. 또한 물리적 강도는 코코넛 섬유상 담체보다 우수하여 수명이 짧은 치명적인 단점을 보완할 수 있는 고효율의 고분자 인공담체로 판단된다.

사사

본 연구는 중소기업청 산학연 공동기술개발사업의

연구비 지원으로 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Deviny, J. S., Deshusses, M. A., and Webster, T. S., "Biofiltration For Air Pollution Control", Lewis Publishers(1999).
2. Lesson, G., and Winer, A. M., "Biofiltration: an innovative air pollution control technology for VOC emission", J. Air Waste Management Assoc., 41, pp. 1045~1054(1991).
3. Zhou, Q., Huang, Y. L., Tseng, H., Shim, H., and Yang, S. T., "A tricking fibrous-bed bioreactor for biofiltration of benzene in air", J. Technol. Biotech., 73, pp. 359~368(1998).
4. Elias, A., Barona, A., Arreguy, A., Rios, J., Aranguiza, I., and Penas, J., "Evaluation of a packing material for the biodegradation of H₂S and product analysis", Process Biochem., 37, pp. 813~820(2002).
5. 임정수, 이은영, 조옥상, "Biomedia를 충전한 Biofilter에서 H₂S와 NH₃ 혼합악취의 제거", 한국청정기술학회지, 12(3), pp. 165~170(2006).
6. 이은영, 조옥상, "폐자동차에서 회수된 폐폴리우레탄과 분변토를 이용한 바이오필터용 생물담체의 제조", 한국냄새환경학회지, 4(1), pp. 35~41(2005).
7. 이은영, 조경숙, 류희욱, "황농도에 따른 Acidiothiobacillus thiooxidans 의 성장 특성", 한국미생물생명공학학회지, 34(4), pp. 338~341(2006).
8. Yang Y., and Allen E. R., "Biofiltration control of hydrogen sulfide. : 1. Design and operational parameters", J. Air & Waste Manage Assoc., 44, pp. 863~868(1994).
9. 이은영, "Polyurethane 담체 및 ceramic담체를 이용한 Biofilter에서의 CH₃SH 제거", 한국냄새환경학회지, 4, pp. 189~195(2005).
10. Ottengraf, S. P. P. and Diks, R., "Review paper: process technology of biotechniques. In Biotechniques for Air Pollution Abatement and Odor Control Policies", Ieds Drag, A. J. & Ham, J. van, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 17~32(1992).
11. Chung, Y. C., Huang, C., and Tseng, C. P., "Removal of hydrogen sulfide by immobilized Thiobacillus sp. strain CH11 in a biofilter", J. Chem. Tech. Biotechnol., 69, pp. 58~62(1997).
12. Lec, S. K. and Shoda, M., "Biological deodorization using activated carbon fabric as a carrier of microorganisms", J. Ferment. Bioeng., 68, pp. 432~437(1991).
13. 유선경, 이은영, "지렁이 분변토를 이용한 생물담체가 충전된 바이오필터에 의한 황화수소제거", 대한환경공학학회지, 29(7), pp. 820~825(2007).
14. Park, N. B., Lee, H. M., and Yang, B. S., "The optimum mixture ratio of food waste and sewage sludge mixture treatment using anaerobic batch reactor", J. Korea Society of Waste Management., 17(1), pp. 1~8(2000).
15. Allen, E. R. and Phatak, S., Control of organo-sulfur compound emissions using biofiltration-methyl mercaptan. In 86th Annual Meeting & Exhibition Air & Waste Manag. Assoc., Denver Colorado, 93-WA52B.03(1993).
16. Shoda, M., Methods for the biological treatment of exhaust gases. In biological Degradation of Wastes, ed. Martin, A. M. Elsevier, London, pp. 31~46(1991). 