

Bioscrubber와 Biofilter 병합 시스템에 의한 H₂S 제거특성

빈 정 인* · 이 병 현* · 감 상 규** · 이 민 규*
부경대학교 응용화학공학부, *부경대학교 환경시스템공학부, **제주대학교 토목환경공학전공
(2007년 1월 10일 접수; 2007년 6월 10일 채택)

H₂S Removal Characteristics by Combined System of Bioscrubber and Biofilter

Jung-In Bin*, Byung-Hun Lee*, Sang-Kyu Kam** and Min-Gyu Lee*
Division of Applied Chemical Engineering, and *Division of Environmental System Engineering,
Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
**Division of Civil and Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea
(Manuscript received 10 January, 2007; accepted 10 June, 2007)

This study compared the performance of a bioscrubber, a biofilter, and a combined system of bioscrubber and biofilter employed being operated at the laboratory-scale, for the removal of hydrogen sulfide. The bioscrubber maintained 100% removal of hydrogen sulfide up to inlet load of 56 g-S/m³ · hr, while the removal efficiency was decreased with the increase of inlet load. The biofilter showed 100% removal efficiency up to inlet load of 126 g-S/m³ · h and the maximum elimination capacity of 126 g S/m³ · h for the inlet load of 224 g-S/m³ · h. On the other hand, the combined system of bioscrubber and biofilter showed 100% removal for an inlet hydrogen sulfide load of up to 85 g-S/m³ · h and the maximum elimination capacity of 153 g-S/m³ · h for inlet loads of 224 g-S/m³ · h.

Key Words : Biofilter, Bioscrubber, Combined system, Hydrogen sulfide, Offensive odor

1. 서 론

하수처리장과 같은 환경기초시설 및 산업시설 등에서 발생하는 악취는 주민들의 민원 발생의 원인이 되고 있으며, 악취로 인한 민원 발생은 사회가 발전하고 생활수준이 향상됨에 따라 증가하는 추세에 있다. 악취물질을 제거하는 방법 중에서 연소, 약액세정 및 활성탄 흡착과 같은 물리·화학적 처리법은약품 사용 등으로 인해 운전비용이 많이 소요되고 부산물이 생기는 단점이 있는 반면에, 생물학적 처리법은 운전비용이 매우 적게 들고 부산물이 생기지 않는 친환경적인 기술로써 부각되고 있다¹⁻⁵⁾. 그에 따라 악취문제를 생물학적으로 처리하는 방안에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다.

일반적으로 생물학적 처리 반응기는 오염된 공기를 처리하기 위해서 미생물의 대사반응을 이용하는 것으로써 bioscrubber⁶⁻⁹⁾, biotrickling filter¹⁰⁻¹²⁾ 그리고 biofilter¹³⁻¹⁵⁾로 구분되며, 기본적인 제거 메커니즘은 비슷하다. Bioscrubber와 biotrickling filter의 경우 기상 오염원이 현탁 또는 고정된 미생물에 의해 분해되기 이전에 자유수 상태의 액상에 흡수되는 것은 동일하다. 그러나 biotrickling filter는 흡수와 생분해가 같은 반응기에서 이루어지지만 bioscrubber에서는 흡수와 생분해 과정이 따로 분리되어 있다. 한편, biofilter는 미생물이 고정된 담체층을 기체가 통과하면서 공기중의 오염물질이 담체 표면에 형성된 생물막으로 흡착되어 미생물의 생분해 반응에 의하여 제거되는 방식이다. 특히 biofilter는 다른 두 가지 방식에 비하여 낮은 운전비용과 넓은 기·액 접촉면적을 가짐으로써 처리효율이 높아 많은 연구자들에 의하여 연구되고 있다^{16,17)}. 그러나 biofilter는 담체 충전층 내에서 미생물 성장에 필요

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

한 수분 공급을 위하여 증습장치가 필요한데, 이러한 증습장치는 그 형태가 bioscrubber와 매우 유사하다. 그러므로 이러한 기존의 증습장치를 보완한다면 biofilter에서의 증습장치의 기능을 살리면서 한편으로는 biofilter에 bioscrubber의 기능을 추가적으로 부가할 수 있을 것으로 사료되었다.

따라서 본 연구에서는 기존 biofilter에서의 증습장치를 보완한 형태의 bioscrubber를 제작하여 먼저 bioscrubber에서의 세정에 의한 황화수소(H_2S)의 제거능을 살펴본 다음에 biofilter와 bioscrubber를 병합 처리하는 경우에 있어서의 H_2S 제거특성을 살펴 보았다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서 사용된 실험장치는 혼합기, bioscrubber와 biofilter로 구성되어 있으며, Fig. 1과 같다. 혼합기는 air pump로부터 유입된 실내공기와 bomb의 고농도 가스를 일정한 유입농도로 혼합하는 장치로써, 내경 9 cm의 아크릴관에 baffle을 설치하여 완전 혼합이 이루어지도록 하였다. Bioscrubber는 세정수를 상부로부터 살수하여 악취 물질을 제거하는 장치이며, 내경 4.4 cm의 아크릴관에 플라스틱 담체를 충전 부피 0.6 L가 되게 충전하였다. 세정수는 순환펌프를 이용하여 150 mL/min의 유량으로 연속 살수하고, 세정수 저장조로부터 0.5 L/day의 유량으로 새로운 세정수를 보충하였다. Biofilter는 충전담체에 부착 성장하는 미생물의 산화작용으로 악취를 제거하는 장치로써, 내경 6 cm의 아크릴

관에 직경 5~7 mm인 활성탄을 담체로 충전하여 충전 부피가 1.1 L로 되게 하였다. Biofilter 충전담체에는 탈취균주로써 농축된 활성슬러지를 접종하였으며, 세정 및 영양물질 공급을 위한 장치와 하부 드레인 장치를 설치하였다. 또한 bioscrubber와 biofilter에는 유입과 유출 및 각 충전 깊이별 시료 채취구를 설치하였으며, 공기흐름방식에 있어서 bioscrubber는 상향류식으로 biofilter는 하향류식으로 운전하였다.

실험 대상기체는 대표적인 악취물질인 H_2S 를 선정하였다. 공급된 영양물질은 yeast extract 2 g/L, KH_2PO_4 2 g/L, K_2HPO_4 2 g/L, NH_4Cl 0.5 g/L, KNO_3 0.5 g/L, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.5 g/L, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 0.05 g/L, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.03 g/L, EDTA 0.02 g/L로 구성하였다.

H_2S 의 농도분석은 FPD가 장착된 gas chromatography(HP6890, USA)를 이용하여 분석하였으며, 검지관(GASTEC, Japan)을 이용하여 비교 분석하였다. 드레인수의 pH 및 이온에 대한 분석은 각각 pH-meter(ORION, 420A)와 ion chromatography(DX-120, U.S.A.)를 이용하였다.

Bioscrubber에서 세정에 의한 직접적인 악취제거 특성을 살펴보기 위해 시중에 시판되고 있는 탈취제 용액을 세정수로 사용하였으며, 이의 특성은 Table 1과 같다.

세정수는 원액을 4배 희석한 용액 500 mL를 bioscrubber의 하부 저장부에 주입하고 순환펌프를 이용하여 150 mL/min의 유량으로 연속 순환시켰다.

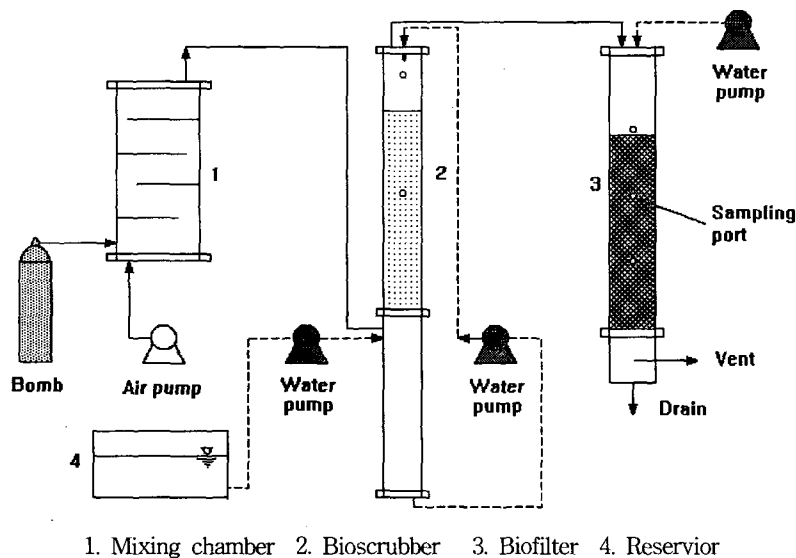


Fig. 1. Schematic diagram of the combined system of bioscrubber and biofilter.

Table 1. Characteristics of washing water used in this study

Washing water	Components
Deodorant solution	<i>Enterococcus faecalis</i> , Yeasts, <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus thuringiensis</i> , <i>Bifidobacterium longum</i> , <i>Bifidobacterium bifidum</i> , <i>Lactobacillus acidophilus</i> , <i>Lactobacillus salivains</i> , etc

세정수는 직경 5 mm의 glass bead로 충전된 충전층(충전부피 500 mL) 상부로부터 살수하고 H₂S는 충전층 하부로부터 유입시킴으로써 효과적인 세정작용이 이루어지도록 하였다.

Bioscrubber와 biofilter 병합 시스템의 구성은 고농도의 H₂S와 실내공기를 혼합기에서 혼합하여 일정농도로 희석하여 bioscrubber 하부로 유입되도록 하였으며, bioscrubber를 통과한 후 다시 biofilter의 상부로 유입되도록 하였다. Bioscrubber는 자체 세정수 저장조로부터 순환펌프를 이용하여 150 mL/min의 유량으로 연속적으로 살수하였으며, 외부 세정수 저장조로부터 하루 0.5 L를 자체 저장부로 공급하여 세정에 의해 유실되는 세정수를 보충해 주었다. Biofilter의 경우 bioscrubber에 의해 증습이 되도록 하였으며, 간헐적으로 영양물질 공급 및 담체 세척을 위한 살수를 하였다. 악취가스의 유량은 8.5 L/min으로 조절하였으며, bioscrubber는 직경과 높이가 7 mm인 원통형 플라스틱 담체를 0.6 L의 부피로 충전하여 EBCT가 4.2 s인 조건에서 운전하였다. Biofilter의 경우 충전부피가 1.1 L가 되도록 활성탄을 충전하여 EBCT를 7.8 s로 운전하였다. H₂S의 유입농도를 100, 200, 300, 500 ppmv로 점차적으로 증가시키면서 약 30일 동안의 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Bioscrubber의 세정에 의한 H₂S 제거특성

H₂S의 유입농도에 따른 세정효과를 살펴보기 위하여 고농도의 H₂S를 혼합기로부터 실내공기와 희석하여 유입농도를 90~130 ppmv로 조절하여 bioscrubber에 유입시켰으며, H₂S의 유량은 1 L/min, EBCT는 30 s로 운전한 경우에 H₂S의 제거효율을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보듯이 H₂S의 유입농도가 증가함에 따라 제거효율은 감소하였으며, 평균제거용량은 36 g-S/m³·hr로 산정되었다. 보충된 세정수는 약 50% 정도가 유실되었으며, 세정수는 1일 1회 회수하여 pH와 SO₄²⁻를 측정하였다. pH는 2.5 정도까지 감소하였으며, SO₄²⁻를 분석한 결과에 의하면 약 24% 정도가 SO₄²⁻로 산화되었다.

H₂S의 유입농도를 50 ppmv로 조절하여 bioscrubber에 유입하면서 가스의 체류시간 변화에 따른 세정효과의 변화를 살펴보기 위하여 EBCT를 각

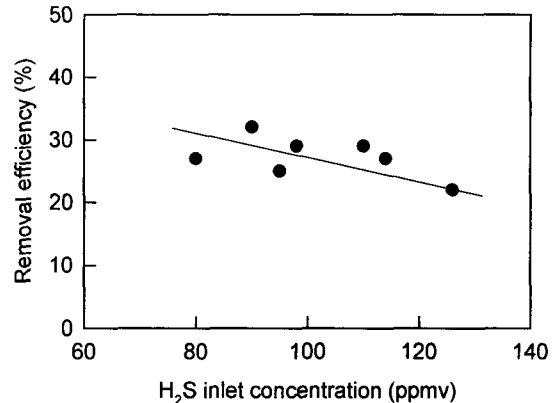


Fig. 2. Effect of removal efficiency on H₂S inlet concentration.

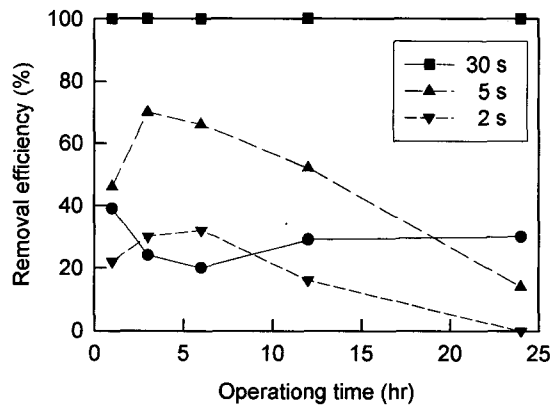


Fig. 3. Removal efficiency profiles with the different EBCT.

각 30 s, 5 s 및 2 s를 달리하면서 24 hr 동안 운전한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. EBCT가 30 s인 경우에 유출농도는 24 hr 동안 전혀 검출되지 않음으로써 제거효율 100%를 유지하였다. EBCT가 5 s인 경우에는 제거효율이 71%까지 증가한 후 점차 감소하여 평균 50% 정도의 제거효율은 나타내었다. EBCT가 2 s인 경우에는 6 hr 경과 후에 32%의 최대제거효율이 얻어졌으며, 이 후 제거효율이 감소하여 평균 제거효율은 20%로 나타났다. EBCT의 감소는 bioscrubber 내 선속도의 증가를 유발함으로써 세정수의 유실액은 짧은 EBCT에서 급격히 증가하

였다. 이러한 세정수 유실의 증가는 결국 제거효율 감소를 유발하였다.

3.2. Bioscrubber와 biofilter 병합 시스템에 의한 H₂S 제거특성

앞서 실험한 bioscrubber의 세정효과는 짧은 체류시간에 비교적 낮은 제거효율을 보였다. 이는 담체에 부착성 미생물과의 반응이 거의 없으며 단순히 순환되는 세정수와 악취가스와의 직접적인 접촉에 의해서만 제거되기 때문이다. 따라서 이러한 단점을 보완하고자 bioscrubber에 미생물 부착이 어느 정도 가능한 담체를 충전하여 세정수에 의한 세정효과와 더불어 부착 미생물에 의한 악취 제거가 가능한 장치를 제작하여 bioscrubber 장치와 biofilter 장치를 연결한 병합 시스템에 의한 악취 제거 특성에 대해 살펴보았다.

Fig. 4에서와 같이 H₂S 유입농도 100 ppmv의 초기 운전조건에서 bioscrubber의 경우 약 7일 간의 순응기간을 가졌으며, 이후 제거효율이 증가하였고 11일 경과 후부터 안정된 제거효율을 보였다. 반면 biofilter의 경우 H₂S에 대해 이미 순응된 상태로 운전되었으므로 운전초기부터 안정된 제거효율을 보였다. 유입농도를 200, 300, 500 ppmv로 증가시키면서 bioscrubber의 제거효율이 점차 감소하였으며, biofilter의 경우 200 ppmv까지 완전 제거되다가 300 ppmv 이상에서 유출농도가 검출되기 시작하였다. 유입농도를 증가시키기에 따라 bioscrubber의 경우 유입농도에 대해 약 85~170 ppmv 정도의 농도 감소를 보였으며, biofilter의 경우 약 150~190 ppmv 정도의 농도 감소를 보였다. Bioscrubber와 biofilter 모두 유입농도가 증가함에 따라 농도 감소가 증가하였으며, biofilter의 경우 좀 더 높은 농도 감소를 보였다.

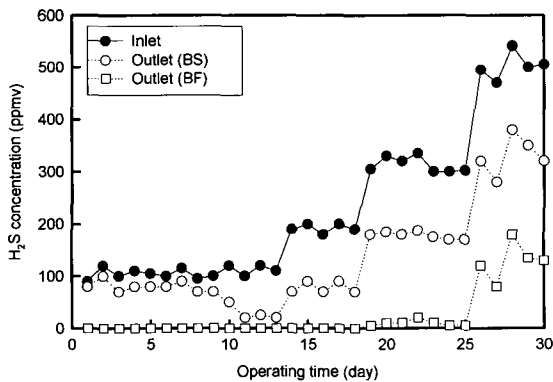


Fig. 4. H₂S concentration profiles with the inlet concentration change.

유입 부하량에 대한 제거효율과 이에 따른 제거용량은 시스템을 설계하는데 중요한 인자가 된다. 따라서 bioscrubber와 biofilter 단일 반응조 및 bioscrubber와 biofilter의 병합 시스템에서의 유입농도 변화에 의한 유입 부하량 변화에 따른 제거효율과 제거용량의 변화를 각각 Fig. 5와 6에 나타내었다. Fig. 5에서 보듯이 bioscrubber의 경우 유입 부하량 56 g-S/m³·hr까지 제거효율이 100%를 유지하였으며, 유입 부하량이 증가함에 따라 제거효율이 감소하여 유입 부하량이 137 및 617 g-S/m³·hr인 조건에서는 제거효율이 각각 76% 및 33%로 나타났다. Biofilter의 경우는 유입 부하량 126 g-S/m³·hr까지 제거효율이 100%를 유지하였으나, 유입 부하량이 112 및 224 g-S/m³·hr인 경우에는 각각 제거효율이 91%와 51%로 나타났다. 한편, bioscrubber와 biofilter의 병합시스템의 경우에는 유입 부하량 85 g-S/m³·hr까지 H₂S는 100% 제거되었으나, 유입 부하량이 135 및 217 g-S/m³·hr인 경우에는 제거효율이 각각 95%와 71%로 나타났다. Fig. 6에서 bioscrubber의 경우는 최대 유입 부하량 조건에서의 제거용량은 203 g-S/m³·hr, biofilter의 경우는 최대 제거용량이 126 g-S/m³·hr로 산정되었다. 또한, bioscrubber와 biofilter의 병합시스템의 경우에는 최대 유입 부하량 224 g-S/m³·hr의 조건에서 최대 제거용량이 153 g-S/m³·hr로 산정되었다. Bioscrubber의 경우 유입농도가 높고 EBCT가 짧기 때문에 유입 부하량이 매우 높게 나타났으며, 상대적으로 높은 유입 부하량을 가짐으로써 제거용량 또한 높게 나타난 것으로 사료된다. 반대로 biofilter의 경우 유입 부하량이 낮고 영양물질의 공급이 다소 원활하지 못함으로써 제거용량이 낮게 나타나는 것으로 보여진다. 따라서 bioscrubber와 biofilter의 병합시스템의 경우에는 bioscrubber에 의해 유입 부하량의

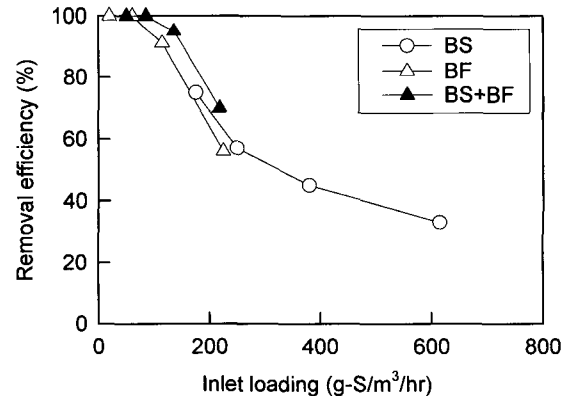


Fig. 5. Effect of removal efficiency on H₂S inlet loading.

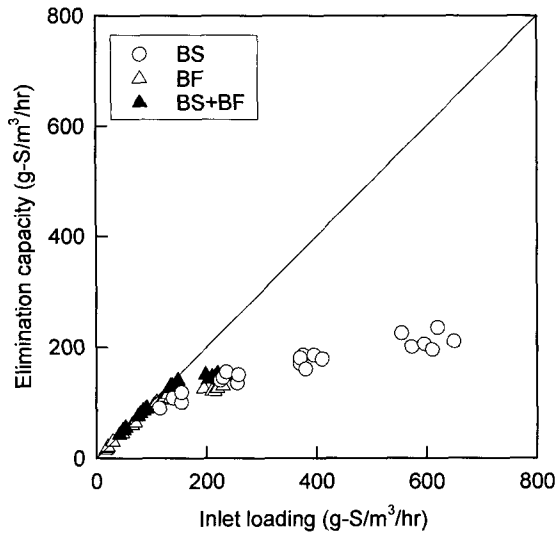
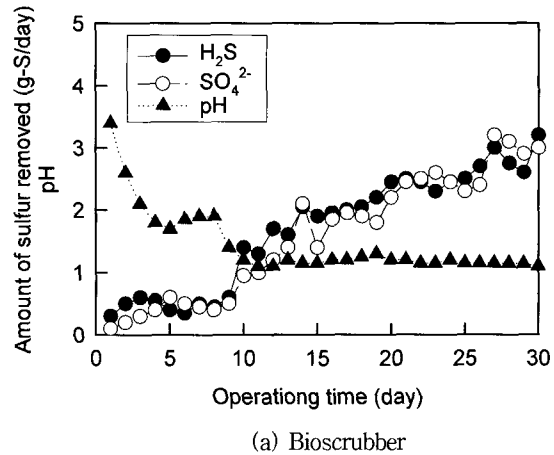


Fig. 6. Relation between H₂S inlet loading and elimination capacity.

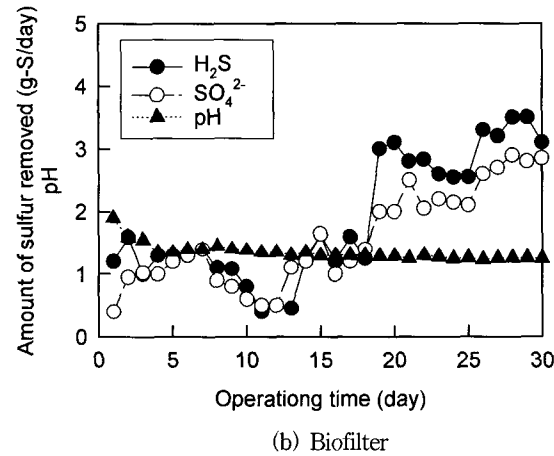
상당한 감소 효과를 얻을 수 있으며, 제거용량 또한 단일 시스템보다 높게 나타남으로써 그에 따라 biofilter의 효과적이고 안정된 운전이 가능할 것으로 판단된다.

Bioscrubber의 세정수와 biofilter의 영양물질 공급수의 드레인수를 1일 1회 회수하여 pH와 황산이온을 측정된 결과는 Fig. 7에 나타내었다. Bioscrubber의 경우 Fig. 7(a)에서 보면 초기 pH가 3.4에서 점차 감소하였으며, 미생물이 순용되는 동안에는 pH 1.8 정도로 유지되다가 순용된 10 일 이후부터는 pH 1.2 정도로 낮게 유지되었다. Biofilter의 경우는 Fig. 7(b)에서 초기 pH 1.8에서 점차 감소하였으며, 유입 부하량이 높아지면서 pH 1.2~1.3 정도로 유지되었다. pH가 1~2 정도로 매우 낮게 유지되었으나 미생물에 대한 직접적인 저해작용은 나타나지 않음을 알 수 있었다. 이는 황산화 미생물이 낮은 pH에서도 성장이 가능하기 때문인 것으로 사료된다¹⁸⁾. 다음으로 드레인수 내의 황산이온의 농도를 측정된 후 이를 하루 동안 기상으로부터 제거되는 H₂S의 양과 비교해보면, bioscrubber의 경우 기상으로부터 제거되는 H₂S의 양과 드레인수 내에 생성되는 황산이온의 양이 거의 일치하는 것으로 나타났다(Fig. 7(a)). 반면 biofilter의 경우 초기 저부하 조건에서는 거의 일치하는 것으로 나타났으나 고부하 조건에서는 황산이온의 생성율이 약 85% 정도로 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 7(b)).

본 실험에서 사용한 탈취제가 bioscrubber의 세정수로써 효과를 검증하기 위하여 단순히 수돗물을 세정수로 이용하는 경우, 영양물질을 혼합한 수돗물



(a) Bioscrubber



(b) Biofilter

Fig. 7. Variation of pH and sulfur under different H₂S inlet concentration for (a) bioscrubber and (b) biofilter.

그리고 영양물질 및 글루코오스를 혼합한 수돗물을 세정수로 사용한 경우의 실험을 수행하였다. H₂S의 유입농도를 320 ppmv로 하여 운전한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 보듯이 탈취제를 세정수로 사용한 경우에는 bioscrubber와 biofilter 유출농도는 각각 169, 16 ppmv이었으나, 수돗물을 세정수로 사용한 경우는 각각 251, 171 ppmv로 나타났다. 수돗물을 세정수로 사용한 경우보다 탈취제를 세정수로 사용한 경우에 제거효율이 약 2 배 정도 높게 나타났다. 또한 수돗물에 영양물질을 혼합한 경우보다 탈취제의 경우가 제거효율이 약 1.3 배 정도 높게 나타났으며, 수돗물에 영양물질과 글루코오스를 혼합한 경우에는 탈취제의 경우보다 약간 낮은 제거효율을 보였다. 따라서 탈취제를 세정수로 사용한 경우가 H₂S 제거능이 우수한 것을 알 수 있었으며, 수돗물을 세정수로 하는 경우 biofilter의 제거효율

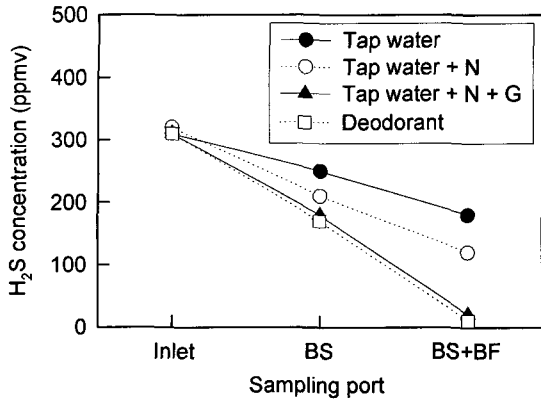


Fig. 8. Change in H₂S concentration with the different scrubbing solution.

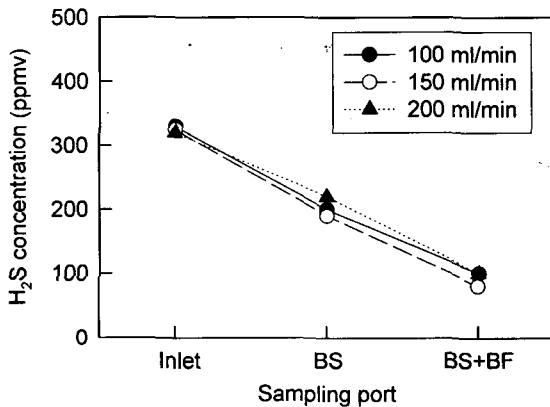


Fig. 9. Change in H₂S concentration with the spray flow-rate of scrubbing solution.

이 떨어지는 것은 bioscrubber의 세정수가 유실되어 biofilter로 유입되면서 수분 공급 및 영양물질 공급 역할을 하기 때문으로 생각된다.

세정수의 순환유량에 따른 H₂S 제거특성을 알아보기 위해 순환유량을 100, 150, 200 mL/min으로 증가시키면서 실험을 수행하여 순환유량 변화에 따른 초기 유입농도, bioscrubber의 유출농도 및 biofilter의 유출농도를 Fig. 9에 나타내었다. 전체적으로 H₂S 제거에 순환유량 변화는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며 10% 이내의 제거효율 변화를 보였다. 순환유량이 150 mL/min인 경우에 가장 제거효율이 좋은 것으로 나타났으며, 200 mL/min의 순환유량 조건에서 유출농도가 가장 높게 나타났다. 이는 순환유량이 일정 범위 이상으로 많은 경우 담체 충전층의 공극이 세정수로 채워짐으로써 유입가스의 실체류시간이 줄어들어 제거효율이 감소하는 것으로 사료되었다.

4. 결 론

활성탄을 충전한 biofilter와 bioscrubber를 병합 처리하는 경우 악취 제거특성에 대해 살펴본 결과는 다음과 같았다.

Bioscrubber의 경우 H₂S 유입 부하량 56 g-S/m³·hr까지는 제거효율 100%를 유지하였으며, 유입 부하량이 증가함에 따라 제거효율이 감소하였다. Biofilter의 경우는 H₂S 유입 부하량 126 g-S/m³·hr까지 제거효율이 100%를 유지하였으나 유입 부하량이 112 및 224 g-S/m³·hr인 경우에는 각각 제거효율이 91%와 51%로 감소하였으며, 최대 제거용량은 126 g-S/m³·hr로 산정되었다. 또한 bioscrubber와 biofilter의 병합시스템의 경우에는 H₂S 유입 부하량 85 g-S/m³·hr까지 H₂S는 100% 제거되었으나 유입 부하량이 135 및 217 g-S/m³·hr인 경우에는 제거효율이 각각 95%와 71%로 감소하였으며, 최대 유입 부하량 224 g-S/m³·hr의 조건에서 제거용량은 153 g-S/m³·hr로 산정되었다.

Bioscrubber와 biofilter의 병합시스템의 경우 bioscrubber에 의해 유입 부하량의 상당한 감소 효과를 얻을 수 있었으며, biofilter 단일 시스템보다 H₂S의 제거율 및 제거용량이 높게 나타남으로써 biofilter에 bioscrubber를 병합함으로써 보다 효과적이고 안정된 운전이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) Hansen N. G., Rindel K., 2000, Bioscrubbing, an effective and economic solution to odour control at wastewater treatment plants, *Water Sci. Technol.*, 41, 155-164.
- 2) Park D., Lee D. S., Joung J. Y., Park J. M., 2005, Comparison of different bioreactor systems for indirect H₂S removal using iron-oxidizing bacteria, *Process Biochem.*, 40, 1461-1467.
- 3) Son H. J., Lee J. H., 2005, H₂S removal with an immobilized cell hybrid reactor. *Process Biochem.*, 40, 2197-2203.
- 4) Burgess J. E., Parsons S. A., Stuetz R. M., 2001, Development in odour control and waste gas treatment biotechnology: a review. *Biotechnol Adv.*, 19, 35-63.
- 5) Elias A., Barona A., Arreguy A., Rios J., Aranguiz I., Penas J., 2002, Evaluation of a packing material for the biodegradation of H₂S and product analysis. *Process Biochem.*, 37, 813-820.

- 6) Hansen N. G., Rindel K., 2000, Bioscrubbing, an effective and economic solution to odour control at wastewater treatment plants, *Water Science and Technology*, 41, 155-164.
- 7) Hecht V., Brebbermann P., Deckwer W. D., 1995, Cometabolic degradation of trichloroethylene in a bubble column bioscrubber, *Biotech. Bioeng.*, 47, 461-469.
- 8) Hammervold R. E., Overcamp T. J., Grady C. P. L., Smets B. F., 2000, A sorptive slurry bioscrubber for the control of acetone, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 50, 954-960.
- 9) Neal A. B., Loehr R. C., 2000, Use of biofilters and suspended growth reactors to treat VOCs. *Waste Manage.*, 20, 59-68.
- 10) Baltzis B. C., Mpanias C. J., Bhattacharya S., 2001, Modeling the removal of VOC mixtures in biotrickling filters, *Biotech. Bioeng.*, 72, 389-401.
- 11) Mpanias C. J., Baltzis B. C., 1998, Biocatalytic removal of monochlorobenzene vapor in trickling filters, *Catalysis Today*, 40, 113-120.
- 12) Cox H. H., Deshusses M. A., 1998, Biological waste air treatment in biotrickling filters, *Current Opinion in Biotechnol.*, 9, 256-262.
- 13) Ergas S. J., Kinney K., Fuller M. E., Scow K. M., 1994, Characterization of a compost biofiltration system degrading dichloromethane, *Biotechnol. Bioeng.*, 44, 1048-1054.
- 14) Devinny J. S., Deshusses M. A., Webster T. A., 1999, *Biofiltration for air polluted control*, Boca-Roton, Fl., Lewis Publishers, 299pp.
- 15) Lee M. G., Jun P. J., Lee D. H., Kam S. K., 2003, Removal of toluene vapor in the biofilter packed with activated carbon/polyurethane composite media, *J. Ind. Eng. Chemistry*, 14(7), 864-868.
- 16) Kang K. H., Kam S. K., Lee T. K., Lim S. B., Lee M. G., 2005, Removal characteristics of styrene vapor in the biofilter packed with loess/polyurethane composite media, *J. Environ. Sci.*, 14(11), 1027-1033.
- 17) Kam S. K., Kang K. H., Lee M. G., 2005, Removal characteristics of ethyl acetate and 2-buthanol by a biofilter packed with Jeju scoria, *J. Microbiol. Biotechnol.*, 15(5), 977-983.
- 18) Lee M. G., Bin J. I., Lee B. H., Kim J. K., Kwon S. H., Choi H., 2001, Removal characteristics of hydrogen sulfide in the biofilter packed with volcanic rock (Scoria), *HWAHAK KONGHAK*, 39, 379-384.