

흡착, 습식세정 및 흐름방식이 활성탄 담체 바이오필터에 의한 H_2S 제거에 미치는 영향

빈정인* · 이병현** · 김종균*** · 이민규†

부경대학교 화학공학부, **환경시스템공학부, ***식품생명공학부

608-739 부산시 남구 용당동 산 100

*조이엔텍(주)

608-739 부산시 남구 용당동 산 100, 부경기술사업단 405호

(2002년 11월 1일 접수, 2003년 1월 7일 채택)

Effects of Adsorption, Wet Scrubbing, and Flow Pattern on Activated Carbon-Packed Biofilter for H_2S Removal

Jung In Bin*, Byung Hun Lee**, Joong Kyun Kim*** and Min Gyu Lee†

Division of Chemical Engineering, **Division of Environmental System Engineering, and

***Division of Food Science and Biotechnology, San 100, Yongdang-dong, Nam-gu, Busan 608-739, Korea

*Joy Entech Co. Ltd., 405 Pukyong Business Incubator Center, San 100, Yongdang-dong, Nam-gu, Busan 608-739, Korea

(Received 1 November 2002; accepted 7 January 2003)

요 약

활성탄 충전 바이오필터의 H_2S 제거능을 조사하였다. 활성탄 자체의 H_2S 에 대한 흡착능은 $0.1\text{ g-}H_2S/\text{g-media}$ 로 산정되었으며, 100 ppm의 유입농도와 15초의 EBCT(공탑접촉시간) 조건하에서 습식세정에 의한 H_2S 제거실험의 결과 세정에 의한 효율은 약 40% 정도로 나타났다. 활성탄과 *Bacillus* 균주를 충전한 본 바이오필터에 유입 H_2S 농도를 100-600 ppm, EBCT를 15초로 운전시 99.9% 이상의 안정된 제거율을 얻을 수 있었다. H_2S 의 유입부하가 $200\text{ g-}H_2S/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$ 이하에서는 100%의 제거율을 보였으며, 최대제거용량은 $258\text{ g-}H_2S/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$ ($10.67\text{ g-}H_2S/\text{kg-media} \cdot \text{day}$)으로 산정되었다. 또한 배수 중의 pH가 2 이하로 유지되어도 미생물에 대한 저해작용 없이 안정된 제거효율을 유지하였다. 상향류와 하향류 운전방식의 비교 결과 상향류의 제거효율 및 제거용량이 10% 정도 높게 나타났다.

Abstract – The performance of an activated carbon-packed biofilter for the removal of H_2S was investigated. The adsorption capacity of the activated carbon itself for H_2S was estimated to be $0.1\text{ g-}H_2S/\text{g-media}$, and the removal efficiency of H_2S on the condition of wet scrubbing was about 40% under the conditions of 15 sec EBCT(Empty Bed Contact Time) and 100 ppm of influent H_2S concentration. The biofilter packed with activated carbon and *Bacillus* sp. showed stable removal efficiency higher than 99.9% for the inlet concentration of H_2S ranged from 100 to 600 ppm under 15 sec EBCT. When the inlet loading of H_2S was less than $200\text{ g-}H_2S/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$, the removal efficiency of H_2S reached 100%. The maximum elimination capacity of H_2S was determined to be $258\text{ g-}H_2S/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$ ($10.67\text{ g-}H_2S/\text{kg-media} \cdot \text{day}$). During operation, the biofilter exhibited stable removal efficiency without any inhibition to the microorganisms even when the pH in the drain water maintained below 2. The removal efficiency and the elimination capacity of H_2S in the upward flow biofilter were about 10% higher than those in the downward flow biofilter.

Key words: Hydrogen Sulfide, Odor, Biofilter, Activated Carbon, Flow Pattern, Wet Scrubbing

1. 서 론

황화수소(H_2S)는 폐수처리장, 축산폐수 처리장, 음식물 쓰레기, 제지 공장 등에서 다량 발생하는 부패된 계란 냄새가 나는 악취물질로서, 약 8 ppbv 정도의 낮은 농도에서도 심미적인 거부감을 주며 하수처리제통

에서 부식문제를 야기하는 물질이다[1, 2]. 우리나라에서는 '96년과 '97년에 울산 및 여천공단지역이 대기질 규제지역 및 특별대책지역으로 지정되는 등 '90년대 초반부터 악취가 점차 사회적으로 대두되고 있고, 이러한 악취문제 해결을 위해 8개 화학물질을 악취물질로 지정하고 배출 허용기준을 설정하는 등 다각적으로 노력하고 있으나 악취로 인한 민원이나 악취 중점관리업소의 수는 급격히 증가하고 있는 추세이다.

악취제거를 위한 기존의 습식세정, 흡착법, 직접연소법, 촉매산화법, 매스킹법 등과 같은 물리화학적 방법은 오염가스의 제거효율은 높지만

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mglee@pknu.ac.kr

시설비 및 재료비, 약품비 등과 같은 조업비가 많이 소요되어 고유량의 저농도 폐가스를 배출허용치까지 감소시키는데는 비경제적이며, 2차 오염물질을 발생시키는 단점이 있다[3-5].

바이오필터(biofilter)는 생물학적 대기오염제어(air pollution control, APC) 기술로서 폐가스가 생물학적으로 활성화된 다공성 담체를 통과함으로써 처리된다. 바이오필터는 그 응용원리에 있어서 폐수의 생물학적 처리 및 오염된 토양의 정화에 쓰이는 것과 유사한 것으로 유럽에서 악취 저감을 위해 시작하였으며, 최근에는 악취제거공정으로부터 산업에서 발생하는 특정 화합물을 제거하는 고성능 공정으로 인식되고 있다[6-8]. 바이오필터의 기본적인 메커니즘은 악취성분이 수분에 용해되는 악취성분의 용해반응단계, 용해된 악취물질이 미생물의 세포내로 흡수 단계, 악취물질을 분해하는 단계의 3단계로 구성되며, 최종적으로 탄화수소물질은 탄산가스과 물로, 황화합물은 이황산이온과 황산이온으로, 질소화합물은 암모니아 이온, 아초산 이온 혹은 초산 이온 등으로 변환된다[7]. 이러한 생물학적 탈취공정은 시설비와 운전비용이 저렴할 뿐만 아니라 낮은 에너지 소비량과 2차 공해처리를 해야하는 잔류물이 없는 이유로 그 이용 폭을 넓혀 나가려는 노력을 경주하고 있어 유망기술로 알려져 있다[3, 9-13].

일반적으로 바이오필터의 효율은 미생물과 담체의 선택에 크게 좌우되므로 이에 따라 최근에는 바이오필터의 효율을 높이기 위한 방안으로 peat, 화산석, 슬래그, 다공성 세라믹, 활성탄 등 무기성 재료를 바이오필터의 담체로 많이 사용하고 특정 성분에 대한 분해능이 뛰어난 미생물 균주의 선택적 접종에 따른 제거능의 향상에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다[14-19]. 특히 활성탄은 비표면적이 클 뿐만 아니라 비중이 작으며, 함수율이 높고 내구성이 뛰어난 물리·화학적 특성으로 인하여 수처리 분야에서 뿐만 아니라, 흡착에 의한 악취 제거 등에서도 많이 사용되고 있다. 활성탄의 이러한 특성은 바이오필터의 충전 담체로서도 우수하다는 것이 많은 선행 연구에서 밝혀졌다[4, 9, 20, 21].

그러나 기존 연구들의 대부분이 담체를 충전한 바이오필터에 대한 제거효율 및 제거능과 같은 운전인자에 대한 영향을 파악하는데 중점을 두고 있으며, 실제 현장에 적용함에 있어서 흡착특성이나 습식세정에 의한 특성 등을 제시할 수 있는 연구는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 활성탄을 충전 담체로한 바이오필터에서 흡착 및 습식세정에 의한 H₂S 제거 특성을 살펴보고자 하며, 유입가스를 상향류 및 하향류로 운전함에 따른 바이오필터의 성능 비교 실험을 수행하였다.

2. 실험 및 방법

2-1. 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치의 모식도는 Fig. 1과 같다. 반응기는 미생물과 담체를 충전하여 악취성분을 생물학적인 분해과정을 통해 제거하는 부분으로 내경 6 cm, 높이 70 cm의 원형 아크릴관 3조로 구성하였다. 각 반응기의 충전부피는 1.1 L이며, 담체는 다공판 위에 충전하였다. 반응기 운전은 기본적으로 상부로 유입되어 하부로 유출되는 하향식을 채택하였으며, 상향식과의 비교실험을 수행하였다. 상부 유입부에는 영양물질과 세척수 공급을 위한 분무기를 설치하였으며, 하부에는 배수의 저장 및 배출이 가능한 구조로 되어 있다. 충전 깊이별 가스 시료채취와 담체 시료채취를 위한 시료 채취구를 일정한 간격으로 설치하였다.

2-2. 충전담체

본 연구에서는 활성탄을 담체로 사용하였으며, 먼저 체분리하여 직경이 5-7 mm인 것들만 선별한 후에 물로 수회 세척하고 미세입자들을 제거하여 반응기에 충전하였다. 각 반응기에 충전된 활성탄의 중량은 동일하게 각각 0.64 kg이었으며, 충전에 사용한 것과 동일한 활성탄 일부를 채취하여 밀도, 공극율, 함수율 등의 특성 분석 실험을 수행하여 그

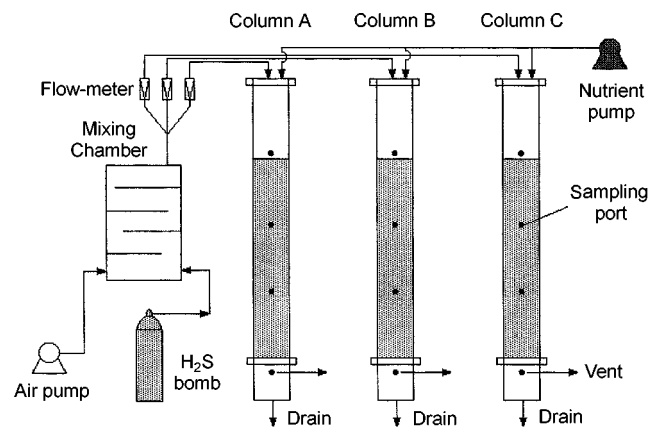


Fig. 1. Schematic diagram of lab-scale biofilter.

Table 1. Physical characteristics of the packing material

Physical characteristics	Value
Apparent density, g/cm ³	1.38
Packing density, g/cm ³	0.58
Void volume ratio	0.42
Water holding capacity, % (w/w)	46.3
Mesh size, mm	5-7

결과를 Table 1에 요약 정리하였다.

2-3. 미생물

본 실험에서 사용된 탈취미생물은 *Bacillus* sp.로 운전되고 있는 하수처리장의 반응슬러지를 접종하여 사용하였다. *Bacillus* sp.는 비광합성 세균에 속하며, Gram + 세균으로서 유기폐수 성분의 분해성 및 자화성이 있으며, 육편, 단백질을 분해하고 전분을 포도당으로 분해하며, 또한 지방과 커피성분을 분해하는 특성이 있고, 유기폐수 중의 암모니아, 황화수소, 아민류를 직접 섭취 또는 분해·자화하는 특성이 있다[22]. 바이오필터내의 미생물 충전은 담체를 슬러지와 직접 혼합하여 미생물을 부착시킨 후 각 반응기에 충전하였다. 사용된 *Bacillus* sp. 슬러지는 MLSS농도가 6,720 mg/L, MLVSS가 5,130 mg/L이었으며, 최종적으로 담체에 부착된 미생물의 양은 0.517 g-MLVSS/g-dry material이었다.

2-4. 분석

2-4-1. 가스 분석

본 연구에서 오염물질로 사용한 가스는 황화수소(H₂S)로서 순도 99% 이상의 가스분배를 이용하여 needle-valve로 그 유량을 조절하여 혼합기에서 일정농도로 혼합되도록 하였다. 황화수소는 가스 검지관(GASTEC, Japan)을 이용하여 각 반응기에 부착되어 있는 시료채취구로부터 직접 분석하였다. 또한 시료채취구를 통하여 gas-tight syringe로 시료 채취 후 gas chromatography(FPD, HP 6890, U.S.A.)를 이용한 기기분석법과 흡수액으로 흡수한 후 이를 흡광광도계를 이용한 메틸렌블루법(대기오염 공정시험법)을 병행하여 실시하면서 이들에 대해 상호 검증하였다. 온도 및 습도는 습도계(Cole-Parmer, U.S.A.)를 이용하여 측정하였으며, 압력강하는 경사마노메타(DWER, U.S.A.)를 이용하여 측정하였다.

2-4-2. 배수 분석

본 연구에서 미생물의 성장을 위해 공급한 영양물질의 구성은 yeast extract 2, KH₂PO₄ 2, K₂HPO₄ 2, NH₄Cl 0.5, KNO₃ 0.5, MgSO₄·7H₂O 0.5, CaCl₂·2H₂O 0.05, FeSO₄·7H₂O 0.03, EDTA 0.02 g/L이며, 바이오필터에 공급할 때에는 이를 수돗물과 10-20배 희석하여 공급하였다. 연속

적으로 순환 공급되는 nutrient에 의해 발생하는 배수는 1일 1회 회수하여 H₂S 산화에 의한 생성물과 이로 인한 pH 변화를 측정하였다. 먼저 pH측정은 pH meter(ORION, model 420A, U.S.A.)를 사용하여 측정하였고, 현미경을 통하여 미생물 활성을 주기적으로 확인하였다. 그리고 배수 중의 음이온 분석은 ion chromatography(DIONEX, DX 100)로 분석하였다.

2-5. 실험방법

활성탄 자체에 의한 황화수소의 흡착실험은 Fig. 1의 반응기에 활성탄을 충전한 후, H₂S 가스를 유입농도 100 ppm, 유입 유량 8.25 L/min (EBCT 8 sec, SV 450/hr)으로 공급하여 유입농도 및 충전깊이 1/3 지점(13 cm 지점)에 위치한 시료 채취구에서의 농도를 각각 측정하였다. 세정에 의한 황화수소의 제거 실험은 반응기에 멸균된 활성탄을 충전하고 1 L의 수돗물을 세정수로서 바이오필터와 동일한 조건인 15 mL/min의 유량으로 반응기 상부로부터 공급하여 실험하였다. 순환 사용한 세정수는 매일 교체하였다. 활성탄을 충전담체로 하는 바이오필터에 의한 H₂S 제거실험은 입경 5-7 mm인 입상 활성탄에 농축된 *Bacillus sludge*를 혼합하여 각 반응기에 39 cm의 높이로 충전하였으며, 충전부피와 공급율은 각각 1.1 L와 42%이었다. 초기에는 H₂S 유입농도를 100 ppm, 유입유량을 2.2 L/min(EBCT 30 sec, SV 120/hr)와 4.4 L/min(EBCT 15 sec, SV 240/hr)의 조건에서 각각 운전하였으며, 이후 동일한 유입유량의 조건으로 유입농도를 300, 600, 900, 1,200 ppm까지 단계적으로 증가시키면서 운전하였다. 또한 유입유량 6.6 L/min(EBCT 10 sec, SV 360/hr)와 13.2 L/min(EBCT 5 sec, SV 720/hr)의 조건에서 H₂S 유입농도를 85, 150, 300, 450, 600 ppm으로 변화시켜가면서 연속실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 활성탄 충전층에서 흡착에 의한 H₂S 제거

활성탄은 van der Waals 힘이나 미세 기공으로의 내부확산, 모세관 응축 등의 작용에 의하여 비극성 물질을 흡착하며 대부분의 경우 유기용제 증기를 제거하는데 탁월한 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 활성탄 자체의 H₂S 흡착능을 알아보고자 Fig. 1의 반응기에 활성탄을 충전한 후, H₂S 가스를 유입농도 100 ppm, 유입 유량 8.25 L/min(EBCT 8 sec, SV 450/hr)으로 공급하여 유입농도 및 충전깊이 1/3 지점(13 cm 지점)에 위치한 시료 채취구에서의 농도를 각각 측정하고 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보여지는 바와 같이 운전 3일 후에 농도가 검출되었으며, 운전 16일 경과 후에는 유출농도가 유입농도와 같아졌다.

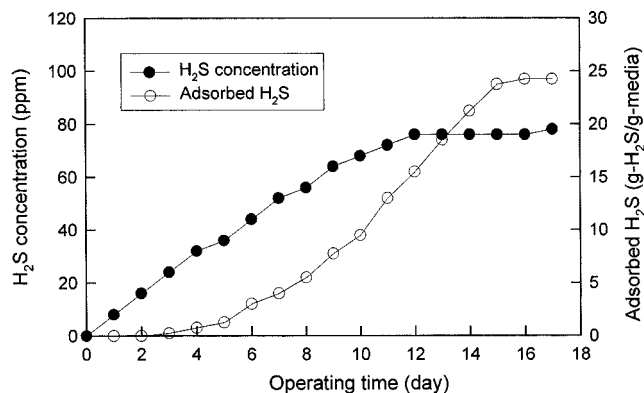


Fig. 2. Removal patterns and adsorbed amount of H₂S by adsorption column packed with activated carbon(EBCT: 15 sec, inlet concentration: 100 ppm).

흡착이 포화된 기간까지의 흡착된 H₂S 양으로부터 계산된 흡착량은 약 0.1 g-H₂S/g-media로 얻어졌다. 이러한 결과는 SV 62/hr와 H₂S 유입농도 약 40 ppm의 조건에서 20일 간 세라믹 담체의 흡착실험을 수행한 Park과 Kim[23]의 연구에서 얻어진 흡착량 1.7×10^{-5} g-H₂S/g-media에 비해서는 아주 높은 값이지만, Cho 등[24]의 침착 활성탄을 이용한 연구에서의 흡착량 0.22 g-H₂S/g-media에 비해서는 다소 낮게 나타났다.

실제로 바이오필터는 세척수 등으로 인하여 수분이 과포화된 상태로 운전됨으로써 장기적인 담체 자체의 흡착 효과는 크게 기대할 수가 없다. 그러나 활성탄의 이와 같은 흡착능은 바이오필터에 접촉된 미생물이 유입가스에 대해 순응하는 초기 운전기간 동안에는 담체 자체의 흡착으로 인한 제거효율의 상승 효과를 기대할 수가 있을 것으로 사료된다.

3-2. 활성탄 충전층에서 습식세정에 의한 H₂S 제거

바이오필터에는 수분공급, 세척, 중화 등의 목적으로 여러 형태의 수분이 공급되며, 이러한 수분에 약취성분이 용해되는 것이 생물학적탈취의 첫 번째 단계이다. 이와 같이 용해된 약취성분이 담체에 부착된 미생물의 세포내로의 흡수과정을 거쳐 최종적으로 미생물에 의해 분해·제거된다. 따라서 약취성분의 수분에 의한 제거는 중요한 의미를 가지므로 황화수소에 대한 세정에 의한 제거 특성에 대해 살펴보기 위하여 H₂S의 유입농도를 100 ppm, 유입유량을 4.4 L/min(EBCT 15 sec, SV 240/hr)의 조건으로 운전하여 그 실험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 초기에 유출농도가 약 40 ppm으로 유지되는 것은 흡착 및 세정 두 가지가 동시에 작용하기 때문으로 보이며, 운전 5일 이후 유출농도가 약 60 ppm으로 유지되는 것은 수분에 의한 흡착능의 저하로 인한 세정작용만으로 제거되는 것으로 사료된다. 그러나 운전 약 10일 후에는 유출

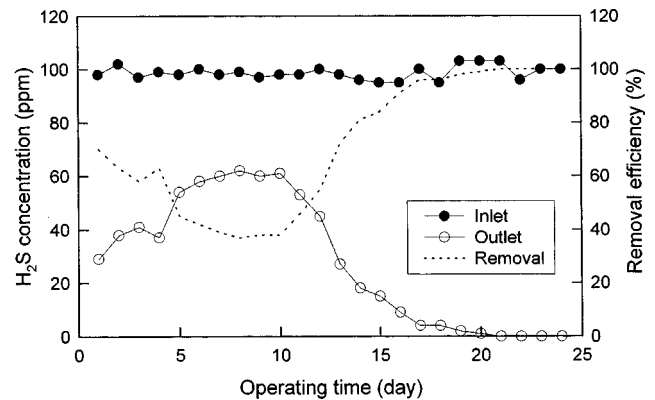


Fig. 3. Removal patterns of H₂S by wet scrubber packed with activated carbon(EBCT: 15 sec, inlet concentration: 100 ppm).

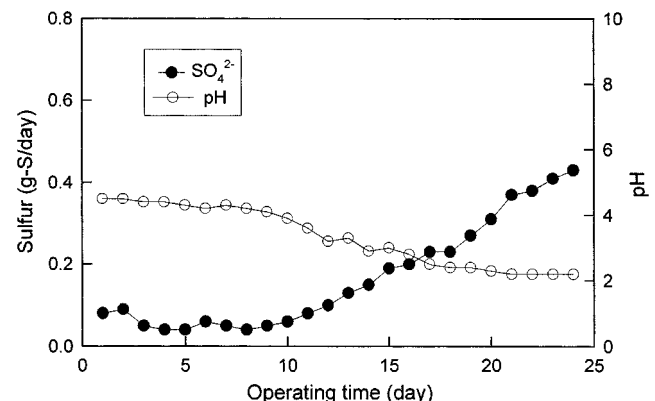


Fig. 4. Variation of pH and sulfur in the drain water for the wet scrubbing experiment.

농도가 다시 감소하여 운전 약 20일 이후에는 100% 제거되는 결과를 보였는데, 이는 유입되는 공기와 공급되는 수돗물을 멸균하지 않고 공급하였기 때문에 외부로부터 미생물 오염으로 인한 생물학적 분해가 진행된 것으로 사료된다. 배수의 분석결과를 나타낸 Fig. 4에서 운전 10일부터 배수 내의 황산이온의 양이 증가하고, 그에 따라 pH가 감소하는 결과로써 미생물의 오염과 생물학적 분해가 일어났음을 설명할 수 있을 것이다.

3.3. 유입농도 및 유량 변화에 따른 H_2S 제거

활성탄을 충전담체로 하는 바이오필터에 의한 H_2S 제거특성을 살펴 보기 위하여 유입유량 2.2 L/min(EBCT 30 sec, SV 120/hr) - 13.2 L/min(EBCT 5 sec, SV 720/hr)의 조건에서 H_2S 유입농도를 100-1,200 ppm으로 변화시켜가면서 연속실험을 수행한 결과 중에서 EBCT 15 sec인 경우에 농도변화 및 배수의 분석결과를 Fig. 5와 6에 각각 나타내었다. 반응기의 충전깊이 1/3 지점(13 cm)과 2/3 지점(26 cm)에 두 개의 시료 채취구가 있으며, Fig. 5에서의 port (1)과 port (2)는 각각 첫 번째와 두 번째 시료 채취구에서 분석한 결과를 의미한다. 그림에서 보여지는 바와 같이 H_2S 유입농도가 100 ppm인 운전초기에는 이틀만에 완전 제거됨으로써 유출가스 내에 황화수소는 검출되지 않았다. 이후 유입농도 600 ppm까지는 port (2)와 출구에서는 100 %의 제거효율을 유지하였으며, port (1) 및 (2)에서는 900 ppm 이상의 유입농도에 대해서는 제거효율이 점차 감소하는 결과를 보였다. *Thiobacillus thioparus* CH11 biofilter를 이용한 Chung 등[25]의 연구결과에 의하면 EBCT 28 sec와

H_2S 유입농도 60 ppm인 경우 약 7일간의 순응기간이 필요한 것으로 보고하고 있다. 그러나 본 연구 결과에서 순응기간이 짧은 것은 초기에 활성탄의 흡착과 더불어 미생물의 빠른 순응에 의한 결과로 보여지며, 이는 현장 적용에 있어서 유리하게 작용할 것으로 사료된다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 배수의 분석결과에서 기상으로부터 제거된 황화수소의 양에 비하여 황산이온의 생성량이 낮게 나타났다. 이는 순응된 미생물의 번식속도보다 유입부하율의 단계적인 증가속도가 더 빠르게 실험이 진행됨으로써 황산이온으로의 완전 산화율이 낮게 유지되었기 때문인 것으로 사료된다. 반면 최대제거용량에 도달한 20일 이후에는 생성된 황산이온의 양이 약 95%까지 증가하였다. 바이오필터 컬럼 하부에서 유출되는 배수 중의 pH는 운전 초기에 2정도였으나 점차적으로 감소하여 최종적으로 약 1.1까지 감소하였다. 또한 EBCT 5 sec로 운전한 경우에는 pH가 1이하로까지 떨어졌으나 미생물의 저해작용 없이 안정된 제거효율을 유지하였다.

Fig. 7과 8은 EBCT가 30, 15, 10, 5 sec인 조건에서 유입되는 H_2S 의 농도 변화 실험을 행하여 얻은 결과를 유입부하량에 대한 제거효율과 제거용량으로 각각 나타낸 것이다. EBCT에 관계없이 유입부하량 200 g- H_2S /m³·hr(8.27 g- H_2S /kg-media·day) 이하인 조건에서 모두 100%의 제거효율을 보였으며, 유입부하량 300 g- H_2S /m³·hr과 400 g- H_2S /m³·hr인 경우에 각각 80%와 60% 정도의 제거효율을 나타내었다. 최대 유입부하량인 473 g- H_2S /m³·hr(19.57 g- H_2S /kg-media·day)에서는 제거효율이 49%까지 감소하는 결과를 보였다. Fig. 8에 나타난 것과 같이 유입부하량 240 g- H_2S /m³·hr까지 제거용량이 직선적으로 증가하다가 그 이상의 유입부하량에 대해서는 제거용량이 일정하게 분포하는 것을 알

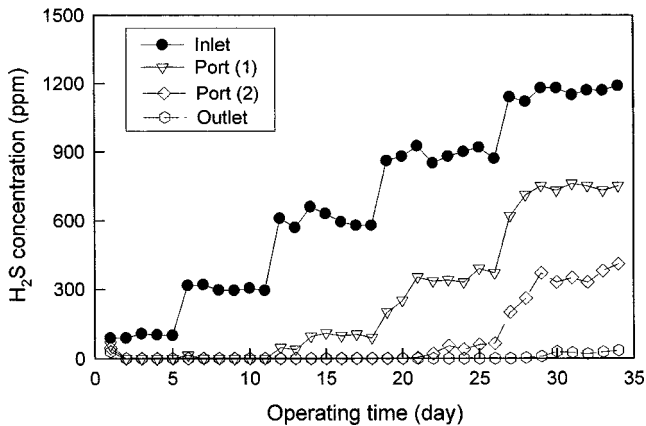


Fig. 5. Removal patterns of H_2S by biofilter packed with activated carbon at flow-rate of 4.4 L/min(EBCT: 5 sec in port 1, 7.5 sec in port 2, and 15 sec in outlet).

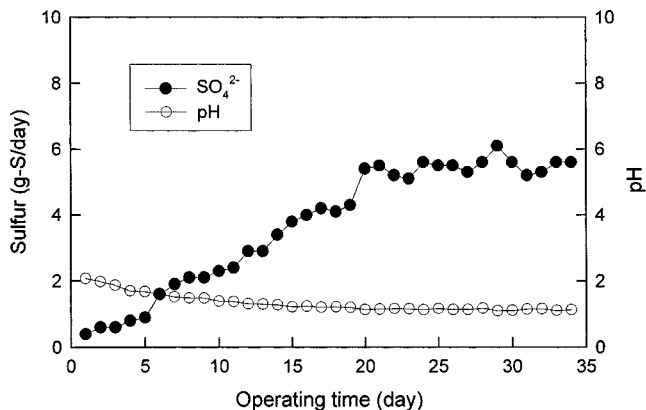


Fig. 6. Variation of pH and sulfur under different inlet concentration at flow-rate of 4.4 L/min(EBCT: 15 sec).

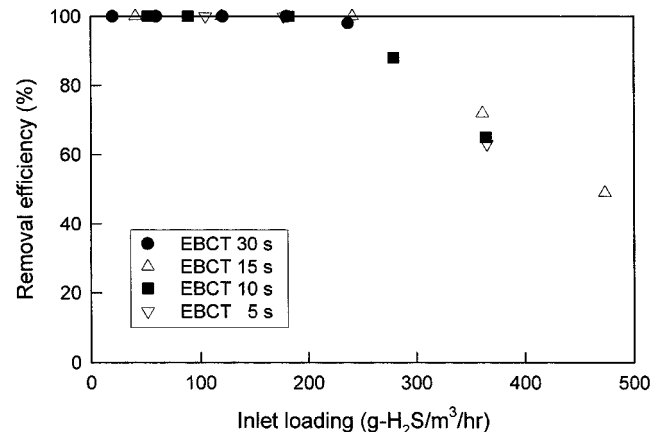


Fig. 7. Removal efficiency of H_2S as a function of inlet loading under various EBCT.

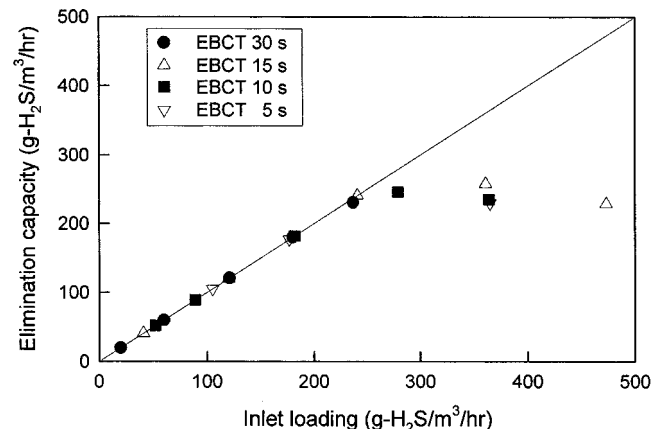


Fig. 8. Relationship between inlet loading and elimination capacity.

수 있었다. 결과적으로 최대제거용량은 $258 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3 \cdot \text{hr}$ ($10.67 \text{ g-H}_2\text{S/kg-media} \cdot \text{day}$)로 산정되었다. EBCT 15 sec와 10 sec에서는 유입농도 증가에 대해 제거용량이 $280 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3 \cdot \text{hr}$ 정도까지 증가하였으나 다시 감소하는 결과를 보였는데, 이는 황화수소의 미생물에 대한 저해작용보다 충전된 활성탄의 입경이 작고 관형이므로 미생물의 증식과 압밀에 의한 압력손실의 증가로 총공극율이 감소하는 등의 운전상의 문제로 인하여 제거효율과 함께 제거용량이 감소한 것으로 보여진다. 따라서 압력손실을 주기적 측정하여 이를 적절히 조절하고 운전상의 문제점들을 보완한다면 보다 높은 제거용량을 유지할 수 있을 것으로 사료된다.

이러한 현상은 현장에서도 문제가 될 수 있으므로 적절한 nutrient 공급으로 미생물의 과다 성장을 막고 수분이 과도하게 공급되어 공극을 폐쇄하는 것을 방지하여야 하며, 충전 담체의 적절한 선택으로 항상 일정한 공극을 유지할 수 있어야만 안정된 제거효율을 얻을 수 있을 것이다. 본 실험에서는 EBCT 10 sec에서 실험을 진행한 후 공극이 폐쇄되고 압력손실이 급증하여 담체를 세척한 후 재충전하여 추가 실험을 진행한 경우 제거용량이 약 $300 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3 \cdot \text{hr}$ 까지 향상되는 결과를 얻을 수 있었다.

3.4. 상향류와 하향류 방식의 비교

바이오필터는 여러 형태로 설계가 가능하지만 처리 대상 가스의 유입 방식에 따라 상향류(upward flow)와 하향류(downward flow)로 구분할 수 있다. 현장에서는 이 두 가지 방식 중에서 현장 조건에 따라 선택적으로 설치를 하고 있으며, 2단으로 운전되는 바이오필터의 경우 상향류와 하향류를 연속적으로 운전할 수도 있다. 이러한 운전방식에 대한 비교 연구를 위해 유입유량을 2.2 L/min (EBCT 30 sec, SV 120/hr)과 6.6 L/min (EBCT 10 sec, SV 360/hr)의 두 가지 유량조건에서 실험을 수행하였다.

Fig. 9는 EBCT 10 sec인 경우에 유입농도 변화에 따른 제거효율의 변화를 비교하여 나타낸 것이며, Fig. 10은 동일한 EBCT 조건에서 유입농도 150, 300, 450, 600 ppm인 경우에 대한 충전층 깊이별 농도변화를 나타낸 것이다. Fig. 9에서 보여지는 바와 같이 유입농도 600 ppm인 경우에 상향류와 하향류 방식의 제거효율은 각각 75%와 65%로써 10% 정도 상향류가 높게 나타났다. 또한 제거용량면에서도 하향류 방식의 경우 제거용량이 증가하다가 다시 감소하면서 유입농도 600 ppm의 조건에서 약 $237 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3 \cdot \text{hr}$ 로 산정된 반면 상향류 방식의 경우 제거용량의 감소 없이 지속적으로 증가하였으며, 600 ppm의 조건에서 약 $273 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3 \cdot \text{hr}$ 로 산정되었다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 충전층 이가 1/3 지점과 2/3 지점에서의 농도를 분석해 본 결과, 상향류 방식이 하향류 방식에 비해 70-100 ppm 정도 낮게 나타났다. 반면 유출농도는

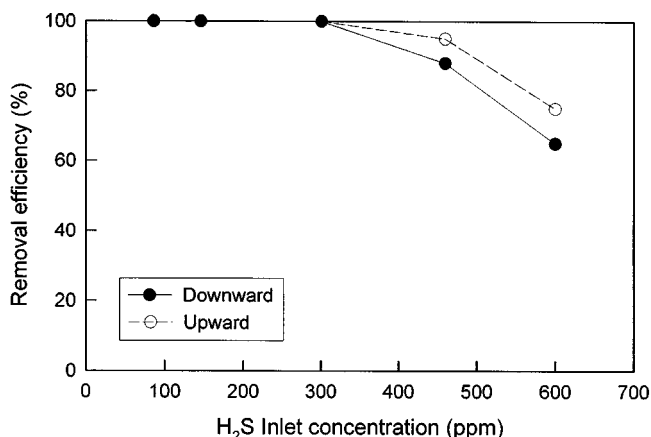


Fig. 9. Variation of H₂S removal efficiency as a function of inlet concentration under different flow type(EBCT: 10 sec).

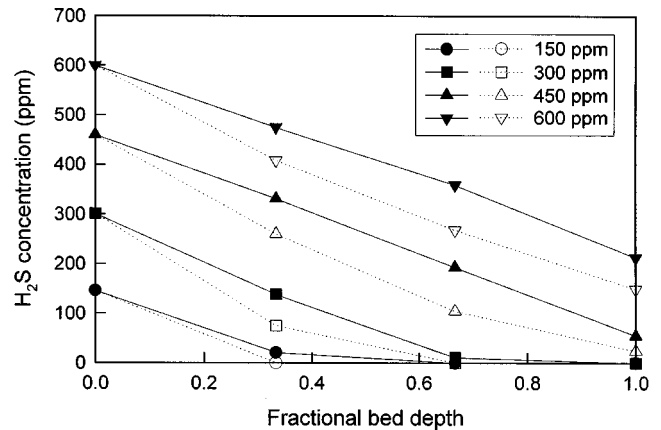


Fig. 10. Variation of H₂S concentration as a function of bed depth under different flow type(EBCT: 10 sec, closed symbols: downward, open symbols: upward).

30-60 ppm으로 차이가 다소 줄어드는 경향을 보였다.

이러한 결과들은 상향류 방식의 경우 공기의 흐름이 원활하고 유입부에서 양호한 조건이 유지되기 때문이며, 반면 하향류의 경우에는 공기의 흐름과 담체 자체의 하중으로 인하여 충전층이 압밀되고 과다 번식한 미생물에 의해 공극이 줄어드는 현상으로 인하여 제거능이 감소하는 것으로 사료된다. 압력손실의 경우 상향류 방식이 하향류 방식에 비해 절반 정도로 낮게 유지되는 것도 좋은 이유가 될 것이다. 하지만 상향류 방식의 경우 살수량이 많고 짧은 EBCT 즉, 충전층 내의 공기 유속이 빠르게 되면 하향의 수분 흐름과 상향의 공기 흐름이 교차되면서 압력손실이 급격히 증가하고 세정수나 nutrient 용액의 하향 흐름이 완전 방해되어 정상적인 운전이 불가능하게 되는 현상을 초래할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

활성탄을 충전담체로 하고 *Bacillus* sp.를 탈취균주로 한 바이오필터의 생물학적 탈취실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 활성탄 충전층에서의 H₂S에 대한 흡착능은 $0.1 \text{ g-H}_2\text{S/g-media}$ 로 산정되었으며, EBCT 15 sec와 유입농도 100 ppm의 조건에서 습식세정에 의한 H₂S 제거 실험 결과 초기에는 흡착과 세정이 동시에 진행되었고 세정에 의한 효율은 약 40% 정도로 나타났다.

(2) 유입부하량이 $200 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3 \cdot \text{hr}$ 이하인 경우에는 100%의 제거효율을 보였으며, 유입부하량이 $300 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3 \cdot \text{hr}$ 와 $400 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3 \cdot \text{hr}$ 인 조건에서는 제거효율이 각각 80%와 60%로 감소하였다. 최대제거용량은 $258 \text{ g-H}_2\text{S/m}^3 \cdot \text{hr}$ ($10.67 \text{ g-H}_2\text{S/kg-media} \cdot \text{day}$)로 산정되었다.

(3) 상향류와 하향류 방식의 비교 결과 상향류의 제거효율 및 제거용량이 10% 정도 높게 나타났다.

(4) 배수의 분석 결과 충분한 미생물이 존재하고 활성이 유지되는 경우 제거된 기상의 황화수소는 약 90% 이상 황산이온으로 산화되어 배수로 배출되는 것으로 관찰되었다. 또한 pH가 2이하로 유지되면서도 미생물에 대한 저해작용 없이 안정된 제거효율을 유지하였다.

이상의 결과로 미루어 볼 때 활성탄을 담체로 하고 *Bacillus* sp.를 탈취균주로 하는 바이오필터는 농도 및 유량 변화에 대해 제거효율과 제거용량이 양호하였다. 특히 pH 저하에 따른 미생물의 저해효과가 나타나지 않아 운전방법이 간소화 될 수 있는 장점을 가짐으로써 효과적인 생물탈취 시스템으로 적용 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Smet, E., Lens, P. and Van Langenhove, H., "Treatment of Waste Gases Contaminated with Odorous Sulfur Compounds," *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, **28**, 89-117(1998).
2. Eikum, A. and Storchang, S., *Odour Problems Related to Waste Water 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(1986).
3. Devinny, J. S., Deshusses M. A. and Webster, T. S., *Biofiltration for Air Pollution Control*, Lewis publishers, CRC Press LLC(1999).
4. Ottengraf, S. P. P., "Exhaust Gas Purification," In Rehm, H. J. and Reed, G., *Biotechnology*, **8**, 425-452(1986).
5. Sorial, G. A., Smith, F. L., Suidan, M. T., Biswas, P. and Brenner, R. C., "Evaluation of a Trickle Bed Biofilter for Toluene Removal," *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, **45**(12), 801-810(1995).
6. Warren J. S. and Loehr, R. C., "Biofiltration: Fundamentals, Design and Operations Principles, and Applications," *J. Environ. Eng.*, **123**, 538-546(1997).
7. Yoon, I. K. and Park, C. C., "Effects of Gas Flow Rate, Inlet Concentration and Temperature on Biofiltration of Volatile Organic Compounds in a Peat-Packed Biofilter," *J. Biosci. Bioeng.*, **93**(2), 165-169(2002).
8. Kim, S. S., Park, D. W., Kim, S. Y., Kim, J. H., Haam, S. J., Kim, E. B. and Kim, W. S., "VOC Treatment Characteristics Using Biofilter and Its Performance Enhancement with the Addition of Microorganisms," *HWAHAK KONGHAK*, **39**(2), 340-345(2001).
9. Van Lith, C., Leson, G. and Michelsen, R., "Evaluating Design Option for Biofilters," *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, **47**, 37-48(1997).
10. Acuna, M. E., Perez, F., Auria, R. and Revah, S., "Microbiological and Kinetic Aspects of a Biofilter for the Removal of Toluene from Waste Gases," *Biotechnol. Bioeng.*, **63**, 175-184(1999).
11. Jorio, H., Kiared, K., Brezezinski, R., Lernoux, A., Viel, G. and Heitz, M., "Purification of air Polluted by High Concentration of Toluene and Xylene in a Pilot Scale Biofilter," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **73**, 183-196(1998).
12. Shareefdeen, Z. and Baltzis, B. C., "Biofiltration of Toluene Vapor under Steady-State and Transient Conditions: Theory and Experimental Results," *Chem. Eng. Sci.*, **49**, 4347-4360(1994).
13. Kiared, K., Fundenberger, B., Brzezinski, R., Viel, G. and Heitz, M., "Biofiltration of Air Polluted with Toluene under Steady-State Conditions: Experimental Observations," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **36**, 4719-4725(1997).
14. Lee, M. G., Bin, J. I., Lee, B. H., Kim, J. K., Choi, H. and Kwon, S. H., "Removal Characteristics of Hydrogen Sulfide in the Biofilter Packed with Volcanic Rock (Scoria)," *HWAHAK KONGHAK*, **39**, 379-384(2001).
15. Cho, K. S., Ryu, H. W. and Lee, N. Y., "Biological Deodorization of Hydrogen Sulfide Using Porous Lava as a Carrier of *Thiobacillus Thiooxidans*," *J. Biosci. Bioeng.*, **90**(1), 25-31(2000).
16. Yang Y. and Allen, E. R., "Biofiltration Control of Hydrogen Sulfide. I, Design and Operation Parameters," *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, **44**, 863-868(1994).
17. Frusawa, N., Togashi, I., Hirai, M., Shoda, M. and Kubota, H., "Removal of Hydrogen Sulfide by a Biofilter with Fibrous Peat," *J. Ferment. Technol.*, **62**(6), 589-594(1984).
18. Togashi, I., Suzuki, M., Hirai, M., Shoda, M. and Kubota, H., "Removal of Ammonia by a Peat Biofilter without and with Nitrifier," *J. Ferment., Technol.*, **64**, 425-432(1986).
19. Cha, J. M., Park, Y. and Lee, I. W., "Effects of Cultivation Condition on Growth of the Hydrogen Sulfide Degradating *Thiobacillus* sp. IW Isolated from Waste Coal Mine Water," *Korean J. Biotechnol. Bioeng.*, **9**(3), 287-293(1994).
20. Ottengraf, S. P. P., "Application for Biological Treatment of Waste Gases," U.S. Patent #4, 806, 148(1989).
21. Liu, P. K. T., Gregg, R. L., Sabol, H. K. and Barkley, N., "Engineered Biofilter for Removing Organic Contaminants in air," *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, **44**, 299-303(1994).
22. Yeom, H. K., "Nitrogen Removal of Domestic Wastewater Treatment by Using *Bacillus* sp.," Master Thesis, Pukyong National University, Busan, Korea(2001).
23. Park, S. J., "Evaluation Study on the Deodorization of Methyl Mercaptan Using Various Ceramic Packing Materials," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **21**(5), 959-967(1999).
24. Cho, K. C., Im, Z. W., Cho, S. W., Song, J. S. and Oh, K. J., "A Study on the H₂S Removal Using Na₂CO₃ Impregnated Activated Carbon (I)," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **21**(10), 2003-2011(1999).
25. Chung, Y. C., Huang, C. and Tseng, C. P., "Operation Optimization of *Thiobacillus Thioparus* CH11 Biofilter for Hydrogen Sulfide Removal," *J. Biotechnol.*, **52**, 31-38(1996).