

황산화 균주가 부착된 다공성 세라믹 biofilter를 이용한 H₂S 제거

Removal of Hydrogen Sulfide Using Porous Ceramic Biofilter Inoculated with Sulfur Oxidizing Bacteria

박 상 진 · 조 경 숙*

우송대학교 토목환경공학과, *이화여자대학교 환경공학과

(1998년 11월 30일 접수, 1999년 9월 8일 채택)

Sang-Jin Park and Kyoung-Suk Cho*

Dept. of Civil & Environmental Engineering, Woo-Song University

*Dept. of Environmental Engineering, Ewha Womans University

(Received 30 November 1998; accepted 8 September 1999)

Abstract

Biofiltration of polluted gas streams contained H₂S was studied. The experiments were performed in a laboratory-scale reactor with a porous ceramic media inoculated with sulfur oxidizing bacterium, TAS which was isolated from activated sludge. The concentration of H₂S in the inlet gas varied from 109 to 3,841 ppm_v at the various space velocities (SV) of 50 h⁻¹ to 250 h⁻¹. Various tests have been conducted to evaluate the effects of such parameters as pH, concentration of sulfate ion and retention time on the pressure drop and maximum elimination capacity. The removal efficiency of H₂S decreased as the H₂S concentration or gas velocity increased in the inlet gas. Pressure drop was insignificant in this system. The maximum elimination capacity could reach up to 16.35 g-S/kg-dry packing material/day.

Key words : biological deodorization, hydrogen sulfide removal, sulfur oxidizing bacteria, porous ceramic as microbial carriers, maximum elimination capacity

1. 서 론

황화수소(H₂S)는 석유화학제품 제조공정, 제지공장, 식품가공 공장, 퇴비공장 및 하·폐수처리장 등의 산업현장에서 많이 발생되고 있는 대표적인 유황계 악취물질이다(Chung *et al.*, 1996; Yang and Allen, 1994). 황화수소의 처리에는 활성탄 흡착, 오

존산화 등의 물리화학적 공법들이 주로 이용되었으나, 최근에는 처리비용이 저렴하며 저농도 대용량 처리가 용이한 생물탈취기술이 가장 적절한 처리방법으로 주목받고 있다(Tang and Hwang, 1996).

토양탈취상(soil bed)은 대표적인 생물탈취기술로서 널리 사용되어 왔으나 충전재료로서 토양을 사용하고 있어 낮은 통과유속으로 인해 넓은 부지가 필요하고 압밀에 의한 압력손실의 증가와 함께 압

력손실이 크며 pin holes, air channel 형성 등의 문제점이 많이 지적되어 왔다(Yang and Allen, 1994). 퇴비나 peat moss는 재료구입의 용이성, 저렴한 가격, 우수한 제거효율이 인정되어 많은 연구자들에 의해서 biofilter의 미생물담체로 이용되었다(Yang and Allen, 1994; Cho *et al.*, 1991; Wada *et al.*, 1986; Frusawa *et al.*, 1984). 그러나 peat 등 유기성 재료들은 재료 자체가 분해되면서 압밀에 의한 압력손실의 증가와 함께 탈취를 위한 유효체적이 감소 및 동력비 증가요인이 되므로 bulking agent의 사용이 불가피하다는 단점을 안고 있다(Van Lith *et al.*, 1997). 따라서 1990년대 후반에는 슬래그, 세라믹 등 탈취용 담체로서 무기성 재료가 많이 사용되고 있는 것으로 보고되고 있다(Gero and Winer., 1991).

탈취미생물원의 악취물질 분해능을 향상시키기 위해 1980년대부터는 황산화 세균을 분리하여 H₂S를 선택적으로 제거하는 방법에 대한 연구가 수행되어 왔다. Wada *et al.*(1986)은 *Thiobacillus intermedius*를 H₂S 분해균주로서 이용하였으며, Zhang *et al.*(1991)은 peat biofilter로부터 분리한 *Hypomicrobium* sp. 155 균주를 이용한 H₂S 제거 연구를 수행하였다. Park *et al.*(1993)은 *Thiobacillus thioparus* DW44 균주를 접종한 peat biofilter를 이용하여 분뇨처리장 현장악취 제거에 관한 연구를 수행하였으며, Chung *et al.*(1996)은 축산폐수로부터 분리한 *Pseudomonas putida* CH11 균주로부터 H₂S 제거실험을 수행하였다. 이러한 연구는 거의 모두 미생물균주의 탈취능 향상을 보고하고는 있으나, 대부분의 경우 peat 등 유기성 재료를 탈취용 담체로 사용하였기 때문에 전술한 바와 같이 유기성 탈취재료가 갖고 있는 문제는 그다지 개선되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 재료 자체 분해에 의한 압밀 문제를 해결하기 위해 미생물 부착능이 우수하면서도 다공성인 무기 세라믹담체를 충전재료로 하고, 악취물질 분해능을 극대화하기 위해 활성슬러지로부터 분리한 황산화 미생물 균주를 탈취미생물원으로 하는 세라믹 biofilter를 이용하여 H₂S의 제거에 대한 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험장치의 구성

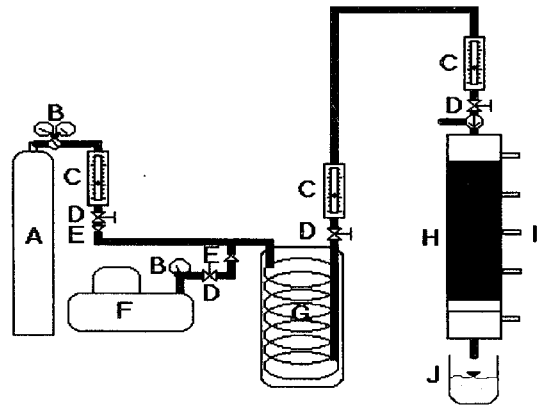


Fig. 1. Schematic diagram of lab.-scale ceramic biofilter used in this study. (A) H₂S gas, (B) Gas regulator, (C) flow meter, (D) control valve, (E) Check valve, (F) Air compressor, (G) Mixing chamber, (H) Glass column, (I) Sampling port, (J) Drainage

그림 1은 본 연구에서 사용된 실험장치의 구성을 나타낸 것으로, H₂S 가스는 한국표준과학연구소에서 제작한 표준 가스를 사용하였으며 가스분배로부터 나오는 H₂S를 콤프레서 공기와 mixing chamber에서 정량적으로 혼합하여 실험조건으로 설정된 농도까지 희석된 H₂S를 칼럼 상부로부터 주입하였다. 칼럼은 유리로 제작되었으며 칼럼의 크기는 직경 4.8cm, 높이 85cm이며 60cm의 높이로 충전재료를 충전하였다. 충전층을 15cm 간격으로 나누어 sampling port를 장착하였으며 칼럼의 하단부 출구에는 유출수(drainage)를 받을 수 있도록 제작하였고, 칼럼 상단부와 하단부에서 마노메타를 이용하여 유입 풍량 증가에 따른 칼럼 내부의 압력손실을 측정하였다.

2.2 충전재료의 특성

본 실험에 사용된 충전재료는 환경공학기술개발사업(G-7 Project)의 일환으로 우송대와 동양물산기업(주)에서 개발한 미생물탈취용 담체로서, fly ash와 diatomite를 주원료로 하여 제조한 다공성 무기세라믹 담체이다. 표 1은 세라믹 담체의 물리적 특성을 나타낸 것으로, 20 μm의 미세기공과 100 μm의 거대기공이 동시에 분포하여 미생물의 부착 및 서식이 용이하며 흡수율이 높아 미생물이 생육하기

Table 1. Physical characteristics of packing material used.

Physical characteristics	Volumetric density (g/cm ³)	Apparent density (g/cm ³)	Porosity (%)	Water holding capacity (%)
Packing material	0.68	2.84	73.79	71.07

에 양호한 조건을 가지고 있다. 또한 평균 압축강도가 19.84 kg/cm²로서 압밀에 의해 잘 파쇄되지 않는 특징을 가지고 있다(환경부, 1997).

2.3 사용된 탈취미생물 균주

탈취미생물 균주는 pH 6.8인 thiosulfate 배지 (Na₂S₂O₃ · 5H₂O 8 g/L, KH₂PO₄ 2 g/L, K₂HPO₄ 2 g/L, NH₄Cl 0.4 g/L, MgCl₂ · 7H₂O 0.2 g/L, FeSO₄ · 7H₂O 0.01 g/L, Agar 15 g/L)를 이용하여 활성슬러지로부터 분리하여 배양한 황산화 균주 (이하 "Strain TAS"로 명기)를 이용하였으며, 재료에 식중한 미생물 양은 3.3 × 10⁷ CFU/g-dry material이었다.

2.4 실험장치 운전조건

미생물을 부착후 공탑속도는 (Space Velocity, SV) 50~250 h⁻¹, 유입선속도 (Linear Velocity, LV)는 8.3~41.5 mm/sec, 공탑체류시간 (Empty Bed Retention Time, EBRT)은 72~14 sec, H₂S 유입농도는 109~3,841 ppm_v 범위에서 운전하였다. 온도는 상온 (18~25°C)에서 실시하였다. 칼럼내부의 함수율은 1 일 2회씩 200 ml의 증류수를 살수하여 평균 41~45%를 유지하였으며, 증류수 이외에 별도의 영양원은 넣어주지 않았다. 이때 발생하는 drainage는 SO₄²⁻와 pH 분석에 이용하였다. 실험장치의 압력손실 측정은 살수 후 30분이 경과한 상태에서 측정하였다.

2.5 시료의 분석

H₂S의 분석은 각 sampling port에서 gastight syringe (Hamilton Co., USA)를 이용하여 H₂S가스를 채취하였으며, 채취된 시료는 FPD (Flame Photometric Detector)가 부착된 Gas Chromatograph (GC-17A, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였다. 분석용칼럼은 β, β'-oxidopionitriebo 60~80 mesh chromosorb w가 충전된 glass column을 사용하였다. GC 분석조건으로서 carrier gas인 N₂ flow rate은 50 ml/min, H₂ gas pressure는 60 kPa, 분석온도로서 column temp. 70°C, injector temp. 150°C, detector temp. 150

°C로 설정하였다. Drainage의 SO₄²⁻ 분석은 Dionex 2000I AS4A Column이 부착된 Ion Chromatography (Dionex Co.)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 운전기간의 경과에 따른 제거율 변화 및 순치기간에 대한 검토

그림 2는 SV를 50~250 h⁻¹까지 변화시키면서 유입농도 109~3,841 ppm_v, 유입부하량 0.098~17.16 g-S/kg-dry packing material/day의 범위에서 52일간 운전한 결과를 나타낸 것이다. Strain TAS를 식중한 다공성 세라믹 biofilter는 유입농도 Ci 100 ppm_v 이하에서는 SV 50~250 h⁻¹에서 운전초기부터 일정한 순치기간이 필요없이 90% 이상의 높은 제거효율을 나타내었다. 그러나 SV 150 h⁻¹ 공탑체류시간 24 sec으로 유입농도를 증가시킨 경우에는 약 3일 정도의 순치기간이 필요한 것으로 나타났으며, 고농도의 황화수소가 유입될 때에는 SV의 증가에 따라 pH의 저하와 함께 제거효율이 큰 폭으로 감소되었다.

한편 Biofilter는 일정기간 유입되는 기질공급이 중단되어도 제거효율이 저하되지 않는 장점이 있다고 보고되고 있는데 (Yang and Allen, 1994), 본 연구에서도 운전시작 30일부터 36일까지 7일간 운전을 중단하였다가 운전을 재개하였을 때 제거효율이 95% 이상 회복되었다.

3.2 순간 유입농도 변동에 대한 제거능 및 안정성 검토

순간 유입부하의 변동에 대한 무기세라믹 biofilter의 대응력을 평가하기 위해 그림 2에 나타낸 바와 같이 운전기간 동안 3번의 spike test를 실시하였다.

Run 1단계 SV 50 h⁻¹, 평균유입농도 500 ppm_v 이하에서 짧은 시간 동안 농도를 3,500 ppm_v까지 증가시킨 1차 spike test에서 제거율은 99%에서 약간 저하되었으나 93% 이상의 안정적인 제거능을 나타내

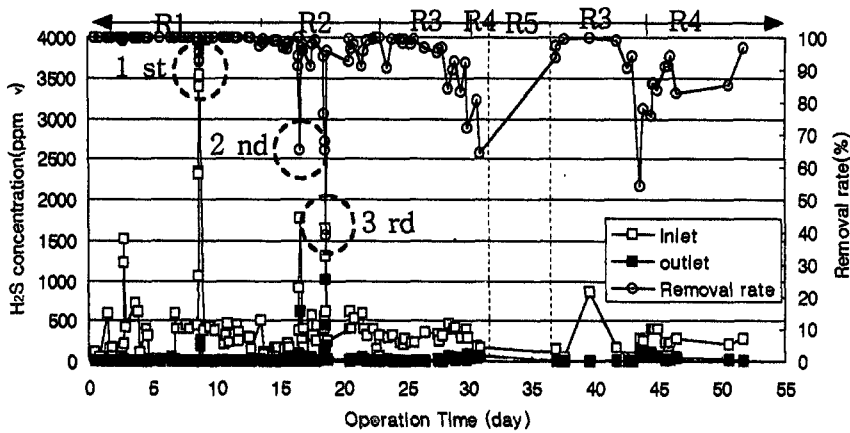


Fig. 2. H₂S removal efficiency of lab.-scale ceramic biofilter.

#Run 1 SV 50 h⁻¹, #Run 2 SV 100 h⁻¹, #Run 3 SV 150 h⁻¹, #Run 4 SV 250 h⁻¹, #Run 5: run off period (7day), #1: 1st spike test, #2: 2nd spike test, #3: 3rd spike test

었다. SV 100 h⁻¹, 평균유입농도 400 ppm_v으로 운전된 Run 2 단계에서 순간 유입부하량을 평상시 운전 조건보다 3배 이상 주입한 2차 및 3차 spike test에서는 제거율이 50% 이하까지 감소하는 매우 낮은 제거능을 나타내었다. 이는 2차, 3차 spike test의 경우 1차 spike test와는 달리 SV가 증가되어 황화수소와 미생물이 접촉할 수 있는 체류시간이 반감된 상태에서 순간유입부하량이 최대제거부하량을 초과하여 유입되었기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 유입농도를 정상 실험조건으로 유지하였을 때에는 제거율이 곧 90% 이상으로 회복되어, 순간적인 충격부하 (shock load)에 대해서도 비교적 안정적인 회복능을 나타내었다.

3.3 pH 저하에 따른 제거율 변화

Biofilter에 서식하는 황산화 균주는 유입되는 H₂S를 최종적으로 SO₄²⁻ 형태로 산화시키며 이로 인하여 pH의 저하가 유발되고 결과적으로 biofilter의 제거능을 저하시키는 주요 원인이 된다. Peat biofilter를 이용한 Wada *et al.* (1986)의 연구에 의하면 SO₄²⁻의 농도 증가는 pH와 미생물 생균수의 감소를 초래하는데, pH 3.0 이하부터는 미생물 균수의 급격한 감소와 함께 제거효율도 급격한 감소를 나타냈다고 보고하고 있고, 퇴비를 증진재료로 이용한 Yang과 Allen (1994) 연구 역시 pH 3.2까지는 제

효율이 유지되었으나 pH 3.0 이하에서는 제거효율이 급격히 낮아지는 결과를 나타냈다고 한다. 그림 3은 본 실험에서의 운전기간내 pH 변화와 제거율과의 관계를 나타낸 것이다. 본 연구에서 Strain TAS 균주를 접종시킨 컬럼의 초기 pH는 3.28로서 Yang과 Allen (1994)의 연구에서 제거효율이 낮아지기 전의 pH조건에서부터 운전을 시작하였다. 본 연구 역시 운전기간의 경과와 함께 pH는 지속적으로 감소되었으나 pH 2.8까지는 제거율은 저하되지 않았다. 그러나 그 이하의 pH에서는 제거율도 감소하기 시작하여 pH 2.6 정도에서는 제거율이 62%까지 감소하였다. 7일간 H₂S의 공급을 중단시키고 칼럼 상부로부터 주기적으로 물을 공급하여 축적된 SO₄²⁻를 세정시킨 결과 pH는 3까지 상승하였으나 다시 황화수소 가스를 공급하면서 pH는 다시 저하되었다. 실험이 계속되면서 pH를 2.8 이상으로 유지하였을 때에는 그림 3에서의 같이 SV 250 h⁻¹에서도 점차 회복하는 것으로 나타났는데, 이러한 실험결과로부터 본 연구에 사용된 무기세라믹 담체는 한계 pH가 3.0이었던 기존의 유기성 탈취재료 보다는 pH에 대한 완충능이 다소 우수한 것으로 나타났다. 그러나 drainage의 SO₄²⁻의 농도는 약 120 m mol까지 증가되었으며 이에 따른 pH 저하 및 제거율의 감소현상이 뚜렷하였으므로 안정적인 제거능 확보를 위해서는 pH control 방안에 대한 연구가 필요하다.

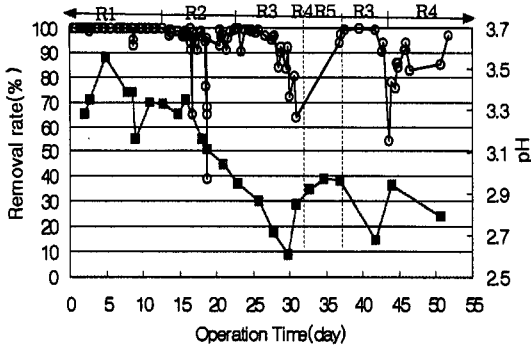


Fig. 3. Relationship between removal rate and pH changes during operation period.
 ○, Removal rate; ■, pH; #Run 1 SV 50 h⁻¹, #Run 2 SV 100 h⁻¹, #Run 3 SV 150 h⁻¹, #Run 4 SV 250 h⁻¹, #Run 5: run off period (7day)

것으로 생각되며, 이에 대한 방안으로 기존의 연구에서는 주기적인 세정에 의한 SO₄²⁻ 제거를 제안하고 있다 (Chung *et al.*, 1996; Yang and Allen, 1994; Wada *et al.*, 1986).

3.3 유입풍량 및 유입농도 증가에 따른 제거율 변화

그림 4는 공탑속도(SV)별 유입농도의 증가에 따른 제거율 변화를 나타낸 것이다. 그림 4에서와 같이 유입농도 100 ppm_v까지는 SV 250 h⁻¹까지 90% 이상의 제거효율을 나타내었다. 그러나 그 이상의 유입농도에서는 SV 증가에 따라 제거율의 감소폭이 더 크게 나타났는데 이는 높은 농도의 황화수소 가스유입과 함께 유입풍량 역시 커짐에 따라 유입되는 부하량이 biofilter의 최대제거부하량을 훨씬 상회하기 때문인 것으로 생각된다. 한편 단위체적당 유입부하량 (volumetric load)는 유입농도 Ci와 SV의 곱으로 나타낼 수 있는데, 그림 4의 실험결과로 볼 때 동일한 부하조건에서는 유입풍량의 증가보다 유입농도의 증가가 제거율에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한 예로서 동일한 부하조건 즉 SV 150 h⁻¹, Ci 250 ppm_v과 SV 250 h⁻¹, Ci 150 ppm_v에서의 제거율을 비교해 보면 각각 69%와 86%를 나타내고 있으며 SV 50 h⁻¹, Ci 400 ppm_v과 SV 250 h⁻¹, Ci 80 ppm_v 역시 동일한 결과를 보이고 있다.

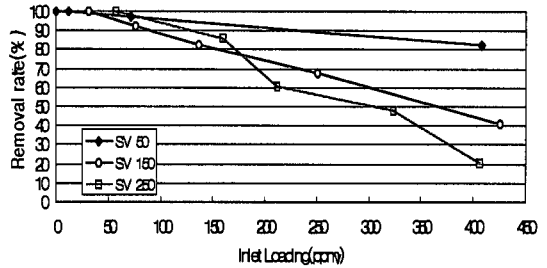


Fig. 4. H₂S removal rate at various space velocities and concentrations of inlet gas.

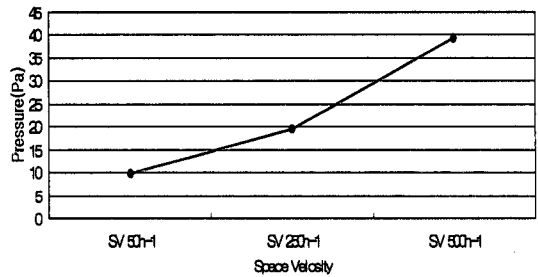


Fig. 5. Changes of pressure drop according to space velocities.

3.4 압력손실에 대한 검토

탈취장치내 탈취용 담체에 의한 압력손실은 송풍기의 동력비 증가뿐만 아니라 유입선속도를 제한하게 되므로 biofilter에서는 매우 중요한 운전요소가 된다. 전술한 바와 같이 토양재료를 대체하여 많이 사용되어온 peat moss 등 유기성재료는 자체분해에 의한 압밀로 인해 압력손실이 증가되므로 이러한 문제점을 보완하기 위해 기존의 연구에서는 세라믹, 플라스틱, wood chip 등을 혼합하여 40~80%의 공극율을 유지할 것을 권고하고 있으며 (Van Lith *et al.*, 1997), 또한 압력손실이 2.5 kPa 이상일 경우에는 충전재료를 재배치하거나 교체할 것을 권고하고 있다 (Yang and Allen, 1994). 본 연구에서 사용한 다공성 무기세라믹 담체의 경우 그림 6에서와 같이 유입풍량이 증가됨에 따라 압력손실은 SV치와 거의 비례하여 증가되었으나, SV 500 h⁻¹ (9 L/min)까지 상승시켜도 측정된 압력손실치는 39.2 Pa로서 400 Pa 전후의 유기성 탈취재료에 비해서는 매우 우수한 것으로 나타났다. 일반적으로 현장에서 사용되고 있

는 biofilter의 SV는 주로 100~250 h⁻¹의 범위에서 운전되고 있으므로 본 연구에서 개발한 다공성 세라믹 biofilter의 경우 현장에서 압력손실로 인한 문제점은 크게 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

3.5 최대제거부하량에 대한 검토

최대제거부하량(maximum elimination capacity)은 미생물이 저해를 받지 않고 제거할 수 있는 유입부하량을 말하며 이는 biofilter 설계 및 운전에서 가장 중요한 요소 중의 하나이다.

실험기간중 황화수소 약취의 유입 및 제거부하량은 다음의 공식과 같이 유입풍량, 입구와 출구에서의 황화수소 농도, 반응장치의 온도 등을 이용하여 산출할 수 있다.

$$EC = \left(\frac{Q \times C_i \times \frac{M_w}{22.4l} \times \frac{273}{273+t}}{W} \right) - \left(\frac{Q \times C_o \times \frac{M_w}{22.4l} \times \frac{273}{273+t}}{W} \right)$$

여기서, EC : 제거부하량(g-H₂S/kg-dry packing material/day)

Q : 유량(m³/day)

C_i : 유입농도(μl/l)

C_o : 유출농도(μl/l)

M_w : 분자량(g)

t : 온도(°C)

W : 충전무게(kg)

그림 6은 상기 공식을 이용하여 산출한 실험기간중 황화수소 유입부하량에 대한 세라믹 biofilter의

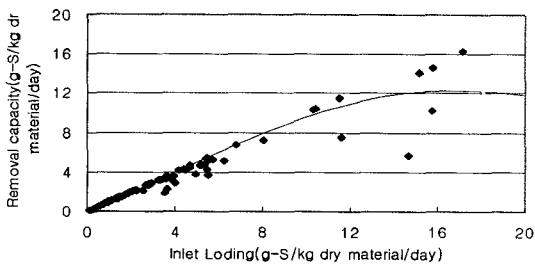


Fig. 6. H₂S elimination capacity of lab.-scale ceramic biofilter used in this study.

제거부하량을 나타낸 것으로, 실험기간중 최대 유입부하량인 16.35 g-S/kg-dry packing material/day까지 전량 제거가 가능한 것으로 나타났다. 그러나 유입부하량이 10.5 g-S/kg-dry packing material/day부터는 제거부하량이 불안정한 상태를 나타내고 있어, 본 연구에서 사용한 무기세라믹 biofilter의 적정 제거부하량은 10.5 g-S/kg-dry packing material/day 정도인 것으로 판단된다.

한편 타 연구사례와 비교해 보면 유기성 재료인 peat moss를 이용하였던 Furusawa(1986)와 Yang과 Allen(1994)는 각 탈취장치의 적정제거부하량에 대하여 0.44 g-S/kg-dry packing material/day와 8.13 g-S/kg-dry packing material/day으로 보고하고 있어, 본 연구에서 사용된 무기세라믹 탈취재료가 peat moss 등 유기탈취재료보다 약 1.3~24배 이상 향상된 제거능을 가지고 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

탈취미생물원으로 황산화 균주인 Strain TAS를 식종한 다공성 무기세라믹 biofilter를 이용하여 H₂S 가스 제거실험을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 다공성 무기세라믹 biofilter는 유입농도 100 ppmv 이하인 경우 SV 250 h⁻¹, EBRT 14 sec까지는 초기운전부터 일정한 순치기간의 필요없이 98%이상의 처리가 가능한 것으로 나타났으며, 순간유입농도의 증가에 대해서도 안정적인 제거능을 보였다.

2. 무기세라믹 미생물담체는 타 유기성 탈취재료에 비해 pH 완충능이 다소 높기는 하나 H₂S의 산화생성물인 SO₄²⁻의 축적에 의해 pH 2.6 이하에서는 제거율이 급감되므로 안정적인 제거를 위해 별도의 pH control 방안이 필요하다.

3. 유입농도 증가에 따른 제거율은 유입풍량이 증가할수록 급격히 감소하였으며, 동일한 유입부하조건에서 유입풍량보다는 유입농도의 크기가 제거율에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4. 실험실에서 측정된 무기세라믹 탈취재료에 의한 압력손실은 SV 500 h⁻¹ (9 L/min)에서 39.2 Pa로서 타 유기탈취재료에 비해 매우 낮은 것으로 나타나, 압력손실에 의한 동력비 증가 등 경제성 면에서 훨씬 유리한 것으로 판단된다.

5. 실험결과로 산출된 무기세라믹 biofilter의 최대 제거부하량은 16.35 g-S/kg-dry packing material/day 정도이며, 적정처리부하량은 10.5 g-S/kg-dry packing material/day 정도인 것으로 판단된다.

감 사

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구(96-0601-06-01-3)의 일환으로 수행된 것이며, 이 연구를 위해 연구비를 지원해 주신 한국과학재단과 탈취재료를 지원해 주신 동양물산기업(주) 중앙연구소에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- 이은영, 조경숙, 류희욱, 배무(1998) 황화수소와 암모니아의 혼합 악취제거를 위한 황산화세균의 분리 및 특성, 한국산업미생물학회 춘계학술발표논문집, 281.
- 환경부(1997) 악취공해저감을 위한 생물학적 유허계 혼합 취기물질 제거기술 개발, G-7 1차년도 보고서, 79.
- Cho, K.S., M. Hirai, and M. Shoda(1991) Degradation characteristics of hydrogen sulfide, methanethiol, dimethyl sulfide, and dimethyl disulfide by *Thiobacillus thioeparus* DW44 isolated from peat biofilter, J. of Ferment. and Bioeng. 71(6), 384-389.
- Chung, Y.C., C. Huang, and C.T. Tseng (1996) Biodegradation of hydrogen sulfide by a laboratory-scale immobilized *Pseudomonas putida* CH11 biofilter, Biotechnol. Prog., 12, 773-778.
- Chung, Y.C., C. Huang, and C.T. Tseng (1996) Operation optimization of *Thiobacillus thioeparus* CH11 biofilter for hydrogen sulfide removal, J. of Biotechnol. 52, 31-38.
- Frusawa, N., I. Togashi, M. Hirai, M. Shoda, and H. Kubota (1984) Removal of hydrogen sulfide by a biofilter with fibrous peat, J. of Ferment. Technol., 62(6), 589-594.
- Leson, G. and A.M. Winer(1991) Biofiltration: An innovative air pollution control technology for VOC emissions. J. of Air & Waste Manage. Assoc., 41, 1045-10534.
- Hirai, M., M. Ohtake, and M. Shoda (1990) Removal kinetics of hydrogen sulfide, methanethiol and dimethyl sulfide by peat biofilters, J. of Ferment. and Bioeng. 70(5), 334-339.
- Kosteltz, A. and A. Finkelstein (1996) What are the 'real opportunities' in biological gas cleaning for North America, Paper # 96-RA87B.02, in Proceeding for the 89th Annual Meeting & Exhibition of Air & Manage. Asscc. Nashville, Tennessee.
- Park, S.J., K.S. Cho, M. Hirai, and M. Shoda (1993) Removability of malodorous gases from a night soil treatment plant by a pilot-scale peat biofilter inoculated with *Thiobacillus thioeparus* DW 44, J. of Ferment. and Bioeng. 76(1), 55-59.
- Tang, H.M. and S.J. Hwang (1996) Waste gas treatment in biofilters, J. of Air & Waste Manage. Assoc., 46, 349-354.
- Yang, Y., E.R. Allen (1994) Biofiltration control of hydrogen sulfide. 1. Design and operation parameters, J. of Air & Waste Manage. Assoc., 44, 863-868.
- Van Lith, C., G. Leson, and R. Michelsen (1997) Evaluating design options for biofilters, J. of Air & Waste Manage. Assoc., 47, 37-48.
- Wada, A., M. Shoda, H. Kubota, and T. Kobayashi (1986) Characteristics of H₂S oxidizing bacteria inhibiting a peat biofilter, J. Ferment. Technol., 64(2), 161-167.
- Zhang, L., M. Hirai, and M. Shoda (1991) Removal kinetics of dimethyl sulfide, methanethiol and hydrogen sulfide by *Hyphomicrobium* sp. 155 isolated from peat biofilters, J. of Ferment. and Bioeng. 72(5), 392-396.