

지렁이 분변토를 접종한 세라믹 바이오필터의 암모니아 제거에 미치는 온도의 영향

조 경 숙

이화여자대학교 환경학과

Effect of Temperature on Removal of Ammonia in the Ceramic Biofilter Inoculated with Earthworm Casts

Cho, Kyung-Suk

Dept. of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

Abstract

Removal of ammonia using the porous ceramic biofilter inoculated with earthworm casts was characterized. By assuming a plug air flow in the biofilter and applying the Michaelis-Menten equation, the maximum removal rate of NH_3 was $280.7 \text{ g-N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ($18.0 \text{ g-N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) at 30°C . NH_3 removal rate was increased as temperature increases from 15°C to 35°C . The maximum removal rate was $285.8 \text{ g-N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ($18.8 \text{ g-N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) at 35°C . At 15°C , the NH_3 removal rate was $122.8 \text{ g-N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ($8.1 \text{ g-N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$). When 210 ppm NH_3 was supplied to the biofilter at space velocity of 220 h^{-1} , the removal efficiency of NH_3 at 15, 25, 30 and 35°C was 80, 90, 95, and 96%, respectively. The removal rate of the ceramic biofilter was 3 to 15 times higher than other biofilters comparing the removal efficiency of NH_3 per unit volume of carrier. This result indicates that earthworm casts and porous ceramics are very good inoculum source and carrier, respectively, for the NH_3 -degrading biofilter.

Keyword: Biofilter, Ammonia, Earthworm casts, Porous ceramics, Air pollution

I. 서 론

암모니아는 분뇨처리장, 하·폐수처리장, 비료 제조공장, 주물공장, 식품가공공장, 제지공장 및 각종화학공장 등에서 발생하는 악취의 주성분이

다.¹⁾ 암모니아는 무색의 최루성 가스로 부식성이 강한 물질로, 흡입 시 미각상실, 메스꺼움, 구토, 언어장애, 흉통, 호흡곤란, 두통, 폐손상 및 장기 흡입 시 소화장애를 야기 시킨다.¹⁾ 암모니아 악취는 주로 약액세정법, 연소법, 활성탄 흡착법 등

에 의해 처리되고 있으나,²⁻⁴⁾ 최근 들어서는 암모니아를 아질산이나 질산으로 산화할 수 있는 질화세균을 이용한 생물학적 탈취방법을 이용한 암모니아 제거 기술이 활발히 개발되고 있다.⁵⁻⁸⁾

독립 영양 세균인 질화세균은 증식 속도가 매우 느리고, 축적된 암모니아 혹은 아질산염에 의해 질화세균의 증식이 저해 받는다.⁹⁾ 공학적으로 질화세균을 활용하는데 있어 이러한 균주의 단점을 해결하기 위하여, 질화세균을 biofilm에 고정화하거나,^{10,11)} gel bead 등에 인공적으로 고정화하는 방법이 개발되어왔다.^{12,13)} 탈취기술 분야에서는 질화세균을 적절한 담체에 고정화하여 폐가스 중의 암모니아 악취를 제거하는 biofiltration 기술이 유망한 방법으로 인정받고 있다.^{6,7,14)}

Biofiltration에 있어서 탈취효율을 좌우하는 주요 인자는 담체와 탈취미생물이다. 좋은 담체의 조건은 비 표면적이 넓어 미생물의 고정화능이 우수해야 하며 보수성과 내구성이 좋아야 한다.¹⁵⁾ 담체의 종류는 크게 유기성 담체와 무기성 담체로 나눌 수 있다. 유기성 담체로 왕겨, 토탄, 퇴비 및 톱밥 등이 주로 사용되고 있다.¹⁶⁻²¹⁾ 이러한 유기성 담체는 보습성이 뛰어난 반면, 장기간 운전 시에 분해되거나 압밀현상이 발생하는 문제점이 있다.²²⁾ 무기성 담체로 입자성 활성탄, 활성탄 섬유, polystyrene, perlite 및 다공성 세라믹 등이 개발되어 사용되고 있다.^{15,23,24)} 무기성 담체는 유기성 담체에 비해 가격이 비싸기는 하지만, 통기성이 우수하고 내구성이 좋기 때문에 장기간 사용이 가능한 특성을 가지고 있다. 그러므로, 최근 들어서는 무기성 담체를 이용한 biofilter의 개발이 활발히 진행되고 있다.

바이오필터의 탈취 효율을 향상시키기 위해서는 우수 미생물 균주 개발이 요구된다. 탈취 미생물원으로 슬러지나 토양 등을 많이 이용되어 왔으며,^{5,14)} 토양생물인 지렁이가 배설하는 분변토도 활용되고 있다.^{25,26)} 지렁이 분변토는 지렁이 체내에서 분비된 각종 효소, 광물질, 미처 소화되지

않은 먹이 등이 혼합된 매우 안정된 물질로, 비 표면적 및 공극률이 커서 악취에 대한 흡착능이 뛰어나 우수한 탈취 효과를 나타낸다고 알려져 있다.²⁵⁾ 또한, 분변토는 보수성이 좋고 다양한 미생물이 존재하며, 실제적으로 황산화소를 효율적으로 분해하는 무색 황산화세균이 분리된 적이 있다.²⁶⁾

본 연구에서는 암모니아를 제거하기 위한 바이오필터를 개발하기 위해, 지렁이 분변토를 탈취 미생물원으로, 대표적인 무기성 담체인 다공성 세라믹을 담체로 이용한 바이오필터에 의한 암모니아 제거 특성과, 제거속도에 미치는 온도의 영향을 조사하였다. 또한, 암모니아 제거에 관한 속도론적 해석을 통하여 지렁이 분변토를 접종한 다공성 세라믹 바이오필터의 성능을 기존의 암모니아 제거용 바이오필터의 성능과 비교하였다.

II. 연구방법

1. 암모니아 분해 세균을 고정화한 바이오필터에 의한 암모니아 제거 실험

서울 근교 하수처리장에서 탈취용으로 사용되고 있는 지렁이 분변토를 접종원으로 사용하였다. 지렁이 분변토 50g(습중량)를 무기염배지 500ml에 현탁한 후에 250 rpm에서 30분간 교반하여 상등액을 취하였다. 이 상등액을 8,000rpm에서 40분간 원심 분리하여 균체를 회수하였다. 회수된 균체를 40ml의 무기염배지에 현탁하여 만든 균체 농축액을 건조시킨 다공성 세라믹 담체(평균입자 크기: 9 mm)와 혼합하였다. 이와 같이 암모니아 분해 세균을 고정화시킨 다공성 세라믹 담체를 유리칼럼(46mm Φ ×300mm L)에 충전하였다. 바이오필터의 충전조건을 Table 1에 나타내었는데, 충전부피 및 밀도는 각각 274 ml와 431g/L이었다.

공간속도(담체의 충전부피당 바이오필터에 주입한 암모니아 가스의 유량) 56h⁻¹인 조건에서

Table 1. Experimental conditions.

Packing conditions	
Packing material	Porous ceramics
Packing dry weight (g)	118
Packing volume (ml)	274
Packing density (g · L ⁻¹)	431
Packing height (cm)	16.5
Acclimation conditions	
Space velocity(h ⁻¹)	56
Inlet NH ₃ concentration(ppm)	60-590

60ppm의 암모니아 가스를 지렁이 분변토를 접종한 다공성 세라믹 바이오필터에 주입하였다. 바이오필터의 출구가스 중의 암모니아 농도를 매일 측정하여 출구농도가 일정해지게 되면 암모니아의 입구농도를 170ppm으로 높였다. 이러한 방식으로 입구 암모니아 농도를 320, 590ppm까지 순차적으로 높여 바이오필터내의 암모니아 분해 세균이 정상 상태(steady state)에 도달하게 하였다.

정상상태에 도달한 바이오필터의 암모니아 제거 속도에 미치는 온도의 영향을 조사하기 위해 바이오필터를 항온조에 담구어 실험을 수행하였다. 항온조의 온도는 15, 25, 30 및 35°C로 설정하였다. 각각의 온도에서의 암모니아 제거 속도를 구하기 위해 바이오필터에 유입되는 암모니아의 농도와 공간속도를 100-700 ppm과 50-500 h⁻¹의 범위에서 부하량을 변화시키면서 암모니아 제거 특성을 조사하였다.

암모니아 가스 실린더(Hana co., Korea)로부터 100,000ppm의 암모니아를 mixing chamber에서 공기로 희석하여 필요로 하는 농도로 조절하였다. 또한, 실험이 진행되는 동안 담체의 습도를 일정하게 유지하기 위해 1일 1~2회씩 약 50ml의 멸균수를 분사해 주었다.

2. 분석방법

바이오필터의 입구와 출구 가스 중의 암모니아

농도를 측정하기 위해 0.01N H₂SO₄ 용액을 100ml 넣은 흡수병에 가스를 10분간 흡수시켰다. 이 흡수액 중의NH₄⁺ 농도는 IC Pak-TM Cation M/D(3.9mm Φ×150mm L, Waters, U.S.A.) 컬럼을 이용하여 이온 크로마토그래피(Waters 510, U.S.A.)로 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 지렁이 분변토를 접종한 바이오필터의 암모니아 제거 특성

지렁이 분변토를 접종한 세라믹 바이오필터에 공간속도 56 h⁻¹인 조건에서 60-590 ppm의 암모니아 가스를 주입하였을 때 바이오필터에 의한 암모니아 제거 특성을 Fig. 1에 도시하였다.

암모니아의 유입농도를 증가시킨 직후 몇일 동안에는 출구가스 중에 암모니아가 검출되었으나, 시간이 경과함에 따라 0.1 ppm 이하로 감소하였다. 한편, 멸균한 다공성 세라믹 담체를 유리 컬

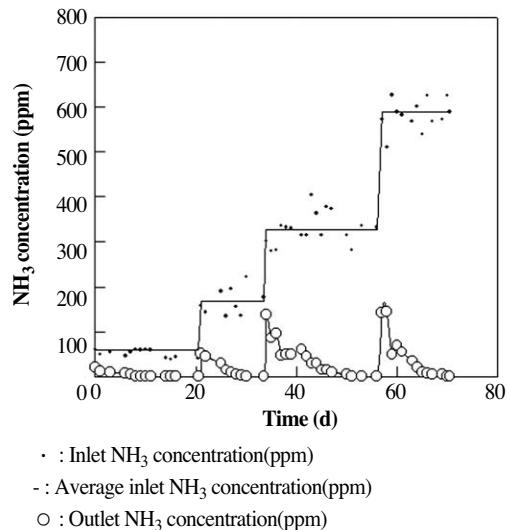


Fig. 1. Time course of NH₃ concentration on the biofilter inoculated with earthworm casts.

럼에 충전하여 100 ppm의 암모니아를 공간속도 56 h⁻¹의 조건에서 주입하였을 때 약 61시간만에 입구 암모니아 농도와 출구 농도가 같아지는 파괴점에 도달하였다. 즉, Fig. 1에서 보인 암모니아 제거는 다공성 세라믹 담체에 의한 물리·화학적 제거 반응이 아닌 지렁이 분변토 유래의 암모니아 분해 세균에 의한 생물학적 반응의 결과임을 알 수 있었다. 또한, 바이오필터를 멸균수로 세정한 후, 세정수를 이온크로마토그래피로 분석한 결과, 아질산염과 질산염이 검출되었다. 따라서, 지렁이 분변토를 접종한 바이오필터에 의한 암모니아의 제거 반응은 암모니아 산화세균과 아질산염 산화세균의 공동작용에 의한 반응임을 알 수 있었다.

2. 암모니아 제거의 속도론적 해석

지렁이 분변토를 접종한 세라믹 바이오필터에 의한 암모니아 제거속도는 다음과 같은 방법에 의해 해석하였다. 우선, 바이오필터내의 암모니아 가스의 흐름을 plug-flow로 가정하고, Michaelis-Menten식을 적용하면 아래의 식을 얻을 수 있다.^{16,17,27}

$$-\frac{dC}{dl} = \frac{V_m \cdot C}{K_s + C} \cdot \frac{S_a}{F} \cdot \alpha = \frac{V_m \cdot C}{K_s + C} \cdot \frac{1}{L \cdot SV} \cdot \alpha \quad (1)$$

여기에서 C는 악취가스의 농도(ppm), l은 컬럼의 길이(m), V_m는 최대제거속도(g-N · kg-carrier · h⁻¹), K_s는 포화상수(ppm), S_a은 바이오필터의 단면적(m²), F는 가스의 부피유속(m³ · h⁻¹), L은 담체의 충전 높이(m), SV는 공간속도(h⁻¹), α는 환산 계수(kg-carrier · g-N⁻¹)이다. α는 다음의 (2)의 식을 이용하여 농도의 단위를 ppm으로 전환하는데 이용하였다.

$$\alpha = \frac{(22.4 \cdot \frac{273+T}{273}) \cdot 10^6}{MW \cdot 1000} \cdot \frac{W}{V} \quad (2)$$

여기에서 T(°C)는 온도, V(m³)는 담체의 충전

부피, W(kg)는 충전 담체의 질량, MW는 암모니아의 분자량이다.

l=0일 때 C=C_o이고, l=L일 때 C=C_e인 경계 조건으로 부터 식(1)을 적분하여 식(3)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\alpha}{(C_o - C_e)SV} = \frac{K_s}{V_m} \cdot \frac{1}{(C_o - C_e)} + \frac{1}{V_m} \ln \frac{C_o}{C_e} \quad (3)$$

여기에서 C_o(ppm)와 C_e(ppm)는 각각 바이오필터의 입구와 출구에서의 암모니아 농도이다.

식(3)을 간결하게 정리하여 최종적으로 식 (4)을 얻을 수 있다.

$$\frac{C_{ln}}{R} = \frac{C_{ln}}{V_m} + \frac{K_s}{V_m} \quad (4)$$

여기에서 R = $\frac{SV(C_o - C_e)}{\alpha}$ 이고, C_{ln} = S = $\frac{C_o - C_e}{\ln \frac{C_o}{C_e}}$ 이다.

식(4)을 $\frac{C_{ln}}{R}$ 과 C_{ln}의 Hanes-Wolf plot으로 부터 V_m과 K_s를 각각 구할 수 있다.

30°C에서 지렁이 분변토를 고정화한 바이오필터의 최대 암모니아 제거속도를 상기와 같은 방법에 의해 해석한 결과를 Fig. 2에 도시하였다. C_{ln}/R과 C_{ln}의 그래프의 기울기로부터 구한 암모니아의 최대 제거속도는 280.7 g-N · m⁻³ · h⁻¹(18.0

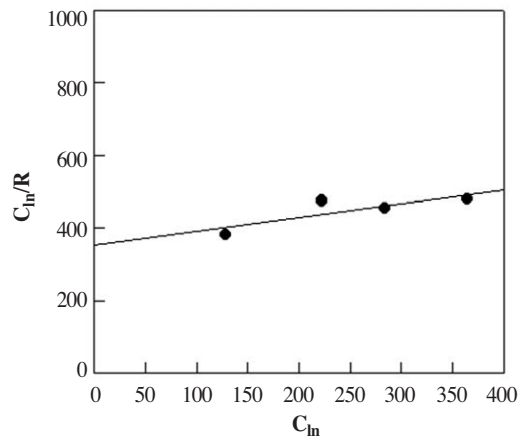


Fig. 2. Kinetic analysis of NH₃ removal by the biofilter inoculated with earthworm casts at 30°C.

g-N · kg⁻¹ · d⁻¹)이었다.

3. 암모니아 제거 속도에 미치는 온도의 영향

15, 25, 30 및 35°C 조건에서 측정된 지렁이 분변토를 고정화한 바이오필터의 최대 암모니아 제거속도를 Table 2에 제시하였다. 온도가 증가할수록 암모니아의 제거속도도 증가하였는데, 35°C에서 최대값(285.8 g-N · m⁻³ · h⁻¹, 18.8 g-N · kg⁻¹ · d⁻¹)을 얻을 수 있었다. 15°C에서는 암모니아 제거 속도는 낮아졌지만, 최대값의 약 43%인 122.8 g-N · m⁻³ · h⁻¹(8.1 g-N · kg⁻¹ · d⁻¹)의 제거 속도를 얻을 수 있었다.

210 ppm과 680 ppm의 암모니아 가스를 공간속도 220 h⁻¹ 조건으로 바이오필터에 주입하였을 때, 15-35°C의 온도 조건에서 얻은 암모니아 제거 효율을 Fig. 3에 도시하였다. 210 ppm의 암모니아를 바이오필터에 주입하였을 때 15°C에서는 80%의 제거효율을 얻을 수 있었으나, 25, 30 및 35°C에서는 각각 90, 95, 96%의 제거효율을 얻을 수 있었다. 즉, 온도가 증가할수록 암모니아 제거 효율도 증가하였다. 680 ppm의 고농도 암모니아를 주입하였을 경우에는 210 ppm을 주입하였을 때보다 약간 낮은 제거효율을 얻을 수 있었다.

본 연구 결과, 비록 최대 암모니아 제거효율은 25-35°C에서 얻을 수 있지만, 15°C의 저온에서 암모니아 제거능이 심각하게 저하되지 않음을 알 수 있었다.

Chung 등²⁵⁾은 중속영양세균인 *Arthrobacter*

Table 2. Maximum removal rate of NH₃ by the biofilter inoculated with earthworm casts at 15, 25, 30 and 35°C.

Temperature (°C)	Maximum removal rate	
	g-N · m ⁻³ · h ⁻¹	g-N · kg ⁻¹ · d ⁻¹
15	122.8	8.1
25	258.4	17.0
30	280.7	18.0
35	285.8	18.8

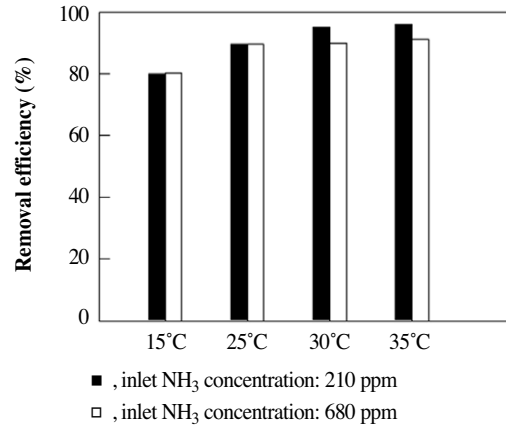


Fig. 3. Effect of temperature on NH₃ removal efficiency by the biofilter inoculated with earthworm casts (SV=220 h⁻¹).

oxydans CH8을 고정화한 바이오필터를 이용하여 암모니아 제거효율에 미치는 온도의 영향을 조사한 결과, 본 연구의 결과와 유사하게 20-35°C에서 가장 높은 제거효율을 얻을 수 있었다. 또한, 이들은 40°C 이상의 고온 조건에서 암모니아 제거 효율에 미치는 온도의 영향을 조사한 결과, 온도가 높아질수록 제거능력이 급격하게 감소하였다. 중온성 질화세균의 암모니아 분해에 중추적인 역할을 하는 대부분의 효소는 40°C 이상부터 활성이 저하 되기 때문에 암모니아 분해능이 급격하게 저해 받는 것으로 사료된다.²⁹⁾

4. 암모니아 제거 속도 비교

30°C 온도 조건에서 지렁이 분변토를 접종한 바이오필터에 의한 암모니아 최대제거속도를 기존의 타연구자의 결과와 비교한 결과를 Table 3에 나타내었다.

Arthrobacter oxydans CH8을 고정화한 바이오필터의 암모니아 최대제거속도는 1.2 g-N · kg bead⁻¹ · d⁻¹이었다.²⁵⁾ 이를 바이오필터 단위 부피당 제거속도로 환산하면 18.2 g-N · m⁻³ · h⁻¹에 해당된다. 또한, 분뇨처리 슬러지를 실험실 규모의

Table 3. Comparison of NH₃ maximum removal rate.

Inoculum source	Immobilized material	Maxim removal rate		ref.
		g-N · m ⁻³ · h ⁻¹	g-N · kg ⁻¹ · d ⁻¹	
<i>Arthrobacter oxydans</i> CH8	Na-alginate	18.2	1.2	25
Night soil sludge	Peat moss	93.1	11.4	14
Earthworm casts	Porous ceramics	280.7	18.0	This study

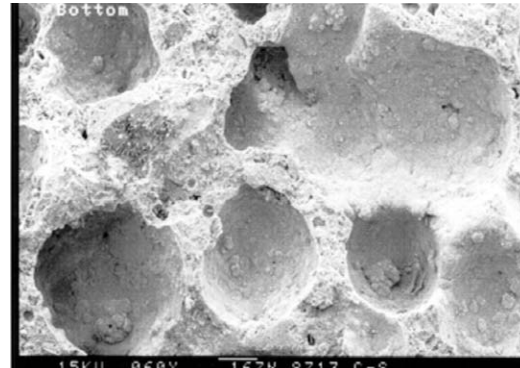
peat 바이오필터에 접종하여 암모니아를 처리한 결과, 110일간의 실험 기간 동안 최대로 평균 95%의 암모니아 처리 효율을 보였다.¹⁴⁾ 이때, 최대제거속도는 11.4 g-N · kg-dry peat⁻¹ · d⁻¹(93.1 g-N · m⁻³ · h⁻¹)이었다.¹⁴⁾ 바이오필터의 단위 부피당 암모니아 제거 성능을 비교해보면, 본 연구에서 사용한 지렁이 분변토를 접종한 세라믹 바이오필터의 암모니아 제거 성능은 기존의 바이오필터보다 3-15배 정도 높았다. 즉, 지렁이 분변토와 다공성 세라믹 담체는 암모니아를 효율적으로 제거하기 위한 매우 우수한 탈취미생물원과 담체임이 증명되었다.

5. 전자현미경 관찰 결과

암모니아 제거 실험 종료 후, 바이오필터로부터 담체를 채취하여 주사형 전자현미경으로 관찰한 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 다공성 세라믹 담체 표면에 직경이 약 1μ 정도의 rod type의 세균이 많이 관찰되었다. 일반적으로 질화세균은 1μ 정도의 단간균으로 알려져 있으므로, 지렁이 분변토를 접종한 바이오필터에서 질화세균에 의해 암모니아가 질산 혹은 아질산으로 산화되어 제거되었을 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 암모니아를 제거하기 위한 바이



(a)



(b)

Fig. 4. Scanning electron photomicrograph of raw porous ceramics(a) and ammonia degrading bacteria immobilized on porous ceramics(b).

오필터를 개발하기 위해, 지렁이 분변토와 다공성 세라믹을 각각 탈취미생물원과 담체로 이용한 바이오필터에 의한 암모니아 제거 특성을 조사한 결과 다음과 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 바이오필터내의 암모니아 가스 흐름을 plug-flow로 가정하고 Michaelis-Menten 식을 이용하여 지렁이 분변토를 접종한 세라믹 바이오필터의 30°C에서의 암모니아 최대제거속도를 측정된 결과, 280.7 g-N · m⁻³ · h⁻¹(18.0 g-N · kg⁻¹ · d⁻¹)을 얻을 수 있었다.
- 2) 지렁이 분변토를 접종한 세라믹 바이오필터의 암모니아 제거속도에 미치는 온도의 영향

을 15, 25, 30 및 35°C의 조건에서 조사한 결과, 온도가 증가할수록 암모니아의 제거속도도 증가하였다. 35°C에서 최대값 285.8 g-N · m⁻³ · h⁻¹(18.8 g-N · kg⁻¹ · d⁻¹)이 얻어졌다. 또한, 15°C에서도 최대제거속도의 약 43%인 122.8 g-N · m⁻³ · h⁻¹(8.1 g-N · kg⁻¹ · d⁻¹)을 얻을 수 있었다.

- 3) 공간속도 220 h⁻¹ 조건에서 210 ppm의 암모니아를 바이오필터에 주입하였을 때 15°C에서는 80%의 제거효율을 얻을 수 있었으나, 25, 30 및 35°C에서는 각각 90, 95, 96%의 제거효율을 얻을 수 있었다. 또한, 동일 공간속도의 조건에서 680 ppm의 고농도 암모니아를 주입한 경우, 15, 25, 30, 35°C에서의 암모니아 제거 효율은 각각 80, 90, 90, 91%이었다.
- 4) 바이오필터의 단위 부피 당 암모니아 제거 성능을 비교해보면, 본 연구에서 사용한 지렁이 분변토를 접종한 다공성 세라믹 바이오필터의 암모니아 제거 성능은 기존의 바이오필터보다 3-15배정도 높았다. 즉, 지렁이 분변토와 다공성 세라믹 담체는 암모니아를 효율적으로 제거하기 위한 매우 우수한 탈취미생물원과 담체임을 알 수 있었다.
- 5) 지렁이 분변토를 접종한 세라믹 바이오필터로부터 담체를 채취하여 주사형 전자현미경으로 관찰한 결과, 약 1μ정도의 단간균이 우점종으로 관찰되었다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 한국과학재단 특정기초연구비(과제번호 96-0601-01-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Ryer-Power, J.E., 1991, Health Effects of

- Ammonia, Plant/Oper. Prog., 10: 228-232.
2. Durme, G.P.V., McNamara, B.F., and McGinley, C.M., 1992, Bench-Scale Removal of Odor and Volatile Organic Compounds at a Composting Facility, Water Environ. Res., 64: 19-27.
3. Barth, C.L., Elliott, F.L., and Melvin, S.W., 1984, Using Odor Control Technology to Support Animal Agriculture, Trans. ASAE, 27: 859-864.
4. Mannebeck, H., 1986, Covering Manure Storing Tanks to Control Odor, In Odor Prevention and Control of Organic Sludge and Livestock Farming: Neilsen, V.C., Voorburg, J.H., and Hermite, P.L., Eds., Elsevier Applied Science Publishers, London, pp. 188-192.
5. Bohn, H., 1992, Consider Biofiltration for Decontaminating Gases, Chem. Eng. Prog., 88: 35-40.
6. Togashi, I., Suzuki, M., Hirai, M., Shoda, M., and Kubota, H., 1986, Removal of NH₃ by a Peat Biofilter without and with Nitrifier, J. Ferment. technol., 64: 425-432.
7. Hartikainen, T., Ruuskanen, J., Vanhatalo, M., and Martikainen, P.J., 1996, Removal of Ammonia from air by a Peat Biofilter, Environ. Technol., 17: 45-53.
8. Marin, G., Lemaste, M., and Taha, S., 1996, The Control of Gaseous Nitrogen Pollutant Removal in a Fixed Peat bed Reactor, J. Biotechnol., 46: 15-21.
9. Bower, C.E. and Turner, D.T., 1981, Accelerated Nitrification in New Seawater Culture Systems. Aquaculture, 24: 1-9.
10. Tjihuis, L., van Loosdrecht, M.C.M., and Heijnen, J.J., 1992, Nitrification with Biofilms on Small Suspended Particles in Airlift Reactors, Water Sci. Technol., 26: 2207-2211.
11. Tanaka, H., Uzman, S., and Dunn, I.J., 1981, Kinetics of Nitrification using a Fluidized Sand Bed Reactor with Attached Growth, Biotechnol.

- Bioeng., 23: 1683-1702.
12. Hunik, J.H., Bos, C.G., van den Hoogen, M.P., de Gooijer, C.D., and Tramper, J., 1994, Co-immobilized *Nitrosomonas europaea* and *Nitrobacter agilis* Cells: Validation of a Dynamic Model for Simultaneous Substrate Conversion and Growth in κ -Carrageenan Gel Beads, *Biotechnol. Bioeng.*, 43: 1153-1163.
 13. Tanaka, K., Nakao, M., Mori, N., Emori, H., Sumino, T., and Nakamura, Y., 1994, Application of Immobilized Nitrifiers Gel to Removal of High Ammonium Nitrogen, *Water Sci. Technol.*, 29: 241-250.
 14. Yani, M., Hirai, M. and Shoda, M., 1998, Removal Kinetics of Ammonia by Peat Biofilter Seeded with Night Soil Sludge, *J. Ferment. Bioeng.*, 85: 502-506.
 15. Wani, A.H., Branion, R.M.R., and Lau, A.K., 1997, Biofiltration: A Promising and Cost-Effective Control Technology for Odors, VOCs, and Air Toxics, *J. Environ. Sci. Health*, A32: 2027-2055.
 16. Cho, K.S., Zhang, L., Hirai, M., and Shoda, M., 1991, Removal Characteristics of Hydrogen Sulfide and Methanethiol by *Thiobacillus* sp. Isolated from Peat in Biological Deodorization, *J. Ferment. Bioeng.*, 71: 44-49.
 17. Cho, K.S., Hirai, M., and Shoda, M., 1991, Degradation Characteristics of Hydrogen Sulfide, Methanethiol, Dimethyl Sulfide and Dimethyl Disulfide by *Thiobacillus thioeparus* DW44 Isolated from Peat Biofilter, *J. Ferment. Bioeng.*, 71: 384-389.
 18. Cho, K.S., Hirai, M., and Shoda, M., 1992, Degradation of Hydrogen Sulfide by *Xanthomonas* sp. Strain Isolated from Peat, *Appl. Environ. Microbiol.*, 58: 1183-1189.
 19. Bohn, H.L., 1976, Compost Scrubbers for Malodorous Air Steams, *Compost Sci.*, 17: 15-17.
 20. Smer, E., Chasaya, C., Van Langenhove, H., and Verstraete, W., 1996, The Effect of Inoculation and the Type of Carrier Material Used on the Biofilter of Methyl Sulfides, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 45: 293-298.
 21. Van Langenhove, H., Wuyts, E., and Schamp, N., 1986, Elimination of Hydrogen Sulfide from Odorous Air by a Wood Bark Biofilter, *Wat. Res.*, 20: 1471-1476.
 22. Devinny, J.S., Deshusses M.A., and Webster, T.S., 1999, *Biofiltration for air pollution control*, Lewis Publishers, New York, p. 46.
 23. Scheels, M. and Park, J.K., 1995, Grounds for odor removal, *Wat. Environ. Technol.*, 17: 48-51.
 24. Tiwaree, R.S., Cho, K.S., Hirai, M., and Shoda, M., 1992, Biological Deodorization of Dimethyl Sulfide using Different Fabrics as the Carriers of Microorganisms, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 32: 135-148.
 25. 과학기술처, 1992, 토양 미생물을 이용한 유기성 슬러지 처리기술에 관한 연구(I), pp. 81-82.
 26. 이은영, 조경숙, 류희욱, 박상진, 배무, 1997, 지렁이 분변토로부터 황화수소 분해균주의 분리 및 특성, *한국환경생물학회지*, 15: 53-61.
 27. Hirai, M., Ohtake, M., and Shoda, M., 1990, Removal Kinetics of Hydrogen Sulfide, Methanethiol and Dimethyl Sulfide by peat Biofilter, *J. Ferment. Bioeng.*, 70: 334-339.
 28. Chung, Y.C., Huang, C., and Tseng, C.P., 1997, Biotreatment of Ammonial from Air by an Immobilized *Arthrobacter oxydans* CH8 Biofilter, *Biotechnol. Prog.*, 13: 794-798.
 29. Focht, D.D. and Verstraete, W., 1977, Biochemical Ecology of Nitrification and Denitrification, *Adv. Micro. Ecol.*, 1: 135-214.