

분변토를 접종한 바이오필터의 암모니아 제거 특성

류희욱^{1,2} · 한희동¹ · 조경숙³

¹숭실대학교 환경·화학공학과, ²바이오세인트(주) 환경생명공학연구소,

³이화여자대학교 국가지정 지하환경연구실

Characteristics of Ammonia Removal in Biofilters Inoculated with Earthworm Cast. Ryu, Hee Wook^{1,2} Hee Dong Han¹, and Kyung-Suk Cho³. ¹Department of Chemical and Environmental Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea, ²Research Institute of Biological and Environmental Technology, Biosaint Co., Seoul 153-120, Korea, ³National Subsurface Environmental Research Laboratory, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea – Four inorganic packing materials (zeocarbon, porous celite, porous glass, zeolite) and an earthworm cast were compared with regard to the removal of ammonia in a biofilter inoculated with earthworm cast. Physical adsorption of ammonia on packing materials were negligible except zeocarbon (23.5 g-NH₃/kg), and cell immobilization capacity have similar values irrespective of packing materials. Pressure drops of the packed bed were in order of earthworm cast ≥ zeocarbon ≥ zeolite ≥ porous glass ≈ porous. The maximum elimination capacity (g-N·kg⁻¹·d⁻¹) of ammonia, which were based on a unit volume of packing material, were in order of zeocarbon (526) earthworm cast (220) ≥ porous celite (93) > zeolite (68) > porous glass (53). By using kinetic analysis, the maximum removal rates (V_m) and the saturation constant (K_s) for ammonia were determined, and zeocarbon showed superior performance among the five materials.

Key words: Ammonia, Biofilter, Inorganic packing materials, Earthworm cast

암모니아는 분뇨처리장, 하·폐수처리장, 비료제조공장, 주물공장, 식품가공공장, 제지공장 및 각종화학공장 등에서 발생하는 악취의 주성분이다[1]. 암모니아는 무색의 최루성 가스로 부식성이 강한 물질로, 흡입 시 미각상실, 메스꺼움, 구토, 언어장애, 호흡곤란, 두통, 폐손상 및 장기 흡입 시 소화장애를 야기 시킨다[1]. 암모니아 악취는 주로 약액세정법, 연소법, 활성탄 흡착법 등에 의해 처리되고 있으나[2-4], 최근 들어서는 암모니아를 아질산이나 질산으로 산화할 수 있는 질화세균을 이용한 생물학적 탈취방법을 이용한 암모니아 제거 기술이 활발히 개발되고 있다[5-12].

Biofiltration에 있어서 탈취효율을 좌우하는 주요 인자는 담체와 탈취미생물이다. 특히, 담체의 종류에 따라 바이오필터의 탈취효율 차이가 큰 것으로 보고되고 있다[6]. 담체의 종류는 크게 유기성 담체와 무기성 담체로 나눌 수 있다. 유기성 담체로 왕겨, 토탄, 퇴비, 톱밥 등이 주로 사용되고 있다[16-17]. 이러한 유기성 담체는 보습성이 뛰어난 반면, 장기간 운전 시에 분해되거나 압밀현상이 발생하는 문제점이 있다[12]. 무기성 담체로는 입자성 활성탄, 활성탄 섬유, polystyrene, perlite, 다공성 세라믹 등이 개발되어 사용되고 있다[18-21]. 무기성 담체는 유기성 담체에 비해 가격이 비싸

기는 하지만, 통기성이 우수하고 내구성이 좋기 때문에 장기간 사용이 가능한 특성을 가지고 있어 최근 들어서 무기성 담체를 이용한 biofilter의 개발이 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는, 4 종류의 무기담체와 지렁이 분변토를 담체로 사용하여 지렁이 분변토 집식배양한 질산화 세균을 접종한 바이오필터의 암모니아 제거특성을 규명하였다. 또한, 담체의 암모니아 흡착능, 미생물 고정화 능력과 압력손실을 평가하였다.

실험재료 및 방법

담체의 물리적 특성조사

바이오필터의 고정화 담체로 분변토, 다공성 유리(porous glass), 다공성 세라믹(porous celite), 제올라이트, 및 제오카본(제오빌더(주))을 사용하였다. 고정화 담체의 미생물 고정화능 특성을 조사하였다. 독립영양세균인 암모니아 분해 세균은 세포 생장이 느리기 때문에 종속영양세균인 *Alcaligenes eutrophus*(NCIMB 11599) 균주를 사용하여 담체의 고정화능을 pyrex tube(300 mmH × 26 mmID)로 제작한 충전담에서 수행하였다. Pyrex tube에 담체를 각각 16.5 cm 충전시킨 후 초기 흡광도 0.48인 *A. eutrophus* 배양액 200 mL를 pump를 사용하여 순환시키면서 배양액의 흡광도 변화를 측정하여 담체의 미생물 고정화 능을 비교하였다.

담체의 암모니아 흡착능은 고정화 실험에서 사용한 동일한 조건의 pyrex tube에서 조사하였다. 100 ppm의 암모니

*Corresponding author

Tel. 82-2-820-0617, Fax. 82-2-820-5378

E-mail: hwryu@saint.soongsil.ac.kr

아 가스를 충전탑에 $0.25\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ (공간속도 56h^{-1})으로 공급하여 입구와 출구에서의 암모니아 농도를 측정하여 담체의 암모니아 흡착효율을 조사하였다. 암모니아 가스의 악취 발생원으로 한국표준과학연구소에서 제조한 10,000ppm의 암모니아 가스 실린더를 사용하였다.

암모니아 분해세균의 농화배양

암모니아 분해세균의 분리원으로 서울 근교 K 하수처리장 토양 탈취장치의 지렁이 분변토(casting)를 사용하였다. 질화세균배지의 조성(g/L)은 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 6.61, NaCl 2.92, KH_2PO_4 1.36, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2.46이다. 지렁이 분변토 50g (습중량)을 질화세균배지 500 mL에 현탁 시킨 후 250 rpm에서 30분간 교반시켜 상등액을 취했다. 그리고 2.5L 용량의 발효기(Korea Fermentor Co.)에 pH 7.0의 질화세균배지 1.7 L을 넣은 후, 지렁이 분변토 현탁액 300 mL를 접종하였다. 통기량 $0.5\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 의 호기적인 조건에서 암모니아 분해세균을 농화배양하였다(30°C , 300rpm). 배양액의 pH는 28% 암모니아 용액으로 pH 7.0~7.2로 자동 조절하였다. 농화 배양액을 바이오필터의 접종원으로 사용하였다.

바이오필터 장치 및 분해특성연구

고정화 담체로 5종류 (분변토, 다공성 유리, 다공성 세라믹, 제올라이트, 제오카본)를 각각 충전한 바이오필터의 암모니아 제거 특성을 연구하였다. 바이오필터는 pyrex column ($300\text{mmH} \times 46\text{mmID}$)을 사용하였으며, 고정화 담체의 물성 및 충전조건을 Table 1에 정리하였다. 집식배양된 암모니아 산화세균액을 종균으로 사용하여 각각의 담체에 일정량의 농축액을 흡수시켜 암모니아 분해세균을 고정화 시켰다. 각각의 담체가 충전된 바이오필터는 암모니아 가스로 2주일 이상 순취 시킨 후 암모니아 산화특성 연구에 사용하였다. 암모니아 가스에 대한 바이오필터의 순취는 약 60 ppmv의 암모니아 가스를 함유한 공기를 각각의 바이오필터에 $0.25\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 으로 공급하여 수행하였다.

암모니아 분해세균이 고정화된 여러 종류의 담체가 충전된 바이오필터의 암모니아 가스 제거특성을 조사하였다. 실험은 암모니아 가스로 2주일 이상 순취시킨 바이오필터를 사용하였다. 암모니아 가스의 악취발생원으로 발생장치 대신 한국표준과학연구소에서 제조한 10,000ppm의 암모니아

가스 실린더를 사용하였다. 바이오필터에 주입되는 암모니아 가스는 실린더로부터 배출된 암모니아 가스를 가스혼합기(gas mixing chamber, 하나특수)에서 공기와 희석하여 농도를 조절하였다. 암모니아 가스의 유입농도와 공간속도를 각각 100~1,000ppm과 $50\sim 1,200\text{h}^{-1}$ 로 변화시키면서, 바이오필터들의 암모니아 제거능을 조사하였다. 암모니아의 유입농도는 100ppm부터 1,200ppm까지 단계적으로 증가시켜주었다. 모든 실험에서 바이오필터의 유입 및 유출 가스 중의 암모니아 가스 농도를 1시간 간격으로 측정하였다. 출구의 암모니아 가스의 농도가 일정할 때 새로운 조건으로 변화시켰다. 담체의 수분함량을 일정하게 유지하기 위하여 1일 1회씩 약 50 mL의 증류수를 분사해 주었다.

분석방법

바이오필터와 흡착탑의 입구와 출구에서의 암모니아 가스의 농도를 흡수법을 사용하여 측정하였다. 입구와 출구 가스를 0.01N 황산용액 100mL가 들어있는 흡수병에 10분간 흡수시켰다. 흡수액 중의 암모니아(NH_4^+)이온은 IC Pack-™ Cation M/D($3.9\text{mm}\Phi \times 150\text{mmL}$, Waters) 칼럼을 이용하여 이온 크로마토그래피(Waters 431, U.S.A.)로 분석하였다. 또한, 암모니아 분해세균에 의한 암모니아의 분해생성물인 질산염(NO_3^-)과 아질산염(NO_2^-) 이온의 정량분석은 IC Pack-™ Anion ($4.6\text{mm}\Phi \times 50\text{mmL}$, Waters)칼럼을 이용하여 이온 크로마토그래피(Waters 510, U.S.A.)로 분석하였다.

바이오필터 압력손실 변화는 120일 이상 조업한 바이오필터에 일반적인 바이오필터 조업조건인 공기유량 0.5, 1.0, 1.5, $2.0\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (공간속도 $100\sim 400\text{h}^{-1}$)의 범위에서 manometer H₂O를 사용하여 압력손실을 측정하였다. 바이오필터에 의한 악취 제거속도는 바이오필터로 유입되는 가스의 유속을 Michaelis-Menten식을 적용하여 아래의 식으로부터 해석하였다.

결과 및 고찰

담체의 미생물 고정화 특성 및 압력손실

4 종류의 무기성 담체의 암모니아 흡착능과 미생물 고정화 성능을 Table 2에 정리하였다. 암모니아 흡착능은 다공성 세라믹인 porous glass와 porous celite의 경우 무시할 정도로 적었으며, zeolite의 경우에도 암모니아 흡착능은 적

Table 1. Physical properties and packing conditions of filter media in biofilters.

Biofilter media	Mean particle size (mm)	Specific surface area ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	Pore size (Å)	Packing weight (g)	Packing volume (L)	Bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
Earthworm cast	-	-	-	97	0.27	354
Porous glass	8.33	1.02	73.47	72	0.27	262
Porous celite	9.04	18.65	91.98	118	0.27	432
Zeolite	3.35	69.11	65.49	237	0.27	867
Zecarbon	0.72	435.10	15.06	263	0.27	962

Table 2. Physical adsorption of ammonia and cell on different biofilter media

Biofilter media	Adsorption of NH ₃ (g NH ₃ /kg media)	Adsorption of cell	
		mg DCW/g media	mg DCW/L
Porous glass	0.1	0.83	220
Porous celite	0.5	1.04	206
Zeolite	1.5	0.33	268
Zeocarbon	23.5	0.34	270

었다. 반면에, zeocarbon의 경우 23.5 g-NH₃/kg으로 암모니아 흡착능이 우수한 담체 이었다. 담체의 미생물 고정화량은 담체의 단위중량을 기준으로 할 경우 porous celite와 porous glass가 약 1.0 mg/g 으로 가장 우수하였고, 단위부피를 기준으로 할 경우 미생물 고정화량은 담체들간의 큰 차이 없이 206~270 mg-DCW/L로 유사하였다.

약 6개월 조업하는 동안 SV 100~400h⁻¹ 범위에서 각 바이오필터의 압력손실을 측정하였다(Fig. 2). 압력손실은 유속이 증가할수록 거의 선형적으로 증가하였다. 다공성 무기 담체인 porous glass와 porous celite의 압력손실은 약 0.5~1.9 mm H₂O · m⁻¹ 의 매우 낮았으며, zeolite의 경우에도 약 1.2~5.2 mm H₂O · m⁻¹ 로 낮았다. 그러나, zeocarbon의 경우 압력손실이 약 14~57 mm H₂O · m⁻¹ 으로 높았으며, 특히 분변토 바이오필터의 경우 30~136 mm H₂O · m⁻¹ 로 압력손실이 매우 컸다. 분변토의 경우 장기간 조업과정에서 심한 압밀현상이 관찰되었다.

바이오필터의 암모니아 제거특성

암모니아 분해세균의 농화배양균을 고정화한 4종류의 무

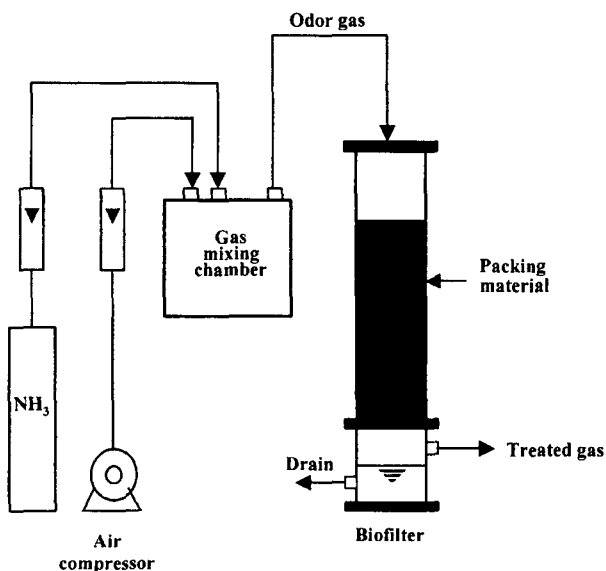


Fig. 1. Schematic diagram of a biofilter system.

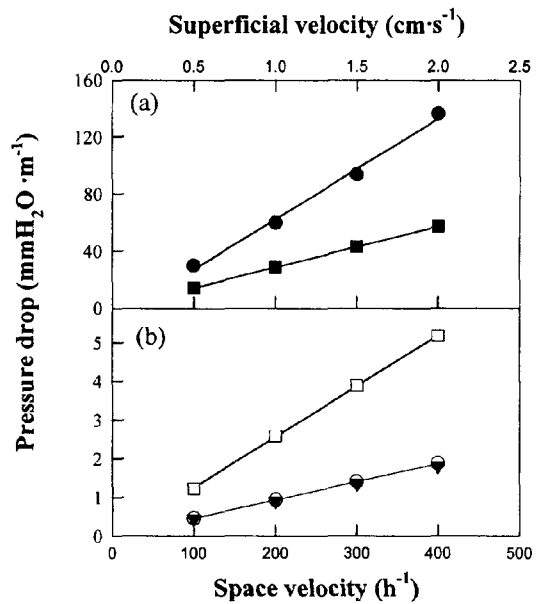


Fig. 2. Effect of gas flow rate on pressure drop in biofilters.
 Symbols: ●, earthworm cast; ○, porous glass; ▼, porous celite; □, zeolite; ■, zeocarbon.

기담체(다공성 유리, 다공성 세라믹, 제올라이트, 제오카본)와 지렁이 분변토를 충전한 바이오필터의 암모니아 제거특성을 조사하였다(Fig. 3와 Fig. 4). 지렁이 분변토는 농화배양액을 접종하지 않았고, 분변토에 자생하는 암모니아 분해세균을 이용하였다. 모든 바이오필터는 60ppm의 암모니아 가스를 공간속도 56h⁻¹에서 약 60일간 순치 시킨 후, 유입 암모니아의 평균농도를 170, 320, 600, 1,050ppm으로 단계적으로 변화시키면서 암모니아 제거특성을 조사하였다(Fig. 3). 암모니아 유입농도의 변화 직후에는 바이오필터 출구에서의 암모니아 농도가 증가하였지만, 변화가 심한 경우에도 2~3일 경과 후에는 정상상태에 도달하여 출구농도가 낮아졌다. 제올라이트와 다공성 유리를 고정화 담체로 사용한 바이오필터의 경우, 암모니아의 유입농도를 60ppm에서 170, 320ppm까지 높였을 때, 정상상태에서의 출구 농도가 일정하였다(Fig. 3 (b), Fig. 4 (a)). 반면, 유입농도 600ppm에서는 시간이 지남에 따라 출구농도가 지속적으로 증가하였고, 최종적으로 입구농도와 비슷하게 되었다. 다공성 세라믹(porous celite)을 담체로 사용한 바이오필터에서는 유입농도가 증가함에 따라, 출구농도가 증가하였으나, 정상상태에서 출구농도가 안정하게 유지되었다(Fig. 3 (c)). 그러나, 유입농도가 1,050ppm 이상에서는 출구농도가 급격하게 증가하였고, 바이오필터의 활성이 완전 저해 받음을 알 수 있었다. 지렁이 분변토를 사용한 경우에도 porous celite 담체와 유사한 성능을 보였으나, 출구에서의 암모니아 농도는 지렁이 분변토 바이오필터에서 더 낮으며, 변동이 적었다. 반면에, zeocarbon을 사용한 바이오필터는 1,050ppm까지

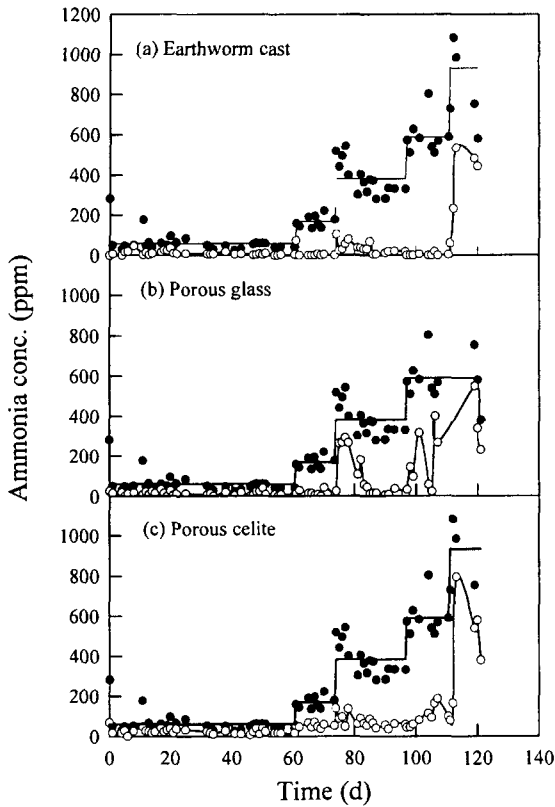


Fig. 3. Time profiles of NH₃ concentrations in inlet and outlet gases of biofilters. (a) earthworm cast, (b) porous glass, and (c) porous celite. Symbols: ●, inlet; ○, outlet.

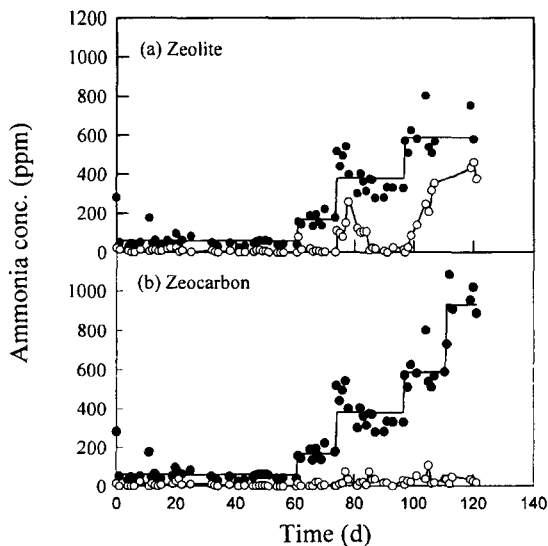


Fig. 4. Time profiles of NH₃ concentrations in inlet and outlet gases of biofilters. (a) zeolite and (b) zeocarbon. Symbols: ●, inlet; ○, outlet.

유입농도를 변화시켜도 출구농도가 50ppm 이하로 안정적으로 유지되었다(Fig. 4 (b)).

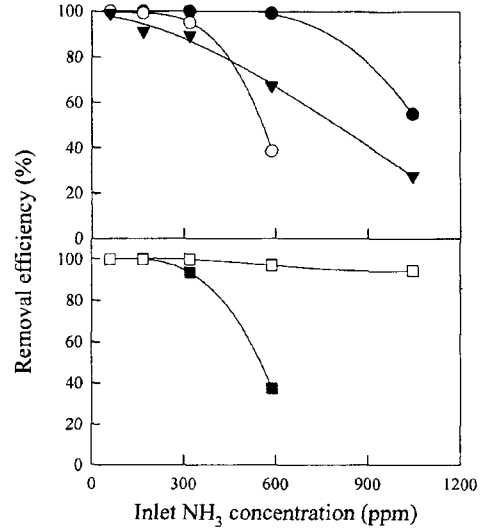


Fig. 5. Effect of NH₃ inlet concentration on NH₃ removal efficiency. Symbols: ●, earthworm cast; ○, porous glass; ▼, porous celite; □, zeolite; ■, zeocarbon.

각각의 바이오필터에서 유입 농도 변화에 따른 정상상태에서의 제거효율을 Fig. 5에 도시하였다. Celite glass와 제올라이트 바이오필터는 320ppm의 유입 암모니아 농도까지 암모니아 제거효율이 93.5~100% 이었으나, 유입 암모니아 농도 600ppm에서는 37~39%로 급감하였다. Porous celite 바이오필터는 유입 암모니아 농도 300ppm 미만에서는 약 90%의 제거효율을 유지하였으나, 암모니아 유입농도가 1,050ppm까지 증가함에 따라 제거효율이 28% 까지 감소하였다. 이들 세 종류 바이오필터의 제거효율은 300ppm 이하에서는 농도의 영향을 받지 않는다는 것을 의미한다. 반면에, 지렁이 분변토 바이오필터는 유입농도가 600ppm 이하인 경우에는 99.4~100%의 안정적인 제거효율을 얻을 수 있었으며, 1,050ppm의 고농도 암모니아 유입조건에서는 제거효율이 급감하였다. 특히, zeocarbon 바이오필터는 유입 암모니아 농도 1,050ppm까지도 우수한 제거효율(95~100%)을 유지하였다.

바이오필터를 장기간 조업하는 동안 배수 중 성분분석을 통하여 바이오필터에 의한 암모니아의 분해산물을 조사하였다(Table 3). 각각의 바이오필터의 배수에서 검출된 분해산물은 NO₂와 NO₃이었다. 농화배양균을 접종한 바이오필터와 지렁이 분변토를 사용한 바이오필터 모두 암모니아 산화세균과 아질산염 산화세균의 작용에 의해서 암모니아가 분해됨을 알 수 있었다. 이러한 결과는 암모니아 물리적 흡착능이 강한 zeocarbon의 경우에 NO₂와 NO₃ 검출 농도가 다른 담체에 비해 매우 높은 것은(1,153 g-NO₂⁻ · m⁻³ · d⁻¹과 996 g-NO₃⁻ · m⁻³ · d⁻¹) 암모니아의 탈취 작용이 담체의 물리적 촉매 작용이 아닌 생물학적 작용임을 의미한다.

바이오필터의 암모니아 제거속도 해석

Table 3. Biodegradation products of ammonia in drainage of biofilters.

Biofilter media	Biodegradation product of ammonia	
	Nitrite (g·m ³ of biofilter·d)	Nitrate (g·m ³ of biofilter·d)
Earthworm cast	99	171
Porous glass	251	12
Porous celite	641	409
Zeolite	124	19
Zeocarbon	1,153	996

약 120일 간의 장기간 동안 암모니아에 충분히 순치된 바이오필터를 사용하여 암모니아 가스의 유입농도와 공간 속도를 각각 100~1,000ppm과 50~1,200h⁻¹로 변화시키면서, 바이오필터의 암모니아 제거속도를 조사하였다. 각각의 담체가 충전된 바이오필터의 암모니아 제거속도를 30°C에서 조사하였다. 암모니아 제거속도는 다음과 같은 Hanes-Woolf plot으로 부터 구하였다.

$$\frac{C_{in}}{R} = \frac{C_{in}}{V_m} + \frac{K_s}{V_m}$$

여기에서 C_o(ppm)와 C_e(ppm)는 각각 바이오필터의 입구와 출구에서의 암모니아 농도이고, $R = \frac{SV(C_o - C_e)}{\alpha}$,

$C_{in} = S = \frac{C_o - C_e}{\ln \frac{C_o}{C_e}}$ 이다. Hanes-Woolf plot으로부터 구한

V_m(최대제거속도)와 K_s(기질 친화도)를 Table 4에 정리하였다. 담체의 종류에 따라 V_m 및 K_s 값이 많은 영향을 받았다. 담체의 충전 부피를 기준으로 할 경우 zeocarbon 바이오필터의 경우 V_m가 526 g-N·m³·h⁻¹(13 g-N·kg⁻¹·d⁻¹)로 가장 우수하였을 뿐만 아니라 기질 친화도(K_s)가 180ppm으로 가장 우수하였다. 지령이 분변토도 V_m와 K_s가 각각 353 g-N·m³·h⁻¹와 322ppm으로 우수하였다. 반면에, 단위 중량을 기준으로 할 경우 V_m는 지령이 분변토 > porous celite > porous glass > zeocarbon > zeolite 순 이었다.

암모니아 유입 부하량에 따른 각 바이오필터의 암모니아

Table 4. Maximum removal rate(v_m) and saturation constnt (K_s) of NH₃ for various biofilters

Biofilter media	V _m		K _s (ppm)
	g-N·m ³ ·h ⁻¹	g-N·m ³ ·h ⁻¹	
Earthworm cast	353	29	322
Porous glass	141	15	787
Porous celite	280	19	936
Zeolite	218	9	1177
Zeocarbon	526	13	180

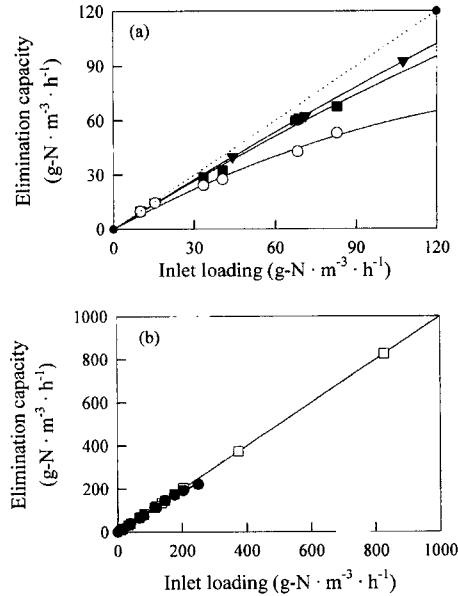


Fig. 6. Relationships between inlet NH₃ load and NH₃ elimination capacity.

Symbols: ●, earthworm cast; ○, porous glass; ▼, porous celite; □, zeolite; ■, zeocarbon.

제거량을 Fig. 6에 도시하였다. Zeocarbon 바이오필터는 유입 암모니아 부하량이 약 826 g-N·m³·h⁻¹까지 암모니아 제거효율이 99~100% 제거가 가능하였고, 지령이 분변토 바이오필터의 경우에도 유입 암모니아 부하량이 약 250 g-N·m³·h⁻¹까지 암모니아 제거효율이 88~100% 이었다. 각 바이오필터의 최대제거용량은 zeocarbon, 지령이 분변토, porous celite, zeolite, 및 porous glass 순으로 각각 825 > 220 > 93 > 68 > 53 g-N·m³·h⁻¹이었고, 임계 부하량(유입 부하량의 95% 이상 제거할 수 있는 제거용량을 기준)은 zeocarbon, 지령이 분변토, porous celite, zeolite, 및 porous glass 순으로 각각 825 > 173 > 15 > 14.8 > 9.8 g-N·m³·h⁻¹이었다. 이상의 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 바이오필터의 성능은 담체에 많은 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 문헌자료에서도 유사한 결과들이 보고되고 있다. Kim 등[20]의 연구에 의하면, 4종류의 담체(peat, rock wool, fuyolite, ceramics)를 사용하였을 때 최대 암모니아 제거용량은 28~50 g-N·m³·h⁻¹으로 담체의 종류에 따라 최대 약 1.8배의 차이가 있는 것으로 보고되고 있다. 일반적으로 다양한 종류의 담체(alginate beads, peat moss, ceramics)와 접종원을 사용한 바이오필터의 암모니아 제거용량은 13~84 g-N·m³·h⁻¹ 범위로 보고되고 있다[5,7,20,22].

요 약

4 종류의 무기담체와 지령이 분변토를 담체로 사용하여 분변토 집식배양한 질산화 세균을 접종한 바이오필터의 암모

니아 제거특성을 규명하였다. 담체의 암모니아 흡착능은 zeocarbon(24 g-NH₃/kg)을 제외하고 무시할 수준이었으며, 충전부피 당 담체의 미생물 고정화량은 담체 종류와 관계없이 유사하였다. 바이오필터의 압력손실은 분변토 \geq zeocarbon \geq zeolite \geq porous glass \approx porous 순이었다. 담체의 충전 부피를 기준으로 한 최대 제거용량(g-N · kg⁻¹ · d⁻¹)은 zeocarbon (526) \geq 분변토 (220) \geq porous celite (93) > zeolite (68) > porous glass (53) 순으로 바이오필터의 성능은 담체에 많은 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 속도론적 해석에 의해 V_m과 K_s를 구하였으며, 담체들간의 암모니아 제거 성능을 고려할 때 가장 우수한 담체는 zeocarbon 이었다.

감사의 글

이 연구는 1999년도 숭실대학교 교내연구비에 의하여 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

- Ryer-Power, J. E. 1991. Health effects of ammonia. *Plant/Oper. Prog.*, **10** : 228–232.
- Durme, G. P. V., B. F. McNamara, and C. M. McGinley. 1992. Bench-scale removal of odor and volatile organic compounds at a composting facility. *Water Environ. Res.* **64**: 19–27.
- Barth, C. L., F. L. Elliott, and S. W. Melvin. 1984. Using odor control technology to support animal agriculture. *Trans. ASAE.* **27**: 859–864.
- Mannebeck, H., 1986, Covering manure storing tanks to control odor. In V. C. Neilser, J. H. Voorburg, and P. L. Hermite (eds.), *Odor prevention and control of organic sludge and livestock farming*. Elsevier Applied Science Publishers, London, pp. 188–192.
- Kim, N. J., M. Hirai, and M. Shoda. 2000a. Removal characteristics of high load ammonia gas by a biofilter seeded with a marine bacterium, *Vibrio alginolyticus*. *Biotech. Letters* **22**: 1295–1299.
- Hirai M., M. Mamamoto, M. Yani, and M. Shoda. 2001(b). Comparison of the biological NH₃ removal characteristics among four inorganic packing materials. *J. Biosci. Bioeng.* **91**: 428–430.
- Yani, M., M. Hirai, and M. Shoda. 1998. Removal kinetics of ammonia by the biofilter seeded with night soil sludge. *J. Ferment. Bioeng.* **85**: 502506.
- Hartikainen, T., J. Ruuskanen, M. Vanhatalo, and P. J. Martikainen. 1996. Removal of ammonia from air by a peat biofilter. *Environ. Technol.* **17**: 45–53.
- Marin, G., M. Lemaste, and S. Taha. 1996. The control of gaseous nitrogen pollutant removal in a fixed peat bed reactor. *J. Biotechnol.* **46**: 15–21.
- Tiwaree, R. S., K. S. Cho, M. Hirai, and M. Shoda. 1992. Biological deodorization of dimethyl sulfide using different fabrics as the carriers of microorganisms. *Appl. Biochem. Biotechnol.* **32**: 135–148.
- Wani, A. H., R. M. R. Branion, and A. K. Lau. 1997. Biofiltration: a promising and cost-effective control technology for odors, VOCs and air toxics. *J. Environ. Sci. Health A32*: 2027–2055.
- Deviny, J. S., M. A. Deshusses, and T. S. Webster. 1999. *Biofiltration for air pollution control*, pp. 46. Lewis Publishers, New York.
- Cho, K. S., L. Zhang, M. Hirai, and M. Shoda. 1991. Removal characteristics of hydrogen sulfide and methanethiol by *Thiobacillus* sp. isolated from peat in biological deodorization. *J. Ferment. Bioeng.* **71**: 44–49.
- Cho, K. S., M. Hirai, and M. Shoda. 1991. Degradation characteristics of hydrogen sulfide, methanethiol, dimethyl sulfide and dimethyl disulfide by *Thiobacillus thioparus* DW44 isolated from peat biofilter. *J. Ferment. Bioeng.* **71**: 384–389.
- Cho, K. S., M. Hirai, and M. Shoda. 1992. Degradation of hydrogen sulfide by *Xanthomonas* sp. strain isolated from peat. *Appl. Environ. Microbiol.* **58**: 1183–1189.
- Tanji, Y., T. Kanagawa, and E. Mikami. 1989. Removal of dimethyl sulfide, methyl mercaptan, and hydrogen sulfide by immobilized *Thiobacillus thioparus* TK-m. *J. Ferment. Bioeng.* **68**: 280–285.
- Smer, E., C. Chasaya, H. Van Langenhove, and W. Verstraete. 1996. The effect of inoculation and the type of carrier material used on the biofilter of methyl sulfides. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **45**: 293–298.
- Cho, K. S., H. W. Ryu, and N. Y. Lee. 2000. Biological deodorization of hydrogen sulfide using porous lava as a carrier of *Thiobacillus thiooxidans*. *J. Biosci. Bioeng.* **90**: 25–31.
- Smer, E., C. Chasaya, H. van Langenhove, and W. Verstraete. 1996. The effect of inoculation and the type of carrier material used on the biofilter of methyl sulfides. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **45**: 293–298.
- Kim, N. -J., M. Mitsuyo, and M. Shoda. 2000. Comparison of organic and inorganic packing materials in the removal of ammonia gas in biofilters. *J. Hazard. Mater.* **B72**: 77–90.
- Hirai M., M. Mamamoto, M. Yani, and M. Shoda. 2001(a). Comparison of the biological H₂S removal characteristics among four inorganic packing materials. *J. Biosci. Bioeng.* **91**: 396–402.
- Chung, Y. C. and C. P. Tseng. 1997. Biotreatment of ammonia from air by an immobilized *Arthrobacter oxydans* CH8 biofilter. *Biotechnol. Prog.* **13**: 794–798.

(Received Dec. 20, 2001/Accepted Feb. 16, 2002)