

토양컬럼을 이용한 합성폐수중의 암모니아성질소 제거

박상일[†] · 정경훈 · 김해연 · 백계진*

조선대학교 환경공학부, *광주광역시 보건환경연구원

Removal of NH₄-N from Synthetic Wastewater Using Soil Column

San Ill Park[†] · Kyung Hoon Cheong · Hai Yeon Kim · Ke Jin Paik*

Division of Environmental Engineering, Chosun University

*Public Health and Environmental Institute of Gwangju City

(Received April 8, 2005; Accepted July 20, 2005)

ABSTRACT

The purpose of this investigation was to evaluate removal efficiency of NH₄-N using the soil column. Soil, oyster shell and natural zeolite were used as a supporting media of soil column. Removal efficiencies of NH₄-N were 35.9%, 41% and 93.4% for the soil column packed with soil, natural zeolite(20%) and oyster shell (20%) at HRT of 72 hours, respectively. The addition of 20% oyster shell to the soil accelerated nitrification in soil column. The influent ammonia nitrogen was mostly converted to nitrate nitrogen in the soil column and little ammonia nitrogen was found in the effluent. When the influent NH₄-N concentration was 200 mg/l, the NH₄-N removal was decreased at HRT of 48 hours, while nitrification was significantly increased after mechanical aeration. It was suggested that nitrification from higher NH₄-N concentration was more affected by aeration in soil column process. The number of nitrifiers was approximately in a level of about 10⁶ MPN/g · soil in the soil column mixed with oyster shell (20%).

Keywords: soil column, ammonia removal, nitrification, nitrifier

I. 서 론

수질오염이 활발하게 진행되고 있는 하천이나 호소, 내만 등에서는 BOD₅나 COD의 저감대책만으로는 수질환경을 개선하기 어렵기 때문에 질소나 인 등의 영양염류를 제거할 수 있는 고도처리 시설이 필요하다. 소규모로 발생하는 하수중의 질소나 인을 제거하기 위한 A₂/O법, 혐기호기 접촉순환법등 생물학적 처리 시스템이 개발되고 있으나 이들 공법들은 유지관리를 위한 전문 인력이 필요할 뿐만 아니라 에너지 소비가 많은 문제점을 안고 있다.¹⁾ 소규모로 발생하는 하수를 처리하기 위해서는 시설비 및 유지관리비 등이 저렴하고 공정이 간단한 공법들이 요구되고 있다.

현재까지 알려져 있는 자연정화공법으로는 토양처리 방법, 산화지법, 식물을 이용한 처리법, 습지처리법 등

이 있다.²⁻⁶⁾ 이러한 자연정화공법을 이용한 수처리 중의 장점중 하나는 기존의 수처리 시스템에 비해 에너지 소비가 낮고 비용이 적게 소요된다는 점이며 환경친화적 수처리방법의 하나로 그 이용이 확대될 것으로 기대되지만 처리과정 중 악취가 발생되거나 공극이 폐쇄되어 투수속도가 저하되거나 또는 지하수를 오염시키는 등의 문제점이 있다.⁶⁾ 최근에는 기능성 재료를 이용하여 오수의 고속처리와 오염물질의 제거효율 향상을 목적으로 한 다단 토양층 시스템에 대한 연구도 이루어지고 있다.⁷⁻¹⁰⁾ 이러한 처리공법들은 하수나 오수를 처리 대상으로 BOD 저감이나 저농도의 질소, 인 등의 영양염을 제거하는 것을 목적으로 아직까지 고농도의 질소를 제거하기 위한 토양 처리법은 개발되지 않고 있다.

한편 고농도의 질소를 함유하고 있는 축산폐수는 기본적으로 축산농가에서 자체 처리하는 것이 원칙이나 소규모 농가의 경우 축산폐수 처리에 보다 큰 어려움이 있어 축산폐수 공공처리 시설을 이용하고 있다. 이러한 축산폐수 공공처리 시설의 설치가 계속적으로 확대 추진될 것으로 예상되는 상황에서 기존의 처리시설

[†]Corresponding author: Division of Environmental Engineering, Chosun University
Tel: 82-62-230-6628 Fax: 82-62-230-6628
E-mail: coyoete@lycos.co.kr

에 대한 질소·인 제거시설의 설치는 필연적일 것이다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 설치되어 운전 중인 축산폐수 처리시설로부터 배출되는 처리수중의 영양염류 중 특히 질소성분을 제거하고자 하였다.

따라서 본 연구에서는 고농도의 질소를 제거하는데 있어서 기초 자료를 얻기 위한 목적으로 합성폐수를 사용하여 토양컬럼에서 질산화를 촉진시키기 위한 토양 첨가제의 효과 및 부하속도에 대한 영향을 검토하고자 한다.

II. 실험방법

1. 공시 토양

본 실험에 사용한 토양은 C 대학교 부근 산림에서 비료를 시비하지 않았던 토양으로 상부 약 5 cm를 제거하고 깊이 20 cm 내에서 취한 것을 그늘지고 통기성이 양호한 곳에서 약 1주일간 통풍 건조시킨 후 직경 5 mm 미만의 토양을 마사토와 1:1로 섞어 사용하였다. 실험에 사용된 토양은 통일분류법에 의하면 실트질(SM) 모래 토양이며, 화학적 특성은 Table 1과 같고 토양의 유기물 함량은 1.5%, 포화수분 함량은 16.3%이고 투수계수는 2.80×10^{-3} cm/sec이었다.

2. 토양 첨가제

토양컬럼에 첨가한 제올라이트는 국내의 포항지역의 구룡포산(SiO₂: 79.3%, Al₂O₃: 13.9%, Si/Al 비: 5.8)으로 분양받은 원광을 선발하여 불순물을 제거하기 위하여 증류수로 깨끗이 세척한 후 자연 건조 하였으며 정계상공 5~8번 체를 사용하여 직경 2~4 mm의 제올라이트를 사용하였다. 본 실험에 사용한 폐굴껍질은 남해안 일대에서 수거한 것으로 흡과 불순물을 제거한 후 파쇄하여 직경 5 mm의 체로 분리하여 사용하였다.

3. 실험장치

실험장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 아크릴(두께 0.5 cm)을 사용하여 내경 14 cm와 길이 48 cm의 원통형 반응조 내부에 내경 4 cm의 원통을 설치한 토양컬럼을 제작하였다. 총 용적은 7.3 l이며 컬럼의 중앙 하

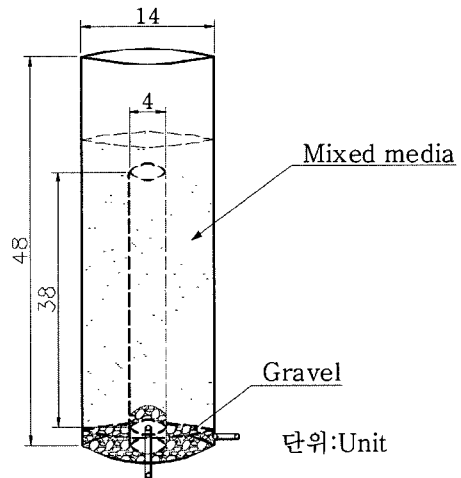


Fig. 1. Schematic diagram of soil column on nitrification.

부에 합성폐수의 유입구, 외부 하부에 유출구를 설치하였으며 합성폐수는 정량펌프로 상향류로 일정하게 공급하였다.

컬럼 아래층에는 유입관의 막힘을 방지하기 위해 모관망을 넣은 후 그 위에 직경 3~7 mm의 자갈을 3 cm 정도의 두께로 깔고 그 위에 건조토양(6 kg)을 충전 하였으며 컬럼의 외부는 빛의 투과로 인한 조류의 광합성을 막기 위해 차광막을 부착하여 반응조 내부를 암실화 하였다. 토양에 제올라이트와 폐굴껍질을 혼합하였을 때에도 토양층의 무게가 같도록 토양의 양을 조절하였다. 토양컬럼 장치는 실험실내에 설치하여 실온에서 운전하였다. 질산화 실험에 사용한 합성폐수의 조성은 Table 2와 같으며 합성폐수는 10배 농도의 원액을 만들어 4°C에 보존 하였으며 사용직전에 증류수로 희석하여 사용하였다.

4. 분석방법

토양층의 pH, 유기물함량, 투수계수는 토양화학분석

Table 2. Composition of synthetic wastewater on nitrification

Component	Concentration (mg/l)	Remarks
NH ₄ Cl	955.17	Nitrogen Source
KH ₂ PO ₄	21.95	Phosphorus Source
NaHCO ₃	468	
FeCl ₃ · 6H ₂ O	0.375	
KCl	4.7	Minerals
MgSO ₄ · 7H ₂ O	5	
CaCl ₂ · 2H ₂ O	10	

Table 1. Chemical properties of sampled soil

Characteristics	pH (1:5)	O.M (%)	P ₂ O ₅ (ppm)	CEC (me/100 g)		
				K	Ca	Mg
Soil	5.35	4.4	59	0.18	11.4	4.06
Sand	7.23	0.2	13	0.06	17.2	4
Soil + Sand	6.23	1.5	11	0.11	12.7	4.03

법¹¹⁾에 따라 분석하였으며 NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N은 수질오염공정시험법¹²⁾에 따라 분석하였고, 토양의 질산화균의 계수는 토양미생물 실험법¹³⁾의 MPN(Most Probable Number)법을 사용하여 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 첨가제 효과

토양컬럼에서 질산화 촉진 효과를 조사하기 위하여 첨가제로서 천연제올라이트를 사용하였으며 실험결과는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2(a)는 토양만을 충전한 토양컬럼에서 HRT 72 시간에서의 질산화를 나타낸 것으로서 실험 초기 유입 NH₄-N 농도는 약 250 mg/l이다. 실험초기부터 반응조 내에서 질산화가 진행되기 시작하였으며 NO₃-N 농도

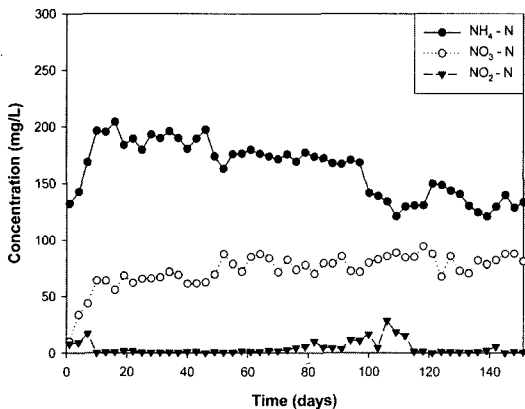
가 9 mg/l에서 60 mg/l로 증가하다가 실험 20일째부터는 유출수 평균 NO₃-N의 농도는 약 77.0 mg/l로 유지되었다. 또한 NH₄-N는 실험기간동안 질산화가 진행됨에 따라 다소 낮아지는 경향을 보이고 있으나 유출수 평균 NH₄-N의 농도는 약 160.4 mg/l로 제거율은 35.9%에 불과하였다. 이와 같이 토양만을 충전한 실험에서는 NO₃-N의 전환율이 낮았기 때문에 질산화율을 촉진시키기 위하여 토양에 천연제올라이트 20%를 충전한 토양컬럼을 사용하였다. 실험결과는 Fig. 2(b)와 같다.

천연제올라이트 20%를 충전하였을 때, 실험 20일까지는 유출수 중의 NH₄-N는 거의 검출되지 않았으나 실험 21일째부터는 서서히 증가하였으며 실험 130일 까지의 유출수 평균 NH₄-N의 농도는 약 124.9 mg/l이었고, 실험 130일부터 다소 증가한 상태(평균 NH₄-N의 농도 147.5 mg/l)를 유지하였다. 이때의 NH₄-N의 제거율은 약 41.0%로 토양만을 충전한 컬럼보다 약 5% 정도 밖에 증가하지 않았다. 손 등¹⁰⁾은 천연제올라이트를 충전한 다단 토양층에서 하수를 대상으로 처리한 결과 질소 제거율이 증가함을 보고한 바 있으나 본 실험에서는 고농도의 NH₄-N를 제거대상으로 하고 있어서 실험 초기에 흡착효과만을 나타내었다. 유출수의 NO₃-N의 농도추이를 보면 토양만을 충전한 토양컬럼에서의 결과와 마찬가지로 실험 초기부터 질산화가 시작되어 NO₃-N의 농도가 증가하는 경향을 보였으나 실험 120일째부터는 약간 낮아지는 경향을 나타내었다.

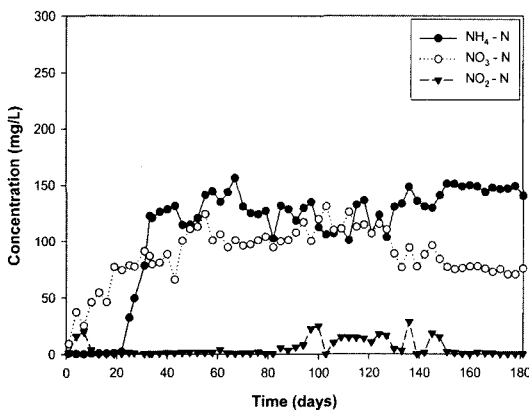
토양컬럼의 초기 유출수중의 pH는 6-8 정도였으나 질산화가 진행됨에 유출수의 pH는 4.0까지 감소하였다. 이것은 토양컬럼 내에서 토양 미생물에 의해 NH₄-N가 NO₃-N로 전환되는 과정에서 pH가 감소한 것으로 판단된다. 이와 같이 토양컬럼에 천연제올라이트를 첨가하면 실험초기에는 제올라이트의 이온교환에 의해 유출수 중의 NH₄-N가 검출되지 않았지만 이온교환 능력을 초과하면 더 이상 흡착되지 않았고 천연제올라이트 20%를 첨가하는 것만으로는 토양컬럼에서 질산화를 촉진시키는 것은 어려울 것으로 생각된다.

Fig. 3에는 토양에 폐굴껍질을 각각 10%와 20%가 되도록 충전한 토양컬럼에서의 질산화를 나타내었다.

폐굴껍질 10%를 첨가한 토양컬럼(Fig. 3(a))에서는 실험초기부터 NH₄-N의 농도 250 mg/l이 거의 제거되어 실험 90일까지는 98.1%의 제거율을 나타내었으나 이후부터는 유출수의 NH₄-N의 농도가 점점 증가하는 경향을 보였다. 이와 반대로 NO₃-N는 실험초기부터 급속하게 증가하였으며 실험 90일까지는 유입된 NH₄-N의 농도가 거의 NO₃-N로 전환되었고 유출수 평균

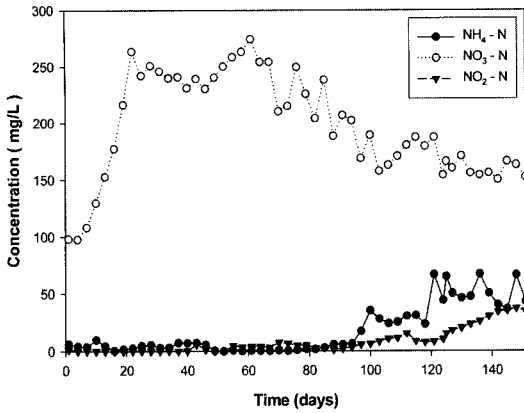


(a) Soil (100%)

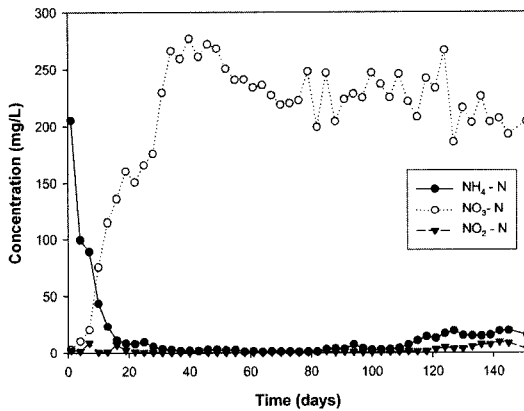


(b) Zeolite (20%)

Fig. 2. Time course of nitrogen concentrations in soil column packed with soil (a) and zeolite (b).



(a) Oyster shell (10%)



(b) Oyster shell (20%)

Fig. 3. Time course of nitrogen concentrations in soil column packed with 10% (a) and 20% (b) of oyster shell.

NO₃-N의 농도는 211.0 mg/l⁰이었으나 실험 91일부터는 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 실험 100일부터 실험 150일까지의 평균 NO₃-N의 농도는 166.37 mg/l로 낮아졌다.

Fig. 3(b)에는 pH를 증대시키고 동시에 질산화를 촉진시키기 위하여 폐굴껍질 20%를 첨가한 토양겉질에서의 질소 농도변화를 나타내었다. 유출수중의 NH₄-N의 농도는 실험 20일까지 급격하게 제거되었고, 실험 110일째부터 NH₄-N의 농도가 증가하는 경향을 보였으나 20 mg/l 이하로 제거되었다. 유출수 NO₃-N의 농도 역시 실험 초기에 증가하여 실험 35일째부터 약 270 mg/l까지 증가하였으나, 실험 52일째부터 감소하는 경향을 나타내었고 유출수 평균 NO₃-N의 농도는 231.7 mg/l로 유입수 NH₄-N가 대부분 NO₃-N으로 전환됨을 알 수 있었다.

폐굴껍질 10%를 충전한 토양겉질에서 실험초기에는 유출수 pH가 7.4 정도였으나 실험기간이 경과함에 따라 pH가 6.4까지 낮아지는 경향을 나타냈고, 폐굴껍질 20%를 충전한 토양겉질에서의 유출수 pH는 7.2로 유지되었다. 高原¹⁴에 의하면 Nitrosomonas의 증식에 따른 최적 pH는 8.0~8.5이고 Nitrobacter의 최적 pH는 7.0~8.0으로 질산화 균의 증식은 pH에 따라 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. NH₄-N를 안정적으로 질산화시키기 위해서는 적어도 pH 7.0 이상으로 유지시켜줄 필요가 있을 것으로 사료된다.

한편, 토양겉질 실험 후 토양내 pH를 조사한 결과 토양만을 충전한 토양겉질인 경우 표층의 pH는 4.49, 중간층 pH가 4.32 및 하층 pH가 4.50을 나타낸 반면에 폐굴껍질 20%를 첨가한 토양겉질인 경우 표층이 7.12, 중간층이 6.97 및 하층이 7.02로서 반응조내의 pH가 토양만을 충전한 토양겉질보다 높았다. 고 등¹⁵은 폐굴껍질과 천연제올라이트를 충전한 2단 겉질을 사용한 하수처리장 방류수의 고도처리에서 폐굴껍질이 반응조내의 pH 상승효과를 올리고 적정 pH를 유지할 수 있음을 보고한 바 있고, 김 등¹⁶과 정 등¹⁷은 암모니아성 질소의 질산화에 따른 pH 감소를 방지하기 위해서는 알칼리도가 필요하며 이론적으로 1 mg의 NH₄-N당 7.14 mg(as CaCO₃)의 알칼리도가 필요하다고 하였다. 이와 같이 폐굴껍질 20%를 충전한 토양겉질에서 질산화가 원활히 이루어지는 것은 알칼리도 보충효과로 인해 pH가 저하 되는 것을 방지하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 토양겉질을 이용하여 고농도의 질소를 안정적으로 질산화를 촉진하기 위해서는 천연제올라이트를 첨가하는 것보다는 토양내의 pH를 증대시켜 주는 폐굴껍질을 첨가하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

2. 유입수 농도와 HRT 변화에 따른 질산화

Fig. 4(a)~(d)에는 NH₄-N의 농도 및 HRT 변화에 따른 질산화 과정을 나타내었다. 유입수 NH₄-N의 농도는 50~400 mg/l이고 초기 HRT는 72시간에서 48시간으로 감소시켰다.

Fig. 4의 (a)와 (b)에서 유입수 NH₄-N의 농도 50 mg/l와 100 mg/l를 공급한 토양겉질인 경우 HRT 48시간일 때 NH₄-N의 제거율은 모두 99%이었으며, 유출수 평균 NO₃-N의 농도는 각각 46.3 mg/l와 98.3 mg/l이었다. 이와 같이 유입수 NH₄-N의 농도가 100 mg/l 이하에서는 HRT를 72시간에서 48시간으로 감소시켜도 유출수 중의 NH₄-N의 농도는 1 mg/l 이하였고 대부분의 NH₄-N는 NO₃-N으로 충분히 질산화가 진행됨을 알 수 있었다.

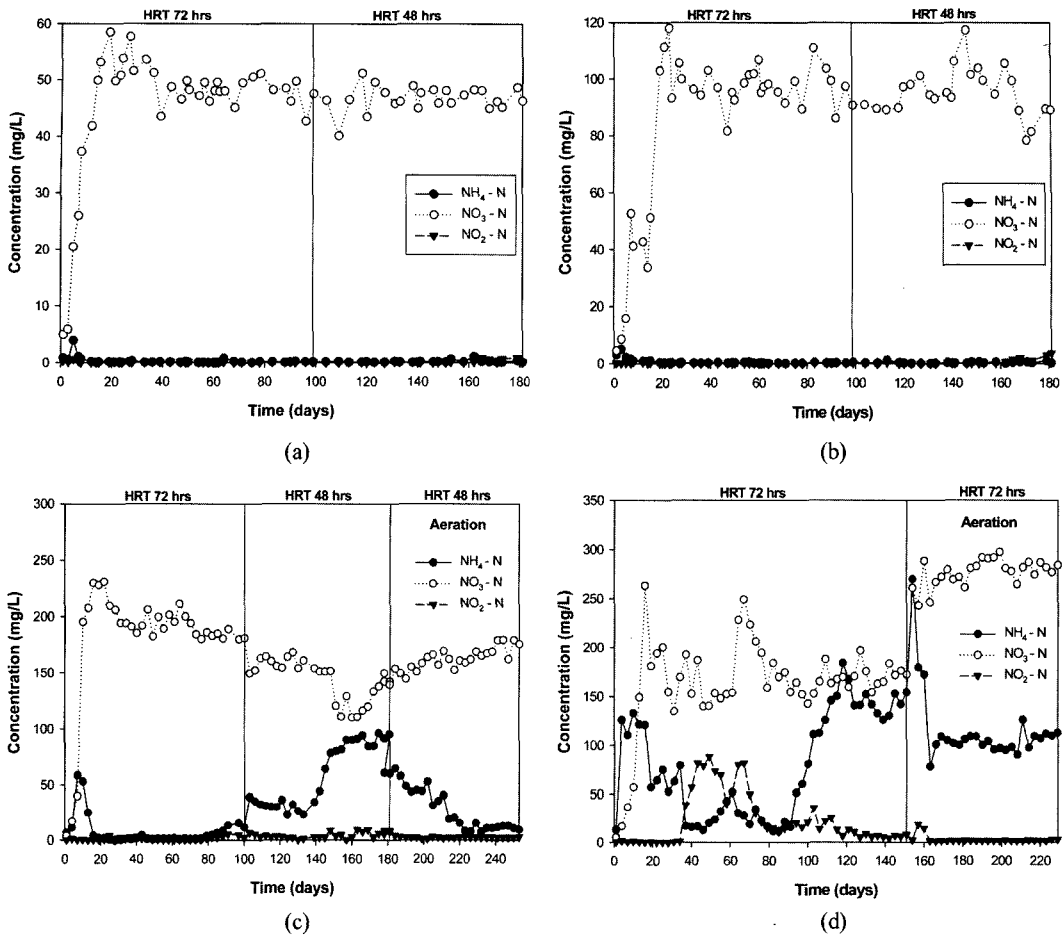


Fig. 4. Time course of nitrogen concentrations in effluent with HRT. Initial $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration; (a) 50 mg/l, (b) 100 mg/l, (c) 200 mg/l, (d) 400 mg/l.

Fig. 4의 (c)와 (d)는 각각 유입수 초기 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도가 200 mg/l와 400 mg/l일 때의 질산화 변화를 나타낸 결과이다. 유입수 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도가 200 mg/l인 경우, HRT 72시간에서는 실험초기에 유출수 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도가 급격히 증가하는 경향을 보였으나 점차 감소하여 194.5 mg/l로 비교적 안정되게 질산화가 진행되었으며 HRT 48시간에서는 HRT의 감소로 인해 유출수 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도가 점점 감소하는 경향을 나타내었다. 유출수 평균 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도는 HRT 72시간일 때 11.4 mg/l로 안정적으로 제거되었으나 HRT를 48시간으로 감소시키면 유출수 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도는 증가함을 알 수 있다.

한편 본 실험에서는 HRT에 따른 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 제거율의 감소를 파악하기 위하여 토양컬럼내의 함수율을 조사하였다. HRT 72시간일 때 함수율은 16.3%에서 HRT

48시간일 때에는 56%로 증가하였다. 본 연구의 토양컬럼은 유입수가 컬럼의 중앙부분의 아랫부분에서 유입된 후 토양층을 지나 컬럼의 외측 아랫부분에서 배출되도록 되어 있다. 즉 합성폐수가 토양층에 유입되면 합성폐수 중의 NH_4^+ 일부는 이온교환에 의해 콜로이드에 부착되고 토양층의 수위는 일단 상승한 후에 아래쪽 방향으로 유동을 일으켜 사이폰작용에 의해 배출된다. 이 때 토양층 상부의 공기가 토양 공극내에 진입되어 산소를 공급하게 되며 호기성 조건이 된 토양속에서 질산화가 진행되도록 한 것이다. 그러나 Fig. 4(c)에서와 같이 함수율이 증가하게 되면 토양공극내로 공기가 들어오는 것이 방해되어 통기가 원활히 이루어지지 않아 질산화가 불안정하게 되는 것으로 사료된다.

Fig. 4(d)의 유입수 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도가 400 mg/l인 경우, 실험 91일째까지 HRT 72시간에서는 유출수 $\text{NO}_3\text{-N}$

N의 농도가 154.2 mg/l~263 mg/l로 불안정하였으며 유출수 NH₄-N의 농도도 실험 90일째부터 계속 증가하는 경향을 나타냈기 때문에 더 이상 HRT를 감소시킬 수 없었다. 부하속도가 큰 경우에는 질산화가 불안정하고 이를 해결하기 위하여 Fig. 4의 (c)와 (d)에서처럼 유입수 NH₄-N의 농도 200 mg/l인 경우에는 실험 180 일째부터 그리고 NH₄-N의 농도 400 mg/l인 경우에는 실험 151일째부터 토양결립내 토양속에 폭기장치를 설치하여 강제적으로 공기를 주입하였다. 폭기장치 설치 후 유출수 NH₄-N의 농도는 점차 감소하였으며 NO₃-N의 농도 역시 155.5 mg/l까지 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 NH₄-N의 농도 400 mg/l을 유입시킨 경우에도 질산화가 진행되어 유출수 NH₄-N의 농도가 낮아지고 NO₃-N의 농도는 증가하는 경향을 보였으며 이때의 유출수 NH₄-N 및 NO₃-N의 농도는 각각 115.2 mg/l와 276.6 mg/l이었다. 이와 같이 부하속도와 유입수 농도가 높거나 체류시간이 짧을 때에는 강제적으로 폭기시켜 토양결립내에 호기성 조건이 유지되도록 하여 질산화 박테리아가 활발히 활동할 수 있는 분위기를 조성하여 주는 것이 타당하다고 판단된다.

3. 토양결립의 위치에 따른 질산화균 수의 분포

Table 3은 제올라이트와 폐굴껍질을 첨가한 토양결립에서 위치에 따른 실험전후의 질산화균 수를 나타내었다.

실험 전 토양 중 암모니아 산화세균 수는 0.68×10 MPN/g · soil이고, 아질산 산화세균 수는 0.23×10 MPN/g · soil이었다. 토양결립에 합성폐수가 유입됨에 따라 암모니아 산화세균과 아질산 산화세균이 초기 토양내의 균수보다 증가하였으며 토양층내부보다 상부에서

Table 3. Cell number according to packed materials in nitrification soil column

Plant species		No. of ammonia-oxidizing bacteria	No. of nitrite-oxidizing bacteria
Soil (100%)	1~13 cm	1.1 × 10 ³	2.3 × 10 ⁴
	13~26 cm	1.8 × 10 ³	1.1 × 10 ³
	26~40 cm	1.5 × 10 ³	4.5 × 10 ³
Zeolite (20%)	1~13 cm	1.7 × 10 ⁴	2.4 × 10 ⁴
	13~26 cm	1.5 × 10 ⁴	1.3 × 10 ⁴
	26~40 cm	1.0 × 10 ³	1.7 × 10 ³
Oyster shell (20%)	1~13 cm	1.4 × 10 ⁶	2.3 × 10 ⁶
	13~26 cm	2.7 × 10 ⁵	7.0 × 10 ⁵
	26~40 cm	7.0 × 10 ⁴	1.3 × 10 ⁵

서 산화세균수 증가가 현저하였다. 폐굴껍질 20%를 첨가한 토양결립에서의 암모니아 산화세균은 7.0×10⁴~1.4×10⁶ MPN/g · soil이며 아질산 산화세균은 1.3×10³~2.3×10⁶ MPN/g · soil으로 천연제올라이트를 첨가한 토양결립보다 높았다. 이는 폐굴껍질을 첨가한 토양결립에서는 결립내의 pH가 중성부근에 유지되었기 때문에 질산화 미생물의 증식이 높은 것으로 사료된다. 또한 토양결립에 있어서 토양층 내부보다 상부에서 산화세균 증식이 높은 것으로 볼 때 토양 결립상부에는 공기가 토양공극 중에 공급되어 호기적 조건이 이루어지나 아랫부분은 상부보다 원활한 공기 공급이 이루어지지 않는 것으로 사료된다. 따라서 토양결립에서 고농도의 NH₄-N의 원활한 질산화를 위해서는 토양층 내부에서의 강제적인 폭기도 고려해야 할 것으로 판단된다. 상기와 같이 토양결립에서도 고농도의 암모니아성 질소를 질산화시키는 것이 가능하므로 고농도의 암모니아성 질소를 함유하고 있는 분뇨 및 축산폐수 처리수의 질소제거에 유용하게 적용될 것으로 판단된다.

IV. 결 론

천연제올라이트와 폐굴껍질을 첨가한 실험실 규모의 토양결립을 사용하여 고농도의 암모니아성 질소의 질산화를 촉진시키기 위한 영향을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 폐굴껍질을 20%를 첨가할 토양결립은 HRT 72시간에서 250 mg/l의 NH₄-N를 93.8% 제거할 수 있었으며 제올라이트(20%)를 첨가한 토양결립에서는 실험 초기에만 NH₄-N의 흡착효과만을 나타내었다.
2. 유입수 NH₄-N의 농도 50 mg/l와 100 mg/l인 경우 HRT 48시간에서도 NH₄-N가 99%정도 제거되었으며 유출수 평균 NO₃-N의 농도는 각각 46.3 mg/l와 98.3 mg/l로 유입수 NH₄-N는 대부분 NO₃-N로 전환되었다.
3. 유입수 NH₄-N의 농도 200 mg/l인 경우 HRT 48시간에서 NH₄-N의 평균제거율이 74.8%에 머물렀으나 토양결립 내부에 폭기장치를 설치한 결과 NH₄-N의 평균제거율은 94.7%로 개선되는 효과를 나타냈으며, 유입수 NH₄-N의 농도 400 mg/l인 경우에는 HRT 72시간에서도 질산화가 불안정하였으나 마찬가지로 강제폭기를 실시한 결과 질산화가 증가하는 경향을 보였다.
4. 실험종료 후 토양결립 내부의 암모니아 및 아질산 산화세균을 조사한 결과 폐굴껍질(20%)을 첨가한 토양결립에서 각각 1.4×10⁵과 2.3×10⁶ MPN/g · soil까지 증가하였다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 조선대학교 연구보조비 지원에 의하여 연구되었음. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 박현건, 이춘식, 이홍재, 서동철, 허종수 : 모래와 굴폐각을 이용한 인공습지 오수처리장치 개발. 한국물환경학회지, **20(5)**, 437-446, 2004.
2. 권순국, 윤추경, 흡수성 : Biofilter를 이용한 농촌 소규모 오수처리 시설의 성능. 한국환경농학회지, **18(4)**, 310-315, 1999.
3. 김혜주 : 자연형 하천 조성을 통한 하천의 자정능력 향상·식물의 수질정화 작용을 중심으로. 한국수자원학회지, **32(5)**, 148-152, 1999.
4. 정동양 : 자연친화형 농어촌 하수처리장 모델개발. 한국환경복원녹화기술학회지, **2(1)**, 10-20, 1999.
5. 박영식 : 부폐조와 모래트랜치를 이용한 소규모 오수처리. 한국환경위생학회지, **9(1)**, 28-33, 2003.
6. 임재명, 김병욱, 강성환 : 수정된 토양트랜치 공정을 이용한 소규모 오수처리. 한국수처리기술연구회지, **5(4)**, 13-17, 1997.
7. Attanandana, T., Saitthiti, B., Thongpae, S., Luanmanee, S. and Wakatsuki, T. : Multi-media-layering system for food service Waster treatment. *Ecological Engineering*, **15**, 133-138, 2000.
8. Luanmanee, S., Attanandana, T., Masunaga, T. and Wakatsuki, T. : The efficiency of a multi-soil-layering system on domestic wastewater treatment during the ninth and tenth years of operation. *Ecological Engineering*, **18**, 185-199, 2001.
9. Masunaga, T., Sato K. and Wakatsuki, T. : Removal of Simazin, fenitrothion, Napropamid and Tetrachloro ethylene by multi-soil-layering method. *J. of Japan Society on Water Environment*, **25(6)**, 361-366, 2002.
10. 손대회, 정윤철, 신정훈, 정진영, 안대회 : 다단토양을 이용한 하수처리에 관한 연구. 한국물환경학회지, **20(3)**, 215-222, 2004.
11. 신방웅, 박홍규 : 토질시험법, 구미서관, 1998.
12. 김종택 : 수질오염공정시험법, 신광출판사, 서울, 1999.
13. 양창술, 김종식 : 토양미생물 실험법, 월드사이언스, 서울, 2002.
14. 高原義昌 : 廢水の生物處理. 地球社, 東京, 312-318, 1985.
15. 고헌용 : 폐굴껍질과 천연제올라이트를 충전한 2단 연속식컬럼에 의한 하수처리장 방류수의 고도처리. 한국폐기물학회지, **19(1)**, 108-114, 2002.
16. 김은호, 성낙창, 장성호 : 정석탈인공정의 정석제로써 폐굴껍질의 재활용에 관한 연구. 한국환경위생학회지, **23(4)**, 133-138, 1997.
17. 정오진, 최형일, 정경훈 : 폐굴껍질에 의한 합성폐수중의 인 제거. 한국환경위생학회지, **26(3)**, 43-49, 2000.