

호흡량에 기준한 강둑여과지 주변 표층토의 무기질소 변환

공인철·배진희·최은영·김승현

영남대학교 환경공학과

Biotransformation of inorganic nitrogens in soil of near bank filtration sites using respirometer

In-Chul Kong, Jin-Hee Bae, Eun-Young Choi, Seung-Hyun Kim

Dept. of Environmental Engineering Yeungnam University

ABSTRACT

Biotransformation of inorganic nitrogens, which are possible contaminants of bank filtered water, in soil of near bank filtration site was investigated based on oxygen consumption and changes of chemical parameters in respirometer. Biotransformation activities of inorganic nitrogens at different conditions of pH, water content, and added initial $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ were compared. At original low pH and 20% of water content, nearly no biotransformation activity of inorganic nitrogen was observed, in addition, control and NH_4 -added sets did not show any significant differences of oxygen consumption. Among tested conditions, the highest activity was observed at 25% water content and pH 8. Nearly 98% nitrification activity was observed at sets amended with 400 mg $\text{NH}_4\text{-N/kg}$ soil as $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ in the condition of pH 8 and 20~23% water content. However, considerable activity of subsequent denitrification was not observed.

요 약 문

강독여과의 적지로 판단되는 지역의 배후 농경지 표층토에 대한 무기질소 변환 활동도를 호흡량 측정기에서 소비한 산소량에 기준하여 조사하였다. 초기 표층토 pH(약 4.8~5.7)를 변화시키지 않고 수분함량을 약 20%로 조정된 상태에서 무기질소의 변환을 관찰한 결과 대조군과 실험군의 뚜렷한 호흡량 및 무기질소변환은 관찰할 수 없었고 조사한 실험조건에서 수분 25%, pH 8 정도에서 가장 활발한 미생물 활동도가 관찰되었다. 또한 초기 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 400 mg $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도에서 98%정도의 질산화가 조사되었으나 탈질화는 거의 발생하지 않았다.

1. 서 론

한국의 4대강 유역 일부는 다양하고 집약적인 농업활동이 이루어지고 있을 뿐 만 아니라 대도시와 공단의 증가로 인해 상수 원수로 사용되는 강물의 오염이 빠른 속도로 증가하고 있는 추세이다. 특히 영남지역의 중요한 상수원수인 낙동강 유역은 지역에 따라 차이는 있으나 오염정도가 상당한 수준에 있으므로 하천수를 직접 상수원수로 이용하는 방법은 다양한 미량 유기오염물질과 난분해성 물질의 함유로 인한 음용수 생산비용의 증가 등의 문제점을 안고 있다. 유럽의 라인강이나 다뉴브강을 포함한 여러 지역에서는 19세기 중엽부터 안전한 상수원수 취수를 위해 오랫동안 자연 시스템을 최대한 이용한 강독여과수 취수법을 사용하고 있다¹⁻³⁾. 우리나라의 경우 대규모 강독 여과수 이용은 아직 시험단계에 있으나 사해천과 강주변의 총적층이 발달하여 강독 여과에 필요한 입자를 갖추고 있는 것으로 알려져 있으나, 강독여과정의 적지로 논의되는 대부분의 지역은 강으로부터 농경지에 인접해 있으므로 다량의 비료 및 농약이 살포되고 유실량의 일부가 하천수계 및 지하수로 유입되어 강독여과수를 오염시킬 가능성이 있다²⁻⁷⁾.

강독여과수를 취수할 때 주변 농경지에 살포된 비료는 $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 형태로 식물에 이용되고 유출된 과다한 양은 질산화, 탈질화

과정을 거치면서 탈질화 되지 않은 질소 성분은 지하층으로 이동한다. 오염 가능한 질소화합물들 중 음전하 특성인 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 토양에 덜 흡착되며 이동성이 있을 뿐 만 아니라⁸⁾ 또한 청색증(methemoglobinemia)이나 다른 건강장해를 끼칠 수 있으므로 지하수 오염에 중요한 원인으로 알려져 있다⁹⁻¹⁰⁾. 실제로 낙동강의 한 지역을 시험 조사한 바에 의하면 강물의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 약 4 mg/L인데 비해 강독여과수의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 약 16 mg/L이었고 이는 음용수 기준치를 넘는 수치이고, 배후 농지로부터의 오염물 유입을 시사하는 것이라고 볼 수 있다.

따라서 시비된 비료의 잔존량이 불포화대를 거쳐 지하수 오염원으로 유입될 수 있으므로 토양에서 무기 질소성분의 생물적 변환에 대한 연구의 필요성이 있다고 하겠다. 본 연구에서는 강독여과의 적지로 판단되는 낙동강유역 배후지의 표층토를 채취하여 다양한 환경조건에서 미생물에 의한 암모니아성 무기질소 생변환능력을 호흡량 측 토양에 존재하는 미생물에 의해 소모되는 산소량에 근거하여 고찰하고자 한다. 특히 질소성분의 대부분은 표층토에서 생변환되고 질소변환 활동도는 토양의 pH 및 수분함량등의 다양한 환경요인에 의해 활동도가 영향을 받으므로 강독여과지 주변 농지의 무기질소 변환에 대한 정보를 도출하고자 미생물에 의한 질소변환 활동도를 호흡량 측정기를 사용하여 미생물

활동에 의해 소비되는 산소량, 미생물 개체수 변화 및 무기질소 변환 정도를 (1) 수분함량 조절에 따른 무기 질소 변화, (2) 수분함량과 pH 변화에 따른 시간별 무기 질소 변화, (3) 조사된 적정 pH와 수분함량에서 초기 암모니아 농도에 따른 무기질소 변환의 순서로 연구하였다.

2. 실험 방법 및 분석

2.1 시료채취

시료는 토양채취기(auger)를 이용하여 채취하였으며, 낙동강의 제외지 홍수터에 위치한 감밭, 수박밭, 복숭아밭, 감자밭, 포도밭으로 이용되고 있는 강독여과지 근처 농지(10지점)의 표층 0~30 cm 깊이에서 채취하여 시료의 균일성을 위해 충분히 혼합한 후 사용할 때까지 저온실에 보관하였으며 목적에 따라 일부는 풍건시킨 후 2 mm체로 걸러 분석에 이용하였다.

2.2 토양 물리, 화학적 및 생물학적 특성조사

채취한 사질토양의 일반적인 특성은 pH, 수분함량, 유기물함량, 총질소, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 양이온치환용량(CEC: cation exchange capacity)에 대한 항목을 조사하였다¹¹⁾.

표층토에 존재하는 일반세균은 평판계수법에 의한 집락형성도(colony forming unit)로, 질산화 및 탈질화 박테리아에 대해서는 최적확수도(most probable number)로 조사하였다.

2.3 호흡량에 기준한 무기 질소 변환 활동도 측정

표층토의 무기질소 변환 능력을 측정하기 위해 호흡량 측정기(BI-1000 Electrolytic Respirometer, Bioscience, Inc. USA)를 사용하여 미생물 호흡에 필요한 산소소비량을 측정하여

질소 변환 능력을 비교하였다. 실험조건에 따라 pH, 수분함량, 다양한 농도의 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 을 첨가하여 호흡량측정기에 연결하여 토양 활동도에 의해 소비되는 산소 소모량에 따라 발생하는 산소량을 조사하였다¹²⁾. 모든 실험은 150 ml 용량의 삼각플라스크에 습토기준 50 g의 표층토를 첨가하여 정치배양 형태 호흡량 측정기의 수조를 $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 표층 밭토양의 특성

실험에 사용된 토양 특성은 Table 1과 같다. 표층토의 pH는 4.8~5.7로 약산성이었으며 수분함량은 7.22~10.37%, CEC는 건토 100 g당 평균 7.17~8.80 meq로 우리나라 일반 답토양 수준인 11 cmol/kg에 상응한 치환능력이었다. 유기물 함량은 0.67~3.31%로 전체적으로 우리나라 농경지 토양의 평균 유기물 함량 2.3%와 비슷한 수준이었다¹³⁾.

표층토에 존재하는 무기질소화합물인 암모니아, 질산, 아질산의 농도는 $\text{NH}_3\text{-N}$ 가 kg 건토당 5.81~10.38 mg-N, NO_3^- 가 kg 건토당 2.26~7.43 mg-N 범위로 조사되었고 NO_2^- 은 거의 검출되지 않았다. TKN은 kg 건토당 102~354 mg-N 범위로 조사되었다. 그러나 표층토에 잔존된 무기질소의 농도는 지역별, 경작지별 그리고 시기에 따라 다양한 농도가 관찰될 수 있을 것이다.

생균수 측정은 100 배로 희석한 PTYG 배지를 사용하였으며¹⁴⁾ 생균수는 대략 건토 1g당 $2.81 \times 10^6 \sim 8.59 \times 10^9$ CFU 범위의 균수가 관찰되었다. 전형적으로 토양의 생균수는 대개 g건토당 $10^8 \sim 10^9$ CFU가 존재하는 것으로 알려져 있으므로¹⁵⁾ 본 조사지역도 전형적인 결과에 상응하는 계

Table 1. Physicochemical and microbial Characteristics of Soils collected from near Bank Filtration Sites

pH	Moisture cont.(%)	CEC(cmol/kg dry wt.)	Organic cont. (w/w dry wt.%)	Concentration(mg N/kg dry soil)		
				NH ₃ -N	NO ₃ -N	TKN
4.79~5.73	7.22~10.37	7.17~8.80	0.67~3.31	5.81~10.38	2.26~7.43	102~354
Viable cells (CFU/g dry wt.)		Nitrifier(ammonium oxidizer) (MPN/g dry wt.)		Denitrifier (MPN/g dry wt.)		
2.81 × 10 ⁶ ~8.59 × 10 ⁷		7.9 × 10 ³ ~7.9 × 10 ⁴		5.53 × 10 ² ~5.54 × 10 ⁷		

수가 조사되었다. 생균수는 토양의 종류 및 배지종류에 따라 다양한 범위의 집락형성도가 관찰되나 희석 PTYG배지를 사용한 Balkwill and Ghiorse¹⁶⁾의 조사에 의하면 5~6 LogMPN 정도가 조사되었다. 생균수에 이어 조사 지역의 질화균(nitrifying bacteria)의 분포는 현재까지 대부분의 연구자들에 의해 가장 많이 사용되는 MPN 방법으로 측정하였다. 조사된 시료에 대해 질화균중 암모니아산화균은 건토 g당 $7.9 \times 10^3 \sim 7.9 \times 10^4$ 으로 관찰되었고 탈질균은 $5.53 \times 10^5 \sim 5.54 \times 10^7$ 으로 조사되었다. 대체적으로 조사된 암모니아 산화균은 Waggoner and Zuberer¹⁶⁾와 Bodelier et al.¹⁷⁾에 의해 조사된 3~5 LogMPN 범위와 일치하였다. 탈질균의 경우 4~5 Log MPN 정도가 관찰된 Sotomayor and Rice¹⁸⁾ 연구보다는 약간 많은 탈질균수가 관찰되었다.

3.2 암모니아성 질소 첨가에 따른 호흡량 변화

과다한 비료 시비에 따라 잔존된 무기질소의 변환 능력 및 환경 조건 변화에 따른 미생물 활동도를 조사하기 위해 수분함량과 pH 변화 및 다양한 농도의 암모니아성 질소, (NH₄)₂SO₄, 첨가에 따른 강독여과수 취수원 주변 밭 표층토의 활동도를 토양의 호흡량(산소소비량)에 기준하여 간접적으로 조사하였다.

3.2.1 수분함량 조절에 따른 호흡량 변화: 표층토 50 g에 (NH₄)₂SO₄를 1 kg wet soil당 500 mg-N를 첨가하고 초기수분을 20 w/w%로 조절한 후(pH는 조정치 아니함), 배양 0, 5, 11, 20 및 37일에 실험군과 대조군의 호흡량 및 토양 특성을 조사하여 호흡량과 무기질소 변환을 비교하였다. 초기 pH는 약 4.4~4.9정도로 관찰되었고 초기 토양의 생물적 및 물리화학적 특성은 Table 1에 나타내었다.

전 배양기간을 통해 pH 및 수분함량은 거의 일정하게 유지되었으며 대조군의 경우에 NH₃-N과 NO₃-N은 각각 초기 10.38과 2.26 mg-N/g dry soil에서 21.17과 13.67 mg-N/g dry soil로 증가하였고 실험군의 경우에는 뚜렷한 암모니아성 및 질산성질소의 변화는 관찰되지 않았다. Fig. 1의 결과와 같이 총 32일간의 배양기간에서 2단계의 활동도가 관찰되었다. 초기 약 9일까지의 대조군과 실험군 산소소모량은 0.094~0.103 mgO₂/g soil/day범위의 산소소비율 활동도 후에 약 12일간의 지체기를 거친후 약 23일 후부터 37일까지 0.1104~0.1136 mgO₂/g soil/day범위의 산소소모 호흡량이 관찰되었다. 초기단계의 활동도는 주로 종속영양균에 의해, 후반단계는 주로 질산화에 기인한 결과로 예측된다. 그러나 실험군의 경우 37일 후의 암모니아성 질소농도는 초기에 첨가된 농도와 뚜렷한 차이가 관찰되지 않았고 또한 낮은 질산농도와 소모된 산소량으로 보아 본 실험조건에서

는 매우 낮은 활동도가 존재하는 것으로 사료된다. 무기질소 변환과정에 관여하는 미생물 활동도는 이용가능한 기질, 온도, pH, 산소 및 수분함량의 조건들에 의해 일반적으로 지배된다. 최적 질산화 조건으로는 온도 30~35℃, 수분함량 50~67% of soil water-holding capacity, pH 6.6~8.0로 알려져 있고 일반적으로 토양 pH가 5보다 낮을 경우 질산화 정도가 굉장히 감소하는 것으로 알려져 있다. 9) 본 실험의 저조한 무기질소 변환은 조정하지 않은 낮은 pH 조건에 기인한 것으로 사료된다. 그러나 어떤 경우에는 일부 질화균이 이러한 부적절한 조건에 적응되어 산성광산 토양에서 질산화가 관찰되기도 한다⁹⁾. 배양중 균수의 변화를 관찰해보면 37 일의 배양기간 후 생균수는 약간 증가하였으나 암모니아산화균과 아질산산화균은 점차 감소하는 경향이 관찰되었다.

3.2.2 수분함량과 pH 조정에 따른 호흡량변화: 표층토의 무기질소 변환 활동도의 중요 환경인자중 적정 pH와 수분함량 조건을 알기 위해 초기 (NH₄)₂SO₄를 200 mg-N/(kg wet soil)되도록 첨

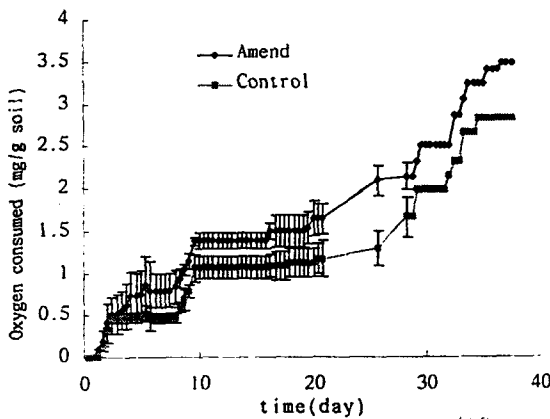


Fig. 1. Comparison of oxygen consumption with and without addition of NH₃-N.

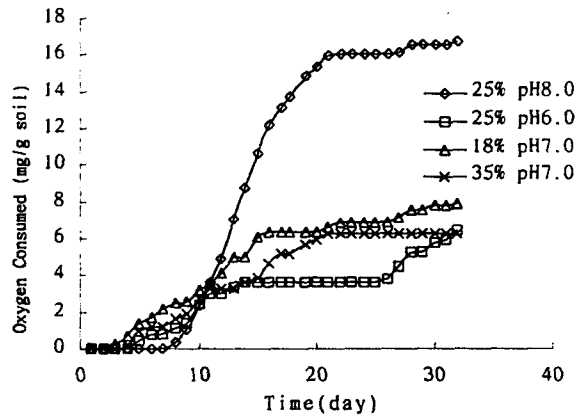


Fig. 2. Profiles of total oxygen consumption at different conditions of pH and water contents in respirometer.

가한 후 수분함량과 pH를 조정하여 각 조건에 따른 무기질소 변환정도를 호흡량에 기준하여 조사하였다. 조건으로는 수분 25%에 pH를 6과 8로 조정하였고, 또한 pH 7에 수분함량을 18와 35%로 조정하여 32 일간 배양하였다.

수분함량을 25%로 고정한 조건에서 pH 8인 경우 32일간 배양기간중 총 846 mgO₂ 산소발생량이 관찰된 반면에 pH 6에서는 322 mgO₂ 산소발생량이 관찰되었다. 또한 pH를 7로 고정한 후 수분함량을 18과 35%로 조정하였을 경우에도 각각 420과 311 mgO₂ 산소발생량이 관찰되었다. 따라서 조사된 네 조건 중에서 산소소모량에 기준할 때 pH 8, 수분함량 25%인 조건에서 가장 활발한 활동도가 관찰되었다(Fig. 2). 수분함량이 25%, pH 8인 경우에는 약 8일 정도의 지체기를 거친 후 배양 21일 정도까지 급격한 산소소비율이 1.305 mgO₂/g soil/day로 관찰되었고 이후로는 산소소모량이 아주 완만한 상태로 유지되었다. 25%, pH 6인 조건에서도 산소소모량은 낮으나 비슷한 경향이 관찰되었다. 수분함량 25% pH 8인 조건의 높

Table 2. Characteristics of incubated Soils at different Conditions of pH and Water Contents

	Initial	Final			
		25% water cont.		pH 7	
		pH 8	pH 6	18% water cont.	35% water cont.
NH ₃ -N mg/kg dried soil	232.1	12.3	369.2	195.0	253.0
NO ₃ -N mg/g dried soil	3.1	158.7	10.8	123.5	26.6
Viable bacteria (CFU/g dried soil)	2.76 × 10 ⁷	8.30 × 10 ⁶	3.37 × 10 ⁶	5.35 × 10 ⁶	8.15 × 10 ⁶
Ammonium oxidizer (MPN/g dried soil)	3.9 × 10 ³	6.89 × 10 ³	2.45 × 10 ³	3.26 × 10 ³	3.26 × 10 ³
Denitrifier (MPN/g dried soil)	2.62 × 10 ⁶	4.08 × 10 ⁶	2.06 × 10 ⁶	1.51 × 10 ⁶	1.85 × 10 ⁶

은 산소소비량은 적절한 조건에 따른 종속영양균과 질화균의 활동도에 기인한 결과일 것이다. 따라서 호흡량에 기준하여서 조사된 조건에서 토양의 활동도는 수분함량 25%, pH 8 > 18%, pH 7 > 25%, pH 6 > 35%, pH 7의 순서로 활동도가 관찰되었다.

Table 2에 표시된 바와 같이 호흡활동도가 높은 조건(25%, pH 8)에서는 배양 기간후의 암모니아성 질소성분이 초기에 비해 15 배 정도 감소하였고 질산성 질소도 초기에 비해 34 배 정도 증가하였다. 최적조건인 25%, pH 8에서의 산소소모량은 종속영양균과 더불어 질산화균의 활동에 의한 것일 것이나, 조사된 다른 조건에서의 산소소모량은 낮은 질산화와 높은 종속영양균 활동에 의한 결과일 것이다.

3.2.3. 초기 암모니아 농도차에 따른 호흡량 변화: 초기 무기질소 농도에 따른 토양의 무기질소 변환능력을 조사하기 위해 토양의 pH와 수분함량을 각각 초기 4.6에서 약 8로, 7.22%에서 약

20~23%로 조정된 후 초기 (NH₄)₂SO₄ 농도를 50, 200과 400 mgNH₃-N/(kg wet soil)로 조정하여 44일간 배양한 후 조건에 따른 토양의 활동도를 관찰하였다. 초기 토양조건과 44일간의 배양 후 조건은 Table 3에 나타내었다. 수분함량의 변화는 적었으나 pH는 초기 첨가된 암모니아의 성분이 증가할수록 약간 낮아졌다. 이러한 현상은 질산화에 의한 알카리도의 감소에 따른 원인일 것이다. 모든 실험군에서 초기에 첨가된 암모니아성분의 97% 이상 생변환되었음이 관찰되었다. 따라서 적정 수분함량과 pH 조건에서는 400 mg-N/(kg wet soil)의 초기 질소성분에서도 암모니아 변환에는 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다(Table 3).

또한 생균수와 암모니아 및 질산화균수를 조사하였으나 정확한 상관관계를 도출하기는 어려웠으며 대략 생균수는 6에서 7 Log CFU 정도로 증가하였고 탈질균은 4에서 7 Log MPN 정도로 증가하였다. 암모니아와 아질산화균의 경우에는 다양한 변동현상이 관찰되었다. 토양에서 탈질화에 관여하는 균은 일반적으로 호기성균으로 알려져 있고 혐

Table 3. Characteristics of incubated Soils at different initial NH₃-N Concentration

	Initial condition	Amount of nitrogen amended (mg N/kg wet soil)		
		50	200	400
Water cont.(%)	7.22	20.9	21.8	21.8
pH	4.6	8.7	8.1	7.7
NH ₃ -N (mg/kg dry soil)	20.61	7.31	5.77	10.18
NO ₃ -N (mg/kg dry soil)	2.18	7.97	53.42	328.04
Viable bacteria (CFU/g dry soil)	3.86 × 10 ⁶	2.39 × 10 ⁷	1.39 × 10 ⁷	1.29 × 10 ⁷
Ammonium oxidizer (MPN/g dry soil)	4.07 × 10 ⁴	1.86 × 10 ⁴	1.66 × 10 ⁴	8.04 × 10 ⁴
Denitrifier (MPN/g dry soil)	4.94 × 10 ⁴	1.89 × 10 ⁷	5.63 × 10 ⁷	1.90 × 10 ⁷
Oxygen uptaken (mgO ₂ /50g wet soil/44.5d)	-	755.23	800.34	2379.68

Table 4. Comparison of oxygen Consumption Rates at various Conditions of pH, Water content and Initial Ammonium Contents

Condition			Oxygen consumption rates	
Nitrogen amended (mg NH ₃ -N/kg wet soil)	pH	Water cont. (%)	(mg O ₂ /g soil)	(mg O ₂ /g soil/day)
0	4.9	20	3.48	0.0928
500	4.3	20	2.83	0.0755
200	8.0	25	16.92	0.5288
200	6.0	25	6.44	0.2013
200	7.0	18	8.40	0.2625
200	7.0	35	6.22	0.1944
0	9.5	20.0	25.13	0.5647
50	8.7	20.9	15.10	0.3393
200	8.1	21.8	16.01	0.3598
400	7.7	21.8	47.59	1.0694

기성에서는 질산을 산소대신 전자수용체로 사용하므로 표층토의 산소부재시 질산화에 의한 질소의 존재로 탈질화가 발생할 수 있을 것이다. 첨가된

농도중 최대 농도인 400 mg-N/(kg wet soil)에서는 약 98%의 초기 첨가된 암모니아성 질소가 질산으로 생변환 되었으나 생변환된 대부분의 아질산

은 44일간의 배양기간 까지도 활발한 탈질화는 관찰되지 않았다.

설중점연구소 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사를 드립니다.

4. 결 론

강독여과지 주변 경작지 표층토에 과다 시비된 비료에 의한 무기질소 성분의 변환을 호흡량에 기준하여 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

- (1) 조사된 경작지의 표층토의 경우 암모니아의 생물적 변환을 위한 실험적 조건에서는 수분 함량 약 25% 와 pH 8정도에서 활발한 활동도가 관찰되었으며 적정 수분함량에서도 낮은 pH 에서는 무기질소의 변환이 관찰되지 않았다.
- (2) 암모니아의 질산화는 400 mg/(kg wet soil)의 농도에서도 활발하게 발생하였으나 뚜렷한 탈질화 현상은 관찰되지 않았다.
- (3) 생균수, 암모니아산화균, 질산화균과 호흡량은 변동이 심하여 상관관계를 도출하기는 용이하지 않았다
- (4) 전 실험과정에서 배양 후 생균수는 6~9 Log CFU, 탈질균은 대략 6~8 Log MPN 존재하는 것으로 조사되었으나 암모니아산화균 및 아질산화균은 5 Log MPN 보다 적게 존재하는 것으로 조사되었다
- (5) 적정조건에서 호흡량(산소소모량)을 조사한 결과 200 mgNH₃-N/(kg wet soil) 에서는 대략 g토양당 16~17 mgO₂가 소모되었고 조사된 최대 농도인 400 mgNH₃-N/(kg wet soil) 에서는 48 mgO₂가 소모되었다. 또한 적정조건의 control에서는 25 mgO₂가 소모되었다.

사 사

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 대학부

참 고 문 헌

1. 김승현, 박영규, 이철희 “강독여과에서 최적 취수정 위치 선정을 위한 모델개발,” 대한환경공학회지, 20(1), pp83-92(1998).
2. Schubert, J. “Experience with bank filtration for the public water supply in D sseldorf, Germany,” International Symposium in Commemoration of 50th Anniversary of Yeungnam University, pp123~160(1997).
3. Lindner, K. “Water quality management of the Rhine river from the view of water works,” pp183~204(1997).
4. 정동양 “강변 여과 공법을 통한 용수확보,” 제 4회 세계 물의 날 기념 토론회, “물부족 과연 해결방법은 없는가?”, 삼성지구환경연구소, pp81~113, 1996년 3월 26일
5. 中村陽子 “農藥の環境汚染防止對策,” 水質汚濁研究 14(2), pp92~95(1991).
6. 茂岡忠義 “農藥へ水生生物生態系への影響評價,” 水質汚濁研究 14(2), pp88~91(1991).
7. Hallberg, G. R. “From holes to herbicides : Agriculture and groundwater quality,” *J. Soil Water Conserv.* 41(6), pp357~364(1986).
8. Domenico, P. A., and Schwarz, F. W., “Physical and chemical hydrogeology,” John Wiley & Sons, Inc. New York(1990).
9. Pierzynski, G. M., Sims, J. T., and Vance, G. F. *Soils and Environmental Quality*, Lewis Publishers(1994).
10. Prasad, R., and Power, J. F. “Nitrification inhibitors for agriculture, health, and the environment,” *Adv. Agron.* 54, pp233~281

- (1995).
11. 토양화학분석법, 농촌진흥청(1989).
 12. 공인철 외 6인 "강독여과지 주변의 밭에 살포된 무기질소의 거동연구," 한국토양환경학회지, 3(1), pp11-20(1998).
 13. 김정국 "낙동강 유역 농업지대의 수질 및 토양오염 조사," 영남대학교 농학과 석사학위논문, pp31(1997).
 14. Balkwill, D. L., and Ghiorse, W. C. "Characterization of subsurface bacteria associated with two shallow aquifers in Oklahoma," *Appl. Environ. Microbiol.* 50(3), pp580~588(1985).
 15. Tate III, R. L. "Soil Microbiology." John Wiley & Sons, INC(1995).
 16. Waggoner, P. J., and Zuberer, D. A. "Response of nitrification and nitrifying bacteria in mine spoil to urea or ammonium sulfate," *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, pp477~486(1996).
 17. Bodelier, P. L. E. *et al.* "dynamics of nitrification and denitrification in root-oxygenated sediments and adaptation of ammonia-oxidizing bacteria to low-oxygen or anoxic habitats," *Appl. Environ. Microbiol.* 62(11), pp4100~4107(1996)
 18. Sotonayor, D., and Charles, W. R. "Denitrification in soil profiles beneath grassland and cultivated soils," *Soil Sci. Am. J.*, 60, pp1822~1828(1996).
 19. Weaver, R. W., Mickelson, S. H., and Bigham. J. M. *Methods of Soil Analysis Part2.* Soil Sci. Soc. Am. Inc(1994).