

## A pilot study on attenuation of nitrate in a paddy rice field: preliminary results

최병영, 윤성택, 김강주\*, 김동승, 전종욱, 윤성문

고려대학교 지구환경과학과 및 천부지권환경연구실, \*군산대학교 환경공학과 (styun@korea.ac.kr)

### <요약문>

국내 대부분의 경작지를 차지하고 있는 논농사 지역에서의 질산성 질소의 자연저감을 고찰하기 위하여, 세 유형의 수조 환경을 조성하고 mesocosm 실험 연구를 수행하였다. 두개의 mesocosm에는 논토양을, 그리고 비교를 위하여 다른 하나에는 발토양(황토)을 사용하였으며, 하나의 논토양 mesocosm과 발토양(황토) mesocosm에는 벼를 재배하였다. 인위적으로 질산성 질소 성분을 용해한 지하수를 주입수로 사용하였으며, mesocosm을 통과한 물 시료를 41일 동안 12시간 또는 24시간 간격으로 채취하고 화학 분석을 실시하였다. 실험 결과, 논토양에서는 실험 시작과 동시에 급격한 환원환경이 형성되었으며, 그 결과 탈질반응에 의해 질산성 질소의 농도가 현저히 저감되었다. 분석 자료의 해석 결과, 논토양 mesocosm에서는 유기물이, 발토양 mesocosm에서는 철이온( $Fe^{2+}$ )이 질산성 질소의 탈질 반응에 중요한 역할을 수행하는 것으로 판단된다.

Key word : mesocosm, 질산성 질소, 탈질 반응, 유기물, 철이온

### 1. 서론

농업지역의 지하수 수질 저하는 세계 여러 나라에서 중요한 환경문제로 인식되고 있다. 특히 질산성 질소의 오염은 인간의 건강 뿐 아니라 강과 호수의 부영양화를 유발하기 때문에 가장 큰 관심 대상이 되고 있다(Ghosh and Bhat, 1998). 많은 연구자들은 강기슭(riparian)과 습지(wet land) 환경에서의 질산성 질소의 저감 기작을 연구하여 왔다(Martin et al., 1999; Liesack et al., 2000). 습지는 물, 토양, 식물, 미생물 등으로 이루어진 복잡한 생태계로서, 지구화학반응과 지구미생물학 작용, 그리고 식물에 의한 섭취를 통하여 질산성 질소를 포함한 영양분과 기타 오염물질의 거동에 영향을 미치는 sink 및 source로서의 역할을 한다. 특히 자연적인 습지나 인공적으로 건설된 습지는 질산성 질소에 오염된 하수 및 관개수를 처리하는 시스템으로 사용되어왔다. 한국을 포함한 아시아 몬순 지역에서 논은 벼를 재배하는 시기동안 대부분 물에 침수되어 있어 습지로서의 역할을 한다. 경작기간 동안에 논이 물에 침수되면 토양 속으로의 산소 유입은 제한되며 동시에 유기물에 의해 소모되게 된다. 그 결과, 물과 토양의 경계면 근처에서는 산화환경과 환원환경의 경계를 형성하게 되며, 환원환경에서는 산소의 소모 외에 선택적인 전자수용체에 의하여  $NO_3^-$ ,  $Mn^{4+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $CO_2$ 가 순차적으로 소모되게 된다.

우리나라의 경우 논이 차지하는 비율은 전체 경지 면적의 60%이며 쌀 생산량은 OECD 국가 중 3번

째를 차지하고 있다. 또한 2000년도에 화학비료 사용량은 801,000톤이었는데 이는 OECD 국가 중 14 번째이며, 아울러 질소계 비료의 생산량은 420,000톤으로 13번째이다. 한편, 비료의 과잉 투여로 인하여 농업지역의 천층 지하수는 질산성 질소로 심하게 오염된 것으로 보고되고 있다. 이에, 본 연구는 mesocosm 실험 연구를 통하여 논농사 지역에서의 '질산성 질소의 자연저감을 평가하고자 수행되었는바, 본 발표에서는 현재까지의 연구 결과를 요약하여 소개하고자 한다.

## 2. 연구 방법

본 연구를 위해 세 개의 mesocosm을 제작하고, 고려대학교 아산이학관 옥상에 설치하였다(그림 1). 그림에서 보는 것과 같이, mesocosm 하부에는 Tygon 튜브를 연결하여 중력배수를 유도하고, 튜브의 높이를 이용해 물의 흐름속도를 조절하였다. 배수되는 물은 2리터 통을 이용하여 모으면서 무게(부피)를 측정하였다. mesocosm 상부에서는 수위 감소를 측정하였고, 증발접시를 이용하여 증발량을 계산하고 이를 이용하여 물수지를 계산하였다.

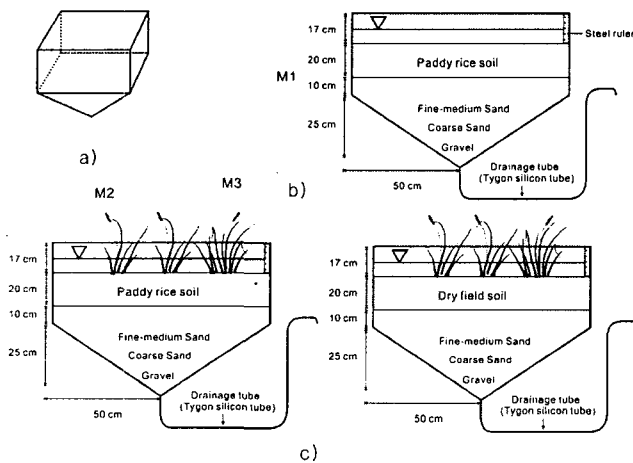


그림 1. 본 실험에 사용된 mesocosm의 개요

기다렸다. M1의 경우에는 개구리밥(Duckweed) 식물이 자연적으로 발생하여 물 표면의 90% 이상을 덮었다. 본 실험 중 주입된 물은 동일한 관정에서 채취한 지하수를 이용하였는데, KBr, NaNO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 일정량(대략 50 mg/l) 용해시켜 사용하였다. 물은 수위가 토양 상부에 근접할 때 재주입하였다.

물 시료는 mesocosm의 상부와 하부에서 정기적으로(12시간 또는 24시간) 채취하였다. pH, Eh, DO, EC, alkalinity는 시료 채취와 동시에 측정하였고, Fe와 Mn은 ICP-AES로, 음이온(Br, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)은 IC를 이용해 분석하였다. 사용된 토양 시료의 경우에는 미세입자를 분리하여 XRD 분석을 실시하였다. 특히, 0.5N HCl 추출법을 이용하여 토양 내에 존재하는 비정질 철수산화물과 능철석(siderite) 부분의 Fe를 선택적으로 추출하고자 하였다(Heron et al., 1994).

## 3. 결과 및 토의

세 개의 mesocosm에서 측정된 Eh 값과 DO 농도를 그림 2에 도시하였다. 실험이 시작되면서 Eh 값은 급격히 감소하고 DO 농도는 대부분 2 ppm 이하로 유지되는 것으로 보아 환원환경으로 빠르게 변함을 알 수 있다. 이는 침수로 인한 산소의 유입 제한 및 유기물의 산화에 의한 산소의 소모 반응 때문인 것으로 판단된다. 반면, 30일 이후의 Eh 값의 재상승은 전자수용체(질산성 질소)의 지속적 주입에

의한 Eh 완충작용의 결과이며, DO의 변동은 벼 뿌리의 성장과 함께 산소의 유입이 영향을 받기 때문으로 판단된다. 이는 실험이 끝난 후 토양 단면을 고찰한 결과, 벼 뿌리 주변에 철수산화물 침전물이 생성되었음을 확인하였는바, 상기한 설명을 뒷받침해 주었다.

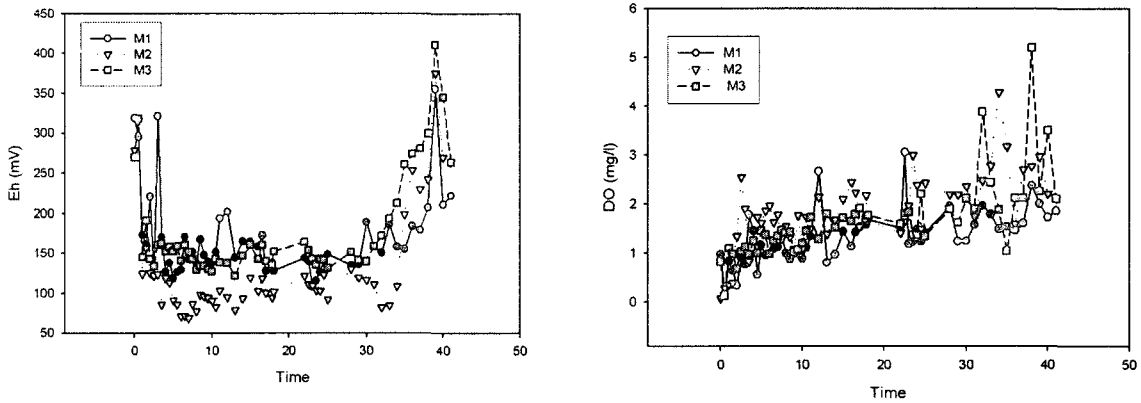


그림 2. Eh 값과 DO 농도

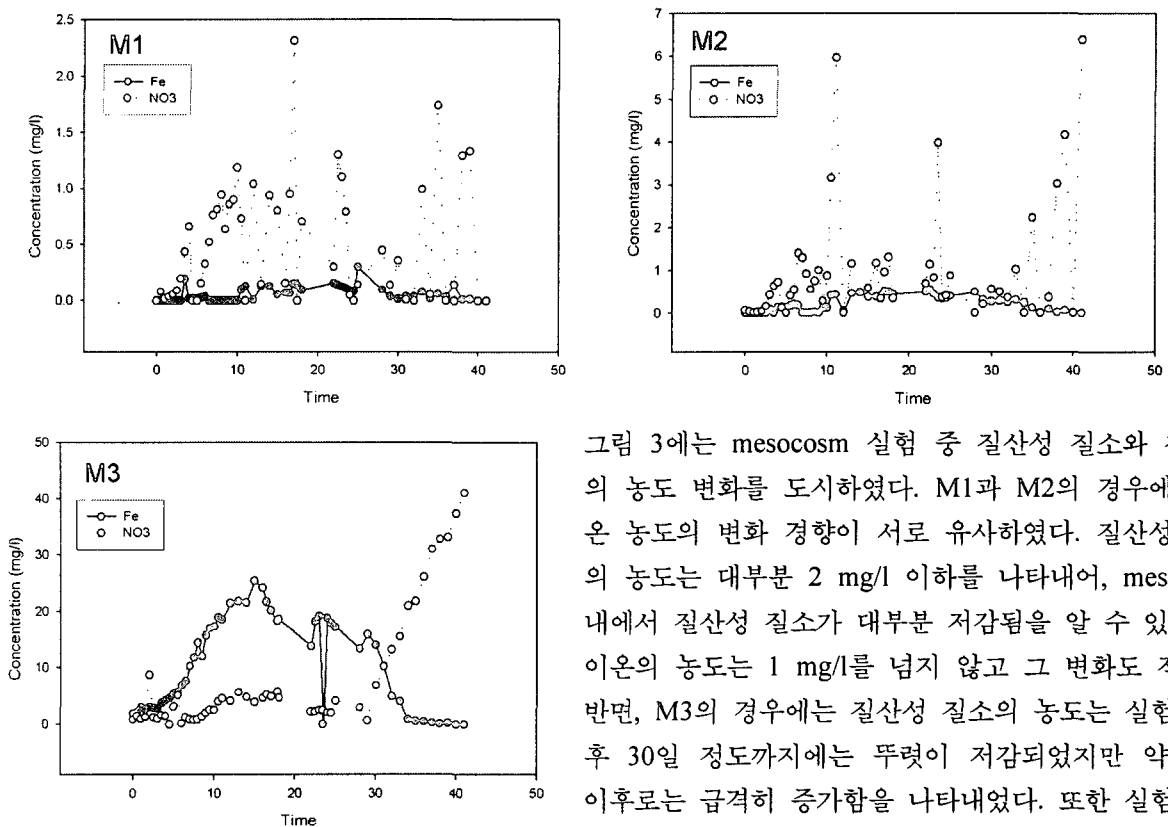
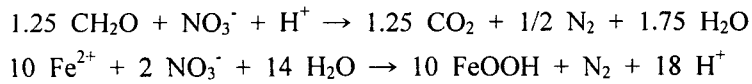


그림 3. 철이온과 질산성 질소의 농도

그림 3에는 mesocosm 실험 중 질산성 질소와 철이온의 농도 변화를 도시하였다. M1과 M2의 경우에는 이온 농도의 변화 경향이 서로 유사하였다. 질산성 질소의 농도는 대부분 2 mg/l 이하를 나타내어, mesocosm 내에서 질산성 질소가 대부분 저감됨을 알 수 있다. 철이온의 농도는 1 mg/l를 넘지 않고 그 변화도 적었다. 반면, M3의 경우에는 질산성 질소의 농도는 실험 시작 후 30일 정도까지는 뚜렷이 저감되었지만 약 30일 이후로는 급격히 증가함을 나타내었다. 또한 실험 시작과 동시에 철이온의 농도는 꾸준히 증가하여 거의 30 mg/l 수준까지 이르렀다.

따라서 M1, M2 및 M3 초기의 모든 mesocosm에서 탈질 반응에 의한 질산성 질소의 농도 저감이 확인되었다. 여러 자료를 종합할 때, mesocosm 내에서의 가능한 반응식은 다음과 같이 고려된다.



위 반응식을 보면, 이론적으로 철이온 20 mg/l은 질산성 질소 약 36 mg/l를 탈질시킬 수 있음을 알 수 있다. 아울러, M1, M2, M3 모두에서 P<sub>CO2</sub>의 증가를 보여주었다. 결과적으로, M1과 M2의 경우에는 유기물에 의한 탈질 반응이 우세한 것으로 판단되며, M3의 경우에는 Fe<sup>2+</sup> 이온의 산화에 의한 탈질 반응이 지배적인 반응으로 판단된다.

#### 4. 참고문헌

- Ghosh, B. C., and Bhat, R. 1998. Environmental hazards of nitrogen loading in wetland rice fields. *Environmental Pollution* 102, pp 123-126.
- Heron, G., Crouzet, C., Bourg, A. C. M., and Christensen, T. H., 1994. Speciation of Fe(2) and Fe(3) in contaminated aquifer sediments using chemical extraction techniques. *Environmental Science and Technology* 28, pp 1698-1705.
- Liesack, W., Schnell, S., and Revsbech, N. P. 2000. Microbiology of flooded rice fields. *FEMS Microbiology Review* 24, pp 625-645.
- Martin, T. L., Kaushik, N. K., Trevors, J. T., and Whiteley, H. R. 1999. Review: denitrification in temperate climate riparian zones. *Water, Air, and Soil Pollution* 111, pp 171-186.