

농업활동(벼농사)에 의한 충적대수층 내 Fe 및 Mn 농도 제어

김현중^{1)*} · 김강주¹⁾ · 최병영¹⁾ · 김석휘¹⁾ · 박기훈¹⁾ · 박은규²⁾ · 고동찬³⁾

1. 서론

현재 많은 나라에서는 충적 대수층을 이용하여 강변여과수를 개발하고 있다. 그러나, 충적 충지하수의 높은 질산성질소, 철, 망간 등은 강변여과수 개발에 있어 장애가 되고 있다. 이러한 문제는 대부분의 충적층이 경작에 이용되는 한국에서도 마찬가지이다. 높은 Fe/Mn농도는 혐기성환경에서 SO₄의 환원에 의해 생성된 sulfide 와의 반응에 의해 제거될 수 있음이 널리 알려져 있으며, 이 때문에 Fe/Mn농도를 낮추기 위해서는 충분한 SO₄가 필요하다. 농경지역 지하수에서는 황철석으로부터 공급된 황산염이 황산염환원의 주된 기원으로 보고되고 있다. 그러나 질량균형법과 동위원소적 방법을 이용한 본 연구는 시비와 관개와 같은 농경활동으로부터 공급된 SO₄의 환원에 의하여 철/망간의 농도가 현격히 낮아짐을 잘 보여주고 있다. 본 연구는 40년 이상 벼농사가 이루어지고 있는 포인트바(point bar)지역에서 철/망간의 농도를 제어하는 기작을 조사하기 위해 수행되었다. 본 연구에서는 지질조건과 수직적 산화환원대 변화와의 관계를 관찰하기위해서 몇 개의 다중시료채취기를 설치하여 수질을 관찰하였다. 본 연구의 결과는 철/망간의 농도가 천층부에서는 NO₃의 존재여부에 의해서, 그리고 심층부에서는 SO₄의 환원에 의해서 제어됨을 보여주고 있다. 특히, 동위원소 분석결과와 질량균형분석결과는 이들 NO₃와 SO₄가 농경활동에 의해서 공급됨을 보여주고 있으며, 바로 이 때문에, Fe/Mn 농도가 높은 지하수의 산출도 지표의 침투여건을 잘 반영하고 있다.

2. 연구지역 및 방법

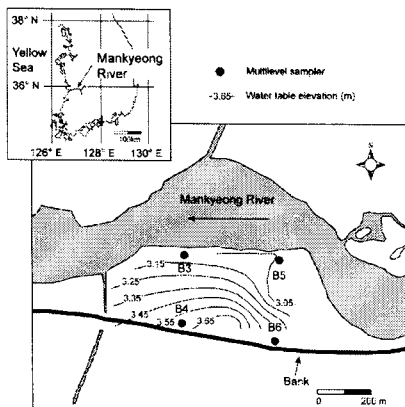


그림 1. 연구지역.

본 연구는 농업활동(주로 벼농사)에 이용되는 만경수역의 포인트바 (point bar) 지역에서 수행되었다 (그림 1). 연구지역은 황해와 가깝고 지형이 낮기 때문에 과거에 해수의 영향을 받았으나, 농업용수 확보를 위하여 연구지역의 하류 7 km 지점에 제수문을 설치한 이후에는 더 이상 해수의 영향을 받지 않고 있는 지역이다. 연구지역 지역은 벼 재배기간 동안 물에 잠겨있어야 하기 때문에 논에 고인물이 이 지역 지하수의 주요 기원으로 판단된다.

본 연구를 위하여 6개의 다심도시료채취기를 설치하였으며, 본 연구는 이중 4개(B3, B4, B5, B6)에서 얻은 시료에 대한 수질분석과 동위원소 자료를 이용하여 수행되었다. 본 연

주요어 : 충적층 지하수, 산화/환원 반응, 지구화학반응, 군집분석, 요인분석

1) 군산대학교 토목환경공학부(kangjoo@kunsan.ac.kr)

2) 경북대학교 지질학과(egpark@knu.ac.kr)

3) 한국지질자원연구원

구를 위해서는 비슷한 지질구조를 보인 B3, B4, B5에서 얻은 수질자료는 산화환원에 민감한 NO₃, Fe, Mn의 농도를 이용하여 다음 기준에 의해서 군집화하였다(Group 2, if Fe > 0.02 mmol/L or Mn > 0.02 mmol/L; Group 1, else if NO₃ > 0.03 mmol/L; Group 3, or else).

3. 연구 결과 및 토의

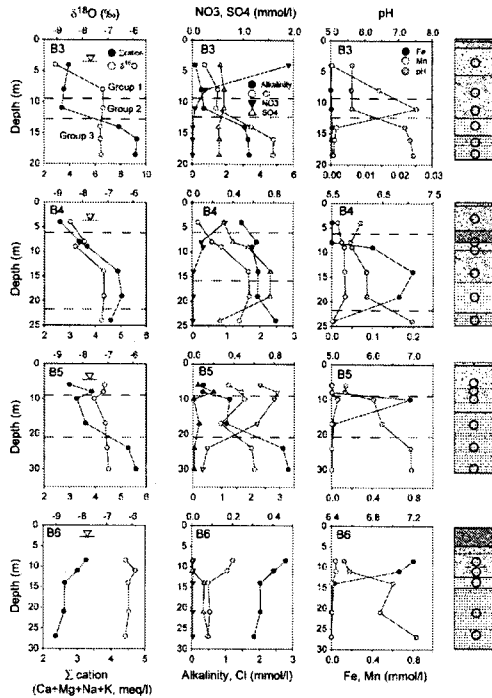


그림 2. 측정된 변수의 수직적 변화. 깊이가 깊어질수록 그룹 1, 2, 3순으로 분포하고 있으며, 이에 따라 환원환경이 강해짐을 알 수 있다.

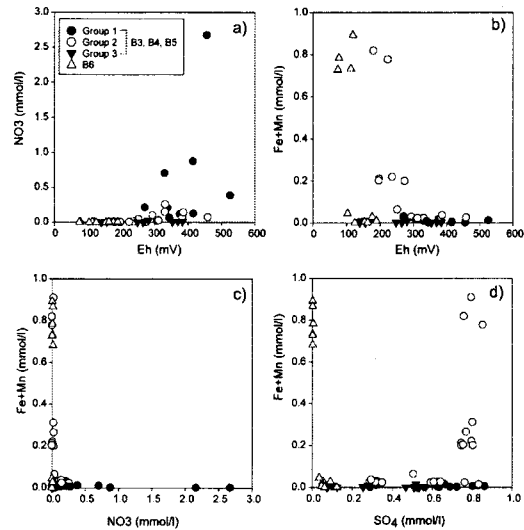


그림 3. 산화환경에서는 질산성질소가 높고 환원환경에서는 철망간의 농도가 매우 높으며, 질산성질소와 철망간의 농도는 강한 역의 관계를 보인다. 특히, B3, B4, B5는 SO₄가 낮아짐(즉, 심도가 깊어짐; 그림 2)에 따라 철망간의 농도를 보이는 반면, B6의 경우는 오히려 증가함을 보이고 있다.

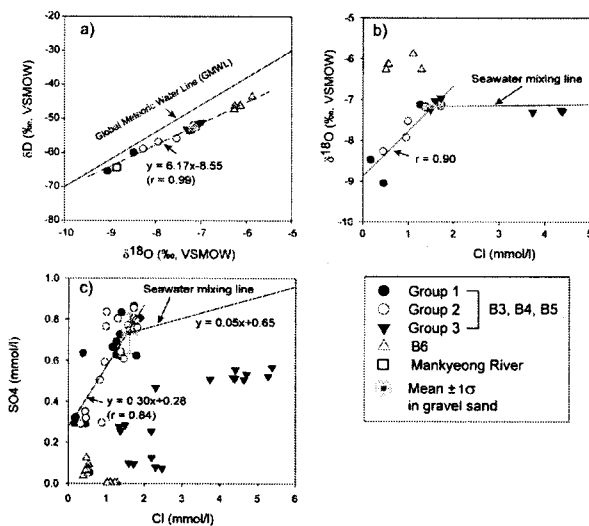
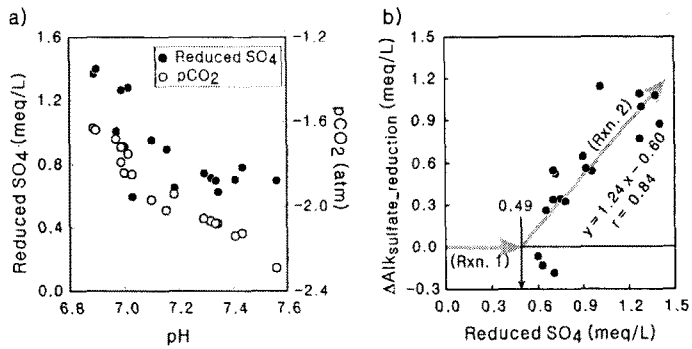


그림 4. 연구지역 지하수는 강한 증발효과를 보이며(a), 이는 고인 물(논물)의 함량이 주된 지하수기원임을 보이는 결과이다.

Cl-δ¹⁸O 상관관계(b)에서 볼 때, gravel sand층을 기준으로 상층부에서는 지표기원의 물과의 혼합(주로 그룹 1, 2)이 하층부에서는 해수와의 혼합(그룹 3)이 주된 기작임을 보여주고 있다(b). SO₄의 경우도 상층부에서는 Cl과 좋은 상관관계를 보임으로써, 혼합에 의해 농도가 좌우됨을 보이는 반면, 심층부에서는 해수혼합선 하부에 도시됨으로써, SO₄가 상당부분 제거되고 있음을 보이고 있다.

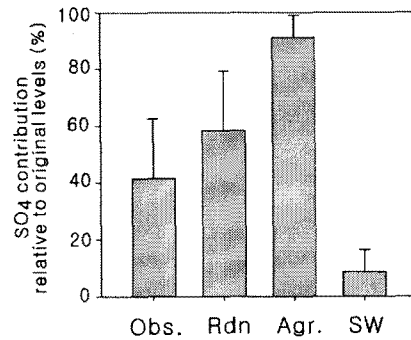
그림 5. 그림 4c에서 그룹3의 해수 혼합선과 SO₄농도의 차이가 환원에 의한 것이라면, 황산염 환원이 클수록 이산화탄소의 발생에 의해 pH는 감소한다(a). 그리고 그에 따라 alkalinity도 증가된다(b). (b)의 Δalkalinity_{sulfate_reduction}은 순수하게 황산염의 환원에 의해 증가된 alkalinity를 의미하며, 이는 질량균형법으로 계산되었다. 환원된 황산염과 Δalkalinity_{sulfate_reduction}의 관계는 그 절편과 기울기로 볼 때, 황산염환원에 의해 먼저 용존 Fe(II)



이온이 침전되고 ($Fe^{2+} + SO_4^{2-} + 2CH_2O \Rightarrow FeS(s) + 2CO_2 + 2H_2O$; Rxn 1), 용존 Fe(II)이온이 모두 소모된 이후에는 퇴적물 내 Fe(III)(수)산화물을 Fe(II)S로 전환시키는 반응이 일어남을 지시한다 ($4FeOOH(s) + 4SO_4^{2-} + 9CH_2O \Rightarrow 4FeS(s) + 8HCO_3^- + CO_2 + 15H_2O$; Rxn 2).

그림 6. 질량균형을 이용하여 계산된 황산염의 물질수지.

그룹3으로 공급되는 총 황산염의 91 ± 8 %는 시비 및 관개와 같은 농업활동에 의한 것이며, 나머지 8.7 ± 7.8 %는 해수로부터 공급된다. 그러나, 그룹3지하수에서는 총 공급된 황산염의 58 ± 21 %가 환원되어 없어졌으며, 이는 해수에 의해 공급된 양보다 훨씬 많은 양이다. 이와 같은 결과는 그룹3에서의 낮은 철/망간농도는 농업활동으로 공급된 황산염의 환원에 의한 것이라고 할 수 있다. 특히, 연구지역에서의 영류기원은 관개용수(주로 만경강물) 공급과 시비라고 할 수 있다. 관개 후 경작지에서 비료에 의한 이공급이 없고, 지하수환경에서 SO₄가 추가되거나 없어지지 않는다(해수영향이 없는 천층수는 해당됨)고 가정하면, 다음 식을 이용하여 비료에 의한 SO₄공급비율을 계산할 수 있다.



$$\text{Fertilizer contribution (\%)} = \frac{(SO_4/Cl)_{\text{groundwater}} - (SO_4/Cl)_{\text{river}}}{(SO_4/Cl)_{\text{groundwater}}}$$

위의 식을 이용하여 계산하면, 그룹1지하수에 용존된 SO₄의 52 ± 21 %가 비료에 의해 공급됨을 지시한다. 그러나 실제로는 이도 비료로부터 공급되므로 위의 계산결과는 최소치라고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서 우리는 동위원소와 Cl, SO₄의 관계를 이용하여 황산염의 물질수지를 계산할 수 있었다. 이러한 결과를 통하여 깊은 심도에서는 농업활동으로 공급된 황산염이 철/망간의 농도를 낮추는 데 결정적인 공헌을 함을 알 수 있다. 반면, B6의 경우(그림2, 그림3)는 표층에 나타나는 두꺼운 실트층으로 인하여 지표기원의 황산이온이 원활하게 지하수로 공급되지 못하고 있으며, 이로 인하여 매우 높은 철/망간의 농도를 보였다.