

제주도 지하수중 오염물질의 농도와 토양중 그의 행동에 관한 연구

II. 서북부지역 양돈단지 주변 지하수중의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도와 다른 이온과의 관계

玄海男 · 高昇鶴 · 吳相實*

Concentrations of the Pollutants in Ground Water and their Behavior in Soils in Cheju Island

II. Nitrate-nitrogen concentration and its relation to other ions in ground water near the district of pig farming complex in the northwest region

Hae-Nam Hyun, Seung-Hak Koh, Sang-Sil Oh*

Abstract

This study was conducted to investigate the $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration, the relationship between $\text{NO}_3\text{-N}$ and other ions, and patterns of ions in ground water used as drinking water in Cheju Island. Samples were collected from 19 wells in the northwest region, near the district of poultry complex, and 9 wells in the northeast region.

In the northwest region, $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations in D-14 and D-202 wells near the pig farming facilities were 10.95 and 13.1 mg/L, respectively, exceeding the standard concentration of drinking water. The concentration in D-65, D-35, and D-120 wells were slightly lower than the standard concentration. However, $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations in the wells in the northeast region were lower than 3mg/L.

In wells in the northwest region, $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations were negatively correlated with pH and positively correlated with Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{--} , and $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$. However, in the northeast region, they were not related with pH and the ions.

The chemical compositions in D-65, D-35, and D-41 wells showed higher concentrations of Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , Cl^- , $\text{NO}_3\text{-N}$ and SO_4^{--} than the unpolluted D-42 well. These results suggest that ground water near the pig farming complex was polluted by pig farming waste in the northwest region.

제주대학교 농과대학 농화학과(Dept. Agric. Chem., Coll. of Agric., Cheju Nat'l Univ., Cheju 690-756, Korea)

* 제주도 보건환경연구원(Prov. Gov't Inst. of Health and Environ., Cheju-do 690-756, Korea)

- 이 논문은 '93 한국학술진흥재단의 연구비 지원에 의해 수행된 연구의 일부임.

서 론

제주도에서 지하수는 음용수용, 농업용, 영업용 등으로 사용되며, 전체 지하수 관정의 수는 약 3,000개를 초과하는 것으로 보고 있다. 개발된 각 지하수는 관정에 부착된 자동 염소 주입기를 통하여 살균된 후 그 부근 주민에게 음용수로 이용되고 있다. 제주도에서 지하수를 오염시킬 수 있는 성분의 하나는 NO₃-N로서 도시를 형성하고 있는 지역의 지하수에서 농도가 점차 높아지고 있으며, 제주도 지하수의 주요오염원으로 대두되고 있다.

제주도는 1970년대부터 축산진흥 정책에 의하여 중산간 지역에 축산단지가 형성되어 서부지역의 한경면, 애월읍 및 대정읍 지역에는 소규모의 양돈단지가 밀집된 형태로 형성되었다. 이 지역의 양돈시설은 대부분 소규모로서 폐수처리 시설이 거의 갖추어 있지 않았으며, 발생하는 분뇨 및 돈사 세척수는 토양 폐기 또는 습골(용암이 흐르면서 생긴 작은 굴)을 통하여 지하 침투식으로 방류하여 처리하고 있는 실정이다. 이와 같은 처리 방법 때문에 이 지역의 지하수는 NO₃-N에 의한 오염의 위험성이 상존하고 있는 실정이다.

여러 연구자에 의해 축산 폐기물은 지하수중의 NO₃-N의 농도를 높이는 주요인의 하나로 보고되었는데, 양돈 폐기물을 토양에 처리한 지역의 지하수는 비오염 지역에 비하여 NO₃-N 농도가 현저히 높은 편이다^{1, 2)}. 따라서, 처리량을 감소시켜서 토양중의 NO₃-N의 농도를 감소시켰을 때 지하수중의 농도는 거의 직선적으로 감소하는 것으로 보고되었다³⁾. 토양으로 유입된 유기태 질소가 무기화 작용을 받아 생성된 NO₃-N은 토양중에서 거의 Cl과 유사한 속도로 빠르게 하향이동하여 지하수를 오염시킬 수 있다^{4, 5)}. 일반적으로 여름에는 토양중의 NO₃-N이 작물에 이용되기 때문에 지하수중의 농도가 낮지만, 작물이 자라지 않는 겨울에는 토양 하층부에 농도가 높아지는 경향이 있다⁶⁾. 토양내 NO₃-N의 하향이동량은 기상 조건에 따라 크게 영향을 받는데, 강수량 또는 관개량이 많을수록 토양 하층부의 농도는 현

저히 높아진다⁷⁾. 이들 연구의 대부분은 NO₃-N에 의한 토양 오염은 지하수중 NO₃-N의 농도를 높이는 직접적인 요인으로 보고 있다.

제주도에서 지하수중 이온의 이온조성은 오염 정도에 따라 양상을 달리하는데, 인위적인 오염 현상이 나타나지 않는 지역은 Ca/Mg비가 높고 Na, Cl 및 SO₄의 농도가 낮은 경향을 보이며, 오염 현상이 나타나는 지하수에서는 이와 반대의 경향을 보인다고 보고되었다⁸⁾.

제주도는 지역에 따라 토양의 이화학적 성질이 매우 다른 토양이 분포되어 있는데, 서부지역에 양돈 단지가 형성되어 있는 지역의 토양은 토양층이 형성되어 있지 않은 용암류 대지와 B층이 형성되지 않아 투수속도가 빠르고 오염물질의 흡착능이 매우 낮은 Entisols 등이 분포되어 있어서 토양으로 오염물질이 유입될 때 지하수 오염의 위험성이 매우 높은 편이다.

따라서 본 연구는 양돈단지가 밀집해 있어서 지하수 오염의 위험성이 큰 서북부 지역과 동북부 지역 지하수의 NO₃-N 오염 정도를 조사하고 지역간 NO₃-N과 다른 이온간의 관계, 각 이온간의 관계 및 이온조성의 차이를 밝히기 위하여 수행되었다.

재료 및 방법

1. 시료 채취

지하수 시료는 '93년 갈수기인 3, 4 및 5월에 음

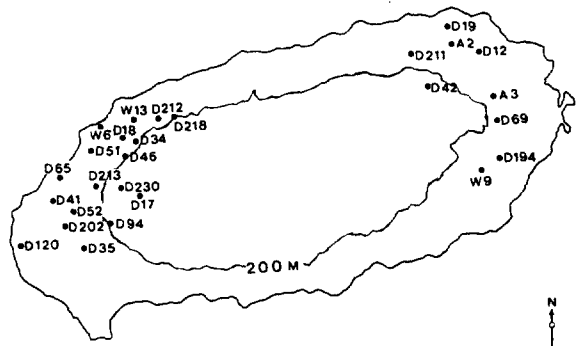


Fig. 1. Map of the study area and sampling locations.

용수로 사용하고 있는 서북부 지역 19개 관정과 동북부 지역의 9개 관정에서 채취하였다(그림 1). 지하수의 수위는 해수위에 크게 영향을 받으므로 시료의 채취 시기는 조금(潮減)을 기준으로 채취하였다. 지하수의 채취는 polyethylene 용기를 사용하였으며, 채취 즉시 냉장 보관하여 실험실로 운반한 직후 측정하였다. 관정명은 지하수 굴착시 농진공에서 부여한 고유명으로서 D는 음용수로 이용하기 위하여 시추한 drinking well, W는 관측용으로 시추한 well를 의미한다. 동부지역의 D-19는 해안과 가까운 곳에 위치한 관정으로 해수침입이 확인되는 관정이며, D-41은 해발 200m 이상에 위치한 관정으로 인위적인 지하수 오염의 위험성이 적은 곳이었다. 서북부 지역의 관정중 D-41, D-202, D-35는 양돈 밀집 지역과 근접거리에 있는 것이었다.

2. 방법

시료의 분석은 표준수질분석법을 이용하였는데, pH는 초자전극법, 전기전도도는 conductivity meter로, Ca, Mg, K 및 Na는 atomic absorption spectrophotometer로, Cl, HCO₃, SO₄는 ion chromatography로 측정하였다⁹⁾.

결과 및 고찰

1. 양돈단지 주변 지하수중 NO₃-N 농도

제주도 서북부 지역에서 양돈단지가 형성되어 있는 인근 지하수중의 평균 NO₃-N 농도를 그림 2에 나타내었다. 양돈단지가 밀집되어 있는 지역에 위치한 D-41과 D-202 관정의 NO₃-N 농도는 10.95와 13.1mg/l로서 음용수수질 기준을 초과하였으며, D-65, D-35 및 D-120 관정의 농도는 8.4, 8.5 및 9.5mg/l로서 수질기준에 가까운 높은 농도를 나타내었다. 이와 같이 NO₃-N 농도가 높은 지역은 그림 3의 양돈단지가 밀집해 있는 지역과 거의 일치하였다. 축산 분뇨 폐기물은 지하수중의 NO₃-N의 농도를 높게하는 주요인의 하나로서^{10, 11)} 폐기물 더미 부근의 지하수중 농도가 비오염 지역에 비하여 현저히

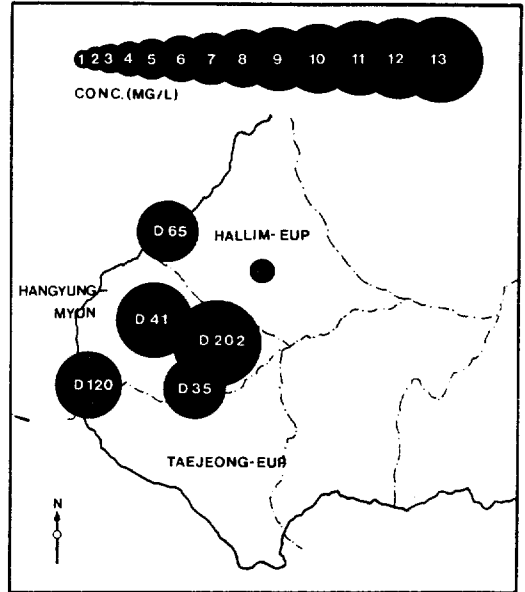


Fig. 2. NO₃-N concentrations at northwest region.

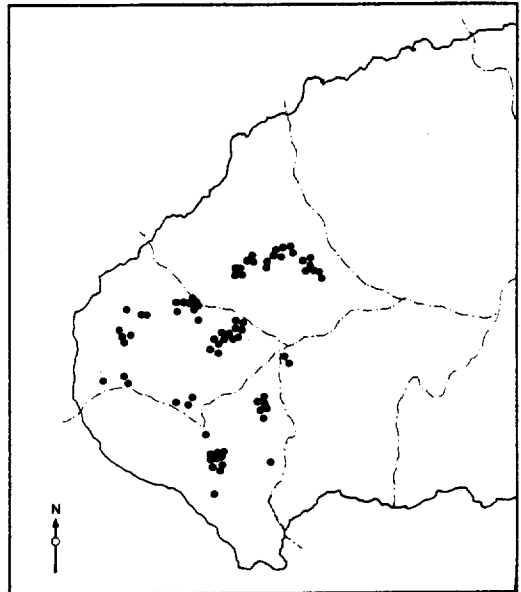


Fig. 3. Identified point sources of contamination at northwest region. Points are pig farming facilities.

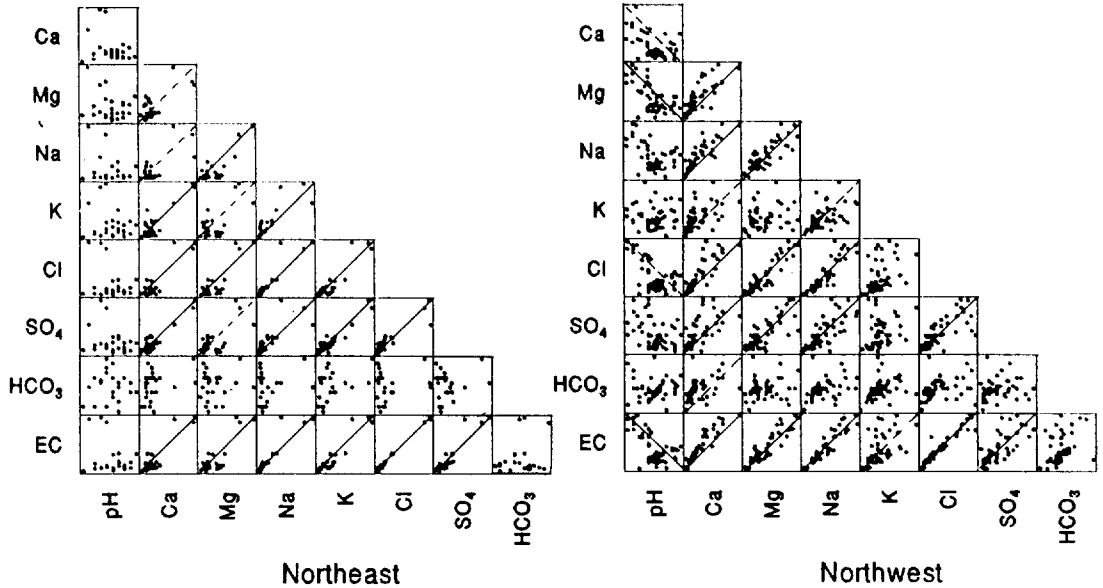


Fig. 4. Matrix correlation of the ions in ground water at northeast and northwest regions. (— : Significant at 1% level, ---- : Significant at 5% level)

높게 검출되며²⁾, 폐기물의 토양 처리량을 감소시켰을 때 지하수중의 농도는 현저히 감소하는 것으로 보고되었다³⁾. Exner와 Spalding¹⁰⁾은 Nebraska 일부 지역에서 71%가 음용수 기준치를 초과하며, NO₃-N의 오염원이 주로 축산 분뇨에 의한 것으로 보고하였다. 서부지역의 토양은 주로 토양층이 형성되어 있지 않은 용암류 대지 또는 B층이 형성되지 않은 Entisols이 분포되어 있어서¹²⁾ 토양으로 유입된 질소 성분이 무기화 작용에 의해 NO₃-N으로 변화하여 쉽게 토양층을 통과할 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 이 지역 양돈 농가의 양돈 분뇨 및 세척수의 처리 방식을 보면, 분뇨는 노천에 더미를 쌓아 일정기간 보관한 후 토양에 처리하거나 세척수는 제주도 특유의 습골을 통하여 지하 침투식으로 처리하고 있다. 따라서 이 지역 지하수중에 NO₃-N의 농도가 높은 것은 주로 양돈 폐기물에 의한 오염으로 보이며, coprostanol¹³⁾ 또는 N의 동위원소 측정 등^{11, 14)}의 후속 연구를 통하여 오염원에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

2. 지역별 이온간의 상관관계

서북부 지역과 동북부 지역의 각 이온간 상관관계를 그림 4에 matrix correlation으로 나타내었다. 두 지역에서 pH와 다른 이온간의 상관성은 차이가 있었는데 서북부 지역에서 pH는 Ca, Mg 및 EC와 역의 상관관계가 있었으나, 동북부 지역에서는 상관관계가 없었다. 두 지역에서 모두 Ca, Mg, Na, Cl 및 SO₄ 사이에는 서로 정의 상관관계를 보였으며, HCO₃는 다른 이온과 상관관계를 보이지 않았다. 제주도 지하수는 대부분 pH 7~8 범위에 있으나 오염현상이 나타나는 지역에서는 일부 pH가 낮아지는 경향을 보였는데(I보)¹⁵⁾, 본 결과에서도 축산 폐수에 의한 오염현상이 나타나는 서북부 지역에서 Ca, Mg 및 EC의 농도가 높을수록 pH는 낮아지는 경향이였다. 이것은 양돈단지가 밀집해 있는 서북부 지역에서 이들 이온들이 함유된 양돈 폐수가 지하수로 유입되어 전기전도도도 높아지고 pH는 낮아진 것으로 보인다.

3. 지역별 NO₃-N과 다른 이온과의 관계

pH와 NO₃-N과의 관계는 그림 5에 나타낸 것과 같이 서북부 지역에서는 역의 상관관계가 있었으며 ($r=0.679^{**}$), NO₃-N 농도가 5.2mg/l 이상의 관정은

pH 7.6 이하로 나타났다. 동북부 지역의 NO₃-N의 농도는 3mg/l 이하였으며, pH와 상관성을 보이지 않았다. 제주도 인구밀집지역의 지하수에서 NO₃-N 농도가 높을수록 pH는 낮은 것으로 보고되었는데

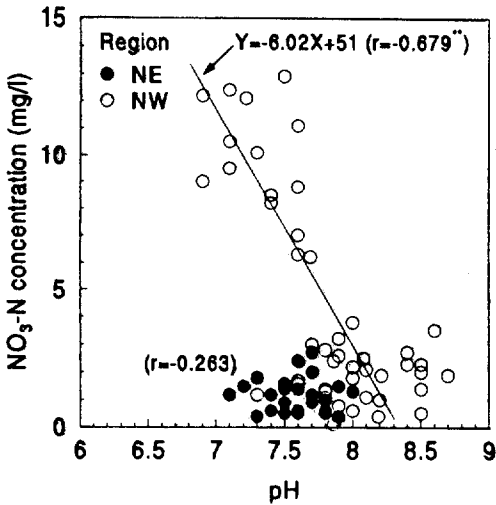


Fig. 5. Relationship between pH and NO₃-N concentration in ground water at northwest and northeast regions.

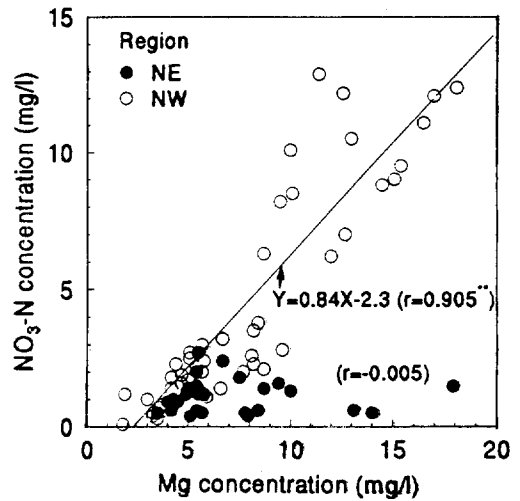


Fig. 7. Relationship between Mg and NO₃-N concentration in ground water at northwest and northeast regions.

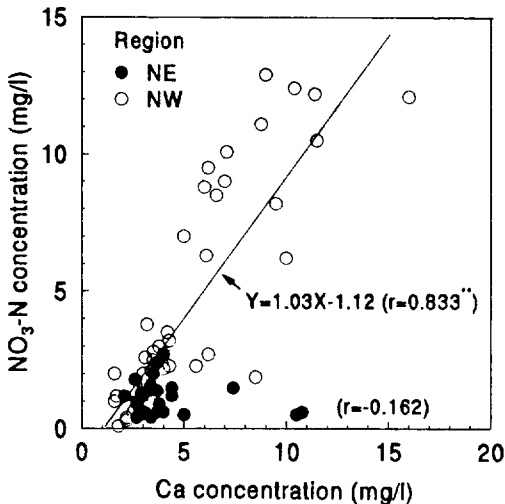


Fig. 6. Relationship between Ca and NO₃-N concentration in ground water at northwest and northeast regions.

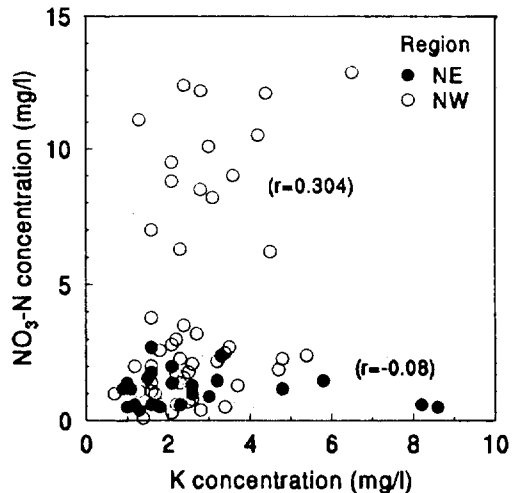


Fig. 8. Relationship between K and NO₃-N concentration in ground water at northwest and northeast regions.

(I보)¹⁶⁾, 이와 유사한 결과이었다.

그림 6은 Ca와 NO₃-N과의 관계를 나타낸 것으로서 서북부 지역에서는 정의 상관관계가 있었으나, 동북부 지역에서는 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 서북부 지역중에서 특히 양돈단지가 밀집해 있는 지역에서 Ca 농도가 높았으며, NO₃-N 농도가 5.2mg/l 이상인 관정에서 Ca 농도는 5mg/l 이상이였다. 동부지역에서 Ca의 농도는 D-19 관정을 제외하고는 5mg/l 이하로 낮은 편이었다. 일반적으로 돈분은 CaO를 약 2% 함유하고 있는데¹⁵⁾, 서북부 지역 지하수에 NO₃-N과 Ca가 상관성을 갖고 있고 Ca 농도가 높은 것은 지하수로 이들 이온이 함유된 양돈 폐수중 유입되었기 때문으로 생각된다.

Mg와 NO₃-N과의 관계는 그림 7에 나타낸 것과 같이 Ca과 농도와 경향이 비슷하였다.

그림 8은 K와 NO₃-N과의 관계를 나타낸 것으로서 지역간 차이를 보이지 않고 상관이 없는 것으로 나타났다.

그림 9는 Na와 NO₃-N과의 관계를 나타낸 것으로서 서북부 지역은 높은 정의 상관관계가 있었으나 ($r=0.829^{***}$), 동북부 지역에서는 상관관계가 없었다.

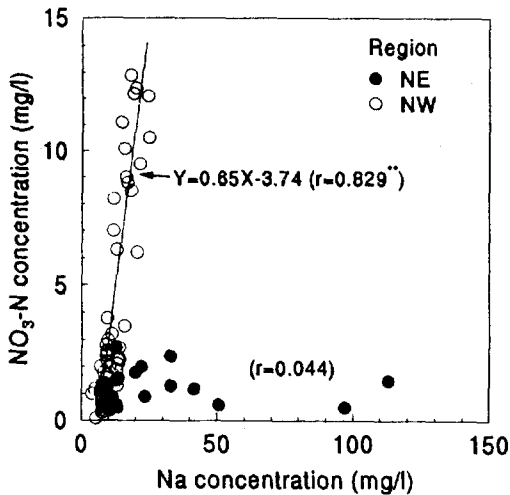


Fig. 9. Relationship between Na and NO₃-N concentration in ground water at northwest and northeast regions.

서북부 지역에서 Na의 농도는 대부분 20mg/l 이하로서 동북부 지역에 비하여 낮은 편이었다. 동부 지역은 해수의 침투가 용이한 지질학적인 구조를 갖고 있어서 전기전도도, Na, Cl 등의 농도가 높은 것으로 알려져 있다¹⁷⁾.

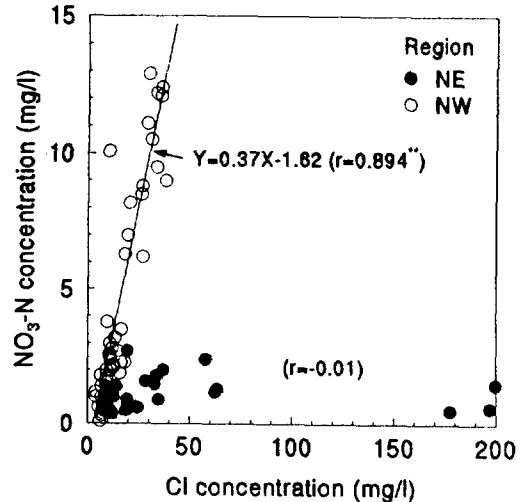


Fig. 10. Relationship between Cl and NO₃-N concentration in ground water at northwest and northeast regions.

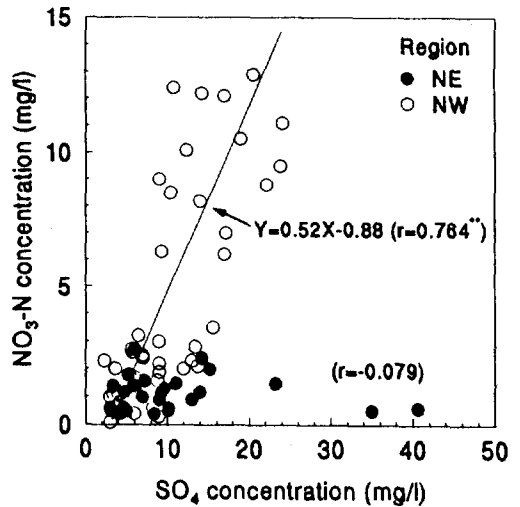


Fig. 11. Relationship between SO₄ and NO₃-N concentration in ground water at northwest and northeast regions.

Cl과 NO₃-N과의 관계는 그림 10에서 보는 바와 같이 서북부 지역은 매우 높은 정의 상관관계가 있었으나($r=0.894^{**}$), 동북부 지역의 Cl는 NO₃-N의 농도와 상관성이 없었는데 이것은 Na의 경우와 유

사한 것이었다. 서북부 지역에서 Cl 농도는 50mg/l 이하이었으나, 동부지역에서는 최고 농도가 200mg/l로 매우 높은 편이었다. 서부지역에서 Na가 농도는 낮으나 NO₃-N와 상관성이 높은 것은 양돈 폐수중의 Na가 지하수로유입되었기 때문으로 생각되며, 동부 지역에서 Cl의 농도가 높은 이유는 해수의 영향을 받았기 때문으로 보인다¹⁷⁾.

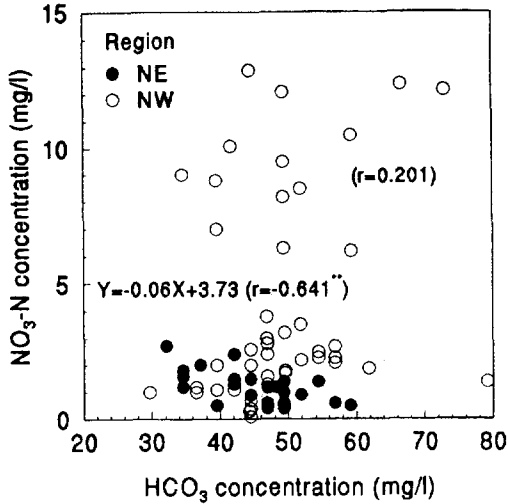


Fig. 12. Relationship between HCO₃ and NO₃-N concentration in ground water at northwest and northeast regions.

그림 11은 SO₄의 농도와 NO₃-N 농도와의 관계를 나타낸 것으로 서북부 지역에서는 상관성이 높았으나, 동부지역에서는 상관성이 없는 것으로 나타났다.

HCO₃는 두 지역에서 모두 상관성이 없는 것으로 나타났다(그림 12). 반면, Cl/HCO₃비는 NO₃-N는 서북부 지역에서는 상관성이 높았으며, 동부지역에서는 상관성이 없는 것으로 나타났다(그림 13).

전기전도도는 그림 14와 같이 서북부 지역에서 NO₃-N과 상관성이 높았는데($r=0.950^{**}$), 이것은 전기전도도와 관계가 깊은 Ca, Mg, Na, Cl, SO₄ 등이 NO₃-N과 상관성이 높았기 때문으로 생각된다. 동북부 지역에서는 상관성이 없었으며, 전기전도도가 700mS/cm 이상이 검출되는 지하수가 있었는데 이것은 해수 유입에 의한 것으로 보인다¹⁷⁾. 양돈지역

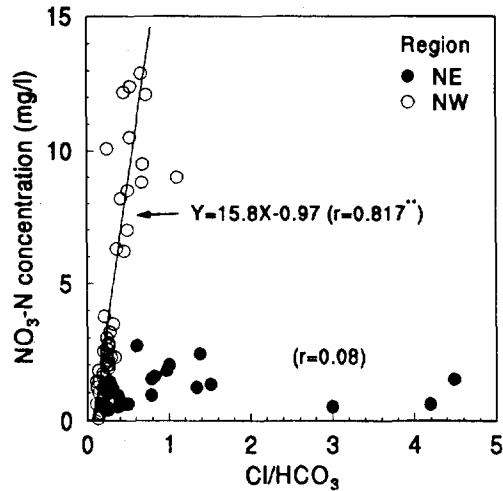


Fig. 13. Relationship between Cl/HCO₃ and NO₃-N concentration in ground water at northwest and northeast regions.

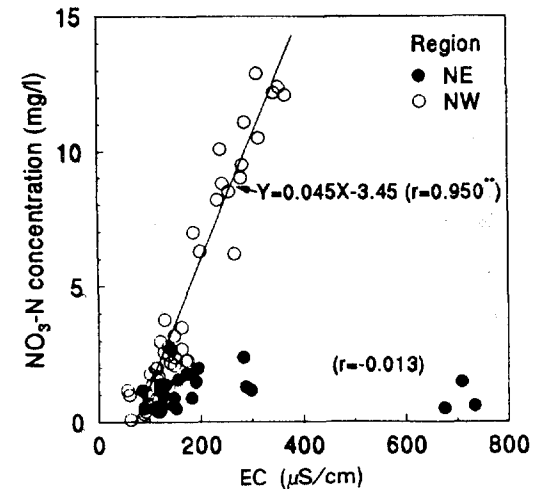


Fig. 14. Relationship between EC and NO₃-N concentration in ground water at northwest and northeast regions.

에서의 전기전도도는 비오염지역에 분포되어 있는 관정에 비하여 현저히 높은 편이었다.

이와 같이 양돈농가가 밀집해 있는 서북부 NO₃-N 농도는 pH와 역의 상관관계를 나타냈고 Ca, Mg, Na, Cl, SO₄, Cl/HCO₃비와 정의 상관관계를 나타내어 동북부 지역의 지하수와 큰 차이가 있었는데, 이것은 서북부 지역의 지하수가 이들 이온들이 함유된 양돈폐수에 의해 오염되었기 때문으로 생각된다.

4. 이온조성

서부지역에서 양돈 폐수의 영향을 많이 받은 것으로 예상되는 D-65, D-35 및 D-41, 동부지역에서 해수의 영향을 받은 D-19, 동부 중산간 해발 200m 이상에 위치하여 인위적인 오염의 위험이 적은 D-42의 이온조성을 그림 15에 나타내었다. 서부지역 지하수의 이온조성은 관정간 차이가 없이 비슷하였으며, D-42와는 HCO₃를 제외하고 농도 차이만 있을 뿐 같은 경향이였다. 반면, D-19 관정의 Ca와 Mg은 다른 지역과 같았으나, Na와 Cl의 농도는 매우 높

았다. Eckstein⁸⁾이 1966년에 제주도 지하수와 용천수에 대한 조사에서 인위적인 영향을 거의 받지 않은 어승생(제주도 북서쪽 900m 고지의 용천수를 이용한 저수지)의 이온조성은 Ca 농도와 Ca/Mg비가 상대적으로 낮고 그외의 이온들도 다른 지역에 비하여 상대적으로 낮다고 보고하였다. 반면, 해수의 침입현상이 뚜렷한 동부지역에서는 Ca/Mg비가 높으며, 어승생과 다른 양상을 보인다고 하였다. D-19 관정의 이온조성은 Ca를 제외하고 Eckstein⁸⁾이 동부 해수침투 지역에서 조사한 이온조성과 비슷하였다. 서부지역의 이온조성은 HCO₃를 기준으로 하였을 때 Mg, Na 및 Cl이 높은 편이었다. 이와 같이 서부지역의 지하수의 이온조성이 Ca와 Mg를 제외하고 어승생⁸⁾과 D-42 관정에 비하여 농도가 높은 양상은 축산폐수중의 Na, Cl, SO₄ 등이 지하수에 유입되어 나타난 것으로 보인다. 특히 토양내에서 이동성이 매우 빠른 음이온의 농도가 높은 편이었다.

요 약

본 연구는 음용수로 사용하고 있는 지하수를 대상으로 양돈시설이 밀집해 있는 서북부지역의 19개 관정과 동북부지역의 9개 관정의 지하수를 채취하여 지역간 NO₃-N 농도의 차이, NO₃-N과 다른 이온과의 관계, 각 이온간의 관계 및 이온조성의 차이를 밝히기 위하여 수행되었다.

서북부 지역에서 양돈단지 주변의 D-41과 D-202 관정의 NO₃-N 농도는 10.95 및 13.1mg/l로서 음용수 수질 기준을 초과하였으며, D-65, D-35 및 D-120 관정에서의 농도는 음용수 수질기준에 비하여 약간 낮았다. 동북부 지역의 지하수중 농도는 대부분 3 mg/l 이하였다.

서북부 지역에서 pH는 Ca, Mg 및 EC와 역의 상관관계가 있었으나, 동북부 지역에서는 상관성이 없었으며, 두 지역에서 모두 Ca, Mg, Na 및 SO₄ 간에는 정의 상관성을 나타내었다. 서북부 지역에서

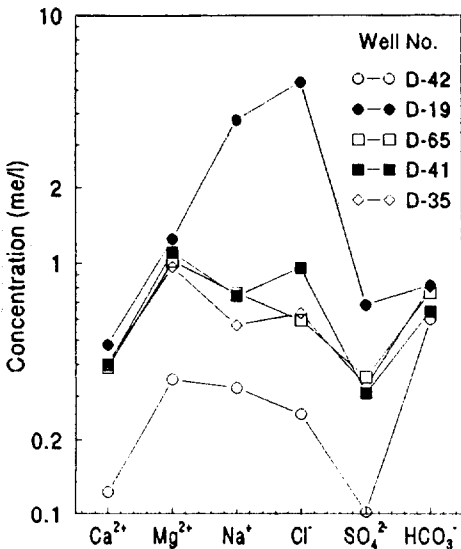


Fig. 15. Chemical composition of ions in selected wells.

NO₃-N은 pH와 역의 상관관계가 있었으며, Ca, Mg, Na, Cl, SO₄ 및 Cl/HCO₃와 정의 상관성을 나타내었으나, 동북부 지역에서는 상관성을 나타내지 않았다. D-65, D-35 및 D-41 관정의 이온조성은 인위적인 오염의 정도가 낮은 D-42 관정에 비하여 Ca, Mg, Na, Cl 및 SO₄가 높은 편이었다. 이와 같은 결과는 서북부 지역의 지하수가 양돈폐수에 의하여 영향을 받아 폐수중의 성분이 지하수로 유입되었기 때문에 나타난 결과라고 추정된다.

참 고 문 헌

1. Gerhart, J. M. (1986) : Ground-water recharge and its effects on nitrate concentrations beneath a manured field site in Pennsylvania. *Ground water*. **24** : 483-489.
2. Weil, R. R., R. A. Weismiller, and R. S. Turner. (1990) : Nitrate contamination of ground-water under irrigated coastal plain soils. *J. Environ. Qual.* **19** : 441-448.
3. Hall, D. W. (1992) : Effects of nutrient management on nitrate levels in ground water near Ephrata, Pennsylvania. *Ground water*. **30** : 720-730.
4. Adriano, D. C., P. F. Pratt, and F. H. Takatori. (1972) : Nitrate in saturated zone of an alluvial soil in relation to fertilizer nitrogen rate and irrigation level. *J. Environ. Qual.* **1** : 418-422.
5. Walker, W. G., J. Bouma, D. R. Kenney, and F. R. Magdoff. (1973) : Nitrogen transformation during subsurface disposal of septic tank effluent in sands: I. Soil transformations. *J. Environ. Qual.* **2** : 475-480.
6. Johnson, A. H., D. R. Bouldin, E. A. Goyette, and A. M. Hedges. (1976) : Nitrate dynamics in Fall Creek, New York. *J. Environ. Qual.* **5** : 386-391.
7. Bergstrom, L. (1987) : Nitrate leaching and drainage from annual and perennial crops in tile-drained plots and lysimeters. *J. Environ. Qual.* **16** : 11-18.
8. Eckstein, Y. (1969): Hydrogeology of a volcanic island Cheju do, Korea. *Bull. of Internat'l Ass. Sci. Hydrol.* **XIV** : 45-60.
9. Clesceri, R. S. et al ed. (1989) : Standard methods for the examination of water and wastewater. APHA-AWWA-WPCF.
10. Exner, M. E. and R. F. Spalding. (1985) : Ground water contamination and well construction in southeast Nebraska. *Ground Water*. **23** : 26-34.
11. Komor, S. C. and H. W. Anderson, Jr. (1993) : Nitrogen isotopes as indicators of nitrate sources in Minnesota Sand-Plain aquifers. *Ground Water*. **31** : 260-270.
12. 정밀토양도, 제주도. (1976) : 농촌진흥청 농업기술연구소.
13. 伊藤治郎, 立川 涼. (1978) : コプロスタルお指標とした松山平野河川の糞尿汚染. *陸水學雜誌* **39** : 123-129.
14. Heaton, T. H. E. (1986) : Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: a review. *Chemical Geology*. **59** : 87-102.
15. 현해남, 오상실, 고승학 (1994) : 제주도 지하수중 오염물질의 농도와 토양중 그의 행동에 관한 연구. I. 한국환경농학회지. **13(1)** : 19-30.
16. 류순호 등. (1992) : 농업 환경 오염 경감 대책 연구. 농진청 연구보고서. pp. 111-131.
17. 안종성, 김선준, 유장걸, 송성준. (1992) : 환경동위원소를 이용한 제주 동부지역 대수층의 해수오염에 관한 연구. 한국환경농학회지. **11** : 26-40.