

碩士學位論文

제주도 지하수중 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도와 토양중
그의 이동성에 관한 연구

濟州大學校 大學院

農化學科



1994年 6月

제주도 지하수중 NO₃-N의 농도와 토양중 그의 이동성에 관한 연구

指導教授 玄 海 男

高 昇 鶴

이 論文을 農學 碩士學位 論文으로 提出함

1994年 6月

高昇鶴의 農學 碩士學位 論文을 認准함



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

審査委員長

이 광 철



委 員

유

기 중



委 員

한

해 은



濟州大學校 大學院

1994年 6月

Studies on the Nitrate-nitrogen Concentration
in Ground Water and Its Mobility in Soils,
Cheju Island

Seung-Hak Koh

(Supervised by professor Hae-Nam Hyun)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL
FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE
DEGREE OF MASTER OF AGRICULTURE

DEPARTMENT OF AGRICULTURAL CHEMISTRY
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1994. 6.

목 차

Abstract

I. 서 론	3
II. 재료 및 방법	6
1. 시료 채취 및 분석방법	6
2. 토양내 이동성	7
III. 결과 및 고찰	9
1. NO ₃ -N 농도의 월변화	9
2. 지역별 지하수의 NO ₃ -N 농도	11
3. NO ₃ -N과 다른 이온과의 관계	16
3.1. NO ₃ -N을 제외한 다른 이온간의 관계	16
3.2. pH와의 관계	17
3.3. Cl과의 관계	18
3.4. Ca 및 Mg과의 관계	19
3.5. Na와의 관계	21
3.6. K과의 관계	21
3.7. EC와의 관계	22
4. 토양내 이동성	23
IV. 제 요	27
V. 참고문헌	29

Abstract

This study was conducted to investigate NO₃-N contamination, in relation to other ions in ground water and mobility of anions in different soils in Cheju Island. Ground water samples were collected from 4 wells at Shicheju, 3 wells at Seogwipo city, 9 wells at East region and 19 wells used for drinking water at West region. The mobility of NO₃, Cl, SO₄ and PO₄ was examined through soil columns made with Mureung soil, brown nonvolcanic soil, and Namwon soil, black volcanic soil.

The NO₃-N concentrations in wells at Shicheju were high in March to June and those at Seogwipo city in June to October. Average concentration of NO₃-N at Seogwipo city was 7.2 mg/l, being higher than any other regions. The concentrations in wells at East region were below 3 mg/l and the NO₃-N concentration in C 5 well, unpolluted forest area, ranged from <1.0 mg/l to just over 1.2mg/l. In the study area, NO₃-N concentrations in the samples did not exceed the criterion concentration of drinking water (10mg/l) except for D 41 and D 202 wells.

The NO₃-N concentrations in D-41 and D-202 wells near pig facilities at west region were 10.95 and 13.1mg/l respectively, exceeding the criterion concentration of drinking water. The concentrations in D-65, D-35, and D-120 wells were slightly lower than the criterion concentration. The pHs at Seogwipo city were in the range of 6.6 to 7.3, being lower than those in the other areas.

The NO₃-N concentrations in wells at west region were negatively

correlated with pH and positively correlated with Ca, Mg, Na, Cl and EC. However, at east region, there was no correlation between pH and other ions. The concentrations of NO₃-N and Cl varied widely in the ground water but the Cl/NO₃-N ratios in ground water except at east region were much less variable and the ratios in the west, Shincheju and Seoqwipo regions were 2.7, 7.0 and 6.41, respectively.

A large percentage of Cl and NO₃ were eluted in 1 pore volume and eluted faster than SO₄ through Namwon and Mureung soil columns. The phosphate (PO₄) was not detected during the experimental period. The anions in Mureung soil were more mobile than those in Namwon soil. When the soil columns were eluted with solution mixture of 50 mg/l of Cl and SO₄, and 20 mg/l of NO₃ after completely leaching the anions with deionized water, the elution volumes at C/C₀ for Cl, SO₄, and NO₃ ions were 50 ml, 285 ml and 64 ml, respectively.



I. 서 론

제주도는 용수의 대부분을 지하수에 의존하는 지역으로 다른 지역에 비하여 지하수 보전의 필요성이 강조된다. 특히, 다량의 용수를 사용하고 있는 호텔 등이 밀집되어 있는 지역과 양돈장 등의 축산업이 밀집된 지역의 지하수는 하수나 폐수에 의한 오염이 우려된다.

제주도에서 지하수 오염에 관한 연구는 '80년대 초부터 시작되었는데 해수에 의한 지하수의 오염에 관한 연구가 대부분이었으며, 이들 보고중에 인구밀집 지역 및 서부지역의 몇개의 지하수에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도가 높다고 보고되었다(정 등, 1986; 유 등, 1988; 안 등, 1989; 유 등, 1991).

지하수를 오염시키는 물질중에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 검출빈도가 가장 높은 성분의 하나이다(Somasundaram 등, 1993). 도시지역에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 의한 지하수 오염은 Long Island(Flipse 등, 1984), Nassau county(Katz 등, 1980), Bermuda(Thomson과 Foster, 1986) 등의 지역에서 보고된 바 있다. 이들 지역에서는 대부분 세균, SO_4 등이 동시에 검출되었다. 도시지역에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도가 높아지는 원인은 주로 정화조의 유출액과 도시하수에 의하여 나타날 수 있으며, 대부분 비오염지역에 비하여 현저히 높은 농도로 검출되고 있다(Walker 등, 1973 a; Walker 등, 1973 b; Hantzsche and Finnemore, 1992). 따라서 지하수의 오염을 감소시키기 위해서 미국환경청에서는 정화조의 수를 1 km^2 당 15.5개 이상을 초과하지 않도록 제안하고 있다(Yates, 1986).

농경지에서 비료와 축산분뇨의 사용은 지하수중의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도를 높이는 데 직접적으로 영향을 미친다. Nebraska는 비점오염원(nonpoint source)에 의해 지하수가 질산성 질소로 오염된다고 보고된 지역으로(Spalding 등, 1978) 질소 동위원소를 이용하여 조사한 바에 의하면 오염원이 주로 비료(Gormly와 Spalding, 1979) 또는 토양 유기물로부터 유래된 것으로 밝혀졌다(Lindau와

Spalding, 1984). Gerhart(1987)은 Pennsylvania에서 축산분뇨의 토양처리는 여러 경로를 통하여 지하수로 유입되는데, 암반틈과 함락공을 통하여 유입되는 경우에는 수일내에 지하수중의 농도가 높아지며, 토양을 통한 경우에는 수주 또는 그 이상의 기간이 경과하였을 때 높아진다고 하였다. 또한, 이렇게 지하수로 유입된 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도는 지하수위와 같은 경향으로 농도가 높아지기도 하고 반대로 낮아지기도 한다고 보고하였다. 양돈 폐기물을 토양에 사용한 지역의 지하수는 비오염 지역에 비하여 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도가 현저히 높은 편이다(Gerhart, 1986 weil 등, 1990). 따라서, 사용량을 감소시켜서 토양중의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도를 감소시켰을 때 지하수중의 농도는 거의 비례적으로 감소하는 것으로 보고되었다(Hall, 1992).

농경지에서 비료의 사용은 지하수중의 질산성 질소의 농도를 높이는데 중요한 역할을 하는데, 질소질 비료와 염화가리를 사용한 지역에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도가 높을 뿐만 아니라 $\text{Cl}/\text{NO}_3\text{-N}$ 비가 일정하다고 보고되었다(Saffigna와 keeney, 1977). 토양으로 유입된 유기태 질소가 무기화 작용을 받아 생성된 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 토양중에서 거의 염소이온과 유사한 속도로 빠르게 하향이동하여 지하수를 오염시킬 수 있다(Adriano 등, 1972; Walker 등, 1973). 일반적으로 여름에는 토양중의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 작물에 이용되기 때문에 지하수중의 농도가 낮지만, 작물이 자라지 않는 겨울에는 토양 하층부에서 농도가 높아지는 경향이 있다(Johnson 등, 1976). 토양내 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 하향이동량은 기상 조건에 따라 크게 영향을 받는데, 강수량 또는 관개량이 많을수록 토양 하층부의 농도는 현저히 높아진다(Bergstrom, 1987). 이 들 연구보고의 대부분은 지하수중의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도가 점차 높아지고 있으며, 음용수 수질 기준을 초과하거나 인간 활동에 의한 오염 수준을 초과하는 지하수의 수가 증가하고 있다고 하였다(Spalding 등, 1987; Madison and Brenuit, 1985).

제주도는 지역에 따라 토지 이용 형태 및 배출되는 폐수의 종류가 다양하다. 제주시와 서귀포시는 인구가 밀집되어 있어서 정화조의 유출수와 하수에 의한 오염이 우려되는 지역이며, 서부지역은 집약적인 양돈 등의 축산 단지가 조성되

어 있다. 반면, 동부지역은 해수침입 현상이 보고된 지역으로 대부분 농경지와 초지가 조성되어 있다. 본 연구는 호텔, 상가, 아파트 등이 밀집되어 있는 제주 시 및 서귀포시 지역, 축산단지가 형성되어 있는 서부지역 및 해수침입현상이 나타나고 있는 동부지역에서 지하수의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 오염 정도를 조사하고 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 다른 이온간의 관계 및 토양내에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 이동성을 밝히기 위하여 수행되었다.



II. 재 료 및 방 법

1. 시료채취 및 분석방법

지하수 분석 시료는 신제주, 제주시 외곽지역, 서귀포시, 서부 및 동부지역에서 음용수로 사용하고 있는 지하수를 채취하였다(그림 1). 신제주지역은 호텔밀집 지역의 4개의 관정에서 채취하였으며, 서귀포시 지역에서는 인구밀집도가 높은 상가밀집 지역에 위치한 3개의 관정에서 채취 하였다. 또한, C-5는 제주시 외곽지역으로 해발 300m 부근의 지하수 오염의 위험성이 비교적 적은 지역이다. 서부지역과 동부지역의 시료는 전용수도로 개발되어 음용수로 사용하고 있는 각각 19개 관정과 9개관정에서 채취하였다. 관정명은 제주시 및 서귀포시 지역에서는 시료 채취시 부여한 번호이며, 동부와 서부지역에서는 지하수 굴착시 농진공에서 부여한 고유명사로서 D는 음용수로 이용하기 위하여 개발한 drinking well, w는 관측용으로 시추한 well를 나타낸다. 동부지역의 D-19는 해안과 가까운 곳에 위치한 관정으로 해수침입이 확인된 관정이며, D-42는 해발 200m 이상에 위치한 관정으로 인위적인 지하수 오염의 위험성이 적은 곳이었다.

제주시, 서귀포시 및 아라골프장의 시료는 1992년 1월부터 1993년 6월 까지 월별 1회 채취 하였고, 서부 및 동부지역의 시료는 1993년 3, 4, 5월에 채취하여 분석하였다. 채취용기는 polyethylene병을 사용하였으며, 채취 즉시 실험실로 운반하여 냉장 보관하여 측정하였다.

시료의 분석은 표준수질분석법을 이용하였는데, pH는 pH meter(Orion 520A)로, 전기전도도는 conductivity meter(Toa CM-11P)로, Ca, Mg, k 및 Na는 atomic absorption spectrophotometer(Pye Unicam SP 9)로, NO₃-N, Cl 및 SO₄는 membrane filter(O 0.45 μ m)를 통과시켜 ion chromatography(Dionex 94086)로 측정하였으며, HCO₃는 HCl로 적정하여 구하였다(Clesceri 등, 1989).

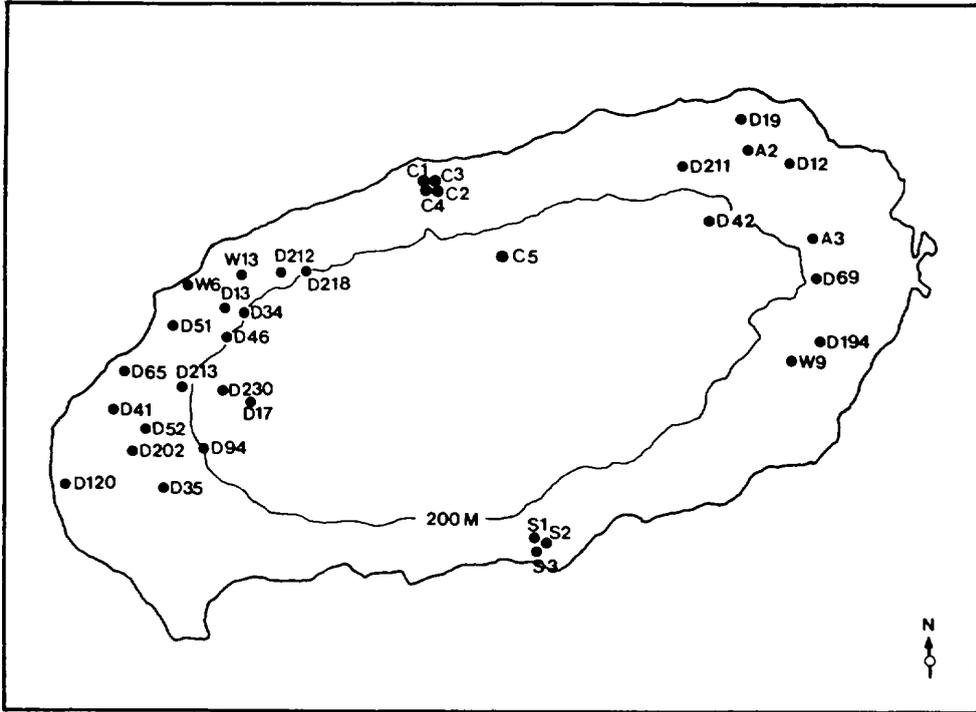


Fig. 1. Map of the sampling locations.

2. 토양내 이동성



토양내에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 이동성은 토주를 만들어 실내실험으로 수행하였다(그림 2). 토주는 길이 150 mm, 직경 32 mm의 acryl column으로 만들어 양돈단지 밭토양인 무릉릉과 동부지역의 대표 토양인 남원릉을 충전하였다. 토주내에서의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 Cl , SO_4 및 PO_4 와의 이동성을 비교하기 위하여 증류수를 초기속도 30 ml/hr로 2,200 ml를 흘려보냈으며, 실험과정중에 투수속도는 점차 감소하여 최종 투수속도는 1.5 ml/hr이었다. 이동성의 차이는 토주를 통과한 출현액을 fraction collector로 수거하여 ion chromatography(Dionex 94086)로 NO_3 , Cl , SO_4 및 PO_4 를 분석하여 비교하였다.

이들 음이온의 토양 흡착 특성은 증류수로 토주내 음이온을 완전히 용탈시

실험 후 20, 50 및 50 mg/l의 NO_3 , Cl 및 SO_4 의 용액을 흘려보내어 유출액중의 이들 이온의 농도를 측정하여 breakthrough curve를 그려 비교하였다.

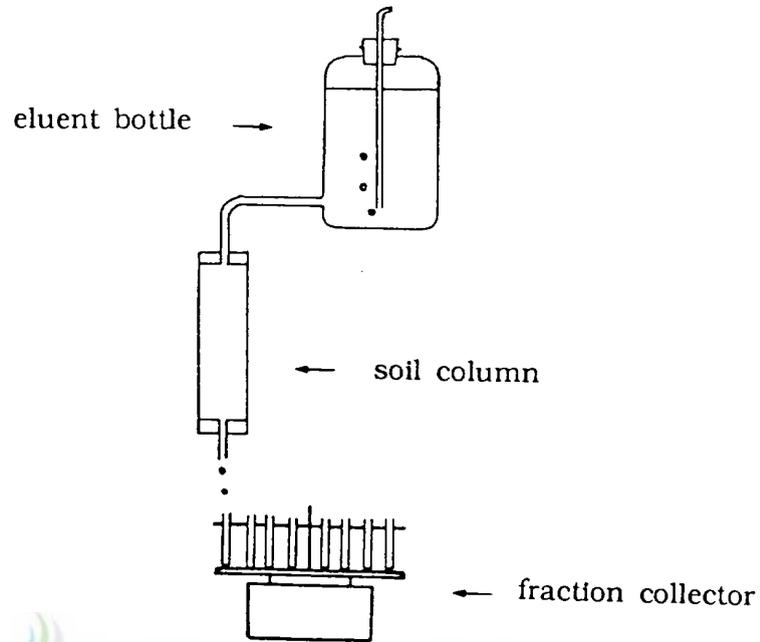


Fig. 2. Schematic diagram of experimental set-up for mobility of NO_3 , Cl , SO_4 , and PO_4 ions in Mureung and Namwon soils.
(soil column: length, 150 mm; I.D., 32 mm)

III. 결과 및 고찰

1. NO₃-N 농도의 월변화

92년 1월부터 93년 6월까지 신제주 지역의 지하수중 NO₃-N 농도의 월변화를 그림 3에 나타내었다. NO₃-N의 농도는 1.6 ~ 6.7 mg/l로 측정시기에 따라 차이가 컸다. 92년도에는 3 ~ 6월 사이에 농도가 높아졌다가 7월부터 12월까지는 3 ~ 4mg/l로 낮아지고 그 이후 다시 높아지는 경향이였다. 신제주 지역은 1980년대 초부터 도시가 형성되어 주로 관광객을 위한 호텔이 밀집해 있는 지역으로 봄과 가을부터 겨울사이에 관광객의 숫자가 많다. 따라서 이와

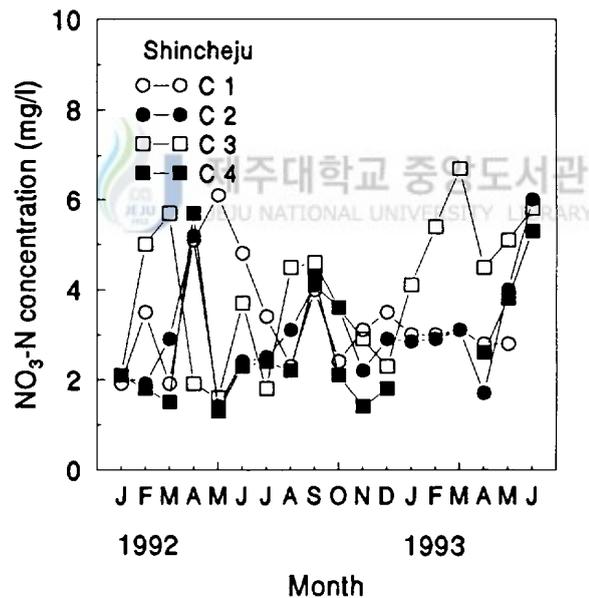


Fig. 3. Monthly changes in NO₃-N concentration in ground water at Shincheju.

같은 NO₃-N 농도의 월변화는 관광 성수기와 거의 일치하는 것으로서 이들이 사용한 하수에 의하여 영향을 받는 것으로 보이며, 차후 이에 관한 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

서귀포시 지역에서의 NO₃-N 월농도 변화는 관정간 차이없이 비슷하게 변화었는데, '92년 6월에서 10월 사이에는 8 mg/l 내외로 높아졌다가 11월에서 익년 1월 사이에는 4 mg/l로 낮아진 후 다시 높아지는 경향이였다(그림 4). 이와 같은 월농도 변화는 강우량과 관계가 있는 것으로 보이며 신제주에서의 경향과는 차이가 있는 것이었다. 서귀포시에서 시료를 채취한 지역은 서귀포시에서 오래전부터 시장 등이 밀집 형성되어 있어서 지하수를 오염시킬 수 있는 잠재적 오염원이 많은 지역인데, 장마기에 집중 오후에 의하여 육지부의 오염원이 지하로 유입된 것으로 보인다. 농경지에서 NO₃-N 농도의 월변화는 작물이 생육하는

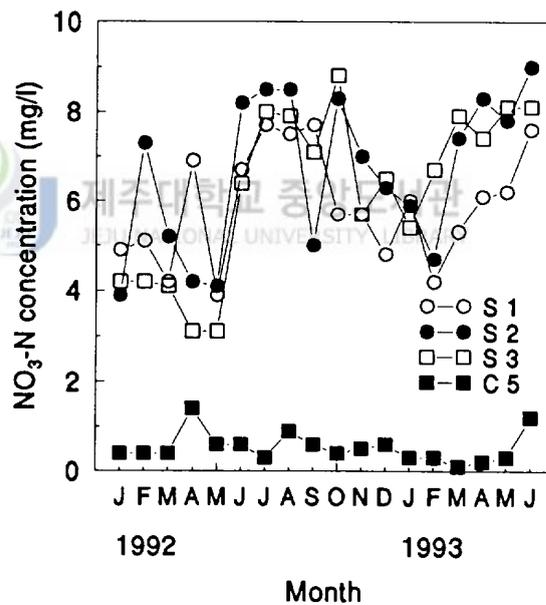


Fig. 4. Monthly changes in NO₃-N concentration in ground water at Seogwipo city(Samp. No. S 1, S 2, S 3) and forest region (C 5).

여름에 농도가 낮고 겨울에 농도가 높으나(Weil 등, 1990; walker 등, 1973 b; Johnson 등, 1976; Hubbard 등, 1984), 신제주 지역과 서귀포시 지역에서의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도는 이들의 보고와는 차이가 있었다. 이 지역에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도의 월변화는 오염물질의 지하수 유입량에 영향을 미칠 수 있는 하수 배출량 등의 주변 환경과 강우량에 의해 결정되는 것으로 보인다. 도시지역에서 정화조에서 유출되는 하수에 의하여 지하수가 오염되어 음용수 기준을 초과하는 예는 여러 도시에서 보고되었다(Walker 등, 1973 b; Hantzsche and Finnemore, 1992). Madison과 Brunett(1985)은 미국에서 25년 동안 124,000개의 지하수질에 관하여 보고된 연구를 종합하여 약 20%가 인간활동에 의한 오염기준인 3mg/l를 초과하고 6%가 음용수 수질기준인 10mg/l을 초과한다고 하였다. Nielson과 Lee(1986)은 미국내의 조사관정중 29%가 3mg/l를 초과하였다고 보고하였다. 인위적인 오염 수준을 3 mg/l로 기준하였을 때(Madison과 Brunett, 1985), 신제주 지역과 서귀포시 지역은 인위적인 요인에 의하여 오염이 상당히 진행된 것으로 보인다.

제주시 외곽지역의 산림지역에 위치한 C-5 지하수의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도는 측정 시기별로 약간 차이는 있으나 0.5 mg/l 내외로 다른 지역에 비하여 현저하게 낮았다. 산림지역 지하수중의 질산성 질소의 농도는 0.2 mg/l 또는 1.0 mg/l 이하로서 이 수준의 농도를 인위적인 요인에 의하여 오염되지 않은 상태의 것으로 보고 있는데(Weil 등, 1990; Hubbard 등, 1984), C-5 지하수는 범위내에 있었다.

2. 지역별 지하수의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도

지역별 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 최소, 최대 및 평균 농도를 표 1에 나타내었다. 서귀포시 지역의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 평균농도는 7.2 mg/l으로 가장 높았으며, 최소값을 나타내는 지하수의 농도도 3.0 mg/l 이상으로 인위적 오염기준인 3 mg/l(Madison과 Brunet, 1985)를 초과하였다. 제주시와 서부지역에서의 NO_3 평균농도도 각각 4.2 mg/l 및 4.1 mg/l로 서귀포시보다는 낮으나 인위적인 오염기준을 초과하였

다. 특히, 서부지역에서는 음용수 수질기준을 초과하거나 비슷한 농도를 나타내는 지하수가 검출되었다. 반면, 주로 농경지와 초지가 조성되어 있는 동부지역에서는 평균 1.1 mg/l이었으며, 최고농도도 2.7 mg/l로서 인위적인 오염기준 이하이었다. 따라서 동부지역의 지하수는 NO₃-N을 기준으로 하였을 때 오염되지 않은 것으로 판단된다.

토지 이용 형태에 따라 지하수중 NO₃-N의 농도는 차이가 있는데, 농도는 집약 축산 지역>주거지역>산림지역 순서로 높게 나타나기도 하며(Komor 등, 1993; Pionke와 Urban, 1984), 비료 사용량이 많은 지역에서는 축산분뇨의 사용 지역보다 더 높게 나타나기도 한다(Gormly와 Spalding, 1979). 도시가 형성된지 오래된 지역에서 지하수가 NO₃-N에 의하여 오염되는 원인은 주로 정화조 유출수와 하수에 의한 것으로 보고 있다(Somasundaram 등, 1993; Flipse 등, 1984; Katz 등, 1980). 본 조사에서 NO₃-N의 평균 농도는 인구밀집 지역인 서귀포시 지역이 서부의 양돈단지 및 동부의 농경지에 비하여 높았고 동부지역은 거의 오염되지 않은 것으로 나타났는데, 이것은 농경지와 초지가 조성되어 있는 동부지역이 비료의 사용량이 적어 그 영향이 지하수에 나타나지 않았거나 pH 의존 전하가 많고 ZPC가 높은 흑색 화산회토가 분포되어 있어서 토양에 의한 흡착이 일어나 지하수 유입량이 적었기 때문으로 생각된다. 서부지역 지하수에서 NO₃-N의 농도는 유 등(1988)이 대부분 1mg/l 이하라고 보고한 것에 비하여 현저히 높은 것이었는데, 이것은 시료 채취 관정의 차이에서 온 것으로 보인다.

Table 1. Minimum, maximum and mean concentration of NO₃-N in ground water at 4 divided regions

	East	West	Shincheju*	Seogwipo
Min	0.4	0.1	1.5	3.0
Max	2.7	13.9	6.7	9.7
Mean	1.1	4.1	4.2	7.2

* excluded analysis results for C-5 well

서부지역에서 NO₃-N 농도가 집중적으로 높게 나타나는 한림읍과 한경면의

양돈장 밀집 지역 인근의 지하수에서 '93년 3, 4 및 5월의 평균 농도를 그림 5-A에 나타내었다. 양돈장이 밀집되어 있는 지역 가까이에 위치한 D-41과 D-202 관정의 NO₃-N 농도는 11.0과 13.1 mg/l로서 음용수수질 기준인 10 mg/l를 초과하였으며, D-65, D-35 및 D-120 관정에서도 8.4, 8.5 및 9.5 mg/l로서 수질기준에 가까운 높은 농도를 나타내었다.

이와 같이 NO₃-N 농도가 높은 지하수 관정은 그림 5-B의 양돈장이 밀집해 있는 지역과 거의 일치하는 경향이였다. 축산 분뇨 폐기물은 지하수중의 NO₃-N의 농도를 높게하는 주요인의 하나로서(Gerhart, 1986; Exner, Spalding, 1985; Komor, 1993) 폐기물 더미 부근의 지하수중 농도가 비오염지역에 비하여 현저히 높게 검출되며(Weil, 1990), 폐기물의 토양 처리량을 감소시켰을 때 지하수중의 농도도 비례하여 감소하는 것으로 보고되었다(Hall, 1992). Exner와 Spalding(1985)은 Nebraska 일부 지역에서 71%가 NO₃-N의 음용수 기준치를 초과하며, 오염원이 주로 축산 분뇨에 의한 것이라고 하였다. 미국의 경우 축산

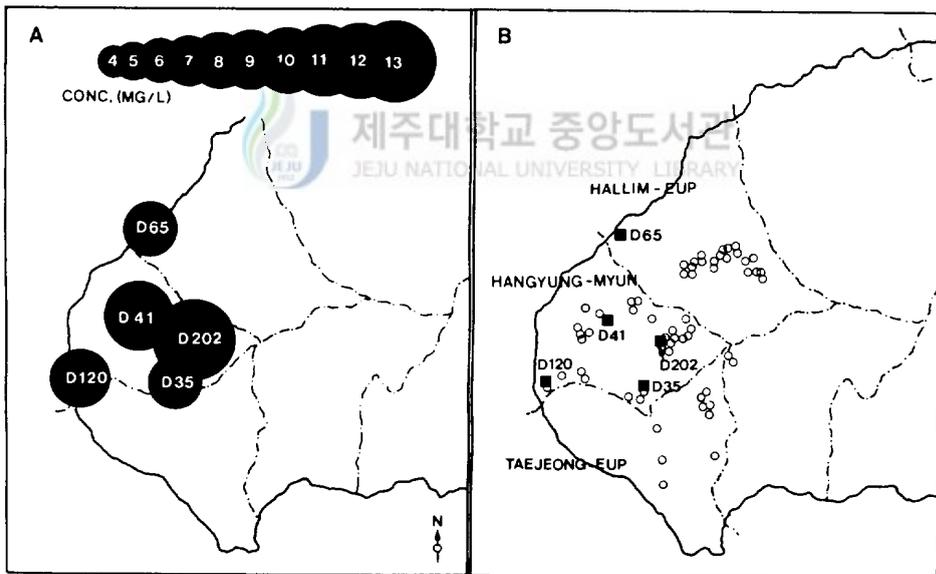


Fig. 5. NO₃-N concentrations(A) and pig facilities(B) at Hangyung-myun and Hallim-eup. (○, pig facility; ■, Well)

분뇨 및 비료를 계속 시용한 농경지 지하수중의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도가 1950년부터 1974년 사이에 2.8 mg/l에서 12.1 mg/l로 농도가 높아지는 지하수가 조사되기도 하였으며(Spalding 등(1978), 영국에서도 연 0.2 ~ 1 mg/l가 높아지는 지하수가 관측된다고 보고되었다(Carey and Lloyed, 1985).

서부지역의 토양은 주로 토양층이 형성되어 있지 않은 용암류 대지 또는 B층이 형성되지 않은 Entisols이 분포되어 있어서(정밀토양도, 1976) 토양에 유입된 질소 성분이 무기화 작용에 의해 생성된 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 토양층을 쉽게 통과하여 지하수를 오염시킬 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 숨골을 통하여 지하 침투식으로 처리하고 있다. 따라서 이 지역 지하수중에 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도가 높은 것은 주로 양돈 폐기물에 의한 오염으로 보이며, N의 환경동위원소 측정 등(Komor 등, 1993; Heaton, 1986)의 후속 연구를 통하여 오염원 구명에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

지역별 pH, EC 및 이온의 최소, 최대 및 평균 농도는 표 2와 같다. 평균 pH는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도가 가장 높은 서귀포시 지역이 pH 6.9로서 다른 지역에 비하여 낮았으며, pH 6.6인 지하수도 검출되었다. 동부지역의 pH는 유 등(1988)이 구좌읍 및 성산읍에서, 서부지역에서는 유 등(1991)이 안덕면, 대정읍 및 한경면에서, 서귀포시 지역에서는 정 등(1986)이 보고한 값과 비슷하였다.

Cl의 평균 농도는 동부지역이 가장 높은 편이었으며, 최고 농도가 음용수 기준치(150 mg/l)를 초과하는 지하수도 조사되었다. 신제주와 서귀포시 지역은 비슷하였으며, 서부지역은 가장 낮은 것으로 나타났다. 동부지역의 지하수에서 Cl 농도가 높은 것은 유 등(1988)에 의해서도 보고되었으며, 그 원인은 주로 해수 침입에 의한 것이라고 하였다.

SO_4 평균농도는 조사 대상 지역에서 비슷한 경향을 보였으나, 동부지역이 약간 높고 서귀포시 지역이 약간 낮은 편이었다. 동부지역에서는 40 mg/l 이상이 검출되는 지하수도 있었다. 정 등(1986), 유 등(1988), 유 등(1991)도 해수의

Table 2. Chemical properties of ground water at 4 divided regions

		East	West	Shincheju	Seoguipo
		----- concentration* -----			
pH	Min	7.1	6.9	7.0	6.6
	Max	8.0	8.7	8.0	7.3
	Mean	7.6	7.8	7.6	6.9
Cl	Min	7.4	4.3	14	23.1
	Max	199.5	38.3	51.5	48.0
	Mean	43.9	15.4	31.5	32.8
SO ₄	Min	3	2.3	3.8	4.8
	Max	40.6	24.1	16.5	18.4
	Mean	10.9	9.6	10.4	9.0
Ca	Min	2.1	1.6	1.6	3.9
	Max	10.8	16.0	8.1	12.4
	Mean	4.1	5.0	5.0	7.7
Mg	Min	3.5	1.8	3.41	4.0
	Max	17.9	18.1	12.9	10.2
	Mean	7.1	7.6	8.3	6.4
Na	Min	7.0	4.1	8.9	9.9
	Max	113.0	25.0	43.2	19.9
	Mean	23.4	11.9	21.63	15.7
K	Min	0.9	0.7	1.9	2.3
	Max	8.6	6.5	5.6	4.8
	Mean	2.6	2.7	3.4	3.3
EC	Min	86	57	146	201
	Max	733	366	361	342
	Mean	220	166	236	247

* mg/l except for pH and EC(μ S/cm).

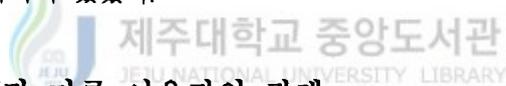
영향을 받은 지하수에서 SO₄ 농도는 매우 높게 나타난다고 하였는데, 동부지역의 지하수에서 농도가 높은 것은 이와 같은 원인에 의한 것이라고 생각된다.

Ca 농도는 서귀포시 지역이 평균 7.7 mg/l로서 다른 지역에 비하여 2.7 ~

3.6 mg/l 높았다. 이와 같은 값은 정등(1986), 유 등(1988) 및 유 등(1991)이 보고한 것에 비하여 현저히 낮은 것이었는데, 이것은 이들이 조사한 관정이 해수 침입 현상이 나타나는 지하수이어서 Ca 농도가 높게 나타난 것으로 보인다. 도시지역 지하수에서는 Ca 등의 양이온과 음이온을 함유한 하수가 지하수로 유입되기 때문에 지하수중의 농도가 높게 나타나는 경우가 있는데(Somasundaram 등, 1993), 서귀포시에서 Ca 농도가 높은 것은 이와 같은 원인에서 온 것으로 생각된다. Mg는 지역간 큰 차이없이 비슷하였으나 신제주지역이 약간 높은 편이었다. K는 동부와 서부지역이 2.6 mg/l 내외로서 비슷하였으며, 신제주와 서귀포시 지역은 3.3 mg/l 내외로 비슷하였다.

Na의 평균 농도는 동부와 신제주 지역이 각각 23.36 및 21.63 mg/l로 높은 편이었으며, 서부지역은 매우 낮은 편이었다. 동부지역에서는 100 mg/l 이상이 검출되는 지역도 있었다.

평균 EC는 서부지역이 167 μ S/cm으로 가장 낮았으며, 그외의 지역은 220 μ S/cm 이상이였다. 축산 집약 지역의 오염이 심한 지하수에서 전기전도도는 농경지 및 주거지에 비해서 높다는 보고(Komor 등, 1993)도 있으나 본 연구의 결과는 이와 차이가 있었다.



3. NO₃-N과 다른 이온과의 관계

3. 1. NO₃-N을 제외한 다른 이온간의 관계

지하수의 조성은 유입물질의 종류와 양에 의해 농도 및 이온간의 관계가 달라지게 되므로 이온간의 관계를 Schoeller, Piper diagram 또는 상관관계를 분석하여 수질 특성을 분류하고 있다(Mellouel과 Collin, 1992; Weil 등, 1990; Pionke와 Urban, 1984; Saffigna와 Keeney, 1977). 이온간의 관계가 다른 양상을 보이는 동부 지역과 서부 지역에서 '93년 3 ~ 5월 사이에 채취한 지하수중 NO₃-N을 제외한 각 이온간 상관관계를 그림 6에 matrix correlation으로 나타내었다. 서부 지역에서 pH는 Ca, Mg 및 EC와 역의 상관관계가 있었으나, 동부

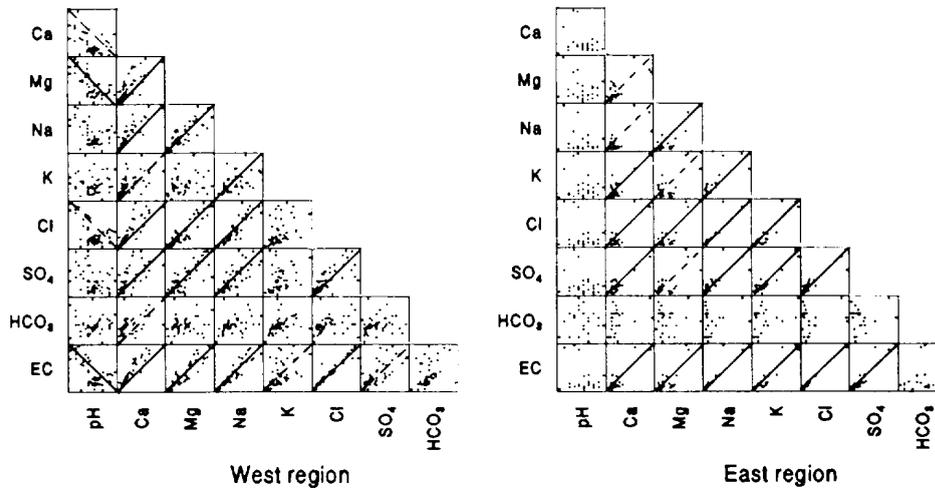


Fig. 6. Matrix correlation of ions in ground water at east and west regions.
 (—, significant at 1% level; ---, significant at 5% level)

지역에서는 상관관계가 없었다. 두 지역에서 모두 Ca, Mg, Na, Cl 및 SO₄ 사이에는 서로 정의 상관관계를 보였으며, HCO₃는 다른 이온과 상관관계를 보이지 않았다. 서부지역에서 Ca, Mg 및 EC가 높아짐에 따라 pH가 낮아지는 것은 특이한 현상으로 양돈단지가 밀집해 있는 이 지역에서 이들 이온들과 pH를 낮출 수 있는 성분이 함유된 양돈 폐수가 지하수로 유입되어 나타나는 것으로 생각되며, 이에 관한 구멍이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

3. 2. pH와의 관계

지하수의 pH와 NO₃-N과의 관계는 지역에 따라 차이가 있었다(그림 7). 서부 지역에서는 유의성 있는 역의 상관관계가 있었으나, 동부지역에서는 상관성을 보이지 않았다. 서귀포시 및 신제주지역에서의 지하수에서도 NO₃-N 농도가 높을수록 pH는 낮아지는 경향이였다. 토양중에서 질소비료를 과다하게 시용하여 NO₃의 농도가 높을수록 pH는 낮아지며(윤과 류, 1991), 토양의 용탈액에서도 같은 경향이 나타난다(윤, 1994). 동부지역에서는 NO₃-N 농도와 pH는 상관

성이 없었는데, 이것은 NO₃-N의 농도가 낮아 pH 변화에 영향을 미치지 못하였거나 다른 요인에 의한 것으로 보인다.

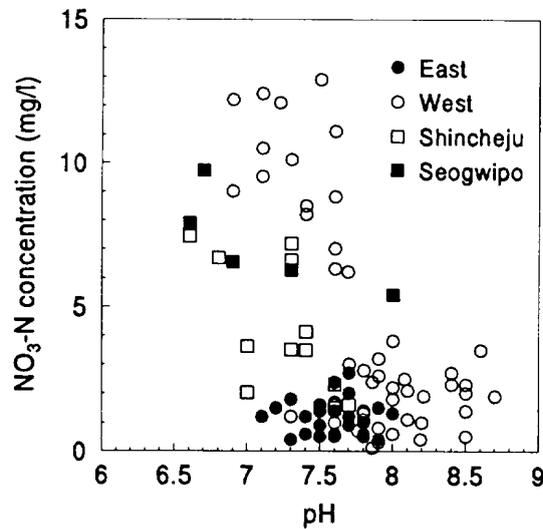


Fig. 7. Relationship between pH and NO₃-N concentration in ground water.

3. 3. Cl과의 관계

동부지역을 제외한 서부, 신제주 및 서귀포시 지역은 농도는 낮으나 NO₃-N와 정의 상관관계를 보였으나, 동부지역에서는 상관성이 없었다(그림 8). Cl/NO₃-N 비는 서부지역이 2.7, 신제주지역이 6.7, 서귀포시 지역이 6.41로서 인구 밀집지역과 양돈단지 주변간에 차이가 있었다. 산림지역에서 Cl/NO₃-N 비는 5 이상으로 높으며, 농경지에서는 1 내외로 낮다고 보고되었으며(Weil 등, 1990; Pionke와 Urban, 1984), Saffigna와 Keeney(1977)도 Cl/NO₃-N 비는 농도에 관계 없이 농경지에서는 대부분 0.7 ~ 0.8 범위에 있으며, 하수의 영향을 받은 곳에서는 2.8 정도로서 토지 이용 형태에 따라 차이가 있다. 본 연구에서도 하수와 축산분뇨의 영향을 받은 것으로 예상되는 지하수간에 Cl/NO₃-N 비가 차이

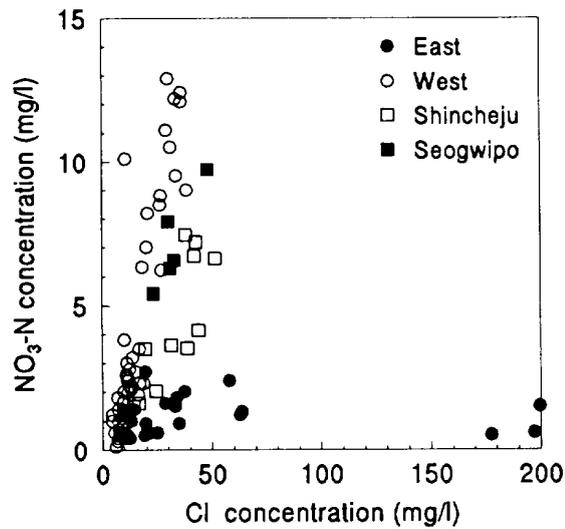


Fig. 8. Relationship between Cl and NO₃-N concentration in ground water.

가 있었으며, Cl과 NO₃-N의 비율이 다른 양돈 배출수와 도시하수가 지하수로 유입되어 나타난 결과라고 생각된다.



3. 4. Ca 및 Mg과의 관계

그림 9는 NO₃-N과 Ca 농도와의 관계를 나타낸 것으로 서부지역에서는 상관관계가 높았으나, 그외의 지역에서는 두 이온간에 상관성이 없었다. 이와 같이 서부지역에서 두 이온간에 상관관계가 높은 것은 일반적으로 돈분이 Ca를 상당량 함유하고 있어서(류 등, 1992) 폐수가 지하수로 유입됨에 따라 이들 성분의 농도가 동시에 높아진 것으로 보인다.

Mg와 NO₃-N과의 관계도 그림 10에 나타낸 것과 같이 Ca의 경우와 농도와 경향이 비슷하였다.

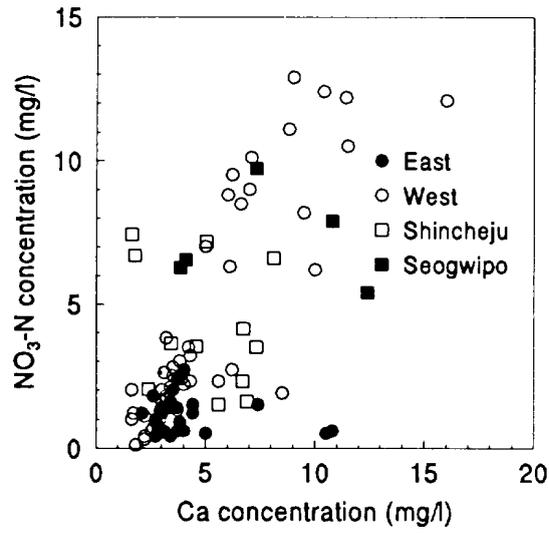


Fig. 9. Relationship between Ca and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration in ground water.

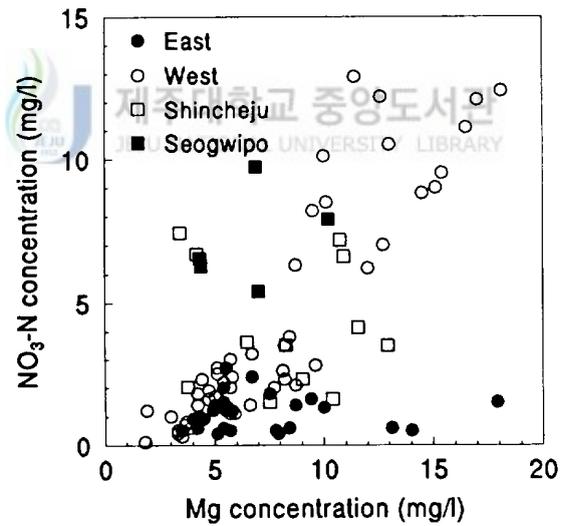


Fig. 10. Relationship between Mg and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration in ground water.

3. 5. Na과의 관계

서부지역과 서귀포시 지역에서 Na는 농도는 낮으나 NO₃-N과 정의 상관관계를 보였으나, 그외의 지역에서는 상관관계가 없었다(그림 11). 서부지역과 서귀포시 지역에서 Na/NO₃-N 비는 1.54와 5으로 산림지역의 2.78(Pionke와 Urban, 1984)에 비하여 차이가 있는 것으로서 오염원중의 Na/NO₃-N 비의 차이에서 온 것으로 생각된다.

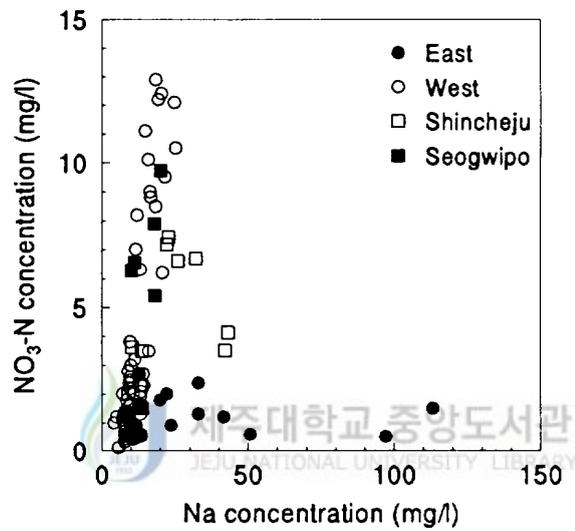


Fig. 11. Relationship between Na and NO₃-N concentration in ground water.

3. 6. K과의 관계

그림 12는 K와 NO₃-N과의 관계를 나타낸 것으로서 지역간 차이 없이 상관성이 없는 것으로 나타났다. 이것은 다른 양이온과 NO₃-N과의 관계와 상이한 결과이었다. 비료 및 축산분뇨를 시용한 농경지 지하수에서 NO₃-N, Cl 및 PO₄-P 간에는 서로 상관관계를 나타내지만 K는 상관성을 나타내지 않는 성분으로 알

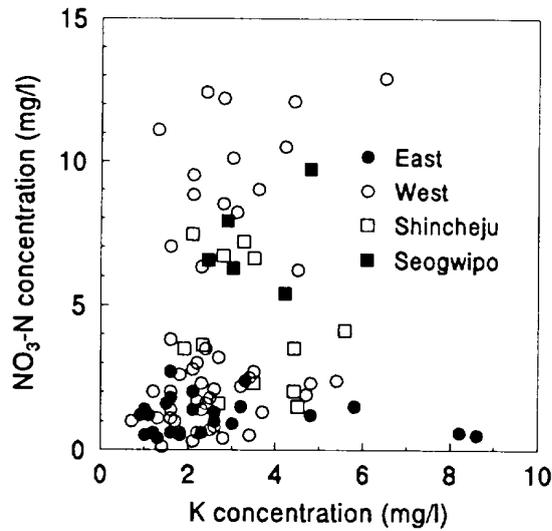


Fig. 12. Relationship between K and NO₃-N concentration in ground water.

려져 있으며(Pionke와 Urban, 1984), 토양에서 용탈되는 K의 양이 주로 식물 흡수 여부에 의해 영향을 받기 때문으로 보고 있다(윤 등, 1990).

3. 7. EC와의 관계

EC는 그림 13과 같이 서부, 신제주 및 서귀포시 지역에서 NO₃-N과 상관성이 높았는데, 이것은 이들 지역에서 NO₃-N과 EC를 높게할 수 있는 Ca, Mg, Na, Cl, SO₄ 등이 지하수로 동시에 유입되었기 때문으로 생각된다. 그러나 동북부 지역에서는 NO₃-N의 농도가 높아질 수 있는 원인과는 다른 요인에 의해 EC가 높아졌기 때문에 상관관계가 없는 것으로 생각된다.

이와 같이 양돈농가가 밀집해 있는 서북부 NO₃-N 농도는 pH와 역의 상관관계를 나타냈고 Ca, Mg, Na, Cl와 정의 상관관계를 나타내어 다른 지역의 지하수와 큰 차이가 있었는데, 이것은 서부지역 조사지역내에 약 300여개 돈사에서 일일 약 1,000톤의 오수가 배출되어 이들 이온들이 함유된 양돈폐수가 토양 또는 습곡을 통하여 지하수로 유입되었기 때문으로 생각된다.

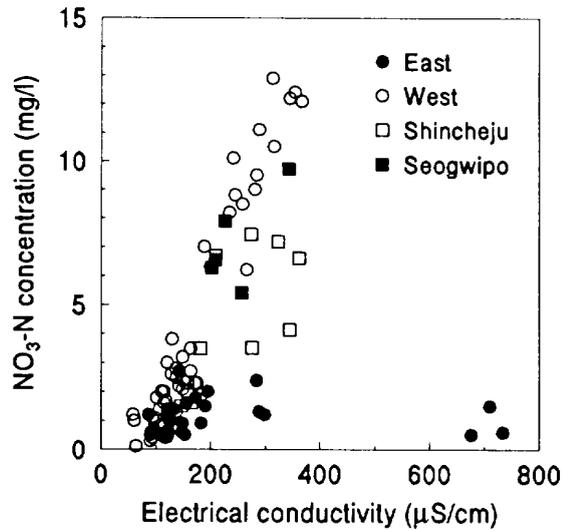


Fig. 13. Relationship between electrical conductivity and NO₃-N concentration in ground water.

4. 토양내 이동성

동부지역과 서부지역에서 대표 토양인 남원릉과 무릉릉의 발토양에서 토양 시료를 채취하여 토주를 만들어 일정 수두차에서 증류수를 흘려보내면서 용출액중의 음이온의 breakthrough curve의 차이로부터 이온간 이동성을 비교하였다.

남원릉에서 음이온의 breakthrough curve는 그림 14와 같다. 전체적인 출현 양상은 Cl과 NO₃은 출현양상이 비슷하였으며, SO₄에 비하여 먼저 출현하였다. 인산은 실험기간 동안 출현하지 않았다. 초기 10ml가 용출되었을 때 Cl, NO₃ 및 SO₄의 농도는 각각 19.8, 2.85 및 28 mg/l이었으며, 용출량이 많아짐에 따라 농도가 증가하였는데 Cl과 NO₃는 32.7 ml를 흘려보냈을 때 최고 농도인 71.7 mg/l 및 39.4 mg/l에 도달한 후 다시 낮아졌다. SO₄는 94 ml 부터 170 ml가 용출되는 사이에 최고농도인 80 mg/l에 도달하였으며, 그 이후 다시 낮아졌

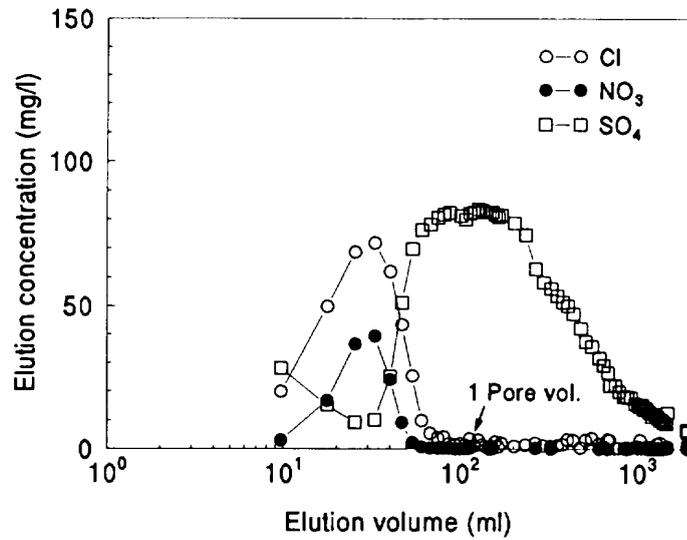


Fig. 14. Breakthrough curves of Cl, NO₃, and SO₄ through Namwon soil column leached with deionized water.

다. PO₄는 실험기간 동안 출현하지 않았다.

Cl과 NO₃는 각각 138 ml와 87 ml 이상이 용출되었을 때 농도가 1 mg/l 이하로 낮아진 것으로 보아 column내 토양의 1 pore volume인 104 ml를 용탈시켰을 때 토주내 Cl과 NO₃의 대부분이 용탈되는 것으로 보인다. SO₄는 2200 ml가 용출되는 동안에도 5 mg/l 이상의 농도로 용출되었다. 발토양에서 NO₃는 토양표면의 양전하와 비특이적 흡착기작에 의하여 흡착되어 (Mott, 1981; Hingston, 1972) 흡착력이 약하므로 특이적 흡착을 하는 인산에 비하여 현저히 빠르게 이동한다. 토주에 일정량의 Cl과 NO₃를 처리한 후 증류수로 용탈시킬 때 출현 순서는 NO₃와 Cl이 비슷하거나 NO₃가 빨리 용탈되며, 거의 물의 용탈 속도와 비슷하다(Misra와 Mishra, 1977). 반면, 출현액중에서 검출되지 않은 인산은 토양과 배위자 결합을 하여 강하게 결합되기 때문에 이동되지 않은 것으로 보인다.

무릉통에서의 breakthrough curve는 그림 15에서 보는 바와 같이 남원통과

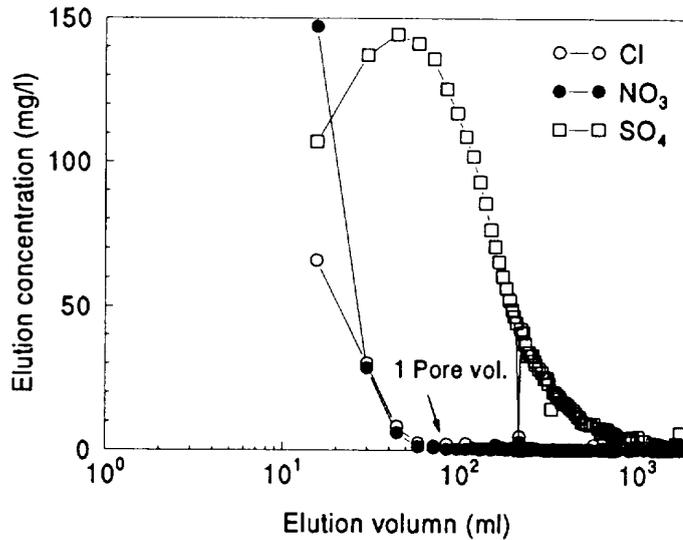


Fig. 15. Breakthrough curves of Cl, NO₃, and SO₄ through Mureung soil column leached with deionized water.

약간 차이가 있었다. 용액의 출현시점인 15.5 ml가 출현될 때 Cl과 NO₃의 농도는 65.8 및 146 mg/l로서 최고농도를 나타내었으며, 그 이후의 농도는 직선적으로 감소하여 58 ml가 용출되었을 때 1 mg/l 이하를 나타낸 것으로 보아 무릉퉁의 1 pore volumn인 83 ml를 용탈 시켰을 때 토주내 대부분의 Cl과 NO₃가 용탈되는 것으로 나타났다. SO₄는 출현시점에서는 106 mg/l이었으며, 용출량이 많아짐에 따라 점차 증가하여 44 ml가 용출되었을 때 최고 농도인 144.3 mg/l가 용출되었고 그 이후 농도가 점차 낮아졌다. 이와 같은 출현 양상은 무릉퉁이 남원퉁에 비하여 NO₃, Cl 및 SO₄의 이동속도가 현저히 느린 것을 나타내는 것으로 흑색 화산회토인 남원퉁이 암갈색 비화산회토인 무릉퉁에 비하여 이들 이온을 강하게 흡착하여 이동속도를 느리게 하는 것으로 보인다.

중류수로 토주내의 NO₃, Cl 및 SO₄를 용탈시킨 후 50, 20 및 50 mg/l의 Cl, NO₃ 및 SO₄ 용액을 흘려보내어 이들 이온을 흡착시킨후 출현액중의 이들 이온의 breakthrough curve를 그림 16에 나타내었다. C/C₀=0.5의 농도가 출현하는

용출액의 양은 Cl이 50 ml, NO₃가 64 ml, SO₄가 285 ml로서 토양에 의한 흡착 후 Cl이 가장 빨리 이동하는 것으로 나타났다.

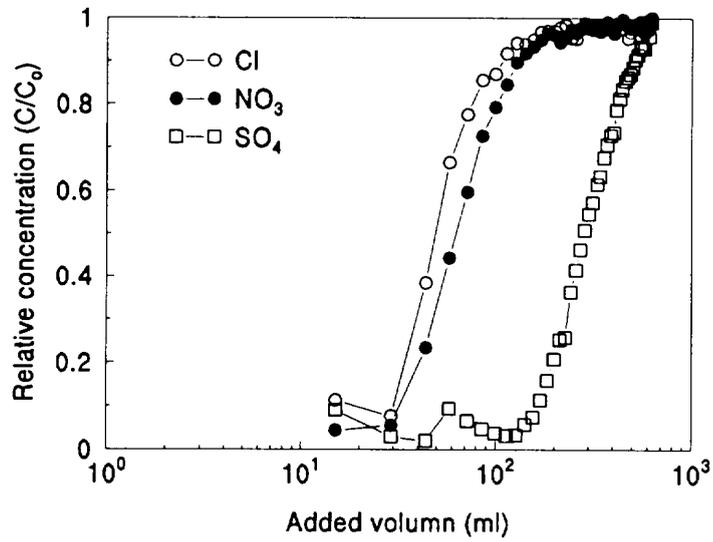


Fig. 16. Breakthrough curves of Cl, NO₃, and SO₄ through Mureung soil column leached with solution containing 50, 20, and 50 mg/l of Cl, NO₃, and SO₄.

IV. 적 요

본 연구는 제주도에서 음용수로 사용하는 지하수중 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 오염 정도와 다른 이온과의 관계를 밝히고 토양내에서 이온간 이동성을 비교하기 위하여 수행되었다. 지하수 시료는 신제주에서 호텔이 밀집되어 있는 지역의 4개 관정과 외곽지역의 1개 관정, 서귀포시에서 상가가 형성되어 있는 지역의 3개 관정, 해수침입현상이 보고된 동부지역의 9개 관정 및 양돈장이 밀집해 있는 서부지역의 19개 관정에서 채취하였다. 토양내에서 NO_3 , Cl , SO_4 및 PO_4 의 이동성 비교는 서부지역에서 암갈색 비화산회토인 무릉토, 동부지역에서는 흑색 화산회토인 남원토로 토주를 만들어 수행하였다.

신제주지역에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도는 3 ~ 6월 사이에 높았으며, 서귀포시 지역에서는 장마직후인 6 ~ 10월 사이에 높았다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 평균농도는 서귀포시가 7.2 mg/l로서 가장 높았으며, 동부지역 지하수중의 농도는 3mg/l 이하이었다. 제주시 외곽지역으로 비오염지역으로 예상되는 C-5 관정에서 질산성 질소의 농도는 0.5 mg/l 내외이었으며, 최고농도도 1.2 mg/l 이하이었다. D-41 및 D-202 관정을 제외한 지하수의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도는 음용수 기준치 이하로 나타났다. 양돈단지 부근에 위치한 D-14 및 D-202 관정은 10.95 및 13.1 mg/l로서 음용수 기준치를 초과하였으며, D-65, D-35 및 D-120도 기준치에 비하여 약간 낮은 농도이었다. 서귀포시 지역의 pH는 6.6 ~ 7.3 범위에 있었으며, 이것은 다른 지역의 지하수에 비하여 현저히 낮은 것이었다.

서부지역에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도는 pH와 역의 상관관계를 보였으며, Ca, Mg, Na, Cl 및 SO_4 농도와의 정의 상관성을 나타내었다. 반면, 동부지역에서는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 다른 이온간에 상관성이 없는 것으로 조사되었다. 동부지역을 제외한 서부지역, 신제주 서귀포시 지역에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 Cl 농도는 차이가 있었으나 Cl/ $\text{NO}_3\text{-N}$ 비는 일정하였으며, 그 비는 각각 2.7, 7.0 및 6.4 이었다.

남원통과 무릉통을 충전한 토주에서 NO_3 와 Cl 은 1 pore volume의 증류수를 용탈시켰을 때 토양중에 존재하는 대부분이 용탈되었으며, 이동순서는 $\text{NO}_3 = \text{Cl} > \text{SO}_4$ 이었다. 인산은 시험기간 동안 용탈액중에서 검출되지 않았다. 이들 이온의 이동속도는 남원통이 무릉통에 비하여 느렸다.

용탈 시험후 50, 20 및 50 mg/l의 Cl , NO_3 및 SO_4 용액을 흘려보냈을 때, 토주를 통과한 용액중의 이들 이온의 상대농도 $C/C_0=0.5$ 가 출현하는 용출액의 양은 Cl 이 50 ml, NO_3 가 64 ml, SO_4 가 285 ml이었다.



V. 참고 문헌

- 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.
- Bergstrom, L. 1987. Nitrate leaching and drainage from annual and perennial crops in tile-drained plots and lysimeters. *J. Environ. Qual.* 16:11-18.
- Carey, M. A. and J. W. Lloyd. 1985. Modelling non-point sources of nitrate pollution of groundwater in the Great Ouse Chalk, U. K. *J. Hydrol.* 78:83-106
- Clesceri, R. S. et al ed. 1989. Standard methods for the examination of water and wastewater. APHA-AWWA-WPCF.
- Eckstein, Y. 1969. Hydrogeology of a volcanic island Cheju do, Korea. *Bull. of Internat'l Ass. Sci. Hydrol.* XIV:45-60.
- Exner, M. E. and R. F. Spalding. 1985. Ground water contamination and well construction in southeast Nebraska. *Ground Water.* 23:26-34
- Flipse, W. I., B. G. Katz, J. B. Lindner, and R. Markel. 1984. Sources of nitrate in ground water in a sewered housing development, Central Long Island, New York. *Ground Water.* 22:418-426
- 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.
- Gormly, J. R. and R. F. Spalding. 1979. Sources and concentration of nitrate-nitrogen in ground water of the Central Platte Region, Nebraska. *Ground Water.* 17:291-301.
- Hall, D. W. Effects of nutrient management on nitrate levels in

- ground water near Ephrata, Pennsylvania. *Ground water*. 30:720-730.
- Hantzsche, N. N. and E. J. Finnemore. 1992. Predicting ground-water nitrate-nitrogen impacts. *Ground Water*. 30:490-499.
- Heaton, T. H. E. 1986. Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: a review. *Chemical Geology*. 59:87-102.
- Hingston, F. J., A. M. Posner, and J. P. Quirk. 1972. Anion adsorption by goethite and gibbsite. I. The role of the proton in determining adsorption envelopes. *J. Soil Sci.* 23:177-192.
- Hubbard, R. K., L. E. Asmussen, and H. D. Allison. 1984. Shallow ground water quality beneath an intensive multiple-cropping system using center pivot irrigation. *J. Environ. Qual.* 13:156-161.
- 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
- Katz, B. G., J. B. Lindner, and S. E. Ragone. 1980. A comparison of nitrogen in shallow ground water from sewered and unsewered areas, Nassau County, New York, from 1952 through 1976. *Ground Water*. 18: 607-618
- 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.
- Lindau, C. W. and R. F. Spalding. 1984. Major procedural discrepancies in soil extracted nitrate levels and nitrogen isotopic values. *Ground Water*. 22:273-278.
- Madison, R. J. and J. O. Brunett. 1985. Overview of the occurrence

- of nitrate in ground water in the United States. In: U. S. G. S. Nat'l Water Summary 1984, U. S. Geol. Surv. Water-supplying Paper 2275, pp. 93-105. Cited from Follett (ed.). 1989. Nitrogen management and ground water pollution. p. 38
- Mellouel, A. and M. Collin. 1992. The 'principal components' statistical method as a complementary approach to geochemical methods in water quality factor identification; application to the Costal Plain aquifer of Israel. II. Hydrol. 140:49-73.
- Misra, C. and B. K. Mishra. 1977. Miscible displacement of nitrate and chlorride under field condition. Soil Sci. Soc. Am. J. 41:496-499
- Mott, C. J. B. 1981. Anion and ligand exchange, In The chemistry of soil processes. pp. 179-219. Wiley, New York
- Nielson, E. G. and L. K. Lee. 1986. The magnitude and costs of ground water contamination from agricultural chemicals: a national perspective. USDA-Econ. Res. Serv., Nat. Res. Econ. Div., staff Rept. AGES70318, Washiton DC. 54pp. Cited in Follett(ed). 1989. Nitrogen management and ground watr protection. Elsevier Sci. Pub. Co. New York.
- Pionke, H. B. and J. B. Urban. 1985. Effect of agricultural land use on ground water quality in a small Pennsylvania watershed. Ground Water. 23:68-80.
- Reevers, Jr, C. C. and E. D. Miller. 1978. Nitrate, chloride and dissolved soilds, Ogallala aquifer, West Texas. Ground Water. ???
- Saffigna, P. G. and D. R. Keeney. 1977. Nitrate and chloride in ground water under irrigated agriculture in Central Wisconsin. Ground Water. 15:170-177.

- Somasundaram, M. V., G. Ravindran, and J. H. Tellam. 1993. Ground-water pollution of the Madras urban aquifer, India. *Ground Water* 31:4-11
- Spalding, R. F., J. R. Gormly, B. H. Curtiss, and M. E. Exner. 1978. Nonpoint nitrate contamination in Merrick County, Nebraska. *Ground Water*. 16:86-95
- Spalding, R. F., J. R. Gormly, B. H. Curtiss, and M. E. Exner. 1987. Nonpoint nitrate contamination of ground water in Merrick country, Nebraska. *Ground Water*. 16:86-95.
- Thomson, J. A. M and S. S. D. Foster. 1986. Effects of urbanisation on groundwater of limestone island: An analysis of Bermuda case. *J. Inst. Water Engrs. and Scientists*. 40:527-540.
- Walker, W. G., J. Bouma, D. R. Keeney, and F. R. Magdoff. 1973 a. Nitrogen transformations during subsurface disposal of septic tank effluent in sands: 1. Soil transformations. *J. Environ. Qual.* 4:475-480.
- Walker, W. G., J. Bouma, D. R. Keeney, and P. G. Olcott. 1973 b. Nitrogen transformations during subsurface disposal of septic tank effluent in sands: II. Ground water quality. *J. Environ. Qual.* 4:521-525.
- Weil, R. R., R. A. Weismiller, and R. S. Turner. 1990. Nitrate contamination of groundwater under irrigated coastal plain soils. *J. Environ. Qual.* 19:441-448.
- Yates, M. V. 1986. Septic tank density and ground-water contamination. *Ground Water*. 23:586-591.
- 류순호 등. 1992. 농업 환경 오염 경감 대책 연구. 농진청 연구보고서. pp. 111-131.

- 안종성, 유장걸, 정창조, 송성준. 1989. 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구. (IV) 제주대학교 방사능연구소 연구보고. 4:35-60.
- 유장걸, 정창조, 송성준, 안종성. 1991. 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구. (VI) 제주대학교 방사능연구소 연구보고. 6:23-44.
- 유장걸, 정창조, 안종성, 송성준. 1988. 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구(III). 제주대학교 방사능연구소 연구보고. 3:87-116.
- 윤순강, 이혁호, 이종열. 1990. 주요 목초의 질적 및 양적 계절간 생산성과 양분 조성 변화에 관한 연구. 농시논문집. 32:32-41.
- 윤순강, 류순호. 1991. 요소를 시용한 초지의 토양단면에서 pH 및 인산, 유기물과 치환성 양이온 함량의 계절적 변화. 한국토양비료학회지. 24:254-259
- 윤순강. 1994. 요소와 가축분에서 유래한 $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 동반 양이온의 토양중 행동. 서울대 대학원 박사학위 논문.
- 정밀토양도, 제주도. 1976. 농촌진흥청 농업기술연구소.
- 정창조, 유장걸, 안종성, 송성준. 1986. 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구. 제주대학교 방사능연구소 연구보고. 2:29-44.



감사의 글

본 논문이 완성되기 까지 아낌없는 지도와 따뜻한 격려를 해 주신 현해남 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

그리고 바쁘신 중에도 본 논문을 심사하여 주신 유장걸 교수님, 류기중 교수님과 항상 관심을 보여주시고 격려를 해주신 강순선 교수님, 고정삼 교수님, 김찬식 교수님, 이육영 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

또한 실험 수행에 있어서 많은 도움을 주신 고정은 선배님, 양상호 선배님께 감사를 드리며, 동료 대학원생과 농화학과 조교 선생님들께도 감사를 드립니다.

아울러 연구조사에 특히 많은 도움을 주신 오상실 선배님과 임한철 선배님, 문두경 연구사, 오순미 연구사에게 감사를 드리며, 토양학 실험실에서 공부하고 있는 강봉철, 강군봉과 여러 학부생들에게도 고마움을 전합니다. 그리고 어려울 때 마다 힘이 되어준 여러 친구들과 후배들에게 고마움을 전합니다.

끝으로 어려운 여건속에서도 뒷바라지를 해주신 부모님께 깊은 감사를 드리며 이 논문을 바칩니다. 그리고 동생 선학이와 이 작은 기쁨을 함께 나누고 싶습니다.