

한림읍 옹포천 유역의 질산성질소 오염 실태 및 오염원 조사 기초 연구

현 승 규* · 박 원 배** · 김 길 성***

<목 차>

- | | |
|----------------|-------------|
| I. 서론 | IV. 결과 및 고찰 |
| II. 이론적 고찰 | V. 향후 대책 |
| III. 조사 및 분석방법 | |

I. 서론

제주도는 지질적인 특성으로 인해 하천과 호수가 발달하지 않아서 과거 수자원을 확보하는 것이 상당히 힘들었다. 농업 형태의 변화와 인구 증가에 의해 수자원 개발이 절실히 요구되고, 이에 1970년대 이후 지하수 관정의 개발이 급속히 증가하여 2000년 현재 담지하수 지하수 관정은 4,118공에 이른다(제주도, 2000). 이와 같이 제주도의 산업과 생활을 유지하기 위한 수자원으로 지하수가 차지하고 있는 위치는 절대적이라 할 수 있다.

'94~'98년까지 상수도용 공공관정 중 오염도가 높다고 판단되고 지역 대표성이 있는 118개소의 관정에 대해서 1,780건의 수질을 검사한 결과 188건이 먹는물 중 질산성질소 수질기준 10 mg/l를 초과하여 10.6%의 부적합률을 보임으로써(제주도, 1999) 일부 지역의 지하수가 질산성질소에 의해 오염되었음을 알 수 있다.

제주도 북제주군 지역의 지하수에 대한 조사 결과 검사건수 659건 중 먹는물 수

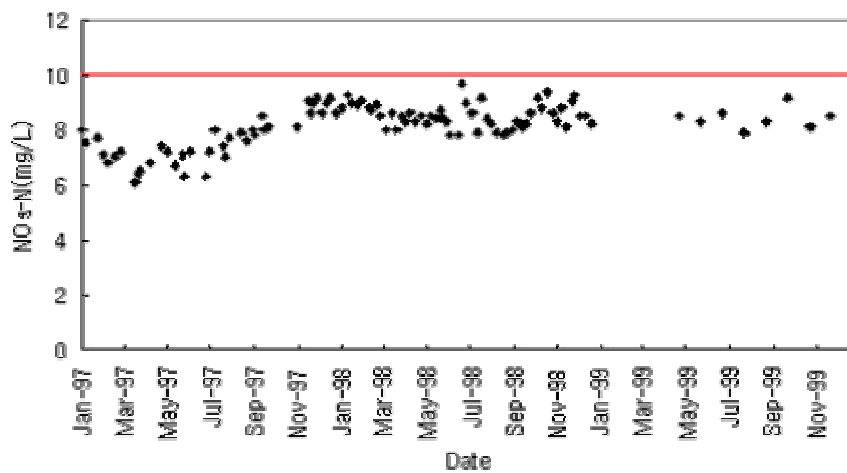
* 연세대학교 일반대학원 지구시스템과학과 박사과정

** 제주발전연구원 책임연구원

*** 제주도 보건환경연구원

질 기준 10 mg/ℓ 초과건수는 133건의 20.2 % 부적합률을 보이고 있으며, 평균 5.6 mg/ℓ로 높은 농도를 나타냈다. 이중 한림읍의 경우 검사 건수 43건 중 수질기준 초과는 18건으로 41.9%의 부적합률을 보이고 있다(제주도, 1999).

<그림 1>은 북제주군 한림읍 일대에 존재하는 옹포천 유역 내 용출수 중 질산성 질소의 농도의 변화를 나타내며, '97부터 '99년까지의 농도 변화는 6.1~9.7 mg/ℓ의 범위에서 일어나 먹는물 수질기준(10 mg/ℓ)을 초과할 우려가 있다.



<그림 1> 옹포천 유역 용출수 중의 질산성질소 농도(mg/ℓ) 변화(북제주군)

이러한 지하수 중의 질산성질소 증가의 원인은 인구의 증가에 의한 생활 오수의 발생, 농업 형태 변화에 따른 화학비료의 사용 증가 그리고 중산간 지역의 무분별한 농지개량과 축산시설의 밀집에 기인하는 것으로 추정할 수 있다.

이런 오염원들을 규명하기 위한 여러 가지 노력들이 이루어 졌으나, 최근에는 안정동위원소를 이용한 방법이 주로 이용되고 있다. 田瀬(1996)과 Komor and Andrsion (1993)은 질산성질소에 의한 지하수 오염원의 규명을 위해 안정동위원체의 자연존재비를 이용하여 측정함으로써 질소화합물로 인한 지하수 오염원을 추정 가능한 것으로 보고하였다.

본 연구에서 한림읍 일대의 수자원인 한림정수장을 포함하고 있는 옹포천 유역내에 있는 관정들에 대해서 질산성질소에 의한 오염 정도를 확인하고 질소 안정동위원소의 자연존재비를 측정분석하여 오염원을 규명하고자 하였다.

II. 이론적 고찰

1. 음용수 중 질산성질소의 위해성

질산성질소가 인체에 미치는 영향으로는 nitrosamine이라는 발암물질을 형성하는 것과 3개월 미만의 영아에게 치명적인 methemoglobinemia 등을 들 수 있다. 후자는 1945년 처음으로 발견되었다. 이는 고농도의 질산염으로 오염된 물을 이용하여 영아의 이유식 등을 먹었을 때 섭취 후 위에서 질산염이 아질산염으로 환원되며, 이 아질산염이 흡수되어 혈액과 반응하여 산소운반을 저해하는 methemoglobin을 형성하여 호흡에 지장을 초래하므로 피부가 청색으로 변하는 blue babies를 유발하는 증상이다. 미국과 유럽 등에서 1945년 이래 약 2,000명의 환자가 발생하였으며 사망률은 78%였다. 그러나 질병 진단이 매우 어렵고 질병 발생보고가 의무적이 아니기 때문에 실제 발생 환자수는 이보다 몇 배 이상 높을 것으로 추정된다(현, 1996).

이와 같은 이유에 근거하여 먹는물 수질기준에서 질산성질소 농도는 10 mg/l을 기준으로 하고 있으며, 자연적인 기원에 인한 질산성질소의 농도는 2~3 mg/l을 기준으로 하고 있다(Arthur, 1995).

2. 지하수중의 질산성 질소

제주도는 화산섬이 지닌 특수한 지질과 지형조건으로 연 강우량의 45%정도가 지하로 쉽게 침투하는 특성을 갖고 있어 강수의 지하침투가 용이하고 오·폐수의 지하침투 또한 용이하다. 따라서 토양중의 성분이 용탈되어 지하수질에 영향을 미칠 수 있고 지표 및 토양오염에 의해서 지하수는 그 성분이 변할 수 있다(농어촌 진흥공사, 1994).

지하수의 수질은 지질 특성과 물의 화학적 특성 그리고 지화학적 특성에 의해 고유의 수질 특성을 갖는다. 토양이 오염되면 지층 내에 평형 상태를 유지하기 위하여 여러 가지 화학반응이 일어나 지하수 수질의 화학조성이 변하게 된다. 그래서 지하수의 화학적 특성은 지하매질의 지화학적 특성, 지하 침투수의 수질, 오염물질의 조성들이 복합적으로 작용하여 나타난다.

제주도는 토양 생성학적으로 아직 풍화작용이 충분히 일어나지 않은 미숙토양에 속한다. 따라서 자갈 함량이 많고 점토함량이 적어 투수계수가 커져 지하수 함양량이 많아지나 이에 따라 지표의 오염물질이 충분히 여과되지 않고 지하수로 이동하는 위험성도 있다(오, 1994)

박(1993)와 오(1994)의 보고에 의하면 제주도의 투수성지질(곶자왈 및 습골)이 강수를 지하수체로 유입시키는 통로와 같은 역할을 하기 때문에 표면 유출이 발생하는 50mm이상의 강수시에는 24시간 이내에 강수가 지하수체로 침투되어 지하수의 수위상승에 영향을 주고 있는 것으로 보고되고 있다. 이런 경로가 오염물질의 경로로 사용될 경우 지하수 오염이 빠르게 일어날 수 있다.

토양 중의 질산성질소는 음전하를 갖는 이온으로 토양 점토의 전하와 반발하여 쉽게 용탈할 수 있는 이온이다.

지하수 중의 질산성질소의 농도에 영향을 미치는 것에는 가정 하수, 가축 분뇨 그리고 농업 활동에 사용된 비료에 의한 영향이 크다고 할 수 있다.

Klassen (1990)의 보고에 의하면 미국 농경지에 유입되는 질소량은 질소비료와 퇴비가 전체의 약 50.1%를 차지하고 있어서 지하수에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 보고하였다.

토양에 시비된 질소비료가 식물에 이용되는 양은 일반적으로 시비된 질소의 50% 이하이고, 8 ~ 23%는 토양에 있는 유기물질과 결합되어 복합체를 형성하거나 토양 미생물에 의해 유기성 질소로 존재한다. 이러한 질소는 시간이 경과함에 따라 토양 중에서 무기화된다. 또한 시비된 질소의 2 ~ 18%는 토양반응에 따라 암모니아 형태로 휘산 또는 질소 산화물이나 질소 가스 상으로 대기 중으로 이동한다. 식물 영양학적 측면에서는 손실되는 것으로 착각할 수 있으나 강수 시에 다시 토양으로 유입될 수 있는 질소이다. 그러나 시비 질소의 2 ~ 8%는 질산성 질소로 산화되어 토양수의 하향이동시 심토층으로 이동되고 결국 지하수에 도달할 잠재성을 갖게되어 질산성질소 오염원으로 작용하게 되는 것으로 보고되고 있다(윤과 류, 1993).

도내 농가들의 화학비료 사용량은 제주도 농촌 진흥원의 자료를 보면 도내 5만 9천9백ha의 농지를 대상으로 화학비료 사용 실태를 조사한 결과 모두 6천2백 여톤이 사용된 것으로 조사되었으며, 이는 시비 기준량인 569 kg/ha보다 35%많은 1,005 kg/ha이 시비된 것이며, 감귤원의 경우는 시비기준량인 957 kg/ha을 17%나 초과하

는 1,120 kg/ha시비하고 있는 것으로 보고 됐다. 제주도(1996)에 의하면 경지면적당 질소비료 사용량은 제주도내 농가는 503 kg/ha로 미국의 10배, 일본의 3.7배, 전국평균보다 2.5배나 많이 사용하는 것으로 보고되었다.

제주도(1999)에 의하면 도내 축산 폐수 발생량은 5,521 m³/day로 이것 중 82.8%인 4,573m³/day이 처리되고 82.8 m³/day가 재활용되고 있어 처리되지 않은 축산폐수에 의해 지하수의 질산성질소의 농도에 영향을 미칠 수 있다.

3. 질소의 안정동위원소 자연존재비

각각의 지하수 중 질산성질소의 15N 분석이 지하수 중 질산성질소의 오염원을 조사하기 위해 이용되었다는 것이 알려져 있다(Choi, 1998; Yoo et al., 1999a; Yoo et al., 1999b).

초기 1950년대 이후 조사자들은 지표수와 지하수 중 질산성질소의 오염원들을 파악하기 위해 노력해왔다. 지하수 중 질산성질소의 자연 질소 동위원소 비를 연구하고 이것을 다른 토양 환경으로부터의 질산성질소의 질소 동위원소 비와 비교하여서 특정한 지하수의 질산성 질소가 단일 오염원이라는 것을 추적할 수 있다(Kreiter, 1975; Kreiter and Browning, 1983; Komor and Anderson, 1993, Wilson et al., 1994).

다섯 개의 질소동위원소(13N, 14N, 15N, 16N 과 17N) 중 세 개가 거의 불안정하며 13N, 16N 그리고 17N의 반감기는 각각 10분, 7초, 4초이다(Jansson, 1968). 안정 동위원소는 14N과 15N으로 대기 중 질소의 99.632±0.002%가 14N로 지배적이다(Junc and Sev, 1958). 다른 질소 화합물들에서 이런 비율은 동위원소 비율에 기인하여 약간 변한다. 자연계(Natural system)에서 질소는 유기 질소(amide, amine, 단백질 그리고 amino acids), 암모니아 (NH₄⁺), 암모늄 (NH₃), nitrite (NO₂⁻), nitrate (NO₃⁻) 그리고 질소 가스(N₂)로 나타난다. 이런 변화들은 일반적으로 일반적인 대기의 질소 가스(N₂)를 기준하여 이에 대한 편차로써 표현할 수 있다. 질소의 동위원소 비율(δ15N)은 다음의 수식으로 나타낼 수 있다(Rennie et al., 1976).

$$15N (\text{per mil } 15N \text{ excess}, \% 15N) = \frac{R_S - R_R}{R_R} \times 1000$$

여기서 R_S 는 시료에 대한 15N 동위원소 비($15N/(15N+14N)$)이고 R_R 는 기준인 대기 질소 가스(N_2 , 0.3663 % 15N)에 대한 15N 동위원소 비이다. $\delta^{15}N$ 의 양의 값은 기준보다 시료 중에 15N의 높은 비율을 나타낸다.

Nitrogen 15(^{15}N)의 자연 중 원자비는 대기중 N_2 (강주명, 1990)내에 일정하지만 이것은 물리적, 화학적 평형 그리고 화학적 운동 분류의 결과에 의한 질소의 다른 형태들에서 변화한다(河野 伊一郎, 1994).

세 개의 질소 동위원소 비($\delta^{15}N$) 범위가 질산성질소에 대한 다른 오염원을 규명하기 위해 이용되어져 왔다. Kreitler(1975)과 Kreitler and Jones(1975)는 비료를 살포하지 않은 경작지(작물 경작으로부터 토양내 유기질소 일부의 산화에 의한 질산성질소)로부터의 질산성질소의 동위원소비 범위가 +2~+8%, 축산폐수에 의한 경우 +10~+20%이다. 인공 비료에 의한 질산성질소의 동위원소 비는 -8~+6.2%이며 시료중 90%가 -3~+2%의 범위였다(Freyer and Aly, 1974; Kreitler, 1977; Mariotti and Letolle, 1977).

Kreitler et al.(1978) 지하수 시료가 지하수 중 질산성질소에 대한 인간의 분뇨의 기여도와 도시화의 정도에 상응하여 뉴욕 Long Island 내 동쪽에서 서쪽으로 $\delta^{15}N$ 이 증가한다는 것을 발견하였다. 가장 도시화된 환경의 시료들은 축산 분뇨에 의한 것을 대표하는 범위 내에 있는 +12.1%과 +21.3%의 $\delta^{15}N$ 의 값을 가진다.

Filpse와 Bonner(1985)에 따르면 비료에 기인한 질산성 질소의 동위원소 비율은 지하수 중 축산 분뇨에 의한 질산성질소와 이들을 구별하지 못하게 하는 범위로 바뀌지 않는다. 비료가 살포된 지역에서의 측정에 의하면 가장 높은 지하수 중 $\delta^{15}N$ 은 +6.5%이었다. Komor와 Anderson(1993)은 가축사육장에서 추정되는 $\delta^{15}N$ 값은 21.3%, 주거지역에서는 6.0%, 농경지에서는 3.4%으로 추정하였으며 일반적으로 다른 오염원들에 대해 지하수 중 $\delta^{15}N$ 는 화학 질소 비료에 대해 <+4%, 자연적인 토양 질소에 대해 +4~+9%이고 축산 분뇨와 생활하수에 대해 +10~+20%로 알려져 있다.

4. 질산성질소의 오염원별 기여율의 추정

유 등(1999)은 지하수에 대한 화학비료와 축산분뇨의 기여율을 두 개의 오염원을 나타내는 축 사이의 선형 내사법으로부터 계산하였다. 다음은 계산을 위해 사용된

수식이다.

$$NDFF(\%) = \frac{({}^{15}N_M - {}^{15}N_G)}{({}^{15}N_M - {}^{15}N_F)} \times 100$$

$$NDFM(\%) = 100 - NDFF(\%)$$

여기서 NDFF와 NDFM은 각각 화학비료와 가축 분뇨로부터의 질산성 질소이다. $\delta^{15}N_G$ 은 지하수내 질산성 질소의 $\delta^{15}N$ 의 값이고 $\delta^{15}N_F$ 와 $\delta^{15}N_M$ 은 각각 화학비료와 가축분뇨에 기인한 질산성 질소의 $\delta^{15}N$ 값이다.

여기서 W1의 $\delta^{15}N$ 값이 $\delta^{15}N_F(-1.48\%)$ 와 $\delta^{15}N_M(+20.80\%)$ 으로 사용되었다. 왜냐하면 이 값들이 연구 기간에 걸쳐서 가장 높은 값과 낮은 값이기 때문이다. 가축 사육장에서 거리가 멀수록 지하수 중의 질산성 질소에 대한 가축 분뇨의 기여율이 낮아지고 그 값은 각각 W2, W3 그리고 W4에 대해 79, 56과 44%였다고 보고하였다.

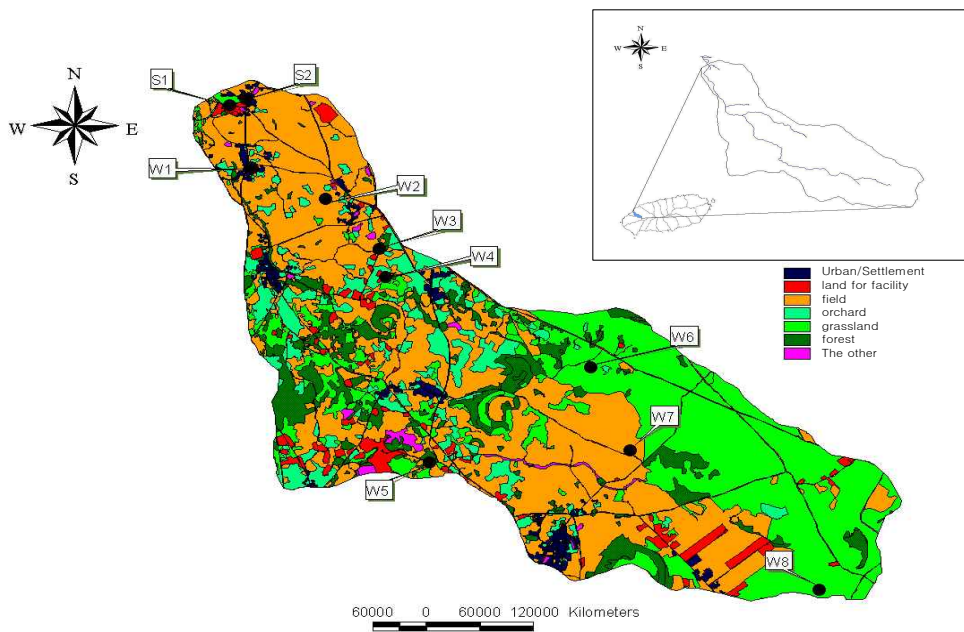
Ⅲ. 조사 및 분석 방법

1. 연구 지역

연구 지역은 옹포천 유역으로서 한림 수역에 위치한다. <그림 2>는 토지 이용현황과 시료 측정 위치들을 나타내었고, <표 1>은 토지 이용 특성을 나타내었다. 유역의 전체 면적은 17,761,129.7m²이며 전체 면적에 대해 밭, 초지 및 산림이 각각 42.1, 30.6% 그리고 10.3%로 전체의 80%이상을 차지하는 것을 볼 수 있다.

<그림 2>을 보면 각각의 시료 채취 위치들의 토지 이용 현황을 보여주고 있다. 유역의 하류 지역은 대부분이 밭 경작지가 주로 분포하고 관측점 S1의 주변은 주거지와 경작지가 주이고 S2는 주거지와 시설용지로 둘러싸여 있고 상위지역에는 경작지가 넓게 분포하고 있다. W1은 주거지역에 존재하며 주거지 주변은 경작지와 과수원이 존재하며 W2는 경작지에 위치하며, W3는 시설용지로 하우스 감귤 재배지에 존재하며 관측점 주위에선 과수원과 밭 그리고 초지와 산림이 복잡하게 분포하고 있

다. W4는 과수원 위치하며 주변에 소규모 축사가 있다. W5는 밭, 삼림 그리고 축사와 같은 시설용지 등이 같이 공존하며 W6 초지에 위치하며 주변은 경작지화 되고 있다. W7은 경작지에 위치하며, 상류에는 초지와 삼림이 분포하고 초지는 현재 경작지로 변하고 있는 경향이 있다. W8은 초지로 둘러싸여 있으며 유역 최상단에 존재한다.



<그림 2> 연구지역의 토지이용 분포도(W : 관정, S : 용출수)

<표 1> 연구지역의 토지이용 특성

Type of the land use	Area(m ²)	Rate of a land use(%)
Urban/settlement	426,664.7	2.4
Land for facility	933,291.2	5.2
Field	7,472,197.3	42.1
Orchard	1,507,702.6	8.5
Grassland	5,426,617.5	30.6
Forest	1,828,871.4	10.3
The others	165,767.0	0.9
Total	17,761,129.7	100

시료 채취 관정과 용천수의 특성은 다음 <표 2>에 나타내었다. S1과 S2는 고도 10m이하이며 W3의 경우 고도 310m에 심도 300m이다.

<표 2> 각각의 시료채취 지점의 특성

sampling sites	altitude	depth	Natural water level	Type of the Land use
s1	<10	0	0	Settlement/field
s2	<10	0	0	Settlement/field
w1	101.9	125	93	Settlement/field
w2	102.5	100	100	Field/settlement
w3	310	300	241	Field/orchard
w4	218	243	200	Field/orchard
w5	25.05	60	11.0	Field/facility
w6	75	100	71.0	grass
w7	180	220	169	Field/grass
w8	240	250	193	grass

2. 시료채취 및 분석

시료를 4월부터 10월 사이에 채수하여 운반 중의 수질 변화를 방지하기 위해 4℃ 이하 상태로 운반하여 pH, 전기 전도도(EC), 음이온(Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-), 양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) 그리고 중탄산염(HCO_3^-)에 대해 분석하였다.

시료는 standard method에 준하여 pH는 pH meter(Orion 290A)로 측정하고, EC는 EC detector를 이용하였으며, 음이온 성분(Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-)은 Ion Chromatography(DIONEX 500)을 이용하였고 HCO_3^- (APHA-AWWA-WPCF, 1992)은 지시약 bromocresol green을 사용하여 0.02N HCl로 적정하여 정량하였다. 양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+)에 대해서는 원자흡광광도계(Varian SpectrAA-800)를 이용하여 분석하였다.

질소안정동위원소비($\delta^{15}\text{N}$)는 정밀동위원소비 측정용 질량분석계(Finnigan Delta-plus)를 이용하여 다음과 같은 전처리 과정을 거친 다음에 분석하였다.

먼저 시료는 질산성질소의 양으로 약 1.5 mg이 되도록 1 ℓ 증류플라스크에 넣고 증류수로 약 600 ml가 되도록 조제한 다음, Kjeldahl법에 의하여 산화마그네슘(MgO) 약 3 g을 넣고 증류하여 암모니아성질소를 제거하고, 데발다합금분말 3 g을

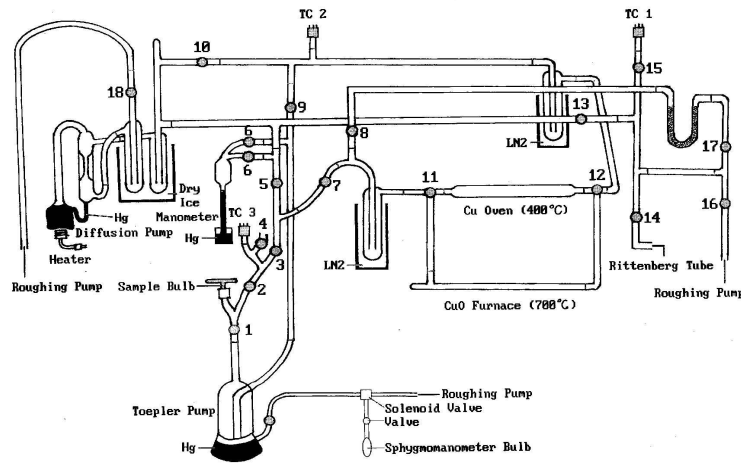
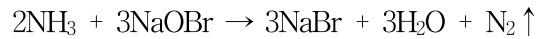
가하여 0.1N H₂SO₄ 10 ml를 넣은 300 ml 비이커를 수기로 사용하여 증류속도가 5 ~ 7 ml/min가 되도록 하여 약 300 ml가 될 때까지 증류하였다.

데발다합금에 의한 NO₃⁻로부터 NH₃로의 환원반응은 다음과 같다.



(NH₄)₂SO₄형태의 증류액은 80 °C이하의 Hot Plate상에서 공기와의 접촉을 피하게 하여 천천히 약 1 ml가 될 때까지 농축시켰다.

농축된 시료는 Rittenberg법에 의하여 NaOBr과 반응시켜 질소가스를 생성시켰으며, 그 반응식은 다음과 같다.



<그림 3> N₂ 전처리 장치

발생된 질소가스는 <그림 3>와 같은 고진공상태의 N₂ 전처리 장치에서 여러 trap 장치를 거치게 하여 정제조작을 거친 후 순수한 질소가스를 포집한 다음 Finnigan Delta-plus의 질량분석계를 이용하여 질소질량의 29와 28(N¹⁵N¹⁴/N¹⁴N¹⁴)을 비교하여 질소안정동위원소비를 측정하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 지하수 중 질산성질소 오염 현황

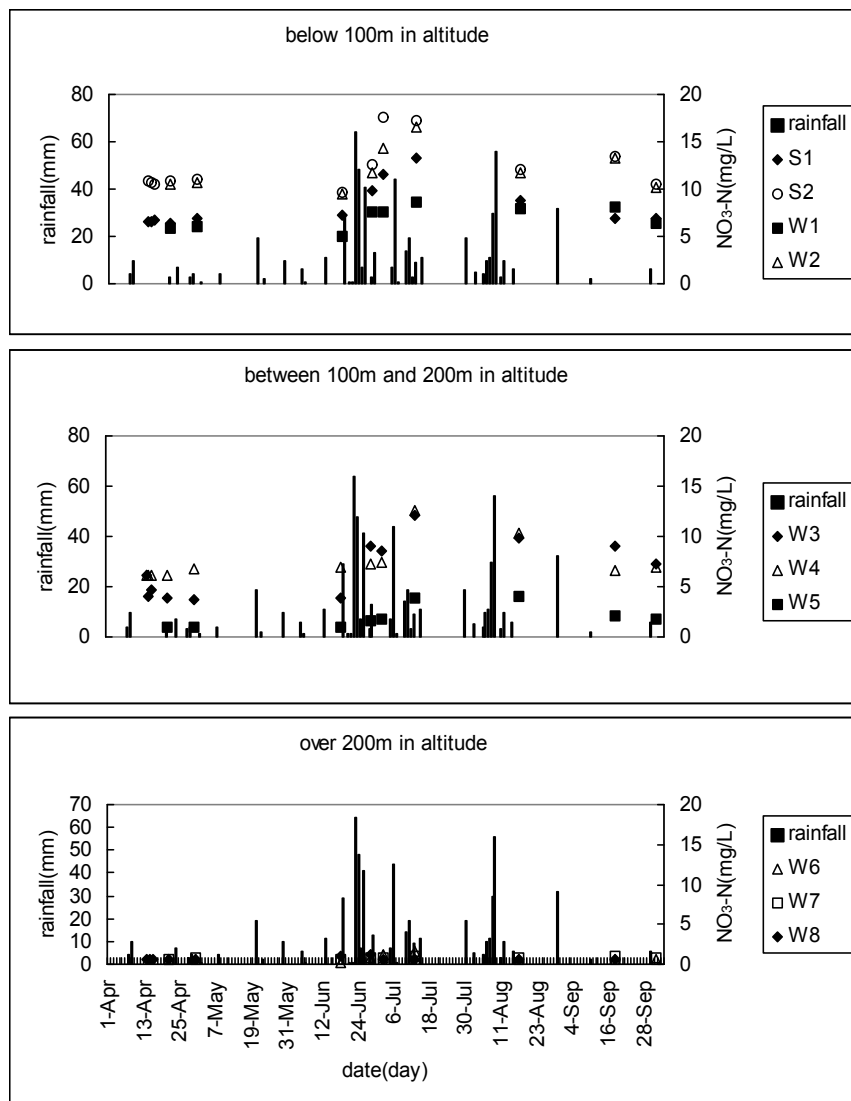
<표 3>은 관측점들의 수질 특성을 나타내고 있다. 고도 200 m 이상의 W6, W7 그리고 W8의 경우는 질산성질소 농도가 최대 2 mg/ℓ를 넘지 않고 있어 질산성질소에 의한 인위적인 오염이 발생하지 않았음을 고찰할 수 있다. W5의 경우 풍수기에 최대 4.0 mg/ℓ로 인위적 오염원에 의해 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. 용천수 S1과 S2는 고도 10 m이하로 질산성질소 농도의 범위가 각각 6.4 ~ 13.3과 9.7 ~ 17.6 mg/ℓ로 인위적인 오염이 나타나고 있음을 알 수 있다. W1, W2, W3 그리고 W4의 경우 각각 5.0 ~ 8.6, 9.4 ~ 16.5, 3.7 ~ 12.0 및 6.1 ~ 12.6 mg/ℓ의 농도 변화를 보이고 있어서 인위적인 오염원에 의해 영향을 받으며, S1, S2, W2, W3 및 W4는 계절적 영향에 의해 먹는샘물 기준치를 초과하고 있음을 알 수 있다.

<표 3> 각 조사 관정의 수질 특성(2001년 4월부터 2001년 10월)

Sampling site		pH	EC(μS/cm)	mg/L							
				NO ₃ -N	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺
S1	Ave.	7.6	214.5	8.1	16.7	7.0	52.4	8.5	3.6	13.1	6.6
	Max.	7.9	242.0	13.3	25.7	10.8	56.0	9.8	4.2	14.8	8.0
	Min.	7.4	200.0	6.4	11.6	5.3	48.5	4.8	1.8	7.4	3.9
S2	Ave.	7.4	271.3	12.3	22.5	9.6	54.4	12.9	4.4	16.1	9.3
	Max.	7.8	294.0	17.6	31.2	13.8	60.5	18.5	9.6	27.9	13.5
	Min.	7.1	251.0	9.7	17.5	7.2	50.8	7.0	1.6	7.7	5.4
W1	Ave.	7.7	197.0	7.0	17.1	7.0	52.8	7.6	3.4	12.6	5.4
	Max.	8.0	204.0	8.6	23.1	8.9	55.4	8.7	4.1	14.4	6.2
	Min.	7.6	190.0	5.0	13.5	5.2	50.8	4.4	1.7	7.1	3.2
W2	Ave.	7.6	260.3	12.3	21.3	8.9	52.7	11.6	3.5	13.0	7.0
	Max.	7.9	272.0	16.5	29.6	12.1	56.0	13.1	4.0	15.0	8.2
	Min.	7.4	252.0	9.4	16.2	6.3	48.5	6.6	1.6	7.2	4.0
W3	Ave.	7.6	185.7	6.8	16.2	5.9	45.1	7.9	2.9	11.4	5.4
	Max.	7.9	227.0	12.0	25.1	10.7	53.2	9.5	3.8	13.6	6.9
	Min.	7.4	152.0	3.7	11.9	3.4	34.6	5.2	1.4	6.7	3.6
W4	Ave.	7.8	199.7	7.4	17.1	6.7	46.3	8.1	3.0	11.7	5.8
	Max.	8.1	230.0	12.6	28.1	12.1	53.2	9.9	3.5	13.4	7.1
	Min.	7.6	191.0	6.1	14.0	5.0	40.3	5.2	1.3	6.6	3.6
W5	Ave.	8.4	126.4	2.0	9.9	3.1	49.9	4.9	3.5	9.5	5.0
	Max.	8.8	157.1	4.0	14.2	4.3	51.7	5.8	3.6	10.3	5.9
	Min.	8.2	91.7	1.0	5.8	2.0	47.0	4.0	3.3	9.1	4.3
W6	Ave.	7.9	110.4	0.8	6.7	2.5	47.8	4.7	3.0	8.6	3.8
	Max.	8.4	119.2	1.6	9.4	3.0	50.8	5.8	4.0	11.5	4.3
	Min.	7.4	105.0	0.4	4.8	1.9	43.8	4.2	2.7	7.6	3.4
W7	Ave.	8.0	93.7	0.8	6.2	2.3	37.9	3.9	2.0	6.1	3.2
	Max.	8.2	97.0	1.0	8.8	2.9	41.5	4.0	2.0	6.2	3.3
	Min.	7.9	91.0	0.7	3.3	1.7	34.6	3.8	1.9	6.1	3.1
W8	Ave.	8.0	83.3	0.6	5.0	2.3	34.2	3.9	2.6	7.3	3.3
	Max.	8.3	85.0	1.2	7.3	5.2	35.3	6.0	4.6	13.0	4.4
	Min.	7.8	82.0	0.5	2.2	1.6	32.3	3.3	1.9	5.8	2.8

2. 강우와 질산성질소와의 관계

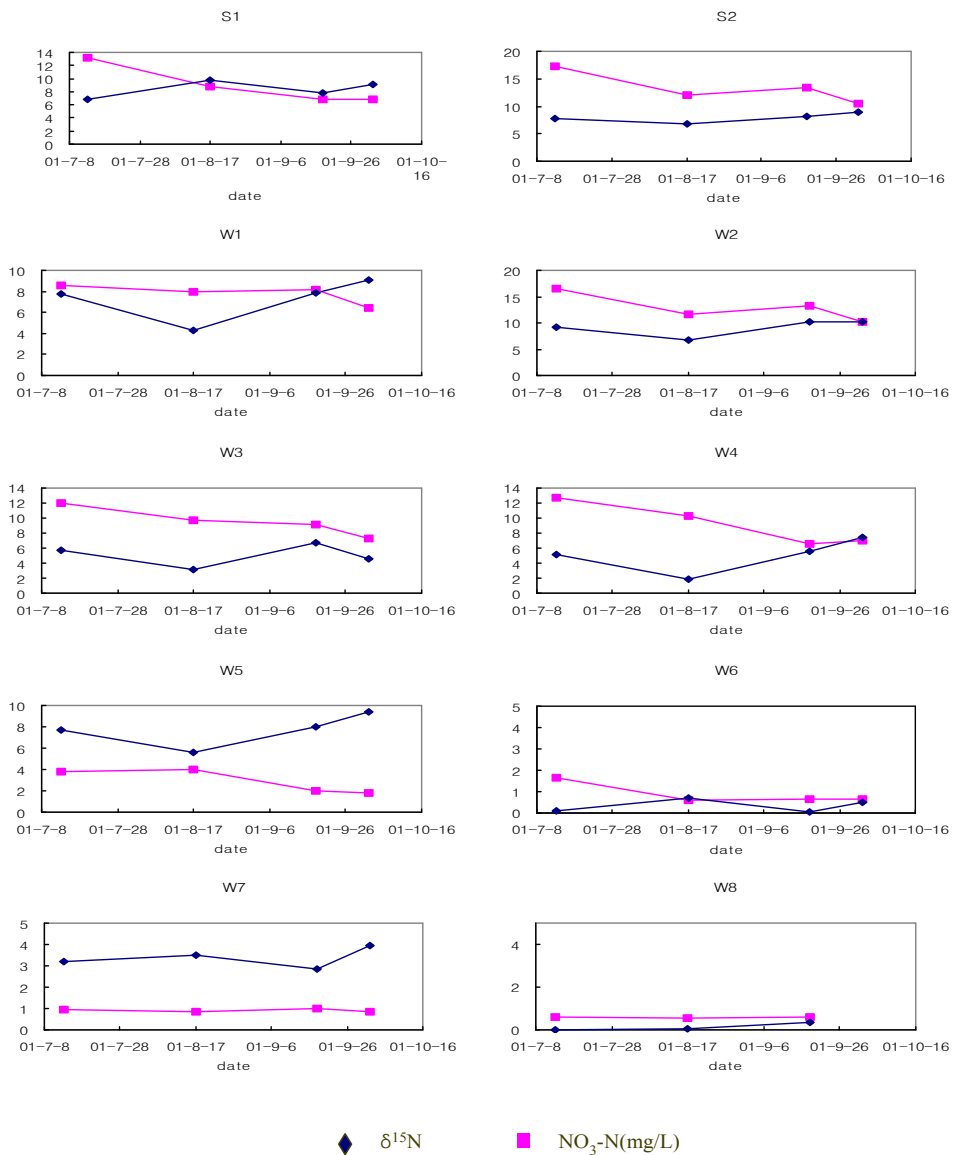
<그림 4>에서 나타난 것과 같이 고도 200 m이하의 지역에 위치한 지하수 관정과 용천수에서 질산성질소 농도가 크게 변화하며, 갈수기인 4월과 10월에는 유사한 농도 수치를 보이고, 풍수기인 6월에서 9월 사이에는 전반적으로 강우의 증가에 따라 200 m 이하 관측점에서 질산성질소 농도가 증가하며 최고값이 나타나고 있다.



<그림 4> 각각의 관측점에서의 강우에 따른 질산성질소 농도 변화

3. 질소동위원소를 이용한 질산성질소 오염원 추정

<그림 5>은 질산성질소의 변화와 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 변화를 나타내고 있다. 가축분뇨의 경우에 있어서 질산성질소 농도가 증가하면 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 증가하고 화학비료의 경우에는 질산성질소 농도가 증가하면 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 낮아지는 경향이 있다.



<그림 5> 각각의 관측점에서 질산성질소 농도와 질소동위원소($\delta^{15}\text{N}$)의 변화

S1과 S2는 각각 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 6.81 ~ 9.70‰과 6.73 ~ 8.85‰의 범위로 Komor and Anderson(1993)과 田瀬(1996)의 보고에 나타난 것과 유사하게 생활하수의 영향을 받아 질산성질소의 오염이 발생하였고, 강우의 영향에 의한 일시적 현상으로 주변 경작지에서 사용된 화학비료의 영향을 받는 것으로 사료된다.

W1과 W2의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 각각 7.75 ~ 9.08‰와 6.66 ~ 10.14‰의 범위로 W1은 주고 생활하수의 영향을 받으며, W2는 축산분뇨 또는 생활하수의 영향을 주로 받는 것으로 사료된다. W1의 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 4.26‰를 나타내는 것은 강우의 영향을 받아 주변 경작지에 사용된 화학비료의 영향이 나타난 것으로 추정된다.

W3와 W4는 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 각각 3.11 ~ 6.74‰와 1.81 ~ 5.54‰의 범위를 나타내어 주로 주변 경작지에 사용된 화학비료의 영향을 받는 것으로 추정된다. W4에서 강우시 일시적으로 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 7.45‰를 나타내고 있는 것은 주변의 축산시설의 영향을 받는다는 사실을 유출할 수 있다.

W5는 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 7.68 ~ 9.37‰로 주로 축산분뇨의 영향을 받으며, 강우에 의한 영향이 일시적으로 발생하여 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 5.59‰를 나타내고 있다.

W6, W7 및 W8의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 각각 0.03 ~ 0.69‰, 2.86 ~ 3.96‰ 그리고 0.02 ~ 0.35‰를 나타내지만 질산성질소 농도가 1.63 mg/l를 초과하지 않고 있어 인위적인 오염이 발생하지 않은 것으로 사료된다.

5. 질소동위원소를 이용한 질산성질소의 오염원별 기여율

유 등(1999)은 지하수에 대한 화학비료와 축산분뇨의 기여율을 두 개의 오염원(화학비료와 축산분뇨 또는 생활하수)을 나타내는 축 사이의 선형 내사법으로부터 계산하였다.

$$NDFF = \frac{(\delta^{15}\text{N}_{M \cdot S} - \delta^{15}\text{N}_G)}{(\delta^{15}\text{N}_{M \cdot S} - \delta^{15}\text{N}_F)} \times 100$$

$$NDFM \cdot S(\%) = 100 - NDFF(\%)$$

위의 우식에서 NDFF(Nitrate derived from Fertilizer)와 NDFM · S(Nitrate derived from livestock manure or sewage)는 각각 화학비료와 가축 분뇨 또는 생활하수로부터

의 질산성질소이다. $\delta^{15}\text{N}_G$ 은 지하수내 질산성질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 의 값이고 $\delta^{15}\text{N}_F$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{M\cdot S}$ 는 각각 화학비료와 가축분뇨 또는 생화하수에 기인한 질산성질소의 $\delta^{15}\text{N}$ 값이다.

W6, W7과 W8은 낮은 질산성질소 농도와 $\delta^{15}\text{N}$ 값으로 질산성질소에 대해 인위적인 오염이 일어나지 않았다고 사료되어 위 수식을 적용하지 않았다.

연구지역에서 $\delta^{15}\text{N}_F$ 은 W4에서 질산성질소 농도가 10.32 mg/ℓ 일 때 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 1.81‰을 나타내고 있음으로 이 값을 이용하였고, $\delta^{15}\text{N}_{M\cdot S}$ 는 W2에서 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 최대인 10.14‰을 이용하였다.

<표 4> 조사지점의 질산성질소 농도에 대한 화학비료와 축산·생활하수의 기여율

Sampling site	Date	NO ₃ -N(mg/ℓ)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	NDF	NDFM·S
S1	7-13	13.26	6.81	39.97	60.02
	8-17	8.77	9.70	5.28	94.72
	9-18	6.83	7.80	28.09	71.91
	10-22	6.89	9.19	11.40	88.60
S2	7-13	17.30	7.76	28.57	71.43
	8-17	12.02	6.73	40.94	59.06
	9-18	13.49	8.07	24.85	75.15
	10-22	10.46	8.85	15.49	84.51
W1	7-13	8.60	7.75	28.69	71.31
	8-17	7.99	4.26	70.59	29.41
	9-18	8.16	7.86	27.37	72.63
	10-22	6.44	9.08	12.73	87.27
W2	7-13	16.51	9.09	12.61	87.39
	8-17	11.64	6.66	41.78	58.22
	9-18	13.30	10.14	0	100
	10-22	10.24	10.13	0.12	99.88
W3	7-13	12.04	5.65	53.90	46.10
	8-17	9.78	3.11	84.39	15.61
	9-18	9.10	6.74	40.82	59.18
	10-22	7.28	4.59	66.63	33.37
W4	7-13	12.64	5.18	59.54	40.46
	8-17	10.32	1.81	100	0
	9-18	6.59	5.54	55.22	44.78
	10-22	6.94	7.45	32.29	67.71
W5	7-13	3.80	7.68	29.53	70.47
	8-17	4.00	5.59	54.62	45.38
	9-18	2.04	7.97	26.05	73.95
	10-22	1.79	9.37	9.24	90.76

<표 4>를 보면 S1은 축산분뇨 또는 생활하수의 영향을 60.02 ~ 94.72%로 강하게 받고 있는 것을 알 수 있고 부분적으로 화학비료의 영향을 보인다. 강우에 의해서 화학비료의 영향은 최대 40%를 보이고 있다. S2의 경우 생활하수의 영향을 59.06 ~ 84.51%로 강하게 받고 있으며 화학비료의 영향은 최대 40.94%를 나타낸다. W1은 생활하수의 영향을 71.31 ~ 87.27%의 범위에서 보이며 강우에 의해 일시적으로 생활하수의 기여율이 낮아지는 반면에 화학비료의 영향은 증가하여 70.59%를 보인다. W2는 58.22 ~ 100%까지의 범위에서 축산분뇨 또는 생활하수의 영향이 나타나며, 화학비료의 영향은 상위의 조사 지점과 유사하게 강우시에 나타나고 있다.

W3은 화학비료의 영향을 40.82 ~ 84.39%의 범위에서 나타내며 축산분뇨의 영향은 강우에 의해 최대 59.18%까지 나타내며 부분적인 영향이 나타나고 있다.

W4는 화학비료의 영향을 주로 받으며 그 범위는 55.22 ~ 100%에 이른다. 강우에 의한 축산분뇨 또는 생활하수의 영향은 40.86 ~ 67.71%로 화학비료와 축산분뇨 또는 생활하수에 대해 관리가 요구된다. W5는 45.38 ~ 90.76%의 범위에서 축산분뇨의 영향을 나타내며, 강우의 영향에 의해 화학비료의 영향이 최대일 경우 그 값은 54.26%를 보였다.

V. 향후 대책

본 연구에서 옹포천 유역의 지하수 중 질산성질소 오염 상태를 조사한 결과 10개의 조사 대상 중 8개의 조사지점의 지하수가 질산성질소에 의해 오염되었음을 알 수 있고 표고 200 m이하에서 그 현상이 주로 나타나고 있다.

본 조사 지역에 질산성질소 오염원을 파악하는 것은 상당히 어려운 것이 현실이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 다음과 같은 노력이 요구된다.

1. 오염원 확인을 위한 다양한 노력

본 연구 지역은 토지 이용의 형태가 주거지, 경작지 그리고 축산시설 집중지로 단순하게 구분할 수 있는 지역이 아니다. 그러므로 각각의 영향이 동시에 나타나고 있

는 것이 현실이다.

축산분뇨와 생활하수의 질소동위원소 비는 유사한 범위에 위치하여 토지이용이 명확하지 않은 경우 해석이 어려운 실정이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 노력의 방안에서 일본 환경청(1999)에서 제시한 방법을 고려하면, 지하수 중의 대장균군 또는 대변성대장균 등의 미생물학적인 특성과 생활하수의 경우 계면활성제에 대한 분석을 통해서 오염원을 명확하게 해석할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 오염원 관리 노력

① 화학비료 및 퇴비의 사용주의: 농작물은 일정한량의 영양분을 요구한다. 영양분을 공급하기 위한 노력으로 과거에는 축산분뇨를 이용한 퇴비를 많이 사용하였으나 과학의 발전에 의해 화학비료의 사용이 증가하고 있는 것이 현실이다. 이러한 비료의 사용은 제주도(1996)의 보고에서 보는 바와 같이 과다 시비되어지는 경향이 있다.

이러한 경작활동은 지하수의 오염을 가중시키는 원인이기도 하다. 농민에 대해 적절한 시비에 대해 교육 홍보를 통해 지하수 오염에 대한 인식을 변화시키는 노력이 이루어져야 할 것이다.

농업기술원과 연계하여 제주도 토양 특성을 고려한 각각의 작물에 실제 필요한 영양분의 소요량을 과학적으로 확인하여 보다 현실적이고 적절한 시비량을 산정하는 노력도 경주되어야 하겠다.

② 생활하수의 관리: 본 연구 기간 동안 하수가 하천으로 직접 유입되는 것이 관찰되었다. 하천으로 유입된 생활하수는 하상 정비 과정에서 발생한 파쇄 구간에서 그 흐름이 단절되는 것이 관찰되었다.

시설미비에 의한 정화조 유출은 정화조 주변의 토양을 오염시키고 최종적으로 지하로 유입되어 지하수를 오염시킬 수 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 정화조의 개량 및 설치가 요구되고 하수관거의 설치를 확대하여 완전 밀폐된 상태로 하수종말처리장을 통해 안정적으로 처리한 후 배출하여 오수의 토양으로의 유입을 억제하는 노력이 경주되어야 한다.

③ 축산분뇨의 관리: 옹포천 유역의 중류와 상류 고도 200 m이상의 지역에도 축산시설과 방목장이 많이 분포하고 있다. 이와 같은 축산시설에서 발생하는 축산분뇨

는 적절한 방법으로 처리되지 않고 토양으로 직접 배출될 경우 지하수를 오염시킬 수 있는 오염원 중의 하나이다.

축산시설에 의한 오염을 방지하기 위해 축산시설에서 발생하는 축산분뇨를 폐쇄된 통로를 통하여 일정 저장 시설에 수집한 축산분뇨처리 시설에 수집하여 적절한 처리를 통한 후 배출하여야 한다.

④ 적절한 토지이용 관리: 옹포천 유역은 복잡한 토지 이용에 의해서 오염원을 해석하는 것이 어려운 것이 현실이다.

계획적이지 못한 토지 이용은 지하수를 보전하는 측면에서는 상당히 어려운 상황을 야기한다. 즉 각각의 오염원에 대해 복합적인 관리 방법을 적용해야 하기 때문이다.

지하수 재충전의 핵심지역인 중산간에서 축산시설의 신축과 초지를 경작지로 개간하여 대단위로 조성된 감자밭에서의 화학비료 사용은 지하수의 오염을 가중시키는 활동이 된다.

이런 행위를 제한하기 위해서 현재 구축되어진 GIS 자료의 활용을 통해서 중산간 지역의 난개발을 막고 지하수를 보전하는 노력이 이루어져야 할 것이다.

3. 지하수 오염에 대한 지속적인 관심

지하수는 제주도민에게 있어서 생명수라는 사실을 다시 한번 강조하는 것은 지나친 것이 아니다. 지하수를 보전하고 관리하기 위해서 초기 교육과정에서부터 환경의 중요성과 함께 지하수에 대한 정확한 교육이 선행되어야 할 필요가 있다.

지하수를 보전하고 관리하기 위해서 지질, 토양 그리고 환경 등의 기초 자료조사 및 연구가 지속되어야 하겠다.

지하수를 보전하려는 지속적인 관심이 있으면 제주도의 지하수는 후세에게 안전하게 물려 줄 수 있는 귀중한 제주도의 자산이 될 것이다.

참고 문헌

농어촌진흥공사, 1973, “제주도와 OAHU도의 지하수”, pp. 43 ~ 162.

- 오상실, 1994, “제주도 지하수의 수질특성에 관한 연구”
- 일본 환경청, 1993, “窒酸性質素及び亞窒酸性質素に係る地下水汚染調査マニュアル”
- 제주도, 1999, “제주도 환경백서(새천년을 맞는 제주의 환경)”, pp. 126 ~ 310.
- 제주도, 2000, “제주도 지하수 보전·관리계획 보고서”, p. 225.
- 田瀬 則雄, 1996, “地下水中の窒酸性質素濃度と窒素安定同位體存在比-汚染源の同定は可能か-”, 水, 38(8). pp. 70-78.
- 현승규, 2002, “제주도 옹포천 유역 지하수의 질산성질소 오염원 규명“, 제주대학교 석사학위 논문. p. 56.
- 현승규, 이용두, 김길성, 2001, “질소동위원소를 이용한 옹포천 유역의 질산성질소 오염원 추정”, 한국환경과학회(가을 학술발표회지) 10(2). pp. 71 ~ 73.
- 현익현, 1996, “질산성질소로 오염된 지하수의 오염원에 관한 연구”, 제주대학교 석사학위논문
- Arthur W. Hounslow, 1995, “Water Quality Data - Analysis and Interpretation-”, Lewis Publisher
- Komor S. C. and H. W. Anderson Jr., 1993, “Nitrogen Isotope as Indicators of Nitrate, Long Island, New York”, GROUND WATER, 18(6). pp. 404 ~ 409.
- Yun, Sun-Gang and Sun-Ho, Yoo, 1993, “Behavior of NO₃-N in soil and groundwater quality”, Korean J. Environ. Agric., 12(3). pp. 282 ~ 283.