

동위원소를 이용한 제주도 서부지역 지하수의 질산성질소 오염원 연구

강봉래 · 박윤석 · 고기원 · 허 목*

제주도광역수자원관리본부,

*제주대학교 환경공학과

1. 서 론

일반적으로 투수성이 높은 지질과 토양으로 이루어진 지역의 경우 육상의 인위적인 오염원에 의한 지하수의 오염우려가 높다고 할 수 있다. 제주도의 경우, 다공질 화산암류와 화산회토로 이루어져 있어 물 빠짐이 매우 양호할 뿐만 아니라, “숨골”이나 “곶자왈”과 같은 투수성 지질구조도 도처에 발달하고 있어 지하수의 오염취약성은 높은 편이다. 또한 1모작 위주의 육지부와는 달리 2~3모작의 작부체계와 척박한 화산회토로 인하여 단위면적당 비료 사용량이 내륙지방보다 훨씬 많은 편이며, 규모가 작은 양돈 및 축산시설들이 곳곳에 흩어져 분포하고 있어 화학비료와 축산시설로 인한 질산성질소 오염으로부터 안전하다고는 할 수 없다. 아울러 중산간지역 취락에서 발생하는 생활하수도 제대로 처리되지 않고 있어 지하수 오염을 가중시키는 요인이 되고 있다. 따라서 제주도에서는 토지이용 형태가 타 지역에 비해 다양할 뿐만 아니라, 질산성질소가 비교적 높게 검출되고 있어 지하수 중의 질산성질소 오염원을 추적하는데 적합한 여건을 지니고 있는 제주도 서부의 대정지역을 대상으로 질산성질소 오염원조사를 2000 ~ 2001년까지 2개년 계획으로 추진하여 조사지역의 전반적인 지하수 수질상태와 질산성질소 검출특성을 파악함과 아울러 환경동위원소에 의한 질산성질소 오염원 해석 등에 중점을 두고 연구를 수행 하였다.

본 연구에는 제주도보건환경연구원 김길성 연구사, 제주발전연구원 박원배 박사, 한국기초과학지원연구원 이광식 박사, 연세대학교 지구시스템과학과 우남칠 교수 등이 함께 참여 하였다.

2. 연구방법 및 지역현황

2-1. 연구방법

음·양이온 및 $\delta^{15}\text{N}$ 분석을 위한 시료채취는 제주도광역수자원관리본부와 제주발전연구원 공동으로 2000년 2월부터 2002년 11월까지 월1회씩 이루어졌으며, 채취된 시료는 제주도 보건환경연구원에서 분석하였다. 그리고 2001년 6월과 9월에는 조사대상 관정 중 구역별로 질산성질소 검출농도가 비교적 높은 관정 10개소의 지하수 시료를 채취하여, 캐나다 워터루 대학 환경동위원소 분석실(EIL; Environmental Isotope Laboratory University of Waterloo) 과 대전에 있는 한국기초과학지원연구원(KBSI; Korea Basic Science Institute)에 의뢰하였는데, 워터루대학에서는 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3$ 와 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3$ 동시 분석을 수행하였고, 한국기초과학지원연구원에서는 $\delta^{18}\text{O}$ 과 $\delta^2\text{H}$ 에 대해 분석을 수행 하였다.

2-2. 지역현황

조사 대상지역은 한라산을 중심으로 제주도 서남측에 해당되며 해안을 따라 완만한 경사를 갖는 저지대가 형성되어 있는데 가시악, 모슬봉, 단산을 제외하고는 거의 평탄한 지형으로 이루어져 있다. 행정구역상으로는 남제주군 대정읍 지역이며 수역구분으로는 대정수역에 속한다. 강우량은 연간 최대가 1,592mm, 최소 1,008mm를 보이고 있으며, 강우량을 월별로 보면 6, 7, 8월에는 150mm이상의 많은 강우가 내리나 10월~3월에는 100mm이하의 적은 강우가 내려 계절변화가 뚜렷하며, 조사기간인 2000년 및 2001년도 상반기는 서부지역 평균 강우량보다 적었으나 2001년 6, 7, 8월에는 평균 강우량보다 훨씬 많은 강우가 있었다. 대정수역의 지하수 함양량은 195천m³/일로 이 양은 제주도 전역 지하수 함양량의 13%정도에 해당한다.

지질구조상 이 지역은 투수성이 양호한 곳자왈 지대이며, 곳자왈을 피복하고 있는 토양통은 중문통, 하원통, 오라통이 분포하고 있는 지역으로 이들 토양통은 자갈함량이 높은 미사질 양토로 토양의 공극율이 최소 50%에서 70%로 크고 투수속도가 빨라서 축산폐수가 배출될 경우 지하로 유입되기 쉬운 곳이라 할 수 있다. 조사 대상지역인 대정읍 관내 지하수 개발현황을 보면 전체 지하수 관정 695공 중 농업용이 626공으로 90%를 차지하고 있다. 이 같은 비율은 도 전체 농업용 지하수 관정 비율이 64.6%임을 감안 할 때 대정지역의 농업용 관정 비율이 매우 높다.

3. 연구결과

3-1. 오염 기여율 추정에 의한 방법

Nakanishi(1995)는 질산염 및 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 이용하여 질산성 질소 오염원을 추적하기 위해 다음과 같은 계산식을 제안하였다. 즉, 질산성질소의 오염원별 구성비를 추정하는 기법에 의해 질산성질소 오염원을 해석하는 방법이다.

$$W = X + Y + Z$$
$$aW = bX + cY + dZ$$

여기서,

W : 지하수 중의 질산염 농도(mg/l)

X : 화학비료로부터 유래된 질산염 농도(mg/l)

Y : 동물성 유기물질로부터 유래된 질산염 농도(mg/l)

Z : 자연 토양으로부터 유래된 질산염 농도(mg/l)

a, b, c, d : 분석시료 각각의 $\delta^{15}\text{N}$ 값

Nakanishi가 제시한 오염원 해석방법에 의해 조사대상 관정별로 화학비료·생활하수·토양 유기물의 오염 기여율을 보면, 구역리 지역은 화학비료·생활하수(축산폐수)보다는 토양 유기물의 기여율이 높게 나타나고 있다. 한군데의 지하수관정에 화학비료 기여율이 높게 나타나고 있지만 이 관정의 토양유기물 비율도 높게 나타나고 있어 복합적인 영향을 받는 것으로 사료된다. 인성리 및 안성리 지역은 화학비료와 토양유기물 오염 기여율이 비슷한 값으로 나타나고 있다. 그러나 화학비료 오염 기여율이 상류지역인 구역리 보다는 높고, 하류 지역보다는 적게 나타나고 있어 이 지역부터 서서히 인위적인 오염의 영향을 받기 시작하는

것으로 사료된다. 상모리 산이수동 지역은 화학비료 오염기여율이 최대 77.6%로 타 구역보다 훨씬 높게 나타나고 있으며 모든 관정의 화학비료 오염기여율이 59% 이상을 나타내고 있어 이 지역은 확실히 화학비료에 의한 질산성질소 오염이 나타나는 지역이라 할 수 있다. 대정읍 시가지은 안성리 및 인성리와 비슷한 형태를 보여주고 있다. 일과리 및 영락 지역과 동일리 천미동 지역은 화학비료와, 토양유기물, 동물성유기물 등이 오염 기여율이 비슷하게 나타나고 있다. 이것은 이지역이 축산단지가 밀집되어 있는 농경지이기 때문에 대부분의 지하수 관정에서 동물성 유기물 기여율이 타 구역보다 높은 30% 이상으로 나타나고 있는 것으로 사료된다.

3-2. NO_3^- -N과 $\delta^{15}\text{N}$ 상관관계에 의한 오염원 해석

질소동위원소 및 질산성질소 분석결과와 토지이용과의 연관성을 고려하여 지하수의 질산성질소 오염원 해석을 사용하였다. 분석결과 상모리 산이수동 지역은 질산성질소의 검출 농도가 6 ~ 25mg/l로 그 변화폭이 크게 나타나고 있으며, $\delta^{15}\text{N}$ 값이 일정한 2 ~ 4‰ 범위 내의 값을 보이고 있고, 질산성질소 농도가 증가함에 따라 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 낮아지는 경향을 보이는데 이러한 형태는 질산성질소가 화학비료에 의해 유래된 것으로 추정할 수 있는데, 이 지역 대부분이 밭 경작지로서 마늘 등 다비성 작물을 많이 재배하는 지역이므로 비료 사용량이 많아 이러한 결과가 나타나고 있다고 사료된다. 구역리 지역에 위치한 관정들의 경우는 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 변화폭이 2 ~ 6‰ 정도로 거의 비슷한 범위의 값을 보이고 있으며, 질산성질소의 농도가 1.5 ~ 5mg/l로 낮은 값을 나타내고 있는데 이것은 구역리 지역이 과수원이 많기 때문에 화학비료의 사용량이 밭작물 재배지역보다 적고, 유기질비료를 많이 사용하고 있기 때문에 자연토양과 같은 경향을 보이는 것으로 사료된다. 일과리 및 천미동 축산시설 밀집지와 그 하류 지역은 질산성 질소 농도가 증가함에 따라 $\delta^{15}\text{N}$ 의 값이 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이러한 경향은 가축배설물의 경향과 잘 일치하고 있다. 그러나 일반적으로 알려져 있는 축산분뇨의 $\delta^{15}\text{N}$ 동위원소 값이 8 ~ 10‰ 이상이고, 이 지역의 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 화학비료로부터 유래되는 최대값인 6 ~ 8‰ 범위 내에 포함되기 때문에 축산폐수와 화학비료의 영향을 복합적으로 받고 있는 것으로 사료된다. 대정읍 시가지에 위치한 관정과 안성리, 인성리 지역의 관정들은 분포가 분산되어 있어 특별한 경향을 보이지 않고 있는데, 이것은 지역적으로 상, 하류 중간에 위치하고 있어 복합적으로 영향을 받고 있기 때문이라 사료된다.

3-3. $\delta^{15}\text{N}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$ 의 상관관계에 의한 오염원 해석

최근에 들어와서는 질산염의 근원은 질소와 산소동위원소 조성에서 구별이 된다는 점을 고려하여 질산성질소 오염원을 추적을 위해 질소동위원소($\delta^{15}\text{N}$ - NO_3^-)-산소동위원소($\delta^{18}\text{O}$ - NO_3^-) 상관관계를 사용한 해석방법을 이용하고 있다.

그림 4-1을 보면 2가지 그룹으로 나타나고 있는데, 첫 번째 그룹은 $\delta^{15}\text{N}$ 이 4.5 ~ 7‰이고 $\delta^{18}\text{O}$ 가 3 ~ 6‰을 나타내는 I그룹이며, 두 번째 그룹은 $\delta^{15}\text{N}$ 이 7 ~ 9‰이고 $\delta^{18}\text{O}$ 가 3 ~ 6‰을 나타내는 II그룹으로 여기에 속하는 지하수 관정은 영락리에 있는 Y199540215 관정과, 일과리 중앙부에 위치한 Y199540232관정으로 축산시설이 밀집된 동일리, 일과리 하류지역에 위치하고 있는 관정으로 축산폐수에 의한 영향받고 있다고 사료된다.

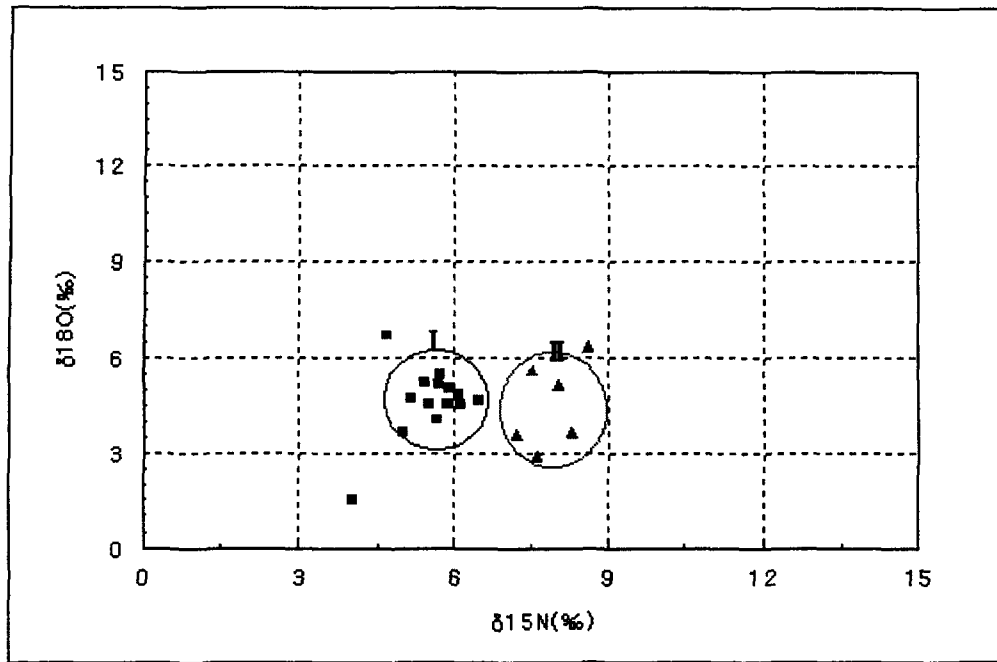


그림 4-1. 조사 대상지역 지하수 관정의 $\delta^{15}\text{N}$ 와 $\delta^{18}\text{O}$ 의 상관관계

4. 참고문헌

- 1) 윤순강, 유순호,, 요소를 사용한 초지의 토양단면에서 무기태질소 함량의 계절적 변화, 한국토양비료학회지, 24(3), 1991, pp. 171~176
- 2) 윤순강, 요소와 가축분에서 유래한 $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 동반 양이온의 토양 중 행동, 1994, 서울대학교 박사학위 논문
- 3) 오운근, 현익현, $\delta^{15}\text{N}$ 을 이용한 제주도 지하수중의 질산성질소 오염원 추정에 관한 연구, 대한지하수환경학회지, 1997, Vol 4, No. 1, pp. 1~4
- 4) 송영철, 고용구, 유장걸, $\delta^{15}\text{N}$ 을 이용한 제주도 지하수중의 질산염 오염원조사, 대한지하수환경학회지, 1999, Vol 6, No. 3, pp. 107~110
- 5) 고기원, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 이학박사 학위논문, 1997, pp. 72~73, pp. 145~160
- 6) 최순학, 김영기, 제주도 지하수의 수질특성, 지질학회지, 1989, Vol. 25, No. 3, pp. 230~238
- 7) C. Kendall and J. J. McDonnell (Eds.), Isotope Tracers in Catchment Hydrology, Elsevier Science B.V., Amsterdam, 1998, pp. 519-576.
- 8) Charles W. Kreitler, David C. Jones, Natural Soil Nitrate : The Case of the Nitrate Contamination of Ground Water in Runnels County, Texas, GROUND WATER, Vol. 13, No. 1, 1975, pp.53~61
- 9) 日本 環境廳, 窒酸性窒素及び亞窒酸性窒素に係る地下水汚染調査マニュアル, 1999, pp. 12~18
- 10) 中西康博, 山本洋司, 朴光來, 加藤茂, 熊鐸喜久雉, $\delta^{15}\text{N}$ 値移用による地下水硝酸基源推定法の考案と検証, 日本土壤肥料學會雜誌, 1995, 第66卷 第5号, pp. 544 ~ 551.
- 11) 山本洋司, 朴光來, 中西康博, 加藤茂, 熊鐸喜久雉, 宮古島 の地下水中 の硝酸態窒素濃度と $\delta^{15}\text{N}$ 値, 日本土壤肥料學會雜誌, 1995, 第66卷 第1号, pp. 18 ~ 26.