

안정동위원소를 이용한 제주 한림 지역 지하수 환경 및 오염 특성

정성욱, 한원식*, 우남철, 이광식**

연세대학교 지구시스템과학과, *New Mexico Tech, **한국기초과학지원연구원

(e-mail : cbronte@hanmail.net)

<요약문>

이 연구는 안정동위원소를 이용하여 제주도 한림 지역의 지하수 환경 및 오염 특성을 규명하고자 시행되었다. 이를 위해 2002년 8월, 11월과 2003년 4월, 8월 네 차례에 걸쳐 39개 지점에서 지하수 및 용천수 시료를 채취하였다. 연구지역은 농촌지역의 대표적 오염특성인 질산성 질소의 오염이 심각하게 나타났으며, 고도 100m 내외에서 급증하는 특성을 보인다. 특히, 집중 강수가 있었던 8월에는 이러한 현상이 심화되었다. 질소 동위원소를 이용한 오염원 추정 결과, 대부분 화학비료의 영향으로 나타났으며, 이는 토지 이용 특성과 일치한다. 강수의 산소·수소 동위원소 조성은 “우량효과”를 반영하였으며, 지하수 시료들의 경우 함양에서 배출까지 순환이 매우 빠른 지하수 환경을 나타낸다.

주요어 : 안정동위원소, 제주도 한림, 질산성 질소, 지하수 환경

1. 서론

제주도는 화산활동에 의해 형성된 섬으로 지표에 지표수계의 발달이 미약하고 투수성이 큰 현무암류로 구성되어 있어 필요한 수자원의 대부분을 지하수에 의존하고 있다. 따라서, 예전부터 도 차원에서 지하수에 대한 많은 연구와 조사가 이루어져 왔다. 하지만, 대부분의 연구가 제주도의 광역적인 차원에서 이루어졌고 국지적인 지역에 그대로 적용하기에는 다소 무리가 있다. 따라서, 이 연구는 북제주군 한림읍 일대를 중심으로 지하수 환경 및 오염의 시간적·공간적 변화와 특성을 규명하고자 하였다.

2. 연구지역

제주도의 서북부에 위치하는 북제주군 한림읍 일대로 지형은 저지대인 해안에서부터 한라산과 연결되는 남동쪽으로 갈수록 완만한 경사를 이루며, 저지대와 고지대의 고도 차이는 약 300m에 달한다¹⁾. 토지 이용은 저지대에서 중산간 지역에 이르기까지 광범위하게 밭작물 재배 지역이 분포하고 있으며, 해발 약 100m를 중심으로 과수원이 발달하여 있다. 가축 방목장 및 축사는 해발 약 100~300m에 걸쳐 산재하여 있으며, 주거 지역은 해안선을 따라 대규모로 존재하고 농업 활동이 이루어지는 곳을 중심으로

로 소규모의 마을이 형성되어 있다.

3. 연구방법

2002년 8월 및 11월과 2003년 4월 및 8월 네 차례에 걸쳐 지하수 39개 지점, 용천수 5개 지점에서 시료를 채취하였다 (Fig. 1). 강수 시료는 조사 시점에서 강수 이벤트가 있었던 2003년 4월과 8월에 채취하였다. 질산성 질소 분석을 위한 시료들은 4°C 이하로 냉장 보관되었으며, IC(DX-80)를 이용하여 분석되었다. 산소·수소 동위원소($\delta^{18}\text{O}$ · $\delta^2\text{H}$)분석을 위한 시료들은 밀폐 보관되었으며, 한국기초과학 지원연구원 대전 분소에 분석을 의뢰하였다. 분석 정 밀도는 $\delta^{18}\text{O}$ 가 $\pm 0.1\%$, 그리고 $\delta^2\text{H}$ 가 $\pm 1\%$ 이다. 2003년 4월에 시행된 질소 동위원소($\delta^{15}\text{N}$) 분석을 위한 시료들은 적정량의 0.001M 염화수은을 이용하여 미생물의 활동을 억제시켰으며, 서울대학교 농업 과학공동기기센터에 분석을 의뢰하였다.

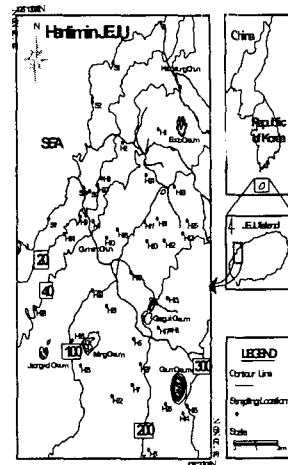


Fig. 1. Topography and sampling locations of study area: H and S denote ground- and spring-water, respectively.

4. 결과 및 토의

4.1. 질산성 질소 오염 특성

공간적 분석을 위해 채취한 시료들을 고도별로 분류하여 질산성 질소의 평균 농도를 강수량과 함께 비교하였다(Fig. 2). 고도가 감소함에 따라 질산성 질소의 농도가 증가하였고, 고도 약 100m를 중심으로 급격한 농도 증가를 나타냈다. 이러한 현상은 우기인 8월에 더욱 심화되었는데, 한림 자동기상관측장비(AWS)에 따르면 시료 채취 시점인 2002년 8월은 한림읍에 약 400mm 이상의 집중 강수가 있었다. 우기인 8월에 농도가 급증하는 현상은 저지대에서 중산간 지역에 이르기까지 다양한 질산성 질소 오염원이 분포하여 여름철 집중 강수로 인한 생활 하수, 축산 폐수 등이 유입되어 나타날 수 있으며, 비료 시비 등으로 인해 토양이나 비포화대에 농축된 질산염이 강수에 의해 특징적으로 유입되어 급격히 증가할 수 있다. 특히, 고도 41~100m에서 가장 심각한 오염양상을 나타냈는데, 이 지역은 발작물 재배 지역과 과수원이 주된 토지 이용 형태로 나타나 이들이 점오염원으로 작용할 수 있음을 지시한다.

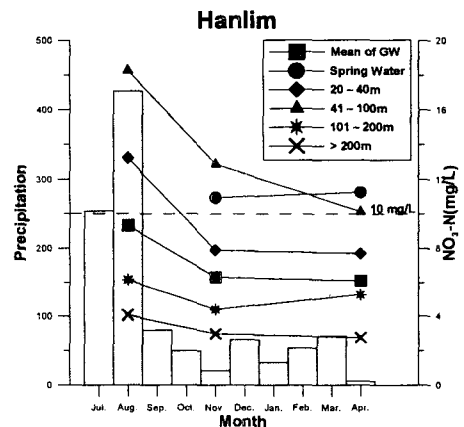


Fig. 2. Relationship between precipitation and average $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations of each altitude range.

4.2. 질소 동위원소를 이용한 오염원 추정

질소 동위원소 비를 이용하는 방법은 지하수에서 질산성 질소 오염원을 추정하는 데 있어 가장 효과적인 방법으로서, 많은 연구자들에 의해 선행되어 왔다. 이에 따른 일반적인 질산성 질소 오염원을 분류하여 보면, 화학비료 기원은 $-4\sim+4\%$, 토양 내 유기질소 기원은 $+3\sim+8\%$, 생활 하수 유래는 $+6\sim+10\%$ 그리고 동물이나 인간의 분뇨 기원은 $+10\sim+20\%$ 이라고 알려져 있다. 2003년 4월 조사의 질산성 질소 농도와 질소 동위원소 비를 도시한 결과, 질산성 질소의 농도가 5 mg/L를 초과하여 오염이

이미 진행 중이라고 판단되는 15개 지하수 시료들은 모두 -2.8~+3.4‰에 분포하였다(Fig. 3).

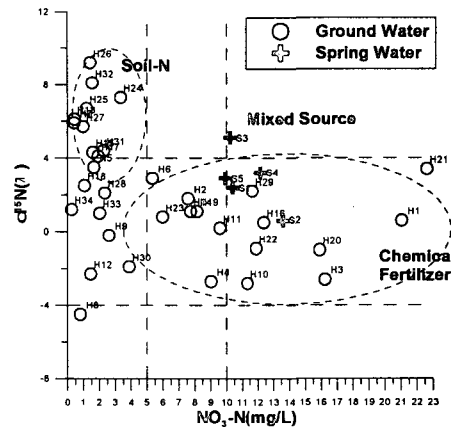


Fig. 3. Relationship between $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations of ground- and spring-water samples. It shows the origin of nitrate.

이는 기존 연구의 화학 비료 기원의 동위원소 비 영역에 도시되며, 이들 시료 채취 지점들이 대체로 밭작물 재배 지역에 위치하고 있어 이 지역의 토지 이용 형태와 부합되었다. 또한, 제주도는 2~3모작의 작부 체계가 일반적이고, 화산회의 영향을 받아 형성된 척박한 토양으로 인해 밭 지역 및 과수원 등지에서는 비료 시비 추천량보다 관행적으로 시비되는 비료량이 약 2~3배까지 초과하는 것으로 보고되어 있다3). 비교적 질산성 질소의 농도가 낮은 시료들에서는 -4.5~+9.2‰로 다양하게 나타났으며, 일부 시료들은 자연적으로 발생 가능한 토양의 유기질소 기원을 보였다. 질산성 질소의 농도가 대부분 10 mg/L를 초과하는 용천수 시료들은 +0.6~+3.2‰의 값을 나타냈다. 이 역시 화학 비료 기원과 잘 일치하였으며, +5.1‰의 값을 보인 S3 시료의 경우 주변에 주거 지역이 밀집하는 등 주변 환경을 고려할 때 생활 하수 등의 복합적인 기원을 가지고 있는 것으로 사료된다.

4.3. 산소·수소 동위원소를 이용한 수문 순환 특성

이 연구에서 우기인 8월에 채취된 강수의 평균 산소·수소 동위원소 조성비는 -9.2‰, -59‰로 건기인 4월에 채취된 강수의 동위원소 조성비인 -3.3‰, -16‰에 비해 가벼워지는 경향을 나타냈다. 이와 같이, 강수량이 집중되는 8월 강수의 동위원소 조성이 더욱 가벼워지는 현상을 '우량효과(amount effect)'라 하며, 제주도를 포함한 우리나라에서는 잘 관찰되는 현상이다. 일반적으로 대부분의 지하수는 강수가 함양되어 형성되며, 제주도의 경우 특정 계절에 편중되어 지하수가 함양되는 것이 아닌, 연중 내내 내리는 강수가 함양에 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다4). 지하수 시료들의 산소·수소 동위원소 분석 자료는 각각 11월 -7.5~-7.0‰, -51~-43‰, 4월 -7.5~-6.9‰, -48~-45‰, 8월 -7.5~-6.7‰, -51~-45‰로 비슷한 범위에 분포하였다. 이는 지하수계로 침투한 강수가 대수층 내에서 기존의 지하수체와 혼합되어 비슷한 범위를 가지는 것으로 사료된다. 하지만, 지하수 시료들의 분석 자료를 순환수선에 도시한 결과(Fig. 4), 8월 자료에서 Craig 지구순환수선($\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+10$)과 가장 가까운 기울기를 가지며, 4월 자료에서는 지구순환수선보다 작은 기울기를 가져 여름철 집중 강수가 지하수체에 영향을 미치고 있음을 나타낸다. 아울러 계절에 따라 동위원소 자료가 군집의 형태를 달리하는 것은 강수가 지하수면에 도달되는 속도가 한 달 이내로 매우 빠름을 의미한다5). 또한, 고도 10m 내외에서 채취한 용천수 시료들 역시 지하수 시료들과 비슷한 범위를 나타내었는데, 이는 고지대에서 함양된 지하수가 저지대에 이르기까지 매우 빠른 수문 순환 과정을 의미한다.

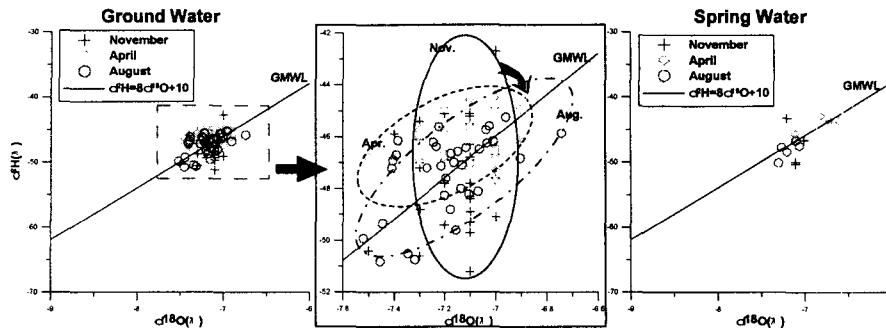


Fig. 4. Plot of $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ for ground- and spring-water.

5. 결론

- (1) 연구지역의 질산성 질소 오염은 공간적으로 고도 약 100m를 중심으로 한 저지대에서, 시간적으로 우기인 8월의 집중 강수 후에 급증하는 특성을 보인다.
- (2) 질소 동위원소 비를 이용한 오염원 추정 은 화학비료 기원이 가장 우세하게 나타났다. 이는 농업 활동으로 인한 과도한 비료 시비 관행의 개선이 시급함을 암시한다.
- (3) 강수의 산소·수소 동위원소 조성비는 8월 강수가 가장 가벼웠으며, 4월 강수가 무거워지는 경향을 관찰하였다. 이러한 강수의 동위원소 비는 지하수에 직접적인 영향을 미친다.
- (4) 지하수 시료들의 산소와 수소 동위원소 조성비는 비슷한 범위 내에 분포하였으나, 계절별로 다른 군집 형태를 보이며 저지대의 용천수와 비슷한 범위를 보인다. 이는 연구 지역지하수가 함양에서 배출에 이르기까지 빠른 수문 순환 환경을 가지고 있음을 지시한다.

참고문헌

1. 한국자원연구소, 모슬포-한림도폭 지질보고서, 2000.
2. Canter, L. W., Nitrates in groundwater, Lewis publishers, 1997.
3. 제주도, 환경백서, 2002.
4. Lee, K.S., Wenner, D.B. and Lee, I., Using H- and O-isotopic data for estimating the relative contributions of rainy and dry season precipitation to groundwater: example from Cheju Island, Korea, Journal of Hydrology, v. 222, p. 65-74, 1999.
5. 우남철, 김형돈, 이광식, 박원배, 고기원, 문영석, 지하수 수질 관측에 의한 제주도 대정수 지역의 지하수계 및 오염특성 분석, 자원환경지질, 34권, p. 485-498, 2001.