

제주도 한라산 남북측 사면 용천수의 수리지구화학

이광식, 박원배*, 현승규**, 김용제***, 문덕철*, 김구영***

한국기초과학지원연구원, *제주발전연구원, **연세대학교, ***한국지질자원연구원
(e-mail : kslee@kbsi.re.kr)

<요약문>

A total of 23 springs distributed in the southern and northern sides of Mt. Hala in Jeju Island were seasonally sampled and analyzed for their major ion chemistry and oxygen and hydrogen isotope compositions to investigate their hydrogeochemical and isotopic characteristics. Dissolved ion concentrations of the south-side springs slightly increase with decreasing altitude. This indicates that dissolved ion concentrations of groundwater recharged at higher altitudes increase by water-rock interaction during the downgradient migration of groundwater through highly permeable volcanic aquifer. Dissolved ion concentrations of the north-side springs also slightly increase with decreasing altitude, but dramatically increase at ~300 m.a.s.l. This may indicate a sudden input of contaminants to the north-side groundwater system around ~300 m.a.s.l. Springs located in areas above ~300 m.a.s.l. have very low concentrations of dissolved ions, showing little seasonal variations. Whereas springs located in areas below ~300 m.a.s.l. show a big seasonal variation in the concentration of dissolved ions. Seasonal variation of oxygen isotope compositions of springs is ~3‰ for high-altitude springs (~1700 m.a.s.l.) and is ~2‰ near shore, indicating an attenuation of the variation through mixing with other groundwater bodies during migration.

Key words : southern and northern sides of Mt. Hala, springs, dissolved ions, seasonal variation, oxygen and hydrogen isotope composition

1. 서 언

이 연구는 한라산 남북측사면에 분포하는 용천수들의 수리지구화학적 특징을 밝히고 산소와 수소 동위원소 조성의 계절변화를 관찰하기 위하여 시도되었다. 한라산 남북사면 용천수의 동위원소 조성의 계절변화 연구는 지하수 순환속도에 대한 중요한 정보를 제공할 것이다. 아울러 용존 이온 함량의 계절변화 연구는 용천수의 수질이 물암석반응과 오염물질 유입에 의하여 어떻게 지배받는지에 대한 과학적인 정보를 제공할 것이다.

2. 시료채취 및 분석

한라산 남북측사면 분포하는 23개 용천수를 선택하여 계절별로 4번 시료채취를 실시하였다. 시료채취 일자 2002년 4월 22-25일(봄), 2002년 7월 27-29일(여름), 2002년 10월 28-31일(가을), 2003년 1월 21일(겨울)이다. 수온, 수소이온 농도, 전기전도도(EC)는 현장에서 측정하였고, 알칼리도는 24시간 이내에 산을 이용한 적정법으로 측정하였다. 양음이온과 동위원소 분석은 한국기초과학지원연구원의 분석기기를 이용하여 이루어졌다. 양이온은 AAS, ICP-MS, ICP-AES를 이용하여 분석하였고 음이온은 이온크로마토그래피로 분석하였다. 산소 동위원소는 CO₂-H₂O 평형법으로 준비한 후 CO₂를 분리하여 안정동위원소 질량분석기(영국 Isotech사의 VG Prism II 모델)로 측정하였다. 수소 동위원소는 온라인 전처리 장치인 PyrOH에서 물을 Cr(상표명은 MaxChrome)과 반응시켜 수소를 발생시킨 후 안정동위원소 질량분석기(영국 GV Instrument사 IsoPrime 모델)로 측정하였다. 측정값들은 비엔나표준평균해수(VSMOW)로 표준화한 천분율(‰)로 나타냈다. 분석정밀도는 δ¹⁸O가 ±0.1‰이며 δD가 ±0.5‰이다. 산소와 수소 동위원소 자료는 δ값으로 보고 되었으며 다음 식으로 정의된다. δ(‰) = (R_{Sample}/R_{Standard} - 1) × 1000, 여기서 R_{Sample}과 R_{Standard}는 각각 시료와 표준시료의 D/H 또는 18O/16O를 나타낸다.

3. 결과 및 토의

3.1 고도 변화에 따른 용존 이온의 함량 변화

1,000 m 이상의 고지대에서 산출되는 용천수의 전기전도도(EC = 9~36 μS/cm)와 양음이온 함량은 세계 여러 나라에서 관찰되는 강수의 조성보다 비슷할 정도로 낮은 값을 보인다(Nagano and Tanaka, 1997). 이러한 현상은 현무암질암을 모암으로 하는 순환이 빠른 지역에서 관찰되는 연구결과와 일치하고 있다(Nakagawa and Iwatsubo, 2000). 이것은 한라산 고지대 용천수가 지역적으로 발달된 불투수층 위에 존재하는 분리된 유형의 지하수(perched type groundwater)이며, 강수로부터 지하수가 빠르게 함양되고 빠르게 배출되는 특성을 보이기 때문이다(Hahn et al., 1997).

아울러 남북측사면 모두에서 고지대에서 저지대로 내려가면서 용존 이온들의 함량이 점진적으로 증가하는 현상이 관찰된다(그림 1). 이것은 고지대에서 강수가 지하수로 함양된 후 저지대로 흘러가면서 물암석반응에 의하여 용존 이온의 함량이 증가하는 것을 의미한다. 남북측사면에서는 해안까지 도달될 때까지 용존 이온 함량이 점진적으로 증가하였다. 그러나 북측사면 용천수의 경우 용존 이온의 함량이 고지대부터 해발 ~300 m 까지 내려가는 동안에 점진적인 증가를 보였지만 ~300 m부터 해안까지는 급격한 증가 양상을 보이고 있다(그림 1). 이러한 현상은 북측사면의 경우 ~300 m 이하 지대에서 오염물질의 유입이 급격히 이루어지고 있음을 시사하는 것이다. 이와 같이 남북측사면보다 북측사면에서 오염현상이 훨씬 큰 영향을 미치고 있는 것은 이봉주 외 (2002)의 연구결과와 상반된다. 이봉주 외 (2002)는 제주도 다른 권역보다 남부권역에서 오염이 가장 심하게 진행되었음을 발표한바있다.

해안에 가까운 용천수는 해수 침투에 의한 영향을 받아 용존 이온들의 함량이 높아졌을 가능성도 있다. 그러나 Na와 Cl의 함량 증가가 크지 않을 뿐만 아니라 인위적 오염의 지시자인 NO₃ 함량도 같이 증가하기 때문에, 해수침투보다는 생활오수 등에 의한 인위적 오염에 의한 현상임을 알 수 있다. 이러한 사실은 남북측사면의 용천수에는 오염현상이 미미하지만 북측사면 용천수에는 인위적 오염이 매우 심하게 진행되고 있음을 의미하는 것이다.

제주도는 남북측사면 모두에서 현무암질 화산암등으로 구성된 유사한 지질특성을 보이기 때문에(박기화 외, 2003) 지하수의 유동속도가 유사하다고 가정할 수 있다. 또한 물암석반응에 의하여 수질이 전적으로 지배 된다고 가정하면 동일고도의 남북측사면 용천수의 용존 이온의 함량은 서로 유사할 것으

로 예상할 수 있다. 해발 ~300 m 이상에 분포하는 남북측사면 용천수에는 이러한 예상이 매우 잘 맞는다. 그러나 ~300 m 이하 지대에서는 동일고도에서 용존 이온 함량이 북측사면의 것들이 남측사면보다 2-3배 높은 값을 보인다. 이 점은 북측사면 지하수의 유동속도가 남측사면보다 빠르다는 제주도 (1999)의 해석과 배치되는 특징이라 할 수 있다. 지하수 유동속도가 빠르면 물암석반응이 일어날 시간이 적어서 용천수의 용존 이온의 함량이 낮을 것이기 때문에, 제주도 (1999)와 연구결과처럼 북측사면 지하수의 유동속도가 빠르다면 북측사면 지하수가 남측사면 지하수보다 용존 이온의 함량이 낮을 것이다. 북측사면 용천수가 인위적 오염을 많이 받아 용존 이온들의 함량이 증가한 것이기는 하지만, 오염과 비교적 무관한 원소인 Si와 F의 함량이 남북측사면의 동일고도에서 큰 차이가 없는 것은 남북측사면 지하수 순환속도에 큰 차이가 없음을 시사하는 것이다.

3.2 용존 이온 함량의 계절변화

북측사면 용천수의 용존 이온 자료를 고도와 계절별로 구분하여 도시하였다. 해발 300m 이상의 용천수들은 용존 이온 함량이 낮을 뿐만 아니라 계절적인 변화도 별로 보이지 않는다. 그러나 ~300m 이하 지대에서는 고도가 감소하면서 용존 이온의 함량이 급격히 증가할 뿐만 아니라 계절별 용존 이온의 함량에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 북측사면의 해안 가까이에 분포하는 용천수들의 NO₃ 농도는 음용수 기준치인 45 mg/l보다 2~3배 부화되어 있다. 농업활동에 의한 질소비료의 영향을 주로 받아 NO₃ 오염이 일어났다면 시비와 관련된 특정한 계절 지하수에 NO₃ 농도가 높을 것이지만, 북측사면의 경우 모든 계절에 높은 특징을 보이는 것으로 보아 농업활동보다는 가축분뇨나 생활오수에 의하여 오염된 것으로 판단된다. 지도상에서 토지 이용 특성을 살펴보면 북측사면은 농경지 보다는 시가지가 발달된 지역이기 때문에 지하수의 유동방향을 고려할 때 농경활동에 의한 비료 영향으로 NO₃ 농도가 높아질 가능성은 크지 않아 보인다(한정상, 1994).

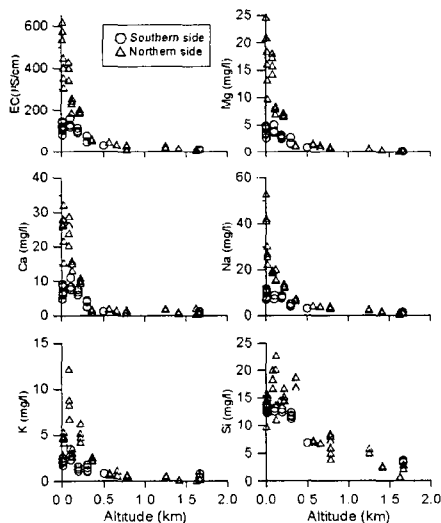


Fig. 1. Relationship between dissolved ion concentrations and altitude.

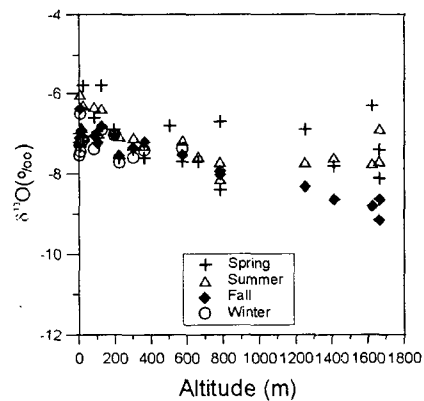


Fig. 2. Relationship between δ¹⁸O values and altitude.

용존 이온의 함량이 매우 높은 해발 ~300m 이하의 북측사면 용천수에서는 여름이나 가을에 용존 이온 함량이 높고 겨울에 낮은 경향을 보인다. 즉 북측사면에서 모든 계절에 시료가 채취되었으며 용출 수량이 많은 대표적인 용천수인 SP-10과 SP-11의 경우 용존 이온의 총 함량과 밀접하게 관련된 전기전도도(EC) 값을 보면 봄(406 μS/cm), 여름(433~451 μS/cm), 가을(402 μS/cm), 겨울(347~358 μS/cm)로

여름>봄>가을>겨울의 순서를 보인다. 봄에 시료를 채취하지 못한 SP-19 용천수도 여름(622 $\mu\text{S}/\text{cm}$), 가을(581 $\mu\text{S}/\text{cm}$), 겨울(540 $\mu\text{S}/\text{cm}$)로 여름>가을>겨울의 순서를 보인다. 우리나라 다른 지역처럼 제주도에도 여름철에 총강수량의 약 70%가 집중된다(Lee et al., 1999). 강수량이 많을 경우 오염물질이 지하수로 더 효과적으로 유입될 수 있어서 용천수의 용존 이온 농도가 높을 가능성이 크다. 뒤의 동위원소 조성 관련 분야에서 자세히 언급하겠지만 북측사면 대표적 용천수(SP-10, SP-11, SP-19)의 여름 시료의 중수소과잉값(d-값)은 8.0~9.3‰로 여름 강수에서 함양된 특징을 보인다. 이는 여름철에 용출되는 용천수가 여름철에 지하수로 함양된 강수로부터 유래하고 있음을 지지하는 것이다. 이러한 점은 용천수의 함양시기와 배출시기에 큰 차이가 없이 순환이 매우 빠르거나, 아니면 몇 년인지 순환시간은 알 수 없지만 이들 용천수가 매우 정확하게 년 단위의 평균체류시간을 가지고 있음을 의미한다.

3.3 용천수의 산소와 수소 동위원소 특성

용천수의 산소 동위원소 조성을 계절별로 도시하면(그림 2), 약 1700 m 고지대에서는 ~3‰의 변화 폭을 보이는 것이 해안 가까이 내려와서는 ~2‰의 변화 폭으로 줄어들었음이 관찰되었다. 600 m 이상의 고지대 용천수의 경우 겨울철 시료를 채취하지 못하였다. 산소 동위원소 조성이 매우 낮을 것으로 판단되는 고지대 겨울 용천수를 포함하면 고지대에서는 산소 동위원소 조성의 변화 폭이 더 클 것으로 판단된다. 즉 고지대 용천수가 저지대 용천수보다 계절변화를 더 심하게 보여주고 있는 것이다. 이것은 앞서 언급한 대로 고지대 용천수가 지역적으로 발달된 불투수성층 위에 존재하는 분리된 유형 지하수(perched type groundwater)이며, 이러한 유형의 제주도 고지대 지하수는 강수로부터 지하수가 빠르게 함양되고 빠르게 배출되는 특성을 보이기 때문에 강수의 동위원소 조성을 빠르게 반영하여 동위원소 조성의 변화 폭이 크게 나타나는 현상으로 판단된다(Hahn et al., 1997). 저지대에서 계절별 용천수의 동위원소 조성 차이가 작아지는 것은 고지대에서 저지대로 지하수가 흐르는 동안에 다른 지하수와의 혼합으로 저감되어 동위원소 조성의 변화 폭이 줄었기 때문이다.

봄 시료가 가장 분산된 특성을 보였다. 이는 제주도 고지대에서 봄철에 일어나는 지하수 함양이 봄에 내리는 강수로부터만 이루어지는 것이 아니고 겨울동안 녹지 않고 쌓인 눈이 초봄에 함께 녹으며 지하수 함양이 함께 일어나서 서로 혼합되기 때문에 나타나는 복잡성을 반영하기 때문으로 해석된다. 여름 시료는 저지대와 고지대 시료 사이에 산소 동위원소 조성에 큰 차이를 보이지 않았으며 다른 계절 시료에 비하여 고도효과가 크게 관찰되지는 않았다. 이번 연구에서 채취한 용천수에 강수의 동위원소 우량효과가 관찰되지는 않았지만, 제주도 여름철 강수가 우량효과에 의해 크게 좌우되는 것과 온도효과가 잘 보이지 않는 것이(이광식 외, 2002; Lee et al., 2003) 용천수의 고도효과가 크지 않는 것에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

한라산 남북측사면에서 채취한 용천수의 산소와 수소 동위원소 조성을 함께 도시하였다. 용천수들은 Lee et al. (2003)이 보고한 전기 강수와 우기 강수의 순환수선들 사이에 도시되고 있다. 이점은 용천수가 강수로부터 함양되어 만들어진 것이며 전기 강수와 우기 강수가 혼합되어 있는 것임을 지지하는 것이다. 여름 용천수의 d-값이 가장 적고 봄 용천수의 d-값이 가장 크다. 만일 용천수의 함양시기와 배출시기에 큰 차이가 없다면 여름 용천수의 d-값이 가장 작고 겨울 용천수의 d-값이 가장 큰 값을 보일 것이다.

북측사면 해안가 여름 용천수의 d-값이 가장 작은 것은 강수량이 많은 계절에 매우 빠른 함양과 순환이 이루어지고 있거나 년 단위의 평균체류시간을 가지고 있음을 지지하고 있다. 그러나 겨울 용천수보다 봄 용천수의 d-값이 더 큰 것은 강수의 d-값과 비교 할 때 겨울 용천수의 함양과 순환이 여름 용천수만큼 빠르지 않음을 시사한다. 이렇게 제주도에서 계절에 따라 지하수 함양 및 순환속도에 차이가 있는 것은 토양수채수기를 이용한 연구에서도 밝혀지고 있다(이광식 외, 2003). 제주도 강수의 d-값은 12

월에 가장 큰 값을 보이고 있는데(이광식 외, 2002; Lee et al., 2003), 겨울 용천수가 겨울 강수에서 곧바로 함양되어 순환이 빠르게 일어난다면 겨울 용천수의 d-값이 다른 계절 용천수의 d-값보다 클 것이다. 그러나 겨울에 고산지대에 쌓인 눈이 초봄에 녹아 지하수 함양이 일어나고 순환이 이루어진다면 봄 용천수가 겨울 용천수보다 d-값이 클 것이다. 이러한 가정을 증명하기 위해서는 제주도 지하수 및 용천수에 대한 연대측정 자료의 획득이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 3-2-1)에 의해 수행되었다.

참고문헌

- 박기화, 이봉주, 한만갑, 김정찬, 기원서, 박원배, 김태윤, 2003, 제주도 지질여행. 한국지질자원연구원 · 제주발전연구원, 179 p.
- 이광식, 고동찬, 이대하, 박원배, 2002, 제주도 강수의 동위원소 조성의 시공간적 분포: 지하수 함양에의 응용. 지질학회지, 38, 151-161.
- 이광식, 이동림, 김용제, 박원배, 2003, 토양수채수기를 이용한 토양수의 이동 관찰: 제주도 지하수 함양에의 예비적 연구. 지질학회지, 39, 535-543.
- 이봉주, 문상호, 박기화, 고동찬, 고기원, 2002, 제주도 용천수의 수리지화학적 특성. 지질학회지, 38, 421-439.
- 제주도, 1999, 제주의 물, 용천수. 경신인쇄사, 392 p.
- 한정상, 1994, 제주도 지하수 자원의 보호전략에 관한 연구, 30, 325-340.
- Hahn, J., Lee, Y., Kim, N., Hahn, C. and Lee, S., 1997, The groundwater resources and sustainable yield of Cheju volcanic island, Korea. Environmental Geology, 33, 43-53.
- Lee, K.S., Wenner, D.B. and Lee, I., 1999, 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, 222, 65-74.
- Lee, K.S., Grundstein, A.J., Wenner, D.B., Choi, M.S., Woo, N.C. and Lee, D.H., 2003, Climatic controls on the stable isotopic composition of precipitation in Northeast Asia. Climate Research, 23, 137-148.
- Nakagawa, Y. and Iwatsubo, G., 2000, Water chemistry in a number of mountainous streams of east Asia. Journal of Hydrology, 240, 118-130.
- Nakano, T. and Tanaka, T., 1997, Strontium isotope constraints on the seasonal variation of the provenance of base cations in rain water at Kawakami, Central Japan. Atmospheric Environment, 31, 4237-4245.