

## 제주도 강수의 동위원소 조성의 시공간적 분포 : 지하수 함양에의 응용

The temporal and spacial distribution of stable isotope compositions of precipitation in Jeju Island : applicability to groundwater recharge study

이광식\* · 고동찬\*\* · 이대하\*\* · 박원배\*\*\*

\* 한국기초과학지원연구원 · \*\* 한국지질자원연구원 환경지질연구부 · \*\*\* 제주발전연구원

e-mail : kslee@comp.kbsi.re.kr

### 요약문

제주도에 내리는 강수의 동위원소 조성의 시공간적인 분포를 파악하고 지하수 함양과의 관련성을 연구하기 위하여, 한라산의 남측과 북측 사면에 8개의 강수채수기를 설치하여 1년 동안 (2000. 9~2001. 8) 월강수를 채취하였다. 연구기간 동안에 강수량은 남측사면이 북측사면보다 약 37% 더 많았다. 강수의 산소동위원소 조성은 온도효과를 거의 보이지 않았다. 그러나 여름 경우에는 우량효과가 매우 뚜렷하였다. 고도가 높아지면서 강수의 동위원소 조성이 낮아지는 고도효과가 남측과 북측사면에서 모두 뚜렷이 관찰되었다. 가중평균값으로 볼 때 북측사면 강수의 동위원소 조성이 남측사면 강수보다 약 0.5‰ 낮은 것이 관찰되었는데 이는 비그늘효과(rain shadow effect) 때문인 것으로 해석된다. 다른 지역에 비하여 북부지역 지하수 동위원소 조성이 상대적으로 결핍되어 있는 것은 기존 연구 결과처럼 지하수 이동속도가 빠르기 때문에 일어나는 현상이 아니고 지하수로 함양된 강수의 원래의 동위원소 조성을 반영하기 때문인 것으로 해석된다.

**주요어:** 강수의 동위원소, 고도효과, 지하수 함양, 비그늘효과, 제주도

### 1. 서 언

1999년 제주발전연구원에서 발표한 보고서에는 1999년 7월과 10월에 제주도 북부지역에서 채취된 지하수의 산소 동위원소 조성이 같은 고도의 다른 지역 지하수에 비하여 가벼운 것이 보고되었다(제주도, 1999; 그림 4-31, 4-32 참조). 이 보고서에서는 이러한 현상이 다른 지역에 비하여 북부지역에서 지하수의 유동속도가 상대적으로 빠르기 때문에 일어나는 것으로 추정하고 있다. 그러나 이와 같은 현상이 일어나는 이유를 과학적으로 밝히기 위해서는 우선 제주도에 내리는 강수의 동위원소 조성의 공간적인 분포를 파악해야 한다. 만일 한라산 남측사면과 북측사면에 내리는 강수의 동위원소 조성이 동일 고도에서 유사하다면 지하수의 유동속도가 달라서 일어나는 현상이라고 판단할 수 있다. 그러나 그렇지 않은 경우엔 지하수가 강수의 동위원소 조성을 직접 반영하기 때문에 일어나는 현상일 가능성이 크다. 이 연구에서는 이러한 현상의 원인을 밝히기 위하여 한라산의 남측사면과 북측사면에서 고도가 다른 위치에 각각 4개씩 모두 8개의 강수채수기 설치하고 1년 동안 월강수를 채수하여 산소와 수소 동위원소 조성을 분석하였다. 이 논문에서는 이렇게 하여 얻은 동위원소 자료와 기상자료를 해석하고 제주도 지하수 함양현상과 관련지어 논의하였다.

### 2. 시료 채취 및 분석 방법

한라산의 남측사면과 북측사면에서 해발고도가 다른 위치에 강수채수기를 8개 설치하여 2000년 9월부터 2001년 8월까지 1년 동안 월강수를 채취하였다. 직사광선에 의한 영향을 차단하기 위하여 채수통의 외부를 알루미늄 호일로 감았다. 강수는 한달 동안 내린 것을 모두 모으는 방법으로 채취하였으며 강수 채취 중에 빗물이 증발되는 것을 방지하기 위하여 국제원자력기구(IAEA)에서 이용하는 방법에 따라 채수기에 파라핀유를 넣어 사용하였다. 강수의 산소 동위원소는 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 평형법으로 그리고 수소 동위원소는 아연에 의한 환원법으로 시료를 전 처리한 후 한국기초과학지원연구원의 안정동위원소 질량분석기(VG Prism II)로 동위원소 비를 측정하였다. 측정값들은 비엔나표준평균해수(VSMOW)에 표준화한 천분율(‰)로 나타났다. 분석 정밀도는  $\delta^{18}\text{O}$ 가  $\pm 0.1\%$  그리고  $\delta\text{D}$ 가  $\pm 1\%$ 이다.

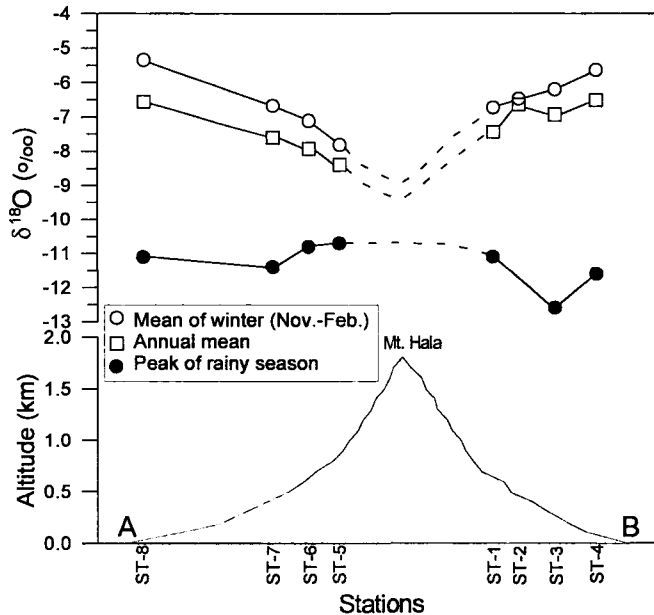
### 3. 결과 및 해석

북측사면과 남측사면 모두 우기인 6~9월에 1년 동안 내린 강수량의 약 53~64%가 집중되었다. 특히 9월에는 태풍 사오마이(Saomai)의 영향으로 성판악과 어리목에서는 600mm 이상의 강수량을 기록하였다. 연구기간 동안 남측사면의 연평균강수량은 2,865mm로 북측사면의 2,091mm보다 약 37% 더 많았다. 동일고도로 강수량을 환산하여 비교하여 보아도 남측사면이 북측사면보다 많았다. 이는 과거 30년(1969~1998)의 강수량 자료를 바탕으로 계산된 결과와도 일치하는 것인데, 강수량이 집중되는 여름철에 강수를 일으키는 기단이 남쪽과 남동쪽으로부터 유래하고 있음과 관련이 있다. 즉 제주도 남쪽 및 남동쪽 바다에서 유래한 기단이 한라산 남쪽 및 남동쪽 사면을 따라 고지대로 상승하면서 응축되어 먼저 비를 내리고, 북쪽과 북서쪽 사면으로 넘어가기 때문에 남쪽과 남동쪽사면에서 강수량이 가장 많은 것이다. 남측사면과 북측사면 모두 저지대보다 고지대에서 강수량이 더 많다. 이는 고도가 높아지면서 기온이 내려가기 때문에 일어나는 응축효과 때문에 일어나는 현상이다.

연구 기간동안에 채취된 월강수의 산소 동위원소 조성은 -12.6~-3.3‰로 약 9‰의 변화폭을 보인다. 강수의 산소 동위원소 조성을 월별로 도시하면 기온이 높은 여름철에 동위원소 조성이 낮고 기온이 낮은 겨울철과 봄철에 동위원소 조성이 높음이 관찰된다. 이는 기온과 동위원소 조성이 비례관계를 보이는 강수의 온도효과(temperature effect)와 반대되는 현상이다. 제주도 뿐만아니고 우리나라 내륙 지방과 일본에서 강수의 온도효과가 거의 관찰되지 않는 것은 이미 잘 알려져 있다(Lee et al., 1999). 여름철 강수는 다른 계절 강수보다 동위원소 조성이 뚜렷이 낮다. 특히 남측사면의 6월 강수는 동위원소 조성이 가장 낮다. 이 강수는 열대저기압으로부터 유래된 동위원소의 특징을 보인다. 남측사면과 북측사면 모두에서 6월과 7월 강수는 고지대 시료가 저지대 시료보다 동위원소 조성이 높는데 이는 고도효과와 반대되는 현상이다. 이 시료들을 제외하면 다른 시료들은 모두 고도가 높아지면서 강수의 동위원소 조성이 낮아지고 있다. 이는 6월과 7월 강수는 고도효과보다는 우량효과에 주로 영향을 받고 다른 달 강수는 주로 고도효과에 의하여 영향을 받았음을 의미한다. 북측사면의 고지대인 ST-5(960m)에서 채취한 10월 강수는 동위원소 조성이 연중 최저치를 보인다. 그러나 10월 강수는 6월 강수와는 달리 강수량이 많지 않고 고지대로 가면서 동위원소 조성이 낮아진다. 이는 6월 강수는 우량효과에 의하여 주로 지배를 받고 있는 기단에서 유래한 것이고 10월 강수는 6월 기단과는 성격이 다른 기단에서 유래되었으며 우량효과 보다는 고도효과에 의하여 영향을 받고 있음을 의미한다. 산소와 수소 동위원소 자료를 함께 도시하면 여름 강수와 겨울 강수가 뚜렷이 구분되어 진다.

8지점 채수기에서 모아진 월강수 모두에서 d-값이 계절 변화를 보인다. 그러나 같은 달에 채수한 시료들은 8지점 모두에서 d-값이 서로 유사하다. 이는 응축작용이 일어나는 동안에 d-값이 변화되지 않음을 의미하지만 자료를 자세히 보면 저지대에서 고지대로 올라가면서

d-값의 미약한 증가가 있음이 관찰된다. 이러한 현상은 북측사면보다 남측사면에서 더 잘 관찰된다. 일반적으로 수소 동위원소의 조성 분석이 어렵고 오차가 크기 때문에 9, 10, 12월에 보여지는 d-값의 증가는 분석 오차를 감안할 때 변화가 뚜렷하다고 보기가 어렵다. 그러나 2월과 11월 강수의 d-값 증가는 매우 뚜렷하기 때문에 전체적으로 고도가 높아지면서 d-값이 증가하는 현상이 제주도에서 관찰된다고 할 수 있다. 해안에서 거리에 따라 남측사면과 북측사면에서 채취한 강수의 연평균 산소동위원소 조성을 도시하였다(그림 1). 이 그림에서는 고도가 높아짐에 따라 여름철(건기)의 산소 동위원소 조성이 양측사면에서 감소하는 고도효과



가 뚜렷이 관찰된다. 그러나 우기인 여름철에는 건기 시료보다 동위원소 조성이 훨씬 낮을 뿐만 아니라 오히려 고도효과와는 반대되는 현상을 보인다.

그림 1. 한라산 북측사면과 남측사면에서 채취한 강수의 거리와 고도에 따른 산소동위원소 조성 변화

지하수 함양에 영향을 미치는 고도효과를 정량적으로 평가하기 위하여 각 측정지점의 단순평균보다 강수량으로 가중평균한 값을 이용하였다. 단순평균값과 가중평균값을 함께 도시하였는데 가중평균값이 단순평균값보다 약 1‰ 낮은 값을 보인다. 이는 여름철 강수의 동위원소 조성이 낮고 강수량이 많기 때문에 가중평균값 계산에 영향을 미쳤기 때문에 나타나는 현상이다. 남측사면의 ST-2 채수기는 등산객이 훼손하였기 때문에 5~7월에 강우를 채취하지 못하였다. 이 지점의 시료는 연평균값을 왜곡시키기 때문에 회귀직선을 구하는데서 제외하였다. 이 시료만을 제외하면 연단순평균값과 연가중평균값이 모두 저지대에서 고지대로 가면서 선형적으로 감소하고 있다.

북측사면 시료들이 동일고도의 남측사면의 시료보다 산소 동위원소 조성의 연가중평균값이 약 0.5‰ 낮음을 알 수 있다. 북측사면 강수가 남측사면 강수의 동위원소 조성보다 상대적으로 가벼운 것은 북태평양으로부터 이동되어온 기단이 제주도 남측사면에 부딪쳐서 먼저 비가 내리기 시작하기 때문에 무거운 동위원소 조성을 보이는 강수를 남측사면에 먼저 내리고, 동위원소 조성이 상대적으로 가벼워진 구름이 북측사면으로 넘어가면서 강수를 내리기 때문인 것으로 해석된다. 또한 북측사면에는 비그늘효과(rain shadow effect) 때문에 남측사면보다 강수량이 적은 것이다. 이러한 사실로 볼 때 북측사면에서 낮은 동위원소 조성을 가지는 지하수가 다른 지역보다 넓게 확대되어 나타나는 현상(제주도, 1999)이 단순히 북측사면 지하수의 이동속도가 다른 지역보다 빠르기 때문에 일어나는 것으로 해석하는데는 무리가 있다. 이 보다는 북측사면 지하수에 함양된 강수의 동위원소 조성이 남측사면 지하수에 함양된 강수의 동위원소 조성보다 가볍기 때문에 일어나는 현상이라 해석하는 것이 타당하다. 최근  $^3\text{H}/^3\text{He}$  법과 CFCs법으로 구한 제주도 지하수의 걸보기 연령이 남측사면보다 오히려 북측사면에서 더 오래된 것으로 볼 때 북측사면 지하수의 순환속도가 남측사면보다 빠르지 않음이 확인된다(제주도, 2001).

#### 4. 결 언

연구기간동안에 강수량은 남측사면이 북측사면보다 약 37% 더 많았다. 산소 동위원소 조성은 온도효과를 거의 보이지 않았지만 여름 강우에는 우량효과가 매우 뚜렷하였다. 중수소 과잉값(d-값)은 계절변화가 뚜렷하였으며 고도가 증가하면서 d-값이 미약하게 증가하는 현상이 관찰되었다. 고도가 높아지면서 강수의 동위원소 조성이 낮아지는 고도효과가 남측과 북측사면 모두에서 뚜렷이 관찰되었다. 가중평균값으로 볼 때 북측사면 강수의 동위원소 조성이 남측사면 강수보다 약 0.5‰ 낮은 것이 관찰되었다. 이러한 원인은, 북태평양으로부터 이동되어온 기단으로부터 제주도 남측사면에서 먼저 비가 내리기 시작하여 무거운 동위원소 조성을 보이는 강수를 남측사면에 먼저 내리고 동위원소 조성이 상대적으로 가벼워진 구름이 북측사면 강수에 영향을 주기 때문인 것으로 해석된다. 제주도(1999)에서 보고된 것처럼 제주도 지하수 동위원소 조성이 동일고도에서 남측사면과 북측사면에 차이가 나는 것이 지하수 이동속도 때문에 일어나는 것이 아니고 지하수로 함양된 강수의 원래의 동위원소 조성이 다르기 때문에 나타나는 현상임이 밝혀졌다.

#### 참고문헌

- 이광식, 이인성, 최만식, 박은주, 1997, 제주도 강수의 환경 동위원소 연구. 지질학회지, 33, 139-147.
- 제주도, 1999, 제주도 지하수순환시스템 조사. 446 p.
- 제주도, 2001, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사 (I). 378 p.
- 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. J. Hydrol., 222, 65-74.