

포항 강수의 안정 동위원소 조성 변화

이광식* · 정재일**

Stable Isotopic Variation of Precipitation in Pohang, Korea

Kwang-Sik Lee* and Jae-Il Chung**

ABSTRACT : In this paper an attempt is made to explain some of the factors controlling oxygen and hydrogen isotopic variations of precipitation in Pohang by analysing the IAEA data (1961~1976) through statistical correlations and trend observations. During this period, the values of $\delta^{18}\text{O}$ and D varied widely from -17.80 to +0.07 ‰ and from -131.9 to +7.7‰, respectively, and fall along a local meteoric water line defined by $\delta\text{D}=(8.05\pm 0.32)\delta^{18}\text{O}+(12.72\pm 2.44)$ ($n=108$, $r^2=0.86$). The $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of the precipitation appear to be little dependent on temperature. Although the amount effect is clearly shown in summer precipitation of 1963 and 1965, the isotopic composition of summer precipitation seems not to be greatly dependent on the amount of precipitation.

서 언

자연수의 안정 동위원소 조성 변화는 주로 대기의 순환에 의하여 이루어진다. 지표수와 지하수의 안정 동위원소 조성은 조성이 상이한 다른 물과의 동위원소 교환반응을 제외하고는 별로 변하지 않기 때문에, 강수에 의한 동위원소의 영향을 그대로 보존하게 된다. 지표수와 지하수의 양은 개별 강수의 양에 비하여 매우 크다. 따라서 이들의 동위원소 조성은 개별 강수에 의한 영향을 크게 받지 않으며, 일반적으로 그 지역에 오랜 기간 내린 강수의 평균 동위원소 조성을 반영하게 된다 (Kumar *et al.*, 1982; Cortes, Farvolden, 1989). 어떤 지역에서 지표수와 지하수의 동위원소 특성을 효과적으로 연구하기 위해서는 그 지역에 내린 강수의 오랜 기간의 동위원소 자료가 필요하며, 이와 같은 자료를 국제원자력기구 (IAEA)에서 얻을 수 있다. 국제원자력기구는 세계기상기구 (WMO)와 합동으로 강수의 동위원소 특성을 연구하기 위한 프로그램을 1958년에 시작하였고, 1961년부터 세계의 많은 지점에서 강수의 월평균 동위원소 자료를 생산하여 왔다. IAEA/WMO의 강수 채취 지점은 65개국 151 지점에서 시작하

여 1963~1964년에 최대 220 지점에 이르렀다. 이후 채취 지점이 감소되어 1992년 IAEA 발간 보고서에 의하면 75개 지점에서 동위원소 자료를 생산하고 있다 (IAEA, 1992). 이러한 IAEA/WMO 자료는 세계 여러 지역에서 오랜 기간 축적된 자료이기 때문에, 지구 규모의 동위원소 특성 연구에 효과적으로 이용되고 있다. 우리나라의 포항도 IAEA/WMO의 강수 채취 지점에 해당된다. 포항에서는 1961년부터 1976년까지 IAEA/WMO 강수 감시망이 운영되어 왔으며, 월별 강수의 산소와 수소 동위원소 자료 및 삼중수소 (^3H) 자료를 생산하여 왔다. 일부 누락된 자료들이 있기는 하지만 이들 자료는 우리나라 강수의 동위원소 자료중 가장 오랜 기간 축적된 귀중한 자료이다. 국내에서는 그 동안 강수의 동위원소 연구가 활발히 이루어지지 않았기 때문에 이러한 자료가 연구에 이용되지 못하였다. 이 논문에서는 IAEA/WMO가 우리나라 포항에서 채취한 강수의 안정 동위원소 자료의 변화 경향을 파악하고 회귀분석을 실시하여, 동위원소 변화에 영향을 주는 요인들은 연구하였다.

자료의 해석

IAEA/WMO 강수 채취 지점중의 하나였던 우리나라 포항에 내린 1961~1976년 강수의 동위원소 자료 (산소 108 자료와 수소 116 자료)의 변화 경향성을 파악하고 최

* 기초과학지원연구소 (Korea Basic Science Institute, Taejeon 305-333, Korea)

** 전북대학교 자연과학대학 지질학과 (Department of Geology, Chonbuk National University)

소제곱법 (method of least squares)으로 회귀분석을 실시하여, 동위원소 조성에 영향을 주는 요인들을 알아보았다 (IAEA, 1969, 1970, 1971, 1973, 1975, 1979, 1983). IAEA/WMO에서 생산한 자료들은 개별 강수 자료가 아니고 월별로 채취한 총 강수의 동위원소 자료이다. 강수의 연가중평균 (δ_{WA} =yearly weighted average)은 (1) 식을 이용하여 구하였다.

$$\delta_{WA} = \sum P_i \delta_i / \sum P_i \quad (1)$$

여기서 P_i 는 월강수량이고 δ_i 는 동위원소 조성이다.

동위원소 조성 변화

1961~1976년 동안 포항 지역의 월강수량, 월평균기온, 강수의 산소와 수소 동위원소 조성을 Fig. 1에 나타냈다. 1968~1972년에는 IAEA/WMO에서 포항의 자료를 생산하지 못하였다. 월강수량은 1~479 mm로 변화 폭이 매우 크다. 이 기간에 내린 강수의 연강수량은 738~1469 mm (평균 1106 mm) 이었는데, 여름철에 강수량이 집중되고

겨울철에 적은 주기적인 변화를 보인다. 월평균기온은 1~2월에 가장 낮고 7~8월에 가장 높은 주기적인 변화를 잘 보여준다. 월평균최저기온은 0.3°C, 월평균최고기온은 26.2°C, 그리고 연평균기온은 $13.2 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 이다.

이 기간 중에 내린 강수의 월별 산소 동위원소 조성은 $-17.80 \sim +0.07\%$, 그리고 수소 동위원소 조성은 $-131.9 \sim +7.7\%$ 로 매우 변화가 크다. 연가중평균값은 산소 동위원소 조성이 $-9.46 \sim -7.03\%$, 그리고 수소 동위원소 조성이 $-66.1 \sim -32.8\%$ 범위에서 변화하였는데, 월별 동위원소 자료보다 변화 폭이 훨씬 좁다. 포항 강수의 산소와 수소 동위원소 조성은 (2) 식으로 표현되는데 이는 Craig (1961)의 순환수선인 $\delta D = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ 과 매우 유사하다 (Fig. 2).

$$\delta D = (8.05 \pm 0.32) \delta^{18}\text{O} + (12.72 \pm 2.44) \quad (2)$$

$(r^2 = 0.86, n = 108)$

이들 모든 자료의 평균값을 구하면 산소 동위원소는 -7.21% 그리고 수소 동위원소는 -45.3% 이다. 그리고 강수량 자료를 이용하여 가중평균값을 구하면 산소 동위원소는 -7.78% 이고 수소 동위원소는 -51.0% 이다. 이 가중

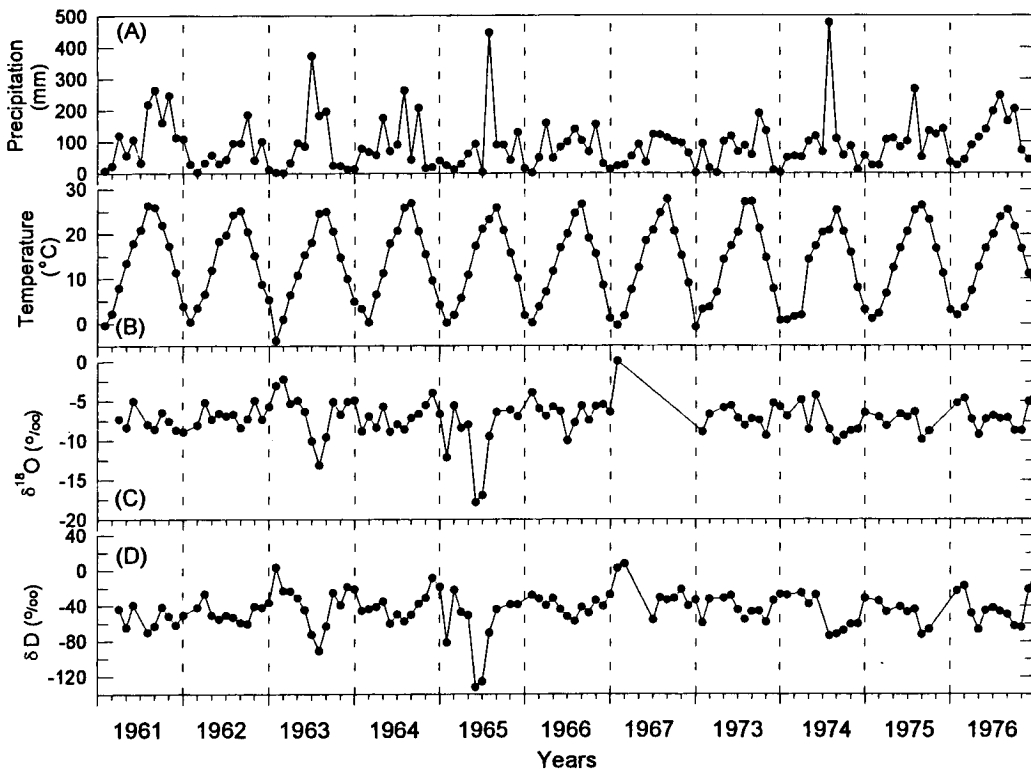


Fig. 1. Seasonal variations of total monthly amount of precipitation (A), monthly average air temperature (B), and oxygen and hydrogen isotopic composition of precipitation (C and D) in Pohang.

평균값 (-7.78‰, -51.0‰)은 그 동안 우리 나라 온천수와 지하수에서 얻어진 산소 동위원소 조성 (약 -11~-5‰)과 수소 동위원소 조성 (약 -75~-35‰)의 평균값과 매우 유사하다 (Kim, Nakai, 1981; 김규한, 申井信之, 1988; 이광식, 미발표 자료). 이 점은 우리 나라 온천수와 지하수가 강수의 산소와 수소 동위원소 조성을 그대로 반영하고 있음을 지시하는 것이다.

포항 강수를 월별로 구분하여 회귀직선을 구하면 기온기와 Y 절편에 변화가 크다 (Table 1). 이는 회귀분석에 이용한 자료의 수가 월별로 8~10개로 매우 적기 때문에 나타나는 현상이다. 이 중 2월 강수에서 얻은 직선이 순환수선에서 가장 많이 벗어난다. 이는 회귀분석에 이용한 자료가 적을 뿐만 아니라, 2월 강수중 1개의 자료 (-2.20, -22.9‰)가 순환수선보다 오른쪽으로 심하게 편중되었기 때문으로 판단된다. 이 자료는 시료 채취 과정 중에 증발 현상을 심하게 겪었거나 또는 동위원소 분석 결과에 문제가 있을 가능성이 있지만, IAEA 보고서에 이러한 사항에 대한 언급이 없기 때문에 평가하기 곤란하다. 4월 강수에서 얻은 직선은 순환수선과 거의 일치되는 기온기와 Y 절편을 갖는다. 나머지 직선들도 정도에 차는 다소 있지만 순환수선에서 크게 벗어나지 않는 기온기를 보인다.

동위원소 조성에 영향을 주는 요인들

온난 다습한 지역에 내리는 강수는 일반적으로 Craig (1961)의 순환수선을 잘 따르지만, 반건조 (semi-arid) 내지 건조 지역에 내리는 여름철 강수는 흔히 빗방울의 부분증발 현상에 의하여 기온기가 8보다 적은 직선 (4~6이 전형적인 기온기임) 부근에 도시된다 (Dansgaard, 1964; Yurtsever, Gat, 1981; Martinelli *et al.*, 1996). 포

항에 내린 강수가 강수시의 부분증발에 의하여 영향을 받았는지를 알아보기 위하여, 강수량이 30 mm 미만인 경우와 30 mm 이상인 경우로 구분하여 회귀분석 하였다. 강수량이 30 mm 미만인 강수는 (3) 식으로, 그리고 30 mm 이상의 강수는 (4) 식으로 표현되는데, 기온기나 Y 절편에 별 차이가 없다. 이는 포항에 내린 강수의 대부분은 강수 시에 부분증발을 별로 겪지 않았으며 기단의 특성을 나타내는 d 값이 거의 변화하지 않았음을 지시한다. 강수량 30 mm 미만 강수의 기온기가 8보다 다소 작은 것은 시료수가 적기 때문일 가능성이 크지만 일부 강수들이 강수시 부분증발을 다소 겪었을 가능성도 배제할 수 없다 (Ehhalt *et al.*, 1963).

$$\delta D = 7.64\delta^{18}O + 13.40 \quad (\gamma^2 = 0.91, n = 23) \quad (3)$$

$$\delta D = 8.07\delta^{18}O + 11.97 \quad (\gamma^2 = 0.82, n = 85) \quad (4)$$

강수를 계절별로 구분하여 δD 와 $\delta^{18}O$ 그림에 도시하여 보았다 (Fig. 2). 여기서 봄은 3~5월, 여름은 6~8월, 가을은 9~10월 그리고 겨울은 11~2월로 구분하였다. 여름철에 내린 강수는 Craig (1961)의 순환수선과 매우 유사한 직선 부근에 도시된다. 겨울철에 내린 강수도 순환수선과 가까이 도시되지만 여름철 강수보다 d 값이 더 큰 직선 상에 도시된다. 그리고 겨울철 강수는 여름철 강수에 비해 무거운 동위원소가 상대적으로 농집되어 있는 경향을 보여준다. 이 점은 우리 나라에 내리는 강수들의 동위원

Table 1. δD - $\delta^{18}O$ relationship of Pohang precipitation in months (1961~1967, 1973~1976).

Month	Relationship	Correlation coef. (γ^2)	Number of points (n)
1	$\delta D = 7.06\delta^{18}O + 11.00$	0.89	8
2	$\delta D = 3.98\delta^{18}O - 7.41$	0.59	8
3	$\delta D = 6.46\delta^{18}O + 6.66$	0.84	9
4	$\delta D = 7.72\delta^{18}O + 10.38$	0.69	9
5	$\delta D = 7.66\delta^{18}O + 5.64$	0.96	10
6	$\delta D = 7.88\delta^{18}O + 11.30$	0.93	8
7	$\delta D = 6.71\delta^{18}O - 5.59$	0.79	10
8	$\delta D = 7.24\delta^{18}O + 2.03$	0.95	10
9	$\delta D = 10.34\delta^{18}O + 26.92$	0.88	9
10	$\delta D = 7.07\delta^{18}O + 3.37$	0.84	9
11	$\delta D = 10.08\delta^{18}O + 27.06$	0.87	9
12	$\delta D = 8.05\delta^{18}O + 21.05$	0.83	9

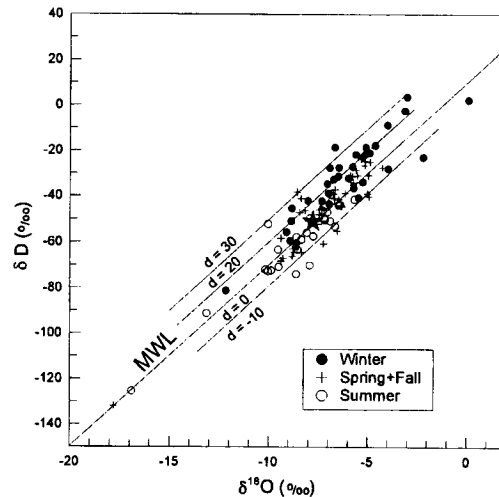


Fig. 2. Plot of δD versus $\delta^{18}O$ in precipitation samples. The δD and $\delta^{18}O$ data of all precipitation samples fall along a line defined by $\delta D = 8.05\delta^{18}O + 12.72$ ($\gamma^2 = 0.86, n = 108$). Star represents a weighted average (-7.78‰, -51.0‰) of all precipitation data.

소 조성이 d 값에 의하여 비교적 잘 구분되며, 계절 변화에 따른 기단 변화를 그대로 반영한다는 기존 연구와 잘 일치된다 (이광식, 장병욱, 1994; 이광식 등, 투고중). 봄과 가을에 내린 강수는 여름과 겨울에 내린 강수 사이에서 과도기적인 특징을 보인다.

포항에 내린 강수의 산소와 수소 동위원소 조성은 계절 변화에 따른 온도효과 (temperature effect)를 효과적으로 반영하지 못하는 것으로 나타났다 (Fig. 1). 온도가 높을 때 동위원소 조성이 무겁고 온도가 낮을 때 동위원소 조성이 가벼운 것을 온도효과라 하는데, 온도효과는 극과 가까운 추운 대륙 강수의 산소와 수소 동위원소 조성을 지배하는 주요한 요인으로 알려져 있다 (Dansgaard, 1964; Yurtsever, Gat, 1981). 포항에 내린 강수는 연도에 따라서 이러한 온도효과가 다소 나타나기도 하지만 (예, 1961, 1962, 1973), 그 외의 연도엔 온도효과와는 반대로 온도가 낮은 겨울철에 가장 높은 동위원소 조성을 보이고 온도가 높은 여름철에 낮은 동위원소 조성을 보여준다. 이러한 원인은 겨울철 강수의 채취 및 운반시의 증발현상과 상대습도가 낮은 계절에 내리는 강수의 부분증발에 의하여 일어날수도 있지만, 앞서 살펴본 바와 같이 포항에 내린 강수는 증발현상에 의하여 강수의 산소와 수소 동위원소 조성에는 큰 영향을 받지 않았다.

포항 강수가 온도효과를 얼마나 반영하고 있는지를 알아보기 위하여, 월별로 산소 동위원소 조성을 취합하여 box-and-whisker 그림에 도시하였다 (Fig. 3). 포항 강수

는 일반적인 온도효과와는 반대로 기온이 낮은 겨울철에 산소 동위원소 조성이 높고 기온이 높은 여름철에 동위원소 조성이 낮은 특이한 변화 경향을 보여준다 (Fig. 3). 산소 동위원소 조성을 계절별로 분류하여 월평균기온 자료와 도시하면 이러한 경향성은 더욱 뚜렷해진다 (Fig. 4). Fig. 4에서 우리는 산소 동위원소 조성이 월평균기온과 완만한 역비례 관계를 보임을 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 포항 강수의 안정동위원소 자료는 기온에 의하여 별로 영향을 받지 않았으며, 온도효과보다는 우량효과에 의하여 더 지배되었음을 알 수 있다. 이점은 제주도 강수와도 일치되는 현상이다 (이광식 등, 투고중).

일부 연도의 여름철 강수는 다른 계절에 비하여 동위원소 조성이 낮은 우량효과 (amount effect)가 나타나는데, 1963년과 1965년에 뚜렷하다 (Fig. 1). 이 두 해의 여름철 강수의 산소와 수소 동위원소 조성은 다른 계절에 비하여 현저히 낮지만, 다른 연도에는 이러한 현상이 잘 나타나지는 않는다 (Fig. 1). Fig. 3에서는 6~8월 강수의 산소 동위원소 조성이 다른 계절의 값보다 다소 낮은 값을 보인다. 온난한 중위도 지방에서는 온도효과와 우량효과 모두가 강수의 산소와 수소 동위원소 조성을 좌우하는 것으로 알려져 왔으며 (Gedzelman *et al.*, 1987; Lawrence, White, 1991), 대전과 서울 지역 강수에서도 이러한 현상이 확인된 바 있다 (이광식, 장병욱, 1994). 이러한 우량효과를 보다 자세히 보기 위하여 강수량과 산소 동위원소 조성을 함께 도시하였다 (Fig. 5). 겨울철 강수에는 강수량이 많아짐에 따라 산소 동위원소 조성이 다소 낮아지는 경향을 보여주

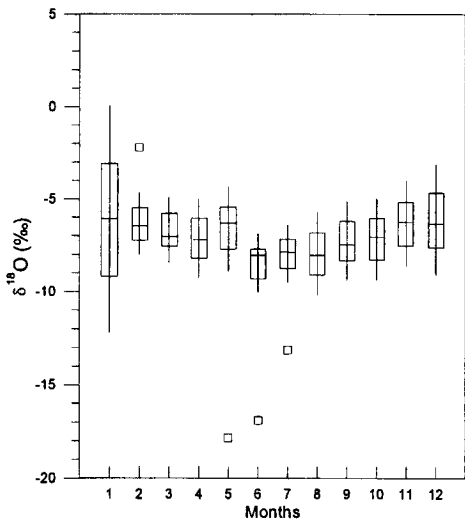


Fig. 3. A box-and-whisker plot of oxygen isotopic composition of Pohang precipitation. The outliers occurring far away from the bulk of the data are plotted as separated points. The central lines are average values.

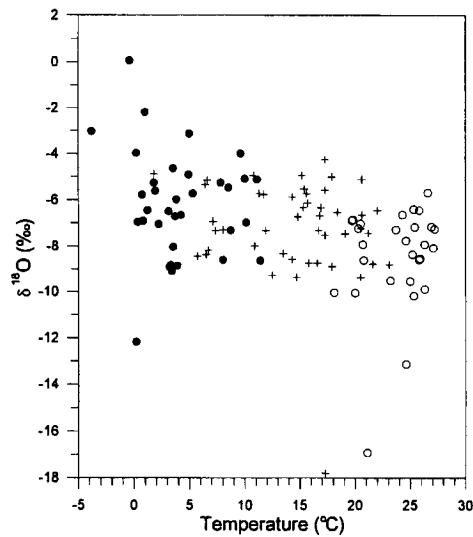


Fig. 4. Plot of $\delta^{18}\text{O}$ versus monthly average air temperature. Symbols are the same as in Fig. 2.

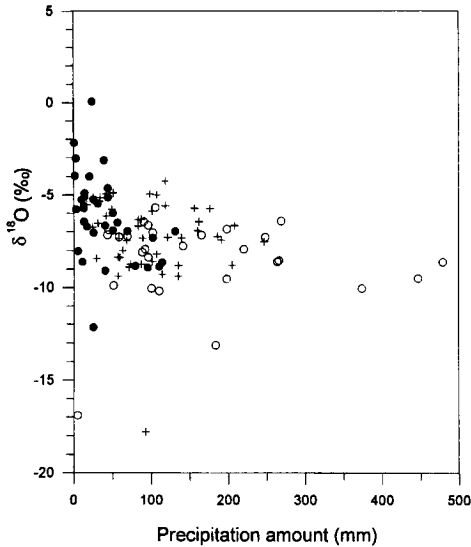


Fig. 5. Plot of $\delta^{18}\text{O}$ versus precipitation amount. Symbols are the same as in Fig. 2.

나, 강수량이 적고 분산이 심해서 평가하기가 곤란하다. 봄과 가을 강수는 강수량이 많아져도 산소와 수소 동위원소 조성이 별로 변하지 않는다. 여름철 강수는 강수량의 변화가 매우 크다. 여름철 강수는 강수량이 많아짐에 따라 산소 동위원소 조성이 낮아지는 관계를 약하게 보이지만, 전반적으로 큰 변화가 없다. 이 점은, 비록 일부 연도의 포항 강수에 우량효과가 잘 나타나기는 하지만, 전체적으로는 포항 여름 강수에는 우량효과가 그리 크지 않음을 의미한다.

결 언

IAEA/WMO 강수 감시망의 한 지점인 우리나라 포항에서 1961~1976년에 얻어진 강수 동위원소 자료를 회귀 분석하고 계절에 따른 동위원소 조성변화를 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 이 기간 중에 내린 강수는 산소와 수소 동위원소 조성이 $\delta D = 8.05\delta^{18}\text{O} + 12.72$ ($\gamma^2 = 0.86$, $n = 108$) 관계식을 보였는데, 이는 Craig (1961)의 순환수선과 매우 유사하다. 포항에 내린 강수는 일부 연도를 제외하고는 계절변화에 의한 온도효과를 별로 반영하지 않았다. 여름철 강수는 연도에 따라 우량효과를 뚜렷이 반영하기도 하였지만, 전체적으로 우량효과를 크게 반영하지는 않았다. 이와 같이 포항 강수의 산소와 수소 동위원소 조성에는 온도효과와 우량효과가 둘다 크게 반영되지는 않았지만, 온도효과 보다는 우량효과가 더 큰 영향을 미치는 것으로 해석된다.

감사의 글

이 논문의 심사를 맡아 유익한 비평을 하여주신 진명식 박사님께 깊이 감사드린다.

참고문헌

김규한, 中井信之 (1988) 남한의 지하수 및 강수의 안정동위원소 조성. 지질학회지, v. 24, p. 39-46.
 이광식, 이인성, 최만식, 박은주 (투고중) 제주도 강수의 환경 동위원소 연구, 지질학회지.
 이광식, 장병욱 (1994) 우리 나라 대전과 서울 지역 강수의 안정동위원소 성분. 지질학회지, v. 30, p. 475-481.
 Cortes, A. and Farvolden, R.N. (1989) Isotope studies of precipitation and groundwater in the Sierra de las Cruces, Mexico. J. Hydrol., v. 107, p. 147-153.
 Craig, H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters. Science, v. 133, p. 1702-1703.
 Dansgaard, W. (1964) Stable isotopes in precipitation. Tellus, v. 16, p. 436-468.
 Ehhalt, D., Knott, K., Nagel, J.F. and Vogel, J.C. (1963) Deuterium and oxygen 18 in rain water. J. Geophys. Res., v. 68, p. 3775-3780.
 Gedzelman, S.D., Lawrence, J.R., White J.W.C. and Smiley, D. (1987) The isotopic composition of precipitation at Mohonk Lake, New York: the amount effect. J. Geophys. Res., v. 92, p. 1033-1040.
 IAEA (1969, 1970, 1971, 1973, 1975, 1979, 1983) Environmental isotope data. No. 1-7. Tech. Rep. Ser., No. 96, 117, 129, 147, 165, 192, 226, International Atomic Energy Agency, Vienna.
 IAEA (1992) Statistical treatment of data on environmental isotopes in precipitation. Tech. Rep. Ser., No. 331, International Atomic Energy Agency, Vienna.
 Kim, K.H. and Nakai, N. (1981) A study on hydrogen, oxygen and sulfur isotopic ratios of the hot spring waters in South Korea. Geochemistry (Japan), v. 15, p. 6-16.
 Kumar, B., Athavale, R.N. and Sahay, K.S.N. (1982) Stable-isotope geohydrology of the Lower Maner Basin, Andhra Pradesh, India. J. Hydrol., v. 59, p. 315-330.
 Lawrence, J.R. and White, J.W.C. (1991) The elusive climate signal in the isotopic composition of precipitation. In: Taylor, H.P.Jr., O'Neil, J.R. and Kaplan, I.R. (eds.), Stable isotope geochemistry: A tribute to S. Epstein. pp. 169-185.
 Martinelli, L.A., Victoria, R.L., Sternberg, L.S.L., Ribeiro, A. and Moreira, M.Z. (1996) Using stable isotope to determine sources of evaporated water to the atmosphere in the Amazon basin. J. Hydrol., v. 183, p. 191-204.
 Yurtsever, Y. and Gat, J.R. (1981) Atmospheric waters. In: Stable isotope hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle. Tech. Rep. Ser., No. 210, IAEA, Vienna, pp. 103-142.