

유성 소유역의 강수 및 지열수의 산소·수소 안정동위원소 조성 변화

문상호^{1*} · 조성현¹ · 이광식² · 윤욱¹

¹한국지질자원연구원 지하수지열연구부, ²한국기초과학지원연구원

The Variation of Oxygen and Hydrogen Isotopic Composition in Precipitation and Geothermal Waters from the Yuseong Catchment

Sang-Ho Moon^{1*}, Sung-Hyeon Cho¹, Kwang-Sik Lee² and Uk Yun¹

¹Groundwater and Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

²Korea Basic Science Institute(KBSI)

The oxygen and hydrogen isotopic composition in precipitation, groundwater and geothermal water were monitored over four-year period from 2001 to 2004 at the Yuseong catchment, Daejeon. By analyzing the long term rainfall pattern, we found out the drought cycle of 6 or 7 year. We fortunately revealed that the oxygen and hydrogen isotopic composition of rain has progressively changed to heavier isotopic ratios from 2001 to 2004. The weighted mean values of $\delta^{18}\text{O}$ and δD of rain are calculated to be -7.7‰ and -51‰ , respectively. These isotopic values are much heavier than those of groundwater and geothermal water collected at the same period, which indicates that the rain or snow of the study area would not immediately affect the isotopic composition of groundwater or geothermal water. Comparing with the previous data, the groundwater and geothermal water collected at 1990 and 1992 year has the heaviest isotopic composition and afterwards their isotopic composition has been progressively shifted to the direction of lighter composition field.

Key words : Yuseong catchment, Rainfall, Groundwater, Geothermal water, Variation of oxygen and hydrogen isotopic composition

2001년부터 2004년까지 유성 소유역내 강수, 지하수, 지열수의 산소 및 수소 동위원소 조성 변화를 검토하였다. 1975년부터 2006년까지의 강수 패턴을 분석한 결과, 연구지역은 6~7년의 가뭄 주기성을 보였다. 2001년도 가뭄 시기부터 2004년까지 4년간 강수의 산소·수소 동위원소 조성은 점차 무거운 성분으로 변화해가는 양상을 보였다. 연구 지역에서 4년간의 강수량을 고려한 동위원소의 가중 평균값을 구해 보면 $\delta^{18}\text{O} = -7.7\text{‰}$, $\delta\text{D} = -51\text{‰}$ 로서, 동일 기간 내의 지하수와 지열수의 동위원소보다 무거운 조성 범위를 보였다. 이는 연구 지역의 지하수 및 지열수가 동위원소적 관점에서 2~3년 이내의 강수에 의해 큰 영향을 받지 않는 것을 의미한다. 기존 자료들을 검토해 볼 때, 연구지역에서의 지하수와 지열수는 1990년과 1992년이 가장 무거운 동위원소 조성을 보였으며 이후로는 산소 및 수소 동위원소 조성이 점차 가벼워지는 쪽으로 변화해가는 양상을 보였다.

주요어 : 유성 소유역, 강수, 지하수, 지열수, 산소 및 수소 동위원소 조성 변화

1. 서 언

자연수의 순환은 대기권, 수권, 암석권, 생물권을 포함하는 복잡한 요인들에 의해 영향을 받고 있으나, 산소와 수소는 물의 순환 과정에서 보존적이기 때문에

이들의 안정동위원소가 자연수 순환 과정과 물질의 기원을 추적하는데 있어서 매우 유용한 도구로 활용되어 왔다(Peterson *et al.*, 1985; Martinelli *et al.*, 1996; Clark and Fritz, 1997). 지표수와 지하수의 산소 및 수소 동위원소 조성은 증발작용, 다른 수체와의 혼합,

*Corresponding author: msh@kigam.re.kr

고온 상태에서의 물-암석 반응 등에 의해 변화되는 경우를 제외하면 대체로 함양지역 강수의 동위원소 조성을 반영하는 것으로 알려져 있다(Lee and Lee, 1999). 그러나, mass-balance 측면에서 일시적인 강수에 비해 지표수, 지하수, 지열수의 양은 매우 크기 때문에, 이들 순환수들의 동위원소 조성이 단기간 강수에 의한 영향을 받기 보다는 장기간에 걸친 강수의 평균적 동위원소 조성을 반영하는 것으로 이해되고 있다(Kumar *et al.*, 1982; Cortes and Farvolden, 1989). 또한, 지표수, 지하수의 동위원소 조성에 영향을 미치는 강수의 동위원소 조성 역시 온도효과, 고도효과, 위도효과, 우량효과 등 기온 및 강수량 변화에 의하여 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Dansgaard, 1964; Yurtsever and Gat, 1981; Lawrence *et al.*, 1982; Lawrence and White, 1984; Yapp and Epstein, 1985; Gedzelman *et al.*, 1987; Kim and Nakai, 1988; Lawrence and White, 1991; Lee *et al.*, 2001).

1993년부터 1997년까지 대전 및 유성지역에 내린 강수의 산소·수소 동위원소 조성과 1990년부터 1998년까지의 지하수 및 지열수에 대한 산소·수소 동위원소 조성이 Yuseong-gu Office(1997), Lee and Chang (1994), Lee and Lee(1999), Kim *et al.*(2000) 등에 의해 보고된 바 있다.

이 연구에서는 2001년부터 2004년까지 유성 소유역에서 채취 분석된 강수, 지하수, 지열수의 동위원소 조성 변화와 강수 동위원소의 온도효과, 고도효과, 우량효과 등을 검토하였다. 또한, 금번 자료와 기존 자료들을 종합적으로 고찰함으로써 이들의 장기적 동위원소 조성 변화 특성과 순환 특성을 고찰해 보았다.

2. 유역 현황

유성 소유역은 대전분지 서북부에 위치하며, 대전광역시 유성구와 서구 일부를 포함하는 면적 74.96 km²에 해당된다. 연구 유역의 서측은 계룡산 국립공원의 줄기를 능선으로 공주시와 접하여 고지대를 이루며, 동측은 갑천을 경계로 대전시내와 접하고 있어 평탄한 서고동저의 지형을 나타낸다. 서측의 고지대는 북에서 남으로 가면서 우솔봉(573.5 m)-갑하산(469.0 m)-도덕봉(535.2 m)-백운봉(483.5 m)-금수봉(532.0 m)-빈계산(415.0 m)-구봉산(256.1 m)과 이들로부터 연장 발달된 능선으로 둘러 싸여 있다. 유성 소유역에서 서측으로 약 5 km 거리에 계룡산(845.0 m)이 위치한다(Fig. 1).

유성 소유역은 유성온천지구 지열수의 주요 집수구

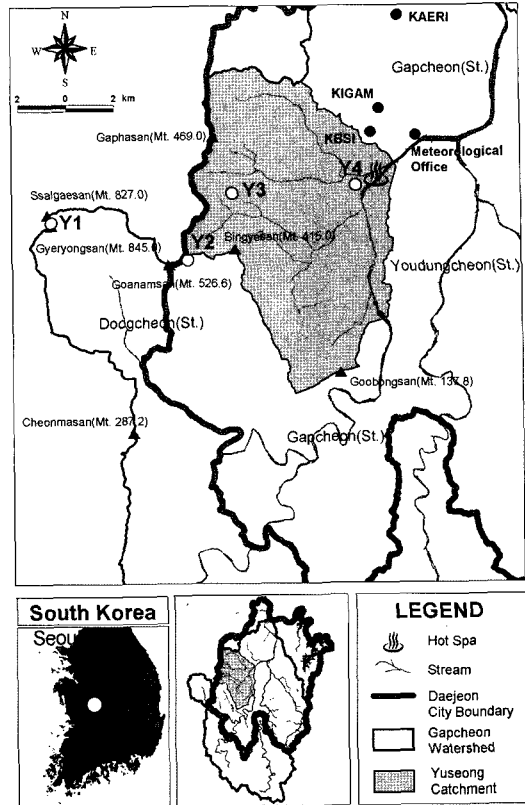


Fig. 1. Location map of the study area.

Y1~Y4; sampling site of precipitation

KAERI; Korea Atomic Energy Research Institute

KIGAM; Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

KBSI; Korea Basic Science Institute

역으로 추정되는 유역으로서 갑천 하류지역 서편에 해당된다. 그러나, 연구 유역은 섬지역과 같은 하나의 닫힌 계(closed system)가 아니라 열린계(open system)로서 지형적인 경계를 넘어서 보다 광역적인 지하수 유출입이 진행될 수 있음을 배재할 수는 없다. 유성 소유역에는 유성천, 반석천, 진잠천, 성전천, 화산천이 있으며, 지열수가 산출되는 유성온천지구는 진잠천과 유성천이 갑천에 합류되는 지점으로서 유성 집수구역의 배출구 가까이에 위치한다.

3. 시료 채취 및 분석

동위원소 분석을 위한 강수 시료 채취 지점은 Fig. 1의 Y1~Y4로 4개 지점이며, 이들의 좌표 및 고도는 Table 1과 같다. 강수 시료 채취를 위한 적산강수계는 2001년 7월 30일부터 8월 1일에 걸쳐 설치되었다. 유성온천지구 지열수의 함양지로 추론된 곳은 계룡산 일

Table 1. Inventory of sampling site for precipitation.

Site No.	Site name	Latitude	Longitude	Altitude (m) above sea level	precipitation collector Equipped Date
Y1	Cheonhwangbong	36°20'24.1"	127°12'28.3"	842	2001. 08. 01.
Y2	Baekunbong	36°19'32.7"	127°16'16.1"	424	2001. 07. 31
Y3	Yuseong C.C.	36°21'1.5"	127°17'30.7"	209	2001. 07. 30
Y4*	Kyeryong Spatel	36°21'10.7"	127°20'57.5"	60	2001. 07. 30

*Y4 site was moved to KIGAM at 17th Oct., 2002.

대와 유성천 유역이며, 열원은 NS 방향의 맥암군으로 보는 다수의 연구가 있다(Moon *et al.*, 2005; Jeong *et al.*, 1997). 따라서 적산강수계의 설치 지점을 유역의 지형적인 경계를 넘어서 인근에 가장 높은 계룡산 정상(Fig. 1의 Y1 지점)까지 확대하였다. 강수 시료 채취는 2001년 9월부터 2004년 3월까지 1개월 내지 6개월 간격으로 13회 채취하였으며, 강수 시료채취는 강우시에 채취한 것이 아니라 일정 기간 동안 집적된 누적 강수 시료를 채취하였다. 강수 채취를 위한 적산강수계는 18.9L 용량의 생수통으로 제작하였으며, 외부에 알루미늄 은박을 입혀 최대한 태양광을 차단하였고 내부에는 액체 파라핀을 넣어서 채집된 강수의 증발을 막도록 하였다. 또한, 1m 이상 높이의 삼각 받침대를 받쳐서 지표면에서 튕겨 들어오는 강우를 차단하였으며, 상부에는 첩이 달린 깔대기(지름 24cm)를 달아 깔대기 안에 떨어진 빗물이 튕겨 나가지 않도록 하였다. 통 하부에는 콧(cock)을 달아 강수 시료 채취가 용이하도록 하였다.

지열수 및 지하수 시료는 2001년 11월에 12개, 2002년 8월~9월에 12개, 2003년 3월에 19개 등 3차례에 걸쳐 채취하였다. 지열수 및 지하수 시료는 모두 유성온천지구내에 개발된 온천공 및 지하수공으로부터 직접 토출되는 것을 채취한 것이다.

산소 및 수소 동위원소 분석을 위한 전처리는 각각 아연에 의한 환원법(Coleman *et al.*, 1982; Kendall and Coplen, 1985)과 H₂O-CO₂ 평형법(Epstein and Mayeda, 1953)에 의하였다. 강수, 지열수 및 지하수 시료에 대한 동위원소 분석은 한국지질자원연구원과 한국기초과학지원연구원서 실시하였다. 시료의 안정동위원소비는 국제표준시료인 V-SMOW와 비교하였으며, 측정 오차는 산소 ±0.1‰, 수소 ±1‰이다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 강수량과 강수 패턴

대전지방기상청(DRMO; 대전광역시 유성구 구성동

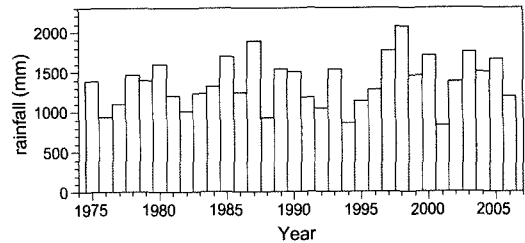


Fig. 2. Yearly precipitation from 1975 to 2006 at Daejeon area. Data are acquired from the Daejeon Weather Bureau.

22번지) 자료에 의하면, 대전지역에서 1975년 이후 30년 동안 과우년(drought year)은 1976년(939.3 mm), 1982년(1007.6 mm), 1988년(920.9 mm), 1994년(857.9 mm), 2001년(828.7 mm)이다(Fig. 2). 과우년은 대체로 6~7년 정도의 주기성을 보였으며, 1982년 이후 최근으로 오면서 과우년 때의 강수량이 점차 줄어들고 있는 양상을 보였다. 반면에, 과우년의 주기성을 기준으로 하였을 때, 과우년과 과우년 사이의 평년에 연평균 강수량 1,353.8 mm을 넘긴 횟수는 1976년~1982년 사이에 3회, 1982년~1988년 사이에 2회, 1988년~1994년 사이에 3회, 1994년~2001년 사이에 4회, 2001년 이후 2006년까지 4회로서 1994년도 이후 최근으로 올수록 과우년과 과우년 사이의 평년에는 강수량이 증가되는 추세를 보였다. 지난 30년간 대전에서 연강수량이 가장 많았던 시기는 1998년으로서, 이 해의 연강수량은 2,070 mm에 달하였다.

동위원소 분석 시료가 채취되었던 2001년~2004년 기간 중에는 일일 50 mm 이상의 호우 발생 횟수가 2001년에 3회, 2002년에 7회, 2003년에 7회, 2004년에 8회를 기록하였다. 즉, 대전지역에서는 최근에 강우강도가 커지고 있으며 일일 50 mm 이상의 집중호우 일수가 점차 늘고 있는 것으로 나타났다. 한편, 2002년~2004년 기간에는 연중 풍수기인 7월~8월 뿐 아니라 갈수기인 4월~5월과 6월중에도 40 mm 이상의 집중호우가 자주 발생하였다.

티센망에 의하면, 연구지역은 대전지방기상청의 기상관측소에 해당되어 전반적인 기상이 상기한 대전지

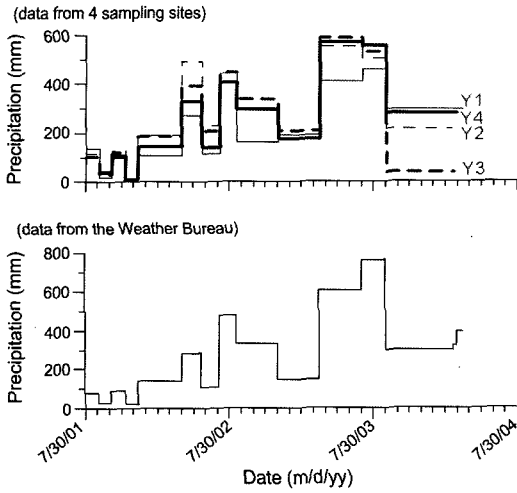


Fig. 3. Comparison of precipitations among 4 sampling sites (Y1~Y4) and the Daejeon Weather Bureau.

역 기상과 유사한 것으로 볼 수 있다. 그러나, 대전에서의 강우는 지형의 영향을 받아 지역적으로 차이를 보이는 경우가 많으며, 대전 시내를 이루고 있는 분지와 서측의 고지대간에 강우 빈도 및 강도가 서로 다른 경우가 많이 발생하고 있다. Table 2는 연구 지역 내 4개 강수 시료 채취 지점에서 측정된 강수 집적량과의 환산 강수량 그리고 대전지방기상청의 강수량 자료를 비교 정리한 것이다. 이 중 2002년 4월 2일~2002년 5월 22일, 2002년 7월 8일~2002년 8월 17일, 2003년 3월 19일~7월 4일, 2003년 7월 5일~9월 2일 기간 중에는 많은 누적 강수량으로 인해 시료 채취기의 집적 용량을 초과하였으며, 시료의 일부가 유실되었다. Fig. 3는 Table 2의 자료를 이용하여 시기별, 위치별 강수량 변화를 대전지방기상청의 강수량 자료와 비교해 본 것이다. 4개 지점 모두에서의 시기별 강수 강도가 대체로 기상청 자료에 의한 강수 강도 변화에 준하

Table 2. Rainfall data observed at four sampling sites and reported by Weather Bureau.

Site No.	Observed Date	Observed amount (ml)	Estimated rainfall (mm)	the Weather Bureau data (mm)	Site No.	Observed Date	Observed amount (ml)	Estimated rainfall (mm)	the Weather Bureau data (mm)
Y1	2001.09.04	6160	136	78.1	Y3	2001.09.03	4760	105	78.1
	2001.10.04	810	17.9	31		2001.10.04	1500	33.2	31
	2001.11.08	4420	97.7	89.8		2001.11.09	5390	119	89.8
	2001.12.11	350	7.7	23.3		2001.12.06	840	7.5	23.3
	2002.04.01	4910	108.6	141.1		2002.04.01	8470	187.3	141.1
	2002.05.22	12260*	271.1	286		2002.05.15	17750*	392.6	278.5
	2002.07.07	5250	116.1	100.9		2002.07.07	9450	209	108.4
	2002.08.17	19980*	441.9	477.8		2002.08.17	20260*	448.1	477.8
	2002.11.30	7270	160.8	332.8		2002.11.30	15320	338.8	332.8
	2003.03.18	8700	192.4	147.4		2003.03.17	9350	206.8	147.4
	2003.07.04	18570*	410.7	605.6		2003.07.04	26500*	586.2	605.6
	2003.09.02	20830*	460.7	765.7		2003.09.01	23920*	529.1	759.2
2004.03.15	13330	294.8	391.9	2004.02.20	1800	39.8	299.7		
Y2	2001.09.03	5140	114	78.1	Y4	2001.10.04	1720	38	31
	2001.10.04	1580	34.9	31		2001.11.09	4790	106	89.8
	2001.11.09	5820	129	89.8		2001.12.05	-	-	23.3
	2001.12.10	340	7.5	23.3		2002.03.29	6610	146.2	141.1
	2002.03.29	8600	190.2	141.1		2002.05.15	15000*	331.7	278.5
	2002.05.16	22400*	495.4	279.5		2002.07.07	6450	142.6	108.4
	2002.07.07	10340	228.7	107.4		2002.08.18	18270*	404.1	477.8
	2002.08.17	18556*	410.4	477.8		2002.11.30	13430	297	332.8
	2002.11.30	13560	299.9	332.8		2003.03.18	7850	173.6	147.4
	2003.03.17	8000	177	147.4		2003.07.05	25780*	570.2	607.1
	2003.07.04	25050*	554.1	605.6		2003.09.02	25.15*	556.3	764.2
	2003.09.01	22800*	504.3	759.2		2004.03.01	12700	280.9	321.2
	2004.02.15	9750	215.6	299.7					

*It is inferred that some part of accumulated rain samples has been overflowed due to excess precipitation compared to the volume of sampler.

여 변화였으나, 위치 및 고도별로 강수 강도의 차이가 있음을 보였다. 2003년 9월 3일~2004년 3월 15일 기간 중에는 Y3 지점(유성 컨트리클럽, 고도 209 m)의 강수량이 다른 3개 지점에 비해 현저히 낮았으나, 이 기간을 제외하면 전반적으로 Y3과 Y2 지점(백운봉, 고도 424 m)의 중산간 지대가 Y1 지점(천황봉, 고도 842 m)의 고지대와 Y4 지점(계룡스파텔 및 한국지질자원연구원, 고도 60 m)의 저지대에 비해 강수량이 많은 양상을 보여 왔다. 해발고도가 가장 높은 Y1 지점은 4개 지점 중 가장 적은 강수량을 보인 경우가 많다.

한편, Y4 지점은 대전지방기상청과 매우 근접 거리에 위치하여 양자간의 강수량 차이가 크지 않을 것으로 예상되는 상황이다. 다투 현상으로 인한 시료 유실이 없던 시기의 강수 자료만을 이용하여 대전지방기상청과 Y4 지점의 강수량 차이를 비교해 보면, 양자간에는 약 30~40 mm 범위 이내의 강수량 차이를 보인다. 이를 고려할 때, 기상청 자료에 비해 Y4 지점의 총 누

적 강수량이 280 mm 정도 적게 측정된 것은 누적 강수량이 가장 많았던 2003년 7월 6일~9월 2일 기간 중에 주로 기인되었으며 이 기간 중에는 207.9(±40) mm 정도 수량의 강수 시료가 유실되었음을 추정할 수 있다.

전반적인 강수 패턴을 볼 때, Y1 지점의 고지대에서 총 강수량이 가장 적었고, Y2, Y3 지점의 중산간 지대에서 가장 강수량이 많은 것으로 관측되었다. 기상청 관측 지점에서 가장 가까이 위치하는 Y4 지점에서의 총 누적강수량은 4개 위치의 중간 수치를 보였으며, Y4 지점이 적어도 2001년 9월부터 2004년 3월까지의 기간 중에는 연구지역에서의 평균치를 보여줄 수 있을 것으로 판단된다.

4.2. 강수, 지하수 및 지열수의 동위원소 조성

적산강수계가 설치된 2001년 7월 30일 이후 2004년 7월 24일까지의 강수 시료에 대한 산소 및 수소 동위원소 조성비($\delta^{18}O$, δD)는 Table 3와 같다. 채취된

Table 3. Oxygen and hydrogen isotopic composition of precipitation at four sampling sites from the Yuseong catchment.

Sampled date	Y1			Sampled date	Y2		
	$\delta^{18}O(‰)$	$\delta D(‰)$	d-value(‰)		$\delta^{18}O(‰)$	$\delta D(‰)$	d-value(‰)
2001-09-04	-7.1	-50.5	6.3	2001-09-03	-6.8	-46.0	8.4
2001-11-08	-13.6	-93.8	15.0	2001-10-04	-9.9	-63.8	15.4
2001-12-11	-5.8	-20.7	25.7	2001-11-09	-12.4	-82.8	16.4
2002-04-01	-7.3	-47.3	11.1	2001-12-10	-7.9	-44.3	18.9
2002-05-22	-6.2	-38.2	11.4	2002-03-29	-7.1	-41.8	15.0
2002-07-07	-7.4	-50.2	9.0	2002-05-16	-5.7	-32.3	13.3
2002-11-30	-10.0	-63.4	16.6	2002-07-07	-7.3	-51.5	6.9
2003-03-18	-8.3	-65.8	0.6	2002-11-30	-8.9	-61.3	9.9
2003-07-04	-9.1	-63.8	9.0	2003-03-17	-10.1	-63.7	17.1
2003-09-02	-7.8	-55.5	6.9	2003-07-04	-8.3	-57.0	9.4
2004-07-24	-7.0	-47.3	8.7	2003-09-01	-8.4	-59.0	8.2
				2004-02-15	-7.7	-46.9	14.7
				2004-06-26	-7.6	-47.6	13.2
				2004-07-24	-7.4	-49.5	9.7

Sampled date	Y3			Sampled date	Y4		
	$\delta^{18}O(‰)$	$\delta D(‰)$	d-value(‰)		$\delta^{18}O(‰)$	$\delta D(‰)$	d-value(‰)
2001-09-03	-7.2	-48.6	9.0	2001-07-15	-7.2	-48.2	9.4
2001-10-04	-9.4	-64.3	10.9	2001-10-04	-9.5	-65.6	10.4
2001-11-09	-11.9	-85.4	9.8	2001-11-09	-11.5	-80.8	11.2
2002-04-01	-7.1	-40.4	16.4	2002-03-29	-6.5	-37.6	14.4
2002-05-15	-4.9	-27.4	1.8	2002-05-15	-6.1	-39.6	9.2
2002-07-07	-7.0	-47.5	8.5	2002-07-07	-9.2	-64.7	8.9
2002-11-30	-9.8	-68.1	10.3	2002-11-30	-8.4	-50.5	16.7
2003-03-17	-9.1	-55.7	17.1	2003-03-18	-7.0	-49.8	6.2
2003-07-04	-8.2	-55.3	10.3	2003-09-02	-4.1	-22.2	10.6
2003-09-01	-6.0	-45.7	2.3	2004-06-26	-7.2	-51.1	6.5
2004-07-24	-4.4	-29.3	5.9	2004-07-23	-6.7	-47.5	6.1

d-value: deuterium excess value= $\delta D - 8 \times \delta^{18}O$

시료 중 일부는 분실되어 동위원소 분석이 이루어지지 못한 것도 있다. 이 기간 내 강수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 $-4.1\sim -13.6\text{‰}$, δD 값은 $-22\sim -94\text{‰}$ 범위를 보였으며, 2001년 9월부터 2001년 11월까지 내린 강수의 동위원소 조성이 $\delta^{18}\text{O}=-9.4\sim -13.6\text{‰}$, $\delta\text{D}=-64\sim -94\text{‰}$ 로서 가

장 가벼운 값을 보였다. 이 기간 중의 강수의 δD 와 $\delta^{18}\text{O}$ 의 관계는 Craig(1961)의 순환수선(Global Meteoric Water Line; GMWL) $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$ 에 잘 일치하는 양상을 보인다(Fig. 4).

4개 적산강수계가 설치된 지점들은 거리상 차이가 크지 않음에도 불구하고 전반적으로 동일 강수시기의 동위원소 조성이 위치별로 차이를 보이는 경우가 많다(Fig. 5(a), 5(b)). 이는 상대적인 거리는 가깝지만 고도에 따른 효과가 있거나 혹은 대전시내의 기상이 지역별 지형에 따른 영향을 받는 것과 연관이 있다. 2001년 11월 9일~12월 11일 기간 중에는 고도가 가장 높은 Y1 지점의 강수 시료가 가장 무거운 수소동위원소 값을 보인 반면에, 2003년 3월 18일~9월 2일 기간 중에는 고도가 가장 낮은 Y4 지점의 강수 시료가 가장 무거운 수소 및 산소 동위원소 조성을 보였다. 따라서, 강수 발생 시 고도에 따른 동위원소비 값이 일률적으로 커지거나 작아지는 경향은 없어 보인다. 그러나, 각 지점에서의 강수량에 따른 가중 평균치를 구해 보면(Fig. 5 (a), 5(b)에서 십자 표시), 고도가 높아지면서 산소 및 수소 동위원소 조성이 점차 가벼워지는 경향을 볼 수 있다. 이로 보아, 장기간 누적된 강수의 평균 동위원소 조성은 어느 정도 고도 효과를 받

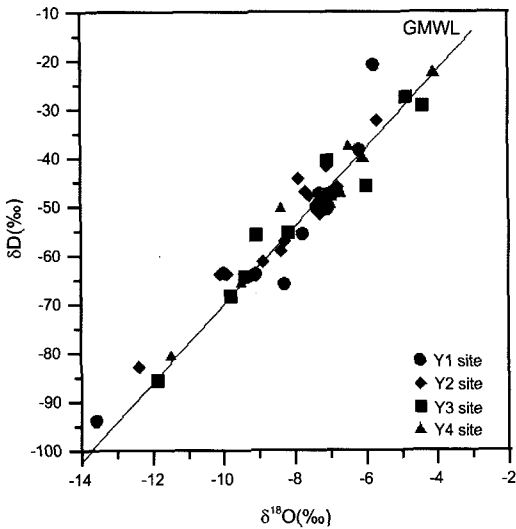


Fig. 4. $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ relationship for rain at a Yuseong catchment area during 4 years from 2001 to 2004.

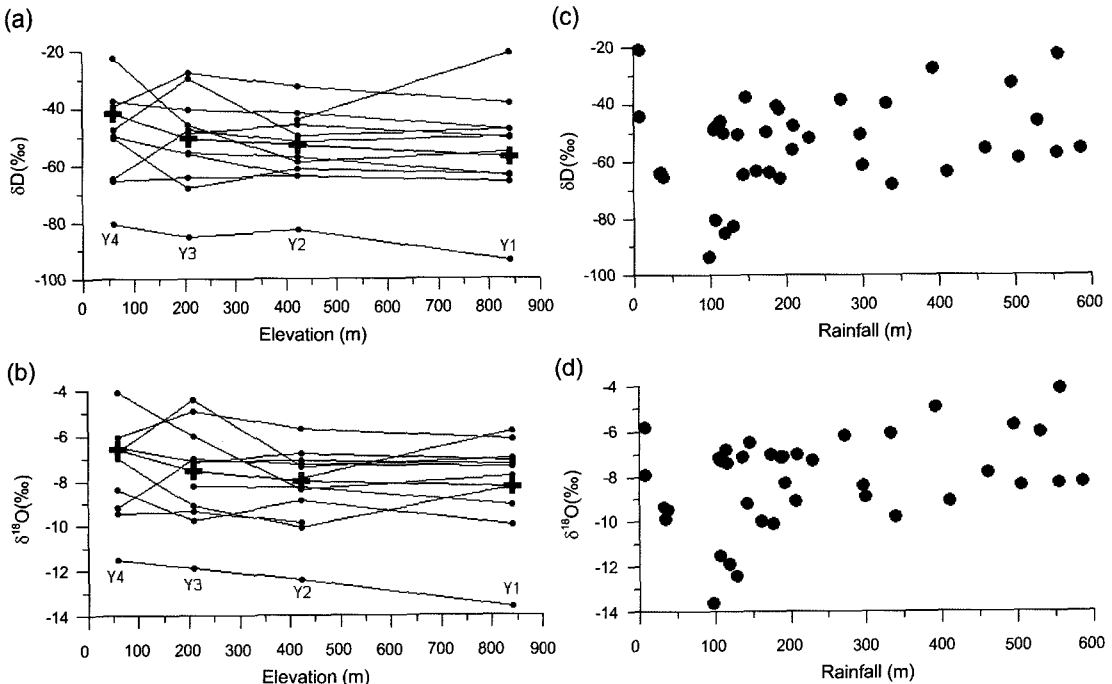


Fig. 5. Relationships among δD , $\delta^{18}\text{O}$, elevation and amount of rainfall at study site. Bold cross symbols in (a) and (b) means weighted average values at each sites.

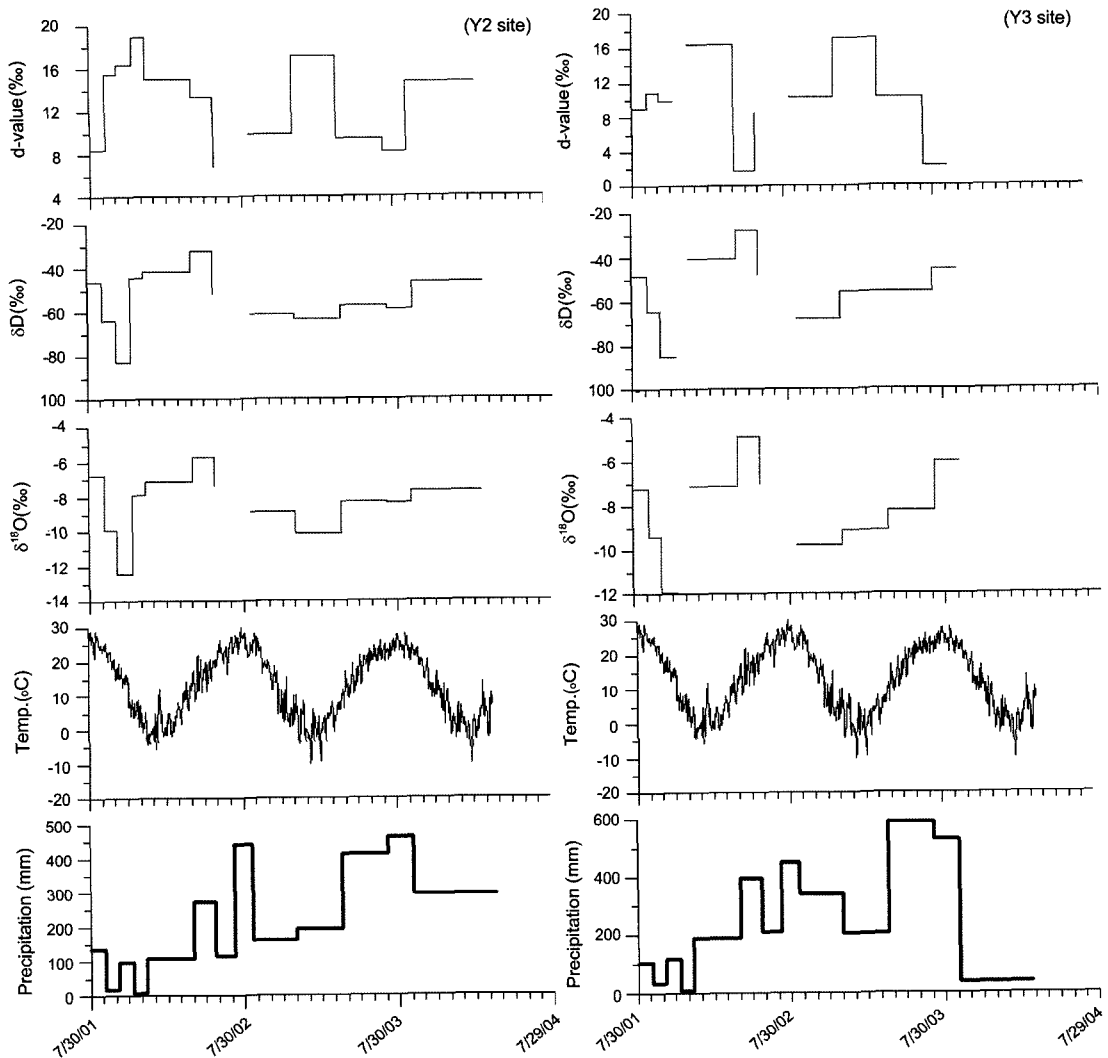


Fig. 6. Variations of precipitation, temperature, $\delta^{18}\text{O}$, δD and d-value from the Y2 and Y3 sites.

영하고 있을 것으로 추정된다. 한편, 강수량과 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 값의 상관관계에서(Fig. 5(c), 5(d)), 양자간에 뚜렷한 비례 관계를 보이지는 않지만 강수량이 많은 경우에는 상대적으로 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 조성이 무거워지는 경향을 보였다.

Fig. 6는 비교적 연속적인 자료 취득이 가능했던 Y2, Y3 지점에 대하여 2001년부터 2004년까지의 우량 변화 및 온도 변화에 따른 δD , $\delta^{18}\text{O}$, 수소 과잉 값($d\text{-value} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$)의 변화를 비교해 본 것이다. 2001년도는 과거기로서 9월~12월 기간 중의 강수량이 적었으며, 10월 초에서 11월 중순까지의 강수는 다른 기간 중의 강수에 비하여 산소 및 수소 안정동위원소비가 가벼웠던 것으로 나타났다. Y2, Y3 지점에서는 온

도가 낮은 겨울철에 d 값은 10 이상으로 높고 온도가 높은 여름철에는 d 값이 10 이하로 낮아지는 양상을 보였다. 또한, Y2, Y3 지점에서는 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 값의 변화가 우량 변화와 비례적으로 동조되는 반면에, d 값의 변화는 우량 변화와 반대 양상을 보이는 경향도 어느 정도 보여, 강수의 동위원소 조성 변화에는 온도와 우량 효과가 복합적으로 반영되고 있는 것으로 해석된다.

2001년 11월 8일부터 2002년 3월 29일까지 연구 유역에서 갈수기에 채취한 강수의 pH 및 전기전도도(EC) 값은 Table 4와 같다. 빗물의 pH는 4.9~6.0, EC는 9.5~53.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 눈의 pH는 5.1~6.4, EC는 59.4~179.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 범위를 보였다. 연구 유역에서의 강수는 모두 산성을 나타냈으며, 빗물에 비해 눈의 전기

Table 4. pH and electric conductivity(EC) values of rain and snow from the study area.

Date	Y1		Y2		Y3		Y4	
	pH	EC(μ S/cm)	pH	EC(μ S/cm)	pH	EC(μ S/cm)	pH	EC(μ S/cm)
2001.11.08	5.8	16.4						
2001.11.09			5.8	10.2	5.5	9.5	5.8	16.4
2001.12.05							6.4 ^s	176.1 ^s
2001.12.06			6.3 ^s	59.4 ^s	5.1 ^s	75.1 ^s		
2001.12.10			5.4 ^s	179.8 ^s				
2001.12.11	5.8 ^s	73.4 ^s						
2002.03.29			4.9	34.1			6.0	53.9

s: snow sample, others: rain sample

Table 5. Oxygen and hydrogen isotopic composition of cold and thermal groundwater within the Yuseong Spa area.

(a) cold groundwater (outflowing temperature < 25°C)

Well No.	Nov., 2001		Aug.-Sep., 2002		Mar., 2003	
	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$
19	-8.0	-54	-7.9	-55	-8.1	-55.4
G1	-8.1	-55	-	-	-7.9	-57.2
G5	-8.5	-61	-8.4	-60	-8.3	-58.8
G9	-8.4	-57	-8.2	-59	-8.2	-59.9
G11	-8.1	-54	-8.0	-55	-	-

(b) thermal groundwater (outflowing temperature > 25°C)

Well No.	Nov., 2001		Aug.-Sep., 2002		Mar., 2003	
	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$
4	-	-	-	-	-7.9	-55.6
5	-8.1	-58	-8.2	-59	-8.1	-58.6
6	-	-	-	-	-8.0	-56.0
7	-	-	-	-	-7.9	-57.0
9	-	-	-	-	-8.5	-60.7
10	-8.6	-59	-8.6	-58	-8.6	-59.8
14	-7.9	-54	-8.0	-54	-8.0	-58.0
16	-	-	-8.0	-59	-8.0	-58.1
24	-8.5	-60	-8.5	-56	-8.4	-59.9
25	-8.4	-58	-8.4	-57	-	-
29	-7.9	-52	-	-	-8.0	-56.1
30	-	-	-8.1	-54	-8.0	-58.6
Gu-3	-8.3	-56	-8.3	-55	-8.3	-58.1
Shin-2	-	-	-	-	-8.0	-57.0
G4	-	-	-	-	-8.3	-56.9
Gu-1	-	-	-	-	-8.4	-59.5

전도도 값이 상대적으로 높게 검출되었다.

2001년 11월부터 2003년 3월까지 유성온천지구 내에서 채취한 지열수 및 지하수의 산소, 수소 안정동위원소 조성은 Table 5와 같다. 2001년도에 지열수는 $\delta^{18}\text{O} = -7.9 \sim -8.6\text{‰}$, $\delta\text{D} = -52 \sim -60\text{‰}$, 지하수는 $\delta^{18}\text{O} = -8.0 \sim -8.5\text{‰}$, $\delta\text{D} = -54 \sim -61\text{‰}$, 2002년도에 지열수는 $\delta^{18}\text{O} = -8.0 \sim -8.6\text{‰}$, $\delta\text{D} = -54 \sim -59\text{‰}$, 지하수는 $\delta^{18}\text{O} = -7.9 \sim -8.4\text{‰}$, $\delta\text{D} = -55 \sim -60\text{‰}$, 2003년도에 지열수는 $\delta^{18}\text{O} = -7.9 \sim -8.6\text{‰}$, $\delta\text{D} = -56 \sim -61\text{‰}$, 지하수는 $\delta^{18}\text{O}$

$= -7.9 \sim -8.3\text{‰}$, $\delta\text{D} = -55 \sim -60\text{‰}$ 의 범위로서, 2001년부터 2003년까지 매년 지열수와 지하수간에 동위원소 조성의 차이가 거의 없는 것으로 나타났으며, 동일 관정에서 채취된 시료의 채취 시기별 동위원소 조성 변화도 거의 없는 것으로 나타났다. 지열수 및 지하수 시료가 채취될 당시의 토출온도 자료(Moon *et al.*, 2005, 2006)를 이용하여 온도와 산소·수소 동위원소비 값의 관계를 도시해 보면(Fig. 7) 양자간의 상관성이 없는 것으로 나타난다. 즉, 연구지역에서 2001년부터 2003년

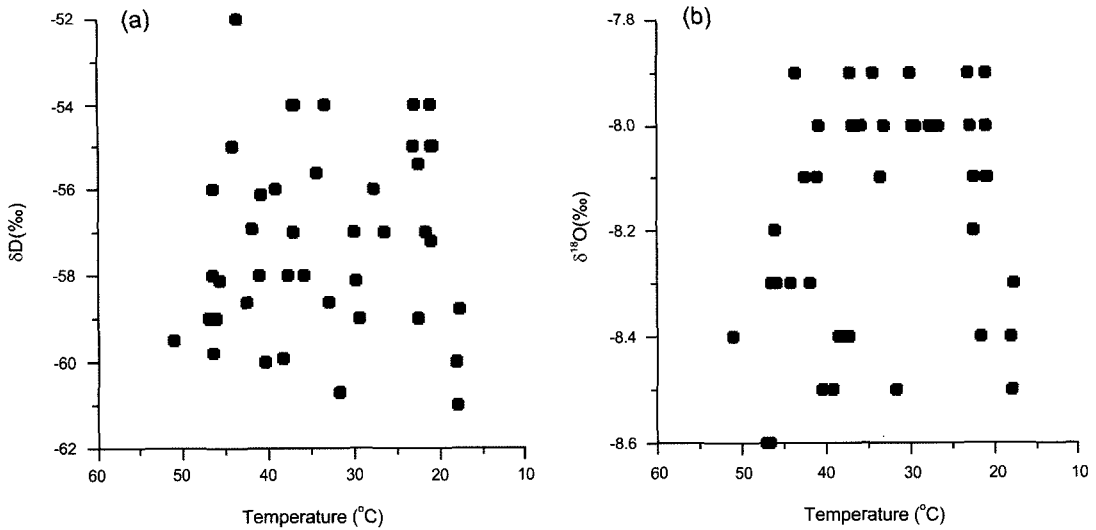


Fig. 7. Relationship between temperature and isotopic composition for groundwater and geothermal water from 2001 to 2003. (a) T-δD plot, (b) T-δ¹⁸O plot.

동안 산출된 지하수 및 지열수의 동위원소 조성은 온도에 의한 분별작용은 없었던 것으로 해석된다.

4.3. 동위원소적 순환 특성에 대한 고찰

연구지역에서의 지하수 및 지열수의 산소·수소 안정동위원소 조성은 Craig(1961)의 순환수선상이나 그 부근에 해당하는 것으로 나타나 순환수 기원임을 지지하였다(Fig. 8). 지하수와 지열수간에 안정동위원소 조성의 차이가 별로 없는 것은 양자간에 동위원소적 순환 및 연결성이 양호함을 지시해 준다.

강수가 지하수 및 지열수의 동위원소비 값에 미치는 영향을 알아보기 위해 지하수 및 지열수와 이들의 시료 채취 시기 직전의 강수 시료들을 상호 비교하였다. 2001년도에는 11월에 채취된 지열수와 지하수의 시료를 2001년 9월 4일~11월 4일 기간 중 강수의 동위원소 자료와 비교해 보았다(Fig. 8(a)). 이 기간 중의 일부 강수에서는 지열수 및 지하수에 비해 산소와 수소 동위원소비 값이 각각 3~4‰, 30~40‰ 정도 작은 것으로 나타났다. 2002년도에는 8월~9월 기간 중에 채취된 지열수와 지하수의 시료를 2002년 3월 29일~7월 7일 기간 중 강수의 동위원소 자료와 비교한 결과(Fig. 8(b)), 이 기간 중 강수의 대부분 산소·수소 동위원소비 값은 지열수 및 지하수에 비해 무거운 값을 나타내는 경향을 보였다. 2003년도에도 3월의 지열수 및 지하수 시료를 그림 8(c)와 같이 2003년 3월 17일~3월 18일 기간 중에 채취된 강수의 동위원소 자료와 비교한 결과, 지열수 및 지하수의 산소·수소 동

위원소비는 강수의 범위에 들어 있음을 보였다.

이와 같이, 2001년과 2002년의 산소·수소 동위원소비를 비교해 볼 때, 온천지구내 지열수와 지하수는 수 개월 이내에 발생된 강수의 산소·수소 동위원소비 값과는 직접적인 연관성이 없는 경우가 많았다. 이러한 현상은 일시적인 강수 현상이 온천지구의 지열수 대수층 함양에 큰 영향을 미치지 못하는 것을 지시하는 것으로 해석된다.

2001년~2003년 기간 중에 동일 관정에서 채취한 지열수 및 지하수의 동위원소 조성은 모두 δ¹⁸O = -7.9~-8.6‰, δD = -52~-61‰ 범위로서 3년간 시기별로 차이를 보이지 않고 동위원소 조성이 거의 일정함을 보였다. 그러나, 강수량을 고려하여 강수의 산소·수소 동위원소 조성의 연도별 가중 평균값(δ = ΣP_iδ_i/ΣP_i, P_i는 누적강수량, δ_i는 산소 및 수소 동위원소 조성)을 구해보면, 2001년도에 δ¹⁸O = -9.9‰, δD = -68‰, 2002년도에 δ¹⁸O = -7.2‰, δD = -46‰, 2003년도에 δ¹⁸O = -7.6‰, δD = -52‰로서 연도별로 차이를 보였다. Fig. 8(d)는 2001년부터 2004년까지 지열수 및 지하수와 함께 고도를 서로 달리하는 4개 지점에서의 강수의 산소·수소 동위원소 조성을 비교해 본 것이다. 유성온천지구가 포함된 유역내에서 4년간의 강수가 보이는 동위원소 범위는 매우 광범위하였으며, 유성온천의 지열수는 이와 같이 장기간에 걸친 건기-우기 강수의 동위원소 조성에 의해 혼합된 영향을 받고 있을 것으로 판단된다. 한편, 강수량을 고려한 3년간의 동위원소 가중 평균값을 구해보면, δ¹⁸O = -7.7‰, δD =

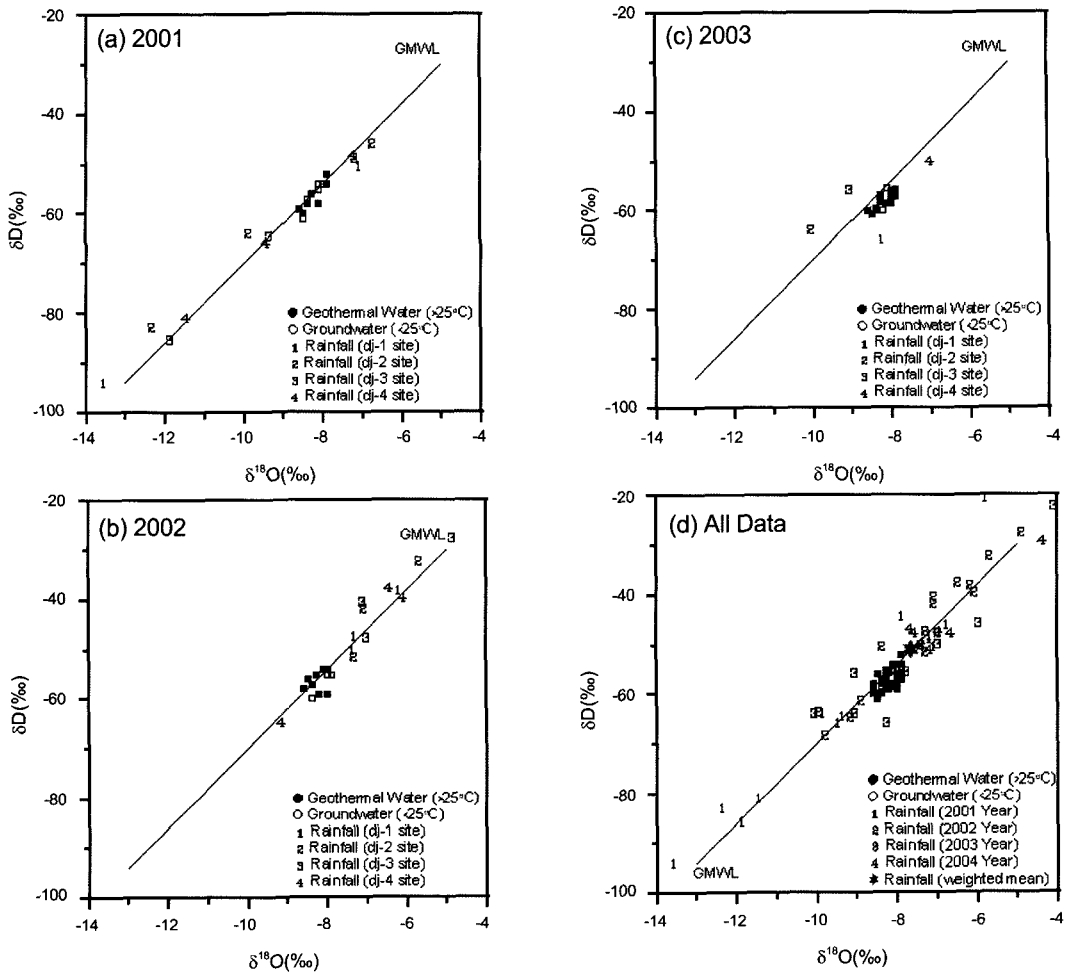


Fig. 8. δD - $\delta^{18}O$ plots for rainfall, groundwater, geothermal water in study area. (a) 2001 year, (b) 2002 year, (c) 2003 year, (d) all data plot.

-51‰(Fig. 8(d)에서의 별 표시)로서, 2001년부터 2003년까지 온천지구내 지열수 및 지하수의 안정동위원소 조성 범위에 비해 높은 값이다. 이와 같이, 3년간 강수의 동위원소 조성은 변화를 보여 왔으나, 동일 기간 중에 지하수 및 지열수의 동위원소 조성에는 변화가 나타나지 않는 점, 그리고 3년간 강수의 동위원소 가중 평균값이 동일 시기의 지하수 및 지열수의 동위원소 조성 범위보다 큰 점 등으로 보아, 연구지역에서는 2~3년 정도의 단기적 강수의 동위원소 조성 변화가 지열수나 지하수의 조성 변화에 직접적인 영향을 주지 못하였던 것으로 판단된다.

Fig. 9(a)는 유성 소유역 인근의 한국기초과학지원연구원 부지(Fig. 1의 KBSI)에서 1993년~1994년, 1996년~1997년에 채취한 강수의 δD , $\delta^{18}O$ 값(Lee and

Chang, 1994; Lee and Lee, 1999), 한국원자력연구소 부지(Fig. 1의 KAERI)에서 1994년~1995년에 채취한 강수의 δD , $\delta^{18}O$ 값(Yuseong-gu Office, 1997)을 함께 도시한 것이다. 한국원자력연구소 부지에서 1993년~1994년에 채취한 강수의 $\delta^{18}O$ 값은 -25.7~+2.3‰, δD 값은 -192~+5‰ 범위로서 매우 폭넓은 변화를 보였으며, 1993년의 강수는 Craig(1961)의 순환수선(GMWL)에서 벗어난 경우가 많다. Lee and Chang(1994)에 의하면, 1993년과 1994년도에는 강수에 비해 눈의 산소 및 수소 동위원소비 값($\delta^{18}O = -25.7 \sim -10.2\%$, $\delta D = -192 \sim -53\%$)이 매우 낮은 상태를 보였으며, 전반적으로 가물었던 1994년도(강수량 857.9 mm)에 동위원소 조성 범위가 매우 폭넓게 나타났다. 가물어듬해인 1995년도에는 강수의 동위원소비 값이 $\delta^{18}O$

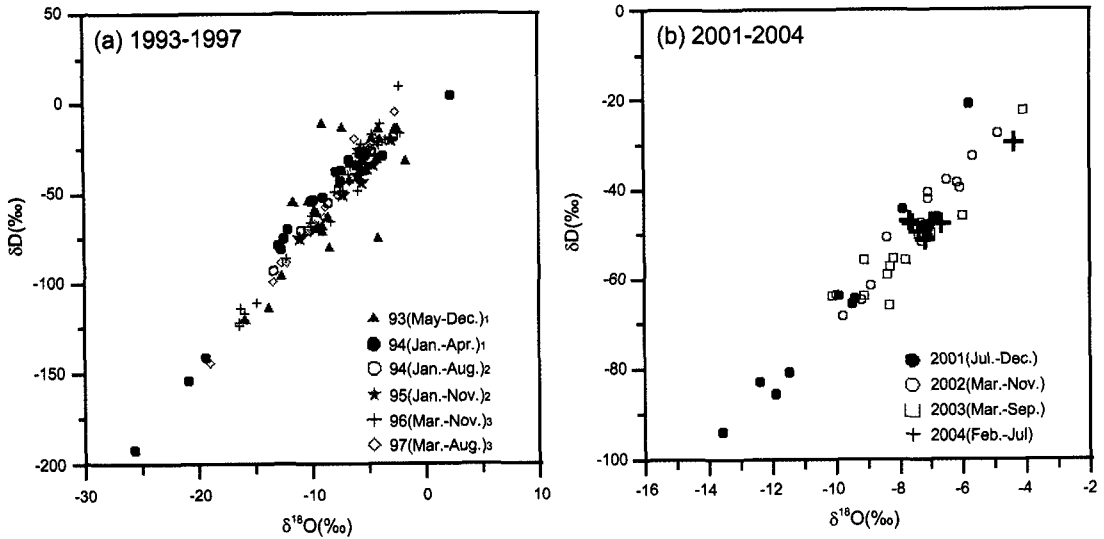


Fig. 9. Variation of hydrogen and oxygen isotopic compositions in precipitations from 1993 to 1997(a) and from 2001 to 2004(b). Data are cited from Lee and Chang(1994)¹, Yuseong-gu Office(1997)² and Lee and Lee(1999)³.

=-13.5~-2.7‰, δD=-93~-18‰ 로써 1994년도에 비해 비교적 무거운 동위원소비 값을 나타내는 경향을 보였다. 그리고, 1996년과 1997년에는 다시 가벼운 동위원소비 값을 나타내고 범위가 넓어지는 경향을 보였다.

Fig. 9(b)는 2001년~2004년 기간 중에 연구지역 4개 지점(Y1~Y4)에서 채취한 강수의 δD, δ¹⁸O 값을 연도별로 도시한 것이다. 2001년도의 강수량은 828.7 mm로서 비교적 심한 가우년이었으며, 이 시기의 동위원소 조성은 δ¹⁸O=-13.6~-5.8‰, δD=-94~-21‰로서 1995년도의 동위원소 조성 과 유사한 범위를 보였다. 그러나, 이듬해인 2002년과 2003년도의 동위원소 조성은 각각 δ¹⁸O=-10.0~-4.9‰, δD=-68~-27‰ 과 δ¹⁸O=-10.1~4.1‰, δD=-66~-22‰이고, 2004년도의 동위원소 조성은 δ¹⁸O=-7.7~-4.4‰, δD=-51~-29‰로서, 2001년에 비해 2004년으로 가면서 산소·수소 동위원소비 값이 무거워진 경향을 보였다. 1998년부터 2000년까지 3년간의 자료가 없긴 하나, 1993년부터 2004년까지 약 11년간의 자료를 종합해 볼 때, 연구 유역과 인근에 내린 강수의 산소·수소 동위원소 비 값이 가우년에 상대적으로 가벼워지는 경향성을 엿볼 수 있다.

Fig. 10은 기존 자료(Yuseong-gu Office, 1997; Kim et al., 2000)와 금번 자료를 이용하여 1990년부터 2003년까지 유성온천지구내의 지열수 및 지하수에 대한 산소·수소 동위원소 조성 변화를 도시한 것이다. 지열수 및 지하수의 동위원소 조성은 1990년과 1992

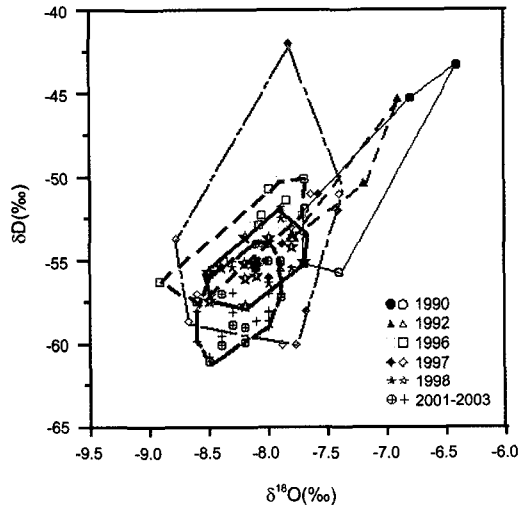


Fig. 10. δD-δ¹⁸O plots for groundwater and geothermal water in study area from 1990 to 2003. (Closed symbols; groundwater, Open symbols; geothermal water).

년도에 δ¹⁸O=-7.8~-6.4‰, δD=-56~-43‰, 1996년의 경우에는 δ¹⁸O=-8.9~-7.7‰, δD=-57~-50‰로서 산소 및 수소 동위원소 조성이 1990년 및 1992년도에 비해 1996년도에 상대적으로 가벼워진 양상을 보였다. 1997년도에는 수소 동위원소 조성이 매우 분산된 경향을 보였으나 산소 동위원소 조성은 1996년도와 거의 유사한 범위를 보였다. 1998년도에는 δ¹⁸O=-8.5~-7.7‰, δD=-58~-52‰, 2001년~2003년도에는 δ¹⁸O

= $-8.6\sim-7.9\%$, $\delta D=-61\sim-52\%$ 로서, 지열수 및 지하수의 수소 동위원소 조성이 1996년도에 비해 1998년과 2001년~2003년으로 가면서 약간씩 가벼워지는 경향을 보였다(Fig. 10). 이와 같은 변화는 온천지구에서의 지열수 및 지하수 사용량 변화와 관계가 있어 보인다. Moon *et al.*(2006)에 의하면, 유성온천지구에서의 연간 온천수 사용량은 1990년과 1992년 사이에 1,167,378~1,352,927 m³이었으나 1993년과 1994년도에 1,927,975~1,900,423 m³로 급증하였으며, 1998년도의 1,247,498 m³까지 감소하였다. 2000년도에 1,528,094 m³까지 일시 증가하다가 이후 감소 추세를 보였으며, 2004~2005년도에는 1,000,000 m³ 미만으로 급감하였다. 즉, 1993년과 1994년도에 가장 온천수 사용량이 많았으며, 이 시기에는 전반적으로 수위가 저하되어 이전과 이후의 지열수 및 지하수 산출 심도에 차이가 있었을 것으로 추정된다.

한편, 2001년부터 2003년까지의 기간 중에는 지하수와 지열수간에 동위원소 조성차가 없는 것으로 나타났으나, 1990년부터 1998년까지의 기간 중에는 지열수에 비해 지하수의 동위원소 조성이 다소 무거운 특징을 보였다. 즉, 1990~1998년 기간 중에는 지열수와 지하수간에 동위원소적으로 어느 정도 분별된 양상을 보여 왔으나, 2000년대에 들어서면서는 양자가 혼재된 양상을 보였다. 이는 장기간에 걸쳐 많은 양의 지열수와 지하수를 사용하는 것이 수위를 저하시키고 이로 인해 이전까지 분리되어 있었던 지열수와 지하수가 동위원소적으로는 혼합될 수 있음을 추론케 해준다.

5. 결 언

유성 소유역내 강수와 지열수의 산소 및 수소동위원소 분석 결과는 다음과 같다.

(1) 2001년 7월 30일 이후 2004년 7월 24일까지의 기간 중에 연구지역에서의 강수의 산소·수소 동위원소 조성비는 $\delta^{18}O=-4.1\sim-13.6\%$, $\delta D=-22\sim-94\%$ 범위를 보였으며, δD 와 $\delta^{18}O$ 의 관계는 천수기원을 지지하였다. 이 중 2001년 9월부터 11월까지 내린 강수의 동위원소 조성이 $\delta^{18}O=-9.4\sim-13.6\%$, $\delta D=-64\sim-94\%$ 로서 가장 가벼웠으며, 이후 2004년까지 점차 무거워지는 경향을 보였다.

(2) 4개 지점에서 채취된 강수의 가중평균 동위원소 비 값은 고도 효과와 우량 효과를 반영하였다. Y2, Y3 지점에서는 δD , $\delta^{18}O$ 값의 변화가 우량 변화와 비례적

으로 동조되는 반면에, d 값의 변화는 우량 변화와 반대 양상을 보여, 강수의 동위원소 조성 변화에는 온도와 우량 효과가 복합적으로 반영된 것으로 해석된다.

(3) 2001년 11월부터 2003년 3월까지 유성온천지구 내에서 채취한 지열수 및 지하수의 산소 및 수소 동위원소 조성은 $\delta^{18}O=-7.9\sim-8.6\%$, $\delta D=-52\sim-61\%$ 범위이며, 매년 지열수와 지하수간에 동위원소 조성의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 또한, 동일 관정에서 채취된 시료에서의 시기별 동위원소 조성 변화도 거의 없는 것으로 나타났으며, 온도 차이에 의한 동위원소 분별작용도 없었던 것으로 해석된다.

(4) 2001년부터 2003년까지 3년간 강수와 지하수 및 지열수의 동위원소 조성을 비교해 본 결과, 연구지역에서는 2~3년 정도의 단기적 강수의 동위원소 조성 변화가 지열수나 지하수의 조성 변화에 큰 영향을 주지 못하였던 것으로 판단된다.

(5) 1993년부터 2004년까지 자료를 종합해 볼 때, 연구 유역과 인근에 내린 강수의 산소·수소 동위원소 비 값이 과우년에 상대적으로 가벼워지는 경향성을 보였다.

(6) 1990~1998년 기간 중에는 지열수에 비해 지하수의 동위원소 조성이 다소 무거운 양상을 보여 양자간에 동위원소적 분별작용이 있었던 것으로 해석되나, 2000년대에 들어서면서는 양자가 혼재된 양상을 보였다. 이는 온천지구에서 장기간에 걸쳐 많은 양의 지열수 및 지하수를 사용하는 것이 양자의 수리화학적 연결을 초래할 수 있음을 추론케 해준다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 '청정 대용량 지하수자원 확보 기술개발(07-3211)' 과제의 일환으로 수행되었습니다. 이 논문 작성시 사용된 자료 중 일부는 유성구온천개발사업소한국지질자원연구원의 '유성온천지구 온천자원조사 보고서(Moon *et al.*, 2005)'를 활용하였습니다. 논문에 대하여 세심한 심사와 유익한 조언을 해주신 심사위원들께 감사를 드립니다.

참고문헌

- Clark, I. D. and Fritz, P. (1997) Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, New York, 328p.
Coleman, M. C., Sheperd, T. J., Durham, J. J. and Rouse, J. E. (1982) Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis. Anal. Chem., v. 54, p. 993-995.

- Cortes, A. and Farvolden, R. N. (1989) Isotope studies of precipitation and groundwater in 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.
- DRMO(Daejeon Regional Meteorology Office) <http://daejeon.kma.go.kr>
- Epstein, S. and Mayeda, T. K. (1953) Variation of ^{18}O content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 4, p. 213-224
- Gedzelman, S. D., Lawrence, J. R., White, J. W. C. and Smiley (1987) The isotopic composition of precipitation at Mohonk Lake, New York: the amount effect. *J. Geophys. Res.*, 92, p. 1033-1040.
- Jeong, J., Suh, M., Kim, K. and Hwang, H. (1997) Characterization on the geological structures and geothermal gradient distribution in the Yusong area. *Jour. Eng. Geol.*, v. 7, n. 3, p. 173-189.
- Kendall, C. and Coplen, T. B. (1985) Multisample conversion of water to hydrogen by zinc for stable isotope determination. *Anal. Chem.*, v. 57, p. 1438-1440.
- Kim, G., Koh, Y. K., Kim, C. S., Bae, D. S. and Park, M. E. (2000) Geochemical studies of geothermal waters in Yusong geothermal area. *Jour. Korean Soc. Groundwater Environ.*, v. 7, No. 1, p. 32-46.
- Kim, K. H. and Nakai, N. (1988) Isotopic compositions of precipitations of precipitations and groundwaters in South Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 24, n. 1, p. 37-46.
- 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., Gedzelman, S. D., White, J. W. C., Smiley, D. and Lazov, P. (1982) Storm trajectories in eastern US D/H isotopic composition of precipitation. *Nature*, 296, p. 638-640.
- Lawrence, J. R. and White, J. W. C. (1984) Growing season precipitation from D/H ratios of Eastern White Pine. *Nature*, 311, 558-560.
- 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*. p. 169-185.
- Lee, K. S. and Chang B. U. (1994) Oxygen and hydrogen isotopic composition of precipitation in Taejeon and Seoul, Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 30, n. 5, p. 475-481.
- Lee, K. S. and Lee, C. B., 1999, Oxygen and hydrogen isotopic composition of precipitation and river waters in South Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 35, n. 1, p. 73-84.
- Lee, K. S., Woo, N. C. and Kim, K. (2001) Factors controlling stable isotope composition of precipitation in Northeast Asia. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 37, n. 2, p. 183-192.
- Martinelli, L. A., Victoria, R. L., Stemberg, L. S. L., Ribeiro, A. and Moreira, M. Z. (1996) Using stable isotopes to determine sources of evaporated water to the atmosphere in the Amazon basin. *J. Hydrol.*, v. 183, p. 191-204.
- Moon, S. H., Ha, K., Cho, S., Koh, D., Kim, Y. and Kim, S. (2005) Report for estimating geothermal resources at the Yuseong Spa area. Yuseong-gu office and KIGAM's Report. 291p.
- Moon, S. H., Ha, K., Kim, Y. and Cho, S. (2006) Characteristics of water levels and occurrences of thermal groundwater at the Yuseong spa area. *Econ. Environ. Geol.*, v. 39, No. 5, p. 537-554.
- Peterson, B. C., Howarth, R. W. and Garritt, R. H. (1985) Multiple stable isotopes used to trace the flow of organic matter in estuarine food webs. *Science*, v. 227, p. 1361-1363.
- Yapp, C. J. and Epstein, S. (1985) Seasonal contribution to the climatic variations recorded in tree ring D/H data. *J. Geophys. Res.*, 89(D2), p. 3747-3752.
- Yurtsever, Y. and Gat, J. R. (1981) Atmospheric waters. In: Gat, J. R. and Gonfiantini, G. (eds.) *Stable isotope hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle*, IAEA Technical Reports Series, n. 210, p. 103-142.
- Yuseong-gu Office (1997) Report for estimating geothermal resources at the Yuseong Spa area. 445p.