

안정동위원소를 이용한 제주삼다수 유역의 지하수 함양 특성 연구

신영승¹ · 김태형¹ · 문수형^{1*} · 윤성택² · 문덕철¹ · 한희주¹ · 강경구¹

¹제주특별자치도개발공사 수자원연구팀

²고려대학교 지구환경과학과

A Study on the Recharge Characteristics of Groundwater in the Jeju Samdasoo Watershed Using Stable Water Isotope Data

Youngsung Shin¹ · Taehyeong Kim¹ · Suhung Moon^{1*} · Seong-Taek Yun²
Dukchul Moon¹ · Heejoo Han¹ · Kyounggu Kang¹

¹Water Resources Research Team, Jeju Special Self-Governing Province Development Co., Jeju 63345 Korea

²Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 02841, Korea

ABSTRACT

This study evaluated monthly, seasonal and altitudinal changes of oxygen and hydrogen isotope compositions of wet precipitation samples (n = 238) that were collected for last four years from 7 altitudes (from 265 to 1,500 m above sea level) in the Jeju Samdasoo watershed at the southeastern part of Jeju island, in order to examine the recharge characteristics of groundwater that is pumped out for the production of the Samdasoo drinking mineral water. Precipitation samples showed a clear seasonal change of O-H isotopic composition as follow, due to the different air masses and relative humidity: $\delta D = 7.3\delta^{18}O + 11.3$ ($R^2 = 0.76$) in the wet season (June to September), while $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 9.5$ ($R^2 = 0.91$) in the dry season (October to May). In contrast, the stable isotope compositions of groundwater were nearly constant throughout the year and did not show a distinct monthly or seasonal change, implying the well-mixing of infiltrated water during and after its recharge. An altitudinal effect of the oxygen isotope compositions of precipitation was also remarkable with the decrease of -0.19‰ ($R^2 = 0.91$) with the elevation increase by 100 m. Based on the observed altitudinal change, the minimum altitude of groundwater recharge was estimated as 1,200 m above the sea level in the Jeju Samdasoo watershed.

Key words : Groundwater recharge, Jeju Samdasoo watershed, Recharge altitude, Oxygen and hydrogen isotopes of precipitation

1. 서 론

강우로부터 출발되는 자연수의 순환시스템을 이해하는데 있어 산소-수소 안정동위원소 조성이 매우 유용하게 활용된다. 특히, 강우와 지하수의 물 안정동위원소 조성은 지하수 함양 및 유동 특성, 물의 기원과 이동 기작 등에

관한 수리지질학적 연구에서 매우 유용한 추적자이다 (Clark and Fritz, 1997). 강수는 지표수와 지하수의 함양 원을 이루지만, 지표수와 지하수의 물 동위원소 조성은 함양 환경 및 특성에 따라 서로 다른 양상으로 나타난다. 즉, 지하수의 경우 수년간에 걸쳐 강수가 불포화대를 통과하는 동안에 물의 산소-수소 안정동위원소 성분의 계절적 변화는 완화되며, 이로 인해 적정 심도 이하의 지하수가 갖는 산소-수소 안정동위원소 성분은 해당 지역 강수의 산소-수소 안정동위원소 성분의 누적 평균치와 유사하게 나타난다. 뿐만 아니라 강수의 산소-수소 동위원소 조성은 수체의 증발 및 응결과정에서 발생하는 동위원소 분별 작용을 반영하기 때문에 고도 효과, 계절 변동, 대륙 효과와 우량효과 등을 나타내며, 따라서 이들을 상세히 검

주저자: 신영승, 연구원

공저자: 김태형, 선임연구원; 윤성택, 교수; 문덕철, 선임연구원; 한희주, 연구원; 강경구, 수석연구원

*교신저자: 문수형, 수석연구원

Email: justdoit@jpdco.co.kr

Received : 2021. 05. 31 Reviewed : 2021. 06. 05

Accepted : 2021. 06. 17 Discussion until : 2021. 8. 31

토함으로써 강수에 의한 지하수 함양 과정을 추정할 수 있다(Clark and Fritz, 1997). 지하수의 동위원소 조성은 단기간 강수에 의한 영향보다는 장기간에 걸친 강수의 평균적 동위원소 조성을 반영하므로 장기적인 연구가 진행되어야 한다. 계절적으로 해양 및 대륙 기단의 영향을 함께 받는 제주도의 경우, 강수의 동위원소 조성, 특히 계절 및 고도 효과는 일부 연구자에 의해 수행된 바 있다(Lee, S. et al., 1999; Lee, K.S. et al., 2003, 2007).

본 연구에서는 2016년 3월부터 2019년 11월까지 약 4년에 걸쳐 월별로 제주삼다수 유역에서 채취 분석된 강수, 지하수 및 용천수의 동위원소 조성 변화를 자세히 살펴봄으로써, 먹는샘물인 삼다수의 함양 특성을 고찰하였다.

2. 연구지역

2.1. 위치, 지형 및 지질

제주삼다수가 위치하는 표선유역의 총면적은 207.3 km² (제주도 전체 면적의 약 11%)로서 제주도 4개 광역유역 중 한라산 동측사면을 포함하고 있는 동부유역에 해당된다(Fig. 1). 본 연구에서는 표선유역 중 제주삼다수를 생산하는 지역(55.18 km²)의 물 순환, 특히 지하수 보전·관리 측면에서 함양 특성을 파악하기 위하여 두 개의 단위

유역으로 나누어 고찰하였다. 즉, 삼다수 취수원이 위치하는 해발고도 400 m 이상의 유역을 삼다수 유역으로, 그리고 해발고도 400 m 이하의 유역을 삼다수 하류유역으로 구분하였다(제주특별자치도개발공사, 2020).

제주도는 약 180만 년 전부터 최근까지 이어진 오랜 화산활동에 의해 형성된 우리나라에서 가장 큰 화산섬으로서 동-서 길이 약 73 km, 남-북 길이 약 33 km의 타원형 형상(총면적 약 1,852 km²)을 하고 있으며, 중앙의 해발 1,950 m 한라산을 중심으로 동, 서, 남, 북의 4개 사면을 따라 고도가 점차 낮아진다. 제주도에서는 해발고도 기준으로 200 m 이하를 해안지역, 200~600 m 사이를 중산간지역, 600 m 이상을 산간지역으로 구분하고 있다(고기원 외, 2017). 제주도의 지질은 주로 다양한 화학조성을 갖는 여러 분출 시기의 신생대 현무암질 암석으로 구성되며, 일부 지역에서 퇴적암류가 나타난다(고기원 외, 2017). 현무암질 화산암류는 투수성이 좋아 강수의 지하 침투가 용이하며, 이러한 투수성 지질구조는 지하수 함양에 크게 기여한다.

2.2. 기후

제주도의 기후는 전형적으로 고온다습한 우기와 한랭건조한 건기를 갖는 동아시아 몬순기후 특성을 나타내며, 한

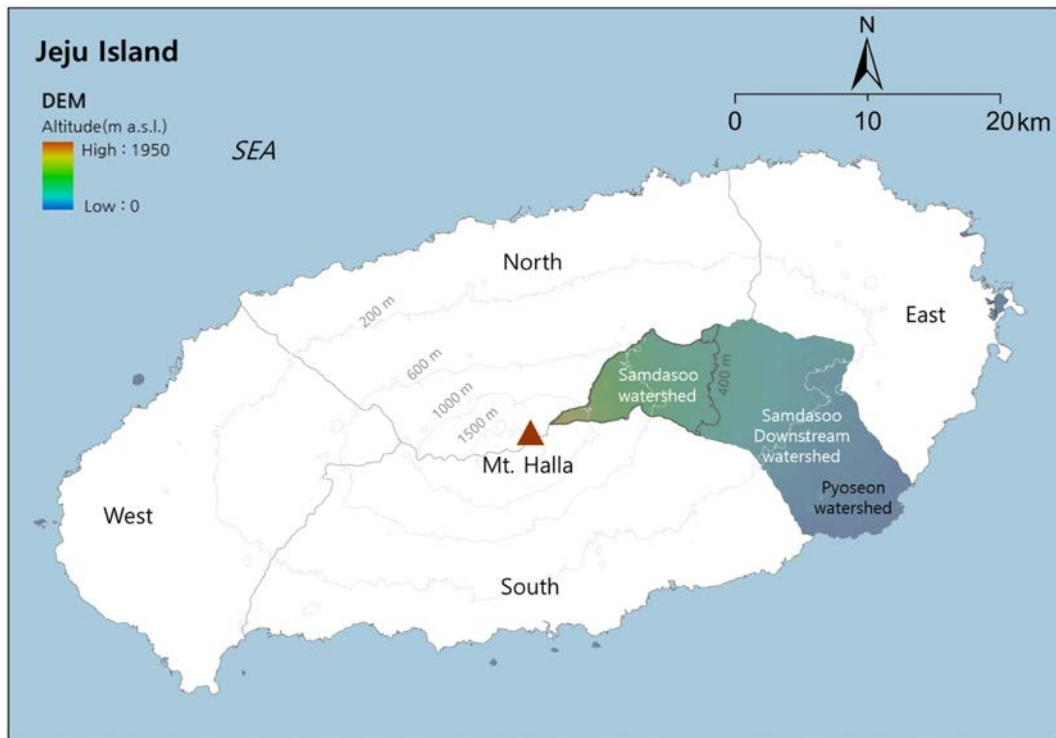


Fig. 1. Distribution map of the Jeju Samdasoo and Samdasoo downstream watershed.

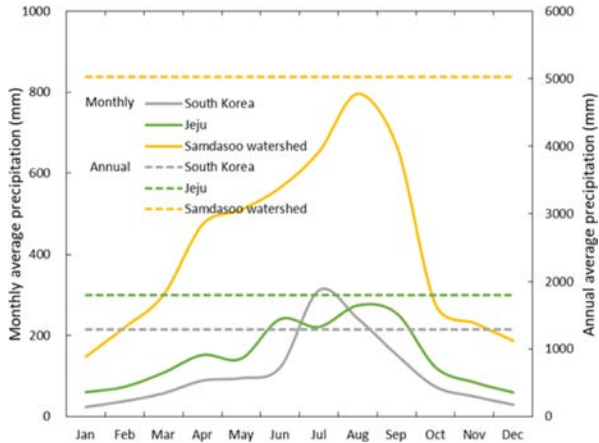


Fig. 2. Monthly and annual average precipitation in the Jeju Samdasoo watershed.

반도 최남단의 저위도에 바다로 둘러싸여 위치하기 때문에 한반도 내륙부에 비하여 기온이 높고 기온교차가 작게 나타난다. 여름에는 내륙과 거의 같은 기온을 나타내며, 겨울에는 내륙보다 기온이 훨씬 높은 해양성 기후를 보이고 있다. 특히, 한라산이 차가운 북서계절풍을 막아 서귀포 등 남쪽 사면은 좀 더 높은 평균기온을 나타내며, 북쪽 사면은 평균기온이 낮고 겨울철에 눈이 많이 내린다

(제주지방기상청, 2018).

연구지역인 제주삼다수 유역의 2006년부터 2020년까지 15년간의 기상관측 자료(기상자료개방포털 - 전국, 제주도 종관기상관측시스템 월별 데이터; 진달래밭, 성판악 및 한라생태숲 방재기상관측장비 일별 데이터, 제주도 재난안전대책본부 - 교래 강우관측소 일별 데이터)에 의하면, 연평균강수량은 5,032 mm로서 우리나라 연평균강수량(1,287 mm)에 비해 3.9배, 제주도 연평균강수량(1,798 mm)에 비해 2.8배 많으며, 대체적으로 6~9월의 강수량 합이 1년 강수량의 약 54%를 차지하고 있어 계절적 편차가 큰 특징을 보인다(Fig. 2). 고도별 연평균 기온을 분석한 결과(제주지방기상청, 2018), 산간지역은 $9.5 \pm 1.8^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮고, 중산간지역은 $13.4 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$, 해안지역은 $15.7 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 로서 고도에 따른 뚜렷한 온도 차이가 나타난다.

3. 연구 방법

본 연구를 위하여 강수, 지하수 및 용천수 시료 채취는 2016년 3월부터 2019년 11월까지 총 21개 지점에서 이루어졌으며(Fig. 3), 각 지점 정보는 Table 1과 같다. 강수 시료 채취를 위한 적산 강수계는 삼다수 하류 유역(265 m)으로부터 한라산 고지대(1,500 m)에 걸쳐 고도별로

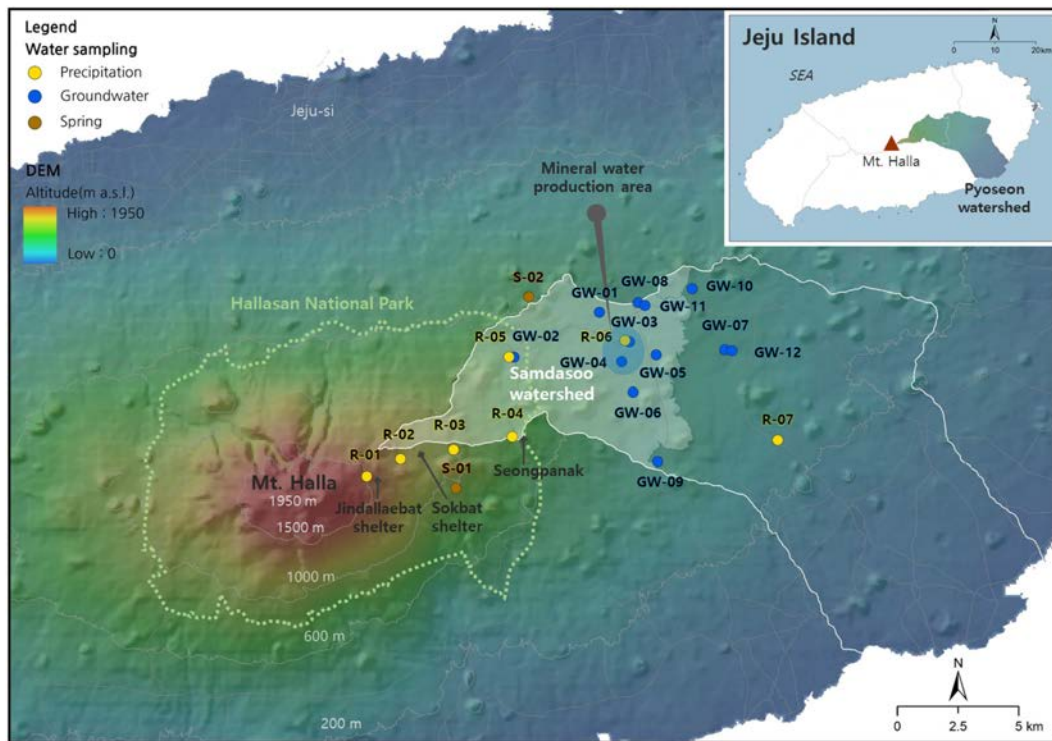


Fig. 3. Sampling locations of precipitation, groundwater, and spring water.

Table 1. Description of the sampling stations of precipitation, groundwater and spring water

No.	Station name	Type	Altitude (m a.s.l.)	Excavation depth (m)	GWL ^a (m)	Groundwater pumping rate (m ³ /d)
1	R-01	Precipitation	1,500			
2	R-02	Precipitation	1,200			
3	R-03	Precipitation	1,000			
4	R-04	Precipitation	750			
5	R-05	Precipitation	630			
6	R-06	Precipitation	441			
7	R-07	Precipitation	265			
8	GW-01	Groundwater	450	480	295	141
9	GW-02	Groundwater	630	630	381.6	-
10	GW-03	Groundwater	440	420	266.6	1,300
11	GW-04	Groundwater	467	410	317	1,500
12	GW-05	Groundwater	434	500	307.5	568
13	GW-06	Groundwater	461	431	315.3	100
14	GW-07	Groundwater	344	296	246	376
15	GW-08	Groundwater	415	400	262.9	150
16	GW-09	Groundwater	394	421	303.1	300
17	GW-10	Groundwater	390	390	310	359
18	GW-11	Groundwater	415	400	265.3	800
19	GW-12	Groundwater	335	325	246	1,080
20	S-01	Spring	913			
21	S-02	Spring	565			

^a GWL : natural groundwater level (depth from the land surface)

총 7개 지점에 고정 설치하였다(Ryuh, 2017). 지하수 시료는 삼다수 지역의 공공 및 시설 관정을 대상으로 고도를 고려하여 총 12개 지점에서 채수하였으며, 삼다수 먹는샘물 취수 지역 주변에서 고도 차이가 있는 2지점의 용천수도 채취하였다. 지하수 채수 지점 중 표고 400 m 이상인 8개 중에는 먹는샘물 제주삼다수 취수원 두 지점(440 m, 467 m)을 포함하고 있으며, 표고 400 m 미만 지점은 4개이다. 강수 시료는 강우 시기에 상관없이 일정 기간(한 달 내외) 동안 집적된 누적 강수 시료를 채취하였다.

산소 및 수소 동위원소 분석을 위한 물 시료(적산 강우)는 현장에서 0.45 μm 멤브레인 필터로 여과하여 취하였다. 동위원소 분석은 한국기초과학지원연구원에서 실시하였다. 시료의 안정동위원소비는 국제표준시료인 V-SMOW와 비교하여 보고하였으며, 측정 오차는 산소 $\pm 0.1\%$, 수소 $\pm 1\%$ 이다.

4. 연구 결과 및 고찰

4.1. 강수의 산소-수소 안정동위원소 조성

본 연구 기간 중 채수 분석된 삼다수 지하수(취수정 원

수) 및 삼다수 하류 유역의 7개 지점(1,500~265 m a.s.l.) 강수 238개 시료에 대한 산소($\delta^{18}\text{O}$) 및 수소(δD) 안정동위원소 조성비를 연도별로 요약 정리하면 Table 2와 같다. 강수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 $-10.7 \sim -1.61\%$ (평균 $-6.3 \pm 1.9\%$), δD 값은 $-71.2 \sim -4.3\%$ (평균 $-34.6 \pm 15.7\%$)로서 넓은 범위를 나타내었으며, 중수소초과(d-excess; $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$) 값은 $-0.9 \sim 40.1\%$ (평균 $15.6 \pm 7.8\%$)의 넓은 범위를 보였다. 중수소초과 값은 지역적 기상 조건에 따라 달라져 수증기단 발생 지역에서의 습도, 풍속 및 해수 표면온도의 차이를 반영한다(Dansgaard, 1964). 특히, 중수소초과 값은 일차적으로 기단이 처음 형성될 때의 대기의 상대습도에 의해 영향을 받으며, 이차적으로는 증발속도에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Dansgaard, 1964).

4년 동안 내린 강수의 지점별 동위원소 조성 차이를 살펴보면, 가장 높은 고도(1,500 m)인 R-01 지점에서는 산소와 수소 동위원소 값이 각각 $-10.7 \sim -4.1\%$ (평균 $-7.4 \pm 1.8\%$) 및 $-71.2 \sim -13.5\%$ (평균 $-43.0 \pm 15.4\%$)로서 가장 가벼운 값을 보였다.

Fig. 4에는 강수량, 상대습도 및 대기 온도의 변화에 따른 산소, 수소 동위원소 및 중수소초과 값의 경시적 변화

Table 2. Oxygen and hydrogen isotopic compositions of precipitation, groundwater and spring water from the Jeju Samdasoo watershed during Mar 2016 to Nov 2019. $\delta^{18}\text{O}$ and δD values are given in ‰

Sample no.	2016			2017			2018			2019			
	Aver.	Max.	Min.	Aver.	Max.	Min.	Aver.	Max.	Min.	Aver.	Max.	Min.	
1 R-01	$\delta^{18}\text{O}$	-7.2	-4.7	-10.1	-8.1	-8.1	-8.1	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8
	δD	-42.7	-25.1	-70.9	-44.0	-44.0	-44.0	-42.1	-42.1	-42.1	-42.5	-42.5	-42.5
2 R-02	$\delta^{18}\text{O}$	-7.0	-4.0	-9.8	-7.6	-7.6	-7.6	-7.3	-7.3	-7.3	-7.4	-7.4	-7.4
	δD	-39.7	-18.5	-65.9	-39.8	-39.8	-39.8	-43.3	-43.3	-43.3	-42.3	-42.3	-42.3
3 R-03	$\delta^{18}\text{O}$	-6.5	-4.4	-9.2	-7.2	-7.2	-7.2	-6.8	-6.8	-6.8	-6.9	-6.9	-6.9
	δD	-36.0	-18.0	-62.4	-37.1	-37.1	-37.1	-38.1	-38.1	-38.1	-36.7	-36.7	-36.7
4 R-04	$\delta^{18}\text{O}$	-5.7	-4.2	-8.0	-6.2	-6.2	-6.2	-5.4	-5.4	-5.4	-5.4	-5.4	-5.4
	δD	-32.1	-20.6	-52.2	-31.8	-31.8	-31.8	-32.5	-32.5	-32.5	-26.2	-26.2	-26.2
5 R-05	$\delta^{18}\text{O}$	-5.9	-4.2	-7.9	-6.4	-6.4	-6.4	-5.6	-5.6	-5.6	-5.9	-5.9	-5.9
	δD	-31.4	-18.7	-51.4	-33.5	-33.5	-33.5	-33.0	-33.0	-33.0	-31.4	-31.4	-31.4
6 R-06	$\delta^{18}\text{O}$	-5.6	-3.9	-8.7	-6.2	-6.2	-6.2	-4.9	-4.9	-4.9	-4.5	-4.5	-4.5
	δD	-30.8	-16.9	-60.9	-33.9	-33.9	-33.9	-29.1	-29.1	-29.1	-22.3	-22.3	-22.3
7 R-07	$\delta^{18}\text{O}$	-5.1	-3.2	-6.4	-5.3	-5.3	-5.3	-5.0	-5.0	-5.0	-5.1	-5.1	-5.1
	δD	-26.8	-11.4	-41.3	-26.6	-26.6	-26.6	-29.2	-29.2	-29.2	-26.1	-26.1	-26.1
8 GW-01	$\delta^{18}\text{O}$	-7.3	-7.1	-7.4	-7.3	-7.3	-7.3	-7.3	-7.3	-7.3	-7.2	-7.2	-7.2
	δD	-43.2	-42.1	-44.0	-42.9	-42.9	-42.9	-42.5	-42.5	-42.5	-42.0	-42.0	-42.0
9 GW-02	$\delta^{18}\text{O}$	-7.4	-7.3	-7.5	-7.4	-7.4	-7.4	-7.4	-7.4	-7.4	-7.4	-7.4	-7.4
	δD	-43.0	-42.3	-43.5	-42.7	-42.7	-42.7	-42.9	-42.9	-42.9	-42.7	-42.7	-42.7
10 GW-03	$\delta^{18}\text{O}$	-7.5	-7.4	-7.5	-7.5	-7.5	-7.5	-7.5	-7.5	-7.5	-7.4	-7.4	-7.4
	δD	-44.1	-42.7	-45.0	-44.1	-44.1	-44.1	-43.5	-43.5	-43.5	-42.9	-42.9	-42.9
11 GW-04	$\delta^{18}\text{O}$	-7.4	-7.4	-7.5	-7.4	-7.4	-7.4	-7.4	-7.4	-7.4	-7.4	-7.4	-7.4
	δD	-43.5	-42.2	-44.2	-43.1	-43.1	-43.1	-42.6	-42.6	-42.6	-42.2	-42.2	-42.2
12 GW-05	$\delta^{18}\text{O}$	-7.3	-7.1	-7.4	-7.3	-7.3	-7.3	-7.2	-7.2	-7.2	-7.2	-7.2	-7.2
	δD	-42.7	-41.0	-43.4	-42.4	-42.4	-42.4	-42.2	-42.2	-42.2	-41.7	-41.7	-41.7
13 GW-06	$\delta^{18}\text{O}$	-7.5	-7.4	-7.6	-7.6	-7.6	-7.6	-7.6	-7.6	-7.6	-7.6	-7.6	-7.6
	δD	-43.7	-42.1	-44.8	-43.9	-43.9	-43.9	-43.8	-43.8	-43.8	-43.5	-43.5	-43.5
14 GW-07	$\delta^{18}\text{O}$	-7.0	-6.9	-7.1	-7.0	-7.0	-7.0	-6.8	-6.8	-6.8	-6.9	-6.9	-6.9
	δD	-41.0	-40.1	-42.2	-40.6	-40.6	-40.6	-39.4	-39.4	-39.4	-39.9	-39.9	-39.9
15 GW-08	$\delta^{18}\text{O}$	-7.2	-7.2	-7.3	-7.2	-7.2	-7.2	-7.1	-7.1	-7.1	-7.1	-7.1	-7.1
	δD	-42.4	-41.9	-43.2	-42.1	-42.1	-42.1	-41.0	-41.0	-41.0	-40.9	-40.9	-40.9
16 GW-09	$\delta^{18}\text{O}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-7.4	-7.4	-7.4
	δD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-42.3	-42.3	-42.3
17 GW-10	$\delta^{18}\text{O}$	-	-	-	-	-	-	-7.0	-7.0	-7.0	-7.0	-7.0	-7.0
	δD	-	-	-	-	-	-	-41.0	-41.0	-41.0	-40.8	-40.8	-40.8
18 GW-11	$\delta^{18}\text{O}$	-7.1	-6.9	-7.2	-7.2	-7.2	-7.2	-7.1	-7.1	-7.1	-7.1	-7.1	-7.1
	δD	-42.3	-40.4	-43.6	-42.0	-42.0	-42.0	-41.8	-41.8	-41.8	-41.0	-41.0	-41.0
19 GW-12	$\delta^{18}\text{O}$	-6.9	-6.9	-7.0	-6.9	-6.9	-6.9	-6.9	-6.9	-6.9	-6.9	-6.9	-6.9
	δD	-40.3	-37.4	-41.4	-40.3	-40.3	-40.3	-39.7	-39.7	-39.7	-39.3	-39.3	-39.3
20 S-01	$\delta^{18}\text{O}$	-7.3	-6.7	-7.7	-7.3	-7.3	-7.3	-7.0	-7.0	-7.0	-7.0	-7.0	-7.0
	δD	-41.5	-35.2	-46.3	-41.0	-41.0	-41.0	-38.3	-38.3	-38.3	-38.6	-38.6	-38.6
21 S-02	$\delta^{18}\text{O}$	-7.9	-7.6	-8.1	-7.9	-7.9	-7.9	-7.7	-7.7	-7.7	-7.5	-7.5	-7.5
	δD	-47.9	-45.8	-50.1	-47.1	-47.1	-47.1	-46.2	-46.2	-46.2	-44.4	-44.4	-44.4

를 도시하였다. 전체 연구기간에서는 공통적으로 매년 6월에 동위원소비가 가장 낮아지는 특징을 보였다. 연구기

간 중 전반부(2016~2017년)에서는 후반부(2018~2019년)에 비해 동위원소 조성의 변동 주기가 1~2개월로 짧게

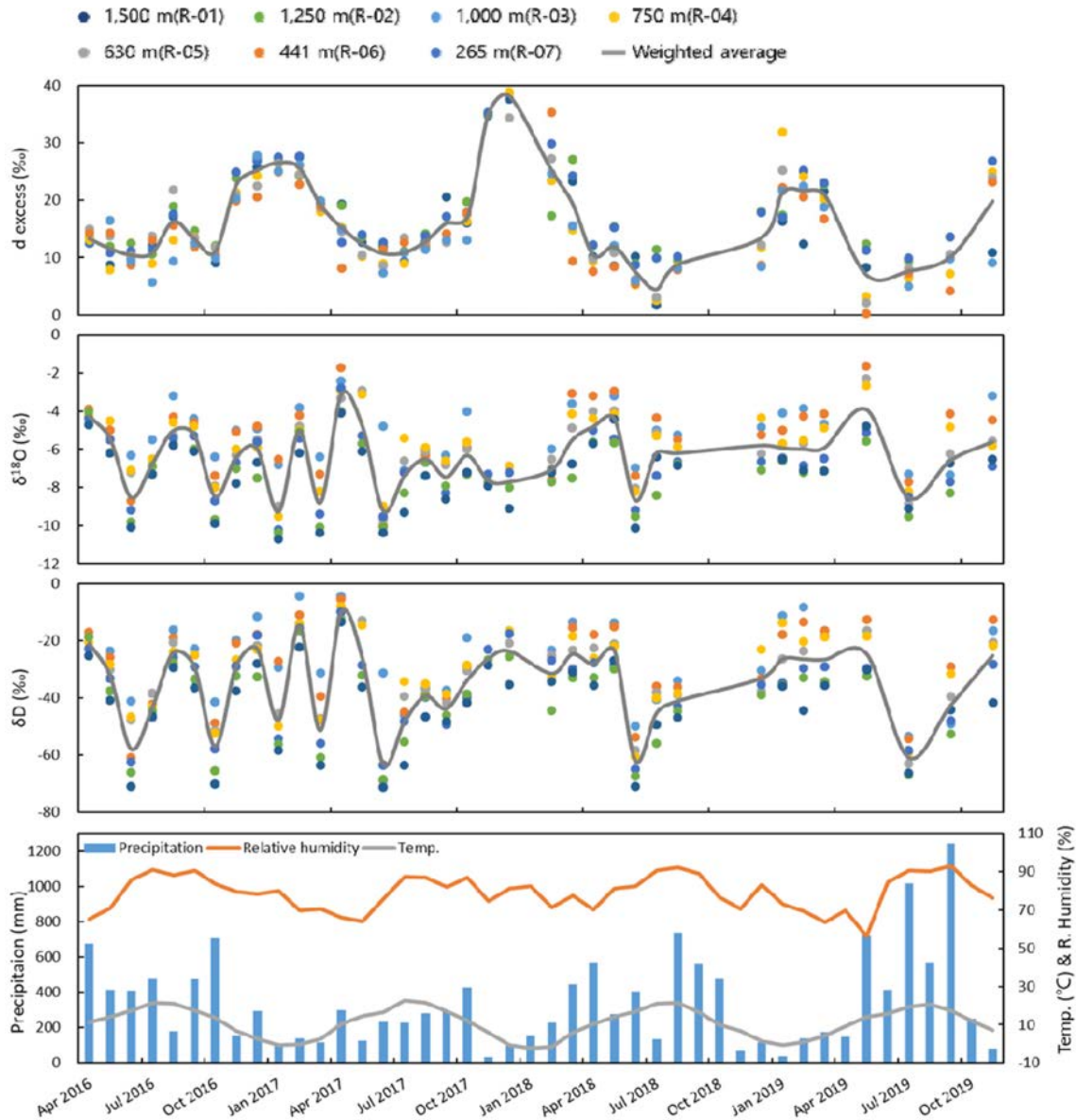


Fig. 4. The temporal variations of precipitation, relative humidity, temperature, $\delta^{18}\text{O}$, δD and d excess values from the Jeju Samdasoo watershed during Mar 2016 to Nov 2019.

나타나는 양상을 보였는데, 이에 대해서는 강수량, 상대습도 및 기온 등의 기후인자와 결부지어 세밀한 추가 연구가 필요하다. 특히, 시계열 동위원소 조성 특성상 2017년도 강우에서는 짧은 주기의 변동성이 강하여 변곡점이 다소 많았는데, 본 연구지역에서는 2017년도가 과우년 (drought year)으로서 타 연도 연강수량의 약 50%에 지나지 않았다.

4.1.1. 강수 동위원소 조성의 시간적 변화
적도 지역을 제외하고 대부분의 중위도 이상의 대륙에

서는 강수의 안정동위원소 조성은 온도효과가 뚜렷하여 온도가 높은 여름에는 무거워지고 반대로 겨울에는 감소되는 경향을 보임이 잘 알려져 있다. 반면에 적도 열대지역의 섬 등 강수량이 많고 강한 폭우가 나타나는 지역에서는 온도효과와는 달리 소위 우량효과가 강하여 안정동위원소 조성이 강수의 양과 높은 상관관계를 가진다 (Dansgaard, 1964; Miyake et al., 1968; Lee and Fung, 2008).

동아시아 몬순기후에 해당하는 제주도 지역의 경우, 고온다습한 북태평양 기단의 영향을 받는 여름철 우기(6~9

월)에는 강수의 산소 안정동위원소 값이 낮아지는 반면 겨울 건기(10~5월)에는 시베리아 기단의 영향으로 한랭 건조해지면서 안정동위원소 값이 높아지는 경향을 나타낸다. 제주 표선유역 강수의 중수소초과 값은 계절적인 주기 변화를 뚜렷이 나타내는데(Fig. 4), 이는 계절적으로

다습한 기단과 건조한 기단의 변화가 뚜렷한 제주도의 계절적 특징을 잘 나타내는 것으로 판단된다.

강수의 월별 동위원소 조성 변화를 살펴보면, 6월에 가장 가볍고 4월에 다소 무거운 경향을 나타내었다(Fig. 5). 또한, 9~10월에 다소 낮아지는 현상을 보였다. 연구기간 동안 월별 강수량을 보면 9~10월의 평균 강수량이 연평균 강수량의 약 28%로서 높았으며, 하루에 500 mm 이상의 많은 비가 내리기도 하는 등 집중 호우의 영향이 높았다. 그러나 강우사상 별로 동위원소비와 강수량 간에 직접적인 상관관계는 나타나지 않았다.

Table 3은 $\delta^{18}\text{O}$, δD 및 중수소초과 값과 기상 인자(강수량, 상대습도, 온도)와의 상관분석 결과를 보여준다. 중수소초과 값은 전반적으로 온도와 음의 상관관계(-0.79)를 가졌으며, 우기와 건기로 구분하여 살펴보면 우기에는 산소 안정동위원소비가 상대습도와 양의 상관관계(0.64)를, 그리고 건기에는 중수소초과 값이 온도와 높은 음의 상관관계(-0.83)를 나타냈다. 따라서 중수소초과 값의 변화가 강수의 계절적 특징을 가장 효과적으로 반영함을 확인할 수 있었다.

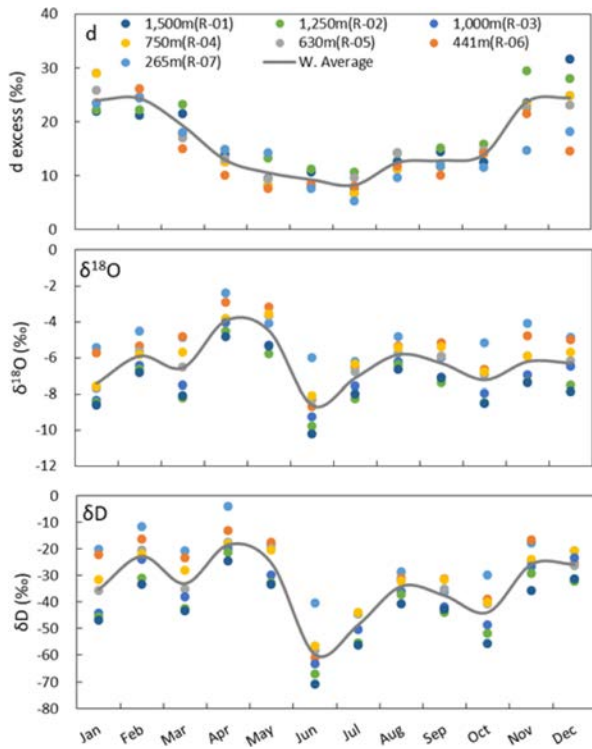


Fig. 5. The monthly variations of $\delta^{18}\text{O}$, δD and d excess values from the Jeju Samdasoo watershed.

4.1.2. 지역천수선(Local Meteoric Water Line, LMWL) 도출

해양에서 증발 또는 대류에 의해 생성된 수증기는 대기 로 이동하고 응축되면서 산소 및 수소 동위원소비는 점차 낮아지지만, 양자 간에는 기울기 8과 세로 절편 10의 직 선식을 따라 변화하게 된다. 이를 지구천수선(Global Meteoric Water Line; GMWL)이라 부른다. 또한 중수소

Table 3. Correlations among precipitation, relative humidity, temperature, $\delta^{18}\text{O}$, δD and d-excess values of precipitation samples during Apr 2016 to Nov 2019

	Precipitation		R. humidity ^a		Temp.		$\delta^{18}\text{O}$		δD		d excess	
	Rainy	Dry	Rainy	Dry	Rainy	Dry	Rainy	Dry	Rainy	Dry	Rainy	Dry
Precipitation	1											
R. humidity	* ^b 0.32		1									
	0.52	-0.14	1									
Temp.	*0.51		*0.53		1							
	-0.15	0.61	0.50	-0.17	1							
$\delta^{18}\text{O}$	*0.02		*-0.41		*-0.02		1					
	-0.07	0.33	0.64	-0.51	0.46	0.47	1					
δD	*-0.29		*-0.51		*-0.46		*0.83		1			
	-0.13	-0.10	0.50	-0.40	0.37	0.01	0.96	0.78	1			
d excess	*-0.51		*-0.21		*-0.79		*-0.09		*0.41		1	
	-0.24	-0.57	-0.20	0.32	-0.09	-0.83	0.32	-0.50	0.56	0.02	1	

a : relative humidity
b : both rainy and dry seasons

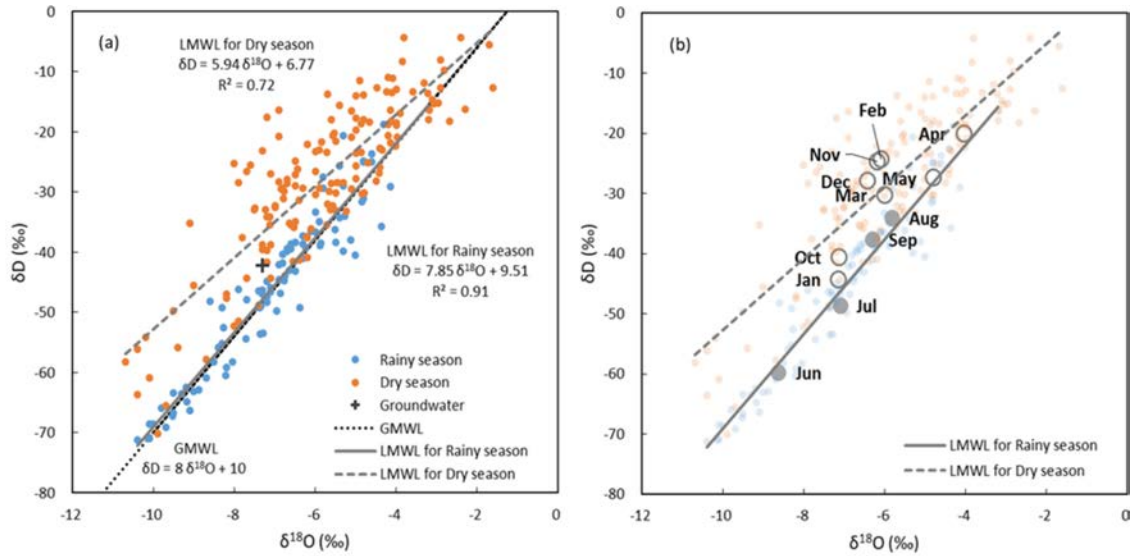


Fig. 6. (a) The plot of $\delta^{18}\text{O}$ and δD values for precipitation samples from the rainy season and the dry season, (b) the plots for monthly precipitation samples from the rainy season and the dry season.

초과 값은 기온기가 8인 지구천수선의 세로 절편으로서 수증기 근원수체의 습도가 증가하면 10보다 작고, 감소하면 10보다 큰 값을 나타낸다(Dansgaard, 1964).

연구지역 강수 전체와 우기(6~9월) 및 건기(10~5월)의 동위원소 조성을 나타내는 지역천수선은 각각 식 (1), (2), (3)의 관계식으로 나타나 우기에는 지구천수선과 유사하였다.

$$\delta\text{D} = 7.3\delta^{18}\text{O} + 11.3; (R^2=0.76, n=238) \quad (1)$$

$$\delta\text{D} = 7.9\delta^{18}\text{O} + 9.5; (R^2=0.91, n=91) \quad (2)$$

$$\delta\text{D} = 6.0\delta^{18}\text{O} + 6.8; (R^2=0.72, n=147) \quad (3)$$

연구지역 건기 강수의 경우 기온기는 6으로서 지구천수선 8에 비해 낮았으며, 이는 상대적으로 빠른 증발이 일어나는 건조한 기단의 영향을 반영하였다. 반면, 우기 강수는 다습한 기단의 영향을 받아 지구천수선과 유사한 기온기를 갖는 것으로 분석되었다. 이는 제주지역에서의 Lee, et al.(1999) 및 Lee, et al.(2003)에 의한 기존 연구 결과와 유사하였다.

4.1.3. 강수 동위원소 조성의 고도 변화

고도별 강수의 산소 및 수소 안정동위원소 조성을 살펴보면, 고도가 높아질수록 두 안정동위원소의 평균값이 낮아지는 현상이 뚜렷하며, 이는 잘 알려진 고도효과 (altitude effect)와 일치하였다. 강수의 고도효과는 지하수

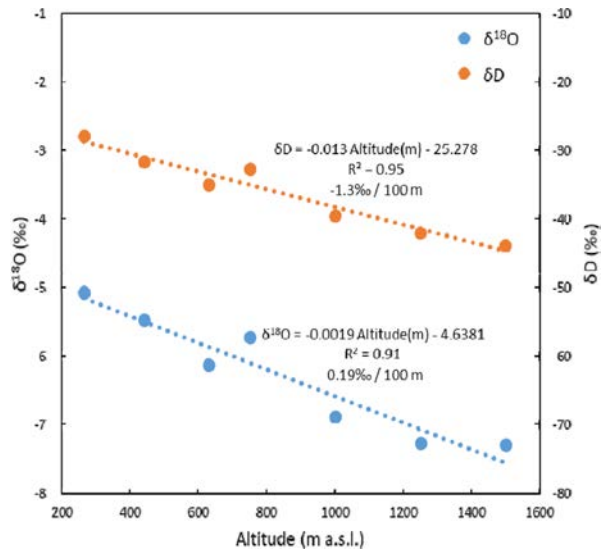


Fig. 7. Changes in $\delta^{18}\text{O}$ and δD values as a function of altitude. Each circle plot represents a weighted average for the whole study at a given altitude.

함양의 기원을 규명하는데 중요한 도구로 사용될 수 있다 (Leonitiadis et al., 1996; Clark and Fritz, 1997). 삼다수 유역의 경우, 고도가 100 m 증가함에 따라 강수의 산소 안정동위원소 값은 0.19‰, 수소 안정동위원소 값은 1.3‰씩 감소하였으며(Fig. 7), 이는 제주도 전역의 고도별 용천수를 이용하여 Lee et al.(1999)이 도출한 $-0.15\text{‰} \delta^{18}\text{O}/100\text{ m}$ 보다는 크다.

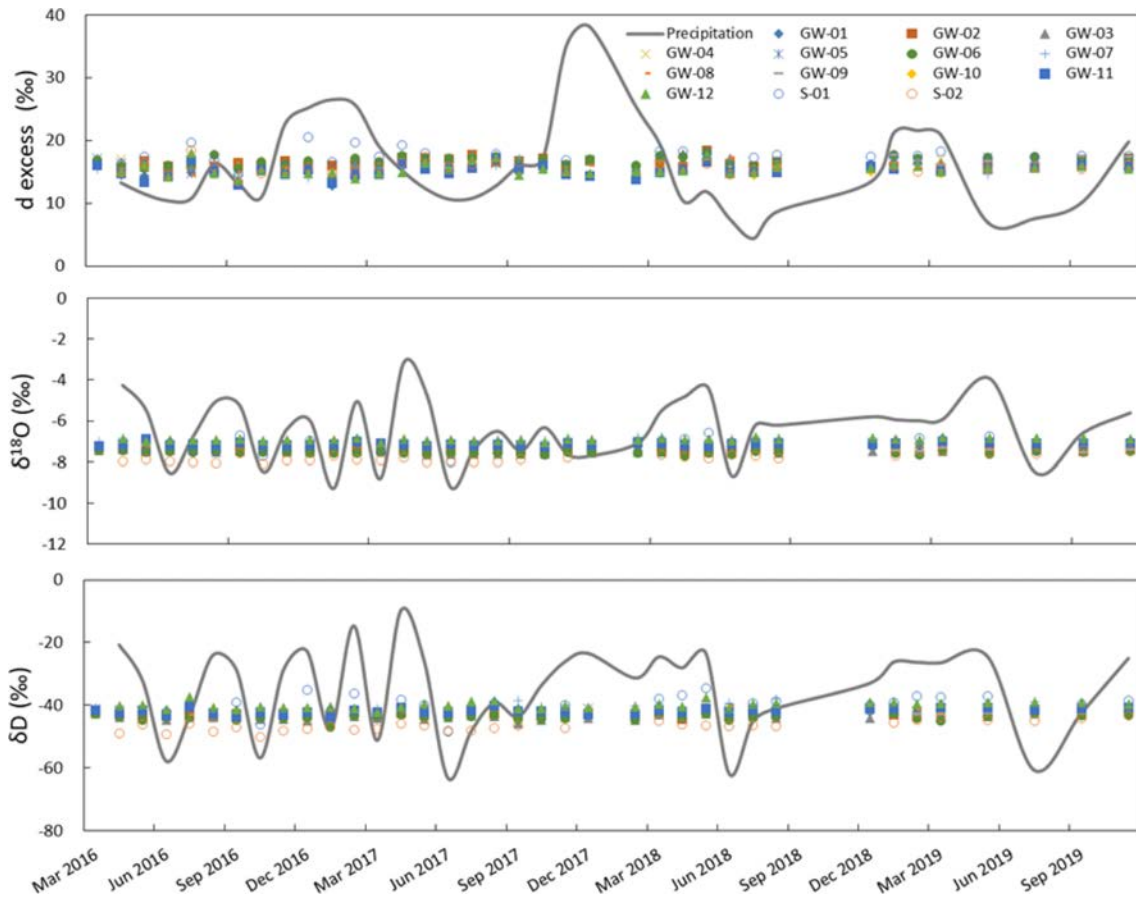


Fig. 8. The temporal variations of $\delta^{18}\text{O}$, δD and d excess values of precipitation, groundwater and spring water from the Jeju Samdasoo watershed during Mar 2016 to Nov 2019.

4.2. 지하수 및 용천수의 산소-수소 안정동위원소 조성

Fig. 8에는 제주삼다수 유역의 지하수(12지점), 용천수(2지점)의 산소-수소 동위원소 값과 중수소초과 값의 시계열 변화를 강수의 가중 평균값의 시계열 변화와 비교하였다. 연구지역 지하수의 $\delta^{18}\text{O} = -7.7 \sim -6.8\text{‰}$ (평균 $-7.3 \pm 0.2\text{‰}$), $\delta\text{D} = -46.8 \sim -37.4\text{‰}$ (평균 $-42.2 \pm 1.5\text{‰}$), 중수소초과 값은 $12.6 \sim 18.4\text{‰}$ (평균 $15.9 \pm 1.0\text{‰}$)로 나타났다. 즉, 강수에서 관측되던 계절적 변화의 주기성이 없이 관측기간 동안 거의 일정한 값을 가지며 거의 변동이 없는 특징을 나타내었다(Fig. 8). 중수소초과 값 역시 강수의 중수소초과 평균값과 유사한 결과를 보였으며(Fig. 9), 연구지역 강수의 우기 지역천수선과 건기 지역천수선 사이에서 집중 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 10(a)). 이러한 경향은 연구지역 삼다수 지하수계에서는 침투되는 강수의 계절적 변동에 영향을 나타내지 않는 안정적인 대수층 환경이 유지되고 있음을 알 수 있다. 한편, 연구지역의 상이한 고도에서 채수한 용천수의 경우, $\delta^{18}\text{O} = -8.1 \sim -6.6\text{‰}$

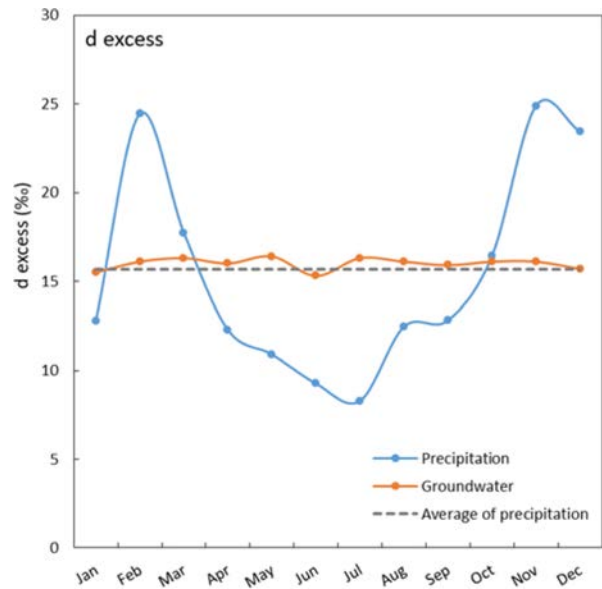


Fig. 9. The monthly variation of d excess values for precipitation and groundwater samples.

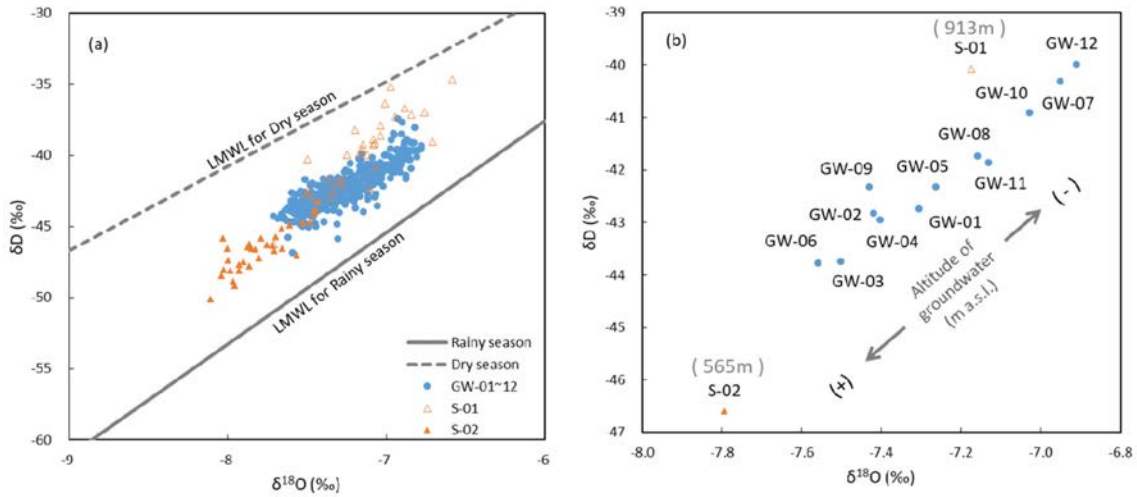


Fig. 10. (a) The plot of $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of groundwater and spring water samples, (b) the plot of average $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of groundwater and spring water samples with their sampling altitudes.

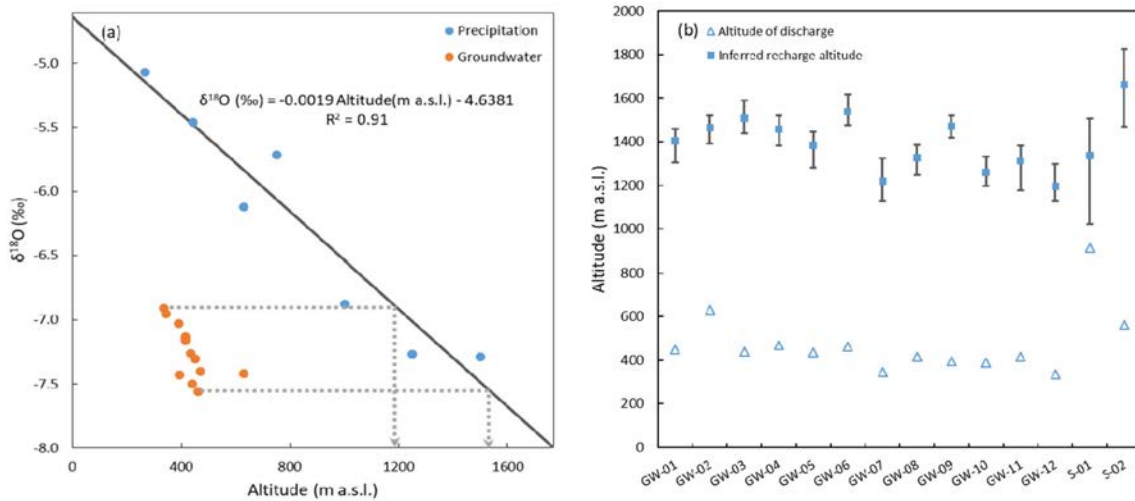


Fig. 11. (a) Inferred recharge altitude. The groundwater $\delta^{18}\text{O}$ values vs. altitude, (b) the plot of groundwater altitude and inferred groundwater recharge altitude in the Jeju Samdasoo watershed.

(평균 $-7.5 \pm 0.4\text{‰}$), $\delta\text{D} = -50.1 \sim -34.7\text{‰}$ (평균 $-43.3 \pm 4.0\text{‰}$), 중수소초과 값 $13.5 \sim 20.6\text{‰}$ (평균 $16.6 \pm 1.4\text{‰}$)을 나타내었다. 용천수의 경우에도 지하수와 비슷하게 강수에서 나타나는 계절적인 주기변화를 보이지 않았으며, 중수소초과 값 역시 강수의 평균값과 큰 차이를 보이지 않았다.

연구지역 지하수의 동위원소 조성 특성을 채수 지점별로 고찰하면, GW-06가 가장 가벼운 동위원소비를 보였고, GW-03 및 GW-12의 순서로 무거운 동위원소비를 나타내었다. 따라서 지하수 채수 지점의 표고가 높아질수록 동위원소 값은 낮아지는 것으로 분석되었다(Fig. 10(b)). 용천수의 경우에도 낮은 고도(565 m)에 위치한 S-02가 높은

고도(913 m)에 위치한 S-01에 비해 약간 가벼운 동위원소 조성을 나타내었다. 이는 용천수 S-02의 함양원이 보다 높은 고도에서의 강수에 의한 것임을 시사한다.

4.3. 지하수의 함양고도 추정

고도별 각 강수 채취 지점에서의 강수의 산소 동위원소 조성의 강수량 가중 평균값을 계산하고 지하수의 값과 비교하여 연구지역 삼다수 지하수의 함양 고도를 평가하였다(Fig. 11(a)). 삼다수 수역 강수의 산소 동위원소 조성의 고도효과로부터 얻어진 지하수 함양 고도 추정식은 (4)와 같다.

Table 4. Estimated recharge altitude of groundwater and spring water samples from the Jeju Samdasoo watershed

No.	Station name	Type	Altitude (m a.s.l.)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Inferred recharge altitude (m a.s.l.)
1	GW-01	Groundwater	450	-7.3	1,404
2	GW-02	Groundwater	630	-7.4	1,464
3	GW-03	Groundwater	440	-7.5	1,508
4	GW-04	Groundwater	467	-7.4	1,456
5	GW-05	Groundwater	434	-7.3	1,382
6	GW-06	Groundwater	461	-7.6	1,538
7	GW-07	Groundwater	344	-7	1,218
8	GW-08	Groundwater	415	-7.2	1,326
9	GW-09	Groundwater	394	-7.4	1,470
10	GW-10	Groundwater	390	-7	1,258
11	GW-11	Groundwater	415	-7.1	1,312
12	GW-12	Groundwater	335	-6.9	1,196
13	S-01	Spring	913	-7.18	1,335
14	S-02	Spring	565	-7.79	1,661

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = -0.0019 \times \text{Altitude (m a.s.l.)} - 4.64 (R^2 = 0.91) \quad (4)$$

위 관계를 이용하여 삼다수 유역의 지하수 함양 고도는 약 1,200~1,500 m의 범위 및 평균 약 1,400 m로 추정되었다(Table 4). 연구지역 지하수가 개발된 조사 지점들의 평균 고도가 약 430 m임을 고려하면, 지하수는 적어도 평균적으로 약 800 m 더 높은 한라산 고지대에서 함양이 일어남을 알 수 있다(Fig. 11(b)).

5. 결 론

먹는샘물로 개발·이용되고 있는 제주삼다수가 부존하는 삼다수 유역 지하수의 함양 고도를 추정하기 위하여 2016년 3월부터 2019년 11월까지 약 4년에 걸쳐 강수와 지하수의 산소 및 수소 안정동위원소 조성을 분석하였다. 제주도의 경우 오랜기간 동안 내린 강우가 대수층으로 함양되어 지하수를 형성하며, 삼다수 유역 강수는 $\delta D = 7.3\delta^{18}\text{O} + 11.3$ 의 동위원소 선형관계식(지역천수선)을 나타내고, 주로 해양 기원의 수증기 증발에 의해 생성된 기단으로부터 기원함을 알 수 있었다. 또한, 삼다수 유역의 고도별 강수의 산소-수소 동위원소 조성의 고도효과를 평가한 결과, 표고가 100 m 증가함에 따라 산소 안정동위원소 비는 -0.19%의 감소율을 보임을 확인하였다. 안정동위원소 기법에 의한 강수의 고도효과를 활용하여 제주 삼다수 유역 지하수의 함양 고도를 산정한 결과 1,200 m 이상의 고지대에서 함양되어 유래함을 추정하였다. 추정된 지하

수 함양지역은 청정지역인 한라산국립공원의 상류부에 해당된다. 앞으로 삼다수 유역 지하수의 지속가능한 수량과 수질 관리를 위해서는 도출된 함양지역을 중심으로 토지 이용 및 개발행위에 관한 관리가 중요함을 시사한다. 본 연구에서 도출된 함양 고도로부터의 지하수 이동 및 대수층 형성과 수질 형성에 관한 추가 연구가 필요하며, 아울러 좀 더 광역적인 지역으로 강수 채수 지점을 확대하여 장기간의 연구가 진행되어야 할 것이다.

사 사

이 연구는 제주특별자치도개발공사 자체 연구사업으로 수행되었습니다.

References

- 고기원, 박준범, 문덕철, 2017, 화산섬 제주도의 지질과 지하수, 제주특별자치도개발공사, 제주도.
- 제주지방기상청, 2018, 제주지역 기후특성 및 기후변화 경향 조사·분석
- 제주특별자치도개발공사, 2020, 먹는샘물 지하수개발·이용허가 유효기간 연장 지하수영향조사서.
- Clark, I. and Fritz, P., 1997, Environmental Isotopes in Hydrogeology, Lewis, Boca Raton, FL.
- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters, *Science*, **133**(3465), 1702-1703.
- Dansgaard, W., 1964, Stable isotopes in precipitation, *Tellus*, **16**(4), 436-468.
- Lee, J.E. and Fung, I., 2008, "Amount effect" of water isotopes and quantitative analysis of post-condensation processes, *Hydrological Processes*, **22**(1), 1-8.
- 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.
- Lee, K.S., Kim, J.M., Lee, D.R., Kim, Y., and Lee, D., 2007, Analysis of water movement through an unsaturated soil zone in Jeju Island, Korea using stable oxygen and hydrogen isotopes, *Journal of Hydrology*, **345**(3-4), 199-211.
- 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**(1-4), 66-74.
- Lee, S., Shimada, J., and Kayane, I., 1999, Stable isotopes in precipitation in the volcanic island of Cheju, Korea, *Hydrologi-*

cal Processes, **13**(1), 113-121.

Leontiadis, I.L., Vergis, S., and Christodoulou, Th., 1996, Isotope hydrology study of areas in Eastern Macedonia and Thrace, Northern Greece, *Journal of Hydrology* **182**(1-4), 1-17.

Miyake, Y., Matsubaya, O., and Nishihara, C., 1968, An isoto-

pic study on meteoric precipitation, *Papers in Meteorology and Geophysics*, **19**(2), 243-266.

Ryuh, Y.K., 2017, The use of stable O-H isotope data to evaluate groundwater recharge in Jeju island, Korea. Unpublished Ms. Sc. thesis, Korea University.