

碩士學位論文

안정동위원소를 이용한
제주지역 토양수의 이동특성 연구



濟州大學校 大學院

海 洋 學 科

李 東 林

2004年 12月

안정동위원소를 이용한
제주지역 토양수의 이동특성 연구

指導教授 崔永贊

李東林

이 論文을 理學 碩士學位 論文으로 提出함



2004年 12月

李東林의 理學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 윤 정 수 (印)

委 員 박 원 배 (印)

委 員 최 영 찬 (印)

濟州大學校 大學院

2004년 12月

A study on the characteristics of soil water
movement in Jeju area using stable isotope

Dong-Rim Lee

(Supervised by Professor Young-Chan Choi)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF OCEANOGRAPHY
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목차

List of Figures	ii
List of Tables	iii
Summary	iv
I. 서언	1
II. 연구지역의 개요	4
2-1. 제주도의 지형 및 지질	4
2-2. 제주도의 기후	6
III. 연구방법	8
3-1. 시료채취방법	8
3-2. 분석방법	9
IV. 결과 및 고찰	11
4-1. 강수 동위원소 조성의 계절변화	11
4-2. 토양수 동위원소 조성의 계절변화	18
V. 결론	30
참고문헌	32

List of Figures

Fig. 1. Location map of the study site in Jeju Island	5
Fig. 2. Total amount of monthly precipitation and monthly average air temperature for the period 1994 to 2003 at the jeju city, Jeju Island	7
Fig. 3. Sketch map for the arrangement of lysimeters and schematic view of vertical soil profile	10
Fig. 4. The $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of monthly precipitation	14
Fig. 5. Rainfall amount(mm), $\delta^{18}\text{O}$ values and d-values of monthly precipitation	16
Fig. 6. Plot $\delta^{18}\text{O}$ versus δD values in monthly precipitation	17
Fig. 7. Seasonal variation of $\delta^{18}\text{O}$ values of soil waters	22
Fig. 8. Seasonal variation of δD values of soil waters	23
Fig. 9. Seasonal variation of d-values of soil waters	26
Fig. 10. Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of soil waters	27
Fig. 11. Progression in $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of soil water(30cm)	29

List of Tables

Table 1. Grain size analysis data for study site soil	8
Table 2. Isotopic data in the monthly precipitation of the study area	13
Table 3. Oxygen and hydrogen isotopic compositions of soil waters	20
Table 4. Deuterium excess values of soil waters	25



Summary

In order to study recharge characteristics of groundwater in the unsaturated zones from the precipitation in temperate climate regions, 17 lysimeters were installed at the depths of 30cm, 60cm, and 80cm under the ground, at a test site of Cheju National University in Jeju Island and then oxygen and hydrogen isotopic compositions of soil waters were monitored from November 2002 to November 2003. For the comparisons, a precipitation collector was installed at a point of Ildo-Dong, Jeju City and then the monthly collected precipitation was analyzed for oxygen and hydrogen isotopes from June 2002 to December 2003.

Oxygen and hydrogen isotopes of the monthly precipitation have not shown any particular seasonal variation owing to the both temperature effect and amount effect, while deuterium excess value(d -value) has shown the periodical seasonal variation that the value is high in winter but low in summer.

From the analysis results of the isotopic compositions in precipitation and soil water, it is observed that the oxygen and hydrogen isotopic compositions of soil water reflect those of the precipitation of the study area. On the comparison of isotopic compositions only on the basis of the individual data of oxygen and hydrogen, it was not easy to estimate the transmit time of the precipitation infiltration through the soil layers to the specific depth, but when the aspects in variable values of the hydrogen isotopes were closely monitored, the information of the time for the precipitation to reach the specific depth could be obtained by comparing the variation of the deuterium excess value.

Based on the d-values of soil water, transit times of 2 and 4-5 months were estimated for infiltration of water through the soil layer to depths of 30cm and 60-80cm. The transmit time to both the depth of 60cm and 80cm made few differences, because this layer between 60cm and 80cm in depth consists of the geological medium which has very high permeability.

No or little evaporation effect was observed in the soil water in the study site and this can be used as a significant factor for the future work that analyzes isotopes to study the recharge rate of the precipitation in Jeju Island.



I. 서언

물에 용해되어 있는 대부분의 화학 성분들과는 달리 물을 직접 구성하는 산소와 수소는 물의 순환 과정에서 보존적으로 이동되기 때문에, 물의 순환과 기원에 대한 연구에서 매우 유용한 도구로서 활발히 이용되어 왔다 (Martinelli et al., 1996; Clark and Fritz, 1997). 세계의 많은 지역에서 지표수와 지하수는 그 지역에 오랜 기간 동안 내린 강수의 동위원소 조성을 그대로 반영하기 때문에 강수와 지하수의 산소와 수소 동위원소 조성을 비교하여 지하수의 함양량과 기저유출량 산정이 가능하다. 특히 제주도는 지하수 의존도가 높은 지역일 뿐만 아니라 육지와 고립된 섬이기 때문에 동위원소 기법을 이용한 지하수 함양량 연구에 적합한 지역이다. 제주도에 적용이 가능한 동위원소 기법을 개발하고 시범 적용하여 국내 타 지역에서도 적용이 가능한 방법으로 심화 발전시킬 필요성이 크다.

선진국에서는 다양한 방법을 동원하여 지하수 함양률에 대한 연구를 하고 있으며 많은 연구 성과를 거두고 있다. 그러나 국내에서는 아직 초보수준의 연구에 머물러 있기 때문에 국내의 지역적인 지질 특성에 적합한 지하수 순환시스템을 이해하고 지하수 자원의 개발과 관리에 필수적인 지역적 함양률 자료를 구축하기 위하여 동위원소 기법을 포함하는 다양한 기법을 적용한 연구가 수행되어야 할 것이다.

본 연구는 동위원소 기법을 활용하여 제주도 지하수의 함양특성, 유동특성 및 순환시간을 평가하여 지하수 개발과 관리에 필수적인 정보를 도출하고 이를 지하수 자원의 과학적인 개발과 관리에 활용케 하는데 목적이 있다.

선진국에서는 지하수 순환시스템 연구를 위하여 1960년대 초부터 동위원소 기법을 적용하여 지하수 함양, 지하수의 기원, 이동현상, 기저유출량 산

정 및 수문분리 등과 관련한 연구를 활발히 진행하여 왔다. 특히 1980년대 말부터는 순환주기가 짧은 지하수(0~50년)의 연대측정 연구가 지하수 오염 현상 연구와 유기적으로 연관되어 진행되어 왔으며 뛰어난 연구 성과를 거두고 있다(Clark and Fritz, 1997).

지하수 함양이란 강수나 지표수가 비포화대를 통해 대수층으로 유입되는 현상이다. 따라서 비포화대 상부에 발달된 토양층에서 토양수와 강수의 동위원소 조성의 상호 관련성을 연구하면 지하수 함양에 대한 중요한 정보를 얻을 수 있다. 건조나 반건조 지역에서는 강수가 지하수로 함양될 때 비포화대 모래층에서 증발현상을 심하게 받는 것이 여러 연구자들에 의해 관찰되었다. 증발현상이 크지 않은 온대지역에서는 지하수 함양기작과 함양률 추정을 위하여 비포화대 토양에서 동위원소 특성 연구가 수행되어 왔다(Saxena, 1984; Darling and Bath, 1988; Geake and Foster, 1989).

지표에 내린 강수가 비포화대인 토양층을 통과하여 지하수로 함양되는 과정을 연구하기 위해서는 토양수를 직접 채취하여 산소와 수소 동위원소 조성을 연구하는 것이 매우 효과적이다. 토양수의 동위원소 조성 분석을 통하여 강수의 함양특성, 특정 깊이의 토양까지 강수가 도달하는데 걸리는 통과시간, 토양에서의 증발현상, 서로 다른 토양수 간의 혼합과정 등에 대한 정보를 얻을 수 있다(Liu et al., 1995; Maloszewski et al., 1995).

토양층에서 토양수를 추출하는 방법에는 진공증류법이나 유기용매추출법이 있다(Revesz and Woods, 1990; Ingraham and Shadel, 1992; Liu et al., 1995). 이들 추출방법은 코어 형태로 채취한 토양에서 진공증류법이나 유기용매추출법으로 토양수를 얻는 방법으로 원하는 깊이의 토양수를 매우 좁은 간격으로 얻을 수 있는 장점이 있지만 동일지점에서 시간 경과에 따른 토양수의 동위원소 변화를 볼 수 없는 단점이 있다. 그래서 최근 토양으로부터 토양수를 분리하지 않고 CO₂와 반응시켜 산소 동위원소를 분석할 수 있는 직접평형법(direct equilibration method)이 개발되어 이용되고 있다(McConvi

lle et al., 1999).

지하 동일지점에서 시간 경과에 따른 토양수의 동위원소 조성의 변화를 관찰하기 위해서는 원하는 깊이의 토양에 토양수채수기(lysimeter)를 설치하고 운영하여야 한다. 토양수채수기에는 인공구조물에 토양을 채워 넣고 일정 깊이에서 흘러나오는 토양수를 채수하여 분석하는 방법(Maloszewski et al., 1995)과 자연토양에 수직구멍을 뚫어 토양수채수기를 설치하여 운영하는 방법이 있는데(Wenner et al., 1991), 이들 방법은 토양수를 반복해서 채취할 수 있으므로 토양수의 동위원소 조성의 계절변화를 연구할 수 있는 장점이 있다.

Dansgaard(1964)에 의해 정의된 중수소과잉값[deuterium excess value ; d-값(‰) = $\delta D - 8\delta^{18}O$]은 기단의 수증기 근원지에 대한 정보를 제공한다. 동북아시아 지역은 계절에 따라 영향을 미치는 기단의 종류가 달라지기 때문에 여름철 강수는 d-값이 작고, 겨울철 강수는 d-값이 큰 계절변화를 잘 보이는 것으로 밝혀졌다(Araguás-Araguás et al., 1998; 이광식의, 2001). 최근 Lee et al.(2003)에 의하면 제주도에서 채취한 강수의 동위원소 조성은 겨울에 d-값이 크고 여름에 d-값이 작은 주기적인 특징을 뚜렷이 보여주고 있기 때문에 이러한 동위원소 특징은 강수의 지하수 함양 연구에 효과적인 이용이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 토양수채수기를 이용하여 제주도에서 토양수가 강수의 동위원소 조성의 계절변화를 어떻게 반영하고 있는지, 그리고 특정 깊이 토양층에 도달되는데 걸리는 시간은 얼마나 되는지를 집중적으로 연구·분석하였다.

II. 연구지역의 개요

2-1. 제주도의 지형 및 지질

제주도는 하나의 한라산체로 이루어진 섬으로 동경 126°08'45" ~ 126°58'15", 북위 33°06'23" ~ 34°00'00"에 위치하고, 총면적은 1,839km²로 전국토의 약 1.8%에 달한다. 현재의 지형은 신생대 제3기말에서 제4기까지(이백만년전~이만년전)의 화산활동에 의해 형성되었으며, 장축이 북동동-남서서 방향으로 74km, 단축이 북북서-남남동 방향으로 32km인 타원체의 모양을 보이고 있다. 한라산(△1,950m)을 중심으로 동서사면은 매우 완만한 경사를 이루고 있으나, 남북사면은 동서사면보다 급한 경사를 보이고 있으며, 전 지역의 평균 경사도는 약 8%이다. 제주도의 전체지형은 해발고도와 지형경사도에 따라 해발 200m이하의 해안지대, 해발 200~600m의 중산간지대, 해발 600m이상의 산악지대로 구분되고 있는데, 본 연구지역은 제주도 제주시 아라동 일원에 위치하며, 표고가 약 280m지점으로 중산간지대에 속하고 있다(Fig. 1).

제주도 구성 암석은 역암, 용암분출에 의해 형성된 화산암, 화산폭발에 의해 형성된 화산쇄설암이 있다. 역암은 용암과 용암 사이에 협재한 황적색 혹은 회색의 니질퇴적암, 역암, 함각력 역암으로 구성되어 있다. 화산암은 성분으로 보아 현무암, 조면현무암, 현무암질조면안산암, 조면안산암 및 조면암류로 분류되는데, 일부 조면암류는 관입상을 보여 높은 지형을 이루기도 한다. 현무암은 분출 당시에 점성이 낮아 넓은 지역을 피복하여 평활한 지형을 이루어 제주도 동측과 서측에 분포한다. 화산쇄설암은 수성화산분출과 스트롬볼리분출에 의해 형성된 것으로 구분되는데, 수성화산분출에 의해 형성된 유리질쇄설암은 주로 해안에 분포하며 잘 발달된 층리를 보이고, 스

트롬볼리상 분출과 관련된 화산쇄설암은 분석구를 형성하고 있다.

지하수와 온천수개발을 위한 심부시추 결과 화산암 하부에 대한 지질이 대략 밝혀지게 되었는데, 제주도 동부지역은 해수면 하부로 두께가 120m에 이르는 용암류가 분포하고, 그 밑에는 약 120m 두께의 미고결퇴적층이 분포함이 밝혀졌으며, 서부지역은 용암류 두께가 50~70m이며 하부로 서귀포층 및 미고결퇴적층이 분포하는 것으로 밝혀졌다(고기원, 1997). 미고결퇴적층 하부에는 중생대 기반암층으로 해석되는 용결응회암, 화강암 등이 분포한다(고기원, 1991).

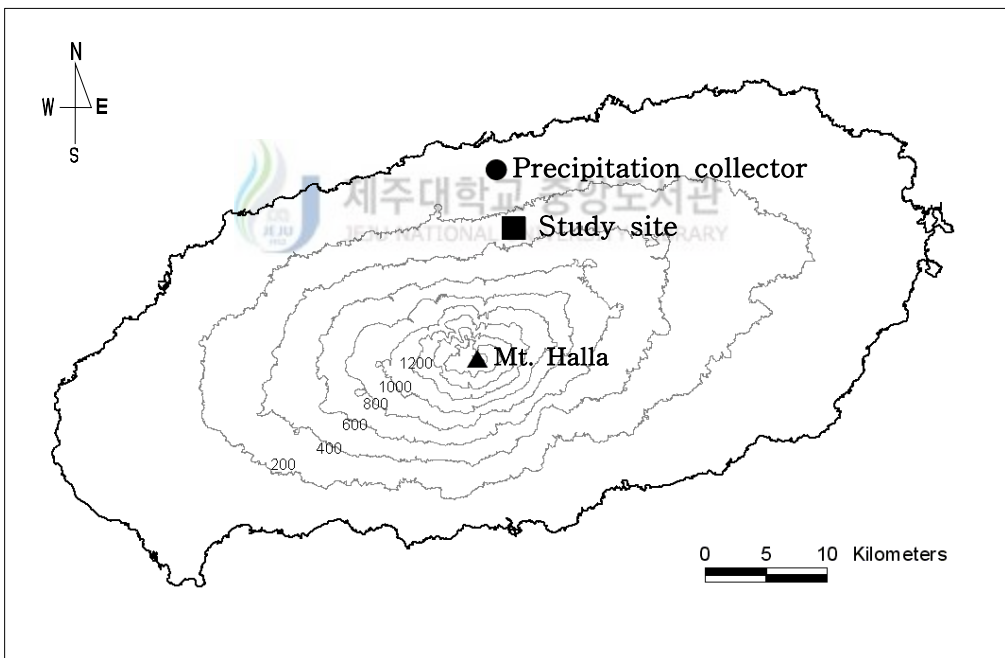


Fig. 1. Location map of the study site in Jeju Island.

2-2. 제주도의 기후

제주도는 계절에 따라 대륙성 기후와 해양성 기후가 뚜렷이 구분되어 나타난다. 4면이 바다로 둘러싸여 있고 섬의 중앙에 한라산이 위치하고 있기 때문에, 제주도 근해의 해류와 지형이 복잡하게 기후 인자로 작용하고 있다. 여름철에는 고온다습한 북태평양 기단의 영향으로 집중적인 강수 현상이 있으며 겨울철에는 북서계절풍의 영향으로 기온차가 심하다. 그러나 제주도는 연평균 기온이 16℃의 온화한 기후를 보일 뿐만 아니라 도서라는 특성에서 오는 해양성 기후의 영향과 난대성 기후를 나타내어 아열대성 식물분포를 보이고 있다(이광식 외, 1997).

본 연구지역이 위치하는 제주시 지역의 최근 10년간 월평균기온과 월별 총강수량의 변화를 도시하면 Fig. 2와 같다(제주지방기상청, 1994 - 2003). 본 지역은 사계절이 뚜렷한 기후 변화를 보여주고 있는데 월평균기온이 4.5~28.4℃ 사이에서 주기적인 변화를 보이고 있으며, 월별 총강수량 또한 4.5~706mm사이에서 주기적인 변화를 보이고 있다(Fig. 2). 그리고 연간 강수량은 2,000mm내외로 온난 다습한 기후의 특성을 잘 보여주고 있다. 기상자료에 의하면 본 지역은 1994~2003년 여름철(6월~9월)에 내린 강수가 전체 강수의 40~82%를 기록하였다. 이는 여름철에 태풍의 영향을 자주 받고, 장마기간 동안에 집중적인 강수가 내리기 때문이다.

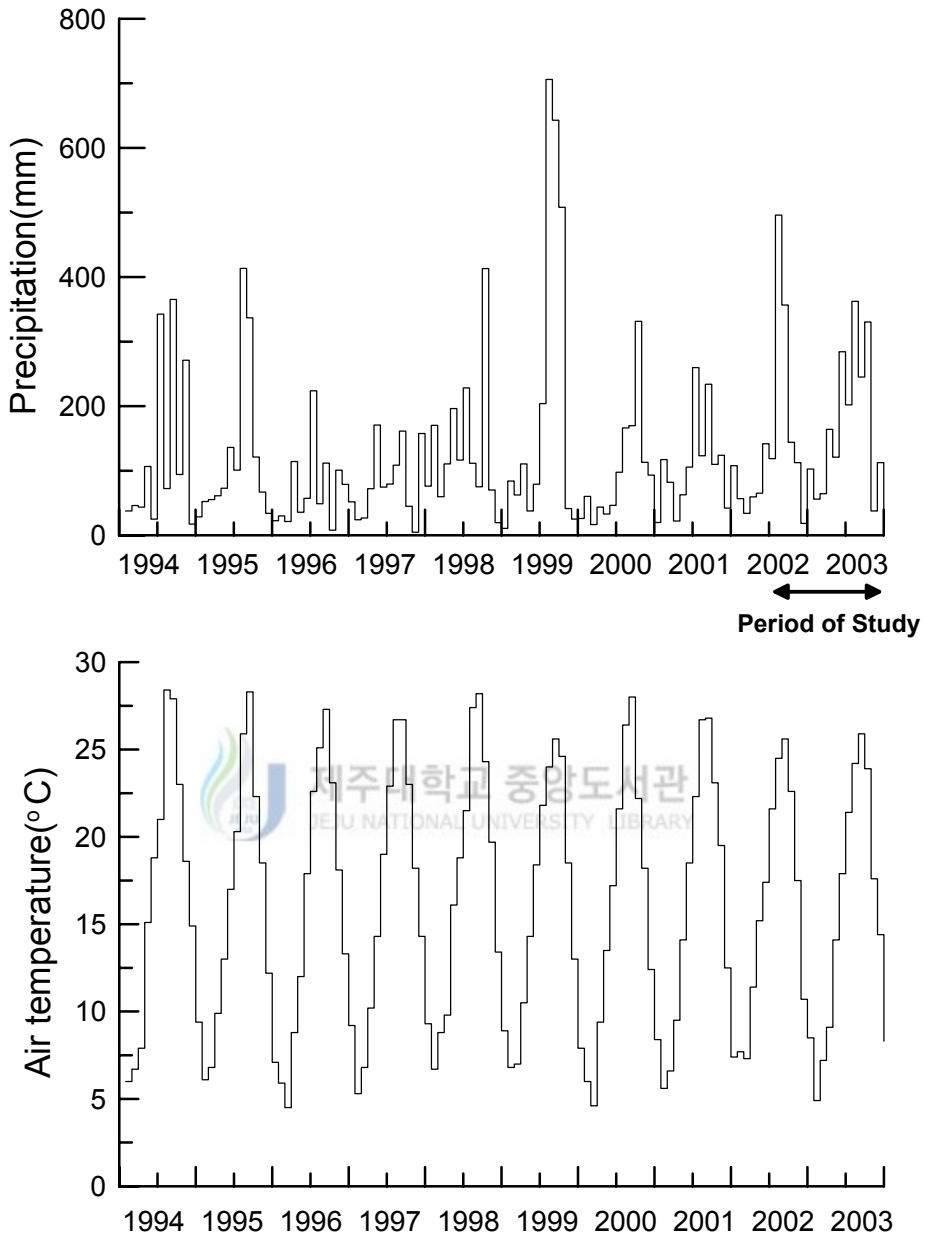


Fig. 2. Total amount of monthly precipitation and monthly average air temperature for the period 1994 to 2003 at the jeju city, Jeju Island.

Ⅲ. 연구방법

3-1. 시료채취방법

온대지역에서 강수가 비포화대를 통과하여 지하수로 함양되는 특성을 평가하기 위하여 제주대학교 농업시험장에서 지표에 잔디가 잘 발달되어 있는 곳을 선정하여 30cm, 60cm, 80cm 깊이로 토양수채수기 17개를 설치하였다 (Fig. 3). 연구지역에서 어느 깊이까지 토양층이 발달되어 있는지에 대한 정보는 없지만 90cm 깊이까지 토양층을 파본 결과 지표로부터 약 45cm 깊이까지는 주로 실트와 점토로 구성되어 있다. 이 층은 매우 균질하며 농업시험장 건설시 복토되었을 것으로 판단된다. 특히 깊이 45cm에서 약 90cm 깊이까지는 투수성이 비교적 양호한 지질특성을 보이는데, 이곳에서는 지름이 수cm에서 십여cm에 이르는 크고 작은 수많은 화산암 암편들과 이 사이를 충전하고 있는 사질점토가 발달되어 있다(Table. 1, Fig. 3).

Table 1. Grain size analysis data for study site soil.

Station	Sediment composition			Classification	Textural parameters			
	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)		Mean (Mz)	Sorting (σ)	Skewness (SK ₁)	Kurtosis (K _G)
S-1 (0~45cm)	5.63	44.22	50.15	M	6.97	2.37	-0.13	0.72
S-2 (45~90cm)	26.30	45.77	27.93	sM	4.93	3.87	-0.12	0.92

NOTE. Mz : mean grain size, σ : sorting, Sk : skewness, K_G : kurtosis,
sM : sandymud, M:mud

토양수채수기는 2002년 9월 3일에 설치한 후 약 2개월 동안 자연상태에서 적응되도록 방치하였다가 11월 7일부터 토양수 채수를 시작하였다. 설치한 17개의 토양수채수기 모두에서 토양수를 얻을 수 있었으며 2003년 11월 7일까지 12개월 동안 1~2주 간격으로 토양수를 채수하였다. 한편, 강수채수기는 제주시 일도동에 설치하고 2002년 6월부터 2003년 12월까지 강수를 채수하였다. 강수채수기는 깔대기와 폴리에틸렌 채수통(20ℓ)으로 구성되며, 제주도 월평균 강수량을 고려하여 깔대기의 직경은 25cm로 하였다. 직사광선에 의한 영향을 차단하기 위하여 채수통의 외부를 알루미늄 호일로 감았다. 강수는 한달 동안 내린 것을 모으는 방법으로 채취하였으며 강수 채취중에 빗물이 증발되는 것을 방지하기 위하여 국제원자력기구(IAEA)에서 이용하는 방법에 따라 채수기에 과란핀유를 넣어 사용하였다.

3-2. 분석방법

강수와 토양수의 산소 동위원소는 CO₂-H₂O 평형법으로 준비한 후 (Epstein and Mayeda, 1953) CO₂를 분리하여 한국기초과학지원연구원의 안정동위원소 질량분석기(영국 Isotech사의 VG Prism II 모델)로 동위원소 비($\delta^{18}\text{O}$)를 측정하였다. 수소 동위원소는 온라인 전처리장치인 PyrOH에서 물을 Cr(상표명은 MaxChrom)과 반응시켜 수소를 발생시킨 후 안정동위원소 질량분석기(영국 GV Instrument사의 Isoprime 모델)로 측정하였다. 측정값들은 천분율(‰)로 나타냈다. 분석정밀도는 $\delta^{18}\text{O}$ 가 $\pm 0.1\%$ 그리고 δD 가 $\pm 0.5\%$ 이다. 산소와 수소 동위원소 자료는 델타값(δ -value, ‰)으로 보고되었으며 다음 식으로 정의된다. $\delta(\%) = (R_{\text{Sample}} / R_{\text{Standard}} - 1) \times 1000$, 여기서 R_{Sample} 과 R_{Standard} 는 각각 시료와 표준시료의 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 또는 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 를 나타낸다.

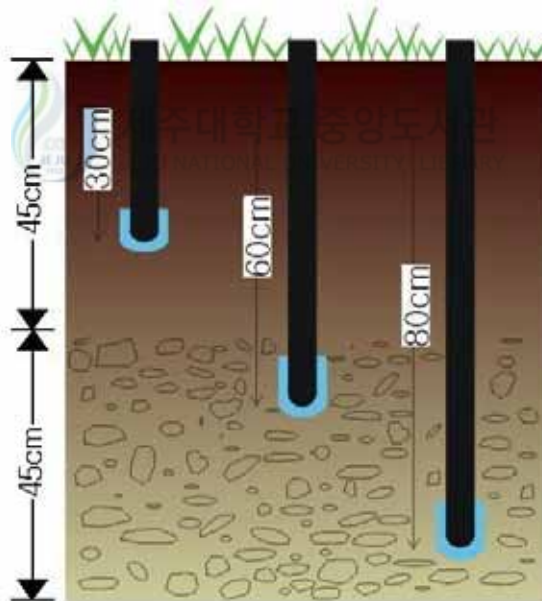
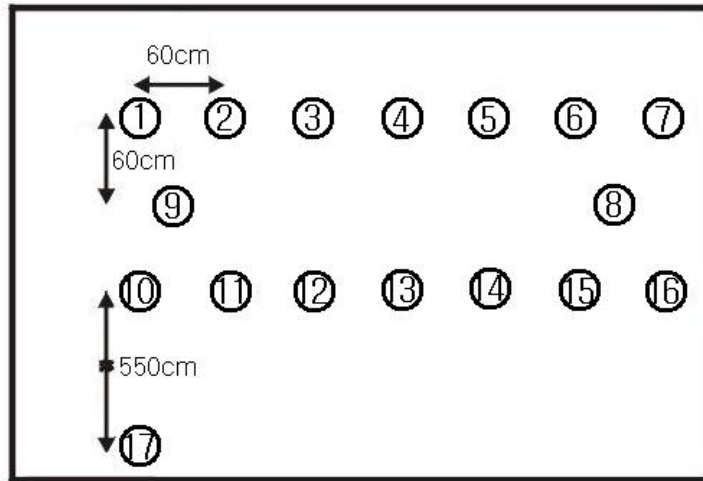


Fig. 3. Sketch map for the arrangement of lysimeters and schematic view of vertical soil profile.

IV. 결과 및 고찰

4-1. 강수의 동위원소 조성의 계절변화

강수의 안정동위원소 자료를 해석하는데 있어서 강수의 최후의 동위원소 조성을 조절하는 메커니즘을 이해하는 것이 매우 중요하다. 강수의 동위원소 조성을 결정하는 요인으로는 대륙과 해양에서 물이 증발할 당시의 기온과 빗방울이 만들어질 때의 응축농도가 가장 중요한 것으로 알려져 왔다 (Dansgaard, 1964). 해양에서 증발이 일어날 때는 ^{16}O 와 ^1H 와 같은 가벼운 동위원소를 가진 물분자들이 수증기 중으로 빨리 증발되기 때문에, ^{18}O 나 ^2H 와 같이 무거운 동위원소를 상대적으로 많이 함유하는 물분자들은 용액 중에 농집되게 된다. 이와는 달리 응축이 일어날 때는 무거운 동위원소를 함유하는 물분자가 가벼운 것들보다 빨리 응축되기 때문에, 구름속에는 가벼운 동위원소를 함유하는 물분자들이 농집되게 된다. 기단은 이동하면서 강수를 일으키는데 이때 무거운 동위원소를 가진 물분자가 기단에서 먼저 제거되기 때문에 시간이 경과함에 따라 강수의 동위원소 조성은 낮아지게 된다. 해양에서 표고가 높아지는 대륙쪽으로 이동하면서 이러한 현상이 일어날 때 대륙효과(continental effect)라 하며, 대륙내에서 높은 산맥 등의 고도가 높은 쪽으로 이동하면서 이런 현상이 일어날 때 고도효과(altitude effect)라 한다. 그리고 추운 계절의 강수가 더운 계절의 강수에 비하여 가벼운 동위원소가 상대적 많은 것을 온도효과(temperature effect)라 하며, 강수량이 많아질수록 강수의 동위원소 조성이 낮아지는 것을 우량효과(amount effect)라 한다(이광식 외, 1997).

일반적으로 극지역과 가까운 추운 대륙에서의 동위원소 조성은 온도와 매우 밀접히 관련되어 있으며, 수증기의 기원이 언제나 일정한 무더운 적도지

방에서는 동위원소 조성이 강수량과 밀접한 관계를 보여주고 있다. 그리고 온난한 중위도 지방에서는 온도효과와 우량효과 모두가 강수의 산소와 수소 동위원소 조성을 좌우하는 것으로 알려져 있다(Lawrence and White, 1991).

이광식 외(2001)는 동북아시아에 설치 운영된 국제원자력기구의 강수채수 지점에서 얻어진 동위원소 자료를 통계 처리하여, 대륙부에서는 강수의 동위원소 조성에 온도효과가 매우 뚜렷하여 산소동위원소 자료만으로 계절별 강수의 지하수 함양 정도를 평가할 수 있음을 밝혔다. 이와는 달리 해안과 인접한 곳이나 섬에서는 온도효과와 우량효과가 복합적으로 나타나기 때문에 산소동위원소 자료가 계절변화를 보이지 않았으며, 따라서 산소동위원소 조성만으로 지하수 함양 연구가 매우 어려운 것이 밝혀졌다(이광식 외, 2001). 다행히도 이러한 지역에서는 중수소과잉값(d -값)이 계절변화를 뚜렷이 보이기 때문에 계절별 강수의 지하수 함양특성 연구가 가능함이 관찰되고 있다(이광식 외, 2001).

제주도 성산에서 1995년부터 1997년에 채취한 강수의 동위원소 조성은 d -값이 겨울에 높고 여름에 낮은 주기적인 특징을 뚜렷이 보여주고 있는데(이광식 외, 1997; Lee et al., 2003), 이러한 동위원소 특징을 이용한 제주도 지하수의 함양 연구가 수행되어오고 있다(Lee et al., 1999; 이광식 외, 2002).

연구지역에서 2002년 6월에서 2003년 12월까지 채취한 강수의 월별 강수량은 겨울철에는 100mm이하로 적지만 2002년 7월에는 496mm가 내릴 정도로 여름철에 강수가 집중되는 현상이 나타났다(Table. 2). 연구기간 중에 여름철인 6~9월에 연강수량의 약 55%가 집중되었다. 월강수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 $-11.0 \sim -2.9\%$ 범위에서 약 8%의 변화폭을 보이고, δD 값은 $-81.8 \sim -9.4\%$ 범위로 매우 큰 변화폭을 보이고 있다.

연구지역에 내린 강수의 산소와 수소 동위원소 조성을 살펴보면 기온의 낮은 겨울철에 낮은 동위원소비를 보이고 기온이 높은 여름철에 높은 동위원소비를 보이는 온도효과를 뚜렷이 보이지 않았다(Fig. 4).

Table 2. Isotopic data in the monthly precipitation of the study area.

Months	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	d * (‰)	Precipitation (mm)
Jun-02	-8.2	-58.1	7.5	119
Jul-02	-4.9	-35.3	3.9	496
Aug-02	-7.0	-50.0	6.0	357
Sep-02	-7.4	-47.3	11.9	144
Oct-02	-6.0	-34.3	13.9	112
Nov-02	-10.3	-63.1	19.4	18
Dec-02	-5.5	-20.0	24.0	102
Jan-03	-7.5	-37.1	23.1	56
Feb-03	-4.4	-19.7	15.8	64
Mar-03	-6.0	-29.8	17.9	164
Apr-03	-2.9	-14.8	8.4	121
May-03	-4.8	-33.8	4.6	284
Jun-03	-11.0	-81.8	6.2	202
Jul-03	-8.5	-60.3	7.6	362
Aug-03	-7.8	-55.0	7.8	245
Sep-03	-7.7	-53.0	8.4	330
Oct-03	-4.4	-18.1	17.2	38
Nov-03	-4.1	-9.4	23.4	113
Dec-03	-7.7	-32.5	29.1	20

* $d = \delta\text{D} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$ (defined by Dansgaard, 1964)

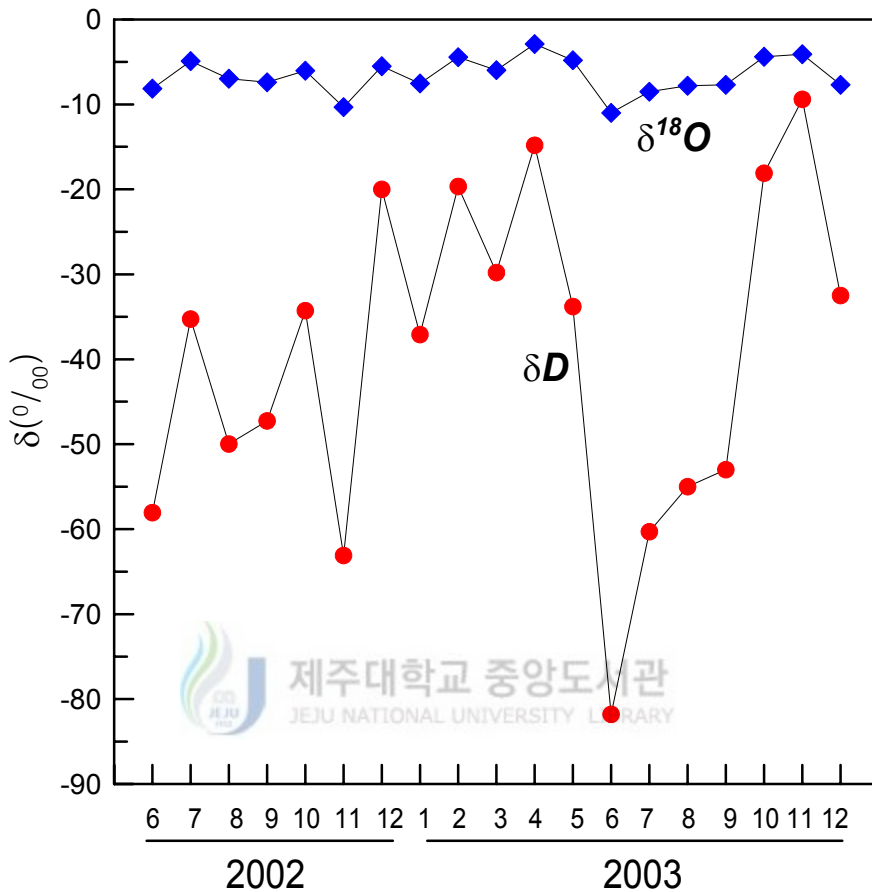


Fig. 4. The $\delta^{18}O$ and δD values of monthly precipitation.

그런데 2003년 여름철(6월~9월) 강수의 동위원소 조성은 다른 계절의 동위원소 값보다 현저히 낮은 값을 보이는 우량효과를 나타낸다. 이는 여름철에 제주도에 주로 영향을 미치는 고온다습한 북태평양 기단이 열대저기압형 강수를 일으키기 때문에 나타나는 효과이다. 태풍과 같이 강수를 빈번히 일으키는 북태평양 기단은 초기강수에 의한 무거운 동위원소가 수증기로부터 급격히 제거되기 때문에, 나중에 내리는 강수에는 가벼운 동위원소가 뚜렷하게 농축되게 된다(lee et al, 1997). 즉, 열대저기압형 강수를 일으키는 기

단은 대만과 필리핀 부근 해상과 같이 무더운 지방에서 형성되는데 이 세력이 확장됨에 따라 북동쪽으로 이동하게 된다. 이 기단은 이동 중에 흔히 폭우를 동반하는데, 우리나라 최남단인 제주도에 도착하기 전에 이미 많은 비를 내리기 때문에 제주도에는 동위원소 조성이 낮은 강수를 내리게 되는 것으로 사료된다.

반면, 중수소과잉값(d-값)은 3.9~29.1‰ 범위로 겨울철에 크고 여름철에 작은 주기적인 특징을 뚜렷이 보여주고 있다(Fig. 5, Table. 2). 이와 같이 제주도 강수에서 d-값이 뚜렷한 계절변화를 보이는 것은 여름철에는 북태평양 기단이 영향을 미치고 겨울철에는 시베리아 기단이 영향을 미치기 때문인 것으로 사료된다(이광식 외, 2002; Lee et al., 2003). 즉, 여름철의 북태평양 기단은 고온다습한 상태에서 천천히 증발되어 생성되었기 때문에 d-값이 10‰ 이하 값을 보이는 것이고, 겨울철에는 제주도에 영향을 주는 차고 건조한 시베리아 기단이 상대적으로 온도가 높은 황해를 지날 때 빠른 증발현상에 의하여 d-값이 15‰ 이상으로 높은 값을 보이는 것이다(Araguás-Araguás et al., 1998; 이광식 외, 2002; Lee et al., 2003). Fig. 5에서 보는 바와 같이 강수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 계절적인 변화의 경향이 나타나지 않아 지하수 함양연구에 이용하기가 어렵지만 d-값은 계절적으로 주기적인 변화양상이 뚜렷하여 계절별 강수의 지하수 함양연구에 매우 효과적으로 이용될 수 있음을 잘 보여주고 있다.

연구기간 중에 6월~9월의 조사지역 강수는 고온다습한 북태평양 기단의 영향을 받아 지구순환수선(Global Meteoric Water Line) 부근에 위치하며, 11월~3월의 조사지역 강수는 한랭 건조한 시베리아 기단의 영향을 받아 지구순환수선의 위쪽에 분포한다(Fig. 6). 지구순환수선의 위쪽에 분포하는 것은 중수소과잉값이 지구순환수보다 크다는 것을 의미하는데 이는 제주도 겨울강수의 일반적인 특징으로 알려졌다(Lee et al., 1999). 2003년 12월에 강수의 d-값이 29.1‰로 연구기간중 가장 큰 값을 보여주고 있으며, 2002년 7월에 강수의 d-값이 3.9‰로 가장 낮은 값을 보이고 있다.

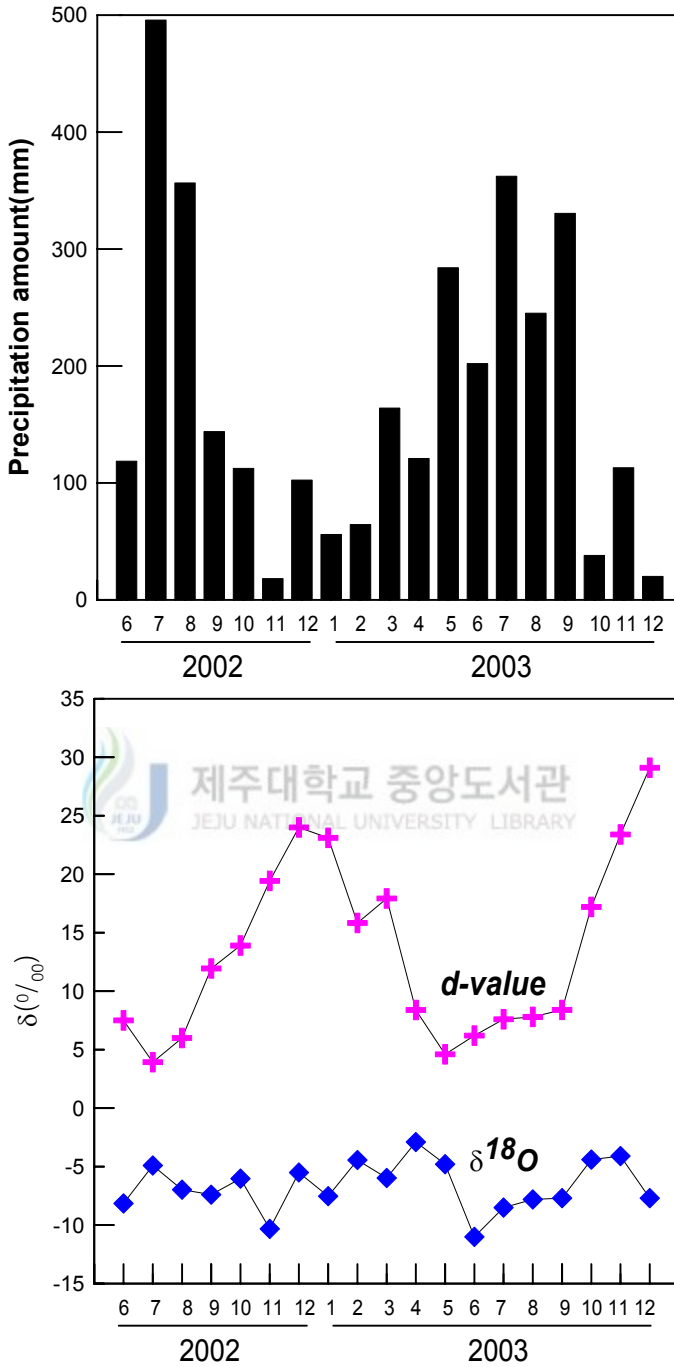


Fig. 5. Rainfall amount(mm), $\delta^{18}\text{O}$ values and d-values of monthly precipitation.

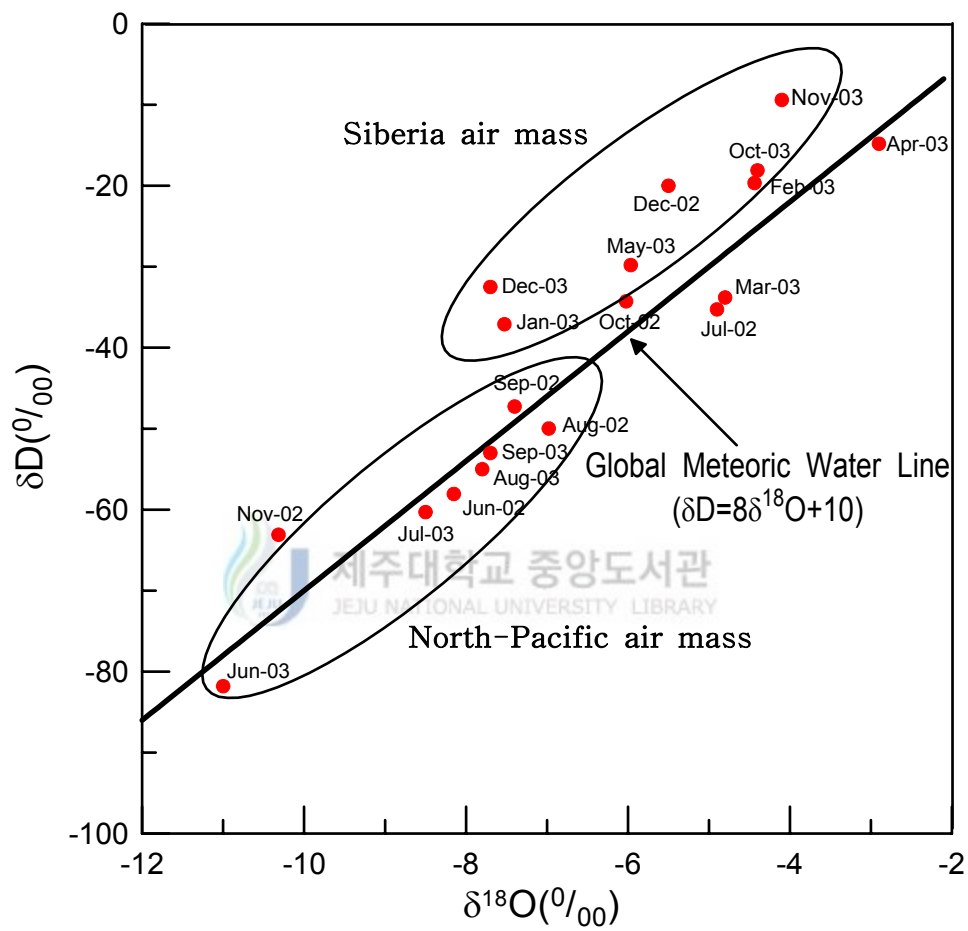


Fig. 6. Plot $\delta^{18}\text{O}$ versus δD values in monthly precipitation.

4-2. 토양수의 동위원소 조성의 계절변화

30cm 깊이 토양수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 2002년 11월부터 12월까지는 거의 변화를 보이지 않다가 2003년 1월부터 서서히 무거워지기 시작하여 2월말까지 약 1% 정도 무거워졌다(Fig. 7, Table. 3). 4월부터 이 값은 더욱 급격하게 무거워져서 6월초에 최고치를 보인후 급격히 가벼워지다가 7월말에 최저치를 보인후 다시 무거워지는 현상을 나타내고 있다. 이와는 달리, 60cm 깊이에서 채취된 토양수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 11월부터 3월말까지는 거의 변화를 보이지 않다가 4월에 들어서면서 급격히 무거워진다(Fig. 7). 7월말에 최고치를 보인후 30cm 깊이 보다는 다소 서서히 가벼워지는 것을 보이고 있고, 10월부터는 다시 변화를 보이지 않고 있다. 80cm 깊이에서 채취한 토양수도 60cm에서 채취한 것과 동위원소 조성도 유사하고 변화 형태도 유사한데, 이는 60~80cm 사이를 구성하고 있는 지질의 특성이 매우 유사하기 때문이다. 즉 이 구간에서는 화산암 풍화산물인 각역들과 모래가 많이 든 사질점토로 구성되어 있어 투수성이 높기 때문에 토양수의 통과시간이 빨라서 나타나는 현상으로 판단된다.

δD 값의 변화는 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 변화 경향이 유사하기는 하지만 보다 뚜렷한 경향을 보여준다(Fig. 8). 30cm 깊이 토양수의 δD 값은 2002년 11월부터 무거워지기 시작하여 2003년 6월초에 최고치를 보인후 급격히 가벼워지다가 7월말에 최저치를 보인후 다시 무거워지는 현상을 나타내고 있다. 60cm 깊이에서는 채취된 토양수의 δD 값은 11월부터 2월말까지는 거의 변화를 보이지 않다가 3월초에 들어서면서 급격히 무거워진다(Fig. 8). 7월말에 최고치를 보인후 30cm 깊이의 토양수보다 다소 서서히 가벼워지고 있다.

그러나, 연구 기간에 토양수채수기가 설치된 위치와 가까운 제주시 일도동에 내린 강수의 산소와 수소 동위원소 조성 변화가 계절변화를 보이지 않기 때문에(Fig. 4) 토양수의 산소와 수소 동위원소 개별자료만 가지고 강수

의 지하수 함양 특성과 통과시간을 평가하기는 어렵지만 깊이에 따른 δD 값의 변화양상을 자세히 관찰하면 특정깊이 토양에서의 강수의 도달시간에 대한 정보를 얻을 수 있다. 즉 30cm 깊이에서 채취한 토양수에서는 2002년 11월부터 δD 이 증가하지만 60cm와 80cm 깊이에서는 2003년 3월초부터 증가하기 때문에 60cm와 80cm 깊이 토양까지는 강수가 도달되는데 4개월 이상의 통과시간이 소요되었음을 유추할 수 있으며, 이러한 것은 d-값의 변화와 비교하여 확인할 수 있었다.



Table 3. Oxygen and hydrogen isotopic compositions of soil waters.

Lysimeter NO.	#1	#1	#2	#2	#3	#4	#5	#5	#6	#7	#7	#8	#8
Depth (cm)	30	30	60	60	30	60	30	30	60	60	30	80	80
	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	δD
Date	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)
2002-11-07	-7.0	-43.5	-6.5	-44.3	-6.9	-6.4	-6.9	-43.5	-6.5	-42.1	-6.6	-6.5	-45.5
2002-11-15	-6.8	-42.1	-6.4	-44.2	-6.8	-6.5	-6.7	-42.2	-6.4	-41.0	-6.5	-6.5	-45.6
2002-11-22	-6.8	-41.4	-6.6	-43.1	-6.8	-6.6	-6.9	-41.6	-6.5	-41.6	-6.5	-6.7	-45.0
2002-11-29	-6.9	-40.6	-6.6	-44.4	-6.8	-6.7	-6.6	-41.6	-6.6	-43.0	-6.6	-6.7	-44.0
2002-12-06	-7.0	-40.8	-6.7	-43.4	-6.9	-6.7	-6.6	-40.1	-6.7	-42.9	-	-6.7	-45.0
2002-12-12	-6.7	-39.9	-6.8	-45.3	-6.7	-6.6	-6.6	-40.1	-6.7	-43.9	-6.4	-6.7	-46.2
2002-12-19	-6.6	-37.4	-6.7	-44.0	-6.5	-6.7	-6.5	-35.7	-6.6	-43.4	-6.4	-6.7	-46.4
2002-12-26	-6.3	-33.8	-6.8	-44.2	-6.4	-6.7	-6.3	-33.5	-6.6	-43.1	-6.3	-6.8	-45.1
2003-01-02	-6.2	-32.1	-6.7	-43.5	-6.2	-6.7	-6.2	-31.4	-6.7	-43.1	-6.3	-6.9	-46.0
2003-01-17	-6.0	-29.6	-6.8	-44.2	-6.2	-6.6	-6.1	-30.6	-6.8	-43.1	-6.2	-6.9	-45.6
2003-02-03	-5.7	-26.6	-6.7	-44.4	-5.9	-6.6	-5.9	-28.7	-6.6	-45.2	-6.0	-6.8	-45.4
2003-02-17	-5.7	-25.3	-6.7	-42.7	-	-	-5.9	-28.4	-6.7	-42.3	-	-6.8	-45.2
2003-02-28	-5.8	-26.8	-6.7	-41.0	-5.9	-6.4	-6.1	-28.0	-6.6	-45.5	-6.0	-6.7	-43.5
2003-03-14	-6.0	-29.0	-6.5	-41.1	-5.9	-6.5	-6.1	-30.3	-6.5	-43.2	-6.0	-6.5	-40.5
2003-03-29	-5.9	-30.2	-6.6	-39.5	-	-6.2	-6.0	-31.1	-6.5	-41.5	-5.8	-6.4	-38.2
2003-04-12	-5.6	-26.6	-6.3	-38.3	-5.7	-6.1	-5.7	-29.0	-6.3	-39.0	-5.6	-6.2	-35.8
2003-04-26	-5.6	-27.6	-6.4	-35.6	-5.8	-6.0	-5.6	-28.0	-6.2	-35.9	-5.4	-6.2	-33.0
2003-05-03	-5.5	-27.0	-6.3	-34.6	-5.5	-6.0	-5.4	-25.4	-6.2	-33.1	-5.2	-6.2	-30.1
2003-05-10	-5.2	-26.6	-6.2	-34.9	-5.2	-6.0	-5.1	-25.9	-6.0	-32.6	-4.8	-6.1	-29.9
2003-05-16	-5.0	-24.5	-6.1	-31.7	-5.1	-5.9	-5.0	-23.0	-6.1	-31.4	-4.8	-6.1	-31.7
2003-05-23	-4.6	-22.8	-6.2	-29.3	-4.8	-5.9	-4.7	-23.2	-6.0	-31.1	-4.7	-6.1	-29.8
2003-05-31	-4.3	-20.8	-5.9	-30.3	-4.7	-5.8	-4.6	-21.8	-6.0	-31.1	-4.3	-6.0	-28.3
2003-06-07	-4.3	-23.8	-5.7	-28.8	-4.4	-5.8	-4.7	-23.0	-5.9	-29.5	-4.2	-5.9	-26.8
2003-06-13	-5.1	-29.7	-5.9	-29.3	-4.9	-5.7	-4.9	-27.0	-5.9	-30.7	-4.5	-5.9	-27.1
2003-06-20	-5.4	-33.1	-5.8	-29.8	-4.7	-5.7	-5.1	-30.1	-5.9	-31.3	-4.8	-5.7	-26.9
2003-06-27	-6.5	-41.9	-5.7	-28.7	-	-5.5	-5.8	-34.7	-5.8	-28.9	-5.2	-5.5	-26.4
2003-07-04	-7.6	-52.2	-5.6	-31.8	-6.1	-5.5	-6.4	-44.9	-5.7	-32.8	-5.8	-5.5	-31.3
2003-07-12	-8.9	-64.4	-5.5	-33.3	-7.3	-5.5	-7.5	-52.6	-5.8	-32.7	-6.7	-5.4	-31.3
2003-07-18	-9.8	-68.5	-5.9	-36.6	-8.7	-5.4	-8.5	-61.0	-5.8	-33.3	-7.6	-5.4	-31.6
2003-07-25	-9.9	-72.6	-6.3	-38.9	-9.2	-5.4	-8.8	-64.1	-6.2	-33.6	-8.0	-5.5	-31.6
2003-08-01	-9.7	-70.0	-6.0	-39.5	-9.1	-5.7	-8.5	-62.0	-5.8	-33.9	-8.2	-5.4	-34.3
2003-08-18	-8.9	-62.5	-6.5	-41.1	-8.9	-6.1	-8.4	-60.8	-6.0	-36.0	-8.0	-5.8	-34.7
2003-08-30	-8.1	-56.0	-7.1	-48.3	-8.2	-6.8	-7.8	-55.0	-6.1	-38.0	-7.8	-6.2	-40.0
2003-09-15	-7.8	-53.8	-7.1	-48.8	-7.9	-7.0	-7.7	-54.8	-6.3	-40.2	-7.8	-6.7	-46.6
2003-09-27	-7.8	-54.2	-7.4	-48.8	-7.8	-7.5	-7.9	-55.1	-6.9	-43.6	-7.9	-7.5	-50.6
2003-10-11	-8.1	-55.8	-7.7	-50.0	-7.9	-7.9	-8.1	-55.5	-7.2	-46.8	-8.0	-7.9	-53.7
2003-10-25	-8.0	-55.1	-	-	-8.0	-7.6	-8.1	-56.2	-7.2	-47.8	-7.3	-7.7	-54.3
2003-11-07	-8.1	-55.6	-	-	-7.7	-7.5	-8.2	-56.2	-7.4	-48.2	-7.9	-7.6	-54.4

Table 3. Continued.

Lysimeter NO.	#9	#9	#10	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17
Depth (cm)	80	80	30	30	60	30	60	30	30	30	80
	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$
Date	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)
2002-11-07	-6.2	-39.3	-6.7	-44.7	-6.8	-6.7	-6.5	-6.7	-6.4	-6.9	-6.5
2002-11-15	-6.1	-38.5	-6.7	-42.2	-6.7	-6.7	-6.6	-6.6	-6.5	-6.7	-6.5
2002-11-22	-6.2	-39.1	-6.7	-40.7	-6.5	-6.8	-6.4	-6.6	-6.5	-6.9	-6.6
2002-11-29	-6.4	-39.0	-6.7	-40.2	-6.8	-6.5	-6.8	-6.6	-6.6	-6.3	-6.6
2002-12-06	-6.2	-40.2	-6.8	-40.8	-6.8	-6.7	-6.6	-6.6	-6.7	-6.9	-6.8
2002-12-12	-6.1	-37.4	-6.5	-38.9	-6.9	-6.5	-6.7	-6.4	-6.6	-6.5	-6.3
2002-12-19	-6.3	-39.4	-6.4	-36.8	-6.7	-6.5	-6.7	-6.5	-	-6.5	-6.5
2002-12-26	-6.4	-39.0	-6.3	-34.7	-6.7	-6.2	-6.6	-6.4	-6.6	-6.5	-6.6
2003-01-02	-6.4	-40.5	-6.3	-33.9	-6.6	-6.1	-6.7	-6.4	-6.7	-6.4	-6.6
2003-01-17	-6.4	-40.9	-6.0	-30.0	-6.6	-5.9	-6.8	-6.3	-6.7	-6.3	-6.6
2003-02-03	-6.5	-40.8	-6.0	-30.0	-6.6	-5.8	-6.6	-6.0	-6.6	-6.1	-6.5
2003-02-17	-6.5	-42.4	-6.0	-28.3	-	-	-	-	-	-	-
2003-02-28	-6.4	-41.9	-5.9	-29.3	-6.3	-6.1	-6.3	-6.2	-6.5	-6.2	-6.4
2003-03-14	-	-	-	-	-6.5	-6.1	-6.3	-6.1	-6.5	-6.1	-6.5
2003-03-29	-6.4	-38.8	-5.7	-30.1	-6.1	-6.1	-6.1	-6.0	-6.3	-6.0	-6.1
2003-04-12	-6.3	-39.6	-5.4	-27.9	-6.0	-5.8	-6.0	-5.5	-6.2	-5.8	-6.0
2003-04-26	-6.2	-37.2	-5.4	-26.4	-6.0	-5.6	-6.0	-5.4	-6.2	-5.7	-5.9
2003-05-03	-6.2	-33.7	-5.4	-25.7	-5.9	-5.4	-5.9	-5.1	-6.0	-5.4	-5.9
2003-05-10	-6.2	-33.3	-5.3	-25.6	-	-5.0	-5.7	-4.9	-6.2	-5.1	-5.7
2003-05-16	-6.2	-32.4	-5.2	-25.3	-5.9	-5.0	-6.0	-4.8	-6.0	-5.0	-5.8
2003-05-23	-6.1	-32.3	-5.0	-24.7	-5.8	-4.7	-5.9	-4.6	-5.9	-4.7	-5.5
2003-05-31	-5.5	-30.2	-4.7	-23.3	-5.7	-4.2	-5.7	-4.6	-5.7	-4.7	-5.4
2003-06-07	-5.5	-30.0	-4.3	-23.2	-5.4	-4.6	-5.7	-4.1	-5.7	-4.8	-5.3
2003-06-13	-5.7	-30.6	-4.4	-23.2	-5.2	-5.0	-5.5	-4.0	-5.7	-4.7	-5.3
2003-06-20	-5.9	-33.0	-4.5	-24.9	-5.2	-5.3	-5.6	-4.3	-5.6	-4.8	-5.2
2003-06-27	-6.1	-34.8	-4.9	-26.6	-5.2	-5.9	-5.6	-4.7	-5.7	-5.6	-5.1
2003-07-04	-5.8	-34.5	-5.3	-34.1	-5.4	-6.7	-5.5	-5.9	-5.8	-5.7	-5.0
2003-07-12	-6.0	-35.9	-6.2	-41.7	-6.1	-7.8	-5.8	-5.9	-5.7	-6.4	-5.0
2003-07-18	-6.2	-38.9	-7.0	-47.8	-6.7	-8.6	-6.0	-6.8	-5.8	-6.7	-4.9
2003-07-25	-5.6	-32.7	-7.7	-55.1	-7.0	-8.9	-6.3	-7.4	-5.9	-7.6	-5.1
2003-08-01	-5.8	-34.3	-8.1	-57.8	-	-8.8	-6.5	-7.8	-5.8	-7.8	-5.3
2003-08-18	-5.9	-36.0	-8.2	-59.1	-7.6	-8.7	-7.0	-7.8	-6.3	-7.9	-5.7
2003-08-30	-6.4	-42.0	-8.2	-58.6	-7.9	-8.0	-7.3	-7.8	-7.1	-7.8	-6.0
2003-09-15	-6.5	-42.3	-7.9	-55.1	-8.1	-7.6	-7.6	-7.7	-6.7	-7.7	-6.3
2003-09-27	-6.7	-45.5	-7.8	-53.8	-8.2	-	-7.8	-7.6	-6.8	-7.9	-6.9
2003-10-11	-6.6	-44.0	-8.0	-53.8	-8.3	-7.9	-8.1	-7.7	-7.2	-	-6.8
2003-10-25	-6.7	-44.2	-7.8	-52.6	-8.1	-7.9	-7.9	-7.4	-7.3	-7.7	-6.9
2003-11-07	-6.6	-44.3	-7.7	-52.2	-7.9	-8.0	-7.7	-7.7	-7.4	-7.7	-6.8

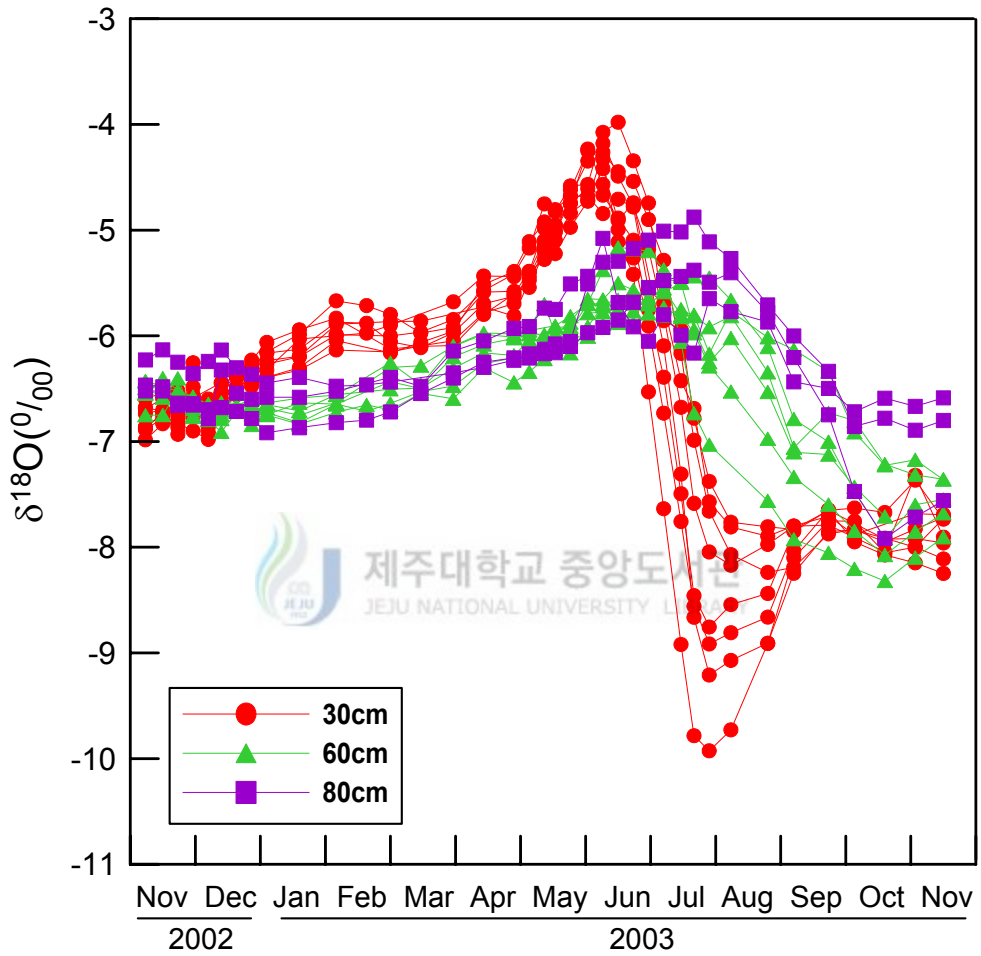


Fig. 7. Seasonal variation of $\delta^{18}\text{O}$ values of soil waters.

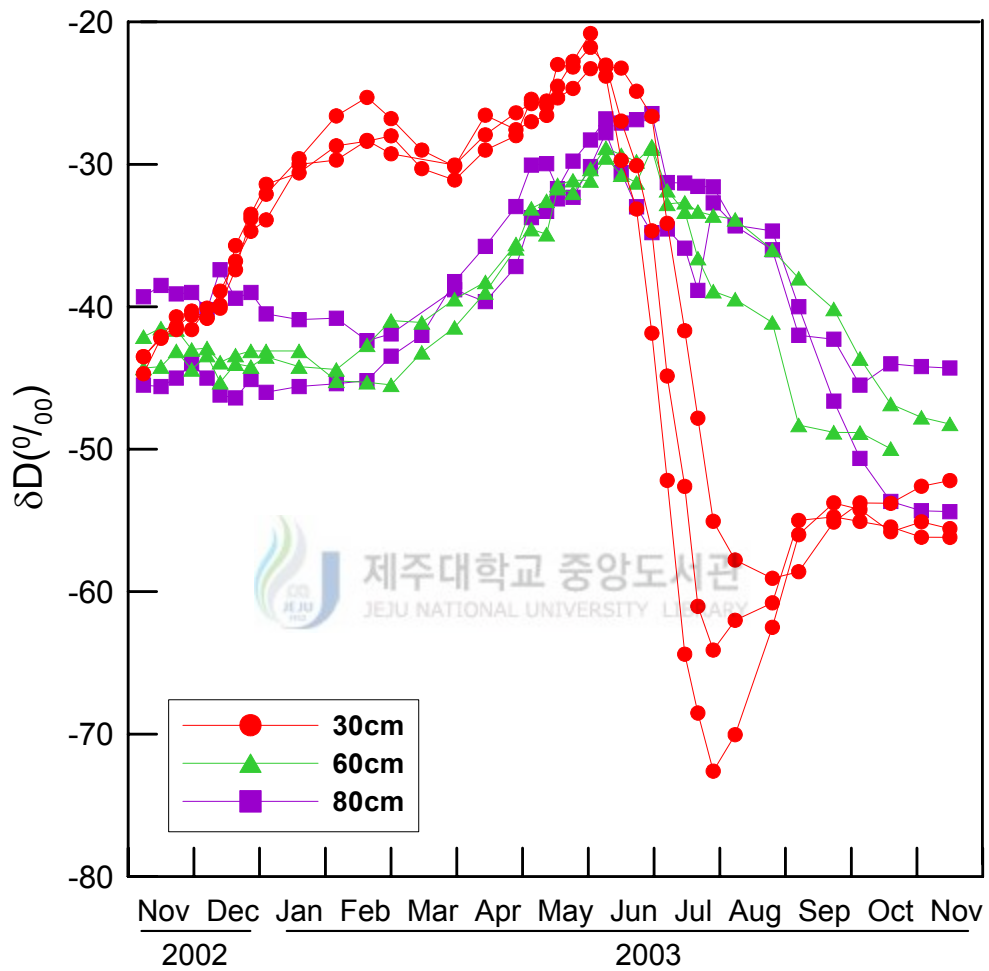


Fig. 8. Seasonal variation of δD values of soil waters.

채취된 토양수의 d-값은 강수가 비포화대를 통과하여 함양되는 특성을 잘 보여준다(Fig. 9, Table. 4). 30cm 깊이에서 채취한 토양수에서는 2002년 11월부터 d-값이 증가하는 경향을 보인다. 2003년 2월 말경에 d-값이 최고치를 보이다가 감소하는 경향을 뚜렷이 보여준다. 이러한 변화경향은 앞서 설명한 토양수의 산소와 수소 동위원소와는 다른 변화경향이다. Fig. 5에서 강수의 d-값은 2002년 12월에서 최대값을 보이지만, 30cm 깊이의 토양수에서는 2월말에 최대값을 보이기 때문에 강수가 30cm까지 침투하는데 약 2개월의 통과시간이 소요되었음을 알 수 있다. 30cm와는 달리 60cm와 80cm 깊이에서는 d-값이 변화가 없는 상태가 계속되다가 2월말부터 증가하기 시작한다. 이것은 2월말부터 겨울강수가 60cm 깊이에 영향을 미치기 시작했음을 의미한다. 60cm와 80cm 깊이에서 d-값은 5월초나 6월초에 최고치를 보이다가 서서히 감소하는 경향을 보인다. 이는 겨울강수가 60cm와 80cm 깊이를 통과하는데 4개월 이상의 시간이 소요됨을 의미하는 것이다. 60cm와 80cm 깊이에서 토양수의 통과시간에 차이가 없어 보이는 것은 두 깊이의 지질학적 특성이 매우 유사하고 투수성이 높아 토양수의 이동이 매우 빠르기 때문인 것으로 판단된다.

토양수의 산소와 수소 동위원소 조성을 Fig. 10에 함께 도시하였다. 아울러 비교를 위하여 1995년부터 2003년까지 제주도에서 얻어진 월강수의 산소와 수소동위원소 자료를 이용하여 얻어진 여름강수와 겨울강수의 지역순환수선(Local Meteoric Water Line)을 함께 도시하였다. Fig. 10에서 시간경과에 따라 토양수 동위원소 조성이 변화양상을 살펴보면, S지점에서 출발하여 화살표 방향을 따라 동위원소 조성이 변화하다가 다시 S지점으로 돌아오고 있다. 이러한 동위원소 조성 변화는 30cm 깊이에서 가장 먼저 일어나고, 약 2개월이 더 경과한 후에 60cm와 80cm에서 동시에 일어나는 것을 볼 수 있는데, 이는 연구지역 토양수의 동위원소 조성이 시간경과에 따라 강수의 동위원소 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.

Table 4. Deuterium excess values of soil waters.

Lysimeter NO.	#1	#2	#5	#6	#8	#9	#10
Depth (cm)	30	60	30	60	80	80	30
Date	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)
2002-11-07	12.4	8.0	11.4	10.3	6.7	10.5	8.7
2002-11-15	12.6	7.3	11.7	9.7	6.6	10.6	11.5
2002-11-22	13.2	9.9	13.9	10.5	8.3	10.9	13.1
2002-11-29	14.6	8.4	11.0	9.6	9.2	11.9	13.1
2002-12-06	15.0	10.2	13.1	10.3	8.6	9.7	13.3
2002-12-12	13.9	9.0	12.6	9.7	7.2	11.7	13.4
2002-12-19	15.1	9.5	16.4	9.0	7.3	11.0	14.4
2002-12-26	16.6	10.5	16.9	10.1	9.2	11.9	15.7
2003-01-02	17.1	10.5	17.9	10.7	9.3	11.1	16.7
2003-01-17	18.3	10.5	18.4	11.5	9.4	10.3	18.2
2003-02-03	18.8	9.4	18.3	8.0	9.2	11.0	18.3
2003-02-17	20.4	10.6	18.7	8.4	9.2	9.3	19.5
2003-02-28	19.6	12.6	20.5	7.6	10.3	9.6	17.9
2003-03-14	18.8	11.3	18.6	9.0	10.4	-	-
2003-03-29	17.2	13.3	16.7	10.3	13.0	12.0	15.4
2003-04-12	18.1	12.2	16.6	11.1	14.2	10.7	15.5
2003-04-26	17.1	15.9	17.0	13.8	16.7	12.7	17.1
2003-05-03	17.3	16.2	18.1	16.4	19.6	15.6	17.4
2003-05-10	15.0	14.8	15.3	15.8	19.1	16.0	16.7
2003-05-16	15.1	17.3	17.0	17.3	16.9	16.9	16.4
2003-05-23	14.2	17.3	14.8	17.0	19.0	16.1	15.1
2003-05-31	13.2	17.0	15.1	16.9	19.5	13.9	14.5
2003-06-07	10.8	16.9	14.3	17.6	20.6	12.8	11.0
2003-06-13	11.2	17.7	12.1	16.2	19.7	14.9	12.3
2003-06-20	10.2	16.3	10.7	15.8	18.6	14.3	11.4
2003-06-27	10.4	16.9	11.4	17.4	17.9	13.6	12.6
2003-07-04	8.9	12.9	6.3	13.1	12.5	11.9	8.1
2003-07-12	7.0	10.7	7.3	13.9	12.2	12.1	7.7
2003-07-18	9.7	10.9	6.6	13.1	11.5	10.5	8.1
2003-07-25	6.8	11.1	5.9	12.0	12.4	12.5	6.2
2003-08-01	7.8	8.7	6.3	12.3	9.0	11.8	6.8
2003-08-18	8.8	11.2	6.7	12.1	11.5	11.0	6.8
2003-08-30	8.8	8.5	7.8	11.0	9.6	9.5	6.9
2003-09-15	8.2	8.2	6.4	10.5	7.4	9.7	7.9
2003-09-27	7.8	10.6	8.5	11.7	9.1	8.2	8.9
2003-10-11	8.6	11.7	9.1	11.0	9.7	8.7	9.8
2003-10-25	8.9	-	9.0	9.6	7.4	9.1	10.0
2003-11-07	9.3	-	9.8	10.7	6.1	8.4	9.6

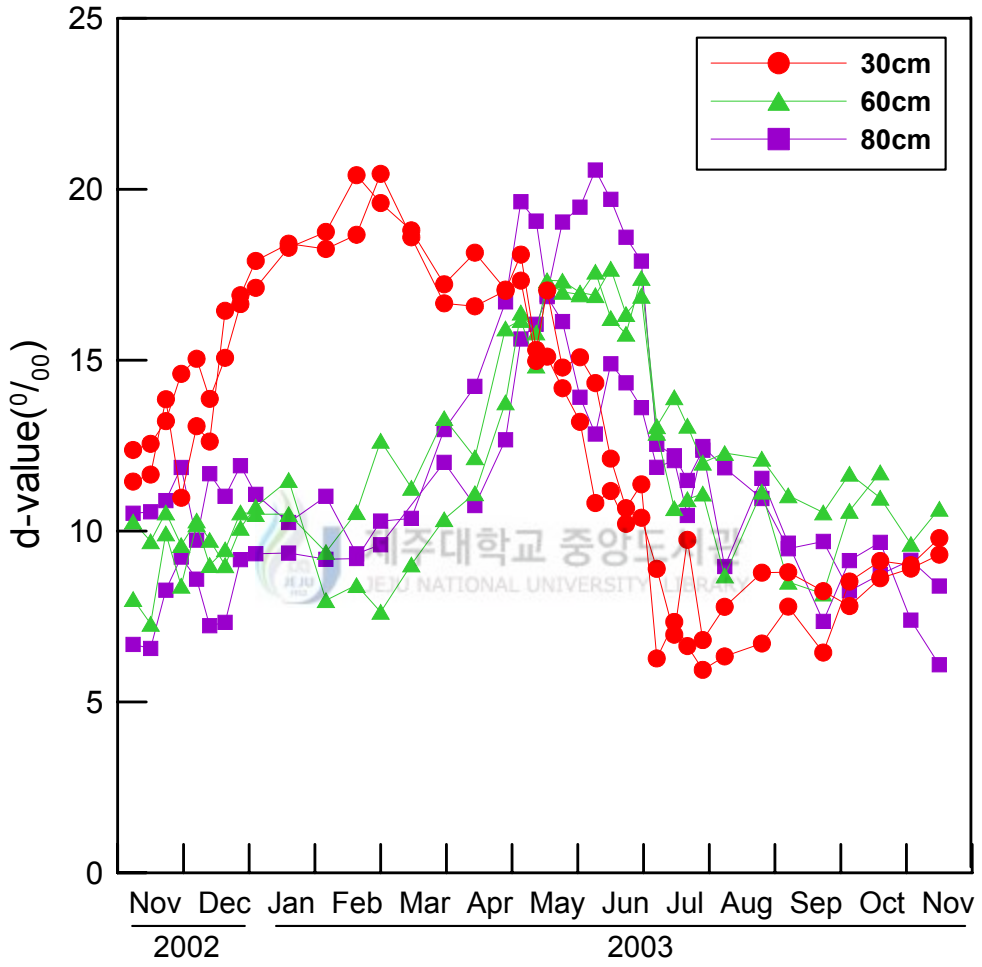


Fig. 9. Seasonal variation of d-values of soil waters.

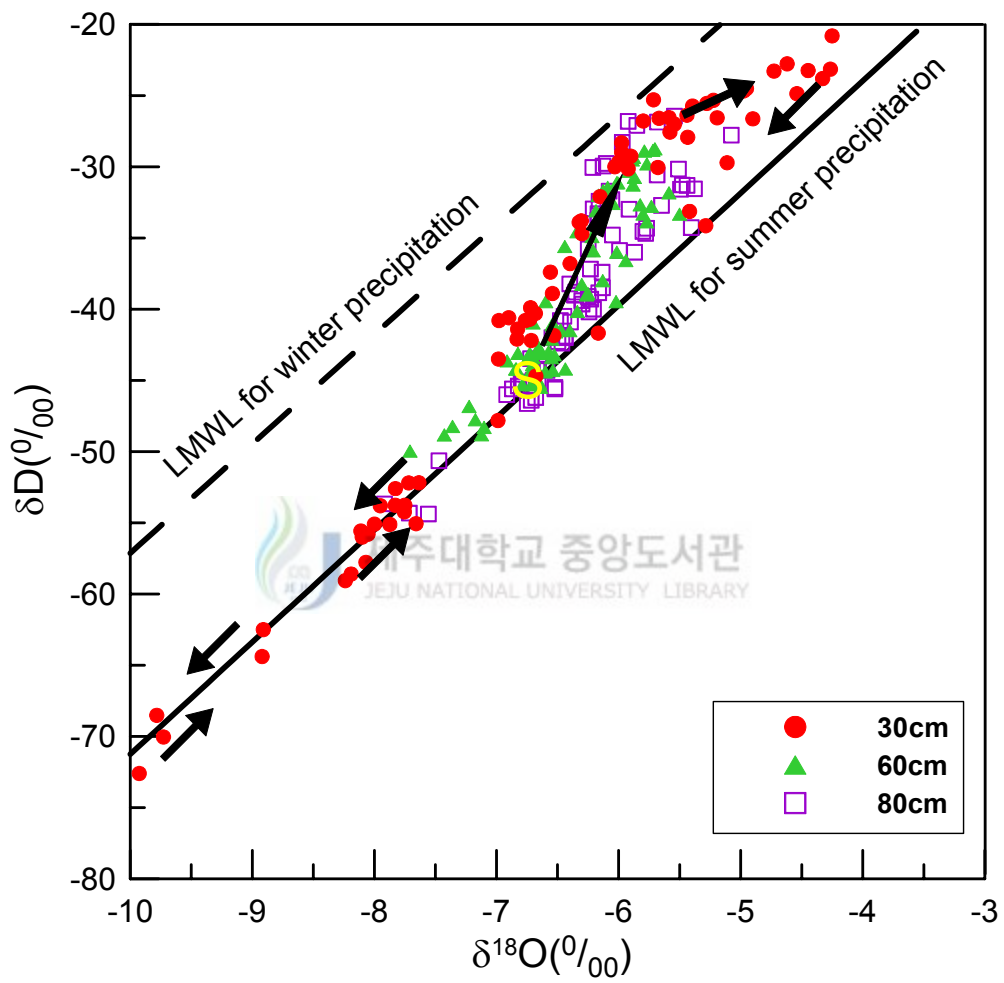


Fig. 10. Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of soil waters.

이러한 토양수의 동위원소 조성 변화를 더 자세히 분석하기 위해 30cm 깊이 토양수와 2002년 9월부터 2003년 8월까지 강수의 산소와 수소동위원소 조성을 Fig. 11에 함께 도시하였다. 2002년 11월부터 2003년 4월까지 채수된 토양수의 산소와 수소 동위원소 조성은 여름강수 조성에서 겨울강수 조성으로 서서히 변화되어 가다가 5월말이나 6월초에 산소와 수소 동위원소 조성이 최대값을 보인다. 6월초 이후에는 5월과 6월 강수의 영향을 받아 동위원소 조성이 급격히 낮아져서 6월말에는 2002년 11월 처음 채수한 토양수와 동위원소 조성이 유사해 졌으며, 7월말에 동위원소 조성이 최저치를 보인 후 다시 높아지고 있다. 토양수의 동위원소 조성이 겨울철 강수보다 여름철 강수에 더 빠르게 반응하는 것은 강수량의 차이에 의한 우량효과때문에 일어나는 현상으로 판단된다(Fig. 11).

연구를 시작할 때 기온이 높은 여름철에는 토양에서 증발이 일어날 것으로 예상하였지만 분석된 토양수의 동위원소 자료는 증발현상에 의한 영향은 거의 받지 않았음을 보여주고 있다(Fig. 10). 만일 토양에서 증발현상에 의하여 일부 토양수가 증발되었다면 동위원소 분별이 일어나서 여름강수의 순환수선보다 기울기가 적은 방향으로 동위원소 조성이 변할 것이지만 Fig. 10에서 이러한 경향은 거의 보이지 않는다. 5월에 채수된 30cm 깊이 토양수는 기울기가 8보다 적어서 증발현상의 영향으로 보일수도 있지만, 이것은 증발현상이 아니라 4월 강수에 의해 영향을 받아 토양수의 동위원소 조성이 4월 강수쪽으로 가까워진 현상임을 알 수 있다(Fig. 11).

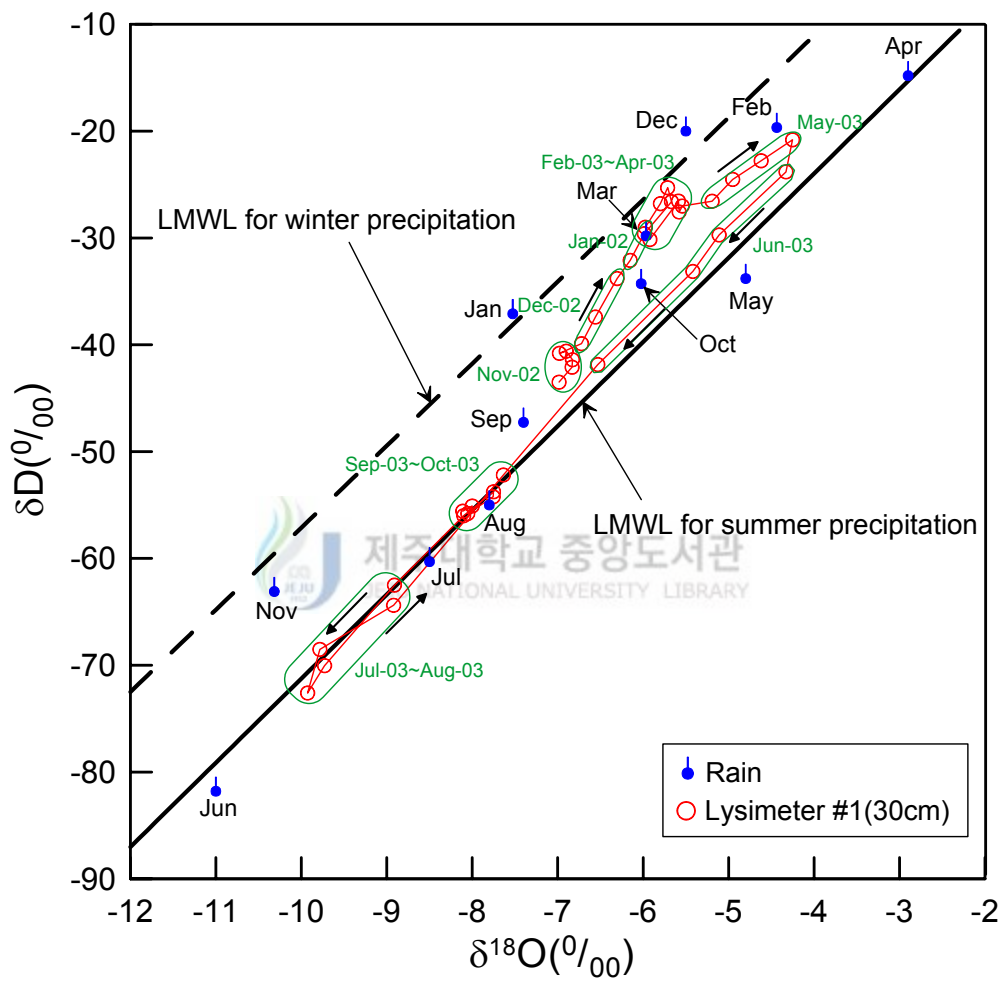


Fig. 11. Progression in $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of soil water(30cm).

V. 결론

비포화대에서 토양수의 이동특성과 강수의 지하수 함양특성을 평가하기 위하여 제주대학교 농업시험장 부지 내에 30cm, 60cm, 80cm 깊이로 토양수채수기 17개를 설치하여 토양수의 동위원소 조성 변화를 관찰하였고, 아울러 제주시 일도동에 강수채수기를 설치하여 월강수의 동위원소 조성 변화를 동시에 분석하였다.

1. 월강수의 산소와 수소동위원소는 온도효과와 우량효과가 복합적으로 나타나고 있기 때문에 뚜렷한 계절변화의 양상은 보여주고 있지 않는 것으로 관찰되었다. 그렇지만 중수소과잉값(d -값)은 겨울철에 크고 여름철에 작게 나타나고 있어 뚜렷한 계절변화의 양상을 잘 보여주고 있는 것으로 관찰되었다.

2. 특정 심도의 토양에 강수가 도달되는 시간을 측정하여 강수의 지하수 함양특성을 평가하기 위한 방법으로 토양수와 강수의 산소와 수소 동위원소 조성에 관한 개별자료를 활용하기보다는 시간경과에 따른 강수의 동위원소 특성이 잘 반영되어 나타나는 중수소과잉값(d -값)을 분석하는 것이 적합하다.

3. 심도별 강수의 통과시간을 산정해보면 30cm 깊이의 토양까지 도달되는데 약 2개월, 60cm 깊이의 토양까지 도달되는데 약 4~5개월이 소요되는 것으로 관찰되었다. 그러나 60cm와 80cm 깊이의 토양에서는 강수의 통과시간에 거의 차이가 보이지 않는 것으로 관찰되었다.

4. 30cm 깊이까지의 토양은 점토와 실트성분이 많은 점토층으로 구성되어 있어 투수성이 낮고 토양수의 이동속도가 느리기 때문에 2개월의 통과시간이 소요되었다. 반면 60cm~80cm 구간에서의 토양은 화산암의 풍화암편들

과 이들 사이에 충전되어 있는 모래와 실트성분이 많은 사질점토로 구성되어 있어 투수성이 높고 토양수의 이동속도가 빠르기 때문에 통과시간이 거의 차이가 보이지 않는 것으로 판단된다.

본 연구지역의 토양수에서는 증발작용이 거의 없는 것으로 관찰되었는데, 이는 제한된 지역에 대한 분석자료의 결과이므로 향후 연구지역의 확대, 장기적인 연구, 자료축적을 통해 증발작용에 대한 체계적인 조사·연구가 필요하다고 판단된다. 이런 점으로 미루어 볼 때 본 논문연구가 동위원소를 이용한 제주도 수자원 연구에 기초자료로 이용될 수 있을 것으로 보인다.



참고문헌

- 고기원, 1991, 제주도 서귀포층의 지하분포 상태와 지하수와의 관계(요약).
지질학회지, 27, 528 p.
- 고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련
성. 부산대학교 대학원 박사학위 논문, 325 p.
- 김건영, 고용권, 배대석, 김경수, 김천수, 2001, 지하수 함양 특성 해석을 위
한 동위원소 적용. 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회 요약집,
149-152.
- 농어촌진흥공사, 1989, 지하수장기개발계획보고서, 농림부.
- 조성현, 문상호, 이광식, 김석중, 2003, 산소동위원소(^{18}O)추적자를 이용한 청
도지역 소유역에서의 유출수문곡선 분리 연구, 지질학회지, 39,
509-518.
- 박기화, 이봉주, 한만갑, 김정찬, 기원서, 박원배, 김태운, 2003, 제주도 지질
여행. 한국지질자원연구원 · 제주발전연구원, 179 p.
- 산업기지개발공사, 1981, 제주도 수자원개발 종합보고서.
- 이광식, 장병욱, 1994, 우리나라 대전과 서울 지역 강수의 안정동위원소 성
분. 지질학회지, 30, 475-481.
- 이광식, 정제일, 1997, 포항 강수의 안정 동위원소 조성 변화. 자원환경지질,
30, 321-325.
- 이광식, 고동찬, 이대하, 박원배, 2002a, 제주도 강수의 동위원소 조성의 시
공간적 분포: 지하수 함양에의 응용. 지질학회지, 38, 151-161.
- 이광식, 박원배, 이대하, 고동찬, 2002b, 강수의 중수소과잉값에 영향을 주는
요인들. 한국지하수토양환경학회 추계학술대회, 2002년 9월 13-14일,
부산대학교.

- 이광식, 이동림, 김용제, 박원배, 2003, 토양수채수기를 이용한 토양수의 이동 관찰: 제주도 지하수 함양에의 예비적 연구. 지질학회지, 39, 535-543.
- 이광식, 이인성, 최만식, 박은주, 1997, 제주도 강수의 환경 동위원소 연구. 지질학회지, 33, 139-147.
- 이광식, 우남철, 김강주, 2001, 동북아시아 강수의 안정동위원소 조성에 영향을 주는 요인들. 지질학회지, 37, 183-192.
- 이봉주, 문상호, 박기화, 고동찬, 고기원, 2002, 제주도 용천수의 수리지화학적 특성. 지질학회지, 38, 421-439.
- 윤정수, 박상운, 1998, 제주도 용천수의 수리지화학적 특성. 지하수환경학회지, 5, 66-79.
- 제주도, 1999a, 제주도 지하수순환시스템 조사. 446 p.
- 제주도, 1999b, 제주의 물, 용천수. 경신인쇄사, 392 p.
- 제주도, 2001, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사 (I). 378 p.
- 제주도, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(3), 한국수자원공사, 425 p.
- 한국수자원공사, 1993, 제주도 수자원종합개발계획수립 보고서.
- 한국자원연구소, 2000, 제주(백야도, 진남포) 지질도폭 설명서. 15 p.
- 한정상, 1994, 제주도 지하수 자원의 보호전략에 관한 연구, 30, 325-340.
- Araguás-Aaraguás, L., Froehlich, K., Rozanski, K., 1998, Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia. Journal of Geophysical Research, 103, 28721-28742.
- Bartaya, S.K., Bhattacharya, S.K., Ramesh, R. and Somayajulu, B.L.K., 1995, $\delta^{18}\text{O}$ and δD systematics in the surficial waters of the Gaula river catchment area, Kumaun Himalya, India. Journal of Hydrology, 167, 369-379.
- Clark, I.D. and Fritz, P., 1997, Environmental isotopes in hydrogeology,

- Lewis publisher, New York., 328.
- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- Craig, H. and Gordon, L., 1965, Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and marine atmosphere, In: Tongiorgi, E. (ed.), *Stable isotopes in oceanographic studies and paleotemperatures*. Spoleto, 9-130.
- Cunningham, E.E.B., Long, A., Eastoe, C. and Bassett, R.L., 1998, Migration of recharge waters downgradient from the Santa Catalina Mountains into the Tucson basin aquifer, Arizona, USA. *Hydrogeology Journal*, 6, 94-103.
- Darling, W.G. and Bath A.H., 1988, A stable isotope study of recharge processes in the English chalk. *Journal of Hydrology*, 101, 31-46.
- Dansgaard, W., 1964, Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-468.
- Ehhalt, D., Knott, K., Nagel, J.F. and Vogel, J.C., 1963, Deuterium and oxygen-18 in rain water. *Journal of Geophysical Research*, 68, 3775-3780.
- Epstein, S. and Mayeda, T.K., 1953, Variation of O18 content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4, 213-224.
- Gat, J.R. and Carmi, I., 1970, Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area. *Journal of Hydrology*, 16, 177-212.
- Geake, A.K. and Foster, S.S.D., 1989, Sequential isotope and solute profiling in the saturated zone of British Chalk. *Hydrological Sciences*, 34, 79-95.

- 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.
- Ingraham, N.L. and Shadel, C., 1992, A comparison of the toluene distillation and vacuum/heat methods for extracting soil water for stable isotopic analysis. *Journal of Hydrology*, 140, 371-387.
- Kendall, C., Sklash, M.G. and Bullen, T.D., 1995, Isotope tracers of water and solute sources in catchments, In: Stephen T. Trudgill (ed), *Solute Modelling in Catchment Systems*. John Wiley & Sons Ltd, p. 261-303.
- Lakey, B. and Krothe, N.C., 1996, Stable isotopic variation of storm discharge from a perennial karst spring, Indiana, *Water Resources Research* 32, 721-731.
- Lawrence, J.R. and Gedzelman, S.D., 1996, Low stable isotope ratios of tropical cyclone rains. *Geophysical Research Letters*, 23, 527-530.
- 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.
- Liu, B., Phillips, F., Hoines, S., Campbell, A.R. and Sharma, P., 1995, Water movement in desert soil traced by hydrogen and oxygen isotopes, chloride, and chlorine-36, southern Arizona. *Journal of Hydrology*, 168, 91-110.

- Majoube, M., 1971, Fraccionement en oxygene-18 et en deuterium entre l'eau et sa vapeur. *Journal of Chemical Physics*, 197, 1423-1436.
- Maloszewski, P., Moser, H., Stichler, W. and Trimborn, P., 1995, Isotope hydrology investigations in large refuge lysimeters. *Journal of Hydrology*, 167, 149-166.
- Martinelli, L.A., Victoria, R.L., Sternberg, 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.*, 183, 191-204.
- McConville, C., Kalin, R. and Flood, D., 1999, Direct equilibration of soil water for $\delta^{18}\text{O}$ analysis and its application to tracer studies. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 13, 1-7.
- 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.
- Négrel, P. and Roy, S., 1998, Chemistry of rainwater in the Massif Central (France): a strontium isotope and major element study. *Applied Geochemistry*, 13, 941-952.
- Panettiere, P., Cortecchi, G., Dinelli, E., Bencini, A. and Guidi, M., 2000, Chemistry and sulfur isotopic composition of precipitation at Bologna, Italy. *Applied Geochemistry*, 15, 1455-1467.
- Revesz, K. and Woods, P., 1990, A method to extract soil water for

- stable isotope analysis. *Journal of Hydrology*, 115, 397-406.
- Rozanski, K., Araguas-Araguas, L. and Gonfiantini, R., 1993, Isotopic patterns in modern global precipitation. In: Swart, P.K., Lohmann, K.C., McKenzie, J. and Savin, S. (eds.), *Climate Change in Continental Isotopic Records*. 1-36, *Geophysical Monograph* 78, American Geophysical Union.
- Saxena, R.K., 1984, Seasonal variations of oxygen-18 in soil moisture and estimation of recharge in esker and moraine formations. *Nordic Hydrology*, 15, 235-242.
- Waseda, A. and Nakai, N., 1983, Isotopic compositions of meteoric and surface waters in Central and Northeast Japan. *Geochemistry (Japan)*, 17, 83-91 (Japanese with English abstract).
- Wenner, D.B., Ketcham, P.D. and Dowd, J.F., 1991. Stable isotopic composition of waters in a small Piedmont watershed. In: Taylor, Jr., H.P., O'Neil, J.R. and Kaplan, I.R. (Eds.), *Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein*. The Geochemical Society, Special Publication No. 3: 195-203.
- Winograd, I.J., Riggs, A.C. and Coplen, T.B., 1998, The relative contributions of summer and cool-season precipitation to groundwater recharge, Spring Mountains, NV, USA. *Hydrogeology Journal*, 6, 77-93.
- Yurtsever, Y., and Gat, J.R., 1981, Atmospheric waters. In: Gat, J.R. and Gonfiantini, R. (eds.), *Stable Isotope Hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle*. 103-142, IAEA Technical Reports Series, No. 210.

감사의 글

그 동안 저의 학업과 연구에 도움을 주신 모든 분들께 감사의 마음을 드리고자 합니다. 먼저 학문의 길로 인도하여 주시고 끊임없는 지도와 격려로 보살피 주신 최영찬 교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 또한 동위원소 분석뿐만 아니라 논문작성에 이르기까지 많은 지도와 격려, 조언을 아끼지 않으신 한국기초과학지원연구원의 이광식 박사님께 감사를 드립니다. 바쁘신 일정속에서 많은 시간을 할애하여 심사를 해주신 윤정수 교수님과 부족한 저에게 조언과 지도를 해주신 제주발전연구원 박원배 박사님께 진심으로 감사를 드립니다. 아울러 대학과 대학원 시절을 통하여 관심과 정성으로 가르침을 주신 고유봉 교수님, 방익찬 교수님, 이준백 교수님, 윤석훈 교수님께 진심으로 감사를 드립니다.

본 논문이 완성되기까지 직장생활과 학업을 병행할 수 있도록 배려해 주신 농업기반공사 제주도본부 송현기 본부장님, 김종경 부장님, 이용섭 부장님, 박태석 과장님, 이상선 과장님, 서정진 과장님과 신희섭, 박진홍, 안중기, 정차연, 김창옥 계장님들께 감사의 마음을 전합니다. 그리고 문영석 선배님과 김기표 선배, 해양화학연구실 후배들, 영양조사팀의 후배 창석, 병훈, 성우, 호철, 정선에게도 고마운 마음을 전합니다.

늘 애정과 사랑으로 지켜봐 주시고 도움을 주신 아버지, 어머니, 장인어른, 장모님, 누님과 형님 및 동생 내외분과 친지들에게 감사를 드리며, 마지막으로 사랑과 정성으로 온갖 뒷바라지를 다하고 학업에 전념할수 있도록 용기를 준 사랑하는 아내 은숙이에게 이 작은 결실의 기쁨을 함께 나누고자 합니다.