

환경동위원소를 이용한 여수지역 소유역에서의 지하수함양특성 고찰

고용권 · 배대석 · 김천수 · 김경수 · 정현재* · 김성용**

한국원자력연구소, *농업기반공사, **고려대학교 지구환경과학과

Consideration of the Groundwater Recharge Based on Environmental Isotopic Characteristics of the Small Basin in the Yeosu Area.

Yong-Kwon Koh · Dae-Seok Bae · Chun-Soo Kim · Kyeong-Su Kim ·
Hyung-Jae Chung* · Seong-Yong Kim**

Korea Atomic Energy Research Institute

**Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation*

***Dept. of Earth & Environment Sciences, Korea University*

ABSTRACT

The processes and rates of groundwater recharge were studied by long-term monitoring of groundwater level and isotopic compositions of precipitation, surface water and groundwater in the Yeosu area. The isotopic compositions of surface water and groundwater were directly related to the precipitation event. It is also shown that the minimum amount of precipitation for infiltration to groundwater is about 20mm. The isotopic variations of groundwater shows that the isotopic composition of groundwater changed by each precipitation event between June and Sep. 2000 is gradually changed without input of precipitation again. It indicates that the groundwater recharged from the upper part is mixed with the groundwater in reservoir. The infiltration rate of first precipitation event after a dry season is estimated to be 16.5% using isotopic mixing equations. It is expected that the groundwater recharge rate could be estimated more quantitatively, if the isotopic method is combined with the conservative methods.

요약문

장기적인 강수량 및 지하수위 관측과 강수, 지표수 및 지하수에 대하여 동위원소모니터링을 수행함으로써, 여수지역 소규모 수계에서의 지표수와 지하수 상관관계 및 지하수의 함양특성을 고찰하였다. 지표수 및 지하수

의 동위원소조성은 강우량과 강우의 동위원소조성에 직접적으로 영향을 받고 있음을 보여준다. 또한 강우량이 약 20mm이하일 경우는 강우가 지하수로 침투되지 못함을 나타낸다. 지하수의 동위원소조성은 2000년 6월과 9월사이 발생한 12번의 각 강우사건에 의해 변화된 후, 다시 지하수 저류체의 조정으로 변화되는 양상을 확인하였다. 이는 모니터링된 강우 초기에는 강우가 상층부로부터 지하수체계로 유입되고 있음을 보여준다. 혼합방정식을 이용하면 갈수기 이후 첫 번째 강우의 지하수에 침투비율은 16.5%로 산출된다. 지하수의 함양특성에 대하여 기존 방법과 결부시켜, 보완된 동위원소방법을 적용한다면, 지하수 함양율을 보다 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

1. 서 론

산소 및 수소 안정동위원소(^{18}O and ^2H)와 삼중수소(^3H)는 물의 구성원소로서 수문순환연구에서 유용하게 활용되는 가장 이상적인 추적자이다^{1~3}. 이러한 물을 구성하는 동위원소들은 변화가 적은 (conservative) 추적자이기 때문에, 계절에 따른 강수(precipitation)의 동위원소함량이 지하수의 유동로를 따라 변화하는 지하수의 동위원소특성에 반영되게 된다. 그러므로 추적자로서 동위원소의 특성은 지하수 층의 체류시간 및 지하수의 함양특성을 평가하는데 활용될 수 있다⁴. 국외에서는 오래전부터 수리지질학 연구에 환경동위원소를 적용함으로써 지하수의 함양특성, 체류시간, 지표수와 지하수의 상관관계등 지하수 유동체계를 밝히는데 활발한 연구결과들이 제시되고 있다^{5~8}.

국내의 경우 최근에 지하수에 대한 지화학적 연구와 관련하여 환경동위원소가 적용되어^{9~12}, 지하수의 기원, 지하수의 함양지역 및 체류시간 등에 대한 해석결과를 제시하고 있다. 그러나 이러한 결과들은 일시적인 환경동위원소 결과만을 제시하고 있어, 지속적으로 순환되는 지하수유동체계를 해석하는데는 제한적이었다. 동위원소의 특성을 동력학적인 물의 순환체계에 적용하기 위해서는 시·공간적인 지하수유동체계에 대한 해석이 우선 되어야 하며, 물의 순환체계에서의 시간적인 변화에 따른 동위원소변화특성에 대한 연구가 뒷받침되어야 한다. 특히, 강우의 일부가 지하수에 유입·혼합되는 지하수 함양특성을 밝히기 위해서는 강수, 지표수 및 지하수에 대한 체계적인 시료채취에 따른 동위원소분석이 요구된다. 동위원소는 물의 가장 이상적인 추적자로 활용되어 물의 유동연구에 신뢰성

있고 정량적인 결과를 제시할 수 있다는 장점이 있지만, 지속적인 시료채취에 수반된 다량의 동위원소분석을 수행하여야 한다는 단점이 있다.

본 연구에서는 전남 여수시 낙포동내 소유역에서 강우, 지표수 및 지하수에 대하여 시간에 따른 동위원소를 분석하므로서, 기후변화(강수량 변화)에 의해 나타나는 동위원소 변화특성을 살펴보고, 이를 지속적으로 관측된 강우량 및 지하수위변화 자료와 연계시켜 연구지역의 지하수의 함양특성을 고찰하고자 하였다.

2. 지형 및 지질개요

연구지역의 위치는 여수반도의 북동단 해안에 접하여 있으며, 행정구역상으로는 전남 여수시 낙포동 일대로서 2km × 2km의 면적에 해당된다(Fig. 1). 연구지역의 중앙부에는 해발 338m(제석산)고지가 독립된 산체를 이루었으며, 남쪽 오천동 지역에는 해발 340m 고지를 정점으로 동서방향의 산계가 발달되어 있다. 제석산 동측은 완만한 경사를 이루고, 정상으로부터 저지대까지의 평균 지형경사는 약 0.5의 값을 갖는다. 남서측은 비교적 낮고 완만한 경사의 산지로 이루어진다. 표토층의 발달이 미약하여, 지형적으로는 경사가 급하기 때문에 강수의 많은 양이 지표로 직접 유출된다.

연구지역의 지질은 크게 중생대 백악기 유천층군 화산암류와 이를 관입한 알칼리 장석 화강암과 맥암으로 구성되어 있다(Fig. 1). 유천층군은 층서상 하부로부터 응방산층, 신성리층, 봉화산 용결옹회암 순으로 구성되며, 각 층은 정합적으로 놓인다. 이들 화산암류의 형성이후에 백악기 후기에 알칼리장석화강암이 관입하였다. 화강암지역은 부분적으로 풍화가 상당히 심화되었으며, 화산암류 분포지역은 신선한 노두의 발달이

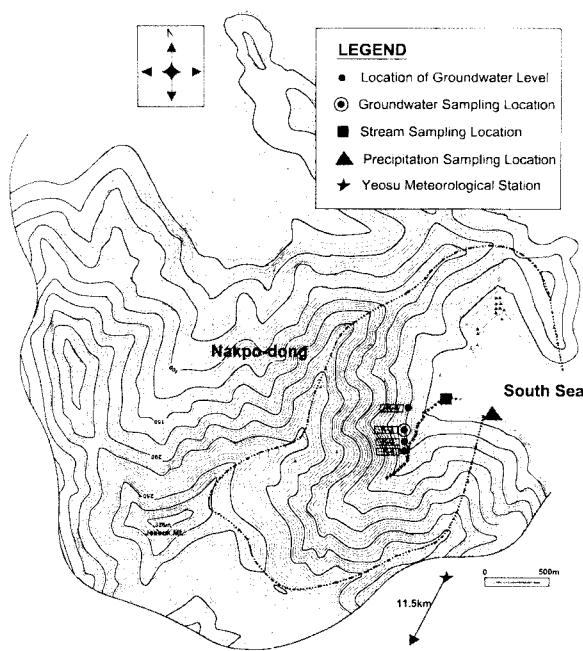


Fig. 1. Location of the study area with measuring and sampling points.

양호하며, 암반은 치밀하다. 연구지역의 지질특성은 기존 연구에 상세히 기재되어 있다¹³.

3. 연구방법

3.1 지하수위측정

연구지역의 지하수위 측정은 여수반도 북동부 해안의 제석산 동측사면에 위치한 시추공에서 이루어졌다. 시추공들은 연구지역에서 남북방향으로 4개소(K1공, K2공, K3공, K4공)가 있으며, 이중 수위측정은 K3공과 K4공에서 수행되었다(Fig. 1). 지하수위 변화는 자동수위측정기(Model no. : Diver 1215)를 이용하여 매 3시간 간격으로 자동측정되었다(www.eijkelkamp.com). 측정오차는 $\pm 0.1\%$ 이다. 수위측정은 K3공의 경우 1999년 9월 14일부터 2000년 9월 14일까지이며, K4공은 1999년 9월 15일부터 2000년 8월 16일까지 이루어졌다. K1공과 K2공은 1999년 6월에 다중팩커시스템(Multi-packer

system)이 설치된 바 있으며, 심도에 따른 지하수의 화학특성 및 동위원소특성이 연구된 바 있다¹³.

K3공과 K4공의 지표고도는 각각 57m와 50m(E. L.)이며 시추공 직선거리는 108m이다. 심도는 각각 50.1m와 90.1m(E. L.)이며, K3공과 K4공에는 각각 1.5m의 케이싱이 설치되어 있다. K1공과 K2공의 위치, 심도 및 거리 등은 동일지역에 대한 기존 단열특성 연구¹⁴와 수리화학특성 연구¹³ 등을 참고하였다.

3.2 시료채취 및 분석방법

강우(Precipitation)의 시료채취는 별도로 제작된 시료용기(25L)에 깔대기(직경 50cm)를 사용하여 일별 강수를 누적하여 가능한 한 매일 동일한 시각(오전 6시경)에 채취하여 폴리에틸렌용기에 담아 보관한 후 분석하였다. 강우시료의 증발은 동위원소 분별작용(Isotope fractionation)을 일으키므로, 이를 피하기 위해 강우채수용 용기내에는 파라핀오일을 첨가하여 강수의 증발을 최대한 방지하였다. 시료용기벽을 통한 증발을 최소화하고 외부광원을 차단하기 위하여 알루미늄 박막지로 시료용기를 포장하였다. 강우량은 별도의 강우량측정기를 사용하지 않고 연구지역에서 북동쪽으로 15km 떨어져 위치한 여수기상관측소의 관측자료(1999년 8월부터 2000년 9월까지)를 이용하였다.

지표수와 지하수의 시료채취는 흡입방식을 사용하는 자동시료채취기(Model no. : ISCO 6700)을 사용하여 2000년 5월부터 2000년 9월까지 5개월간 매일 동일한 시각(오전 11시)에 수행되었다(www.isco.com). 자동시료채취기는 24개의 1L용기를 설치할 수 있으며, 시료채취량은 900mL로 동위원소분석에 필요한 충분한 양을 채취하였으며, 강수와 마찬가지로 증발작용을 방지하기 위해 시료채취전 모든 용기에 파라핀 오일을 넣은 상태에서 시료채취가 이루어졌다. 지하수시료채취는 K3공에서만 이루어졌으며, 지표수는 시추공에 인접한 소규모수계 하류(5 m E. L.)에서 수행되었다. K3공 지하수의 경우, 지표에서 10m 깊이에 위치한 Casing 하단부의 지하수가 채취되었다.

물시료의 산소와 탄소동위원소($\delta^{18}\text{O}$ 및 $\delta^{13}\text{C}$)는 한국

원자력연구소내 안정동위원소질량분석기 (VG SIRA II)를 이용하여 분석하였고, 수소동위원소(δD) 분석을 위해서는 Micromass Optima를 사용하였다. 물시료의 산소동위원소분석은 동위원소교환반응장치 (VG Isoprep 18)를 이용하여 25°C ($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)에서 물시료와 동위원소교환반응을 거친 CO_2 gas의 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 를 측정함으로써 물시료의 $\delta^{18}\text{O}$ 값을 구하였다¹⁵⁾. 수소안정동위원소분석을 위하여 먼저 물시료로부터 아연반응제를 사용하여, 450°C 조건에서 환원반응을 통하여 수소가스를 얻는 Zn 환원법을 사용하였다¹⁶⁾. 산소와 수소동위원소분석의 분석오차는 각 $\pm 0.1\%$ 과 $\pm 1.5\%$ 이내이다.

3.3 적용방법

물의 순환체계는 강수로 유입된 물이 토양층을 거쳐 지하로 침투하여 지하수를 형성하고, 강수의 지표유출이나 지하수의 기저유출을 통하여 시간에 따른 지표수를 형성하는 것으로 간단히 설명할 수 있다. 기존에 형성된 지표수와 지하수는 물의 순환과정에서 새로운 지표수와 새로운 지하수가 계속 혼합된다. 이러한 강수, 지표수와 지하수내에 포함되어 있는 동위원소분석을 통하여 지표수와 지하수의 상관관계를 해석할 수 있다. 어느 한 시점의 지표수나 지하수에 다른 체계의 물이 혼합되었을 경우, 이에 대한 혼합방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다

$$\delta_o Q_o + \delta_n Q_n = \delta_t Q_t$$

여기서 δ_o , δ_n , δ_t 는 기존(old), 새로운(new), 혼합된(total) 지표수나 지하수의 동위원소조성을 의미하고, Q_o , Q_n , Q_t 는 각각의 유량을 나타낸다. 유량에 대한 질량보전식은 $Q_o + Q_n = Q_t$ 로 표현될 수 있으므로, 혼합된 지표수나 지하수에 대한 새로운 지표수나 지하수의 비율은 다음과 같다.

$$\frac{Q_n}{Q_t} = \frac{\delta_t - \delta_o}{\delta_n - \delta_o}$$

수문순환계의 동위원소분석 결과를 상기 식을 이용하여 수문곡선(Hydrograph)에서 새로운 강우와 눈에 대한 비율을 정량적으로 제시된 바 있다^{5,6,8,17)}. 그러나

상기 방법에 의한 수문곡선을 분리하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다¹⁷⁾: (1) 기존 지표수나 지하수의 동위원소조성은 새로운 지표수나 지하수의 동위원소조성과 상이하여야 한다. (2) 새로이 유입되는 지표수나 지하수는 유입되는 기간동안 일정한 동위원소조성을 가져야 한다. (3) 지하수와 토양수의 동위원소조성은 동일하여야 한다. 이러한 조건들은 지하수 함양특성을 평가하기 위하여 수문곡선분리 또는 동위원소적용방법에 의한 결과에 크게 영향을 미친다.

4. 연구결과

4.1 강수량과 지하수위변화

연구지역 인근 여수 기상관측소의 관측자료를 토대로 장기간의 강수량 변화를 살펴보면, 1991년~1996년 사이의 강수량 특성은 연간 평균 $1,047\text{mm}$ 이며, 1992년~1993년에는 평균 강우량인 $1,455\text{mm}$ 이고, 1994~1995년의 강우량은 이의 절반 수준인 799mm 로 그 변화의 폭이 심하게 나타난다. 특히, 약 1년간 수위관측 기간 동안(1999년 9월부터 2000년 9월까지) 계측된 총 강수량은 $1,528\text{mm}$ 로서, 연구지역에서 20년 동안의 평균 강수량보다 약 500mm 정도가 더 많다. 연구기간 중 월 강수량이 100mm 이상인 경우는 6월 중순에서 9월 하순 동안에 집중되는 경향을 보이고 있으며, 총 강수량의 80% 이상이 이시기에 집중되는 특성을 보인다.

연구기간동안의 지하수위 관측자료(Fig. 2)를 보면, 강우가 집중되는 1999년 8월과 9월사이에는 지하수위가 높게 나타나는 반면, 강우량이 적은 1999년 10월 이후에는 지하수위가 크게 감소하게 되고, 다시 2000년 6월 이후에는 급격히 지하수위가 증가되며 우기와 건기에 걸쳐 반복되는 양상을 보여준다. 즉, 천부지하수위 변화는 우리나라의 기후특성을 반영하는 강우량의 변화에 직결됨을 알 수 있다. 겨울철과 봄철인 10월과 5월사이에는 지하수위가 완만하게 감소하면서, 미약하나마 강우가 지하수위에 영향을 미치고 있음을 보여주는 반면 장마와 태풍에 영향을 받는 6월이후에는 그동안 감소되었던 지하수위가 급격하게 증가되었

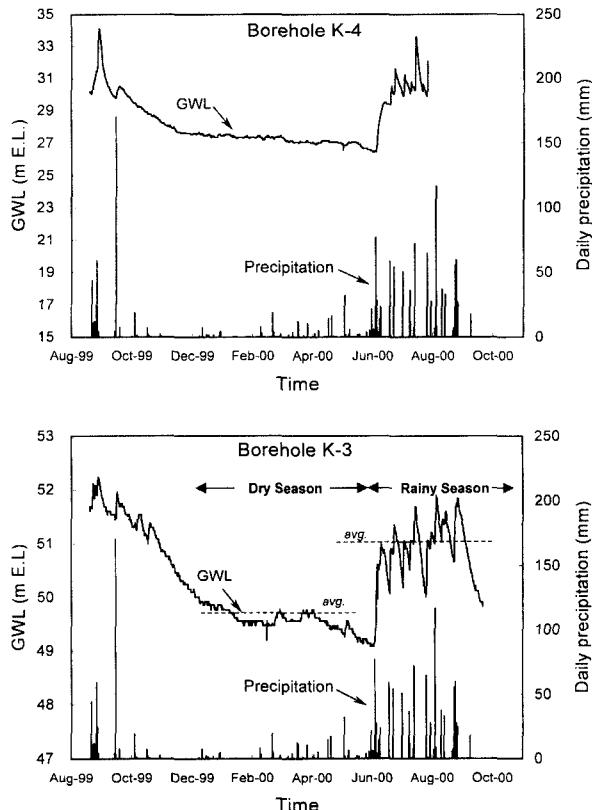


Fig. 2. Groundwater level hydrograph for K3 borehole with daily amount of precipitations in the study area.

음을 보여준다(Fig. 2).

이는 지하수 저류체(Groundwater reservoir)의 한정된 체적에 기인되는 것으로 사료된다. 충분한 강우에 의해 지하수의 함양이 시작되면 거의 일시에 최대지하수위에 가까운 값을 보이게 된 후, 다시 2차, 3차등 계속되는 강우가 유입되기 전까지 반복적인 지하수위 강하를 보이면서 전반적으로 높은 지하수위를 나타낸다. 즉, 급격한 지하수위 증가를 보여준 6월 이후에는 후속되는 강우량이 거의 일정한 값을 보임에도 지하수위는 지속적으로 증가하지 않는 것으로 나타났다. 이는 여름철에는 강우량이 풍부하다 하더라도 한정된 지하수저류체에는 일정량 이상의 강우는 함양되지 못하고 곧바로 지표유출로 유실되므로써, 지하 침투량은 선행 무강우일수와 강우강도에 좌우됨을 알 수 있다.

강우량이 집중된 2000년 6월과 9월사이의 강우량과 K3공의 지하수위와의 상관관계를 자세히 살펴보았다 (Fig. 3). 지하수위변화에 따른 강우의 영향에 대한 설명을 용이하게 하기 위하여, 상기 기간동안의 각 강우에 대해 12개의 강우사건(Event)을 선정하였다. 연구기간 전체의 지하수위자료 및 강수량자료와 동위원소 분석값들을 모두 제시하는 것은 자료가 너무 방대 할 뿐 아니라 이후의 설명과 관련하여 의미가 없으므로 각 강우사건의 강수량과 지하수위변화 및 강우사건

Table 1. Data for precipitation and groundwater level(GWL) in the 12 precipitation events.

Event	Date	Precipitation(mm)	¹ GWL1(m E.L)	² GWL2(m E.L)	Dh(m)
1	00-6-20	146.8	49.14	50.95	1.81
2	00-7-10	60.3	50.12	50.91	0.79
3	00-7-14	54.5	50.88	51.28	0.40
4	00-7-23	50.7	50.30	51.04	0.74
5	00-7-30	48.1	50.58	51.06	0.48
6	00-8-2	80.0	51.06	51.65	0.59
7	00-8-16	64.6	50.19	51.04	0.85
8	00-8-20	27.5	50.94	51.15	0.21
9	00-8-24	116.7	51.05	51.84	0.79
10	00-8-31	37.0	51.17	51.42	0.26
11	00-9-3	33.0	51.39	51.57	0.18
12	00-9-11	115.1	50.79	51.79	1.00

¹GWL1 : before the precipitation event, ²GWL2 : after the precipitation event

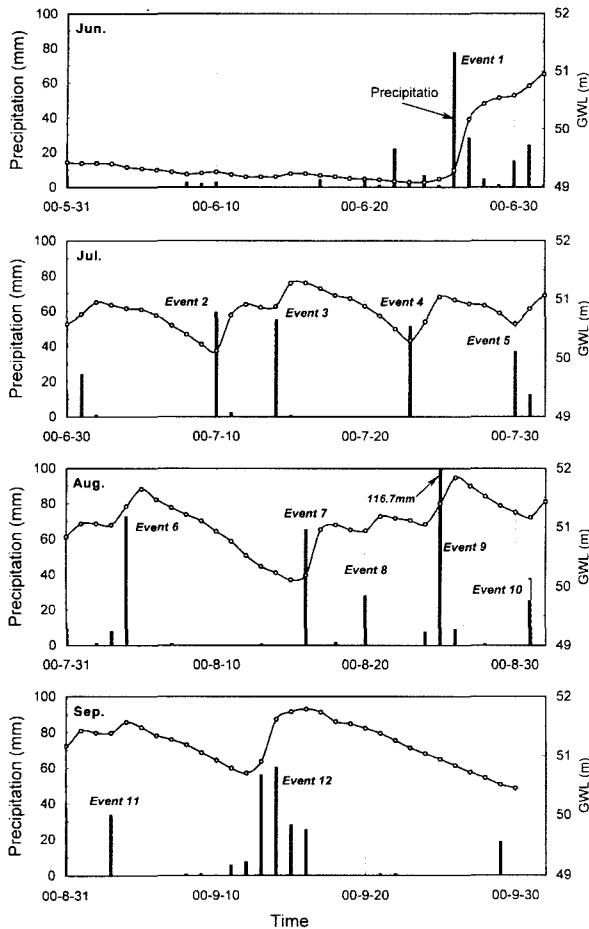


Fig. 3. Groundwater level hydrograph for borehole during rainy season. The precipitation event are divided by 12 events.

시의 지하수위만을 Table 1에 정리하였다. 모든 지하수위는 각 강우사건이 시작된 이후 급격하게 증가된 후, 약 2일 이내에 최대수위가 나타남을 보여준다. 또한, 약 20mm이하의 강우량을 보이는 경우에는 지하수위가 상승되지 않음이 확인되었다(2000년 6월 22일 강우량 : 21.4mm). 즉, 이는 연구지역 시추공지하수에 함양되는 최저임계강우량으로 설정할 수 있으며, 이는 후술하는 동위원소결과에서도 확인되고 있다(동위원소변화특성 참조).

각 강우사건에 대한 강우량과 K3공에대한 지하수위 변화의 상관관계는 강우량이 많을수록 대체로 해당 강

수사건에 의한 지하수위변화가 증가됨을 보여준다 (Fig. 4). 그러나, 한 시점에서 강우가 지하수위에 주는 영향(함양특성)은 강우량 뿐만 아니라 선행강우에 의한 영향과 강우가 지속되는 시간등에 의해 복합적으로 작용된다. 선행강우에 의한 영향은 이미 지하수위에 반영되어 있으므로 K3공의 경우 각 강우사건에 대한 지하수위와 지하수위변화(Δh)를 도시하면 (Fig. 4), 서로 역의 관계가 있음을 보여준다. 즉, 낮은 지하수위에서는 강우에 의한 지하수위의 상승효과(지하수 함양의 기여도)가 크며, 지하수위가 높을 경우는 상대적으로 지하수의 함양이 적음을 보여준다. 이는 지하수함양량은 국지적으로 발달된 지하수저류체 특성(부존체적, 연결성 등)에 지배되는 것으로 판단된다.

4.2 동위원소변화특성

강우가 집중된 시기인 2000년 5월 25일부터 2000년 9월 26일까지의 강우량, 강우, 지표수 및 지하수(K3공)의 산소동위원소분석결과($\delta^{18}\text{O}$, ‰)를 Fig. 5에 도시하였다. 강우내 산소동위원소분포는 지표수나 지하수에 비해 큰 변화(-10.9~ -3.9‰) 양상을 보여준다. 지표수의 경우는 강우처럼 동위원소조성 변화가 크지 않지만, 강우가 집중되는 시점인 6월을 전후하여 크게 변화하였음을 보여준다. 이는 6월전후에 낮은 동위원소조성을 갖는 강우의 영향으로 사료된다. 지하수는 동위원소조성변화가 지표수에 비해서도 상대적으로 좁은 범위를 보이며 6월말을 전후하여 동위원소조성이 변화되었고, 시간이 지날수록 소규모의 변화폭을 보이며 6월전의 동위원소조성값으로 회복되는 특성을 보인다. 또한 6월말을 전후하여 지표수와 지하수의 동위원소조성이 변화시기가 다르게 나타나고 있다. 지표수의 급격한 동위원소조성변화는 2000년 6월 22일에 발생되었으며, 지하수의 경우는 강우침투로 인한 지하수위 상승이 두드러지게 나타나는 2000년 6월 26일에 일어났다. 이는 강우가 상부표토층을 통과하는데 걸리는 시간이라고 해석하는 것 보다는, 강우량과 지하수위변화를 고려하면, 6월 22일부터 6월 26일까지 발생한 강우(최대 21.4mm)는 지하침투 임계 강우량 이하로서 지하수로 함양되지 못하고 모두 지표유출 되어, 지

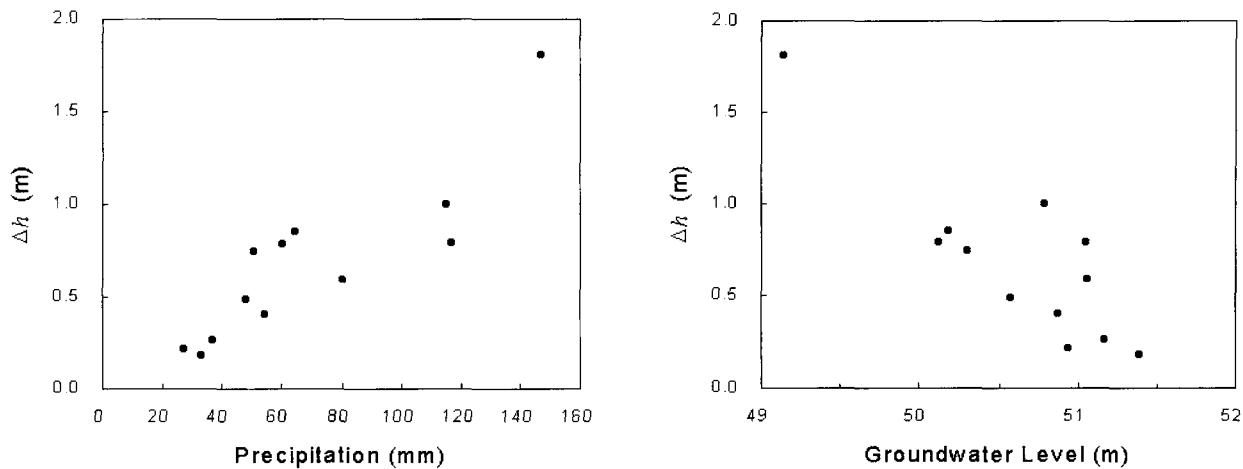


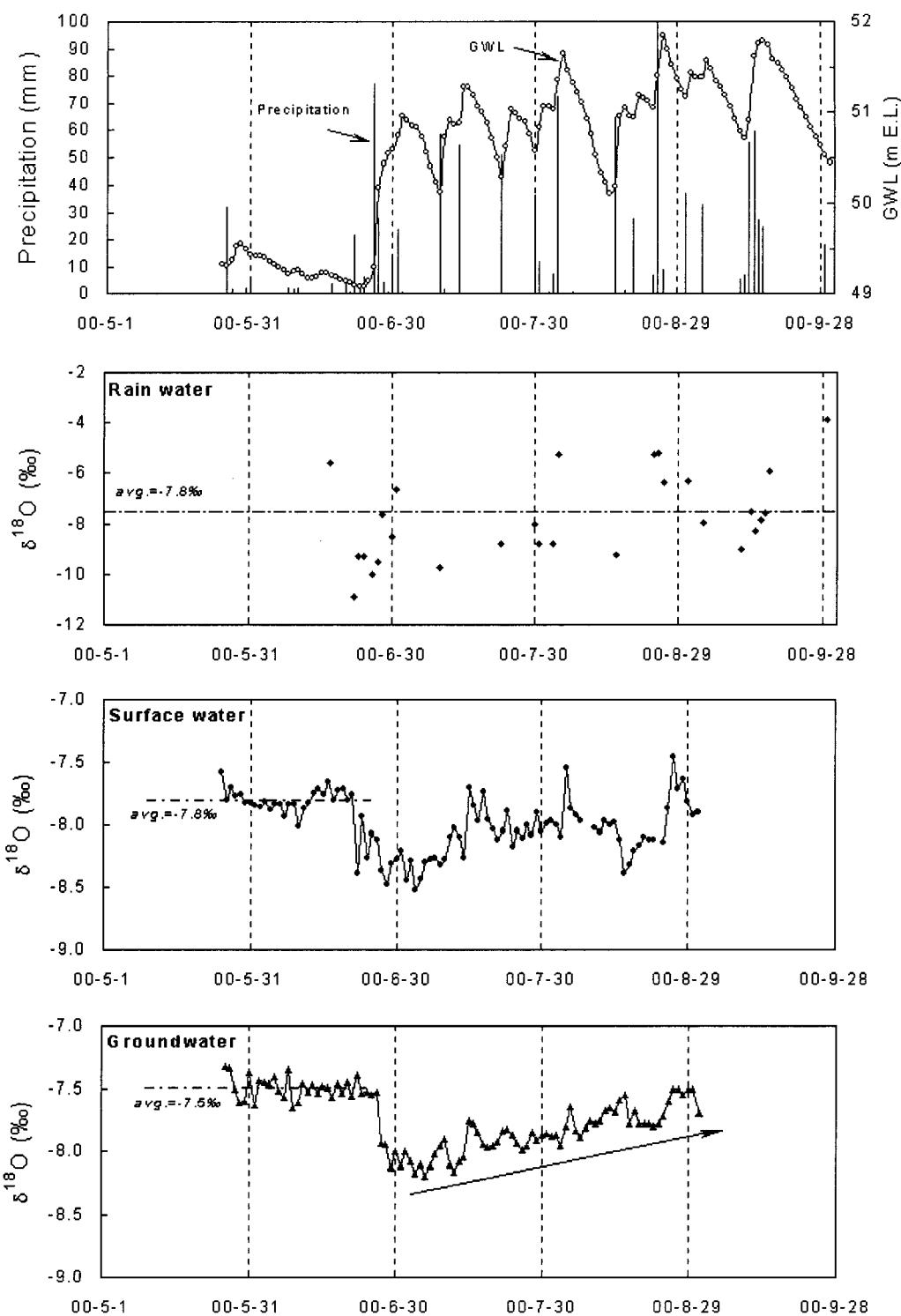
Fig. 4. The relationship between changed groundwater level (Δh) and precipitation (A) and groundwater level (B) in the study area.

표수에만 동위원소조성변화를 야기시킨 것으로 사료된다(Fig. 5).

지표수와 지하수의 동위원소변화와 이들의 상관관계를 상세히 다루기 앞서 이들의 동위원소조성이 갖는 의미를 간단히 살펴보았다. 모든 시료에 대한 산소와 수소동위원소의 상관관계는 세계적인 순환강우선($\delta D=8\delta^{18}\text{O}+10$)¹⁹ 보다는 약간 아래쪽으로 벗어나서 평행하게 도시되는 특성을 보여준다(Fig. 6). 강우에 대한 산소 및 수소동위원소의 상관관계로부터 여수지역 순환강우선의 관계식을 $D=7.7\delta^{18}\text{O}+5.3$ 으로 제시할 수 있다. 강우의 동위원소조성은 온도의 함수로서 일반적으로 온도가 높을수록 높은 동위원소조성을 갖게된다¹⁹. 그러나 일별강우의 동위원소조성은 지표온도(여수 기상관측소자료)와 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는다. 국내 포항, 서울과 제주지역 강우에서 확인된 바와 같이 동위원소의 우량효과(Amount effect)가 여수지역에서도 강우의 동위원소특성을 결정짓는데 주요한 요인임을 보여주고 있다²⁰⁻²². 전반적으로 지표수는 지하수에 비해 낮은 동위원소조성을 보여준다(Fig. 6). 특히, 강우가 집중되기 이전시기에서는 뚜렷이 지하수의 동위원소조성(평균 -7.5‰, $\delta^{18}\text{O}$)보다 지표수의 동위원소조성(평균 -7.8‰, $\delta^{18}\text{O}$)이 낮은 값을 보여준다. 일반적으로 강우의 동위원소조성의 분포에서 나타나는

고도효과(Altitude effect)를 고려한다면¹⁹, 지형특성에 따라 높은 고도로부터 함양되므로서 깊게 순환하는 지하수가 낮은 동위원소조성이 나타난다¹⁰. 상대적으로 낮은 지표수의 동위원소조성은 지표수가 지하수에 비하여 강우에 의해 민감하게 영향을 받기 때문에 강우의 동위원소 조성에 의한 영향으로 고려할 수도 있지만, 타당한 설명으로는 부족하다. 비록 K3공의 지하수는 지표(57m E.L.)로부터 10m 심도에서 채취되었지만, 지표수의 시료채취 장소가 지하수 시료채취지점 하류인 5m(E.L.)에서 채취되었기 때문에(Fig. 1), 갈수기 동안에 유출되는 지표수는 K3공 지하수보다도 더 깊게 순환하는 지하수(낮은 동위원소조성)의 기저 유출을 통하여 형성된 것으로 설명하는 것이 타당한 것으로 사료된다. 참고적으로 K1공과 K2공에서 다중 패커시스템(Multi-packer system)을 이용하여 채취된 지하수 역시 낮은 산소동위원소조성(최대 -7.8‰)을 보이지 않는다(고용권 등, 미발표자료).

시간에 따른 지표수의 동위원소조성변화는 강우량과 함께 Fig. 7에 도시되었다. 강우의 빈도가 적은 갈수기인 6월21일까지는 지표수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 거의 일정한 값(평균 -7.8‰)을 보여주다가 6월 22일 이후 21.4mm(-10.9‰)의 강우에 의해 지표수의 동위원소조성이 크게 변화되었음(-8.39‰)을 보여준다. 이를



**Fig. 5. The isotopic variations of precipitation, surface water and groundwater during rainy season
Groundwater level hydrograph are also shown with amount of precipitation.**

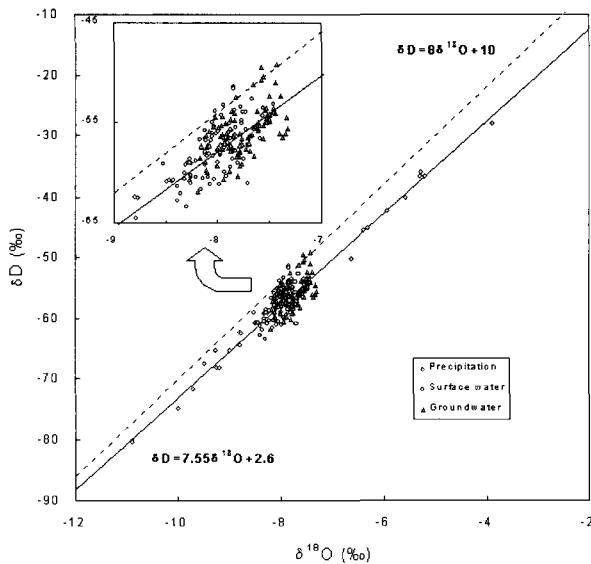


Fig. 6. The relationship of ^{18}O versus D diagram of water samples from the Yeosu area.
Dotted line = worldwide meteoric water line (Craig, 1961); solid line = local meteoric water line suggested for the Yeosu area.

앞서 기재한 혼합방정식에 적용하면 6월22일 발생된 강우에 의해 새로이 유입된 지표수는 혼합된 지하수 중 약 20%를 차지하는 것으로 계산된다. 또한 6월22일 발생한 강우는 지하수위에 영향을 미치지 못하고, 지표수의 동위원소조성의 변화에 국한되는 것으로 미루어, 21.4mm의 강우량은 지하로 침투하지 못하고 모두 지표로 직접 유출되는 것으로 판단된다.

Fig. 7에서는 이후 계속되는 강우사건에 의해 지표수의 동위원소조성은 강우의 동위원소조성에 상응하여 변화되고 있음을 보여준다. 즉, 기존 지표수에 비해 낮은 동위원소조성을 갖는 강우의 영향(Events 1 and 7)을 받을 경우는 지표수가 낮은 동위원소를 갖게되고, 강우가 상대적으로 높은 동위원소조성을 가질 경우(Events 4, 6 and 9)는 지표수에서도 높은 값을 보여주게 된다. 또한 새로운 강우의 동위원소조성이 지표수와 유사할 경우에는 동위원소조성 변화가 나타나지 않았다(Events 2 and 5). 각 강우기간에 대한 지표수의 동위원소변화는 대부분은 곧바로 나타나며,

다시 기존값으로 회복되는 특성을 보여준다. 이는 새로운 강우가 혼합된 지표수는 강우사건 이후 곧바로 지표유출로 손실되며, 지표수는 기저유출을 통하여 지하수의 영향을 크게 받고 있는 것으로 판단된다.

K3공 지하수의 시간에 따른 지하수위변화와 동위원소조성변화는 Fig. 8에 도시되었다. 지표수의 경우와 마찬가지로 지하수의 동위원소조성도 강우량이 적은 시기에는 거의 일정한 값(평균 -7.5‰, $\delta^{18}\text{O}$)을 보이다가 강우빈도가 높은 6월말이후에 변화되고 있음을 보여준다. 그러나 동위원소조성이 변화되는 폭은 지표수에 비해 크게 나타나지 않고 있다(Figs. 7 and 8). 지표수의 경우에서 적용된 바와 같이 혼합방정식을 적용함으로써 강우가 K3공 지하수에 함양된 비율을 계산할 수 있다. 즉 유입된 강우의 동위원소는 -10‰이고 강우사건 전후의 지하수의 동위원소조성이 각각 -7.52‰과 -7.93‰이므로, 6월 26일에 나타난 강우사건 1(Event 1)에 의해 6월 27일에 나타난 지하수의 함양율은 16.5%으로 산출할 수 있다. 여기서 강우와 강우사건 전후의 동위원소조성이 다르고 (-10.0‰, -7.52‰, -7.93‰), 본 논문에서는 동위원소 혼합방정식을 강우사건에 대하여 연속적으로 적용하는 것이 아니고 일시적으로 적용하였기 때문에 앞서 기재한 혼합방정식 적용조건을 충족시킨다고 할 수 있다. 단, 강우사건 시기에 토양수와 지하수의 동위원소 조성은 동일하다고 가정하였다.

지표수의 동위원소조성에서 확인되었던 6월22일 강우(21.4 mm)에 의한 동위원소변화는 지하수의 동위원소조성에서는 변화를 확인하지 못하였다(Fig. 8). 즉, 지하수위변화에서 보여진 바와 같이 임계 침투강우량(21.4mm)이하의 강우사건은 지하수 함양에 기여하지 못하는 것을 반영하는 것으로 사료된다.

Fig. 8에서 보여주는 바와 같이, 시기에 따른 지표수의 동위원소조성은 강우후 대부분 곧바로 변화된 것과는 달리 지하수의 동위원소변화의 극점은 강우후 약 2일이내에 나타난다. 즉, 지하수의 동위원소조성변화는 각각 강우에 의한 지하수위 변화와 일치하고 있음을 보여주며, 강우에 의한 지하수의 함양이 지하수의 동위원소조성에 나타나고 있음을 보여준다. 또한, 지

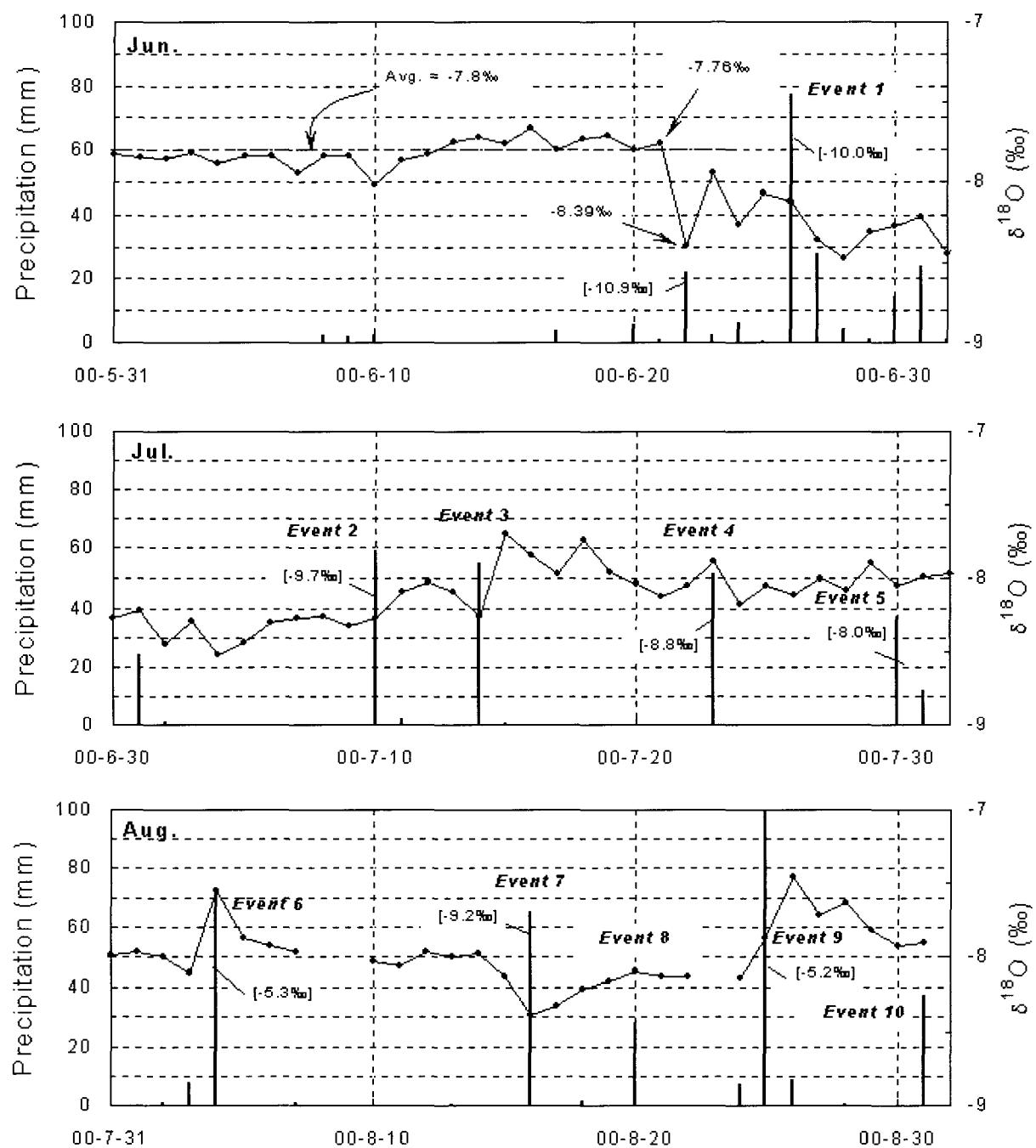


Fig. 7. The isotopic variation of surface water during rainy season. The amount and isotopic composition of precipitation are also included.

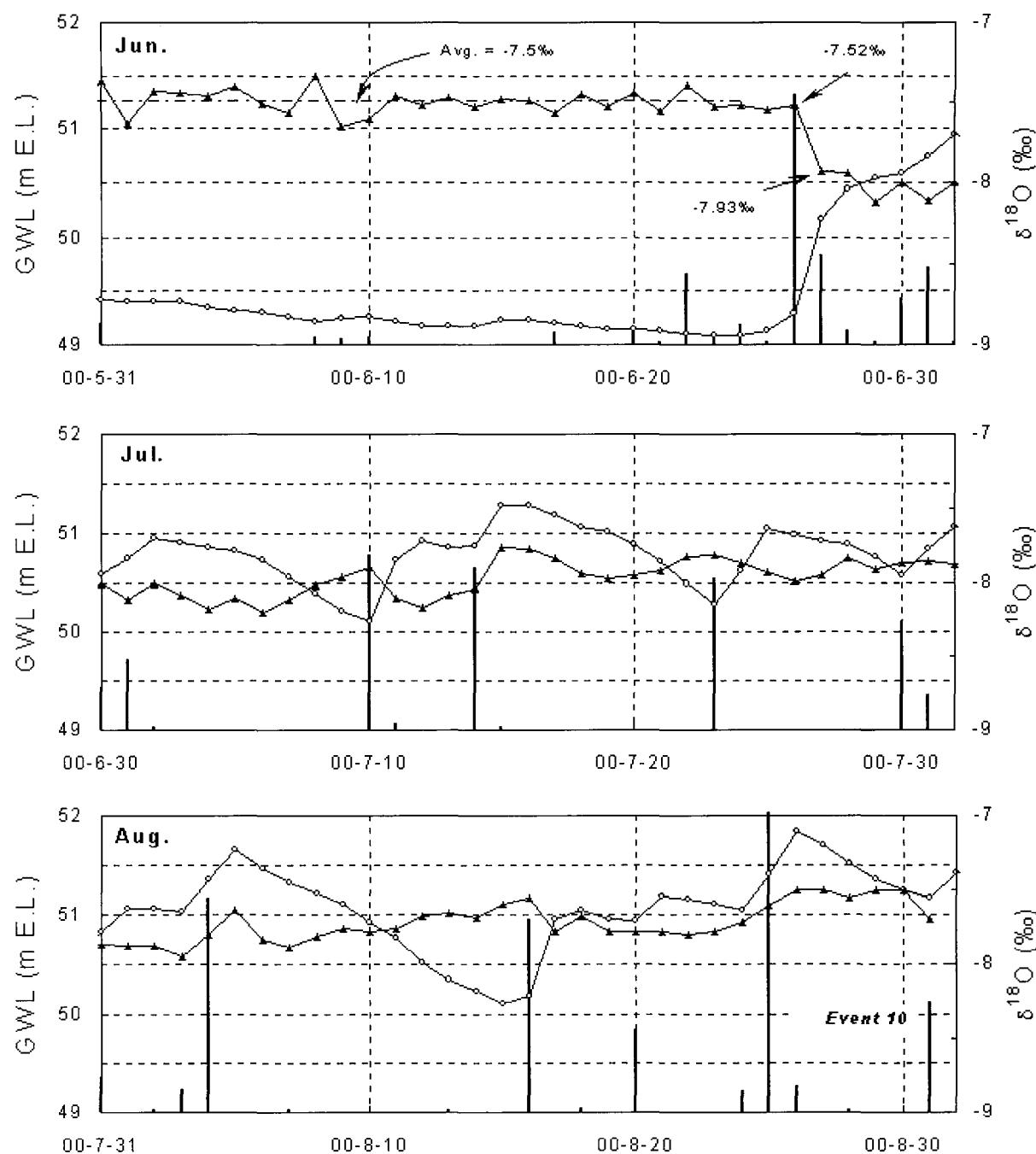


Fig. 8. The isotopic variation of groundwater during rainy season. The groundwater level hydrograph are also included.

표수의 동위원소변화에서는 뚜렷하게 확인될 수 없었지만, 지하수의 동위원소변화에서는 최고점에 도달한 후 감소하다가 최소 2일에서 최대 4일이후에는 동위원소조성이 배경 조성값(background values)으로 돌아가는 경향을 보여준다. 이는 K3공의 지형적인 위치가 가파른 산기슭에 위치하고 있어, K3공 주변에서 함양된 지하수의 동위원소조성이 초기에는 나타나고, 그 이후에는 K3공 주변에 부존된 하부 지하수의 영향을 받는 것으로 해석할 수 있다.

5. 토 의

국내에서 지하수의 함양량에 대한 연구는 물수지방법²³⁾, SCS-SN 방법²⁴⁾, 지하수위 강하곡선해석법²⁵⁾, GIS를 이용한 방법²⁶⁾ 등 많은 연구가 수행되었지만 아직까지 객관적으로 인정되는 방법이 확립되지 못하여²⁷⁾ 지하수 함양량을 정량화시키지 못하고 다만 서로 비교분석하여 사용되고 있다²⁸⁾. 본 논문에서는 지하수 함양을 해석하기 위하여 동위원소를 이용하여 지하수 함양특성을 고찰하고자 하였다. 동위원소는 물의 구성원소로서 강우, 지표수 및 지하수의 상관관계를 간접적인 추정방법이 아닌 직접 분석을 통하여 정량적으로 해석 할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 동위원소를 이용한 방법을 여수지역의 소규모 수계에 적용하였으며, 전술한 바와 같이 시간에 따른 강우, 지표수, 지하수의 동위원소조성을 강우사건과 연관하여 분석함으로서 국내 기후특성을 반영하는 6월말경 발생된 강우에 의해 나타나는 지표수내 강우의 혼합비와 지하수에 강우가 침투된 비율(함양율)을 각각 20%와 16.5%로 산출할 수 있었다. 이러한 지하수 함양율은 강우사건중 최대침투량에 해당되며, 이외 강우사건은 이 수치이하의 침투특성을 나타낼 것이다. 또한, 상기 결과는 경사가 급한 지형에서 일정 무강우일 이후에 첫 번째 강우사건에 대한 지하수 함양 현상임을 감안하여야 할 것이다. 특히, 후속 강우사건의 특성 즉, 강우빈도에 따른 함양특성은 초기 강우사건과 동일하지 않음을 감안하여야 한다. 더욱이 상기 결과는 지하수층 상부에서 나타난 지하수의 함양특성만을 보여주는 것이며, 침투된

강우의 하부 지하대수층(암반지하수)로 유입되는 것에 대한 지하수의 함양특성이 밝혀져야만 지하수 함양량에 대한 자료가 도출될 수 있을 것으로 사료된다.

앞서 동위원소변화특성에 기재된 바와 같이 지하수의 동위원소조성은 갈수기간 후 첫 번째 발생한 강우의 비율을 확인할 수 있지만, 그 후 지하수의 동위원소조성은 강우에 의한 동위원소변화 뿐만 아니라 기존 지하수와의 혼합 영향을 받아 뚜렷하게 구분되지는 않는다. 결국, 이를 평가하기 위해서는 지하수의 혼합관계 2가지 요소만으로 평가할 수는 없고, 지하수저류체의 기존 지하수의 특성을 접목한 3가지 혼합방정식을 적용하여야 할 것이다. 즉, 강우와 K3공 지하수 뿐만 아니라 지하수 유역에 부존된 지하수의 심도에 따른 동위원소조성 특성이 파악되어야 할 것이다. 또한, 본 연구에서는 지표유출량에 대한 정량적인 측정이 수행되지 못하였지만, 상기 동위원소 이용 결과와 함께 지표유출량에 대한 직접적인 측정이 이루어진다면, 수문순환계에서 보다 정량적인 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 이와 더불어 본 연구에서 부족하였던 점은 수문순환계의 입력역할을 하는 연구지역에서의 강우량 측정 및 강우의 시료채취가 보다 체계적으로 이루어진다면 지하수의 함양특성 평가에 대하여 불확실성(Uncertainty)을 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 또한 시료채취 간격을 일단위로 수행되었지만 강우기간만이라도 보다 짧은 시간 간격으로 모니터링 한다면 강우, 지표수, 지하수의 상관관계를 보다 자연조건에 맞게 평가 할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

지하수위 관측과 지표수 및 지하수의 동위원소 모니터링을 통하여 전남 여수지역 소규모 수계에서 나타나는 지하수의 함양특성을 고찰하였으며, 다음과 같은 특성으로 요약될 수 있다.

1. 지하수위 변화는 강우사건 후 약 2일이내 최대수위를 보여주며, 강우가 지속되지 않을 경우 빠르게 지하수위가 강하됨을 보여준다. 강우량이 약 20 mm이하일 경우는 강우가 지하수로의 침투현

- 상에 기여하지 못함을 보여준다.
2. 지표수의 동위원소변화특성은 지하수의 동위원소 변화특성에 비해 더욱 복잡한 변화양상을 보여준다. 동위원소 혼합방정식을 이용하여 일정 무강 우기간 경과후 첫 번째 강우사건에 의한 지표수의 혼합비는 약 20%이고, 상부지하수로 침투되는 비율은 16.5%로 계산되었다.
 3. 지표수의 동위원소조성변화는 매 강우사건에 의해 영향을 크게 받은 후, 기저유출을 통하여 지하수가 지속적으로 유입되고 있는 특성을 보여준다.
 4. 상기 결과들은 동위원소를 이용하여 지하수 함양율을 수리체계의 물수지분석과 함께, 함양/배출 지역에서의 지하수 모니터링과 지표수의 유량측정을 병행한다면 지하수 함양율에 대하여 불확실성을 줄이면서 보다 정량적인 평가를 할 수 있는 가능성을 보여준다.

사 사

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발과제의 일환으로 수행되었으며, 부분적으로 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 : 2000-1-13100-001-3)의 지원을 받은 바를 밝히며, 이에 감사한다.

참 고 문 헌

1. Ferrosky, V. I. and Polyakov, V. A., Environmental Isotopes in the Hydrosphere, John Wiley & Sons, Chichester(1982).
2. Moser, H. and Rauert, W., Isotopenmethoden in der Hydrologie. Beitr. Bodenforsch., Berlin-Stuttgart(1980).
3. Mazor, E., Applied Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology. Open University Press, Buckingham, U.K.(1991).
4. Maloszewski, P. and Zuber, A. "Determining the turnover time of groundwater system with the aid of environmental tracers, 1. Models and their applicability", Journal of Hydrology 57, pp207-231(1982).
5. Vitvar, T. and Balderer, W. "Estimating of mean water residence times and runoff generation by ^{18}O measurements in a Pre-Alpine catchment(Rietholzbach, Eastern Switzerland)", Applied Geochemistry 12(6), pp787-796(1997).
6. Hopper, R. P. and Shoemaker, C. A. "A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation", Water Res. Res. 22(10), pp1444-1454(1986).
7. Darling, W. G. and Bath A. H. "A stable isotope study of recharge processes in the English chalk", Journal of Hydrology 101(1), pp31-46(1988).
8. International Atomic Energy Agency, Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology, Panel Proceedings Series, IAEA, Vienna(1976).
9. Koh, Y.K., Yun, S.T. and Ahn, J.S. "Environmental isotope and hydrochemical studies of geothermal waters in Korea : Yusung geothermal area", J. Korean Inst. Mineral & Energy Resour. Eng. 31(4), pp388-397(1994).
10. 고용권, 윤성택, 김천수, 최현수, 김건영 "중원 지역 탄산수의 지구화학적 진화", 자원환경지질 32(5), pp469-483(1999).
11. 김건영, 고용권, 김천수, 배대석, 박맹언 "유성지역 지열수의 지구화학적 특성 연구", 지하수환경 7(1), pp32-46(2000).
12. 고용권, 김천수, 배대석, 이동익 "문경지역 심부지하수의 수리화학 및 환경동위원소 연구", 자원환경지질 33(6), pp469-489(2000).
13. 고용권, 김경수, 배대석, 김천수, 한경원 "여수북동부지역 시추공지하수의 지화학특성", 자원환경지질 34(3), 인쇄중(2001).
14. 조성일, 송무영, 김경수, 이은용 "여수 북부지역 화산암의 단열특성과 수리전도도와의 관계", 지질공학, 9(3), pp227-241(1999).
15. Friedman, I. and O' Neil, J. R. Compilation of stable

- isotopic fractionation factors of geochemical interest : Data of Geochemistry, Chapter KK, U.S. Geological Survey Professional Paper 440-KK(1977).
16. Coleman, M. L., Shepherd, T. J., Durham, J.J., Rouse, J.E., and Moore, G.R. "Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis", *Analytical Chemistry* 54(6), pp993-995(1982).
 17. Sklash, M. G. and Rarvolden, R. N. "The role of groundwater in storm runoff", *Journal of Hydrology* 43, pp45-65(1979).
 18. Craig, H. "Isotopic variations in meteoric water", *Science* 133, pp1702-1703(1961).
 19. International Atomic Energy Agency, Stable Isotope Hydrology : Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle, Technical Rep. Series no. 210, IAEA, Vienna(1981).
 20. International Atomic Energy Agency, Statistical treatment of data on environmental isotopes in precipitation, Technical Reports Series no. 331, IAEA, Vienna(1992)
 21. 이광식, 장병욱 "우리나라 대전과 서울지역 강수의 안정동위원소 성분", *지질학회지*, 30(5), pp475-481(1994).
 22. 이광식, 이인성, 최만식, 박은주 "제주도 강수의 환경동위원소 연구", *지질학회지* 33(3), pp139-147(1997).
 23. 선우중호 "지하수자원 기본조사 보고서"(1992).
 24. 최병수 "소유역의 지하수 함양량 산정에서 SCS-CN방법의 적용", *농공기술*, 56, pp11-20(1997).
 25. 최병수, 안중기 "지역단위 자연함양율 산정방법 연구", *지하수환경*, 5(2), pp57-65(1998).
 26. 한국수자원공사, 공간자료를 이용한 지하수 함양량 계산기법 연구, 1997 연구요약보고서(1997).
 27. 박재성, 김경호, 전민후, 김지수 "소유역의 지하수 함양율 추정기법", *지하수환경* 6(2), pp76-86(1999).
 28. Su, N. "A formula for computation of time-varying recharge of groundwater", *Journal of Hydrology* 69, pp123-135(1994).