

## 무주지역 소유역내 지표수와 지하수의 안정동위원소 조성의 시공간적 변화

한원식<sup>1</sup> · 우남철<sup>1\*</sup> · 이광식<sup>2</sup> · 이기철<sup>3</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 지구시스템과학과, <sup>2</sup>한국기초과학지원연구원, <sup>3</sup>농업기반공사 농어촌연구원

## Temporal and Spatial Variation of Stable Isotopic Compositions of Surface Water and Ground Water in a Small Catchment, Muju, Korea

Weon-Shik Han<sup>1</sup>, Nam-Chil Woo<sup>1\*</sup>, Kwang-Sik Lee<sup>2</sup> and Ki-Churl Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

<sup>2</sup>Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-333, Korea

<sup>3</sup>Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation, Kyunggi 426-170, Korea

The purpose of this study is to identify the temporal and spatial variation of stable isotopic compositions of surface waters and shallow ground waters at a local watershed(100 km<sup>2</sup>) near the Muju area. For oxygen and hydrogen isotope analysis, water samples were collected from 19-22 sites during August, October 2001, through April 2002. Seasonal variation in the isotopic compositions of surface waters was clearly shown. However, the degree of such isotopic variation was highly attenuated in shallow ground waters because of mixing with preexisting ground waters. Isotope values of surface waters and ground waters were very similar in each season, indicating that precipitation/ground water/surface water interactions were very active and continuous in the watershed. Stable isotopic ratios of surface waters in the study area were lighter than those of the downstream reach of Geum River on south, indicating "latitude effect". Both "altitude effect" and "amount effect" were also shown in the stable isotopic ratios of surface waters in the study area as well as seasonal variation of stable isotopes.

**Key words** : Stable isotopes, Temporal and spatial variation, Surface- and groundwater relations, Latitude-altitude-amount effects, Muju

이 연구는 무주군 적상산 부근에 위치하는 소유역(100 km<sup>2</sup>)에서 지표수와 천부 지하수의 안정동위원소 조성의 시공간적 변화를 조사하기 위해서 실시되었다. 시료채취는 2001년 8월(여름)과 10월(가을), 2002년 4월(봄), 3회에 걸쳐 실시되었다. 지표수의 동위원소 조성은 계절에 따라 뚜렷이 구분되어 도시되지만 천부 지하수에서는 이러한 변화가 줄어든 것이 관찰되었다. 하지만 지표수와 지하수의 안정동위원소 조성의 변화 폭은 계절별로 서로 유사하게 나타나고 있다. 이것은 이 지역에서 강수, 지표수 및 지하수 사이의 상호작용이 매우 활발하며 지속적으로 일어나고 있음을 의미한다. 무주지역 지표수의 안정동위원소 조성은 남쪽에 위치하는 섬진강의 조성보다는 가벼운 "위도효과"를 나타내고 있다. 또한 하천수에는 동위원소 조성의 계절변화와 아울러 강수의 "고도효과"와 "우량효과"가 잘 반영되어 있음이 관찰되었다.

**주요어** : 안정동위원소, 시공간적 변화, 지표수-지하수 연계, 위도-고도-우량 효과, 무주

### 1. 서 언

국지적인 규모의 지하수의 특성을 해석하기 위해서는 대수층의 매질특성, 시간에 따른 수두의 변화, 화학

적 특성과 같은 수리지질학적 특성들에 대한 연구가 필요하다. 그러나 대부분의 경우 지하수와 대수층의 물리, 화학적 특성들은 자료를 얻기 힘들뿐만 아니라 계절과 강우량에 따른 변화가 심하여 해석하는데 어려움

\*Corresponding author: ncwoo@ysgeo.yonsei.ac.kr

이 있다.

동위원소를 이용한 방법은 전통적인 수리지질학적 방법에서 해석하기 힘든 지하수 유동량 추정에 효과적이며 지하수와 지표수의 관계를 해석하는데 좋은 결과를 보여준다. 대부분의 지역에서는 그 지역에 내리는 강수가 지하수로 함양되기 때문에 지하수의 함양과 배출과 같은 순환특성을 보다 잘 이해하기 위해서는 강수와 지표수의 이해가 선행되어야 한다. 물에 용해되어 있는 물질과는 달리 물의 구성 성분인 산소와 수소 동위원소는 물의 흐름에 대한 정보를 그대로 보존하기 때문에 수문순환 연구에서 가장 효과적인 도구로 자리 잡은지 이미 오래이다(Clark and Fritz, 1997). 산소와 수소 동위원소는 지하수의 순환 뿐만 아니라 대기의 순환과 기후변화 그리고 지하수의 기원과 체류시간 연구에도 광범위하게 이용되고 있다(McGuire *et al.*, 2002; Vandenschrick *et al.*, 2002). 특히 지하수와 지표수의 함양 및 배출 특성을 연구하는데 있어서 산소와 수소 동위원소는 물리화학적 자료로는 해결하기 힘든 연구를 가능케 한다(Criss and Davission, 1996; Sholl *et al.*, 1996; Deshpande *et al.*, 2003).

안정동위원소를 이용한 기존 연구들은 주로 광역적

인 범위에서 강수와 지표수의 관계에 대한 연구에 이용되어왔다. 이 연구에서는 매우 규모가 작은 수계에서 나타나는 지표수와 지하수의 안정동위원소 특성(위도효과, 고도효과, 우량효과)을 관찰하였으며, 국지적인 규모에서 지표수와 지하수의 산소와 수소 동위원소 조성이 시·공간적으로 어떤 특성을 반영하고 상호 어떤 연관성을 보이는지에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 연구지역

무주분지에 대한 지질학적 연구는 여러 연구자들에 의하여 수행되었다. 이러한 연구들로는 지질도 작성을 위한 조사(이대성과 남기상, 1969), 무주 양수 발전소의 건설을 위한 적상산 동쪽 부근의 지질 및 암반의 특성에 관한 연구(한국전력공사, 1991), 기존 지질분포와 지질 구조의 재해석에 대한 연구(박정웅과 이용일, 1997; 박정웅과 이용일, 2000) 등이 있다. 그러나 이러한 기존의 연구들은 대체로 지질매체의 특성에 관한 연구들이며 조사지역에서 지표수와 지하수에 대한 연구는 매우 제한적으로 수행되었다. 수문순환과 관련된 지표수와 지하수의 연구로는 농어촌 지역 지하수 자원

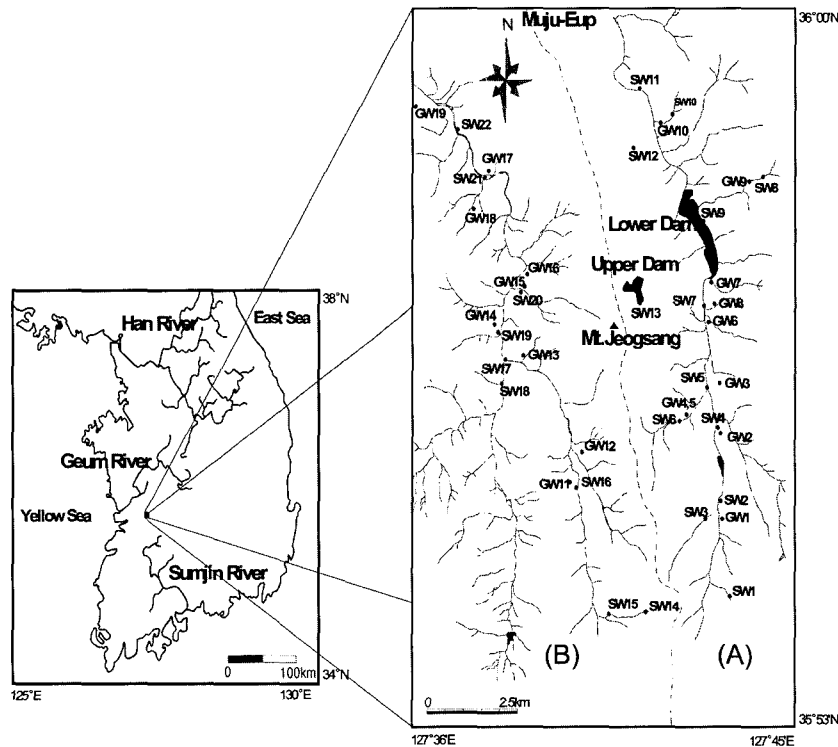


Fig. 1. Study area and sampling locations. SW and GW denote surface water and ground water, respectively.

의 오염 예측도 작성 기법에 관한 연구(농림부, 2000)와 수질특성자료의 통계적 분석에 의한 소유역 구분에 대한 연구(한원식 등, 2002)가 수행되었다.

무주 분지는 동서와 남쪽 방향으로 고도가 약 1000 m인 산들로 둘러싸여 있으며 중앙에는 850 m인 적상산이 있다(Fig. 1). 이 연구에서는 적상산 동측 수계를 A 수계, 서측 수계를 B 수계로 구분하였다. 적상산의 정상과 A 수계의 중간에는 양수발전댐이 위치하고 있다. 적상산을 중심으로 조사지역의 동측(A 수계)과 서측(B 수계)에는 규모가 작은 소유역(100 km<sup>2</sup>)이 위치하고 있으며 남쪽에서 북쪽으로 향할수록 고도는 낮아진다. 가장 높은 지점에서 시료를 채취한 곳과 낮은 곳의 해발고도 차이는 400 m이다.

### 3. 시료채취 및 분석방법

무주지역 소유역(100 km<sup>2</sup>)에서 지표수와 지하수의 산소와 수소 동위원소 연구를 위하여 2001년 8월(여름)과 10월(가을) 그리고 2002년 4월(봄), 3차례에 걸쳐 현장조사가 수행되었다. 8월과 10월의 조사에서 지표수는 22개 지점, 지하수는 19개 지점에서 시료를 채취하였으며, 2002년 4월 조사에서는 대표성 있는 지표수 시료 11개를 선택하여 채취하였다. 지표수는 적상산 동측에 위치한 A 수계와 적상산 서측에 위치한 B 수계의 하천과 적상산 상부 및 하부담에서 채취하였으며, 지하수는 하천에 인접한 충적층과 풍화대에서 개발된 천부 지하수를 채취하였다(Fig. 1). 채취된 시료들은 분석 전까지 증발이 일어나지 않도록 밀폐하여 냉장 보관하였으며, 한국기초과학지원연구원의 안정동위원소질량분석기를 이용하여 분석되었다. 분석정밀도는  $\delta^{18}\text{O}$ 가  $\pm 0.1\%$ ,  $\delta^2\text{H}$ 가  $\pm 1\%$ 이다.

### 4. 결과 및 토의

우리나라에서 하천수의 근원이 되는 강수에 대한 안정동위원소 자료는 포항에 위치한 IAEA/WMO의 강수 채취 지점에서 1961~1976년에 최초로 얻어졌다(이광식과 정재일, 1997). 그 후 서울, 대전 및 제주도 등에서 강수의 안정동위원소 자료가 축적되어 왔다(김규한과 中井信之, 1988; 이광식과 장병욱, 1994; 이광식과 이창복, 1999; 이광식 등, 2002; Lee *et al.*, 2003). 이들 자료들은 현재 우리나라 하천수와 지하수의 안정동위원소 조성을 이용한 수문순환과 기원 연구에 중요한 기본 자료로 활용되고 있다.

우리나라 하천수에 대한 안정동위원소 연구는 中井信之 등(1982)에 의하여 한강에서 최초로 이루어졌다. 그들은 한강 상류에서 하류로 내려감에 따라 안정동위원소의 조성이 무거워지는 “고도효과”를 보고하였다. 그 후 김규한과 中井信之(1988)는 남한 전체를 대상으로 안정동위원소의 공간적인 분포특성에 대해 연구하였으며, 고도효과와 위도효과가 남한의 동위원소 조성을 좌우하는 주된 요인임을 제시한 바 있다. 이광식과 이창복(1999)은 1991~1995년에 한강, 금강, 섬진강의 안정동위원소 특성을 조사하여 위도효과와 고도효과를 확인하였으며, 하천수의 안정동위원소 조성 변화의 크기가 수계의 크기 및 하천에 위치한 댐들과 밀접하게 관련되어 있음을 보고하였다. 최근 김규한과 이세희(2002)는 한강 하천수에 대한 동위원소 연구를 실시한 바 있다.

연구 기간 중에 무주지역에서 얻은 지표수와 지하수의 산소동위원소 조성( $\delta^{18}\text{O}$ ), 수소동위원소 조성( $\delta^2\text{H}$ ) 및 고도 자료는 Table 1에 나타내었다. 8월 지표수의  $\delta^{18}\text{O}$ 와  $\delta^2\text{H}$  값은 각각 -10.2~-9.1‰과 -75~-63‰이며, 8월 지하수의  $\delta^{18}\text{O}$ 와  $\delta^2\text{H}$  값은 각각 -10.0~-8.8‰, -74~-59‰이다. 10월 지표수는  $\delta^{18}\text{O}$ (-9.7~-8.6‰)와  $\delta^2\text{H}$ (-69~-60‰) 모두 8월 지표수보다 약간 무거워진 값을 보여주고 있다. 4월 지표수의  $\delta^{18}\text{O}$ 와  $\delta^2\text{H}$  값은 각각 -9.5~-8.0‰, -67~-54‰로 8월과 10월보다 더욱 무거운 조성을 나타내고 있다. 지표수와 지하수 모두 Craig 지구순환선 주변에 잘 도시되어 이들이 모두 강수에서 기원된 순환수임을 지시한다(Fig. 2).

#### 4.1. 동위원소 조성의 계절변화

동일시간에서 지표수와 지하수의 안정동위원소 조성 변화를 비교하면, 8월 지표수의  $\delta^{18}\text{O}$  값은 -10.2~-9.1‰로 약 1.1‰의 변화를 나타내고 있으며, 지하수의  $\delta^{18}\text{O}$  값은 -10.0~-8.8‰로 1.2‰의 변화를 보이며 지표수와 비슷한 범위를 나타내고 있다(Table 1). 10월에도 마찬가지로 지표수와 지하수의  $\delta^{18}\text{O}$  값의 범위는 약 1.0‰ 내외의 값을 나타내고 있다.  $\delta^2\text{H}$  값은 8월과 10월, 4월에 지표수와 지하수 사이에서 약 12‰ 내외의 값을 나타내고 있다.

8월, 10월, 4월 모든 계절에 걸쳐 채취한 지표수의  $\delta^{18}\text{O}$  값의 범위는 -8.0~-10.2‰이며, 지하수는 -8.3~-10.0‰로 지표수의 변화 폭이 약간 크게 나타나고 있지만 대체로 비슷한 값을 보이고 있다. 마찬가지로 지표수의  $\delta^2\text{H}$  값의 범위는 -54~-75‰이며, 지하수는 -58~-74‰로 지표수의 변화 폭이 약간 크게 나타나고

있으며  $\delta^{18}\text{O}$  값과 비슷한 경향을 나타내고 있다(Fig. 2). 계절에 따라 지표수와 지하수의 안정동위원소 값이 비슷한 범위를 나타내는 것은 연구지역의 지표수와 천부 지하수 사이에 배수와 함양이 지속적으로 발생하고

**Table 1.** Oxygen and hydrogen isotopic composition of surface water and ground water.

Site	August 2001			October 2001			April 2002			Altitude (m)
	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	Temp.( $^{\circ}\text{C}$ )	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	Temp.( $^{\circ}\text{C}$ )	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	Temp.( $^{\circ}\text{C}$ )	
SW1	-10.1	-69	17.7	-9.5	-67	12.9	-9.5	-67	13.6	590
SW2	-9.8	-67	19.9	-9.2	-68	14.5	-9.2	-63	14.9	370
SW3	-9.8	-73	20.5	-9.4	-66	15.3	-	-	-	410
SW4	-9.4	-67	23.4	-9.0	-67	15.6	-	-	-	310
SW5	-9.4	-67	25.4	-8.8	-62	16.0	-8.3	-58	14.4	300
SW6	-9.5	-68	22.9	-8.9	-61	15.5	-	-	-	330
SW7	-9.3	-66	25.1	-9.0	-67	17.6	-8.4	-57	15.7	275
SW8	-10.2	-70	21.2	-9.7	-69	13.3	-9.3	-63	13.2	420
SW9	-9.7	-71	27.1	-9.0	-68	19.2	-8.1	-58	14.4	270
SW10	-9.8	-70	22.9	-9.3	-64	13.8	-	-	-	270
SW11	-	-	-	-8.6	-64	13.1	-	-	-	225
SW12	-9.8	-75	19.5	-9.0	-66	14.8	-	-	-	350
SW13	-9.6	-72	26.4	-8.9	-69	18.2	-	-	-	850
SW14	-10.0	-69	17.7	-9.3	-66	11.6	-9.4	-65	15.2	580
SW15	-9.6	-68	20.1	-9.4	-66	11.6	-	-	-	440
SW16	-9.5	-69	16.8	-9.1	-66	13.0	-8.3	-58	17.0	325
SW17	-9.2	-63	26.2	-8.9	-62	14.3	-8.0	-55	20.1	260
SW18	-9.4	-68	26.3	-8.7	-66	14.7	-	-	-	275
SW19	-9.2	-67	28.0	-8.8	-60	14.9	-	-	-	250
SW20	-9.8	-69	27.4	-8.9	-65	13.2	-	-	-	245
SW21	-9.1	-66	31.1	-8.7	-62	14.6	-8.0	-56	20.5	205
SW22	-9.2	-68	29.5	-8.6	-64	12.4	-8.0	-54	20.0	195
Max.	-9.1	-63.0	31.1	-8.6	-60	19.2	-8.0	-54	20.5	850
Min.	-10.2	-75.0	16.8	-9.7	-69	11.6	-9.5	-67	13.2	195
Aver.	-9.6	-68.7	23.6	-9.0	-65	14.6	-8.5	-59	16.3	352
Std.	0.3	2.6	4.1	0.3	2.7	2.0	0.6	4.0	2.7	154
GW1	-9.4	-70	12.7	-9.2	-65	13.9	-8.9	-60	13.5	400
GW2	-9.2	-62	17.9	-9.1	-66	16.8	-9.0	-65	16.3	330
GW3	-8.8	-68	13.8	-9.2	-68	14.5	-9.2	-65	13.8	320
GW4	-9.1	-63	13.8	-9.0	-67	14.6	-9.2	-69	14.5	320
GW5	-8.8	-64	18.8	-8.8	-64	16.0	-9.0	-63	15.6	320
GW6	-9.0	-59	13.6	-9.2	-70	14.0	-9.0	-66	13.2	280
GW7	-9.7	-68	13.5	-9.4	-71	15.7	-8.8	-62	12.9	275
GW8	-9.9	-70	14.2	-9.6	-73	15.1	-8.6	-58	11.5	285
GW9	-10.0	-70	19.6	-9.9	-70	15.5	-8.9	-59	12.7	385
GW10	-9.8	-70	17.0	-9.2	-67	15.0	-8.8	-62	14.7	230
GW11	-9.0	-66	18.2	-9.4	-69	12.4	-8.6	-63	13.8	325
GW12	-9.7	-67	17.0	-9.0	-61	12.4	-8.8	64	12.7	320
GW13	-9.8	-73	17.3	-9.5	-73	15.4	-8.3	-61	11.9	275
GW14	-9.8	-70	16.3	-9.5	-68	13.6	-8.5	-60	12.6	250
GW15	-9.7	-66	15.1	-9.5	-66	13.3	-9.0	-64	12.6	255
GW16	-9.2	-74	15.3	-9.8	-73	12.8	-8.3	-59	15.1	250
GW17	-9.8	-68	18.6	-9.2	-63	16.2	-8.4	-61	12.2	230
GW18	-9.1	-67	18.5	-9.2	-71	12.7	-9.2	-65	14.6	240
GW19	-9.1	-62	15.8	-9.1	-66	13.0	-9.2	-61	14.4	190
Max.	-8.8	-59	19.6	-8.8	-61	16.8	-8.3	-58	16.3	400
Min.	-10.0	-74	12.7	-9.9	-73	12.4	-9.2	-69	11.5	190
Aver.	-9.4	-67	16.2	-9.3	-68	14.4	-8.8	-63	13.6	289
Std.	0.4	3.9	2.1	0.3	3.5	1.4	0.3	2.9	1.3	54

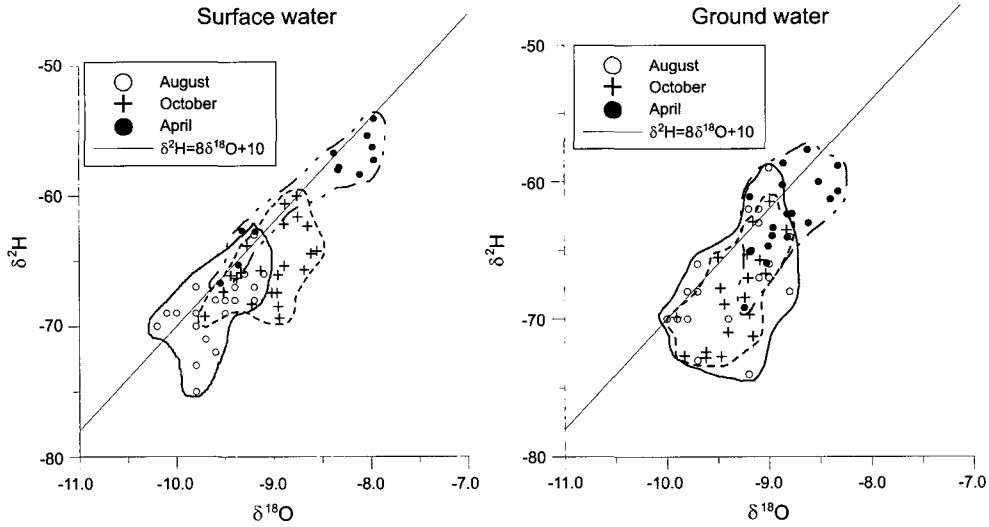


Fig. 2. Plot of  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  for surface water and ground water.

있음을 의미한다.

Frederickson and Criss(1999)는 미국 미주리에 위치한 머라백강 유역에서 강우, 지표수 그리고 용천수의 산소동위원소 조성을 약 2년 동안 연구하여 강우의 변화 폭은 약 10‰, 지표수는 약 3~5‰, 용천수는 1~2‰이 됨을 관측하였다. 그들은 지하수의 변화 폭이 강우나 지표수에 비하여 뚜렷이 적어진 것을 기존 지하수체와의 혼합으로 인한 저감으로 설명하고 있다. 지하수체는 지표수체보다 더 풍부하기 때문에 강우와 지표수체가 지하수체로 함양되더라도 기존에 지하수체가 가진 동위원소 조성과의 혼합으로 인해 지하

수체의 안정동위원소 조성은 크게 변하지 않고 있음을 밝힌 바 있다.

이번 연구에서 강우의 동위원소 분석은 시행하지 못하였지만 Frederickson and Criss(1999)의 연구결과와 유사하게 지하수의 산소와 수소 동위원소 조성의 계절 변화가 지표수의 변화보다 뚜렷이 적을 것으로 기대하였었다. 그러나 분석자료에서는 그러한 효과가 잘 나타나지는 않고 있다. 전술한 바와 같이 이러한 원인은 지표수와 지하수 사이에서 수문 순환이 지속적으로 일어나고 있기 때문으로 해석된다. 김규환과 中井信之(1988)는 우리나라 지하수가 순환수 기원이므로 비교

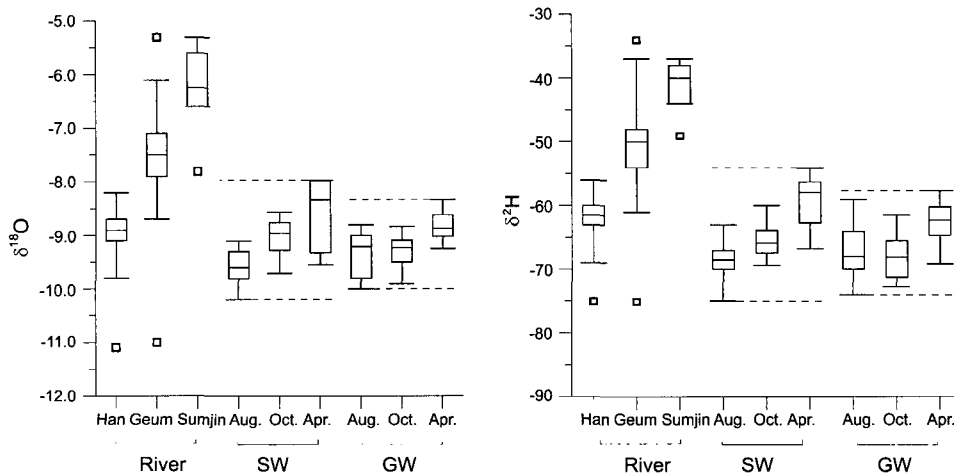


Fig. 3. Box plots for stable isotopic compositions of surface water and ground water. River data were taken from Lee and Lee(1999). Outliers plotted as squares.

적 동위원소의 조성이 일정한 지하수로부터 하천수의 많은 부분이 공급받을 수 있다고 하였으며, 이광식과 이창복(1999)은 지표수체에 위치한 댐의 영향 또한 고려대상이라 언급한 바 있다. Fig. 3에서 한강의 동위원소 조성 변화가 금강의 조성 변화보다 현저히 적은 이유는 한강에 7개의 댐이 위치하여 강수와 하천수로의 혼합을 촉진하지만 금강에는 1개 밖에 댐이 없기 때문으로 해석하였다.

동위원소 조성의 계절별 변화를 해석하기 위해서 연중 강수량과 지하수의 수위 변화를 함께 비교하였다. Fig. 4는 연구지역에서 약 20 km 거리에 위치한 금산 지역의 강수량 자료와 층적층에 설치된 관측정에서 나타난 지하수위 변화를 함께 도시한 것이다. 지하수위는 매년 건교부에서 출판하고 있는 자료 중에서 2001년 분에 해당되는 층적층 지하수위 자동 관측망 자료를 이용하였으며(건설교통부와 한국수자원공사, 2002), 강수량 자료는 기상청의 기상월보자료를 이용하였다(기상청, 2001). 지하수위를 관측한 지역의 표고는 142.62 m이며, 연중 지하수의 최저 수위는 137.49 m로서 3월초에서 4월 중순에 해당된다. 지하수의 최고수위는 138.46 m이며 6월초에서 7월중순 사이에 해당된다. 그렇지만 여름철 높아진 지하수위는 10월말까지 수위가 좀처럼 강하하지 않고 있다(Fig. 4).

10월은 8월보다 강수량이 적으며 지하수위의 변화는 8월에서 10월로 갈수록 점진적으로 감소한다(Fig. 4). 따라서 8월과 10월 지하수의 산소동위원소의 조성변화

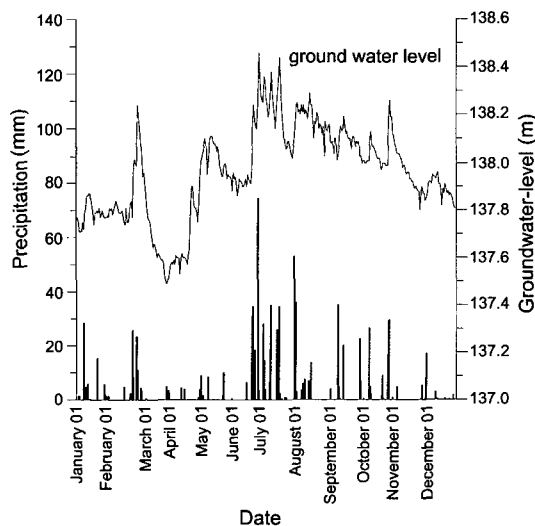


Fig. 4. Variations of groundwater-level and the amount of precipitation at the Geum-san monitoring station during 2001.

가 유사한 범위를 나타내는 것은 고도가 높은 지점에서 함양되어 원거리를 이동하는 지하수 순환이 있음을 암시한다.

무주분지는 지형적으로 높은 산이 장막처럼 둘러싸여 있는 지역이다. 그러므로 여름철에 고지대로 충전된 가벼운 조성의 강수가 지하에 유입되어 원거리를 이동하여 지하수의 배출지역인 층적층에 위치한 지하수로 유입될 수 있다. 여름철에 가벼운 안정동위원소 조성의 강수와 지표수가 10월에도 지속적으로 유입되어 8월과 10월의 지하수의 동위원소 조성은 차이를 나타내지 않을 수 있다.

#### 4.2. 위도효과와 고도효과

적도에 가까운 해양에서 만들어진 기단은 점차 극지방으로 이동하게 된다. 기단이 고위도로 이동함에 따라 기온강하 현상에 의해 기단의 수증기 보유력은 점차 떨어져, 수증기가 응축되어 강우로 내리게 된다. 따라서 강우 초기에 무거운 동위원소를 많이 함유하는 비가 내리던 것이 고위도로 갈수록 점차 동위원소 조성이 가벼운 비를 내리게 되는데 이러한 현상을 “위도효과”라 한다. 고도에 의해서도 위도효과와 유사하게 강수의 동위원소 분별 현상이 일어나게 된다. 육지에서 고도가 높아질수록 기온이 점진적으로 하강하기 때문에 저지대에서 고지대로 가면서 강수의 동위원소 조성이 가벼워지게 되는데 이러한 현상을 강수의 “고도효과”라 한다.

연구지역인 무주에서 얻은 지표수의 동위원소 자료를 이광식과 이창복(1999)이 연구한 한강, 섬진강, 금강 자료의 안정동위원소 조성과 비교하여 Fig. 3에 함께 도시한 결과, 무주지역 하천수에서 위도효과가 잘 나타남을 관찰할 수 있다. 위도로 볼 때 연구지역인 무주 소유역은 금강과 비슷한 위도에 위치하고 있다. 한강은 무주보다 고위도에 위치하고 섬진강은 무주보다 저위도에 위치하고 있다(Fig. 1). 이광식과 이창복(1999)은 고위도로 갈수록 즉 섬진강에서 금강을 거쳐 한강으로 올라갈수록 하천수의 동위원소 조성이 가벼워지는 위도효과를 보고하였는데, 무주 소유역 하천수의 경우 섬진강의 안정동위원소 조성보다는 가벼운 조성을 보여 위도효과의 영향이 있었을 것으로 판단된다. 그러나 비슷한 위도에 위치한 금강의 안정동위원소 조성보다 가벼우며, 오히려 위도가 높은 곳에 위치하고 있는 한강의 안정동위원소 조성과의 비슷한 값을 보이고 있다. 이러한 현상은 무주 소유역에서 시료를 채취한 위치의 평균 해발고도가 352 m인 높은 지점에 해당하기 때문에



오히려 더 가벼운 값을 보인다. 이러한 현상을 “우량 효과”라 하며 강수량과 밀접히 관련이 있는데, 즉 강수량이 많은 계절이 동위원소 조성이 뚜렷이 낮은 특징을 보이게 된다.

우리나라 여름철 강수에서도 우량효과가 잘 관찰되고 있다(이광식과 장병욱, 1994; 이광식과 정재일, 1997; 이광식과 이창복, 1999; Lee *et al.*, 2003). 더운 여름철인 8월의 산소와 수소동위원소 조성이 기온이 보다 낮은 10월과 4월보다 더 가벼운 값을 보이고 있는데 이것은 하천수가 강수의 우량효과를 반영하고 있기 때문이다. 우리나라는 몬순 기후대에 속하며 더운 여름철에 강수가 집중되어 있다(Fig. 4). 8월 지하수는 8월 지표수와 비슷한 동위원소 조성을 보이고 있다. 이는 8월 천부 지하수가 여름철 강수의 동위원소 조성을 반영하기 때문이며, 무주분지에서 수문순환이 활발하여 강수와 지표수가 빠르게 지하로 함양되기 때문으로 판단된다(Fig. 2).

그러나 10월 지하수의 안정동위원소 조성은 동일시기에 얻은 지표수의 안정동위원소 조성보다 다르며, 8월 지하수의 안정동위원소 조성보다 거의 비슷하게 나타난다(Fig. 2). 이는 앞서서도 언급하였듯이, 여름철에 고지대로 충전된 가벼운 조성의 강수가 지하에 유입된 후 원거리를 이동하여 지하수의 배출지역인 충적층에 위치한 지하수로 지속적으로 유입되기 때문으로 판단된다.

4.4. 산소 동위원소 조성의 공간적 분포

10월 지표수와 지하수의 산소동위원소 등고선도를 Fig. 6에 도시하였다. 지표수의 산소동위원소 조성변화는 고도에 의해 영향을 받고 있음이 뚜렷이 보여진다.

또한 8월과 10월을 동시에 도시한 결과, 등고선도의 유형은 변하지 않고 있으며 단지 등고선을 이루고 있는 값들만 변하고 있음을 확인할 수 있었다(한원식, 2002). 이는 내리는 강수의 조성에 관계없이 동위원소 고도효과와 기온기는 그대로 유지되고 있음을 의미한다(Fig. 5 참조). 4월 지표수의 등고선도는 시료의 채취지점 수가 부족하기 때문에 도시하지 못하였다.

8월과 10월의 산소동위원소 등고선도를 도시한 결과, 소유역일지라도 자연상태에서 산소동위원소의 분별 현상은 계절에 따라 일정하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 8월과 10월의 산소동위원소의 등고선도를 비교하여 보면 8월의 산소동위원소 조성값에 비하여 10월의 조성은 약 0.5‰ 정도 무거워지는 것을 알 수 있었다. 8월의 안정동위원소 조성이 10월보다 가벼워진 이유는 앞서서도 언급하였듯이 우리나라 8월의 강수가 “우량효과”에 의해 영향받기 때문으로 생각된다. 따라서 강수에 의해서 직접 영향받는 지표수의 안정동위원소 조성도 가벼워지기 때문에 8월 지표수의 안정동위원소 조성이 10월보다 가볍게 나타나게 되는 것이다.

8월, 10월과 4월의 지하수의 산소동위원소 등고선도 또한 지표수와 마찬가지로 비교적 일정한 값들을 나타내고 있다. 그러나 8월과 10월 지하수 등고선도 값은 동일하지만 4월에는 소유역 전체적으로 0.5‰씩 무거워진 특성을 나타낸다.

5. 결 언

무주지역에서 지표수와 지하수는 농업용수와 음용수의 중요한 부분으로 이용되고 있다. 이렇게 중요한 수자원을 잠재오염원으로부터 오염되지 않도록 사전에 보

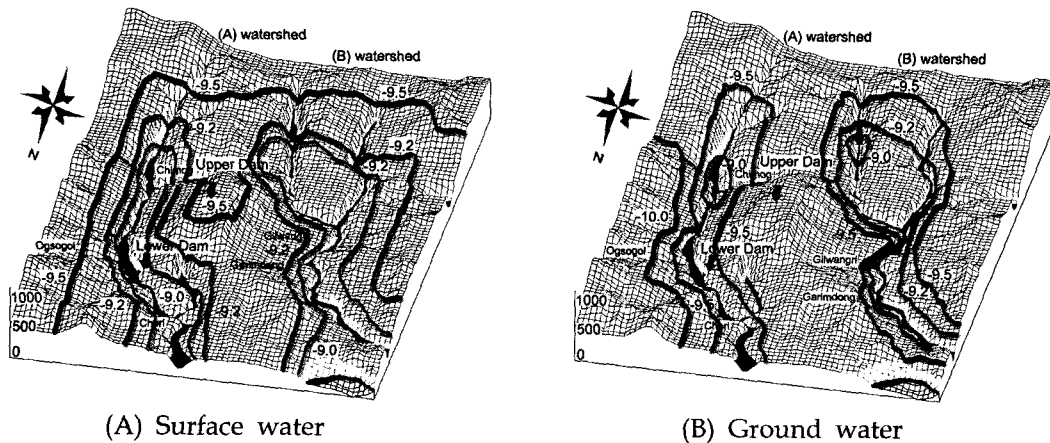


Fig. 6. Contour maps of  $\delta^{18}O$  values for surface water and ground water sampled in October.



호하면서 이를 최적 상태로 개발하기 위해서는 이 지역 수자원의 수문순환에 대한 이해가 선행되어야 한다.

이번 연구에서는 무주지역 소유역에서 지표수와 천부지하수의 산소와 수소 동위원소 조성의 계절적/공간적 분포에 대한 조사가 수행되었다. 이 지역에서 향후 연구가 지속적으로 수행되어 지표수, 지하수, 강수에 대한 충분한 자료가 확보된다면, 강우로부터 유입되어 이동하는 지하수와 지표수 이동경로의 규명이 가능할 것이다. 또한 지하수가 함양되는 위치에 대한 추정이 가능하기 때문에 이를 활용하여 수자원 및 오염 취약성에 대한 관리가 용이해질 수 있다. 따라서 앞으로도 동위원소를 이용한 연구는 지속적으로 이루어져야 한다. 동위원소를 이용한 기존 연구들은 주로 광역적인 지역에서 수행되었지만 이번 연구지역과 같은 소유역에서도 동위원소가 효과적으로 이용될 수 있음을 보여주고 있다. 이는 무주지역 뿐만 아닌, 비교적 작은 규모의 다른 지역에서도 동위원소를 이용한 연구가 가능함을 암시한다.

2001년 8월과 10월, 2002년 4월 세 차례에 걸쳐 무주군 적상산 부근에 위치하는 소유역에서 지표수와 인접한 천부지하수의 안정동위원소 분석을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 지표수의 동위원소 조성은 계절에 따라 뚜렷이 구분되어 도시되지만 천부 지하수에서는 이러한 변화가 줄어드는 것이 관찰되었다.
2. 계절별 지표수와 지하수의 안정동위원소 조성이 비슷하게 나타나는 결과는 이 지역 지표수와 지하수 사이에는 함양과 배출과 같은 상호작용이 빠르고 지속적으로 일어나고 있음을 지시한다. 8월과 10월 지하수의 안정동위원소 조성이 비슷한 이유는 8월에 고도가 높은 지점에서 함양되어 원거리를 이동하는 지하수의 순환이 있음을 지시한다.
3. 섬진강, 금강, 한강의 동위원소 자료와 비교하여 보면, 무주지역 소유역의 지표수는 위도효과를 반영하고 있음을 알 수 있다.
4. 연구지역 하천수는 동위원소의 고도효과를 잘 보여주고 있다. 계절별 시료의 동위원소 부화정도는 각기 다르지만 고도효과와 기울기는 유사하게 나타나서 동위원소 조성의 공간적 분포 특성은 계절에 관계없이 유사하게 나타나고 있다.
5. 8월 지표수의 안정동위원소 조성은 여름강수의 우량효과와 영향으로 10월과 4월보다 더 가벼운 조성을 나타내고 있으며 지하수에도 이러한 특징이 반영되어

나타난다.

## 사 사

연구과정에 많은 도움을 준 연세대학교 지하수 연구실 정성욱교과, 논문 검토를 맡아 주신 김강주, 정명채 두 분 교수님께 진심으로 감사드립니다. 이 연구는 농림부의 “농촌지역 청정지하수 수질감시/관리시스템 개발 과제(301007-03-2-WT011)”의 지원으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 건설교통부, 한국수자원공사 (2002) 지하수 관측연보. p. 633-636.
- 기상청 (2001) 기상월보. (<http://www.kma.go.kr>)
- 김규한 (1991) 동위원소 지질학. 민음사, p. 122-165.
- 김규한, 이세희 (2002) 한강 수계 분지내 하천수의 산소, 수소 안정동위원소 조성. 자원환경지질, 35권, p. 113-120.
- 김규한, 中井信之 (1988) 남한의 지하수 및 강수의 안정동위원소 조성. 지질학회지, 24권, p. 37-46.
- 농림부 (2000) 농어촌 지역 지하수 자원의 오염 예측도 작성 기법에 관한 연구. 321p.
- 박정웅, 이용일 (1997) 백악기 무주분지의 층서 재정립. 지질학회지, 33권, p. 65-77.
- 박정웅, 이용일 (2000) 적상산에 분포하는 백악기 무주분지 역암(길왕리층)의 기원지. 지질학회지, 36권, p. 355-370.
- 이광식, 고동찬, 이대하, 박원배 (2002) 제주도 강수의 동위원소 조성의 시공간적 분포: 지하수 함양에의 응용. 지질학회지, 38권, p. 151-161.
- 이광식, 이창복 (1999) 남한의 강수와 하천수의 산소와 수소 동위원소 조성. 지질학회지, 35권, p. 73-84.
- 이광식, 장병욱 (1994) 우리나라 대전과 서울 지역 강수의 안정동위원소 성분. 지질학회지, 30권, p. 475-481.
- 이광식, 정재일 (1997) 포항 강수의 안정 동위원소 조성 변화. 자원환경지질, 30권, p. 321-325.
- 이대성, 남기상 (1969) 한국 지질도 (1:50,000), 장거리 도폭 및 설명서. 한국지질조사소, 33p.
- 中井信之 등 10人 (1982) 漢江(韓國)及び流域生態系における環境動態に関する基礎的, トヨタ 調査 財團 研究 助成 研究報告 要約.
- 한국전력공사 (KEPCO) (1991) 무주양수 1, 2호 설계기술 용역 지질조사보고서 (미발간).
- 한원식 (2002) 무주지역 지표수·지하수 수질 및 안정동위원소 특성 연구. 연세대학교 대학원 석사학위 논문, 지구시스템과학과, 99p.
- 한원식, 우남철, 이광식 (2002) 무주지역 수질특성자료의 통계학적 분석에 의한 소유역 구분. 지하수토양환경, 7권, p. 19-32.
- Clark, I.D. and Fritz, P. (1997) Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, New York, p. 328.
- Criss R.E. and Davisson M.L. (1996) Isotopic imaging of surface water/ground water interactions, Sacramento Valley, California. Journal of Hydrology, v. 178, p. 205-222.
- Deshpande, R.D., Bhattacharya, S.K., Jani, R.A. and

- Gupta, S.K. (2003) Distribution of oxygen and hydrogen isotopes in shallow groundwaters from Southern India: influence of a dual monsoon system. *Journal of Hydrology*, v. 271, p. 226-239.
- Frederickson G.C. and Criss R.E. (1999) Isotope hydrology and residence times of the unimpounded Meramec River Basin, Missouri. *Chemical Geology*, v. 157, p. 303-317.
- 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*, v. 23, p. 137-148.
- McGuire, K.J., DeWalle, D.R. and Gburek, W.J. (2002) Evaluation of mean residence time in subsurface waters using oxygen-18 fluctuations during drought conditions in the mid-Appalachians. *Journal of Hydrology*, v. 261, p. 132-149.
- Scholl, M.A., Ingebritsen, S.E., Janik, C.J. and Kauashikaua, J.P. (1996) Use of precipitation and groundwater isotopes to interpret regional hydrology on a tropical volcanic island: Kilauea volcano area, Hawaii. *Water Resources Research*, v. 32, p. 3523-3537.
- Vandenschrick, G., Wesemael, B., Frot, E., Pulido-Bosch, A., Molina L., Stievenard, M. and Souchez, R. (2002) Using stable isotope analysis ( $\delta D$ - $\delta^{18}O$ ) to characterise the regional hydrology of the Sierra de Gador, south east Spain. *Journal of Hydrology*, v. 265, p. 43-55.

---

2003년 7월 12일 원고접수, 2003년 10월 2일 게재승인.