

## 고해상도 강우동위원소변동에 대한 연구

이정훈<sup>1\*</sup> · 김송이<sup>1</sup> · 한영철<sup>2</sup> · 나운성<sup>2</sup> · 오윤석<sup>3</sup> · 김영희<sup>1</sup> · 김혜린<sup>1</sup> · 함지영<sup>1</sup> · 최혜빈<sup>1</sup> · 고동찬<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>이화여자대학교 과학교육과, <sup>2</sup>극지연구소 기후연구부, <sup>3</sup>인천과학고등학교, <sup>4</sup>한국지질자원연구원 지하수연구실

### A High-resolution Study of Isotopic Compositions of Precipitation

Jeonghoon Lee<sup>1\*</sup>, Songyi Kim<sup>1</sup>, Yeongcheol Han<sup>2</sup>, Yoon Seok Oh<sup>3</sup>, Young-Hee Kim<sup>1</sup>, Hyerin Kim<sup>1</sup>, Ji-Young Ham<sup>1</sup>, Hye-Bin Choi<sup>1</sup>, Un-Sung Na<sup>2</sup> and Dong-Chan Koh<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

<sup>2</sup>Division of Climate Change, Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, Korea

<sup>3</sup>Incheon Science High School, Incheon 400-831, Korea

<sup>4</sup>Groundwater Dept., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

(Received: 2 February 2015 / Revised: 1 October 2015 / Accepted: 5 October 2015)

Isotopic compositions of precipitation have been used to understand moisture transport in the atmosphere and interactions between precipitation and groundwater. Isotopic compositions of speleothems and ice cores, so called, "paleoarchives", can be utilized to interpret climate of the past and global circulation models (GCMs). The GCMs are able to explain the paleoarchives, can be validated by the precipitation isotopes. The developments of stable isotope analyzers make high-resolution isotopic studies feasible. Therefore, a high-resolution study of precipitation isotopes is needed. For this study, precipitation samples were collected for every 5 to 15 minutes, depending on precipitation rates, using an auto-sampler for precipitation isotopes near coastal area. The isotopic compositions of precipitation range from -5.7‰ (-40.1‰) to -10.8‰ (-74.3‰) for oxygen (hydrogen). The slope of  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  diagram for the whole period is 6.8, but that of each storm is 5.1, 4.2, 7.9 and 7.7, respectively. It indicates that evaporation occurred during the first two storms, while the latter two storm did not experience any evaporation. The isotopic fractionations of precipitation has significant implications for the water cycle and high-resolution data of precipitation isotopes will be needed for the future studies.

**Key words** : precipitation isotopes, high-resolution, evaporation, precipitation rates

강우의 산소 및 수소안정동위원소는 물순환 연구에서 수분의 이동 및 강우와 지하수계의 상호작용을 이해하는 데에 사용되어 왔다. 종유석 및 빙하의 안정동위원소를 이용하여 과거의 기후 및 기상을 이해하는 데에 이용되고 있으며, 이러한 과거지시자를 설명하기 위한 전지구순환모델의 기초자료로 이용되고 있다. 동위원소 분석기기의 발전으로 인해 이전보다 고해상도 연구가 점차 가능해 지고 있으며, 강우안정동위원소 역시 고해상도 연구에 대한 필요성이 제기되고 있다. 이번 연구에서는 해안에서 강우안정동위원소의 변동을 관찰하기 위하여 자동시료채취장치를 개발하여 강우량에 따라 5-15분 간격으로 강우시료를 채취하였다. 강우동위원소의 변동은 연구기간동안 최대 -5.7(-40.1)‰, 최소 -10.8(-74.3)‰ 값을 보였으며, 연구기간동안 강우안정동위원소의 산소와 수소의 선형관계의 기울기는 6.8이며, 이를 강우사상으로 분리하면 각각 5.1, 4.2, 7.9, 7.7이다. 이는 첫 두 강우가 내리면서 증발이 일어났음을 지시하며, 시간이 갈수록 증발이 더 이상 일어나지 않았음을 의미한다. 이러한 안정동위원소의 분화는 여러 물순환 연구에 시사하는 바가 크며, 앞으로 강우안정동위원소를 이용한 연구를 수행할 때 강우의 고해상도 분석이 필요할 것으로 판단된다.

**주요어** : 강우동위원소, 고해상도, 증발, 강우속도

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

\*Corresponding author: jeonghoon.d.lee@gmail.com

## 1. 서 론

물의 순환(water cycle 또는 hydrological cycle)에서 강우는 지하수를 충전시키거나 유출에 의해 하천에 영향을 주기도 한다(Lee *et al.*, 2003; Mayr *et al.*, 2007). 물의 순환과정에서 이러한 강우의 이동과정을 추적하기 위하여 강우의 안정동위원소(isotopic compositions of precipitation)가 지난 반세기동안 이용되어 왔다(Lee *et al.*, 2010). 2000년대에 이르러 동위원소질량분석기를 이용한 분석법은 전처리장비의 발전(H-device 및 gas bench)과 레이저분광법(laser based spectroscopy)을 이용한 분석법이 발전을 거듭하면서 불안정동위원소를 이용하여 물의 순환을 이해하려는 노력이 과거에 비하여 비약적으로 증가하고 있는 추세이다(Gupta *et al.*, 2009; Iannone *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2013). 강우동위원소와 함께 수증기동위원소를 측정하여 물의 상변화(phase change) 및 이동(transport)에 대한 연구가 세계적으로 진행되고 있다(Frankenbergh *et al.*, 2009). 국내에서도 이러한 세계적인 추세에 발맞추어 불안정동위원소의 분석법을 발전시키고 이를 이용한 다양한 연구가 시도 중에 있다(Lee *et al.*, 2013; Jung *et al.*, 2013).

특히, 강우의 안정동위원소는 국내에서는 지난 20여 년 동안 제주지역을 중심으로만 연구되어 왔다(Lee *et al.*, 1999; S. Lee *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2003). 강우안정동위원소를 이용하여 강우의 근원이 되는 수증기의 계절성(seasonality)에 대한 연구와 강우안정동위원소와 지하수 안정동위원소간의 상관관계를 이용하여 강우로부터 지하수로의 충전 과정을 이해하기 위한 연구 등이 진행되어 왔다(Lee *et al.*, 2013). 불안정동위원소는 두 수계에서의 혼합(mixing) 및 물의 기원 문제를 해결하는 데에 이용되어 왔다(Koh *et al.*, 2012). Lee *et al.* (1999)에서는 강우와 지하수의 안정동위원소의 관계를 파악하여 제주 지역에서 주로 여름에 지하수가 강우에 의해 충전된다는 결론을 보고하였다. Lee *et al.* (2003)의 연구에서는 동위원소의 계절적변동성을 해석하여 제주지역의 수증기의 기원에 대하여 보고하였다.

동위원소수분리법(isotopic hydrograph separation)을 이용하여 강우와 지하수가 하천에 기여하는 비율을 정량적으로 구할 수 있다. Lee *et al.* (2013)의 연구에서는 새로운 물(new water)인 강우의 동위원소분화를 고려하지 않았을 때 연구결과에 얼마만큼의 오차가 발생하는가를 불확정성의 원리(error propagation)를

이용하여 계산하였다. 동위원소수분리법을 수계연구에 적용할 때, 강우안정동위원소의 시간적인 변화를 고려하여야 하지만, 실제로는 연구기간동안의 강우의 평균값 또는 일회 분석한 값을 사용하고 있다(Cho *et al.*, 2007). 강우동위원소가 상대적으로 짧은 시간동안 변동이 없을 것이라는 가정에서 기인한다. 단일 강우(one storm)에서도 강우안정동위원소 값이 시간에 따라 달라진다는 것이 여러 연구에서도 관찰되었다(Pionke and Dewalle, 1992; Lee *et al.*, 2013). 한편, 고기후 지시자(proxies of paleoclimate)인 빙하 및 중유석을 이용한 연구에서도 시간적인 해상도가 점점 증가하면서 이전보다 고해상도의 강우 및 강설동위원소의 변동에 관심이 증가되고 있다(Posmentier *et al.*, 2004). 따라서, 이번 연구에서는 서해안에서 바로 증발 또는 대류에 의해 이동된 강우를 채집하여 짧은 기간(1시간 미만)동안 강우동위원소가 얼마나 어떻게 분화(fractionation)하는지, 이러한 변화가 어떤 의미를 가지는 것인지를 고찰하는 것이 연구의 목적이다.

## 2. 시료채집 및 분석방법

서해안에서 증발(evaporation) 또는 대류(convection)에 의해 생성된 구름에서 응축된 강우를 채집하기 위하여 영종도에 위치한 인천과학고등학교를 연구 지역으로 선정하였다(Fig. 1). 긴 시간동안 강우를 채집하기 위해서는 강우를 채집하는 동안 증발을 막기 위하여 미네랄오일(mineral oil)을 채집장치 표면에 뿌려 놓지



Fig. 1. Map of sampling location (Incheon Science High School) at the coastal area of Incheon, Korea.

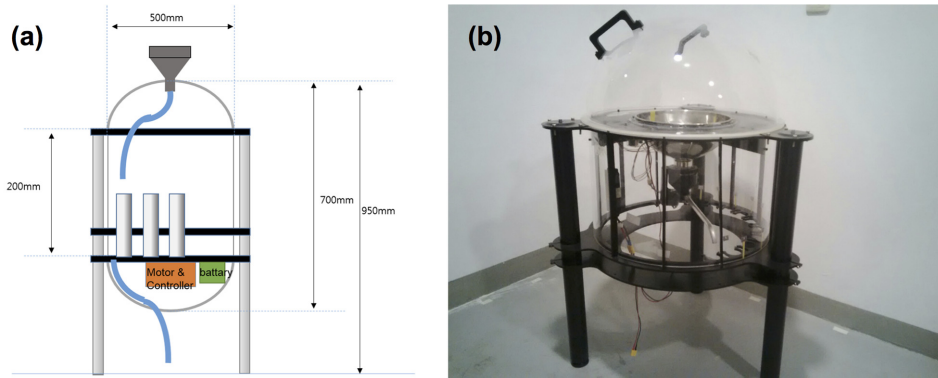


Fig. 2. An auto-sampler used in this study. (a) A schematic diagram of auto-sampler (b) a photo of auto-sampler.

만, 이번 연구에서는 짧은 기간동안 시료를 채취하기 때문에 증발의 효과는 매우 적을 것이라고 가정하고 미네랄오일을 사용하지 않았으며, 시료를 채취한 후 분석이 실시되기 전까지 바로 냉동시설에 보관하였다.

이번 연구에서는 강우가 일어나는 동안 짧은 시간에도 안정동위원소의 분화가 일어나는 지를 관찰하기 위하여 강우량에 따라 시료를 채집하였다. 짧은 시간간격동안 사람이 지속적으로 직접 강우를 채집하기 어렵기 때문에, 이를 위하여, 자동시료채집장치(auto-sampler)를 자체적으로 제작하였다(Fig. 2). 자동시료채집장치를 이용한다면 수작업에 비해 강우를 고정된 자리에서 일정한 시간동안 자동적으로 채취할 수 있다. 기본적인 구조는 상부에 깔때기를 놓고 튜브를 통해 강우가 자동적으로 취수병(bottle)로 이동하면서 일정 시간 이후에 다음 시료의 취수병으로 시료를 흐르게 하는 것이다(Fig. 2a). 이러한 구조에서 크게 두 가지 문제가 발생할 수 있는데, 자동시료채집장치가 있는 곳에 전기를 공급하는 것과 취수병을 일정시간 간격으로 바꾸어야 하는 것이다. 첫 번째 문제는, 강우 채집 시 나무의 영향 등을 배제하기 위하여 완전히 열린 공간에서 채집하여야 하므로 배터리를 이용하여 전기를 공급하는 형태로 제작하였다(Fig. 2b). 취수병이 설치되어 있는 디스크가 일정시간에 한 번씩 회전하게 만들게 되었을 때는 취수병에 시료가 서로 다른 양이 담기게 되므로 취수병의 무게가 각기 달라지게 된다. 따라서, 깔대기 하부에 있는 튜브를 일정한 시간 간격으로 회전시켜서 취수병에 강우시료가 들어가도록 설계하였다(Fig. 2). 취수병은 60 mL를 사용하였다.

냉장보관 된 시료는 동위원소분석기가 설치되어 있는 극지연구소(Korea Polar Research Institute,

KOPRI)에서 실시하였다. 강우동위원소는 상용 불안정 동위원소분석장비(Picarro L2130-*i*)를 이용하여 분석하였다. 레이저흡광법(a cavity ringdown spectrometer, CRDS, <http://www.picarro.com>)을 이용하여 기체의 흡수스펙트럼의 고유성을 이용하는 이같은 장비는 최근 동위원소질량분석기를 대체하는 추세이다(Gupta *et al.*, 2009; Iannone *et al.*, 2010; Jung *et al.*, 2013). 정밀하게 조정된 파장의 빛을 측정 챔버(cavity)에 조사한 후 빛이 측정 챔버 안에 있는 대기의 목적성분의 양에 비례하여 흡수 및 소멸되는 시간을 측정 하는 원리이다. 먼저, 액상의 표준물질을 기체화하여 검량선을 만들고 그 다음에 대기로부터 수증기를 분석기기로 주입하여 동위원소를 분석하였다. 표준물질로는 국제원자력기구(IAEA)에서 제공하는 VSMOW2(산소 및 수소동위원소값: 0‰, 0‰), SLAP(-55.50‰, -427.5‰), GISP(-24.76‰, -189.5‰)를 사용하였다. 각 시료 1회당 주입횟수를 6회로 정하고 세 번째까지는 이전 시료의 메모리 효과(memory effect)를 고려하여 결과 값 산출시 제외하였다. 시료 5회 분석후 표준물질을 이용하여 분석값을 검증하였다. 수소 및 산소동위원소의 정밀도는 0.8‰과 0.08‰이다. 불안정동위원소의 δ값은 H<sub>2</sub><sup>16</sup>O의 농도 값에 대한 H<sub>2</sub><sup>18</sup>O의 농도 값의 상대조성비로 나타내며, δ의 값은 H<sub>2</sub><sup>16</sup>O의 농도 값에 대한 HD<sup>16</sup>O의 농도 값의 상대 조성비로 나타낸다. δ의 정의는 아래 식 1과 같다.

$$\delta(\text{‰}) = \left[ \frac{R_{obs} - R_{VSMOW}}{R_{VSMOW}} \right] \times 1000 \quad (1)$$

여기서  $R_{obs}$ 와  $R_{VSMOW}$ 는 각각 분석된 시료와 표준 시료의 D/H 또는 <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O를 나타낸다.

### 3. 연구 결과 및 토의

#### 3.1. 시간에 따른 안정동위원소분화

강우안정동위원소가 상대적으로 짧은 시간 간격에서도 분화가 일어나는 가를 관찰하기 위하여 2014년 7월 24일에서 25일까지 총 4회의 강우사상(storm) 동안 강우를 채집하였다. 첫 번째 강우(event 1)는 24일 12:26분에서 12:56분까지 5분 간격으로 5개의 시료를 채취하였으며, 두 번째 강우(event 2)는 13:30분부터 14:40분까지 10분 간격으로 5개의 시료를 채취하였으며, 세 번째 강우(event 3)는 21:37분부터 23:37까지 15분 간격으로 8개의 시료를 채취하였으며, 네 번째 강우(event 2)는 다음 날 00:34분부터 03:19분까지 15분 간격으로 10개의 시료를 채취하였다. 시료채취의 시간간격은 강우량에 따라 조절하였다. 강우량은 취수병의 무게를 미리 측정된 후 증가된 만큼 단위시간당 질량으로 나타내었다(Fig. 3).

Fig. 3은 연구기간동안 측정된 강우안정동위원소의 값 중에서 수소동위원소 값(black diamond)과 단위시간동안 측정된 강우량(grey square)을 나타낸 것이다. 연구기간동안 측정된 강우의 산소 및 수소동위원소의 평균값은 각각  $-7.7 \pm 1.3\%$ 과  $-52.3 \pm 9.2\%$ 이다. 산소 및 수소동위원소의 최대값은 각각  $-5.7\%$ 과  $-40.1\%$ 이었으며, 최소값은 각각  $-10.8\%$ 과  $-74.3\%$ 이었다. 산소 및 수소동위원소의 최대값과 최소값의 차이는 각각  $5.1\%$ 과  $34.1\%$ 이다. Lee *et al.* (2003)의 연구결과에 의하면, 제주도 강우의 산소동위원소의 변동은  $-13.5\%$ 에서  $-1.0\%$ 을 나타내었다. 동위원소의 변동폭은  $12.5\%$ 정도이며 이는 1995년 5월부터 1997년 5월까지 측정된 값이다. 제주도에서 관찰된 이러한 분화정도는

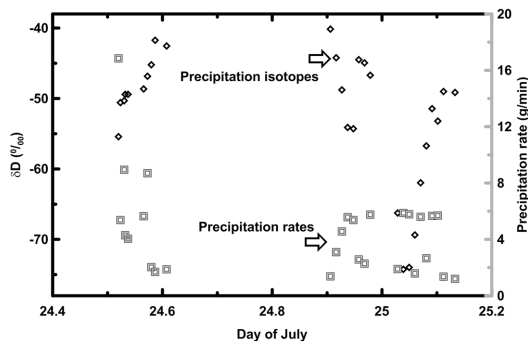


Fig. 3. Time series of precipitation rate (g/min, square) and isotopic composition of precipitation ( $\delta D$ , diamond). Each period of event is described in the text in detail.

제주도 주변에 미치는 수증기의 근원지역의 계절적 변화 및 다양한 기상변화가 다 반영된 값이며, 그에 비해 이번 연구에서 관찰된 분화정도는 여름에 서해안에서 증발 또는 대류에 의해 발생된 수증기가 응축되어 내린 강우의 분화정도이다.

지하수와 강우가 하천에 얼마만큼 기여하는 가를 정량화하는 동위원소수분분리법에서 강우안정동위원소의 변화를 고려하지 않았을 때 상대오차가 얼마만큼 발생하는 가를 Lee *et al.* (2013)에서 제시하였다. 상대오차( $\Delta x$ )에 영향을 주는 변수로는 강우( $ppt$ ,  $x$ )가 하천에 기여하는 비율, 강우와 지하수( $grw$ )와의 동위원소 차이, 마지막으로 강우의 분화정도이다. 이를 수식으로 나타내면 식 2와 같다.

$$\Delta x = \frac{x}{(\delta D_{ppt} - \delta D_{grw})} \Delta \delta D_{ppt} \quad (2)$$

식 2에 의하면 이번 연구에서 관찰된 것은 강우안정동위원소가 시간에 따라 분화하여 강우의 평균값과의 차이( $\Delta \delta D_{ppt}$ )는 최대 22%에 해당된다. 따라서, 강우안정동위원소가 분화하여 연구기간동안 평균값과 차이가 크게 날수록 동위원소수분분리법의 상대오차는 커질 수밖에 없다.

저위도지역에서는 강우의 양과 강우동위원소간에는 역관계가 알려져 있다(우량효과, amount effect). 최근에는 동위원소가 포함된 전지구순환모델(isotope enabled global circulation model, isotope-GCM)을 이용하여 적도지역에서 우량효과가 어떠한 과정으로 일어나는 지에 대한 연구가 활발히 진행 중이다(Risi *et al.*, 2012). 이번 연구에서는 이러한 우량효과가 연구기간동안에도 관찰될 수 있는 지 알기 위해서 강우량을 단위시간당 질량으로 Fig. 3에 표시하였다. 첫 번째 강우(event 1)에서 두 번째 강우(event 2)로 진행되면서 강우량은 감소하고 강우동위원소 값은 증가함을 알 수 있다. 세 번째 강우(event 3)에서 강우량이 증가하면서 강우안정동위원소 값은 감소함을 볼 수 있다. 따라서, 강우안정동위원소값과 강우량 간의 역관계를 관찰할 수 있지만 이번 연구로 상대적으로 짧은 시간에도 우량효과가 나타난다고 할 수 없으며 앞으로 주기적으로 긴 시간동안 관찰해야 이러한 결과에 도달할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 3.2. 산소와 수소의 안정동위원소의 선형적 관계

물의 순환 연구에서 물이 계(system)를 이동하는 과정을 추적하는데 불안정동위원소는 가장 효과적인 도

구이다(Lee *et al.*, 2010). 불안정동위원소를 이용할 때, 가장 먼저 검토하는 것이 산소와 수소의 선형적인 관계(linear relationship)이다. Craig (1961)과 Dansgaard (1964)에서는 전지구적으로 내리는 강우의 두 안정동위원소의 관계를 고찰하였다. 이를 지구순환수선(Global Meteoric Water Line, GMWL)이라 부르며, 기울기가 8인 일차선형함수이다. 또한, 각 지역별로 강우를 채집하고 강우의 두 안정동위원소의 관계를 정립한 것은 지역순환수선(Local Meteoric Water Line, LMWL)으로 불리며, 세계의 대부분의 지역에서 지역은 정립되어 있다(Lee *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2003). 국내에서도, 제주지역에서의 지역순환수선이 정립되어 있으며, 국내의 많은 연구에서 제주지역의 지역순환수선을 활용하여 물의 물리적인 이동을 설명하고 있다(Lee *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2003). 한편, 기울기가 8인 선형관계는 물이 근처의 바다에서 증발하고 응결하여 강우를 채취한 지역까지 더 이상의 물리적인 과정없이 강우가 내리는 경우이며, 기울기가 8이 아닌 경우에는 대부분 강우가 내리면서 재증발(re-evaporation)하는 것으로 의미한다(Lee *et al.*, 2010).

이번 연구에서 관찰된 강우가 어떠한 물리적 과정을 거치면서 서해안에서 연구지역까지 도달하였는지 알기 위하여, 산소와 수소의 선형관계를 Fig. 3에 도시하였다. 연구지역이 서해안 영종도에 위치하고 있기 때문에, 해양에서 생성된 구름이 바로 응축되어 강우로 내릴 것이라고 가정하면 기울기는 지구순환수선과 크게 차이 나지 않을 것으로 예상되었다. 이번 연구에서 관찰된 산소와 수소동위원소의 기울기가 6.8이며, 이는 지구순환수선의 기울기 8과는 차이가 있으며, 이는 수증기가 기원지에서 이동하면서 응축(condensation)이외에 다른 물리적인 과정이 있었음을 의미한다. Fig. 3에 도시된 자료는 연구기간 전체동안 관찰된 동위원소 값이며, 각각의 강우사상 동안 일어난 물리적 과정을 살펴 보기 위하여, 앞 절에서 언급했던 강우사상별로 안정동위원소를 Fig. 4에 도시하였다. 4번의 강우사상동안 산소와 수소의 선형관계의 기울기는 5.1, 4.2, 7.9, 7.7로 관찰되었다(각각 Fig. 4a, 4b, 4c, 4d). 첫 번째와 두 번째 강우사상이 기울기가 8에서 벗어나 있으며, 마지막 두 번의 강우는 지구순환수선의 기울기 8과 크게 다르지 않다. 첫 두 번의 강우동안은 비가 내리면서 재증발(re-evaporation)이 일어났음을 의미하며, 마지막 두 번의 강우동안은 해양에서 연구지역으로 재증발없이 비가 내렸음을 의미한다. 첫 두 번의 강우동안 연구지역의 상대습도(relative humidity)는 포화상태에

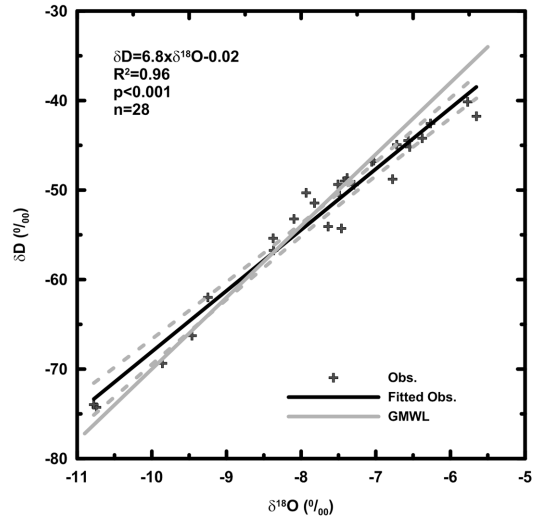


Fig. 4. A linear regression line between  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  (black solid line). The grey solid line is the Global Meteoric Water Line (GMWL,  $\delta\text{D}=8\times\delta^{18}\text{O}+10$ ). The grey dotted lines are the 95% of confidence intervals on the estimated mean.

이르지 않아 재증발이 일어났으며, 다음 두 번의 강우사상 동안에는 상대습도가 포화상태에 이르러 더 이상의 재증발이 일어나지 않아 대기의 수증기와 강우의 동위원소교환반응이 더 이상 일어나지 않았음을 의미한다(Risi *et al.*, 2008).

#### 4. 결론 및 제언

강우의 안정동위원소를 시간적 고해상도 연구를 수행하기 위하여 자동시료채집장치를 개발하였으며, 이 장치는 향후 강우의 안정동위원소 연구에 유용하게 사용될 것으로 기대된다. 강우량에 따라 고해상도 강우동위원소연구를 수행하기 위하여 총 2일동안 10-15분 간격으로 총 4회의 강우사상동안 시료를 채집하여 산소와 수소의 동위원소 값이 각각 5.1‰과 34.1‰의 차이를 나타내었다. 이는 국내에서 일년동안 관찰되는 강우안정동위원소의 변동에 비해서 무시할 수 없는 변동이며 그 동안 많은 연구에서 강우동위원소는 일정기간 동안 변하지 않을 것이라는 가정을 다시 한 번 고려해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다. 4번의 강우 사상동안 첫 두 번의 강우동안은 기울기가 지구순환수선의 기울기 8과는 차이가 나는 값을 보였으며, 이는 강우사상동안 재증발이 일어났음을 의미한다. 마지막 두 번의 강우동안은 지구순환수선의 기울기 8과 거의 일치함을

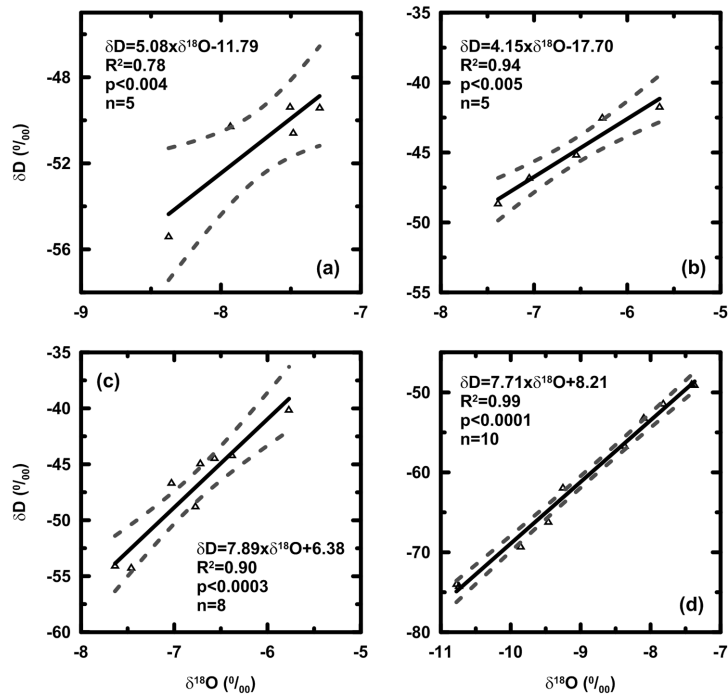


Fig. 5. Isotopic linear regression line for each storm. The dotted lines are the 95% of confidence intervals on the estimated mean. (a) event 1, (b) event 2, (c) event 3 and (d) event 4 as indicated in Fig. 3.

보였으며, 이는 계속되는 강우로 인해 상대습도가 거의 포화상태에서 강우가 연구지역에 내렸음을 의미한다.

국내에서 고기후에 관한 연구 중에서 빙하연구는 주로 양극지역과 고산지역에서 채취한 시료를 이용하여 수행 중이지만, 중유석을 이용한 연구는 여러 지역에서 활발히 진행 중이다(Jo *et al.*, 2014). 중유석을 이용하여 고기후연구를 수행하기 위해서는 고기후지시자를 이해하기 위한 선행연구가 활발히 진행되어야 한다. 특히, 강우에서 기원하여 지하수를 충전시키고 지하수에 의해 중유석이 형성되는 과정의 동위원소변동에 대한 연구가 선행되어야 고기후지시자의 해석을 좀 더 정확하게 할 수 있을 것이라고 판단된다.

## 사 사

이 논문은 2014년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2014 R1A1A2057572)의 지원과 한국지질자원연구원의 주요 사업인 “수리생태학적 기법을 활용한 수권 경계면에서 물질 순환 평가 기술개발(14-3211-2)” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- Cho, S.H., Ha, K., Kim, T., Cheon, S. and Song, M.Y. (2007) Hydrograph separation for two consecutive rainfall events using tracers ( $\delta^{18}\text{O}$  & Cl). *Journal of Geological Society of Korea*, v.43, p.253-263.
- Craig, H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, v.133, p.1702-1703.
- Dansgaard, W. (1964) Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, v.16, p.436-468.
- Frankenberg, C., et al. (2009) Dynamic processes governing lower-tropospheric HDO/H<sub>2</sub>O ratios as observed from space and ground. *Science*, v.325, p.1374-1377.
- Gupta, P., Noone, D., Galewsky, J., Sweeny, C. and Vaughn, B.H. (2009) Demonstration of high precision continuous measurements of water vapor isotopologues in laboratory and remote field deployments using WS-CRDS technology. *Rapid Communications in Mass-spectrometry*, v.23, p.2534-2542.
- Henderson, A.K. and Shuman, B.N. (2014) Hydrogen and oxygen isotopic compositions of lake water in the western United States. *Geological Society of America Bulletin*, v.121, p.1179-1189.
- Iannone, R.Q., Romanini, D., Cattani, O., Meijer, H.A.J. and Kerstel, E.R.Th. (2010) Water isotope ratio ( $^2\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$ ) measurements in atmospheric moisture using an optical feedback cavity enhanced absorption

- laser spectrometer. *Journal of Geophysical Research*, v.115, D10111, doi:10.1029/2009JD012895.
- Jo, K.N., Woo, K.S., Yi, S., Yang, D.Y., Lim, H.S., Wang, Y., Cheng, H. and Lawrence, R.L. (2014) Mid-Latitude interhemispheric hydrologic seesaw over the past 550,000 years. *Nature*, v.508, p.378-382.
- Jung, Y.Y., Koh, D.C., Lee, J. and Ko, K.G., (2013) Applications of isotope ratio infrared spectroscopy (IRIS) to analysis of stable isotopic compositions of liquid water. *Economic and Environmental Geology*, v.46, 495-508
- Koh, D.C., Ha, K., Lee, K.S. and Ko, K.S. (2012) Flow paths and mixing properties of groundwater using hydrogeochemistry and environmental tracers in the southwestern area of Jeju volcanic island. *Journal of Hydrology*, v.432-433, p.61-74.
- Lee, J., Choi, H., Oh, J., Na, U.S., Kwak, H. and Hur, S.D. (2013) Moisture transport observed by water vapor isotopes in the vicinity of coastal area, Incheon, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v.46, 339-344.
- Lee, J., Feng, X., Faiia, A.M., Posmentier, E.S., Kirchner, J.W., Osterhuber, R. and Taylor, S. (2010) Isotopic evolution of a seasonal snowcover and its melt by isotopic exchange between liquid water and ice. *Chemical Geology*, v.270, p.126-134.
- Lee, J., Koh, D.C. and Choo, M.K. (2013) Influences of fractionation of stable isotopic composition of rain and snowmelt on isotopic hydrograph separation. *Journal of Korean Earth Science Society*, v.35, p.97-103.
- Lee, J., Worden, J., Koh, D.C., Yoshimura, K. and Lee, J.E. (2013) A seasonality of  $\delta D$  of water vapor (850-500 hPa) observed from space over Jeju Island, Korea. *Geosciences Journal*, v.17, p.87-95.
- 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*, v.222, p.66-74.
- 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*, v.23, p.137-148.
- Lee, S., Shimada, J. and Kayane, I. (1999) Stable isotopes in precipitation in the volcanic island of Cheju, Korea. *Hydrological Processes*, v.13, p.113-121.
- Mayr, C. et al. (2007) Precipitation origin and evaporation of lakes in semi-arid Patagonia (Argentina) inferred from stable isotopes ( $\delta^{18}O$ ,  $\delta^2H$ ). *Journal of Hydrology*, v.334, p.53-63.
- Pionke, M.G. and Dewalle, D.R (1992) Intra- and inter-storm  $^{18}O$  trends for selected rainstorms in Pennsylvania. *Journal of Hydrology*, v.138, p.131-143.
- Posmentier, E.S., Feng, X. and Zhao, M. (2004) Seasonal variations of precipitation  $\delta^{18}O$  in eastern Asia. *Journal of Geophysical Research*, v.109, D23106, doi:10.1029/2004JD004510.
- Risi, C., et al. (2012) Process-evaluation of tropospheric humidity simulated by general circulation models using water vapor isotopic observations: 2. Using isotopic diagnostics to understand the mid and upper tropospheric moist bias in the tropics and subtropics. *Journal of Geophysical Research*, 117, D05304, doi:10.1029/2011JD016623.