

수증기안정동위원소를 이용한 해안지역 수분의 이동경로에 관한 연구

이정훈^{1*} · 최희진² · 오진만³ · 나운성² · 곽호제⁴ · 허순도²

¹이화여자대학교 과학교육과, ²극지연구소 극지지구시스템연구부

³KNJ 엔지니어링(주), ⁴인하대학교 해양학과

Moisture Transport Observed by Water Vapor Isotopes in the Vicinity of Coastal Area, Incheon, Korea

Jeonghoon Lee^{1*}, Heejin Choi², Jinman Oh³, Un-Sung Na², Hoje Kwak⁴ and Soon Do Hur²

¹Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

²Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, Korea

³KNJ Engineering, Inc., Uiwang 437-820, Korea

⁴Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon 402-751, Korea

Water vapor isotopes can be excellent tools for understanding complex mechanisms in the water cycle and atmospheric hydrological cycle and they can be applied to various fields of paleoclimatology, atmospheric science, hydrogeology, oceanography, and ecohydrology. Thus, studies of global or local transport of water vapor may be able to provide a very useful clue to better understand the movements of water and energy in the atmosphere, hydrosphere and biosphere. In this study, the isotopic compositions of water vapor have been observed for moisture transport during the passage of Typhoon Bolaven at Korea Polar Research Institute (KOPRI), Incheon, in the western part of Korea, from August 27 to August 29, 2012. In the clear sky, the isotopic compositions of water vapor at KOPRI exhibited relatively higher isotopic ratios, which were near isotopic equilibrium with sea surface water ($\delta^{18}\text{O}=-14\text{‰}$). On the other hand, a largely depleted isotopic ratios in surface water vapor were observed in association with the passage of Typhoon Bolaven (approximately 10‰ depleted compared to the clear sky). The fact that the isotopic minima in water vapor are encountered during the onset period of the Typhoon Bolaven with increases of relative humidity, which is consistent with, so called, “the amount effect”.

Key words : stable water isotopes, transport of water vapor, the Typhoon Bolaven

물의 순환의 복잡한 기작을 이해하는 데 수증기동위원소는 중요한 단서를 제공할 수 있으며 지구과학의 다양한 영역(고기후학, 수리지질학, 대기학, 해양학 및 생태학)에 적용될 수 있다. 수분의 전지구적 또는 지역적 이동에 대한 연구는 물의 순환 및 대기에서의 에너지이동을 좀 더 잘 이해하는 데 도움을 줄 것이다. 본 연구에서는 해안근처에서의 수분의 이동을 파악하기 위해서 태풍 볼라벤이 한반도를 통과하는 기간동안(2012년 8월 27일부터 8월 29일까지) 수증기의 안정동위원소를 극지연구소에 설치된 동위원소분석기를 이용하여 측정하였다. 수분동위원소의 두 동위원소의 선형관계식($D=7.8 \times 10^{18}\text{O}+10.1$)으로부터 해양 기원의 수증기가 증발에 의해 이동되어 측정되었음을 알 수 있었다. 날씨가 맑을 때는 해양으로부터 증발되어 다른 물리적인 변동없이 직접 이동된 수증기의 동위원소 조성(산소동위원소, $\delta^{18}\text{O}=-14\text{‰}$)을 보여 주었으며, 태풍이 통과하면서 수분동위원소의 값은 10‰ 정도 낮은 값을 보였다. 태풍의 통과로 인해 상대습도는 증가하였으며 수분동위원소값은 감소하는 소위 “우량효과(amount effect)”를 보여주었다.

주요어 : 수증기 동위원소, 수분이동, 태풍 볼라벤

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

1. 서 론

불안정동위원소(stable water isotopes)는 물의 순환(water cycle)을 이해하는 데 필수적이며 최근 동위원소분석방법 및 기기의 발전과 더불어 다양한 연구가 많이 이루어지고 있다(Iannone *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2013). 특히 증발산(evapotranspiration), 용설의 침투(snowmelt infiltration), 기저량 유출(runoff) 및 대기 수분의 리사이클링(recycling)등 물의 순환과 관련되어 수분이 서로 다른 시스템으로 이동되는 과정을 이해하는 데 불안정동위원소 연구는 필수적이다(Lee *et al.*, 2010). 또한 빙하, 중유석 및 나무의 나이테 같은 과거지시자(paleoproxy)를 이용하여 고기후를 연구하기 위해서는 현재의 강수 및 수증기 안정동위원소연구가 선행되어야 하며, 이러한 과거지시자가 현재의 기상변수와 어떠한 함수관계에 있는 지 알아야 한다(Dansgaard, 1964; Lee *et al.*, 2013). 따라서, 온도(temperature) 또는 강우(precipitation)의 양이 강우 및 수증기(water vapor) 안정동위원소와 어떤 상관관계를 갖느냐가 과거지시자를 이용하여 고기후 및 고환경을 복원하는 데 중요한 변수가 될 것이다.

강우 및 기상변수와의 관계는 지난 몇 십년간의 연구를 통하여 잘 알려져 있다(Dansgaard, 1964; Lee *et al.*, 2002). 특히 고위도지역과 극지역에서 현재의 강우와 온도관계를 이용하여 빙하의 연대측정 및 과거의 온도를 복원할 수 있다(온도효과). 한편, 저위도지역에서는 현재 강우와 강우의 양(amount)과의 역관계를 이용하여 연대 측정 및 과거 강수와 관련된 기후를 복원할 수 있다(우량효과) (Lee *et al.*, 2008). 강우안정동위원소의 경우 국제원자력기구(IAEA)에서 운영하는 GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation) 자료를 활용하여 전세계적인 강우동위원소분포를 연구할 수 있다. 강우와는 달리 수증기 동위원소(water vapor isotopes)의 연구는 1990년대 후반에 이르러 열대성저기압의 이동경로 및 적도지역에서 수증기가 대류현상에 의해 대류권에서 성층권으로의 이동과정을 밝혀내기 위해서 연구되기 시작하였다(Lawrence and Gedzelman, 1996). 그러나 시료채집과 분석의 어려움으로 인해 많은 연구가 이루어지지 않다가 최근에 이르러 레이저분광법을 이용한 새로운 분석방법과 인공위성자료에서 수증기 동위원소를 산출(retrieval)하는 알고리즘의 개발로 인하여 수증기 동위원소를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다(Gupta *et al.*, 2009;

Iannone *et al.*, 2010; Worden *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2013).

안정동위원소분별작용(stable isotopic fractionation)으로 인해 수증기동위원소를 분석한다면 수분의 이동 경로에 관한 연구를 수행할 수 있다(Lawrence and Gedzelman, 1996; Lee *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2013). 대표적인 예로, Lawrence and Gedzelman (1995)는 열대성저기압이 통과할 때 강우 및 수증기동위원소를 측정하여 안정동위원소의 변동을 보고하였다. 한편 제주지역주변에서 인공위성으로 산출된 특정 고도의 수증기동위원소의 계절적변동을 기존의 강우 동위원소와 비교하여 이전 연구결과와 다른 결과가 보고되어 있다(Lee *et al.*, 2013). 따라서, 한반도가 포함된 중위도지역에서 불안정동위원소의 변동이 극지역이나 적도와는 다른 변동성을 보여 주고 있어 이에 대한 연구가 필요한 것으로 사료되었다. 따라서, 본 연구에서는 국내 최초로 태풍 블라벤(Bolaven)이 한반도를 통과했던 기간(2012년 8월 27일에서 29일까지)을 중심으로 한반도 서해안 주변의 수증기동위원소변동 및 태풍으로 인해 안정동위원소의 변동이 어떻게 변하는가를 측정하였다. 해안지역에서 수분의 이동, 특히 태풍 같은 이벤트로 인해 수증기안정동위원소가 어떻게 변화하는지 이해하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 시료채집 및 분석방법

본 연구는 수증기동위원소분석기기가 설치되어 있는 극지연구소(Korea Polar Research Institute, KOPRI)에서 실시하였다(Fig. 1). 서해안에서 증발이나 대류에 의해 생성된 수증기를 관찰하기 위해서 KOPRI에서 수증기동위원소의 분석을 시도하였다. 수증기동위원소는 1분단위로 상용 불안정동위원소분석장비(Picarro L2130-J)를 이용하여 분석하였다(Fig. 2). 1분단위로 분



Fig. 1. Map of sampling location.



Fig. 2. Commercial laser spectrometer (CRDS from Picarro) used in this study.

석된 자료는 다시 1시간 단위의 평균으로 연구를 수행하였다. 레이저흡광법(a cavity ringdown spectrometer, CRDS, <http://www.picarro.com>)을 이용하여 기체의 흡수스펙트럼의 고유성을 이용한 이같은 장비는 최근 동위원소질량분석기를 대체하는 추세이다(Gupta *et al.*, 2009; Iannone *et al.*, 2010). 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(Fig. 3). 표준물질로는 국제원자력기구(IAEA)에서 제공하는 VSMOW2(산소 및 수소동위원소값: 0‰, 0‰), SLAP(-55.50‰, -427.5‰) 및 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 검

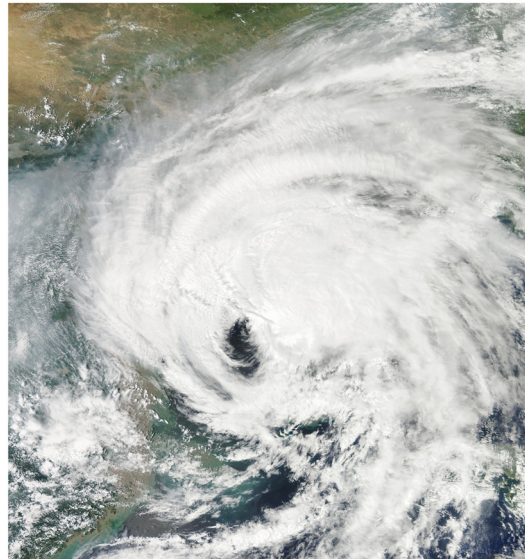


Fig. 4. The passage of Typhoon Bolaven and image of MODIS.

증하였다. 수소 및 산소동위원소의 정밀도는 0.15‰과 0.08‰이다. 수증기의 $R^{18}O$ 값은 $H_2^{16}O$ 의 농도 값에 대한 $H_2^{18}O$ 의 농도 값의 상대조성비로 나타내며, RD의 값은 $H_2^{16}O$ 의 농도 값에 대한 $HD^{16}O$ 의 농도 값의 상대 조성비로 나타낸다. δ 의 정의는 아래 식1과 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 $^{18}O/^{16}O$ 를 나타낸다.

태풍 블라벤의 영향으로 인한 수분 이동을 연구하기 위해 8월 27일 18시부터 8월 29일 17시까지 KOPRI

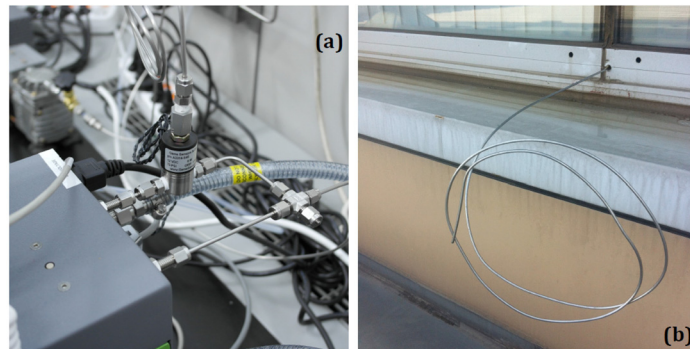


Fig. 3. Accessories to measure water vapor isotopes.

에서 수증기동위원소를 측정하였으며 상대습도 및 온도 역시 측정을 시도하였으나 기기의 오작동으로 인해 상대습도는 기상청의 자료(3시간 간격)를 사용하였다. 3층 건물 높이의 실험실에 스테인리스 스틸재질로 된 튜브를 통해 펌프를 이용하여 대기의 수증기를 빨아들여 동위원소분석기에 분사하여 측정을 시도하였다(Fig. 3). 태풍 블라벤은 28일부터 새벽부터 한반도에 영향을 주었으며 오후 4시경에 한반도에 상륙한 것으로 알려져 있다(Fig. 4).

3. 연구 결과 및 토의

3.1. 수증기안정동위원소

물안정동위원소를 이용하여 물의 순환을 연구할 때 가장 흔한 방법은 수소와 산소의 선형적인 관계를 검토하는 것이다(Lee *et al.*, 2010). 선형관계(절편과 기울기)를 이용하여 수분이 각기 다른 시스템을 이동할 때 어떠한 물리적 과정을 거치는 가에 대한 정보를 얻을 수 있다. 예를 들어, 지구천수선(Global Meteoric Water Line, GMWL, Dansgaard, 1964)의 기울기 8과 다른 기울기를 가진다면 다른 물리적 작용을 생각해 보아야 한다. Lee *et al.* (2010)의 연구에서는 눈 녹은 물의 기울기를 관찰하여 이것이 용설의 침투에 의한 동위원소교환반응으로 지구천수선 기울기 8보다 작은 값들을 설명하였다. 수증기의 산소-수소 동위원소의 결과를 도시하면 Fig. 5와 같다. 두 안정동위원소의 선형관계에서 기울기는 7.8이며 이는 지구천수선의 기

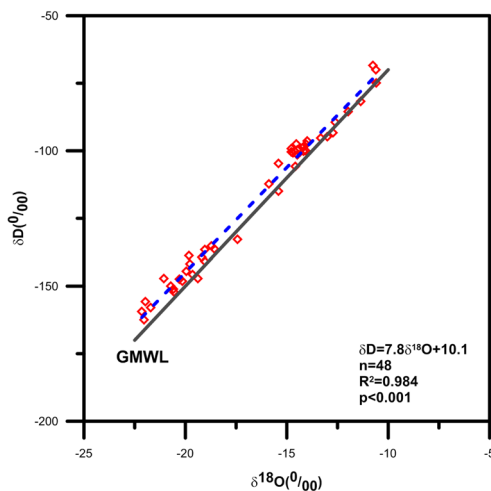


Fig. 5. A linear regression line between δD and $\delta^{18}O$. The line is almost identical to the GMWL ($\delta D = 8^{18}O + 10$).

울기 8과 거의 일치함을 보여 주고 있다. 따라서, 연구 지역의 수증기동위원소분석을 통해 해안에서 증발(evaporation) 또는 대류(convection)에 의해 수증기가 대기로 상승한 후 연구지역으로 이동하였음을 알 수 있다(Dansgaard, 1964).

Fig. 6은 연구기간(2012년 8월 27일 18시부터 8월 29일 17시까지)동안 수증기안정동위원소의 변동을 1시간 간격으로 도시한 것이다. 태풍 블라벤이 서해안을 통과하기 전, 즉 맑은 하늘 하(clear sky)에서는 수증기 안정동위원소값이 대체적으로 $-14 \pm 0.5\text{‰}$ (산소동위원소)와 $-100 \pm 3.7\text{‰}$ (수소동위원소)의 값으로 일정함을 알 수 있다. 이러한 결과는 맑은 날씨의 해안지역에서 수증기는 해수의 증발에 의해서만 영향을 받으므로 일정한 동위원소의 값들이 설명이 된다. 태풍 블라벤이 지나가면서 두 안정동위원소의 값들은 크게 감소한다(28일 10시). 두 안정동위원소값이 가장 많이 감소하였을 때 산소동위원소 -22.1‰ 이며 수소동위원소는 -162.4‰ 이다. 태풍 블라벤이 지나갈 때 수증기 동위원소값이 감소추세를 보이다 28일 15:00를 기점으로 동위원소값이 증가 및 감소를 반복하는 W형태를 보인다. 이는 다음 절에서 상대습도와 관련하여 논의하도록 하겠다.

맑은 하늘하에서의 값 -14‰ 의 산소동위원소비를 가지는 초기의 수증기단이 응축하여 강우를 내린다고 가정하여 레일레이증류방정식(Rayleigh distillation equation, 식 2)을 적용하였다.

$$R = R_0 f^{(\alpha - 1)} \quad (2)$$

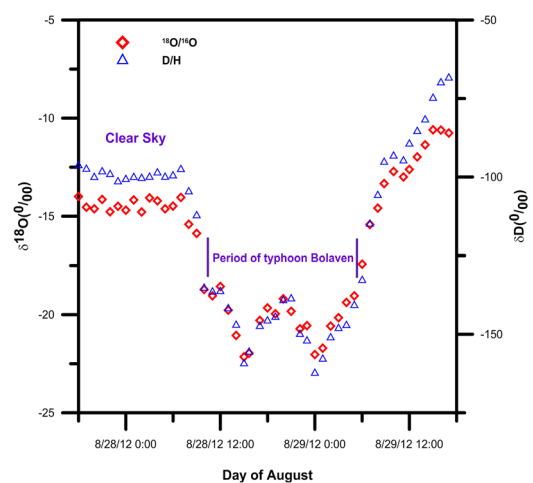


Fig. 6. Isotopic compositions of water vapor observed during the typhoon Bolaven.

여기서 R 은 응축 후 남은 수증기의 동위원소비이며, R_0 는 응축전 수증기의 동위원소비이며 f 는 남은 수증기의 물 분율이며 α 는 동위원소분별정수이며 여기에서는 1.0092를 사용하였다(Kim, 2010). 단순한 레일레이식에 의하면 태풍 블라벤이 통과하면서 55% 응축되었을 때 산소동위원소값 -22.1‰이 된다.

3.2. 안정동위원소와 상대습도와와의 관계

Lee *et al.* (2013)에서 제주지역에서 수분의 농도가 증가하면 동위원소가 낮아지는 현상, 우량효과(amount effect)를 인공위성 자료를 이용하여 보고하였다. 중위도지역인 한반도 지역 주변의 불안정동위원소는 전통적인 관점에서는 온도에 의해서 영향을 받는 것으로 알려져 있으나 최근의 연구결과에 의해서 여름에는 우량효과에 의해 불안정동위원소의 조성이 결정되며 그 이외의 기간동안은 온도에 의해서 결정되는 것으로 알려져 있다(Araguás-Araguás *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2003). 서해안 지역에서 관찰한 이번 연구에서도 태풍 블라벤이 통과하면서 수증기동위원소의 값이 급격히 낮아지는 것을 관찰할 수 있었다. 태풍 블라벤이 통과하면서 수증기 및 강우의 양이 증가할 것이라는 것은 쉽게 예측할 수 있다.

이번 연구에서는 태풍 블라벤의 영향으로 수증기동위원소의 변동에 초점을 두었기 때문에 수증기의 양이나 강우의 양을 측정하지 못하였다. 최근의 우량효과에 대한 연구결과에 의하면 상대습도(relative humidity)가 증가할수록 수증기 동위원소의 값은 낮아진다는 것이

모델연구로 알려져 있다(Risi *et al.*, 2008). Fig. 7은 상대습도와 수증기동위원소의 변동을 함께 도시한 것이다. 3시간간격의 상대습도 자료는 기상청의 자료 중에서 KOPRI에서 가장 가까운 5 km 떨어진 남동공단 자료(인천광역시 연수구 동춘동)를 이용하였다(<http://www.kma.go.kr/weather/observation/currentweather.jsp>). 상대 습도가 상대적으로 낮은 맑은 하늘하에서는 동위원소 조성이 높고 태풍 블라벤이 통과하면서 상대 습도가 증가하기 시작하면서 동위원소값이 감소하기 시작한다. 태풍이 지나가는 동안 상대습도가 감소하면서 동위원소값이 증가하였다가 다시 상대습도가 증가하면서 동위원소값이 감소한다. 상대습도가 거의 포화상태(100%)에서 떨어지기 시작하는 순간부터 동위원소값이 증가하기 시작하며 태풍이 통과한 후 동위원소값은 다시 맑은 하늘 하에서의 값으로 돌아간다. 하지만, 처음 측정을 시도하였던 값보다는 증가하는 경향을 보여주는데, 이에 대해서는 식생에 의한 것인지 혹은 측정을 시작하였을 때 연구지역이 태풍에 의해 영향을 받았는지에 대해서는 좀 더 길게 측정을 시도하여야 할 것이다. 수증기동위원소값은 주변지역의 상대습도변화에 민감하게 반응하며 역의 관계를 가짐을 알 수 있다. 이는 강우동위원소변동에서 나타나는 “우량효과(amount effect)”와 같은 현상을 보여 주고 있다.

4. 결론 및 제언

해안근처에서의 수분의 이동을 파악하기 위해서 태풍 블라벤이 한반도의 서해안을 통과하는 기간동안(2012년 8월 27일부터 8월 29일까지) 수증기의 동위원소를 불안정동위원소분석기(Picarro)를 이용하여 분석하였다. 불안정동위원소의 두 동위원소의 선형관계식($\delta D = 7.8 \times \delta^{18}O + 10.1$)으로부터 해양 기원의 수증기가 증발에 의해 이동되어 측정되었음을 알 수 있었다. 날씨가 맑을 때는 해양으로부터 증발되어 다른 물리적인 변동없이 직접 이동된 수증기의 동위원소 조성(산소동위원소, $\delta^{18}O = -14‰$)을 보여 주었으며, 태풍이 통과하면서 수분동위원소의 값은 10% 정도 낮은 값을 보였다. 수증기동위원소값은 주변지역의 상대습도변화에 민감하게 반응하며 역의 관계를 가짐을 알 수 있다.

최근 국내에서도 제주지역을 중심으로 풍유석을 이용한 고기후 연구 및 남극에서 가져온 빙하를 이용하여 고기후연구가 진행중이며 불안정동위원소를 과거지시자로 이용하는 연구가 진행중이다(Jo *et al.*, 2010). 고기후연구를 정량적으로 수행하기 위해서는 모델연구

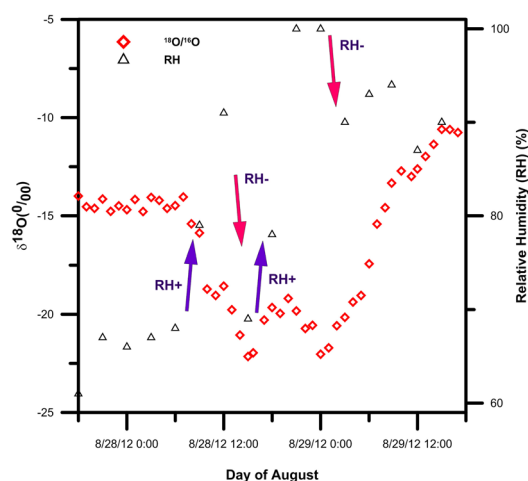


Fig. 7. Isotopic composition of water vapor related to relative humidity (RH).

가 필수적이며 이러한 모델을 개발하고 검증하기 위해서는 현장에서의 동위원소변동에 관한 자료를 축적하는 것이 최우선이다. 강우동위원소와 높이별 수증기동위원소값을 측정하여 기상, 환경 및 생태 같은 인자들과의 연관성에 대하여 연구가 세계적으로 시작하는 추세이다(Risi *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2013). 국내에서는 이러한 다학제 연구의 중요성은 인식하고 있으나 분석의 어려움과 협력연구의 부족으로 인해 많은 연구를 수행하지 못하고 있다. 따라서, 고기후 및 현재의 물의 순환을 연구하기 위한 지역에서 수증기 및 강우의 동위원소를 측정하는 일이 선행되어야 할 것이며 다학제 분야의 연구도 시도되어야 할 것이다.

사 사

이 연구는 극지연구소 주요사업 “극한지 빙하시추와 Ice Core Bank 운영을 위한 핵심기술개발(PE13070)”의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- Kim, K.-H. (2010) Isotope Geochemistry, Sigmappress.
- Lee, K.-S., Koh, D.-C., Lee, D. and Park, W.-B. (2002) The temporal and spatial distribution of stable isotope composition of precipitation in Jeju Island: application to groundwater recharge study. *Journal of Geological Society of Korea*, v.38, p.151-161.
- Araguás-Araguás, L., Froehlich, K. and Rozanski, K. (1998) Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia. *Journal of Geophysical Research*, v.103, p.28,721-28,742.
- Dansgaard, W. (1964) Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, v.16, p.436-468.
- Fudeyasu, H., Ichiyangi, K., Sugimoto, A., Yoshimura, K., Ueta, A., Yamanaka, M.D., and Ozawa, K. (2008) Isotope ratios of precipitation and water vapor observed in Typhoon Shanshan. *Journal of Geophysical Research*, v.113, D12113, doi:10.1029/2007JD009313.
- 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.
- Iannone, R.Q., Romanini, D., Cattani, O., Meijer, H.A.J. and Kerstel, E.R.Th. (2010) Water isotope ratio (^2H and ^{18}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., Hong, G.H., Kim, S.H. and Suk, B.C. (2010) Rainfall and hydrological controls on speleothem geochemistry during climatic events (droughts and typhoons): An example from Seopdong Cave, Republic of Korea. *Earth and Planetary Science Letters*, v.295, p.441-450.
- Lawrence, J.R. and Gedzelman, S.D. (1996) Low stable isotope ratio of tropical cyclone rains. *Geophysical Research Letters*, v.23, p.527-530.
- Lawrence, J.R., Gedzelman, S.D., Zhang, X. and Arnold, R. (1995) Stable isotope ratios of rain and vapor in 1995 hurricanes. *Journal of Geophysical Research*, v.103, p.11381-11400.
- Lee, J.-E. and Fung, I. (2008) “Amount effect” of water isotopes and quantitative analysis of post-condensation processes. *Hydrological Processes*, v.23, p.1-8.
- Lee, J., et al. (2011) Relating tropical ocean clouds to moist processes using water vapor isotope measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v.11, p.741-752.
- 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., Worden, J., Koh, D.C., Yoshimura, K. and Lee, J.E. (2013) A seasonality of δD of water vapor (850-500 hPa) observed from space over Jeju Island, Korea. *Geosciences Journal*, v.17, p.87-95.
- 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.
- Moyer, E.J., Irion, F.W., Yung Y.L. and Gunson, M.R. (1996) ATMOS stratospheric deuterated water and implications for troposphere-stratosphere transport. *Geophysical Research Letters*, v.17, p.2385-2388.
- Risi, C., Bony, S. and Vimeux, F. (2008) Influence of convective processes on the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of precipitation and water vapor in the tropics: 2. Physical interpretation of the amount effect. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, D19306, doi:10.1029/2008JD009943.
- Worden, J., et al. (2011) Estimate of bias in Aura TES HDO/H₂O profiles from comparison of TES and in situ HDO/H₂O measurements at the Mauna Loa observatory. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v.11, p.4491-4503.

2013년 4월 10일 원고접수, 2013년 6월 16일 1차수정,
2013년 8월 18일 게재승인