

Article

알베도 변화에 의한 남극 눈 안정동위원소의 변동에 관한 연구

이정훈^{1*} · 한영철² · 함지영¹ · 나운성²

¹이화여자대학교 과학교육과
(120-750) 서울특별시 서대문구 이화여대길 52
²한국해양과학기술원 부설 극지연구소
(406-840) 인천광역시 연수구 송도미래로 26

A Study of Stable Isotopic Variations of Antarctic Snow by Albedo Differences

Jeonghoon Lee^{1*}, Yeongcheol Han², Ji-Young Ham¹, and Un-Sung Na²

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

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

Abstract : Snow albedo can be decreased if there are any impurities on the snow surface other than the snow itself. Due to the decrease of snow albedo, melting rates of surface snow can increase, which is very crucial in climate change and hydrogeology in many parts of the world. Anthropogenic black carbons caused by the incomplete combustion of fossil fuel affect snow and tephra particles generated by geologic volcanic activities reduce snow albedo. In this study, we investigated isotopic compositions for snow covered by tephra particles and compared with this with clean snow. Isotopic compositions of snow with tephra statistically show more enriched than those of clean snow ($p < 0.02$). This can be explained by the fact that snow becomes enriched in ¹⁸O or D relative to meltwater as melting rates are increased. In addition, the slopes of the linear regression between oxygen and hydrogen for snow with tephra and clean snow are 6.7 and 8, respectively, and the latter is similar to that of the global meteoric water line of 8. Therefore, we can conclude that snow impurities control the isotopic compositions of snow, which is very crucial in the study of climate change and hydrogeology. To quantitatively explain these observations, melting experiments and numerical approaches are required.

Key words : snow's albedo, tephra, melting rates, isotopic composition of snow

1. 서 론

많은 온대지역(temperate region)에서 겨울동안 쌓여 있던 눈이 녹은 물, 융설(snowmelt)은 홍수조절, 전력생산,

농업용수, 휴양시설 등에 활용되고 있다(Park et al. 2010). 기후변화(climate change)로 인한 겨울철의 기온 상승은 겨울철의 융설량을 증가시키고 이로 인해 대기로의 증발량이 증가하게 된다(Lee 2014). 따라서, 봄에 확보할 수 있는 물의 양은 줄어들 것이다(Bales et al. 2006). 봄이 되면 눈 속에 있던 질산염 등이 융설과 함께 수계에 배출되

*Corresponding author. E-mail : jeonghoon.d.lee@gmail.com

면서 물과 영양분의 형태로 생태계에 영향을 줄 것이다. 또한, 눈이 쌓여 있으면 겨울철에 낮은 기온의 영향으로부터 눈 아래에 존재하는 생태계를 보호해 줄 수 있는 절연체 역할을 한다(Lee and Ko 2011). 융설 및 봄철의 유출에 영향을 주는 물리적 과정 및 인자들에 대한 정량적인 이해는 이로 인해 경제적 및 생태학적으로 매우 중요하다(Lee 2014; Lee et al. 2014).

현장조사 및 복사전달모델(radiative transfer model) 연구에 의하면, 눈 표면의 불순물에 의해 눈의 알베도(albedo)는 감소한다고 알려져 있다(Sterle et al. 2013). 그 결과, 복사강제력(radiative forcing)에 의해 눈이 쌓여 있는 시간이 줄고 이로 인해 이른 융설의 유출(runoff)이 일어나기도 한다(Lee and Ko 2011). 눈이 쌓여 있는 시간이 줄고 이른 유출이 일어나게 되면 지하수로 충전되어야 할 물이 증발로 인해 대기로 이동하게 되어 수자원관리 측면에서 물의 손실이 일어나게 된다. 또한, 극지역에서도 알베도 감소로 인해 눈 표면에서 흡수되는 에너지의 양이 증가하게 되면, 융설이 증가하게 되고 이로 인해 빙하가 좀 더 수월하게 이동할 수 있는 가능성이 증가하게 된다(Conway 1996). 이러한 눈 표면의 불순물에는 화산활동 같은 자연적인 원인과 인간의 활동으로 인한 먼지(dust) 또는 블랙카본(black carbon) 등이 있다(Sterle et al. 2013). 최근에는 이러한 인간의 활동으로 인한 빙권(cryosphere)의 변화에 많은 연구자들이 주목하고 있다.

눈 표면에서 흡수되는 에너지가 증가하게 되면 눈은 녹

기 시작하여 융설(meltwater)을 발생시키게 된다. 융설은 아래로 흐르면서 눈과 동위원소교환반응(isotopic exchange between liquid water and ice)을 하게 되고 융설과 눈의 안정동위원소가 변하게 된다(Lee et al. 2009). 눈 표면에 불순물이 존재하지 않는다면 그만큼 눈이 녹는 속도가 늦어지게 되거나 극지역에서는 눈이 녹지 않을 것이다. 따라서, 같은 지역에서 녹은 눈과 그렇지 않은 눈의 안정동위원소 값은 차이를 보이게 될 것이다. 이러한 차이는 안정동위원소를 활용하는 연구에서 그 결과값에 오차를 발생시킨다(Warren et al. 1980; Lee 2012). 눈 안정동위원소를 새로운 물(new water)로 가정하고 하천(stream)에 새로운 물이 미치는 영향을 계산하는 동위원소수분리법(isotopic hydrograph separation)과 아이스코어(ice core)를 이용하여 과거의 온도를 복원하는 연구에서도 눈이 쌓인 후에 발생하는 이러한 변화(post depositional process)에 의해서 새로운 물의 기여 및 과거의 온도가 정확하게 계산되어 질 수 없게 된다(Taylor et al. 2001). 따라서, 이번 연구에서는 눈이 쌓인 후에 눈에 포함되어 있는 불순물에 의해서 눈의 안정동위원소 값이 어떻게 변화하는지를 살펴보고, 이러한 변화가 언급된 연구에서 어떤 의미를 가지는지에 대하여 고찰해 보는 것을 목적으로 한다.

2. 연구지역 및 방법

이번 연구는 사우스세틀랜드의 킹조지 섬에 위치한 세

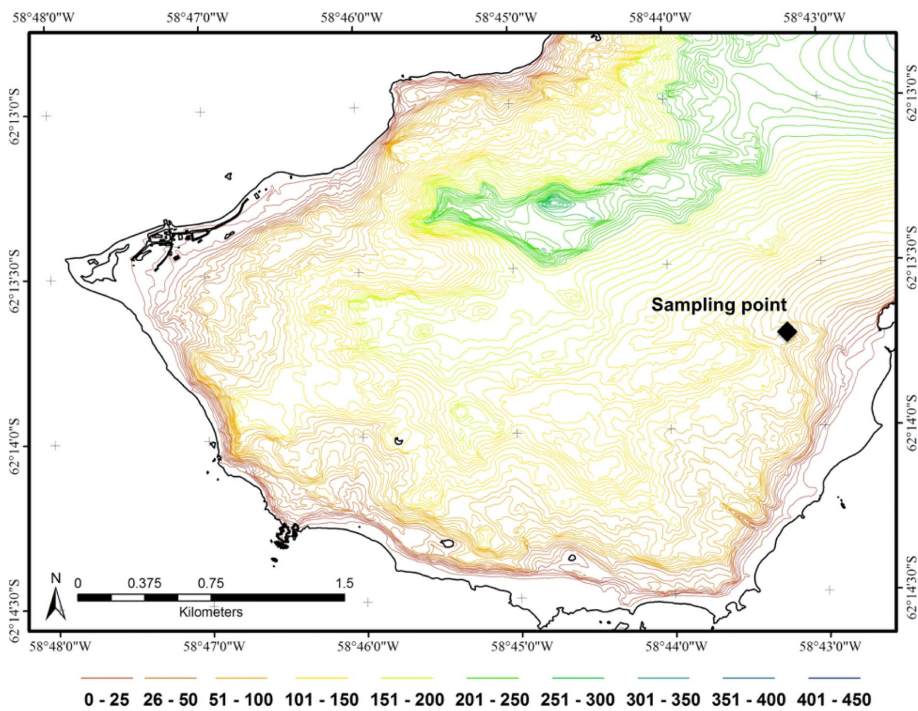


Fig. 1. A map of study area



Fig. 2. A photo of sampling region

종기지에서 3 km 정도 떨어진 곳에서 수행하였다(Fig. 1). 자연적인 화산활동으로 인해 존재하는 눈 표면의 불순물이 알베도에 영향을 미쳐 눈 안정동위원소에 어떠한 변화를 일으키는 지를 관찰하기 위해 화산활동의 부산물인 테프라가 풍화되어 이동되는 지역을 먼저 조사하였다. Fig. 2에 잘 나타나듯이, 풍화된 테프라가 용설에 의해 이동되다가 추운 날씨로 인해 이동이 멈춘 상태이다. 하지만, 현재 바람에 의해 눈 표면에 뿌려지고 있으며 Fig. 2에 의하면 주 바람방향은 테프라가 모여 있는 곳을 기준으로 오른쪽에서 왼쪽일 것이다. 따라서, Fig. 2의 왼편은 테프라에 의해 눈 표면에 영향을 받은 지역이며 오른쪽은 상대적으로 눈 표면에 아무런 불순물이 없는 경우이다. 시료를 채취하는 시점에서 테프라에 의해 영향을 받은 지역은 그렇지 않은 지역에 비해 상대적으로 눈이 많이 녹아 있음을 알 수 있다(Fig. 2).

테프라에 의한 눈 안정동위원소의 변동을 관찰하기 위하여 Fig. 3과 같이 시료를 채취하였다. 테프라에 모여 있는 곳을 중심으로 테프라에 의해 영향을 받은 지역(snow cover with tephra)에서 5개의 시료와 그렇지 않은 지역(relatively clean snow)에서 4개의 시료를 채취하였다. 첫 시료는 테프라 언덕에서 30-40 cm 떨어진 지점에서 채취하였으며 다음 시료들은 각각 90-120 cm 씩 이동하여 시료를 채취하였다. 눈 시료는 폴리에틸렌병에 담아 세종기지에서 냉동으로 보관한 후 극지연구소에서 분석할 때까

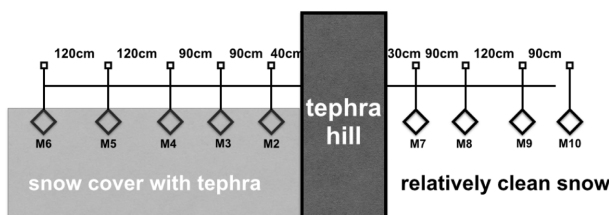


Fig. 3. A schematic diagram of sampling positions

지 최대한 냉동 보관하였다. 분석을 위해서 눈을 녹여 액상상태의 시료를 불안정동위원소분석장비를 이용하여 분석하였다.

눈 안정동위원소(δD , $\delta^{18}O$)는 극지연구소에 설치되어 있는 상용 불안정동위원소분석장비(Picarro L1102)를 이용하여 분석하였다. 레이저흡광법(a cavity ringdown spectrometer, CRDS, <http://www.picarro.com>)을 이용하여 기체의 흡수스펙트럼의 고유성을 이용한 이 장비는 최근 동위원소질량분석기를 대체하는 추세이다. 정밀하게 조정된 파장의 빛을 측정 챔버(cavity)에 조사한 후 빛이 측정 챔버 안에 있는 대기의 목적성분의 양에 비례하여 흡수 및 소멸되는 시간을 측정하는 원리이다(Jung et al. 2013). 표준물질로는 국제원자력기구에서 제공하는 VSMOW2 (산소 및 수소동위원소 값: 0‰, 0‰), SLAP(-55.50‰, -427.5‰), GISP(-24.76‰, -189.5‰)를 사용하였다. 각 표준물질은 개당 주입회수를 24회로 정하고 열두 번째 시료까지는 이전 시료의 기억효과(memory effect)를 고려하여 결과 값 산출 시 제외하고 나머지 열두 번의 결과의 평균값을 이용하였다. 시료는 개당 주입회수를 12회로 정하고 뒤의 여섯 번의 결과 값의 평균값을 이용하였다(Lee et al. 2013). 시료를 5회 분석한 후 표준물질을 러닝스탠다드(running standard)로 이용하였다. 수소 및 산소동위원소의 정밀도(precision)는 각각 0.8‰, 0.08‰이다. 불안정동위원소의 $\delta^{18}O$ 값은 $H_2^{16}O$ 의 농도 값에 대한 $H_2^{18}O$ 의 농도 값의 상대조성비로 나타내며, δD 의 값은 $H_2^{16}O$ 의 농도 값에 대한 $HD^{16}O$ 의 농도 값의 상대 조성비로 나타낸다. δ 의 정의는 아래 식 (1)과 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 표준시료의 D/H 또는 $^{18}O/^{16}O$ 를 나타낸다.

3. 연구결과 및 토의

테프라에 따른 눈의 안정동위원소 차이

블랙카본이나 테프라 등의 불순물이 눈 표면에 존재하게 되면 눈의 알베도는 감소하게 된다(Sterle et al. 2013). 이러한 불순물 등은 눈의 변성작용(metamorphism) 또는 노화작용(aging)의 속도를 증가시키고 이로 인해 고체상의 얼음 또는 눈에서 액체상의 용설로 전환되는 시간을 줄이게 된다(Lee et al. 2010). 한편, 눈이 녹지 않는 환경과 눈이 녹는 환경에서의 눈 안정동위원소값의 차이가 나타나게 되는데, 이는 눈 속을 통과하는 물과 눈과의 동위원소 교환반응에 기인하게 된다(Lee et al. 2009; Lee et al. 2010). 따라서, 눈 표면에서 눈이 녹아 액체상의 물이 눈

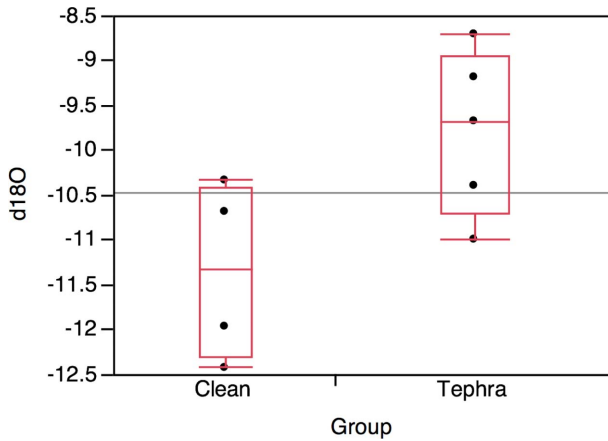


Fig. 4. Statistical differences between snow samples collected from different conditions

속을 흐르게 되면 동위원소교환반응으로 인해 ^{18}O 또는 D는 고체상인 눈에 남게 된다(Taylor et al. 2001; Lee et al. 2009; Lee et al. 2010). 이로 인해 눈의 안정동위원소 값(δD , $\delta^{18}\text{O}$)은 증가하게 된다.

테프라에 의해 영향을 받은 지역과 그렇지 않은 지역의 안정동위원소의 평균값은 각각 $-9.8 \pm 1.0\text{‰}$ 과 $-11.3 \pm 0.9\text{‰}$ 이다. 위에서 언급한 테프라에 의한 영향을 알아보기 위해 t-test를 수행하였다(Fig. 4). t-test 결과 테프라에 의해 영향을 받은 지역의 눈 안정동위원소 값은 그렇지 않은 지역보다 높다는 것을 알 수 있다($p < 0.02$). 테프라에 의해 알베도가 낮아지게 되면 흡수하는 복사에너지의 양이 많아지게 되고, 이로 인해 눈이 녹게 되거나 눈이 녹는 속도가 빨라지게 된다(Lee and Ko 2011; Lee 2014). 눈 표면에서 눈이 녹기 시작하면, 눈과 물의 동위원소교환반응(isotopic exchange between liquid water and ice), 즉

고체상과 액체상의 동위원소교환반응이 발생하여 동위원소분화가 일어나게 된다(Lee et al. 2009). 평형상태에서, 물의 $\delta^{18}\text{O}$ 과 δD 의 값은 고체상의 얼음과 눈에 비해 각각 3.1, 19.5‰ 낮게 된다(O'Neil 1968). 따라서, 동위원소교환반응으로 인해 눈은 용해(melting)가 일어나게 되면, 상대적으로 액상의 물에 비해 고체상인 눈은 동위원소 값이 증가하게 된다(Lee 2014). 따라서, 테프라에 의해 영향을 받은 지역은 그렇지 않은 지역에 비해 알베도 감소에 의해 눈 표면에서 눈이 녹기 시작하였으며, 이로 인해 안정동위원소 값이 통계적으로 유의미하게 그렇지 않은 지역보다 높은 값을 보여 주고 있다.

눈의 산소와 수소동위원소간의 선형적 관계

물의 안정동위원소를 연구하는 방법 중에서 가장 먼저 시도하여 보는 것이 산소와 수소의 선형적 관계를 나타내는 것이다(Lee et al. 2010). 산소와 수소의 선형적 관계에서 제시될 수 있는 직선의 기울기(slope)와 절편(intercept)은 물의 기원지 및 물이 거쳐 왔던 물리적 과정을 말해 줄 수 있다(Lee et al. 2010). 전 지구적으로 해양에서 증발한 수증기가 응축되어 내리는 강수의 경우에는 산소와 수소의 선형적 관계에서 기울기가 8을 나타내며, 이러한 것을 전지구순환선(Global Meteoric Water Line, GMWL)이라 부른다. 이러한 관계는 액상의 물이 기체상의 수증기와 동위원소분화를 일으킬 때 분화계수(fractionation factor)에 의해서 결정되며, 산소와 수소의 분화계수는 1.010과 1.080이다(Dansgaard, 1964). 따라서, 기울기는 8/10~8에 가까운 값이다.

Fig. 5는 연구지역에서 테프라로 덮힌 지역(Fig. 5a)과 그렇지 않은 지역(Fig. 5b)로 구분하여 산소와 수소의 안정동위원소의 선형적인 관계를 도시하였다. 위의 통계적

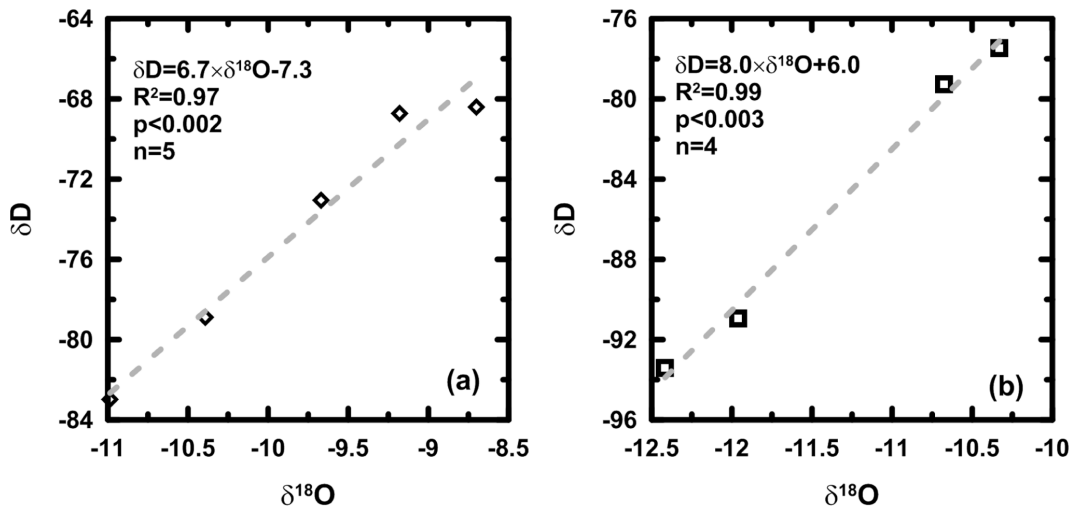


Fig. 5. A linear relationship of $\delta^{18}\text{O}$ vs. δD for (a) tephra on top of snow and (b) clean snow

인 접근에서도 알 수 있듯이, 테프라로 덮힌 지역은 알베도의 감소로 인해 눈이 녹기 시작하여 동위원소의 분화가 일어났으며, 그렇지 않은 지역에서 거의 눈이 녹지 않아 나타난 차이는 두 동위원소의 선형관계에서도 잘 보여지고 있다. 먼저, 테프라에 의해 영향을 받은 지역은 두 동위원소의 선형적 관계에서 기울기가 6.7이며, 그렇지 않은 지역은 기울기가 8.0으로서 앞에서 설명한 GMWL과 거의 일치하고 있다. 따라서, 세종기지 주변의 해안에서 증발하여 응축된 수증기가 눈으로 내리고, 이러한 눈 위에 테프라가 바람에 의해 퍼지면서 알베도를 변화시켜 눈을 녹이게 되어 안정동위원소 값에 변화가 생기게 되었을 것이다.

눈이 녹기 시작하여 눈 녹은 물이 눈 속을 통과하게 되면 위의 결과와 같이 동위원소값에 변화를 가져 오게 된다. 눈이 녹지 않은 경우에는 기울기가 GMWL과 거의 비슷한 기울기 값을 나타낼 것이다. 물과 얼음이 반응할 때, 산소와 수소의 안정동위원소의 분화계수는 각각 3.1‰과 19.5‰이므로 눈이 녹을 때의 눈의 기울기는 19.5/3.1~6.3을 나타내게 된다(Lee et al. 2009). 따라서, 이러한 기울기의 변화를 통해 눈으로 확인할 수 없는 눈의 용해상태를 파악할 수 있으며, 인위적 및 자연적으로 눈 위에 불순물이 있을 때 알베도의 변화로 인한 눈의 용해상태를 이번 연구 결과와 같이 확인할 수 있다.

극지역에서 눈 안정동위원소를 변화시킬 수 있는 또 다른 요소로는 눈과 대기의 수증기간의 교환반응, 즉 고체가 기체로 승화(sublimation)되는 과정이 있을 수도 있다(Earman et al. 2006). 많은 극지역에서는 눈을 녹일 수 있을 만큼의 복사에너지가 눈에 전달되지 않기 때문에, 눈 안정동위원소의 변동을 주로 승화로 설명하고 있다. 승화가 일어날 때는 기울기가 7.7 정도로 알려져 있으며, 이번 연구에서 관찰된 기울기는 6.7이므로 눈의 용해가 일어날 때는 위에서 설명된 눈과 물의 동위원소교환반응이 더 합리적인 설명이 될 수 있을 것이다(Lee et al. 2010). 또한, Lee et al. (2010)의 연구결과에 의하면, 온도가 낮고 용해가 제한적인 지역에서는 고체와 기체의 동위원소교환반응이 중요하지만, 용해가 발생하는 지역에서는 액체와 고체의 동위원소교환반응이 더욱 우세한 것으로 간주할 수 있다. 증발(evaporation)은 기울기 값을 감소시킬 수 있지만, 테프라에 영향을 받지 않은 지역은 기울기가 지구순환수선 기울기와 거의 비슷하므로 증발이 일어날 가능성은 있지만, 본 연구에서는 고려하지 않도록 하였다(Lee et al. 2010).

눈 안정동위원소의 값의 변동이 테프라의 기원지로부터 거리와의 상관성을 나타내는지 살펴보기 위해 거리에 따른 안정동위원소 값을 Fig. 6(실선)에 도시하였다. 테프라 지역에서 멀어질수록 눈 표면이 가까운 곳에 비해 눈 표면에 불순물이 있을 확률이 낮아질 것이고, 이로 인한 알

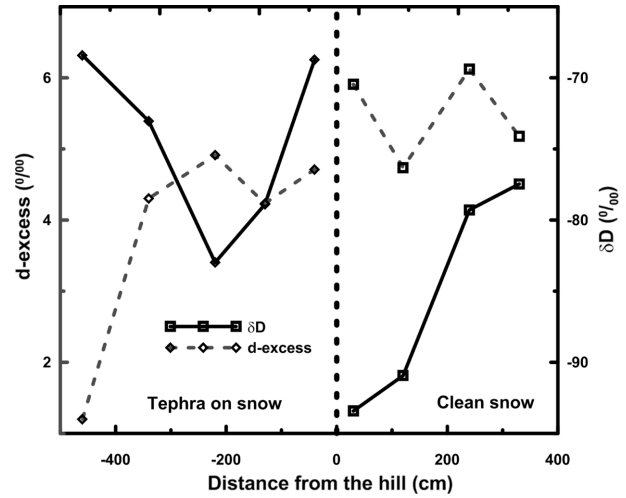


Fig. 6. Isotopic distributions of snow as a function of distance from the tephra hill

베도 감소 역시 줄어들 것이다. 따라서, 테프라의 기원지에서 멀어질수록 눈의 안정동위원소 값은 테프라의 영향을 받지 않은 지역의 안정동위원소 값과 비슷한 값을 가질 것이다. Fig. 6에서 가로축의 절대값이 커질수록 테프라의 기원지에서 멀어지는 것을 뜻한다. 테프라의 영향을 받지 않은 지역은 동위원소 값이 기원지에 가까워 질수록 감소되는 경향을 보여 주고 있고, 테프라의 영향을 받은 지역은 V자 형태를 나타내고 있다. 이번 연구에서 나타난 이러한 변동을 현재 설명할 수 있는 적합한 모델은 없을 것 같으며 향후 좀 더 넓은 지역 또는 고해상도 시료 채취를 통해 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 6에서 점선으로 나타낸 것은 중수소과잉값(d -excess, deuterium excess)이다. 중수소과잉값의 경우에는 기원지의 습도상태를 알려 줄 수 있는 지표로서 d -excess = $\delta D - 8 \times \delta^{18}O$ 로 정의된다(Lee et al. 2010). 그러나, 중수소과잉값은 강수가 지표면에 떨어진 후, 증발 또는 다른 물리적인 과정에 의해서 바뀔 수 있다(Lee et al. 2010). 눈의 변성 작용과 눈이 녹는 과정 역시 두 동위원소 선형관계의 기울기(8에서 6.7)를 변화시키기 때문에, 중수소과잉값은 동위원소값이 증가하면 중수소과잉값은 감소하며, 동위원소값이 감소하면 중수소과잉값은 증가할 것이다(Lee et al. 2010). 따라서, 테프라의 영향을 받은 지역은 동위원소의 변동과 대체적으로 반대적으로 움직이는 반면에, 테프라의 영향을 받지 않은 지역은 동위원소변동과는 무관한 변동을 보여 주고 있다(Fig. 6).

4. 결론 및 제언

남극 세종기지 주변에서 자연적인 요인인 테프라로 인

해 알베도의 차이가 발생하고 때문에 눈 표면에서 눈 녹는 속도에 변화가 생겨 눈 안정동위원소의 변화가 생기는 것을 관찰하였다. 테프라에 의해 눈 표면에 불순물이 있는 지역의 경우에는 눈 안정동위원소 값이 그렇지 않은 지역보다 통계적으로 높았으며, 이는 알베도 감소로 인해 눈 표면에서 에너지 흡수에 의해 눈이 녹기 시작하고, 물과 눈의 안정동위원소교환반응으로 인해 눈에 지속적으로 상대적으로 무거운 ^{18}O 가 남았기 때문이다. 또한, 수소와 산소의 선형직선관계에서도 이러한 변화는 관찰되었으며, 테프라에 의해 영향을 받은 지역은 선형 기울기가 6.7이었으며, 그렇지 않은 지역은 전지구순환선과 거의 동일한 8.0을 나타내었다. 안정동위원소교환반응으로 인해 기울기가 8.0에서 눈이 녹아 기울기가 6.7로 바뀌었음을 알 수 있다.

이번 연구를 통해 눈 표면에 불순물이 존재하게 되면 눈 안정동위원소값에 변화가 생긴다는 것을 알 수 있다. 눈 표면의 알베도를 변화시키는 양을 정량적으로 측정할 필요가 있으며, 향후 눈 표면의 알베도를 직접 측정하는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이러한 연구결과는 고기후 연구 및 수리지질학 연구에 많은 의미를 줄 수 있다 (Lee 2014). 빙하의 안정동위원소를 이용하여 과거의 온도를 복원하는 연구에서 해수면의 온도 이외에 다른 물리적인 과정이 포함되게 되면 복원된 온도는 오차를 가지게 될 것이다. 이번 연구에서처럼 자연적이든 인공적이든 눈 표면에 불순물로 인해 알베도가 변하게 되어 눈 안정동위원소 값이 증가하게 되면 복원된 기온 역시 원래 값보다 높은 값을 가지게 되어 과거의 기후가 따뜻한 쪽으로 잘못 이해될 수 있다(Taylor et al. 2001). 강우 및 지하수가 하천에 미치는 영향을 평가하는 동위원소수문분리법(isotopic hydrograph separation)의 경우에도 새로운 물(용설; meltwater)의 동위원소조성이 바뀌지 않는다는 가정에서 출발하는데, 이번 연구를 통해 눈에 불순물이 있을 경우 이러한 가정이 위배 될 수 있으며, 또한 연구결과에 심각한 오차가 발생할 수 있을 것이다(Lee et al. 2014). 이러한 눈 안정동위원소의 변동을 이해하기 위해서는 냉동 실험실(cold laboratory)에서 용융실험(melting experiment)과 동위원소교환반응(isotopic exchange)을 이용한 수치모델 연구를 통해 좀 더 정량적으로 접근 할 수 있을 것이라고 판단된다(Lee et al. 2009).

사 사

이 연구는 극지연구소 “국내 학·연 극지진흥 프로그램(Polar Academic Program, PAP)” 및 “장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측(PM14010)” 과제의 일환으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- Bales RC, Molotch NP, Painter TH, Dettinger MD, Rice R, Dozier J (2006) Mountain hydrology of the western United States. *Water Resour Res* **42**:W08432. doi:10.1029/2005WR004387
- Conway H, Gades A, Raymond CF (1996) Albedo of dirty snow during conditions of melt. *Water Resour Res* **32**:1713-1718
- Dansgaard W (1964) Stable isotopes in precipitation. *Tellus* **16**:436-468
- Earman S, Campbell AR, Phillips FM, Newman BD (2006) Isotopic exchange between snow and atmospheric water vapor: estimation of the snowmelt component of groundwater recharge in the southwestern United States. *J Geophys Res* **111**:D09302. doi:10.1029/2005JD006470
- Jung YY, Koh DC, Lee J, Ko KS (2013) Applications of isotope ratio infrared spectroscopy (IRIS) to analysis of stable isotopic compositions of liquid water. *Econ Environ Geol* **46**:495-509
- Lee J (2012) Development of mathematical model for both solute transport in snow and isotopic evolution of snowmelt. *J Soil Groundwater Env* **17**:31-39
- Lee J (2014a) A numerical study of isotopic evolution of a seasonal snowpack and its meltwater by melting rates. *Geosci J* **18**:503-510
- Lee J (2014b) A review on stable isotopic variations of a seasonal snowpack and meltwater. *J Geological Soc Korea* **50**:671-679
- Lee J, Choi H, Oh J, Na US, Kwak H, Hur SD (2013) Moisture transport observed by water vapor isotopes in the vicinity of coastal area, Incheon, Korea. *Econ Environ Geol* **46**:339-344
- Lee J, Feng X, Faiia AM, Posmentier ES, Kirchner JW, Osterhuber R, Taylor S (2010) Isotopic evolution of a seasonal snowcover and its melt by isotopic exchange between liquid water and ice. *Chem Geol* **270**:126-134
- Lee J, Feng X, Posmentier ES, Faiia AM, Taylor S (2009) Stable isotopic exchange rate constant between snow and liquid water. *Chem Geol* **260**:57-62
- Lee J, Ko KS (2011) An energy budget algorithm for a snowpack-snowmelt calculation. *J Soil Groundwater Env* **16**:82-89
- Lee J, Koh DC, Choo MK (2014a) Influences of fractionation of stable isotopic composition of rain and snowmelt on isotopic hydrograph separation. *J Korean Earth Sci Soc* **35**:97-103
- Lee J, Koh DC, Kim H (2014b) A review on solute transport mechanisms in a snowpack. *J Geological Soc*

-
- Korea **50**:681-687
- O'Neil JR (1968) Hydrogen and oxygen isotope fractionation between ice and water. *J Phys Chem* **72**:3683-3684
- Park Y, Lee JY, Choi HM, Lim HS (2010) A review of researches on groundwater in permafrost regions. *J Geological Soc Korea* **46**:429-437
- Sterle KM, McConnell JR, Dozier J, Edwards R, Flanner MG (2013) Retention and radiative forcing of black carbon in eastern Sierra Nevada Snow. *Cryosphere* **7**:365-374
- Talyor S, Feng X, Kirchner JW, Osterhuber R, Klaue B, Renshaw CE (2001) Isotopic evolution of a seasonal snowpack and its melt. *Water Resour Res* **37**:759-769
- Warren SG, Wiscombe WJ (1980) A model for the spectral albedo of snow, II: snow containing atmospheric aerosols. *J Atmos Sci* **37**:2734-2745
-
- Received Feb. 27, 2015*
Revised Mar. 17, 2015
Accepted May 28, 2015