

<Review>

스노우팩과 용설의 불안정동위원소의 변동-리뷰

이정훈

이화여자대학교 과학교육과

요 약

용설은 고위도 및 산악지역 지하수와 지표수 유출의 상당한 부분에 기여하고 있으므로 용설의 수계 이동에 대한 이해는 기후변화 및 수리학적 연구에서 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 용설의 이동을 이해하기 위해서는 용설의 안정동위원소가 매우 유용하게 이용될 수 있으며 지난 반 세기 동안 고기후 연구 및 수리학연구에 많이 이용되어 왔다. 특히, 수자원 관리를 위한 수문분리법 및 빙하코어를 이용한 고기후복원에 안정동위원소 변동에 관한 연구는 필수적이다. 최근에 이르러, 여러 연구에 의해 용설의 안정동위원소의 분화가 눈 표면 및 눈 속에서의 여러 물리적 과정, 예를 들어, 고체에서 기체로의 승화 및 고체상과 액체상의 동위원소교환반응에 의해 복잡하다는 것이 제시되었다. 본 논문에서는 용설의 안정동위원소에 대한 연구의 과정 및 최근 경향을 소개하고자 한다. 국내에서도 봄철 수자원 관리를 위한 용설의 연구 및 불안정동위원소를 이용한 극지역연구를 수행하기 위해서는 용설의 안정동위원소에 대한 이해가 필수적이다.

주요어: 용설, 안정동위원소, 수문분리법, 고기후복원

Jeonghoon Lee, 2014, A review on stable isotopic variations of a seasonal snowpack and meltwater. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 5, p. 671-679

ABSTRACT: Snowmelt is the largest contributor to groundwater recharge and runoff in many high latitude and alpine regions. Understanding the hydrological responses of snowmelt to the watersheds is crucial for water resources managements and adaptation to climate change. Over the last half-century, stable isotopic compositions of snowmelt have been utilized to better understand the movement of snowmelt and applied to the studies of hydrology and paleoclimate, for instance, hydrograph separation for water resources managements and paleoclimate reconstruction using ice cores. Recently, field and laboratory experiments have shown that the isotopic compositions of snowmelt vary with time due to several physical processes, such as sublimation and isotopic exchange between liquid water and ice. In this work, studies of isotopic compositions of snowmelt are reviewed and recent studies are introduced. Future studies in Korea should include snowmelt studies for water resources managements in spring and polar environments and climate change using stable water isotopes.

Key words: snowmelt, stable isotopes, hydrograph separation, paleoclimate reconstruction

(Jeonghoon Lee, Dept. of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Republic of Korea)

1. 서 론

최근 들어 한반도에서도 겨울철에 폭설등 기상 이변이 자주 발생하고 있으며, 이러한 기상 및 기후 변화와 관련하여 수문순환계(hydrological cycle) 중 많은 지역에서 눈의 역할의 중요성이 점점 강조되고 있다(Park *et al.*, 2010). 미서부, 유럽, 일본을 포

함한 온대지역(temperate region)의 경우, 순간적으로 내리는 강우와는 다르게 눈은 겨울동안 쌓여 있다가 봄철이 되면 녹아서 많은 양의 물을 생태계(ecosystem) 및 수계(watershed 또는 catchment)에 한꺼번에 배출하는 특징이 있다(Taylor *et al.*, 2001; Feng *et al.*, 2002). 전 지구적으로 많은 지역에서 깨끗한 물에 대한 수요는 증가하고 있으며, 이로 인해 많은 지

‡ Corresponding author: +82-2-3277-3794, E-mail: jeonghoon.d.lee@gmail.com

역에서 눈이 녹은 물, 즉 용설(snowmelt)에 의해 충전된 지하수에 의존하고 있으며 앞으로 용설의 중요성은 더욱 더 중요성을 가지게 될 것이다(Lee *et al.*, 2012a). IPCC 4차 보고서에 의하면 우리나라가 속한 동아시아 지역은 향후 100년간 겨울철의 기온이 증가할 것으로 예상되며 겨울철의 기온상승은 강수량의 증가로 이어질 것으로 예측되고 있다(Christensen *et al.*, 2007). 기온상승으로 인한 겨울철의 강수량의 증가는 고위도 지역과 산악지역에서는 강설량의 증가를 의미하며 이로 인해 겨울철에 쌓인 눈의 양이 증가하여 눈이 녹아 지하로 침투하거나 유출되는 물의 양이 증가할 수 있는 가능성이 높아지게 된다. 따라서, 용설의 지하수 및 지표수에 대한 영향에 대한 연구의 필요성은 기후변동과 함께 증가하고 있다(Lee and Ko, 2011, Lee *et al.*, 2010a).

물순환에서 물의 움직임을 추적(tracing)하기 위해서는 불안정동위원소가 가장 이상적인 추적자(tracer)로 알려져 있다(Worden *et al.*, 2007; Feng *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2010a). 물이 서로 다른 계(system)를 이동하는 경우, 예를 들어 대기의 수분 순환(atmospheric moisture cycling), 증발산(evapotranspiration), 지하수 충전(groundwater recharge), 유출(runoff) 등과 같이 물순환과 관련된 과정(process)을 연구하는 데 불안정동위원소가 많이 사용되어 왔다(Worden *et al.*, 2007; Jo *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2011, 2013). 용설이 지하수를 충전하는 시기 및 양을 파악하기 위하여 전통적으로 용설의 안정동위원소가 사용되어 왔다(Taylor *et al.*, 2001). 동위원소수분리법(isotopic hydrograph separation)을 이용하여 용설이 하천(stream)에 미치는 영향을 정량적으로 분리를 시도할 때, 용설을 “새로운 물(new water)”과 지하수를 “오래된 물(old water)”의 두 부분으로 나눈다(Lee *et al.*, 2014). 이 두 부분의 안정동위원소 값의 차이를 이용하여 질량보존의 법칙을 사용하여 각각 하천에 얼마만큼 기여하는가를 결정할 수 있다(Taylor *et al.*, 2001). 새로운 물인 용설의 안정동위원소 값은 시료 채취의 어려움으로 인해 전통적으로 그 값이 거의 일정하다고 가정된 후 수분분리법을 수행하였다. 최근에 이르러 용설의 안정동위원소 값이 시간이 지남에 따라 변화가 있음을 여러 연구를 통해 밝혀 졌으며 이로 인한 수분분리법의 오차가 상당히 있음이 보고 되었다(Taylor *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2010a, 2012b, 2014). 이러한

오차를 줄이기 위해서 용설의 안정동위원소 변화에 대한 연구가 현재 많은 그룹에서 진행중에 있다(Taylor *et al.*, 2001; Unnikrishna *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2012a, 2012b).

한편, 빙하코어(ice core)를 이용한 고기후 복원이 극지연구소를 중심으로 국내에서도 시도되고 있으며 현재 몽골시료 및 남극시료를 중심으로 불안정동위원소, 주요이온, 미량원소등을 이용하여 시추지역의 과거 환경 및 기후변화에 대하여 연구 중이다. 예를 들어, 불안정동위원소를 이용하여 빙하코어 시료의 처리에 가장 중요한 빙하의 연대측정을 할 수 있으며, 기온, 해빙의 면적, 바람방향, 수분의 이동등 과거의 물순환 및 기후에 관련된 변수들을 복원할 수 있다(Masson-Delmotte *et al.*, 2008). 특히, 빙하코어로부터 과거의 기온을 복원하는 일은 극지역 연구에서 기후변화를 이해하는 데에 가장 중요한 일이며 따라서 불안정동위원소의 연구는 이로 인해 그 중요성이 더욱 더 부각되고 있다(Steig *et al.*, 1998). 시추지역에서의 강수 또는 강우의 안정동위원소와 기온간의 상관관계를 구한 후, 빙하코어의 안정동위원소를 분석하여 과거의 기온을 복원하는 할 수 있다(Steen-Larsen *et al.*, 2011). 하지만, 불안정동위원소를 이용하여 과거의 기온을 복원하기 위해서는 강수가 생성되는 지역에서의 온도에 의해서만 불안정동위원소가 변화하여야 한다는 가정이 전제되어 있어야 한다(Taylor *et al.*, 2001). 불안정동위원소를 변화시키는 원인이 이러한 것 이외에 다른 물리적인 과정이 포함되게 된다면 복원된 기온의 불확실성이 높아진다.

따라서, 용설의 안정동위원소 변동을 일으키는 요인에 대한 고찰이 필요하며 빙하연구시 눈 안정동위원소를 기온이외에 변화시키는 원인에 대한 연구가 또한 필요하다. 이 논평에서는 눈과 용설의 안정동위원소를 변화시키는 원인들과 관련된 연구 결과를 소개하고 최근 해외 및 국내 연구동향과 전망에 대하여 소개하고자 한다. 이를 위해서 다음 장에서는 빙하연구와 수분분리법에서 눈과 용설의 안정동위원소가 어떤 역할을 하는지에 대해 고찰해 보았으며 3장에서는 2장에서 눈과 용설의 안정동위원소의 변동을 설명하는 물리적인 과정에 대하여 기존 연구를 제시하였다. 마지막장에서는 향후 국내에서 연구를 진행하여야 하는 방향에 대하여 제시하였다.

2. 빙하연구 및 수문분리법

2.1 빙하연구에서의 눈 안정동위원소

앞 장에서도 언급했지만, 빙하연구에서 불안정동위원소의 역할은 상당히 중요하다. 먼저, 불안정동위원소를 이용하여 빙하의 연대를 추정할 수 있다. 해수 온도 또는 기온의 변화는 불안정동위원소의 변화를 일으키게 되어 극지역에서 겨울에 내리는 눈과 여름에 내리는 눈의 불안정동위원소 값의 차이를 일으키게 되면 계절적인 변동(seasonal variation)을 보이게 되고 이를 이용하여 과거의 여름과 겨울을 구분할 수 있게 된다(Kuramoto *et al.*, 2011). 또한, 이러한 계절적 변동이 눈과 빙하에서 계속 반복되므로 이러한 특징을 이용하여 눈과 빙하의 연령을 1년 단위로 추정할 수 있다. 이러한 추정을 확정하는 방법에는 방사성동위원소(radiogenic isotope)를 이용할 수 있고 핵실험이 빈번하게 일어났던 1963년을 지시하는 방사성동위원소 및 빙하 최하부에서 발견되는 유기물을 이용하여 탄소 연대법을 적용할 수 있다(Gabrieli *et al.*, 2011).

극지역에서 빙하의 연대측정과 더불어 물순환 복원과 기후복원 역시 불안정동위원소의 중요한 역할 중에 하나이다. 빙하코어를 이용한 과거의 기온을 복원하는 것은 앞에서 언급한 것처럼 수증기의 근원지에서의 온도차에 의한 수증기동위원소의 분화에 의한 것이다. 따라서, 기온이 높을 때에는 강수동위원소의 값이 높고, 반대로 기온이 낮을 때에는 동위원소의 값이 낮게 된다(“온도효과, temperature effect”). 또한, 극지역 해안가 근처에서 시추한 빙하코어를 이용하여 불안정동위원소를 분석한다면 과거의 기온과 더불어 해빙의 면적을 함께 복원할 수 있어 현재 많은 연구가 진행 중이다(Comiso *et al.*, 2011). 몽골, 중국, 히말라야 등 중위도에서 시추한 빙하코어에서는 불안정동위원소가 때때로 강수량을 지시하여 과거의 큰 가뭄을 간접적으로 나타내기도 한다(Thompson *et al.*, 2000). 강수동위원소는 강수량에 반비례하는 것이 적도지역을 중심으로 알려져 있는데(“우량효과, amount effect”), 강수동위원소의 값이 높은 시기에는 강수량이 적은 시기이며 동위원소의 값이 낮을 때는 강수량이 많은 시기를 뜻한다(Dansgaard, 1964).

이러한 과거기후복원의 노력들은 불안정동위원소가 앞에서 언급한 물리적인 과정에 의해서만 변화

가 발생된다는 가정을 바탕으로 두고 있다. 따라서, 이러한 물리적인 과정이외에 다른 과정이 발생하게 된다면 복원된 과거의 기록은 오차를 포함할 수 밖에 없다. 예를 들어, 눈 또는 빙하코어를 이용하여 과거의 기온을 복원하는 경우, 이는 대부분의 경우 시료를 채취하는 지역에서 강수의 불안정동위원소와 기온 간의 상관관계를 구한 경우 이를 바탕으로 역으로 기온을 복원하는 과정을 따른다(Taylor *et al.*, 2001). 이러한 접근방법은 눈과 빙하코어의 불안정동위원소 변동은 오직 수증기가 생성되는 지역의 기온차에 의해 분화(fractionation)이 발생되어야 한다는 전제 조건에 바탕을 두고 있다. 하지만, 중위도지역의 경우 많은 지역에서 여름에 눈이 온 후 증가된 복사에너지와 기온으로 인해 눈이 녹는 과정을 쉽게 관찰할 수 있으며 그린란드와 남극 내륙을 제외한 지역에서도 용융(melting)이 보고되어 있다(Taylor *et al.*, 2001). 눈이 온 후 발생하는 이러한 일련의 과정(post depositional process)에 의해서 눈 안정동위원소의 값은 원래의 값에서 분화과정을 겪을 수 밖에 없으며 이러한 것들은 눈의 공극(pore space)에 있는 물의 존재로 인해 증명될 수 있다(Taylor *et al.*, 2001). 이러한 물 안정동위원소의 변동을 일으키는 원인은 눈이 녹아 눈 또는 얼음 속에 존재하는 물과의 동위원소 교환반응(isotopic exchange between liquid water and ice)에 의해 발생되게 된다.

2.2 수문분리법에서 융설의 안정동위원소

동위원소 수문분리법(Isotopic hydrograph separation)은 산악지역 수리지질학(alpine hydrogeology 또는 mountain hydrology)에서 수계에 “새로운 물(new water)”이 하천에 얼마만큼 영향을 줄 수 있는지에 대한 영향을 평가하는 데 서구에서 지난 30여년간 전통적으로 많이 이용되어 왔다(Hooper and Shoemaker, 1986). 여기서, 새로운 물이란, 강수를 뜻하는데 산악지역에서는 주로 낮은 기온으로 인한 눈이 녹아서 생기는 융설(snowmelt)을 의미하며, 눈의 특징으로 인해 강우처럼 바로 영향을 주는 것이 아니라 겨울철에 쌓여 있다가 봄에 쌓여 있던 눈이 한꺼번에 녹아서 수계에 영향을 주는 것이 가장 큰 특징이다. 이로 인해 고도가 낮은 지역과는 완전히 다른 수리지질학적인 접근법을 필요로 한다(Lee *et al.*, 2010a; Lee and Ko, 2011).

기본적으로 눈은 에너지의 변동에 크게 의존하므로 다른 수계에 비해 산악수계는 기상변화와 기후변화에 매우 민감하다(Lee and Ko, 2011). 겨울철에 쌓여 있던 눈이 봄이 되면서 상승된 기온과 입사단파 복사에너지(incoming solar radiation)에 의해 눈 표면이 에너지를 흡수하여 눈의 어는점(freezing point)을 지나게 되면 녹기 시작한다(Lee and Ko, 2011). 따라서, 특정지역에서 지표의 눈과 대기와의 에너지교환(energy exchange) 과정에서 변화가 생기게 된다면 산악수계의 물의 순환 역시 영향을 받게 된다. 이러한 이유로 인해, 산악수계에 대한 관심이 기상 및 기후변화와 관련하여 점차 증가하고 있다(Lee *et al.*, 2010a). 특히, 산악수계에 크게 의존하는 많은 지역에서 눈에 의해 충전되는 지하수와 하천의 물의 양과 질에 민감할 수밖에 없다(Lee *et al.*, 2010a).

전통적으로는 새로운 물인 겨울철에 쌓여 있는 눈이 지하수와 비교하여 얼마나 기여하는 가를 알기 위해 지난 30여년간 수문분리법을 수행하여, 지하수가 하천에 50% 이상 기여한다는 연구결과가 많이 발표되었다(Taylor *et al.*, 2002). 따라서, 봄철에 눈이 녹기 시작하면 용설은 지하수를 충전시키게 되며 차례로 지하수는 하천으로 이동하게 되는 기작으로 수문분리법의 결과를 이해하여 왔다(Gremillion *et al.*, 2000). 이러한 이해를 위해서는 주로 비반응추적자(conservative tracer)를 활용하는데, 대부분의 연구에서 물안정동위원소(δD and $\delta^{18}O$)를 사용하여 왔다. 오래된 물인 지하수안정동위원소는 거의 일정하다고 가정하고, 새로운 물인 눈의 안정동위원소는 스노우팩(snowpack)의 평균값을 이용하였다(Taylor *et al.*, 2001). 이 때, 두 동위원소의 값의 차이가 큰 것을 이용하여 하천의 안정동위원소변동이 일어날 때 두 부분을 분리할 수 있다. 2000년대 이르러 먼저 스노우팩의 동위원소 변동이 매우 크며 이로 인해 용설의 동위원소 값의 변동도 크다는 것을 인식하면서 스노우팩의 평균값을 쓸 때 수문분리법에서 오차가 발생할 수 있다는 것이 보고되기 시작하였다(Taylor *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2014). 이러한 오차는 스노우팩의 동위원소변동과 함께 용설의 동위원소 변동에 기인하는 것으로 보고 되었다(Feng *et al.*, 2002). 따라서, 용설의 동위원소변동을 일으키는 원인에 대한 연구가 계속 진행되고 있으며 다음 장에서는 변동에 대한 연구결과를 소개 하고자 한다.

3. 용설의 안정동위원소변동

앞 장에서 눈 녹은 물, 용설의 안정동위원소의 변동에 대한 이해는 과거 기온 복원 및 새로운 물이 하천에 기여하는 바를 결정하는 데 중요한 역할을 함을 소개하였다. 이번 장에서는 이러한 용설의 동위원소 변동에 대한 연구결과를 현장조사, 용융실험, 모델링 결과를 바탕으로 소개할 것이다.

3.1 용설의 안정동위원소변동에 대한 원인

용설의 실험적인 연구는 Herrmann *et al.* (1981)에 의하여 처음으로 제시되었다. 동위원소값이 균질한 스노우팩(isotopic homogeneous snowpack)을 이용하여 컬럼용융실험(column melting experiment)을 통하여 용설의 동위원소 값이 시간에 따라 어떻게 변하는 지를 제시하였다. 용설의 수소동위원소 값(δD)과 스노우팩의 평균값이 20% 정도의 차이를 보이는 것을 보고하였다. 뒤를 이어 여러 현장 연구를 통해 용설의 안정동위원소가 봄이 되어 녹기 시작하면서 어떻게 변동되어 왔는 지 제시하였다(Taylor *et al.*, 2001; Feng *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2010a). Hooper and Shoemaker (1986)의 연구에서는 스노우팩 기저부에서 채취한 시료의 수소동위원소변동이 일반적인 경우에는 30% 정도 있었으며 봄이 되어 비가 오는 경우(rain-on-snow)에는 60% 정도 차이가 있음을 보고하였다. Taylor *et al.* (2001)의 연구에서는 현장결과, 용융실험, 모델링 결과를 비교하여 용설의 동위원소변동은 눈 표면에서 용설이 발생하게 되면 눈 속을 내려가면서 눈 또는 얼음과 지속적인 동위원소교환반응(isotopic exchange between liquid water and ice)에 의해서 발생되게 되는 것을 보였다. 이후의 계속된 연구에서 고체상과 액체상이 동위원소교환반응을 일으킬 때 모든 고체상이 교환반응에 참여하는 것이 아니라 부분적으로 참여한다는 것을 증명하였다(Feng *et al.*, 2002; Taylor *et al.*, 2002).

Lee *et al.* (2009)의 연구에서는 용설과 눈 사이의 교환반응이 일어날 때 수소동위원소와 산소동위원소의 교환반응계수가 통계적으로 다르지 않다는 것을 증명하였다. 산소 및 수소의 안정동위원소의 선형관계(linear relationship)를 연구하면 유용한 정보를 얻을 수 있는 데, Lee *et al.* (2010a)에서는 새로운 눈, 스노우팩, 용설의 동위원소의 선형관계를 연

구하여 새로운 눈에서 스노우팩을 거쳐 용설로 상이 변하면서 선형관계의 기울기가 통계적으로 감소함을 보였다. 새로운 눈의 안정동위원소값은 그림 1과 같이 지구천수선(Global Meteoric Water Line, GMWL)과 같이 기울기가 8인 직선상에 도시되지만, 동위원소 교환반응으로 인해 선형관계의 기울기가 6.3 (19.5/3.1) 정도로 감소하게 된다. 19.5와 3.1은 각각 수소와 산소의 동위원소평형상수이다(O'Neil, 1968). 많은 지하수의 연구에서 동위원소의 선형관계가 8보다 작으면 대부분의 연구에서 증발로 설명을 하는데, 눈이 녹아 지하수를 충전하는 지역에서는 증발 이외에 기울기를 변화시키는 물리적인 원인이 동위원소교환 반응에도 있다.

눈이 표면에서 녹는 속도가 증가하게 되면 눈 속에서 공극(pore space)을 흐르는 물의 속도 역시 증가하게 된다. 이러한 경우, 고체상과 액체상의 교환 반응을 할 수 있는 시간이 줄어들게 되어 용설의 동위원소 값은 표면에서의 눈의 값과 차이가 많이 나지 않게 된다. 하지만, 눈 속에서 물의 속도가 줄어들게 되면, 액체상인 물이 공극속에 머무르는 시간이 길어지게 되면서 자연적으로 고체상과 교환반응을 지속적으로 하여 동위원소평형(isotopic equilibrium)을 이루게 된다. 물의 고체상과 액체상의 동위원소평형상수(α_{eq})의 경우에는 0°C에서 수소의 경우 19.5‰, 산소의 경우 3.1‰이다(O'Neil, 1968). 따라서, 하루의 경우에도 눈 표면이 흡수하는 에너지의 변동이 생기게 되므로, 용설의 동위원소의 변동

도 일일변동(diurnal or diel variation)이 나타나게 된다(Lee *et al.*, 2010b).

공극 중에서도 물이 흐르는 통로(flow path or channel)로 쓰이는 것과 고립되어 있지만 연결된 것이 있으며(mobile), 통로와 전혀 연결성이 없는 것이 있다(immobile, van Genuchten and Wierenga, 1976). 눈의 이러한 물리적인 특징으로 인해 용설의 안정동위원소의 변동에도 영향을 주게 된다. immobile water는 고체상인 눈과 지속적인 동위원소 교환반응으로 인해 동위원소 값이 고체상과 평형을 이루게 된다. 눈 속에서 물의 속도가 증가하게 되고 공극간의 연결성이 생겨 immobile water와 mobile water가 만나게 된다면 동위원소값이 서로 다른 물간의 혼합(mixing)이 일어나게 되어 동위원소 값에 변화가 생기게 된다(Lee *et al.*, 2010b). 이러한 것은 다음 절의 모델 설명에서 좀 더 자세히 다룰 것이다.

3.2 용설의 안정동위원소 모델

용설의 안정동위원소변동에 대한 모델은 Búason (1972)에 의해 처음으로 제시되었다. 용질의 이동(solute transport)을 설명하는 개념을 그대로 동위원소이동에 적용한 모델이다. 이 후 Taylor *et al.* (2001)는 액상의 물과 고체상의 눈이 반응할 때 부분적으로 반응할 것이라는 가정하여 모델을 수정하여 제시하였다(식 1-4).

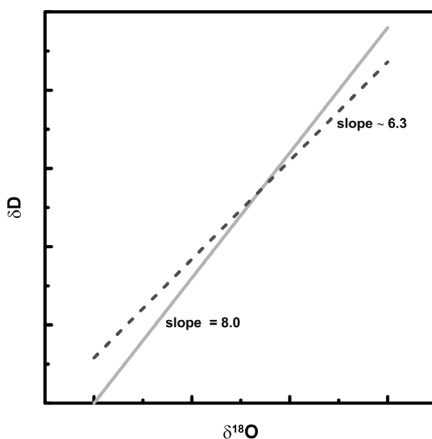


Fig. 1. A linear relationship of isotopes for global meteoric water line (GMWL, grey solid) and snowmelt (black dotted).

$$\frac{\partial R_{iiq}}{\partial t} = -\frac{\partial R_{iiq}}{\partial z} + \psi\gamma(R_{ice} - \alpha R_{iiq}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial R_{ice}}{\partial t} = \psi(1-\gamma)(\alpha R_{iiq} - R_{ice}) \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{bf}{a+bf} \quad (3)$$

$$\psi = \frac{k_p Z}{u} \quad (4)$$

여기에서 R_{iiq} 및 R_{ice} 는 각각 액상과 고체상에서의 D/H 또는 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 의 비율을 나타내며 α 는 0°C에서의 수소 또는 산소의 평형상태에서의 분별계수를 나타낸다. 평형상태에서 수소 및 산소의 분별계수는 각각 3.1‰과 19.5‰이다(O'Neil, 1968). 변수 γ 는 고체상인 얼음이 동위원소교환반응에 얼마만큼 참여하는 가를 정량적으로 나타낸 것이며 변수 ψ 는 무

차원동위원소 속도계수(dimensionless rate constant of isotopic exchange)이다. 기존의 모델에서는 눈 또는 얼음의 전 지역에서 동위원소교환반응이 일어난다고 가정하였지만, Taylor *et al.* (2001)의 연구에서는 γ 를 이용하여 동위원소교환반응이 부분적으로 일어날 것이라고 가정하였다. 여기에서 k_r 은 동위원소속도계수이며, Z 는 최초의 눈의 깊이이며, u 는 용설의 속도이다. a 와 b 는 각각 단위부피의 눈에 있는 물과 얼음의 질량을 나타낸다.

식 1에서 4를 이용하여 방정식을 수치적으로(numerically) 풀게 되면 초기조건(initial condition)에 따라 그림 2과 같은 결과를 얻게 된다. 위의 미분방정식을 수치적으로 계산하는 과정은 Feng *et al.* (2001)에 자세히 서술되어 있다. 이 모델의 개념적인 그림은 그림 3에 제시하였다. 용설이 아래로 흐르면서 눈 또는 얼음과 동위원소교환반응을 하지만 얼음은 아래로 흘러 내리지 않는다고 가정하였다. 스노우팩의 초기 동위원소 조건은 그림 2과 같이 두 가지가 가능한데, 스노우팩내에 존재하는 물의 안정동위원소 값을 스노우팩과 비교하여 어떻게 가정하느냐에 따라 곡선의 형태가 달라지게 된다. 첫 번째는 스노우팩내의 액상이 물과 스노우팩의 동위원소값이 같다고 가정하는 경우이며($\delta D_{ice} = \delta D_{liquid}$ or $\delta^{18}O_{ice} = \alpha \delta^{18}O_{liquid}$), 두 번째는 두 상이 동위원소적으로 평형을 이루고 있다고 가정하는 것이다($\delta D_{ice} = \alpha_{eq} \delta D_{liquid}$). 두 경우 모두 시간이 지나면서 결국 용설의 동위원소 값이 증가하는

것에는 차이점이 없지만, 두 번째의 경우에는 물과 고체상이 동위원소 교환반응을 시작하기 때문에 물의 동위원소값이 점차 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보여 준다. 실험 및 관찰 조건을 어떻게 설정하는가에 따라 두 초기조건은 달라질 수 있다(Taylor *et al.*, 2001; Feng *et al.*, 2002). 눈 속에 물이 존재하지 않아 표면에서 에너지에 의해 눈이 녹아 용설이 발생하면 첫 번째 경우에 해당될 수 있으며, 눈 속에 물이 존재하여 용설과 얼음이 동위원소적으로 평형상태에 있으면 두 번째 경우에 해당될 수 있다.

Feng *et al.* (2002)에서는 이 모델을 이용한 민감도 분석(sensitivity analysis)을 통하여 용설의 안정동위원소변동에 미치는 인자들이 어떻게 영향을 주는 지 제시하였다. 또한 Taylor *et al.* (2002)에서는 이러한 변수들을 조절하여 컬럼용용설시험을 하여 얼음과 물의 동위원소속도상수가 0.14에서 0.17hr⁻¹라고 제시하였다. 앞에서 소개한 모델은 모두 수리화적인 조건이 일정하다고 가정하였지만, Lee *et al.* (2010b)에서는 이전의 모델에서 구현하지 못하였던 수리화적인 환경이 바뀔 때를 고려한 모델을 제시하였다(식 5-12).

$$\frac{\partial(SC)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(SD \frac{\partial C_m}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (uSC_m) + \frac{\omega}{\phi(1-\xi)} (C_{im} - C_m) + S \frac{(A - C_m)^2}{A} k_r \gamma_m \left(\frac{C_{ice}}{A - C_{ice}} - \alpha \frac{C_m}{A - C_m} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \frac{\omega}{\phi \xi} (C_m - C_{im}) + \frac{(A - C_{im})^2}{A} k_r \gamma_{im} \left(\frac{C_{ice}}{A - C_{ice}} - \alpha \frac{C_{im}}{A - C_{im}} \right) \quad (6)$$

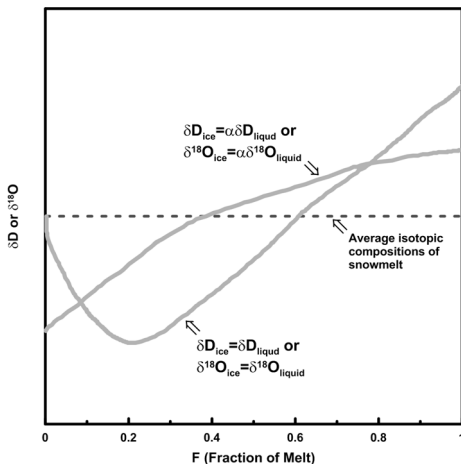


Fig. 2. Schematic diagram of isotopic evolution of meltwater. α_{eq} represents a fractionation factor between liquid and ice.

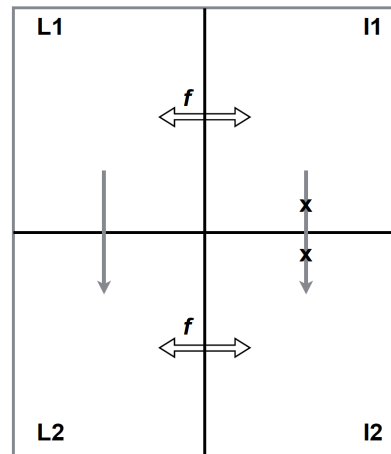


Fig. 3. Conceptual diagrams of liquid (L) - ice (I) exchange model used in Feng *et al.* (2002). x represents the water does not flow.

$$\frac{\partial C_{ice}}{\partial t} = \frac{(A - C_{ice})^2}{A} \left[k_r(1 - \gamma_{im}) \left(\alpha \frac{C_{im}}{A - C_{im}} - \frac{C_{ice}}{A - C_{ice}} \right) \right] + \frac{(A - C_{ice})^2}{A} \left[k_r(1 - \gamma_m) \left(\alpha \frac{C_m}{A - C_m} - \frac{C_{ice}}{A - C_{ice}} \right) \right] \quad (7)$$

$$\gamma_m = \frac{bf_1}{a_m + bf_1} \quad (8)$$

$$\gamma_{im} = \frac{bf_2}{a_{im} + bf_2} \quad (9)$$

$$a_m = \phi(1 - S_i) S \rho_w \quad (10)$$

$$a_{im} = \phi S_i \rho_w \quad (11)$$

$$b = (1 - \phi) \rho_{ice} \quad (12)$$

여기에서 S는 유효포화도(effective water saturation), S_i는 더 이상 줄일 수 없는 물(irreducible water), φ는 공극률, C_m, C_{im} 및 C_{ice}는 각각 mobile water, immobile water 및 얼음의 ¹⁸O 또는 D는 농도 (단위부피당 질량)이다. A는 H₂¹⁸O (HDO)와 H₂¹⁶O (H₂O)의 분자량비를 ¹⁸O (D)의 농도로 변환 계수(각각 20/18, 19/18)이다(Lee et al., 2010a; Lee, 2012a). f₁와 f₂는 각각 mobile water와 immobile water와 동위원소 반응하는 얼음의 비율이며 그 합은 1보다 작아야 하며(f₁+f₂≤1), 이는 고체상인 얼음이 눈 속을 흐르는 물에 얼마만큼 접근성이 좋은지에 의해 결정될 것이다. 변수 a_m, a_{im}과 b는 각각 단위 부피의 눈에 있는 mobile water, immobile water 및 얼음의 질량을 나타낸다. ρ_w 및 ρ_{ice}는 각각 물과 얼음의 밀도를 나타낸다. 변수 f₁와 f₂는 직접적으로 측

정될 수 없으며 모델에서 민감도분석을 통해 유도될 수 있다(Feng et al., 2002; Lee, 2012a). w는 mobile water와 immobile water와의 물리적인 교환상수이다(Lee et al., 2010a). 모델에 대한 유도 및 자세한 설명은 Lee (2012)에 제시되어 있다. 수리화적인 조건을 고려하면서 앞 절에서 설명한 immobile water를 함께 고려한 모델에 대한 모식도를 그림 4에 제시하였다(Lee et al., 2010b). Lee et al. (2010b)에서는 눈 표면에 비가 내릴 때(rain-on-snow experiment)와 일일변동(diel variation)과 같은 수리화적인 조건이 지속적으로 변하는 경우를 그림 4에서 제시된 모델을 이용하여 설명하였다. 특히, immobile water가 동위원소교환반응에 중요한 역할을 한다는 것을 모델 연구로 증명하였다.

4. 향후 국내외 연구전망 및 과제

융설의 안정동위원소에 대한 연구는 현재 미 서부, 유럽, 일본 등 선진국에서 매우 중요한 연구 주제 중의 하나이다. 장기적으로 기후변화와 관련하여 겨울철에 쌓인 눈이 봄에 녹아 지하수 및 하천을 충전시키는 과정에서 교란(perturbation)을 받게 되면 산악수계에 수자원을 의존하는 많은 대도시에 어려움이 발생할 것으로 전망하고 있다(Theakstone, 2008). 북반구의 겨울철에 기온이 증가하게 되면 쌓여야 할 눈이 녹아 자연적으로 증발되어 다음 봄에 지하로 내려가야 할 수자원이 대기로 이동하게 되면 양적인 문제가 발생되게 된다. 아직까지는 많은 연구자 그룹에서 향후 어떻게 변화할지 모니터링하는 단계이며 앞으로 10여년 정도 꾸준한 기상변동, 강설량, 융설의 양을 관찰할 것이다.

국내에서도 일부 연구자그룹에서 융설이 수계에 얼마만큼의 영향을 줄 것인가에 대한 논의가 시작되고 있다. 특히, 제주도의 물순환 연구는 많은 부분이 이루어져 있지만 겨울철에 내린 눈에 의해 발생된 물수지(water budget)은 전혀 접근조차 못하고 있는 실정이다(El-Kadi et al., 2014; Park et al., 2014). 제주지역에서 겨울과 봄에 물순환에 대한 연구를 수행할 때 눈을 고려하지 않는다면 이는 “잃어버린 고리(missing link)”가 될 가능성이 높으며 물수지 계산에서 오차를 발생할 것이다. 제주지역 이외에도 강원, 울릉지역등 겨울철 눈에 의해 수계가 영향을

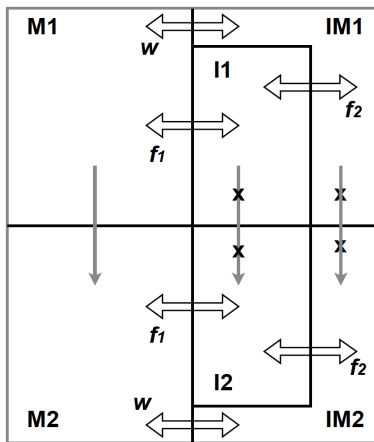


Fig. 4. Conceptual diagrams of three component (M: mobile water; IM: immobile water and I: ice) model incorporating mobile and immobile water suggested by Lee et al. (2010b). x represents the water does not flow.

받는 지역에서는 물순환 연구를 수행하기 위해서는 용설에 대한 연구가 시작되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 극지연구소 “국내 학·연 극지진흥 프로그램(Polar Academic Program, PAP)” 지원으로 이루어졌습니다.

REFERENCES

- Búason, T., 1972, Equation of isotope fractionation between ice and water in a melting snow column with continuous rain and percolation. *Journal of Glaciology*, 11, 387-405.
- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A. and Whetton, P., 2007, Regional Climate Projection. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Comiso, J., Kwok, R., Martin, S. and Gordon, A.L., 2011, Variability and trends in sea ice extent and ice production in the Ross sea. *Journal of Geophysical Research*, 116, C04021, doi:10.1029/2010JC006391.
- Dansgaard, W., 1964, Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-468.
- El-Kadi, A.I., Tillery, S., Whittier, R.B., Hagedorn, B., Mair, A., Ha, K. and Koh, G.-W., 2014, Assessing sustainability of groundwater resources on Jeju Island, South Korea, under climate change, drought, and increased usage. *Hydrogeology Journal*, 22, 625-642.
- Feng, X., Taylor, S., Renshaw, C.E. and Kirchner, J.W., 2002, Isotopic evolution of snowmelt. 1. A physically based one-dimensional model. *Water Resources Research*, 38, 1217, doi:10.1029/2001WR000814.
- Feng, X., Faiia, A.M. and Posmentier, E.S., 2001, Seasonality of isotopes in precipitation: a global perspective. *Journal of Geophysical Research*, 114, D08116, doi:10.1029/2008JD011279.
- Gabrieli, J., *et al.*, 2011, Contamination of Alpine snow and ice at Colle Gnifetti, Swiss/Italian Alps, from nuclear weapons tests. *Atmospheric Environment*, 45, 587-593.
- Gremillion, P., Gonyeau, A. and Waniyelista, M., 2000, Application of alternative hydrograph separation models to detect changes in flow paths in a watershed undergoing urban development. *Hydrological Processes*, 14, 1485-1501.
- Herrmann, A. and Stichler, W., 1981, Isotopic input into runoff systems from melting snow covers. *Nordic Hydrology*, 12, 309-318.
- Hooper, R.P. and Shoemaker, C.A., 1986, A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. *Water Resources Research*, 22, 1444-1454.
- 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*, 295, 441-450.
- Kuramoto, T., *et al.*, 2011, Seasonal variations of snow chemistry at NEEM, Greenland. *Annals of Glaciology*, 52, 193-200.
- Lee, J., 2012a, Development of mathematical model for both solute transport in snow and isotopic evolution of snowmelt. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 17, 31-39 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., 2012b, Validations of a numerical model of solute transport in a snowpack. *Economic and Environmental Geology*, 45, 525-533.
- Lee, J., Feng, X., Faiia, A.M., Posmentier, E.S., Kirchner, J.W., Osterhuber, R. and Taylor, S., 2010a, Isotopic evolution of a seasonal snowcover and its melt by isotopic exchange between liquid water and ice. *Chemical Geology*, 270, 126-134.
- Lee, J., Feng, X., Faiia, A.F., Posmentier, E.S., Osterhuber, R. and Kirchner, J.W., 2010b, Isotopic evolution of snowmelt: A new model incorporating mobile and immobile water. *Water Resources Research*, 46, W11512, doi:10.1029/2009WR008306.
- Lee, J. and Ko, K.-S., 2011, An energy budget algorithm for a snowpack-snowmelt calculation. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 16, 82-89 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., Koh, D.-C. and Choo, M.-K., 2014, Influences of fractionation of stable isotopic composition of rain and snowmelt on isotopic hydrograph separation. *Journal of Korean Earth Science Society*, 35, 97-103 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., *et al.*, 2011, Relating tropical ocean clouds to moist processes using water vapor isotope measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 741-752.
- 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*, 17, 87-95.

- Mason-Delmotte, V. *et al.*, 2008, A review of Antarctic surface snow isotopic composition: Observations, atmospheric circulation, and isotopic modeling. *Journal of Climate*, 21, 3359-3387.
- O'Neil, J.R., 1968, Hydrogen and oxygen isotope fractionation between ice and water. *Journal of Physical Chemistry*, 72, 3683-3684.
- Park, C., Seo, J., Lee, J., Ha, K. and Koo, M.-H., 2014, A distributed water balance approach to groundwater recharge estimation for Jeju volcanic island, Korea. *Geosciences Journal*, 18, 193-207.
- Park, Y., Lee, J.-Y., Choi, H.-M. and Lim, H.S., 2010, A review of researches on groundwater in permafrost regions. *Journal of Geological Society of Korea*, 46, 429-437 (in Korean with English abstract).
- Steen-Larsen, H.C. *et al.*, 2011, Understanding the climatic signal in the water stable isotope records from the NEEM shallow firn/ice cores in northwest Greenland. *Journal of Geophysical Research*, 116, D06108, doi:10.1029/2010JD014311.
- Steig, E.J. *et al.*, 1998, Synchronous climate changes in Antarctica and the north Atlantic. *Science*, 282, 92-95.
- Taylor, S., Feng, X., Kirchner, J.W., Osterhuber, R., Klaue, B. and Renshaw, C.E., 2001, Isotopic evolution of a seasonal snowpack and its melt. *Water Resources Research*, 37, 759-769.
- Taylor, S., Feng, X., Williams, M. and McNamara, J., 2002, How isotopic fractionation of snowmelt affects hydrograph separation. *Hydrological Processes*, 16, 3683-3690.
- Theakstone, W.H., 2008, Dating stratigraphic variations of ions and oxygen isotopes in a high-altitude snowpack by comparison with daily variations of precipitation chemistry at a low-altitude site. *Hydrology Research*, 39, 101-112.
- Thompson, L.G., *et al.*, 2000, A high-resolution millennial record of the south Asian monsoon from Himalayan ice core. *Science*, 289, 1916-1919.
- Unnikrishna, P., McDonnell, J.J. and Kendall, C., 2002, Isotope variation in a Sierra Nevada snowpack and their relation to meltwater. *Journal of Hydrology*, 260, 38-57.
- van Genuchten, M.T. and Wierenga, P.J., 1976, Mass transfer studies in sorbing porous media: I. Analytical solution. *Soil Science Society of America Journal*, 40, 473-480.
- Worden, J., Noone, D. and Bowman, K., 2007, Importance of rain evaporation and continental convection in the tropical water cycle. *Nature*, 445, 528-532.

투 고 일 : 2014년 9월 2일

심 사 일 : 2014년 9월 4일

심사완료일 : 2014년 10월 18일