

Note

인공강우실험을 이용한 동위원소수분분리 및 각각의 추적자에 따른 의미

이정훈*

이화여자대학교 사범대학 과학교육과
(03760) 서울특별시 서대문구 이화여대길 52

Isotopic Hydrograph Separation Using Artificial Rain-on-snow Experiments and Its Implications by Each Tracer

Jeonghoon Lee*

Department of Science Education, College of Education, Ewha Womans University
Seoul 03760, Korea

Abstract : Many studies using tracers have been conducted to understand a physical process in a system. Rain-on-snow could accelerate snowmelt processes, which influences the hydrological process in both temperate and polar regions. Hydrological and ecological conditions will be affected by the amount and timing of discharge reaching the bottom of a snowpack. The discharge consists of the rain-on-snow, pore water penetrating into the snowpack and natural meltwater. In this study, after a rain-on-snow experiment, we conducted an isotopic hydrograph separation to distinguish rainwater and pore water from meltwater. Using the isotopic data of snow and meltwater from Lee et al. (2010), two components were separated based on the assumption that rainwater and pore water are new water and natural meltwater is old water. After the second rain-on-snow experiment, the maximum contributions of rainwater and pore water reached up to 69% of the discharge and then decreased. During the study period, the measured total discharge was 4153 L and 40% (based on hydrogen isotope) of rainwater and pore water was calculated in the discharge, which is not consistent with what Lee et al. (2016) calculated using chemical separation (63%). This inconsistency can be explained by how an end-member was defined in both approaches. The contributions of artificial rainonsnow and pore water to melwater discharge range between the two methods. This study will suggest a mixing calculation from isotopic compositions of the Southern Ocean.

Key words : rainonsnow, stable water isotopes, hydrograph separation, meltwater

1. 서 론

계(system) 내에서 어떠한 물리적 과정이 일어나는지 알기 위하여 화학적 또는 동위원소적 추적자(tracer)를 이용하여 왔다(Gremillion et al. 2000). 주로 매체(medium) 과 반응을 하지 않는 비반응(conservative)추적자를 사용하는데, 매체내에 존재하지 않거나 매체내에 농도가 낮은

화합종을 선택한다. 특히, 물의 안정동위원소는 물분자 그 자체이며, 상온에서 암석과 반응하지 않고, 혼합(mixing)에 의해서만 그 비율 또는 농도가 변화된다. 이러한 특징을 이용한 것이 질량보존방정식(mass balance equation)에 기반한 계 내에서의 혼합비계산이 대표적이다. 계 내에서 두 종류의 물이 혼합할 때 이들의 화학조성이나 동위원소 조성의 차이가 있다면 적절한 가정을 통해 두 물의 혼합비를 계산할 수 있다. 하지만, 화학조성과 동위원소 조성 모두 매체와 반응을 하지 않는 비반응계열의 추적

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

자이더라도, 계에 어떻게 투입되고, 계와 어떻게 반응하는가에 따라, 즉 추적자의 역할에 따라 다른 물리적인 의미를 가질 수도 있다(Kirchner et al. 2010; Klaus and McDonnell 2013; Kim et al. 2015).

수문분리(hydrograph separation)는 추적자를 이용하여 두 부문(compartment) 이상에 존재하는 물이 최종적인 곳에 각각 얼마만큼 기여하는가를 계산하는 기법이다. 수문분리를 이용하여 강우사상(precipitation event)이 발생한 이후 어떠한 경로를 통해 강우가 하천(stream)으로 이동하는지에 대한 연구가 지난 반세기동안 국내외에서 활발히 이루어져 왔다(Kim et al. 2015; Sklash and Farvolden 1979; Taylor et al. 2001). 기본적으로 강우가 유출(runoff)되어 하천으로 흘러 들어가는 성분을 새로운 물(new water)과 지하수가 하천으로 이동하는 성분을 오래된 물(old water)로 규정하고 이 두 성분이 하천에 기여한다는 가정을 바탕으로 추적자 성분의 질량보존방정식을 이용하면 각 성분의 기여도를 계산할 수 있다(Lee et al. 2014). 또한, 수계(watershed 또는 catchment)의 하천에 기여하는 성분이 지하수와 강우사상 이외에 중요한 성분이 더 있으면 이를 추가한 삼성분계(three component mixing calculation)를 이용할 수 있다(Lee et al. 2016). 예를 들어, 토양수가 중요한 역할을 하는 경우에는 지하수 성분을 지하수와 토양수 두 성분으로 나눌 수 있다. 이전 연구에 의하면 대체적으로 강우사상 발생이후 유출되어 하천으로 흘러 들어가는 성분보다는 지하수에 의한 하천의 충전(recharge)이 대체적으로 더 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Taylor et al. 2002).

극지역 및 산악지역(alpine region)에서는 눈 녹은 물, 용설(snowmelt)이 발생하여 하천에 얼마만큼의 영향을 주는지에 대한 연구가 유사하게 이루어져 왔다(Taylor et al. 2001). 용설이 발생한 후 지표면을 따라 유출이 되는지 혹은 지하로 침투(infiltration)하여 지하수에 합류할지에 대한 질문에 답하기 위한 수문분리 연구가 많이 수행되었다(Dinçer et al. 1970). 산악지역에서는 봄철에 눈이 녹기 시작하면 강우사상과 비슷하게 유출보다는 지하수로 침투되는 양이 더 많은 것으로 연구되어 있다(Taylor et al. 2001). 눈이 많은 지역에서도 눈이 녹기 시작하면, 눈에 의한 직접적인 충전보다는 지하수로 인한 하천으로의 충전이 더 많은 것으로 알려져 있다(Taylor et al. 2002). 하지만, 극지역 또는 산악지역에서는 기상조건에 따라 이른 봄철에는 지표가 얼어 물이 침투될 수 있는 환경이 될 수 없기 때문에 침투되는 양보다 유출이 되는 양이 많을 것으로 예측될 수 있다(Lee et al. 2014). 또한 봄철에 강우(rain-on-snow)가 발생하여 눈 표면에 추가적인 에너지 및 물을 공급하게 되면 눈 녹는 속도 및 눈 속을

통과하는 용설의 속도가 빨라지게 된다(Lee et al. 2014).

겨울철에 쌓여 있던 눈 위에 봄철이 되면서 내리는 강우는 많은 온대지역(temperate region)에서 자주 발생하는 현상이며, 해양성 기후인 남극 세종기지 주변에서도 관찰되는 현상이다. 이러한 눈 위의 강우(rain-on-snow)는 여러 연구자들에 의해 강우가 눈에 미치는 영향에 대한 연구가 재난 및 수자원의 관점에서 이루어져 왔다(Lee et al. 2016). 주로 인공강우실험(artificial rain-on-snow experiment)을 이용하여 강우가 어떻게 눈에 에너지를 공급하고 눈의 결정을 변화시키는가에 대한 연구가 수행되어 왔다(Singh et al. 1997). 하지만, 강우사상이 눈 위에 발생할 때 수계에 강우와 눈이 녹은 용설이 어떻게 영향을 주는가에 대한 연구는 아직 초기 단계에 있다. 이를 위해서, 눈의 기저부에서 배출되는 물에 강우와 용설이 얼마만큼 기여하는가를 정량적으로 구할 필요가 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 Lee et al. (2010)의 두 번의 인공강우 실험자료를 이용하여 인공강우와 용설이 각각 눈의 기저부에서 배출된 물에 기여하는 양을 계산하고 이를 논의하였다. Lee et al. (2016)에서는 Lee et al. (2008)에서 수행한 인공강우의 화학적 자료를 이용하여 추적자의 회수율이 101%인 두 번째 인공강우 실험을 이용하여 눈 속, 공극에 존재하는 물과 자연적으로 발생된 용설의 합을 인공강우와 분리하였다. 인공강우를 새로운 물로, 공극수 및 용설의 합을 오래된 물로 규정하고 수문분리를 통해 각각 63%, 37%가 배출수에 기여하는 것으로 계산되었다.

동위원소 조성을 이용한 수문분리를 스노우팩(snowpack) 연구에 적용된 적은 없으며, 적용방식 및 추적자의 종류에 따라 수문분리의 결과가 다를 것을 제안하였다(Kirchner et al. 2010). 본 연구에서는 Lee et al. (2010)의 동위원소 실험결과를 활용하여 새로운 추적자인 눈의 안정동위원소를 수문분리에 이용하였다. Lee et al. (2010)의 연구에서는 눈의 안정동위원소를 이용하여 용설의 동위원소 모델을 검증하는 연구를 수행하였다. 첫 번째 인공강우실험(서로 다른 추적자를 사용, F^- and Br^-)으로 인해 공극수가 인공강우와 같은 동위원소 조성을 가지지만, 화학적으로는 다른 조성을 가지기 때문에 두 분리법의 차이가 발생할 수 밖에 없을 것이다. 화학적으로는 공극수와 용설이 같은 조성을 가지지만, 동위원소비는 공극수와 새로운 물이 같은 조성을 가진다. 따라서, 본 연구에서는 이전의 수문분리와는 달리 인공강우와 공극수의 합을 새로운 물로, 자연적으로 발생하는 용설을 오래된 물로 가정하고 눈의 기저부에서 배출되는 물의 시계열 자료를 이용하여 수문분리를 시도하였으며, 이 두 성분이 각각 눈의 기저부의 배출수에 얼마만큼 기여하는가를 결정하였다.

2. 연구지역 및 연구방법

연구지역

본 연구는 눈 속을 통과하는 용설 및 눈 자체의 동위원소가 시간에 지남에 따라 어떻게 변하는가를 연구한 Lee et al. (2010)의 자료를 이용하였다. 연구지역에 대한 정보는 Lee et al. (2008), Lee et al. (2010), Lee and Ko (2011), Lee et al. (2016) 등에 잘 서술되어 있기 때문에 본 연구에 필요한 정보만 정리하였다. 본 연구의 실험부지인 Central Sierra Snow Laboratory(CSSL)은 미국 서부지역 기후센터(Western Regional Climate Center)에서 운영하고 있으며, 해발 고도 2,100 m이며, 연평균 강수량 1,300 mm(강설량 10.4 m, 최대 적설 높이 2.4 m)이고 연평균 최고 26°C와 최저 -10°C를 나타내었다. CSSL에서는 눈과 관련된 기상변수들(온도, 강수 및 강설량, 장단파 에너지 복사량, 풍속, 풍향 및 습도)을 지속적으로 측정하고 있다. CSSL에는 용설을 채집하기 위한 두 개의 용설 팬(melt pan; 6 m × 3 m)이 설치되어 있으며, Lee et al. (2010)에서는 북쪽의 한 개의 팬만을 이용하였다. 시료 채취팬은 용설이 배수되어 모일 수 있도록 모서리가 완만하게 기울어져 있으며 유출되는 용설의 양은 4 L의 격측식 우량계(tipping bucket)를 이용하여 측정되었다. 격측식 우량계는 데이터 기록장치가 구비된 작은 오두막(hut) 안에 설치되어 있으며 시료채취 팬과는 8 m 길이의 PVC 파이프에 의해 지하로 연결되어 있다.

동위원소수분분리법(Isotopic hydrograph separation)

이번 연구에서는 기존의 동위원소수분분리법을 이용하여 눈 기저부에서 관찰된 배출수를 인공강우(새로운 물) 및 자연적으로 발생된 용설(오래된 물)의 분리를 시도하였다. 자연적으로 발생되는 용설의 양은 에너지함수 또는 기온을 바탕으로 하여 특정지역에 존재하는 경험식을 통해 계산할 수 있다(Lee and Ko 2011). 겨울철이 시작되어 눈이 쌓이기 시작하고, 눈 표면에 복사에너지가 전달되게 되어 눈 표면과 눈 속의 온도가 0°C가 넘게 되면 눈이 녹기 시작한다. 겨울동안 여분의 에너지로 인해 이러한 일이 반복되게 되면 눈 속에 물이 존재하거나 물이 얼어서 공극 속에 얼음으로 눈과 함께 존재하게 된다. 겨울에서 봄이 되면 눈의 변성작용(metamorphisms) 또는 노화(aging)이 발생하게 되어 밀도가 점점 증가하게 된다. 따라서 겨울철의 막 내린 눈보다 봄철에 싸여 있는 눈의 공극속에 물이 존재할 확률이 상대적으로 높을 수 있으며 이러한 때 강우가 발생하게 되면 많은 양의 물이 수계로 공급되게 된다. Lee et al. (2016)에서는 이러한 공극 속에 들어 있던 물이 첫 번째 인공강우로 인해 모두 인공강우로 치환되었으며, 두 번째 강우 역시 동위원소 조성이 같

은 물을 눈 위에 투입하였기 때문에, 물의 안정동위원소 값으로는 구분을 할 수 없게 된다. 하지만, 눈 표면에서 복사에너지에 의해 발생하는 물은 눈의 구성과 기본적으로 같기 때문에 인공강우와는 동위원소 값이 확연히 구별된다.

기본적으로 질량보존(mass balance) 개념을 이용하여 새로운 물(new water, nw)과 오래된 물(old water, ow)을 다음과 같은 식으로 분리할 수 있다.

$$Q_{tw} = Q_{ow} + Q_{nw} \quad (1)$$

$$Q_{tw} \times R_{tw} = Q_{ow} \times R_{ow} + Q_{nw} \times R_{nw} \quad (2)$$

$$R_{tw} = x \times R_{ow} + (1-x) \times R_{nw} \quad (3)$$

$$x = \frac{R_{tw} - R_{nw}}{R_{ow} - R_{nw}} \quad (4)$$

$$\Delta x = -\frac{x}{(\delta_{new} - \delta_{old})} \Delta \delta_{new} \quad (5)$$

여기서 Q_{tw} 는 눈의 기저부(bottom)에서 측정된 배출양이며, Q_{ow} 는 자연적으로 발생된 물의 양이며, Q_{nw} 는 인공강우에 의해 발생된 물의 양이며, R 는 동위원소의 비율이다. 식 (1)은 질량보존방정식이며, 식 (2)는 기저부에서의 총양은 눈 속에 들어 있던 물의 양과 인공강우의 양의 합으로 나타낼 수 있다. x 는 인공강우가 발생하였을 때 눈 속에 들어 있는 물이 전체 측정된 물의 양에 기여하는 비율이다. 위의 식은 보존적인 추적자(conservative tracer) 역시 적용될 수 있다. 동위원소 수분분리를 수행하여 새로운 물이 배출수에 기여하는 바의 불확정도(uncertainty)는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다(Lee et al. 2014). 불확정도는 새로운 물의 비율 그 자체와 새로운 물의 동위원소 분화정도에 비례하며 새로운 물과 오래된 물의 동위원소 차에 반비례한다.

인공강우실험(Artificial rain-on-snow experiments)

연구부지인 CSSL에서 2002-2003년 겨울기간(2002년 11월 1일부터 2003년 5월 31일까지) 동안에 실시한 인공강우실험에 대한 연구결과는 Lee et al. (2008) 및 Lee et al. (2010)에 자세히 소개되어 있다. 두 연구에서는 대기에서 유도된 용질(solute)과 물의 안정동위원소가 눈 속에서 어떤 거동을 보이는가에 대한 연구를 인공강우실험과 이 결과를 재현하는 모델을 구축하는 데에 초점을 두었으나, 본 연구에서는 이러한 인공강우실험을 이용하여 강우가 발생하였을 때 인위적으로 투입된 물과 자연적으로 발생하는 용설을 안정동위원소를 이용하여 눈의 기저부에서 배출되는 물을 분리하는 데에 있다. 이는 인공강우에

이용된 물과 자연적인 눈 동위원소의 비 차이를 이용한 것이다.

이러한 목적을 위해 2003년 4월 5일과 8일에 두 차례 인공강우실험을 수행한 연구결과를 사용하였으며 본 연구를 위해 필요한 정보는 다음과 같다. Lee et al. (2016)에는 인공강우실험 및 CSSL에서 수행된 연구를 구분하고 정리하여 보고하였다. 겨울기간동안 내린 총 강수의 양은 1454 mm이며, 이 중에서 눈은 74%를 차지하였다. 실험을 시작하기 직전의 눈의 높이는 210 cm이었으며, 인공강우실험동안 기온은 -5°C 에서 12°C 였다. 4월 5, 6, 12, 13일은 하루 종일 0°C 이하의 기온을 보였다. 따라서, 자연적으로 발생하는 융설의 양은 복사에너지의 양과 온도를 고려하여 계산하였다(Lee et al. 2008; Lee and Ko 2011). 특히, Lee and Ko (2011)에서는 기온을 이용한 경험적인 식이 아니라 흡수되는 복사에너지의 양과 기온을 고려한 새로운 알고리즘을 융설의 발생량을 예측하는 데 적용하였다. 일반적으로 눈이 녹기 시작하면 얼음 혹은 눈에서 물로 상이 변화될 때 에너지를 필요로 하게 된다. 이 때 필요한 에너지는 눈에 흡수된 단파 또는 장파 에너지 및 현열(sensible heat)이 있다. 눈을 녹이는 데 필요한 총에너지는 언급된 에너지의 합으로 설명할 수 있다. 만약 눈 속의 온도가 빙점 이하로 내려가게 되면 언급된 에너지가 사용되어야 하므로 예상되는 융설의 양은 적어질 수 있다.

두 개의 스프링클러(sprinkler)를 스노우 팬의 양쪽, 즉 6 m가 떨어지게 설치하여 인공강우를 스노우 팬의 넓이보다 2배 정도 넓게 눈 위에 뿌렸다. 눈을 파서 인공탱크를 만들어 수돗물을 공급하여 눈 위에 뿌릴 수 있도록 만들었으며, 인공탱크의 바닥은 플라스틱 재질의 종이를 바닥에 덮개로 사용하였다. 인공탱크 속의 물의 온도는 1°C 였으며, 실제 눈 표면에 뿌려지는 물의 온도는 이보다 더 낮았을 것이라고 추정할 수 있다. 인공탱크 속의 물은 전혀 얼지 않은 것으로 관찰되었다.

Lee et al. (2008)에서는 비활성추적자(conservative tracer)로 F^{-} 와 Br^{-} 를 각각의 인공강우실험에 사용하여 눈 속에서 용질의 이송(solute transport)에 대한 연구를 수행하였으며, Lee et al. (2010)에서는 스노우팩과 융설이 어떻게 동위원소 교환반응을 하는가를 모사할 수 있는 모델을 개발하고 이를 적용하는 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 Lee et al. (2010)에서 수행된 실험결과 중에서 두 번째 인공강우 자료를 이용하여 수문분리를 시도하였다. 두 번째 인공강우실험은 첫 번째 인공강우 실험과는 달리 추적자로 사용된 Br^{-} 이 모두 회수(101%)된 반면, 첫 번째 실험은 추적자로 사용된 F^{-} 이 70%만 회수되어 본 연구에서는 두 번째 인공강우실험에 수문분리를 적용하였다. 첫 번째 강우로 인해 눈 속의 물이 모두 첫 번째 강우의 물

로 모두 대체되었으며, 이로 인해 본 연구에서는 인공강우와 자연적인 융설을 분리할 때 눈 속의 물은 인공강우에 포함될 수 있다. Lee et al. (2016)의 연구에서는 인공강우에 추적자가 없었기 때문에 눈 속의 공극수는 자연적인 융설에 포함되었다.

20개의 컵을 눈 표면에 설치하여 단위시간당 눈에 뿌려지는 인공강우의 양을 질량으로 측정하여 평균을 구하였다. 인공강우실험이 끝난 후에 컵의 질량을 측정하고 이의 평균을 구하였다. 첫 번째 인공강우실험은 4월 5일 오후에 시행되었으며, 5.1시간 동안 지속되었으며 눈 위에 뿌려진 물의 양은 $157 \pm 15 \text{ mm}$ (1σ)이었다. 두 번째 인공강우실험은 4월 8일 오전에 시작하였으며, 5.5시간동안 지속되었으며 인공강수량은 $145 \pm 8.5 \text{ mm}$ 였다. 인공강우실험기간동안은 자연적인 눈은 내리지 않았으나, 4월 12일과 13일에 10 cm 정도의 눈이 내렸다. 두 번의 인공강우가 자연강우 또는 강설보다는 양(magnitude)과 강도(intensity)에서 측면에서 높게 설계되었으며, 이는 이 지역의 하루 최대치에 해당된다(Lee et al. 2010b). 수돗물의 안정동위원소 조성은 수소 및 산소가 각각 -10.4 와 -79.4‰ 이었으며, 연구시작 직전의 융설의 동위원소 조성은 -14.3‰ 이었다. 인공강우실험 이전의 스노우팩의 물리적, 화학적 성질을 파악하기 위하여, 팬 근처에 스노우핏(snowpit)을 한 군데 파서, 표면에서 바닥까지의 눈의 온도, 밀도, 눈 속에 있는 물의 양을 측정하였으며, 이는 Lee et al. (2016)에 제시되었다. 스노우핏에서의 눈 시료는 채취 이후 미리 세척된 용기(bottle)에 담아 분석이 수행되기 전까지 냉동실에 보관되었다. 융설은 발생하는 물의 양을 계산하여 시기별로 다르게 채취하였다. 물의 안정동위원소는 동위원소질량분석기를 이용하여 분석하였으며, 정밀도(precision)은 수소와 산소가 각각 0.5%과 0.1%이다. 수문분리를 위해 사용된 스노우팩의 안정동위원소 값의 평균은 수소와 산소가 각각 -13.1‰ 과 -88.5‰ 이다.

3. 연구결과 및 토의

인공강우실험 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 인공강우의 시기, 적용된 시간 및 속도를 표시하였다. Lee and Ko (2011)에서 제시한 융설계산 알고리즘을 적용하여 자연적으로 발생하는 융설의 양을 계산하여 Fig. 1a에 제시하였다. Fig. 1b는 인공강우 및 자연적인 융설로 인한 눈의 기저부에서의 배출량(discharge)의 변화를 로그단위로 나타낸 것이다. 인공강우 및 자연적으로 발생된 융설에 의한 영향이 배출량의 변화에 뚜렷히 나타나고 있으며 자연적으로 발생된 융설은 일일단위의 변동을 나타내고 있다. 융설의 안정동위원소(δD , $\delta^{18}\text{O}$) 값은 Fig. 1c, d에 나타나

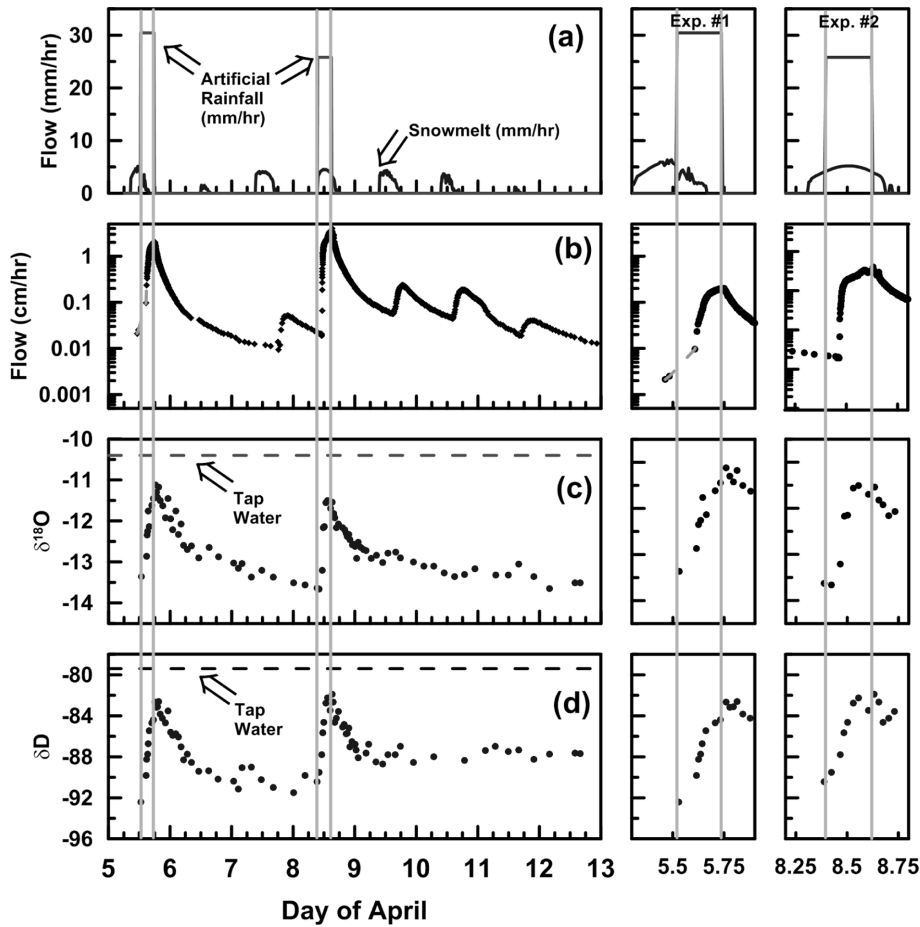


Fig. 1. Experimental observations from the two artificial rain-on-snow events. (a) Water input, including artificial rainstorms and calculated natural meltwater rates. (b) Discharge rate. (c–d) Oxygen and hydrogen isotopic variations from the base of the snowpack, respectively. Experimental data were from Lee et al. (2010)

있으며 인공강우실험 직후 용설의 안정동위원소 값이 인공강우 값으로 증가함을 알 수 있다. 하지만, 인공강우 실험이후 용설의 동위원소 조성은 인공강우의 동위원소 조성에 가까워지지만 도달하지는 못하였으며, 이는 눈과 물의 동위원소교환반응에 의한 결과로 해석될 수 있다. Lee et al. (2008)과 Lee et al. (2016)에서도 밝힌 바와 같이 두 번의 인공강우 실험에서 추적자가 거의 모두 회수된 실험은 두 번째 인공강우 실험이다(추적자 101%, 배출수 95%). 따라서, 본 연구에서도 두 번째 인공강우실험을 이용하여 수문분리법을 적용하였다.

인공강우동안 스노우팩의 동위원소변동이 어떻게 바뀌는가를 알기 위해 인공강우 이전과 이후로 나누어 5 cm 단위로 눈 안정동위원소를 분석하였다(Fig. 2). Fig. 2a에서는 눈 표면에서 눈의 기저부까지의 안정동위원소의 변동을 인공강우실험 이전과 이후로 분리하여 나타내었다. 인공강우실험이후 눈의 안정동위원소 값도 전체적으로 인공강우의 영향을 받아 증가하는 경향을 보여 주었다.

Fig. 2b는 눈의 두 안정동위원소인 수소와 산소의 선형적 관계를 나타내었다. 인공강우 실험 이후 동위원소값이 전체적으로 증가하였으며 두 동위원소의 기울기 값도 8.5에서 7.7로 바뀌었다. 기본적으로 눈 안정동위원소는 지구 천수선(global meteoric water line)의 기울기 8을 따르게 되어 있다. 새로 내린 눈은 지구천수선 기울기 8을 따르지만, 시간이 지날수록 눈이 녹기 시작하면서 고체인 눈과 액체인 물의 동위원소 교환반응(isotopic exchange between liquid water and ice)에 의해 기울기가 감소하는 것으로 알려져 있다(Lee et al. 2009). 인공강우 이후 기울기가 감소한 것은 눈 표면에서 발생한 자연적인 용설의 영향이 고려될 수 있다.

식 (1)–(4)를 이용하여 인공강우 이후 눈의 기저부에서 측정된 배출수에서 수소동위원소를 이용하여 인공강우가 차지하는 비율을 계산하여 Fig. 3에 나타내었다. 두 번째 인공강우이후 배출수에서 인공강우 및 공극에 들어 있던 물의 비율이 급속하게 증가하여 8.55일에 최댓값 69%(수

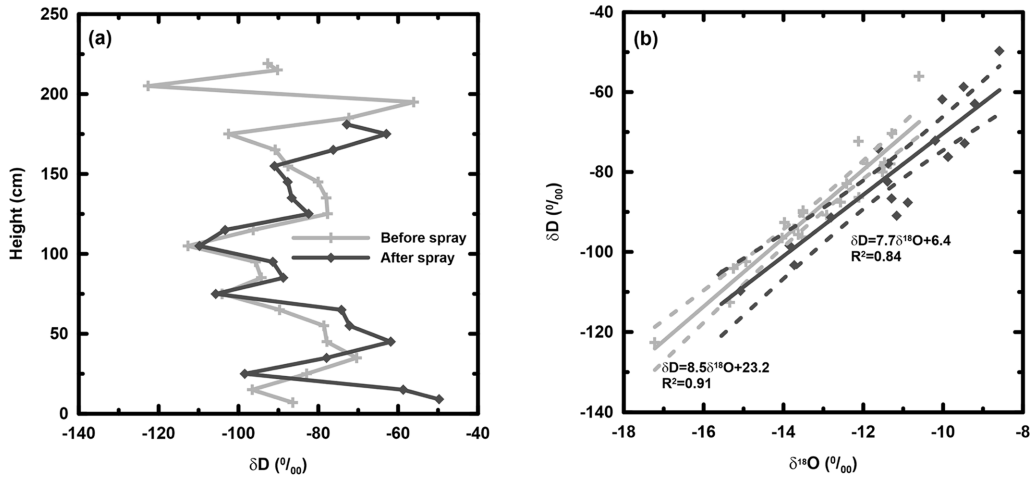


Fig. 2. (a) Variations of isotopic compositions of the snowpack collected before and after the second storm (b) A linear relationship between oxygen and hydrogen isotopes before and after the storm

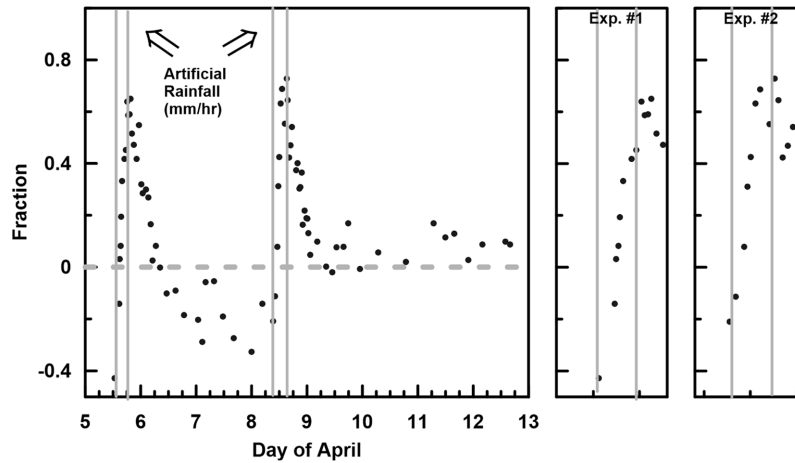


Fig. 3. Fractions of new water (artificial rainstorm) component using hydrogen isotopic compositions during the study period

소), 58%(산소) 값을 나타낸다. Fig. 3에서 각각의 점들은 배출수에서의 새로운 물(x)의 기여도를 나타내고 있으며, 오래된 물은 최솟값이 31%(수소), 42%(산소)임을 알 수 있다(오래된 물의 영향은 $1-x$). 이후로 인공강우와 공급수(새로운 물)의 영향은 점차 줄어들면서, 오래된 물(용설)의 영향이 점차 커지는 것을 알 수 있다. 식 (5)에서 제시한 불확정성은 인공강우의 배출수에 대한 기여도가 커질수록 증가하므로 8.55일에 최대값인 22%를 나타내었다. 새로운 물과 오래된 물의 동위원소 차이는 고정되어 있으므로 기여도가 증가할수록 불확정성은 증가할 수 밖에 없다(Lee et al. 2014). 9.94일이 지난 이후에는 새로운 물의 기여도가 음의 값도 가지는 것을 알 수 있다. 새로운 물이 배출수에 기여하는 비율은 인공강우 이후 급격히 줄었지만 음의 값을 가진 이후에도 증가하였다가 감소하는 경향을 보여 주고 있다. 이는 자연적인 용설의 발생과 같은 경향을 보여 주는데, 눈 표면에서 용설이 발생할 때 눈

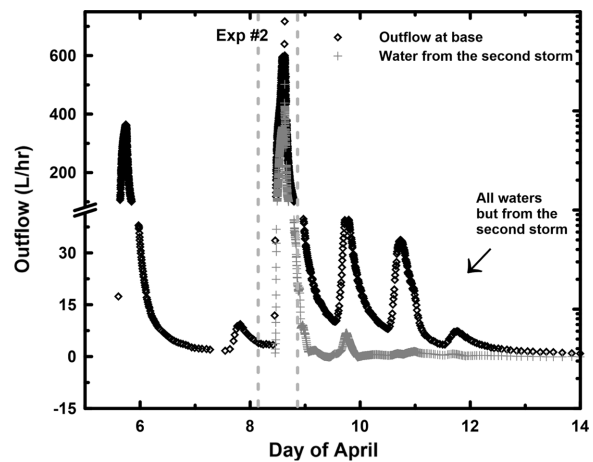


Fig. 4. Isotopic separation of hydrograph generated by the artificial rainstorms. Observations of outflow were from Lee et al. (2010). The method was applied to the second storm

속에 있던 새로운 물이 공극수의 형태로 자연적인 용설과 함께 배출되기 때문일 것이다.

Fig. 3에서 계산된 기여도를 배출수의 양에 실제 적용하여 얼마만큼의 물이 눈의 기저부에 도달하였는가를 알기 위해, Fig. 1b의 기저부에서 측정된 용설의 배출량에 기여도를 적용하였다(Fig. 4). 두 번째 인공강우이후 14일까지 배출된 총 물의 양은 4153 L이며 이 중에서 인공강우 및 공극수에 의해 배출된 양은 1667 L(40%, 수소), 1327 L(32%, 산소)이며, 나머지는 자연적인 용설에 의해 발생된 양이다. 눈의 안정동위원소를 이용한 수문분리법에서는 60%(수소), 68%(산소)의 자연적인 용설이 배출수에 기여함을 알 수 있다.

4. 논의 및 요약

겨울에서 봄까지 쌓여 있던 눈이 녹으면서 눈이 수계를 추진하는 지역에서 강우 및 이전 강우에 의한 공극수에 의한 영향(새로운 물)과 자연적인 용설(오래된 물)이 눈의 기저부에 배출수의 형태로 기여하는 바를 동위원소 수분분리를 이용하여 계산하였다. Lee et al. (2010)의 인공강우실험 결과를 이용하여 동위원소 수문분리법을 배출수에 적용하였다. 두 번의 인공강우실험 중에서 추적자의 회수율이 높은 두 번째 인공강우실험을 이용하여 인공강우와 눈의 동위원소 차이를 이용한 수문분리 연구를 수행하였다. 두 번째 인공강우 실험 이후에는 새로운 물, 인공강우와 이전 인공강우에 의한 공극수가 최대 69%(수소동위원소결과)를 차지한 후, 시간이 지날수록 눈 표면에서 발생하는 자연적인 용설에 의해 새로운 물이 배출수에 기여하는 바는 줄어들었다. 화학적 추적자(Br⁻)를 이용한 Lee et al. (2016)의 연구에서는 인공강우만이 최대 84%에 이른 이후 용설과 공극수에 의해 기여도가 시간이 지날수록 줄어드는 연구결과를 제시하였다. 동위원소를 이용한 본 연구에서는 인공강우 및 공극수의 합이 최대 69%를 차지하였는데, 이전 연구에서는 인공강우만이 최대 84%를 차지하여 두 연구간의 불일치를 보였다. 배출수에 기여하는 양 역시 본 연구에서는 공극수와 인공강우의 합이 40%(수소동위원소결과)였으나, Lee et al. (2016)에서는 인공강우의 양이 63%를 차지하였다. 즉, 동위원소를 추적자로 사용한 연구결과와 화학성분을 추적자로 사용한 연구 결과간의 오차가 발생하였으며, 이는 두 연구방법의 차이로 인해 발생하였다고 판단된다. Lee et al. (2016)에서는 브롬이온의 농도가 존재하는 곳은 새로운 물(인공강우)로, 그렇지 않은 부분(component)은 오래된 물(공극수 및 용설)로 가정하였다. Fig. 5에 브롬이온 농도와 물의 수소안정동위원소를 단성분과 배출수에서 분석된 값을 표시하였다. 가로방향인 브롬이온의 경우에는

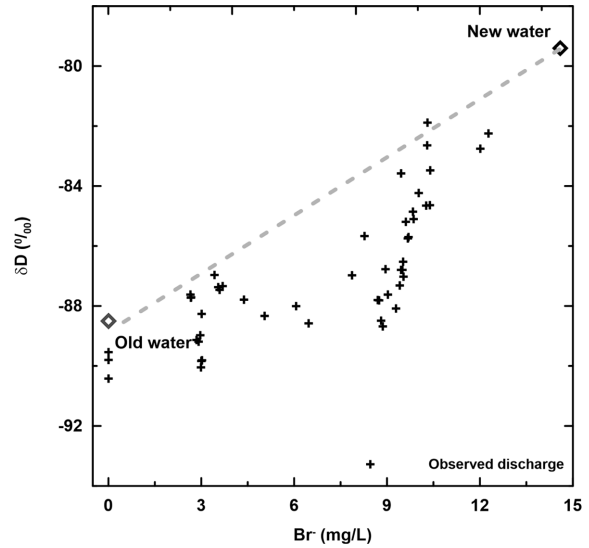


Fig. 5. Dual tracer diagram of stable isotopes (hydrogen isotopes) and bromide used in this study

두 단성분, 새로운 물(인공강우)와 오래된 물(공극수와 용설)의 화학조성사이에 배출수의 화학조성이 대부분이 포함된다. 세로방향인 수소동위원소인 경우에는 단성분인 공극수와 용설의 동위원소 조성보다 낮은 배출수가 관찰되었으며, 이로 인해 기여도가 음의 값을 가지는 것을 알 수 있다.

배출수에 대한 기여도가 두 방법에서 다르게 나타나는 이유는 화학적인 분리에서는 인공강우만 추적자의 농도를 가지며 그 외의 다른 성분들, 즉 공극수와 자연적인 용설은 추적자의 농도가 0이라고 가정하였다. 따라서 인공강우 실험 이후의 눈 표면 및 공극수에 존재하는 추적자는 모두 인공강우의 기여도에 포함되기 때문에 인공강우의 기여도가 과대평가(overestimated) 되었을 것이다. 또한, 본 연구의 안정동위원소를 이용한 결과는 스노우팩 전체의 눈 안정동위원소의 평균을 이용하였기 때문에 Fig. 2에서 눈 안정동위원소 값이 눈의 깊이에 따라 매우 다를 수 있다. 특히, 연구기간동안 녹았을 것을 추정되는 눈의 표면의 값은 다른 깊이에 비해 상대적으로 동위원소 값이 낮음을 알 수 있다(Fig. 2a). 또한, 스노우팩에서 눈 시료를 채취할 때 눈 속의 공극수(동위원소 조성이 새로운 물과 같음)가 같이 포함되어 있기 때문에 눈 안정동위원소 값이 실제 눈의 값보다는 부화(enriched)된 값을 나타낼 수 있다. 이로 인해 안정동위원소를 이용하여 배출수에 기여한 값을 구하게 되면 실제보다 낮은 값(underestimated)을 나타낼 수 있다. 따라서, 비반응계열의 추적자일지라도 사용되는 방법 및 환경에 따라서 그 물리적 의미가 다를 수 있으며, 추적자의 단성분의 조성을 결정하는 것도 매우 중요하다고 할 수 있다.

이러한 동위원소 수분분리법은 장보고기지 주변의 로스해(Ross Sea)에서도 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 예를 들어, 해수의 동위원소 성분에 기여하는 성분을 내륙에서의 담수, 해빙의 증감(production or melt of sea ice), 남극의 표면수(Antarctic surface water)등으로 가정하고 이를 단성분(end-member)로 가정하고 단성분의 동위원소 성분을 결정한다면 각각의 단성분이 얼마만큼씩 해수에 기여하는지를 결정할 수 있다(Rye et al. 2014). 현재 이를 위해서 장보고기지 주변에서 채취한 해수시료의 동위원소 성분을 분석 중이며, 해빙 및 내륙에서의 담수를 채취하기 위하여 빙하 하부에 존재하는 담수와 접촉하고 있는 해수 등을 채취하기 위한 국제공동연구가 추진 중에 있다.

사 사

이 연구는 극지연구소의 “국내 학·연 극지진흥 프로그램(Polar Academic Program, PAP)”과 “장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측(PM16020)” 과제의 지원으로 이루어졌습니다. 좋은 의견을 주신 두 분의 심사 위원님과 한 분의 편집위원님께도 감사드립니다.

참고문헌

- Dinçer T, Payne BR, Florkowski T, Martinec J, Tongiorgi E (1970) Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18. *Water Resour Res* **6**:110–124
- Gremillion P, Gonyeau A, Wanielist M (2000) Application of alternative hydrograph separation models to detect in flow paths in a watershed undergroing urban development. *Hydro Process* **14**:1485–1501
- Kim H, Cho SH, Lee D, Jung YY, Kim YH, Koh DC, Lee J (2015) Old water contributions to a granitic watershed, Dorim-cheon, Seoul. *J Soil Groundw Environ* **20**:34–40
- Kirchner JW, Tetzlaff D, Soulsby C (2010) Comparing chloride and water isotopes as hydrological tracers in two Scottish catements. *Hydrol Process* **24**:1631–1645
- Klaus J, McDonnell JJ (2013) Hydrograph separation using stable isotopes: rview and evaluation. *J Hydrol* **505**:47–64
- Lee J, Feng X, Posmentier E, Faiia A, Osterhuber R, Kirchner J (2008) Modeling of solute transport in snow using conservative tracers and artificial rain-on-snow experiments. *Water Resour Res* **44**:W02411. doi:10.1029/2006WR005477
- Lee J, Feng X, Posmentier E, Faiia A, Osterhuber R, Kirchner J (2010) Isotopic evolution of snowmelt: a new model incorporating mobile and immobile water. *Water Resour Res* **46**:W11512. doi:10.1029/2009WR008306
- Lee J, Ko KS (2011) An energy budget algorithm for a snowpack-snowmelt calculation. *J Soil Groundw Environ* **16**:82–89
- Lee J, Koh DC, Choo MK (2014) 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, Lee HJ, Ham JY, Kim H (2016) Chemical separation of the discharge generated by artificial rain-on-snow experiments in a snowpack. *J Geol Soc Korea* **52**:113–120
- Rye CD, Garabato NAC, Holland PR, Meredith MP, Nurser AJG, Hughes CW, Coward AC, Webb DJ (2014) Rapid sea-level rise along the Antarctic margins in response to increased glacial discharge. *Nat Geosci* **7**:732–735
- Sklash MG, Farvolden RN (1979) The role of groundwater in storm runoff. *J Hydrol* **43**:45–65
- Singh P, Spitzbart G, Hübl H, Weinmeister HW (1997) Hydrological response of snowpack under rain-on-snow events: a field study. *J Hydrol* **202**:1–20
- 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
- Taylor S, Feng X, Williams M, McNamara J (2002) How isotopic fractionation of snowmelt affects hydrograph separation. *Hydrol Process* **16**:3683–3690

Received Jul. 4, 2016

Revised Nov. 23, 2016

Accepted Dec. 5, 2016