

강우와 용설의 안정동위원소 변동에 의한 동위원소 수분분리법의 계통오차계산

이정훈^{1,*} · 고동찬² · 추미경¹

¹이화여자대학교 과학교육과, 120-750, 서울특별시 서대문구 이화여대길 52
²한국지질자원연구원 지하수연구소, 305-350, 대전광역시 유성구 과학로 124

Influences of Fractionation of Stable Isotopic Composition of Rain and Snowmelt on Isotopic Hydrograph Separation

Jeonghoon Lee^{1,*}, Dong-Chan Koh², and Mi Kyung Choo¹

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

²Groundwater Department, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources,
Daejeon 305-350, Korea

Abstract: An isotopic hydrograph separation technique has been able to determine the contribution of new water (event water such as rain or snowmelt) and old water (pre-event water like groundwater) to a stream hydrograph for last several decades using stable water isotopes. It is based on the assumption that the isotopic compositions of both new water and old water at a given instant in time are known and the stream water is a mixture of the two waters. In this study, we show that there is a systematic error (standard error in the new water fraction) in the isotopic hydrograph separation if the average isotopic compositions of new water were used ignoring the temporal variations of those of new water. The standard error in the new water fraction is caused by: (1) the isotopic difference between the average value and temporal variations of new water; (2) the new water fraction as runoff contributing to the stream during rainfall or spring melt; and (3) the isotopic differences between new and old water (inversely). The standard error is large, in particular, when new water dominates the stream flow, such as runoff during intense rainfall and in areas of low infiltration during spring melt. To reduce the error in the isotopic hydrograph separation, incorporation of fractionation in the isotopic composition of new water observed at a point should be considered with simultaneous sampling of new water, old water and stream water.

Keywords: stable water isotopes, isotopic hydrograph separation, precipitation and snowmelt, groundwater, stream

요약: 불안정동위원소를 이용하여 지하수와 강우 또는 용설이 하천에 미치는 영향을 정량적으로 분리하는 방법을 동위원소 수분분리법이라고 하며 지난 30년 동안 사용되어 왔다. 오래된 물(지하수)과 새로운 물(강우 및 용설)의 두 성분이 하천에 영향을 미치는 것으로 가정하고 새로운 물과 오래된 물의 주어진 시간동안의 동위원소를 측정하여 각각의 성분에 대한 비율을 결정할 수 있다. 본 연구에서는 동위원소 수분분리법을 수계에 적용할 때 새로운 물의 시간적인 안정동위원소분화를 고려하지 않고 새로운 물의 평균값을 이용하였을 때 계통오차가 발생함을 보였다. 이러한 표준오차의 크기는 (1) 새로운 물이 하천에 많이 기여할수록, (2) 사용된 평균값과 분화된 새로운 물의 안정동위원소 값과 차이

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

Tel: +82-2-3277-3794

Fax: +82-2-3277-2684

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 the original work is properly cited.

가 클수록, 마지막으로 (3) 오래된 물과 새로운 물의 안정동위원소 값의 차이가 작을수록 커진다. 집중 호우로 유출이 증가하거나 봄철에 지면이 아직 녹지 않아 융설이 유출이 되는 경우 새로운 물이 하천에 미치는 영향이 커지게 되어 상대오차 역시 증가한다. 이러한 오차를 줄이기 위해서 각각의 새로운 물, 오래된 물, 하천의 안정동위원소를 같은 시간 간격으로 측정하여 새로운 물이 분화되는 것을 고려한 수문분리법을 수행하는 것을 고려하여야 한다.

주요어: 불안정동위원소, 동위원소수문분리법, 강우 및 융설, 지하수, 하천

서 론

물의 안정동위원소(stable water isotopes)를 이용하여 지하수(groundwater)와 강우(precipitation) 또는 융설(눈 녹은 물, meltwater)이 하천(stream)에 미치는 영향을 정량적으로 분리하는 방법을 동위원소 수문분리법(isotopic hydrograph separation)이라고 한다(Sklash and Farvolden, 1979; Hooper and Shoemaker, 1986; Taylor et al., 2001; Taylor et al., 2002; Cho et al., 2003; Cho et al., 2005). 동위원소 수문분리법을 수계(watershed or catchment) 연구에 적용할 때 하천에 영향을 주는 요소를 “새로운 물(new water or event water)”과 “오래된 물(old water or pre-event water)”의 두 부분(two components)으로 나눈다. 이 때 새로운 물은 고위도나 추운지역의 융설 또는 저위도와 따뜻한 지역의 강우가 해당 되며 오래된 물은 지하수이다. 오래된 물은 잔류시간(residence time) 또는 체류시간(travel time)이 대체적 길어 불안정동위원소의 값이 일정하지만, 새로운 물에 해당되는 강우와 융설은 불안정동위원소의 값의 변화가 매우 큰 것으로 알려져 있다(Taylor et al., 2001; Lee et al., 2010). 이와 같이 두 부분간의 불안정동위원소 값의 차이가 큰 것을 이용하여 새로운 물과 오래된 물이 각각 하천(stream)에 얼마만큼씩 기여하는가를 질량보존의 법칙을 이용하여 계산할 수 있다(Taylor et al., 2002; Cho et al., 2003).

국내에서는 주로 소유역에서 불안정동위원소 또는 이온의 농도를 이용하여 강우성분과 지하수에 의한 기저유출(baseflow)을 분리하여 기저유출량을 정량적으로 측정하는 시도가 수행되었다(Cho et al., 2003; Cho et al., 2005; Lee et al., 2006; Cho et al., 2007; Ha et al., 2008). 선행연구에서는 주로 강우가 발생한 뒤의 기저유출량의 변화에 중점을 두었기 때문에, 하천에 영향을 주는 새로운 물, 즉 강우의 안정동위원소 값이 연구기간동안 일정하다고 가정하였다(Cho et al., 2003). 따라서, 연구지역 전체에 불안

정동위원소 값이 일정한 강우가 내려야 하지만, 단일 강우(one storm)의 경우에도 안정동위원소 값이 시간에 따라 달라진다는 것이 여러 연구에 의해 관찰되었다(Pionke and Dewalle, 1992; Lawrence and Gedzelman, 1996). 이로 인해, 시간에 따른 강우동위원소값이 변한다면, 새로운 물이 하천에 미치는 영향을 계산할 때 오차가 발생하는 요인이 될 수가 있다(Taylor et al., 2002).

해양으로부터 증발한 수증기가 응축되어 비 또는 눈의 형태로 내리는 강수(강우와 강설)는 기원지인 해양 표면의 온도, 대기환경, 수증기의 이동경로에 따라 안정동위원소 값이 결정된다(Lee et al., 2013). 국내에서도 강우기간 동안 불안정동위원소의 특성 중 하나인 “우량효과(amount effect)”가 여러 연구에서 보고되었다(Lee et al., 2003; Lee et al., 2013). 따라서, 앞에서 언급한 것처럼 강수의 안정동위원소 값은 시간에 따른 변동을 나타낸다(Lee et al., 2003). 고도가 낮은 지역 또는 저위도 지역에서 비는 강우의 안정동위원소 자체의 변화에 동위원소 수문분리법이 영향을 받으며, 고도가 높은 지역 또는 중위도 지역 이상의 지역에서 눈은 앞에서 언급했던 동위원소 변동에 영향을 주는 요소 이외에 눈 그 자체의 고유성으로 발생하는 동위원소분화(isotopic fractionation)과정이 추가되어야 한다(Taylor et al., 2002; Lee et al., 2009; Lee et al., 2010). 눈 안정동위원소의 변동은 대기에서부터 지상에 쌓이기 전까지 강우 동위원소와 같은 변동을 보이지만 눈이 지표면에 쌓이기 시작하고 눈 변성작용(snow metamorphism)이 생기는 시점부터 다른 형태의 동위원소분화과정을 보여 준다. 융설은 눈 표면에서 눈이 녹기 시작하면서 눈 속을 흐르는 물과 눈 또는 얼음의 동위원소교환반응(isotopic exchange between liquid water and ice)에 의해 동위원소 값이 일정하지 않고 시간이 지남에 따라 대체적으로 증가하는 것으로 알려져 있다(Taylor et al., 2001; Unnikrishna et al., 2002; Lee et al., 2010). 강우동위원소와 마찬가지로, 융설의 안정동위원소 값이

시간에 따라 변한다면 이것 또한 새로운 물이 하천에 얼마만큼의 영향을 주는 지 계산할 때 오차를 발생시키게 된다.

새로운 물은 이렇게 안정동위원소 값이 시간 또는 공간적으로 변동이 매우 심한 것으로 알려져 있지만 실제 동위원소 수문분리법을 수행할 때 오래된 물인 지하수와 마찬가지로 새로운 물도 안정동위원소 값이 일정하다는 가정을 한다(Taylor et al., 2001; Taylor et al., 2002). 이러한 가정은 새로운 물인 눈 또는 비 시료 채취의 어려움에 기인한다. 강우의 안정동위원소의 경우 실시간으로 채취하여 분석해야 하지만 실제 연구를 수행할 경우에는 강우 전체 또는 강우가 일어나는 동안 한 번 채취하고 분석하므로 앞에서 언급한 것처럼 강우가 내리는 동안 일정하다고 가정하는 것이 일반적이다. 또한 새로운 물인 눈에 의해 충전되는 지역에서 시간에 따른 용설의 안정동위원소 변동을 고려하기 위해서는 눈이 쌓여 있는 지역에서 겨울 동안 일정간격의 시료채취가 수행되어야 하는데 현실적으로 매우 어려운 일이다. 이러한 경우에는 눈 시료를 채취하여 새로운 물의 값으로 가정하는 것이 대부분이다. 하지만, 용설 및 눈 안정동위원소의 분화에 대한 연구가 진행되고 강우동위원소에 대한 연구가 진행되면서 이러한 가정은 수문분리법에서 오차를 발생시킬 것이라고 생각되어 왔다. Taylor et al. (2002)은 평균적인 눈의 안정동위원소 값을 이용하여 수문분리법을 수행하였을 때에 발생할 수 있는 오차를 산소동위원소를 이용하여 계산하고 새로운 물이 하천에 기여를 많이 할 때 불확정성(uncertainty)이 커지는 것을 보고 하였다.

따라서, 이 연구의 목표는 새로운 물인 용설 또는 강우에 대해 안정동위원소의 시간적인 분화과정을 고려하지 않고 평균값을 이용하여 새로운 물이 하천에 미치는 기여도를 고려할 때 발생할 수 있는 오차, 즉 계통오차(systematic error)를 결정하는 것이다. 이를 위해서 다음 장에서는 동위원소 수문분리법을 수행할 시 발생하는 상대오차에 대한 수학적 미분방정식을 고찰해 보았으며, 3장에서는 2장에서 제시한 수학적 식으로부터 계산된 결과를 통해 새로운 물의 시간적인 변동을 고려하지 않았을 때 발생할 수 있는 상대오차의 결과를 제시하였다. 마지막 장에서는 이

연구를 통해 발견된 사항 등을 요약하였으며 향후 불안정동위원소를 이용한 연구 등을 제시하였다.

수문분리법

동위원소 수문분리법은 Dinçer et al. (1970)에 의해 처음으로 제안되었으며 Sklash and Farvolden (1979)에 의해 발전되어 많은 연구에서 사용되고 발전하여 왔다(Taylor et al., 2001). Sklash and Farvolden (1979)은 하천은 지하수와 강우의 두 성분(two component mixing model)으로 이루어져 있으며, 하천에 기여하는 두 성분(강우 또는 용설과 지하수)의 안정동위원소 조성 또는 비활성추적자의 농도를 알고 있어야 한다는 가정을 바탕으로 수문분리법을 수행하였다. 전통적으로는 강우(새로운 물)와 지하수(오래된 물)의 산소동위원소($^{18}O/^{16}O$, $\delta^{18}O$)의 조성 차이를 이용하여 두 성분이 하천에 미치는 영향을 연구하였다(Genereux, 1998). 최근에 이르러 분석기술의 발전(H-device 및 레이저 분광법)으로 인한 수소 동위원소의 분석이 용이해 지면서 많은 연구에서 수소동위원소가 이용되고 있다(Lee et al., 2010).

앞 장에서 언급한 것처럼 새로운 물(강우 또는 용설, δD_{new})과 오래된 물(지하수, δD_{old})의 두 부분이 수계의 천에 영향을 준다고 가정하면 하천의 안정동위원소(δD_{str}) 값은 질량보전의 법칙을 이용한 다음의 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$\delta D_{str} = x\delta D_{new} + (1-x)\delta D_{old} \tag{1}$$

여기서 x 는 강우가 발생하였을 때 주어진 시간에 새로운 물이 하천에 기여하는 비율을 나타낸 것이다. 따라서, 이 비율(x)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$x = \frac{\delta D_{str} - \delta D_{old}}{\delta D_{new} - \delta D_{old}} \tag{2}$$

새로운 물(강우 및 용설)이 하천에 기여하는 비율(x)은 식 (2)를 이용하여 정량적으로 계산할 수 있으며 x 의 표준오차(standard error)는 가우스의 불확정성전파(Gaussian error propagation)를 이용하여 상대오차를 구할 수 있으며 다음과 같다(Genereux, 1998).

$$s_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \delta D_{str}} \Big|_{C_{str}, C_{old}, C_{new}} s_{C_{str}}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \delta D_{old}} \Big|_{C_{str}, C_{old}, C_{new}} s_{C_{old}}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \delta D_{new}} \Big|_{C_{str}, C_{old}, C_{new}} s_{C_{new}}\right)^2} \tag{3}$$

여기서, s_x 는 x 의 표준오차를 나타내며, $s_{C_{str}}$, $s_{C_{old}}$, $s_{C_{new}}$ 는 각각 하천, 오래된 물, 새로운 물의 상대오차를 나타낸다.

식 (3)에서 새로운 물이 하천에 기여하는 비율(x)의 상대오차를 계산할 때, 세 가지의 제공항이 존재한다. 여기서, 첫 번째 제공항은 하천 자체의 안정동위원소변동에 의해서 발생하는 x 의 표준오차를 수학적으로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial \delta D_{str}} \Delta \delta D_{str} = \frac{1}{(\delta D_{new} - \delta D_{old})} \Delta \delta D_{str} \quad (4)$$

여기서, Δx 는 x 의 계산된 오차이다. 오래된 물, 즉 지하수에 의해 안정동위원소분화에 의해서 발생하는 상대오차, 식 (3)에서 두 번째 항에 해당되는 것을 수학적으로 표시하면 식 (5)와 같다.

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial \delta D_{old}} \Delta \delta D_{old} = \frac{(\delta D_{str} - \delta D_{old}) - (\delta D_{new} - \delta D_{old})}{(\delta D_{new} - \delta D_{old})^2} \Delta \delta D_{old} = \frac{x-1}{(\delta D_{new} - \delta D_{old})} \Delta \delta D_{old} \quad (5)$$

앞장에서 언급했듯이, 하천과 오래된 물(지하수)의 경우, 잔류시간 또는 체류시간이 대체적으로 길어 안정동위원소 값이 거의 일정하다고 가정할 수 있으므로 $(\Delta \delta D_{str}, \Delta \delta D_{old})$ 식 (4)와 식 (5)에서 발생하는 상대오차, 지하수와 하천에 해당되는 항은 0에 수렴한

다고 할 수 있다.

마지막으로, 새로운 물, 강우나 용설의 안정동위원소의 분화에 의해서 발생하는 상대오차, 식 (3)에서 마지막 항에 해당되는 것을 다음과 같이 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial \delta D_{new}} \Delta \delta D_{new} = -\frac{(\delta D_{str} - \delta D_{old})}{(\delta D_{new} - \delta D_{old})^2} \Delta \delta D_{new} = -\frac{x}{(\delta D_{new} - \delta D_{old})} \Delta \delta D_{new} \quad (6)$$

$\Delta \delta D_{new}$ 는 δD_{new} 의 오차이며 이는 새로운 물로 가정하는 물안정동위원소값과 실제 분화되는 물안정동위원소 값의 차이이다. 예를 들어, 시간에 따른 강우 및 용설의 안정동위원소의 분화를 고려하지 않고 평균값 또는 특정한 값을 사용할 때 분화된 값과 사용된 값의 차이를 나타낸다. 따라서, 식 (6)에 의하면 새로운 물이 하천에 미치는 영향(x)을 고려하였을 때 발생하는 오차는 새로운 물과 오래된 물의 동위원소 값의 차이($\delta D_{new} - \delta D_{old}$)에 반비례하며 값 자체와 새로운 물의 오차($\Delta \delta D_{new}$)의 값, 즉 시간에 따른 새로운 물의 안정동위원소분화에 비례한다. 이는 상대오차를 계산한 식 (3)의 세 번째 항에 해당된다.

하였으며 마지막항의 새로운 물의 안정동위원소분화에 의한 상대오차항만이 존재함을 알 수 있었다. 따라서, 다음 장에서는 새로운 물의 상대오차를 계산하기 위해 실제 연구에서 강우 및 용설의 안정동위원소, 즉 새로운 물의 안정동위원소가 얼마만큼 변하는가에 대한 기존 연구결과를 Table 1에 제시하였다. 이번 연구에서는 수소동위원소의 경우를 이용하여 강우와 용설의 안정동위원소 분화정도를 Table 1에서 제시된 범위를 고려하여 새로운 물(강우와 용설의 평균)과 오래된 물의 동위원소값의 차이($\delta D_{new} - \delta D_{old}$)가 -40%과 -20%의 경우를 가정하여 계산을 수행하였다(Fig. 1a, 1b).

세 가지의 제공항 중에서 처음 두 항은 0에 수렴

Table 1. Fractionation of stable water isotopes reported by previous studies

Reference	Location	Tracers	Fractionation of water isotopes
Pionke and Dewalle (1992)	Pennsylvania, US	$\delta^{18}O$	~16‰
Lawrence and Gedzelman (1996)	Texas, US	$\delta^{18}O$	~10‰
Taylor et al. (2001)	Central Sierra Snow Laboratory (Snow), US	$\delta^{18}O$	4-5‰
Taylor et al. (2001)	Laboratory cold room experiment (Snow)	$\delta^{18}O$	2-3‰
Unnikrishna et al. (2002)	Central Sierra Snow Laboratory (Snow)	$\delta^{18}O$	15-20‰
Lee et al. (2003)	Jeju Island (Rain), Korea	$\delta^{18}O$ and δD	7-8‰ for $\delta^{18}O$ 50-60‰ for δD
Lee et al. (2010)	Central Sierra Snow Laboratory (Snow), US	δD	10-12‰
Lee et al. (2013)	Incheon, Korea	$\delta^{18}O$ and δD	~20‰ for $\delta^{18}O$ ~60‰ for δD

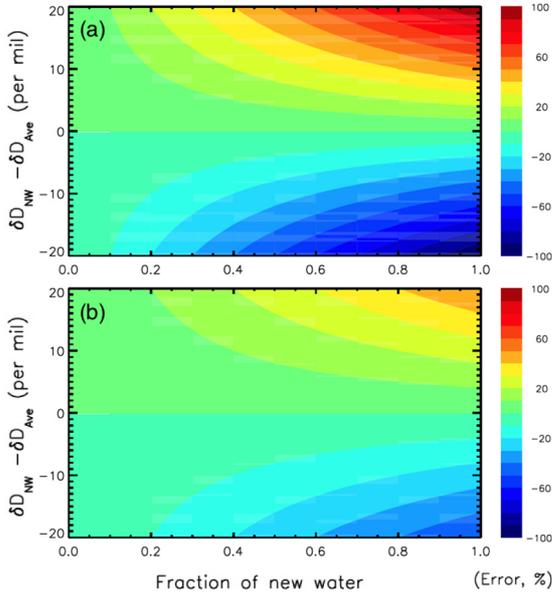


Fig. 1. Contour diagram of the error in the calculated new water fraction as a function of the isotopic difference between new water value and the average new water value (Ave) and the fraction of new water (%). NW denotes new water value. These calculations were conducted for two different conditions: (a) Case of a 20‰ difference between the average isotopic composition of new water and that of old water was considered for the analysis ($\delta D_{new} - \delta D_{old} = -20\text{‰}$). (b) Case of a 40‰ difference between them ($\delta D_{new} - \delta D_{old} = -40\text{‰}$).

연구결과 및 토의

앞 장에서 제시된 새로운 물이 하천에 기여하는 비율(x)의 상대오차는 새로운 물의 안정동위원소의 분화에 의해 결정됨을 보였다. 식 (2)로부터 새로운 물의 안정동위원소 값이 연구기간동안 분화가 일어난다면 x 의 오차가 발생함을 알 수 있다. 강우 또는 용설의 안정동위원소 값이 시간에 따라 식 (2)에 사용된 δD_{new} 보다 작다면 x 값을 과대평가(overestimate)할 수 있으며 크다면 x 값을 과소평가(underestimate)할 수 있다. 또한, x 의 오차는 x 값 자체와 새로운 물의 안정동위원소의 분화에 비례하며, 새로운 물과 오래된 물의 동위원소 값의 차이에 반비례함을 알 수 있었다. Fig. 1은 식 (6)에 의한 x 의 상대오차를 위에서 언급한 세 가지의 함수로 나타낸 것이다. Fig. 1에 제시된 것은 새로운 물의 안정동위원소의 시간적 분화를 고려하지 않았을 때 발생된 오차이다.

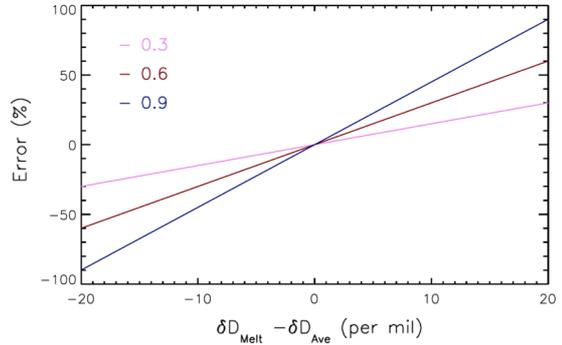


Fig. 2. Calculated errors as a function of new water fraction (0.3, 0.6 and 0.9) from Case of (a).

Fig. 1에서 수직축($\delta D_{NW} - \delta D_{Ave}$, $\Delta \delta D_{new}$)의 0을 기준으로 위의 부분은 x 값을 과소평가 한 영역이며, 아래 부분은 x 값을 과대평가 한 부분이다. 예를 들어, 불안정동위원소가 분화하여 새로운 물의 평균값($\delta D_{NW} - \delta D_{Ave}$)과 -20‰ 이 차이가 나고 새로운 물의 안정동위원소값이 지하수에 비해 20% 낮을 경우($\delta D_{new} - \delta D_{old}$)를 가정해 볼 수 있다. 이 때, 하천에 새로운 물이 20% 기여했을 때, 상대오차는 -0.2 (-20%)이며(Fig. 1a), x 값은 20%만큼 과대평가 된 값이다.

Fig. 2는 새로운 물이 하천에 기여하는 비율(x)과 새로운 물의 분화($\delta D_{NW} - \delta D_{Ave}$)에 따른 상대오차의 값을 나타내었다. Fig. 1a의 경우를 가정하여 도시하였으며, x 값이 증가할수록 새로운 물이 평균값에서 시간에 따라 분화될수록 상대오차의 절대값은 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 1과 마찬가지로 양의 값은 과소평가된 부분이며 음의 값은 과대평가된 부분이다. 식 (6)과 Fig. 2는 새로운 물, 즉 강우와 용설이 하천에 미치는 영향이 증가하게 되면 동위원소 수문분리법에서의 x 값의 오차가 늘어난다는 것을 의미한다.

강우와 용설, 즉 새로운 물이 하천에 미치는 영향은 다양한 것으로 알려져 있다(Gremillion et al., 2000). Hooper and Shoemaker (1986)의 연구결과에 의하면 용설은 25% 이하로 하천에 영향을 준다고 보고되었으며, Gremillion et al. (2000)은 20% 이하라고 보고하였다. 이러한 연구에 의하면 새로운 물의 동위원소분화에 의한 오차는 본 연구결과를 바탕으로 그리 크지 않음을 알 수 있다. 하지만, 새로운 물의 비율이 수문곡선에서 높은 경우에 새로운 물의 시간에 따른 안정동위원소의 분화를 고려하지 않게 되면 상대오차가 커질 것이다. 예를 들어, 집중호우로 인

해 강우가 하천에 직접 유출(runoff)되는 경우 새로운 물이 하천에 미치는 비율은 증가하게 될 것이다. 봄에 눈이 녹는 경우 낮은 기온으로 인해 지표면이 녹지 않았을 때 용설은 지하로 침투(percolation) 되기보다 유출될 가능성이 높을 것이며, 새로운 물이 하천에 미치는 영향이 커질 것이다. 따라서, 본 연구결과에서 보였듯이 새로운 물의 하천에 대한 영향이 커질수록 새로운 물의 분화과정을 고려하여야 동위원소 수문분리법의 오차를 줄일 수 있을 것이다.

새로운 물(강우 및 용설)은 Table 1에 제시한 안정 동위원소의 분화 이외에 시간 간격을 짧게 고려할수록 시료를 채취하여 분석하면 좀 더 국지적인 변동을 보여 주는 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2010; Lee et al., 2013). 예를 들어, 용설의 경우 하루 동안 눈 표면이 받는 에너지 차이로 인해, 눈 속을 흐르는 물의 속도가 일일변동을 보이게 되고 이로 인해 눈과 물 사이의 동위원소 교환반응(isotopic exchange between liquid water and ice)의 시간이 결정된다. 따라서, 속도가 빠르면 용설의 동위원소값은 눈 표면의 동위원소값과 거의 비슷하게 되지만 속도가 느리게 되면 동위원소교환반응을 할 수 있는 시간이 늘어남에 따라 용설의 동위원소값은 눈에 비해 낮은(depleted)된 값을 보여준다(Lee et al., 2010). 즉, 물의 속도가 일일변동을 보이면 용설의 동위원소 값도 일일변동(diel variation)을 나타나게 되는 것이다.

강우에서도 태풍(typhoon)이나 집중호우 같은 경우에는 하루 동안에도 불안정동위원소 값의 변동이 심한 것으로 알려져 있다. Lee et al. (2013)은 국내에서 수증기의 안정동위원소 값이 태풍이 지나가는 동안 Table 1에 제시한 것처럼 산소동위원소는 20%, 수소동위원소는 60% 정도의 차이를 보이는 것으로 관찰되었다. 맑은 하늘의 수증기 동위원소 값과 태풍이 지나가면서 ‘우량효과’에 의해서 수증기 동위원소 값을 비교하여 수증기의 이동경로를 동위원소를 이용하여 추적을 시도하였다. 따라서, 태풍이 지나갈 때 시간간격을 줄여 강우동위원소를 분석한다면 강우동위원소의 변동이 국지적으로 일어나는 것을 알 수 있을 것이다.

본 연구에서는 하천에 영향을 주는 성분을 두 성분(새로운 물과 오래된 물)으로 나누어 상대오차분석을 시도하였다. 만약, 토양수 또는 수계에 저장되어 있는 물(soil water or new water storage)을 추가하여 세 성분을 고려한다면 새로운 물이 하천에 주는 영

향은 감소할 것이다(Klaus and McDonnell, 2013). 새로운 물(강우 및 용설)이 하천에 도달하는 데 걸리는 시간이 상대적으로 길다면 토양수 또는 수계에 저장되어 있는 물은 여러 새로운 물의 혼합수가 될 것이며, 이를 고려하기 위해서는 체류시간(travel time)을 고려해야 하므로 이 연구의 범위를 벗어나게 된다(Kirchner et al., 2000).

결론 및 제언

이번 연구를 통해서 동위원소 수문분리법을 수행할 시 새로운 물의 시간적인 안정동위원소 분화를 고려하지 않고 평균값을 이용하였을 때 계통오차가 발생함을 보였다. 이러한 계통오차로 인하여 새로운 물이 하천에 기여하는 비율은 새로운 물의 안정동위원소 값이 실제로 사용한 평균값보다 낮으면 과대평가 될 것이며 높으면 과소평가 될 것이다. 이러한 상대오차의 크기는 새로운 물이 하천에 많이 기여할수록, 사용된 평균값과 분화된 새로운 물의 안정동위원소 값과의 차이가 클 때, 마지막으로 오래된 물과 새로운 물의 차이가 작을수록 커진다. 집중 호우 및 봄철에 지표면이 아직 녹지 않은 상황에서 발생하는 용설의 경우 유출이 증가하게 되어 새로운 물이 하천에 미치는 영향이 커지게 되며, 이로 인해 상대오차 역시 증가하게 된다.

이러한 오차를 줄이기 위해서는, 동위원소 수문분리법을 수행할 시 새로운 물, 오래된 물, 하천의 안정동위원소를 가능한 같은 시간 간격으로 측정하여야 한다(Taylor et al., 2001; Feng et al., 2002). 이는 인공함양연구 같이 지하수의 안정동위원소 조성을 변화시키는 경우 지하수의 안정동위원소도 새로운 물과 같이 안정동위원소변화를 통해 상대오차를 발생시킬 수 있을 것으로 판단된다. 현재 국내에서는 비동위원소에 대한 연구결과가 주로 한 달의 평균값들이 보고되어 있다. Lee et al. (2013)에서 시도한 것처럼 비동위원소도 좀 더 짧은 시간동안 측정된다면 다른 많은 연구에 도움이 될 것 이라고 판단된다. 이러한 시도는 새로운 물, 강우 및 용설의 안정동위원소의 변동을 이해하는 연구에 많은 도움을 줄 것이다. 기후변화 및 환경변화로 인해 새로운 물 자체의 변동 및 새로운 물이 하천에 도달하는 경로(hydrologic path)가 변화할 것이다(Gremillion et al., 2000). 새로운 물의 변화로 인한 물순환(water cycle or

hydrological cycle)변동에 대처하기 위해서는 주기적인 모니터링으로 새로운 물의 변화를 탐지하고 이러한 변화가 지표 이하에서 어떻게 하천까지 이동할 것인가에 대한 연구가 필요할 것이라고 사료된다.

사 사

이 연구는 극지연구소의 “국내 학·연 극지진흥 프로그램(Polar Academic Program, PAP)”과 한국지질자원연구원의 주요사업인 “수리생태학적 기법을 활용한 수권 경계면에서 물질 순환 평가 기술 개발(14-3211-2)” 과제의 일환으로 수행되었습니다. 논문을 심사해 주신 2명의 심사위원님들께도 감사드립니다.

References

- Cho, S.-H., Ha, K., Kim, T., Cheon, S., and Song, M.Y., 2007, Hydrograph separation for two consecutive rainfall events using tracers ($\delta^{18}O$ & Cl). *Journal of Geological Society of Korea*, 43, 253-263. (in Korean)
- Cho, S.-H., Moon, S.-H., Koh, D.-C., Cho, M., and Song, M.Y., 2005, Hydrograph separation using a chemical tracer (Cl) and estimation of baseflow rate in two small catchments, Yuseong, Daejeon. *Journal of Geological Society of Korea*, 41, 427-436. (in Korean)
- Cho, S.-H., Moon, S.-H., Lee, K.-S., and Kim, S.-C., 2003, Hydrograph separation using ^{18}O tracer in a small catchment, Cheongdo. *Journal of Geological Society of Korea*, 39, 509-518. (in Korean)
- Dinçer, T., Payne, B.R., Florkowski, T., Martinec, J., and Tongiorgi, E., 1970, Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18. *Water Resources Research*, 6, 110-124.
- 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.
- Genereux, D., 1998, Quantifying uncertainty in tracer-based hydrograph separation. *Water Resources Research*, 34, 915-919.
- Gremillion, P., Gonyeau, A., and Wanielist, 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.
- Ha, K., Moon, D., Koh, K.-W., and Park, K.-W., 2008, Runoff characteristics of the Oedocheon watershed in Jeju Island. *Journal of Korea Society of Soil and Groundwater Environment*, 13, 20-32. (in Korean)
- Hooper, R.P. and Shoemaker, C.A., 1986, A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. *Water Resources Research*, 22, 1444-1454.
- Kirchner, J.W., Feng, X., and Neal, C., 2000, Fractal stream chemistry and its implication for contaminant transport in catchments. *Nature*, 403, 524-527.
- Klaus, J. and McDonnell, J.J., 2013, Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation. *Journal of Hydrology*, 505, 47-64.
- Lawrence, J.R. and Gedzelman, S.D., 1996, Low stable isotope ratios of tropical cyclone rains. *Geophysical Research Letters*, 23, 527-530.
- Lee, J., Feng, X., Faiia, A., Posmentier, E., Osterhuber, R., and Kirchner, J., 2010, Isotopic evolution of snowmelt: A new model incorporating mobile and immobile water. *Water Resources Research*, 46, W11512, doi:10.1029/2009WR008306.
- Lee, J., Feng, X., Posmentier, E.S., Faiia, A.M., and Taylor, S., 2009, Stable isotopic exchange rate constant between snow and liquid water. *Chemical Geology*, 260, 57-62.
- 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*, 46, 339-344. (in Korean)
- 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*, 23, 137-148.
- Lee, K.-S., Park, Y., Kim, Y., Jeong, J.-H., Park, S.-K., Shin, H.-S., and Bong, Y.-S., 2006, A preliminary hydrograph separation study in a small forested watershed using natural tracers. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 427-437. (in Korean)
- Pionke, M.G. and Dewalle, D.R., 1992, Intra- and inter-storm ^{18}O trends for selected rainstorms in Pennsylvania. *Journal of Hydrology*, 138, 131-143.
- Sklash, M.G. and Farvolden, R.N., 1979, The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology*, 43, 45-65.
- Taylor, S., Feng, X., Kirchner, J.W., Osterhuber, R., Klauer, 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.
- Unnikrishna, P.V., McDonnell, J.J., and Kendall, C., 2002, Isotope variations in a Sierra Nevada snowpack and their relation to meltwater. *Journal of Hydrology*, 260, 38-57.

Manuscript received: February 24, 2014

Revised manuscript received: March 10, 2014

Manuscript accepted: March 19, 2014