

## <Review>

# 동위원소 추적자를 이용한 수문분리에 대한 연구 - 리뷰

이정훈

이화여자대학교 과학교육과

### 요 약

강우가 발생한 후, 어떠한 경로로, 얼마만큼의 물이 유출 또는 침투가 발생하는 가를 이해하는 것은 환경변화 및 기후변화에 대응하기 위하여 매우 중요하다. 동위원소수문분리법은 강우 및 융설, 지하수, 토양수등이 하천에 얼마만큼씩 기여하는 가를 정량적으로 계산하는 방법이다. 최근 레이저분광법이 개발되어 하천과 투입성분(강우 및 융설)의 고해상도 이중 동위원소 분석이 가능해졌다. 이를 통해 이전 강우에 의해 물이 하천에 도달하는 과정에 대해 근본적인 재해석을 필요로 하고 있다. 본 논평에서는 주로 이성분계를 이용할 때 고려해야 하는 사항과 이성분계 수문분리의 계통오차에 대하여 논하였으며, 토양수가 포함된 삼성분계에서 필요한 식을 유도하여 제시하였다. 또한, 각 성분의 산소 및 수소동위원소의 특성 역시 논하였다. 이성분계 수문분리를 이용하여 이전 강우인 지하수가 하천에 기여하는 바가 강우보다 크다는 것이 알려져 있지만, 최근의 환경변화 및 기후변화에 의해 그 기여도 또한 바뀔 것으로 예상된다. 향후, 이러한 환경변화 및 기후변화가 물의 순환에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 수문분리를 통한 소유역의 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

**주요어:** 수문분리, 불안정동위원소, 계통오차, 지하수, 하천, 강우 및 융설

**Jeonghoon Lee, 2017, A review on hydrograph separation using isotopic tracers. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 2, p. 339-346**

**ABSTRACT:** It is very crucial to understand what pathway water takes and how much water is delivered by runoff and percolate into subsurface after rain storms. Isotopic hydrograph separation quantitatively calculates how much each component, such as rainfall and snowmelt, groundwater and soil water, contributes to stream. Recent advent of laser-spectroscopy enables high frequency observations of dual isotopes of stream and input component (rainfall and snowmelt). This forces a fundamental re-examination of processes of water delivery to streams by pre-event water. In this review, assumptions and systematic errors of two component hydrograph separation is mainly discussed. Governing equations for three component hydrograph separation considering soil water are derived and presented. Isotopic characteristics of each component ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ) are discussed. Although it is known that a contribution of pre-event water to stream water is greater than that of event-water, such as rainfall or snowmelt by hydrograph separation, it will be expected to change due to recent environmental and climate change. To better understand influences of this environmental and climate change on the hydrological cycle, it is necessary to monitor a specific watershed by isotopic hydrograph separation.

**Key words:** hydrograph separation, stable water isotopes, systematic error, groundwater, stream, rainfall or snowmelt

(Jeonghoon Lee, Dept. of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 03760, Republic of Korea)

## 1. 서 론

물의 순환에서 강우(precipitation), 즉 강수(rainfall)와 눈(snow) 또는 눈 녹은 물(snowmelt)이 발생하

였을 때 유출, 증발, 침투의 형태로 대기에서 지표 및 지표 밑으로 또는 지표 및 지표 밑에서 다시 대기로 이동하게 된다. 이러한 과정에서 새로운 강우사상(precipitation event)이 발생한 후 강우는 유출(runoff)

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

또는 침투(infiltration)의 형태로 하천 또는 지하수로 이동하게 된다. 수자원관리(water resources management) 차원에서 강우가 발생한 이후 어떠한 경로로, 얼마만큼의 물이 유출 및 침투가 발생하는가를 이해하는 것은 현재 및 향후 기후변화에 대응하기 위해서도 매우 중요하다(Lee *et al.*, 2015a). 수문분리법(hydrograph separation)은 비반응추적자(conservative tracer)를 사용하여 강우, 지하수, 토양수등의 각각의 부문이 하천(stream)에 얼마만큼씩 기여하는가를 정량적으로 계산하는 방법이다(Hoeg *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2017). 수문분리법은 강우 발생 이후 어떠한 과정으로 강우가 하천까지 이동하는가에 대한 정보를 제공하기 때문에 소유역(small watershed)에서 수자원관리에 매우 유용할 수 있다.

지난 반세기 동안 물순환 요소인 강우, 토양수, 용설, 지하수, 수증기등이 어떻게 계(system)를 이동하는가를 이해하기 위하여 동위원소를 이용한 동위원소 수리지질학(Isotope Hydrogeology)이 발전하여 왔다(Lee *et al.*, 2015b). 불안정동위원소를 추적자로 이용한 강우수문분리(storm hydrograph separation)는 많은 지역에서 지난 40여년간 수계의 특성을 이해하는 데에 큰 기여를 해 왔다. 특히, 과거에는 강우가 발생한 후 강우가 하천에 도달하는 과정에서 표면류(overland flow)나 수평적 선택류(lateral preferential flow)가 강조되었지만, 동위원소수문분리법(isotopic hydrograph separation)에 의해 많은 지역에서 이전 강우(pre-event water), 즉 지하수의 형태로 대수층 또는 토양에 저장되어 있던 물의 중요성이 강조되고 있다. 최근에 레이저를 기반으로 한 레이저분광법(laser-spectroscopy)이 개발되어 불안정동위원소 분석이 용이해지면서, 많은 지역에서 고해상도(highly resolved) 동위원소수문분리 연구를 수행하고 있다(Jung *et al.*, 2013). 이러한 고해상도 동위원소 수문분리를 통해 오래된 물(old water) 또는 이전 강우의 하천의 기여도가 새로운 물(new water) 또는 강우의 기여도보다 높음을 제시하고 있다(Kim *et al.*, 2017). 국내에서도 기저유출을 정량화하기 위하여 수문분리를 불안정동위원소를 이용한 사례가 보고되어 있다(Cho *et al.*, 2005, 2007). 하지만, 대부분의 경우에 국내에서는 불안정동위원소가 지하수의 혼합(mixing) 과정 또는 해수에 의한 지하수의 오염(sea water intrusion)을 이해하기 위하여 제한

적으로 이용되어 왔다(Kim *et al.*, 2003).

수문곡선을 단순히 빠른(fast) 요소와 느린(slow) 요소의 두 가지만으로 분리하는 그래픽(graphic)적인 방법은 아직도 공학에서는 많이 이용되고 있다. 하지만, 동위원소수문분리법은 수문곡선을 새로운 물(new water 또는 event water)과 오래된 물(old water 또는 pre-event water)로 나누어 매우 객관적이며 물 자체를 이용하기 때문에 수계에서 물의 압력에 의한 그래픽적인 방법을 대체하고 있으며 수계에서의 물의 유동(flow)을 이해하는 데에 큰 발전을 가져 왔다(Klaus and McDonnell, 2013). 기본적으로 질량보존개념을 이용하여 하천의 다양한 추적자의 총합은 직접적으로 온 강우부분과 지하수의 두 부분으로 이루어지는 것으로 가정하였다. 지금도 이 개념을 이용하고 있지만, 강우사상(storm hydrograph event) 동안 오래된 물과 새로운 물의 완전한 혼합의 형태로 이해하고 있다. 최근에서는 물의 안정동위원소인 산소( $^{18}\text{O}$ )와 수소(D)를 모두 이용하고 있지만, 1970년대의 초기의 동위원소수문분리법은 주로 트리튬 또는 산소동위원소를 사용하였다(Dinçer *et al.*, 1970; Sklash and Folvolden, 1976). 지난 40여년동안 동위원소 추적자를 활용하여 지하수, 용설, 토양수, 강우등이 어떠한 경로로 하천까지 이동하는가에 대한 연구가 진행되어 왔다(McDonnell, 1990; Stewart and McDonnell, 1991). Ladouche *et al.* (2001)에서는 용존 탄소등도 이용하여 수문분리를 수행하였으며, Rahman *et al.* (2015)에서는 산악수계에서 매일 유출이 얼마만큼 발생하는가를 알기 위해 단성분혼합분석(end member mixing analysis)을 수행하였다.

본 논평에서는 동위원소 수문분리법의 전반적인 개념 및 실제 수계에 적용할 때 필요한 사항들을 제시하였다. 삼성분계 이상의 수문분리에서는 비반응 용질추적자(solute tracer)도 사용하여야 하지만, 본 논평에서는 주로 불안정동위원소와 관련된 사항들을 중심으로 서술하였다. 수문분리를 통해 환경변화 및 기후변화가 발생할 때 수계에서 관찰될 수 있는 사항들을 정리하였다. 이를 위해서 다음 장에서는 동위원소 수문분리법을 2성분계와 삼성분계로 나누어 설명하고, 3장에서는 물순환과 기후변화와 관련하여 수문분리를 통해 이해할 수 있는 요소들을 제시하였다. 마지막장에서는 향후 국내에서 연구해야 할 방향을 제시하였다.

## 2. 동위원소 수문분리법(Isotopic Hydrograph Separation)

동위원소 및 화학성분을 이용한 수문분리법은 기본적으로 소유역(watershed 또는 catchment)에서 하천에 기여하는 성분을 2개 또는 그 이상으로 규정 또는 가정하고 이들의 동위원소 조성 또는 화학 조성의 차이를 이용하여 수문곡선을 분리하는 것이다. 이 중에서 동위원소를 이용한 것이 동위원소 수문분리법이다. 특히, 불안정동위원소는 다른 추적자(tracer)에 비해 수계 연구에서 다음과 같은 장점이 있다(Cho *et al.*, 2005; Klaus and McDonnell, 2013; Kim *et al.*, 2017).

- 1) 불안정동위원소는 물 분자 그 자체가 추적자가 된다.
- 2) 강우에 의해 자연적으로 추적자를 투입할 수 있다.
- 3) 상온에서는 암석 또는 광물속의 물과 반응하지 않아 비반응(conservative)추적자이다.
- 4) 오직 혼합(mixing)과 증발에 의해서만 동위원소 비(ratio)를 변화시킬 수 있다.

이러한 불안정동위원소의 특성을 활용하여 질량보존방정식(mass balance equation)을 각계(하천수, 지하수, 강우 등)에 적용하면 각각의 성분이 하천에 어떻게, 얼마만큼 기여하는 가를 계산할 수 있다. 이성분계의 경우에는 간단히 이원 일차연립방정식의 형태이므로 쉽게 계산할 수 있지만, 삼성분계 이상의 경우에는 행렬의 형태를 이용하여 계산하여야 한다. 삼성분계 이상이 필요한 시스템인 경우에도 적절한 가정을 통하여 기여하는 성분 사이의 관계식을 유도하여 좀 더 간단히 계산할 수 있다(Hoeg *et al.*, 2000). 예를 들어, 추적자로 규소(silica)의 농도를 분석하여 수문분리에 적용하게 되면 강우와 토양수의 경우 거의 0에 수렴하게 된다.

### 2.1 이성분계 수문분리법

이성분계(two components) 수문분리법은 강수(precipitation)가 발생한 후 하천(stream)에 기여하는 성분이 두 가지, 즉 강수에 의한 유출을 새로운 물(new water)과 지하수를 오래된 물(old water)로 가정한 것이다. 이성분계에 사용되는 방정식은 아래 식 1, 2, 3과 같다.

$$Q_t = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

$$C_t Q_t = C_1 Q_1 + C_2 Q_2 \quad (2)$$

$$x_1 = \frac{C_1 - C_2}{C_1 - C_2} \quad (3)$$

$Q_t$ 는 하천에서 측정된 유량이며,  $Q_1$ 과  $Q_2$ 는 각각 새로운 물과 오래된 물이 하천에 기여하는 양이다.  $C$ 는 추적자의 농도 또는 동위원소 비율이며,  $x_1$ 은 새로운 물이 하천에 기여하는 비율이다( $x_1 = \frac{Q_1}{Q_t}$ ). 이러한 질량보존방정식을 이용하여 이성분계 수문분리를 하기 위해서는 다음의 가정이 필요하다(Sklash and Farvolden, 1979).

- 1) 새로운 물과 오래된 물의 추적자 농도 또는 동위원소 비율의 차이가 커야 한다( $C_1 - C_2$ ).
- 2) 새로운 물과 오래된 물의 추적자 농도 또는 동위원소 비율은 시간과 지역의 편차가 없어야 한다.
- 3) 오래된 물과 불포화대에 있는 물의 추적자 농도 또는 동위원소 비율이 같아 비포화대에 있는 물이 기여하는 바를 무시할 수 있다.
- 4) 유출이 되는 동안 지표에 머무르는 물의 양은 거의 없어야 한다.

위의 4가지 조건을 만족하면 이성분계 수문분리를 활용할 수 있지만 그렇지 않은 경우에는 다음 절에서 설명하게 될 삼성분계 이상의 수문분리를 수행하여야 한다. 예를 들어, 비포화대에 있는 물의 양을 무시할 정도가 아니라 고려하여야 한다면, 유출에 의한 성분, 토양수, 지하수 이러한 삼성분계 수문분리를 활용하여야 한다. 이성분계에서 토양수는 수리지질학적인 특성에 따라 유출 또는 지하수로 해석될 수 있다.

또한, 위에서 언급한 가정 2에서 새로운 물과 오래된 물의 동위원소 조성의 시간적 또는 공간적인 편차가 없어야 한다고 했는데, 이는 편차 즉 동위원소분화(isotopic fractionation)를 뜻하게 된다. 새로운 물과 오래된 물의 동위원소 조성이 시간에 따라 변하게 된다면 이는 계통오차(systematic error)를 발생하게 되며, 이성분계의 계통오차는 불확정의 원리(propagation of error)를 이용하여 결정할 수 있다(Gemereux, 1988; Lee *et al.*, 2014). 오래된 물인 지하수의 동위원소는 상대적으로 매우 안정적으로

알려져 있으나, 새로운 물인 강수(비 또는 용설)의 동위원소 조성이 상대적으로 동위원소 분화 정도가 크기 때문에 강수의 평균을 이용하여 수문분리를 수행하게 되면 계통오차가 발생하게 된다. 강수의 동위원소 분화로 인한 새로운 물의 불확정성은 다음 식과 같다(Lee *et al.*, 2014).

$$\Delta x_1 = -\frac{x_1}{(C_1 - C_2)} \Delta C_1 \quad (4)$$

$\Delta x_1$ 은 새로운 물이 하천에 기여할 때의 계통오차이며,  $\Delta C_1$ 은  $C_1$ 의 오차이다. 이는 연구기간동안 새로운 물로 가정하는 강수의 추적자 농도 또는 안정동위원소의 비율이 변하는 값이다. 따라서, 식 4에 의하면 새로운 물이 하천에 미치는 영향을 고려하였을 때 발생하는 오차는 새로운 물과 오래된 물의 추적자 농도 또는 안정동위원소 값의 차이( $C_1 - C_2$ )에 반비례하며 새로운 물이 하천에 기여하는 그 값 자체( $x_1$ )와 새로운 물과 오차의 값( $\Delta C_1$ ), 즉 시간에 따른 새로운 물의 추적자 농도 또는 안정동위원소 값에 비례한다. Feng *et al.* (2002)의 연구에서는 새로운 물의 이러한 동위원소 분화를 고려하여 분화를 고려하지 않았을 때보다 10%정도의 오차가 발생한다는 것을 보고하였다. Lee *et al.* (2014)에서는 새로운 물의 분화에 따른 오차 및 그 중요성에 대하여 논의하였다. Kim *et al.* (2017)에서는 새로운 물의 농도 변화에 따라 추적자에 따라 오차 역시 제시하였다.

그림 1에 강우가 발생하였을 때 개념적인 수문분

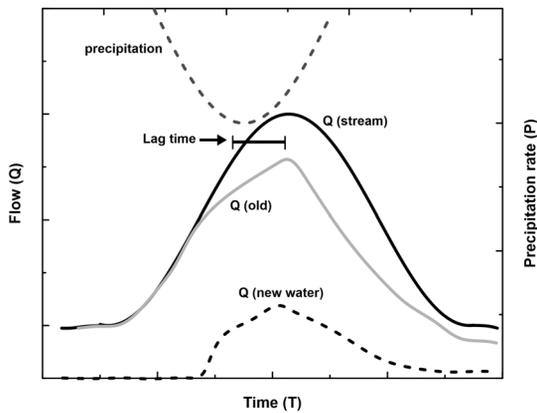


Fig. 1. A schematic diagram of typical hydrograph separation after rain storm.

리의 결과를 나타내었다. 강우가 발생하여 하천의 유량이 증가하기 시작하면 이에 기여하는 성분이 무엇 인지를 구분하여 나타내었다. 강우가 발생한 후 강우의 질량 중심선에서 하천의 유량곡선에서 최대점까지 도달하는 시간을 지체 시간(lag time)으로 정의 하는데, 이는 수계(watershed)의 특성을 규명하는데 매우 중요한 요소가 된다. 다음 절에서 기후변화 및 환경변화에 따라 어떻게 지체시간이 변동하는 지에 대하여 논의할 것이다. 일반적으로 강우 또는 용설이 발생하여 하천의 유량이 증가할 때 오래된 물인 지하수가 하천에 기여하는 바가 크다고 알려져 있다(Taylor *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2017). 하지만, 집중호우 같은 경우에는 강우가 하천에 직접 유출되는 경우에 새로운 물이 하천에 미치는 비율이 증가할 것이며, 고위도 지역이나 온대지역에서는 눈이 녹을 경우 낮은 기온으로 인해 지표면이 녹지 않았을 때 용설은 지하로 침투되기 보다는 지표면을 따라 유출될 가능성이 높아 새로운 물이 하천에 기여하는 비율이 증가할 것이다(Lee *et al.*, 2014). 이러한 새로운 물의 역할은 기후변화와 매우 밀접하게 연관성이 있기 때문에 국내에서도 향후 관심을 가져야 할 분야라고 판단된다. 이성분계를 이용하여 새로운 물이 얼마만큼 수계에 영향을 주는 가에 대한 연구는 Kim *et al.* (2015)에는 수계의 크기에 따라 다른 연구의 사례를 제시하였다.

수문분리를 위한 각 부문의 물안정동위원소의 특징은 그림 2에 제시하였다. 그림 2는 강우가 발생한

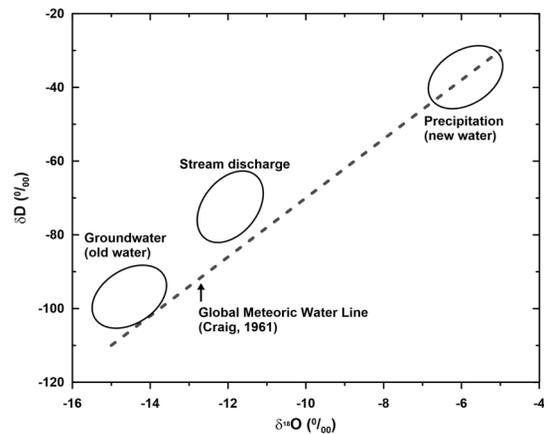


Fig. 2. A linear relationship between oxygen and hydrogen isotopes for precipitation, stream discharge and groundwater.

후 물안정동위원소분포의 전형적인 형태로서, 지하수, 하천, 강우의 동위원소 분포를 산소와 수소의 선형관계위에 도시하였다. 산소와 수소의 안정동위원소를 이용한 선형관계는 동위원소 수리지질학에서 가장 많이 활용되는 형태이며, 이는 물의 이동(water movement)에 대한 물리적인 과정을 설명해 준다(Lee *et al.*, 2010). 먼저, 강우(새로운 물)는 지구천수선(Global Meteoric Water Line,  $\delta D=8 \times \delta^{18}O+10$ )위에 분포하며, 눈이 쌓인 이후 아무런 물리적과정(no post depositional process)이 없는 눈 또한 지구천수선 위에 분포할 것이다. 하지만, 쌓인 눈이 녹은 이후 발생하는 용설(snowmelt)은 녹는 동안 동위원소 분화과정이 발생하므로 지구천수선 위에는 분포되지 않는다(Lee *et al.*, 2010). 강우가 발생한 이후 증발 등을 포함한 물리적 과정으로 인해 지하수 및 하천수는 지구천수선 위에 대부분이 분포하지 않는다. 하천이 강우와 지하수가 혼합되어 있으면, 하천의 동위원소 조성은 강수와 지하수 사이에 위치하게 된다. 이러한 특징을 이용하여 강우 및 지하수를 두 단성분으로 간주하여 수문분리를 수행하게 된다. 하지만, 강우가 장기간 발생하지 않는 시기에는 지하수와 하천의 동위원소조성이 거의 일치하게 된다(Kim *et al.*, 2015, 2017).

**2.2 삼성분계 수문분리**

비포화대가 깊어 토양수를 무시할 수 없거나 유출과정에서 지표에 물이 오랜 기간 머무르게 되어 그 과정을 무시될 수 없을 경우 이성분계 이상의 부문을 고려하여야 한다. 따라서, 삼성분계 또는 그 이상의 부문(compartment)를 고려하여 수문곡선을 분리하고자 할 경우에는 다음과 같은 관계식을 정립하여야 한다. 아래의 식은 삼성분계 이상의 경우 적용될 수 있으며, 삼성분계의 경우에는 아래의 식에서  $n=3$ 에 해당된다.

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \tag{5}$$

$$\begin{aligned} C_t^1 Q_t &= C_1^1 Q_1 + C_2^1 Q_2 + \dots + C_n^1 Q_n \\ C_t^2 Q_t &= C_1^2 Q_1 + C_2^2 Q_2 + \dots + C_n^2 Q_n \end{aligned} \tag{6}$$

⋮

$$\begin{aligned} C_t^{n-1} Q_t &= C_1^{n-1} Q_1 + C_2^{n-1} Q_2 + \dots + C_n^{n-1} Q_n \\ A &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ C_1^1 & C_2^1 & \dots & C_n^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_1^{n-1} & C_2^{n-1} & \dots & C_n^{n-1} \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ C_t^1 \\ \vdots \\ C_t^{n-1} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{7}$$

여기에서 A는 2번째 열부터 각 부문의 추적자의 농도 및 동위원소 비율이며, X는 각 부문이 하천에 기여하는 비율( $q_i = \frac{Q_i}{Q_t}$ )이며, B는 2열부터 하천의 추적자의 농도 또는 동위원소 비율이다. 삼성분계의 경우에는 적절한 가정을 바탕으로 해석해가 제시되어 있으며, 그 이상을 부문을 가정하는 경우에는 다음과 같이 행렬을 계산할 수 있다.

$$AX = B, X = A^{-1}B \tag{8}$$

강수가 발생하거나 봄철에 눈이 녹은 이후 하천수에 기여하는 성분 중 토양수를 고려하는 경우에는 토양수( $q_1$ ), 지하수( $q_2$ ), 비 또는 용설( $q_3$ )의 세 성분을 이용한 삼성분계 수문분리를 활용하여야 한다. 삼성분계의 경우에는 기본적으로 삼원일차연립방정식의 형태로 나타나며, 이는 식 5, 6을 이용하여 다음과 같은 해석해를 가질 수 있다.

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 \tag{9}$$

$$C_t = f_1 C_1 + f_2 C_2 + f_3 C_3 \tag{10}$$

$$I_t = f_1 I_1 + f_2 I_2 + f_3 I_3 \tag{11}$$

$$f_1 = \frac{(I_t - I_1)(C_2 - C_3) - (I_2 - I_3)(C_t - C_1)}{(I_2 - I_3)(C_2 - C_1) - (I_2 - I_3)(C_2 - C_3)} \tag{12}$$

$$f_2 = \frac{(I_1 - I_3)(C_t - C_3) - (I_t - I_1)(C_1 - C_3)}{(I_1 - I_3)(C_2 - C_3) - (I_2 - I_3)(C_1 - C_3)} \tag{13}$$

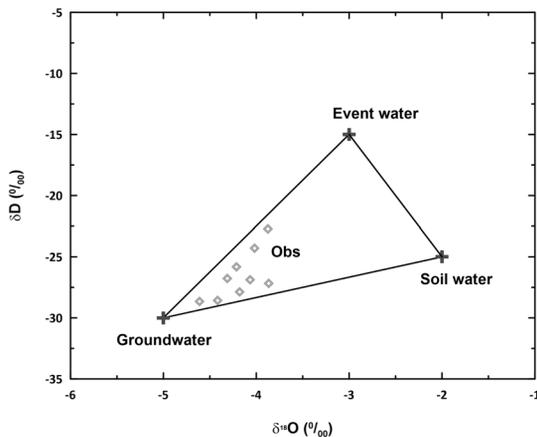
$$f_3 = \frac{(I_t - I_1)(C_2 - C_3) - (I_2 - I_3)(C_t - C_1)}{(I_2 - I_3)(C_2 - C_1) - (I_2 - I_3)(C_2 - C_3)} \tag{14}$$

여기에서 C는 각 부문의 화학적 추적자의 농도를 나타내며, I는 동위원소의 비율을 나타낸다. f는 각 부문이 최종성분에 기여하는 분율을 나타내며, 1,2,3은 각 부문을 나타낸다(예를 들어, 강우, 지하수, 토

양수). 이성분계과 마찬가지로 삼성분계에서도 단성분(end-member)를 선정하는 것은 매우 어려운 일이다. Liu *et al.* (2004)에서는 단성분의 조성을 변화시킬 때 최종적으로 하천에 단성분들이 미치는 영향을 바꿀 수 있음을 보여 주었다. 그림 3은 일단 단성분의 조성이 결정되면 하천수(Obs)는 단성분의 조성 경계 안에 분포함을 알 수 있다. 산소와 수소의 전형적인 동위원소 값을 이용하여 하천수의 동위원소 조성은 강우(Event water), 토양수(Soil water), 지하수(Groundwater)의 동위원소 조성에 의해 결정됨을 알 수 있다.

### 3. 수문분리와 물순환 관계

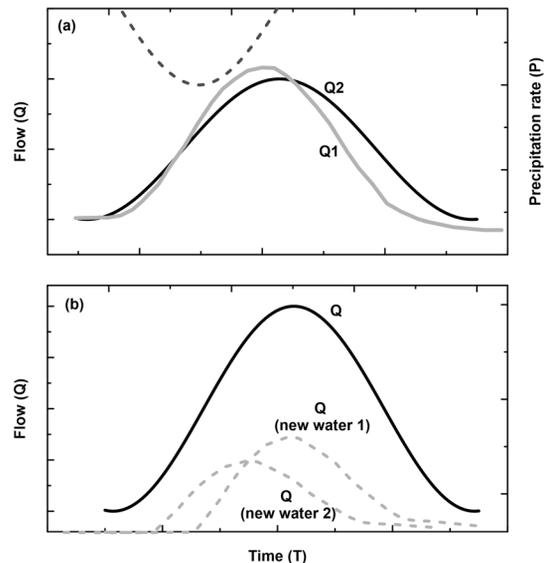
최근 기후변화와 관련하여 강우의 패턴변화와 겨울철 동안 쌓여 있는 눈이 봄철에 녹으면서 어떻게 수계에 충전될 것인가는 물관리(water management)에 매우 중요하다. 또한, 도시화(urbanization) 같은 환경변화에 따라 강우의 패턴변화 없이 지표면의 변화에 따른 수계에 대한 반응도 물에 의한 재난관리차원에서 매우 중요한 사항이다. 그림 4(a)는 지표면의 변화에 따른 수문곡선의 변화를 나타낸 것이다. 같은 양의 강수가 특정 수계에 내렸을 때( $Area_{Q_1} = Area_{Q_2}$ ), 도시화(urbanization)에 의해 투수율이 낮은 피복(cover)으로 덮혀 있을 때( $Q_1$ ), 수문곡선에서 지체 시간은 짧아지면서 유량의 최대값은 증가하는 경향이 나타난



**Fig. 3.** Dual tracer diagram of  $^{18}\text{O}$  and D. The observed distributions of stream discharge (gray diamonds) can only be explained when the soil water is taken into account as an end-member.

다(Gremillion *et al.*, 2000). 이는 도시화의 진행에 따라 아래로 침투(infiltration)되어 지하수로 가야 될 물의 양은 줄어 들면서 유출에 의해 하천으로 직접 물이 이동하기 때문이다. 즉, 오래된 물보다 새로운 물이 하천에 기여하는 바가 증가한다.

같은 양의 눈이 수계에 내리더라도 겨울철의 기후 변화에 따라 수계에 이동하는 패턴은 달라 질 수 있다. 이는 도시화와 다른 반대의 경우로 설명될 수 있는데, 같은 양의 눈이 수계에 내렸어도, 겨울철에 온도가 증가하게 되어 용융(melting)이 발생하게 되면 수계에 전달되는 물의 양이 달라지게 된다( $Area_{Q_1} \neq Area_{Q_2}$ , 그림 4a). 수자원관리(water resource management) 차원에서는 겨울철에 내려 쌓여 있던 눈이 한꺼번에 녹아 수계를 충전하는 것이 상대적으로 많은 수자원을 확보할 수 있다. 도시화에 따른 지체시간이 감소하여 자연재해가 발생하는 것과는 반대로 수자원을 확보하는 것은 대기로의 이동이 줄어들수록 수계에 저장되는 양은 많기 때문이다. 겨울철의 온도 증가로 인해 눈이 녹는다면 이는 수계와 대기로 동시에 이동하게 된다. 이는 새로운 물이 하천에 기여하는 바가 감소함을 뜻하는 것이며(그림 4b), 이는 봄철에 녹는 눈에 의해 충전 되는 수계에 전적으로 의존하는 지역에서는 향후 발생할 수 있는 문제이며, 기후변



**Fig. 4.** (a) A change of stream discharge pattern due to surface changes (b) A change of new water fraction due to winter warming.

화에 의해 수자원의 손실이 발생됨을 의미하게 되어 이에 대한 연구가 현재 활발히 논의 중에 있다(Lee *et al.*, 2016).

#### 4. 요약 및 향후 연구

동위원소 수문분리법은 1970년대부터 국외에서 주로 산간지역에서 강수발생 이후 눈 또는 강우가 어떠한 경로로 하천에 이동하는 가에 초점을 두어 연구가 발전되어 왔다. 국내에서는 주로 지하수가 하천에 어떻게 영향을 미치는가에 초점을 두어 기저유출의 중요성을 강조하는 연구들이 주로 수행되어 왔다. 대부분의 연구에서 용설과 강우가 발생한 후 유출(runoff)보다는 침투(percolation)를 통해 지하수가 하천에 더 많은 영향을 미치는 것으로 보고 되어 왔다. 하지만, 최근의 환경변화(예를 들어 도시화 등) 및 기후변화가 향후 물순환에 어떻게 영향을 주는 가에 동위원소 수문분리 연구는 동위원소를 추적자로 활용하여 질량보존방정식을 적용하기 때문에 다양한 연구에 활용이 가능할 것으로 기대된다. 단성분의 화학조성 및 동위원소 조성을 이용하여 계(system) 내에서의 물리적 과정을 추적하는 연구에 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

국내에서는 주로 동위원소 또는 비반응추적자를 활용한 이성분계 수문분리연구만이 진행되어 왔다(Cho *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2017). 추적자를 활용하여 강수가 발생한 후 하천으로 이동하는 과정을 관찰하는 것은 수계의 특성을 파악하고자 하는 것에 있다. 서론에서 언급한 것처럼 최근의 레이저분광법 등의 동위원소 분석 기술발전 및 이전에는 시도되지 않았던 수증기동위원소 분석이 가능함에 따라 토양수의 규명이 가능해지면서 삼성분계의 필요성이 더욱 대두되고 있다(Klaus and McDonnell, 2013; Kim *et al.*, 2016). 이러한 수계의 특성을 파악한 후 기후변화 및 환경변화에 따라 강수가 발생한 이후부터 물이 어떠한 경로로 하천까지 이동하는 가에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다. 이러한 연구를 통해 환경변화 및 기후변화가 물의 순환에 미치는 영향을 좀 더 이해할 수 있을 것으로 예상된다.

극지역 및 산악지역(alpine region)에서 눈 녹은 물, 용설(snowmelt)가 발생하여 하천에 얼마만큼의 영향을 주는 가에 대한 연구도 주로 동위원소수문분

리를 활용해 왔다(Taylor *et al.*, 2001). 산악지역에서도 강우와 비슷하게 용설에 의한 유출보다는 오래된 물인 지하수에 의해 하천에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Dinçer *et al.*, 1970; Taylor *et al.*, 2001). 특히, 국내에서는 봄철에 눈 위에 비(rain-on-snow)가 오게 되면 용설의 이동속도가 빨라지게 되어 하천에 영향을 어떻게 줄 것인가에 대한 연구를 통해 용설이 어떻게 하천으로 이동하는 가에 대한 이해를 좀 더 할 수 있을 것으로 기대된다(Lee, 2016). 또한, 수문분리의 기본 개념인 질량보존개념을 이용하여 장보고기지 주변의 로스해(Ross Sea)에 기여하는 성분을 분리할 수 있을 것으로 판단된다. 내륙에서의 담수(fresh water), 해빙의 증감(production or melt of sea ice), 남극의 표면수(Antarctic surface water)를 단성분으로 가정하고, 이들의 시료의 동위원소를 분석하여 질량보존방정식을 적용하여 기후변화에 따른 담수의 해수에 대한 영향을 좀 더 정량적으로 이해할 수 있을 것으로 예상되어 현재 해빙 및 빙하하부에 존재하는 물의 시료를 채취하기 위하여 국제공동연구가 추진 중에 있다.

#### 사 사

이 연구는 극지연구소의 “장보고기지 주변 빙권 변화 진단, 원인규명 및 예측(PM16020)”과제의 일환으로 이루어졌습니다.

#### REFERENCES

- Cho, S.H., Moon, S.H., Koh, D.C., Cho, M.J. and Song, M.Y., 2005, Hydrograph separation using a chemical tracer (Cl) and estimation of baseflow rate in two small catchments. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 427-436 (in Korean with English abstract).
- Cho, S.H., Ha, K., Kim, T., Cheon, S. and Song, M.Y., 2007, Hydrograph separation for two consecutive rainfall events using tracers ( $\delta^{18}\text{O}$  & Cl). *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 253-263 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Geneux, 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.
- Hoeg, S., Uhkenbrook, S. and Leibundgut, Ch., 2000, Hydrograph separation in a mountainous catchment - combining hydrochemical and isotopic tracers. *Hydrological Processes*, 14, 1199-1216.
- Jung, Y.Y., Koh, D.C., Lee, J. and Ko, K.K., 2013, Applications of isotope ratio infrared spectroscopy (IRIS) to analysis of stable isotopic compositions of liquid water. *Economic and Environmental Geology*, 46, 495-508 (in Korean with English abstract).
- Kim, H. *et al.*, 2015, Old water contributions to a granitic watershed, Dorim-cheon, Seoul. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 20, 34-40 (in Korean with English abstract).
- Kim, H. *et al.*, 2017, Influence of pre-event water on streamflow in a granitic watershed using hydrograph separation. *Environmental Earth Sciences*, 76: 82, doi: 10.1007/s12665-017-6402-6.
- Kim, S., Han, Y., Hur, S.D. and Lee, J., 2016, Applications of cryogenic method to water vapor sampling from ambient air for isotopes analysis. *Ocean and Polar Research*, 339-345 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y., Lee, K.S., Koh, D.C., Lee, D.H., Lee, S.G., Park, W.B., Koh, G.W. and Woo, N.C., 2003, Hydrogeochemical and isotopic evidence of groundwater salinization in a coastal aquifer: A case study in Jeju volcanic island, Korea. *Journal of Hydrology*, 270, 282-294.
- Klaus, J. and McDonnell, J.J., 2013, Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation. *Journal of Hydrology*, 505, 47-64.
- Ladouche, B. *et al.*, 2001, Hydrographs separation using isotopic chemical and hydrological approaches (Strengbach catchment, France). *Journal of Hydrology*, 242, 255-274.
- Lee, J., 2016, Isotopic hydrograph separation using artificial rain-on-snow experiments and its implications by each tracer. *Ocean and Polar Research*, 38, 331-338 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., Feng, X., Faiia, A., Posmentier, E., Kirchner, J., 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*, 270, 126-134.
- Lee, J., Han, Y., Koh, D.C., Kim, S. and Na, S.U., 2015b, A review on the application of stable water vapor isotope data to the water cycle interpretation. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 20, 34-40 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., Kim, S., Han, Y., Oh, Y.S., Kim, H.Y., Kim, H., Ham, J.Y., Choi, H.B., Na, U.S. and Koh, D.C., 2015a, A high-resolution study of isotopic compositions of precipitation. *Economic and Environmental Geology*, 48, 371-377 (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., Lee, H.J., Ham, J.Y. and Kim, H., 2016, Chemical separation of the discharge generated by artificial rain-on-snow experiments in a snowpack. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 113-120 (in Korean with English abstract).
- Liu, F.J., Williams, M.W. and Caine, N., 2004, Source waters and flow paths in an alpine catchment, Colorado Front Range, United States. *Water Resources Research*, 40, W09401, doi:10.1029/2004WR003076.
- McDonnell, J.J., 1990, A rationale for old water discharge through macropores in a steep, humid catchment. *Water Resources Research*, 26, 2821-2832.
- Rahman, K. *et al.*, 2015, Quantification of the daily dynamics of streamflow components in a small alpine watershed in Switzerland using end member mixing analysis. *Environmental Earth Sciences*, 74, 4927-4937.
- Sklash, M.G. and Farvolden, R.N., 1979, The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology*, 43, 45-65.
- Stewart, M.K. and McDonnell, J.J., 1991, Modeling base flow soil water residence times from deuterium concentrations. *Water Resources Research*, 27, 2681-2693.
- Taylor, S., Feng, X., Kirchner, J., Osterhuber, R., Klaue, B. and Renshaw, C., 2001, Isotopic evolution of a seasonal snowpack and its melt. *Water Resources Research*, 37, 759-769.

---

Received : March 28, 2017

Revised : April 8, 2017

Accepted : April 10, 2017