

<Review>

동위원소 추적자를 이용한 수문곡선분리 및 정량적 기저유출 산정에 대한 고찰

정혜정 · 이정훈[‡]

이화여자대학교 과학교육과

요 약

최근 기후변화에 의한 강우 패턴 변화는 하천의 유출량 변화에 영향을 미치고 가뭄 및 홍수와 같은 자연재해의 위험성을 더욱 증가시키고 있다. 이러한 강우 패턴 변화는 하천의 유량뿐만 아니라 수질에도 영향을 미쳐 사회적, 경제적, 환경적인 측면에서 많은 문제를 유발하게 된다. 따라서, 안정적인 수자원 확보와 비점오염원 관리를 위해 하천 유량의 대부분을 차지하는 기저 유출을 관리하는 것은 매우 중요하다. 하지만, 기저 유출은 직접 유출과 달리 직접적인 측정이 어려워 그 중요성에도 불구하고 그동안 많은 연구들에서 그 중요성이 간과되어 왔다. 본 논평에서는 기저 유출의 특성을 이해하기 위해 최근에 보편적으로 사용되는 ‘수문곡선분리(hydrograph separation)’에 대하여 설명하고 기존의 그래픽을 이용한 방법과 이를 바탕으로 개발된 모형에 대해 설명하였다. 그리고 동위원소 및 화학성분을 이용한 수문분리법을 2성분계와 3성분계로 나누어 설명하고 국내 연구 사례들을 함께 제시하였다. 또한, 이러한 수문분리법을 실제 수계에 적용할 때 가장 크게 고려해야 할 사항인 단성분(end-member)과 그로 인해 발생하는 수문분리의 불확정성에 대해 설명하였다. 이러한 연구를 통해 실제 수계에서 보존적 화학성분이나 동위원소를 추적자로 이용한 정량적 수문분리시 불확정성을 유발시키는 요인에 대한 추가적인 연구가 필요함을 강조하고자 하였다.

주요어: 기저유출, 수문분리, 동위원소수문분리, 불안정동위원소

Hyejung Jung and Jeonghoon Lee, 2020, A review on quantitative estimation of baseflow and hydrograph separation using isotopes as a tracer. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 4, p. 501-514

ABSTRACT: A change in precipitation patterns due to recent climate change affects on the discharge rate of streams and increases the risk of natural disasters such as drought and flooding. This also affects not only the stream discharge, but also water quality, causing many problems in social, economic, and environmental aspects. In order to secure available water resources and manage nonpoint contaminant sources, it is very important to manage the baseflow, which occupies most of the streamflow. However, unlike direct runoff, the baseflow is difficult to constrain directly, and despite its importance, many studies have overlooked its importance. In this review, we examine “hydrograph separation” to better understand the baseflow, which has been commonly used and discuss the traditional graphical method, models developed based on the method and chemical and isotopic hydrograph separation. In addition, end-member and hydrograph separation uncertainties, which are the most important considerations when applying the chemical and isotopic hydrograph separation to actual water systems, have been described. Through these studies, we would like to emphasize the need for further studies on factors that cause uncertainty in quantitative hydrograph separation using conservative chemical components or isotopes as tracers in actual water systems.

Key words: baseflow recession, hydrograph separation, isotope hydrograph separation, stable water isotopes

(Hyejung Jung and Jeonghoon Lee, Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 03760, Republic of Korea)

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

1. 서 론

최근 기후변화에 의한 강우 패턴 변화는 하천으로의 유출량 변화에 영향을 미치고 있으며, 가뭄 및 홍수와 같은 자연재해의 위험성을 더욱 증가시키고 있다(Ahn *et al.*, 2001; Kumar and Merwade, 2011). 이러한 기후변화로 인한 강우 패턴 변화는 하천의 유량뿐만 아니라 환경 및 생태적인 측면에도 영향을 미칠 수 있다. 그 예로서 강우 패턴의 변화는 오염물질의 배출 특성을 변화시킬 수 있으며, 이로 인한 비점오염원 관리가 기존보다 더욱 어려워질 수 있다(Oh *et al.*, 2012). 따라서, 강수가 하천으로 이동하는 경로를 확인하고 유출 유량 및 오염원의 유입 거동을 분석하는 것은 효율적인 수자원 관리 차원에서 매우 중요하다. 이러한 하천의 특성을 이해하기 위해 보편적으로 이용하는 방법 중에 하나가 수문곡선(hydrograph)을 활용하는 것이다. 수문곡선은 시간의 경과에 따른 하천수의 유량 변화를 표시한 곡선으로 강우의 질량 중심선에서 하천 유량의 최대점까지 도달하는 시간을 지체 시간(lag time)으로 정의하는데, 이는 수계(watershed)의 특성을 규명하는 데에 매우 중요한 요소가 된다. 이러한 수문곡선은 강우가 발생한 직후 단시간에 하천으로 흘러 들어가는 직접유출(direct runoff)과 강우가 토양에 침투된 후에 그 속에서 흐름이 지연되어 대수층을 통해 하천으로 지속적으로 유출되는 기저유출(baseflow)로 나눌 수 있고 이러한 두 요소를 분리하는 것을 수문곡선분리(hydrograph separation)라고 한다. 특히, 기저유출은 하천 유량의 상당한 부분을 차지하고 있으나 직접적인 측정이 어려워 그 중요성에도 불구하고 상대적으로 연구성과가 미흡한 것은 사실이다(Choi *et al.*, 2014; Kang *et al.*, 2019). 더욱이 우리나라처럼 대부분의 강수가 여름철에 집중되어있는 경우, 갈수기 때의 기저유출은 하천 환경에 매우 중요한 요소로 작용하기 때문에 하천의 유역별 기저유출량을 정량적으로 산정하고 그 변동성을 해석하는 것은 유역관리에 있어서 반드시 필요하다(Choi *et al.*, 2014; Han *et al.*, 2016; Kang *et al.*, 2019).

지난 100여 년간 기저유출의 특성을 조사하기 위해 수문학자들은 많은 연구를 수행하였고, 1900년대 초반에 기초 수학의 발전으로 수문분리에 대한 몇 가지 분석기법들이 정립되었다(Hall, 1968). 이러한 초

기의 분석기법들은 대부분이 그래픽적인 방법(graphical method)을 이용하여 수문곡선을 직접유출과 기저유출로 분리하였다. 이 방법은 수문곡선에서 유량이 증가하기 시작하는 점과 변곡점이나 일정한 시간적 경계점을 선으로 연결하여 직접유출과 기저유출을 구분한다. 하지만, 이러한 방법은 수위 상승부가 존재하는 이득하천(gaining stream)에 대해서만 적용이 가능하며 손실하천(losing stream)에서는 적용하기 힘들며 지하수의 유입을 시간 변화에 따라서는 나타낼 수 있으나 공간적 분포에 대한 정보는 제공하지 못한다(Brodie and Hostetler, 2005). 더욱이, 기저유출 분리과정에서 임의로 분석자가 기저 유출량을 정하고 그러한 과정에서 주관이 반영될 가능성이 크기 때문에 신뢰도가 떨어진다(Chernaya, 1964; Hong *et al.*, 2015; Han *et al.*, 2016). 이러한 문제를 보완하고자 1980년대부터 수문곡선 분리법을 이용한 기저유출 분리 모형이 개발되어 활용되어 왔다(Han *et al.*, 2016; Kang *et al.*, 2019). 2000년대 이후에는 기존에 개발된 기저유출 산정 모형들을 비교하고 미세측 유역에서 수문정보를 얻기 위한 연구, 장기 기저유출 변화에 대한 연구 등이 수행되었다(Kang *et al.*, 2019). 하지만 이러한 모형을 이용한 방법 역시 여전히 주관적인 요소가 반영될 수 있음을 여러 연구 결과들에 의해서 밝혀졌다(Sloto and Crouse, 1996; Joo *et al.*, 2007; Shao *et al.*, 2020).

이러한 주관적인 요소를 배제하고 이전의 수문분리 모형을 검증하기 위해 최근에 많이 사용되고 있는 수문분리기법 중에 하나가 ‘동위원소 및 화학성분을 이용한 수문분리법(isotopic and chemical hydrograph separation)’이다. 이 기법은 하천의 물 속에 포함된 비반응(conservative) 화학성분이나 동위원소를 추적자로 이용하여 하천의 직접유출과 기저유출을 분리해내는 방법이다. 이전의 수문분리 모형에 비해 이 기법은 질량보존법칙을 적용하여, 수문곡선을 강우 성분(new water 또는 event water)과 강우 이전 성분(old water 또는 pre-event water)으로 비교적 정확하게 구분할 수 있다(Pinder and Jones, 1969; Bottomley *et al.*, 1984, 1986; Hooper and Shoemaker, 1986; Moore, 1989; Wels *et al.*, 1991; Cho *et al.*, 2003; Klaus and McDonnell, 2013; Kim *et al.*, 2017). 뿐만 아니라, 다양한 추적자를 이용하여 하천에 기여하는 성분을 3가지 이상으로 구분하여 지표수, 토양

수, 층적층지하수, 천부지하수, 심부지하수 등으로 나누어 분리할 수도 있다(Hooper and Shoemaker, 1986; McDonnell *et al.*, 1991; Hinton *et al.*, 1994; Lee and Krothe, 2001). 동위원소 및 화학적 성분을 이용한 수문분리법은 직접유출과 기저유출을 분리하여 기여율을 산정하는 것 외에 수문학적 과정에서 강우 및 지하수의 유출경로를 추정하는데 이용할 수 있다(Sklash and Farvolden, 1979; Sklash *et al.*, 1986; McDonnell *et al.*, 1991; Cho *et al.*, 2003).

지난 50여 년 동안 동위원소 추적자를 활용하여 지하수, 용설, 토양수, 강우 등이 어떠한 경로로 하천까지 이동하는 가에 대해 많은 연구들이 진행되어 왔다(McDonnell *et al.*, 1990; Klaus and McDonnell, 2013). 1970년대의 초기에는 주로 트리튬(^3H) 또는 산소안정동위원소(^{18}O)를 이용한 동위원소 수문분리법이 사용되었지만 1970년대 후반에는 분석법의 발달로 인해 수소안정동위원소(^2H)까지도 사용이 되었다(Hermann *et al.*, 1978). 이러한 불안정동위원소를 추적자로 이용한 '강우 수문곡선 분리(storm hydrograph separation)'는 많은 지역에서 수계의 특성을 이해하는 데 큰 기여를 해왔다. 특히, 과거에는 강우가 발생한 후 모두 지표 밑으로 침투된 후 지하수로 충전되어 하천에 방출되는 1성분계(그림 1a)와 지표수 및 지하수를 고려하는 2성분계(그림 1b)에 대해 연구들이 많이 수행되었지만, 최근 동위원소 수문곡선 분리법(isotopic hydrograph separation)의 발달로 인해 지표수, 지하수 뿐만 아니라 토양에 저장되어 있던 토양수도 함께 고려하는 3성분계(그림 1c)의 중요성이 강조되고 있다. 수문분리를 위한 기존의 그래픽을 이용한 방법은 기저유출이 발생하는 시점이나 경로를 파악하기 어려우며, 결과 해석의 복잡성과 모호성이 내재하여 정확한 기저유출량 파악이 어려운 실정이다. 이에 반해, 동위원소 수문곡선 분리법은 유출경로나 유출량에 대한 직접적인 정보를 제공해 주기 때문에 전 세계적으로 다양한 규모의 유역에서 물 안정동위원소를 중심으로 활발한 연구가 진행 중이다(표 1). 이에 반해 국내에는 소수의 연구사례가 있다.

이 논평에서는 기저유출의 정량적 해석 및 중요성을 강조하기 위해 다양한 수문곡선분리법의 특징에 대하여 논하고, 실제 수계에서 적용할 때 고려해야 할 사항들에 대해서 제시하였다. 이를 위해서 다

음 장에서는 기저유출 및 그래픽적 방법과 이를 바탕으로 개발된 모형에 대해 소개하고, 2장에서는 동위원소 및 화학성분을 이용한 수문분리법을 2성분계와 3성분계로 나누어 설명하고 국내 연구사례들을 함께 제시하였다. 마지막으로 3장에서는 동위원소 및 화학성분을 이용한 수문분리법을 수계에 적용할 때 가장 크게 고려해야 할 사항인 단성분(end-member)과 그로 인해 발생하는 수문분리 결과의 불확정성에 대해 설명하였다. 이러한 연구를 통해 실제 수계에서 보존적 화학성분이나 동위원소를 추적자로 이용한 정량적 수문분리시 불확정성을 유발시키는 요인에 대한 추가적인 연구가 필요함을 강조하고자 한다.

2. 다양한 수문분리 기법을 이용한 기저유출 산정

2.1 그래픽적 방법 및 모형을 이용한 수문분리

기저유출 분리에는 여러 가지 방법들이 존재하지

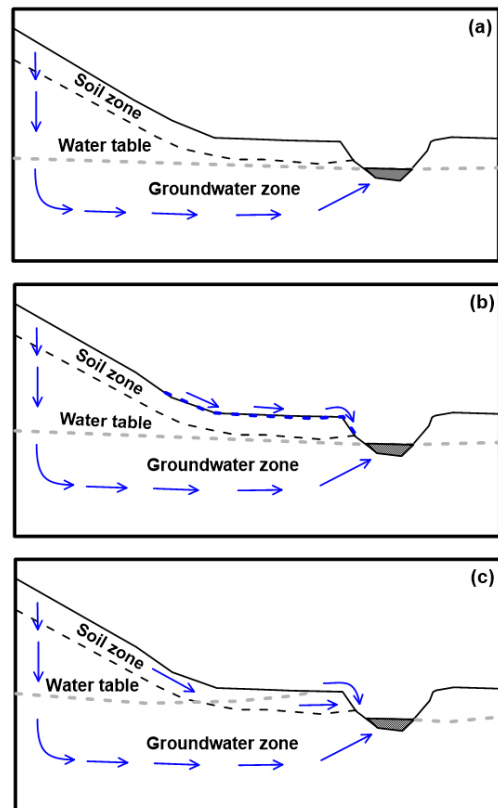


Fig. 1. Source of streamflow from hillslopes: (a) streamflow maintained by groundwater contributions, (b) runoff and groundwater, and (c) runoff, soil water and groundwater.

Table 1. Summary of studies explaining more than two different end-members in hydrograph separation using water isotope tracer.

Area	End-member	Tracer	Reference
1.4 km ²	new water, old water	$\delta^2\text{H}$	Xiao <i>et al.</i> (2020)
4.3 km ²	rainfall, pre-event water	$\delta^{18}\text{O}$	Fischer <i>et al.</i> (2017)
0.246 km ²	Groundwater, soil water, event water	$\delta^2\text{H}$ and EC, $\delta^{18}\text{O}$ and EC	Muñoz-Villers and McDonnell (2012)
8.8 km ²	Event water, Pre-event water	$\delta^2\text{H}$ or $\delta^{18}\text{O}$	Lyon <i>et al.</i> (2008)
203-2,050 km ²	Snowmelt, baseflow (groundwater + surface water)	$\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$	St. Amour <i>et al.</i> (2005)
1.2 km ²	old water, snowmelt	$\delta^{18}\text{O}$	Huth <i>et al.</i> (2004)
1.35 km ²	Throughfall, groundwater, soil water	$\delta^{18}\text{O}$, Cl^-	McHale <i>et al.</i> (2002)
9.98 km ²	Event water, soil water, groundwater	$\delta^2\text{H}$, Cl^-	Ogunkoya and Jenkins (1993)

만, 국내에서는 수문곡선을 단순히 빠른(fast) 요소와 느린(slow) 요소, 이 두 가지만으로 분리하는 그래픽한 방법(graphical method)이 주로 사용되었다. 대표적인 방법으로는 주 지하수감수곡선법, 수평직선분리법, N-Day 법, 수정 N-day 법, 가변경사법 등이 있다. 주 지하수감수곡선법은 과거 수문곡선으로부터 수문곡선의 감수곡선들을 중첩시켜 얻은 유역의 대표 지하수 감수곡선으로 직접 기저 유출을 분리하는 방법이며, 수평직선분리법은 지표면 유출이 발생하는 지점(상승부 지점)과 감수곡선이 만나는 수평선을 그어 직접유출과 기저유출을 분리하는 방법이다(Linsley *et al.*, 1975). 그리고 N-day법은 침투유량이 발생한 시점부터 N일 후의 감수곡선에 해당하는 지점을 선택하여 직접유출이 발생하는 상승부 지점과 연결하여 직접유출과 기저유출을 분리하는 방법이다(Linsley *et al.*, 1975). 수정 N-day법은 고정기저시간법(fixed base method)라고도 불리며 특정 강우가 발생하기 바로 전의 지하수 감수곡선은 강우가 계속되더라도 어느 기간 동안은 감소하게 되는 이러한 효과를 고려하기 위한 직접유출과 기저유출을 분리하는 방법이다(Choi *et al.*, 2014). 마지막으로, 가변경사법은 감수곡선에서 경사가 급변하는 지점을 결정하여 그 지점부터 하강부 곡선의 변곡점 발생 시간까지 거꾸로 보간하여 침투 발생 시의 기저유출과 직선으로 연결하여 직접 기저유출을 분리하는 방법이다(Choi *et al.*, 2014).

그림 2a의 경우, 강우가 발생하였을 때 N-day법과 주 지하수감수곡선(groundwater recession curve)을 이용한 수문분리의 결과를 나타낸 것으로 N-day법의 경우 침투유량이 발생하는 A점에서부터 N일 후의 유량을 표시하는 C점을 결정한 후, AC를 직선으로 연결시켜 직접유출(runoff)과 기저유출(baseflow)을 분리하며, N은 다음식으로 결정한다(Linsley *et al.*, 1975).

$$N = 0.827A_1^{0.2} \quad (1)$$

여기서, N : 일 수, A_1 : 유역의 면적(km²)이다. 주 지하수감수곡선법의 경우 앞에서 설명한 것처럼 해당 유역의 감수특성을 파악하여 (a)와 같이 지하수 감수곡선을 정의하고 유역 내의 기저유출을 분리한다.

앞서 1장에서 언급한 그래픽한 방법의 단점인 주관적인 요소를 최소화하고자 RORA (Rorabaugh, 1964), RECESS (Anderson and Burt, 1980), BFI (Wahl and Wahl, 1995), PART (Rutledge, 1998), HYSEP (Sloto and Crouse, 1996), BFLOW (Lyne and Hollick, 1979; Arnold and Allen, 1999), WHAT (Web based Hydrograph Analysis Tool; Lim *et al.*, 2005) 등과 같은 다양한 기저유출 분리 모형들이 개발되어 활용되고 있다(Barlow *et al.*, 2015). 이러한 모형들은 장기 기저유출 뿐만 아니라 미세측 유역에 대한 기저유출 분석까지 가능하게 한다는 장점이 있지만, 모

형에 따라 기저유출 산정방법이 저마다 다르고, 같은 연구지역이라도 다소 다른 경향의 기저유출 값이 산정이 될 수 있다는 단점을 가지고 있다(Chen and Teegavarapu, 2020). 따라서 이러한 모형 이용 시, 연구지역의 대수층 특성 및 계절적 변동성에 대한 유출 특성을 고려하여 기저유출 값을 산정할 필요가 있다.

3. 동위원소 및 화학성분을 이용한 수문분리

동위원소 수문분리법(isotopic hydrograph separation)은 삼중수소(^3H)을 추적자로 이용한 것으로 Hubert *et al.* (1969)에 의해 처음 제안되었다(Klaus *et al.*, 2013). 이후 많은 초기 연구들이 수문분리 추적자로 삼중수소를 사용했지만, 1970년대 초 이후 대부분의 연구에서는 ^{18}O 또는 ^2H 를 추적자로 사용했다(Mook *et al.*, 1974; Fritz *et al.*, 1976; Sklash *et al.*, 1976; Hermann *et al.*, 1978; Sklash and Farvolden, 1979; Herrmann and Stichler, 1980). 최근에는 레

이저를 기반으로 한 레이저분광법(laser-spectroscopy)이 개발되어 불안정동위원소 분석이 용이해지면서, 많은 지역에서 고해상도(high resolution) 동위원소 수문분리 연구를 수행하고 있다(Jung *et al.*, 2013). 또한 불안정동위원소 외에도 질산염안정동위원소를 붕소, 스트론튬, 황, 탄소, 리튬, 우라늄동위원소와 함께 이용하여 오염원의 기여도를 산정하는 연구들이 꾸준히 진행되고 있다(Kendall *et al.*, 2007; Jung *et al.*, 2020). 이러한 다양한 동위원소 추적자를 이용한 수문분리의 결과, 하천에 기저유출 기여도가 직접 유출보다 높음을 여러 연구들을 통해서 알 수 있었다(Durka *et al.*, 1994; Taylor *et al.*, 2001; Ohte *et al.*, 2004; Barnes *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2017).

동위원소 및 화학성분을 이용한 수문분리법은 하천에 기여하는 성분의 순수한 동위원소 및 화학 조성을 단성분으로 규정 또는 가정하고 이들이 하천에 어떤 비율로 혼합되었는지를 계산하여 수문곡선을 분리하는 것이다(Lee, 2017). 동위원소를 이용한 수문분리법 중에 불안정동위원소를 추적자로 이용한 연구는 다음과 같은 장점이 있다(Kendall and McDonnell, 1998; Klaus and McDonnell, 2013; Kim *et al.*, 2017; Lee, 2017).

- 1) 물 안정동위원소는 물 분자(H_2O) 그 자체가 추적자가 된다.
- 2) 강우에 의해 자연적으로 추적자를 투입할 수 있다.
- 3) 상온에서는 암석 또는 광물 속의 물과 반응하지 않아 비반응(conservative)추적자이다. 200°C 이상에서는 암석과 물이 반응하여 물의 안정동위원소 값을 변화시킬 수 있다.
- 4) 오직 혼합(mixing)과 증발만이 동위원소비(ratio)를 변화시킬 수 있다.

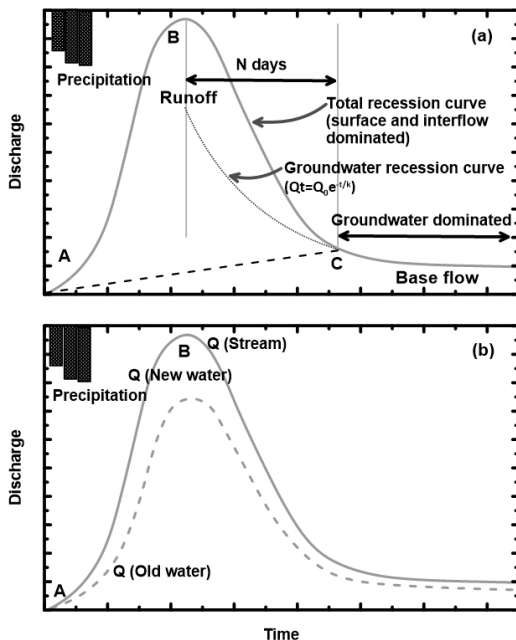


Fig. 2. Compare to result of hydrograph separation using graphic method and isotope method. (a) Hydrograph separation results based on a two-component separation using pre-event baseflow (groundwater) and event water (rain water) as end-member (modified Linsley and Franzini, 1964). (b) Different results are gained from the use of ^{18}O and ^2H that are different to the known pre-event water fraction (baseline separation).

따라서 불안정동위원소는 물의 이동을 추적하는데 이상적인 추적자로 여겨지며 이러한 특성을 활용하여 질량보존방정식(mass balance equation)을 각 계(하천수, 지하수, 강우 등)에 적용하면 각각의 성분이 하천에 어떻게, 얼마만큼 기여하는 가를 정량적으로 계산할 수 있다. 그림 3은 단성분의 조성(강우: RA, 지하수: GW, 토양수: SW, 천부 지하수: SGW, 심부 지하수: DGW)을 이용한 하천수의 기여율을 기하학적으로 계산하는 모식도이다. 그림 3a의 경우 2

성분계로서 추적자로 산소안정동위원소를 이용하여 두 개의 단성분인 강우와 지하수가 하천수(Stream water)에 기여하는 바를 계산할 수 있다. 그림 3b의 경우 3성분계로서 하천수 샘플이 단성분(강우, 지하수, 토양수)의 조성 경계 안에 분포함을 알 수 있다. 따라서 수소와 산소안정동위원소 조성을 이용하여 단성분이 하천수에 기여하는 바를 결정할 수 있다. 마지막으로 그림 3c 경우, 4성분계로서 수소와 산소안정동위원소 조성, 염소이온의 농도, 이 3가지 추적자를 이용하면 네 가지 단성분(강우, 토양수, 천부 지하수, 심부 지하수)이 각각 하천에 얼마나 기여하는지를 결정할 수 있다. 이처럼 물 자체를 직접적인 추적자로 활용한 물안정동위원소 수문분리법은 기저유출 발생 시점, 기저유출과 강수와의 관계, 기저유출 경로 등에 관한 정보를 제공할 수 있으며, 기저유출량을 비교적 정확하게 산정할 수 있다는 장점이 있다.

3.1 2성분계 수문분리

Sklash and Farvolden (1979)은 다음과 같이 강수에 의한 직접유출(new water)과 지하수에 의한 기저유출(old water) 성분을 추적자의 조성이나 농도에 대한 질량보존방정식을 이용하여 직접유출이 하천에 기여하는 바를 아래와 같이 구하였다.

$$Q_t = Q_r + Q_g \tag{2}$$

$$C_t Q_t = C_r Q_r + C_g Q_g \tag{3}$$

$$x_r = \frac{C_t - C_g}{C_r - C_g} \tag{4}$$

Q_r 는 하천에서 측정된 유량이며, Q_r 과 Q_g 는 각각 직접유출과 기저유출이 하천에 기여하는 양이다. C 는 추적자의 농도 또는 동위원소 비율이며, x_r 은 직접유출이 하천에 기여하는 비율이다($x_r = Q_r / Q_t$). 그림 2b는 강우가 발생하였을 때 동위원소를 이용한 개념적인 수문곡선분리 결과를 나타내었다. 이를 통해 강우가 발생하여 하천의 유량이 증가하기 시작하면 이에 기여하는 성분이 직접유출에 의한 것인지 기저유출에 의한 것인지를 알 수 있다. 이러한 질량보존방정식을 이용하여 이성분계 수문분리를 하기 위해서는 다음의 가정이 필요하다(Sklash and Farvolden, 1979).

- 1) 강우와 강우사상 전의 물의 추적자 농도 또는 동위원소 비율이 뚜렷하게 차이가 나야한다.
- 2) 강우와 강우사상 전의 물의 추적자 농도 또는 동위원소 비율은 일정한 값을 가져야하며 시간과 공간에 대해서 편차가 없어야 한다.
- 3) 통기대수(vadose water)의 추적자 농도 또는 동위원소 비율은 지하수와 같거나 통기대수가 하천에 기여하는 바를 무시할 수 있어야 한다.
- 4) 유출이 되는 동안 지표저류수(surface storage)가 하천에 기여하는 바는 최소가 되어야 한다.

Cho *et al.* (2003)의 연구에 의하면 위의 4가지 가정 외에도 강우사상 전에 하천수가 전적으로 지하수에 의존하는 기저유출이라는 추가적인 가정이 성립될 때, 2성분계 수문분리가 보다 명확히 이뤄짐을 알 수 있었다. 이러한 5가지 전제조건을 기본으로 산소

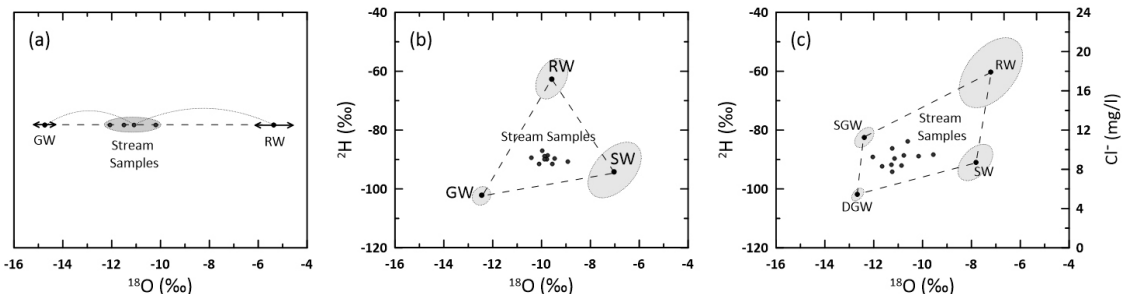


Fig. 3. Conceptual summary related to the geometric calculation of hydrograph separation using chemical and isotope composition of end-member (GW: Groundwater, RW: Rainwater, SW: Soil water, SGW: Shallow groundwater, DGW: Deep groundwater). (a) two-component separation, (b) three-component separation, and (c) four-component separation.

동위원소($\delta^{18}\text{O}$)를 이용한 청도지역의 도로천 소유역에서의 2성분계 유출수문곡선분리를 수행한 결과, 기저유출이 전체 유출량의 20%를 차지하고 나머지 80%는 강우 성분이 차지하고 있음을 알 수 있었다. 이 연구에서는 강우가 하천에 기여하는 바가 기저유출 보다 크게 산정되었지만 이후 대부분의 연구에서는 기저유출의 영향이 더 큰 것으로 나타났다. Cho *et al.* (2005)의 연구에서는 염소이온(Cl)을 추적자로 이용하여 대전 지역의 유성천과 화산천 소유역에서 강우에 의한 기저유출량을 산정하였다. 그 결과, 총 강우량에 대해 강우와 기저유출이 차지하는 비율이 집수구역이 큰 곳(하류)에서 각각 14.1%, 11.8%로 나타났으며, 집수구역이 작은 곳(상류)에서는 13.3%, 32.0%로 나타났다. 이러한 연구결과는 강우와 하천수의 염소이온(Cl) 농도와 유출량만을 이용하여 시료 채취 시기만 잘 선택한다면 강우 성분의 유출량과 기저유출량을 분리할 수 있음을 보여 주었다.

Cho *et al.* (2007)의 연구에서는 산소동위원소($\delta^{18}\text{O}$)와 염소이온(Cl)을 추적자로 이용하여 대전 지역의 화산천 소유역에서 발생한 두 연속 강우에 대한 유출수문곡선을 새로운 물(new water)과 기저유출(baseflow, old water)로 구분하였다. 그 결과, 선행강우와 후행강우의 기저유출률은 산소동위원소($\delta^{18}\text{O}$)를 이용하였을 때 각각 82.3%와 93.2%, 염소이온(Cl)을 이용하였을 때는 70.8%와 64.9%로 각각 나타났다. 더불어 두 연속 강우 기간 전체에 대한 기저유출과 첫 번째, 두 번째 강우 성분의 기여율은 산소동위원소($\delta^{18}\text{O}$)를 추적자로 이용하였을 때 각각 86.9%, 10.5%, 2.6%, 염소이온(Cl)을 추적자로 이용하였을 때 68.3%, 23.5%, 8.2%로 나타났다. 이 연구는 기존에 사용되었던 2성분계를 바탕으로 변형된 새로운 모델을 제시하여 현장에서 적용해 봄으로서 복합강우에 대해 각 강우에 대한 유출성분들이 중첩되거나 지연(lag)되는 효과를 현실성 있게 표현하였다는 점에서 의미가 있다. 이러한 산소동위원소($\delta^{18}\text{O}$)를 이용한 이전의 연구들은 강우의 산소동위원소 조성이 시간과 공간에 따라 변할 가능성이 있기 때문에, 대부분의 소규모 집수면적(10 km² 미만)에서 수행되었다.

하지만 이러한 한계에도 불구하고, Cho *et al.* (2008)의 연구에서는 충북 보은군의 약 600 km²에 해당하

는 넓은 유역에서 산소동위원소($\delta^{18}\text{O}$)를 이용하여 지하수 함양량을 산정하였다. 그 결과, 보은군의 평균 지하수 함양률은 17%로 산정되었으며, 산소동위원소 추적자를 이용한 수문분리가 큰 규모에서도 가능함을 확인할 수 있었다. 이후에, Kim *et al.* (2015a)과 Kim *et al.* (2017) 연구에서는 화강암 기반의 도립천에서 물 안정동위원소를 이용해 강우 성분(new water)과 기저유출(pre-event water)성분을 분리하였다. 그 결과 전체 유출 유량의 각각 71.3%와 73-74%가 기저유출량으로 산정되었다. 이처럼 상대적으로 투수율이 낮은 화강암 기반의 하천에서 조차 기저유출의 기여도가 큰 것으로 보아 하천의 유량 변동성에 지하수가 미치는 영향이 상당하다는 것을 알 수 있다.

3.2 3성분계 이상의 수문분리

카르스트 지형과 같이 토양수를 무시할 수 없거나 유출과정에서 지표에 물이 오랜 기간 머무르는 경우 2성분계 수문분리 모델에 한계가 있음이 여러 연구결과들에 의해 밝혀졌다(Lakey and Krothe, 1996; Clark and Fritz, 1997; Lee and Krothe, 2001; Lee *et al.*, 2006; Lee, 2017). 따라서 하천에 기여하는 성분이 3성분계 이상일 경우 보다 많은 추적자를 이용하여 3성분계 이상의 수문분리를 수행하여야 한다. 수문 성분이 3개이고 추적자가 2개일 경우 3성분계 수문곡선분리는 다음과 같은 관계식에 의해 정립된다. 식 (5)은 이전에 2성분계에서 설명한 바와 같이 각 부분의 유량 합계를 전체 유량으로 나타낸 식이다. 식 (6)과 식 (7)은 각각 화학적 추적자 농도와 동위원소 추적자 조성에 각 요소의 하천에 기여하는 비율을 곱하여 나타낸 식이다.

$$Q_t = Q_r + Q_g + Q_s \tag{5}$$

$$C_t = C_r \frac{Q_r}{Q_t} + C_g \frac{Q_g}{Q_t} + C_s \frac{Q_s}{Q_t} \tag{6}$$

$$I_t = I_r \frac{Q_r}{Q_t} + I_g \frac{Q_g}{Q_t} + I_s \frac{Q_s}{Q_t} \tag{7}$$

여기에서 Q는 각 성분의 유량을 나타내며, C는 화학적 추적자의 농도를 나타내며, I는 동위원소 조성을 나타낸다. r, g, s 각 성분을 나타내는 것으로 강

우, 지하수, 토양수에 대해 표현하였다. 3성분계의 경우, 다음 식 (8), (9), (10)과 같이 각 성분의 기여율로 구성된 행렬 X 를 계산할 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ C_r & C_g & C_s \\ I_r & I_g & I_s \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} \frac{Q_r}{Q_t} \\ \frac{Q_g}{Q_t} \\ \frac{Q_s}{Q_t} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ C_t \\ I_t \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$AX = B \quad (9)$$

$$X = A^{-1}B \quad (10)$$

이러한 행렬을 이용한 방법은 4성분계 이상의 경우에도 성분 수를 증가시켜 동일한 방법으로 기여율을 구할 수 있다. 국내에서는 Lee *et al.* (2006)에 의해 충남 예산의 소유역에서 Si, Mg, $\delta^{18}\text{O}$ 와 같은 자연 추적자의 이용한 3성분계 수문분리가 이뤄졌다. 그 결과 6월에는 강우(44~47%), 지하수(50~55%), 토양수(1~3%) 3성분이 서로 잘 구분되었지만, 7월 여름철 우기의 경우 지하수와 강우의 산소 동위원소 조성이 잘 구분되지 않아서 $\delta^{18}\text{O}$ 를 추적자로서 이용할 수 없었다. 이는 여름 강우 동위원소의 우량효과 때문인 것으로 나타났다.

3.3 단성분 조성 및 불확정성

앞서 2절에서 동위원소 수문분리를 위한 두 번째 가정에서 단성분들의 동위원소 조성에 시간적 또는 공간적인 편차가 없어야 한다고 규정하였다. 하지만 실제 동위원소는 분화(fractionation)를 통해서 시공간적 변화에 따라 그 값이 변화할 수 있다. 이러한 이유로 단성분 조성이 변화할 경우 수문분리에서 매년 다른 결과 값이 나오고 불확정성이 증가하기 때문에 어떠한 단성분의 조성을 선택할 것인지는 지속적인 논쟁의 대상이다(Klaus and McDonnell, 2013). 수문분리시 일반적인 단성분으로 사용되는 강우, 융설, 토양수는 각각 다음과 같은 영향에 의해 불안정 동위원소는 시공간적 오차가 유발된다.

먼저, 강우의 동위원소 조성의 경우 고도효과(altitude effect), 우량효과(amount effect), 계절효과(seasonal effect), 온도효과(temperature effect) 등에 의해 동위원소 분화가 발생하기 때문에 강우 동위원소 조성

의 평균을 이용하여 수문분리를 수행하게 되면 계통 오차를 발생하게 되고, 2성분계의 계통오차는 불확정의 원리(propagation of error)를 이용하여 결정할 수 있다(Ribolzi *et al.*, 1996; Genereux, 1998; Rice and Hornberger, 1998). 강수의 동위원소 분화로 인한 새로운 물의 불확정성은 다음 식 (11)과 같다 (Lee *et al.*, 2014).

$$\Delta x_r = -\frac{x_r}{C_r - C_g} \Delta C_r \quad (11)$$

Δx_r 은 새로운 물이 하천에 기여할 때의 계통오차이며, C_r 과 C_g 는 각각 강우와 지하수의 화학적 또는 동위원소 추적자 농도이며, ΔC_r 은 C_r 의 오차이다. ΔC_r 은 연구기간 동안 새로운 물로 가정하는 강우의 화학적 추적자 또는 안정동위원소 조성이 변화하는 정도이다. 우리나라 여름철 몬순 기간의 경우 빈번한 강우로 인해 각기 다른 동위원소 조성을 가진 강우 사상이 여러 번 반복되고 이에 동위원소 조성의 혼합이 발생하게 됨으로서 ΔC_r 값이 커지고 불확정성 또한 증가한다. 따라서 우리나라의 경우 계절적으로 갈수기에서 풍수기로 넘어가는 시기에 기저유출과 강우의 동위원소 조성이 뚜렷이 구분되기 때문에 유출수문곡선으로부터 기저유출성분을 분리하는 것이 유리하다(Cho *et al.*, 2007). 또한 식 (11)에 의하면 새로운 물이 하천에 미치는 영향을 고려하였을 때 발생된 오차는 새로운 물과 오래된 물의 추적자 농도 또는 안정동위원소 값의 차이에 반비례하며 새로운 물이 하천에 기여하는 그 값 자체와 새로운 물과 오차의 값, 즉 시간에 따른 새로운 물의 추적자 농도 또는 안정동위원소 값에 비례한다.

융설의 동위원소 조성의 시공간적 변동성은 일반적으로 용융(melt), 재동결(refreezing) 및 스노우팩(snow pack)내에서의 선택적 흐름(preferential flow), 적설량, 승화나 용융 시에 눈과 공기 또는 주변 물과 동위원소 교환작용에 의한 분별작용(fractionation), 지역적 특성 등 여러 가지 물리적 프로세스의 상호작용과 관련이 있다(Schmieder *et al.*, 2016). Feng *et al.* (2002)의 연구에서는 눈이 녹는 과정에서 융설과 동위원소 교환에 의한 분별작용을 고려하였을 때와 고려하지 않았을 때의 수문분리 결과가 10% 정

도의 오차가 발생한다는 것을 보고하였다. Lee *et al.* (2014)에서는 이러한 용설의 동위원소 변동에 의한 오차 및 그 중요성에 대하여 논의하였다. 더불어 토양수의 경우 유입되는 강우의 성분과 증발, 식물에 의한 흡수(water uptake), 다공질 매체(porous media)내에서의 선택적 흐름(preferential flow), 주변에 다른 source를 가진 토양수와 혼합과 같은 원인으로 동위원소 변동성이 커진다(Clark and Fritz, 1997). Ogunkoya and Jenkins (1993)에서는 고정된 값의 단성분 조성과 변화하는 단성분 조성을 이용하여 수문분리를 하였을 때의 결과를 비교하여 제시하였다. 그 결과 단성분 조성이 고정되어 있을 때에는 토양수(soil water)와 지하수(groundwater)가 각각 28%, 53%였지만, 시간에 따라 변화하는 단성분 조성을 수문분리에 이용한 결과, 토양수는 19%, 지하수는 66%로 산정되었다. Rodhe (1981)의 연구에서는 처음으로 동위원소를 이용한 수문분리에서 불확정성을 정량적으로 평가하였다. 이 연구에 따르면 지하수의 산소동위원소 값은 $\pm 0.5\%$, 용설의 수소동위원소 값이 $\pm 1\%$ 정도의 오차를 보였으며, 하천에 대한 지하수의 기여율은 결과적으로 $\pm 15\%$ 편차를 보임을 결과로 제시하였다. Hooper and Shoemaker (1986)와 McDonnell *et al.* (1991)의 2성분계 수문분리 결과에서는 각각 $\pm 10\%$, $\pm 5\%$ 의 불확정성을 보여주었다.

질산염안정동위원소의 경우 오염물질마다 각기 다른 동위원소비를 가지고 있기 때문에, 오염원의 기원을 판별할 수 있으며, 수문분리를 이용하여 오염원이 어떠한 경로로 얼마나 유출되었는지를 판별할 수 있다. 하지만 질산염안정동위원소 또한 환원 환경에서 탈질작용(denitrification)의 가능성이 있고 잔류하는 질산염의 동위원소비가 증가하게 되어 물안정동위원소와 마찬가지로 단성분인 오염원의 조성이 변화하여 기여율의 불확정성도 증가하게 된다. 이러한 동위원소의 시·공간적 변동은 규모가 큰 유역에서 뿐만 아니라 소유역을 대상으로 한 수문분리 연구 시에도 주의해야 할 필요가 있다. 소유역의 경우 유량 자체가 적기 때문에 수계 변동성이 외부, 내부적 요인에 의해 영향을 쉽게 받게 되고 전체 유역을 대표할 만한 단성분의 동위원소 조성을 설정하는 것에 어려움이 있다. Penna and van Meerveld (2019) 연구에서는 10 km^2 이하의 유역을 연구지역으로 한 148개의 연구결과들을 바탕으로 공간에 따

른 동위원소 변동성이 수문분리 결과에 어떠한 영향을 줄 것인지를 분석하였다. 그 결과, 샘플링 장소의 개수가 적을수록 수문분리 결과의 오차가 커지는 것을 알 수가 있었다. 따라서 소유역에서 이러한 불확정성을 줄이고 유역의 동위원소 조성을 대표할 수 있는 단성분을 설정하기 위해서는 시·공간적 이질성(temporal-spatial heterogeneity)을 고려해 되도록 많은 장소에서 주기적인 샘플링을 통해 안정적인 단성분 조성을 수문분리에 사용해야 함을 시사하고 있다.

이러한 불확정성은 동위원소뿐만 아니라 보존적 화학적 성분을 이용한 수문분리에서도 발생할 수 있다. 대표적으로 농업용 비료와 제설용 염화칼슘(CaCl_2)에 많이 포함되어있는 염소이온(Cl^-)의 경우, 증발로 인해 토양에 농축되거나 강우 사상 발생 시 주변 하천에 인위적으로 공급될 수 있기 때문에 기저유출량 산정 시 불확정성을 높인다(Herczeg and Edmunds, 2001; Cho *et al.*, 2005, 2007; Lee *et al.*, 2006). 따라서 정확한 기저유출 성분을 분리하기 위해서는 사전 유역조사를 통해 보존적 화학성분의 인위적 공급과 농축 가능성을 조사하고, 이러한 시기 및 환경을 피해서 현장연구를 수행할 필요가 있다(Cho *et al.*, 2007).

4. 요약 및 향후 연구

최근 기후변화의 영향으로 계절에 따른 강우 강도의 편차가 커짐에 따라 하천의 변동성이 증가하였고 이러한 변화는 하천의 유량뿐만 아니라 환경적인 측면에서도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 안정적인 수자원 확보와 비점오염원 관리를 위해 하천 유량의 대부분은 차지하고 있는 기저유출을 관리하는 것이 매우 중요하다. 지난 100여 년 동안 기저유출의 특성에 대한 많은 연구들이 수행되었고, 초기에는 비교적 간단한 그래픽을 이용한 수문분리 방법이 많이 사용되었다. 하지만 이러한 방법은 이득하천에 대해서만 적용이 가능하며 분석자의 주관이 반영될 가능성이 있기 때문에 신뢰도가 떨어진다. 이를 보완하고자 다양한 알고리즘을 가진 기저유출 분리 모형이 개발되어 활용되고 있다. 이러한 모형을 통해서 장기 기저유출 뿐만 아니라 미세측 유역에 대한 기저유출 분석까지 가능하게 되었지만, 모형에 따라 기저유출 산정과정이 저마다 달라서 동일한 자료를 이

용하더라도 각기 다른 기저유출량이 산정되는 경우가 발생하였다.

이러한 주관적인 요소를 배제하고 이전의 수문분리 모형을 검증하기 위해 최근에 많이 사용되고 있는 수문분리기법 중에 하나가 물 속의 보존적 화학 성분이나 동위원소들을 추적자로 이용하여 직접유출과 기저유출을 분리해내는 ‘동위원소 및 화학성분을 이용한 수문분리’이다. 특히, 물 안정동위원소를 추적자로 이용할 경우 물 분자 자체를 추적자로 이용할 수 있으며, 강우에 의해 자연적으로 투입할 수 있다는 점, 상온에서 주변 다공질 매체(porous media)와 반응을 하지 않는 점, 오직 혼합과 증발만으로 동위원소비를 변화시킬 수 있다는 점에서 이상적인 추적자로 여러 분야에서 활용되어왔다. 하지만 물 동위원소의 경우 단기간 강우 사상이 반복되어 발생할 경우, 각 성분의 동위원소 조성이 뚜렷하게 구분이 되지 않으며, 그로 인해 기저유출량 산정에 어려움이 있음을 이전 연구결과들을 통해 알 수 있었다. 또한 이러한 강우 동위원소의 우량효과 외에도 증발이나 동위원소 교환반응 등 여러 가지 원인으로 인해 단성분(강우, 용설, 토양수) 값이 시·공간에서 따라 변화할 수 있기 때문에 수문분리시 전체 유역을 대표할 단성분으로 어떠한 값을 선택할지는 지속적인 논쟁의 대상이다. 질산염안정동위원소의 경우 오염원마다 각기 다른 동위원소 조성을 가지고 있기 때문에 수문분리를 이용하면 하천에 어떠한 오염원이 어떠한 경로로 얼마나 유출되었는지를 정량적으로 계산할 수 있다. 하지만 질산염안정동위원소 또한 환원 환경에서 탈질작용(denitrification)의 가능성이 있고 단성분인 오염원의 동위원소 조성이 변화하여 기여율의 불확정성이 증가하게 된다. 또한, 대규모 유역에서 뿐만 아니라 소유역의 경우에서도 단성분 조성은 시·공간적으로 변동성을 가질 수 있다. 소유역의 경우 유량 자체가 적기 때문에 수계 변동성이 커지게 되고 전체 유역을 대표할 만한 단성분의 동위원소 조성을 설정하는데 어려움이 있다. 따라서 소유역에서 이러한 불확정성을 줄이고 유역의 동위원소 값을 대표할 수 있는 단성분을 설정하기 위해서는 시·공간적 이질성(Temporal-Spatial heterogeneity)을 고려해 되도록 많은 장소에서 주기적인 샘플링을 통해 안정적인 단성분을 수문분리에 이용해야 할 필요가 있다. 이러한 불확정성은 동위원

소 뿐만 아니라 보존적 화학적 성분을 이용한 수문분리에서도 발생할 수 있다. 대표적으로 염소이온의 경우, 증발에 의해 토양에 농축되거나, 강우 사상이 발생할 경우 주변 하천에 인위적으로 공급되어 기저유출량 산정에 불확정성을 높인다. 따라서 정확한 기저유출 성분을 분리하기 위해서는 사전 유역조사를 통해 보존적 화학성분의 인위적 공급과 농축 가능성을 조사하고, 이러한 시기 및 환경을 피해서 현장연구를 수행할 필요가 있다.

최근에는 IsoSource Mixing Model (ISSMM)이 도입되어 보다 편리하게 동위원소 및 화학성분을 이용한 수문분리에서 각 성분의 기여율을 산출할 수 있다. 하지만 이러한 선형 방정식을 바탕으로 계산한 기여율의 경우 안정동위원소 조성의 평균값을 사용하다 보니 동위원소 분별작용을 제대로 반영하지 못한다는 단점이 있다(Phillips, 2001). 이러한 단점을 보완하고자 최근에는 동위원소 혼합모델에 베이저안 통계적 방법을 적용하여 베이저안 동위원소 혼합 모델(Bayesian stable isotope mixing models)을 사용하여 각 성분의 기여율을 해석하는 연구가 주목받고 있다(Parnell *et al.*, 2010). 이 모델은 R기반의 SIAR (Stable Isotope Analysis in R) 패키지로 Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 알고리즘을 발전시켜 베이저안 추정값과 이에 관련된 표준오차를 계산하여 기여율의 확률 추정값을 생성한다(Parnell *et al.*, 2010). 따라서 동위원소 분별작용에서 기인한 불확정성을 반영하여 수문분리 및 오염원 추적시 성분 수에 관계없이 신뢰성있는 추정값을 얻을 수 있다(Markovich *et al.*, 2019). 하지만 국내에서는 아직 이러한 방법을 적용한 연구사례가 많지 않다. 대표적으로, Kim *et al.* (2015b)에 의해 주성분 분석과 베이저안 동위원소 혼합모델을 이용한 지하수의 질산염 오염원을 정량적인 평가한 연구가 있었으며, Nam *et al.* (2019)에 의해 베이저안 혼합모델을 이용하여 하천에서의 질소 오염원 기여율을 정량화한 연구가 있다. 이처럼 동위원소 및 화학성분을 이용한 수문분리법에 적용할 수 있는 다양한 통계적 프로그램이 개발되고 있으며 이러한 최신 기법을 국내 수계에도 적용하여 다양한 변수들과 수문분리 결과의 관련성을 분석하여 불확정성에 영향을 주는 요인들을 분석할 필요가 있다. 더불어 우리나라 환경 특성에 맞는 수문 성분 간의 상호작용 및 수계의 주

요 오염원을 규명하기 위한 추가적인 연구가 다양한 환경에서 이뤄질 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원으로 이루어졌습니다(서남극 스웨이트 빙하 주변 해수 및 용빙수의 동위원소 진화과정 분석 기반 빙저수 이동과정 규명, KIMST20190361).

REFERENCES

- Ahn, J.H., Yoo, C.S. and Yoon, Y.N., 2001, An Analysis of Hydrologic Changes in Daechung Dam Basin using GCM Simulation Results due to Global Warming. *Journal of the Korea Water Resources Association*, 34, 335-345 (in Korean with English abstract).
- Anderson, M.G. and Burt, T.P., 1980, Interpretation of recession flow. *Journal of Hydrology*, 46, 89-101 (in Korean with English abstract).
- Arnold, J.G. and Allen, P.M., 1999, Automated Methods for Estimating Baseflow and Ground Water Recharge from Streamflow Records. *Journal of the American Water Resources Association*, 35, 411-424.
- Barlow, P.M., Cunningham, W.L., Zhai, T. and Gray, M., 2015, U.S. Geological Survey Groundwater Toolbox, a graphical and mapping interface for analysis of hydrologic data (version 1.0)-User guide for estimation of base flow, runoff, and groundwater recharge from streamflow data: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. B10, 27 p.
- Barnes, R.T., Raymond, P.A. and Casciotti, K.L., 2008, Dual isotope analyses indicate efficient processing of atmospheric nitrate by forested watersheds in the north-eastern U.S. *Biogeochemistry*, 90, 15-27.
- Bottomley, D.J., Craig, D. and Johnston, L.M., 1984, Neutralization of acid runoff by groundwater discharge to streams in Canadian Precambrian Shield watersheds. *Journal of Hydrology*, 75, 1-26.
- Bottomley, D.J., Craig, D. and Johnston, L.M., 1986, Oxygen-18 studies of snowmelt runoff in a small Precambrian shield watershed: implications for streamwater acidification in acid-sensitive terrain. *Journal of Hydrology*, 88, 213-234.
- Brodie, R.S. and Hostetler, S., 2005, A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. *Managing Connected Water Resources Project*, Bureau of Rural Sciences, ABARE, The Australian National University.
- Chen, H. and Teegavarapu, R.S.V., 2020, Comparative Analysis of Four Baseflow Separation Methods in the South Atlantic-Gulf Region of the U.S. *Water*, 12, 120.
- Chernaya, T.M., 1964, Comparative evaluation of graphical methods of separation of groundwater components of streamflow hydrographs. *SoviSoviet Hydrology*, 5, 454-465.
- Cho, S.-H., Cho, M.J., Moon, S.-H., Kim, Y. and Lee, K.-S., 2008, Estimation of groundwater recharge in a district-scale area using O tracer. *Journal of Geological Society of Korea*, 44, 331-340 (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 Geological Society of Korea*, 43, 253-263 (in Korean with English abstract).
- 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 with English abstract).
- 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 the Geological Society of Korea*, 39, 509-518 (in Korean with English abstract).
- Choi, Y.H., Park, Y.S., Ryu, J., Lee, D.J., Kim, Y.S., Choi, J. and Lim, K.J., 2014, Analysis of Baseflow Contribution to Streamflow at Several Flow Stations. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30, 441-451 (in Korean with English abstract).
- Clark, B.D. and Fritz, P., 1997, *Environmental isotopes in hydrogeology*. New York, NY: Imprint CRC Press.
- Durka, W., Schulze, E.D., Gebauer, G. and Voerkeliust, S., 1994, Effects of forest decline on uptake and leaching of deposited nitrate determined from ^{15}N and ^{18}O measurements. *Nature*, 372, 765-767.
- 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, 35-1-35-8.
- Fischer, B.M., van Meerveld, H. and Seibert, J., 2017, Spatial variability in the isotopic composition of rainfall in a small headwater catchment and its effect on hydrograph separation. *Journal of Hydrology*, 547, 755-769.
- Fritz, P., Cherry, J., Weyer, K. and Sklash, M., 1976, Storm runoff analyses using environmental isotopes and major

- ions. In: Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater, Panel Proceedings Series International Atomic Energy Agency. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 111-130.
- Geneux, D., 1998, Quantifying uncertainty in tracer-based hydrograph separations. *Water Resources Research*, 34, 915-919.
- Hall, F.R., 1968, Base-Flow Recessions-A Review. *Water Resources Research*, 4, 973-983.
- Han, J.H., Ryu, T.S., Lim, K.J. and Jung, Y.H., 2016, A Review of Baseflow Analysis Techniques of Watershed-Scale Runoff Models. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 58, 75-83 (in Korean with English abstract).
- Herczeg, A.L. and Edmunds, W.M., 2001, Inorganic ions as tracers. Chapter 2, In: Cook, P.G. and Herczeg, A.L. (Eds.), *Environmental tracers in subsurface hydrology*, Kluwer Academic Publishers, 32-77.
- Hermann, A., Martinec, J. and Stichler, W., 1978, Study of snowmelt-runoff components using isotope measurements. In: Colbeck, S.C., Ray, M. (Eds.), *Modeling of Snow Cover Runoff*. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover.
- Herrmann, A. and Stichler, W., 1980, Groundwater-runoff relationships. *Catena*, 7, 251-263 (in French with English abstract).
- Hinton, M.J., Schiff, S.L. and English, M.C., 1994, Examining the contributions of glacial till water to storm runoff using two-component and three-component hydrograph separations. *Water Resources Research*, 30, 983-993.
- Hong, J., Lim, K.J., Shin, Y. and Jung, Y., 2015, Quantifying Contribution of Direct Runoff and Baseflow to Rivers in Han River System, South Korea. *Journal of the Korean Water Resources Association*, 48, 309-319 (in Korean with English abstract).
- Hooper, R.P. and Shoemaker, C.A., 1986, A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. *Water Resources Research*, 22, 1444-1454.
- Hubert, P., Marin, E., Meybeck, M., Olive, E. and Siwertz, E., 1969, Aspects Hydrologique, Gèochimique et Sédimentologique de la Crue Exceptionnelle de la Dranse du Chablais du 22 Septembre 1968. *Archives des Sciences (Genève)* 3, 581-603 (in French with English abstract).
- Huth, A.K., Leydecker, A., Sickman, J.O. and Bales, R.C., 2004, A two-component hydrograph separation for three high-elevation catchments in the Sierra Nevada, California. *Hydrological Processes*, 18, 1721-1733.
- Joo, S.W., Park, Y.S., Kim, J.G., Heo, S.G., Choi, J.D. and Lim, K.J., 2007, Estimation of BFI max value for accurate baseflow separation using WHAT system. *J. Agric. Sci. Kangwon Natl. Univ.*, 18, 155-162 (in Korean with English abstract).
- Jung, H., Koh, D.-C., Kim, Y.S., Jeon, S.-W. and Lee, J., 2020, Stable Isotopes of Water and Nitrate for the Identification of Groundwater Flowpaths: A Review. *Water*, 12, 138.
- Jung, Y.-Y., Koh, D.-C., Lee, J. and Ko, 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).
- Kang, H., Hyun, Y.-J. and Jun, S.-M., 2019, Regional estimation of baseflow index in Korea and analysis of baseflow effects according to urbanization. *Journal of Korea Water Resources Association*, 52, 97-105 (in Korean with English abstract).
- Kendall, C., Elliott, E.M. and Wankel, S.D., 2007, Tracing anthropogenic inputs of nitrogen to ecosystems. In *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*, 2nd ed., Michener, R., Lajtha, K. (Eds.), Wiley/Blackwell: Malden, MA, USA, 375-449.
- Kendall, C. and McDonnell, J.J., 1998, *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Elsevier Science Limited, Amsterdam.
- Kim, H., Cho, S.-H., Lee, D., Jung, Y.-Y., Kim, Y.-H., Koh, D.-C. and Lee, J., 2015a, Old Water Contributions to a Granitic Watershed, Dorim-cheon, Seoul. *Journal of soil and groundwater environment*, 20, 34-40.
- Kim, H., Cho, S.-H., Lee, D., Jung, Y.-Y., Kim, Y.-H., Koh, D.-C. and Lee, J., 2017, Influence of pre-event water on streamflow in a granitic watershed using hydrograph separation. *Environmental Earth Sciences*, 76, 82.
- Kim, K.-H., Yun, S.-T., Mayer, B., Lee, J.-H., Kim, T.-S. and Kim, H.-K., 2015b, Quantification of nitrate sources in groundwater using hydrochemical and dual isotopic data combined with a Bayesian mixing model. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 199, 369-381.
- Klaus, J. and McDonnell, J.J., 2013, Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation. *Journal of Hydrology*, 505, 47-64.
- Klaus, J., Zehe, E., Elsner, M., Külls, C. and McDonnell, J.J., 2013, Macropore flow of old water revisited: experimental insights from a tile-drained hillslope. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 103-118.
- Kumar, S. and Merwade, V., 2011, Evaluation of NARR and CLM3.5 outputs for surface water and energy budgets in the Mississippi River Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D8).
- Lakey, B. and Krothe, N.C., 1996, Stable isotopic variation of storm discharge from a perennial karst spring, Indiana. *Water Resources Research*, 32, 721-731
- Lee, E.-S. and Krothe, N.C., 2001, A four-component mixing model for water in a karst terrain in south-central

- Indiana, USA. Using solute concentration and stable isotopes as tracers. *Chemical Geology*, 179, 129-143.
- Lee, J., 2017, A review on hydrograph separation using isotopic tracers. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 339-346 (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, 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 with English abstract).
- Lim, K.J., Engel, B.A., Tang, Z., Choi, J., Kim, K.S., Muthukrishnan, S. and Tripathy, D., 2005, Automated web gis based hydrograph analysis tool, WHAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 41, 1407-1416.
- Linsley, R.K. and Franzini, J.B., 1964, *Water-resources Engineering*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Linsley, R.K., Kohler, M.A. and Paulhus, J.L.H., 1975, *Hydrology for Engineers* (second edition). McGrawHill Series in Water Resources and Environmental Engineering. McGraw-Hill Book Company.
- Lyne, V. and Hollick, M., 1979, Stochastic time-variable rainfall runoff modelling. In: *Institute of Engineers Australia National Conference*, Barton, Australia: Institute of Engineers Australia, 89-93.
- Lyon, S.W., Desilets, S.L.E. and Troch, P.A., 2008, Characterizing the response of a catchment to an extreme rainfall event using hydrometric and isotopic data. *Water Resources Research*, 44, W06413.
- Markovich, K.H., Dahlke, H.E., Arumí, J.L., Maxwell, R.M. and Fogg, G.E., 2019, Bayesian hydrograph separation in a minimally gauged alpine volcanic watershed in central Chile. *Journal of Hydrology*, 575, 1288-1300.
- McDonnell, J.J., Bonell, M., Stewart, M.K. and Pearce, A.J., 1990, Deuterium variations in storm rainfall: implications for stream hydrograph separation. *Water Resources Research*, 26, 455-458.
- McDonnell, J.J., Stewart, M.K. and Owens, I.F., 1991, Effect of catchment-scale subsurface mixing on stream isotopic response. *Water Resources Research*, 27, 3065-3073.
- McHale, M.R., McDonnell, J.J., Mitchell, M.J. and Cirno, C.P., 2002, A field-based study of soil water and groundwater nitrate release in an Adirondack forested watershed. *Water Resources Research*, 38, 2-1-2-16.
- Mook, W.G., Groeneveld, D.J., Brown, A.E. and Van Ganswijk, A.J., 1974, Analysis of a runoff hydrograph by means of natural ^{18}O . In: *Isotope Techniques in Groundwater Hydrology*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 145-156.
- Moore, R.D., 1989, Tracing runoff sources with deuterium and oxygen-18 during spring melt in a headwater catchment, southern Laurentians, Quebec. *Journal of Hydrology*, 112, 135-148.
- Muñoz-Villers, L.E. and McDonnell, J.J., 2012, Runoff generation in a steep, tropical montane cloud forest catchment on permeable volcanic substrate. *Water Resources Research*, 48, W09528.
- Nam, T.-H., Ryu, H.-S., Kang, T.-W., Han, Y., Kim, J., Lee, K., Hwang, S. and Kim, K., 2019, Quantifying nitrogen source contribution ratios using stable isotope method: Application of Bayesian mixing model. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 35, 510-519 (in Korean with English abstract).
- Ogunkoya, O.O. and Jenkins, A., 1993, Analysis of storm hydrograph and flow pathways using a three-component hydrograph separation model. *Journal of Hydrology*, 142, 71-88.
- Oh, J.M., Ahn, T.-W. and Kim, T.-H., 2012, Analysis of First Flushing Effects and EMCs of Non-point Pollutants from Impervious Area during Rainfall. *Korean Journal of Ecology and Environment*, 45, 459-473 (in Korean with English abstract).
- Ohte, N., Sebestyen, S.D., Shanley, J.B., Doctor, D.H., Kendall, C., Wankel, S.D. and Boyer, E.W., 2004, Tracing sources of nitrate in snowmelt runoff using a high-resolution isotopic technique. *Geophysical Research*, 31, L21506.
- Parnell, A.C., Inger, R., Bearhop, S. and Jackson, A.L., 2010, Source Partitioning Using Stable Isotopes: Coping with Too Much Variation. *PLoS ONE*, 5, e9672.
- Penna, D. and van Meerveld, H.J., 2019, Spatial variability in the isotopic composition of water in small catchments and its effect on hydrograph separation. *WIREs Water*, 6, e1367.
- Phillips, D.L., 2001, Mixing models in analyses of diet using multiple stable isotopes: a critique. *Oecologia*, 127, 166-170.
- Pinder, G.F. and Jones, J.F., 1969, Determination of the Ground-Water Component of Peak Discharge from the Chemistry of Total Runoff. *Water Resources Research*, 5, 438-445.
- Ribolzi, O., Vallès, V. and Bariac, T., 1996, Comparison of hydrograph deconvolutions using residual alkalinity, chloride, and oxygen 18 as hydrochemical tracers. *Water Resources Research*, 32, 1051-1059.
- Rice, K.C. and Hornberger, G.M., 1998, Comparison of hydrochemical tracers to estimate source contributions

- to peak flow in a small, forested, headwater catchment. *Water Resources Research*, 34, 1755-1766.
- Rodhe, A., 1981, Spring flood meltwater or groundwater?. *Nordic Hydrology*, 12, 21-30.
- Rorabaugh, M.I., 1964, Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow. *International Association of Scientific Hydrology*, 63, 432-441.
- Rutledge, A.T., 1998, Computer Programs for Describing the Recession of Ground-water Discharge and for Estimating mean Ground-water Recharge and Discharge from Streamflow Records-update, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4148, 1-52.
- Schmieder, J., Hanzer, F., Marke, T., Garvelmann, J., Warscher, M., Kunstmann, H. and Strasser, U., 2016, The importance of snowmelt spatiotemporal variability for isotope-based hydrograph separation in a high-elevation catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 5015-5033.
- Shao, G., Zhang, D., Guan, Y., Sadat, M.A. and Huang, F., 2020, Application of Different Separation Methods to Investigate the Baseflow Characteristics of a Semi-Arid Sandy Area, Northwestern China. *Water*, 12, 434.
- Sklash, M.G. and Farvolden, R.N., 1979, The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology*, 43, 45-65.
- Sklash, M.G., Farvolden, R.N. and Fritz, P., 1976, A conceptual model of watershed response to rainfall, developed through the use of oxygen-18 as a natural tracer. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 13, 271-283.
- Sklash, M.G., Stewart, M. and Pearce, A., 1986, Storm runoff generation in humid headwater catchments 2. A case study of hillslope and low-order stream response. *Water Resources Research*, 22, 1273-1282.
- Sloto, R.A. and Crouse, M.Y., 1996, HYSEP: A Computer Program for Streamflow Hydrograph Separation and Analysis; U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4040, USGS: Reston, VA, USA, 46 p.
- St Amour, N.A., Gibson, J.J., Edwards, T.W.D., Prowse, T.D. and Pietroniro, A., 2005, Isotopic time-series partitioning of streamflow components in wetland-dominated catchments, lower Liard River basin, Northwest Territories, Canada. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19, 3357-3381.
- 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.
- Wahl, K.L. and Wahl, T.L., 1995, Determining the flow of Comal Springs at New Braunfels, Texas. in *Proceedings of Texas Water 95, August 16-17, 1995, San Antonio, Tex.*, American Society of Civil Engineers, 77-86.
- Wels, C., Cornett, R.J. and Lazerte, B.D., 1991, Hydrograph separation: a comparison of geochemical and isotopic tracers. *Journal of Hydrology*, 122, 253-274.
- Xiao, X., Zhang, F., Li, X., Zeng, C., Shi, X., Wu, H., Jagirani, M.D. and Che, T., 2020, Using stable isotopes to identify major flow pathways in permafrost influenced alpine meadow hillslope during summer rain-fall period. *Hydrological Processes*, 34, 1104-1116.

Received : June 3, 2020
 Revised : July 1, 2020
 Accepted : July 8, 2020