

소유역에서의 3성분계 수문분리 연구

이광식¹·박영윤¹·김용제²·박승기³·정재훈³·봉연식¹

¹한국기초과학지원연구원, ²한국지질자원연구원, ³공주대학교
e-mail: kslee@kbsi.re.kr

요약문

예산의 소유역에서 비가 와서 하천수의 유량이 증가 할 때, 하천수 시료를 시계열로 채취하여 하천수를 구성하는 강수, 토양수, 지하수의 상대적인 양을 추적자를 이용한 3성분계 모델을 적용하여 산정하였다. 연구지역에서는 토양수가 전체 유량의 약 5% 내에서 영향을 주었으며 강수와 지하수가 하천수의 대부분을 구성하고 있음이 밝혀졌다.

Key words: 수문분리, 추적자, 비반응물질, 3성분계, 산소와 수소 동위원소

1. 서 언

- ① 수문분리(hydrograph separation)란 어떤 수계에서 강수에 의하여 하천수의 양이 늘어날 경우 하천수 중에 포함된 강수, 지하수 또는 토양수의 상호 비를 평가하는 것이다. 수문분리를 하기 위해서는 염소(CI)와 같은 비반응물질을 추적자로 이용해야 한다. 염소(CI)는 물에 대한 용해도가 매우 높고, 물에 녹은 후에 침전이나 이온교환 반응과 같은 화학반응에 참여하지 않기 때문에 물의 흐름을 따라 보존적으로 이동하는 것으로 알려져 있다. 다만 증발에 의하여 토양에 염소농도가 농축되는 건조지역이나 제설재를 많이 뿌리는 지역에서는 추적자로 이용이 곤란하다. 이러한 일부 보존적인 원소를 제외하면 물에 녹아있는 원소들의 대부분은 물의 이동과정에서 물-암석 상호작용에 참여하거나 흡착, 침전, 용해 등에 의하여 물에서 제거되거나 증가되기 때문에 물의 이동과 체류시간 등에 대한 정보를 제공하기 어렵다.
- ② 산소와 수소 안정동위원소는 물 분자를 직접 구성하기 때문에 물 사이의 혼합과 이동을 가장 정확하고 효과적으로 반영하는 것으로 평가되고 있다(Kendall et al., 1995; Clark and Fritz, 1997). 따라서 산소와 수소 동위원소를 이용하면 수문분리를 매우 효과적으로 할 수 있다. 어떤 수계에서 산소와 수소 동위원소를 이용하여 수문분리 연구를 하기 위해서는 그 수계의 지하수, 하천수, 강수의 동위원소 조성이 서로 차이가 나야만 한다. 일반적으로 어떤 수계의 지하수 동위원소 조성은 오랜 기간 동안 그 수계에 내린 강수의 평균 동위원소 조성을 반영하고 있다. 만일 개별강수와 지하수의 동위원소 조성이 오차의 한계 내에서 차이가 나지 않는 경우는 동위원소를 이용한 수문분리가 불가능하기 때문에 대신 전기전도도(EC), Si, Mg, 또는 CI등과 같은 다른 추적자를 이용하여야 한다.

초창기 수문분리 연구는 두 가지 성분[강수(rain water)와 지하수(groundwater)]만이 배출수(total discharge)를 구성하고 있다는 가정 하에 수행되었다. 즉 하천 유출량(Q_t)은 비가 오기 전에 흐르던 가저유출량(Q_{gw})과 나중에 강수에 의하여 더하여진 양(Q_r)의 합이 되는 것이다. 1990년대에 들어서 연구자들은 이성분계를 이용한 수문분리에 매우 큰 한계가 있음을 알게 되었고 일부 지역에서는 토양수가 무시할 수 없는 성분임이 밝혀졌다. Lakey and Krothe (1996)은 산소와 수소 동위원소 기법을 이용하여 카르스트 지역에서 토양수의 중요성을 실증하였다. 강수, 지하수 및

토양수로 이루어진 3성분계를 이용하여 수문분리를 하기 위해서는 두 가지 보존성 물질이 필요하다. 즉 동위원소 조성뿐만 아니라 또 다른 보존성 원소의 농도를 이용해야 한다.

2. 연구방법

추적자를 이용한 수문분리 연구를 하기 위해서는 하천수의 정확한 유량측정이 필수적이다. 이를 위하여 예산의 소규모 하천에 유량자동측정기를 설치하여 10분 간격으로 유량을 측정하였다. 토양수채수기를 설치하여 15cm, 30cm, 60cm, 90cm 깊이의 토양수를 채취하였다. 비가 오기 전에 하천수와 토양수를 먼저 채취하여 수문분리 시에 지하수와 토양수의 대푯값으로 이용하였다. 빗물은 총강우를 채취하여 동위원소 및 원소 분석을 실시하였다. 시료들의 주성분 이온 분석은 ICP-MS, ICP-AES, IC등을 이용하여 측정하였으며 모든 분석은 한국기초과학지원연구원의 장비를 이용하여 실시되었다.

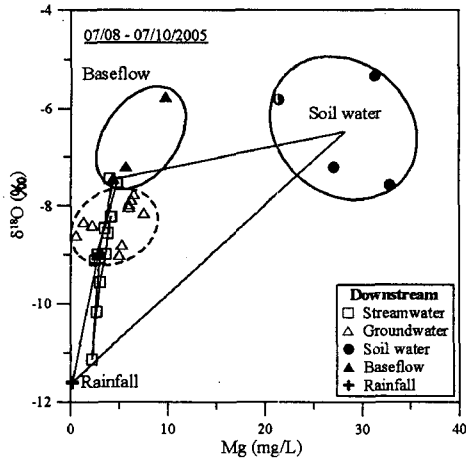
산소 동위원소는 CO₂-H₂O 평형법을 이용하여 한국기초과학지원연구원의 안정동위원소 질량분석기(영국 Micromass사의 Optima 모델)로 동위원소 비를 측정하였다. 수소 동위원소는 온라인 전처리장치인 PyrOH에서 물을 Cr과 반응시켜 수소를 발생시킨 후 안정동위원소 질량분석기(영국 GV Instrument사 IsoPrime 모델)로 측정하였다.

3. 결과 및 해석

기존 연구에서 수문분리 연구를 수행하기 위한 추적자로서는 전기전도도(EC), 산소와 수소 동위원소, 용존규소(Si)가 주로 이용되어 왔다 (Ladouche et al., 2001; Shanley et al., 2002; Huth et al., 2004). 일부 연구에서는 Na, Ca, Mg, SO₄가 이용되기도 하였고 (Dreiss, 1989; Katsuyama et al., 2001), 카르스트 지역에서 용존무기탄소(DIC)와 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 가 이용된 예도 있다 (Lee and Krothe, 2001).

수문분리 연구에서 추적자로 이용되기 위해서는 물의 이동과정에서 보존적이어야 하는 것이 가장 중요한 요소이다. 물을 직접 구성하는 성분인 산소와 수소 동위원소는 80°C 이하의 저온에서는 물-암석 반응에 의하여 영향을 거의 받지 않기 때문에 증발현상에 의해 큰 영향을 받지 않는 경우에는 천부환경에서 보존적으로 알려져 왔다 (Clark and Fritz, 1997). 즉 천부환경에서 물은 이동과정 중에 다른 물과의 혼합에 의해서만 산소와 수소의 동위원소 조성이 달라진다고 할 수 있다. 이런 이유로 이성분계 수문분리에는 수소 동위원소 보다 분석이 상대적으로 용이한 산소 동위원소($\delta^{18}\text{O}$)가 추적자로서 가장 많이 이용되어 왔다.

연구 지역에서 채취한 시료들의 $\delta^{18}\text{O}$, Si, Mg 농도는 Hinton et al (1994)이 제시한 5가지 가정을 모두 만족시키고 있다. 강수와 지하수에 비하여 토양수의 $\delta^{18}\text{O}$, Si, Mg 값의 변화 범위가 매우 커서 대푯값을 결정하는데 어려움이 있지만, 토양수가 하천수에 영향을 주는 정도가 강수와 지하수에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 별로 문제가 되지 않는다 (그림 1). 따라서 연구지역에서 채취한 수문분리 시료는 지하수와 강수의 2성분계 혼합 모델로 설명해도 크게 문제가 되지 않음을 알 수 있다.



③ Fig. 1. A three-component diagram using Mg and $\delta^{18}\text{O}$ data in the study area. All stream samples plot within the triangle formed by the three end members (baseflow, soil water, rainfall).

④

강수가 내리기 전에 하천에서 채취한 기저유출수를 지하수의 대푯값으로 가정하여 수문분리에 이용하였다. 인근에서 채취한 심부지하수도 하천수와 유사한 조성을 보이고 있기 때문에 위의 가정이 유효하다는 것을 알 수 있다. 연구지역에서 채취한 지하수의 Si 농도와 산소동위원소 조성은 강수와 기저유출수 사이에 도시된다. 이 점은 지하수의 조성이 강수에 의하여 영향을 직접 받아 변화하고 있음을 지시한다. 연구지역 상류에서 실시한 수문분리 연구 결과 비가 내리자마자 하천수의 유출량은 급격히 증가하는 것이 관찰된다. 이 점은 최상류의 수계의 크기가 매우 작고 경사가 가파르기 때문에 빗물이 지표에 떨어져서 상당부분이 지표유출로 하천으로 유입되기 때문이다. 하천의 유출량이 증가함에 따라 배출되는 지하수의 양도 크게 증가하는 것이 관찰되는데 새로 내린 빗물이 지하로 함양되면서 지하수를 하천으로 밀어냈기 때문으로 해석된다. 하천수의 유출량이 증가하는 초기에는 토양수의 성분이 관찰되지 않다가 하천수의 유출량이 최고치에 가까이 이르렀을 때 토양수가 하천으로 유출되는 특성을 보여준다. 이런 현상은 상류와 하류에서 모두 관찰된다. 7월 8~10일에 연구지역에서 채취한 하천수는 강수가 65%, 지하수 31%, 토양수 4%로 구성되어 있다 (그림 2).

⑤

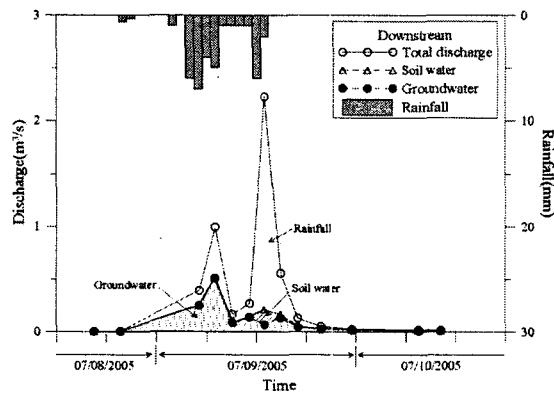


Fig. 2. Storm hydrograph separation for a three-component using Si and $\delta^{18}\text{O}$ data in the study area.

감사의 글

이 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 3-2-2)에 의해 수행되었다.

참고문헌

- Clark, I.D. and Fritz, P., 1997, Environmental isotopes in hydrogeology, Lewis publisher, New York., 328.
- Dreiss, S.J., 1989, Regional scale transport in a karst aquifer 1. Component separation of spring flow hydrographs, *Water Resources Research*, 25, 117-125.
- Hinton, M.J., Schiff, S.L., and English, M.C., 1994, Examining the contributions of glacial till water to storm runoff using two- and three-component hydrograph separations, *Water Resources Research*, 30, 983-993.
- Katsuyama, M., Ohte, N., Kobashi, S., 2001, A three-component end-member analysis of streamwater hydrochemistry in a small Japanese forested headwater catchment, *Hydrological Processes*, 15, 249-260.
- Kendall, C., Sklash, M.G. and Bullen, T.D., 1995, Isotope tracers of water and solute sources in catchments, In: Stephen T. Trudgill (ed), *Solute Modelling in Catchment Systems*. John Wiley & Sons Ltd, p. 261-303.
- Ladouche, B., Probst, A., Viville, D., Idir, S., Baqué, D., Loubet, M., Probst, J.-L., and Bariac, T., 2001, Hydrograph separation using isotopic, chemical and hydrological approaches (Strengbach catchment, France), *Journal of Hydrology*, 242, 255-274.
- 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.
- Shanley, J.B., Kendall, C., Smith, T.E., Wolock, D.M. and McDonnell, J.J., 2002, Controls on old and new water contributions to stream flow at some nested catchments in Vermont, USA, *Hydrological Processes*, 16, 589-609.
- 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.