

## 유상지역 소유역에서 추적자(CI)를 이용한 강우시상에 따른 지표수로부터 기저유출의 분리

조성현, 하규철, 고동찬, 조민조, 송무영

충남대학교, \*한국지질자원연구원

sh-cho@hanmail.net

### ABSTRACT

This study aims to separate hydrograph into baseflow and event water to calculate baseflow rate during a rainfall in small catchments, Yuseong, Daejeon. The hydrograph of stream during a period with no excess rainfall will decay. The discharge is composed entirely of groundwater contributions. During the period, the Cl concentration of the stream water can be regarded as being in equilibrium with that of the groundwater. Using Cl as a conservative tracer, two-component hydrograph separations were performed from end point of the period to next end point. The required data were obtained by monitoring of the surface water table, along with discharge rate of stream. Cl concentration of rainfall, surface water were measured and recorded. Hydrograph separation, a mixing model using chemical tracer is applied to chemical hydrograph separation technique. These results show that baseflow rates are 31.6% of rainfall in the catchments during study period.

key ward: Hydrograph separation, Excess rainfall, Tracer, Baseflow, Mixing model.

### 1. 서론

유역의 지하수 함양(recharge)량의 산정은 합리적인 수자원관리계획 수립과 운영 차원에서 기본적인 요소로 중요하다. 지하수 함양량을 산정하는 방법에는 추적자법, 수위변동법, Darcy법, 기저유출법, seepage meter나 Lysimeter를 이용하여 측정하는 법 등이 있으며 이들은 시간과 공간적으로 적용범위가 구별된다(Bridget et al., 2002). 기저유출은 지하수가 하천에 공급되는 것으로, 기저유출법은 지표수로부터 기저유출을 분리하여 그 변동량으로 지하수함양을 평가하는 방법이다. 국내에서 기저유출을 지표수로부터 분리하는 방법은 해석학적 방법이나 경험적인 방법인 기저유출감수곡선법과 곡선접합법이 많이 사용되었다(구민호 외, 2002). 이 방법들의 적용은 1년 이상의 자료를 바탕으로 5대 강과 같은 큰 하천에서 이뤄졌다(한국수자원공사, 1995; 박창근, 1996; 윤용남, 1996; 원이정 외, 2000; 김경수와 조기태, 2000). 이 방법의 단점은 하천유출량을 정확히 측정하였어도 기저유출을 분리하는 과정에서 임의성이 내재되어 있기 때문에 기저유출량이 과장되거나 과소평가 될 수 있다는 점이다.

임의성을 배제하고 지표수로부터 기저유출을 분리할 수 있는 방법으로 보존적인 화학성분(Cl, Si)이나 동위원소( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ) 추적자(tracer)를 이용하는 방법이 있다(Kendall and McDonnell, 2000). 강우(rainfall)와 강우사상(rain event) 전 지표수의 성분이 뚜렷이 구분될 때, 유출량을 강우와 강우사

상 이전의 성분으로 구분할 수 있다(Bottomley et al., 1984, 1986; Hooper and Shoemaker, 1986; Moor, 1989; Wels et al., 1991; 조성현 외, 2003). 이 방법은 그 성분의 특성을 반영한 여러 가지 추적자를 사용할 경우 정량적인 분리(Eshleman et al., 1993)를 할 수 있을 뿐만 아니라 지표수, 중간류, 천부지하수, 심부지하수 등 3성분 이상으로 구분할 수도 있다(Hooper and Shoemaker, 1986; McDonnell et al., 1991; Hinton and Schiff, 1994; Lee and Krothe, 2001; Lee et. al., 2003). 그리고 강우사상 전에 지표수가 기저유출에 전적으로 의존한다면, 보다 쉽게 기저유출을 분리할 수 있으며 강우사상 전후의 기저유출량 변동을 강우사상에 의한 반응으로 평가할 수도 있다(조성현 외, 2003). 그러나 이러한 분리는 단일강우사상이나 아주 짧은 기간에 걸쳐서 내린 강우일 때 적용되었고, 공간적으로 100km<sup>2</sup>내로 국한된다(Kenall and McDonnell, 2000).

본 연구의 목적은 CI 추적자를 이용하여 집수구역이 명확한 대전 유성지역의 소유역에서 함양량 추정에 이용될 수 있는 기저유출량을 유출수문곡선으로부터 분리하고 강우량에 대한 기저유출량의 비율을 추정하는데 있다.

## 2. 지형 및 수계

화산천 유역(이하 S1)은 S1 집수구역의 남쪽에 위치하며 경도 127°16′09.2″~127°17′47.9″ 위도 36°21′03.8″~36°21′10.7″에 해당한다. 집수면적은 4.09km<sup>2</sup>로 계룡산 줄기의 높은 산들에 둘러싸여 있으며 백운봉(483.5m)에서 발원한다. 서쪽으로는 백운봉(483.5m), 북으로 유성천 집수구역과 도덕봉(535.2m)을 경계로 접해 있으며 남으로 금수봉(532.0m)과 빈계산(415.0m)이 있어 집수구역의 경계를 나타낸다. S1 집수구역과 마찬가지로 서고동저로 동쪽으로 트이여 있다. 다른 유역에 비하여 인위적인 교란이 없으며 계룡산 국립공원과 인접해 있고 자연적인 하천을 유지하고 있다(그림 1).

## 3. 연구방법

### 3.1 2성분계 혼합모델의 적용한 기저유출 분리

강우와 지표수의 CI 농도의 차가 클 경우, 지표수의 CI 농도는 강우의 영향으로 강우사상 전과는 다르게 변하며 이 둘 사이에는 식 (1)과 식 (2)와 같은 질량평형방정식이 성립한다. 식 (1)과 식 (2)의 방정식을 정리하면 식 (3)이 유도된다.

$$Q_T = Q_O + Q_N \quad (1)$$

$$C_T Q_T = C_O Q_O + C_N Q_N \quad (2)$$

$$\frac{Q_O}{Q_T} = \left[ \frac{C_T - C_N}{C_O - C_N} \right] \quad (3)$$

여기서,  $Q_T$  : 지표수의 총유출량,  $Q_O$  : 강우사상전의 지표수 유출량,  $Q_N$  : 강우량,  $C_T$  : 지표수의 CI 농도,  $C_O$  : 강우사상전의 지표수의 CI 농도,  $C_N$  : 강우의 CI 농도이다.

Sklash and Farvolden(1979)은 환경동위원소 추적자를 위와 같은 2성분계 혼합모델(mixing model)에 적용하여 강우성분과 강우사상전 성분으로 분류하였으며 2성분계 혼합모델 적용을 위한 4가지 조건을 제시하였다. 추적자를 환경동위원소 대신 CI로 바꾸어 정리하면 다음과 같다. 1) 강우와 강우사상전의 하천수의 CI 농도가 서로 달라야 한다. 2) 강우사상 지속 기간 동안 강우의 CI 농도가 일정해야 한다. 3) 통기대수(vadose zone water)와 지하수는 CI 농도가 같거나, 통기대수가 하천에 기여

하는 것이 미미해야 한다. 4) 지표유출 기간동안 지표저류가 최소이어야 한다.

그런데 이 혼합모델을 적용하여 기저유출성분을 분리하기 위해서는 5) 강우사상전에 지표수가 전적으로 지하수에 의존하는 기저유출이라는 가정이 성립되어야 한다(조성현 외 2003). 이것은 지표수가 얼마동안 유효강우가 없어서 기저유출에 의존하며 인간 활동에 의한 인위적인 유출에 영향을 받지 않아야 한다는 조건이다.

### 3.4 강우에 대한 기저유출량의 비율

식 (1)에서  $Q_T$ ,  $Q_O$ ,  $Q_N$ 을 시간에 따른 총유출량( $Q_T(t)$ ), 기저유출량( $Q_O(t)$ ), 강우성분 유출량( $Q_N(t)$ )으로 나타내면, 강우사상에 의한 총유출량( $Q_{Total}$ ), 총기저유출량( $Q_{Ototal}$ ), 강우성분 총유출량( $Q_{Ntotal}$ )은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{Total} = \int Q_T(t) dt \quad (4)$$

$$Q_{Ototal} = \int Q_O(t) dt \quad (5)$$

$$Q_{Ntotal} = Q_{Total} - Q_{Ototal} \quad (6)$$

그런데 금번 강우에 의한 기저유출량만을 취하고자 한다면 금번 강우사상 전의 영향으로 배출되는 기저유출량을 제거해야 된다. 금번 강우사상 전의 영향으로 배출되는 기저유출량을  $Q_{PO}$ 라고 한다면 시간에 따른 양은  $Q_{PO}(t)$ 라고 표현할 수 있다. 금번 강우사상 전의 영향으로 배출되는 기저유출량을 제거한 양을  $Q_{Ocorrected}$ 라고 하면 식 (5)을 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$Q_{Ocorrected} = Q_{Ototal} - \int Q_{PO}(t) dt \quad (7)$$

그리고 식 (7)을 강우량( $P$ )에 대한 기저유출량의 비율( $\alpha$ )로 나타내면 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{Q_{Ototal} - \int Q_{PO}(t) dt}{P} \quad (8)$$

## 4. 연구결과

### 4.1 수위-유량관계곡선(stage-discharge rating curve)

S1과 집수구역에서의 유량은 수위별로 17회를 측정하였고 이를 수위-유량관계곡선으로 나타내면 그림 2와 같다. 그래프의 가로축은 수위(단위: m)를, 세로축은 유량( $m^3/s$ )을 나타낸다. S1 집수구역의 수위-유량관계곡선식에서 한계수위는 0.45m이고 그때의 유량은  $1.5m^3/s$ 가 조금 안된다(그림 2).

### 4.2 유출수문곡선 분리

S1 집수구역에서 2004년 4월 26일부터 5월 2일까지 2시간 내지 27시간 간격으로 하천의 물을 채취하고 빗물을 받았는데 강우량은 2004년 4월 26일부터 27일 사이에 49mm이며 CI의 평균농도는 0.38ppm이다(표 1).

S1 집수구역에서 유출수문곡선을 강우성분의 유출량( $Q_N$ )과 기저유출량( $Q_O$ )으로 분리한 것이 그림 3이다. 그림 3에서 (A)는 강우사상에 대하여 총유출량( $Q_T$ )을 강우성분의 유출량( $Q_N$ )과 기저유출량( $Q_O$ )

으로 구분하여 시간에 따라 나타낸 것이다. 강우사상 전 유출의 농도( $C_0$ )가 기저유출의 것으로 가정하였으며 강우사상 후 이러한 농도를 가진 유출량( $Q_0$ )의 변화는 어두운 부분에 해당한다. 그림 3에서 (B)는 두 집수구역에서 채취한 농도 변화(왼쪽 세로축)와 강우성분( $C_N$ )의 유출량( $Q_N$ )과 강우사상 전 성분( $C_0$ )의 유출량(기저유출량:  $Q_0$ )이 차지하는 상대적인 비율을 백분율로 나타낸 것이다(오른쪽 세로축). 어두운 부분은 그림 3에서의 (A)와 마찬가지로 기저유출량이 차지하는 비율로 시간에 따른 기저유출량의 변화를 나타낸다. 그림 3에서 (A)와 (B)의 가로축은 동일한 기간으로 시간을 나타낸다.

### 4.3 기저유출량 분리

유출수문곡선을 강우사상의 전부터 다음 강우사상이 있을 때까지 식 (4), (5), (6) 과 같이 적분하여 집수구역에서 강우사상에 의한 총유출량( $Q_{Total}$ ), 총기저유출량( $Q_{Ototal}$ ), 강우성분의 총유출량( $Q_{Ntotal}$ )를 구하였다. 식 (7)를 이용하여 강우사상전 측정된 양( $Q_{PO}$ )인  $4 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ 가 다음 강우사상이 있을 때까지 지속적으로 유출된다고 가정하고 적분하여 금번 강우사상 전의 영향으로 유출되는 기저유출량( $Q_{POtotal}$ )을 구하였다. 그리고 총기저유출량( $Q_{Ototal}$ )에서 앞에서 구한 금번 강우사상 전의 영향으로 유출되는 기저유출량( $Q_{POtotal}$ )을 빼주어 금번 강우에 의한 기저유출량( $Q_{Ocorrected}$ )을 구하였다. 물론, 금번 강우사상 전의 영향으로 유출되는 기저유출량( $Q_{PO}$ )은 시간이 지남에 따라 감소되어 처음 측정된  $4 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ 와 차이가 있겠지만, 일반적으로 지수 함수적인 특성을 갖는 유출량의 감수로 볼 때, 연구기간 동안의 차이는 매우 적을 것으로 판단하여 무시하였다. 각 성분별 유출량은 강우량을 표현하는 방법과 같은 방법으로, 단위면적당 유출량인 유출고로 표현하면 비교할 수 있어 편리하다. 집수구역에서 강우성분의 총유출량( $Q_{Ntotal}$ )은 6.8mm, 총기저유출량( $Q_{Ototal}$ )은 15.6mm로 강우에 대한 백분율은 13.9%와 31.8%이다. 금번 강우에 의한 기저유출량( $Q_{Ocorrected}$ )은 총기저유출량( $Q_{Ototal}$ )에서 강우사상전의 영향으로 유출되는 기저유출량( $Q_{POtotal}$ ) 0.1mm를 빼서 15.5mm이다. 이것을 강우에 대한 백분율로 나타내면 31.6%이다(표 2).

### 5. 결 론

이 연구는 추적자를 이용하여 대전광역시 유성지역의 서로 인접한 두 소유역에서 유출수문곡선으로부터 기저유출을 정량적으로 분리한 것이다. 추적자로서 보존적인 Cl를 이용하였으며 강우성분과 기저유출로 분리하기 위하여 2성분계 혼합모델(mixing model)이 사용되었다. 전제조건으로는 유효강우가 없는 기간 동안 지표수 유출은 기저유출에 의한 것이라는 가정과 Sklash and Farvolden(1979)이 제시한 조건이 적용되었다.

1. 총유출량은 12.7mm이고 이 양은 연구기간 중 내린 강우량 49mm에 비교해서 45.5%에 해당한다.
2. 총유출량을 강우성분과 기저유출인 2성분계로 분리하였으며 단위면적당 강우성분의 총유출량은 6.8mm, 총기저유출량은 15.6mm로 강우에 대한 백분율은 13.9%와 31.8%이다.
3. 금번 강우에 의한 기저유출량은 총기저유출량에서 강우사상전의 영향으로 유출되는 기저유출량 0.1mm를 빼서 15.5mm이다. 이것을 강우에 대한 백분율로 나타내면 31.6%이다.

## 6. 사사

이 연구는 한국지질자원연구원의 수탁사업인 “대전지역 지하수기초조사”의 일환으로 수행되었습니다.

## 7. 참고문헌

- Bottomley, D. J., Craig, D. and Johnston, L. M., 1984, Neutralization of acid runoff by groundwater discharge to streams in Canadian Precambrian Shield watersheds. *J. Hydrol.*, Vol. 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. *J. Hydrol.*, Vol. 88, 213~234.
- Eshleman, K. N., Pollard, J. S. and O'Brien, A. K., 1993, Determination of contributing areas for saturation overland flow from chemical hydrograph separations. *Water Resources Research*, Vol. 29 No. 10, 3577~3587.
- Hinton, M. J and Schiff, S. L., 1994, Examining the contributions of glacial till water to storm runoff using two-and three-component hydrograph separations. *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 4, 983~993.
- Hooper, R. P. and Shoemaker, C. A., 1986, A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 10, 1444~1454.
- Kendall, C. and McDonnell, J. J., 2000, *Isotope tracers in catchment hydrology*. Elsevier Science B. V., 839.
- 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*, Vol. 179, 129-143.
- 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*, Vol. 23, 137-148.
- McDonnell, J. J., Stewart, M. K. and Owens, I.F., 1991, Effect of catchment-scale subsurface mixing on stream isotopic response. *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 12, 3065~3073.
- Moore, R. D., 1989, Tracing runoff sources with deuterium and oxygen-18 during spring melt in a headwater catchment, Southern Laurentians, Quebec. *J. Hydrol.*, Vol. 112, 135~148.
- Sklash, M. G. and Farvolden, R. N., 1979, The role of groundwater in storm runoff. *J. Hydrol.*, Vol. 43, 45~65.
- Sklash, M. G., Stewart, M. K. and Pearce, A. J., 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.
- Uhlenbrook, S., Frey, M., Leibundgut, C. and Maloszewski, P., 2002, Hydrograph separations in a mesoscale mountainous basin at event and seasonal timescales. Water Resources Research, Vol. 38, No. 6. 31-1-31-14.
- Wels, C., Cornett, J. and LaZerte, B., 1991, Hydrograph separation: A comparison of geochemical and isotopic tracers. J. Hydrol., Vol. 122, 253~274.
- 건설교통부, 한국수자원공사, 1995, 지하수 관리조사 보고서; 지하수자원 기본조사(3차), IPD-95-5a
- 김경수, 조기태, 2000a, 대청댐유역의 기저유출분리를 통한 기저유량 산정에 관한 연구, 지하수환경, 7(1), 15~19.
- 김경수, 조기태, 2000b, 섬진강 쌍치유역의 기저유출감수곡선식 개발에 관한 연구, 지하수환경, 7(1), 66~77.
- 박재성, 김경호, 전민우, 김지수, 1999, 소유역의 지하수함양을 추정기법, 지하수환경, 6(2), 76~86.
- 박창근, 1996, 우리나라 지하수 개발가능량 추정: 1. 개념정립과 기법의 개발, 지하수환경, 3(1), 15~20.
- 원이정, 김형수, 한찬, 2000, 낙동강 진동 및 왜관 수문자료를 이용한 기저유출 분리방식 지하수 개발가능량 산정, 한국지하수토양환경학회 창립총회 및 춘계학술발표회, p157.
- 이동률, 윤용남, 1996, 우리나라의 지하수 함양량 추정과 분석, 대한토목학회, 16, 321~334.
- 조성현, 문상호, 이광식, 김석중, 2003, 산소동위원소( $^{18}\text{O}$ ) 추적자를 이용한 청도지역 소유역에서의 유출 수문곡선 분리 연구, 지질학회, 36(4), 509~518.

Table 1. Rainfall characteristics in S1 catchments.

Event Dates (day)	Area (km <sup>2</sup> )	Rainfall (mm)	Cl concentration (ppm)
April 26-27, 2004	4.09	49	0.38

Table 2. Results of hydrograph separation to the event for the S1 catchments in depth(mm) normalized by catchment area. Proportions to total rainfall of each component were also presented as percent in parenthesis.

Total rainfall (P)	Total runoff (Q <sub>Total</sub> )	Total New water (Q <sub>Ntotal</sub> )	Uncorrected Baseflow (Q <sub>Ototal</sub> )	Total Pre-old water (Q <sub>POtotal</sub> )	Corrected Baseflow (Q <sub>Ocorrected</sub> (α))
49	22.3	6.8	15.6	0.1	15.5
(100)	(45.5)	(13.9)	(31.8)	(0.2)	(31.6)

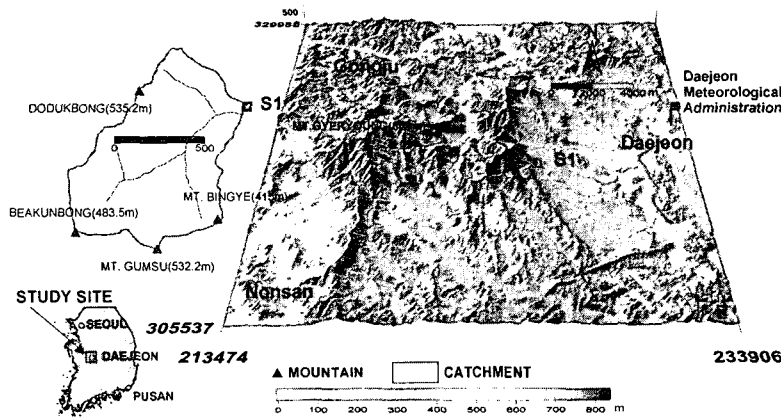


Fig. 1. Map of the study area showing relief and sampling site.

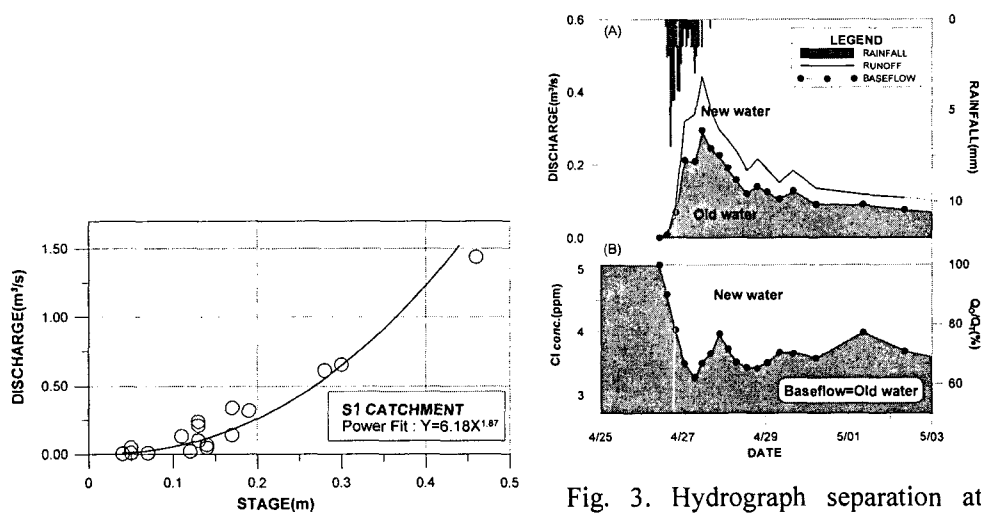


Fig. 3. Hydrograph separation at the S1 catchment during April 26 through May 2, 2004. (A) Rainfall and discharge. (B) Cl concentration and percentage of the event water and baseflow.

Fig 2. Stage-discharge rating curve at S1. The horizontal line is water table(m) through May 2, 2004 and the vertical line is runoff(m<sup>3</sup>/s) in catchment.

