

수문곡선의 기저유출분리 방법에 대한 고찰

조성현^{1*} · 문상호^{2*}

¹서울대학교 농생명과학공동기기원

²한국지질자원연구원 기후변화대응연구본부 지하수환경연구센터

A Comparative Study on the Storm Hydrograph Separation Methods for Baseflow through Field Applications

SungHyen Cho^{1*} · Sang-Ho Moon^{2*}

¹National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

²Climate Change Response Division, Keorea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Deajeon 34132, Korea

ABSTRACT

There are several methods for separating the baseflow from the hydrograph, and graphical methods (GM) have mostly been used. GMs are those that separate the baseflow from the direct flow simply by connecting rising point with inflection point or points related to some duration from a hydrograph. Environmental tracer method (ETM) is another tool researched and developed under several conditions to estimate the groundwater recharge. The goal of this study is to separate the baseflow component from a storm hydrograph by applying various GMs and ETM, and to compare their results. The baseflow component estimated by ETM was different from the results by GMs in terms of their shapes of fluctuation and flow rates. Another important feature is that the form of the baseflow to which ETM is applied is similar to that of a storm hydrograph. This similarity is presumed to be due to the selection of tracer that respond quickly to rainfall.

Key words: Baseflow, Direct flow, Hydrograph separation, Graphical Method (GM), Environmental Tracer Method (ETM)

1. 서 론

강우로 인한 하천의 유출량은 수문곡선(hydrograph)을 통해서 나타난다. 수문곡선은 단순한 유역의 유출지에서 유출하는 하천 수량의 변화를 나타낸 것이 아니며, 유역 내에서 발생할 수 있는 지표류(overland flow), 직접유출(direct precipitation), 중간유출(interflow) 및 기저유출(baseflow) 등 여러 유출성분이 합해진 것이다(Horton, 1933). 그리고 수문곡선은 특정한 집수구역에서 강우와 유출량 관계를 지배하는 지형과 기후 특성의 종합적인 표현

이라고 할 수 있다(Lee, 2007).

수문곡선의 기저유출분리 방법에는 여러 방법이 사용되고 있으나 도식적인 방법(graphical method, GM)과 환경추적자 방법(environmental tracer method, ETM)으로 구분할 수 있다(Fig. 1). 도식적인 방법에는 N-day법, 수정 N-day법(fixed base method), 가변경사법(variable slope method) 및 수평직선분리법(straight line method) 등이 있다(Yun, 2001; Lee 2007). 이들 방법은 수문곡선으로부터 직접유출과 기저유출 성분을 구분하는데 임의성을 가지기에 도식적인 방법이 임의적이라는 비판이 있다(Lee, 2007). 도식적인 방법과 달리 환경추적자 방법은 주변에서 쉽게 접할 수 있는 다양한 환경추적자의 특성을 활용하여 수문곡선에서 직접유출과 기저유출 성분뿐만 아니라 다양한 성분으로 구분하고 각 성분의 유출경로도 탐색 가능한 방법이다(Pinder and Jones, 1969; Sklash and Farvolden, 1979; Bottomley et al., 1984, 1986; Hooper and Shoemaker, 1986; Sklash et al., 1986; Moore, 1989;

저자, *교신저자 : 조성현, 서울대학교 농생명과학공동기기원, 책임연구원, 010-2473-5428

*교신저자 : 문상호, 한국지질자원연구원 기후변화대응연구본부 지하수환경연구센터, 책임연구원, 010-5455-6599

Email: sunghc@snu.ac.kr, msh@kigam.re.kr

Received : 2022. 01. 07 Reviewed : 2022. 01. 11

Accepted : 2022. 02. 21 Discussion until : 2022. 04. 30

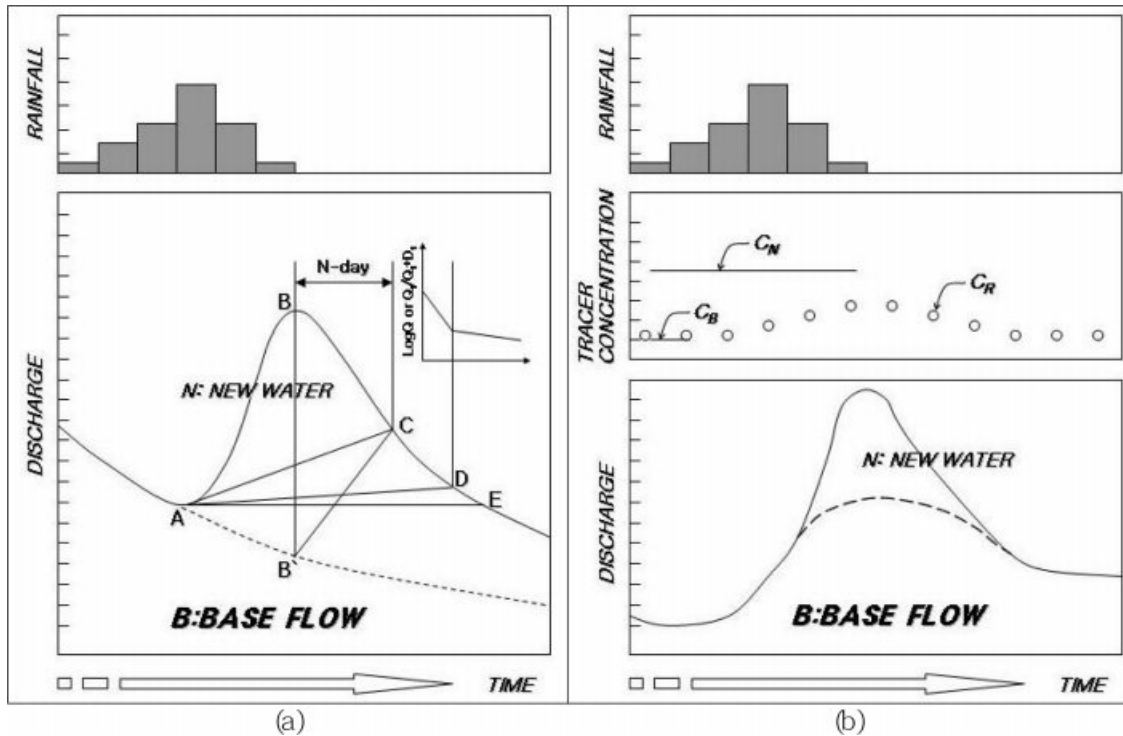


Fig. 1. Two different hydrograph separation methods for rainfall event: (a) graphical methods (N-day=A-C; fixed base=A-B'-C; variable slope=A-D; straight line=A-E) and (b) environmental tracer method. The environmental tracer method in Fig. 1(b) can separate the hydrograph into new water and baseflow using the mass balance equation.

McDonnell et al., 1991; Wels et al., 1991; Eshleman et al., 1993; Hinton et al., 1994; Lee and Krothe, 2001; Cho et al., 2003, 2005, 2007, 2008; Lee et al., 2006).

기저유출은 지하로부터 하천으로 자연 배출하는 성분으로, 지형을 분수령으로 구분하는 수계에서 기저유출의 양은 지하수 함양량을 추정할 수 있게 한다. 한때는 기저유출은 하천유출의 한 성분으로 생각되었지만, 지하로부터 하천에 배출되기에 지하수 단일성분으로 간주 되었다 (Horton, 1933; Barnes, 1939; Lanbein, 1938; Pinder and Jones, 1964; Singh, 1969; Fetter, 1994). 현재의 연구는 기저유출 성분이 좀 더 세분되어 중간유출과 지하수유출이 합쳐진 시간이 지체되는 느린 유출로 정의된다(Sklash and Farvolden, 1979; Ward and Robinson, 1990; Kendall and McDonnell, 2000; Yun, 2001; Lee, 2007).

이번 연구는 수문곡선에서 느린 유출로 정의되는 기저 유출 성분을 도식적인 방법과 환경추적자 방법을 적용해 수문곡선으로부터 직접유출과 기저유출 성분을 분리하고, 도식적인 여러 방법과 환경추적자 방법을 비교 검토하는 것이다. 나아가 이들의 장단점을 비교함으로써 기저유출 성분의 특성을 조금 더 이해하고자 한다.

2. 연구 방법

연구지역은 분수령으로 지형의 경계를 나눠 집수구역(catchment)을 확정하였고, 유출구(outlet point)에서 하천의 수위와 유량을 관측하고 측정하였다. 수위는 TD-diver(Van Essen Instruments)를 이용하여 자동 측정하였고 기압보정은 같이 설치된 Baro-diver로 보정하였다. 유량의 산정은 중간단면적방법(midsection method)을 적용해 수행하였고, 유속계는 horizontal-axis형태의 C2(OTT co.)형을 사용하였다. 유량 계산을 위해 유속 측정은 0.6H(H는 수심) 방법을 이용하여 2회 이상 반복하여 유속을 측정하였다. 강우량은 기상청에서 운영하는 AWS 4개소와 보은기상관측소 1개소, 민사무소 옥상에 설치된 자동기상관측시스템(AWS; Automatic Weather System) 6개로 총 11개 지점에서 측정하였다. 하지만 9개 지점의 강우량 자료만 이 지역의 강우량 해석에 사용되었다(Fig. 2).

강우는 6개 지점에서 채수하였고, 하천수는 유출구에서 10회 채수하였다(Fig. 2 참조). 강우를 채취하기 위해 보은군 면사무소 옥상의 6개 자동기상관측시스템 옆에 적산강우량계를 설치하였다. 적산강우량계의 설치장소의 선정 사유는 자동기상관측시스템에서 측정한 강우량을 검증하

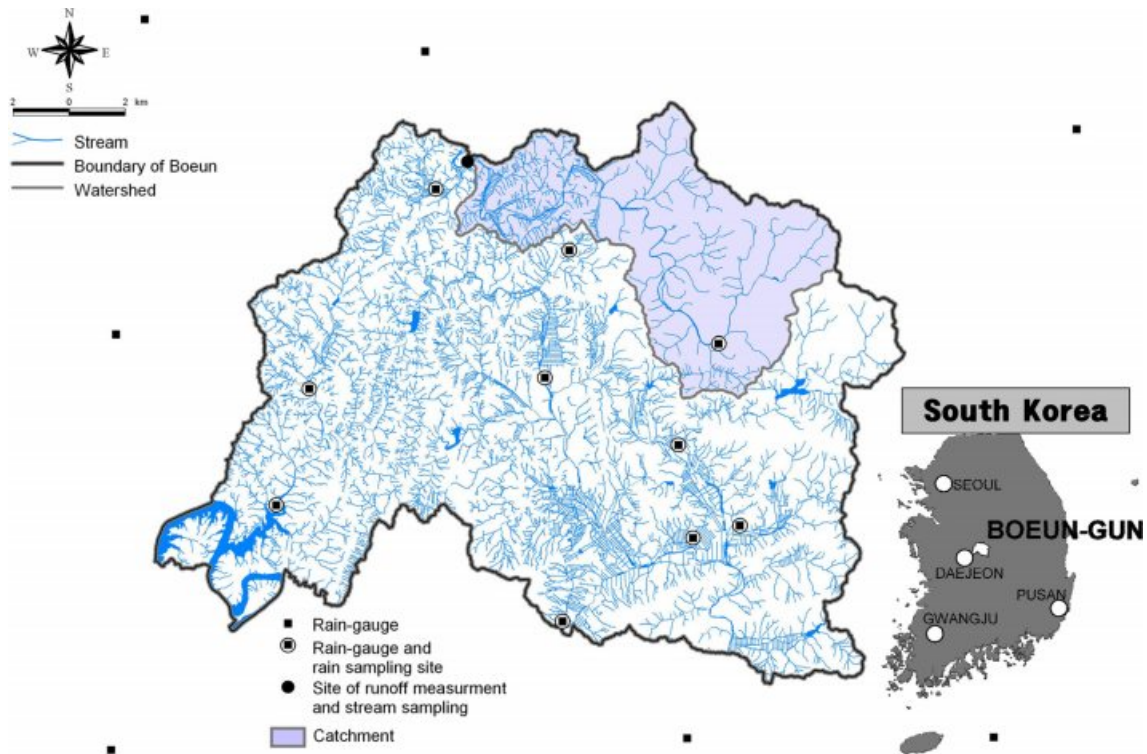


Fig. 2. Location map of the study area within Boeun-gun, Korea. The study area is represented as light purple in the upper part. The water system and Dalcheon catchment boundary (study are) are also expressed together.

고 보완하는 것이었다. 적산강우량계에는 액체파라핀을 300 mL씩 넣어 연구 기간에 발생할 수 있는 증발을 차단하였다. 모든 시료는 무균채수병을 사용하여 채수하였고, 추적자 분석을 위해 일부를 덜어 0.45 μm 멤브레인 필터를 이용하여 여과하였다.

환경추적자 방법을 적용하기 위해 선택한 추적자는 산소동위원소($\delta^{18}\text{O}$)로, 물 분자를 이루는 원소이기에 물의 이동을 추적하는데 최적의 환경추적자(environmental tracer)로 생각한다. 산소동위원소 조성은 한국기초과학지원연구원에서 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 평형법 (Epstein and Mayeda, 1953)으로 $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 에서 CO_2 와 동위원소교환반응을 시킨 후에 안정동위원소 질량분석기(Stable Isotope Ratio Mass Spectrometer, 영국 Micromass 사의 Optima 모델)로 분석하였다. 산소 동위원소의 분석정밀도는 약 $\pm 0.1\%$ 이었다.

2.1. 강우량과 강우의 산소동위원소 조성의 공간적인 분포

집수구역에 관여된 9개 지점에서 관측된 강우량은 ArcGIS 소프트웨어를 이용하여 50 m \times 50 m의 격자(grid)에 크리깅(kriging) 방법으로 1 mm 강우 간격의 등우선

(isohyets)도를 작성하였다(Fig. 3a). 각 등우선 사이의 면적 A_i 를 ArcGIS 소프트웨어를 이용하여 계산하고 총 집수구역의 면적(A)에 대한 면적비 $a_i = A_i/A$ 를 결정하였다. 그리고 각 등우선 간의 평균강우량(P_i)을 곱한 값을 모두 합하여 면적 평균 강우량(P)을 산출하였다(식 1).

$$P = \frac{\sum P_i A_i}{\sum A_i} = \sum \frac{A_i}{A} P_i = \sum a_i P_i \quad (1)$$

6개 지점에서 각각의 적산 강우량계에서 얻은 시료의 산소동위원소 조성도 면적 평균강우량을 구한 것과 같이 동일한 격자 조건으로 ArcGIS를 이용하여 0.01‰ 간격으로 등산소동위원소 조성을 작성하고(Fig. 3b), 각 집수구역에 대한 면적 평균 산소동위원소 조성을 산정하였다(식 2).

$$O = \frac{\sum O_j A_j}{\sum A_j} = \sum \frac{A_j}{A} O_j = \sum a_j O_j \quad (2)$$

여기서, O 는 면적 평균 산소동위원소 조성, O_j 는 각 등산소동위원소 조성 사이의 평균 산소동위원소, A_j 는 등산소동위원소 조성 사이의 면적, A 는 집수구역의 면적, 그리고 a_j 는 A_j/A 이다.

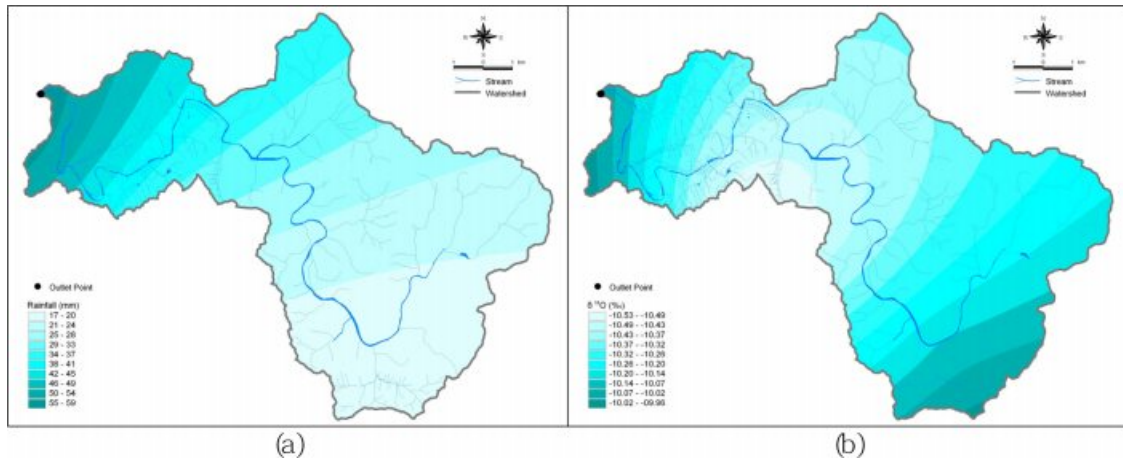


Fig. 3. The spatial distribution of rainfall (a) and $\delta^{18}\text{O}$ values (b) in the study catchment during July 29, 2007.

2.2. 기저유출성분의 분리

연구에서 검토된 기저유출성분 분리방법들은 도식적인 방법과 환경추적자 방법으로, 도식적인 방법은 N-day법, 수정 N-day법, 경사급변법 및 수평직선분리법, 등이었다 (Fig. 1 참조).

2.2.1. 도식적인 방법

감수곡선의 정의는 흐름이 장기간에 걸쳐 지하수위와 하천수면 사이의 높이(수두) 관계에 의존하므로 다음과 같다(식 3).

$$Q_t = Q_0 K^t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (3)$$

여기서 Q_0 는 감수곡선상의 임의 시각에 있어서 유량, Q_t 는 Q_0 발생 시부터 t 시간 후의 유량, K 는 감수계수, $\alpha = -\ln K$ 이다. 도식적인 방법은 수문곡선에서 감수부의 어느 특정지점과 수문곡선이 시작하는 기점(Fig 1a의 A 참조)을 연결하여 직접유출과 기저유출을 분리하는 방법으로, 특정지점의 선정에 있어서 다음과 같은 여러 방법으로 구분된다.

N-day법은 첨두(peak)가 발생한 시점부터 식 4를 이용하여 N일 후의 감수부에 해당하는 특정지점을 선정하고 수문곡선이 시작하는 기점과 연결하여 직접유출과 기저유출 성분을 분리하는 방법이다.

$$N = 0.8A^{0.2} \quad (4)$$

여기서 N 은 일(day), A 는 유역면적(km^2)이다(Fig 1a의 A-C).

수정 N-day법(fixed base method)은 첨두가 발생하기 전까지 선행 감수부(선행 기저유출 성분)이 감소하는 추

세로 유지하다가 N일 후의 감수부에 해당하는 특정지점과 직선으로 연결하여 직접유출과 기저유출 성분을 분리하는 방법이다(Fig 1a의 A-B'-C). 경사급변법(constant slope method)은 수문곡선의 기점과 감수부에서 경사급변점을 찾아 연결하여 직접유출과 기저유출 성분을 분리하는 방법이다(Fig 1a의 A-D). 그리고 수평직선 분리법(straight line)은 수문곡선에서 기점을 수평선으로 그어 감수부와 만나는 점을 연결하여 직접유출과 기저유출 성분을 분리한다(Fig 1a의 A-E).

2.2.2. 환경추적자 방법

다음은 환경추적자 방법으로, 질량평형방정식 5, 6 및 7을 이용하여 강우와 하천수에서 추적자의 조성이나 농도에 대해 수문곡선으로부터 직접유출과 기저유출 성분을 분리하는 방법이다(Sklash and Farvolden, 1979).

$$R = B + N \quad (5)$$

$$C_R R = C_B B + C_N N \quad (6)$$

$$N = \left[\frac{C_R - C_B}{C_N - C_B} \right] R \quad (7)$$

여기서, R 은 하천 유출량, B 는 기저유출 성분, N 은 강우 성분, C_R 는 하천의 산소동위원소 조성, C_B 는 기저유출 성분의 산소동위원소 조성, C_N 는 강우 성분의 산소동위원소 조성이다(Fig. 1b).

2.3. 환경추적자 방법에서 기저유출 변동량

한편, 단일강우에 반응하는 기저유출(EB) 성분을 결정하기 위해서 식 8을 이용하여 수문곡선으로부터 환경추적

자 방법을 이용해 기저유출 성분(B)에서 이전 강우에 의한 기저유출 성분(PB)을 제거해야 한다.

$$EB = B - PB \quad (8)$$

집수구역에서의 지하수 함양량은 질량평형에 의해 강우 사상이 있을 때, 기저유출의 변동량(EB)으로 나타낼 수 있다. 식 9를 이용하여 기저유출률(η)은 강우량(P)에 대한 기저유출의 변동량(EB)을 정의된다.

$$\eta = \frac{EB}{P} = \frac{B - PB}{P} \quad (9)$$

식 (8)에서 기저유출 변동량(EB)은 식 (10)을 이용하여 유출기간(t) 동안 단일강우로 인한 변동된 기저유출 성분(EB(t))을 적분하여 구하였다.

$$EB = B - PB = \int_{t_0}^t EB(t) = \int_{t_0}^t B(t)dt - \int_{t_0}^t PB(t)dt \quad (10)$$

여기서, B와 PB는 기저유출량과 이전 강우에 의한 기저유출량이고, B(t)와 PB(t)는 시간(t)에 대한 기저유출량과 이전 강우에 의한 기저유출량이다.

3. 연구 구역

연구지역인 보은군에는 보성천, 회인천, 달천, 삼가천,

거현천, 흑천, 오덕천 등의 하천들이 발달되어 있으며, 연구지역은 행정구역상 충청북도 보은군의 봉황교 상류의 집수구역이다(Fig. 2). 집수구역의 주 하천인 달천은 내속리면의 속리산에서 발원하여 산외면 북부를 동에서 서로 관통하고 내북면에서 지천인 흑천과 합류하여, 보은군으로부터 유출되는 한강수계의 최상류 유역의 하천이다. 달천과 흑천은 봉황교 부분에서 합류되는데 집수구(outlet point)는 봉황교로부터 약 500 m 떨어진 상류였다. 집수구는 하천을 가로지르는 맨홀형 보가 있어, 순간 강우에 의한 유출량을 측정하기에 이상적인 조건을 갖추고 있었으며, 무엇보다 접근의 편의성이 있었다. 맨홀형 보는 유출구가 수류 방향과 일치되어 있고, 맨홀 사이를 시멘트로 채워서, 맨홀의 유출구로만 물이 나간다. 따라서, 맨홀형 보의 유출구는 위어(weir)와 같은 역할을 했다. 집수구역 면적은 109.83 km²이었다.

4. 연구 결과

4.1. 강우량과 강우의 산소동위원소 조성

강우량은 11개소에서 관측하였다(Fig. 2 참조). 11개 관측 지점에서 2007년 7월 29일 13시와 14시에 시간 단위로 계측된 강우량의 공간적인 분포는 Fig. 3(a)와 같다. 이 중 집수구역이 포함된 9개 지점만 해석에 사용되었다. 강우 시료는 6개 지점에서 2007년 7월 29일에 각 1개씩

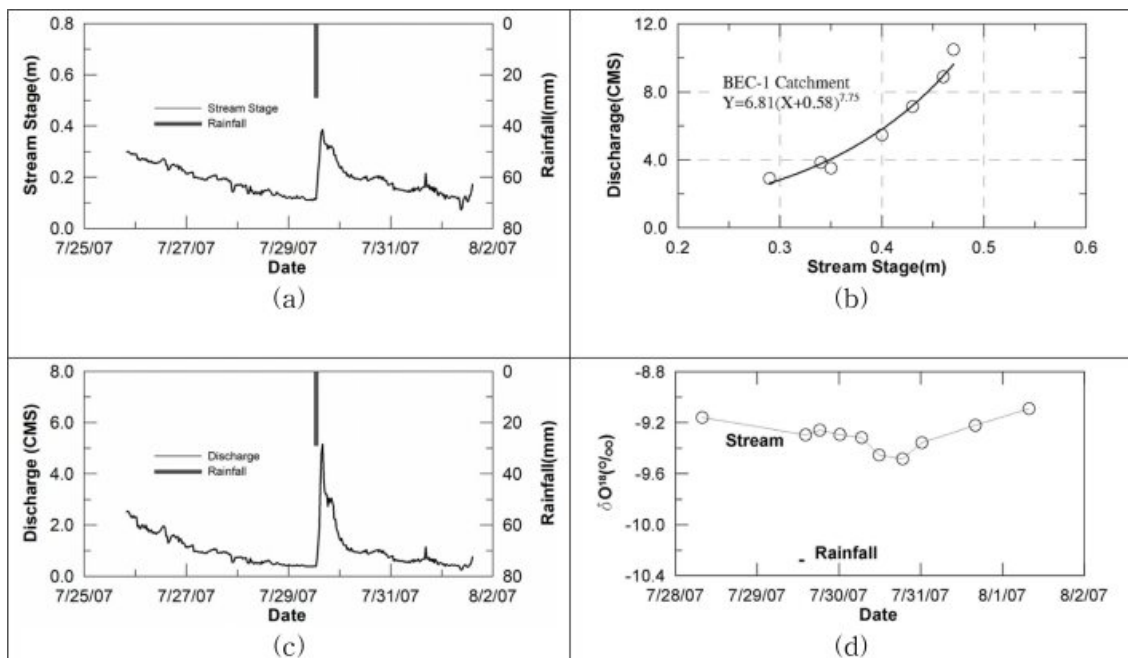


Fig. 4. Stream monitoring results in the stream of study catchment: (a) stage, (b) rating curve, (c) discharge, and (d) change in $\delta^{18}\text{O}$ value.

채수하였고 강우의 산소동위원소 조성의 공간적인 분포는 Fig. 3(b)와 같았다. 보은군의 남북으로 강우량의 밀도가 높았고 서남으로 산소동위원소 조성이 무거웠다. 이것은 동북 방향의 속리산이 있어서 고도 효과에 의한 영향으로 판단하였다.

4.2. 하천의 유출량과 산소동위원소 조성

수위 자료는 대기압과 목측 수위 보정을 거쳐 환산되었다. 수위 계측과 유량측정 기간은 2007년 7월 25일부터 8월 1일까지였다(Fig. 4(a)). 유량측정은 7회 측정이 있었고, 집수지에서 수위-유량 관계곡선은 Fig. 4(b)와 같았다. 수위-유량 관계 곡선식을 이용하여 유출량을 나타내면 Fig. 4(c)와 같다. Fig. 4(d)는 동기간에 하천에서 산소동위원소 조성의 변화를 보여주는 그림이다. 하천에서 산소동위원소 조성은 강우 발생 후 일정 시간 경과 후 낮은 조성으로 가벼워졌다.

4.3. 유출수문곡선 분리와 기저유출률

도식적인 방법들과 환경추적자 방법으로 기저유출 성분을 분리한 그림이 Fig. 5이다. Fig. 5a에서 검정색은 감

수곡선, 빨간색은 N-day법, 파란색은 수정 N-day법, 녹색은 경사급변법, 보라색은 수평직선분리법이다. Fig. 5b에서 원(○ or ●)으로 표시된 부분은 하천으로부터 시료를 채취한 시각과 그때의 기저유출 성분을 나타낸다. 흰 원(○)은 측정된 값이며 검정 원(●)은 추정된 값이다. 추정 값은 강우가 내리기 바로 전과 하천유출의 침투 부분이다. 추정된 두 값의 표현은 그 시각에 시료를 채취하지 못했기 때문이었다. 그러나 강우가 내리기 바로 직전에 시료를 채취하지 못했더라도 앞서 채취한 첫 번째 채취한 값과 같거나 유사할 것으로 가정하였는데, 강우 사상 전 하천에서 유출수는 외부적으로 유출입한 인위적인 기작이 없는 한 같은 값이기 때문이다. 마지막 시료 채취는 2007년 8월 1일 있었고 이때의 산소동위원소 조성은 강우가 오기 전의 값과 유사하였다(Fig. 4d 참조). 점선은 하천유출의 감수부를 나타낸 것으로 이전 강우에 의한 기저유출 성분(PB)과 강우 사상 이후 하천 유출량을 추정한 감수곡선(recession curve)이다. 각 감수곡선은 상관계수(R^2)가 0.96이 되도록 산정하였고, 감수곡선식은 강우 전·후로 구분하여 Table 1에 정리하였다. Table 1에서 R은 유출량이고 T는 시간이다.

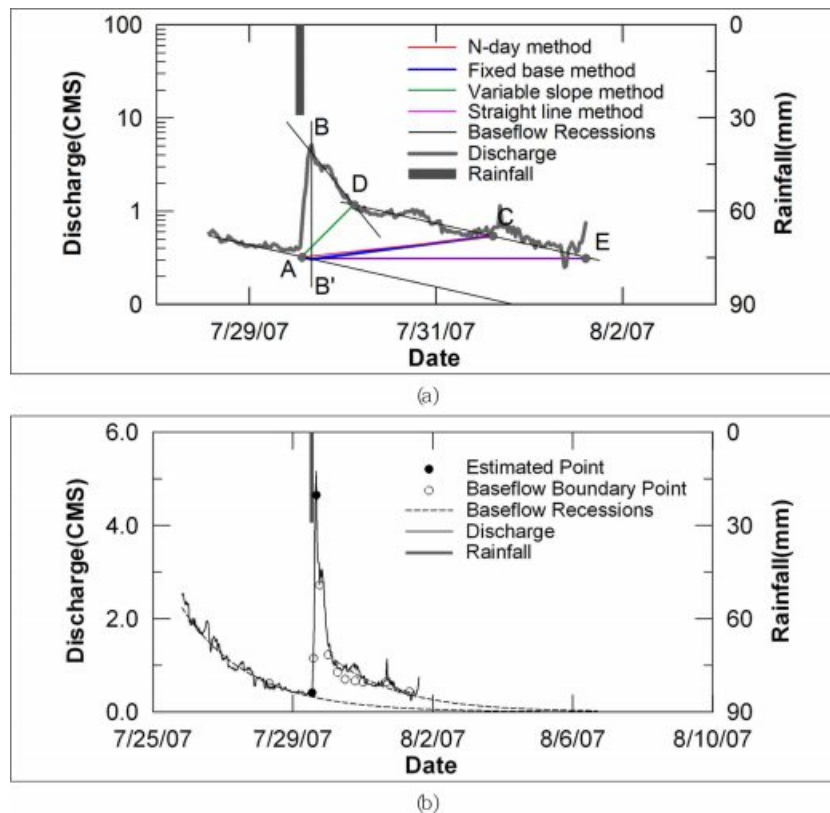


Fig. 5. Results of hydrograph separation in study catchment by (a) graphical methods and (b) environment tracer method. The two baseflow recessions (see dot lines) were divided into the pre-baseflow (under) and the baseflow change (upper).

Table 1. Equations of recession curve to the hydrograph in the study area

Contents	Equation of recession curve	Correlation coefficient (R^2)
Before rainfall	$R = 1.5 \times EXP(-0.000006 \times T + 0.4)$	0.96
After rainfall	$R = 1.5 \times EXP(-0.000006 \times T - 0.3)$	0.96

Table 2. Baseflow ratio in the study area calculated by four graphical methods and environmental tracer method

Contents	N-day	Fixed base	Variable slope	Straight line	Environ. Tracer
Rainfall (mm)			21		
Baseflow (mm)	1.4	1.4	1.9	1.3	2.0
Pre-baseflow (mm)			0.5		
Baseflow change (mm)	0.9	0.9	1.4	0.8	1.5
Baseflow ratio (%)	4.4	4.3	6.7	3.6	7.0

The baseflow ratio is the ratio of the baseflow change to the baseflow, and the baseflow change is the baseflow minus the pre-baseflow. All values were divided by the catchment area to match rainfall units. See Fig. 1 for the methods, and Fig. 5 for the definition of the pre-baseflow and the baseflow change.

기저유출 변동량을 계산해서 면적에 대한 유출고로 나타내면 강우와 같은 단위(mm)가 되기에 기저유출 성분을 강우량에 대하여 비교하기가 수월하다. 강우량에 대해 백분율로 계산된 기저유출률은 N-day법이 4.4%, 수정 N-day법이 4.3, 경사급변법이 6.7%, 수평직선법이 3.6%, 추적자를 이용한 방법이 7%이었다(Table 2 참조).

5. 고 찰

도식적인 방법 중 N-day법과 수정 N-day법은 유출성분의 변화는 유역면적과 관련된다는 가설이 적용된 방법이다. 경사급변법은 수문곡선은 유출량을 나타내는 것이므로 유출량의 변화는 유출성분의 변화로 봐야 한다는 해석을 바탕으로 하고 있다. 수평직선분리법은 수문곡선의 기점부터 수평선을 그어서 직접유출과 기저유출 성분을 구분하는 가장 간단한 방법이다. 이와 같이 도식적인 방법들은 다소 직관적어서 충분한 과학적 근거를 가졌다고 볼 수 없었다.

수문곡선은 유역의 면적뿐만 아니라 수문 특성과 관련된 토양 및 지질분포, 대수층 특성, 식생 분포, 수로 및 지형 특성 등 모든 것들의 특성이 반영된 결과이므로 오로지 유역면적에 근거해 기저유출 성분을 분리하기에는 한계가 있다. 결정적으로 도식적인 방법들은 직접유출과 기저유출 성분을 분리한 형태는 경사급변법을 제외하고는 모두 유사하였다. 다만, 경사급변법은 수문곡선 상승부와 하강부의 곡선을 어느 정도 반영하는 모양을 따르고 있는데, 이와 같은 모양은 짧은 시간에 여러 단일강우가 자주 발생하는 우리나라에 더 적합할 것으로 생각된다(Fig. 5a

참조). 다른 도식적인 방법은 여러 강우사상을 고려하지 않고 일정시간이 지나거나, 수문곡선의 기점의 유량이 감부수에서 동일할 때 직접유출과 기저유출 성분을 분리하는 것이므로 여러 강우사상에 대한 해석이 반영되지 않기 때문에 기저유출량을 과소평가할 것으로 생각된다.

한편, 환경추적자 방법은 수문곡선으로 분리된 기저유출 성분의 모양이 수문곡선과 유사해 수문곡선에서 상당한 부분이 기저유출 성분임을 보여준다(Fig. 5b 참조). 하천수에서 산소동위원소 조성의 변화를 살펴보면, 조성이 가벼운 강우로 인해 상대적으로 무거웠던 하천수의 조성도 가벼워졌다(Fig. 4d 참조). 또 질량평형방정식을 이용해 분리한 모양은 증가부에서 도식적인 방법과 많은 차이를 보였다(Fig. 5 참조). 수문곡선으로부터 분리된 기저유출성분의 침투 시각이 수문곡선의 것과 유사하였다. 이러한 결과는 국내에서 행하여진 추적자를 이용한 다른 연구 결과들(Cho et al., 2003, 2005, 2007, 2008; Lee et al., 2006)에서도 비슷하였다. 환경추적자 방법은 기저유출 성분이 호우 시에도 감소하지 않고 오히려 더 많이 유출되고 있음을 보여준다.

강우에 대해 기저유출률이 가장 큰 순서대로 나열하면, 환경추적자 방법 > 경사급변법 > N-day법 > 수정N-day법 > 수평직선법 순이었다(Table 2). 도식적인 방법들은 수문곡선에서 기점은 동일하지만 감수부의 특정지점의 선택이 방법들마다 다르기에 기저유출량도 다르게 산정된다. 이렇게 감수부에서 특정지점을 선택하는 것은 충분한 물리적 근거를 가졌다고 볼 수 없다. 이에 비하여 환경추적자 방법은 질량평형방정식에 의해 추적자의 조성이나 농도 차로부터 산정되기에 충분한 물리적 근거가 있다고 볼

수 있다.

그러나 환경추적자 방법은 수문곡선에서 분리된 기저유출 성분을 시간에 따라 살펴보면 기저유출의 변화량이 강우에 대해 즉각적으로 반응하는 것처럼 보였다. 기저유출은 느린 유출로 정의되는데 이렇게 빠른 반응이 가능한지 의심스럽다. 일반적인 토양에서 지하수의 평균속도는 하루에 0.86 cm(Fetter, 1994)이므로 강우 발생 후 약 1시간 만에 기저유출량의 변동은 또 다른 기작이 있어야 가능하다. 추적자의 조성이나 농도의 대비(contrast)가 강우와 강우 전 하천수(기저유출)과 클수록, 수문곡선으로부터 기저유출 성분은 명확히 분리된다. Fig. 3b처럼 강우의 산소동위원소 조성이 위치마다 다르기에 일부 지역에서 강우와 하천수의 조성 차가 크지 않아 명확히 분리되지 않을 수 있다. 그렇지만 그것도 강우에 대한 기저유출 성분의 즉각적인 반응의 사유로 해석하기엔 한계가 있다. 강우의 빠른 침투(preferential pathway)가 층적층과 암반층의 경계에서 피스톤 흐름(piston flow)으로 반응하거나, 비교적 지하수면이 지표에 가까운 이득하천(gaining stream) 주변에서 하천수가 지하수와 빠르게 반응한 결과인지는 더 연구가 필요하다.

수문곡선으로부터 기저유출 성분을 분리하는 도식적인 방법들(N-day법, 수정 N-day법, 경사급변법, 수평직선법 등)은 간편하고 경제성이 있어서 널리 사용되어 온 방법들이다. 이러한 방법들은 호우 시 수문곡선에서 기저유출 성분이 크지 않을 것이라는 가정 하에 분리된 결과도 오차가 크지 않을 것이라고 단정되었다(Lee, 2007). 그러나 환경추적자 방법을 연구한 학자들의 많은 결과는 호우 시 수문곡선에서 40~50%가 기저유출 성분임을 보였다(Turner and Barnes, 2000). 물론, 이러한 결과는 100 km² 이하의 유역면적을 갖는 상류 수계에서 소유역에 국한된 결과일 수 있다. 호우 시 총 하천유출에 대한 기저유출 성분의 유출율은 집수면적이 작은 유역에서 크다는 연구 결과를 보였기 때문이다(McDonnell et al., 1991; Cho et al., 2007). Cho et al.(2005)은 이러한 결과가 유역이 크면 클수록 강우 총량이 많아지므로 상대적으로 기저유출 성분은 적어질 것으로 생각하였다.

도식적인 방법들은 국가하천이나 큰 강을 포함하는 대유역에서 지하수 함양량을 추정하기 위해서 많이 활용되었다(MOLIT and K-Water, 1995; Park, 1996; Lee and Yun, 1996; Kim and Jo, 2000a; Kim and Jo, 2000b; Park et al., 1999; Weon et al., 2000). 그러나 이러한 방법들로 추정된 지하수 함양량은 소유역부터 대유역까지 하천 유출량에 대한 기저유출 성분의 유출율이 일정하

에 하천유출량에 대해 일정하였다. 기저유출 성분의 유출율은 유역의 형상별, 면적별 그리고 식생별 등에 따라 일정하기보다는 다를 것이라는 추정이 합리적이라 생각된다. 이러한 추정을 과학적으로 해결하기 위해 향후 다양한 유역에서의 추가적인 연구가 필요하다.

6. 결 론

수문곡선으로부터 기저유출 성분을 분리하는데 도식적인 방법들과 환경추적자 방법을 현장에 적용하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연구지역에서 여러 가지 방법으로 기저유출률을 산정하였다. 그 결과, 환경추적자 방법 > 경사급변법 > N-day법 > 수정N-day법 > 수평직선법 순으로 기저유출 성분이 크게 산정되었다. 도식적인 방법들에서 기저유출 성분의 변동량이 많이 나타나는 이유는 직접유출과 기저유출을 분리하는 분리선의 위치에 따라 유출량이 달라지는 당연한 결과로 해석된다. 환경추적자 방법은 선택된 추적자로 인해 기저유출의 변화량이 강우에 대해 즉각적으로 반응을 보여서 나타난 결과로 해석되나, 느린 유출로 대변되는 기저유출의 특성과는 다소 다르므로 추가적인 연구가 필요하다.

(2) 도식적인 방법들은 호우 시 유출성분에서 기저유출 성분이 크지 않을 것이라는 가정에 직선적인 도식에 의한 기저유출 분리였기에 오차가 크지 않을 것이라고 단정했지만, 추적자를 이용하는 방법과 비교했을 때 차이가 크게 나타났다. 단기간의 기저유출 성분을 분리하기 위해서는 도식적인 방법이 다소 과대 또는 과소로 평가될 수 있는 여지가 있다고 판단한다.

(3) 수문곡선에서 주관적으로 기저유출 성분을 구분하는 도식적인 방법들은 과학적인 근거가 충분하다고 볼 수 없다. 집수유역의 수문곡선은 수문 특성과 관련된 토양, 지질, 대수층, 식생, 수로 및 지형 등의 분포와 특성이 모두 반영된 결과이므로, 수문곡선과 유사한 모양의 기저유출 성분을 분리하는 환경추적자 방법이 더 타당하리라 판단된다. 또한, 환경추적자 방법은 질량평형방정식을 이용한 정량적인 근거를 가진다.

사 사

본 연구는 건설교통부의 “보은지역 지하수 기초조사” 보고서 자료(MOCT et al., 2007)를 활용하였으며, 공동연구자는 한국지질자원연구원의 기본사업 “기후변화대응

대용량지하수 확보 및 최적활용 기술개발(GP2020-012)” 지원을 받아 수행하였습니다. 세심한 심사를 맡아준 심사위원들에게 감사의 말씀을 드립니다.

References

- Barnes, B.S., 1939, The structure of discharge-recession curves, *Trans. AGU*, **20**(4), 721-725.
- 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.*, **75**(1-4), 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.*, **88**(3-4), 213-234.
- Cho, S.H., Cho, M.J., Moon, S.-H., Kim, Y.S., and Lee, K.-S., 2008, Estimation of groundwater recharge in a district-scale area using ^{18}O tracer, *J. Geol. Soc. Korea*, **43**(3), 331-340.
- Cho, S.H., Ha, K., Kim, T., Cheon, S., and Song, M.Y., 2007, Hydrograph separation for two consecutive rainfall events using tracers (^{18}O & Cl), *J. Geol. Soc. Korea*, **43**(2), 253-263.
- Cho, S.H., Moon, S.H., Kho, 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, *J. Geol. Soc. Korea*, **41**(3), 427-436.
- Cho, S.H., Moon, S.-H., Lee, K.-S., and Kim, S.C., 2003, Hydrograph separation using ^{18}O tracer in a small catchments, Cheongdo, *J. Geol. Soc. Korea*, **39**(4), 509-518.
- 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 Res.*, **29**(10), 3577-3587.
- Fetter, C.W., 1994, Applied hydrogeology, 3rd Edition, Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 691 p.
- 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 Res.*, **30**(4), 983-993.
- Hooper, R.P. and Shoemaker, C.A., 1986, A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation, *Water Resources Res.*, **22**(10), 1444-1454.
- Horton, R.E., 1933, The role of infiltration in the hydrologic cycle, *Trans. AGU*, **14**(1), 446-460.
- Kendall, C. and McDonnell, J.J., 2000, Isotope tracers in catchment hydrology, 2nd impression, Elsevier, Netherlands. 839 p.
- Kim, G.-S. and Jo, K.-T., 2000a, A study on the estimation of base flow using baseflow separation in the Daechung Dam Basin, *J. Korean Soc. Groundwater Environ.*, **7**(1), 15-19.
- Kim, G.-S. and Jo, K.-T., 2000b, A study on the base flow recession curve development in the Ssangchi Basin of the Sumjin River, *J. Korean Soc. Groundwater Environ.*, **7**(2), 66-72.
- Lanbein, W.B., 1938, Some channel-storage studies and their application to the determination of infiltration, *Trans. AGU*, **19**(1), 435-447.
- 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, *Chem. Geol.*, **179**(1-4), 129-143.
- Lee, D.R. and Yoon, Y.N., 1996, Estimation and analysis of groundwater Recharge in Korea, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, **16**(II-4), 321-334.
- Lee, J.S., 2007, Hydrology, 2nd impression, Kumiseokwan, Seoul, Korea. 725 p.
- 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, *J. Geol. Soc. Korea*, **42**(3), 427-437.
- McDonnell, J.J., Stewart, M.K., and Owens, I.F., 1991, Effect of catchment-scale subsurface mixing on stream isotopic response, *Water Resources Res.*, **27**(12), 3065-3073.
- MOCT (Ministry of Construction and Transportation), K-Water (Korea Water Resources Corporation), and KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2007, Basic Survey of Groundwater in Boeun area.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) and K-Water (Korea Water Resources Corporation), 1995, Groundwater Management Investigation Report; Groundwater Resource Basic Investigation (3rd), IPD-95-5a.
- Moore, R.D., 1989, Tracing runoff sources with deuterium and oxygen-18 during spring melt in a headwater catchment, Southern Laurentians, Quebec, *J. Hydrol.*, **112**(1-2), 135-148.
- Park, C.-G., 1996, Estimation of the available amount of groundwater in South Korea: 1. Development of the method, *J. Korean Soc. Groundwater Environ.*, **3**(1), 15-20.
- Park, J.-S., Kim, K.-H., Jeon, M.-W., and Kim, J.-S., 1999, Estimation methods of groundwater recharge rate in small basin, *J. Korean Soc. Groundwater Environ.*, **6**(2), 76-86.
- Pinder, G.F. and Jones, J.F., 1969, Determination of the groundwater component of peak discharge from the chemistry of total runoff, *Water Resources Res.*, **5**(2), 438-445.
- Singh, V.P., 1969, Theoretical baseflow curves, *J. Hydraulics Div.*, ASCE, 95(HY6), 2079-2048.

Sklash, M.G. and Farvolden, R.N., 1979, The role of groundwater in storm runoff, *J. Hydrol.*, **43**(1-4), 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 Res.*, **22**(8), 1273-1282.

Turner, J.V. and Barnes, C.J., 2000, Modeling of isotope and hydrogeochemical responses in catchment hydrology. In: Kendall C. and McDonnell J.J. (Eds) *Isotope tracers in catchment hydrology*; Elsevier, Netherlands, Chapter 21, p. 723-760.

Ward, R.C. and Robinson, M., 1990, Principles of hydrology, 3rd

Edition., McGraw-Hill, London, 365 p.

Wels, C., Cornett, J., and LaZerte, B., 1991, Hydrograph separation: A comparison of geochemical and isotopic tracers, *J. Hydrol.*, **122**(1-4), 253-274.

Weon, L.-J., Kim, H.-S., Han, C., 2000, Estimation of groundwater development potential by baseflow separation method using hydrographic data of Jindong and Waekwan area in Nakdong River Basin, *KoSSGE 2000 Fall Meeting*, Seoul Nat'l. Univ., Seoul, p. 157.

Yun, T.H., 2001, Applied Hydrology, 5th impression, Cheongmoogak, Seoul, Korea. 924 p.