

수문곡선의 감수부 특성을 고려한 기저유출 산정

정영훈 · 임경재* · 김형수**[†]

국립강원대학교 환경연구소

* 국립강원대학교 지역건설과

** 인하대학교 토목공학과

Estimation of baseflow considering recession characteristics of hydrograph

Jung, Younghun · Lim, Kyoung Jae* · Kim, Hungsoo**[†]

Institute of Environmental Research, Kangwon National University, Korea

** Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, Korea*

*** Department of Civil Engineering, Inha university, Korea*

요 약

수문곡선의 감수부는 기저유출의 특성을 반영하기 때문에 강우유출 모형과 기저유출분리법을 이용한 기저유출 산정 과정에서 감수부의 특성을 고려해야한다. 따라서 본 연구는 감수특성을 고려하여 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)의 보정에서 유량예측의 정확성을 높이고, 보정된 SWAT으로부터 예측된 유량으로부터 기저유출을 분리하고자 하였다. 이를 위하여 RECESS으로부터 산정된 alpha factor와 11개의 다른 매개변수를 자동보정모듈에 적용한 시나리오 (S1)와 SWAT의 매개변수인 alpha factor를 포함한 12개의 매개변수를 자동보정모듈에 적용한 시나리오 (S2)에 대해 SWAT을 이용해 유량 모의를 하였다. 또한, 두 시나리오에 대해 SWAT으로 예측된 유량을 Web-based Hydrograph Analysis Tool (WHAT)을 적용하여 기저유출을 산정하였다. 보정 결과는 유량에 대한 두 시나리오의 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) 값들 사이에 큰 차이는 보이지 않았으나 기저유출의 경우 S1에 대한 NSE는 0.777이고, S2의 NSE 결과는 0.844로 다소 큰 차이를 보였다. 연평균 유량의 분포의 정량적 비교를 위한 관측유량과 상대오차를 산정하였으며 S1에 대하여 20.78%, S2에 대하여 6.59%의 상대오차를 보였다. 본 연구는 모형을 이용하여 예측된 유량으로부터 기저유출을 산정하는데 있어 감수부 특성의 중요성을 보여주었다.

핵심용어 : 기저유출, 감수부, 보정, SWAT, WHAT

Abstract

Recession of hydrograph gives a significant contribution to estimation of baseflow using rainfall-runoff models and baseflow separation methods, because recession affects baseflow. This study attempted to enhance the accuracy of streamflow predictions using a Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model and to separate baseflow from the predicted streamflow. For this, this study used two scenarios: 1) to calibrate eleven parameters using an auto-calibration tool with the alpha factor obtained from RECESS (S1); and 2) to calibrate twelve SWAT parameters including alpha factor (one of SWAT parameters) using an auto-calibration tool (S2). Then, baseflow separation from the predicted streamflow was conducted by using Web-based Hydrograph Analysis Tool (WHAT). The results show that there is no significant difference between Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) values of S1 and S2 for calibrations to streamflow. However, calibrations to baseflow showed that NSEs are 0.777 for S1 and 0.844 for S2, which means a significant difference. Quantitatively compared to the observed streamflow, relative errors were 20.78 % for S1 and 6.59 % for S2. Finally, this study showed the importance of recession in baseflow separated from the predicted streamflow using a rainfall-runoff model.

Keywords : Baseflow, Recession, Calibration, SWAT, WHAT

1. 서론

기후변화로 인하여 수문학적 환경의 변동성이 증가하고 있으며, 이러한 지속적인 변동성은 홍수와 가뭄과 같은 자연재해의 빈도와 규모를 증가시키고 있다 (Kumar and Merwade, 2012; Jung et al., 2013). 특히, 강우강도 증가와 건기기간의 장기화는 극지화의 경향을 따라가는 계절별 강우분포의 양극성을 보여준다. 국내와 같이 유황계수가 큰 지역에서 기후변화에 따른 수문변동성은 지속 가능한 수자원관리에 심각한 걸림돌이 될 수 있다. 이에 따라 기후변화에 대한 수자원 확보 및 수생태 안정을 위한 대응체계를 정확한 수문예측을 기반으로 구축하여야 한다.

지하수는 상수도가 보급되지 않은 국내 농업지역 및 산간지역에서 수자원의 주요 공급원이다. 게다가, 지하수는 수자원 이용성을 증가시켜 기후변화에 따른 지표 수자원 공급에 대한 변동성을 줄일 수 있는 중요한 수자원이다. 이러한 인식으로 인하여 지하수 관리에 대한 필요성이 대두됨에 따라 지하수 관련 다양한 연구들이 활발히 수행되었다 (Eckhardt and Ulbrich, 2003; Kim et al., 2005) 일반적으로 효율적인 지하수 관리를 위해서 지하수의 이용 가능량과 지하수 함양량을 파악하는 것이 중요하다. 지하수의 감소는 하천의 건천화를 초래할 수 있으며, 용수공급, 수생태 서식지, 친수공간으로써의 하천기능을 저하시킬 수 있기 때문이다. 기저유출은 대수층으로부터 유출입 되는 지하수의 영향을 받기 때문에 지하수 이용 가능량 및 함양량과 큰 연관성을 가지고 있다. 이러한 이유로 기저유출 특성을 파악하기 위한 많은 노력들이 있었다. 기저유출-감수곡선 분석법, 곡선 접합법, 지하수위 변동곡선법 등은 대표적인 해석적 (analytic) 도식적 (graphical) 기저유출 분리방법들이다. 또한, 추적자 (tracer)를 이용한 수치적 (numerical) 방법도 기저유출 분리를 위해 사용되어왔다.

컴퓨터의 발달은 장기간 유량자료에 대한 기저유출 분리방법의 활용성 및 접근성을 높였다. 예를 들어, Hydrograph Separation Program (HYSEP) (Sloto and Crouse, 1996), PART (Rutledge, 1998), RORA (Rutledge, 1998), BFlow (Arnold and Allen, 1999), Web-based Hydrograph Analysis Tool (WHAT) (Lim et al., 2005) 등은 기저유출 분리에서 널리 사용되어온 대표적인 프로그램들이다. 이러한 기저유출분리 프로그램 중 하나인 RECESS는 주 감수곡선 분석법을 적용하여 유량으로부터 기저유출을 분리한다. RECESS를 통해 얻을 수 있는 감수인자 (Recession Index)는

하나의 Log cycle에서 감소하는 지하수 유출이 걸리는 시간을 의미한다 (Rutledge, 1998). 이는 유역에서의 감수특성을 설명하기에 편리한 방법이기 때문에 (Kienzle, 2006), 유역이 작고, 유역경사가 급해 강우 사상 후 빠른 시일(1-3일) 내에서 하구까지 물이 도달하는 우리나라의 강수특성을 파악하는데 중요한 역할을 할 수 있다.

기저유출은 직접유출과 함께 하천의 수문학적 및 생태학적 기능을 유지하기 위한 통합하천관리에서 중요한 역할을 한다. 기저유출은 그 특성상 관측이 매우 어렵기 때문에, 대부분 계측유역에서 관측된 유량으로부터 기저유출을 분리하여왔다. 하지만 통합적인 유역 및 하천관리를 위해서는 미계측 유역에서의 기저유출을 파악하는 것이 중요하다. 미계측 유역에서의 기저유출 분리는 강우유출 모형을 이용한 예측 유량에 대하여 이루어 질 수 있다. 미계측 유역에서의 유량을 예측하기 위하여 다양한 강우유출 모형들이 사용되어 왔다 (Yadav et al., 2007; Kim and Shin, 2009; Loukas and Vasiliades, 2014) Soil and Water Assessment Tool (SWAT)은 준 분포형 강우유출 모형으로써 미계측 유역에서의 수문 특성을 예측하기 위해 가장 널리 사용된 모형들 가운데 하나이다 (Shin et al., 2007; Srinivasan et al., 2010). SWAT에서 제공하는 자동보정모듈은 SWAT의 이용성 및 적용성을 확장시켜왔다 (Abbaspour et al., 2007). 그러나 SWAT은 각 수문요소들과 관계된 많은 매개변수들이 포함되어 있고, 자동보정모듈은 물리적 의미 없이 임계값을 만족하는 매개변수들의 수학적 조합을 찾는다. 이러한 과정에서 보정된 매개변수는 각 수문요소들의 특성을 나타내지 못하는 경우가 발생하기 때문에 SWAT으로 예측된 유량을 이용할 때 불확실성이 발생할 수 있다. 특히 정확한 기저유출을 산정하기 위하여 유량을 예측하는 과정에서 기저유출과 상관성이 높은 수문곡선의 감수특성을 반영하는 것이 필요하다. 이러한 점들은 고려하여, 본 연구의 목적은 1) 수문곡선의 감수특성을 고려하여 SWAT의 보정에서 유량산정의 정확성을 높이고, 2) 보정된 SWAT으로부터 모의된 유량으로부터 기저유출을 분리하는 것이다. 본 연구에서 감수특성은 RECESS를 이용하여 산정된 SWAT의 매개변수인 alpha factor를 자동보정모듈에 적용함으로써 반영되었다. 이는 alpha factor를 자동보정모듈로 산정된 결과와 비교함으로써 SWAT의 적용에서 감수특성의 중요성을 나타내고자 한 것이다. 또한, 기저유출분리는 보정된 SWAT으로 모의된 유량에 WHAT을 적용하여 수행되었다.

2. 연구 방법

2.1 대상유역 및 자료

갑천유역은 금강수계에 위치해 있으며, 대전광역시를 포함하고 있다. 중앙정부의 인구분산 및 지역균형발전 정책으로 인하여 많은 정부기관이 세종시로 이전함에 따라 갑천유역내 인구는 꾸준히 증가하여 2011년 기준 1,478,430명이 거주하고 있다. 특히, 대전광역시는 지난 25년동안 600,000명이 증가하여, 금강 수계에서 갑천유역의 수문학적 기능은 더욱 중요해졌다. 게다가 갑천과 금강분류 합류점을 기준으로 상류에는 대청댐이 위치하고 있고, 하류에는 세종시가 위치하고 있다. 이에 따라 다목적 댐인 대청댐은 환경관리, 용수공급, 친수공간 등의 금강분류 기능을 유지하기 위하여 갑천의 유입량은 매우 중요한 정보이다. 그러나, 갑천은 금강과의 합류점에서 일유량관측이 이루어지지 않기 때문에 금강으로 유입되는 갑천의 유량 및 기저유출에 대한 정보가 미흡한 실정이다. 갑천이 금강분류와 합류하는 지점을 기준으로 유역의 총면적은 649 km²이다. 갑천유역내 회덕지점에 유량관측소가 있기 때문에 회덕지점을 기점으로 한

597 km²의 유역 (회덕유역)에 대하여 SWAT을 보정하였으며, WHAT을 이용하여 모의된 유량으로부터 기저유출을 산정하였다. 갑천유역은 가파른 산악지역이며, 평균 유역경사는 28 %이다. 또한 평균표고는 약 176 m이며 평균 유역폭은 약 11 km이다. 연평균 강수량은 1,354 mm이며, 연평균 온도는 약 12.3 °C이다.

SWAT을 이용한 유량모의는 일반적으로 토지이용도, 토양도, 표고자료와 함께 강우, 풍속, 습도, 일사량, 온도 등의 기상자료를 이용하여 수행된다. 본 연구에서 사용된 표고자료는 국토지리정보원에서 제공하는 5 × 5 m 해상도의 수치표고모델 (Digital Elevation Model: DEM)를 이용하였다. 환경지리정보시스템에서 제공하는 2005년 토지이용도와 농촌진흥청에서 제공하는 토양도를 이용하였으며, 두 지도의 해상도는 30 × 30 m 이다. 또한, SWAT모의를 위해 기상청에서 제공하는 일단위의 연속적인 기상자료를 이용하였으며, 보정을 위해 국가수자원관리종합시스템에서 제공하는 일유량을 관측자료로 이용하였다 (Table 1).

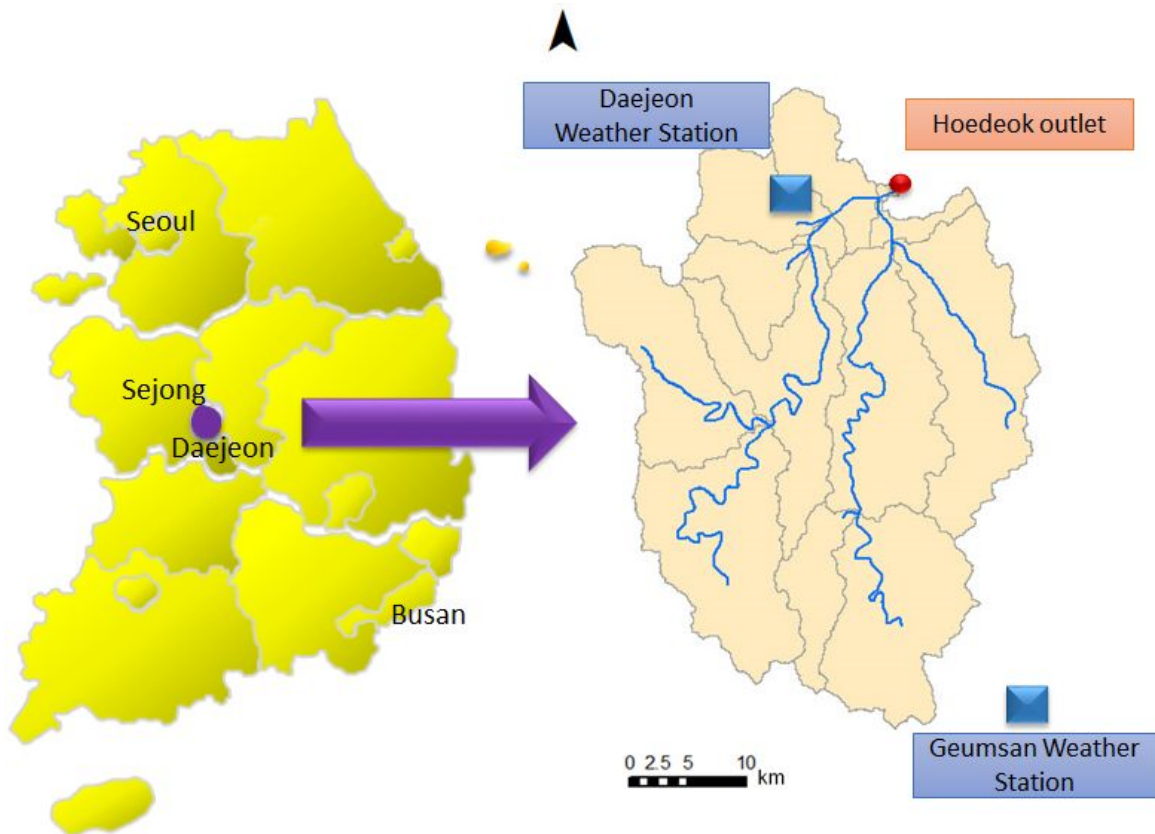


Figure 1. Study Site: Gapcheon watershed, South Korea

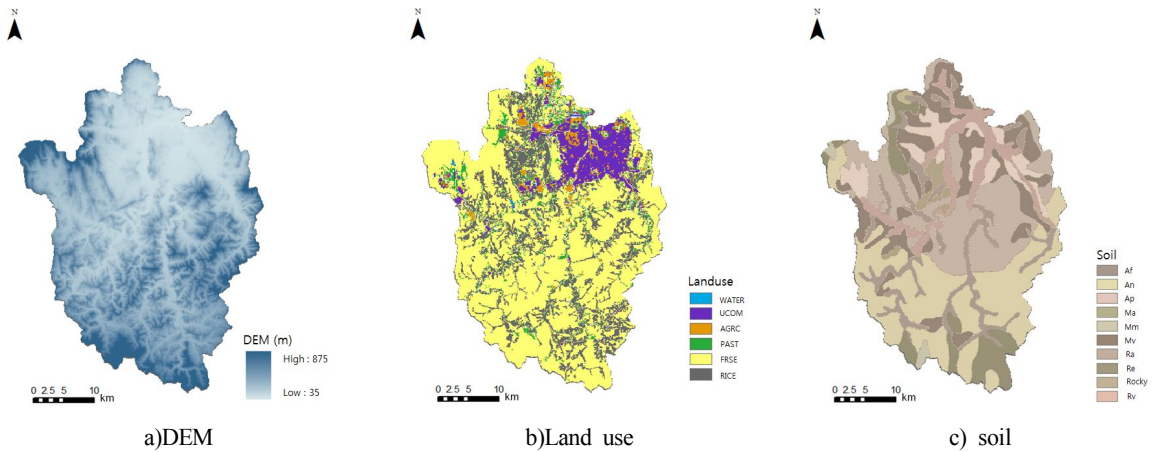


Figure 2. DEM, Land use, and Soil map.

Table 1. Dataset used in the SWAT simulations

Dataset	Period	Data source
Daily Precipitation (mm)	2002 - 2007	Korea meteorological administration (KMA)
Daily Temperature (°C)		
Daily Wind Speed (m/sec)		
Daily Solar Radiation (MJ/m ²)		
Daily Humidity (%)		
Daily Streamflow (m ³ /s)	Water management information system, Republic of Korea (WAMIS)	

2.2 RECESS 모형을 이용한 alpha factor 산정

RECESS 모형은 미국 지질조사국(United States Geological Survey: USGS)에서 개발하여 배포하는 모형으로(Anderson and Burt, 1980) 유역의 장기 유출량 자료를 이용하여 감수특성을 파악하여 Recession index(days per log cycle of recession)를 결정하고(Rutledge and Mesko, 1996) 주지하수감수곡선(Master Recession Curve, MRC)를 정의하여 유역 내 기저유출을 분리한다. Alpha factor (α)는 식 1에 의하여 산정된다.

$$\begin{aligned} Q_t &= Q_0 K^t = Q_0^{-\alpha t} \\ \alpha &= -\ln K \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, Q_0 는 감수부 시작점에서의 유량, Q_t 는 시간 t 에서의 유량, 그리고 K 는 감수인자 (recession index)이다.

2.3 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)의 개요

SWAT (Soil and Water Assessment Tool)은 유역단위 준분포 강우유출 모형으로 유출, 유사, 수질 등의 모의를 할 수 있으며 다양한 분야에 널리 사용되어 왔다 (Arnold et al., 1993). SWAT은 지형 및 수계자료를 이용하여 대상유역을 여러개의 소유역(Sub-basin)으로 나누며, 소유역의 토지이용, 토양상태, 유역경사의 조합을 통하여 더 세분화된 수문반응단위(Hydrologic Response Unit: HRU)로 나눈다. 각각의 소유역이 HRU로 정의됨에 따라, 비슷한 토지이용 및 토양 면적은 집중형의 단위로 고려되기 때문에 계산 시간을 줄일 수 있다 (Neitsch et al., 2002). 수문순환(hydrologic cycle)에 대한 SWAT의 기본개념은 식 2의 물수지 방정식이다

$$\begin{aligned} SW_t &= SW_o \\ &+ \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_\alpha - w_{secp} - Q_{gw}) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, SW_i : 최종 토양수분량 (mm H₂O); SW_0 : i 일의 초기 토양수분량 (mm H₂O); R_{day} : i일의 강수량 (mm H₂O); Q_{surf} : i일의 지표유출량 (mm H₂O); E_{α} : i일의 증발산량 (mm H₂O); Q_{gw} : i일의 회귀수량 (mm H₂O); w_{seep} : i일의 토양층으로부터 투수층으로 유입 수량 (mm H₂O).

2.4 감수부 특성을 고려한 SWAT 보정 및 유량 산정

SWAT-CUP(Calibration and Uncertainty Program)과 같은 자동보정모듈들은 SWAT을 구성하는 많은 매개변수를 보정하는데 있어 편리성을 제공하기 때문에 SWAT의 이용성과 적용성을 증대시켜왔다. 그러나 자동보정모듈은 SWAT의 많은 매개변수들에 대하여 임계점을 만족하는 매개변수 조합을 찾기 위해 각 매개변수의 물리적 특성을 고려하기 보다는 수학적인 매개변수 조합에 의존한다. 이러한 이유로 많은 매개변수를 보정할수록 더욱 많은 시간이 필요하며, 보정 과정에서 하나의 매개변수는 다른 매개변수들에 의해 왜곡된 보정결과를 도출할 수 있다. SWAT보정에 있어 사용자가 원하는 목적에 따라 임계점과 보정 매개변수를 선택하기도 한다. 이와 같은 이유로 미 계측 유역의 기저유출을 분리하기 위해 사용되는 유량 예측에 대해서도 기저유출과 밀접한 관계를 가지는 감수부의 특성을 반영시키는 것이 필요하다. SWAT에서 감수부의 특성은 alpha factor에 따라 결정되기 때문에 보정시 관측유량으로부터 산정된 alpha factor를 적용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 RECESS를 이용해 회덕지점의 2001년부터 2010까지의 관측유량으로부터 alpha factor를 산정하고, 그 값을 SWAT-CUP에 의한 자동보정에 적용하였다 (시나리오 1: S1). 이렇게 보정된 결과는 alpha factor를 포함한 모든 매개변수를 SWAT-CUP에 의한 자동보정한 결과 (시나리오 2: S2)와 비교 평가하였다. 본 연구에서 모형 평가는 가장 널리 사용되는 방법들 가운데 하나인 결정계수 (R²)와 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)에 적용하였다. R²과 NSE는 식 3과 4에 의하여 각각 계산될 수 있다.

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (y_i^o - \bar{Y}^o)(y_i^s - \bar{Y}^s) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^o - \bar{Y}^o)^2 \sum_{i=1}^n (y_i^s - \bar{Y}^s)^2} \quad (3)$$

여기서, y_i 는 i번째의 유량이며, n은 자료의 개수를 나타낸다. \bar{o} 는 관측값 s 는 모의값, \bar{Y}^s 는 모의값의 평균, \bar{Y}^o 는 관측값의 평균을 나타낸다.

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^o - y_i^s)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^o - \bar{Y}^o)^2} \right) \quad (4)$$

2.5 WHAT 모형을 통한 기저유출량 추정

본 연구에서는 기저유출특성을 파악하기 위하여 보정된 SWAT을 이용하여 모의된 유량으로부터 기저유출을 분리하였다. 기저유출량을 추정하기 위하여 먼저 감수부 보정을 위해서 6년간의 유출량을 모의하였으며, 3년간의 warming-up 기간을 제외하고 2005년부터 2007년 까지 3년간의 유출량 자료를 이용하여 회덕지점의 유량에 대하여 SWAT모형을 보정하였다. 또한 모의된 유출량 자료를 WHAT(<http://www.envsys.co.kr/~what/>)시스템의 입력자료로 이용하여 기저유출량을 추정하였다. WHAT은 인터넷상에서 USGS 유량 자료에 직접 접근하여 기저유출분리를 쉽게 할 수 있는 시스템이다. 또한, USGS의 유량 자료의 다른 형태의 유량자료는 인터넷상에 바로 업로드하고 기저유출을 분리할 수 있는 매우 유용한 시스템이다. 이러한 이유로 본 연구에서 기저유출분리를 수행하기 위해 WHAT이 선택되었다. WHAT 시스템은 유량자료로부터 기저유출 분리를 위해 Local minimum method, BFLOW filter, Eckhardt filter의 방법을 이용한다. Local minimum method는 수문곡선에서 감소하다 증가하는 점들 가운데 지역의 최소값을 직선으로 연결하여 기저유출을 분리한다. BFLOW filter는 식 5와 6에 의하여 기저유출을 산정할 수 있다.

$$q_t = \beta \times q_{t-1} + \frac{(1+\beta)}{2} \times (Q_t - Q_{t-1}) \quad (5)$$

여기서, q_t 는 시간 t에서의 지표유출이며, Q는 유량을 나타내고, β 는 필터의 매개변수로 일반적으로 Nathan and McMahon (1990)과 Arnold et al. (1995)에 의해 제시된 0.925의 값이 적용된다. 식 3에서 산정된 지표유출 (q)과 유량 (Q)를 이용하여 식 4에서 기저유출 (b)을 산정할 수 있다.

$$b_t = Q_t - q_t \quad (6)$$

그러나 BFLOW filter 대수층의 특성을 고려하지 못하기 때문에 WHAT시스템은 대수층의 특성을 고려할 수 있도록 BFLOW filter를 수정한 Eckhardt filter를 포함한다. 이는 대수층의 특성을 반영하기 위해 BFI_{max} 를 이용하며, 장기간 총 유출량에 대한 기저유출 비율의 최댓값으로 적용된다. Eckhardt filter에 의한 t시간의 기저유출 (b_t)은 식 7에 의해서 계산될 수 있다.

$$b_t = \frac{(1 - BFI_{max}) \times \beta \times b_{t-1} + (1 - \beta) \times BFI_{max} \times Q_t}{1 - \beta \times BFI_{max}} \quad (7)$$

여기서, β 는 필터의 매개변수이며, Q는 총유량을 나타낸다. Eckhardt (2005)는 지속적으로 흐르는 하천에 대하여 0.8의 BFI_{max} 을 사용하도록 제안하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 감수 특성을 고려한 SWAT 보정

SWAT을 이용하여 유량을 모의하는 과정에서 수문곡선의 감수특성을 고려하기 위하여 RECESS를 이용하여 alpha factor를 산정하였다. 회덕유량관측소에 대한 alpha factor는 0.178로 산정되었다 (S1). 이 결과는 SWAT-CUP에 고정하여 11개의 다른 매개변수들을 보정하였다. 반면 alpha factor를 포함한 12개의 모든 매개변수를 SWAT-CUP으로 보정하였을 때, alpha factor는 0.61로 산정되었다 (S2). 이는 두 시나리오 모두 각각 500번의 SWAT 모의 결과에 의해 산정된 것이다. Table 2는 보정을 위한 매개변수의 초기조건과 S1과 S2에 대한 매개변수 보정결과를 나타내었다. 두 시나리오를 이용하여 모의된 유량은 회덕유량관측소의 관측유량과 비교하여 평가였다. S1에 대한 R^2 는 0.788, NSE 는 0.779로 산정되었으며, S2에 대한 R^2 는 0.785, NSE 는 0.782로 산정되어, Saleh et al. (2000)의 SWAT보정의 평가기준 ($NSE > 0.65$)에 있어 “very good”으로 평가되었다 (Table 3). R^2 와 NSE 값은 다른 매개변수들의 값을 갖는 두 시나리오에 대하여 매우 흡사하게 산정되었다. 이는 S1과 같이 감수부 특성을 고려한 매개변수 (alpha factor)를 기상자료와 같이 입력자료처럼 사용하더라도 S2와 같이 수학적 조합으로만 보정되는 매개변수들에 의한 결과와 비슷하게 산정될 수 있다는 것을 보여준다. S2는 S1보다 더

많은 매개변수 조합 (S1: 11개의 매개변수; S2: 12개의 매개변수)이 가능하기 때문에 모의수를 크게 늘린다면 S2는 S1보다 좋은 NSE 결과가 나올 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 매개변수가 많을수록 과도한 계산이 요구되며, Figure 3에서 보듯이, 저유량 부분에서 S2에 대해 모의된 유량이 S1보다 관측유량에 더 가까운 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 alpha factor가 클수록 감수부의 경사가 더 급하다. 본 연구에서 다른 매개변수들 역시 두 시나리오에 대하여 다른 값을 가지기 때문에 단지 alpha factor에 의해서 감수부의 경사가 급하다고 단정할 순 없다. 그러나 alpha factor가 S1에 대해서 0.612이고, S2에 대해서 0.178으로 큰 차이가 난다는 것을 감안할 때 대부분 감수부에서 S1이 S2보다 감수경사가 급하다는 것을 본 연구를 통해 확인할 수 있었다 (Figure 3). 그러나 관측자료의 일관성에 대한 부족으로 다른 기간에 대하여 보정된 모형을 검증할 수 없는 것은 본 연구의 한계이다. 본 연구에서 보정은 2002년부터 2007년까지의 회덕지점의 관측유량을 이용하여 수행되었으나, 검증은 다른 기간에 대하여 수행하여야 할 것이다. 그러나 다른 기간에 대한 토지이용의 변화는 검증의 상당한 불확실성을 초래할 것이다. 또한, 4대강 사업 등에 의한 유량의 변동성은 검증의 실효성에 대한 또 다른 한계가 될 수 있다.

Table 2. Initial boundary of parameters for calibration and results.

Parameter Name	Initial boundary for calibration		Calibration results	
	Min	Max	S1	S2
CN2	-2	2	-0.12	-0.84
ALPHA_BF	0	1	0.612	0.178
GW_DELAY	0	500	245	225
GWQMN	0	5000	4150	4920
GW_REVAP	0	0.2	0.146	0.162
CH_N2	-0.01	0.3	0.0861	0.1481
CH_K2	-0.01	500	34.991	4.990
SOL_AWC	-25	25	-21.5	-8.5
ESCO	0	1	0.41	0.55
SOL_BD	0.9	2.5	1.908	2.388
SFTMP	-20	20	-17.2	18.8
SOL_K	-25	25	-14.5	0.5

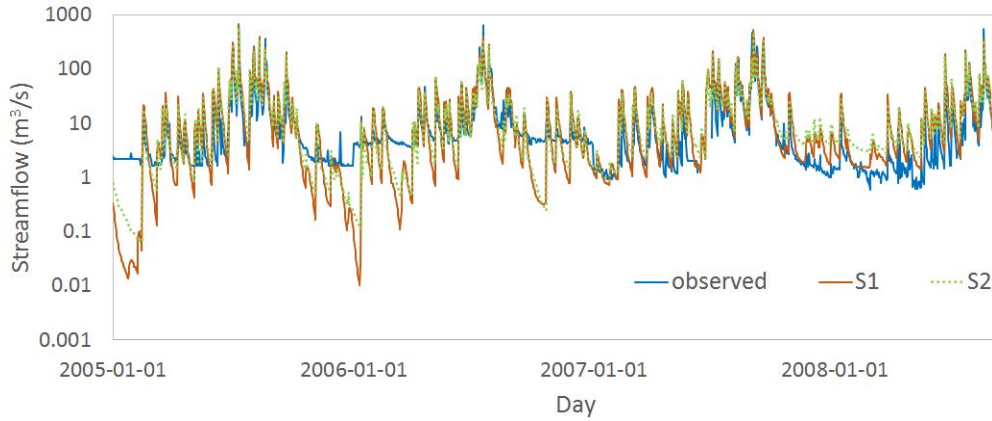


Figure 3. Comparison of observations (Observation) and simulations (S1 and S2) using SWAT. where, y-axis is logarithmic scale and x-axis is normal.

Table 3 Evaluation of calibration according to S1 and S2

Evaluation Index	Streamflow		Baseflow	
	S1	S2	S1	S2
R^2	0.788	0.785	0.850	0.852
NSE	0.779	0.782	0.777	0.844

3.2 WHAT을 이용한 기저유출 산정

직접유출이 강우사상에 매우 민감한 반면, 기저유출은 하천유량에 미치는 강우사상의 영향이 작아지는 감수부분과 저유량에 의하여 상당히 큰 영향을 받는다. 이를 검토하기 위하여, 회덕지점의 관측유량을 WHAT에 적용하여 산정된 기저유출을 본 연구에서 관측 기저유출이라 가정하였다. 이러한 가정은 실질적으로 기저유출을 관측하는 것에 기술적인 한계가 있기 때문에 기저유출 관측자료가 회덕지점에 부재하고, 대부분 기저유출은 관측 유량에 기저유출분리법을 적용하여 산정하는 이유로 설정되었다. 이 가정의 전제로, Ahiablame et al. (2013)은 미국 인디애나에 미계측

구역에서 회귀분석법을 이용해 산정된 기저유출을 검토하기 위해 WHAT을 이용한 관측유량으로 분리된 기저유출을 관측자료 혹은 비교자료 (base data)로 이용하였다. 또한 S1과 S2에 의하여 산정된 유량을 WHAT에 적용하여 각 시나리오별 기저유출량을 산정하였고, 이를 관측 기저유출에 대해 비교하여 R^2 와 NSE 를 산출하여 평가를 수행하였다. R^2 의 경우 S1에 대하여 0.850, S2에 대하여 0.852로 두 시나리오 사이에 큰 차이는 보이지 않았으나, NSE 는 S1에 대하여 0.777, S2에 대하여 0.844로 매우 큰 차이를 보이고 있다 (Table 3 and Figure 4). NSE 에 대하여 두 시나리오 사이에 큰 차이를 보이지 않았던 유량과는 다른 경향을 보여준다. 유량보정에 결과에 대하여 R^2 와 NSE 모두 비슷한 결과를 보였기 때문에 실질적으로 감수부 특성을 고려한 S2가 기저유출 산정에 어떠한 영향을 주는지 정량적으로 파악하기 어려웠지만, 본 연구에서는 관측유량으로부터 분리된 기저유출을 관측치로 가정하므로 정량적인 평가가 가능하였다. 그러나 관측유량으로부터 산정된 기저유출은 기저유출분리법에 따라 변할 수 있다는 점을 감안하여야 할 것이다.

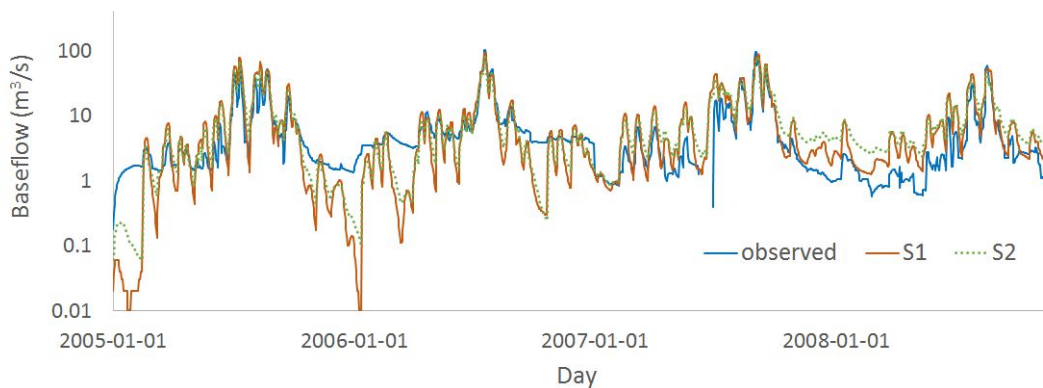


Figure 4. Comparison of baseflows estimated from WHAT using the observed streamflow (Observation) and the simulated streamflows (S1 and S2). where, y-axis is logarithmic scale and x-axis is normal.

3.3 시나리오에 따른 회덕지점의 총 유량의 구성

체계적으로 하천환경을 관리하기 위해서는 하천의 유량을 구성하는 직접유출과 기저유출의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 시나리오에 따라

모의된 유량을 직접유출과 기저유출의 특성을 파악하고 감수부의 특성이 미치는 영향을 파악하고자 하였다. Figure 5는 S1과 S2에 따른 총 유량의 구성을 직접유출과 기저유출의 시간적 분포로 나타내었다.

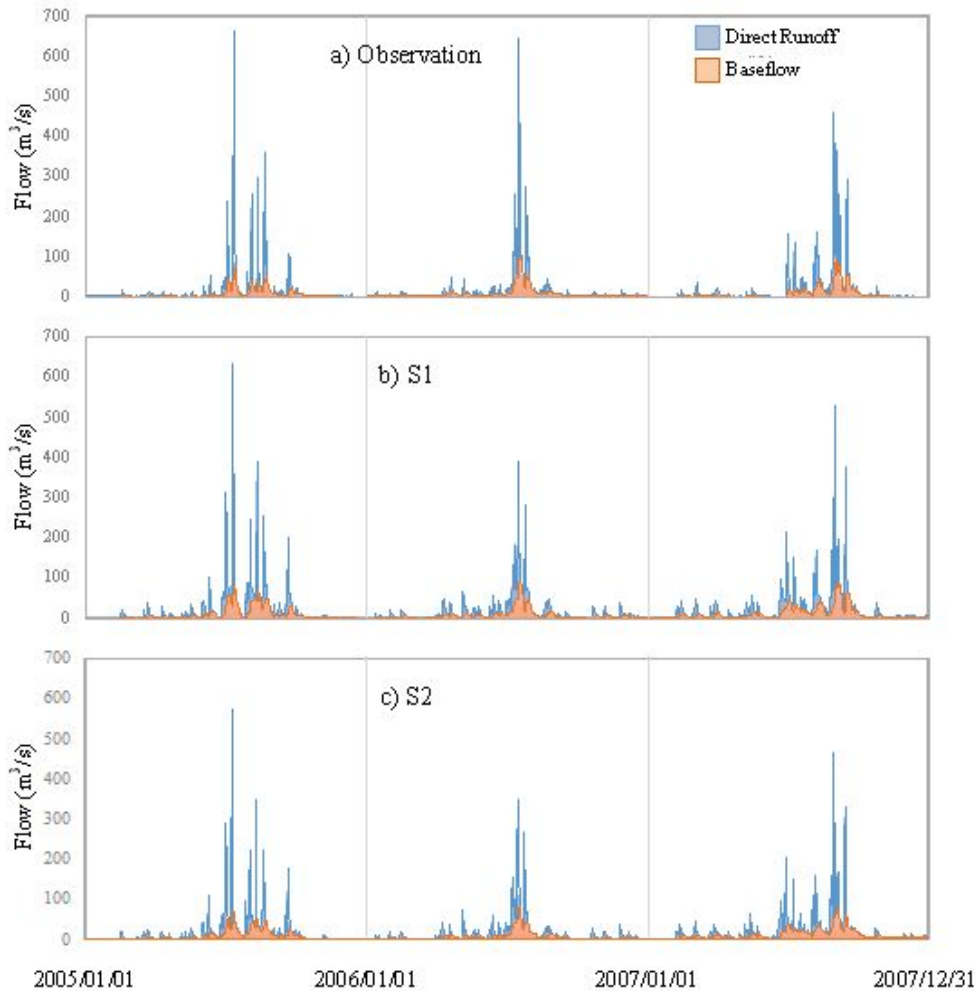


Figure 5. Temporal distributions of direct flow and baseflow. a) observations; b) S1; and c) S2

관측자료, S1, S2 모두 회덕유량관측소의 계절별 유량을 점유하는 유출특성을 매우 흡사하게 나타내었다. 또한, 우기시 직접유출에 의하여, 건기시 기저유출에 의하여 하천이 유지하는 전형적인 모습을 보여 주었다. 기저유출에 있어 건기에는 거의 일정한 기저유출량을 보이지만, 우기에는 강우에 의한 얇은 지표하 유출 (shallow subsurface runoff)와 측방유출 (lateral runoff)에 의하여 영향을 받은 것으로 보인다. 이러한 영향은 직접유출이 더 클수록 더 명확히 확인된다. 이와 관련하여 본 연구에서는 다루지 않았지만 직접유출량과 기저유출의 상관관계를 파악한다면 얇은 지표하 유출 및 측방유출의 특성까지 영향을 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4와 Figure 6은 본 연구에서 시나리오에 따른 회덕지점의 총 유량의 구성을 보여준다. 2005년부터 2007년까지 산정된 연평균 총 유량은 S1에 대하여 1013.55 mm/year, S2에 대하여 894.49 mm/year이다. 회덕유량관측소에서 839.16 mm/year의 연평균 유량을 고려했을 때 상대적 오차는 S1에 대하여 20.78 %, S2에 대하여 6.59 %로 산정되었다. 두 시나리오 모두 과대산정 되었지만, S2가 S1보다 관측유량에 더욱 가까운 유량을 모의하였다. 직접유출의 경우, S1은 546.59 mm/year, S2는 451.72 mm/year로 448.30 mm/year의 관측 직접유출을 고려했을 때 S2는 21.92 %, S2는 0.76 %의 상대오차를 보인다. 또한, 390.86 mm/year의 관측 기저유출을 고려했을 때 S1은 466.97

mm/year, S2는 442.77 mm/year로 상대오차는 S1은 19.47 %, S2는 13.28 %를 보인다. S2는 관측 총 유량의 직접유출과 기저유출의 양을 S1보다 정량적으로 더욱 잘 모의한 것으로 나타났다. S2에서 SWAT을 이용한 유량 모의 과정에서 감수부의 특성을 대변하는 alpha factor는 입력자료와 같이 사용했음에도 불구하고, 총유량 산정 및 기저유출 산정에 있어 S1보다 비슷하거나 개선된 결과를 유도했다. 본 연구에서는 기저유출 산정을 위해 alpha factor의 특성만을 고려하였지만 보다 정확한 기저유출 산정을 위해서 지하수와 관련 있는 SWAT내 다른 매개변수들의 특성도 파악할 필요가 있다.

Table 4. Quantities of annual average streamflow, direct flow, and baseflow at the Hoedeok gauge station.

	Observation (mm/year)	S1		S2	
		Simulation (mm/year)	RE (%)	Simulation (mm/year)	RE (%)
Stream flow	839.16	1,013.55	20.78	894.49	6.59
Direct runoff	448.30	546.59	21.92	451.72	0.76
Base flow	390.86	466.97	19.47	442.77	13.28

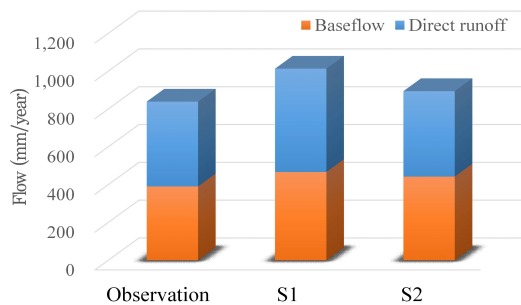


Figure 6. Annual average baseflow and direct flow for the observed streamflow and the simulated streamflow (S1 and S2)

4. 결론

국내에서 기후변화에 대한 대응 체제를 구축하기 위해 많은 노력을 하고 있으나, 하천관리에 있어 직접유출에 대한 기후변화의 영향을 평가하는 많은 연구에 비하여 기저유출에 대한 기후변화의 영향에 대

한 연구는 다소 부족하다. 기저유출은 안정적인 하천의 흐름을 지속하게 하여 수생태 및 친수공간, 용수공급 등의 하천의 기능을 안정적으로 발휘할 수 있게 한다. 이에 따라 본 연구에서는 기저유출을 보다 정확히 파악하기 위해서 관측된 유량을 이용하여 감수부특성을 파악하고, 이를 강우유출 모형에 적용하여 유량모의에 있어 보다 감수부의 특성을 반영하고자 하였다.

RECESS를 이용하여 산정된 alpha factor는 0.178이다. SWAT-CUP의 자동보정모듈에 의하여 산정된 0.612의 alpha factor와는 다소 큰 차이를 보인다. 이러한 차이는 두 가지 방법을 이용하여 alpha factor를 산정하는 과정이 다르기 때문에 발생한 것으로 보인다. SWAT-CUP의 자동보정모듈은 많은 매개변수의 수학적 조합을 통하여 관측유량에 가까운 조합을 찾아내고, 그 매개변수 조합에 속해있는 alpha factor를 유역의 감수특성으로 간주한다. 이러한 이유로 자동모듈로 산정된 alpha factor는 실질적으로 유역의 물리적 감수 특성을 반영한다고 보기 어렵다. 반면 본 연구에서 사용된 RECESS는 회덕 유량관측소에서 관측된 유량에 의하여 단일 alpha factor를 산정하였고, 이를 준 분포형 모형인 SWAT에 적용하여, 수문곡선의 감수특성을 반영했다 할 수 있다. 그러나 유역내 모든 감수부 특성을 획일화시켜 상류지역의 감수특성을 다소 낮게 산정할 가능성이 있다. RECESS 프로그램을 이용하여 산정한 alpha factor를 이용하여 SWAT 모형의 결과를 보정하였을 때 NSE는 0.782이고, 전체적인 유량에서도 Auto-Calibration 한 NSE 결과는 0.779로 거의 비슷한 NSE 수치를 보였다. 그러나 관측 기저유출량에 대하여 RECESS를 이용하여 산정된 alpha factor에 의하여 모의된 유량으로부터 산정된 기저유출의 NSE는 0.844이고, auto-calibration의 NSE 결과는 0.777로 다소 큰 차이를 보였다.

본 연구에서 RECESS를 이용하여 수문곡선의 감수 특성을 SWAT에 적용하여 유량을 보정한 결과는 자동보정모듈에 의한 결과와 NSE에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나, 기저유출 부분에서는 자동보정모듈에 의한 결과보다 관측치에 가깝게 모의하였다. 이러한 결과는 관측된 유량에서 산정된 감수특성이 유량모의에서 수문곡선의 감수특성을 보다 잘 반영했다 볼 수 있다. 본 연구는 미계측 유역의 기저유출뿐만 아니라 모형을 이용하여 예측된 유량으로부터 기저유출을 산정할 때 수문곡선의 감수특성을 반영하여 하천관리에 보다 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, RECESS 프로그램을 Web으로 구

축하여 alpha factor를 각 유량관측소에서 쉽게 산정할 수 있다면, 감수부의 특성을 기상관측소나 유량관측소의 관측 자료처럼 이용할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며 (No.2011-0028564) 이에 감사드립니다. 또한, 본 연구를 지원해준 강원대학교의 GIS연구실 연구원들에게 감사의 말을 전합니다.

Reference

- Abbaspour, KC, Yang, J, Maximov, I, Siber, R, Bonger, K, Mieleitner, J, Zobrist, J and Srinivasan, R (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine Thur watershed using SWAT, *J. of Hydrology*, 333(2-4), pp. 413-430.
- Ahiablame, LM, Engel, BA and Chaubey, I (2013). Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement, *J. of environmental management*, 119(15), pp. 151-161.
- Anderson, MG and Burt, TP (1980). Interpretation of recession flow, *J. of Hydrology*, 46(1-2), pp. 89-101.
- Arnold, JG and Allen, PM (1999). Validation of automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from stream flow records, *J. of American Water Resources Association*, 35(2), pp. 411-424.
- Arnold, JG, Allen, PM and Bernhardt, G (1993). A comprehensive surface - groundwater flow model, *J. of Hydrology*, 142 (1-4), pp. 47-69.
- Arnold, JG, Allen, PM, Mutiah, R and Bernhardt, G (1995). Automated baseflow separation and recession analysis techniques, *Groundwater*, 33(6), pp. 1010-1018.
- Eckhardt, K (2005). How to construct recursive Digital Filters for baseflow separation, *Hydrological Processes*, 19(2), pp. 507-515.
- Eckhardt, K and Ulbrich, U (2003). Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range, *J. of Hydrology*, 284(1), pp. 244-252.
- Jung, Y, Merwade, V, Yeo, K, Shin, Y and Lee, SO (2013). An approach using a 1D hydraulic model, Landsat image and generalized likelihood uncertainty estimation for an approximation of flood discharge, *Water*, 5(4), pp. 1598-1621.
- Kienzle, SW (2006). The use of the recession index as an indicator for streamflow recovery after a multi-year drought, *Water resources management*, 20(6), pp. 991-1006.
- Kim, NW, Chung, IM and Won, YS (2005). Method of estimating groundwater recharge with spatial-temporal variability, *J. of Korea Water Resource Association*, 38(7), pp. 517-526.
- Kim, HT and Shin, HS (2009). The development and application of GIS-based geomorpho-hydrological watershed model (G2WMS), *J. of Korean Society of Hazard Mitigation*, 9(1), pp. 123-133.
- Kumar, S and Merwade, V (2011). Evaluation of NARR and CLM3.5 outputs for surface water and energy budgets in the Mississippi River Basin, *J. of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012)*, 116. DOI:10.1029/2010JD014909
- Lim, KJ, Engel, BA, Tang, Z, Choi, J, Kim, K, Muthukrishnan, S and Tripathy, D (2005). Automated web gis based hydrograph analysis tool, WHAT1, *J. of the American Water Resources Association*, 41(6), pp. 1407-1416.
- Loukas, A and Vasiliades, L (2014). Streamflow simulation methods for ungauged and poorly gauged watersheds, *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2(2), pp. 1033-1092.
- Nathan, RJ and McMahon, TA (1990). Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis". *Water Resources Research*, 26(7), pp. 1465-1473.
- Neitsch, SL, Arnold, JG, Kiniry, JR, Srinivasan, R and Williams, JR (2002). *Soil and Water Assessment*

- Tool: User Manual, Version 2000.* Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX, USA.
- Rutledge A (1998). *Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records: Update.* US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4148, USGS.
- Rutledge, AT and Mesko, TO (1996). *Estimated hydrologic characteristics of shallow aquifer systems in the Valley and Ridge, the Blue Ridge, and the Piedmont Physiographic Provinces based on analysis of streamflow recession and base flow.* U.S. Geological Survey Professional Paper 1422-B, USGS.
- Saleh, A, Arnold, JG, Gassman, PWA., Hauck, LM, Rosenthal, WD, Williams, JR and McFarland, AMS. (2000). Application of SWAT for the upper North Bosque River watershed, *Transactions of the ASAE.*, 43(5), pp. 1077-1087.
- Shin, HS, Kang, DK and Kim SD (2007). Analysis of the effect of water budget elements on flow duration characteristics using SWAT-Nak Dong, *J. of Korea Water Resource Association*, 40(3), pp.251-263.
- Sloto, RA and Crouse, MY (1996). *HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis.* Water-Resources Investigations Report. US Geological Survey. 96-4040, USGS
- Srinivasan, R, Zhang, X and Arnold, J (2010). SWAT ungauged: hydrological budget and crop yield predictions in the Upper Mississippi River Basin, *Transactions of the ASABE.*, 53(5), pp. 1533-1546.
- Yadav, M, Wagener, T and Gupta, H (2007). Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins, *Advances in Water Resources*, 30(8), pp. 1756-1774.
- 논문접수일 : 2014년 03월 21일
 - 심사의뢰일 : 2014년 03월 25일
 - 심사완료일 : 2014년 04월 15일