



## 유역단위 유출 모형 별 기저유출 분석 기법 검토

### A Review of Baseflow Analysis Techniques of Watershed-Scale Runoff Models

한정호\* · 류태상\*\* · 임경재\* · 정영훈\*\*,<sup>†</sup>

Han, Jeong Ho · Ryu, Tae Sang · Lim, Kyoung Jae · Jung, Young Hun

#### Abstract

Streamflow is composed of baseflow and direct runoff. However, most of streamflow during dry seasons depends on baseflow. Thus, baseflow analysis is very important to simulate streamflow of dry seasons. Generally, baseflow analysis is conducted using watershed-scale runoff models due to difficulty of measuring baseflow. However, it is needed to understand and review how the model simulates baseflow because each model uses inherent baseflow analysis techniques. In this study, SWAT, HSPF, PRMS-IV were reviewed focusing on baseflow and soil water. HSPF and PRMS-IV calculate baseflow using the variables which depends on user, so the baseflow analysis results of HSPF and PRMS-IV are not consistent. Moreover, soil structures which were assumed from HSPF and PRMS-IV, since these two models assume soil structure as two soil zones and three conceptual reservoirs, were not enough to describe real soil structure. On the other hand, baseflow in SWAT is calculated using baseflow recession constant which can consider the characteristics of aquifer and also, soil structure in SWAT is similar to real soil structures. Thus, baseflow analysis result from SWAT was concluded as the most suitable and reliable model because SWAT can reflect the characteristics and soil structure which is close to reality.

**Keywords:** Runoff model; Baseflow separation; SWAT; HSPF; PRMS-IV

#### 1. 서론

국내 수자원 이용량은 매년 증가하고 있지만 (Ministry of Construction Transportation, 2006), 이에 상응한 안정적인 수자원 확보는 기후변화의 영향으로 인해 매년 어려움을 겪고 있다 (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011). 이에 미래 장기적 관점에서 안정적인 수자원 확보를 위해 댐내 토사제거를 통한 저수용량 확보, 대체수원개발, 저수지 운영기술 고도화 등 다양한 노력을 하고 있다. 하지만 이러한 노력에도 기후변화의 영향으로 안정적인 수자원 확보 문제는 매우 중요한 문제로 지속적으로 제기되고 있다. 특히 2061~2090년에는 1977~2006년 비해 가뭄 발생기간이 3.4배 증가될 것으로 전망되고 있다. 또한 건기시 하천 수량 부족은 수질악화로 이어져 하천 수질 및 수생태계에도 악영향을 미칠 것으로 전망되고 있다. 이에 따라 건기시 수자원 확보 방안 수립이 매우 필요한 시점이다 (Ministry of Construction Transportation, 2010).

일반적으로 하천의 유량은 직접유출과 기저유출로 구성된다. 직접유출이란 강우가 발생했을 때 단시간에 하천으로 흘러들어 가는 유출을 의미하고, 기저유출이란 청천 시 하천 유량의 대부분을 구성하는 유출로 강우 시 토양으로 침투하여 오랜 시간에 걸쳐 대수층을 통해 하천으로 유출되는 것을 의미한다 (Han et al., 2016). 따라서 건기시 안정적 수자원 확보를 위한 계획 수립을 위해서는 기저유출에 대한 관리가 매우 중요하다. 그러나 홍수로 인해 막대한 경제적·환경적 피해를 야기 시키는 직접유출에 비해 기저유출은 상대적으로 중요성이 부각되지 않은 상황이며, 직접유출과 달리 기저유출은 측정시간, 장비 그리고 기술 등 다양한 어려움으로 인해 관측 자료가 미비한 실정이다 (Cho, 2006).

이에 기저유출 분석을 위한 다양한 기법들이 개발되어 활용되고 있다. 기저유출 분석은 수문곡선을 이용해 직접유출과 기저유출을 분리하는 방법과 유역단위 모형을 통해 기저유출을 분석하는 방법 등으로 구분된다. 수문곡선을 이용한 기저유출 분리는 직접유출이 발생하는 지점에서 감수곡선과 만나는 수평선을 그어 직접유출과 기저유출을 분리하는 방법인 수평직선분리법 (Straight line method), 첨두유량이 발생한 시점부터 N일 후의 감수곡선에 해당하는 지점을 택해 직접유출이 발생하는 상승부 지점과 연결하여 직접유출과 기저유출을 분리하는 방법인 N-day법 그리고 감수곡선에서 경사가 급변하는 지점을 결정하여 그 지점부터 하강부 곡선의 변곡점 발생 시간까지 거꾸로 보간하여 첨두 발생시의 기저유량과 직선으로 연결하여 직접유출과 기저유출을 분리하는 방법인 가변경사법 (Variable slope method) 등이 활용되고 있다

\* Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

\*\* Korea Water Resources Corporation

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-42-870-7473 Fax: +82-42-870-7499

E-mail: [younghun@kwater.or.kr](mailto:younghun@kwater.or.kr)

Received: July 14, 2016

Revised: July 28, 2016

Accepted: July 28, 2016

(Brodie and Hostetler, 2005). 하지만 이러한 수문곡선을 통한 기저유출 분리 방법은 장기유출에 적용하기에는 효율적이지 못하며, 기저유출 분리 과정에서 객관적인 기저유출 분리가 어렵다는 단점이 있다 (Hong et al., 2015).

이에 RECESS (Anderson and Burt, 1978), RORA (Rutledge, 1998), WHAT (Lim et al., 2005), Bflow (Arnold and Allen, 1999) 등 장기유출 수문곡선에서 기저유출을 분리하는 모형들이 개발되어 활용되고 있으며, HSPF (Hydrological Simulation Program-FORTRAN), SWAT (Soil and Water Assessment Tool), PRMS-IV (precipitation-runoff modeling system, version 4) 등과 같은 유역 단위 모형을 통해 기저유출량을 산정하고 있다 (Atkins et al., 2005; Caldwell et al., 2015; Dams et al., 2015). 하지만 모형에 따라 기저유출은 각기 다른 방법을 통해 산정되기 때문에 다양한 모형을 활용함에 있어 각 모형의 기저유출 분리 및 산정 기법들에 대한 이해와 검토가 선행되어야 한다. 이에 본 연구는 1) 문헌연구를 바탕으로 기저유출 분석이 가능한 다양한 유역모형을 비교분석하고, 2) 검토 결과를 통해 기저유출 분석을 통한 수문분석을 위한 최적의 유역모형을 제시하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 유역 단위 수문 모형

미계측 유역의 기저유출 분석을 위해서 SWAT, HSPF, PRMS-IV, APEX, L-THIA ACN-WQ system 등 다양한 유역 단위 수문 모형이 사용되고 있다 (Atkins et al., 2005; Caldwell et al., 2015; Chalise and Dol, 2013; Cherkauer and Douglas, 2004; Dams et al., 2015; Golmohammadi et al., 2014; Ryu, 2016). 각 유역 모형에서의 기저유출 산정 과정은 모형 내 토양 및 대수층의 구조와 수문 분석 방법에 따라 서로 다른 과정을 통해서 이루어진다. 본 연구에서는 국내외에서 널리 활용되고 있는 유역모형인 SWAT, HSPF, PRMS-IV 모형에서의 기저유출 산정 과정을 검토하였다 (Luo et al., 2012; Zhang et al., 2011; Peterson and Mamlet, 1998; Said et al., 2005; Said et al., 2007; Cherkauer, 2004).

#### 가. SWAT 모형

SWAT 모형은 준분포형 강우 유출 모형으로서 다양한 종류의 토성과 토지이용도 등 복잡한 유역을 대상으로 장기간에 걸친 유출량 예측이 가능하다. SWAT 모형은 이미 많은 선행 연구를 통해 다양한 조건의 국내 유역에 대해서도 적용성 평가가 이루어진 모형이다 (Kong et al., 2012; Kim et al., 2005). SWAT 모형의

수문 모의는 수문반응단위 (Hydrologic Response Unit, HRU) 를 기본 모의 단위로 이루어지며, 물수지 방정식을 기반으로 초기 손실, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수, 토양수 등을 모의한다 (Neitsch et al., 2010).

SWAT 모형에서 지표유출 (Surface Runoff)은 수분공급이 증가하다가 토양층의 침투율을 초과할 때 발생하며, 기본적으로 지표 유출을 평가하기 위해 Soil Conservation Service (SCS) 유출곡선법과 Green & Ampt 침투법의 두 가지 방법을 제공하고 있다. 증발산은 토양에서의 증발과 식물에서 발생하는 증산을 통해 모의된다. 잠재 토양 수분 증발은 잠재 증발산과 엽면적지수의 함수로 고려되며, 실제 토양 수분 증발은 토양심과 수분량의 지수함수로 고려된다. 식물의 증산은 잠재증발산과 엽면적지수의 선형함수에 의해 모의된다 (Neitsch et al., 2010).

SWAT 모형에서 토양수는 측방유출, 침투, 함양 등의 형태로 이동하며 이 과정에서 식물의 생장을 통하거나 증발에 의해 일부가 소모된다. 토양수는 인접한 하부토층으로 침투하게 되며, 토양층의 가장 하부층까지 침투된 토양수는 대수층에 함양되어 최종적으로 하천유량에 기여하게 된다. SWAT 모형은 토양을 clay, silt, sand 입자함유량에 따라 분류하고, 토층을 1개 ~ 10개의 층으로 구분하여 물의 이동을 고려한다 (Fig. 1).

SWAT 모형에서 지하수 시스템은 얇은 대수층 (shallow aquifer)과 깊은 대수층 (deep aquifer)으로 구분되어 있다. 최하부 토층에서 대수층으로 함양되는 물 중에서 깊은 대수층으로 침투되는 일부를 제외한 모든 함양량이 얇은 대수층으로 이동하게 된다. 이렇게 얇은 대수층으로 함양된 물은 대수층 특성에 따라 일정 시간동안 저류되어 있다가 최종적으로는 기저유출 형태로 하천유량에 기여한다 (Spruill et al., 2000).

기저유출 분석을 위한 SWAT 모형의 적용사례를 살펴보면, Luo et al. (2012)는 중국 Tianshan 산맥에 위치한 Manas 강 유역을 대상으로 SWAT 모형을 적용하여 기저유출을 분리하였으

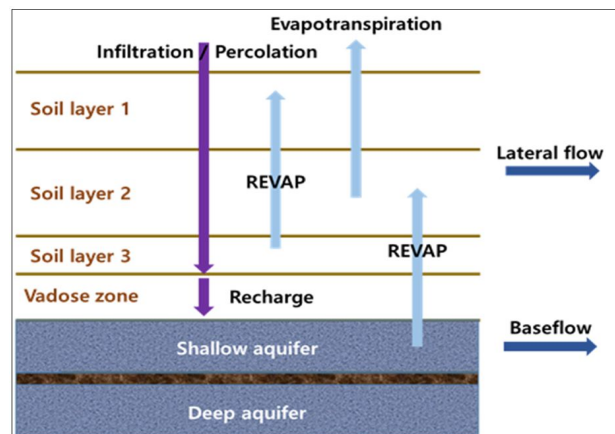


Fig. 1 Soil structure and soil water behavior of SWAT

며, Srinivasan et al. (2010)은 미국 Mississippi 강 상류에 위치한 미계측 유역에 대하여 물수지 분석과 작물 생산량을 예측하기 위하여 SWAT 모형을 적용하여 기저유출 등 다양한 수문 컴포넌트를 모의하였다.

나. HSPF 모형

HSPF 모형은 강우에 의한 유역유출 및 수체의 수리 및 수질모의가 가능한 유역모형으로, 1960년대 초반 스탠포드 유역모형으로 처음 개발되어 미국 환경청 (Environmental Protection Agency, EPA) 및 미국 지질조사국 (US Geological Survey, USGS)에 의해 지속적으로 보완 및 발전되어 많은 사용자를 보유하고 있다 (Singh et al., 2005; Saleh and Du, 2004; Sobel et al., 2015). HSPF 모형은 물리적 기반의 준분포 모형으로 광범위한 수리 및 수질, 수문현상을 모의할 수 있는 여러 개의 모듈로 구성되어 있다. 또한 모형 내 구축된 소유역과 하천에 공간적으로 다양한 유역특성 및 기상자료를 반영할 수 있다는 장점을 가지고 있다 (Bicknell et al., 2001).

HSPF모형의 수문모의는 크게 지표유출, 중간유출, 기저유출로 구성된다. 각각의 수문 모의는 Fig. 2와 같이 불투수면과 투수면으로 구분되어 이루어진다. 불투수면은 지표유출과 증발산량을 통한 유출이 발생되고, 투수면은 지표층, 상부층, 하부층, 지하수층으로 구분되어 지표유출, 중간유출, 기저유출을 통한 유출이 발생한다 (Bae and Ha, 2011).

HSPF 모형은 입력자료인 User control input (UCI)을 호출하여 분석하고 모형의 실행순서를 결정한다. Operation supervisor는 UCI에 의해 제공되는 정보를 바탕으로 Operating module을 실행하게 된다. Operating module에는 직접유출과 기저유출, 오염부하량 등을 직접적으로 모의하는 Application module이 포함되어 있다. Application module은 투수면에서 발생하는 수문 모의를 위한 PERLND 모듈, 불투수면에서 발생하는 수문 모의를 위한 IMPLND 모듈 그리고 하천 및 호소의 매커니즘 모의를

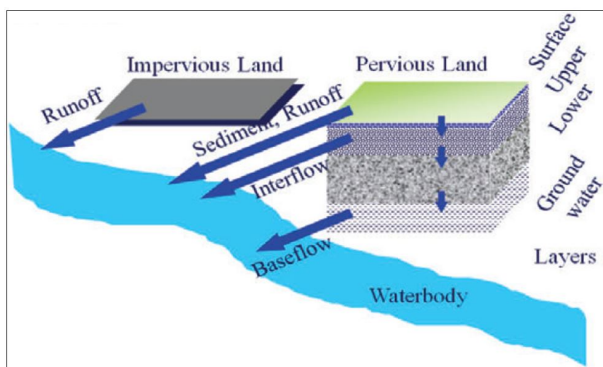


Fig. 2 Soil structure and soil water behavior of HSPF

위한 RCHRES 모듈로 구성되어 있으며 이 세 모듈에서 대부분의 수문 모의가 이루어진다 (Bicknell et al., 2001).

HSPF 모형을 적용한 기저유출 관련 선행연구를 살펴보면 Brun and Lawrence (2000)은 HSPF 모형을 이용하여 미국 Gwynns Falls 유역을 대상으로 도시지역에서 토지이용 변화가 직접유출과 기저유출의 관계에 미치는 영향을 분석하였으며, Cho et al. (2009)은 미국 Roanoke 강 상류 유역에서 지하수 함양량 감소로 인한 중간유출의 변동성을 분석하기 위하여 HSPF 모형을 적용하여 지하수 함양량을 산정하였다.

다. PRMS-IV 모형

PRMS-IV 모형은 USGS에서 개발한 준분포형 유역모형으로서 유역의 다양한 조건을 고려할 수 있다. PRMS-IV 모형은 HRU로 구분하고, 물수지와 에너지수지를 이용하여 각 HRU에서 수문 모의를 한다. HRU는 경사, 경사향, 식생 유형, 토지 유형과 강우분포와 같은 유역 특성을 기초로 유역을 구분한 것이며, 각 HRU는 수문응답에 대해 동일한 반응을 보인다고 가정한다. 각 HRU에서의 수문모의 결과 (지표면 유출, 지표하 유출, 기저유출 등)의 합이 유역 유출구에서의 하천유량이 된다 (Markstrom et al., 2015).

PRMS-IV 모형의 기본적인 수문 모의는 토양대와 지하수대로 구분할 수 있다. 토양대는 선택류 저류지 (preferential-flow reservoir), 모관수 저류지 (capillary reservoir), 중력수 저류지 (gravity reservoir) 세 가지의 저류지 체계로 구성되어 있으며, 각 저류지의 포화상태에 따라 토양수의 이동이 결정된다 (Fig. 3). 여기서 저류지란 호수나 연못과 같이 실제 존재하는 저류지의 개념이 아니고, 토양대에서 토양수를 모의하기 위한 개념적 저류지를 의미한다. 토양대 내에서 수직으로 이동하는 토층수는 지하수대에 위치한 지하수 저류지 (groundwater reservoir)로 이동

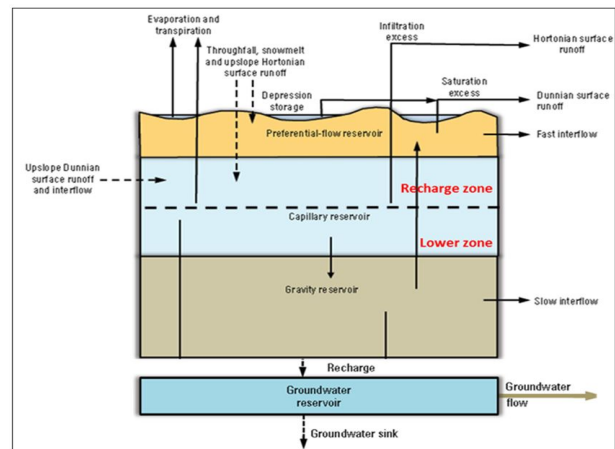


Fig. 3 Soil structure and soil water behavior of PRMS-IV

한다. 지하수 저류지로 유입된 토층수는 기저유출 형태로 하천으로 유출되거나 지하수 싱크를 통해 모이된다. 여기서 기저유출은 하천유량 모의에 중요한 역할을 하고, 지하수 싱크로 고려된 유량은 발생한 시점을 기준으로 더 이상 유역 내 수문과정에서 고려되지 않는다 (Leavesley et al., 1995).

PRMS-IV 모형을 이용한 기저유출 관련 선행연구를 살펴보면, Cherkauer (2004)는 다양한 면적을 가진 7개 유역 (60-500km<sup>2</sup>)을 대상으로 지하수 함양량의 정량화를 위해 PRMS 모형의 적용성 평가를 했으며, Lee and John (2002)는 PRMS 모형을 이용하여 미국 Willamette 강 유역을 대상으로 지하수 함양량과 기저유출량을 분석하였다.

## 2. 유역모형 토층수 및 기저유출 산정 과정

유역모형에서 기저유출량은 각 유역모형에서 사용되는 기저유출 산정 방식에 따라 저마다 서로 다른 과정을 통해 이루어진다. 따라서 기저유출 산정 과정의 차이로 사용자가 선정한 유역모형에 따라 기저유출 분석 결과는 달라질 수 있다. 또한 기저유출 산정 방식의 차이 이외에도 토양수 산정 과정 역시 기저유출에 영향을 미칠 수 있다. 기저유출의 주 수원인 대수층의 저류량은 토양속에 존재하고 있는 토양수가 대수층으로 함양되어 유지되는데 (Fig. 4), 유역모형에 따라 토층수를 산정하는 과정이 다르기 때문이다. 이에 본 연구에서는 유역모형에서의 토층수 및 기저유출 산정과정을 비교·검토하였다.

### 가. SWAT

#### 1) SWAT 모형에서의 토양수

SWAT 모형은 토양을 clay, silt, sand 입자들의 함유비율에 따라서 분류하고, 토층을 1개에서 최대 10개 층으로 구분한다. 또한 분석하고 싶은 유역에 대한 토양특성 자료를 모형 내 기본 데

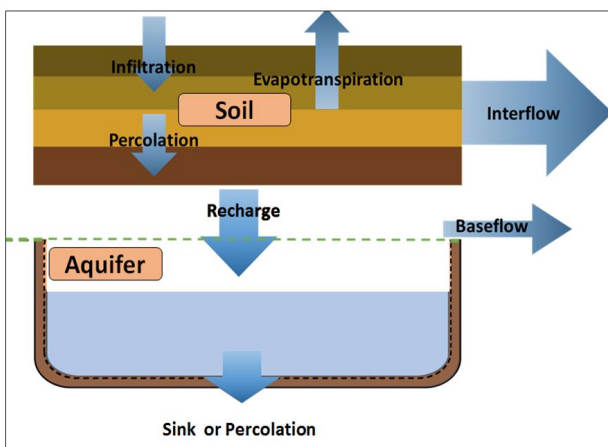


Fig. 4 Behavior of soil water in soil profiles and aquifers

이터베이스에 사용자가 구축가능하기 때문에 실제 유역의 토양 구조와 토양층 별로 토양특성 반영이 가능하다 (Neitsch et al., 2010).

각 토층에서 토양수의 이동은 크게 2가지로 구분된다. 첫 번째는 불포화 상태의 토층에서 발생하는 수평방향의 흐름이다. 이는 인접한 토층과의 토양수분함량 차이에 의한 구배 차이로 발생한다. 두 번째는 중력에 의해 아래 방향(수직)으로 이동하는 흐름이다. 하지만 SWAT 모형은 동일한 토층에서의 토양수분함량은 일정하게 분포한다고 가정하기 때문에 수평방향의 흐름은 고려하지 않고 중력에 의한 수직방향의 흐름만을 고려한다. 수직방향 흐름은 토층이 포화상태가 되어 토양수분함량이 포장용수량보다 커지는 경우 발생한다. 이때 포장용수량을 초과한 물은 침루를 통해 대수층으로 함양되거나 또는 중간유출에 기여된다. SWAT 모형에서 침루되는 물의 양은 아래 식 (1), (2)로 산정된다.

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \text{ 단, } SW_{ly} > FC_{ly} \quad (1)$$

$$SW_{ly,excess} = 0, \text{ 단, } SW_{ly} < FC_{ly} \quad (2)$$

여기서,  $SW_{ly,excess}$  는 토층 내 배수 가능한 물의 양 (mm),  $SW_{ly}$  는 토층 내 수분함량 (mm),  $FC_{ly}$  는 포장용수량에서의 토층의 수분함량 (mm)이다. 침루량이 계산되면 저류추적방법 (storage routing methodology)을 이용하여 침루량 중에서 하부토층으로의 실제 침루량을 산정한다. 중간유출은 식 (3)으로 산정된다.

$$Q_{lat} = 0.024 \times \left( \frac{2 \times SW_{ly,excess} \times K_{sat} \times slp}{\Phi_d \times L_{hill} \times \text{ri}gh} \right) \quad (3)$$

여기서,  $Q_{lat}$  는 경사면 출구에서의 유출량,  $SW_{ly,excess}$  는 단위면적당 경사면 포화대의 저장량,  $K_{sat}$  는 포화수리전도도  $\Phi_d$  는 배수가능한 토양 공극율,  $L_{hill}$  는 경사면 길이,  $slp$  는 단위거리이다.

#### 2) SWAT 모형에서의 기저유출

SWAT 모형은 대수층을 깊은 대수층과 얇은 대수층으로 구분한다. 최하부 토층의 토양수 중에서 대수층으로 함양된 물의 양 중 일부가 깊은 대수층으로 이동하고, 나머지는 얇은 대수층으로 함양되어 대수층에 저류되거나 기저유출로 하천으로 유출된다. 최하부 토층에서 대수층으로의 함양량은 다음 식 (4)로 산정된다.

$$w_{rchrg,i} = (1 - \exp[-\frac{1}{\delta_{gw}}]) \cdot w_{seep} + \exp[-\frac{1}{\delta_{gw}}] \cdot w_{rchrg,i-1} \quad (4)$$

여기서,  $w_{rechrq,i}$ 는  $i$ 일의 대수층 함양량,  $\delta_{gw}$ 는 상부 지질 구조에 따른 지연 시간,  $w_{seep}$ 는  $i$ 일의 토층에서 대수층으로 침투되는 양,  $w_{rechrq,i-1}$ 는  $i-1$ 일의 대수층 함양량이다. 이렇게 얇은 대수층으로의 함양량이 결정되면 식 (5)를 통해 대수층에서 하천으로 유출되는 기저유출량을 산정한다.

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t] + w_{rechrq,sh} \cdot (1 - \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t]) \quad (5)$$

여기서,  $Q_{gw,i}$ 는  $i$ 일 기저유출량,  $Q_{gw,i-1}$ 는  $i-1$ 일의 기저유출량,  $\alpha_{gw}$ 는 기저유출 감수상수,  $\Delta t$ 는 time step,  $w_{rechrq,sh}$ 는  $i$ 일 얇은 대수층 함양 수량,  $a_{qsh}$ 는 얇은 대수층 저류량,  $a_{qshthr,q}$ 는 기저유출 산정을 위한 얇은 대수층 임계값이다.

#### 나. HSPF

##### 1) HSPF 모형에서의 토양수

HSPF 모형은 토양을 상부층과 하부층 2개의 층으로 구분하여 토양수를 모의한다. HSPF 모형에서 토양수는 먼저 상부층으로의 침투 또는 중간유출 저류지로의 이동하게 된다. 상부층으로의 침투량은 모형에서 규정한 상부층 규격 저류용량 (nominal storage)에 대한 사용자가 지정의 상부층 최대 저류량의 비율을 산정하여 이를 기준으로 결정된다. 중간유출은 지표에서의 유입량과 인접한 상류에서 유입되는 중간유출량을 고려하여 결정된다. 중간유출량은 감수매개변수와 유입량 그리고 저류량의 함수로 결정된다(식 (6)).

$$IFWO = (IFWK1 * INFLO) + (IFWK2 * IFWS) \quad (6)$$

여기서  $IFWO$ 는 중간유출량 (in/interval),  $INFLO$ 는 인접한 상류의 중간유출량과 지표에서의 유입량을 포함한 유입량 (in/interval),  $IFWS$ 는 해당 날에서의 초기 중간유출 저류량 (inches)이다.  $IFWK1$ 과  $IFWK2$ 는 식 (7), (8), (9)로 산정된다.

$$IFWK1 = 1.0 - (IFWK2 / KTFW) \quad (7)$$

$$IFWK2 = 1.0 - EXP(-KIFW) \quad (8)$$

$$KIFW = = ALOG(IRC) * \nabla T60 / 24.0 \quad (9)$$

여기서  $IRC$ 는 중간유출 감수 매개변수 (per day),  $\nabla T60$ 은 hr/interval,  $EXP$ 는 지수함수,  $ALOG$ 는 자연로그를 뜻한다.

##### 2) HSPF 모형에서의 기저유출

HSPF 모형은 지하수층 (일반적인 유역모형에서의 대수층)에서 유출을 활성 지하수와 비활성 지하수 두 가지로 구분한다. 여기서 활성 지하수란 일반적인 유역모형에서 기저유출로써, 지하수층에서 하천으로 유출되어 하천유량을 구성하는 지하수를 뜻한다. 비활성 지하수란 지하수층에서 하천으로 유출되는 활성 지하수와 달리 대수층에서 발생하는 유출이지만 하천 유량에 관여하지 않는 유출로써, 앞서 설명한 SWAT 모형에서 깊은 대수층으로의 유출과 유사한 개념을 의미한다.

지하수층의 유입량은 직접 침투된 물의 양과 상부층으로부터 발생하여 하부층으로 유입되지 않고 침투된 물의 양을 합한 값이며, 활성 지하수와 비활성 지하수의 비율은 사용자 입력에 의한 매개변수 (DEEPER)에 의해 결정된다. 지하수 유출량은 다음 식 (10)으로 산정된다.

$$AGWO = KGW * (1.0 + KVARY * GWVS) * AGWS \quad (10)$$

여기서  $AGWO$ 는 활성지하수 유출 (in/interval),  $KGW$ 는 지하수 유출 감수 매개변수 (/interval),  $KVARY$ 는 지하수 유출속도 인자 (/inches),  $GWVS$ 는 지하수의 경사면 지수 (inches),  $AGWS$ 는 활성 지하수의 초기 저류량 (inches)를 뜻하고 있다.  $GWVS$ 는 활성지하수 유입량에 의해 증가되는 값이다. 그러나  $GWVS$ 는 하루에 3% 만큼 지속적으로 감소하며, 선행 활성 지하수의 유입량에 영향을 받는다. 또한  $KVARY$ 는 지하수 감수 비율에 대한 다양한 고려가 가능하도록 설정해주는 값으로,  $KVARY$ 가 0이 아닐 때는 반대수의 유량과 시간 그래프는 비선형으로 나타난다. 따라서  $KVARY$ 를 활용하여 기저유출량의 변동을 반영할 수 있다.

#### 다. PRMS-IV

##### 1) PRMS-IV 모형에서의 토양수

PRMS-IV 모형은 앞에서 설명한 것과 같이 토양을 크게 선택류 저류지, 모관수 저류지, 중력수 저류지 3개의 저류지를 가정하여 토양수를 모의한다. 각 저류지의 저류량은 사용자가 입력한 매개변수를 기준으로 최대 저류량을 결정한 후 이를 기준으로 산정된다.

PRMS-IV 모형은 토양에서 발생하는 중간유출을 느린 중간유출과 빠른 중간유출 2가지로 구분하여 산정한다. 느린 중간유출은 중력수 저류지에서 하천으로 발생하는 유출을 의미하며 다음 식 (11), (12)를 통해 산정된다.

$$\begin{aligned} \text{slow\_flow} &= (\text{slowcoef\_lin}_{HRU} \times \text{grav\_stor}_{HRU}) \\ &+ (\text{slowcoef\_sq}_{HRU} \times (\text{grav\_stor}_{HRU})^2) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{grav2\_stor}_{HRU} = \text{grav\_stor}_{HRU} - \text{slow\_flow}_{HRU} \quad (12)$$

여기서, *slow\_flow*는 중력수 저류지에서 하천으로 유출되는 중간유출 (CFS), *slowcoef\_lin*은 중력수 저류지 저류량의 라우팅을 위한 선형 계수 (fraction/day), *grav\_stor*은 중력수 저류지의 저류량 (inches), *slowcoef\_sq*는 중력수 저류지 저류량의 라우팅을 위한 비선형 계수, *grav2\_stor*은 중력수 저류지 저류량에서 느린 중간유출을 제외한 저류량 (inches)이다. 빠른 중간유출은 선택류 저류지에서 발생하는 유출을 뜻하며 다음 식 (13), (14)를 통해 산정된다.

$$\begin{aligned} \text{fast\_flow}_{HRU} &= (\text{fastcoef\_lin}_{HRU} \times \text{pref2\_stor}_{HRU}) \\ &+ (\text{fastcoef\_sq}_{HRU} \times (\text{pref2\_stor}_{HRU})^2) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{pref\_flow\_stor}_{HRU} = \text{pref2\_stor}_{HRU} - \text{fast\_flow}_{HRU} \quad (14)$$

여기서, *fast\_flow*는 선택류 저류지에서 유출되는 빠른 중간유출 (inches), *fastcoef\_lin*은 선택류 저류지에서 유출되는 빠른 중간유출 산정을 위한 선형계수, *pref2\_stor*은 선택류 저류지의 저류량 (inches), *fastcoef\_sq*는 선택류 저류지에서 유출되는 빠른 중간유출 산정을 위한 비선형계수이다.

## 2) PRMS-IV 모형에서의 기저유출

PRMS-IV 모형은 지하수 저류지를 통해 지하수 저류량 및 기저유출을 모의한다. 여기서 지하수 저류지는 SWAT 모형에서의 얇은 대수층과 유사한 개념이며, PRMS-IV 모형에서 지하수 저류지의 저류량은 무한하다고 가정한다. 지하수 저류지의 유입량은 모관수 저류지, 중력수 저류지, 상류 지하수 저류지에서의 유입량을 모두 합하여 계산된다 (식 (15)).

$$\begin{aligned} \text{gwres\_in}_{GWR} &= \text{soil\_to\_gw}_{GWR} + \text{ssr\_to\_gw}_{GWR} \\ &+ \text{gw\_upslope}_{GWR} + \text{gw\_dprst\_seep}_{GWR} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, *gwress\_in*은 지하수 저류지로의 총 유입량 (inches), *soil\_to\_gw*는 모관수 저류지에서 지하수 저류지로 이동하는 물의 양 (inches), *ssr\_to\_gw*는 중력수 저류지에서 지하수 저류지로 이동하는 물의 양 (inches), *gw\_upslope*는 상류 지하수 저류

지로부터의 유입량 (inches)이다.

지하수 저류지의 함양량이 결정되면 지하수 저류지의 저류된 물은 기저유출과 지하수 싱크 두 가지 형태로 이동하게 된다. 지하수 싱크는 고려되는 물은 더 이상 모형의 하천 유량 산정 과정에서 배제되며, 기저유출은 지하수 저류지에서 유출되어 하천으로 유입되어 하천 유량에 합쳐진다.

$$\begin{aligned} \text{gwres\_flow}_{GWR} &= \text{gwflow\_coef}_{GWR} \\ &\times \text{gwres\_stor}_{GWR} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, *gwres\_flow*는 기저유출 (inches), *gwflow\_coef*는 기저유출 산정식에서의 선형계수로 범위는 0.001-0.5이며, *gwress\_stor*는 지하수 저류지의 저류량 (inches)이다. 최종적으로 지하수 저류지의 저류량은 해당 시간에서의 유입/유출량과 이전 시간에서의 지하수 저류지의 저류량을 고려하여 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{gwres\_stor}_{GWR} &= \text{gwres\_stor}_{GWR}^{t-1} + \text{gwres\_in}_{GWR} \\ &- \text{gwres\_flow}_{GWR} - \text{gwres\_sink}_{GWR} - \text{seepage}_{lake}^{t-1} \end{aligned} \quad (17)$$

## III. 결과 및 토의

### 1. 정확한 기저유출 분석을 위한 유역모형 비교 및 검토

#### 가. 유역모형 별 기저유출 산정식

대수층에서 하천으로 유출되는 기저유출의 정확한 분석을 위해서는 기본적으로 실제 유역에서의 대수층 특성 반영이 가능해야 한다. 이 관점에서 SWAT 모형, HSPF 모형, PRMS-IV 모형의 기저유출 산정식을 살펴보면 Table 1과 같다.

각 유역모형에서 기저유출 산정을 위한 사용자 입력 변수를 살펴보면 SWAT 모형에서 사용자 입력 변수  $\alpha_{gw}$ 는 기저유출 감수상수 (baseflow recession constant), HSPF 모형에서 KVARY는 지하수 유출 감수 매개변수, GWVS는 기저유출 속도 인자, AGWS는 초기 시간에서의 지하수 저류량이며, PRMS-IV 모형에서 *gwflow\_coef*는 기저유출 산정을 위한 선형계수이다.

이 중에서 KVARY, GWVS, AGWS, *gwflow\_coef*는 실제 유역에서의 대수층 특성을 고려하여 산정할 수 있는 값이 아니며, 단순히 사용자가 모형에서 제시한 범위 내에서 사용자가 임의로 입력하는 값이다 (Bicknell et al., 2001). 이로 인해 사용자가 실제 대수층 특성과 상이한 변수 값을 사용할 경우, 잘못된 기저유출 분석을 초래할 수 있다.

이와 달리 SWAT 모형의 사용자 입력 변수인 감수상수는 수문곡선에서 감수부 특성을 통해 산정되는 값으로, 관측 유량자료

Table 1 Baseflow calculation equations of each model

| Model   | Baseflow calculation equation   | User input variable |
|---------|---|---------------------|
| SWAT    | $Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t] + w_{rchr,sh} \cdot (1 - \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t])$ | $\alpha_{gw}$       |
| HSPF    | $AGWO = KGW * (1.0 + KVARY * GWVS) * AGWS$  | KVARY, GWVS, AGWS   |
| PRMS-IV | $gwres\_flow_{GWR} = gwflow\_coef_{GWR} \times gwres\_stor_{GWR}$   | gwflow_coef         |

를 활용하여 산정할 수 있으며 실제 유역의 대수층 특성을 고려할 수 있는 가장 대표적인 지표이다. 또한 Web-based RECESS (Lee et al., 2014)와 SWAT Bflow (Arnold and Allen, 1999)는 기저유출 분리 결과와 기저유출 감수상수 산정 결과를 함께 제시해 주기 때문에 비전문가도 관측 유량자료로부터 쉽게 기저유출 감수상수 값을 산정할 수 있다. 이 때문에 SWAT 모형 외에도 HEC-HMS 등 다양한 강우-유출 모형에서 기저유출 산정을 위해 활용되고 있다 (Luo et al., 2012; Verma et al., 2010; Gupta et al., 1983). 따라서 SWAT 모형, HSPF 모형, PRMS-IV 모형의 기저유출 산정식을 비교·검토한 결과 유역에서의 대수층 특성을 반영할 수 있는 기저유출 감수상수를 적용한 SWAT 모형의 기저유출 산정식이 가장 신뢰 높은 기저유출 분석이 가능할 것으로 판단된다.

#### 나. 함양량 산정을 위한 토양수 모의 과정 검토

실제 유역에서 강우가 발생하면 지표면 유출, 증발산, 차단 등을 제외한 물은 토양으로 침투가 발생된다. 이렇게 토양으로 침투된 물(토양수)은 Fig. 4와 같이 토양 특성에 따라 또는 토층의 포화 상태에 따라 중간유출의 형태로 하천으로 이동하거나 식물에 의해 흡수되어 증산의 형태로 대기 중으로 이동하는 등 다양한 과정을 거치게 된다. 이런 중간 과정을 거쳐 가장 하부 토층에 도달한 토양수는 대수층으로 함양된다. 그런 다음 마지막으로 대수층 저류량 중 일부가 기저유출 형태로 하천으로 이동한다. 마찬가지로 유역모형에서도 위의 수문 과정은 동일하게 고려된다.

이렇듯 대수층으로의 함양은 토양으로 침투된 물의 토양 내 마지막 수문 과정이다. 그렇기 때문에 유역 단위 강우 유출 모형을 활용하여 기저유출을 정확히 분석하기 위해서는 대수층으로 함양되는 함양량이 정확히 산정되어야 한다. 이를 위해서는 토양수 모의 과정에서 토양 구조 및 특성은 반영한 토양수 모의가 필요하다. 이러한 관점에서 각 유역모형을 검토해보면, SWAT 모형은 토양의 실제 구조와 동일하게 토양을 최대 10개의 층으로 구분하여 각 토층에서의 토양수 모의가 가능하다. 또한 사용자가 모형 기본 데이터베이스에 구축한 토양 특성 자료를 기반으로 각 토층에서의 토양 특성 관련 변수를 자동으로 산정하기 때문에 변수에

대한 신뢰가 높을 뿐만 아니라 실제 토양 특성을 반영한 토층수 모의가 가능하다. 이와 달리 HSPF 모형은 토양을 단순히 상부층과 하부층으로 구분하여 토양수를 모의한다. 따라서 사용자가 토양 특성 변수를 실제 유역의 토양 특성을 고려하여 설정한다 하더라도 단순히 상부층과 하부층으로 구분된 토양 구조로는 서로 다른 특성을 가진 여러 개의 토층으로 구성된 실제 토양 구조를 반영하기에는 한계가 있다.

PRMS-IV 모형은 앞의 두 모형과는 다른 개념인 3개의 저류지를 가정하여 토양수를 모의한다. 이 때문에 대상 유역의 토양 특성에 대한 기초 자료가 있더라도 실제로 이를 모형에 반영하여 토양 특성 관련 변수를 설정하기 위해서는 추가적인 계산 과정이 요구된다. 이는 실제 모형 구동 시간 외 별도의 시간 노력이 필요하기 때문에 많은 사용자들이 이 과정을 생략하고 모형에서 제시하는 기본 범위만을 만족시키는 임의값을 사용하고 있다 (Markstrom et al., 2015). 정확한 대수층의 함양량 산정을 위해 각 유역모형에서의 토양수 모의 과정 검토 결과 실제 토양 구조를 고려하여 토양수를 모의하는 SWAT 모형이 가장 정확하고 객관적인 함양량 산정이 가능할 것으로 판단된다.

## IV. 결 론

최근 기후변화의 영향으로 매년 봄에 발생하는 가뭄이 장기화됨에 따라 이에 대한 해결방안으로 건기시 유량 확보와 가용 수자원의 확보 등이 제시되고 있다. 건기시 하천유량의 대부분이 기저유출에 의존하고 있기 때문에 건기시 안정적인 수자원 확보를 위해서는 기저유출 관리가 매우 중요하다. 하지만 기저유출은 직접 유출과 달리 발생 특성상 측정에 많은 어려움이 있기 때문에 미계측 유역에 대한 기저유출 분석은 다양한 유역모형을 활용하여 이루어지고 있는 상황이다. 하지만 유역모형에 따라 기저유출 산정 과정과 기저유출 발생 이전의 수문 모의 과정이 저마다 상이하기 때문에 정확한 기저유출 분석을 위해서는 다양한 유역모형에서의 기저유출 분석 기법에 대한 이해와 검토가 요구된다. 본 연구

에는 SWAT 모형, HSPF 모형, PRMS-IV 모형 3가지를 검토하여 기저유출 산정 기법을 비교하였다. 또한 기저유출에 직접적으로 영향을 주는 대수층 함양량 산정과정의 신뢰성을 판단할 수 있는 토층수 모의 과정을 각 유역모형 별로 검토하였다.

먼저 본 연구에서는 SWAT 모형, HSPF 모형, PRMS-IV 모형의 기저유출 산정식을 비교하였다. 분석 결과 사용자 임의의 입력 변수를 통해 기저유출을 산정하는 HSPF 모형과 PRMS-IV 모형과 달리 실제 유역에서의 대수층 특성을 반영할 수 있는 기저유출 감수상수를 적용한 SWAT 모형의 기저유출 산정식이 가장 객관적인 것으로 판단되었다.

다음으로 기저유출의 주수원인 대수층 함양량 산정에 직접적인 영향을 미치는 토양에서의 토층수 모의 과정을 비교하였다. 비교 결과 HSPF 모형과 PRMS-IV 모형은 실제 토양의 구조를 반영하지 못하고, 토양의 구조를 단순화 시켜 모형에서 가정한 토양 구조를 이용하여 토양수를 모의하였다. 하지만 SWAT 모형의 경우 실제 유역의 토양을 기반으로 토양 특성에 대한 기본 데이터 베이스 구축이 가능하며, 실제 토양 구조와 같이 토양을 여러개의 토층으로 구분하여 각 토층에서의 토양수 모의가 가능하여 가장 신뢰 높은 토양수 모의가 가능한 것으로 판단되었다.

결과적으로 유역의 대수층 특성을 반영할 수 있으며, 실제 토양의 구조와 각 토층별 토양 특성을 고려할 수 있는 SWAT 모형이 가장 객관적이고 신뢰 높은 기저유출 분석이 가능할 것으로 판단되었다. 따라서 SWAT 모형을 활용하여 건기시 기저유출을 고려한 신뢰 높은 유량 모의가 가능할 것으로 기대된다. 또한 정확한 기저유출 분석과 건기시 유량 예측을 통해 건기시 수질악화 대책 마련을 위해 기저유출에 의한 수질오염원 부하량 예측이 가능할 것으로 기대된다.

하지만 앞서 본문에서 언급한 것과 같이 기저유출은 측정의 다양한 한계로 SWAT 모형뿐만 아니라 유역모형 전반적으로 기저유출 분석결과에 대한 정확도 평가가 제대로 이루어지지 못한 상황이다. 이에 정확한 기저유출 분석을 위한 유역모형의 기저유출 분석 정확도 평가를 위해서 국가적 차원의 장기간 기저유출 관측이 필요할 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14AWMP-B082564-01)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Albek, M., Ü.B. Ögütveren, and E. Albek, 2004. Hydrological

modeling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF. *Journal of Hydrology* 285(1): 260-271.

2. Arnold, J.G., and P.M. Allen, 1999. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records1, *Wiley Online Library*.

3. Atkins, J.T., J.B. Wiley, and K.S. Paybins, 2005. Calibration parameters used to simulate streamflow from application of the Hydrologic Simulation Program-FORTRAN model (HSPF) to mountainous basins containing coal mines in West Virginia, US Department of the Interior, US Geological Survey.

4. Bae, D., and S. Ha, 2011. Assessing impact of reduction of non-point source pollution by BASINS/HSPF. *Environment Impact Assessment* 20(1): 71-78 (In Korean).

5. Brodie, R.S., and S. Hostetler, 2005. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. *Proceedings of the NZHS-LAH-NZSSS 2005 conference* 28.

6. Brun, S.E., and E. Lawrence. Band, 2000. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computers, Environment and Urban Systems* 24(1): 5-22.

7. Caldwell, P.V., J.G. Kennen, G. Sun, J.E. Kiang, J.B. Butcher, M.C. Eddy, L.E. Hay, J.H. LaFontaine, E.F. Hain, and S.A. Nelson, 2015. A comparison of hydrologic models for ecological flows and water availability. *Ecology* 8(8): 1525-1546.

8. Chalise, D.R., 2013. Evaluating temporal and spatial scale issues with hydrologic models in the Black hills, South Dakota, South Dakota School of Mines and Technology.

9. Cherkauer, D.S., 2004. Quantifying ground water recharge at multiple scales using PRMS and GIS. *Ground Water* 42(1): 97-110.

10. Cho, J., V.A. Barone, and S. Mostaghimi, 2005. Simulation of land use impacts on groundwater levels and streamflow in a Virginia watershed. *Agricultural water management* 96(10): 1-11.

11. Cho, S.H., 2006. Computation of baseflow contribution to streamflow using environmental tracers in three small catchments Yuseong, Daejeon. Ph.D. Diss., Choongnam National University.

12. Dams, J., J. Nossent, T. Senbeta, P. Willems, and O. Batelaan, 2015. Multi-model approach to assess the impact of climate change on runoff. *Journal of Hydrology* 529: 1601-1616.

13. Golmohammadi, G., S. Prasher, A. Madani, and R. Rudra, 2014. Evaluating three hydrological distributed watershed models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. *Hydrology* 1(1): 20-39.

14. Gupta, V.K. and Sorooshian, S, 1983. Uniqueness and observability of conceptual rainfall-runoff model parameters: The percolation process examined. *Water Resources Research* 19(1): 269-276.

15. Han, J. H., K. J. Lim, and Y. H. Jung, 2016. A study on relationship between streamflow variability and baseflow contribution in Nakdong river basin. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58(1): 27-38 (In Korean).



16. Kihubyeonhwa daeeung mirae sujawonjeonryak, 2010, Ministry of Construction Transportation.
17. Leavesley, G., L. Stannard, and V. Singh, 1995. The precipitation-runoff modeling system-PRMS. *Computer models of watershed hydrology*: 281-310.
18. Lee, G., Y. Shin, and Y. Jung, 2014. Development of Web-based RECESS model for estimating baseflow using SWAT. *Sustainability* 6(4): 2357-2378.
19. Lim, K. J., B. A. Engel, Z. Tang, J. Choi, K. S. Kim, S. Muthukrishnan, and D. Tripathy, 2005. Automated web gis based hydrograph analysis tool, WHAT1, Wiley Online Library.
20. Lee, K. Karl, and C. John, Risley, 2002. Estimates of ground-water recharge, base flow, and stream reach gains and losses in the Willamette River Basin, Oregon. US Department of the Interior, US Geological Survey.
21. Luo, Y., J. Arnold, P. Allen, and X. Chen, 2012. Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(4): 1259-1267.
22. Markstrom, S. L., R. S. Regan, L. E. Hay, R. J. Viger, R. M. Webb, R. A. Payn, and J. H. LaFontaine, 2015. PRMS-IV, the precipitation-runoff modeling system, version 4. US Geological Survey Techniques and Methods, 6-B7.
23. Neitsch, S., J. Arnold, J. Kiniry, R. Srinivasan, and J. Williams, 2010. Soil and Water Assessment Tool. User's Manual, Version 2009. Texas Water Resources Institute, Technical Report.
24. Peterson, J., and J. Hamlett, 1998. Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed containing fragipan soils1, Wiley Online Library.
25. 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 Department of the Interior, US Geological Survey.
26. Ryu, J., 2016. Development and Evaluation of ArcGIS-based watershed-scale Long-term Hydrologic Impact Assessment (L-THIA) ACN-WQ system. Ph.D. Diss., Kangwon National University.
27. Ryu, J., J. W. Choi, H. Kang, D. Gum, D. S. Shin, K. H. Lee, G. Jeong, and K. J. Lim, 2012a. Evaluation of groundwater recharge rate for land uses at Mandae stream watershed using SWAT HRU Mapping module. *Journal of Korean Society on Water Environment* 28(5): 743-753 (In Korean).
28. Ryu, J., H. Kang, J. W. Choi, D. S. Kong, D. Gum, C. H. Jnag, and K. J. Lim, 2012b. Application of SWAT-CUP for streamflow auto-calibration at Soyang-gang dam watershed. *Journal of Korean Society on Water Environment* 28(3): 347-358 (In Korean).
29. Said, A., M. Ross, and K. Trout, 2007. Calibration of HSPF using active ground water storage. *In World Environmental and Water Resources Congress*: 342-342.
30. Said, A., D. K. Stevens, and G. Sehlke, 2005. Estimating water budget in a regional aquifer using HSPF-MODFLOW intergrated MODEL1. *Journal of the American Water Resources Association* 41(1): 55-66.
31. Saleh, A., and B. Du, 2004. Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS program for the upper North Bosque River watershed in central Texas. *Transactions of the ASAE* 47(4): 1039.
32. Singh, J., H. V. Knapp, J. Arnold, and M. Demissie, 2005. Hydrological modeling of the iroquois river watershed using HSPF and SWAT1, Wiley Online Library.
33. Sloto, R. A. and M. Y. Crouse, 1996. HYSEP, a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis, US Department of the Interior, US Geological Survey.
34. Sobel, R., H. Rifai, and T. Petersen, 2015. Refinement and application of a coupled tidal prism model with HSPF for managing bacterial water quality impairment in a coastal watershed. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 197: 201-209.
35. Spruill, C., S. Workman, and J. Taraba, 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. *Transactions of the ASAE* 43(6): 1431.
36. Sujawonjabgkijonghapkyehoek, 2006, Ministry of Construction Transportation.
37. Sujawonjabgkijonghapkyehoek, 2011, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
38. Srinivasan, Raghavan, Xuesong Zhang, and Jeffrey Arnold, 2010. SWAT ungauged: hydrological budget and crop yield predictions in the Upper Mississippi River Basin. *Transactions of the ASABE* 53(5): 1533-1546.
39. Verma, A. K., M. K. Jha, and R. K. Mahana, 2010. Evaluation of HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using remote sensing and geographical information system. *Paddy and Water Environment* 8(2): 131-144.
40. Zhang, X., R. Srinivasan, J. Arnold, R. C. Izaurralde, and D. Bosch, 2011. Simultaneous calibration of surface flow and baseflow simulations: a revisit of the SWAT model calibration framework. *Hydrological Processes* 25(14): 2313-2320.