



## Groundwater evaluation in the Bokha watershed of the Namhan River using SWAT-MODFLOW

Han, Daeyoung<sup>a</sup> · Lee, Jiwan<sup>b</sup> · Jang, Wonjin<sup>c\*</sup> · Kim, Seongjoon<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Graduate Student, Department of Civil, Environmental, and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Post-Doctoral Researcher, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University, Seoul, Korea

<sup>c</sup>Integrated Ph.D. student, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University, Seoul, Korea

<sup>d</sup>Professor, Division of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

Paper number: 20-081

Received: 26 August 2020; Revised: 22 September 2020; Accepted: 22 September 2020

### Abstract

SWAT (Soil and Water Assessment Tool)-MODFLOW (Modular Groundwater Flow) is a coupled model that linking semi-distributed watershed hydrology with fully-distributed groundwater behavior. In this study, the groundwater simulation results of SWAT and SWAT-MODFLOW were compared for Bokhacheon watershed in Namhan river basin. The models were calibrated and validated with 9 years (2009~2017) daily streamflow (Q) data of Heungcheon (HC) water level gauge station and the daily groundwater level observation data of Yulheon (YH). For SWAT, the groundwater parameters of GW\_DELAY, GWQMN, and ALPHA\_BF affecting baseflow and recession phase were treated. The SWAT results showed the coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.7 and Nash-Sutcliffe model efficiencies ( $NES_Q$ ,  $NSE_{inQ}$ ) for Q and 1/Q with 0.73 and -0.1 respectively. For SWAT-MODFLOW, the spatio-temporal aquifer hydraulic conductivity ( $K$ , m/day), specific storage ( $S_s$ , 1/m), and specific yield ( $S_y$ ) were applied. The SWAT-MODFLOW showed  $R^2$ ,  $NES_Q$ , and  $NSE_{inQ}$  of 0.69, 0.74, and 0.51 respectively. The SWAT-MODFLOW considerably enhanced the low flow simulation with the help of aquifer physical information. The total streamflow of SWAT and SWAT-MODFLOW were 718.6 mm and 854.9 mm occupying baseflow of 342.9 mm and 423.5 mm respectively.

**Keywords:** SWAT, MODFLOW, Groundwater, Aquifer characteristics, SWAT-MODFLOW

## SWAT-MODFLOW를 활용한 남한강 복하천유역의 지하수 모의 평가

한대영<sup>a</sup> · 이지완<sup>b</sup> · 장원진<sup>c\*</sup> · 김성준<sup>d</sup>

<sup>a</sup>건국대학교 일반대학원 사회환경플랜트공학과 석사과정, <sup>b</sup>건국대학교 일반대학원 사회환경플랜트공학과 박사후연구원

<sup>c</sup>건국대학교 일반대학원 사회환경플랜트공학과 석박사통합과정, <sup>d</sup>건국대학교 공과대학 사회환경공학부 교수

### 요 지

SWAT (Soil Water Assessment Tool)-MODFLOW은 준분포형 연속강우유출모형과 분포형 지하수 모형을 결합한 모델이다. 본 연구는 남한강에 위치한 복하천 유역의 지하수에 대해 SWAT과 SWAT-MODFLOW의 모의결과를 비교평가 하였다. 두 모델간의 비교에 앞서 각 모델은 유역 내 흥천 수위 관측소의 일별 유출량 자료와 울현 지하수위 관측데이터의 9년(2009 ~ 2017년)의 자료로 보정 및 검증되었다. SWAT의 경우 기저유량과 감수위에 영향을 주는 GW\_DELAY, GWQMN과 ALPHA\_BF를 이용하여 보정하였고 그 결과 결정계수( $R^2$ )는 0.70, Nash-sutcliffe 모델효율( $NES_Q$ ,  $NSE_{inQ}$ )은 각각 0.73, -0.1을 나타냈다. SWAT-MODFLOW의 경우는 토양속성별 대수층 수리전도도( $K$ , m/day), 비저류량( $S_s$ , 1/m), 비산출량( $S_y$ ) 및 유효토심(m) 자료가 추가로 적용되었다. 동일 기간의 모의 결과  $R^2$ ,  $NES_Q$ ,  $NSE_{inQ}$ 는 각각 0.69, 0.74, 0.51을 나타냈다. 특히, SWAT-MODFLOW 적용결과 대수층의 수리지질학적 자료 입력을 통해 저유량 모의가 상당히 개선되었다. SWAT과 SWAT-MODFLOW의 총 유출량은 각각 718.6 mm, 854.9 mm이며 기저유량은 각각 342.9 mm, 423.5 mm로 산정되었다.

**핵심용어:** SWAT, MODFLOW, 지하수, 대수층 특성, SWAT-MODFLOW

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-444-0186  
E-mail: jangwj0511@konkuk.ac.kr (W. Jang)

## 1. 서론

지하수는 전세계 담수 자원(34%)을 공급하는 귀중한 천연 자원으로서, 최근 기후변화에 따른 극한가뭄에 대응할 수 있는 비상용수 또는 대체 수자원으로서 중요성이 강조되고 있다 (Dar *et al.*, 2010; Ghosh *et al.*, 2016; Murmu *et al.*, 2019). 제3차 수자원장기종합계획(2016)에 따르면 전국의 지하수 이용량의 증가와 도시화로 인해 지하수위는 매년 조금씩 감소하고 있음을 보고하고 있다. 1994년 25.7억 m<sup>3</sup>이었던 지하수 이용량은 2014년 41억 m<sup>3</sup>으로 약 60% 증가하여 지하수 이용량에 대한 의존도가 매우 높아지고 있는 상황이다.

우리나라는 지형적 영향으로 유출량의 많은 부분이 바다로 그냥 흘러나가 손실되는 단점을 가지고 있다. 이를 막기 위한 댐 설치 및 추가 수자원 확보를 위한 지하수 확보의 필요성이 대두되고 있다. 마찬가지로 국지적으로 발생하는 물부족에 대처하기 위해서는 하천 주변의 지하수 함양량 및 적정 개발량 산정문제, 과도한 하도유출 문제 등 명확한 해결을 위한 방안을 강구해야 한다.

기저유출은 하천으로 단기 유출되는 지하수로 그 자체로서 중요할 뿐 아니라 여름철 홍수를 제외한 나머지 평수기 및 갈수기 하천 유량의 대부분을 차지하고 있어 갈수기 하천 수질과 수생태계 관리에 매우 중요한 요소이다. 따라서, 기후변화에 의한 이상가뭄 발생 등을 대비하기 위한 비상용수 또는 대체 수자원으로서의 지하수 개발요구가 증가하는 추세 여건에 따라 기저유출 확보 및 수질 개선방안을 수립하는 것은 장기적인 수자원 이용·관리 측면에 꼭 필요하다. 따라서 충분한 지하수를 확보하기 위해서는 해당 지역의 지하수량 거동을 정확히 파악하고 기후변화에 의한 예측 및 대응이 가능한 해석 기술 개발이 요구되며, 특히 지하수량에 직접적 영향을 미치는 지하수위 및 충전량에 대한 효율을 객관적으로 정량화할 수 있는 연구가 선행되어야 한다. 그러나 기존의 유역 유출모형은 주로 지표수 관리문제에만 적용되어왔으며, 지하수 모형 역시 대수층 관리문제를 중점적으로 다루고 있어 상호작용을 고려한 통합해석기술이 부족한 실정이다. 다양한 수자원 현황 분석을 통한 국내 지표수-지하수 연계기술 적용이 필요하다.

국내 지하수위 관련 연구사례를 살펴보면, Chung *et al.* (1994)는 MODFLOW를 이용하여 부곡온천의 지속적인 지하수위 하강에 대비하여 지하수위의 변동을 추정하여 적정 양수량을 결정하였으며, Hue (2003)는 지하수 유동성 파악을 위해 MODFLOW에 기반암에 대한 수리전도도를 산정하여 검토하여 유용성을 판단한 바 있다. 지하수의 변동특성으로 기저유출 및 지하수위에 대해 Ryu *et al.* (2011)는 SWAT의 HRU

별 모의결과를 공간적으로 표출할 수 있도록 매핑 모듈을 개발하여 지표수 및 지하수 관리 기법을 제공하였으며, Lee *et al.* (2014)은 SWAT Bflow를 소양강 유역에 적용하여 기저유출 비율을 산정하고 지하수 함양 및 기저유출량의 경향을 전망하였다. Lee *et al.* (2018)은 SWAT 모형의 HRU를 이용하여 지하수위를 검·보정하여 SWAT 모형 내 지하수위 산정기법을 제시한 바 있으나 지하수 하강특성을 재현하지 못한 한계점이 있었다. 국외에서는 SWAT 모형을 이용하여 미시시피강 유역의 지하수 함양을 추정하여 기저유출을 평가하였으며(Arnold *et al.*, 2000), Liu *et al.* (2010)은 대만유역의 지하수 자원 지속 가능한 활용 유지를 위해 MODFLOW를 이용하여 대수층의 수리전도도와 저류계수를 이용해 지하수 흐름을 모의하였고, Jang *et al.* (2018)은 인디애나에 있는 Upper white 유역의 정확한 지표수와 지하수 흐름 파악을 위해 EFCM (Efficient Flow Calibration Method)을 개발하여 이에 매개변수로 지하수 재충전 및 수리전도도를 사용해 SWAT 모형의 지표유출 및 지하유출 흐름을 평가하였다.

이처럼 SWAT 모형을 이용해 지하수 모의를 실시하였지만, 분포형 매개변수(투수계수, 저류계수 등)로 인해 공간적 변동성을 고려하기 어려우며 계산된 지하수위의 공간적 분포를 제대로 표현할 수 없는 단점을 가지고 있다(Kim *et al.*, 2006). 반면, MODFLOW 모형의 경우 유역 토양속성과 하천수위를 이용하여 지하수위를 산정하게 되며 지하수위 변동 및 유동해석에 뛰어난 성능을 보인다. 그러나 토양 내부로의 함양량을 계산을 위한 방법인 토양의 다양한 피복과 경사 및 대수층 증발산의 고려하기 어려운 단점이 있다(Heo *et al.*, 2017). 이에 두 모형의 단점을 상호보완하고자 Sophocleous *et al.* (1997)은 분포 매개변수를 가진 대수층과 변화하는 양수량을 모의할 수 있는 통합 지표수-지하수 모형 SWATMOD를 개발하였으며, Kim *et al.* (2004)은 준분포형 모형인 SWAT의 HRU를 분포형 모형인 MODFLOW의 격자로 대응시키기 위해 DEM을 이용한 HRU-GRID변환기법을 개발하여, 완전연동형 방식으로 결합한 바 있다.

SWAT-MODFLOW 모형의 적용사례를 살펴보면, Kim *et al.* (2008)은 대수층의 수리전도도를 이용하여 지하수의 충전량과 양수량을 산정하였으며, Kim *et al.* (2009)는 지하댐 건설 예정지 하동군 횡천강 일대를 SWAT-MODFLOW를 통해 지표수 및 지하수의 연계 해석을 실시해 지하수위 변화를 예측하였고, Izady *et al.* (2015)는 SWAT-MODFLOW를 이용하여 Neishaboor 유역에서의 지하수 충전량 추정을 하여 지표수와 지하수 사이의 상호작용을 통한 지하수 흐름을 파악한 바 있다. 또한, Goodarzi *et al.* (2016)은 SWAT 및 MODFLOW

**SWAT Input Data**

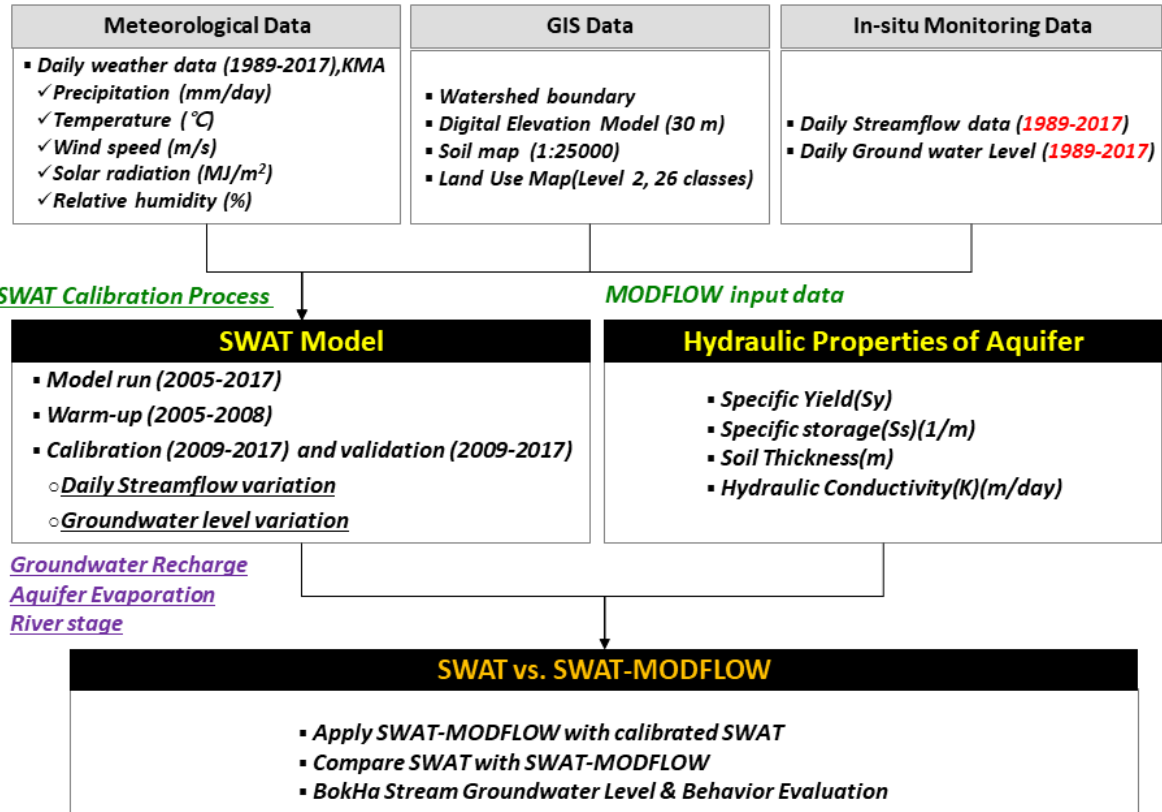


Fig. 1. Flow chart of this study

모형을 연계하여 기후변화에 따른 지하수 함양량 변화를 추정하였고, Fatemeh *et al.* (2019)는 지하수위 변동 비교 결과 MODFLOW보다 SWAT-MODFLOW가 지하수의 패턴과 크기를 추적함에 뛰어나다 하였고, Liu *et al.* (2020)은 SWAT-MODFLOW 모델을 덴마크의 Uggerby 저수지 대상으로 사용하였으며, 미래기후 시나리오에 대해 시뮬레이션을 통해 수문 변화를 예측하였다. 이처럼 SWAT-MODFLOW를 이용한 지하수 변화에 대한 연구들이 활발히 진행되어 왔으나, 토양 속성에 따른 지하수 변화 대한 연구는 아직 많이 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구는 준분포형 장기유출모형인 SWAT모형과 3차원 분포형 지하수 모형인 MODFLOW모형 두 모형을 연계한 SWAT-MODFLOW 모형을 복하천 유역(303.8 km<sup>2</sup>) 내에서 토양 속성에 따른 대수층의 특성 수리전도도(1/day), 비저류량(1/m), 비산출율 및 두께(m)를 고려하여 지하수 충전량을 시공간적으로 분석하고 지하수위의 변동과 MODFLOW 적용 전·후의 유출량을 비교하고자 한다. 본 연구의 흐름도는 다음과 같다(Fig. 1).

## 2. SWAT 및 SWAT-MODFLOW

### 2.1 SWAT

SWAT (Arnold *et al.*, 2000)은 물리적 기반의 준분포형 연속강우유출모형으로서, 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출을 모의한다. SWAT은 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산량, 지표유출, 기저유출, 지하수 등에 대한 모의를 각 수문반응단위(Hydrological Response Unit, HRU) 별로 계산할 수 있다(Neitsch *et al.*, 2001).

SWAT에서 일별 유출량은 SCS (Soil Conservation Service) CN (Curve Number) 방법으로 산정하고 측방유입량은 Kinematic Storage Model을 이용하며, 침투는 토층을 최대 10개 까지 세분화 하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 지하수는 얇은 대수층과 깊은 대수층으로 나뉘며 얇은 대수층은 지표면에서 대수층으로 침투된 유량으로 유역의 하천 회귀수를 공급하고, 얇은 대수층으로 침투된 일부는 깊은 대수층으로 공급되어 유역 밖으로 흘러나간다. 이때 지하수 충전량 및 지하수위는 각각 Eqs. (1) and (2)를 이용하여 계산된다.

$$Q_{gw} = \frac{8000 \cdot K_{sat}}{L_{gw}^2} h_{wtbl,i} \quad (1)$$

$$h_{wtbl,i} = h_{wtbl,i-1} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t] + \left[ \frac{w_{rchrg} \cdot (1 - \exp[-\alpha_{gw}] \cdot \Delta t)}{800 \cdot \mu \cdot \alpha_{gw}} \right] \quad (2)$$

여기서,  $Q_{gw}$  은 매일 하천으로 유입되는 지하수 혹은 기저유출 (mm H<sub>2</sub>O),  $K_{sat}$  는 대수층의 수리전도도(mm/day),  $L_{gw}$  는 지하수시스템에 대한 분할경계 및 소유역에서 주 하천까지의 거리(m),  $h_{wtbl,i}$  는  $i$  일의 지하수위(m),  $h_{wtbl,i-1}$  은  $i-1$  일의 지하수위,  $\alpha_{gw}$  는 기저유출 하단체수,  $\Delta t$  는 단위시간(일),  $w_{rchrg}$  는  $i$  일에 대수층으로 들어가는 침투량, 그리고  $\mu$  는 얇은 대수층의 비산출율 이다(Lee *et al.*, 2018).

### 2.2 SWAT-MODFLOW

본 연구에서 사용한 SWAT-MODFLOW 연계 모델은 Bailey *et al.* (2016)이 SWAT 2012를 기반으로 MODFLOW-NMT를 연동하도록 개발된 것으로 SWAT의 HRU에서 계산된 토양함수대에서의 침투, 증발산, 하천의 수심을 MODFLOW 격자(Disaggregated HRU, DHRU)로 변환하였다. 이는 준분포형 모형인 SWAT에서는 계산하기 어려웠던 지하수위, 하천 침윤, 지하수 흐름 등을 분포형 매개변수를 산정하여 계산하는 방식이다. 지하수와 지표수의 상호작용은 Darcy의 법칙을 사용하여 대수층과 하도 사이의 횡단면에 대한 체적 유량을 산정한다 (Eq. (3)).

$$Q_{leak} = K_{bed}(L_{str}P_{str})\left(\frac{h_{str} - h_{gw}}{z_{bed}}\right) \quad (3)$$

여기서,  $Q_{\leq ck}$  은 대수층과 하도 사이의 횡단면에 대한 체적 유량 (L<sup>3</sup>/T),  $K_{bed}$  는 하상수리전도도(L/T),  $L_{str}$  은 하천 연장(L),  $P_{str}$  은 하천의 윤변(L),  $h_{str}$  은 하천수위,  $h_{gw}$  는 지하수두,  $z_{bed}$  하상 두께(L)이다.  $Q_{\leq ck}$  이 음수일 경우 지하수가 하천으로 흐르며, 양수일 경우 하천수가 대수층으로 스며든다. 이러한 계산은 DHRU별로 계산된다. SWAT-MODFLOW는 Fig. 2와 같이 연계과정을 통해 모의된다.

### 3. 대상유역

북하천은 이천시, 여주시, 용인시가 포함되는 유역면적 303.8 km<sup>2</sup>의 중규모 지류하천으로 이포보(IP)를 기점으로 남한강과 합류한다. 북하천에 의해 이천, 여주일대는 총적토가 발달하여 하천 주변으로 농경지가 전체 면적의 약 45%로 분포되어 있어 지하수 개발밀도가 높아 지하수위가 매년 감소하고있다(Kim *et al.*, 2013). 본 연구에서는 북하천 출구인 IP로부터 약 5.0 km 상류에 위치한 홍천 수위관측소(HC)를 유역 출구로 하는 북하천 중상류 유역을 연구대상지역으로 설정하였다. 연구대상 지역의 면적은 290.7 km<sup>2</sup>으로서 북하천 유역 전체의 95.7%를 차지한다(Fig. 3).

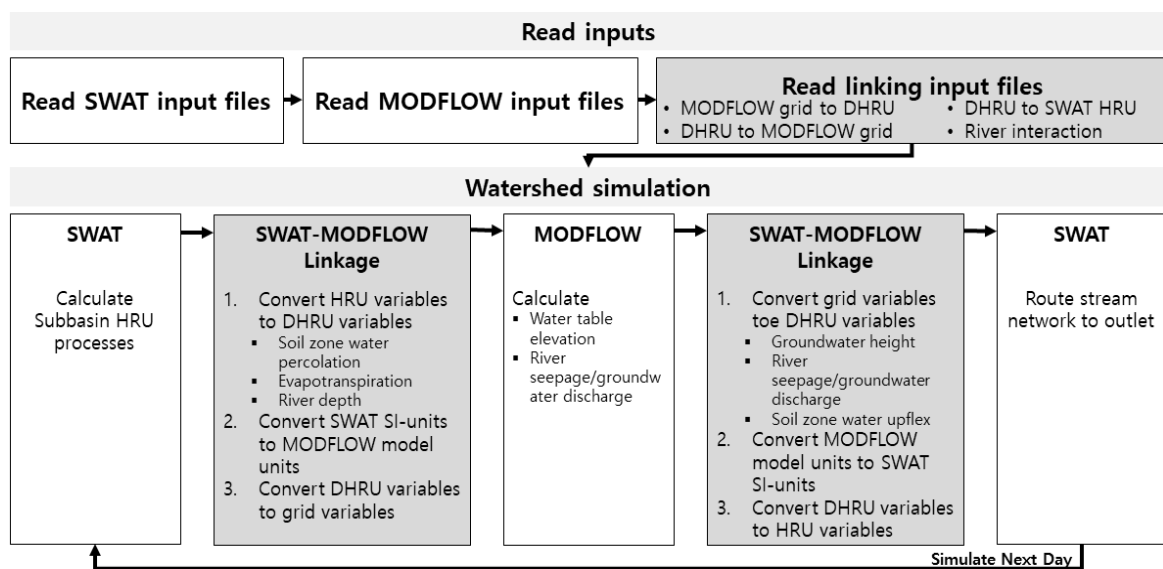


Fig. 2. Diagram of the coupled SWAT-MODFLOW model (Bailey *et al.*, 2016)

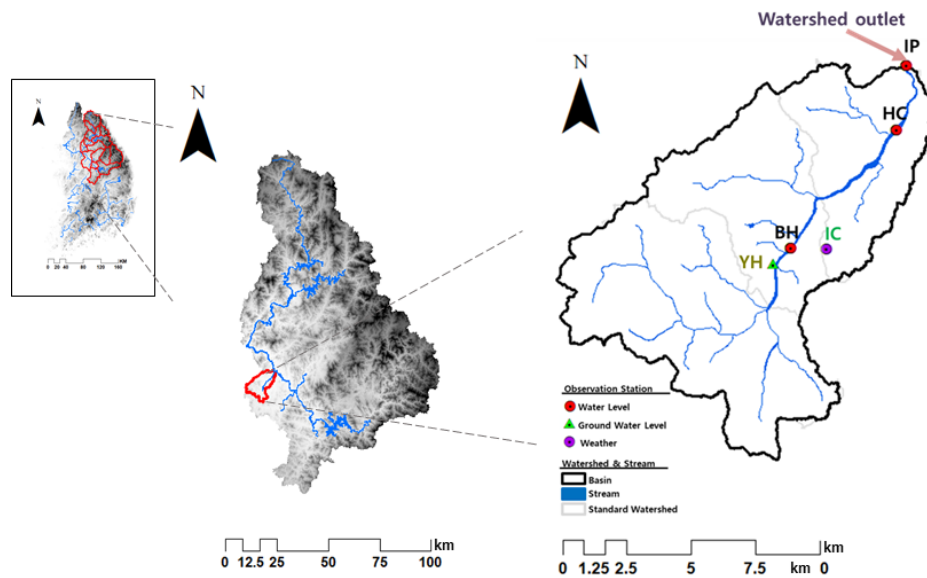


Fig. 3. Study area

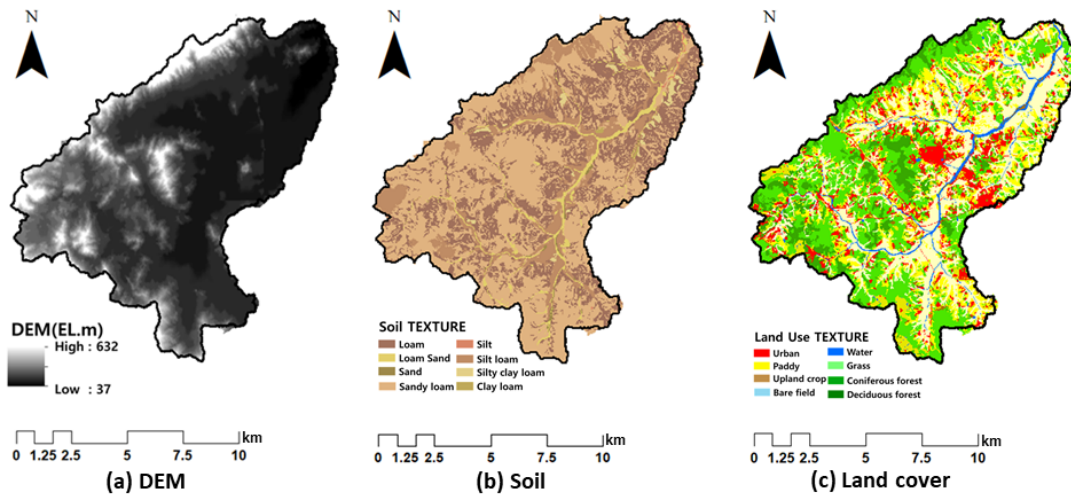


Fig. 4. GIS data of Bokhacheon watershed

#### 4. SWAT-MODFLOW의 입력자료 구축

SWAT의 GIS 입력자료로 DEM (Digital Elevation Model)은 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)의 30 m×30 m 해상도 자료(Fig. 4 (a))를 이용하였다. 토양도는 농촌진흥청 흙토람의 1:25,000 정밀토양도(Fig. 4(b))를 이용하였으며, 토지이용도는 환경부의 2020년 세분류 자료를 이용하였으며, 이를 이를 8개 항목(활엽수림, 침엽수림, 주거지, 논, 밭, 초지, 나지, 수역)으로 분류하여 모형에 입력하였다(Fig. 4(c)). 유역 내 토양특성의 경우 사양토(Sandy loam)와 양토(Loam)가 각각 54.4%, 27.9%

로 높은 비율을 차지하고 있고 있으며, 토지이용은 농지가 44.9%, 산림이 38.8%로 구성되어 있다.

SWAT의 기상입력자료는 이천관측소의 강수량(mm/day), 최고·최저 기온(°C), 풍속(m/s), 상대습도(%), 일사량(MJ/m<sup>2</sup>)에 대해 13년(2005~2017년)의 일 자료를 사용하였으며, 복하천 유역의 유출량 검·보정을 위하여 환경부의 홍천수위관측소 일유출량 자료를 구축하였다. 지하수위 자료는 유역 내 국가 지하수정보센터(National Groundwater Information Center, GIMS)의 이천울현(YH)의 층적 지하수 관측정에 의해 관측된 지하수위 일자료를 사용하였다.

SWAT에서는 토양도(Fig. 4(b))와 토지이용도(Fig. 4(c))

를 중첩시켜 수문학적 반응단위인 HRU를 생성하게 되는데 HRU는 소유역 내 동일한 토지이용, 토양특성을 갖는 지역을 1개의 polygon으로 구성한다. 이러한 HRU를 격자로 변환하여 MODFLOW 모델링을 수행하게 되는데 본 연구에서는 SWAT을 통해 생성된 1,091개의 HRU를 300 m × 300 m MODFLOW 자료와 조합하여 총 29,756개의 DHRU 격자를 생성하였다. MODFLOW의 주요 매개변수인 수리전도도, 비저류량, 비산출량과 같은 인자는 지하수 흐름 특성을 지배하는 인자로서 모델링의 결과에 큰 영향을 미치는 요소이다. 선행 연구를 살펴보면, 수리전도도는 비양수량과 투수량 계수와 의 상관성을 이용한 경험식을 주로 사용하며(Oh *et al.*, 2011), 비산출량은 Johnson (1967)와 Freeze and Cherry (1979)의 연구결과를 적용한 사례가 있다(Kim *et al.*, 2006).

본 연구에서는 Johnson (1967)이 실험을 통해 산정한 토양 속성별 수리전도도, 비저류량, 비산출량 계수와 농촌진흥청 토양도 내 토양 속성 정보(Fig. 4(b))를 이용하여 MODFLOW의 입력변수로 활용했다(Table 1). Fig. 5는 수리전도도, 저류

계수, 비산출량, 대수층 두께를 산정한 결과로, 수리전도도는 0.017 ~ 7.1 m/day, 저류계수는 0.0002 ~ 0.0008 1/m, 비산출량은 0.021 ~ 0.32 범위를 가지고 있으며(Figs. 5(a) ~ 5(c)), 대수층 두께의 경우는 유효토심 자료로부터 0.09 ~ 1.5 m 깊이로 산정되었다(Fig. 5(d)).

Table 1. The aquifer hydraulic properties (Steven *et al.*, 2005)

Soil Texture	K (m/day)	S <sub>s</sub> (1/m)	S <sub>y</sub>	Rate (%)
Loam	0.250	0.0005	0.075	27.9
Loam sand	3.500	0.0003	0.260	3.6
Sand	7.100	0.0002	0.320	0.5
Sandy loam	1.100	0.0004	0.170	54.4
Silt	0.060	0.0006	0.026	1.3
Silt loam	0.110	0.0006	0.037	11.3
Silty clay loam	0.017	0.0007	0.072	1.1
Clay loam	0.062	0.0008	0.021	0.1

K: Hydraulic conductivity, S<sub>s</sub>: Specific storage, S<sub>y</sub>: Specific yield

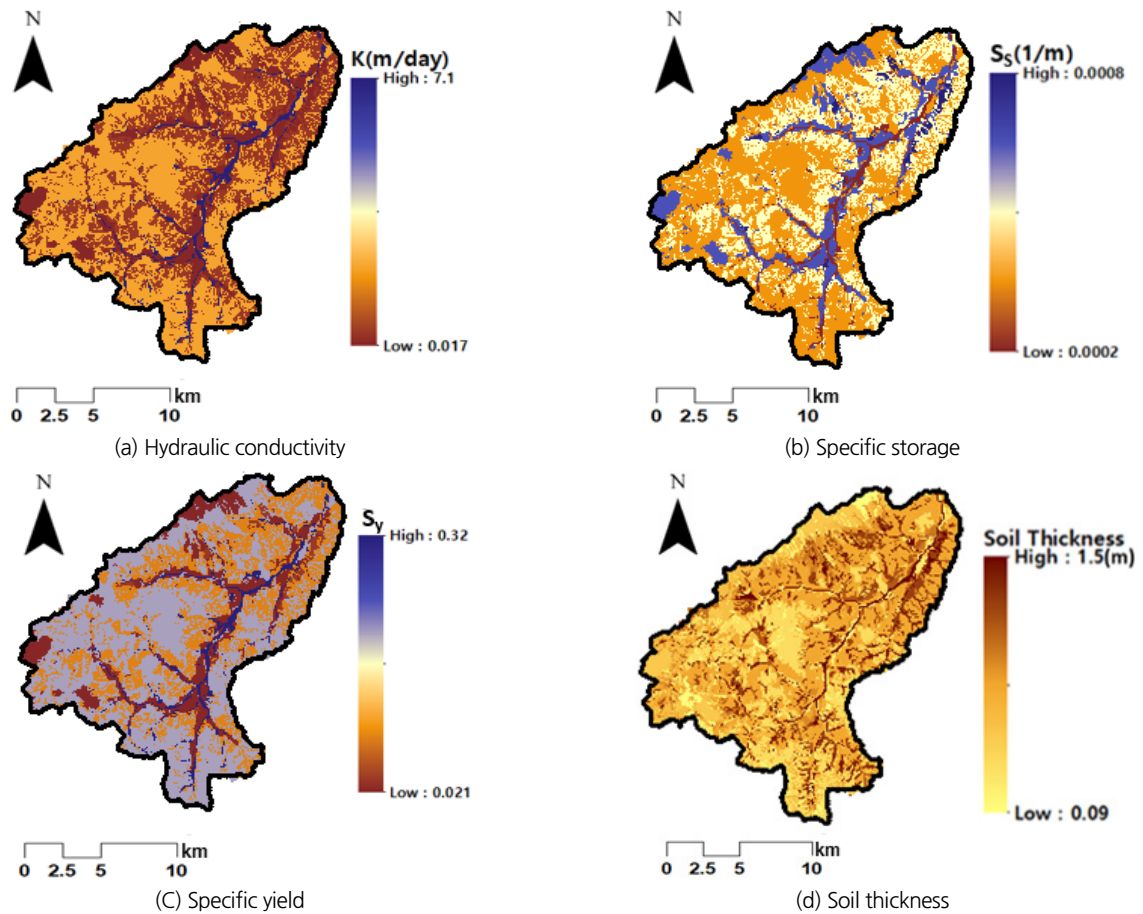


Fig. 5. The Aquifer hydraulic parameters

## 5. 결과 및 고찰

### 5.1 SWAT 검·보정

본 연구에서는 SWAT 모형의 적용에 앞서 북한천 유역에 대한 매개변수 민감도분석을 수행하고 최적의 매개변수를 선정하였다. Table 2는 선정된 매개변수와 적용한 값을 정리한 것으로, 지표유출관련 매개변수는 CN2와 CH\_N(2)가 민감하게 나타났으며, 증발산 관련 매개변수는 CANMAX와 ESCO, 토양 관련 매개변수는 SLSOIL을 선정하였다. 지하수 관련 매개변수는 GW\_DELAY, GWQMN, ALPHA\_BF, REVAPMN, GW\_Revap이 해당 유역에서 민감하게 나타났으며 해당 변수를 중점으로 보정을 실시하였다.

모형의 보정기간은 2009~2013년, 검정기간은 2014~2017년으로 하였으며, 모형의 적용성 평가는 Determination Coefficient ( $R^2$ ), Nash and Sutcliffe model Efficiency ( $NSE_Q$ ), Root-Mean Square Error (RMSE)를 사용하였으며,  $R^2$ 는 관측값과 모의값이 완벽하게 일치할 경우 1의 값을 나타내며,  $NSE_Q$ 는 고수위부분의 첨두유량을 평가하고,  $NSE_{mQ}$ 는 감수위부분의 모의를 평가하기 위해 사용되며,  $-\infty$ 에서 1까지의 범위를 가지고 지수값이 1일 때 관측값과 모형으로부터 산정된 값이 완벽하게 일치함을 의미하며 Eqs.(4) and (5)와 같이 산정된다.

$$NSE_Q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (4)$$

$$NSE_{mQ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{Q_i} - \frac{1}{P_i})^2}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{Q_i} - \frac{1}{\bar{Q}_i})^2} \quad (5)$$

여기서  $Q$ 는 실측유출량,  $P$ 는 모형의 모의유출량,  $\bar{Q}_i$ 는 실측값의 평균이다. RMSE는 0에 가까울수록 만족스러운 결과로 판단되며 오차가 작은 것을 의미한다(Son and Kim, 2008; Kim and Kim, 2017; Kim et al., 2018; Kim et al., 2020).

Table 3은 검·보정 결과 중 홍천 관측소 유출량에 대한 통계 분석 값을 정리한 것으로 검·보정 전체기간에 대한  $R^2$ ,  $NSE_Q$ , RMSE는 각각 0.70, 0.73, 10.44 mm/day로 통계적으로 유의한 것으로 분석되었으나, 저유량의 효율을 평가하기 위한  $NSE_{mQ}$ 의 경우 모형 효율이 -0.10으로 통계적으로 유의하지 않음을 보여주고 있다. 특히 2009, 2016, 2017년의 저유량의 모의값이 실측치의 경향을 잘 반영하지 못한 것으로 나타났다.

Fig. 6(a)은 북한천 유역의 연도별 실측 강수량과 유출량(검은색선) 및 SWAT 모의 결과(빨간색선)를 나타낸 것으로 2014년부터 2016년까지 이어진 강수량의 부족으로 인해 유출량 및 저유량이 하강하는 것을 확인할 수 있으며, 특히 2016년 하반기의 강수량 부족이 2017년 상반기까지 영향을 주어 저유량 모의결과가 실측치에 비해 매우 낮게 모의되었다. 2016년과 2017년의  $NSE_{mQ}$  효율이 각각 -0.92와 -0.98로 유의성이 낮은 것으로 평가된 것은 저유량 모의곡선이 실제 유출량과 큰 차이가 발생했기 때문으로 판단된다.

### 5.2 SWAT-MODFLOW 검보정

SWAT-MODFLOW는 검·보정된 SWAT의 Output 파일

Table 2. The SWAT calibrated parameters

Parameter	Definition	Range	Adjusted value
Surface runoff			
CN2	SCS curve number for moisture condition	35 to 98	+10
CH_N (2)	Manning's "n" value for the tributary channel	0.01 to 30	0.014
ET (Evaporation) and Soil			
CANMAX	Maximum canopy storage	0 to 100	2
ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0 to 1	0.95
SLSOIL	Slope length of lateral subsurface flow (m)	0 to 150	0
Groundwater			
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge (days)	0 to 500	10
GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for base flow (mm)	0 to 5000	2000
ALPHA_BF	Base flow recession constant	0 to 1	0.002
REVAPMN	Threshold water level in shallow aquifer for revap (mm)	0 to 1000	750
GW_REVAP	Groundwater revap coefficient	0.02 to 0.2	0.02

**Table 3.** Summary of SWAT calibration and validation results for streamflow

Remarks	Year	PCP (mm)		Q (mm)		QR (%)	R <sup>2</sup>	NSE <sub>Q</sub>	NSE <sub>inQ</sub>	RMSE (mm/day)
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.					
C	2009	1,401.5	862.4	788.6	61.5	56.3	0.93	0.93	-0.78	3.86
	2010	1,429.6	1,191.5	805.6	83.3	56.4	0.37	0.72	0.35	20.20
	2011	2,045.0	1,877.0	1,369.5	91.8	67.0	0.78	0.64	0.31	26.56
	2012	1,559.2	813.2	1,006.3	52.2	65.5	0.89	0.89	0.24	10.09
	2013	1,366.9	1,071.4	808.1	78.4	59.1	0.92	0.77	0.32	13.78
	<b>Avg.</b>	<b>1,560.4</b>	<b>1,163.1</b>	<b>955.6</b>	<b>73.4</b>	<b>60.8</b>	<b>0.78</b>	<b>0.79</b>	<b>0.09</b>	<b>14.90</b>
V	2014	791.5	450.5	334.7	56.9	42.3	0.40	0.35	0.49	6.06
	2015	841.5	333.3	279.4	39.6	33.2	0.68	0.73	0.09	2.82
	2016	870.3	376.9	326.5	43.3	38.5	0.65	0.82	-0.92	2.64
	2017	1,011.5	622.2	470.9	61.5	47.5	0.67	0.71	-0.98	7.92
	<b>Avg.</b>	<b>878.7</b>	<b>445.7</b>	<b>352.9</b>	<b>50.3</b>	<b>40.4</b>	<b>0.60</b>	<b>0.65</b>	<b>-0.33</b>	<b>4.86</b>

Obs.: observed, Sim.: simulated, Q: runoff, QR: runoff ratio, C: calibration, V: validation

**Table 4.** Comparison of SWAT and SWAT-MODFLOW calibration and validation results for streamflow

Remarks	Year	PCP (mm)	Observed		SWAT		SWAT-MODFLOW					
			Q (mm)	QR (%)	Q (mm)	QR (%)	Q (mm)	QR (%)	R <sup>2</sup>	NSE <sub>Q</sub>	NSE <sub>inQ</sub>	RMSE (mm/day)
C	2009	1,401.5	862.4	61.5	788.6	56.3	918.1	65.5	0.93	0.93	0.61	2.91
	2010	1,429.6	1,191.5	83.3	805.6	56.4	899.3	62.9	0.36	0.74	0.76	15.29
	2011	2,045.0	1,877.0	91.8	1369.5	67.0	1290.7	63.1	0.77	0.68	0.39	30.69
	2012	1,559.2	813.2	52.2	1006.3	64.5	1051.0	67.4	0.87	0.92	0.37	12.43
	2013	1,366.9	1,071.4	78.4	808.1	59.1	880.3	64.4	0.93	0.84	0.38	10.00
	<b>Avg.</b>	<b>1,560.4</b>	<b>1,163.1</b>	<b>73.4</b>	<b>955.6</b>	<b>60.7</b>	<b>1,008.0</b>	<b>64.7</b>	<b>0.77</b>	<b>0.82</b>	<b>0.50</b>	<b>14.26</b>
V	2014	791.5	450.5	56.9	334.7	42.3	529.3	66.9	0.37	0.38	0.62	4.13
	2015	841.5	333.3	39.6	279.4	33.2	490.6	58.3	0.67	0.75	0.49	8.23
	2016	870.3	376.9	43.3	326.5	37.5	509.5	58.5	0.65	0.74	0.18	6.94
	2017	1,011.5	622.2	61.5	470.9	46.5	606.9	60.0	0.66	0.69	0.75	0.80
	<b>Avg.</b>	<b>878.7</b>	<b>445.7</b>	<b>50.3</b>	<b>352.9</b>	<b>39.9</b>	<b>534.1</b>	<b>60.9</b>	<b>0.59</b>	<b>0.64</b>	<b>0.51</b>	<b>5.03</b>

Q: runoff, QR: runoff ratio C: calibration, V: validation

을 그대로 이용하여 MODFLOW 모델링에 사용하도록 개발되었다. 또한, SWAT 모델링 시 분할되었던 수문학적반응단위(HRU)와 소유역 정보 및 하천정보를 바로 MODFLOW 입력자료 형태로 변환하여 입력된다. SWAT은 지하수위를 출력할 수 없으나, SWAT-MODFLOW는 지하수위를 출력함에 따라 본 연구에서는 유역 내 이천울현(YH) 지점에 대한 지하수위 모의결과를 출력하여 실측자료와 비교를 수행하였다. Table 1 및 Fig. 4는 신뢰성 있는 지하수 모의를 위해 입력변수에 관한 선행연구를 참고하여 MODFLOW에 적용하였으며, Table 4와 Fig. 7은 SWAT-MODFLOW 모의 결과를 정리하여 나타낸 것이다.

홍천 관측소에 대하여 SWAT과 SWAT-MODFLOW의 모의결과를 통계분석한 결과, SWAT-MODFLOW의 유역 평균 총 유출률은 SWAT 대비 10.8% 증가하였으나 R<sup>2</sup>, NSE<sub>Q</sub>, RMSE는 큰 변화가 나타나지 않았다. 다만, 저유량의 효율을 평가하기 위한 NSE<sub>inQ</sub>의 경우 SWAT 모의 시 -0.10로 평가되었던 것에 반해(Table 3) SWAT-MODFLOW는 0.51로 크게 향상되었다(Table 4). 강수량이 적었던 2014년부터 2016년의 유출량경우, SWAT 모의 시 33.2 ~ 42.3%였던 반면 SWAT-MODFLOW는 58.3 ~ 66.9%로 평균 23.6% 증가하였다.

Fig. 6(a)은 실측유출량(검정), SWAT 모의 결과(빨강), 및 SWAT-MODFLOW(하늘)을 함께 도시한 것으로 기존 SWAT



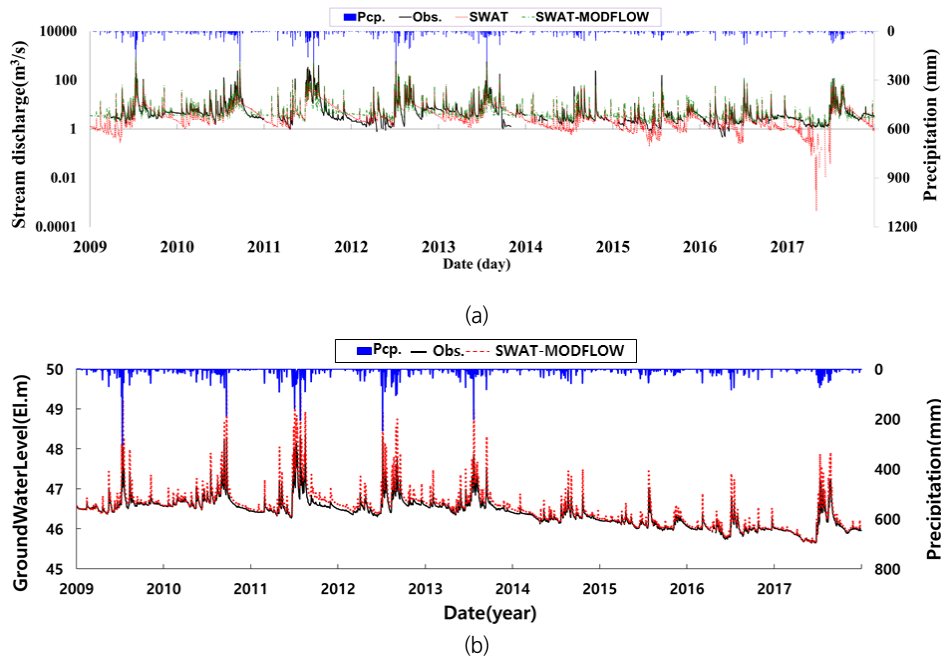


Fig. 6. (a) SWAT versus SWAT-MODFLOW streamflows and (b) SWAT-MODFLOW groundwater level with observed ones

Table 5. Summary of SWAT-MODFLOW groundwater level (GWL) calibration and validation results

Remarks	Year	PCP (mm)	Groundwater level (EL.m)		RMSE (EL.m)	R <sup>2</sup>
			Observed	Simulated		
C	2009	1,401.5	46.6	46.7	1.29	0.93
	2010	1,429.6	46.7	46.8	1.66	0.94
	2011	2,045.0	46.7	46.8	3.60	0.96
	2012	1,559.2	46.6	46.8	2.99	0.92
	2013	1,366.9	46.6	46.7	4.86	0.93
	<b>Avg.</b>	<b>1,560.4</b>	<b>46.6</b>	<b>46.8</b>	<b>2.88</b>	<b>0.94</b>
V	2014	791.5	46.3	46.4	8.64	0.92
	2015	841.5	46.1	46.2	1.14	0.93
	2016	870.3	46.0	46.1	34.95	0.93
	2017	1,011.5	46.0	46.1	1.30	0.98
	<b>Avg.</b>	<b>878.7</b>	<b>46.1</b>	<b>46.2</b>	<b>11.51</b>	<b>0.94</b>

C: calibration, V: validation

대비 저유량 모의에 있어 상당 부분 개선됨을 확인할 수 있다. 특히 SWAT 모의 시  $NSE_{inQ}$  효율이 낮게 평가되었던 2009, 2017년의 경우 SWAT-MODFLOW 연계 시 실제 유출자료와 유사하게 모의 되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6(b)는 SWAT-MODFLOW를 이용하여 유역 내 이천 울현 지점에 대한 지하수위 모의결과를 출력한 것으로, 모의

값과 실측값이 매우 유사한 것으로 나타났다. 통계분석 결과 RMSE 6.72 m, R<sup>2</sup>는 0.94였으며, 2009년부터 2013년까지 지하수위는 평균 EL. 46.7 m으로 모의 되었으나, 강수량이 부족했던 2014년부터 2017까지의 지하수위는 EL. 46.1 m로 약 0.6 m 하강하였다(Table 5). SWAT-MODFLOW에서 모의된 지하수위의 경우에도 매년 강수량 부족으로 인한 지하수위 하강이 실제 관측자료와 동일한 패턴으로 모의된 것으로 분석되었다. 하지만 여름철 수위가 관측수위와 비교하면 과도하게 산정되었는데 이는 MODFLOW에 관정 지하수 사용량 자료가 반영되지 않아 발생한 오차로 판단된다.

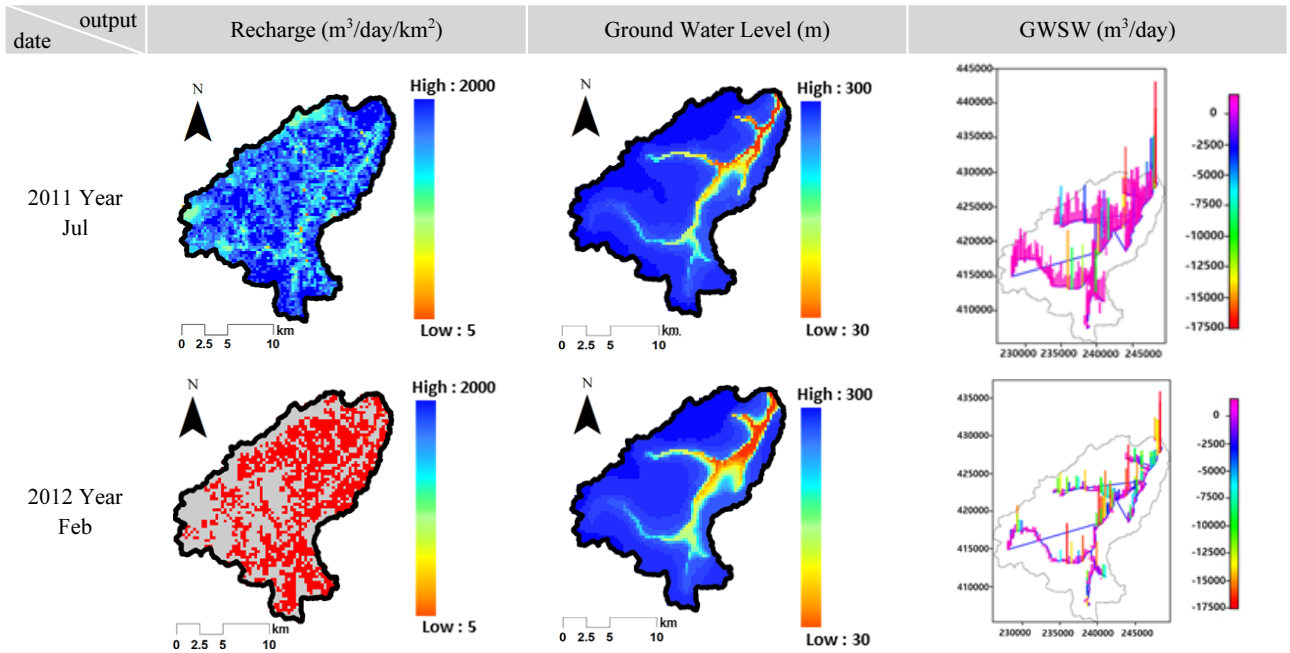
### 5.3 SWAT 및 SWAT-MODFLOW의 유역유출 결과비교 및 출력자료

Table 6은 유역 전체에 대하여 지표유출(SURQ), 중간유출(LARQ), 기저유출(GWQ)에 대하여 SWAT와 SWAT-MODFLOW의 모의 결과를 연별 평균값으로 정리하여 나타낸 것으로 분석기간(2009~2017)동안의 총유출량 경우 각각 718.6 mm (54.6%), 854.9 mm (68.3%)로 산정되었다. Table 4와 Fig. 6에서와 같이 강수량이 적었던 2014년부터 2016의 유출률은 실측자료 및 SWAT 모의결과보다 SWAT-MODFLOW에서 과대하게 산정되었는데, 기저유출을 살펴보면 SWAT-MODFLOW의 모의 결과가 SWAT 결과에 비해 171.6 ~ 183.3 mm 증가한 것을 확인할 수 있으며, 이는 기저유출의 증

**Table 6.** Comparison of SWAT and SWAT-MODFLOW for runoff components

Year	PCP (mm)	SWAT runoff				SWAT-MODFLOW runoff			
		SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	TQ (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	TQ (mm)
2009	1,401.5	312.9	175.2	328.9	817.0 (58.3%)	379.3	166.0	425.8	971.1 (69.3%)
2010	1,429.6	246.4	182.7	392.8	821.9 (57.5%)	333.75	174.3	435.7	943.8 (66.0%)
2011	2,045.0	407.7	305.7	642.2	1,355.6 (66.3%)	530.75	291.7	509.4	1,331.9 (65.1%)
2012	1,559.2	347.1	205.2	477.4	1,029.7 (66.0%)	430.64	195.2	480.4	1,106.2 (71.0%)
2013	1,366.9	241.1	170.0	425.7	836.8 (61.2%)	310.77	162.3	463.4	936.5 (68.5%)
2014	791.5	86.8	78.4	220.0	385.2 (48.75%)	115.48	76.5	403.3	595.3 (75.2%)
2015	841.5	72.4	88.6	177.7	338.7 (40.2%)	97.25	87.0	375.3	559.6 (66.5%)
2016	870.3	94.2	96.0	191.3	381.5 (43.8%)	120.54	93.7	362.9	577.1 (66.3%)
2017	1,011.5	148.41	122.4	230.6	501.4 (49.6%)	198.54	118.4	355.7	672.6 (66.5%)
<b>Avg.</b>	<b>1,257.4</b>	<b>217.4</b>	<b>158.2</b>	<b>342.9</b>	<b>718.6 (54.6%)</b>	<b>279.7</b>	<b>151.7</b>	<b>423.5</b>	<b>854.9 (68.3%)</b>

SURQ: Surface runoff, LATQ: Lateral runoff, GWQ: Groundwater runoff, TQ: Total runoff



GWSW : Ground Water and Surface Water interaction

**Fig. 7.** The SWAT-MODFLOW Spatial distribution Output data

가가 총 유출량을 증가하는데 영향을 준 것으로 판단된다. 기저유출이 증가한 것은 SWAT의 경우 지하수 계산시 얇은 대수층까지 계산되었으나, SWAT-MODFLOW 연계 모의 시 대수층의 시공간적 특성을 고려한 지하수 계산이 가능해짐에 따라 기저유출량이 증가한 것으로 판단된다.

SWAT-MODFLOW는 지표수와 지하수의 물교환량을 통해 지하수 충전량, 지하수위 지하수유동평가지료(GWSW; Ground Water and Surface Water interaction)를 공간분포하여 지하수 변동특성을 시각적으로 표현할 수 있으며, 월평균

유출량이 가장 높은 2011년 7월과 가장 낮은 2017년 5월을 기준으로 공간분포 하였다(Fig. 7). 강수 여부에 따라 지하수 충전량이 약 2,000 m³/day/km² 만큼 차이가 났으며, 지하수위의 경우는 각 격자별 수위 차이가 1 m 이내이기 때문에 그림에서 큰 변화를 관찰할 수 없었지만 홍천수위관측소 주변 하천의 지하수위가 다소 감소한 것을 확인하였다. GWSW에서 값이 음수이면 지표수가 대수층으로 유입, 양수인 경우는 대수층에서 지표수로 유출되는 것을 의미한다. 7월 자료의 경우 많은 양의 지하수가 지표로 이동하고 있으며 5월의 경우는 지표유

출이 감소하고 반대로 대수층으로 물이 유입되고 있다. 해당 자료는 유역내 지하수공간 분포 정량화하는데 중요한 자료로 활용될 수 있다(Bailey et al., 2020).

## 6. 요약 및 결론

본 연구에서는 물리적 기반의 준분포형 장기유출모형인 SWAT과 3차원 분포형 지하수 모형인 MODFLOW의 연계를 통한 지표수-지하수 통합유출 모형인 SWAT-MODFLOW를 SWAT과 복하천 유역을 대상으로 수문 모의결과를 비교 평가하였다. 기존 SWAT모형 대비 기저유출량 산정에 있어 개선된 모의 결과를 산출하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) SWAT의 복하천 HC (홍천)수위 관측소 자료에 대한 일별 유출량 자료에 대한 검·보정을 실시한 결과  $R^2$ 는 0.70,  $NSE_Q$ 는 0.73, RMSE는 10.44 mm/day,  $NSE_{inQ}$ 은 -0.10로 특정년도에서 저유량 모의값이 실측치의 경향을 제대로 반영하지 못하였다.
- 2) SWAT-MODFLOW를 통해 SWAT의 입력자료와 토양 속성에 따른 수리전도도(K m/day), 비저류량( $S_s$ , l/m), 비산출량( $S_y$ ) 및 유효토심(m)에 해당하는 MODFLOW의 입력자료를 연계 모의하였다. 그 결과 SWAT 모의 값과 비교 시 평균 유출량이 11.6% 증가하였으며 지하수 유출량이 평균 80.5 mm 증가하였다. SWAT-MODFLOW의 결과는  $R^2$ ,  $NSE_Q$ , RMSE,  $NSE_{inQ}$ 가 각각 0.69, 0.74, 10.16 mm/day, 0.51로 산정되었다. 세 개의 목적함수 값에는 큰 변화가 없었으나, 저유량의 효율을 평가하기 위한  $NSE_{inQ}$ 의 값이 상당히 개선되었다.
- 3) SWAT-MODFLOW의 지하수위 모의결과 관측값의 증가 및 감소 패턴을 통계분석 결과 RMSE 6.72 (mm/day),  $R^2$ 는 0.94로 나타났으며 지하수위의 감소패턴을 잘 모의하였으나, 여름철 수위가 비교적 과도하게 산정되었으며 이는 관정 지하수 사용량이 반영하지 않아 발생한 오류로 판단된다.
- 4) 분석기간(2009 ~ 2017년)동안의 SWAT의 총유출량은 718.6 mm (54.6%)이며, SWAT-MODFLOW 854.9 mm (68.3%)로 산정되었다. SWAT-MODFLOW가 SWAT에 비하여 총유출량이 증가 되었는데, 이는 대수층의 시공간적 특성을 고려한 지하수 계산이 가능해짐에 따라 기저 유출량이 증가한 것으로 판단된다.
- 5) SWAT-MODFLOW의 출력결과자료인 지하수 변동특성을 알 수 있는 충전량 및 지하수위 유출량이 가장 높은 2011

년 7월과 가장 유출량이 낮은 2017년 5월의 경우를 비교하였으며, 최대 2140.8 m<sup>3</sup>/day/km<sup>2</sup> 만큼 차이가 났으며, 지하수위의 경우는 각 격자별 수위 차이가 1 m 이내였으며, GWSW를 통한 지하수 배출량 및 침투량을 시공간적으로 볼 수 있었다.

본 연구에서는 SWAT과 SWAT-MODFLOW 비교 결과 지하수 내 공간적 변동성을 고려해 기존 결과대비 지표유출과 기저유출이 큰 폭으로 개선된 것을 확인하였으며, 또한 추가적으로 지하수 변동특성인 지하수위 및 충전량에 대한 공간분포 특성도 파악할 수 있었다. 하지만 국내 지하 대수층에 대한 정확한 관측자료가 없어 경험식을 적용했다는 점과 지하수 사용량을 반영하지 못했다는 점에서 다소 오차를 포함하고 있다. 다만 국내외로 널리 사용되는 두 모델(SWAT, MODFLOW)을 사용한 점과 홍천수위관측소, 이천울현 충전 지하수위 관측소의 실측자료를 통한 통계분석결과를 통해 증명한 결과 지하수 유출량 부분 확인에서는 유의미한 것으로 판단 되었다. 추후, 모델링에 있어 전 유역에 대한 지하수 이용량 자료를 반영하여 지하수위가 6~7월에 과대추정되는 문제를 개선하여 지하수위 변화에 대한 정보를 생산하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 한강수계관리위원회 환경기초조사사업 및 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 수생태계 건강성 확보 기술개발사업(2020003050001)의 지원을 받아 연구되었습니다.

## References

- Arnold, J.G., Muttiah, R.S., Srinivasan, R., and Allen, P.M. (2000). "Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 227, pp. 21-40.
- Bailey, R., Park, S.G., Bieger, K., Arnold, J.G., and Allen, P.M. (2020). "Enhancing SWAT+ simulation of groundwater flow and groundwater-surface water interactions using MODFLOW routines." *Environmental Modelling and Software*, Elsevier, Vol. 126, 104660.
- Bailey, R.T., Wible, T.C., Arabi, M., Records, R.M., and Ditty, J. (2016). "Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model." *Hydrological Processes*, Wiley Online

- Library, Vol. 30, No. 23, pp. 4420-4433.
- Chung, S.O., Lee, Y.D., and Min, B.H. (1994). "An analysis of groundwater flow at Bugok Area Using MODFLOW." *Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 27, No. 1, pp. 79-88.
- Dar, I.A., Sankar, K., and Dar, M.A. (2010). "Remote sensing technology and geographic information system modeling: An integrated approach towards the mapping of groundwater potential zones in Hardrock terrain Mamundiyan basin." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 394, No. 3-4, pp. 285-295.
- Fatemeh, A., Ryan, T.B., Ali, T., Andre, D., Mazdak, A., and Kurt, Z. (2019). "Coupled SWAT-MODFLOW model for large-scale mixed agro-urban river basins." *Environmental Modelling & Software*, Elsevier, Vol. 115, pp. 200-210.
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A. (1979) *Groundwater*. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., U.S.
- Ghosh, P.K., Bandyopadhyay, S., and Jana, N.C. (2016). "Mapping of groundwater potential zones in hard rock terrain using geoinformatics: A case of Kumari watershed in western part of West Bengal." *Modeling Earth Systems and Environment*, Springer, Vol. 2, No. 1.
- Goodarzi, M., Abedi-Koupai, J., Heidarpour, M., and Safav, H.R. (2016). "Evaluation of the effects of climate change on groundwater recharge using a hybrid method." *Water Resources Management*, Springer, Vol. 30, No. 1, pp. 133-148.
- Heo, Y.T., Park, J.H., Hwang, M.H., Jang, S.Y., Kim, B.W., and Park, G.Y. (2017). *Coupling of Long-term Surface Runoff and Ground Water Movement*. 17-01, Korea water resources corporation.
- Hue, C.H. (2003). "Groundwater Flow Analysis using MODFLOW in the Tunnel." *Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 36, No. 1, pp. 129-142.
- Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ziaei, A.N., Akhavan, S., Alipoor, A., Joodavi, A., and Brusseau, M.L. (2015). "Groundwater conceptualization and modeling using distributed SWAT-based recharge for the semi-arid agricultural Neishaboob plain." *Iran Hydrogeology Journal*, Springer, Vol. 23, No. 1, pp. 47-68.
- Jang, W.S., Engel, B., and Ryu, J. (2018). "Efficient flow calibration method for accurate estimation of baseflow using a watershed scale hydrological model (SWAT)." *Ecological Engineering*, Elsevier, Vol. 125, pp. 50-67.
- Johnson, A.I. (1967). *Specific yield-compilation of specific yields for various materials*. No. 1662, US Government Printing Office.
- Kim, D.R., and Kim, S.J. (2017). "A study on parameter estimation for SWAT calibration considering streamflow of long-term drought periods." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineer*, KSAE, Vol. 59, No. 2, pp. 19-27.
- Kim, J.T., Kim, M.I., Chung, I.M., Kim, N.W., and Jeong, G.C. (2009). "An analysis of groundwater level fluctuation caused by construction of groundwater dam." *The Journal of Engineering Geology*, KSEG, Vol. 19, No. 2, pp. 227-233.
- Kim, N.W., Chung, I.M., and Won, Y.S. (2004). "The development of fully coupled SWAT-MODFLOW model (I) model development." *Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 37, No. 6, pp. 499-507.
- Kim, N.W., Chung, I.M., and Won, Y.S. (2006). "An integrated surface water-groundwater modeling by using fully combined SWAT-MODFLOW model." *Korean Society of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 26, No. 5B, pp. 481-488.
- Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S., and Arnold, J.G. (2008). "Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 356, No. 1-2, pp. 1-16.
- Kim, N.W., Lee, J., and Lee, J.E. (2013). "Estimation of natural streamflow for the Bokhacheon middle-upper watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 12, pp. 1169-1180.
- Kim, Y.G., Seo, S.B., and Kim, Y.O. (2018). "Development of a hybrid regionalization model for estimation of hydrological model parameters for ungauged watersheds." *Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 51, No. 8, pp. 677-686.
- Kim, Y.W., Lee, J.W., Woo, S.Y., and Kim, S.J. (2020). "Inter-basin water transfer modeling from Seomjin River to Yeongsan River using SWAT." *Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 53, No. 1, pp. 57-70.
- Lee, J.M., Park, Y.S., Jung, Y.H., Cho, J.P., Yang, J.E., Lee, G.J., Kim, K.S., and Lim, K.J. (2014). "Analysis of spatiotemporal changes in groundwater recharge and baseflow using SWAT and BFlow Models." *Journal of Korean society on Water Environment*, KSWE, Vol. 30, No. 5, pp. 549-558.
- Lee, J.W., Jung, C.G., Kim, D.R., and Kim, S.J. (2018). "Assessment of future climate change impact on groundwater level behavior in Geum river basin using SWAT." *Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 51, No. 3, pp. 247-261.
- Liu, C.W., Chou, Y.L., Lin, S.T., Lin, G.J., and Jang, C.S. (2010). "Management of high groundwater level aquifer in the Taipei basin." *Water resources management*, Springer, Vol. 24, No. 13, pp. 3513-3525.
- Liu, W., Bailey, R.T., Andersen, H.E., Jeppesen, E., Nielsen, A., Peng, K., Eugenio, M., N. Par, S.G., Thodsen, H., and Trolle, D. (2020). "Quantifying the effects of climate change on hydrological regime and stream biota in a groundwater-dominated catchment: A modelling approach combining SWAT-MODFLOW with flow-biota empirical models." *Science of the Total Environment*, Elsevier, Vol. 745, 140933.
- Murmu, P., Kumar, M., Lal, D., Sonker, I., and Singh, S.K. (2019). "Delineation of groundwater potential zones using geospatial techniques and analytical hierarchy process in Dumka district, Jharkhand, India." *Groundwater for Sustainable Development*, Elsevier, Vol. 9, 100239.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2001). *Soil and water assessment tool; the theoretical documentation*. U.S Agricultural Research Service, pp. 340-367.
- Oh, S.H., Kim, Y.C., and Koo, M.H. (2011). "Modeling artificial groundwater recharge in the Hancheon Drainage Area, Jeju island, Korea." *Journal of Soil and Groundwater Environment*, KSSGE, Vol. 16, No. 6, pp. 34-45.

- Ryu, J.C., Mun, Y.R., Moon, J.P., Kim, I.J., OK, Y.S., Jang, W.S., Kang, H.W., and Lim, K.J. (2011). "Development and application of the SWAT HRU mapping module for estimation of groundwater pollutant loads for each HRU in the SWAT Model." *Environmental Policy Research*, KEI, Vol. 10, No. 1, pp. 49-70.
- Steven, P.L., James, J.B., and Steven, M.G. (2005). "Estimation of groundwater consumption by phreatophytes using diurnal water table fluctuations: A saturated-unsaturated flow assessment." *water resources research*, AGU, Vol. 41, W07030.
- Son, K.H., and Kim, J.K. (2008). "Application of Proxy-basin differential split-sampling and blind-validation tests for evaluating hydrological impact of climate change using SWAT." *Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 10, pp. 969-982.
- Sophocleous, M.S., Perkins, S.P., Stadnyk, N.G., and Kaushal, R.S. (1997). *Lower republican stream-aquifer project, Final Report*, Kansas Geological Survey Open File Report 97-8, 1930 Constant Avenue. KS 66047-3726, University of Kansas Lawrence.