



## SWAT model calibration/validation using SWAT-CUP I : analysis for uncertainties of objective functions

Yu, Jisoo<sup>a</sup> · Noh, Joonwoo<sup>b</sup> · Cho, Younghyun<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>Researcher, Water Resources Research Center, K-water Research Institute, Daejeon, Korea

<sup>b</sup>Head Researcher, Water Resources Research Center, K-water Research Institute, Daejeon, Korea

<sup>c</sup>Principal Researcher, Water Resources Research Center, K-water Research Institute, Daejeon, Korea

Paper number: 19-092

Received: 15 November 2019; Revised: 2 December 2019; Accepted: 2 December 2019

### Abstract

This study aims to quantify the uncertainty that can be induced by the objective function when calibrating SWAT parameters using SWAT-CUP. SWAT model was constructed to estimate runoff in Naesenong-cheon, which is the one of mid-watershed in Nakdong River basin, and then automatic calibration was performed using eight objective functions ( $R^2$ ,  $bR^2$ , NS, MNS, KGE, PBIAS, RSR, and SSQR). The optimum parameter sets obtained from each objective function showed different ranges, and thus the corresponding hydrologic characteristics of simulated data were also derived differently. This is because each objective function is sensitive to specific hydrologic signatures and evaluates model performance in an unique way. In other words, one objective function might be sensitive to the residual of the extreme value, so that well produce the peak value, whereas ignores the average or low flow residuals. Therefore, the hydrological similarity between the simulated and measured values was evaluated in order to select the optimum objective function. The hydrologic signatures, which include not only the magnitude, but also the ratio of the inclining and declining time in hydrograph, were defined to consider the timing of the flow occurrence, the response of watershed, and the increasing and decreasing trend. The results of evaluation were quantified by scoring method, and hence the optimal objective functions for SWAT parameter calibration were determined as MNS (342.48) and SSQR (346.45) with the highest total scores.

**Keywords:** SWAT, SWAT-CUP, Parameter calibration/validation, Objective function, Uncertainty

## SWAT-CUP을 이용한 SWAT 모형 검·보정 I: 목적함수에 따른 불확실성 분석

유지수<sup>a</sup> · 노준우<sup>b</sup> · 조영현<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>K-water연구원 물순환연구소 연구원, <sup>b</sup>K-water연구원 물순환연구소 수석연구원, <sup>c</sup>K-water연구원 물순환연구소 책임연구원

### 요 지

본 연구는 SWAT-CUP을 이용한 SWAT 모형 매개변수 보정을 수행할 때, 목적함수에 의해 발생할 수 있는 불확실성을 정량화하는 것을 목표로 수행되었다. 먼저 낙동강 권역의 내성천 유역을 대상으로 유출량 산정을 위한 SWAT 모형을 구축한 후, SWAT-CUP을 이용하여 8개 목적함수( $R^2$ ,  $bR^2$ , NS, MNS, KGE, PBIAS, RSR 및 SSQR)를 기준으로 자동 보정을 수행하였다. 최종 매개변수는 목적함수에 따라 서로 다른 범위를 나타내었으며, 모의 결과의 수문특성 또한 상이하게 도출되는 것을 확인하였다. 이것은 각각의 목적함수가 특정 수문특성에 대하여 민감하게 반응하여 서로 다른 모의 성능을 평가하기 때문이다. 즉, 특정 목적함수는 극치값의 간차에 대해 민감하게 반응하여 첨두값을 잘 모의하는 반면, 저유량 또는 평균 유량에 대한 모의 성능이 떨어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최적 목적함수를 선정하기 위해 8개의 목적함수에 따라 산정된 모의값과 관측값 사이의 수문학적 유사성을 평가하였다. 단순히 유량의 크기 비교 뿐 아니라 유량의 발생 시기, 유역의 반응 및 증가·감소 경향성을 함께 고려하기 위해 수문곡선의 증수부 및 감수부 유지시간 비율을 수문특성으로 정의하여 SWAT 모형을 평가하였으며, 평가 결과를 점수로 정량화하여 나타냈다. 그 결과 최종적으로 SWAT 매개변수 보정을 위한 최적 목적함수는 총점이 높은 MNS (342.48) 및 SSQR (346.45)로 선정되었다.

**핵심용어:** SWAT, SWAT-CUP, 매개변수 검·보정, 목적함수, 불확실성

\*Corresponding Author. Tel: +82-48-870-7476

E-mail: yhcho@kwater.or.kr (Y. Cho)

## 1. 서론

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold *et al.*, 1993)은 준분포형(semi-distributed) 수문 모형으로 기존의 집중형(lumped) 모형보다 수문과정의 모의, 수자원의 계획/관리, 기후 및 토지이용의 변화에 따른 수문·수질 변화에 대한 예측에 있어 더 효율적이라는 점에서 널리 적용되고 있다. 하지만 SWAT처럼 다양한 입력 자료와 매개변수가 필요한 모형은 모의 결과에 대한 불확실성이 필연적으로 발생한다 (Yang *et al.*, 2008). 특히, 지역의 특성에 따라 결정되는 매개변수는 관련 자료의 부재 또는 관측의 부정확성으로 인해 정확한 산정이 어렵기 때문에 반드시 검·보정 과정이 수반되어야 한다(Arnold *et al.*, 2012). 수문모형의 검·보정은 지역의 수문 특성을 최대한 유사하게 모의할 수 있는 최적의 매개변수를 찾는 과정이다. 예를 들어, 홍수 위험도 평가를 목적으로 한다면 첨두유량(peak flow)에 대해 우수한 모의 성능을 갖는 모형을 구축해야 하며, 갈수해석 또는 안정적 용수공급을 위해서는 저유량(low flow)에 초점을 맞추어 매개변수 보정을 진행해야 한다.

SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Program)은 SWAT 모형의 매개변수 검·보정, 민감도 분석 및 불확실성 해석을 위해 개발되었으며, SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting Ver.2), PSO (Particle Swarm Optimization), GLUE Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), ParaSol (Parameter Solution) 및 MCMC (Markov Chain Monte Carlo)의 5가지 알고리즘을 적용한 자동 보정(auto-calibration) 기능을 제공한다. 국내 유역을 대상으로 SWAT 모형을 수행한 여러 선행연구에서도 SWAT-CUP을 이용한 매개변수 보정 방법을 적용하여 그 활용성에 대해 평가한 바 있다(Lee and Seo, 2011; Joh *et al.*, 2012; Ryu *et al.*, 2012; Choi, 2013; Lee *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2018; Li and Kim, 2019).

SWAT-CUP에서의 자동 보정은 목적함수(objective function)를 최소화하기 위해 지정된 알고리즘에 따라 매개변수가 조정되며, 기본적으로 11개의 목적함수를 활용한다. 한편, Abbaspour *et al.* (2018)은 SWAT 모형의 매개변수 검·보정 수행 시 사용되는 여러 목적함수는 서로 유사한 모의 결과를 도출할 수 있으나, 각 매개변수 값이 목적함수에 따라 다르게 산정될 수 있다는 점을 지적한 바 있다. 또한, 매개변수 보정에 사용되는 목적함수는 모두 상충적(trade-off) 성격을 내포하고 있다(Madsen, 2000). 즉, 어떤 목적함수는 최대유량에 대하여 좋은 모의 결과를 나타내는 반면 저유량에 대한 모의는 미진할 수 있으며, 그 반대의 경우도 발생할 수 있다. 따라서

연구자는 분석의 목적에 맞는 모의 결과를 산출하는 목적함수를 선택할 필요성이 있다(Booij and Krol, 2010).

본 연구는 SWAT-CUP을 이용한 SWAT 모형 매개변수 검·보정을 수행할 때 발생할 수 있는 다양한 쟁점 중, 목적함수로 인해 발생할 수 있는 불확실성을 정량화하는 것을 목표로 수행되었다. 목적함수에 따라 모의 결과가 달라지는 것은 매개변수 보정 결과가 서로 상이하게 나타나기 때문이다. 그럼에도 불구하고 모형의 모의 성능이 높은 것으로 평가될 수 있는데, 이러한 모형의 비고유성(non-uniqueness)은 매개변수로 인한 모형의 구조적 불확실성 요인으로 작용하게 된다 (Abbaspour *et al.*, 2018). 입력 자료만으로 산정될 수 없는 매개변수는 관측값과 가장 유사하게 모의 결과를 도출할 수 있는 방법에 의존하여 추정하는 것이 불가피하므로, 목적함수의 결정이 전반적인 모형 성능을 결정하게 된다. 따라서 본 연구에서는 선택된 목적함수에 따라 산정된 유량의 모의값과 관측값 사이의 수문학적 유사성을 평가하고 최종적으로 SWAT을 활용한 장기 강우-유출분석 시 매개변수 검·보정을 위한 최적의 목적함수를 결정하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 SWAT

SWAT 모형은 복합토지이용유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양, 토지이용 및 토지관리 상태의 변화에 따른 유역의 유출량, 유사량 및 영양물질의 영향을 예측하기 위한 모형으로, 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service)에서 개발되었다(Arnold *et al.*, 1998). SWAT은 비교적 접근이 용이한 입력 자료를 이용하여 물리적 기반의 4가지 부모형(수문 모형, 토양유실 모형, 영양물질 모형 및 하도추적 모형)의 구축이 가능하다.

이 중에서 수문 모형의 해석은 Eq. (1)에 나타난 것과 같이 차단, 지표면 유출, 중간유출, 침투, 기저유출, 수로손실, 증발산 등의 수문순환을 반영하는 물수지 방정식에 근거한다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서,  $SW_0$ 는 초기 토양수분량(mm),  $SW_t$ 는  $t$ 일의 최종 토양수분량(mm),  $R_{day}$ 는 강우량(mm),  $Q_{surf}$ 는 지표면 유출량(mm),  $E_a$ 는 증발산량(mm),  $w_{seep}$ 는 침투량(mm),  $Q_{gw}$ 는 지하수 유출량(mm),  $t$ 는 시간(day)이다.

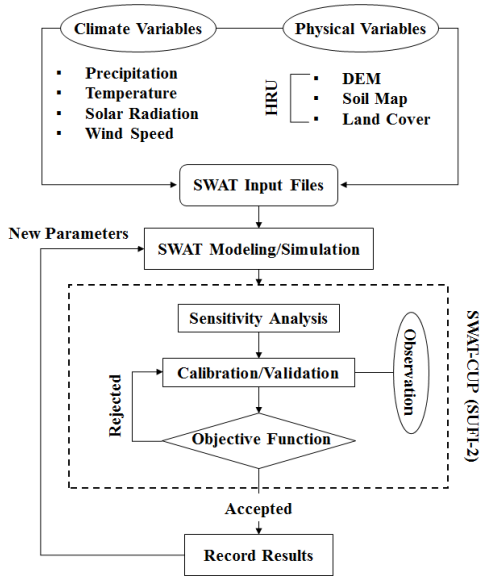


Fig. 1. SWAT model calibration procedure using SWAT-CUP

### 2.2 SWAT-CUP

SWAT 모형의 매개변수 보정 방법은 크게 수동 보정(manual calibration)과 자동 보정(automatic calibration)으로 구분할 수 있다. SWAT은 기본적으로 수동 보정 기능을 제공하고 있으나, 주관성에 크게 의존하여 사용자의 숙련도에 따라 보정 결과가 달라질 수 있기 때문에 모의 결과에 대한 신뢰도를 보장하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 SWAT 모형 매개변수의 자동보정 기능을 제공하는 SWAT-CUP 프로그램이 개발되었다. Fig. 1은 SWAT 모형 구축 및 SWAT-CUP을 이용한 매개변수 검·보정 과정을 개략적으로 보여준다. 본 연구에서는 Hypercube의 다변량 균일 분포에 의해 매개변수의 불확실성을 정량화하여 나타낼 수 있는 최적화 기법 중 하나인 SUFI2 알고리즘을 적용하였다(Abbaspour *et al.*, 2007).

## 3. 연구대상 및 방법

### 3.1 대상 유역

본 연구에서는 SWAT 모형을 구축하기 위한 대상 지역으로 낙동강 권역의 내성천 유역을 선정하였다. 내성천은 행정구역상 경상북도 봉화군에서 시작하여 경상북도 예천군에서 낙동강으로 합류되는 낙동강 제 1지류이며, 유역면적은 1,806.7 km<sup>2</sup>, 유로연장은 108.2 km로 국가하천 및 지방하천으로 구성되어 있다. 내성천 유역은 우리나라의 대표적 모래하천으로 SWAT 등의 유역 모형을 이용하여 유량 및 유사 등의 수문특

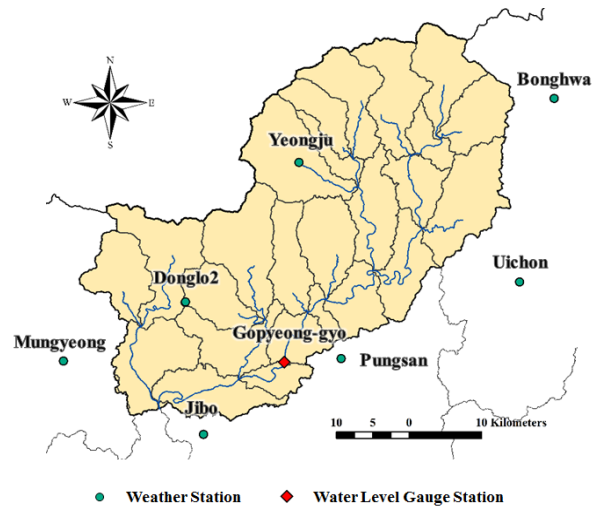


Fig. 2. Study area and station information

성 분석 연구를 진행하기에 적지로 판단되었으며, 대상 유역은 흐름 방향과 최종 출구지점을 고려하여 Fig. 2에 나타난 것과 같이 총 26개의 소유역으로 구분하였다.

### 3.2 지형 및 기상 자료

SWAT 모형을 구축하기 위한 입력 자료는 크게 지형자료와 기상자료로 구분된다. 지형자료는 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM), 토지피복도 및 토양도를 포함한다. 대상 유역은 DEM으로부터 생성된 하천망과 사용자에 의해 지정된 유역의 최종 출구지점에 따라 여러 개의 소유역으로 분할된다. 본 연구에서는 환경부에서 제공하는 1:25,000 토지피복도의 23개 중분류를 적용하였으며, 대부분의 유역면적은 임야와 전답으로 이용되고 있는 것으로 나타났다. 토양도는 국립농업과학원에서 실시하고 있는 토양도 전산화 사업을 통해 구축된 1:25,000 정밀토양도를 사용하였다.

기상자료는 일 강우(mm), 기온(°C), 일사량(MJ/m<sup>2</sup>), 평균 상대습도(%), 평균풍속(m/sec)을 포함하며, SWAT 모형은 기상자료를 통해 유출 및 증발산 등의 수문 성분을 산정한다. 내성천 유역 내외의 기상관측소 중 30년의 모의기간(1989.01.01.~2018.12.31.)과 기록연한이 일치하는 7개 지점이 선택되었다(Fig. 2). 강수자료는 기상청(영주, 봉화, 문경), 환경부(동로2, 지보, 풍산) 및 한국수자원공사(의춘)에서 제공하는 7개 지점에서 수집되었으며, 강수량을 제외한 기상자료는 기상청 산하의 3개 관측소의 자료가 사용되었다. 또한 매개변수 보정을 위해 고평교 지점에서 수집된 2007.01.01.~2015.12.31.의 유량 자료를 이용하였으며, 유량(수위) 관측소의 위치는 Fig. 2에 나타난 것과 같다.

### 3.3 매개변수 선정

SWAT 모형 보정을 수행하기 위해 우선적으로 적합한 매개변수를 선정해야 한다. 각 매개변수는 관련된 수문과정에 영향을 주며, 따라서 모형의 보정은 관측값과 비교하여 타당한 범위의 모의 결과를 산정할 수 있는 조건을 찾는 과정이다. 본 연구에서는 유역의 장기유출 모형을 구축하기 위해 SWAT을 적용하였으므로, 유출량 산정 과정에 영향을 줄 수 있는 토양, 지하수, 유출 및 하도추적의 과정에 관련된 변수로 범위를 제한하였다.

그러나 유역 유출에 관련된 특정 매개변수만을 정확하게 선별하기 어렵다. 이는 SWAT 모형이 유출량, 유사량 및 영양물질과 관련된 수문과정을 서로 복합적으로 연계하여 모의결과를 산정함으로 각각의 매개변수가 다수의 계산과정에 영향을 미치기 때문이다. 예를 들어, CN (curve number)은 지표유출에 직접적 영향을 미치는 매개변수이지만, 유역 유출량 변

화는 물수지 방정식에 의해 수문순환과 관련된 모든 요소들의 변화로 기인된다. 선행연구에서는 SWAT 모형 보정 및 민감도 분석을 위한 매개변수 선정 시의 몇 가지 지침을 제시한 바 있으며, 다음과 같이 세 가지 범주로 구분할 수 있다.

- 1) 유출, 유사 및 오염원 산정에 영향을 줄 수 있는 변수를 분류하여 다목적 매개변수 검보정을 수행한다(Teshager *et al.*, 2016; Me *et al.*, 2015; Arnold *et al.*, 2012; Abbaspour *et al.*, 2007).
- 2) 유출과 관련된 수문과정에 대하여 지표(surface), 지표하(subsurface), 유역(watershed)의 세 가지 반응(response)으로 구분하고, 각 반응에 관련된 매개변수를 선정한다(Kumar and Merwade, 2009; Feyereisen *et al.*, 2007; Van Liew *et al.*, 2007).
- 3) 여러 매개변수를 대상으로 민감도 분석을 수행하여 유출

Table 1. SWAT input parameters and their ranges selected for calibration

Input	Parameters	Description	Unit	Change Type	Absolute Range	
					Min	Max
gw	ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	day <sup>-1</sup>	a	0	1
hru	CANMX	Maximum canopy storage	mm	a	0	100
rte	CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	mm/hr	a	-0.01	500
sub	CH_N1	Manning's "n" value for the tributary channels	—	a	0.01	30
rte	CH_N2	Manning's "n" value for the main channel	—	a	-0.01	0.3
mgt	CN2	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II	—	r	35	98
hru	EPCO	Plant uptake compensation factor	—	a	0	1
hru	ESCO	Soil evaporation compensation factor	—	a	0	1
gw	GW_DELAY	Groundwater delay time	dyas	v	0	500
gw	GW_REVAP	Groundwater re-evaporation coefficient	—	v	0.02	0.2
gw	GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for baseflow	mm	v	0	5000
gw	RCHRG_DP	Deep aquifer percolation fraction	%	a	0	1
gw	REVAPMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for re-evaporation	mm	v	0	500
bsn	SFTMP	Snowfall temperature	°C	a	-20	20
hru	SLSUBBSN	Average slope length	m	r	10	150
bsn	SMFMN	Melt factor for snow on December 21	mm/°C·day	a	0	20
bsn	SMFMX	Melt factor for snow on June 21	mm/°C·day	a	0	20
bsn	SMTMP	Snow melt base temperature	°C	r	-20	20
sol	SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	mm	r	0	1
sol	SOL_K	Saturated hydraulic conductivity	mm/hr	r	0	2000
sol	SOL_Z	Depth from soil surface to bottom of layer	mm	r	0	3500
bsn	SURLAG	Surface runoff lag coefficient	—	a	0.05	24
bsn	TIMP	Snow pack temperature lag factor	—	a	0	1

\* "a" means a given quantity is added to the default value

\*\* "v" means the default value is replaced by a given value

\*\*\* "r" means the default value is multiplied by (1+a given value)

에 영향을 가장 크게 미치는 매개변수를 선정한다(Malago *et al.*, 2015; Dechmi *et al.*, 2012; Muleta, 2012; Ahl *et al.*, 2008).

이와 같은 선행연구는 모형의 매개변수 선정 뿐 아니라 보정 과정까지 포함하며, 따라서 변수의 선택은 모형의 목적 및 보정 방법에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 선행연구를 참고하여 Table 1에 나타난 것과 같이 유역유출 모의를 위한 총 23개의 매개변수를 선정하였다.

**3.4 목적함수에 의한 SWAT 모형 검·보정**

SWAT-CUP에서는 총 11개의 목적함수를 제공하고 있으나 본 연구에서는 Table 2에 나타난 것과 같이 8개의 목적함수를 선택하여 검·보정을 수행하였다. 각각의 목적함수는 오차를 정량화하여 나타내는 특성에 따라 최적 매개변수를 다르게 산정하며, 따라서 동일한 기상 및 지형 자료를 갖는 유역을 대상으로 구축된 SWAT 모형은 서로 다른 수문특성을 갖는 유

량 시계열 자료를 생성한다.

$R^2$ (결정계수)는 관측값과 모의값의 공분산과 표준편차의 비율로 정의되며, 분산(dispersion) 정도에 의해 모의 결과를 평가한다. 관측값과 모의값의 분산 정도가 일치하면 모의 효율이 높은 것으로 판단하므로, 이러한 점을 보완하기 위해  $bR^2$ 가 개발되었다.  $bR^2$ 는  $R^2$ 에 선형회귀계수( $b$ )를 곱하여 관측값과 모의값 사이의 선형관계를 고려한 평가가 가능하다.  $R^2$ 와  $bR^2$ 는 1에 가까울수록 모의 결과가 관측과 유사함을 나타낸다.

NS (Nash-Sutcliffe efficiency)는 잔차(residual)의 분산과 관측값의 분산 사이의 상대적 크기를 비교하여 모형의 효율을 평가한다. NS는 분산의 제곱( $p=2$ )을 사용하므로 첨두값이 과대산정되고 극소값이 과소평가되는 경향이 존재하므로, MNS (수정 NS)는  $p$ 값을 조정하여 극치값에 대한 평가 효율을 높이기 위해 사용된다. 반면 KGE (Kling-Gupta efficiency)는 분산과 더불어 상관계수와 평균을 동시에 고려하여 NS의 단점을 극복하고자 개발되었다. NS, MNS 및 KGE는 1에 가까울수록 모형의 모의 성능이 높음을 나타낸다.

**Table 2.** The information of objective functions in SWAT-CUP

Objective Function	Formulation	Range
Coefficient of Determination ( $R^2$ )	$R^2 = \left( \frac{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \sqrt{\sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2}} \right)^2$	0 to 1
Modified Coefficient of Determination ( $bR^2$ )	$bR^2 = \begin{cases}  b R^2 & \text{if }  b  \leq 1 \\  b ^{-1}R^2 & \text{if }  b  > 1 \end{cases}$	0 to 1
Nash-Sutcliffe Efficiency (NS)	$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2}$	$-\infty$ to 1
Modified Nash-Sutcliffe Efficiency (MNS)	$MNS = 1 - \frac{\sum_i  Q_m - Q_s _i^p}{\sum_i  Q_{m,i} - \bar{Q}_m _i^p}$	$-\infty$ to 1
Kling-Gupta Efficiency (KGE)	$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2}$	0 to 1
Percent Bias (PBIAS)	$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i}{\sum_i Q_{m,i}}$	$-\infty$ to $\infty$
RMSE-Observations Standard Deviation Ratio (RSR)	$RSR = \frac{\sqrt{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}}{\sqrt{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2}}$	0 to $\infty$
Ranked Sum of Squared Error (SSQR)	$SSQR = \frac{1}{n} \sum_i [Q_{i,m} - Q_{i,s}]^2$	0 to $\infty$

\*  $R$  is the correlation coefficient between measured and simulated data;  $b$  is the slope of regression line between measured and simulated data;  $Q_{m,i}$  and  $Q_{s,i}$  are the  $i$ th measured and simulated values, respectively;  $\bar{Q}_m$  and  $\bar{Q}_s$  are the mean measured and simulated values, respectively;  $n$  is the total number of observations;  $\alpha = \sigma_s / \sigma_m$  and  $\beta = \sigma_s / \sigma_m$  where  $\sigma_m$  and  $\sigma_s$  are the standard deviation of the measured and simulated data, and  $\mu_m$  and  $\mu_s$  are the mean of measured and simulated data, respectively.

PBIAS (percent bias)는 평균적으로 관측값이 모의값 보다 크게 혹은 작게 산정되었는지 평가하며 양의 값일 때 모의결과가 과소산정, 음의 값일 때 과대산정 되었음을 의미한다. PBIAS는 절댓값이 0에 가까울수록 모의 성능이 높다. RSR (RMSE-observations standard deviation ratio)과 SSQR (ranked sum of squared error)은 잔차의 합을 이용하여 산정된다. RSR은 잔차와 관측값의 표준편차의 비로 정의되며, SSQR은 관측값과 모의값을 크기 순서로 정렬하여 새로운 자료를 구축한 후 잔차의 제곱합을 평균하여 산정된다. RSR과 SSQR은 0에 수렴할수록 모의 결과가 관측과 유사함을 나타낸다.

### 4. 연구 결과

#### 4.1 매개변수 산정의 불확실성

최적의 매개변수를 산정하기 위해 SWAT-CUP을 이용하여 8개의 목적함수에 따라 보정 과정을 5-7회 반복 시행하였으며 한 번의 시행(iteration)마다 동일하게 500번의 모의(simulation)를 수행하였다. 모의 횟수 또한 매개변수 보정 과정에서 불확실성 요인으로 작용할 수 있지만, 모의 신뢰성을 높이기 위해 필요한 최소 횟수는 규정하고 있지 않다. 그러나 SUFI-2 알고리즘에서는 LHS (Latin Hypercube Sampling) 방법을 적용하기 때문에 모의 횟수에 따라 최적 매개변수 집합의 후보군이 달라지므로, 충분한 횟수(500-1,000번 이상)의 모의를 수행할 것을 권장한다(Abbaspour et al., 2018).

SWAT-CUP은 시행이 종료될 때마다 최적 매개변수 값과

불확실성을 고려하여 다음 시행을 위한 매개변수 범위를 산출한다. 따라서 시행이 반복될 때마다 이전 시행에서 결정된 값을 바탕으로 새로운 최적값을 도출하게 된다. 그러나 매 시행마다 항상 목적함수의 값이 개선되는 것은 아니며, 또한 매개변수가 특정 값으로 수렴되기도 하지만 점차 증가하거나 감소하는 경향을 나타내기도 한다. Fig. 3은 여러 번의 시행을 반복하였을 때 변화하는 목적함수 값을 나타낸다. 목적함수의 값이 더 이상 개선되지 않거나, 시행을 반복하더라도 변경되는 값이 이전 시행과 크게 달라지지 않을 때 시행을 종료하였다. 다수의 시행 중, Fig. 3에서 붉은점으로 표시한 시행의 결과가 최적의 모의 결과로 선정되었다.

Fig. 4는 각 시행을 통해 결정된 최적 매개변수 값의 초기 값에 대한 상대적 변화량을 나타낸다. 산점도의 값이 0에 가까울수록 보정된 값이 초기 값에서 크게 변화하지 않음을 나타내며, 음의 값일 때는 (-) 변화량, 양의 값일 때는 (+) 변화량을 의미한다. 파란 산점도와 빨간 산점도는 각각 첫 번째 시행 및 마지막 시행의 결과로 보정된 값을 나타내며, 회색 산점도는 중간 과정의 결과를 나타낸다. Fig. 4에서 나타나듯이, 본 연구에서 적용된 8개의 목적함수는 서로 다른 매개변수 보정 결과를 도출하며, 또한 목적함수의 적용에 따라 민감하게 변화하는 매개변수가 달라지는 결과를 확인하였다. 공통적으로 변화량이 가장 큰 매개변수는 ESCO, REVAPMN, SFTMP 및 SURLAG으로 나타났다.

Fig. 4는 동일한 지형 및 기상학적 자료를 통해 정의된 유역에서 목적함수의 변화에 따라 각기 다른 범위의 매개변수가 적용될 수 있음을 시사하며, 이러한 결과는 여러 매개변수를 통

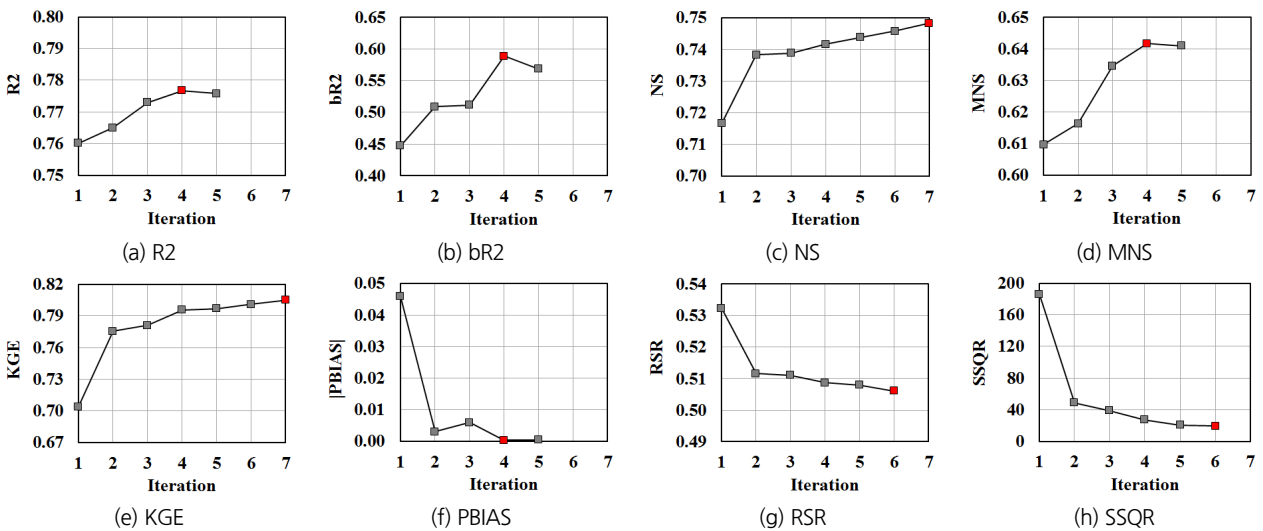


Fig. 3. The results of each iteration

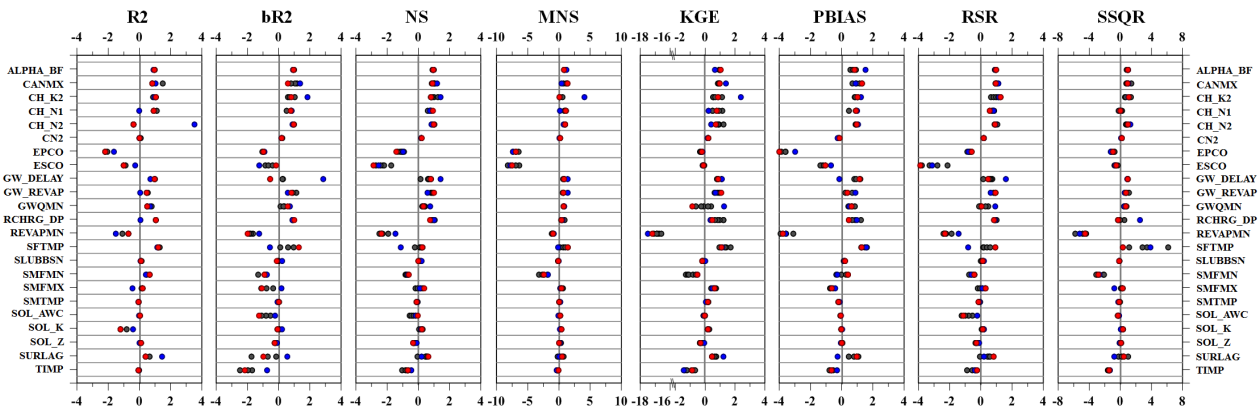


Fig. 4. The relative changes between the initial values and the best fitted values corresponding to each iteration using SWAT-CUP auto-calibration

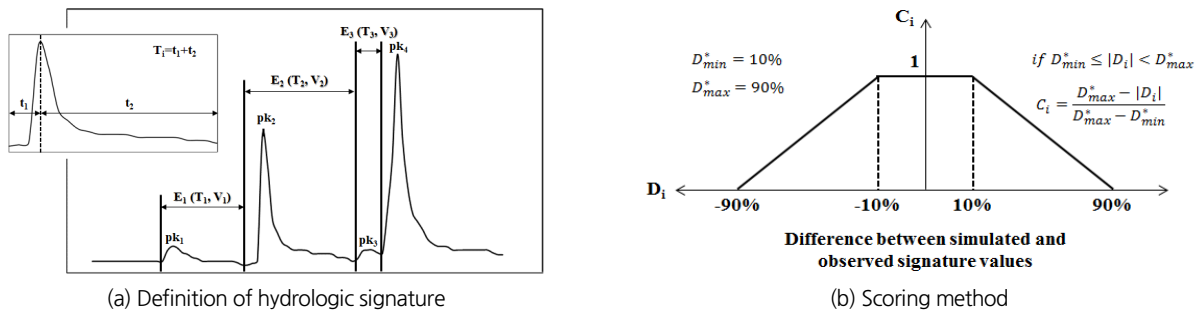


Fig. 5. The method of evaluating hydrologic similarities between the measured and simulated streamflow time series

해 정의되는 SWAT 모형의 불확실성을 나타낸다. Houshmand *et al.* (2017) 또한 여러 개의 목적함수를 사용하여 보정을 수행 하였을 때, 목적함수에 따라 서로 다른 매개변수를 갖는 SWAT 모형이 정의되는 문제점을 지적한 바 있다. SWAT-CUP의 매개변수 보정 과정을 통해 결과적으로 관측값과 잘 부합하는 우수한 성능의 유출 모형을 정의할 수는 있지만, 모형의 비교 유성으로 인해 모의 결과의 불확실성이 매우 높아지며, 이로 인해 모형의 신뢰도 또한 낮아질 수 있다.

#### 4.2 수문특성을 이용한 SWAT 모형 성능 평가

본 연구에서 적용된 8개의 목적함수는 관측값과 모의값 사이의 간차를 이용하여 서로 다른 방법으로 정의된다. 매개변수 보정 결과는 목적함수의 영향을 받아 달라질 수 있다 (Sorooshian *et al.*, 1983; Gupta *et al.*, 1998). 각각의 목적함수는 특정 수문특성에 대하여 민감하게 반응하여 서로 다른 모의 성능을 평가한다. 즉, 특정 목적함수는 극치값의 간차에 대해 민감하게 반응하여 첨두값을 잘 모의하는 반면, 저유량 또는 평균유량에 대한 모의 성능이 떨어질 수 있다. 이러한 자동 보정 과정에서 목적함수의 역할에 대해 분석하기 위해 관측

유량 시계열과 모의 유량 시계열 사이의 유사성을 평가할 수 있는 새로운 평가 기준이 적용되었다.

유량 시계열은 Fig. 5(a)에 나타낸 것과 같이 첨두(peak)를 중심으로 하나의 증수부(rising limb)와 하나의 감수부(falling limb)로 구성되어 있는 여러 수문곡선의 집합으로 간주할 수 있다. 시계열에서 각각의 수문곡선은 관측 유량 시계열과 모의 결과 시계열이 어느 정도의 유사성을 갖는지 정량적으로 판단하기 위해 정의되었으며, 각 수문곡선의 총유량( $V_i$ ), 증수부 유지시간 비율( $r_{1i} = t_1 / T_i$ ) 및 감수부 유지시간 비율( $r_{2i} = t_2 / T_i$ )으로 수문특성을 나타냈다. 여기서,  $i = 1, \dots, k$ 로  $k$ 는 수문곡선의 총 개수를 의미하며,  $T_i$ 는  $i$ 번째 수문곡선의 총 지속시간,  $t_1$ 은 증수부 지속시간,  $t_2$ 는 감수부 지속기간을 나타낸다.

매개변수 보정을 위해 사용된 관측 유량자료에서 정의된 수문곡선은 총 309개이며, 8개의 목적함수를 이용하여 최종 결정된 SWAT 모형의 모의 결과와 동일 기간에 대하여 비교 평가를 수행하였다. 평가는 Fig. 5(b)와 같이 점수화(scoring)하여 수행하였다(Blazkova and Beven, 2009; Shafii and Tolson, 2015). 관측값과 모의값의 분산( $D_i = (S_i^{obs} - S_i^{sim}) / S_i^{obs}$ )이

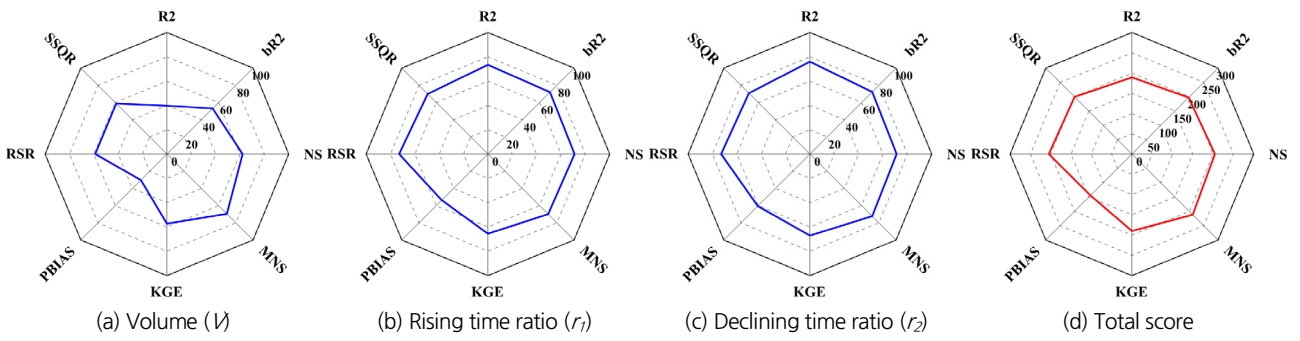


Fig. 6. The score of the model evaluation based on the hydrograph signatures

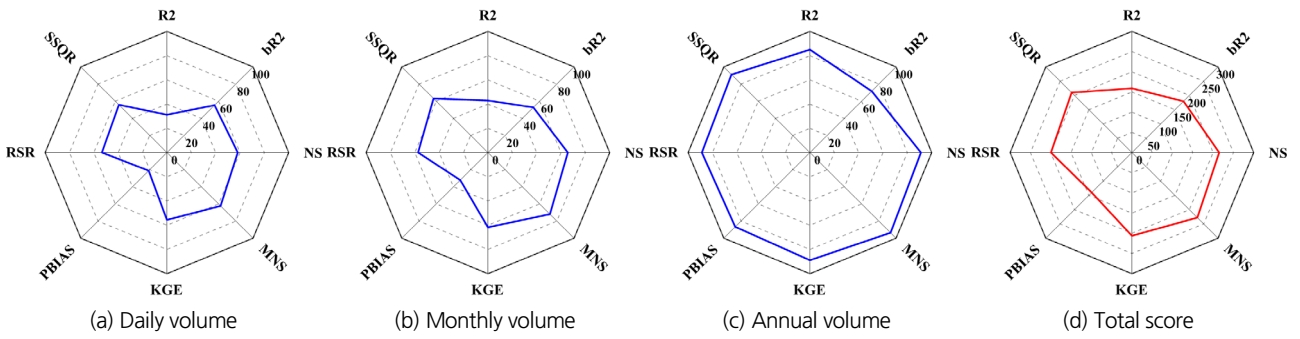


Fig. 7. The score of the model evaluation based on the total volume of each time scale

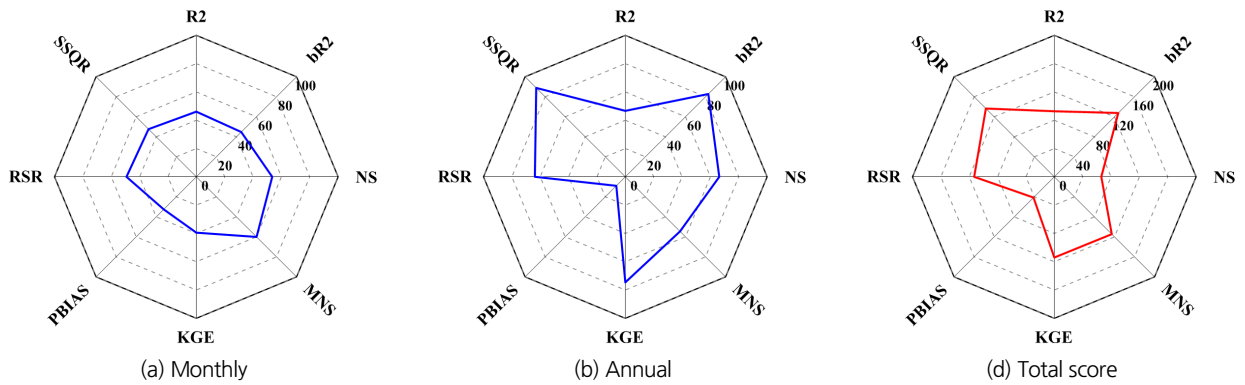


Fig. 8. The score of the model evaluation based on the peak volume of each time scale

10% 내외일 때 만족( $C_i = 1$ ), 90% 이상일 때 불만족( $C_i = 0$ ), 10-90% 사이의 값일 때는 선형적으로 감소되는 값으로 계산한다. 총 점수는 309개의 수문곡선에 대한  $C_i$ 를 합산하여 100점으로 환산하며, Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다.

총유량은 두 수문곡선 사이의 양적 비교를 가능하게 하며, 증수부 및 감수부 유지시간 비율은 유역의 반응 속도 및 수문곡선의 모양을 유량의 크기와 독립된 인자로 평가할 수 있다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 300점 만점 중 점수가 가장 높은 것은 MNS (211.79)로 나타났으며, 그 다음은 RSR (204.71), NS

(204.47) 순이다. 한편, 증수부-감수부 유지시간 비율은 유사한 결과를 나타내지만 유량에 대한 모의 결과는 목적함수에 따라 편차를 나타낸다. 따라서 수문곡선의 경향성에 대한 비교보다 유량의 크기에 대한 평가가 유의미할 것으로 판단되며, 시간 척도(time-scale)에 따른 유량의 크기와 최대유량에 대한 평가를 Figs. 7 and 8과 같이 수행하였다. 수행 결과 총유량에 대하여 가장 우수한 모의 성능을 나타낸 것은 MNS와 NS이며, 모의 성능이 가장 낮은 것은 PBIAS와  $R^2$ 으로 분석되었다.

Fig. 7은 수문곡선과 별개로 관측 유량과 모의 결과의 일



월·연단위의 총유량을 각각 비교한 결과이다. 최종적으로 300점 만점 중 총점이 가장 높은 목적함수는 MNS (227.87)이며, 그 다음으로는 NS (214.88), SSQR (209.95), KGE (206.25) 순으로 나타났다. 반면, Fig. 8은 관측 유량과 모의 유량의 매월 또는 연중 발생한 일최대유량 값을 비교한 결과이며, 200점 만점 중 총점이 가장 높은 목적함수는 SSQR (136.50)이고 그 다음으로는  $bR^2$  (127.57), MNS (114.61), KGE (114.07) 순으로 나타났다.

### 4.3 최적 목적함수의 결정

매개변수 보정을 위해 적용되는 목적함수는  $R^2$ , NS, 및 PBIAS가 일반적이다. 결정계수( $R^2$ )는 관측값과 모의값 사이의 분산 정도를 비교하는 지표이기 때문에 모의 결과가 과대 또는 과소 산정되더라도 높은 효율을 갖는 것으로 평가되기도 한다(Muleta, 2012). 반면, NS는 잔차의 분산과 관측값의 분산 정도를 비교하여 모의 성능을 평가하며, 때때로 극치값이 지

나치게 과소·과대 산정되는 경향이 있다(Gupta *et al.*, 2009). 또한 PBAIS는 평균 유량이 과대 또는 과소 산정되는 특성을 나타낸다(Gupta *et al.*, 1999). 본 연구에서는  $R^2$ 와 NS의 단점을 보완하기 위해 제안된  $bR^2$ 와 MNS, KGE의 모의 성능이 더 우수하게 평가되었으며, 8개 목적함수 중 PBIAS의 모의 성능이 가장 낮게 평가되었다.

4.2절에서의 평가 결과를 통해 8개의 목적함수는 침투의 발생(유역 반응) 및 증가·감소 경향성을 반영하는 데에 있어 모두 유사한 성능을 나타내는 것으로 확인되었다. 다만 발생 유량의 총량과 침투유량에 대하여 각기 다른 모의 결과를 나타내며, 총유량의 모의에 대해서는 MNS, 침투유량의 모의는 SSQR을 통해 보정된 모형이 우수한 성능을 나타내는 것으로 평가되었다. 총유량과 침투유량의 점수를 합산하면 500점 만점 중 MNS는 342.48, SSQR은 346.45를 나타내며, 최적 목적함수는 연구 목적에 따라 MNS 또는 SSQR를 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

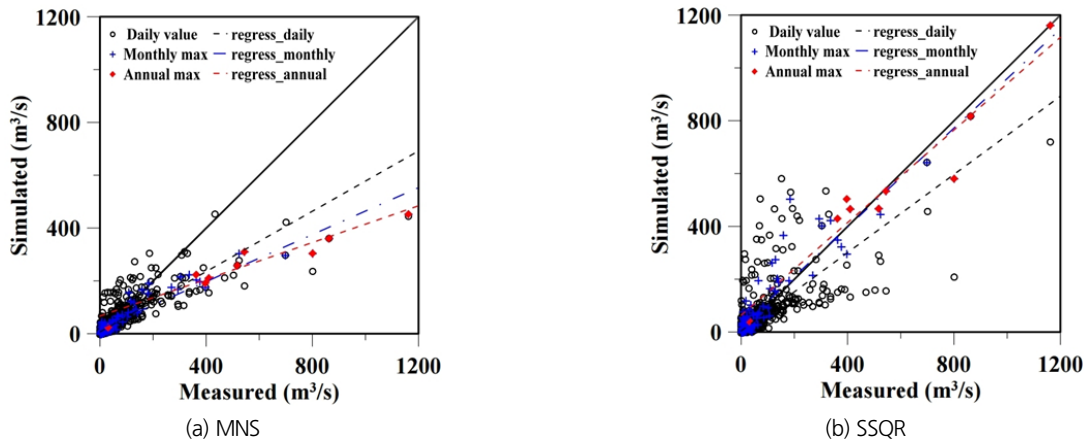


Fig. 9. The comparisons for the calibration performance to select the most appropriate objective function

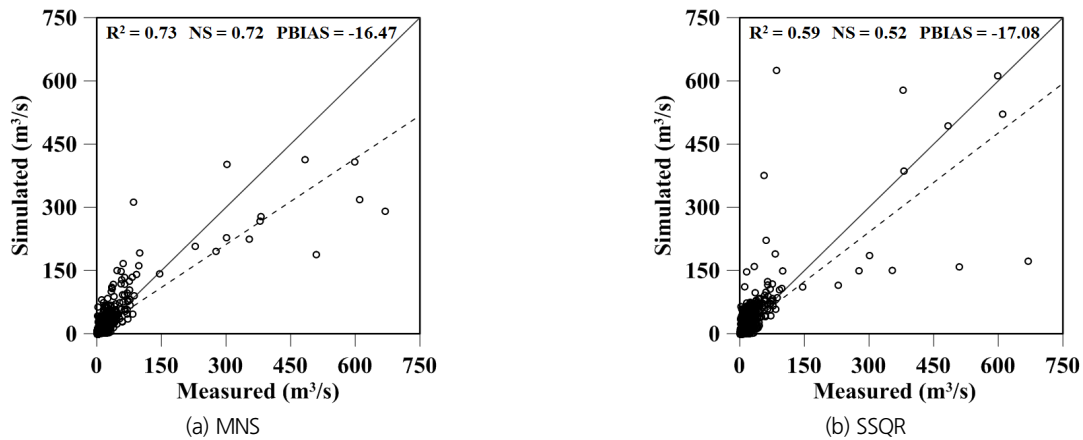


Fig. 10. The comparisons between the measured and simulated streamflow in the validation period

Fig. 9는 MNS와 SSQR을 이용하여 보정된 SWAT 모형의 모의 결과와 관측값을 나타낸 것으로, 두 목적함수 간의 모의 특성을 잘 나타낸다. 지나치게 작거나 큰 극치값은 이상치(outlier)로 판단하여 제거하는 것이 일반적이지만, 본 연구에서는 침투유량에 대한 모의 성능을 평가하기 위해 이상치를 포함하여 분석을 수행하였다. 일유량에 대하여 도시하였을 때 MNS의 분산 정도가 SSQR 보다 현저히 작은 것을 확인할 수 있으며, 이러한 결과는 MNS가 전반적인 일유량에 대한 모의 성능이 우수함을 나타낸다. 반면, 월침투유량과 연침투유량에 대하여 관측값과 더 유사한 모의 성능을 나타내는 것은 SSQR이며, MNS는 침투유량에 대해 과소산정되는 것을 확인할 수 있다.

#### 4.4 최적 목적함수를 이용한 유출량 검정 결과

최종적으로 SWAT-CUP을 이용한 매개변수 보정의 활용성을 평가하기 위해 3년(2016.01.01. ~ 2018.12.31.) 동안 관측된 고평교 지점의 유출량 자료를 이용하여 모형의 검정을 수행하였다. Fig. 10은 최적 목적함수로 선정된 MNS와 SSQR을 적용하여 보정된 SWAT 모형 모의 유량과 관측 유량을 비교하여 나타낸 것이다. MNS를 이용하여 보정된 모형에 의해 산정된 오차( $R^2=0.73$ ,  $NS=0.72$ ,  $PBIAS=-16.47$ )는 전반적으로 SSQR에 의해 산정된 결과( $R^2=0.59$ ,  $NS=0.52$ ,  $PBIAS=-17.08$ )보다 우수한 수준을 나타냈다. 그러나 4.3절에서 언급한 바와 같이 MNS는 침투유량에 대해 SSQR 보다 비교적 과소산정되는 것을 알 수 있다. 이와 반대로 SSQR은 비교적 침투유량에 대해 우수한 보정 성능을 나타내지만, Fig. 10(b)에서 볼 수 있듯이 저유량이 과대산정되거나 침투값이 과소산정되는 경우가 발생하기도 한다. 따라서 안정적인 모의 결과를 얻기 위해서는 MNS를 목적함수로 적용하는 것이 보다 타당하다고 할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 SWAT-CUP에서 제공하는 8개의 목적함수를 적용하여 모형 보정을 수행하였을 때, 목적함수 선택에 의해 발생 가능한 모의 결과의 불확실성을 확인하였다. 서로 다른 목적함수를 적용하여 같은 조건 하에서 SWAT-CUP을 이용한 자동보정을 수행하였을 때, 목적함수마다 유사한 범위의 매개변수 보정 결과를 나타내기도 했지만 전혀 다른 보정 결과를 나타내기도 하였다. SWAT처럼 여러 매개변수를 통해 정의되는 수문모형의 비교유형은 실제 수문환경을 파악

하려는 시도를 어렵게 만드는 요인으로 작용한다.

또한 8개의 목적함수( $R^2$ ,  $bR^2$ ,  $NS$ ,  $MNS$ ,  $KGE$ ,  $PBIAS$ ,  $RSR$  및  $SSQR$ )는 서로 다른 수문특성에 대하여 모의 결과를 평가하므로, 모의 성능 평가는 모의값과 관측값 사이의 수문학적 유사성을 평가를 통해 수행되어야 한다. 본 연구에서는 단순히 모의 유량의 크기 비교 뿐 아니라 유량의 발생 시기, 유역의 반응 및 증가·감소 경향성을 함께 고려하기 위해 수문곡선의 증수부 및 감수부 유지시간 비율을 정의하여 SWAT 모형을 평가하였다. 증수부 및 감수부 유지시간 비율을 통해 평가된 8개 목적함수는 평균적으로 관측 수문곡선과 잘 부합하는 것으로 확인되었으나, 일·월·연 단위의 총유량과 침투유량에 대한 평가는 서로 다른 결과를 나타냈다.

SWAT 모형의 적용은 홍수기 및 갈수기를 대비하기 위한 극치값 모의 또는 유역의 장기유출 경향성 분석을 위한 평유량 모의 등 목적에 따라 검·보정의 목표치가 달라질 수 있다. 따라서 본 연구는 최적의 모의 성능을 나타내면서 분석의 목적에 부합하는 결과를 산출할 수 있는 최적 목적함수에 대한 가이드라인을 제공하고자 하였다. 이와 같은 관점에서 최적의 목적함수는 MNS와 SSQR로 후보를 좁힐 수 있다. MNS는 평균유량에 대하여 우수한 매개변수 보정 성능을 나타내지만, 다소 과소 산정되는 경향이 있다. 이와 반대로 SSQR은 침투유량에 대해 우수한 모의 성능을 나타내지만, 평균유량에 대한 모의 성능이 떨어진다. 따라서 SWAT-CUP을 이용한 매개변수 보정 시, 연구 목적에 따라 MNS 또는 SSQR을 목적함수로 적용하는 것이 적합하다.

그러나 본 연구에서는 대상 지역을 낙동강 권역 중 하나의 중권역으로 한정지어 분석을 수행하였으므로, 결과를 우리나라 전체 유역에 대하여 일반화하는 것은 타당하지 않을 수 있다. 일반적으로 국내 유역에 모두 적합한 목적함수를 결정하기 위해서는 수계별 또는 지역별 분석이 추가적으로 수행되어야 한다. SWAT-CUP을 이용한 매개변수 검·보정을 수행할 때, 목적함수의 결정 뿐 아니라 시행 및 모의 횟수에 의해 결과가 달라질 수 있다. 따라서 이후 연구에서는 본 연구 결과를 기반으로, SWAT 모형 검·보정 시의 모의 횟수에 따른 불확실성 분석이 수행되었다.

## 감사의 글

본 연구는 K-water(한국수자원공사)의 “영주댐 운영을 고려한 하도 및 유역 유사량에 관한 연구(G18057)”과제에 의해 수행되었습니다.

## References

- Abbaspour, K.C., Vaghefi, S.A., and Srinivasan, R. (2018). "A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: a review of papers from the 2016 international SWAT conference." *Water*, MDPI, Vol. 10, W10010006.
- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximove, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., and Srinivasan, R. (2007). "Modeling hydrology and water quality in the pre-alpine/apline Thur watershed using SWAT." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 333, pp. 413-430.
- Ahl, R.S., Woods, S.W., and Zuuring, H.R. (2008). "Hydrologic calibration and validation of SWAT in a snow-dominated Rocky mountain watershed, Montana, U.S.A." *Journal of the American Water Resources Association*, Wiley, Vol. 44, No. 6, pp. 1411-1430.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). "A comprehensive surface-groundwater flow model." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 142, pp. 47-69.
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., Van Griensven, A., Van Liew, M.W., Kannan, N., and Jha, M.K. (2012). "SWAT: model use, calibration, and validation." *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, ASABE, Vol. 55, No. 4, pp. 1491-1508.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttliah, R.S., and Williams, J.R. (1998). "Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development." *Journal of the American Water Resources Association*, Wiley, Vol. 35, No. 1, pp. 73-89.
- Blazkova, S., and Beven, K. (2009). "A limits of acceptability approach to model evaluation and uncertainty estimation in flood frequency estimation by continuous simulation: Skalka catchment, Czech Republic." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 45, W00B16.
- Booij, M.J., and Krol, M.S. (2010). "Balance between calibration objectives in a conceptual hydrological model." *Hydrological Sciences Journal*, Taylor & Francis, Vol. 55, No. 6, pp. 1017-1032.
- Choi, H.S. (2013). "Parameter estimation of SWAT model using SWAT-CUP in Seom-river experimental watershed." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 33, No. 2, pp. 529-536.
- Dechmi, F., Burgute, J., and Skhiri, A. (2012). "SWAT application in intensity irrigation system: model modification, calibration and validation." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 470-471, pp. 227-238.
- Feyereisen, G.W., Strickland, T.C., Bosch, D.D., and Sullivan, D.G. (2007). "Evaluation of SWAT manual calibration and input parameter sensitivity in the Little River watershed." *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, ASABE, Vol. 50, No. 3, pp. 843-855.
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., and Martinez, G.F. (2009). "Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modeling." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 377, pp. 80-91.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S., and Yapo, P.O. (1998). "Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 34, No. 4, pp. 751-763.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S., and Yapo, P.O. (1999). "Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 1999.4, pp. 135-143.
- Houshmand, K.D., Esmaili, K., Faridhosseini, A., Sanaeinejad, S.H., Khalili, D., and Abbaspour, K.C. (2017). "Sensitivity of calibrated parameters and water resources estimates on different objective functions and optimization algorithms." *Water*, MDPI, Vol. 9, No. 6, pp. 384.
- Joh, H.K., Park, J.Y., Jang, C.H., and Kim, S.J. (2012). "Comparing prediction uncertainty analysis techniques of SWAT simulated streamflow applied to Chungju Dam watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 9, pp. 861-874.
- Kumar, S., and Merwade, V. (2009). "Impact of watershed subdivision and soil data resolution on SWAT model calibration and parameter uncertainty." *Journal of American Water Resources Association*, Wiley, Vol. 45, No. 5, pp. 1179-1196.
- Lee, E., and Seo, D. (2011). "Flow calibration and validation of Daechung Lake watershed, Korea using SWAT-CUP." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 9, pp. 711-720.
- Lee, J., Kim, J., Jang, W.-S., Lim, K.-J., and Engel, B.A. (2018). "Assessment of baseflow estimates considering recession characteristics in SWAT." *Water*, MDPI, Vol. 10, No. 371, W10040371.
- Lee, W.-H., Lee, J.-H., Park, J.-H., and Choi, H.-S. (2016). "The relationship between parameters of the SWAT model and the geomorphological characteristics of a watershed." *Ecology and Resilient Infrastructure*, KSEIE, Vol. 3, No. 1, pp. 35-45.
- Li, T., and Kim, G. (2019). "Impacts of climate change scenarios on non-point source pollution in the Saemangeum watershed, South Korea." *Water*, MDPI, Vol. 11, No. 10, pp. 1982.
- Madsen, H. (2000). "Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 235, pp. 276-288.
- Malago, A., Pagliero, L., Bouraoui, F., and Franchini, M. (2015). "Comparing calibrated parameter sets of the SWAT model for the Scandinavian and Iberian peninsulas." *Hydrological Sciences Journal*, Taylor & Francis, Vol. 60, No. 5, pp. 949-967.
- Me, W., Abell, J.M., and Hamilton, D.P. (2015). "Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand." *Hydrology and Earth System Sciences*, EGU, Vol. 19, pp. 4127-4147.

- Muleta, M.K. (2012). "Model performance sensitivity to objective function during automated calibrations." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 17, No. 6, pp. 756-767.
- Ryu, J., Kang, H., Choi, J.W., Kong, D.S., Gum, D., Jang, C.H., and Lim, K.J. (2012). "Application of SWAT-CUP for streamflow auto-calibration at Soyang-gang dam watershed." *Journal of Korean Society on Water Environment*, KSWE, Vol. 28, No. 3, pp. 347-358.
- Shafii, M., and Tolson, B.A. (2015). "Optimizing hydrological consistency by incorporating hydrological signatures into model calibration objectives." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 51, pp. 3796-3814, WR016520.
- Sorooshian, S., Gupta, V.K., and Fulton, J.L. (1983). "Evaluation of maximum likelihood parameter estimation techniques for conceptual rainfall-runoff models: Influence of calibration data variability and length on model credibility." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 19, No. 1, pp. 251-259.
- Teshager, A.D., Gassman, P.W., Secchi, S., Schoof, J.T., and Misgna, G. (2016). "Modeling agricultural watersheds with the soil and water assessment tool (SWAT): calibration and validation with a novel procedure for spatially explicit HRUs." *Environmental Management*, Springer, Vol. 57, pp. 894-911.
- Van Liew, M.W., Veith, T.L., Bosch, D.D., and Anorid, J.G. (2007). "Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: comparison on USDA agricultural research service watersheds." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 12, No. 2, pp. 173-189.
- Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Xia, J., and Yang, H. (2008). "Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe basin in China." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 358, pp. 1-23.