

단장천 유역에서 SWAT-CUP을 이용한 SWAT모형 검 · 보정

이창훈¹, 이남주², 김종태^{1*}
¹자연과기술, ²경성대학교 토목공학과

SWAT model calibration/validation using SWAT-CUP in Danjang-stream watershed

Chang-Hun Lee¹, Namjoo Lee², Jong-Tae Kim^{1*}

¹Nature and Technology Inc.

²Department of Civil Engineering, Kyung Sung University

요약 본 연구에서는 SWAT-CUP을 이용하여 밀양댐 상류에 위치한 단장천 유역을 대상으로 목적함수에 따른 매개변수의 보정과 검정을 실시하고 그 적용성을 평가하였다. 단장천 유역은 낙동강 권역 중 하나의 표준유역으로써 유역 면적은 61.9 km²이며, 토지 이용은 산림 92.7 %, 농경지가 4.59 %를 차지한다. SWAT 모형의 구동을 위한 수치표고모델, 하천망도, 토지이용도, 토양도는 ArcGIS 10.5를 이용하여 구축하였다. 선정된 23개 매개변수를 SWAT-CUP의 SPE 알고리즘을 이용하여 목적함수를 1개씩 순차적으로 변경하여 1000회 반복 수행하였다. 연구결과, 유출량의 관점에서 보면 목적함수 PBIAS를 적용한 경우 가장 실측유출량과 동일한 결과를 보였으며, P-factor와 R-factor의 결과에서 보면 P-factor 0.88, R-factor 0.56으로 모두 같은 결과값을 보였다. 8개의 목적함수를 적용한 시나리오 중에서 최상의 매개변수 보정결과로써 목적함수 bR²은 P-factor는 0.88, R-factor는 0.56, R²는 0.66, NS는 0.66, PBIAS는 3.0으로 모의 결과가 가장 우수한 수준으로 나타났다. 그러나 같은 조건에서 SWAT-CUP을 이용한 자동보정을 수행하였을 때 8개의 목적함수를 적용하며, 유사한 범위의 매개변수 보정 결과를 나타내기도 했지만 전혀 다른 보정 결과를 나타내기도 하였다. 이러한 결과는 목적함수를 통해 정의되는 SWAT 모형의 불확실성을 나타내며, 향후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Abstract In this study, the Soil and Water Assessment Tool Calibration and Uncertainty Programs (SWAT-CUP) were used to calibrate and validate the parameters according to the objective function for the Danjang-stream watershed located upstream of Miryang Dam, and the applicability was evaluated. The Danjang-stream watershed is one of the standard watersheds in the Nakdong River region. The area of the Danjang-stream watershed is a total of 61.9 square kilometers, and land use of the watershed accounts for 92.7% of forests and 4.59 % of agricultural land. Digital elevation models (DEMs), river network maps, land use maps, and soil maps for SWAT model operations were developed using ArcGIS (version 10.5). The 23 parameters selected were repeated a thousand times by sequentially changing the objective function one by one using the SWAT-CUP Parameter Estimator (SPE) Algorithm. As a result, in terms of runoff, when the objective function percent biases (PBIAS) were applied, the results were similar to those of the measured runoff. The results of the P-factor and R-factor showed the same results, with a P-factor of 0.88 and an R-factor of 0.56. As the best parameter correction result among the possible scenarios, in which the eight objective functions were applied, the objective function bR² had a P-factor of 0.88, an R-factor of 0.56, an R² of 0.66, Nash-Sutcliffe Efficiency(NS) of 0.66, and PBIAS of 3.0, showing the best simulation results. On the other hand, eight objective functions were applied when automatic correction using SWAT-CUP was performed under the same conditions. The parameter correction resulted in a similar range but with completely different correction results. These results indicate the uncertainty of the SWAT model defined through the objective function, but further research is needed.

Keywords : SWAT, SWAT-CUP, SPE, Parameters, Calibration, Validation, Objective Functions

본 연구는 낙동강수계관리위원회 환경기초조사사업의 지원을 받아 추진되었습니다.

*Corresponding Author : Jong-Tae Kim(Nature and Technology Inc.)

email: kjtt98@naver.com

Received May 14, 2021

Accepted September 3, 2021

Revised June 17, 2021

Published September 30, 2021

1. 서론

SWAT은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold에 의해 개발된 유역모델로써 Soil and Water Assessment Tool의 약자이다. SWAT은 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출량, 유사량 및 영양물질의 거동에 대한 토지관리방법의 영향을 예측하기 위하여 개발되었다[1]. 하지만 SWAT처럼 다양한 입력 자료와 매개변수가 필요한 모형은 모의 결과에 대한 결과제시가 어렵다. 특히, 유역의 특성에 따른 매개변수는 관측의 부정확성으로 인해 정확한 산정이 어렵기 때문에 반드시 검·보정 과정이 수반되어야 한다[2]. 수문모형의 검·보정은 유역의 수문특성을 최대한 유사하게 모의할 수 있는 최적의 매개변수를 찾는 과정이다.

매개변수의 보정을 위한 방법은 크게 수동 보정 (manual calibration)과 자동 보정 (automatic calibration)으로 구분할 수 있다. 수동 보정은 시간이 오래 걸리는 과정을 거치게 된다[3]. 또한 사용자에게 따른 주관성과 보정된 매개변수의 고유성이 부족하며 이로 인해 모형의 모의결과에 대한 신뢰도를 평가하고 사용자에게 일관성을 유지하기가 어려운 단점이 있지만, 숙련된 전문가의 경우 수동 접근법을 사용하여 우수한 보정결과를 얻을 수 있다. 자동 보정은 목적함수를 최소화하기 위해 지정된 검색 체계에 따라 매개변수가 조정되며, 수동 보정과 비교하면 자동 보정이 보다 빠르게 신뢰성 있는 모의결과를 산출할 수 있다[4].

SWAT 모형의 매개변수 자동보정에 따른 불확실성 해석을 위해 SWAT-CUP(Calibration and Uncertainty Program)이 많이 이용되고 있다. 최근 SWAT-CUP의 개선된 버전으로 SWAT-CUP Premium이 출시되었다. SWAT-CUP Premium은 2가지 사항이 변경하였다. 첫 번째, 널리 사용되지 않으며, SWAT 모형을 실행하는데 매우 비효율적이고, 비실용적인 GLUE, PARASOL, MCMC 알고리즘을 제거하였다. 두 번째, SUFI-2 알고리즘을 업그레이드한 SPE 알고리즘을 대체하였다[5]. 이에 본 연구에서는 SWAT-CUP Premium을 사용하였다. SWAT-CUP Premium은 SWAT 모형의 매개변수 검·보정, 민감도 분석 및 불확실성을 해석하기 위해 SPE(SWAT Parameter Estimator) 및 PSO(Particle Swarm Optimization) 알고리즘을 적용한 자동 보정 기능을 제공한다.

국내 SWAT-CUP을 이용한 매개변수 보정방법에 대한 적용 사례를 살펴보면, 대청호 유역을 대상으로 SWAT-CUP의 적용에서는 GLUE와 SUFI-2 알고리즘을 이용하여 NS와 R^2 는 각각 0.87과 0.89를 나타냈으며, 두 알고리즘에 따른 차이는 거의 없는 것으로 나타났다[6]. 소양강댐 유역의 유출 자동보정을 위한 SWAT-CUP의 적용성 평가에서 GLUE, PARASOL, SUFI-2의 세가지 알고리즘을 이용하여 매개변수 보정결과를 비교한 바 있다[7]. 충주댐 유역을 대상으로 SWAT-CUP의 SUFI-2, GLUE, PARASOL의 세가지 알고리즘을 이용하여 SWAT 모형의 예측 불확실성을 분석한 결과, SUFI-2 알고리즘이 가장 좋은 결과를 보였다[8]. 섬강시험유역에서 SWAT-CUP을 이용한 SWAT 모형 매개변수 추정에서 민감도 분석결과를 토대로 7개의 매개변수를 선정하고 SUFI-2 알고리즘을 이용하여 2년간의 자료기간에 대해 보정한 결과 P-factor 0.85, R-factor 0.06로 NS와 R^2 는 각각 0.92, 0.98로 모의치가 실측치와 높은 상관성을 보이는 결과를 얻었다[9]. 섬강시험유역의 지형학적 특성 매개변수와 SWAT-CUP의 SUFI-2 알고리즘을 이용한 SWAT 모형 매개변수와와의 상관관계식을 개발하고, 개발한 상관관계식을 이용하여 속사천 유역의 SWAT 모형의 매개변수를 추정 및 적용성을 평가하였다[10]. 내성천 유역을 대상으로 SWAT-CUP을 이용하여 8개의 목적함수에 따라 선정된 모의값과 관측값 사이의 수문학적 유사성을 평가하였으며, 그 결과 최종적으로 SWAT 매개변수 보정을 위한 최적 목적함수는 MNS 및 SSQR로 선정하였다[11].

SWAT-CUP에서의 자동 보정은 목적함수(objective function)를 최소화하기 위해 지정된 알고리즘에 따라 매개변수가 조정되며, 기본적으로 11개의 목적함수를 활용한다. 한편, SWAT 모형의 매개변수 검·보정은 모의 시 사용되는 여러 목적함수는 서로 유사한 모의 결과를 도출할 수 있으나, 각 매개변수 값이 목적함수에 따라 다르게 산정될 수 있다는 점을 지적한 바 있다[12]. 즉, 어떤 목적함수는 저유량(low flow)에 대하여 적합한 모의 결과를 나타내는 반면 첨두유량(peak flow)에 대한 모의는 적합하지 못한 모의 결과가 발생할 수 있다. 따라서 연구 목적에 맞는 모의 결과를 산출하는 목적함수 선택이 필요하다.

본 연구에서는 SWAT 모형의 매개변수 자동보정과 불확실성 해석을 위해 개발된 SWAT-CUP의 SPE 알고리즘을 이용하여 밀양댐 상류에 위치한 단장천 유역을 대상으로 목적함수에 따른 매개변수의 보정과 검정을 실시

하고 그 적용성을 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 SWAT

SWAT은 준 분포형 장기-강우유출모형으로서 일 단 위의 모의가 가능하며, 물리적 기반의 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적 4가지의 모형으로 구성되어 있다. 이 중에서 수문 모형의 해석은 Eq. (1)에 나타난 것과 같이 침투, 차단, 증발산, 중간 유출, 지표면 유출, 기저유출, 수로손실 등의 수문순환을 반영하는 물수지 방정식을 사용한다[11].

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

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

2.2 SWAT-CUP

SWAT 모형은 수동 보정과 자동 보정으로 매개변수 보정 방법을 구분할 수 있다. SWAT의 수동 보정 기능은 주관성에 크게 의존하여 사용자에게 따라 보정결과가 달라질 수 있기 때문에 신뢰도를 보장하기 어렵다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 자동보정 기능을 제공하는 SWAT-CUP이 개발되었다. 이 프로그램은 SPE, PSO 2가지 알고리즘 중 하나를 선택할 수 있으며, 선택된 알고리즘을 이용하여 매개변수의 범위 내에서 교환적, 상대적인 매개변수 변경방법을 이용하여 보정을 수행하여 최적의 매개변수를 도출한다. 본 연구에서는 SPE 알고리즘을 사용하였다. SPE 알고리즘은 순차적으로 매개변수를 추정하는 방법이며, 매개변수, 측정값 등과 같은 불확실한 매개변수로 이루어져 있다. 모든 불확실성의 정도는 95% 예측의 불확실성 비율로 측정된다. Fig. 1은 SWAT-CUP을 이용한 매개변수 검·보정 과정을 보여준다. Fig. 2는 SWAT-CUP의 SPE 알고리즘 순서에 의한 매개변수 추정과정을 나타낸 것이다.

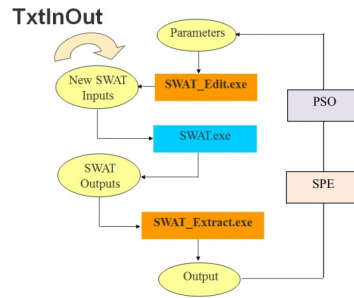


Fig. 1. SWAT model calibration procedure using SWAT-CUP (User manual SWAT-CUP Premium, 2020)



Fig. 2. Step-by-step creating of SWAT-CUP SPE input files(User manual SWAT-CUP Premium, 2020)

3. 연구대상 및 방법

3.1 대상유역

본 연구에서는 대상 유역으로 낙동강 권역의 밀양댐 상류에 위치한 단장천 유역을 선정하였다. 단장천은 울산광역시 울주군 상북면 능동산의 연봉에서 발원하여, 급격한 산간계곡을 따라 흐르다가 밀양댐으로 유입되는 낙동강 제 2지류이며, 전체 유역면적은 350.13 km^2 , 유로연장은 43.15 km 인 지방하천이다. 이 중에서 대상 유역면적은 61.9 km^2 , 유로연장은 23.0 km 이다. 단장천 유역은 전형적인 산지하천으로 SWAT 모델을 이용하여 유출량 관점에서 수문특성 분석 연구를 진행하기에 적합하다고 판단되었으며, 대상 유역은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 1개의 소유역으로 구분하였다.

3.2 지형 및 기상자료

SWAT 모형의 입력 자료는 지형자료와 기상자료이며, 지형자료는 수치표고모형(DEM), 하천망도, 토지이용도 및 토양도를 포함한다. 대상 유역은 구축된 하천망과 사용자에게 의해 지정된 유역의 출구지점이 일치하여 1개의 소유역으로 지정하였다. 본 연구에서는 수치표고모형의 경우는 30 m 격자 크기의 ASTER Global Digital Elevation Map을 사용하였고, 토지이용도의 경우는 환경부에서 제공하고 있는 1:25,000 토지피복도의 23개 중분류를 적용하였으며, 대부분의 유역면적은 산림지역이 92.7 %로 가장 많이 분포하는 것으로 나타났으며, 논과 밭을 포함한 농경지가 4.59 % 정도인 것으로 나타났다. 토양도는 국립농업과학원에서 제공하고 있는 1:25,000 정밀토양도를 사용하였다(Fig. 4).

기상자료는 일 강수(mm), 일 최고기온 및 일 최저기온(°C), 일 일사량(MJ/m²), 일 평균상대습도(%), 일 평균풍속(m/sec)을 포함하며, SWAT 모형은 기상자료를 통해 유출에 대한 수문 성분을 산정한다. 본 연구를 2020년도 진행하였으며, 2011년부터 2019년까지 단장천 유역 주변의 기상자료 및 유량자료를 취득하였다. 하지만 매개변수 보정을 위한 대리수위관측소 지점 유량자료 중 2017년도와 2019년도 유량자료의 일부 결측이 있어 부득이하게 2011년부터 2016년까지 자료를 이용하였다. 단장천 유역 주변의 기상관측소 중 6년의 모의기간(2011.01.01. ~ 2016.12.31.)과 일치하는 4개 지점이 선택되었다(Fig. 2). 강수량, 평균풍속, 최고기온 및 최저기온은 기상청(밀양, 단장, 송백, 양산상북)에서 제공하는 4개 지점에서 수집되었으며, 일사량과 평균상대습도는 밀양관측소의 자료가 사용되었다. 또한 매개변수 보정을 위해 대리수위관측소 지점에서 수집된 2013년 1월 1일부터 2016년 12월 31일까지 유량 자료를 이용하였으며, 기상 및 유량(수위) 관측소의 위치는 Fig. 3에 나타낸 것과 같다.

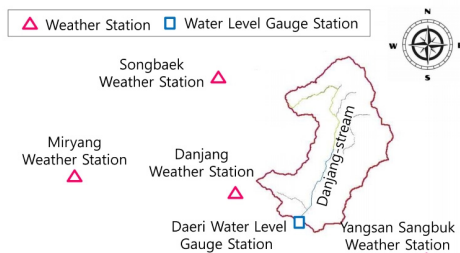


Fig. 3. Study area and station information

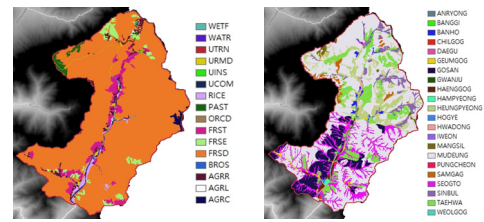


Fig. 4. Landuse(left) and soil map(right) for the Danjang stream watershed

3.3 매개변수 선정

모형의 보정은 관측값과 비교하여 적합한 범위의 모의 결과를 찾는 과정이며, SWAT 모형 검·보정을 수행하기 위해 먼저 적합한 매개변수를 선정해야 한다.

선행연구에서는 Kumar and Merwade은 유출과 관련된 수문과정에 대하여 지표, 지표하, 유역의 세 가지 구분하고, 관련된 매개변수를 선정하였다[13]. Malago et al.은 매개변수를 대상으로 민감도 분석하고 유출에 영향을 가장 크게 영향을 미치는 매개변수를 선정하였다[14]. Teshager et al.은 유출, 유사 및 오염원 산정에 영향을 줄 수 있는 매개변수를 분류하여 다목적 매개변수 검보정을 수행하였다[15]. Yu et al.은 유출량 산정 과정에 영향을 줄 수 있는 토양, 지하수, 유출 및 하도추적의 과정에 관련된 매개변수로 선정하였다[16].

위와 같은 기존연구를 참고하여 본 연구에서는 Table 1 ~ Table 2에 나타난 것과 같이 모의를 위한 총 23개의 매개변수를 선정하였다.

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

Parameter Name	Unit	Change Type	Initial range
ALPHA_BF.gw	day ⁻¹	a	-0.048 ~ 0.952
CANMX.hru	mm	a	0 ~ 100
CH_K2.rte	mm/hr	a	-0.01 ~ 500
CH_N1.sub	-	a	-0.004 ~ 29.986
CH_N2.rte	-	a	-0.024 ~ 0.286
CN2.mgt	-	r	-0.25 ~ 0.25
EPCO.hru	-	a	-1 ~ 0
ESCO.hru	-	a	-0.95 ~ 0.05
GW_DELAY.gw	days	v	0 ~ 500
GW_REVAP.gw	-	v	0.02 ~ 0.2
GWQMN.gw	mm	v	0 ~ 5000
RCHRG_DP.gw	%	a	-0.05 ~ 0.95
REVAPMN.gw	mm	v	0 ~ 500

SFTMP.bsn	℃	a	-6 ~ 0
SLSUBBSN.hru	m	r	-0.25 ~ 0.25
SMFMN.bsn	mm/℃·day	a	-4.5 ~ 5.5
SMFMX.bsn	mm/℃·day	a	-4.5 ~ 5.5
SMTMP.bsn	℃	r	-0.25 ~ 0.25
SOL_AWC.sol	mm	r	-0.25 ~ 0.25
SOL_K.sol	mm/hr	r	-0.25 ~ 0.25
SOL_Z.sol	mm	r	-0.25 ~ 0.25
SURLAG.bsn	-	a	-3.95 ~ 20
TIMP.bsn	-	a	-1 ~ 0

[Change type]

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)

Table 2. SWAT input parameters and description selected for calibration

Parameter Name	Description
ALPHA_BF.gw	Baseflow alpha factor
CANMX.hru	Maximum canopy storage
CH_K2.rte	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium
CH_N1.sub	Manning's "n" value for the tributary channels
CH_N2.rte	Manning's "n" value for the main channel
CN2.mgt	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II
EPCO.hru	Plant uptake compensation factor
ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor
GW_DELAY.gw	Groundwater delay time
GW_REVAP.gw	Groundwater re-evaporation coefficient
GWQMN.gw	Threshold water level in shallow aquifer for baseflow
RCHRG_DP.gw	Deep aquifer percolation fraction
REVAPMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for re-evaporation
SFTMP.bsn	Snowfall temperature
SLSUBBSN.hru	Average slope length
SMFMN.bsn	Melt factor for snow on December 21
SMFMX.bsn	Melt factor for snow on June 21
SMTMP.bsn	Snow melt base temperature
SOL_AWC.sol	Available water capacity of the soil layer
SOL_K.sol	Saturated hydraulic conductivity
SOL_Z.sol	Depth from soil surface to bottom of layer
SURLAG.bsn	Surface runoff lag coefficient
TIMP.bsn	Snow pack temperature lag factor

3.4 모의 실행 및 반복 횟수

SWAT-CUP을 이용한 모의 실행 및 반복 횟수는 기

존 연구에서 Abbaspour 등은 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 제시하였다[17]. Yu 등은 1000번 이상의 큰 모의 실행 횟수를 설정하여 초기 1~2회 정도 반복 모의하는 것이 효율적이라고 제시하였다[16]. 본 연구에서는 효율적인 모의를 수행하기 위해 1,000번의 모의 실행 횟수를 수행하였다. 모의 실행 횟수를 1000번으로 설정하였다면 사용자가 정의한 각각의 매개변수의 범위는 1000개의 구간으로 나뉜다. 예를 들어, 매개변수 x_k 의 범위를 0~1으로 지정하였다면, 0.001(1/1000)의 간격으로 총 1000개의 값이 생성된다. 따라서 23개 매개변수의 가능한 조합은 1000^{23} 개이며, 그 중 1000개의 조합이 SPE 알고리즘에 따라 관측값에 가장 적합한 모의 결과를 산출하는 매개변수 범위 및 값을 결정한다.

3.5 목적함수에 따른 SWAT 모형 검·보정

본 연구에서는 Table 3에 나타난 것과 같이 SWAT-CUP에서 제공하는 총 11개의 목적함수 중 8개의 목적함수를 선택하여 검·보정을 수행하였다. 8개의 목적함수는 오차를 정량화 방법에 따라 최적 매개변수를 다르게 산정한다. 동일한 지형 및 기상 자료를 갖는 SWAT 모형에 대해 각각의 목적함수별로 서로 다른 수문특성 자료를 생성한다.

R^2 (Coefficient of Determination)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 (Modified Coefficient of Determination)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(Modified Nash-Sutcliffe Efficiency)(수정 NS)는 p값을 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.

PBIAS(Percent Bias)는 평균적으로 관측값이 모의값보다 크게 혹은 작게 산정되었는지 평가하며 양의 값일 때 모의결과가 과소산정, 음의 값일 때 과대산정되었음을 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.

Table 3. The information of objective functions in SWAT-CUP(Yu et al., 2020)

Objective Function	Formulation	Range
Coefficient of Determination (R^2)	$R^2 = \frac{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \sqrt{\sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2}}$	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 ∞
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 ∞
Ranked Sum of Squared Error (SSQR)	$SSQR = \frac{1}{n} \sum_i [Q_{m,i} - Q_{s,i}]^2$	0 to ∞

* 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 σ_m and σ_s are the standard deviation of the measured and simulated data, and μ_m and μ_s are the mean of measured and simulated data, respectively.

4. 연구결과

4.1 매개변수 보정

본 연구에서는 선정된 23개 매개변수를 SWAT-CUP을 이용하여 8개의 목적함수별로 1000회 반복 수행하였다.

SWAT-CUP에서 매개변수의 불확실성은 95%의 확률 분포로 나타내며, P-factor는 관측값이 95PPU에 포함되는 비율을 나타내며, 0~1의 범위를 가지고 1에 가까울수록 관측값과 유사한 것으로 판단한다. SWAT-CUP 개발자의 연구에 따르면, P-factor가 0.7 이상이고, R-factor가 1.5 보다 작으면 적용 가능한 값이라고 본다 [18].

SWAT-CUP의 맨 처음 목적함수 R^2 를 적용한 결과, P-factor는 0.88, R-factor는 0.56이었고, 모의유출량의 평균은 $1.18 \text{ m}^3/\text{s}$ 였으며, 보정기간(2013년~2016년) 동안의 실측유출량은 $1.33 \text{ m}^3/\text{s}$ 였다. 목적함수를 하나씩 변경시키면서 8개의 목적함수를 적용한 결과는 다음 Table 4와 같다. 유출량의 관점에서 보면 목적함수 PBIAS를 적용한 경우 가장 실측유출량과 동일한 결과를 보였으며, P-factor와 R-factor의 결과에서 보면 P-factor 0.88, R-factor 0.56으로 모두 같은 결과값을 보였다. 매개변수 보정을 위한 목적함수는 R^2 , NS, 및 PBIAS가 일반적이며, 국외 선행 연구자가 발표한 논문 [19]에 따르면, R^2 가 0.5이상, NS가 0.5이상이면 PBIAS가 25 보다 작으면 적용 가능한 값이라고 본다 [19].

SWAT-CUP의 보정결과, R^2 에서 보면 목적함수(R^2 , bR^2 , NS, MNS, RSR)를 적용한 경우 0.65 이상으로 높은 값을 보였으며, bR^2 의 보정결과에서 목적함수(bR^2)를 적용하였을 때 0.46으로 가장 높은 값을 보였다.

NS의 보정결과에서 보면 목적함수(R^2 , bR^2 , NS, MNS, RSR)를 적용한 경우 0.64 이상으로 높은 값을 보였으며, MNS의 보정결과에서 목적함수(R^2 , bR^2 , NS, MNS, RSR)를 적용하였을 때 0.5 이상으로 높은 값을 보였다. 또한 KGE의 보정결과에서 목적함수(bR^2 , KGE, PBIAS, SSQR)를 적용하였을 때 0.74 이상으로 높은 값을 보였다.

PBIAS의 보정결과에서 보면 목적함수(bR^2 , KGE, PBIAS, SSQR)를 적용한 경우 10 이하의 값을 보였다. RSR의 보정결과에서 보면 목적함수(R^2 , bR^2 , NS, RSR)를 적용한 경우 0.58 이하로 낮은 값을 보였으며, SSQR의 보정결과에서 목적함수(bR^2 , KGE, PBIAS)를 적용하였을 때 1.0 이하로 낮은 값을 보였다.

Table 4. Calibration results according to the objective functions

Calibration results \ Objective functions	R ²	bR ²	NS	MNS	KGE	PBIAS	RSR	SSQR
P-factor	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
R-factor	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
R ²	0.68	0.66	0.68	0.65	0.61	0.58	0.68	0.55
bR ²	0.40	0.46	0.43	0.38	0.45	0.43	0.43	0.41
NS	0.67	0.66	0.67	0.64	0.59	0.54	0.67	0.5
MNS	0.54	0.5	0.52	0.54	0.45	0.44	0.52	0.42
KGE	0.64	0.76	0.68	0.64	0.76	0.76	0.68	0.74
PBIAS	11.3	3.0	15.2	10.1	6.2	0.1	15.2	-2.3
RSR	0.58	0.58	0.57	0.6	0.64	0.68	0.57	0.71
SSQR	1.5	0.99	1.2	1.4	0.78	0.58	1.2	5.4
Mean_sim (Mean_obs=1.33)	1.18	1.29	1.13	1.20	1.25	1.33	1.13	1.36

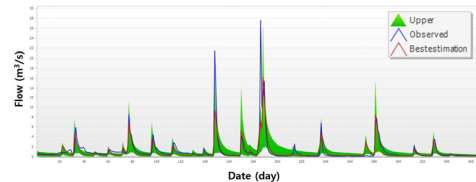
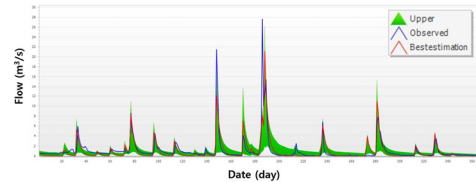
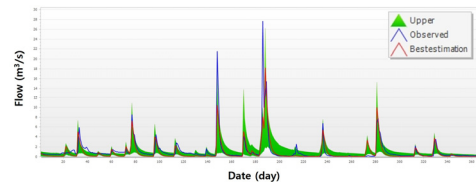
4.2 최적 목적함수의 결정 및 유출량 검정

본 연구에서는 P-factor, R-factor, R², NS, PBIAS 등을 고려하여 8개의 목적함수를 적용한 시나리오 중에서 최상의 매개변수 보정결과를 채택하였다. 연구결과, 목적함수 bR²에 따른 매개변수 검정결과는 P-factor는 0.88, R-factor는 0.56이었고, 모의유출량의 평균은 1.29 m³/s이었으며, 검정기간(2013년~2016년) 동안의 실측유출량은 1.33 m³/s이었다. 검정기간에 대한 bR²는 0.66, NS는 0.66, PBIAS는 3으로 모의 결과가 우수한 수준을 나타냈다. 일별 유량의 수준도 무리없이 유사하게 재현하고 있어서 적용성을 확인하였다. Table 5는 보정된 매개변수의 값과 제안된 새로운 최소 및 최대 범위를 보여주고 있다. Fig. 5에 목적함수에 따른 관측치와 모의치를 비교한 결과를 95PPU 그래프와 함께 보여주고 있다. Fig. 6은 최적 목적함수로 선정된 bR²을 적용하여 관측 유량과 모의 유량을 비교하여 나타낸 것이다.

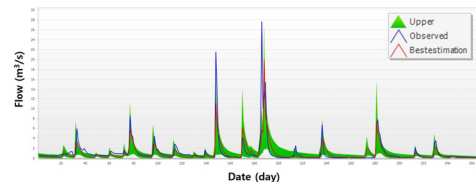
Table 5. Fitted value of calibrated parameters and suggested new minimum and maximum ranges

Parameter_Name	Fitted_Value	Min_value	Max_value	New_Min	New_Max
ALPHA_BF	0.830	-0.048	0.952	0.391	1.268
CANMX	45.7	0.0	100.0	18.471	72.829
CH_K2	160.7	-0.010	500.0	-8.904	330.390
CH_N1	5.979	-0.004	29.986	-6.026	17.984
CH_N2	0.098	-0.024	0.286	0.004	0.192

CN2	0.191	-0.250	0.250	-0.030	0.411
EPCO	-0.859	-1.0	0.0	-1.288	-0.429
ESCO	-0.109	-0.950	0.050	-0.529	0.312
GW_DELAY	87.250	0.0	500.0	-119.142	293.642
GW_REVAP	0.151	0.020	0.200	0.085	0.216
GWQMN	347.5	0.0	5000.0	-1978.926	2673.926
RCHRG_DP	0.474	-0.050	0.950	0.212	0.735
REVAPMN	226.8	0.0	500.0	90.107	363.393
SFTMP	-5.781	-6.0	0.0	-8.672	-2.890
SLSUBBSN	0.196	-0.250	0.250	-0.027	0.419
SMFMN	-3.235	-4.500	5.500	-7.603	1.133
SMFMX	2.075	-4.500	5.500	-1.213	5.363
SMTMP	-0.156	-0.250	0.250	-0.359	0.047
SOL_AWC	-0.065	-0.250	0.250	-0.222	0.093
SOL_K	0.153	-0.250	0.250	-0.048	0.355
SOL_Z	0.191	-0.250	0.250	-0.029	0.412
SURLAG	16.300	-3.950	20.000	6.174	26.425
TIMP	-0.982	-1.000	0.000	-1.472	-0.491

(a) R²(b) bR²

(c) NS



(d) MNS

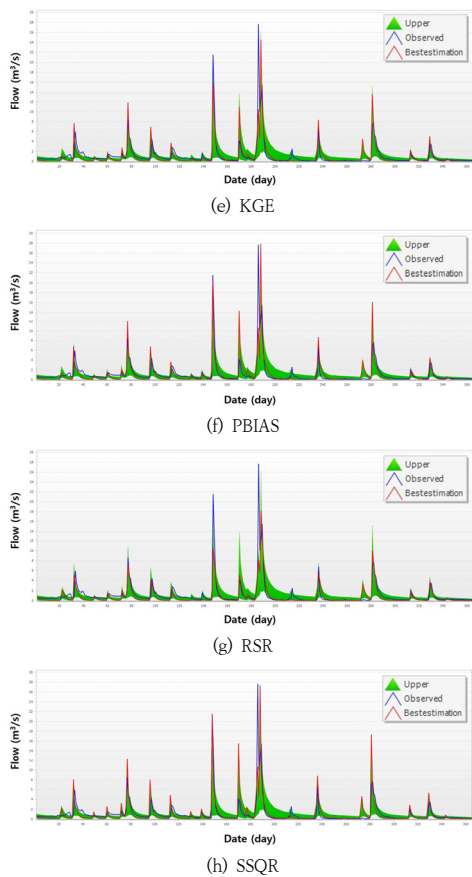


Fig. 5. Comparison between observed and best estimation along with 95PPU (shaded area) derived by SPE for the calibration period

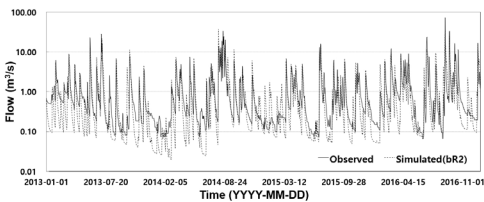


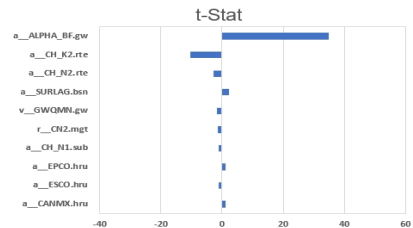
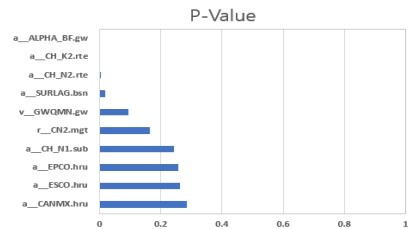
Fig. 6. Comparison between observed and best estimation

4.3 목적함수에 따른 매개변수의 민감도 및 불확실성

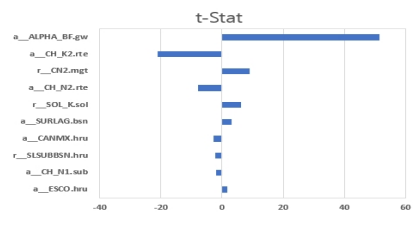
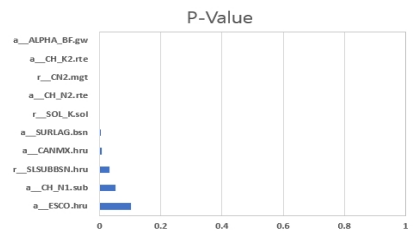
Fig. 7은 SWAT-CUP의 SPE 알고리즘을 이용한 민감도 분석결과이며 각각 매개변수의 상대적인 민감도를 나타낸 것이다. P-Value 값은 절대값이 작을수록 민감도가 높은 것을 의미하며, t-Stat 값은 절대값이 클수록 목적함수에 대한 민감도가 높은 지표라는 것을 말한다.

목적함수 PBIAS 사용을 제외하고 매개변수 ALPHA_BF가 가장 민감도가 높게 나타났다.

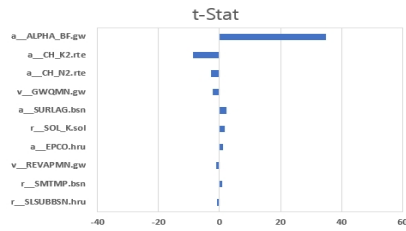
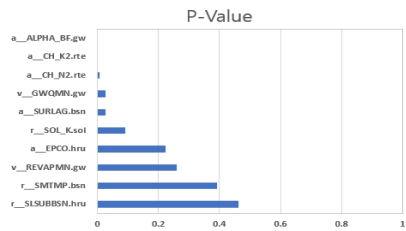
본 연구에서 8개의 목적함수는 다른 매개변수 보정 결과를 도출하였으며, 목적함수에 따라 민감하게 변화하는 매개변수가 달라지는 결과를 확인하였다. 동일한 지형 및 기상자료를 가진 유역에서 목적함수에 따라 다른 범위의 매개변수가 적용될 수 있음을 시사하며, 이러한 결과는 목적함수를 통해 정의되는 SWAT 모형의 불확실성을 나타낸다. 또한 여러 가지의 목적함수를 사용하여 보정을 수행하였을 때, 목적함수에 따라 서로 다른 매개변수를 갖는 SWAT 모형이 정의되는 문제점을 지적한 바 있다[20].



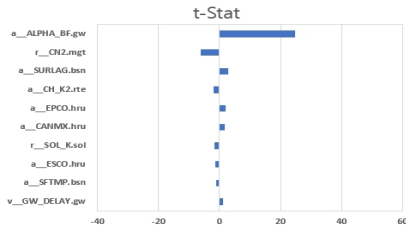
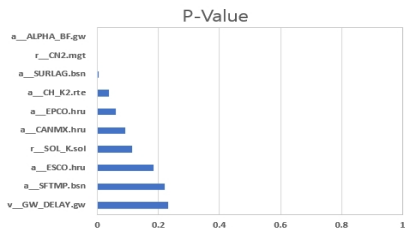
(a) R^2



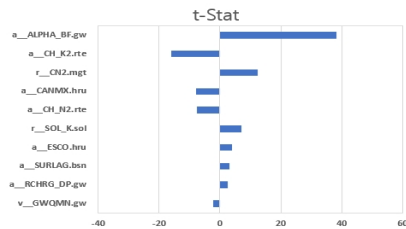
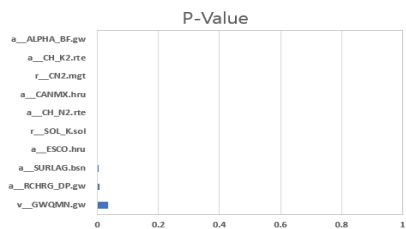
(b) bR^2



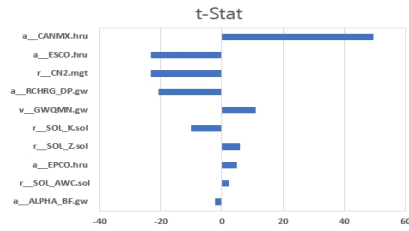
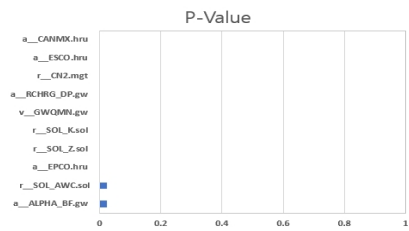
(c) NS



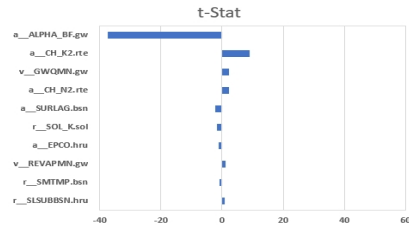
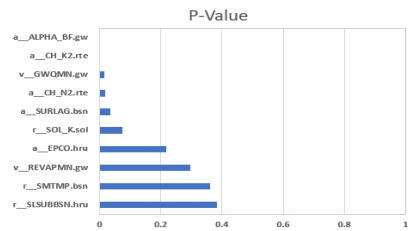
(d) MNS



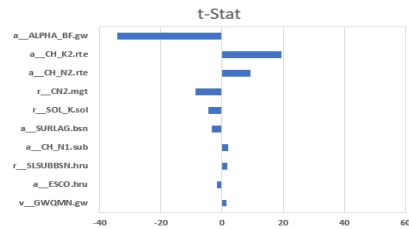
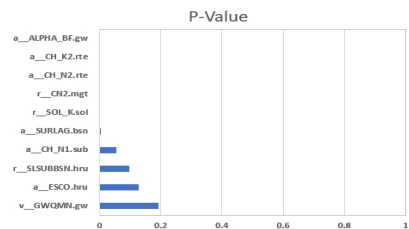
(e) KGE



(f) PBIAS



(g) SSQR



(h) SSQR

Fig. 7. Sensitivity of parameters by SPE of SWAT-CUP

5. 결론

본 연구에서는 산지하천에 대한 수문특성을 분석하기 위해 밀양댐 상류에 위치한 단장천 유역을 대상으로 SWAT-CUP을 이용하여 목적함수에 따른 매개변수의 보정과 검정을 수행하고 그 적용성을 평가하였다.

SWAT 모형의 구동을 위한 수치표고모델, 하천망도, 토지이용도, 토양도는 ArcGIS 10.5를 이용하여 구축하였고, 기상자료는 대상유역 주변의 기상관측소 중 6년의 모의기간과 일치하는 4개 지점의 자료를 이용하였으며, 유량자료는 대상 유역 내에 위치한 대리수위관측소 지점의 일 평균 유량 자료를 이용하였다. SWAT 모형의 보정을 위해 2013년부터 2016년까지 4년간의 자료를 이용하였다.

SWAT-CUP의 SPE 알고리즘을 이용하여 목적함수에 따른 매개변수를 보정하기 위해 선정된 매개변수를 23개를 이용하여 1000회 반복으로 보정을 수행하였다. 유출량의 관점에서 보면 목적함수를 적용한 경우 가장 관측치와 근접한 결과를 선택하였으며, P-factor, R-factor, R^2 , NS, PBIAS 고려하여 8개의 목적함수를 적용한 시나리오 중 최적의 매개변수 보정결과로 선택하였다. 연구결과 중 목적함수 bR^2 에 의한 보정결과가 P-factor는 0.88, R-factor는 0.56이었고, 모의유출량의 평균은 $1.29 \text{ m}^3/\text{s}$ 이었으며, 검정기간 동안의 실측유출량은 $1.33 \text{ m}^3/\text{s}$ 이었다. 검정기간에 대한 bR^2 는 0.66, NS는 0.66, PBIAS는 3으로 모의 결과가 우수한 수준을 나타냈다. 일별 유량의 수준도 무리없이 유사하게 재현하고 있어서 적용성을 확인하였다.

그러나 같은 조건에서 SWAT-CUP에서 8개의 목적함수(R^2 , bR^2 , NS, MNS, KGE, PBIAS, RSR 및 SSQR)를 적용하였을 때, 동일한 범위의 매개변수 보정 결과를 나타내기도 했지만 전혀 다른 결과를 나타내기도 하였다. 이러한 결과는 여러 가지 매개변수를 이용하는 SWAT 모형의 불확실성으로서 실제 수문특성을 파악하는데 어려움으로 작용한다. 또한 SWAT 모형은 홍수기 및 갈수기를 대비하기 위한 극치값 모의와 평유량 모의 등 목적에 따라 검·보정의 목표치가 달라질 수 있다. 따라서 SWAT-CUP을 이용한 매개변수 보정 시, 연구 목적에 적합한 목적함수로 적용하는 것이 필요하다.

본 대상 유역을 낙동강 권역 중 하나의 표준유역으로 국한하여 분석을 수행하였으므로, 결과를 우리나라 모든 유역에 대하여 일반화하는 것은 타당하지 않다. 이에 향후 국내 유역에 모두 적합한 목적함수를 결정하기 위해

서는 다양한 형태를 가진 유역을 대상으로 수문특성 분석에 대한 연구가 필요하며, 또한 여러 가지의 목적함수를 사용하여 보정을 수행할 때, 목적함수에 따라 서로 다른 매개변수를 갖는 SWAT 모형의 애로사항에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] J. G. Arnold, R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams, "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, 1998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- [2] J. G. Arnold, D. N. Moriasi, P. W. Gassman, K. C. Abbaspour, M. J. White, R. Srinivasan, C. Santhi, R. D. Harmel, A. Van Griensven, M. W. Van Liew, N. Kannan, and M. K. Jha, "SWAT: model use, calibration, and validation.", *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, ASABE, Vol. 55, No. 4, pp. 1491-1508, 2012.
<https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1408&context=biosysengfacpub>
- [3] H. Madsen, "Automatic calibration of a conceptual rainfall runoff model using multiple objectives.", *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 235, pp. 276-288, 2000.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00279-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00279-1)
- [4] D. P. Boyle, H. V. Gupta, and S. Sorooshian, "Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods" *Water Resources Research* 36(12): 3663-3674, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2000WR900207>
- [5] User manual Swat-Cup Premium, "SWAT-CUP Premium SWAT Calibration and Uncertainty Programs(Premium version)", 2020.
<https://www.2w2e.com/home/SwatCupPremium>
- [6] E. H. Lee, and D. I. Seo, "Flow calibration and validation of Daechung lake watershed, Korea using SWAT-CUP.", *Journal of Korean Water Resources Association* 44(9): 711-720 (in Korean), 2011.
<https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ART001588523>
- [7] J. Ryu, H. Kang, J. W. Choi, D. S. Kong, D. Gum, C. H. Jang, and K. J. Lim, "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), 2012.
<https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ART001662463>

- [8] H. K. Joh, J. Y. Park, C. H. Jang, and S. J. Kim, "Comparing prediction uncertainty analysis techniques of SWAT simulated streamflow applied to Chungju dam watershed.", *Journal of Korean Water Resources Association* 45(9): 861-874 (in Korean), 2012.
DOI: <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ART001696098>
- [9] H. S. Choi, "Parameter estimation of SWAT model using SWAT-CUP in Seom-river experimental watershed.", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 33(2): 529-536 (in Korean), 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.2.529>
- [10] W. H. Lee, J. H. Lee, J. H. Park, and H. S. Choi, "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, 2016.
<https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ART002258931>
- [11] J. S. Yu, J. W. Noh, Y. H. Cho, "SWAT model calibration/validation using SWAT-CUP I: analysis for uncertainties of objective functions", *J. Korea Water Resour. Assoc.* Vol. 53, No. 1, pp. 45-56, 2020.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2020.53.1.45>
- [12] K. C. Abbaspour, S. A. Vaghefi, and R. Srinivasan, "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, 2018.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/w10010006>
- [13] S. Kumar, and V. Merwade, "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, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.2009.00353.x>
- [14] A. Malago, L. Pagliero, F. Bouraoui, and M. Franchini, "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, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2014.978332>
- [15] A. D. Teshager, P. W. Gassman, S. Secchi, J. T. Schoof, and G. Misgna, "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, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-015-0636-4>
- [16] J. S. Yu, J. W. Noh, Y. H. Cho, "SWAT model calibration/validation using SWAT-CUP II: analysis for uncertainties of simulation run/iteration number.", *J. Korea Water Resour. Assoc.* Vol. 53, No. 5, pp. 347-356, 2020.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2020.53.5.347>
- [17] K. C. Abbaspour, S. A. Vaghefi, and R. Srinivasan, "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, No. 6, 2018.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/w10010006>
- [18] K. C. Abbaspour, E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang, and B. Kløve, "A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model.", *Journal of Hydrology* 524: 733-752, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- [19] D. N. Moriasi, M. W. Gitau, N. Pai, P. Daggupati, "HYDROLOGIC AND WATER QUALITY MODELS: PERFORMANCE MEASURES AND EVALUATION CRITERIA.", *2015 American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 58(6): 1763-1785, 2015.
https://www.researchgate.net/publication/289540757_Hydrologic_and_Water_Quality_Models_Performance_Measures_and_Evaluation_Criteria
- [20] K. D. Houshmand, K. Esmaili, A. Faridhosseini, S. H. Sanaeinejad, D. Khalili, and K. C. Abbaspour, "Sensitivity of calibrated parameters and water resources estimates on different objective functions and optimization algorithms.", *Water*, MDPI, Vol. 9, No. 6, pp. 384, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.3390/w9060384>

이 창 훈(Chang-Hun Lee)

[정회원]



- 2010년 2월 : 상지대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2010년 8월 ~ 2015년 7월 : 한국건설기술연구원 석사후연구원
- 2015년 10월 ~ 현재 : 주식회사 자연과기술 선임연구원

<관심분야>

토목공학, 하천공학

이 남 주(Namjoo Lee)

[정회원]



- 1996년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 경성대학교 토목공학과 교수

〈관심분야〉

토목공학, 하천공학

김 종 태(Jong-Tae Kim)

[종신회원]



- 2009년 8월 : 안동대학교 지구환경과학과 (이학박사)
- 2017년 4월 ~ 2018년 4월 : 경북도청 자연재난과 주무관
- 2004년 9월 ~ 현재 : 안동대학교 지구환경과학과 겸임교수
- 2018년 5월 ~ 현재 : 주식회사 자연과기술 대표이사

〈관심분야〉

토목공학, 영상분석