



Hardware 유역의 수문매개변수 보정을 위한 SWAT-CUP 프로그램의 적용성 평가

Evaluation of Applicability of SWAT-CUP Program for Hydrologic Parameter Calibration in Hardware Watershed

김상민*[†]
Kim, Sang Min

Abstract

The purpose of this study was to calibrate the hydrologic parameters of SWAT model and analyze the daily runoff for the study watershed using SWAT-CUP. The Hardware watershed is located in Virginia, USA. The watershed area is 356.15 km², and the land use accounts for 73.4 % of forest and 23.2 % of pasture. Input data for the SWAT model were obtained from the digital elevation map, landuse map, soil map and others. Water flow data from 1990 to 1994 was used for calibration and from 1997 to 2005 was for validation. The SUFI-2 module of the SWAT-CUP program was used to calibrate the hydrologic parameters. The parameters were calibrated for the highly sensitive parameters presented in previous studies. The P-factor, R-factor, R², Nash-Sutcliffe efficiency (NS), and average flow were used for the goodness-of-fit measures. The applicability of the model was evaluated by sequentially increasing the number of applied parameters from 4 to 11. In this study, 10-parameter set was accepted for calibration in consideration of goodness-of-fit measures. For the calibration period, P-factor was 0.85, R-factor was 1.76, R² was 0.51 and NS was 0.49. The model was validated using the adjusted ranges of selected parameters. For the validation period, P-factor was 0.78, R-factor was 1.60, R² was 0.60 and NS was 0.57.

Keywords: SWAT; SWAT-CUP; calibration; hydrology parameter

1. 서 론

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형은 미국 농무성 (USDA, United States Department of Agriculture) 산하 농업연구소 (ARS, Agricultural Research Service)에서 개발된 모형으로 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동을 모의할 수 있도록 개발된 준분포형 유역 모델이며 현재 전세계적으로 광범위하게 이용되고 있다 (Arnold et al., 2012).

SWAT 모형의 입력 매개변수는 연속적인 수문순환과정을 나타내고 있으며 일정범위의 현실적인 불확실한 범위를 가진다. 매개변수의 보정과 검정을 위해 먼저 매개변수의 민감도 분석을 통해 대상유역에서 가장 민감한 매개변수를 선정하고, 각각의 매개변수의 범위와 변화율 (rate of changes)을 결정한다. 다음은 매개변수 보정의 단계로 입력값의 변화에 따

른 모형의 결과를 실측자료와 비교하여 매개변수 값을 결정한다. 마지막 검정단계는 보정을 통해 선정된 매개변수 값이 모형의 적용 목적에 맞게 충분히 정확한가를 증명하는 과정이다 (Arnold et al., 2012).

매개변수의 보정을 위한 방법은 크게 수동 보정 (manual calibration)과 자동 보정 (automatic calibration)으로 구분할 수 있다. 수동 보정은 시간이 오래 걸리며 지루한 과정을 거치게 된다 (Madsen, 2000). 또한 사용자에게 따른 주관성과 보정된 매개변수의 고유성이 부족하며 이로 인해 모형의 모의결과에 대한 신뢰도를 평가하고 사용자간에 일관성을 유지하기가 어려운 단점이 있지만, 숙련된 전문가의 경우 수동 접근법을 사용하여 우수한 보정결과를 얻을 수 있다. 자동 보정은 목적 함수를 최소화하기 위해 지정된 검색 체계에 따라 매개변수가 조정되며, 수동 보정과 비교하면 자동 보정이 보다 빠르게 신뢰성 있는 모의결과를 산출할 수 있다 (Boyle et al., 2000).

SWAT 모형의 매개변수 자동보정에 따른 불확실성 해석을 위해 최근 SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Program) 프로그램이 많이 이용되고 있다. 이 프로그램은 SWAT 모형의 민감도 분석, 보정, 검정, 불확실성 해석을 위한 것으로 매개변수의 보정을 위해 SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Ver.2), PSO (Particle Swarm Optimization), GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), ParaSol (Parameter

* Department of Agricultural Engineering (Institute of Agriculture and Life Science), Gyeongsang National University

† Corresponding author

Tel.: +82-55-772-1931 Fax: +82-55-772-1939

E-mail: smkim@gnu.ac.kr

Received: January 4, 2017

Revised: April 4, 2017

Accepted: April 4, 2017

Solution), MCMC (Markov Chain Monte Carlo)의 알고리즘을 제공한다 (Abbaspour, 2008).

SWAT-CUP 프로그램의 국내 적용 사례를 살펴보면, 소양강댐 유역의 유출 자동보정을 위한 SWAT-CUP의 적용성 평가에서 GLUE, PARASOL, SUFI-2의 세가지 알고리즘을 이용하여 매개변수 보정결과를 비교한 바 있다 (Ryu et al., 2012). 섬강시험유역에서 SWAT-CUP을 이용한 SWAT 모형 매개변수 추정에서 민감도 분석결과를 토대로 7개의 매개변수를 선정하고 SUFI-2 알고리즘을 이용하여 2년간의 자료 기간에 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 (Choi, 2013). 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 (Lee and Seo, 2011). 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 (Joh et al., 2012).

본 연구에서는 SWAT 모형의 매개변수 자동보정과 불확실성 해석을 위해 개발된 SWAT-CUP 프로그램의 SUFI-2 알고리즘을 이용하여 미국 버지니아주에 위치한 Hardware 유역을 대상으로 매개변수의 보정과 검정을 실시하고 그 적용성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. SWAT 모형의 개요

SWAT 모형은 복합토지이용유역에서 다양한 토양과 토지 이용 조건에서 토지이용관리에 따른 수문, 영양물질, 유사에 대한 영향을 분석하기 위한 목적으로 개발되었다. 이를 위해 물리적 기반으로 쉽게 이용할 수 있는 자료를 이용하여 계산이 효율적이고 장기간의 효과를 분석할 수 있도록 만들어졌다. 모형에 대한 자세한 내용은 SWAT 모형에 대한 이론적인 기술과 입출력 자료 등에 대한 설명은 사용자 매뉴얼에 수록되어 있다 (Neitsch et al., 2011; Arnold et al., 2011). SWAT 모형은 현재 다양한 분야에서 광범위하게 적용되고 있다 (Hunink et al., 2011).

SWAT 모형은 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준 분포형 장기-강우유출모형으로서 4가지의 부모형 (sub-model)으로 구성되어 있다. 즉 수문 부모형, 토양유실 부모형, 영양물질 부모형, 하도추적 부모형으로 구분된다. 이 중에서 수문 부모형은 저류방정식에 의해 일 단위로 물수지를 산정하며,

차단, 지표면 유출, 중간유출, 침투, 기저유출, 수로손실, 증발산 등으로 구성되어 있다. SWAT 모형에서 일별 지표면 유출량은 SCS방법을 이용하여 산정하며, 측방유출은 Kinematic Storage Model을 이용하고 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 또한 SWAT은 지하수를 두개의 대수층으로 구분하였다. 즉 유역의 하천에 회귀수를 공급하는 얇은 비피압 대수층과 유역 밖의 하천에 대한 회귀수에 기여하는 깊은 피압 대수층으로 나누어 물수지에 의해 계산된다. 모형에서는 잠재 증발산을 산정하기 위하여 Hargreaves, Priestley-Taylor, Penman-Monteith 방법을 제공한다 (Arnold et al., 2011).

SWAT모형에서 토지부분의 수문순환을 정확히 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수, 지하수 등에 대한 모의를 각 수문반응단위 (HRU, Hydrologic Response Unit) 별로 계산한다. 유출량은 각각의 HRU에 대해 독립적으로 계산되어지며, 하도추적을 통해 하루 최종 출구지점에서 유출량을 다음의 식 (1)로부터 산정할 수 있다.

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

여기서 SW_t 는 i 일의 최종 토양수분량 (mm), SW_0 는 i 일의 초기 토양수분량 (mm), R_{day} 는 i 일의 강우량 (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. SWAT-CUP 프로그램 개요

SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Program)은 SWAT 모형의 매개변수 자동보정과 불확실성을 해석하기 위한 프로그램으로 현재 SWAT-CUP 2012 버전이 개발되어 무료로 제공되고 있으며, 스위스의 Eawag 연구소에서 개발되었다 (Abbaspour, 2008). 이 프로그램은 SWAT 모형의 민감도 분석, 보정, 검정, 불확실성 해석을 위한 것으로 SUFI-2, PSO, GLUE, ParaSol, MCMC 등 5가지 알고리즘 중 하나를 선택할 수 있으며, 선택된 알고리즘을 이용하여 지정된 매개변수의 범위내에서 상대적 (relative), 절대적 (absolute), 교환적 (replace)인 매개변수 변경방법을 이용하여 반복적으로 보정을 수행하여 최적의 매개변수를 도출한다 (Fig. 1). 본 연구에서는 SUFI-2 알고리즘을 사용하였다.

SWAT-CUP은 매개변수의 보정을 위한 11개의 목적함수를 제공하고 있으며, 본 연구에서는 목적함수로 Nash-Sutcliffe (1970)의 효율성 지수를 이용하였으며 다음의 식 (2)와 같다.

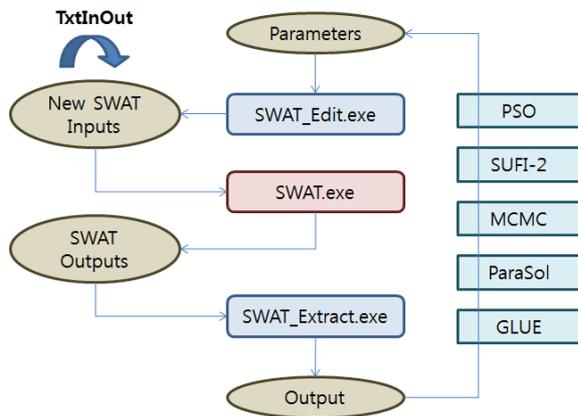


Fig. 1 A schematic of the linkage between SWAT and five optimization programs

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \overline{Q_m})^2} \quad (2)$$

여기서, Q_m 는 실측 유량(m^3/s), Q_s 모의 유량 (m^3/s)을 나타내는 인자이며, $\overline{Q_m}$ 는 실측 평균 유량값(m^3/s)을 나타낸다.

3. 대상유역

본 연구에서는 기존에 오염총량관리 대상유역에 포함되어

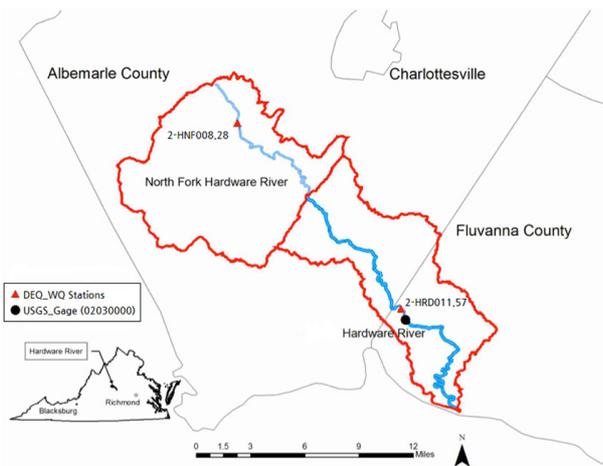


Fig. 2 Hardware watershed locations and monitoring stations

Table 1 Landuse of study watershed

Hardware	Landuse							Total
	Water	Residential	Barren	Forest	Wetlands	Pasture	Cropland	
Area (km^2)	1.52	2.93	3.63	261.43	1.46	82.72	2.46	356.15
Percent of Area	0.4	0.8	1.0	73.4	0.4	23.2	0.7	100.0

오염총량관리 프로그램을 개발한 바 있는 미국 버지니아주에 위치한 Hardware 유역을 대상유역으로 하였다. Hardware 유역은 James 강의 지류이며, James 강은 다시 Chesapeake Bay로 흘러들어간다. 이 유역은 2002년부터 대장균에 대한 미국의 오염총량관리 대상유역으로 지정되었으며, 2007년 오염총량관리를 위한 저감대책이 마련되었다(VADEQ, 2007). Hardware 유역은 North Fork Hardware 유역과 Lower Hardware 유역으로 나누어져 있으며, 각각 20개와 24개의 소유역으로 구분되어 있다. 소유역은 하천망, 토지이용 분포, 모니터링 지점 등을 고려하여 구분하였다. 다음의 Fig. 2는 대상유역의 위치와 주하천, 모니터링 지점 등을 보여주고 있다.

4. 입력자료 구축

대상유역의 기상자료는 미국기상정보센터(National Climatic Data Center, NCDC)의 협력기상관측지점(Cooperative Weather Station)으로 운영되고 있는 Breomo Bluff(COOPID: 440993)의 자료를 이용하였으며, 이 관측지점은 대상유역으로부터 남동쪽으로 10.4 km 떨어져 있다. 관측지점의 결측자료는 인근에 위치한 미국기상정보센터의 자료를 이용하여 보완하였다. 관측지점의 1971년부터 2000년까지 30년간의 연평균 강수량은 1,094 mm였으며, 연강수량의 53%는 작물생육기간인 5월부터 10월까지 발생했으며, 일평균기온은 13.2 °C였다. 유량자료는 미국지질조사국(USGS)에서 운영하는 Hardware 유역 내에 위치한 Scottsville(02030000) 지점의 일평균 유량 자료를 이용하였으며, USGS 홈페이지의 자료를 다운로드하여 이용하였다(USGS, 2005).

ArcGIS 10.2를 이용하여 지형도, 하천망도, 토양도, 토지이용도 등의 GIS 자료를 구축하였다(Fig. 3). 지형자료는 USGS의 1:24,000 DEM 자료를 이용하였으며, 하천망은 미국통계국(US Census)의 TIGER(Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing) 자료를 이용하였다. 토양자료는 미국 자연자원보전국(NRCS)의 STATSGO2(State Soil Geographic) 자료를 이용하였다. 대상유역의 주된 수문학적 토양그룹은 중간에서 낮은 유출율을 보였고, 토지이용의 경우 아래의 Table 1에서 보는 바와 같이 산림(forest)이 73.4%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 초지(pasture)가 23.2%로 높은 비중을 보였으며 경작지(cropland)와 주거지(residential)

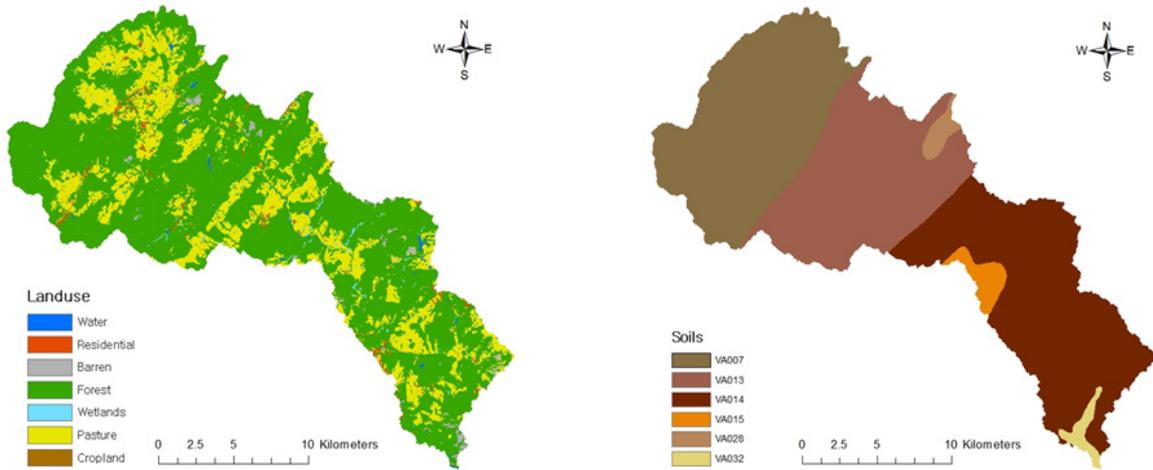


Fig. 3 Landuse (left) and soil map (right) for the Hardware watershed

의 등은 1 % 미만의 낮은 비율을 차지하고 있다.

5. 실측 수문자료

SWAT 모형의 보정을 위해 1990년부터 1994년까지 5년간의 자료를 이용하였다. 보정기간 동안 발생한 시험유역의 연평균 강수량은 1,072.1 mm, 연평균 유출량은 447.8 mm로 연

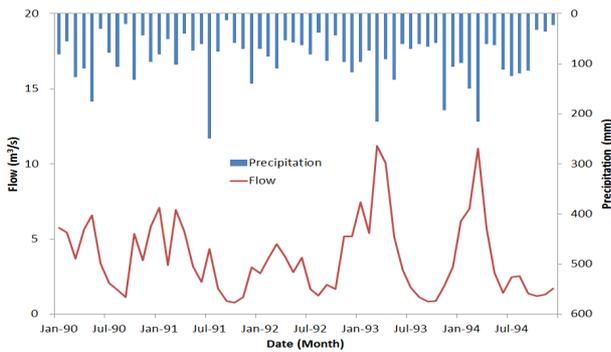


Fig. 4 Monthly precipitation and flow data for calibration period

Table 2 Yearly precipitation, flow, and runoff ratio for calibration period

Year	Precipitation (mm)	Flow (cms)	Flow (mm)	Runoff ratio
1990	1,056.6	1,518	437.5	0.414
1991	1,016.0	1,559	449.4	0.442
1992	910.6	1,498	431.7	0.474
1993	1,226.8	1,599	460.8	0.376
1994	1,150.6	1,595	459.7	0.399
Mean	1,072.1	1,554	447.8	0.421

평균 유출율은 42.1 %였으며 연도별 유출율은 37.6 %~47.6 %의 범위를 보였다 (Table 2). 다음의 Fig. 4는 월별 강수량과 유출량의 관계를 보여주고 있으며, 대체로 강수량이 높을 때 유출량도 상승하는 경향을 보이고 있으나, 1991년 7월의 경우 월별 강수량은 249 mm로 비교적 많은 강우가 발생했으나, 유출량은 134 m³/s (38.6 mm)로 상대적으로 낮은 값을 보였다. 이처럼 실측자료의 강우-유출관계에서 특이한 값이 발생하면 매개변수의 보정에서 오차가 커지는 원인이 된다.

모형의 검정을 위해 1997년부터 2005년까지 8년간의 자료를 이용하였다. 연평균 강수량은 1,042 mm, 연평균 유출량은 312.9.8 mm로 연평균 유출율은 28.8 %로 보정기간에 비해 비교적 낮은 값을 보였으며 연도별 유출율은 9.9 %~45.3 %의 범위를 보였다 (Table 3). 다음의 Fig. 5는 월별 강수량과 유출량의 관계를 보여주고 있으며, 1999년부터 2002년까지는 비교적 낮은 유출량을 보여주고 있다.

Table 3 Yearly precipitation, flow, and runoff ratio for validation period

Year	Precipitation (mm)	Flow (cms)	Flow (mm)	Runoff ratio
1997	975.4	1,148	330.7	0.339
1998	1,066.8	1,676	483.1	0.453
1999	950.0	749	216.0	0.227
2000	919.5	751	216.5	0.235
2001	883.9	502	144.7	0.164
2002	1,008.4	347	100.0	0.099
2003	1,452.9	2,251	648.7	0.446
2004	1,079.5	1,261	363.3	0.337
Mean	1,042.0	1,086	312.9	0.288

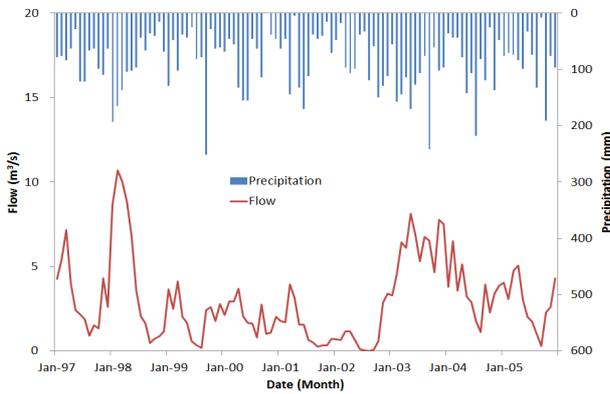


Fig. 5 Monthly precipitation and flow data for validation period

III. 결과 및 고찰

1. 수문매개변수 선정

SWAT-CUP을 실행한 후 SWAT 모형의 구동하면 생성되는 TxInOut 디렉토리의 위치를 선택하면 SWAT 모형에서 구축한 입력자료와 모형의 구동결과를 한번에 불러올 수 있다. 매개변수의 보정을 위한 실측자료는 하천유량 (.rch)를 활성화하였으며, 매개변수의 보정을 위해 이용한 매개변수는 van Griensven et al. (2006)의 연구결과에서 제시한 가장 민감한 매개변수 10개를 포함한 11개의 매개변수를 선정하였으며, Yang et al. (2007) 등의 연구결과를 참고하여 매개변수 보정 방법과 매개변수의 범위를 설정하였다 (Table 4). 매개변수

의 초기치는 SWAT 모형의 입력자료 구축후 TablesIn 디렉토리의 입력자료 데이터베이스 파일에서 각 매개변수가 포함되어 있는 테이블의 값을 이용하여 작성하였다.

2. 수문매개변수 보정

SWAT-CUP에서 매개변수의 불확실성은 95%의 확률분포로 표현되며, 이 값은 매개변수 불확실성을 전파하여 생성된 출력 변수의 누적 분포의 2.5% 및 97.5% 수준에서 계산되며. 이를 95% 예측 불확실도 (95PPU)라 한다. P-factor는 실측값이 95PPU에 포함되는 비율을 나타내며, 0~1의 범위를 가지고 1에 가까울수록 모의결과가 우수한 것으로 판단한다. R-factor는 95PPU 범위의 두께를 나타내며, R-factor가 커질수록 높은 P-factor를 얻을 수 있다. SWAT-CUP 개발자가 발표한 논문에 따르면, 유량의 경우 P-factor가 0.7 이상이면 R-factor가 1.5 보다 작으면 만족할 만한 값이라고 본다 (Abbaspour et al., 2015).

SWAT-CUP을 이용한 수문매개변수를 보정하기 위하여 Table 4에서 선정한 매개변수를 순차적으로 이용하여 1000회 반복으로 보정을 수행하였다. 보정에 이용된 매개변수는 4개부터 시작하여 1개씩 순차적으로 증가시켰으며, 적용된 매개변수에 따른 보정결과는 다음의 Table 5와 같다.

SWAT-CUP의 초기설정인 4개의 매개변수 (CN2, ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN)를 적용한 결과, P-factor는 0.72, R-factor는 1.43이었고, 모의유출량의 평균은 3.08 m³/s였으며, 보정기간(1990년~1994년) 동안의 실측유출량은 3.74 m³/s

Table 4 Selected most sensitive model parameters and their prior distributions (van Griensven et al., 2006; Yang et al., 2007)

Aggregate parameters ^a	Name and meaning of underlying SWATparameter	Initial parameter range	Prior distribution of aggregate parameter ^b
r_CN2,mgt	Curve number	55-77	U[-0.5, 0.4]
v_ALPHA_BF,gw	Base flow alpha factor (1/day)	0.048	U[0, 1]
v_GW_DELAY,gw	Groundwater delay time (days)	31	U[30, 450]
v_GWQMN,gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm H ₂ O)	1000	U[0, 5000]
v_ESCO,hru	Soil evaporation compensation factor	0.95	U[0, 1]
r_SOL_AWC,sol	Soil available water capacity (mm H ₂ O/mm soil)	0.01-0.19	U[-0.5, 0.5]
v_GW_REVAP,gw	Groundwater "revap" coefficient	0.02	U[0.02, 0.2]
v_RCHRG_DP,gw	Deep aquifer percolation fraction	0.05	U[0, 1]
v_SURLAG,bsn	Surface runoff lag coefficient [days]	4	U[0, 10]
r_SOL_K,sol	Soil hydraulic conductivity (mm/h)	0.71-650	U[-0.8, 0.8]
v_CH_K2,rte	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium (mm/h)	0	U[0, 150]

^av_ means the existing parameter value is to be replaced by a given value, a_ means a given value is added to the existing parameter value, and r_ means an existing parameter value is multiplied by (1+a given value).

^bU[x, y] represents the uniform distribution over the interval [x, y] for the given aggregate parameter.

였다. 매개변수를 하나씩 추가시키면서 11개까지 매개변수를 적용하여 모의한 결과를 정리한 결과는 다음의 Table 5와 같다. 유출량의 관점에서 보면 매개변수를 6개, 7개를 적용한 경우 가장 실측치와 근접한 결과를 보였으며, P-factor의 관점에서 보면 매개변수를 10개 적용한 경우 0.85로 가장 높은 값을 보였다. NS와 R²의 값은 매개변수를 10개, 11개 적용한 경우에 가장 높은 값을 보였다. R-factor의 관점에서 보면 매개변수를 4개, 5개 적용한 경우에만 개발자가 추천한 범위인 1.5 이하의 값을 보였다. 본 연구에서는 P-factor, R-factor, R², NS, 실측유출량 등을 고려하여 10개의 매개변수를 적용한 시나리오를 최상의 매개변수 보정결과로 채택하였다. Table 6은 매개변수 보정에 따른 매개변수 보정치와 각각의 매개변수에 대해 새롭게 제시된 매개변수의 범위를 보여주고 있다. Fig. 6은 보정된 결과에 대해 실측치와 모의치를 비교한 결과를 95PPU 그래프와 함께 보여주고 있다. 앞서 살펴본 Fig. 4의 실측자료에 대한 강우-유출 관계에서 1991년 7월의 경우 높은 월별 강수량에 비해 낮은 유출량을 보였으며, 이로 인

해 전체적인 매개변수의 보정에서 R-factor가 다소 높은 값을 보였고, R², NS 값은 각각 0.51과 0.49로 다소 낮은 경향을 보였다.

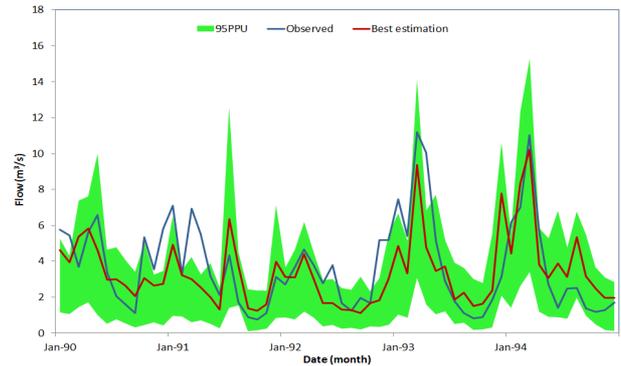


Fig. 6 Comparison between observed and best estimation along with 95PPU (shaded area) derived by SUFI-2 for the calibration period

Table 5 Calibration results according to the adjusted parameter numbers

No of parameters	Added Parameter	P-factor	R-factor	R ²	NS	Mean* (m ³ /s)	STD
4	CN2 ALPHA_BF GW_DELAY GWQMN	0.72	1.43	0.49	0.42	3.08	1.77
5	ESCO	0.72	1.43	0.49	0.42	3.08	1.77
6	SOL_AWC	0.78	1.7	0.45	0.44	3.68	1.86
7	GW_REVAP	0.78	1.71	0.45	0.44	3.68	1.86
8	RCHRG_DP	0.83	1.87	0.47	0.44	3.41	2.02
9	SURLAG	0.83	1.87	0.47	0.44	3.41	2.02
10	SOL_K	0.85	1.76	0.51	0.49	3.41	1.94
11	CH_K2	0.83	1.81	0.51	0.49	3.42	1.91

*Observed mean: 3.74

Table 6 Fitted value of calibrated parameters and suggested new minimum and maximum ranges

Parameter_Name	Fitted_Value	Min_value	Max_value	New_Min	New_Max
1:R_CN2,mgt	-0.11	-0.5	0.4	-0.36	0.15
2:V_ALPHA_BF,gw	0.2	0	1	-0.19	0.6
3:V_GW_DELAY,gw	445.17	30	450	237.57	652.77
4:V_GWQMN,gw	757.5	0	5000	-1363.93	2878.93
5:V_ESCO,bsn	0.32	0	1	-0.02	0.66
6:R_SOL_AWC,sol	-0.34	-0.5	0.5	-0.76	0.08
7:V_GW_REVAP,gw	0.06	0.02	0.2	-0.01	0.13
8:V_RCHRG_DP,gw	0.08	0	1	-0.38	0.54
9:V_SURLAG,bsn	4.83	0	10	2.24	7.41
10:R_SOL_K,sol	0.7	-0.8	0.8	-0.05	1.45

3. 수문매개변수 검증

보정된 매개변수를 이용하여 1997년부터 2005년까지 8년간의 자료를 이용하여 모형의 검정을 수행하였다. 매개변수 보정결과 얻어진 Table 6의 매개변수의 최소치와 최대치를 입력하여 매개변수 보정에서와 같이 1000회 반복하여 SWAT-CUP을 구동하였다. 매개변수 검증결과는 P-factor는 0.78, R-factor는 1.60이었고, 모의유출량의 평균은 2.60 m³/s이었으며, 검증기간(1997년~2005년) 동안의 실측유출량은 2.97 m³/s이었다. 검증기간에 대한 R²는 0.60, NS는 0.57로 모의되었다. 다음의 Fig. 7은 매개변수 검증기간에 대한 실측치와 모의치를 비교한 결과를 95PPU 그래프와 함께 보여주고 있다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 오염총량관리 대상유역에 포함되어 오염총량관리 프로그램을 개발한 바 있는 미국 버지니아주에 위치한 Hardware 유역을 대상유역으로 SWAT-CUP 프로그램을 이용하여 SWAT 모형의 수문매개변수를 보정하고 검증하였다.

SWAT 모형의 구동을 위한 지형도, 하천망도, 토양도, 토지이용도 등은 ArcGIS 10.2를 이용하여 구축하였고, 기상자료는 대상유역으로부터 남동쪽으로 10.4 km 떨어져 있는 Bremono Bluff 지점의 자료를 이용하였으며, 유량자료는 대상 유역 내에 위치한 Scottsville 지점의 일평균 유량 자료를 이용하였다. SWAT 모형의 보정을 위해 1990년부터 1994년까지 5년간의 자료를, 모형의 검정을 위해 1997년부터 2005년까지 8년간의 자료를 이용하였다.

SWAT-CUP의 SUFI-2 모듈을 이용하여 이용한 수문매개변수를 보정하기 위하여 기존 연구결과에서 제시된 민감도가

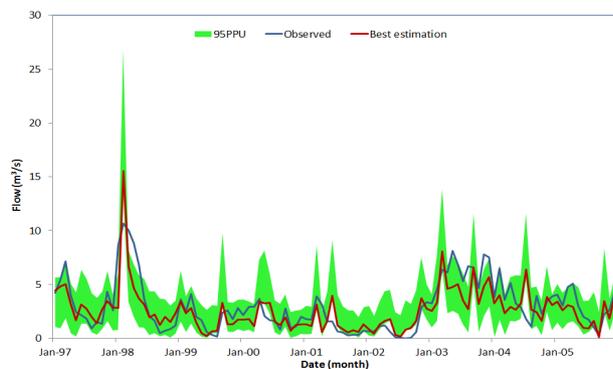


Fig. 7 Comparison between observed and best estimation along with 95PPU (shaded area) derived by SUFI-2 for the validation period

높은 매개변수를 4개부터 11개까지 1개씩 순차적으로 증가 시키며 1000회 반복으로 보정을 수행한 결과, 유출량의 관점에서 보면 매개변수를 6개, 7개를 적용한 경우 가장 실측치와 근접한 결과를 보였으며, 본 연구에서는 P-factor, R-factor, R², NS, 실측유출량 등을 고려하여 10개의 매개변수를 적용한 시나리오를 최상의 매개변수 보정결과로 채택하였다. 선정된 매개변수 조합에 의한 보정결과, P-factor는 0.85, R-factor는 1.76이었고, 모의유출량의 평균은 3.41 m³/s이었으며, 보정기간의 실측유출량은 3.74 m³/s이었다. 보정기간에 대한 R²는 0.51, NS는 0.49로 모의되었다. 매개변수 보정결과 제시된 매개변수의 최대치와 최소치를 적용하여 모형을 검증한 결과, P-factor는 0.78, R-factor는 1.60이었고, 모의유출량의 평균은 2.60 m³/s이었으며, 검증기간의 실측유출량은 2.97 m³/s이었다. 검증기간에 대한 R²는 0.60, NS는 0.57로 모의되었다.

매개변수 보정기간에 비해 검증기간에 대한 모의결과에서 R²와 NS 값이 보다 양호한 결과를 보이는 데, 이는 보정기간의 강우-유출 관계에서 1991년 7월의 경우 높은 월별 강수량에 비해 낮은 유출량을 보였기 때문으로, 매개변수의 보정결과에 실측자료의 강우-유출 관계가 중요한 변수가 됨을 알 수 있다. 이처럼 실측자료의 강우-유출관계에서 특이한 값이 발생하면 매개변수의 보정에서 오차가 커지는 원인이 된다. 본 연구에서는 매개변수의 보정을 통해 선정된 10개의 매개변수에 대한 NS는 0.49로 0.5보다는 작으나 P, R-factor를 고려할 때 적용성이 있다고 판단하였다. 본 연구의 시험유역은 유역면적이 356.15 km²로 비교적 넓고, 산림면적이 넓은 데 반해 강우관측지점이 한군데로 실측 강우-유출 자료에 오차가 있는 것으로 보인다.

SWAT-CUP 구동을 위한 실측자료 구축 등은 자동으로 수행되지 않기 때문에 사용자가 매뉴얼에 따라 입력해야 하며, 매개변수의 선택과 범위설정, 최적화 모듈 선택 등에 대한 사용자의 판단이 필요하다. 입력자료 구축과 설정이 완료되면, 대상 유역에 대한 빠른 매개변수 보정 결과를 보여주지만, 사용자의 수문모형과 보정에 대한 전문적인 지식이 동반되어야 보다 양호한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 향후 다양한 토지이용과 유역특성을 가진 유역을 대상으로 SWAT-CUP 프로그램의 적용성을 평가해 보다 신뢰성 있는 수문매개변수의 보정방법을 구축할 필요가 있을 것으로 생각된다.

사 사

This Work was Supported by Development Fund Foundation, Gyeongsang National University, 2015.

REFERENCES

1. Abbaspour, K. C., 2008. SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Program – A User Manual. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modeling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland.
2. Abbaspour, K. C., E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang, and B. Kløve, 2015. 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.
3. Arnold, J. G., 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, 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55(4): 1491-1508.
4. Arnold, J. G., J. R. Kiriny, R. Srinivasan, J. R., Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, 2011. Soil and Water Assessment Tool – Input/Output file documentation –version 2009, Texas Water Resources Institute, College Station, Technical Report no. 365.
5. Boyle, D. P., H. V. Gupta, and S. Sorooshian, 2000. Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research* 36(12): 3663-3674.
6. 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* 33(2): 529-536 (in Korean).
7. Hunink, W., P. Terink, H. Droogers, J. Reuter, and J. Huting, 2011. Towards a Proof-of-Concept of Green Water Credits, for the Sebou Basin, Morocco. Wageningen, FutureWater, Report FutureWater 99.
8. Joh, H. K., J. Y. Park, C. H. Jang, and S. J. Kim, 2012. 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).
9. Lee, E. H. and D. I. Seo, 2011. Flow calibration and validation of Daechung lake watershed, Korea using SWAT-CUP. *Journal of Korean Water Resources Association* 44(9): 711-720 (in Korean).
10. Madsen, H., 2000. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology* 235: 276-288.
11. Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
12. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiriny, and J. R. Williams, 2011. Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation, version 2009, Texas Water Resource Institute, Temple, Technical Report no. 406.
13. Ryu, J., H. Kang, J. W. Choi, D. S. Kong, D. Gum, C. H. Jang, and K. J. Lim, 2012. 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).
14. USGS, 2005. USGS water data for the nation, U.S. Geological Survey: Washington, D.C., USA.
15. VADEQ, 2007. Bacteria Total Maximum Daily Load Development for North Fork Hardware River and Hardware River; Prepared by the Biological Systems Engineering, Virginia Tech; Submitted by the Virginia Department of Environmental Quality.
16. van Griensven, A., T. Meixner, S. Grunwald, T. Bishop, and A. Diluzio, R. Srinivasan, 2006. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology* 324(1-4): 10-23.
17. Yang, J., P. Reichert, and K. C. Abbaspour, 2007. Bayesian uncertainty analysis in distributed hydrologic modeling: A case study in the Thur River basin (Switzerland). *Water Resources Research* 43: W10401.