

## 다중목적 최적화기법을 이용한 SWAT 모형 수문매개변수의 자동보정

### Auto-calibration for the SWAT Model Hydrological Parameters Using Multi-objective Optimization Method

김학관\* · 강문성\*\*† · 박승우\*\* · 최지용\*\*\* · 양희정\*\*\*\*

Kim, Hak Kwan\* · Kang, Moon Seong\*\*† · Park, Seung Woo\*\* · Choi, Ji Yong\*\*\* · Yang, Hee Jeong\*\*\*\*

#### ABSTRACT

The objective of this paper was to evaluate the auto-calibration with multi-objective optimization method to calibrate the parameters of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. The model was calibrated and validated by using nine years (1996-2004) of measured data for the 384-ha Baran reservoir subwatershed located in central Korea. Multi-objective optimization was performed for sixteen parameters related to runoff. The parameters were modified by the replacement or addition of an absolute change. The root mean square error (RMSE), relative mean absolute error (RMAE), Nash-Sutcliffe efficiency index (EI), determination coefficient ( $R^2$ ) were used to evaluate the results of calibration and validation. The statistics of RMSE, RMAE, EI, and  $R^2$  were 4.66 mm/day, 0.53 mm/day 0.86, and 0.89 for the calibration period and 3.98 mm/day, 0.51 mm/day, 0.83, and 0.84 for the validation period respectively. The statistical parameters indicated that the model provided a reasonable estimation of the runoff at the study watershed. This result was illustrated with a multi-objective optimization for the flow at an observation site within the Baran reservoir watershed.

**Keywords:** SWAT model; parameter; multi-objective auto-calibration; SCE-UA; runoff

## 1. 서 론

미농부성 농업연구소에서 개발된 분포형 매개변수 모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형 (Arnold et al., 1998)은 다양한 국가 및 분야에서 수문 및 수질을 모의하기 위한 강력한 유역 모형으로 인정받고 있다 (Gassman et al., 2007). 그러나 SWAT 모형은 많은 수의 매개변수들을 포함하고 있어 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 합리적인 매개변수의 추정기가 필요하다. 과거에는 유역 모형의 매개변수를 추

정하기 위하여 유역 및 모형에 대한 풍부한 지식과 경험이 요구되는 시행착오법을 이용한 수동보정 방법을 주로 사용하였다.

하지만, 최근에는 모형이 점차 복잡해지고 많은 매개변수를 가지는 모형이 개발됨에 따라 보정에 대한 시간 절약 및 매개변수 상관성을 고려한 다양한 최적화 알고리즘 개발을 통한 자동보정 방법이 개발되고 이용되고 있다 (Van Liew et al., 2005; van Griesven and Meixner, 2007).

자동보정 방법은 최적화 기법을 적용하여 최적의 매개변수를 자동으로 추정함으로써 주관적인 수동보정 방법과 달리 모형 사용자가 다르더라도 동일하고 객관적인 매개변수 추정하고, 많은 노동력과 시간을 절감해주는 장점을 지니고 있다. 그러나 보정된 매개변수 값이 실질적으로 유역 특성을 반영할 수 없는 가능성이 있기 때문에 보정된 매개변수에 대한 검토가 필요하다 (Lee, 2006; Van Liew et al., 2005).

Wang and Melesse (2005)는 미네소타 북서부에 위치하고 있는 Wild Rice River 유역에서 용설과 관련된 매개변수 11개를 PEST (Parameter ESTimation) 소프트웨어를 이용하여

\* 서울대학교 농업생명과학연구원

\*\* 서울대학교 조경·지역시스템공학부, 농업생명과학연구원 겸임연구원

\*\*\* 한국환경·정책평가연구원

\*\*\*\* 국립환경과학원 한강물환경연구소

† Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4582

Fax: +82-2-873-2087

E-mail address: mskang@snu.ac.kr

2008년 12월 2일 투고

2008년 12월 31일 심사완료

2008년 12월 31일 게재확정

자동보정 방법을 적용하였으며, Van Liew et al. (2007)은 다양한 기후적 특징을 지닌 미국의 5개 유역에 대해 SCE-UA (Shuffled Complex Evolution algorithm-University of Arizona) 법을 이용한 자동화 보정을 실시하였다. Bekele et al. (2007)은 다중목적 최적화 알고리즘인 NSGA-II를 이용하여 Mississippi와 Ohio 강이 합류하는 Big Creek 유역에서 일유출량 및 유사농도와 관련된 매개변수 18개를 자동보정하였고, 그 결과를 분석하였으며 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II)를 이용한 모형의 보정이 일관적이고 효율적이라고 보고하였다. Van Grienseven and Meixner (2007)은 SCE-UA 알고리즘을 이용하여 다중목적함수를 단일목적함수로 통합한 자동보정기법을 개발하고 그 효율성을 평가하기 위해 미국 Honey Creek 유역에 대하여 유출과 관련된 매개변수 11개를 보정하였으며 그 효율성을 증명하였다.

국내의 경우는 수동보정기법을 이용한 연구들이 대부분이며, Lee (2006)이 SWAT 모형의 자동보정을 위해 SCE-UA 최적화 방법을 보청천 유역에 적용하였으며, 보정자료, 보정매개변수, 통계적 오차의 선택에 따라 모형의 성능이 좌우된다고 보고한 바 있다. 그러나 다중목적 최적화기법에 관한 연구는 미진한 상태이다.

본 연구의 목적은 발안저수지 유역의 소유역인 HP#6 시험유역을 대상으로 SWAT 모형의 보정을 위하여 매개변수의 자동보정을 수행하고, 모형의 검정을 통하여 다중목적 최적화기법의 적용성을 평가하는 데 있다.

## II. 재료 및 방법

### 1. SWAT 모형

SWAT 모형은 복합 토지이용상태 및 토양 특성을 갖는 유역에서의 유출량, 유사량 및 농화학물질량을 예측하기 위해 미농무성 농업연구소에서 개발된 분포형 매개변수 모형이다 (Arnold et al., 1998). SWAT 모형은 수문, 토양유실, 영양물질, 하도 추적의 네가지 부모형 (sub-model)으로 구분되며 수문반응의 최소단위로 토지이용과 토양 특성 및 소유역을 기준으로 생성되는 수문응답단위 (hydrological response unit, HRU)를 사용한다. SWAT 모형의 구성과 유출, 유사량, 영양물질 등의 산정 알고리즘은 Neitsch et al., (2005)에서와 같다.

### 2. 다중목적 최적화 기법

Van Griensven and Meixner (2007)는 매개변수를 최적화하기 위해 단일 목적함수 (objective function)를 최소화하는 SCE-UA법을 응용하여 여러 목적함수를 통합한 전역 최적화 기준

(global optimization criterion, GOC)을 제안하였고, 이를 최소화하는 다중목적 최적화 방법을 제안하였다.

#### 가. SCE-UA법

SCE-UA법은 단체법 (simplex method) (Nelder and Mead, 1965), 제어 임의 탐색법 (controlled random search) (Price, 1987), 경쟁적 진화법 (competitive evolution) (Holland, 1975) 등 기존의 탐색기법과 집합체의 혼합 (complex shuffling)이라는 새로운 개념을 적용한 전역탐색법 (global search method)이다 (Duan et al., 1992). SCE-UA법은 자연진화의 과정을 최적화 탐색과정에 도입한 것으로, 첫 단계에서 p개의 매개변수에 대한 적합 매개변수 공간으로부터 무작위 표본추출에 의해 초기 모집단 (population)을 구성한다. 이 모집단은 몇 개의 집합체 (complex)로 나누어지고, 한 개의 집합체는 2p+1개의 개체로 구성되며 각 집합체는 단체법 (simplex) 알고리즘을 이용하여 독립적으로 진화하게 된다. 각각의 집합체에서 얻은 탐색공간에 대한 정보를 공유하기 위하여 집합체를 주기적으로 혼합 (shuffling)하여 새로운 집합체를 형성하게 된다. SCE-UA법은 이러한 경쟁적 진화와 혼합을 이용한 집합체의 재생산을 통하여 모집단에 포함된 정보가 다음 세대로 전달되도록 하며, 이는 진화의 과정에서 탐색공간에 대한 정보가 퇴보되는 것을 방지한다. 이러한 특징은 SCE-UA법이 광범위한 문제의 영역에서 전역 최적해를 효과적으로 탐색할 수 있도록 한다.

#### 나. 목적함수

본 연구에서 사용된 목적함수는 잔차 제곱의 합 (sum of the squares of the residuals, SSQ)과 실측값과 모의값에 대한 각각의 순위별로 정렬한 값에 대한 잔차 제곱의 합 (sum of the squares of the difference of the measured and simulated values after ranking, SSQR)이다. SSQ와 SSQR은 다음 식과 같이 계산된다.

$$SSQ = \sum_{i=1}^N (x_{i,measured} - x_{i,simulated})^2 \quad (1)$$

$$SSQR = \sum_{j=1}^N (x_{j,measured} - x_{j,simulated})^2 \quad (2)$$

여기서  $x_{measured}$ 와  $x_{simulated}$ 는 각각 실측치 및 모의치를 나타내며, N은 관측 자료수를 나타낸다.

#### 다. 다중목적 최적화

다중목적 최적화를 위한 여러 목적함수의 통합방법은 Bayesian

방법을 이용한다 (Van Griensven and Meixner, 2007). 잔차 (residual)가 평균 0과 분산  $\sigma^2$ 을 가지는 정규분포 (normal distribution)를 따른다고 가정하고, 매개변수군 (parameter set)의 우도 (likelihood)가 관측값  $y_{n,obs}$ 인 경우에 분산과 확률은 다음 식과 같이 계산한다.

$$\sigma^2 = \frac{SSQ_{MIN}}{N} \quad (3)$$

$$P(\theta|y_{n,obs}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(y_{n,sim} - y_{n,obs})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

여기서  $SSQ_{MIN}$ 은 최적해를 위한 잔차제곱의 합,  $y_{n,obs}$ 는 모의치,  $y_{n,sim}$ 는 관측치이다.

따라서 N개의 관측 시계열 자료 ( $Y_{obs}$ )에 대한 확률은 다음 식과 같이 계산한다.

$$P(\theta|Y_{obs}) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi\sigma^2})^N} \prod_{n=1}^N \exp\left[-\frac{(y_{n,sim} - y_{n,obs})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

이때 매개변수군  $\theta$ 에 대한 확률은 다음과 식과 같다.

$$P(\theta|Y_{obs}) \propto \exp\left[-\frac{SSQ_1}{2\sigma_1^2}\right] \quad (6)$$

Bayes의 이론에 의하면, 결합확률 (joint probability)은 각 독립확률을 곱하여 계산하므로 M개의 독립적인 목적함수에 대한 결합확률은 다음 식과 같이 계산한다.

$$p(\theta|Y_{obs}) \propto \prod_{m=1}^M \exp\left[-\frac{SSQ_m}{2 \times \sigma_m^2}\right] \quad (7)$$

식 (7)에 식 (3)을 대입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\ln[-p(\theta|Y_{obs})] \propto \sum_{m=1}^M \frac{SSQ_m \times N_m}{SSQ_{m,min}} \quad (8)$$

여기서 GOC를 식 (9)와 같이 정의하면 식 (8)은 식(10)으로 다시 쓸 수 있다. GOC를 최소화함으로써 GOC에 대한 우도를 최적화 할 수 있다.

$$GOC = \sum_{m=1}^M \frac{SSQ_m \times N_m}{SSQ_{m,min}} \quad (9)$$

$$P(\theta|Y_{n,obs}) \propto \exp[GOC] \quad (10)$$

목적함수인 SSQ 또는 SSQR는 SEC-UA법에 의한 최적화 과정에서에 의해 갱신되며 최소화 과정을 거치게 되며 이에 따라 GOC도 매번 계산한다.

### 3. 시험구역 및 자료 구축

SWAT 모형의 매개변수의 자동보정을 위한 다중목적 최적화 기법의 적용성을 검토하기 위하여 경기도 화성시 봉담읍과 팔탄면에 위치한 발안유역의 HP#6 소유역을 시험구역으로 선정하였다 (Fig 1). HP#6 소유역의 면적은 385 ha, 유로장은 3.1 km, 유역경사가 1.5 m/km였고, 형상계수가 1.56으로 정방형의 소유역이다. 기상자료와 강우자료는 발안유역으로부터 약 10 km 떨어진 곳에 위치한 수원기상대의 자료를 이용하였다. HP#6 측점의 하천수위자료는 1996년부터 1998년 8월까지는 자기 수위계를 1998년 9월부터는 압력식 수위계를 설치하여 수위를 관측하였다. 하천 수위측점에 대한 수위-유량관계를 조사하여 유량자료를 수집하였다. 수위-유량관계는 하천단면 변화를 고려하여 기간별로 달리 산정하였으며, Table 1은 산정 결과를 보여주고 있다. Table 2는 1996년부터 2004년까지 결측기간을 제외한 계측기간 동안의 수문측정결과를 보여주고 있으며, HP#6 소유역의 유출률은 44%~71%의 범위를 보였다.

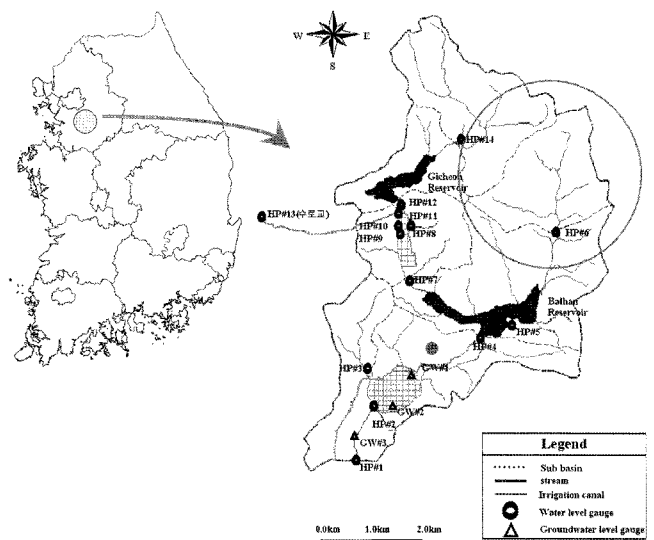
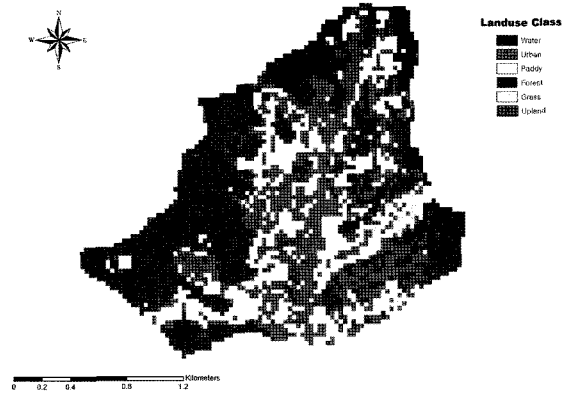


Fig. 1 Monitoring networks of Baran study watershed

시험유역의 기본도는 1/5,000 NGIS (national geographical information system)수치지도과, 농촌진흥청의 1/25,000 정밀 토양도를 이용하였다. 토지피복도는 2000년 3월 20일에 촬영된 Path 116/Row 34 Landsat-5 TM 영상을 이용하여 토양

**Table 1 Stage-discharge relationships for the HP#6 subwatershed gauging station**

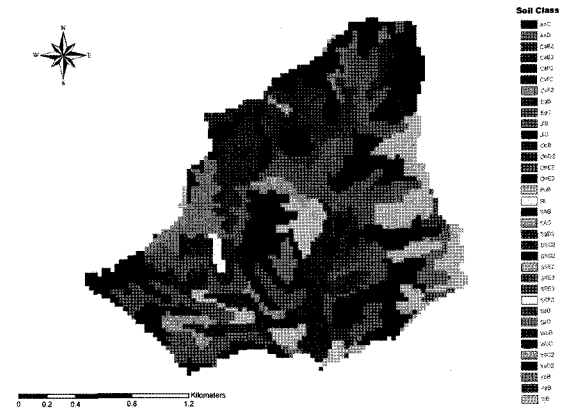
Period	Rating Curve	R <sup>2</sup>
1996~1998	Q= 12.475×h <sup>4.187</sup>	0.898
1999~2000	Q= 13.356×h <sup>3.063</sup>	0.979
2001~2002	Q= 19.867×h <sup>4.181</sup>	0.972
2003~2004	Q= 10.834×h <sup>2.950</sup>	0.983



**Fig. 2 Landuse map of the study site**

**Table 2 Ration of runoff to rainfall at the HP#6 subwatershed**

Year	Observed span (day)	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Runoff ratio
1996	274	780	345	0.44
1997	348	1204	788	0.65
1998	273	955	564	0.59
1999	299	1254	846	0.56
2000	151	1237	784	0.62
2001	160	866	475	0.55
2002	298	1191	657	0.55
2003	238	1117	677	0.61
2004	312	1155	820	0.71



**Fig. 3 Soil map of the study site**

**Table 3 Parameters and parameter ranges used in auto-calibration**

Parameter	Description	Min	Max	Units
Parameters governing surface water response				
CN2	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II	30	100	none
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0	1	none
SOL_AWC	Available soil water capacity of soil layer	0	1	mm/mm
Parameters governing subsurface water response				
GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.02	0.2	none
REVAPMIN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur	0	500	mm
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	0	5000	mm
GW_DELAY	Groundwater delay time	0	50	days
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor or recession constant	0	1	days
RCHRG_DP	Deep aquifer percolation fraction	0	1	none
Parameters governing basin reponse				
SURLAG	Surface runoff lag coefficient	0	24	none
CHL2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	0.025	150	mm/hr
TIMP	Snow pack temperature lag factor	0.01	1	none
SFTMP	Snowfall temperature	-5	5	°C
SMTMP	Snow melt base temperature	-5	5	°C
SMFMX	Melt factor for snow on June 21	0	10	mm/°C/day
SMFMN	Melt factor for snow on December 21	0	10	mm/°C/day

명도지수 (soil brightness index), 녹색식생지수 (green vegetation index), 그리고 토양수분지수 (soil moisture index) 등의 식생지수를 사용하여 최대우도법에 의한 토지피복분류를 수행한 결과를 이용하였다. 토지피복 분류는 산림 (forest), 초지 (grass), 논 (paddy), 밭 (upland), 주거지 (urban), 물 (water) 등의 여섯 가지로 분류하였으며, 산림이 전체 유역 면적의 45%를 차지하고 있었으며, 논이 26%, 주거지가 23%, 밭이 4%, 초지가 2%인 것으로 분석되었다. 토양도를 구축한 결과 시험유역의 토양은 35개로 분류되었다. 주제도는 기본도로부터 소유역 경계도, 수계망도, 경사도 등을 구축하였고, 1/25,000 정밀토양도로부터 수문학적토양군, 토성, 토양침식성인자도 등을 구축하였다. 도형자료는 분포형 수질모형의 구동을 위해 벡터 맵으로부터 격자형 자료인 그리드 (grid) 자료로 변환하였으며, 위성영상의 분해력인 30 m × 30 m의 그리드 자료를 이용하였다. Fig. 2와 3은 구축된 토지피복도와 토양도를 보여주고 있다.

#### 4. 보정 매개변수

자동화보정 기법을 이용하여 보정할 매개변수는 SWAT 모형의 유출에 비교적 큰 영향을 주는 16개의 매개변수를 선택하였다. 선택된 각 매개변수에 대한 설명과 범위는 Table 3에서와 같다. 각각의 매개변수들 중에서 CN2, ESCO, SOL\_AWC는 지표수 흐름 모의, GW\_REVAP, REVAPMIN, GWQMN, GW-DELAY, ALPHA\_BF, RCHRG\_DP는 지표하 흐름, SURLAG, CH\_K2, T1MP, SFTMP, SMTMP, SMFMX, SMFMN는 지하수 흐름 모의에 지배적인 영향을 미친다 (Van Liew et al., 2007).

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 매개변수의 보정

매개변수 자동화 보정을 위해서 1997년부터 2000까지 실측된 유출량 자료를 이용하였다. CN2와 SOL\_AWC의 경우는 구축된 매개변수 값에서 가감하는 방법으로 최적화기법을 적용하였으며, 그 이외의 매개변수에 대해서는 값을 대체하는 방법으로 매개변수를 자동보정하였다. 16개의 매개변수 자동보정 과정에서 SWAT 모형은 6,369번 수행되었으며, Table 4는 보정된 매개변수의 값을 보여주고 있다.

매개변수의 보정에 대한 평가를 위해 평균제곱근오차 (root mean square error, RMSE), 상대평균절대오차 (relative mean absolute error, RMAE), Nash-Sutcliffe 효율지수 (efficiency index, EI) (Nash and Sutcliffe, 1970), 결정계수 ( $R^2$ ) 등의 통계적인 변량을 사용하였다 (David and Gregory, 1999). 모형의 추정 오차를 평가하기 위해서 사용되는 결정계수 ( $R^2$ )는

Table 4 Parameters calibrated with the observed runoff data from 1997 to 2000

Parameter	Calibrated value	Parameter	Calibrated value
ALPHA_BF	0.02	REVAPMIN	329.14
CH_K2	147.95	SFTMP	3.9205
CN2	▽4	SMFMN	4.4438
ESCO	1	SMFMX	7.2387
GW_DELAY	21.415	SMTMP	3.2998
GW_REVAP	0.053	SOL_AWC	▽0.10
GWQMN	49.955	SURLAG	1
RCHRG_DP	0.0094	T1MP	0.8723

0.0~1.0 범위의 값을 가지며, 1.0에 가까울수록 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영한다. 그러나, 결정계수는 단지 무작위 오차만을 평가하는 것으로서 오차의 정도를 나타내지는 못한다. 따라서, 오차의 정도를 나타내기 위해 RMAE와 RMSE 등을 사용하며, RMAE는 RMSE에 비하여 오차의 크기를 더 효율적으로 나타내는 전형적인 지표로 사용된다. RMSE와 RMAE는 다음 식과 같이 계산한다 (Kang and Park, 2003; Kang et al., 2006).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_f(i) - Q_o(i)]^2} \quad (11)$$

$$RMAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_f(i) - Q_o(i)|}{M_o} \quad (12)$$

여기서,  $Q_o$ 는 실측값,  $Q_f$ 는 모의값,  $n$ 은 자료수이다.

모형의 효율을 평가하기 위해서 사용한 Nash-Sutcliffe 효율지수는 Nash and Sutcliffe (1970)에 의해 제안되었으며, 다음 식과 같이 계산한다.

$$EI = (ST - SE) / ST \quad (13)$$

$$ST = \sum_{t=1}^N (M_o - Q_o)^2 \quad (14)$$

$$SE = \sum_{t=1}^N (Q_o - Q_f)^2 \quad (15)$$

여기서,  $M_o$ 는 실측치의 평균,  $Q_o$ 는 모의치이다. 식 (14)에서 ST는 실측치의 초기 분산 (initial variation)을 나타내며, SE는 실측치와 모의치의 불일치 (index of disagreement)를 나

Table 5 Observed and simulated runoff for calibration period at the HP#6 subwatershed

Year	Rainfall (mm)	Runoff (mm)		Runoff ratio		RMSE	RMAE	EI	R <sup>2</sup>
		Observed	Simulated	Observed	Simulated				
1997	1204.0	787.9	798.7	0.65	0.66	4.66	0.53	0.86	0.89
1998	982.7	563.9	632.1	0.35	0.39				
1999	1238.4	846.2	967.5	0.56	0.64				
2000	1249.8	783.8	808.5	0.62	0.64				
Total	3,425.1	2,198	2,398.3	0.64	0.69				

Table 6 Observed and simulated runoff for verification period at the HP#6 subwatershed

Year	Rainfall (mm)	Runoff (mm)		Runoff ratio		RMSE	RMAE	EI	R <sup>2</sup>
		Observed	Simulated	Observed	Simulated				
2002	1231.7	678.3	770.9	0.55	0.63	3.98	0.51	0.83	0.84
2003	1512.8	787.2	653.0	0.52	0.43				
2004	1217.0	893.4	729.6	0.73	0.60				
Total	0	0	0	0.60	0.54				

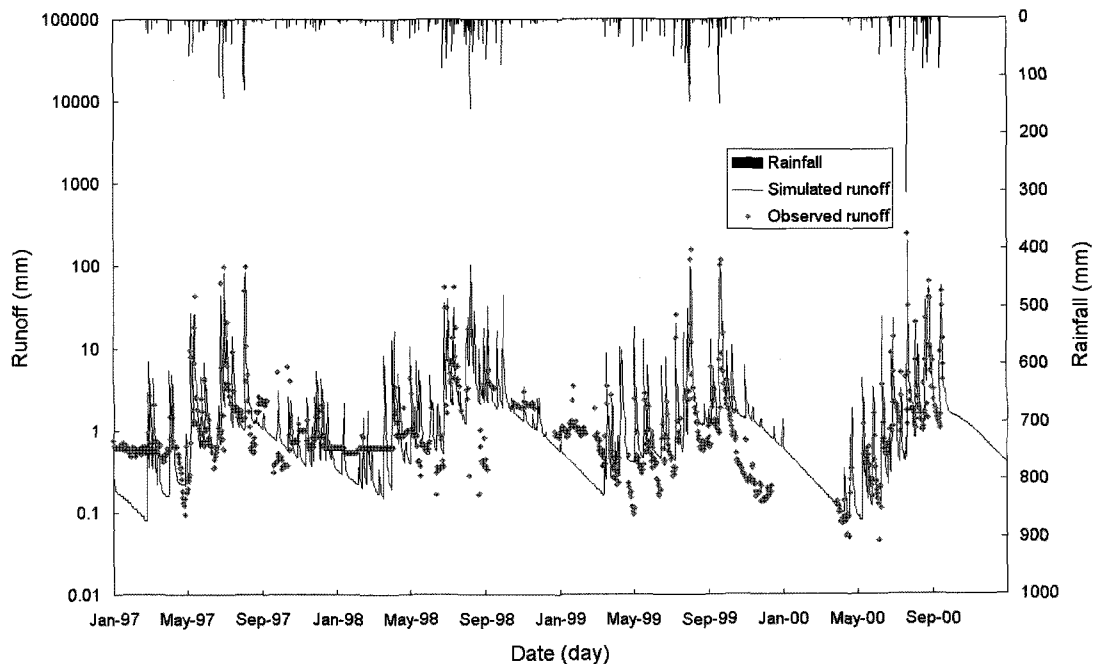


Fig. 4 Comparison of observed and simulated runoff for calibration period at the HP#6 subwatershed

타낸다. EI는 추정치와 실측치가 일치하면 1.0이며, 그 값이 0 과 1.0 사이에 있으면 추정치를 사용하는 것이 실측치의 평균 을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 계산된 EI가 0보다 작으면 모형의 추정 결과가 나쁘거나 실측 자료가 일관 성이 없음을 의미한다 (Nash and Sutcliffe, 1970; Kang and park, 2003; Kang et al., 2006). Table 5는 유출 모의 결과 에 대한 통계적인 변량을 나타내고 있다. 자동화 보정된 매개 변수를 이용한 모형의 보정 결과를 평가한 결과 RMSE는 4.66 mm/day, RMAE는 0.53 mm/day, EI는 0.86, R<sup>2</sup>는 0.89로 나

타났다. 모의 유출량은 실측 유출량의 경향을 비교적 잘 나타 내고 있으나, 전체적으로 실측 유량보다 큰 값을 보였다. Fig. 4는 자료 보정기간에 대한 유출량의 모의결과를 실측치와 비 교하여 보여주고 있으며, Fig. 6은 유출에 대한 모형의 보정 결과를 일대일로 비교하여 보여주고 있다.

### 3. 매개변수의 검정

매개변수의 검정을 위해서 2002년부터 2004까지 실측된 유

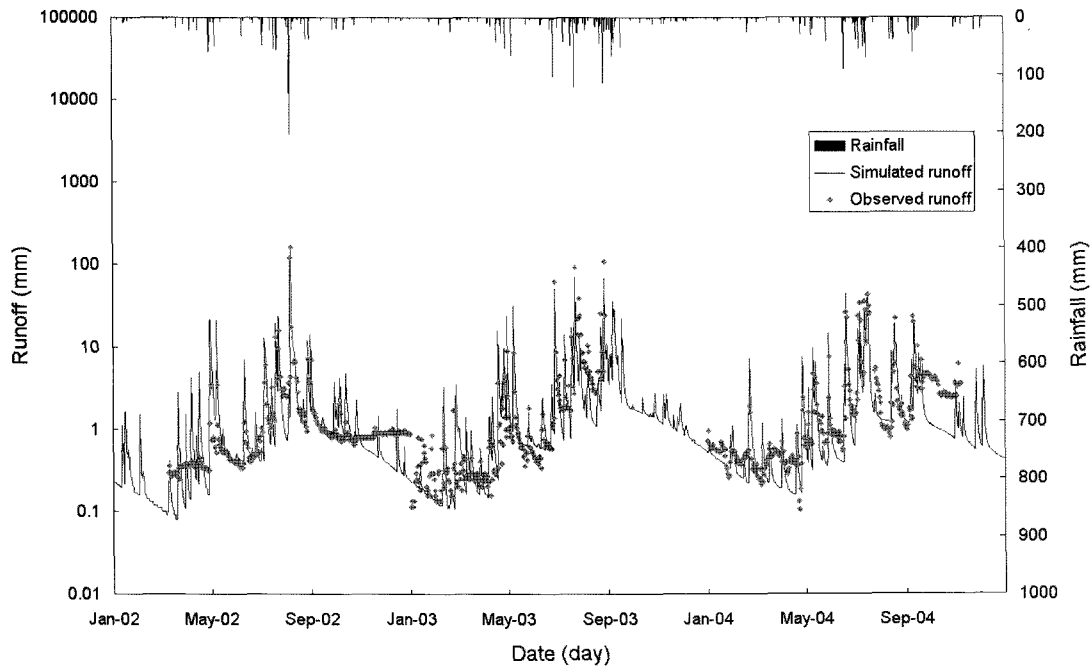


Fig. 5 Comparison of observed and simulated runoff for verification period at the HP#6 subwatershed

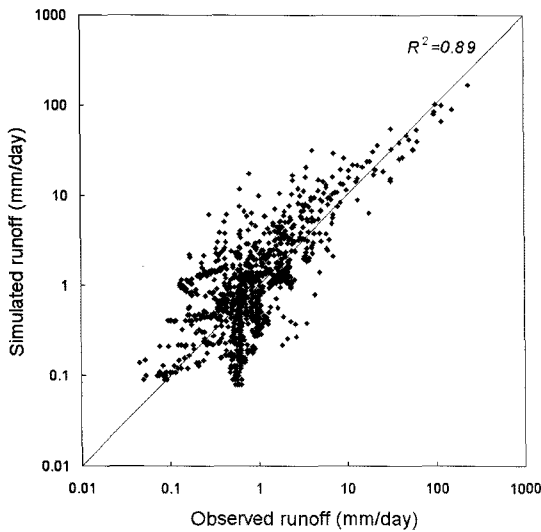


Fig. 6 Scatterplots comparing observed and simulated runoff for calibration period at the HP#6 subwatershed

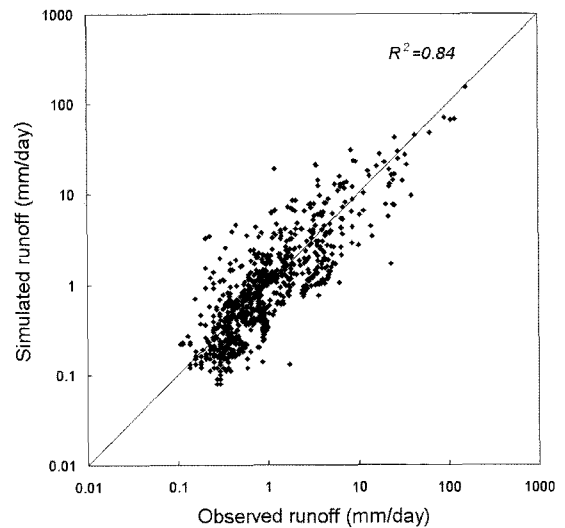


Fig. 7 Scatterplots comparing observed and simulated runoff for validation period at the HP#6 subwatershed

출량 자료를 이용하였으며, 모형의 검정에 대한 평가는 보정에 대한 평가 방법과 동일하게 RMSE, RMAE, EI,  $R^2$  등의 통계적인 변량을 사용하였다. Table 6은 모형의 검정에 대한 평가 결과를 보여주고 있다. 모형의 보정 결과를 평가한 결과 RMSE는 3.98 mm/day, RMAE는 0.51 mm/day, EI는 0.83,  $R^2$ 는 0.84로 분석되어 보정된 매개변수를 이용하여 SWAT 모형에 의해 모의된 유출량은 실측치를 잘 반영하는 것으로 분석되었다. Fig. 5는 매개변수 검정기간에 대한 유출량의 모의결과를

실측치와 비교하여 보여주고 있으며, Fig. 7은 유출에 대한 모형의 검정 결과를 일대일로 비교하여 보여주고 있다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 경기도 화성시 봉담읍과 팔탄면에 위치한 발안저수지 유역의 HP#6 시험유역을 대상으로 1996년부터 2004년까지 현재까지 수문관측 자료를 이용하여 SWAT 모형의 매

개변수의 자동보정을 위한 다중목적 최적화기법의 적용성을 검토하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 경기도 화성시 봉담읍과 팔탄면에 위치한 발안저수지 유역을 시험유역으로 선정하여 1996년부터 수문자료를 구축하였다. 시험유역의 지형자료를 구축하기 위하여 1/5,000 NGIS 자료, Landsat-5 TM 영상자료, 1/25,000 정밀토양도를 이용하였으며, 이로부터 유역특성인자 및 유출곡선번호도 등을 추출하였다.

2) 시험유역에 인접한 수원기상대 자료를 이용하여 기상자료를 구축하였으며, 1996년부터 2004년까지 결측기간을 제외한 결측기간 동안의 수문 측정결과, HP#6 소유역의 유출물은 44~71%의 범위를 보였다.

3) 자동화보정 기법을 이용하여 보정할 매개변수는 SWAT 모형의 유출에 비교적 큰 영향을 주는 16개의 매개변수를 선택하였다.

4) 1997년부터 2000년 유출량 자료와 다중목적 자동 최적화 방법을 이용하여 모형의 매개변수를 보정하였으며, 매개변수 보정 결과를 평가한 결과 RMSE는 4.66 mm/day, RMAE는 0.53 mm/day, EI는 0.86, R<sup>2</sup>는 0.89로 나타났다.

5) 2002년부터 2004년 유출량 자료를 이용하여 매개변수 검증 결과를 평가한 결과 RMSE는 3.98 mm/day, RMAE는 0.51, EI는 0.83, R<sup>2</sup>는 0.84로 분석되었다.

6) SWAT 모형의 매개변수의 자동보정을 위한 다중목적 최적화기법을 적용한 결과 실측 유출량의 경향성과 크기를 잘 반영하는 것으로 분석되어 적용성이 있는 것으로 평가되었다.

본 연구는 한강수계관리위원회의 환경기초조사사업 연구비지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams, 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment Part I: Model development. *Journal of American Water Resources Association* 34: 73-89.
2. Bekele E. G., and J. W. Nicklow, 2007. Multi-objective automatic calibration of SWAT using NAGA II. *Journal of Hydrology* 341: 165-176.
3. Gassman P. W., M. R. Reyes, C. H. Green, and J. G. Arnold, 2007. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50: 1211-1250.
4. Heathwaite, A. L., P. F. Quinn, and C. J. M. Hewett, 2005. Modelling and managing critical source areas of diffuse pollution from agricultural land using flow connectivity simulation. *Journal of Hydrology* 304: 446-461.
5. Kang, M. S., S. W. Park, J. J. Lee, and K. H. Yoo, 2006. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields. *Agricultural Water Management* 79(1): 72-92.
6. Kang, M. S., and S. W. Park, 2003. Development and application of total maximum daily loads simulation system using nonpoint source pollution Model. *J. of Korea Water Resources Association (KWRA)* 36(1): 117-128 (in Korean).
7. Lee D. H., 2006. Automatic calibration of SWAT model using LH-OAT sensitivity analysis and SCE-UA optimization method. *Journal of Korea Water Resources Association* 39: 677-690 (in Korean).
8. Legates D. R., and G. J. McCabe Jr., 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35: 233-241.
9. 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.
10. Neitsch, S. G., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams, 2005. Soil and water assessment tool theoretical documentation. Version 2005, *United States Department of Agriculture Agricultural Research Service*, Temple, Texas.
11. Van Griensven A., and T. Meixner, 2007. A global and efficient multi-objective auto-calibration and uncertainty estimation method for water quality catchment models. *Journal of Hydroinformatics* 9: 277-291.
12. Van Liew M. W., J. G. Arnold, and D. D. Bosch, 2005. Problems and potential of autocalibrating a hydrological model. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 48: 1205-1040.
13. Van Liew M. W., T. L. Veith, D. D. Bosch, and J. G. Arnold, 2007. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: A comparison on USDA-



- ARS watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering* 12: 173-189.
14. Wang X., and A. M. Melesse, 2005. Evaluation of the SWAT model's snowmelt hydrology in a northwestern Minnesota watershed. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 48: 1359-1376.