

## 소양강댐 유역의 유출 자동보정을 위한 SWAT-CUP의 적용 및 평가

류지철 · 강현우 · 최재완\* · 공동수\*\* · 금동혁 · 장춘화 · 임경재†

강원대학교

\*국립환경과학원

\*\*경기대학교

Application of SWAT-CUP for Streamflow Auto-calibration  
at Soyang-gang Dam WatershedJichul Ryu · Hyunwoo Kang · Jae Wan Choi\* · Dong Soo Kong\*\* · Donghyuk Gum ·  
Chun Hwa Jang · Kyoung Jae Lim†

Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

\*National Institute of Environmental Research

\*\*Department of Biological Sciences, Kyonggi University

(Received 16 November 2011, Revised 8 February 2012, Accepted 16 February 2012)

## Abstract

The SWAT (Soil and Water Assessment Tool) should be calibrated and validated with observed data to secure accuracy of model prediction. Recently, the SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Program for SWAT) software, which can calibrate SWAT using various algorithms, were developed to help SWAT users calibrate model efficiently. In this study, three algorithms (GLUE: Generalized Likelihood Uncertainty Estimation, PARASOL: Parameter solution, SUFI-2: Sequential Uncertainty Fitting ver. 2) in the SWAT-CUP were applied for the Soyang-gang dam watershed to evaluate these algorithms. Simulated total streamflow and 0~75% percentile streamflow were compared with observed data, respectively. The NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) and  $R^2$  (Coefficient of Determination) values were the same from three algorithms but the P-factor for confidence of calibration ranged from 0.27 to 0.81. the PARASOL shows the lowest p-factor (0.27), SUFI-2 gives the greatest P-factor (0.81) among these three algorithms. Based on calibration results, the SUFI-2 was found to be suitable for calibration in Soyang-gang dam watershed. Although the NSE and  $R^2$  values were satisfactory for total streamflow estimation, the SWAT simulated values for low flow regime were not satisfactory (negative NSE values) in this study. This is because of limitations in semi-distributed SWAT modeling structure, which cannot simulated effects of spatial locations of HRUs (Hydrologic Response Unit) within subwatersheds in SWAT. To solve this problem, a module capable of simulating groundwater/baseflow should be developed and added to the SWAT system. With this enhancement in SWAT/SWAT-CUP, the SWAT estimated streamflow values could be used in determining standard flow rate in TMDLs (Total Maximum Daily Load) application at a watershed.

**keywords** : Auto-calibration, GLUE, PARASOL, SUFI-2, SWAT-CUP

## 1. 서론

최근 국내 하천의 점오염 및 비점오염원에 의한 수질 오염이 심각하게 진행되어 오고 있으며 이는 자연 생태계에 혼란을 초래하여 인간의 생활 및 건강을 위협하고 있다(신지웅과 길경익, 2011; 이춘원 등, 2011). 이러한 문제를 해결하기 위해 여러 환경 단체 및 국가적 차원의 하천 수질 개선을 위한 다양한 노력이 진행되고 있으며 많은 연구자들이 이를 위해 컴퓨터모형을 통한 수문 및 수질 분석을 수행하고 있다(배다혜와 하성룡, 2011; 장원석 등, 2011;

Pandey et al., 2008; Ryu et al., 2011).

이와 같은 수문 및 수질 분석을 위하여 SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Arnold, 1992; Arnold et al., 1998), HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran; Bicknell et al., 2001), WEPP (Water erosion Prediction project; Flanagan and Livingston, 1995), SWMM (Storm Water Management Model; Huber and Dickinson, 1988) 등 다양한 모형이 개발되어 사용되고 있고 그 중 SWAT은 전 세계적으로 널리 사용되는 유역단위 수문 모형 중 하나이다. 미국 농무성 농업연구소에서 개발된 연속적 준분포형 모형인 SWAT은 유역 단위 모형으로 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 그리고 관리상태의 변화에 따른 크고 복잡한 유역의 유출량, 유사량 및 농업 화학물의 영향을

† To whom correspondence should be addressed.

kjlim@kangwon.ac.kr

예측할 수 있다(Arnold et al., 1998).

그러나 SWAT과 같은 유역단위 수문모형들은 유역에 대한 다양한 매개변수들을 이용하여 수문 및 수질을 예측하기 때문에 이러한 매개변수들을 유역에 최적화 하여 수문 및 수질을 보정하는 과정이 반드시 필요하며, 다양한 SWAT 적용 연구에서 모형의 정확성을 확보하기 위하여 매개변수를 이용한 검보정 과정이 수행되고 있다. SWAT 모형 내 Auto-calibration 모형에는 2가지 알고리즘(PARASOL, SUNGLASS)이 내장되어 있으나, 수문 모형 보정에 많이 사용되는 다른 알고리즘을 활용하지 못하는 제한점을 가지고 있다. 최근 SWAT auto-calibration의 한계를 극복하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다(Kang et al., 2011). 이러한 문제점을 해결하기 위하여 2007년 SWAT-CUP 프로그램이 Eawag 연구소에서 개발되었다(Abbaspour, 2007). SWAT-CUP 프로그램은 SUFI-2, PARASOL, MCMC, PSO, GLUE라는 총 5가지의 알고리즘을 이용하여 SWAT을 보정하는 Window 기반 독립형 프로그램으로, SWAT에서 고려하지 못하는 다양한 알고리즘들을 고려 할 수 있도록 SWAT 자동 보정들을 보조해 주고 사용자의 편의를 위해 조작이 간단한 window용 인터페이스로 구성되어 있다. 하지만 SWAT-CUP 프로그램 내 내장된 다양한 알고리즘들을 이용한 국내유역과 같이 유황계수가 큰 유역에 대해 SWAT-CUP 적용에 관한 평가는 아직 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 우리나라 소양강댐 유역에 SWAT 모형의 자동 보정 툴인 SWAT-CUP 프로그램의 세 가지 알고리즘을 이용하여 SWAT 모형의 유량을 자동 검보정하고, 유황별 검보정 결과를 평가하는데 있다.

## 2. 연구방법

### 2.1. SWAT-CUP의 개요

SWAT-CUP은 SWAT모형의 자동 보정을 보조하기 위한 무료 배포 컴퓨터 프로그램으로 Eawag 연구소에서 개발되었다(Abbaspour, 2007; Fig. 1).

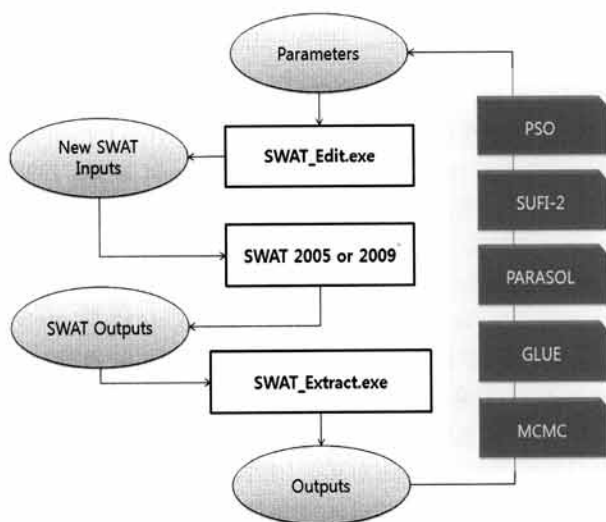


Fig. 1. Overview of SWAT-CUP (Abbaspour, 2007).

SWAT-CUP은 각 알고리즘 별 불확실성에 대한 수치를 나타내는 P-factor 지수를 제공한다. P-factor란 95% 범위의 예측 불확실성(95PPU)에 실측값이 포함되는 범위를 수치로 나타내며 0에서 1의 범위를 지니고 1에 가까울수록 예측값과 실측값이 일치함을 의미한다. 또한 P-factor가 계산될 때 사용되는 95PPU는 5%의 좋지 않은 모의를 제외하고, Latin hypercube sampling을 통한 결과 값 누적분포의 2.5%에서 97.5%사이에서 계산된다. 따라서 SWAT-CUP에서 각 알고리즘 별 R<sup>2</sup> 및 NSE지수는 비슷하게 나타날 수 있어도 P-factor의 차이에 따라 실측값과의 상관관계에 따른 신뢰도에 차이가 있을 수 있다.

SWAT-CUP프로그램의 3가지 알고리즘 중 GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)방법은 강우유출 모형의 구조적인 불확실성을 고려하기 위해 제안되었다(이효상 등, 2009; Beven and Binley, 1992). 이 알고리즘은 먼저 모형의 성능을 판단하기 위한 일반화한 우도 함수 (Generalized likelihood measure)인  $L(\theta)$ 를 정의하고, 각각의 매개변수 세트는 선정된 우도함수(likelihood measure)에 따라 반응변수(Behavioral)와 비반응변수(Non-behavioral)로 구분한다. 선정된 반응변수 세트에 대하여 우도함수의 가중치를 식 (1)과 같이 산정하여 우수한 성능을 보인 변수세트에 대한 가중치를 부여하며 N은 반응변수 세트의 개수이다.

$$w_i = \frac{L(\theta_i)}{\sum_{k=1}^N L(\theta_k)} \tag{1}$$

마지막으로 예측불확실성은 반응변수 가중치에서 누적분위로 표현된 예측 사분위로 표현된다. GLUE방법에서 우도함수는 주로 NSE가 사용되며 식 (2)와 같이 표현된다. 식 (2)에서의 n은 실측데이터의 개수이고  $y_{t_i}$ 와  $y_{t_i}^M(\theta)$ 는 실측값과 파라미터  $\theta$ 와 함께 모형에서 모의된 값,  $t_i$ 는 시간을 각각 나타내며  $\bar{y}$ 는 실측값의 평균을 나타낸다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t_i=1}^n (y_{t_i}^M(\theta) - y_{t_i})^2}{\sum_{t_i=1}^n (y_{t_i} - \bar{y})^2} \tag{2}$$

PARASOL (Parameter solution; Van Griensven and Meixner, 2006)방법은 SCE-UA 알고리즘(Duan et al., 1992)을 사용하여 매개변수들을 변환하고 목적함수(OF's: Objective functions)로 SSQ (Sum of the squares of the residuals)를 사용하여 최적의 매개변수(Best parameter)를 찾아낸다. SSQ는 식 (3)과 같이 계산되고  $Q_i$ 는 실측값,  $S_i$ 는 예측값이며 식 (4)에서와 같이 NSE가 산정될 때 이용된다.

$$SSQ = \sum_{i=1}^n (Q_i - S_i)^2 \tag{3}$$

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

식 (2)에서와 같이 NSE는 최종 매개변수를 결정하는 데에 사용되며  $\bar{Q}$ 는 실측값의 평균을 의미하고 NSE가 1에 수렴할수록 또는 SSQ의 수치가 작을수록 실측값과 예측값의 상관관계가 높아진다.

SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting ver. 2)방법의 기본 컨셉은 posterior 매개변수를 취하는 방법만 다를 뿐 GLUE 방법과 매우 유사하다. SUFI-2 방법 내, 매개변수의 불확실성은 강력한 변수(강우량 등), 개념적 모형, 매개변수 및 실측데이터 등과 같은 모든 불확실성들의 소스를 설명한다. 불확실성 정도는 95% 예측 불확실성 구간(95PPU) 내 실측 데이터가 포함되는 것을 나타내는 P-factor로 나타내며 이 95PPU는 Latin Hypercube sampling을 통해 얻어진 결과의 2.5%와 97.5% 범위의 누적 분포를 통해 계산되어 진다(Abbaspour et al., 2007).

### 2.2. 대상 지구

본 연구에서는 우리나라 북한강 상류지역인 소양강댐 유역을 대상 지구로 선정하였다. 소양강댐 유역의 유역 면적은 약 2,703 km<sup>2</sup>, 유역 평균표고 650.5 m, 유역 평균 폭은 16.5km, 그리고 유역 평균 경사는 40.6%로써 우리나라 북동부 산악지역에 위치해 있으며 총 유역면적에서 산림 면적이 약 89%가 넘게 차지하고 있다(Fig. 2). 소양강댐 유역은 수위관측소의 유입량이 곧 자연적인 수문패턴을 가지고 유출이 발생한다고 볼 수 있어 일별 유출 자료의 신뢰성이 우수하기 때문에(임혁진 등, 2006) 이 유역을 대상 지구로 선정하였다. 유역의 유출 모니터링 자료는 Fig. 2에서와 같이 유역 말단부에 위치한 소양강댐에서 측정된 자료를 이용하였다.

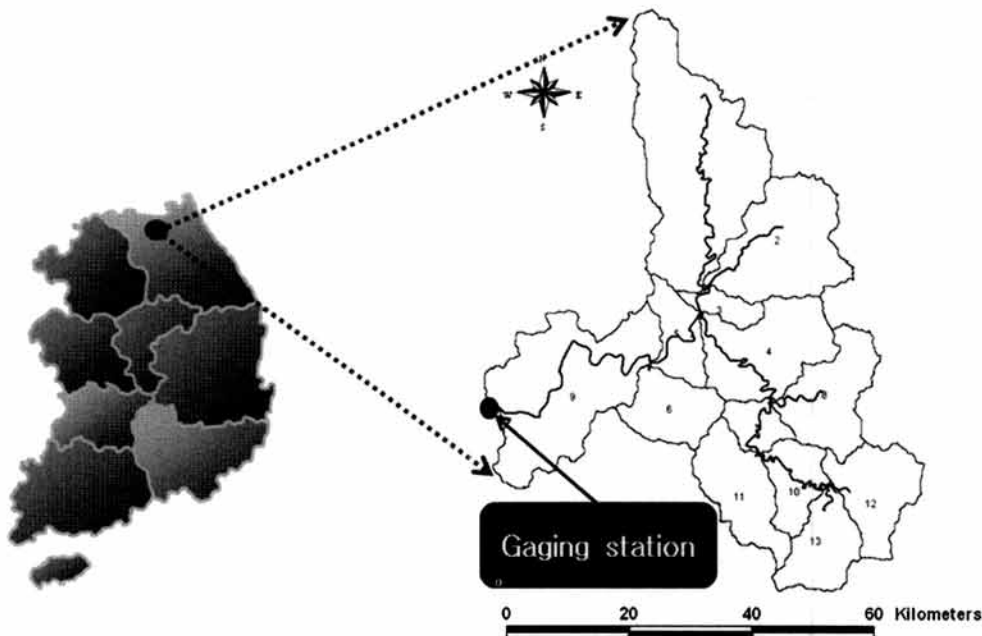


Fig. 2. Study watershed.

### 2.3. SWAT 입력자료

SWAT-CUP으로 유역을 보정하기 위해서는 먼저 SWAT 모형을 구동하여 유역을 모의하여야 한다. 따라서 SWAT 모형을 구동하기 위한 소양강댐 유역의 GIS 입력 자료를 구축하였다. 먼저 Fig. 3과 같이 소양강댐 유역의 1:25000 국가 지리정보유통망(National Geographic Information System, NGIS, 2002) 수치지도로부터 cell size 100 × 100 m의 DEM을 구축하였고(Fig. 3) 토지이용도는 환경지리정보서비스의 1:25000 토지피복도 중분류를 이용하였다(Fig. 4). 소양강댐 토지이용 현황은 산림(FRST)이 89.6%, 농업지역(AGRL) 5.3%, 수역(WATR) 3.7%, 도로(URLD) 0.7%, 목

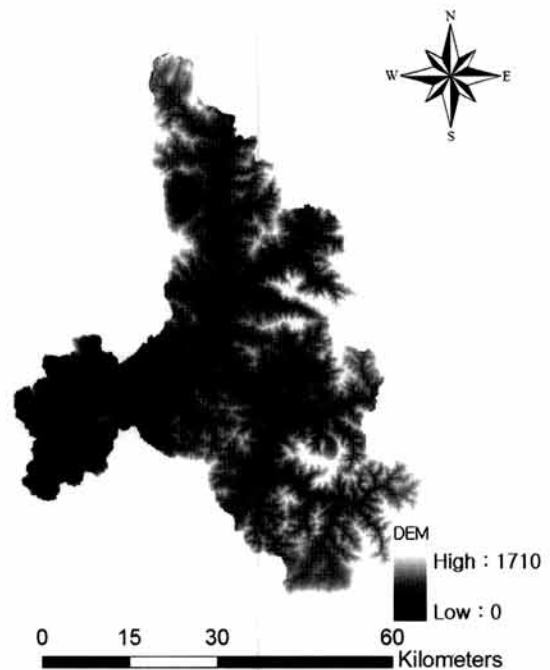


Fig. 3. DEM at the study watershed.

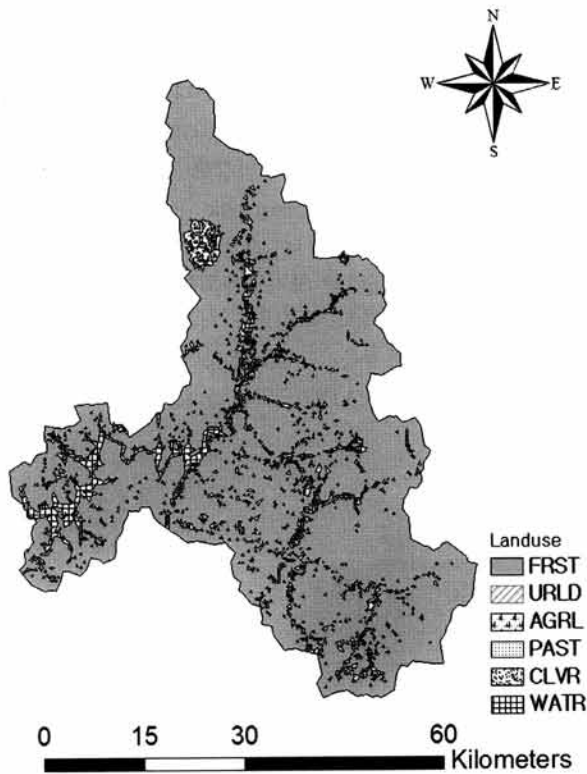


Fig. 4. Landuse map at the study watershed.

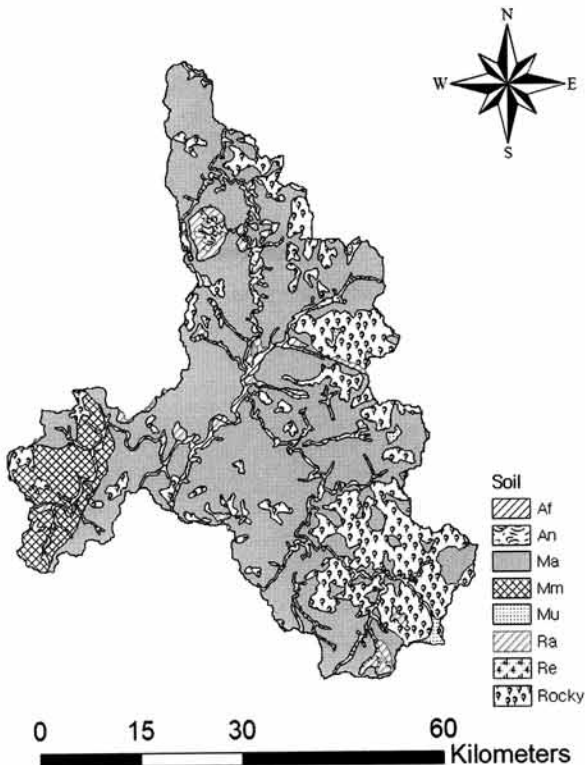


Fig. 5. Soil map at the study watershed.

초지(PAST) 0.2%와 붉은 토끼풀(CLVR) 0.51%의 분포로 이루어져 있으며 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 개략 토양도를 이용하였다(Fig. 5). 또한 SWAT 모형의 기상자료는 소양강댐 인근 기상청 7개 지점의 일 기상 자료를 사용하였다.

### 2.4. SWAT-CUP의 적용

SWAT-CUP으로 소양강댐 유역을 자동 보정하기 위해서는 먼저 SWAT/GIS를 이용하여 SWAT 모형의 입/출력 자료를 생성해야 한다. 따라서 이를 바탕으로 SWAT-CUP은 내장되어 있는 다섯 가지 알고리즘(GLUE, PSO, SUFI-2, PARASOL, MCMC) 중 하나를 선택하여 SWAT 매개변수에 대한 자동 보정을 실시한다. 본 연구에서는 SWAT-CUP 내에 내장되어 있는 5가지 알고리즘 중 3가지(GLUE, SUFI-2, PARASOL)을 선택하여 매개변수에 대한 자동 보정을 실시하였으며, Table 1과 같이 총 22개의 SWAT-CUP에 적용할 매개변수를 선정하였다. 매개변수를 22개로 선정한 이유는 SWAT모형의 유량에 관한 모든 매개변수를 최대한 동일하게 SWAT-CUP 내 적용하기 위해서이며, 3가지의 알고리즘 모두 22가지 매개변수를 동일하게 적용하였다. 각 SWAT-CUP에서 매개변수 별 값을 변환시키는 방법은 총 3가지로써 Add to value, Multiply by value(%)와 Replaced by value가 있으며, Add to value는 각 매개변수의 초기값에서 lower bound 및 upper bound의 설정한 범위 내에서 자동으로 가감하여 매개변수 값을 조정하고, Replaced by value는 설정한 범위 내에서 자동으로 값을 치환시키며 매개변수를 조정한다. 또한 Multiply by value는 설정한 범위 내에서 초기값에 선택된 값의 비율만큼 가감하여 매개변수를 변환시킨다.

따라서 SWAT-CUP 내 각각의 매개변수 변환방법에 따른 위의 22가지 매개변수를 3가지 알고리즘에 적용하여 소양강댐 유역의 2004년 1월 1일부터 2004년 12월 31일 까지 모형의 보정을 수행하였고 보정된 각각의 알고리즘 별 매개변수를 이용하여 2005년 1월 1일부터 2006년 12월 31일 까지 SWAT모형의 검정을 수행하였다.

또한 소양강댐 유역의 실측 유량 자료중 상위 25% 풍수량을 제외한 유량과 전체 유량을 SWAT-CUP의 세 가지 다른 알고리즘(GLUE, PARASOL, SUFI-2)으로 자동 검보정된 소양강댐 각각의 일별 예측 유량중 상위 25% 풍수량을 제외한 예측 유량과 전체 유량을 각각 비교하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 각 알고리즘 별 전체유량에 대한 검보정 결과

3가지 알고리즘을 적용한 소양강댐 유역의 2004년 1월 1일부터 2004년 12월 31일까지의 일별 보정결과는 Table 2와 같이 나타났다. Table 2에서와 같이 최종 보정된 결과를 NSE수치로 나타냈을 때 SUFI-2, PARASOL, GLUE 모두 0.8로 동일한 결과가 나타났으며 R<sup>2</sup>도 마찬가지로 동일한 결과를 나타냈지만(Fig. 6) 각 알고리즘 별 22가지 매개변수에 따른 수치는 대부분 다른 결과 값을 나타냈으며 최적의 매개변수 조합을 찾아내는 모의 횟수도 다르게 나타났다.

SWAT-CUP은 95%예측 불확실성 내 실측데이터가 포함되는 비율을 P-factor라는 수치로 나타내며 이 수치가 1에 수렴할수록 매개변수 보정에 대해 신뢰성이 높아지는 것을 의미하며 본 연구에서의 각각의 알고리즘 별 유량 보정된

**Table 1.** Parameters used in the SWAT-CUP auto-calibration routine

Parameter	Description	Variation method	Lower bound	Upper bound
GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	Add to value	-0.036	0.036
GW_DELAY	Groundwater delay	Add to value	-10	10
CH_N2	Mannings' "n" value for the main channel	Replace by value	0	1
CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	Replace by value	0	150
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	Multiply by value (%)	-25	25
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity(mm/hr)	Multiply by value (%)	-25	25
SOL_BD	Moist bulk density	Multiply by value (%)	-25	25
SFTMP	Snowfall temperature (°C)	Replaced by value	-5	5
SLSOIL	Slope length for lateral subsurface flow	Replaced by value	0	6
ALPHA_BNK	Baseflow alpha factor for bank storage	Replaced by value	0	1
ESCO	Soil evaporation compensation factor	Replaced by value	0	1
EPCO	Plant evaporation compensation factor	Replaced by value	0	1
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	Add to value	-1000	1000
REVAPMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur (mm)	Add to value	-100	100
SLSUBBSN	Average slope length	Multiply by value (%)	-25	25
SMFMX	Maximum melt rate for snow (mm/°C/day)	Replaced by value	0	10
SMFMN	Minimum melt rate for snow (mm/°C/day)	Replaced by value	0	10
SMTMP	Snow melt base temperature (°C)	Replaced by value	-5	5
SOL_Z	Soil depth (%)	Multiply by value	-25	25
SURLAG	Surface runoff lag time	Replaced by value	0	10
TIMP	Snow pack temperature lag factor	Replaced by value	0	1
CN2	SCS runoff curve number for moisture condition II	Multiply by value	-25	25

**Table 2.** List of calibrated parameters using three algorithms in SWAT-CUP

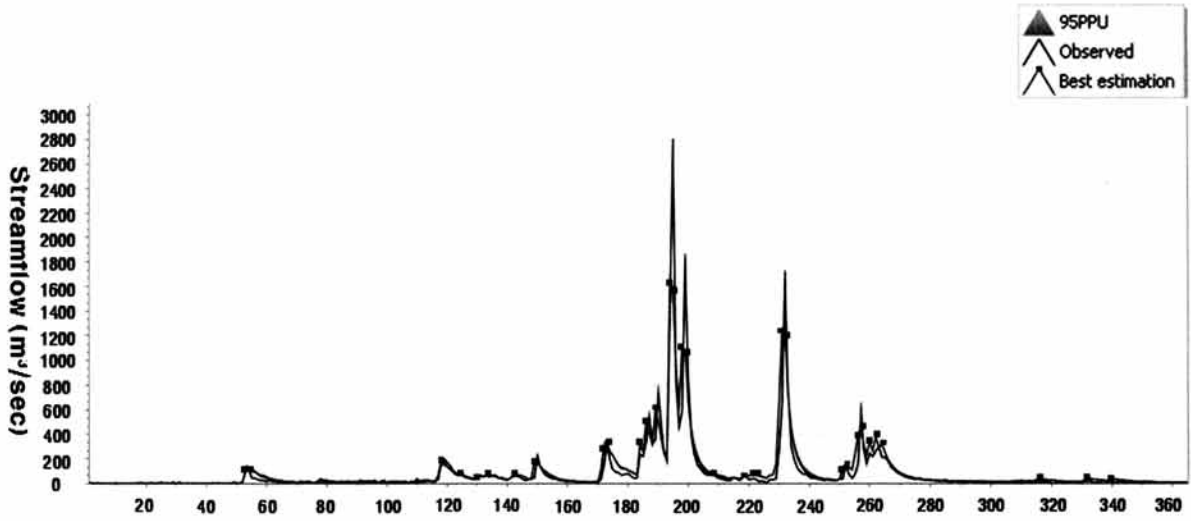
Criterion	Algorithm		
	GLUE	PARASOL	SUFI-2
Goal function	Nash-Sutcliffe		
GW_REVAP	0.04	0.03	0.00
GW_DELAY	10.00	10.00	-4.42
CH_N2	0.24	0.19	0.84
CH_K2	0.00	11.29	133.16
ALPHA_BNK	0.48	0.54	0.48
SOL_AWC	0.34	0.37	0.20
SOL_K	0.35	0.54	0.03
SOL_BD	0.42	0.40	0.22
SFTMP	0.66	4.91	1.82
ESCO	0.00	0.48	0.21
EPCO	1.00	0.77	0.36
GWQMN	1000.00	403.50	479.79
REVAPMN	-25.75	92.75	11.50
SLSUBBSN	0.90	0.12	0.68
SLSOIL	5.52	1.62	1.28
SMFMX	5.57	3.55	9.71
SMFMN	5.49	9.75	2.36
SMTMP	0.72	0.47	0.84
SOL_Z	0.14	0.12	0.19
SURLAG	8.62	1.33	2.60
TIMP	0.20	0.96	0.12
CN2	-0.10	-0.09	0.15
NSE for stream flow calibration	0.80	0.80	0.80
R <sup>2</sup> for stream flow calibration	0.80	0.80	0.80
P-factor for stream flow calibration	0.78	0.27	0.81
Number of the best simulation	1694	1503	1506
Calibration period	2004. 1. 1 ~ 2004. 12. 31		

P-factor 지수는 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 NSE 및 R<sup>2</sup>와는 다르게 SUFI-2 0.81, PARASOL 0.27과 GLUE 0.78로 많은 차이를 보였으며 SWAT-CUP 알고리즘 중 SUFI-2가 R<sup>2</sup> 및 NSE 지수가 가장 높으면서 매개변수 보정에 대한 신뢰성이 가장 높은 것으로 나타났다.

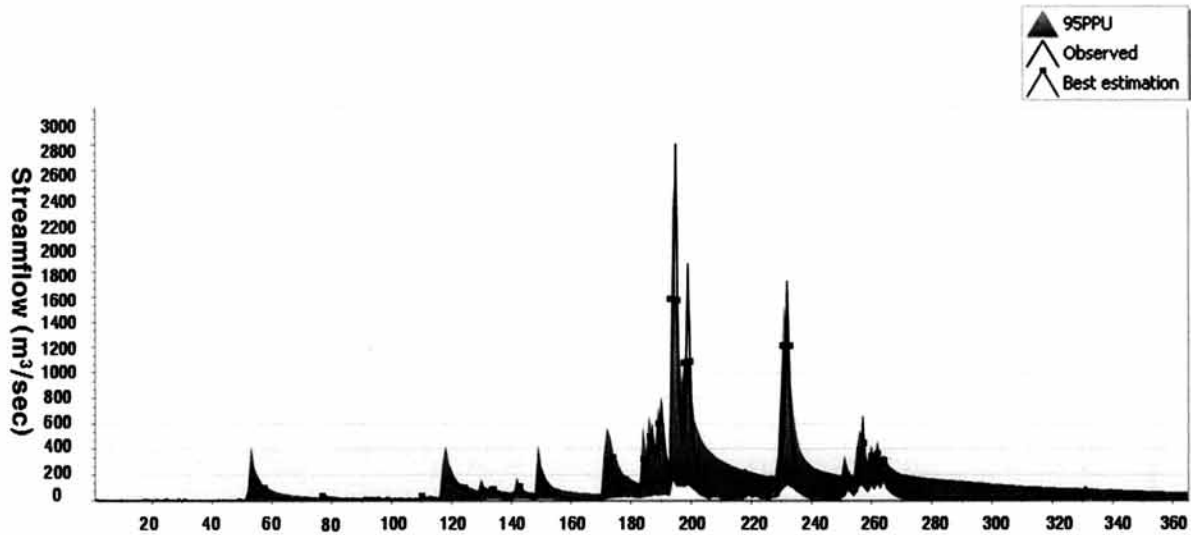
또한 각각의 알고리즘 별 일별 유량이 보정된 소양강댐 유역의 매개변수들을 이용하여 2005년 1월 1일부터 2006년 12월 31일까지 검정을 실시한 결과, 2005년 R<sup>2</sup>지수는 각각 0.85(SUFI-2), 0.85(PARASOL), 0.82(GLUE), NSE지수는 0.78(SUFI-2), 0.79(PARASOL), 0.76(GLUE) 나타났으며(Fig. 7), 2006년에는 3가지 알고리즘 모두 R<sup>2</sup>지수가 0.92, NSE지수는 0.91로 나타났다(Fig. 8). 따라서 검정된 2005, 2006년의 소양강댐의 일별 유량 결과는 위의 보정된 2004년 소양강댐 일별 유량 결과와 마찬가지로 R<sup>2</sup> 및 NSE가 0.7이상을 나타내는 것으로 보아 SWAT이 소양강댐 유역의 전체 유량을 비교적 잘 모의하는 것으로 분석되었다.

**3.2. 각 알고리즘별 저유량에 대한 보정결과**

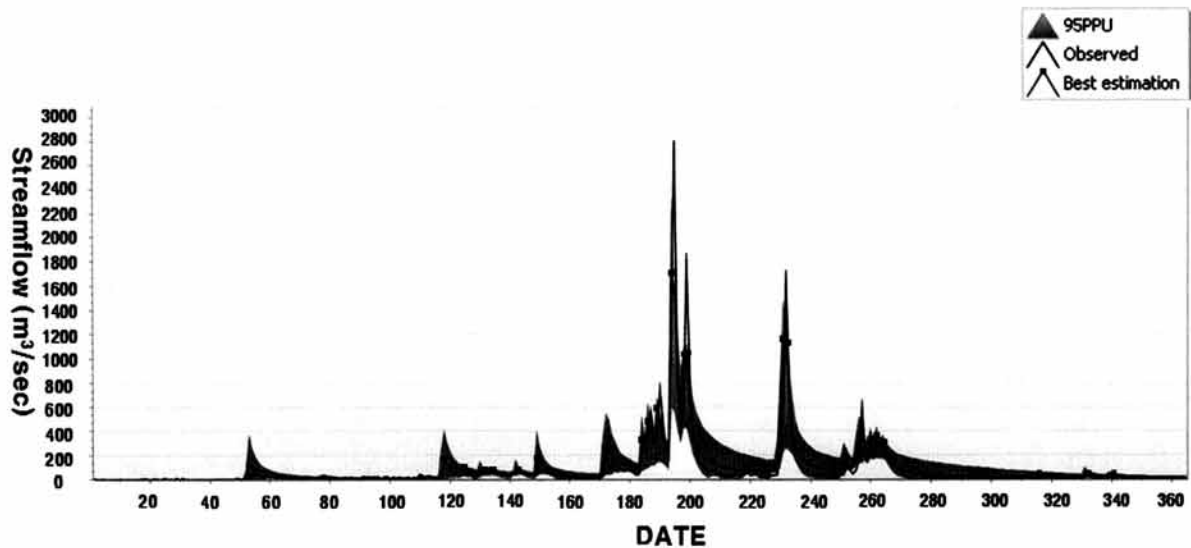
상위 고유량 25%를 제외한 저유량 부분에 대한 SWAT-CUP의 검보정은 위의 소양강댐유역의 전체유량에 대한 보정과는 반대로 매우 만족할 수 없는 결과를 나타냈다. Fig. 9는 2004년 소양강댐유역의 전체유량을 보정한 결과 중 상위 고유량 25%를 제외한 저유량 부분에 대해 실측 데이터와 예측치를 비교한 그래프이며 SUFI-2은 R<sup>2</sup> 0.53, NSE-0.99, PARASOL은 0.57, -0.56이며 GLUE는 R<sup>2</sup> 0.69, NSE-1.39로 나타났다. 또한 Fig. 10과 Fig. 11은 2005년, 2006년 소양강댐 유역의 유량을 검정한 결과 중 상위 고유량 25%를 제외한 저유량 부분에 대해 실측 데이터와 예측치를 비



(a) PARASOL

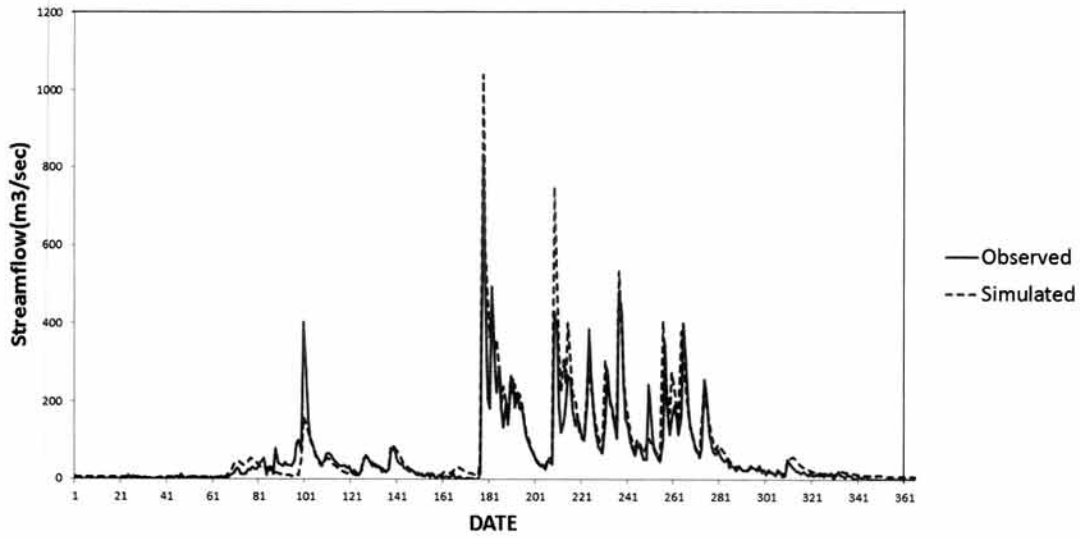


(b) SUFI-2

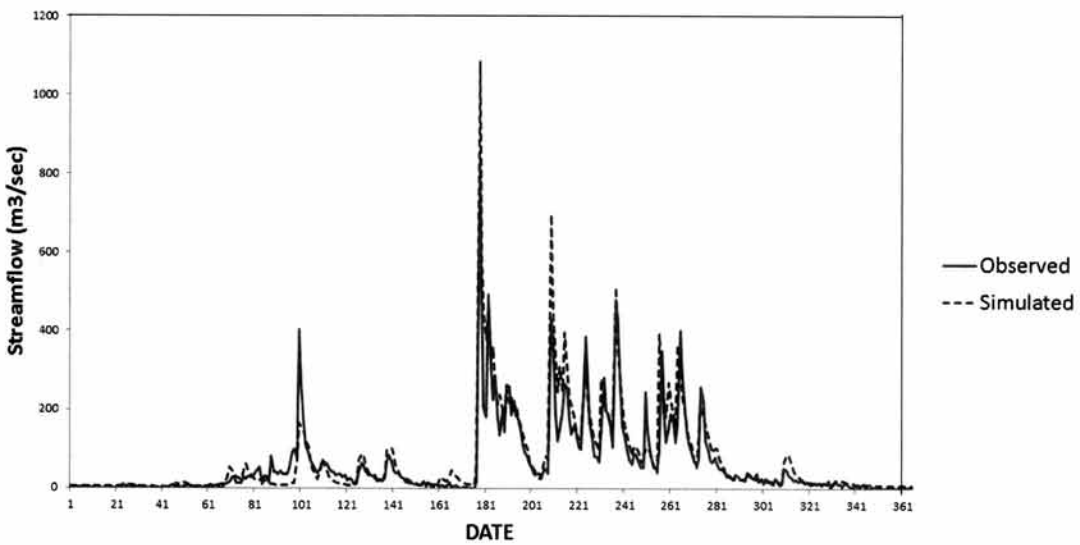


(c) GLUE

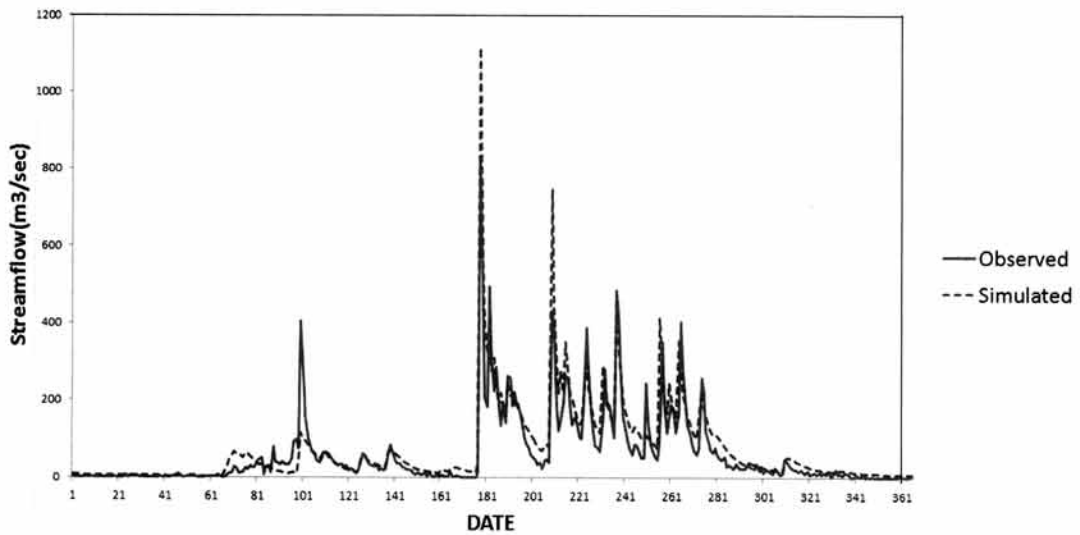
Fig. 6. Comparison of calibration result for Total streamflow (2004/1/1 ~ 2004/12/31).



(a) PARASOL

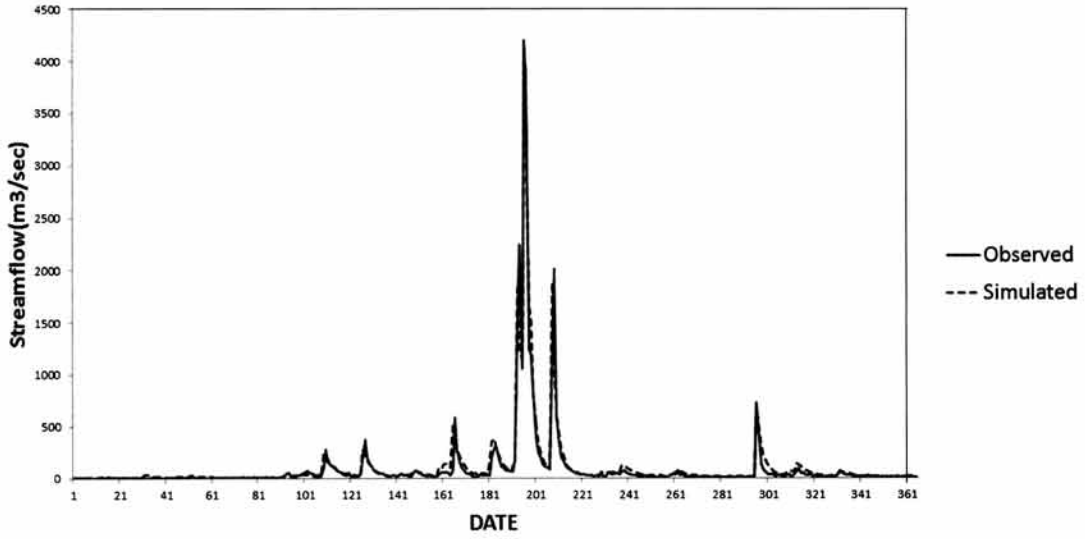


(b) SUFI-2

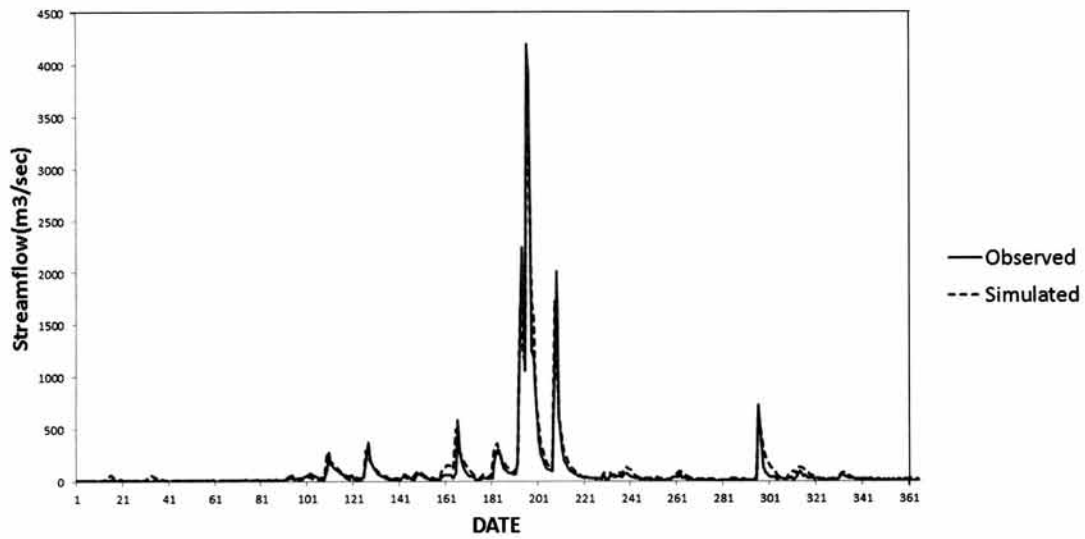


(c) GLUE

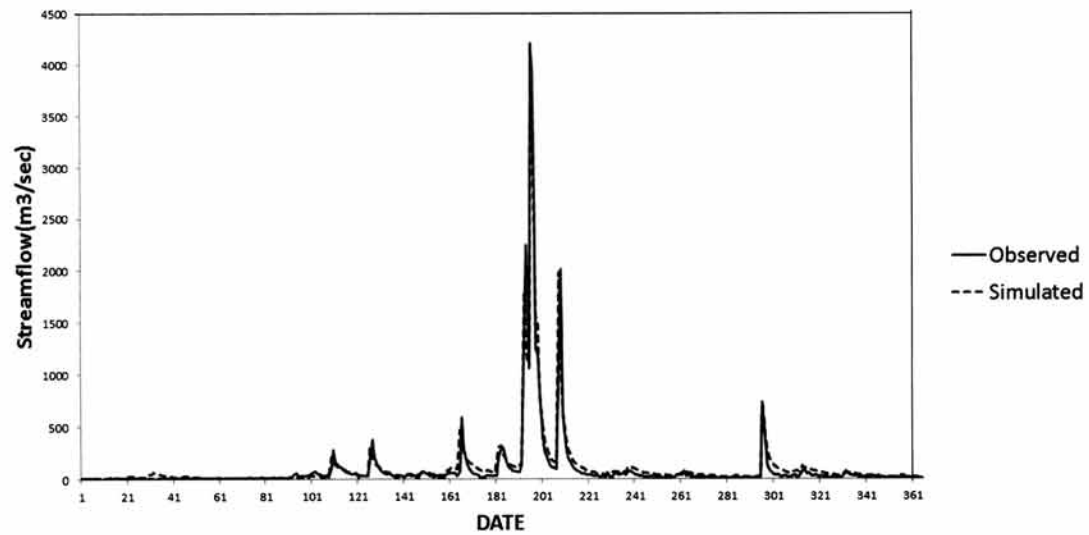
Fig. 7. Comparison of validation result for total streamflow in year 2005.



(a) PARASOL



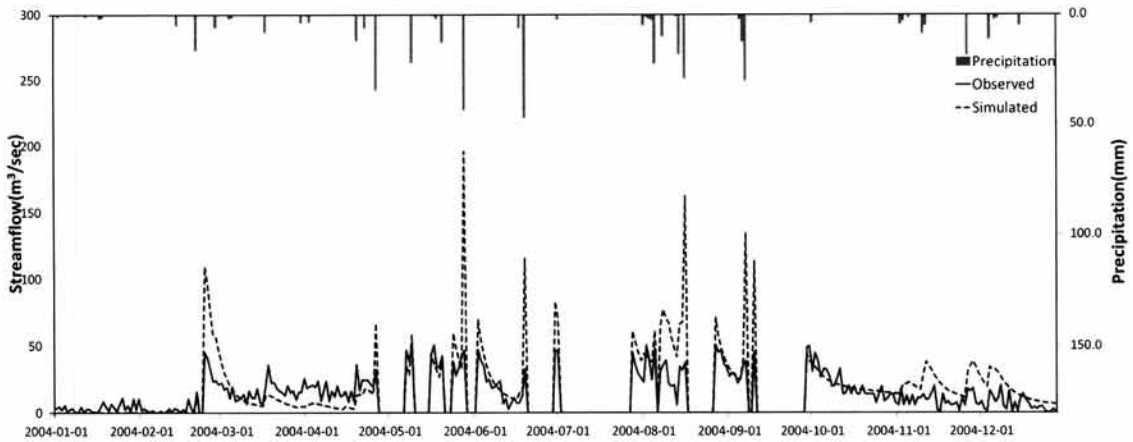
(b) SUFI-2



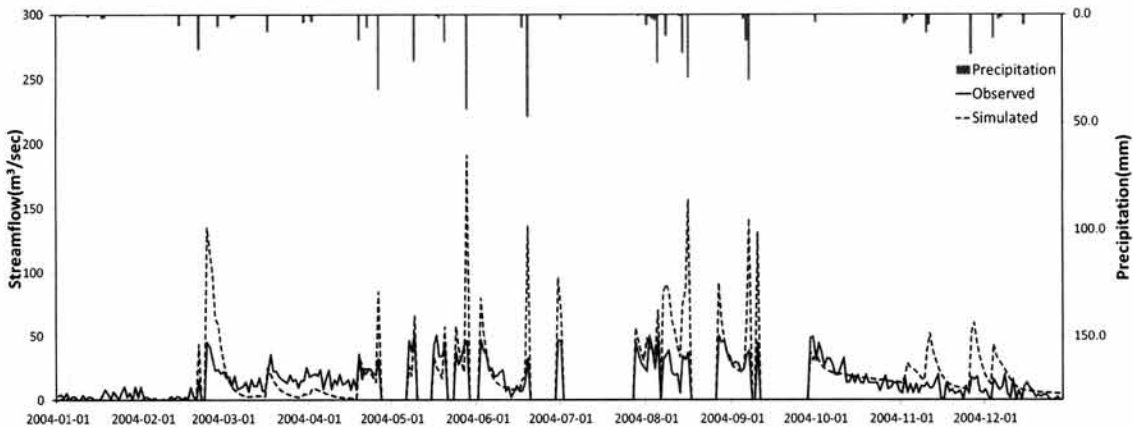
(c) GLUE

Fig. 8. Comparison of validation result for total streamflow in year 2006.

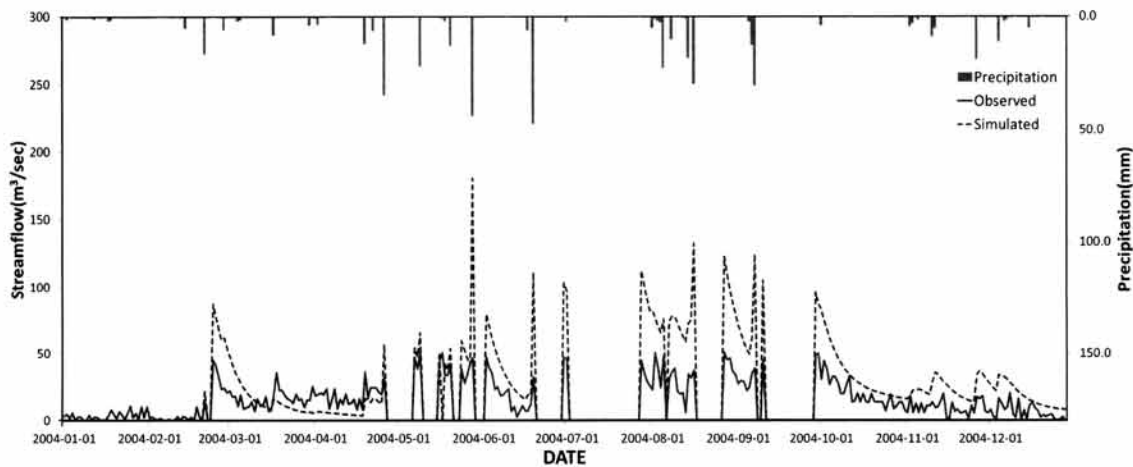




(a) PARASOL



(b) SUFI-2



(c) GLUE

Fig. 9. Comparison of calibration result for low flow in year 2004 (Flow duration of 25% or less).

교한 그래프이며 Fig. 9와 마찬가지로  $R^2$  0.5 이하, NSE-1.0 이하로 나타나 실측 및 예측 데이터와의 상관관계 수준이 매우 낮은 것으로 나타났다.

따라서 SWAT-CUP 프로그램을 이용하여 모형을 보정할 경우 위에 설명된 바와 같이 전체유량을 잘 예측하는 것으로 모의되었으나, 저유량 부분 보정에 있어서는 SWAT-CUP의 3가지 알고리즘을 이용하여 모형을 보정하더라도 저유량

부분을 정확하게 예측하기에는 한계가 있는 것으로 보인다.

또한 저유량 부분을 정확히 예측하지 않더라도 SWAT-CUP이 본 연구결과에서 보정된 매개변수를 선택한 이유는 SWAT-CUP 내 목적함수로 사용하는 NSE 검정지수 산정 방법의 단점 때문인 것으로 판단된다. NSE 산정 방법은 대부분의 실측 및 예측 데이터와의 상관관계가 잘 맞지 않더라도 몇 개의 이벤트 즉 SWAT에서는 일부 고유량 부분

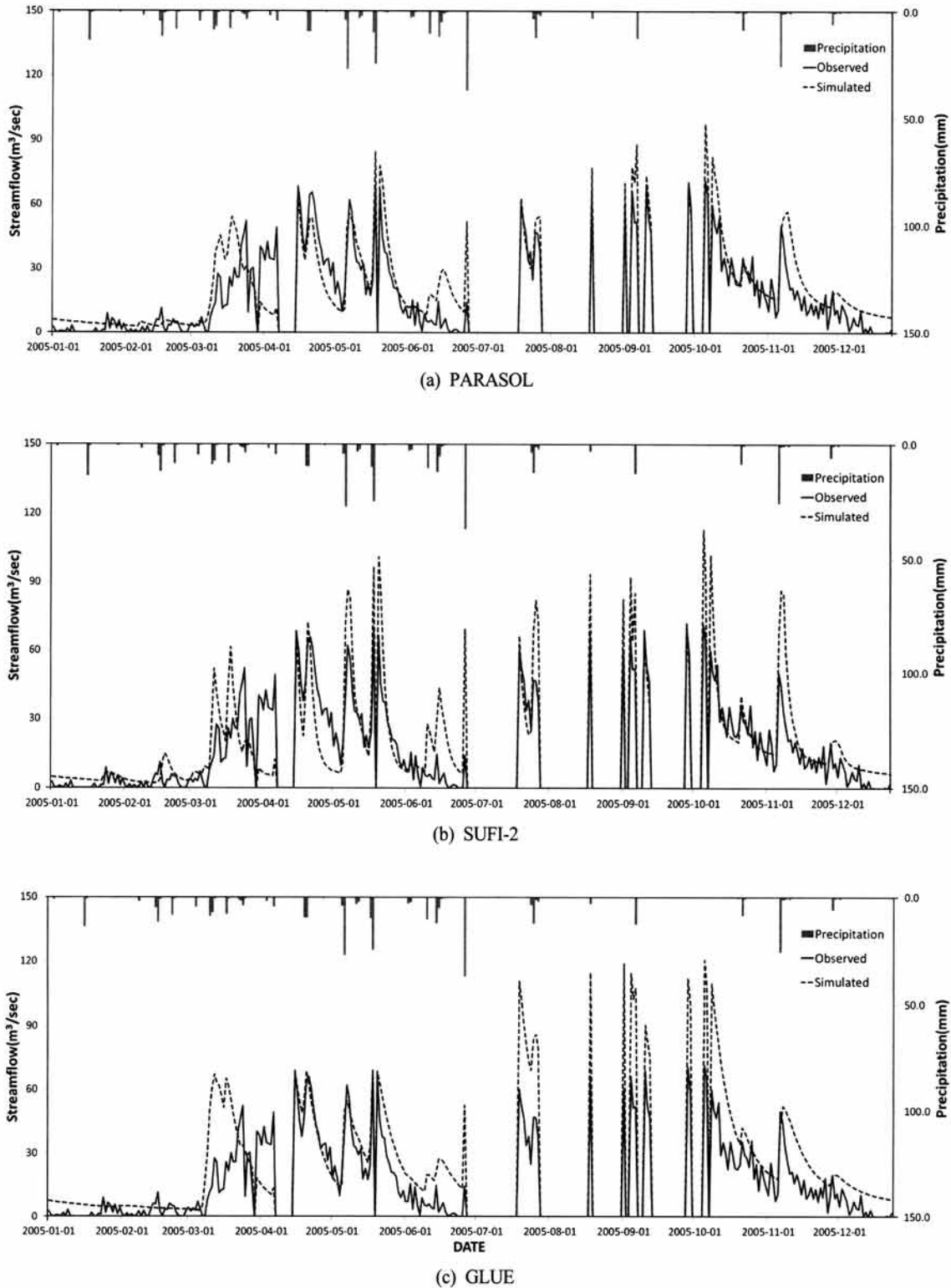


Fig. 10. Comparison of validation result for low flow in year 2005 (Flow duration of 25% or less).

에서의 예측/실측 데이터에 대한 상관관계가 잘 일치 한다면 나머지 일치하지 않는 저유량 부분의 실측/예측 상관관계가 무시되면서 전체유량의 실측 및 예측 데이터의 상관관계가 매우 높게 나타날 수 있다(McCuen et al., 2006).

#### 4. 결론

본 연구에서는 다양한 알고리즘을 고려하여 SWAT을 보

정할 수 있는 SWAT-CUP 프로그램을 우리나라 소양강댐 유역에 적용하여 2004년 1월 1일부터 2006년 12월 31일까지 보정을 실시하였다. 보정 결과, 세 가지 알고리즘 모두 전체유량에 대한 R<sup>2</sup> 및 NSE 지수가 모두 높게 나타났으며, 보정 결과가 실측데이터를 잘 예측하는 것으로 분석되었다. 하지만 각 알고리즘 별 P-factor는 SUFI-2가 다른 알고리즘에 비해 매우 높은 것으로 나타났기 때문에 소양강

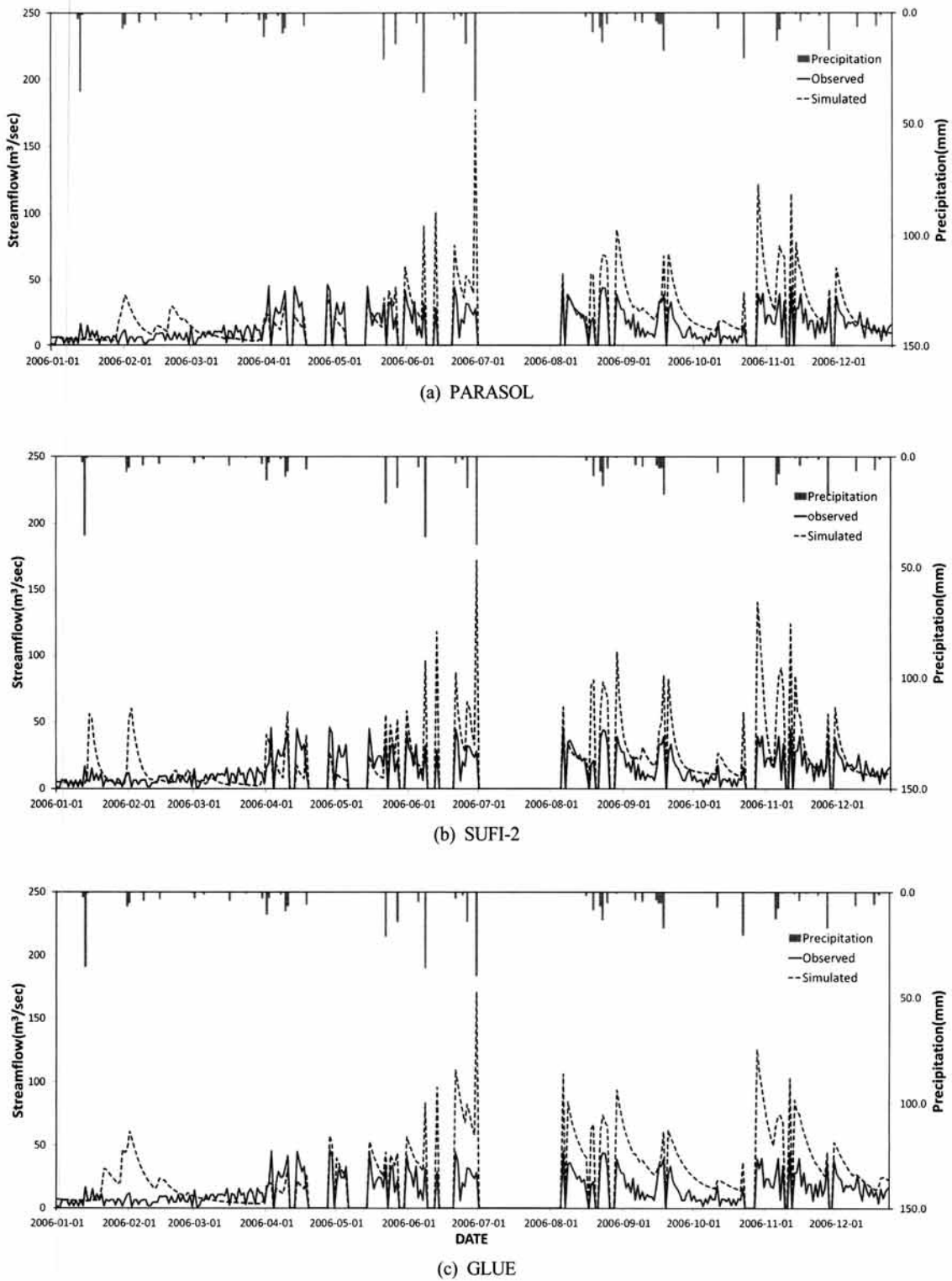


Fig. 11. Comparison of validation result for low flow in year 2006 (Flow duration of 25% or less).

댐 유역에서는 SWAT 모형 내 내장되어있는 PARASOL 알고리즘 보다 SUFI-2 알고리즘을 사용하여 SWAT을 보정하는 것이 가장 적합하다고 판단된다. 또한 SWAT의 보정시 단순히 R<sup>2</sup> 및 NSE 지수뿐만 보정결과를 판단하는 것이 아니라 P-factor까지 같이 고려한다면 모형 보정의 신뢰성을 보다 높일 수 있을 것이라고 판단된다.

그러나, SWAT-CUP 알고리즘을 이용하여 저유량 예측 정확성을 평가해본 결과 3가지 알고리즘 모두 만족할 만한

결과를 도출하지 못했다. 이와 같은 이유는 SWAT이 준분포형 모형으로 각 HRU 침투/침투 성분이 하천으로 흘러들어오는 특성을 평가하지 못하고 특히 소유역내 HRU의 공간적 특성에 따라 하천으로 유입되는 특성을 제대로 모의하지 못하기 때문에 SWAT 내 유량이 산정되는 부분에서 비강우시 기저유량이 지연되어 전달될 수 있으며, 이는 저유량 산정에 큰 문제를 야기시킬 수 있을 것이라 판단된다. 따라서 최근 우리나라 환경부에서 시행하는 수질오염 총

량관리제에서 SWAT을 이용한 다양한 수질분석에 관한 시도가 이루어지고 있지만 우리나라 수질오염 총량관리제는 고유량 25%를 제외한 저유량 및 평수위 부분에 대해 관리 및 평가가 이루어지고 있기 때문에 위와 같이 저유량 부분에 대해 정확하게 보정하지 못하는 SWAT 및 SWAT-CUP은 우리나라 환경부 수질오염 총량관리제에 적용하기에는 한계가 있다고 판단된다. 따라서 향후 우리나라 수질오염총량관리제에 사용할 수 있도록 SWAT 및 SWAT-CUP 내에 기저유량 해석 부분을 보다 정확하게 예측할 수 있는 모듈이 추가 되어야 할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 Eco-STAR Project(과제번호 EW07-II-06, 농촌 비점오염원 제어를 위한 효율적인 관리기술 개발)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

## 참고문헌

- 국가지리정보시스템 (NGIS) (2002). <http://www.ngis.go.kr/>.
- 배다혜, 하성룡(2011). HSPF를 이용한 비점오염원 삭감에 따른 효과 분석, *한국환경영향평가학회지*, 20(1), pp. 71-78.
- 신지웅, 길경익(2011). 다양한 회귀분석을 통한 강우유출용적에 따른 비점오염부하량 예측 방안, *수질보전 한국물환경학회지*, 27(3), pp. 257-263.
- 이춘원, 강선홍, 안태웅, 양주경(2011). 청양-홍성간 도로에서의 강우 시 비점오염 유출특성 및 오염부하량 분석, *상하수도학회지*, 25(2), pp. 265-274.
- 이효상, 전미우, 발린 다니엘라, 로드 미하엘(2009). 강우자료의 불확실성을 고려한 강우 유출 모형의 적용, *한국수자원학회지*, 42(10), pp. 773-783.
- 임혁진, 권형중, 배덕효, 김성준(2006). CA-Markov 기법을 이용한 기후변화에 따른 소양강댐 유역의 수문분석, *한국수자원학회지*, 39(5), pp. 453-466.
- 장원석, 문종필, 김남원, 유동선, 금동혁, 김의재, 문유리, 임경재(2011). 웹기반의 유량 군집화 EI 평가시스템을 이용한 SWAT 직접유출과 기저유출 평가, *수질보전 한국물환경학회지*, 27(1), pp. 61-72.
- Abbaspour, K. C. (2007). *User Manual for SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs*, Swiss federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Deubendorf, Switzerland, pp. 1-33.
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bongler, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., and Srinivasan, R. (2007). Modelling Hydrology and Water Quality in the Pre-alpine/alpine Thur Watershed using SWAT, *Journal of Hydrology*, 333, pp. 413-430.
- Arnold, J. G. (1992). *Spatial Scale Variability in Model Development and Parameterization*, Ph.D. thesis, Purdue University, pp. 112.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Mutiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment: Part I: Model Development, *Journal of American Water Resources Association*, 34(1), pp. 73-89.
- Beven, K. J. and Binley, A. M. (1992). The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction, *Hydrological Processes*, 6, pp. 279-298.
- Bicknell, B. R., Imhoff, J. C., Kittle, J. I. Jr., Jobes, T. H., and Donigan, A. S. Jr. (2001). Hydrologic Simulation Program Fortran (HSPF) User's Manual for version 12, U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, GA, pp. 1-12.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V. (1992). Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-runoff Models, *Water Resources Research*, 28(4), pp. 1015-1031.
- Flanagan, D. C. and Livingston, S. J. (1995). *WEPP user Summary*, NSERL Report 11, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana, pp. 1-18.
- Huber, W. C. and Dickson, R. E. (1988). *Storm Water Management Model Version 4; User's Manual*, University of Florida, Gainesville, USA, Department of Environmental Engineering Sciences, pp. 1-15.
- Kang, H., Ryu, J., Park, Y. S., Kim, J., Jang, W. S., Kim, N. W., Kong, D. S., and Lim, K. J. (2011). Modification of SWAT Auto-calibration Routine with Additions of Direct Runoff Separation and Flow Clustering Calibration Modules. In revision, pp. 23-33.
- McCuen, R. H., Knight, Z., and Cutter, A. G. (2006). Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency Index, *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(6), pp. 597-602.
- Pandey, A., Chowdary, V. M., Mal, B. C., and Billib, M. (2008). Runoff and Sediment Yield Modeling from a Small Agricultural Watershed in India using the WEPP Model, *Journal of Hydrology*, 348, pp. 305-319.
- Ryu, J., Cho, J., Kim, I. J., Mun, Y., Moon, J. P., Kim, N. W., Kim, S. J., Kong, D. S., and Lim, K. J. (2011). Enhancement of SWAT-REMM to Simulate Reduction of Total Nitrogen with Riparian Buffer, *Transactions of ASABE*, 54(5), pp. 1791-1798.
- Van Griensven, A. and Meixner, T. (2006). Methods to Quantify and Identify the Sources of Uncertainty for River Basin Water Quality Models, *Water Science & Technology*, 53(1), pp. 51-59.