

# 섬강시험유역에서 SWAT-CUP을 이용한 SWAT모형 매개변수 추정

최흥식\*

Choi, Heung Sik\*

## Parameter Estimation of SWAT Model Using SWAT-CUP in Seom-river Experimental Watershed

### ABSTRACT

The semi-distributed rainfall runoff model of SWAT is applied to the Seom-river experimental watershed. The simulations of various antecedent periods before the targeted simulation periods of 2002 to 2009 are not necessary despite of the slight appearance of corresponding changes in simulated total runoff. The simulated results of total runoff by using various numbers of soil layer maps have little differentiated nevertheless the slight changes in simulated results have been appeared. The 7 parameters of *CANMX*, *CN<sub>2</sub>*, *ESCO*, *GW\_REVAP*, *SOL\_ALB*, *SOL\_AWC*, and *SOL\_K* greatly govern the rainfall runoff are confirmed and their sensitivity analyses have been carried out. The optimal parameters used in SWAT are derived by SUFI-2 of SWAT-CUP. The *NS* and *R<sup>2</sup>* are 0.99 and 0.98, respectively which is shown the good agreement between the observed and the simulated results. The uncertainty factors of P-factor and R-factor are 0.85 and 0.06, respectively which is also shown the high efficiency of the model. The high applicability is also shown with improving the RMSE in SWAT model simulation using the parameters estimated by SUFI-2 of SWAT-CUP.

**Keywords :** SWAT, SWAT-CUP, SUFI-2, Antecedent simulation, Usersoil, Parameter

### 초 록

본 연구는 준분포형 강우-유출 모델인 SWAT 모형을 섬강시험유역에 적용하였다. 대상기간 강우-유출모의에 앞선 선행모의 기간에 따른 유출량의 변화는 나타났지만 선행모의 기간에 따른 총 유출량의 변화는 크지 않았다. 선행모의의 필요성은 없는 것으로 판단된다. 토양이용도 사용 층의 개수에 따른 총 유출량의 변화가 다소 있었지만, 층수의 사용개수에 따른 총 유출량의 변화는 크지 않았다. 유출량을 지배하는 7가지 매개변수(*CANMX*, *CN<sub>2</sub>*, *ESCO*, *GW\_REVAP*, *SOL\_ALB*, *SOL\_AWC*, *SOL\_K*)의 확인과 민감도 분석을 실시하였다. SWAT-CUP 모형의 SUFI-2 알고리즘을 이용하여 SWAT 모형의 최적매개변수를 도출하였다. 모의값과 실측값과의 비교분석결과 *NS*, *R<sup>2</sup>*은 각각 0.92, 0.98로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 모형의 불확실도를 나타내는 지표 *P-factor*와 *R-factor*는 각각 0.85, 0.06으로 모형의 신뢰성이 높게 나타났다. SWAT-CUP의 SUFI-2에 의해 산정한 매개변수의 적용결과에서 RMSE의 개선이 있어 모형의 적용성이 높은 것으로 판단된다.

**검색어 :** SWAT, SWAT-CUP, SUFI-2, 선행모의, 토양층수, 매개변수

## 1. 서론

최근 물의 이용에 대한 수자원 종합개발과 관련한 유출량 예측에 대한 인식이 증가하고 있다. 수자원 개발이나 관리 분야에 있어서 강우에 따른 정확한 유출량의 예측은 매우 중요하다. 이에 따라 장기 강우-유출모형의 개발 및 적용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에는 지형적인 특성인자를 고려한 분포형 모형(distributed model)이 기존의 집중형 모형(lumped model)의 단점을 보완한다는

\* 정회원·상지대학교 건설시스템공학과 교수 (Corresponding Author·Professor, Dept. of Civil Engineering, Sangji University·hsikchoi@sangji.ac.kr)

Received August 23 2012, Revised November 18 2012, Accepted February 18 2013

점에서 연구가 진행되고 있다.

강우-유출 모형은 정확한 유출량을 계산하기 위한 적절한 수문학적 순환 특성자료, 수리학적 입력자료 등이 중요하다. 수문학적 순환에 대해서는 각 순환요소에 작용하는 유역의 특성 인자와 이들의 상호작용 및 기상요소들의 정확성이 강우-유출모형의 효용성을 결정짓는 중요한 요소이다. 유출에 영향을 미치는 다양한 매개변수들의 추정을 위해서는 먼저 매개변수에 영향을 미치는 유역의 특성인자들의 정확한 정보와 유역환경에 대한 정보가 필요하다. 이전에는 유역정보가 주로 수치정보로 관리되어 지역의 특성을 정확히 파악하기 어려웠고, 개발에 따른 유역환경의 변화를 적절히 나타내기가 어려웠다. 따라서 정확한 유역정보를 표현하기 위해서는 지역의 특징을 나타내는 지도정보와 수치정보 모두 관리되는 지리정보시스템(Geographic Information System : GIS)의 이용이 필요하다.

1980년대부터 컴퓨터의 발달과 함께 강우와 유출과의 물리적 관계를 수학적으로 해석하려는 모형들이 개발되었다. 유역전체를 여러 소유역으로 구분하고 유역 특성인자 및 수문과정 변수의 공간적 변화를 고려하여 전체의 수문학적인 반응을 해석하려는 분포형 모형이다. 이는 GIS의 발전과 함께 유역의 방대한 자료와 강우유출현상의 수많은 매개변수를 효과적으로 다룰 수 있어서 최근에 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

SWAT 모형은 미국 농무부(USDA, United States Department of Agriculture)의 농업연구소(ARS, Agricultural Research Service)에서 개발된 유역 모델로서 Soil and Water Assessment Tool의 약자이다. ArcGIS와 연계되어 SWAT을 사용 가능한 ArcSWAT (Winchell et al., 2010)이 개발되고, 이를 이용하여 장기간 강우-유출과정의 거동을 예측한다.

Jang 등(2004)은 GIS를 기반으로 SWAT모형을 이용한 하천 유출량을 모의하였고, Kim 등(2005)은 SWAT을 이용한 유역내 수위관측지점을 기준으로 관측유량과 모의유량을 비교 검토하여 모형의 적절성을 평가하였다. Lee 등(2006)은 SWAT 모형을 이용한 도시하천 상류유역의 하천유지유량 산정방안에 대한 연구를, Lee(2006)는 LHOAT(Latin Hypercube One factor At a Time) 민감도 분석과 SCEUA(Shuffled Complex Evolution at University of Arizona) 최적화 방법을 이용한 SWAT 모형의 자동보정, Park 등(2008)은 SWAT모형에서 공간 입력자료의 다양한 해상도에 따른 수문수질 모의결과의 비교분석하였다. Lee와 Seo(2011)는 SWAT-CUP모형을 이용한 대청호 유역 장기 유출 유량 보정 및 검증을 실시하여 매개변수를 최적화하여 유출량 비교분석을 하였다. Joh 등(2011)은 충주댐 유역의 유출량에 대한 SWAT모형의 예측불확실성 분석을 통해 SWAT-CUP의 SUFI-2와PARASOL 알고리즘이 불확실도 평가에 신뢰성이 높다고 평가

하였다. Ryu 등(2012)이 소양강댐 유역에 SWAT-CUP의 3가지 알고리즘(SUFI-2, PARASOL, GLUE)을 사용하여 자동 검·보정 결과 SUFI-2가 실측자료를 잘 예측하는 것으로 분석하였다.

Arnold와 Allen(1996)은 일리노이주 3개 하천에 대하여 유출량을 모의하였고, Van Griesven과 Meixner(2003)는 SWAT모형의 매개변수들의 민감도분석 및 최적화를 통하여 매개변수의 검정 및 보정을 실시하였고, Cao 등(2005)은 산지에서 다양한 변화 및 공간에 따른 유출량의 변화를 분석하였다. Winchell 등(2010)은 SWAT2009의 ArcSWAT 구동설명서를 제시하였다. Abbaspour 등(2007)은 SWAT-CUP 4에 대한 설명과 내장 프로그램인 SUFI2, GLUE, ParaSol 3가지를 소개하였다. Yang 등(2008)은 중국의 Chaoho 유역의 SWAT 모형을 적용하였으며, SWAT 모형이 유출량예측에 정확성이 높은 것으로 판단하였고, 검·보정 및 불확실성 분석기법을 SUFI-2, GLUE, ParaSol 기법을 사용하여 비교한 결과 SUFI-2가 신뢰성이 높은 것으로 판단하였다. Setegn 등(2010)은 에디오피아의 Tana 유역에 SWAT 모형을 적용하고 불확실성 및 매개변수추정 기법으로 SUFI-2, GLUE, ParaSol 기법을 사용하였다.

본 연구는 SWAT 모형의 모의에 따른 선행모의기간과 토양층 구성 사용개수의 적절성과 그에 따른 수문학적 순환요소의 해석 결과가 어떻게 변화하는지에 관하여 검토하였다. 또한, SWAT 모형은 많은 매개변수를 다루고 있어 적절한 값의 추정이 어렵고, 대부분의 경우 시행착오의 과정을 통해 매개변수 값들을 추정하게 된다(Kim et al., 2006). 따라서 민감도 분석에 의한 유출에 지배적인 매개변수의 특성을 정리하였다. Eawag 연구소의 Abbaspour (2008)가 개발한 SWAT-CUP(Calibration and Uncertainty Program)의 SUFI-2 알고리즘을 사용하여 유출에 영향을 미치는 매개변수에 대한 최적의 매개변수 값을 추정하고, 이의 적용성을 검토하였다.

## 2. SWAT모형과 SWAT-CUP의 SUFI-2 알고리즘

### 2.1 SWAT 모형

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

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

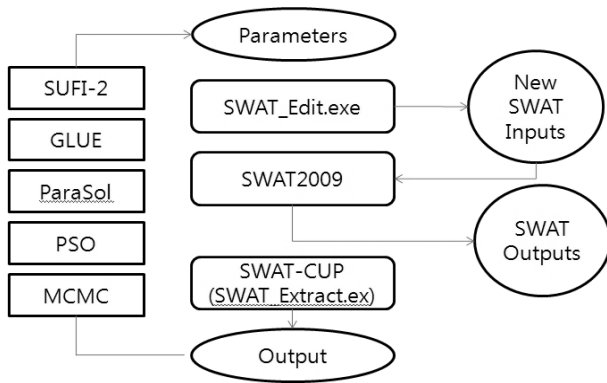


Fig. 1. Model Structure of the SWAT-CUP

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.

SWAT-CUP은 SWAT모델의 복잡한 여러가지 매개변수의 최적값 산정에 적용할 수 있으며 (Abbaspour, 2008), SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Ver.2), GLUE(Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), Parasol(Parameter Solution), MCMC(Markov Chain Monte Carlo)의 PSO(Particle Swarm Optimization)의 5가지 통계 알고리즘으로 구성되어 있다 (Figure 1). 본 연구에서는 SUFI-2 알고리즘을 사용하였다.

### 2.2 SWAT-CUP의 SUFI-2 알고리즘

SWAT-CUP모형내의 SUFI-2 알고리즘은 순차적이고 반복적으로 매개변수를 산정한다. 모형의 보정 및 예측결과의 불확실성 정도는 95% 예측불확실성 구간(95PPU) 내 실측 자료의 백분율로  $P$ -factor에 의해 나타낸다. 95PPU는 Latin-hypercube sampling 기법을 이용하며 얻어진 결과의 2.5% ( $X_L$ )와 97.5% ( $X_U$ )범위의 누적분포를 통해 계산되어진다(Abbaspour, 2011). Latin Hypercube sampling 기법은 매개변수 별 최대값과 최소값의 범위 내에서 초기 값에 선택 값의 비율만큼 가감하는 방법 (Multiply by value), 설정 범위에서 자동으로 치환하는 자동치환 방법(Replaced by value)을 사용하여 500 ~ 1,000회 정도의 반복적인 모의를 권장하나, 본 연구에서는 2,000회의 반복적인 계산을 통해 값을 도출하였다.  $P$ -factor는 각 수문성분마다 계산된다. 95% 범위 안에 포함되는 실측치를 백분율로 평가하며, 상위 경계와 하위 경계 사이의 거리  $\bar{d}$ 는 식 (2)와 같다.

$$\bar{d}_x = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (X_U - X_L)_i \quad (2)$$

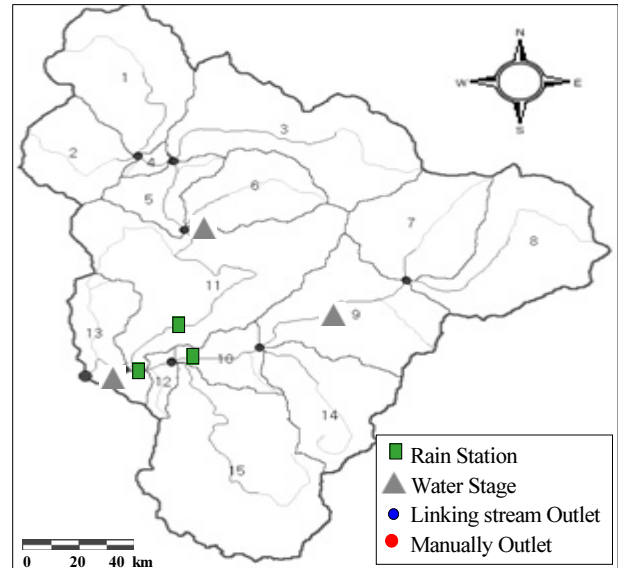


Fig. 2. Subbasin of Seom-river Experimental Watershed

여기서,  $k$ 는 관측자료의 개수이다. 95% 범위 안에 들어가는 실측치의 비율이 100% 이면서, 거리  $\bar{d}$ 는 0에 가까울 때 이상적인 결과라고 할 수 있다. 또한, 식 (3)과 같이 불확실성 분석을 평가할 수 있는 다른 척도로  $R$ -factor는 평균 95PPU를 실측자료( $\bar{d}$ )를 표준편차( $\sigma_x$ )로 나누어 산정할 수 있다. 95PPU band의 평균 폭을 의미하므로 0에 가까울수록 모델 보정의 정확도는 증가한다 (Schuol et al., 2008).

$$R\text{-factor} = \frac{\bar{d}}{\sigma_x} \quad (3)$$

### 3. 대상유역 및 입력자료의 구성

섬강 시험유역은 남한강의 제1지류인 섬강의 횡성댐 상류에 위치한 지방 하천인 계천유역으로서 계천과 유동천이 합류하는 부채꼴 형상의 유역이다. 유역면적은 유역의 출구인 매일수위국을 기준으로  $164.45 \text{ km}^2$ 이고 유로 연장은  $22.41 \text{ km}$ 로 대상유역의 지형은 대체로 만장년기 지형으로 주로 산지로 형성되어 있다.

섬강 시험유역은 2000년 횡성댐이 건설되어 운영되기 시작한 시점으로 매일수위국을 기점으로 하여 수문관측을 실시하였다. 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 2002년 3월부터는 매일수위국 상류에 위치한 농거리교 및 소근교 지점에 수위계를 설치하고 아울러 유역 내에 봉덕, 춘당 그리고 매일 수위국에 강우관측을 실시함으로써 체계적인 수문관측이 이루어졌다(Figure 2). 국토지리원에서 제공하는 1:5,000 수치지도를 활용하여 5.0 m 해상도의 DEM을 작성하였다. Figure 2에서와 같이 유역내의 지

류를 중심으로 15개의 소유역으로 구분하였다. 기상자료는 유역의 기본 구성자료로 기상모의 시 이용된다. 계천유역에 기상관측소가 없기 때문에 가장 근접한 원주 관측소자료를 이용하였다. 기상청에

서 제공하는 기상연보를 활용하여 30년 평균의 최고 및 최저기온, 평균강우량, 태양복사열, 이슬점, 풍속 등 정확한 기상자료를 구성하였다. Table 1은 각각의 소유역별의 면적구성이다.

Table 1. Area of Subbasin

Subbasin	Area(km <sup>2</sup> )	Ratio(%)	Subbasin	Area(km <sup>2</sup> )	Ratio(%)
1	13.90	8.45	9	13.92	8.46
2	7.57	4.61	10	3.96	2.41
3	18.87	11.47	11	24.06	14.63
4	0.89	0.54	12	1.56	0.95
5	4.38	2.67	13	6.17	3.75
6	7.83	4.76	14	10.34	6.29
7	11.20	6.81	15	24.35	14.81
8	15.45	9.40	Total	164,45	100

객관적인 강우량 자료를 구축하기 위하여 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS : Water Management Information System)을 이용하여 봉덕, 춘당, 매일 자료로 구성하였다. 토양자료의 구성은 Landuse, SoilType, Slope 등 3가지로 구성된다. 정밀토양도에서 사용되는 토양자료는 한국토양정보시스템(ASIS : An Introduction of Korean Soil Information System)을 이용하여 토양의 속성을 파악하였다. Table 2는 유역의 정밀토양도(Soiltype)를 나타내며 농촌진흥청에서 제공하는 정밀토양도(1:50,000)를 이용하여 작성하였다. Table 3은 토지이용도(Landuse) 구성현황으로 WAMIS에서 제공되는 토지이용도를 사용하였으며 8가지 (WATR: 수역, URBN: 시가화지역, HAY: 나지, PAST: 목장용지,

Table 2. Soil Types

Soil Type	Area(km <sup>2</sup> )	Ratio(%)	Hydrological Soil Group	Soil Type	Area(km <sup>2</sup> )	Ratio(%)	Hydrological Soil Group
ArC	0.980	1.616	B	SfC	0.040	0.065	B
DbF2	0.060	0.105	B	SgE2	10.290	16.926	A
DpF2	6.030	9.913	B	SmE2	0.100	0.171	A
GpB	0.020	0.030	D	SmF2	2.280	3.752	A
HbF2	0.210	0.353	B	SND2	0.010	0.013	A
HEC	0.760	1.248	A	SNE2	5.390	8.868	A
HYB	0.110	0.176	A	SNF2	6.720	11.050	A
JiB	0.150	0.248	C	SqC	0.750	1.237	A
JiC	0.130	0.210	C	SqD	0.300	0.490	A
JoB	0.430	0.712	A	SRF2	2.380	3.922	A
JoC	1.830	3.016	A	StD	0.030	0.053	B
KcB	0.270	0.444	A	SuB	0.120	0.203	A
MdF	11.190	18.410	C	SuC	0.280	0.466	A
MoC	0.270	0.440	A	UoB	0.110	0.185	B
OaE	0.090	0.145	A	UoC	0.090	0.147	B
OaF	9.530	15.675	A	WjE	0.400	0.663	A
OdE	2.130	3.503	A	WjF	1.320	2.172	A
OdF	32.060	52.735	A	WoB	0.510	0.846	A
PxB	0.060	0.100	A	WoC	0.040	0.066	A
RC	0.780	1.276	A	YbD2	0.040	0.074	A
RCS	1.590	2.617	A	YjB	0.080	0.124	C

Table 3. Landuse

Classification	WATR	URBN	HAY	PAST	FRST	AGRL	AGRR
Area(km <sup>2</sup> )	0.005	0.163	0.140	2.111	148.444	12.638	0.960
Ratio(%)	0.001	0.100	0.090	1.280	90.260	7.680	0.580

Table 4. Slope

Slope(°)	0 - 25	25 - 50	over 50
Area(km <sup>2</sup> )	50.05	85.92	28.48
Ratio(%)	30.4	52.2	17.3

FRST: 산림용지, AGRL: 논, AGRR: 밭) 항목 중 산림용지가 90% 이상 차지하는 것을 확인하였다. Table 4는 유역평균경사(Slope)의 구성현황이며 수치지도(1:5000)를 활용하여 DEM을 자료를 분석하여 3등분하여 나타내었다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 선행모의 기간

SWAT 모형의 선행모의 구성기간에 적절한 설정이 필요하다. 선행모의기간이 유출에 미치는 영향을 확인하고자 본 모의기간을 2003년~2009년을 대상으로 하고, 선행모의기간을 0년, 1년, 2년, 3년, 8년의 5가지로 구성하여 모의하였다. Figure 3에서는 5가지 선행모의기간의 실측 및 모의 유출량에 대한 산포도의 적용결과다. 선행모의기간의 적용에 따른 유출량은 다소 차이가 있어 선행모의에 대한 필요성은 있으나, 총 유출량에 큰 영향을 미치지 않았다. 아울러 선행모의기간이 2년 이상인 경우에 총 유출량의 변동이 없는 것을 확인하였다. Table 5에서와 같이 각 선행모의기간에 따른 RMSE, 평균상대오차와 잔차평균의 차이는 다소 있으나 큰 변화는 없다. 이는 SWAT 모형이 장기 유출모형으로 선행모의에 의한 강우에 대한 유역의 반응이 민감하지 못함에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 선행모의기간에 따라 유출량 산정이 크게 영향을 미치지 못한다고 판단되어 선행모의의 필요성은 없는 것으로 판단 된다.

##### 4.2 토양도의 층수 적용

토양층의 토양자료 사용개수는 최대 10개의 층으로 구분되고, 본 연구에 사용된 황성지역 정밀토양도에는 토양의 심도와 속성에 따라 최대 6개 층의 사용이 가능하다. 토양층 수 및 입력인자들을 1층~5층 이상으로 분류하여 토양층 수의 적용 개수에 따라 2003년~2009년의 유출모의를 진행하여 모의 값과 실측값을 비교 분석 하였다. 토양층의 사용에 따른 투수계수(*k*)와 용적밀도(*AWC*)는 정밀토양도의 토양층별 값을 달리하므로 여러 층을 적용할 필요가 있다. 토양층 수별 적용에 따른 토양의 층이 깊어지면서 토양에 흡수되는 유효 수분량, 침투 및 침투현상 등이 증가되어 적은 강우에 대해서는 유출이 감소되는 것을 확인하였으나 큰 변화는 없었다. 반면에 많은 강우가 내렸을 경우 침투 유출량 값을 증대되는 결과를 보였다. Figure 4는 2003년~2009년의 토양층수별 실측값과 모의

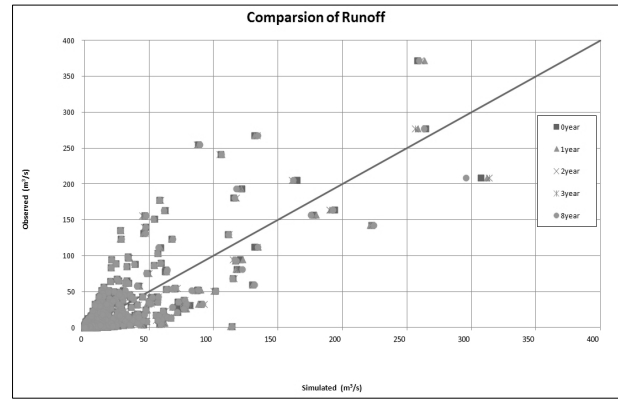


Fig. 3. Scattering between Simulated and Observed Runoffs with the Simulation of various Antecedent Periods

Table 5. Statistical Values with the Simulation of various Antecedent Periods

Classification	Antecedent Simulation Period(year)					Rem.
	0	1	2	3	8	
RMSE(m <sup>3</sup> /s)	13.67	13.66	13.70	13.70	13.62	
Averaged relative error(%)	1.34	1.33	1.35	1.35	1.35	
Residual mean (m <sup>3</sup> /s)	4.15	4.15	4.16	4.16	4.14	
Total runoff(m <sup>3</sup> /s)	15,558	15,505	15,621	15,621	15,621	

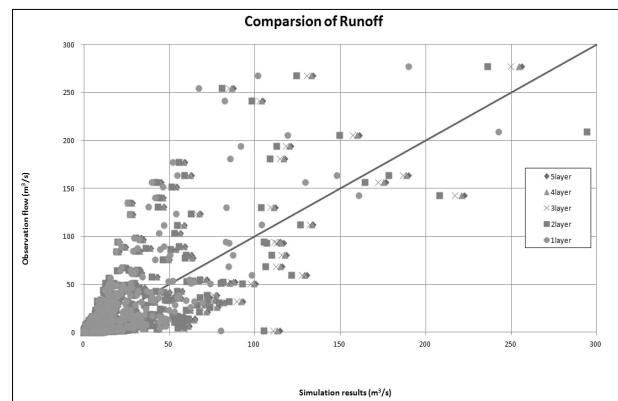


Fig. 4. Scattering between Simulated and Observed Runoffs with the Number of Soil Layers

Table 6. Statistical Values with the Number of Soil Layers

Classification	Number of Soil Layers(layer)					Rem.
	1	2	3	4	over 5	
RMSE (m <sup>3</sup> /s)	14.44	13.88	13.76	13.72	13.70	
Averaged relative error (%)	2.08	1.58	1.43	1.37	1.35	
Residual mean (m <sup>3</sup> /s)	4.49	4.29	4.21	4.17	4.16	
Total runoff(m <sup>3</sup> /s)	15,911	15,667	15,613	15,596	15,621	

결과를 비교한 산포도이다. Table 6은 토양층 수별 적용결과에 실측유량과 모의유량에 대한 RMSE, 상대오차, 잔차평균, 총 모의 유출량이다. 토양층수의 적용개수는 강우-유출의 결과 실측값과 모의 값의 차이가 크지 않았다. 따라서 여러 토양층수 사용에 따른 유출량의 변화는 다소 있으나 그 영향이 크지 못한 것으로 판단된다. SWAT 모형의 특성상 많은 입력 자료의 사용에 따른 불편이 있으므로 토양층의 사용 층수를 다소 축소하여도 유출량의 큰 변화가 없을 것으로 판단된다.

4.3 매개변수 민감도 및 최적화

SWAT모형의 각각 매개변수들 마다 최소와 최대값이 정의되어 있다. 시행착오법에 의한 매개변수 민감도 분석결과 유출에 영향을 가장 많이 미치는 매개변수들은 25가지의 항목에서 CANMX, CN<sub>2</sub>, ESCO, GW\_REVAP, SOL\_ALB, SOL\_AWC, SOL\_K, EPCO, GWQMN, SLOPE, SLSUBBSN의 11개로 확인하였다. Figure 5에서와 같이 매개변수 변경에 따른 유출의 비례, 반비례 기타 값에 대한 증감 폭을 도식화 하였다. GIS에 의해 직접입력이 가능한 SLOPE와 SLSUBBSN은 매개변수 최적화에 제외하였다. 아울러 유출에 큰 영향을 미치나 유출의 변화폭이 너무 크고, 최소최대 변동폭이 큰 EPCO와 GWQMN을 제외시킨 최종 7가지 매개변수에 대한 최적값을 추정하였다.

Table 7은 SWAT-CUP의 SUFI-2 알고리즘을 이용한 민감도 분석결과이며 각 변수의 상대적인 민감도 값을 나타낸다. 절대값이 클수록 목적함수 값에 대한 민감도가 높은 지표 *t-test*와 절대값이 작을수록 민감도가 높은 *P-value* 값은 각각 2.25, 0.15로 CANMAX이 가장 민감하게 나타났다.

SWAT-CUP의 SUFI-2에 의한 매개변수 산정의 적용성을 검토

하기 위하여 2003-2007년의 강우-유출자료를 이용하여 최적 매개변수를 산정하였다. Table 8은 7가지 매개변수에 대한 정의와 각 매개변수의 최대, 최소의 범위와 그에 따른 SWAT-CUP의 SUFI-2에 의한 최적 매개변수 값이다. SWAT-CUP 모형의 최적 매개변수 값은 입·출력자료를 Import하여 SUFI-2프로그램에서

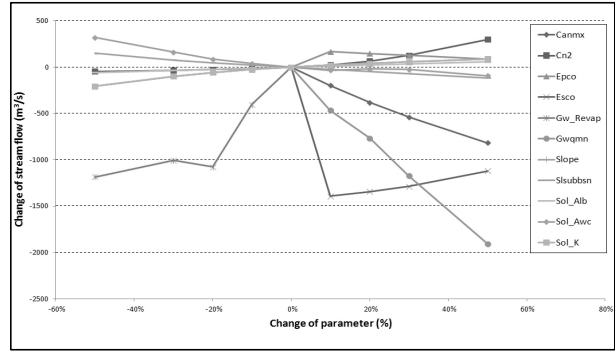


Fig. 5. Sensitivity Analysis for Parameters

Table 7. Sensitivity Analysis of Parameters by SUFI-2 of SWAT-CUP

Subbasin	Sensitivity Analysis		Rem.
	<i>t-test</i>	<i>P-value</i>	
v_GW_REVAP	1.21	0.35	
v_CANMX	2.25	0.15	
v_ESCO	1.36	0.31	
r_CN <sub>2</sub>	0.36	0.76	
r_SOL_ALB	0.62	0.60	
r_SOL_AWC	0.80	0.51	
r_SOL_K	0.41	0.72	

Table 8. Optimal Parameters by SUFI-2 of SWAT-CUP

Input File	Parameters	Definition	SUFI - 2 Simulation		
			Lower Boundary	Upper Boundary	Fitted Value
GW	v_GW_REVAP	Revap. coefficient	0.02	0.20	0.03
HRU	v_CANMX	Maximum canopy storage (mm H <sub>2</sub> O)	0.00	10.00	8.50
MGT1	v_ESCO	Soil evaporation compensation factor	0.00	1.00	0.81
SOL	r_CN <sub>2</sub>	Initial SCS runoff curve number	35.00	98.00	69.65
	r_SOL_ALB	Moist soil albedo	0.00	0.25	0.21
	r_SOL_AWC	Available water capacity of soil layer (mm H <sub>2</sub> O/mm soil)	0.00	1.00	0.45
	r_SOL_K	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	0.00	100.00	55.00

Table 9. Evaluations for SUFI-2 of SWAT-CUP

Subbasin	Objective Function Evaluation		Uncertainty Evaluation	
	R <sup>2</sup>	NS	<i>P-factor</i>	<i>R-factor</i>
Seom-river	0.98	0.92	0.85	0.06

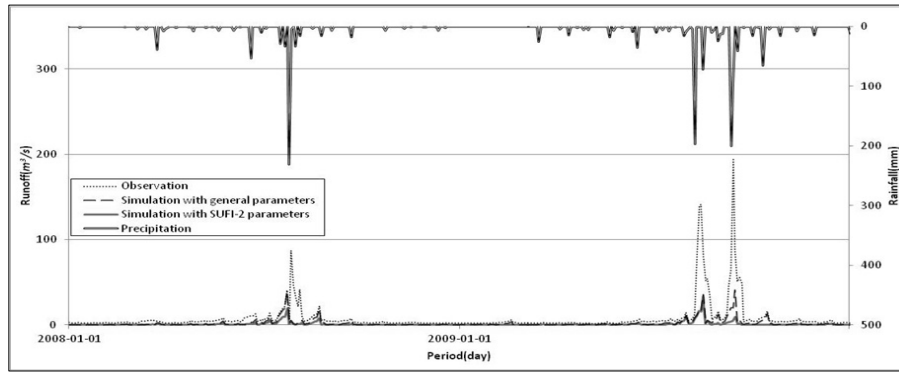


Fig. 6. Rainfall-Runoff Simulations using the Estimated Parameters by SUFI-2 and Default Parameters in SWAT (2008 ~ 2009)

Table 11. Verification for the Estimated Parameters (2008 ~ 2009)

Subbasin	RMSE ( $m^3/s$ )	
	Simulation with Default Parameters	Simulation with Estimated Parameters by SUFI-2
Seom-river	1.02	0.96

매개변수의 값을 변환시키는 방법을 사용하였다. Table 7과 8의 각각 매개변수 앞에 붙인 ‘v’은 Replaced by value 방법이고, ‘r’은 Multiply by value(%) 방법이다.

Table 9는 SWAT-CUP의 SUFI-2에 의한 최적매개변수를 적용한 유출모의결과 매개변수의 적합성을 나타내고 1에 가까울수록 정확도가 향상되는 지표 NS(Nash-Sutcliffe)는 0.92이고(Daren and Smith, 2007), 결정계수  $R^2$  또한 0.98로 높게 나타났다. 또한, 모형의 불확실도를 나타내는 95PPU 밴드는 비교적 고르게 나타났으며, 지표  $P-factor$ 는 1에 가까울수록 신뢰성이 높으며,  $R-factor$ 는 0에 가까울수록 불확실도에 수렴하는 지표로 각각 0.85, 0.06으로 모형의 신뢰성을 나타냈다. 불확실성을 나타내는 95PPU 밴드가 규칙적으로 고르게 나타나지는 않았지만 통계적인 결과 값이 만족하다 해서 무조건 신뢰할 수 없을 것이다. 따라서  $P-factor$ 의 값이 크면서  $R-factor$  값이 작으며 95PPU 밴드가 고르게 분포할 때 불확실성 파악에 가장 용이하다.

Figure 6는 2003~2007년 섬강시험유역 자료에 의한 SWAT-CUP에 SUFI-2의 최적매개변수 값을 사용한 2008-2009년의 강우-유출결과이다. 실측치와의 분석결과는 SWAT모형의 일반적인 매개변수를 사용한 유출모의결과의 RMSE는 1.02, SWAT-CUP의 SUFI-2 알고리즘을 이용한 최적매개변수 값을 적용한 모의 유출결과 RMSE가 0.98로 나타났다(Table 11). 따라서 SWAT-CUP의 SUFI-2 알고리즘에 의한 매개변수의 사용에 따른 RMSE가 작게 나타나 강우-유출 현상을 적절하게 모의함을 보여준다. SWAT모형의 모의를 통하여 침투유량을 과소 모의하는 문제점을 확인할 수 있었다. 이는 SWAT 모형이 일 단위 기상자료를 입력자

료로 사용하기 때문에 강우의 집중을 고려하지 못하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

### 5. 결론

장기 강우-유출과정의 특성을 파악하기 위한 준분포형인 SWAT 모형의 적용성을 평가하였다. 실제 대상모의 기간 이전의 선행모의 기간과 토양층의 사용 개수의 적용에 따른 강우-유출 특성을 분석하였다. 아울러 SWAT모형의 매개변수의 민감도 분석과 SWAT-CUP모형의 SUFI-2 알고리즘의 반복계산을 통해 SWAT 모형 매개변수의 자동보정을 실시하고 최적 매개변수를 추정하였다. 자료는 섬강시험유역에서 2003 ~ 2009년까지 계속된 유출량을 이용하였다.

- (1) 실제 모의에 앞서 선행모의에 따른 총 유출량 모의결과의 변화는 있으나, 장기 강우-유출모형으로 선행모의 기간에 따른 총 유출량의 영향은 크지 못하여 선행모의의 필요성은 없는 것으로 판단된다.
- (2) SWAT모형 구성 요소의 UseSoil 구성에서 사용하는 토양층의 사용수에 따라 유출량의 변화는 다소 있으나 그 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 토양층의 사용수에 따른 유출량의 모의결과는 큰 영향을 미치지 못한다고 판단된다.
- (3) SWAT모형의 매개변수의 민감도 분석을 실시하였다. 그 중 7가지 매개변수인  $CANMX$ ,  $CN_2$ ,  $ESCO$ ,  $GW\_REVAP$ ,  $SOL\_ALB$ ,  $SOL\_AWC$ ,  $SOL\_K$ 의 최대, 최소 범위를 통해 SWAT-CUP의 SUFI-2 모델의 반복 계산을 통해 최적값을 도출하였다. 최적값의 판단을 위한 NS값은 0.92로 유출모의 결과 실측값과 모의값은 매우 유사한 값을 나타내었고, 모형 효율성계수  $R^2$  값 0.98로 유사한 값을 나타냈다. 불확실도 범위를 나타내는  $P-factor$ 가 0.85,  $R-factor$ 는 0.06으로 모의 결과가 실측값과 일치하는 것으로 확인하였다.

- (4) 섬강시험유역에 2003-2007년의 강우-유출 자료를 이용하여 SWAT-CUP의 SUFI-2에 의한 최적 매개변수를 산정하였다. 산정한 매개변수의 적용성 검토를 위해서 2008-2009년의 자료를 이용하여 SWAT모형의 유출모의를 실시하였다. SWAT 모형에서 권장하는 일반적으로 사용 가능한 매개변수에 의한 SWAT모형의 유출모의 결과 RMSE가 1.02, SWAT-CUP의 SUFI-2에 의한 최적매개변수를 적용한 유출모의 결과 RMSE가 0.96으로 나타났다.
- (5) SWAT 모형의 매개변수 추정에 있어 SWAT-CUP의 SUFI-2에 의한 매개변수의 사용은 강우-유출의 적용성이 높은 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2011학년도 상지대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., and Srinivasan, R. (2007). "Spatially-distributed modelling of hydrology and water quality in the prealpine/alpine Thur watershed using SWAT." *Journal of Hydrology*, pp. 413-430.
- Abbaspour, K.C. (2008). *SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling(SIAM)*, Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland.
- Abbaspour, K.C. (2011). *SWAT-CUP4: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling(SIAM)*, Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland.
- Arnold, J.G. and Allen, P.M. (1996). "Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds." *Journal of Hydrology*, Vol. 176, pp. 57-77.
- Cao, W., Bowden, W.B., Davie, T., and Fenemor, A. (2005). "Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability." *Hydrological Processes*, Vol. 20, pp. 1057-1073.
- Daren, R. and Smith, P.K. (2007). "Consideration of measurement uncertainty in the evaluation of goodness-of fit in hydrologic and water quality modeling." *Journal of Hydrology*, Vol. 337, pp. 236-336.
- Jang, D.W., Kim, N.W., Kim, H.S., and Seoh, B.H. (2004). "Simulation of Daily Streamflows by SWAT Based on GIS." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 724-730 (in Korean).
- Joh, H.K., Park, J.Y., Shin, H.J., Lee, J.W., and Kim, S.J. (2011). "The Uncertainty Analysis of SWAT Simulated Streamflow Applied to Chungju Dam Watershed." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 29-29 (in Korean).
- Kim, J., Son, K., Noh, J., Jang, C-L., and Ko, I.H. (2006). "Multi-variable and Multi-site Calibration and Validation of SWAT for the Gap River Catchment." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 10, pp. 867-880 (in Korean).
- Kim, N.W., Lee, J.E., and Won, Y.S. (2005). "Application of SWAT model on Soyang Dam Basin." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 628-632 (in Korean).
- Lee, D.H. (2006). "Automatic Calibration of SWAT Model Using LH-OAT Sensitivity Analysis and SCE-UA Optimization Method." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 8, pp. 677-690 (in Korean).
- Lee, E. and Seo, D. (2011). "Flow Calibration and Validation of Daechung Lake Watershed, Korea Using SWAT-CUP." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 9, pp. 711-720 (in Korean).
- Lee, K.S., Chung, E.S., Shin, M.J., and Kim, Y.O. (2006). "Determination of Instreamflow Requirement for Upstream Urban Watershed Using SWAT Model." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 8, pp. 703-716 (in Korean).
- Park, J.Y., Lee, M.S., Park, G.A., and Kim, S.J. (2008). "Comparative Analysis of SWAT Generated Streamflow and Stream Water Quality Using Different Spatial Resolution Data." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 11, pp. 1079-1094 (in Korean).
- Ryu, J., Kang, H., Choi, J.W., Kong, D.S., Gum, D., Jang, C.H., and Lim, K.J. (2012). "Application of SWAT-CUP for Streamflow Auto-calibration at Soyang-gang Dam Watershed." *Journal of Korean Society on Water Environment*, KSWE, Vol. 28, No. 3, pp. 347-358 (in Korean).
- Schuol, J., Abbaspour, K.C., Srinivasan, R., and Yang, H. (2008). "Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model." *Journal of Hydrology*, Vol. 352, pp. 30-49.
- Setegn, S. G., Srinivasan, R., Melesse, A. M., and Dargahi, B. (2010). "SWAT model application and prediction uncertainty analysis in the Lake Tana Basin, Ethiopia." *Hydrological Processes*, 24, pp. 357-367.
- Van Griesven, A. and Meixner, T. (2003). "Sensitivity, optimization and uncertainty analysis for the model parameters of SWAT. In: SWAT 2003." *2nd International SWAT Conference*, Bari, Italy.
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M., and Arnold, J. (2010). *ArcSWAT interface for SWAT2009 : User's Guide*. USDA Agricultural Research Service.
- Yang, J., Abbaspour, K.C., Reichert, P., and Yang, H. (2008). "Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to Chaohe Basin in China." *Journal of Hydrology*, 358, pp. 1-23.