

충주댐 유역의 유출량에 대한 SWAT 모형의 예측 불확실성 분석 기법 비교

Comparing Prediction Uncertainty Analysis Techniques of SWAT Simulated Streamflow Applied to Chungju Dam Watershed

조형경* / 박종윤** / 장철희*** / 김성준****

Joh, Hyung Kyung / Park, Jong Yoon / Jang, Cheol Hee / Kim, Seong Joon

Abstract

To fulfill applicability of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model, it is important that this model passes through a careful calibration and uncertainty analysis. In recent years, many researchers have come up with various uncertainty analysis techniques for SWAT model. To determine the differences and similarities of typical techniques, we applied three uncertainty analysis procedures to Chungju Dam watershed (6,581.1 km²) of South Korea included in SWAT-Calibration Uncertainty Program (SWAT-CUP): Sequential Uncertainty Fitting algorithm ver.2 (SUFI2), Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE), Parameter Solution (ParaSol). As a result, there was no significant difference in the objective function values between SUFI2 and GLUE algorithms. However, ParaSol algorithm shows the worst objective functions, and considerable divergence was also showed in 95PPU bands with each other. The *p-factor* and *r-factor* appeared from 0.02 to 0.79 and 0.03 to 0.52 differences in streamflow respectively. In general, the ParaSol algorithm showed the lowest *p-factor* and *r-factor*, SUFI2 algorithm was the highest in the *p-factor* and *r-factor*. Therefore, in the SWAT model calibration and uncertainty analysis of the automatic methods, we suggest the calibration methods considering *p-factor* and *r-factor*. The *p-factor* means the percentage of observations covered by 95PPU (95 Percent Prediction Uncertainty) band, and *r-factor* is the average thickness of the 95PPU band.

Keywords : SWAT-CUP, SUFI2, GLUE, ParaSol, Prediction Uncertainty

요 지

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형의 적용성 검증을 위해서는 매개변수 민감도 분석 및 검·보정, 예측 불확실성 분석을 필요로 한다. 최근 SWAT 모형의 불확실성을 분석하기 위한 다양한 기법들이 개발되었는데, 본 연구는 충주댐 유역(6,581.1 km²)을 대상으로 유역출구점의 실측 일 유출량 자료(1998~2003)를 바탕으로 SWAT 모형의 유출관련 매개변수에 대한 불확실성 분석을 실시하였다. 이때 사용된 분석 기법으로는 SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting algorithm ver.2), GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), ParaSol (Parameter Solution) 등을 적용하였다. 이러한 기법은 모두 SWAT-CUP (SWAT-Calibration Uncertainty Program; Abbaspour et al., 2007) 모형에 탑재되어있으

* 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 석사, 차세대도시농림융합기상사업단 연구원 (e-mail: jawbreak@konkuk.ac.kr)
Master, Researcher, Weather Information Service Center, Seoul 121-835, Korea

** 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 박사수료 (e-mail: bellyon@konkuk.ac.kr)
Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

*** 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 박사, 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원 (e-mail: chjang@kict.re.kr)
Ph.D., Researcher, Hydrologic Cycle Research Team, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi-do 411-712, Korea

**** 교신저자, 건국대학교 생명환경과학대학 사회환경시스템공학과 교수 (e-mail: kimsj@konkuk.ac.kr, Tel: 02-450-3749)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

며, 모형의 결과로써 검·보정, 매개변수의 민감도 분석, 각종 목적 함수 및 불확실성의 범위 등이 자동으로 산출되므로 모형의 사용자가 불확실성 평가 기법의 분석 및 비교를 손쉽게 할 수 있다. 그 결과 대표적인 목적 함수인 결정 계수(R^2 ; Legates and McCabe, 1999)와 NS (Nash and Sutcliffe, 1970) 모형 효율은 모두 0.67에서 0.92 사이의 값을 나타내어 대체적으로 모의가 잘 이루어졌음을 알 수 있었다. 그러나 불확실성의 범위를 나타내는 지표인 p -factor 및 r -factor에서는 평가 기법 별로 그 차이가 확연하게 드러났다. 여기서 p -factor는 불확실성 범위에 실측치가 포함되는 비율이며, r -factor는 불확실성의 상대적인 범위로 각각 1과 0에 가까울수록 모의 기법의 성능이 우수함을 의미한다. 세 가지 알고리즘 중에서 SUFI2의 p -factor가 약 0.79로 가장 높게 나타났으며, ParaSol의 r -factor가 0.03으로 가장 작게 나타났다. 본 연구의 결과는 SWAT 모형을 이용한 수문 모의에서 수문분석에 따른 예측결과의 불확실성을 정량적으로 평가함으로써, 모형의 적용성 평가 및 모의결과의 신뢰성 확보에 근거자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : SWAT-CUP, SUFI2, GLUE, ParaSol, 예측 불확실성

1. 서 론

SWAT 모형은 특정 지역의 관리나 정책 결정, 연구 등을 목적으로 하는데 있어 매우 유용한 모형이라 할 수 있다(Arnold et al., 1998). 대부분의 SWAT 모형을 이용한 연구에서는, 유역내의 수문 반응을 검증하기 위하여 실측되는 유출 자료가 주로 사용되어 왔다(Arnold and Allen, 1996; Manguerra and Engel, 1998; Petersons and Hamleet, 1998; Sophocleous et al., 1999). 어떤 정책의 결정이나 차선책을 결정하는데 있어서 이러한 분포형 모형을 이용한 연구가 필수적이라고 할 수 있겠으며, 이를 위해서는 반드시 신중한 검·보정 과정과 모형 내 매개변수의 민감도 분석이 병행되어야 한다. 그러나 이러한 모형은 입력자료, 모형의 구조, 매개변수, 사용자에 의한 환경 변화 등에 따라 필연적으로 모의 결과의 불확실성이 발생하게 된다(Yang et al., 2008). 이러한 무수하고 복잡한 불확실성의 원인에, 모형을 이용함에 있어 오류가 발생할 수밖에 없을 것이다(Bastidas et al., 2003; Seibert and McDonnell, 2003). Jake and Hornberger (1993)는 특정 강수와 유출량 자료만으로는 모형의 보정 매개변수의 복잡함을 설명하기에는 매우 제한적이라고 하였으며, Kuczera and Mrozkowski (1998)은 유사한 모형들을 이용하여 유출량자료 만으로는 매개변수의 식별이 매우 저급할 수도 있으며, 이러한 유출량 자료만의 이용은 매개변수의 불확실성을 감소시키는데 비효과적이라고 주장하였다. 모형의 구조에 따른 불확실성으로는, 유역 내에서 발생하나 사용자가 파악하지 못한 활동에 의함과 과도하게 단순화되어 표현된 수문기작에 따른 모형의 부정확성 등이 있다. 이러한 불확실성은 유역 내 지표면·지표하 유출에 따른 저수지 기작이나 수리·수문학적 또는 영양물질 등의 이송 등을 명확하게 모의하

지 못하게 한다. 입력 자료에 의한 불확실성은 관측 자료 자체의 오차나 표고, 토지이용, 강우 강도 등의 일률적이고 임의적인 보간 등과 연관이 있을 것이다. 또 다른 불확실성의 원인으로서는 분포형 모형내의 알려지지 않은 수많은 매개변수 등이 있다.

이러한 모형의 불확실성을 고려하고자 최근 불확실성 분석 기법들이 다수 개발되어 다양한 유역에 적용되어 왔다(Yang et al., 2008). 이러한 기법들은 일반적으로 사용되는 Frequentist나 Bayesian 접근법으로부터 파생되어 개발된 것이며, 연립되어 발생하는 최적화와 자료의 동화작용(Vrugt et al., 2005), 순차적으로 발생하는 자료의 동화작용(Moradkahn et al., 2005), 융합된 Bayesian 불확실성 산정 기법(Ajami et al., 2007), 모형의 결손을 파악하기 위한 시간독립적인 매개변수의 사용과 입력자료 및 모형 구조의 불확실성(Reichert and Mieleitner, 2009) 등을 포함할 수도 있을 것이다. 수많은 기법들이 존재함에도 불구하고, 극히 드문 연구만이 한 개 이상의 기법을 비교 평가하였다(Yang et al., 2008).

그러나 이러한 수많은 모형의 불확실성의 원인 중 모형 사용자가 파악할 수 있는 것은 부정확한 매개변수에 의함이며, 모형을 구동하면서 부정확한 매개변수의 평가를 실시할 수도 있을 것이다. 따라서 본 연구는 기존의 목적함수에 의한 모형 검정 대신, SWAT-CUP에 내장되어 있는 SUFI2, GLUE (Beven and Binley, 1992) 및 ParaSol (van Griensven and Meixner, 2006)를 이용하여 SWAT 모형의 매개변수에 따른 예측 불확실성을 산정하고 정량화 하여 비교 분석을 실시하였다. 이를 위하여 실측자료가 95PPU 밴드에 포함되는 비율인 p -factor와 95PPU 밴드의 상대적인 넓이를 나타내는 r -factor를 이용하였으며, 각 기법에 따라 모형의 능력을 검정하고자 하였다(이론적으

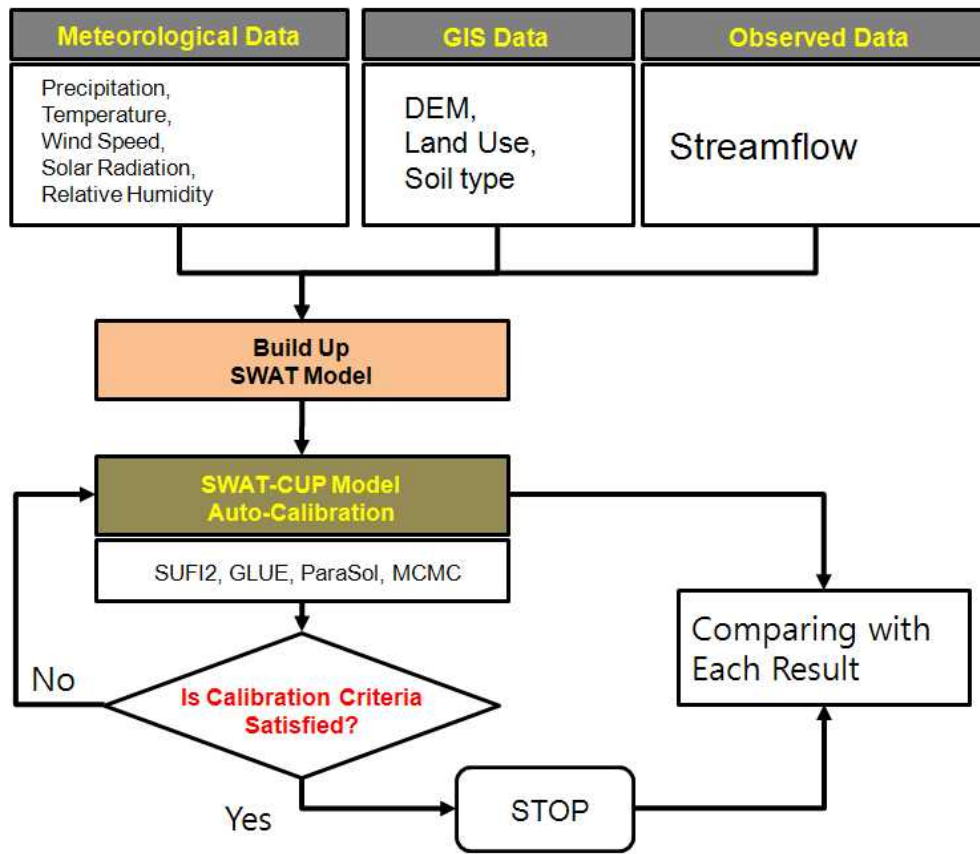


Fig. 1. The Flow Chart of This Study

로는 p -factor는 1에 가까울수록, r -factor는 0에 가까울수록 뛰어난 결과라 할 수 있다). Fig. 1은 본 연구의 흐름도를 나타낸 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 SWAT 모형

SWAT 모형은 물리적 기반의 준분포형 장기 강우유출 모형으로써, 수문학적 토지이용정책, 토사유실과 농업지구의 이송물질 등을 예측하기 위해 개발된 모형이다. 각 수문 성분 및 수질 성분 등의 일단위 모의가 가능하며, 유역을 몇 개의 작은 소유역으로 나누어 모의를 한다. 소유역의 크기 및 개수는 하천의 복잡도와 유역자체의 크기에 따라 달라지며, 이 소유역은 지형자료(DEM: Digital Elevation Model, 토양도, 토지이용도)를 기반으로 하여 HRUs (Hydrological Response Units) 단위로 더 잘게 나누어진다. 토양통 자료의 물리적 속성은 usersoil.dbf파일 형태로 모델에서 구동이 되며 국내토양속성값을 적용하기 위해 토양환경정보시스템으로부터의 값들을 사용하여 입력하였다. HRUs는 지리학적 지도에 따라 각 구역별로 조합되며, 입력된 기상자

료, 토양속성, 지형, 식생, 토지이용정책과 기타 여러 요소들이 복합적으로 연관되어 각 수문성분(유출, 증발산 토양수분 등)과, 유사, 영양물질 부하 등이 각 HRUs별로 계산되고 예측된다(Neitsch et al., 2005). 이때 사용된 지형자료는 다음 Table 1과 같다.

2.2 SWAT-CUP 모형

SWAT-CUP 모형은 스위스 연방 연구소인 Eawag (Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz)에서 개발된 모형으로써, SWAT 모형의 검·보정 결과에 영향을 미치는 매개변수의 불확실성의 범위를 평가하고 예측할 수 있는 모형이다. 기존에 개발된 불확실성 평가기법은 무수하지만, 결과를 이끌어 내거나 비교하는 전 과정은 모형 구동자가 직접 수동으로 계산하여야 했다. 따라서 SWAT-CUP 모형은 이러한 불편함과 무의미한 시간소모를 줄이고자 개발되었으며, 총 4개의 평가기법을 탑재하고 있다. SWAT 모형의 자동 검·보정을 수행할 수 있으며 및 평가기법별 결과를 매우 손쉽게 비교하고 도식화 할 수 있는 장점이 있다. 본 프로그램은 Eawag 웹사이트(<http://www.eawag>).

Table 1. GIS (Geographic Information System) Sets for SWAT

GIS Data	Source	Scale	Data Description / Properties
Terrain	NGIS ^[*]	1/5,000	DEM
Soil	KRDA ^[**]	1/25,000	Soil Classifications and Physical Properties
Land Use	Landsat TM Satellite Image	30 m	Land Use Classifications

[*] : National Geographic Information System

[**] : Korea Rural Development Administration

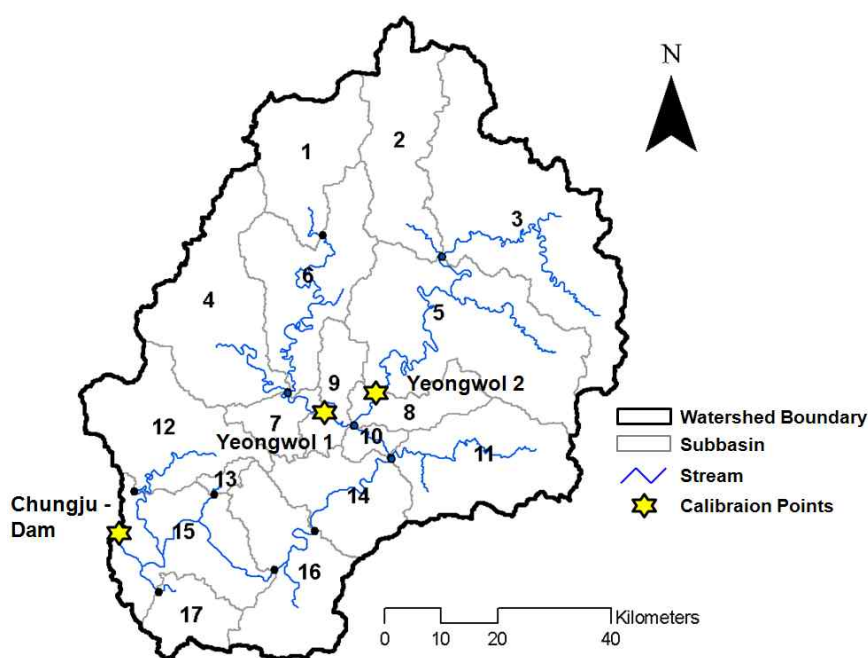


Fig. 2. Boundary and Calibration Points of the Study Watershed

ch/forschung/siam/software/swat/index)에서 무료로 배포하고 있으며, SWAT 버전에 따라 2.1.5와 3.1.3의 두 가지 버전이 있다. SWAT-CUP은 SWAT 모형의 입력 자료 및 모의 결과 자료를 그대로 불러들여 다시 입력 자료로 재활용 하므로, 입력자료를 재구축해야하는 번거로움은 없다. 또한 사용자는 간단한 텍스트 입력만으로 손쉽게 모형을 구동할 수 있다.

2.3 연구 대상 유역

본 연구에서는 충주호를 포함하는 충주댐 상류유역을 대상유역으로 선정하였다. 기본 지형입력자료 구축을 위하여 NGIS의 1:5,000 수치지도로부터 격자크기 30m의 DEM(Digital Elevation Model)을 제작하고(Fig. 2), SWAT 모형의 자동경계추출(Automatic Delineation)모듈에서 DEM을 입력자료로 하여 지형전처리 과정을 수행하였

다. 토지이용도는 수문해석 및 비점오염원 평가에 있어 필수 정보 중에 하나이다. 토지이용도는 환경부로부터 1:25,000 중분류 토지이용도 구축하였다. 이를 위해 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 기준으로 분류하였다. 이로부터의 지형자료로 유역면적은 6,581.1 km²이며, 유역평균표고는 609.1 m, 유역평균경사는 36.9%로 국내 북동부 산악지역에 위치함을 알 수 있었다. 논과 밭이 유역면적의 2.8%와 8.8%를 차지하며 산림면적은 유역면적의 82.2%를 차지하고 있다. 기상청에서의 요소별 기상자료로부터 최근 10년 동안의 연평균 강수량은 1,359.5 mm, 평균온도는 9.4°C를 나타냈다. SWAT 모형에서 필요로 하는 입력 자료인 기상자료는 일 강우(mm), 기온(°C), 일사량(MJ/m²), 평균상대습도(%), 평균풍속(m/sec)이며, 본 연구에서는 강우, 기온, 상대습도, 풍속 자료는 1998년 1월 1일부터 2003년 12월 31일까지 기상

청에서 측정한 충주댐 유역의 기상관측소(대관령, 원주, 영월, 제천, 충주, 태백 관측소) 자료를 이용하였고(http://www.kma.go.kr), 일사량은 기상청에서 자료를 제공하지 않으므로, 일조시간을 이용하여 동일한 기간의 자료를 구축하였다. 다음 Fig. 2는 대상유역의 개요를 나타낸 것으로 유역경계, 소유역경계, 하천도 및 검·보정 지점을 나타내었다.

2.4 불확실성 분석 기법

SWAT-CUP은 총 GLUE, ParaSol, SUFI2, MCMC (Markov Chain-Monte Carlo)기법이 탑재되어있으나, 본 연구에서는 GLUE, ParaSol, SUFI2 등 총 3가지 방법을 이용하였다. 다른 분석 기법과는 다르게 MCMC를 이용한 결과에서는 목적함수나 최적 모의 결과, 매개변수의 민감도 등의 결과가 산출되지 않았기 때문이다.

2.4.1 SUFI2

SUFI2는 매개변수 Hypercube의 다변량 균일 분포에 의해 매개변수의 불확실성을 설명하는 기법이다. 이는 매개변수가 변함에 따라 출력된 자료의 상위 97.5%부터 하위 2.5%를 축적하여 산정하는 95% 예측 불확실성 밴드(95PPU)를 통해 불확실성을 수치화 하고 정량화 할 수 있다(Yang et al., 2008). Latine Hypercube 표본화를 통해 독립적인 매개변수 세트가 작성된다(Abbaspour et al., 2007). GLUE와 SUFI2는 유사한 방법으로 수문 모형에서 매개변수의 불확실성에 의한 예측 불확실성을 묘사한다(Yang et al., 2008).

SUFI2의 계산방법은 다음과 같다.

- 1) 먼저 목적함수 $g(\theta)$ 와 타당한 값을 갖는 매개변수의 최대, 최소값을 지정한다.
- 2) 매개변수 Hypercube로 부터 Latin Hypercube 표본화가 실행된다. 이에 부합하는 목적함수가 산정되고, 민감도 행렬 J 와 매개변수 공분산 행렬 C 가 다음에 의해 실행된다. 여기서 s_j^2 는 모형이 구동됨에 따라 얻어지는 목적함수의 변화량이다.

$$J_{ij} = \frac{\Delta g_i}{\Delta \theta_j}, \quad i = 1, \dots, C_2^m, \quad j = 1, \dots, n, \quad (1)$$

$$C = s_j^2 (J^T J)^{-1} \quad (2)$$

- 3) 매개변수 θ_j 의 95% 예측 간격은 다음과 같이 계산된다. 여기서 θ_j^* 는 매개변수 θ_j 의 최적 값이며, v 는 자유도이다.

$$\theta_{j,lower} = \theta_j^* - t_{v,0.025} \sqrt{C_{jj}} \quad (3)$$

$$\theta_{j,upper} = \theta_j^* + t_{v,0.025} \sqrt{C_{jj}} \quad (4)$$

- 4) 불확실성의 범위인 95PPU가 계산되면, 마지막으로 불확실성의 범위를 정량화 하는 지표인 p -factor와 r -factor가 계산이 된다. 여기서 Sim_i 는 95PPU 밴드 안에 포함되는 모의 결과의 개수이고, Sim_t 는 전체 모의 결과의 개수이다. k 는 관측자료 지점의 개수이며, X_U 는 95PPU의 최상위 값, X_L 은 최하위 값이다. 95PPU의 범위 안에 들어가는 실측치의 비율(p -factor)이 100%이면서, 95PPU의 상대적 넓이(r -factor)가 0에 가까울수록 이상적이라 할 수 있으나, 일반적으로 이러한 결과는 이끌어 내기 힘들다.

$$p\text{-factor} = \frac{Sim_i}{Sim_t} \quad (5)$$

$$r\text{-factor} = \frac{\frac{1}{k} \sum_{l=1}^k (X_U - X_L)_l}{\sigma_X} \quad (6)$$

2.4.2 GLUE

강우-유출 모형의 구조적인 불확실성을 고려하기 위해 1992년 Beven and Binley가 제안한 방법이며, 중요도에 따른 표본화와 지역규모 민감도 분석으로부터 파생된 기법이다(RSA; Hornberger and Spear, 1981). GLUE는 모든 불확실성의 근원을 매개변수에 의한 것으로 설명하는데, 그 이유는 우도추정 값은 매개변수의 세트와 연관되어 있으며 모든 불확실성의 원인과 매개변수 값의 공분산의 효과를 반영하기 때문이다(Beven and Freer, 2001). 또한 현실적인 관점에서 보면, 모형의 오류를 근원 요소로 분해하는 것은 매우 어려운 일이며, 부분적으로는 모형의 비선형적이고 다양한 오류의 원인들이 측정된 편차를 산정하는데 영향을 줄 것이기 때문이다(Gupta et al., 2005). GLUE는 “복잡한 자연의 유역 수문작용을 정확히 있는 그대로 수치 모형화 할 수 없다”는 수문 모의 방법의 한계에서 출발 하였다. 다양한 모형을 통해서 최적의 유량 예측과 유사한 결과들을 얻을 수 있다는 사실과 모형의 성능이 거의 동등하며 기준을 만족시키는 모형 및 매개변수가 하나 이상 존재한다는 사실을 고려한 방법이다(이효상 등, 2009).

GLUE의 계산 방법은 다음과 같이 단계별로 간략히 설명할 수 있다.

- 1) 모형의 성능을 판단하기 위한 일반화된 우도 함수 (Generalised likelihood measure)를 정의한다. 사전 분포로부터 충분히 많은 수의 매개변수 세트가 표본화되며, 각각의 매개변수 세트는 선정된 우도함수의 기준치(Threshold)에 따라 반응 변수(behavioral)와 비반응 변수(non-behavioral)로 구분한다.
- 2) 선정된 반응변수 세트에 대하여 우도함수의 가중치를 다음과 같이 산정하여 우수한 성능을 보인 변수 세트에 대한 가중치를 부여한다. 여기서 N은 반응변수 세트의 개수다.

$$w_i = \frac{L(\theta_k)}{\sum_{k=1}^N L(\theta_k)} \quad (7)$$

- 3) 주어진 모형의 매개변수의 사전 분포형으로 부터 많은 수의 매개변수 세트를 무작위로 추출한다. 모형의 영역의 적용에 관한 정확한 사전 정보가 없는 경우 일반적으로 균등분포를 사용한다.
- 4) 기준치의 선정은 모형의 성능 및 목적에 따라 사용자의 주관적인 판단이 고려된다.
- 5) GLUE 유량예측은 가중치된 모형의 매개변수들에 대하여 모의된 유량의 누적분위를 통하여 평가하고 있다. 일반적으로 사용되고 있는 90분위는 상하위의 5%의 예측을 제외한 범위로서 유량예측의 신뢰도를 나타내고 있다.
- 6) 사용 목적에 따라 다양한 우도 함수가 사용되나 본 연구에서 사용한 NS (Nash and Sutcliffe, 1970) 모형 효율이 일반적으로 사용되고 있다(Beven, 2001). 여기서 n은 관측 데이터의 개수이고, y_{t_i} 및 $y_{t_i}^M(\theta)$ 는 t_i 시간에서 관측값과 매개변수 θ 를 이용한 모형 모의 값을 나타낸다. \bar{y} 는 관측값의 평균치이다.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t_i=1}^n (y_{t_i}^M(\theta) - y_{t_i})^2}{\sum_{t_i=1}^n (y_{t_i} - \bar{y})^2} \quad (8)$$

2.4.3 ParaSol

ParaSol 방법은 목적함수를 포괄적인 최적화 기준(global optimization criterion, GOC)과 일치시키며, SCE-UA (Shuffle Complex Evolution-University of Arizona) 알고리즘을

기반으로 개발되었다(Hapuarachchi et al., 2001). 이는 최적값에 가까운 산정법에 초점을 맞춤 전체 매개변수의 범위를 표본화하기 때문에 모의가 실행되면서 매개변수 불확실성이 산출된다(van Griensven and Meixner, 2006).

ParaSol의 계산 과정은 다음과 같다.

- 1) 수정 SCE-UA 적용의 최적화 이후에, 모의는 “좋은”과 “좋지 않음”으로 구분된다. SCE-UA의 무작위성은 매개변수 전체 범위를 개선시킨다. 이는 GLUE에서 쓰이는 목적함수의 값을 기준으로 삼아 실행된다. 그 결과 “좋은” 매개변수 세트와 “좋지 않은” 매개변수 세트를 산출한다.
- 2) 예측 불확실성은 “좋은” 모의에 동등한 가중치를 부여하는 과정에 의해 구성된다. ParaSol에서 사용되는 목적함수는 SSQ (Sum of the Squares of the Residuals)이다.

$$SSQ = \sum_{t_i=1}^n (Y_{t_i}^M(\theta) - y_{t_i})^2 \quad (9)$$

NS 모형 효율과 SSQ와의 관계는 다음과 같다.

$$NS = 1 - \frac{1}{\sum_{t_i=1}^n (y_{t_i} - \bar{y})^2} \times SSQ \quad (10)$$

여기서, $\sum_{t_i=1}^n (y_{t_i} - \bar{y})^2$ 는 주어진 관측값에 의한 고정 값이다. GLUE와의 비교가능성을 향상시키기 위하여, 모든 ParaSol의 목적함수는 NS 모형 효율로 전환된다. 보정과 매개변수 불확실성의 “좋은”과 “좋지 않음”은 p -factor와 r -factor에 의해 판단된다.

만약 두 요소가 만족할만한 값을 갖는다면, 매개변수 hypercube (θ_{\min} , θ_{\max})의 균일한 분포가 새로운 후속 매개변수 분포로 해석 된다. 그 외에는, (θ_{\min} , θ_{\max})는 다음과 같이 갱신되며 새로운 계산과정이 필요하게 된다. 이 과정에서 목적함수는 자동으로 계산된다.

$$\theta_{j,\min,new} = \theta_{j,\min} - \max\left(\frac{\theta_{j,\min} - \theta_{j,\min}}{2}, \frac{\theta_{j,\max} - \theta_{j,\max}}{2}\right) \quad (11)$$

$$\theta_{j,\max,new} = \theta_{j,\max} + \max\left(\frac{\theta_{j,\min} - \theta_{j,\min}}{2}, \frac{\theta_{j,\max} - \theta_{j,\max}}{2}\right) \quad (12)$$

2.5 매개변수

수문 검·보정에 사용될 매개변수의 선정은 SWAT Theoretical Documentation (Neitsch et al., 2005)을 참고

Table 2. Parameters Concerned with Streamflow (Neitsch et al., 2005)

Parameters	Input File	Define	LB ^[*]	UB ^[**]
ALPHA_BF	.gw	Baseflow recession constant	0	1
CH_K2	.rte	Effective hydraulic conductivity in main channel	-0.01	500
CH_N2	.rte	Manning's "n" value for main channel	-0.01	0.3
CN2	.mgt	Moisture condition II SCS Curve Number	35	98
ESCO	.bsn	Soil evaporation compensation coefficient	0	1
GW_Delay	.gw	Delay time for aquifer recharge (days)	0	500
GW_Revap	.gw	Revap coefficient	0.02	0.2
GWQMN	.gw	Threshold water level in shallow aquifer for base flow (mm H ₂ O)	0	5,000
REVAPMN	.gw	Threshold water level in shallow aquifer for revap (mm H ₂ O)	0	500
SFTMP	.bsn	Mean air temperature at which precipitation is equally likely to be rain as snow/freezing rain (°C)	-5	5
SLSUBBSN	.hru	Average Slope Length (m)		
SMFMN	.bsn	Melt factor on December 21 (mm H ₂ O/day-°C)	0	10
SMFMX	.bsn	Melt factor on June 21 (mm H ₂ O/day-°C)	0	10
SMTMP	.bsn	Threshold temperature for snow melt (°C)	-5	5
SNOCVMX	.bsn	Threshold depth of snow, above which there is 100% cover	0	500
Sol_AWC	.sol	Available water capacity	0	1
Sol_K	.sol	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	0	2,000
TIMP	.bsn	Snow temperature lag factor	0	1

[*] : Lower Boundary

[**] : Upper Boundary

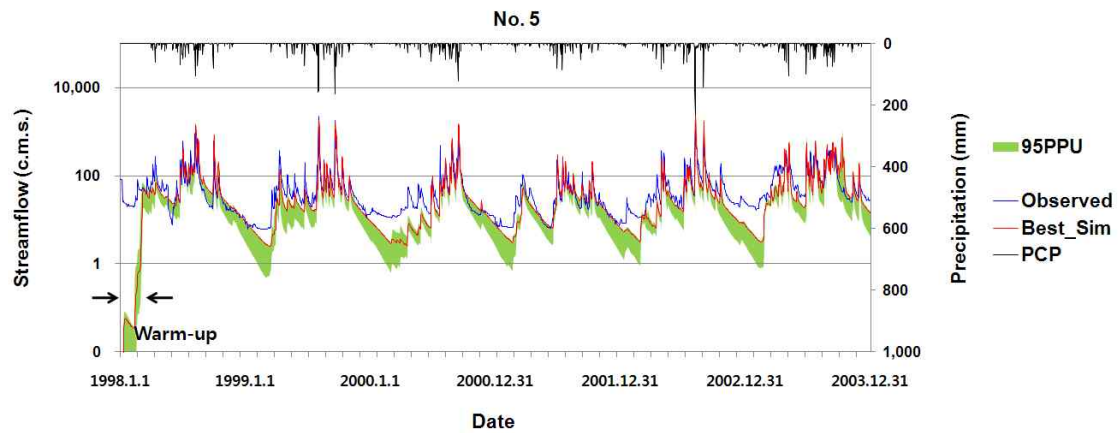
하였다. SWAT-CUP 모형은 SWAT 내에 내장되어있는 매개변수를 대부분 다룰 수 있기 때문에 최대한 많은 경우의 수를 고려하여 Table 2와 같이 매개변수를 선정하였다. 이때, 매개변수 민감도는 목적함수 결과값에 반응하여 계산이 되며, 결과는 *t-test*와 *p-value* 값으로 산정된다. 여기서 *t-test*에 의해 산정된 값은 절대값이 클수록 민감함을 뜻하며, *p-value* 값은 0에 가까울수록 민감함을 나타낸다(Abbaspour, 2009).

3. 결과 및 고찰

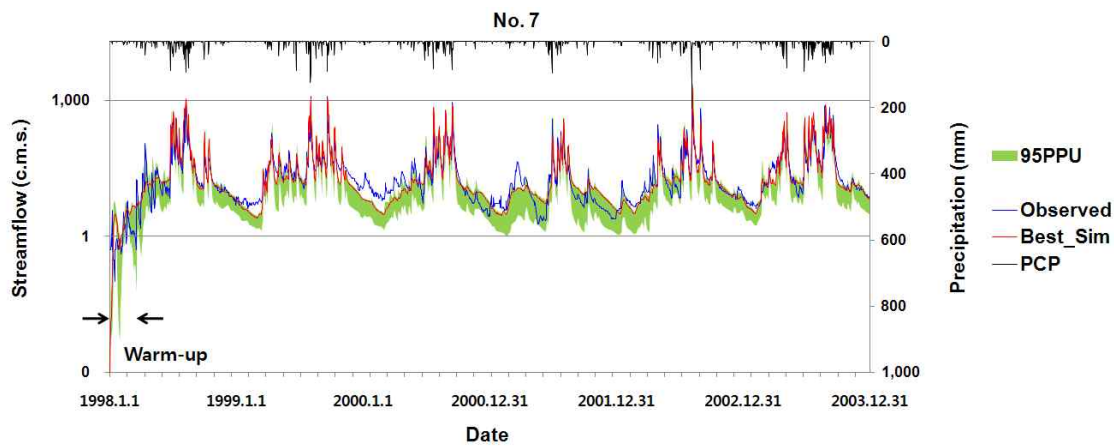
본 연구에서 실시된 SWAT-CUP 모형을 이용한 자동 검·보정 및 불확실성 추정에 대한 결과는 다음 Fig. 3~5 and Table 3과 같다. 매개변수의 선정은 SWAT Theoretical Documentation (Neitsch et al., 2005)을 참고하였다. 매개변수의 평가를 위해서 매개변수의 최대-최소 범위를

산정하였는데, 이에 대한 어떠한 이론적인 개념이나 연구가 없기 때문에 Abbaspour (2009)에 의하면 모든 매개변수는 균등하게 분포된다고 봐도 무방할 것이다. 여기서 매개변수의 최대-최소 범위의 산정이란 매뉴얼이나 기존 연구에서 제시된 개념이 아니다. 사용자가 특정 매개변수의 최대-최소값을 임의로 제시하였을 경우, 임의로 제시된 범위의 차이가 결과값의 변동에 미치는 영향에 대한 연구가 없다는 뜻이다.

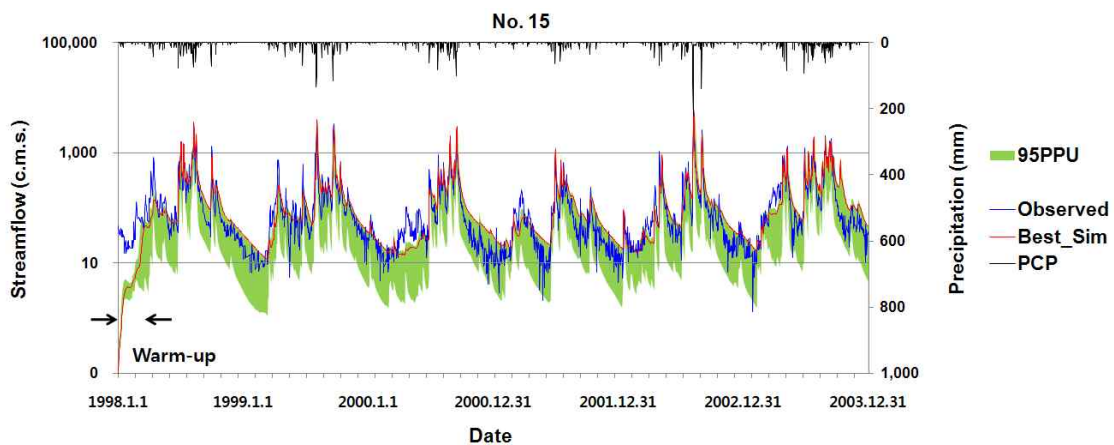
본 연구를 실시한 결과 세 가지 알고리즘의 R² (Legates and McCabe, 1999) 및 NS 모형효율은 소유역별로 약간의 차이가 있었으나 각각 0.71~0.93, 0.59~0.90 사이의 값을 나타내었다. 이 수치는 모두 1에 가까울수록 모의 결과가 실측값과 일치함을 나타내며, 대체적으로 모의가 잘 이루어졌음을 알 수 있다. 또한 전반적으로 상류측보다는 하류측에서 만족스러운 모의 결과가 나타났는데, 이는 모의 결과에 미칠 수 있는 요소들이 하류로 갈수록 축적이 되기 때



(a) Outlet No, 5 (Yoengwol #2)



(b) Outlet No, 7 (Yoengwol #1)

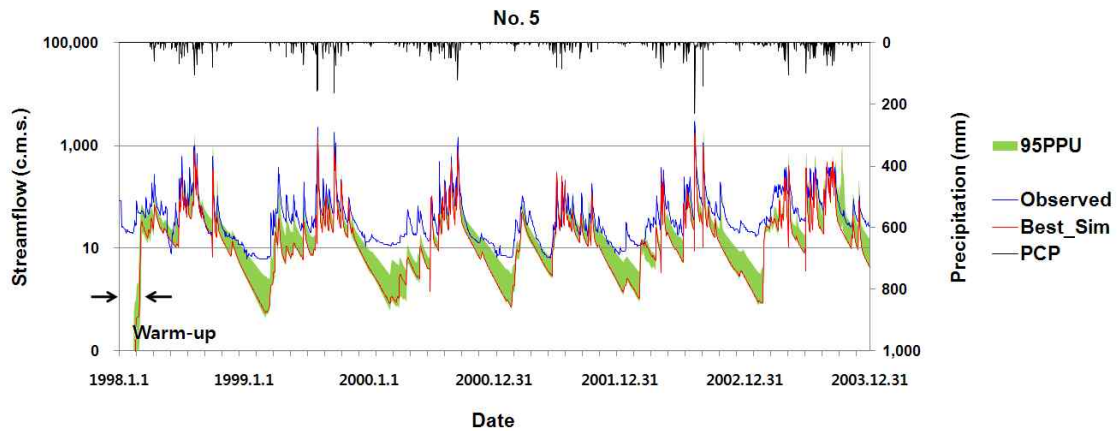


(c) Outlet No, 15 (Chungju-Dam)

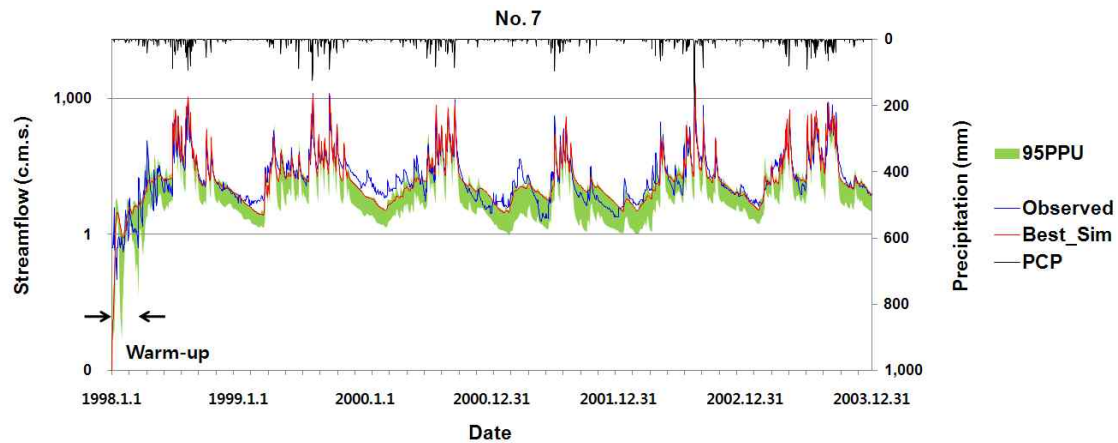
Fig. 3. 95PPU Bands, Simulated and Observed Streamflow with SUFI2 Algorithm at Each Outlet of Subbasins: (a) No. 5, (b) No. 7, and (c) No 15.

문으로 사료된다. 그러나 불확실성의 범위를 나타내는 지표인 p -factor와 r -factor에서는 알고리즘 별로 그 차이가 확연하게 드러났다. 먼저 불확실성의 범위가 실측값

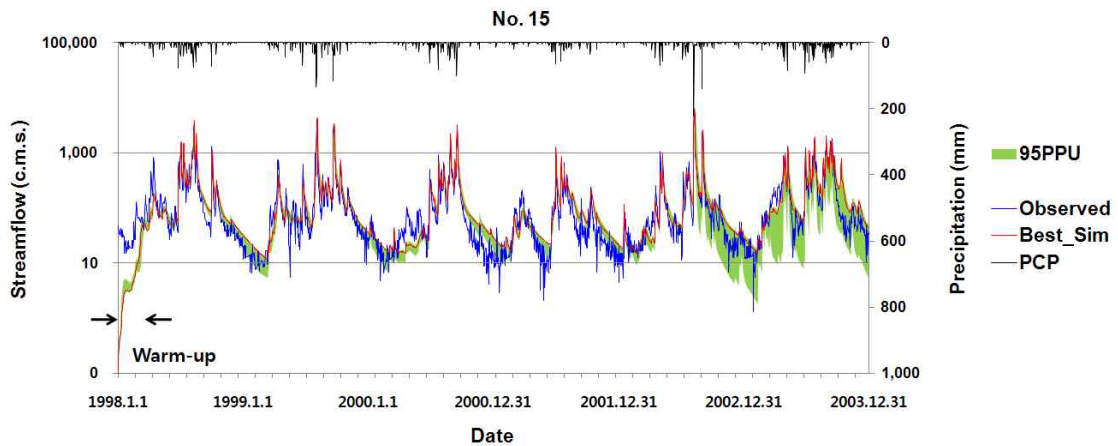
을 포함하는 정도를 상대적인 비율로 나타내는 p -factor는 그 값이 1에 가까울수록 그 모의결과의 신뢰성이 높다고 할 수 있는데, 세 가지 알고리즘 중에서 SUFI2의 p -factor



(a) Outlet No, 5 (Yoengwol #2)



(b) Outlet No, 7 (Yoengwol #1)

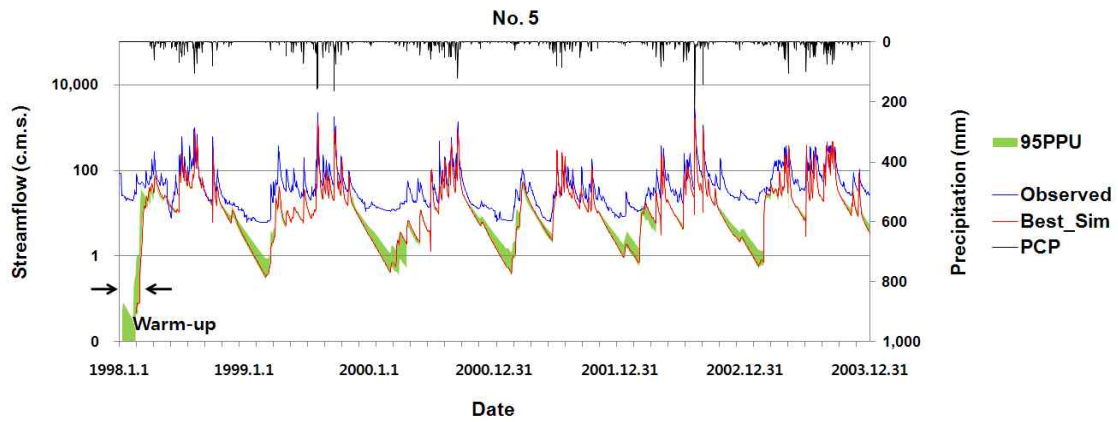


(c) Outlet No, 15 (Chungju-Dam)

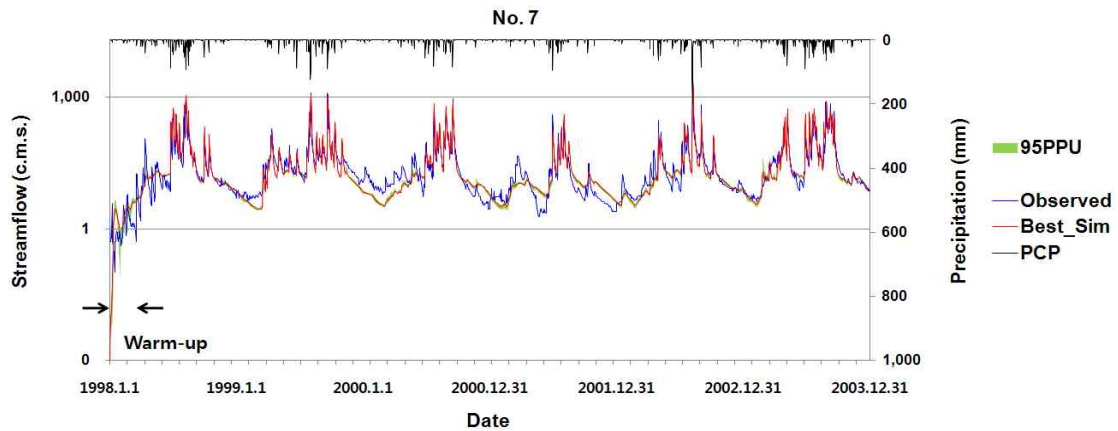
Fig. 4. As in Figure 3 but GLUE Algorithm

가 가장 높게 나타났다. 또한 불확실성의 상대적인 넓이를 나타내는 r -factor는 ParaSol에서 가장 작게 나타났다. 그러나 ParaSol에 의해 도식화된 그래프를 보면(녹색 밴드) 95PPU가 규칙적으로 고르게 나타나는 것이 아니라 산

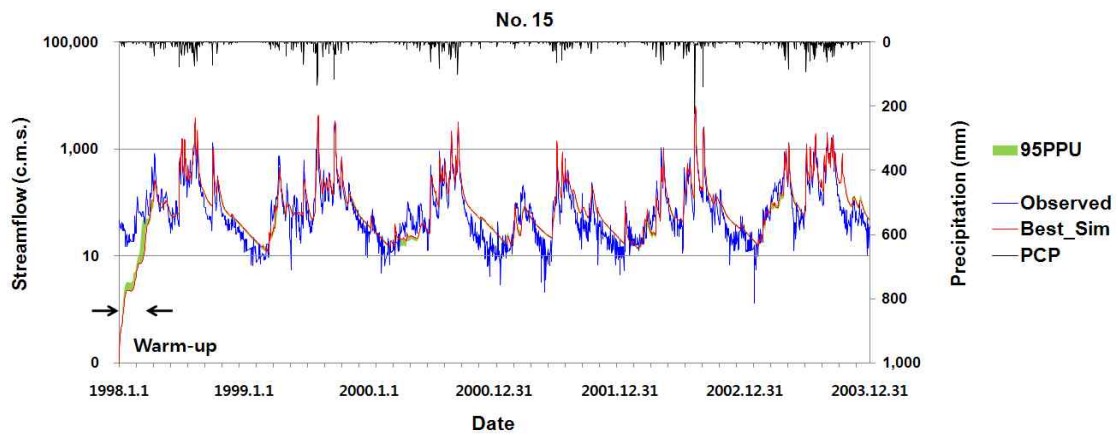
발적으로 희박하게 나타남을 알 수 있으므로 통계적인 결과 값이 만족할만하다고 해서 무조건 신뢰할 수 없을 것이다. 비록, SUFI2의 r -factor 값이 가장 크게 나왔지만, 이는 모의 횟수를 늘려 불확실성의 상대적인 범위를 점차 줄



(a) Outlet No, 5 (Yoengwol #2)



(b) Outlet No, 7 (Yoengwol #1)



(c) Outlet No, 15 (Chungju-Dam)

Fig. 5. As in Figure 3 but ParaSol Algorithm

여 나갈 수 있으므로 p -factor를 1에 가깝게 유지하면서 r -factor를 0에 가까운 결과를 도출할 수 있을 것이다. 따라서 p -factor의 값이 크면서 r -factor값이 적절하고 95PPU 밴드가 고르게 분포하는 그래프가 도식화 된, 매개

변수의 변화에 가장 민감한 반응을 보여주었던 알고리즘인 SUFI2가 SWAT 모형의 불확실성 파악에 가장 용이하다고 할 수 있다. 민감한 불확실성 범위를 점차 줄여나가는 데에도 SUFI2가 가장 용이할 것이다. 모의 결과 그래프(Figs.

Table 3. Summary of Objective Functions, p -factor and r -factor for Discharge

	R^2			NS			p -factor			r -factor		
	No.5	No.7	No.15	No.5	No.7	No.15	No.5	No.7	No.15	No.5	No.7	No.15
SUFI2	0.71	0.79	0.91	0.59	0.67	0.90	0.33	0.68	0.79	0.30	0.38	0.52
GLUE	0.80	0.79	0.93	0.72	0.67	0.90	0.26	0.56	0.44	0.30	0.35	0.37
ParaSol	0.81	0.79	0.92	0.72	0.67	0.90	0.02	0.14	0.07	0.03	0.03	0.05

Table 4. Best Value of Parameters

	No. 5			No. 7			No. 15		
	SUFI2	GLUE	ParaSol	SUFI2	GLUE	ParaSol	SUFI2	GLUE	ParaSol
ALPHA_BF (days)	2.2	2.3	2.9	2.5	2.7	2.4	2.8	2.3	2.9
CH_K2 (mm/hr)	28.8	64.0	69.3	66.8	55.7	57.0	61.3	64.0	69.3
CH_N2	0.02	0.01	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.04
CN2	69.8	69.7	69.5	42.8	43.2	42.6	62.0	62.1	61.9
ESCO	0.5	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.8	0.8	0.8
GW_DELAY (days)	9.8	8.3	1.1	5.7	1.2	8.7	9.8	8.3	1.1
REVAPMN (mm)	13.9	15.5	16.3	12.9	12.9	15.1	12.4	15.5	16.3
SFTMP (°C)	6.9	4.5	6.3	6.0	6.4	4.5	6.3	4.5	6.3
SMFMN (mm/day)	6.1	5.6	5.6	5.0	7.6	7.2	5.3	5.6	5.6
SMFMX (mm/day)	5.7	5.2	8.0	8.8	6.7	7.6	5.1	5.2	8.0
SMTMP (°C)	0.5	0.6	0.5	0.3	0.5	0.6	0.4	0.6	0.5
SNOCOV MX (mm)	37.4	57.5	30.5	66.4	33.7	54.7	55.4	57.5	30.5
SOL_AWC(1) (mm/mm)	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	0.3	0.5	0.4	0.5
SOL_K(1) (mm/hr)	14.46	14.48	14.47	6.02	6.07	6.04	19.27	19.29	19.28
TIMP	0.9	1.8	0.2	1.3	0.9	0.7	0.3	1.8	0.2

3~5)를 보면 전체적으로 안정화기간(warm-up periods)은 약 100일 정도로 나타났으며, 이는 SWAT-CUP을 구동할 때 사용자가 원하는 모의기간에서 100일 정도 기간을 침삭하여 결과를 확인해야 함을 뜻한다. 본 연구에서는 동일한 매개변수의 조건하에 따른 결과를 살펴보고자 상류(영월 2)와 하류(충주댐)에 적용되는 매개변수의 범위를 동일하게 적용하였다. 그러나 그림에서 볼 수 있듯이 동일 매개변수의 범위에 의한 불확실성의 범위(녹색 밴드, 95PPU)가 서로 다른 경향을 나타냈으며, 이는 선정된 매개변수가 상대적으로 하류측보다 상류측에서 큰 영향을 발휘하지 못하기 때문으로 사료된다. 또한 갈수기에서는 모의 결과가 실측치를 잘 따라가지 못하는 부분이 존재하는데, 이는 실측치의 변동성(Fluctuation)이 너무 심하기 때문으로

사료된다.

매개변수의 민감도와 최적값에 대한 결과는 Tables 4 and 5에 표시하였다. 불확실성 추정 기법마다 그 결과는 조금씩 다르지만 대부분 유사하게 나타났으며, 이는 연구목적에 따라 사용될 매개변수의 선정을 더 용이하게 할 수 있도록 수치화 할 수 있다는 것에 의의가 있을 것이다. 이러한 결과를 종합적으로 살펴보면, 먼저 매개변수의 범위를 최대한 크게 정한 상태에서 SWAT-CUP을 모의하여 불확실성의 범위를 확인한 다음 민감한 매개변수의 조절을 위주로 녹색 밴드의 범위를 줄여나간다면(실측치가 녹색 밴드 안에 들어오는 상태를 유지한 상태로, 즉 p -factor 증가, r -factor 감소) 더욱 신뢰성 있는 최적의 결과를 도출할 수 있을 것이다.

Table 5. Sensitivity (*t*-test and *p*-value) of Parameters

	SUF2						GLUE						ParaSol					
	No. 5		No. 7		No. 15		No. 5		No. 7		No. 15		No. 5		No. 7		No. 15	
	<i>t</i> ^[*]	<i>P</i> ^[**]	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>P</i>
ALPHA_BF	-0.18	0.89	-1.59	0.11	0.22	0.86	0.08	0.95	-0.07	0.94	1.12	0.47	-0.68	0.62	-0.02	0.98	2.80	0.22
CH_K2	-1.54	0.37	-0.02	0.99	5.74	0.11	-0.80	0.57	0.31	0.75	-0.07	0.96	0.12	0.92	0.31	0.75	-2.38	0.25
CH_N2	0.10	0.94	-121.24	0.00	-6.25	0.10	-0.75	0.59	-21.10	0.00	-3.20	0.19	0.40	0.76	36.30	0.00	23.65	0.03
CN2	0.02	0.98	-2.27	0.02	-6.27	0.10	0.25	0.84	-4.14	0.00	1.22	0.44	0.68	0.62	13.99	0.00	-6.11	0.10
ESCO	-0.25	0.84	-0.50	0.62	-0.61	0.65	0.12	0.93	0.47	0.64	0.77	0.58	-1.33	0.41	-0.08	0.93	-4.11	0.15
GW_DELAY	0.24	0.85	-1.29	0.20	0.63	0.64	1.62	0.35	3.85	0.00	0.69	0.61	-0.83	0.56	-4.69	0.00	-2.22	0.27
GW_REVAP	-0.72	0.60	0.78	0.44	4.12	0.15	-0.71	0.61	-1.28	0.20	-1.20	0.44	-0.33	0.80	-1.56	0.12	-10.50	0.06
GWQMN	-0.26	0.84	1.13	0.26	4.91	0.13	0.53	0.69	0.98	0.33	-1.57	0.36	0.20	0.87	-0.58	0.56	-1.36	0.40
REVAPMN	0.40	0.76	1.02	0.31	-3.04	0.20	-0.77	0.58	1.71	0.09	-0.17	0.89	-0.75	0.59	-1.89	0.06	1.91	0.31
SFTMP	0.44	0.74	-1.88	0.06	-3.07	0.20	0.76	0.59	0.03	0.97	0.92	0.53	-0.82	0.56	-1.74	0.08	4.47	0.14
SLSUBBSN	-0.29	0.82	-0.36	0.72	2.59	0.23	-0.07	0.95	0.77	0.44	1.06	0.48	-0.12	0.92	-0.34	0.74	4.79	0.13
SMFMN	-1.13	0.46	1.23	0.22	0.41	0.75	-1.24	0.43	-0.04	0.97	-0.84	0.56	-0.49	0.71	0.35	0.72	-6.51	0.10
SMFMX	0.87	0.55	1.89	0.06	-0.10	0.94	-0.96	0.51	0.96	0.34	-0.80	0.57	-1.11	0.47	0.29	0.77	3.61	0.17
SMTMP	-0.51	0.70	-0.10	0.92	-3.81	0.16	0.92	0.53	1.28	0.20	1.40	0.39	0.09	0.95	0.63	0.53	2.55	0.24
SNOCVMX	0.13	0.92	-1.14	0.26	-4.50	0.14	0.42	0.75	1.13	0.26	1.77	0.33	-1.03	0.49	2.64	0.01	2.09	0.28
SOL_AWC(1)	0.11	0.93	-1.07	0.28	5.62	0.11	-0.36	0.78	1.56	0.12	-0.93	0.52	-0.51	0.70	-0.57	0.57	-4.13	0.15
SOL_K(1)	-0.26	0.84	0.40	0.69	-3.11	0.20	1.14	0.46	-1.35	0.18	0.77	0.58	0.48	0.71	-1.17	0.24	-1.41	0.39
TIMP	0.42	0.75	0.60	0.55	1.53	0.37	-0.42	0.75	0.27	0.79	-1.16	0.45	0.20	0.87	-0.38	0.71	-2.60	0.23

[*] : *t*-test provides a measure of sensitivity. Larger absolute values are more sensitive.

[**] : *p*-value determines the significance of the sensitivity. A values close to zero has more significance.

4. 요약 및 결론

본 연구는 매개변수의 변화가 결과에 미치는 영향과 불확실성을 알아보려고 하였다. 이를 위해 국내 충주댐 유역을 대상으로 준분포형 장기강우 유출 모형인 SWAT 모형을 구축하였다. 이를 위해 30m 격자크기의 DEM과 1/25,000 토양도, 1/25,000 토지이용도를 수집 및 작성하여 공간입력자료를 구성하였고, 기상청에서 제공하는 자료를 이용하여 기상입력자료를 작성하였다. 이러한 자료를 이용하여 구축된 결과물을 다시 SWAT-CUP 모형의 입력자료로 적용함으로써 SWAT 모형에 내장되어 있는 매개변수의 영향력을 평가할 수 있었다. 여기서 SWAT 모형은 수동으로 검·보정을 할 필요가 없다. 대상 매개변수는 SWAT Theoretical Documents를 참고하였고, 모형의 불확실성을 평가할 수 있는 알고리즘은 SUFI2, GLUE 및 ParaSol 등 총 세 가지를 이용하였다. 1998년부터 2003년

까지 수문 관측자료와 비교하여 각 알고리즘을 구동해 본 결과, 일반적으로 사용되는 목적함수인 R²과 NS 모형 효율에서는 각각 0.71~0.93, 0.59~0.90으로, 서로 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 전반적으로 상류측보다는 하류측에서 만족스러운 모의 결과가 나타났는데, 이는 상류측의 유출 흐름이 상대적으로 하류측보다 불안정하기 때문에 하류측에서 모의결과가 더 좋게 나타난 것이라 사료된다. 그러나 불확실성에 포함되는 관측치를 나타내는 *p*-factor와 불확실성의 상대적인 넓이를 나타내는 *r*-factor에서는 각 알고리즘마다 다른 결과가 나타났는데, 특히 ParaSol 알고리즘에서는 불확실성의 범위가 고르게 분포한 것이 아니라 산발적으로 희박하게 나타났다. 이는 각 알고리즘마다 불확실성 범위를 추정하는 방법이 상이하기 때문이라고 볼 수 있다. 따라서 *p*-factor와 *r*-factor의 값이 적절하고, 95PPU 밴드가 고르게 분포하는 그래프가 도식화 된, 매개변수의 변화에 가장 민감한 반응을 보여주었던 알고리즘인 SUFI2가 SWAT

모형의 불확실성 파악에 가장 용이하다고 할 수 있을 것이다. 이론적으로는 p -factor는 1에 가까울수록, r -factor는 0에 가까울수록 뛰어난 결과라 할 수 있다. 비록, SUFI2의 r -factor값이 크게 산정되었지만 p -factor를 1에 가깝게 유지하면서 r -factor는 0에 가깝도록 모의 횟수를 늘려 불확실성의 범위를 줄여나갈 수 있기 때문에, SWAT 모형에서 발생할 수 있는 불확실성을 다루는 데에는 SUFI2 알고리즘이 가장 적합하다고 볼 수 있다. 향후 검·보정에 대한 연구에서 매개변수에 의해 발생하는 모형의 불확실성 산정 및 산정된 해당 불확실성의 감소에 중점을 둔다면, 모형을 통한 예측의 신뢰성을 향상시킬 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원의 2009 건설기술혁신사업인 ‘기후변화에 의한 수문영향 분석과 전망’에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

이효상, 전민우, 발린 다니엘라, 로드 미하엘 (2009). “강우 자료의 불확실성을 고려한 강우 유출 모형의 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제 42권, 제 10호, pp. 773-783.

Abbaspour, K.C. (2009). SWAT-CUP user manual. Dept. of System Analysis, Integrated Assessment and Modelling, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology Duebendorf, Switzerland.

Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobris, J., and Srinivasan, R. (2007). “Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT.” *Journal of Hydrology*, Vol. 333, pp. 413-430.

Ajami, N.K., Duan, Q.Y., and Sorooshian, S. (2007). “An integrated hydrologic Bayesian multimodal combination framework: confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction.” *Water Resources Research*, Vol. 43, No. 1, Art. No. W01403.

Arnold, J.G., and Allen, P.M. (1996). “Estimating hydrologic budgets for three illinois watershed.” *Journal of Hydrology*, Vol. 176, pp. 57-77.

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Mutiah, R.S., and Williams, J.R. (1998). “Large area hydrologic modeling and assessment-Prat 1: Model development.” *Journal of the American Water Resources Association*, JAWRA, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.

Bastidas, L.A., Gupta, H., Hsu, VK-1., and Sorooshian, S. (2003). Parameter, structure, and model performance evaluation for land-surface schemes. In: Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, H., Rosseau, H., and Turcotte, R. (Eds.). “Calibration of Watershed Models.” *Water Science and Applications*, Vol. 6, pp. 239-254.

Beven, K. (2001). Rainfall-runoff modeling-The primer. John Wiley and Sons.

Beven, K., and Binley, A. (1992). “The future of distributed models-model calibration and uncertainty prediction.” *Hydrological Process*, Vol. 6, No. 3, pp. 279-298.

Beven, K., and Freer, J. (2001). “Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modeling of complex environmental systems using the GLUE methodology.” *Journal of Hydrology*, Vol. 249, No. 1-4, pp. 11-29.

Gupta, H.V., Beven, K.J., and Wagner, T. (2005). “Model calibration and uncertainty estimation.” In: Anderson, M.G. (Ed.). “Encyclopedia of Hydrological Science.” *John Wiley*, New York. pp. 2015-2031.

Hapuarachchi, H.A.P., Zhijia, L., and Shouhui, W. (2001). “Application of SCE-UA method for Calibrating the Xinanjiang watershed model.” *Journal of Lake Sciences*, Vol. 12, No. 4, pp. 304-314.

Hornberger, G.M., and Spear, R.C. (1981). “An approach to the preliminary-analysis of environmental system.” *Journal of Environmental Management*, Vol. 12, No. 1, pp. 7-18.

Jakeman, A.J., and Hornberger, G.M. (1993). “How much complexity is warranted in rainfall-runoff model.” *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 8, pp. 2637-2649.

Kuczera, G., and Mroczkowski, M. (1998). “Assessment of hydrological parameter uncertainty and the worth of multi-response data.” *Water Resources Research*, Vol. 34, pp. 1481-1489.

Legates, D.R., and McCabe, G.J. (1999). “Evaluating the

- use of goodness-of-fit measures in hydrologic and model validation." *Water Resources Research*, Vol. 35, pp. 233-241.
- Manguerra, H.B., and Engel, B.A. (1998). "Hydrologic parameterization of watersheds for runoff prediction using SWAT." *Journal of the American Resources Association*, JAWRA, Vol. 34, No. 5, pp. 1149-1162.
- Moradkahn, H., Hsu, K.L., Gupta, H., and Sorooshian, S. (2005). "Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters: sequential data assimilation using the particle filter." *Water Resources Research*, Vol. 41, Art. No. W05012, doi: 10.1029/2004WR003604.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part I. "A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 283-290.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2005). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005: Draft-january 2005. Temple, TX, USA: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station.
- Peterson, J.R., and Hamlett, J.M. (1998). "Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed containing Fragipan soils." *Journal of the American Water Resources Association*, JAWRA, Vol. 34, No. 3, pp. 531-544.
- Reichert, P., and Mieleitner, J. (2009). "Analyzing input and structural uncertainty of a hydrological model with stochastic, time-dependent parameters." *Water Resources Research*, Vol. 45, Art. No. W10402, doi: 10.1029/2009WR007814.
- Seibert, J., and McDonnell, J.J. (2003). The quest for an improved dialog between modeler and experimentalist. In: Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, H., Rosseau, H., and Turcotte, R. (Eds.). "Calibration of watershed models." *Water Science and Applications*, Vol. 6, pp. 301-316.
- Sophocleous, M.A., Koelliker, J.K., Govindaraju, R.S., Birdie, T., Ramireddygari, S.R., and Perkins, S.P. (1999). "Integrated numerical modeling for basin-wide water management: The case of the rattlesnake creek basin in south-central Kansas." *Journal of Hydrology*, Vol. 214, No. 1, pp. 179-196.
- van Griensve, A., and Meixner, T. (2006). "Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models." *Water Science and Technology*, Vol. 53, No. 1, pp. 51-59.
- Vrugt, J.A., Diks, C.G., Bouten, W., Gupta, H.V., and Verstraten, J.M. (2005). "Towards a complete treatment of uncertainty in hydrologic modeling: combining the strength of global optimization and data assimilation." *Water Resources Research*, Vol. 41, Art. No. W01017, doi: 10.1029/2004WR003059.
- Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Xia, J., and Yang, H. (2008). "Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe basin in China." *Journal of Hydrology*, Vol. 358, pp. 1-23.

논문번호: 11-110	접수: 2011.09.29
수정일자: 2012.05.09/06.08	심사완료: 2012.06.08