

SWAT-CUP을 이용한 대청호 유역 장기 유출 유량 보정 및 검증

Flow Calibration and Validation of Daechung Lake Watershed, Korea Using SWAT-CUP

이 은 형* / 서 동 일**

Lee, Eunhyoung / Seo, Dongil

Abstract

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model was calibrated for the flow rate of the Deaechung lake with a large area of 3108.29 km². Application of SWAT model requires significant number of input data and is prone to result in uncertainties due to errors in input data, model structure and model parameters. The SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Ver. 2) program and GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) program in SWAT-CUP (SWAT-Calibration and Uncertainty Program) are used to select the best parameters for SWAT model. Optimal combination of parameter values was determined through 2,000 iterative SWAT model runs. The Nash-Sutcliffe values and R² values were 0.87 and 0.89 respectively indicating both methods show good agreements with observed data successfully. RMSE and MSE values also showed similar results for both programs. It seems the SWAT-CUP has a great practical appeal for parameter optimization especially for large basin area and it also can be used for less experienced SWAT model users.

Keywords : SWAT, SWAT-CUP, watershed modeling, uncertainty analysis, daechung lake, GLUE, SUFI-2

요 지

본 연구에서는 용담댐 하류부터 대청댐상류까지 총유역면적 3108.29 km² 유역을 대상으로 SWAT 모델을 적용하여 유출유량 모의를 실시하는 데 있어서 최적의 매개변수를 추정하는 방법을 보고하고 있다. SWAT 모델의 모의를 위해서는 방대한 양의 매개변수가 요구되며 이러한 매개변수의 최적값을 산정하는 것은 어려운 실정이다. 본 연구에서는 SWAT-CUP에서 제공하는 4가지 통계 알고리즘 중에서 GLUE와 SUFI-2의 2가지 내부 프로그램을 이용하여 각각 2,000 회의 반복계산 결과를 통해 SWAT 모델을 최적으로 보정하기 위한 매개변수를 산정하고자 하였다. SUFI-2 및 GLUE 적용결과 선정된 매개변수 값에 의한 유출 결과는 실측 유량값과 비교하였을 때, NS (Nash-Sutcliffe) 값과 R² 값은 각각, 0.87 및 0.89 범위로 거의 같으며 두 가지 방법 모두 매우 우수한 모의결과를 나타내었다. RMSE, MSE 값 또한 거의 유사한 값을 나타내어 두 프로그램의 성능은 차이를 나타내지 않은 것으로 판단된다. SWAT-CUP 프로그램은 국내에서 현재까지 적용 사례가 많지 않으나, 방대한 매개변수를 필요로 하고, 보정시 많은 시간과 반복 작업을 필요로 하는 모델을 보정하는 경우에 특히 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단되며, 모델 사용이 익숙하지 않는 경우에도 유용하게 사용될 수 있을 것으로 보인다.

핵심용어 : SWAT, SWAT-CUP, 유역모델링, 불확실성 분석, 대청호, GLUE, SUFI-2

* (주)엠큐빅 기술이사 (e-mail: lehmm@empal.com)

Technical Director, M-Cubic Co., Ltd., Daejeon 305-500, Korea

** 교신저자, 충남대학교 공과대학 환경공학과 교수 (e-mail: seodi@cnu.ac.kr)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Environmental Eng., Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

1. 서론

유역의 수리, 수문 해석 및 하천내의 수질 변화 예측을 위한 도구로 유역모델링의 사용이 일반화되고 있다. 우리나라에서도 AGNPS (Agricultural Nonpoint Source model), HSPF (Hydrologic Simulation Program-Fortran), SWAT (Soil and Water Assessment Tool), SWMM (Storm Water Management Model) 등 다양한 유역 모델이 유역의 특성에 따라 많은 연구자들에 의해 적용되고 있다.

유역모델링은 일반적으로 오염원에서부터 수계로 유입되기까지 오염물질의 생성과정 및 이동과정을 모의하는 것을 의미하며, 이를 위해서는 오염물질 발생량이 토지이용 형태에 의해 결정되는 것으로 가정하는 비교적 단순한 형태의 모델로부터 강수량, 표면유출, 유사의 흠 탈락 등을 모두 고려하는 복잡한 형태에 이르기까지 다양한 모델이 개발되어 사용되고 있다.

국내 유역모델의 적용분야로는 통합유역관리 (신현석과 강두기, 2006; 이길성 등, 2007; 장재호 등, 2009; 송혜원 등, 2009), 장기 유출 해석 (이길성 등, 2006; 신현석 등, 2007), 비점오염원 관리 효과 분석 (이은정 등, 2007; 정계운 등, 2009), 토양침식 영향 예측 (허성구 등, 2005; 예령 등, 2008; 김정곤 등, 2008), 토지이용도 변화 해석 (박민지 등, 2005; Seo D et al., 2007; 박종윤 등, 2008; 허성구 등, 2008) 및 기후변화 효과 해석 (이용준 등, 2008; 손경호와 김정곤, 2008), 수질모델과 연계를 통한 수질 예측 (권명준 등, 2003) 분야 등으로 구분될 수 있으며, 다양한 분야에 대한 과학적인 해석도구로 적용되고 있다. 최근에는 GIS와 유역모델이 통합되면서 DEM을 이용하여 자동으로 유역을 추출하고, 다양한 토양 특성 및 토지 이용 성분을 바탕으로 공간적, 시간적인 수리 수문 해석이 가능하고 수질모델과의 연계운영이 가능한 모델의 적용이 보편화되고 있다. 이러한 모델 중 대표적인 것으로 SWAT모델을 들 수 있으며, 국내에서도 SWAT 모델의 적용은 점차 확대되고 있는 추세이다.

유역모델의 적용은 궁극적으로는 통합적인 수질 관리 대안 수립을 위한 의사결정 지원 도구로 사용될 수 있으며, 이를 위해서는 유역모델의 정확도 보정 및 검증, 민감도 분석 등을 통해 모델의 정확도가 검증되었을 때 비로소 의사결정 지원도구로의 활용이 가능하다 (Jing Yang et al., 2007). SWAT 모델관련 연구는 여러 대상유역에 적용한 후 유출량 및 수질 농도를 예측하고 실측치와의 비교를 통한 활용가능성을 제시한 연구가 대부분이며, 그 밖에 모형의 정확도 향상을 위한 HRU 개수 추정 (권명준과 권순국, 1998), 강우계 필도 및 소유역 규모 산정 (유철상 등, 2005), 수질 예측을 위한 민감도 분석 (김정곤 등,

2006) 등이 연구된 바 있으나 모델의 정확도 향상을 위한 보정, 검증 및 민감도 분석 등의 연구는 제한적인 실정이다.

SWAT과 같이 많은 매개변수들을 가진 복잡한 모형의 경우 매개변수 값들을 데이터로부터 직접 추정하는 것은 불가능하며, 대부분의 경우 보정시에 시행착오의 과정을 통해 매개 변수값들을 추정하게 된다 (김정곤 등, 2006). 이러한 작업은 많은 시간을 요하게 되며, 매개변수의 선정 및 범위는 모델사용자의 주관적인 판단에 의존할 수밖에 없다. 따라서 이러한 매개변수의 선정과정을 보다 손쉽고, 객관적인 기준을 통해 수행하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 ArcSWAT Version 2009.93.5를 대청호 상류 지점에 적용하여 장기 유출모의를 실시하였으며, 모델의 보정 및 검증을 위한 도구로 SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Program) Version 2.1.3 (K. C. Abbaspour, 2008) 프로그램을 적용하였다. SWAT-CUP은 여러 가지 통계 모듈을 제공하고 있으며, 이를 통해 짧은 시간 내에 대상유역의 유출 특성을 반영할 수 있는 최적의 매개변수 값을 산정할 수 있다.

2. 연구방법

2.1 SWAT 모델의 개요

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모델은 미국 농무성 (USDA) 산하 농업연구소 (Agricultural Research Service)에서 개발되었으며, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 경우 및 유출, 다양한 종류의 토양과 토지 이용 및 토지관리 상태에 따른 토사의 이동 및 화학물질의 거동 예측을 위해 개발된 준분포형 유역 모델이다.

SWAT 모델은 1994년에 최초로 개발되었으며, 이후 꾸준히 발전되어 2002년에는 SWAT과 ArcView를 연계 운영할 수 있는 BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources) 시스템이 구축되었고 (USEPA, 2001), SWAT2005 모형의 개발과 함께 ArcGIS의 연계 시스템인 ArcSWAT Version 2.3.4 (M. Winchell et al., 2009), 현재는 SWAT2009와 ArcGIS가 연계된 ArcSWAT Version 2009.93.5 (M. Winchell et al., 2010)가 개발되어 사용되고 있다.

SWAT 모델에서는 지형 및 수계 자료를 이용하여 대상유역을 소구역 (Subbasin)으로 구분한 후 유역의 토지 이용현황, 토양특성 등을 고려하여 동일한 특성을 나타내는 수문반응단위 (HRU; Hydrologic Response Unit)로 세분한다. SWAT 모델에서 계산되는 물수지는 다음식과 같이 물수지 방정식에 의해 산정된다.

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

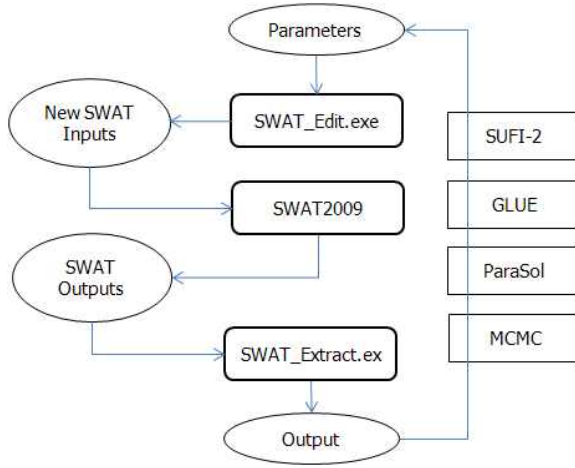


Fig. 1. Overall SWAT-CUP Program Structure

여기서, SW_t 는 최종 토양수분량 (mmH_2O), SW_0 는 i 일의 초기 토양수분량 (mmH_2O), t 는 시간 (day), R_{day} 는 i 일의 강수량 (mmH_2O), Q_{surf} 는 i 일의 지표유출량 (mmH_2O), E_a 는 i 일의 증발산량 (mmH_2O), w_{seep} 는 i 일의 토양층에서 투수층으로 투수되는 양 (mmH_2O), Q_{gw} 는 i 일의 하천으로의 회귀수량 (mmH_2O)을 나타낸다. 유출량은 각각의 HRU에 대해 독립적으로 계산되며, 하도추적과정을 통해 유역 최종 출구지점에서의 유출량을 산정할 수 있다. 유역으로부터의 토양 침식은 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) 식에 의해 계산되며 하천과 저수지 등의 수체에서는 유량, 퇴적물, 영양염류 및 유기성화합물질의 반응 기작이 모의된다.

2.2 SWAT-CUP 프로그램의 개요

SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Program)은 SWAT 모델의 보정을 위한 보조프로그램으로 SUFI2, GLUE, Parasol, MCMC (Monte Carlo Markov Chain) 등 4가지 통계 알고리즘을 하나의 인터페이스 (SWAT-CUP) 안에서 SWAT 모델과 연계함으로써 모델의 최적 매개변수를 도출하고 이를 통해 모델의 정확도를 향상시키기 위해 개발된 프로그램이다.

Fig. 1은 SWAT-CUP 프로그램의 구조를 나타내고 있다. 모델 사용자는 GLUE, Parasol, SUFI2, MCMC 중 하나의 분석알고리즘을 선택할 수 있으며, 선택된 알고리즘 내에서 지정된 범위의 모델 입력 매개변수를 반복적으로 변화시키면서 최적의 매개변수를 도출하는 방식으로 구

성된다.

이러한 프로그램은 모델의 적용과정에서 발생하는 보정오차를 제거함으로써 모델이용자에 의한 불확실성을 최소화할 수 있는 장점이 있으며, 보정결과 그래프 출력 및 데이터 비교 분석 등의 추가 기능을 통해 사용자 편의를 제공하고 있다.

2.3 분석 알고리즘

본 연구에서는 SWAT-CUP에서 제공하는 4가지 통계 알고리즘 중에서 GLUE, SUFI-2 2개의 프로그램을 이용하여 모델을 보정하고 최적의 매개변수를 산정하고자 한다. 각 알고리즘에 대한 설명은 다음과 같다.

2.3.1 GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)

GLUE 프로그램은 SWAT과 같이 다수의 매개변수를 갖는 모델의 매개변수 산정과정에 있어 매개변수들의 조합에는 비고유성 (Nonuniqueness) 또는 동귀결성 (Equifinality)이 존재하므로 모델 보정과정을 통해 특정 모델에 대한 유일한 최적의 매개변수 세트는 존재할 수 없다는 가정 하에 출발하였다. 이러한 모형의 동귀결성은 모형의 구조 및 매개변수의 불확실성에 기인하고, 따라서 각기 다른 매개변수들의 조합이라도 같은 결과를 나타낼 수 있다는 원칙을 고려한 방법이다 (K. C. Abbaspour, 2008). 모델의 성능을 파악하기 위하여 다양한 우도 함수 (Likelihood function)가 사용될 수 있으나 GLUE에서는

Eq. (2)에 나타낸 바와 같이 NS (Nash-Sutcliffe) 값을 통해 평가될 수 있다. 여기에서 NS 값이 1에 가까울수록 모델의 정확도는 향상된다 (R. Daren Harmel and Patricia K. Smith, 2007).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t_i=1}^n (Y_t(\theta) - Y_t)^2}{\sum_{t_i=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

여기에서, n은 측정된 데이터의 수, Y_{it} 는 실측값, $Y_t(\theta)$ 는 시간 t_i 에서 매개변수 세트 (θ)에 대한 모의값, \bar{Y} 는 실측값의 평균을 나타낸다. 우도 함수 ($L(\theta)$)가 결정되면 앞서 산정된 매개변수의 범위 내에서 많은 수의 매개변수 세트가 무작위로 추출되고 각 매개변수 세트는 선정된 우도 함수의 임계값에 따라 반응변수와 비반응변수로 구분되고, 선정된 반응변수 세트에 대하여 Eq. (3)의 계산식에 의해 우도 함수의 가중치가 부여된다.

$$W_i = \frac{L(\theta_i)}{\sum_{k=1}^N L(\theta_k)} \quad (3)$$

여기에서, N은 반응변수 세트의 개수를 나타낸다. 최종적으로 모델예측의 불확실성은 가중치가 부여된 매개변수 세트로부터 계산된 누적분포로부터의 백분위로 나타낼 수 있다.

2.3.2 SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Ver.2)

SUFI-2 프로그램은 순차적이고 반복적인 매개변수 산정 프로그램으로 초기의 일정 범위의 매개변수에서 Latin-hypercube sampling 기법을 이용하여 매개변수를 추출하고 추출된 매개변수를 이용하여 사용자가 지정한 횟수만큼 모델이 반복 수행된다. 모델의 보정 및 예측결과와 불확실성은 P-factor에 의해 판단되며, 이는 95%의 불확실성 (95PPU)을 갖는 데이터 범위 내에 속하는 실측자료의 백분율을 나타내며, 95PPU는 Latin-hypercube sampling을 통해 산정된 출력변수의 누적분포에서 2.5%와 97.5% 범위에서 계산된다 (KC Abbaspour et al., 2004).

SUFI-2에서 보정 및 불확실성 분석을 평가할 수 있는 또 다른 척도로는 R-factor를 들 수 있으며, 이는 평균 95 PPU를 실측자료의 표준편차로 나누어 산정할 수 있으며, 95PPU band의 평균 폭을 의미한다. 따라서 SUFI-2에서는 P-factor가 100%에 가까울수록, R-factor가 0에 가까울수록 모델 보정의 정확도는 증가하는 것으로 볼 수 있다 (Jurgen Schuol et al., 2008a). 이외에 모델의 적합성

(Goodness of fit)은 실측자료와 최종 모의값으로부터 산정할 수 있는 R^2 또는 NS (Nash-Sutcliffe)값을 통해 평가될 수 있다.

2.3.3 Parasol (Parameter Solution)

Parasol은 Shuffle Complex Evolution 알고리즘 (SCE-UA)을 이용하여 목적함수 값을 최소화하며, 불확실성 분석을 할 수 있는 프로그램이다. SCE-UA 알고리즘은 자연진화의 과정을 최적해 산정과정에 도입한 것으로 첫 번째 단계에서 매개변수들의 최소값과 최대값의 범위 내에서 무작위 표본추출에 의해 초기 모집단 (Population)을 구성한다. 초기 모집단의 무작위 추출 후에 개체의 모집단은 p개의 집합체로 나누어지고, 한 개의 집합체는 $2p+1$ 개의 개체로 구성된다. 개개의 집합체가 구성된 후에 simplex 알고리즘을 이용하여 개개의 집합체를 독립적으로 진화시키며 탐색과정의 새로운 정보 공유를 위해 집합체를 주기적으로 혼합 (Suffling)하여 새로운 집합체를 형성하고 수렴조건이 만족할 때까지 반복모의를 수행하여 전체 매개변수 범위에 대한 최적해를 찾을 수 있다 (이도훈, 2006). Parasol 프로그램에서 사용되는 목적함수는 SSQ로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$SSQ = \sum_{i=1}^n (y_i^M(\theta) - y_i)^2 \quad (4)$$

2.3.4 MCMC (Markov chain Monte Carlo)

MCMC는 마코프 연쇄 (Markov chain)와 몬테카를로 적분 (Monte Carlo Integration)을 이용하여 사후분포로부터 모수를 추출하고 통계적 특성치를 계산하는 방법이다 (김상욱 등, 2008). SWAT-CUP의 MCMC 프로그램에서는 임의보행 (Random walk) 기법을 통해 확률분포로부터 무작위 표본을 추출하는 알고리즘의 하나로 가장 간단한 기법인 Metropolis-Hastings algorithm을 이용하여 최적의 매개변수 세트를 산정한다. Metropolis-Hastings algorithm은 관심의 대상이 되는 확률분포 $f(x) = (1/c)h(x)$ 이고, 상수 c를 모르는 경우에 $f(x)$ 를 극한분포로 갖는 마코브연쇄로부터 난수를 발생시키는 방법으로 초기값 X_0 를 정하고, 적당한 조건부 확률밀도함수 $g(x|y)$ 를 정하여 초기화한다. 다음으로 $g(x|X_{m-1})$ 로부터 난수 X^* 를 발생시키고 다음 식을 이용하여 이동확률 (α)을 구한다.

$$\alpha = \min \left\{ 1, \frac{h(X^*)g(X^* | X_{m-1})}{h(X_{m-1})g(X_{m-1} | X^*)} \right\} \quad (5)$$

균등분포로부터 난수 r을 발생시키고, r이 α 보다 작거나 같으면 $X_m = X^*$ 로 갱신하고 그렇지 않으면 $X_m = X_{m-1}$ 로의 갱

신과정을 통해 최적 매개변수 조합을 산정할 수 있다.

3. 연구내용

3.1 연구대상지역

본 연구를 위한 대상지역은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 용담댐하류부터 대정댐상류 지역으로 총유역면적은 3108.29 km², 분류인 금강의 길이는 약 171 km이며, 주요 지류로는 무주남대천, 봉황천, 영동천, 조강천, 보청천 및 소옥천이 유입되고 있다.

본 모의에서는 대상지역을 총 12개의 소구간으로 구분하였으며, 토지이용도 및 토양도 자료를 기반으로 총 65개의 HRU로 구분하여 SWAT 모델링을 실행하였다.

연구대상지역은 전체 면적의 72.2%가 산림지역, 20.4%는 농경지로 구성되어 있으며, 평균고도는 322.52 m를 나타내고 있다.

3.2 입력자료의 구성

SWAT모형에 적용하기 위한 입력자료는 지형자료, 지형자료와 연결된 속성자료, 그리고 기상자료로 구분된다. 지형자료로는 수치표고모형 (DEM), 토지이용도, 토양도 파일이 요구된다.

본 모의 대상지역에 대한 수치표고모형 (DEM) 자료는 국토지리정보원에서 구축한 1/5,000 수치지형도를 이용하

여 10 × 10 m 해상도의 DEM을 생성하였다. 토지이용도는 환경부에서 2003년 촬영한 영상을 바탕으로 구분한 중분류의 토지이용도를 사용하였다. 토양도는 농업과학기술원에서 제공하는 1/25,000 정밀토양도를 이용하여 댐유역별로 토양도를 작성하였다.

SWAT모형을 위한 기상자료는 총 3개의 기상관측소 (보은, 추풍령, 금산)에서 관측된 2000년부터 2009년까지의 10년간의 일평균 강우 및 온도자료를 입력하였으며, 기타 기상자료는 모델 내에서 계산되어 입력되도록 하였다. Fig. 3은 각 기상관측지점에서 실측된 강우량을 나타내고 있다.

점오염원자료의 입력은 유역내의 총 5개의 하수처리장 (무주, 금산, 영동, 옥정, 보은)의 방류수 자료를 이용하였으며, 년평균 방류량 자료를 입력하였다.

각 소유역 출구에서의 유량은 실측 자료의 확보가 불가능하였으므로 본 모의에서는 일평균 유량 실측자료의 확보가 가능한 옥천수위표 지점에서 측정된 2000년부터 2009년까지의 10년간의 일평균 유량자료를 이용하였다. 옥천 수위표는 Fig. 2의 Subbasin 6지점의 출구지점과 근접한 지점으로서 본 모의에서는 이를 옥천수위표 지점의 유량으로 가정하였으며, 2000년과 2001년의 자료는 모델 안정화 기간으로 본 모의의 결과 분석에서는 제외하였으며, 2002년부터 2005년까지, 2006년부터 2009년 각각 4년에 대한 보정과 검증을 실시하였다.

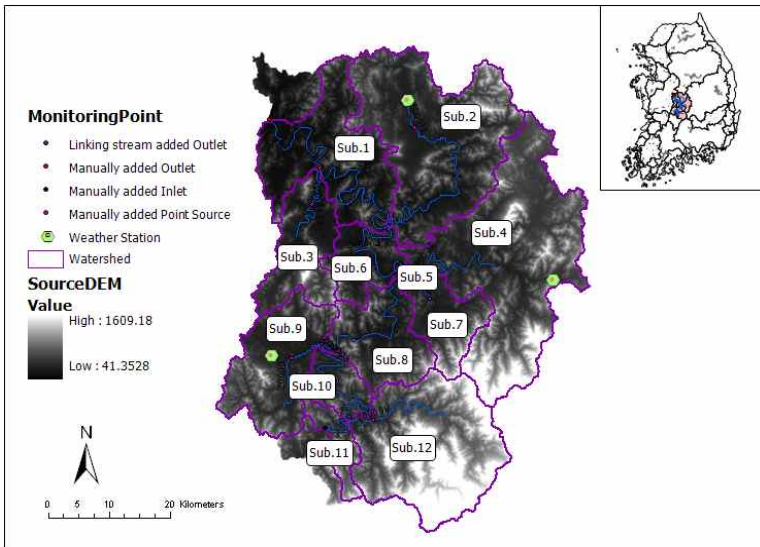


Fig. 2. The Daechung Lake Basin and Sub-basins

Table 1. Characteristics of Subbasins

No. of Subbasin	HRU	Area (ha)	% Subbasin
1	4	35237.81	11.34
2	6	55392.13	17.82
3	4	19228.44	6.19
4	4	66301.76	21.33
5	10	127.88	0.04
6	6	11969.14	3.85
7	4	14427.59	4.64
8	4	20332.78	6.54
9	6	26275.55	8.45
10	8	8889.68	2.86
11	4	46329.52	14.91
12	5	6317.53	2.03
Total	65	310,829.81	100

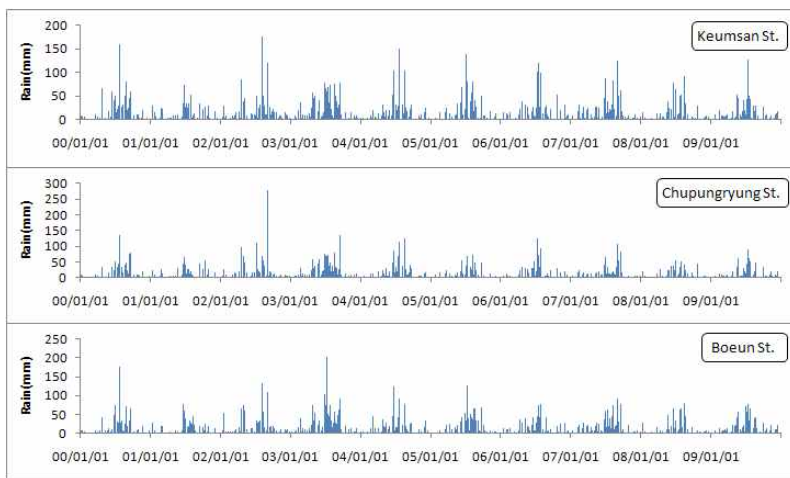


Fig. 3. Precipitation Records at Weather Stations in the Basins (2000–2009)

Table 2. Characteristics of Point Sources from WWTP in the Basins

WWTP	Boeun	Keumsan	Muju	Youngdong	Oekcheon
Outflow (m ³ /day)	6,000	10,000	3,000	10,000	18,000

본 연구에서는 SWAT 모델의 보정 및 불확실성 분석을 위해 SWAT-CUP 프로그램이 제공하는 분석 모듈 중 GLUE와 SUFI-2를 적용하였으며, 각 모듈의 분석 결과

를 통해 본 대상지역에 최적의 매개변수 값을 제공하는 모듈을 선정하고자 한다.

4. 결과 및 고찰

유역으로부터의 유출량에 영향을 미치는 모델 매개변수는 다양하게 존재하고 있으나, 본 연구에서는 Jung et al. (2008b) 등의 연구에서 제시한 유역의 유출량에 특히 민감도가 높은 항목과 Jing Yang et al. (2008), Monireh Faramarzi (2009) 등의 연구 및 김정곤 (2006) 등의 연구에서 제시된 유출관련 매개변수 자료를 이용해 Table 3에 나타난 바와 같이 6개 매개변수를 선택하였으며, 최대값 및 최소값의 범위 내에서 변수값을 변화시키면서 최적값을 선정하였다.

매개변수 값은 3가지 방법에 의해 변환될 수 있으며, 첫 번째는 기본값에 더하거나 빼는 방식, 두 번째는 기본값이 지원되는 방식, 세 번째는 기본값에 곱해지는 방식으로 매개변수값을 변화시키면서 최적의 매개변수값들의 조합을 산정한다.

Table 4는 각 매개변수들에 대한 최대값 및 최소값의 범위를 나타내고 있으며, SUFI-2와 GLUE 모의 결과 선정된 최적의 매개변수 값을 나타내고 있다. t-stat 값은 각 변수의 상대적인 민감도값을 나타내며 절대값이 클수록 목적함수값에 대한 민감도가 높다는 것을 나타낸다. 본 모의에서는 GW_DELAY값이 민감도가 가장 큰 것으로

나타났다.

최적의 매개변수 값은 두 개의 프로그램에서 ESCO와 SOL_K 값은 비교적 유사한 값을 나타내고 있으나, 이외의 변수 값은 다소 상이한 값을 나타내고 있다. 이는 IM (Inverse Modeling)의 기본 가정에 기인하는 것으로 최적의 모델링 결과는 유일한 최적 매개변수 값보다는 최적의 매개변수들의 조합에 의해 얻어질 수 있다. 이러한 모델링 기법은 다수의 매개변수를 필요로 하는 유역모델의 보정을 위해 널리 사용되고 있다.

Fig. 4는 3장에서 기술된 입력자료를 이용하여 연구대상 지역에 대해 SWAT모델을 구성한 후 모델에서 기본적으로 제공하는 매개변수 값을 그대로 적용한 경우에 대한 모델링 결과를 실측자료와 비교하여 나타내고 있다. Table 5에 나타난 바와 같이 R^2 , NS, RMSE값은 각각 0.169, -0.453, 97.449로 실측값과 모의값은 매우 큰 차이를 보이고 있다.

기본값을 이용하여 모델을 실행시킨 후 생성되는 입출력파일은 SWAT-CUP 모형에서 불러오기를 통해 import 되고 SUFI-2 또는 GLUE 프로그램을 통해 매개변수 값을 변화시키면서 SWAT모델의 반복 실행이 이루어진다.

Fig. 5는 두 개의 프로그램을 통해 선정된 최적 매개변수에 대한 유출 모의 결과를 나타내고 있다. SUFI-2 및

Table 3. Definition of Selected Parameters

Parameter name	Definition
a ¹⁾ _CN2.mgt	Initial SCS runoff curve number
v ²⁾ _ALPHA_BF.gw	Baseflow alpha factor (days)
v ²⁾ _GW_DELAY.gw	Groundwater delay time(days)
a ¹⁾ _SOL_AWC.sol	Available water capacity of soil layer (mm H ₂ O/mm soil)
v ²⁾ _ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor
r ³⁾ _SOL_K.sol	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)

¹⁾ "a" means a given quantity is added to the default value

²⁾ "v" means the default value parameter is replaced by a given value

³⁾ "r" means the existing parameter value is multiplied by (1+a given value)

Table 4. Comparison of Two Different Calibration Uncertainty Procedures

Parameter name	Min/Max	SUFI-2 Simulation		GLUE Simulation	
		t-stat	Fitted value	t-stat	Fitted value
CN2.mgt	-4.0/4.0	10.049	2.298	9.927	1.641
ALPHA_BF.gw	0.0/1.0	13.584	0.935	14.645	0.127
GW_DELAY.gw	1.0/100	-64.057	6.965	-66.544	2.107
SOL_AWC.sol	-0.05/0.05	2.550	-0.022	0.709	0.044
ESCO.hru	0.02/1.0	62.123	0.926	67.326	0.910
SOL_K.sol	-0.8/0.8	23.243	-0.690	25.007	-0.627

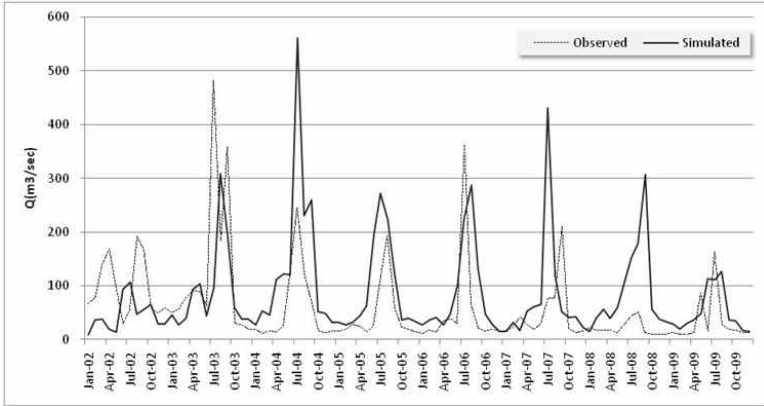


Fig. 4. Result of Flow Simulation Using Default Parameters

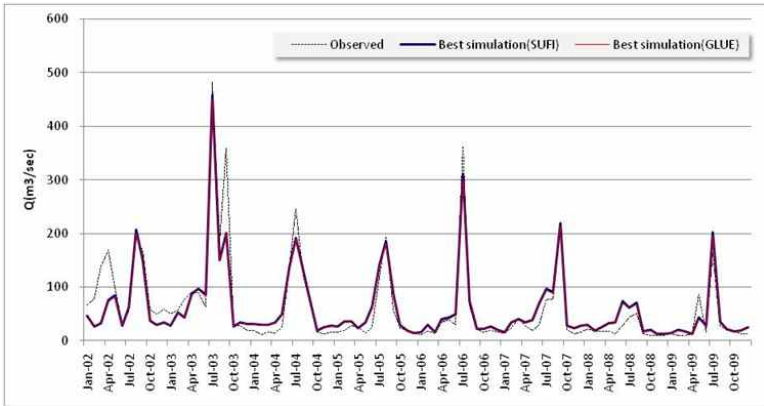


Fig. 5. Result of Flow Simulation Using SUFI and GLUE Programs

Table 5. Comparison of Statistical Analysis

Program	NS	R ²	RMSE	MSE
Default simulation	-0.453	0.169	97.449	9698.55
SUFI-2	0.877	0.886	28.284	800.00
GLUE	0.878	0.890	28.201	795.30

GLUE 프로그램 모두 2000회의 반복 계산을 통해 최적 매개변수를 선정하였으며, 선정된 매개변수를 통한 목적함수값은 Table 5에 나타내었다.

SUFI-2 및 GLUE 적용결과 선정된 매개변수 값에 의한 유출 결과는 매우 유사한 분석값을 나타내고 있으며,

본 모의에서 목적함수로 사용한 NS(Nash-Sutcliffe) 값은 0.87로 우수한 모의결과를 얻을 수 있었다. R²값과 RMSE, MSE 값에 대해서도 거의 유사한 값을 나타내어 GLUE와 SUFI-2 두 프로그램의 성능은 차이를 나타내지 않은 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 용담댐 하류부터 대청댐상류까지 총유역면적 3108.29 km² 유역에 대해 SWAT 모델을 통해 유출유량 모의를 실시하였다. SWAT 모델의 모의를 위해서는 방대한 양의 매개변수가 요구되며 이러한 매개변수의 최적값을 산정하는 것은 어려운 실정이다. 따라서 본 모의에서는 SWAT-CUP 프로그램을 이용하여 최적의 매개변수를 산정하고자 하였다. 이를 위해 SWAT-CUP에서 제공하는 4가지 통계 알고리즘 중에서 GLUE, SUFI-2의 2개 프로그램을 이용하여 모델을 보정하고 최적의 매개변수를 산정하였다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- 1) SWAT모델 내의 기본 매개변수 값을 이용한 유출 모의 결과 유출유량에 대한 실측값과 모의값의 R² 값은 0.169로 매우 낮은 값을 나타내어 최적 매개변수 산정을 위해서는 보정과정이 필수적이다.
- 2) 본 모의에서는 SWAT 모델의 보정을 위해 SWAT-CUP모형을 연계하여 적용하였으며, GLUE, SUFI-2 각각의 모델에 대해 2000회의 반복적인 모델 실행을 통해 목적함수값(NS 값)이 가장 높은 매개변수의 조합을 산정하였다. SUFI-2 및 GLUE 적용결과 선정된 매개변수 값을 이용한 유출모의 결과 실측값과 모의값은 매우 유사한 값을 나타내었다.
- 3) 본 모의에서는 모델의 정확도를 판단하기 위한 목적함수로 NS(Nash-Sutcliffe) 값을 선정하였으며 모의결과 SUFI-2 및 GLUE 모두 NS 값은 0.87로 매우 우수한 모의결과를 얻을 수 있었다. 이 외에도 R²값과 RMSE, MSE 값에 대해서도 거의 유사한 값을 나타내어 두 프로그램의 성능은 유사한 것으로 판단된다.
- 4) SWAT-CUP 프로그램은 국내에서 현재까지 적용 사례가 많지 않으나, 방대한 매개변수를 필요로 하고, 보정 시 많은 시간과 지루한 반복 작업을 필요로 하는 모델을 보정하는 경우에 효과적으로 사용될 수 있으며, 또한 모델링 초보자들이 사용하기에 매우 유용한 프로그램으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(기초과학 분야 : KRF-2007-357-D00143).

참고문헌

권명준, 권순국(1998). "SWAT모형에서의 유출량에 대

한 HRU의 영향." **한국농공학회 학술발표회논문집**, 한국농공학회, pp. 349-352.

권명준, 권순국, 홍성구(2003). "농촌유역 하천의 수질예측을 위한 SWAT모형과 WASP모형의 연계운영." **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제45권, 제2호, pp. 116-125.

김상욱, 이길성(2008). "Bayesian MCMC를 이용한 저수량 점 빈도분석: 이론적 배경과 사전분포의 구축." **한국수자원학회 학술논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제1호, pp. 35-47.

김정근, 손경호, 노준우(2008). "SWAT 모델을 이용한 임하.안동 유역의 부유사량 발생량 추정." **대한환경공학회지**, 대한환경공학회, 제30권, 제12호, pp. 1209-1217.

김정근, 손경호, 이상욱(2006). "용담유역의 SWAT 모형을 이용한 수질 예측을 위한 민감도 분석." **대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 465-471.

박민지, 권형중, 김성준(2005). "HSPF 모형을 이용한 토지피복변화에 따른 유출 변화 분석." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제6호, pp. 495-504.

박종훈, 이미선, 이용준(2008). "SWAT 모형을 이용한 미래 토지이용변화가 수문-수질에 미치는 영향 분석." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제2호, pp. 187-197.

손경호, 김정근(2008). "SWAT을 이용한 기후변화의 수문학적 영향평가를 위한 Proxy-basin Differential Split-Sampling 및 Blind-Validation 테스트 적용." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제10호, pp. 969-982.

송혜원, 이혜원, 최정현(2009). "유역관리에 따른 수질개선 효과분석을 위한 HSPF 모델 적용." **대한환경공학회지**, 대한환경공학회, 제31권, 제 5호, pp. 358-363.

신현석, 강두기, 김상단(2007). "낙동강유역 SWAT 모형 구축 및 물수지 시나리오에 따른 유황분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 251-263.

신현석, 강두기(2006). "SWAT모형을 이용한 인공저류시설물의 하류장기유출 영향분석 기법에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제3호, pp. 227-240.

예령, 윤성원, 정세용(2008). "대청댐 유역 토양 침식량 산정을 위한 SWAT 모델의 적용." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제2호, pp. 149-162.

유철상, 김경준, 김남원(2005). "SWAT모형의 적용을 위한 적정 강우계밀도의 추정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제5호, pp. 415-425.

이길성, 정은성, 신문주(2006). "SWAT 모형을 이용한 토

시하천 상류유역의 하천유지유량 산정방안.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제8호, pp. 703-716.

이길성, 정은성, 이준석 (2007). “HSPF 모형을 이용한 안양천 유역의 물순환 및 BOD 부하량 분석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제8호, pp. 585-600.

이도훈 (2006). “LH-OAT 민감도 분석과 SCE-UA 최적화 방법을 이용한 SWAT 모형의 자동보정.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제8호, pp. 677-680.

이용준, 박종운, 박민지 (2008). “SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화 및 토지이용 변화에 따른 안성천 유역 수문-수질 변화 분석 (I).” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제6호, pp. 653-663.

이은정, 김학관, 박승우 (2007). “AGNPS 모형을 이용한 농경지 관리대안에 따른 비점오염 저감효과 분석.” **농업생명과학연구**, 경상대학교 농업생명과학연구원, 제41권, 제4호, pp. 55-61.

장재호, 윤윤경, 정광욱 (2009). “BASINS-SWAT 모델을 이용한 경안천 유역의 비점원 오염배출 중점관리 대상 지역 결정.” **한국농공학회논문집**, 한국농공학회, 제51권, 제5호, pp. 69-78.

정재운, 윤광식, 한국현 (2009). “주암호 소유역의 영양물질 부하 추정을 위한 SWAT 모형의 적용성 평가.” **한국환경과학회지**, 한국환경과학회, 제18권, 제9호, pp. 1027-1033.

허성구, 김기성, 김남원, 안재훈, 박상헌, 유동선, 최중대, 임경재 (2008). “토지피복도 정확도에 따른 SWAT 예측 오류 평가.” **수질보존 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제24권, 제6호, pp. 690-700.

허성구, 김기성, 사공명, 안재훈, 임경재 (2005). “고랭지 농경지의 토양유실모의를 위한 SWAT 모형의 적용성 평가.” **한국농촌계획학회지**, 한국농촌계획학회, 제11권, 제4호, pp. 67-74.

Jing Yang, Peter Reichert, K.C. Abbaspour, Jun Xia b, and Hong Yang al. (2008). “Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China.” *Journal of Hydrology*, Vol. 358, pp. 1-23.

Jing Yang, Peter Reichert, Karim C. Abbaspour, and Hong Yang (2007). “Hydrological modeling of the Chaohe basin in China: Statistical model formulation and Bayesian interface.” *Journal of Hydrology*, Vol. 340, pp. 167-182.

Jurgen Schuol, Karim C. Abbaspour, Raghavan

Srinivasan, and Hong Yang (2008a). “Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 352, pp. 30-49.

Jurgen Schuol, Karim C. Abbaspour, Hong Yang, Raghavan Srinivasan, and Alexander J.B. Zehnder (2008b). “Modeling blue and green water availability in Africa.” *Water Resource Research*, Vol. 44, W07406. doi:10.1029/2007WR 006609.

K.C. Abbaspour,* C.A. Johnson, and M. Th. van Genuchten (2004). “Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure.” *Vandose zone Journal*, Vol. 3, pp. 1340-1352.

K.C. Abbaspour (2008). “SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs-A User Manual.” *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology*; Duebendorf, Switzerland.

M. Winchell, R. Srinivasan, M. Di Luzio, and J. Arnold (2009). ArcSWAT 2.3.4 Interface for SWAT2005 User’s Guide.

M. Winchell, R. Srinivasan, M. Di Luzio, J. Arnold (2010). ArcSWAT Interface for SWAT2009 User’s Guide.

Monireh Faramarzi, Karim C. Abbaspour, I Rainer Schulin and Hong Yang (2009). “Modelling blue and green water resources availability in Iran.” *Hydrological Process*, Vol. 23, pp. 486-501.

R. Daren Harmel, and Patricia K. Smith (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.

Seo, D., Kim, J.S., and Chang, E. (2007). “Application of medium class land cover maps to AVSWAT2000 for the prediction of inflow, CBOD, TN and TP for Yongdam Lake, Korea.” *Water Sci Technol*, Vol. 55, Issues 1-2, pp. 513-518.

USEPA (2001). BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources) Version 3.0 User’s Manual.

논문번호: 11-059	접수: 2011.06.07
수정일자: 2011.08.08	심사완료: 2011.08.08