

SWAT 모형의 매개변수와 유역의 지형학적 특성 관계

The Relationship between Parameters of the SWAT Model and the Geomorphological Characteristics of a Watershed

이용희¹ · 이지행² · 박지훈³ · 최흥식^{1*}

¹상지대학교 토목공학과, ²삼화건설환경(주), ³방재안전기술원

Woong Hee Lee¹, Ji Haeng Lee², Ji Hun Park³ and Heung Sik Choi^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Sangji University, Wonju 26338, Korea

²Samhwa Construction and Environment, 1 Gaun-ro 1-gil, Namyangju 12263, Korea

³Disaster Prevention Safety Institute, 164 Tancheonsang-ro, Seongnam 13631, Korea

Received 4 February 2016, revised 9 March 2016, accepted 20 March 2016, published online 31 March 2016

ABSTRACT: The correlation relationships and their corresponding equations between the geomorphological parameters and the Soil Water Assessment Tool (SWAT) model parameters by Sequential Uncertainty Fitting - version 2 (SUFI-2) algorithm of SWAT Calibration and Uncertainty Programs (SWAT-CUP) were developed at the Seom-river experimental watershed. The parameters of the SWAT model at the Soksa-river experimental watershed were estimated by the developed equations. The SWAT model parameters were estimated by SUFI-2 algorithm of SWAT-CUP with rainfall-runoff data from the Soksa-river experimental watershed from 2000 to 2007. Rainfall-runoff simulation of the SWAT model was carried out at the Soksa-river experimental watershed from 2000 to 2007 for the applicability of the estimated parameters by the developed equations. The root mean square errors (RMSE) between the observed and the simulated rainfall-runoffs using the estimated parameters by developed equations of correlation analysis and the optimum parameters by SUFI-2 of SWAT-CUP were 1.09 m³/s and 0.93 m³/s respectively at the Soksa-river experimental watershed from 2000 to 2007. Therefore, it is considered that the parameter estimation of the SWAT model by the geomorphological characteristics parameters has applicability.

KEYWORDS: Geomorphological characteristics, Parameters, SUFI-2, SWAT-CUP

요 약: 섬강 시험유역의 지형학적 특성 매개변수와 SWAT-CUP의 SUFI-2 알고리즘을 이용한 SWAT 모형 매개변수와의 상관관계와 이들의 관계식을 개발하였다. 개발한 상관 관계식을 이용하여 속사천 유역의 SWAT 모형의 매개변수를 추정하였다. 아울러, 속사천 유역의 2000 - 2007년의 강우-유출 자료를 대상으로 SWAT-CUP의 SUFI-2 알고리즘을 이용하여 SWAT 모형의 매개변수를 추정하였다. 개발한 식에 의해 산정한 각 매개변수의 적용성을 검토하기 위해 2000 - 2007년의 속사천 시험유역 자료를 이용하여 SWAT 모형의 유출모의를 실시하였다. 실측자료와 지형학적 특성 매개변수의 상관관계 분석으로 산정된 매개변수를 이용하여 속사천에 적용한 유출 모의결과와의 RMSE (root mean square error)는 1.09 m³/s이고, SWAT-CUP의 SUFI-2 최적 매개변수를 적용한 유출 모의결과와의 RMSE는 0.93 m³/s으로 나타났다. 따라서 지형학적 특성 매개변수를 이용한 SWAT 모형의 매개변수 추정이 적용성이 있다고 판단된다.

핵심어: 지형학적 특성, 매개변수, SUFI-2, SWAT-CUP

*Corresponding author: hsikchoi@sangji.ac.kr, ORCID 0000-0001-9703-3199

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

강우-유출모형의 정확한 예측을 위해서는 강수와 더불어 유역의 지형학적, 수문학적, 지질학적 인자는 물론 토양과 식생에 대한 정보가 필요하다. 최근에는 지리정보체계 (GIS)의 발달로 하천유역의 공간적 특성자료를 이용한 유출해석이 활발히 진행되고 있다. 유역의 지형특성자료를 이용한 강우-유출 해석에 관한 연구로 Ahn et al. (2002)은 영천댐 유역에서 지형학적 하천차수를 이용한 지형학적 매개변수를 산정하고 Clark 방법과 비교를 실시하여 순간단위도 (Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH)의 적용성을 평가하였다. Jang et al. (2004)은 GIS를 기반으로 Soil Water Assessment Tool (SWAT) 모형을 이용한 하천 유출을 모의하였다. Lee and Seo (2011)는 SWAT Calibration and Uncertainty Programs (SWAT-CUP)을 이용한 대청호 유역에서 장기 유출 보정 및 검증을 실시하여 매개변수를 최적화하여 유출량 비교분석을 하였다. Ryu et al. (2012)은 소양강댐 유역에 SWAT-CUP을 이용한 SWAT 모형의 유량을 자동 검정하고 유허별 검정 결과를 평가하였다. Van Griensven and Meixner (2003)는 SWAT 모형의 매개변수들의 민감도 분석 및 최적화를 통하여 매개변수의 검정 및 보정을 실시하였다. Abbaspour et al. (2007)은 스웨덴의 라인강 지류인 Tru강에 SWAT 모형의 적용성을 검토하였다. 매개변수의 산정과 검정은 Sequential Uncertainty Fitting - version 2 (SUFI-2) 알고리즘을 적용하였다. Yang et al. (2008)은 중국의 Chaohe 유역의 SWAT 모형을 적용하였으며, SWAT 모형이 유출량예측에 정확성이 높은 것으로 판단하였고, 검·보정 및 불확실성 분석기법을 SUFI-2, Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE), Parameter Solution (ParaSol) 기법을 사용하여 비교한 결과 SUFI-2가 신뢰성이 높은 것으로 판단하였다. Setegn et al. (2010)은 에디오피아의 Tana 유역에 SWAT 모형을 적용하고 불확실성 및 매개변수추정 기법으로 SUFI-2, GLUE, ParaSol 기법을 사용하였다. 현재까지의 연구는 SWAT 모형의 사용에 따른 매개변수의 추정을 위한 연구로 SWAT-CUP을 기반으로 수행하였으나, 하천의 지형학적 매개변수와 유출의 상관을 통한 연구는 부족한 실정이다. 그러나

강우-유출의 정확한 해석을 위해서는 유역의 특성을 나타내는 각종 매개변수의 정확한 입력이 요구된다. 강우-유출모형에 따라 사용되는 매개변수는 지형적, 지질적, 토양과 식생 등의 특성을 나타내는 값으로 모형마다의 특성을 달리하는 것으로 다양하다. 준분포 모형인 SWAT은 21개의 매개변수로 수문현상과 유역의 특성에 의해 결정되는 변수와 정량적인 산정 근거로부터의 결정보다는 특정의 범위에서 적절한 값의 사용을 권장하는 매개변수가 있으며, 각 매개변수에 대한 정량적인 산정 근거의 제시가 필요하다. 따라서 매개변수는 유역의 지형학적 특성과 상관성이 있을 것으로 판단되어 지형학적 특성을 나타내는 매개변수에 의한 SWAT 모형의 매개변수를 추정할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 섬강 시험유역에서의 지형학적 특성을 나타내는 매개변수를 도출하였고, 2000 - 2007년의 강우-유출자료를 이용하여 SWAT-CUP의 SUFI-2 알고리즘을 이용한 SWAT 모형의 민감도 분석, 불확실도 분석과 최적 매개변수를 추정하고 지형학적 특성을 나타내는 매개변수와 상관관계를 분석하여 그 관계식을 제시하였다. 섬강 시험유역에서의 지형학적 특성의 매개변수를 사용한 SWAT 모형의 매개변수 상관 관계식을 사용하여 속사천 시험유역의 SWAT 모형의 매개변수를 추정하였다. SWAT-CUP의 SUFI-2 알고리즘을 이용한 SWAT 모형의 매개변수와 상관 관계식에 의해 추정한 매개변수를 이용하여 속사천 시험유역의 2000 - 2007년에 대한 강우-유출모의를 실시하여 지형학적 특성의 매개변수에 의한 상관 관계식을 이용한 SWAT 모형의 매개변수 추정값의 적용성을 검토하였다.

2. SWAT 모형과 유역의 지형학적 특성의 매개변수 추정

2.1 SWAT-CUP을 이용한 SWAT 모형의 매개변수 추정

준분포형 모형인 SWAT 모형은 ArcGIS와 연계한 ArcSWAT (Winchell et al. 2010)을 통해 비교적 정확한 유출을 예측한다. SWAT 모형에 의한 수치모의에는 각종 매개변수들을 정확하게 입력하는 보정 작업이 필요하다. SWAT 모형 내 자동검정 (auto-

calibration)은 수문모형 보정에 많이 사용되는 다른 알고리즘을 활용하지 못하는 제한 점을 가지고 있었으나, 다양한 연구가 진행되어 SWAT 모형에서 고려하지 못하는 매개변수에 대해 자동보정 기능을 보완해주는 SWAT-CUP을 개발하였다 (Abbaspour 2008).

SWAT 모형은 준분포형 모형으로 입력자료는 기상, 하도추적, 지하수 등의 자료, GIS와 수동입력을 병행하여 작성되는 소유역 자료로 구분된다. SWAT 모형은 강우-유출 모형으로서 토지부분의 수문순환을 정확히 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수 등에 대한 모의를 수행한다. SWAT 모형의 유출량은 각각의 수문 반응단위 (HRU, hydrologic response unit)에 대해 독립적으로 계산되며, 하도추적을 통해 하류 최종 출구지점에서 유출량을 산정한다.

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

여기서 SW_t 는 i 일의 최종 토양수분량 (mm), SW_o 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 SWAT 모형의 자동 보정을 위한 보조 프로그램 (Abbaspour 2008)으로 SUFI-2, GLUE, Parasol, Markov chain Monte Carlo (MCMC), particle swarm optimization (PSO)의 5가지 통계 알고리즘으로 구성되어 있으며 사용목적에 따라 알고리즘을 선택하여 사용한다. 본 연구에서는 SUFI-2 알고리즘을 사용하였다. SUFI-2 알고리즘은 지정된 범위에서 순차적이고 반복적으로 매개변수를 산정하며, 모형 입력 매개변수를 반복적으로 변화시키면서 모형의 적용과정에서 발생하는 보정오차를 제거함으로써 불확실성을 최소화하여 최적 매개변수를 도출한다. 불확실성에 대한 수치를 나타내는 P -factor 지수란 95% 범위의 예측 불확실성 (95% prediction uncertainties, 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, 라틴 하이퍼큐브 샘플링 (LHS, latin

hypercube sampling) 기법을 통한 결과 값의 2.5% (X_L)에서 97.5% (X_U) 범위의 누적분포를 통해 계산된다 (Abbaspour 2011). 각 수문성분마다 계산되는 P -factor는 95% 범위 안에 포함되는 실측치를 백분율로 평가하며, 상위경계와 하위경계 사이의 거리는 Eq. 2와 같다.

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

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 Eq. 3과 같이 불확실성 분석을 평가할 수 있는 다른 척도로 R -factor는 평균 95PPU를 실측자료 (\bar{d})를 표준편차 (σ_x)로 나누어 산정할 수 있으며, 95PPU의 평균 폭을 의미하므로 0에 가까울수록 모델 보정의 정확도는 증가한다 (Schuol et al. 2008).

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

2.2 유역의 지형학적 특성의 매개변수 추정

유역의 하도망 구성에 대한 기하학적인 특성의 하천 차수 법칙은 Horton (1945)의 이론을 Strahler (1957)가 수정한 방법을 사용한다. 지형학적 특성을 나타내는 매개변수는 분기율 (R_b , bifurcation ratio), 유역 면적비 (R_a , stream area ratio), 하천 길이비 (R_l , stream length ratio), 하천 함몰도 (R_s , stream concavity)이다. 하천차수와와의 관계식은 하천차수 법칙 (the law of stream order), 평균하천길이 법칙 (the law of stream length), 평균하천경사 법칙 (the law of stream slope)과 Schumm (1956)에 의해 제안된 유역면적 법칙 (the law of drainage area)으로 관계식은 아래와 같다.

$$N_u = R_b^{\Omega - u} \quad (\text{Eq. 4a})$$

$$L_u = L_1 R_l^{u-1} \quad (\text{Eq. 4b})$$

$$S_u = S_1 R_s^{U-1} \quad (\text{Eq. 4c})$$

$$A_u = A_1 R_A^{U-1} \quad (\text{Eq. 4d})$$

여기서 N_u , L_u , S_u 및 A_u 는 각각 u 차 하천의 개수, 평균 수로길이, 평균 수로경사 및 유역면적이다. Ω 는 유역내 하천의 최고 차수이다.

Eq. 4a는 하천 분기율로서 차수별 하천의 개수를 산정하고 각각에 대수를 취하여 구한 직선의 기울기를 $\log(R_b)$ 로 나타낸다. 분기율은 유역수문곡선의 침투유량 크기와 비례하는 관계를 가지므로 유역간 분기비를 비교하면 개략적인 크기와 비교가 가능하다. 또한 하천 발달과 깊은 관계를 갖고 있으며, 일반적으로 자연하천에서 발달된 하천수계의 분기율은 3.0 - 5.0의 값을 갖는다. Eq. 4b는 하천 길이비로 평균 수로 길이가 1차 하천의 평균 수로 길이와 일정한 관계를 가짐을 나타낸다. 일반적으로 높은 차수의 평균 수로 길이가 낮은 차수의 평균 수로 길이보다 항상 큰 값을 갖게 되며, 자연하천에서는 길이비가 1.5 - 3.5로 나타난다. Eq. 4c는 연장비로서 일반적으로 하천의 차수가 높아질수록 경사는 완만해지며, 경사비율이 높은 하천일수록 하천 길이 비율이 낮게 나타난다. Eq. 4d는 면적비로서 유역 내 하천의 평균면적이 1차 하천의 유역평균 면적과 일정한 관계를 갖는 법칙으로 일반적으로 3.0 - 6.0의 값으로 나타나며 유역이 기하학적 상사성 (geometric similarity)을 갖는 경우에는 이론적으로 4의 값으로 나타난다.

3. 연구방법

3.1 대상유역 현황

대상유역은 남한강의 제1지류인 섬강 시험유역과 평창강의 제1지류인 속사천 시험유역이다. 섬강 시

험유역은 황성담 상류에 위치한 지방 하천인 계천유역으로서 계천과 유동천이 합류하는 부채꼴 형상의 유역이다. 유역면적은 유역의 출구인 매일수위국을 기준으로 164.45 km²이고 유로 연장은 22.41 km로 대상유역의 지형은 대체로 만장년기 지형으로 주로 산지로 형성되어 있다. 속사천 시험유역은 평창강 상류에 위치하고 있는 지방하천으로 속사천에 도사천이 합류하는 수지형의 유역으로 구성되어 있다. 유역면적은 유역의 출구인 의풍포교 하류 기준으로 119.37 km²이고 유로 연장은 28.71 km로 대상유역이 전반적으로 산지형태로 형성되어있다 (Gangwon-do 2000, 2001).

3.2 입력자료의 구성

구축자료로는 국토지리원에서 제공하는 수치지도 (1:5000)를 활용하여 DEM을 작성하였다. Fig. 1은 섬강 시험유역과 속사천 시험유역의 소유역 구성현황이며, 섬강 시험유역은 유역내의 지류를 중심으로 15개의 소유역으로 구분하였고, 속사천 시험유역은 11개의 소유역으로 구분하였다.

강우량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템 (WAMIS, Water Management Information System, <http://www.wamis.go.kr>)을 이용하여 섬강 시험유역은 봉덕, 춘당, 매일의 강우 자료로 구성하였고, 속사천 시험유역은 용전, 계방의 강우자료로 구성하였다. 섬강 시험유역의 계천유역에는 기상관측소가 없기 때문에 가장 근접한 원주 기상대 자료를 이용하였고, 속사천 시험유역은 대관령 기상대 자료를 이용하였다. 기상청에서 제공하는 기상연보 (KMA 2013)를

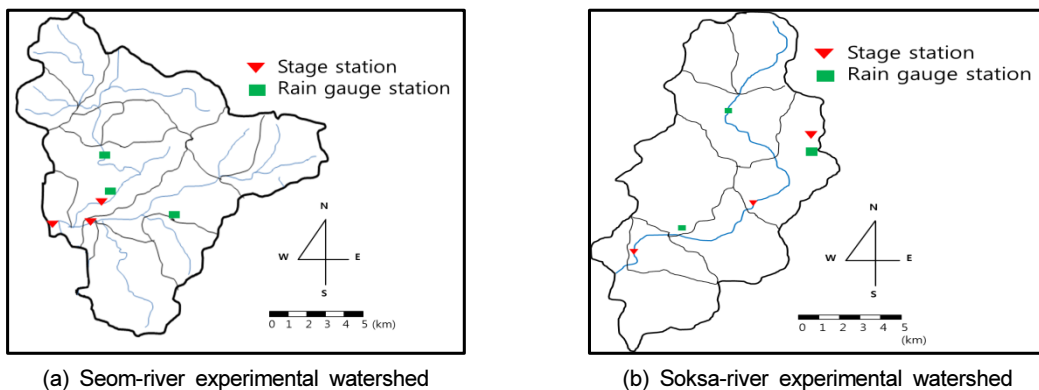


Fig. 1. Configuration of subbasins for experimental watersheds.

활용하여 30년 평균의 최고 및 최저기온, 평균 강수량, 태양 복사열, 이슬점, 풍속 등 기상자료를 구성하였다.

토양자료에는 토지 이용도, 정밀 토양도, 유역 평균경사로 구성되어 있다. 토지 이용도는 WAMIS에서 제공하는 8가지 (WATR, 수역; URBN, 시가지지역; HAY, 나지; PAST, 목장용지; FRST, 산림용지; AGRL, 논; AGRR, 밭) 항목을 적용하였다. 섬강 시험유역과 속사천 시험유역에서의 FRST는 90.26%와 87.27%로 가장 높게 나타났다. 정밀 토양도의 경우 농촌진흥청 (<http://www.rda.go.kr>)에서 제공하는 정밀 토양도 (1:50,000)를 사용하여 작성하였으며, 유역 평균경사는 수치지도 (1:5000)를 활용하여 DEM을 분석해 3등분하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 SUFI-2 적용에 의한 SWAT-CUP 모형의 매개변수 추정

SWAT 모형에서는 수문, 유역, 토양 등에 대한 다양한 입력인자와 매개변수들이 있으며, 각각 매개변수들마다 최소와 최대값이 정의된다. 본 연구에서는 유출에 영향이 큰 21가지 매개변수를 선정하였으며, 섬강과 속사천 시험유역의 2000 - 2007년 강우-유출 자료를 이용하여 SWAT-CUP 모형의 SUFI-2 알고리즘을 사용하여 민감도 분석, 불확실도 분석과 최적 매개변수를 도출하였다. 민감도 분석을 위해서는 각 매개변수에 대한 T-stat과 P-factor를 산정하였다. T-stat은 각 매개변수 값을 그 매개변수 별 표준편차로 나눈

값으로, 이 값이 크다는 것은 민감도가 크다는 것을 의미한다. Fig. 2는 민감도 분석결과이며 CANMX (산림 최대 흡수량, maximum canopy storage), ALPHA_BF (기저유량감소계수, base flow reduction factor)가 속사천 시험유역과 섬강 시험유역에서 가장 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

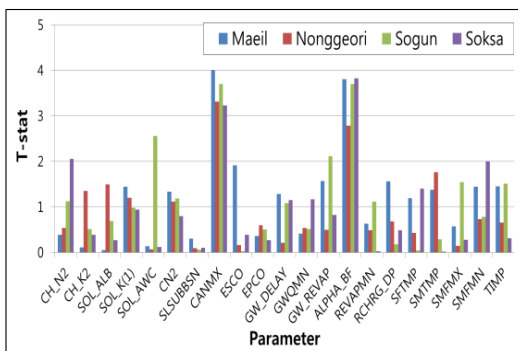
Table 1은 매개변수 별 최대값과 최소값의 범위 내에서 값을 변환시키는 자동가감법 (add to value), 초기 값에 선택 값의 비율만큼 가감하는 방법 (multiply by value), 자동치환방법 (replaced by value)을 사용하여 SUFI-2 알고리즘에서의 2,000회의 반복적인 계산을 통해 섬강 시험유역과 속사천 시험유역의 매개변수 최적값을 도출한 결과이다.

P-factor값은 속사천에서 0.73, 매일교 0.87, 농거리교 0.85, 소군교 0.86이고, R-factor값은 속사천에서 0.32, 매일교 0.22, 농거리교 0.27, 소군교 0.26으로 적절하게 수렴하였다.

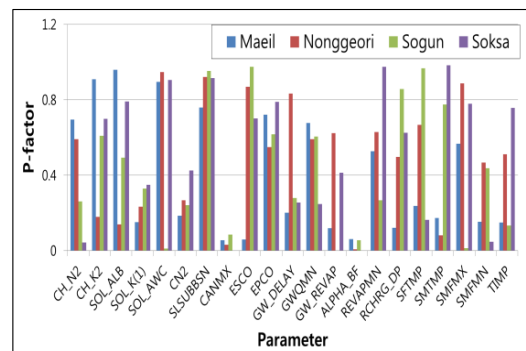
4.2 유역의 지형학적 특성의 매개변수

지형학적 특성 매개변수와 SWAT 모형의 유출관련 매개변수와의 상관성 분석을 위해서 섬강과 속사천 시험유역에서의 지형학적 특성의 매개변수를 산정하였다.

Table 2에서와 보는 바와 같이 분기율은 속사천 시험유역에서 3.86, 섬강 시험유역의 매일교는 3.72, 농거리교는 4.47, 소군교는 4.79로 잘 발달된 수계의 분기율 범위 (3.0 - 5.0)로 나타났다. 면적비는 속사천에서 5.70, 매일교는 4.57, 농거리교는 5.42, 소군교는 5.68로 잘 발달된 수계의 면적비 범위 (3.0 -



(a) Sensitivity analysis (T-stat)



(b) Sensitivity analysis (P-factor)

Fig. 2. Sensitivity analysis for the estimated parameters of SWAT-CUP. The abbreviation refers to Neitsch et al. (2002).

Table 1. Optimal parameters by SUFI-2 of SWAT-CUP for experimental watersheds.

| Parameters ¹ | Range | | Optimal value | | | |
|--|---------|---------|---------------|------------|---------|-----------|
| | | | Soksa-river | Seom-river | | |
| | Minimum | Maximum | Soksa | Maeil | Sogun | Nonggeori |
| CH_N2 | 0.00 | 1.00 | 0.85 | 0.62 | 0.63 | 0.90 |
| CH_K2 (mm/hr) | 0.00 | 150.00 | 42.75 | 51.75 | 24.75 | 45.75 |
| SOL_ALB | 0.00 | 0.25 | 0.07 | 0.08 | 0.19 | 0.11 |
| SOL_K(1) (mm/hr) | 0.00 | 100.00 | 89.50 | 54.50 | 0.50 | 24.50 |
| SOL_AWC (mm/mm) | 0.00 | 1.00 | 0.55 | 0.61 | 0.39 | 0.37 |
| CN2 | 35.00 | 98.00 | 43.51 | 91.75 | 68.71 | 91.39 |
| SLSUBBSN (m) | 10.00 | 150.00 | 70.90 | 23.30 | 105.90 | 58.30 |
| CANMX (mm) | 0.00 | 10.00 | 3.85 | 8.45 | 5.85 | 6.65 |
| ESCO | 0.00 | 1.00 | 0.31 | 0.42 | 0.98 | 0.31 |
| EPCO | 0.00 | 1.00 | 0.51 | 0.12 | 0.92 | 0.47 |
| GW_DELAY (day) | 0.00 | 50.00 | 25.75 | 45.75 | 31.25 | 30.25 |
| GWQMN (mm) | 0.00 | 5000.00 | 4775.00 | 4425.00 | 2325.00 | 2775.00 |
| GW_REVAP | 0.02 | 0.20 | 0.17 | 0.09 | 0.12 | 0.16 |
| ALPHA_BF (day) | 0.00 | 1.00 | 0.11 | 0.10 | 0.76 | 0.25 |
| REVAPMN (mm) | 0.00 | 500.00 | 332.50 | 247.50 | 182.50 | 87.50 |
| RCHRG_DP | 0.00 | 1.00 | 0.95 | 0.94 | 0.54 | 0.30 |
| SFTMP (°C) | 0.00 | 5.00 | 3.53 | 4.13 | 0.38 | 0.63 |
| SMTMP (°C) | 0.00 | 5.00 | 3.53 | 1.93 | 4.73 | 2.18 |
| SMFMX (mm °C ⁻¹ day ⁻¹) | 0.00 | 10.00 | 2.25 | 0.85 | 4.45 | 8.95 |
| SMFMN (mm °C ⁻¹ day ⁻¹) | 0.00 | 10.00 | 3.05 | 8.75 | 2.45 | 0.15 |
| TIMP | 0.00 | 1.00 | 0.32 | 0.82 | 0.71 | 0.88 |

¹Neitsch et al. (2002).

Table 2. Geomorphological parameters for experimental watersheds.

| Classification | Soksa-river | Seom-river | | |
|-------------------------------|-------------|------------|-----------|-------|
| | Soksa | Maeil | Nonggeori | Sogun |
| Bifurcation ratio (R_b) | 3.86 | 3.72 | 4.47 | 4.79 |
| Stream area ratio (R_a) | 5.7 | 4.57 | 5.42 | 5.68 |
| Stream length ratio (R_l) | 2.7 | 2.88 | 3.21 | 3.35 |
| Stream concavity (R_s) | 2.41 | 2.00 | 1.79 | 1.49 |

6.0)로 나타났다. 길이비는 속사천에서 2.70, 매일교는 2.88, 농거리교는 3.21, 소군교는 3.35로 잘 발달된 수계의 길이비 범위 (1.5 - 3.5)로 나타났다. 함몰도는 속사천에서 2.41, 매일교는 2.00, 농거리교는 1.79, 소군교는 1.49로 나타났다. 따라서 속사천 시험유역과 섬강 시험유역은 Eagleson (1970)이 제시한 차수법칙에 따라 일정한 규칙성을 가지고 잘 발달된 하천수계임을 확인하였다.

4.3 유역의 지형학적 특성 및 SWAT 모형의 매개변수와의 상관관계

4.3.1 분기율과의 관계

섬강 시험유역의 지형학적 특성 매개변수인 분기율과 SWAT 모형의 유출에 지배적인 매개변수와의 상관성 분석은 Fig. 3과 같다. 하천차수에 따른 도달 시간과 침투유량의 크기와 관계가 있는 매개변수에

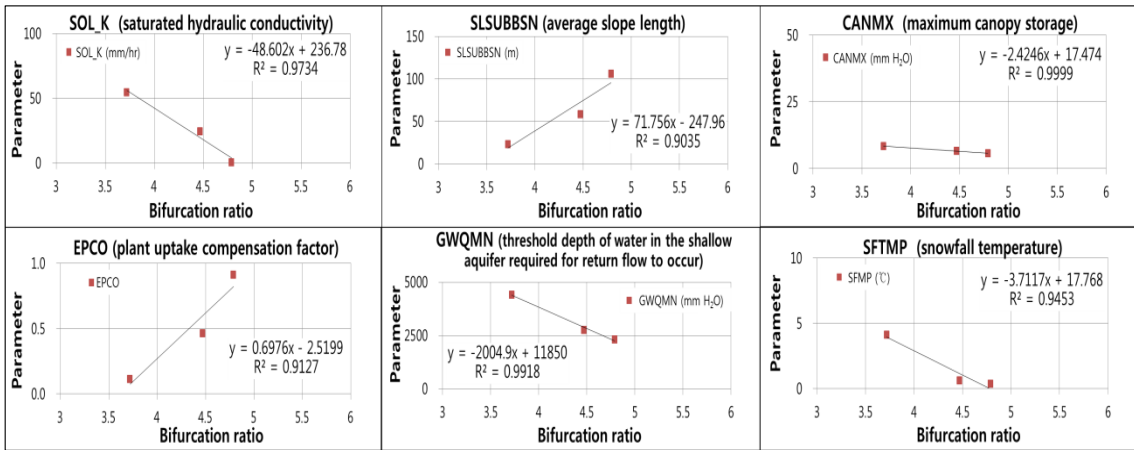


Fig. 3. Regression analysis of the SWAT model parameters with bifurcation ratio.

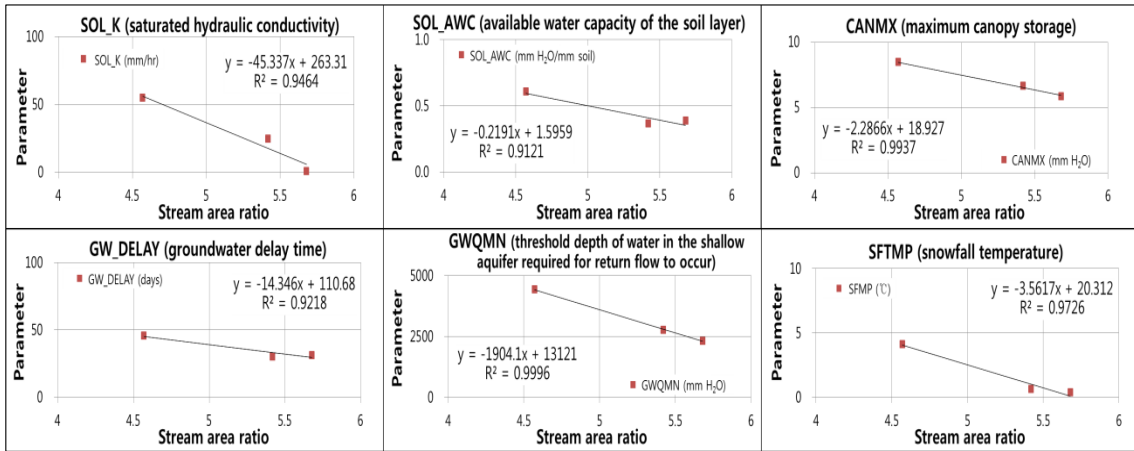


Fig. 4. Regression analysis of the SWAT model parameters with stream area ratio.

대해서 상관성이 높은 것으로 나타났고 그 관계식을 제시하였다. 상관계수는 SOL_K (포화 투수계수, saturated hydraulic conductivity)가 0.97, SLSUBBSN (하천경사 길이, average slope length)이 0.90, CANMX가 0.99, EPCO (식물흡수 보정계수, plant uptake compensation factor)가 0.91, GWQMN (기저유량에 대한 얇은 대수층의 임계 수분량, threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur)이 0.99, SFTMP (눈의 온도, snowfall temperature)가 0.94로 6개의 매개변수에 대해서 상관성이 높은 것으로 나타났다.

4.3.2 면적비와의 관계

섬강 시험유역의 지형학적 특성 매개변수인 면적

비와 SWAT 모형의 유출에 지배적인 매개변수와의 상관성 분석은 Fig. 4와 같다. 유역면적에 따른 토양 특성과 기상조건의 특성으로 영향을 미치는 매개변수에 대해서 높은 상관성이 나타났고 그 관계식을 제시하였다. 상관계수는 SOL_K가 0.94, SOL_AWC (유효 토양수분함량, available water capacity of the soil layer)가 0.91, CANMX가 0.99, GW_DELAY (지하수 지연시간, groundwater delay time)가 0.92, GWQMN이 0.99, SFTMP가 0.97로 6개의 매개변수에 대해서 상관성이 높은 것으로 나타났다.

4.3.3 길이비와의 관계

섬강 시험유역의 지형학적 특성 매개변수인 길이비와 SWAT 모형의 유출에 지배적인 매개변수와의 상

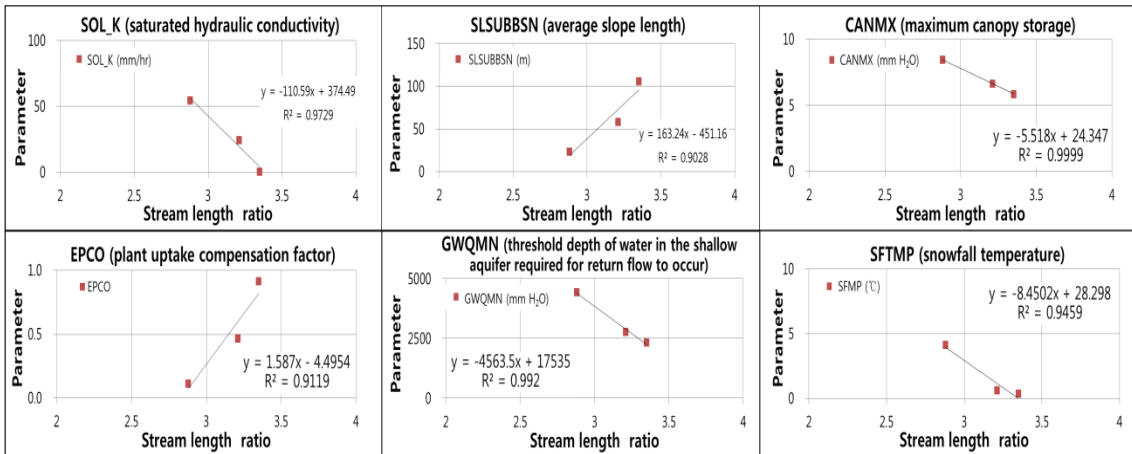


Fig. 5. Regression analysis of the SWAT model parameters with stream length ratio.

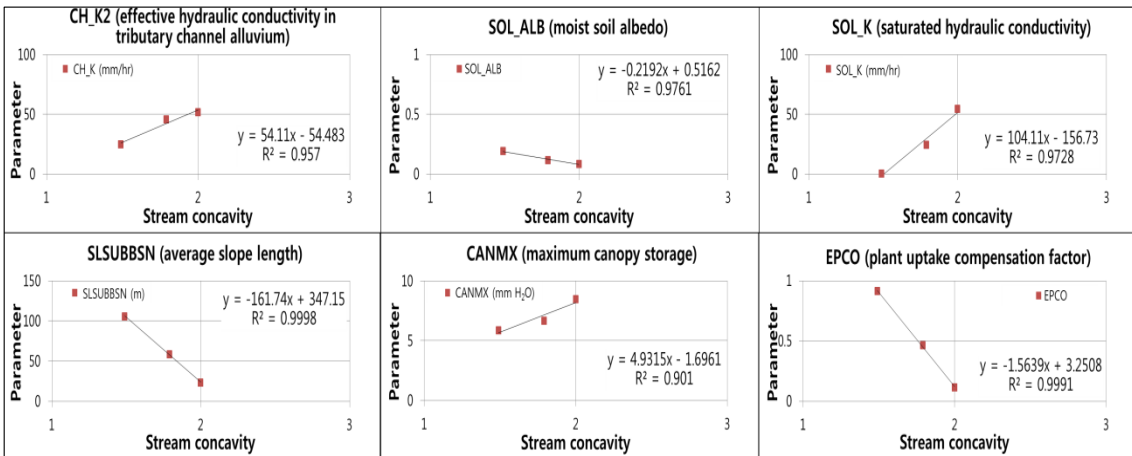


Fig. 6. Regression analysis of the SWAT model parameters with stream concavity.

관성 분석은 Fig. 5와 같다. 산지형태로 구성된 대상구역에서의 소하천의 발달과 하폭이 좁고, 경사가 급하며, 자갈하천의 특성으로 영향을 미치는 매개변수에 대해서 상관성이 높은 것으로 나타났고 그 관계식을 개발하였다. 상관계수는 SOL_K가 0.97, SLSUBBSN이 0.90, CANMX가 0.99, EPCO가 0.91, GWQMN이 0.99, SFTMP가 0.94로 6개의 매개변수에 대해서 상관성이 높게 나타나는 것으로 나타났다.

4.3.4 함몰도와의 관계

섬강 시험구역의 지형학적 특성 매개변수인 함몰도와 SWAT 모형의 유출에 지배적인 매개변수와의 상관성 분석은 Fig. 6과 같다. 산지형태로 구성된 대상유

역에서의 토양속성, 지형의 특성 및 기상조건의 변화로 인해 영향을 미치는 매개변수에 대해서 상관성이 높은 것을 확인하였고 그 관계식을 제시하였다. 상관계수는 CH_K2 (하천수리 유효 전도계수, effective hydraulic conductivity in tributary channel alluvium)가 0.95, SOL_ALB (습윤토 반사율, moist soil albedo)가 0.97, SOL_K가 0.97, SLSUBBSN이 0.99, CANMX가 0.90, EPCO가 0.99, ALPAH_BF가 0.95로 7개의 매개변수에 대해서 상관성이 높게 나타났다.

4.4 상관 관계식에 의한 속사천에서의 매개변수 산정과 적용

섬강 시험구역의 지형학적 특성의 매개변수와 SWAT

모형의 매개변수와와의 상관 관계식을 이용하여 속사천에서의 SWAT 모형의 매개변수를 추정하였다. 유역의 지형학적 특성의 매개변수와 상관성이 높은 SWAT 모형의 매개변수는 전체 11개 매개변수로 분기율은 *CANMX*, 면적비는 *SOL_AWC*, *GW_DELAY*, *SFTMP*, 길이비는 *SOL_K*, *GWQMN*, 함몰도는 *CH_K2*, *SOL_ALB*, *SLSUBBSN*, *EPCO*, *ALPHA_BF*에 대한 상관성이 높게 나타났다. 상관성이 높은 11개의 매개변수를 관계식에 의해 속사천에서 산출한 매개변수는 Table 3과 같다. 그 외의 매개변수는 SWAT 모형에서 권장하는 기본값을 적용하였다.

지형학적 매개변수 상관 관계식을 이용한 SWAT 모형의 매개변수를 사용하여 속사천 시험유역의 강우-유출을 모의하였다. Table 4는 지형학적 특성의 매개변수를 이용한 상관 관계식으로 산정된 속사천 시험유역의 SWAT 모형의 매개변수와 속사천 시험

유역의 2000 - 2007년 자료에 의한 SWAT-CUP의 SUFI-2 알고리즘에 의한 SWAT 모형의 최적 매개변수이다. Fig. 7은 속사천 시험유역의 2000 - 2007년 강우-유출에 대한 SWAT 모형의 모의결과이다. 이때 사용한 매개변수는 지형학적 특성의 상관 관계식을 이용한 매개변수와 SWAT-CUP의 SUFI-2에 의한 매개변수에 의한 결과로 실측자료와의 비교이다. 지형학적 특성의 매개변수의 상관 관계식을 통해 추정된 SWAT 모형의 매개변수를 이용한 유출모의 결과와 실측 유출과의 RMSE (root mean square error)는 $1.09 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 나타났으며, SWAT-CUP의 SUFI-2에 의한 최적 매개변수를 통한 유출모의 결과와 실측 유출과의 RMSE는 $0.93 \text{ m}^3/\text{s}$ 으로 나타났다. 따라서, SWAT-CUP의 SUFI-2에 의한 최적 매개변수의 적용보다 지형학적 특성에 의한 상관 관계식에 의한 SWAT 모형의 매개변수에 의한 유출모의가 다소 정확도가 떨

Table 3. Parameters proposed by regression equation or the recommended value in the Soksa-river.

| Parameters ¹ | Bifurcation ratio (R_b) | Stream area ratio (R_a) | Stream length ratio (R_l) | Stream concavity (R_s) | Values used | Remarks |
|--|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------|-------------|
| CH_N2 | 0.68 | 0.59 | 0.64 | 0.73 | 0.01 | recommended |
| CH_K2 (mm/hr) | 51.02 | 31.19 | 62.90 | 58.47 | 58.47 | regression |
| SOL_ALB | 0.09 | 0.17 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | regression |
| SOL_K (mm/hr) | 49.03 | 4.89 | 75.12 | 73.35 | 75.12 | regression |
| SOL_AWC (mm/mm) | 0.56 | 0.37 | 0.68 | 0.63 | 0.37 | regression |
| CN2 | 92.20 | 76.45 | 96.32 | 105.22 | 36.00 | recommended |
| SLSUBBSN (m) | 36.96 | 94.03 | 36.59 | 35.94 | 35.94 | regression |
| CANMX (mm) | 8.11 | 5.89 | 9.41 | 7.87 | 8.11 | regression |
| ESCO | 0.38 | 0.73 | 0.16 | 0.41 | 0.95 | recommended |
| EPCO | 0.17 | 0.81 | 0.80 | 0.24 | 0.24 | regression |
| GW_DELAY (day) | 42.62 | 28.91 | 45.17 | 41.12 | 28.91 | regression |
| GWQMN (mm) | 4105.07 | 2267.63 | 4181.61 | 3908.10 | 4181.61 | regression |
| GW_REVAP | 0.10 | 0.14 | 0.14 | 0.11 | 0.02 | recommended |
| ALPHA_BF (day) | 0.11 | 0.60 | 0.32 | 0.21 | 0.21 | regression |
| REVAPMN (mm) | 213.28 | 129.26 | 260.63 | 203.46 | 1.00 | recommended |
| RCHRG_DP | 0.80 | 0.37 | 0.65 | 0.75 | 0.05 | recommended |
| SFTMP (°C) | 3.43 | 0.01 | 2.74 | 3.06 | 0.01 | regression |
| SMTMP (°C) | 1.92 | 3.88 | 0.73 | 2.11 | 0.50 | recommended |
| SMFMX (mm °C ⁻¹ day ⁻¹) | 2.58 | 7.04 | 0.05 | 6.26 | 4.50 | recommended |
| SMFMN (mm °C ⁻¹ day ⁻¹) | 6.97 | 0.55 | 8.68 | 6.72 | 4.50 | recommended |
| TIMP | 0.83 | 0.77 | 0.87 | 0.83 | 1.00 | recommended |

¹Neitsch et al. (2002).

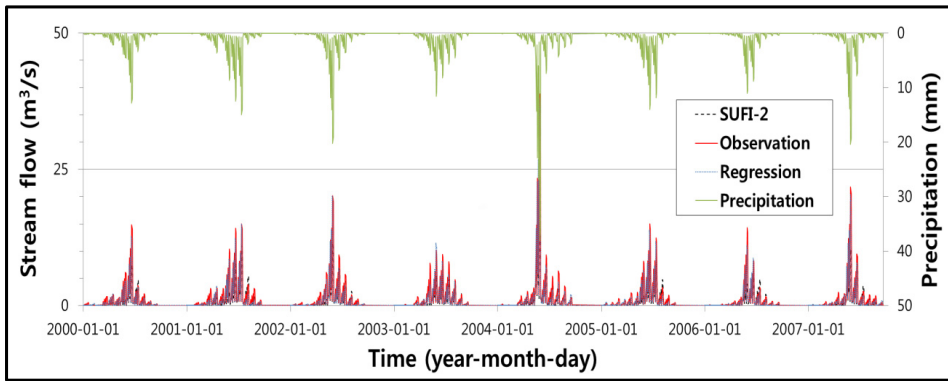


Fig. 7. Rainfall-runoff simulations using the estimated parameters by the SUFI-2 and developed regression equation in the Sok-sa experimental watershed (2000 - 2007).

Table 4. Parameters by regression equation on geomorphological characteristics and SUFI-2 of SWAT model.

| Parameters ¹ | The estimated by regression equation | Optimal search by SUFI-2 |
|--|--------------------------------------|--------------------------|
| CH_N2 | 0.01 | 0.85 |
| CH_K2 (mm/hr) | 58.47 | 42.75 |
| SOL_ALB | 0.03 | 0.07 |
| SOL_K (mm/hr) | 73.35 | 89.50 |
| SOL_AWC (mm/mm) | 0.37 | 0.55 |
| CN2 | 36.00 | 43.51 |
| SLSUBBSN (m) | 35.94 | 70.90 |
| CANMX (mm) | 7.87 | 3.85 |
| ESCO | 0.95 | 0.31 |
| EPCO | 0.24 | 0.51 |
| GW_DELAY (day) | 28.91 | 25.75 |
| GWQMN (mm) | 4181.61 | 4775.00 |
| GW_REVAP | 0.02 | 0.17 |
| ALPHA_BF (day) | 0.21 | 0.11 |
| REVAPMN (mm) | 1.00 | 332.50 |
| RCHRG_DP | 0.05 | 0.95 |
| SFTMP (°C) | 0.01 | 3.53 |
| SMTMP (°C) | 0.50 | 3.53 |
| SMFMX (mm °C ⁻¹ day ⁻¹) | 4.50 | 2.25 |
| SMFMN (mm °C ⁻¹ day ⁻¹) | 4.50 | 3.05 |
| TIMP | 1.00 | 0.32 |

¹Neitsch et al. (2002).

어지나 큰 차이는 발생치 않는 것으로 나타났다. 따라서 지형학적 특성을 이용하여 추정된 한 SWAT 모형의 매개변수의 추정은 적용성이 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

섬강과 속사천 시험유역의 지형학적 특성의 매개변수를 도출하였고, 2000 - 2007년의 강우-유출 자료를 이용하여 SWAT-CUP의 SUFI-2 알고리즘을 이용한 SWAT 모형의 매개변수에 대한 민감도 분석, 불확실도 분석과 최적 매개변수를 추정하여 지형학적 특성의 매개변수와 상관계수를 분석하였다. 섬강 시험유역에서의 지형학적 특성의 매개변수에 의한 SWAT 모형의 매개변수 추정을 위한 상관 관계식을 사용하여 속사천 시험유역의 SWAT 모형의 매개변수를 추정하였다. SWAT-CUP의 SUFI-2 알고리즘을 이용한 SWAT 모형의 최적 매개변수와 지형학적 특성의 매개변수를 이용한 상관 관계식에 의한 SWAT 모형의 매개변수를 사용하여 속사천 시험유역의 2000 - 2007년의 강우-유출자료에 적용하여 각각의 모의유출과 실제 유출을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 지형학적 특성의 매개변수를 분석한 결과 섬강과 속사천 시험유역은 하천차수법칙에 따라 일정한 규칙성을 가지고 잘 발달된 수계임을 확인하였다.
- 2) 유역의 지형학적 특성의 매개변수와 상관성이 높은 SWAT 모형의 매개변수는 전체 11개 매개변수로 분기율은 *CANMX*, 면적비는 *SOL_AWC*, *GW_DELAY*, *SFTMP*, 길이비는 *SOL_K*, *GWQMN*, 함몰도는 *CH_K2*, *SOL_ALB*, *SLSUBBSN*, *EPCO*, *ALPHA_BF*에 대한 상관성이 높게 나타났다.
- 3) 지형학적 특성의 매개변수를 이용한 상관 관계식을 이용하여 추정된 SWAT 모형의 매개변수를

적용한 유출모의 결과는 실측치와 비교한 RMSE는 1.09 m³/s로 나타났으며, SWAT-CUP의 SUFI-2에 의해 최적화된 매개변수를 적용한 유출모의 결과는 실측 유출과 비교한 RMSE는 0.93 m³/s으로 나타났다. 따라서 지형학적 특성의 매개변수에 의한 상관 관계식을 사용한 SWAT 모형의 매개변수 추정은 적용성이 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 2015 물관리연구사업 (15AWMP-C104709-01)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Abbaspour, K.C. 2008. *SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual*. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), 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), Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland.
- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, 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: 413-430.
- Ahn, S.S., Kim, D.H., Heo, C.H. and Park, J.K. 2002. Analysis of GIUH Model using river branching characteristic factors. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 5: 9-23. (in Korean)
- Eagleson, P.S. 1970. *Dynamic Hydrology*. McGraw-Hill, New-York, USA.
- Gangwon-do. 2000. *Fundamental Planning Report for Gyecheon River*. Ministry of Construction and Transportation, Gwacheon, Korea. (in Korean)
- Gangwon-do. 2001. *Fundamental Planning Report for Soksacheon River*. Ministry of Construction and Transportation, Gwacheon, Korea. (in Korean)
- Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society America bulletin* 56(3): 275-370.
- Jang, D.W., Kim, N.W., Kim, H.S. and Seoh, B.H. 2004. Simulation of daily streamflows by SWAT based on GIS. In, *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*. Korea Water Resources Association. pp. 724-730. (in Korean)
- KMA. 2013. *Annual Climatological Report*. Korea Meteorological Administration, Korea. (in Korean)
- Lee, E.H. and Seo, D. 2011. Flow calibration and validation of Daechung Lake Watershed, Korea using SWAT-CUP. *Journal of Korean Water Resources Association* 44: 711-720. (in Korean)
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R. and Williams, J.R. 2002. *Soil and Water Assessment Tool User's Manual; Version 2000*. Texas Water Resources Institute, Texas, USA.
- Ryu, J.C., Kang, H.W., Choi, J.W., Kong, D.S., Gum, D.H., 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* 28: 347-358. (in Korean)
- Schumm, S.A. 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin* 67: 597-646.
- Schul, 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* 352: 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: 357-367.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 38: 913-920.
- Van Griensven, 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. pp.162-167.
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M. and Arnold, J. 2010. *ArcSWAT interface for SWAT2009: User's Guide*. Texas Agricultural Experiment station and USDA Agricultural Research Service.
- 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* 358: 1-23.