불확실성을 고려한 SWAT 모형의 최적 매개변수 선정

Parameterization Analysis of SWAT Model Considering the Uncertainty

조형진* · 정동국** · 최용준***

Cho, Hyoung Jin · Jeong, Dong Kug · Choi, Yong Jun

Abstract

Recently in Korea, there has been interested in retaining sustainable water resources as a strategy to cope with climate change. To do that, a more accurate flow estimation is needed. In general, the watershed runoff in a basin is estimated by rainfall-runoff model. However, many kinds of uncertainties in these models make much harder to estimate accurate runoff. Thus, the SUFI-2 algorithm was used to reduce the potential uncertainty in the process of building rainfall-runoff model. The SUFI-2 algorithm has the advantage of combining an optimization concept and being able to handle multiple parameters at once in uncertainty analysis. As a target basin, Cho-river having tremendous impact on Geum-river flow rate and as a rainfall-runoff model, the SWAT model widely used recently was selected. In the result of the optimal parameters of the SWAT model to the target basin using SUFI-2 algorithm, the parameters having the most influence on the outflow were in the following order, "Plant uptake compensation factor", "Available Water Capacity of the Soil Layer", "Runoff curve number in moisture condition II" and "Critical depth of water in the shallow aquifer required to get back(GWQMN.gw)".

Key words : SUFI-2, SWAT model, Parameter, Uncertainty

요 지

최근 국내에서는 기후변화에 대응전략의 일환으로 지속가능한 수자원 확보에 많은 관심을 가지고 있다. 이를 위해서는 무엇보다 정확한 유출량 산정이 필요하다. 일반적으로 유역의 유출량은 강우-유출 모형으로 이용하여 산정한다. 그러나 이러한 모형들은 여러 가지 불확실성을 포함하고 있어 정확한 유출량 산정에 어려움을 겪게 된다. 따라서 본 연구에서는 유출모형을 구축하는 과정에 SUFI-2 알고리즘을 사용하여 잠재되어 있는 불확실성을 줄이는 방안을 모색하였다. SUFI-2 알고리즘은 불확실성 분석에 최적화 개념을 접목하고 있고, 여러 개의 매개변수를 한 번에 다룰 수 있다는 장점을 갖고 있다. 대상유역은 금강의 유량에 지대한 영향을 미치는 초강유역을 선정하였으며, 강우-유출 모형은 최근 폭넓게 이용되고 있는 SWAT 모형을 선정하였다. 대상유역에 대한 SUFI-2 알고리즘을 이용하여 불확실성을 고려한 SWAT 모형의 최적 매개변수를 산정한 결과 유출량에 가장 많은 영향을 미치는 매개변수는 식물흡수보상인자, 토양의 물 저장능, 선행토양함수조건 II에서의 유출곡선지수, 얇은 대수층에서 물이 돌아오는데 요구되는 한계수심의 순서로 나타났다.

핵심용어 : SUFI-2, SWAT 모형, 매개변수, 불확실성

1. 서 론

전 세계적으로 이상기후가 발생하면서 가뭄과 홍수에 피해가 극심해지고 있다. 이러한 기후변화에 대응 전략의 일환으로 지속가능한 수자원 확보에 관한 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 지속가능한 수자원의 연구를 위해서는 우선 대상유역의 정확한 유출량 산정이 선행되어야 한다. 이러한 경우 유출량 산정은 일반적으로 강우-유출모형을 이용하게 되는데, 주로 HEC-HMS(Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System), SWAT(Soil and Water Assessment Tool),

TANK 모형 등이 이용되고 있다. 최근에는 이러한 모형 중 지리정보시스템(GIS, Geographic Information System)의 발달에 따라 이를 기반으로 한 SWAT모형이 폭넓게 사용되고 있다(황태화 등, 2006; 김정곤 등, 2008). 준분포형 유출모형인 SWAT모형은 유역 전체를 여러 개의 소유역으로 구분하고, 유역 특성 인자 및 수문 과정변수의 공간적 변화를 고려하는 것이 가능하다. 또 소유역별 수문학적 반응(hydrologic response)을 유역 전체에 걸쳐 합성함으로써 전유역의 대표적인 수문학적 반응을 알 수 있다(최윤석 등, 2010). 이런 SWAT 모형은 유역 전반에 걸친 수문학적 변화를 합리적으로 고려

*정회원 · K-water연구원 연구원

**정회원 · 한남대학교 공과대학 건설시스템공학과 교수(E-mail: dkjeong@hnu.kr, 교신저자)

***K-water연구원 연구원

하기 때문에 방대한 양의 입력자료를 필요로 하는 특징을 가지고 있다.

그러나 현재까지의 인간의 기술적 한계로 개발된 어떠한 강우-유출 모형도 자연현상을 정확하게 모의한다는 것은 불가능하다. 그 이유는 모형 내 여러 가지 불확실성을 포함하고 있기 때문이다. 이러한 불확실성에는 자연현상을 단순화하여 모형을 제작하는 과정에서 발생하는 개념적인 모형의 불확실성과 지점에서 측정한 자료를 유역의 대표값으로 가정하여 모형에 입력할 때 발생하는 관측치의 불확실성, 유역의 토성과 토지피복 등에 따라 발생 할 수 있는 수많은 매개변수를 모두 고려하지 못하는 점에서 생기는 매개변수의 불확실성 등이 있다.

이런 불확실성을 최소화하기 위해 여러 방법이 개발되고 있다. Arnold and Allen(1996)은 Bosque강 유역에 대하여 유출과 유사량에 대하여 매개변수를 산정하는 과정에서 trial and error 방법을 이용하였고, Beneman(2003)은 Monte Carlo 알고리즘을 이용하여 Cannonsville 저수지의 유출과 유사량에 대한 최적 매개변수를 산정하였다. 또한 국내의 경우 김상단 등(2007)은 임하댐 유입량과 부유사량을 모의하는 과정에서 Monte Carlo 알고리즘을 이용하여 SWAT모형의 최적한 매개변수를 산정한 바 있다.

본 연구에서는 이러한 불확실성의 감소를 위해 SUFI(Sequential Uncertainty Fitting)-2 알고리즘을 적용하였다. SUFI-2 알고리즘은 Van Genuchten에 의해 최초로 개발되어 소개되었으며, 관측값을 고려하여 목적함수(초기조건)를 설정하여 모의 값이 목적함수를 만족하는 상태에서 계속적으로 목적함수의 범위를 좁혀 최적한 매개변수를 산정하는 알고리즘이다. 또한 이 알고리즘은 모형에 포함된 많은 매개변수를 모두 처리할 수 있으며 수행과정 중 민감도 분석이 가능하여 폭넓게 적용되고 있다. Van Genuchten et al.(1997)은 SUFI-2 알고리즘을 이용하여 중간류(subsurface) 흐름과 이송에 관련된 매개변수를 산정하였고, Abbaspour et al.(1999)은 침투계를 설치하여 흙의 간극수압을 측정하는 과정에서 SUFI-2 알고리즘을 사용하여 변수들을 산정하였다. 또한 Schulin et al.(2001)은 개미의 군집 활동에서 착안한 ACO(Ant Colony Optimization) 개념을 SUFI-2 알고리즘에 접목시켜 지표수의 유출과정을 재현한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 SUFI-2 알고리즘을 이용하여 SWAT 모형의 매개변수의 불확실성을 저감시켜 초강유역에 대한 최적매개변수를 산정하였다.

2. 기본이론

2.1 SWAT 모형 개요

SWAT 모형은 효율적으로 수문과 수질에 대해 다양한 범위의 분석이 가능하여 국제적으로도 많이 이용되고 있다(Arnold and Allen, 1996; Narasimhan et al., 2005; Gosain et al., 2006; Yang et al., 2007; Schuol et al., 2008). 이 모형은 다양한 토양 특성과 토지이용상태를 가진 넓고 복잡한 유역의 물, 유사, 농업 화학물 이동을 장기간에 걸쳐 정량화하기 위하여 미국 농무성 농업연구소(USDA ARS, United States

Fig. 1. Sub-Modules of SWAT Model

Department of Agriculture Agricultural Research Service)에서 개발하였다. 기본 모형 구성은 Fig. 1과 같이 수문(hydrology), 토양유실(erosion), 영양물질(nutrients/pesticides), 그리고 하도추적(main channel processes)등 4개의 submodule로 이루어져 있다(김정곤 등, 2008). 일반적으로 유역내에서 발생하는 유출량을 계산할 경우 수문과 하도추적의 모듈만이 사용되지만, 본 연구에서는 대상유역 내에 저수지나 연못이 없기 때문에 수문모듈만 이용하였다.

Fig. 2는 SWAT 모형에서 물의 이동 경로를 나타낸 것이다. SWAT 모형의 수문 부분은 저류방정식에 의해 차단, 지표면 유출, 측면유출, 침투, 기저 유출, 수로 손실, 증발산 등을 고려하여 식 (1)과 같은 일 단위 물수지 방정식을 기본으로 한다.

$$SW = SW_o + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - P_{erc} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서, SW 는 최종 토양수분량(mm), SW_o 는 t 일의 초기 토양수분량(mm), t 는 시간(일), R_{day} 는 t 일의 강수량(mm), Q_{surf} 는 t 일의 지표유출량, E_a 는 t 일의 증발산량(mm), P_{erc} 는 t 일의 토양층으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm), 그리고 Q_{gw} 는 t 일의 회귀수량(mm)을 나타낸다.

SWAT 모형에서 사용되는 지표유출량 산정은 NRCS 유출곡선법과 Green and Ampt 침투법 중 선택이 가능하나, 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되고 있는 NRCS 유출곡선법을 사용하여 지표유출량을 산정하였다. 식 (2)는 지표유출량을 산정하는 NRCS 방법이다(이근상 등, 2009).

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)}, \quad S = \frac{2500}{CN} - 254 \quad (2)$$

여기서, I_a 는 유출 이전에 발생하는 지면저류, 차단, 침투로 인한 초기손실(mm), S 는 저류상수, 그리고 CN 은 유출곡선지수를 의미한다.

증발산 산정에는 Penman-Monteith방법, Priestley-Taylor 방법과 Hargreaves 방법을 제시하고 있다. 이 중에서 전 세계적으로 다양한 기후조건에서 검증된 바 있고, 최근에 가장 널리 사용되고 있으며, 또한 다른 기준증발산 산정식들을 평가하는 표준으로 사용하도록 국제식량농업기구(FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations)가 제시하고 있는 식 (3)의 Penman-Monteith 방법을 사용하였다(임창수, 2008).

Fig. 2. Schematic of Pathways Available for Water Movement in SWAT(Neitsch et al., 2002)

$$\lambda E = \frac{\Delta(H_n - G) + \rho_{air} \cdot C_p \cdot \frac{(e_z^o - e_z)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (3)$$

여기서, λE 는 잠열유동(MJ/m²/day), H_n 은 순방사(MJ/m²/day), G 는 토양열 유동밀도(MJ/m²/day), ρ_{air} 는 일정한 대기 압하의 평균대기밀도(kg/m³), C_p 는 대기의 비열(MJ/kg/°C), r_s 는 표면저항(sec/m), 그리고 r_a 는 공기동력학적 저항(sec/m)이다.

2.2 SUFI-2 알고리즘

Fig. 3는 SUFI-2 알고리즘의 개념을 나타낸 것이다. 만약 모형이 단일 매개변수를 가지고 모의가 가능하다면 Fig. 3(A)와 같이 나타날 것이다. 그러나 매개변수가 불확실성을 포함하고 있고, 이 불확실성이 분산형으로 표현된다면, 넓은 범위에 산개된 결과물을 얻게 될 것이다. 매개변수의 불확실성이 작다면 Fig. 3(B)와 같이 나타나고, 불확실성이 크다면 Fig. 3(C)와 같이 나타날 것이다. 이런 불확실성을 정량화하고 저감시키기 위하여 본 연구에서는 95% Prediction Uncertainty (95PPU)이용하여 최적 매개변수를 산정하였다.

95PPU는 latin hypercube sampling을 통해 관측치의 누계 분포 2.5%와 97.5% 사이에 모의치가 존재 하도록 매개변수의 범위를 조절하는 방법이다. 다시 말해, 매개변수의 보정은 넓은 범위의 매개변수 불확실성에서 시작하여 충분한 95PPU에 도달하기까지 불확실성을 좁혀나가는 과정이다. 만약 초기 매개변수 불확실성이 넓은 범위에 분포하게 되면 두가지 가능성을 예상할 수 있다. 관측치 값이 95PPU에서 완전히 벗어나 있는 경우(Fig. 4(A))와 관측치 값이 95PPU 범위 안에 완전히 포함되는 경우(Fig. 4(B))이다. 첫 번째 경우는 매개

Fig. 3. Relation of Uncertainty and 95PPU

Fig. 4. Relation of Observed Data and 95PPU

변수의 보정 문제가 아니고 모형의 개념적인 문제이기 때문에 모형 또는 경계조건이 재설정 되어야 한다. 두 번째 경우는 초기 매개변수 불확실성의 범위가 너무 넓어서 발생한 것이기 때문에 더 좁은 95PPU 범위를 설정해야 한다. 이런 두가지 사항을 고려하여 관측치 값이 95PPU 범위에 들어오

Table 1. List of Weather Stations

Precipitation	Temperature	Solar Radiation	Wind	Relative Humidity
<ul style="list-style-type: none"> • Jangsu • Boeun • Geochang • Hwanggang • Geumsan • Cupungryung 	<ul style="list-style-type: none"> • Jangsu • Boeun • Geochang • Geumsan • Cupungryung 	<ul style="list-style-type: none"> • Chupungryung 	<ul style="list-style-type: none"> • Jangsu • Boeun • Geochang • Geumsan • Cupungryung 	<ul style="list-style-type: none"> • Jangsu • Boeun • Geochang • Geumsan • Cupungryung

Fig. 7. The Division of Sub-Basin Considering HRU

관측 자료로는 Table 1에서 나타난 것처럼 강우, 온도, 태양 복사, 풍속, 상대습도 자료를 수집하여 적용하였다. SWAT 모형의 기본단위인 HRU(Hydrologic Response Unit)는 분할된 각 소유역내에서 동일한 토지이용과 토양특성의 조합으로 구성된다. 이러한 HRU 토지이용과 토양특성의 비율을 지정하여 각 소유역별로 그 수를 조절 할 수 있다(이근상 등, 2009). 본 연구의 대상유역은 비교적 작은 소유역(183.18 km²)

에 속하기 때문에 토지이용과 토양특성 비율을 5% 지정하고, 수치지도와 하천망도를 고려하여 소유역의 유출부를 설정하여 HRU 분할을 실시하였다. 최종적으로 생성된 소유역은 Fig. 7과 같이 31개로 분할하였다. 대상유역의 최종유출부는 검 · 보정 작업을 위해 심천 수위관측소의 위치에 맞추어 설정하였다.

3.2.2 SUFI-2 알고리즘 적용

SWAT 모형은 많은 수의 매개변수를 포함하고 있기 때문에 합리적인 모형의 적용을 위해서는 민감도 분석(sensitivity analysis)과 보정(calibration)과 검정(validation) 과정이 필수적이다. 본 연구에서는 이러한 분석과정을 SUFI-2 알고리즘을 이용해 유역 유출량을 과정에 적용하였다. 우선 SUFI-2 알고리즘을 이용하여 유역의 1998년 ~ 1999년의 실제 관측 월 유출량에 대해 매개변수를 보정하였다. 보정에 사용된 SWAT 모형의 매개변수에 대한 범위 및 초기값은 Table 2와 같다(김상단 등, 2007). 보정된 매개변수는 2000년 ~ 2004년의 관측자료를 이용하여 검정하였으며, 각 단계에서 불확실성 분석(uncertainty analysis)의 과정을 함께 수행하였다.

불확실성 저감을 통한 최적매개변수를 산정하는 SUFI-2 알고리즘의 과정은 다음의 절차에 따라 수행하였다.

Step 1. 목적함수(objective function) $g(\theta)$ 와 주요 매개변수의 범위($\theta_{abs\ min}$, $\theta_{abs\ max}$)를 정의함. 본 연구에서의 목적함수는 심천 수위국의 관측값으로 설정하였고 매개변수의 범위는 Table 2를 근거하여 설정한다.

Table 2. Range and Initial Value of Parameters (김상단 등, 2007)

Parameter	Definition	Initial value	Min.	Max.
EPCO.hru	Plant uptake compensation factor	0	0	1
SOL_AWC.sol	Soil available water storage capacity(mm H ₂ O/mm soil)	0.5	0	1
CN2.mgt	NRCS runoff curve number for moisture condition II	36	35	44
GWQMN.gw	Threshold depth of water in the shallow auifer required for return flow to occur(mm)	0	0	5000
CH_N2.rte	Manning's value for main channel	0.014	0.01	0.3
SLSUBBSN	Average slope length(m)	0.05	0	50
OV_N.hru	Manning's value for overland flow	0.1	0.01	30
SOL_K.sol	Soil conductivity(mm/hr)	28	0	2000
SOL_CRK	Potential or maximum crack volume of the soil profile expressed as fraction of the total soil volume	0.5	0	1
GW_REVAP.gw	Groundwater recap. coeggcient	0.02	0.02	0.2
REVAPMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for 'revap' to occur(mm)	1	0	500
EPCO.hru	Plant uptake compensation factor	0	0	1
CH_K2.rte	Effective hydraulic conductivity in the main channel(mm/hr)	0	0	300
SOL_K.sol	Soil conductivity(mm/hr)	28	0	2000
CANMX.cont	Maximum canopy storage(mm H ₂ O)	0	0	100

Step 2. latin hypercube sampling을 각 매개변수 범위내에서 수행 후, sensitivity matrix J와 공분산(covariance) matrix C를 통해 목적함수에 부합 정도의 평가 및 각 매개변수의 민감한 정도를 계산한다.

$$J_{ij} = \frac{\Delta g_i}{\Delta \theta_j}, \quad i = 1, \dots, C_2^m, \quad j = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$C = s_g^2 (J^T J)^{-1} \quad (5)$$

$$S_j = \bar{b}_j \frac{1}{C_2^m} \sum_{i=1}^{C_2^m} \left| \frac{\Delta g_i}{\Delta \theta_j} \right| \quad (6)$$

여기서, J_{ij} 는 Jacobian matrix, C 는 공분산, S_j 는 민감지수, s_g^2 는 표준편차, C_2^m 은 Jacobian matrix의 행의 수, j 는 Jacobian matrix의 열의 수, 그리고 $\bar{b}_j$ 는 j 번째 매개변수의 평균값을 나타낸다.

Step 3. 매개변수 의 95PPU 간격을 계산한다.

$$\theta_{j,lower} = \theta_j^* - t_{v,0.025} \cdot s_g^2, \quad \theta_{j,upper} = \theta_j^* + t_{v,0.025} \cdot s_g^2 \quad (7)$$

여기서, θ_j^* 는 최종 추정된 매개변수 (θ_j) 값을 나타낸다.

Step 4. r-factor를 통한 보정과 불확실성의 적합성 평가를 수행하며, 이 때, r-factor가 1에 근접할수록 불확실성이 줄어든 것이다.

$$r\text{-factor} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{t_p,97.5\%}^M - y_{t_p,2.5\%}^M)}{\sigma_{obs}} \quad (8)$$

여기서, $y_{t_p,97.5\%}^M, y_{t_p,2.5\%}^M$ 는 각각 95PPU의 최대, 최소 경계의 값, 그리고 σ_{obs} 는 관측값의 분산을 나타낸다.

Step 5. 최종 산정한 매개변수를 사용한 모의값과 관측값의 상관관계수(R^2)와 RMSE(Root Mean Square Error)를 계산하여 매개변수의 적합성을 판단한다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

여기서, O 는 관측값, P 는 모의값, $\bar{O}$ 는 평균관측값, 그리고 N 은 모의값의 자료의 수를 나타낸다.

위 과정은 FOTRAN 프로그램을 통해 구축하여 SWAT 분석 결과 파일을 불러와 일괄적으로 계산하여 변경된 매개변수를 SWAT 모형에 재설정하여 분석하는 과정을 반복 수행하였다.

3.3 결과 분석

SUFI-2 알고리즘 적용 전의 1998년 ~ 1999년의 월유출량 모의 결과는 Fig. 8과 같이 95PPU의 영역이 광범위하게 나타났다. 모의값과 관측값의 최대 절대 오차는 45.50%로 나타났다, 오차의 절대값에 대한 RMSE는 32.74로 나타났다. 또한 불확실성을 나타내는 r-factor는 0.368로 아직 불확실성이 많이 존재하고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 SWAT모형의 최적 매개변수를 산정하는 목적에 따라 불확실성을 최대한 줄이기 위하여 SUFI-2 알고리즘을 시행하였다. SUFI-2 알고리즘을 이용하여 대상유역의 매개변수를 보정한 결과 각각의 보정된 매개변수는 다음 Table 3의 (4)와 (8)란과 같다. 또한 보정된 매개변수를 이용한 1998년 ~ 1999년의 월유출량 모의 결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 음영부분은 95PPU 범위를, 실선은 모의값을 나타낸 것이다. 모의값과 관측값과의 최소 절대 오차는 1.38%, 최대 절대오차는 14.63%로 평균 8.72%의 오차를 나타냈으며, RMSE는 5.67로 비교적 양호한 모의 결과를 나타

Fig. 8. Result of Initial Simulation

Table 3. Sensitivity Ranking of Parameter and Result of Parameterization

Parameter	Rank	Sensitivity (S_i)*	Final value	Parameter	Rank	Sensitivity (S_i)*	Final value
ESCO.hru	1	0.673	0.19	SOL_CRK	9	0.000	0.7
SOL_AWC.sol	2	0.426	0.18	GW_REVAP.gw	10	0.000	0.14
CN2.mgt	3	0.102	37	REVAPMN.gw	11	0.000	25
GWQMN.gw	4	0.024	1200	EPCO.hru	12	0.000	0.45
CH_N2.rte	5	0.018	0.015	CH_K2.rte	13	0.000	150
SLSUBBSN	6	0.017	10.05	SOL_K.sol	14	0.000	124
OV_N.hru	7	0.008	0.25	CANMX.cont	15	0.000	85
SOL_K.sol	8	0.002	125				

* The parameter which is closed to 1 influence simulation

Fig. 9. Result of Calibration Process

Fig. 11 Result of Validation Process

Fig. 10. Result of Regression Analysis in Calibration Process

Fig. 12. Result of Regression Analysis in Validation Process

났다. 또한 Fig. 10은 매개변수 보정을 통한 관측값과 모의값 사이의 상관관계를 나타낸 것으로 상관계수(R^2)는 91.74%로 매우 우수하게 나타났다. 또한 불확실성을 나타내는 r-factor는 0.923으로 1에 근접한 결과를 얻었다. 따라서 본 연구에서 추정된 매개변수(Table 3)는 불확실성을 충분히 저감한 값으로 대상유역의 유출 모의에 있어 대표성을 갖는다.

2000년 ~ 2004년까지 유출량 자료를 이용한 검정결과는 Figs. 11 and 12와 같다. 모의값과 관측값과의 최소 절대 오차는 0.14%, 최대 절대오차는 27.58%로 평균 7.99%의 오차를 나타냈으며, RMSE는 16.06로 나타내며 비교적 양호한 모의 결과를 나타냈다. 또한 Fig. 12는 관측값과 모의값 사이의 상관관계를 나타낸 것으로 상관계수(R^2)는 80.2%로 우수하게 나타났다. 따라서 이상의 검보정 결과를 바탕으로 본 연구에서 추정된 Table 3의 매개변수 값들은 대상유역의 월 유출 모의에 대표성을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

각각의 매개변수들에 대해 식 (6)를 이용한 매개변수 민감도 분석 결과는 Table 3의 (2), (3)란과 같다. 이중 (2)란은 민감도 순위를 (3)란은 민감도를 나타낸 것이다. 민감도 분석 결과 대상유역의 월유출 모의에 있어서 지대한 영향을 주는 (즉, 민감도가 높은) 입력자료인 ESCO.hru, SOL_AWC.sol, CN2.mgt로, $S_{\text{값}}$ 각각 0.673, 0.426, 0.102로 1에 가까운 것으로 확인되었으며, 그 외의 나머지 매개변수는 유출량에 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 확인되었다.

토양증발보상인자로 토양의 모세관 작용, 딱딱한 정도, 균열 상태에 의한 증발량을 토양심도에 따른 분포를 나타내는 ESCO.hru의 최적값은 0.19를 나타냈으며, ESCO.hru의 값이 작다는 것은 표토에서 증발량이 많다는 것을 의미한다. 또한 토양층에 식물이 이용할 수 있는 물의 양을 의미하는 SOL_AWC.sol의 최적값은 0.18을 나타냈다. SOL_AWC.sol의 값이 작다는 것은 토양의 간극수가 다른 곳으로 쉽게 이동될 수 없다는 것을 의미한다. 마지막으로 선행함수조건(AMC) II의 조건하의 초기 NRCS curve number를 의미하는 CN.mgt의 최적값은 37을 나타냈다. 즉 산림지가 많은 초강유역의 경우 NRCS curve number 값이 다소 작게 나타남을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 SUFI-2 알고리즘을 이용하여 초강유역을 대상으로 장기유출 모형을 구축하는 과정에서 불확실성을 줄이고 최적한 매개변수를 산정하였다. 이러한 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 대상유역에 있어 SWAT 모형을 이용한 월유출량 산정시 유출모의 결과에 큰 영향을 미치는 매개변수는 ESCO.hru, SOL_AWC.sol, CN2.mgt, GWQMN.gw, CH_N2.rte의 순

으로 나타났으며, 이들은 각각 물리적으로 토양증발보상인자, 토양층에 이용가능한 물의 양 및 AMC II조건하의 NRCS curve number를 의미한다.

- 2) 이상의 3개의 매개변수들(ESCO.hru, SOL_AWC.sol, CN2.mgt)은 유출모의에 큰 영향을 미치는 반면, 나머지 매개변수들은 유출모의 결과에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.
- 3) 대상유역에 대해 SUFI-2 알고리즘을 이용한 최적매개변수 산정결과를 바탕으로 토양증발보상인자, 토양층에 이용가능한 물의 양, AMC II조건하의 NRCS curve number에 대해 적절한 값을 제시하였다.
- 4) 매개변수의 민감도 결과를 통해 대상유역은 표토에서의 수분함유량이 커서 증발산량과 식물에 의한 증산되는 양이 많음을 확인하였으며, 산간지역이 많고 식생 상태가 불량한 대상유역의 특징으로 AMC II조건하의 NRCS curve number의 최적값은 다소 작게 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 김상단, 김보경, 이은테, 김형수 (2007) SWAT 모형 매개변수의 적정범위 추정방법개발 : 임하호 유입량 및 부유사량에의 적용, **대한토목학회논문집-B : 수공학, 해안 및 항만공학, 해안및항만공학, 환경공학**, 대한토목학회, 제27권, 제6호, pp. 661-668.
- 김정곤, 손경호, 노준우, 이상욱 (2008) SWAT 모델을 이용한 임하안동 유역의 부유사량 발생량 추정, **대한환경공학회지**, 대한환경공학회, 제30권 12호 pp.1209-1217.
- 이근상, 김유리, 예령, 이을래 (2009) GIS 기반 SWAT 모형을 이용한 동향 천천유역의 부유사량 분석, **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제12권, 제2호 pp. 82-98.
- 임창수 (2008) 증발산 산정 방법들의 비교 - 잔디기준작물을 중심으로, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제2호, pp. 212-228.
- 최윤석, 김경탁, 심명필 (2010) 분포형 강우-유출 모형을 이용한 미세측 중소유역의 유량 추정, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제4호, pp. 353-365.

- 황태화, 김병식, 김형수, 서병화 (2006) SWAT 모형을 이용한 토양수분지수 산정과 가뭄감시, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제4B호, pp. 345-354.
- Abbaspour K.C., Sonnleitner M.A. and Rainer Schulin (1999) Uncertainty in estimation of soil hydraulic parameters by inverse modeling : Example lysimeter experiments, **Soil science. society. America. Journal.**, Vol. 63, pp. 501-509.
- Arnold. J.G. and Allen. P.M. (1996) Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. **Journal of hydrology**, No. 176 pp. 57-77.
- Beneman, J. (2003) *Uncertainty and sensitivity analysis for watershed model : Hydrology and sediment transport modeling on the Cannonsville reservoir system*, Cornell Univ, Ithaca, N.Y.
- Gosain, A.K., Rao. S. and Basuray. D. (2006) Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basin, **Current Science**, No. 90 pp. 149-165.
- Narasinmhan, B., Srinivasan. R., Arnold J.G. and Di Luzio. M. (2005) Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data, **Journal Transactions of the ASAE**, No. 48 pp. 1101-1113.
- Neitsch. S.L., Arnold. J.G., Kiniry J.R., Williams. J.R. and King. K.W. (2002) *Heat exchange Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation version 2000*, Texas Resource Institute, College Station, Texas.
- Schulin. R., Abbaspour. K.C. and Van Genuchten M.T (2001) Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization, **Advances in Water Resources**, No. 24, pp. 827-841.
- Schuol, J., Abbaspour. K.C., Sarinivasan. R. and Yang. H. (2008) Estimation of freshwater availability in the West African Sub-continent using the SWAT hydrologic model, **Journal of hydrology**, No. 352 pp. 30-42.
- Van Genuchten M.T., Abbaspour. K.C., Schulin R. and Schlappi E. (1997) A sequential uncertainty domain inverse procedure for estimating subsurface flow and transport parameters, **Journal water resources research**, Vol. 33, No. 8, pp. 1879-1892.
- Yang. J., Reichert. P., Abbaspour. K.C. and Yang. H. (2007) Hydrological modelling of the Chaohe basin in China : Statistical model formulation and Bayesian inference. **Journal of hydrology**, No. 340 pp. 167-182.

© 논문접수일 : 11년 11월 22일
 © 심사요청일 : 11년 11월 24일
 © 심사완료일 : 12년 01월 27일