



장기 가뭄기간의 유출량을 고려한 SWAT 보정 매개변수 추정 연구

A Study on Parameter Estimation for SWAT Calibration Considering Streamflow of Long-term Drought Periods

김다래* · 김성준*,†

Kim, Da Rae · Kim, Seong Joon

Abstract

Recently, the hydrological model Soil Water Assessment Tool (SWAT) has been applied in many watersheds in South Korea. This study estimated parameters in SWAT for calibrating streamflow in long-term drought periods. Therefore, we focused on the continuous severe drought periods 2014~2015, and understand the model calibrated parameters. The SWAT was applied to a 366.5 km² Gongdo watershed by using 14 years (2002~2015) daily observed streamflow (Q) including two years extreme drought period of 2014~2015. The 9 parameters of CN2, CANMX, ESCO, SOL_K, SLSOIL, LAT_TIME, GW_DELAY, GWQMN, ALPHA_BF were selected for model calibration. The SWAT result by focusing on 5 normal years (2002~2006) calibration showed the 14 years average Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE) for Q and 1/Q with 0.78 and 0.58 respectively. On the other hand, the 14 years average NSEs of Q and 1/Q by focusing on 2 drought years (2014~2015) calibration were 0.86 and 0.76 respectively. Thus, we could infer that the SWAT calibration trial by focusing on drought periods data can be a good approach to calibrate both high flow and low flow by controlling the 9 drought affected parameters.

Keywords: SWAT; Calibration; Drought; Long-Term; Nash-Sutcliffe

1. 서 론

유역의 수문순환을 파악하기 위한 수문모델의 검·보정은 일반적으로 다년간의 관측 유출 자료를 대상으로, 임의 구간을 보정하고 다른 구간은 보정된 매개변수를 이용하여 검증 과정을 거친다. 최근 우리나라에서는 유역 수문 파악, 농업 비점원오염 및 수질 평가를 위하여 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모델을 많이 사용하고 있다.

특히, 2000년대 들어 기존 6~7년의 가뭄주기가 짧아지고 있고, 가뭄심도 또한 1~2개 월 만에 커지는 형태를 보이고 있다. 앞으로 빈번할 것으로 전망되는 가뭄년의 유출 그리고 짧은 시기에 도달하는 심한 갈수상황에 대한 수자원 관리를 위해서도 가뭄기간의 수문모델에 의한 유역수자원 연구가 필요하다.

그러나, 기존의 연구결과 (Singh et al., 2005; Hong et al., 2009; Jung et al., 2012a; Ahn et al., 2013a)를 살펴보면, 2001, 2008, 2012 등 가뭄년의 Nash-Sutcliffe Model Efficient

(NSE)이 일반적으로 낮은 결과를 보이고 있다. Singh et al. (2005)에 의하면, 일반적으로 사용되는 수문모델에서 가뭄년 기간에는 39~49% 유출량이 과대평가되고, 홍수년 기간에는 14% 정도 과소평가된다고 하였다. Hong et al. (2009)의 충주댐유역 연구에서 2001년 가뭄년 유출 NSE가 0.35로 전기간 (2000~2006)의 평균 NSE 0.69보다 훨씬 낮은 결과를 나타내었으며, Jung et al. (2012a)의 금호강유역 연구에서도 2008년 가뭄년의 NSE가 각각 0.41로 전체 평균보다 낮은 결과를 보였다. 또한 Ahn et al. (2013a)의 용담댐유역의 2008년 가뭄년에 대하여 0.25의 NSE (2005~2010) 평균 NSE: 0.52)를 보였다. 따라서, 가뭄년의 유출을 보정하기 위한 매개변수 보정연구가 필요한 것으로 생각된다.

이에 Shin et al. (2006)은 낙동강 유역을 대상으로, 풍수기 (6월~9월)와 갈수기 (10월~5월)로 분리하여 분석한 결과, 전체적으로 홍수기에는 비교적 모형이 관측유출을 잘 모의하고, 갈수기에는 제대로 모의하지 못하고 있는 것으로 평가된 바 있다. Wu et al. (2007)은 가뭄년의 증발산량과 용설과 관련된 매개변수를 다르게 적용하여 모델을 평가하고자 하였으며, Zhang et al. (2011)은 가뭄지수를 통하여 갈수기와 풍수기를 구분한 후, SWAT 모델을 이용하여 매개변수를 보정할 필요가 있다고 한 바 있다.

이에 본 연구의 목적은 안성천 공도유역을 대상으로 최근 2

* Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Konkuk University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-444-0186 Fax: +82-2-444-0186

E-mail: kimsj@konkuk.ac.kr

Received: August 10, 2016

Revised: January 5, 2017

Accepted: January 20, 2017

년 (2014~2015) 동안의 매우 극심한 연속가뭄에 대한 유출형태를 집중 고려한 SWAT 모델의 보정을 통하여, 가뭄년을 포함한 전 기간 (2002~2015)의 모델효율 향상여부, 그리고 가뭄보정에 민감한 매개변수들의 종류와 특성을 파악하고자 하는데 있다. Fig. 1은 본 연구의 흐름도를 나타낸 것이다.

II. 재료 및 방법

1. SWAT의 개요

SWAT은 미국 농무성 농업연구소 (United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service, USDA-ARS)에서 개발된 물리적 기반의 준분포형 연속 수문모델로서, 유사량 및 질소, 인 등 영양물질의 이동 및 평가까지 가능한 모델이다.

SWAT은 유역을 토양, 식생, 지형특성이 반영된 각 수문 반응단위 (HRUs, Hydrologic Response Units)로 구분하여, Eq. (1)과 같이 일 단위 토양수분량 추적에 근거를 두고 있다. 이를 위하여 강우에 의한 차단량 (canopy storage), Penman-

Monteith, Priestley-Taylor 등에 의한 증발산량 산정, SCS-CN (Soil Conservation Service-Curve Number) 방법에 의한 지표유출 (surface runoff), 다수의 토양층에 대한 각각의 토양저류능 (soil water capacity)과 포화 투수계수 (saturated hydraulic conductivity)에 의한 토양수 이동 등에 의한 중간 유출 (lateral flow)과 기저유출 (baseflow) 등을 각기 모의에 대한 모의를 계산할 수 있다. 하천을 통한 흐름은 하천구간별로 Muskingum, Muskingum-Cunge, Variable Storage 방법 등으로 하도추적을 시행하여, 최종 유역 출구의 수문곡선이 모의되도록 구성되어 있다 (Arnold et al., 1996).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - W_{secp} - E_a - Q_{gw}) \quad (2)$$

여기서, SW_t 는 최종 토양수분량 ($mm H_2O$), SW_0 는 i 일의 초기 토양수분량 ($mm H_2O$), R_{day} 는 i 일의 강수량 (mm), t 는 시간 (일), Q_{surf} 는 i 일의 지표유출량 (mm), W_{secp} 는 i 일의 지표하 침투량 (mm), E_a 는 i 일의 증발산량 (mm), Q_{gw} 는 i 일의 회귀수량 ($mm H_2O$)이다.

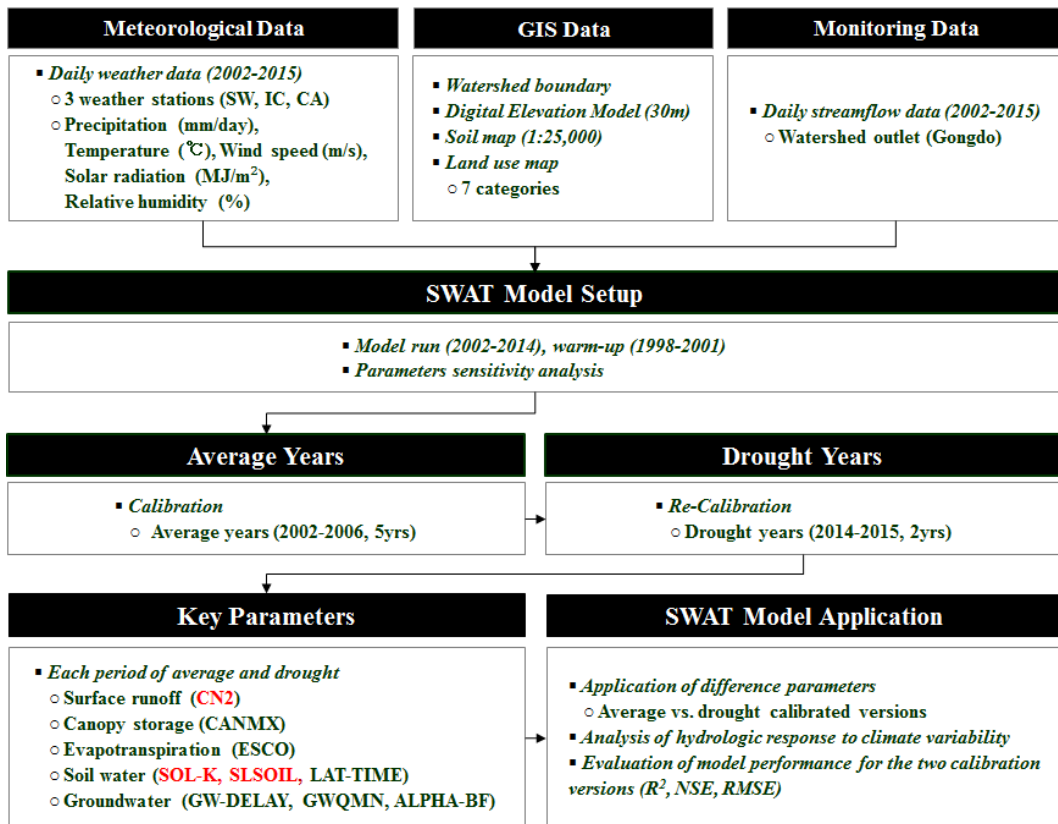


Fig. 1 The SWAT calibration procedure focusing on 2014~2015 streamflows by 2 years continuous severe drought

2. 대상유역 개요

본 연구의 대상유역은 안성천의 공도 수위관측소 상류유역(366.5 km²)이다. Fig. 2는 기상자료를 위한 공도유역 주변의 3개 기상관측소(수원, 천안, 이천), 소유역 구분 및 수위관측소가 위치한 유역출구를 나타낸 것이다. Fig. 3은 SWAT의 공간 입력자료인 유역의 DEM (Digital Elevation Model), 토지이용, 토성도를 보여주고 있다. 유역의 평균표고와 평균경사는 각각 113.6 m, 10.6%이며, 산림, 논, 밭이 각각 52%, 19%, 11%를 차지하며, 나머지는 주거지 및 초지로 구성되어 있다. 주요 토양으로는 미사질 양토가 49%, 미사질 식양토가 17%를 차지하고 있다.

3. 자료 및 방법

본 연구에서는 Fig. 1의 흐름도에 따라 자료를 구축하고 연구를 진행하였다. SWAT의 구동 및 검보정을 위하여 14년(2002~2015)간의 일 기상자료와 공도수위관측소의 일 유량 자료를 수집하였다. 기상 입력 자료로는 일강수량 (mm), 최고 및 최저기온 (°C), 일평균 풍속 (m/sec) 및 상대습도 (%), 일사량 (MJ/m²)이 필요하다. Table 1은 이상의 자료들에 대한 자료원, 자료해상도 및 내용을 정리한 것이다.

SWAT의 보정에 앞서, 기존 연구들의 보정과정에서 주요하게 다뤄졌던 매개변수와 더불어 가뭄에 영향을 받을 가능성이 있는 매개변수들을 선정하여 민감도분석을 실시하고, 이 결과로부터 모델의 검보정 과정을 거치도록 하였다.

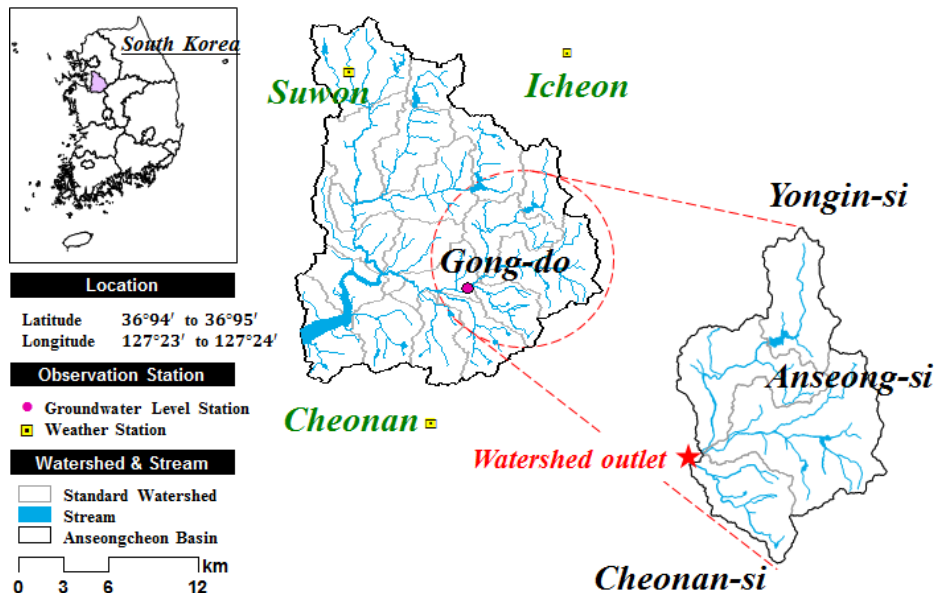


Fig. 2 Gongdo study watershed, meteorological and streamflow gauge stations

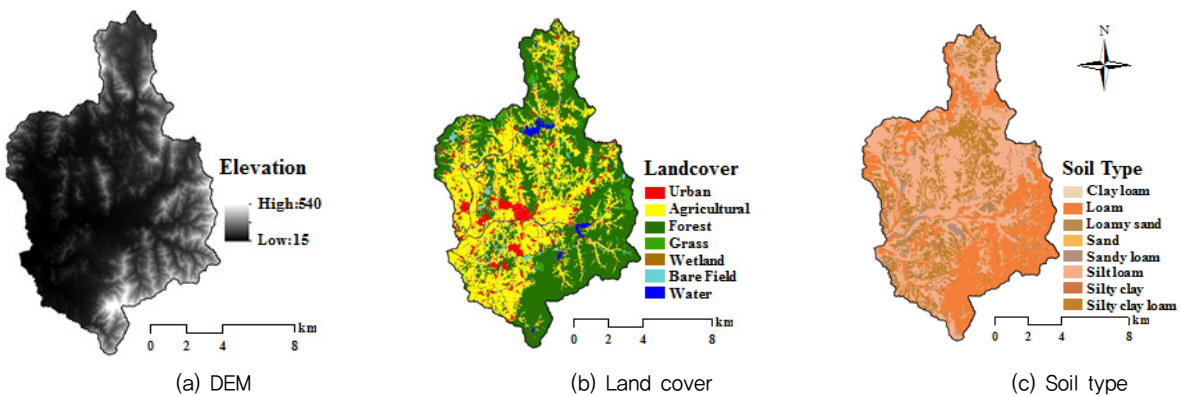


Fig. 3 GIS data of Gongdo study watershed

Table 1 Data sets for SWAT model parameterization

Data Type	Source	Scale / Period	Data Description / Properties
Topography	Water Resources Management Information System	30 m by 30 m	DEM (digital elevation model)
Land cover	Water Resources Management Information System	30 m by 30 m	2010 Landsat land use classification (7 classes)
Soil	Rural Development Administration	1/25,000	Soil classifications and physical properties viz. texture, porosity, field capacity, wilting point, saturated conductivity, and soil depth
Weather	Korea Meteorological Administration	1998~2015	Daily precipitation, minimum and maximum temperature, mean wind speed, solar radiation and relative humidity data
Streamflow	Water Resources Management Information System	1998~2015	Daily streamflow data at Gongdo watershed outlet

본 연구에서는 가뭄에 따른 지표유출, 중간유출 및 기저유출에 영향을 미치는 SWAT의 매개변수로서 각각 3개씩 총 9개를 선정하였다. 지표유출 관련 매개변수로는 SCS-CN (Soil Conservation Service-curve number)의 CN2, 식생 최대차단량CANMX, 증발산관련 토양증발 보상계수ESCO, 중간유출 관련 매개변수로는 포화투수계수 SOL_K, 토양층의 기율기 SLSOIL, 중간유출 지연계수LAT_TIME, 기저유출 매개변수로는 지하수유출 지연 GW_DELAY, 지하자연수위 관련 초기 지하수위 GWQMN, 감쇄곡선의 완만한 정도 ALPHA_BF이다. 이와같이, 본 연구에서는 앞서 진행한 민감도 분석을 통하여 선정한 4개 (CANMX, SOL_K, SLSOIL, LAT_TIME)을 제외한 5개 매개변수들은 기존 연구(Kim et al., 2003; Jung et al., 2012b; Ahn et al., 2013b)에서 유출량에 크게 영향을 미치는 민감한 매개변수들로 연구된 바 있다.

이상 매개변수들의 민감도 분석결과를 토대로 SWAT 보정을 실시하고, 보정결과와 적정성으로는 실측유출량과 모의유출량간의 결정계수(R²)와 평균제곱근오차(RMSE; root mean square error) 그리고 고수위부분의 침두유출량과 감수위부분의 저유출량 모의정도를 각각 평가하기 위하여 Eq. (2)와 (3)의 Nash-Sutcliffe 모델효율(NSE_Q, NSE_{InQ})을 각각 사용하였다 (Pushpalatha et al., 2012).

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

$$NSE_{InQ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{O_i} - \frac{1}{P_i})^2}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{O_i} - \frac{1}{\bar{O}_i})^2} \quad (3)$$

여기서 O_i는 실측유출량, P_i는 SWAT 모의유출량, \bar{O}_i 는

실측값의 평균이다. NSE의 값이 0이면, 실측유출량의 평균값을 사용하는 수준으로 모의된 것을 의미하며, 1에 가까울수록 모델효율이 높아진다.

III. 결과 및 고찰

1. SWAT 매개변수 민감도 분석

Table 2는 본 연구에서 선정한 9개 매개변수들에 대한 정의와 민감도 분석에서 매개변수 값을 변화시킨 범위를 정리한 것이다. Fig. 4는 Table 2의 각 매개변수별 변화에 대한 총 유출량의 변화 민감도를 도시한 것이다. 이에 ESCO, CN2, SOL_K와 같은 매개변수는 값에 따라 유출량에 민감하게 반응하는 반면 ALPHA_BF, GW_DELAY와 같은 매개변수는 유출량에는 민감하게 반응하지 않는다는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 매개변수 값의 변화가 침두유출과 감쇄곡선 변화에

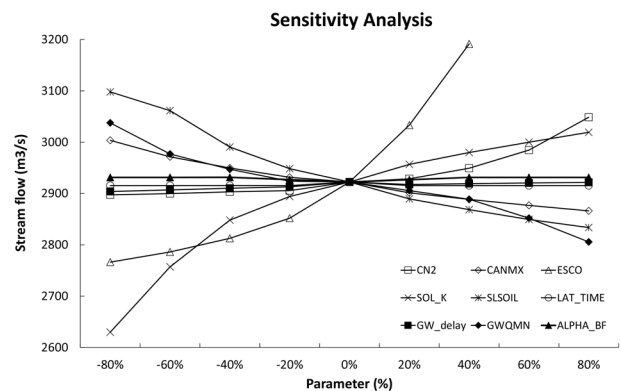


Fig. 4 The sensitivity analysis results for 9 selected parameters with total discharge

미치는 정도를 매개변수별로 지표유출은 Normal scale, 중간 및 기저유출은 Log scale로 유출량을 도시한 것이다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이, 침투유출을 감소시키려면 매개변수 값을 CN2는 감소, CANMX는 증가, ESCO는 증가시

켜야 하며, 이 중에서 CN2가 침투유출에 가장 크게 영향을 주는 것을 알 수 있었으며, 총 유출량의 변화는 CN2, ESCO, CANMX 순으로 영향을 주는 것으로 나타났다. 한편, 토양층을 통한 중간유출을 감소시키려면 SOL_K는 증가, SLSOIL

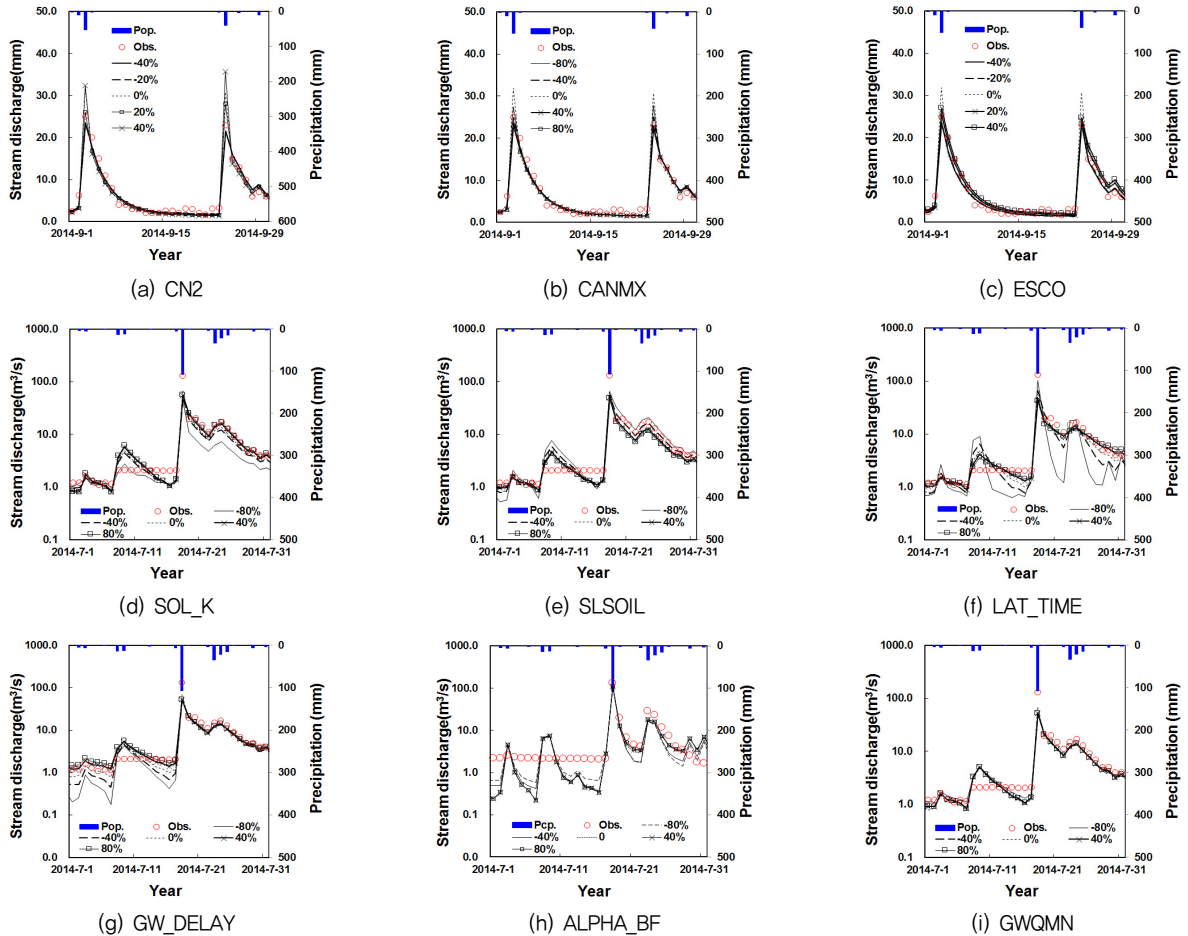


Fig. 5 The sensitivity analysis results for 9 selected parameters showing the hydrograph shape

Table 2 The value range for parameter sensitivity analysis

Parameters	Definition	Range	Range of Value				
			MIN. → MAX.				
CN2	SCS curve number for moisture condition	35 to 98	56	61	66*	71	76
CANMX	Maximum canopy storage	0 to 100	0*	2	4	6	8
ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0 to 1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95*
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	0 to 2000	0,1	0,5	0*	1,5	1,9
SLSOIL	Slope length of lateral subsurface flow (m)	0 to 150	0*	2,5	5	7,5	10
LAT_TIME	Lateral flow travel time (days)	0 to 180	0*	10	20	40	60
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge (days)	0 to 500	10	20	31*	50	100
GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for base flow (mm)	0 to 5000	500	1000*	1500	2000	3000
ALPHA_BF	Base flow recession constant	0 to 1	0,048*	0,1	0,3	0,5	0,8

* Parameter default values, Neisch et al. (2002)

은 증가, LAT_TIME은 감소시켜야 하며, 중간유출에 의한 총 유출량의 변화는 LAT_TIME, SOL_K, SLSOIL 순으로 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 지하수 흐름에 의한 기저유출을 감소시키려면 GW_DELAY, ALPHA_BF, GWQMN는 모두 증가시키는 방향으로 매개변수 값을 조정해야 하며, 기저유출에 의한 총 유출량 변화는 GW_DELAY, ALPHA_BF, GWQMN 순으로 영향을 주는 것으로 나타났다.

2. SWAT의 일반 보정결과와 가뭄년 집중 보정결과 비교분석

일반 보정으로는 가뭄이 포함되지 않는 평년에 대한 5개년 (2002~2006)동안의 실측 자료를 대상으로 SWAT 유출을 보정하고, 가뭄년 집중 보정으로는 2014~2015의 2개년 동안의 실측 자료를 대상으로 보정한 후, 두 가지 경우에 대한 전체 기간 (2002~2015) 보정결과를 R², RMSE, NSE로 비교 평가하였다. Fig. 6은 공도구역의 년도별 실측 강수량과 실측 유출량의 패턴을 보여주고 있다.

Table 3은 본 연구에서 선정한 총 9개 매개변수들에 대하여 일반보정 (2002~2006)과 가뭄년 집중 보정 (2014~2015)에 대한 최종 매개변수 값들을 비교 정리한 것이다. Table 4와 5는 일반 보정과 가뭄년 집중 보정에 의한 SWAT의 통계적 결과들을 각각 보여주고 있으며, Fig. 7과 8은 각각 이들에 대한 연도별 실측과 모의 유출곡선을 비교하여 나타낸 것이다.

Table 4의 일반보정 (2002~2006)에 의한 전 기간 (2002~2015)의 평균 R²는 0.60, RMSE는 3.68 mm/day, NSE_Q와 NSE_{InQ}에 대한 효율은 각각 0.78, 0.58의 결과를 보이고 있으나, 2014~2015 가뭄년의 저유량에 대한 NSE_{InQ} 각각 0.12, -0.42로서, 가뭄기간의 모델효율이 좋지 않으며, Fig. 6과 Fig. 7에서 이 기간 중의 SWAT 저유량 모의곡선이 실제 유출량과

차이가 많음을 알 수 있다.

이에 Table 3에서 보는 바와 같이, 일반보정으로 결정된 9개의 매개변수 값들을 변화시켜, 2014~2015년 저유량 부분의 유출곡선을 재보정한 결과, Table 5에서 보는 바와 같이, 전 기간의 평균 R²가 0.69, RMSE는 3.25 mm/day, 유출량 NSE_Q와 NSE_{InQ}에 대한 효율은 각각 0.86, 0.76으로 전체적으로 모델효율이 향상된 것을 알 수 있다. 또한, 2014~2015 가뭄년의 NSE_{InQ}도 각각 0.88, 0.58로, 가뭄기간의 모델효율이 크게 향상된 것을 알 수 있으며, Fig. 7과 Fig. 8에서도 저유량 모의곡선이 실제 유출량의 형태로 많이 개선된 것을 확인할 수 있다.

이러한 모델의 개선의 원인을 Table 3의 매개변수 값들을 통하여 살펴보면, CANMX는 5 mm에서 7 mm로 증가, CN2는 66에서 61로 감소, ESCO는 0.2에서 0.65로 증가를 통하여

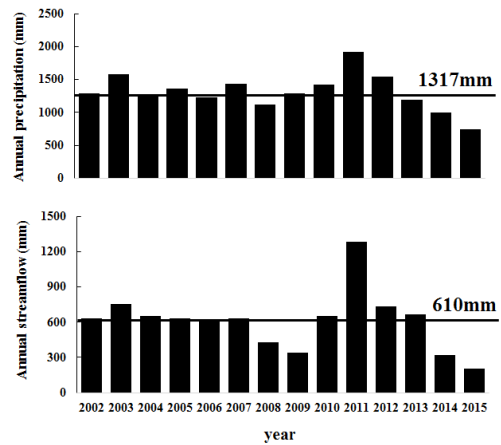


Fig. 6 Long-term patterns of annual average precipitation and the streamflow of study watershed, Horizontal line shows the average values during the entire period of 2002~2015

Table 3 The SWAT 9 calibrated parameters for 2002~2006 periods data and 2014~2015 drought periods data

Parameters	Definition	Default*	Adjustment	Calibrated values	
				2002~2006 ^{a)}	2014~2015 ^{b)}
CANMX	Maximum canopy storage (mm)	0	replace	5	7
CN2	SCS curve number for moisture condition	given by HRU	added	66 (default)	-5
ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0,95	replace	0,2	0,75
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	given by HRU	multiply	0 (default)	*0,6
SLSOIL	Slope length of lateral subsurface flow (m)	0	replace	0 (default)	5
LAT_TIME	Lateral flow travel time (days)	0	replace	8	3
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge (days)	31	replace	100	180
GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for base flow (mm)	1000	replace	2000	2500
ALPHA_BF	Base flow recession constant	0	replace	0,5	0,55

* Source: Neisch et al. (2002) calibrated a) focusing on 2002~2006 b) focusing on 2014~2015

Table 4 Summary of calibration results focusing on 2002~2006 observed data for the whole periods

Year	PCP (mm)	Runoff (mm)		Runoff ratio (%)		R ²	RMSE (mm/day)	NSE	
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.			Q ^{a)}	InQ ^{b)}
2002	1146.4	555.0	622.0	48.4	54.3	0.96	0.77	0.91	0.56
2003	1522.9	857.8	890.3	56.3	58.5	0.74	0.40	0.92	0.68
2004	1168.7	635.2	654.3	54.4	56.0	0.68	2.26	0.92	0.95
2005	1362.5	690.9	624.7	50.7	45.9	0.77	3.46	0.97	0.75
2006	1008.4	647.8	644.9	64.2	64.0	0.72	5.79	0.78	0.63
2007	1437.9	630.9	742.4	43.9	51.6	0.38	5.83	0.92	0.74
2008	1118.8	428.5	461.6	38.3	41.3	0.56	1.71	0.89	0.79
2009	1291.1	338.5	526.1	26.2	40.7	0.68	9.82	0.11	0.83
2010	1426.0	653.8	699.2	45.8	49.0	0.29	2.37	0.32	0.69
2011	1927.3	1285.5	1219.1	66.7	63.3	0.56	3.47	0.64	0.60
2012	1548.8	737.1	789.5	47.6	51.0	0.55	2.74	0.94	0.79
2013	1193.4	663.8	564.7	55.6	47.3	0.24	5.19	0.85	0.43
2014	997.9	375.2	310.2	37.6	31.1	0.71	3.40	0.97	0.12
2015	514.4	201.5	130.1	39.2	25.3	0.56	4.33	0.84	-0.42
Avg.	1,261.8	621.5	634.2	48.2	48.5	0.60	3.68	0.78	0.58

a) NSE_Q b) NSE_{InQ} (inverse discharge)

Table 5 Summary of calibration results focusing on 2014~2015 observed data for the whole periods

Year	PCP (mm)	Runoff (mm)		Runoff ratio (%)		R ²	RMSE (mm/day)	NSE	
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.			Q	InQ
2002	1146.4	555.0	663.5	48.4	57.9	0.96	1.99	0.96	0.51
2003	1522.9	857.8	948.5	56.3	62.3	0.83	2.59	0.96	0.86
2004	1168.7	635.2	723.3	54.4	61.9	0.73	0.12	0.94	0.90
2005	1362.5	690.9	686.4	50.7	50.4	0.87	0.24	0.98	0.91
2006	1008.4	647.8	695.5	64.2	69.0	0.81	0.63	0.82	0.88
2007	1437.9	630.9	781.7	43.9	54.4	0.62	7.89	0.95	0.64
2008	1118.8	428.5	511.6	38.3	45.7	0.67	4.35	0.92	0.79
2009	1291.1	338.5	566.6	26.2	43.9	0.81	11.94	0.44	0.80
2010	1426.0	653.8	721.7	45.8	50.6	0.40	3.55	0.49	0.75
2011	1927.3	1285.5	1230.0	66.7	63.8	0.74	2.91	0.81	0.75
2012	1548.8	737.1	835.1	47.6	53.9	0.71	5.12	0.97	0.73
2013	1193.4	663.8	633.5	55.6	53.1	0.40	1.59	0.90	0.71
2014	997.9	375.2	362.7	37.6	36.3	0.73	0.66	0.97	0.88
2015	514.4	201.5	169.4	39.2	32.9	0.44	1.94	0.86	0.58
Avg.	1,261.8	621.5	680.7	48.2	52.6	0.69	3.25	0.86	0.76

지표유출을 감소시킨 것이 주요인으로 판단된다. 즉, CANMX와 ESCO의 조정은 각각 수문을 고려한 식생 차단량의 증가와 토양증발량의 증가로 반영되었으며, CN2의 조정은 침투 유출 감소를 반영한 것으로 보인다.

중간유출에 영향을 주는 SOL_K는 기존 값에 0.6배 감소, SL_SOIL은 0 m에서 5 m로 증가, LAT_TIME은 8 days에서 3 days로 감소시켜, 초기 수문감쇄곡선의 기울기가 완만한 형태에서 급한 형태로 변화시키는 영향을 주었다. 즉, SOL_K

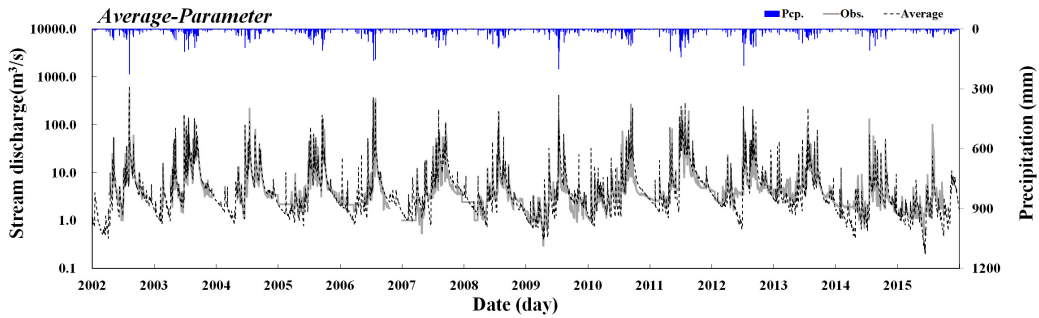


Fig. 7 Comparison of the observed and SWAT simulated streamflows calibrated focusing on 2002~2006 for the whole periods

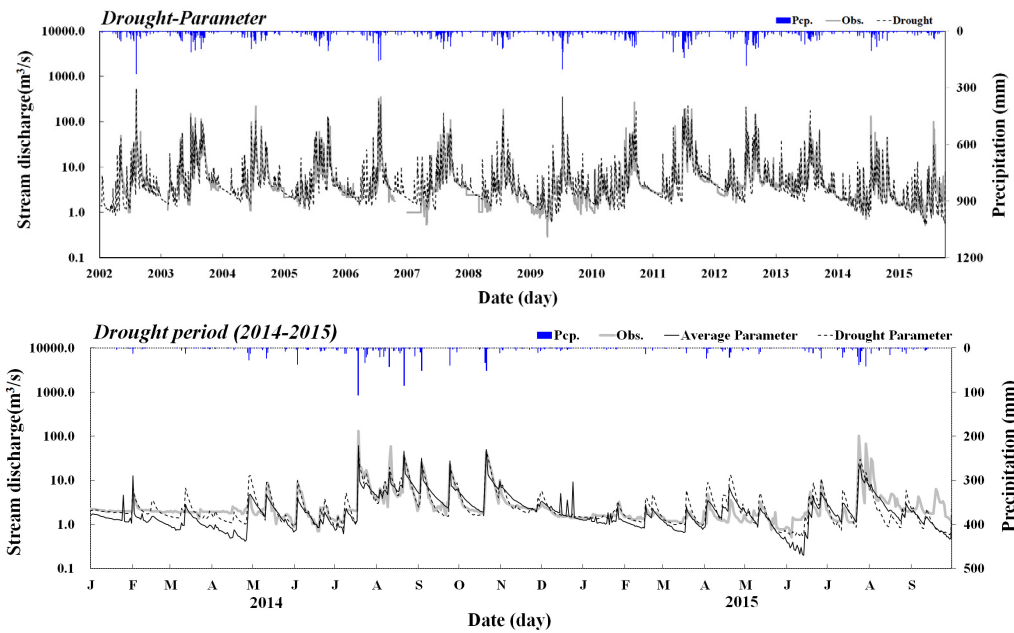


Fig. 8 Comparison of the observed and SWAT simulated streamflows calibrated focusing on 2014~2015 for the whole periods

의 조정은 가뭄 시에는 토양중발량의 증가가 토양의 건조로 바로 이어져서, 건조 토양의 불포화 상태에 따른 포화투수계수의 감소가 반영되었으며, SL_SOIL과 LAT_TIME은 상호 밀접하게 연계된 매개변수들로서, 이들의 조정은 강우 시 토양으로 침투된 양에서 토양수분이 포장용수량을 넘어서게 되면 발생하는 중간유출의 속도 증가에 반영된 것으로 판단된다.

기저유출에 영향을 주는 GW_DELAY는 100 days에서 180 days로 증가, GWQMIN은 2000 mm에서 2500 mm로 지하 자연수위를 더 낮추는 방향으로 조정하였으며, ALPHA_BF는 0.5에서 0.55로 변화시켜, 기저유출량의 감소와 더불어 후반부 수문감쇄곡선을 급한 형태에서 완만한 형태로 변화시키는 역할을 하는 것을 알 수 있었다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 장기 가뭄기간이 포함된 유역의 일유출 자료를 대상으로, SWAT을 보다 잘 보정하기 위한 매개변수 추정을 시도하였다. 안성천의 공도유역 (366.5 km²)을 대상으로 2014~2015년의 장기 가뭄기간을 포함한 총 14년 (2002~2015) 동안 분석 하였다. 가뭄을 고려한 보정 매개변수로는 지표유출 관련 매개변수 3개, 중간유출 관련 매개변수 3개, 기저유출 매개변수 3개로 총 9개를 선정하였다.

가뭄이 포함되지 않는 평년에 대한 5개년 (2002~2006)간의 자료를 대상으로 한 일반 보정과 2014~2015의 2개년 동안의 매우 극심한 연속가뭄 자료를 대상으로 가뭄년 집중 보정을 각각 실시하여, 두 가지 경우에 대한 보정결과를 R², RMSE, NSE로 비교 평가하였다. 일반 보정의 경우, 2014~2015 가뭄

년의 저유량에 대한 NSE_{InQ} 가 각각 0.12, -0.42이었으나, 가뭄년 집중 보정을 실시한 결과, NSE_{InQ} 가 각각 0.88, 0.58로 크게 향상되었다. 또한 전 기간(2002~2015)의 NSE, R^2 , RMSE도 모두 향상되었다.

이와 같이, 임의 구간을 보정하고 다른 구간은 보정된 매개변수를 이용하는 것이 아닌 평년기간과 가뭄년 기간의 수문곡선의 특성에 따라 매개변수 값의 보정이 중요한 것을 알 수 있다. 따라서, 장기가뭄에 따른 모델의 보정에는 가뭄 시에 영향을 받는 산림 식생의 차단량, 토양건조로 인한 증발량, 투수계수 변화, 지하수위 저하 등의 변화를 고려한 가뭄 수문곡선의 형태를 맞출 수 있도록 폭을 넓혀 조정되어야 한다. 본 연구에서 시도한 SWAT의 가뭄년 집중 보정과정과 같은 가뭄기간의 유출량 해석은 SWAT모델의 정확도를 높이고 이를 위한 매개변수 최적화에 대한 연구가 유역의 수문모델링의 개선에 도움이 될 것이라 판단된다. 또한, 안정적인 활용을 위해서는 향후 많은 유역에 대한 추가연구가 필요할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 기상청 기상산업지원 및 활용기술개발사업(KMIPA 2015-2070) 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, S. R., G. A. Park, and S. J. Kim, 2013a. Assessment of Agricultural Water Supply Capacity Using MODIM-DSS Coupled with SWAT. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 33(2): 507-519 (in Korean).
- Ahn, S. R., G. A. Park, C. H. Jang, and S. J. Kim, 2013b. Assessment of Climate Change Impact on Evapotranspiration and Soil Moisture in a Mixed Forest Catchment Using Spatially Calibrated SWAT Model. *Journal of the Korea Water Resources Association* 46(6): 569-583 (in Korean).
- Hong, W. Y., M. J. Park, J. Y. Park, R. Ha, G. A. Park, and S. J. Kim, 2009. The Correlation Analysis Between SWAT Predicted Forest Soil Moisture and MODIS NDVI During Spring Season. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 51(2): 7-14 (in Korean).
- Jung, Y. H., C. G. Jung, S. W. Jung, J. Y. Park, and S. J. Kim, 2012a. Estimation of Upstream Ungauged Watershed Streamflow using Downstream Discharge Date. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(6): 169-176 (in Korean).
- Jung, C. G., H. K. Joh, J. Y. Park, and S. J. Kim, 2012b. Runoff Characteristics Comparison of Nonpoint Source Pollution for Two Adjacent Stream Watersheds using SWAT Model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(3): 91-101 (in Korean).
- Kim, N. W., S. C. Shin, and C. G. Kim, 2003. The sensitivity analysis of parameters in SWAT model. *Korean Society of Civil Engineers Conference*. 2264-2268 (in Korean).
- Pushpalatha, R., C. Perrin, N. L. Moine, and V. Andreassian, 2012. A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. *Journal of Hydrology* 420-421, 171-182.
- Singh, J., H. Vernon Knapp, J. G. Arnold, and M. Denissie, 2005. Hydrological Modeling of the Iroquois River Watershed Using HSPF and SWAT. *Journal of the American Water Resources Association* 41(2): 343-360.
- Shin, H. S. and D. K. Kang, 2006. *Journal of the Korea Water Resources Association* 39(3): 227-240 (in Korean).
- Wu, K. and C. A. Johnston, 2007. Hydrologic response to climatic variability in a Great Lakes Watershed: A case study with the SWAT model. *Journal of hydrology* 337: 187-199.
- Zhang, H., G. H. Huang, D. Wang, and X. Zhang, 2011. Multi-period calibration of a semi-distributed hydrological model based on hydroclimatic clustering. *Journal of Advances in Water Resources* 34(5): 1292-1303.