



## 2014~2015 연속가뭄을 고려한 SWAT 수질 매개변수 보정 Calibration of Water Quality Parameters in SWAT Considering Continuous Drought Periods 2014~2015

김다래\* · 이지완\* · 정충길\* · 김성준\*,†

Kim, Da Rae · Lee, Ji Wan · Jung, Chung Gil · Kim, Seong Joon

### Abstract

This study is to calibrate the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) water quality of SS (Suspended Solid), T-P (Total Phosphorus), and T-N (Total Nitrogen) by focusing on 2014~2015 drought periods and identify the important parameters. For Gongdo watershed (366.5 km<sup>2</sup>), the SWAT was calibrated for 2 cases of 2002~2006 normal year focusing calibration and 2014~2015 drought focusing calibration respectively. The parameters of N\_UPDIS (Nitrogen uptake distribution parameter) and CMN (Rate factor for humus mineralization of active organic nutrients) played important roles for T-N calibration during drought periods. The SWAT SS, T-N, and T-P average R<sup>2</sup> (Coefficient of determination) results by focusing on 2014~2015 drought periods calibration showed 0.71, 0.65 and 0.62 while 2002~2006 normal year focusing calibration showed 0.63, 0.58 and 0.50 respectively. Also SWAT SS, T-N, and T-P model efficiency NSE (Nash-Sutcliffe efficiency) results by focusing on drought period (2014~2015) calibrated showed 0.76, 0.77, 0.87 respectively. Even though the SS, T-P parameters were unchanged during the calibration, the SS and T-P results were improved by the hydrological parameters (SCS-CN, SOL\_K, SLSOIL) during the drought periods. The SWAT water quality calibration needs to be considered for the movement of SS and nutrients transport especially focusing on the drought characteristics.

**Keywords:** Calibration; drought period; parameters; SWAT; watershed hydrology; water quality

### 1. 서 론

오염총량관리는 여러 가지 대안들이 수계의 수질에 미치는 영향을 평가하기 위해서 유역모형의 적용이 필요하다. 특히, 가뭄년의 비점오염 부하가 하천수질 및 녹조현상에 미치는 영향을 구명하기 위해서는 지천에서의 유입 오염부하량의 파악이 필요한데, 이를 위해서는 유역모형의 도움이 필수적이다. SWAT (Soil and Water Assessment Tool)은 장기유출 기반의 비점오염을 모의할 수 있는 유역모형으로서, 특히 농촌유역에서 장기간동안 비점오염물질에 대한 농도변화 모의가 가능한 모형으로 알려져 있다. 게다가, SWAT은 전체 유역을 작은 소유역으로 구분할 수 있기 때문에, 수질오염총량관리 및 녹조현상 유발의 최소 유역단위인 세유역으로 유역구분이 가능한 장점을 가지고 있다.

2000년 이후 9번 (2000, 2001, 2006, 2008, 2009, 2012,

2013, 2014, 2015)이나 전국적으로 가뭄이 발생하는 상황에서 (National Drought Information-Analysis Center, 2017), 물 부족과 더불어 하천유량이 줄어들면서 수질오염과 녹조현상 또한 빈번하게 발생하고 있다. 이는 가뭄 시에는 평상시와는 달리 고농도의 오염물질들이 유입되며, 긴 가뭄 후 약간의 강우에도 쌓여있던 오염물질들이 유사와 함께 하천으로 유입되기 때문으로 판단된다. 여러 가뭄 중에서, 특히 2014~2015년과 같이 2014년의 중부지방 가뭄이 2015년으로 천이되면서 봄부터 가을까지 장기간 진행된 가뭄은 매우 드문 경우이다. 이와 같은 특이한 장기 가뭄은 지표토가 약화되고, 토양수분의 부족과 더불어 지하수위가 저하된 상태에서, 질소의 지표하 이동기작과 간헐적 강우에 의한 토사유출로 평년의 질소와 인 이동 기작과 다른 양상을 보일 가능성이 많다.

SWAT을 이용한 비점오염 및 하천수질 모의와 관련된 국내 연구로는, Lee et al. (2008)의 안성천유역 (1997~2005) 수문·수질 변화연구, Park et al. (2008)의 경안천유역 수질 보정 기간 (1999~2002년)에 대한 SS, T-P의 평균 R<sup>2</sup>가 각각 0.88, 0.68에 비해 2001년 가뭄년에는 각각 0.64, 0.63로 낮게 보정되었으며, Choi et al. (2009)의 병성천유역 (1997~2005) 수질 변화연구, Jang et al. (2012)의 낙동강 유역 기준년 (2007), 홍수년 (2002), 가뭄년 (1994)에 대한 수문·수질 영향평가, Ahn

\* Dept. 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](mailto:kimsj@konkuk.ac.kr)

Received: July 26, 2017

Revised: November 3, 2017

Accepted: November 13, 2017

et al. (2014)의 충주댐유역 (2000~2010) 호소유입 오염물질이 호내의 탁수 및 부영양화 영향평가 연구가 있으나, 수질매개변수 보정에 있어 가뭄시의 유출 및 오염부하 특성을 고려한 별도의 매개변수 보정은 이뤄지지 않았던 것을 알 수 있었으며, 국외의 최근 연구 (Luo et al., 2013; Wu et al., 2013; Rocha et al., 2015; Zhou et al., 2015; Singh et al., 2016; Merwade et al., 2017)들에서도 가뭄년을 대상으로 한 별도의 세부보정결과는 찾아볼 수 없었다. 다만, 최근 국외에서는 가뭄시 질소의 배출특성 등에 대한 현장실험 연구사례 (Burt et al., 2009; Giese et al., 2011; Dijkstra et al., 2012; He et al., 2014; Dijkstra et al., 2015)가 증가추세에 있다.

본 연구에서는 2014~2015 장기가뭄을 고려한 안정천 공

도유역의 SWAT 수문매개변수 보정 연구결과 (Kim et al., 2017)를 이용하여, 동일 가뭄기간의 SS (Suspended Solid), T-N (Total Nitrogen), T-P (Total Phosphorus) 등 하천수질 보정에 있어, 수질관련 주요 매개변수들의 결정과 더불어 이 매개변수들의 거동 및 의미를 파악하고자 한다. Fig. 1은 본 연구의 흐름도를 나타낸 것이다.

## II. 재료 및 방법

### 1. SWAT 모형의 개요

SWAT (Soil and Water Assessment Tool)은 미국 농무성

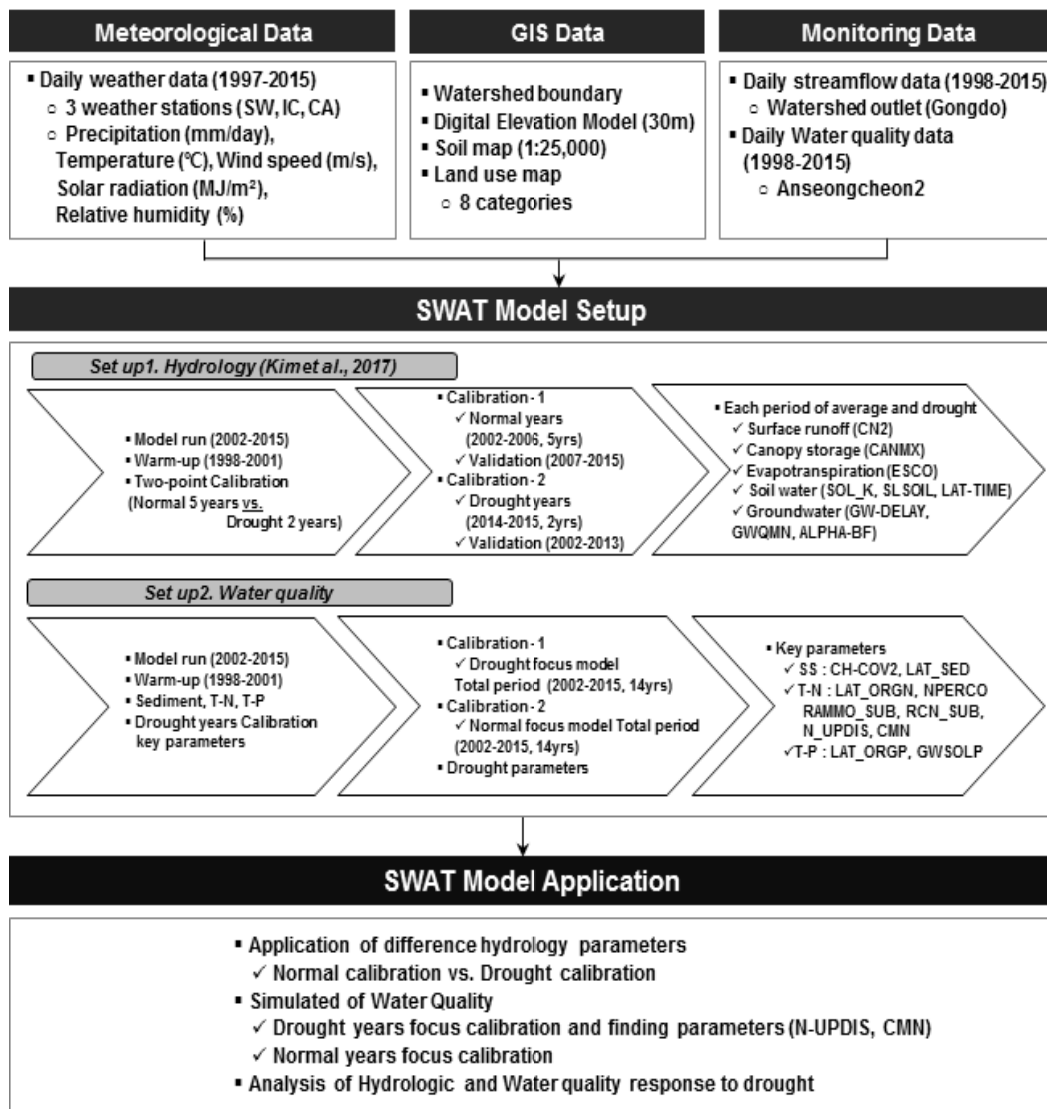


Fig. 1 Flowchart of the study procedure

(United States Department of Agriculture, USDA) 농업연구소 (Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 모형으로서, 다양한 토양속성과 장기간에 걸친 토지이용 그리고 토지관리 상태에 따른 크고 복잡한 유역의 유출량, 유사량 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위하여 활용되고 있다. 기본적으로 SWAT은 수문, 토양유실, 영양물질, 그리고 하도추적 등 4개의 sub model로 구성되어 있다 (Arnold et al., 1998).

SWAT 모형은 유역의 서로 다른 표면특성을 반영할 수 있도록 대상유역을 몇 개의 소유역 (Subbasin)으로 나누고, 소유역 내에서 유사한 특성을 나타내는 수문반응단위 (Hydrologic Response Unit, HRU)로 세분화된다. 전체적인 모의는 유역부분과 수체부분으로 나누어 실시되는데, 유역에서는 각 HRU에서 물수지 식에 따라 강우량, 지하수로의 침투량, 증발산량 그리고 지표면유출량을 산정한다. 토양침식은 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)에 의하여 계산되며, 인, 질소와 같은 유기성 화학물질의 이동량을 모의할 수 있다. 수체는 하천과 저수지를 의미하며 이 모듈에서는 유량, 퇴적물, 영양염류 그리고 유기성 화학물질의 반응 등이 고려된다.

SWAT 모형에서 토양에 있는 질소는 다섯 가지의 저장형태로 모의된다. 두 가지는 질소의 무기체 형태 ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ )이며, 다른 세 가지는 질소의 유기체 형태이다. 토양에서의 인은 6개의 다른 저류조를 모의한다. 세 개의 저류조는 인의 유기형태인 반면, 다른 세 개의 저류조는 인의 무기형태이다. SWAT에서 질소와 인의 영양물질 추적을 위해 사용되는 하천내 동역학은 QUAL2E (Brown and Barnwell, 1987)로부터 채택되었다. 이는 토양입자에 붙어 있는 영양물질이 지표면 유출로 이송된 후, 하천 내에서 용해되거나 유사에 부착된 영양물질을 추적하게 된다. 이러한 질소와 인은 HRU에서의 유사량과 관계가 있으며, 유사량의 부하는 영양물질의 부하량에 영향을 미치게 된다. 자세한 이론은 Neitsch et al. (2011)에서 찾아볼 수 있다. 특히, 영양물질인 질소의 모의에 있어서 문헌들을 참고하여 관련매개변수 중 CMN 및  $N\_UPDIS$ 을 기후특성에 맞도록 고려하여 모의하였으며 이론은 다음과 같다.

CMN의 경우 토양의 각 층에 대한 물과 온도 그리고 부식도가 무기물화 (mineralization) 작용에 대한 계산을 한다 (eq. 1).

$$N_{\min,ly} = CMN \times (\gamma_{tmp} \times \gamma_{sw,ly})^{1/2} \times orgN_{act,ly} \quad (1)$$

$NO_{\min,ly}$ 는 유기질소에서 무기화 과정을 통하여 무기질소가 되어 진양 ( $kg N/ha$ ).  $\gamma_{tmp,ly}$ 는  $ly$ 층의 영양물질 순환 온도 요소,  $\gamma_{sw,ly}$ 는  $ly$ 층의 영양물질 순환 물 요소,  $orgN_{act,ly}$ 는 유

기질소 양 ( $kg N/ha$ )이다.  $N\_UPDIS$ 는 토양에서의 상위계층으로부터 소멸되어지는 질소를 깊이에 따라 분포시키고 질소의 흡입을 조정한다. 뿌리 층에서의 하위 계층은 상위계층으로부터 질소의 부족을 보상받는다 (eq. 2).

$$N_{up,z} = \frac{N_{up}}{[1 - \exp(-N\_UPDIS)]} \times \left[ 1 - \exp(-N\_UPDIS \times \frac{z}{z_{ro}}) \right] \quad (2)$$

$N_{up,z}$ 은 토양의 지표면부터 깊이  $z$ 까지 잠재되는 질소 흡입량 ( $kg N/ha$ ),  $N_{up}$ 은 잠재 질소 흡입량 ( $kg N/ha$ ),  $z$ 은 토양 지표수로부터의 깊이,  $z_{ro}$ 는 토양에서의 뿌리 깊이이다 (Neitsch et al., 2011).

## 2. 대상유역 및 수질관련 자료

본 연구의 대상 유역은 안성천의 공도 수위관측소를 유역 출구로 하는 상류유역 (366.5  $km^2$ )이다 (Fig. 2). 이 유역은 지난 수십년간 지속적으로 공단, 택지, 골프장 조성 등 기존의 산림지역과 농지를 대상으로 꾸준한 토지이용 변화가 진행된 지역이다. 1970년대 산림, 논·밭의 구성 비율이 각각 53.0%, 46.4%에서 2000년대에 49.2%, 35.6%로 감소하였다 (Fig. 3).

SWAT 모형 구동을 위하여 공간자료로는 NGIS (National Geography Institute System)의 1:5,000 수치지도로부터의 검수과정을 거쳐 격자크기 30 m의 DEM (Digital Elevation Model)을 제작하여 적용하였다. 토지이용도는 2008년 WAMIS (Water Resources Management Information System)에서 제공하는 중분류 토지이용 항목에 대하여 SWAT 모형에 적용하



Fig. 2 The Gongdo study watershed and location of gauging stations

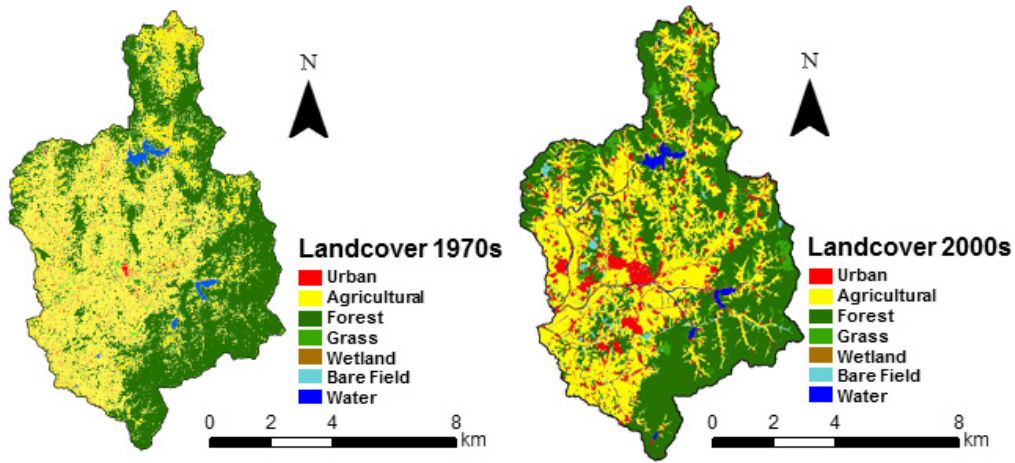


Fig. 3 Land covers (1970s and 2000s)

였으며, 토양도는 농촌진흥청 (Rural Development Administration)에서 제공하는 1:25,000을 적용하였다. 모형의 수문 모의를 위하여 공도수위관측소의 14년 (2002~2015) 동안의 유출량 자료를 이용하였고, 수질모의를 위한 자료로는 환경부 물환경정보시스템 (<http://water.nier.go.kr>)에서 안성천2 수질관측소의 14년 (2002~2015년) 동안의 8일 간격 부유사, 총 질소, 총 인 측정 자료를 이용하였다. 수문관련 모의내용은 Kim et al. (2017)의 논문을 인용하였다 (Fig. 1).

SWAT 모형은 기본적인 비점오염원 모의를 기본적으로 포함하고 있다. 본 연구에서는 모형 내에서 비점오염뿐만 아니라 점오염원에 대한 고려를 위해 유역 내 위치하고 있는 안성하수종말처리장에 대한 점원 및 비점오염원 자료를 구축하였다. 점오염원 자료로서 안성하수종말처리장 (Table 1)의 일 단위 배출량 ( $m^3/day$ ) 자료를 사용하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. SS, T-N, T-P 관련 수질매개변수들의 민감도 분석

본 연구에서 선정한 수질 (SS, T-N, 및 T-P)관련 매개변수들은 기존의 수질에 대한 연구들에서 사용된 매개변수들을 중심으로 선정하였으며, 이들 매개변수들의 민감도 분석 결과는 Table 2 및 Fig. 4와 같다. RAMMO\_SUB은 대기로부터 침착되는 암모니아의 양, RCN\_SUB은 대기침착 질산염의

양, CH\_COV2는 하천피복인자로서 0값은 완전피복, 1값은 피복이 없는 것을 나타낸다. LAT\_SED는 중간 및 기저유출에서의 유사농도를 의미한다. LAT\_ORGN은 기저유출에서 유기질소의 양, NPERCO는 질산염 지중 침투계수, N\_UPDIS는 토양상부로의 질소 흡수계수, CMN은 부식토 유기 영양물 질들의 무기화 비율을 조절하는 매개변수이다. LAT\_ORNP는 기저유출에서 유기인의 양, GWSOLP는 기저유출을 통한 용해인의 농도를 의미한다.

민감도 분석결과, SS는 LAT\_SED가 가장 민감한 매개변수로서, 값을 증가시킬수록 SS 배출량이 증가하였으며,

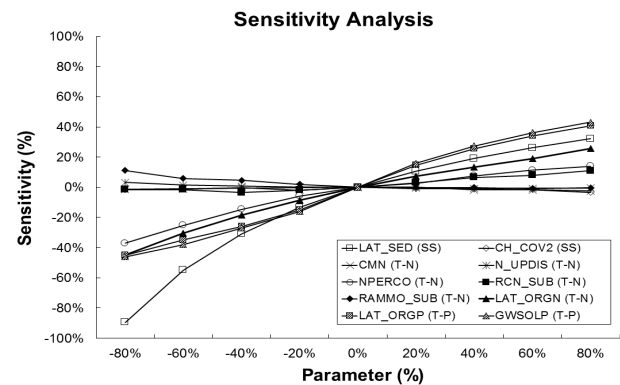


Fig. 4 The sensitivity analysis results for 10 selected parameters (SS, T-N and T-P)

Table 1 The Environmental foundational facility of Gongdo study watershed

Sewage disposal plant name	Processing capacity ( $m^3/day$ )	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
Anseong	17,500	5.94	10.01	4.75	10.53	0.87

CH\_COV2는 값을 늘릴수록 SS 배출량이 감소하였다. T-N은 LAT\_ORGN이 가장 민감한 매개변수로서, LAT\_ORGN, NPERCO, RCN\_SUB의 경우는 모두 값을 늘릴수록 T-N의 배출이 증가하였으며, CMN, N\_UPDIS, RAMMO\_SUB은 값을 줄일수록 T-N이 줄어드는 매개변수들이었다. T-P의 매개변수로는 LAT\_ORGP, GWSOLP가 값을 증가시킬수록 T-P의 배출이 증가하는 것을 알 수 있었다.

## 2. SWAT모형의 수질 보정결과

수질 매개변수들의 민감도 분석결과를 토대로, 총 14개년(2002~2015년)동안의 8일 간격 수질 측정자료를 이용하여 SS, T-N, T-P를 보정하였으며, 검보정에 대한 기간은 해당유

역의 연평균 강수량 및 유출량에 따라 평균기간(2002~2006년, 5년)과 평균이하기간 즉 가뭄기간(2014~2015년, 2년)으로 나누어 각각 검보정을 실시하였다(Kim et al., 2017). 보정 결과에 따른 모형의 적합성과 상관성을 판단하기 위한 목적 함수로는 결정계수(Coefficient of determination,  $R^2$ )와 Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 모형효율성계수(Nash-Sutcliffe efficiency, NSE)를 활용하였다. 우선, 2002~2006년(평년)의 5년 동안의 측정자료를 활용하여 수질보정을 한 최종 매개변수들은 Table 3에서 정리하였으며, SS, T-N, T-P에 대한 검보정 결과를 정리하면, Table 4, Table 5 및 Fig. 5, Fig. 6과 같다. Table 4에서, 보정기간의 SS, T-N, T-P의  $R^2$ 는 각각 0.67, 0.44, 0.56로 나타났으며, NSE는 각각 0.77, 0.73, 0.73이었던

Table 2 The value range for parameter sensitivity analysis

Parameters	Range	Parameter change of Value								
		-80%	-60%	-40%	-20%	0%	+20%	+40%	+60%	+80%
SS										
CH_COV2_rte	-0,001 to 1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
LAT_SED_hru	0 to 5000	50	100	150	200	250	300	350	400	450
T-N										
LAT_ORGN_gw	0 to 200	20	40	60	80	100	120	140	160	180
RAMMO_SUB_bsn	0 to 1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
RCN_SUB_bsn	0 to 2	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
NPERCO_bsn	0 to 1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
N_UPDIS_bsn	0 to 100	10	20	30	40	50	60	70	80	90
CMN_bsn	0,001 to 0,003	0,0012	0,0014	0,0016	0,0018	0,002	0,0022	0,0024	0,0026	0,0028
T-P										
LAT_ORGP_gw	0 to 200	20	40	60	80	100	120	140	160	180
GWSOLP_gw	0 to 1000	1	2	3	4	5	6	7	8	9

\*Source: Neisch et al. (2011)

Table 3 The SWAT water quality calibrated parameters in this study

Parameters	Definition	Range	Default*	Calibrated values	
				Sim1 <sup>a)</sup>	Sim2 <sup>b)</sup>
Streamflow (Kim et al., 2017)					
CANMX	Maximum canopy storage (mm)	0 to 100	0	5	7
CN2	SCS curve number for moisture condition	35 to 98	given by HRU	default	-5
ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0 to 1	0,95	0,2	0,75
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	0 to 2000	given by HRU	default	*0,6
SLSOIL	Slope length of lateral subsurface flow (m)	0 to 150	0	default	5
LAT_TIME	Lateral flow travel time (days)	0 to 180	0	8	3
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge (days)	0 to 500	31	100	180
GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for base flow (mm)	0 to 5000	1000	2000	2500
ALPHA_BF	Base flow recession constant	0 to 1	0	0,5	0,55

**Table 3** The SWAT water quality calibrated parameters in this study (Continued)

Parameters	Definition	Range	Default*	Calibrated values	
				Sim1 <sup>a)</sup>	Sim2 <sup>b)</sup>
SS					
CH_COV2	Channel cover factor	-0.001 to 1	0	-0.001	-0.001
LAT_SED	Sediment concentration in lateral and groundwater flow (mg/L)	0 to 5000	0	15	15
T-N					
LAT_ORGN	Organic N in the baseflow (mg/L)	0 to 200	0	150	150
RAMMO_SUB	Atmospheric deposition of ammonium	0 to 1	0	0.95	0.95
RCN_SUB	Atmospheric deposition of nitrate	0 to 2	0	2	2
NPERCO	Nitrate percolation coefficient	0 to 1	0.2	0.25	0.25
N_UPDIS	Nitrogen uptake distribution parameter	0 to 100	20	20	80
CMN	Rate factor for humus mineralization of active organic nutrients	0.001 to 0.003	0.0003	0.0003	0.003
T-P					
LAT_ORGP	Organic P in the base flow (mg/L)	0 to 200	0	4	4
GWSOLP	Concentration of soluble phosphorus in groundwater contribution to stream from subbasin (mg P/L or ppm)	0 to 1000	0	0.4	0.4

\*Source: Neisch et al. (2011) calibrated a) Normal period focus (2002~2006), b) Drought period focus (2014~2015)

**Table 4** Statistical summary of SWAT SS, T-N, and T-P results focusing on normal year (2002~2006) calibration

Year	SS (ton/year)		T-N (kg/year)		T-P (kg/year)		R <sup>2</sup>			NSE			Re marks
	Obs*	Sim1*	Obs	Sim1	Obs	Sim1	SS	T-N	T-P	SS	T-N	T-P	
2002	11.4	8.3	6,184.0	6,110.0	92.6	117.4	0.90	0.53	0.78	0.90	1.00	0.78	C*
2003	14.1	14.7	1,629.9	1,605.0	57.8	56.0	0.17	0.34	0.30	0.58	0.80	0.90	C
2004	11.2	7.3	3,434.5	4,409.6	96.8	86.6	0.85	0.40	0.55	0.76	0.75	0.41	C
2005	3.6	2.3	1,234.9	1,297.4	44.5	45.9	0.48	0.57	0.90	0.65	0.47	0.85	C
2006	8.9	30.5	1,139.9	111.6	45.8	41.8	0.93	0.34	0.28	0.96	0.65	0.71	C
2007	3.7	2.2	1,434.7	857.7	41.3	40.1	0.24	0.30	0.56	0.04	0.02	0.48	V*
2008	5.2	2.7	1,128.9	888.9	38.6	33.6	0.90	0.86	0.00	0.54	0.72	0.06	V
2009	28.4	10.0	852.8	950.7	52.8	27.4	0.92	0.75	0.56	0.45	0.67	0.08	V
2010	1.2	1.3	723.8	428.1	24.9	24.5	1.00	0.91	0.89	0.86	0.98	0.31	V
2011	3.5	6.1	3,014.7	2,718.8	57.3	64.2	0.02	0.45	0.62	0.90	0.89	0.56	V
2012	18.7	13.9	1,712.0	1,682.3	92.7	81.1	0.82	0.43	0.02	0.75	0.94	0.93	V
2013	32.5	27.5	1,273.0	1,016.7	37.7	39.6	0.02	0.82	0.43	0.98	0.76	0.36	V
2014	4.1	2.2	692.5	715.1	39.2	38.2	0.74	0.76	0.71	0.12	0.88	0.64	V
2015	1.4	1.4	472.4	422.3	28.4	27.2	0.77	0.62	0.37	0.56	0.80	0.37	V
AVG	10.6	9.3	1,780.6	1,729.6	53.6	51.7	0.63	0.58	0.50	0.65	0.74	0.53	

\*Obs: Observed, Sim1: Normal period focus (2002~2006), C: Calibration, V: Validation

다. 전체기간의 평균 R<sup>2</sup>는 각각 0.63, 0.58, 0.50로 나타났으며, NSE는 0.65, 0.74, 0.53이었다.

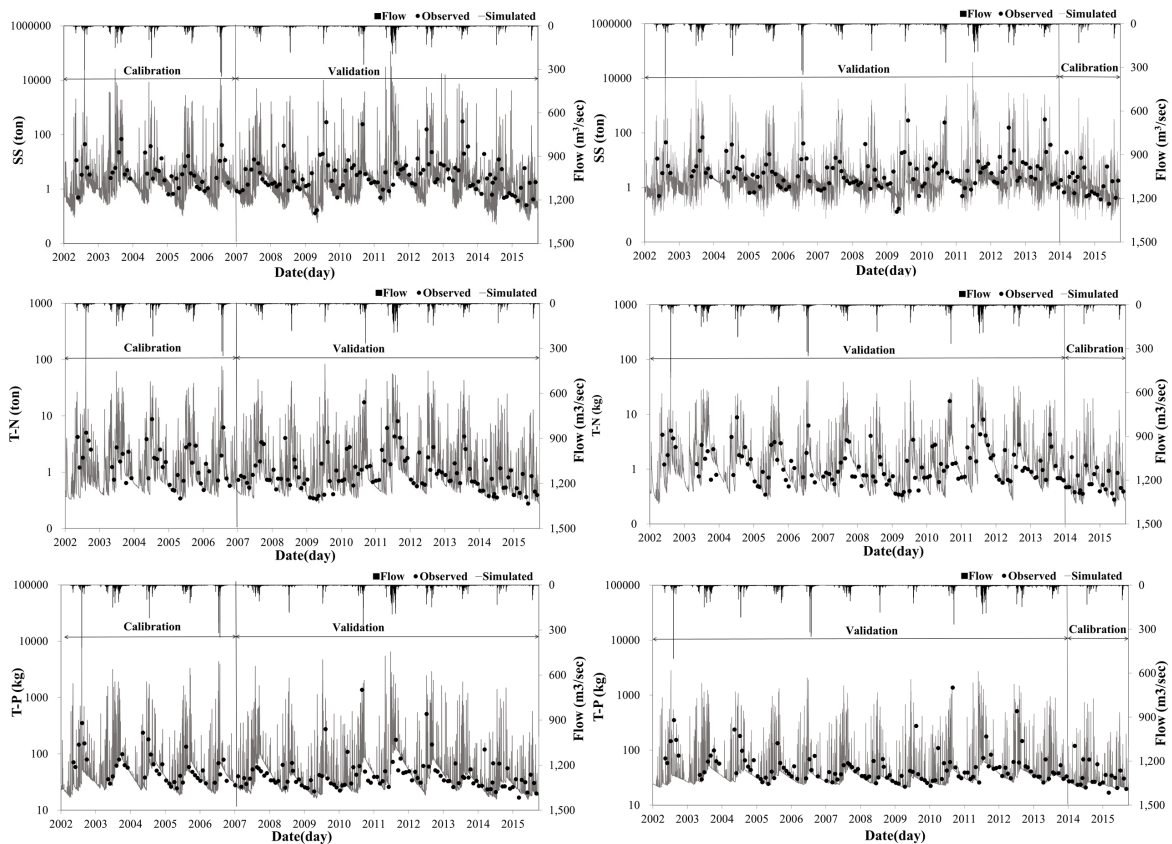
다음으로 가뭄년인 2014~2015년의 수질 측정자료를 대상으로 보정을 한 후, 나머지 기간(2002~2013년)에 대하여 검증 을 시도하였다. 이 과정에서, 특히 가뭄이 고려되어 보정된

매개변수들은 질소이동과 관련된 N\_UPDIS (질산염의 흡수를 분포시키는 매개변수), CMN (질산염의 무기화에 대한 비율을 조절하는 매개변수)이다. 가뭄기간을 기준으로 보정된 매개변수 값들은 Table 5에서 볼 수 있듯이, 2002~2006년 (평균)의 매개변수들보다 N\_UPDIS는 4배, CMN은 10배 각

**Table 5** Statistical summary of SWAT SS, T-N, and T-P results focusing on drought year (2014~2015) calibration

Year	SS (ton/year)		T-N (ton/year)		T-P (kg/year)		R <sup>2</sup>			NSE			Re marks
	Obs*	Sim2*	Obs	Sim2	Obs	Sim2	SS	T-N	T-P	SS	T-N	T-P	
2002	11.4	4.1	6,184.0	5,619.4	92.6	93.3	0.90	0.53	0.73	0.40	0.99	0.84	V*
2003	14.1	10.6	1,629.9	2,088.5	57.8	48.2	0.90	0.33	0.10	0.88	0.25	0.73	V
2004	11.2	6.6	3,434.5	3,982.6	96.8	81.3	0.23	0.15	0.50	0.47	0.93	0.98	V
2005	3.6	2.2	1,234.9	1,186.8	44.5	39.8	0.44	0.59	0.93	0.65	0.81	0.99	V
2006	8.9	22.8	1,139.9	957.7	45.8	37.9	0.45	0.85	0.47	0.87	0.52	0.86	V
2007	3.7	2.9	1,434.7	1,435.6	41.3	35.7	0.18	0.53	0.40	0.64	0.90	0.71	V
2008	5.2	4.4	1,128.9	847.6	38.6	34.5	0.96	0.48	0.55	0.94	0.11	0.67	V
2009	28.4	24.5	852.8	762.9	52.8	36.2	0.99	0.83	0.65	0.99	0.86	0.91	V
2010	1.2	0.8	723.8	391.6	24.9	25.2	1.00	0.92	0.92	0.96	0.98	0.94	V
2011	3.5	4.2	3,014.7	2,792.6	57.3	45.9	0.18	0.61	0.54	0.88	0.93	0.92	V
2012	18.7	18.3	1,712.0	1,666.1	92.7	52.6	0.98	0.76	0.96	0.88	0.97	0.96	V
2013	32.5	26.7	1,273.0	1,269.2	37.7	34.0	0.99	0.92	0.76	0.98	0.90	0.93	V
2014	4.1	3.2	692.5	595.7	39.2	35.0	0.72	0.82	0.78	0.48	0.77	0.96	C*
2015	1.4	1.3	472.4	456.9	28.4	27.5	0.95	0.72	0.42	0.59	0.80	0.81	C
AVG	10.6	9.5	1,780.6	1,718.1	53.6	44.8	0.71	0.65	0.62	0.76	0.77	0.87	

\*Obs: Observed, Sim2: Drought period focus (2014~2015), C: Calibration, V: Validation



**Fig. 5** The observed vs. SWAT simulated SS, T-N, and T-P comparison results, (a) 2002~2006 normal year focus, (b) 2014~2015 drought year focus calibration

각 크게 보정되었다.

이는 식물의 질소섭취 (nitrogen uptake)와 관련된 것으로, 장기 가뭄 시에는 토양의 재습윤 (rewetting)의 과정에서 식물이 질소를 더 많이 흡수하려는 경향을 보이는 것을 반영한 것으로 판단된다. 이는 Fiere et al. (2002)의 현장실험에서도 알 수 있듯이, 토양건조와 재습윤 과정에서 특히 질소이동 및

고정에 대한 변화가 크다는 연구결과로 추정할 수 있으며, 또한 Kang et al. (2013)의 현장실험 결과에 따르면 건기와 우기에 실시한 질소 함량 비교 결과 우기보다 건기에 토양에 존재하는 질소의 함량이 높게 측정되었다.

2014~2015년 (가뭄년)의 2년 동안의 측정 자료를 활용한 수질 검보정 결과는 Table 5와 Table 6에서 볼 수 있다. Table

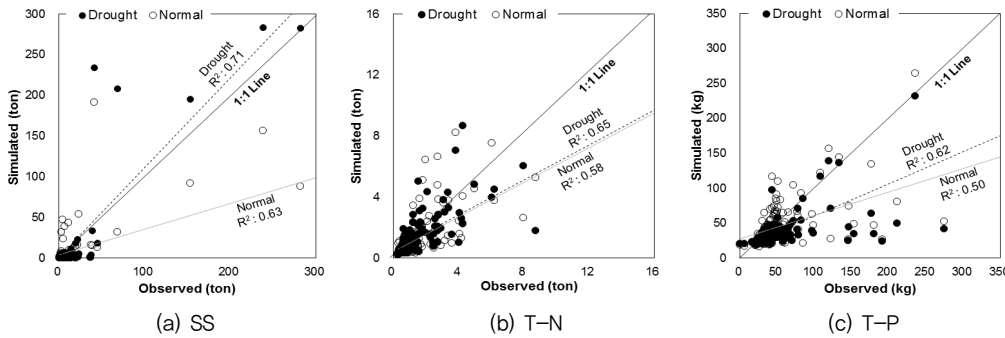


Fig. 6 Scatter plots of the observed vs. SWAT simulated (a) SS, (b) T-N, and (c) T-P focusing on normal year (2002~2006) focus calibration and drought year (2014~2015) focus calibration

Table 6 Statistical Summary of SWAT Water Quality Results for Overall Period and Drought Period Focusing Calibration

Date	pcp (mm)	Stream discharge (mm)			Sediment (mg/L)			T-N (mg/L)			T-P (mg/L)		
		Obs*	Sim1*	Sim2*	Obs	Sim1	Sim2	Obs	Sim1	Sim2	Obs	Sim1	Sim2
2014-01	0.0	0.49	0.35	0.47	10.4	5.4	4.6	2.60	2.51	2.98	0.15	0.18	0.17
2014-02	0.0	0.50	0.27	0.41	3.6	4.3	6.4	2.60	2.49	2.44	0.15	0.16	0.16
2014-03	12.43	0.45	0.67	1.58	116.9	13.5	124.3	10.00	11.43	6.71	0.73	0.15	0.16
2014-04	0.0	0.45	0.14	0.28	14.7	29.7	51.6	2.30	2.28	1.69	0.14	0.95	0.85
2014-05	0.0	0.95	0.77	1.23	9.7	1.1	3.1	2.20	3.02	1.80	0.07	0.05	0.07
2014-06	3.95	0.34	0.18	0.25	5.0	1.3	1.5	3.00	2.96	2.66	0.25	0.16	0.18
2014-07	0.0	0.27	0.14	0.20	24.3	4.0	10.8	3.56	5.45	2.36	0.21	0.20	0.24
2014-08	0.0	2.64	1.82	2.50	12.6	10.6	0.7	1.22	1.04	1.10	0.07	0.02	0.02
2014-09	0.0	0.6	0.89	0.47	24.3	11.3	7.6	2.40	1.93	2.71	0.12	0.12	0.11
2014-10	0.0	0.52	0.74	0.46	2.5	8.9	8.3	2.82	2.54	2.99	0.14	0.17	0.14
2014-11	0.0	0.71	1.27	0.96	2.0	4.5	3.4	2.21	2.16	2.14	0.21	0.13	0.10
2014-12	2.36	0.58	0.70	0.90	3.3	2.8	0.7	5.11	4.89	4.04	0.11	0.23	0.14
2015-01	0.0	0.33	0.30	0.35	4.9	7.2	8.0	3.24	3.13	3.99	0.21	0.21	0.23
2015-02	0.0	0.35	0.26	0.34	4.1	13.6	4.5	4.00	3.71	4.47	0.27	0.22	0.20
2015-03	0.0	0.29	0.16	0.27	3.5	3.5	3.7	4.10	3.31	3.72	0.16	0.25	0.23
2015-04	0.04	0.50	0.66	1.06	6.0	2.5	4.2	4.08	4.00	3.96	0.19	0.12	0.13
2015-05	0.0	0.61	0.48	0.90	25.8	25.5	27.6	1.63	1.46	1.52	0.14	0.10	0.15
2015-06	0.0	0.16	0.07	0.14	4.4	5.7	29.6	4.84	4.82	3.72	0.36	0.68	0.55
2015-07	4.54	0.29	0.39	0.27	16.0	0.9	1.7	6.19	4.89	6.07	0.41	0.15	0.20
2015-08	0.83	0.76	0.58	0.24	1.5	8.6	6.0	1.83	1.90	2.13	0.11	0.16	0.17
2015-09	0.0	0.85	0.31	0.26	5.7	0.9	0.7	1.27	1.08	1.04	0.06	0.10	0.07
AVG	1.15	0.60	0.53	0.65	14.34	7.9	14.7	3.39	3.38	3.06	0.20	0.21	0.20

\*Obs: Observed, Sim1: Average period focus (2002~2006), Sim2: Drought period focus (2014~2015)



5에서 보는 바와 같이, SS, T-N, T-P에 대한 보정  $R^2$ 는 각각 0.84, 0.77, 0.60으로, 2002~2006년(평년) 보정시의 2014~2015년 검정  $R^2$  0.76, 0.69, 0.54보다는 더 좋은 양상을 보였으며, 전체기간의  $R^2$ 가 각각 0.71, 0.65, 0.62로 NSE는 0.76, 0.77, 0.87로 향상된 것을 알 수 있다. Table 6에서도 보듯이, 측정 결과와의 월별 비교에서도 가뭄년을 대상으로 한 SS, T-N, T-P의 보정결과도 향상된 것을 알 수 있다.

수질보정 및 검정결과에서 평년보정보다 가뭄보정에 의한  $R^2$ 가 향상된 이유는 수문보정(Kim et al., 2017)시 결정된 매개변수(Table 3)들에 의한 지표유출, 지표하유출, 기저유출 관련 매개변수들이 가뭄보정 시에 SS와 T-P의 이동량에 영향을 주었기 때문이다. Kim et al. (2017)의 연구에 의하면, 가뭄시 특히 침투유출 SCS-CN, 포화투수계수 SOL\_K, 토양층의 기율기 SLSOIL 등이 수문순환에 영향을 받는 매개변수들이었다. 이들 수문 매개변수의 변화가 SS와 T-P의 모의에도 영향을 주기 때문에, 결론적으로 가뭄을 고려한 수문순환의 보정은 SS와 T-P의 이동기작에 중요한 역할을 하였다. 하지만, T-N의 경우 이동기작이 SS와 T-P와는 다른 형태로 이동하기 때문에 이에 기후의 특성을 반영하여 매개변수의 조정이 중요한 것으로 판단된다. 2014~2015년의 기간에 수질실측 일자를 기준으로 각 일자의 수질 검보정 결과를 Fig. 5에 도시하였으며, 결과에 따른 통계분석을 Fig. 6에 나타내었다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 안성천 공도유역을 대상으로, SWAT모델에 의한 SS, T-N, T-P의 하천수질 보정에 있어, 2014~2015장기가뭄을 고려한 수질관련 주요 매개변수들의 결정과 더불어 이 매개변수들의 거동 및 의미를 파악하고자 하였다.

총 14년(2002~2015년)동안의 8일 간격 수질 측정자료(SS, T-N, T-P)를 이용하여, 2002~2006(평년)을 대상으로 한 보정과 2014~2015(가뭄년)를 대상으로 한 SWAT 매개변수 보정을 각각 실시하였다. 그 결과, SS, T-N, T-P의  $R^2$ 는 평년 2002~2006년의 보정에 대하여는 각각 0.63, 0.58, 0.50, NSE에 대해서는 각각 0.65, 0.74, 0.53으로 나타났으며, 가뭄년 2014~2015년의 보정에 대해서는  $R^2$ 가 각각 0.71, 0.65, 0.62로, NSE가 0.76, 0.77, 0.87로 향상 보정되었다.

특히 가뭄년의 특징을 고려한 매개변수들은 질소이동과 관련된 N\_UPDIS(질산염의 흡수를 분포시키는 매개변수), CMN(질산염의 무기화에 대한 비율을 조절하는 매개변수)으로서, 평년의 매개변수들보다 N\_UPDIS는 4배, CMN은 10배 각각 크게 보정되어, 가뭄시에는 토양의 재습윤(rewetting)의 과정에서 식물이 질소를 더 많이 흡수하려는 경향을 보이

는 것을 반영한 것으로 나타났다. Hass et al. (2015)의 연구에서 분석한 결과로 CMN과 N\_UPDIS는 질소가 무기물화 되는 과정에서 밀접한 관련이 있으며 N\_UPDIS의 경우 봄과 같이 낮은 유출이 발생할 때 매개변수 값이 높게 반영되며 이는 식물이 자라며 질산염에 대한 수요가 증가되기 때문이라고 판단하였다.

한편, 평년보정과 가뭄보정으로 최종 결정된 수질매개변수들 중에서 SS와 T-P의 수질매개변수들은 동일하게 적용되었으나, 수문보정(Kim et al., 2017)시에 결정된 매개변수(SCS-CN, SOL\_K, SLSOIL)들이 SS와 T-P의 이동기작에 연계되어 수질 보정 결과에 영향을 준 것으로 나타났다. 다만, 수질실측자료의 경우 8일 간격 측정으로 인한 측정횟수와 측정시기의 불연속성 문제로 인하여 강우유출이 높은 시기에는 실측자료가 없는 경우가 많아, 모델의 검증에 대하여 결과를 절대적 판단기준으로 적용하기에 무리가 있을 것이라 판단되어진다.

건기일수의 증가는 토양수분을 고갈시키며 건조해진 토양은 강우 시 지표유출로 인한 토양유실을 보다 쉽게 발생시키기 때문에 유실되는 부유물질의 농도에 상당한 영향을 준다. 이에 따라 SWAT모델의 검보정시에는 가뭄과 같은 극한 기후에 대하여 수문 매개변수와 더불어 수질매개변수를 조정할 때 가뭄 시에 영향을 받는 토양의 투수계수 변화, 토양건조, 식물의 흡수 등의 변화를 고려하여 부유물질 매개변수들의 보정이 필요하며 이와 관련된 추가 연구들이 필요하다고 생각된다. 부유물질 중에서도 특히 질소의 이동기작은 하천 및 호소의 플랑크톤 증식, 용존산소의 부족 등을 유발하면서 궁극적으로 수질 및 부영양화에 영향을 미치므로, 유역 모델링을 통한 오염물질의 거동을 구명하는데 있어 가뭄시의 수문 및 수질의 특성을 반영한 유역모델의 검보정은 중요하다고 판단되며, 이를 정량화 하여 적절한 관리방안이 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(과제번호 17AWMP-B083066-04)의 지원으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- Ahn, S. R., R. Ha, S. W. Yoon, and S. J. Kim, 2014. Evaluation of future turbidity water and eutrophication in Chungju lake by climate change using CE-QUAL-W2. *Korea Water Resources Association Conference* 47(2): 145-159 (in Korean).
- Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams,

1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of American Water Resources Association (JAWRA)* 34(1): 73-89.
3. Brown, L.C. and T.O. Barnell, 1987. The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS documentation and user manual. EPA document EPA/600/3-87/007, USEPA, Athens, Ga.
  4. Burt, T. P., N. J. K. Howden, F. Worrall, and M. J. Whelan, 2009. Long-term monitoring of river water nitrate: how much data do we need?. *Journal of Environmental Monitoring* 12: 71-79.
  5. Choi, D. G., M. S. Keem, N. W. Kim, and S. D. Kim, 2009. An analysis of the effect of climate change on Byeongseong stream's hydrologic and water quality responses using CGCM's future climate information. *Korea Water Resources Association Conference* 42(11): 921-931 (in Korean).
  6. Dijkstra, F. A., E. Pendall, J. A. Morgan, D. M. Blumenthal, Y. Carrillo, D. R. Le Cain, R. F. Follett, and D. G. Williams, 2012. Climate change alters stoichiometry of phosphorus and nitrogen in a semiarid grassland. *New Phytologist* 196: 807-815.
  7. Dijkstra, F. A., M. He, M. P. Johansen, J. J. Harrison, and C. Keitel, 2015. Plant and microbial uptake of nitrogen and phosphorus affected by drought using  $^{15}\text{N}$  and  $^{32}\text{P}$  tracers. *Soil Biology & Biochemistry* 82: 135-142.
  8. Fiere, N. and J. P. Schimel, 2002. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations. *Soil Biology & Biochemistry* 34: 777-787.
  9. Giese, M., Y. Q. Gao, S. Lin, and H. Brueck, 2011. Nitrogen availability in a grassed semi-arid grassland is dominated by seasonal rainfall. *Plant Soil* 340: 157-167.
  10. Hass, M. B., B. Guse, M. Pfannerstill, and N. Fohrer, 2015. Detection of dominant nitrate processes in ecohydrological modeling with temporal parameter sensitivity analysis, *Ecological Modeling* 314: 62-72.
  11. He, M. and F. A. Dijkstra, 2014. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: a meta-analysis. *New Phytologist* 204: 924-931.
  12. Jang, J. H. and J. H. Ahn, 2012. Hydrologic and water quality responses to precipitation extremes in Nakdong river basin. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 42(11): 1081-1091 (in Korean).
  13. Kang, K., S. G. Hong, and S. J. Park, 2013. Change in soil properties after planting giant miscanthus. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(6): 69-75 (in Korean).
  14. Kim, D. R. and S. J. Kim, 2017. A study on parameter estimation for SWAT calibration considering streamflow of long-term drought periods. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 59(2): 19-27 (in Korean).
  15. Lee, Y. J., S. R. Ahn, B. S. Kang, and S. J. Kim, 2008. Assessment of future climate and land use change on hydrology and stream water quality of anseongcheon watershed using SWAT model (I). *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 28(6B): 665-673 (in Korean).
  16. Luo, Y., D. L. Ficklin, X. Liu, and M. Zhang, 2013. Assessment of climate change impacts on hydrology and water quality with watershed modeling approach. *Science of the Total Environment* 450-451: 72-82.
  17. Merwade, V., C. Baffaut, K. Bieger, L. Boithias, and H. Rathjens, 2017. Featured series introduction: SWAT applications for emerging hydrologic and water quality challenges. *Journal of the American Water Resources Association* 53(1): 67-68.
  18. National Drought Information-Analysis Center: available at <https://drought.kwater.or.kr/menu/m30/m32.do>.
  19. Nash, J. E. and J. E. Sutcliffe, 1970. Riverflow forecasting through conceptual models, Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290.
  20. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams, 2011. Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Theoretical documentation, version 2009, Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406.
  21. Park, J. Y., M. S. Lee, G. A. Park, and S. J. Kim, 2008. Comparative analysis of SWAT generated streamflow and stream water quality using different spatial resolution data. *Journal of the Korea Water Resources Association* 41(11): 1079-1094 (in Korean).
  22. Rocha, J., P. Roebeling, and M. E. Rial-Rivas, 2015. Assessing the impacts of sustainable agricultural practices for water quality improvements in the Vouga catchment (Portugal) using the SWAT model. *Science of the Total Environment* 536: 48-58.
  23. Singh, G. and D. Saraswat, 2016. Development and evaluation of targeted marginal land mapping approach in SWAT model for simulating water quality impacts of selected second generation biofeedstock. *Environmental Modeling & Software* 81: 26-39.
  24. Williams, J. R., 1995. The EPIC model, In Computer models of watershed hydrology, Singh, V.P. (ed), Water Resources Publication Chapter 25: 909-1000.
  25. Wischmeier, W. H. and D. D. Smith, 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning, Agriculture Handbook 282.
  26. Wu, Y. and J. Chen, 2013. Investigating the effects of point source and nonpoint source pollution on the water quality of the East River (Dongjiang) in South China. *Ecological Indicators* 32: 294-304.
  27. Zhou, X. V., C. D. Clark, S. S. Nair, S. A. Hawkins, and D. M. Lambert, 2015. Environmental and economic analysis of using SWAT to simulate the effects of switchgrass production on water quality in an impaired watershed. *Agricultural Water Management* 160: 1-13.