



SWAT 모형을 이용한 기후변화에 따른 남강댐 유입량 추정

Estimation of Inflow into Namgang Dam according to Climate Change using SWAT Model

김동현^{*,**} · 김상민^{***,†}

Kim, Dong-Hyeon · Kim, Sang-Min

Abstract

The objective of this study was to estimate the climate change impact on inflow to Namgang Dam using SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model. The SWAT model was calibrated and validated using observed flow data from 2003 to 2014 for the study watershed. The R^2 (Determination Coefficient), RMSE (Root Mean Square Error), NSE (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient), and RMAE (Relative Mean Absolute Error) were used to evaluate the model performance. Calibration results showed that the annual mean inflow were within $\pm 5\%$ error compared to the observed. R^2 were ranged 0.61~0.87, RMSE were 1.37~7.00 mm/day, NSE were 0.47~0.83, and RMAE were 0.25~0.73 mm/day for daily runoff, respectively. Climate change scenarios were obtained from the HadGEM3-RA. The quantile mapping method was adopted to correct bias that is inherent in the climate change scenarios. Based on the climate change scenarios, calibrated SWAT model simulates the future inflow and evapotranspiration for the study watershed. The expected future inflow to Namgang dam using RCP 4.5 is increasing by 4.8 % and RCP 8.5 is increasing by 19.0 %, respectively. The expected future evapotranspiration for Namgang dam watershed using RCP 4.5 is decreasing by 6.7 % and RCP 8.5 is decreasing by 0.7 %, respectively.

Keywords: SWAT model, Climate change, RCP scenario, Namgang dam, Inflow, Evapotranspiration

1. 서 론

최근 기후변화로 인해 이상기후 현상이 나타나고 홍수 및 가뭄의 빈도가 높아지면서 수자원에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지고 있다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 보고서에 따르면, 지구온난화로 인한 지구 평균 기온은 지난 133년간(1880~2012년) 0.85 °C 상승하였고, 21세기 말 평균기온은 2.4 °C, 강수량은 7% 증가할 것으로 전망하고 있다(IPCC, 2013). 지구온난화에 따른 기온상승, 강수량의 규모 및 패턴의 변화는 궁극적으로 수문 변화에 많은 영향을 미치게 될 것이다(Ahn et al., 2013). 따라서 기후변화에 따른 수문 변화, 분석 및 평가 연구는 수자원 관리에 있어 앞으로 야기될 피해와 예방에 도움이 될 것이다.

국내에서 SWAT 모형을 이용한 연구들을 살펴보면, 실측

자료를 통해 매개변수를 보정하고 보정된 매개변수의 적용으로 실측자료의 근접한 수문모의가 가능해지면, 미래 기상자료를 입력하여 미래 수문요소들을 산정하고 분석하는 연구가 이루어지고 있다. Kim et al. (2015)은 금호강 유역 유역을 대상으로 SWAT 모형을 구축하고 미래 기후변화 시나리오 적용을 통해 미래 자연유출량 변화를 예측하였다. 기후변화 시나리오는 HadGEM3-RA 모형을 이용하여 RCP 4.5, 8.5 시나리오를 적용하였으며, 월별, 계절별, 표준유역별로 변화를 분석하였다. Jang et al. (2015)은 임하댐 유역을 대상으로 SWAT 모형을 구축하고 HadGEM3-RA 모형을 이용하여 RCP 4.5, 8.5 기후변화 시나리오 적용을 통해 월별 증발산, 토양수분, 지표유출, 중간유출, 회귀유출 등의 변화를 분석하였다. Park et al. (2014)은 용담댐 유역을 대상으로 SWAT 모형을 구축하고 HadGEM3-RA 모형을 이용하여 RCP 4.5, 8.5 기후변화 시나리오 적용을 통해 유출량, 증발산 그리고 토양수분 등에 대한 변화를 분석하였다. 이 밖에도 SWAT 모형을 이용하여 다양한 대상유역에 적용하였으며, 수자원 분야에 대한 기후변화 영향평가 연구들이 선행되었다. SWAT에서 모의되는 여러 수문인자(유출, 수질, 증발산 그리고 토양수분)들에 대한 분석이 이루어졌으며, 최근에는 유역의 환경변화를 예측하여 고려한 연구들이 이루어지고 있다. 하지만 SWAT 모형과 기후변화 연구들이 많이 진행되고, 최신 경향인 RCP 시나리오가 제공되고 있음에도 불구하고 아직 기후변화 영향평가

* Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Science, RDA

** Department of Rural Construction Engineering, Chonbuk National University

*** Department of Agricultural Engineering, (Insti. of Agric. and Life Sci.) Gyeongsang National University

† Corresponding author

Tel.: +82-55-772-1931 Fax: +82-55-772-1939

E-mail: smkim@gnu.ac.kr

Received: May 26, 2017

Revised: August 4, 2017

Accepted: August 7, 2017

가 미흡하고 분석이 필요한 유역들이 남아있다. SWAT 모형을 이용하여 다양한 수문인자들의 대한 분석과 고찰에 대한 방법들은 이미 정립되어 있기 때문에 수자원 평가가 미흡한 유역에 최신 경향을 반영한 RCP 시나리오를 적용할 필요가 있다고 판단된다.

본 연구의 대상유역인 남강댐 유역은 연평균 강수량이 1,634 mm (2000~2014년의 연평균 강수량)으로 남부지방에서도 다우지역에 속하며(기상청), 하천하상계수가 크기 때문에 우기시 수위, 유속증가에 따른 하천 침식 및 고농도의 탁수가 발생하여 매년 피해가 발생하고 있다(Kim and Kim, 2016). 또한 국가수자원종합정보시스템(Wamis)의 유역정보에 따르면, 소양강댐과 남강댐을 비교했을 때, 유역면적은 비슷하나 저수면적과 저수용량에서 큰 차이를 나타내며, 남강댐은 저수용량이 적은데도 불구하고 유역평균유입량이 크고 홍수조절용량은 적은 것으로 나타났다. 따라서 미래 기후변화에 따른 유입량 변화에 따라 댐의 안정적인 운영에 영향을 미칠 수 있기 때문에 수문분석이 필요한 실정이다. 연구지역인 남강댐 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용한 국내 연구에서는 유출량을 모의하고 적합성 평가를 실시한 연구들은 이루어졌으나, 기후변화 시나리오를 적용하여 미래 장기적인 수문영향을 분석한 연구는 미흡한 실정이다. 기후변화에 대한 영향 평가가 이루어진 바는 있으나(Lee et al., 2012) IPCC 보고서에서 제안하는 기후변화 시나리오와 RCM의 출처를 알 수 없기 때문에 최근 기후변화 경향에 맞는 RCP 시나리오를 적용해 볼 필요가 있으며, 기상청에서 제공하는 RCP 한반도 기후

변화 전망자료를 적용하여 기후변화에 따른 남강댐 유역의 수문영향을 분석할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 서부 경남 지역의 상수원으로 이용되고 있는 남강댐 유역을 대상으로 SWAT 모형을 구축하고 기상청에서 제공되는 RCP 4.5 및 8.5 시나리오를 적용하여 남강댐 유역의 유입량 및 증발산량을 추정하고 미래 변화를 분석하였다.

II. 연구방법

1. 대상유역 및 입력자료

남강댐 유역은 유역면적 2,281.72 km², 유역평균고도 427.57 m, 유역평균경사 40.39%, 유로연장 110.84 km, 유역평균 폭 20.52 km, 형상계수는 0.43이다(국가수자원종합정보시스템, WAMIS). 남강댐은 다목적댐으로 높이 34 m, 길이, 1,126 m, 체적 1,280 m³이다(Kim and Kim, 2016). 남강댐 유역의 특성은 남부지방에서도 다우지역에 속하며, 유역의 하상계수가 크기 때문에 우기에는 남강의 수위 상승에 따른 유속증가로 침식 및 탁수 등이 발생한다. 또한 한강유역의 소양강댐과 비교하였을 때, 유역면적(소양강: 2,703 km², 남강: 2,285 km²)은 비슷하나 저수용량(소양강: 2,900 백만m³, 남강: 309.2 백만m³)에서 큰 차이를 나타내며, 남강댐은 저수용량이 적은데도 불구하고 유역평균유입량이 크고 홍수조절용량(소양강: 770 백만m³, 남강: 270 백만m³)은 작다. 따라서 기후변화에 따른 유입량 변화가 남강댐 운영에 영향을 미칠 수 있기 때

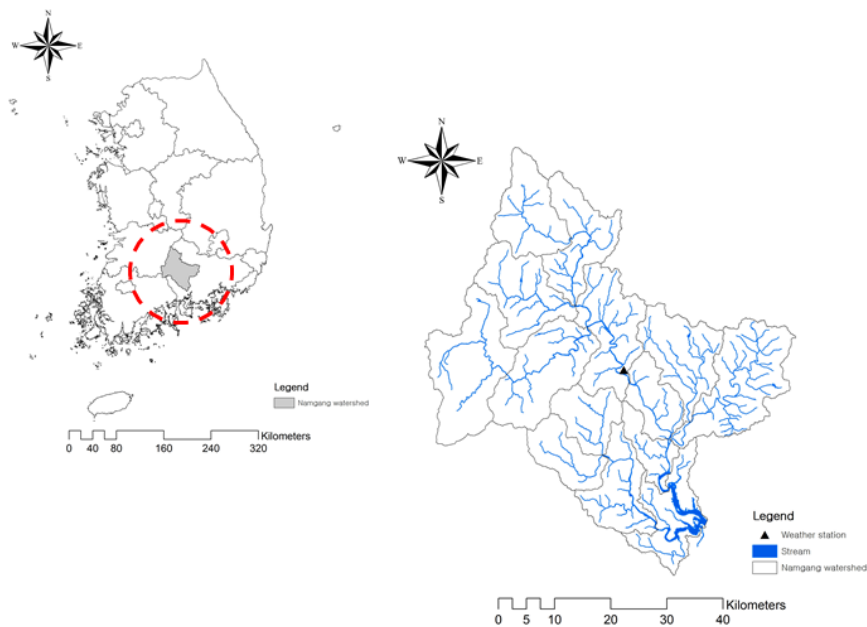


Fig. 1 Location and stream network of Namgang dam watershed

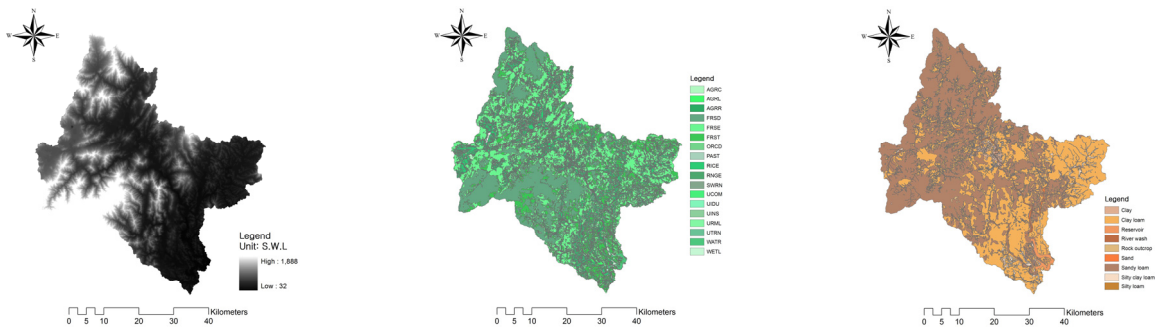


Fig. 2 DEM, land cover, and soil texture map for the Namgang dam watershed

Table 1 Annual mean rainfall and inflow to Namgang dam from 2003 to 2014

Year	Rainfall (mm)	Namgang dam	
		Inflow (mm)	Inflow rate (%)
2003	1,935	1,810	93.5
2004	1,886	1,186	62.9
2005	1,313	688	52.4
2006	1,685	1,133	67.3
2007	1,776	1,374	77.4
2008	786	350	44.5
2009	1,169	636	54.4
2010	2,190	1,474	67.3
2011	2,013	1,388	69.0
2012	1,914	1,270	66.3
2013	1,254	710	56.7
2014	1,539	862	56.0
Mean	1,622	1,073	64.0

문에 수문분석이 필요하며, 남강댐 유역을 본 연구의 대상유역으로 선정하였다. Fig. 1은 본 연구의 대상유역인 남강댐 유역도와 하천도를 나타내고 있다.

Fig. 2에서는 SWAT 모형의 입력자료인 수치지도모형 (DEM), 토지피복도, 정밀토양도를 나타내고 있다. 토지피복도는 환경부에서 제공하는 중분류의 2010년도 토지피복자료를 이용하였으며, 토양도는 국립농업과학원에서 제공하고 있는 1:25,000 정밀토양도를 이용하였다. 각 입력자료의 해상도는 30 m × 30 m, 좌표체계는 GRS80으로 동일하게 설정하였다.

기상자료는 기상청 자료를 사용하였으며, 산청 지상관측소의 2000년부터 2014년까지 강우량, 최고기온, 최저기온, 평균풍속, 평균습도를 일 자료로 수집하였으며, 일사량 자료의 경우 대상유역과 근접한 진주 지상관측소의 자료를 활용하였다.

대상유역의 유입량 자료는 국가수자원통합정보시스템 (WAMIS)에서 수집하였으며, 남강댐 유입량 자료의 경우 댐 저수량에서 전시간의 저수량차와 단위시간동안 방류량을 더한 양을 cms로 단위로 환산하여 간접적으로 얻어진 값이다. 남강댐 유입량 자료를 2003~2014년까지의 수집하였으며, Table 1은 남강댐 연평균 유입량 및 유입률을 나타내고 있다. 남강댐의 연평균 유입량은 1,073 mm이며 연평균 유입률은 64.0%로 나타났다. 2003년도의 경우 유입률이 93%로 크게 나타났는데, 태풍 ‘매미’의 영향도 있었지만, 강우지속기간, 월별 강우량 및 유입량 등을 원본자료로 비교, 분석해봤으나 이상이 없는 것으로 보아 실측에 오류가 있었던 것으로 판단된다.

2. SWAT 모형 개요

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형은 미국에서 개발되었으며, GIS를 기반으로 하여 유입, 유출, 침투, 증발, 수질, 토양유실 그리고 비점오염원 등 다양한 수문 영향에 대해서 모의가 가능한 모형이다 (Neitsch et al., 2009). 대상유역 내에 다양한 종류의 토양과 토지이용조건, 경사도 등에 의해 수문반응단위 (Hydrologic Response Unit, HRU)가 결정되며, 각 HRU를 통해 유출과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 영향을 예측하기 위한 모형으로서 농업유역에 적용하기 적합하다. 남강댐의 경우 산지가 75%이고, 농업지역이 20%이기 때문에 농업유역에서 수문모의에 적합한 모형으로 SWAT 모형을 선정하였다. SWAT 모형은 물수지식에 근거하여 지표면유출, 침투량, 증발산량을 산정하며, 수문을 모의하기 위해 식 (1)과 같은 물수지 방정식을 기초한다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_{suri} - ET_i - W_{secp} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서, SW_t 는 t일까지의 최종 토양수분함량 (mm), SW_0

는 i 일 동안의 초기토양수분량 (mm), t 는 시간으로서의 일단위 (day), R_i 는 i 일 동안의 강수량 (mm), Q_{suri} 는 i 일 동안의 표면유출량 (mm), ET_i 는 i 일 동안의 증발산량 (mm), W_{seep} 은 i 일 동안의 침투량 (mm), Q_{gw} 는 i 일 동안의 회귀수량 (mm)를 나타낸다.

3. 기후변화 시나리오

가. RCP 시나리오

본 연구에서 사용된 기후변화 시나리오는 기상청에서 제공하는 RCP 4.5 및 8.5 시나리오를 사용하였다. RCP (Representative Concentration Pathways) 시나리오는 최근 온실가스 농도 변화경향을 반영하였으며, 복사강제력 (W/m^2)을 기준으로 RCP 2.6, 4.5, 6.0 그리고 8.5로 구분한다. 본 연구에서 사용된 RCP 4.5는 온실가스 저감정책이 상당히 실현되는 경우이며, RCP 8.5는 반대로 저감없이 온실가스가 배출되는 경우이다 (Korea Meteorological Administration, KMA).

기상청에서 제공받은 RCP 시나리오는 다양한 GCM (General Circulation Model) 모델 중 HadGEM2-AO (Hadley Centre Global Environmental Model version2 - Atmosphere Ocean) 을 기반으로 하고 있다. 이는 135 km 해상도의 전지구 기후변화 시나리오이며, 이를 한반도에 적용하기 위해 지역기후모델인 HadGEM3-RA를 통해 12.5 km 해상도로 상세화하여 ASCII, Binary 파일로 제공하고 있다. 본 연구에서는 기상청으로부터 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에 대한 강수량, 최고기온, 최저기온, 풍속, 습도 자료 (1979~2100년)를 ASCII파일로 제공받고 Matlab을 이용해 대상유역과 산청관측소가 포함되는 격자에서 자료를 추출하여 데이터를 구축하였다.

나. 편의보정

GCM 모형에서 예측된 기후변화 시나리오는 해상도가 낮기 때문에 상세화과정이 필요하며, 상세화된 결과는 계통적 오차가 포함하고 있다. 따라서 기후변화 시나리오의 계통적 오차를 제거하고 불확실성을 보완하기 위해 과거기간의 관측치와 모의치의 편의보정이 필요하며, 본 연구에서는 선행연구들을 통해 검증된 분위사상법을 사용하였다 (Hashino, 2007; Park et al., 2012; Hwang et al., 2013; Kim and Ryu, 2013). 분위사상법은 관측과 모의치의 누적확률분포를 이용하여 관측치의 누적확률분포 역함수에 대입하여 사상시키는 방법이다 (식 (2)).

$$x'_c = CDF_0^{-1} [CDF_{s_c}(x_c)] \quad (2)$$

여기서, CDF_0^{-1} 은 관측치의 누적확률분포 역함수이며, CDF_{s_c} 는 RCP시나리오의 과거모의자료의 누적확률분포 함수이다. x_c 는 과거 모의치이며, x'_c 는 편의보정 결과이다. 분위사상법에 적용한 누적확률분포로 Gamma 분포를 선정하였으며, Gamma 분포는 지수분포의 형태이며, 형상(shape) 및 규모(scale) 매개변수가 결합된 분포형태이다. Gamma 분포는 분위사상법 적용시 오차보정효과가 뚜렷하며 (Kwon and Kang, 2008), 특성상 변수 x 가 양의 값을 갖기 때문에 사상시 음의 값을 갖지 않는 장점을 가지고 있다 (Moon et al., 2013). 또한 매개변수 추정이 간편하며, 매개변수는 모멘트 (Method of moments, MM), 최우도법 (Maximum Likelihood, ML) 등이 있다. Gamma 분포의 누적분포함수 (Cumulative Distribution Function, CDF)는 다음의 식 (3)과 같다.

$$p = F(x|a,b) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} \int_0^x t^{a-1} e^{-\frac{t}{b}} dt \quad (3)$$

여기서, a , b 는 각각 형상 및 규모 매개변수이다. 과거 1979~2005년 동안 강수량, 최고기온, 최저기온, 풍속, 습도 등의 관측치와 기후변화 시나리오의 모의치를 Gamma 분포에 각각 적합하였다. 분위사상법을 통해 얻은 매개변수를 미래 기상자료에 적용하였다. 2006~2100년 미래 기상자료를 월별로 산정한 후 매개변수 및 Gamma 분포를 적용하여 편의보정을 수행하였으며, 강수량은 식 (4), 나머지 기후요소는 식 (5)와 같은 방법으로 자료를 보정하였다 (Kim and Ryu, 2013).

$$x'_f = x_f \times \frac{CDF_o^{-1} [CDF_f(x_f)]}{CDF_{s_c}^{-1} [CDF_f(x_f)]} \quad (4)$$

$$x'_f = x_f + \{CDF_o^{-1} [CDF_f(x_f)] - CDF_{s_c}^{-1} [CDF_f(x_f)]\} \quad (5)$$

III. 결과 및 고찰

1. SWAT 모형의 적용성 평가

Table 2는 본 연구에서 사용된 매개변수의 정의, 보정할 수 있는 값의 최대·최소 범위 그리고 보정된 매개변수 값을 나타내고 있다. 기존의 SWAT 모형을 연구했던 논문들을 참고하여 유입과 유출에 민감한 매개변수 12개를 선정하였으며, 매개변수 값은 Kim and Kim (2016)의 논문에서 산청, 신안, 창촌 소유역의 보정된 매개변수 값을 적용하였으며, 이를 제외

한 소유역은 관측값과 비교하여 시행착오법을 통해 매개변수를 보정하였다. 모형의 적합성과 상관성을 평가하기 위해 결정계수 (Determination Coefficient, R^2), 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE), Nash-Sutcliffe 효율성 지수 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient), 상대평균절대오차 (Relative Mean Absolute Error, RMAE)를 사용하였다.

Table 3은 남강댐 유역에 대한 강우량과 남강댐 유입량에 대한 모형의 보정과 검증결과를 보여주고 있다. 보정기간에 대한 실측 연평균 유입량은 1,089.9 mm이며, 모의 유입량은 1,126.4 mm로 +3.35 %의 오차를 나타내었다. 보정기간에 대한 평균적인 적합성 평가 결과 R^2 의 경우 0.78, RMSE 4.12 mm/day, NSE 0.73, RMAE 0.47 mm/day로 나타났다. 검증

Table 2 List of runoff parameters of SWAT model

Class	Parameter	Definition	Range		Calibrated values
			Min	Max	
HRU (.hru)	ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0	1	1
	EPCO	Plant uptake compensation factor	0	1	0.1
	CANMAX	Maximum canopy storage	0	100	100
Ground water (.gw)	Gw_Delay	Delay time for aquifer recharge	0	500	31
	Alpha_Bf	Baseflow recession constant	0	1	0.98
	Gwqmin	Threshold water level in shallow aquifer for base flow	0	5,000	2000
	Gw_Revap	Revap coefficient	0.02	0.2	0.02
	Revapmn	Threshold water level in shallow aquifer for revap	0	500	100
Management (.mgt)	Cn2	SCS runoff curve number	35	98	65
General data (.bsn)	EVLAI	Leaf area index at which no evaporation occurs from water surface	0	10	0.1
	CNOFF	Plant ET curve number coefficient	0.5	2	2
	SURLAG	Surface runoff lag time	0.05	24	0.2

Table 3 Calibrated and validated results for the study watershed

Year	Rainfall (mm)	Observed data		Simulated data		R^2	RMSE (mm/day)	NSE	RMAE (mm/day)
		Inflow (mm)	Inflow rate (%)	Inflow (mm)	Inflow rate (%)				
Calibration									
2003	1,935	1,809.7	93.5	1,408.4	72.8	0.80	6.15	0.74	0.70
2004	1,886	1,185.7	62.9	1,373.5	72.8	0.81	4.06	0.80	0.46
2005	1,313	687.5	52.4	877.7	66.8	0.61	3.25	0.47	0.39
2006	1,685	1,133.4	67.3	1,178.1	69.9	0.87	4.59	0.83	0.51
2007	1,776	1,373.7	77.4	1,351.0	76.1	0.81	5.28	0.78	0.51
2008	786	349.6	44.5	569.5	72.5	0.77	1.37	0.78	0.25
Mean	1,563	1,089.9	66.3	1,126.4	71.8	0.78	4.12	0.73	0.47
Validation									
2009	1,169	635.8	54.4	758.3	64.9	0.87	2.63	0.80	0.34
2010	2,190	1,473.8	67.3	1,615.5	73.8	0.71	6.15	0.71	0.66
2011	2,013	1,388.2	69.0	1,510.5	75.0	0.76	7.00	0.75	0.73
2012	1,914	1,269.6	66.3	1,378.3	72.0	0.80	5.73	0.78	0.55
2013	1,254	710.3	56.7	763.9	60.9	0.83	2.17	0.83	0.28
2014	1,539	861.7	56.0	1,067.9	69.4	0.81	3.11	0.80	0.41
Mean	1,680	1,056.6	61.6	1,182.4	69.3	0.80	4.47	0.78	0.50

기간에 대한 실측 유입량은 1,056.6 mm이며, 모의 유입량은 1,182.4 mm로 +10.6%의 오차를 나타내었다. 보정기간과 달리 실측치와 비교하여 모의치의 유입량이 높게 산출되었다. 검증기간에 대한 평균적인 적합성 평가 결과 R^2 의 경우 0.80, RMSE 4.47 mm/day, NSE 0.78, RMAE 0.50 mm/day로 나타났다.

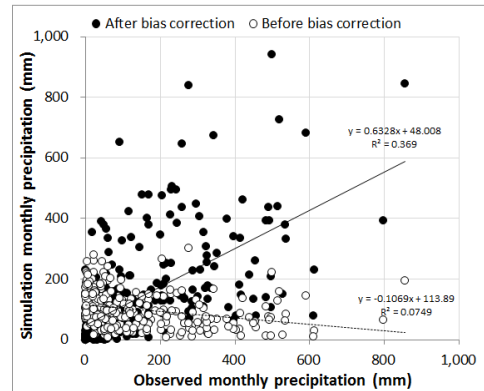
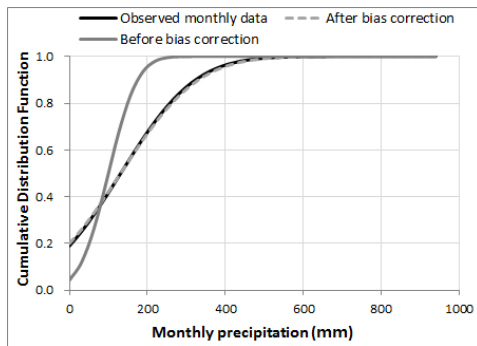
매개변수의 보정과 검증에 따른 모형의 적합성을 다양한 평가지수로 분석한 결과, R^2 , NSE 그리고 RMAE의 평균값들은 관측치와 모의치의 일치도가 높은 것을 나타내고 있으며, 매개변수 보정이 적합한 것으로 나타났다. 하지만 RMSE의 경우 일 유입량에 대한 오차가 다소 큰 것으로 보이며, 향후 SWAT CUP과 같은 객관적인 자동보정 프로그램을 통해 매개변수 보정의 신뢰성을 높이는 연구를 추진할 필요가 있다.

2. 기후변화 시나리오의 미래 전망

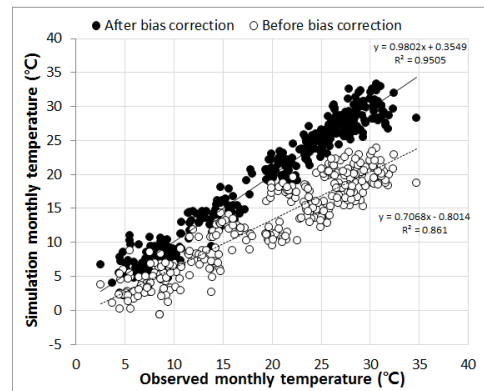
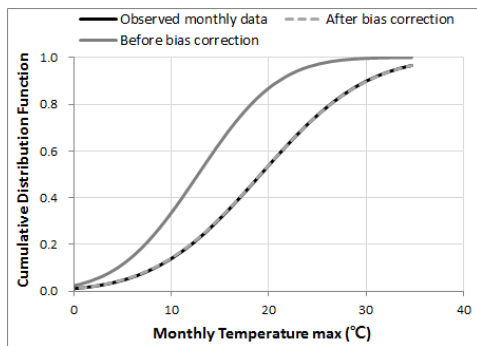
산청 기상관측소의 과거 27년 (1979~2005년) 동안의 관측자료를 이용하여 RCP 시나리오의 과거 모의자료를 편의

보정하였다. 각 기상요소 (강수량, 기온, 풍속, 습도)들은 월 자료로 산정하였으며, 월별로 누적확률값과 매개변수를 산정하였다. 모의치에 해당하는 누적확률값을 관측치 누적확률분포 함수에 사상시켜 편의보정하였으며, 관측치와 모의치의 연평균 오차가 10% 이내를 만족할 때까지 매개변수를 최적화 하였다. Fig. 3은 강수량과 최고기온자료의 편의보정 전·후 Gamma 누적확률분포 변화와 관측치와 모의치의 상관관계를 나타내었다. 누적확률곡선의 경우 편의보정 후 관측값에 대한 누적확률곡선과 일치함을 나타냈으며, 이 때에 최적화된 매개변수를 미래 자료의 편의보정에 사용하였다. 편의보정하기 전·후의 상관관계 또한 높아진 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 RCP 4.5 및 8.5 시나리오의 편의보정 전·후에 따른 각 기상요소들의 연평균값의 변화를 나타내고 있다. Table 4는 각 기상요소들의 평균 관측값과 RCP 4.5 및 8.5 시나리오의 2020년부터 2100년까지 10년 단위로 연평균 값을 나타내고 있다. 연평균 강수량의 경우 RCP 4.5 시나리오에서는



(a) Precipitation



(b) Temperature max

Fig. 3 Cumulative distribution functions and scatter plots for observed vs before and after bias correction RCP scenarios for Sancheong station

미래로 갈수록 조금씩 증가하지만 현재와 비교했을 때 큰 차이는 없었고, RCP 8.5 시나리오에서는 미래로 갈수록 증가하여 2090s (2091~2100년)에는 현재와 약 250 mm 정도의 차이를 보였다. 최고기온의 경우 현재와 비교했을 때, 미래로 갈수록 현저히 증가하는 것으로 나타났으며, 2090s에 관측자료를 기준으로 2~3 °C 증가하는 것으로 나타났다. RCP

4.5와 8.5를 비교했을 때에는 RCP 8.5 시나리오가 1 °C 더 높은 것으로 나타났다. 최저기온의 경우에도 미래로 갈수록 현저히 증가하는 것으로 나타났으며, 2090s에 관측자료를 기준으로 2 °C 증가하는 것으로 나타났다. 결과적으로 풍속과 습도의 경우 미래로 갈수록 현재와 큰 변화가 없는 것으로 나타났으며, 강수량과 기온의 경우 국내에서 선행되었던 여러

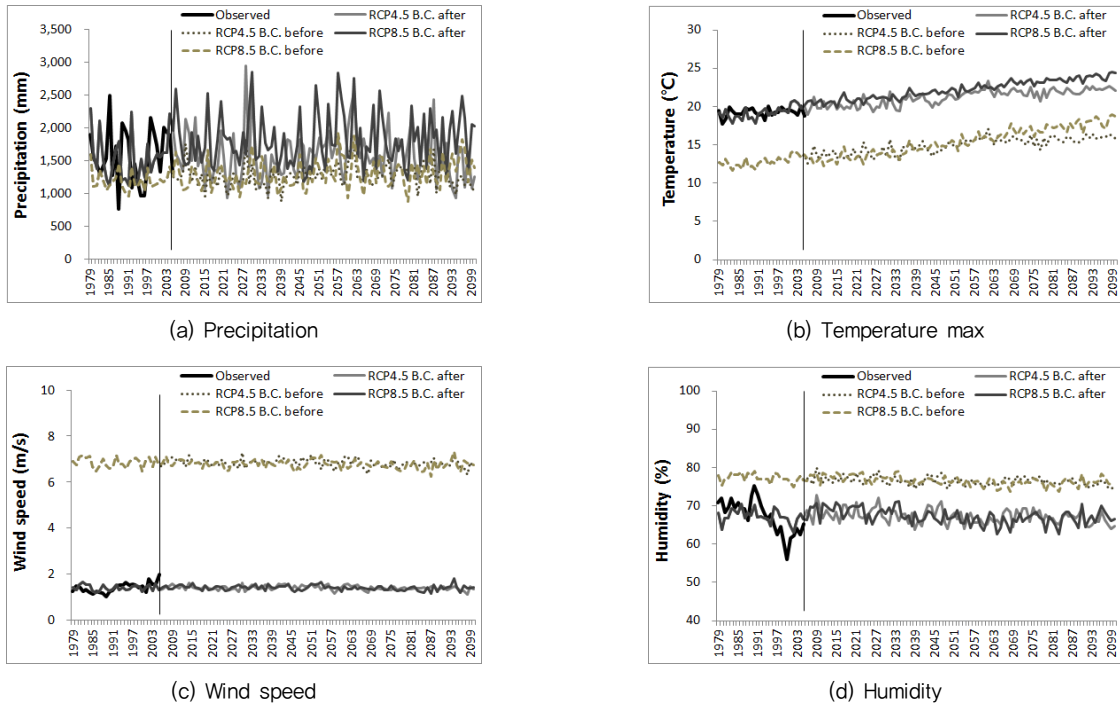


Fig. 4 Estimated future annual mean precipitation, temperature, wind speed, and humidity by RCP scenarios for Sancheong station

Table 4 Estimated future annual mean precipitation, temperature, wind speed, and humidity by RCP scenarios from 2020s to 2090s for Sancheong station

Period	Precipitation (mm)		Temperature max (°C)		Temperature min (°C)		Wind speed (m/s)		Humidity (%)	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Observed (1979~2005)	1,575		19.2		7.4		1,395		67.2	
2020s	1,646	1,893	20.2	21.1	7.9	8.7	1,372	1,402	68.2	68.0
2030s	1,341	1,735	20.8	21.4	8.7	9.0	1,392	1,422	66.6	67.8
2040s	1,589	1,612	20.9	21.9	8.7	9.5	1,468	1,377	67.6	66.9
2050s	1,683	1,984	21.7	22.3	9.5	10.0	1,404	1,456	66.3	66.1
2060s	1,739	1,863	22.1	22.8	9.9	10.5	1,410	1,367	66.7	65.7
2070s	1,673	1,715	21.7	23.3	9.4	10.9	1,348	1,344	67.6	66.7
2080s	1,594	1,844	22.0	23.5	9.8	11.3	1,378	1,329	67.1	66.4
2090s	1,344	1,908	22.4	24.0	10.2	11.8	1,338	1,424	65.5	66.9
mean	1,576	1,819	21.5	22.5	9.3	10.2	1,389	1,390	67.0	66.8

RCP 시나리오의 연구결과와 같이 편의보정 방법 및 대상유역에 따라 변화량은 차이가 있지만 현재와 2090s를 비교했을 때 강수량은 13 % 증가하고, 기온은 2~3 °C 상승하는 것으로 전망되었다.

3. 남강댐 유역의 기후변화 영향 평가

Table 5는 RCP 시나리오를 이용하여 SWAT 모형으로 모델링한 결과이며, 관측기간 (2003년부터 2014년까지)과 미래기간 (2021년부터 각 10년간)들에 대하여 강수량, 남강댐 유입량 그리고 SWAT에서 모의된 증발산량을 연평균과 변화율을 나타내고 있다. 이 때 증발산량은 수문순환을 분석하기 위해 중요한 인자로서 특히 유입량은 댐에 저류되는 양으로 증발산량과 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서 증발산량과 유입량 분석을 통해 남강댐 유역의 전반적인 수자원 평가가 가능하다.

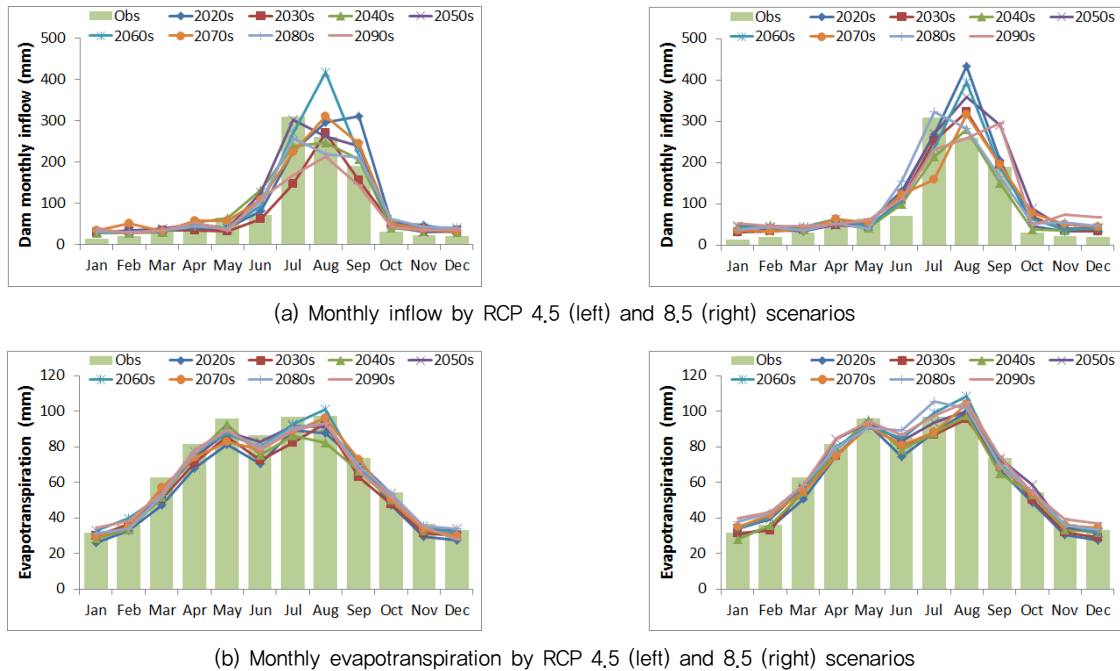
각 미래기간별 연평균 강수량의 경우 RCP 4.5에서는 21세기 중반(2040s~2080s)에 현재보다 증가하는 추세를 보이거나 총 평균값은 현재 실측값과 비교하여 변화가 거의 없는 것 (0.1 % 차이)으로 나타났으며, RCP 8.5에서는 계속적으로 증가하는 추세를 나타내어 현재대비 평균 13 % (약 250 mm) 정도 증가하는 것으로 예측되었다. 연평균 유입량의 경우 연평균 강수량과 비슷한 추세를 나타냈으며, RCP 4.5와 8.5 시나리오에서 현재대비 각 평균 4.8 % (50 mm), 19.0 % (약 200 mm) 정도 증가하는 것으로 나타났다. 연평균 증발산량은 최

고기온이 RCP 시나리오에서 각각 2~3 °C 정도 증가함에도 불구하고 RCP 4.5에서는 -6.7 % (-50 mm), RCP 8.5에서는 현재와 비슷한 차이 (-0.7 %)를 나타내었다.

Fig. 5는 관측기간과 10년 단위 미래기간의 월별 평균 남강댐 유입량과 SWAT에서 모의된 월별 평균 증발산량을 나타내고 있다. 막대그래프는 관측기간의 평균값을 나타내고 있다. 월별 남강댐 유입량의 경우 8월과 9월에 평균 유입량이 증가하는 것을 나타냈으며, RCP 4.5 시나리오보다 RCP 8.5 시나리오에서 훨씬 집중적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 8월에 유입량이 약 100~150 mm 정도 크게 증가하는 것으로 나타났다. 월별 증발산량의 경우 전반적으로 현재와 비슷한 월별 평균 추세를 나타냈으며, RCP 4.5 시나리오에서는 21세기 후반으로 갈수록 현재보다 감소한 값을 나타냈다. RCP 8.5 시나리오에서는 RCP 4.5 시나리오 결과보다는 높게 나타났으나 여전히 현재보다 감소한 값을 나타냈고, 21세기 후반으로 갈수록 현재와 비슷한 평균값을 나타냈다. 결과적으로 증발산량의 경우 오히려 감소하는 것으로 나타나 갈수기에 가뭄현상이 완화될 것으로 판단되며, 월별 평균 유입량을 현재와 비교했을 때 관개기 기간 (4월~10월)에 큰 변화를 나타내었고, 특히 7~9월에 집중되는 경향을 나타내었다. 이는 홍수, 집중호우 등으로 인한 피해가 우려되며, 기후변화에 따른 농업수자원 영향을 정밀히 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Table 5 Estimated future annual mean precipitation, inflow and evapotranspiration by RCP scenarios in Namgang dam watershed

Period	Precipitation (mm) (±%)		Dam inflow (mm) (±%)		Evapotranspiration (mm) (±%)	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Observed	1,575		1,073		773	
2020s	1,646 (+4.5)	1,893 (+20.2)	1,210 (+12.8)	1,352 (+26.0)	678 (-12.3)	719 (-6.9)
2030s	1,341 (-14.8)	1,735 (+10.2)	905 (-15.6)	1,213 (+13.0)	693 (-10.4)	732 (-5.3)
2040s	1,589 (+0.9)	1,612 (+2.4)	1,116 (+4.0)	1,083 (+0.9)	706 (-8.7)	739 (-4.3)
2050s	1,683 (+6.8)	1,984 (+25.9)	1,218 (+13.5)	1,446 (+34.7)	739 (-4.4)	783 (+1.4)
2060s	1,739 (+10.4)	1,863 (+18.3)	1,291 (+20.3)	1,303 (+21.4)	750 (-2.9)	787 (+1.9)
2070s	1,673 (+6.2)	1,715 (+8.9)	1,232 (+14.8)	1,189 (+10.8)	729 (-5.7)	763 (-1.2)
2080s	1,594 (+1.2)	1,844 (+17.1)	1,105 (+3.0)	1,287 (+19.9)	739 (-4.4)	799 (+3.4)
2090s	1,344 (-14.6)	1,908 (+21.2)	923 (-14.0)	1,342 (+25.0)	736 (-4.8)	815 (+5.5)



(a) Monthly inflow by RCP 4.5 (left) and 8.5 (right) scenarios

(b) Monthly evapotranspiration by RCP 4.5 (left) and 8.5 (right) scenarios

Fig. 5 Comparison between observed and estimated future 10-year average for (a) inflow and (b) evapotranspiration by RCP scenarios

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 SWAT 모형을 이용하여 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 8.5의 미래 기상자료 적용에 따른 남강댐의 유입량과 증발산량을 산정하고 평가하였다. SWAT 모형의 적용성을 평가한 결과, 남강댐 유입량의 연평균 유입량의 실측치는 1,139 mm이며, 모의치는 1,207.6 mm로 나타나 5.68%의 오차를 나타냈고, 평균 R^2 는 0.79, RMSE는 4.56, NSE는 0.75, RMAE는 0.50로 나타나 RMSE를 제외한 모형의 적합성 평가지표는 비교적 모형의 적용성이 높은 것으로 나타났다.

기후변화 시나리오는 산청 기상관측소 지점에 해당하는 격자자료에서 각 기상요소를 추출하였으며, 누적확률곡선의 분위사상을 통해 연평균 오차가 10% 이내가 되도록 편의보정하였다. RCP 4.5와 8.5 시나리오를 비교한 결과, RCP 8.5가 RCP 4.5보다 높게 나타나는 것으로 확인했으며, 현재보다 연평균 강수량은 300 mm, 기온은 2~3 °C 정도 증가하는 것으로 나타났다.

기후변화에 따른 남강댐 유역의 수문 영향을 평가하기 위해 미래 기간을 10년 단위로 평균하여 분석하였다. 남강댐 유역의 유입량을 예측한 결과, 21세기 중반부터 (2040s~2080s) 증가하는 것을 나타냈으며, RCP 4.5에서는 4.8%, RCP 8.5에서는 19.0% 증가하는 것으로 나타났다. 증발산량을 산정한 결과, RCP 4.5에서는 -6.7%, RCP 8.5에서는 -0.7%로 나

타나 현재와 비슷한 값을 나타냈다. 특히 증발산량의 경우 기온이 증가함에도 불구하고 21세기 초반에 현재대비 감소(50~100 mm 차이)하는 것으로 예측되었으며, 21세기 후반으로 갈수록 현재와 비슷한 값이 되는 경향을 나타냈다. 이러한 이유는 기후변화 시나리오에서 일사량 자료를 구축하지 못하였고, 이는 잠재증발산량을 계산하는 Penman 식에 반영되지 않은 것으로 판단되며, 강우빈도 및 기상 증가에 따라 다소 감소하여 모의된 것으로 사료된다. 월별 유입량을 분석한 결과 8~9월에 현재기간과 비교하여 약 100 mm 정도 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 21세기 중반에 급격히 증가하다가 21세기 후반에는 감소하여 현재와 비슷한 평균 유입량을 나타내었다. 이는 8~9월에 집중되는 강우의 영향으로 판단되며, 더불어 홍수, 집중호우의 영향과 유량 증가에 따른 고탁수의 수질악화와 같은 피해가 우려된다. 이러한 본 연구결과는 남강댐 유역의 장기적인 측면에서 댐 운영 및 수자원 관리를 위한 계획수립에 활용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 기후변화 시나리오와 SWAT 모형을 이용하여 남강댐 유역의 미래 수문 영향에 대해서 평가하였다. 하지만 기후변화 시나리오는 GCM, 상세화 기법 그리고 편의보정 방법에 따라 상이한 결과들이 나타날 수 있으며, 기본적으로 불확실성을 내포하고 있다. 다양한 매개변수 보정을 통해 모의하는 SWAT 모형의 결과 또한 불확실성을 나타낼 수 있기 때문에 본 연구 결과가 절대적이라고 판단하기에는 무리

가 있다(Park et al., 2009; Park et al., 2014). 따라서 사용하고 자하는 목적에 부합하는 자료로 구축할 수 있어야 하며, 과거 재현성을 포함한 미래 기후자료의 적용 적합성을 평가하는 과정이 최종 결과의 신뢰도를 최대한 나타낼 것이다(Cho et al., 2015). 또한 본 연구에서는 유역특성을 크게 반영하는 토지이용도가 미래 2100년까지 일정하게 유지된다는 가정을 두고 수문분석을 진행하였다. 현재에도 도시개발, 산지개간 등으로 인해 토지이용 변화가 심화되고 있으며, 이에 따른 유출량 및 토양유실량이 증가하고 있는 추세이다. 따라서 기후 변화에 따른 수문영향을 분석하기 위해 토지이용도의 변화를 고려한다면 기존연구를 보완할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- Ahn, S. R., G. A. Park, C. H. Jang, and S. J. Kim, 2013. Assessment of climate change impact on evapotranspiration and soil moisture in a mixed forest catchment using spatially calibrated SWAT model. *Journal of the Korean Water Resources Association* 46(6): 569-583 (in Korean).
- Cho, J. P., S. W. Hwang, G. D. Go, K. Y. Kim, and J. D. Kim, 2015. Assessing the climate change impacts on agricultural reservoirs using the SWAT model and CMIP5 GCMs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(5): 1-12 (in Korean).
- Hashino, T., A. A. Bradley, and S. S. Schwartz, 2007. Evaluation of bias-correction methods for ensemble streamflow volume forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 11: 939-950.
- Hwang, S. W., Y. G. Her, and S. W. Jang, 2013. Uncertainty in regional climate change impact assessment using bias-correction technique for future climate scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(4): 95-106 (in Korean).
- Jang, S. S., S. R. Ahn, H. K. Joh, and S. J. Kim, 2015. Assessment of climate change impact on Imha-dam watershed hydrologic cycle under RCP scenarios. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 18(1): 156-169 (in Korean).
- IPCC, 2013. Summary for policymakers in: Climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and Newyork, NY, USA.
- Kim, D. H. and S. M. Kim, 2016. Evaluation of SWAT model applicability for runoff estimation in Nam river dam watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58(4): 9-19 (in Korean).
- Kim, H. N., E. R. Lee, S. U. Kang, and H. G. Choi, 2015. Long-term natural flow prediction based on RCP climate change scenarios. *Korean Review of Crisis and Emergency Management* 11(5): 151-166 (in Korean).
- Kim, J. J. and J. H. Ryu, 2013. GCMs-driven snow depth and hydrological simulation for 2018 Pyeongchang winter olympics. *Journal of the Korean Water Resources Association* 46(3): 229-243 (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2016. Available at: www.kma.go.kr.
- Kwon, J. W. and B. S. Kang, 2008. Downscaling GCM climate change output using quantile mapping and artificial neural network. Proceeding of the KSCE conference & Civil Expo 2008 10: 1603-1606 (in Korean).
- Lee, J. M., Y. D. Kim, B. S. Kang, and H. S. Yi, 2012. Impact of climate change on runoff in namgang dam watershed. *Journal of the Korean Water Resources Association* 45(6): 517-529 (in Korean).
- Moon, S. J., J. J. Kim, and B. S. Kang, 2013. Bias correction for GCM long-term prediction using nonstationary quantile mapping. *Journal of the Korean Water Resources Association* 46(8): 833-842 (in Korean).
- Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams Grassland, 2009. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Soil and Water Research Laboratory – Agricultural Research Service Blackland Research Center – Texas AgriLife Research.
- Park, J. H., M. S. Kang, and I. H. Song, 2012. Bias correction of RCP-based future extreme precipitation using a quantile mapping method; For 20-wether stations of South Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(6): 133-142 (in Korean).
- Park, J. Y., H. Jung, C. H. Jang, and S. J. Kim, 2014. Assessing climate change impact on hydrological components of Yongdam dam watershed using RCP emission scenarios and SWAT model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(3): 19-29 (in Korean).
- Park, J. Y., M. J. Park, S. R. Ahn, and S. J. Kim, 2009. Watershed modeling for assessing climate change impact on stream water quality of Chungju dam watershed. *Journal of the Korean Water Resources Association* 42(10): 877-889 (in Korean).
- Soil and Water Assessment tool, 2016. Available at: swat.tamu.edu
- Water Resources Management Information System (Wamis), 2016. Available at: www.wamis.go.kr.