

RCP 기후변화 시나리오에 따른 임하댐 유역의 미래 수문순환 전망

장선숙¹ · 안소라^{1*} · 조형경¹ · 김성준¹

Assessment of Climate Change Impact on Imha-Dam Watershed Hydrologic Cycle under RCP Scenarios

Sun-Sook JANG¹ · So-Ra AHN^{1*} · Hyung-Kyung JOH¹ · Seong-Joon KIM¹

요 약

본 연구는 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 임하댐 유역(1,355.5km²)을 대상으로 RCP(AR5) 기후변화 시나리오에 따른 미래 수문순환 영향을 평가하였다. 3지점의 실측된 유출량을 활용하여 모형의 보정(2002~2007년) 및 검증(2008~2013년)을 실시하였다. 검·보정 결과 결정계수(R²)는 0.70~0.85로, Nash-Sutcliffe 모형 효율(NSE)은 0.67~0.82로 분석되어 신뢰성 있는 유출량 모의 결과를 나타내었다. 기후변화 시나리오는 기상청에서 제공하는 HadGEM3-RA 모형의 RCP 4.5 및 8.5 시나리오를 수집하여, 과거 34년(1980~2013, baseline period)의 기상자료를 기준으로 편이보정(Bias Correction)하여 SWAT 모형에 적용하였다. 기후변화 분석 결과 강수량과 평균기온이 10.8%, 4.9°C 증가하였으며, 강수량과 기온의 증가로 증발산 11.2%, 토양수분 1.9%, 지표유출 10.0%, 중간유출 12.1%, 회귀유출 18.2%이 각각 증가함에 따라 총 하천유출량이 11.2% 증가하였다.

주요어 : 기후변화, RCP 시나리오, 수문순환, 물수지, SWAT

ABSTRACT

This study was to evaluate the RCP climate change impact on hydrological components in the Imha-Dam watershed using SWAT(Soil and Water Assessment Tool) Model. The model was calibrated for six year(2002~2007) and validated for six year(2008~2013) using daily observed streamflow data at three watershed stations. The overall simulation results for the total released volume at this point appear reasonable by showing that coefficient of determination(R²) were 0.70~0.85 and Nash-Sutcliffe model efficiency

2015년 1월 8일 접수 Received on January 8, 2015 / 2015년 3월 18일 수정 Revised on March 18, 2015 / 2015년 3월 23일 심사완료 Accepted on March 23, 2014

¹ 건국대학교 사회환경시스템공학과 Department of Civil & Environmental System Engineering, Konkuk University

* Corresponding Author E-Mail : ahnsora@konkuk.ac.kr

(NSE) were 0.67–0.82 for streamflow, respectively. For future hydrologic evaluation, the HadGEM3–RA climate data by scenarios of Representative Concentration Pathway(RCP) 4.5 and 8.5 of the Korea Meteorological Administration were adopted. The biased future data were corrected using 34 years(1980~2013, baseline period) of weather data. Precipitation and temperature showed increase of 10.8% and 4.9%, respectively based on the baseline data. The impacts of future climate change on the evapotranspiration, soil moisture, surface runoff, lateral flow, return flow and streamflow showed changes of +11.2%, +1.9%, +10.0%, +12.1%, +18.2%, and +11.2%, respectively.

KEYWORDS : Climate Change, RCP Scenarios, Hydrologic Cycle, Water Balance, SWAT

서론

IPCC 5차 보고서에 따르면, 지구온난화로 인한 지구 평균기온은 지난 133년간(1880~2012년) 0.85℃ 상승하였고, 21세기 첫 10년이 가장 높았던 것으로 나타나 지구온난화가 현재에도 진행 중인 것으로 보고되고 있다(IPCC *et al.*, 2013). 지구온난화에 의한 기온 상승, 강수일수의 감소, 강수량의 규모 및 패턴의 변화는 유출량의 변화와 증발산량 증가의 원인이 되며 토양수분의 변화에 영향을 미친다(Ahn *et al.*, 2001). 이는 수문순환 과정의 변화가 지금까지와는 다른 경향으로 변화될 수 있다는 것을 내포하고 있다. 따라서 가속화되고 있는 기후변화에 따라 나타나게 될 수문순환의 변화를 정확하게 파악하고 안정적인 수자원 확보를 위한 수자원 관리가 필수적으로 이루어져야 한다.

이러한 기후변화에 의한 수문순환의 변화를 예측하기 위해서는 수문모형의 모의된 결과를 실측자료와 비교하여 검증하는 과정을 통해 수문모형의 정확도를 향상시키고 기후변화 시나리오 및 GCM(General Circulation Model)을 연계하는 과정을 거치게 된다. 기후변화 시나리오는 IPCC AR4 SRES(Special Report on Emission Scenarios) 시나리오에 이어서 최근에는 AR5 RCP(Representative Concentration Pathway) 시나리오가 제공되고 있다. 지난 10년간 수문모형과 기후변화 시나리오를 연계하

여 기후변화에 따른 수문 영향평가에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내 연구동향을 살펴보면, Park *et al.*(2010)은 소양강댐 유역을 대상으로 SWAT 모형과 SRES A2, A1B, B1 기후변화 시나리오를 이용하여 수문요소 영향을 분석하였으며, Lee *et al.*(2010)은 안동 및 임하댐 유역을 대상으로 SWAT 모형과 SRES A1B 기후변화 시나리오를 이용하여 유출 및 부유사량의 변화특성을 분석하였고, Joh *et al.*(2011)은 A1B, A2, B1 기후변화 시나리오를 이용하여 미래 강설량을 예측하였다. Jeong *et al.*(2013)은 충주댐 및 조정지댐을 포함한 유역을 대상으로 SWAT 모형과 SRES B1, A2 기후변화 시나리오를 이용하여 저수량에 미치는 영향평가를 분석하였고, Ahn *et al.*(2013)은 설마천 유역을 대상으로 SWAT 모형과 RCP 4.5, 8.5 기후변화 시나리오를 이용하여 증발산과 토양수분에 미치는 영향평가를 분석하였으며, Park *et al.*(2014)은 SWAT 모형을 이용하여 RCP 4.5, 8.5 기후변화 시나리오를 이용하여 용담댐 유역의 수문요소에 미치는 영향에 대해 분석하였고, Kim *et al.*(2014)은 격자기반의 분포형 모델과 SRES A1B 기후변화 시나리오를 이용하여 미래 기후변화에 따른 수문영향을 평가하였다. 기후변화에 따른 수문학적 변화모의에서 각 수문요소에 대한 모의가 가능하며 장기 강우-유출 모형인 SWAT모형이 많이 활용되고 있다. 다음으로 국외 연구동향을 살펴보면, Andersen *et al.*(2006)은 Gjern강 유역을 대상으로 SRES

A2 시나리오를 이용하여 기후변화에 따른 수문 및 수질의 영향을 분석하였고, Su *et al.* (2014)은 중국의 Songhuajiang강 유역을 대상으로 SRES 및 RCP 시나리오에 따른 강수량과 유출량 변화를 비교 분석하였으며, Chen *et al.* (2014)은 중국 동부 유역을 대상으로 RCP 2.6, 4.5 및 8.5 시나리오를 이용하여 몬순지역에서의 수문 변화를 분석하였다.

따라서 본 연구에서는 기후변화 영향평가에 많이 활용되는 SWAT 모형을 선정하였으며, 임하댐 유역을 대상으로 실측 유출 자료를 이용한 모형의 검보정을 통해 유역의 수문순환을 재현하여 정확도를 향상시키고, 기상청에서 제공하는 RCP 기후변화 시나리오를 적용하여 미래 기후변화에 의한 수문순환 전망을 평가하고자 한다. 본 연구는 기존 연구와는 달리 강우량이 줄어드는 유역 특성이 있기 때문에 미래 수문요소별(증발산, 토양수분, 지표유출, 중간유출, 기저유출, 하천유출) 변화를 분석하여 수문순환 전망을 평가하고자 한다. 그림 1은 본 연구의 흐름도이다.

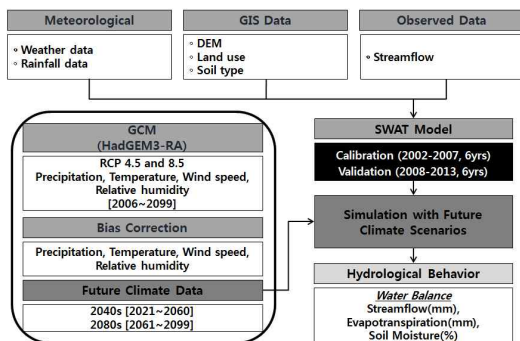


FIGURE 1. Flow chart of this study

자료 및 방법

1. SWAT 모형의 개요

SWAT 모형은 물리적 기반의 준 분포형 장기 강우-유출 모형으로 미국 농무성 농업연구소(United States Department of Agriculture; USDA)에서 개발한 모형이며, 대

규모의 복잡한 유역에서 장시간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출을 예측하기 위해 개발된 유역 모형이다. SWAT 모형은 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적의 4가지 부모형으로 구성되어있다. 이 중 수문 부모형에서는 토양과 토지이용조건에 의해 결정되는 수문 반응단위(Hydrologic Response Unit; HRU)를 기본으로 SCS(Soil Conservation Service) 유출곡선법과 Green & Ampt 침투법을 이용하여 지표유출량을 산정하며, 측방유출량은 동역학적 저류모형(Kinematic Storage Model)을 이용한다. 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형 저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 잠재증발산량을 산정하기 위하여 Hargreaves 방법, Priestley-Taylor 방법과 Penman-Monteith 방법을 제공하며, 작물과 토양의 증발산을 분리하여 모의하기 위해 Ritchie 방법을 이용한다 (Park *et al.*, 2014). SWAT 모형의 이론은 Arnold *et al.* (1996)와 Neitsch *et al.* (2001)에 자세히 언급되어 있다.

SWAT 모형에서의 물수지는 중요한 요소이며 모형에 의해 모의되는 수문순환을 정확히 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수 등에 대한 모의를 각 수문반응단위별로 계산할 수 있다. SWAT 모형에서 사용되는 물수지 방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{secp} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서, SW_t 는 최종토양수분량(mm), SW_0 는 초기토양수분량(mm), t 는 시간(일), R_{day} 는 i 일의 강수량(mm), Q_{surf} 는 i 일의 지표유출량(mm), E_a 는 i 일의 증발산량(mm), W_{secp} 는 i 일의 토양면으로부터 투수층으로의 총투수량(mm), Q_{gw} 는 i 일의 회귀수량(mm)이다.

2. RCP 기후변화 시나리오

2007년 IPCC 4차 보고서에서 인구, 경제성장, 기술 등 미래 온실가스 배출에 영향을 미치는 사회경제적 요소들을 다루어 크게 4개의 SRES(Special Report on Emission Scenario, SRES) 시나리오(A1, A2, B1, B2)로 구분한 자료인 반면, IPCC 5차 보고서에서 AR5의 RCP는 온실가스와 에어로졸 등의 영향뿐만 아니라 인간의 활동이 대기에 미치는 요인을 다루어 온실가스농도를 산정하였다. RCP 시나리오의 SRES 자료의 노후화 및 해상도 문제를 보완하고 정확도 향상 및 다양한 분야에서 활용할 수 있는 새로운 시나리오의 필요성에 의해 개발되었으며, 복사강제력(radiative forcing)에 따라 4개의 RCP 시나리오(8.5, 6.0, 4.5, 2.6)로 구분된다. 이 중 RCP 4.5(CO₂ 540ppm)와 RCP 8.5(CO₂ 940ppm) 시나리오를 이용하였으며, RCP 4.5는 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우이고, RCP 8.5는 현재 추세로 저감 없이 온실가스가 배출되는 시나리오이다. 기상청에서 제공하는 HadGEM3-RA 모형을 사용하였으며 지역기후 모형(Regional Climate Model, RCM)의 모의 결과 값을 이용하였다. HadGEM3-RA 기후모형의 공간해상도는 12.5 km이고, 일별 강수량, 최고기온, 평균기온, 최저기온, 상대습도, 풍속 자료(2006~2009년)를 제공하고 있다(NIMR, 2011). 한편, 기후모형의 결과물을 연구에 사용할 때에는 신뢰성을 높이기 위하여 기후모형 결과를 현재 관측된 자료와 비교하여 확인하는 과정이 필요하다(Carter *et al.*, 1999). 따라서 본 연구에서는 임하댐유역의 과거 34년(1980~2013년, Baseline) 기상자료와 RCP 4.5와 8.5 시나리오 자료(2006~2009년)를 비

교해본 결과 중복되는 기간(2006년~2013년)에 대하여 최고기온은 현재보다 낮게 추정되었고, 최저기온은 높게 추정되었으며, 강수량의 경우에는 일률적으로 과소 추정된 것을 확인할 수 있었다. 유역규모의 기후변화 시나리오를 작성하기 위해 Alcamo *et al.*(1997)이 사용한 편이보정(Bias Correction) 방법을 이용하여 기온과 강수에 대해 식 (2)와 (3)을 이용하여 통계적인 유사성을 가지도록 보정을 실시하였다(Park *et al.*, 2009). 기온의 경우,

$$T'_{GCM,fut} = T_{meas} + (\overline{T_{GCM,fut}} - \overline{T_{GCM,his}}) \quad (2)$$

여기서, $T'_{GCM,fut}$ 는 보정된 미래 기온, T_{meas} 는 과거 기준기간 동안 관측된 기온, $\overline{T_{GCM,fut}}$ 는 GCM에서 모의된 미래 기온에 대한 평균값, $\overline{T_{GCM,his}}$ 는 과거 기준기간 동안의 GCM에서 모의된 기온의 평균을 의미한다. 강수량의 경우,

$$P'_{GCM,fut} = P_{meas} \times (\overline{P_{GCM,fut}} / \overline{P_{GCM,his}}) \quad (3)$$

여기서, $P'_{GCM,fut}$ 는 보정된 미래의 강수량, P_{meas} 는 과거 기준기간 동안 관측된 강수량, $\overline{P_{GCM,fut}}$ 는 GCM에서 모의된 미래 강수량에 대한 평균값, $\overline{P_{GCM,his}}$ 는 과거 기준기간 동안의 GCM에서 모의된 강수량의 평균을 의미한다. 편이보정 기법에 의해 각 시나리오별로 추출된 보정계수는 표 1과 같다. 그림 2는 보정된 RCP 4.5 및 8.5 시나리오의 강수량, 최저기온 및 최고기온을 보정전과 비교하여 나타내었다.

TABLE 1. Calculated bias correction factor by GCM data

Scenarios	PCP	Tmin	Tmean	Tmax	RH	WS	
HadGEM3-RA	4.5	1.15	-4.62	-0.64	4.29	0.92	0.35
	8.5	1.30	-3.93	0.02	4.92	0.93	1.30

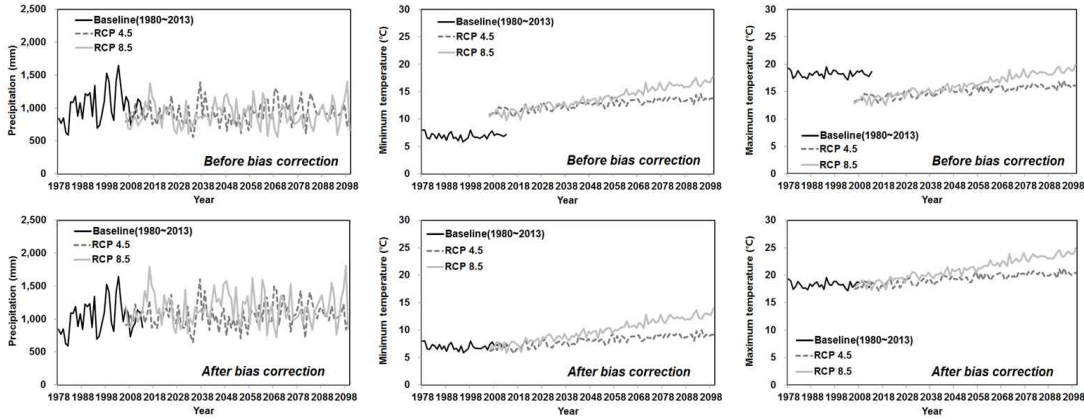


FIGURE 2. Adjusted temperature and precipitation data for GCM data using historical observed data

3. 대상유역 및 입력자료

본 연구의 대상유역은 낙동강 상류에 위치한 북위 36° 00′ ~ 36° 40′, 동경 128° 40′ ~ 129° 20′의 범위에 위치하고 있으며 행정구역상 경북 안동시, 영양군, 청송군의 경계에 걸쳐있다(그림 3). 유역면적은 1,355.5km²로 대부분 산지와 농업지역으로 각각 80%, 15%를 차지하고 있으며 유역의 연평균 기온은 12.6°C이고, 연평균 강수량은 851mm로 전국 연평균 강수량인 1162.8mm에 비해 적은편이다. 임하댐

은 낙동강 중·하류부와 남동해안지역의 장기적인 용수수급 대책과 홍수피해 방지를 위해 건설된 다목적댐 저수지이다. Park *et al.*(2013)에 의하면 임하댐은 상대적으로 유입량이 부족하고 댐 용량이 작아 용수공급계획에 어려움을 겪고 있으며 세로로 긴 형태의 유역이지만 동쪽에서 서쪽으로 유량이 흘러내려오기 때문에 도달시간이 짧아 홍수기에는 불필요한 방류량이 발생한다고 제시하고 있다. 따라서 기후변화에 따른 미래 수문순환 변화를 파악하

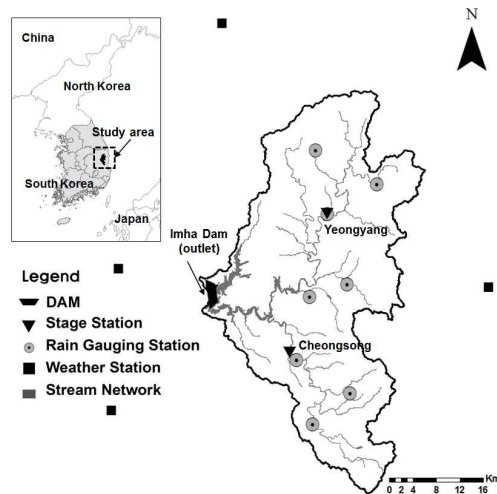


FIGURE 3. Location of the Imha dam watershed and observation stations

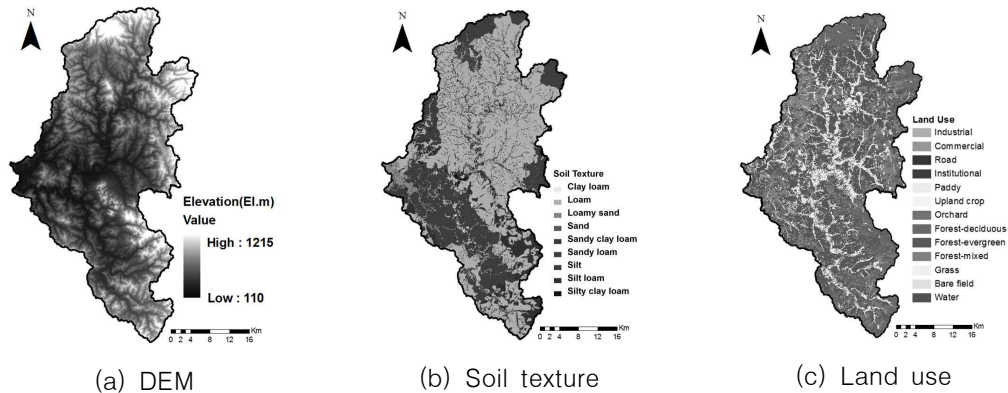


FIGURE 4. Spatial input data for model setup

여 수자원 관리가 필요하기 때문에 대상유역으로 선정하였다.

SWAT 모형의 지형입력 자료가 되는 DEM (Digital Elevation Model, DEM)은 국토지리정보원의 1/5,000 수치지도로부터 검수과정을 거쳐 격자크기 30m를 제작하였다(그림 4(a)). 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 이용하여 미국 NRCS(The U.S. Natural Resource Conservation Service formerly the Soil Conservation Service) 토양분류 기준(Soil Survey Staff, 1996)에 따른 수문학적 토양그룹 A, B, C, D로 분류하였다. 농업과학기술원의 자료를 사용하여 토양층의 개수 및 토양층별 깊이를 구축하였으며 토양층의 유효수분량, 포화수리전도도 등의 물리적 값들은 Saxton *et al.*(1986)의 결과를 토대로 SWAT에서 요구하는 형식의 토양 속성값을 부여하였다(그림 4(b)). 토지이용도는 환경부가 제공하는 중분류 토지이용 항목에 대하여 SWAT 모형에서 요구하는 LULC(Land Use/Land Cover)으로 재작성 하였다(그림 4(c)). 임하댐 유역에서의 관측소 현황은 5개의 기상 관측소(봉화, 안동, 영덕, 의성, 포항), 8개의 우량관측소 및 8개의 수위·유량관측소가 위치해있으며 1978년부터 2013년까지의 일별 강우량(mm), 기온(°C), 일사량(MJ/m²), 풍속(m/s) 및 상대습도(%) 자료를 기상청으로부터

제공받아 모형의 기상입력 자료로 사용하였다. 모형의 적용성 평가를 위해서 유역 출구지점인 임하댐(Imha Dam, IH) 지점과 상류유역에 해당하는 영양(Yeongyang, YY) 지점 및 청송(Cheongsong, CS) 지점에 대하여 수자원공사에서 제공하는 댐 유입량 자료와 국가 수자원 관리 종합정보시스템에서 제공하는 일별 유출량 자료를 사용하였다.

결과 및 고찰

1. SWAT 모형의 적용성 평가

본 연구에서는 2000~2001년을 모형의 warm up 기간으로 설정하였고, 실측 자료가 실행된 시점으로 모형의 보정 기간은 2002~2007년, 모형의 검증기간은 2008~2013년으로 설정하였다. 먼저, 상류유역인 영양(YY)과 청송(CS)을 보정 한 후 최종유역출구인 임하댐(IH)을 보정하였으며, SWAT 모형의 보정을 위해 총유출량, 침투유량 및 감수곡선 형태에 영향을 주는 매개변수를 시행착오 방법으로 최적화하였고 민감도 분석을 실시하였다. 그 결과 지하수 지체시간인 GW_DELAY, 기저유출 감수상수인 ALPHA_BF, 회귀수 발생에 대한 얇은 대수층 임계 깊이인 GWQMIN 변수가 가장 민감한 것으로 나타났다. 3지점에 대하여 표 2는 모형 보정 매개변수이며, 그림 5는 유출량에 대한

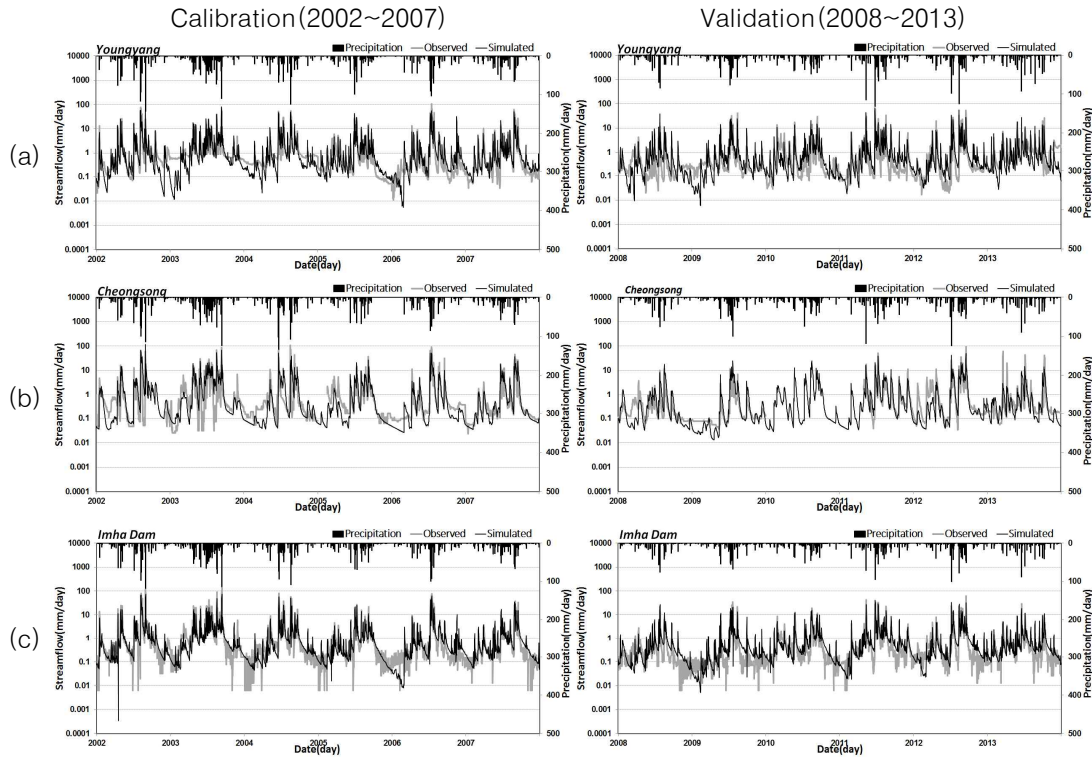


FIGURE 5. Comparison of the observed and SWAT-simulated daily streamflow at (a) YY, (b) CS, and (c) IH stations

TABLE 2. The calibrated SWAT model parameters

Parameter	Definition	Range		YY	CS	IH (outlet)
		min	max			
GW_DELAY	Groundwater delay(days)	0	500	150	2	10
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor(days)	0	1	1	0.5	–
GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.02	0.2	0.2	0.02	0.2
GWQMIN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for return flow to occur(mmH ₂ O)	0	5000	500	100	50
REVAPMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur(mmH ₂ O)	0	500	500	–	500
RCHRF_DP	Deep aquifer percolation fraction	0	1	0.5	0.01	0.5
CN2	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II	35	98	–	–	+20
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0	1	1	–	1
SOL_AWC	Available water capacity of first soil layer(mm/mm)	0	1	×0.5	–	×0.1
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity of first soil(mm/hr)	0	2000	×1.5	×0.125	×0.125
CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium (mm/hr)	0.01	500	20	25	–
CANMAX	Maximum canopy storage(mmH ₂ O)	0	100	–	–	25
SLSOIL	Hillslope length	0	150	–	50	150

TABLE 3. Statistical summary of the model calibration and validation results for streamflow at three station

Gauging station	Static	Calibration (2002~2007)	Validation (2008~2013)	All data	
YY	Precipitation(mm/yr)	1124.8	942.0	1005.6	
	Streamflow(mm/yr)	Obs.	656.0	496.6	583.5
		Sim.	669.5	489.3	587.6
	Runoff ratio(%)	Obs.	58.4	52.7	55.8
		Sim.	59.1	51.5	55.6
	Evaluation criteria	R2	0.68	0.49	0.60
		NSE	0.58	0.38	0.49
RMSE		3.62	2.78	3.24	
CS	Precipitation(mm/yr)	1165.6	1017.0	1050.7	
	Streamflow(mm/yr)	Obs.	665.2	540.1	535.4
		Sim.	684.7	501.8	557.4
	Runoff ratio(%)	Obs.	57.2	53.4	49.2
		Sim.	57.8	48.7	51.1
	Evaluation criteria	R2	0.66	0.52	0.61
		NSE	0.61	0.51	0.58
RMSE		3.91	3.47	3.76	
IH (outlet)	Precipitation(mm/yr)	1208.0	901.4	1054.7	
	Streamflow(mm/yr)	Obs.	758.3	342.8	550.6
		Sim.	664.9	417.9	541.4
	Runoff ratio(%)	Obs.	60.4	36.5	48.5
		Sim.	54.2	45.6	49.9
	Evaluation criteria	R2	0.85	0.70	0.78
		NSE	0.82	0.67	0.75
RMSE		2.88	1.73	2.36	

수문곡선을 비교한 것으로, 각 지점에 대한 통계분석결과를 표 3에 정리하였다. 영양, 청송, 임하댐 지점에서의 검보정 결과에 따른 결정계수(R^2)는 0.60, 0.61, 0.78, 평균제곱근오차(RMSE)는 3.24, 3.76, 2.36, 모형 효율성계수(NSE)는 0.49, 0.58, 0.75으로 분석되었다. 모의값과 실측값의 통계분석 결과로부터 SWAT 모형은 임하댐 유역의 유출특성을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.

$$RMSE = \left\{ \left[\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \right] / N \right\}^{0.5} \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

여기서, P 는 모의값, O 는 관측값, \bar{O} 는 관측값의 평균, $i=1,2,\dots,N$, 이때 N 은 총 모의기간이다.

2. 미래 기후변화 전망

본 연구에서는 다양한 기후요소(강수량, 최저기온, 평균기온, 최대기온, 상대습도 및 풍속)에 대하여 편이보정을 실시하였다. Baseline 기간은 1980~2013년이며, 분석기간은 2040s(2021~2060), 2080s(2061~2099)의 2개의 기간으로 설정하여 RCP 4.5 및 8.5 시나리오별 결과 값을 분석하였다. RCP 4.5와 8.5 시나리오에 대한 기후요소별 변화를 그림 6에 월별로 도시화하여 나타내었으며, 표 4는 연별 변화를 정리하였다. 먼저, 강수량 변화를 살펴보면, RCP 4.5와 8.5 시나리오 모두 여름철(6월~8

월)에 특히 50% 감소하였고, 봄철(3월~5월), 가을철(9월~11월) 및 겨울철(12월~2월)에는 대부분 50%이상 강수량이 증가하는 것으로 나타났다. 평균기온은 RCP 4.5에서 6월~8월은 1.0°C 감소하였으나 1월~3월, 9월~12월은 1.0~4.0°C 증가로 두드러지게 나타났다. RCP 8.5에서는 Baseline보다 2040s, 2080s 에서

평균기온이 1.0~8.0°C 증가하였다. RCP 4.5와 8.5 시나리오에서 특히 가을과 겨울에 증가폭이 크게 증가하였으며, 전반적으로 CO2 농도가 높은 RCP 8.5 시나리오에서 기온과 강수량이 더 큰 변화를 보이는 것으로 나타났다. 동시에 상대습도와 풍속은 Baseline과 비슷한 값과 패턴을 보이고 있다.

TABLE 4. Change in future climate compared to the baseline(1980~2013)

Period	Scenario	PCP(mm)	Tmin(°C)	Tmean(°C)	Tmax(°C)	RH(%)	WS(m/s)	
Annual	Baseline	1021.5	6.9	12.1	18.2	66.9	1.9	
	RCP 4.5	2040s	1000.9 (-2.1%)	7.7 (+0.8°C)	13.0 (+0.8°C)	19.0 (+0.8°C)	66.8 (-0.1%)	1.9 (+0.0m/s)
		2080s	1088.7 (+6.2%)	8.8 (+1.9°C)	14.0 (+1.9°C)	20.1 (+1.9°C)	66.3 (-0.6%)	1.9 (+0.0m/s)
	RCP 8.5	2040s	1145.4 (+10.8%)	9.0 (+2.1°C)	14.2 (+2.1°C)	20.2 (+2.0°C)	67.2 (+0.3%)	1.9 (+0.0m/s)
		2080s	1115.4 (+8.4%)	11.9 (+5.0°C)	17.0 (+4.9°C)	23.0 (+4.8°C)	66.4 (-0.5%)	1.8 (-0.1m/s)

* PCP: Precipitation, Tmin: Minimum temperature, Tmean: Mean temperature, Tmax: Maximum temperature, RH: Relative humidity, WS: Wind speed

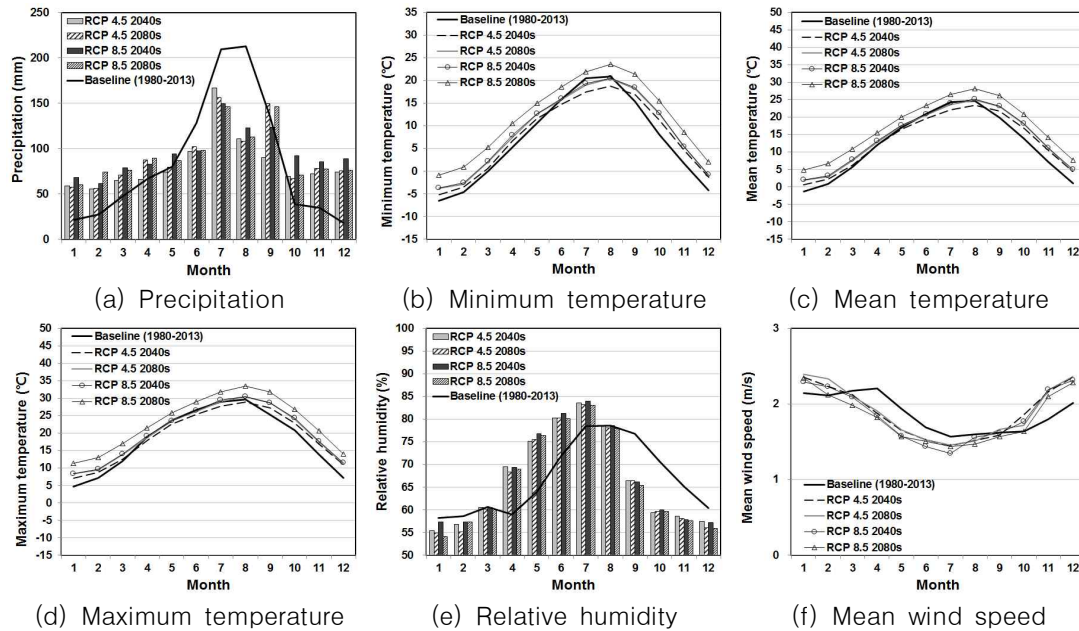


FIGURE 6. Changes in the timing and magnitude of monthly climate under the RCP 4.5(left graphs) and 8.5(right graphs) scenarios in the 2040s and 2080s

표 4의 결과로부터 임하댐 유역의 미래 연평균 강수량은 -2.1%~+10.8%의 변화를 보였으며, 대체로 증가하는 경향을 보였다. 평균기온은 0.8~5.0℃ 증가하는 경향을 보였다. NIMR (2011) 연구결과에 따르면 RCP 8.5 시나리오에서 21세기 말 한반도 평균기온과 강수량은 각각 6.0℃, 20.4% 증가할 것이라 전망하였고, Park *et al.*(2014)은 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에서 충주댐유역에의 평균기온과 강수량은 각각 4.7℃, 22.5% 증가하는 것으로 한반도의 평균값과 유사하게 전망하였다. 본 연구의 임하댐 유역은 기후변화 시나리오에 따른 미래 평균기온은 한반도의 평균값과 유사하게 나타났으나 강수량의 변화는 한반도의 평균값보다 작게 나타났다. 임하댐 유역의 1월~9월 강수량을 살펴보면 과거 10년(2003년~2012년) 동안 평균 강수량은 1,015.7mm인 반면 2008~2013년의 강수량은 과거 10년 평균 강수량 보다 줄어들었으며, 2008년~2013년의 평균 강수량은 851.6mm이다. 그중에서도 2013년 강수량은 746.3mm으로 특히 줄어드는 것으로 나타났다. 이러한 변화는 앞서 분석된 기후변화 시나리오 값의 편이보정 과정에 반영되었고, 여름철 강수량이 미래에 감소하는 경향은 지역에 따라 차이가 있다고 판단되어진다.

3. 미래 기후변화에 따른 수문순환 전망

SWAT 모형을 활용하여 모형의 적용성을 평

가한 후, 미래 기후변화 RCP 시나리오 자료를 적용하여 수문요소인 증발산(Evapotranspiration, ET), 토양수분(Soil Moisture, SM), 지표유출(Surface Runoff, SR), 중간유출(Lateral Flow, LAT), 회귀유출(Return Flow, RF) 및 하천유출(Streamflow, ST)에 대한 변동성을 분석하였다. 그림 7은 각 수문요소에 대한 월별 변화를 도시화하여 나타내었으며, 표 5는 연별 변화를 정리하였다. 먼저, 그림 7 및 표 5에서 미래 증발산량의 증가가 두드러지게 나타났고, 토양수분은 강수량의 증가 및 감소에 따라 유사한 패턴이 나타났다. 유출성분별 변화를 살펴 보면, 강수량의 양과 패턴의 변화가 지표유출량 및 기저유출량(baseflow=LAT+RF)과 비슷한 경향을 보이면서 6~8월은 유출량 감소로 이어졌으나, 총 유출량은 증가하는 것으로 나타났다. 그림 8(a)는 RCP 4.5 시나리오를 적용한 임하댐 유역의 물수지 변화를 도시화 한 것이다. RCP 4.5 2040s에서 강수량이 2.1% 감소함에 따라 지표유출량, 중간유출량이 각각 17.0%, 4.2% 감소하였으나 회귀유출량은 2.5% 증가하는 것으로 나타났고 하천유출량은 7.7% 감소하였다. 증발산량은 3.3% 증가하였으며, 토양수분은 큰 차이를 보이지 않았다. RCP 4.5 2080s에서는 강수량, 증발산량, 토양수분이 각각 6.2%, 6.4%, 1.4% 증가함에 따라 중간유출량, 회귀유출량, 하천유출량이 각각 6.9%, 10.1%, 4.4% 증가하였으나 지표유출량

TABLE 5. Change in future hydrology compared to the baseline(1980~2013)

Period	Scenario	PCP(mm)	ET(mm)	SW(%)	SR(mm)	LAT(mm)	RF(mm)	ST(mm)	
Annual	Baseline	1021.5	394.5	27.5	253.7	91.7	163.7	509.2	
	RCP 4.5	2040s	1000.9 (-2.1 %)	408.0 (+3.3 %)	28.4 (+0.9 %)	216.9 (-17.0 %)	88.0 (-4.2 %)	167.9 (+2.5 %)	472.8 (-7.7 %)
		2080s	1088.7 (+6.2 %)	421.3 (+6.4 %)	28.9 (+1.4 %)	252.0 (-0.7 %)	98.6 (+6.9 %)	182.0 (+10.1 %)	532.5 (+4.4 %)
	RCP 8.5	2040s	1145.4 (+10.8 %)	427.9 (+7.8 %)	29.3 (+1.9 %)	268.6 (+5.6 %)	104.4 (+12.1 %)	200.2 (+18.2 %)	573.2 (+11.2 %)
		2080s	1115.4 (+8.4 %)	444.4 (+11.2 %)	26.4 (-1.1 %)	281.8 (+10.0 %)	96.5 (+4.9 %)	165.5 (+1.1 %)	543.7 (+6.4 %)

* Precipitation(P), Evapotranspiration(ET), Soil moisture(SM), Surface runoff(SR), Lateral flow(LAT), Return flow(RF) and Streamflow(ST)

은 변화가 없었다. 그림 8(b)는 RCP 8.5 시나리오를 적용한 임하댐 유역의 물수지 변화를 도시화 한 것이다. RCP 8.5 2040s에서 강수량, 증발산량, 토양수분이 각각 10.8%, 7.8%, 1.9% 증가함에 따라 지표유출량, 중간유출량, 회귀유출량, 하천유출량이 각각 5.6%, 12.1%, 18.2%, 11.2% 증가하였고, RCP 8.5 2080s에

서는 강수량, 증발산량이 각각 8.4%, 11.2% 증가로 지표유출량, 중간유출량, 회귀유출량, 하천유출량은 각각 10.0%, 4.9%, 1.1%, 6.4% 증가하였다.

Baseline과 비교하였을 때 미래로 갈수록 강수량이 증가하는 경향이 있었지만 RCP 4.5 시나리오의 2040s는 강수량이 감소하는 경향에

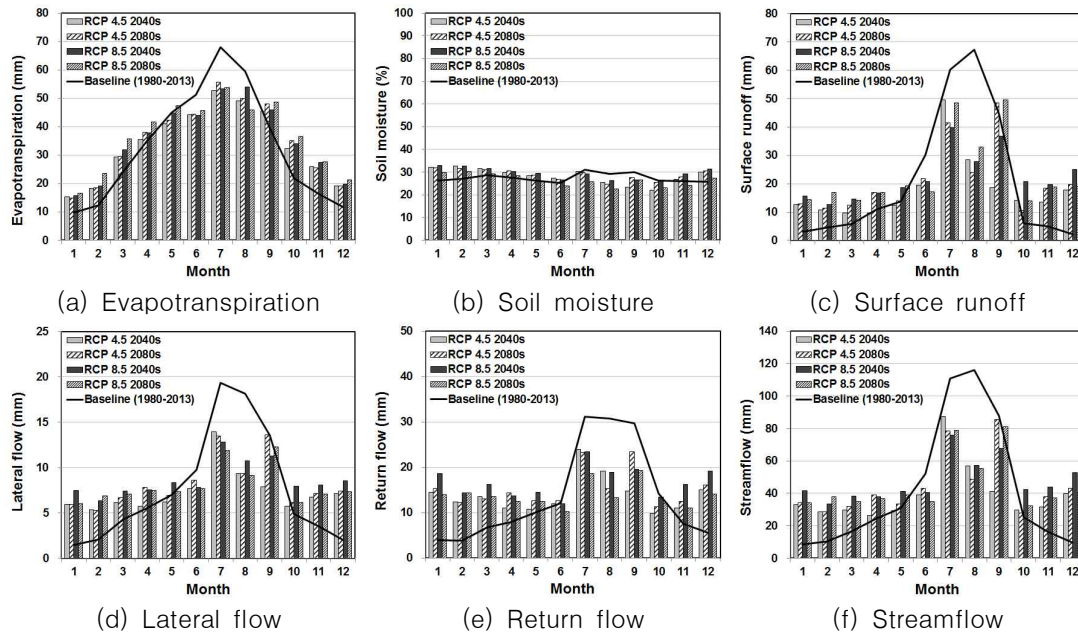


FIGURE 7. Future climate change impact on hydrology components under the RCP 4.5 and 8.5 scenarios in the 2040s and 2080s

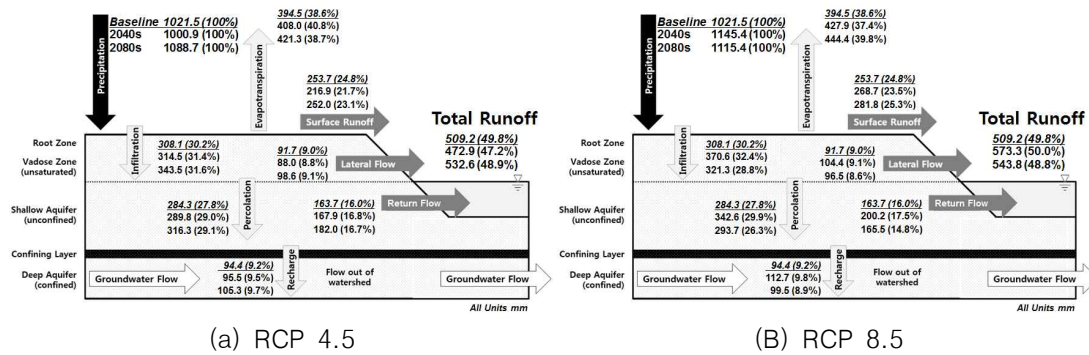


FIGURE 8. Watershed water balance in the 2040s and 2080s under the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios

영향을 받아 지표유출과 기저유출의 감소로 이어져 총유출량이 감소하였다. 반면 RCP 8.5 시나리오는 Baseline보다 미래 강수량의 증가로 지표유출, 기저유출 및 총 유출량이 증가하는 경향이 나타났다. 증발산량은 높아지는 기온의 영향을 받아 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에서 Baseline 보다 증가하였다. 강수량을 100%로 했을 때 지표유출, 중간유출, 회귀유출 및 하천유출의 구성 비율은 Baseline 보다 증가했음에도 불구하고 강수량 100%에 대한 수문순환에서 차지하는 비율은 유지하거나 감소하였다. 마찬가지로 증발산량과 토양수분도 미래에 증가했음에도 불구하고 수문순환 구성비율을 유지하는 것으로 나타났다. 미래 기후변화에 따른 유역 물수지의 변화는 있지만 구성비율의 변화는 유지하거나 크게 바뀌지 않을 것으로 전망되었다.

결론

본 연구에서는 임하댐 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 검보정을 통해 수문순환과정을 모의한 후, HadGEM3-RA 모형의 결과로부터 RCP 4.5 및 8.5 기후변화 시나리오에 대한 편이보정을 통한 자료를 적용하였다. Baseline(1980~2013년)을 기준으로 2040s(2021~2060년), 2080s(2061~2099년)의 2개의 기간에 대하여 수문요소별 변화 특성을 비교분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 수문모의 및 다지점 검·보정이 가능한 SWAT 모형을 선정하였다. 임하댐 유역의 3개 지점(영양, 청송, 임하댐)의 실측유량을 이용하여 보정(2002~2007년) 및 검증(2008~2013년)을 통해 모형의 적용성 평가 결과, 3개 지점에서 년 평균 일 유출량에 대한 R2는 각각 0.60, 0.61, 0.78이고, NSE는 각각 0.49, 0.58, 0.75이며, RMSE는 각각 3.24, 3.76, 2.36 mm/day로 실측치와 관측치의 유출량은 유사성이 있는 것으로 나타났으며, 임하댐 유역의 수문을 적절히 재현함을 알 수 있었다.

둘째, 미래 기후변화 시나리오를 적용하기 위해 IPCC 5차보고서의 RCP 4.5 및 8.5 기후변화 시나리오를 이용하였고, 기상청에서 제공되


는 RCP 4.5와 8.5 기후변화 시나리오 자료는 2006~2099년까지 제공되며 2006~2013년까지 중복되는 기간과 통계적인 유사성을 가지도록 편이보정을 하였다.

셋째, RCP 4.5 및 8.5 시나리오별 기후변화를 분석한 결과 Baseline 기준으로 RCP 4.5 시나리오 경우 평균기온은 0.8~1.9℃, 강수량은 -2.1~6.2%로 대체로 증가하고, RCP 8.5 시나리오는 평균기온 2.1~4.9℃ 증가, 강수량은 8.4~10.8% 증가하였다. 미래로 갈수록, CO2농도가 높은 RCP 8.5 시나리오가 RCP 4.5 시나리오 보다 강수량과 기온의 크기와 변화폭이 두드러지게 나타났다.

넷째, RCP 4.5 및 8.5 시나리오별 수문순환의 변화를 분석한 결과 강수량의 변화가 6.2%, 10.8% 증가함에 따라, 증발산량의 변화는 6.4%, 11.2% 증가, 토양수분의 변화는 1.4%, 1.9% 증가하였다. 미래 유출성분별 변화는 지표유출량이 17.0%, 10.0% 증가, 중간유출량은 6.9%, 12.1% 증가, 회귀수량은 10.1%, 18.2% 증가함에 따라, 하천유출량의 변화는 4.4%, 11.2% 증가하였다. 강수패턴은 봄, 가을 및 겨울에 50% 증가하는 반면 여름은 50% 감소한다. 이러한 강수패턴은 수문순환 변화에 영향을 미치게 된다.

본 연구를 통해 강수량 증가는 수문요소의 증가로 이어졌고, 생·공용수, 관개용수, 하천유지용수 및 발전용수에 대한 수요가 증가할 것으로 기대 되는 가운데(MLTM, 2006), 미래 강수량이 여름에 집중되는 한반도의 패턴 보다 4계절에 분포함에 따라 더욱 용수 관리가 필요하다. 미래 기후변화에 따른 봄, 가을 및 겨울철의 강수량이 증가로 인한 수문 패턴에 따른 적절한 방류 조정이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비 지원(14AWMP-B082564-01)에 의해 수행되었음. 

REFERENCES

- Ahn, J.H., C.S. Yoo and Y.N. Yoon. 2001. An analysis of hydrologic changes in Daechung dam basin using GCM simulation results due to global warming. *Journal of the Korea Water Resources Association* 34(4):335-345 (안재현, 유철상, 윤용남. 2001. GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석. *한국수자원학회지* 34(4)335-345).
- 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 Korea Water Resources Association* 16(6):569-583 (안소라, 박근애, 장철희, 김성준. 2013. SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화가 설마천 혼효림 유역의 증발산과 토양수분에 미치는 영향 평가. *한국수자원학회지* 16(6):569-583).
- Alcamo, J., P. Doll, F. Kaspar and S. Siebert. 1997. Global change and global scenarios of water use and availability: an application of Water GAP 1.0. Report A9701. Kassel, Germany: University of Kassel, Center for Environmental Systems Research.
- Andersen, H.E., B. Kronvang, S.E. Larsen, C.C. Hoffmann, T.S. Jensen and E.K. Rasmussen. 2006. Climate-change impacts on hydrology and nutrients in a Danish lowland river basin. *Science of the Total Environment* 365:223-237.
- Arnold, J.G., J.R. Williams, R. Srinivasan and K.W. King. 1996. SWAT manual, USDA. Agricultural Research Service and Blackland Research Center, Texas.
- Carter, T.R., M. Hulme and M. Lal. 1999. IPCC-TGCIA guidelines on the use of scenario data for climate change impact and adaptation assessment. version 1, IPCC, Task Group on Scenarios for Impact Assessment.
- Chen, J., J. Xia, C. Zhao, S. Zhang, G. Fu, and L. Ning. 2014. The mechanism and scenarios of how mean annual runoff varies with climate change in Asian monsoon areas. *Journal of Hydrology* 517:595-606.
- IPCC. 2013. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jeong, H.G., S.J. Kim and R. Ha. 2013. Assessment of climate change impact on storage behavior of Chungju and the regulation dams using SWAT model. *Journal of the Korea Water Resources Association* 46(12):1235-1247 (정현교, 김성준, 하림. 2013. SWAT을 이용한 기후변화가 충주댐 및 조정지댐 저수량에 미치는 영향 평가. *한국수자원학회지* 46(12):1235-1247).
- Joh, H.K., S.B. Kim, H. Cheong, H.J. Shin and S.J. Kim. 2011. Projection of future snowfall by using climate change scenarios. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 14(3):188-202 (조형경, 김셋별, 정혁, 신형진, 김성준. 2011. 기후변화 시나리오를 이용한 미래의 강설량 예측. *한국지리정보학회지* 14(3):188-202).

- Kim, S.J., G.A. Park, Y.G. Lee and S.R. Ahn. 2014. Development of a meso-scale distributed continuous hydrologic model and application for climate change impact assessment to Han river basin. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 17(3):160-174 (김성준, 박근애, 이용관, 안소라. 2014. 분포형 광역 수문모델 개발 및 한강유역 미래 기후변화 수문영향평가. *한국지리정보학회지* 17(3):160-174).
- Lee, G.S., J.Y. Kim, S.R. Ahn and J.M. Sim. 2010. Analysis of suspended solid of Andong and Imha basin according to the climate change. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 13(1):1-15 (이근상, 김정열, 안소라, 심정민. 2010. 기후변화에 따른 안동·임하호 유역의 부유사량 분석. *한국지리정보학회지* 13(1):1-15).
- MLTM. 2006. Water vision 2020. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (국토해양부. 2006. 수자원장기종합계획 2006~2020).
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry and J.R. Williams. 2001. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation.
- NIMR, 2011. Climate change scenario report 2011 to respond to the IPCC 5th assessment report. National Institute of Meteorological Research (국립기상연구소. 2011. IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화시나리오 보고서. 국립기상연구소).
- Park, J.H. and Y.O. Kim. 2013. Coping with climate change through coordinated operations of the Andong & Imha dams. *Journal of the Korea Water Resources Association* 46(12):1141-1155 (박준형, 김영오. 2013. 안동-임하댐 연계운영을 통한 미래 기후변화 대응. *한국수자원학회지* 46(12):1141-1155).
- 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 (박중윤, 정혁, 장철희, 김성준. 2014. RCP 배출 시나리오와 SWAT 모형을 이용한 기후변화가 용담댐 유역의 수문요소에 미치는 영향 평가. *한국농공학회지* 56(3):19-29).
- Park, M.J. H.J. Shin, G.A. Park and S.J. Kim. 2010. Assessment of future hydrological behavior of Soygangang dam watershed using SWAT. *Journal of Korea Society of Civil Engineers* 30(4B):337-346 (박민지, 신형진, 박근애, 김성준. 2010. SWAT 모형을 이용한 소양강댐 유역의 미래 수자원 영향 평가. *대한토목학회지* 30(4B):337-346).
- Saxton, K.E., W.J. Rawls, J.S. Romberger and R.I. Papendick, 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science of America Journal* 50(4):1031-1036.
- Soil Survey Staff. 1996. National Soil Survey Handbook. Title 430-VI, USDA Natural Resources Conservation Service, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Su, B., X. Zeng, J. Zhai, Y. Wang and X. Li. 2014. Projected precipitation and streamflow under SRES and RCP emission scenarios in the Songhuajiang River basin, China. *Quaternary International* XXX(2014):1-11. **KAGIS**