



SWAT모형을 이용한 RCP 기후변화 시나리오에 따른 고랭지농업유역의 수문 및 수질 평가

Assessment of Climate Change Impact on Highland Agricultural Watershed Hydrologic Cycle and Water Quality under RCP Scenarios using SWAT

장선숙* · 김성준*,†

Jang, Sun Sook · Kim, Seong Joon

Abstract

The purpose of this study were to evaluate the effect of best management practices (BMPs) of Haeon highland agricultural catchment (62.8 km²) under future climate change using SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Before future evaluation, the SWAT was setup using 3 years (2009~2011) of observed daily streamflow, suspended solid (SS), total nitrogen (T-N), and total phosphorus (T-P) data at three locations of the catchment. The SWAT was calibrated with average 0.74 Nash and Sutcliffe model efficiency for streamflow, and 0.78, 0.63, and 0.79 determination coefficient (R²) for SS, T-N, and T-P respectively. Under the HadGEM-RA RCP (Representative Concentration Pathway) 4.5 and 8.5 scenarios, the future precipitation and maximum temperature showed maximum increases of 8.3 % and 4.2 °C respectively based on the baseline (1981~2005). The future 2040s and 2080s hydrological components of evapotranspiration, soil moisture, and streamflow showed changes of +3.2~+17.2 %, -0.1~-0.7 %, and -9.1~+8.1 % respectively. The future stream water quality of suspended solid (SS), total nitrogen (T-N), and total phosphorus (T-P) showed changes of -5.8~+29.0 %, -4.5~+2.3 %, and +3.7~+17.4 % respectively. The future SS showed wide range according to streamflow from minus to plus range. We can infer that this was from the increase of long-term rainfall variability in 2040s less rainfalls and 2080s much rainfalls. However, the results showed that the T-P was the future target to manage stream water quality even in 2040s period.

Keywords: SWAT; RCP scenarios; climate change; Hydrologic Cycle; highland agriculture; NPS pollution

1. 서론

기후변화로 인한 2100년 지구 평균기온은 3.7 °C 상승하고, 해수면은 63 cm 상승한다고 예측되고 있다. 한반도의 2011년 평균기온은 1981~2010년보다 5.7 °C 상승하고, 계절간 강수량의 차이도 커질 것으로 전망하였다(IPCC, 2013). Ahn et al. (2001)에 따르면 지구온난화에 의한 기온상승, 강수일수의 감소, 강수량의 크기 및 패턴의 변화는 유출량의 변화에 영향을 미치고 증발산량과 토양수분 변화에 영향을 미친다. 최근 기상이변으로 인한 자연재해가 빈번하게 일어나고 기후양극화 현상으로 홍수, 가뭄, 수질 등의 피해가 지속적으로 발생하고 있다.

현재 농촌유역은 강우발생시 비점오염물질이 하천으로 유

입되어 수질오염 문제가 발생되고 있다. 또한 기후변화로 인한 강우량의 증가로 농촌유역에서 발생하는 비점오염원 유출이 증가할 것으로 보이며, 강우빈도, 강우강도, 지속시간 등의 변화로 인해 수질오염에 악영향을 미칠 것이다. 비점오염원 유출은 토지피복 상태, 유역경사 및 강우에 의한 지표유출에 영향을 받으므로 기온상승, 강수량의 크기 및 패턴의 변화로 인한 유량의 변화는 농촌유역의 유사 및 오염물질의 거동에 변화를 가져올 것이라 예상된다.

기후변화 시나리오는 IPCC AR4 SRES (Special Report on Emission Scenarios) 시나리오에 이어서 최근에는 AR5 RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오가 제공되고 있으며, 수문·수질 모형인 SWAT 모형과 기후변화 시나리오를 연계하여 기후변화에 따른 수문·수질 영향평가에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

기후변화에 따른 수문 및 수질 분석에 대한 국내 연구동향으로는, Lee et al. (2008)은 안성천 상류 유역을 대상으로 SRES A2, B2 기후변화 시나리오와 CA-Markov 기법의 미래 토지이용에 따른 비점오염원의 거동을 분석하였으며, Lee et al. (2010)은 안동 및 임하댐 유역을 대상으로 SRES A1B 기

* Konkuk University, Department of Civil, Environmental Plant Engineering

† Corresponding author

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

E-mail: kimsj@konkuk.ac.kr

Received: March 22, 2016

Revised: March 23, 2017

Accepted: April 17, 2017

후변화 시나리오를 이용하여 유출 및 부유사량의 변화특성을 분석하였다. Ahn et al. (2013)은 RCP4.5 및 8.5 시나리오를 이용하여 설마천 유역의 증발산과 토양수분에 미치는 영향평가를 분석하였고, Park et al. (2014)은 RCP4.5 및 8.5 시나리오를 이용하여 용담댐 유역의 수문요소에 미치는 영향에 대해 분석하였다. Jang et al. (2015)은 임하댐 유역을 대상으로 RCP4.5 및 8.5 시나리오를 이용하여 미래 수문순환을 분석하였고, Jung et al. (2015)은 용담댐 유역을 대상으로 SWAT모형과 RCP4.5 및 8.5 시나리오를 이용하여 미래 수문에 대해 전망하고, 기존 연구들의 미래 수문 결과에 대해서 비교하였다.

국외에서는, Andersen et al. (2006)은 SRES A2 시나리오를 이용하여 Gjerm강 유역의 수문 및 수질의 영향을 분석하였고, Su et al. (2015)는 중국 Songhuajiang강 유역을 대상으로 SRES 및 RCP 시나리오에 따른 강수량과 유출량 변화를 비교 분석하였으며, Chen et al. (2014)은 RCP 2.6, 4.5 및 8.5 시나리오를 이용하여 중국 동부 유역을 대상으로 문순지역에서의 수문 변화를 분석하였다.

우리나라의 고령지 농업구역은 과다한 객토와 비료가 사용되고 있으며, 강우시 토양유실이 발생되어 탁수 및 수질오염 문제가 발생하며 기후에 취약하다. 따라서 본 연구에서는 고령지 농업구역 특성을 고려하여 기후변화에 따른 수문 및 수질변화를 분석하고자 한다.

II. 자료 및 방법

1. SWAT 모형 개요

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소 (United States Department of Agriculture; USDA)에서 개발한 모형이며, 물리적 기반의 준분포형 장기 강우-유출 모형으로 이다. 대규모의 복잡한 유역에서 장시간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출을 예측하기 위해 개발된 유역 모형이다. 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 선형저수량 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., 2014a).

SWAT 모형의 이론은 Arnold et al. (1996)와 Neitsch et al. (2001)에 자세히 언급되어 있다.

SWAT 모형 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. 강수와 유출에 의한 침식은 수정범용토양유실공식 (Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE) (Williams, 1975)에 의해 각 수문반응단위 (HRU)에 대해서 추정된다. MUSLE는 범용토양유실공식 (Universal Soil Loss Equation, USLE)의 수정버전이다. USLE는 침식에너지의 지표로서 강우를 사용하는 반면에 MUSLE는 침식과 유사량을 모의하기 위해 총 유출량을 사용한다.

2. 기후변화 시나리오

IPCC 5차보고서에서 온실가스와 에어로졸 등의 영향뿐만 아니라 인간 활동이 대기에 미치는 요인을 다룬 온실가스의 대표농도 경로 (RCP)에 따른 기후변화 시나리오 자료를 사용하였다. RCP 시나리오는 SRES 기후변화 시나리오의 노후화 및 해상도 문제를 보완하고 정확도 향상 및 다양한 분야에서 활용할 수 있는 새로운 시나리오의 필요성에 의해 개발되었으며, 복사강제력 (radiative forcing)에 따라 4개의 시나리오 (8.5, 6.0, 4.5, 2.6)로 구분된다.

기후변화 시나리오 자료는 Earth System Grid Federation (ESGF, <http://pcmdi9.llnl.gov/esgfwebfe/>)을 통해 제공되고 있으며, 모든 전지구기후모델 (GCM, Global Climate Model) 들을 대상으로 강수량, 최고기온, 최저기온, 평균풍속, 상대습도, 일사량에 대하여 일자료를 수집하였다. ESGF에서 수집한 33개 GCM 자료와 기상청에서 HadGEM2-AO 전지구기후모델 결과를 지역기후모델 (Regional Climate Model, RCM)인 HadGEM3-RA 모형을 이용하여 역학적 상세화 과정을 거쳐 12.5 km 격자크기로 제공하고 있는 국가 기후변화 시나리오 1개를 포함하여 총 34개의 기후변화 자료를 사용하였다 (Cho, 2013).

기후모형의 결과물을 연구에 사용할 때에는 신뢰성을 높이기 위하여 기후모형 결과를 현재 관측된 자료와 비교하여 확인하는 과정이 필요하다 (Carter et al., 1999). 따라서 본 연구에서는 과거 (1981~2005년, Baseline) 기상자료와 Historical (1981~2005년), RCP4.5와 8.5 시나리오 자료 (2006~2010년)를 대상으로 유역규모의 기후변화 시나리오를 작성하기 위해 공간적 상세화 과정과 편의보정을 동시에 할 수 있도록 분위위상법 (Quantile Mapping)을 적용하여 GCM 격자내에 존재하는 모든 기상청 관측소 (76개소)를 대상으로 보정된 자

료를 생산하였다. RCP 기후변화 시나리오의 편이보정 및 상세화 과정은 Cho (2013)에 자세히 언급되어 있다.

3. 대상유역 및 입력자료 구축

본 연구의 대상유역은 강원도 양구군 해안면에 위치한 해안유역을 선정하였다 (Fig. 1). 해안유역은 대표적인 고랭지 농업유역이며, 고랭지 작물의 수요가 증가함에 따라 개간을 통해 고랭지 작물 재배면적이 지속적으로 확장되고 있다. 강우가 집중되는 여름철에는 무분별한 객토 사용 증가로 인해 토양유실이 심각하게 발생되어 소양호로 상당량의 유사가 매년 유입되고 있다. 해안유역의 유역면적은 62.8 km²이며, 유역평균표고는 1276 m, 유역평균경사는 34.9%이다. 산림 면적은 35.7 km²로 유역의 56.9%이며, 농업유역의 면적은 17.9 km²로 28.5%이다. 농업작물은 고랭지작물이 6.5 km², 일반작물이 11.0 km²에 해당된다. 30년 평균 강우량은 1,298.7 mm이며, 기온은 9.5 °C이다.

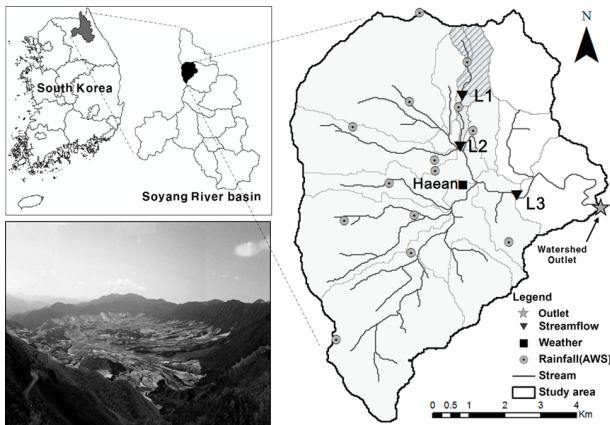


Fig. 1 Location of the Haeon watershed and observation stations

SWAT 모형의 지형자료 중 DEM (Digital Elevation Model)은 NGIS (National Geographic Information System)은 1/5,000 수치지도로부터 검수과정을 거쳐 격자크기 30 m로 제작하였다 (Fig. 2 (a)). 토양도, 토지이용도, 기후자료, 수문 및 수질자료는 Terreco (Complex Terrain and Ecological Heterogeneity) 프로젝트에서 제공받았으며, Terreco는 한국과 독일 간의 산지복합지형에서의 기후, 수문, 토양 과정의 상호연관성을 연구하는 프로젝트로 수행되었다 (Kang et al., 2010). 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1/25,000 정밀토양도를 기반으로 Terreco가 2009년 현장 조사에서 도출된 자료를 토대로 미국 NRCS (The U.S. Natural Resource Conservation Service formerly the Soil Conservation Service) 토양분류 기준 (Soil Survey Staff, 1996)에 따른 수문학적 토양그룹 (Hydrologic Soil Group) A, B, C, D와 토성 (Soil texture)을 분류하였다 (Fig. 2 (b)). 토양성분은 sandy loam 60 %, silty sand 27 %, sand 10 %로 구성되어있으며, Shope et al. (2014)에서 해안유역 토양도의 자세한 정보를 볼 수 있다. 토지이용도는 Terreco에서 2009년에 현장측량을 통해 토지이용항목을 산림, 주거, 나지, 수역, 농경지 등 17개로 세분화하여 분류한 자료를 이용하였다 (Fig. 2 (c)). 해안유역에서 농경지의 면적은 전체면적의 20.6%에 해당하며, 고랭지 작물의 면적 비율은 감자 2.6 %, 배추 1.12 %, 콩 2.3 %, 무 1.9%이다. Seo et al. (2014)에서 해안유역 토지이용도에 대한 자세한 정보를 볼 수 있다.

SWAT 모형의 입력 자료인 기상자료 (강우량, 기온, 습도, 풍속, 일사량)는 인제 기상관측소와 유역 내 총 15개의 AWS (Automatic Weather System)의 자료를 이용하였다. 인제 기상자료는 1981~2011년 기간의 일별 자료와 AWS의 강우자료는 2007~2011년 기간의 일별 자료를 기상청과 Terreco 프로젝트로부터 제공받아 입력 자료로 활용하였다.

모형의 보정을 위해 3개 지점 (L1, L2, L3)에 대한 수문 및

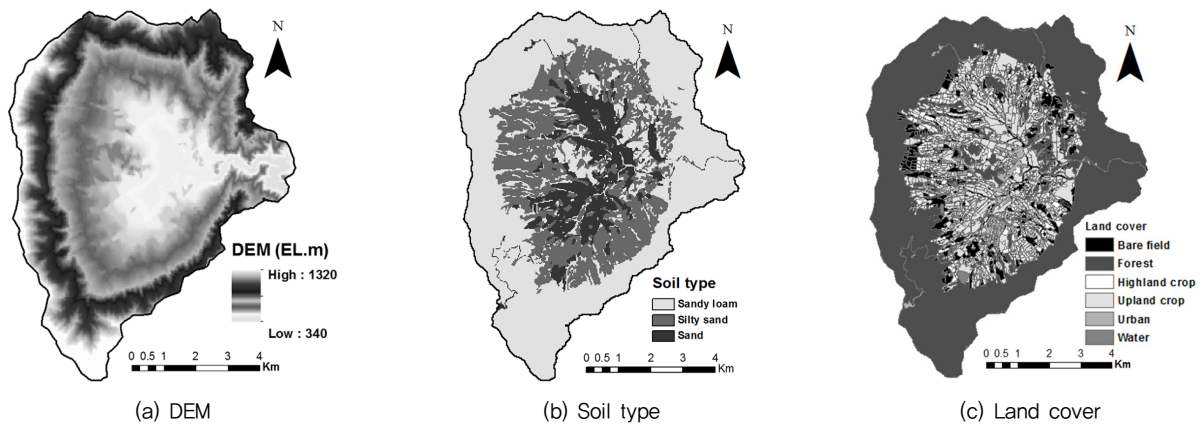


Fig. 2 Spatial input data for SWAT model setup

수질자료는 독일에서 해안유역을 대상으로 Terreco 프로젝트가 진행될 때 현장조사를 통한 실측 자료로서 2009~2011년의 유출량, 유사량 (suspended solid, SS), 총 질소 (Total Nitrogen, T-N) 및 총 인 (Total Phosphorus, T-P)의 자료를 제공받아 이용하였다.

4. 객토 및 비료자료

고랭지 밭은 연작으로 인한 지력 저하와 표토 유실 등으로 악화된 토질 보전을 위해 주기적으로 객토와 과다한 비료가 실시된다. 객토된 토양은 토양구조가 흐트러진 상태이며, 보비력과 보수력이 낮기 때문에 강수에 따른 유출로 인하여 쉽게 유실된다. 토양유실로 인한 오염물질은 수계나 지하수로

유입되어 탁수 및 수질오염의 주 원인이 된다. Park et al. (2006)에 따르면 소양강 유역 고랭지 밭의 객토 종류는 화강암풍화토이며, 용적밀도는 1.3 g/cm³, 객토 높이는 30 cm이다.

고랭지농업의 비료량은 일반 농업의 비료량보다 과다하게 사용되기 때문에 수질에 큰 영향을 미친다. 보다 신뢰성 있는 수질 검·보정을 위해 양구군 해안면 현지 농업인을 대상으로 비료량을 조사하여 SWAT 모형의 입력 자료로 활용하였다. 조사 항목으로는 비료 종류, 비료 양, 비료 살포 기간, 작물생육단계별기간, 수확기간이며 고랭지작물인 감자, 배추, 콩, 무에 대해 작물별로 조사하였다. Table 1은 농업인을 대상으로 조사한 비료 자료이다.

III. 결과 및 고찰

1. SWAT 모형의 검·보정

본 연구에서는 2007~2008년을 SWAT 모형의 warm up 기간으로 설정하였고 보정 및 검증 기간은 실측 자료가 실행된 시점으로 보정기간은 2009~2010년, 검증기간은 2011으로 설정하였다. 검·보정 지점은 3개의 지점으로 L1, L2, L3이며 최상류부터 순차적으로 실시하였다.

Table 1 The investigated data of fertilizer for highland crops

Crop	Fertilizer (kg/ha)		Fertilizer Date	Planted Date	Harvest Date
	N	P			
Potato	330	180	Apr. 27	Apr. 29	Aug. 29
Cabbage	360	91	May. 11	May. 15	Jul. 15
Soybean	345	30	May. 25	May. 29	Oct. 20
Radish	490	120	Apr. 27	Jun. 1	Sep. 5

Table 2 SWAT calibrated parameters for streamflow, SS, T-N, and T-P

Parameter	Description	LB	UB	Default	Calibrated value		
					L1	L2	L3
[Streamflow]							
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer (mm/mm)	0	1	each	0,100	0,099	0,402
SOL_BD	Moist bulk density (mg/m ³) (highland soil addition)	0,6	2,5	each	1,9 (1,3)	1,9 (1,3)	1,9 (1,3)
LAT_TIME	Lateral flow travel time (days)	0	180	0	2	0	0
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0	1	0	0,05	0,1	1
GW_DELAY	Groundwater delay time (days)	0	500	31	150	50	150
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor (days)	0	1	0,048	1	0,2	0,8
CN2	Curve number adjustment ratio	35	98	each	68	68	78
[SS]							
PRF	Peak rate adjustment factor for sediment routing in the main channel	0	2	1	0,03	0,03	0,03
LAT_SED	Sediment concentration in lateral and groundwater flow (mg/L)	0	5000	0	5	1	3
[T-N]							
RCN	Concentration of nitrogen in rainfall (mg N/L)	0	15	1	0,1	0,1	0,1
ERORGN	Organic N enrichment ratio for loading with sediment	0	5	0	2,5	4	2,5
NPERCO	Nitrogen percolation coefficient	0	1	0,2	0,15	0,15	0,15
[T-P]							
PSP	Phosphorus availability index	0,01	0,7	0,4	0,7	0,7	0,7
ERORGP	Phosphorus enrichment ratio for loading with sediment	0	5	0	5	5	5

LB: lower bound, UB: upper bound

SWAT 모형의 유출량 보정을 위해 총 유출, 지표유출, 침투유출, 기저유출 및 감수곡선 형태에 영향을 주는 매개변수를 시행착오 방법으로 최적화하였고 매개변수 민감도 분석을 실시하였다. 매개변수 중 지표수흐름에 관련된 매개변수는 CN2, ALPHA_BF, ESCO 순으로 민감하게 반응하였고, 지하수흐름은 GW_DELAY이다. 수질 항목은 SS, T-N, T-P이며 보정작업은 민감도 분석을 통해 유사와 영양물질 매개변수를 선정하였다. SS의 민감도 분석 결과 본류의 유사 추적을 위한 피크 속도 조절 인자인 PRF와 측방 및 지하수 흐름에서의 유사 농도 인 LAT_SED가 가장 민감하였고, T-N은 강우 질소의 농도인 RCN, 유기질소 농축 비율인 ERORGN, 질소 침투 계수인 NPERCO가 민감하였으며, T-P는 인 가용성 지수인 PSP와 인 농축 비율인 ERORGP가 민감하였다. 모형의 검보정은 상류부터 순차적으로 유출량, SS, T-N, T-P 순으로 실시되었으며, Table 2는 SWAT 모형의 유출량 보정 매개변수이다.

검보정 결과에 따른 모형의 효율성 검증을 위해 Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 모형효율성계수 (Nash and Sutcliffe model efficiency, NSE)를 사용하였으며, 모형의 상관성을 판단하기 위한 목적함수로는 결정계수 (determination coefficient, R^2)와 제곱근평균오차 (root mean square error, RMSE)를 사용하였다. Table 3은 유출 및 수질 검증결과를 나타낸 것이다. L1, L2, L3 지점에서 유출량 검보정 결과에 따른 R^2 는 0.84, 0.83, 0.84, RMSE는 4.79 mm/day, 4.52 mm/day, 4.49 mm/day, NSE는 0.59, 0.80, 0.82로 분석되었다. L1 지점에서 검·보정 결과에 따른 SS, T-N, T-P의 R^2 는 각각 0.89, 0.68, 0.84, L2 지점의 SS, T-N, T-P의 R^2 는 각각 0.73, 0.61, 0.76이며, L3 지점의 SS, T-N, T-P의 R^2 는 각각 0.89, 0.68, 0.84로 분석되었다. 모의값과 실측값의 통계분석 결과로부터 SWAT 모형은 해안구역의 유출 및 수질 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. Fig. 3은 L3 지점의 유출 및 수질 (SS, T-N, T-P)의 검보정 결과이다.

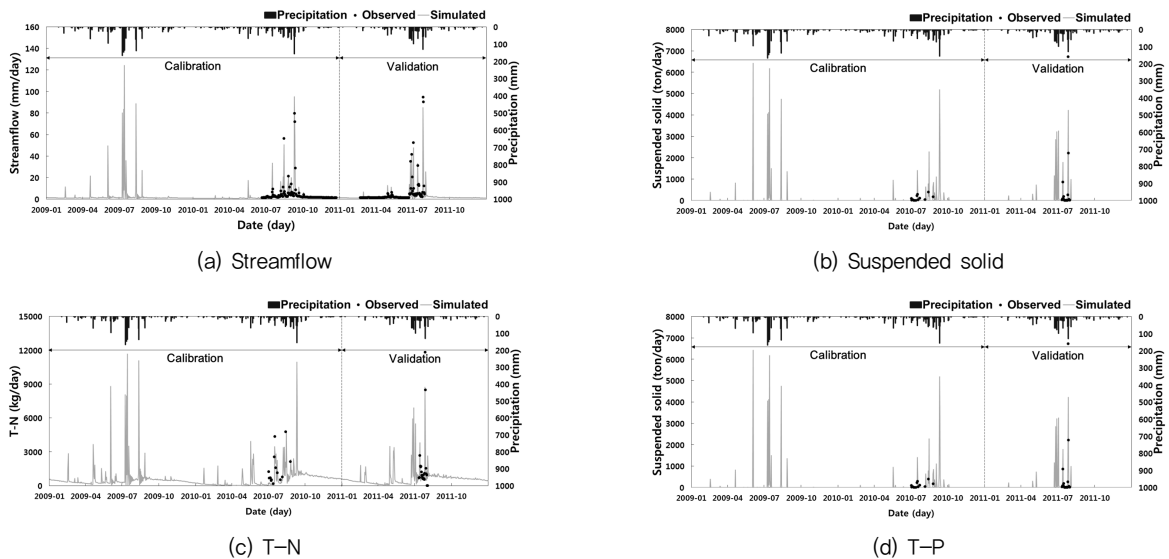


Fig. 3 Calibration and validation results for stream flow and water quality (L3)

Table 3 Statistical summary of SWAT calibration and validation results of streamflow and water quality at the 3 subwatersheds

Model output	Evaluation criteria	L1			L2			L3			Total		
		Cal.	Val.	Avg.	Cal.	Val.	Avg.	Cal.	Val.	Avg.	Cal.	Val.	Avg.
Q	RMSE	5.42	4.15	4.79	4.11	5.33	4.52	3.29	5.68	4.49	4.27	5.05	4.60
	NSE	0.57	0.61	0.59	0.90	0.61	0.80	0.87	0.77	0.82	0.78	0.66	0.74
	R^2	0.96	0.72	0.84	0.92	0.65	0.83	0.88	0.80	0.84	0.92	0.72	0.84
SS	R^2	0.80	0.98	0.89	0.83	0.54	0.73	0.77	0.76	0.73	0.80	0.76	0.78
T-N		0.76	0.60	0.68	0.64	0.54	0.61	0.67	0.66	0.61	0.69	0.60	0.63
T-P		0.70	0.97	0.84	0.78	0.73	0.76	0.77	0.77	0.76	0.75	0.82	0.79

2. 미래 기후변화 전망

상세화 및 편이보정 결과를 이용하여 Historical의 기간은 1981~2005년이며, 미래 분석기간은 2040s (2021~2060년), 2080s (2061~2100년) 두 기간으로 설정하여 분석하였다. Table 4는 기후요소에 대한 연별 변화의 통계치 결과를 정리하였다. 연별 강수량은 RCP4.5의 2040s와 2080s는 각각 -3.7%, +8.3%이며, RCP8.5의 2040s와 2080s는 각각 -4.4%, +1.8%의 변화를 보였다. 최저기온의 경우에는 RCP4.5에서 2040s와 2080s는 각각 +1.7°C, +2.9°C이며, RCP8.5에서 2040s와 2080s는 각각 +1.7°C, +4.2°C의 변화로 나타났다. 최고기온의 경우에는 RCP4.5에서 2040s와 2080s는 각각 +1.6°C, +2.6°C이며, RCP8.5에서 2040s와 2080s는 각각 +1.7°C, +4.2°C의 변화가 나타났고, 최저기온과 최고기온의 변화와 크기는 유사하게 나타났다. 상대습도, 풍속, 일사량은 Historical과 비슷한 크기를 보이고 있다.

미래 기후 변화를 요약하면, 전반적으로 CO₂ 농도가 높은 RCP8.5 시나리오에서 기온이 더 큰 변화를 보였으며, 먼 미래로 갈수록 강수량과 기온의 변화가 더 큰 경향을 나타냈다. 상대습도, 평균풍속, 일사량의 경향은 강수량과 기온에 비해 두드러지게 나타나지 않았다. 기온과 강수량의 변화는 증발산 및 토양수분에 영향을 미치며, 유출 요소성분의 변화가 예상된다.

3. 미래 기후변화에 따른 수문순환 전망

기후변화 시나리오를 적용하기 위해서는 과거 관측 기상 자료와 기후변화 시나리오의 과거 자료와 비교하여 수문 및

수질요소의 재현성 여부를 살펴보는 것은 최종적으로 도출된 결과에 대한 신뢰성을 판단할 수 있다 (Cho, 2013). Baseline (1981~2005년)과 기후변화 시나리오 과거 Historical (1981~2005년)의 수문요소별로 살펴보면, Baseline과 Historical에 대해 강수량 (Precipitation, PCP)은 각각 1,187.2 mm, 1,238.3 mm로 +4.3%의 차이를 보였으며, 토양수분 (Soil Moisture, SM)은 각각 38.4%, 38.2%로 -0.5%의 차이, 증발산 (Evapotranspiration, ET)은 각각 439.0 mm, 431.6 mm로 -1.7% 차이, 지표유출 (Surface Runoff, SR)은 각각 392.7 mm, 413.3 mm로 +5.3%의 차이, 기저유출 (Baseflow=LAT+GW, BS)은 각각 401.8 mm, 438.3 mm로 +9.1%의 차이, 하천유출 (Streamflow, ST)은 각각 794.4 mm, 851.6 mm로 +7.2%의 차이를 보였다.

Historical를 기준으로 RCP4.5 및 8.5 시나리오의 수문순환 변화를 분석하였으며, 분석기간은 두 기간 2040s (2021~2060년), 2080s (2061~2100년)으로 구분하였다. Historical과 RCP4.5 및 8.5 시나리오의 두 기간에 대한 각 수문요소의 월별 변화를 Fig. 4에 나타냈으며, Table 5는 연별 변화의 통계치 결과이다.

먼저 수문요소의 월별 및 계절별 변화를 살펴보면, RCP4.5 및 8.5 시나리오에서의 강수량은 봄 (3~5월)과 겨울 (12~2월)에 +9.4~+21.7%, +9.5~+25.5%의 변화율로 증가하는 경향을 나타내었고, 여름과 겨울에는 -11.4~+8.6%, -16.0~-1.1% 변화율로 감소하는 경향이 나타났다. 토양수분은 0.1~0.9% 감소하였으며, 증발산량은 봄 (3~5월), 여름 (6~8월), 겨울 (12~2월)에 +10.1~+34.2%, +5.0~+15.7%, +1.2~+10.5%의 변화율로 증가하였다. 유출량은 봄에 +8.6~+16.2%의 변

Table 4 Change in future climate compared to the baseline

Scenario	Historical	RCP4,5		RCP8,5	
		2040s	2080s	2040s	2080s
PCP (mm) [variation (%)]	1237.8	1,193.3 (-3.7)	1,350.2 (+8.3)	1,185.1 (-4.4)	1,259.9 (+1.8)
TMN (°C) [difference]	5.3	7.0 (+1.7)	8.1 (+2.9)	6.9 (+1.7)	9.5 (+4.2)
TMX (°C) [difference]	17.3	18.9 (+1.6)	19.9 (+2.6)	18.9 (+1.7)	21.5 (+4.2)
RH (%) [difference]	71.9	71.5 (-0.3)	71.7 (-0.2)	71.5 (-0.3)	71.9 (+0.0)
WS (m/s) [difference]	2.0	2.0 (+0.0)	2.0 (+0.0)	2.0 (+0.0)	2.0 (+0.0)
SLR (MJ/m ²) [difference]	11.6	11.5 (-0.2)	11.5 (-0.2)	11.5 (-0.1)	11.6 (+0.0)

PCP (Precipitation), TMN (Minimum temperature), TMX (Maximum temperature), RH (Relative humidity), WS (Mean wind speed), SLR (Solar radiation)

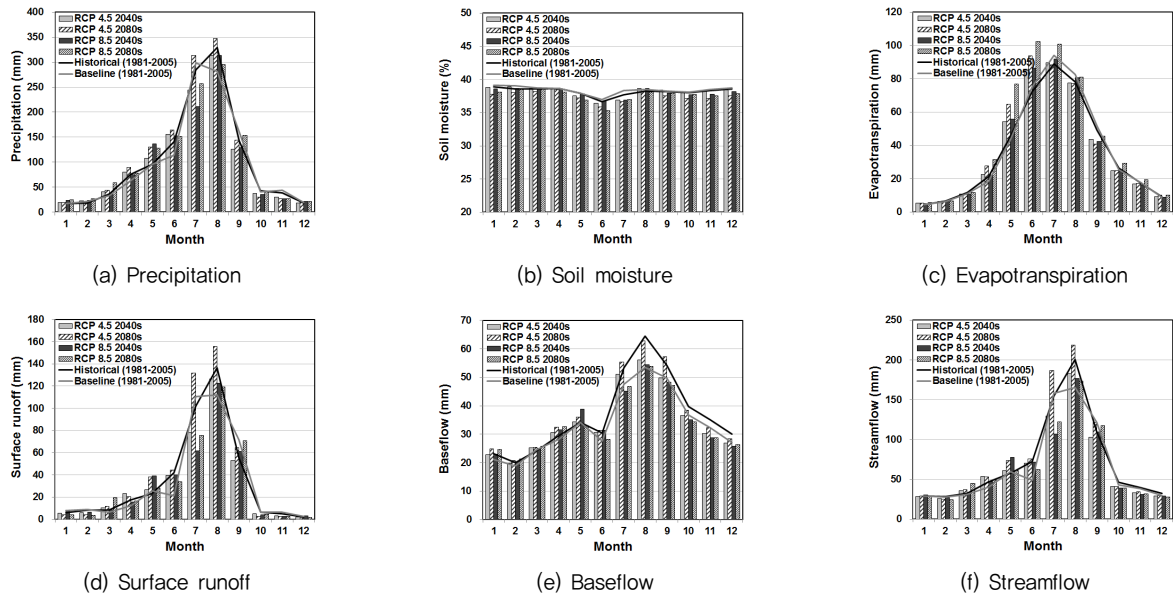


Fig. 4 Future climate change impact on hydrology components under the RCP 4.5 and 8.5 scenarios in the 2040s and 2080s

Table 5 Summary of future predicted annual hydrologic components for RCP 4.5 and 8.5 scenarios

Scenario	Baseline	Historical	RCP4.5		RCP8.5	
			2040s	2080s	2040s	2080s
PCP (mm) [variation (%)]	1,187.2	1,238.3	1,193.8 (-3.7)	1,350.7 (+8.3)	1,185.6 (-4.4)	1,260.4 (+1.8)
SM (%) [difference]	38.4	38.2	38.1 (-0.1)	37.5 (-0.7)	38.0 (-0.2)	37.6 (-0.6)
ET (mm) [variation (%)]	439.0	431.6	445.8 (+3.2)	467.8 (+7.7)	451.8 (+4.5)	521.3 (+17.2)
SR (mm) [variation (%)]	392.7	413.3	379.6 (-8.9)	481.8 (+14.2)	372.8 (-10.9)	380.2 (-8.7)
BS (mm) [variation (%)]	401.8	438.3	413.7 (-6.0)	445.1 (+1.5)	407.7 (-7.5)	402.8 (-8.8)
ST (mm) [variation (%)]	794.4	851.6	793.3 (-7.4)	926.9 (+8.1)	780.5 (-9.1)	782.9 (-8.8)

Baseline: 1981~2005, Historical: 1981~2005, 2040s: 2021~2060, 2080s: 2061~2100, PCP: Precipitation, SM: Soil Moisture, ET: Evapotranspiration, SR: Surface Runoff, BS: Baseflow (Lateral Flow+Groundwater Flow), ST: Streamflow

화율로 증가하였으나 여름, 가을 (9~11월), 겨울에는 -20.4~+11.0%, -10.4~+1.0%, -10.4~4.2%의 변화율로 감소하는 경향이 나타났으며, 지표유출 및 기저유출은 유출량 변화양상과 동일하게 나타났다. 대체로 RCP8.5시나리오는 RCP4.5시나리오보다 변화율의 크기가 두드러지게 나타났으며, 특히 7월 강수량은 RCP4.5 2040을 제외한 나머지 시나리오에서 감소하는 경향이 나타나 강수량의 변화는 유출량 변화와 상동 밀접한 관계가 나타나는 것으로 분석되었다.

Table 5의 결과로부터 연별 변화를 각 수문요소에 대하여

분석하였다. RCP4.5 2040s에서 강수량이 3.7% 감소하고, 증발산량이 3.2% 증가함에 따라 지표유출과 기저유출은 각각 8.9%, 6.0% 감소하였다. 또한 수문요소의 감소로 인하여 유출량은 7.4% 감소하였다. RCP4.5 2080s는 강수량과 증발산량이 8.3%, 7.7% 증가함에 따라 지표유출 14.2%, 기저유출 +1.5%, 총 하천유출은 8.1% 증가하는 것으로 나타났다.

RCP8.5 2040s는 강수량이 4.4% 감소하고, 증발산량이 4.5% 증가함에 따라 지표유출이 10.9%, 기저유출 7.5%, 총 하천유출은 9.1% 감소하였다. RCP8.5 2080s에서 강수량이 1.8

%, 증발산량이 17.2 % 증가하였고, 지표유출과 기저유출이 8.7 %, 8.8 % 감소함에 따라 총 하천유출은 8.8 % 감소하는 경향을 나타내었다.

미래 기후변화에 따른 해안유역의 수문영향을 종합해보면, 기온상승으로 토양수분은 감소하고 증발산량은 증가하는 경향이 나타났으며, 가까운 미래 2040s의 강수량은 감소하고 먼 미래 2080s의 강수량은 증가함에 따라 유출요소의 변화 패턴은 강수량의 변화 패턴과 유사하게 나타났다. 토양수분, 증발산량, 유출성분별 증가량이 RCP 8.5 시나리오에서 상대적으로 크게 나타났으며, 먼 미래로 갈수록 변화 폭이 증가하였다.

4. 미래 기후변화에 따른 수질 전망

기후변화로 인한 수온 상승과 수문의 변화는 수질에 영향을 미치게 된다. 따라서 기후변화에 따른 수문 변화를 분석한 후 수질 변화를 분석하였다. 먼저 과거 관측 Baseline (1981~2005년)과 기후변화 시나리오 과거 Historical (1981~2005년)의 수질요소별로 살펴보면, Baseline과 Historical에 대해 유사(Suspended solid, SS)는 각각 8,349.3 ton/day, 10,475.5 ton/day로 +25.5 %의 차이를 보였으며, 총 질소(Total nitrogen, T-N)는 각각 202,534.2 kg/day, 229,683.3 kg/day로 +13.4 %의 차이, 총 인(Total phosphorus, T-P)은 각각 15,686.1 kg/day,

16,985.7 kg/day로 +8.3 %의 차이로 나타났다.

Fig. 5는 Historical을 기준으로 RCP4.5 및 8.5시나리오의 두 기간에 대해서 수질요소(SS, T-N, T-P)에 대한 월별 변화를 나타낸 것이다. 월별 변화를 살펴보면 하천유출(Fig. 4 (f))과 수질은 유사한 패턴을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 강수량이 6월, 7월, 10월, 11월, 12월에 감소하는 영향으로 하천유출이 감소되며, 이러한 유량 감소는 비점오염물질의 감소로 이어진다. 또한 강수량의 증가로 인하여 하천유출이 증가되는 3월, 4월, 5월, 9월은 유사 및 비점오염물질이 증가하는 것으로 분석되었다.

각 수질요소에 대하여 연별 변화를 분석하였다(Table 6). RCP4.5 2040s에서 SS, T-N, T-P의 경우 각각 -5.8 %, -4.5 %, +6.4 %의 변화율로 나타났으며, RCP4.5 2080s에서 SS, T-N, T-P의 변화율은 각각 +29.0 %, +0.8 %, +17.4 %로 증가하는 경향으로 나타났다. RCP8.5 2040s에서 SS, T-N, T-P의 경우 각각 -2.6 %, -1.9 %, +3.7 %의 변화율로 나타났으며, RCP8.5 2080s에서는 SS, T-N, T-P의 변화율은 각각 +6.4 %, +2.3 %, +6.8 %로 증가하였다. RCP4.5와 8.5 시나리오는 먼 미래(2080s)에서 강수량의 증가로 인해 비점오염원 물질이 증가하는 경향을 나타냈으며, 가까운 미래(2040s)에서 비점오염원 물질이 감소하는 경향은 미래 강수량의 감소로 인한 것으로 나타났다. 강수량의 변화는 비점오염원에 영향을 있는 것

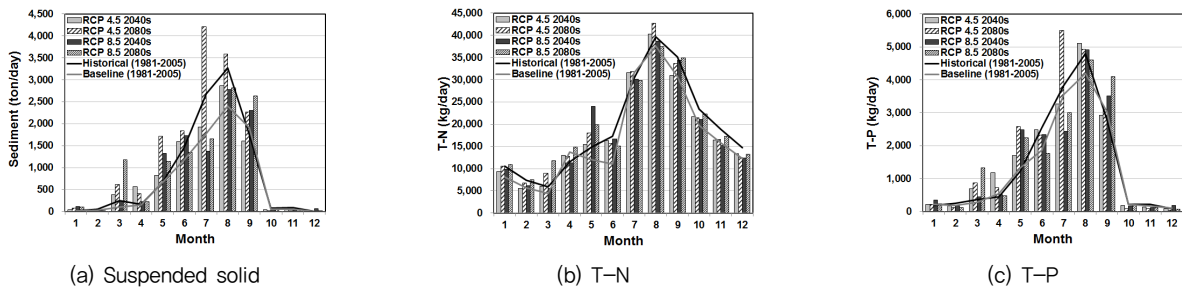


Fig. 5 Future climate change impact on water quality components under the RCP 4.5 and 8.5 scenarios in the 2040s and 2080s

Table 6 Summary of future predicted annual water quality components for RCP 4.5 and 8.5 scenarios

Scenario	Baseline	Historical	RCP4.5		RCP8.5	
			2040s	2080s	2040s	2080s
SS (ton/day) [variation (%)]	8,349.3	10,475.5	9,902.2 (-5.8)	14,758.6 (+29.0)	10,212.2 (-2.6)	11,191.4 (+6.4)
T-N (10 ³ ·kg/day) [variation (%)]	202.5	229.7	219.7 (-4.5)	231.6 (+0.8)	225.4 (-1.9)	235.1 (+2.3)
T-P (kg/day) [variation (%)]	15,686.1	16,985.7	18,142.0 (+6.4)	20,567.2 (+17.4)	17,636.0 (+3.7)	18,224.0 (+6.8)

Baseline: 1981~2005, Historical: 1981~2005, 2040s: 2021~2060, 2080s: 2061~2100, SS: suspended solid, T-N: total nitrogen, T-P: total phosphorus

으로 분석되었다. 비점오염원 물질 중 T-P는 SS와 흡착되어 유출되기 때문에 변화 패턴이 유사하게 나타났으나 연평균 변화율을 살펴보면 SS가 감소하고 T-P는 증가하는 것으로 나타났다.

VII. 요약 및 결론

본 연구에서는 기후에 취약한 고랭지농업유역인 해안유역을 대상으로 기후변화에 따른 수문순환 및 수질의 변화를 평가하기 위해 SWAT모형을 선정하였다. 고랭지농업유역 특성(비료, 객토)을 고려하여 검·보정을 실시한 후, RCP4.5 및 8.5 기후변화 시나리오를 적용하여 수문 및 수질요소의 변화를 분석하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 고랭지농업유역 특성을 반영하기 위해 작물별 (감자, 배추, 콩, 무) 비료의 종류, 양, 살포 기간, 작물생육단계별 기간, 수확기간을 적용하였고, 객토로 인한 토양특성은 토양 깊이 30 cm에 대해서 토양용적밀도 매개변수 (SOL_BD)를 1.3 g/cm^3 적용하였다.
2. 해안유역의 3개 지점 (L1, L2, L3)의 수문·수질자료를 이용하여 보정 (2009~2010년) 및 검증 (2011년)하였다. 모형의 적용성 평가 결과, 년 평균 일 유출량에 대한 R^2 는 0.84이고, NSE는 0.74이며, RMSE는 4.36 mm/day 이다. SS, T-N, T-P의 R^2 는 각각 0.78, 0.63, 0.79로 실측치와 관측치의 유출량 및 수질은 유사성이 있는 것으로 나타났으며, 해안 유역의 수문과 수질을 적절히 재현함을 알 수 있었다.
3. 기후변화 시나리오의 과거자료 (Historical)와 과거 기상자료 (Baseline)과 유사성을 가지도록 편이보정 후, Historical (1981~2005년)을 기준으로 미래 두 기간 2040s (2021~2060년), 2080s (2061~2100년)에 대해서 분석하였다. RCP 4.5 및 8.5 시나리오별 기후변화를 분석한 결과 RCP4.5 시나리오 경우 강수량은 $-3.7\sim+8.3\%$, 최고기온은 $+1.6\sim+2.6\text{ }^\circ\text{C}$ 변화, RCP 8.5 시나리오의 강수량은 $-4.4\sim+1.8\%$, 최고기온은 $+1.7\sim+4.2\text{ }^\circ\text{C}$ 로 변화하는 것으로 나타났다.
4. 기후변화에 따른 수문순환의 변화를 분석한 결과, RCP4.5의 변화는 강수량의 경우 $-3.7\sim+8.3\%$, 토양수분 $-0.7\sim-0.1\%$, 증발산량 $+3.2\sim+7.7\%$ 이며, 지표유출, 기저유출, 하천유출의 변화는 각각 $-8.9\sim+14.2\%$, $-6.0\sim+1.5\%$, $-7.4\sim+8.1\%$ 이다. RCP8.5의 변화는 강수량의 경우 $-4.4\sim+1.8\%$, 토양수분 $-0.6\sim-0.2\%$, 증발산량 $+4.5\sim+17.2\%$ 이며, 지표유출, 기저유출, 하천유출의 변화는 각각 $-10.9\sim-8.7\%$, $-8.8\sim-7.5\%$, $-9.1\sim+8.8\%$ 이다. 기온상승으로 인해 토양수분이

감소하고 증발산량은 증가하는 경향이 나타났으며, 강수량의 크기 및 패턴의 변화는 유출요소에 영향을 미치며 CO_2 농도가 클수록, 먼 미래일수록 수문요소의 변화 폭이 증가하였다.

5. 기후변화에 따른 수질 변화를 분석한 결과, 가까운 미래 2040s에서는 T-P가 $3.7\sim6.4\%$ 증가하였으나 SS, T-N은 각각 $2.6\sim5.8\%$, $1.9\sim4.5\%$ 감소하였다. 먼 미래 2080s에서는 SS, T-N, T-P의 양이 각각 $6.4\sim29.0\%$, $0.8\sim2.3\%$, $6.8\sim17.4\%$ 증가 하였다. 강수패턴은 봄과 겨울에 $9.4\sim25.4\%$ 증가하는 반면 여름과 가을에는 $1.1\sim17.1\%$ 감소한다. 이러한 계절별 강수패턴의 변화는 수문순환과 수질 변화에 영향을 미치게 된다.

지형 및 영농조건 등 고랭지농업유역의 특성을 고려하여 기후변화에 따른 수문 및 수질변화를 분석한 결과, 강수량의 증가는 하천유출량의 증가로 이어졌으며, 기온, 강수량, 및 하천유출량이 증가함에 따라 비점오염원 부하량도 증가하는 것으로 나타났다. 기후변화로 인한 수문 및 수질의 변화는 고랭지농업으로 인한 수질오염 문제를 가중시킬 수 있으며, 고랭지농업 면적 증가 등의 토지이용변화가 이루어진다면, 수질에 악영향을 미칠 수 있을 것으로 예상된다. 향후 고랭지농업 유역에서 기후변화에 대응하기 위해서는 기후변화를 고려한 비점오염원 저감 대책이 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원 (14AWMP-B082564-01)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. 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 (in Korean).
2. 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 (in Korean).
3. 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.
4. Arnold, J. G., J. R. Williams, R. Srinivasan, and K. W. King, 1996. SWAT manual, USDA. Agricultural Research Service and Blackland Research Center, Texas.
 5. Carter, T. R., M. Hulme, and M. Lal, 1999. IPCC-TGCI guidelines on the use of scenario data for climate change impact and adaptation assessment. version 1, IPCC, Task Group on Scenarios for Impact Assessment.
 6. 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.
 7. Cho, J. P., 2013. Impact assessment of climate change for agricultural reservoirs considering uncertainty. Research Report, APEC climate Center, Busan, Republic of Korea (in Korean).
 8. 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.
 9. 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).
 10. Jung, C. M., M. J. Shin, and Y. O. Kim, 2015. A Comparison Study of Runoff Projections for Yongdam Dam Watershed Using SWAT. *Journal of the Korea Water Resources Association* 48(6): 439-449 (in Korean).
 11. Kang, S. K. and J. Tenhunen, 2010. Complex Terrain and Ecological Heterogeneity (TERRECO): Evaluating Ecosystem Services in Production Versus water Quantity/quality in Mountainous Landscapes. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 12(4): 307-316 (in Korean)
 12. 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 (in Korean).
 13. Lee, Y. J., S. R. Ahn, B. S. Kang, and S. J. Kim, 2008. Assessment of Future Climate and Land Use Change Impact 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).
 14. Nash, J. E. and J. E. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting though conceptual models: Part I, A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290.
 15. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams, 2001. Soil and water assessment tool, Theoretical Documentation.
 16. Park, H. K., 2006. Environmental Damages and Control Measures By Highland Agriculture-Study on System Improvement. Master's thesis. Kangwon National University (in Korean).
 17. 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).
 18. Seo, B., C. Bogner, P. Poppenborg, E. Martin, M. Hoffmeister, M. Jun, T. Koellner, B. Reineking, C. L. Shope, and J. Tenhunen, 2014. Deriving a per-field land use and land cover map in an agricultural mosaic catchment. *Earth System Science Data* 6(2): 339-352.
 19. Shope, C. L., G. R. Maharjan, J. Tenhunen, B. Seo, K. Kim, J. Riley, S. Arnhold, T. Koellner, Y. Ok, and S. Peiffer, 2014. Using the SWAT model to improve process descriptions and define hydrologic partitioning in South Korea. *Hydrology and Earth System Sciences* 18(2): 539-557.
 20. Su, B., X. Zeng, J. Zhai, Y. Wang, and X. Li, 2015. Projected precipitation and streamflow under SRES and RCP emission scenarios in the Songhuajiang River basin, China. *Journal of Quaternary International* 380(381): 95-105.
 21. Williams, J. R., 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In present and prospective technology for predicting sediment yield and sources, ARS-S-40, USDA-ARS.