



SWAT모형과 CMIP5 자료를 이용한 기후변화에 따른 농업용 저수지 기후변화 영향 평가

Assessing the Climate Change Impacts on Agricultural Reservoirs using the SWAT model and CMIP5 GCMs

조재필* · 황세운**,† · 고광돈*** · 김광용**** · 김정대****

Cho, Jaepil · Hwang, Syewoon · Go, Gwangdon · Kim, Kwang-Young · Kim, Jeongdae

Abstract

The study aimed to project inflows and demands for the agricultural reservoir watersheds in South Korea considering a variety of regional characteristics and the uncertainty of future climate information. The study bias-corrected and spatially downscaled retrospective daily Global Climate Model (GCM) outputs under Representative Concentration Pathways (RCP) 4.5 and 8.5 emission scenarios using non-parametric quantile mapping method to force Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. Using the historical simulation, the skills of un-calibrated SWAT model (without calibration process) was evaluated for 5 reservoir watersheds (selected as well-monitored representatives). The study then, evaluated the performance of 9 GCMs in reproducing historical upstream inflow and irrigation demand at the five representative reservoirs. Finally future inflows and demands for 58 watersheds were projected using 9 GCMs projections under the two RCP scenarios. We demonstrated that (1) un-calibrated SWAT model is likely applicable to agricultural watershed, (2) the uncertainty of future climate information from different GCMs is significant, (3) multi-model ensemble (MME) shows comparatively reasonable skills in reproducing water balances over the study area. The results of projection under the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenario generally showed the increase of inflow by 9.4% and 10.8% and demand by 1.4% and 1.7%, respectively. More importantly, the results for different seasons and reservoirs varied considerably in the impacts of climate change.

Keywords: RCP scenario; GCM; SWAT; agricultural reservoirs; climate change impacts

1. 서론

기후변화에 따른 농업 및 수자원 등 다양한 분야에 미치는 영향 평가와 관련된 연구는 일반적으로 전 지구 규모의 기후 변화 자료의 생산 과정 및 생산된 원 기후 자료를 응용분야에 활용하기 위해 필요한 통계학적 또는 역학적 시·공간 상세화(Downscaling) 과정을 거쳐 생산된 미래 기후정보를 바탕으로 수행된다. 더불어 필요한 모델링 과정을 통해 관련 분야에 대한 영향 예측 결과를 최종적으로 도출하게 되는데 각 연구 과정에서 다양한 경로를 통해 누적되는 불확실성에 대한 고찰은 연구 결과의 신뢰성 및 실효성 제고를 위한 필수적인 과

제이다(Hwang and Kang, 2013). 그 예로, 낙동강 권역의 기후변화에 따른 관개수요량 예측에 관한 연구(Chung, 2009a; Chung et al., 2009b) 결과, 사용한 Global Climate Model(GCM), 증발산량 계산식, 상세화 방법에 따라 관개 수요량 변화에 대해 상반된 예측 결과가 보고되는 등 관련 연구에서의 GCM의 선정에 따른 미래 전망의 불확실성은 다양한 방법론을 적용한 연구에 의해 지적되고 있다. 불확실성이 가장 큰 것으로 알려진 강수량 자료가 중요한 인자로 고려되는 분석에 있어서 단일 GCM을 사용하는 경우 어떤 GCM의 자료를 사용하느냐에 따라서 상이한 결과가 도출될 수 있다. 이에 기후변화에 따른 수자원 분야 미래 전망에 있어서 다중모형앙상블(Multi-Model Ensemble, MME) 기반 접근은 특정 GCM의 선정으로부터 발생할 수 있는 불확실성을 고려할 수 있는 방법으로 이용되고 있다(Tebaldi and Knutti, 2007). MME 기반의 동일한 미래 전망이 주어지는 경우에도 다중 모형에 의해 결정되는 범위(최소 및 최댓값의 범위)인 불확실성의 정도가 작은 경우가 큰 범위의 경우와 비교하여 신뢰도가 높을 수 있으며 이러한 불확실성에 대한 고려는 미래 예측 연구에 있어 필수적인 과정으로 부각되고 있다(Hwang, 2014a)

2011년 기준 국내 농업용수 공급 시설물로는 저수지, 양·배수장, 취입보, 집수암거 등이 있으며, 저수지의 경우 전체

* Climate Research Department, APEC Climate Center
 ** Department of Agricultural Engineering, Gyeongsng National University
 *** Agricultural Infrastructure Development Division, Korea Rural Community Corporation
 **** Water Resources Research Division, Rural Research Institute
 † Corresponding author
 Tel.: +82-55-772-1934, Fax: +82-55-772-1939
 E-mail: swhwang@gnu.ac.kr

Received: April 28, 2015
 Revised: August 5, 2015
 Accepted: August 6, 2015

시설물 69,568개소 중 17,505개로 25%를 차지하고 있으나 관계 면적으로는 전체 772,108 ha 중 449,105 ha를 관계하여 전체 농업용수의 58%를 관계하고 있는 실정이다 (Rural Agricultural Water Resource Information System, <https://rawris.ekr.or.kr/>). 국내의 대다수 농업용 저수지들은 다목적 댐과 비교하여 저수량이 작기 때문에 가뭄과 같은 극심한 기상이변에 민감할 수 있다. 또한, 농업 가뭄과 관련하여서는 상당부분의 농경지가 수리시설을 통한 관계에 의존하고 있는 국내 상황의 특수성을 고려할 때 수문학적 및 기상학적 가뭄의 접근방식과는 달리 농업용수의 주요 공급원인 저수지의 기후변화에 따른 거동을 예측하는 접근방법의 적용이 필요하다. 농업용 저수지 거동을 분석하기 위해서는 기후변화에 따른 상류 유역으로부터 저수지로 유입되는 공급 가능량의 변화와 관계구역 내에서의 온도를 포함한 기후 특성의 변화에 따른 작물의 필요수량 변화에 대한 영향 평가가 이루어져야 한다 (Ahn et al., 2004). 더불어 농업용수의 개념이 ‘농촌용수’로 확장되면서 용수량뿐만 아니라 수질도 중요한 요소로 평가·관리되어야 하며 농업용수 또한 유역통합관리 (Integrated Watershed Management)의 일부 요소로서 관리하는 것이 바람직하다 (Cheong et al., 2008). 그러나 국내에서 농업용 저수지에 대한 유역통합관리 차원의 관리는 미흡한 실정이다 (Park et al., 2009; Lee et al., 2008). 농업용 저수지 유역의 경우에는 유입유량 또는 방류량에 대한 실측자료 부족으로 저수지 유입량의 경우 미세측 유역에서의 유역면적과 토지이용 면적 비율을 이용한 탱크 모형의 매개변수 산정을 통해 추정된 사례가 많다 (Kim et al., 1988; Kang et al., 2013).

기후변화에 따른 농업용 저수지에 미치는 영향평가 연구는, 논 관개용수 수요의 변화와 관련된 국외 논 생산 지역에서의 연구 (De Silva et al., 2007; Fischer et al., 2007)와 더불어 국내에서도 다양한 연구가 진행되어 왔다. 미래기후정보로서 단일 GCM 산출물을 사용한 경우에서부터 다중 GCM을 사용한 결과까지 다양한 가운데 많은 연구가 IPCC 4차 보고서에 사용되었던 SRES (Special Report on Emission Scenarios) 시나리오 자료를 기반으로 하고 있다 (Oh et al., 2012; Park et al., 2009; RRI, 2011; Yun et al., 2011). Hwang (2014b)은 IPCC 5차 보고서의 대표농도경로 시나리오 (RCP, Representative Concentration Pathway) 기반 GCM 산출물의 SRES 시나리오 대비 개선점을 고려할 때 향후 기후변화 연구에서 RCP 기반 GCM 결과의 평가와 적용의 중요성을 강조하였다. RRI (2011)와 Park et al. (2009)은 월 단위 미래 전망 자료로부터 기상모의발생기(Weather Generator)를 사용하여 일 단위 자료를 생산함으로써 과거기간의 특성에 기반을 둔 미래 기간의 일 단위 변동을 고려하였다. 또한 최근 기후변화 연구

의 경우 RCP 기반 GCM 산출물의 결과를 사용하더라도 자료의 불확실성 관련 정보에 대한 고찰이 미흡한 경우가 대부분이다 (Nam et al., 2014; Park et al., 2013). Nam et al. (2014)은 기후변화에 따른 농업용 저수지의 미래 용수공급 전망을 위해 기온, 강수량은 남반 상세 (1 km) 자료 및 상대습도, 풍속, 일사량은 한반도 상세 (12.5 km) 자료의 단일 GCM 기반 자료를 사용하였으며, Park et al. (2013)의 경우도 강우의 Intensity-Duration-Frequency (IDF) 곡선 분석을 위해 기상청에서 제공하는 3시간 단위의 12.5 km 자료를 사용함으로써 기후모형의 선정에 따라 발생할 수 있는 불확실성은 연구 범위에서 배제하였다. 더불어 소수의 저수지 선정에 따른 개별 분석 결과를 바탕으로 국내 저수지에 대한 적응정책을 수립하는 것은 한계가 있기 때문에 이에 대한 지속적 보완연구가 필요한 실정이다.

본 연구는 최신 IPCC 5차 보고서에 사용된 RCP 시나리오 기반 일 단위 9개 GCM 자료의 불확실성을 고려하여 기후변화에 따른 농업용 저수지의 공급 가능량 및 관계지구의 용수 수수량 변화를 분석하고자 한다. 즉 의사결정을 위한 불확실성 정보 제공을 목적으로 대표 저수지에 대하여 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 모형의 미세측 유역에서의 적용 가능성과 과거기간 및 미래기간에 대한 기후변화 시나리오 자료의 재현성 및 불확실성을 각각 평가한 후 전체 58개 대상 저수지에 대한 기후변화에 따른 상류 유입량과 관계 필요수량의 변화를 분석하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 기후변화 시나리오

미래 기후정보 자료는 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, phase 5)를 통해 공개된 RCP 시나리오 기반 9개 GCM 산출물을 Earth System Grid Federation (ESGF, <http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>)을 통해 수집하여 사용하였다. CMIP5는 다양한 GCM 결과를 비교·평가하는 세계 기후 연구 프로그램 (WCRP, World Climate Research Programme)의 일환으로 전 세계 30여개의 기후모델링 그룹이 참여하여 GCM 모델링의 장기 미래기후 예측에 대한 성능과 불확실성을 평가하고 모델 결과물을 국제적으로 공유하여 연구 결과를 통합적으로 축적하는데 목적을 둔 프로젝트이다. 본 연구에 적용된 GCM은 응용 모델로 선정된 SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Arnold et al., 1998) 모형의 입력자료로서 필요한 6개 기상 변수 (강수, 최고기온, 최저기온, 평균풍속, 상대습도, 일사량) 대한 일 단위 자료가 제공되는 모

Table 1 Characteristics of the GCMs in CMIP5 data analyzed in this study

Model acronym	Modeling System	Institute/ Country	Spatial Resolution (Lon. × Lat.)
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	CCCMA/ Canada	128 × 64
GFDL-ESM2G	GFDL Earth System Model with Generalized Ocean Layer Dynamics (GOLD) component (ESM2G)	GFDL/ USA	144 × 90
GFDL-ESM2M	GFDL Earth System Model with Modular Ocean Model 4 (MOM4) component (ESM2M)	GFDL/ USA	144 × 90
HadGEM2-CC	Hadley Centre Global Environment Model, version 2-Earth System; Met Office, United Kingdom	MOHC/ UK	192 × 145
INM-CM4	Institute of Numerical Mathematics (INM) Coupled Model, Russia	INM/ Russia	180 × 120
IPSL-CM5A-LR	L'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) Coupled Model, coupled with NEMO, low resolution; France	IPSL/ France	96 × 96
MIROC-ESM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	MIROC/ Japan	128 × 64
MIROC-ESM-CHEM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	MIROC/ Japan	128 × 64
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute (MRI) Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model, Japan	MRI/ Japan	320 × 160

형으로서 Table 1 은 모델 정보와 더불어 산출물 격자 규모를 보여준다. 온실가스 배출 시나리오로는, RCP 중 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우인 RCP8.5 시나리오와 2100년 이전에 안정화되는 경우인 RCP4.5 시나리오를 적용하였다. 일반적으로 GCM 자료는 유역 규모에서의 시공간적인 기후 특성을 재현할 수 있도록 공간적 상세화 및 편이보정 (Bias Correction) 과정을 요구한다 (Hwang and Kang, 2013). 본 연구에서는 과거기간에 대한 GCM 모의 결과의 계통오차를 동일 기간의 관측자료의 확률 분포와 비교하는 비모수적 분위사상법 (Non-parametric Quantile Mapping Method)을 적용하여 보정하였다. 비모수적 분위사상법은 확률분포함수 없이 모의 및 관측 자료의 실제 분포를 직접 사용하기 때문에 모수적 기법에 비해 용이하며 효과적으로 적용될 수 있다 (Gudmundsson, 2012). 일 단위 GCM 자료를 사용하였기 때문에 시간적 상세화 절차는 필요 없으며, GCM 격자 자료를 76 곳의 종관기상관측시스템 (Automated Synoptic Observing System, ASOS)에 대하여 편이보정을 수행하는 과정에서 관측지점의 공간적인 기후특성을 반영한 시나리오 상세화 자료를 생산하였다. 편이보정은 과거 30년 (Historical, 1976~2005) 년 기간 자료를 이용하여 수행하였으며 연구 대상 미래기간 (2011~2040)에 대해 분위별 오차를 동일하게 적용하였다. 과거기간은 현재 시점 대신 CMIP5에서 상호 비교를 목적으로 결정된 2005년까지를 선정하였으며 미래기간은 자료가 존재하는 2100년 대신 2040년까지의 기간만을 고려하였다. 본 연

구의 목적은 농업용 저수지에 대한 기후변화 영향평가에 있어서 GCM의 선정에 따라 발생하는 높은 불확실성을 고려하는 것이다. Oh et al. (2012)은 A1B 온실가스 배출 시나리오에 나타난 사회·경제적 가정에 따라 모의된 OECD 및 유럽 지역의 토지이용변화 결과를 바탕으로 국내 농업용 저수지 지역에서의 공간적인 토지피복의 변화를 향후 100년 기간에 대해 모의한 바 있다. 하지만 다양한 변수들에 의해 발생할 수 있는 토지피복 예측의 불확실성을 고려할 때 최종 분석 결과가 기후변화에 의한 것인지 토지이용 변화에 의한 것인지 구분이 어렵게 된다. 따라서 비교적 토지이용 변화가 적을 것으로 기대되는 2040년까지의 기간을 분석 대상으로 선정하였다.

2. 대상 저수지

대상 저수지의 선정은 농어촌공사에서 관리하는 3,372개 저수지 중에서 한발빈도가 10년이며, 농어촌공사에서 보유하고 있는 저수지별 수해면적 및 상류유역면적 정보와 GIS 공간분석을 통해 산출한 면적 오차가 ±10% 내외인 저수지 중에서 SWAT 적용이 가능한 58개의 저수지를 선정하였다. 본 연구에서는 농업용 저수지의 미세측 유역 특성을 고려하여, 58개 저수지 중 저수지 유역 하류에 유량관측소가 있는 금광, 하곡, 지소, 적량, 금전 저수지 유역을 대표 저수지 유역으로 선정하여 보정 (Calibration) 과정을 거치지 않은 SWAT 모형의 미세측 유역에 대한 적용성을 평가하였다. SWAT 입력자료 구

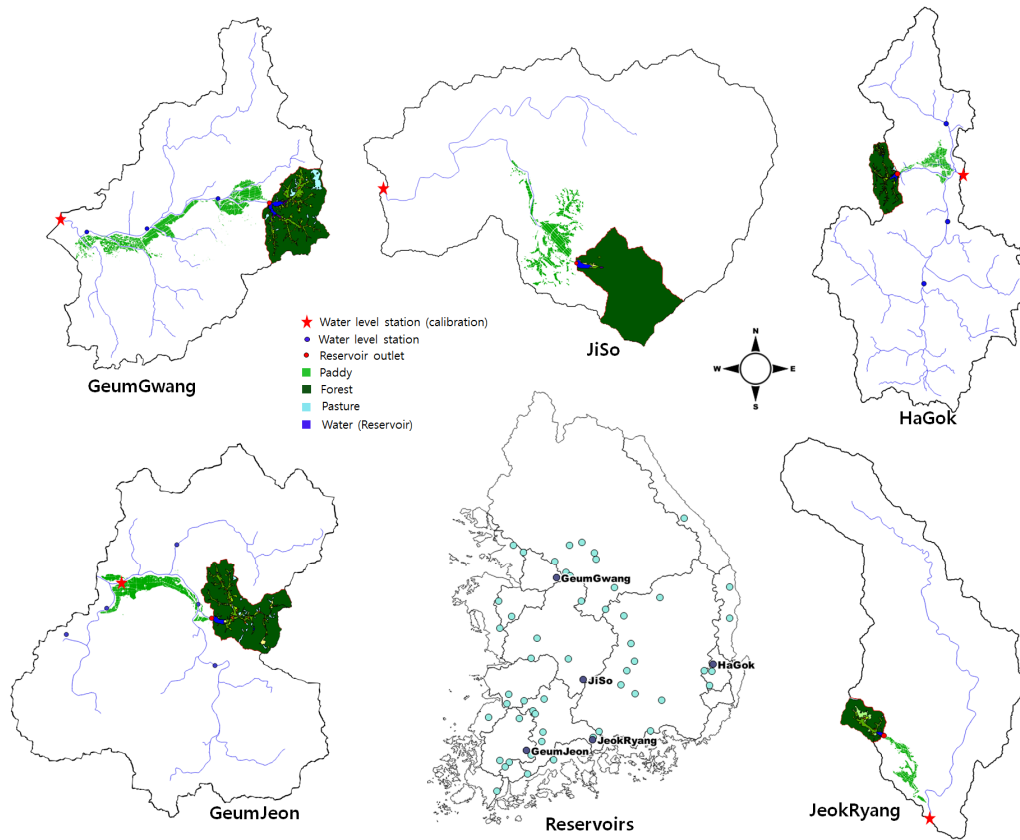


Fig. 1 Location of representative reservoirs

Table 2 Characteristics of the representative reservoirs and watersheds

Name	Storage capacity (1000 t)	Reservoir surface area(ha)	Irrigation area(ha)	Upstream watershed area (ha)	Distance to weather station (km)	Dead storage water level(m)	Full water level(m)	Land use (%)		
								Paddy	Upland	Forest
GeumGwang	12095	138.4	2134.0	4830.0	38.2	51.5	67	10.3	3.5	76.4
HaGok	4785	78.4	975.6	3370.0	22.9	47	58.7	6.0	6.3	81.4
GeumJeon	2738	50.1	825.8	3147.0	28.5	494	525	6.5	2.6	83.5
JiSo	2253	16.1	375.8	1380.0	24.2	82	105.5	0.4	0.0	98.0
JeokRyang	1265	11.0	145.4	450.0	32.8	51.1	58.9	9.6	2.5	75.6

축에 필요한 공간정보로는 토양도의 경우는 국립농업과학원에서 제공하는 정밀토양도와 DEM의 경우는 30m 격자 크기의 ASTER Global Digital Elevation Map (<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>)을 사용하였다. 토지이용도의 경우는 환경부에서 제공하는 2007년 중분류 토지이용도를 사용하였는데 논의 경우 저수지 물수지 분석을 위해서 필요한 관개 지역만을 구분하는데 제한적이다. 따라서 저수지별 관개지역의 공간 분포는 농어촌공사에서 보유하고 있는 시설별 수혜지구 지번과 한국토지정보시스템에서 제공하는 지적도 자료를 활용하

여 분석하였다. Fig. 1은 선정된 58개 대상 저수지의 위치와 그 중 대표 저수지의 유역 내 저수지 및 수혜지구 위치, 하천망도를 보여 주고 있으며 Table 2는 저수지 재원 및 유역 특성을 정리한 것이다.

3. SWAT 모델링 절차

상류유입량 및 필요수량 산정을 위해서 미계측 유역에서의 적용을 위해 개발된 SWAT (Arnold et al., 1998) 모형을

사용하였다. 대표적인 유역모델 중 Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF)의 경우는 SWAT 모형과 비교하여 관측 데이터를 이용한 보다 심도 있는 매개변수 선정이 필요한 것으로 알려져 있다 (Im et al., 2004). 농업용 저수지 설계에 사용되어 온 TANK 모형과 HSPF 및 SWAT 모형을 국내 저수지 상류유역에 적용한 결과 HSPF의 경우 TANK 및 SWAT 모형에 비하여 적은 유출량을 보여 TANK 모형을 대체하는데 있어서 주의해야 하는 것으로 보고되었다. Kim and Kim (2012)은 팔당댐 상류의 자연유출량 계산에 있어서 TANK 모형은 홍수기를 제외한 평수기 이하에서 일정 유량 이하로 모의되지 않는 문제를 보여 준 반면 SWAT의 경우 일부 홍수사상을 제외하고 대체로 관측치의 경향을 잘 모의하는 것으로 분석하였다.

본 연구에서는 SWAT 모형의 미계측 유역에서의 적용성을 평가하기 위해 관측 자료가 있는 5개 대표 유역을 대상으로 관측 기상 자료를 이용하여 매개변수 보정 없이 모형을 적용한 후 저수지 하류에 위치해 있는 유량 관측지점의 실측 자료와 비교하였다. 또한 기후변화 영향 평가를 위해 58개 저수지를 대상으로 생산된 미래 기후정보를 적용하여 기후변화에 따른 상류 유입량과 관개 필요수량의 변화를 분석하였다. 필요수량의 경우에는 SWAT 모형의 제한으로 인하여 모내기 용수와 같은 관리용수 및 관개수로를 통한 손실량을 제외한 작물에 의한 증발산량의 변화만을 분석하였다. 또한 필요수량에 영향을 미칠 수 있는 작물생육기간은 농어촌공사의 (Hydrological Operation Model for Water Resources System (HOMWRS)의 입력과 동일하게 중부와 남부 지역으로 구분하여 적용하였다. HOMWRS는 밭 필요수량 산정 시 작부시기 입력에 한계가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 수해지구를 논으로 가정하여 중부 지역의 경우에는 이앙 (Planting) 시기를 모내기 시작인 4월 27일로 수확 (Harvest) 시기를 관개 종료일인 9월 21일로 고려하였으며 남부의 경우에는 각각 4월 11일 및 9월 20일을 적용하였다.

모의 결과는 일 및 월 단위로 산출된 Root Mean Square Error (RMSE)와 Nash Sutcliffe Efficiency (NSE, Nash and Sutcliffe, 1970) 비교를 통해 평가하였다 (식 (1)~(2)).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [Q_s^t - Q_o^t]^2} \quad (1)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_o^t - Q_s^t)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (2)$$

여기서, Q_s^t 와 Q_o^t 는 각각 t 일 또는 월에 해당하는 모의값과 실측값에 해당하며, \bar{Q}_o 는 실측값의 평균을, n 은 전체 자료의 개수를 의미한다.

시나리오 자료에 대한 SWAT 모의 결과의 과거 재현성 분석의 경우 동일한 과거기간 (1976~2005)에 대하여 편이보정 및 공간 상세화된 기후 정보와 과거 관측 기후자료의 적용 결과를 비교하여 상류 유입량 및 증발산량의 시간적 변화를 비교·분석하였다. SWAT 모형의 유입량 및 필요수량 모의 결과의 순별 30년 평균을 비교함으로써, 사용된 기후 자료의 농업용 저수지 분석에 대한 적합성을 평가하였다. 저수지 관리에 있어 이앙시기 조정 등 비구조적인 방법을 통해 용수사용의 효율을 극대화하고자 하는 경우 순별 자료의 높은 활용성을 고려하여 월별로 수행된 상세화 과정을 거친 자료에 대한 순별 재현성 분석을 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 대표 저수지 기초 분석

가. 미계측 유역에 대한 SWAT 적용성 평가

선정된 대표 저수지 유역에 대해 매개변수 보정 없이 모형을 적용한 후 저수지 하류부에 위치한 유량관측 자료를 이용하여 모의 성능을 평가하였다. Table 3은 각 저수지 유역에 대한 모의 기간과 일 단위 및 월 단위 결과의 오차를 보여주고 있다. 적량 및 금광 저수지에서의 총 유출량의 경우 각각 10.2% 및 22.2% 낮게 모의 하는 것을 제외하고 나머지 3개 저수지의 경우 10% 미만의 오차를 보여 양호한 모의 성능 보였다. 월 단위 NSE의 경우 5개 유역에서 값이 0.5 이상으로 양호한 결과를 보였으며 유역별 모의치와 실측치의 산포도를 나타내는 Fig. 2에서 보는바와 같이 결정계수 (R^2)는 금광, 하곡, 지소, 적량, 금전 저수지에서 각각 0.82, 0.91, 0.93, 0.82, 0.87의 값을 보였다. 반면 일 단위 NSE값은 금광 및 적량 저수지에서 각각 0.46 및 0.33으로 0.5보다 작은 값을 보였다. RRI (2013)는 SWAT 모형의 농업용 저수지 물수지 분석에 있어서 수해지구의 관개수량을 저수지로부터 공급하도록 연계 운영하는 경우 저수지 일별 거동을 잘 모의하지 못하는 것으로 분석하였다. 저수지 및 수해지구를 포함하는 소유역 규모에서는 SWAT 모형의 저수지 모의 성능이 하류 하천에서의 일 유량에 큰 영향을 미칠 수 있으나 저수지의 상류 유입량에는 영향을 주지 못한다. Cho (2013)는 미계측 유역에서 저수지 모델 선정에 따른 불확실성을 살펴보기 위하여 동일한 5개 대표 저수지에 HOMWRS를 이용하여 30년 과거기간에 대한 상류 유입량을 모의하였다. 동일한 조건에서 SWAT 모의 결과와 비교하는

Table 3 SWAT simulation results at representative reservoir watersheds without calibration

Performance Criteria		Reservoirs/Simulation period				
		GeumGwang 2009~2011	HaGok 2009~2011	JiSo 2001~2003	JeokRyang 2010~2011	GeumJeon 2006~2008
% Error		-10,2	6,1	-3,3	-22,2	-2,1
RMSE	Daily	23,8	27,2	8,9	20,7	21,5
	Monthly	9,8	5,4	2,1	6,4	6,0
NSE	Daily	0,46	0,64	0,67	0,33	0,52
	Monthly	0,78	0,91	0,93	0,68	0,86

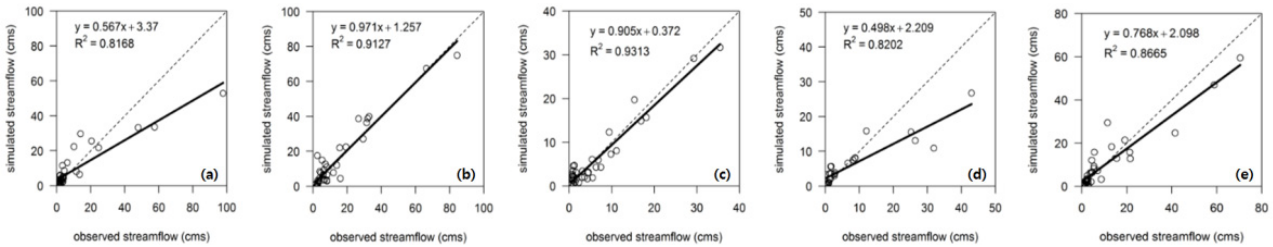


Fig. 2 SWAT simulation results (without calibration) for (a) GeumGwang, (b) HaGok (c) JiSo, (d) JeokRyang, and (e) GeumJeon reservoir watershed

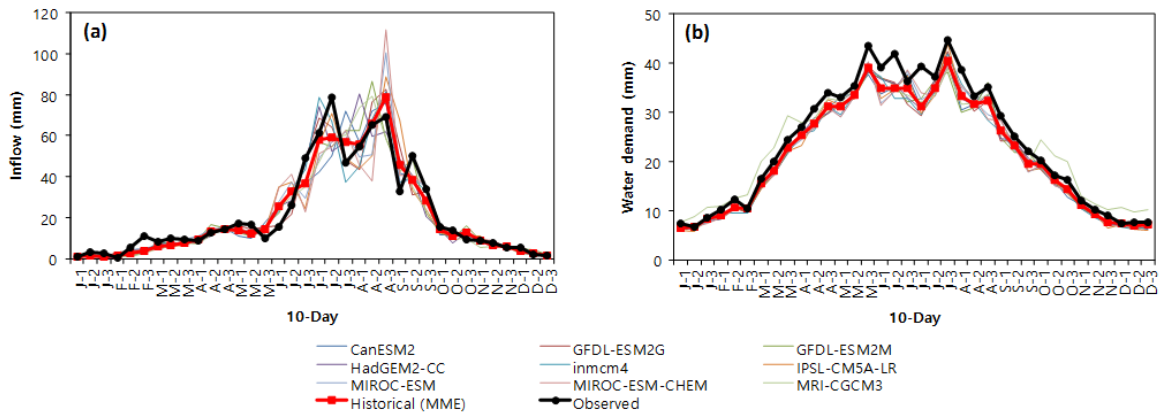


Fig. 3 Comparison of simulated 30-year 10-day average (a) inflow and (b) demand using observed weather data and GCMs historical data at Jiso reservoir watershed

경우 HOMWRS가 금광, 하곡, 지소, 금전 저수지에 대해서 각각 13.5, 10.7, 7.6, 15.5% 크게 모의하였고 적량 저수지에서는 -11.8%로 적게 모의하여 20% 미만에서의 차이를 보였다. 이와 같은 차이는 HOMWRS TANK 모형의 경우 1988년에 개발된 매개변수 추정식을 적용하고 있으며 이에 따른 제한성에 기인할 수 있다.

나. 기후변화 시나리오의 과거 재현성 평가

과거 재현성 평가는 5개 대표 저수지에 대하여 수행되었으나 시간적 분포는 지소 저수지에 대하여 Fig. 3에 유입량 및 필요수량에 대한 결과를 제시하고 있다. 지소 저수지 유입량의

경우 9개 GCM 결과가 우기인 7월과 8월에 넓게 분포 (7월 초~8월말의 순별 표준편차의 평균: 13.05 mm)하고 있는 것을 확인할 수 있으며 GCMs 단순 평균인 MME의 경우 7월 중순과 하순의 유입량이 실측과 비교해 과소, 과대 모의하는 교차 경향을 보였다. 지소 저수지 유역에서의 필요수량의 경우도 9개 GCMs에 의한 MME 값이 6월 및 7월에 낮게 나타나는 경향을 보였다.

Table 4는 각 대표 저수지에 대한 GCM별 유입량 및 필요수량 모의 결과의 총오차와 NSE값을 제시하고 있다. 우선 관측치에 대한 MME와의 총오차를 살펴보면 상류 유입량의 경우는 금광, 하곡, 지소, 적량, 금전 저수지에 대하여 각각

Table 4 SWAT simulation results (without calibration) at representative reservoir watershed

GCMs	Reservoirs									
	GeumGwang		HaGok		JiSo		JeokRyang		GeumJeon	
	diff.(%)	NSE	diff.(%)	NSE	diff.(%)	NSE	diff.(%)	NSE	diff.(%)	NSE
Inflow										
CanESM2	0.8	0.93	0.9	0.92	-4.1	0.84	-0.1	0.95	2.8	0.79
GFDL-ESM2G	2.6	0.72*	4.9	0.83	-1.2	0.90	2.4	0.88	5.9	0.88
GFDL-ESM2M	3.1	0.91	3.8	0.80	-1.5	0.87	1.3	0.82*	5.9	0.85
HadGEM2-CC	3.4	0.85	3.5	0.94	-2.5	0.86	-1.3	0.88	2.6	0.73
inmcm4	2.8	0.86	4.3	0.85	-2.0	0.93**	1.7	0.87	3.5	0.76
IPSL-CM5A-LR	-0.7	0.77	1.5	0.76*	-3.9	0.79	0.6	0.86	4.5	0.72
MIROC-ESM	-1.4	0.90	-0.6	0.93	-4.2	0.83	-1.3	0.96	3.0	0.77
MIROC-ESM-CHEM	-0.7	0.82	-1.3	0.85	-3.2	0.71*	-1.9	0.90	4.4	0.56*
MRI-CGCM3	-2.4	0.90	-1.2	0.85	-6.5	0.86	-3.3	0.84	3.0	0.88
MME	0.8	0.95**	1.8	0.95**	-3.3	0.92	-0.1	0.96**	3.8	0.89**
Demand										
CanESM2	-1.1	0.98*	-2.5	0.96	-9.5	0.94	-1.8	0.96	-0.5	0.96
GFDL-ESM2G	-2.2	0.99	-3.1	0.98	-10.0	0.94	-2.3	0.99**	-0.7	0.99**
GFDL-ESM2M	-2.1	0.98	-3.0	0.97	-9.9	0.94	-2.3	0.96	-0.8	0.96
HadGEM2-CC	-1.3	0.99	-1.6	0.98	-9.0	0.95	-0.2	0.97	0.3	0.97
inmcm4	-0.7	0.99	-4.9	0.97	-11.1	0.93	-4.0	0.97	0.7	0.98
IPSL-CM5A-LR	-1.6	0.99	-3.4	0.96	-10.1	0.94	-2.8	0.96	-1.5	0.98
MIROC-ESM	-0.8	0.99	-2.9	0.97	-9.9	0.94	-2.2	0.96	-1.2	0.96
MIROC-ESM-CHEM	-0.9	0.99	-2.9	0.96	-9.9	0.94	-2.1	0.95	-1.1	0.95
MRI-CGCM3	7.3	0.96	0.4	0.90*	-1.6	0.93*	5.4	0.86*	3.0	0.85*
MME	-0.4	0.99**	-2.7	0.98**	-9.0	0.95**	-1.4	0.98	-0.2	0.98

* represents lowest value and ** represents highest value among 9 GCMs and MME.

0.8%, 1.8%, -3.3%, -0.1%, 3.8%의 오차를 보여 금전 저수지에서 가장 큰 총오차를 보이는 것으로 나타났다. NSE 평가결과 과도 각 저수지 유역에 대해 0.95, 0.95, 0.92, 0.96, 0.89로 나타나 금전 저수지에서 가장 낮은 정확도를 보였다. MME 필요수량에 대한 총 오차의 경우 금광, 하곡, 지소, 적량, 금전 저수지에 대하여 각각 -0.4%, -2.7%, -9.0%, -1.4%, -0.2%로 나타나 지소 저수지에서 가장 큰 오차를 보였으며, NSE값 또한 0.95로 가장 낮은 값을 보였다. MME의 경우 전체적으로 5개 대표 저수지에서 유입량 및 필요수량 모두 지소 저수지에서의 -9.0%(필요수량)을 제외하고 총오차가 ±4% 미만으로 나타나 본 연구에 사용된 편이보정 및 상세화 기법이 농업용 저수지의 유입량 및 필요수량 분석에 적합한 것으로 판단하였다.

또한 과거기간에 대한 재현성 평가의 경우 개별 GCM 및 MME의 유입량에 대한 NSE 기준으로 금광, 하곡, 적량, 금전 저수지에서 MME가 개별 모형들보다 가장 높은 정확도를 보였다. 필요수량의 경우는 금광, 하곡, 지소 저수지에서 MME가 개별 모형들 보다 높은 NSE값을 보였다. 다중 모형의 단순

평균인 MME는 개별 모형의 불확실성 또는 오차를 상쇄하는 역할을 하여 과거 재현성에 있어서 순별 유입량 및 필요수량의 시간적 변화를 비교적 잘 모의하는 것으로 판단된다.

다. 기후변화 시나리오의 미래 전망 불확실성

GCM 선정에 따른 저수지 유입량의 미래 전망의 불확실성을 살펴보기 위하여 일단위 자료 확보가 용이한 9개 GCM을 이용한 5개 대표 저수지에 대한 유입량 및 필요수량 모의 결과를 분석하였으며, 지소 저수지에서의 결과는 Fig. 4에 제시되어 있다. RCP4.5 시나리오에 대한 가까운 미래기간(2011~2040) 동안의 GCM별 순평균 유입량 모의 결과, 지소 저수지에서 RCP4.5 시나리오의 경우 inmcm4 모형과 CanESM2모형이 각각 과거기간 대비 최소 및 최대 모의 결과를 보였으며 과거기간의 MME와의 차이는 각각 -11.2% 및 25.9%로 나타났다 (Fig. 4, Table 5). 과거기간과 비교하여 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오에 의한 지소 저수지에서 MME 유입량은 각각 8.5%와 9.1% 증가하는 예측 결과를 보였다. 5개 대표저수

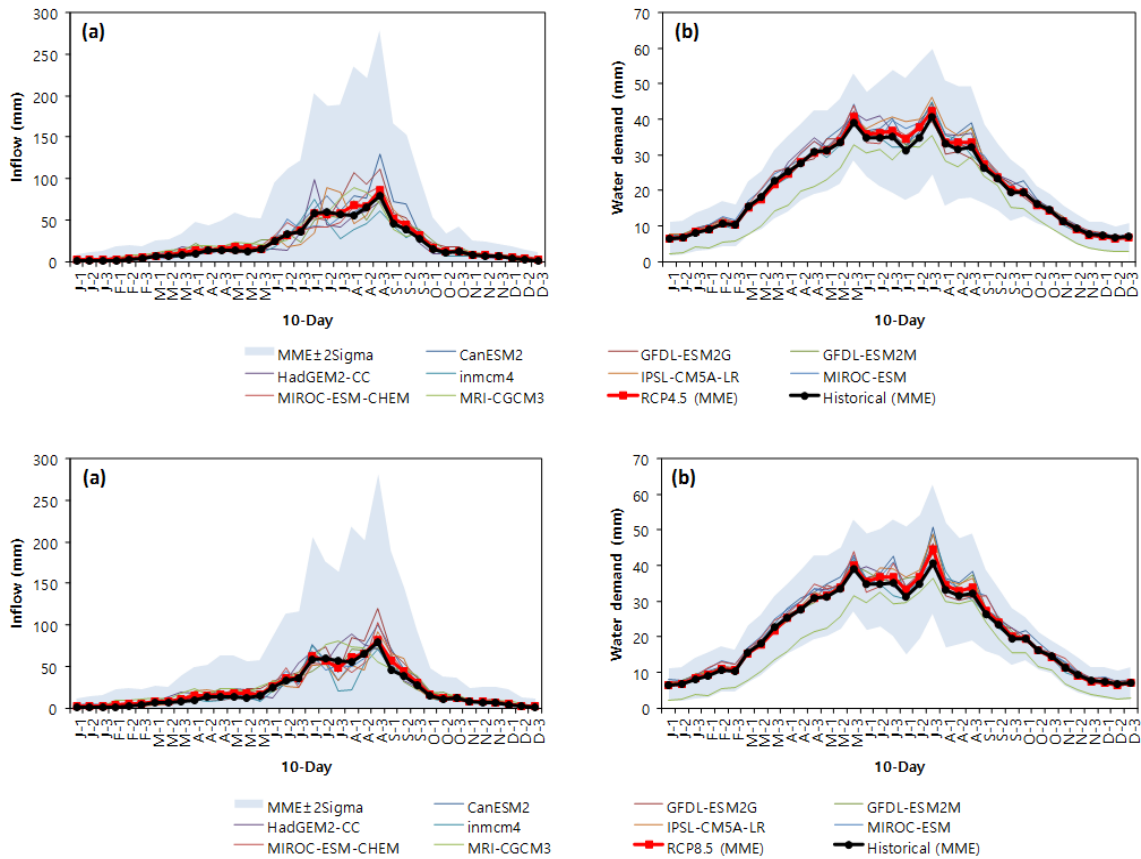


Fig. 4 Comparison of simulated 10-day average (a) inflow and (b) demand of JiSo reservoir watershed for the future period (2011~2040) of RCP 4,5 (Up) and RCP 8,5 (down) scenarios using GCMs and MME

지에 대한 모의 결과, inmcm4 모형은 과거기간의 MME값과 비교하여 대부분의 저수지에 대해 유입량이 감소하는 결과를 보였다. HadGEM2-CC와 inmcm4이 과거기간 대비 유입량 감소 경향을 보인 반면, 나머지 모형의 경우 모든 저수지 및 시나리오에 대하여 증가하는 경향을 보였다. 특히 증가폭이 비교적 큰 GCM은 CanESM2, GFDL-ESM2G, MRI-CGCM3로 나타났다.

필요수량의 경우 지소 저수지에서 과거기간에 대한 MME 값과 비교하여 RCP4.5 시나리오에서 가장 큰 감소 경향을 전망한 GCM은 MRI-CGCM3 (-23.3%)이었으며 가장 큰 증가 경향을 전망한 모형은 HadGEM2-CC (7.8%)로 나타났다 (Fig. 4, Table 5). 또한 과거기간의 MME와 비교하여 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오에 의한 MME 필요수량은 각각 1.9%와 2.6%로 소폭 증가하는 결과를 보였다. 이는 대부분의 모형이 필요수량의 증가 경향을 전망하고 있으나 MRI-CGCM3 모형의 경우 모든 저수지 및 RCP 시나리오에 대하여 지소 저수지의 RCP4.5 시나리오의 경우인 -23.3% 보다 큰 감소 경향을

보여 기타 모형들에 의한 증가 전망이 상쇄되었기 때문으로 판단된다.

2. 전체 저수지 대상 기후변화 영향 평가

가. 상류 유입량 분석

Fig. 5는 58개 대상 저수지에 대한 MME 기반 유입량의 순별 결과를 보여 준다. 실선은 순별 MME에 대한 58개 저수지 평균을 의미하며 음영 부분은 개별 저수지들에 의한 최솟값 및 최댓값의 범위를 보여준다. 평균 유입량의 저수지별 최댓값 및 최솟값의 범위를 살펴보면 10월부터 3월 사이에는 저수지별, 순별 평균 유입량이 좁은 폭에서 변화하는 반면에 생육기간 동안의 유입량의 변동 폭이 매우 높은 특성을 보이고 있다. 이는 우기에 집중되는 지역적 강우량 특성 및 생육기간 동안에 유역의 특성, 특히 토지이용에 따라서 서로 다른 유출 특성을 보이기 때문인 것으로 판단된다. 전체 저수지 평균을 기반으로 하여 과거기간 및 미래기간의 월별 유입량을 분석한 결과 (Table 6) 연평균 유입량은 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리

Table 5 Changes (%) in inflow and demand projections under the two RCP scenarios (2011~2040) comparing to the MME of historical period (1976~2005) at representative reservoir watersheds

GCMs	Reservoirs									
	GeumGwang		HaGok		JiSo		JeokRyang		GeumJeon	
	RCP4,5	RCP8,5	RCP4,5	RCP8,5	RCP4,5	RCP8,5	RCP4,5	RCP8,5	RCP4,5	RCP8,5
Inflow										
CanESM2	25.4**	17.0	37.3**	17.9	25.9**	13.4	33.7**	15.2	28.3	16.9
GFDL-ESM2G	17.5	22.6**	21.6	24.4**	23.7	25.8	19.3	23.2	30.4**	28.1
GFDL-ESM2M	6.5	8.4	7.7	7.4	5.9	5.7	7.0	6.5	15.3	7.8
HadGEM2-CC	2.1	18.5	-11.2*	4.5	1.0	17.8	-9.5	16.5	-9.1*	20.9
inmcm4	-1.7*	8.1	-8.5	-9.2*	-11.2*	-10.7*	-9.7*	-10.6*	6.9	4.2
IPSL-CM5A-LR	0.6	6.4	6.6	5.7	4.8	0.9	4.7	3.9	4.9	0.1*
MIROC-ESM	7.2	0.8*	9.4	6.6	3.4	1.5	7.6	5.9	3.8	1.6
MIROC-ESM-CHEM	15.8	11.4	13.4	18.8	9.7	7.5	11.1	16.7	12.4	8.0
MRI-CGCM3	13.7	13.0	14.5	21.5	19.5	26.6**	21.5	28.1**	28.0	29.2**
MME	8.7	10.6	9.6	9.5	8.5	9.1	9.1	10.5	12.5	12.3
Demand										
CanESM2	4.0	5.1	8.7	13.1**	6.8	10.2**	7.6	11.8**	6.5	10.2**
GFDL-ESM2G	0.4	1.5	2.6	3.0	2.1	2.3	1.9	2.0	1.8	1.1
GFDL-ESM2M	2.3	1.6	3.0	5.0	2.4	4.3	2.0	4.0	2.2	4.2
HadGEM2-CC	7.2	4.0	11.4	10.1	7.8**	4.9	11.5**	9.8	10.8**	9.0
inmcm4	1.1	-0.4	0.1	1.7	0.0	1.8	-0.5	1.1	2.5	3.3
IPSL-CM5A-LR	8.0**	8.1**	8.2	7.2	7.7	6.7	7.5	6.2	7.3	6.0
MIROC-ESM	3.4	4.0	9.1**	9.5	6.8	8.1	8.1	8.1	6.9	7.8
MIROC-ESM-CHEM	-2.2	-0.9	7.2	7.1	5.4	6.9	6.1	5.8	5.2	6.6
MRI-CGCM3	-28.4*	-28.5*	-35.5*	-35.9*	-23.3*	-23.4*	-31.4*	-31.6*	-38.2*	-38.4*
MME	0.2	-0.1	1.9	2.6	1.9	2.6	1.6	2.2	0.7	1.2

* represents lowest value and ** represents highest value among 9 GCMs and MME.

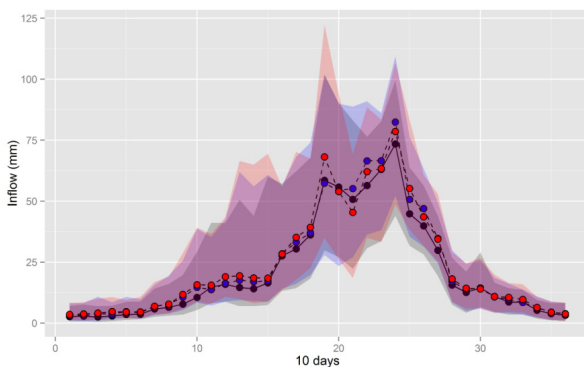


Fig. 5 Comparison of historical simulation and projection (2011~2040) for inflow of 58 reservoirs (black: historical, blue: RCP4,5, and red: RCP8,5, shaded area represents minimum and maximum ranges over the reservoirs)

오에 대하여 각각 846.9 mm 와 857.7 mm로 과거기간의 774.2 mm와 비교하여 9.4% 및 10.8%의 증가 경향을 보여

Table 6 Comparison of inflow projections under the two RCP scenarios to historical simulation results on monthly basis

Month	Inflow (mm)				
	Historical	RCP4,5	Change (%)	RCP8,5	Change (%)
Jan	8,0	10,4	29,8	11,4	42,3
Feb	10,2	12,7	25,3	13,8	36,2
Mar	20,0	25,2	25,6	26,4	31,8
Apr	41,2	44,6	8,3	50,2	21,8
May	45,2	51,9	14,9	56,4	24,9
Jun	94,1	98,6	4,8	102,8	9,2
Jul	165,0	166,8	1,1	167,4	1,5
Aug	192,8	215,5	11,8	204,0	5,8
Sep	114,4	132,3	15,6	133,2	16,4
Oct	42,6	45,2	6,0	46,3	8,7
Nov	28,2	29,0	2,8	31,2	10,4
Dec	12,4	14,6	17,8	14,6	17,6
Total	774,2	846,9	9,4	857,7	10,8

RCP 8.5 시나리오에 대한 결과가 비교적 높은 증가율을 보이는 것을 확인 하였다. 월별 증가율 비교 결과 겨울 및 봄철에 유입량의 증가율이 두 RCP 시나리오에 대해 모두 높게 나타난 반면에 여름 및 가을 기간 중에는 9월의 증가율이 크게 나타났다.

나. 관개 필요수량 분석

Fig. 6은 58개 저수지에 대한 MME 기반 필요수량의 순별 결과를 보여 주며 개별 저수지의 순별 MME를 전체 저수지에 대하여 계산한 평균 필요수량과 개별 저수지에 대한 결과의 범위 (최댓값~최솟값)를 보여준다. 필요수량에 대한 모의 결

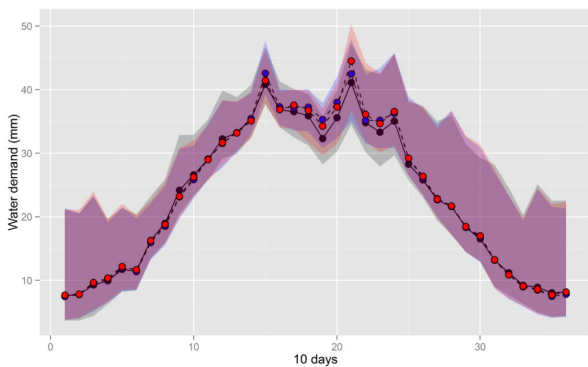


Fig. 6 Comparison of historical simulation and projection (2011~2040) for water demand of 58 reservoirs (black: historical, blue: RCP4.5, and red: RCP8.5, shaded area represents minimum and maximum ranges over the reservoirs)

Table 7 Comparison of demand projections under the two RCP scenarios to historical simulation results on monthly basis

Month	Demand (mm)				
	Historical	RCP4,5	Change (%)	RCP8,5	Change (%)
Jan	24,6	24,7	0,2	25,2	2,1
Feb	33,1	33,4	0,9	34,2	3,1
Mar	59,4	57,6	-3,1	58,2	-2,0
Apr	87,9	86,5	-1,6	86,9	-1,1
May	109,4	111,2	1,6	109,7	0,2
Jun	109,3	111,7	2,2	111,2	1,7
Jul	109,0	115,7	6,2	116,0	6,5
Aug	103,1	106,6	3,4	107,3	4,1
Sep	76,7	78,1	1,8	78,4	2,1
Oct	56,4	56,9	0,8	57,2	1,3
Nov	33,6	33,0	-1,7	33,2	-1,1
Dec	25,1	23,8	-5,4	24,5	-2,6
Total	827,8	839,2	1,4	841,9	1,7

과의 범위를 살펴보면 유입량과는 반대로 여름철에 좁은 변화폭을 보이는 반면, 가을 및 겨울 기간에 필요수량의 변동 폭이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Table 7은 전체 저수지 평균을 기반으로 하여 과거기간 및 미래기간의 월별 필요수량을 보여 준다. 연평균 필요수량은 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오 미래기간에 대하여 각각 839.2 mm 와 841.9 mm로 과거기간 (827.8 mm)에 대한 결과와 비교하여 1.4% 및 1.7%의 증가 경향을 보였다. 월별 증가율 비교 결과 7월과 8월에 필요수량의 증가율이 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에서 모두 높게 나타났으며 겨울 및 봄 기간 중에는 감소하는 경향을 나타냈다.

IV. 결론

본 연구에서는 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오 기반 9개 GCM의 일 단위 자료와 국내 농업용 저수지 유역 자료를 이용하여 SWAT 모형의 미계측 지역에 대한 적용성을 평가하고 58개 농업용 저수지에 대해 예측의 불확실성을 고려한 미래 (2011~2040) 유입량과 필요수량 변화를 분석하였다.

우선 5개 대표 저수지에 대해 보정과정을 거치지 않은 SWAT 모의 결과를 분석하여 그 적용성을 검증하였다. 과거 기간 동안에 편이 보정된 GCM 산출물에 대한 평가를 위해 모의된 유입량 및 필요수량 결과는 다중 GCM의 평균값인 MME 대비 약±25%의 범위로 GCM의 종류에 따라 큰 차이를 보여 GCM 선정에 따른 미래 기후예측의 큰 불확실성을 확인하였다. 또한 MME를 관측치 기반의 모의 결과와 비교한 결과 10% 미만의 오차를 보여 그 활용성이 큰 것으로 나타났다. 미래기간 동안에 모의된 연평균 유입량 전망 결과와 과거기간의 MME를 기준으로 비교한 경우 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오에 대하여 각각 9.4% 및 10.8%의 증가 경향을 보였으며, 필요수량은 각 시나리오에 대해 1.4% 및 1.7%의 증가 경향을 보였다. 전체적으로 RCP 8.5 시나리오에 대한 결과가 비교적 높은 증가율을 보였다. 계절별 변화를 살펴보면 두 RCP 시나리오 모두 유입량의 경우에는 겨울 및 봄철에 증가율이 높게 나타난 반면에 필요수량의 경우는 7월과 8월에 증가율이 높게 나타났으며 겨울 및 봄 기간 중에는 감소하는 계절적 특성을 보였다. 또한 저수지별 결과의 범위가 평균적 모의 결과의 오차에 비해 크게 나타나 주요 저수지에 대해서는 지역적 기후변화 영향 평가가 필요할 것으로 판단되었다.

기후변화 시나리오 자료는 다양한 목적의 응용분야에 활용될 수 있다. 하지만 분석하고자 하는 목적에 따라서 시스템의 중요한 기작과 시나리오의 적용 결과가 달라 질 수 있으므로 기후 자료에서 중요하게 고려되어야 할 기후변수의 특성

이 신중히 결정되고 평가되어야 한다. 따라서 과거 재현성을 포함한 미래 기후자료의 적용 적합성을 평가하는 과정은 기후변화 시나리오를 적용하여 도출된 최종 결과를 해석하는데 있어서 중요한 정보가 될 수 있으며 최종적으로 도출된 결과에 대한 신뢰성을 판단하는데 필수적인 과정이다.

사 사

본 연구는 APCC의 지원을 통해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, T. J., D. H. Cho, S. H. Lee, G. W. Choi, and Y. N. Yoon, 2004. Evaluation of the effective storage of existing agricultural reservoir. *Journal of Korea Water Resources Association* 37(5): 353-361 (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. *J. Amer. Water Resources Association* 34(1): 73-89.
- Nam, W. H., E. M. Hong, T. Kim, and J. Y. Choi, 2014. Projection of future water supply sustainability in agricultural reservoirs under RCP climate change scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(4): 59-68 (in Korean).
- Cho, J., 2013. Impact assessment of climate change for agricultural reservoirs considering uncertainty. Research report, APEC Climate Center, Busan, Republic of Korea (in Korean).
- De Silva, C. S., E. K. Weatherhead, J. W. Knox, and J. A. Rodriguez-Diaz, 2007. Predicting the impacts of climate change – A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka. *Agricultural Water Management* 93: 19-29.
- Chung S. O., 2009a. Climate change impacts on paddy irrigation requirement in the Nakdong river basin. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(2): 35-41 (in Korean).
- Chung S. O., 2009b. Prediction of paddy irrigation demand in Nakdong river basin using regional climate model outputs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(4): 7-13 (in Korean).
- Cheong T. S., S. U. Kang, M. H. Hwang, and I. H. Ko, 2008. Development and validation of reservoir operation rules for integrated water resources management in the Geum river basin. *Journal of Korea Water Resources Association* 41(4): 433-444 (in Korean).
- Fischer, G., F. N. Tubiello, H. Van Velthuizen, and D. A. Wiberg, 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements: effects of mitigation, 1990–2080. *Technological Forecasting and Social Change* 74: 1083–1107.
- Hwang, S. W., 2014a. Assessing the performance of CMIP5 GCMs for various climatic elements and indicators over the southeast US. *Journal of Korea Water Resources Association* 47(11): 1039-1050 (in Korean).
- Hwang, S. W., 2014b. Summary and inter-comparison of GHG scenarios and the results of climate change forecasts in the IPCC Assessment Reports. *Rural Resources* 56(2): 26-32 (in Korean).
- Hwang, S. W., and Kang, M. S., 2013. The methodologies of climate change impact assessment and uncertainty in each procedure. *Rural Resources* 55(1): 30-39 (in Korean).
- Im, S. J., K. M. Brannan, S. Mostaghimi, and J. Cho, 2004. Simulating fecal coliform bacteria loading from an urbanizing watershed. *Journal of Environmental Science and Health, Part A-Toxic /Hazardous Substances & Environmental Engineering* 39(3): 663-679.
- Kang, M. G., J. H. Lee, and K. W. Park, 2013. Parameter regionalization of a TANK model for simulating runoffs from ungauged watersheds. *Journal of Korea Water Resources Association* 46(5): 519-530 (in Korean).
- Kim H. Y., and S. W. Park, 1988. Simulating daily inflow and release rates for irrigation reservoirs(III). *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 30(3): 95-105 (in Korean).
- Kim, C. G., and N. W. Kim, 2012. Comparison of natural flow estimates for the Han river basin using TANK and SWAT models. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(3): 301-316 (in Korean).
- Lee Y. J., M. J. Park, K. W. Park, and S. J. Kim, 2008. Analysis of hydrologic behavior including agricultural reservoir operation using SWAT model. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 11(1): 20-30 (in Korean).
- Oh, Y. G., S. H. Yoo, S. H. Lee, N. Y. Park, J. Y. Choi, and D. K. Yun, 2012. Prediction of land-cover change and analysis of paddy fields changes based on climate change scenario (A1B) in agricultural reservoir watersheds. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(2): 77-86 (in Korean).
- Park, G. A., S.-R. Anh, Y.-J. Lee, H.-j. Shin, M.-J. Park, and S.-J. Kim, Assessment of climate change impact on the inflow and outflow of two agricultural reservoirs in Korea. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 52(5): 1869-1883.
- Park, J., M. S. Kang, I. Song, S. H. Hwang, and J. H. Song, 2013. Development of IDF curve based on RCP4.5 scenario for 30-reservoirs in South Korea. *Journal of Korean Society*

- Hazard Mitigation* 13(6): 145-159 (in Korean).
21. Rural Agricultural Water Resource Information System, <https://rawris.ekr.or.kr/>.
 22. Rural Research Institute (RRI), 2011. A study on the impact assessment of climate change on agricultural water. Korean Rural Community Corporation, Republic of Korea (in Korean).
 23. Rural Research Institute (RRI), 2013. Saemangeum basin modeling study considering future water quality characteristics analysis and agricultural non-point source pollution mechanism. Korean Rural Community Corporation, Republic of Korea (in Korean).
 24. Tebaldi, C. and R. Knutti, 2007. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 365: 2053-2075.
 25. Yun D. H., S. O. Chung, and S. J. Kim, 2011. Climate change impacts on paddy water requirement. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(4): 39-47 (in Korean).