J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 51, No. 1 (2018), pp. 11-18
doi: 10.3741/JKWRA.2018.51.1.11
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

Assessing hydrologic impact of climate change in Jeju Island using multiple GCMs and watershed modeling

Kim, Chul Gyum[a]* · Cho, Jaepil[b] · Kim, Nam Won[a]

[a]Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology
[b]Climate Application Department, APEC Climate Center

Paper number: 17-082
Received: 13 October 2017; Revised: 13 November 2017; Accepted: 13 November 2017

Abstract

The climate change impacts on hydrological components and water balance in Jeju Island were evaluated using multiple climate models and watershed model, SWAT-K. To take into account the uncertainty of the future forecast data according to climate models, climate data of 9 GCMs were utilized as weather data of SWAT-K for future period (2010-2099). Using the modeling results of the past (1992-2013) and the future period, the hydrological changes of each year were analyzed and the precipitation, runoff, evapotranspiration and recharge were increasing. Compared with the past, the change in the runoff was the largest (up to 50% increase) and the evapotranspiration was relatively small (up to 11% increase). Monthly results show that the amount of evapotranspiration and the amount of recharge are greatly increased as the amount of precipitation increases in August and September, while the amount of evapotranspiration decreases in the same period. January and December showed the opposite tendency. As a result of analyzing future water balance changes, the ratio of runoff, evapotranspiration, and recharge to rainfall did not change much, but compared to the past, the runoff rate increased up to 4.3% in the RCP 8.5 scenario, while the evapotranspiration rate decreased by up to 3.5%. Based on the results of other researchers and this study, it is expected that rainfall and runoff will increase gradually in the future under the assumption of present climate change scenarios. Especially summer precipitation and runoff are expected to increase. As a result, the amount of groundwater recharge in Jeju Island will increase.

Keywords: Climate change, Jeju Island, Water balance, GCM, SWAT-K

다중 GCM과 유역모델링을 이용한 기후변화에 따른 제주도의 수문학적 영향 평가

김철겸[a]* · 조재필[b] · 김남원[a]

[a]한국건설기술연구원 수자원하천연구소, [b]APEC 기후센터 응용사업본부

요 지

본 연구에서는 다중 기후모델에 의한 미래 기후자료를 기반으로 SWAT-K 유역모형을 적용하여, 제주도 지역의 미래 기후변화에 따른 수자원 영향을 평가하였다. 기후모델에 따른 미래 전망자료의 불확실성을 고려하여 9개의 GCM 모델의 기후자료를 미래기간(2010~2099년)에 대한 SWAT-K 모형의 기상자료로 적용하였다. 과거(1992~2013년) 및 미래기간에 대한 연도별 수문변화를 분석한 결과 강수량, 유출량, 증발산량, 함양량 모두 증가하는 추세로 나타났다. 과거기간에 비해 유출량의 변화가 가장 크게 나타났으며(최대 50% 증가), 증발산량은 상대적으로 작게 나타났다(최대 11% 증가). 월별로는 8월과 9월의 강수량 증가에 따라 유출량과 함양량도 크게 증가하는 반면, 동일기간에 대한 증발산량은 감소하는 것으로 분석되었다. 1월과 12월은 반대의 경향이 나타났다. 미래의 물수지 변화를 분석한 결과 강수량 대비 유출량, 증발산량, 함양량의 비율은 변화가 크지 않으나, 과거와 비교했을 때 RCP 8.5 시나리오에서 유출량 비율은 최대 4.3% 증가하는 반면, 증발산량 비율은 최대 3.5% 감소하는 것으로 나타났다. 기존의 타 연구와 본 연구에서 도출한 결과를 종합해 볼 때, 현재 제시되고 있는 기후변화 시나리오 가정 하에서는 미래로 갈수록 점차 강수량과 유출량이 증가할 것이고 특히 여름철 강수량 및 유출량의 증가가 예상된다. 이로 인해 제주도 지역의 함양량도 함께 증가할 것으로 판단할 수 있다. 다만, 본 연구는 장기적인 측면에서 자연적인 기후변화로 인한 영향을 분석한 것이며, 추가적으로 단기적인 수재해 대응을 위한 홍수와 가뭄관리, 인위적인 용수 수급 관리 등에 대한 종합적인 분석을 통해 제주도 수자원의 지속가능한 이용을 위한 대응방안이 필요하다고 판단된다.

핵심용어: 기후변화, 제주도, 물수지, GCM, SWAT-K

***Corresponding Author.** Tel: +82-31-910-0545
E-mail: cgkim@kict.re.kr (C. G. Kim)

© 2018 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

제주도의 연평균 강수량은 약 2,000 mm 정도로서 국내 타 지역에 비해 상대적으로 많은 편이며, 수문지질학적 특성상 강수량의 40% 이상이 지하수로 함양되고 수자원 이용량의 80% 이상을 지하수로 활용하고 있어 가용 수자원은 풍부한 편이라 볼 수 있다. 제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013~2022) (JSSGP, 2013)에서 제시한 1993년, 2003년, 2012년의 수문분석 비교 결과에 의하면, 과거에 비해 강수량의 증가로 인해 지하수 함양량도 점차 증가하는 것으로 나타나고 있어 (1993년 1,494백만 m^3에서 2012년 1,676백만 m^3) 이에 따른 가용수자원량도 점차 증가한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 한편으로는 지속적인 인구증가와 도시지역의 확대, 시설작물의 증가 등에 따른 용수 수요의 증가로 인해 오히려 실제 수요량 대비 가용수자원은 점차 감소하고 있는 추세이다. 특히 섬지역이라는 특성상 고립된 수자원관리체계를 가지고 있는 제주도에서는 최근 빈번히 발생하는 홍수 및 가뭄 등이 단기적인 수자원 운영에 있어 위험요소로 작용하고 있으며, 중장기적인 관점에서는 전지구적인 기후변화에 대한 불확실성이 수자원 운영의 취약성을 증가시킬 것으로 예상된다.

기후변화에 따른 우리나라의 미래 수자원에 미치는 영향에 대해서는 이미 많은 연구를 통해 분석되고 있다. 일반적인 방법으로는 전지구적 기후모델에 의해 생산된 미래의 기후변화 시나리오별 기상자료를 시·공간적 상세화 과정을 통해 대상유역별 모델링을 위한 입력자료를 구축하고, 최종적으로 수문모델링을 통해 모의된 미래의 물수지 성분들을 분석하여 기후변화 영향을 평가하고 있다. 이를 위해 다양한 기후변화 시나리오, 기후모델, 유역모델링 기법들이 적용되고 있다. 수자원장기종합계획(2011~2020) (MLTMA, 2011)에서도 미래 기후변화에 따른 이·치수적 대응 방향을 제시하고 있다.

그러나, 제주도 지역을 대상으로 한 기후변화 전망, 특히 수자원 분야에 대한 영향에 대해서는 상대적으로 많은 연구가 진행되지 못한 상태이다. 이는 제주도 지역의 독특한 수문학적 특성을 반영하기 위한 모델링 기법이 다양하지 못한 이유도 있고, 이수적인 측면에서 제주도는 내륙처럼 지표유출에 의한 하천수 및 댐 저류량이 아닌 강수로부터의 함양에 의해 형성된 지하수를 이용하고 있어 상대적으로 기상변화에 덜 민감한 수자원 이용 여건을 가지고 있기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 대부분의 수자원을 지하수 위주로 활용하고 있기 때문에 기후변화로 인한 지하수자원의 변화를 정확히 예측하고, 이에 대한 충분한 대응책을 마련하는 것이 제주도의 지속가능한 수자원 확보를 위해 중요하다고 볼 수 있다.

제주도의 미래 기후변화에 대한 전망을 보면, 기온의 상승과 함께 점차 강수량이 증가할 것으로 예상되고 있으나, 한편으로는 집중호우의 증가에 따른 지표 유출량의 증가로 수자원 확보에 어려움이 있을 것으로 분석되고 있다(Lee *et al.*, 2016). 또한 서부와 북부의 해발 200 m 이하 지역에서는 가뭄심도가 현재에 비해 깊어지는 것으로 전망되기도 하며(Park *et al.*, 2014), 수질저하 및 해안대수층 염수화, 지하수 함양량 감소 등으로 인해 지하수 지속이용 가능량이 감소될 것으로 분석하고 있어(Koh *et al.*, 2014) 대체로 수자원 이용 여건에 부정적인 변화를 예상하고 있다. 그러나 이와 같은 연구들은 대부분 특정 기후모델에 의한 결과만을 제시하고 있어, 기후모델별 나타날 수 있는 다양성 및 수문분석을 위해 기후모델의 자료를 상세화하는 과정과 수문모델링 과정 등에서 나타날 수 있는 불확실성에 대한 충분한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 기존의 연구에서 보여주는 특정 기후모델에 의한 결과가 아닌 다양한 기후모델의 결과를 기반으로 제주도의 독특한 유출특성을 잘 반영할 수 있는 유역 수문모델링 기법을 접목함으로써, 미래 기후변화에 따른 제주도에서의 시·공간적 수문변화 및 수자원 여건 변화를 분석하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 유역 모델링 구축

대상유역은 제주도 부속 섬들 및 하천과 연계되지 않은 일부 해안지역을 제외한 본도 전역으로서, 기존에 제주도 지역의 다양한 수문학적 특성을 분석하기 위해 사용되었던 SWAT-K 유역모형을 적용하였다. SWAT-K는 미국 농무성에서 개발한 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold *et al.*, 1993)을 기반으로, 우리나라의 지형·지질 및 수문학적 조건을 반영하고, 지표수-지하수 연계 등을 통해 국내 유역에서의 적용성을 개선시킨 한국형 장기유출 해석모형이다(KICT, 2007). 제주도 지역에서는 Kim *et al.* (2009a) 이후 여러 연구를 통해 한천, 가마천, 송천, 천미천, 외도천, 강정천 등의 다양한 하천유역에 적용된 바 있으며, 특히 Chung *et al.* (2011)과 Kim *et al.* (2013)의 연구를 통해 제주도 하천의 대표적인 간헐적 유출 현상을 재현하는데 최적의 기법으로 평가되고 있다.

특정규모 이상의 호우에만 반응하는 제주도 하천의 유출특성을 모의하기 위하여 SWAT-K 모형에 Chung *et al.* (2011)이 개발한 한계유출 모의기법과 Kim *et al.* (2013)의 연구에서 제시된 간헐하천 모의기법을 적용하였다. 또한 제주도 중심에 위치한 한라산으로 인하여 나타나는 고도별 강수량 및 기

온의 변화와 지역별 풍속 및 습도의 영향을 반영하기 위하여 Kim *et al*. (2012)이 이용하였던 PRISM 기법을 적용하여 격자별 자료로부터 각 소유역별 입력자료를 생산하였다.

SWAT 및 SWAT-K 모형에 의한 제주도 하천의 유출특성 모의는 Kim and Kim (2016)에서 기술한 것처럼, 2008년 이후부터 최근까지 천미천, 외도천, 강정천, 한천, 화북천 등 다양한 하천유역에 대해 수행된 바 있으나 대부분은 관측자료에 대한 충분한 평가가 이루어지지 못하고 보정이 수행된 것으로 분석되고 있다. 이는 일정규모 이상의 강우시에만 하천유출을 나타내고 평상시에는 거의 건천의 형태를 보이는 제주도 하천의 유출특성과 지질학적 특성으로 인한 불규칙한 하상단면 등을 고려할 때, 관측자료에서 나타날 수 있는 불확실성이 매우 크기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 기존 연구들(Jeju Province and KOWACO, 2003; Kim *et al*., 2009b; JSSGP, 2013, Seo *et al*., 2014)에서 제시되고 있는 유출률 값을 고려하여 제주도 전체를 대상으로 강수량 대비 하천유출률이 20% 내외가 되도록 관련 매개변수를 보정하였으며, 각 소유역별 하천유역별 특성을 반영하여 모형의 보정을 수행하였다.

2.2 기후변화 적용방법

기후변화에 따른 영향 평가를 위해서는 미래 전망자료의 불확실성을 고려하여 다중모형을 사용하였다. 이를 위해 Table 1과 같이 IPCC (International Panel on Climate Change) CMIP5 (the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project)에서 제시하는 대순환모델(General Circulation Model, GCM) 중 SWAT-K 모형에 필요한 기상요소(강수량, 최고/최저온도, 상대습도, 풍속, 일사량)를 모두 제공하는 9개의 GCM을 선정하였다. 기존의 관측자료를 기반으로 소유역별로 상세화 및 편의보정된 미래의 기후변화 시나리오 자료를 적용함으로써 미래 기후변화에 따른 물수지 및 유출특성 변화를 평가하였으며, 4개의 RCP 기후변화 시나리오 중 RCP 4.5와 RCP 8.5 자료를 분석에 사용하였다.

3. 연구결과

3.1 과거기간에 대한 물수지 및 유출 특성

모의된 물수지 성분 결과에 대한 정확성은 각 하천유역별 관측치와의 비교를 통해 검증할 수 있으나, Kim and Kim (2016)이 분석한 바와 같이 실제 관측되는 유출자료의 불확실성이나 결측으로 인해 정확한 평가는 곤란하다. 또한 기존 제주도 하천의 유출 분석에 대한 연구들이 특정연도의 제한된 관측유량을 이용하거나, 관측유량의 불확실성에 대해서도 충분한 평가가 수행되지 않았기에 도출된 유출특성에 대한 충분한 검증이 필요하다고 판단된다(Kim and Kim, 2016). 따라서 각 하천별 비교 결과보다는 기존 연구들로부터 제시하는 제주도 전체의 물수지 특성과의 비교를 통해 본 연구에서 제시하는 물수지 결과 및 모델링 결과의 적용성을 평가하고자 한다.

과거 관측기간(1992~2013년)을 대상으로 분석한 물수지 결과는 선행연구(Kim and Kim, 2017)에서 제시한 바와 같이, 제주도 전체의 연평균 강수량 2,046 mm에 대해 유출량은 21.8%, 증발산량 34.1%, 지하수 함양량 44.1%이다. 이는 Table 2에 정리한 바와 같이, 「제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013~2022)」(JSSGP, 2013)에서 1992~2011년을 대상으로 분석한 강수량 대비 유출량 22.1%, 증발산량 33.4%, 지하수 함양량 44.5%와 거의 일치하는 결과이며, 과거의 물수지 분석결과(KOWACO, 1993; Jeju Province and KOWACO, 2003)와도 크게 다르지 않다. 따라서, 본 연구에서 제시하는 모델링 자료가 기존 연구들에서 제시하는 제주도 전체의 물수지 특성을 잘 재현하고 있다고 평가할 수 있다.

Table 1. The description of CMIP5 models applied in this study

Model	Atmospheric resolution		Institution
	Latitude	Longitude	
BCC-CSM1.1	2.7906	2.8125	Beijing Climate Center, China
CanESM2	2.7906	2.8125	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada
GFDL-ESM2G	2.0225	2.0	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
GFDL-ESM2M	2.0225	2.5	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
HadGEM2-CC	1.25	1.875	Met Office Hadley Centre, UK
INM-CM4	1.5	2.0	Institute of Numerical Mathematics, Russia
IPSL-CM5A-LR	1.8947	3.75	Institute Pierre Simon Laplace, France
MIROC-ESM	2.7906	2.8125	Atmosphere and Ocean Research Institute, Japan
MIROC-ESM-CHEM	2.7906	2.8125	Atmosphere and Ocean Research Institute, Japan

Table 2. Comparison of water balance analysis results for Jeju Island

Literature	Annual precipitation (mm)	Rates to precipitation (%)			Period
		Runoff	ET	Recharge	
This study & Kim and Kim (2017)	2,046	21.8	34.1	44.1	1992-2013
JSSGP (2013)	2,061	22.1	33.4	44.5	1992-2011
Jeju Province and KOWACO (2003)	1,975	20.7	33.2	46.1	1993-2002
KOWACO (1993)	1,872	19	37	44	-

Table 2에서 비교하고 있는 4개 연구들은 분석기간이 조금씩 다르고, 사용된 강수량이나 물수지 요소의 산정에서 약간의 차이가 있으나 모두 다음과 같은 수문학적 물수지 방법에 기초하고 있다.

$$GW = P - R - ET \pm S \tag{1}$$

여기서, GW: 지하수 함양량(mm), P: 강수량(mm), R: 유출량(mm), ET: 증발산량(mm), S: 다른 유역과의 지하수 유출입량(mm)으로 모두 연 총량이다. 이때, 다른 유역과의 지하수 유출입량(S)는 Jeju Province and KOWACO (2003)에서 제시한 바와 같이, 제주도의 지하수 흐름방향 및 지하수 유역 특성, 하천특성 등을 고려하여 “0”으로 가정하여 적용하였다.

4개 연구 모두 유출량은 기본적으로 NRCS CN 방법을 이용하고 있으며, 증발산량은 Penman 또는 Penman-Monteith 방법에 의한 기준작물증발산량을 산정하여 적용하고 있다. 다만, CN 방법을 적용하는데 있어 본 연구에서는 SWAT-K 유역모형을 이용하고, JSSGP (2013)에서는 L-THIA (Long-Term Hydrologic Impact Assessment) 모형을 적용하여 산정한 반면, Jeju Province and KOWACO (2003)과 KOWACO (1993)에서는 일부 지역 또는 지점의 유출율을 산정하고 이를 토대로 제주도 전체 소유역별 직접유출률을 추정하여 유출량을 산정하였다. 또한 증발산량을 산정하는 과정에서도 본 연구에서는 SWAT-K 모형을 이용하여 유역 전체에 대해 소유역별 가용토양수분과 작물생육과정을 고려하여 실제 증발산량을 산정하였으나, 타 연구에서는 기상관측소별 산정된 기준증발산량으로부터 토양수분평형법을 적용하여 실제증발산량을 산정하고 이를 소유역별로 확장하여 유역 전체에 대한 값을 제시하고 있다.

3.2 미래 기후변화에 따른 수문 변화

Fig. 1은 전체분석기간(1992~2099년)에 대한 연도별 수문성분(강수량, 유출량, 증발산량, 함양량)의 변화를 도시한 것으로, 1992~2009년은 과거의 기상자료를 이용하여 모델링한 결과이며, 2010~2099년은 RCP 4.5와 RCP 8.5 기후변화 시나리오에 대한 GCM 기후자료를 이용하여 모델링한 결과이다. 이때 2010~2099년의 자료는 총 9개 GCM 모형의 기후자료를 이용하여 모델링한 결과의 평균이기 때문에 과거기간의 자료에 비해 변화폭이 상대적으로 작게 나타나고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 강수량, 유출량, 증발산량, 함양량 모두 점차 증가하는 경향을 보이고 있으며, RCP 8.5에서의 변화가 큰 것으로 분석되었다.

Fig. 2와 같이 미래를 전반기(2010~2039년), 중반기(2040~2069년), 후반기(2070~2099년)으로 구분하여 과거(1992~2013년)의 모의결과와 비교하였을 때, 유출량의 변화율이 가장 크게 나타났으며, 증발산량의 변화율이 비교적 작은 것으로 분석되었다. RCP 4.5보다는 RCP 8.5에서의 변화율이 크게 나타났다.

Figs. 3~6은 미래의 월별 수문량의 변화를 시기별로 구분하여 과거의 결과와 비교한 것이다. 연도별 변화에서는 강수량, 유출량, 증발산량, 함양량이 모두 과거기간(1993~2013)과 비교하여 대체로 증가하는 추세를 보였으나, 월별로는 강수량의 경우 8월과 9월의 증가세가 뚜렷이 나타난 반면 오히려 1월과 12월은 약간의 감소가 예측되고 있다.

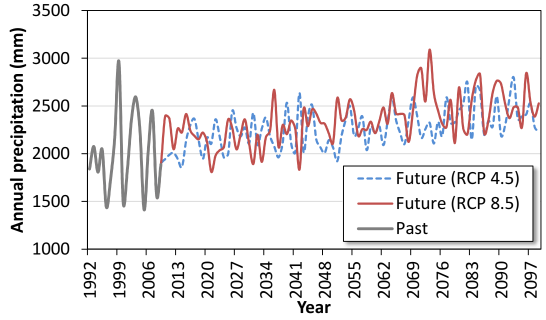
강수량의 증가에 따라 유출량과 함양량도 8월과 9월에 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 증발산량은 후반기로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있으나, 8~10월은 강수량의 영향 등으로 과거기간보다 오히려 감소하는 것으로 분석되었다.

이러한 결과는 기존 타 연구들에서 미래에 집중호우 및 강수량 증가에 따라 유출량이 증가될 것이란 전망(Kang, 2011; Koh *et al*., 2014; Lee *et al*., 2016)과 부합한다고 볼 수 있다. 다만, 제주도의 수자원 확보와 관련된 지하수 함양량과 관련해서는 부정적인 견해(Koh *et al*., 2014; Lee *et al*., 2016)도 있어 본 연구 결과와 다소 상충된다고 할 수 있다. 그러나 실제 용수 수요량 및 가용 수자원과 관련해서는 자연적인 기상여건의 변화 외에 인위적인 요인(작물종류 및 재배면적, 인구 및 개발사업, 수질오염 등)에 의한 영향이 크기 때문에 종합적인 고찰을 통한 미래의 용수 수급 분석이 필요하다고 판단된다.

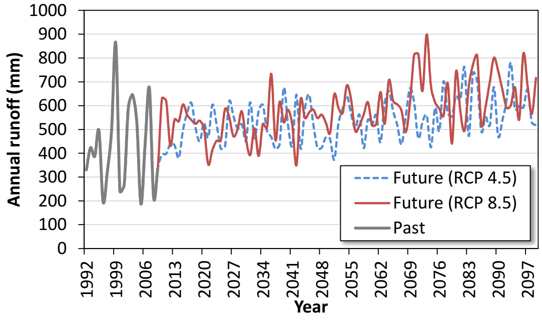
Fig. 7은 물수지 관점에서 강수량 대비 유출량, 증발산량, 함양량의 비율에 대한 미래 기후변화 영향을 분석한 것이다. 앞서 분석한 것과 같이 후반기로 갈수록 유출량, 증발산량, 함

양량의 절대치는 증가하는 것으로 나타났으나, 강수량 대비 비율은 변화가 크지 않았다. 특히 강수량 대비 함양량은 큰 변화가 없으며, 증발산량은 후반기로 갈수록 감소하고 유출량은 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 변화는 RCP 8.5 시나리오에서 상대적으로 크게 나타났다.

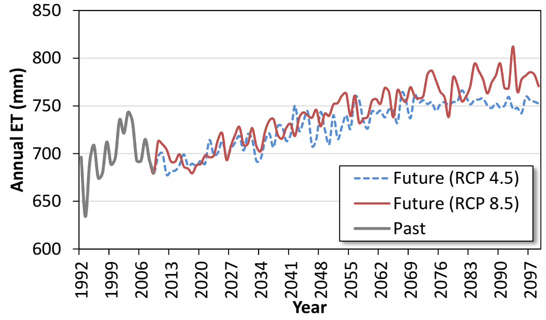
과거기간(1992~2013년)의 물수지와 비교하면, 강수량 대비 함양량은 거의 비슷한 반면, 유출량은 크게 증가하며 증발산량은 감소할 것으로 전망된다.



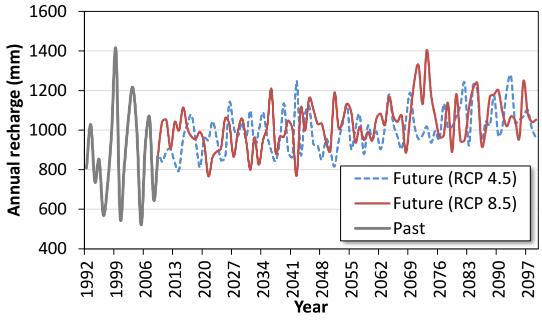
(a) Precipitation



(b) Runoff

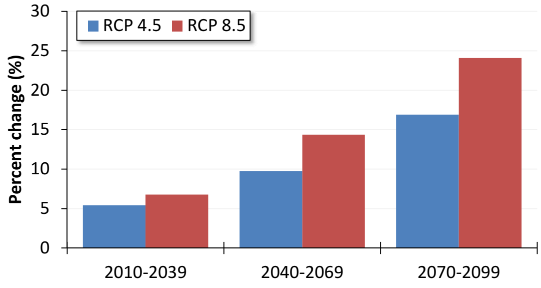


(c) Evapotranspiration

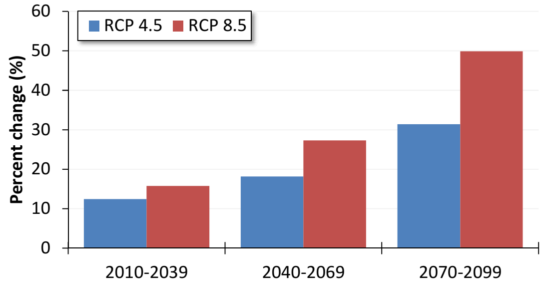


(d) Groundwater recharge

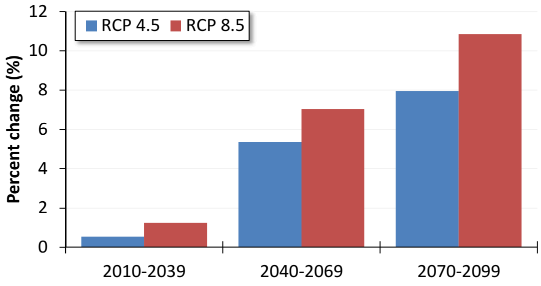
Fig. 1. Annual variation of hydrological components (1992-2099)



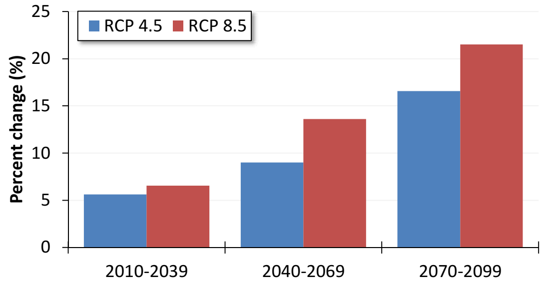
(a) Precipitation



(b) Runoff

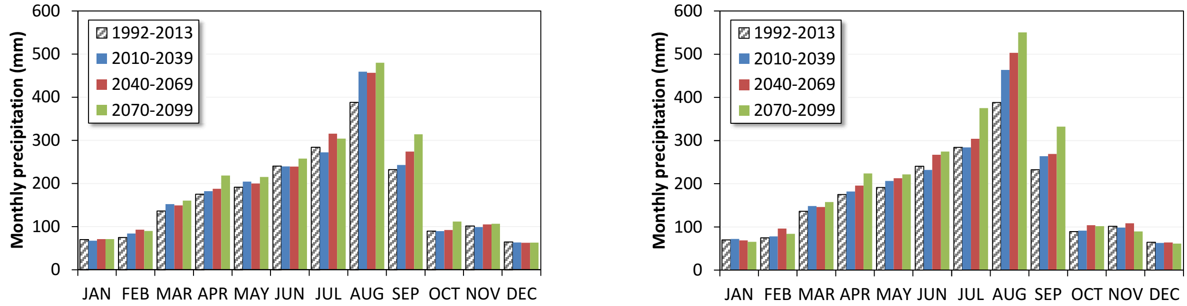


(c) Evapotranspiration



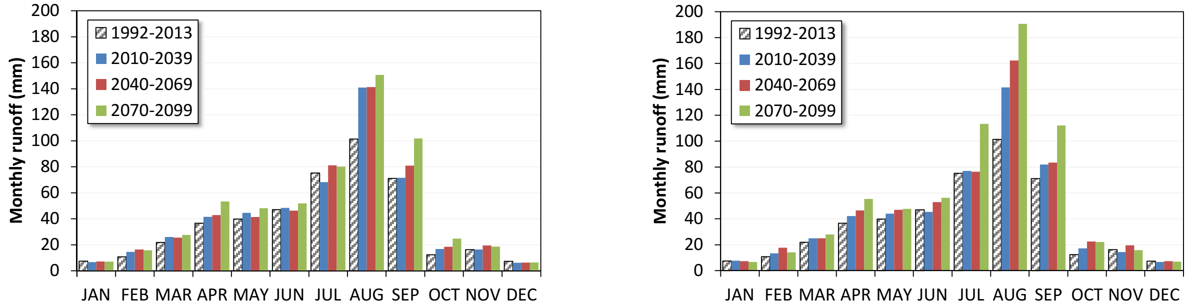
(d) Groundwater recharge

Fig. 2. Changes in hydrological components by period



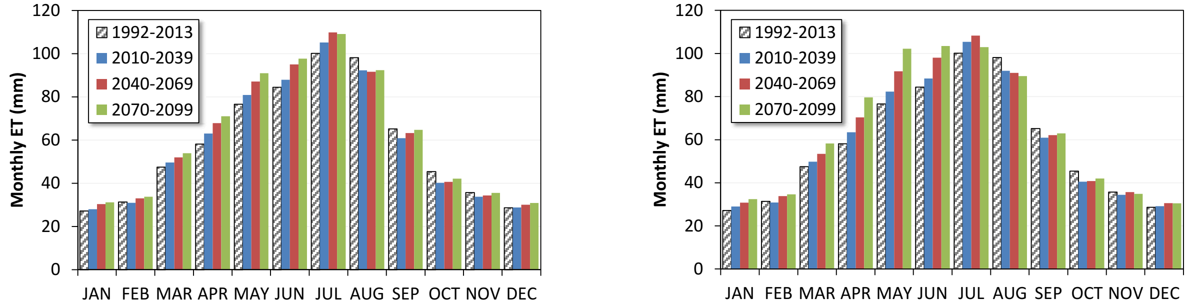
(a) RCP 4.5 (b) RCP 8.5

Fig. 3. Comparison of monthly precipitation



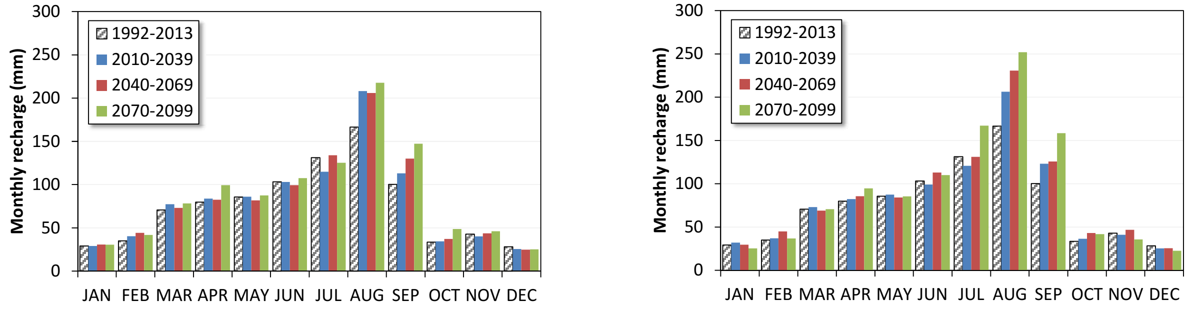
(a) RCP 4.5 (b) RCP 8.5

Fig. 4. Comparison of monthly runoff



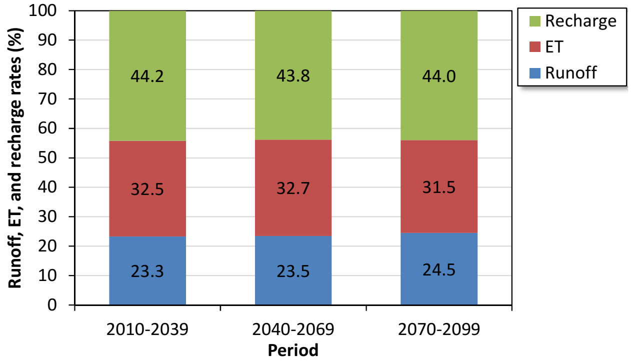
(a) RCP 4.5 (b) RCP 8.5

Fig. 5. Comparison of monthly evapotranspiration

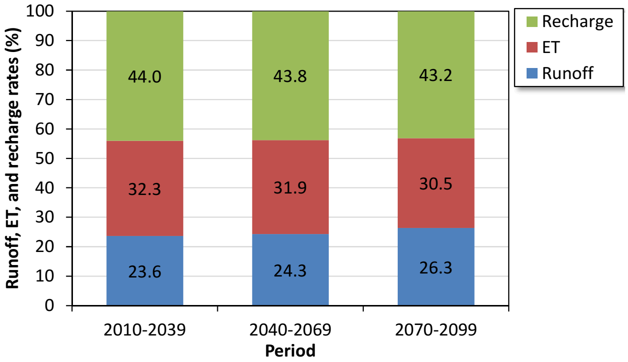


(a) RCP 4.5 (b) RCP 8.5

Fig. 6. Comparison of monthly groundwater recharge



(a) RCP 4.5



(b) RCP 8.5

Fig. 7. Comparison of water balance by period

4. 결 론

본 연구에서는 다중 기후모델에 의한 미래 기후자료를 기반으로 제주도 지역에 최적화된 유역모델링 기법인 SWAT-K를 이용하여, 제주도 전역을 대상으로 미래 기후변화에 따른 주요 수문성분의 변화 및 물수지 등 수자원에 미치는 영향을 평가하였다.

기후모델에 따른 미래 전망자료의 불확실성을 고려하기 위해 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오 각각에 대해 총 9개의 GCM 모형의 결과를 활용하였으며, 유역모델링 적용을 위해 각 소유역별로 상세화 및 편의보정된 자료(강수량, 최고/최저 온도, 상대습도, 풍속, 일사량)를 미래기간(2010~2099년)에 대한 기상 입력자료로 적용하였다. 기후변화에 따른 장기간의 수문 변화를 분석하기 위해 선행연구(Kim and Kim, 2017)에서 구축된 과거기간에 대한 모델링 자료(1992~2013년)를 활용하여 미래기간의 모의 결과와 비교하였다.

전기간(1992~2099년)에 대한 연도별 수문 변화를 분석한 결과 강수량, 유출량, 증발산량, 함양량 모두 증가하는 추세로 나타났으며, RCP 8.5에서 증가현상이 더 크게 나타났다. 과거기간에 비해 강수량의 증가에 따라 유출량의 변화가 가장 크게 나타난 반면(최대 50%), 증발산량은 상대적으로 작게 나타났다(최대 11%). 월별로는 8월과 9월의 강수량 증가에 따라 유출량이 크게 증가하고, 제주도 지역의 높은 함양율 특성으로 인해 함양량도 같이 증가하는 것으로 나타난 반면, 동일기간에 대한 증발산량은 감소하는 것으로 분석되었다. 1월과 12월은 반대의 경향이 나타났다. 즉 미래 기후변화로 인한 강수량의 변화가 유역 물수지에 크게 영향을 주고 있음을 의미한다. 한편, 미래의 강수량 대비 유출량, 증발산량, 함양량의 비율은 변화가 크지 않으나, 과거와 비교했을 때 RCP 8.5 시나리오에서 유출량 비율은 최대 4.3% 증가하는 반면, 증발산량 비율은 최대 3.5% 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 총 9개의 기후모델의 결과를 활용한 것으로, 제시된 결과는 9개 기후모델의 평균치를 이용하여 분석한 것이다. 동일한 RCP 시나리오 하에서 기후모델별 나타날 수 있는 다양한 변화가 있을 수 있으며, 사용되는 유역모델링에 따라서도 다양한 결과를 도출할 수 있으므로 어느 특정의 조건을 적용하여 기후변화 결과로 일축하기는 곤란하다. 또한, 현재 제시되고 있는 여러 기후변화 시나리오는 미래에 대한 예측이 아니라 미래에 예상되는 여러 상황에 대한 가정 중의 하나이다. 따라서 본 연구에서 제시하고 있는 분석결과도 미래에 어떻게 될 것이라는 예측보다는 다양한 기후변화 시나리오에 따른 수문학적 영향을 분석한 것이다.

다만, 기존의 타 연구자들의 결과와 본 연구에서 도출한 결과를 종합해 볼 때, 여러 기후변화 시나리오 가정 하에서 전망되는 미래의 수자원 여건을 예상해 볼 수 있다. 즉, 강수량과 유출량이 증가할 것이고 특히 여름철 강수량 및 유출량의 증가가 예상되며 이로 인해 제주도 지역의 함양량도 함께 증가할 것으로 판단할 수 있다. 함양량의 증가로 인해 수자원 이용가능량이 과거 및 현재보다 많아질 것으로 예상되지만 서론에서 언급한 것과 같이 인구의 지속적인 증가와 도시지역의 확대 등으로 인한 수요량 증가, 반대로 작물재배면적의 감소로 인한 농업용수 수요량의 감소 등 인위적인 요소에 따른 변동성이 더욱 크게 작용할 것으로 보인다. 아울러 지역적인 홍수와 가뭄의 발생 또한 단기적인 수자원 운영에 많은 불확실성을 줄 것이다. 본 연구는 장기적이고 거시적인 측면에서 자연적인 기후변화로 인한 영향을 분석한 것이며, 이와 별도로 단기적인 수재해 대응을 위한 홍수와 가뭄관리, 인위적인 용수수급 관리 등에 대한 종합적인 고려와 합리적인 의사결정 과정을 통해 제주도 수자원의 지속가능한 이용을 위한 대응방안이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술 지역특성화사업「제주권 국토교통기술 지역거점센터」연구과제(17RDRP-B076272-04)와 한국건설기술연구원 주요사업 "가뭄대응 중소하천 물부족 위험도 평가 및 물 확보 기술 개발" 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Arnold, J. G., Allen, P. M., and Bernhardt, G. (1993). "A comprehensive surface-groundwater flow model." *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.

Chung, I. M., Lee, J., Kim, J. T., Na, H., and Kim, N. W. (2011). "Development of threshold runoff simulation method for runoff analysis of Jeju Island." *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 20, No. 10, pp. 1347-1355.

Jeju Province and Korea Water Resources Corporation (KOWACO) (2003). *Comprehensive investigation of hydrogeology and groundwater resources in Jeju Island (Ⅲ)*. Jeju Province.

Jeju Special Self-Governing Province (JSSGP) (2013). *The water management comprehensive plan for Jeju Special Self-Governing Province (2013-2022)*.

Kang, J. Y. (2011). "Establishment and task of detailed implementation plan of adaptation to climate change in Jeju region." *Jeju Development Forum*, Vol. 38, pp. 110-116.

Kim, C. G., and Kim, N. W. (2016). "Evaluation and complementation of observed flow in the Hancheon watershed in Jeju Island using a physically-based watershed model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 11, pp. 951-959.

Kim, C. G., and Kim, N. W. (2017). "Estimation and evaluation of irrigation water need using net water consumption concept in Jeju Island." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 7, pp. 503-511.

Kim, N. W., Chung, I. M., and Na, H. (2013). "A method of simulating ephemeral stream runoff characteristics in Cheonmi-cheon watershed, Jeju Island." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 22, No. 5, pp. 523-531.

Kim, N. W., Chung, I. M., Yoo, S. Y., and Lee, J. (2009a). "Analysis on the groundwater usage in Pyoseon area by using the integrated SWAT-MODFLOW model." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 1939-1944.

Kim, N. W., Um, M. J., Chung, I. M., and Heo, J. H. (2012). "Estimating the total precipitation amount with simulated precipitation for ungauged stations in Jeju Island." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 9, pp. 875-885.

Kim, Y. C., Moon, D. C., and Kim, Y. J. (2009b). "Analysis of flood runoff characteristics of Hancheon in Jeju Island for groundwater artificial recharge." *Water for Future, Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol, 42, No. 11, pp. 19-24.

Koh, G. W., Park, W. B., and Moon, S. H. (2014). "The direction of managing the water resources of Jeju Island in response to climate change." *Jeju Development Research*, Vol. 12, pp. 27-55.

Korea Institute of Construction Technology (KICT) (2007). *Development of analysing system for sustainable water hydrological components*. Sustainable Water Resources Research Program of 21st Century Frontier R&D Program, Ministry of Science and Technology.

Korea Water Resources Corporation (KOWACO) (1993). *Establishment of comprehensive development plan for water resources in Jeju Province*.

Lee, J. H., Yang, S. K., Yang, W. S., and Lee, G. B. (2016). "Runoff analysis of climate change scenario in Gangjung basin." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 539-543.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2011). *The long-term comprehensive plan for water resources (2011-2020)*.

Park, J. C., Cho, K. J., and Song, S. H. (2014). "Prediction of regional drought considering aspect and elevation in Jeju Island under future climate change." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 23, No. 4, pp. 649-660.

Seo, J., Kim, Y., Moon, D., Koh, K. W., and Kim, Y. (2014). "Evaluation of surface infiltration rate in Hancheon reservoir, Jeju Island, Korea." *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 50, No. 3, pp. 419-430.