



PREFACE

It is our pleasure to present this report on the APEC Climate Center (APCC)'s research activities in 2013, which has been a very productive year for our Center.

APCC has expanded its research scope, in response to regional societal and scientific needs. While building expertise in climate prediction remains a priority, we are extending our reach to include policy-relevant climate applications and value-added climate information products.

APCC has accelerated efforts to better our service to the region. As one of the main services provided by APCC, the MME 3-month prediction information has been productively applied by scientists in developing countries that are unable to produce their own prediction information. Furthermore, in order to better prepare for climate-related hazards in a timely manner, APCC launched its 6-month MME prediction service in September 2013. We also began to release forecasts of the Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO), starting from July 2013, as the world's first operational BSISO forecast service. Our researchers also achieved great success in publishing their papers in noted academic journals. Dr. Ok-Yeon Kim, for example, published a paper in *Climate Dynamics* and her research was later selected as one of the Research Highlights by another distinguished journal, *Nature Climate Change*. The following research report provides more information about our research outcomes from 2013.

We will continue to promote the best use of our research outcomes in various scientific and application areas. Our successes and achievements would not have been possible without the support of our valued partners. In this regard, I extend my thanks to you and I hope you enjoy this 2013 Research Report.

Chin-Seung Chung
Director, APEC Climate Center

CONTENTS

불확실성을 고려한 농업용 저수지의 기후변화 영향 평가

■ 조재필 | 기후변화연구팀

1. 서론	55
2. 연구 자료 및 방법	58
2.1 연구 자료	59
2.2 연구 방법	66
3. 연구결과	75
3.1 기후변화 시나리오 분석 결과	75
3.2 SWAT의 적용성 평가 및 유출 모델링에 따른 불확실성 평가	82
3.3 저수지 가뭄지표 분석	84
4. 결론 및 토론	101



APCC
RESEARCH REPORT 2013-05

불확실성을 고려한 농업용 저수지의 기후변화 영향 평가

조재필 | 기후변화연구팀

ABSTRACT

In recent years, the extreme social and economic damages caused by flooding and drought have increased due to extreme weather. Extreme drought can cause great economic damage to agricultural productivity due to the reduction of the agricultural water supply, as well as an increase in water consumption by crops. Agricultural facilities for water supply include reservoirs, pumping stations, weirs, and infiltration galleries. According to a survey in 2011, there are 17,505 reservoirs in Korea, accounting for 25% of the total agricultural water facilities. However, 772,108 ha are irrigated by reservoirs, which accounts for 58% of the entire irrigated area. Therefore, as a major supplier of agricultural water in Korea, it is important to look into the behavior of reservoirs in relation to climate change. This requires estimation of the changes in inflow amounts from upstream areas, water consumption by crops in irrigated areas, and water storage level of reservoirs. Finally, agricultural drought vulnerability should be analyzed by considering water demand and available water supply via agricultural facilities for each crop growth stage, taking into account temporal and spatial changes. With this information, an adaptation plan for agricultural reservoir drought can be provided. Therefore, the objective of this study is to evaluate the impacts of climate change on agricultural water resources in Korea by considering the agricultural water supply through reservoirs, water demand from irrigated crop land, and changes in storage level and related agricultural drought according to the characteristics of the reservoirs.

104 reservoirs were selected based on the maximum available data. The selected reservoirs were classified into five clusters based on storage ratio (lowest storage / max. storage) and time of minimum storage level. Among the 104 study reservoirs, 5 reservoirs which have stream flow gauge stations down stream of the reservoir, were selected to evaluate the applicability of SWAT on ungauged watersheds.

This study consisted of 3 sub-components: 1) generating climate change scenario data through bias correction and statistical downscaling of multiple Global Climate Models (GCMs), 2) reservoir modeling using SWAT and HOMWRS, and 3) estimating the changes in watershed characteristics, including cluster analysis of study reservoirs and spatial analysis of the reservoir-irrigated paddy area. The reservoir modeling included 4 sub-items, including 1) evaluating the impacts of upstream inflow on available water supply, 2) evaluating the impact of ET changes on water demand within an irrigation district, 3) estimating the daily storage level of reservoirs based on the estimated demand and supply, and 4) providing an agricultural drought index based on the estimated storage level. This reservoir modeling approach was applied within the selected 5 representative reservoirs and then extended to all the remaining 99 study reservoirs.

Among 34 available GCMs, the KMA 12.5km resolution RCM and eight and ten GCMs for the RCP4.5 and 8.5 scenarios, respectively, were selected because the selected GCMs provided the 6 weather variables required for SWAT application. The selected GCMs were bias corrected and downscaled for historical (1976-2005), future 2020s (1911-2040), 2050s (2041-2070), and 2080s (2071-2100) periods using the non-parametric quantile mapping method based on observed data from 76 Korea Meteorological Administration (KMA) stations. Compared to the observed data,



the bias corrected data appropriately reflected the temporal trends of the selected weather variables, precipitation characteristic index, and the three reservoir modeling outputs, namely inflow, water demand, and storage level. It was decided that the quantile mapping method is suitable for agricultural reservoir analysis in which reproducing temporal trends is important for management purposes.

The bias-corrected climate data for future periods showed the highest uncertainties in the precipitation variable according to the selection of GCMs by showing different (increasing or decreasing) trends compared to the historical period. However, both the minimum and maximum temperature variables increased in all GCMs, regardless of RCP scenarios. The future scenario data of other weather variables showed a tendency to converge closely to the past observations.

In the case of the RCP8.5 scenario, most of the eleven GCM data, including the KMA 12.5km RCM data, showed a tendency to increase during most months. As a result, the 30-year monthly mean of the multi-model ensemble (MME) showed a 5.6% increase in total precipitation.

When the MME was used, inflow to reservoirs in the future period (2011–2040) increased by 7.8% and 9.3% for the RCP4.5 and 8.5 scenarios, respectively, mainly due to the increase in precipitation. Similarly, irrigation water demands in 2020s increased 0.7% and 0.5% for RCP4.5 and 8.5, respectively, due to the increase in temperature. As a result, the water storage level increased by 2.3% and 1.6%, respectively, for RCP4.5 and 8.5 due to the combined influence of the increase in inflow and in water demand.

Clustering reservoirs based on characteristics such as storage capacity and ratio of watershed area to benefitted area cannot explain the responses of reservoirs within each cluster which show a wide range of variations in storage levels. When storage rate and time with minimum storage level were used for reservoir clustering, variations in each cluster decreased and it has been considered that clusters with the lowest storage rate can be most vulnerable to severe drought under climate change. However, inflow and water demand showed similar temporal patterns among clusters by showing an increasing trend, regardless of clustering methods.

As far as the evaluation of the applicability of SWAT for integrated watershed management by including agricultural reservoirs in the watershed modeling frame, SWAT showed limitations in representing the processes of ponded paddy fields and linking required water demands in benefitted areas to reservoir storage. However, SWAT showed reasonable performance for the ungauged watershed conditions and the difference in inflow amounts between SWAT and HOMWRS showed a range from 11.8% and 15.5% uncertainty envelope.

As an adaptation plan, structural, non-structural (management-based), and institutional measures are available. However, it was suggested that a no-regret or low-regret approach, which is based on non-structural and institutional measures will be appropriate, considering the high uncertainty in climate change impact analysis results. Non-structural measures may include efficient water management to minimize the loss of agricultural water supplies by adjusting the amount and time of irrigation and increasing the use of effective rainfall. This may require the development of a drought forecasting system, decision support system for effective irrigation,

and an automatic water management system and monitoring system. Institutional solutions may include the inclusion of a governing body within the integrated watershed management concept for maximizing the use of surplus water and return-flow by linking water resources-related facilities. Also, the quality of agricultural water, environmental water, and the ecosystem should be considered in the concept of integrated water resources management.

1. 서론

최근 기후변화와 관련하여 극심한 기상이변으로 홍수와 가뭄으로 인한 사회경제적 피해가 증가하고 있다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서는 기후변화에 따른 미래 전망을 통해 전 지구의 평균 온도의 상승을 예측하고 있다. 전지구기후모델(Global Climate Model, GCM)을 이용한 모델링 과정에서 생산된 기상 변수들은 농업 및 수자원을 포함한 다양한 분야에 있어서 기후변화의 영향을 평가하는데 활용되고 있으며, 많은 기후변화 관련 연구가 국내외에서 수행되어 왔다(강지윤 등, 2013; 김대준 등, 2012; 배덕효 등, 2011; 장재호와 안중호, 2012).

기후변화는 장기간에 걸쳐 진행되고 이에 따라서 미래의 기후 특성이 변화될 수 있는데, 이는 과거에 관측된 기후 특성을 고려하여 설계된 다양한 시설물들의 용량을 초과하는 극심한 홍수 및 가뭄 등 기상이변으로 인하여 사회에 많은 피해를 끼칠 가능성을 의미한다. 이에 정부는 사회 각 분야의 취약성을 분석하고 적응 방안을 수립하고 있으나(국립환경과학원, 2012) 수립된 적응 방안을 시행하기 위해서는 막대한 예산을 필요로 하기 때문에 정책결정에 있어서 신중을 기해야 한다. 기후변화에 따른 취약성 분석 및 영향 평가를 바탕으로 제시된 적응 방안들이 정책적으로 반영되려면 모든 분석들이 과학적인 근거를 기반으로 생산 제공되어야 하고 정책 결정자들이 이해할 수 있는 언어로 정보를 전달하는 과정이 필요하다. 먼 미래에 대한 특정 시나리오를 기반으로 하는 기후변화 연구의 특성을 고려할 때 불확실성 관련 정보가 정책 결정자들을 위하여 제공되는 정보에 반드시 포함되어야 한다. 이에 IPCC에서는 정책결정자들을 위한 요약에서 분석된 결과들에 대한 불확실성 관련 정보를 함께 제시하고 있다.

기후변화에 따른 농업 및 수자원 등 다양한 분야에 미치는 영향 평가와 관련된 연구는 전 지구 규모의 기후변화 자료의 생산 과정, 생산된 원 기후 자료를 유역 규모에서 사용하기 위해 필요한 통계학적(statistical) 또는 역학적(dynamical) 시·공간적인 상세화(downscaling) 과정, 수자원 분야의 분석을 위해 필요한 모델링 과정 등을 거치게 된다. 하지만 각각의 단계에서 다양한 경로를 통해 불확실성이 증폭될 가능성을 내포하고 있다(황세운 등, 2013). 또한 낙동강 권역의 기후변화에 따른 관개수요량 예측에 관한 연구에서는 사용한 GCM, 증발산량 계산식, 상세화 방법 등에 따라서 관개 수요량이 증가(정상옥, 2009b)하거나 감소하는(정상옥 등, 2009a) 상반된 결과를 보여 관련 연구에서의 불확실성을 보여 주었다. 따라서 다양한 국가 및 기관에서 생산된 기후변화 정보의 최종 사용자인 다양한 응용 분야의 연구자들이 기후변화 정보의 불확실한 특성을 이해하는 것이 필요하다. 또한 기후정보의 불확실한 특성이 응용 분야의 최종 분석 결과에 미칠 수 있는 영향을 고려하여 수자원 분석 결과에서 발생할 수 있는 불확실성 관련 정보를 함께 제시하는 것이 중요할 것이다.

2011년 기준 국내 농업용수 공급 시설물로는 저수지, 양·배수장, 취입보, 집수암거 등이 있으며, 저수지의 경우 전체 시설물 69,568개소 중 17,505개로 25%를 차지하고 있으나 관개 면적으로는 전체 772,108ha 중 449,105ha를 관개하여 전체 농업용수의 58%를 관개하고 있는 실정이다(농촌용수종합정보시스템). 국내의 대다수 농업용 저수지들은 다목적댐과 비교하여 저수량이 작기 때문에 가뭄과 같은 극심한 기상이변에 민감할 수 있다. 또한, 농업 가뭄과 관련하여서는 상당부분의 농경지가 수리시설물에 의한 관개에 의존하고 있는 국내 상황의 특수성을 고려할 때 수문학적 및 기상학적 가뭄의 접근방식과는 달리 농업용수의 주요 공급원인 저수지의 기후변화에 따른 거동을 살펴보는 것은 중요한 일이다. 농업용 저수지 거동을 분석하기 위해서는 기후변화에 따른 상류 유역으로부터 저수지로 유입되는 공급 가능량의 변화와 관개구역 내에서의 온도를 포함한 기후 특성의 변화에 따른 작물의 필요수량 변화에 대한 영향 평가가 필요하다(안태진 등, 2004). 따라서 기상학적 또는 수문학적 가뭄 지표와는 달리 국내의 농업 가뭄은 많은 농경지가 관개에 의존하는 점을 고려할 때 작물의 생육 시기별 필요수량과 주요 농업수리시설물의 공급가능수량 사이의 물수지(water balance)를 고려하여 분석하는 것이 타당하다(장민원, 2000). 농업용 저수지의 경우는 작물생산이 끝나는 10월 이후부터 자연 강수에 의한 저류를 시작하여

영농이 시작되는 4-5월까지 농업용수를 확보하여 작물생육 시기별 필요수량을 고려하여 관개를 하게 된다. 따라서 생육기간 동안의 기온 및 강수량의 변화에 따른 필요수량의 변화에 더하여 가장 많은 농업용수를 필요로 하는 이앙기 이전 기간에 대하여 기후변화에 따른 강수량의 변화가 우선 중요하게 고려되어야 한다. 개별 저수지의 공급가능수량의 변화를 고려하기 위해서는 정확도가 높은 상류 유역으로부터의 저수지 유입량 자료가 필요하지만, 농업용 저수지는 다목적댐과 비교하여 저수지 유입량 자료가 전무하다. 또한 생육 시기별 필요수량에 따른 방류량 자료도 전무하여 앞서 언급하였 듯이 기후변화 자료 자체의 불확실성에 더하여 저수지의 물수지 분석 과정에서도 불확실성이 추가될 수 있다. 최근에 유효저수량 10만톤 이상의 농어촌공사관리 저수지(1587개소)를 대상으로 저수지의 저수율 자료가 수집되고 있는 상황이다.

이에 더하여 최근 농업용수의 개념이 농촌용수 개념으로 확장되고 있고(정태성 등, 2008) 용수의 수량뿐만 아니라 수질도 중요하게 다뤄져야 할 필요성을 고려할 때 농업용수 또한 통합유역관리(Integrated Watershed Management)의 일부로서 다뤄져야 한다. 그러나 국내에서 농업용 저수지가 통합유역관리 차원의 유역 모델링 안에서 고려된 경우는 부족한 상황이며(박근애, 2008; 이용준 등, 2008), 농업용 저수지 유역의 경우에는 유입유량 또는 방류량에 대한 실측자료가 없는 이유로 저수지 유입량의 경우는 미계측 유역에서의 유역면적과 토지이용 면적 비율을 이용하여 탱크 모형의 매개변수들을 산정하여 계산하여 왔다(김현영, 1988; 강민구 등, 2013).

기후변화에 따른 농업용 저수지에 미치는 영향 평가와 관련된 기존 연구를 살펴보면 기후변화에 따른 논 관개용수 수요의 변화와 관련된 국외 논 생산 지역에서의 연구(De Silva et al., 2007; Fischer et al., 2007)뿐만 아니라 국내에서도 다양한 연구가 진행되어 왔다. 기후정보의 불확실성 측면에서 볼 때 단일 모형을 사용한 경우와(서울대학교, 2013) 다중모형을 사용하였지만 원 자료의 불확실성 관련 정보의 제공이 미흡한 경우가 대부분이다(농어촌연구원, 2011; 박근애, 2008, 윤동균 등, 2011). 또한 현재 저수지의 안전성과 관련하여 진행중인 연구를 제외한 기존의 연구들은 IPCC 4차 보고서에 사용되었던 SRES 시나리오 자료를 기반으로 하고 있다. 사용된 기후변화 자료 또한 월별 자료를 사용하여 미래 기간에 발생할 수 있는 일별 기상특성의 변화를 고려하는데 한계를 가지고 있다(농어촌연구원, 2011; 박근애, 2008). 또한 대상 저수지의 선정에 있어서 소수의 저수지에 대해



여 개별 저수지에 대한 결과 분석으로 인하여 17,000여개가 넘는 저수지에 대한 적응정책을 수립하는데 어려움이 있다. 농업용 저수지관련 기후변화 연구의 경우 소수의 경우를 제외하고 미래 기간 동안에 저수지 저수량이 감소하거나(박근애, 2008) 필요 유효저수량이 증가하는 것으로 분석되어(농어촌연구원, 2011) 미래 기후변화 시나리오에 따라서 가뭄이 심화될 가능성을 시사하고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 기후변화 시나리오 자체의 불확실성, 전지구 규모의 자료를 유역 규모에서 사용하기 위한 자료처리 과정에서의 불확실성, 농업용 저수지의 물수지 분석 과정에서 발생할 수 있는 불확실성 등을 고려하여 기후변화에 따른 농업용저수지의 공급 가능량, 관개지구의 용수수요량 및 이에 따른 저수지의 저수량 변화를 분석하는데 있다. 이에 더하여 국내에서는 처음으로 IPCC 5차 보고서에 사용된 신시나리오(CMIP5)의 일(daily) 자료를 사용하였고, 다수의 저수지를 대상으로 분석하여 개별 저수지에 대한 정보에 더하여 저수지의 특성별 적응방안을 수립하는데 필요한 정보를 제공하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구 자료 및 방법

본 연구는 Figure 1과 같이 세 개의 세부항목들로 구성되어 있다. 우선 기후변화 시나리오 자료처리 부분에서는 불확실성을 줄이기 위해 일반적으로 사용되고 있는 다중모형 앙상블(Multi-Model Ensemble, MME)을 위하여 활용가능한 모든 기후정보의 수집 및 수집된 기후정보를 유역 규모에 적용하기 위해 필요한 편의보정(bias correction) 및 상세화(downscaling) 과정을 포함하고 있다. 둘째로 유역 특성 분석에서는 저수지 특성별 구분 및 저수지의 관개지구 공간분석 등 유역 규모에서 저수지 모델링에 필요한 공간자료의 분석을 포함하고 있다. 셋째 저수지 모델링에서는 1) 상류 유역으로부터의 유입량 변화로 인한 용수공급량에 미치는 영향, 2) 관개구역에서의 증발산량의 변화에 따른 관개용수 수요량에 미치는 영향, 3) 공급량과 수요량을 고려한 일별 저수지 모의운명을 통한 저수율 모의, 4) 저수율을 고려한 농업가뭄지표 제시 등의 세부절차를 포함한다. 앞에서 언급한 바와 같이 농업용 저수지의 미세측 유역 특성을 고려하기 위하여 저수지 하류에 유량 관측 자료가 있는 대표저수지를 선정하여 간접적으로나마 보정 없이 모의된 유출량을 검정하였

다. 또한 농업용 저수지를 통합유역관리 차원에서 고려할 필요성과 저수지 모델링의 방법에 따른 불확실성을 평가하기 위해서 토양, 지형, 토지이용 등의 공간적인 분포를 고려할 수 있는 유역모형인 Soil and Water Assessment Tool(SWAT)과 공간적인 분포를 고려하지 않고 저수지 물수지 분석이 가능한 HOMWRS 모형을 선정된 전체 저수지 유역에 적용하여 결과를 비교하였다.

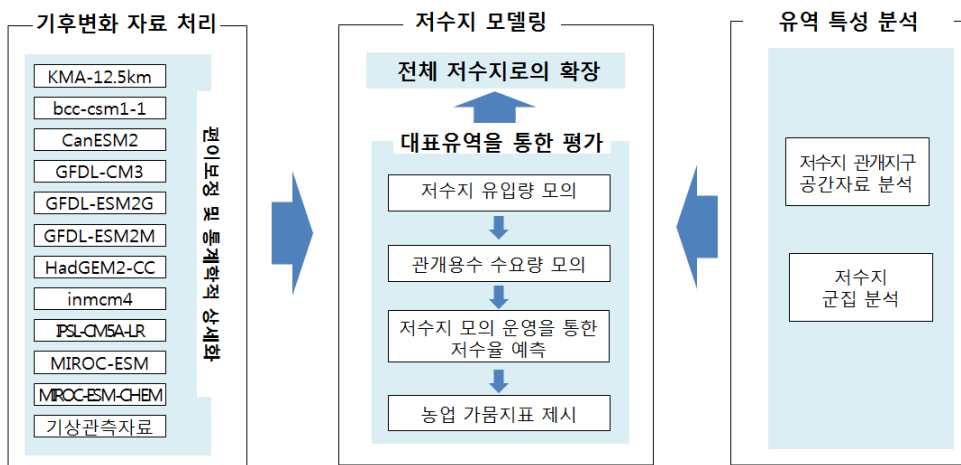


Figure 1 Flow chart and subcomponents of climate change impact analysis on agricultural reservoir.

2.1 연구 재료

2.1.1 기후변화 시나리오

기후변화 시나리오 자료는 IPCC 제5차 기후변화 평가보고서에 사용된 온실가스의 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)에 따른 시나리오 자료를 사용하였다. 사용된 자료는 전지구 기후변화 시나리오 산출을 위한 국제사업인 CMIP5 (the phase five of the Coupled Model Intercomparison Project)에서 취합되어 Earth System Grid Federation(ESGF, <http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>)을 통해 제공되고 있다. 모든 전지구기후모델(GCM, Global Climate Model)들을 대상으로 Table 1과 같이 SWAT 모형에서 필요로 하는 6개 주요 변수(강수, 최고기온, 최저기온, 평균풍속,



상대습도, 일사량)에 대하여 일(daily) 자료를 수집하였다. 일사량과 관련하여서는 HOMWRS의 경우 일조시간을 입력으로 사용하기 때문에 본 연구에서는 특정 위치에서의 최대 가능한 일사량과 실제 일사량의 자료로부터 일조시간을 계산하여 사용하였다 (Snyder, 2001).

Table 1 Selected CMIP5 weather variables for SWAT modeling.

variable name	long name	units
tasmin	Daily Minimum Near-Surface Air Temperature	K
tasmax	Daily Maximum Near-Surface Air Temperature	K
pr	Precipitation	kgm ⁻² s ⁻¹
sfcWind	Daily-Mean Near-Surface Wind Speed	ms ⁻¹
rhs	Near-Surface Relative Humidity	%
rsds	Surface Downwelling Shortwave Radiation	Wm ⁻²

ESGF에서 6개변수에 대하여 일자료가 존재하는 33개의 GCM 자료를 다운 받았다. Table 2는 ESGF에서 수집한 33개 GCM 자료와 기상청에서 HadGEM2-AO 전지구기후모델 결과를 지역기후모델(Regional Climate Model, RCM)인 HadGEM3-RA 모형을 이용하여 역학적 상세화 과정을 거쳐 12.5km 격자크기로 제공하고 있는 국가 기후변화 시나리오 1개를 포함하여 총 34개의 기후변화 자료에 대하여 시나리오 및 변수별 자료 현황을 보여 준다. 이 중에서 과거기간(Historical)에 대한 자료만 존재하고 대표농도경로 미래 전망 자료가 존재하지 않는 7개 모형(bcc-csm1-1-m, BNU-ESM, CESM1-BGC, CESM1-FASTCHEM, CMCC-CM, MPI-ESM-MR, MPI-ESM-P)을 제외한 27개 모형 중에서 강수량 및 증발산량 계산에 필요한 기상변수 등 6개 주요 기상변수에 대한 자료가 존재하는 RCM/GCM 자료만을 사용하였다. RCP4.5 및 8.5 시나리오의 경우 9개(KMA-12.5km, CanESM2, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, HadGEM2-CC, inmcm4, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM)와 11개(KMA-12.5km, bcc-csm1-1, CanESM2, GFDL-CM3, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, HadGEM2-CC, inmcm4, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM) 모형이 각각 선정되었다. Figure 2는 사용된 GCM의 공간해상도를 보여준다.

IPCC 5차 보고서에는 온실가스 농도를 복사량으로 나타냈는데 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우인 RCP8.5 시나리오, 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우에 대하여 복사강제력이 2100년 이후에 안정화되는 경우인 RCP6.0 시나리오와 2100년 이전에 안정화되는 경우인 RCP4.5 시나리오, 지구가 회복력을 가질 수 있는 최대 한계값인 RCP2.6 시나리오 등 4종의 시나리오가 있다(국립기상연구소, 2011). 본 연구에서는 기후변화 시나리오 자료의 편의보정 및 상세화의 경우 4종의 온실가스 대표농도경로 시나리오(RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5¹⁾)에 대하여 기상청 76개 관측소의 과거 기록을 이용하여 관측소별 기후변화 미래 전망을 생산하였다.

Table 2 Available daily CMIP5 data for each GCM model and climate variable.

No	Models	Historical					RCP2.6					RCP4.5					RCP6.0					RCP8.5									
		Pr	Mx	Mn	Ws	Rh	Sr	Pr	Mx	Mn	Ws	Rh	Sr	Pr	Mx	Mn	Ws	Rh	Sr	Pr	Mx	Mn	Ws	Rh	Sr	Pr	Mx	Mn	Ws	Rh	Sr
1	KMA-12.5km	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
2	ACCESS1-0	o	o	o	o								o	o	o											o	o	o			
3	bcc-csm1-1	o	o	o	o	o	o						o				o	o	o	o	o				o	o	o	o	o	o	
4	bcc-csm1-1-m		o	o																											
5	BUN-ESM	o	o	o	o																										
6	CanCM4	o	o	o									o	o	o																
7	CanESM2	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o						o	o	o	o	o	o
8	CCSM4	o	o	o				o	o	o				o	o	o										o	o	o			
9	CESM1-BGC	o	o	o																											
10	CESM1-FASTCHEM	o	o	o																											
11	CMCC-CESM	o	o	o	o		o																			o	o	o	o	o	
12	CMCC-CM	o	o	o																											
13	CNRM-CM5	o	o	o	o		o						o	o	o			o							o			o	o		
14	CSIRO-Mk3-6-0	o	o	o	o	o	o						o	o	o			o							o	o	o				
15	FGOALS-g2	o	o	o			o	o	o	o			o	o	o			o							o	o	o		o		
16	FGOALS-s2	o	o	o									o	o	o			o	o	o					o	o	o		o		
17	GFDL-CM3	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
18	GFDL-ESM2G	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
19	GFDL-ESM2M	o	o	o	o	o	o						o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o		o	o	o	o	o	
20	HadCM3	o	o	o	o								o	o	o	o															
21	HadGEM2-CC	o	o	o	o	o	o						o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
22	HadGEM2-ES	o	o	o		o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
23	inmcm4	o	o	o	o	o							o	o	o	o	o								o	o	o	o	o	o	
24	IPSL-CM5A-LR	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
25	IPSL-CM5A-MR	o	o	o	o	o	o						o	o	o																
26	MIROC4h	o	o	o		o	o						o	o	o			o													
27	MIROC5	o	o	o	o	o	o						o	o	o			o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
28	MIROC-ESM	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
29	MIROC-ESM-CHEM	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
30	MPI-ESM-LR	o	o	o	o	o	o						o	o	o			o							o	o	o		o	o	
31	MPI-ESM-MR	o	o	o	o																										
32	MPI-ESM-P	o	o	o	o																										
33	MPI-CGCM3	o	o	o	o		o						o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
34	NorESM1-M	o	o	o		o	o						o	o	o			o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	

1) 숫자는 온실가스에 의한 복사에너지의 양으로 단위는 W/m²이며, 8.5 시나리오의 경우 지상에 도달하는 태양복사가 238 W/m²의 3.6%에 해당된다.

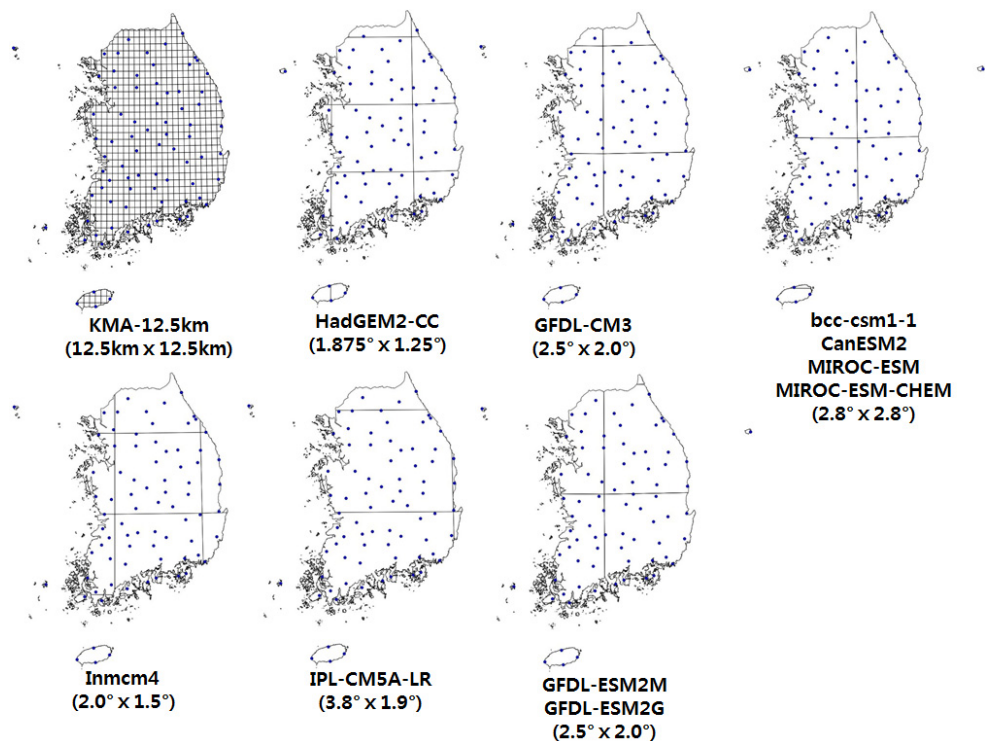


Figure 2 Spatial resolution of selected GCMs (horizontal x vertical resolution).

2.1.2 저수지 모형 선정

농업용 저수지의 분석을 위해서 농어촌공사에서 저수지 설계에 사용하여 온 HOMWRS 모형을 기본 모형으로 선정하였다. HOMWRS 모형은 유역유입량 산정, 논·밭 필요수량 산정, 저수지 물수지 분석의 3개 모듈로 구성되어 있으며 일별(daily time-step) 및 순별(10-day time-step) 분석이 가능하다. 본 연구에서 필요한 일별 분석 모듈을 살펴보면, 우선 유입량 산정은 미세측 유역에 적용 가능하도록 개발된 DIROM 모형(김현영, 1988)이 사용되고 있다. DIROM 모형은 실측 유출량 자료로 모형을 보정해야 하는 Suwagra에 의해 제시된 탱크(Tank) 모형을 농업용 저수지의 미세측 유역 특성을 고려하여 유역면적 및 토지이용별 면적 등에 기반한 회귀식을 이용하여 매개변수를 추정할 수 있도록 개선한 3단 탱크 모형이다. 논 관개지구에서의 관개필요수량은 단위면적당 필요수량에 이앙재배, 담수직파, 건답직파 등 3개의 다른 영농방식에 따른 관리용수를 고려하여 계산한다. 단위

면적당 필요수량은 생육시기별 증발산량과 토양 침투량에 의한 총 손실량에서 강수량 중에서 비의 생육에 기여하는 양인 유효우량을 감하여 산정한다. 증발산량은 Penman-Monteith식(Allen et al., 1998)에 의해 일별 잠재증발산량(Potential Evapotranspiration)이 계산되고 생육시기별 비에 대한 작물계수를 곱하여 실제증발산량을 계산한다. 삼투량은 토양의 종류 및 지하수위 등에 영향을 받을 수 있으나 모형이 토양의 공간적 분포 및 토양의 특성을 고려하지 않기 때문에 모의 기간동안 동일한 상수값으로 계산된다. 유효우량 산정은 60mm 담수심법에 의해서 산정된다. 마지막으로 저수지 물수지 분석은 산정된 유역유입량과 필요수량에 생공용수량을 고려하여 분석되게 된다(한국농어촌공사, 2001).

본 연구에서는 HOMWRS에 더하여 두 가지 목적을 고려하기 위하여 국내 농업 유역에 가장 적합한 모델을 선정하여 유역모델링하에서 농업용 저수지의 고려 가능성을 평가하였다. 우선, 앞에서 언급한 농업용 저수지를 포함한 농업용수의 분석이 향후 통합유역관리(Integrated Watershed Management) 개념에서 고려되어야 하는 것과, 둘째로, 기후변화 영향 평가의 불확실성 중 저수지 모델링 자체에 의한 불확실성을 줄이기 위하여 HOMWRS와의 비교를 목적으로 유역모델을 선정하였다. 유역모형으로는 전세계적으로 보편적으로 사용되고 있는 Soil and Water Assessment Tool(SWAT, Arnold et al., 1998)과 Hydrologic Simulation, Program-FORTRAN(HSPF, Bicknell et al., 1993) 중에서 SWAT 모형을 선정하였다. 앞서 언급한 농업용 저수지 유역의 미세측 유역 특성을 고려할 때, 적합한 유역모형은 보정(calibration)을 통한 매개변수(parameters)의 선정 없이도 유역 유출량을 잘 모의할 수 있어야 한다. HSPF의 경우는 SWAT 모형과 비교하여 관측 데이터를 이용한 보다 심도 있는 매개변수 선정이 필요한 것으로 알려져 있다(Im et al., 2004). 농업용저수지 설계에 사용되어 온 TANK 모형과 HSPF 및 SWAT 모형을 저수지 상류 유역에 적용한 국내 적용 사례에서도 HSPF의 경우 TANK 및 SWAT 모형에 비하여 적은 유출량을 보여 TANK 모형을 대체하는데 있어서 주의해야 하는 것으로 보고되었다. 팔당댐 상류의 자연유출량 계산에 TANK 모형과 SWAT 모형을 비교한 연구에서도 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 나타났다(김철겸과 김남원, 2012). 그리고 기후변화에 대한 대응방안으로 구조적 비구조적 접근방식이 있을 수 있는데, 물관리 방식의 변경 등 비구조적인 대응방안에



따른 영향을 고려하기 위해서는 다양한 시비, 경운, 관개 등 농업관련 관리방안(managements) 들을 고려할 수 있도록 농업유역에 적합하게 미국농무성(USDA)에서 개발된 SWAT 모형을 선정하였다.

2.1.3 대상 저수지 및 대표 저수지 선정

대상 저수지의 선정은 2011년의 17,531 전체 농업용 저수지 중에서 3,356개의 농어촌 공사 관리 대상 저수지로 대상 범위를 좁혔고, 그 중에서 한발빈도가 10년인 2,584개 저수지로, 이 중에 수로에 수위계가 설치된 저수지 517개소로 대상 범위를 축소하였다. 517개 저수지 중에서 앞에서 구축한 수혜지구 지적 데이터가 존재하는 491개 저수지로, 이 중에서 농어촌공사에의 저수지별 수혜면적 정보와 GIS 공간분석을 통해 산출한 수혜지구의 면적 오차가 $\pm 10\%$ 내외인 112개 저수지를 분석 가능한 저수지로 선정하였다. 112개의 저수지 중에서 입력자료 생성을 위한 공간정보 분석과정에서 토지이용 분류가 가능한 104개 저수지를 최종 모델링 대상 저수지로 선정하였으며, 선정된 저수지에 대한 중요 제원은 부록1에 제시하였다. 2008년 이후 관개수로에 수위계가 설치된 저수지를 선정한 것은 본 연구를 바탕으로 향후 추가 연구를 수행할 경우에 관측자료가 없는 농업용 저수지의 유역 특성의 한계를 극복하기 위해 관개수로에서의 수위자료로부터 방류량 자료를 추정하여 사용할 수 있는 가능성을 고려하기 위함이다. 또한 수혜면적 오차가 $\pm 10\%$ 인 저수지 유역을 선정한 것은 실제 수혜지구의 공간적 분포를 이용하는 SWAT 및 수혜지구면적 만을 가지고 산정하는 HOMWRS의 모형의 비교 시 동일한 입력 조건을 고려하기 위함이며, 두 모형의 경우 GIS분석을 통해 산정된 수혜면적을 입력으로 사용하였다.

최종 선정된 104개 저수지에 대하여 SWAT 모형의 적용을 시도하였다. 하지만 저수지가 해안 지역에 위치하고 있어 수혜지구를 포함하는 유역경계를 추출하기에 어려움이 있는 경우, 또는 유역이 북한지역을 포함하여 필요한 공간정보가 존재하지 않은 경우, ArcSWAT으로 구분된 저수지 상류 소유역의 면적이 농어촌공사에서 제시한 저수지별 유역 면적과 큰 차이를 보이는 경우는 SWAT 모형의 적용에서 제외하였다. 따라서, 최종적으로 HOMWRS의 경우는 104개, SWAT의 경우는 67개의 저수지를 대상 저수지로 선정하였다 (부록1).

개별 저수지에 대한 기후변화 영향 분석에 더하여 17000여개의 전체 저수지에 대한 정책결정을 위한 정보를 제공하기 위해서는 저수지 유형을 구분하여 유형별로 다른 기후변화 적응 대책을 마련하는 것이 바람직할 것이다. 따라서 본 연구에서는 선정된 104개 저수지에 대하여 군집분석을 수행하였고, 저수지의 특성을 고려하여 군집별로 기후변화 시나리오에 따른 영향을 분석하였다.

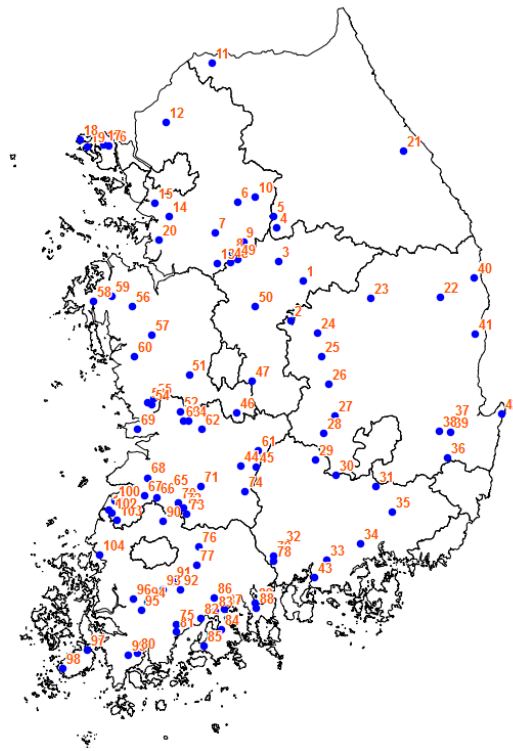


Figure 3 Location of study reservoirs (number is the reservoir ID which is provided in the appendix 1).

본 연구에서는 104개 저수지 중에서 한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강권역별로 저수지 유역 하류에 유량관측소가 있는 금광 저수지, 하곡 저수지, 지소 저수지, 적량 저수지, 금전 저수지 유역을 각각 대표 저수지 유역으로 선정하였다(부록 1). 대표 저수지 선정의 목적은 우선 농업용 저수지의 미계측 유역 특성을 고려하여 매개변수의 보정 없이 SWAT 모형을 적용하는 경우에 모의 결과와 유량관측점의 실측 유량과의 비교를 통하여 SWAT 모형의 미계측 유역에의 적용성을 평가하기 위함이다. 또한 통합유역관리 차원에서

농업용 저수지를 고려하기 위한 SWAT 모형의 적용성 평가에 더하여 저수지 분석에 사용되는 모형들에 따른 불확실성을 SWAT 모형과 HOMWRS 모형과의 비교를 통해 줄이기 위함이다. 5개의 대표 저수지 유역을 선정하는데 있어서 한강홍수통제소에서 제공 받은 WAMIS 관측 자료에서 수위자료만 있고 유량자료가 없는 경우와 외부유입량, 조석의 영향, 배수갑문 등 시설물의 영향 등 자연유량 이외에 영향을 주는 요소가 있는 경우는 제외하였다. Figure 4은 선정된 5개 대표 저수지의 위치와 그 중 지소 저수지의 유역내 저수지 및 수혜지구 위치, 하천망도를 보여 주고 있다. 나머지 4개 대표 저수지에 대한 정보는 부록1에 제시하였다.

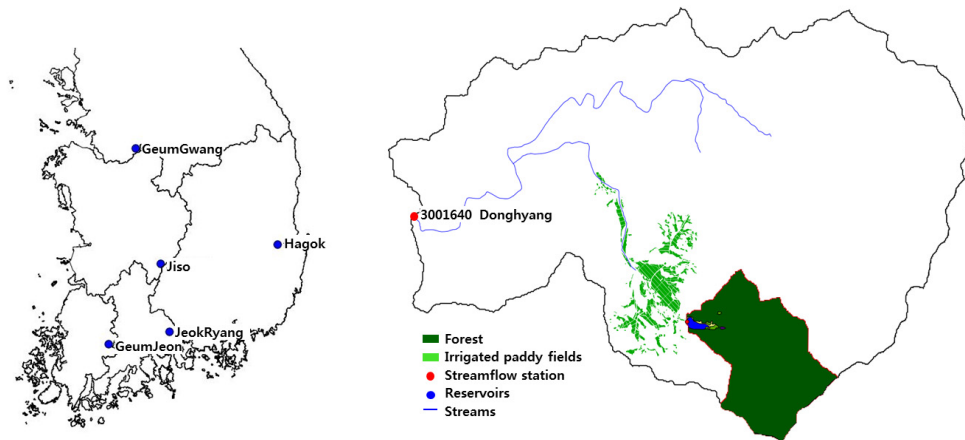


Figure 4 Location of representative reservoirs (left) and Jiso watershed (right).

2.2 연구 방법

2.2.1 기후변화 시나리오의 편의보정 및 상세화

선정된 GCM 데이터는 격자별 공간 해상도가 낮을 뿐만 아니라 해양을 포함한 대상지역에 대한 공간평균의 의미를 가지고 있어 유역 규모에서의 시·공간적인 기후 특성을 재현하는데 어려움이 있기 때문에 유역 규모 모델링에서 바로 사용할 수 없다. 또한, 기후변화에 따른 유역의 수문순환을 잘 묘사하기 위해서는 지점들 간의 공간적인 상관성 및 기상변수들 사이에서의 상관성 또한 확보되어야 한다. 즉 특정 일에 특정 관측점에서 강우가 발생

할 경우 주변 인근 관측점에서 강우가 발생할 가능성이 높으며, 강우시 온도 및 상대습도 등의 변수들도 일관성 있게 고려 되어야 한다. 따라서 GCM 자료를 유역 규모에 적용하기 위해서는 상세화(downscaling) 및 편의보정(bias correction)과 같은 GCM 자료의 수정이 필요하다. 또한 기후모델에 의해 생산된 미래 기후 전망을 신뢰할 수 있기 위해서는 과거 및 현재 기후를 잘 모의해야 한다. 따라서, 과거 및 현재 기간에 대해 모의된 기후 모델 결과를 동일 기간의 관측자료와의 비교를 통하여 GCM의 계통오차를 보정해 주는 편의보정 과정 또한 필요하다. 그리고 과거 수자원 분야에 있어서 기후변화 시나리오 자료의 유역 규모 적용은 대부분 월자료를 기반으로 일자료를 생산하여 적용하여 왔는데(손태석 등, 2010; 박민지 등, 2010), 월자료를 사용할 경우에는 공간적인 상세화에 더하여 시간적인 상세화 과정 또한 필요로하며, 일자료로 상세화를 한 경우와 비교할 때 원래 GCM에서 포함하고 있는 일별 특성을 고려하지 못하는 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 일별 GCM 자료를 사용하였기 때문에 시간적 상세화 과정이 필요하지 않으며 관측지점의 특성을 살리기 위한 공간적 상세화 과정과 편의보정을 동시에 할 수 있도록 분위사상법(Quantile Mapping)을 적용하여 GCM 격자내에 존재하는 모든 기상청 관측소(76개소)를 대상으로 보정된 자료를 생산하였다.

관측치와 모의치에 가장 잘 맞는 누적확률분포를 결정하고 누적확률분포의 역함수를 이용하여 편의보정을 하는 모수적분위사상법(parametric quantile mapping)의 경우는 실제 자료의 분포에 정확히 일치하는 확률분포를 찾아야 하며 실제 데이터와 확률분포함수 사이에 발생하는 차이에 따라서 편의보정 결과에 오차가 발생할 수 있다. 반면에 비모수적분위사상법(non-parametric quantile mapping)은 확률분포함수 없이 모의 및 관측 자료의 실제 분포를 직접 사용하기 때문에 오차를 줄여 보다 정확한 편의보정을 할 수 있는 것으로 알려져 있다(Gudmundsson, 2012). 본 연구에서는 비모수적분위사상법을 사용하였다. 비모수적분위사상법의 보정 절차를 살펴보면 우선 과거 관측기간에 대하여 크기 순으로 정렬된 실제 관측 자료와 모형에 의한 모의 자료 사이의 차이를 분위별로 계산하고, 기후변화 미래 전망 자료도 크기 순으로 정렬한 후 분위별로 계산되었던 차이를 고려하여 원 GCM 자료를 보정하게 된다.

본 연구에서는 Table 2에서 제시된 34개 모형별 기상변수들의 일 자료를 76개 기상청 관측소에 대하여 30년 과거 관측자료를 이용하여 자료 보정을 수행하였다. 강수를 포함한

기상변수들의 월별 분포가 수자원의 관리를 위해서 중요하다는 판단하에 월별로 분위사상법을 적용하여 SWAT 모형의 적용에 필요한 6개 변수에 대하여 편의보정을 수행하였다. 분석에 사용된 과거기간(historical period)의 경우 기상관측소의 관측기간이 1976년 이전 자료를 가지고 있는 경우 GCM 자료는 1976~2005년 기간의 30년 자료를 사용하였으나, 기상청에서 제공하는 12.5km RCM 자료는 1979년 이후의 자료만을 제공하는 관계로 1979~2005년의 기간을 사용하였다. 기상관측지점의 관측기간이 30년 미만인 경우에는 관측소별로 가용한 기간을 사용하여 분위사상법을 적용하여 보정하였다. 본 연구에서 편의보정은 Table 2에 제시되어 있는 모형별, 시나리오별, 가용 변수에 해당하는 모든 자료에 대하여 미래전망기간을 2020년(2011-2040), 2050년(2041-2070), 2080년(2071-2100)의 3개 기간으로 나누어 수행하였다.

기후시나리오 자료의 분석은 각 지점별로 편의보정 및 상세화된 결과를 바탕으로 두가지 관점에서 분석하였다. 우선 6개 기상변수별 과거 및 미래 기간 30년에 대한 월평균 비교를 통하여 지점별기상변수별 변화율을 살펴 보았다. 다음으로 6개 기상변수 중에서 가장 불확실성이 크며 저수지의 물수지와 가장 밀접한 연관이 있는 강수에 대하여 강우특성인자의 변화를 분석하였다. 유입량과 관련된 인자로 호우일수, 강수강도, 5일최대 강수량, 계절강수량의 4개 특성 인자에 대한 시나리오별 변화를 분석하였고, 필요수량과 밀접한 관계가 있다고 판단되는 최대연속무강수일수를 분석하였으며, 연총강수량 중심의 변동 또한 분석하였다. 계절강수량의 경우는 농업용 저수지 운영과 가장 밀접하다고 판단되는 10월에서 3월 사이의 강수량만을 고려하였다. Table 3은 편의보정 및 상세화된 결과를 이용하여 수행된 강우특성인자에 대한 내용을 보여준다.

Table 3 Precipitation indices.

Precipitation Index	Description	Unit
호우일수	일 강수량이 80mm 이상인 날의 연중일수	day
강수강도	연총강수량을 연중 습윤일수(강수량이 1.0mm 이상)로 나눈 값	mm/day
5일 최대강수량	5일 연속 누적강수량 중 최대인 값	mm
최대연속무강수일수	연속적인 무강우 일수의 최대값	day
계절 강수량	수확 후 10월에서 모내기 이전 3월 사이의 계절 강수량	mm
연총강수량 중심	연 강수 총량의 반이 발생하는 시간 (Stewart et al., 2005)	day

2.2.2 유역 특성 분석 및 자료 수집

저수지 분석에 필요한 자료로는 선택된 모형에 따라 차이를 보인다. SWAT의 최소 계산 단위는 소유역 내에서 서로 다른 토양-토지이용-경사의 조합에 의해 결정되는 Hydrologic Response Unit(HRU)이다. SWAT의 경우 소유역 내에서의 유출 및 수질 모의에 있어 HRU의 위치는 고려되지 않지만, HRU를 생성하기 위해서는 토양, 토지이용, 경사 등의 위치정보가 필요하다. 반면 HOMWRS의 경우에는 소유역 개념이 없는 총괄형모형으로서 공간 분포와 관련된 정보가 필요 없다. SWAT입력자료 구축에 필요한 공간정보는 토양도의 경우는 국립농업과학원에서 제공하는 정밀토양도를, 토지이용도의 경우는 환경부에서 제공하는 2007년 중분류 토지이용도를, 수치표고자료(Digital Elevation Model, DEM)의 경우는 30m 격자 크기의 ASTER Global Digital Elevation Map (<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>)을 사용하였다.

SWAT을 이용한 농업용 저수지 유역의 물수지 분석을 위해서는 저수지로부터 관개되는 수혜지구의 필요수량 분석이 필요하다. 하지만 환경부에서 제공하는 중분류 토지이용도의 경우에는 관개논과 비관개논을 구분할 수 없을 뿐만 아니라 저수지별 관개구역이 제시되지 않고 있다. 따라서 저수지별 수혜지구 공간정보 분석이 필요하며, 본 연구에서는 농어촌공사에서 보유하고 있는 시설별 수혜지구 지번번호와 한국토지정보시스템에서 제공하는 지적도 자료를 활용하여 저수지별 수혜지구도를 작성하였다. Figure 5은 SWAT모델링을 위해 필요한 DEM, 토지이용, 토양도, 관개논의 한반도 내 공간 분포를 보여 준다.

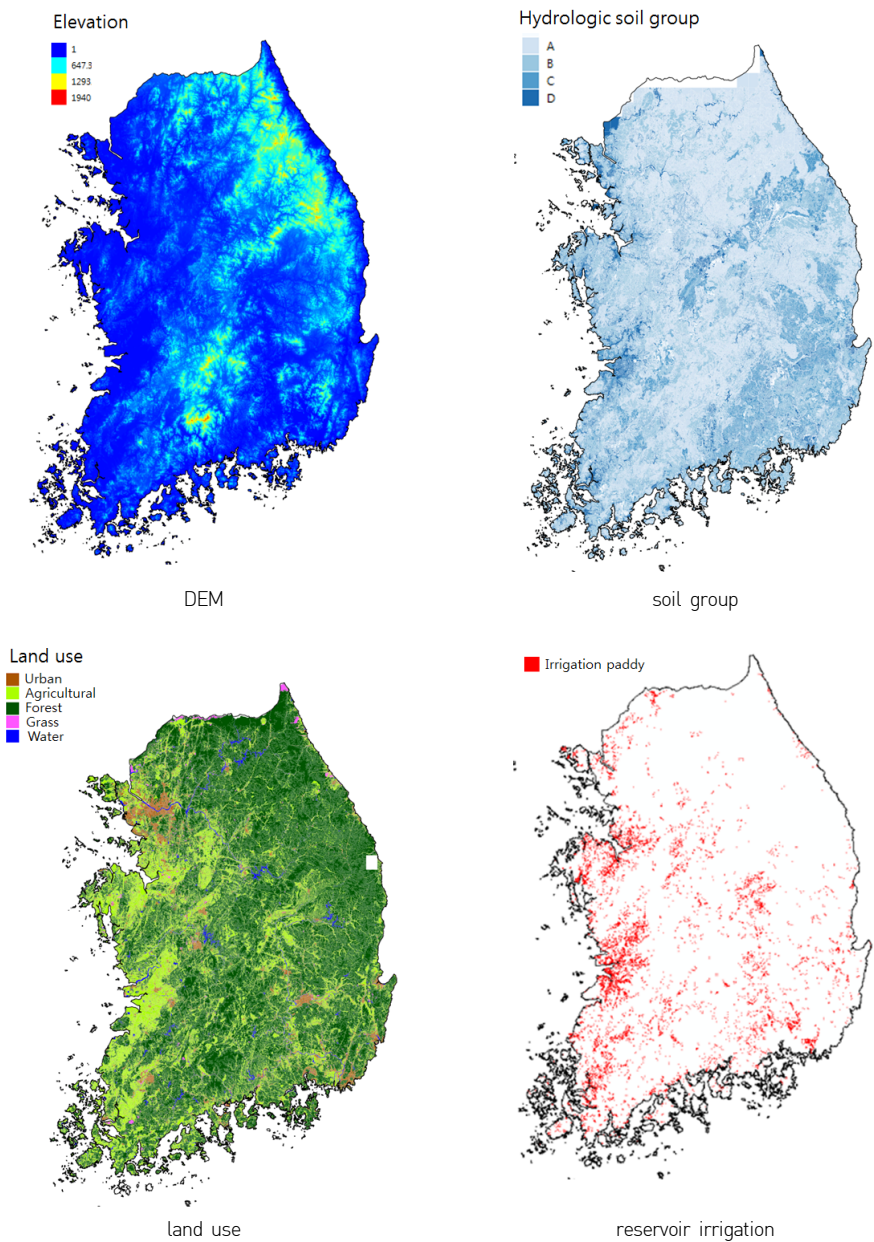


Figure 5 Spatial information used for SWAT modeling.

HOMWRS를 이용하여 상류 유역으로부터의 유입량 산정을 위해서는 저수지 상류 유역에 대한 토지피복의 비율이 필요하다. 토지피복 비율은 DEM을 이용하여 저수지의 출구 점을 기준으로 유역구분을 한 후에 환경부의 2007년 중분류 토지피복도 자료를 유역경계도와 중첩하여 계산하였다(부록1). 농업지역을 제외한 중분류항목들은 환경부의 대분류항목으로 재분류하여 사용하였으며 농업지역의 경우는 논, 밭, 기타(하우스재배지, 과수원, 기타재배지)로 세분하여 비율을 계산하였다.

GCM을 이용한 대표농도경로 시나리오별 기후변화 모델링을 위해서 미래 기간에 대한 토지이용변화 정보가 고려되고 있다. 기후변화에 따른 실질적인 수자원 영향 평가를 위해서는 시나리오 별 미래 시점에서의 토지이용변화 정보가 일관성 있게 고려되어야 한다. 미래 시나리오 기간에 대한 토지이용변화의 예측은 토지이용 공간 정보를 필요로 하는 경우와 공간 정보 없이 지목별 변화량만을 필요로 하는 경우에 따라서 접근할 수 있다. 본 연구에서 사용한 SWAT 모형의 경우는 토지이용의 공간 정보를 모형입력 자료 구축시 필요로 하며, HOMWRS의 경우에는 토지이용 지목별 비율만을 필요로 한다. 본 연구에서는 CMIP5에서 추천하는 한반도 지역의 미래 토지이용 변화 전망이 실제 발생하고 있는 토지이용 변화 경향과 상반되는 결과를 보여(부록2) 미래전망기간에 대한 토지이용 변화를 고려하지 않고 현재와 동일한 토지이용 조건으로 가정하였다.

저수지 모델링에 필요한 강우 및 기상자료는 기상청 76개 관측소의 과거 자료를 활용하였고, 유량자료는 국가수자원관리종합정보(WAMIS)에서 제공하는 관측점별 일유량 자료를 사용하였다.

2.2.3 저수지 모델링

기후변화 자료의 경우 4개 RCP 시나리오에 대하여 과거기간 및 미래전망기간을 2020년(2011~2040), 2050년(2041~2070), 2080년(2071~2100)의 3개 기간으로 나누어 수행하였으나, 개별 저수지에 대하여 모의는 과거기간(observed: 1976~2005, 30년)에 대한 관측 자료를 이용한 경우, 시나리오별 과거기간(historical: 1976~2005, 30년) 자료를 이용한 경우, RCP4.5 및 8.5 시나리오의 미래전망기간(future: 2011~2040, 30년) 자료를 이용



한 경우에 대하여만 유역유입량, 관개필요수량, 물수지분석을 통한 저수량 변화를 모의하여 저수지별 기후변화에 따른 영향을 평가하였다.

우선, 미계측 유역에의 적용 가능성 및 농업용 저수지를 포함한 통합유역모델링 차원에서 SWAT 모형의 적용성을 살펴 보았다. 선정된 5개 대표 유역을 대상으로 관측 기상 자료를 이용하여 매개변수 보정 없이 SWAT을 적용한 후 저수지 하류에 위치해 있는 유량 관측지점의 실측 자료와 비교하였다. 또한 SWAT과 HOMWRS의 비교를 통한 불확실성 평가의 경우, 두 모형 모두 유역유입량, 논에서의 필요수량, 저수지 저수율 모의가 가능하지만 필요수량의 계산에 있어서 개념적 차이를 가지고 있어 유역유입량을 제외하고는 직접적인 비교가 불가능하다. SWAT 모형의 경우 작물에 의한 증발산량만을 모의하고 있는 반면에 HOMWRS의 경우는 식 (1) ~ (4)와 같이 ET값에 더하여 묘대정지기, 묘대기, 묘대이양기, 이양본답기 기간으로 구분하여 모내기 용수와 같은 관리용수를 고려하고 있으며 관개수로를 통한 손실율을 추가적으로 고려한 관개필요수량을 모의한다. 본 연구에서는 이양용수량 140mm에 못자리 정지 용수 1.75mm(35mm 못자리 정지용수를 전체 관개면적의 1/20에 해당하는 못자리 면적에 적용)를 더한 후 30%의 수로손실을 고려하였고, 담수된 논에서의 침투량은 5mm로 고려하였다.

$$\text{묘대정지기} : Req(t) = \left(I + \frac{WR_n}{D_n} \right) \times A_n \quad (1)$$

$$\text{묘대기} : Req(t) = (I + ET_n(t)) \times A_n \quad (2)$$

$$\text{묘대·이양기} : Req(t) = (I + ET_n(t)) \times A_n + \left(\frac{WR_t}{0.5D_t} \right) \times A_t \quad (3)$$

$$\text{이양·본답기} : Req(t) = \left(I + ET_n(t) + \frac{WR_t}{0.5D_t} \right) \times A_t \quad (4)$$

여기서, $Req(t)$ = 기간별 필요수량, $ET_n(t)$ = 기간별 증발산량(mm/day), I = 일 삼투량(mm/day), WR_n = 못자리 정지용수량(mm), D_n = 못자리 정지일수, A_n = 묘대면적(ha), WR_t = 이양용수량, A_t = 이양재배 면적, D_t = 이양일수.

또한 저수율을 기반으로한 농업가뭄 지표를 산정하여 저수지별 미래 기후변화에 따른 발생빈도별 저수지별 가뭄에의 취약성을 평가하였다. 가뭄은 접근 방식에 따라 기상학적 가뭄, 기후학적 가뭄, 농업적 가뭄, 대기적 가뭄, 수문학적 가뭄, 사회경제적 가뭄 등으로 구분될 수 있으며, 지역별 농업가뭄의 크기를 정확하게 묘사하기 위해서는 강수량뿐 아니라 지역 내 작물의 생육시기별 필요수량과 용수시설에서의 공급 가능수량 등을 모두 고려하는 방법이 타당하다(장민원, 2000). 따라서 본 연구에서는 장민원(2000)이 제시한 바와 같이 농업용저수지의 유역유입량과 작물의 필요수량을 반영하여 저수지 물수지 분석을 통해 산정된 일별 가용저수량 자료로부터 가용저수량의 순별 최소값을 선택하여 총 36개 순에 대한 시계열변화를 추출하여 아래와 같이 순별 농업가뭄지표를 계산하였다. 가용저수량 (X)이 순별 최소치(x_T)보다 작거나 같게 될 확률인 비초과확률 ($X \leq x_T$) 계산을 위해서는 저수량의 시계열에 적합한 확률분포의 선정이 필요한데, 본 연구에서는 저수율의 시계열에 적합한 것으로 알려진 표준정규분포를 선정하였다(김현영 1998, 장민원, 2000). 비초과확률은 시계열자료로부터 계산된 정규분포의 매개변수(평균, 표준편차)를 이용하여 정규화를 거쳐 구할 수 있다.

$$P(X \leq x_T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_T} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_T-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (5)$$

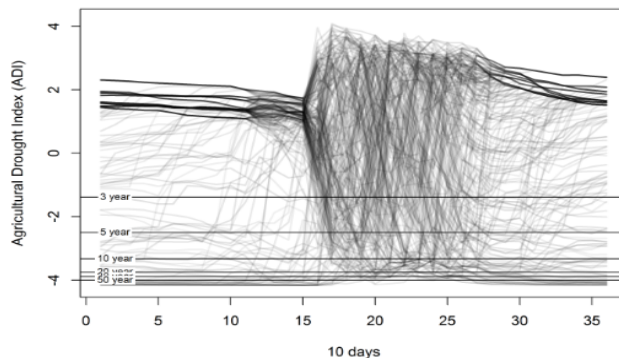
$$ADI = \frac{P - 50}{12} \quad (6)$$

여기서, x_T 변수, μ 평균, σ 표준편차, P 가용저수량의 순별 최소치에 대한 비초과확률(%), ADI 농업가뭄지표(Agricultural Drought Index)이다.

최종적으로 기후변화에 따른 농업용 저수지의 가뭄 영향 평가는 저수지의 용량별로



큰 차이를 보이는 저수용량 대신에 저수량을 기반으로 정규화한 농업용 저수지의 가뭄지표 (Agricultural Drought Index, ADI)를 사용하였다. 본 연구에서는 Figure 6 (a)에서와 같이 모의 기간인 30년동안 다중 GCM에 의해 모의된 저수량을 ADI로 전환한 후 Figure 6 (b)에 제시된 가뭄빈도별 ADI이하로 떨어지는 순의 개수를 가지고 미래 기후변화 시나리오에 따른 농업 저수지 가뭄 영향을 평가하였다. 본 연구에 사용된 저수지의 경우 모두 10년 빈도 저수지를 선정하였기 때문에 10년빈도 보다 심한 가뭄이 발생하는 경우에(ADI \leq -3.33, Severe and Extreme drought) 대하여 분석하였다.



(a)

Frequency(yr)	~3	3	5	10	20	30	50	50~
P(X≤x)		0.33	0.20	0.10	0.05	0.03	0.02	
ADI		-1.39	-2.50	-3.33	-3.75	-3.89	-4.00	
Classification	Normal	Moderate drought		Severe drought			Extreme drought	

(b)

Figure 6 Simulation example of 10-day Agricultural Drought Index (ADI) at Jiso reservoir using multiple GCMs (a) and drought classification based on ADI according to frequency.

5개소의 대표 저수지에서의 연구 결과를 바탕으로 저수지 모델링 방법에 대해 확정하여 전체 104개 저수지에 적용하였다. 본 연구에서 유입량, 필요수량, 저수량, 가뭄지표의 분석은 순별(10-day) 기간에 대하여 산정하였는데, 이는 월별로 편의보정을 한 기후변화 자료가 보다 작은 시간 스케일에서의 변화를 잘 반영하고 있는지를 평가하며, 기후변화 적응대책의 제시에 있어서도 보다 섬세한 영농방법의 적용을 고려하기 위함이다.

3. 연구결과

3.1 기후변화 시나리오 분석 결과

우선 분위사상법을 이용하여 과거기간 동안의 월평균 차이를 맵핑하여 미래 전망 자료를 보정한 결과에 대하여 시나리오별, 기상변수별로 월평균 값의 변화를 비교하였다. 기후변화 시나리오의 과거기간(Historical: 1976 ~ 2005)과 기상관측소의 관측자료와 중복기간이 존재하는 76개 관측소에 대하여 수집된 모든 GCM 자료를 이용하여 월별로 편의보정을 수행하였으나 지면의 제한 상 농업용 저수지가 비교적 많이 분포하고 있는 전라북도의 전주 관측소의 결과만을 본문에 제시하였다. Figure 7은 편의보정 전 과거기간(1979~2005) 동안에 각 GCM별 기상변수들의 월평균 분포를 보여준다. 우선 6개의 기상변수에 대하여 편의보정 전 결과의 경우 GCM과 관측값 사이에 상당한 차이가 있음을 보여주고 있다. 강수량의 경우는 11개 GCM의 평균(MME)과 관측값의 평균과 비교할 때 MME가 6~9월의 여름철에는 강수량을 적게 모의하고 그 이외의 기간에 대해서는 강수량을 관측보다 크게 모의하는 경향을 보였다. 강우를 제외한 변수들의 경우 최저온도, 상대습도, 일사량, 풍속의 경우는 개별 모형 및 MME가 관측값 보다 크게 모의하는 경향을 보인 반면 최고온도는 개별 모형 및 MME값이 관측값보다 작게 모의하는 경향을 보였다. 편의보정이 없는 경우 기상청의 12.5km RCM자료가 기타 GCM 자료와 비교하여 여름철 강수량을 관측값에 가깝게 가장 잘 모의하고 있다. 하지만 강수량의 월별 변화가 농업용 저수지를 포함한 수자원 관련 분석에 있어서 중요한 점을 고려할 때 월별 평균값에 대한 편의보정 및 상세화 과정 없이 미래 전망 자료를 유역 모델링에 사용할 경우 유출량에 있어서 상당한 차이를 보여 줄 것으로 판단된다.

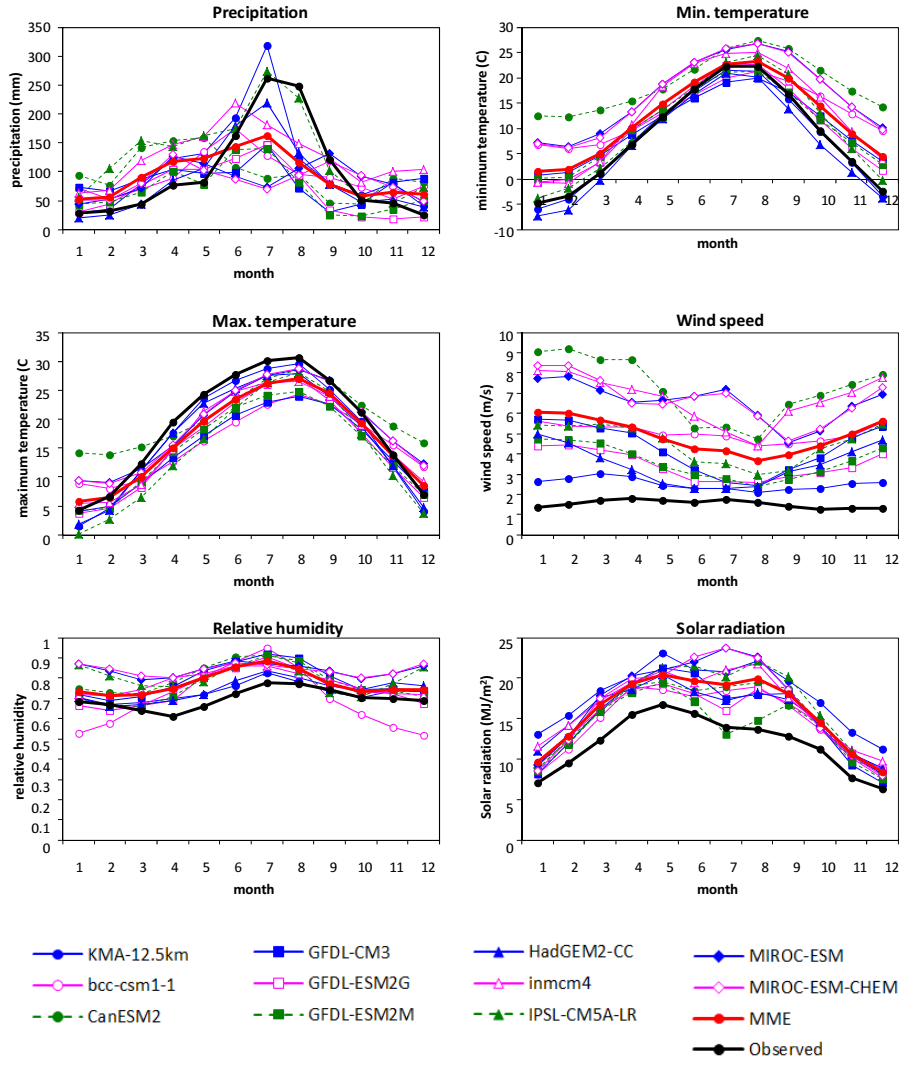


Figure 7 Comparison of monthly average of selected six variables between GCMs without bias correction (RCP8.5) and the observed at Jeonju station for the historical period (1976-2005).

Figure 8는 보정 후 미래기간(2011~2040)에 대한 RCP8.5시나리오의 월평균 분포를 보여 준다. 편의보정 후 6개 기상변수 모두 개별 GCM에 의한 월평균 값들이 다중모형이상 불(MME) 주변으로 수렴하는 경향을 보였다. 강수량의 경우는 편의보정 이후에도 개별 모형 결과들이 여타 변수들과 비교하여 MME 중심으로 비교적 넓게 분포하여 높은 불확실

성의 특성을 보였다. 과거기간 실측값과 MME자료와의 변수별 월별 변화는 Table 4에 제시하였다. 최저 및 최고 온도는 모두 1.9도 증가를 보인 반면, 풍속, 상대습도, 일사량은 연평균 각각 -1.3%, -0.2%, -0.5%의 연평균 변화로 미래 기간 동안에 거의 변화가 없음을 보여 주고 있다. 강수량의 경우 11개 모형의 앙상블 결과는 7, 10, 12월을 제외한 모든 기간 동안에 증가하는 경향을 보였다. 전체적으로 앙상블 결과는 연평균 강수량이 1267.2mm에서 1338.7mm로 약 5.6% 증가하는 결과를 보였다.

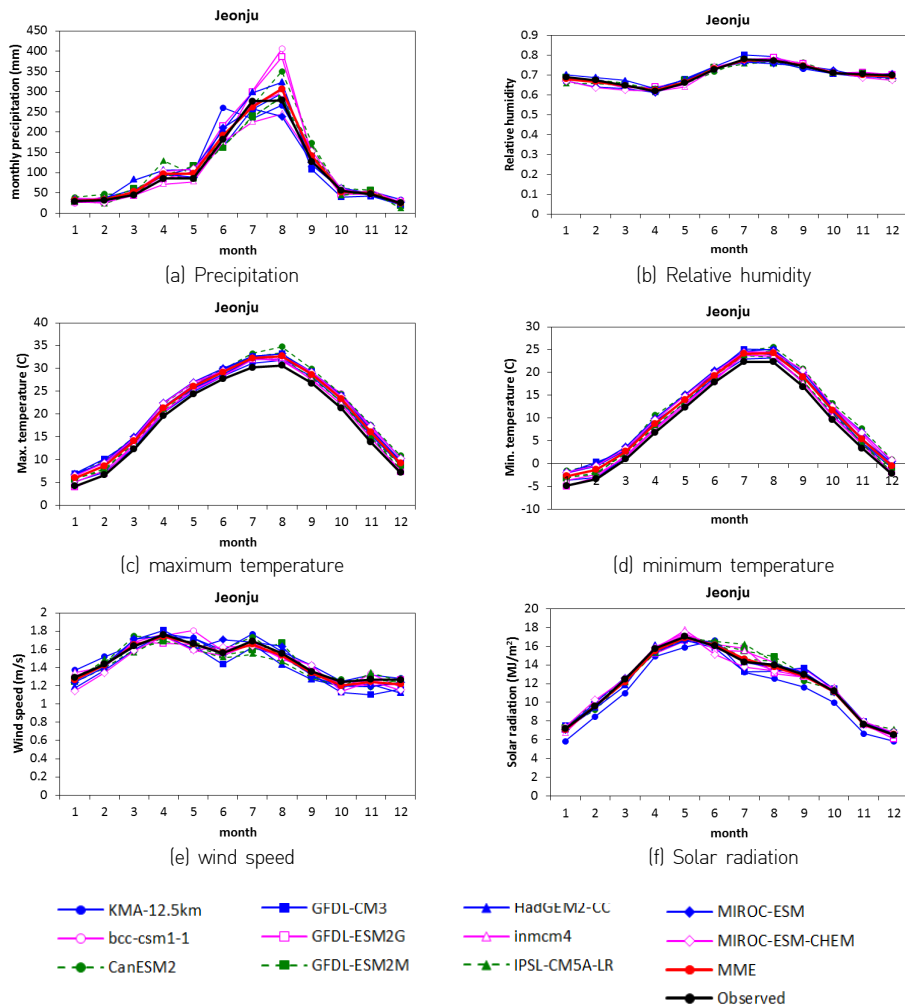


Figure 8 Comparison of monthly average of selected six variables between GCMs after bias correction (RCP8.5) for the future period (2011-2040) and the observed for the historical period (1976-2005) at Jeonju station.

Table 4 Comparison of monthly average of selected six variables between GCMs after bias correction (RCP8.5) for the future period (2011~2040) and the observed for the historical period (1976~2005) at Jeonju station.

Variable	Month												Annual
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
Precipitation (mm)													
Observed	28.8	32.1	44.6	85.6	85.4	181.3	276.4	278.2	127.4	55.4	46.9	25.1	1267.2
MME	31.4	33.4	52.9	96.9	98.0	191.3	261.8	306.9	140.8	51.9	49.3	24.2	1338.7
% difference	8.8	4.0	18.6	13.1	14.7	5.6	-5.3	10.3	10.5	-6.4	5.1	-3.8	5.6
Max. temperature (C)													
Observed	4.2	6.6	12.3	19.6	24.3	27.7	30.2	30.6	26.7	21.3	13.8	7.1	18.7
MME	6.0	8.6	14.1	21.3	26.0	29.2	32.3	32.7	28.6	23.3	16.0	9.2	20.6
diff (O-E)	1.8	2.0	1.9	1.7	1.7	1.5	2.1	2.1	1.9	2.0	2.2	2.0	1.9
Min. temperature (C)													
Observed	-4.8	-3.4	1.0	6.8	12.3	17.8	22.3	22.4	16.8	9.6	3.4	-2.2	8.5
MME	-2.7	-1.3	2.6	8.8	14.0	19.3	24.2	24.2	19.1	11.7	5.4	-0.5	10.4
diff (O-E)	2.1	2.1	1.6	2.0	1.7	1.5	1.8	1.9	2.2	2.1	2.0	1.7	1.9
Wind speed (m/s)													
Observed	1.29	1.44	1.63	1.76	1.66	1.56	1.69	1.56	1.36	1.24	1.27	1.27	1.48
MME	1.26	1.43	1.65	1.74	1.66	1.57	1.66	1.53	1.34	1.20	1.24	1.22	1.46
% difference	-2.2	-0.6	0.8	-1.1	-0.3	0.3	-1.9	-1.5	-1.2	-3.2	-2.1	-3.9	-1.3
Relative humidity													
Observed	0.69	0.67	0.65	0.62	0.66	0.73	0.78	0.77	0.74	0.71	0.70	0.70	0.70
MME	0.68	0.67	0.65	0.62	0.66	0.73	0.77	0.77	0.75	0.71	0.70	0.69	0.70
% difference	-0.01	-1.2	-0.1	0.9	0.6	0.4	-0.7	0.1	0.4	0.3	-0.8	-0.9	-0.2
Solar radiation (MJ/m2)													
Observed	7.19	9.59	12.46	15.75	17.05	16.02	14.31	13.99	12.97	11.22	7.65	6.52	12.06
MME	7.07	9.62	12.18	15.51	16.87	16.13	14.62	13.77	12.83	11.16	7.63	6.55	11.99
% difference	-1.7	0.4	-2.3	-1.6	-1.1	0.7	2.2	-1.6	-1.0	-0.5	-0.2	0.5	-0.5

편의보정 후 변수들의 한반도 내 공간 분포를 살펴 보기 위해서 서울, 강릉, 청주, 전주, 광주, 대구, 부산의 7개 대표 관측소를 대상으로 분석을 하였으며, 앞서 살펴 본 전주 관측소와 비슷한 결과를 보여 부록2에 제시하였다.

기후변화에 따른 월평균 값의 변화 분석 결과 강수량의 경우에 가장 큰 불확실성을 내포하고 있음을 알 수 있다. 수자원 분야에 있어서 강수량은 유출량에 직접적인 영향을 미치는 가장 중요한 인자임을 고려할 때, 월평균 강수량의 비교에 더하여 수문순환에 영향을 미칠 수 있는 강우특성인자의 변화를 살펴 보는 것은 중요하다. 예를 들어 월별 강수량

이 정확히 같더라도 강우일수, 호우일수, 최대 무강우 일수 등 강우 특성이 변할 경우 전혀 다른 수문순환 기작(process)으로 인하여 유출량에 있어서 큰 차이를 보일 수 있다. 따라서, 자료처리에 사용된 동일 과거기간에 대하여 실측자료와 보정된 GCM 자료 사이의 강우 특성인자를 비교하여 사용된 편의보정 기법인 quantile mapping의 과거기간에 대한 재현성을 평가하였다.

동일한 기후변화 시나리오 자료는 다양한 목적의 응용분야에 활용될 수 있는데, 분석하고자 하는 목적에 따라서 시스템의 중요한 기작이 달라 질 수 있으며 이에 따라서 기후자료에서 중요하게 고려되어야 할 기후변수의 특성이 결정되고 평가되어야 한다. 따라서 사용하고자 하는 목적에 대하여 과거 재현성을 포함한 기후자료의 적합성을 평가하는 것이 기후변화 시나리오를 적용하여 도출된 최종 결과를 해석하는데 있어서 중요한 정보가 될 수 있다. 전주 관측소에서의 Table 3에 제시된 강우특성인자에 대한 분석 결과를 Table 5 및 Figure 9에 제시하였다.

과거기간에 대하여 편의보정 자료의 관측자료에 대한 재현성을 살펴 보면 강수량이 80mm 이상인 호우일수, 연총강수량을 습윤일수로 나눈 강수강도, 10월~3월 갈수기 강수량, 연총강수량 중심 인자의 경우 각각 0.1일(-3.4%), 0.1 mm/day(0.9%), 2mm(-1.7%), 0일(-0.1%)의 차이를 보여 해당 인자에 대한 재현성에 있어서 좋은 결과를 보였다. 반면에 5일최대 강수는 GCM에 의한 값이 관측값을 이용한 경우와 비교하여 25mm(12.3%)가 늘었고 최대 연속 무강우일수는 GCM에 의한 값이 7일(-18.4%) 줄어 드는 경향을 보였다. 미래전망기간에 대해서는 호우일수, 강수강도, 5일최대 강수, 갈수기 강수량, 최대연속 무강우 일수의 경우 RCP4.5 및 8.5 시나리오에 대하여 증가하는 경향을 보였고, 강수량의 계절내변동은 RCP4.5 및 8.5에 대하여 각각 -0.5% 및 -1.1% 감소하는 경향을 보였다. 특히 최대 연속 무강우일수가 6.5% 및 4.9% 증가하여 가뭄을 악화시킬 가능성으로 작용할 수 있는 반면에, 농업용 저수지의 저류에 필요한 기간인 10월 ~ 3월 사이의 강수량 증가는 시나리오별로 31.4% 및 36.7%로서 모내기 기간의 가뭄에 도움이 될 가능성으로 작용할 수 있다. 강수강도 및 5일최대 강수량의 경우는 두 시나리오 모두 증가하는 경향을 보였는데, RCP 8.5 시나리오에 경우 각각 23.4% 및 5.8% 증가하는 경향을 보여 미래 기간 동안에 극한 강수의 증가 가능성을 보여주고 있다. 강우특성인자의 한반도 내에서의 공간적 분포를 살펴 보기 위해서 앞서 선정한 대표 관측소에 대한 강우특성인자의 분석 결과를 부록3에 제시하였다.



Table 5 Results of precipitation index analysis at Jeonju station.

Precipitation Index	호우일수 (day)	% diff.	강수강도 (mm/day)	% diff.	5일최대강수량 (mm)	% diff.
Observed	1.9		15.0		204	
Historical	1.8	-3.4	15.1	0.9	229	12.3
Historical	1.8		15.1		229	
RCP4.5	2.1	13.8	16.1	6.8	264	15.3
RCP8.5	2.2	23.4	16.0	5.8	246	7.7
Precipitation Index	갈수기 강수량 (mm)	% diff.	최대연속 무강우일수 (day)	% diff.	연총강수량 중심 (day)	% diff.
Observed	142		35		194	
Historical	140	-1.7	28	-18.4	194	-0.1
Historical	140		28		194	
RCP4.5	184	31.4	30	6.5	192	-0.5
RCP8.5	191	36.7	30	4.9	191	-1.1

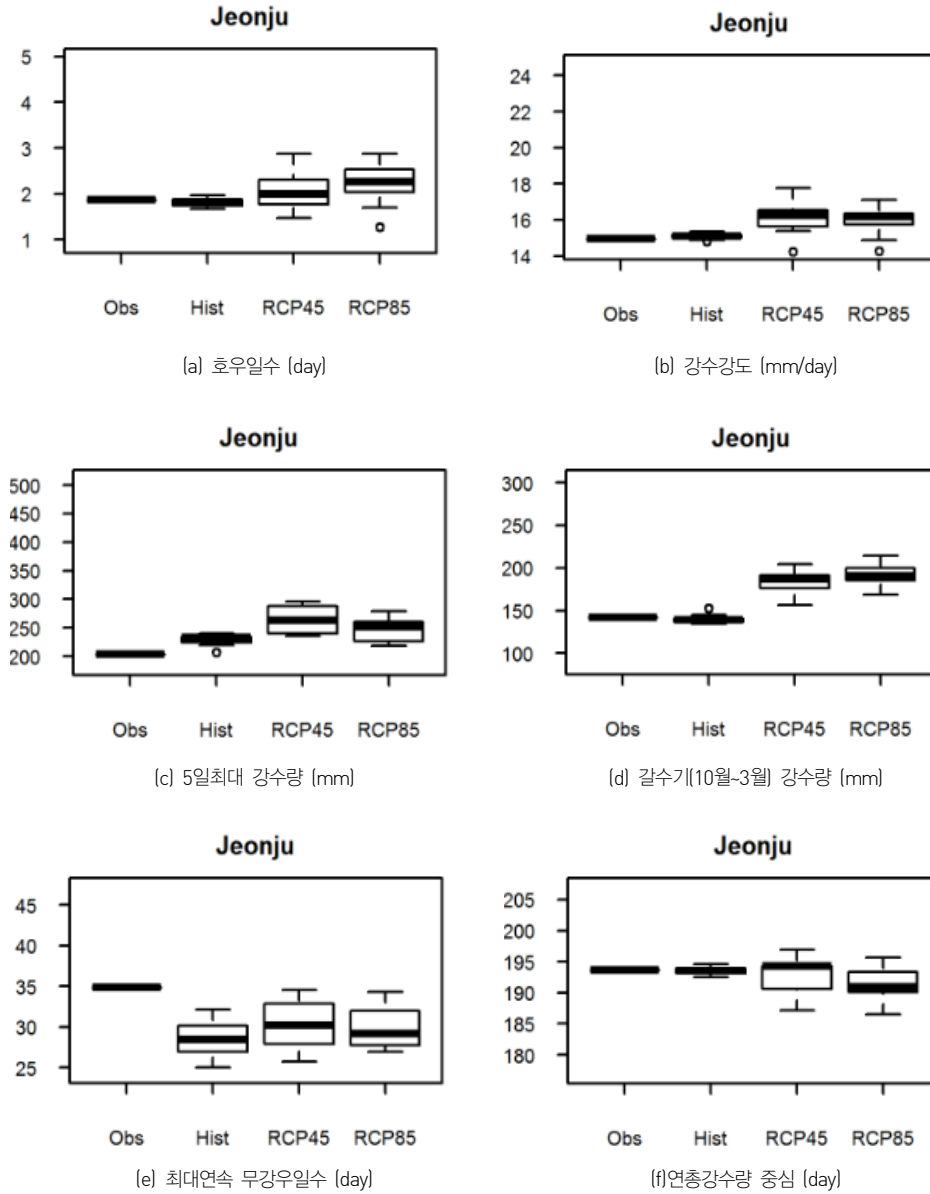


Figure 9 Comparison of precipitation index at Jeonju station.



3.2 SWAT의 적용성 평가 및 유출 모델링에 따른 불확실성 평가

통합유역 모델링 개념에서 농업용 저수지를 고려하기 위해 선정된 SWAT 모형의 미계측 유역에서의 적용성 평가 결과는 Table 6과 같다. Table 6은 SWAT 모형을 선정된 5개 대표 유역에 매개변수 보정 없이 적용한 후 저수지 하류부에 위치한 유량관측 자료와의 비교를 통한 모의 성능을 보여준다. 적량 및 금광 저수지에서의 30년 평균 유출량의 경우 각각 10.2% 및 22.2% 낮게 모의 하는 것을 제외하고 나머지 3개 저수지 유역에서는 10% 미만으로 비교적 양호한 모의 결과를 보였다. Nash sutcliffe efficiency(NSE, Nash and Sutcliffe, 1970)도 금광 및 적량 저수지를 제외한 3개 유역에서 일별 및 월별 NSE값이 0.5 이상으로 양호한 결과를 보였다. Figure 10은 지소 저수지에서의 일(a, c) 및 월별(b, d) 모의 유출량과 실측 유출량의 비교를 보여 주고 있으며, 나머지 4개 유역에 대한 모의 결과는 부록4에 제시하였다.

Table 6 SWAT simulation results at representative reservoir watershed without calibration.

Performanc Criteria		Reservoirs				
		GeumGwang	HaGok	JiSo	JeokRyang	GeumJeon
% 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

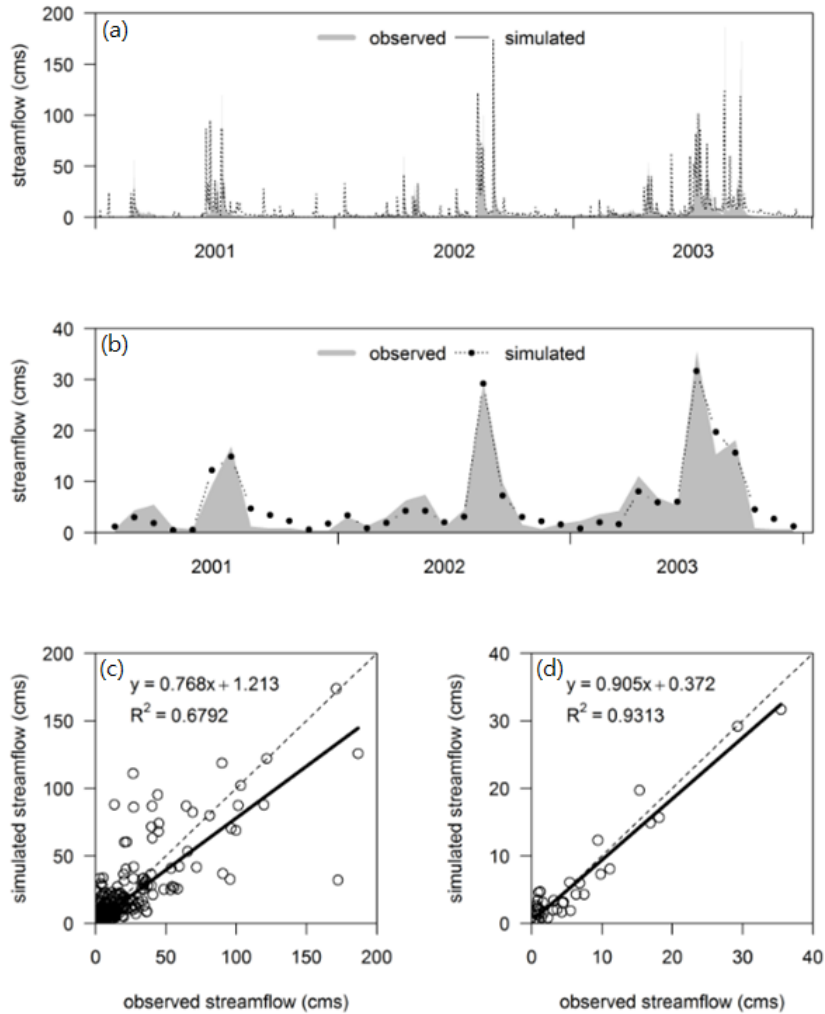


Figure 10 SWAT simulation results at Jiso reservoir watershed without calibration.

저수지 모델링 방법에 따른 유역유입량의 불확실성을 평가하기 위한 SWAT 및 HOMWRS 모형에 의한 대표 저수지 유역에서의 유입량 비교는 Table 7에 제시되어 있다. 적량 저수지 상류 유역에서 HOMWRS가 SWAT 모형 보다 유출량을 -11.8% 작게 모의한 경우를 제외하고 나머지 4개 저수지 유역에서 HOMWRS 모형이 SWAT 모형보다 유출량을 크게 모의하는 것으로 나타났으며 차이는 20% 미만의 결과를 보였다. Figure 11은 지소 유역에서의 두 모형에 의한 월별 유입량 모의 결과를 비교한 것으로 두 모형의 결과가



잘 일치하는 경향을 보이고 있어 통합유역모델링 개념에서 SWAT 모델링을 통한 유입량 예측은 적합할 것으로 판단된다.

Table 7 Comparison of simulated streamflow by SWAT and HOMWRS without calibration.

Inflow (mm)		Reservoirs				
		GeumGwang	HaGok	JiSo	JeokRyang	GeumJeon
30-year annual average	SWAT (a)	404.5	341.2	544.1	578.6	452.7
	HOMWRS (b)	459.1	377.5	585.4	510.3	522.9
% difference (b-a)/a*100		13.5	10.7	7.6	-11.8	15.5

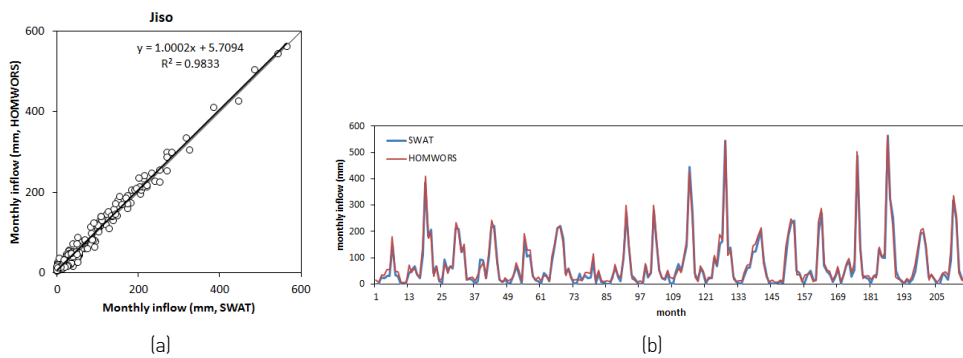


Figure 11 Scatter plot(a) and time series (b) of monthly streamflow simulated by SWAT and HOMWRS at Jiso reservoir.

3.3 저수지 가뭄지표 분석

3.3.1 대표 저수지 분석 결과

기후변화 시나리오에 따른 104개 저수지의 거동 분석 이전에 일 자료 기반의 비모수적 분위사상법을 이용하여 생성한 기후 정보를 과거 관측 기후자료와 비교하여 저수지 물수지 기작에 있어서의 재현성 여부를 살펴 보는 것은 최종적으로 도출된 결과에 대한 신뢰성을 판단하는데 많은 도움이 된다. 만약 과거기간의 시나리오 자료를 사용한 분석결과(유입량, 필요수량, 저수량 등)가 동일 기간의 관측자료를 사용한 결과와 비교하여 전혀 다른 시간적(일별, 순별, 월별) 패턴을 보인다면, 과거기간을 기준으로하여 제공되는 미래전망기간

에 있어서의 상대적인 증감 결과를 신뢰하기 힘들 것이다. 즉, 재현성에 있어서 큰 차이를 보이는 경우에는 제공된 정보를 의사결정에 사용하는데 있어서 제한적일 수 밖에 없을 것이다. 따라서 104개 저수지에 대한 포괄적인 분석결과에 앞서 선정된 대표 저수지 중 하나인 지소 저수지에서의 분석결과를 바탕으로 사용된 기후변화 자료의 농업용 저수지 분석을 위한 적합성 여부를 평가하였다. 이를 위해서 보정에 사용된 월별 시간간격보다 작은 순별 시간간격으로 유입량, 필요수량, 저수량, 농업가뭄반복 횟수를 분석하였다. 순별 분석결과는 저수지 관리자가 이양시기의 조정 등 비구조적인 방법을 통해 용수사용의 효율을 극대화 하고자 하는 경우 월별 자료와 비교하여 보다 섬세한 운영방안 도출을 가능하게 할 것으로 판단된다. 제시된 개별 저수지에 대한 결과는 9개(RCP4.5) 또는 11개(RCP8.5)의 GCM 기후자료를 30년 기간에 대하여 HOMWRS의 입력으로 사용하여 모의된 유입량, 필요수량, 저수량의 결과를 Figure 12와 같이 순별로 평균하여 분석하였다.

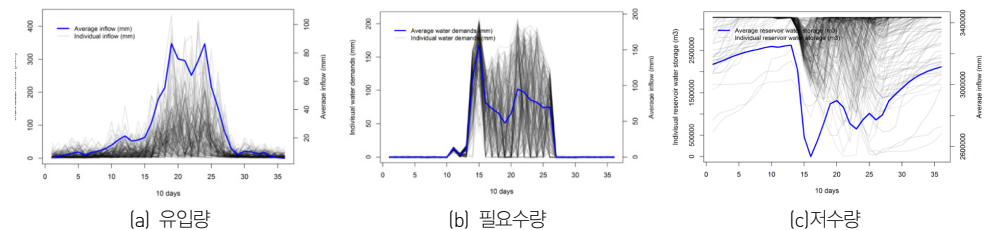


Figure 12 Historical simulation results of HOMWRS using multiple GCMs for inflow (a), water demand (b), and water storage (c) at Jiso reservoir.

지소 저수지에서의 유입량의 분석 결과는 Figure 13에 제시되어 있다. 우선 동일기간에 대한 관측 기후정보와 모형에 의한 기후정보를 활용한 경우 유입량의 변화를 살펴 보면 연 유입량이 관측(Observed)과 GCM(Historical)에 대해 각각 975.6 mm와 988.4 mm로 1.3%의 차이를 보였으며, 1:1 scatter plot에서도 기울기가 1에 가깝고 R^2 또한 0.913의 높은 값을 보였다. 또한 순별 시계열 그래프도 7월 중순 및 8월 말을 제외하고 비슷한 경향을 보였다. 따라서 사용된 편의보정/상세화 기법이 농업용 저수지의 유입량 분석에 적합한 것으로 판단하였고, 본 연구에서 도출된 미래기간에 있어서의 순별 변화량에 관한 정보를 사용하는데 문제가 없으리라 판단하였다. 과거기간에 대한 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오

미래 전망을 비교해 보면 두 시나리오 모두 유입량이 각각 70.3mm 와 89.6mm 가 늘어 7.1%와 9.1% 증가하는 결과를 보였다. 시기적으로 보면 8월에 가장 큰 증가 경향을 보이고 있는데 이는 지소 저수지에 가장 가까운 전주 관측소의 결과인 Figure 7 (a)에서 미래 기간에 대한 MME값이 과거기간의 관측값과 비교하여 증가한 결과에 기인한 것으로 판단된다.

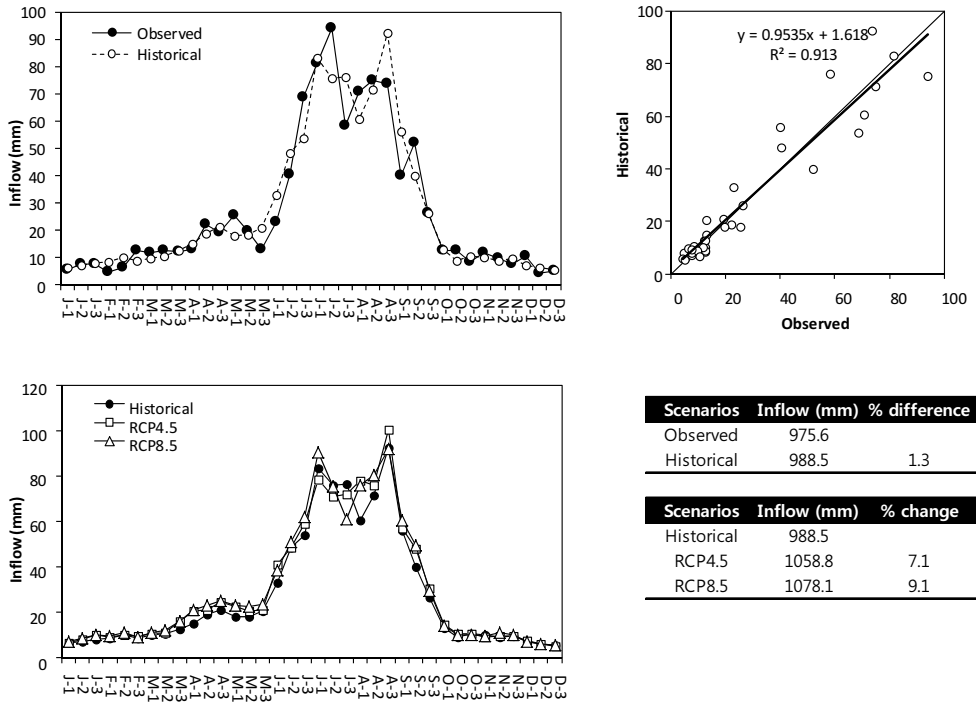


Figure 13 Comparison of simulated 30-year 10-day average inflow using observed weather data and GCMs historical data (top left: time series and top right: scatter plot) and among GCMs historical, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios (bottom left: time series and bottom right: analysis results).

관개필요수량의 변화는 Figure 14에 제시되어 있으며 사용된 편의보정 기법이 유입량과 마찬가지로 필요수량 산정에 있어서도 적합한 것으로 판단된다. 과거기간에 대한 관측자료와 GCM 자료에 의한 연필요수량의 경우 5.4%의 차이를 보였고 기울기나 R²값도 0.99 및 0.97로 만족스러운 결과를 보였다. 과거기간과 미래전망기간과의 변화를 살펴 보면 RCP4.5 및 8.5 경우 각각 26.5mm 및 5.7mm의 필요수량이 늘어 2.4% 및 0.5%의 증가 경향을 보였다. 이는 동일한 과거기간에 대하여 관측자료를 사용한 경우와 GCM 모형 자료

를 사용한 경우에 과거 재현성과 관련하여 발생된 5.1%차이보다 작은 값을 보여 기후변화에 의한 영향으로 고려하기에는 많은 불확실성을 포함하고 있다고 판단된다. 시간적인 변화의 분포를 보면 작물 재배를 시작하기 시작하는 4월초에서 5월말까지는 과거기간 및 RCP시나리오 사이에서 큰 차이를 보이고 있지 않은 반면에 6월초부터 작물생육이 끝나는 9월말 사이에는 필요수량의 미미한 증가 경향을 보이고 있다. 이는 초기 필요수량은 이양 용수와 관련하여 모형에서 140mm로 고정된 값을 사용하고 있는 반면 6월초 이후의 필요 수량은 기후에 의한 증발산량의 변화에 영향을 받기 때문이다.

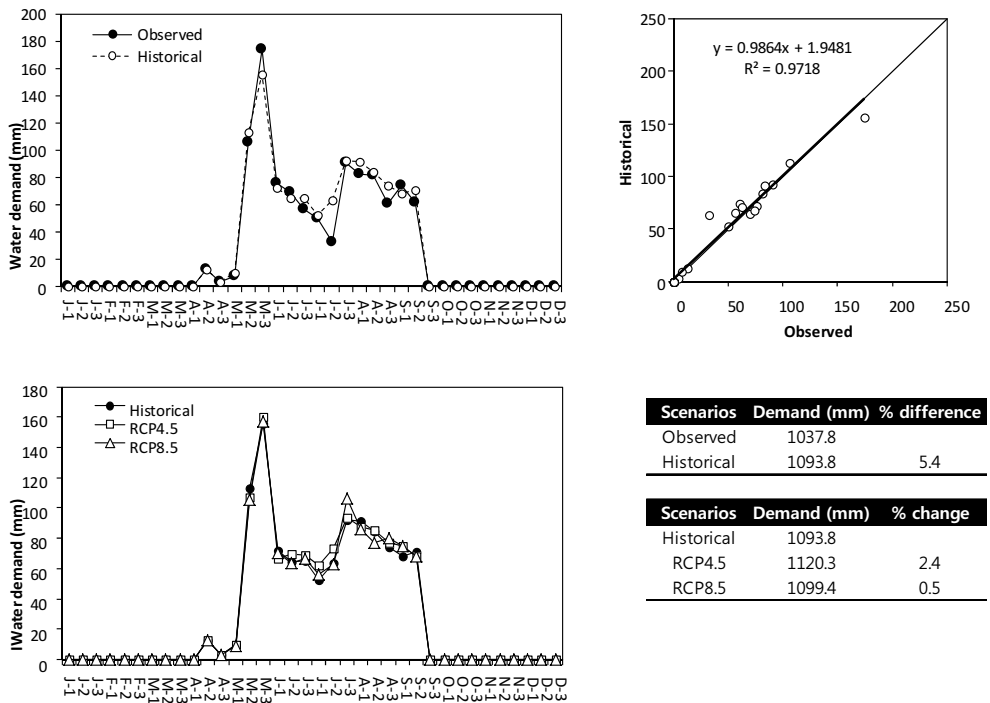


Figure 14 Comparison of simulated 30-year 10-day average water demand using observed weather data and GCMs historical data (top left: time series and top right: scatter plot) and among GCMs historical, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios (bottom left: time series and bottom right: analysis results).

지소 저수지의 저수량의 변화는 Figure 15에 제시되어 있으며 사용된 편의보정 기법이 유입량 및 필요수량과 마찬가지로 저수량 산정에 있어서도 적합한 것으로 판단된다. 과거기간에 대한 관측과 GCM에 의한 연평균 저수량의 경우 3백만톤으로 -0.4%의 차이를



보였고 분산형 그래프에서 추세선의 기울기나 R^2 값도 0.90 및 0.92로 만족스러운 결과를 보였다. 과거기간에 대한 미래전망기간 동안의 변화를 살펴 보면 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오의 경우 각각 8천2백톤 및 5천6백톤의 저수량이 늘어 0.3% 및 0.2% 증가하였지만 기후변화에 따른 평균 저수량의 변화에는 큰 영향이 없는 것으로 판단된다. 이는 앞에서 살펴본 큰 폭의 유입량의 증가와 미미한 필요수량의 증가를 고려할 때 작은 증가 경향을 보이는 것으로, 유입량의 증가가 있더라도 만수위 이상의 경우 여수토로 방류되어 전체 평균 저수량에는 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

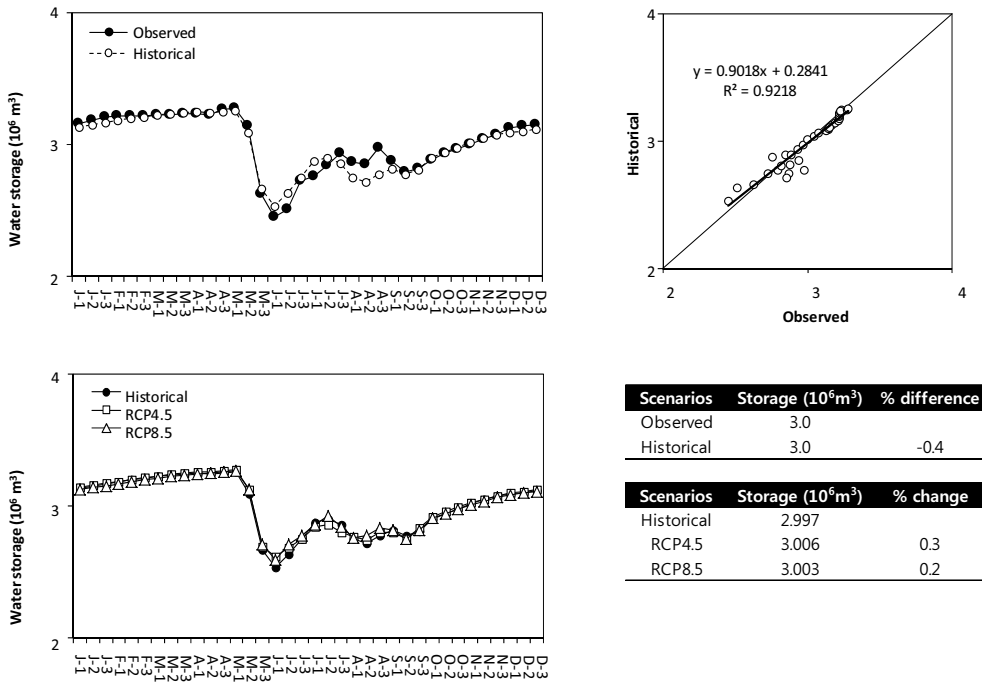


Figure 15 Comparison of simulated 30-year 10-day average water storage using observed weather data and GCMs historical data (top left: time series and top right: scatter plot) and among GCMs historical, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios (bottom left: time series and bottom right: analysis results).

Figure 16은 10년빈도 가뭄보다 심한 가뭄이 발생한 순의 횟수를 보여 준다. 관측치 (Observed)의 경우 양상블 멤버가 없어 순별 발생 횟수가 정수로 나타나는 반면 GCM에 의한 과거기간의 경우 다중모형양상블(MME)의 결과로 실수형으로 제시되었다. 과거기간 동안에 관측과 GCM을 사용한 경우 10년빈도 보다 심한 가뭄이 발생한 순의 횟수가 72.0과

73.3으로 1.8%의 차이를 보여 사용된 편의보정 기법에의해 생산된 과거기간의 기후변화 자료가 동일 기간의 관측 자료에 의한 특성을 잘 재현하고 있는 것으로 판단하였다. 표의 괄호 안의 값은 생육기간인 4월에서 9월 사이의 값만을 포함한 결과로 생육기간 동안의 10년빈도 보다 심한 가뭄의 발생 횟수 또한 관측치 및 GCM 결과 모두 39.0 및 37.5일로 -3.7%의 차이를 보여 전체 기간의 경우와 마찬가지로 만족할 만한 결과를 얻었다. 다만 순별 시간적 경향은 R^2 값이 0.14로 낮은 값을 보여 주었다. 과거기간과 미래전망기간 사이의 변화를 살펴 보면 RCP4.5 및 8.5 경우 123.0 및 110.43회로 67.9% 및 50.6%가 각각 증가하였고, 생육기간만을 고려할 경우 RCP4.5의 경우 80.5% 및 RCP8.5의 경우 54.2%로 증가하는 경향을 보였다.

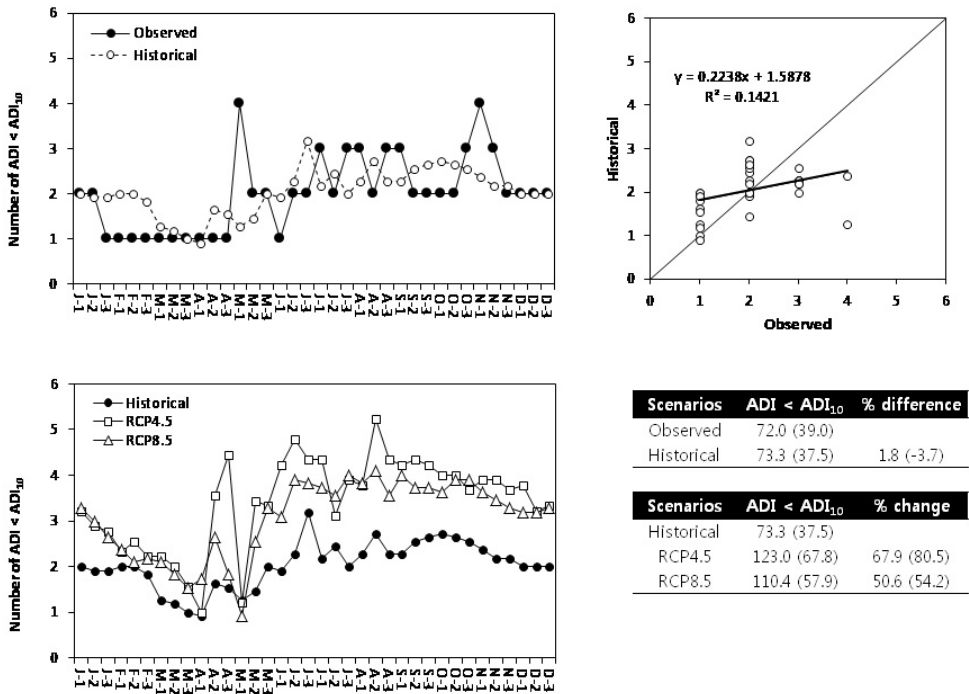


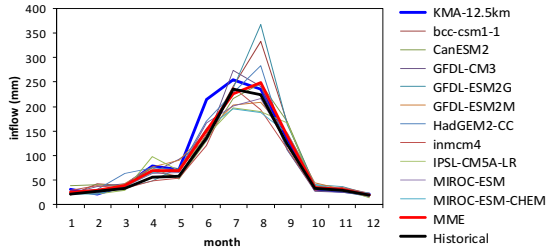
Figure 16 Comparison of simulated 30-year 10-day average Agricultural Drought Index (ADI) using observed weather data and GCMs historical data (top left: time series and top right: scatter plot) and among GCMs historical, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios (bottom left: time series and bottom right: analysis results).

앞서 살펴 본 과거 기간에 대한 재현성에 더하여 GCM모형 선정에 따른 미래 전망의



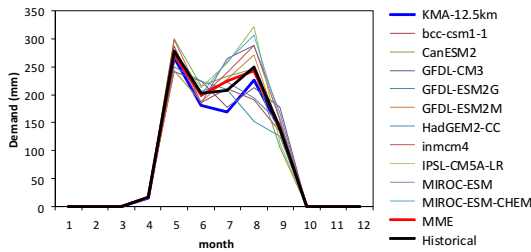
불확실성을 살펴보기 위하여 다양한 GCM자료를 사용하였을 때의 대표 저수지(지소 저수지)에서의 반응을 살펴 보았다. 우선 RCP8.5 시나리오 기간(2011~2040)의 모형별 월평균 유입 유량 모의 결과를 살펴 보면 MME와 비교하여 가장 적게 모의한 모형은 inmcm4 모형이었고 가장 크게 모의한 모형은 GFDL-ESM2G 모형으로 각각 -11.5% 및 11.1%의 차이를 보였다(Figure 17 (a)). 필요수량의 경우는 MME 값과 비교하여 가장 낮게 모의한 모형은 GFDL-ESM2G 모형으로 -11.0%의 차이를 보였고 가장 크게 모의한 모형은 MIROC-ESM-CHEM 모형으로 10.0%의 차이를 보였다(Figure 17 (b)). 저수량의 경우는 가장 크게 모의한 모형은 KMA-12.5km 모형으로 2.1%의 차이를 가장 작게 모의한 모형은 inmcm4 모형으로 -3.9%의 차이를 보인 반면에(Figure 17 (c)), 10년빈도 가뭄보다 심한 가뭄이 발생한 횟수의 경우는 MME 결과와 비교하여 가장 낮게 모의한 모형은 GFDL-ESM2G 모형으로 -24.8% 차이를 가장 크게 모의한 모형은 MIROC-ESM 모형으로 88.5% 차이를 보였다(Figure 17 (d)). 이는 월평균 저수량의 경우 기후변화에 따라서 민감하게 반응하지 않더라도 극한 사상과 관련되어 있는 가뭄 발생 횟수의 경우는 기후변화에 따라서 더욱 증폭될 수 있음을 보여 준다.

또한 국내에서 일반적으로 사용하고 있는 국가 기후변화 시나리오 자료를 사용하였을 때의 결과를 기타 GCM자료를 사용하였을 때의 결과들과의 비교를 통하여 기상청에서 제공하는 국가 기후변화 시나리오만을 사용하였을 경우 발생될 수 있는 가능성에 대해서 살펴 보고자 한다. Figure 17 (a)의 유입량 결과는 KMA-12.5km 결과가 MME와 비교하여 7.0% 크게 모의하여 11개 모형들 중에서 3위로 기타 모형들과 비교하여 상대적으로 크게 모의한 경향을 보여주고 있는 반면에 Figure 17 (b)의 필요수량 모의 결과는 -9.3%로 MME 보다 낮게 모의하여 10위의 결과를 보여 주었다. 결과적으로 평균 저수량의 경우는 Figure 17 (c)에서와 같이 상대적으로 크게 모의된 유입량과 작게 모의된 필요수량의 복합적인 영향으로 MME와 2.1%의 차이로 가장 크게 모의하는 결과를 보였다. 하지만 앞선 언급한 바와 같이 가뭄 발생 횟수의 경우는 저수량의 증가에도 불구하고 MME와 비교하여 6.0% 크게 모의하는 경향을 보였다. 낮은 저수율의 증가는 유입량의 증가가 크더라도 만수위 이상의 경우에 여수로로 방류되어 전체 평균저수율 변화에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. 앞의 결과들을 종합해 보면 유출량 및 필요수량의 증가에 의한 평균저수량의 미소한 증가에도 불구하고 가뭄발생횟수의 증가를 살펴 볼 때 국가 표준시나리오의 경우 계절내 변동성이 클 것으로 예측된다.



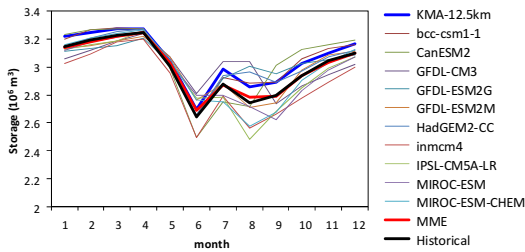
Models	Inflow (mm)	% difference	Rank
MME	1078		
KMA-12.5km	1153	7.0	3
bcc-csm1-1	1192	10.6	2
CanESM2	1088	0.9	5
GFDL-CM3	1083	0.4	6
GFDL-ESM2G	1198	11.1	1
GFDL-ESM2M	1052	-2.5	7
HadGEM2-CC	1125	4.3	4
inmcm4	954	-11.5	11
IPSL-CM5A-LR	1009	-6.5	8
MIROC-ESM	1003	-6.9	9
MIROC-ESM-CHEM	993	-7.9	10

(a) Inflow



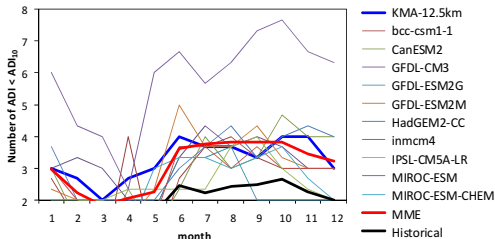
Models	Demand (mm)	% difference	Rank
MME	1099		
KMA-12.5km	997	-9.3	10
bcc-csm1-1	1026	-6.7	9
CanESM2	1117	1.6	5
GFDL-CM3	1051	-4.4	8
GFDL-ESM2G	979	-11.0	11
GFDL-ESM2M	1079	-1.9	6
HadGEM2-CC	1062	-3.4	7
inmcm4	1195	8.7	4
IPSL-CM5A-LR	1196	8.7	3
MIROC-ESM	1197	8.9	2
MIROC-ESM-CHEM	1210	10.0	1

(b) water demand



Models	Storage (10 ⁶ m ³)	% difference	Rank
MME	3.00		
KMA-12.5km	3.07	2.1	1
bcc-csm1-1	3.06	2.0	2
CanESM2	3.04	1.3	4
GFDL-CM3	3.01	0.3	6
GFDL-ESM2G	3.03	0.8	5
GFDL-ESM2M	3.00	0.0	7
HadGEM2-CC	3.04	1.4	3
inmcm4	2.89	-3.9	11
IPSL-CM5A-LR	2.95	-1.7	10
MIROC-ESM	2.97	-1.2	9
MIROC-ESM-CHEM	2.98	-0.8	8

(c) water storage



Models	Number of ADI < ADI ₁₀	% difference	Rank
MME	3.07		
KMA-12.5km	3.25	6.0	2
bcc-csm1-1	2.58	-15.7	8
CanESM2	2.81	-8.5	6
GFDL-CM3	3.17	3.3	4
GFDL-ESM2G	2.31	-24.8	11
GFDL-ESM2M	3.00	-2.1	5
HadGEM2-CC	3.19	4.2	3
inmcm4	2.61	-14.8	7
IPSL-CM5A-LR	2.53	-17.5	9
MIROC-ESM	5.78	88.5	1
MIROC-ESM-CHEM	2.50	-18.5	10

(d) count of 10-days with occurrence of severe or extremedrought

Figure 17 Monthly simulation results of (a) inflow, (b) water demand, (c) water storage, and (d) count of ADI which below ADI₁₀ for RCP8.5 scenario (2011-2040).

3.3.2 전체 대상 저수지 분석 결과

17,000여개가 넘는 농업용 저수지에 대한 기후변화에 따른 적응방안을 도출하기 위하여 선정된 104개 저수지를 대상으로 군집분석을 수행하여 군집별 저수지 거동을 분석하였다. 군집분석의 방법으로는 k-means(MacQueen, 1967) 방법을 선정하였다. k-means 방법은 군집의 개수를 지정해 주어야 하는데, 적절한 군집의 개수는 통계 분석 결과 Whithin groups sum of squares 값이 완만하게 변하기 시작하는 시점으로 결정하였다.

군집분석은 사전적 접근(pre-simulation approach) 및 사후적 접근(post-simulation approach) 방식의 두 가지 관점에서 시도하였다. 사전적 군집분석은 저수지 모델링 결과 없이도 저수지 제원과 같은 특성만을 고려하여 저수지를 분류하는 접근 방식인 반면에, 사후적 군집분석은 앞서 설명한 저수지 모델링 결과를 포함하여 저수지를 분류하는 접근 방식이다. 사후적 군집분석 방법은 사전적 군집분석에 따라서 분류된 저수지들이 기후변화에 따라서 저수지 유형별 상이한 거동 특성을 보일 경우에 17,000여개가 넘는 전체 저수지에 대한 적응 방안을 수립할 수 있는 장점을 가지고 있다. 반면 사후적 군집분석의 경우는 저수지의 모의 결과를 활용하기 때문에 전체 저수지에 대한 모델링이 필요한 단점을 가지고 있다.

사전적 군집분석을 위해서 최종 결과인 농업용저수지가뭍지표(Agricultural Drought Index)가 저수지의 가용저수량에 의해서 결정되는 점을 고려하여 저류량과 관련된 요소를 선정하였다. 우선 저수지의 크기에 따른 농업기물의 민감도를 고려하기 위하여 유효저류량을 하나의 요소로 선정하였고, 저수지에서의 유입량 및 필요수량과 직접적인 연관을 갖고 있어 저수지의 물수지(water balance)에 영향을 미칠 수 있는 유역면적과 수혜면적의 비(Watershed area/Benefitted area)를 다른 하나의 요소로 선정하였다. Whithin groups sum of squares 값의 분석 결과군집의 개수를 5개로 정하고 Figure 18 (a)와 같이 5개 군집으로 104개 저수지를 분류하였으며 저수지 유형 결정을 위한 분류절차는 Figure 18 (b)에 제시하였다. 군집분석 결과 유역면적이 수혜면적과 비교하여 18보다 큰 1유형에는 오봉 및 매화 2개 저수지가, 면적비가 7이상으로 비교적 큰 2유형에는 반계, 박달, 장찬, 연봉, 궁산 5개 저수지가, 면적비가 7이하인 저수지들 중에서 유효저류량이 2천3백만톤 이상인 3유형에는 성주 및 동화 2개 저수지가, 850만톤과 2천3백만 톤 사이의 4유형에는 토교, 금광, 동부 3개 저수지가 포함되었고, 나머지 92개 저수지는 5유형으로 분류되었다.

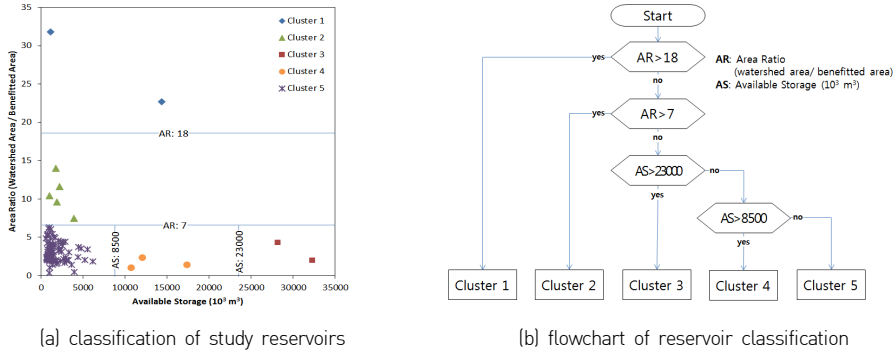


Figure 18 Results of k-means cluster analysis based on pre-simulation approach.

사후적 접근 방식의 경우에는 저수지 모델링 결과로부터 도출된 저수지별 거동 특성을 고려하여 저수지를 분류하였다. 본 연구에서는 과거 30년 기간(1976~2005)에 대하여 관측 자료를 이용하여 모의한 104개 개별 저수지별 저수지 물수지 분석 결과로부터 도출된 순평균 저수율 자료로부터 가장 낮은 저수율 및 저수율이 발생한 시기(순)를 가지고 군집 분석을 수행 하였다. Figure 19 (a)은 순평균최저저수율 및 최저저수율 발생 시기를 인자로 하여 군집분석한 결과이고 (b)는 앞서 수행하였던 군집분석의 인자로 사용했던 저수지 제원을 축으로 하고 새롭게 분류된 군집을 도시한 것으로 두 관계에서 저수율 기준(최저순별저수율 및 시기)에 의한 군집과 저수지 제원(저수량 및 면적비)을 기준으로 한 경우에 서로 상관성이 없음을 알 수 있다.

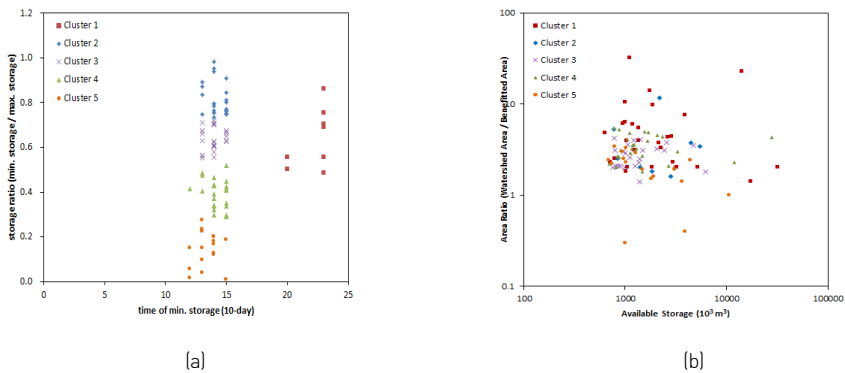


Figure 19 (a) Cluster analysis result based on post-simulation approach using storage ratio and time of minimum storage and (b) relation to the reservoir specification (storage and area ratio).



우선 앞서 대표 저수지에 적용하여 검증된 방법을 모든 대상 저수지에 적용하고 저수량 및 면적비(유역면적/수해면적)를 기준으로 구분한 사전적 군집분석 결과로 분류된 5개 저수지 군집에 대하여 유입량, 관개필요수량, 저수량, 가뭄발생횟수에 대해 분석하였다. 군집에 속한 모든 저수지를 대상으로 유역유입량, 관개필요수량, 저수율(저수량/최대저수용량), 가뭄횟수에 대한 분석한 결과 유입량 및 관개필요수량의 경우에는 군집에 상관없이 5개 군집 사이에 유입량 및 필요수량의 경우 비슷한 경향을 보였다. 반면 저수율의 경우는 군집 내 저수지별 저수율의 변동이 크게 나타났는데, 이는 군집내 저수지 물수지 반응이 개별 저수지별로 다르게 반응하고 있는 것으로 추론할 수 있다. 저수지 제원(저수량 및 면적비)에 의해 분류된 저수지 군집별로 일관된 저수지 물수지 분석 결과를 보이는 경우에는 17000여개가 넘는 저수지를 저수지 제원만을 이용하여 유형을 분류하고 유형별 도출된 기후변화 적응방안을 적용하면 되기 때문에 적응 방안의 수립 및 적용에 있어서 가장 효율적일 수 있다. 하지만 군집 내 저수지들이 개별적으로 다양하게 반응하는 경우에는 개별 저수지별로 적응정책을 수립해야 하는 문제점이 발생하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 사후적 접근 방식인 모델링 결과로부터 도출된 저수지 저수율 기준으로 분석한 군집을 기준으로 104개 저수지에 대한 군집별 유입량, 필요수량, 저수율, 가뭄횟수의 변화를 분석하였다.

Figure 20은 군집별 저수지들에 의해 모의된 유입유량의 결과를 보여 준다. RCP4.5 및 8.5 시나리오에서 모두 증가하는 경향을 보였으나 8.5 시나리오에서 보다 높은 증가율을 보였다. RCP4.5 시나리오의 경우 군집2에서의 가장 낮은 7.3% 증가율과 군집3에서의 가장 높은 10.4% 증가율을 보여 군집별 유입량에서의 차이는 보이지 않았다. RCP8.5 시나리오의 경우에도 동일한 군집에서 9.5% 및 12.5%로 가장 낮거나 높은 증가율을 보였다. RCP8.5 시나리오의 경우 11개 앙상블 멤버를 사용하였을 때 강수량은 5.6% 증가를 보였으나 유역유입량은 강우 증가율보다 다소 높은 증가율을 보였다.

군집별 유입량의 시간적 변화는 모두 비슷한 경향을 보였는데 7월 말에 유입량이 감소하는 것을 제외하고 대부분의 기간 동안에 유입량이 증가하는 경향을 보였다. 유입량의 최대 및 최소값을 살펴보면 10월부터 3월 사이에는 저수지별, 순별 평균 유입량이 좁은 폭에서 변화하는 반면에 생육기간 동안에 유입량의 변동 폭이 매우 높은 결과를 보이고 있다. 이는 한반도의 강수가 여름철에 집중적으로 발생하기 때문이며 생육기간 동안에 유역의 특성, 특히 토지이용에 따라서 서로 다른 유출 특성을 보이기 때문인 것으로 판단된

다. Figure 9에서 나타났던 갈수기 강수량의 증가가 저수지 유입량의 변화에는 영향을 미치지 못하고 있는 것으로 나타났다.

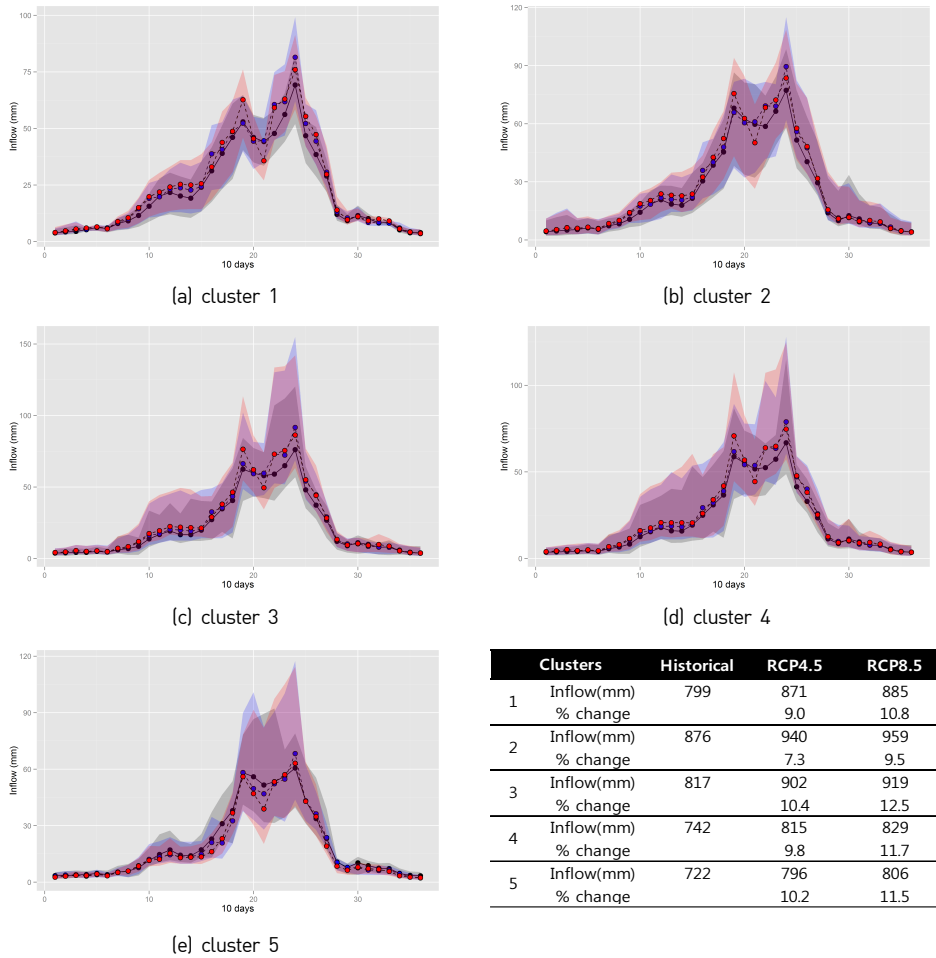


Figure 20 Inflow response of reservoirs within each cluster according to the climate change scenarios (black: historical, blue: RCP4.5, and red: RCP8.5, shades represent minimum and maximum ranges).

Figure 21은 RCP8.5 시나리오에서의 관개필요수량의 변화를 보여 주고 있는데, 유입량의 변화와 마찬가지로 군집에 무관하게 비슷한 시간적 변동 특성을 보이고 있다. RCP4.5 시나리오의 경우 군집5에서 1.8% 증가율로 가장 작은 변화를 보인 반면 군집2에



서 2.8%로 가장 큰 증가율을 보였으나 군집별 변화율의 차이는 작게 나타났다. RCP8.5 시나리오의 경우에도 동일한 군집에서 가장 크고 작은 변화율을 보였으나 4.5 시나리오와 비교하여 1.3% ~ 2.1%의 범위를 보여 다소 작은 증가 경향을 보였다. 가장 큰 필요수량 값을 보인 기간은 5월과 6월로 남부 및 중부 지역별로 이양용수가 필요한 시기이며 이후 기간은 작물 생육에 필요한 증발산량에 더하여 침투량 및 관개손실을 포함하고 있다. 7월 초에 낮은 필요수량의 경향을 보이다가 8월에 증가하고 다시 감소하는 경향을 보이고 있는데 이는 벼의 생육과 관련있는 것으로 판단된다. 과거기간과 미래전망기간 사이에서의 필요수량의 변화를 비교하면 5~6월 이양기간에는 증가폭이 적은 반면에 그 이후에는 RCP4.5 및 8.5 모두 증가 폭이 비교적 크게 나타나고 있다. 이는 이양기의 경우 인위적인 관개가 주로서 큰 변동성이 적지만 생육기간에는 기상변수의 변동에 따라서 필요수량이 영향을 받기 때문에 기후변화에 따른 시간적 변동에 영향을 크게 받는 것으로 판단된다. 따라서 용수 관리자 측면에서는 예측에 불확실성이 큰 기상변수 보다는 다양한 관리방안의 도입으로 이양용수 등 관리용수를 조절할 수 있는 방법을 적용하여 용수 이용을 최적화 하는 것이 필요할 것이다.

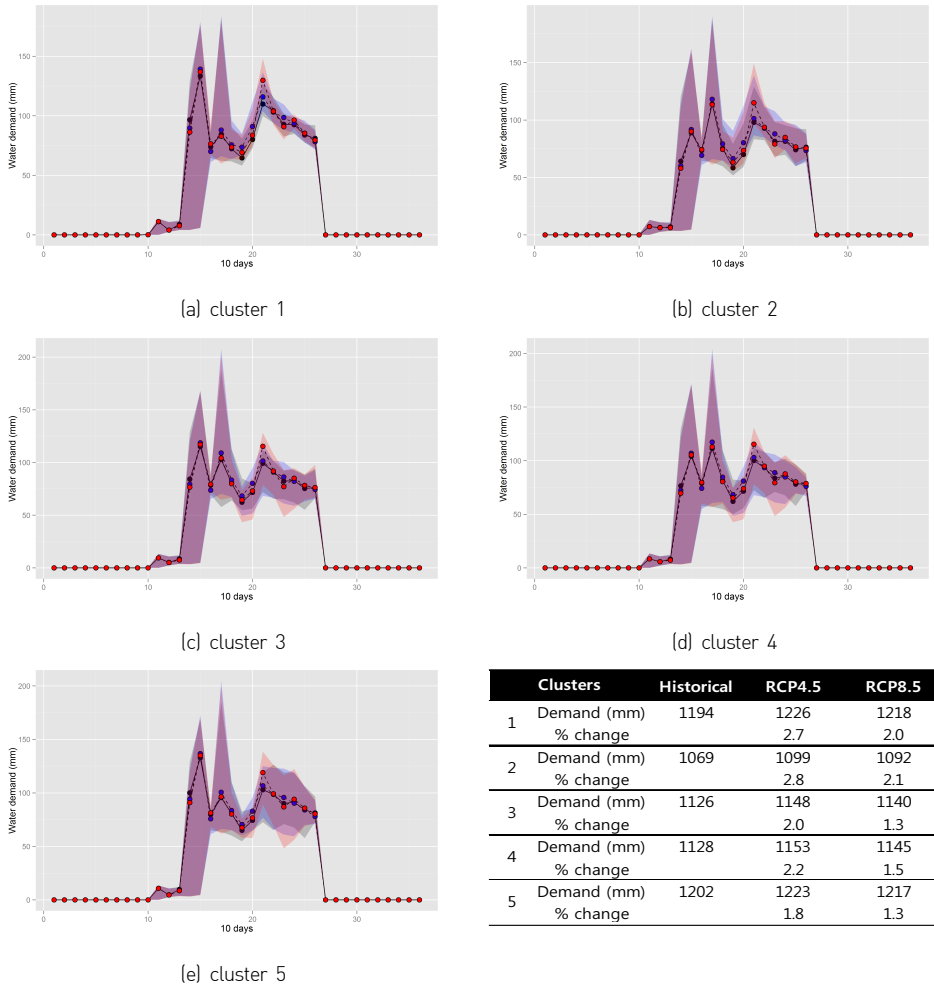


Figure 21 Water demand response of reservoirs within each cluster according to the climate change scenarios (black: historical, blue: RCP4.5, and red: RCP8.5, shades represent minimum and maximum ranges).

Figure 22은 시나리오에 따른 30년 평균 순별 저수량의 변화를 보여 준다. 평균 저수율의 경우 상류 유입량의 변화와 관개지구 필요수량의 변화에 영향을 받는데 본 연구의 경우 유입량 및 필요수량의 증가에 의한 복합적인 영향으로 모든 군집에서 RCP4.5 및 8.5의 경우에 소폭으로 증가하는 경향을 보였다. RCP4.5 및 8.5 시나리오 모두 군집5에서 1.6%의 가장 큰 저수율의 증가 경향을 보였다. 이는 군집5의 저수지들의 경우 순평균최저



저수율이 가장 낮은 군집으로서 상류 유입량의 증가가 저수량의 변화에 기여할 수 있는 여지가 크다. 반면에 평균 저수율이 높은 나머지 저수지 군의 경우에는 10월~3월 사이의 갈수기 강수량의 증가 및 유입유량의 증가가 만수위 이상의 수위에서 하천으로 방류되어 저수지 저수량에 적게 기여하는 것으로 판단된다. 군집1의 경우는 관측 자료를 기반으로 수행한 군집분석 결과와 같이 가장 낮은 저수량이 여타 군집에 비하여 늦게 발생하는 경향을 보였고, 군집 2~5의 경우는 6월 중순에 가장 낮은 저수율을 보였다. 군집 4와 5의 경우 최저 저수율이 낮고 저수율의 변동 또한 가장 크게 나타나고 있는데 이는 기후변화에 따라서 가뭄에 취약할 가능성이 높음을 의미하며 이는 보다 세심한 농업용수 관리가 필요하리라 판단된다. 저수율의 경우에는 유입량 및 필요수량과는 달리 전체 기간에 걸쳐 변화율에서 비슷한 경향을 보였다.

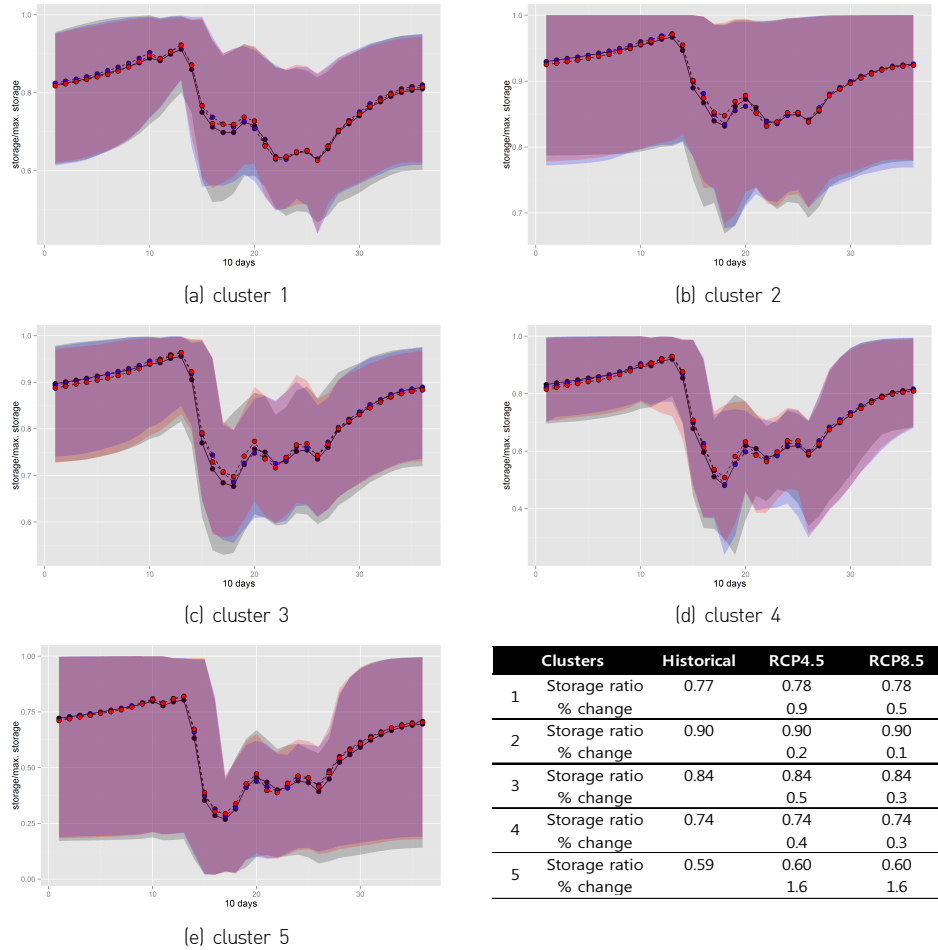


Figure 22 Water storage response of reservoirs within each cluster according to the climate change scenarios (black: historical, blue: RCP4.5, and red: RCP8.5, shades represent minimum and maximum ranges).

Figure 23은 가뭄 발생 횟수(10년빈도 ADI보다 낮은 ADI가 발생한 횟수)를 보여 준다. 미래전망기간 동안에 가뭄 발생 횟수의 경우는 최저 저수율의 발생 시기가 다른 군집에서 RCP4.5 및 8.5 시나리오에서 각각 -6.2% 및 -12.0%로 감소하는 경향을 보인 반면에 나머지 군집들에서는 RCP4.5의 경우 5.3% ~ 15.1%의 범위로, 8.5 시나리오의 경우에는 4.9% ~ 13.8%의 범위로 발생 횟수가 증가하는 경향을 보였다. 이는 양적인 변화에 더하여 시간적인 변화의 경향이 중요하게 고려되어야 함을 의미한다. 평균 저수량의 경우 모든



군집에서 2% 미만으로 증가하는 경향을 보여 가뭄의 발생횟수가 증가할 것으로 예상할 수 있으나 가뭄발생횟수의 경우에는 군집1을 제외한 나머지 군집에서 증가하는 경향을 보였다. 이는 미래전망기간에 대하여 유입량, 필요수량, 저수량의 경우 변화가 없더라도 극한 사상의 시간적 변동성이 커질 경우 발생할 가능성이 있으므로 향후 기후변화 시나리오 자료에 대한 일별, 순별, 월별, 계절별 변동성에 대한 분석이 필요할 것이다.

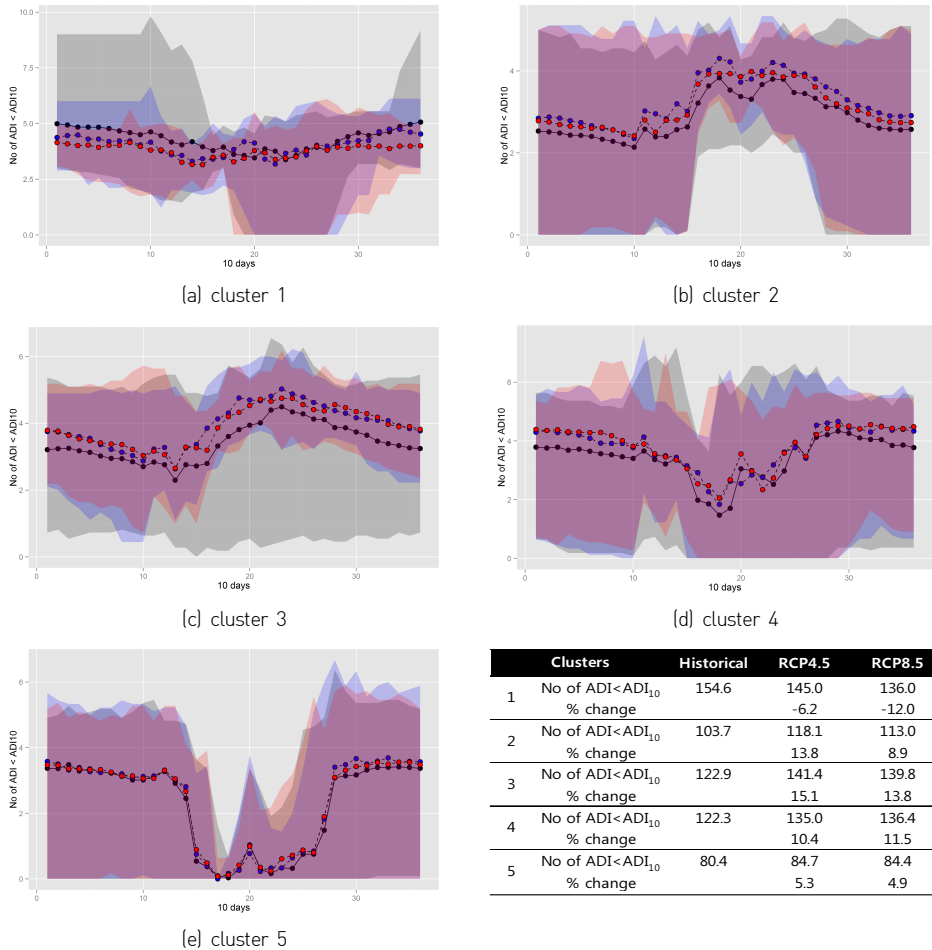


Figure 23 ADI response (count of ADI which is below ADI of 10-year frequency) of reservoirs within each cluster according to the climate change scenarios (black: historical, blue: RCP4.5, and red: RCP8.5, shades represent minimum and maximum ranges).

4. 결론 및 토론

최종적인 결론을 도출하기 전에 앞서 제시된 결과를 통하여 어떠한 GCM 모형 자료를 사용하는냐에 따라서 기후변화 영향 평가 결과가 달라 질 수 있는 여지가 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 RCP4.5 및 8.5 시나리오에 대하여 각각 9개 및 11개의 GCM 자료를 사용하였는데 만약 더 많은 기후변화 자료를 사용할 경우 결과에 어떠한 영향을 미칠 것인지 고민해 봐야 할 것이다. 강수를 제외한 기상변수들의 경우 GCM사이에 변동이 작고 일관된 변화 경향을 보이므로 최종 결과에 있어 불확실성은 강수 자료의 불확실성에 가장 큰 영향을 받을 것으로 판단된다. 불확실성과 관련하여 본 연구에서는 SWAT 모형의 잠재 증발산량 계산 방법 중 Penman-Monteith 방법에 필요한 6개 변수를 포함하고 있는 GCM을 선택하였기 때문에 보다 많은 GCM을 사용하는데 제한이 있었다. 하지만 SWAT의 경우 PET 계산에 적은 수의 기상변수를 활용하는 방법들(Hargreaves, Priestley-Taylor methods)을 사용하는 것이 가능하다. 따라서 ET 계산에 정도가 떨어 지는 방법을 사용하고 보다 다양한 강수 자료를 사용하는 것이 본 연구에서 사용한 방법과 비교하여 분석 결과의 불확실성을 줄일 수 있을지 평가하는 것이 필요할 것이다. 다만 다양한 ET계산 방법을 선택함에 따라서 발생할 수 있는 불확실성은 관측자료를 이용한 모형의 보정을 통해 보완할 수 있는데 농업용 저수지는 미세측 유역의 특성으로 인하여 어려움을 가지고 있다.

또한 본 연구에서는 베스트 모형의 선정 없이 사용한 모든 GCM에 대하여 동일한 가중치를 주어 산술평균으로 결과를 분석하였는데, 연구 목적에 따라 적합한 베스트 모형을 선정하고, 선정 순위에 따라서 상이한 가중치를 결정하여 다중모형앙상블(MME) 결과를 도출하는 경우 모의 성능이 현저히 떨어지는 특정 모형에 의해 전체 결과가 영향을 받는 문제를 최소화 할 수 있을 것이다.

미래 기후변화에 따른 농업용 저수지에 미치는 영향을 최소화하여 안정적인 농업용수를 확보하기 위한 적응 방안을 제시하기 앞서 본 연구를 통해 제시할 수 있는 결과는 아래와 같다.

6개 주요 기상변수에 대해 가능한 모든 GCM의 일 자료를 수집하고, 76개 기상 관측소



의 관측자료를 활용하여 비모수적분위사상법(non-parametric quantile mapping)을 이용하여 편의보정/상세화 과정을 거쳐 기후변화 시나리오 자료를 생성하였다. 편의보정된 기후변화 자료는 동일한 과거기간(historical) 동안의 관측 자료와 비교할 때 월 시계열 특성(monthly trend) 및 강우특성인자 등 중요 요소를 잘 반영하고 있고, 유입량, 필요수량, 저수율 등 관련 기작(process)을 잘 재현하고 있어 시간적 변화 경향이 중요한 농업용 저수지 분석에 적합한 것으로 나타났다.

편의보정 자료는 강우자료가 선택되어지는 GCM에 따라서 과거 관측과 비교하여 증가하거나 감소하는 등 가장 큰 불확실성을 보였고, 기온의 경우 모든 GCM에서 증가하는 경향을 보였으며, 나머지 기상변수들의 경우는 과거 관측 자료를 중심으로 수렴하는 경향을 보였다.

RCP8.5의 경우 사용된 11개 RCM/GCM 자료 중에서 GFDL-CM3 및 inmcm4 모형을 제외하고 기상청에서 제공하는 12.5km RCM 자료를 포함하여 대부분의 GCM의 경우 과거 기간과 비교하여 증가하는 경향을 보였으며 다중모형앙상블(MME)은 5.6% 증가하는 경향을 보였다. RCP4.5 시나리오에서도 inmcm4이 과거기간과 비교하여 감소하는 경향을 보였으며 MME의 경우는 5.2% 증가하는 경향을 보였다.

대표 저수지인 지소 저수지에서의 다양한 GCM 모형 자료를 적용한 결과 유역유입량은 MME 값과 비교하여 모형별로 -11.5% ~ 11.1%의 범위를 보였고, 필요수량의 경우도 -11.0% ~ 10.0%의 범위를 보인 반면, 저수량의 경우는 -3.9% ~ 2.1%의 다소 좁은 범위를 보였다.

MME를 사용하였을 때 강수량의 증가와 온도 상승으로 인한 증발산량의 증가로 인하여 상류 유역으로부터 저수지로 유입되는 유역유입량의 경우 104개 저수지 평균 RCP4.5 및 8.5의 경우 각각 7.8% 및 9.3% 증가하는 경향을 보였다. 관개 필요수량은 온도 증가의 영향으로 104개 저수지 평균 RCP4.5 및 8.5의 경우 각각 2.3% 및 1.6% 증가하는 경향을 보였다.

MME를 사용하였을 때 저수율은 큰 폭으로 증가한 유입량과 소폭으로 증가된 관개필요수량으로 인하여 104개 저수지 평균 RCP4.5 및 8.5의 경우 각각 0.7% 및 0.5% 증가하

는 경향을 보였다. 반면 평균 저수량의 증가에도 불구하고 10년빈도 농업가뭇지수(ADI) 이하로 심한 가뭇이 발생하는 횟수의 경우 군집1의 경우 RCP4.5 및 8.5에 대하여 -6.2% 및 -12.0% 감소하는 경향을 제외하고 나머지 군집에서는 RCP4.5의 경우 5.3% ~ 15.1%의 범위로, 8.5 시나리오의 경우에는 4.9% ~ 13.8%의 범위로 발생 횟수가 증가하는 경향을 보였다.

저수지 제원(저수량, 유역/수혜면적비)으로 저수지를 분류하였을 경우 군집 내 저수율의 저수지별 변동이 크게 나타나 모형 결과를 이용한 저수율 기준(최저 저수율 및 최저 저수율 발생 시기)을 가지고 군집 분석을 다시 수행한 결과 군집 내 저수율의 저수지별 변동이 줄어들었고, 최저 저수율이 낮은 군집이 기후변화에 따른 가뭇에 취약할 것으로 판단하였다.

저수지의 제원 또는 저수율을 기준으로 군집을 나누더라도 유입량 및 관개필요수량의 경우에는 군집에 상관 없이 5개 군집에서 증가하는 일관된 결과를 보였으며 시간적 패턴 또한 군집별로 비슷한 경향을 보였다.

통합유역관리 개념에서 SWAT의 농업용 저수지 고려를 위한 적용성 평가에서는 SWAT이 논의 담수상태를 고려하지 못하며 수혜지구의 필요수량을 저수지 저류량과 연계 하는데 문제를 가지고 있는 것으로 나타났다.

SWAT의 미계측 유역에의 적용성은 만족스러운 결과를 보였고 대표 유역에서의 SWAT 및 HOMWRS에 의한 저수지 유입량의 차이는 -11.8% ~ 15.5%의 범위를 보였다.

기후변화 시나리오 자료의 불확실성에 의해 선택되는 GCMs에 따라 전혀 다른 결과가 나올 가능성이 있는 상황에서 다양한 적응 방안들 중에서 현실적으로 선택할 수 있는 방안들은 제한적일 수 밖에 없다. 적응 방안을 크게 구조적인 접근 방식과 비구조적인 접근 방식으로 나눌 경우 농업용 저수지의 가뭇이 심화될 수 있다는 가능성을 고려하여 아래와 같은 구조적, 비구조적, 제도적 방안들의 적용이 가능할 것이다. 또한 논농사는 감소하고 대신 비닐하우스 등을 통한 발작물 재배가 증가하고 있어 농업용수도 4월~10월 이외의 기간에 대해서도 늘어나는 용수수요를 고려해야 할 것이다.

구조적 방안: 수리시설로는 주수원공인 저수지와 용배수로가 있으며, 독높이기 사업



과 같은 저수지의 개보수 사업을 통해 저수용량을 늘리는 방안과, HOMWRS에서 30%로 고려하고 있는 관개 손실을 줄이기 위해서 50%에 달하는 흙수로를 관수로화 또는 콘크리트 수로화 하여 수로에서의 관개용수 손실을 줄이는 방법등이 구조적인 방안들로 고려될 수 있다.

비구조적 방안: 비구조적 방안들은 용수 관리를 효율적이고 합리적으로 바꾸어 농업 용수의 손실을 최소화 하는 방안들로서 용수 공급의 시기와 양을 조절하는 방법, 기후변화에 따른 재배시기의 변경, 강우시 저류를 통하여 유효우량을 늘리는 방법 등을 포함할 수 있다. 이를 위해서는 가뭄을 예측할 수 있는 시스템의 개발, 가뭄 시 효율적인 영농관리와 관련된 의사결정 지원시스템의 개발, 자동 물관리 시스템의 개발 등 소프트웨어적인 지원이 필요할 수 있으며, 이와 연계되어 활용될 수 있는 모니터링 시스템도 포함될 수 있다.

제도적인 방안: 현재 분산되어 있는 관리 주체들을 통합유역관리 개념에서 일원화하여 수리시설물 간의 통합 재편을 통한 연계 운영으로 저수지의 잉여 용수 및 회귀수를 활용하여 양적인 용수 활용을 극대화 하는 것이 필요하다. 또한 최근 농업용수는 농촌용수의 개념으로 바뀌어 가고 있으며 이로 인하여 농촌지역 소하천의 생태환경의 건전성을 확보하기 위한 하천유지용수 공급에 대한 요구가 증대되고 있다. 이에 필요수량으로서 관개용수와 하천유지용수를 동시에 고려해야 하는 필요성이 높아지고 있다. 따라서 수질 및 생태를 함께 고려할 수 있는 통합수자원관리 개념으로의 전환 등이 필요할 것이다.

기후변화의 큰 불확실성을 고려할 때 후회 없는(noregret) 적응 방안으로서 비구조적인 관리 중심의 적응방안이 수리시설물의 개보수에 막대한 비용을 필요로 하는 구조적인 접근 방식 보다 위험부담이 적으며, 비구조적인 방법에 더하여 수자원 관리의 효율화를 위한 제도적인 뒷받침을 통하여 용수 활용의 효율을 극대화 하는 방향으로 전환해야 할 것이다.

부록 1 대상 저수지 자원 및 대표 저수지 유역 구분

NO	저수지명	표준코드	총 저수량 [천톤]	유효 저수량 [천톤]	만수 면적 [ha]	수해 면적 [ha]	유역 면적 [ha]	유역 토지이용 (%)			인근 기상 관측소	적용 모형	군집
								논	밭	산림			
1	JoongSan	4313010024	2497	2270	19.9	240.9	798.0	0.8	15.4	80.4	충주	S	5
2	SongMyeon	4376010052	13`96	1366	15.7	179.0	690.0	0.0	0.0	98.0	보은	S	5
3	HwaGok	4313010014	873	861	16.7	141.1	388.0	3.3	5.9	82.1	충주	S	5
4	SonGok	4213010067	969	969	16.2	166.5	1012.0	2.3	6.1	86.9	원주	S	5
5	BanGye	4213010030	1779	1779	31.3	178.5	2500.0	8.2	5.8	82.8	원주	S	2
6	GeumSa	4173010012	2982	2890	22.9	178.9	794.0	2.7	3.5	89.3	양평	S	5
7	YongDam	4149010046	1027	1023	37.7	212.0	700.0	8.9	15.4	59.4	이천	S	5
8	YongSeol	4155010056	3146	3064	53.8	395.0	790.0	10.9	7.5	71.0	이천	S	5
9	SeongHo	4153010019	912	858	34.7	300.4	616.0	31.4	26.7	29.6	이천	S	5
10	DaePyung	4183010018	641	641	13.6	149.5	725.0	7.0	7.8	67.4	양평	S	5
11	ToGyo	4278010015	25409	17412	334.8	1678.0	2370.0	16.3	1.8	103.2	철원	B	4
12	MaJi	4151010003	3412	3322	45.0	469.8	1420.0	18.0	3.2	70.7	동두천	B	5
13	GeumGwang	4155010012	12095	12047	138.4	2134.0	4830.0	10.3	3.5	76.4	천안	S	4
14	WangSong	4111010010	2079	2077	83.6	486.4	1555.0	33.4	7.2	22.7	수원	S	5
15	HeungBoo	4139010006	1873	1840	50.3	864.7	1320.0	13.3	11.3	52.9	수원	S	5
16	GukHwa	2871010001	1068	1058	23.5	101.4	420.0	15.2	1.7	76.6	문산	B	5
17	HaJeom	2871010024	1129	1009	9.5	482.0	160.0	0.4	0.0	99.6	문산	S	5
18	NanJeong	2871010025	6214	6214	119.0	1070.0	1884.0	65.6	21.3	0.0	문산	B	5
19	SangHa	2871010023	2715	2367	34.2	365.0	1608.0	0.0	0.0	68.7	인천	B	5
20	DongBang	4175010031	1015	1014	55.9	220.0	628.0	16.5	26.6	35.6	수원	S	5
21	OhBong	4215010007	14453	14346	79.4	480.0	10900.0	0.8	2.4	93.9	강릉	S	1
22	DoGok	4776010098	1191	1050	12.7	190.0	740.0	10.1	1.1	64.1	태백	B	5
23	DonDap	4790010127	1152	1061	14.2	81.6	166.5	12.1	17.8	61.4	영주	S	5
24	JiPyung	4725010226	2758	2664	55.0	593.1	2556.0	17.5	10.0	65.7	문경	S	5
25	GaeWoon	4725010004	1195	1180	23.0	203.5	650.0	8.6	7.2	77.4	상주	S	5
26	GwangDeok	4715010110	795	795	13.1	124.4	384.0	16.6	7.3	71.0	구미	S	5
27	SoSung	4784010168	1394	1280	14.7	331.2	952.0	7.2	2.3	86.6	구미	S	5
28	SungJu	4784010100	47490	28150	205.0	3506.0	14960.0	5.1	4.7	85.6	구미	S	3
29	JookJeon	4889010056	2101	2086	18.8	296.4	1320.0	4.6	2.4	91.4	거창	S	5
30	SangSin	4889010129	837	824	8.1	88.0	180.0	0.0	1.8	93.5	합천	S	5



NO	저수지명	표준코드	총저수량 (천톤)	유효저수량 (천톤)	만수면적 (ha)	수혜면적 (ha)	유역면적 (ha)	유역 토지이용 (%)			인근 기상 관측소	적용 모형	군집
								논	밭	산림			
31	GamDong	4874010067	1278	1214	22.2	351.0	1400.0	5.5	4.4	80.1	밀양	S	5
32	OkJong	4885010167	3385	3251	19.4	451.7	905.0	7.2	4.0	84.3	진주	S	5
33	InDam	4817010061	768	725	10.3	82.2	189.0	4.2	3.0	86.3	진주	S	5
34	BongSung	4873010038	867	780	13.6	316.0	1317.0	12.2	3.8	78.8	거제	S	5
35	ChoDong	4827010134	1568	1568	43.3	413.0	2050.0	20.9	5.4	58.8	밀양	B	5
36	BakDal	4713010276	1939	1890	32.0	151.3	1450.0	4.9	5.4	85.0	울산	S	2
37	HaGok	4713010095	4785	4785	78.4	975.6	3370.0	6.0	6.3	81.4	영천	S	5
38	SimGok	4713010355	3124	3124	52.0	1025.0	1970.0	7.6	3.1	82.1	영천	S	5
39	NamSa	4713010404	960	952	24.0	238.3	715.0	7.4	2.2	85.5	영천	S	5
40	MaeHwa	4793010010	1156	1113	39.1	176.6	5620.0	2.3	1.6	94.3	울진	S	1
41	MyoGok	4777010102	5575	5528	63.5	1036.0	3530.0	1.6	2.5	93.1	영덕	S	5
42	SamJung	4711010003	856	852	10.5	101.0	250.0	0.0	0.0	93.6	포항	B	5
43	DuckGok	4824010077	816	742	8.6	312.0	686.0	4.2	0.0	87.6	진주	B	5
44	ChunChun	4574010050	1027	1015	12.5	213.0	1350.0	4.1	2.3	90.2	장수	S	5
45	DaeGok	4574010083	5871	5218	42.0	643.0	1317.0	4.0	2.4	83.9	장수	S	5
46	SeokDong	4471010090	1083	903	9.6	150.7	322.6	0.9	5.0	93.8	금산	S	5
47	JangChan	4373010058	4604	3923	37.0	474.0	3547.0	2.2	0.6	90.4	금산	B	2
48	GwangHye	4155010058	3166	2995	34.9	446.0	1040.0	10.1	8.4	75.0	이천	S	5
49	YangDuk	4377010047	1119	1119	26.7	292.1	754.0	14.8	16.6	53.1	이천	S	5
50	SamGi	4376010012	1400	1400	19.5	419.0	1050.0	2.0	10.1	84.6	청주	S	5
51	GaGok	4423010022	876	695	26.4	209.3	500.0	19.2	14.5	59.0	부여	S	5
52	MiReuk	4514010061	1320	1270	24.8	302.0	626.0	10.7	4.4	75.6	군산	S	5
53	DongBoo	4477010006	12182	10733	244.1	2799.0	2834.0	0.7	0.0	82.1	군산	B	4
54	ChookDong	4477010004	1707	1490	82.4	401.0	752.0	24.5	17.9	39.2	군산	B	5
55	DeokYoung	4476010069	4111	3657	86.4	1166.0	1580.0	19.7	3.7	67.3	군산	B	5
56	BongRim	4481010027	1074	1065	20.5	233.5	840.0	8.2	8.6	78.5	서산	S	5
57	SanMuk	4481010019	729	714	9.3	100.0	220.0	3.3	18.4	73.8	부여	S	5
58	InPyung	4482010002	970	891	43.8	202.9	1062.0	15.7	51.5	15.0	서산	B	5
59	JamHong	4421010002	1509	1485	69.1	363.4	1129.0	34.4	44.0	6.2	서산	B	5
60	NaeHyun	4418010107	834	758	13.3	130.4	260.0	13.7	7.9	74.6	보령	S	5
61	JiSo	4574010071	2253	2168	16.1	375.8	1380.0	0.4	0.0	98.0	장수	S	5
62	HwaJeong	4571010150	2732	2732	34.4	342.0	735.0	5.7	1.5	86.9	전주	B	5

NO	저수지명	표준코드	총 저수량 (천톤)	유효 저수량 (천톤)	만수 면적 (ha)	수해 면적 (ha)	유역 면적 (ha)	유역 토지이용 (%)			인근 기상 관측소	적용 모형	군집
								논	밭	산림			
63	GeumMa	4514010093	935	818	25.0	218.9	452.0	19.7	13.8	53.7	전주	B	5
64	WangGoong	4514010130	1957	1941	47.9	554.8	866.0	23.7	4.8	61.0	전주	B	5
65	SooChung	4518010207	4644	4426	40.3	540.3	1270.0	0.7	3.4	90.6	정읍	S	5
66	YongSan	4518010021	2447	2439	37.4	418.4	1290.0	4.9	2.1	87.0	정읍	B	5
67	SungNae	4579010308	960	958	27.9	181.0	545.0	29.4	13.8	47.4	정읍	S	5
68	SeokWoo	4518010094	991	991	24.3	221.0	446.0	13.0	15.5	59.6	정읍	S	5
69	MiRyong	4513010006	3953	3950	88.0	1000.0	366.0	0.0	0.0	0.9	군산	B	5
70	YangSin	4577010178	1020	878	13.9	93.4	245.0	0.0	1.5	96.4	정읍	B	5
71	ChungWoong	4575010197	1068	908	9.7	178.0	555.0	1.4	7.0	83.5	임실	S	5
72	GuRim	4577010172	1239	1127	21.9	238.1	1154.0	7.4	2.8	83.3	정읍	S	5
73	PalDeok	4577010100	1141	1034	13.5	510.1	1172.0	0.1	0.0	89.7	남원	S	5
74	DongHwa	4519010159	32349	32242	126.8	3000.0	5880.0	2.0	1.8	89.9	장수	B	3
75	DamAn	4678010125	1138	1035	9.2	200.0	360.0	2.6	0.7	91.9	장흥	S	5
76	SongDan	4679010103	1529	1508	15.2	252.1	450.0	5.2	1.4	183.9	순천	S	5
77	YuCheon	4679010112	1692	1692	24.3	313.1	1225.0	3.7	2.9	90.0	순천	S	5
78	JeokRyang	4885010022	1265	1237	11.0	145.4	450.0	9.6	2.5	75.6	진주	S	5
79	SamHwa	4885010025	1213	1209	9.4	99.1	590.0	7.9	1.6	87.5	진주	S	5
80	BongYang	4681010059	979	973	11.4	155.1	394.0	0.0	1.7	81.5	해남	B	5
81	SinChon	4680010063	1503	1503	16.5	222.8	600.0	0.2	2.7	93.0	장흥	B	5
82	HaePyung	4678010098	2014	1853	23.2	263.0	480.0	0.2	2.3	90.9	고흥	B	5
83	WonDeung	4677010203	1421	1417	14.0	185.7	375.0	7.1	3.2	84.8	고흥	B	5
84	YeonBong	4677010153	1020	1020	45.0	219.8	2292.0	20.8	19.3	48.8	고흥	B	2
85	PoongDo	4677010039	1108	1046	21.0	195.7	200.0	23.3	27.0	40.0	고흥	B	5
86	JeungGwang	4678010018	1384	1372	22.9	375.4	860.0	9.5	5.0	74.9	순천	S	5
87	OhWol	4677010210	2844	2844	54.6	465.6	730.0	20.5	19.9	46.3	고흥	B	5
88	DaePo	4613010040	1381	1381	22.6	265.0	1440.0	9.7	6.4	73.1	여수	B	5
89	SinPoong	4613010053	782	782	10.6	76.2	400.0	1.3	0.4	79.2	여수	B	5
90	WolSan	4671010097	1192	1192	12.2	204.4	710.0	0.5	0.1	96.3	정읍	S	5
91	GeumJeon	4679010013	2738	2585	50.1	825.8	3147.0	6.5	2.6	83.5	광주	S	5
92	JangChi	4679010051	1751	1717	23.4	383.0	1885.0	6.6	1.9	88.5	순천	S	5
93	DoAm	4679010093	1857	1854	22.0	220.0	444.0	6.9	7.1	72.5	장흥	B	5
94	YeepSeok	4683010051	805	805	13.1	204.0	516.0	2.3	5.6	87.3	장흥	S	5



NO	저수지명	표준코드	총 저수량 (천톤)	유효 저수량 (천톤)	만수 면적 (ha)	수해 면적 (ha)	유역 면적 (ha)	유역 토지이용 (%)			인근 기상 관측소	적용 모형	군집
								논	밭	산림			
95	SsangJung	4683010003	1264	1138	20.6	285.0	837.0	14.1	4.6	73.2	장흥	S	5
96	SungSan	4683010119	797	797	30.9	265.0	909.0	30.2	45.8	11.8	목포	S	5
97	DunJeon	4690010025	1761	1316	79.7	227.9	725.0	13.9	29.2	45.8	진도	B	5
98	BongAm	4690010124	1950	1407	74.2	397.7	571.3	14.7	18.2	51.4	진도	B	5
99	YangChon	4682010038	4673	4481	62.9	486.0	1780.0	8.0	4.7	81.1	해남	S	5
100	GoongSan	4579010257	2210	2210	81.0	260.0	3025.0	44.3	14.9	16.4	정읍	B	2
101	SeokNam	4579010158	1427	1427	75.9	263.0	1080.0	30.9	34.2	22.2	정읍	B	5
102	DaeJung	4579010116	2362	2360	54.0	605.5	1128.0	22.9	15.3	55.2	정읍	S	5
103	YeJeon	4579010146	826	787	36.3	146.0	794.0	27.0	38.4	27.1	정읍	S	5
104	WolCheon	4686010028	1251	1251	50.7	361.5	1308.0	11.3	36.9	26.8	정읍	B	5

적용 모형: B (SWAT 및 HOMWRS 적용), S (SWAT 적용)

군집: 모형 결과 기반의 저수율 기반 군집 분석 결과

부록 2 CMIP5 토지이용 변화 분석

토지이용의 변화는 상류 유역으로부터의 유입량의 변화 뿐만 아니라 관개지구에서의 필요수량의 변화에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 미래 기후변화 시나리오에 따른 영향을 평가하기 위해서는 미래 시점에서의 토지이용변화 또한 고려되어야 한다. GCM 기후변화 모델링을 위해서 각 대표농도경로 시나리오에 대해서도 미래 기간에 대한 토지이용변화 정보가 필요하다. 따라서 RCP에 따른 기후변화 시나리오의 상호 비교를 위한 CMIP5에서 추천하는 토지피복 자료를 RCP Database(version 2.0: <http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb/>)에서 다운받아 활용하였다. 토지피복 자료는 RCP2.6의 경우 네덜란드의 IMAGE에서, RCP4.5는 미국의 MiniCAM에서, RCP6.0은 일본의 AIM에서, RCP8.5의 경우는 오스트리아의 MESSEGE에서 만들었으며 RCP DB에서 제공하는 한반도에 대한 공간해상도는 대략 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (대략 50km)로 Figure 24와 같다. 각 격자에 대하여 토지피복 유형 사이에서의 변화율이 시나리오 기간(2006-2099)동안 연도별로 제시되어 있으며, 토지피복 유형으로는 crop, pasture, urban, primary forest land, secondary land의 5개 항목으로 제시되어 있다. 미래 기간에 대하여 공간적인 분포를 고려하지 않고 토지이용 변화를 예측하기 위해서 CMIP5에서 추천하는 연도별 토지피복 변화율을 사용하였다. 2007년 환경부 토지이용자료로부터 추출된 유역 내의 항목별 토지이용률을 기준으로 하여 저수지로부터 가장 가까운 격자의 미래토지이용변화율 자료를 이용하여 2020s(2011~2040) 기간의 대표 토지이용률을 2025년에 대하여 각각 분석하였다.

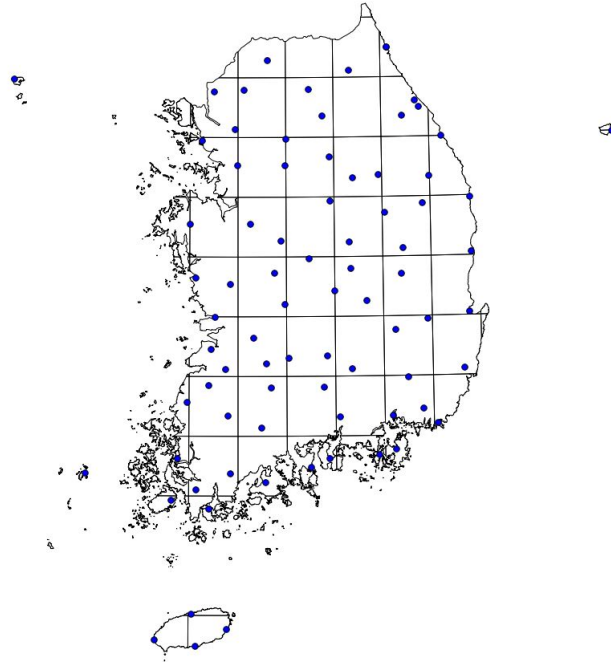


Figure 24 Spatial resolution of CMIP5 recommended land use change scenario data.

104개 저수지가 포함되어 있는 격자 별 토지이용 변화율을 RCP4.5 및 8.5 시나리오에 대하여 2025년 시점을 대상으로 분석한 결과는 Figure 25에 제시되어 있으며 두 시나리오 모두 농업 지역이 증가하는 것으로 분석이 되었다. 이는 실제 상황과 상반되는 결과를 보여 주고 있다.

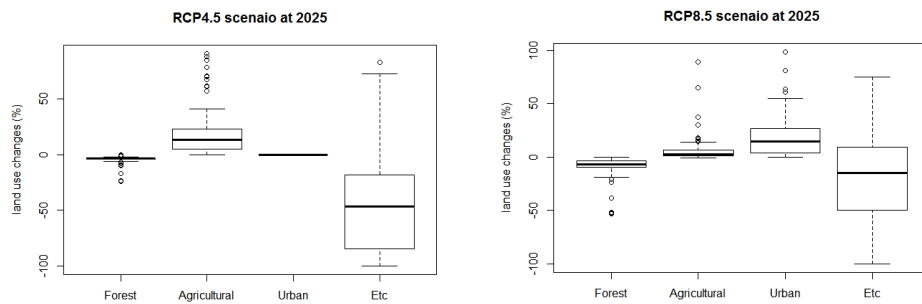


Figure 25 Percent land use changes at 2025 for RCP4.5 (left) and RCP8.5 (right).

부록 3 주요 관측소에서의 편의보정 후 기상변수의 월변화

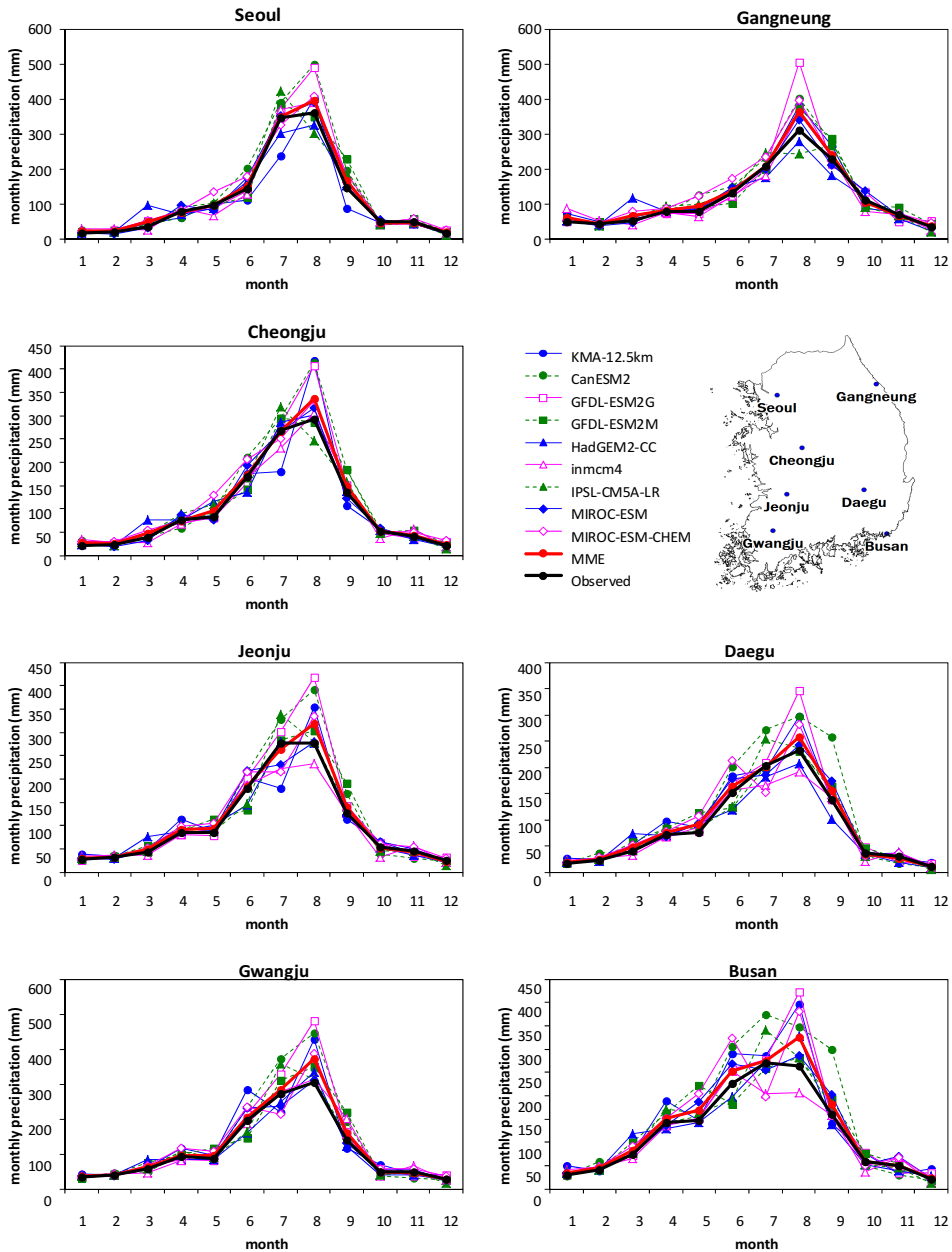


Figure 26 Temporal trend of bias-corrected monthly precipitation at seven KMA weather stations (RCP4.5 future period: 2011~2040).

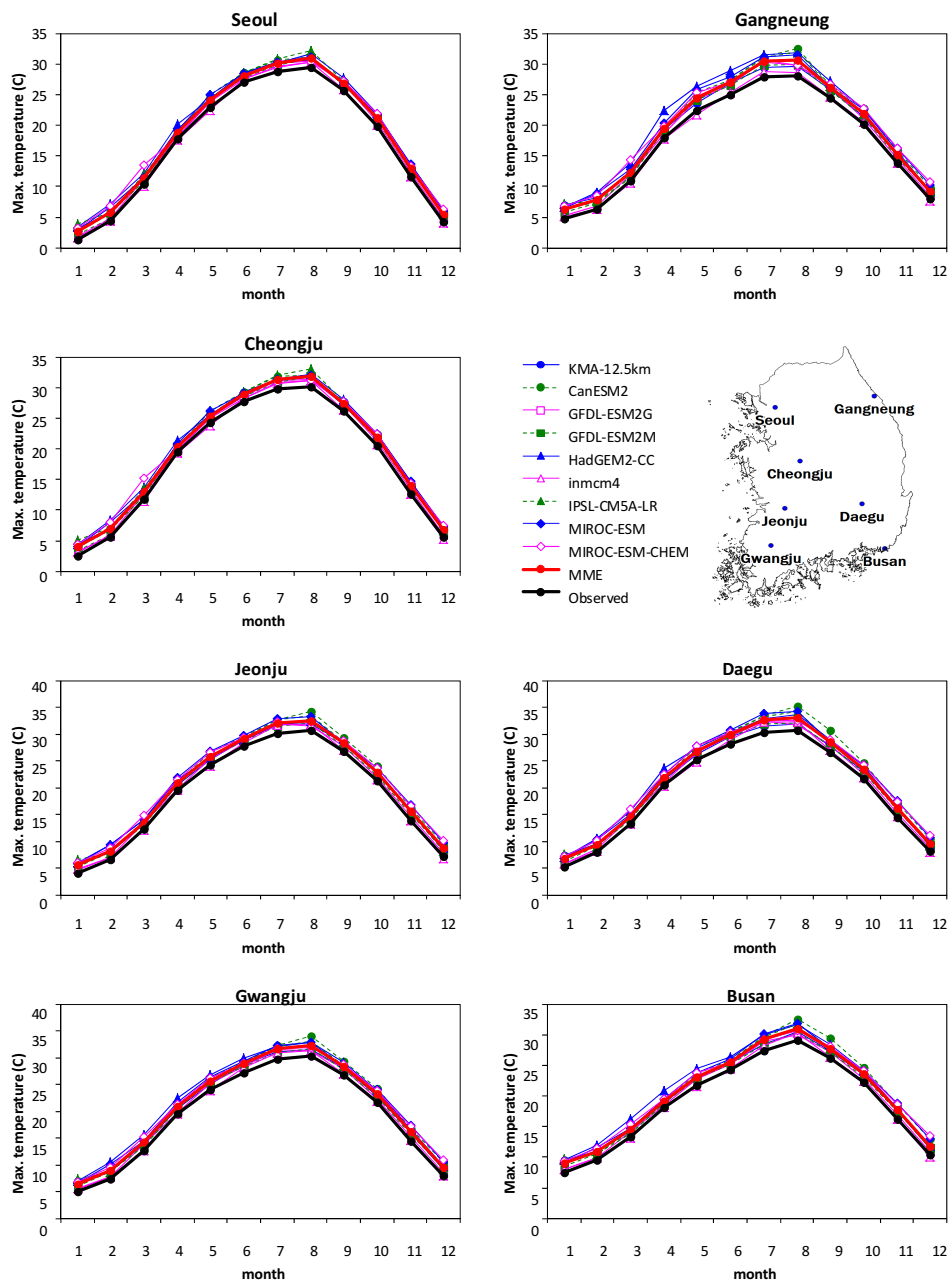


Figure 27 Temporal trend of bias-corrected monthly maximum temperature at seven KMA weather stations (RCP4.5 future period: 2011~2040).

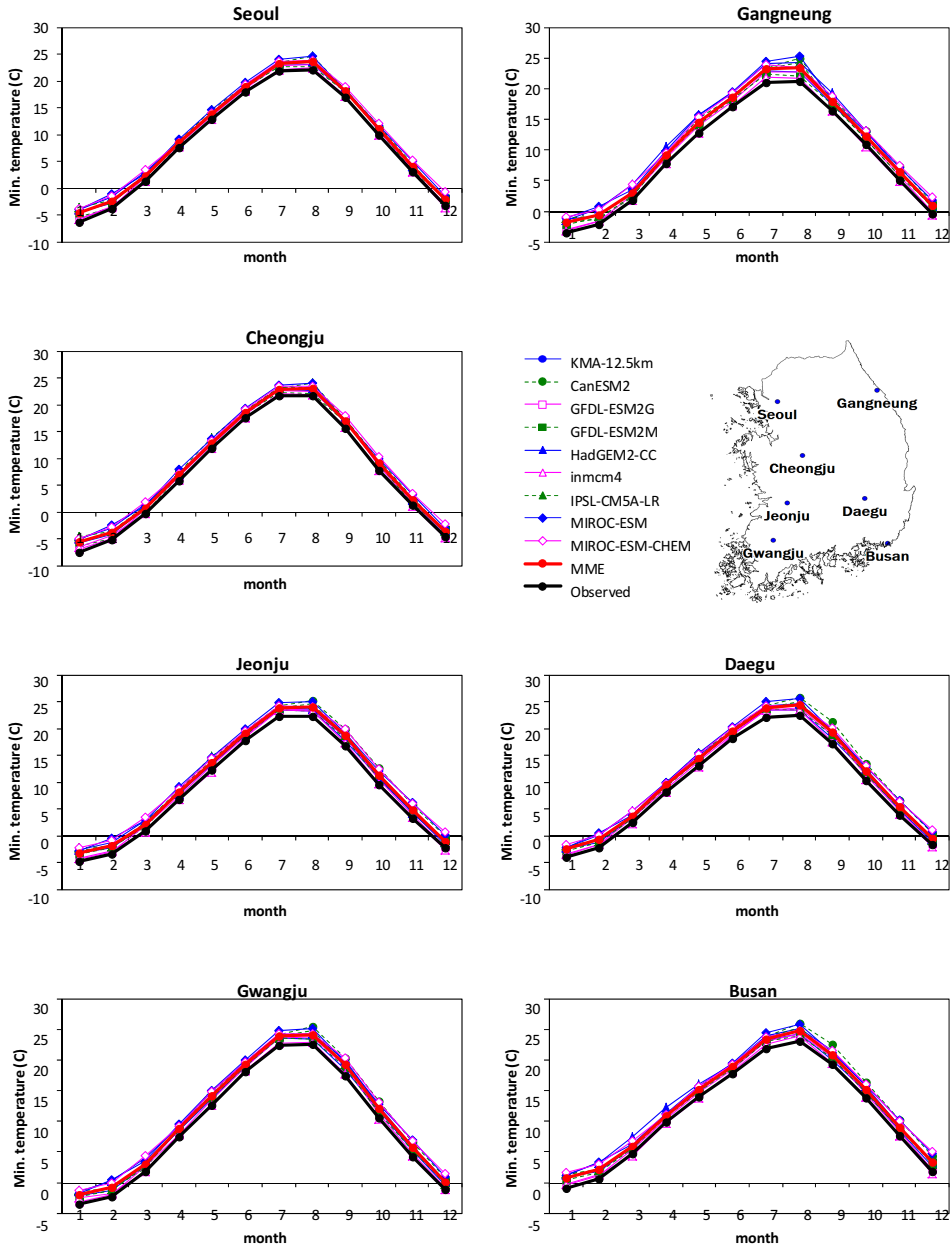


Figure 28 Temporal trend of bias-corrected monthly minimum temperature at seven KMA weather stations (RCP4.5 future period: 2011~2040).

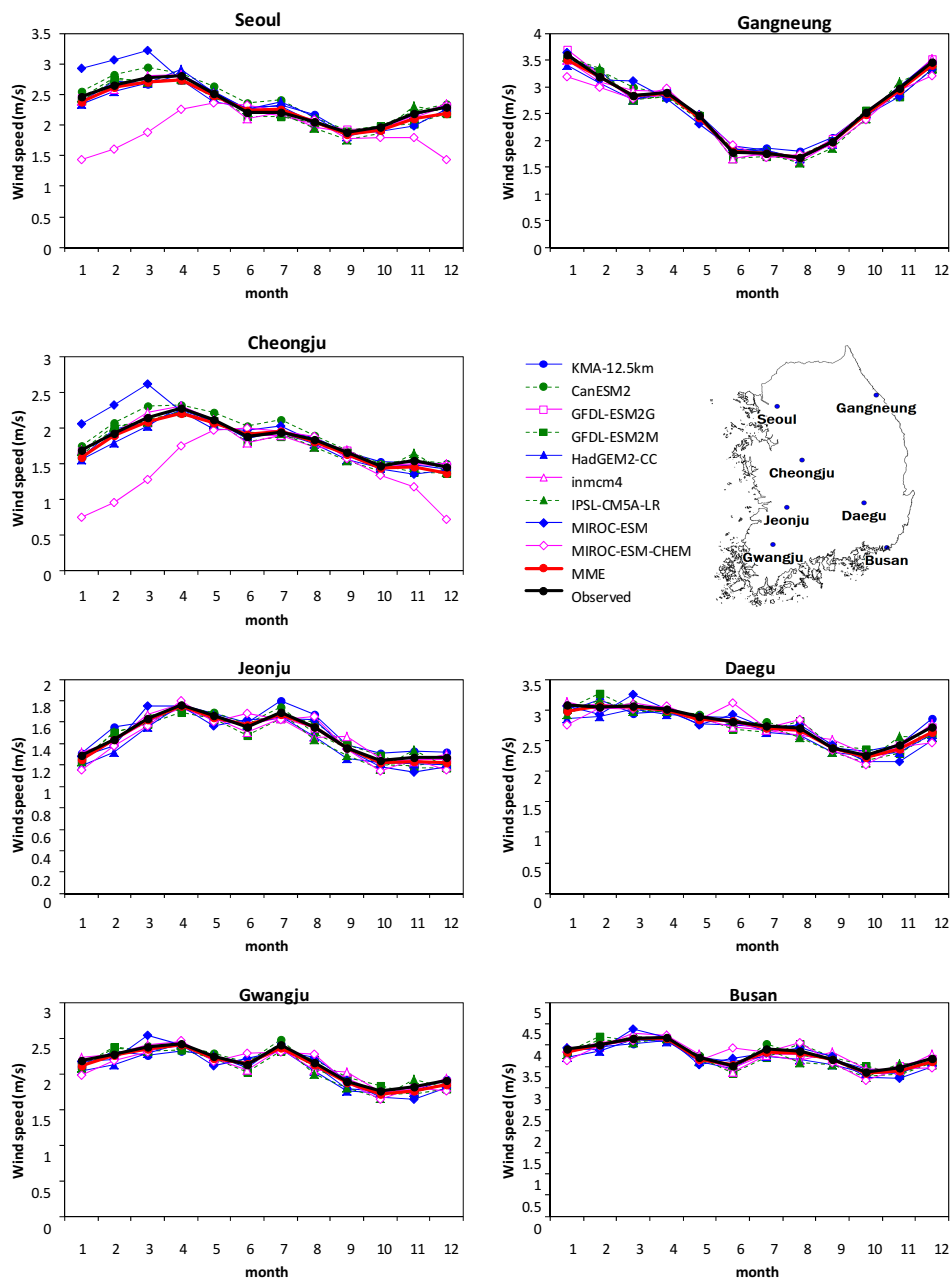


Figure 29 Temporal trend of bias-corrected monthly wind speed seven KMA weather stations (RCP4.5 future period: 2011~2040).

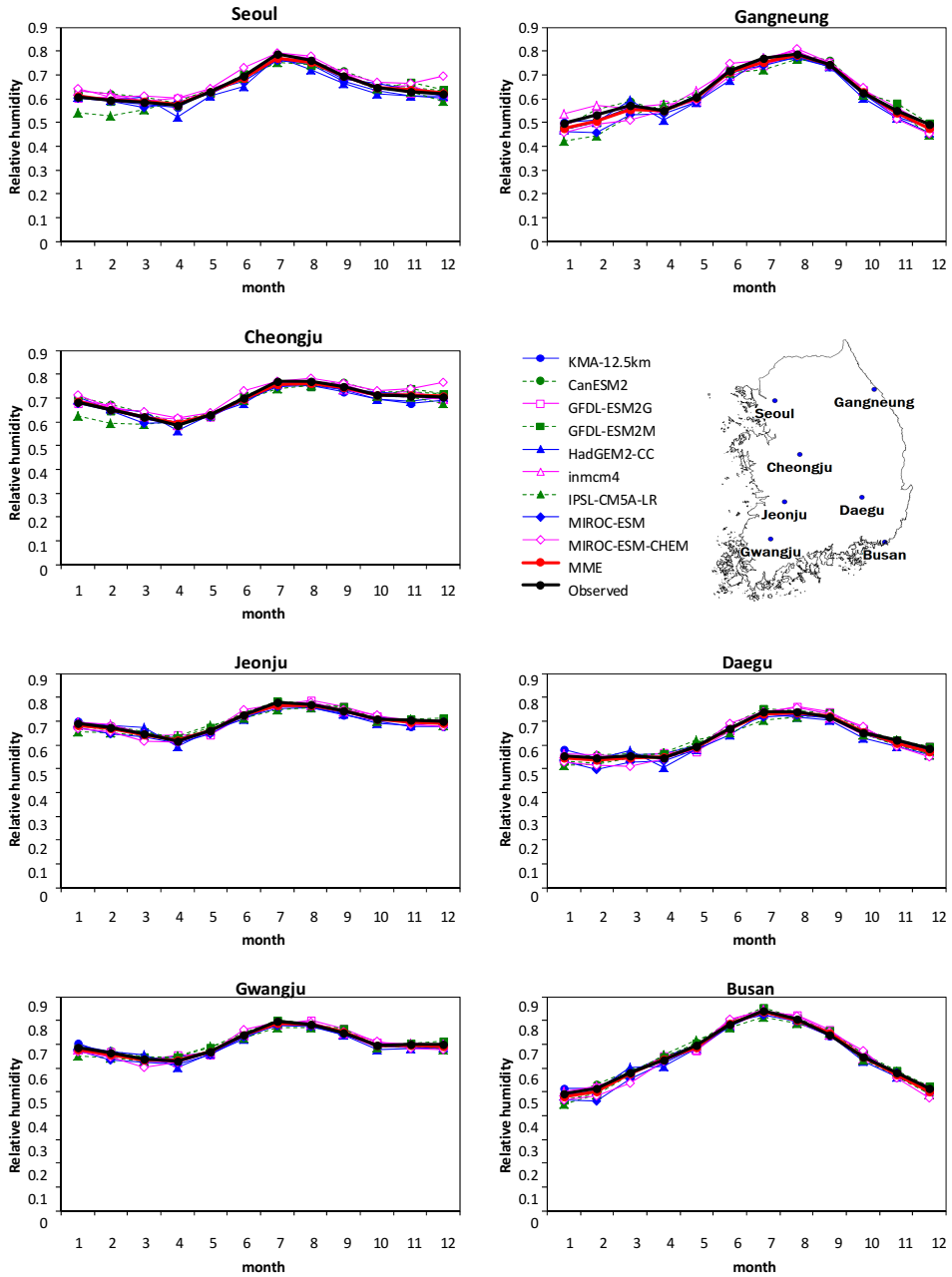


Figure 30 Temporal trend of bias-corrected monthly relative humidity at seven KMA weather stations (RCP4.5 future period: 2011-2040).

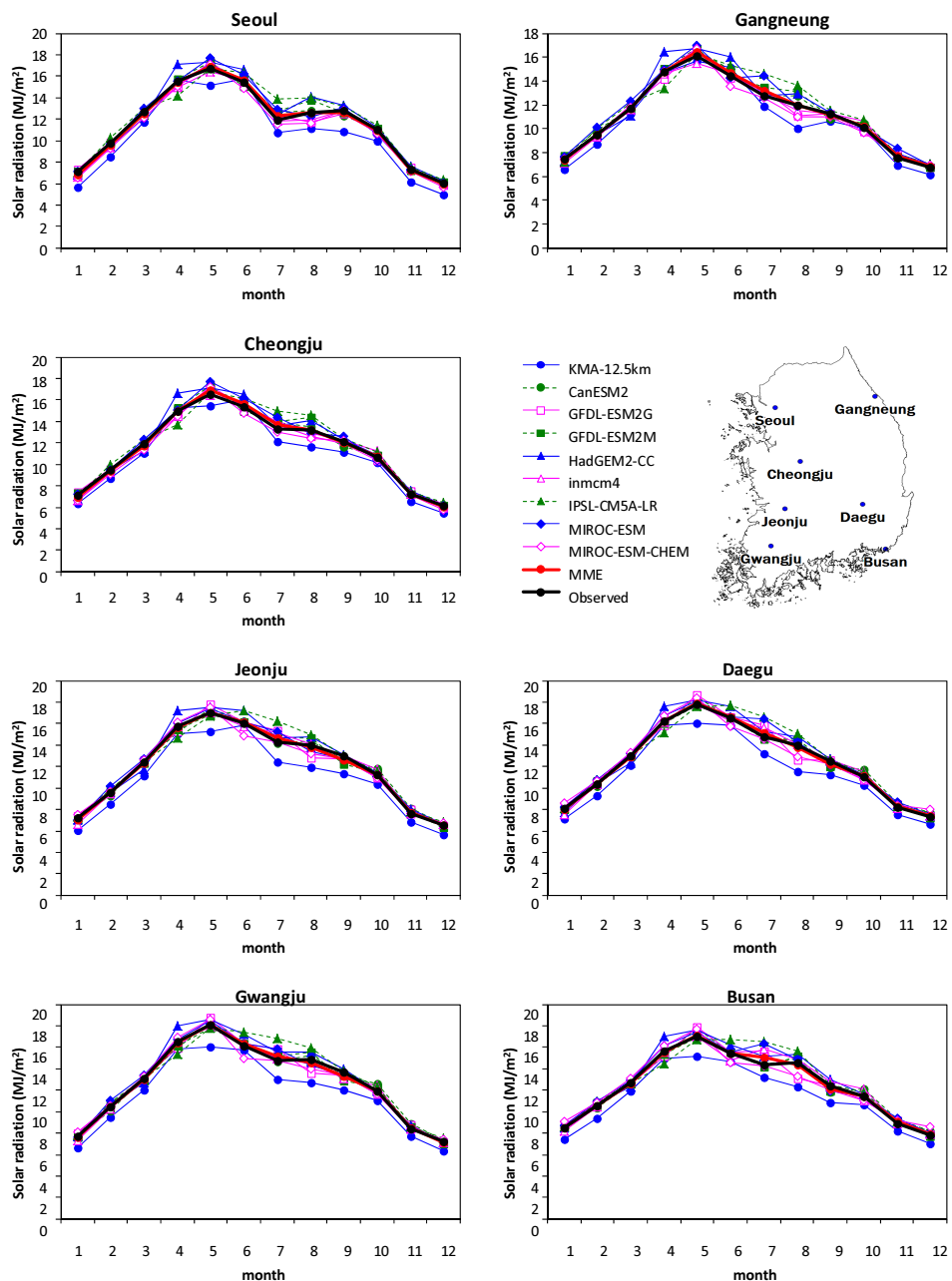


Figure 31 Temporal trend of bias-corrected monthly Solar radiation at seven KMA weather stations (RCP4.5 future period: 2011-2040).

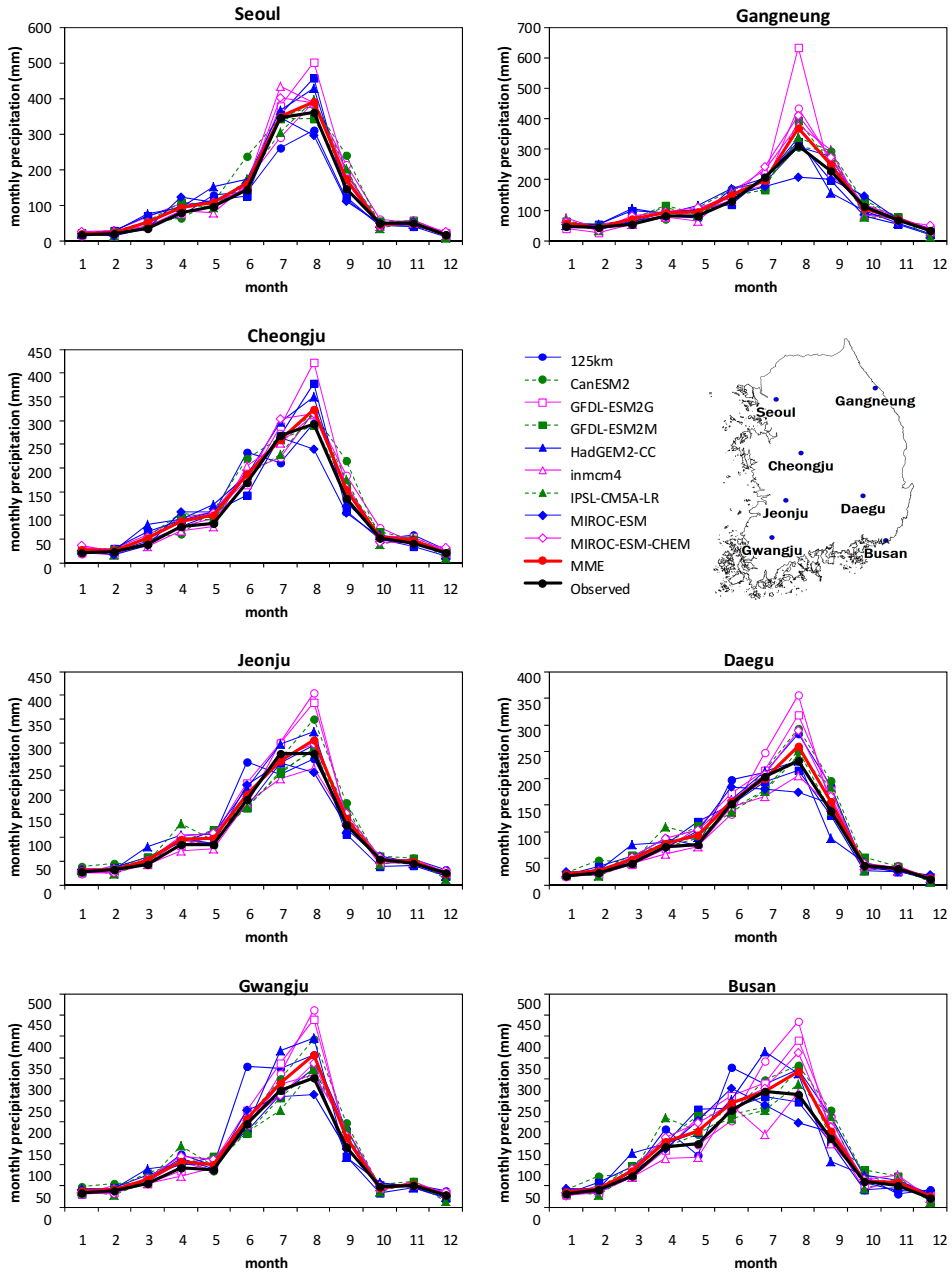


Figure 32 Temporal trend of bias-corrected monthly precipitation at seven KMA weather stations (RCP8.5 future period: 2011-2040).

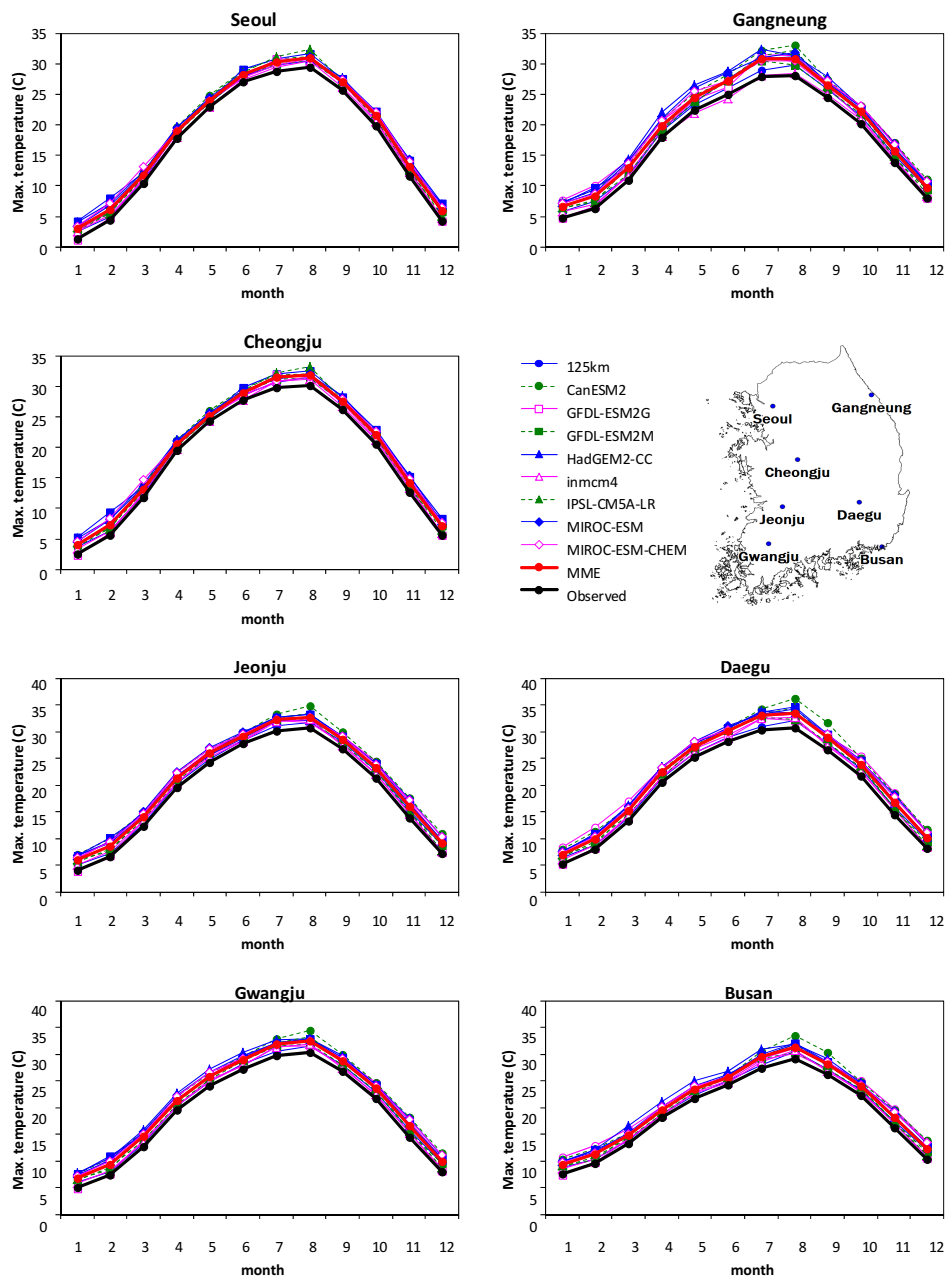


Figure 33 Temporal trend of bias-corrected monthly maximum temperature at seven KMA weather stations (RCP8.5 future period: 2011-2040).

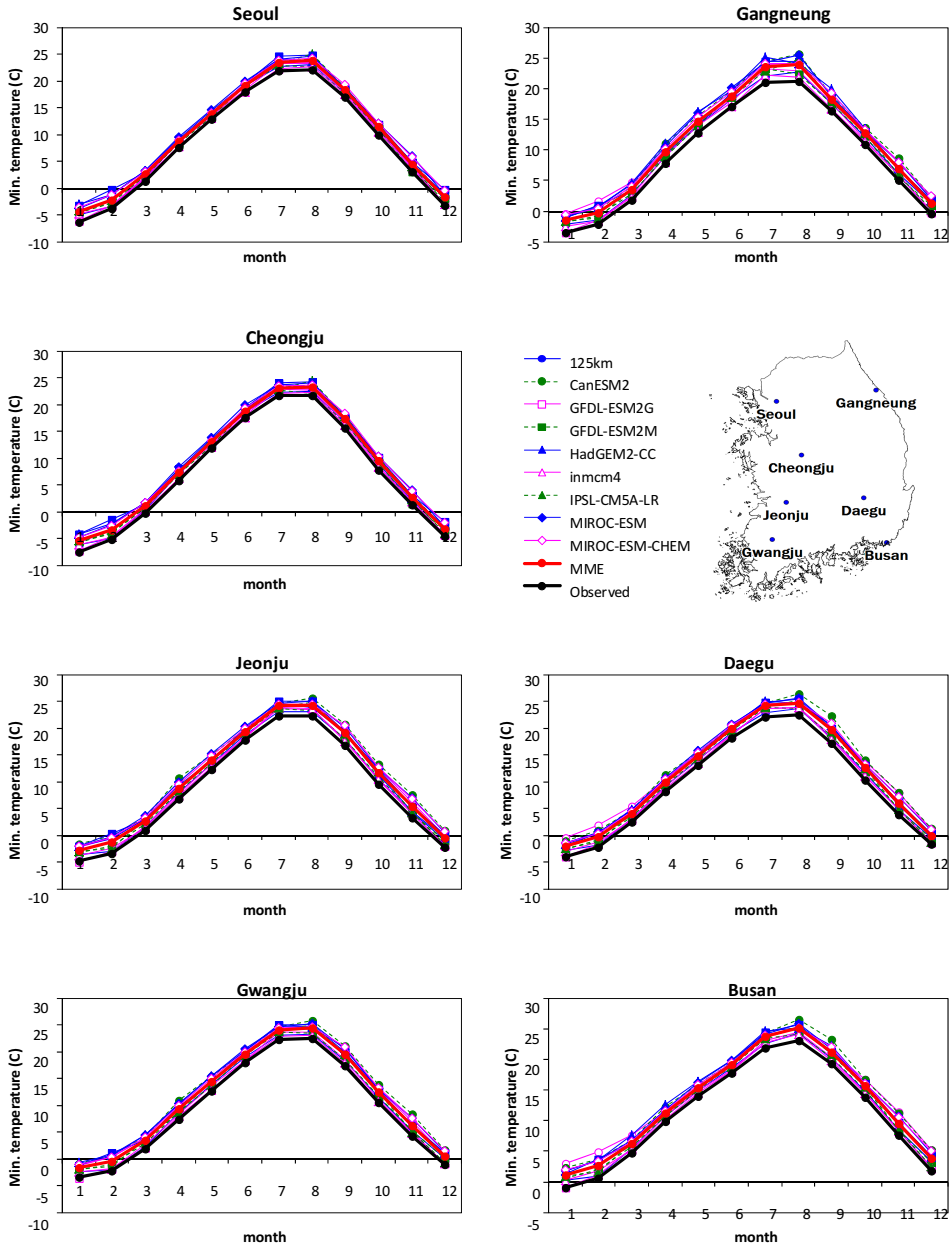


Figure 34 Temporal trend of bias-corrected monthly minimum temperature at seven KMA weather stations (RCP8.5 future period: 2011~2040).

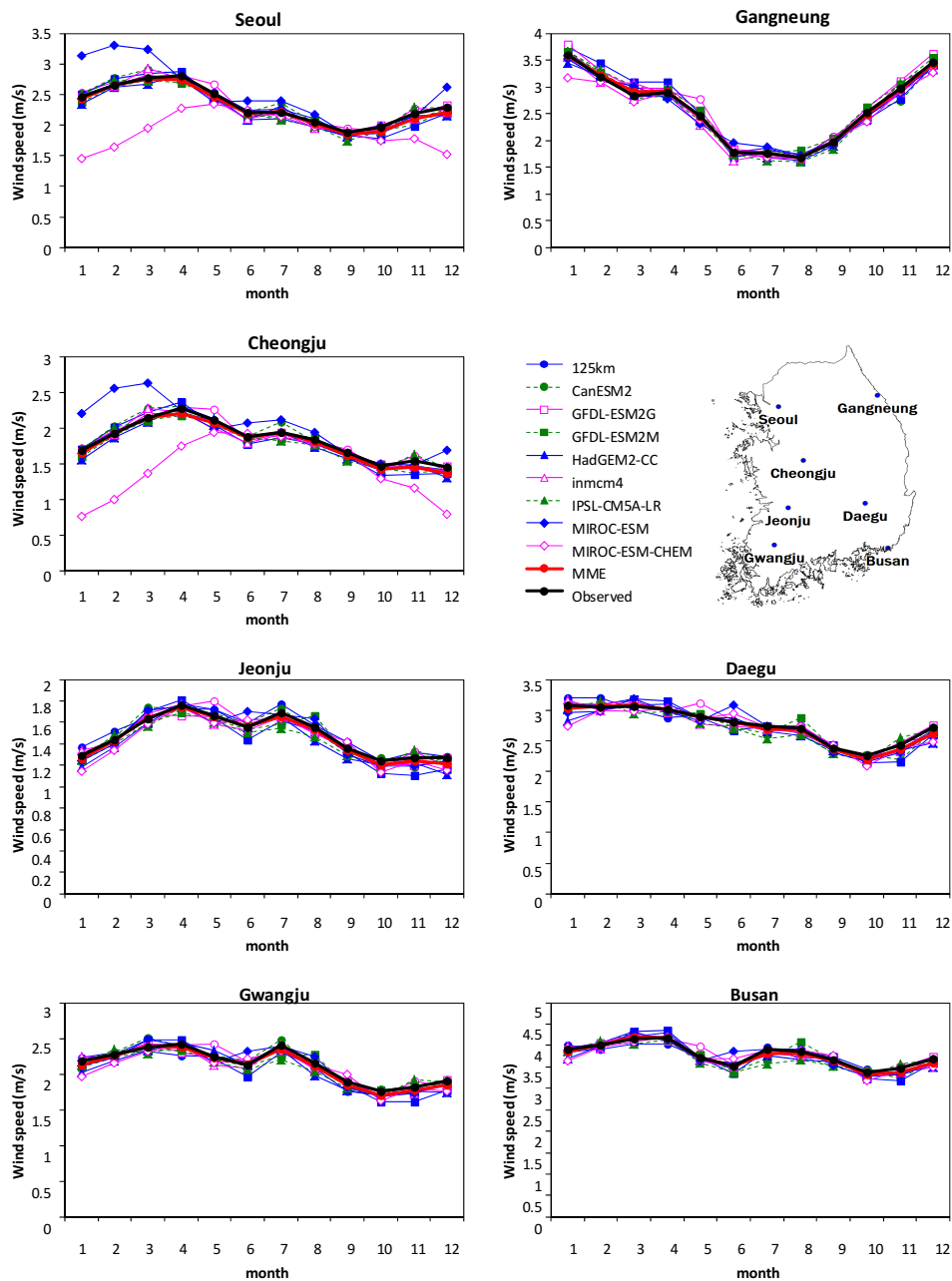


Figure 35 Temporal trend of bias-corrected monthly wind speed at seven KMA weather stations (RCP8.5 future period: 2011~2040).

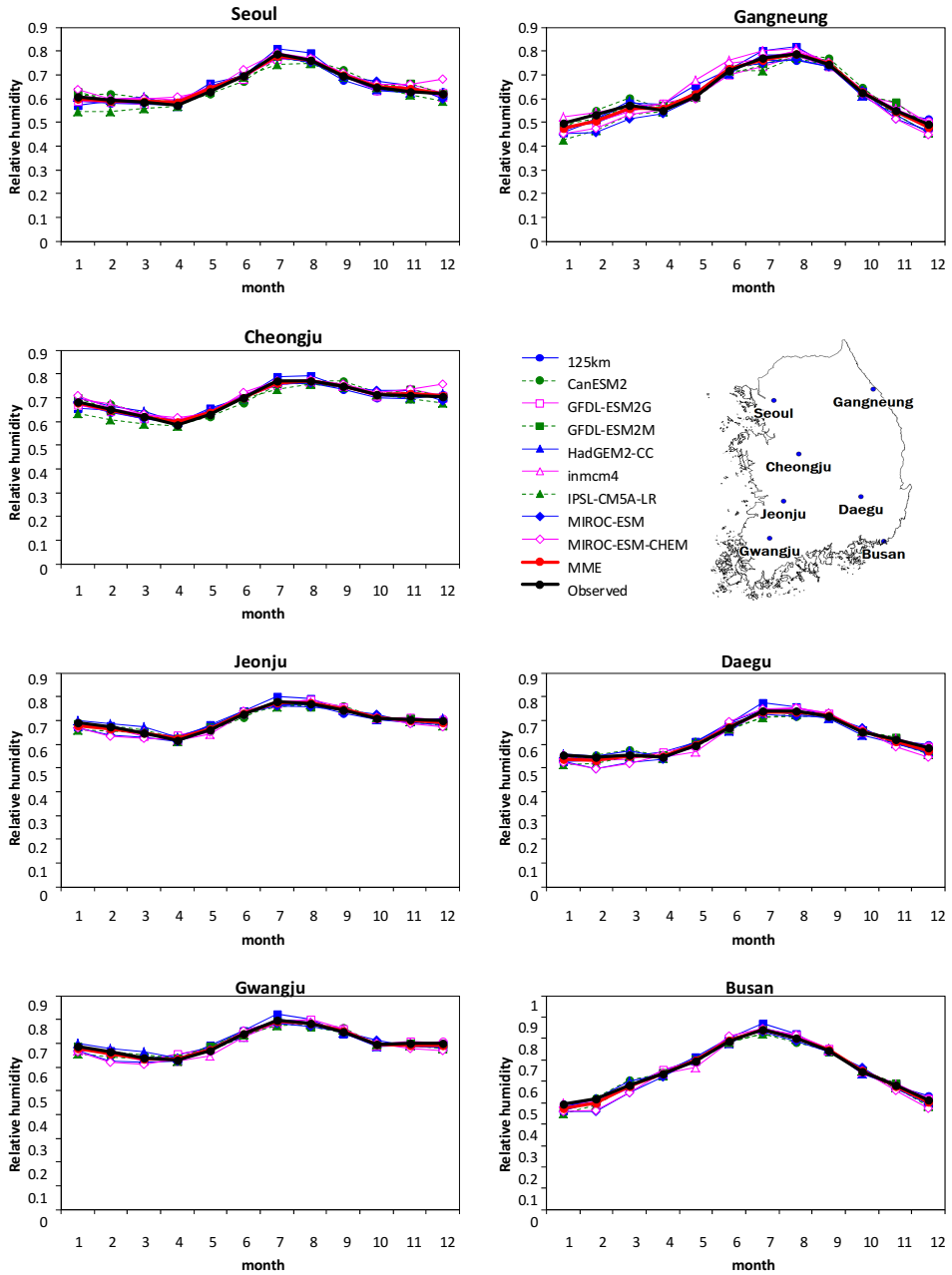


Figure 36 Temporal trend of bias-corrected monthly relative humidity at seven KMA weather stations (RCP8.5 future period: 2011-2040).

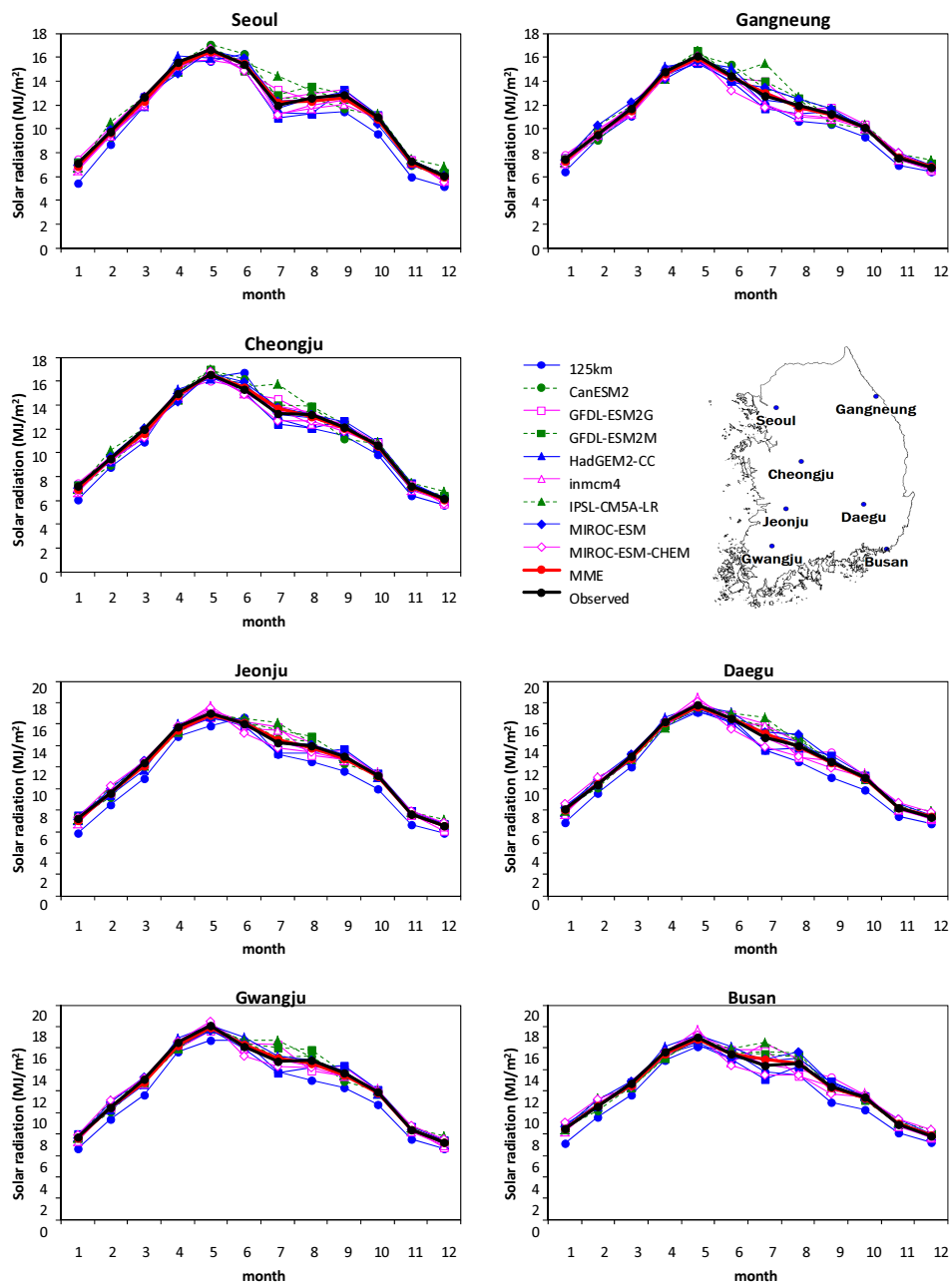


Figure 37 Temporal trend of bias-corrected monthly solar radiation at seven KMA weather stations (RCP8.5 future period: 2011~2040).

부록 4 한반도 대표 관측소에 대한 강우 특성 분석 결과

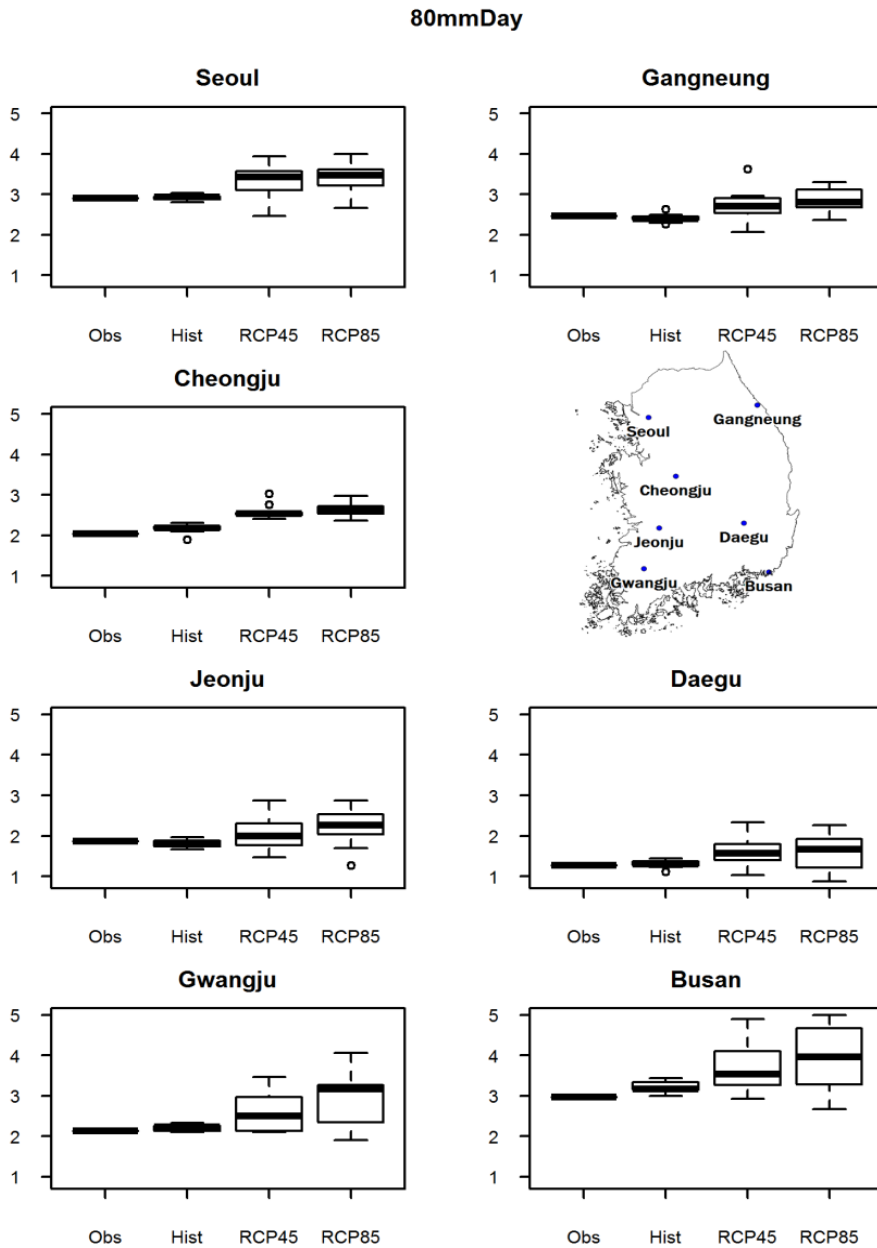


Figure 38 호우일수 (일 강수량이 80mm 이상인 날의 연중일수, day).



Pinten

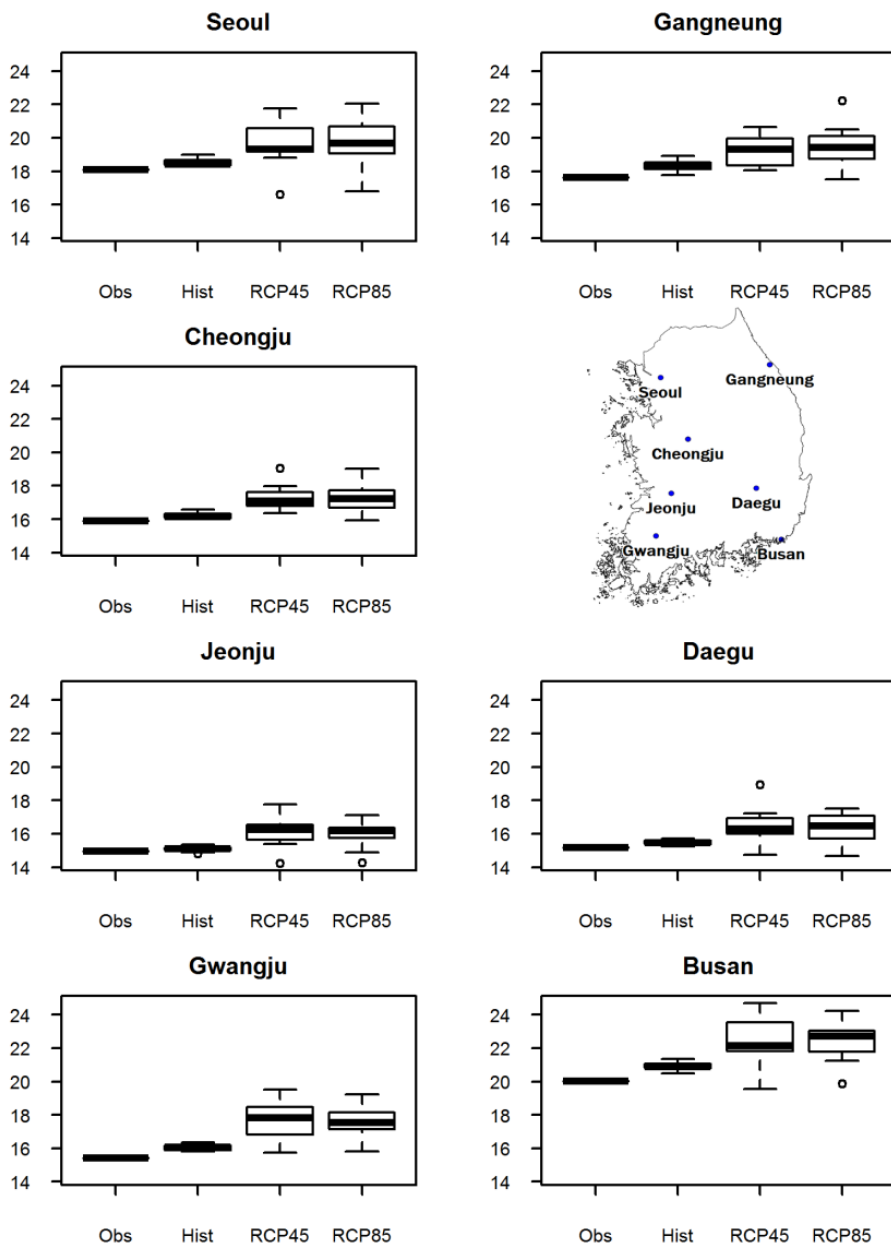


Figure 39 강수량도 [연중 습윤일수로 나누어진 연총강수량] (mm/day).

P5dMAX

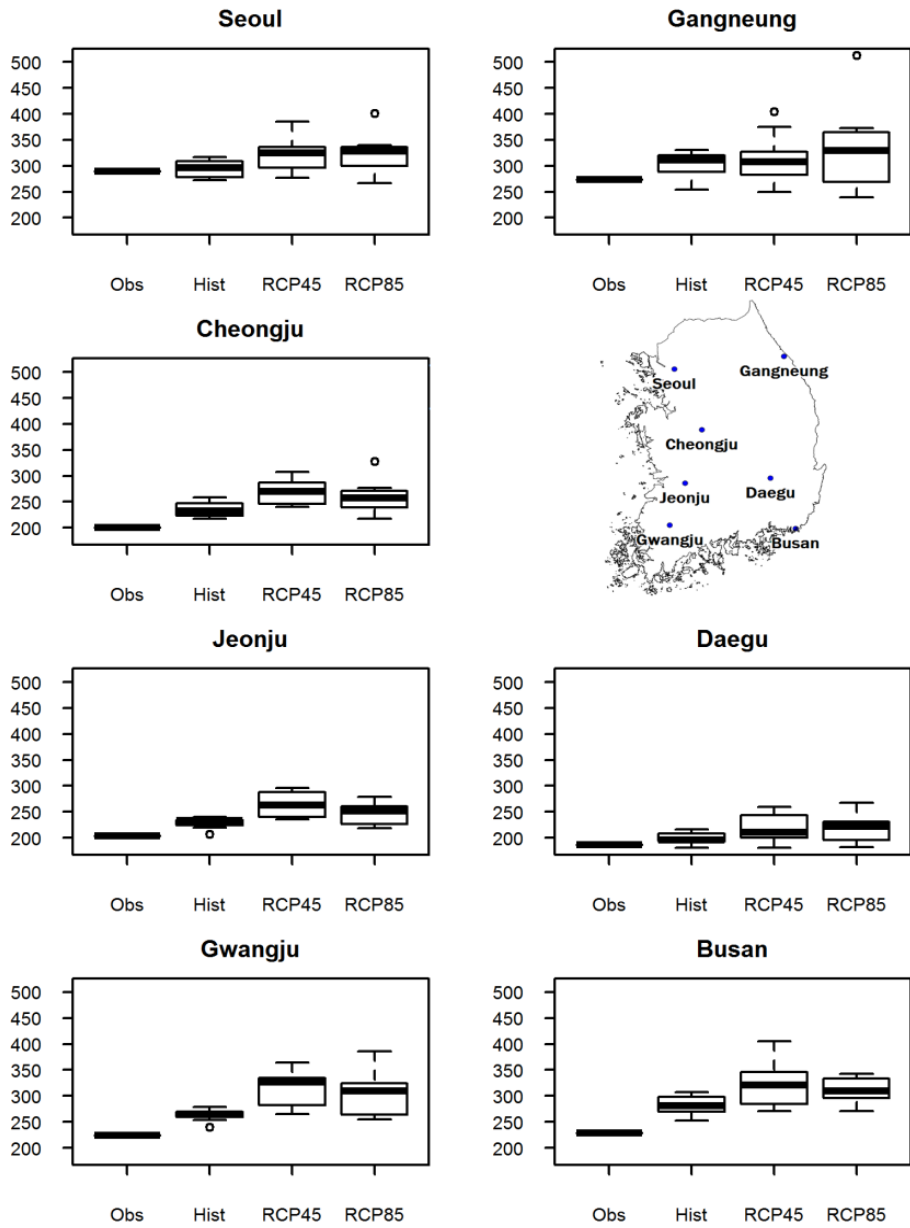


Figure 40 5일최대 강수량 (mm).



P_dry

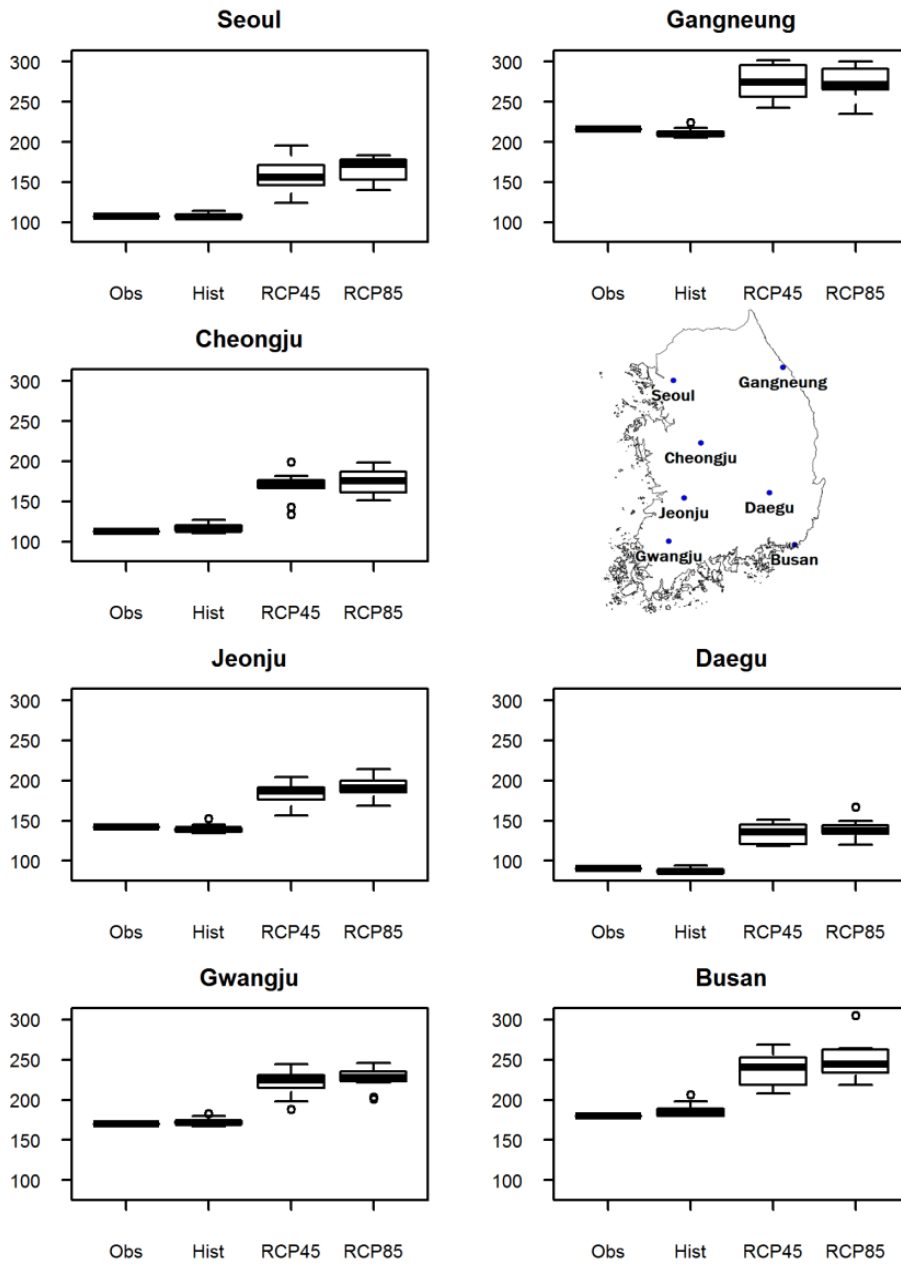


Figure 41 갈수기(10월-3월) 강수량 (mm).

MAXdry

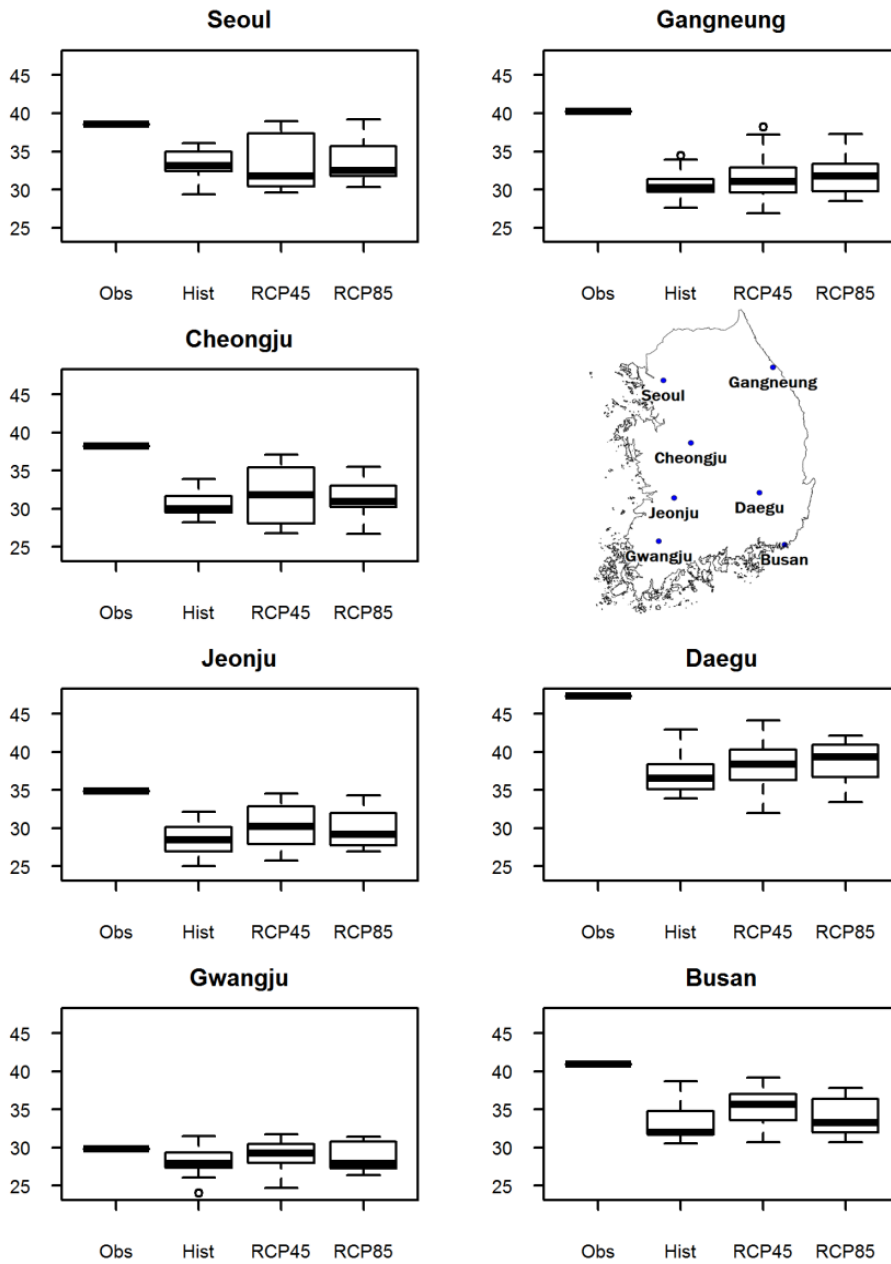


Figure 42 최대연속무강우일수 (day).



CT_{sea}

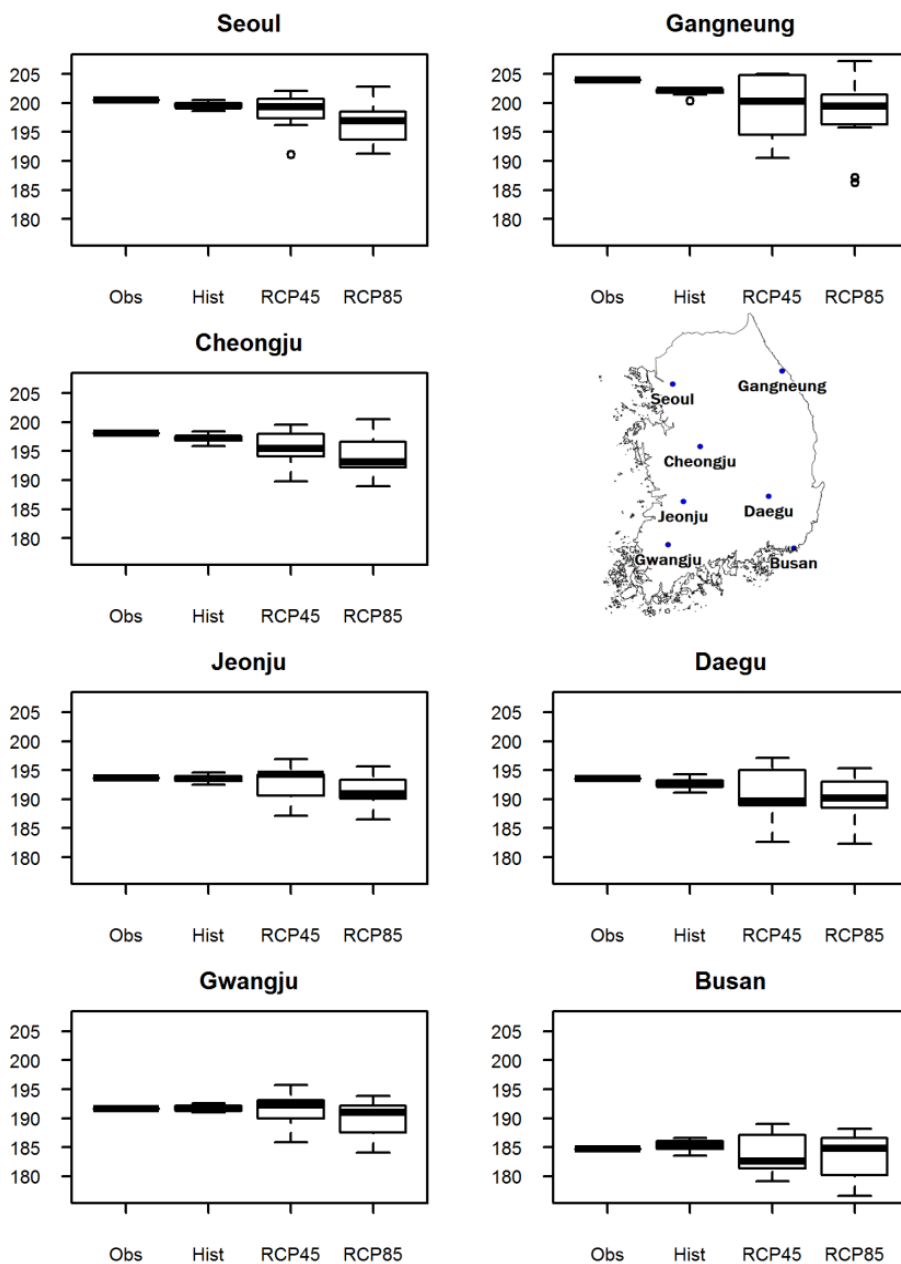


Figure 43 연총강수의 중심 (day)

부록 5 대표 저수지 유역에서의 SWAT 모델링 결과

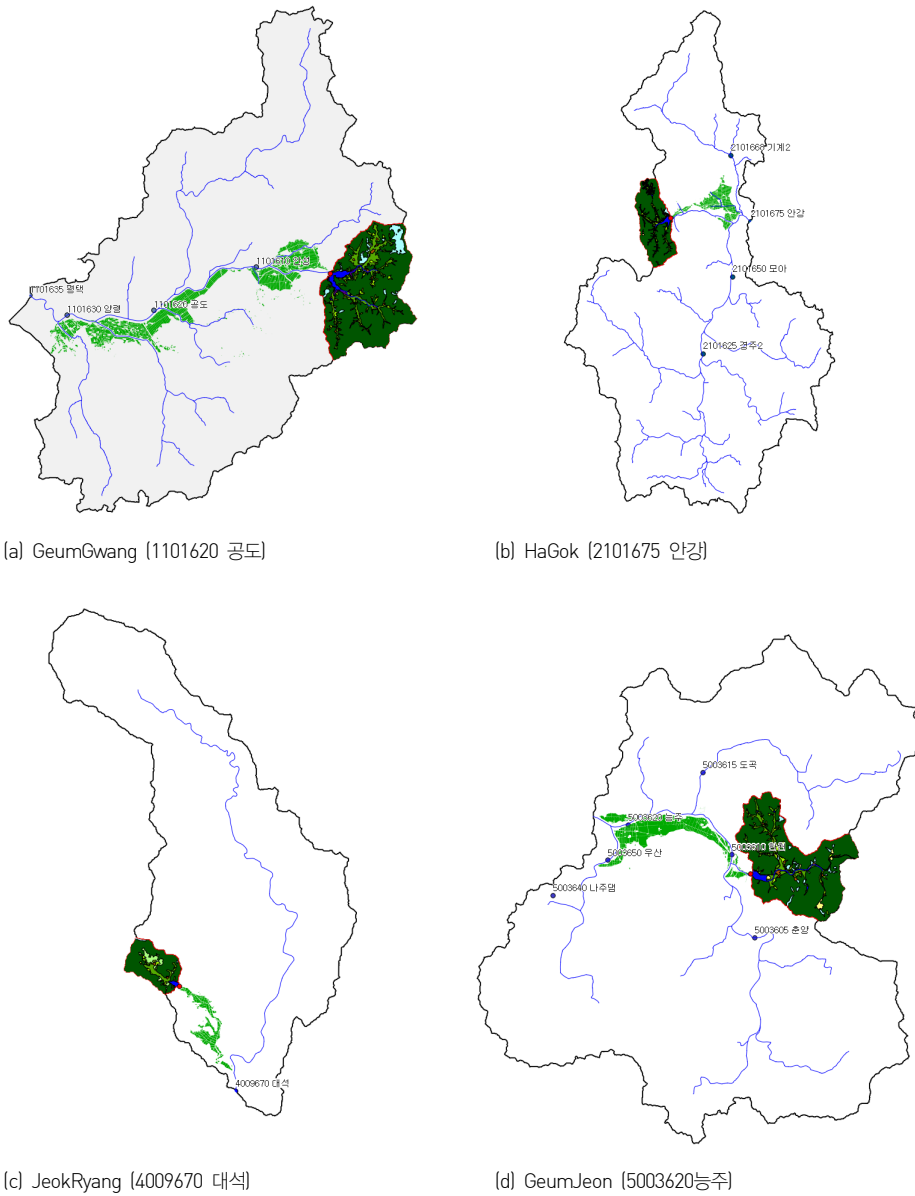


Figure 44. 대표 저수지 유역도.

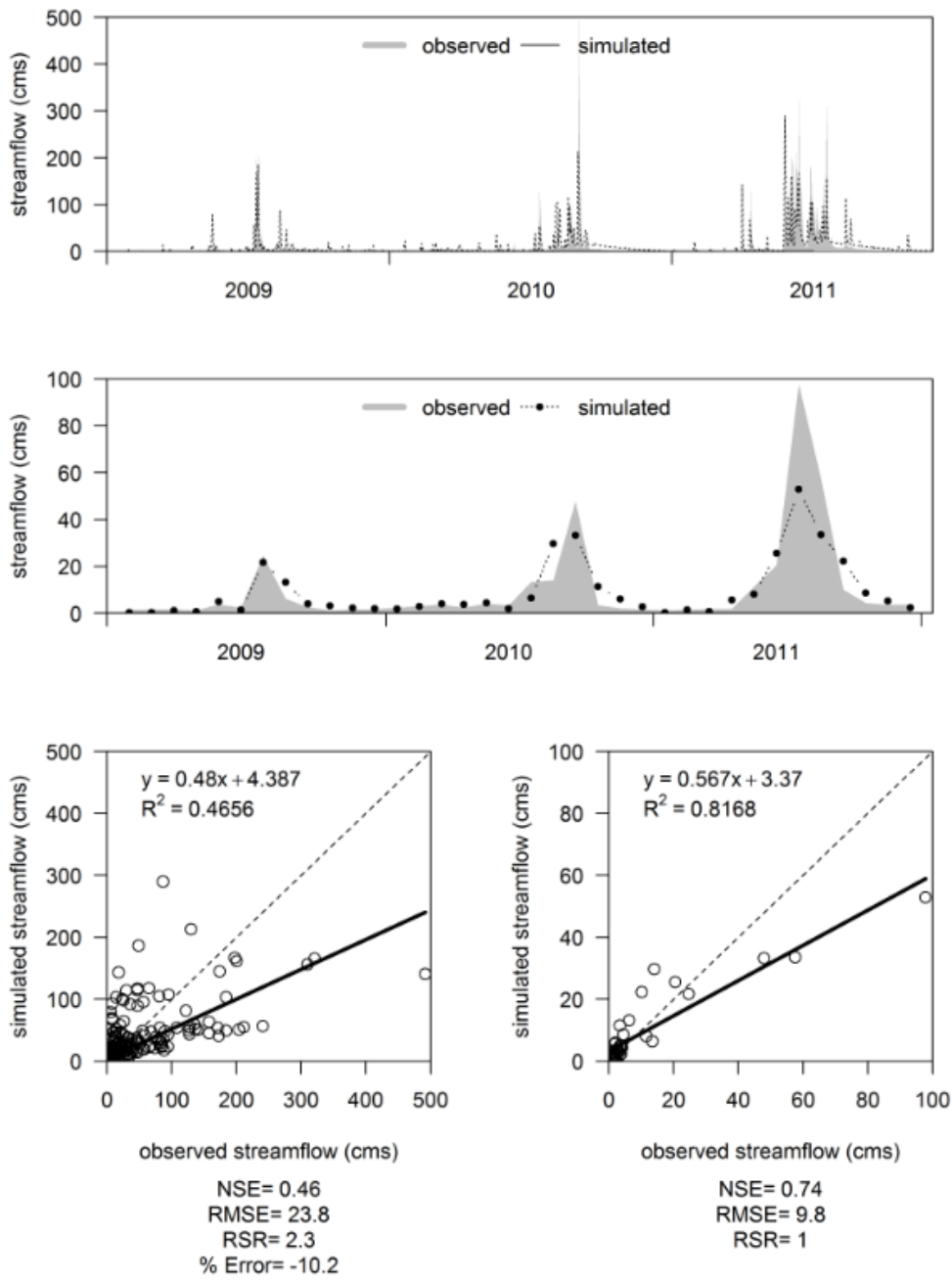


Figure 45 SWAT simulation results at Geumkwang reservoir watershed without calibration.



400909-JeokRyang

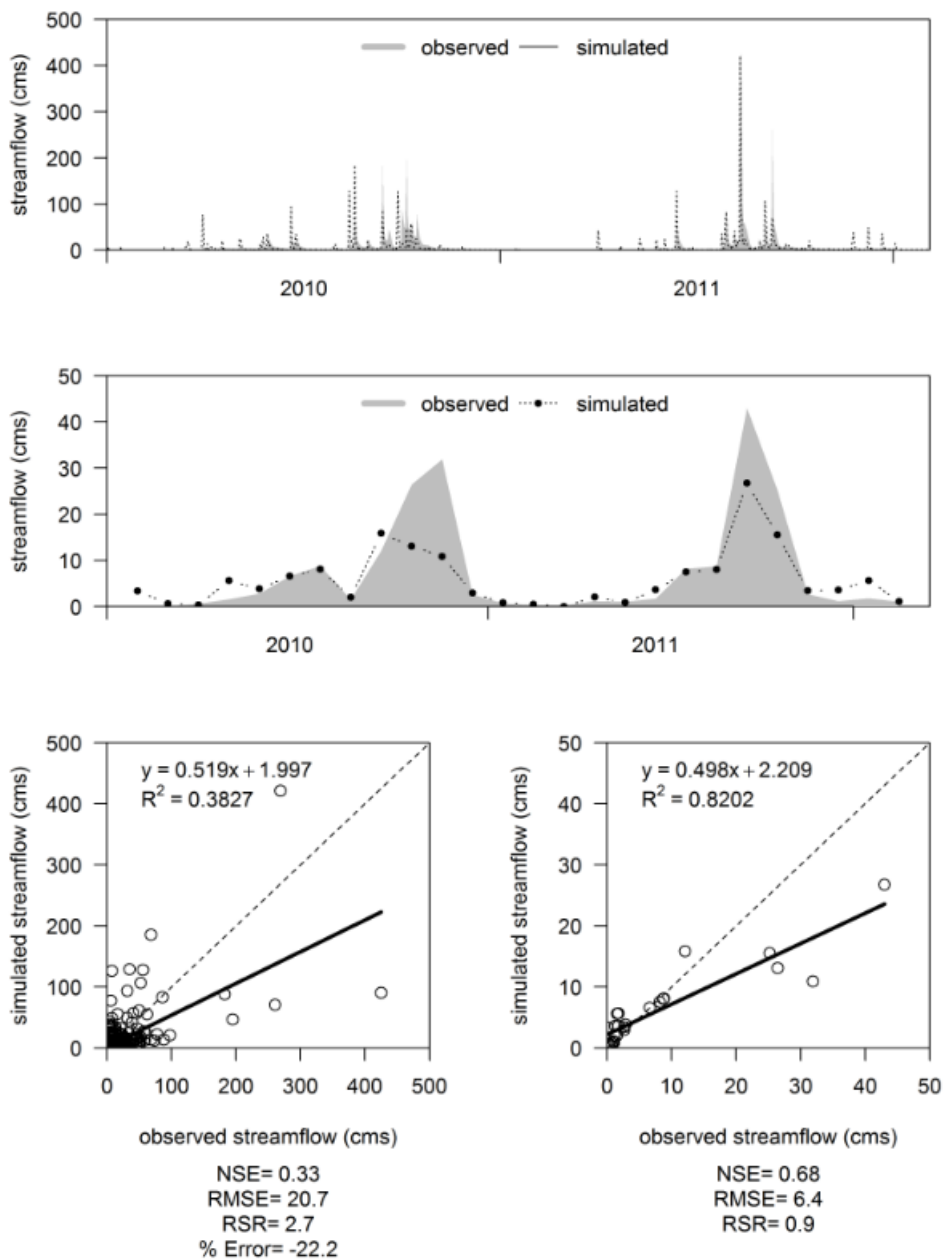


Figure 47 SWAT simulation results at JeokRyang reservoir watershed without calibration.

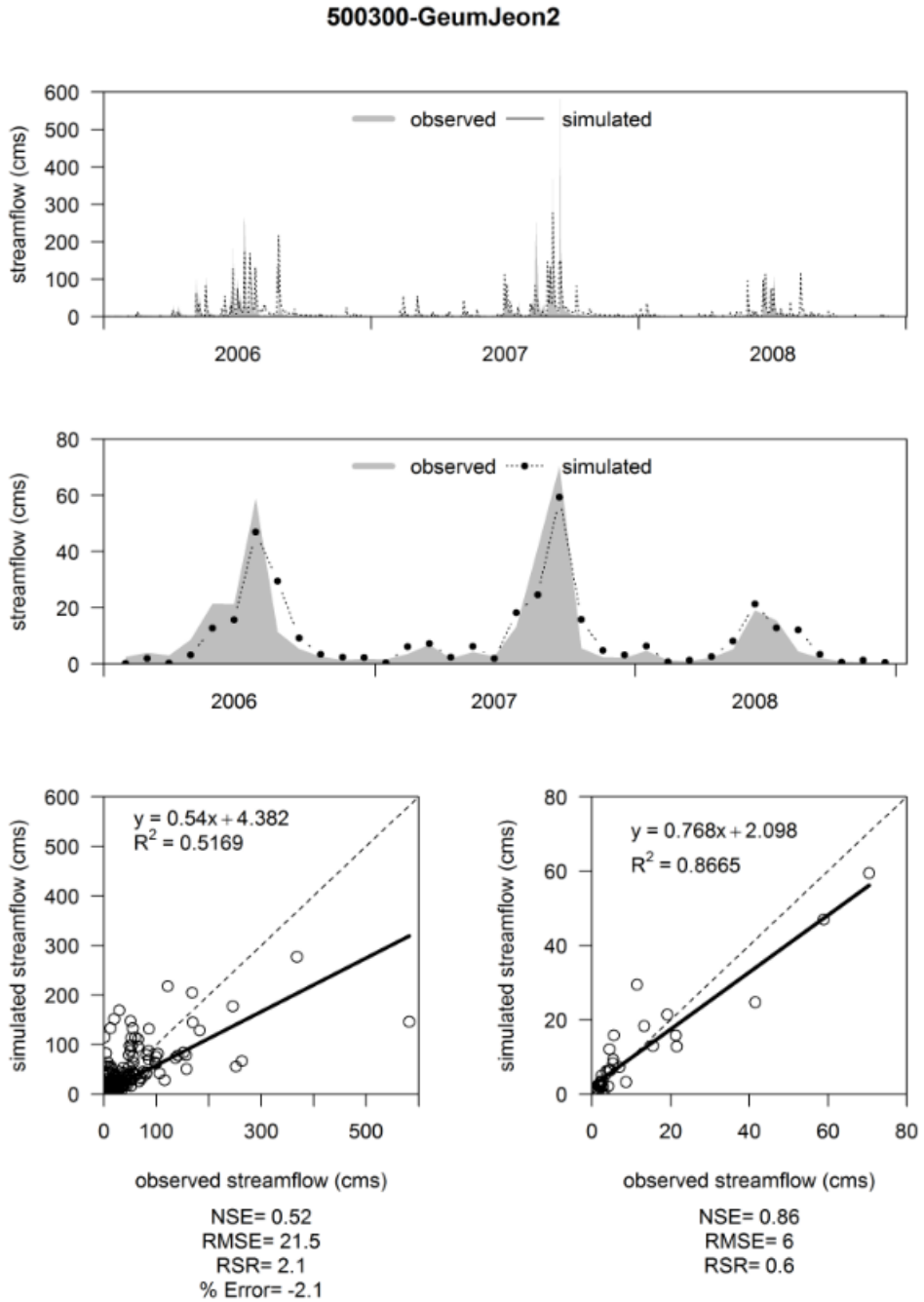


Figure 48 SWAT simulation results at Geumjeon reservoir watershed without calibration.

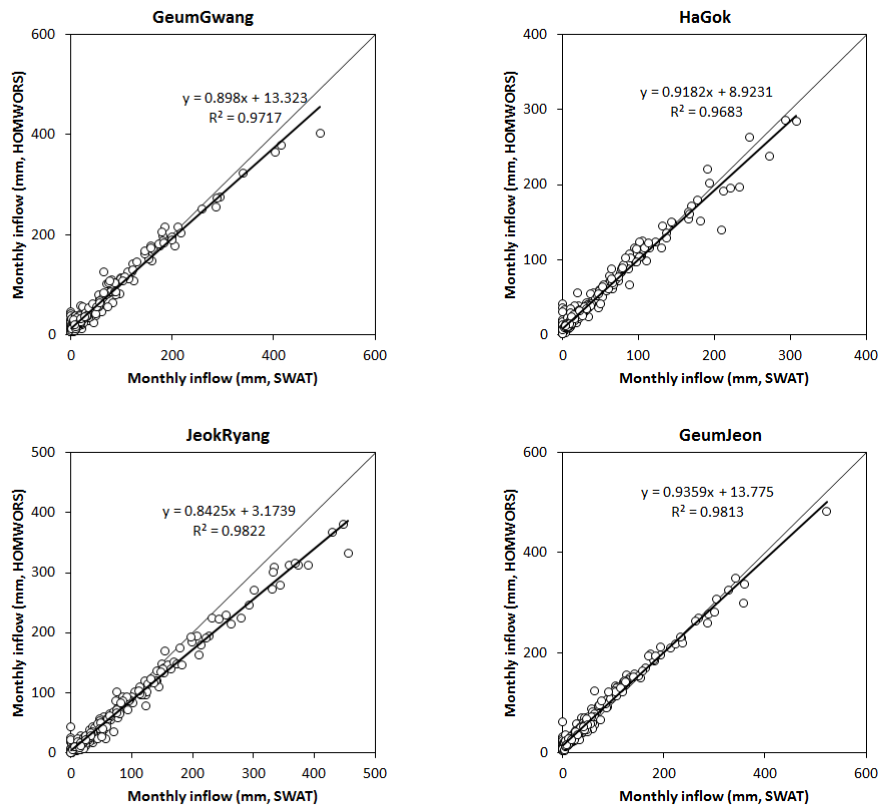


Figure 49 Scatter plot of 10-day inflow simulated by SWAT and HOMWRS at the 4 major reservoirs.

REFERENCES

- 국립환경과학원, 2012: 지자체 기후변화 적응 세부 시행계획 수립 지원을 위한 기후변화 부문별 취약성 지도. 환경부.
- 강민구, 이주현, 박기욱, 2013: 미계측유역유출모의를 위한 Tank 모형의 매개변수 지역화. 한국수자원학회 논문집, 46, 519-530.
- 강지훈, 김영도, 강부식, 2013: 기후변화에 따른 남강유역의 수문환경의 변화가 하천수질에 미치는 영향. 한국수자원학회 논문집, 46, 873-884.
- 국립기상연구소, 2011: IPCC 5차 평가 보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011.
- 김대준, 김진희, 노재환, 2012: 신 기후변화 시나리오에 따른 한반도 내 겨울보리 재배 적지 이동. 한국농림기상학회지, 14(4), 161 - 169.
- 김철겸, 김남원, 2012: TANK 모형과 SWAT 모형을 이용한 한강유역의 자연유출량 산정 비교. 한국수자원학회 논문집, 45(3), 301 - 316.
- 김현영, 1988: 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의 발생. 서울대학교 박사학위 논문.
- 농촌진흥연구원, 2011: 기후변화에 따른 농업용수 영향평가 연구.
- 농촌용수종합정보시스템, <https://rawris.ekr.or.kr/>.
- 박근애, 2008: 미래 기후변화가 농업수자원에 미치는 영향 연구. 건국대학교 박사학위논문.
- 박민지, 신형진, 박근애, 김성준, 2010: SWAT 모형을 이용한 소양강댐 유역의 미래 수자원 영향 평가. 대한토목학회 논문집, 30, 337-346.
- 배덕효, 정일원, 이병주, 이문환, 2011: GCM과 수문모형의 불확실성을 고려한 기후변화에 따른 한반도 미래 수자원 전망. 한국수자원학회 논문집, 44, 389-406.
- 서울대학교, 2013: 농업생산기반시설 통합 관리시스템 개발-기후변화 대응 농업생산기반시설 수리/수문 안정성 분석기술 개발.
- 손태석, 이상도, 김상단, 신현석, 2010: 유역기반 모형을 이용한 기후변화에 따른 낙동강 유역의 하천유량 영향 분석. 한국수자원학회 논문집, 43, 865-881.
- 안태진, 조동호, 이상호, 2004: 기존 농업용 저수지에서 유역유출저수량의 평가. 한국수자원학회 논문집, 37, 353 - 361.
- 윤동균, 정상옥, 김성준, 2011: 기후변화가 논 필요수량에 미치는 영향. 한국농공학회 논문집, 53, 39 - 47.
- 이용준, 박민지, 박기욱, 2008: 농업용 저수지 운영을 고려한 SWAT 모형의 수문학적 거동 분석. 한국지리정보학회지, 11, 20 - 30.
- 장민원, 2000: 관개용 저수지에 의한 담작물의 농업가뭄 분석 및 평가에 관한 연구. 서울대학교 석사학위 논문.
- 장재호, 안중호, 2012: 미래 기후변화에 따른 낙동강 유역의 수문·수질 변화. 한국수자원학회 논문집, 45(11), 1121-1130.
- 정상옥, 2009a: 기후변화가 낙동강 권역의 논 관개용수 수요량에 미치는 영향. 한국농공학회 논문집, 51, 35 - 41.
- 정상옥, 2009b: 지역 기후모형 자료를 이용한 낙동강 권역의 논 관개용수 수요량 예측. 한국농공학회 논문집, 51, 7 - 13.
- 정태성, 강신욱, 황만하, 2008: 금강유역의 유역통합수자원관리를 위한 저수지 운영률 개발 및 적용성 검토. 한국수자원학회 논문집, 41, 433 - 444.



- 한국농어촌공사, 2001: 수리시설물 모의조작 시스템 사용자설명서-HOMWRS(Ver 2.10).
- 황세운, 허용구, 장승우, 2013: 미래 기상 시나리오에 대한 편의 보정 방법에 따른 지역 기후변화 영향 평가의 불확실성. 한국농공학회논문집, 55, 95-106.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998: Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome 300:6541.
- 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.
- Bicknell, B.R., J.C. Imhoff, J.L. Kittle, Jr., A.S. Donigian, Jr., and R.C. Johanson, 1993: Hydrologic Simulation Program-FORTRAN (HSPF): User's Manual for Release 10. Report No. EPA/600/R-93/174, Athens, GA: U.S. EPA Environmental Research Lab.
- 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.
- 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.
- Gudmundsson, L., J.B. Bremnes, J.E. Haugen, and T. Engen Skaugen, 2012: Technical Note: Downscaling RCM Precipitation to the Station Scale Using Quantile Mapping—a Comparison of Methods. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9, 6185-6201.
- Im, S.J., K.M. Brannan, S. Mostaghimi, and J. Cho, 2004: Simulating Fecal Coliform Bacteria Loading from an Urbanizing Watershed. *Environmental Science and Health, Part A-Toxic /Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 39(3), 663-679.
- MacQueen, J., 1967: Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations. *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. California, USA, p. 14.
- Nash, J.E., and J.V. Sutcliffe, 1970: River flow forecasting through conceptual models part 1 - A discussion of principles. *J. Hydrology*, 10(3), 282-292.
- Snyder, R. L., 2001. Converting Solar Radiation to Hours of Bright Sunshine, <http://biomet.ucdavis.edu/biomet/Radiation/Wton.htm>
- Stewart, I.T., D.R. Cayan, and M.D. Dettinger, 2005: Changes toward Earlier Streamflow Timing across Western North America. *J. Climate*, 18, 1136-1155.



APCC RESEARCH REPORT 2013-05

- Assessment of Climate Change Impacts on Rice Productivity in the Asia-Pacific Region
- Assessment of Climate Change Impacts on Agricultural Reservoirs in Consideration of Uncertainty
- Estimation of GHG Fluxes by Landcover Type Including Rice Paddy Fields

APEC Climate Center

12, Centum 7-ro, Haeundae-gu, Busan 612-020,
Republic of Korea
Tel: +82-51-745-3900 Fax: +82-51-745-3949
www.apcc21.org

비매품



ISBN 978-89-97333-97-4
ISBN 978-89-97333-92-9 (세트)