

# CMIP5 GCMs의 근 미래 한반도 극치강수 불확실성 전망 및 빈도분석

## The Uncertainty of Extreme Rainfall in the Near Future and its Frequency Analysis over the Korean Peninsula using CMIP5 GCMs

윤 선 권\* / 조 재 필\*\*

Yoon, Sun-kwon / Cho, Jaepil

### Abstract

This study performed prediction of extreme rainfall uncertainty and its frequency analysis based on climate change scenarios by Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) for the selected nine-General Circulation Models (GCMs) in the near future (2011-2040) over the Korean Peninsula (KP). We analysed uncertainty of scenarios by multiple model ensemble (MME) technique using non-parametric quantile mapping method and bias correction method in the basin scale of the KP. During the near future, the extreme rainfall shows a significant gradually increasing tendency with the annual variability and uncertainty of extreme rainfall in the RCP4.5, and RCP8.5 scenarios. In addition to the probability rainfall frequency (such as 50 and 100-year return periods) has increased by 4.2% to 10.9% during the near future in 2040. Therefore, in the longer-term water resources master plan, based on the various climate change scenarios (such as CMIP5 GCMs) and its uncertainty can be considered for utilizing of the support tool for decision-makers in water-related disasters management.

**Keywords** : CMIP5, GCMs, extreme rainfall, uncertainty, frequency analysis

### 요 지

본 연구에서는 기후변화 시나리오의 미래 전망 불확실성 요소를 감안한 근 미래(2011~2040년) 극치 강수전망과 빈도분석을 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 9개 GCMs(General Circulation Models)를 사용하여 수행하였다. 또한, 기후자료의 유역규모 비모수적 상세화 및 편이보정 기법을 적용하여, 다중 모델 앙상블(MME)을 통한 불확실성 분석을 수행하였다. 분석결과, RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 모두 한반도 근 미래 극치 강수특성인자의 연간 변동성과 불확실성이 커지는 것으로 분석되었으며, 강우빈도분석 결과 2040년까지 50년과 100년 빈도 확률강수량이 최대 4.2~10.9% 증가할 것으로 분석되었다. 본 연구 결과는 다중모델 앙상블 GCMs의 불확실성을 고려한 국가수자원 장기종합 개발계획과 기후변화 적응대책 마련 등 기후변화 방재관련 정책결정 및 의사결정 지원 자료로 활용이 가능할 것이다.

**핵심용어** : CMIP5, GCMs, 극치강수, 불확실성, 빈도분석

### 1. 서 론

최근 기후변화의 영향으로 지구상의 여러 지역에서는

극치사상의 발생 빈도와 강도가 날로 증가하고 있는 추세이며, 자연재해의 형태는 점차 대형화, 다양화되고 있다 (Easterling et al. 2000; Parmesan and Yohe, 2003; IPCC,

\* APEC 기후센터 연구본부 기후변화연구팀 선임연구원 (e-mail: skyoon@apcc21.org)

Research Fellow, Climate Research Department, APEC Climate Center, Busan 612-020, Korea

\*\* 교신저자, APEC 기후센터 연구본부 기후변화연구팀 선임연구원 (e-mail: jpcho89@apcc21.org, Tel: 82-51-745-3994)

Corresponding Author, Research Fellow, Climate Research Department, APEC Climate Center, Busan 612-020, Korea

2007; Wood, et al. 2011; KMA, 2012; Yoon, 2012; Sillmann et al. 2013a). IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 기후변화 시나리오의 미래 전망을 통해 높은 신뢰수준에서 전 지구 평균 기온이 상승할 것으로 예측하고 있으며, 이는 대기가 포함할 수 있는 수증기의 양을 증가시켜 수문순환에도 영향을 미쳐 수자원의 시공간적 변화와 극치수문발생의 변화를 야기할 것으로 전망하고 있다(Hulme et al., 1998; Kingston et al., 2009; Wilby and Dessai, 2010; IPCC, 2013; Kim et al., 2013; Sillmann et al., 2013b; Merz et al., 2014).

온실가스 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오 (RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5)에 따라 전 세계 40여개 전 지구기후모형(General Circulation Models/Global Climate Models, GCMs)에 의해 기후변화 모의가 이루어진 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)에서는 과거, 현재, 그리고 미래 기상 변수들의 전망결과를 제공하고 있다. 기후변화에 따른 미래 수자원 평가는 GCMs 모형의 결과로부터 산출된 강수량, 기온, 풍속 등 여러 가지 기후변수들을 지수화 하여 전망하는 등 다양한 방법으로 진행되고 있다. 대표적인 연구로 Kay et al. (2006)은 영국의 HadRM3H 지역기후모형(RCM, Regional Climate Model)으로 산출된 고해상도(25×25 Km) 격자 강수량자료를 사용하여 15개 계측구역에 대하여 Probability Distributed Model (PDM)을 이용한 유출 분석과 홍수빈도 해석을 수행하여 영국의 주요 하천의 50년 빈도 첨두홍수량이 미래에는 약 50%가까이 증가할 수 있음을 보였으며, Kingston et al. (2009)은 전 지구 기후모형 결과로부터 기후변화에 따른 수문순환의 변화에 따른 잠재증발산량(Potential Evapotranspiration)의 추정과 불확실성에 대한 연구를 통하여, 21세기에는 열대지역의 평균 잠재증발산량이 14.1%, 동아시아지역은 15.4%, 서남아시아 지역은 7.9% 증가할 수 있음을 보였다. 또한 Wilby and Dessai (2010)는 고해상도 기후변화 시나리오 자료의 수자원분야 적용 시 고려해야할 후회가 적은(Low-regret) 진보된 기후변화 적응정책 수립 방법론을 제안하였으며, 영국 Wales 지역을 대상으로 기후변화 불확실성을 감안한 수자원 적응정책을 시범 적용한 바 있다. Sillmann et al. (2013a, b)은 기후모형으로부터 산출할 수 있는 27가지 극한 기후지수를 분류하여 CMIP3와 CMIP5의 GCMs 앙상블 결과를 과거기간에 대하여 모의 성능을 평가하였으며, 기후모형과 시나리오 자료의 불확실성을 정량화하였다.

국내에서도 기후변화 시나리오 자료를 이용한 수자원

분야 영향 평가에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔다(Bae et al., 2011; Park et al., 2011; Jeung et al., 2014; Yoon et al., 2014; and Hwang 2014). Bae et al. (2011)은 기후변화에 따른 한반도 수자원의 변화 전망을 위하여 AR4에 적용되었던 A2, A1B, B1 시나리오를 사용하여 13개 GCMs 결과를 이용한 3개(PRMS, SWAT, SLURP)의 유출모형 적용으로 한반도 5대강 유역의 109개 중권역별 미래 수자원전망 분석을 실시한바 있으며, 여름과 겨울철 유출량은 증가 추세를 보이고 봄철의 유출량은 감소할 것으로 분석되어 미래 수자원 관리에 어려움이 있음을 밝힌바 있다. 또한, Park et al. (2011)은 우리나라의 대청댐과 용담댐 유역을 대상으로 A1B 기후변화 시나리오 하에서의 RCM 결과를 SWAT 모형에 활용하여 유출량 전망을 수행한 바 있으며, Jeung et al. (2014)은 HadGEM3-RA 지역기후모형에서 생산된 RCPs 시나리오를 대상으로 한반도 극한 기후지수 평가를 위하여 STARDEX (STAtistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes)에서 제시한 10개의 강수관련 극한기후지수를 분석하여 미래 우리나라의 극치 강우의 지역적 변동 특성 및 증가 패턴이 있음을 확인하였다. Yoon et al. (2014)은 KMA-12.5 km RCPs 시나리오 자료를 이용하여 기후변화에 따른 광동댐 유역의 가뭄발생 재현기간별 경계핵함수(Boundary Kernel Function)를 이용하여 갈수빈도해석을 수행한바 있으며, RCPs 기후변화 시나리오 적용을 통한 Arc-SWAT 장기 유출량 계열 (Median flow, Quantile 25% flow)의 빈도해석 결과, 비교적 먼 미래로 갈수록 30년 빈도 이상의 극심한 가뭄의 발생 빈도가 커질 수 있음을 밝혔다. Hwang (2014)은 CMIP5에 참여한 17개 GCMs 모형결과를 바탕으로 미국 플로리다 남동부 지역의 모의 성능 평가를 실시한 바 있다. 분석결과, 일 강수량, 일 최대·최저기온, 그리고 풍속 변수를 활용한 16가지 기후요소에 대하여 관측기간(1950~2000)동안 기온에 대한 재현성은 우수하나 강수와 풍속에 대한 재현성을 다소 떨어짐을 확인하였고, GCMs 모형 결과의 적용 시 지역기후 특성과 불확실성을 고려한 합리적인 모형 평가가 선행되어야 함을 시사하였다.

현재 한반도를 대상으로 한 CMIP5 GCMs 다중모형 앙상블(Multi-Model Ensemble, MME)의 극치 강수전망에 따른 빈도분석 연구 사례는 드문 실정이다. 보다 신뢰성 있는 기후변화 정보 제공을 위해서는 다중모형앙상블자료에 대한 분석이 필요하며 각 기후모형과 기후변화 시나리오 자체가 가지고 있는 미래 전망의 불확실성을 정량화하는 일은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 CMIP5에 참여한 다양한 GCMs로부터 도출된 기후정보를 활용하

여 다중모델 앙상블기법을 적용하여 모형별 강수량의 연최대치 계열을 구축한 후 한반도 5대강 유역의 근 미래 극치강수 전망과 빈도분석을 수행하였으며, 불확실성을 고려한 보다 신뢰성 있는 극치 수문분석의 방법론을 제시하는데 연구의 목적이 있다.

## 2. 연구 방법 및 범위

### 2.1 연구 대상유역

본 연구의 대상지역은 한반도의 5대강(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강) 유역을 선정하였다. 여기서 섬진강과 영산강유역은 서로 인접해 있으며, 유출분석 결과를 포함하지 않으므로 두 유역을 하나로 간주하고 분석하였다. 국가 수자원관리 종합정보시스템(www.wamis.go.kr)의 1966년~2012년까지의 유역조사 결과를 바탕으로 한반도 5대강 유역별 수문특성을 살펴보면 다음과 같다. 한강유역의 유역면적은 38,421.8 km<sup>2</sup>, 연평균 강수량은 1,259.4 mm, 여름철(6~9월)강수량은 894.2 mm (71.0%)이다. 낙동강유역의 유역면적은 31,712.0 km<sup>2</sup>, 연평균 강수량은 1,238.6 mm, 여름철 강수량은 808.8 mm (65.3%)이다. 금강유역의 경우 유역면적은 17,537 km<sup>2</sup>이고, 연평균 강수

량은 1,224.6 mm이며, 여름철 강수량은 815.6 mm (66.6%)이다. 섬진강유역의 유역면적은 8,299.1 km<sup>2</sup>, 연평균 강수량은 1,437.3 mm, 여름철 강수량은 929.9 mm (64.7%)이다. 영산강유역의 유역면적은 7,598.7 km<sup>2</sup>, 연평균 강수량은 1,296.7 mm, 여름철 강수량은 820.8 mm (63.3%)이다.

### 2.2 분석 대상 자료

본 연구에서는 한반도 지역의 근 미래 극치강수 전망 및 빈도분석을 위하여 IPCC 제5차 기후변화 평가보고서에 사용된 CMIP5 온실가스 대표농도경로 시나리오(RCPs) 기반의 기후전망 자료를 사용하였다. 또한 기후변화 시나리오와 다양한 GCMs이 가지고 있는 불확실성을 평가하기 위하여 다중모델앙상블을 사용하였다. CMIP5의 온실가스 대표농도경로별 시나리오에 따른 일(Daily) 단위 전지구 기후모형 결과는 Earth System Grid Federation (ESGF, <http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>)을 통해 내려받아 사용하였다. 기후변화 시나리오 자료를 내려받은 결과, 총 33개 GCMs에서 일단위 자료가 제공되고 있으나 과거기간 및 미래기간의 경우 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오 자료 중에서 극치강수 전망 및 빈도분석과 추후 수문 분석에 필요한 6가지 기상 변수(강수량, 최고기온, 최저기

Table 1. Climate Models and the Spatial Resolutions Used in This Study

GCMs/RCM	Institution	Matrix
HadGEM2-AO (KMA-12.5 km)	Korea Meteorological Agency	12.5 × 12.5 km
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	128 × 64 (2.8° × 2.8°)
GFDL-ESM2G	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	144 × 90 (2.5° × 2.0°)
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	144 × 90 (2.5° × 2.0°)
HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre, UK	192 × 144 (1.875° × 1.25°)
inmcm4	Institute for Numerical Mathematics, Russia	180 × 120 (2.0° × 1.5°)
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre Simon Laplace, France	96 × 96 (3.8° × 1.9°)
MIROC-ESM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	128 × 64 (2.8° × 2.8°)
MIROC-ESM-CHEM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	128 × 64 (2.8° × 2.8°)

은, 평균풍속, 상대습도, 일사량)들을 모두 포함하고 있는 총 8개의 GCMs 모형을 선정하였으며, 기상청에서 제공하고 있는 HadGEM2-AO모형의 활용성을 검토하기 위하여 KMA-12.5 km 지역규모모형(Regional Scale Model, RCM) 결과를 추가하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 9개 기후모형과 보유기관, 그리고 공간해상도를 나타내었다.

관측기간 동안(historic periods)의 기후변화 시나리오 자료의 편이 보정 및 상세화를 위하여 기상청(KMA, <http://www.kma.go.kr/>)에서 제공하는 종관기상관측시스템(ASOS, Automated Synoptic Observing System)의 76개 관측지점 중에서 30년 자료가 존재하는 59곳의 자료를 사용하였다. 기후모형의 관측 자료기간은 1976~2005년까지 30년을 사용하였고, 미래기간은 2011~2040년까지 30년 기간을 사용하였다. 다만 기상청의 KMA-12.5 km 자료의 경우 과거기간은 1979~2005년의 27년 기간이 사용되었으며, 잠재증발산량 분석은 CMIP5의 8개 GCMs에 대해서만 분석하였다. 분석 결과는 한강, 낙동강, 금강, 섬진 및 영산강 등 4대강 권역별로 제시하였고, 각각 15개, 21개, 13개, 10개 관측지점이 사용되었다.

### 2.3 시나리오 자료 편이보정

선정된 GCMs 자료는 격자별 공간 해상도가 낮을 뿐만 아니라 해양을 포함한 대상지역에 대한 공간평균의 의미를 가지고 있어 유역 규모에서의 시공간적인 기후 특성을 재현하는데 어려움이 따른다. 따라서 GCMs 자료를 유역 규모에 적용하기 위해서는 공간적 상세화(downscaling) 작업이 필요하다. 또한 기후모형에 의해 생산된 미래 기후 전망을 신뢰할 수 있기 위해서는 기후모형이 과거 및 현재 기후를 잘 모의해야 한다. 따라서, 과거 및 현재 기간에 대해 모의된 기후 모형 결과를 동일 기간의 관측자료와의 비교를 통하여 GCMs의 계통오차를 보정해 주는 편이보정(Bias Correction)이 필요하다(Cho, 2013). 일반적으로 관측기간에 대한 관측과 모의의 계통오차 편이보정을 위하여 분위사상법(Quantile Mapping)이 사용되며, GCMs의 기후변화 시나리오 자료 모의 결과에 대한 재현성이 검증된 후, 미래에 대한 전망의 신뢰도를 확보할 수 있다.

분위사상법의 경우 모수적 분위사상법 및 비모수적 분위사상법 중 선택하여 사용할 수 있다. 모수적 분위사상법은 관측치와 모의치에 가장 잘 맞는 누적확률분포를 결정하고 누적확률분포의 역함수를 이용하여 편이보정을 하기 때문에, 실제 자료의 분포에 정확히 일치하는 확률분포를 찾아야 하며 실제 데이터와 확률분포함수 사이에 발생하는 차이에 따라서 편이보정 결과에 오차가 발생할

수 있다. 반면에 비모수적 분위사상법은 확률분포함수의 매개변수 가정 없이 모의 및 관측 자료의 실제 분포를 직접 사용하기 때문에 오차를 줄여 보다 정확한 편이보정을 할 수 있다는 것이 장점이다(Gudmundsson, 2012).

본 연구에서는 비모수적 분위사상법을 사용하였으며, 비모수적 분위사상법의 보정 절차를 살펴보면 우선 과거 관측기간에 대하여 실제 관측 자료와 모형에 의한 모의 자료를 크기순으로 정렬하여 두 자료 사이의 분위(quantile)별 차이를 보정하고, 기후변화 미래 전망 자료 또한 크기순으로 정렬한 후 과거기간으로부터 도출된 분위별차이를 고려하여 미래기간에 대한 시나리오 자료를 보정하게 된다. 본 연구에서는 강수를 포함한 기상변수들의 월별 분포가 수자원의 관리를 위해서는 중요하다는 판단 하에 월별로 분위사상법을 적용하였다(Cho, 2013).

### 2.4 CMIP5 MME 자료 처리 흐름도

동일한 지역에 대하여 다양한 기후변화 시나리오 자료 처리 방법의 적용으로 결과가 상이한 경우가 발생하고 있으며, 이는 정책결정을 위한 시나리오 자료의 적용 시 문제점으로 작용하고 있다. 따라서 표준화된 기후변화 시나리오 자료처리 방법의 개발이 필요하며 더불어 다양한 GCMs결과를 활용한 기후변화 시나리오 자료의 불확실성을 언급해 줄 필요성이 있다. 하지만 여러 기후응용분야 연구자들의 경우 익숙지 않은 기후자료 포맷과 방대한 자료의 양으로 인하여 수자원 분야를 포함한 여러 응용분야 연구자들이 어려움을 겪고 있다. 본 연구에서는 『불확실성을 고려한 농업용 저수지의 기후변화 영향 평가 연구(Cho, 2013, APEC Climate Center Annual Report 2013-05)』를 통하여 개발된 APEC기후센터의 한반도 영역에 대한 CMIP5 기후변화 시나리오 자료 표준화 처리 방법을 적용하였다.

Fig. 1은 CMIP5 GCMs자료와 기상청 12.5 km의 RCM 자료, 그리고 각 지상 관측소 자료로부터 시계열 자료를 추출하고, 각 관측소별 편이보정에 이르는 전체적인 자료 처리 흐름도를 나타내고 있다. 상기 연구에서는 CMIP5 GCMs 자료의 원활한 처리를 위하여 4단계의 자동화 프로그램을 개발하였으며, 각 부 프로그램의 수행절차는 다음과 같다. 1단계: Earth System Grid Federation (ESGF, <http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>)에서 제공하는 모든 CMIP5 GCMs 일 자료를 자동으로 내려 받으며, 2단계: 리눅스 서버를 이용한 NCO (NetCDF Operator) 기능 수행 및 Shell 스크립트를 이용한 자료의 Clipping을 수행한다.

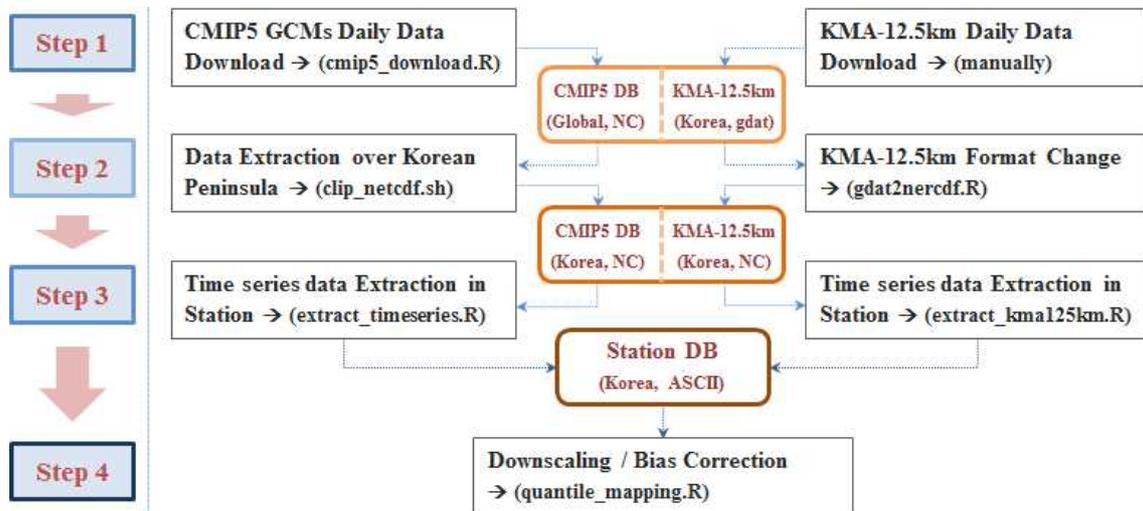


Fig. 1. Climate Change Scenario Data Analysis and Processing Flow Chart using CMIP5 GCMs (Cho, 2013)

이 과정을 통하여 사용자가 입력하는 위경도 좌표를 기준으로 원하는 지역에 해당되는 NetCDF 그리드를 추출함으로써 향후 과정에 필요한 DB의 크기와 처리 속도를 향상시킬 수 있다. 3단계: 지점 별 시나리오 자료 추출 과정에서는 CMIP5 및 KMA-12.5km 자료에 대하여 별도의 스크립트를 활용하여 NetCDF 포맷의 그리드 상에 존재하는 관측점의 좌표를 이용하여 자료로부터 텍스트 포맷의 시계열 자료를 추출하고, 4단계: 지점 별 상세화/편이보정 과정에서는 R의 qmap 패키지를 이용하여 지점 별 관측자료의 정보를 기반으로 시나리오 자료를 보정하게 된다(Cho, 2013).

### 2.5 강수특성인자분석

개별 GCMs에 의한 기후변화 시나리오자료의 관측기간과 미래 기간의 불확실성 분석과 빈도 분석을 실시하기 위하여 강수의 특성을 대표할 수 있는 인자를 선정하는 일은 매우 중요하다. 본 절에서는 강수특성인자 선정을 위해서 『지자체 기후변화 적응 세부시행계획 수립 지원을 위한 기후변화 부문별 취약성 지도, 국립환경과학원, 2012』에서 제시하고 있는 기후노출 대응변수들 중 강수 관련 가장 높은 빈도로 사용되고 있는 변수들을 선정하였다(Table 2). 취약성 평가에 제시되어 있는 강수관련 변수는 크게 1) 연강수량 또는 계절 강수량의 총량, 2) 최대치 개념의 최대강수량, 3) 발생 빈도와 관련되어 특정 크기 이상의 강수가 발생한 날의 횟수, 4) 가뭄과 관련된 연속적인 무강수 일수 등 4개 그룹으로 나누어 볼 수 있다. 본 연구에서는 수자원 관리 측면에서 치수목적과 관련이 깊은 3개 강수 특성인자를 고려하였다. 물관리 치수 목적으로 강수량을 평가할 수 있는 6~9월 강수량지수와, 극한강

수에서 재난 및 물관리 치수 분야를 평가할 수 있는 일최대강수량을 선정하였으며, 추가적으로 강우빈도 개념의 중호우 사상 발생을 평가할 수 있는 일강수량이 80mm 이상인 날의 횟수를 선정하여 분석하였다. 다음 Table 2는 환경부 산하 국립환경과학원의 지자체 기후변화 적응 세부시행계획 수립 지원을 위한 취약성평가 항목 중 강수관련 대응변수 목록과 본 연구에서 채택한 대응변수를 나타내었다.

### 3. 한반도 근 미래 극치강수 특성인자 전망

본 연구에서는 CMIP5 기후변화 시나리오 하의 한반도 근 미래 극치강수 전망을 위하여 수자원 관리 치수목적으로 3개의 특성인자(6~9월 강수, 일 최대 강수량, 일강수량이 80mm 이상인 날의 횟수)를 선정하였다. Figs. 2~4의 Box-plot은 기후자료의 편이보정을 수행한 결과이며, 파란색 실선은 관측 자료로부터 계산된 값으로서 동일한 과거기간 동안에 모형별로 계산된 값들과의 비교를 위해 제시되었고, 붉은색 실선은 과거기간 동안의 다중모형앙상블 값으로서 RCP4.5 및 8.5 미래기간 동안의 증감을 비교할 목적으로 제시되었다. 결과를 분석하는데 있어서 두 가지 관점에서 살펴보는 것이 필요하다. 우선 상자수염도(Box-Whisker plots)의 중앙값(median)을 비교하는 것은 대상 기간(30년)의 자료의 평균적인 변화 특성을 살펴보기 위해서이며, 상자수염도의 최댓값의 변화는 특정 연도에 발생할 수 있는 극치값의 가능성 차원에서 중요한 의미를 갖는다. 모든 그래프들은 개별 모형별로 대상 권역 내에 존재하는 관측지점별로 특성인자를 계산한 후 유역 평균을 계산하여 도출된

Table 2. Rainfall Relevant Variables List for support Local Governments Climate Change Adaptation Detailed Implementation Plan Related to vulnerability Assessment (National Institute of Environmental Research, 2012)

Division	Weather Exposure Representative Variables	Vulnerability Fields
Rainfall	June to September Rainfall (mm)	Water Management (Flood Control)
Extreme Rainfall	Daily Maximum Rainfall (mm)	Health (Floods, Typhoons, Insects and Rodents, Waterborne Diseases Mediated), Disasters (Infrastructure for Flooding), Water Management (Flood Control, Water Quality and Aquatic Ecosystems), Forest (Landslide)
Rainfall Frequency	Number of Days over 80 mm Daily Rainfall (Frequency)	Health (Floods, Typhoons, Insects and Rodents, Waterborne Diseases Mediated), Disasters (Infrastructure for Flooding), Forest (Landslide), Water Management (Flood Control, Water Quality and Aquatic Ecosystems), Ecosystem (National Park), Ocean / Fisheries (Aquaculture), Agriculture (Agricultural Soil Erosion)

결과다. 따라서 특정 관측지점에서만 발생한 극치값의 경우 유역평균 과정에서 상쇄될 수 있기 때문에 그래프에서 보여지는 최댓값의 경우는 유역 전체에서 전반적으로 발생할 수 있는 값들로 해석하는 것이 타당할 것이다.

### 3.1 여름철(6~9월) 강수량 근 미래 전망

여름철(6~9월) 강수량의 근 미래 전망은 Fig. 2에 제시되어 있다. 우선 과거 관측기간 동안의 평균치(Obs.)와

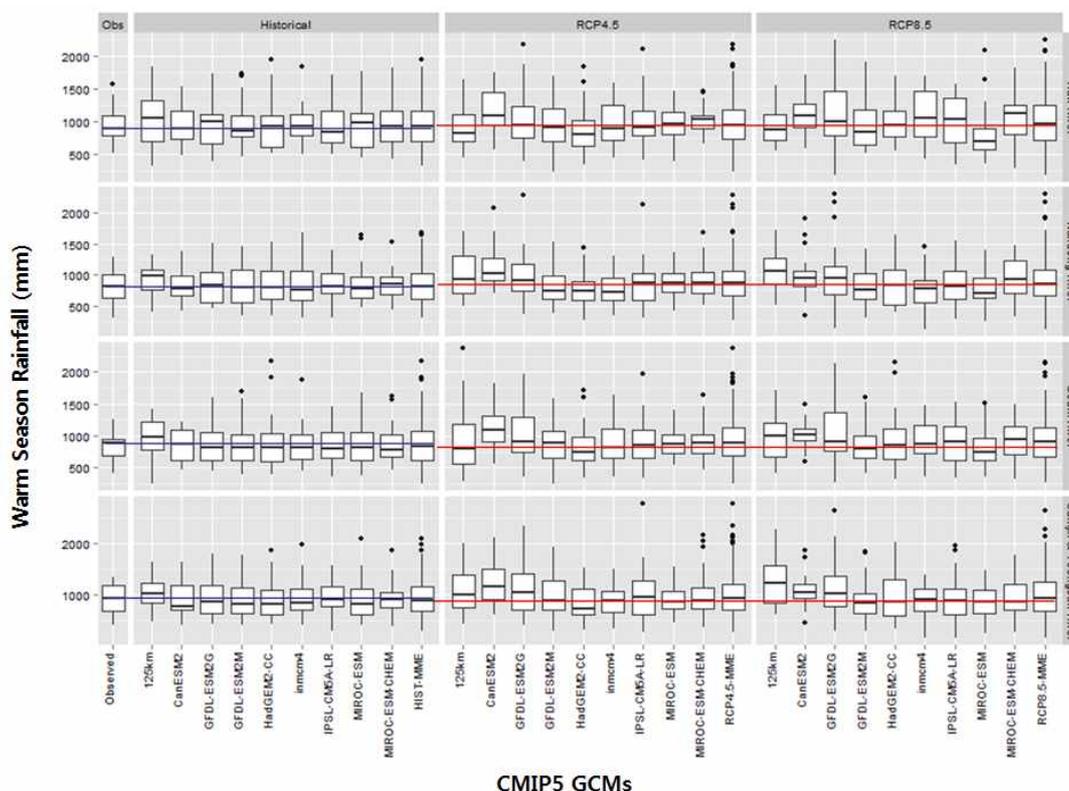


Fig. 2. The Variability of Warm Season (June to September) Rainfall over the 4-Major River Basin during Past (1976–2005) and Future (2011–2040) Periods

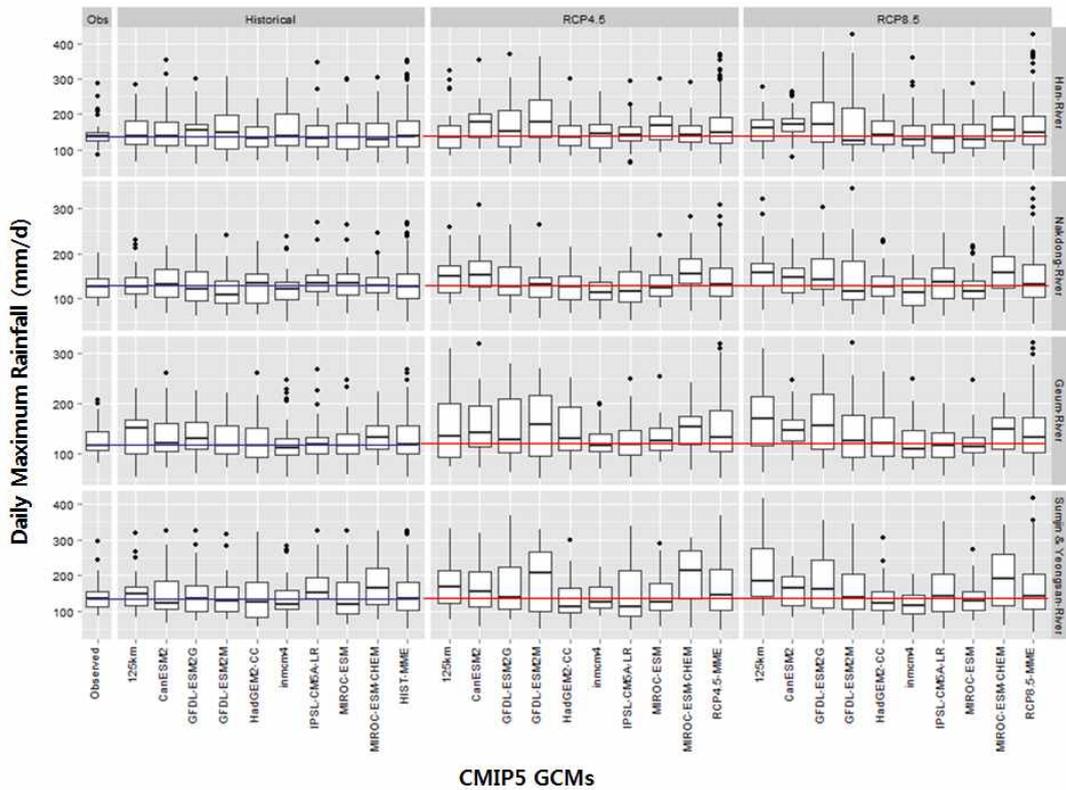


Fig. 3. Same as Fig. 2. Except the Variability of Daily Maximum Rainfall

동일기간의 다중모델 앙상블 평균(HIST-MME)의 비교 결과, 4개 유역에서 모두 근접한 결과를 보였다. 다만 기상청 12.5km 자료의 경우 4개 유역에서 일관되게 관측 평균과 비교하여 크게 나타내는 경향을 보임을 확인하였다. 또한 과거기간에 대하여 여름철 강수량 최댓값의 범위를 살펴보면 대부분의 모형들이 4개 유역에서 과거 관측의 최댓값보다 큰 값을 보이고 있어 장기간 평균은 동일하더라도 CMIP5 모형들이 연간 6~9월 강수량 변동성을 크게 모의하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 관측기간에 대하여 본 연구에서 제시한 CMIP5 일자료의 비모수적 분위사상법의 적용이 필요함을 확인하였다.

또한 과거기간(1971~2005)과 근 미래기간(2011~2040)의 비교에 있어서도 과거기간 동안의 다중모델앙상블(HIST-MME)과 미래기간 RCP4.5 및 8.5 시나리오 조건 하에서 다중 모델 평균(RCP4.5-MME, RCP8.5-MME) 값은 금강 및 섬진-영산강 유역에서 소폭으로 증가하는 경향을 나타내고 있으나 관측기간과 거의 동일한 것으로 나타났다. 하지만 6~9월 강수량의 연간 변동성은 과거기간에 비하여 근 미래기간 동안에 뚜렷이 증가하는 경향이 나타나고 있음을 확인하였으며, 특히 IPSL-CM5A-LR은 RCP4.5에서 GFDL-ESM2G은 8.5에서 각각 증가하는 경

향이 있음을 확인하였다.

### 3.2 일 최대 강수량 근 미래 전망

모형별 유역평균 일최대강수량의 과거기간 및 RCP4.5와 8.5 시나리오의 미래기간에 대한 분석 결과는 Fig. 3에 제시하였다. 일최대강수량은 취약성 분석에 있어서 홍수, 태풍, 수인성 매개 질환에 의한 건강부담, 홍수에 대한 기반시설과 관련된 재난/재해 부문, 치수와 관련된 물관리 부문, 산사태와 관련된 산림부문 등에 사용되는 대응변수이다. 과거기간 재현성과 관련하여서는 4개 모든 권역에서 관측 평균(Obs.)이 동일기간에 대한 다중모델평균(HIST-MME)과 비슷한 값을 보였으나 최댓값과 관련해서는 대부분의 개별 모형에서 관측 최댓값보다 크게 증가하는 경향을 보였다.

과거기간과 미래기간을 비교하면 RCP4.5와 8.5 시나리오의 다중모델평균(RCP4.5-MME 및 RCP8.5-MME)의 경우 낙동강 권역을 제외한 3개 권역에서 과거기간 다중모델평균(HIST-MME)과 비교하여 소폭으로 증가하는 경향을 보였다. HIST-MME와 비교하여 3~4개 권역에서 평균값의 증가를 보인 모형들은 RCP4.5 시나리오의 경우 KMA-12.5km, CanESM2, GFDL-ESM2M, MIROC-ESM-CHEM

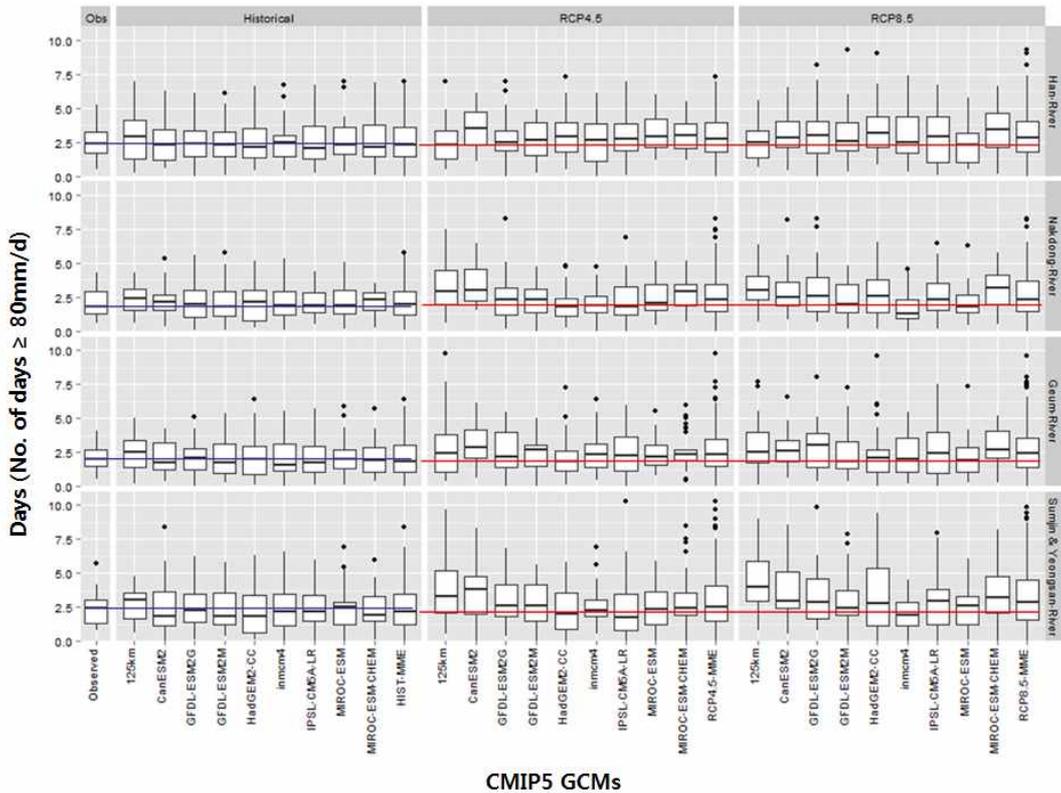


Fig. 4. Same as Fig. 2. Except the Number of Days over 80 mm/d

모형들이, RCP8.5 시나리오의 경우 4.5 시나리오의 KMA-125km, CanESM2 모형에 더하여 GFDL-ESM2G, MIROC-ESM-CHEM 모형들이 포함되어 있다. 최댓값의 경우도 과거기간과 비교하여 미래기간 동안에 증가하는 경향을 보였는데, GFDL-ESM2M 모형이 RCP8.5 시나리오에서 4개 권역에서 모두 뚜렷한 증가 경향을 보였다.

### 3.3 80 mm/d 이상인 날의 횟수 큰 미래 전망

건강, 재난/재해, 산림, 물관리, 생태계, 해양/수산, 및 농업 등 7개 분야의 취약성 분석에 가장 빈번하게 사용되는 일강수량이 80 mm 이상인 날의 횟수에 대한 분석결과는 Fig. 4와 같다. 과거기간에 대하여 관측 평균(Obs) 및 다중모형 평균(HIST-MME)과의 비교를 통한 재현성 측면에서 살펴보면 4개 권역에서 서로 비슷한 값을 보였으나, 최대치의 경우는 대부분의 개별 모형에서 증가하는 경향을 보여 CMIP5 자료가 관측과 비교하여 연간 변동성을 크게 모의하고 있는 것으로 나타났다. 특히 기상청의 KMA-125km의 경우는 과거기간 동안에 4개 권역에서 관측 평균과 비교하여 모두 크게 나타내는 경향을 보였다.

과거기간과 미래기간의 비교에서는 모든 권역에서 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에 의한 다중모형평균(RCP4.5-MME,

RCP8.5-MME)이 과거기간 다중모형 평균(HIST-MME)과 비교하여 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였다. 최댓값의 변화는 RCP4.5 시나리오의 경우 KMA-125 km 모형이 모든 권역에서 크게 증가하는 경향을 보인 반면에 RCP8.5 시나리오의 경우에는 KMA-125 km을 포함하여 GFDL-ESM2G, HadGEM2-CC, IPSL-CM5A-LR 등 많은 모형들의 최댓값 증가 경향을 보여 주었다.

앞서 살펴본 3개 특성인자 (6~9월 강수량, 일최대강수량, 일강수량이 80 mm 이상인 날의 횟수)는 물관리의 치수와 관련된 대응 변수들이다. 분위사상법을 통해 편의보정/상세화된 값들은 관측값과 비교하여 3개 특성인자 모두 전체적으로 연간 변동성을 크게 모의하고 있는 특성을 보였다. 또한 가까운 미래기간(2011~2040년) 전망은 과거기간의 다중모형평균과 비교하여 여름철 강수량, 최대강수량, 및 호우의 발생 빈도 측면에서 모두 소폭으로 증가하는 경향을 보였다. 소폭으로 증가하는 것은 CMIP5의 34개 모형의 월자료를 이용한 RCP 4.5 및 8.5 시나리오별 한국의 연강수량 전망에서 2040년까지의 강수량 변화가 4% 미만인 점을 고려할 때 보다 많은 모형들의 일자료를 고려하더라도 비슷한 경향을 보일 것으로 판단된다. 앞서 살펴본 강수특성인자들의 분석결과를 종합해 보면, CMIP5 일

자료를 기반으로 비모수적 분위사상법을 이용하여 편의 보정/상세화된 기후변화 시나리오 자료의 경우 홍수와 관련된 강수특성들은 관측과 비교하여 연간 변동성을 크게 모의하는 경향이 있고, 미래기간에 대하여도 강수량, 최대 강수량, 80 mm/d 이상인 날의 횟수 모두 증가하는 경향을 보였다. 이는 향후 기후변화에 따른 치수와 관련된 물관리에 있어서 과거 및 현재 상황과 비교하여 보다 어려운 상황으로 변화되어 가는 것으로서 적응방안의 수립 및 적용을 위한 의사결정에 있어서 보다 과학적인 분석 및 불확실성 관련 정보가 함께 제시되는 것이 필요할 것이다.

#### 4. 한반도 극치강수 빈도 분석 결과

수문변량(hydrologic variables)은 무작위하게 발생하는 특성을 가지고 있으므로 확률통계학의 접근원리로 수문자료 분석을 실시하여야 한다(Rao and Hamed, 2000). 수문자료의 확률통계학적 접근 원리에 의한 수문자료의 분석은 재현기간(return period)과 지속기간(duration)에 해당하는 강수량 또는 강수강도의 형태로 기술되어질 수 있다. 이러한 확률강수는 재현기간에 따른 지속기간별 발생확률 값으로 표현되며, 관측되는 자료의 기간 증가와 극대치 수문 사상 발생에 따른 Quantile 값이 많은 영향을 받을 수 있다. 따라서 다양한 GCMs 모형에 의해 생산된 미래 기후변화 시나리오로 부터 분석 자료기간의 확충에 의

한 극치 수문사상의 빈도분석의 가능성을 의미하며, 이는 미래 기후변화에 따른 수공구조물 설계에 활용될 수 있다.

본 연구에서는 CMIP5 GCMs 일 강수량 극대치 계열에 대하여 매개변수적 강우빈도해석을 위하여 일반적으로 매개변수적 강우빈도해석은 모멘트법(Method of Moments), 최우도법(Method of Maximum Likelihood) 및 확률가중 모멘트법(Methods of Probability Weighted Moments)으로 매개변수 추정을 실시하였으며, 총 13개 확률 분포형을 적용하여 KS-검정,  $\chi^2$ 검정 등을 통한 적합도 검정을 수행하였다. 또한 분포형별로 실제 강수 자료와의 적합성을 판단하기 위해  $\chi^2$ 검정, K-S검정, CVM검정 및 PPCC검정을 실시하였다. CMIP5 GCMs 모형별로 생산된 기후변화 시나리오 자료의 재현기간별 확률강수량 산정을 위한 최적 분포형 선정은, 최근 지점빈도 해석 시 채택 분포형으로 가장 많이 사용하고 있으며, 우리나라의 강수관측 자료의 적합성 검정(goodness of fit test)결과 통과율이 가장 높은 Gumbel 분포형을 선정하였다.

##### 4.1 일 최대 강수 시계열 분석 결과

Fig. 5는 한반도의 4대강 권역을 대상으로 CMIP5 9개 GCMs 모형별 관측기간(Historic Period, 1976~2005년)과 근 미래기간(2011~2040년)의 일 강수량 최대치 시계열자료를 추출하여 각각의 결과를 도시하였다. RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 하에서 모형별 일 강수 연최대치 계열

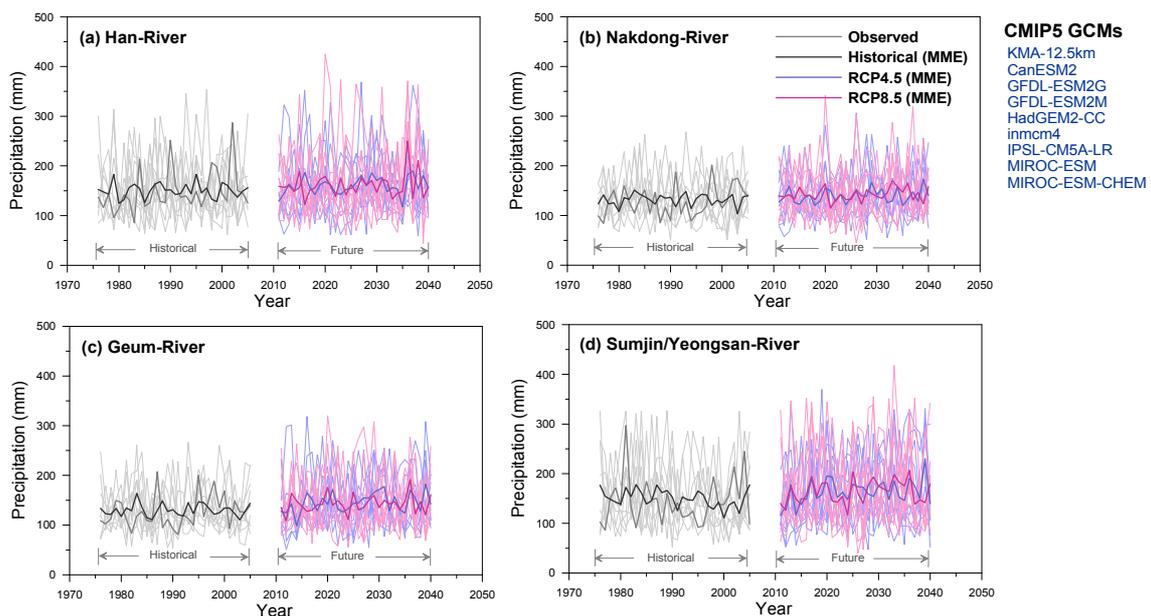


Fig. 5. Daily Maximum Rainfall Time Series Data Extraction Results during Observed (Historic) and Scenario (Future) Periods. (a) to (d) Mean the Han River, the Nakdong River, the Geum River, and the Sumjin and the Yeongsan River, Respectively

이 4대강 권역 모두 관측기간에 비하여 증가하는 경향이 있음을 확인할 수 있으며, 특히 다중모델앙상을 평균치를 비교한 결과 관측기간에 비하여 가까운 미래기간에서의 연 최대치 강수량 시계열은 한강권역의 경우 RCP4.5에서는 6.0%, RCP8.5에서는 6.8% 증가하였고, 낙동강권역의 경우 RCP4.5에서는 5.6%, RCP8.5에서는 8.0% 증가하였다. 또한 금강권역의 경우 RCP4.5에서는 11.7%, RCP8.5에서는 9.8% 증가하였고, 섬진/영산강권역의 경우 RCP4.5에

서는 8.8%, RCP8.5에서는 8.7% 증가하는 것으로 분석되었다. 각각의 모형별 연최대치 계열의 편차는 발생하고 있으나 대체로 관측기간 보다 근 미래 기간에 불확실성이 커지는 것으로 나타났으며, 4대강 권역 중 섬진/영산강 권역에서의 편차가 가장 큰 것으로 분석되었다.

#### 4.2 큰 미래 50년 빈도 강수분석 결과

Fig. 6은 상자수염도를 통하여 CMIP5 GCMs 모형별

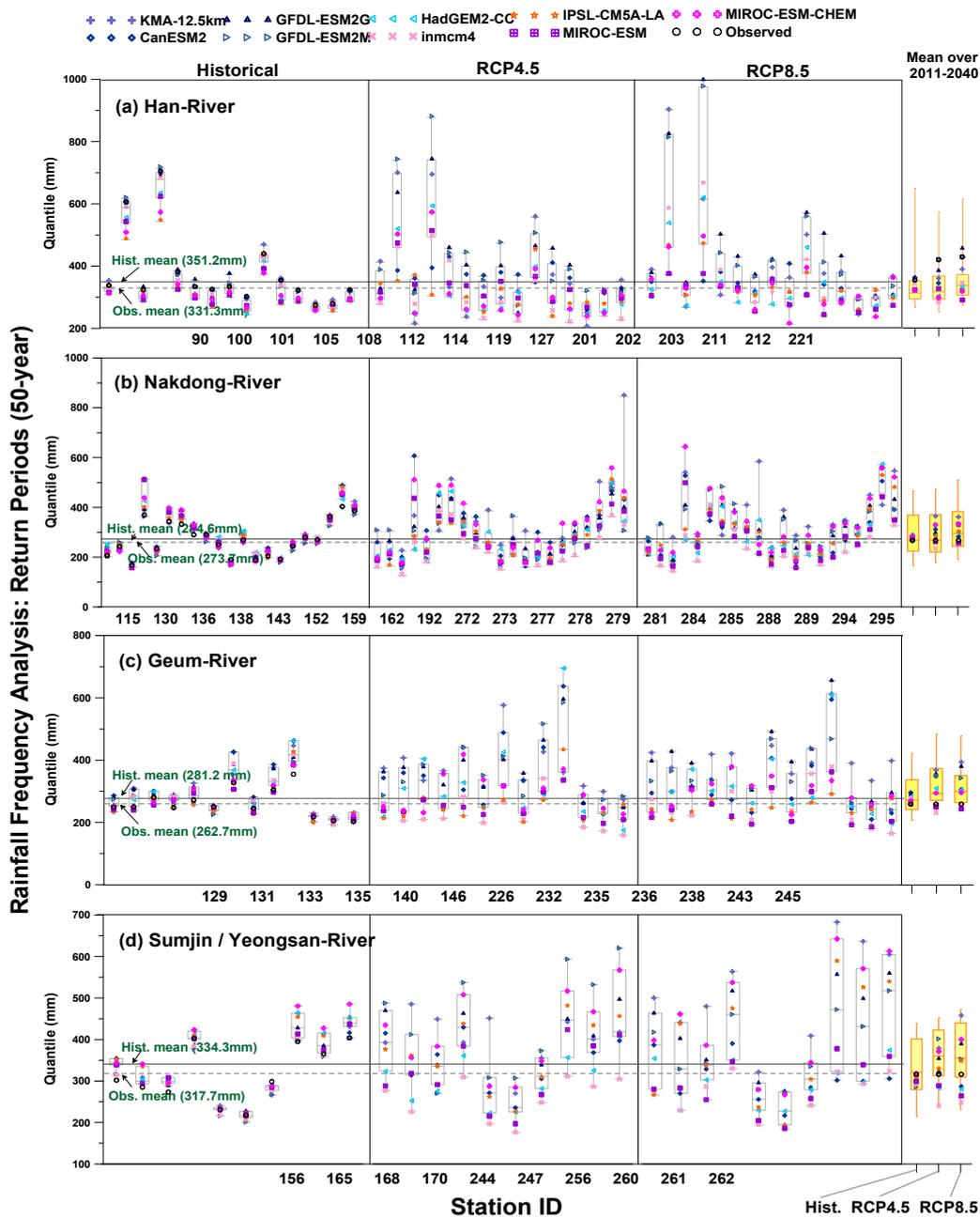


Fig. 6. Rainfall Frequency Analysis Results for the 50-year Return Periods over the 4-Major River Basin using CMIP5 GCMs during Historical, RCP4.5, and RCP8.5 Scenarios. (a) to (d) Mean the Han River, the Nakdong River, the Geum River, and the Sumjin and the Yeongsan River, Respectively

관측기간과 근 미래기간에 대하여 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 따른 4대강 유역의 지점별 재현기간 50년에 대한 권역별 빈도분석 결과를 정리하여 나타낸 결과이다.

한강권역 15개 기상관측지점의 9개 모형 관측기간 평균 50년 빈도 확률강수량은 351.2 mm로 분석되었고, 미래 RCP4.5 시나리오에서는 345.2 mm (-1.7%)로 다소 감소하였으나 RCP8.5 시나리오에서는 366.2 mm (+4.3%)로 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 낙동강권역 21개 기상관측지점의 9개 모형 관측기간 평균 50년 빈도 확률강수량은 287.7 mm로 분석되었고, 미래 RCP4.5 시나리오에서는 299.4 mm (+4.0%)로 소폭 증가하였으며 RCP8.5 시나리오에서는 311.8 mm (+8.4%)로 증가하였다. 다음으로 금강권역 13개 기상관측지점의 9개 모형 관측기간 평균 50년 빈도 확률강수량은 281.6 mm로 분석되었고, 미래 RCP4.5 시나리오에서는 310.8 mm (+10.3%)로 증가하였으며 RCP8.5 시나리오에서는 311.2 mm (+10.5%)로 증가하였다. 마지막으로 섬진/영산강권역 10개 기상관측지점의 9개 모형 관측기간 평균 50년 빈도 확률강수량은 304.9 mm로 분석되었고, 미래 RCP4.5 시나리오에서는 332.4 mm (+9.0%)로 증가하였으며 RCP8.5 시나리오에서는 338.0 mm (+10.9%)로 증가하는 것으로 분석되었다.

모형별 결과를 살펴보면, 관측기간간 동안의 50년 빈도에서 최대치를 모의한 모형은(한강: CanESM2, 낙동강: GFDL-ESM2G, 금강: CanESM2, 섬진/영산강: MIROC-ESM-CHEM)으로 분석되었으며, 모형별 편차는 18.2 mm ~ 41.4 mm로 분석되었다. 또한 RCP4.5 시나리오 기간 동안의 50년 빈도에서 최대치를 모의한 모형은(한강: GFDL-ESM2G, 낙동강: KMA-12.5 km, 금강: KMA-12.5 km, 섬진/영산강: GFDL-ESM2G)으로 분석되었으며, 모형별 편차는 130.3~161.5 mm로 분석되었다. 다음으로 RCP8.5 시나리오 기간 동안의 50년 빈도에서 최대치를 모의한 모형은(한강: GFDL-ESM2G, 낙동강: KMA-12.5 km, 금강: KMA-12.5 km, 섬진/영산강: KMA-12.5 km)으로 분석되었으며, 모형별 편차는 108.3~210.1 mm로 분석되었다.

기후변화에 따른 강우빈도분석 결과를 종합해 보면, 관측기간에 비하여 가까운 미래기간의 50년 빈도 확률강수량은 RCP4.5 시나리오에서 -1.7~10.4%, RCP8.5 시나리오에서 4.2~10.9% 변화될 가능성이 있음을 확인하였으며, 향후 2040년까지 한반도의 50년 빈도 확률강수량 값이 최대 10%정도 증가할 수 있음을 시사한다. 또한 관측기간 동안의 GCMs별 편차가 작으나, RCP4.5 시나리오 기간과 RCP8.5 시나리오 기간에는 편차가 크게 발생하여 빈도해석 결과의 불확실성이 큼을 확인할 수 있었다. 주로

KMA-12.5 km와 GFDL-ESM2G, CanESM2 모형들이 상대적으로 한반도 영역에서 강수를 크게 모의하는 경향이 있는 것으로 분석되었다.

### 4.3 근 미래 100년 빈도 강수분석 결과

Fig. 7은 상자수염도를 통하여 CMIP5 GCMs 모형별 관측기간과 근 미래기간에 대하여 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 따른 4대강 유역의 지점별 재현기간 100년에 대한 권역별 빈도분석 결과를 정리하여 나타낸 결과이다.

한강권역 15개 기상관측지점의 9개 모형 관측기간 평균 100년 빈도 확률강수량은 393.3 mm로 분석되었고, RCP4.5 시나리오에서는 384.1 mm (-2.3%)로 다소 감소하였으나 RCP8.5 시나리오에서는 409.3 mm (+4.1%)로 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 낙동강권역 21개 기상관측지점의 9개 모형 관측기간 평균 100년 빈도 확률강수량은 316.6 mm로 분석되었고, RCP4.5 시나리오에서는 322.3 mm (+1.8%)로 소폭 증가하였으며 RCP8.5 시나리오에서는 340.8 mm (+7.6%)로 증가하는 것으로 분석되었다. 다음으로 금강권역 13개 기상관측지점의 9개 모형 관측기간 평균 100년 빈도 확률강수량은 312.8 mm로 분석되었고, RCP4.5 시나리오에서는 346.6 mm (+10.8%)로 증가하였으며 RCP8.5 시나리오에서는 346.4 mm (+10.7%)로 증가하는 것으로 분석되었다. 마지막으로 섬진/영산강권역 10개 기상관측지점의 9개 모형 관측기간 평균 100년 빈도 확률강수량은 372.9 mm로 분석되었고, RCP4.5 시나리오에서는 404.1 mm (+8.4%)로 증가하였으며 RCP8.5 시나리오에서는 409.7 mm (+9.9%)로 증가하는 것으로 분석되었다.

모형별 결과를 살펴보면, 관측기간간 동안의 100년 빈도에서 최대치를 모의한 모형은(한강: KMA-12.5 km, 낙동강: CanESM2, 금강: CanESM2, 섬진/영산강: MIROC-ESM-CHEM)으로 분석되었으며, 모형별 편차는 24.7~47.1 mm로 분석되었다. 또한 RCP4.5 시나리오 기간 동안의 100년 빈도에서 최대치를 모의한 모형은(한강: GFDL-ESM2G, 낙동강: KMA-12.5 km, 금강: KMA-12.5 km, 섬진/영산강: GFDL-ESM2G)으로 분석되었으며, 모형별 편차는 123.0~160.1 mm로 분석되었다. 마지막으로 RCP8.5 시나리오 기간 동안의 100년 빈도에서 최대치를 모의한 모형은(한강: GFDL-ESM2G, 낙동강: KMA-12.5 km, 금강: KMA-12.5 km, 섬진/영산강: KMA-12.5 km)으로 분석되었으며, 모형별 편차는 123.4~252.3 mm로 분석되었다.

기후변화에 따른 강우빈도분석 결과를 종합해 보면, 100년 빈도 확률강수량은 관측기간에 비하여 RCP4.5 시나리오에서 -2.3%~10.8%, RCP8.5 시나리오에서 54.1%

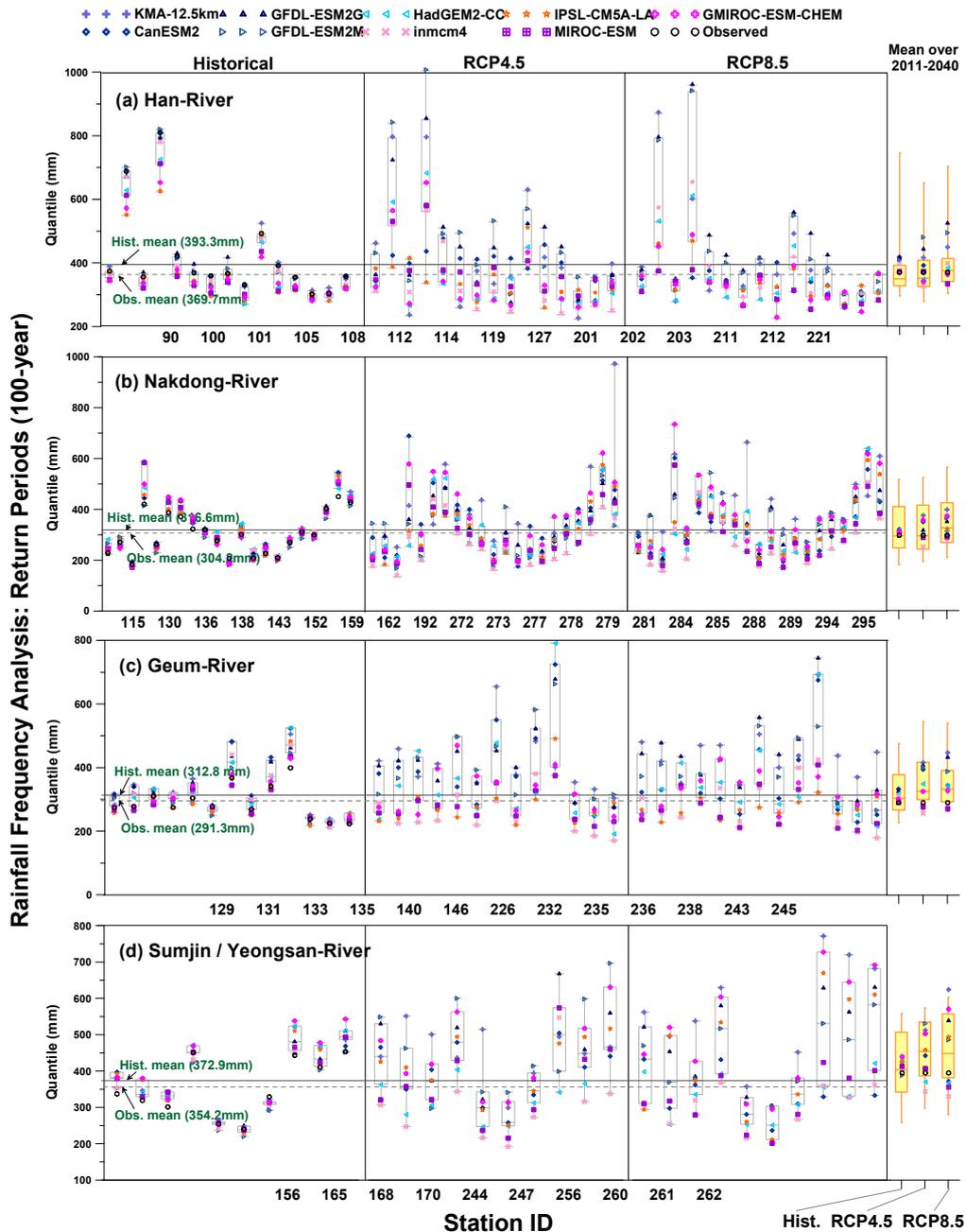


Fig. 7. Same as Fig. 6. Except the 100-year Return Periods

~10.7%까지 변화 가능성을 보임을 확인하였으며, 향후 가까운 미래 2040년까지 한반도의 100년 빈도 확률강수량 값은 최대 10%정도 증가할 것으로 분석되었다. 또한 50년 빈도결과와 마찬가지로, 관측기간 동안의 GCMs별 편차가 작으나, RCP4.5 시나리오 기간과 RCP8.5 시나리오 기간에는 편차가 크게 발생하여 결과의 불확실성이 큼을 확인할 수 있었으며, 주로 KMA-12.5km와 GFDL-ESM2G, CanESM2 모형들이 상대적으로 한반도 영역에서 강수를 크게 모의하는 경향이 있는 것으로 분석되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 CMIP5에 참여한 다양한 GCMs의 적용으로 기후변화 시나리오 자체가 가지고 있는 미래 전망의 불확실한 요소를 감안한 한반도 5대강 유역을 대상으로 수자원분야 근 미래(2011~2040년) 극치 강수전망과 불확실성 분석, 그리고 빈도분석을 수행하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) CMIP5 기후자료를 유역규모에서 사용할 수 있는 비

모수적 분위사상법을 이용하여 편의보정 및 상세화 기법을 적용하였으며, 생산된 다중 모형의 기후정보를 활용한 국내 수자원 관련 근 미래 극치 수문 전망 분석을 수행하였다. 또한 기후 자료의 과거 재현성 확보를 통한, 다중 모델 앙상블 자료를 사용하는데 있어서 미래 전망 기간에 대한 불확실성과 관련된 정보를 제공하는데 기여 하였다.

- 2) CMIP5 9개 GCMs의 한반도 근 미래 극치 수문 전망 분석결과, 관측기간(Historic Periods: 1971-2005)에 비하여 미래기간(011-2040)에 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 모두 홍수 관련 강수특성인자의 연간 변동성과 불확실성이 커지는 것으로 분석되었으며, 6~9월 강수량, 일최대강수량 80 mm/d 이상인 날의 횟수 모두 증가하는 경향을 보였다.
- 3) 강수 빈도분석 결과, 50년 빈도 강수량은 RCP4.5에서 -1.7~10.4%, RCP8.5에서 4.2~10.9%변화될 가능성이 있음을 확인하였으며, 100년 빈도 확률강수량은 RCP4.5에서 -2.3~10.8%, RCP8.5에서 4.1~10.7% 증가특성을 보임을 확인하였다. CMIP5 GCMs에 의한 시나리오별 근 미래 강수 빈도 분석 결과, 향후 2040년까지 한반도의 50년과 100년 빈도 확률강수량 값이 최대 10%정도 증가할 수 있을 것으로 분석되어 이에 대한 대응책 마련이 필요할 것으로 사료된다.
- 4) RCP4.5, RCP8.5 시나리오 기간에는 GCM별 편차가 크게 발생하여 빈도해석 결과의 불확실성이 커짐을 확인할 수 있으며, 주로 KMA-12.5km와 GFDL-ESM2G, CanESM2 모형의 결과가 평균치에 비하여 강수를 크게 모의하는 경향이 있는 것으로 분석된다.

본 연구의 결과는 다양한 GCMs의 다중모델 앙상블 기후변화 시나리오 자료의 불확실성을 감안한 근 미래 극치 수문 사상의 발생 빈도와 강도의 정량적인 분석으로, 향후 10년 단위의 국가수자원 장기종합개발계획과 기후변화에 따른 수공구조물 설계, 기후변화 대응 및 적응정책 마련을 위한 기술적 자료로 활용될 수 있다. 또한 기후변화 및 방재관련 최종수요자와 정책입안자의 정책 결정 및 의사결정 지원을 위한 자료로 활용이 가능할 것이다.

## 감사의 글

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ 01168601)의 지원에 의해 이루어진 것입니다. 이에 감사드립니다.

## References

- Bae, D.H., Jung, I.W., Lee, B.J., and Lee, M.H. (2011). "Future Korean Water Resources Projection Considering Uncertainty of GCMs and Hydrological Models." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 5, pp. 389-406 (in Korean).
- Cho, J.P. (2013). Assessment of Climate Change Impacts on Agricultural Reservoirs in Consideration of Uncertainty. APEC Climate Center Annual Report 2013-05 (in Korean).
- Easterling, D.R., Meehl, G.A., Parmesan, C., Changnon, S.A., Karl, T.R., and Mearns, L.O. (2000). Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *science*, Vol. 289, No. 5487, pp. 2068-2074.
- ESGF (Earth System Grid Federation) (2013). Available at: <http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>, Accessed: Dec. 2013.
- Gudmundsson, L., Bremnes, J.B. Haugen, J.E., and Skaugen, T.E. (2012). "Technical Note: Downscaling RCM Precipitation to the Station Scale Using Quantile Mapping—a Comparison of Methods." *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Vol. 9, pp. 6185-6201.
- Hulme, M., Osborn, T.J., and Johns, T.C. (1998). Precipitation sensitivity to global warming: Comparison of observations with HadCM2 simulations. *Geophysical research letters*, Vol. 25, No. 17, pp. 3379-3382.
- Hwang, S.W. (2014). "Assessing the Performance of CMIP5 GCMs for Various Climate Elements and Indicators over the Southeast USA." *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 47, No. 11, pp. 1039-1050. (in Korean).
- IPCC (2007). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX)—Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 1-594.
- IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>).
- Jeung, S.J., Sung, J.H., and Kim, B.S. (2014). "Change Projection of Extreme Indices using RCP Climate

- Change Scenario.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 11, pp. 1089–1101. (in Korean).
- Kay, A.L., Jones, R.G., and Reynard, N.S. (2006). “RCM rainfall for UK flood frequency estimation. II. Climate change results.” *Journal of Hydrology*, Vol. 318, pp. 163–172.
- Kim, O.Y., Wang, B., and Sin, S.H. (2013). “How do weather characteristics change in a warming climate?” *Climate Dynamics*, DOI 10.1007/s00382-013-1795-8.
- Kingston, D.G., Todd, M.D., Taylor, R.G., Thompson, J.R., and Arnell, N.W. (2009). “Uncertainty in the estimation of potential evapotranspiration under climate change.” *Geophysical Research Letter*, Vol. 36, L20403, doi: 10.1029/2009GL040267.
- KMA (Korean Meteorological Administration) (2012). “Korea Climate Change Prediction Report.” Korean Meteorological Administration, pp. 1–153. (in Korean).
- KMA (Korean Meteorological Administration) (2014). Available at: <http://www.kma.go.kr/>, Accessed: Jan., 2014.
- Merz, B., Aerts, J., Ambjerg-Nielsen, K., Baldi, M., Becker, A., Bichet, A., Blöschl, G., Bouwer, L.M., Brauer, A., Cioffi, F., Delgado, J.M., Gocht, M., Guzzetti, F., Harrigan, S., Hirschboeck, K., Kilsby, C., Kron, W., Kwon, H.H., Lall, U., Merz, R., Nissen, K., Salvati, P., Swierczynski, T., Ulbrich, U., Viglione, A., Ward, P.J., Weiler, M., Wilhelm, B., and Niedl, M. (2014). “Floods and climate: emerging perspectives for flood risk assessment and management.” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 14, pp. 1921–1942.
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2012. “Climate change sectoral vulnerability map.” Ministry of Environment, pp. 1–144.
- Park, J.H., Kwon, H.H., and No, S.H. (2011). “Outlook of Discharge for Daecheong and Yongdam Dam Watershed Using A1B Climate Change Scenario Based RCM and SWAT Model.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 12, pp. 929–940. (in Korean).
- Parnesan, C., and Yohe, G. (2003). “A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems.” *Nature*, Vol. 421, pp. 37–42.
- Rao, A.R., and Hamed, K.H. (2000). “Flood Frequency Analysis.” CRC Press.
- Sillmann, J., Kharin, V.V., Zwiers, F.W., Zhang, X., and Bronaugh, D. (2013). “Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections.” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 118, pp. 2473–2493.
- Wilby, R.L., and Dessai, S. (2010). “Robust adaptation to climate change.” *Weather*, Vol. 65, No. 7, pp. 180–185.
- Wood, E.F., Roundy, J.K., Troy, T.J., van Beek, L.P.H., Bierkens, M.F.P., Blyth, E., Roo, A. de, Döll, P., Ek, M., Famiglietti, J., Gochis, D., van de Giesen, N., Houser, P., Jaffé, P.R., Kollet, S., Lehner, B., Lettenmaier, D.P., Peters-Lidard, C., Sivapalan, M., Sheffield, J., Wade, A., and Whitehead, P. (2011). Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth’s terrestrial water, *Water Resour. Res.*, Vol. 47, W05301, doi:10.1029/2010WR010090.
- Yoon, S.K. (2012). “Flood Risk and Vulnerability Analysis in an Urban Stream by Climate Change.” Ph.D. Dissertation of the University of Seoul. (in Korean).
- Yoon, S.K., Cho, J.P., and Moon, Y.I. (2014). “Non-Parametric Low-Flow Frequency Analysis using RCPs Scenarios Data: A Case Study of the Gwangdong Storage Reservoir, Korea.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 4, pp. 1125–1138. (in Korean).

paper number : 15-015

Received : 15 February 2015

Revised : 31 July 2015 / 27 August 2015

Accepted : 27 August 2015