

# 다중 GCM 미래 기후자료를 이용한 경안천 유역의 수자원에 대한 기후변화 영향 평가

김철겸\* · 조재필\*\* · 김현준\*\*\*

Kim, Chul-Gyum\*, Cho, Jaepil\*\*, Kim, Hyeonjun\*\*\*

## Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources in the Gyeongang-cheon Watershed Using Multiple GCMs

### ABSTRACT

This study analyzed the effects of future climate change on water resources in the Gyeongang-cheon watershed of the Han River. Considering the uncertainties of GCM climate data, future data using 16 GCMs and SQM downscaling method are used. And SWAT model was applied to simulate the hydrological changes from the past to the future. The maximum to minimum difference according to GCM for the future period (2010-2099) was about 1,500 mm of annual precipitation, 150 mm of evapotranspiration, 1,380 mm of runoff, and the deviation from the mean was -40 % to +60 % of precipitation,  $\pm 15$  % of evapotranspiration, -60 % to +90 % of runoff, which means that the variability is very high according to GCM. The impacts of climate change over the three future periods showed that precipitation, evapotranspiration, and runoff were expected to increase gradually toward the far future (2070-2099), and would be relatively larger under the RCP 8.5 scenario. On a monthly basis, it was analyzed that precipitation and runoff increased in July to September, while the evapotranspiration decreased in July and August, and increased in September and October. The results of this study are expected to be helpful in understanding the future climate impacts of various GCM data and the uncertainties associated with GCMs.

**Key words** : Han river, Gyeongang-cheon, Climate change, Multiple GCMs, SWAT

### 초록

본 연구에서는 한강수계 경안천 유역을 대상으로 미래 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 분석하였다. 기후모형에 따른 미래 전망자료의 불확실성을 고려하여 총 16개 GCMs에 의한 미래 기후자료와 SQM 상세화기법을 이용하여 경안천 유역을 대상으로 미래 기후자료를 도출하고 유역모형인 SWAT을 적용하여 과거부터 미래의 장기간에 대한 수문학적 변화를 분석하였다. 미래기간에 대해 GCM에 따른 차이를 분석한 결과 연간 강수량은 1,500 mm, 증발산량은 150 mm, 유출량은 1,380 mm, 평균값 대비 강수량은 -40 % ~ +60 %, 증발산량은  $\pm 15$  %, 유출량은 -60 % ~ +90 %로서 GCM에 따른 변동성이 크게 나타났다. 미래기간을 3개 기간으로 구분하여 기간별 기후변화 영향을 분석한 결과, 강수량, 증발산량, 유출량 모두 미래 후반기(2070~2099년)로 갈수록 점차 증가하며, RCP 8.5 시나리오 하에서 상대적으로 더 크게 증가할 것으로 전망되었다. 월별로는 미래 후반기로 갈수록 7~9월을 중심으로 강수량과 유출량이 증가하는 반면, 증발산량은 7월과 8월에 감소하고 9월과 10월에 증가하는 것으로 분석되었다. 본 연구결과는 다양한 GCM 자료에 따른 미래의 기후영향을 이해하고, GCM 기후자료에 따른 미래 기후영향의 불확실성을 판단하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

**검색어** : 한강유역, 경안천, 기후변화, 다중 GCM, SWAT

\* 교신저자 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구위원, 공학박사

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · [cgkim@kict.re.kr](mailto:cgkim@kict.re.kr))

\*\* 정회원 · 유역통합관리연구원 유역관리융합센터 센터장, 공학박사 (Integrated Watershed Management Institute · [jpcho89@gmail.com](mailto:jpcho89@gmail.com))

\*\*\* 종신회원 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구위원, 공학박사

(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · [hjkim@kict.re.kr](mailto:hjkim@kict.re.kr))

Received November 20, 2019/ revised December 30, 2019/ accepted January 7, 2020

## 1. 서론

기후변화에 의한 수자원 영향에 대해서는 국외는 물론 국내에서도 이미 많은 연구가 진행되어 왔으며, 지역별 차이는 있으나 대체로 국내의 경우는 강수량과 기온의 증가, 증발산량의 증가, 유출량의 증가 등이 전망되고 있다. 또한 극한사상의 증가와 계절적 변동성의 증가로 인해 가뭄과 홍수의 발생이 증가할 것으로 전망되기도 한다.

일반적으로 미래 기후변화에 따른 수문학적 영향을 분석하는 과정에는 미래 온실가스 시나리오에 따른 GCM (General Circulation Model)의 선정, 대상유역에 대한 분석을 위해 저해상도 GCM 자료의 공간적인 상세화, 상세화된 기후자료를 입력자료로 활용하는 수문모형의 선정 등 단계별 과정에서 많은 불확실성을 내포하고 있으며, 이 중에서도 GCM에 따른 불확실성이 가장 큰 것으로 알려져 있다(Wilby and Harris, 2006; Kay et al., 2009; Lee, 2014; Kim et al., 2018). Kim et al.(2018)의 연구에서는 충주댐 유역을 대상으로 29개 GCMs과 2개의 상세화 기법(SQM, SDQDM)을 적용하여 GCM과 상세화기법에 따른 불확실성 분석을 통해 미래 기후자료의 시·공간적 재현 과정에서 불확실성이 상대적으로 적은 16개 GCMs과 SQM (Simple Quantile Mapping) (Cho et al., 2018a) 상세화 기법을 선정한 바 있다.

본 연구에서 대상으로 하는 경안천 유역은 한강권역의 팔당호로 유입하는 길이 49.5 km의 중소규모 하천유역으로서, 팔당호 전체 상류 하천 중 팔당호 유입량에 대한 기여도는 2% 이내이지만 (Kim et al., 2014), BOD 오염부하량은 16% 수준의 높은 오염도를 지니고 있어 팔당호 수질 문제에 있어 관심이 높은 지역이다(Cho, 2012). 경안천 유역에 대해 과거 기후변화 영향을 분석한 연구를 보면, Bae et al.(2007)은 SRES A2 시나리오 상황에서 강수량과 유출량은 감소하고 증발산량은 증가하는 것으로 분석한 바 있으며, Ahn et al.(2008)도 A2 시나리오와 B2 시나리오에서 비슷한 전망을 하였다. Ahn et al.(2009)의 연구에서는 3개 시나리오(A2, A1B, B1)와 2개 GCMs (MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM)을 이용하여 미래 기후변화 영향을 분석하였으며, 여름철을 제외한 모든 계절에서 강수량이 증가하는 것으로 전망하였다. Kim et al.(2010)의 연구에서도 A2 시나리오 하에서 강수량과 유출량이 과거에 비해 전반적으로 감소하는 것으로 나타났다. 비교적 최근에 수행된 Woo et al.(2018)의 연구에서도 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에서 HadGEM3-RA 기후자료를 적용한 결과 미래의 유출량이 감소하는 것으로 분석되었다. 이러한 연구들은 대부분 단일 또는 한정된 수의 GCM을 적용하고 있거나 과거의 시나리오인 SRES 자료를 기반으로 미래의 기후변화 영향을 분석하고 있어 다양한 미래의 영향을 분석하고 평가하는데 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 Kim et al.(2018)의 연구결과를 고려하여 16개 GCMs과 SQM 상세화 기법을 통해 도출된 미래 기후자료와 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 유역모형을 이용하여 다양한 GCM 자료에 따른 미래 수문 영향을 분석하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 기후변화 시나리오 적용

기후모델에 따른 미래 전망자료의 불확실성을 고려하여 가능한 많은 기후모델로부터 생산된 다양한 기후변화 시나리오에 따른 영향을 상호 비교·검토하였다. 기존 Kim et al.(2018)의 연구에서는 한강권역 충주댐 유역을 대상으로 29개 GCMs과 2개의 상세화 기법(SQM, SDQDM)을 적용하여 GCM과 상세화기법에 따른 불확실성 분석을 통해 미래 기후자료의 시·공간적 재현 과정에서 불확실성이 상대적으로 적은 16개 GCMs과 SQM 상세화 기법을 선정한 바 있다. 본 연구에서도 상기 연구에서 선정하였던 16개 GCMs과 SQM 상세화 기법을 경안천 유역을 대상으로 적용하였다. SQM 기법은 관측지점 및 기상변수에 대해 독립적으로 상세화를 수행하는 방법으로서 계산이 빠르다는 장점이 있으며, Kim et al.(2018)과 Cho et al.(2018b)의 연구 등을 통해 강수량, 기온 등의 기후변수에 대한 공간 재현성 평가에서 우수성을 확인한 바 있다. 16개 GCMs에 대한 공간해상도, 생산기관, 산출되는 주요 기후인자 등은 Kim et al.(2018)의 논문에 표로 잘 정리되어 있다.

미래 기후영향 분석을 위해 온실가스 시나리오로 적용되고 있는 RCP 시나리오는 타 연구에서도 많이 활용되고 있는 RCP 4.5 (온실가스 저감정책이 상당히 실현된다는 시나리오)와 RCP 8.5 (현재 추세대로 온실가스가 지속 배출된다는 시나리오)에 따른 결과를 적용하였다.

SWAT 모형을 이용한 유출량 모의를 위해 CCSM4, CESM1-BGC 등 총 16개 GCMs에 의한 전망자료(강수량과 최고/최저기온)를 활용하였으며, RCP 4.5와 RCP 8.5에 대해 강수량, 증발산량 및 유출량을 중심으로 미래의 기후변화 영향을 분석하였다.

### 2.2 유역모델링 구축

대상 유역면적은 Fig. 1과 같이 하류부의 경안교 지점을 기준으로 약 262 km<sup>2</sup>로서, SWAT 모형 적용을 위해 유역 내 주요하류점을 기준으로 11개의 소유역으로 구분하였다.

모형의 매개변수 보정을 위해 유역 하류부인 경안교 지점에서의 2003~2008년의 유출량 관측자료를 활용하였으며, 검증자료는 2009~2018년의 최근 10년 자료를 활용하였다. 매개변수 보정은

유출량에 관련된 매개변수(CN2, ALPHA\_BF, GW\_DELAY, GWQMN, ESCO, SLSOIL)를 중심으로 SWAT-CUP의 SUFI2 알고리즘을 적용하여 자동보정하였다.

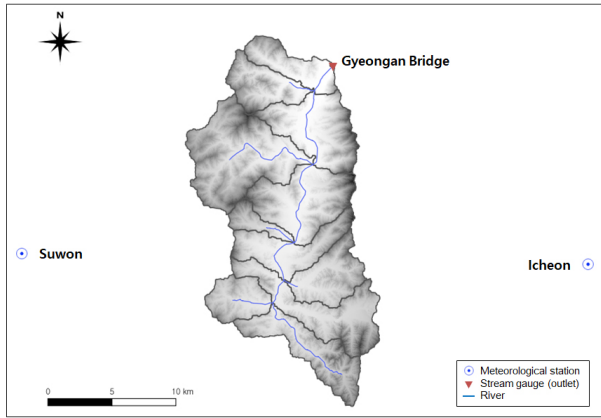


Fig. 1. Study Watershed

Fig. 2는 보정기간과 검증기간에 대해 일 유출량 관측치와 모의치를 비교한 것이고, Fig. 3은 월 유출량에 대한 비교 결과이다. 앞서 기술한대로 SWAT-CUP SUFI2 알고리즘을 활용하여 최적의 결과를 도출한 것으로, 전반적인 경향을 잘 모의하고 있으나 일부 강수량이 많은 여름철에 관측치에 비해 다소 낮은 모의 경향을 나타내었다. Table 1은 각각의 결과에 대한 R<sup>2</sup> (Coefficient of determination), NSE (Nash-Sutcliffe efficiency), RSR (Ratio of RMSE to the standard deviation of the observations), PBIAS (Percent bias) 등의 대표적인 적합성(Goodness of fit) 평가지수를 표로 나타낸 것이다.

Table 2는 Moriasi et al.(2007)이 제시한 모델링 결과의 적합성 판단 기준 중 SWAT 모형에 대한 부분을 정리한 것으로서, 본 연구에서 도출된 보정 및 검증기간에 대한 결과는 NSE와 RSR 기준으로는 Very good, PBIAS 기준으로는 Satisfactory 이상으로 판단된다. 즉, Figs. 2 and 3에 나타난 것처럼 일부 일 자료 및 월 자료에서 편차가 있으나 장기간에 걸쳐 관측치의 경향을 잘

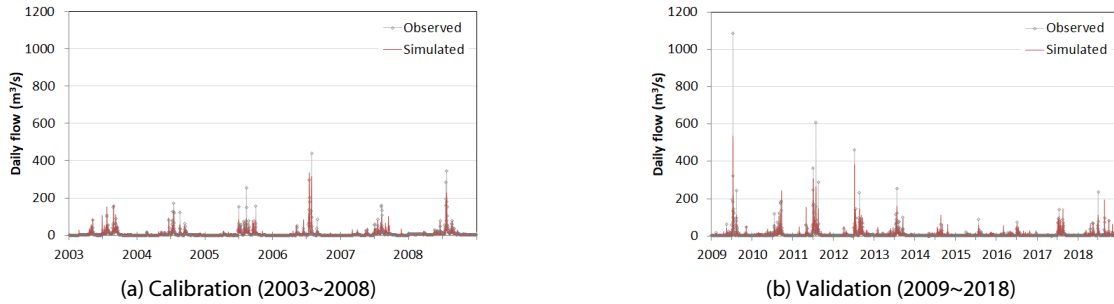


Fig. 2. Calibration and Validation Results for Daily Flow

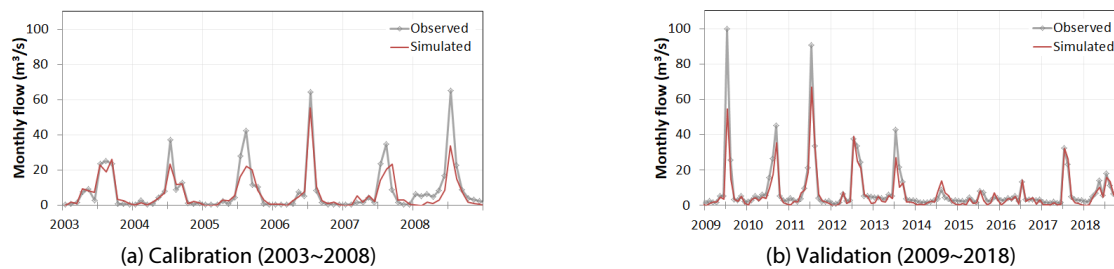


Fig. 3. Calibration and Validation Results for Monthly Flow

Table 1. Goodness of Fit Results for Daily and Monthly Simulations in this Study

GOF index	Calibration		Validation	
	Daily flow	Monthly flow	Daily flow	Monthly flow
R <sup>2</sup>	0.72	0.83	0.81	0.92
NSE	0.71	0.78	0.76	0.85
RSR	0.54	0.46	0.49	0.39
PBIAS (%)	-18.4	-18.2	-22.1	-22.0

Table 2. Model Performance Ratings for a Monthly Time Step (Moriya et al., 2007)

Performance rating	NSE	RSR	PBIAS
Very good	0.75 to 1.00	0.00 to 0.50	< ±10
Good	0.65 to 0.75	0.50 to 0.60	±10 to ±15
Satisfactory	0.50 to 0.65	0.60 to 0.70	±15 to ±25
Unsatisfactory	≤ 0.50	> 0.70	≥ ±25

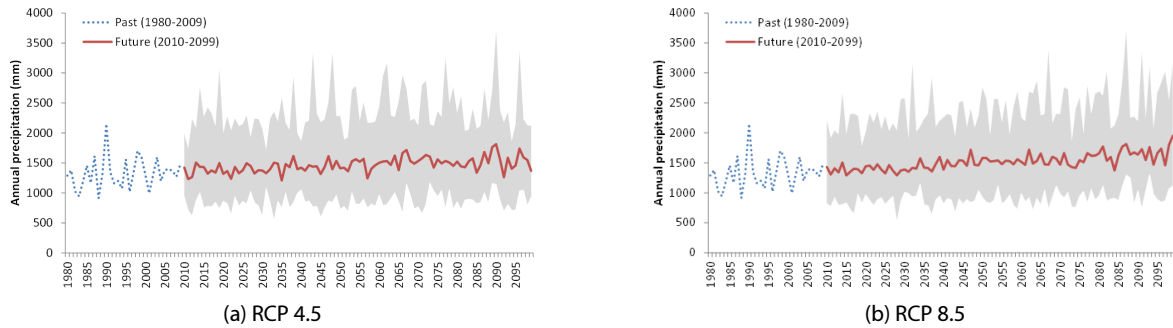


Fig. 4. Annual Precipitation for Past and Future Periods

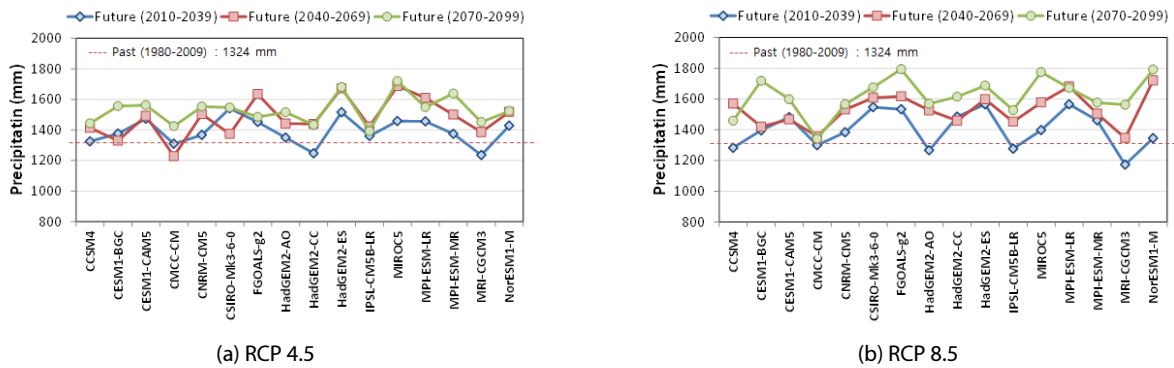


Fig. 5. Annual Precipitation by GCMs for Future Climate Change Scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5

재현하고 있으며, 모델링을 통해 도출된 모의자료의 신뢰성 및 활용성이 높다고 판단할 수 있다.

### 3. 적용 결과

#### 3.1 미래 기후변화에 따른 강수량 변화

SWAT 모형을 적용하기 전에 미래 기후변화 시나리오에 따른 경안천 유역의 강수량의 변화를 분석하였다. Fig. 4는 과거기간(1980~2009년)과 미래기간(2010~2099년)에 대한 연도별 강수량의 변화를 나타낸 것으로 미래기간의 경우에는 GCM에 따른 변동성을 음영으로 나타내었다. 미래기간에 대해 GCM에 따른 최대-최소 차이가 1,500 mm, 평균값 대비 편차는 약 -40% ~ +60% 정도로 변동성이 매우 큰 것을 알 수 있으며, 미래로 갈수록 점차

증가하는 추세이다.

미래기간별 차이를 분석하기 위해 미래기간(2010~2099년)을 크게 3개의 기간(2010~2039년, 2040~2069년, 2070~2099년)으로 구분하고 과거 기간(1980~2009년)에 대해 관측된 값과 비교하였다. Fig. 5는 각 GCM 결과 중 강수량 값을 경안천 유역에 대해 상세화시킨 후 미래 기간에 따라 비교한 결과이다. 일부 GCM 결과를 제외하고는 대체로 미래 후반기로 갈수록 강수량이 증가하며 RCP 4.5보다 RCP 8.5 시나리오에서 더 많이 증가하는 것으로 전망되었다. 과거 관측값과 비교해서는 미래 전반기에는 시나리오에 따라 일부 GCM에서 낮게 전망되었으나 중반기와 후반기에는 거의 모든 GCM의 결과가 관측값보다 높게 나타났다. 즉 현재의 RCP 4.5와 8.5 시나리오 상황에서는 미래로 갈수록 강수량이 증가할 것으로 전망되고 있다.

Fig. 6은 미래기간에 따른 강수량의 월별 변화를 비교한 것으로, GCM에 따른 변동성을 박스플롯으로 나타내었으며 과거 30년(1980~2009년)에 대한 관측자료와 비교하였다. GCM에 따라 차이는 있지만, 대체로 1월~6월과 10월~12월은 과거 관측치와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 반면에 7월~9월은 GCM에 따라 변동성이 다소 크며, 미래 후반기로 갈수록, RCP 4.5보다는 RCP 8.5 시나리오에서 변동폭이 크게 나타났다. RCP 8.5에서는 6월 강수량도 GCM별로 차이가 좀 있는 것으로 나타났다. 또한 GCM 평균치를 기준으로 7월의 강수량은 과거자료와 큰 차이가 없으나, 8월과 9월의 강수량은 대체로 증가할 것으로 전망되었다. 즉, 현재의 RCP 기후변화 시나리오 하에서는 미래의 여름철 강수량이 증가할 것으로 예상할 수 있다.

### 3.2 미래 기후변화에 따른 증발산량 변화

Fig. 7은 미래 기후자료를 경안천 유역에 대해 상세화시킨 후 SWAT 모형의 입력자료로 적용하여 모의된 증발산량에 대한 연도

별 변화를 나타낸 것이다. GCM에 따른 연도별 최대-최소 차이는 150 mm, 평균값 대비 편차는  $\pm 15\%$  정도이며, 미래로 갈수록 RCP 8.5 시나리오에서의 증가추세가 상대적으로 크게 나타났다.

Fig. 8은 앞선 Fig. 5와 같이 GCM별 증발산량의 연 평균값을 비교한 것이다. 미래 전반기(2010~2039)에는 과거와 비슷할 것으로 전망한 GCM도 많았으나, 미래 중반기(2040~2069)와 후반기(2070~2099)에는 거의 모든 GCM에 대해 과거보다 증발산량이 증가할 것으로 전망되었다. 강수량과 마찬가지로 RCP 8.5에서의 변동성이 더 크게 나타났다.

Fig. 9는 미래기간에 따라 월별 증발산량의 변화를 비교한 것으로서, 4월과 9월, 10월은 과거대비 증가할 것으로 전망되는 반면, 7월과 8월은 감소할 것으로 전망되었다. 이는 여러 가지 원인이 있을 수 있으나, 앞의 Fig. 6에 나타난 것과 같이 여름철 강수량의 증가 등이 한 원인일 것으로 판단된다. 또한 강수량과 마찬가지로 RCP 4.5보다는 RCP 8.5에서 그리고 미래 후반기로 갈수록 GCM에 따른 변동성이 크게 나타남을 알 수 있다.

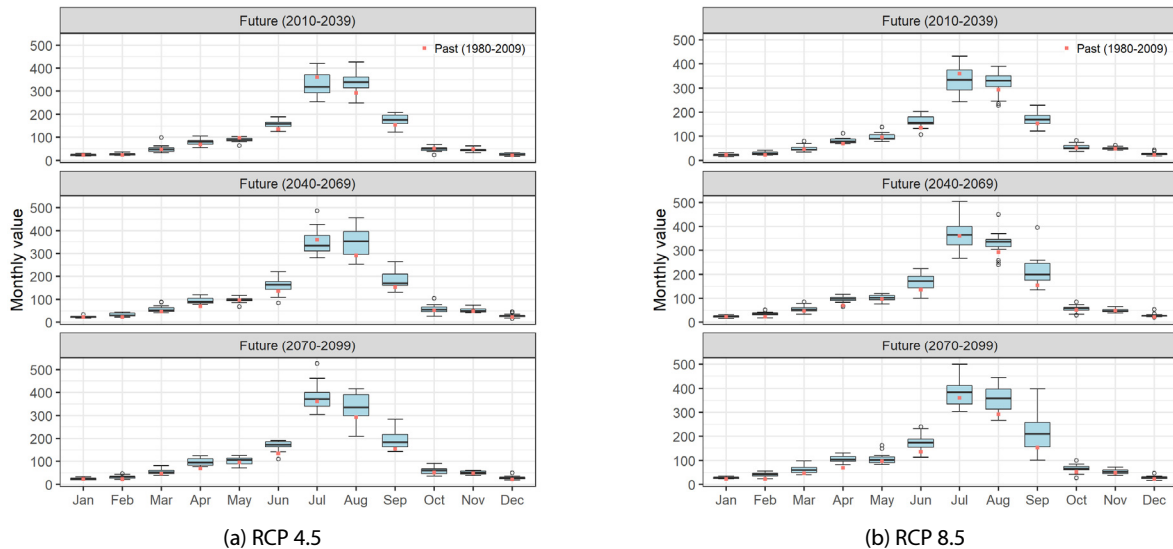


Fig. 6. Monthly Variation in Precipitation with Future Periods for RCP 4.5 and RCP 8.5

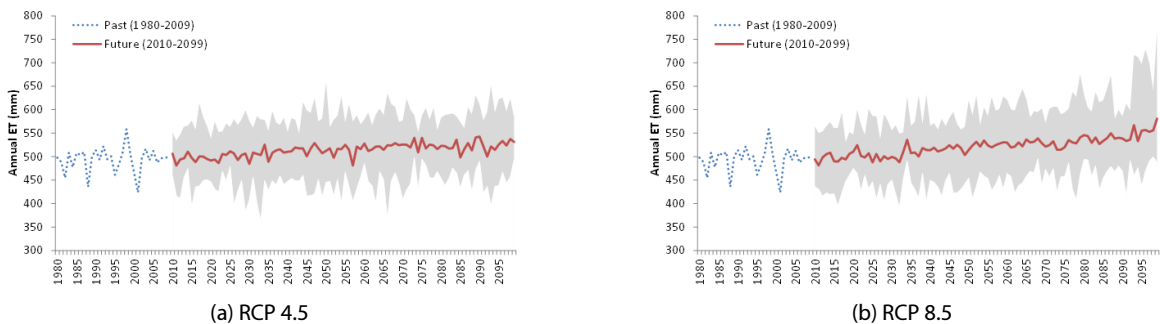


Fig. 7. Annual Evapotranspiration for Past and Future Periods

다중 GCM 미래 기후자료를 이용한 경안천 유역의 수자원에 대한 기후변화 영향 평가

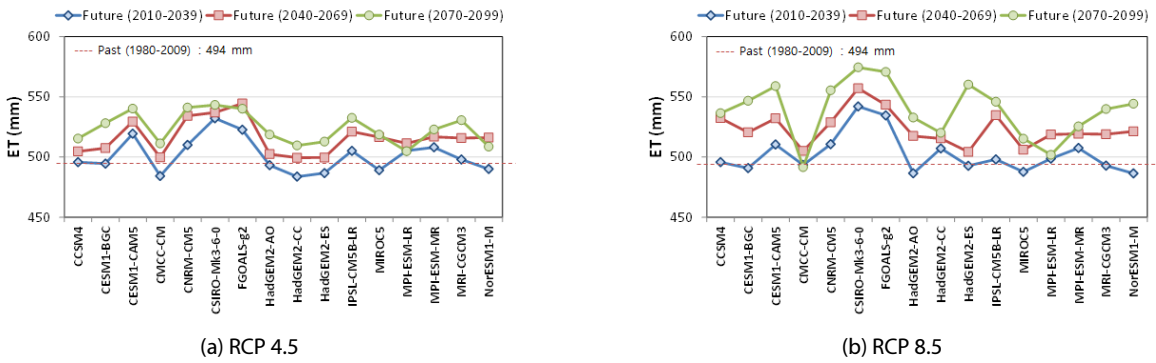


Fig. 8. Annual Evapotranspiration by GCMs for Future Climate Change Scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5

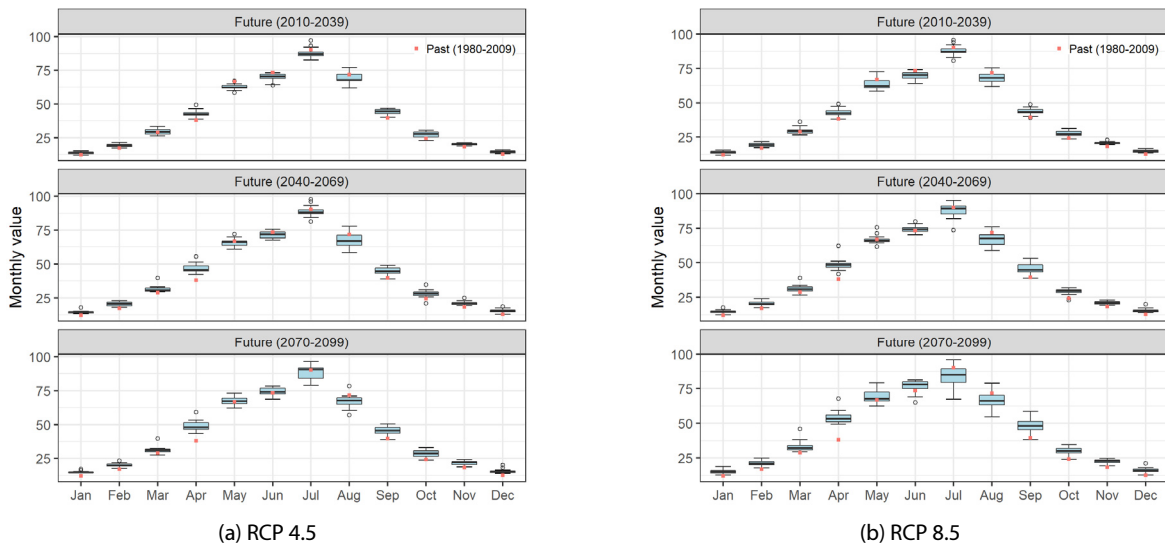


Fig. 9. Monthly Variation in Evapotranspiration with Future Periods for RCP 4.5 and RCP 8.5

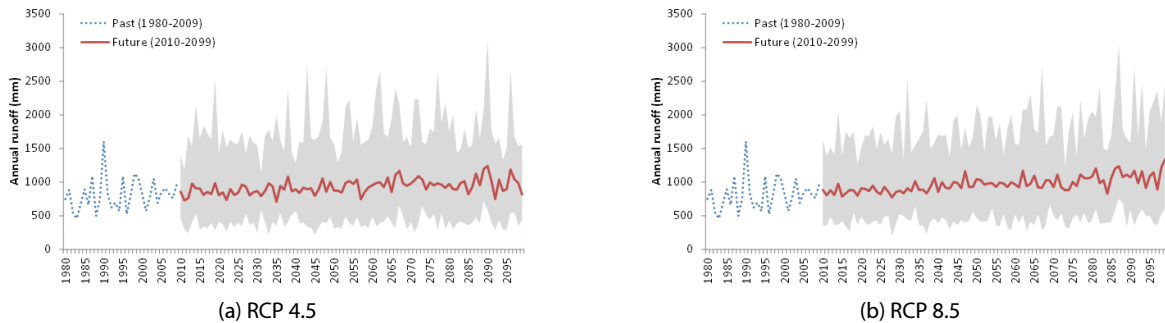


Fig. 10. Annual Runoff for Past and Future Periods

3.3 미래 기후변화에 따른 유출량 변화

Fig. 10은 연도별 유출량의 변화를 나타낸 것으로, GCM에 따른 연간 유출량의 최대-최소 차이는 약 1,380 mm, 평균값 대비 편차는 -60 % ~ +90 % 정도로 분석되었고, 과거기간부터 점차 미래 후반기로 갈수록 유출량이 증가하는 추세로 나타났다.

Fig 11은 GCM에 따라 도출된 연 유출량에 대한 비교 결과이다. 앞서 살펴본 강수량의 증가로 인해 과거보다 미래의 유출량이 증가하고, 미래 후반기로 갈수록 더 많이 증가할 것으로 전망되었으며, RCP 8.5에서 GCM에 따른 변동성 및 과거대비 증가폭이 더 크게 나타났다.



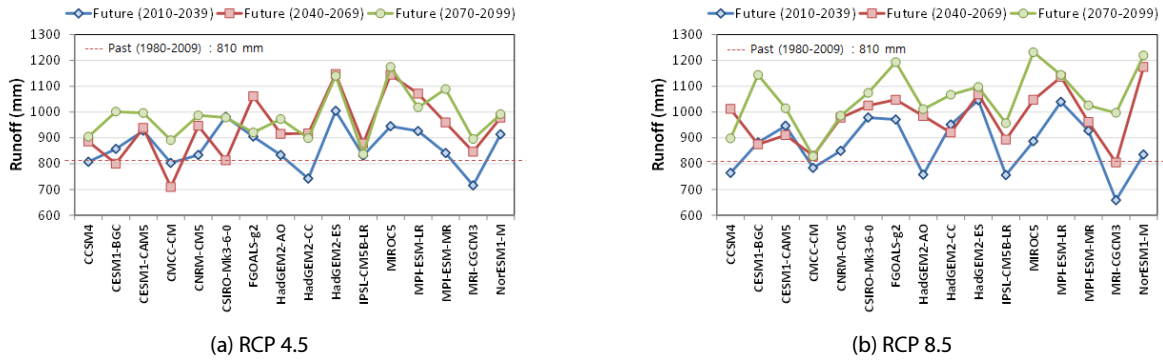


Fig. 11. Annual Runoff by GCMs for Future Climate Change Scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5

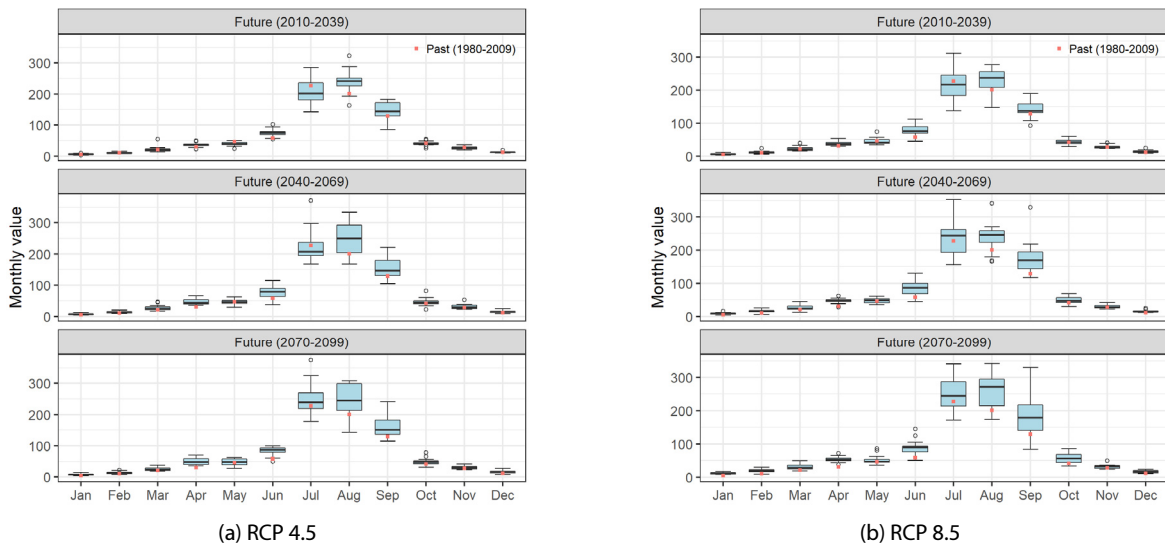


Fig. 12. Monthly Variation in Runoff with Future Periods for RCP 4.5 and RCP 8.5

Fig. 12에 나타난 바와 같이 월별 유출량의 변화 또한 여름철 강수량의 증가로 인해 8월과 9월의 유출량이 큰 폭으로 증가할 것으로 전망되었다. 7월의 경우 미래 전반기 및 중반기에 일부 감소될 것으로 전망되기도 하지만 후반기에는 대체로 증가하는 것으로 전망 되었으며, GCM에 따라 7~9월의 변동성이 크게 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 경안천 유역을 대상으로 미래 기후변화에 따른 주요 수문성분의 변화를 분석하였다. GCM에 따른 미래 기후자료의 불확실성을 고려하여 기존 타 연구에서 분석한 불확실성 결과를 기반으로 미래기후자료의 재현성이 우수한 16개 GCMs과 SQM 상세화 기법을 분석에 활용하였다. 또한 SWAT 유역모형을 이용하여 미래 기후자료로부터 미래의 유출량을 도출하였다.

불확실성 분석을 통해 선정된 GCM을 적용했음에도 본문의

분석 결과에서 나타난 바와 같이 GCM에 따라 연간 강수량은 1,500 mm, 증발산량은 150 mm, 유출량은 1,380 mm의 편차를 보이고, 평균값 대비 강수량은 -40% ~ +60%, 증발산량은 ±15%, 유출량은 -60% ~ +90%로서 GCM에 따른 변동성이 크게 나타났다. 미래기간을 3개 기간으로 구분하여 기간별 기후변화 영향을 분석한 결과, 강수량, 증발산량, 유출량 모두 미래 후반기 (2070~2099년)로 갈수록 점차 증가하며, RCP 8.5 시나리오 하에서 상대적으로 더 크게 증가할 것으로 전망되었다. 월별로는 미래 후반기로 갈수록 7~9월을 중심으로 강수량과 유출량이 증가하는 반면, 증발산량은 7월과 8월에 감소하고 9월과 10월에 증가하는 것으로 분석되었다.

경안천 유역에 대한 기존의 기후변화 연구와 비교해보면, 대체로 강수량과 유출량이 감소할 것으로 전망하고 있으며(Bae et al., 2007; Kim et al., 2010; Woo et al., 2018), 본 연구결과와는 반대로 여름철을 제외한 모든 계절에서 강수량이 증가할 것으로

전망한 연구(Ahn et al., 2009)도 있다. 반면, 경안천 유역을 포함한 강강유역 전체를 대상으로 한 기후변화 연구결과를 보면, 대체로 강수량과 유출량이 증가할 것으로 전망하고 있다(Bae et al., 2007; Jung et al., 2013; Korea Environment Institute, 2012, Do and Kim, 2017). 이러한 연구들은 단일 또는 소수의 GCM을 적용하거나 과거의 SRES 기후변화 시나리오를 기반으로 분석하고 있어 본 연구결과와 차이가 있을 수 있다. 또한, 본문에서 분석한 바와 같이 GCM에 따라 상이한 기후영향을 도출할 가능성도 있다.

일반적으로 미래 수십년 이상의 기간에 대한 장기간의 기후변화 영향은 실제의 기후현상을 모의하여 분석한 것이 아니라 과거의 관측치를 기준으로 미래에 발생가능한 대표적인 시나리오를 수립한 후 미래의 불확실성을 예측하고 있다. 따라서, 시나리오에 따른 다양한 가능성을 염두에 두고 다양한 분석방법에 따라 미래의 변화를 판단할 필요가 있다. 본 연구에서 제시하는 결과는 그러한 다양한 가능성 중의 하나로서 미래의 기후변화 영향을 제시하고 있으며, 특히 GCM 자료에 따른 결과의 불확실성을 이해하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 “가뭄대응 중소하천 물부족 위험도 평가 및 물 확보 기술 개발” 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

본 논문은 2019 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

## References

- Ahn, S. R., Lee, Y. J., Park, G. A. and Kim, S. J. (2008). “Analysis of future land use and climate change impact on stream discharge.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 28, No. 2B, pp. 215-224 (in Korean).
- Ahn, S. R., Park, M. J., Park, G. A. and Kim, S. J. (2009). “Assessing future climate change impact on hydrologic components of Gyeongancheon watershed.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 1, pp. 33-50 (in Korean).
- Bae, D. H., Jung, I. W. and Han, H. J. (2007). “Climate change impact assessment and adaptation strategy on water resources in the Han River basin.” *GRI Review*, Gyeonggi Research Institute, Vol. 9, No. 4, pp. 95-115 (in Korean).
- Cho, J., Cho, W. and Jung, I. (2018a). *rSQM: Statistical downscaling toolkit for climate change scenario using non parametric quantile mapping [Internet]*. [place unknown]. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/rSQM/index.html> (Accessed: February 24, 2018).
- Cho, J., Jung, I., Cho, W. and Hwang, S. (2018b). “User-centered climate change scenarios technique development and application of Korean Peninsula.” *Journal of Climate Change Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 13-29 (in Korean).
- Cho, Y. M. (2012). “Gyeongancheon where humans and nature coexist.” *River and Culture*, Vol. 8, No. 2, pp. 22-28 (in Korean).
- Do, Y. and Kim, G. (2017). “Analysis of hydrological components changes in Soyonggang Dam watershed according to RCP emission scenarios.” *Proceedings of the KSCE Conference*, pp. 78-79 (in Korean).
- Jung, C. G., M oon, J. W., Jang, C. H. and Lee, D. R. (2013). “Assessing of climate change impacts on hydrology and snowmelt by applying RCP scenarios using SWAT model for Hanriver watersheds.” *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, KSAE, Vol. 55, No. 5, pp. 37-48 (in Korean).
- Kay, A. L., Davies, H. N., Bell, V.A. and Jones, R. G. (2009). “Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England.” *Climatic Change*, Vol. 92, No. 1-2, pp. 41-63.
- Kim, C. G. Kim, N. W. and Lee, J. E. (2014). “Assessing the effect of upstream dam outflows and river water uses on the inflows to the Paldang Dam.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 47, No. 11, pp. 1017-1026 (in Korean).
- Kim, C. G., Park, J. and Cho. J. (2018). “Future climate change impact assessment of Chungju Dam inflow considering selection of GCMs and downscaling technique.” *Journal of Climate Change Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 47-58 (in Korean).
- Kim, S. J., Kim, B. S., Jun, H. D. and Kim, H. S. (2010). “The evaluation of climate change impacts on the water scarcity of the Han River basin in South Korea using high resolution RCM data.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 3, pp. 295-308 (in Korean).
- Korea Environment Institute (2012). *Risk management policy for water security in a changing climate*, KEI 2012-08 (in Korean).
- Lee J. K. (2014). *Scenario selection and uncertainty quantification for climate change impact assessments in water resource*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea (in Korean).
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T. L. (2007). “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.” *Transactions of the ASABE*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
- Wilby, R. L. and Harris, I. (2006). “A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK.” *Water Resources Research*, Vol. 42, No. 2, W02419, <https://doi.org/10.1029/2005WR004065>.
- Woo, S. Y., Jung, C. G., Kim, J. U. and Kim, S. J. (2018). “Assessment of climate change impact on aquatic ecology health indices in Han River basin using SWAT and random forest.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 51, No. 10, pp. 863-874 (in Korean).