J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 56, No. 1 (2023), pp. 35-43
doi: 10.3741/JKWRA.2023.56.1.35
pISSN 2799-8746
eISSN 2799-8754

Uncertainty of future runoff projection according to SSP scenarios and hydrologic model parameters

Kim, Jin Hyuck[a] · Song, Young Hoon[b] · Chung, Eun-Sung[c]*

[a]Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea
[b]Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea
[c]Professor, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea

Paper number: 22-087
Received: 30 September 2022; Revised: 17 November 2022; Accepted: 28 November 2022

Abstract

Future runoff analysis is influenced by climate change scenarios and hydrologic model parameters, with uncertainties. In this study, the uncertainty of future runoff analysis according to the shared socioeconomic pathway (SSP) scenario and hydrologic model parameters was analyzed. Among the SSP scenarios, the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios were used, and the soil and water assessment tool (SWAT) model was used as the hydrologic model. For the parameters of the SWAT model, a total of 11 parameter were optimized to the observed runoff data using SWAT-CUP. Then, uncertainty analysis of future estimated runoff compared to the observed runoff was performed using jensen-shannon divergence (JS-D), which can calculate the difference in distribution. As a result, uncertainty of future runoff was analyzed to be larger in SSP5-8.5 than in SSP2-4.5, and larger in the far future (2061-2100) than in the near future (2021-2060). In this study, the uncertainty of future runoff using future climate data according to the parameters of the hydrologic model is as follows. Uncertainty was greatly analyzed when parameters used observed runoff data in years with low flow rates compared to average years. In addition, the uncertainty of future runoff estimation was analyzed to be greater for the parameters of the period in which the change in runoff compared to the average year was greater.

Keywords: Future runoff analysis, SSP scenarios, Jensen-Shannon divergence, Uncertainty

미래 기후변화 시나리오와 수문모형 매개변수에 따른 미래 유량예측 불확실성

김진혁[a] · 송영훈[b] · 정은성[c]*

[a]서울과학기술대학교 건설시스템공학과 박사과정, [b]서울과학기술대학교 건설시스템공학과 박사과정,
[c]서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수

요 지

미래 유량분석은 기후변화 시나리오와 수문모형의 매개변수에 영향을 받고 이에 따른 불확실성이 존재한다. 본 연구에서는 Shared Socioeconomic Pathway (SSP) 시나리오와 수문모형 매개변수에 따른 미래 유량 분석의 불확실성을 분석하고자 하였다. SSP 시나리오 중, 대표적으로 사용되는 SSP2-4.5와 SSP5-8.5시나리오를 사용하였으며, 수문모형으로는 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 모형을 사용하였다. SWAT 모형의 매개변수는 SWAT-CUP을 이용해 관측된 유량 데이터에 따라 총 11개의 기간에 대해 매개변수 최적화를 각각 수행하였다. 그 후 분포의 차이를 계산 할 수 있는 Jensen-Shannon Divergence (JS-D)를 이용해 과거 유량 대비 미래 추정된 유량의 불확실성 분석을 수행하였다. 분석결과 미래 유량의 불확실성은 SSP5-8.5에서 SSP2-4.5보다 더 크게 분석되었으며, 가까운 미래(2021-2060년) 보다 먼 미래(2061-2100년)에서 더 크게 분석되었다. 강우-유출 분석은 수문모형 매개변수에 따라 88.5%-108.5%까지 차이가 발생하였으며, 이에 따라 미래 유량을 추정하는데 불확실성이 발생하였다. 본 연구에서의 수문 모형의 매개변수에 따른 미래 유량 추정의 불확실성은 평년 대비 유량이 적은 연도의 관측 유량 데이터를 이용한 매개변수를 이용할 시 불확실성이 크게 분석되었다. 또한 평년 대비 유량 변화가 큰 기간의 매개 변수일수록 미래 유량 추정의 불확실성이 크게 분석되었다.

핵심용어: 미래 유량분석, SSP 시나리오, Jensen-Shannon divergence, 불확실성

***Corresponding Author.** Tel: +82-2-970-9017
E-mail: eschung@seoultech.ac.kr (Chung, Eun-Sung)

© 2023 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

기후변화는 물순환에 많은 영향을 미치며 이에 따라 강수, 기온패턴을 크게 변화시키고 있다(IPCC, 2014; 2021). 이러한 변화는 미래의 가뭄, 홍수와 같은 물 관련 재해의 심도와 빈도의 변화를 발생시키며 이로인한 피해가 증가하고 있다(Chim *et al*., 2021). 미래의 지구 물순환 변화는 전 세계적으로 불확실성을 가속화시키며, 특히 사계절에 따른 기후특성이 다른 동아시아 지역에서는 더 큰 위협이 된다(Yasuda *et al*., 2014; Arnell and Gosling, 2013; Song *et al*., 2021b). 하천유량은 농업활동, 도시 수자원, 산업 및 수력 발전과 같은 다양한 부문에서 활용되고 있기 때문에 다양 한 수자원적 요소 중 중요한 역할을 수행한다(Vasiliades *et al*., 2011). 따라서, 기후변화로 인한 하천 유량의 불확실성 정량화는 기후 영향 평가에 있어 완화와 적응에 대한 정보를 제공하는데 도움이 될 수 있다. 최근 여러 연구에서 지역 내 유량에 대한 기후변화와 인간 활동에 대한 하천유량 영향 정량화를 수행하고 있다(Zeng *et al*., 2015; Yonaba *et al*., 2021; Kim *et al*., 2022).

강우 유출분석은 신뢰할 수 있는 분석을 통해 수문학적 과정을 연산하여 수행된다(Freeze and Harlan, 1969; Kirchner, 2006). 수문분석을 위한 수문모형은 개념적 수문모형과 물리적 수문모형으로 구분되며, 개념적 수문모형은 사용이 비교적 간편하나, 개발자의 의도에 따라 구조가 다르며, 고려할 수 있는 입력 자료에 따른 불확실성이 존재한다. 다양한 매개변수를 반영할 수 있는 물리적 모형은 집중형 모형과 분포형 모형으로 구분되며 최근 컴퓨터의 하드웨어와 Geographic Information System (GIS) 기술의 발달로 인해 과거 집중형 모형에서 시 공간적 상태변화를 모의할 수 있는 분포, 준 분포형 모형으로 대체되고 있다(Lee *et al*., 2022). 물리적 모형 기반의 하천 유량 분석은 해당지역의 특성을 반영할 수 있는 매개변수 최적화가 필요하며, 이에 관한 연구는 과거부터 현재까지 수행되고 있다. 하지만 과거 관측 값을 이용한 매개변수 최적화는 해당연도의 유량 특성에 따라 다르게 수행되며, 이를 이용한 유량분석은 매개변수에 따라 다르게 분석된다. 따라서, 물리적 기반의 수문모형은 매개변수에 따라 유량이 다르게 산정되기 때문에 불확실성을 내포하고 있으며, 불확실성을 정량화하기 위한 사전 연구들이 수행되었다. Teweldebrhan *et al*. (2018)는 매개변수에 따른 유량분석 시, 내포되는 불확실성에 대한 분석을 수행하였으며, Xie *et al*. (2021)은 수문모형의 매개변수에 따른 불확실성을 확인한 후, 이를 줄이기 위해 Dimension-Adaptive Key Grid Calibration을 제안했다.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)는 6차 보고서를 위해 사회 경제적 요인을 함께 고려하는 Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP)의 Shared Socioeconomic Pathways (SSP) 시나리오를 개발하였으며, SSP 시나리오는 다양한 사회 및 경제적 요소, 온실가스 배출 제한 조건에 따라 분류된다(O'Neill *et al*., 2016). 그러나, SSP 시나리오를 이용한 미래 유량분석 연구는 기후변화에 따라 미래 유출 분석을 수행할 시 불확실성이 발생한다고 설명하고 있다(Giuntoli *et al*., 2018; Peel *et al*., 2015; Akstinas *et al*. , 2020).

본 연구에서는 SSP시나리오와 수문모형 매개변수에 따른 불확실성 분석 및 정량화를 수행하고자 하였다. 연구대상유역은 저수지 및 댐 등 인공 요소개입이 비교적 적은 영산강 유역을 선정하였으며, 해당유역의 수자원 순환을 분석할 수 있는 SWAT 모형을 사용해 유량분석을 수행하였다. 미래 유량 추정의 불확실성은 분포 간 유사성을 정량화 할 수 있는 Jensen-Shannon divergence (JS-D)을 이용하여 과거 유량 대비 미래 유량의 불확실성을 분석하였다. 본 연구는 미래 수자원 관리 계획을 수립하기 위한 미래 기후데이터에 따른 강우-유출 분석 시, 수문모형의 매개변수 사용에 따른 불확실성 분석의 필요성을 제시 할 수 있다.

2. 방법론

2.1 연구대상유역

영산강 유역은 위도 34.9°, 경도 126.5°로 우리나라의 남서쪽에 위치하고 있다. 영산강 유역의 면적은 약 3,371.4 km², 연평균 기온은 14.0℃, 연 평균 강수량은 1,293 mm 이며, 여름철 강수량이 집중되는 기후 추세에 따라 농업활동이 이루어지고 있다. 유역 내 토지이용은 농경지 35.5%, 도심지 7.3%, 초원 5.2%, 수역 3.4%, 나지 1.8%, 습지 1.4%, 산림 45.4%로 이루어져 있으며, 1970년대 도시화가 진행된 이후에도 대규모 농업활동을 수행하고 있는 유역이다. 유역 내 가장 대표적인 도시는 광주광역시가 위치하고 있다. 영산강 유역 내 유량은 농업용수, 생활용수로 사용되고 있다. 그러나 영산강 유역은 종종 유역 내 유량 부족으로 인한 피해가 발생하고 있다. 과거 2000년대 후반 용수 지원을 받은 가뭄 피해가 발생했으며, 2014-2015년에는 강수 부족으로 인한 심각한 기상학적 가뭄 피해가 발생하였다. 즉, 해당유역은 수자원관리 및 계획 수립의 중요성이 높은 유역이다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 영산강 유역 인근의 6개 한국 기상청이 관리하는 기상관측소의 데이터와 영산강 유역 내 극락교 수위관측소 데이터를 이용해 연구를 수행하였다. 지형자료는, 환경지리정보원(Environmental Geographic

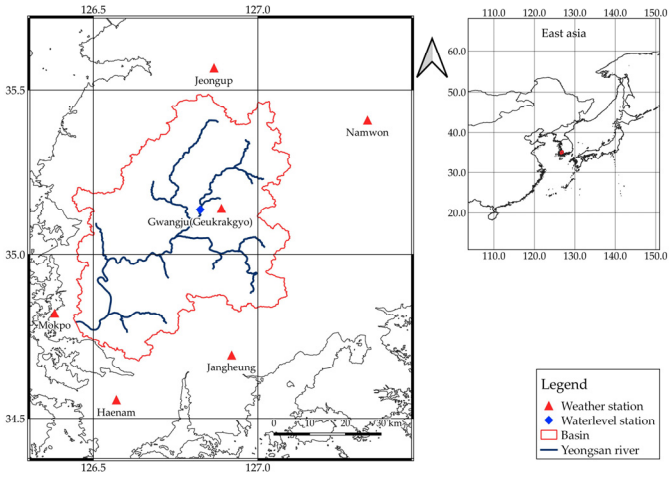


Fig. 1. Description of study area

Information Service, EGIS), 한국토양정보 시스템(Korean Soil Information System, KSIS)의 자료를 이용해 본 연구를 수행하였다.

2.2 General circulation model (GCM) 및 미래 기후 시나리오

GCM은 대기, 해양, 빙하, 지표면에서의 물리적 순환과정을 반영한 모형으로, 온실가스 농도에 따른 기후변화 예측 연구에 사용되는 모형이다. 본 연구에서는 GCM 중, 동아시아(Zhang *et al.*, 2021, Zhao *et al.*, 2022)와 우리나라(Song *et al.*, 2021a; Chae *et al.*, 2022)를 대상으로하는 연구에 주로 쓰이고 있는 GCM 중에서 MRI-ESM2-0을 선정하여 연구를 수행하였다. MRI-ESM2-0은 일본 Meteorological Research Institute에서 개발하였으며, 해상도는 1.1°×1.1°이다. 기존의 기후변화 연구에는 IPCC AR5의 Representative Concentration Pathways (RCP) 시나리오를 이용한 연구가 주를 이루었으나, 본 연구에서는 새롭게 제시한 CMIP6 SSP 시나리오를 이용해 연구를 수행하였다. SSP 시나리오는 기존의 RCP 시나리오의 복사강제력과 함께 사회 및 경제적 요소를 함께 고려하여 미래 적응과 완화에 따른 변화를 고려한 시나리오이다(O'Neill *et al.*, 2017). 또한 새롭게 수행 중인 연구에서 새로운 SSP 시나리오는 기존의 RCP 시나리오에 비해 성능이 향상되었다는 연구 결과가 있다(Su *et al.*, 2021). 본 연구에서는 SSP 시나리오 중 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오를 이용해 연구를 수행하였다.

2.3 공간보간 및 편이보정

GCM은 격자형태로 데이터를 제공하기 때문에 실제 수문관측 값과 상이함이 발생한다. 따라서 공간보간 및 편이보정이 필요하게 된다. 본 연구에서는 우리나라의 기상청 기상관측소의 위치에 따른 역거리가중법(Inverse distance weighting, IDW)을 이용해 GCM 데이터의 공간보정을 수행하였다. 공간보간이 수행된 GCM 데이터는 분위사상법을 이용해 편이보정을 수행하였다. 분위사상법은 기후변화에 대한 분석을 수행하는 연구 중 가장 보편적으로 활용되고 있으며, 우리나라를 대상으로 하는 기후변화 연구에도 사용되고 있다(Song *et al.*, 2020). 본 연구에서는 각 관측소에 대한 경험적 확률 분포를 이용하여 기후 변수에 대한 임계치를 설정하였으며, 미래기간 데이터에 보정계수를 적용하였다. 본 연구에서 사용된 분위사상법은 Eq. (1)과 같다.

$$P_b = F_o^{-1}\left(F_s\left(P_m\right)\right) \tag{1}$$

여기서, P_b는 편이보정 된 값, P_m는 모의 값, F_s는 모의 값의 누적 분포 함수, F_o^{-1}는 관측 값의 누적 분포 역함수이다. 본 연구에서는 분위 사상법의 비모수 변환법인 평활 스플라인(smoothing spline) 방법을 사용했다.

2.4 SWAT 모형 및 SWAT-CUP

SWAT 모형은 물리적 기반 준 분포형 장기 강우-유출 모형이며, 대규모의 유역에서 장기간에 걸친 다양한 토양, 토지이용, 토지관리에 따른 유출, 유사, 농업화학 물질을 모의할 수 있는 모형이다(Arnold *et al.*, 1998). SWAT 모형은 비교적 간단한 입력데이터를 사용하여 유역의 수문순환과정을 모의할 수 있는 장점이 있다. SWAT 모형의 수문순환은 Eq. (2)와 같다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (2)$$

여기서 SW_0는 초기 토양 수분 함량(mm), SW_t는 일최종 토양 수분(mm), R_{day}는 강수량(mm), Q_{surf}는 지표 유출량(mm), E_a는 증발산량(mm), w_{seep}는 침투 수량(mm), Q_{gw}는 지하수 유출량(mm), t는 시간(일) 이다.

수문모형은 유역 특성 등을 반영할 수 있는 매개변수가 존재하며, 매개변수는 최적화가 필요하다. SWAT모형은 기본적으로 수동 매개변수 최적화를 제공한다. 하지만 수동 매개변수 최적화는 모형 사용자의 지식수준, 기술수준에 따라 매개변수 최적화 성능의 차이가 발생하게 된다. 본 연구에서는 SWAT-CUP 2019를 이용해 매개변수를 자동보정 하였다. SWAT-CUP 알고리즘 중 SUFI-2를 사용하였으며, SUFI-2는 최근 SWAT 모형을 사용한 연구에 주로 사용되고 있다(Ahmed *et al*., 2022).

2.5 불확실성 분석

미래 유량분석은 기후변화 시나리오의 GCM 기후데이터를 이용한 강우-유출 수문분석 결과를 이용한다. 이 과정에서 미래 유량은 기후변화시나리오, GCM 데이터, 수문모형의 매개변수에 따라 불확실성이 존재한다. 본 연구에서는 분석된 미래 유량데이터에 대해 SSP 시나리오, GCM 데이터, 수문모형 매개변수에 따른 불확실성을 분석하고자 하였다. 추정된 미래 유량데이터와 과거 유량데이터를 이용해 과거 대비 미래 유량의 불확실성분석은 JS-D를 이용해 분석되었다. JS-D는 확률 분포간의 유사도를 정량화하기 위해 개발된 측정방법이다. JS-D는 통계적 모멘트에 의존하지 않고 두 데이터 분포 간의 유사도를 대칭적으로 측정할 수 있다. JS-D는 잘 알려진 Kullback-leibler divergence를 기반으로 다음과 같이 정의된다. 기존의 Kullback-Leibler divergence는 확률밀도함수에 대한 엔트로피 기반 정보량 손실의 척도이기 때문에 단순분포에는 적합하지 않다(Majtey *et al*., 2005). KL-D는 X 대신 Y의 확률밀도함수를 사용할 때 상대적 엔트로피를 정량화할 수 있다. 여기서 상대적 엔트로피는 두 확률분포 사이의 거리에 대한 척도이다. KL-D의 방정식은 다음과 같다.

$$D_{KL}(X \parallel Y) = \sum_{x \in X}^{P}(x_i)\log_2\frac{p(x_i)}{p(y_i)} \quad (3)$$

여기서 $p(x_i)$와 $p(y_i)$는 x_i, y_i 상태에서 각각 X와 Y가 발생하는 확률이다.

Eq. (3)을 적용하여 $(X \parallel Y)$와 $(Y \parallel X)$의 KL-D 합을 계산하여 대칭으로 만든 후, N분포에 대한 일반적인 J_{KL} 발산은 다음과 같이 설명할 수 있다.

$$J_{KL} = \sum_{i=1}^{N}(X_i \parallel Y_i) \quad (4)$$

Eq. (4)로부터 JS-D는 각 분포를 다음과 같이 정의된 '중간점' 분포 M과 비교하여 다음과 같이 설명된다.

$$M = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X_i + Y_i) \quad (5)$$

따라서 JS-D는 Eq. (5)와 같이 정의된 분포의 중간점에서 N 확률 분포의 평균 발산을 설명한다.

$$JS-D = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}D_{KL}(X_i \parallel M) \quad (6)$$

Eq. (6)을 통해 도출된 JS-D는 두 분포간 유사도를 측정할 수 있다. 여기서 JS-D의 값이 높다면 두 분포 간 유사도 차이가 큰 것으로 분석 가능하다. 본 연구에서는 과거 월평균 유량 대비 미래 월평균 유량 분포 간 유사도 차이를 정량화 해 불확실성을 분석하였다.

3. 결 과

3.1 미래기후데이터의 편이보정 결과

본 연구에서는 CMIP6 GCM 일 단위 강수와 온도에 대한 편이보정을 수행하였다. 연구 대상유역인 영산강 유역 인근의 6개 기후관측소의 과거기간(1985-2014년) 관측값을 이용해 모의값과의 오차를 줄였다. 편이보정 보정 전후의 결정계수, Pearson 상관계수, RMSE (Root Mean Square Error), NSE (Nash Sutcliffe model Efficiency coefficient)는 Table 1과 같다. 편이보정 수행 결과 모든 통계적 성능지표는 편이보정 전(Raw)보다 편이보정 후(Bias corrected)에서 과거 기후의 재현성이 향상되었으며, 과거 유량을 모의하는데 타당성을 확보하였다.

3.2 SWAT 모형 매개변수 최적화

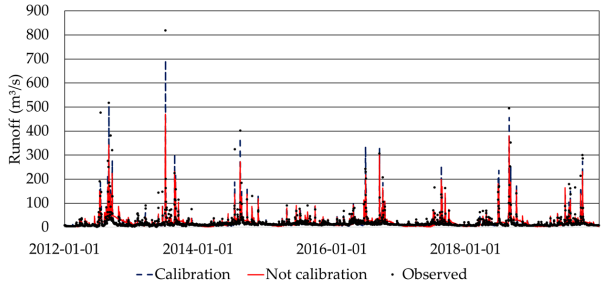
영산강 유역의 기후 데이터와 환경지리정보원, 한국토양정보 시스템의 지형데이터를 이용해 SWAT 모형을 구축하였

으며, SWAT-CUP을 이용해 매개변수 최적화를 수행하였다. SWAT 모형 매개변수로는 지하수, HRU, 유역, 토양의 특성을 반영할 수 있는 매개변수로 선정하였으며 SWAT-CUP 중 SUFI-2 알고리즘을 이용해 NSE를 목적함수로 최적화를 수행하였다. Fig. 2와 같이 영산강 유역 내 2012년부터 2019년을 보정기간, 2020년부터 2021년을 검증기간으로 설정하였다. 2012-2019년까지 보정기간 NSE는 0.73에서 0.81로, RMSE는 18.41에서 15.39로, Pearson 계수는 0.86에서 0.90으로 상승하였다. 검증기간 NSE는 0.75, RMSE는 59.40, Pearson 계수는 0.89로 SWAT모형 매개변수 최적화는 적절하게 수행되었다.

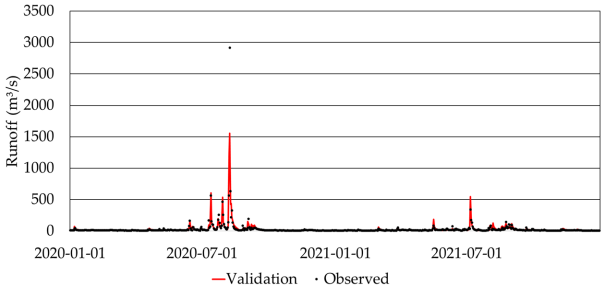
수문모형 매개변수에 따른 미래 유량의 불확실성 분석을 수행하기 위해 영산강 유역 과거 관측 유량을 이용해 관측기간에 따른 매개변수 최적화를 수행하였다. 다양한 매개변수에 따른 불확실성을 고려하기 위해 관측기간은 2000년부터 2021년까지 결측 데이터가 없는 기간으로 선정하여 총 11개의 매개변수를 최적화를 수행하였다. 각 매개변수 Case의 정보 및 매개변수 최적화 전,후 성능은 Table 2와 같다. Case 1의 유량은 연 평균유량대비 119.3%로 가장 큰 유량이 발생한 연도였으며, Case 9는 변화율 -40.7%의 변화율로 가장 작은 유량을 가진 연도였다. 매개변수 최적화 후, Case 7은 NSE 0.87, RSR 0.87, Pearson 계수 0.94로 가장 높은 성능으로 최적화되

Table 1. GCM data performance of precipitation and temperature for raw and bias corrected data

Indicator	Precipitation		Temperature	
	Raw data	Bias corrected	Raw data	Bias corrected
RMSE	16.17	0.5	4.238	1
Pearson	0.05	1	0.911	1
R^2	0.003	1	0.83	1
NSE	-0.4	1	0.797	1



(a) Calibration period (2012-2019)



(b) Validation period (2020-2021)

Fig. 2. Yeongsan river Runoff hydrographs during model: (a) Calibration period; and (b) Validation period

Table 2. The performances of 11 sets of calibrated SWAT parameters

Case (Year)	Change ratio (%)	Calibration	NSE	RMSE	RSR	Pearson coefficient
1 (2000)	19.3	Before	0.60	30.07	0.61	0.78
		After	0.77	23.11	0.79	0.89
2 (2002)	10.4	Before	0.57	34.90	0.61	0.79
		After	0.73	27.63	0.74	0.86
3 (2004)	12.9	Before	0.78	35.93	0.79	0.89
		After	0.83	31.56	0.84	0.91
4 (2006)	-2.2	Before	0.75	17.76	0.76	0.87
		After	0.82	15.08	0.83	0.91
5 (2008)	-34.4	Before	0.79	10.54	0.79	0.89
		After	0.81	10.00	0.81	0.90
6 (2010)	2.4	Before	0.70	32.33	0.80	0.89
		After	0.85	22.84	0.85	0.92
7 (2013)	-10.1	Before	0.76	24.48	0.81	0.90
		After	0.87	18.03	0.87	0.94
8 (2015)	-37.2	Before	0.56	6.62	0.66	0.81
		After	0.71	5.43	0.71	0.84
9 (2017)	-40.7	Before	0.46	12.29	0.62	0.79
		After	0.73	8.67	0.73	0.85
10 (2019)	-27.5	Before	0.74	15.46	0.75	0.87
		After	0.78	14.00	0.79	0.89
11 (2021)	-26.3	Before	0.77	12.21	0.79	0.89
		After	0.82	10.87	0.83	0.91

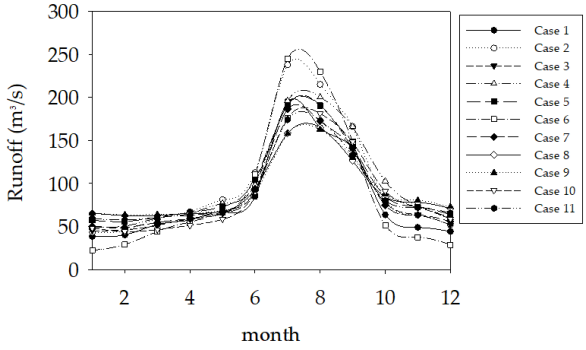


Fig. 3. Uncertainty of past runoff analysis according to HM parameters

었으며, Case 8은 NSE 0.71, RSR 0.71, Pearson 계수 0.84으로 가장 낮은 성능으로 최적화되었다. 각 최적화된 매개변수와 과거 기후데이터(1985-2021년)를 이용한 강우-유출분석의 월 평균 유량은 Fig. 3과 같다. Case 1의 매개변수는 연평균 유량이 11.5% 감소하는 것으로 분석되었으며, Case 2의 매개변수는 8.5%로 가장 많이 증가하는 것으로 분석되었다.

3.3 SSP 시나리오를 이용한 미래 유량 예측

미래 유량분석은 SSP2-4.5와 SSP5-8.5에 따른 강수량과 온도자료를 이용해 분석하였다. 미래 기간은 가까운 미래(2021-2060년)과 먼 미래(2061-2100년)으로 나누어 분석하였으며, 미래 기후는 Fig. 4와 같다. SSP2-4.5의 가까운 미래에서 연 강수량은 평균 8.7% 증가하였다. 계절별로는 봄과 겨울(봄-63.8%, 겨울-63.3% 증가)의 강수량은 증가하였으며, 여름과 가을(여름-2.7%, 가을-36.2% 감소) 강수량은 감소하였다. 먼 미래의 연 강수량은 과거 대비 15.5% 증가하였으며, 계절별로는 봄과 겨울(봄-82.1%, 겨울-69.1% 증가)의 강수량은 증가하였으며, 여름과 가을(여름-3.8%, 가을-18.7% 감소) 강수량은 감소하였다. SSP5-8.5의 가까운 미래 강수는 평균 9.5% 증가하였으며, 계절별로는 봄 겨울(봄-68.9%, 겨울 63.0% 증가) 강수는 증가했으며, 여름과 가을(여름-3.4%, 가을-35.0% 감소) 강수는 감소하였다. 먼 미래의 강수는 연 강수량은 16.4% 증가했으며, 계절별로는 봄과 겨울(봄-85.8%, 겨울-83.9% 증가)의 강수는 증가하였으며, 여름 가을(여름-3.3%, 가을-25.3% 감소)의 강수는 감소하였다.

SSP2-4.5와 SSP5-8.5에 따른 차이는 강수보다 온도에서 더 크게 발생하였다. SSP2-4.5의 가까운 미래는 연 평균 기온은 1.0℃ 증가하였으며, 계절 중 여름과 가을 기온은 1.3℃로 가장 많이 증가하였다. 먼 미래의 기온은 연 평균 1.7℃ 증가하였으며, 여름과 가을 2.1℃ 증가로 가장 많이 증가하였다. SSP5-8.5의 가까운 미래 연 평균 기온은 1.4℃ 증가하였으며, 계절 중 가을철 1.9℃ 증가로 가장 많이 증가하였다. 먼 미래의 연 평균 기온은 3.1℃ 증가하였으며, 계절 중 가을 철 3.8℃로 가장 많이 증가하였다. 가까운 미래에서 먼 미래로 시간에 따른 온도 증가는 SSP2-4.5에서 보다 SSP5-8.5에서 더 큰 폭으로 기온이 증가하였다.

위에서 추정된 미래 기후데이터를 이용해 추정된 미래 유량은 Fig. 5와 같다. SSP2-4.5 가까운 미래의 유량은 평균 과거 대비 31.9% 증가하였다. 계절별로는 가을을 제외한 모든 계절에서 증가하였으며 봄철 126.5%로 가장 크게 증가하였다. 가을철 유량은 15.0% 감소로 유일하게 감소하였다. 먼 미래의 유량은 평균 42.9% 증가로 가까운 미래보다 높게 증가하였다. 먼 미래는 모든 계절에서 유량은 과거대비 증가하였으며, 봄철 135% 증가로 가장 많이 증가하였다. SSP5-8.5의 가까운 미래는 연 평균 31.7% 증가하였으며, 가을을 제외한 모든 계

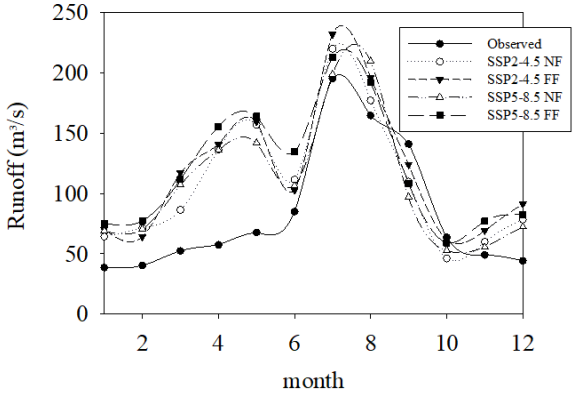
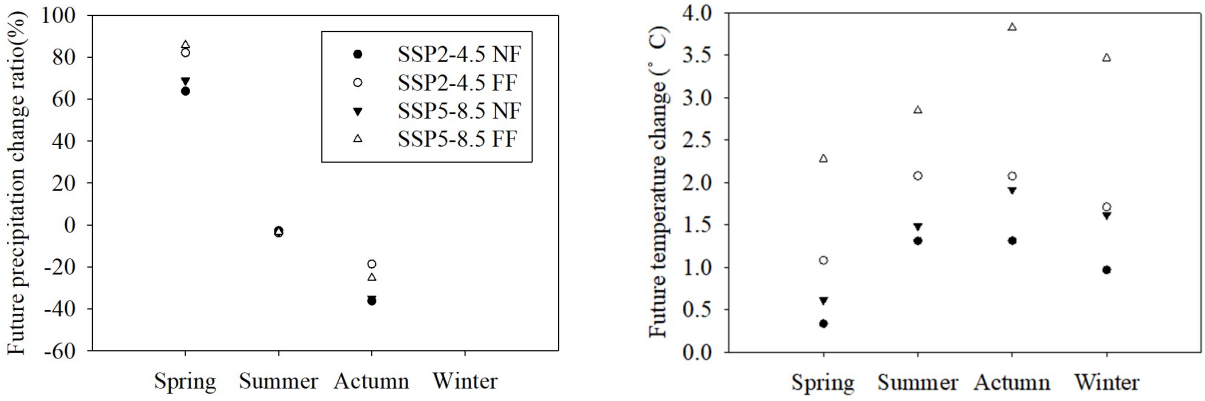


Fig. 5. Variations of runoff under SSP scenarios



(a) Precipitation change ratio (b) Temperatrue change

Fig. 4. Variations of future climate under SSP scenarios

Table 3. The JS-D values for past and future runoff

Case	SSP2-4.5 NF	SSP2-4.5 FF	SSP5-8.5 NF	SSP5-8.5 FF
Case 1	0.028	0.027	0.028	0.032
Case 2	0.021	0.021	0.022	0.026
Case 3	0.024	0.024	0.025	0.030
Case 4	0.014	0.015	0.015	0.020
Case 5	0.026	0.026	0.026	0.031
Case 6	0.019	0.019	0.020	0.024
Case 7	0.028	0.028	0.028	0.033
Case 8	0.034	0.035	0.035	0.038
Case 9	0.037	0.039	0.037	0.042
Case 10	0.018	0.018	0.019	0.023
Case 11	0.029	0.030	0.030	0.035
Average	0.025	0.026	0.026	0.030
Median	0.026	0.026	0.026	0.031

절에서 유량이 증가하였다. 가을의 유량은 19.2%감소하였다. 먼 미래의 경우 과거대비 평균 45.1% 증가하였으며, 계절별로는 가을(3.6% 감소) 유량을 제외하고 모든 계절에서 증가하였다.

3.4 미래 유량 불확실성 분석

위의 과정에서 추정된 미래 유량 자료를 이용해 과거 유량 대비 불확실성 분석을 수행하였다. 분석결과는 Table 3과 같으며 결과는 SSP5-8.5에서 SSP2-4.5보다 불확실성이 큰 것으로 분석되었다. SSP2-4.5의 가까운 미래의 JS-D는 평균 0.025였으며, 먼 미래는 0.026이었다. SSP5-8.5의 가까운 미래 JS-D는 평균 0.026, 먼 미래는 0.030이었다. 즉 과거 유량 대비 미래 유량의 불확실성은 가까운 미래보다 먼 미래에서 더 불확실성이 크며, 가까운 미래에서 먼 미래로 시간에 따른 불확실성 증가는 SSP5-8.5에서 더 크게 증가하였다. 수문모형 매개변수에 따른 불확실성은 Case 9를 사용한 미래 유량이 과거 유량 대비 불확실성이 가장 큰 것으로 분석되었으며, Case 4의 유량은 불확실성이 가장 작은 것으로 분석되었다. 즉, 평년대비 유량이 적은 기간의 관측 유량을 이용한 매개변수는 불확실성이 큰 것으로 분석되었다.

4. 결 론

기후변화에 따른 미래 기후데이터를 이용한 유량추정의 불확실성에 관한 연구는 수행되고 있다. CMIP5 RCP 시나리오의 GCM을 이용한 미래 유량 추정 분석연구는 온실가스 배출농도와 가까운 미래에서 먼 미래로 시간이 지남에 따라 유량 총량이 증가하며, 이에 따라 불확실성이 증가하는 것으로 분석하고 있다(Cha *et al*., 2017; Jang *et al*., 2018). 새롭게 개발중인 CMIP6 GCM을 사용한 본 연구 수행 결과, 기후변화에 적응에 대한 노력이 적고, 고성장하는 SSP5-8.5시나리오는 미래 유량 불확실성이 크며, 시간이 지남에 따라 미래유량 불확실성이 증가하는 것으로 분석되었다. 그러나 기후변화에 대한 노력 및 성장이 중간정도인 SSP2-4.5시나리오의 미래 유량은 가까운 미래에서 먼 미래로 시간에 따른 불확실성 증가가 미비한 것으로 분석되었다. 새로운 CMIP6 GCM은 CMIP5 GCM에 비해 해상도가 높으며 고해상도의 기상정보는 지역규모의 수문학적 모델링을 개선하는데 도움이 된다(Senent-Aparicio *et al*., 2021). 이에 따라 CMIP6 GCM은 CMIP5 GCM보다 더 성능 높은 기후 예측 및 수문분석을 수행할 수 있다(Kim *et al*., 2021). 본 연구에서는 SSP 시나리오와 SWAT 모형을 이용해 미래 기후변화 시나리오에서 수문모형의 매개변수에 따른 미래 유량 불확실성에 관한 연구를 수행하였다. 미래 기후는 연 평균 강수량과 연 평균 온도가 가까운 미래에서 먼 미래로 시간이 지남에 따라 증가하는 것으로 분석되었으며, 이 변화폭은 SSP2-4.5보다 SSP5-8.5에서 더 큰 폭으로 증가하였다. 이에 따라 미래 유량은 과거에 비해 증가하는 것으로 분석되었다. 계절별로는 봄 유량은 가장 크게 증가하였으며, 가을 유량은 감소 또는 증가하는 것으로 분석되었다. 과거 유량 대비 미래 유량 불확실성은 SSP2-4.5보다 SSP5-8.5에서 더 큰 것으로 분석되었다. 가까운 미래보다 먼 미래에서 불확실성은 더 크게 분석되었으며, 이 차이는 SSP5-8.5에서 차이가 더 크게 분석되었다. 수문모형 매개변수에 따른 불확실성은 평년 대비 40.7% 유량이 부족한 갈수기의 유량을 사용한 Case 9 매개변수의 유량이 가장 크게 분석되었다. 즉, 평년 대비 유량의 차이에 따라 최적화된 매개변수는 미래 유량 분석에서 불확실성을 야기한다. 미래 수자원관리 계획 수립에 있어 미래 유량분석은 가장 기초적이며, 중요한 자료가 된다. 변화하는 기후변화에 대비하기 위해선 미래 유량 분석에 대한 불확실성을 이해하는 것이 필요하다. 미래 기후데이터를 이용한 유량 추정의 불확실성은 수문모형의 매개변수뿐만이 아니라 GCM에 의한 보다 큰 불확실성이 존재한다(Chen *et al*., 2022). 본 연구를 통해 제시된 수문모형 매개변수에 따른 미래 유량분석의 불확실성에 더해 GCM에 따른 미래 유량 분석의 불확실성을 함께 고려한 차후 연구 수행 시, 미래 유량 추정의 불확실성을 고려한 수자원 관리 계획 수립에 도움이 될 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 K-water의 개방형 혁신 R&D (D-W-004)와 한국연구재단의(유형1-2) 중견연구(2021R1A2C200569912) 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Reference

Ahmed, N., Wang, G., Booij, M.J., Xiangyang, S., Hussain, F., and Nabi, G. (2022). "Separation of the impact of landuse/land-cover change and climate change on runoff in the upstream area of the Yangtze River, China." *Water Resources Management*, Vol. 36, No. 1, pp. 181-201.

Akstinas, V., Jakimavičius, D., Meilutytė-Lukauskienė, D., Kriaučiūnienė, J., and Šarauskienė, D. (2020). "Uncertainty of annual runoff projections in Lithuanian rivers under a future climate." *Hydrology Research*, Vol. 51, No. 2, pp. 257-271.

Arnell, N.W., and Gosling, S.N. (2013). "The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale." *Journal of Hydrology*, Vol. 486, pp. 351-364.

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. (1998). "Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development 1." *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.

Cha, W.Y., Lee, J., Kim, S.D., and Park, Y.K. (2017). "Analysis of indicators of hydrological alteration on the Geumho river basin under AR5 RCP scenarios." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 4, pp. 317-326.

Chae, S.T., Song, Y.H., Lee, J., and Chung, E.S. (2022). "Prioritizing the target watersheds for permeable pavement to reduce flood damage in urban watersheds considering future climate scenarios." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 55, No. 2, pp. 159-170.

Chen, C., Gan, R., Feng, D., Yang, F., and Zuo, Q. (2022). "Quantifying the contribution of SWAT modeling and CMIP6 inputting to streamflow prediction uncertainty under climate change." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 364, 132675.

Chim, K., Tunnicliffe, J., Shamseldin, A.Y., and Bun, H. (2021). "Assessment of land use and climate change effects on hydrology in the upper Siem Reap River and Angkor Temple Complex, Cambodia." *Environmental Development*, Vol. 39, 100615.

Freeze, R.A., and Harlan, R.L. (1969). "Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model." *Journal of Hydrology*, Vol. 9, No. 3, pp. 237-258.

Giuntoli, I., Villarini, G., Prudhomme, C., and Hannah, D.M. (2018). "Uncertainties in projected runoff over the conterminous United States." *Climatic Change*, Vol. 150, No. 3, pp. 149-162.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). *IPCC climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Geneva, Switzerland.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). "Summary for Policymakers." *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Edited by Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. and Zhou, B., Cambridge University Press. In Press.

Jang, Y., Park, J., and Seo, D. (2018). "Estimations of flow rate and pollutant loading changes of the Yo-Cheon basin under AR5 climate change scenarios using SWAT." *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 32, No. 3, pp. 221-233.

Kim, J.H., Sung, J.H., Chung, E.S., Kim, S.U., Son, M., and Shiru, M.S. (2021). "Comparison of Projection in meteorological and hydrological droughts in the cheongmicheon watershed for RCP4. 5 and SSP2-4.5." *Sustainability*, Vol. 13, No. 4, 2066.

Kim, J.H., Sung, J.H., Shahid, S., and Chung, E.S. (2022). "Future hydrological drought analysis considering agricultural water withdrawal under SSP scenarios." *Water Resources Management*, Vol. 36, pp. 2913-2930.

Kirchner, J.W. (2006). "Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology." *Water Resources Research*, Vol. 42, No. 3, pp. 1-5.

Lee, G.H., Yeon, M.H., Kim, Y.H., and Jung, S.H. (2022). "Analysis of the effect of objective functions on hydrologic model calibration and simulation." *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-12.

Majtey, A., Lamberti, P.W., Martin, M.T., and Plastino, A. (2005). "Wootters' distance revisited: A new distinguishability criterium." *The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics*, Vol. 32, No. 3, pp. 413-419.

O'Neill, B.C., Kriegler, E., Ebi, K.L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D.S., van Ruijven, B.J., van Vuuren, D.P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., and Solecki, W. (2017). "The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century." *Global Environmental Change*, Vol. 42, pp. 169-180.

O'Neill, B.C., Tebaldi, C., van Vuuren, D., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.F., Lowe, J., Meehl, J., Moss, R., Riahi, K., and Sanderson, B.M. (2016). "The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6." *Geoscientific Model Development*, Vol. 9, No. 9, pp. 3461-3482.

Peel, M.C., Srikanthan, R., McMahon, T.A., and Karoly, D.J. (2015). "Approximating uncertainty of annual runoff and reservoir yield using stochastic replicates of global climate model data." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, No. 4, pp. 1615-1639.

Senent-Aparicio, J., Jimeno-Sáez, P., López-Ballesteros, A., Giménez, J.G., Pérez-Sánchez, J., Cecilia, J.M., and Srinivasan, R. (2021). "Impacts of swat weather generator statistics from high-resolution datasets on monthly streamflow simulation over Peninsular Spain." *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 35, 100826.

Song, Y.H., Chung, E.S., and Shiru, M.S. (2020). "Uncertainty analysis of monthly precipitation in GCMs using multiple bias correction methods under different RCPs." *Sustainability*, Vol. 12, No. 18, 7508.

Song, Y.H., Chung, E.S., and Shahid, S. (2021a). "Spatiotemporal differences and uncertainties in projections of precipitation and temperature in South Korea from CMIP6 and CMIP5 general circulation models." *International Journal of Climatology*, Vol. 41, No. 13, pp. 5899-5919.

Song, Y.H., Nashwan, M.S., Chung, E.S., and Shahid, S. (2021b). "Advances in CMIP6 INM-CM5 over CMIP5 INM-CM4 for precipitation simulation in South Korea." *Atmospheric Research*, Vol. 247, 105261.

Su, B., Huang, J., Mondal, S.K., Zhai, J., Wang, Y., Wen, S., Gao, M., Lv, Y., Jiang, S., Jiang T., and Li, A., (2021). "Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in China." *Atmospheric Research*, Vol. 250, 105375.

Teweldebrhan, A.T., Burkhart, J.F., and Schuler, T.V. (2018). "Parameter uncertainty analysis for an operational hydrological model using residual-based and limits of acceptability approaches." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 22, No. 9, pp. 5021-5039.

Vasiliades, L., Loukas, A., and Liberis, N. (2011). "A water balance derived drought index for Pinios River Basin, Greece." *Water Resources Management*, Vol. 25, No. 4, pp. 1087-1101.

Xie, K., Liu, P., Zhang, J., Wang, G., Zhang, X., and Zhou, L. (2021). "Identification of spatially distributed parameters of hydrological models using the dimension-adaptive key grid calibration strategy." *Journal of Hydrology*, Vol. 598, 125772.

Yasuda, T., Nakajo, S., Kim, S., Mase, H., Mori, N., and Horsburgh, K. (2014). "Evaluation of future storm surge risk in East Asia based on state-of-the-art climate change projection." *Coastal Engineering*, Vol. 83, pp. 65-71.

Yonaba, R., Biaou, A.C., Koïta, M., Tazen, F., Mounirou, L.A., Zouré, C.O., Queloz, P., Karambiri, H., and Yacouba, H. (2021). "A dynamic land use/land cover input helps in picturing the Sahelian paradox: Assessing variability and attribution of changes in surface runoff in a Sahelian watershed." *Science of The Total Environment*, Vol. 757, No. 25, 143792.

Zeng, S., Zhan, C., Sun, F., Du, H., and Wang, F. (2015). "Effects of climate change and human activities on surface runoff in the Luan River Basin." *Advances in Meteorology*, Vol. 2015, pp. 1-12.

Zhang, R., Cheng, L., Liu, P., Huang, K., Gong, Y., Qin, S., and Liu, D. (2021). "Effect of GCM credibility on water resource system robustness under climate change based on decision scaling." *Advances in Water Resources*, Vol. 158, 104063.

Zhao, Y., Xu, K., Dong, N., and Wang, H. (2022). "Projection of climate change impacts on hydropower in the source region of the Yangtze River based on CMIP6." *Journal of Hydrology*, Vol. 606, 127453.