



Climate change impact analysis on water supply reliability and flood risk using combined rainfall-runoff and reservoir operation modeling: Hapcheon-Dam catchment case

Noh, Seong Jin^a · Lee, Garim^b · Kim, Bomi^c · Jo, Jihyeon^d · Woo, Dong Kook^{e*}

^aAssistant Professor, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea

^bMaster's Course Student, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea

^cPh.D's Course Student, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea

^dUndergraduate's Course Student, Department of Civil Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea

^eAssistant Professor, Department of Civil Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea

Paper number: 23-042

Received: 7 August 2023; Revised: 14 October 2023; Accepted: 30 October 2023

Abstract

Due to climate change, precipitation variability has increased, leading to more frequent occurrences of droughts and floods. To establish measures for managing water resources in response to the increasing uncertainties of climate conditions, it is necessary to understand the variability of natural river discharge and the impact of reservoir operation modeling considering dam inflow and artificial water supply. In this study, an integrated rainfall-runoff and reservoir operation modeling was applied to analyze the water supply reliability and flood risk for a multipurpose dam catchment under climate change conditions. The rainfall-runoff model employed was the modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J) model, and the reservoir operation model used was an R-based model with the structure of HEC-Ressim. Applying the climate change scenarios until 2100 to the established integrated model, the changes in water supply reliability and flood risk of the Hapcheon Dam were quantitatively analyzed. The results of the water supply reliability analysis showed that under SSP2-4.5 conditions, the water supply reliability was higher than that under SSP5-8.5 conditions. Particularly, in the far-future period, the range of flood risk widened, and both SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios showed the highest median flood risk values. While precipitation and runoff were expected to increase by less than 10%, dam-released flood discharge was projected to surge by over 120% compared to the baseline.

Keywords: Climate change, Integrated rainfall-runoff and reservoir operation modeling, Water supply reliability, Flood risk, Water resources management

강우-유출 및 저수지 운영 연계 모의를 통한 기후변화의 이수안전도 및 홍수위험도 영향 분석: 합천댐 유역 사례

노성진^a · 이가림^b · 김보미^c · 조지현^d · 우동국^{e*}

^a금오공과대학교 토목공학과 조교수, ^b금오공과대학교 토목공학과 석사과정, ^c금오공과대학교 토목공학과 박사과정,

^d계명대학교 토목공학전공 학생연구원, ^e계명대학교 토목공학전공 조교수

요지

기후변화로 인해 강우의 변동성이 증가하여 가뭄 또는 홍수가 빈번하게 발생하고 있다. 불확실성이 증가하는 기후 조건에 대응하는 수자원 시설 관리대책의 수립을 위해서는, 하천의 자연 유출량과 인공계 물공급을 모두 고려한 저수지 운영 모의를 통하여, 이수 및 치수 측면의 수자원 시설 영향에 대한 종합적인 분석이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 강우-유출과 저수지 운영 모형을 연계 모의하여, 합천댐 유역을 대상으로 기후변화에 대한 이수안전도 및 홍수위험도 분석을 수행하였다. 강우-유출모형으로는 modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J) 모형을, 저수지운영 모형은 HEC-Ressim 모형의 구조를 가지는 R 기반모형을 적용하였다. 구축된 연계 모형에 기후변화 시나리오를 2100년까지 적용하여 합천댐의 이수안전도 및 홍수위험도 변화를 정량적으로 분석하였다. 이수안전도 분석 결과, SSP5-8.5에 비해 SSP2-4.5 조건에서 이수안전도가 더 높으며, 먼미래로 갈수록 모두 과거 조건보다 이수안전도가 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 먼미래 기간에서는 홍수위험도의 범위가 더욱 넓어지는 것으로 나타났으며, SSP2-4.5와 SSP5-8.5 두 시나리오 모두 먼미래 기간에서 홍수위험도의 중앙값이 가장 높았다. 또한, 연홍강수량과 연홍유출은 과거 대비 10% 미만 증가하는데 비해, 홍수시뮬무효방류량은 120% 이상 증가하여, 연구대상지역인 합천댐유역의 경우, 미래 기후변화로 인한 홍수위험도가 상승할 것으로 예상된다.

핵심용어: 기후변화, 강우-유출 및 저수지 연계 모의, 이수안전도, 홍수위험도, 수자원 관리

*Corresponding Author. Tel: +82-53-580-5296

E-mail: dkwoo@kmu.ac.kr (Woo, Dong Kook)

1. 서론

대한민국의 기온은 지난 100년간 10년 단위로 대략 0.18°C로 상승하고 있으며, 강우의 변동성이 증가하여 가뭄 또는 홍수가 빈번하게 발생하고 있어, 기후변화 적응 대책의 수립이 필요하다(NIMS, 2018). 기후변화의 주요 원인으로 알려진 이산화탄소의 농도는 역대 최고치를 갱신하고 있으며(2023년 5월 기준 425 ppm), 앞으로 가속화할 것으로 예상되고 있다(IPCC, 2022). 특히, 현재 기후는 과거에 제시한 최악의 기후변화 시나리오(Representative Concentration Pathway 8.5, RCP8.5)의 변화 속도를 넘어서고 있는 것으로 평가되었다(Woo *et al.*, 2022). 이러한 변화로 인하여 자연재해 빈도와 강도가 증가되어, 사회, 경제적 피해뿐만 아니라 인명손실 등이 지속적으로 발생되고 있다. 특히, 우리나라 강우는 몬순 시스템에 많은 영향을 받아 강우의 대부분이 여름철에 집중되어 있으며, 국토의 80%가 산지로 구성되어 있어 유출시간이 짧아 효율적인 수자원 관리가 중요하다. 이에 따라 다수의 댐 운영으로 안정적인 용수 공급 및 홍수예방을 도모하고 있으며, 기후변화로 댐 이수안전도 및 홍수위험도 평가, 그에 대한 대책 수립이 어느 시점보다 중요하다.

기후변화로 인한 기온 및 강수량의 변화가 수자원 관리에 미치는 영향을 검토하기 위해서는 강우-유출 해석을 통한 하천 자연 유출량의 변동성을 이해하고, 댐 유입량과 인공계 물공급을 고려한 저수지 운영 모의를 이수 및 치수 측면에서 종합적으로 분석해야 한다. 먼저 하천 유량은 생활, 농업, 산업 용수 등 물공급의 원천이며, 수력 발전, 하천 생태 등 다양한 인간 활동 및 자연 생태와 연관된다. 기후변화에 따른 하천유량의 불확실성 정량화는 적응대책 수립에 있어 필수적이며, 강우-유출모형을 이용하여 기후변화가 국내 하천의 유출에 미치는 영향을 평가한 다양한 연구가 진행되어 왔다. Kim *et al.* (2004)은 준분포형 강우-유출 모형인 SLURP (Semi-distributed Land Use-based Runoff Process) 모형을 용담댐 유역에 적용하여 기후변화시 연 평균 유출량 분석결과, 현재에 비해 약 7.6% 감소하는 것으로 분석되었다. Shon *et al.* (2010)은 유역모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 낙동강 유역을 대상유역으로 기후변화 시나리오에 따른 유량과 유량변동성을 연, 계절, 중기간으로 나눠 비교 분석한 결과, 기온 및 유량의 증가로 하천 및 호소의 수온상승과 유량변화에 큰 영향을 줄 것으로 예상하였다. Bae *et al.* (2011)은 PRMS (Precipitation Runoff Modeling System), SWAT, SLURP 3가지 모형을 이용하여 기후변화 적용시 기온이 크게 증가할수록 모형 별 결과차이가 증가하였고, 이러

한 수문모형의 불확실성을 고려하여 한반도 미래 수자원 영향 평가 방법이 필요한 것으로 평가하였다. Lee *et al.* (2012)는 미래 기후변화 적용시 SWAT 모형을 이용하여 남강댐 유역의 유출거동 특성을 홍수기와 비홍수기로 구분해 월별, 계절별 분석한 결과, 강우, 상대습도, 최고기온, 최저기온의 값이 강우의 비홍수기를 제외하고는 전체적으로 증가하였다. Ahn *et al.* (2013)은 SWAT 모형을 이용하여 설마천 혼효림 유역을 대상으로 미래 기후변화가 증발산과 토양수분에 미치는 영향을 평가한 결과, 기온, 강수량, 유출량, 증발산비는 증가한 반면 유출률, 토양수분은 감소하였다. Woo *et al.* (2023)은 집중형 수문모형인 IHACRES (Identification of unit Hydrographs and Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data)와 modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J)를 이용하여 강수 및 기온 변화에 따른 유출량 변화를 비교 분석한 결과, 강수와 기온이 증가할 수록 두모형에서 상이한 결과를 보였고, 기후변화의 영향 해석 시 불확실성을 상당히 증가시키는 요소로 판단하였다.

하천유량의 변동성이 댐 운영 등 수자원 관리에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 저수지 운영 모의를 통한 이수 및 치수 안전성에 대한 정량적 분석이 함께 수행되어야 한다. 이수 안전도는 용수공급을 위한 시설이 용수수요에 대하여 실패하지 않고 용수를 안정적으로 공급할 수 있는 정도를 의미하며 (Kwon *et al.*, 2020), 수자원 관리의 안정성을 측정하는 주요 지표로 활용된다. 물 공급의 안정성을 평가하기 위해 이수안전도를 적용한 국내 연구사례로는, 농업용 저수지 나주호를 대상으로 Catchment hydrologic cycle Assessment Tool (CAT) 모형으로 물수지 분석을 수행하고 평년 운영 관리에 따른 이수안전도를 평가한 연구(Jeung *et al.*, 2021)와 농업용 저수지를 대상으로 한발빈도 개념을 적용하여 과거 이수안전도와 기후변화 시나리오를 적용한 미래 이수안전도를 평가하고 기후변화 대응방안을 제시한 연구(Kwon *et al.*, 2020) 등이 있다. 또한, Yoo *et al.* (2021)의 연구에서는 한국의 다목적 댐에 대해 실제 물 부족 자료를 바탕으로 물 부족 지수(water-shortage index; SI)와 일반화 물 부족 지수(generalized water-shortage index; GSI)를 이용하여 우리나라의 댐 용수 공급 능력을 평가하였다. Li *et al.* (2019)의 연구는 중국 뤄허강 유역의 판자커우 저수지의 용수 공급에 대한 가뭄의 영향을 평가하기 위해 copula 기법으로 하천 유량을 산정하고, 신뢰도, 회복도, 취약도, 가뭄 위험 지수(drought risk index; DRI) 및 지속가능성 지수(sustainability index; SUI) 지표를 적용하였다. Hakami-Kermani *et al.* (2020)은 저수지 유입의 불확실성을 고려하여 기후변화가 기상변수와 그에 따른 유출량, 소비량에 미치는

영향을 평가하고 RCP 시나리오에 따라 Namrood Dam Reservoir System Performance Indices의 불확실성을 평가하였다. Li *et al.* (2010)는 미국 프레리 유역의 하천 흐름 및 저수지 운영 성능에 대한 미래 기후 변화의 잠재적 영향을 2001년부터 2100년 기간에 대해 분석하였다. 앞서 살펴본 바와 같이, 강우-유출 및 저수지 연계 해석을 통해 기후변화가 댐 운영에 미치는 영향에 대한 이수 및 치수 측면의 종합적 검토가 필요하나 아직 국내에서 관련 연구가 부족한 편이다.

본 연구에서는 강우유출과 저수지 모형을 결합하여 합천댐 유역을 대상으로 기후변화에 대한 이수안전도 및 홍수위험도 분석을 수행하였다. 기후변화 시나리오는 사회 및 경제적 요인을 고려한 Shared Socioeconomic Pathways 2-4.5(SSP2-4.5) 및 5-8.5(SSP5-8.5)을 활용하였으며, 각각 중간적 및 고강도 지속성을 가지는 시나리오이다. 즉, 장기적 기후변화 완화 및 가속화시 댐 용수공급 및 치수 능력을 평가하였다. 기후변화의 영향을 분석하기 위해 강우-유출-홍수위험도를 연계 분석하였다. 강우-유출모형으로는 GR4J를 활용하였다. 모형의 불확실성을 줄이기 위하여 Kling-Gupta efficiency (KGE)를 목적함수로 매개변수를 보정하였다. GR4J로 모의된 유입량은 HEC-Ressim구조를 가지는 저수지 모형과 결합하였다. 구축된 모형에 기후변화 시나리오를 2100년까지 적용하여 합천댐 이수안전도 및 홍수위험도 변화를 정량적으로 분석하였다.

2. 연구방법 및 자료

2.1 연구지역 및 기후변화 시나리오

연구지역인 합천댐은 대한민국 경상남도 합천군의 합천강의 상류에 위치한 대규모 저수지로(유역면적: 925 km², 유로연장: 63 km), 농업용수 및 상수도 등 지역 수자원 공급과 홍수 방어를 위한 주요한 역할을 담당하고 있다(Fig. 1). 유역 평균 고도는 해발 250~300 m, 댐 지점의 하천 경사는 1/110로 산악 지형에 위치하고 있으며, 토지이용은 농경지가 18%를 차지하고, 유역 대부분은 산림으로 구성되어 있다. 연평균 강수량은 약 1,280 mm이고 연평균 댐 유입량은 약 573,000천 m³이다.

2.2 유출 및 저수지 모형

본 연구에서는 강우-유출 모형 GR4J와 R 기반 저수지 운영 모형을 연계하여 기후변화의 이수안전도 및 홍수위험도 영향을 분석한다. GR4J 모형은 토양수분, 하도저류, 추적과정을 개편화한 집중형 강우-유출 모형으로 2개의 저류지 모듈과 2개의 단위유량도, X1부터 X4까지 4개의 매개변수가 있다(Fig. 2, Table 1). GR4J 모형은 단순한 구조와 비교적 적은 매개변수로 하천 유량을 효율적 재현할 수 있어, 미계측 유역과 같은 수문분석을 위한 자료가 제한적인 유역에 실용적으로 적용할 수 있다(Dakhlaoui *et al.*, 2017). 강우-유출 과정은 차단, 토양수분 저류, 홍수추적 등의 3단계를 통해 계산된다. 입력자료인 강수는 잠재증발과 차단 효과를 고려하여 유효 강우

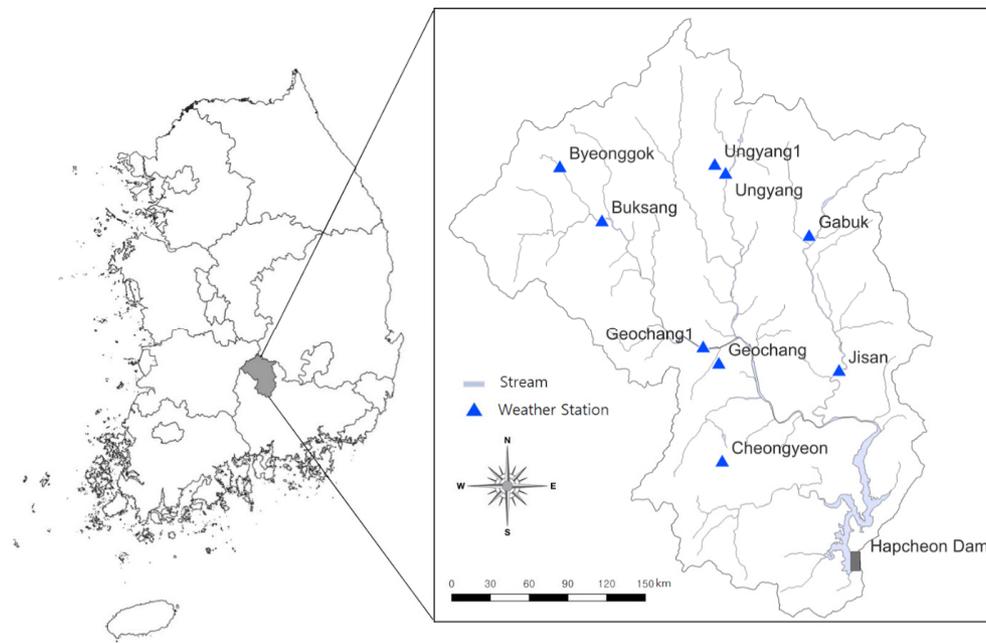


Fig. 1. Study site locations: Hapcheon-Dam catchment. The blue lines and triangles indicate the stream and weather stations, respectively

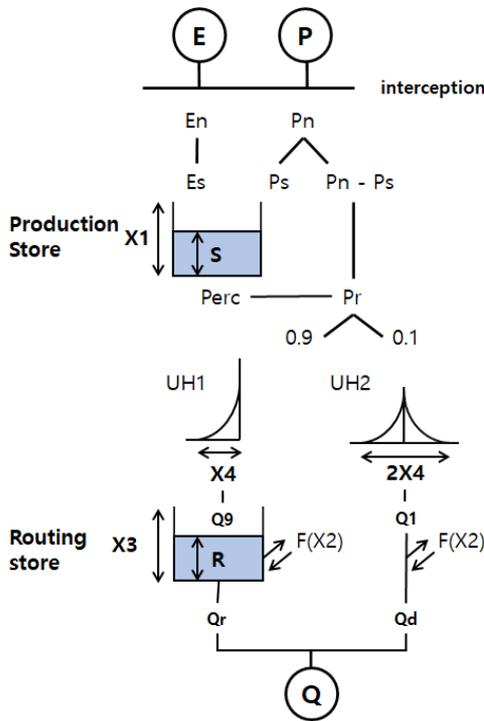


Fig. 2. Schematic diagram of GR4J (adapted from Woo *et al.*, 2022)

Table 1. Description of GR4J parameters (Perrin *et al.*, 2003)

Parameter	Description
X1	Maximum capacity of production store (mm)
X2	Groundwater exchange coefficient (mm)
X3	Maximum capacity of routing store (mm)
X4	Time peak ordinate of hydrograph unit UH1(day)

량으로 환산되고, 토양수분 저류지(production store)에서 유출과 침투(percolation)가 산정된다. 산정된 직접 유출량의 90%는 하천으로 유입되고, 나머지 10%는 지표면을 통해 유출되며, 각각 단위유량도(unit hydrograph)에 의해 유출 시계열로 변환된다. 두번째 저류지(routing store)에서는 단위유량도에 의해 계산된 유량의 하천에서의 지체 및 지하수 유출이 계산된다. 최종적으로 위의 두 과정 즉, 하도와 지하수 유출 유량을 합산하여 유역 유출이 산정된다(Woo *et al.*, 2022).

저수지 운영 모형은 홍수관리, 물 공급, 실시간 의사 결정 지원을 위해 하나 이상의 저수지에서 저수지 운영을 모델링하는 HEC-ResSim과 유사한 구조를 가진 R 모형을 적용한다. R 기반 강우 유출 모형과 결합을 위해 R을 기반으로 구축하였으며, 용수 공급 및 홍수 조절 기능을 고려하여 일 단위 저수지 수위를 산정한다. 모형 입력자료로 댐 고유 특성인 수위, 저수 용량, 공급 계획량, 수위-용량 관계 표와 일시, 일별 유입량이

필요하다. 수위와 저수용량 기준은 각각 상시만수위, 홍수기 제한수위, 저수위용량, 용수공급가능수위, 초기수위에 대한 설정, 공급 기준은 월별 생활, 농업, 하천유지 공급량 설정이 필요하다. 본 연구에서는 연구지역인 합천댐의 제원 및 공급량을 기준으로 저수지 운영모형을 설정하였다. 일시, 일별 유입량이 입력되면 먼저 해당일자의 홍수기, 비홍수기 여부가 구분되어 만수위 기준이 설정되며 해당일자의 공급 필요량이 산정된다. 공급필요량과 저류량의 합과 댐 저수위 용량의 비교에 의해 공급필요량이 공급량, 부족량으로 나뉘어 진다. 이후 해당일자의 만수위 기준과 이전 일자 저류량과 유입량, 공급량이 고려된 양을 비교하여 무효방류량을 결정한다. 해당 일자 저류량은 이전 일자 저류량, 유입량, 공급량, 무효방류량을 고려하여 최종 산정되며, 수위-용량 관계 표에 의해 수위도 산정된다. R 기반 저수지 운영 모형은 댐 이수안전도 평가 및 용수공급 제한을 고려한 저수지 수위 산정, 기후스트레스를 고려한 이수안전도 평가 연구에 적용되어 정확도가 검증된 모형이다(K-water, 2021).

2.3 기후변화 시나리오

본 연구에서는 기후변화 시나리오인 SSP245와 SSP585을 활용하였다. 이는 미래사회 및 경제 발전을 반영한 IPCC에서 발표한 제 6차 보고서의 온실가스 배출에 대한 대처 조치를 바탕으로 작성된 시나리오이다. 여기서 SSP2-4.5 시나리오는 이산화탄소 배출이 증가하지 않으면서, 기후변화 관리와 온난화를 제한하는 시나리오로, 기후변화에 대한 대응조치와 온실가스 감축을 통한 기후의 미래를 예측한 시나리오이다. SSP2-4.5시나리오는 기후 시스템에 대한 영향을 제한하기 위해 상대적으로 온도 상승에 제한을 두었으며 이는 전세계 평균 온도 상승이 2°C 정도로 제어하여 온실가스 배출 감축하는 시나리오이다. 또한, 강수량의 변화로는 지역별 변화를 예측하고, 이 변화는 지역적 특성과 기후 모델링 결과에 따라 다를 수 있다. SSP5-8.5시나리오는 높은 이산화탄소 배출증가와 저성장 경로를 따르는 시나리오로, 지속적인 화석연료 사용과 기후변화 대응에 대한 제한적인 노력으로 인한 미래에 높은 수준의 기후변화 발생을 예측한 시나리오이다. 여기서 SSP5-8.5시나리오는 높은 온실가스 배출로 인하여 전세계 평균 온도가 4.5°C 이상으로 상당히 높은 수준의 온도 상승을 예측하여 그에 따른 기후 시스템의 변화가 발생하는 것을 예측한 시나리오이다.

본 연구에서는 기상청 기후정보포털(<http://www.climate.go.kr>)에서 제공하는 동아시아 데이터를 활용하여 각 시나리오를 대상으로 2015년부터 2100년 까지의 강우와 온도를 활

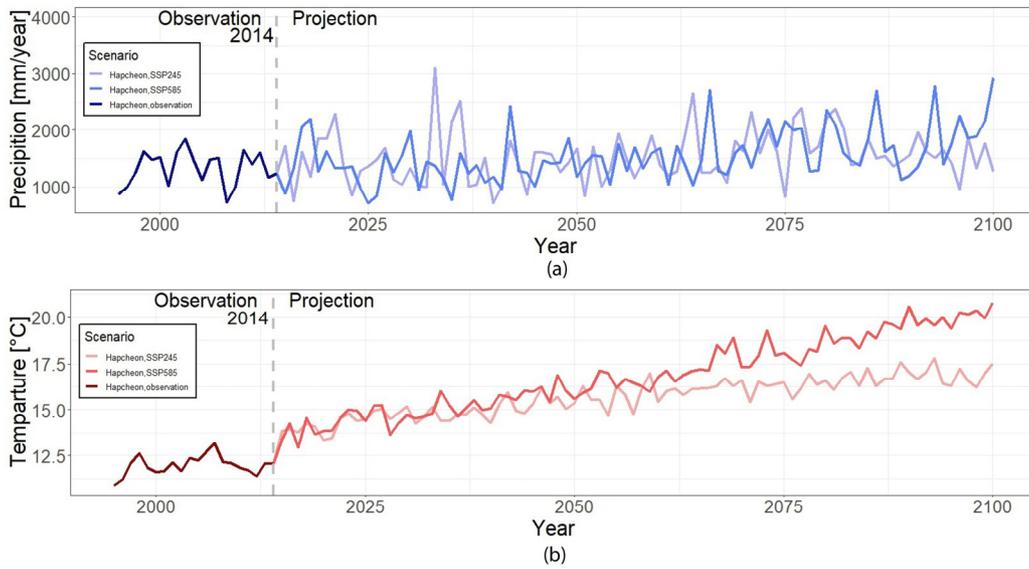


Fig. 3. Historical and climate change scenarios at the Hapcheon-Dam catchment. (a) Observed precipitation from 1995 to 2014 (dark blue), and precipitation under SSP2-4.5 (light blue) and SSP5-8.5 (middle blue). (b) Observed temperature from 1995 to 2014 (dark blue), and temperature under SSP2-4.5 (light blue) and SSP5-8.5 (middle blue)

용하였다(Fig. 3). 과거 관측소 자료(1995년부터 2014년)와 동아시아에서 제공하는 과거 역사적 시나리오(Historical scenario)를 분위수 매핑(Quantile Mapping)을 실시하여 과거 관측 데이터의 경향성을 기후변화 시나리오에 적용하였다. 여기서 분위수 매핑이란, 기후 모델링에서 기후 모델의 결과를 관측데이터와 조정하기 위해 사용되는 통계적 방법이다. 이 방법은 기후 모델의 편향이나 불안정한 모델링 문제를 극복하고 기후 모델의 예측을 관측데이터와 일치시키기 위해 개발되었다. 분위수 매핑의 기본개념은 분위수 함수(Quantile function)와 조정 함수(Mapping function)을 통해 기후 모델의 출력값과 관측 데이터의 분위수 함수 간의 관계를 통해 누적분포함수로 표현하여 모델값과 관측값을 일치시키기 위해 산정되는 과정이다. 식은 다음과 같다(Heo et al., 2019).

$$Y_{adj} = \frac{F_{mod}(Y_{mod})}{F_{obs}} \quad (1)$$

여기서 Y_{adj} 는 조정된 값, F_{obs} 는 관측 데이터의 누적분포함수, F_{mod} 는 기후모델의 출력값 Y_{mod} 의 누적분포함수이다. 본 연구에서는 1995년부터 2014년까지의 과거 관측값을 과거 기간에 대한 모의 시나리오(Historical scenario)에 적용하여 보정 매개변수를 산정하고, 2100년까지의 기후변화 시나리오를 보정하였다.

2.4 수문모형 평가지표

저수지 모의 운영을 통해 물의 공급의 안정성을 평가하기 위해서 수문 모형을 평가하기 위한 평가지표로 Kling-Gupta Efficiency (KGE)를 활용하였다. KGE는 상관 관계, 변동성 및 위치 차이를 종합적으로 평가하여 수문모형의 성능을 더 정확하게 평가할 수 있는 지표이다. 위 지표는 예측의 정확성, 편향, 분산 등 다양한 측면에서 모형의 성능을 평가되며, 식은 다음과 같다.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (2)$$

여기서, r 은 상관 계수(예측값과 관측값 사이의 선형상관계수 관계), α 는 예측값의 표준편차/관측값의 표준편차, β 는 예측값의 평균/관측값의 평균을 나타낸다.

2.5 이수안전도 및 홍수위험도

이수안전도는 용수수요를 충족 시킬 수 있는 물 공급의 안정성 정도를 나타내는 지표(Lee et al., 2012)로 댐의 용수 공급 능력을 평가하는 척도로 사용된다. 이수안전도를 산정하기 위해 Hashimoto et al. (1982)에서 제안한 지표 중 신뢰도 지표가 활용되고 있으며, 신뢰도는 운영단위 및 평가 단위에 따라 발생신뢰도(occurrence reliability), 기간신뢰도(durational reliability), 양적신뢰도(quantitative reliability)로 구분된다. 발생신뢰도는 전체 계획기간(연도)에 대한 댐의 계획공급량

을 공급할 수 있는 연수로 정의되며, 연단위 기간신뢰도와 같다. 기간신뢰도는 전체 계획 기간의 분석단위(일, 반순(5일), 순(10일), 월) 총 기간 수에 대한 댐의 계획공급량을 공급할 수 있는 기간수로 정의되며, 식은 다음과 같다. 여기서 Rel_T 는 기간신뢰도(%), T_f 는 댐에서 계획공급량을 공급하지 못한 기간 수(일/반순/순/월/년), T_t 는 전체 계획기간 수(일/반순/순/월/년)이다.

$$REL_T = \left(1 - \frac{\sum T_f}{T_t}\right) \times 100(\%) \quad (3)$$

양적신뢰도는 전체 계획기간에 대한 분석기간 동안 댐으로부터 공급해야 할 계획공급량에 대한 실제 용수공급량으로 정의할 수 있다. 부족기간에는 댐 유입량을 그대로 공급한다고 가정하여 댐 유입량을 실제 공급량으로 대치하여 계산한다. 식은 다음과 같다. 여기서 Rel_{QP} 는 양적신뢰도(%), QP_f 는 댐에서 공급하지 못한 계획공급부족량, QP_t 는 전체 계획기간동안 총 계획공급량이다.

$$Rel_{QP} = \left(1 - \frac{\sum QP_f}{QP_t}\right) \times 100(\%) \quad (4)$$

홍수위험도는 어떠한 확률로 발생할 홍수에 대해 발생가능한 잠재적인 피해이다. 홍수위험도를 평가하는 방법으로는 홍수위험지수(Flood Risk Index, FRI), 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage, PFD), 홍수취약도 등이 있으나 대부분 하천 유량이나 유역단위 유출과 연관되어 산정되며, 저수지 운영을 고려한 관련된 지표는 드물다. 본 연구에서는 강우-유출 및 저수지 연계모의 후 댐 수위가 상시만수위에 도달한 일수를 연별로 계산한 후, 연도별 편차의 영향을 줄이고 중

장기적인 트렌드를 파악하기 위해 5년간 이동평균하여 홍수위험도를 분석하였다. 상시만수위는 정상적인 댐 운영조건에서 올라갈 수 있는 최대수위이며 용수공급과 수력발전, 하천유지 유량 등 저수지 조작을 할 수 있는 저류용량의 상한선을 의미한다.

3. 결과 및 분석

3.1 모형의 검보정

본 연구에서는 합천댐의 관측자료로 1995년부터 2014년까지의 시계열 강우와 온도를 바탕으로 수문모형 GR4J모형의 평가를 수행하였다. 각 검정기간과 보정기간은 7:3 비율로 검정기간은 1995~2008년으로 14년, 보정기간은 2009~2014년으로 6년의 기간을 활용하였다. Fig. 4(a)는 합천댐의 전체 기간에 모의 유량과 관측 유량을 비교한 1대1 그래프를 나타내었다. 전 기간에 대해서 KGE는 0.9424의 높은 신뢰성으로 나타났다. Fig. 4(b)는 모델값과 관측값을 수위곡선으로 나타냈으며, 합천댐의 상시만수위와 저수위를 나타내었다. 모델값과 관측값의 비교결과 KGE는 0.9527으로 나타났다. 또한 각 모델값과 관측값의 5일단위 기간신뢰도를 비교해보았을 때 관측값은 90.7%, 모델값은 93.4%로 산정되었으며, 두 값의 차이가 2.7%로 높은 신뢰성을 보였다. 즉, 본 연구에서 구축된 모형은 기후변화의 이수안전도 및 홍수위험도 영향 분석에 적합하며, 미래의 기후 변화에 댐 운영 및 대응하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 평가된다.

3.2 이수안전도

관측과 기후변화 시나리오에 따른 강우 유출과 저수지 연계 모의한 결과를 이수안전도로 평가 및 분석하였다(Fig. 5).

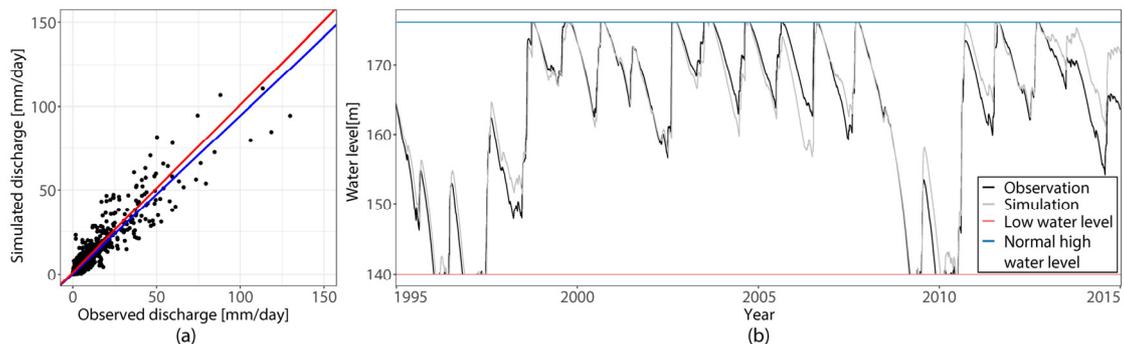


Fig. 4. Rainfall-runoff modeling validation. (a) Comparison between observed and modeled discharge. The red and blue lines in (a) represent the 1:1 relationship and trend line, respectively. (b) Observed (black) and simulated (gray) water levels. The blue and red lines in (b) represent normal high- and low-water level, respectively

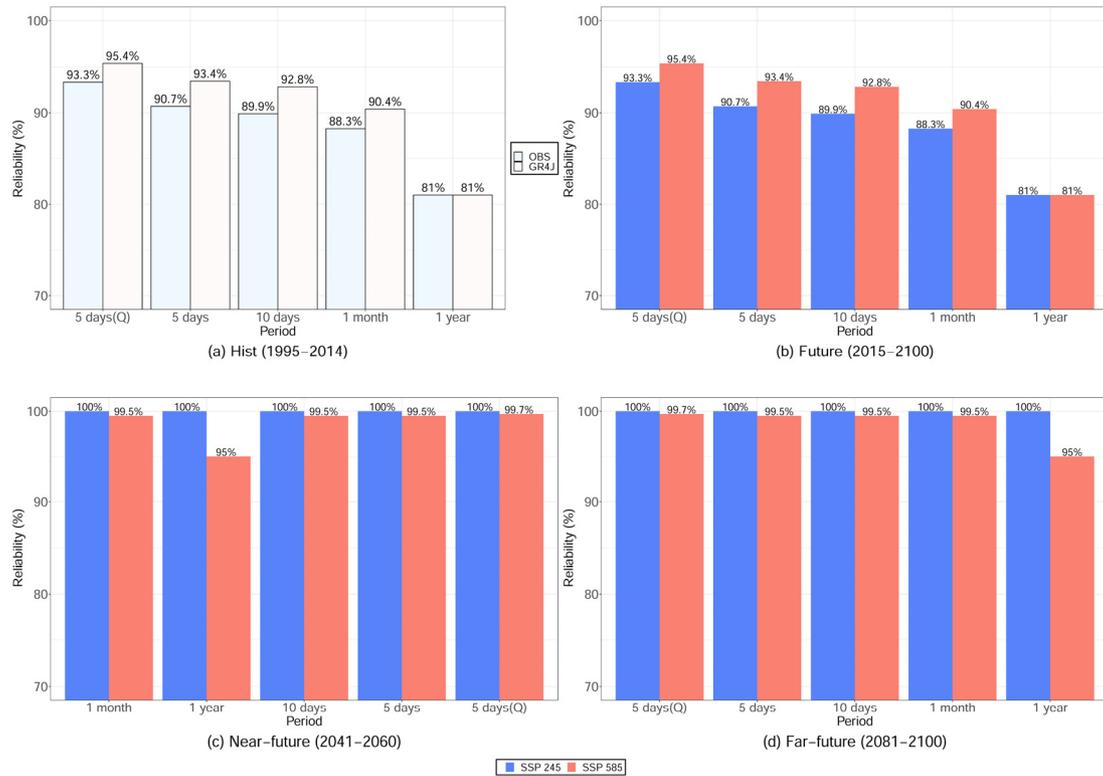


Fig. 5. Assessment of water supply reliability for (a) historical period (1995-2014) and (b) future (2015-2100), (c) near-future (2041-2060), and (d) far future periods (2081-2100) under SSP2-4.5 (blue) and SSP5-8.5 (red)

이수안전도를 평가하는 지표 중 하나로 기간 신뢰도는 5일, 10일, 월, 년 단위로, 양적 신뢰도는 5일 단위로 분석을 수행하였다. 양적 신뢰도는 분석단위(5일, 10일, 월, 년)와 관계없이 전체 계획기간 중 댐으로부터 공급해야 할 계획공급량에 대한 실제 용수공급량을 평가하는 지표로, 분석단위를 구분하여도 결과는 동일하므로 5일 단위에 대해서만 분석하였다. Fig. 5(a)는 과거(1995~2014년) 기간에 대해 관측과 GR4J 모형으로 모의한 결과를 기간 및 양적 신뢰도에 대해 비교하였다. Fig. 5(b)는 미래(2015~2100년) 기간에 대해 기후변화 시나리오 SSP2-4.5와 SSP5-8.5를 GR4J 모형에 적용 모의한 결과를 기간 및 양적 신뢰도로 평가하였다. Figs. 5(c) and 5(d)는 기후변화 시나리오 SSP2-4.5와 SSP5-8.5를 GR4J 모형에 적용 모의한 결과를 근미래(2041~2060년), 먼미래(2081~2100년) 기간에 대해 기간 및 양적 신뢰도로 분석하였다. 과거 기간에 대해 GR4J 모의결과와 관측자료를 기간 및 양적 신뢰도로 평가한 결과, 모의 결과는 양적 신뢰도에서 관측자료와 최대 2.1% 차로 해당 유역에 대한 강우-유출 및 저수지 운영 연계 모의의 신뢰성은 높았으며, 1년 단위 평가시에는 동일한 기간 신뢰도(81%) 결과가 산정되었다(Fig. 5(a)). 미래 기간에 대해 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오를 적용한 결과는 두 시나

리오 모두 기간 및 양적 신뢰도가 과거 기간 대비 상향되었다. 특히 1년 단위로 평가한 기간 신뢰도는 81%에서 SSP2-4.5는 94.3%, SSP5-8.5는 92%로 높아졌다(Fig. 5(b)). 근미래와 먼미래에 대해 비교 분석한 결과 SSP2-4.5는 근미래, 먼미래 모두 이수안전도가 100%로 확인되었다. SSP5-8.5에 대해서는 1년 단위 기간신뢰도를 제외하면 모두 먼미래로 갈수록 신뢰도가 높아졌다(Figs. 5(c) and 5(d)). 이는 SSP5-8.5 시나리오 보다는 SSP2-4.5 시나리오가 신뢰도가 더 높고, 근미래에서 먼미래로 갈수록 기후변화로 인해 양적으로 풍부해져 용수 공급이 안정성이 높아지는 것을 의미한다.

3.3 홍수위험도

과거 및 미래기후에 대한 홍수위험도를 분석하기 위해 상시만수위의 평균, 중앙값, 최소값, 최대값, 사분위수 범위를 기간별로 분석하였다. 구체적으로, 댐에서의 매년 상시만수위 도달 일 수의 5년 이동평균한 결과를 과거(1995~2014년) 및 미래(2015~2100년)에 대해 분석하고, 근미래(2041~2060년), 먼미래(2081~2100년)에 대해 기간별로 분석하였다(Fig. 6). 과거기간(Fig. 6(a))은 관측과 GR4J 모의결과를, 미래기간(Figs. 6(b)~6(d))은 SSP2-4.5와 SSP5-8.5의 상시만수위

도달 일수를 비교하였다.

과거와 미래기간에 대한 상시만수위 평균값을 분석한 결과, 과거 기간의 관측과 GR4J 모형 결과값은 각각 19.9, 13.6일로 나타났고, 미래기간의 SSP2-4.5와 5-8.5는 각각 27.7, 23.5일로 나타났으며, 과거기간 대비 미래기간에서 상시만수위 평균값은 증가하였다(Table 2). 근미래와 먼미래에 대한 상시만수위 평균값을 분석한 결과, SSP2-4.5는 18.8에서 33.3일, SSP5-8.5는 16.5에서 38.5일로, 근미래에서 먼미래로 갈수록 상시만수위 도달 일수의 평균값은 높아졌다. 상시만수위의 사분위수 범위 또한 근미래에서 먼미래로 갈수록 증가하였다. 근미래의 경우 SSP2-4.5는 16.1-21.2, SSP5-8.5는 13.2-21.2이며, 먼미래의 경우 SSP2-4.5는 30.0-37.6, SSP5-8.5는 31.8-47.0로 나타났다. 즉, 근미래 기간에서는 먼미래 기간에 비해 상대적으로 홍수위험도의 영향을 적게 받으며, 먼미래 기간일수록 홍수위험도가 증가하는 것으로 분석되었다. 특히, SSP2-4.5와 SSP5-8.5 두 시나리오 모두 먼미래에서 평균값은 33.3, 38.5, 중앙값은 32.2, 42.2로 두 시나리오 모두 먼미래에서 홍수위험도가 가장 높은 시기로 분석되었다. 본 연구에서는 기후변화 적용시 기간 및 양적 신뢰도는 과거기간 대비 상향되었지만 홍수위험도는 전반적으로 증가하는 것으로 분석되었다.

3.4 강수-유출-홍수위험도 연계 분석

기후변화에 따른 강수 및 기온의 변동성이 유역 유출 및 홍수위험도에 미치는 영향에 대해 분석하였다. Fig. 7은 연간 총 강우, 유출, 홍수시 댐 방류량(댐무효방류량)의 과거(1995~2014년) 대비 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오에 따른 미래기간 변화 비율(%)을 산정한 결과이다. 이 중 댐무효방류량은 Fig. 6의 상시만수위 도달 일수 기간동안 댐에서 방류되는 홍수량을 산정한 것이다. Fig. 7 세부 그림의 맨 왼쪽 두 막대를 비교하면, 미래 전기간(2015~2100년)의 연총강수량은 SSP2-

4.5와 SSP5-8.5 시나리오에서 과거에 비해 각각 7.66%, 9.16% 증가하며, 이에 대해 연총유출(runoff)은 각각 8.47%, 8.98% 증가한다. 즉, 연 총량 관점에서 강우-유출의 변동성은 유사한 상관성을 갖는 것으로 분석되었다. 하지만, 미래 유출 증가가 10% 미만임에도, Fig. 7(c)의 홍수시 댐무효방류량은 SSP2-4.5와 SSP5-8.5에서 각각 121.96%, 129.41%로 급격하게 증가하여, 댐의 홍수위험도에 큰 변화가 발생할 가능성이 간접적으로 확인되었다. 또한, 강수-유출-홍수위험도는 근미래(2041~2060년), 먼미래(2081~2100년) 두 기간에 확연하게 다른 특성을 갖는 것으로 분석되었다. 특히, SSP5-8.5 시나리오의 먼미래에서는 강수, 유출, 무효방류량이 과거 대비 각각 29.25%, 35.21%, 291% 증가하여, 댐의 홍수위험도가 가장

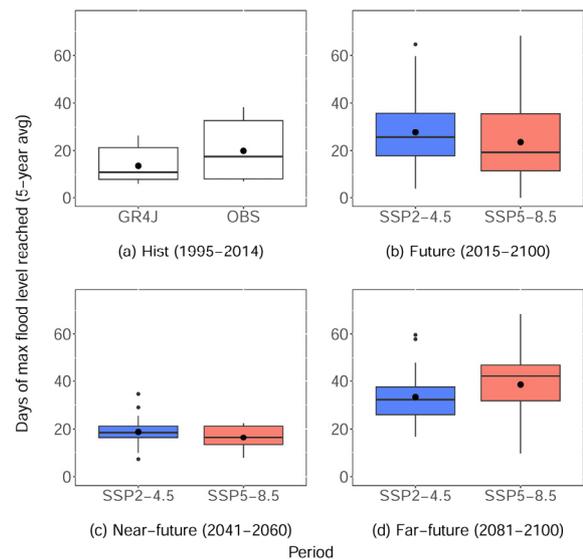


Fig. 6. Assessment of flooding risk for (a) historical period (1995-2014) and (b) future (2015-2100), (c) near-future (2041-2060), and (d) far future periods (2081-2100) under SSP2-4.5 (blue) and SSP5-8.5 (red)

Table 2. Flood risk analysis for historical (Hist) and two future periods (Near- and Far-future)

Observation and simulation periods		Days of flood level reached (5-year avg)				
		Mean	Median	Min.	Max.	Interquartile (25-70%)
Hist (1995-2014)	OBS	19.9	17.5	7.2	38.2	8.2 – 32.8
	GR4J	13.6	11.0	6.2	26.2	8.0 – 21.3
Future (2015-2100)	SSP2-4.5	27.7	25.6	4.2	64.6	17.8 – 35.8
	SSP5-8.5	23.5	19.3	0.0	68.2	11.6 – 35.6
Near-Future (2041-2060)	SSP2-4.5	18.8	18.5	7.2	34.6	16.1 – 21.2
	SSP5-8.5	16.3	16.2	7.8	22.4	13.2 – 21.2
Far-future (2081-2100)	SSP2-4.5	33.3	32.2	16.4	59.6	30.0 – 37.6
	SSP5-8.5	38.5	42.2	9.6	68.2	31.8 – 47.0

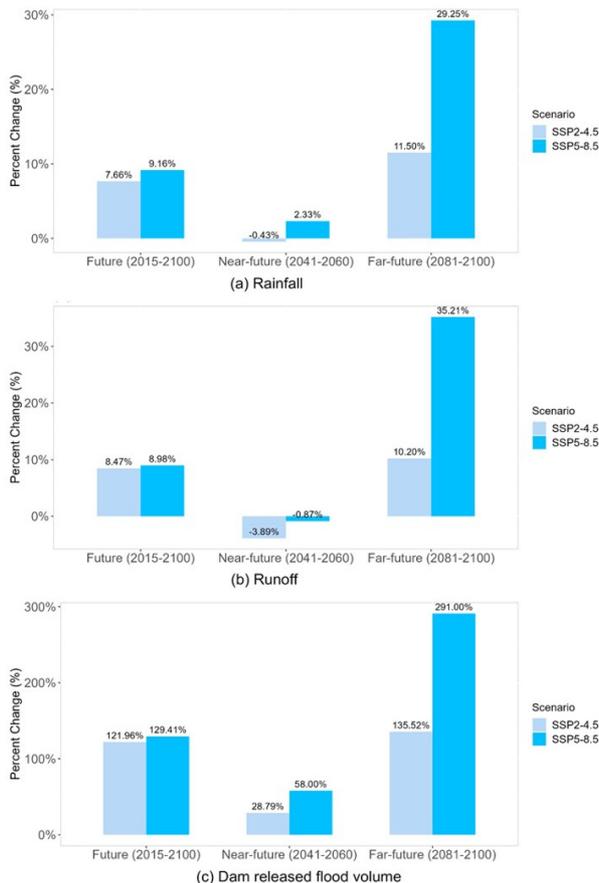


Fig. 7. Assessment of the percentage change in (a) rainfall, (b) runoff, and (c) dam-released flood volume during future (2015-2100), near-future (2041-2060), and far-future periods (2081-2100) under SSP2-4.5 (sky blue) and SSP5-8.5 (blue) compared to the historical period (1995-2014)

큰 증가를 보였다. 근미래의 연 총 강수와 유출은 먼미래에 비해 크지 않아서, SSP2-4.5 조건에서 강수와 유출은 각각 -0.43%, -3.89%로 일부 감소하며, SSP5-8.5에서의 과거대비 변화율은 각각 2.3%, 0.87%였다. 반면, 근미래의 댐무효방류량은 SSP2-4.5와 SSP5-8.5에서 각각 28.79%, 58% 증가하여, 댐의 홍수위험도는 더 증가하는 것으로 나타났다. 이는 연 총강수량보다 일최대강수량의 변화가 더 컸기 때문으로 분석되며, 다양한 기후변화 모형의 결과를 적용한 후속 연구가 필요한 부분이다.

4. 결론

본 연구는 기후변화에 대한 합천댐 유역의 이수 및 치수 부분 영향을 평가하기 위해 수문모형 GR4J와 저수지 운영 모형을 연계모의하고 이수안전도와 홍수위험도를 분석하였다.

(1) 과거 기간과 기후변화 시나리오에 대한 이수안전도 분석을 통해, 모의 결과와 관측 데이터 간의 신뢰성을 확인하였다. SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오에 대한 이수안전도 분석 비교 결과, SSP2-4.5에서 더 높은 이수안전도를 보였다. 또한 근미래(2041-2060)와 먼미래(2081-2100)에 대한 분석에서는, SSP5-8.5 시나리오에서 먼미래로 갈수록 연단위를 제외한 나머지 단위의 기간신뢰도 모두 비교적 높은 이수안전도를 보였다. 이는 먼미래로 갈수록 기후변화로 인한 수자원의 양적 풍부부의 의미하는 것으로 평가된다. 반면, (2) 홍수위험도의 과거와 미래 기후에 대한 위험도를 분석한 결과, 미래 기간의 홍수위험도가 상승하는 경향을 보였다. 특히, 먼미래 기간(2081-2100)에서는 홍수 위험도의 범위가 더욱 넓어지는 것으로 나타났다. 또한, SSP2-4.5와 SSP5-8.5 두 시나리오 모두 먼미래 기간에서 홍수 위험도의 중앙값이 가장 높았다. 본 연구의 대상지역에 대해서는 기후변화로 인해 먼미래에 더 많은 홍수 발생 가능성이 높아지는 것으로 나타났으나, 수자원 시설의 효과적인 기후변화 대비를 위해서는 이수 및 치수 양면을 고려한 종합적인 분석과 대책 수립이 필요한 것으로 판단된다.

감사의글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1C1C1004801).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Reference

- Ahn, S.-R., Park, G., Jang, C., and Kim, S. (2013). "Assessment of climate change impact on evapotranspiration and soil moisture in a mixed forest catchment using spatially calibrated SWAT Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 6, pp. 569-583.
- 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.
- Dakhlaoui, H., Ruelland, D., Trambly, Y., and Bargaoui, Z. (2017). "Evaluating the robustness of conceptual rainfall-runoff models

- under climate variability in northern Tunisia.” *Journal of Hydrology*, Vol. 550, pp. 201-217.
- Hakami-Kermani, A., Babazadeh, H., Porhemmat, J., and Sarai-Tabrizi, M. (2020). “An uncertainty assessment of reservoir system performance indices under the climate change effect.” *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 11, No. 4, pp. 889-904.
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R., and Loucks, D.P. (1982). “Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation.” *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20.
- Heo, J.-H., Ahn, H., Shin, J.-Y., Kjeldsen, T.R., and Jeong, C. (2019). “Probability distributions for a quantile mapping technique for a bias correction of precipitation data: A case study to precipitation data under climate change.” *Water*, Vol. 11, No. 7, 1475.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022). “Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability.” *Contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Edited by Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., Rama, B., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, U.S., p. 116.
- Jeung, M., Beom, J., Sung, M., Lee, J., Yoo, S., and Yoon, K. (2021). “Evaluation of irrigation safety by operation management of water supply from large scale agricultural reservoirs.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Kosham, Vol. 21, No. 1, pp. 189-198.
- Kim, B., Kim, H.S., and Seoh, B. (2004). “Evaluation of the evapotranspiration models in the SLURP hydrological model.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 9, pp. 745-758.
- K-water (2021). *A study on the supply and demand prospects of water supply in Geum river and the drought measures in the western region of Chungnam province*.
- Kwon, H.-J., Nam, W.-H., and Choi, G.-S. (2020). “An irrigation reliability assessment of agricultural reservoir to establish response plan of future climate change adaptation.” *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 62, No. 2, pp. 111-120.
- Lee, J.-M., Kim, Y.D., Kang, B., and Yi, H.-S. (2012). “Impact of climate change on runoff in namgang dam watershed.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 6, pp. 517-529.
- Li, J., Gao, Z., Guo, Y., Zhang, T., Ren, P., and Feng, P. (2019). “Water supply risk analysis of Panjiakou reservoir in Luanhe River basin of China and drought impacts under environmental change.” *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 137, No. 3, pp. 2393-2408.
- Li, L., Xu, H., Chen, X., and Simonovic, S.P. (2010). “Streamflow forecast and reservoir operation performance assessment under climate change.” *Water Resources Management*, Vol. 24, No. 1, pp. 83-104.
- National Institute of Meteorological Science (NIMS) (2018). *Climate change report on the Korean Peninsula for 100 Years*, p. 24.
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. (2003). “Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation.” *Journal of Hydrology*, Vol. 279, No. 1-4, pp. 275-289.
- Shon, T.S., Lee, S.-D., Kim, S., and Shin, H. (2010). “An analysis of the effect of climate change on flow in Nakdong River basin using watershed-based model.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 10, pp. 865-881.
- Woo, D.K., Jo, J., Kang, B., Lee, S., Lee, G., and Noh, S.J. (2023). “Assessing the sensitivity of runoff projections under precipitation and temperature variability using IHACRES and GR4J lumped runoff-rainfall models.” *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 43, No. 1, pp. 43-54.
- Woo, D.K., Riley, W.J., Grant, R.F., and Wu, Y. (2022). “Site-specific field management adaptation is key to feeding the world in the 21st century.” *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 327, 109230.
- Yoo, C., Jun, C., Zhu, J., and Na, W. (2021). “Evaluation of dam water-supply capacity in Korea using the water-shortage index.” *Water*, MDPI, Vol. 13, No. 7, 956.