



The effect of climate change on hydroelectric power generation of multipurpose dams according to SSP scenarios

Wang, Sizhe^a · Kim, Jiyoung^b · Kim, Yongchan^c · Kim, Dongkyun^d · Kim, Tae-Woong^{e*}

^aMaster Student, Department of Civil and Environmental Systems Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

^bDoctoral Student, Department of Smart City Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

^cDoctoral Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hongik University, Seoul, South Korea

^dProfessor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hongik University, Seoul, South Korea

^eProfessor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea

Paper number: 24-030

Received: 23 May 2024; Revised: 3 July 2024; Accepted: 5 July 2024

Abstract

Recent droughts make hydroelectric power generation (HPG) decreasing. Due to climate change in the future, the frequency and intensity of drought are expected to increase, which will increase uncertainty of HPG in multi-purpose dams. Therefore, it is necessary to estimate the amount of HPG according to climate change scenarios and analyze the effect of drought on the amount of HPG. This study analyzed the future HPG of the Soyanggang Dam and Chungju Dam according to the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. Regression equations for HPG were developed based on the observed data of power generation discharge and HPG in the past provided by My Water, and future HPGs were estimated according to the SSP scenarios. The effect of drought on the amount of HPG was investigated based on the drought severity calculated using the standardized precipitation index (SPI). In this study, the future SPIs were calculated using precipitation data based on four GCM models (CanESM5, ACCESS-ESM1-5, INM-CM4-8, IPSL-CM6A) provided through the environmental big data platform. Overall results show that climate change had significant effects on the amount of HPG. In the case of Soyanggang Dam, the amount of HPG decreased in the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. Under the SSP2-4.5 scenario the CanESM model showed a 65% reduction in 2031, and under the SSP5-8.5 scenario the ACCESS-ESM1-5 model showed a 54% reduction in 2029. In the case of Chungju Dam, under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios the average monthly HPG compared to the reference period showed a decreasing trend except for INM-CM4 model.

Keywords: Climate Change, Hydroelectric Power Generation, Multipurpose Dam, SSP Scenarios

SSP 시나리오에 따른 기후변화가 다목적댐 수력발전량에 미치는 영향 분석

왕사철^a · 김지영^b · 김용찬^c · 김동균^d · 김태웅^{e*}

^a한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 석사과정, ^b한양대학교 대학원 스마트시티공학과 박사과정,

^c홍익대학교 대학원 토목공학과 박사과정, ^d홍익대학교 건설환경공학과 교수, ^e한양대학교(ERICA) 건설환경공학과 교수

요지

최근 발생한 가뭄으로 인해 수력발전량이 감소하고 있다. 또한, 미래 기후변화로 인해 가뭄의 빈도와 강도는 커질 것으로 예상되며, 이는 다목적댐의 수력발전량에 대한 불확실성이 커지게 할 것이다. 따라서 미래 기후변화 시나리오에 따른 수력발전량을 추정하고, 가뭄이 수력발전량에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오에 따른 소양강댐과 충주댐의 수력발전량을 분석하였다. My water에서 제공되는 수력발전량, 발전방류량 및 총방류량 자료를 바탕으로 수력발전량에 대한 회귀방정식을 개발하고, SSP 시나리오에 따른 미래 수력발전량을 추정하였다. 또한 환경 빅데이터 플랫폼을 통해 제공되는 4개의 GCM (CanESM5, ACCESS-ESM1-5, INM-CM4-8, IPSL-CM6A) 모델에 대한 강수량 자료를 기반으로 표준강수지수(SPI)를 산정하여 연간 가뭄 심각도를 계산하고, 가뭄에 따른 수력발전량을 비교 분석하였다. 전체적인 분석 결과 기후변화는 수력발전량에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 소양강댐의 경우, SSP2-4.5 및 SSP5-8.5 시나리오에서 수력발전량이 감소하는 추세가 나타났고, SSP2-4.5 시나리오에서 CanESM 모델은 2031년에 65%, SSP5-8.5 시나리오에서 ACCESS-ESM1-5 모델은 2029년에 54% 감소하는 것을 나타냈다. 충주댐의 경우, SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오에서 기준 기간 대비 월평균 수력발전량이 INM-CM4 모델을 제외하고 감소 추세를 보였다.

핵심용어: 기후변화, 가뭄, 수력발전량, 다목적댐, SSP 시나리오

*Corresponding Author. Tel: +82-31-400-5184

E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr (Kim, Tae-Woong)

1. 서론

수력발전은 전 세계 주요 전력 공급원 중 하나로서 글로벌 에너지 시스템에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 2022년 전 세계 수력 발전량은 4,400 TWh로, 전 세계 총발전량의 15%에 해당한다(Roger and Eddie, 2023). 2023년 우리나라 신재생에너지 발전량은 총발전량의 9.2%를 차지했으며, 수력발전량은 신재생에너지 발전량 중 6%를 차지했다(KOSIS, 2023). Qin *et al.* (2020b)은 5개 기후모델(General Circulation Model, GCM)을 통해 기후변화가 중국의 양쯔강 상류 유역 전력 수요에 미치는 영향을 분석했다. 그 결과 미래 수력발전량은 증가하지만, 전력 수요 증가에 비해 훨씬 적어서 전력의 공급과 수요의 격차가 커지게 된다. Guo *et al.* (2021)은 대표 농도 경로(Representative Concentration Pathways, RCP)에 따른 이란 Manjil 유역의 수력발전량을 예측하였으며, 그 결과 미래 발전량은 계절에 따라 불균형한 추세를 보이는 것으로 나타났다.

기후변화로 인해 유출의 변동성이 점점 커지고 있다. 특히, 가뭄 기간 동안에는 유량이 정상 수준보다 낮아지며, 터빈을 통한 방류량 감소로 인해 수력발전량이 줄어든다(Zhao *et al.*, 2023). Kankam-Yeboah *et al.* (2013)은 무작위 기후 생성기를 사용하여 가나의 White Volta와 Pra 강 유역의 유량에 대한 기후변화의 영향을 평가하였다. 그 결과 2020년대와 2050년대에 두 유역의 강수량이 감소하고, 이에 따라 연평균 유량이 상당히 감소한다는 것을 보여주었다. Wagner *et al.* (2017)은 강우-유출 모델(Rural Genius model)을 사용하여 알프스 지역의 유출 변화를 추정하였다. 그 결과 2031년부터 2050년까지의 겨울과 봄에는 유출량이 증가할 것이지만 여름에는 감소하는 것으로 나타났다. Ghafouri-Azar and Bae (2018)는 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)의 INMCM4 모델을 이용하여 우리나라의 하천유량을 예측하였으며, 그 결과 RCP 4.5 시나리오에서는 2025년대와 2055년대 유출량이 각각 7.23%와 3.81% 감소하는 것으로 나타났다.

유출량 감소는 수력발전량에 영향을 미친다. Pieter *et al.* (2018)은 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) A1B 시나리오에 기반하여 예측된 강수량을 바탕으로 브라질 북부와 북동부 지역의 강수량 감소가 유출량과 수력발전량에 미치는 영향을 분석했다. 그 결과 2030년까지 São Francisco 강의 연간 평균 수력발전량이 60% 감소할 것으로 예상되었다. Kim *et al.* (2022a)는 수문 모델인 WATFLOOD (a Micro-Computer Based Flood Forecasting System Based on Real-Time Weather Radar)와 HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)를 사용하여 넬슨강 하

류의 지역 유량을 모의했다. 모의 결과, 2021~2050년과 2041~2070년의 겨울 저수지 유입량이 각각 35%와 37% 감소하며 이는 수력발전 잠재량을 감소시키는 것으로 나타났다. Kim *et al.* (2023)은 충주댐의 발전량과 기상 재해 관련 자료를 수집하고 PLS-SEM (Partial Least Square-Structural Equation Modeling)을 통해 기상 재해가 수력발전량에 미치는 영향을 분석하여 가뭄은 수력발전량에 38.3% 영향이 있는 것을 보여주었다. Kim *et al.* (2022b)는 물리 수문 모델인 VIC (Variable Infiltration Capacity) 모델과 딥러닝(Deep Learning) 모델을 결합하여 미래의 기후 시나리오에서 소양강댐과 충주댐의 유입량 및 발전방류량을 예측했다. 예측 결과에 따르면, 미래의 가뭄 사건이 더욱 빈번해질 것이며, 가뭄 발생 시 유량이 급격히 감소하고 미래의 가뭄기 발전방류량에 영향을 줄 것으로 나타났다. Qin *et al.* (2020a)는 RCP_2.6, RCP_4.5, RCP_8.6 시나리오에서 5개의 GCM 모델 자료를 사용하여 중국 댐 성능에 대한 기후변화의 영향에 대한 연구를 수행했다. 그 결과 홍수기 유입량이 증가할 것이지만 수력발전량은 증가하지 않는 것으로 나타났다.

이처럼, 미래 기후 시나리오에서 수력발전량에 미치는 영향에 대한 대부분의 연구는 주로 댐의 유입량, 유출량 및 방류량을 계산하여 미래의 수력 공급 안정성을 결정하는 데 중점을 두었다. 그러나 미래의 기후변화로 인해 수력발전량에 미치는 영향은 시나리오마다 다르다. 그러므로 기후변화 시나리오에 따라 수력발전량이 얼마나 영향을 받는지 구체적으로 분석하여, 댐 관리자가 조기에 대책을 수립할 수 있도록 하는 것이 매우 중요하다.

따라서 본 논문에서는 Kim *et al.* (2022b)에서 산정된 공통 사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSP) 시나리오를 반영한 소양강댐 및 충주댐의 미래 유입량 및 발전방류량 자료를 활용하여, 기후변화 시나리오에 따른 수력발전량의 변화를 분석하였다. 이를 위해 수력발전량에 대한 회귀방정식을 개발하고, SSP2-4.5 및 SSP5-8.5 시나리오에 따른 수력발전량을 산정하였으며, 분산분석을 활용하여 가뭄이 수력발전량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

2. 대상지역 및 자료

2.1 소양강댐 및 충주댐

본 연구는 대상 지역으로 우리나라 대표적인 다목적댐인 소양강댐과 충주댐을 선정하였다(Fig. 1). 소양강댐은 북한강 유역의 다목적댐으로 높이는 123 m, 만수위는 198 m, 길이

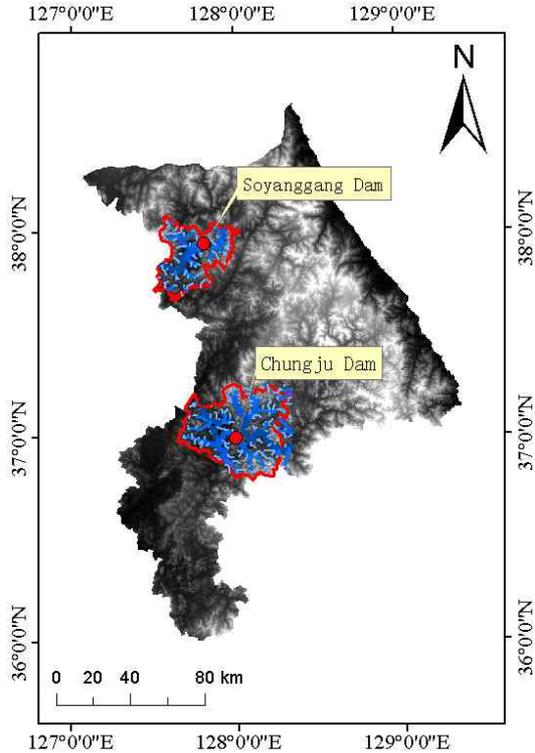


Fig. 1. Study area

는 530 m, 유역면적은 2,703 km²이며, 가능한 저수량은 29억 m³, 연평균 수력발전량은 35억 3백만 kWh이다. 충주댐은 남한강 유역의 다목적댐으로 높이는 97.5 m, 만수위는 145 m, 길이는 447 m, 유역면적은 6,648 km²이며, 저수용량은 27억 5천만 m³, 연평균 수력발전량은 84억 4백만 kWh이다. 소양강댐과 충주댐은 한국의 중요한 다목적댐으로 하류 지역의 용수공급, 발전 및 홍수 통제를 목적으로 한다. 2014년부터 2015년 봄까지 발생한 심한 가뭄으로 인해 소양강댐과 충주댐의 수위가 크게 하락하여 용수공급 및 발전 중단될 위험에 처한 바 있다(TKD, 2015). 2022년에 발생한 가뭄으로 인해 소양강댐은 6월의 저수량이 작년 동기 대비 15.6억 m³ 감소했으며, 충주댐은 2022년 3월부터 5월까지 봄 가뭄으로 인해 2021년 같은 기간 저수율 54.7%보다 22.1%p 감소한 바 있다(TJB, 2022; TKED, 2022).

2.2 SSP 시나리오 자료

2021년 IPCC가 발표한 제6차 평가보고서는 공통사회경제경로(SSP) 시나리오를 채택했다. SSP 시나리오는 인구 통제, 경제발전, 복지, 생태계, 자원, 시스템, 기술발전, 사회적요소 및 정책 결정과 같은 다양한 사회경제적 변화 요인을 고려한 것이다(An et al., 2022).

Table 1. Overview of GCMs used in this study

Model	Institute	Country	Resolution
ACCESS-ESM1.5	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	Australia	1.875° × 1.25°
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canada	2.8° × 2.8°
INM-CM4-8	Institute for Numerical Mathematics	Russia	2.0° × 1.5°
IPSL-CM6A-LR	Institute Pierre-Simon Laplace	France	2.5° × 1.3°

본 연구에서는 환경 빅데이터플랫폼(<https://www.bigdata-environment.kr/user/main.do>)에서 제공하는 소양강댐 유역과 충주댐 유역의 4개 GCM (CanESM5, ACCESS-ESM1-5, INM-CM4-8, IPSL-CM6A) 모델의 강수량 자료를 활용하였다. 소양강댐과 충주댐의 미래 유입량 및 발전방류량 자료도 마찬가지로 4개 GCM 모델을 이용하여 SSP2-4.5 및 SSP5-8.5 시나리오에 따라 Kim et al. (2022b)이 생산한 모의 자료를 활용하였다. 4개의 GCM은 CMIP6에서 선택되었고 GCM 모델들은 여러 격자가 한반도 지역에 포함되어 비교적 상세하게 기후를 표현할 수 있다(Table 1).

기후변화의 영향은 복잡하고 다양하기 때문에 각 모델의 매개변수와 계산방법이 서로 다르며 결과도 다르다. 서로 다른 모델의 자료를 비교함으로써, 모델 간의 유의성을 이해할 수 있다. 서로 다른 모델의 차이를 고려하여 종합적인 평가는 미래 기후변화를 이해하는 데 도움이 된다.

2.3 표준강수지수

기후변화로 인해 강수량이 감소하면 가뭄 위험이 증가할 것이다. 가뭄 상황의 정량적 분석을 위해서 본 연구에서는 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)를 활용하였다. SPI의 계산은 비교적 간단하지만, 다른 복잡한 지수보다 더 나은 성능을 발휘한다는 것이 증명되었다(Adnan et al., 2018). Labeledzki (2007)에 따르면, 3개월 및 6개월 시간 축척의 SPI는 토양 수분 소모 및 작물 수확량 감소와 관련이 있는 농업적 가뭄 특징을 묘사하는데 유용하며, 12개월 시간 축척의 SPI는 저수지 수량과 유량 같은 수자원의 위험 평가에 적합하다. 또한, 12개월 시간 축척의 SPI와 수력발전 잠재력 간에 강한 상관관계가 나타났다(Mlynski et al., 2024). 따라서, 본 연구에서는 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오 강우량 자료를 이용하여 미래 기간 12개월 SPI를 산정하였다.

3. 연구방법

본 연구는 가뭄이 소양강댐과 충주댐의 수력발전량에 미치는 영향을 정량화하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 미래 기상 및 수문자료를 활용하여 회귀방정식을 개발하고, 미래 수력발전량을 산정하였다. 또한, 수력발전량의 시나리오 및 시기별 유의성을 검증한 뒤, 가뭄지수 기반 가뭄 사상 선정을 통해 미래 가뭄에 대한 수력발전량의 증감량을 비교 분석하였다. 구체적인 연구 과정은 Fig. 2와 같다.

3.1 회귀분석

회귀분석을 통해 변수가 다른 변수에 의존하는 가설을 검증할 수 있으며, 특정 변수의 변화가 다른 변수에 미치는 영향의 정도를 추정할 수 있다. 수력 발전량에 대한 회귀분석을 위해서는 여러가지 변수를 고려해야 하며, 다목적 댐에서 사용되는 발전 장비의 상한 사용 수량 또한 고려해야 한다. 상관분석을 통해 수력발전량과 상관성이 높은 수문 변수를 확인한 후, 회귀모형을 개발하고 수력발전량을 예측하는 것이 적절하다. 일반적인 선형 회귀 모델은 Eq. (1)과 같다:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon_i \quad (1)$$

여기서, y_i 는 종속 변수, X_i 는 독립 변수, β_0 은 절편, β_1 은 기울기, ϵ_i 는 잔차이다.

3.2 분산분석

분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)은 변량 분석 혹은

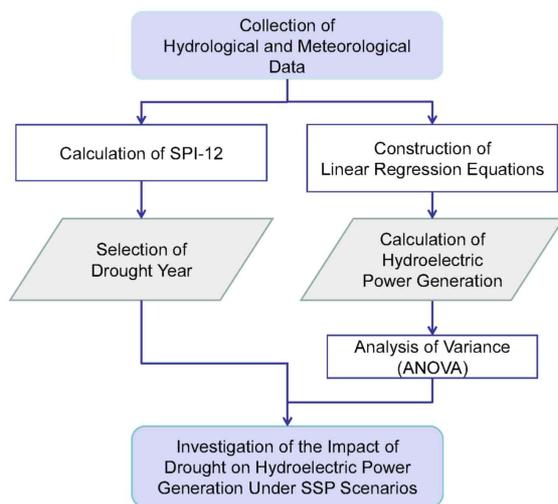


Fig. 2. Research flowchart

은 F-검정으로 불리며, 두 개 이상의 표본 평균의 차이를 검정하는 데 사용된다. 즉, 독립변수를 여러 범주로 나누고, 통계적 검정을 통해 범주별로 분리된 그룹 간의 평균 차이를 확인한다. 분산분석을 통해 수력발전량의 다른 분류 간의 평균 차이를 이해할 수 있을 뿐만 아니라, 다른 분류가 수력발전량에 미치는 영향의 정도를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 분산분석을 사용하여 수력발전량을 시나리오(과거 관측자료, SSP2-4.5, SSP5-8.5) 및 시기(갈수기, 홍수기, 평수기)에 따라 분류하고, 분류에 따른 수력발전량의 차이를 평가하였다. 만약 F 통계량이 크다면(p값이 0.05보다 작다면), 각 그룹 간에 유의한 평균 차이가 있으며, F 통계량이 작다면(p값이 0.05보다 크다면), 각 그룹 간에는 유의한 평균 차이가 없다고 판단한다.

4. 연구결과

4.1 수력발전량을 산정하기 위한 회귀방정식 개발

본 연구에서 수력발전량의 회귀방정식 개발을 위해서 My Water에서 제공하는 소양강댐과 충주댐의 수력발전량 및 발전방류량 자료(2012년부터 2020년까지)를 사용하였다(Fig. 3). 일반적으로 댐의 발전량은 방류량에 비례하지만, 댐에서 사용되는 발전 장비에는 사용 수량의 상한이 있어 홍수기에 최대 사용수량을 초과하는 수량은 여수로를 통해 방류된다. 소양강댐과 충주댐의 일 최대 발전 사용수량은 각각 250.8 m³/s와 828 m³/s이고(Fig. 3의 빨간색 점선), 일 최대 수력발전량은 각각 약 5,460 MWh와 11,650 MWh이다. 댐의 최대 발전 사용수량을 고려하고, 과거 수문 관측자료를 사용하여 상관관계 분석을 수행하고, 수력발전량과 수문 변수 간의 회귀 분석을 실시하였다. 소양강댐과 충주댐의 발전방류량과 수력발전량 간의 상관계수는 각각 0.9921 및 0.9945이며, 회귀 곡선은 Fig. 4에 도시된 바와 같다. 두 댐의 발전방류량이 수력발전량과 높은 관련성을 가지며, 본 연구에서 개발한 소양강댐과 충주댐의 회귀방정식은 각각 Eq. (2)와 (3)이다.

$$y = 22.03x - 1979.74 \quad (2)$$

$$y = 14.02x + 1273.26 \quad (3)$$

여기서, y 는 수력발전량(MWh)이고, x 는 발전방류량(m³/s)이다.

본 연구에서는 미래 수력발전량을 산정하고 가뭄 영향 분석을 수행하기 위해 Kim *et al.* (2022b)의 연구 결과를 활용했다. Kim *et al.* (2022b)는 VIC 수문 모델과 LSTM 모델을 사용

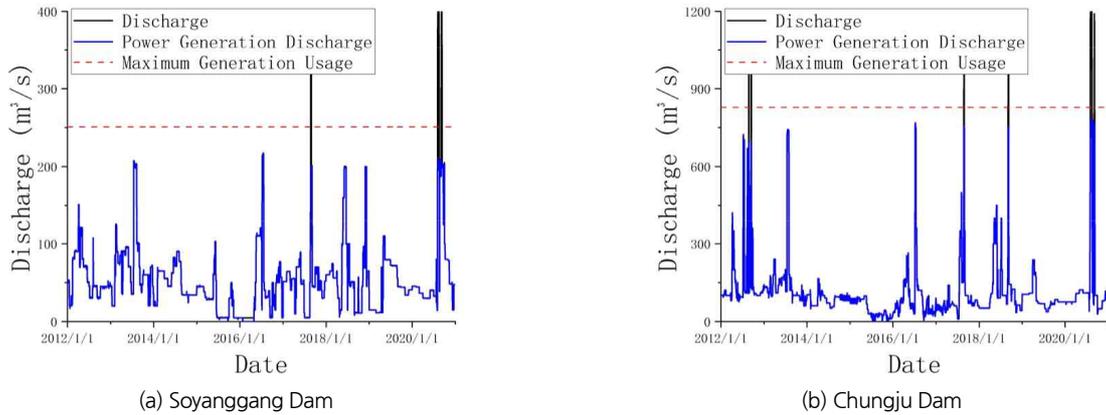


Fig. 3. Observational data of discharge and power generation discharge from 2012 to 2020

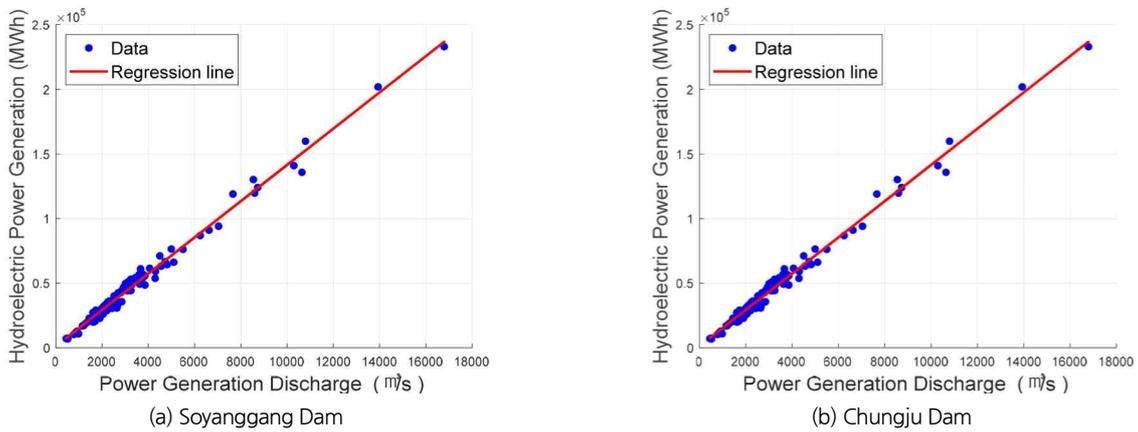


Fig. 4. Linear regression analysis of hydroelectric power generation

Table 2. Variables and parameters of the LSTM prediction models used in Kim *et al.* (2022b)

Model	Input Variables	Output Variables	LSTM Hyperparameters (Number of layers)
Hydropeaking prediction model	Inflow, Water storage, Season Index, Precipitation	Power Generation Discharge	LSTM Hidden Layer: 64 Fully Connected Layer: 10

하여 소양강댐과 충주댐의 발전방류량을 예측했다. 댐에 유입되는 유량은 강수-유출 관계를 따르기 때문에 물리 기반 수문모형인 VIC 모형을 활용하여 모의하였다. 딥러닝 기반 LSTM 모델을 사용하여 예측된 유입량에 대한 방류량을 예측하고, 수력발전의 사용 한계 문제를 고려하여 여수로 방류량과 발전방류량 각각의 모형을 구축하였다. 구축한 LSTM 모델의 입력변수, 출력변수 및 매개변수를 Table 2에 나타냈다. 마지막으로, 모델은 RMSE (Root Mean Squared Error)를 목

적함수로 설정했으며 1986년부터 2003년까지의 자료로 보정하고 2004년부터 2020년까지의 자료로 검증하였다.

SSP2-4.5 및 SSP5-8.5 시나리오에 따른 4개의 GCM 모델로 계산된 발전방류량 자료를 Eq. (2)와 (3)에 적용하여 추정된 미래 수력발전량은 Fig. 5와 같다.

4.2 분산분석을 통한 유의성 검증

Mlynski *et al.* (2024)에 따르면 수력발전량은 시간적인 영향을 받는다. 기후 시나리오 및 시기에 따른 수력발전량의 차이에 대한 유의성을 검증하기 위해 분산분석을 수행하였다. Table 3과 4에 과거와 SSP2-4.5 및 SSP5-8.5 시나리오에 따른 소양강댐과 충주댐의 수력발전량의 비교 결과를 제시하였다. 과거와 SSP2-4.5 및 SSP5-8.5 시나리오에 대한 비교 결과 (Tables 3 and 4), 소양강댐과 충주댐에서는 CanESM5 및 ACCESS-ESM1-5 모델에서는 유의한 차이가 나타나지 않았으나, INM-CM4-8 및 IPSL-CM6A-LR 모델에서는 유의

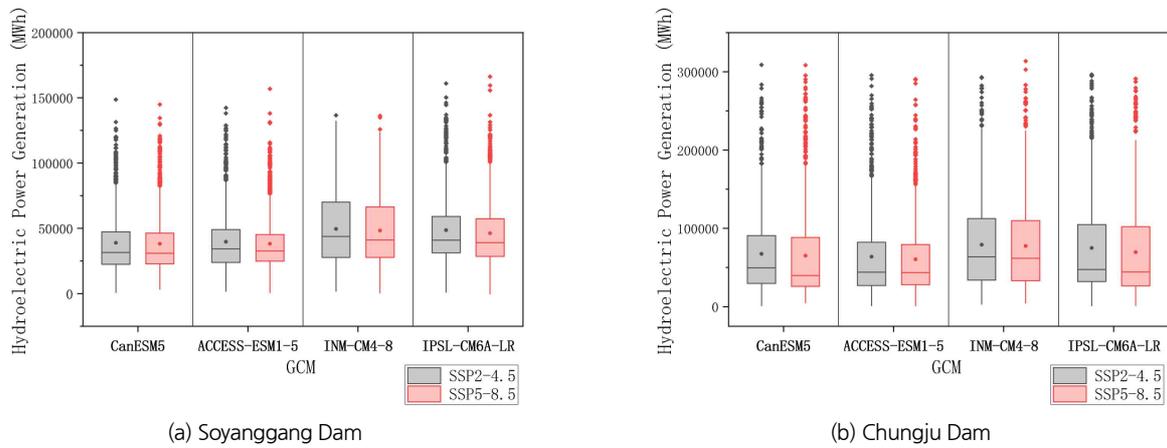


Fig. 5. Boxplots of monthly hydroelectric power generation from 2021 to 2100 under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5

Table 3. ANOVA for the hydroelectric power generation of Soyanggang Dam considering past and two scenarios

GCM	Scenario	Mean (MWh)	SSE (MWh)*	P-value
CanESM5	Past	40641.8	23546	0.14
	SSP2-4.5	38891.7	23948.2	
	SSP5-8.5	38132.7	23970.2	
ACCESS-ESM1-5	Past	40641.8	23546	0.11
	SSP2-4.5	39743.6	23320.3	
	SSP5-8.5	38229.5	21783.2	
INM-CM4-8	Past	40641.8	23546	<0.05
	SSP2-4.5	49544.5	27918.9	
	SSP5-8.5	48352.7	27023	
IPSL-CM6A-LR	Past	40641.8	23546	<0.05
	SSP2-4.5	48625.9	26189.2	
	SSP5-8.5	46213.7	25934.1	

* Sum of Standard Error

Table 4. ANOVA for the hydroelectric power generation of Chungju Dam considering past and two scenarios

GCM	Scenario	Mean (MWh)	SSE (MWh)	P-value
CanESM5	Past	61346.7	52978.5	0.17
	SSP2-4.5	67391.8	53093.4	
	SSP5-8.5	65039.2	58323.9	
ACCESS-ESM1-5	Past	61346.7	52978.5	0.36
	SSP2-4.5	63848.2	55344.9	
	SSP5-8.5	60465.4	49479.7	
INM-CM4-8	Past	61346.7	52978.5	<0.05
	SSP2-4.5	79091.2	56808.4	
	SSP5-8.5	77547.5	57151.9	
IPSL-CM6A-LR	Past	61346.7	52978.5	<0.05
	SSP2-4.5	74921.7	60620	
	SSP5-8.5	69584	60315.9	

한 차이가 나타났다. 또한 SSP2-4.5 및 SSP5-8.5 시나리오에 대한 비교 결과(Fig. 5), 소양강댐과 충주댐 IPSL-CM6A-LR 모델에서만 유의한 차이가 나타났으며 다른 모델에서는 평균 값에서 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이는 미래 기후변화에 의한 수력발전량은 과거 기간의 수력발전량과 유의한 차이를 가지지만, 미래 기후변화시나리오에 따른 수력발전량의 차이는 유의하지 않다는 것을 의미한다.

Mlynski *et al.* (2024)는 Vistula강의 수력발전 잠재력을 계산하기 위해 계절별로 분류하고, 각 계절의 발전 차이를 분석한 결과 봄이 가장 높은 수력발전량을 보였으며, 가을이 가장 낮게 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 전체 기간(1~12월)을 갈수기(10~6월)와 홍수기(7~9월)로 분류하여 수력발전량에 차이가 있는지 분산분석을 수행하였다. Fig. 6과 7은 소양강댐과 충주댐의 SSP2-4.5 및 SSP5-8.5 시나리오에서 4개의 GCM 모델에 따른 갈수기, 홍수기 및 전체 기간의 수력발전량을 보여준다.

소양강댐은 INM-CM4-8 모델을 제외한 모델에서 홍수기

에서 수력발전량의 진폭이 다른 기간에 비해 크게 나타났으며 (Fig. 6), 충주댐은 INM-CM4-8 모델에서 홍수기에서 수력발전량의 진폭이 크게 낮게 나타났다(Fig. 7). 특히 ACCESS-ESM1-5와 IPSL-CM6A-LR 모델은 충주댐의 홍수기 수력발전량이 SSP 시나리오에 따라 크게 달라지는 것으로 나타났다. 전반적으로 홍수기의 수력발전량이 가장 큰 변동 폭을 보이고, 차이가 크게 나타났으며, SSP2-4.5의 진폭이 SSP5-8.5 보다 대부분의 경우에 크다는 것을 확인할 수 있다.

또한 SSP2-4.5와 SSP5-8 시나리오에서 INM-CM4-8 모델을 제외한 다른 GCM 모델에서는 갈수기에 소양강댐과 충주댐의 월평균 수력발전량이 다소 낮게 나타났다.

Shiru and Chung (2021)에 따르면, 모든 GCM 계산의 강수 성능 지표를 비교하여 NRMSE, Pbias, NSE, R² 및 VE를 사용하여 GCM의 순위를 매기는 Compromise Programming 방법을 사용하여 얻은 GCM 모델 순위에서 강수 성능이 가장 나쁜 것이 INM-CM4-8 모델이기 때문에 본 연구에서도 다른 GCM 모델과 큰 차이가 나타났다.

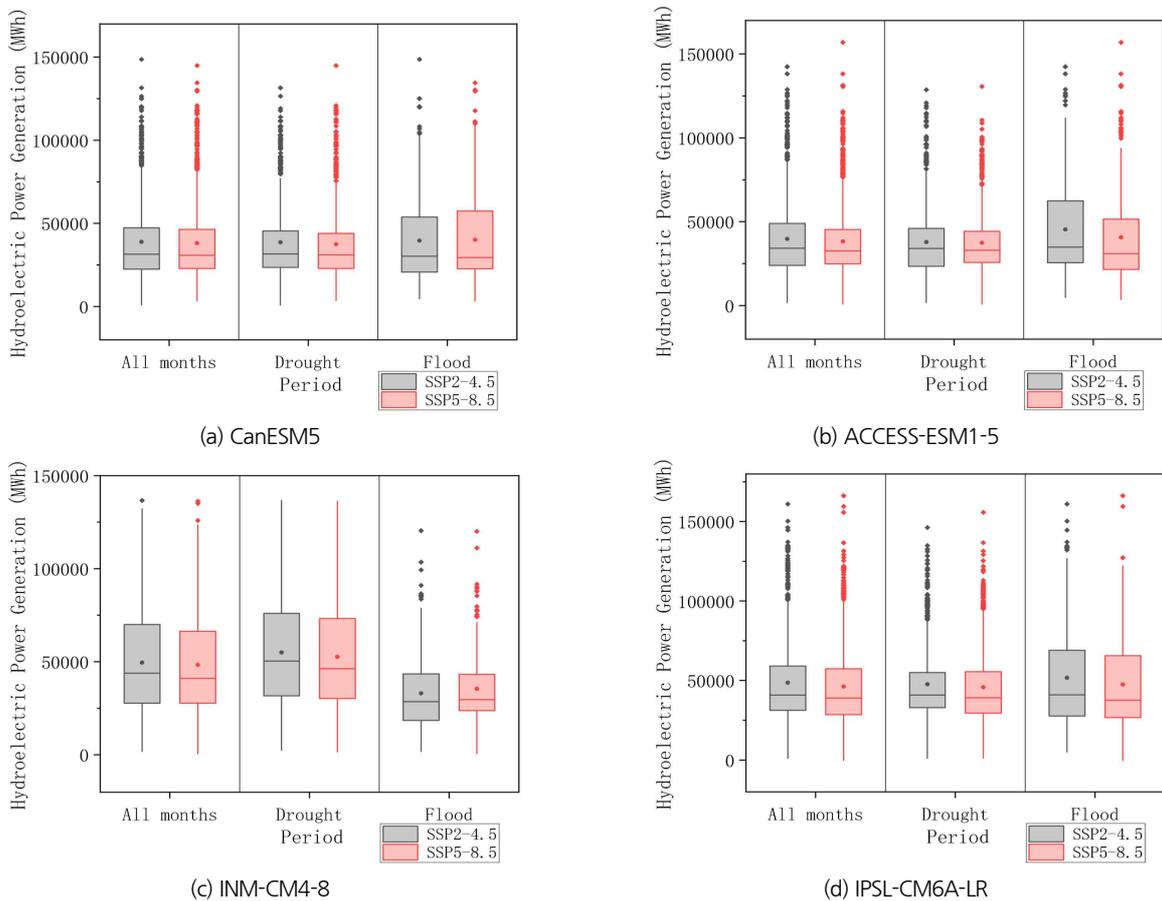


Fig. 6. Boxplots of hydroelectric power generation by periods in Soyanggang Dam

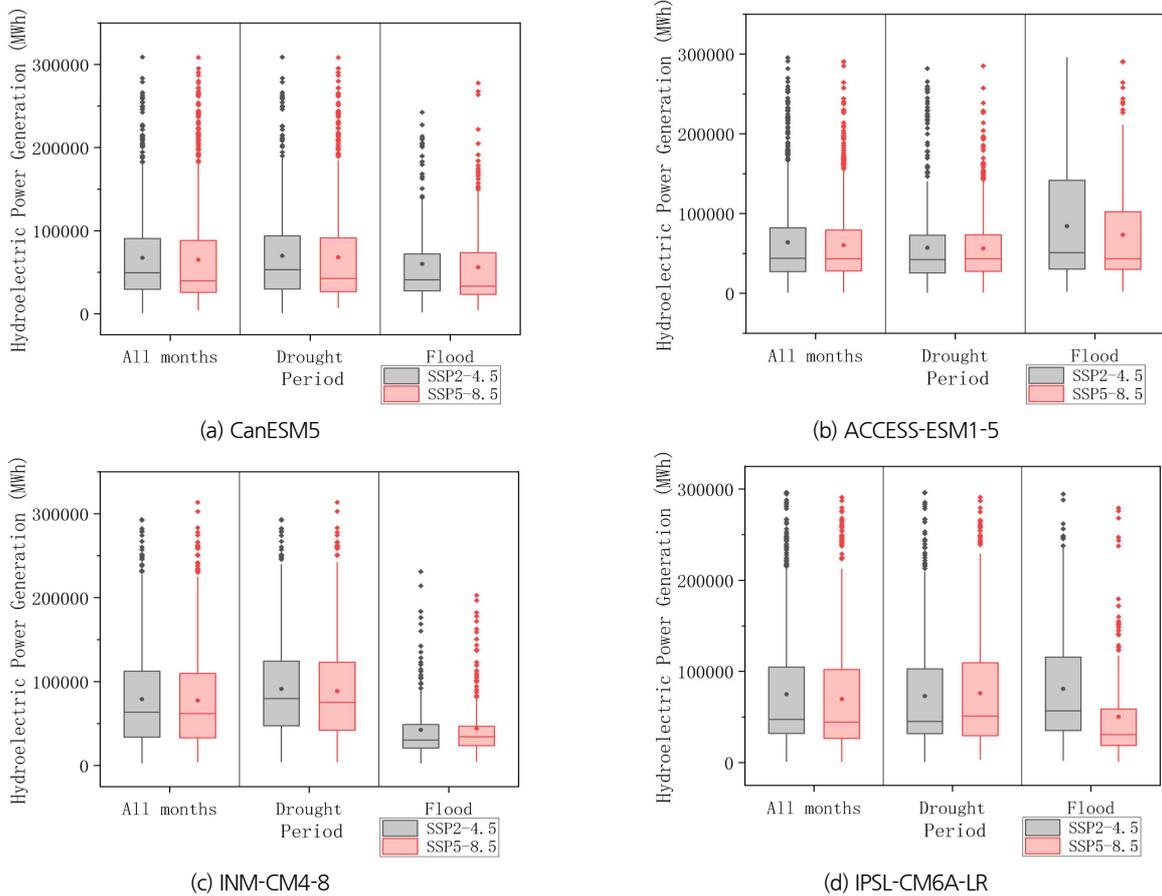


Fig. 7. Boxplots of hydroelectric power generation by periods in Chungju Dam

Table 5. Two-way ANOVA for various component with SSP2-4.5 and SSP5-8.5

Dam	Component	Significance
Soyanggang dam	Scenario	0.01
	GCM	<0.05
	Scenario and GCM	0.77
Chungju dam	Scenario	<0.05
	GCM	<0.05
	Scenario and GCM	0.75

Table 5는 소양강댐과 충주댐의 SSP2-4.5(4개 GCM)과 SSP5-8.5(4개 GCM) 간의 이원 분산분석 결과이다. 미래의 소양강댐과 충주댐에서 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 각각의 시나리오 및 다른 모델에 의해 유의하게 영향을 받았으나, 시나리오와 모델 간의 상호작용은 유의하지 않음을 보여준다.

4.3 SSP 시나리오별 수력발전량의 비교 분석

미래 시나리오에서의 GCM 모델의 수력발전량 범위를 파

악하여 향후 수력 공급 상황을 이해하기 위해, Fig. 5에 도시된 월 수력발전량을 시나리오별 및 GCM 모델에 따라 월평균 수력발전량을 계산하면, 소양강댐의 경우, SSP2-4.5 및 SSP5-8.5 시나리오에서 가장 높은 월평균 수력발전량(INM-CM4-8)은 각각 49544.47 MWh 및 48352.67 MWh이며, 가장 낮은 월평균 수력발전량(CanESM5)은 각각 38891.65MWh와 38132.75 MWh이다. 충주댐의 경우, 가장 높은 월평균 수력발전량(INM-CM4-8)은 각각 79091.15 MWh 및 77547.51 MWh이며, 가장 낮은 월평균 수력발전량(ACCESS-ESM)은 각각 63848.24 MWh와 60465.43 MWh이다. 소양강댐의 과거(1974년~2020년) 월평균 수력발전량은 40634.97 MWh이며, 미래 4개 모델의 SSP2-4.5 및 SSP5-8.5 시나리오와 비교할 때, CanESM5 및 ACCESS-ESM1-5 모델에서 감소하는 경향을 보였다. 충주댐의 경우, 과거(1986년~2020년) 월평균 수력발전량은 61346.67MWh이며, SSP5-8.5 시나리오에서 ACCESS-ESM1-5 모델을 제외한 모든 시나리오에서 상승하는 경향을 보인다.

4.4 가뭄이 수력발전량에 미치는 영향

본 연구에서는 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오에 대한 SPI-12의 M-K 추세 분석을 실시하였다. 소양강댐의 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오에서 CanESM5, ACCESS-ESM1-5, IPSL-CM6A-LR 모델의 경우 가뭄이 감소하는 추세를 나타냈고 INM-CM4-8 모델은 가뭄이 증가하는 추세를 나타냈다. 충주댐의 경우, SSP2-4.5 시나리오의 INM-CM4-8, IPSL-CM6A-LR 모델에서 가뭄이 증가하는 추세가 나타났지만, 나머지 모델에서는 가뭄이 감소하는 추세를 보였다. INM-CM4-8 모델의 경우, SPI-12 가뭄 사상이 증가하는 추세는 해당 모델이 미래 강수량을 낮게 추정하는 것에 영향을 받았다. 그러나 전반적으로 다른 3개 모델에 관한 결과를 종합하면, 소양강댐과 충주댐의 가뭄 사상은 여전히 감소하는 추세를 보인다. 이는 SWAT 모델을 사용하여 소양강댐 유역의 미래 유입량을 모의했을 때, 댐 유입량이 RCP 4.5에서는 9.5~15.9% 증가하고 RCP 8.5에서는 13.3~29.8% 증가한 것으로 나타난 Do and Kim (2018)의 결과와 기본적으로 일치한다.

본 연구 결과는 미래 기후 시나리오에서는 소수의 모델만이 가뭄이 증가하는 경향을 보이지만, 가뭄은 여전히 수력발전량에 매우 심각한 영향을 미친다는 것을 보여준다. 따라서 가뭄년의 수력발전량 감소를 정량화하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 가뭄 연도를 확인하기 위해 12개월 SPI 값을 사용하고, 가뭄에 따른 수력발전량 감소량을 계산했다(Tables 6 and 7).

소양강댐의 수력발전량은 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오에서 모든 모델에서 기준 기간(1974~2020년) 월평균 수력발전량과 비교하여 감소하는 경향을 보였다. SSP2-4.5 시나리오에서 CanESM 모델은 2031년에 65% 감소했으며, SSP5-8.5 시나리오에서 ACCESS-ESM1-5 모델은 2029년에 54% 감소했다. 갈수기와 홍수기를 비교해 보면, 홍수기의 감소 폭이 갈수기보다 크게 나타났다.

충주댐의 수력발전량은 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오에서 기준 기간(1986~2020년) 평균과 비교하여 INM-CM4 모델만 약간 증가하는 경향을 보였으며, 다른 모델들은 감소

Table 6. Soyanggang Dam's reduction in hydroelectric power generation

Scenario	CGM	Seasonal average hydroelectric power generation (MWH)		
		Annual	Drought	Flood
Past (1974-2020)	-	40635	37798.2	49145.4
SSP2-4.5	CanESM (2031s)	14229 (-65%)	13026 (-65.5%)	17838 (-63.7%)
	ACCESS-ESM1-5 (2066s)	25631.5 (-36.9%)	24222.2 (-35.9%)	29859.4 (-39.2%)
	INM-CM4 (2052s)	40330.6 (-0.7%)	45343.1 (+20%)	25292.9 (-48.5%)
	IPSL-CM6A-LR (2048s)	34471.1 (-15.2%)	31758.9 (-16%)	42607.7 (-13.3%)
SSP5-8.5	CanESM (2046s)	22102.4 (-45.6%)	19927 (-47.3%)	28628.6 (-41.7%)
	ACCESS-ESM1-5 (2029s)	18699.8 (-54%)	18379.8 (-51.4%)	19660 (-60%)
	INM-CM4 (2041s)	37122.7 (-8.6%)	40907.7 (+8.2%)	25767.6 (-47.6%)
	IPSL-CM6A-LR (2051s)	39794.1 (-2%)	33982.6 (-10.1%)	57228.8 (+16.6%)

Table 7. Chungju Dam's reduction in hydroelectric power generation

Scenario	CGM	Seasonal average hydroelectric power generation (MWH)		
		Annual	Drought	Flood
Past (1986-2020)	-	61346.7	45124	110014.5
SSP2-4.5	CanESM 2031s)	32704 (-46.7%)	28488.5 (-36.9%)	45350.5 (-58.8)
	ACCESS-ESM1-5 (2066s)	28417.2 (-53.7%)	24899.8 (-44.8%)	38969.1 (-64.6%)
	INM-CM4 (2052s)	63894.1 (+4.1%)	72361.7 (+60.4%)	38491.1 (-65%)
	IPSL-CM6A-LR (2048s)	57502.2 (-6.3%)	64438.3 (+42.8%)	36694.2 (-66.6%)
SSP5-8.5	CanESM (2046s)	32666.6 (-46.8%)	33313.4 (-26.2%)	30726 (-72.1%)
	ACCESS-ESM1-5 (2029s)	29544.7 (-51.8%)	27333.3 (-39.4%)	36179 (-67.1%)
	INM-CM4 (2041s)	65305.3 (+6.4%)	76126.5 (+68.7%)	32841.5 (-70.1%)
	IPSL-CM6A-LR (2051s)	31583.6 (-48.5%)	34732.2 (-23%)	22137.8 (-79.9%)

하는 경향을 보였다. 갈수기와 홍수기를 비교해 보면, 홍수기의 전체 감소 폭이 크며, 4개 GCM 모델의 평균 감소 폭은 68%에 달한다.

전반적으로, 소양강댐과 충주댐의 미래 수력발전량은 가뭄 연도의 갈수기와 홍수기에 대해 감소량이 유의한 차이를 보인다. Park *et al.* (2010)은 SWAT 모델을 사용하여 MIROC 3.2hires, ECHAM5-OM, HadCM3 세 가지 GCM을 이용하여 소양강댐 유역의 수문학적 변화를 정량화하였다. 분석 결과 미래 댐 유입량은 -38.6%~29.5%의 범위에서 변동을 나타냈으며, 특히 가을철 댐 유입량이 대폭 감소했다. 연간 강수량은 -20.4%~32.3%의 범위에서 변동을 했으며, 봄과 겨울에만 강수량이 증가했다. 유입량의 감소가 수력발전량의 감소로 직접 이어지기 때문에 발생하는 것으로, 본 논문 결과 홍수기(7~9월)의 수력발전량이 가장 심각하게 감소하는 시기와 일치한다.

5. 결론

본 연구의 목적은 소양강댐과 충주댐의 미래 수력발전량에 대한 기후변화의 영향을 정량적으로 평가하는 것이다. 이를 위해 Kim *et al.* (2022b)에서 산정한 소양강댐과 충주댐의 SSP2-4.5 및 SSP5-8.5의 유입량 및 발전방류량 자료를 이용하여 미래 수력발전량을 예측했다. 또한, 과거 자료 분석을 통해 월 단위 수력발전량 및 발전방류량의 회귀방정식을 구축한 기후변화 시나리오에서의 미래 수력발전량을 계산하고, 가뭄 영향을 분석했다.

연구 결과에 따르면, 소양강댐의 경우, 과거와 비교하여 미래의 4개 GCM 모델에서는 CanESM5 및 ACCESS-ESM1-5 모델의 월평균 수력발전량이 감소하지만, INM-CM4-8 및 IPSL-CM6A 모델은 증가했다. 충주댐의 경우, SSP5-8.5 시나리오에서 ACCESS-ESM1-5 모델을 제외하고 모든 시나리오에서 증가하는 경향을 보였다.

미래 기간인 2022년부터 2100년 사이에 소양강댐과 충주댐의 가뭄 연도에 따른 월평균 수력발전량 비교 결과, 소양강댐의 경우, SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오에서 모든 모델이 기준 기간 월평균과 비교하여 감소하는 추세를 보였고 SSP2-4.5 시나리오에서 CanESM 모델은 2031년에 65% 감소하였으며, SSP5-8.5 시나리오에서 ACCESS-ESM1-5 모델은 2029년에 54% 감소하였다. 충주댐의 경우, SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오에서 기준 기간 월평균과 비교하여 INM-CM4 모델만 약간 증가하고, 다른 모델들은 감소하는 추세를 보였다. 갈수기와 홍수기를 비교해 보면, 홍수기의 전체 감소 폭이 크며,

미래의 홍수기 수력발전에 대한 위험이 더 높다. 충주댐의 경우 4개 GCM 모델 평균 감소율이 68%에 이른다. 전반적으로, 소양강댐과 충주댐의 미래 가뭄 연도의 수력발전량은 갈수기와 홍수기의 감소량에는 유의한 차이가 있다.

본 연구의 결과는 기후변화가 다목적댐의 수력발전량에 미치는 영향을 정량적으로 제공함으로써 다목적댐의 기후변화 대비 계획 수립에 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2023년 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-RS-2023-00280330).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Adnan, S., Ullah, K., Shuanglin, L., Gao, S., Khan, A. K., and Rashed, M. (2018). "Comparison of various drought indices to monitor drought status in Pakistan." *Climate Dynamics*, Vol. 51, pp. 1885-1899.
- An, S., Park, G., Jung, H., and Jang, D. (2022). "Assessment of future drought index using SSP scenario in Rep. of Korea." *Sustainability*, Vol. 14, No. 7, 4252.
- Do, Y., and Kim, G. (2018). "Analysis of the change of dam inflow and evapotranspiration in the Soyanggang Dam basin according to the AR5 climate change scenarios." *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 60, No. 1, pp. 89-99. (in Korean)
- Ghafouri-Azar, M., and Bae, D.-H. (2018). "Streamflow response to climate change during the wet and dry seasons in South Korea under a CMIP5 climate model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. S-1, pp.1091-1103. (in Korean)
- Guo, L., Chen, S., Kong, D., Yan, S., Xu, Y., Majid, K., and Fatemeh, G. (2021). "Prediction of the effects of climate change on hydroelectric generation, electricity demand, and emissions of greenhouse gases under climatic scenarios and optimized ANN model." *Energy Reports*, Vol. 7, pp. 5431-5445.
- Kankam-Yeboah, K., Obuobie, E., Amisigo, B., and Opoku-Ankomah, Y. (2013). "Impact of climate change on streamflow in selected river basins in Ghana." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 58, No. 4, pp. 773-788.

- Kim, J., Byun, S., Yoo, J., and Kim, T.W. (2023). "Investigating the effects of meteorological disasters on hydroelectric power generation using a structural equation modeling." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 43, No. 1, pp. 33-41. (in Korean)
- Kim, S., Masoud, A., and Tricia, A.S. (2022a). "Climate change impact on water supply and hydropower generation potential in Northern Manitoba." *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 41. 101077.
- Kim, Y., Kim, Y., Hwang, S., and Kim, D. (2022b). "Prospect of future water resources in the basins of Chungju Dam and Soyang-gang Dam using a physics-based distributed hydrological model and a deep-learning-based LSTM model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 55, No. 12, pp. 1115-1124. (in Korean)
- Korean Statistical Information Service (KOSIS) (2023). South Korea, accessed 26 April 2024, <<https://kosis.kr/search/search.do?query=발전량>>.
- Labeledzki, L. (2007). "Estimation of local drought frequency in central Poland using the standardized precipitation index SPI." *Irrig. and Drain*, Vol. 56, pp.67-77.
- Mlynski, D., Ksiqzek, L., and Bogdal, A. (2024). "Meteorological drought effect for central Europe's hydropower potential." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 191. 114175.
- Park, M., Shin, H., Park, G., and Kim, S. (2010). "Assessment of future hydrological behavior of Soyanggang Dam watershed using SWAT." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, pp. 337-346. (in Korean)
- Pieter, D., Clemente, A., Antonio, S., Roger, D., Asher, K., and Ednildo, A. (2018). "Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability." *Science of The Total Environment*, Vol. 634, pp. 1540-1553.
- Qin, P., Xu, H., Liu, M., Du, L., Xiao, C., Liu, L., and Tarroja, B. (2020a). "Climate change impacts on Three Gorges Reservoir impoundment and hydropower generation." *Journal of Hydrology*, Vol. 580. 123922.
- Qin, P., Xu, H., Liu, M., Xiao, C., Forrest, K.E., Samuelsen, S., and Tarroja, B. (2020b). "Assessing concurrent effects of climate change on hydropower supply, electricity demand, and greenhouse gas emissions in the Upper Yangtze River Basin of China." *Applied Energy*, Vol. 279. 115694.
- Roger, G., and Eddie, R. (2023). 2023 Hydropower Status Report, International Hydropower Association 2023, accessed 26 April 2024, <<https://www.hydropower.org/publications/2023-world-hydropower-outlook>>.
- Shiru, M., and Chung, E.S. (2021). "Performance evaluation of CMIP6 global climate models for selecting models for climate projection over Nigeria." *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 146, pp.599-615.
- The Joong Booilbo (TJB) (2022) Persistent spring drought... Chungju Dam water levels significantly drop, accessed 8 April 2024, <<https://www.jbnews.com/news/articleView.html?idxno=1363485>>.
- The Korea Economic Daily (TKED) (2022). Soyang Dam water level plunges due to drought, 11 meters lower than last year, accessed 8 April 2024, <<https://www.hankyung.com/article/202206137355Y>>.
- The Kukmin Daily (TKD) (2015). The worst drought in 42 years... Report on the situation of Chungju Dam and Soyang Dam Crisis of changing riverbeds and suspension of cruise ships... Threat to residents livelihoods, accessed 1 April 2024, <<https://www.kmib.co.kr/article/view.asp?arcid=0923016840>>.
- Wagner, T., Themebl, M., Schuppel, A., Gobiet, A., Stigler, H., and Birk, S. (2017). "Impacts of climate change on stream flow and hydro power generation in the Alpine region." *Environmental Earth Sciences*, Vol. 76, No. 4, pp.1-22.
- Zhao, X., Huang, G., Li, Y., and Lu, C. (2023). "Responses of hydroelectricity generation to streamflow drought under climate change." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 174, 113141.