



A decision-centric impact assessment of operational performance of the Yongdam Dam, South Korea

Kim, Daeha^{a*} · Kim, Eunhee^b · Lee, Seung Cheol^c · Kim, Eunji^d · Shin, June^e

^aAssistant Professor, Department of Civil Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea

^bUndergraduate Student, Department of Civil Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea

^cUndergraduate Student, Department of Civil Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea

^dUndergraduate Student, Department of Civil Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea

^eUndergraduate Student, Department of Civil Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea

Paper number: 21-123

Received: 21 December 2021; Revised: 2 February 2022; Accepted: 3 February 2022

Abstract

Amidst the global climate crisis, dam operation policies formulated under the stationary climate assumption could lead to unsatisfactory water management. In this work, we assessed status-quo performance of the Yongdam Dam in Korea under various climatic stresses in flood risk reduction and water supply reliability for 2021-2040. To this end, we employed a decision-centric framework equipped with a stochastic weather generator, a conceptual streamflow model, and a machine-learning reservoir operation rule. By imposing 294 climate perturbations to dam release simulations, we found that the current operation rule of the Yongdam dam could redundantly secure water storage, while inefficiently enhancing the supply reliability. On the other hand, flood risks were likely to increase substantially due to rising mean and variability of daily precipitation. Here, we argue that the current operation rules of the Yongdam Dam seem to be overly focused on securing water storage, and thus need to be adjusted to efficiently improve supply reliability and reduce flood risks in downstream areas.

Keywords: Decision-centric impact assessment, Dam operation, Flood risk, Water supply and storage reliability

용담댐 기존운영에 대한 의사결정중심 기후변화 영향 평가

김대하^{a*} · 김은희^b · 이승철^c · 김은지^d · 신준^e

^a전북대학교 토목환경자원에너지공학부 조교수, ^b전북대학교 토목환경자원에너지공학부 학사과정, ^c전북대학교 토목환경자원에너지공학부 학사과정,

^d전북대학교 토목환경자원에너지공학부 학사과정, ^e전북대학교 토목환경자원에너지공학부 학사과정

요지

대기온실가스 증가로 인해 전지구 평균기온은 이미 1.0°C 이상 상승했고 폭염, 가뭄, 홍수 등 극한 기상현상의 빈도는 점점 더 높아질 것으로 전망되고 있다. 본 연구에서는 전북-충청지역의 이-치수안전도 확보에 큰 역할을 하고 있는 용담댐의 기존 운영방식이 기후변화에 얼마나 취약한지의 사결정 지표를 중심으로 평가하였다. 현실적인 기후 스트레스 테스트를 위해 GR6J 강우-유출 모형, Random Forests 댐운영 모형을 관측자료에 적합시켰고 추계학적 기법으로 생성된 294개의 기후스트레스 시계열을 모형에 입력해 연최대일방류량, 저수량신뢰도, 공급신뢰도의 변화를 분석하였다. 그 결과 2021~2040년 기간 용담댐 저수량신뢰도는 과도한 수준으로 증가할 것으로 전망되었고 이에 반해 공급신뢰도의 증가는 저수량신뢰도에 미치지 못할 것으로 나타났다. 평균강수량과 강수변동성의 증가로 20년 빈도 연최대방류량은 50%의 확률로 43% 증가할 것으로 나타났다. 용담댐의 기존운영방식은 저수량 확보에 과도하게 치중되어 있는 것으로 판단되며 이 운영이 지속될 경우 용담댐 하류지역의 홍수위험은 더 가중될 것으로 예상된다.

핵심용어: 의사결정중심 영향평가, 댐운영, 홍수위험, 물공급 및 저수량신뢰도

*Corresponding Author. Tel: +82-63-270-2426

E-mail: daeha.kim@jbnu.ac.kr (D. Kim)

1. 서론

기후변화를 위한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 2021년 8월 기후변화의 물리적 근거에 대한 6차 보고서를 배포했고, 인간 활동이 대기, 태양, 대륙의 온도를 모두 상승시켜 지구-생물시스템의 변화를 가속화시키고 있음을 재확인 했다(IPCC, 2021). 현재 온난화 추세는 보통수준 온실가스 배출 시나리오인 Shared Socioeconomic Pathways (SSP; Meinshausen *et al.*, 2020) 2-4.5와 심각한 시나리오인 SSP 5-8.5 시나리오 사이에 있고, 추가 온실가스 배출을 500 GtCO₂로 제한할 경우 파리기후협약 +1.5°C 목표가 달성될 확률은 50% 정도이다(IPCC, 2021). 강도 높은 완화(Mitigation) 정책이 즉각적으로 시작된다 하더라도 효과가 나타나기 전까지는 기상재해의 빈도는 증가하고 재해위험의 지역 간 차이는 점차 커질 것으로 예상되고 있다(IPCC, 2021; Thinda *et al.*, 2020; Trenberth *et al.*, 2014; Dai, 2013; Hirabayashi *et al.*, 2013).

온난화로 인한 강수패턴 변화는 수자원 인프라의 재해위험 경감능력을 떨어뜨리기 때문에 사회지속성에 큰 위협이 될 수 있다(Georgakakos *et al.*, 2012; Raje and Mujumdar, 2011). 특히 용설 유출에 대한 의존성이 높은 지역에서는 봄철 유출이 줄어(IPCC, 2021; 2013) 댐운영효율이 크게 떨어질 수 있다. Ehsani *et al.* (2017)은 미국 동북부 지역 댐의 가뭄-홍수 대응 능력이 점점 감소할 것으로 평가하였고 추가 저수용량 확보와 같은 구조적 대응이 필요할 것으로 전망하였다. 댐과 저수지가 사회 지속성에 미치는 영향은 매우 크지만(Biemans *et al.*, 2011; Nilsson *et al.*, 2005), 환경에 미치는 부작용으로 인해 추가적인 댐 건설, 증축과 같은 구조적 적응정책은 우선적으로 고려되기 어렵다(Foley *et al.*, 2017). 따라서 운영률 개선과 같은 비구조적 적응전략이 필수적인 상황이지만(Emami, 2020) 댐운영은 여전히 변화하지 않는 기후조건을 가정한 경험적 방식으로 이루어지는 경우가 많다(Georgakakos *et al.*, 2012).

변화하지 않는 기후상태(stationary climate)를 가정하는 전통적인 댐 운영방식은 기후변화에 취약하기 때문에(e.g., Poff *et al.*, 2016) 분명 개선이 필요하다. 하지만 개선책의 경제성, 규모, 효과를 분석하는 단계에서부터 큰 불확실성에 직면하는 것이 현실이다. 수자원 시스템의 성능은 통상 기후를 먼저 전망하고 이 전망에 대한 성능을 측정하는 방식('predict-then-act' paradigm)으로 평가되는데(e.g., Brêda *et al.*, 2020), 이 방식은 전망이 빗나갔을 때의 위험비용이 너무 크기 때문에 정책결정자가 분석결과를 채택하기가 매우 어렵다(Weaver *et al.*, 2013; Brown and Wilby, 2012). 이를 보완하

기 위해 Brown *et al.* (2012)은 정책결정에 사용되는 의사결정 수치(decision metric)가 기후스트레스에 얼마나 민감한지 먼저 분석한 후 기후전망으로 그 수치의 범위를 확인하는 Decision-scaling 영향평가 방식을 제안하였다. 한 예로 Whateley *et al.* (2014)은 이수안전도가 기후변화에 반응하는 정도를 수치화하는 기후반응함수(climate response function, CRF)를 개발한 후 요구되는 이수안전도를 만족시킬 수 있는 기후변화의 범위로 적응전략의 효과를 전망하였다. 시스템분석에서 기후전망으로 이어지는 이 상향식(Bottom-up) 평가 방식은 수자원 시스템이 기후변화에 민감한 정도에 따라 적응을 위한 투자 우선순위를 결정할 수 있게 하는 실용적 장점이 있다.

Decision-scaling과 같은 의사결정 중심(decision-centric) 평가방식이 적용된 사례연구는 점차 증가하고 있지만(e.g., Quinn *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2019, 2018; Knighton *et al.*, 2017; Steinschneider *et al.*, 2015; Turner *et al.*, 2014), 한국의 다목적댐 운영성능에 직접 적용된 예는 아직 드물다. 금강유역 수자원 배분에 관한 Kim *et al.* (2019)을 대표적인 예로 들 수 있으나 실제 운영에 대한 영향평가가 아닌 최적수자원 배분을 가정한 경우로 이상적인 상황에서의 평가이다.

따라서 본 연구에서는 전라북도와 충청지역의 물공급과 홍수예방에 중심적 역할을 하고 있는 용담댐의 기존 운영방식이 기후변화에 얼마나 취약한지 decision-scaling 방식을 이용해 평가하였다. 개념적 유출모형으로 먼저 용담댐유역의 강우-유출 반응을 모의하였고 기계학습 모형을 이용해 용담댐의 실제 운영률을 추출하였다. 유출모형과 기계학습 모형을 체계적 날씨 발생기법과 연계하여 기존 운영방식의 홍수위험도, 저수신뢰도, 공급신뢰도가 기후변화에 얼마나 민감한지 분석한 후 2021-2040 기간에 대해 각각을 전망하였다.

2. 연구자료 및 방법

2.1 연구대상지역 및 자료

용담댐은 한국의 대표적인 다목적댐으로 유입량과 방류량, 댐운영에 대해 자주 연구된 지역이다(e.g., Mok *et al.*, 2020). 용담댐 유역(Fig. 1)의 면적은 930.4 km², 표고범위는 205-1589 m (평균 520 m)이고 지면경사는 비교적 급하고 대부분은 숲으로 우거져 있다. 용담댐 유역의 연평균 강수량은 1981-2000년 1,500 mm a⁻¹에서 2001-2020년 1,550 mm a⁻¹로 3.3% 증가했다. 1°C 기온상승으로 대기수분량은 평균 6.5% 증가하기 때문에(Brutsaert, 2017) 강수량 증가는 온난화의 자연스러운 결과로 볼 수 있다.

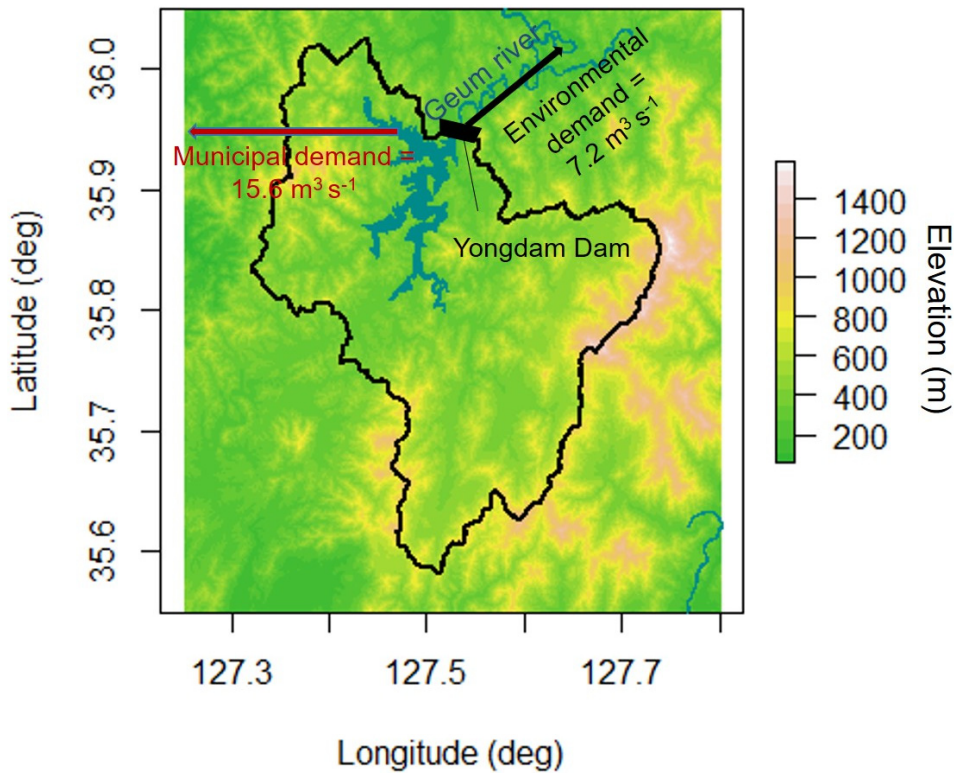


Fig. 1. The boundary and the elevation profile of the Yongdam Dam Basin. The storage in the dam is being transported to the adjacent river basins for municipal and industrial uses ($15.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ is institutionally planned), and the environmental demand for the downstream is $7.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

Penman (1948) 공식으로 산정된 잠재증발산량은 1981-2000년 평균 $1,048 \text{ mm a}^{-1}$ 에서 2001-2020년 평균 $1,086 \text{ mm a}^{-1}$ 로 3.6% 상승했다. 평균강수량이 평균증발산량보다 큰 경우 지면-대기 상호작용의 영향이 비교적 작기 때문에(Kim and Chun, 2021), 용담댐 유역의 잠재증발산량 변화는 온난화에 의한 지면 에너지 증가로 판단된다. 강수량과 잠재증발산량이 동시에 증가하고 있기 때문에 불확실성이 상당히 높은 상태에서 기후변화를 대비해야 하는 상황으로 볼 수 있다.

본 연구에 사용된 기상자료는 Jeong and Eum (2015)의 방법으로 3 km 격자해상도로 생산된 1981-2020 기간 일강수, 일최고기온, 일최저기온 자료이다. Jeong and Eum (2015)은 기상청 종관관측(Automated Synoptic Observation System, ASOS) 60개 지점 자료를 Parameter-elevation Regression on Independent Slope Model (PRISM; Daly et al., 2008)으로 공간보간하였고 Inverse-distance-weighting (IDW) 방법으로 이상치를 제거했다. PRISM과 IDW를 조합하는 방법은 PRISM 방법만으로 보간하는 것보다 편차가 적게 발생한다(Jeong and Eum, 2015; Daly et al., 2008). 잠재증발산 산정에 필요한 상대습도와 풍속자료는 동일한 ASOS 60지점 관측자료를 IDW 방법으로 보간하여 생산되었다. 일유입량 모의를 위해 수집

된 격자 일강우, 일최고·최저기온, 상대습도, 풍속자료는 용담댐유역의 경계를 이용해 공간평균 되었다.

유입량 모의와 댐운영 기계학습 모의를 위해 용담댐의 일 단위 댐유입량, 저수량, 방류량을 함께 수집하였다(<https://www.water.or.kr/>). 용담댐의 일평균 저수량은 우기에 상승하고 건기에 하강하는 뚜렷한 계절성을 가지고 있고 강수에 단기적으로 반응해 상승하고 강수가 그치면 지수적으로 감소하는 자연유량 변화를 가지고 있다. 용담댐의 총저수용량은 $815 \times 10^6 \text{ m}^3$, 상시만수위용량은 $742.5 \times 10^6 \text{ m}^3$, 홍수조절용량은 $137 \times 10^6 \text{ m}^3$, 공급불가능용량은 $44.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 홍수위험이 높은 7~9월의 저수상한은 $(815-137) = 678 \times 10^6 \text{ m}^3$, 나머지 월의 저수상한은 $742.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 을 적용하였다. 용담댐에서 유역변경을 통해 만경강유역으로 공급해야하는 유량은 $15.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 금강으로 공급해야할 유량은 $7.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 이다(K-water, 2019; Fig. 1). K-water 자료에 의하면(<https://www.water.or.kr/>) 2005-2020년 기간의 27%만이 기준이 만족되었으며 신뢰도(Reliability; Hashimoto et al., 1982) 95%를 만족시키는 공급기준은 $10.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (48% 수준)이다. 동일 기간에 저수량 신뢰도 95%를 만족시키는 저수량은 $218.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이다.

영향전망을 위해 IPCC의 Coupled Model Intercomparison

Table 1. List of the GCMs adopted for the decision-centric impact assessment

No.	Model name	Resolution	Institution
1	CMCC-CM	0.750°×0.748°	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
2	CMCC-CMS	1.875°×1.865°	
3	CCSM4	1.250°×0.942°	National Center for Atmospheric Research
4	CESM1-BGC	1.250°×0.942°	
5	CESM1-CAM5	1.250°×0.942°	
6	MRI-CGCM3	1.125°×1.122°	Meteorological Research Institute
7	CNRM-CM5	1.406°×1.401°	Centre National de Recherches Meteorologiques
8	HadGEM2-AO	1.875°×1.250°	Met Office Hadley Centre
9	HadGEM2-CC	1.875°×1.250°	
10	HadGEM2-ES	1.875°×1.250°	
11	MPI-ESM-LR	1.875°×1.865°	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)
12	MPI-ESM-MR	1.875°×1.865°	
13	FGOALS-s2	2.813°×1.659°	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences
14	NorESM1-M	2.500°×1.895°	Norwegian Climate Centre
15	GFDL-ESM2G	2.500°×2.023°	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
16	GFDL-ESM2M	2.500°×2.023°	
17	BCC-CSM1-1	2.813°×2.791°	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration
18	BCC-CSM1-1-M	1.125°×1.122°	
19	IPSL-CM5A-MR	2.500°×1.268°	Institut Pierre-Simon Laplace
20	IPSL-CM5A-LR	3.750°×1.895°	
21	IPSL-CM5B-LR	3.750°×1.895°	
22	MIROC5	1.406°×1.401°	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
23	MIROC-ESM-CHEM	2.813°×2.791°	
24	MIROC-ESM	2.813°×2.791°	
25	CanESM2	2.813°×2.791°	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
26	GISS-E2-R (RCP4.5 only)	2.000°×2.500°	NASA Goddard Institute for Space Studies and Center for Climate Systems Research
27	INM-CM4	2.000°×1.500°	Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences

project Phase 5 (CMIP5; Taylor *et al.*, 2012) GCM 기후전망을 함께 수집하였다(Table 1). 2050년 이후 온실가스 배출이 완화되는 Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 시나리오와 2100년 이후에도 온실가스가 계속 증가하는 것으로 가정하는 RCP8.5 시나리오의 일강수량, 일최고·최저 기온 전망을 수집하였다. GCM의 공간해상도 편차는 Detrended Quantile Mapping (Bürger *et al.*, 2013)기법으로 보정되었다.

2.2 연구방법

2.2.1 Decision-scaling framework

Fig. 2는 decision-scaling framework의 영향평가를 위한 다섯 단계를 나타낸다. 먼저 무작위 기후스트레스 날씨 시계열을 생성하고 이를 유출모형에 입력해 유입량을 모의한 후

모의 유입량을 다시 댐운영 모형에 입력해 저수량과 방류량을 모의할 수 있다. 모의된 방류량과 저수량 시계열을 이용해 20년 빈도 연최대방류량, 저수량신뢰도, 공급신뢰도를 평가할 수 있으며 이 과정을 많은 기후스트레스에 대해 반복하면 각각에 대한 CRF를 개발할 수 있다. 20년 빈도 연최대방류량은 모의방류량 연최대치 계열의 95 percentile로 산정하였고 저수량 및 공급신뢰도는 역시 95% 확률 기준인 $218.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 와 $10.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 를 이용해 평가하였다.

2.2.2 Stochastic weather generator

기후스트레스 날씨 시계열 생성을 위해 사용된 기법은 Steinschneider and Brown (2013)의 semi-parametric weather generator이다. Kwon *et al.* (2007)의 wavelet autoregressive

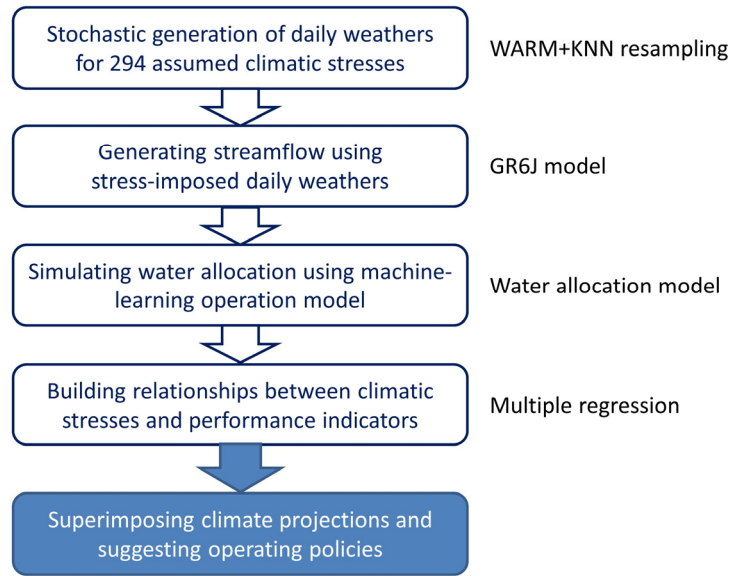


Fig. 2. The five steps for the bottom-up impact assessment (adapted from Kim *et al.* (2018))

model (WARM) 연강수량 모형과 Apipattanavis *et al.* (2007)의 날씨모형을 결합한 방법으로 넓은 기후변화 범위에서 날씨 시계열을 생성할 수 있다. WARM 모형은 연강수량 시계열을 여러 성분으로 분해한 후 각 성분을 자기회귀모형으로 재현한 후 다시 결합한다.

모의 연강수량에 대응하는 일단위 날씨 시계열은 Apipattanavis *et al.* (2007) Markov-chain 기반 Weather bootstrapping 기법으로 발생시킨다. 강수상태를 무강우(0), 보통강우(1), 극한강우(2)로 구분한 후 3×3 전이확률(transition probability; p00, p01, p02, p10, p11, p12, p20, p21, p22)로 발생시키며 강수량은 Bootstrapping 기법으로 임의 추출된다. 일최고기온, 일최저기온, 상대습도, 풍속은 강수량이 임의추출된 일자에 함께 관측된 값으로 추출해 자료간 상관성을 유지하는 방법이다. 날씨 생성기법의 상세한 사항은 Steinschneider and Brown (2013)을 참조할 수 있고 weathergen R package (<http://walkerjeffd.github.io/weathergen/>)로도 유사한 모의가 가능하다.

CRF 생성을 위해 본 연구에서는 일강수량의 평균과 변동계수는 -30%에서 30%까지 10% 간격으로 변화시켰고, 일평균기온은 +0°C에서 +5°C까지 1°C 간격으로 변화시켰다. 따라서 생성된 기후스트레스 조합은 총 $7 \times 7 \times 6 = 294$ 개이다.

2.2.3 GR6J 유출모형 및 Random forests 댐운영 모의

기후스트레스 시계열에 대한 유출반응은 GR6J (Pushpalatha *et al.*, 2011)를 이용해 모의하였다. Lumped 강우-유출모형으로 일강수에 대한 유역의 유출반응을 모의하는 수문모형으로

GR4J (Perrin *et al.*, 2003)의 기저유출 재현능력을 더 개선한 모형이다. GR4J의 매개변수(X1, X2, X3, X4)에 유역 외부유입량을 조절하는 X5, Exponential store의 세밀한 기저유출모의를 조절하는 X6가 포함되어 총 6개 매개변수로 일유출량을 모의한다. X1은 상층 토양수분함량을 개념적으로 정의하고 X4는 fast response와 slow response의 단위도 기저시간, X2는 유역외부에서의 지하수 유입 및 유출, X3는 하층저류능력을 개념적으로 나타내고 비선형 유역반응함수와 결합되어 있다. 잠재증발산량은 Priestley and Taylor (1972) 공식이 사용되었고 Priestley-Taylor 계수 산정을 위해 Szilagyi *et al.* (2017)의 Generalized Complementary Relationship (GCR)을 이용하였다. GCR은 지면-대기상호작용을 이용한 증발산 결정방법으로 GCR에 의한 모의증발량과 물수지증발량 사이의 편의를 최소화 시키는 Priestley-Taylor 계수는 1.11이었다. GR6J의 6개 매개변수는 Kling-Gupta Efficiency (KGE; Gupta *et al.*, 2009)를 최대화시키는 조합으로 결정하였다.

용담댐의 기존 운영률은 Yang *et al.* (2016)에 사용된 Random Forests (RF; Breiman, 2001) 기법으로 추출되었다. RF 기법은 분류나 회귀예측을 위해 사용되는 가장 기본적인 기계학습 모형인 Classification And Regression Tree (CART; Breiman *et al.*, 1984)를 앙상블하는 기법으로 앙상블에 사용되는 각 CART는 같은 종류로 분류되는 결정변수들의 동질성을 최대화 하도록 예측인자를 분류하는 방법이다. RF는 과적합(overfitting)에 취약한 CART 모형을 개선하는 방법으로 학습자료를 무작위로 샘플링해 적합시킨 많은 CART 모형의 평균치를 이용해 예측한다. 용담댐 기존 운영률을 추출하기 위해 일단

위 저수변화량을 간단히 초기 저수량, 유입량, 일강수량으로 결정하는 구조를 사용하였고 댐운영자가 월별로 다른 운영률을 적용할 수 있기 때문에 각 월을 범주형(Categorical) 예측인자로 추가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유입량 및 댐운영 모의 성능

GR6J 모형의 매개변수를 2011-2020년 유입량 관측에 최적화시켰을 때 얻어진 KGE값은 0.76이었다(Fig. 3). 최적화된 매개변수를 이용해 2002~2010년 댐유입량을 모의한 후 관측시계열과 비교한 결과 KGE 값은 0.68로 나타났다. 프랑스 전역에 대해 GR6J를 평가한 Poncelet *et al.* (2017)의 결과와 비교했을 때 0.6-0.7의 KGE는 평균이상의 모의 성능이고 Kim *et al.* (2019)의 GR4J 성능과 비교했을 때 GR6J의 모의 성능은 CRF를 개발하기에 충분한 것으로 판단된다. 하지만 낮은 유출량을 약간 과대추정하고 봄철 유출을 약간 과소모의하

는 경향은 다른 모형을 사용했을 때 좀 더 개선될 여지가 있음을 의미한다. 2002~2020년 기간 자료로 매개변수를 추정했을 때 KGE는 0.74였고 특정한 자료기간에 대해 매개변수의 과적합 경향은 높지 않은 것으로 판단하였다(Table 2).

294개 기후스트레스를 이용한 유입량 모의에는 대표성이 더 강한 2002~2020 기간의 매개변수를 사용하였고 모의 유입량을 RF 댐운영모형에 입력해 일방류량과 저수량을 다시 모의하였다.

2005-2016년 초기저수량, 유입량, 일강수량, 월(month)을 독립변수로 동일기간의 저수변화량을 종속변수로 사용해 RF 모형(500개 CART)을 학습시켰다. 자료불균형(Data imbalance) 문제를 해결하기 위해 Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE)으로 급격한 저수변화량을 oversampling 하여 RF 모형을 학습시켰다. Yang *et al.* (2016)과 같이 불순도를 기준으로 평가했을 때 각 설명변수가 저수량 변화에 미치는 중요도는 유입량(61.2%), 일강수량(20.8%), 초기저수량(10.5%), 월(7.4%) 순으로 나타났다. 학습기간의 관측 저수량 변화와 모의시계열의 Pearson 상관계수는 0.98로 매우 높게

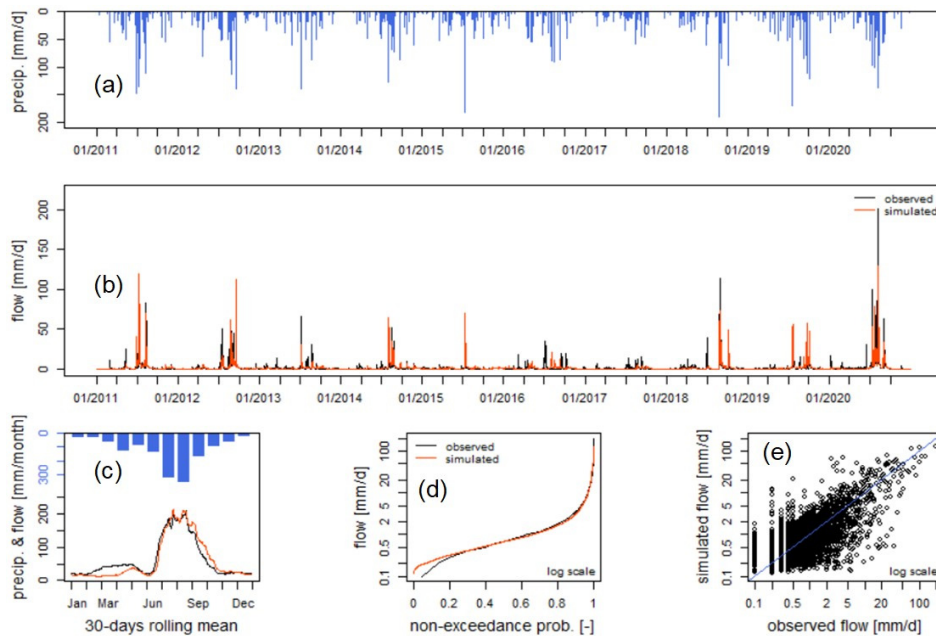


Fig. 3. The time series of (a) daily rainfall, (b) observed and simulated flows, (c) 30-day rolling means of observed and simulated flows, (d) non-exceedance probability of observed and simulated flows, and (e) the 1:1 scatter plot between observed and simulated flows for 2011-2020.

Table 2. Estimated parameters of GR6J runoff model. The parameter ranges are given in the parentheses

Calibration period	X1 [0,21807]	X2 [-1903,1903]	X3 [0,21807]	X4 [0,22]	X5 [0,1]	X6 [0,21807]	KGE
2011-2020	150.7	-0.121	53.51	1.140	0.142	12.1	0.763
2002-2020	126.8	-0.090	8.949	1.179	0.104	19.5	0.735

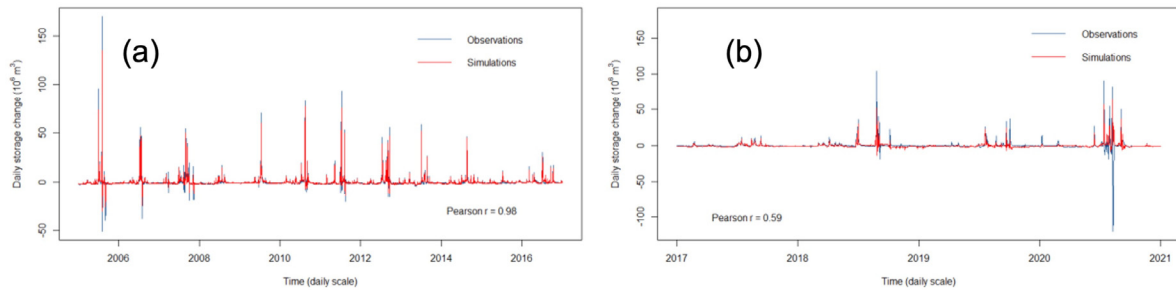


Fig. 4. Comparison between simulated storage changes by the random forests and observations for (a) the training period (2005-2016) and (b) the validation period

나타났다(Fig. 4). 학습된 RF모형을 2017~2020 기간 자료에 적용했을 때 Pearson 상관계수는 0.59로 떨어지기는 하였으나 예측력 감소는 학습되지 않은 2020년 비정상적인 저수량 변화에 기인하는 것을 확인하였다. 실제로 2020년 7월 1일 저수량은 관측개시 이래 최고치였고 이수안전도에 치중된 운영이 이루어진 것으로 판단된다. 2019년 이전의 운영방식과는 상당히 다른 운영이라 할 수 있고 역대급으로 긴 장마로 인해 매우 큰 방류량이 나타난 특별한 기간이다. 이 기간을 제외하면 RF 모형은 저수량의 상시 변화를 매우 높은 정확도를 모의하였다. 따라서 2020년을 운영은 예외적인 것으로 판단하고 대표성을 위해 RF모형을 다시 2005~2019 기간 댐 운영 자료에 학습시켜 CRF를 개발에 적용하였다.

3.2 20년빈도 최대방류량, 저수량 신뢰도, 이수안전도 CRF 개발

Figs. 5(a) and 5(b)는 Steinschneider and Brown (2013)의 기법으로 생성된 무작위 일강수량 시계열의 평균, 변동성과 GR6J와 RF 댐운영 모형으로 모의된 20년빈도 최대방류량의 관계를 나타낸다. 20년 빈도 최대방류량이 일강수량 시계열의 평균, 변동계수와 멱함수적 관계를 가지는 것을 알 수 있는데 Kim et al. (2018)은 이 관계를 다중회귀분석으로 간략화하여 CRF를 개발하였다. 같은 방법으로 20년 빈도 최대방류량 CRF를 얻을 수 있고(Fig.5(c)), 일강수량의 평균과 변동계수가 20년 빈도 최대방류량의 변화의 93%를 설명하는 것을 알 수 있다. 연최대방류량은 시스템의 단기 반응이기 때문에 장기적 영향을 주는 평균온도 변화에는 크게 민감하지 않았다.

Fig. 5(d)는 모의된 저수량 신뢰도의 평균강수량 변화에 대한 반응을 나타낸다. 연평균강수량이 대략 1600 mm a^{-1} 을 넘으면 $218.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 을 확보할 가능성이 거의 100%에 이르게 됨을 알 수 있다. 이에 반해 $10.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 에 대한 공급신뢰도는 연평균강수량이 $1800\text{-}1900 \text{ mm a}^{-1}$ 까지 증가해야 100%에 가까워지는 것을 알 수 있다(Fig. 5(g)). 용담댐의 기존 운영방식

이 공급신뢰도보다는 저수량 확보에 더 치중되어 있음을 의미한다. 저수량 신뢰도와 공급신뢰도는 평균기온 변화에 아주 민감하지는 않았지만 평균기온이 상승할수록 미세하게 줄어드는 경향이 있었고 이는 증발손실 증가를 나타내는 당연한 결과이다. 평균강수량과 평균기온 변화가 저수량 신뢰도와 공급신뢰도를 설명하는 비율은 각각 91%와 88% 였다(Figs. 5(f) and 5(i)). 기후스트레스가 없을 때 CRF로 추정된 저수량 신뢰도와 공급신뢰도는 각각 0.95와 0.86였다. 공급신뢰도가 관측치(0.95)보다 낮은 것은 기후스트레스 시계열에 포함되어 있는 임의적 날씨 변동성이 회귀분석에 의해 제거되었기 때문으로 보인다. 2001~2020년 기간의 임의적 날씨 변동성이 공급신뢰도에 호의적이었음을 의미한다. 일강수량 시계열의 변동성은 저수량 신뢰도와 공급신뢰도에 유의미한 영향을 미치지 않았다.

3.3 기후변화 영향평가

Fig. 6는 20년 빈도 연최대방류량, 저수량 신뢰도, 공급신뢰도 CRF와 수집된 CMIP5 2021~2040 기후 전망을 함께 도시한 결과이다. 27개 모형의 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 대한 기후전망의 불확실성은 크지만 2021~2040 기간의 평균강수량과 강수변동성은 모두 증가할 가능성이 높음을 알 수 있다. 현재 운영이 지속될 경우 이 변화로 인해 20년 빈도 최대방류량은 43% 정도 증가할 것으로 예상된다. 이는 기후전망의 중앙값에 대한 변화이며 최악의 경우 2배 이상으로 치솟을 가능성도 있다. 반면 연평균강수량의 증가로 인해 저수량신뢰도와 공급신뢰도는 모두 증가할 것으로 보인다. CMIP5 기후 전망의 중앙값은 현재 운영이 지속될 경우 2021~2040 기간 동안 $218.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 저수량이 100%로 만족될 것을 가리키고 있다. 이에 반해 $10.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 에 대한 공급신뢰도는 증가되기는 하지만 100%에 도달하기는 어려울 것으로 나타났다.

Figs. 5 and 6에서 저수량 신뢰도가 100%가 되는 기후스트레스의 범위가 공급신뢰도 100%를 만족시키는 범위보다 훨씬

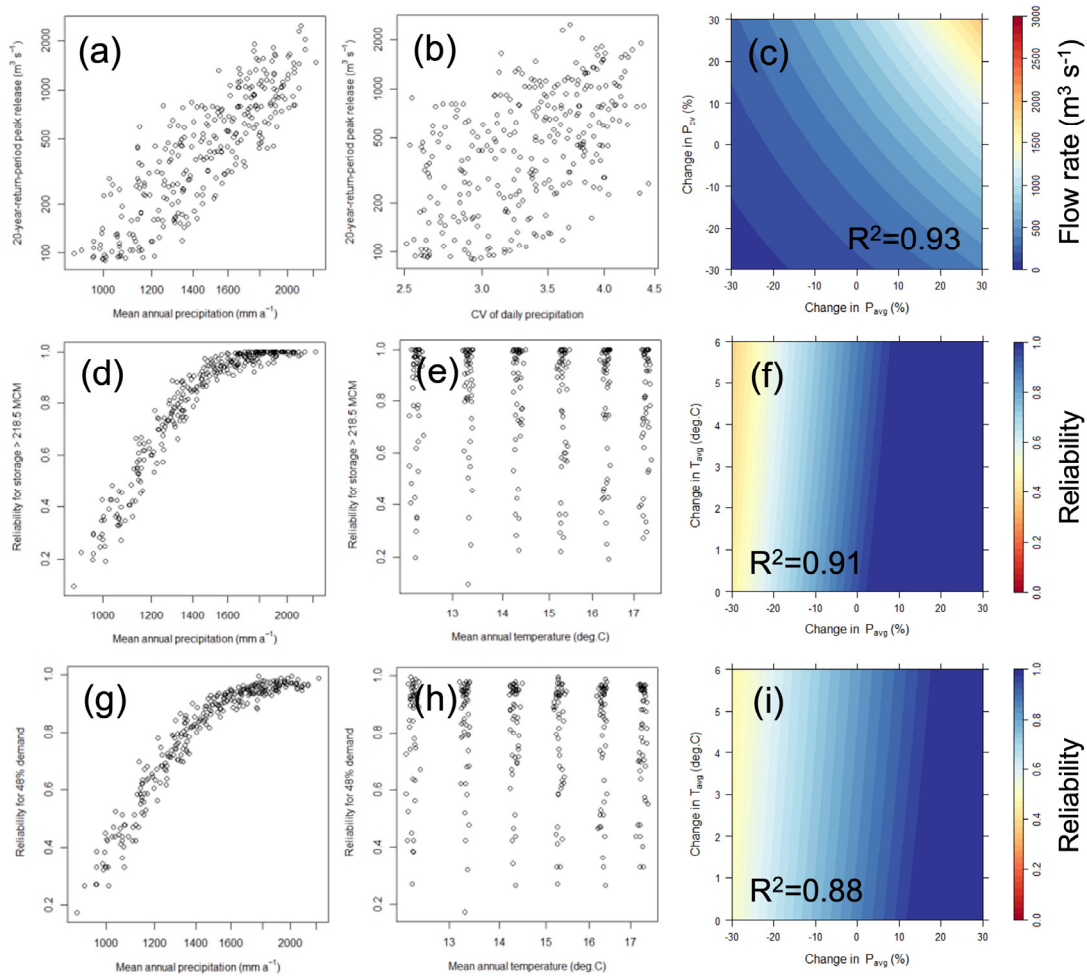


Fig. 5. Responses of the 20-year-return period peak release to changes in (a) mean and (b) coefficient of variation of daily precipitation, and (c) the CRF of 20-year-return period peak release, responses of the storage reliability to changes in (d) mean precipitation and (e) mean temperature, and (f) the CRF of storage reliability, and responses of supply reliability to (g) mean precipitation, (h) mean temperature, and (i) the CRF of water supply reliability. The CRFs in (c), (f), and (i) describes flood risk, water supply reliability, and water storage reliability in response to changes in precipitation patterns (mean and variability) and mean air temperature

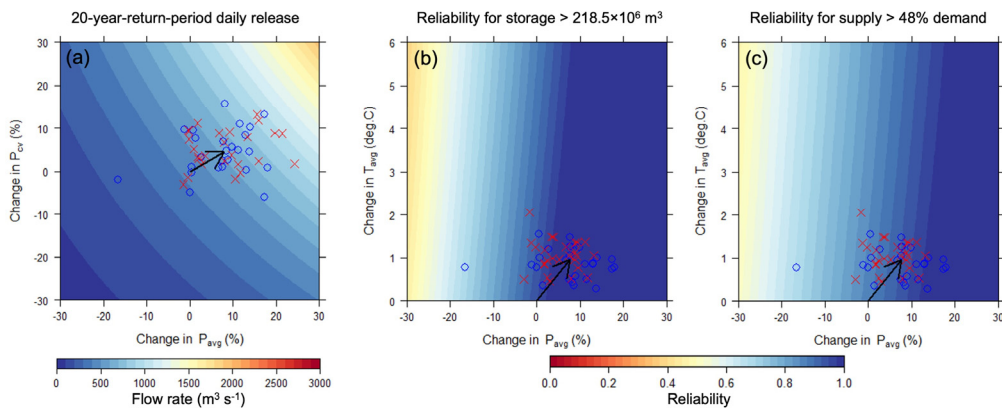


Fig. 6. Projections of (a) 20-year-return-period peak release, (b) storage reliability, and (c) supply reliability by the CRFs and the CMIP5 GCM projections for 2021-2040. The blue circles and the red x symbols are climate projections under RCP 4.5 and 8.5 scenarios, respectively, and the black arrow indicate median changes of the 53 projections

신 넓은 것을 알 수 있다. 현재의 운영방식이 공급신뢰도보다는 저수량 확보에 치중되어 있음을 의미한다. 공급신뢰도와는 달리 20년 빈도 최대방류량은 강수변동성에 큰 영향을 받기 때문에 기존 운영방식이 지속될 경우 용담댐 하류지역의 홍수위험은 훨씬 증가할 것으로 전망된다.

요약하면 용담댐의 기존 운영은 저수량을 충분히 확보할 수는 있지만 요구량의 절반수준만 공급하면서 하류지역의 홍수 위험은 지속적으로 증가시키는 방식이다. 평균강수량이 증가하더라도 이 운영방식으로는 공급요구량의 48%인 $10.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 도 제대로 만족시킬 수 없으며 이미 충분히 높은 저수량 신뢰도만 100% 수준이 된다. 저수량 부족 위험을 줄이는 데 초점이 맞춰진 운영으로 실제 댐수해지역의 이·치수안전도가 중심인 운영방식으로 보기 어렵다. 기후변화로 인한 홍수위험을 줄이기 위해서는 상시공급량을 늘려 홍수기 전 댐 저수능력을 더 확보하는 방안이 고려되어야 할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 개념적 유출모형 GR6J와 Random Forests 모형을 Decision-scaling 프레임과 결합해 용담댐의 홍수 조절 기능과 저수량 및 공급신뢰도를 평가하였다. 추계학적 기후스트레스 테스트와 기후전망을 이용한 영향평가 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 용담댐 기존 운영은 운영자의 저수량 확보에 대한 불안을 줄이는 방식으로 평가할 수 있다. 요구량의 48% 수준으로 공급량을 낮춰 과도하게 저수량을 확보하는 것으로 판단되고, 이미 높게 유지되고 있는 저수량은 평균강수량 증가로 앞으로 더 높아질 것으로 예상된다.
- 2) 저수량신뢰도, 공급신뢰도와는 달리 20년 빈도 연최대방류량은 강수변동성에 매우 민감하게 반응했다. 강수변동성은 평균강수량과 함께 증가할 것으로 전망되기 때문에 용담댐 하류지역의 홍수위험은 가파르게 상승할 것으로 보인다. 저수량 확보 중심의 기존 운영방식을 변경하지 않을 경우 용담댐의 20년 빈도 최대방류량은 50% 확률로 43% 증가하게 된다.
- 3) 저수량 확보 중심의 기존 운영은 저수위 하강에 대한 운영자의 위험부담은 줄일 수 있으나 수해지역 공급신뢰도와 하류지역 홍수위험에는 좋지 않은 영향을 주게 된다. 증가하는 홍수위험을 줄이기 위해 상시공급량을 늘려 홍수기 전 용담댐의 저수능력을 더 확보해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 전북녹색환경지원센터의 연구사업비 지원을 받아 수행되었습니다(Project No. 21-14-01-07-36). 이에 감사드립니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Apipattanavis, S., Podesta, G., Rajagopalan, B., and Katz, R.W. (2007). "A semiparametric multivariate and multisite weather generator." *Water Resources Research*, Vol. 43, W11401.
- Biemans, H., Haddeland, I., Kabat, P., Ludwig, F., Hutjes, R.W.A., Heinke, J., von Bloh, W., and Gerten, D. (2011). "Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century." *Water Resources Research*, Vol. 47, W03509.
- Brêda, J.P.L.F., de Paiva, R.C.D., Collischon, W., Bravo, J.M., Siqueira, V.A., and Steinke, E.B. (2020). "Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections." *Climatic Change*, Vol. 159, pp. 503-522.
- Breiman, L. (2001). "Random forests." *Machine Learning*, Vol. 45, pp. 5-32.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., Stone, C., Steinberg, D., and Colla, P. (1984). *CART: Classification and regression trees*. Routledge, New York, NY, U.S.
- Brown, C., and Wilby, R.L. (2012). "An alternate approach to assessing climate risks." *Eos Transactions American Geophysical Union*, Vol. 93, pp. 401-402.
- Brown, C., Ghile, Y., Laverty, M., and Li, K. (2012). "Decision scaling: Linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector." *Water Resources Research*, Vol. 48, W09537.
- Brutsaert, W. (2017). "Global land surface evaporation trend during the past half century: Corroboration by Clausius-Clapeyron scaling." *Advances in Water Resources*, Vol. 106, pp. 3-5.
- Bürger, G., Sobie, S.R., Cannon, A.J., Werner, A.T., and Murdock, T.Q. (2013). "Downscaling extremes: An intercomparison of multiple methods for future climate." *Journal of Climate*, Vol. 26, pp. 3429-3449.
- Dai, A. (2013). "Increasing drought under global warming in observations and models." *Nature Climate Change*, Vol. 3, pp. 52-58.

- Daly, C., Halbleib, M., Smith, J.I., Gibson, W.P., Doggett, M.K., Taylor, G.H., Curtis, J., and Pasteris, P.P. (2008). "Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States." *International Journal of Climatology*, Vol. 28, pp. 2031-2064.
- Ehsani, N., Vörösmarty, C.J., Fekete, B.M., and Stakhiv, E.Z. (2017). "Reservoir operations under climate change: Storage capacity options to mitigate risk." *Journal of Hydrology*, Vol. 555, pp. 435-446.
- Emami, K. (2020). "Adaptive flood risk management. Irrigation and Drainage." Vol. 69, No. 2, pp. 230-242.
- Foley, M.M., Bellmore, J.R., O'Connor, J.E., Duda, J.J., East, A.E., Grant, G.E., Anderson, C.W., Bountry, J.A., Collins, M.J., Connolly, P.J., and Craig, L.S. (2017). "Dam removal: Listening in." *Water Resources Research*, Vol. 53, pp. 5229-5246.
- Georgakakos, A.P., Yao, H., Kistenmacher, M., Georgakakos, K.P., Graham, N.E., Cheng, F.-Y., Spencer, C., and Shamir, E. (2012). "Value of adaptive water resources management in Northern California under climatic variability and change: Reservoir management." *Journal of Hydrology*, Vol. 412-413, pp. 34-46.
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., and Martinez, G.F. (2009). "Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling." *Journal of Hydrology*, Vol. 377, pp. 80-91.
- 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, pp. 14-20.
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., and Kanae, S. (2013). "Global flood risk under climate change." *Nature Climate Change*, Vol. 3, pp. 816-821.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). Climate Change 2013: The physical science basis. *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Edited by Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P.M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, U.S.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). Summary for Policymakers. In: 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., In Press.
- Jeong, Y., and Eum, H.-I. (2015). "Application of a statistical interpolation method to correct extreme values in high-resolution gridded climate variables." *Journal of Climate Change Research*, Vol. 6, pp. 331-334.
- Kim, D., and Chun, J.A. (2021). "Revisiting a two-parameter Budyko equation with the complementary evaporation principle for proper consideration of surface energy balance." *Water Resources Research*, Vol. 57, e2021WR030838.
- Kim, D., Chun, J.A., and Aikins, C.M. (2018). "An hourly-scale scenario-neutral flood risk assessment in a mesoscale catchment under climate change." *Hydrological Processes*, Vol. 32, pp. 3416-3430.
- Kim, D., Chun, J.A., and Choi, S.J. (2019). "Incorporating the logistic regression into a decision-centric assessment of climate change impacts on a complex river system." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 23, pp. 1145-1162.
- Knighton, J., Steinschneider, S., and Walter, M.T. (2017). "A vulnerability-based, bottom-up assessment of future riverine flood risk using a modified peaks-over-threshold approach and a physically based hydrologic model." *Water Resources Research*, Vol. 53, pp. 10043-10064.
- K-water (2019). *The handbook of water management in practice*.
- Kwon, H.H., Lall, U., and Khalil, A.F. (2007). "Stochastic simulation model for nonstationary time series using an autoregressive wavelet decomposition: Applications to rainfall and temperature." *Water Resources Research*, Vol. 43, W05407.
- Meinshausen, M., Nicholls, Z.R., Lewis, J., Gidden, M.J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., and Canadell, J.G. (2020). "The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500." *Geoscientific Model Development*, Vol. 13, pp. 3571-3605.
- Mok, J.Y., Choi, J.H., and Moon, Y.I. (2020). "Prediction of multi-purpose dam inflow using deep learning." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, pp. 97-105.
- Nilsson, C., Reidy, C.A., Dynesius, M., and Revenga, C. (2005). "Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems." *Science*, Vol. 308, pp. 405-408.
- Penman, H.L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 193, No. 1032, pp. 120-145.
- Perrin, C., Michel, C., and Andreassian, V. (2003). "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation." *Journal of Hydrology*, Vol. 279, pp. 275-289.
- Poff, N.L., Brown, C.M., Grantham, T.E., Matthews, J.H., Palmer, M.A., Spence, C.M., Wilby, R.L., Haasnoot, M., Mendoza, G.F., Dominique, K.C., and Baeza, A. (2016). "Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering decision scaling." *Nature Climate Change*, Vol. 6, pp. 25-34.
- Poncelet, C., Merz, R., Merz, B., Parajka, J., Oudin, L., Andreassian, V., and Perrin, C. (2017). "Process-based interpretation of conceptual hydrological model performance using a multi-national catchment set." *Water Resources Research*, Vol. 53, pp. 7247-7268.
- Priestley, C.H.B., and Taylor, R.J. (1972). "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters." *Monthly Weather Review*, Vol. 100, pp. 81-92.

- Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N., Mathevet, T., and Andreassian, V. (2011). "A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation." *Journal of Hydrology*, Vol. 411, pp. 66-76.
- Quinn, J.D., Hadjimichael, A., Reed, P.M., and Steinschneider, S., (2020). "Can exploratory modeling of water scarcity vulnerabilities and robustness be scenario neutral?" *Earth's Future*, Vol. 8, e2020EF001650.
- Raje, D., and Mujumdar, P.P. (2011). "A comparison of three methods for downscaling daily precipitation in the Punjab region." *Hydrological Processes*, Vol. 25, pp. 3575-3589.
- Steinschneider, S., and Brown, C. (2013). "A semiparametric multivariate, multisite weather generator with low-frequency variability for use in climate risk assessments." *Water Resources Research*, Vol. 49, pp. 7205-7220.
- Steinschneider, S., Wi, S., and Brown, C. (2015). "The integrated effects of climate and hydrologic uncertainty on future flood risk assessments." *Hydrological Processes*, Vol. 29, pp. 2823-2839.
- Szilagyi, J., Crago, R., and Qualls, R. (2017). "A calibration-free formulation of the complementary relationship of evaporation for continental-scale hydrology." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 122, pp. 264-278.
- Thinda, K.T., Ogundeji, A.A., Belle, J.A., Ojo, T.O. (2020). "Understanding the adoption of climate change adaptation strategies among smallholder farmers: Evidence from land reform beneficiaries in South Africa." *Land Use Policy*, Vol. 99, 104858.
- Trenberth, K.E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P.D., Barichivich, J., Briffa, K.R., and Sheffield, J. (2014). "Global warming and changes in drought." *Nature Climate Change*, Vol. 4, pp. 17-22.
- Turner, T.E., Swindles, G.T., and Roucoux, K.H. (2014). "Late Holocene ecohydrological and carbon dynamics of a UK raised bog: impact of human activity and climate change." *Quaternary Science Reviews*, Vol. 84, pp. 65-85.
- Weaver, C.P., Lempert, R.J., Brown, C., Hall, J.A., Revell, D., and Sarewitz, D. (2013). "Improving the contribution of climate model information to decision making: The value and demands of robust decision frameworks." *WIREs Climate Change*, Vol. 4, pp. 39-60.
- Whateley, S., Steinschneider, S., and Brown, C., (2014). "A climate change range-based method for estimating robustness for water resources supply." *Water Resources Research*, Vol. 50, pp. 8944-8961.
- Yang, T., Gao, X., and Sorooshian, S., Li, X. (2016). "Simulating California reservoir operation using the classification and regression-tree algorithm combined with a shuffled cross-validation scheme." *Water Resources Research*, Vol. 52, pp. 1626-1651.