Check for updates

Journal of Climate Change Research 2023, Vol. 14, No. 6-2, pp. 1013~1025
DOI: https://doi.org/10.15531/KSCCR.2023.14.6.1013

기후 스트레스 테스트 기반 댐 이수 취약성 평가 연구

김경민[*] · 김주호[**†] · 임동진[***] · 이기호[****] · 고명준[*****] · 조지현[******]

[*]한국수자원공사 물관리기획처 대리, [**]한국수자원공사 물관리기획처 부장, [***]한국수자원공사 물관리기획처 처장,
[****]한국수자원공사 물관리기획처 차장, [*****]한국수자원공사 물관리기획처 과장 [******]계명대학교 토목공학과 학생연구원

Vulnerability assessment for dam based on climate stress test

Kim, Kyongmin[*] · Kim, Zoo Ho[**†] · Lim, Dong Jin[***] · Lee, Gi Ho[****] · Go, Myeongjun[*****] · Jo, Jihyeon[******]

[*]*Manager, Water resources Management Research & Planning Department, Korea Water Resources Corporation (K-water), Daejeon*
[**]*General Manager, Water Resources Management Research & Planning Department, K-water, Daejeon, Korea*
[***]*General Directer, Water Resources Management Research & Planning Department, K-water, Daejeon, Korea*
[****]*Senior Manager, Water Resources Management Research & Planning Department, K-water, Daejeon, Korea*
[*****]*Manager, Water Resources Management Research & Planning Department, K-water, Daejeon, Korea*
[******]*Undergraduate, Department of Civil Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea*

ABSTRACT

Due to climate change, disasters such as floods and droughts are occurring frequently. As temperatures and precipitation increase and the number of rainy days decreases, preemptive action measures against floods and droughts are needed. In Korea, most runoff occurs in the flood season (June to September), and runoff varies considerably among different years (ME, 2021), with the annual minimum and maximum runoff occurring in 1998 (40.6 billion m^3) and 2003(129.3 billion m^3). The water supply capacity and dam size of multipurpose dams have been reviewed by analyzing water supply reliability based on hydrology and the economic environment at the time of dam construction. There are no standards for calculation of water supply reliability in Korea, and research on water supply reliability and vulnerability for water supply based on various scenarios considering climate factors is insufficient. The objective of this study is to create discharges for climate stress scenarios according to changes in temperature and precipitation and to analyze changes in water supply reliability (durational) and rate of vulnerability for the Chungju, Yongdam, Seomjingang and Hapcheon dams. The analysis period was set as the past period (1995 ~ 2022) and future periods (2041 ~ 2060 and 2081 ~ 2100). To evaluate dam vulnerability according to temperature and precipitation, 1,891 climate stress scenarios were created in which temperature was changed by 1°C from 0 to 3°C and precipitation was changed by 1% from 70% to 130%. To calculate the simulated discharge for each scenario, the IHACRES model was used. The change in water supply reliability(durational) affected by precipitation was more significant than the change by temperature, and Hapcheon Dam was more sensitive to both temperature and precipitation than other dams. In Korea, where seasonal and regional rainfall variation is dramatic, prediction of various temperature and precipitation changes is difficult. This study based on climate stress test has potential to be expanded not only in terms of water supply management but also in terms of flood and water environment policy. These results can be used to establish the direction and standards for water supply reliability in an environment in which climate factors are considered.

Key words: Global Climate Change, Climate Stress Test, Vulnerability Assessment, Durational Reliability

†Corresponding author : swallow@kwater.or.kr (34350, Korea Water Resources Corporation, 200, Sintanjin-ro, Daedeok-gu, Daejeon, Korea. Tel. +82-42-629-3120)

ORCID
김경민 0009-0005-9888-4944
김주호 0009-0003-8949-9425
임동진 0009-0005-2981-1493
이기호 0009-0000-4352-6027
고명준 0009-0003-8167-1788
조지현 0009-0006-2949-6806

Received: November 1, 2023 / Revised: November 27, 2023 / Accepted: December 18, 2023

1. 서론

인간이 초래한 기후변화는 이미 전 지구 모든 지역에 많은 날씨와 극한 기후에 영향을 미치고 있다(IPCC, 2023). 국내에서도 최근 기후변화에 따른 수문사상의 변화로 극한 홍수 및 가뭄 등으로 인한 피해가 지속적으로 발생하고 있다. 특히, 1970년대 이후로 연평균 강수량의 편차가 증가함에 따라 5 ~ 7년 주기로 극심한 가뭄이 발생하고 있으며, 가뭄일수는 2010년대에 평균 63.1일로 크게 증가하는 등 가뭄 발생이 증가하고 있는 추세이다(ME, 2021).

또한, 21세기 후반기로 갈수록 우리나라 연평균 기온이 현재(2000 ~ 2019년) 대비 6.3℃까지 상승 전망되며 평균 강수량은 16%까지 증가하나 강수일수는 감소 전망이 논의 되고 있어 물관리에서 기후변화가 가장 큰 리스크 요인으로 분류되는 만큼 선제적인 물재해 대응방안이 절실한 실정이다(NIMS, 2022). 우리나라의 물관리 특징을 살펴보면 유출량 대부분이 홍수기(6 ~ 9월)에 편중되어 있으며 연 최저 유출량은 1988년 406억㎥, 최고는 2003년 1,293억㎥으로 연도별 변화폭이 큰편이다(MLTM, 2012). 또한, 지형 여건은 국토의 63%가 산악지형으로 하천의 경사가 급하여 홍수가 일시에 유출되고 갈수시에는 유출량이 매우 적어 물이용 및 홍수관리에 취약한 편이다(MOCT, 2018). 계절적·지형적 여건 및 강수일수 감소, 기후변화 증가로 발생하는 수자원 내 유입량 및 유출량의 불균형은 심각한 가뭄사상을 유발하며 용수 부족까지 연결되어 용수공급의 안정성까지 위험하게 된다.

안정적 용수공급을 위해 댐 설계시 용수공급수요에 따른 댐의 규모 산정을 위해 계획당시의 수문, 유역, 경제적 환경 등을 바탕으로 댐 이수안전도 지표를 산정하였지만 점차 변화하는 기후 전망 및 용수수요량 변화에 대비하여 기온 및 강수 등 기후요소를 고려하여 댐의 용수공급능력을 재검토할 필요가 있다고 판단된다. 현재 다목적댐의 용수공급능력은 최대 갈수기 동안에도 용수공급을 보장할 수 있는 최대 공급량 또는 보장공급량 개념을 적용하여 산정하였으나 물 부족을 허용하지 않는 상태에서의 공급가능량을 기준으로 용수공급능력을 평가함에 따라 수자원이용률의 저하를 가져올 수 있다(K-water, 2021).

통상적으로 용수공급능력 평가는 이수안전도 개념을 활용하고 있으며 이는 수자원 시설이 그 시설로부터 수요량 또는 공급량을 충족시킬 수 있는 물 공급 안정성 정도를 나타내는 지표로 정의할 수 있다(K-water, 2012). 현재 국내의 이수안전도에 관한 명확한 기준은 없으며 과거 최대 갈수 시에도 용수공급이 가능한 보장공급량 기준과 전체 계획기간 중 일정 기간 동안 물 부족을 허용하는 신뢰도(reliability) 기준으로 분류할 수 있다(Yi and Song, 2002). 신뢰도 기준 이외에도 국내 다목적댐에 대한 회복도 및 취약도 기준(Hashimoto et al., 1982)을 활용하여 국내 수자원계획 수립을 위한 물공급안전도 및 용수수급체계 개발 등의 연구(Lee et al., 1999), 국내·외 용수공급 평가지표에 대한 조사와 지표 개발을 통해 지침화 할 수 있는 용수공급 평가방법 개선 연구(K-water, 2014), 댐별 주기적인 이수안전도 평가 및 우선순위 판단을 위한 이수안전도의 등급화 방안 연구(Sung et al., 2022) 등 이수안전도 관련 지표개발 등 다양한 연구들이 진행되오고 있다. 반면에 강수 및 기온 증감 등 불확실하게 변화하는 미래 기후에 대해서 댐의 이수 측면에 미치는 영향에 대한 분석은 부족한 실정이다.

본 연구에서는 다목적댐 대상으로 기후 스트레스(기온 및 강수 변화) 테스트 시나리오에 따른 이수안전도를 통해 향후 미래 기후요소(기온, 강수)가 댐의 이수 측면에 미치는 영향정도를 평가하고자 하였다. Woo et al. (2023)에 따르면 최근 기후변화영향평가연구에 있어서 기후 취약성평가를 선행하는 상향식(Bottom-up) 영향평가로 흔히 의사결정 구조화(Decision Framing), 기후 스트레스 테스트(Climate Stress Test), 기후정보기반의 위험도 평가(Climate-informed Risk Assessment)의 3단계가 이루어지고 있다. 이 중 본 연구는 기후 스트레스 테스트를 활용하여 강수는 최대 30% 증가, 기온은 0 ~ 3℃ 내의 독립적 변화에 대해 약 1,891개의 시나리오 설정하고 적은 입력자료와 별도 계산코드 활용가능 및 다양한 시나리오 설정 등이 용이한 IHACRES 강우-유출 모형을 선택하여 유입량을 산정하였다. 이에 시나리오별 산정된 유입량을 활용하여 이수안전도를 산정하여 이수안전도의 변화 및 댐의 이수 취약비율(이수안전도 95% 미만 비율)을 정량적으로 분석하였다.

2. 연구방법

기온 및 강수 변화에 따른 댐별 기후 스트레스 테스트 기반의 취약성 평가를 진행하기 위해 물 공급의 안정성 정도인 이수안전도를 산정하고 Fig. 1과 같은 절차에 따라 평가 연구를 수행하였다.

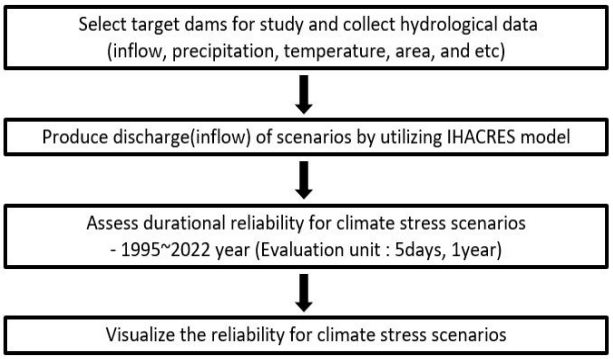

Fig. 1. Flow chart of study procedure

먼저 연계없이 단독운영 중인 다목적댐 대상으로 각 수계별 1개의 댐을 선정하여 최근 용수공급 이슈 등을 고려하고 각 댐별 과거 기온, 강수 자료 등 시계열 분석을 통해 댐별 수문자료를 구축하였다. 또한, 이수안전도 산정을 위해서는 기온 및 강수 변화별 유입량 자료가 필요하므로 IHACRES 모형을 활용하여 시나리오별 모의 유입량을 산정하였다. 해당 시나리오별 유입량을 활용하여 댐별 이수안전도를 도출하여 기온 및 강수 변화에 따른 이수안전도 영향정도 및 취약비율 등 분석을 통해 댐별 이수 취약성 평가를 수행하였다.

3. 연구자료 구축

본 절에서는 연구에 사용된 분석기간 및 조건 설정, 입력자료 및 시나리오 구축방법과 취약성평가 기준 설정에 대해 서술하였다.

3.1. 대상 분석기간 및 분석조건 설정

본 연구에서는 기온 및 강수 변화에 따른 이수안전도 산정을 위해 과거, 미래 중반기 및 미래 후반기 등 3가지의 분석기간을 설정하였다.

물 공급 안정도를 평가하기 위해서는 최소 20년 이상의 분석기간을 권장(KWRA, 2022)하고 있으므로 과거기간은 1995～2022년으로 총 28년의 분석기간을 설정하였다. 또한, 과거기간과의 비교를 위해 21세기 중반기(2041～2060년), 후반기(2081～2100년) 등 남한상세 기후변화 전망보고서(NIMS, 2022)에서 활용하고 있는 미래 기간을 활용하여 본 연구에서는 미래 분석기간으로 2041～2060년을 미래 중반기, 2081～2100년을 미래 후반기로 설정하였다.

2015년부터 댐 용수공급조정기준 시행 및 운영을 통해 강수량 부족으로 댐 용수부족시 댐의 용수공급량을 단계별로 조정하여 댐의 생·공용수 공급에 지장이 발생하지 않도록 하고 있으나(ME, 2023), 본 연구에서는 용수공급량 조건으로 불확실한 미래 기후조건에 따라 수많은 기후스트레스 테스트 시나리오에 극한 상황을 고려하고자 실제 가뭄 시 공급량의 단계별 감축, 수원 간 연계 등의 대응을 고려하지 않고 댐 기본계획공급량을 지속 공급하는 극한의 용수공급조건으로 설정하였다.

3.2. 대상 댐 현황 및 입력자료 구축

단독운영 중인 다목적댐을 대상으로 하여 수계별 최근 용수공급 현황을 종합 고려하여 한강수계의 충주댐, 금강수계의 용담댐, 영·섬수계의 섬진강댐 및 낙동강수계의 합천댐을 선정하였다(Table 1, Fig. 2).

Table 1. Basic information for Chungju, Yongdam, Seomjingang and Hapcheon dam (FCO, 2023)

Dam	Area(㎢)	Average annual inflow		Average annual precipitation (mm)	Annual basic plan supply (10^6m^3)			
		m^3/s	10^6m^3		Total water use	Municipal & Industrial	Agricultural	In-Stream
Chungju	6,648	154.5	4,888	1,197.6	3,380	2,731	315	334
Yongdam	930	24.4	769.5	1,259.7	650.43	492.75	-	157.68
Seomjingang	763	15.8	497.0	1,379.2	435	65	370	-
Hapcheon	925	20.2	637.0	1,301.4	599	520	32	47

국가수자원관리종합정보시스템(FCO, 2023) 및 기상개방자료포털(KMA, 2023a) 등을 통해 기온 및 강수 입력자료와 유입량, 유역면적 등 평가에 필요한 기초자료 및 운영현황을 수집하였다. 과거기간의 기온 및 강수 입력자료는 각 댐유역 내 기상 및 강우관측소 자료를 활용하고 강수는 티센망법을 사용하여 면적강우로 환산하여 구축하였다. 각 관측소별 결측 보완을 위해 역거리 가중법을 활용하여 대상 댐 유역의 관측소 결측을 보완하였다.

미래 기간의 기온 및 강수자료는 기후변화 시나리오 기반으로 구축하였으며 SSP 시나리오 중 산업기술의 빠른 발전에 중심을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발 확대를 가정하고 있는 SSP5-8.5 시나리오를 활용하였다(O'Neill et al., 2014). 본 연구에서는 기후정보포털(KMA, 2023b)에서 제공하는 AR6 보고서 기반의 남한상세(1 km) 기후변화 앙상블 모델(5ENSMN) 시나리오를 활용하였다. 해당 시나리오는 UKESM1 전지구 시나리오를 5개 지역기후모델로 역학적 상세화한 자료를 다시 1 km 격자로 통계적 상세한 모델의 앙상블 시나리오이다. 제공하고 있는 시군구 기반의 시나리오와 함께 대상 댐 유역의 표준유역간 면적비율을 활용하여 미래 중·후반기의 댐 유역 내 기온 및 강수 자료를 구축하였다. 5개의 모델을 활용하여 역학적 상세화를 통해 앙상블한 자료를 본 연구에서는 사용하였으나, Kim et al. (2023)의 연구와 같이 보다 넓은 범위에서 미래 기후변화의 변동성을 반영할 수 있는 Decision Scaling 기반의 댐 운영 기후변화 가뭄 취약성 평가 등 미래 기후에 대한 불확실성을 해소하는 노력으로 다양하고 수많은 모델 및 시나리오 조합으로 이수 취약성 평가 및 분석해야 할 필요성이 있다고 판단된다.

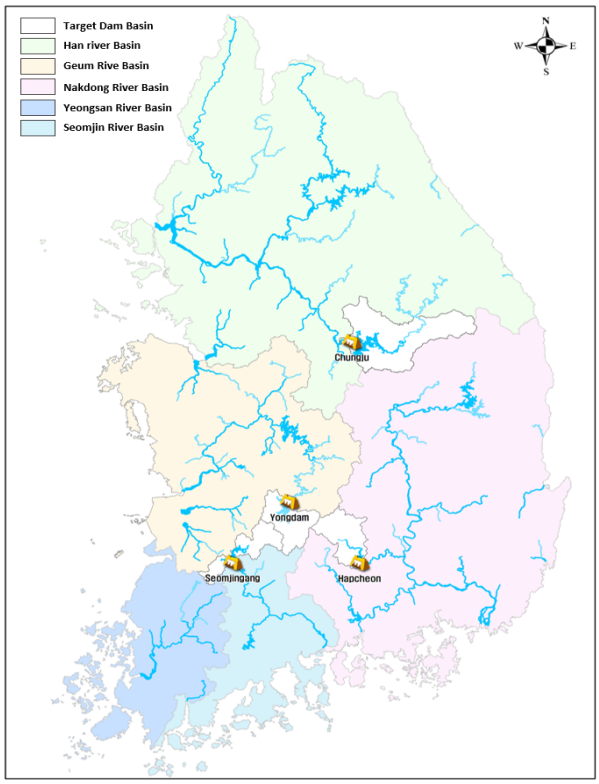

Fig. 2. Basin map in the study area

3.3. 강우-유출 모형을 활용한 모의 유입량 산출

본 연구에서는 분석기간별 1,891개 기후 스트레스 테스트 시나리오의 유입량 산정이 필요하므로 통계분석 프로그램인 R의 코드를 활용가능한 IHACRES 모형을 본 연구를 위한 강우-유출 모형으로 선정하였다. 또한, 본 모형은 타 모형에 비하여 적은 입력자료(기온·강수) 구성과 오픈 코드 활용으로 단시간 빠르게 연산이 가능한 점을 고려하였다. IHACRES 모형은 기본적으로 유역의 기온 및 강수 자료만으로 유출을 모의하는 집중형 모형(Jakeman et al., 1990)으로 Fig. 3과 같이 기온 및 강수 등 기후와 토양수분의 변화를 고려하여 유효우량을 계산하는 비선형 모듈과 유효우량을 유출특성에 맞게 유출량으로 산정하는 선형 모듈로 구성되어 있다(Park and Yoo, 2008).

IHACRES 모형 이외에도 강우-유출 모형으로는 흔히 알고 있는 Tank 모형과 SWAT 모형 등 다양한 강우-유출 모형이 존재한다. 기온, 강수 등 2가지 대표입력자료만을 요구하는 IHACRES 모형에 비해 Tank 모형과 SWAT 모형의 경우 유입량 산정하기 위해 풍속, 습도, 일조량, 기온, 토지이용도 등 상당히 많은 입력자료를 요구한다(Shin et al., 2007).

Fig. 3. Generic structure of the IHACRES model (Croke and Jakeman, 2007)

Woo et al. (2023)은 집중형 모형인 IHACRES와 GR4J를 이용한 강수 및 기온 변동성에 대한 유출 해석 민감도를 평가하였다. 위 연구도 8000개 이상의 강수 및 기온 변화 시나리오를 설정하여 유출해석을 수행하기 위해 IHACRES와 GR4J 모형을 유출모형의 대안으로 선택하였다.

각 분석기간별 기후 스트레스 시나리오별 유입량을 산정하기에 앞서 Table 2와 같은 매개변수를 설정하며 프로그램 R의 package인 Hydromad를 통해 매개변수를 최적화기법으로 산정할 수 있다. 또한, 미래기간의 유입량은 과거기간의 유량 패턴이 고려된 매개변수를 활용하여 해당 기간의 시나리오별 유입량을 산정하였다.

Table 2. Description of IHACRES parameters (Jakeman et al., 1990)

Parameter	Description
d	CMD threshold for producing flow (mm/d)
e	Temperature to potential evapotranspiration conversion factor
f	CMD stress threshold as a proportion of d
tau_s	Time constants for the exponential components for slow flow
tau_q	Time constants for the exponential components for fast flow
v_s	Fractional volumes for slow flow

산정된 매개변수에 따라 모의 유입량이 관측 유입량과 유사하게 모의 되는지 확인하기 위해 R^2, NSE, PBIAS (%) 등 통계적 성능평가 기준을 활용하여 모형의 검·보정을 실시하였다.

R^2는 국내에서는 결정계수라고도 불리며 실측치와 모의치 사이의 선형관계를 정량적으로 나타내는 지표로 수문, 수질 모델링 등 다방면에서 널리 이용되고 있다. 범위는 0에서 1로 1에 가까울수록 선형관계를 잘 나타낸다. 그러나 관측값 및 모의결과가 유사하지 않더라도 둘의 선형관계가 잘 나타나면 그 값이 높게 나타나므로 이에 대한 주의가 필요하다. 또 다른 통계적 지표인 NSE (Nash Sutcliffe)는 유출량, 유사량의 보정 등 가장 널리 이용되는 지표로 R^2에서 제기된 선형관계의 문제점을 극복하는 지표로 평가된다. 범위는 -∞에서 1사이로 나타나며 1의 값에 가까울수록 모의값이 관측값의 경향을 잘 반영하는 것으로 의미한다. PBIAS (%)는 모의값과 관측값의 총합의 대소를 비교하는 지표로 최적값은 0이며, 양수 및 음수는 과소 및 과대 모의를 의미한다. ROV는 관측용적(volume)에 대한 비율로 1에 가까울수록 좋으며, 각 통계적 지표에 대한 기준은 Table 3과 같다(Moriasi et al., 2015; Song and Kang, 2016).

모형의 검·보정시 과거 분석기간을 7:3의 비율로 나눠 1995 ~ 2014년을 보정, 2015 ~ 2022년을 검정기간으로 설정하였다. 단, 용담댐의 경우 준공완료 이후인 2001년 자료부터 분석을 실시하였으므로 보정은 2001 ~ 2016년, 검

Table 3. Performance evaluation Criteria (Moriasi et al., 2015)

Measure	Performance Evaluation Criteria			
	Very Good	Good	Satisfactory	Not Satisfactory
R^2	$R^2>0.85$	$0.75<R^2\leq0.85$	$0.60<R^2\leq0.75$	$R^2\leq0.60$
NSE	NSE>0.80	0.70<NSE≤0.80	0.50<NSE≤0.70	NSE≤0.60
PBIAS (%)	PBIAS(%)<±5	±5≤PBIAS<±10	±10≤PBIAS<±15	PBIAS≥±15

Table 4. Results for calibration and validation according to evaluation measures

Dam	Calibration				Validation			
	R^2	NSE	PBIAS (%)	ROV	R^2	NSE	PBIAS (%)	ROV
Chungju	0.777	0.710	10.687	0.89	0.801	0.795	1.685	0.98
Yongdam	0.824	0.780	8.824	0.91	0.809	0.762	7.070	0.93
Seomjingang	0.812	0.771	10.035	0.90	0.803	0.764	14.363	0.86
Hapcheon	0.854	0.810	8.252	0.92	0.835	0.793	6.467	0.94

정기간은 2017 ~ 2022년으로 설정하였다.

각 댐별 모형의 검·보정 결과는 Table 4와 같으며, 모든 통계적 평가지표가 검·보정기간의 유입량에 대해 평가기준(Table 3)에 근거하여 만족 이상의 결과를 나타내고 있어 IHACRES 모형을 통한 모의 유입량이 관측 유입량과 유사하게 모의되고 있음을 확인하였다.

3.4. 기온 및 강수 변화별 시나리오 자료 구축

기후 스트레스 테스트는 주로 금융권에서 기후변화 리스크가 금융안정에 미치는 영향을 파악하는 목적으로도 사용되었으며 현재 국내외에서 관련 기후 스트레스 테스트 평가방법을 연구 및 시행 중에 있다(Kim and Jeon, 2021; Woo et al., 2023). 물관리 분야에서도 기후변화 리스크(기온, 강수 등)가 미치는 영향을 파악하고자 기후 스트레스 시나리오를 생성하여 본 평가를 수행하였다.

기온 및 강수 변화별 기후 스트레스 시나리오 자료는 우리나라 물관리 여건을 고려하여 구축하였다. 우리나라 연평균 강수량(1,252 mm)의 55.4%(693.9 mm)가 여름에 집중하며 홍수기의 변동으로 연간 강수량 변동성도 큰 편에 속하듯이 계절별 편차가 큰 편이다(ME, 2021). 계절별 편차 등을 고려하여 강수 변화 시나리오를 구축하고자 최소 70%에서 최대 130%까지 1%씩 증가하는 61개의 강수 시나리오와 기온 0℃(Baseline)에서 3℃까지 0.1℃씩 증가하는 31개의 기온 시나리오로 복합적용하여 댐별로 총 1,891개 시나리오를 구축하였다.

3.5. 취약성평가 기준 설정

본 연구에서 취약성평가는 댐의 용수공급능력 평가하는데 확정론적 분석법인 저수지 모의운영 분석 기법을 기반으로 평가기준인 이수안전도 개념을 활용하여 평가를 진행하였다. 이수안전도는 용수수요에 대한 물 공급의 안정성을 나타내는 척도로서 보장공급량 기준과 신뢰도 기준이 있으나 본 연구에서는 효율적인 수자원 이용과 안정적 물 공급을 고려할 수 있는 신뢰도 기준을 채택하였다.

신뢰도 기준에 의한 평가는 분석기간이 길수록 정확도가 높아지며, 평가의 정확도를 높이기 위해서는 분석기간, 유입량 자료의 기간 단위, 신뢰도 적용 기준 등의 설정을 통해 정확도를 관여할 수 있다. 본 연구에서는 총 기간 수 대비 댐 기본계획공급량을 공급할 수 있는 기간 수를 활용한 기간 신뢰도(Durational reliability, %)를 채택하여 분석하였다. 기간 신뢰도 산정 식은 Eq.(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Rel_t = 1 - \frac{\sum T_f}{T_t} \quad (1)$$

T_f은 댐에서 계획공급량을 공급하지 못한 기간의 수, T_t는 전체 계획기간의 수를 의미한다.

또한, 용수공급 주기 등을 고려하여 물 부족의 과대 또는 과소평가가 발생하지 않도록 분석은 5일단위를 활용, 평가는 5일과 연단위를 활용하여(K-water, 2021; KWRA, 2022) 각 시나리오별 이수안전도 현황을 분석하였다.

이수안전도 현황 분석과 함께 최근 기후변화 및 물 공급 안정성 등을 고려하여 20 ~ 30년에 1회 물 부족을 허용하는 조건을 참고하여 분석기간별 1,891개의 시나리오에 대해 기간 신뢰도 95% 미만인 시나리오(취약비율)를 분석하여 이수 취약성 정도를 평가하였다.

4. 연구결과

본 절에서는 구축된 입력자료 및 평가기준에 따라 각 기후 스트레스 테스트 시나리오별 이수안전도 및 취약비율 결과를 분석하였다.

4.1. 기준값(Baseline)의 이수안전도 현황

과거기간인 1995 ~ 2022년까지의 관측 유입량, 댐 유역 내 기온 및 강수 자료를 활용하여 기온·강수 변화가 없는 기준값(Baseline)의 모의유입량을 산정하고 5일 단위 평가 및 분석한 결과 충주댐 92.6%, 용담댐 94.4%, 섬진강댐 98.5%, 합천댐 89.6%의 기간신뢰도를 보였다. 연 단위 분석에서는 충주댐 69.0%, 용담댐 73.9%, 섬진강댐 75.9%, 합천댐 65.5%로 나타났다.

각 신뢰도를 관측 유입량 기반의 기간 신뢰도를 모의값과 비교하였을 때는 연단위의 섬진강댐을 제외하고 모두 5% 이내의 신뢰도 차이로 IHACRES 모형으로 산정한 모의유입량이 관측 유입량을 유사하게 모의하며 과거 사상에 대한 이수안전도 평가와 큰 차이가 없는 것으로 보였다(Table 5).

Table 5. Simulation and observation for baseline scenario

Dam	Evaluation period	Data	Durational reliability (%)	
			5 days	1 year
Chungju	1995 ~ 2022	Sim	92.6	69.0
		Obs	92.1	65.5
Yongdam	2001 ~ 2022	Sim	94.4	73.9
		Obs	94.2	78.3
Seomjin gang	1995 ~ 2022	Sim	98.5	75.9
		Obs	99.8	96.5
Hapcheon	1995 ~ 2022	Sim	89.6	65.5
		Obs	87.5	65.5

섬진강댐의 연단위 이수안전도 차이를 검토하고자 Fig. 4, 5와 같이 모의 및 관측의 유입량, 수위 비교 그래프를 작성하였다. 섬진강댐의 연단위 평가를 비교시 관측값은 1995년에 1번 저수위에 도달하여 96.5%의 이수안전도가 산정되었으나, 모의값의 경우 1995년, 2009년, 2016 ~ 2020년 등 총 7년에 걸쳐 저수위 도달하여 75%의 이수안전도가 산정되었다. 다만, IHACRES 모형에 의해 산정된 모의 유입량은 평가지표인 ROV가 1 이하 등 관측 유입량보다 작게 산정된 영향으로 인해 2009년, 2016 ~ 2020년에 추가로 물부족이 발생한 것으로 판단된다.

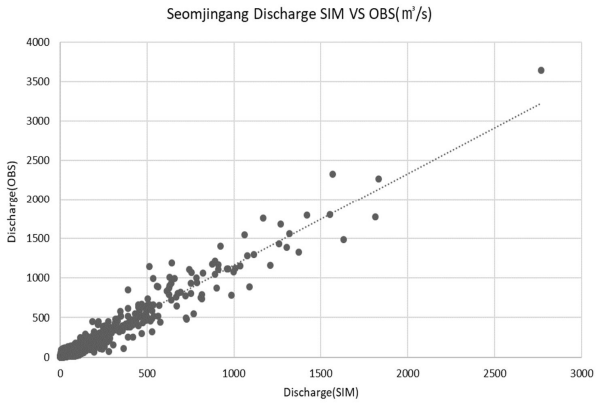

Fig. 4. Discharge for simulation versus observation (Seomjingang dam)

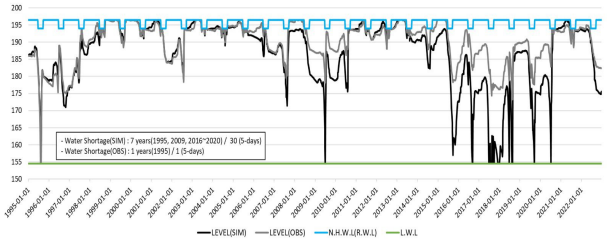

Fig. 5. Waterlevel for simulation versus observation (Seomjingang dam)

4.2. 기온·강수변화 시나리오에 따른 취약성 평가 결과

분석기간별 강수 70%에서 130%까지 1%씩 증가하는 61개의 강수 시나리오와 기온 0℃ (Baseline)에서 3℃까지 0.1℃씩 증가하는 31개의 기온 시나리오로 총 1,891개 시나리오에 대해 댐별 5일 평가단위로 기간 신뢰도를 산정하고 95% 미만의 기간 신뢰도 비율에 대해 분석하였다.

4.2.1. 분석기간별 이수안전도 분석

분석기간별 5일 평가단위 기준 최소 및 최대 이수안전도를 검토하며 각 댐별 3개의 기간을 종합분석하여 총 5,673개의 시나리오를 통해 기온 및 강수의 민감도를 분석하였다. Table 6은 각 기간별 1,891개의 기후 스트레스 테스트 시나리오 중 기온 1℃씩 증가 및 강수 30%씩 증감에 대해서 정리한 표이다. 최소 이수안전도는 극한 갈수(0.7P) 및 폭염(T+3℃) 시나리오일 경우 발생하며 극한 호우(1.3P) 및 기온 변화가 없는(T+0℃) 시나리오일 때 최대 이수안전도가 발생하였다.

과거기간(1995 ~ 2022년)의 최소 이수안전도를 살펴보면 충주댐 48.4%, 용담댐 41.0%, 섬진강댐 54.9%, 합천댐 35.9%이며 최대는 4개의 댐 모두 100%의 이수안전도가 산정되었다. 미래 중반기(2041 ~ 2060년)의 최소 이수안전도는 각각 충주댐 40.1%, 용담댐 33.3%, 섬진강댐 31.3%, 합천댐 30.9%으로 산정되었다. 해당 분석기간에도 최대 이수안전도는 모두 100%의 이수안전도가 산정되었다. 미래 후반기(2081 ~ 2100년)의 최소 안전도는 충주댐 47.0%, 용담댐 38.0%, 섬진강댐 35.1%, 합천댐 33.5%이며 최대 이수안전도는 충주댐 99.6%를 제외한 나머지 3개의 댐은 100%로 산정되었다.극한 호우(1.3P)의 경우 과도한 강수로 인해 댐 유역내 유입량 증가로 4개의 댐 모두 20년에 1회 물부족을 허용하는 수준(이수안전도 95%)에서의 물공급 만족 비율을 충족하는 것으로 평가되었다.

Table 6. Durational reliability (Unit 5days) for 1,891 scenarios

Dam	Temperature	Precipitation change								
		1995 ~ 2022 year (Past)			2041 ~ 2060 year (Future)			2081 ~ 2100 year (Future)		
		70%	100%	130%	70%	100%	130%	70%	100%	130%
Chungju	T+0℃	57.2	92.6	100.0	49.0	97.8	100.0	56.4	97.2	99.6
	T+1℃	54.0	90.1	99.6	45.8	96.2	100.0	53.3	95.9	99.5
	T+2℃	50.9	87.3	98.8	42.6	93.7	100.0	50.1	94.0	99.2
	T+3℃	48.4	84.8	97.9	40.1	90.9	100.0	47.0	91.7	99.0
Yongdam	T+0℃	47.3	94.4	100.0	39.4	97.1	100.0	44.4	92.9	100.0
	T+1℃	44.8	92.0	100.0	37.0	92.4	100.0	41.9	90.6	100.0
	T+2℃	42.5	89.1	100.0	35.0	87.4	100.0	40.0	87.2	100.0
	T+3℃	41.0	86.6	100.0	33.3	83.0	100.0	38.0	83.9	100.0
Seomjin gang	T+0℃	67.9	98.5	100.0	46.5	99.9	100.0	45.6	98.3	100.0
	T+1℃	63.1	97.3	100.0	40.7	99.4	100.0	41.8	97.5	100.0
	T+2℃	59.0	96.0	100.0	35.8	98.4	100.0	38.2	93.5	100.0
	T+3℃	54.9	93.0	100.0	31.3	94.7	100.0	35.1	88.5	100.0
Hapcheon	T+0℃	41.3	89.6	100.0	36.5	99.2	100.0	39.7	92.0	100.0
	T+1℃	39.0	86.1	100.0	34.4	95.4	100.0	37.4	89.8	100.0
	T+2℃	37.5	83.0	100.0	32.6	90.3	100.0	35.3	87.8	100.0
	T+3℃	35.9	80.1	99.7	30.9	85.1	100.0	33.5	85.6	100.0

기온 및 강수 변화가 없는 기준값(Baseline) 시나리오로 각 분석기간별 변화 추이를 확인한 결과 충주댐은 과거기간 92.6%, 미래 중반기 97.8%, 미래 후반기 97.2%로 과거보다 미래 기간의 물공급 만족비율이 다소 높아졌다(Table 6). 용담댐은 과거기간 94.4%. 미래 중반기 97.1%, 미래 후반기 92.9%이며 섬진강댐은 과거기간 98.5%, 미래 중반기 99.9%, 미래 후반기 98.3%, 합천댐은 과거기간 89.6%, 미래 중반기 99.2%, 미래 후반기 92.0%로 산정되었다. 4개 댐 모두 미래 중반기보다 미래 후반기로 갈수록 물부족 횟수가 더욱 많은 것으로 도출되었다. 미래 기후변화 시나리오 기온 및 강수 전망에 따라 과거기간에 비해 미래기간의 이수안전도가 높게 산정되었지만, 앞서 기온 및 강수 변화에 따른 이수안전도 변화폭은 과거기간에 비해 미래기간이 더욱 큰 것으로 분석된다.

Fig. 6은 각 분석기간·댐별 1,891개 시나리오의 이수안전도 수치를 면으로 변환하여 히트맵 그래프를 나타내었다. 색상이 진한 빨간색으로 갈수록 물부족이 많은 것을 의미하며 흰색은 물부족이 전혀 없는 상태인 이수안전도 100%를 의미한다. 합천댐이 타 댐에 비해 미래기간보다 과거기간(1995 ~ 2022년)에 시나리오별 많은 물부족을 현황을 보이고 있다.

Fig. 7은 강수 변화 없이 기온 0 ~ 3℃ 변화 및 기온 변화 없이 강수 70 ~ 130% 변화의 이수안전도 추세를 나타낸 그래프이다. 기온 변화에 따른 최소 이수안전도가 약 80%까지 도달하나 강수 변화에 따른 최소 이수안전도는 약 36%로 상대적으로 기온보다 강수에 의한 영향이 많이 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 7을 통해 과거기간의 기온 변화를 살펴보면 4개의 댐 모두 급격한 변화없이 기온상승에 따라 이수안전

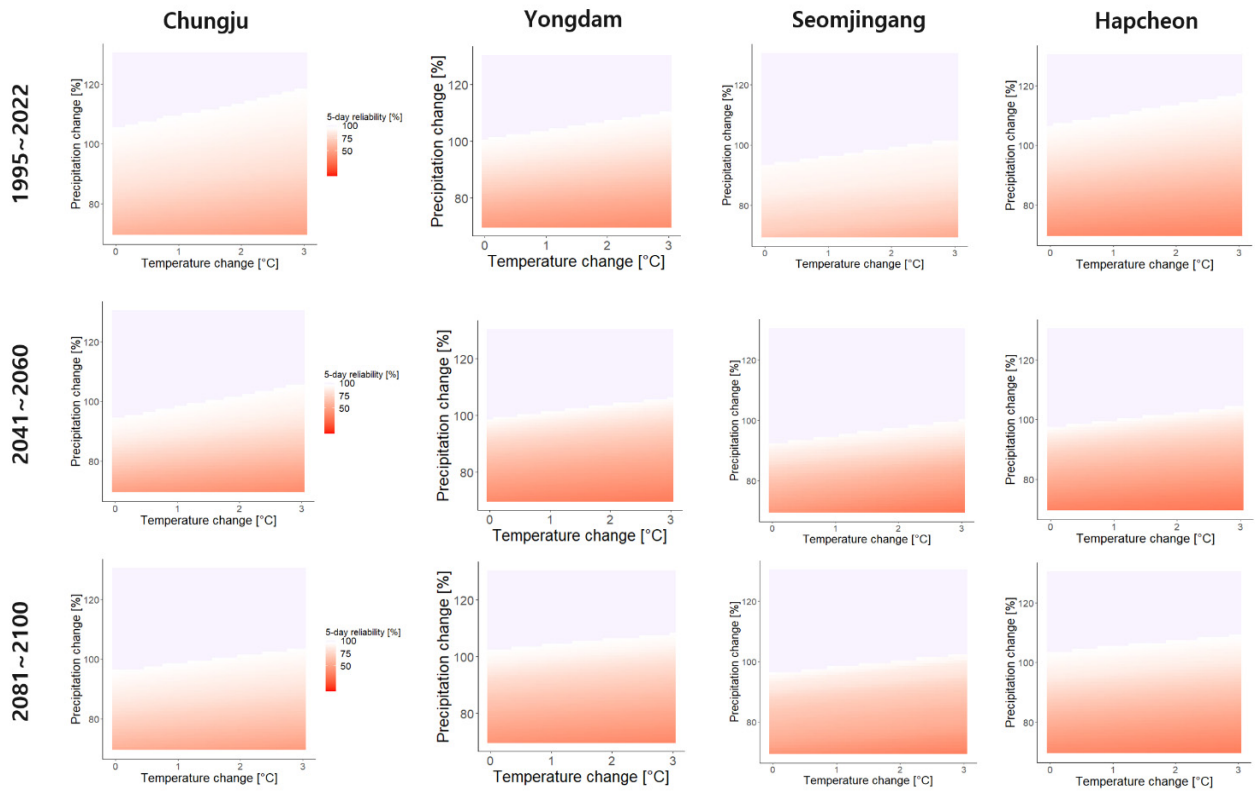

Fig. 6. Durational reliability (Unit 5days) for 1,891 scenarios

도가 감소하나 합천댐의 경우 타 댐에 비해 상대적으로 낮은 이수안전도 현황을 보이고 있다. 과거기간의 강수 변화도 미래기간의 변화 대비 급격한 감소없이 강수 100% 아래로 1% 감소할 때마다 약 2% 이내의 변화폭을 보이고 있다. 미래 중반기 및 하반기 등 미래 기간의 경우 용담댐과 합천댐의 각 기온 및 강수 변화별 이수안전도가 충주댐과 섬진강댐에 비해 낮은 편이며 과거기간에 비해 변화에 따른 이수안전도 감소추세가 높은 편이다. 다만, 과거와 미래 중·후반기를 비교하면 미래 중·후반기가 상대적으로 기온 및 강수 변화에 대한 기울기가 급경사로 타 기간에 비해 많은 이수안전도의 변화폭이 있음을 확인할 수 있다.

또한, Fig. 8을 통해 각 기간별 1,891개의 시나리오를 활용하여 댐별 5,673개의 시나리오의 이수안전도 분포현황을 나타낸 그래프이다. 주로 이수안전도 60% 이상의 분포가 모든 댐에서 보이고 있으며, 5,673개 시나리오의 분포를 보아 합천댐이 타 댐에 비해 분산정도가 높으므로 기온 및 강수 변화별 기후 스트레스 시나리오에 대한 영향이 많은 것으로 판단된다.

4.2.2. 분석기간별 취약비율 분석

각 분석기간 및 댐별 이수안전도 95% 미만 비율(취약비율)을 분석을 통해 댐별 이수 취약성 정도를 검토하였다. 20년에 1번 물부족을 허용하는 조건으로 이수안전도 95% 기준을 설정하였으며 취약비율이 높을수록 안정적 물공급이 어려운 기후 스트레스 테스트 시나리오가 상당히 많은 것을 의미한다.

4개의 댐을 분석기간별 검토시 과거기간은 평균 약 61.1%, 미래 중반기 약 50.2%, 미래 후반기 약 54.4%로 취약비율이 미래로 갈수록 감소하는 추세이다. 댐 간 비교시 합천댐이 타 댐에 비해 취약비율이 높으며, 섬진강댐은 취약비율이 50% 미만인 것으로 검토되었다. 앞서 4.2.1에서 합천댐이 타 댐에 비해 기온 및 강수변화 기반의 기후 스트레스 시나리오에 대한 분산정도가 큰 편으로 인해 평균 60.6%의 다소 높은 취약비율로 검토되었다 (Table 7).

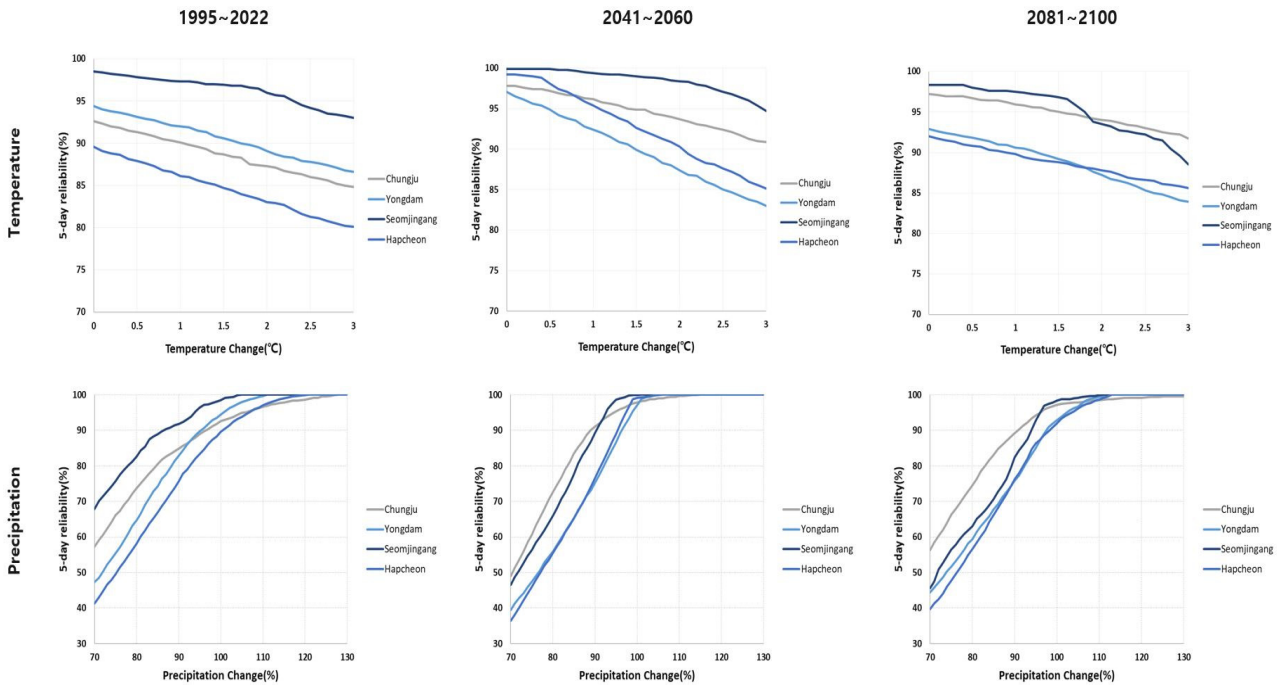

Fig. 7. Change for durational reliability (Unit 5days) : (Upper) Temperature, (Lower) Precipitation

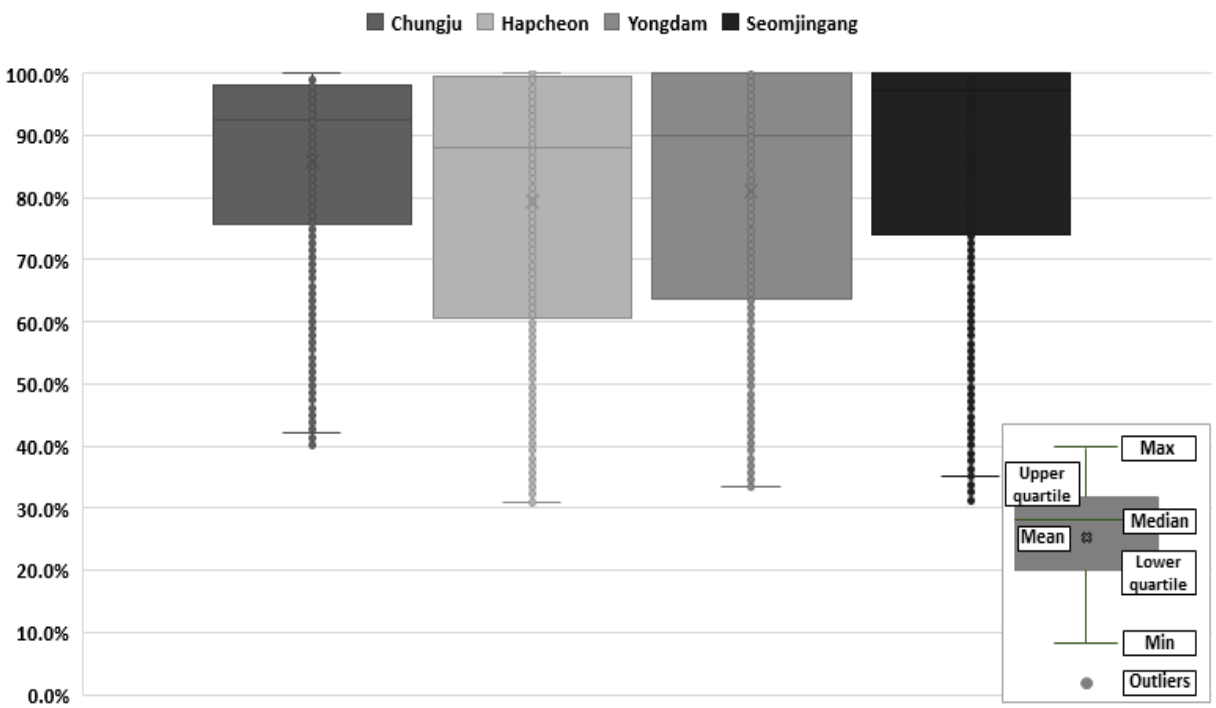

Fig. 8. Distribution of durational reliability (5days) for 5,673 scenarios

Table 7. Rate of vulnerability (%) for each dam

Dam	Total (average)	1995 ~ 2022	2041 ~ 2060	2081 ~ 2100
Average	55.2	61.1	50.2	54.4
Chungju	56.4	69.4	50.2	49.8
Yongdam	57.3	59.1	54.2	58.6
Seomjingang	46.4	46.3	43.9	48.9
Hapcheon	60.6	69.7	51.7	60.4

5. 결론

증가하는 기후변화 대비하여 기온이나 강수의 변화에 따른 댐 이수 취약성 평가는 효율적인 수자원 관리를 위하여 기후위기 적응 대책 등 물 관련 계획 수립에 필수적인 부분으로 판단된다. 이를 위해 미래 기온 및 강수 영향으로 인한 댐의 용수공급능력 재평가를 지속 검토할 필요성이 있다. 본 연구에서는 기후 스트레스 테스트 기반 댐 이수 취약성 평가하고자 충주, 용담, 섬진강, 합천댐 4개의 다목적댐에 대하여 기온 및 강수 자료와 저수지 모의운영 기법을 적용하여 시나리오·분석기간별 댐 이수안전도 및 취약비율 등을 비교하였다. 기후 스트레스 시나리오는 기온 및 강수 변화를 동시에 부여하며 강수는 최소 70%에서 최대 130%까지 1%씩 증가, 기온은 0℃(Baseline)에서 3℃까지 0.1℃씩 증가하는 시나리오로 총 1,891개 시나리오를 구축하였다.

본 연구를 통해강수 및 기온 변화에 따른 과거기간의 댐별 이수안전도 변화를 확인할 수 있었으며 남한상세 기후변화 시나리오를 활용하여 미래 기온 및 강수 전망자료를 구축하여 미래 중·후반기 기간의 물부족 현황도 분석하였다.

본 연구의 결과로 기온과 강수의 변화율을 상대적으로 정의하기는 어려우나 앞서 4.2.1의 Fig. 7과 같이 기온의 영향보다 강수 변동에 따른 댐 이수 취약성(이수안전도 및 취약비율)에 더 큰 영향을 주는 결과를 얻었다. 또한, 4개의 대상 댐 취약성 평가 결과는 5일 평가단위 기준으로 합천댐이 타 댐에 비해 상대적으로 기후 스트레스 시나리오 및 분석기간별 이수안전도가 낮게 분포됨을 확인할 수 있다. 또한, 5,673개의 시나리오의 분포 분석 시에도 합천댐이 분산정도가 높아 기온 및 강수 변화에 민감도가 타 댐에 비해 높은 것으로 판단된다.

기후 스트레스 시나리오별 모의 유입량을 산정하기 위해 선정한 강우-유출 모형에 따라 생성된 유입량 등을 활용한 댐 이수안전도 전망은 불확실성이 존재한다. 그러나 미래 기후요소를 고려한 댐 운영에 대한 예측은 댐 운영에 매우 중요한 기초자료로 활용될 수 있으며, 미래 수자원 관리의 의사결정에 영향을 미치므로 댐 운영에 이러한 불확실성에 대한 복합적인 반영이 필요할 것으로 판단된다. 특히 21세기 후반기로 갈수록 우리나라 연평균 기온 증가 및 연평균 강수량이 지속 증가하는 추세이며 강수일수는 감소하는 등(NIMS, 2022)의 강수량 변동추이의 특징에 따라 강우 증감에 따른 댐 취약성 평가는 향후 기후변화 및 기후 스트레스 테스트 기반의 후속연구에 활용 등 긍정적인 영향으로 끼칠 것으로 사료된다.

다만, 본 연구에서는 평가시 용수공급량을 실 공급량이 아닌 기본계획공급량을 감축없이 전량 공급하는 조건을 적용하였으며 가뭄시 댐 공급비율의 탄력적 조정 및 댐간 연계운영의 조건을 고려하지 않았다. 즉, 기후변화로 인하여 기온, 강수 등으로 직면할 수 있는 극한상황의 댐 이수안전도 시나리오를 평가한 것으로 추후 기후변화 영향에 대한 최소화 대책 수립시 용수공급조정기준에 따른 용수공급 등에 대한 분석도 필요하다고 판단된다.

또한, 미래 중·후반기 기간에 활용된 기온 및 강수자료는 UKESM1 시나리오를 역학적 상세화한 남한상세 앙상블 시나리오를 활용한 것으로 Lee and Kim (2011)의 Maximum entropy를 이용한 대표 GCM 시나리오 간 불확실성 평가처럼 다른 수많은 GCM 시나리오를 고려할 경우 본 연구와 다른 이수 취약성 평가 결과가 도출될 것이다. 대부분의 기후변화 연구는 불확실한 미래를 전망 및 분석하는 과정으로 모든 영향평가에 있어서는 불확실성을 포함하고 있다. 향후 체감하고 있는 불확실성을 저감하기 위해 다양한 GCM 시나리오 간 미래 중·후반기의 취약성 평가 및 의사결정 기법과 함께 댐별 기후변화 대비 이수대책 수립을 위한 연구수행이 필요하다.

안정적인 댐 용수공급은 이수, 치수 그리고 물 환경 모두 만족해야 안정적이고 성공적인 용수공급을 이룰 수 있듯이 이수 측면 뿐만 아니라 향후 기후변화로 인한 댐의 홍수조절 및 물환경(생태계 등) 문제에 대한 다양하고 종합적인 평가로 모든 측면의 효율적인 댐관리가 이루어질 필요가 있다.

사사

본 논문은 한국수자원공사의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Croke BFW, Jakeman AJ. 2007. Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semi-arid regions. In: Wheater H, Sorooshian S, Sharma KD (eds). Hydrological modeling in arid and semi-arid areas. Cambridge: Cambridge University Press. p. 41-48. doi: 10.1017/cbo9780511535734.005

FCO (Flood Control Office). 2023. Dam; [accessed 2023 May 1]. http://www.wamis.go.kr

Hashimoto T, Stedinger JR, Loucks DP. 1982. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. Water Resour Res 18(1): 14-20. doi: 10.1029/wr018i001p00014

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Summary for policymakers. In: Core Writing Team, Lee H, Romero J (eds). Climate change 2023 Synthesis report. Geneva, Switzerland: Author. p. 1-34. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

Jakeman AJ, Littlewood IG, Whitehead PG. 1990. Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. J Hydrol 117(1-4): 275-300. doi: 10.1016/0022-1694(90)90097-h

Kim J, Seo SB, Cho J. 2023. Development of a decision scaling framework for drought vulnerability assessment of dam operation under climate change. J Korea Water Resour Assoc 56(4): 273-284 (in Korean with English abstract).

Kim JY, Jeon EK. 2021. Transition risk for climate change and financial stability. Seoul, Korea: Bank of Korea. Survey Statistics Monthly Report Vol. 75, No. 12.

KMA (Korea Meteorological Administration). 2023a. Data; [accessed 2023 May 1]. https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do

KMA (Korea Meteorological Administration). 2023b. Climate change scenario; [accessed 2023 May 1]. http://www.climate.go.kr/home

KWRA (Korea Water Resources Association). 2022. Dam design standard. Sejong, Korea: Ministry of Environment. KDS 54 10 15 : 2022.

K-water (Korea Water Resources Corporation). 2012. Study on designed water yield evaluation of water resources system. Daejeon, Korea: Author.

K-water (Korea Water Resources Corporation). 2014. Improving reservoir yield evaluation method through drought frequency standardization and water shortage index development. Daejeon, Korea: Author.

K-water (Korea Water Resources Corporation). 2021. A study to prepare a standardization plan for the stability of reservoir yield. Daejeon, Korea: Author.

Lee DR, Yoon SY, Yoo JH, Kim DP, Seo BH, Kim HS, Kim SJ, Yoo CS, Lee YS, Jung SD. 1999. Study on the optimal water resources planing(Ⅲ) (Risk assessment for Korean water supply systems). Daejeon, Korea: Korea Water Resources Corporation. IPD-99-6 (in Korean with English abstract).

Lee JK, Kim YO. 2011. Assessing uncertainties of GCM scenarios using maximum entropy. Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference; 2011 May 19~May 20; EXCO. Daegu, Korea: Korea Water Resources Association. p. 70.

ME (Ministry of Environment). 2021. The 1st master plan for national water management (2021~2030). Sejong, Korea: Author.

ME (Ministry of Environment). 2023. Dam water supply adjustment guide. Sejong, Korea: Author.

MOCT (Ministry of Construction and Transportation).

2018. Long-Term dam construction plans (2012~2021) (modified). Sejong, Korea: Author.

Moriasi DN, Gitau MW, Pai N, Daggupati P. 2015. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. Trans ASABE 58(6): 1763-1785. doi: 10.13031/trans.58.10715

NIMS (National Institute of Meteorological Sciences). 2022. Report on high-resolution projection of future climate change over South Korea. Jeju, Korea: Author.

O'Neill BC, Kriegler E, Riahi K, Ebi KL, Hallegatte S, Carter TR, Mathur R, van Vuuren DP. 2014. A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. Clim Change 122(3): 387-400. doi: 10.1007/s10584-013-0905-2

Park YH, Yoo CS. 2008. Evaluation of stream flow data observed in the Pyungchang river basin using the IHACRES model. J Korean Soc Hazard Mitig 8(4): 123-133 (in Korean with English abstract).

Shin YC, Shin MH, Kim WG, Lim KJ, Choi JD. 2007. Estimation of streamflow discharges using Kajiyama equation and SWAT model. Korean Natl Comm Irrig Drain J 14(1): 41-49 (in Korean with English abstract).

Song JH, Kang MS. 2016. Performance measures and calibration methods for hydrologic and water quality models. Rural Resour 58(2): 11-22.

Sung J, Kang B, Kim B, Noh S. 2022. Development and application of integrated indicators for assessing the water resources performance of multi-purpose and water supply dams. J Korea Water Resour Assoc 55(9): 687-700 (in Korean with English abstract). doi: 10.3741/JKWRA.2022.55.9.687

Woo DK, Jo J, Kang B, Lee S, Lee G, Noh SJ. 2023. Assessing the sensitivity of runoff projections under precipitation and temperature variability using IHACRES and GR4J lumped runoff-rainfall models. KSCE J Civ Environ Eng Res 43(1): 43-54 (in Korean with English abstract). doi: 10.12652/KSCE.2023.43.1.0043

Yi JE, Song JW. 2002. Evaluation of water supply capacity for multi-purpose dam using optimization and simulation techniques. J Korean Soc Civ Eng 22(6B): 811-818 (in Korean with English abstract).