



Development of an evaluation index based on supply capacity for practical evaluation of drought resilience

Kim, Gi Joo^a · Kim, Jiheun^{b*} · Seo, Seung Beom^c · Kim, Young-Oh^d

^aPostdoctoral Scholar, Institute of Construction and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

^bAssociate Researcher, Institute of Urban Science, University of Seoul, Seoul, Korea

^cAssistant Professor, International School of Urban Sciences, University of Seoul, Seoul, Korea

^dProfessor, Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

Paper number: 22-079

Received: 16 September 2022; Revised: 28 October 2022; Accepted: 28 October 2022

Abstract

This study suggests the drought resilience index as S-day as a means of preparing for the recent extreme drought, allowing for the actual operational identification of each drought countermeasure's priority as well as the vulnerability of water resource facilities to drought. Although each dam's drought measures are unique in this case, the representative examples include adjusting the water supply, linking the functioning of various facilities, and considering emergency capacity. Here, 15 multipurpose dams and water supply dams in Korea were inspected. Under the return period of 20-year drought, most of dams showed stable by adjusting the water supply overall. The measures, however, did not seem to be able to resist a multi-year drought lasting more than two years. Besides, Hoengseong and Anodong-Imha Dam only lasted a year under the 100-year drought return period with other measures. Without the deployment of drought mitigation strategies, it is expected that the Hoengseong Dam, Andong-Imha Dam, Gunwi Dam, Unmun Dam, Daecheong Dam, and Juam Dam would not be able to meet the all water demand for a year under the 20-year drought condition. The ideal capacity for each drought measure was then suggested. Additionally, by increasing or decreasing the current supply contract by 10% in order to account for demand changes resulting from socio-economic instability, the drought response capacity of all 15 dams was re-evaluated. By lowering the supply contract amount by 10%, it was possible to endure a severe drought.

Keywords: Drought resilience, S-day, Drought response measure evaluation, Future water demand change

현실적 가뭄대응력 평가를 위한 공급가능일수 기반의 평가지표 개발

김기주^a · 김지훈^{b*} · 서승범^c · 김영오^d

^a서울대학교 건설환경종합연구소 연수연구원, ^b서울시립대학교 도시과학연구원 국제도시 및 인프라연구소 연구원,

^c서울시립대학교 국제도시과학대학원 조교수, ^d서울대학교 공과대학 건설환경공학부 교수

요 지

최근 발생하는 극한가뭄에 대비하고자 본 연구는 실제 운영에서 수자원 시설물의 가뭄 취약도 및 가뭄대책별 우선순위를 파악할 수 있는 가뭄대응력 지표로 S-day를 제안하였다. 여기서 가뭄대책이란 용수공급 조정, 시설간 연계운영, 비상용량 고려 등이 대표적이며, 각 댐별로 그 구성에 차이가 있다. 본 연구에서는 국내 15개 다목적댐 및 용수댐에 대하여 가뭄대응력을 산정하였으며, 그 결과 20년 빈도의 가뭄이 지속될 시 15개 댐 모두 전반적으로 용수공급 조정이라는 가뭄대책을 통해 안정적인 가뭄대응력을 보였다. 하지만 다른 대책에서는 2년 이상 지속되는 다년 가뭄을 대비하지 못하였으며, 황성댐과 안동-임하댐은 100년 빈도 가뭄 발생 시 대부분의 대책에서 S-day가 1년을 넘기지 못하였다. 특히, 황성댐, 안동-임하댐, 군위댐, 운문댐, 대청댐, 주암댐은 20년 빈도 가뭄 발생 시, 가뭄대책을 적용하지 않으면 1년 내로 정상적인 용수공급이 불가능할 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 S-day를 통해 가뭄대책별 최적 공급 용량을 제안하고 대책별 가뭄단계에 따른 가뭄시기를 변경해 가뭄대응 효과를 평가하였다. 마지막으로 미래 사회·경제적 변동에 따른 수요변화를 반영하고자 현행 공급 계약량에 대해 10%씩 증감하여 전체 15개 댐의 가뭄대응력을 재평가하였다. 그 결과 공급계약량이 10% 감소할 경우, 대부분의 댐에서 용수공급 조정만으로도 심각한 가뭄에 대한 대비가 가능할 것으로 분석되었다.

핵심용어: 가뭄대응력, S-day, 가뭄대책 평가, 미래 수요변화

*Corresponding Author. Tel: +82-2-456-9837

E-mail: ozthc23@uos.ac.kr (Kim, Jiheun)

1. 서론

가뭄은 평년 대비 적은 강우가 오랫동안 지속되면서 가용 수자원이 부족해짐에 따라 다양한 피해를 발생시키는 재해이다. 또한, 최근 발표된 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 6차 보고서(Sixth Assessment Report)에 의하면 기후변화로 인한 강우의 변동성이 더욱 증가함으로 인해 홍수와 가뭄과 같은 수재해 리스크가 함께 증가할 것으로 전망되었다. 기후변화는 이러한 가뭄의 발생 빈도와 강도를 증가시킬 것으로 전망되며(WMO, 2009; ME, 2020), 국내에서 또한 2014-2017년 충남지역에서 발생한 장기가뭄과 같은 재해가 앞으로 더욱 빈번히 발생할 것으로 예상된다(Kim *et al.*, 2022). 기후변화로 인해 장기 가뭄이 증가할 것이라는 전망은 전세계적으로 다양한 연구를 통해서도 발표되고 있다(Leng *et al.*, 2015; Kelley *et al.*, 2015; King *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2021).

홍수와 가뭄 등 수재해에 대응하기 위한 전통적인 대안은 댐 건설을 통해 홍수를 조절하고 가용 수자원을 확보하는 것이다. 그러나 현재 우리나라의 환경 및 지형적인 조건을 고려할 때, 추가적인 신규 수자원 시설의 건설보다는 가용 수자원 시설의 재해 대응력을 향상시키는 방향이 적절할 것으로 판단된다(Park, 2015). 한국수자원공사는 국지적으로 발생하는 극한가뭄에 대응하기 위해 각 댐별로 다양한 대응 대책을 수립하여 운영하고 있다. 예를 들어, 2014-2015년에 전국적으로 발생했던 극한가뭄은 용수공급 조절을 통한 과학적 가뭄대응 대책의 수립 및 제도화를 촉진하였으며, 현재 15개 다목적댐에 대한 용수공급 조정기준이 수립되어 가뭄 상황별 용수감량 기준을 적용하여 가뭄 상황에 대응하고 있다. 그러나 이러한 가뭄대책에 대한 명확한 가뭄대응력 평가기준이 없어, 평가기준에 따라 산정되는 공급능력이 상이하고, 우선순위 도출 및 최적 운용 방안을 마련하기 어려운 실정이다(Lee *et al.*, 2012).

따라서 본 연구에서는 각각의 대응 대책에 대한 정량적인 가뭄대응력 평가를 위해 합리적인 평가지표 선정이 우선되어야 한다고 판단하였다. 현재까지 표준강우지수(Standardized Precipitation Index, SPI), 파머가뭄지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI), 표준강우증발산지수(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI), 표준유출지수(Standardized Runoff Index, SRI) 등과 같은 다양한 가뭄지수가 개발되어 가뭄평가에 대표적으로 적용되고 있으며(Pedro-Monzónis *et al.*, 2015), Hashimoto *et al.* (1982)에 따른 신뢰도, 회복도, 취약도(Reliability, Resilience, Vulnerability)와 같은 지표들이 수자원 시설의 대응력 평가에 사용되고 있다

(Kim *et al.*, 2019a; Nguyen *et al.*, 2020). 그렇지만 이러한 가뭄지수 및 대응력 평가지표는 현장의 용수공급능력을 직관적으로 평가하고 다양한 대책별 대응력의 정량적인 비교·평가를 수행하기에 어려움이 있다. 더불어 기후변화로 인해 가뭄의 빈도 및 크기가 향후 증가할 것으로 예상되므로, 극한가뭄에 대한 시설별·대책별 가뭄대응력을 평가하기 위한 실용적인 가뭄대응력 평가지표의 개발이 필수적이다.

이에 따라, 본 연구에서는 현실적인 가뭄대응력 평가를 위해 용수공급가능일수 기반의 가뭄대응력 평가지표를 제안하고 이를 통해 시설물별로 마련된 다양한 추가용수 공급대책을 반영하여 현실적이며 현장에서도 쉽게 적용이 가능한 가뭄대응력 평가 방안을 개발하였다. 2장에서는 해외와 국내에서 가뭄 정량화 및 예측에 주로 사용되는 대표적인 가뭄지수와 가뭄대응력 지수에 대해 전반적으로 소개하고, 이를 바탕으로 본 연구에서 제안하는 가뭄대응력 평가지표의 개념에 대해 서술한다. 3장에서는 개발한 지표를 바탕으로 가뭄대응력을 평가한 전국 다목적댐 및 용수댐과 각 댐별로 가뭄대응을 위해 마련되어 있는 대책들에 대해 소개하고, 4장에서는 적용한 결과와 분석을 제시한다. 최종적으로 5장에서는 본 연구를 통해 도출한 결론과 이를 바탕으로 확장 가능한 향후 연구 주제를 제안하였다.

2. 연구 방법론

2.1 가뭄 평가지표 관련 연구 동향

가뭄지수는 국내뿐만 아니라 해외에서도 가뭄 관찰 및 예측을 위해 적극적으로 사용되고 있다. 특히, 미국 농무부(United States Department of Agriculture)는 U.S. Drought Monitor를 통해 SPI와 PDSI의 정보를 포함시켜 가뭄을 5개 단계(D0-D4)로 분류하고 있다. 가뭄 지수를 활용한 분류는 현재 가뭄 상태의 관찰에서만 활용되는 것이 아니라 일, 월, 계절간 미래 가뭄 예측에도 사용되고 있다. 국내의 가뭄기초조사, 가뭄전망, 가뭄대응기술개발 등의 가뭄 관련 연구를 담당하고 있는 국가가뭄정보분석센터도 가뭄분석을 위해 SPI, PDSI 등의 가뭄지수를 활용하고 있다. 국내에서는 강수를 기반으로 계산되는 SPI, PDSI 외에도 추가적으로 가뭄판단을 위한 참고지수로 표준 지하수지수(Standardized Groundwater level Index, SGI), 수정지표수공급지수(Modified Surface Water Supply Index, MSWSI), 토양수분지수(Soil Moisture Index, SMI) 등의 지하수, 지표수, 토양수분 등의 정보가 포함된 지수를 활용한 분석이 진행되고 있다. 이와 같이 SPI, PDSI, SGI,

MSWSI, SMI 등의 저명한 가뭄지수를 활용한 가뭄평가 및 가뭄분석은 우리나라와 미국 외에도 전세계적으로 많이 사용하고 있는 방법이며, 연구 및 실무에서도 다방면으로 적용되고 있다.

그러나, 위에서 소개한 가뭄지수는 주로 강우, 지하수, 지표수, 토양수분과 같은 자연적인 현상이나 기상학적 요인만을 고려하여 산정된다. 통상적으로 가뭄의 종류가 크게 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, 수문학적 가뭄, 사회경제학적 가뭄과 같이 복합적으로 분류되는 것처럼 하나의 시설이나 유역의 가뭄대응력은 자연적인 요인들뿐만 아니라 용수 수요량과 댐의 저수용량 등 사회경제적인 요인도 영향을 끼친다. 따라서 본 연구에서는 가뭄이 발생했을 때 대상 구조물이 효과적으로 이에 대응할 수 있는지에 대한 종합적인 능력을 구조물의 가뭄대응력으로 정의하고자 한다.

가뭄지수와 마찬가지로 가뭄대응력 또한 지수나 지표를 통해 정량화하고자 하는 연구가 국내외에서 진행되어 왔다. Mehran et al. (2015)는 MSRRRI (Multivariate Standardized Reliability and Resilience Index)라는 지수를 통해 과거 기간 동안의 누적 유입량, 미래 예측 수요량, 월간 저수량을 종합적으로 고려한 가뭄대응력 지수를 개발하였다. 이후, 이를 호주와 미국의 다년 가뭄 사상에 대해 평가하여 타 지수와의 상관관계를 분석한 바 있다. 비슷한 맥락으로, 국내에서는 저수지 가뭄감시를 위하여 Lee et al. (2006)이 물공급능력지수(Water Supply Capacity Index, WSCI)를 개발하여 향후 강수량과 저수지로의 유입량이 모두 없는 조건 하에서 저수지에서의 용수 공급 가능 개월을 계산하였다. WSCI는 또한 표준화 과정을 거쳐 표준물공급능력지수(Standardized Water Supply Capacity Index, SWSCI)로 변환되어 타 가뭄지수와 정량적인 비교가 가능하다. Lee et al. (2006)은 이를 전국 10개의 다목적댐에 적용하였으며 기존 지수와의 상관성을 분석하였다. 그러나, WSCI나 SWSCI는 무강우 및 무유입이라는 비현실적인 조건 하에서 계산되었으며, 가뭄대응을 위해 댐별로 마련된 다양한 대책들에 대한 영향을 고려할 수 없게 설계되었기에 이를 사용한 현실적인 가뭄대응력의 산정은 어려운 실정이다. 따라서, 본 연구에서 제안하고자 하는 공급가능일수 기반의 가뭄대응력 평가지표는 기계발된바 있는 MSRRRI, WSCI, SWSCI 등의 가뭄대응력 평가지표들의 단점을 보완하고자 하며, 세부 개념 및 논리는 아래 2.2절에서 소개하고자 한다.

2.2 공급가능일수 기반 평가지표(S-day)

본 연구를 통해 제안하고자 하는 가뭄대응력 평가지표는 영문으로 공급가능일수를 의미하는 S-day (Supply-day의 약

자)로 지칭하며, 극한가뭄 상황을 고려했을 때, 대상 댐의 유입량, 저수용량, 수요량 등의 요소로 결정되는 댐의 용수공급 능력과 가뭄 상황 발생 시 댐이 이에 대응할 수 있는 대책들을 모두 고려하고자 한다. 또한, 산정한 가뭄대응력 지표를 현장 및 실생활에서도 체감할 수 있는 단위로 제공하고 실제 의사결정 과정에서 적용이 가능하도록 매일 업데이트되며, 각 가뭄대응 정책의 효과의 정량적 분석이 가능하도록 설계하였다. 예를 들어, i 번째 대책 $M(i)$ ($M(i) = M(1), M(2), \dots$)을 시행하였을 때의 t 시점의 시설물의 용수공급 가능일수 $S-day_{M(i),t}$ 는 아래 Eq. (1)을 만족시키는 최대의 자연수 N (일)이다.

$$S_{M(i),t} - S_{\min} \geq \sum_{j=t}^{t+N} (R_{M(i),j} - Q_j^T) \quad (1)$$

여기서 $S_{M(i),t}$ 는 대책 $M(i)$ 을 시행하였을 때의 t 시점의 모의 저수량, S_{\min} 는 댐별 저수위 저수량, $R_{M(i),j}$ 는 대책 $M(i)$ 에 따른 j 시점에서의 일별 계약용수 공급량, Q_j^T 는 j 시점 동안의 재현 기간 T 년 빈도의 일별 가뭄유입량이다. 또한, 위 식을 만족시키는 최대의 자연수 N 을 찾기 전까지 $S_{M(i),t}$ 는 아래와 같은 식을 통해 반복적으로 계산된다.

$$S_{M(i),t} = \min(S_{M(i),t-1} + Q_{t-1}^T - R_{M(i),t-1} + A_{M(i),t-1} \cdot S_{\max}) \quad (2)$$

위 Eq. (2)에서 S_{\max} 는 댐별 최대 저수량(갈수기: 상시만수위 저수량, 홍수기: 홍수기 제한수위 저수량), $A_{M(i),t}$ 는 t 시점 동안의 대책 $M(i)$ 에 따라 대상 댐에 추가적으로 공급되는 용수량이다. 본 모의에서는 증발 및 기타 손실이 대상 댐의 저수량에 미치는 영향은 미미하다고 가정한다. 개념적으로, $S-day_{M(i),t}$ 는 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 T 년 빈도의 가뭄유입량과 대책 $M(i)$ 에 해당하는 추가 용수가 매일 지속적으로 유입되고 계약용수 공급량을 만족하는 용수 방류를 실시한다고 가정할 때, 현재 시점에서의 저수량이 최저저수량까지 도달하는 일수를 나타낸다. 위에서 설명한 바와 같이 이를 통해서 각 댐의 대책별 가뭄대응력을 계산할 수 있으며, 평가지표가 별도의 표준화 과정 없이 그대로 사용될 수 있기 때문에 이를 바탕으로 댐별 및 유역별 가뭄대응력 비교 분석이 가능하다. 본 연구에서 제안하고자 하는 공급가능일수 기반의 가뭄대응력 평가지표 $S-day_{M(i),t}$ 를 계산하는 순서도는 Fig. 2와 같다.

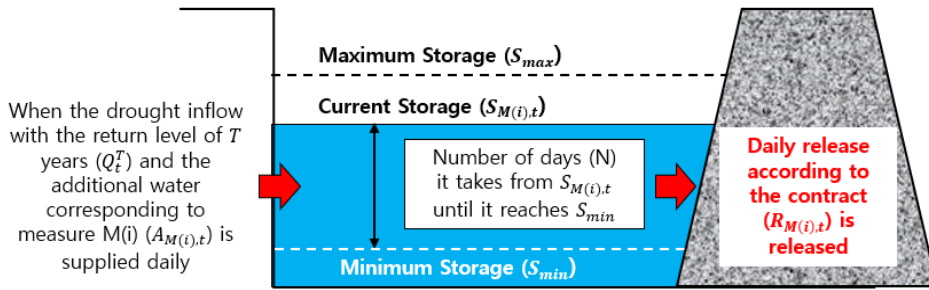


Fig. 1. Conceptual drawing of S-day

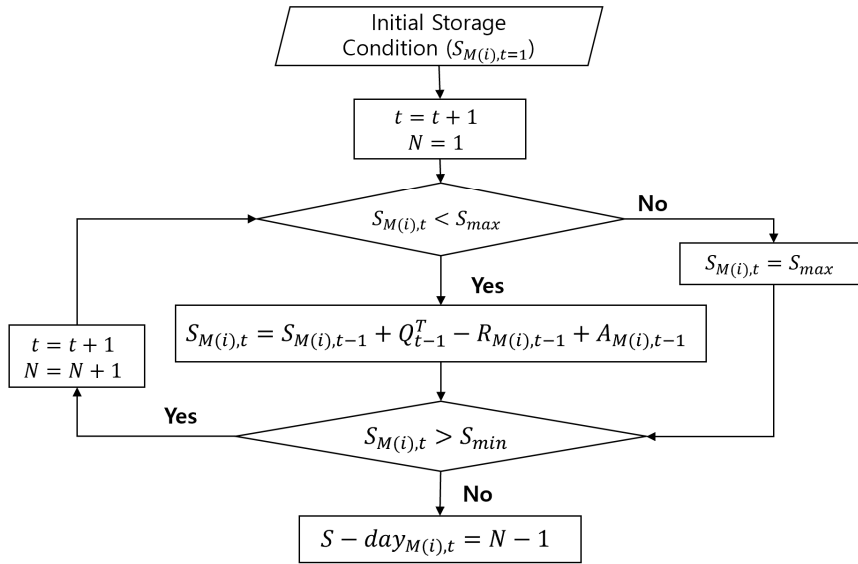


Fig. 2. Procedure of the S-day calculation

3. 모의 및 분석 범위

3.1 모의 범위

본 연구의 대상은 전국 5개 대권역(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강)과 기타유역에 포함된 총 18개 다목적댐(소양강·충주댐, 횡성댐, 영주댐, 안동·임하댐, 성덕댐, 보현산댐, 군위댐, 밀양댐, 합천댐, 남강댐, 김천부항댐, 용담댐, 대청댐, 섬진강댐, 주암·주암조절지댐, 보령댐, 부안댐, 장흥댐)과 11개 용수댐(광동댐, 달방댐, 영천·안계댐, 운문댐, 수어댐, 평림댐, 연초댐, 구천댐, 대곡·사연댐, 대암·선암댐, 감포댐)으로, 전국 모든 다목적댐 및 용수댐에 대하여 대책별 가뭄 대응력 평가를 수행하였다. 전국의 다목적댐 및 용수댐에 대한 S-day 모의시 용수부족 대비 가뭄대응단계 발령기준 및 다목적댐 용수(생공, 농업, 하천유지) 공급량은 K-water (2019)를 따랐다.

3.2 분석 범위

우선적으로 연구 대상인 29개 댐에 대해 모의를 진행하였지만, 그중 가뭄대응력 산정이 가능한 댐을 대상으로 분석을 수행하였다. 전체 댐 중에서 가뭄대응력 계산이 불가능한 경우는 가뭄유입량보다 계획공급량이 작은 경우에 발생하는데, 이는 곧 가뭄대책을 적용하지 않아도 모의 시 최저저수량인 S_{min} (최저수위, LWL)에 도달하지 않기에 S-day 계산이 불가능한 경우를 의미한다. 즉 댐의 저수량이 S_{min} 에 도달하지 않고 안정적인 용수공급이 지속적으로 가능한 상황을 의미한다. 모의 결과, 광동댐, 달방댐, 평림댐, 연초댐, 구천댐, 감포댐의 총 6개 댐은 본 연구에서 평가하고자 하는 가뭄에 대해 안전함이 확인되었다. 또한, 소양강·충주댐과 안동·임하댐은 연계 운영에 따라 가뭄대응단계 및 대책이 통합되어 관리되므로 하나의 모형으로 모의하였다. 자료가 부족하여 모의가 불가능한 댐을 제외하고 최종적으로 총 15개의 댐(다목적댐 14개, 용수댐 1개)에 대한 가뭄대응력 평가 결과를 바탕으로 분석을

Table 1. List of reservoirs and drought measures used in this study

System	Dam	Drought Measures					
		M(0)	M(1)	M(2)	M(3)	M(4)	
Hangang	Soyanggang-Chungju Dam (1996.1.1.-2020.12.31)	No measures applied	Water supply adjustment	Linked operation 1	Linked operation 2	Emergency release outlet	
	Hoengseong Dam (2000.6.1.-2020.12.31)			Linked operation	Emergency conduit operation		
Nakdong-gang	Andong-Imha Dam (1996.1.1.-2020.12.31)	No measures applied	Water supply adjustment	Linked operation	-	Emergency release outlet	
	Bohyeonsan Dam (2017.1.1.-2020.12.31)			-			
	Gunwi Dam (2010.6.1.-2020.12.31)			Linked operation			
	Milyang Dam (2001.1.1.-2020.12.31)			Local government supply			Emergency conduit operation
	Hapcheon Dam (1996.1.1.-2020.12.31)			Linked operation			-
	Gimcheon-Buhang Dam (2013.1.1.-2020.12.31)						
	Unmun Dam (1996.1.1.-2020.12.31)						
Geumgang	Yongdam Dam (2001.1.1.-2020.12.31)	No measures applied	Water supply adjustment	Linked operation	-	Emergency release outlet	
	Daecheong Dam (1996.1.1.-2020.12.31)						
Seomjin-gang	Juam Dam (1996.1.1.-2020.12.31)	No measures applied	Water supply adjustment	Linked operation	-	Emergency release outlet	
Etc	Boryeong Dam (1998.1.1.-2020.12.31)	No measures applied	Water supply adjustment	Linked operation	Emergency conduit operation	Emergency release outlet	
	Buan Dam (1997.1.1.-2020.12.31)				-		
	Jangheung Dam (2005.1.1.-2020.12.31)				Local waterworks supply		

시행하였다.

본 연구에서 월평균 수위를 산정하기 위해 사용한 자료의 기간과 각 댐별 가뭄대응 대책을 Table 1에 나타내었다. 표에서 M(0)은 아무런 가뭄대응 대책을 적용하지 않은 조건(no measures applied)을 의미한다. M(1)은 용수공급 조정기준을 적용할 경우(water supply adjustment), M(2) 및 M(3)는 댐-보-하구둑 탄력 연계운영, 지하채수원 활용 대체공급, 인근댐 연계 대체공급, 지방상수도 대체공급, 도수로 운영 등의 댐별로 다르게 마련된 연계운영(linked operation) 대책을 나타낸다. 마지막으로 대책 M(4)의 경우는 비상용량을 고려한 운영을 의미(emergency release outlet)한다.

4. 적용 및 결과

4.1 S-day에 따른 가뭄대응력 평가 결과

분석에 앞서 S-day는 2.2절에서 설명한 바와 같이 t 시점으로부터 특정 재현기간의 가뭄이 지속될 때의 시설물별 용수공급 가능 일수이므로, 가용한 자료의 모든 시점에서 계산이 가능하다. 따라서 분석의 통일을 위해 초기수위($S_{M(i),t=1}$)에 따른 영향을 확인하였다. Fig. 3(a)는 관측저수위 자료의 월별 평균수위로부터 20년 빈도 가뭄이 지속되는 경우, 첫 번째 대책인 용수공급 조정(M(1))에 따른 저수량의 변화를 시계열로 나타낸 것이다. 저수위가 S_{min} (최저수위)에 다다르기까지 걸리는 일수가 곧 S-day가 되며, 보령댐의 경우 10월에 가장 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다. 이는 이수기 유량확보를 위해 홍

수기 이후 상시만수위까지 최대한 저수위를 유지하는 운영률이 반영된 결과라 할 수 있다. S-day는 같은 월 내에서도 시작 수위에 따라 큰 영향을 받는데, Fig. 3(b)는 각 월 1일의 관측 수위자료로부터 20년 빈도 가뭄이 지속될 경우 가뭄대책 미 적용(M(0))시의 S-day를 산정한 결과다. 따라서 12개의 boxplot은 매월 1일로부터 계산한 22개(1998-2019)의 S-day 값이며, 동일한 월에서도 시작수위에 따라 큰 변동을 보이는 것을 확인할 수 있다. 삼각형으로 표시한 각 점은 Fig. 3(a)에서처럼 월평균 수위로부터 S-day를 계산한 결과이며, 박스 플롯의 중앙값과 유사하게 위치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 향후 분석에서는 월평균수위를 대표값으로 선정하였으며,

실무에서의 운영계획은 일반적으로 수문년의 시작인 10월을 기준으로 설정되므로, 15개 댐의 가뭄대응력 평가를 위한 초기수위는 각 댐의 10월 1일 관측저수위의 평균값을, 시작 일자 는 10월 1일을 적용하였다.

다음 Figs. 4 and 5는 각각 20년 빈도와 100년 빈도 가뭄 빈도 유입량이 매일 유입된다고 가정하였을 때, 15개 댐의 대책 별 가뭄대응력을 일괄적으로 비교한 것이다. 또한, 실제 운영 과정에서는 각 대책이 순차적으로 적용되는 경우가 많지만 본 연구에서는 각 대책에 따른 가뭄대응력 증가 효과를 파악 하고자 각각 개별적으로 적용하였다. 댐별로 해당 가뭄대응 대책이 없는 경우는 공란으로 두었으며, Inf(즉, 발산)는 가뭄

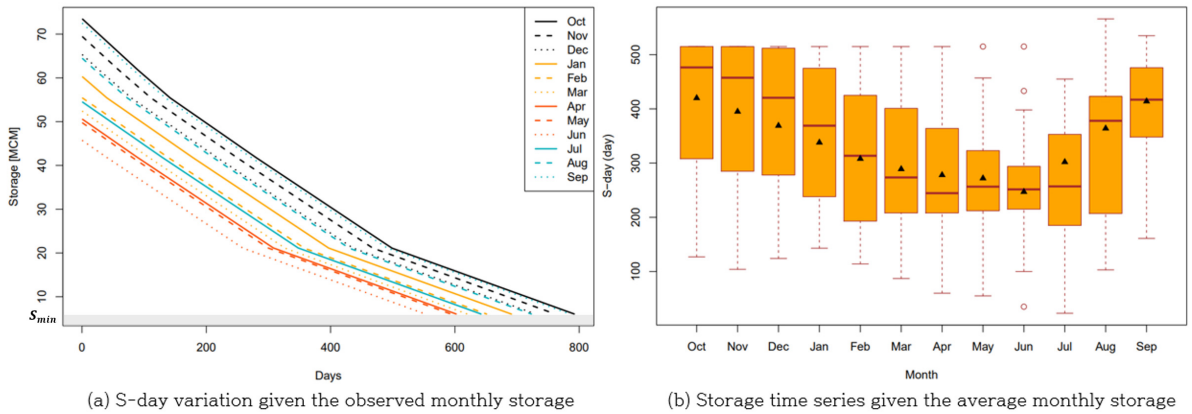


Fig. 3. Boryeong Dam's S-day results considering variations in initial reservoir storage

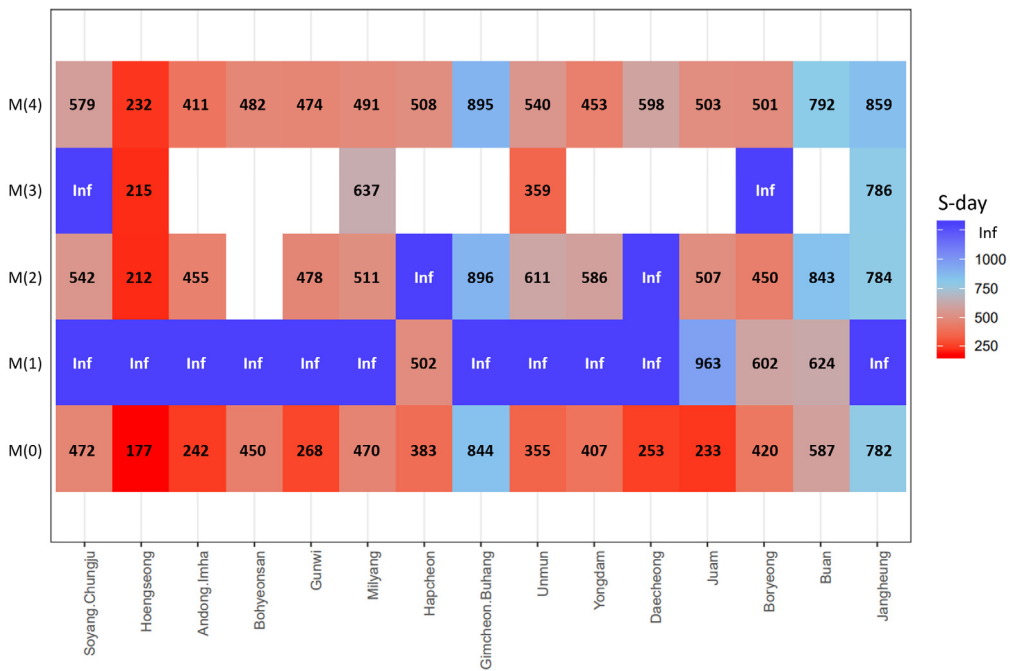


Fig. 4. S-day results of 15 dams under the 20-year drought

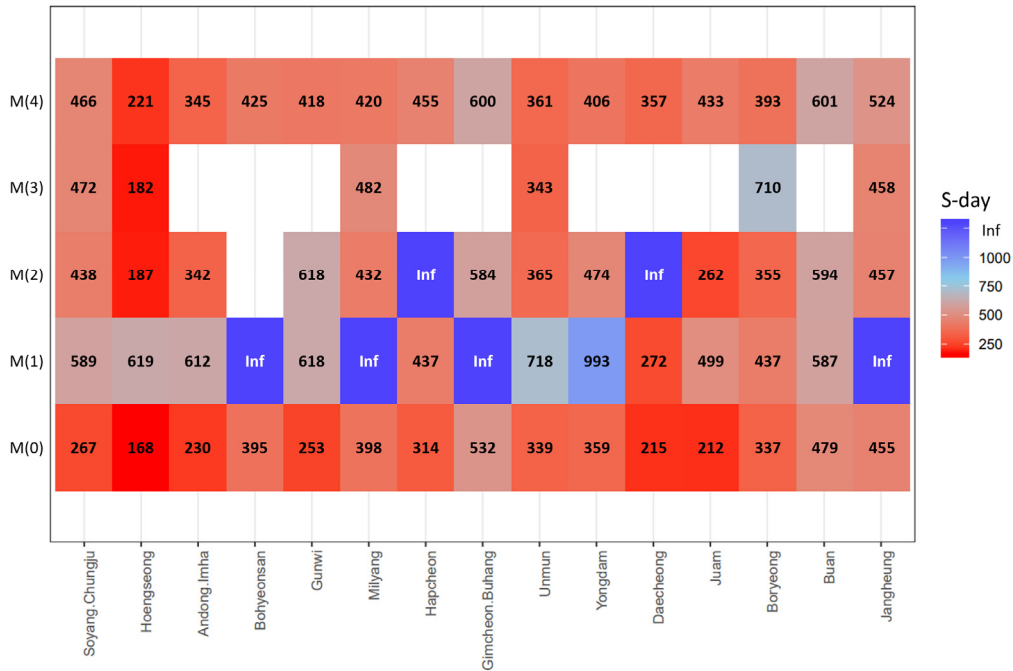


Fig. 5. S-day results of 15 dams under the 100-year drought

대응대책 적용 시 저수위가 최저수위(LWL)에 다다르지 않아, S-day를 산정하지 못하는 경우, 즉, 해당 빈도의 가뭄 하에서 효과적인 가뭄대응력을 가짐을 뜻한다.

15개 댐은 전반적으로 20년 빈도 가뭄 하에서 용수공급 조정(M(1)) 적용 시 안정적인 가뭄대응력을 보였으나, 이외의 대책에서는 김천·부항댐, 부안댐, 장흥댐을 제외하고는 2년 이상의 다년 가뭄에 대해 취약함을 나타냈다. 특히, 황성댐, 안동·임하댐, 군위댐, 운문댐, 대청댐, 주암댐은 20년 빈도 가뭄 발생 시, 가뭄대책을 적용하지 않으면 1년 내로 정상적인 용수 공급이 불가능할 것으로 나타났다. 그림에서 붉은색은 S-day 가 약 2년(730일)을 넘지 못하는 경우로, 20년 빈도 가뭄 결과와 비교하였을 때 100년 빈도 가뭄 하에서 가뭄대응력이 작아져 전반적으로 붉은색이 더 짙어지는 것을 볼 수 있다. 100년 빈도 가뭄 사상은 과거 1988년 낙동강 유역(Kim *et al.*, 2019b) 및 2014-2015년 북한강 및 임진강 유역에서 발생한 것으로 분석되었으며, 이러한 가뭄 사상이 1년 이상 지속될 시 보현산댐, 밀양댐, 합천댐, 김천·부항댐, 대청댐, 장흥댐을 제외한 9개 댐은 2년 이하의 가뭄대응력을 가졌다. 특히 황성댐과 안동·임하댐은 100년 가뭄 발생 시 대부분의 대책에서 용수공급 가능일수가 1년을 넘기지 못해 극한가뭄에 매우 취약함을 보였다. 위와 같은 분석 결과와 과거 관측 결과를 비교해보면 2015년 예년 대비 저수율이 60%에 머무른 소양강·충주댐, 황성댐, 주암댐, 안동·임하댐의 상황이 적절히 반영되었음을 확

인할 수 있다(Park, 2015). 실제로 소양·충주댐과 보령댐은 2015-2019년 꾸준히 가뭄단계에 돌입하였으며, 황성댐, 주암댐 등도 2015-2018년 가뭄단계에 진입하였다. 안동·임하댐의 용수공급능력 부족은 Lee *et al.* (2012)에서도 지적되었으며, 2015-2018년 가뭄단계에 진입한 바 있다. 더 나아가, 100년 빈도의 가뭄 사상에서도 안정적인 용수공급이 가능한 것으로 나타난 보현산댐, 김천부항댐, 장흥댐은 실제로 가뭄단계에 진입한 이력이 없어 본 연구에서 제안하는 S-day에 따른 가뭄대응력 평가가 현실성을 갖는 것으로 판단할 수 있다.

4.2 가뭄대응 대책 분석

본 절에서는 가뭄 발생 시 효과적인 운영을 위해 S-day 개념을 바탕으로 기존 가뭄대응 대책에 따른 가뭄대응력을 분석하고, 대책별 적절한 가동 조건 및 수량을 제안하고자 한다. 먼저 황성댐은 앞서 4.1절에서 보인 바와 같이 20년 빈도 및 100년 빈도 가뭄 하에서 용수공급 조정을 제외한 모든 가뭄대책 시행 시, 최대 8개월 미만의 가뭄대응력을 가져 가뭄에 매우 취약한 것으로 나타났다. 따라서 추가 대책 또는 기존 가뭄대책의 수정이 시급하다고 판단하였으며, 본 절에서의 추가 분석을 위한 대상 댐으로 선정하였다. 황성댐에서의 현재 마련되어 있는 가뭄대응 대책은 주의단계 이하에서 원주정수장 여유량(3.5만m³/일)을 연계공급(M(2))하는 방안 및 경계단계 이하에서 비상도수로 운영(M(3))을 통한 댐 용수 비축이 있다. 만

약 현행 대책의 가동조건을 한 단계씩 앞당겨 원주정수장 여유량 연계운영을 관심단계부터 시행하고(M(2)*), 비상도수로 주의단계(M(3)*) 또는 관심단계부터 가동(M(3)**)한다면 가뭄대응력이 Table 2와 같이 계산될 수 있다. Table 2는 이러한 가동조건 변화에 따른 S-day 결과와 현행 조건 대비 향상된 용수공급일수를 제시한다. 연계운영에 대한 가동조건 조정(M(2)*은 가뭄대응력에 큰 변화를 주지 않았으나 비상도수로는 가뭄대응력의 한 달 이상의 향상을 보여, 횡성댐의 추가적인 가뭄대책은 원주정수장 여유량 연계공급 대책보다는 비상도수로의 가동조건을 변경시키는 것이 더욱 효과적일 것으로 분석되었다.

추가적으로, 안동·임하댐도 20년 빈도 이상의 가뭄 발생 시 용수공급 조정을 제외한 가뭄대책에서 약 1년 미만의 취약한 가뭄대응력을 보였다. 현재 안동·임하댐의 댐-보-하굿둑 연계운영(M(2))은 주의단계 이하에서 시행되며, 최대 댐간 연계운영 가능량 및 상주보 저수구역내 취수 계약량을 합한 126.2만m³/일을 대체공급하는 것으로, 만약 이를 주의단계가 아닌 관심단계 이하에서 가동 시(M(2)*) 약 2-3주 정도 더 가뭄대응력이 증가할 것으로 나타났다(Table 3). 이와 같이 S-day를 바탕으로 댐별로 마련되어있는 대책들에 대해 다양한 시나리오를 적용할 수 있으며, 이를 바탕으로 추가적인 가뭄대책 마련 시 근거 자료로 본 연구에서 제안하는 지수를 사용할 수 있다.

다음으로 수계 내 다양한 수자원 시설의 가뭄 상황을 고려하여 현재 대책이 과대하게 설정된 경우, S-day가 발산하지 않는 선에서 최적의 용량을 제안하고자 추가적인 분석을 진행하였다. 합천댐과 대청댐은 20년 빈도와 100년 빈도 가뭄 모

두에서 연계운영(M(2))을 통해 안정적인 용수공급이 가능하였다. 합천댐의 댐-보-하굿둑 탄력 연계운영(M(2))은 주의단계 이하에서 118.4만 m³/일의 용수가 공급되는 대책으로, 대책 가동시 모든 재현기간의 가뭄에서 안정적인 용수공급이 가능한 것으로 나타났다. 만약, 용수공급을 90만 m³/일로 감소시켜도 재현기간 20년의 가뭄 하에서는 1,733일, 재현기간 100년에서는 542일 동안 안정적인 용수공급이 가능한 것으로 나타났다. 다음으로 상류 용담댐의 방류량 조정, 금강 하굿둑과의 연계를 통한 농업용수 조정, 자체수원을 통한 생공용수 공급을 통한 대청댐의 연계운영(M(2))은 주의단계에서 324.3만 m³/일, 경계단계 이하에서 7.8만 m³/일의 공급량을 갖는다. 이때, 주의단계와 경계단계의 대책 간 공급량 차이가 매우 크므로, S-day가 발산하지 않는 선에서 주의단계 이하의 최적 공급량을 제안할 수 있다. 만약 이를 현행 324.3만 m³/일에서 100만 m³/일로 줄인다면 재현기간 20년 빈도 가뭄 하에서 267일, 100년에서 222일을 갖는다. 더 나아가, 150만 m³/일의 양으로 공급한다면 재현기간 20년에서 621일, 100년에서 228일 공급할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 대청댐 연계운영 대책의 주의단계에서의 가동용량은 약 150만 m³/일로도 충분한 안정적인 가뭄대응력을 가질 수 있는 것으로 분석되었다.

마지막으로, 소양강·충주댐의 연계운영 대책은 한강 수계 내 수력댐 및 팔당댐 공급량 조정을 통해 공급량을 200만 m³/일로 조정한 연계운영1(M(2))과, 400만 m³/일(M(3))로 조정한 연계운영2가 마련되어 있다. 총 400만 m³/일을 공급하는 대책 M(3) 적용 시 100년 빈도 가뭄 하에서도 S-day가 발산하여 안정적인 용수공급이 가능한데, 수력댐(화천댐) 및 팔당댐 하류 등 다양한 수자원 시설의 가뭄상황을 고려하여 역시 적정

Table 2. Hoengseong Dam's S-day results by changing drought measure initiation conditions

Drought measures		S-day results based on return periods		S-day results by changing initiation condition	
		20 years	100 years	20 years	100 years
M(2)*	Linked operation (Under attention stage)	215	191	218(+3)	195(+4)
M(3)*	Emergency conduit (Under caution stage)	243	228	271(+28)	274(+46)
M(3)**	Emergency conduit (Under attention stage)	247	233	280(+33)	284(+51)

Table 3. Andong-Imha Dam's S-day results by changing drought measure initiation conditions

Drought measures		S-day results based on return periods		S-day results by changing initiation condition	
		20 years	100 years	20 years	100 years
M(2)*	Linked operation (Under attention stage)	474	357	493(+19)	372(+15)

공급량을 평가할 수 있다. 만약 공급량을 350만 m^3 /일로 조정한다면, 각 S-day는 재현기간 20년에서 1,262일, 100년에서 493일을 가지며, 공급량을 300만 m^3 /일로 조정할 경우 재현기간 20년에서 900일, 100년에서 448일을 갖는다. 따라서 연계운영2에서 마련된 공급량은 현행 400만 m^3 /일은 과다하다고 판단되며, 연계운영1 또는 상향된 약 200만-350만 m^3 /일의 양으로도 적절할 것으로 분석되었다.

4.3 미래 수요변화를 고려한 가뭄대응력 평가 결과

4.2절에서 분석한 바와 같이 본 논문에서 제안하는 S-day는 댐별로 기 마련된 가뭄대응 대책의 효과를 정량화하는데 사용될 수 있을 뿐만 아니라, 미래 수요량 증감에 대한 영향도 고려할 수 있다. 특히, 사회·경제적 변동에 따른 용수수요의 증감에 대비한 효율적 수자원 관리의 가능성을 분석하기 위하여 본 연구에서는 MLTM (2011)의 수요 추정 시나리오(고수요, 기준수요, 저수요)에 착안하여 댐별 계약용수 공급량에 대해 10%씩 증감하여 가뭄대응력을 재산정하였다. 즉, 기존 S-day 식에서의 계약용수 공급량(R_{Mt}) 항의 10% 증가·절감을 반영한 댐별 향후 수요량에 대하여 S-day를 산정하였다.

본 연구에서는 최근 다년 가뭄을 경험한 바 있으며, 최근 공급량의 증가(2005년 공급량 대비 2014년 공급량이 약 1.87배 증가)로 인해 물 공급이 상대적으로 취약한 보령댐에 대하여 우선적으로 공급량 증감·절감에 따른 S-day를 산정하였다 (Fig. 6). 공급량을 10% 감소할 경우, 재현기간 20년 빈도의

가뭄에서 아무런 가뭄대응 대책을 적용하지 않아도(M(0)) 약 60-90일의 S-day의 증가를 가져, 공급량의 변화가 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 공급량을 10% 감소시킬 경우, 보령댐 도수로 운영(M(3))에 따른 효과가 가장 큰 폭으로 증가하였으며 안정적인 가뭄대응이 가능할 것으로 분석되었다.

동일한 방법을 15개 댐에 대하여 적용하였을 때, 용수공급량을 10%만 감소하여도 대부분의 댐에서 안정적인 공급이 가능할 것으로 나타났다. 한강수계의 소양강·충주댐은 공급량 감소 시 재현기간 100년 빈도에 대해서도 안정적인 용수공급이 가능했으며, 공급량 증가 시 재현기간 20년 빈도의 가뭄에서 약 70-220일의 S-day 감소를 보였다. 낙동강수계의 안동·임하댐은 공급량을 10% 증가하였을 시 재현기간 20년 빈도의 가뭄에서 약 20일의 S-day 감소를 가져, 공급량의 변화가 큰 영향을 미치지 않았으나, 공급량이 10% 감소하는 경우 모든 재현기간에 대해 용수공급 조절을 통한 안정적인 공급이 가능할 것으로 분석되었다. 금강수계의 용담댐은 공급량 10% 증가 시 재현기간 20년 빈도의 가뭄에서 약 40-50일의 S-day 감소가 발생하였으며, 공급량 10% 감소 시 약 60-100일의 증가를 가졌다. 섬진강수계의 주암·주암조절지댐은 공급량 10% 증가 시 20년 빈도 가뭄에서 약 40-260일의 S-day 감소를 가져 공급량에 따른 변화가 매우 컸으며, 공급량 10% 감소 시 용수공급 조정(M(1)) 및 연계운영(M(2))에 따른 안정적인 용수공급이 가능할 것으로 보였다. 이와 같이 미래 불확실한 수요량 변화를 반영한 S-day 계산을 통해 가뭄대응력의 변화를 분석

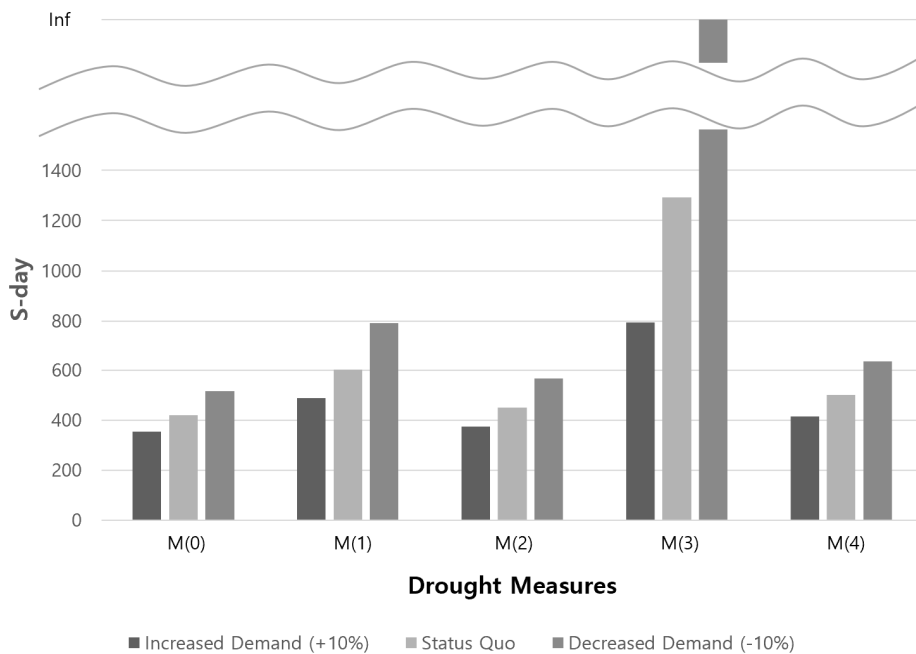


Fig. 6. S-day results of Boryeong Dam considering changes in water demand

하였으며, 물 수요관리를 통한 댐 별 가뭄대응력 개선효과를 정량적으로 평가할 수 있었다.

5. 결론 및 향후 연구

최근 국지적으로 발생하는 극한가뭄에 대비하기 위해서는 수자원 시설물을 통한 구조적 대책과 다양한 비구조적 가뭄대응력을 정량적으로 평가하고 최적 운영방안을 수립할 필요가 있다. 이에 본 연구는 댐별 가뭄 취약도를 파악하고 용수공급 안정성을 최대화하고자 가뭄대응력 지표인 S-day를 제안하였다. 국내 15개 다목적댐 및 용수댐을 대상으로 S-day 지표를 통해 가뭄대응력을 평가한 결과, 용수공급 조정 시 전반적으로 20년 빈도 가뭄 하에서 안정적인 가뭄대응력을 보였으나, 가뭄대책을 적용하지 않으면 횡성댐, 안동·임하댐, 군위댐, 운문댐, 대청댐, 주암댐은 1년 내로 최저수위에 도달할 것으로 분석되었다. 더 나아가, 용수공급 조정을 제외한 대책에서 대부분의 댐이 2년 이상의 다년 가뭄을 대비하지 못하였으며, 100년 빈도의 가뭄 발생 시 9개 댐에서 2년 이하의 가뭄대응력을 가졌다. 또한, 횡성댐과 안동·임하댐은 100년 빈도 가뭄 사상에 대해 대부분의 가뭄대책에서 1년을 넘기지 못하는 매우 취약한 가뭄대응력을 보였다.

이에 본 연구에서는 가뭄대책별 최적 용량 제안 및 가동시기(가뭄단계) 변경에 따른 효과를 추가적으로 분석하였다. 그 결과 횡성댐의 추가적인 가뭄대책은 비상도수로의 용량 또는 가동조건의 변경이 효과적일 것으로 분석되었으며, 안동·임하댐의 연계운영 조건을 기존 주의단계에서 관심단계 이하 가동으로 변경한다면 약 20일 정도의 가뭄대응력 증가가 기대되었다. 더 나아가 본 연구에서는 S-day가 발산한 합천댐, 대청댐, 소양강·충주댐에 대하여 적절한 공급량을 제안하였다. 분석 결과, 연계운영시 합천댐은 기존 주의단계 이하에서 118.4만 m³/일 공급하는 것을 90만 m³/일로, 대청댐은 주의단계 이하 324.3만 m³/일의 공급량을 150만 m³/일로, 소양강·충주댐은 기존 400만 m³/일의 공급량을 350만 m³/일로 감량해도 안정적으로 공급이 가능할 것으로 분석되었다.

마지막으로 미래 물수요 변화의 영향을 고려하고자 미래 수요변화에 따른 가뭄대응력 결과를 분석하였다. MLTM (2011)의 수요 추정 시나리오에 착안하여 댐별 계약용수 공급량의 10% 증감에 따른 댐별 가뭄대응력을 평가하였다. 15개 댐에 대하여 용수공급을 10% 감소할 경우, 대부분의 댐에서 용수공급조절만으로도 20년 빈도 가뭄에 대한 대비가 가능할 것으로 분석되었다. 또한, 공급량이 증가할 경우, 낙동강수계

(40-50일)에 비해 한강수계(70-220일)와 섬진강수계(40-260일)에서의 S-day 감소가 큰 폭으로 나타났다.

분석 과정에서 저수위가 S_{min} 에 도달하지 않아 S-day가 발산(Inf)하는 경우가 발생하는데, 이는 S-day 계산을 위한 기준 수위 조정을 통해 추가적인 분석을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 S-day의 S_{min} 을 최저수위(LWL)로 설정하였는데, 실제 댐 운영에 있어 댐의 수위가 저수위에 도달하는 상황은 극히 드물기 때문에 위기단계, 심각단계 등 특정 가뭄대응단계까지 도달하는데 걸리는 S-day 산정을 통해 좀 더 세분화된 분석을 할 수 있다. 또한, 향후 연구에서는 가뭄 시나리오에 대한 상세한 조정 및 기후변화를 고려한 다양한 가뭄유입량 시나리오 분석은 물론 미래 환경변화를 고려한 수요 절감 시나리오에 대한 분석을 함께 수행할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 K-water의 “유역별 가뭄대응력 평가 및 그에 따른 댐·보 운영 개선방안 연구”(과제번호 M210068)의 일환으로 수행되었으며, 서울대학교 공학연구원 및 건설환경종합연구소의 지원에도 감사를 드립니다. 또한 본 연구는 과학기술 정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. NRF-2021R1C1C1004492).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- 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.
- Kelley, C.P., Mohtadi, S., Cane, M.A., Seager, R., and Kushnir, Y. (2015). “Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought.” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 112, No. 11, pp. 3241-3246.
- Kim, G.J., Kim, Y.-O., and Reed, P.M. (2021). “Improving the robustness of reservoir operations with stochastic dynamic programming.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 147, No. 7, 04021030.
- Kim, G.J., Seo, S.B., and Kim Y.-O. (2019a). “Elicitation of drought

- alternatives based on water policy council and the role of shared vision model.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 6, pp. 429-440.
- Kim, G.J., Seo, S.B., and Kim Y.-O. (2022). “Adaptive reservoir management by reforming the zone-based hedging rules again multi-year droughts.” *Water Resources Management*, Vol. 36, No. 10, pp.3575-3590.
- Kim, J.S., Jain, S., Lee, J.H., Chen, H., and Park, S.Y. (2019b). “Quantitative vulnerability assessment of water quality to extreme drought in a changing climate.” *Ecological Indicators*, Vol. 103, pp. 688-697.
- King, A.D., Pitman, A.J., Henley, B.J., Ukkola, A.M., and Brown, J.R. (2020). “The role of climate variability in Australian drought.” *Nature Climate Change*, Vol. 10, No. 3, pp. 177-179.
- K-water (2019). *Development of water reservation rate and reservoir operation technologies for climate change adaptation*. 2020-WR-RR-15-35, pp. 110-161.
- Lee, D.-R., Moon, J.-W., Lee, D.-H., and Ahn, J.-H. (2006). “Development of water supply capacity index to monitor droughts in a reservoir.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 3, pp. 199-214.
- Lee, D.-H., Choi, C.-W., Yu, M.-S., and Yi, J.-E. (2012). “Reevaluation of multi-purpose reservoir yield.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 4, pp. 361-371.
- Leng, G., Tang, Q., and Rayburg, S. (2015). “Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China.” *Global and Planetary Change*, Vol. 126, pp. 23-34.
- Mehran, A., Mazdinyasni, O., and AghaKouchak, A. (2015). “A hybrid framework for assessing socioeconomic drought: Linking climate variability, local resilience, and demand.” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 120, No. 15, pp. 7520-7533.
- Ministry of Environment (ME) (2020). *Korean climate change assessment report 2020*. Report 11-1480000-001690-01, pp. 30-68.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2011). *Water vision (2011-2020)*. Report 11-1611000-002114-13.
- Nguyen, H., Mehrotra, R., and Sharma, A. (2020). “Assessment of climate change impacts on reservoir storage reliability, resilience, and vulnerability using a multivariate frequency bias correction approach.” *Water Resources Research*, Vol. 56, No. 2, e2019WR 026022.
- Park, J.-S. (2015). “Dam drought status and countermeasures.” *Water for Future*, Vol. 48, No. 9, pp. 28-35.
- Pedro-Monzonis, M., Solera, A., Ferrer, J., Estrela, T., and Paredes-Arquiola, J. (2015). “A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management.” *Journal of Hydrology*, Vol. 527, pp. 482-493.
- World Meteorological Organization (WMO) (2009). *Experts agree on a universal drought index to cope with climate risks*. WMO Press Release No. 872, Geneva, Switzerland.