



Evaluating the economic benefit of diverse drought mitigation strategies for Korean reservoir systems based on simulated inflow sequences

Ji, Sukwang^a · Shin, Geumchae^b · Lee, Seungyub^c · Ahn, Kuk-Hyun^{d*}

^aMaster's Degree Researcher, Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Cheonan, Korea

^bGraduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, Korea

^cAssistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, Korea

^dAssociate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Cheonan, Korea

Paper number: 23-023

Received: 26 April 2023; Revised: 31 July 2023; Accepted: 31 July 2023

Abstract

Recently, South Korea has been making efforts to mitigate the risk of water scarcity during droughts by utilizing various drought response measures in dam operations. While various studies have been conducted on this topic, there is currently a lack of research on the economic effects of drought response measures. In this study, we evaluated the economic effects of drought response measures on nationwide multipurpose dams by using a long-term simulated inflow model based on ARIMA and Copula and a dam operation model that reflects drought response measures. The results showed that the expected benefits per unit flow rate were highest for coordinated operation and alternative water supply measures, at KRW 1,176 and KRW 1,139, respectively, while the benefits of emergency water supply utilization and water supply adjustment were estimated at KRW 956 and KRW 875, respectively. Additionally, when we examined the changes in the economic benefits of drought response measures based on the assumption of increased drought severity in the future, the changes in the drought risk resulting from reduced inflow increased the economic benefits of all drought response measures. The economic benefits of water supply adjustment increased by 2.6% compared to the baseline, while the economic benefits of coordinated operation and alternative water supply measures increased by 11.7% compared to the baseline. This suggests that dam-network-based measures, such as coordinated operation and alternative water supply measures, are crucial as drought risk increases. This study is expected to serve as a fundamental reference for selecting and utilizing drought response measures in the future.

Keywords: Drought mitigation strategy, Economic impact assessment, Simulated inflow volume, Dam operation model

유입량 모의 기법을 활용한 국내 다목적댐 가뭄 대책의 경제적 효과 평가

지수광^a · 신금채^b · 이승엽^c · 안국현^{d*}

^a공주대학교 건설환경공학과 석사, ^b한남대학교 건설환경공학과 학사, ^c한남대학교 건설환경공학과 조교수, ^d공주대학교 건설환경공학과 부교수

요 지

최근 우리나라는 댐 운영에 있어서 다양한 가뭄 대책을 활용하여 가뭄 시 물 부족의 위험 리스크를 줄이기 위해 노력하고 있다. 이를 중심으로 다양한 연구들이 수행되었지만 가뭄 대책의 효과를 경제적인 측면에서 살펴본 연구는 현재 전무한 실정이다. 본 연구에서는 ARIMA와 Copula 기반의 장기간 모의 유입량 생성 모형과 댐별 가뭄 대책을 반영한 댐 운영 모형을 활용하여 전국의 다목적댐을 대상으로 가뭄 대책 시행에 따른 경제적 효과를 평가하였다. 경제적 편익 산정 결과 연계 운영·대체 공급과 비상공급대책의 단위 유량 당 기대 편익이 각각 1,176원과 1,139원으로 가장 높으며, 비상 용량 활용과 용수공급조정의 편익은 956원과 875원으로 추정된다. 추가로 미래에 가뭄이 심화된다는 가정을 기반으로 가뭄 대책의 경제적 편익의 변화에 대하여 살펴본 결과 유입량 감소로 인한 가뭄 리스크의 변화는 모든 가뭄 대책의 경제적 편익을 높이는 효과를 보였다. 용수공급조정의 경제적 효과는 기존 대비 2.6% 상승하였으나, 연계 운영·대체 공급의 경제적 효과는 기존 대비 11.7% 상승하였다. 이는 가뭄의 위험도가 증가할수록 연계 운영과 대체 공급과 같은 댐 네트워크 기반의 대책이 주요한 것으로 판단된다. 본 연구는 향후 가뭄 대책의 선정과 활용에 있어서 기본자료로 활용될 것으로 기대된다.

핵심용어: 가뭄 대책, 경제적 효과 평가, 모의 유입량, 댐 운영 모형

*Corresponding Author. Tel: +82-41-521-9303

E-mail: ahnkukhyun@gm.kongju.ac.kr (Ahn, Kuk-Hyun)

1. 서론

우리나라는 2000년 이후로 전국적 가뭄과 국지적 가뭄의 발생이 증가하고 있다(Yoon *et al.*, 2022). 가뭄은 다른 자연재해에 비해 느린 속도로 진행되지만, 농업과 제조업을 포함한 각종 산업에 막대한 경제적 피해를 입히며, 하천의 건천화를 유발하고 원활한 용수 공급에 문제를 발생시켜 경제·사회·환경 전반에 막대한 규모의 피해를 발생시킨다. 2015년 서해안을 중심으로 발생한 극심한 가뭄에 의해 7,358 ha의 논밭에 수분이 말라 농작물의 생산량 및 품질을 저하하고 최소 154억 원에서 310억 원 수준의 쌀 생산 피해를 입혔다. 또한, 다목적댐 9개소의 저수량이 저하되어 댐 운영에 어려움을 겪었으며 생활용수와 공업용수를 원활하게 공급하지 못해 58,200세대에게 제한 및 운반급수로 인한 피해가 발생했다(Chae *et al.*, 2016). 기상청에서 발표한 “기후변화 전망분석서”에 따르면 우리나라의 연 강수량은 약 14% 증가할 것으로 전망되나, 홍수기의 강수량은 최대 22% 감소하며, 무강수일이 증가하고 강수의 변동성이 커져 연 강수량의 증가에도 불구하고 우리나라의 가뭄이 심화 및 장기화될 전망이다. 따라서, 가뭄에 의한 극심한 물 부족 현상은 점차 심화될 것으로 예상되며, 그로 인한 경제·사회·환경적 피해의 규모 또한 증가할 것으로 전망된다.

2015년부터 우리나라는 지속적으로 발생하는 가뭄으로 인한 물 부족 현상에 대응하기 위해 댐의 가뭄 대응 단계를 세분화하여 관리하고 있다. 다목적댐의 가뭄 대응 단계는 저수량에 최대 4단계(관심, 주의, 경계, 심각)로 구분되며, 단계별로 설정된 가뭄 대책을 시행하여 극심한 물 부족 문제를 대비한다. 댐의 가뭄 대응 단계를 나누는 기준은 지난 8년간 수차례 개정됐으며, 보다 효율적이고 안정적인 댐 운영을 위해 각 단계에 해당하는 가뭄 대책 및 가뭄 대책의 적용 시점 또한 변화했다. 최근에도 이와 관련된 다양한 연구들이 진행되고 있지만, 효율성 개선을 위해 선행되어야 할 기초연구 중 하나인 가뭄 대책의 경제적 효과를 평가한 연구는 미비한 실정이다. 점차 심화되는 가뭄으로 인한 용수공급 부족 문제에 대해 안정적이고 지속 가능한 대책을 마련하기 위해서는 각 가뭄 대책의 시행에 따른 개선 효과나 경제적, 환경적 등 다방면에서의 효과를 정량적으로 분석한 연구가 선행되어야 할 필요가 있다.

댐 운영 모형은 유입량과 수요량, 운영 방식 등에 따른 저수량 및 유출량의 변화를 확인할 수 있어 가뭄에 대한 댐의 대응 능력이나 용수공급능력 평가, 댐의 운영 방법의 개발, 수자원 구조물의 설계 등에 활용됐다. 댐 운영 모형을 사용해 가뭄 대책의 시행에 따른 가뭄 개선 효과를 분석한 사례로는 Lee and Yi (2012)이 있다. 해당 연구에서는 관측 유입량 자료를 기반으로 작동하는 댐 모의 모형을 제작하여 9개 댐의 저수위 이하

비상 용량의 활용에 따른 용수 부족 감소 효과를 분석하였다. 해당 연구에 따르면 임하댐과 대청댐, 합천댐, 남강댐은 4가지 가뭄 평가 지표에서 모두 취약한 모습을 보였으며, 비상 용량을 활용할 시 용수 공급의 부족량과 지속 기간을 평가하기 위해 개발된 용수공급 부족 지표인 일일용수공급부족지표(Water Deficit Per day, DPD)를 기준으로 71 일가량의 용수 부족일 감축 효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 댐 운영 모형을 통해 가뭄 대책의 효과를 분석한 또 다른 사례로는 Ahn *et al.* (2016)이 있다. 이 연구에서는 미국 공병단의 HEC에서 만든 댐 운영 모형인 HEC-ResSim을 사용하여 합천을 대상으로 용수공급 조정 대책과 비상 용량 활용 대책의 시행에 따른 용수공급능력을 비교 평가하였다. 이 연구 결과에 따르면, 비상 용량 활용대책은 일시적인 용수 부족은 해결할 수 있으나, 장기적인 용수 부족현상에 대한 효과는 기대하기 어려울 것으로 예상된다. 또한, 용수공급조정을 단독적으로 시행하면, 선제적인 용수 감량으로 용수공급 부족량이 가뭄 대책을 시행하지 않았을 때보다 증가하는 모습을 보인다. 하지만, 비상 용량 활용대책과 용수공급조정을 모두 적용할 시 공급신뢰도가 0.5% 증가하여 더 많은 용수의 물을 장기간 공급할 수 있는 것으로 나타났다.

앞서 제시한 예시들은 관측 유입량 자료를 활용하여 가뭄 대책의 효과를 분석한 것으로, 단기간의 관측 시계열 자료를 기반으로 분석하였다. 이러한 관측 시계열 자료를 기반으로 한 가뭄 대책의 효과 분석 방법은 관측 기간 동안 댐이 다양한 가뭄을 충분한 기간 경험했다는 가정이 필요하다. 하지만, 우리나라의 다목적댐은 절반 이상이 2000년 이후에 완공된 댐으로, 관측 유입량의 평균 길이는 약 25년에 불과하다. 특히, 가뭄과 같은 극한 수문 사상은 전체 시계열 중 극히 일부만 해당하므로, 관측 유입량만으로는 댐 운영 모형을 통해 가뭄 대책의 효과를 정확하게 분석하기 어렵다. 이처럼 부족한 시계열 자료의 길이와 불충분한 가뭄 경험은 관측 유입량과 통계적 유사성을 지닌 모의 유입량을 생성해 활용함으로써 일부 개선할 수 있다. 모의 유입량은 관측 유입량의 통계적 특성을 유사하게 나타내지만, 샘플링 과정을 통해 다양한 결과물도 출할 수 있어, 여러 가뭄 상황에서의 분석을 진행할 수 있다.

댐 관련 사업의 경제적 효과 분석은 주로 이수, 치수 및 환경 부문으로 구분할 수 있으며, 이수의 경우 용수 공급에 대한 부분과 발전 부분으로 다시 구분할 수 있다(Yoo *et al.*, 2011). 가뭄 대책 등 댐의 운영과 관련한 경제적 효과를 평가하는 것은 주로 댐의 용수 공급과 관련하여 결정할 수 있다. 댐에서 공급하는 용수는 사용 목적에 따라 생활용수와 공업용수, 농업용수, 환경개선용수(유지용수)로 분류할 수 있다. 이러한 용수의 경제적 효과를 평가하기 위한 편익 추정에는 각 용수가 서로 다른 잠재적 가치를 가지고 있기에 분류하여 산정하는

것이 권장된다. KDI는 수자원부문사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구[제4판]에서 수자원 사업의 유형별 편익 항목을 16가지로 분류하고, 각 항목의 특성과 편익 산정 방법이 장단점을 고려하여 항목별 편익 산정 방법을 제시한 바 있다. 해당 연구에서는 생활용수의 공급에 따른 경제적 편익을 산정함에 있어 수용가의 지불의사액(willingness to pay)을 조사해 적용하는 것을 권고하고 있으며, 공업용수와 농업용수에 대해서는 생산함수 접근법을, 하천유지용수에 대해서는 대체비용 접근법과 조건부 가치측정법의 적용을 권고하고 있다. 용수별 경제적 가치를 정량적으로 평가한 연구로는 수자원 및 기술가치 평가시스템 구축이 있다(MSIT, 2007). 이 연구에서는 수자원의 용도에 따라 용수를 생활용수와 농업 및 위락용수, 공업용수로 분류하여 용수별 경제적 가치를 산정하였다. 또한, Yoo et al. (2011)의 연구에서도 댐 하류 하천 정비 사업에 대한 경제적 효과를 분석한 바 있으며, 3개 대상 댐에 대한 용수별 편익을 제시하였다. 이외에도 원수 수질에 따른 생활용수 지불의사, 댐의 레크리에이션 편익(Kwon, 2006; Chah et al., 2018; Park et al., 2015) 등을 산정한 사례도 있다.

요약하자면 가뭄대책의 시행에 따른 가뭄 개선 효과를 분석한 연구나 댐의 용수공급에 따른 경제적 효과를 평가한 연구들이 존재하나, 가뭄대책의 시행에 따른 용수공급의 변화에 대한 경제적 편익을 정량적으로 분석한 연구는 아직 미비하다. 본 연구에서는 댐 운영에 따라 공급 가능한 물 이용량에 대한 경제적인 가치를 경제적 편익으로 정의하였으며, 가뭄대책의 시행에 따라 변화되는 용수공급량에 따른 경제적 편익을 산정해 보고자 한다. 이 과정에서 가뭄 대책의 시행에 따른 가뭄개선 효과 분석에 활용되는 시뮬레이션 기반의 방법론과 용수별 경제적 편익 산정 방법을 사용하며, 다양한 가뭄 상황을 고려하기 위하여 관측 시계열과 통계적 유사성을 지닌 모의 시계열을 생성해 활용한다.

2. 연구대상 지역 및 댐별 가뭄 대책

본 연구에서는 우리나라에 위치한 21개 다목적댐 중 16개 다목적댐의 가뭄 대책별 경제적 편익을 산정한다. 영주댐과 성덕댐을 포함한 4개의 다목적댐은 K-water의 “댐 가뭄 단계별 실행계획” 및 “댐 용수공급 조정기준(6차 개정)”을 기준으로 아직 가뭄 대책이나 용수공급 조정기준이 수립되지 않아 분석에서 제외하였다. 본 연구에서 사용되는 16개 다목적댐의 위치 정보를 Fig. 1에 나타내었으며, 각 댐의 저수용량이나 유역면적 등에 대한 제원 정보는 Table 1에 제시하였다.

우리나라에서 시행하는 가뭄 대책은 크게 용수공급 조정

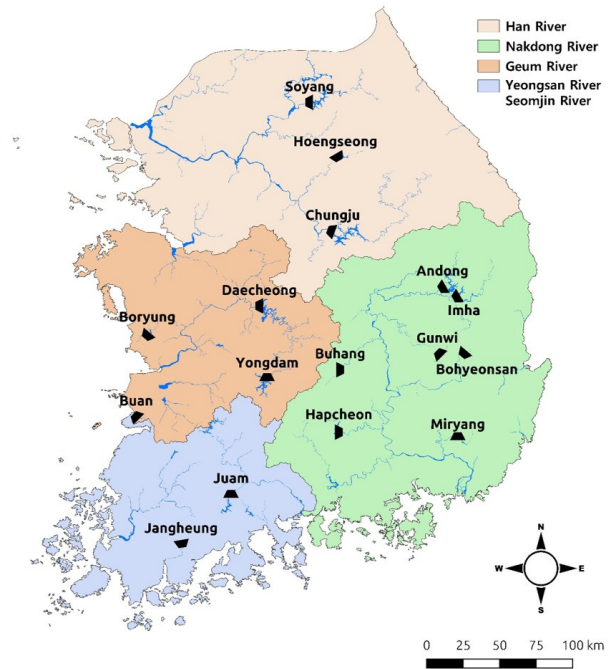


Fig. 1. The location of the multipurpose dam used in this study

Table 1. Specifications of the target multipurpose dam for the study

Basin	Dam	Capacity (MCM)	Basin Area (km ²)	Observation point (Year)
Han River	Soyang	2,900.0	2,703.0	1974
	Chungju	2,750.0	6,648.0	1986
	Hoengseong	86.9	209.0	2001
Geum River	Daecheong	1,490.0	3,204.0	1981
	Yongdam	815.0	930.0	2002
	Buan	50.3	59.0	1997
	Boryung	116.9	163.6	1998
Nakdong River	Andong	1,248.0	1,584.0	1977
	Imha	595.0	1,361.0	1993
	Hapcheon	790.0	925.0	1989
	Miryang	73.6	95.4	2002
	Gunwi	48.7	87.5	2012
	Buhang	54.3	82.0	2015
Yeongsan River · Seomjin River	Bohyeonsan	22.1	32.6	2016
	Juam	457.0	1,010.0	1991
	Jangheung	191.0	193.0	2005

*1 MCM : 10⁶ m³

과 연계 운영·대체 공급, 비상공급대책, 비상 용량 활용으로 분류할 수 있다. 댐별로 시행하는 가뭄 대책과 대책을 적용하는 가뭄 단계는 다목적댐의 위치나 운영 목적, 주변 수자원 시

설의 상황 등에 따라 다르다. 본 연구에서 사용되는 16개 다목적댐의 가뭄 대책과 해당 대책이 어느 가뭄 단계에서부터 적용되는가에 대한 정보는 Table 2에서 확인할 수 있다. 용수공급 조정이란 극심한 물 공급 부족이 발생하는 것을 대비하여 선제적으로 용수를 감량 공급하는 기법으로, 상대적으로 많은 물을 확보하며 댐을 운영하는 방법이다(Bayazit and Ünal, 1990). 댐이 관심 단계에 접어들면 댐의 수요량만큼 용수를 공급하며, 주의 단계에는 하천유지용수의 배분량을 최대 100%까지 감량하고, 농업용수와 생활용수, 공업용수를 실사용량만큼만 공급한다. 경계 단계에 진입하게 되면 농업용수의 실사용량 중 일부분을 추가로 감량하며, 마지막 심각 단계에 진입하면 생활용수와 공업용수 또한 추가로 감량한다. Table 2에서 확인할 수 있듯이 용수공급 조정은 본 연구에서 고려하는 모든 댐에서 시행하고 있으며, 그에 따라 댐의 용수 공급량을 관심 단계부터 심각 단계까지 체계적으로 감량하여 심각한 용수 부족 사태를 사전에 방지한다. 연계 운영·대체 공급은 주변의 다른 수자원 시설과 연계하여 용수를 공급하여 저수량을 비축하는 방법으로, 수계 내 댐 간 연계 운영이나 급수체계조정이 이에 해당한다. 연계 운영·대체 공급은 용수공급 조정과 같이 모든 댐에서 시행하고 있으나, 대책을 적용하는 가뭄 단계는 다를 수 있다. 다음으로, 비상공급대책은 비상 시 하천 처리수를 재이용하거나 도수로를 가동하는 등의 대책을 시행하여 공급량 일부분을 대체하거나 댐에 추가적인 물을 공급하는 방법이다. 비상공급대책은 다른 대책들과 달리 보령댐과 밀양댐을 포함한 7개 다목적댐에서만 시행하고 있다. 비상공급대책은 가뭄이 상당히 진행된 상태인 경계 단계나

심각 단계에 적용되나, 보령댐은 지난 10년 사이 주기적으로 심각한 수준의 가뭄을 겪은 경험이 있어, 2022년부터 관심 단계부터 비상공급대책을 시행하는 것으로 개정되었다. 비상용량 활용은 다목적댐의 저수위 이하 비상용량 및 사수용량을 모두 사용해 용수를 공급하는 방법이다. 댐의 가뭄 단계가 심각 단계에 해당하면 모든 댐에서 비상용량 활용 대책을 시행하며, 조정지가 존재하는 다목적댐은 비상용량 활용 대책을 시행 시 조정지의 비상용량과 사수용량도 함께 활용하여 용수 부족 문제를 해소한다.

3. 방법론

3.1 댐 운영 모형

다목적댐의 가뭄 대책별 경제적 효과를 평가하기 위해서는 가뭄 대책의 적용에 따른 용수 공급량을 산정하는 작업이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 댐 운영 모형을 사용해 가뭄 대책의 적용에 따른 용수별 공급량을 산정하였다. 댐 운영 모형은 Eq. (1)을 기반으로 제작하였다.

$$S_t = S_{t-1} + Q_t - TD_t - SP_t + M_t \tag{1}$$

여기서 S_t 는 t 시점의 저수량을 나타내며, Q_t 는 t 시점의 유입량을 나타낸다. TD_t 는 t 시점에서 생활·공업용수와 농업용수, 환경개선용수 공급량의 총합을 나타내는 것으로 용수공급 조정의 시행으로 인한 용수의 감축량을 함께 반영한다. 다

Table 2. Drought response measures for dams and their implementation timing

Dam	Water supply adjustment	Linked operation · Alternative supply	Emergency supply system	Emergency storage
Soyang·Chungju	Mild	Moderate	Extreme	Extreme
Hoengseong	Mild	Moderate	Severe	Extreme
Jangheung	Mild	Severe	Severe	Extreme
Juam	Mild	Moderate	Severe	Extreme
Boryung	Mild	Severe	Mild	Extreme
Dacheong	Mild	Moderate	-	Extreme
Buan	Mild	Moderate	-	Extreme
Yongdam	Mild	Moderate	-	Extreme
Buhang	Mild	Mild	-	Extreme
Andong·Imha	Mild	Mild	-	Extreme
Gunwi	Mild	Mild	-	Extreme
Bohyeonsan	Mild	Mild	-	Extreme
Hapcheon	Mild	Mild	-	Extreme
Miryang	Mild	Moderate	Extreme	Extreme

만, 용수의 사용 목적에 따른 경제적 편익을 고려하기 위해 모형 내에서 공급량은 용수별로 구분하여 산정한다. SP_t 는 t 시점의 여수로 방류량으로 댐의 총 저수량을 초과하는 유입량은 여수로를 통해 방류하도록 모의한다. M_t 는 t 시점에서 가뭄 대책에 의해 추가되는 유입량의 합으로 댐 간 연계 운영으로 인한 대체 공급량이나 도수로 가동으로 인한 추가 유입량의 합을 의미한다. 댐 운영 모형을 통한 모의 과정에서 저수량 부족으로 인해 용수를 정상적으로 공급하지 못하는 상황 발생 시 용수별 공급량의 비율에 맞춰 배분하도록 한다.

본 연구에서는 댐의 저수량과 유입량, 가뭄 대책 등과 같이 댐별로 다른 특징을 고려하기 위해 16개 다목적댐을 대상으로 댐 운영 모형을 개별적으로 구현하였다. 다만, 소양강댐과 충주댐, 안동댐과 임하댐 또한 같은 가뭄 대응 단계 및 가뭄 대책을 적용하므로 두 댐을 통합한 단일 모형으로 제작한다. 결과적으로 14개의 댐 운영 모형을 제작하며, 이를 기반으로 가뭄 대책의 시행 여부에 따른 서브 모형을 제작한다. 보령댐을 예로 들면, 하나의 댐 운영 모형을 기반으로 가뭄 대책을 미적용한 상황과 용수공급조정 적용, 연계 운영·대체 공급 적용, 비상공급대책 적용, 비상용량활용에 따른 5개의 서브 모형을 제작할 수 있다. 다만, 보현산댐의 연계 운영·대체 공급과 소양강·충주댐, 주암댐의 비상공급대책은 대체 공급량 및 추가 공급량을 협의의 통해 결정하므로 본 연구에서는 해당 대책들의 시행에 따른 서브 모형의 제작을 제외하였다. 결과적으로 14개의 댐 운영 모형을 기반으로 총 59개의 서브 모형을 제작하였다. 본 연구에서는 위 방법으로 제작한 댐 운영 모형으로 관측 유입량에 대한 모의 저수량을 산정한 뒤 관측 저수량과의 유사성을 확인하였다. 모의 저수량과 관측 저수량의 상관 계수를 산정해본 결과 보현산댐은 0.83, 김천부항댐은 0.79, 보령댐은 0.88 등의 상관 계수를 갖는 것으로 나타났다. 추가로, 과거 가뭄 사례와 모의 저수량의 변화를 비교하여 댐 운영 모형의 성능을 확인해본 결과 2015년에 발생한 장기 가뭄을 댐 운영 모형을 통해 산정한 모의 저수량에서도 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 기반으로 본 연구에서는 댐 운영 모형을 통해 댐의 저수량을 모의하고 가뭄 단계를 확인하는 것이 적절하다고 판단하였다.

3.2 모의 유입량 생성

앞서 설명했듯이 본 연구에서는 비교적 짧은 시계열의 길이 갖는 관측 유입량의 사용으로 인한 한계를 개선하기 위해 관측 유입량의 통계적 특성과 시간적 상관관계를 유사하게 표현하는 모의 유입량을 생성한다. 모의 유입량 생성 방법으로는 데이터 기반의 방법이나 수치 모델링, 확률론적 방법 등

다양한 방법들이 존재하나, 단일 방법론으로 일과 월, 계절 등 다양한 스케일에서의 관측치에서 보이는 통계적 특성치들을 충분히 고려하기는 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 보다 현실적인 모의 유입량을 생성하기 위해 두가지 방법들을 사용해 일 유입량과 연 유입량을 각각 모의하며, 서로 다른 시간적 스케일의 유입량을 결합하는 방식을 사용한다. 연 유입량은 대표적인 시계열 예측 모형 중 하나인 ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) 모형을 사용하며, 일 유입량을 모의하기 위해 Copula기반의 모의 유입량 생성 모형을 사용한다.

연 유입량 모의에 사용한 ARIMA 모형은 현재 시점의 값과 과거 시점의 값들의 선형 조합으로 표현하는 모델인 AR 모형과 이전 시점의 오차 간 선형 조합으로 표현하는 MA 모형을 결합한 ARMA 모형을 기반으로 한 예측 모형이다. ARIMA 모형의 AR과 차분, MA의 차수가 각각 p, d, q라고 했을 때 ARIMA 모형의 식은 아래와 같다(Williams and Hoel, 2003).

$$\left(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i B^i\right)(1 - B)^d y_t = c + \left(1 + \sum_{i=1}^q \theta_i B^i\right) \varepsilon_t \quad (2)$$

여기서 B는 식을 단순화하여 표현하기 위해 사용한 후방 이동 (Back shift) 연산자로, $B^i y_t$ 는 y_{t-i} 와 같다. Eq. (2)에서 $\left(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i B^i\right)$ 과 $\left(1 + \sum_{i=1}^q \theta_i B^i\right) \varepsilon_t$ 는 각각 AR(p) 모형과 MA(q) 모형을 나타내는 부분으로, ϕ_i 는 AR 모형의 매개변수, θ_i 는 MA 모형의 매개변수를 의미한다. 기존의 ARMA 모형은 정상성을 지닌 시계열 데이터의 예측이나 모의에서는 유용하게 사용되지만, 비정상성을 고려할 수 없다는 한계를 지니고 있다. ARIMA 모형은 ARMA 모형의 한계를 개선하기 위해 차분을 적용한 방법으로, 시간에 따른 추세를 고려할 수 있다.

일 유입량 모의에 사용한 Copula 함수는 다변량 분포함수와 주변확률 밀도함수를 연결해주는 함수로, Sklar에 의해 처음 제시되었다. 이후 Joe (2005)와 Nelsen (2007)에 의해 기본 이론과 방법론들이 정립되어 경제와 환경, 통계를 포함한 다양한 분야에서 데이터 분석, 모델링, 데이터 예측 등에 활용되어 왔다. 수자원 분야에서 또한 강우빈도 해석이나 수문 시계열 분석, 수문학적 모델링 등에 Copula 함수를 활용한 바 있다(Ahn and Palmer, 2016; Ahn, 2021; Pereira and Veiga, 2019; Ni et al., 2020). 유입량은 평상시와 같이 건조한 상태에서는 0에 가까우나 홍수기에는 극단적으로 높은 값을 가지는 비대칭적인 모습과 두꺼운 꼬리 형상의 분포를 지닌다. Copula 함수는 일 유입량과 같이 데이터가 극단에 집중된 분포를 지닌 데이터의

해석과 모델링에 효과적인 것으로 알려져 있으며, Copula 함수를 기반으로 한 모의 데이터 생성 모형은 상관관계를 유지한 상태로 기존에 관측되지 않았던 새로운 데이터를 생성할 수 있어, 다양한 시나리오에서 시계열 데이터를 모의할 수 있다.

본 연구에서는 관측 일 유입량과 일별 평균 유입량에 대한 Copula 함수를 적용하여 일 유입량 생성 모형을 구축한다. Copula 함수는 [0, 1]의 범위를 갖는 누적 분포 함수를 입력값으로 하므로, [0, ∞]의 범위를 갖는 유입량을 직접 사용할 수는 없다. 이에 관측 일 유입량과 평균 일 유입량을 일별 감마분포에 피팅한 확률값으로 변환해 사용한다. 본 연구에서는 Akaike Information Criterion (AIC)를 기반으로 Gaussian copula나 t-copula, Clayton copula 등 다양한 Copula 함수 중 확률값에 맞는 최적의 Copula 함수를 선택하며, Maximum Likelihood Estimation (MLE)를 통해 Copula 함수의 매개변수를 추정한다. 해당 결과를 통해 일 유입량 생성 모형을 구축한 뒤 모의 유입량에 대한 확률값을 생성하며, 무작위로 생성한 난수값을 기준으로 모의 확률값과 관측 유입량에 대한 확률값을 혼합한다. a와 b라는 모수를 사용하는 베타분포를 $Beta(x; a, b)$ 라고 할 때 난수 생성을 통한 확률값 혼합 방법은 Eq. (3)으로 나타낼 수 있다.

$$p_t^{Final} = \begin{cases} p'_t & \text{if } Beta(4,4) \leq Beta(2,6) \\ p_t & \text{if } Beta(4,4) > Beta(2,6) \end{cases} \quad (3)$$

여기서, p'_t 과 p_t 는 각각 t시점의 모의 확률값과 관측 유입량에 대한 확률값을 나타낸다. 이 과정을 통해 혼합된 확률값은 일별 감마분포를 통해 모의 일 유입량으로 변환된다.

마지막으로, Copula 함수 기반의 일 유입량 생성 모형을 통해 생성한 모의 일 유입량은 연 단위로 환산되어 ARIMA 모형으로 모의 연 유입량과 결합한다. 두 유입량의 결합 방법은 K-NN (K-Nearest Neighbor) 기반의 방법으로, 연 유입량과 일 유입량 사이의 거리를 측정하여 특정 연 유입량에서 가장 가까운 값을 갖는 1년 치 일 유입량을 탐색하여 결합한다. 최종적으로 ARIMA 모형을 통해 생성한 모의 연 유입량과 시간적 길이가 같은 모의 일 유입량을 생성할 수 있다.

3.3 경제적 편익 추정

본 연구에서는 댐 운영 모형을 이용하여 가뭄 대책의 시행에 따른 용수별 공급량을 산정한 뒤 용수별 경제적 가치를 반영하여 가뭄 대책의 시행에 따른 경제적 편익을 산정하였다. 용수별 경제적 가치는 환경가치종합정보시스템(이하 EVIS 툴킷)과 K-water에서 제공하는 용수별 경제적 가치 평가 자료

를 기반으로 추정하였다. 먼저 EVIS 툴킷은 국내 유역 및 댐별 용수의 용도(생활용수, 공업용수, 농업용수)에 따른 경제적 가치에 대한 정보를 제공하고 있다. 해당 툴킷은 크게 3단계의 과정을 기반으로 용수별 편익을 추정하고 있으며, (1) InVEST Annual Water Yield 모형(InVEST AWY)을 사용한 유역별, 광역지자체별 물(담수) 생산량(yield) 추정, (2) 유역별 용수 용도별 유출량(물 생산량) 추정, (3) 용수 용도별 가치 추정이 이에 해당한다. 여기서 InVEST AWY 모형은 강수량, 증발산량 등의 입력값을 토대로 물생산량을 추정하는 강우-유출 모델이다(Ahn et al., 2021). 두 번째 단계인 유역별 유출량 추정 단계에서는 추정된 총 유출량을 용수 용도별로 배분하는 과정으로 K-water와 환경부의 자료를 토대로 배분되는 비율을 결정하게 된다. 마지막 단계인 용수별 가치 추정은 용수 용도별로 다양한 방법론을 토대로 하는데, 생활용수와 공업용수는 시장가격을 활용하여 수량에 대한 가치를 추정하며, 농업용수는 무상으로 제공되기에 잔존가치접근법을 토대로 추정하게 된다. EVIS 툴킷에서 개별적으로 제시되는 생활용수, 공업용수, 농업용수의 경제적 가치와 달리 본 연구에서는 생활용수와 공업용수를 통합하여 고려하므로, 위 자료를 직접적으로 사용할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 생활용수와 공업용수의 사용량을 가중치로 하여 생·공업용수에 대한 경제적 가치를 산정하였다. 추가로, 유지용수에 대한 경제적 가치는 EVIS 툴킷에서 제시하고 있지 않아, K-water (2022)에서 제시한 유지용수 편익을 사용하였다. K-water (2022)에서는 문헌조사를 바탕으로 하천유지유량에 대한 편익을 제시하였으며, 유역의 구분 없이 하천유지용수에 대한 원 단위 편익만 제시하였다.

EVIS 툴킷과 K-water (2022)에서 제시한 경제적 편익 자료는 모두 2020년의 소비자 물가 지수를 반영한 것으로, 보다 현실적인 경제적 편익 산정을 위해 물가 상승을 반영하여 최신화된 용수별 경제적 가치를 산정할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 Eq. (4)를 활용하여 통계청에서 제시하는 소비자 물가 지수(2023년 2월 110.38, 2020년을 100으로 설정한 경우)를 반영하여 용수별 경제적 가치를 현실에 맞게 보정하였다.

$$V_{u+\alpha} = \frac{k_{u+\alpha}}{k_u} V_u \quad (4)$$

여기서 $V_{u+\alpha}$ 와 V_u 는 각각 기준 시간(u)로부터 α 시간만큼 떨어진 현실화된 용수별 편익을 의미하며, $k_{u+\alpha}$ (110.38)와 k_u (=100)는 각 두 시점에서의 소비자 물가 지수를 의미한다. 위 식을 통해 최신화한 각 댐의 용수별 경제적 가치는 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Economic value of multipurpose dam water by type of use (unit: KRW/m³)

Dam	Domestic water-Industrialwater	Agricultural water	Environmental water
Gunwi	973.3	562.9	297
Buhang	973.3	562.9	297
Daecheong	929.7	544.8	297
Miryang	973.3	563	297
Boryung	930.5	544.7	297
Bohyeonsan	973.3	562.9	297
Buan	980.2	525.2	297
Soyang·Chungju	862.4	484	297
Andong·Imha	973.3	563	297
Yongdam	930.5	544.7	297
Jangheung	980.1	525.2	297
Juam	980.1	525.2	297
Hapcheon	973.3	563	297
Hoengseong	862.4	484	297

4. 결 과

4.1 모의 유입량과 관측 유입량의 유사성 검토

모의 유입량을 통해 가뭄 대책별 경제적 편익을 산정하기에 앞서, 유입량 생성 모형을 통해 생성한 모의 유입량이 관측 유입량과 유사한 특성을 보이는가에 대한 검토를 진행한다. 본 연구에서는 연 단위를 기준으로 평균과 표준편차를 산정하여 연 단위에서의 통계적 유사성을 확인한다(Fig. 2). 또한, 월 단위를 기준으로 평균과 표준편차를 산정하여 모의 유입량과 관측 유입량이 월 단위에서 유사한 통계적 특성을 지니는지 확인한다(Fig. 3). 모의 유입량과 관측 유입량 사이의 유사성 검토를 위해 앞서 제안한 유입량 생성을 활용하여 댐별로 관측 유입량과 같은 길이의 일 유입량 자료를 100회 반복 생성하였다.

각 그래프 속 박스 플롯은 모의 유입량에 대한 통계치를 나타낸 것이며, 관측 유입량에 대한 통계치는 점으로 나타낸다. 박스의 내부에 있는 굵은 선은 중앙점을 나타내는 것으로, 각 점이 박스의 중앙선과 가까이 위치할수록 두 데이터간의 유사성이 높다고 판단할 수 있다. Fig. 2은 연 단위 유입량에 대한 통계치를 나타낸 것으로, 노란색 박스플롯은 100회 반복 생성한 모의 연 유입량의 평균과 표준편차를 나타낸 것이며, 붉은색 점은 관측 유입량의 연 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 해당 그림을 보면 관측 유입량에 대한 통계치를 나타내는 붉은색 점이 모의 유입량에 대한 통계치를 나타내는 박스의 내부에 모두 위치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 모의 유입량이

관측 유입량의 연 단위 통계치를 유사하게 표현하고 있음을 의미한다. Fig. 3는 임하댐과 밀양댐을 대상으로 모의 유입량과 관측 유입량의 월 단위 통계치를 나타낸 그림이다. 그래프 속 분홍색 박스와 하늘색 박스는 각각 임하댐과 밀양댐의 모의 유입량에 대한 월 단위에서의 통계적 특성을 나타내며, 빨간색 점과 파란색 점은 각 댐의 관측 유입량에 대한 통계적 특성을 나타낸다. 월 단위의 통계치에 대한 그림 또한 연 단위의 통계치에 대한 그림과 같이 대부분의 점이 박스 내부의 중앙선과 가까이 위치해 있다. 두 그림에서 확인할 수 있듯이, 본 연구에서 제안한 모형을 통해 생성한 모의 유입량은 관측 유입량이 지닌 두가지 시간적 스케일에서의 통계적 특성을 매우 유사하게 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 가독성을 높이기 위해 2개 댐에 대한 월 단위 통계치만 도시하였으나, 나머지 14개 댐에 대한 월 단위 통계치 또한 이와 유사한 결과가 확인되었다. 월 단위와 연 단위에서의 통계치 비교 결과를 통해 모의 유입량이 관측 유입량과 높은 통계적 유사성을 확인되어, 본 연구에서는 관측 유입량의 부족한 시계열 자료로 인한 문제를 개선에 모의 유입량 자료를 활용하며, 이를 기반으로 경제적 편익 산정 및 경제적 효과 평가를 진행한다.

4.2 가뭄 대책에 대한 경제적 효과 평가

본 연구에서는 유출량과 Table 3에 나타난 용수별 경제적 가치를 활용하여 가뭄 대책의 시행에 따른 경제적 효과를 평가하였다. 이때 유출량은 모의 유입량 생성 모형을 이용해 생성한 300년 길이의 댐별 모의 유입량과 가뭄 대책을 개별적으로 적용한 총 59개의 댐 운영 모형을 통해 산정하였다. 댐별로 산출한 가뭄 대책별 경제적 편익은 Table 4에 나타내었다. 보령댐을 예시로 하였을 때 가뭄 대책을 시행하지 않을 때 평균적으로 880.8억 원의 경제적 편익을 얻을 수 있으며, 용수공급 조정과 연계 운영·대체 공급, 비상공급대책, 비상용량 활용을 시행할 시 매년 1.1억 원과 10억 원, 21.3억 원, 3.3억 원의 경제적 편익이 추가로 발생하는 것을 기대할 수 있다. 하지만, 해당 표에서 확인할 수 있듯이 각 가뭄 대책을 적용하였을 때 얻을 수 있는 경제적 편익과 대책을 미적용 했을 때의 경제적 편익이 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 모의한 300년 치 모의 유입량 중 가뭄이라는 극한 수문 사상이 포함되는 기간은 극히 짧기 때문으로, 가뭄 대책의 경제적 효과를 평가하기 위해서는 보다 높은 밀도의 가뭄 상황을 고려하여 가뭄 대책의 경제적 효과를 평가할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 앞서 생성한 300년 치 모의 유입량 중 연 유입량이 하위 20%에 해당하는 60년 치 모의 유입량만을 추출하여 적은 유입량이 지속되는 상황에서 각 가뭄 대책

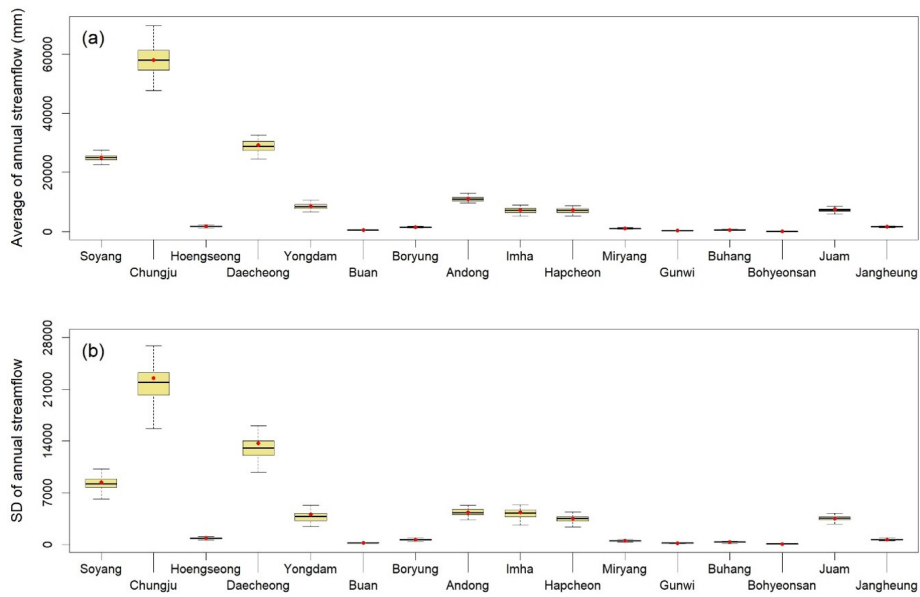


Fig. 2. Verification of annual statistical values for simulated inflow for each dam: (a) Box plot of average annual inflow, (b) Box plot of standard deviation of annual inflow

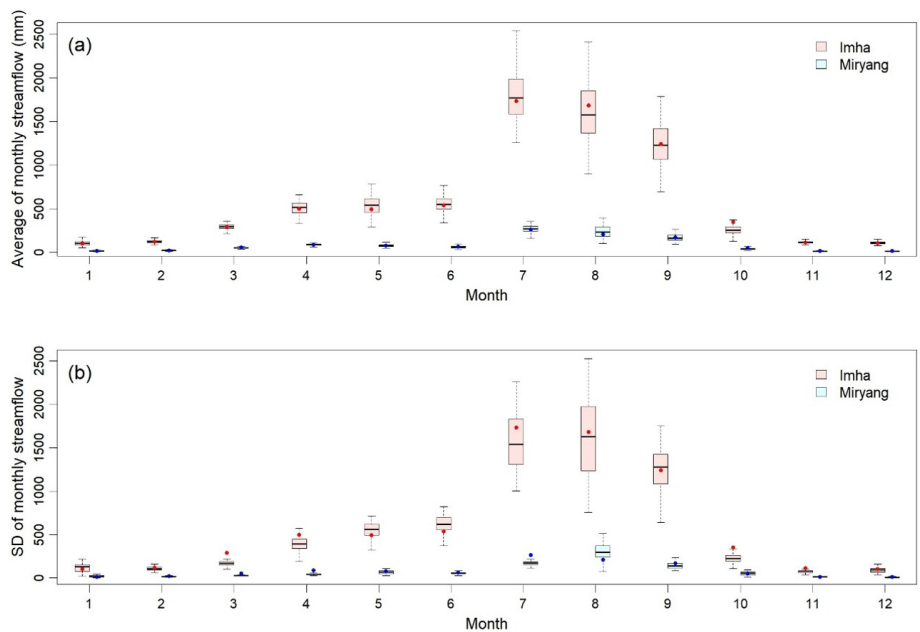


Fig. 3. Verification of monthly statistical values for simulated inflow for Imha and Miryang: (a) Box plot of average monthly inflow, (b) Box plot of standard deviation of monthly inflow

개별적으로 시행했을 때의 경제적 편익을 추가로 산정하였다. 산정된 경제적 편익은 가뭄 대책 간의 비교가 가능하도록 상대적 경제 편익으로 환산하여 Fig. 4로 나타내었다. 해당 그래프는 각 가뭄 대책의 경제적 편익의 합을 100%로 하여 각 가뭄 대책의 경제적 편익이 차지하는 비율을 나타낸 것으로, Fig. 4를 통해 각 가뭄 대책을 독립적으로 시행하였을 때 가뭄

대책별로 얻을 수 있는 경제적 편익의 정도를 비교할 수 있다. 보령댐을 예시로 하면, 용수공급조정은 편익의 합 중 21.5%를 차지하며, 연계 운영·대체 공급은 25%, 비상공급대책은 33.1%, 비상 용량 활용은 20.3%를 차지한다. 이는 보령댐은 다양한 가뭄 대책 중 비상공급대책을 시행했을 때 기대할 수 있는 경제적 편익이 가장 크며, 연계 운영·대체 공급, 용수공급

Table 4. Estimated economic benefits by drought response measure (unit: 10⁸ KRW/year).

Dam	Measures unapplied	Water supply adjustment	Linked operation · Alternative supply	Emergency supply system	Emergency storage
Gunwi	268.3	266.9	316.8	-	270.4
Buhang	303.9	303.3	305.5	-	304.4
Daechong	13,344.3	13,012.1	14,017.8	-	13,627.8
Miryang	570.6	562.4	587.8	583.6	572.3
Boryung	880.8	881.9	890.8	902.1	884.1
Bohyeonsan	117.3	116.6	-	-	117.3
Buan	297.1	294.6	307.7	-	299.4
Soyang · Chungju	37,268.2	37,222.3	37,275.9	-	37,275.9
Andong · Imha	8,550.9	8,831.1	10,172.9	-	8,684.9
Yongdam	4,771.3	4,651.0	5,049.3	-	4,802.8
Jangheung	1,049.1	1,041.9	1,056.8	1,056.1	1,052.7
Juam	4,186.8	4,173.6	4,297.8	-	4,250.7
Hapcheon	4,938.0	4,954.7	5,385.0	-	5,020.1
Hoengseong	739.9	695.1	759.0	769.7	755.5

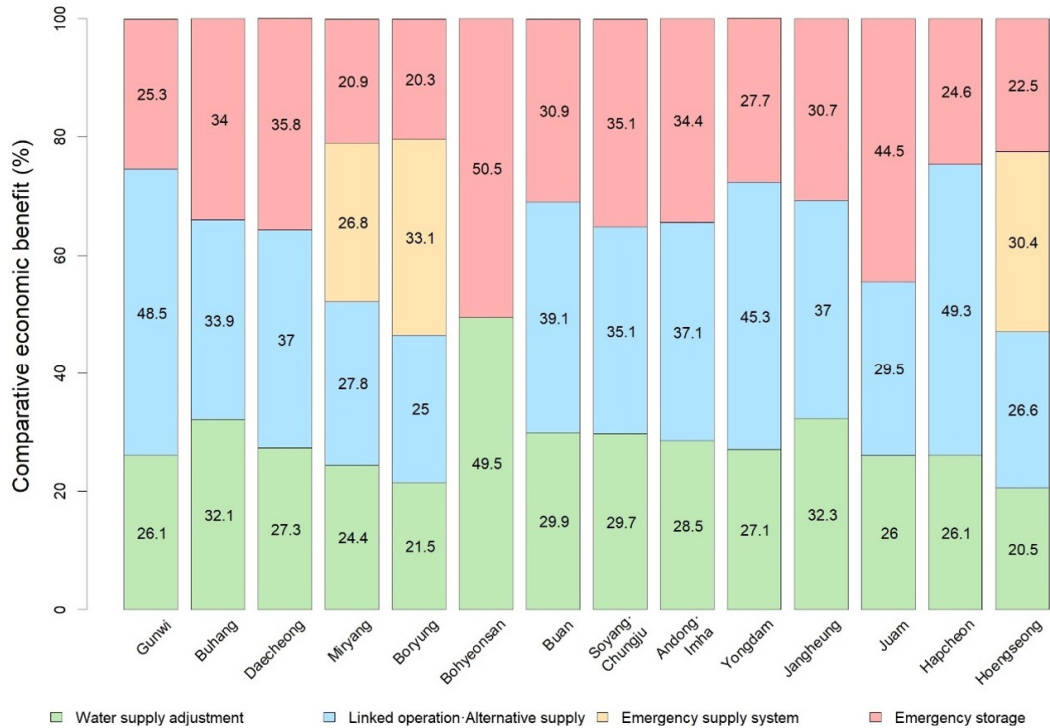


Fig. 4. Relative economic benefits estimated by drought response measures

조정, 비상 용량 활용 순으로 경제적 효과가 적어진다.

상대적 경제 편익 산정 결과 대부분의 댐에서 단일 가뭄 대책 시행 시 연계 운영·대체 공급을 통해 얻을 수 있는 경제적 편익이 가장 크게 나타났으나, 보령댐과 횡성댐은 비상공급 대책의 경제적 효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 두 댐의

비상공급대책인 도수로를 가동할 시 많은 양의 용수가 추가 공급되며, 특히 보령댐은 가뭄의 초기 시점인 관심 단계에 비상공급대책을 시행하기 때문에 경제적인 편익이 높게 산정된 것으로 판단된다. 추가로, 연계 운영·대체 공급과 비상공급 대책을 시행하지 않는 보현산댐이나 비상 용량 활용 시 조정지

댐을 통해 많은 양의 용수를 공급받을 수 있는 주암댐은 비상 용량 활용의 경제적 효과가 가장 큰 것으로 확인된다.

4.3 가뭄의 심화에 따른 가뭄 대책의 경제적 효과 변화 분석

점차 심화되는 기후변화로 인해 국내 가뭄의 빈도와 강도 또한 함께 증가할 것으로 전망되며, 이는 가뭄 대책의 시행으로 얻을 수 있는 경제적 편익에도 변화를 줄 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 가뭄으로 인해 유입량이 줄어든 미래 상황을 가정하여 모의 유입량을 생성한 후 유입량의 감소가 가뭄 대책의 경제적 효과에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 이를 위해 기후변화의 영향으로 유입량이 단계적으로 감축된 상황을 가정하여 연평균 유입량이 10%, 20% 감소한 300년 치 모의 유입량을 생성하며 이를 현재 유입량 기반의 모의한 결과와 함께 분석한다. 가뭄 상태에 대한 분석을 위하여, 앞서 진행한 경제적 효과의 평가 과정과 같이 하위 20%의 연 유입량을 추출하여 경제적 편익을 산정한다. 각 댐에 대하여 산정된 가뭄 대책별 경제적 편익은 연 유입량의 감소가 가뭄 대책에 끼치는 영향을 분석하기 단위 유입량에 대한 가뭄 대책별 기대 편익으로 추정하였다.

Fig. 5은 앞서 설명한 과정을 통해 산정한 단위 유입량에 대한 가뭄 대책별 기대 편익을 나타낸 그림으로, 변동의 폭은 다

르나 모든 가뭄 대책은 연 유입량이 줄어들수록 경제적 효과가 증가하는 양상을 보인다. 특히 연계 운영·대체 공급은 연 유입량이 20% 감소할 시 기대 편익이 11.7% 상승하는 모습을 보이며, 반대로 용수공급조정은 연 유입량의 감소에도 기대 편익의 증가 폭이 2.6%로 크게 상승하지 않는 모습을 보인다. 용수공급조정은 유입량이 제한된 상황에서 용수를 감축시켜 공급하는 반면, 연계 운영·대체 공급이나 비상공급대책은 주변 저수지나 도수로를 통해 용수를 대체 공급하거나 추가 공급받기 때문에 용수를 절감하지 않고 공급하여 경제적 손실을 최소화할 수 있는 것으로 판단된다.

추가로, 현재와 유사한 연 유입량을 가정한 연평균 유입량 100% 상황에서는 연계 운영·대체 공급과 비상공급대책의 1 m³의 유입량에 대한 기대 편익이 각각 1,176원/m³과 1,139원/m³ 원으로 두 대책의 경제적 편익이 유사하였으며, 비상 용량 활용, 용수공급조정 순으로 기대 편익이 줄어드는 모습을 나타냈다. 연평균 유입량이 20% 감소한 상황에서는 연계 운영·대체 공급의 기대 편익이 평상시 대비 11.7% 상승하나, 비상공급대책의 기대 편익은 5.6% 상승하여, 연계 운영·대체 공급이 비상공급대책에 비해 10% 이상 높은 경제적 편익을 지닌다. 따라서, 연 유입량이 감소된 미래 상황에서는 연계 운영·대체 공급이 비상공급대책에 비해 뚜렷하게 큰 경제적 효과를 지닐 것으로 판단되며, 연계 운영·대체 공급, 비상공급대책, 비상

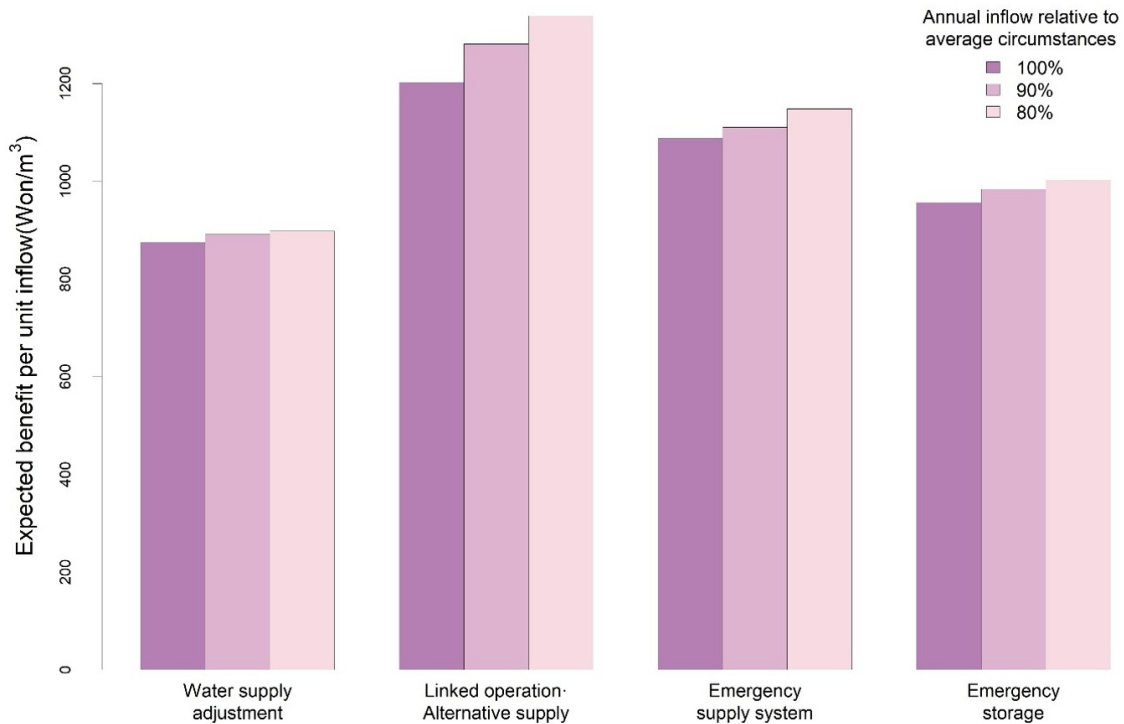


Fig. 5. Expected economic benefits per unit inflow for each drought response measure

용량 활용, 용수공급조정 순으로 경제적 효과가 큰 것으로 확인된다.

5. 결론

본 연구는 가뭄에 의한 물 부족 현상 발생 시 경제적 효과를 고려한 효율적인 대응을 위해 가뭄 대책의 경제적 효과를 평가한 연구로, 전국의 다목적댐을 대상으로 각 가뭄 대책의 시행에 따른 경제적 편익을 산정하고 가뭄 대책의 경제적 효과를 평가하였다. 경제적 편익은 관측 유입량의 짧은 시계열 자료를 대체하기 위한 모의 유입량 생성, 댐 운영 모형을 활용한 용수별 유출량 산정, 용수별 경제적 가치 평가, 가뭄 대책별 경제적 편익 산정 과정을 통해 산정하였다. 이때 댐 운영 모형은 각 댐의 가뭄 대책과 고유 특성을 반영하기 위해 59개의 개별 모형으로 제작하였으며, 용수별 경제적 가치에 대한 추정치는 EVIS 톨킷과 K-water에서 제공하는 용수별 경제적 가치를 현재 물가에 맞춰 보정하였다.

본 연구에서는 가뭄이 지속되는 상황을 가정하기 위해 300년 치 모의 유입량 중 연 유입량이 하위 20%에 해당하는 유입량을 추출하여 경제적 효과를 평가하였다. 각 댐의 가뭄 대책별로 산정한 경제적 편익을 상대적 편익으로 환산하여 비교했을 때 연계 운영·대체 공급의 평균적인 상대적 편익이 37.7%로 가장 경제적인 것으로 나타났으며, 비상공급대책, 비상 용량 활용, 용수공급조정 순으로 큰 경제적 효과를 지니는 것으로 확인되었다. 이를 단위 유입량당 기대 편익으로 환산하면 연계 운영·대체 공급과 비상공급대책, 비상 용량 활용, 용수공급조정의 기대 편익은 각각 1,176원/m³, 1,139원/m³, 957원/m³, 875원/m³으로 나타나, 연계 운영·대체 공급과 비상공급대책이 유사한 정도의 경제적 효과를 지녔으며, 비상 용량 활용, 용수공급조정 순으로 큰 경제적 효과를 지닌 것으로 나타났다.

마지막으로 본 연구에서는 기후변화로 인해 연 유입량이 줄어든 미래 상황을 가정한 모의 유입량을 생성하여 유입량의 감소가 가뭄 대책의 경제적 효과에 끼치는 영향을 확인하였다. 이때 사용한 모의 유입량은 각각 연평균 유입량이 현재에 비해 10%, 20% 감소된 상황을 가정하여 생성하였다. 현재 기반의 유입량 기반의 분석을 포함하여 총 3가지 상황에서의 경제적 편익을 산정한 결과 연평균 유입량의 감소에 따라 모든 가뭄 대책의 경제적 효과가 상승하는 모습을 나타내었다. 다만, 각 가뭄 대책의 상승 폭은 상이한 모습을 보였는데, 기대 편익의 상승 폭이 가장 큰 대책은 연계 운영·대체 공급으로 최대 11.7% 상승하였다. 반대로, 상승 폭이 가장 낮은 대책은 용

수공급조정으로, 연평균 유입량이 20% 감소하였을 때 최대 2.6% 상승한 모습을 보였다. 추가로, 연 유입량이 현재와 유사한 상황에서는 연계 운영·대체 공급과 비상공급대책의 기대 편익이 유사한 모습을 보이나, 연 유입량이 줄어들수록 두 대책의 기대 편익 간의 편차가 커져, 연 유입량이 20% 감소하였을 때는 111원의 편차가 발생하였다. 따라서, 연 유입량이 감소하는 상황에서는 연계 운영·대체 공급의 기대 편익이 크게 상승하여, 연계 운영·대체 공급, 비상공급대책, 비상 용량 활용, 용수공급조정 순으로 큰 경제적 효과를 지닌 것으로 나타났다.

본 연구에서 사용하는 댐 운영 모형은 “댐 가뭄 단계별 실행 계획”의 가뭄 대책 및 공급량과 “댐 용수공급 조정기준(6차 개정)”을 기준으로 제작하였다. 위 자료들은 2016년 용수공급조정이 처음 시행된 이후 수차례 개정된 바 있으며 앞으로도 추가로 개정될 수 있다. 따라서, 댐의 용수 계약량이나 댐의 가뭄 대책 등에 의해 본 연구에서 실시한 경제적 효과의 평가 결과가 변화될 수 있다는 한계가 있다. 추가로, 본 연구에서는 연평균 유입량이 단계적으로 감소된 것으로 단순화하여 표현하였지만, 실제 가뭄은 이처럼 단순히 변화하지 않는다는 한계가 있다. 본 연구에서는 용수별 경제적 가치를 추정하는 데 있어 K-water와 EVIS에서 제공하는 구역별 용수의 가치를 사용하였다. 이는 구역 내 모든 댐에서 공급하는 용수의 가치가 동일하다고 가정한 것으로, 각 댐의 고유한 특성을 고려하여 용수의 가치를 측정하는 연구가 선행되면 보다 현실적인 가뭄 대책의 경제적 효과를 평가하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국수자원공사(K-water)의 개방형 혁신 R&D (OTSK_2022_013) 사업의 일환으로 수행되었습니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Ahn, J.H., Lee, Y., and Jaeung, Y. (2016). “Improving the water yield capabilities using reservoir emergency storage and water supply adjustment standard.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 49, No. 12, pp. 1027-1034.

- Ahn, K.H. (2021). "Streamflow estimation at partially gaged sites using multiple-dependence conditions via vine copulas." *Hydrology and Earth System Sciences*, HESS, Vol. 3250, No. 8, pp. 4319-4333.
- Ahn, K.H and Palmer, R.N. (2016). "Use of a nonstationary copula to predict future bivariate low flow frequency in the Connecticut River Basin." *Hydrological Processes*, Vol. 30, No. 19, pp. 3518-3532.
- Ahn, S.E., Lee, H.L., Park, Y.S., Hong, H.J., Suh Y.-W, Kim, C.-K., Han, S.Y., Jung, D.W., and Jaeung, Y. (2021). *Integrated assessment to environmental valuation via impact pathway analysis: Sectoral assessment*. Korea Environment Institute.
- Bayazit, M., and Ünal, N.E. (1990). "Effects of hedging on reservoir performance." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 26, No. 4, pp. 713-719.
- Chae, K.S., Kim, H.S., Lim, Y.A., and Kim, B.Y. (2016). *The economic effects of droughts: Focused on rice production*. Korea Rural Economic Institute.
- Chah, J., Yu, Y., and Lee, H. (2018). "A study on value estimation of water resources using benefit transfer method focusing on meta-regression analysis." *Journal of Environmental Policy and Administration*, KEPAS, Vol. 26, No. 4, pp. 105-122.
- Joe, H. (2005). "Asymptotic efficiency of the two-stage estimation method for copula-based models." *Journal of Multivariate Analysis*, JMVA, Vol. 94, No. 2, pp. 401-419.
- K-water (2022). *Determination of the optimal river maintenance water reduction by reflecting the characteristics of each multi-purpose dam in the Geumgang Basin*.
- Kwon, O.S. (2006). "Valuing recreational benefits of dam lakes using a choice experiment approach." *Environmental and Resource Economics Review*, KEEA, Vol. 15, No. 3, pp. 555-574.
- Lee, G.M., and Yi, J. (2012). "Analysis of emergency water supply effects of multipurpose dams using water shortage index." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 11, pp. 1143-1156.
- Ministry of Science and ICT (MSIT) (2007). *Building of value evaluation system of water resources and water related technology*.
- Nelsen, R.B. (2007). *An introduction to Copulas*, Springer-Verla, Springer Science & Business Media, Berlin, Germany.
- Ni, L., Wang, D., Wu, J., Wang, Y., Tao, Y., Zhang, J., Liu, J., and Xie, F. (2020). "Vine copula selection using mutual information for hydrological dependence modeling." *Environmental Research*, Vol. 186, 109604.
- Park, S.-Y., Lim, S.-Y., Ryu, M., and Yoo, S.-H. (2015). "The recreational benefits of the Jangheung Multi-purpose Dam." *Journal of Korea Regional Science Association*, KRSA, Vol. 31, No. 3, pp. 79-97.
- Pereira, G., and Veiga, A. (2019). "Periodic copula autoregressive model designed to multivariate streamflow time series modelling" *Water Resources Management*, EWRA, Vol. 33, pp. 3417-3413.
- William, B.M., and Hoel, L.A. (2003). "Modeling and forecasting vehicular traffic flow as a seasonal ARIMA process theoretical basis and empirical results." *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 6, pp. 664-672.
- Yoo, S.-H., Lee, G.-M., and Lee, E.-R. (2011). "Economic analysis of dam operation improvement by dam downstream river improvement works (II) - Economic benefit and cost allocation analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 9, pp. 765-776.
- Yoon, D.H., Nam, W.-H., Jeon, M.-G., An, H., Yoo, D.G., and Park, M.J. (2022). "Assessment of regional drought preparedness and response capacity on the basis of water resources shortage." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 22, No. 2, pp. 39-46.