

# 최근 대기뭍으로 인한 댐 용수 공급 조정 기준선 영향 분석: 주암댐을 중심으로

이강민\*<sup>ORCID</sup> · 정민규\*\*<sup>ORCID</sup> · 이주현\*\*\*<sup>ORCID</sup> · 권현한\*\*\*\*<sup>ORCID</sup>

Lee, Kangmin\*<sup>ORCID</sup>, Jung, Minkyu\*\*<sup>ORCID</sup>, Lee, Joo-Heon\*\*\*<sup>ORCID</sup>, Kwon, Hyun-Han\*\*\*\*<sup>ORCID</sup>

## An Analysis of the Impact of Recent Severe Droughts on Dam Water Supply Adjustment Baseline: A Case Study of Juam Dam

### ABSTRACT

This study aims to evaluate the impact of recent droughts on the variability of current water supply adjustment baselines for dams in response to frequent droughts due to climate change. Using the PARMA model, inflow variability was analyzed for Juam Dam in the southern region, and the sensitivity of water supply adjustment baselines was assessed depending on the inclusion of major drought events. The results showed that increasing the number of stochastic simulations improved the reliability of the water supply adjustment baselines; specifically, while a 15% difference in reservoir levels was observed in the 100-year simulation, the difference decreased to within 5% for simulations of 500 years or more, suggesting the use of at least 500-years simulations. Moreover, comparing scenarios including and excluding the drought years of 2017 and 2022, it was found that incorporating drought years led to an average 20% increase in the target reservoir levels, indicating difficulties in achieving 95% water supply reliability under current standards. In consecutive multi-year drought scenarios, the target reservoir level increased by up to 30%, highlighting the need for further discussions on flood management. Based on these findings, the study proposes revising water supply standards to enhance the reliability of dam operations in response to climate change. Future research should focus on developing more sophisticated water resource management strategies and strengthening the national integrated drought response system.

**Keywords** : Drought response, Water supply, Standard reservoir levels, Water supply adjustment baselines

### 초록

본 연구의 목적은 최근 기후변화로 인해 빈번해지는 가뭄에 대비하여, 최근 발생한 가뭄이 우리나라 댐의 용수 공급 조정 기준선에 미치는 영향을 평가하는 것이다. 이를 위해 남부 지역의 주암댐을 대상으로 PARMA 모델을 사용하여 유입량 변동성을 분석하고, 주요 가뭄 사상의 포함 여부에 따른 용수 공급 조정 기준의 민감도를 평가하였다. 연구 결과, 추계학적 모의 횟수가 증가할수록 용수 공급 조정 기준선의 신뢰성이 높아졌으며, 100년 모의에서는 저수량 차이가 20% 이상 발생하였으나, 500년 이상의 모의에서는 차이가 5% 이내로 나타나 최소 500년 이상의 모의 유량 사용이 권장됨을 확인하였다. 또한, 2017년과 2022년의 가뭄 해를 포함한 시나리오와 포함하지 않은 시나리오를 비교한 결과, 가뭄 해를 반영한 경우 기준 저수량이 평균 20% 상승하였고, 이는 기존 기준으로는 이수안전도 95%를 확보하기 어렵다는 점을 보여주었다. 특히, 다년간 연속 가뭄 상황에서는 기준 저수량이 최대 30%까지 상승하는 경향을 보여, 홍수기 관리에 있어 추가적인 논의가 필요함을 시사한다. 이러한 결과를 바탕으로 기후변화에 대응하는 댐 운영 신뢰도를 높이기 위한 용수 공급 기준의 개선 필요성을 제안하며, 향후 연구에서는 정교한 수자원 관리 방안과 국가 차원의 통합 가뭄 대응 체계 강화를 위한 방안을 모색할 필요가 있다.

**핵심어** : 가뭄 대응, 용수공급, 기준저수량, 용수공급조정기준

\* 세종대학교 건설환경공학과 석사과정 (Sejong University · [vlxjvos4424@gmail.com](mailto:vlxjvos4424@gmail.com))

\*\* 세종대학교 건설환경공학과 박사후연구원 (Sejong University · [jmk856856@gmail.com](mailto:jmk856856@gmail.com))

\*\*\* 중신회원 · 중부대학교 토목공학과 교수 (Joongbu University · [leejh@joongbu.ac.kr](mailto:leejh@joongbu.ac.kr))

\*\*\*\* 중신회원 · 교신저자 · 세종대학교 건설환경공학과 교수 (Corresponding Author · Sejong University · [hkwn@sejong.ac.kr](mailto:hkwn@sejong.ac.kr))

Received October 7, 2024/ revised November 6, 2024/ accepted November 14, 2024

## 1. 서론

최근 기후변동성의 증가로 인해 전국적으로 가뭄 현상이 발생하고 있으며, 특히 2017년과 2022년 남부 지역(광주·전남 등)에서는 강수량 부족으로 인해 댐 저수량이 충분히 회복되지 못해 심각한 수준의 가뭄 피해가 보고되었다(KMA, 2022; Lee et al., 2023). 이러한 지속적인 가뭄은 댐의 가용 수량 확보에 큰 영향을 미치며, 이에 따라 제한적 용수 공급 등 2차 및 3차 피해가 가중될 가능성이 크다.

가뭄은 장기간 지속됨으로써 수자원 계획을 어렵게 만드는 대표적인 자연재해 중 하나이며, 그 지속성은 해당 지역에 심각한 물 부족 문제를 초래할 수 있다. 이러한 문제에 대비하고자 연평균 유출량을 초과하는 물을 저장할 수 있는 다수의 댐이 건설되었다. 저수지 용량의 설계는 댐 건설 지역의 기후 조건에 크게 좌우되며, 일반적으로 가뭄이 빈번한 지역일수록 저수지 용량이 더 크게 설계된다. 그러나 지리적 특성과 비용의 제약으로 인해 저수지 용량을 확대하는 데 한계가 존재할 수 있으며, 이로 인해 다수의 댐이 장기간 지속되는 건조, 즉 다년간의 가뭄에 취약할 가능성이 있다(Kim et al., 2019; Mun et al., 2020).

우리나라는 강우의 계절적 집중과 큰 시·공간적 변동성으로 인해 수자원 관리에 상당한 어려움을 겪고 있다(Lee et al., 2012; Kim et al., 2017). 이러한 강우의 시·공간적 변동성을 고려할 때, 댐을 통한 용수공급은 필수적인 수자원 관리 수단으로 자리 잡고 있다. 최근 기후변화로 인해 강우의 시·공간적 변동성이 증가하면서 홍수와 가뭄과 같은 극단적인 수문 사상의 재현 기간(recurrence time)이 지속적으로 짧아지고 있다(Kim et al., 2020; Lee et al., 2016). 이러한 변화는 댐 운영에 있어 중요한 도전 과제가 되고 있다. 예를 들어, 2020년 섬진강 유역에서는 설계 강우량을 초과하는 지속적인 강우로 인해 대규모 홍수 피해가 발생하였으나(Kim et al., 2020), 2022년부터 2년에 걸친 강수 부족으로 생활·공업용수 공급에 차질이 발생할 정도의 대가뭄이 발생하였다. 여기서 ‘대가뭄’은 지역 내 가뭄의 정도가 심화되어 장기간에 걸쳐 생활 및 공업용수와 같은 필수 자원의 공급에 중대한 영향을 미치는 상황을 의미한다. 이와 같은 상황에서 홍수기 동안 안전한 홍수 조절과 안정적인 이수용량 확보를 위한 댐 운영 기준 수립이 필수적이다.

댐은 건설 당시, 댐의 홍수 및 이수용량을 결정하기 위한 목적으로 빈도 개념의 수문 시나리오를 이용하여 운영률(reservoir operation rule, ROM)이 설정되어 있으나, 이는 실제 댐운영을 위한 기준으로 활용하기에는 현실적이지 않다. 즉, 설계빈도에 해당하는 설계강수량을 활용한 가상의 수문곡선을 가정하여 댐운영률을 설정하기 때문에 실제 댐운영을 위한 기준으로 활용되는데 무리가 있다.

한편, 우리나라에서는 신뢰도 개념을 기반으로 심각한 가뭄에 대비한 가뭄 비상 계획 수립에 관한 연구가 진행되고 있다(Sung et al., 2022). K-water(2018)의 “댐 용수공급 조정기준”은 2015년 한강 수계의 대가뭄을 계기로 다목적 댐 및 용수 댐에 기준 저수량을 설정하기 위해 도입되었다. 일반적으로 용수공급 조정기준이라고 불리는 가뭄 비상 계획에는 자발적 또는 의무적인 물 공급 감소와 관련된 기준이 포함된다. 이러한 계획은 미래의 심각한 물 부족을 방지하기 위해 소량의 물 부족을 허용하는 전략을 포함하며, 연중 안정적인 수자원 활용을 목표로 저수지의 물을 일정 수준 유지하는 것을 목적으로 한다. 이는 저수지의 회복력(resilience)이 낮거나 유입량이 불확실한 상황에서 우선순위가 높은 용수 사용을 보장하기 위해 운영된다.

용수공급 조정기준은 댐 운영에 중요한 영향을 미치며, 이러한 기준은 다양한 방식으로 설정될 수 있다. 예를 들어, 총 가용 수자원(현재 저장된 물과 유입량의 합)을 기준으로 용수공급 조정의 시작점을 설정할 수 있으며, 또는 현재 저수지의 저류량만을 기준으로 활용하는 방법도 고려할 수 있다. 우리나라에 용수공급조정기준은 4단계(관상주의·경계·심각)로 구분하여 기준선 설정을 위한 공급(감량) 방안과 댐의 저수량이 해당 단계에 진입하였을 때 각 가뭄 단계에 상응하는 공급(감량) 방안으로 나누어져 있다. 또한 기준선 산정 시 사용되는 입력자료로는 댐의 제원(저수위량, 홍수기제한수위 저수량, 상시만수위 저수량), 공급량(생활·공업·농업·환경유지용수), 댐 유입량으로 구분된다.

기후변화로 인한 미래의 불확실성이 증가함에 따라 용수공급의 안정성이 더욱 위협받고 있는 가운데, 현재 우리나라에서 활용되고 있는 댐 용수공급 조정기준은 2015년 이전의 수문기상 자료만을 반영하여 설정되고 있다. 기온 상승에 따른 증발량 증가와 강수의 시공간적 변동성 증가는 댐 유입량을 예측하는 데 어려움을 가중시키며, 이러한 변화는 댐의 다목적 기능 수행에 어려움을 초래하고 있다(Jeong et al., 2013).

따라서, 최신 강우 데이터를 반영한 새로운 용수공급 기준의 수립이 필요하며, 유입량 변동성에 대한 정확한 예측과 국가의 가뭄 대응 체계의 적정성을 평가하여 극한 가뭄에 효과적으로 대응할 수 있는 댐 운영 기준의 개선이 요구된다(Kwang et al., 2023). 본 논문은 현행 댐 용수공급 기준의 한계점을 분석하고, 기후변화에 대응할 수 있는 개선 방안을 제시하는 것을 목적으로 한다. 또한, 본 연구에서는 최근 가뭄으로 인한 이수안전도를 재평가하고, 이러한 변동성에 근거하여 기준저수량 재설정 필요성을 검토하였다. 이를 위해 남부 지역의 가뭄으로 가장 큰 피해를 입었던 주암댐을 대상으로, 극심한 가뭄이 발생한 2017년과 2022년의 저수량 변동성을 반영한 댐 모의 운영을 실시하고, 용수공급 조정기준에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 유역 및 수문기상 자료

### 2.1 주암댐 유역

주암댐 유역은 보성강 수계에 속하며, 전체 유역 면적은 약 1,010 km<sup>2</sup>로 담양군, 보성군, 장흥군, 화순군 및 순천시에 걸쳐 있다(Yi et al., 2015). 유역 내에는 주암댐과 그 상류에 위치한 동북댐 및 보성강댐이 포함된다. Fig. 1에 나타난 바와 같이, 주암댐은 섬진강의 제1지류인 보성강 중류에 위치하고 있으며, 1992년에 건설되었다. 저수지의 저수위는 85 m이며, 총 저수량은 4.6억 톤에 이른다. 주요 유입 하천으로는 보성강, 동북천, 송광천이 있으며, 그 외에도 지방 2급 하천 48개가 포함되어 있다.

### 2.2 주암댐 유황 특성

유입량 변동성에 따른 댐 용수 공급 조정 기준의 가뭄 대응 능력을 평가하기 위해 주암댐의 유입량을 분석하였다. Fig. 2는 1991년부터 2023년까지 주암댐 유역의 일별 유입량을 나타낸

그래프이다. 평균 유입량(회색)과 2017년 유입량(파란색), 2022년 유입량(빨간색)이 비교되고 있으며, 특히 2017년과 2022년의 유입량은 다른 해와 비교하여 현저히 낮은 수치를 기록하고 있다. 이 그래프에서 확인할 수 있듯, 2017년과 2022년은 다른 연도에 비해 일별 유입량이 매우 낮아 극심한 가뭄이 지속되었음을 보여준다. 이러한 분석 결과는 주암댐 유역이 극심한 가뭄의 영향을 받았다는 것을 나타내며, 주암댐의 수자원 관리 및 가뭄 대응 전략 수립에 중요한 정보를 제공한다. 특히 2017년과 2022년의 사례는 향후 기후 변화로 인한 극한 기상 현상에 대비하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 3. 용수 공급 조정 기준 산정방법

### 3.1 유량자료 생성을 위한 Periodic ARMA 모형

본 연구에서는 댐 유입량 자료를 생성하기 위해 단변량 계절성(periodic) PARMA(Periodic Autoregressive Moving Average)



Fig. 1. Watershed of Juam Dam Including Boseong River, Dongbok Dam and Boseong River

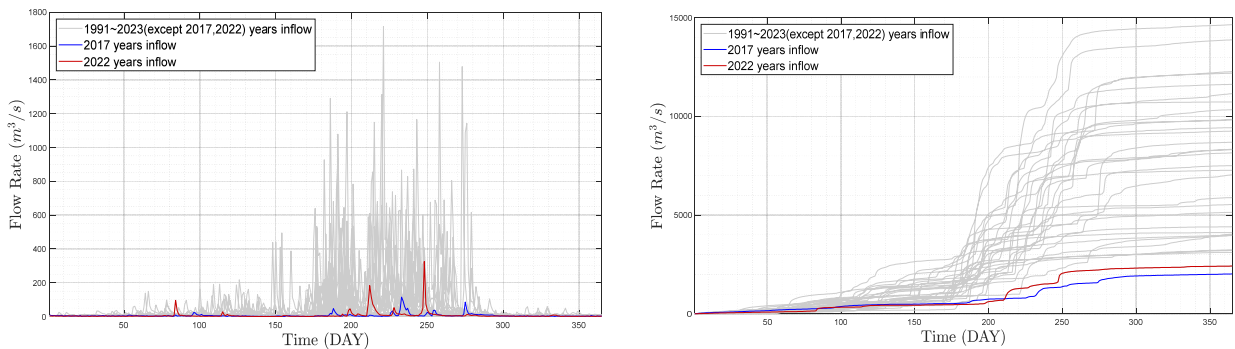


Fig. 2. Comparison of Daily Inflow and Accumulated Flow at Juam Dam for Different Years (1991-2023, 2017, and 2022)

모델을 활용하였다. PARMA 모델은 계절성을 가지는 시계열 자료에 적합한 추계학적(stochastic) 모델로, 월별 유입량이나 강수량과 같은 자료를 모델링하는 데 사용된다. PARMA 모형은 계절적 의존성을 나타내기 위해 설계된 확률적 시계열 모델로, ARMA(p, q) 모델의 확장형이다. PARMA(p, q) 모델은 계절별로 서로 다른 자기회귀 및 이동평균 매개변수를 사용함으로써, 주기적인 계절적 변화를 효과적으로 모델링할 수 있다. PARMA(p, q) 모델은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$Y_{\nu,\tau} = \sum_{i=1}^p \phi_{i,\tau} Y_{\nu,\tau-i} + \sum_{j=1}^q \theta_{j,\tau} \epsilon_{\nu,\tau-j} + \epsilon_{\nu,\tau} \quad (1)$$

여기서,  $Y_{\nu,\tau}$ 는 연도  $\nu$ 와 계절(예:월)  $\tau$ 에서의 시계열 값을 나타내며, 이는 계절성 주기를 가지는 시계열 데이터 자료를 의미한다.  $p$ 는 자기회귀 부분(AR)의 차수를 나타내며,  $q$ 는 이동평균 부분(MA)의 차수를 나타낸다.  $\phi_{i,\tau}$ 는 계절  $\tau$ 에서  $p$ -차수까지의 자기회귀 의존성을 나타내는 매개변수이다.  $\theta_{j,\tau}$ 는 계절  $\tau$ 에서의 이동평균 매개변수이며, 오차 항에 대한 의존성을 모의하는데 활용된다.  $\epsilon_{\nu,\tau}$ 는 평균이 0이고, 분산이  $\sigma^2(\epsilon_{\tau})$ 인 오차항으로, 독립적이며 계절에 따라 다를 수 있다.

PARMA 모델은 연도별로 동일한 ARMA 모델을 사용하는 대신, 각 계절마다 고유한 ARMA(p, q) 모델을 사용하여 계절간의 변화와 차이를 반영할 수 있다. 계절에 따라 달라지는 특성을 나타내기 위해 매개변수  $\phi$ 와  $\theta$ 는 계절별로 다르게 정의된다. 따라

서, 이 모델은 계절적인 통계 특성(평균, 분산, 자기상관 등)이 달라지는 시계열을 잘 설명할 수 있다. 일반적으로 모델을 적용하기 전에 데이터의 정규성을 보장하기 위해 로그 변환(log transformation)이나 Box-Cox 변환 등의 정규화 작업을 수행한다. 매개변수의 추정에는 최소자승법(Least Squares Method)을 활용하였으며, 최소자승법은 주어진 자료를 바탕으로 오차를 최소화하여 매개변수를 추정하는 방법이다. 본 연구에서는 SAMS (Stochastic Analysis Modeling and Simulation)에서 제공하는 PARMA 사용하여 유입량 자료를 생성 및 분석을 수행하였다. SAMS 2007은 미 콜로라도 주립대학교(Colorado State University)와 USBR (US Bureau of Reclamation)에서 하천 흐름과 같은 시계열 수문 자료의 분석, 모델링 및 시뮬레이션을 수행하기 위해 개발된 모형이다(Lee et al., 2024).

### 3.2 기준 저수량 및 이수안전도 산정 방법

본 연구에서는 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 개별 용수 공급량을 감량하면서 용수 공급 조정 기준을 설정하는 감량 기준(hedging rule) 개념을 도입하여 진행하였다. 일반적으로 용수 사용은 생활용수, 공업용수, 농업용수, 하천유지용수로 구분된다. 실제 댐 운영에서는 가뭄 시 용수 공급이 제한되며, 각 용수별 우선순위에 따라 단계적으로 제한이 시행된다. 우리나라에서는 생활·공업용수 수요에 1순위를 부여하고, 농업용수 수요에 2순위를, 하천유지용수 수요에 가장 낮은 우선순위를 부여하고 있다. 따라서 심각한 가뭄이

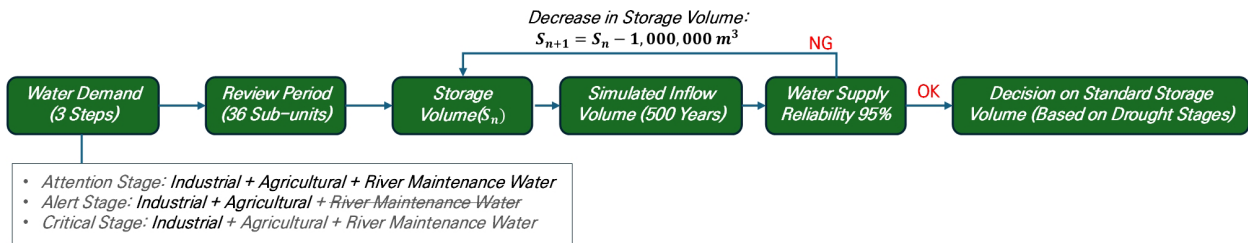


Fig. 3. Procedure for Determining Target Storage Based on Simulated Inflow at the Dam

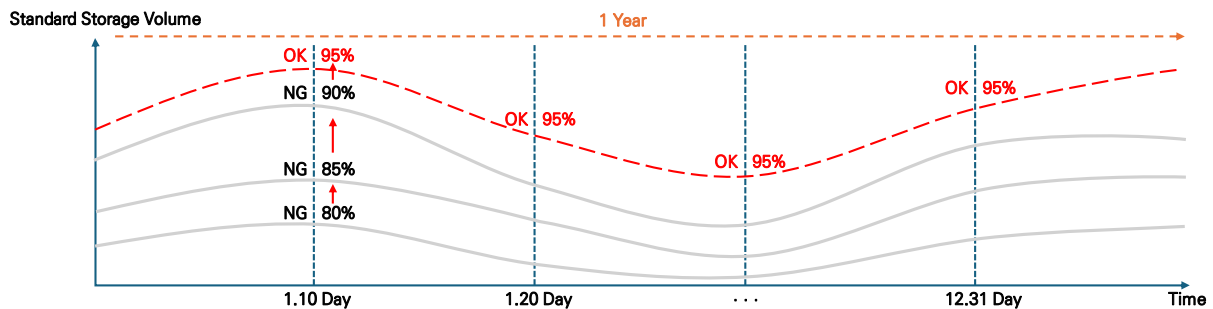


Fig. 4. Variation of Target Storage Over Time and Evaluation of Water Supply Reliability

예측되면 먼저 하천유지용수 수요에 제한을 부과한 후, 농업용수 수요로 제한이 확대된다. 마지막 단계로는 생활-공업용수 공급에 대한 제한이 부과된다. 이러한 단계적 물 공급을 시행하기 위해서는 개별 감량 기준이 필요하다. (1) 정상 조건에서는 저수지 수위가 관심 단계 이상일 때 모든 계획된 물 수요가 충족되며, 여기에는 실제 물 수요에 추가되는 여분의 공급량도 포함된다. (2) 저수지 수위가 관심 단계 이하로 떨어지면 저수지 저류지가 관심 단계에 속할 때, 물 공급량을 실제 수요에 맞게 조정한다. (3) 저수지 수위가 주의 단계 이하로 떨어질 경우, 하천유지용수 수요에 대한 공급량이 최대 100 %까지 제한된다. (4) 저수지 수위가 경계 단계 이하로 떨어질 경우, 하천유지용수 수요에 대한 100 % 제한이 시행된 이후, 농업용수 수요에 대한 공급량이 최대 100 %까지 제한된다. (5) 마지막으로, 저수지 수위가 심각 단계 이하로 떨어지면, 하천유지용수 및 농업용수 수요에 대한 100 % 제한이 부과되고, 생활-공업용수 수요에 대해서도 최대 20 %까지 공급량이 제한된다. 모든 경우에 있어서 댐에 부여된 홍수조절용량을 확보하면 운영하였다.

본 연구에서는 각 단계별 기준 저수량을 평가하기 위해 이수안전도 개념을 도입하였으며, 용수 공급 신뢰도 95 %를 만족하도록 하였다. 우리나라는 현재 이수안전도를 95 %로 설정하고 있으며, 이를 평가하기 위해 검토 시기, 저수량, 저수량 기준 등 다양한 요소를 고려한다. Fig. 4는 이수안전도를 평가하는 과정을 시각화한

것으로, 상단의 수요량은 주의, 경계, 심각한 3단계로 구분되어 있다. 검토 시기는 1년을 기준으로 10일 단위로 나누어 총 36개의 순단위로 구성된다. 500년 동안의 유입량을 모의하여 설정된 이수 안전도를 충족하는지 평가하며, 이수안전도가 충족될 경우 기준 저수량이 결정된다. 만약 충족되지 않을 경우, 기준 저수량을 연속적으로 상향 조정하면서 추가 분석을 시행하였다.

#### 4. 결과 및 토의

##### 4.1 추계학적 모의횡수에 따른 민감도 분석

용수 공급 조정 기준을 설정함에 있어, 자료 연한이 짧은 유입량 정보로 인한 표본 오차(sampling error)를 줄이기 위해 본 연구에서는 추계학적 모의를 통해 다수의 유량 양상별 시나리오를 구축하여 활용하였다. 먼저, PARMA 유량 모의기법에 대한 검증을 위하여 관측값과 주요 통계치를 비교 검토하여 Table 1에 나타내었다. 이 분석을 통해 유량의 계절 변동성을 효과적으로 모의할 수 있음을 확인했으며, 월별 평균 유량은 관측값과 유사하게 재현되었다. 그러나 표준 편차와 왜도에서는 관측값과 차이를 보였다. 이러한 편차는 PAR 모델의 정상성 가정과 유량 자료 잔차 계열의 정규분포 가정에서 기인하는 것으로 판단되며, 상대적으로 극치치(Upper Tail) 계열의 재현에는 어려움이 있지만, 저수량(Lower Tail) 재현에는 비교적 효과적인 것으로 평가된다.

**Table 1.** Statistical Analysis of Observational Data from Juam Dam

Categories	Analysis Results
Inflow Distribution	
Average of Monthly Inflow	
Standard Deviation of Monthly Inflow	
Skewness of Monthly Inflow	

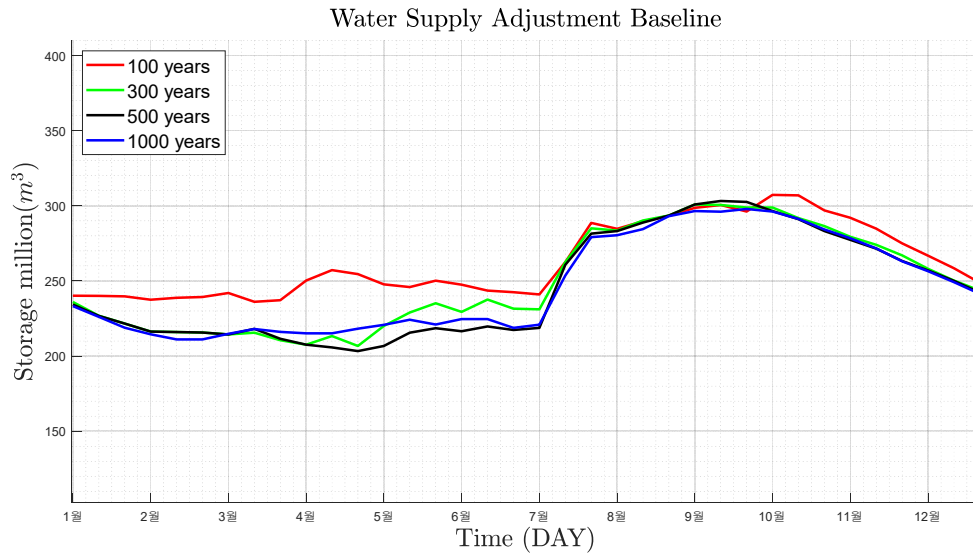


Fig. 5. Review of Baseline Changes Over Different No. Simulations for Juam Dam Water Supply Adjustment Baseline

한편, 용수 공급 조정 기준은 다단계로 기준 저수량을 평가하는 체계를 가지며, 다수의 모의가 필수적이고 해석 결과의 수렴성도 중요한 요소이다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 모의 횟수에 따른 민감도를 평가하였다. PARMA(1, 1) 방법을 사용하여 각기 다른 모의 횟수(100년, 300년, 500년, 1000년)를 반영하여 심각한 단계에 해당하는 기준 저수량, 즉, 생활·공업용수 계약량을 확보할 수 있는 수준에 저수량을 추정 및 검토하였으며, 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 각 모의 횟수에 따른 저수량을 비교한 결과, 300년

이상의 모의에서는 모의 횟수에 따른 차이가 크지 않은 반면, 100년 모의에서는 상대적으로 큰 차이를 보였다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 500년 모의 자료를 기준으로 분석을 수행하였다.

#### 4.2 2017년, 2022년 가뭄에 따른 용수공급조정선 변동성 평가

본 연구의 주요 목적은 댐 건설 이후 심각한 가뭄이 댐 운영 신뢰도에 미치는 영향을 평가하는 것이다. 앞서 언급한 바와 같이,

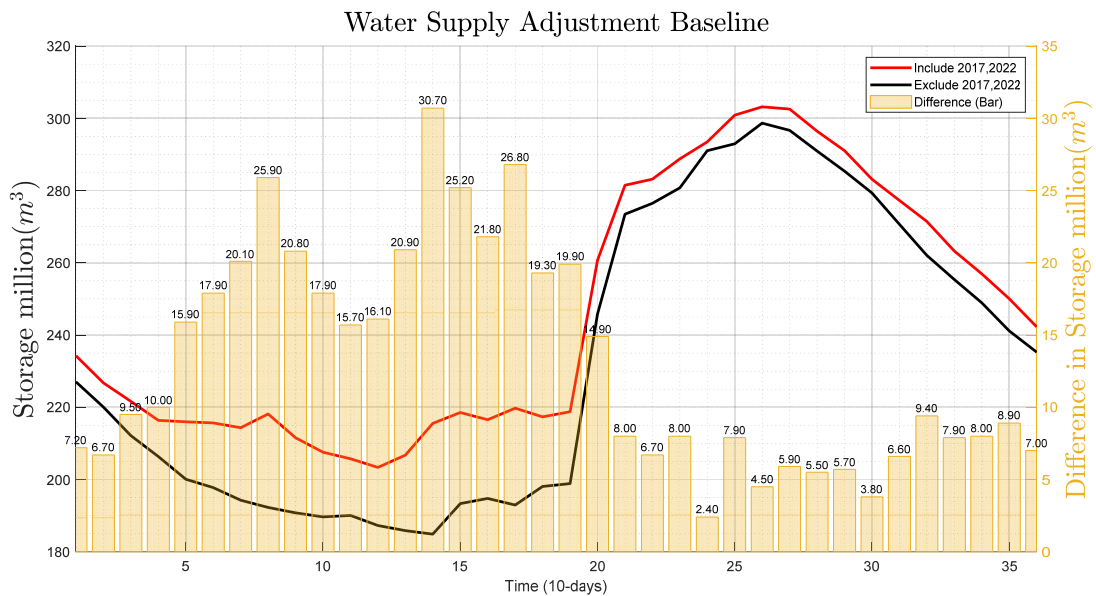


Fig. 6. Assessment of Variability in Water Supply Adjustment Baseline During Drought Years (Juam Dam)

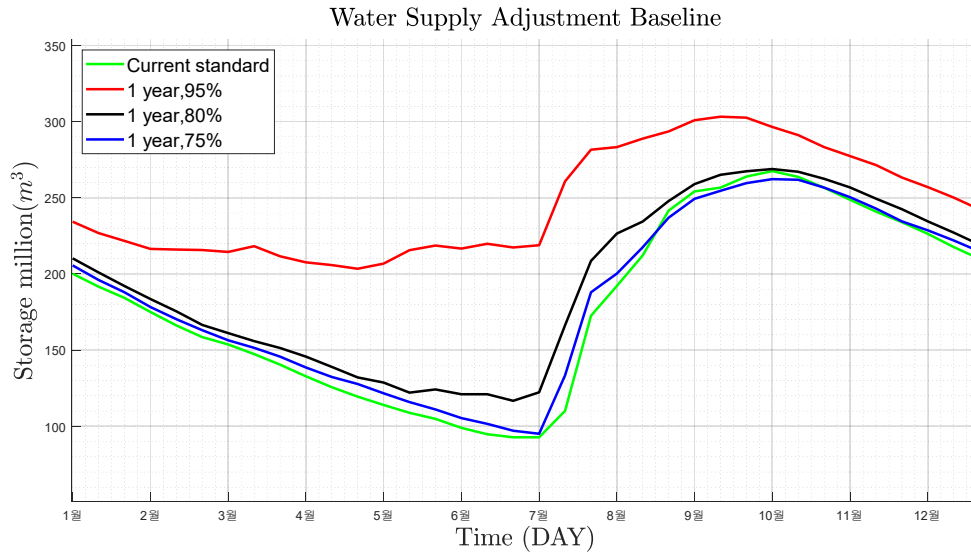


Fig. 7. Comparison of Water Supply Adjustment Baseline Differences by Water Supply Reliability Levels (Juam Dam)

주암댐 유역은 최근 10년 동안 두 차례의 심각한 가뭄(2017년과 2022년)을 경험하였으며, 이로 인해 실제 물 부족이 발생하여 용수 공급에 차질이 빚어졌다. 이러한 점에서 2017년과 2022년의 유입량을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우를 가정하여 용수 공급 조정선을 평가하였다. 용수 공급 조정선을 평가하는 절차는 3장에서 제시된 방법과 동일하다.

Fig. 6은 주암댐의 용수 공급 조정 기준선의 심각 단계를 두 가지 시나리오로 비교한 결과를 나타낸다. 빨간색 선은 2017년과 2022년의 가뭄 해를 반영한 용수 공급 조정 기준선을, 검은색 선은 가뭄 해를 반영하지 않은 용수 공급 조정 기준선을 나타낸다. 또한, 막대그래프는 두 기준선 간의 차이를 나타내며, 해당 차이를 수치로도 표현하였다. 이를 통해 심한 가뭄을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 용수 공급 조정 기준선의 변동성이 크다는 것을 시각적으로 보여준다. 이는 심각한 가뭄이 발생할 경우 댐의 이수안전도가 낮아지는 것을 의미한다. 즉, 이수안전도 95 %를 확보하기 위해서는 평소보다 더 많은 저수량을 유지해야 하며, 이로 인해 다목적댐의 경우 홍수 위험이 증가하게 되어 댐 운영 환경이 더욱 어려워질 수 있음을 시사한다.

Fig. 7은 주암댐의 용수 공급 조정 기준선을 다양한 이수안전도 조건에 따라 비교한 결과를 보여준다. 빨간색 선은 모의 기간 1년을 기준으로 2023년까지의 유입량 데이터를 반영하여 이수안전도 95 %를 맞춘 조정선을 나타내며, 검은색 선과 파란색 선은 각각 이수안전도 80 %, 75 %를 나타낸다. 빨간색 선의 조정선은 현행 기준(초록색 선)보다 높게 나타나며, 이는 이수안전도 95 %를 만족하기 위해서는 더 많은 저수량이 필요함을 의미한다. 반면,

검은색 선과 파란색 선은 모의 결과 이수안전도 75~80 % 수준과 유사한 수준을 보인다. 이러한 결과는 현재의 기준이 가뭄 대비에 충분하지 않으며, 용수 확보에 취약하다는 점을 시사한다. 따라서, 앞으로의 이상 기후에 대비하기 위해서는 충분한 용수를 확보할 필요가 있으며, 이를 위해 이수안전도의 재평가 주기에 대한 정책도 고민이 필요한 시점이다.

### 4.3 2년 연속 가뭄 상황에서의 용수공급조정선 비교

우리나라는 강수에 계절변동성이 매우 크며, 이로 인해 홍수와 가뭄을 모두 고려한 댐 운영을 하고 있다. 즉, 대부분에 강수가 여름 시기에 집중된다는 점에서 이 시기에 적절한 저수량 확보가 이루어지지 않으면 다음해에 물공급에 차질을 빚을 가능성이 매우 크다. 특히, 이러한, 강수부족이 2년 연속되는 경우 이수안전도 측면에서 우리나라 댐은 매우 취약할 수 밖에 없다. 이러한 점에서 추가적인 모의실험을 수행하였다.

Fig. 8은 주암댐의 용수 공급 조정 곡선을 다년간의 연속적인 가뭄 발생 시나리오에 따라 비교한 결과를 나타낸다. 이 그림은 연속적으로 발생하는 가뭄이 댐 운영에 미치는 영향을 평가하기 위해 작성되었다. 앞서 언급한 바와 같이, 주암댐은 2022년에 심각한 가뭄을 경험하였으며, 이를 바탕으로 2022년과 동일한 규모의 가뭄이 최대 3년 연속으로 발생했을 때를 가정하여 저수량 변화를 각각 분석하였다.

검은색 선은 2022년과 같은 규모의 가뭄이 한 번 발생했을 때의 저수량 변화, 빨간색 선은 두 번 연속 발생했을 때, 초록색 선은 세 번 연속 발생했을 때의 저수량 변화를 나타낸다. 각 시나리오별

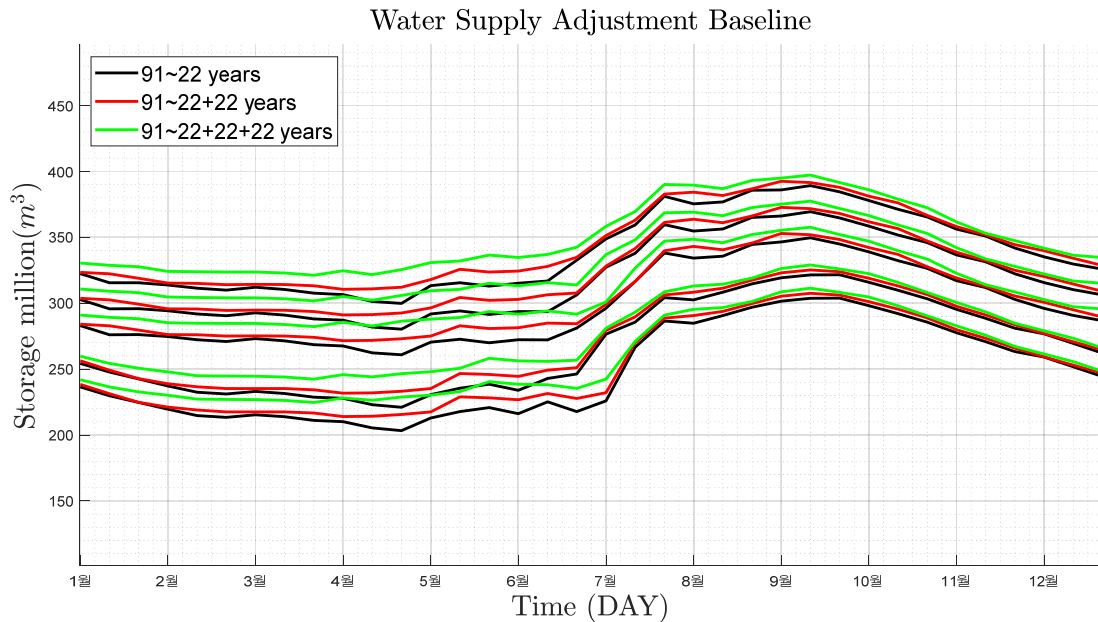


Fig. 8. Comparison of Target Storage Levels Under Multi-Year Drought Conditions (Juam Dam)

로 정상환원, 관심, 주의, 경계, 심각 단계 등 5개의 조정선을 제시하였다. 분석 결과, 가뭄이 반복될수록 저수량을 확보하기 위한 기준선이 상승하는 경향을 보인다. 이는 가뭄의 빈도와 강도가 증가할수록 주암댐의 용수 관리 및 공급 조정이 더욱 중요해짐을 시사한다. 반면, 2022년과 같은 설계빈도를 초과하는 대가뭄을 포함한 이후로는 변동폭이 상대적으로 크지 않음을 보여주고 있다. 이러한 결과는 가뭄 대비 전략 수립에 있어 중요한 참고 자료가 될 수 있으며, 기후 변화로 인한 가뭄 빈도 증가에 따라 저수량 관리의 필요성을 강조한다.

## 5. 결론

본 연구의 목적은 최근 기후변화로 인해 빈번해지는 가뭄에 대비하여, 우리나라 댐의 용수 공급 조정 기준의 한계점을 분석하고 개선 방안을 제시하는 것이다. 이를 위해 남부 지역의 주암댐을 대상으로 PARMA 모델을 활용해 유입량 변동성을 분석하고, 심각한 가뭄 상황에서 용수 공급 조정 기준의 변동성을 평가하였다. 주요 가뭄 사상의 포함 여부에 따른 용수 공급 조정 기준의 민감도를 분석함으로써, 극한 상황에서의 댐 운영 신뢰도를 확보하는 방안을 모색하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 추계학적 모의 횟수에 따른 민감도 분석을 위해 모의 횟수(100년, 300년, 500년, 1000년)에 따른 용수 공급 조정 기준선의 민감도를 분석하였다. PARMA(1, 1) 모델을 사용하여 심각한 단계의 기준 저수량을 추정한 결과, 300년 이상의 모의에서는

저수량의 차이가 크지 않은 반면, 100년 모의에서는 상대적으로 큰 차이가 발생하여, 짧은 연한의 유입량 자료는 표본 오차가 크게 나타날 수 있음을 시사하였다. 이러한 점에서 모의 횟수에 따른 불확실성을 줄이기 위해서는 최소 500년 이상의 모의 유량 사용이 권장된다.

둘째, 2017년과 2022년 가뭄에 따른 용수 공급 조정선 변동성을 평가하여 심각한 가뭄이 댐 운영 신뢰도에 미치는 영향을 분석하였다. 2017년과 2022년의 가뭄 해를 포함한 시나리오와 포함하지 않은 시나리오 간의 용수 공급 조정선을 비교한 결과, 가뭄 해를 고려한 경우 기준 저수량이 크게 상승함을 확인하였다. 다양한 이수안전도(95%, 80%, 75%)에 따른 용수 공급 조정 기준선을 비교한 결과, 최근 대가뭄 이후 현행 용수 공급 조정 기준선은 이수안전도 80% 수준으로 파악되었다. 이러한 결과는 현행 기준이 가뭄 대비에 충분하지 않으며, 미래의 이상 기후에 대비하여 더 높은 수준의 용수를 확보할 필요가 있음을 시사한다.

셋째, 다년간 연속 가뭄 상황을 가정하여 용수 공급 조정 기준선의 변동성을 평가하였다. 2022년과 같은 규모의 가뭄이 최대 3년 연속으로 발생했을 때를 가정하여 기준선 변화를 분석한 결과, 가뭄이 반복될수록 기준 저수량이 상승하는 경향을 보였다. 하지만 최근 가뭄 사상을 포함한 이후에는 변동폭이 크지 않았으며, 이는 최근 가뭄이 얼마나 심각한지를 보여주는 결과로 해석될 수 있다.

본 연구는 최근 기후변화로 인해 빈번해지는 극한 가뭄에 대비하여, 댐 운영 신뢰도를 높이기 위한 용수 공급 조정 기준의 한계점과 개선 방안을 제시하였다. 연구 결과, 심각한 가뭄 발생 시 기준





기준으로는 이수안전도 95 %를 확보하기 어렵다는 점을 확인하였으며, 특히 다년간 반복되는 가뭄 상황에서는 기준 저수량이 상승하는 경향을 보였다. 이러한 결과를 실제 운영 기준으로 적용할 경우 홍수기 관리에 대한 추가적인 논의가 필요하다. 즉, 기후변화로 인해 홍수 및 가뭄의 빈도와 강도가 증가하는 상황에서 댐 운영 고도화에 대한 필요성이 더욱 강조된다.

향후 연구에서는 추계학적 모형의 선택에 따른 민감도를 보다 면밀히 분석하여 댐 운영의 신뢰도를 높이고, 극한 상황에 대응할 수 있는 수자원 관리 방안을 모색할 필요가 있다. 또한, 최신 기후 데이터를 반영하여 새로운 용수 공급 조정 기준을 수립함으로써, 미래의 기후변화로 인한 이상 가뭄에 대비할 수 있는 근거를 재공할 수 있을 것이다.

### Acknowledgements

This research was supported by the Ministry of Environment, Republic of Korea, through the Korea Environmental Industry & Technology Institute under the Drought Response Water Management Innovation Technology Development Project (Project No. RS-2022-KE002027).

### ORCID

- Kangmin Lee  <https://orcid.org/0009-0009-4473-7411>  
 Minkyu Jung  <https://orcid.org/0000-0001-6645-2366>  
 Joo-Heon Lee  <https://orcid.org/0000-0002-5540-1966>  
 Hyun-Han Kwon  <https://orcid.org/0000-0003-4465-2708>

### References

Jeong, H. G., Kim, S. J. and Ha, R. (2013). "Assessment of climate change impact on storage behavior of Chungju and the regulation dams using SWAT model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 12, pp. 1235-1247, <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2013.46.12.1235>.  
 Kim, J. S., Son, C. Y., Moon, Y. I. and Lee, J. H. (2017). "Seasonal rainfall variability in Korea within the context of different evolution patterns of the central Pacific El Niño." *Journal of Water and Climate Change*, Vol. 8, No. 3, pp. 412-422, <https://doi.org/10.2166/wcc.2016.020>.  
 Kim, W., Lee, J., Kim, J. and Kim, S. (2019). "Assessment of water supply stability for drought-vulnerable Boryeong multipurpose

dam in South Korea using future dry climate change scenarios." *Water*, Vol. 11, No. 11, 2403, <https://doi.org/10.3390/w11112403>.  
 Kim, Y. T., Park, M. and Kwon, H. H. (2020). "Spatio-temporal summer rainfall pattern in 2020 from a rainfall frequency perspective." *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, Vol. 13, No. 4, pp. 93-104, <https://doi.org/10.21729/ksds.2020.13.4.93> (in Korean).  
 Korea Meteorological Administration (KMA). (2022). Abnormal climate report. Seoul, Korea (in Korean).  
 K-water. (2018). The working manual of reservoir operations. pp. IV-537-IV-582 (in Korean).  
 Lee, S., Jeon, D., Lee, J., Kwon, H. H., Kam, J. and Yoon, H. (2023). "Measures to improve disaster management preparedness and in response to the intensification and spread of drought in Gwangju and Jeolla Province." *KRIHS Policy Brief*, Vol. 907, pp. 1-8.  
 Lee, J. H., Kwon, H. H., Jang, H. W. and Kim, T. W. (2016). "Future changes in drought characteristics under extreme climate change over South Korea." *Advances in Meteorology*, Vol. 2016, No. 1, 9164265, <https://doi.org/10.1155/2016/9164265>.  
 Lee, J. J., Kwon, H. H. and Kim, T. W. (2012). "Spatio-temporal analysis of extreme precipitation regimes across South Korea and its application to regionalization." *Journal of Hydro-Environment Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 101-110, <https://doi.org/10.1016/j.jher.2012.01.002>.  
 Lee, C., Lee, S., Lee, E., Ji, J., Yoon, J. and Yi, J. (2024). "Predictive analysis of minimum inflow using synthetic inflow in reservoir management: a case study of Seomjingang Dam." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 57, No. 5, pp. 311-320, <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2024.57.5.311> (in Korean).  
 Mun, Y. S., Nam, W. H., Jeon, M. G., Kim, H. J., Kang, K., Lee, J. C., Ha, T. H. and Lee, K. (2020). "Evaluation of regional drought vulnerability assessment based on agricultural water and reservoirs." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 62, No. 2, pp. 97-109, <https://doi.org/10.5389/KSAE.2020.62.2.97>.  
 Sung, J. Y., Kang, B. S., Kim, B. M. and Noh, S. J. (2022). "Development and application of integrated indicators for assessing the water resources performance of multi-purpose and water supply dams." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 55, No. 9, pp. 687-700, <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2022.55.9.687> (in Korean).  
 Yi, H. S., Chong, S. and Lee, S. J. (2015). "Assessment of apprehensive area of non-point source pollution using watershed model application in Juam Dam watershed." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 37, No. 10, pp. 551-557, <https://doi.org/10.4491/KSEE.2015.37.10.551>.