



## Evaluation of hydropower dam water supply capacity (III): development and application of drought operation rule for hydropower dams in Han river

Jeong, Gimoon<sup>a</sup> · Kang, Doosun<sup>b\*</sup> · Kim, Taesoon<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Researcher, Korea Rural Community Corporation, Rural Research Institute, Naju, Korea

<sup>b</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea

<sup>c</sup>General Manager, Hangang Hydro Power Site, Korea Hydro & Nuclear Power Co., LTD., Chuncheon, Korea

Paper number: 22-037

Received: 15 May 2022; Revised: 7 June 2022; Accepted: 8 June 2022

### Abstract

Integrated water resources management (IWRM) has focused on efficient response to various water related disasters by climate change. In particular, more flexible usage of conventional water resources infrastructures is expected to provide an eco-friendly water management. Multi-purpose dams and water supply dams are well known as water management facilities for securing and supplying water in drought season. Recently, based on the report ‘2021 multi-purpose use of hydropower dams in Han river’, contribution of hydropower dams on water resources management is becoming more significant beyond the traditional role of hydropower generation. In drought conditions, the dams control water supply depending on the pre-defined drought stages. In the case of multi-purpose dams, an operation standard during drought has been already prepared and applied; however, for the hydropower dams, specific standards are not fully prepared yet in South Korea. In this study, a method for calculation of standard water storage and discharge reduction of hydropower dams according to drought stage is newly proposed reflecting the characteristics of hydropower dams. The proposed method was applied to the hydropower dams in Han river, where six hydropower dams are located. A case study of the historical droughts occurred in 2014-2017 demonstrated that the proposed hydropower dam operation rule could improve the water supply stability under severe drought conditions compared to the conventional operations. In the future, the role of hydropower dams for water resources management is expected to become more important, and this study can be widely used for water supply planning such as drought response using hydropower dams.

**Keywords:** Climate change, Drought response, Hydropower dam, Operation rule

## 발전용댐 이수능력 평가 연구 (III): 한강수계 발전용댐 가뭄단계별 운영기준 개발 및 효과 분석

정기문<sup>a</sup> · 강두선<sup>b\*</sup> · 김태순<sup>c</sup>

<sup>a</sup>한국농어촌공사 농어촌연구원 주임연구원, <sup>b</sup>경희대학교 사회기반시스템공학과 교수, <sup>c</sup>한국수력원자력(주) 한강수력본부 수자원관리부 부장

### 요 지

최근 국내에서는 수량, 수질 등 기후변화로 인한 다양한 수자원 문제에 효율적으로 대응하기 위한 통합물관리 체계가 점차 고도화되고 있으며, 특히 친환경적인 관점에서 이미 개발된 수자원시설물의 탄력적인 활용 방안이 주목받고 있다. 이처럼 용수를 사전에 확보하고, 적시에 공급하기 위한 대표적인 수자원 관리 시설로 다목적댐, 용수전용댐 등이 가장 잘 알려져 있으나, 지난 2021년 ‘한강수계 발전용댐 다목적 활용 협약’을 기점으로 발전용댐 또한 기존의 수력발전 용도를 넘어 수자원 관리 기여도가 한층 높아지게 되었다. 댐에서는 가뭄 발생시 구체적인 가뭄단계 파악 및 용수 공급량 조절을 통해 용수공급을 조절해야 한다. 이미 다목적댐 및 용수전용댐의 경우 가뭄대응을 위한 용수공급 운영기준이 마련되어 적용 중에 있으나, 최근에 다목적 활용이 추진된 발전용댐의 경우 구체적인 관련 기준이 마련되어 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 기존 다목적댐 및 용수전용댐 운영기준을 참고하여, 발전용댐의 가뭄단계별 기준저수량 산정 방안 및 용수공급 조정 방안 등을 제시하였다. 제시된 방법은 국내 대부분의 발전용댐이 위치한 한강수계 발전용댐을 대상으로 적용하였으며, 지난 2014~2017년 발생한 가뭄사례를 바탕으로 그 적용 효과를 분석한 결과, 대상 발전용댐의 용수공급 안정성이 개선되는 효과를 확인하였다. 수자원의 효율적인 이용을 위한 발전용댐의 역할은 점차 중요해질 것으로 예상되며, 본 연구 결과는 발전용댐을 활용한 용수공급 관련 연구에 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어:** 가뭄대응, 기후변화, 발전용댐, 운영기준

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-201-2513

E-mail: doosunkang@khu.ac.kr (D. Kang)

## 1. 서론

댐은 저류 공간을 활용하여 홍수기에 과도한 방류량을 조절하거나, 이시기 및 갈수기에 미리 확보된 용수를 통해 공급량을 유지하는 등 수자원 재난 관리에 가장 큰 역할을 수행하는 수공 구조물이다. 최근 국내에서는 기후변화 및 이상기후 등으로 인해 증가하는 홍수·가뭄 위협에 대응하고자, 기존 다목적댐 및 용수전용댐 뿐만 아니라 발전용댐의 이·치수 활용에 대한 기대가 높아지고 있다. 특히 한강수계에서는 막대한 물 수요량으로 인해 가뭄시에도 안정적으로 용수를 공급하기 위한 다양한 노력이 계속되고 있으며, 지난 2021년 한강수계 발전용댐을 이·치수 목적으로 활용하기 위한 시범 운영이 시작되었다. 본 연구에서는 이처럼 발전용댐을 활용하여 가뭄시 안정적으로 용수를 공급하기 위한 운영방안을 구체적으로 제시하고 분석하고자 하였으며, 그에 앞서 기존 다목적댐 및 용수전용댐의 대표적인 가뭄대응 운영방안 연구사례를 다음과 같이 조사하고, 분석하였다.

우리나라의 국토교통부(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, MOLIT)에서는 댐 용수부족으로 인한 물공급 피해를 예방하기 위해, 다목적댐 및 용수전용댐을 대상으로 댐의 용수공급능력을 유지할 수 있도록 「댐 용수부족 대비 용수공급 조정기준」(MOLIT, 2015)을 마련하여 적용한 바 있다. 관련 기준에서는 각 댐에서의 실수요량을 기준으로, 안정적인 용수공급에 요구되는 구체적인 기준저수량을 가뭄단계별, 기간별로 산정하였으며, 가뭄단계 심화에 따른 점진적인 용수공급 감축방안을 함께 제시하고 있다. 특히, 이러한 가뭄대응 기준은 댐 용수 수요량 등 사회적 환경, 그리고 댐 유입량 등 수문 조건이 달라짐에 따라 변화하므로, 관련 기준 또한 지속적으로 개정되고 있다(MOLIT, 2016; 2018).

이처럼 외부 환경을 고려하여 단계적으로 용수공급량을 감축하는 방법은 가뭄에 대응하기 위한 대표적인 저수 시설 활용 방안으로, Bayazit and Unal (1990), Shih and Revelle (1995) 등의 연구에서 단계적인 공급량 감축 방안을 제시하고, 감량 공급이 용수공급 안정성에 기여하는 효과를 구체적으로 분석한 바 있다. 이후, 관련 연구는 최적화 기법을 바탕으로 용수공급 효율을 극대화하기 위한 감축량 결정 연구(Draper and Lund, 2004; Tu *et al.*, 2008), 환경유지용수 및 기후변화를 고려한 적응형 댐 운영 최적화 연구(Zhou and Guo, 2013) 등의 연구 분야로 발전하였다. 특히 Tayebiyani *et al.* (2019)의 연구에서는 감축량 결정을 최적화하는 과정에서 수력발전 효율 변화를 고려하였으며, 이처럼 댐 운영 요소가 점차 폭넓게 반영되면서 관련 연구의 적용성 또한 지속적으로 개선되고 있다. 이와 유사하게, 최근 국내에서는 기존 수립된 용수공급

조정기준과 다양한 최적화 기반 감축방안의 적용 효과를 비교 분석하거나(Jin *et al.*, 2021), 원활한 용수공급을 위해 예측을 통해 가뭄대응 단계를 효율적으로 완화하기 위한 방안(Kim *et al.*, 2018), 국내 기후변화 전망을 반영한 용수공급 조정기준 개선 방안(Kim *et al.*, 2019)을 제시하는 등 국내 실정을 고려한 관련 연구들이 활발히 수행되고 있다.

그러나, 앞서 소개한 바와 같이 이·치수 관점에서 최근 발전용댐의 역할이 주목받는 반면, 대부분의 댐 용수공급 조정 관련 연구는 다목적댐을 중심으로 수행되어, 관련 기법을 발전용댐에 효과적으로 적용하기 위한 기준 및 운영방안 마련이 필요하다. 예를 들어, 다목적댐의 경우 용수공급 계약량, 하천유지유량 등 댐 용수 수요량을 비교적 정확히 산정할 수 있으나, 발전용댐의 경우 계약 공급량이 존재하지 않고, 발전용수 관리가 요구되는 등 구체적인 수요량 산정에 어려움이 있다. 이러한 발전용댐의 용수공급 특성을 감안하여, Choi *et al.* (2020)은 기본계획공급량을 바탕으로 저수지 운영모의를 수행하여 화천댐의 평상시 운영곡선을 개발한 바 있으며, 이는 국내 발전용댐을 대상으로 수행된 대표적인 운영방안 연구 사례이다. 발전용댐의 운영 특성을 추가적으로 살펴보면, 일부 발전용댐에서는 방류를 통한 용수공급보다 수위 유지를 통해 용수공급에 기여하는 효과가 더 큰 특징이 있으며, Choi *et al.* (2021)은 이러한 구조적, 비구조적 용수공급 특성을 고려하여 국내 발전용댐을 저류형(Storage type) 및 비저류형(Run-of-river type) 발전용댐으로 구분한 바 있다.

본 연구에서는 발전용댐의 주요 용수 수요환경을 분석하고, 이를 바탕으로 평상시 용수공급 및 가뭄단계별 용수공급 조정방안을 제안하였으며, 또한 가뭄단계를 판단하기 위한 발전용댐 기준저수량 산정방안을 함께 제시하였다. 제안된 가뭄단계별 용수공급 조정 및 기준저수량 산정 방안은 국내 한강수계에 위치한 발전용댐을 대상으로 적용하였으며, 대상지역에서 발생한 대표적 가뭄인 2014~2017년 가뭄사례를 재현하여 개발 기법의 가뭄대응 효과를 정량적으로 분석하였다.

본 논문은 구체적으로 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 발전용댐의 다양한 공급 환경을 고려한 가뭄단계별 용수공급 조정방안을 제시하였으며(2.1 절), 용수공급 조정방안을 바탕으로 가뭄단계별 기준저수량 산정 방안을 제시하였다(2.2 절). 3장에서는 발전용댐 운영을 통한 가뭄대응 효과를 분석하기 위한 다양한 정량적 지표를 소개하였다. 4장에서는 본 연구의 적용대상 수계인 한강수계의 발전용댐 용수공급 구조와 함께, 가뭄시 한강수계 발전용댐 운영방안의 적용 효과를 분석하였으며, 마지막으로 5장을 통해 연구결과를 요약하고 향후 관련 연구의 활용 방안을 제시하였다.

## 2. 가뭄 상황을 고려한 발전용댐 운영 방안

### 2.1 가뭄단계별 발전용댐 방류량 조정 방안

이수기 댐 운영을 통한 용수공급은 댐 저수량 및 유입량 현황에 따라 평상시 운영방안과 비상시(가뭄시) 운영방안으로 구분할 수 있다. 평상시 댐의 운영은 일반적인 댐 관리수위인 상시만수위(Normal operation level)를 유지하는 수준에서 댐 유입량을 모두 방류하며, 댐 하류의 방류 요청이 있을 경우 이를 만족하는 방식으로 이루어진다. 한편, 가뭄시 댐 운영은 장기적이고 안정적인 댐 용수의 공급을 위해 단계적으로 방류량을 제한하는 방식으로 이루어지며, 이때 구체적인 방류량의 조정기준은 해당 댐에 계획된 용수 수요량을 바탕으로 수립할 수 있다.

대표적으로 MOLIT (2018)에 의하면 국내 다목적댐의 경우 각 댐에서의 생활용수 및 농업용수 계약량과 농업용수 및 하천유지용수 배분량 등을 해당댐의 용수 수요량으로 설정하여, Table 1과 같이 가뭄 단계가 심화됨에 따라 하천유지유량을 감축하고, 다시 농업용수 및 생·공용수 수요량의 일부를 감축하는 등 용수 공급량을 점차 감축시킨다. 반면, 발전용댐 운영의 경우, 생활용수 및 농업용수 등의 용수공급 계약량이 별도로 존재하지 않으므로, 구체적인 댐별 용수 수요량은 현재까지 산정된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 수계 단위에서 발전용댐에 요구되는 주요 수요량 및 하천의 유황 등을 바탕으로 발전용댐의 공급량을 감축하는 방안을 다음과 같이 제시하였다.

#### 2.1.1 수계단위 발전용댐 용수공급 주요 수요량

본 연구에서는 수계에서 발전용댐을 통해 공급받는 주요 수요량을 조사하였으며, Table 2에 제시된 바와 같이 기본수요량(Standard water demand), 순간수요량(Temporal water demand), 하천유지용수(River maintenance water demand), 하천수사용량(Non-point water demand) 등 네 가지 유형의 수요량으로 분류할 수 있다.

먼저 발전용댐에서는 다목적댐과 유사하게 댐의 기본적인 용수공급능력을 산정할 수 있으며, 이는 해당 댐에서 기대할

수 있는 용수공급량, 즉 기본수요량으로 정의할 수 있다. 한편, 하천 수계에서는 상·하류에 따라 용수 확보량이 상이한 공간적 불균등 상태가 나타날 수 있다. 이때 하류의 용수 부족이 예상되고, 상류댐의 저수량이 충분한 경우 하류에서는 상류댐 방류를 통한 용수공급을 요청할 수 있으며, 이러한 물 수요는 상류댐에 간헐적으로 요구되는 순간수요량의 개념으로 이해할 수 있다. 또한, 하천법에서는 하천 주요지점에 대하여 일정한 하천유지유량을 만족하도록 규정하고 있으며, 평상시에는 댐의 방류량이 하천유지유량 이상으로 유지되는 것이 일반적이지만, 가뭄시에는 이들 하천유지유량을 수요량으로써 반영하여 발전용댐의 방류량을 조정할 필요가 있다. 그 밖에도 수계에서는 다양한 형태의 물 사용 활동이 발생하며, 각 활동별로 구체적인 산정은 어려우나, 수계 차원에서 그 규모를 가능할 수 있다. 따라서 하천수사용량 또한 하천유지유량과 마찬가지로 가뭄시 발전용댐의 방류량 조정 단계에서 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 앞서 소개한 네 가지 유형의 수요량을 바탕으로, 발전용댐의 용수공급을 정상(Normal) 단계 이외에 관심(Attention), 주의(Caution), 심각(Severe) 단계 등 세 개의 가뭄 단계로 구분하는 방안을 제시하였다. 발전용댐에서는 평상시 기본수요량을 바탕으로 용수를 공급하며, 하류에서 발생하는 순간수요량을 충족시킬 수 있다. 한편, 관심단계 진입시 순간수요량의 공급을 중단하고, 기본수요량의 일부를 용수공급에서 우선 감축하여 1단계 비상공급량을 수립하며, 주의

Table 2. Types of water demand to be considered in hydropower dam operation

Demand type	Description
Standard water demand	Expected water supply yield of a dam
Temporal water demand	Additional water demand by downstream request
River maintenance water demand	Minimum flow for river maintenance
Non-point water demand	Distributed water use in the river

Table 1. Water supply reduction per drought stage for multi-purpose dam

Drought stage	Water supply reduction
Attention	Reduction of surplus municipal/industrial water demand beyond the contracted amount
Caution	Reduction of surplus municipal/industrial and agricultural water demand beyond the actual water demand & River maintenance water demand
Alert	Reduction in Caution stage & Agricultural water demand × Reduction rate* *Reduction rate: 20% (Apr.~Jun.), 30% (Jul.~Sep.)
Severe	Reduction in Alert stage & Municipal/industrial water demand × 20%

단계 및 심각단계 등 점차 가뭄이 심화됨에 따라 하류의 하천 유지유량 및 하천수사용량 등을 추가적으로 감축한 2단계 및 3단계 비상공급량을 각각 수립한다. 이때, 제시된 방류량 조정 방안은 저류형 발전용댐으로 분류된 발전용댐을 대상으로 적용할 수 있으며, 댐 저류능력이 낮은 비저류형 발전용댐에서는 이와 같은 탄력적인 댐 운영을 기대할 수 없다. 따라서, 비저류형 발전용댐의 경우, 평상시 상시만수위를 기준으로 방류량을 결정하되, 가뭄시에는 가뭄단계와 상관없이 각 댐의 하한운영수위를 유지하는 수준에서 유입량을 전량 방류하는 형태로 최대한 용수공급에 기여하도록 운영할 수 있다.

Fig. 1은 세 개의 발전용댐이 위치한 가상의 수계를 나타내고 있다. Dam A는 저류형 발전용댐, Dam B와 C는 각각 비저류형 발전용댐에 해당한다. 이때, 앞서 소개한 발전용댐 방류량 조정 방안에 따라, 평상시 비저류형 발전용댐인 Dam B와 C는 상시만수위를 유지하고, 저류형 발전용댐인 Dam A에서는 기본수요량에 해당하는 용수를 공급하는 동시에 Dam B에 나타난 것과 같이 하류에 순간수요량이 발생하는 경우 이를 충족시키는 방식으로 용수공급을 수행한다. 한편, 가뭄단계에 진입할 경우, 먼저 비저류형 발전용댐인 Dam B와 C는 하한운영수위 이상의 댐 용수를 전량 방류하여 용수공급에 기여한다. 저류형 발전용댐인 Dam A에서는 장기적인 용수공급에 대비하여 공급량을 감축시키며, 먼저 순간수요량 공급을 중단하고 기본수요량 미만으로 방류량을 조정한다. 이때, 방류량의 조정은 1차적으로 하천수사용량과 하천유지유량이 가

장 큰 Dam C 지점의 하천유지유량을 만족하는 수준으로 결정한다. 이후, 가뭄이 점차 심화됨에 따라 Dam A의 방류량 조정은 하천수사용량과 Dam B 지점의 하천유지유량을 만족하는 수준, 그리고 하천수사용량과 Dam A 지점의 하천유지유량을 만족하는 수준 등 수계 내 수요량을 고려하여 그 감축량을 점차 증가시키는 방향으로 결정한다.

2.1.2 발전용댐 유입량 유형 분석

한편, 위와 같이 하류 지점의 하천유지유량 및 하천수사용량을 바탕으로 비상공급량을 결정할 경우, 저류형 발전용댐의 기본수요량에 비해 매우 낮은 방류로 인해 전반적인 하천 유량이 급격히 감소하는 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 가뭄 발생시에도 하천 유량이 자연적인 공급량 수준에 비례할 수 있도록 발전용댐 유입량의 유형을 통계적으로 분석하고, 가뭄시 방류량 조정 방안에 반영하였다.

하천의 유형은 1년 중 특정 지점에서 유지되는 유량 수준을 기간에 따라 분석한 것으로, 1년 중 95일동안 유지되는 풍수량, 185일간 유지되는 평수량, 275일간 유지되는 저수량, 355일간 유지되는 갈수량 등이 대표적인 하천의 유형 수준에 해당한다. 즉, 가뭄시 발전용댐의 방류량 조정은 하천의 자연유형을 고려한 수준에서 이루어져야 하며, 적용 대상인 저류형 발전용댐에서 과거 30년 이상의 일단위 유입량 자료를 수집하고, 일별 평균 유입량을 산정함으로써 연간 평균 유황 분석을 실시한다. 특히 본 연구에서는 Fig. 2에 제시된 바와 같이, 각각

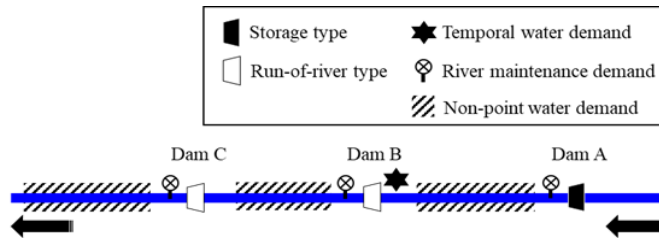


Fig. 1. Scheme of water demand distribution over multiple hydropower dams in a river basin

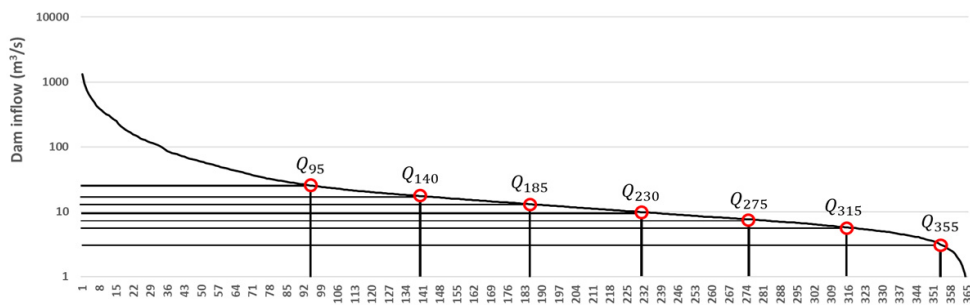


Fig. 2. Sample of flow duration curve and representative flows

풍수량, 평수량, 저수량, 갈수량의 중간 수준에 해당하는 유황을 포함하여  $Q_{95}$ ,  $Q_{140}$ ,  $Q_{185}$ ,  $Q_{230}$ ,  $Q_{275}$ ,  $Q_{315}$ ,  $Q_{355}$  등 7개 유황 수준을 분석하고, 앞서 제시한 수요량 기반 감축 기준과 함께 검토함으로써 저류형 발전용댐의 구체적인 용수공급 감축량을 결정하였다.

**2.2 가뭄단계별 발전용댐 기준저수량**

앞서 제시된 발전용댐 방류량 조정 방안은 가뭄단계에 따라 공급량을 감축하는 과정이므로, 발전용댐의 가뭄단계 판단이 선행되어야 한다. 국내 다목적댐의 경우 댐별 저수량 현황 등을 바탕으로 현재 가뭄단계를 판단하기 위한 기준저수량을 수립하여 MOLIT (2018)을 통해 그 산정 결과를 제시하고 있다. 여기서, 용수공급을 위해 필요한 댐의 기준저수량은 저수지 모의운영 등의 용수공급 모의를 통해 산정된 댐 저수량을 의미하며, 구체적으로 Table 3과 같이 가뭄단계에 따라 하천유지유량 및 농업용수, 생·공용수 수요량 등의 공급이 가능한 최소저수량과 무유입 조건을 고려한 추가 확보 저수량으로 구성된다. Lee (2018)의 연구에서는 특정 공급량을 바탕으로 다양한 수문조건에서 저수지 운영모의를 여러 차례 수행하였을 때, 이수안전도 95% 이상으로 다음해 같은 날의 댐 수위가 저수위(低水位) 밑으로 떨어지지 않도록 운영할 수 있는 현재 시점의 최소저수량을 기준저수량으로 정의하였다. 즉, 기준저수량 이상의 저수량이 확보된 경우, 해당 단계의 용수공급을 1년 동안 꾸준히 공급하여도 95% 이상의 이수안전도로 댐 수위가 저수위에 도달하지 않음을 의미한다.

본 연구에서는 이러한 다목적댐 운영기준을 참고하여, 앞

서 제시된 발전용댐 가뭄단계별 용수공급 기준인 기본수요량(정상) 및 1~3단계 비상공급량(관심, 주의, 심각)을 바탕으로 저류형 발전용댐의 가뭄단계별 기준저수량을 Table 4와 같은 방법으로 산정하였다. 구체적으로, 제시된 기준저수량은 각 가뭄단계별 비상공급량을 1년 동안 꾸준히 공급하는 방식으로 과거 20년 이상의 수문조건에서 연도별 저수지 운영모의를 수행하였을 때, 이수안전도 95% 이상으로 댐 수위가 저수위에 도달하지 않는 최소저수량을 도출한 후, 무유입 조건에서 해당 수요량을 15일 동안 공급할 수 있는 양을 더한 저수량으로 결정하였다. 또한, 가뭄단계 해제의 기준이 되는 정상단계 기준저수량의 경우, 마찬가지로 평상시 용수공급 기준인 기본수요량을 1년간 유지하여도 저수위에 도달하지 않는 최소저수량을 도출하되, 가뭄시 비상공급량 대비 높은 공급 기준임을 감안하여 무유입 기간을 15일이 아닌 10일로 적용하였다.

**3. 발전용댐 운영에 따른 가뭄대응 효과 분석 지표**

본 연구에서는 과거 실제 가뭄사례를 바탕으로, 제안된 가뭄 단계별 발전용댐 운영 방안을 반영한 저수지 모의운영을 수행하고, 그 결과를 과거 운영실적과 비교함으로써 제안 방법의 적용 효과를 분석하였다. 저수지 모의운영은 대표적으로 HEC-5(USACE, 1998) 및 HEC-ResSim (USACE, 2021) 과 같은 저수지 운영 모형을 통해 댐 등 저수 시설의 운영방안에 따른 저수량 및 방류량 등을 모의하는 방법이다. 이때, 수위별 저류용량 등 댐 저류공간의 상태는 시간이 지남에 따라 변

**Table 3.** Standard storage per drought stage for a multi-purpose dam (MOLIT, 2018)

Drought stage	Standard storage
Normal	“Caution stage storage” + Municipal/industrial, agricultural, and river maintenance water demand supply volume over 30 days w/o dam inflow
Attention	“Caution stage storage” + Municipal/industrial, agricultural, and river maintenance water demand supply volume over 15 days w/o dam inflow
Caution	Minimum storage for municipal/industrial, agricultural, and river maintenance water demand supply
Alert	Minimum storage for municipal/industrial and agricultural water demand supply
Severe	Minimum storage for municipal/industrial water demand supply + Municipal/industrial water supply volume over 15 days w/o dam inflow

**Table 4.** Standard storage per drought stage for a storage-type hydropower dam

Drought stage	Standard storage
Normal	Minimum storage for standard water demand supply + Standard water demand supply volume over 10 days w/o dam inflow
Attention	Minimum storage for emergency level 1 water supply + Emergency level 1 water supply volume over 15 days w/o dam inflow
Caution	Minimum storage for emergency level 2 water supply + Emergency level 2 water supply volume over 15 days w/o dam inflow
Severe	Minimum storage for emergency level 3 water supply + Emergency level 3 water supply volume over 15 days w/o dam inflow

화하므로, 저수지 모의운영 결과를 과거 운영실적과 비교하기 위해 먼저 분석대상 가뭄기간의 유입량, 방류량, 저수량(저수위) 자료를 바탕으로 대상 발전용댐 모형의 검보정을 수행하였다. 즉, 저수지 모형의 검보정은 과거 실측 데이터와 동일한 유입/방류 조건에서 모의된 댐 수위와 실측 댐 수위의 오차를 최소화하는 과정이며, 검보정된 저수지 모형을 활용함으로써 사례분석을 통한 개발 기법의 개선효과를 객관적으로 판단할 수 있다.

댐의 가뭄대응 효과는 기본적으로 가뭄기간 동안의 방류량 및 저수량 현황을 통해 판단할 수 있으며, 발전용댐의 경우 댐 운영의 주요 목적 중 하나인 발전량 실적 또한 가뭄대응에 따라 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전체 분석대상 가뭄기간 내 1) 평상시 수요량 대비 공급 과부족량 및 과부족일수, 2) 가뭄단계별 진입일수, 3) 일발전량 및 발전 안정성 등의 지표를 바탕으로 제안된 가뭄시 발전용댐 운영 방안의 적용 효과를 정량적으로 분석하였다. 이때 저수지 운영모에 따른 일발전량의 산정은 일방류량 중 발전용량 이하에 해당하는 방류량은 발전 방류, 발전용량을 초과하는 방류량은 월류 및 수문 방류한 것으로 구분하여 발전량을 산정하였다.

### 4. 적용 및 결과

#### 4.1 적용대상 발전용댐 및 과거 가뭄사례

본 연구에서는 국내 한강수계에 위치한 발전용댐을 대상으로 제안된 가뭄시 발전용댐 운영 방안을 적용하였다. Fig. 3

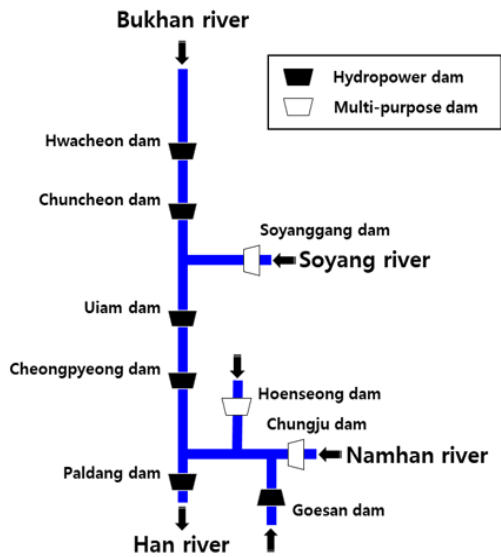


Fig. 3. Schematic diagram of Han river basin

과 같이 한강수계는 한강본류와 북한강수계, 남한강수계로 구분할 수 있으며, 먼저 한강본류에는 최하류 발전용댐인 팔당댐이 위치하고 있으며, 북한강수계에는 화천댐부터 춘천댐, 의암댐, 청평댐 등 네 개의 발전용댐, 남한강수계에는 괴산댐이 각각 위치하고 있다.

Choi et al. (2021)의 연구에서 북한강수계에 위치한 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐을 대상으로 저류형 및 비저류형 특성을 분석한 결과, 화천댐은 저류형 발전용댐으로 분류되었고, 나머지 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐은 모두 비저류형 발전용댐으로 분류되었다. 본 연구에서는 같은 분석방법을 적용하여 남한강수계에 위치한 괴산댐을 비저류형 발전용댐으로 분류하였다. 따라서 한강수계 내 여섯 개 발전용댐 중 유일한 저류형 발전용댐인 화천댐을 대상으로 가뭄단계별 기준저수량 및 방류량 조정 방안을 적용하였다. 나머지 비저류형 발전용댐의 경우 같은 수계에 위치한 화천댐을 기준으로 가뭄단계를 판단하되, 가뭄단계 진입 시 하한운영수위 이상의 유입량을 전량 방류하는 형태로 가뭄시 운영 방안을 동일하게 적용하였다.

한강수계에서는 지난 2014년부터 2017년까지 4년에 걸쳐 장기간 가뭄이 지속되었다. 먼저 해당 기간의 여섯 개 발전용댐별 유입량, 방류량, 저수량(저수위) 자료를 바탕으로 저수지 운영 모의를 위한 모형의 검보정을 실시하였으며 해당 결과는 Fig. 4와 같다. 저수지 모형의 검보정은 과거 실측 데이터와 동일한 유입 및 방류 조건에서, 수위-저수량 관계곡선을 보정하여 모의된 댐 수위와 실측 댐 수위의 오차를 최소화함으로써 수행하였다. 이때 동일 수계에 위치한 소양강댐, 충주댐 및 횡성댐 등 다목적댐의 운영은 팔당댐 등 발전용댐 가뭄대응 효과에 영향을 미칠 수 있으므로, 과거 가뭄 당시의 운영실적과 동일하게 운영되는 것으로 가정하였다.

#### 4.2 가뭄단계별 한강수계 발전용댐 운영 기준

##### 4.2.1 가뭄단계별 한강수계 발전용댐(화천댐) 방류량 조정 방안

먼저 한강수계 발전용댐의 가뭄시 운영기준을 마련하고자 주요 용수 공급목표에 해당하는 기준유량을 조사한 결과는 Table 5와 같다. 먼저 팔당댐의 경우, 한강본류 용수공급을 위해 124.0 m<sup>3</sup>/s의 책임방류량이 요구되나, 팔당댐은 비저류형 댐으로써 용수공급 조절능력이 부족하므로 해당 책임방류량은 각각 팔당댐 상류에 위치한 소양강댐, 충주댐 등의 다목적댐과 저류형 발전용댐인 화천댐의 방류량을 통해 충족된다. 즉, 팔당댐의 책임방류량이 상류에 위치한 다목적댐을 통해 충족되지 못한 경우, 그 부족량을 화천댐이 추가 공급하는 것으로 이해할 수 있으며, 이는 화천댐의 가뭄단계가 정상수준인 경우 공급할 수 있는 순간수요량에 해당한다. 또한, 2021년



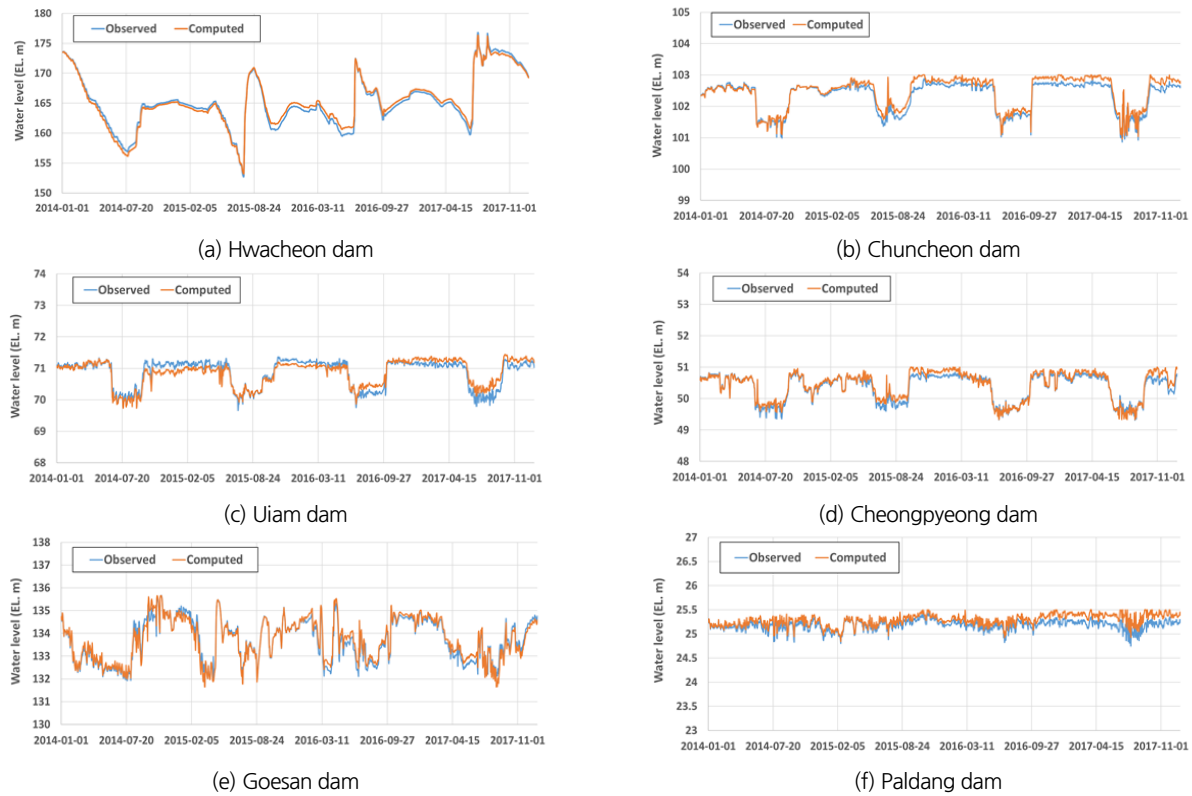


Fig. 4. Reservoir operation model calibration by comparing observed and computed dam water level for 2014~2017 duration

Table 5. Standard water demand at dam downstream locations in Han river basin

Dam	Description	Water demand (m <sup>3</sup> /s)
Paldang dam	Required discharge from Paldang dam	124.0
Hwancheon dam	Standard water demand from Hwancheon dam	22.2
Chuncheon dam	River maintenance flow at Chuncheon dam downstream + Non-point water demand in Bukhan river	6.86
Uiam dam	River maintenance flow at Uiam dam downstream + Non-point water demand in Bukhan river	20.79
Cheongpyeong dam	River maintenance flow at Cheongpyeong dam downstream + Non-point water demand in Bukhan river	11.24

홍수통제소와 한국수력원자력(주)에서 마련한 「한강수계 발전용댐 다목적 활용 운영기준」에 따르면 화천댐은 용수공급 능력 산정 결과를 바탕으로 현재 22.2 m<sup>3</sup>/s의 기본계획공급량을 상시 방류하도록 계획하고 있으며, 이는 마찬가지로 가뭄 단계가 정상 수준일때 공급할 수 있는 기본수요량으로 이해할 수 있다. 한편, 화천댐의 하류에 위치한 북한강수계의 춘천댐, 의암댐 및 청평댐 하류지점에서는 각각 5.20, 19.13, 9.58 m<sup>3</sup>/s의 하천유지유량이 요구되며, 또한 북한강수계 본류 구간에 대하여 1.66 m<sup>3</sup>/s의 하천수사용량이 존재하므로, 각 지점별로 Table 5에 나타난 것과 같이 기준수요량을 수립할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 가뭄단계 심화에 따른 화천댐의 방류량 조정 기준 마련 시 이들 기준수요량 규모를 단계적으로 고려하였다.

또한, 가뭄시에도 화천댐 방류를 통해 하천 유량이 자연적인 공급량 수준에 비례할 수 있도록 화천댐 유입량의 유휴수준을 검토하였으며, 1987~2020년 동안의 일별 화천댐 평균 유입량을 바탕으로 분석된 화천댐 주요 유휴수준을 Table 6에 제시하였다. 최종적으로, 앞서 도출한 한강수계 발전용댐의 기준수요량 및 화천댐 유휴를 화천댐의 기본수요량(22.2 m<sup>3</sup>/s)과 비교한 결과, Fig. 5와 같이 화천댐 기본수요량의 약 80%(17.76 m<sup>3</sup>/s), 60%(13.32 m<sup>3</sup>/s), 40%(8.88 m<sup>3</sup>/s)에 해당하는 유량이 각각 화천댐 유휴의  $Q_{140}$ ,  $Q_{185}$ ,  $Q_{275}$ 이며, Table 5의 주요 수요량 기준과 유사한 것으로 분석되어 Table 7에 정리된 것과 같이 화천댐 기본수요량의 80%, 60%, 40%에 해당하는 각 유량을 화천댐의 관심, 주의, 심각 단계에 해당하는 비상공급량으로 결정하였다.

4.2.2 가뭄단계별 한강수계 발전용댐(화천댐) 기준저수량

앞서 결정된 한강수계 저류형 발전용댐(화천댐)의 평상시 수요량 및 가뭄시 비상공급량을 바탕으로, 본 연구에서 제안한 방법(Table 4)으로 가뭄단계를 판단하기 위한 화천댐의 단계별 기준저수량을 산정하였다. 화천댐 유황 분석과 마찬가지로 과거 34년(1987~2020)의 수문자료를 바탕으로, 먼저 기본수요량(22.2 m<sup>3</sup>/s) 및 단계별 비상공급량(17.76, 13.32, 8.88 m<sup>3</sup>/s)을 1년 동안 유지한다고 가정했을 때, 연도별 34개의 저수지 운영모의 결과 화천댐 수위가 33개 년도에서 저수위에 도달하지 않도록 하는 (즉, 이수안전도 95%를 만족하는) 저수량을 결정한 후, 각각 10일의 기본수요량(정상) 및 15일의 단계별 비상공급량(관심, 주의, 심각)에 해당하는 저수량을 더하여 가뭄단계별 기준저수량을 산정하였다. 이와 같이 산정된 화천댐의 가뭄단계별 기준저수량은 순(10일)별로

Table 6. Flow duration analysis results of Hwacheon dam inflow

Flow duration	Flow rate (m <sup>3</sup> /s)
Q <sub>95</sub>	25.35
Q <sub>140</sub>	17.47
Q <sub>185</sub>	13.13
Q <sub>230</sub>	9.97
Q <sub>275</sub>	7.66
Q <sub>315</sub>	5.79
Q <sub>355</sub>	3.03

Table 8 및 Fig. 6과 같이 정리할 수 있다.

Fig. 6에 제시된 바와 같이 전반적인 기준저수량 곡선의 변화는 수문년을 기준으로 홍수기(6/21~9/20) 직후 1년 동안의 공급량을 유지하기 위해 큰 저수량이 요구되었다가, 다음 해 홍수기가 다가옴에 따라 요구되는 저수량이 점차 작아지는 양상을 보인다.

4.3 발전용댐 운영 시나리오별 가뭄대응 효과 분석

과거 2014~2017 가뭄사례를 바탕으로, 실제 한강수계 발전용댐 운영실적(Case 1)과 금회 연구에서 제안된 가뭄시 발전용댐 운영 방안을 적용한 모의 운영실적(Case 2)을 비교한 결과를 각각 Table 9, 그리고 Figs. 7~10에 제시하였다.

먼저, 해당 가뭄기간 동안 실제 과거 운영실적(Case 1)에서는 팔당댐 책임방류량을 충족하지 못한 기간의 수와 공급 과부족량이 각각 493일, 1,455.3 백만 m<sup>3</sup> 발생하였으나, 금회 제시한 운영 방안을 적용한 모의결과(Case 2) 각각 149일, 809.0 백만 m<sup>3</sup>으로 가뭄 피해가 크게 감소하는 것으로 나타났다. Figs. 7~9을 통해 확인할 수 있듯이, Case 1에서는 2015년 5월~8월에 걸쳐 팔당댐 책임방류량을 충족하기 위한 화천댐의 과다방류로 인해 화천댐 저수위가 확보되지 못하여 2016년 7월에 이르기까지 저수량이 크게 회복되지 못하고 지속적인 공급 부족이 발생한 것으로 분석하였다. 반면, Case 2에서는 비교적 이른 가뭄 판단 및 방류량 감축으로 화천댐의 기본수요량을 만족하지 못하는 날이 911일 발생하였다. 이는 Case 1의 866일 대비

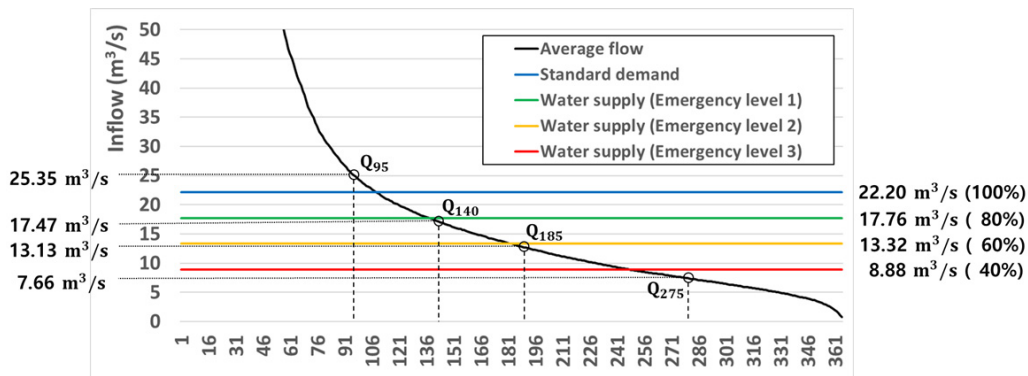


Fig. 5. Flow duration curve of Hwacheon dam inflow

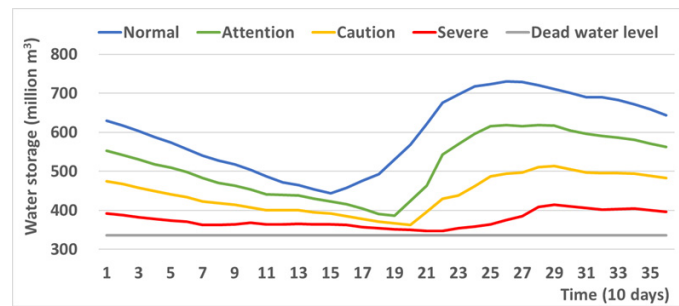
Table 7. Emergency water supply per drought stage for Hwacheon dam

Drought stage	Description	Discharge (m <sup>3</sup> /s)
Normal	Maintain standard water demand supply	22.20
Attention	Maintain emergency level 1 water supply (80% of standard water demand)	17.76
Caution	Maintain emergency level 2 water supply (60% of standard water demand)	13.32
Severe	Maintain emergency level 3 water supply (40% of standard water demand)	8.88



**Table 8.** Standard storage of Hwacheon dam per drought stage

Period (10 days)	Standard storage (million m <sup>3</sup> )				Period (10 days)	Standard storage (million m <sup>3</sup> )			
	Normal	Attention	Caution	Severe		Normal	Attention	Caution	Severe
1	630.2	552.0	474.3	391.5	19	530.7	386.0	366.3	351.5
2	617.2	541.0	467.3	387.5	20	568.2	424.5	362.3	349.5
3	603.2	530.0	457.3	382.5	21	621.7	463.0	395.8	347.5
4	587.2	518.0	449.3	377.5	22	675.2	543.0	429.3	347.5
5	573.2	509.0	441.3	373.5	23	696.2	569.5	438.3	354.5
6	557.2	498.0	434.3	370.5	24	717.2	596.0	461.3	358.5
7	540.2	482.0	422.3	362.5	25	723.5	616.0	486.3	364.5
8	527.2	470.0	418.3	362.5	26	729.8	618.0	494.3	375.5
9	517.2	463.0	414.3	363.5	27	729.2	616.0	496.3	384.5
10	503.2	453.0	407.3	367.5	28	720.2	618.0	511.3	408.5
11	487.2	441.0	400.3	364.5	29	711.2	617.0	513.3	413.5
12	471.2	440.0	400.3	364.5	30	700.2	605.0	505.3	409.5
13	465.2	438.0	400.3	365.5	31	690.2	596.0	497.3	405.5
14	453.2	430.0	395.3	363.5	32	689.2	590.0	495.3	401.5
15	444.2	422.0	392.3	364.5	33	682.2	586.0	495.3	403.5
16	457.2	415.0	385.3	362.5	34	671.2	580.0	493.3	404.5
17	475.2	404.0	378.3	357.5	35	659.2	571.0	488.3	400.5
18	493.2	390.0	371.3	353.5	36	644.2	562.0	482.3	396.5



**Fig. 6.** Standard storage of Hwacheon dam over time per drought stage

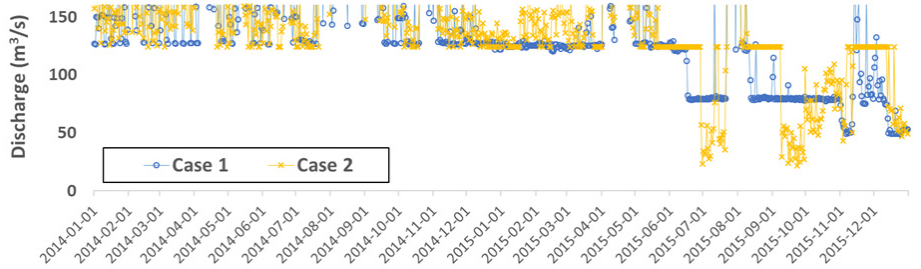
**Table 9.** Hydropower dam operation results comparison during drought years (2014~2017, 1,461 days) in Han river

Indicators		Case 1	Case 2	
Paldang dam discharge demand satisfaction	Unmet period (days)	493	149	
	Unmet volume (million m <sup>3</sup> )	1,455.3	809.0	
Hwacheon dam discharge demand satisfaction	Unmet period (days)	866	911	
	Unmet volume (million m <sup>3</sup> )	1,217.9	743.5	
Hwacheon dam drought stage violation period	Normal	Unmet period (days)	1,218	1,115
	Attention	Unmet period (days)	801	151
	Caution	Unmet period (days)	345	0
	Severe	Unmet period (days)	97	0
Hwacheon dam power generation	Average power generation (MWh/day)		330.9	322.5
	Minimum power generation (MWh/day)		0.0	88.0
	Standard deviation of daily power generation (MWh)		461.0	369.3

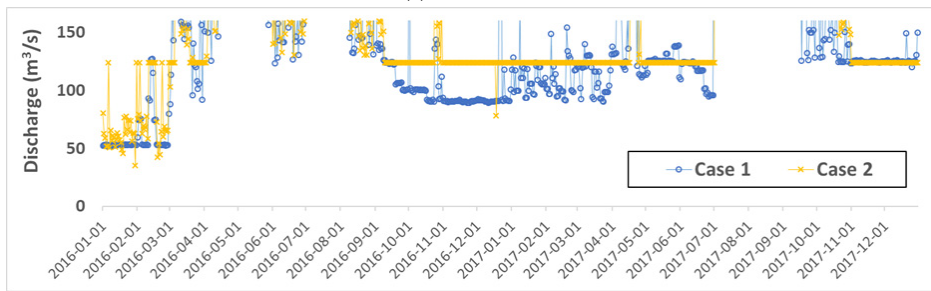
45일 더 많은 것으로 나타났다. 그러나, 공급 과부족량은 Case 2에서 743.5 백만 m<sup>3</sup>으로 Case 1의 1,217.9 백만 m<sup>3</sup> 대비 크게 감소하여 안정적인 용수공급 결과를 보였다.

한편, 가뭄단계별 화천댐의 기준저수량을 충족하지 못한 기간은 정상 및 관심, 주의, 심각 단계별로 Case 1에서 각각

1,218, 801, 345, 97일, Case 2에서 각각 1,115, 151, 0, 0일로 나타나 Case 2에서 화천댐 저수량을 꾸준히 유지하는 것으로 나타났으며, 특히 가뭄시 비상공급량 조절을 통해 주의 및 심각 단계에 진입하지 않는 결과를 보였다. 즉, 가뭄기간 내내 화천댐에서 관심단계 용수공급 기준인 17.76 m<sup>3</sup>/s 이상의 방류량

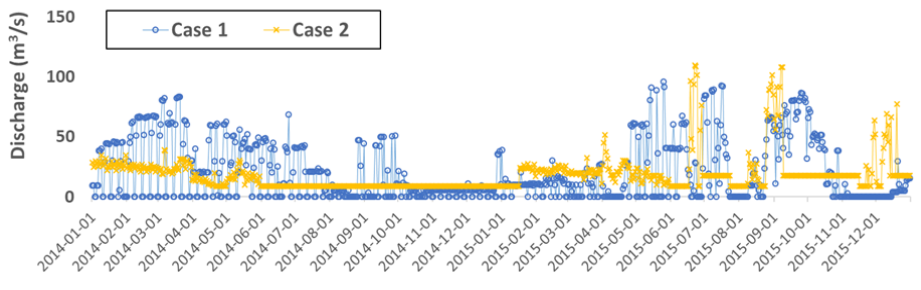


(a) 2014~2015

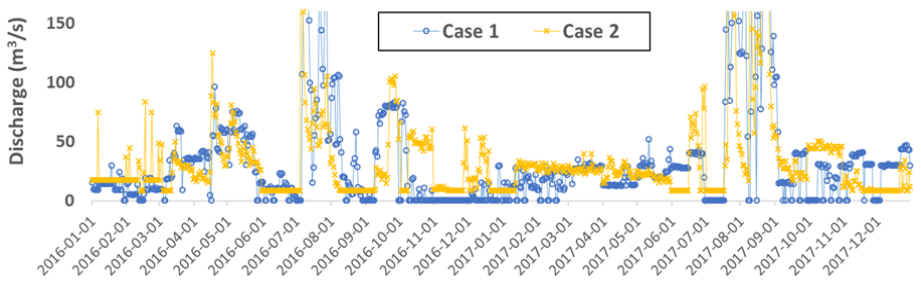


(b) 2016~2017

Fig. 7. Comparison of daily discharge of Paldang dam (2014~2017 years)



(a) 2014~2015



(b) 2016~2017

Fig. 8. Comparison of daily discharge of Hwacheon dam (2014~2017 years)

을 유지할 수 있으므로, 수계 내 하천유지유량을 대부분 만족하는 등 보다 안정적인 용수공급이 가능한 것으로 분석되었다. 또한, 분석대상 기간 내 화천댐의 발전량을 비교한 결과, Case 1의 연간 발전량은 약 120,780 MWh (일평균 330.9 MWh), Case 2의 연간 발전량은 117,712.5 MWh (일평균 322.5 MWh)로 나타나 매우 유사한 것으로 분석되었다. 하지만, Case 1의

경우 수력발전이 불가능한 기간이 존재하거나, 일 발전량의 편차(461.0 MWh)가 크게 발생한 반면, Case 2의 경우 제안된 단계별 방류량 조절을 통해 일 발전량의 편차가 369.3 MWh로 감소하여 수력발전의 지속성이 개선되는 것으로 분석하였다.

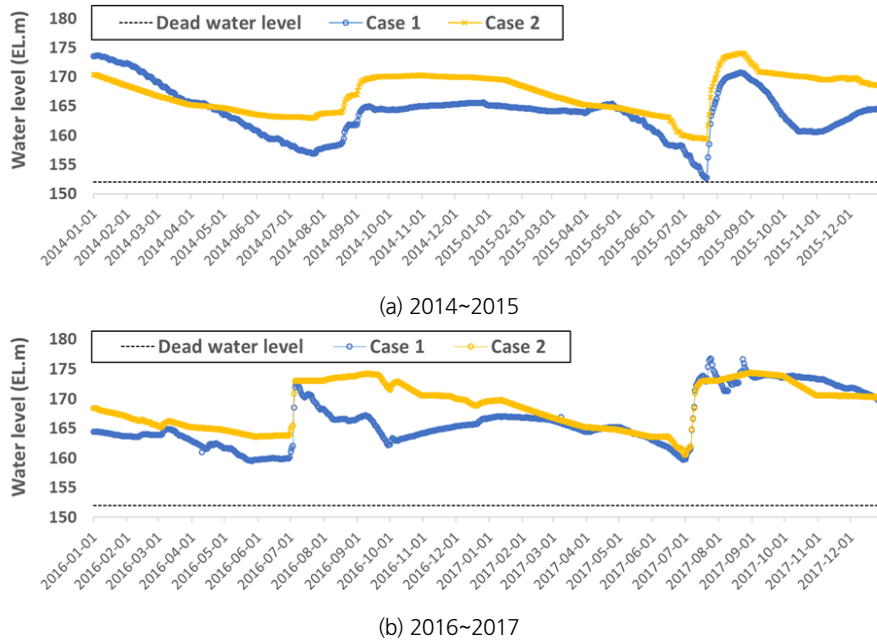


Fig. 9. Comparison of daily water level of Hwacheon dam (2014~2017 years)

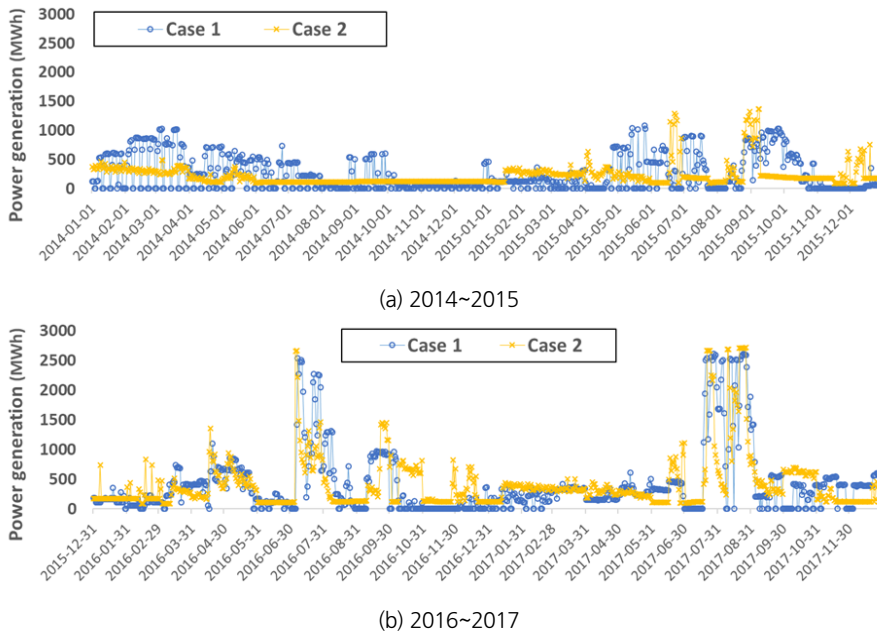


Fig. 10. Comparison of daily power generation of Hwacheon dam (2014~2017 years)

## 5. 결론

본 연구에서는 국내 발전용댐 이수능력 평가의 일환으로, 저류형 발전용댐의 가뭄단계별 기준저수량 및 방류량 조정 방안을 제안하고, 이를 한강수계 발전용댐 가뭄사례에 적용함으로써 그 적용 효과를 분석하였다. 먼저 한강수계 발전용댐의 방류량 조정 방안을 검토하기 위해 수계 내 주요 수요량 기준을 검토한 후, 저류형 발전용댐인 화천댐 유입량의 유황 수준을 검토하고, 이를 바탕으로 각각 관심, 주의, 심각 가뭄단계별 비상공급량 기준을 결정하였다. 또한 다목적댐의 가뭄단계별 기준저수량 산정 방법을 참고하여 가뭄시 발전용댐 비상공급량 및 기본수요량을 기준으로 저류형 발전용댐의 가뭄단계 판단을 위한 기준저수량 산정 방안을 제안하였으며, 구체적으로 화천댐의 가뭄단계별 기준저수량을 결정하였다. 본 연구에서 제안된 가뭄시 발전용댐 운영 방안을 적용한 한강수계 발전용댐의 가뭄단계별 방류량 조정 방안 및 기준저수량 산정 결과를 지난 2014~2017년 한강수계에서 발생한 가뭄사례에 적용하여 가뭄대응 효과를 분석한 결과는 각각 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 한강수계 발전용댐을 이용한 용수공급은 대부분 저류형 발전용댐인 화천댐을 통해 공급되는 것으로 나타났으며, 화천댐의 가뭄단계별 비상공급량은 북한강수계 내 하천 유지유량 및 하천수사용량, 화천댐의 유입량 유황 수준을 검토하여 각각 화천댐의 기본수요량( $22.2 \text{ m}^3/\text{s}$ )의 80% ( $17.76 \text{ m}^3/\text{s}$ , 관심단계), 60% ( $13.32 \text{ m}^3/\text{s}$ , 주의단계), 40% ( $8.88 \text{ m}^3/\text{s}$ , 심각단계)에 해당하는 공급량으로 결정하였다.
- 2) 평상시 기본수요량 및 가뭄단계별 비상공급량을 기준으로, 1987~2020년(34년) 기간의 수문조건에서 화천댐 이수안전도를 만족하는 순별 필요 저수량, 그리고 10일~15일의 무유입 용수 공급을 고려한 저수량을 바탕으로 화천댐의 가뭄단계별 기준저수량을 결정하였다.
- 3) 2014~2017년 한강수계에 발생한 가뭄사례를 재현하여 본 연구에서 제안된 가뭄시 발전용댐 운영방안의 적용 효과를 분석한 결과, 과거 실적 대비 팔당댐 책임방류량을 만족하지 못하는 기간 및 공급 과부족량이 감소하고, 화천댐 기본계획공급량의 과부족량이 감소하는 등 용수공급이 전반적으로 개선되는 것으로 나타났다. 특히, 가뭄단계별 제안된 비상공급량 조절을 통해 화천댐 수위가 안정적으로 유지되어 주의 및 심각 단계 가뭄은 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 수력발전의 지속성이 개선되는 등 가뭄시 용수공급 안정성이 개선되는 것으로 분석되었다.

최근 발전용댐의 다목적 활용이 주목받고 있는 상황에서, 발전용댐의 수력발전 역량을 유지하면서 이·치수 목적에 효과적으로 기여하기 위해서는 앞으로 많은 연구가 필요할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 기존 다목적댐 및 용수전용댐을 대상으로 마련된 국내 댐 가뭄대응 운영 기준을 참고하여, 발전용댐의 운영 여건을 고려한 발전용댐 가뭄대응 운영방안을 제시하고, 그 효과를 분석하였다. 본 연구 결과는 발전용댐의 용수공급능력 검토 및 이수목적의 활용방안 마련에 폭넓게 기여할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 1) 한국수력원자력(주) 「발전용댐 이·치수 능력검토 및 수문학적 안정성 평가 용역」의 지원과 2) 환경부 「기후변화특성화대학원사업」의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Bayazit, M., and Unal, N.E. (1990). "Effects of hedging on reservoir performance." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 4, pp. 713-719.
- Choi, J., Jeong, G., Kang, D., Ahn, J., and Kim, T. (2021). "Classification of hydropower dam in North-han River based on water storage characteristics." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 8, pp. 567-576.
- Choi, Y., Lee, E., Ji, J., Ahn, J., Kim, T., and Yi, J. (2020). "Development and evaluation of the hydropower reservoir rule curve for a sustainable water supply." *Sustainability*, Vol. 12, No. 22, 9641.
- Draper, A.J., and Lund, J.R. (2004). "Optimal hedging and carryover storage value." *Journal of Water Resources and Management*, Vol. 130, No. 1, pp. 83-87.
- Jin, Y., Jeong, T., and Lee, S. (2021). "Analysis and comparison of the water supply adjustment guide and a hedging rule of reservoir operation derived from mixed-integer programming for water supply operation of a multi-purpose reservoir." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 6, pp. 443-452.

- Kim, H.S., Park, J.H., Kang, S.U., and Jang, S.H. (2019). "Improvement and evaluation of multi-purpose dam operation rule considering climate change." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 21, No. Spc, pp. 9-15.
- Kim, J.M., Park, J.H., Jang, S.H., and Kang, H.W. (2018). "Development and effective analysis of termination criteria at each drought response stage in a multipurpose dam." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 5, pp. 23-31.
- Lee, D. (2018). *Water supply adjustment guideline for single-purpose dam against drought*. Master Thesis, Kyungpook National University.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2015). *Improvement report of water supply adjustment criteria*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2016). *Improvement report of water supply adjustment criteria*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2018). *Improvement report of water supply adjustment criteria*.
- Shih, J.S., and Revelle, C.S. (1995). "Water supply operations during drought: A discrete hedging rule." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 82, pp. 163-175.
- Tayebiyani, A., Mohammad, T.A., Al-Ansari, N., and Malakootian, M. (2019). "Comparison of optimal hedging policies for hydropower reservoir system operation," *Water*, Vol. 11, No. 1, 121.
- Tu, M.T., Hsu, N.S., Tsai, F.T.C., and Yeh, W.W.G. (2008). "Optimization of hedging rules for reservoir operations." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 134, No. 1, pp. 3-13.
- US Army Corps of Engineers (USACE) (1998). *HEC-5, simulation of flood control and conservation systems, user's manual*. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC). Davis, CA, U.S.
- US Army Corps of Engineers (USACE) (2021). *HEC-ResSim: Reservoir system simulation user's manual version 3.3*. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC). CPD-82, Davis, CA, U.S.
- Zhou, Y., and Guo, S. (2013). "Incorporating ecological requirement into multipurpose reservoir operating rule curves for adaptation to climate change." *Journal of Hydrology*, Vol. 498, pp. 153-164.