



## Evaluation of hydropower dam water supply capacity (I): individual and integrated operation of hydropower dams in Bukhan river

Jeong, Gimoon<sup>a</sup> · Choi, Jeongwook<sup>b</sup> · Kang, Doosun<sup>c\*</sup> · Ahn, Jeonghwan<sup>d</sup> · Kim, Taesoon<sup>e</sup>

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

<sup>b</sup>Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea

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

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

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

Paper number: 22-035

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

### Abstract

Recently, uncertainty in predicting available water resources is gradually increasing due to climate change and extreme weather conditions. Social interest in water management such as flood and drought prevention is also increasing, and after the unification of water management implemented in 2018, domestic water management is facing a major turning point. As part of such strengthening of water management capabilities, various studies are being conducted to utilize a hydropower dam for flood control and water supply purposes, which was mainly operated for hydroelectric power generation. However, since the dam evaluation methods developed based on a multi-purpose dam are being applied to hydropower dams, an additional evaluation approach that can consider the characteristics of hydropower dams is required. In this study, a new water supply capacity evaluation method is presented in consideration of the operational characteristics of hydropower dams in terms of water supply, and a connected reservoir simulation method is proposed to evaluate the comprehensive water supply capacity of a dam group operating in a river basin. The presented method was applied to the hydropower dams located in the Bukhan River basin, and the results of the water supply yield of individual dams and multi-reservoir systems were compared and analyzed. In the future, the role of hydropower dams for water supply during drought is expected to become more important, and this study can be used for sustainable domestic water management research using hydropower dams.

**Keywords:** Climate change, Hydropower dam, Multi-reservoir system, Reservoir simulation, Water supply yield

## 발전용댐 이수능력 평가 연구(I): 북한강수계 개별 댐 및 댐군 용수공급능력 분석

정기문<sup>a</sup> · 최정욱<sup>b</sup> · 강두선<sup>c\*</sup> · 안정환<sup>d</sup> · 김태순<sup>e</sup>

<sup>a</sup>한국농어촌공사 농어촌연구원 선임연구원, <sup>b</sup>경희대학교 사회기반시스템공학과 박사과정, <sup>c</sup>경희대학교 사회기반시스템공학과 교수,

<sup>d</sup>한국수력원자력(주) 한강수력본부 수자원관리부 차장, <sup>e</sup>한국수력원자력(주) 한강수력본부 수자원관리부 부장

### 요 지

최근 기후변화 및 기상이변 등으로 인해 가용 수자원 예측의 불확실성이 점차 커져가고 있다. 홍수 및 가뭄 예방 등 물관리에 대한 사회적 관심 또한 증가하고 있으며, 2018년 시행된 물관리일원화와 더불어 국내 물관리는 큰 전환점을 맞이하고 있다. 이러한 물관리 역량 강화의 일환으로, 과거 수력 발전을 중심으로 운영되었던 발전용댐을 이·치수 목적으로 활용하기 위한 다양한 검토가 이루어지고 있다. 그러나, 주로 다목적댐을 대상으로 개발된 댐 평가 기법들이 발전용댐에 그대로 적용되고 있어, 발전용댐의 특성을 고려할 수 있는 추가적인 평가기법이 요구된다. 본 연구에서는 저수지 운영모의 방법을 활용하여 이수 측면에서 발전용댐의 운영 특성을 고려한 댐별 용수공급능력 산정 방법을 새롭게 제시하였으며, 여러댐이 상하류에 걸쳐 운영되고 있는 조건에서 연계 댐군의 종합적인 용수공급능력을 평가할 수 있는 저수지 연결모의 방법을 제시하였다. 제시된 방법은 북한강수계 발전용댐을 대상으로 적용되었으며, 개별 댐의 용수공급능력 산정 결과와 댐군 연결모의를 통한 용수공급능력을 비교 분석하였다. 향후 발전용댐의 가뭄시 물 공급 역할은 더욱 중요해질 것으로 예상되며, 본 연구 결과는 발전용댐을 활용한 지속가능한 국내 물 관리 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어:** 기후변화, 발전용댐, 연계 댐군, 용수공급능력, 저수지 운영모의

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

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

## 1. 서론

발전용댐은 저류된 댐 용수를 활용한 수력발전을 주목적으로 건설되었으나, 댐 구조물 특성상 저류공간을 활용하여 이·치수 활동에 기여할 수 있는 수공 구조물이다. 최근 국내에서는 기후변화 및 이상기후 등으로 인해 홍수·가뭄 위협이 증가하고 있어 지속가능한 통합물관리를 위한 발전용댐의 이·치수 능력에 대한 기대가 높아지고 있다. 국내에서 수공 구조물을 활용한 이수능력의 평가는 용수공급댐 및 다목적댐, 다기능보 등의 용수공급능력 산정을 중심으로 이루어져 왔으며, 그 대표적인 연구사례는 다음과 같다.

과거 건설교통부(Ministry of Construction and Traffic, MOCT)와 K-water에서는 한강수계에 건설된 다목적댐 및 일부 수력발전댐(화천댐 등)을 대상으로 용수공급능력 및 홍수조절기능을 전면 평가하였다(MOCT and K-water, 1997). 그러나 댐의 용수공급능력은 분석 대상기간의 수문조건 및 퇴사로 인한 댐 저류공간의 감소 등 시간이 경과함에 따라 다르게 평가될 수 있으며, 따라서 MOCT and K-water (2010, 2011), MOLIT and K-water (2016) 등 국내 댐들의 용수공급능력을 지속적으로 재평가하고 있다.

이와 같은 댐 용수공급능력 평가 연구는 주로 다목적댐을 중심으로 이루어져 왔으며, 구체적인 용수공급능력 산정 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 먼저, 일정량 공급방식(firm-supply)은 실제 댐 방류여건을 고려하여 정해진 기간 또는 댐 저수량 현황 등을 고려하여 일정한 규모의 방류량을 지속적으로 유지하는 방식으로, 댐 유입량 조건이 주어졌을 때 저수지 모의운영을 통해 산정된 댐의 용수공급 가능량을 산정한다. K-water (2012)는 이러한 일정량 공급방식 기반 용수공급능력 산정 절차를 상세하게 제시한 바 있으며, Lee *et al.* (2012), Ahn *et al.* (2016) 등의 연구는 낙동강에 위치한 다목적댐인 안동댐과 임하댐, 그리고 합천댐 등에 해당 방법을 활용한 대표적인 연구사례이다.

반면, 부족분 공급방식(deficit-supply)은 댐 하류에서의 용수수요량을 바탕으로 각 단위기간별로 실제 필요한 용수량을 정확히 공급하는 방식으로, 마찬가지로 댐 유입량 조건이 주어졌을 때, 유역 물 배분 모의 등을 통해 산정된 댐의 용수공급 가능량을 산정한다. Lee *et al.* (2014), Jeong *et al.* (2019), Choi *et al.* (2020) 등의 연구는 다양한 규모의 국내 수계를 대상으로 해당 방법을 활용하여 댐별 용수공급가능량 및 물 부족량 등을 산정한 대표적인 연구사례이다. 이때, 부족분 공급방식의 경우 최적화 기법을 바탕으로 수계 내 댐 용수를 가장 효율적으로 공급할 수 있어, 일정량 공급방식 대비 댐의 용수공급능

력이 더 높게 도출될 수 있으나, 댐 하류의 용수수요량 및 유입량 조건을 정확히 파악할 수 없어 구체적인 댐별 용수공급능력 보다는 수계 단위 용수 확보/부족량 평가에 적합한 것으로 알려져 있다.

국외에서는 단순한 Tank 모형부터 최적화 기법을 활용한 용수공급 모형까지 댐 구조물의 용수공급능력을 평가하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔으며, 최근 연구들에서는 불확실성을 고려한 용수공급능력 평가에도 주목하고 있다. 대표적으로 Vogel *et al.* (2007)은 댐 유입량과 댐 저수용량, 용수공급능력의 관계를 분석하였으며, 이를 일반화하여 댐 구조물의 설계 및 운영에 간편히 활용하고자 하였다. 또한, 국내에서는 댐 용수공급능력 산정시 이수안전도 95%의 공급안정성을 적용하고 있으나, Zeraebuk *et al.* (2017)의 연구에서는 공급안정성에 따른 용수공급능력 변화를 분석하는 등 다양한 유형 및 공급목표에 대하여 댐 용수공급능력을 평가한 바 있다.

앞서 소개한 바와 같이 국내에서는 여러 차례 다목적댐의 용수공급능력을 평가한 바 있으며, 이때 일부 발전용댐을 대상으로 용수공급능력 평가가 이루어졌으나, 단순히 다목적댐과 동일한 방법을 적용하였으며, 발전용댐의 구조적 특성 및 발전량 등을 고려한 연구는 본격적으로 이루어진 바 없다. 일례로, Choi *et al.* (2021)은 발전용댐의 수력발전 용도에 주목하여 다목적댐에 비해 댐 저류공간이 작은 경우가 많으며, 이를 비저류형(Run-of-river type) 댐으로 분류하고, 저류용량을 바탕으로 용수공급에 기여하는 다목적댐 중심의 용수공급능력 산정 기법이 부적합할 수 있음을 지적하였다. 본 연구에서는 이처럼 수위 유지를 통해 용수공급에 기여하는 비저류형 발전용댐의 특성을 고려하여 북한강수계에 위치한 발전용댐의 용수공급능력을 산정하였다. 또한, 북한강수계와 같이 다수의 댐이 연속하여 위치한 상황에서, 각 발전용댐이 용수공급을 위주로 운영되었을 때 확보할 수 있는 댐군 총 용수공급능력을 산정함으로써 상·하류 댐 연계에 의한 이수효과를 함께 분석하였다.

본 논문은 구체적으로 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 정확한 댐별 용수공급능력을 평가하기 위한 자기유입량 산정 방법(2.1절), 저류형 및 비저류형 발전용댐의 구조적 차이(2.2절)를 소개하고, 저수지 운영모의 방법을 통해 저류형과 비저류형 발전용댐의 용수공급능력을 산정하는 방법(2.3절 및 2.4절)을 각각 서술하였다. 3장에서는 수계를 통해 연결된 상·하류 발전용댐군의 총 용수공급능력을 산정하기 위한 저수지 연결모의 방법을 제시하였다. 4장에서는 본 연구의 적용대상 수계인 북한강수계의 구조를 소개하고 다양한 용수공급능력 산정 결과를 분석하였으며, 마지막으로 5장을 통해 연구결과를 요약하고 향후 관련 연구의 확장 및 활용 방향을 제시하였다.

## 2. 저류 특성을 고려한 발전용댐 용수공급능력 산정 방법

### 2.1 댐별 자기유입량 산정

댐 시설물의 용수공급능력은 해당 댐의 유입량을 바탕으로 댐을 활용하여 안정적으로 공급할 수 있는 용수의 규모를 의미한다. 실제로 하천에 다수의 댐이 건설되어 있는 경우, 상류댐의 방류량이 하류댐에 유입될 수 있으므로, 각 댐에서의 유입량을 그대로 적용할 경우, 하류댐의 용수공급능력이 상류댐의 용수공급능력을 일부 포함하는 중복 산정 문제가 발생한다. 따라서, 각 댐별 용수공급능력을 정확히 산정하기 위해서는 해당 댐 유역 자체에서 발생한 자기유입량을 먼저 산정할 필요가 있다.

댐 시설에서는 유입량, 방류량 등의 유량 자료를 관측하여 수집하고 있으므로, 댐별 자기유입량은 기본적으로 해당 댐의 관측유입량에서 상류댐의 관측방류량을 제외함으로써 산정할 수 있으며 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{self} = I_{obs} - \sum_{i=1}^N O_{obs,i} \quad (1)$$

여기서,  $I_{self}$  : 댐 자기유입량( $m^3/s$ ),  $I_{obs}$  : 댐 관측유입량( $m^3/s$ ),  $N$  : 직상류댐의 개수,  $O_{obs,i}$  :  $i$  번째 직상류댐의 관측방류량( $m^3/s$ ).

Fig. 1은 다수의 댐이 관여하는 임의의 하천 수계를 나타내고 있으며, 각 댐별로 구체적인 자기유입량을 산정하는 과정은 다음과 같이 설명할 수 있다. 먼저, Dam A와 C는 상류댐이 존재하지 않는 최상류댐이므로, 각 댐에서의 관측유입량이 모두 댐별 자기유입량에 해당한다. Dam B의 경우 상류댐인 Dam A가 존재하므로, Dam B에서의 관측유입량에서 Dam A의 관측방류량을 제외함으로써 자기유입량을 산정할 수 있다. 마지막으로 Dam D는 상류댐인 Dam C와 Dam B, 그리고 Dam A가

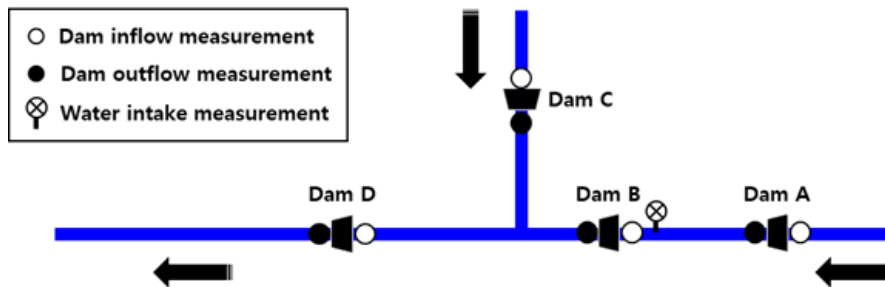


Fig. 1. Scheme of connected dams in a river basin

존재하지만, 수계 구조상 Dam A는 직상류댐이 아니므로 Dam D의 자기유입량은 Dam D의 관측유입량에 직상류댐인 Dam B와 Dam C의 관측방류량을 제외함으로써 산정할 수 있다.

### 2.2 저류형 및 비저류형 발전용댐의 용수공급 구조

이수 및 치수 등의 다양한 목적을 고려하여 건설된 다목적댐의 경우, 댐 시설의 저류 공간이 기본적으로 큰 규모를 가지며, 갈수기 용수공급을 위해 댐의 저류공간을 최대한 활용할 수 있는 저류형 특성이 크게 나타난다. Fig. 2는 이러한 저류형 댐의 일반적인 운영수위 구조를 나타내고 있으며, 각각 댐 최대 계획수위(Maximum design level), 평상시 운영 기준인 상시만수위(Normal operation level), 홍수기 유입량에 대비한 홍수조절수위(Flood control level), 댐 방류구 높이에 따른 저수위(Minimum operation level), 비상 방류구가 존재하는 경우 해당 높이에 따른 사수위(Dead water level) 등으로 구분할 수 있다. 다목적댐과 같은 저류형댐의 경우, 용수공급을 위해 통상적으로 상시만수위부터 저수위까지에 해당하는 유효저수량을 활용하고 있다.

다목적댐과 다르게 수력발전을 주요 목적으로 건설된 발전용댐의 경우, 댐 시설의 저류 규모가 상대적으로 작은 경우가 많으며, 발전을 위한 댐 운영수위 유지가 중요하다. 따라서,

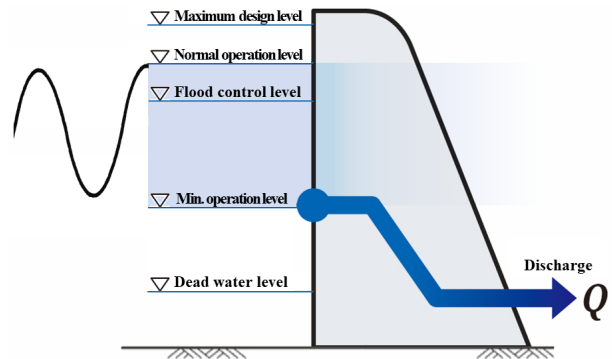


Fig. 2. Operation water levels of a storage type dam

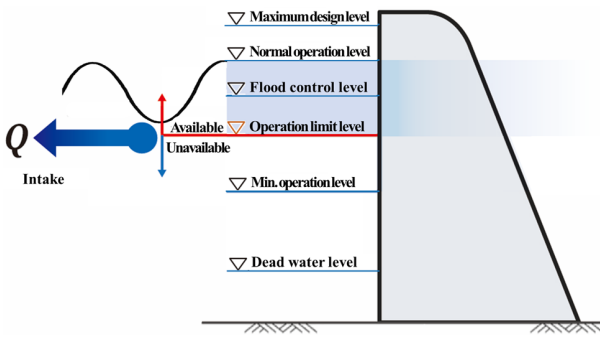


Fig. 3. Operation water levels of a run-of-river type dam

대부분의 발전용댐은 저류공간을 활용한 하류 지역으로의 용수공급보다는 해당 댐의 수위유지를 통한 발전 및 취수에 주목할 필요가 있다. Choi *et al.* (2021)은 북한강수계에 위치한 다섯 개의 발전용댐을 대상으로 1) 유입량 대비 저류용량의 규모, 2) 저류/방류 활동의 빈도, 3) 댐 운영의 용수공급 기여도 등을 분석하여 각 발전용댐의 유형을 평가한 바 있다. 해당 연구결과, 화천댐은 저류형댐으로 분류되었고, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐은 모두 비저류형댐으로 분류되었다. 여기서 비저류형 발전용댐으로 구분된 댐들의 경우 댐 저류공간을 활용한 용수공급보다 수위 유지에 따른 용수공급 효과가 더 현실적인 용수공급능력에 해당하는 것으로 이해할 수 있다. Fig. 3은 발전, 취수 등의 목적으로 인해 제약되는 댐 수위, 즉 하한운영수위(Operation limit level)를 포함한 운영수위 구조와 함께, 비저류형 발전용댐에서의 용수공급(취수 등)이 하한운영수위를 중심으로 이루어짐을 나타내고 있다.

2.3 저류형 발전용댐 용수공급능력 산정

본 연구에서는 저류형 발전용댐 용수공급능력 산정을 위해 기존 다목적댐 용수공급능력 산정에 여러 차례 활용된 바 있는 저수지 모의운영 방법을 활용하였다. K-water (2012) 및 Lee *et al.* (2012) 등의 연구에서는 HEC-5(USACE, 1998) 및 HEC-ResSim (USACE, 2021) 등 저수지 운영 모형을 활용하여 수자원시설물의 용수공급능력을 산정하는 방법을 자세히 다루고 있다. 본 연구에서는 기존 다목적댐 용수공급능력 산정 방법과 동일한 방법으로, HEC-ResSim 모형을 활용한 20년의 모의운영을 통해 저류형 발전용댐의 용수공급능력을 산정하였으며, 구체적인 절차는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 주요 운영수위 및 수위-저수용량 곡선, 수위-방류량 곡선 등 댐 제원 입력
- 2) 분석 대상기간(20년) 댐 자기유입량 자료 입력
- 3) 저수지 모의운영 조건 입력 및 HEC-ResSim을 이용한

저수지 모의운영 수행

- 3-1) 댐 유입량의 유입 후 댐 수위가 상한수위보다 높은 경우, 상한수위 초과 저류량과 상시방류량 중 더 큰 수량을 방류량으로 결정. 여기서, 상한수위는 홍수기(매년 6.20~9.19)의 경우 홍수조절수위 적용, 비홍수기의 경우 상시만수위 적용
- 3-2) 댐 유입량의 유입 후 댐 수위가 상한수위보다 낮고 저수위보다 높은 경우, 저수위 초과 저류량과 상시방류량 중 더 작은 수량을 방류량으로 결정
- 4) 저수지 모의운영 결과를 바탕으로 용수공급의 연간 방류-이수안전도(Eq. (2)) 산정

이때, 용수공급능력 산정 기준은 연간 방류-이수안전도 방법으로 95%(즉, 물부족 발생년도가 20년간 1회 발생)의 이수안전도를 적용하였으며, 따라서 전체 모의운영 기간 20년 중 19개년도 이상에서 항상 공급할 수 있는 상시방류량을 해당 댐의 용수공급능력으로 산정하였다.

$$R(q)_Y = \left(1 - \frac{N(q)_Y}{T_Y}\right) \times 100 \tag{2}$$

여기서,  $R(q)_Y$ : 연간 방류-이수안전도(%),  $N(q)_Y$ : 댐 방류량이 상시방류량을 만족하지 못한 기간이 포함된 연도의 개수,  $T_Y$ : 총 저수지 운영모의 연도의 개수.

2.4 비저류형 발전용댐 용수공급능력 산정

현재까지 댐 시설물의 용수공급능력 산정 연구는 다목적댐, 즉 저류형 댐을 중심으로 이루어졌으며, 비저류형 댐의 운영수위 여건을 고려한 용수공급능력 산정은 수행된 바 없다. 본 연구에서는 저수지 모의운영을 바탕으로 비저류형 발전용댐의 용수공급능력을 산정하기 위한 방법을 다음과 같이 제시하였다. 제시된 산정 절차는 저류형 발전용댐의 용수공급능력 산정과 전반적으로 유사한 구조를 가지며, 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) **주요 운영수위(하한운영수위 포함)** 및 수위-저수용량 곡선, 수위-방류량 곡선 등 댐 제원 입력
- 2) 분석 대상기간(20년) 댐 자기유입량 자료 입력
- 3) 저수지 모의운영 조건 입력 및 HEC-ResSim을 이용한 저수지 모의운영 수행
  - 3-1) 댐 유입량의 유입 후 댐 수위가 상한수위보다 높은 경우, 상한수위 초과 저류량과 **상시취수량** 중 더 큰 수량을 방류량으로 결정

3-2) 댐 유입량의 유입 후 댐 수위가 상한수위보다 낮고 하한운영수위보다 높은 경우, 하한운영수위 초과 저류량과 상시취수량 중 더 작은 수량을 방류량으로 결정

4) 저수지 모의운영 결과를 바탕으로 용수공급의 연간 수위-이수안전도(Eq. (3)) 산정

저류형과 비저류형 발전용댐 용수공급능력 산정 절차의 차이점은 구체적으로 1) 저수지 모의운영 시 하한운영수위의 적용 여부 및 2) 이수안전도 산정 방법의 차이로 구분할 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이, 비저류형 발전용댐의 경우 상대적으로 작은 저류공간과 댐 수위 제약으로 인해 상시만수위부터 저수위까지의 저류공간을 모두 활용할 수 없으며, 따라서 용수공급이 제한되는 수위를 기존의 저수위가 아닌 하한운영수위로 적용하였다. 또한, 이수안전도 산정 시, 방류량과 상시방류량을 바탕으로 용수공급부족을 판단하는 기존 방류-이수안전도 방법과 다르게, Eq. (3)과 같이 비저류형 댐의 수위 유지 목적을 고려하여 댐 수위와 하한운영수위를 바탕으로 용수공급부족을 판단하는 수위-이수안전도 방법을 함께 제시하고, 적용하였다. 이때, 용수공급능력 산정 기준은 연간 수위-이수안전도 95%를 만족하는 상시취수량을 해당 댐의 용수공급능력으로 산정하였다.

$$R(w)_Y = \left( 1 - \frac{N(w)_Y}{T_Y} \right) \times 100 \quad (3)$$

여기서,  $R(w)_Y$ : 연간 수위-이수안전도(%),  $N(w)_Y$ : 댐 수위가 하한운영수위보다 낮은 기간이 포함된 연도의 개수.

### 3. 발전용댐군 총 용수공급능력 산정 방법

앞서 산정된 저류형 및 비저류형 발전용댐의 용수공급능력은 개별 댐에서의 자기유입량만을 고려한 개별 저수지 모의운영을 통해 산정된다. 그러나, 상류댐의 방류량 중 일부는 상류댐의 용수공급능력에 해당하는 상시방류량을 초과하는 방류량, 즉 초과방류량을 포함하므로 상류댐의 용수공급능력을 제외하더라도 하류댐의 용수공급능력에 기여할 수 있는 것으로 판단할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 4에 나타난 것과 같이 상류댐의 방류량 중 초과방류량을 하류댐의 유입량에 포함시키는 저수지 연결모의 방법을 제시하였으며, 이를 바탕으로 동일수계 내 발전용댐군의 총 용수공급능력을 산정하였다.

구체적으로, 상류댐의 초과방류량은 개별 저수지 운영에 따른 방류량 결과 중 댐의 용수공급능력에 해당되는 상시방류량 또는 상시취수량을 제외한 나머지 방류량이며, 중간댐에서는 해당댐의 자기유입량과 직상류댐의 초과방류량을 합산한 유입량을 기준으로 다시 저수지 운영을 수행하여 용수공급능력을 산정하며, 재산정된 상시방류량 또는 상시취수량을 제외한 나머지 방류량을 해당 중간댐의 초과방류량으로 계산하여 하류댐으로 연결한다. 따라서, 저수지 연결모의를 통해 산정된 댐별 용수공급능력의 총합은 각 댐별 용수공급능력이 중복되지 않는 동시에 수계 내 상하류댐의 연계를 고려한 댐군의 총 용수공급능력을 의미한다.

### 4. 적용 및 결과

#### 4.1 적용대상 발전용댐 현황

본 연구에서는 화천댐부터 춘천댐, 의암댐, 청평댐을 거쳐 팔당댐까지 북한강수계 내 다섯 개 발전용댐을 대상으로 제안된 연구방법을 통해 저류형/비저류형 개별 댐 용수공급능력

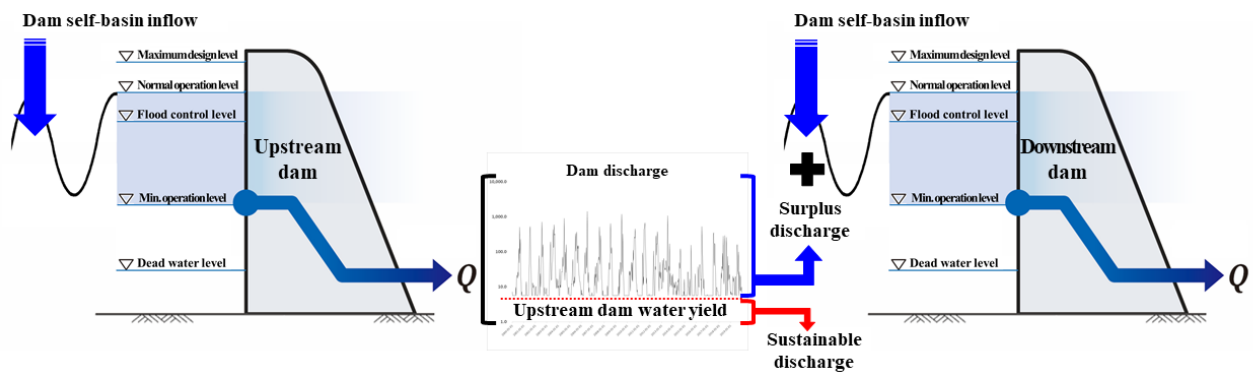


Fig. 4. Conveyance of surplus discharge in connected reservoirs simulation

및 북한강수계 발전용댐군의 총 용수공급능력을 산정하였다. Fig. 5는 대상지역 내 최하류댐인 팔당댐과 관계된 북한강수계 및 일부 남한강수계의 구조를 나타내고 있다. 북한강수계에서는 먼저 홍수조절댐인 평화의댐을 거쳐, 발전용댐인 화천댐, 춘천댐 순서로 댐 시설이 위치하고 있다. 춘천댐 방류 이후, 북한강은 소양강댐 방류량을 포함하는 소양강과 합류한 후, 의암댐을 거쳐 청평댐으로 유입된다. 청평댐 방류 이후, 북한강은 남한강과 합류하여 팔당댐으로 유입되며, 이때 남한강에서는 다목적댐인 황성댐과 충주댐, 그리고 발전용댐인 괴산댐의 방류량 등이 팔당댐 유입량에 관여한다.

위와 같은 수계 구조를 바탕으로, 다섯 개 적용대상 발전용댐의 자기유입량을 산정할 수 있으며, 따라서 개별 댐 및 발전용댐군의 용수공급능력을 산정하기 위한 저수지 모의운영을 수행할 수 있다. Table 1은 HEC-ResSim을 통해 저수지 모의운영을 수행하기 위한 다섯 개 발전용댐의 주요 운영수위를 정리한 표로써, 저류형 발전용댐인 화천댐에서는 상시만수

위, 홍수조절수위, 저수위 등을 조사하였으며, 비저류형 발전용댐인 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐에서는 댐 용수를 이용하기 위해 요구되는 수위 제약인 하한운영수위를 함께 조사하고 적용하였다. 이때, 팔당댐의 경우 제원상 저수위는 25.0 m로 적용하고 있으나, 실제 운영은 인근 취수 활동이 제약되는 24.7 m의 하한운영수위까지 이루어지는 것으로 조사되었다.

**4.2 발전용댐별 자기유입량 산정 결과 분석**

먼저 화천댐 자기유입량 산정 시 상류에 위치한 평화의댐 방류량을 고려할 필요가 있다. 그러나 평화의댐에서는 별도의 수문조작 없이 배수터널을 통해 그대로 용수를 방류하고 있으므로, 화천댐의 유입량에 영향을 미치는 운영 행위가 발생하지 않아 자연유량과 같이 해석할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 화천댐 관측유입량을 그대로 화천댐의 자기유입량으로 적용하였다. 춘천댐의 경우, 상류댐인 화천댐이 춘천댐 유입량에 직접적인 영향을 줄 수 있으므로, 춘천댐 관측유입량에서 화천댐 관측방류량을 제외함으로써 춘천댐의 자기유입량을 산정하였다. 의암댐의 경우, 상류에서 북한강과 소양강이 합류하여 각각 춘천댐, 소양강댐 방류량이 의암댐에 유입되므로, 의암댐 관측유입량에 춘천댐, 소양강댐 관측방류량

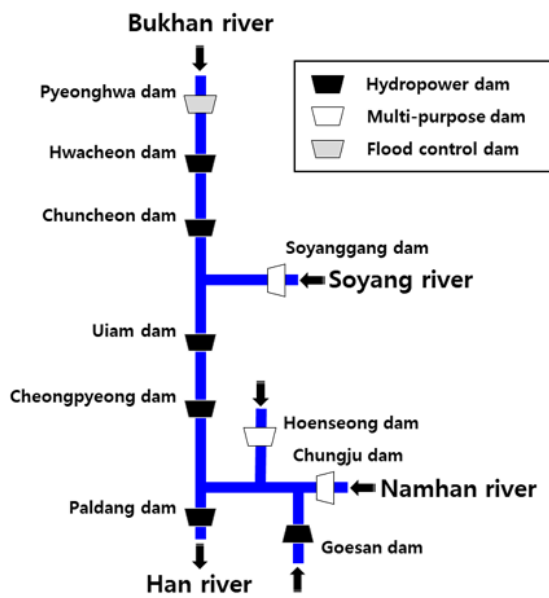


Fig. 5. Schematic diagram of dam connections in the Bukhan river basin

Table 2. Calculation of dam self-basin inflow

Dams	Calculation
Hwacheon dam	Inflow (Hwacheon dam)
Chuncheon dam	Inflow (Chuncheon dam) - Outflow (Hwacheon dam)
Uiam dam	Inflow (Uiam dam) - Outflow (Chuncheon dam) - Outflow (Soyanggang dam)
Cheongpyeong dam	Inflow (Cheongpyeong dam) - Outflow (Uiam dam)
Paldang dam	Inflow (Paldang dam) + Intake (Paldang dam) - Outflow (Cheongpyeong dam) - Outflow (Goesan dam) - Outflow (Chungju dam) - Outflow (Hoengseong dam)

Table 1. Specification of operation water levels of the hydropower dams in Bukhan river basin

Dams	Normal operation level (El. m)	Flood control level (El. m)	Operation limit level (El. m)	Min. operation level (El. m)
Hwacheon dam	181.0	175.0	-	156.8
Chuncheon dam	103.0	102.0	98.0	98.0
Uiam dam	71.5	70.5	69.5	66.3
Cheongpyeong dam	51.0	50.0	49.25	46.0
Paldang dam	25.5	25.0	24.7	25.0

**Table 3.** Results of dam self-basin inflow

Dams	Observed dam inflow (million m <sup>3</sup> /yr)	Dam self-basin inflow (million m <sup>3</sup> /yr)	Self-basin area (km <sup>2</sup> )	Specific dam self-basin inflow (million m <sup>3</sup> /yr/km <sup>2</sup> )
Hwacheon dam	1,651.2	1,651.2	1,700.1	0.96
Chuncheon dam	2,361.2	711.8	775.0	0.92
Uiam dam	4,730.7	256.0	280.8	0.91
Cheongpyeong dam	6,271.5	1,539.3	2,268.3	0.68
Paldang dam	15,095.9	4,865.1	6,107.3	0.80

을 제외하여 의암댐 자기유입량을 산정하였다. 청평댐 자기유입량은 청평댐 관측유입량에서 상류댐인 의암댐의 관측방류량을 제외함으로써 산정하였다. 팔당댐의 경우, 상류에서 북한강과 남한강이 합류하여 발전용댐인 청평댐, 괴산댐, 다목적댐인 충주댐, 횡성댐 방류량이 팔당댐에 유입되므로, 팔당댐 관측유입량에서 이들 상류댐 관측방류량을 제외하고, 팔당댐에서의 광역 취수량을 더하여 자기유입량을 산정하였다. Table 2는 각 발전용댐의 자기유입량 산정 방식을 요약하여 나타낸 표이다.

본 연구에서는 2001~2020년 기간의 20년에 해당하는 각 발전용댐 및 다목적댐의 일 단위 관측유입량 및 관측방류량 자료를 수집하여 적용대상 발전용댐의 자기유입량을 각각 산정하였다. 이때, 일 단위 관측자료를 사용할 경우, 상류댐의 방류량이 하류댐에 도달하기까지의 소요시간을 고려할 수 없는 등 정확도가 저하될 수 있으므로, 순(10일 평균)단위 자기유입량을 산정하였다. Table 3은 다섯 개 발전용댐에서의 연간 관측유입량, 자기유입량 및 자기유역면적, 비자기유입량을 각각 정리하여 나타낸 표이다. 먼저 관측유입량의 경우 상류댐의 방류량과 각 댐 유역에서의 유입량이 누적되어 상류댐에서 하류댐으로 갈수록 관측유입량이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면, 자기유입량을 산정함으로써 상류댐의 영향을 배제하고 각 발전용댐에서 이용 가능한 유입량 규모를 확인할 수 있으며, 비자기유입량의 경우 단위면적(km<sup>2</sup>)당 연간 0.68~0.96 백만 m<sup>3</sup> 범위로 유사한 수준의 비자기유입량 규모를 갖는 것으로 나타났다. 이때, 청평댐 및 팔당댐 유역에서는 지방 취수 시설이 다수 분포한 것으로 조사되었으며, 따라서 이들 발전용댐의 관측유입량에 해당 취수량이 제외됨으로써 비자기유입량이 상대적으로 낮게 산정된 것으로 분석되었다. 이러한 지방 취수는 불규칙하게 발생하고 일별 취수량 정보가 없으므로 자기유입량 산정에 적용하지 않았다.

### 4.3 발전용댐 용수공급능력 산정 결과 분석

#### 4.3.1 개별모의에 따른 발전용댐별 용수공급능력 산정 결과

먼저 저류형 발전용댐에 해당하는 화천댐에 대하여 2001~

**Table 4.** Results of water supply yield calculation using individual reservoir simulation

Dams	Water supply yield (million m <sup>3</sup> /yr)
Hwacheon dam	734.8
Chuncheon dam	107.2
Uiam dam	18.9
Cheongpyeong dam	160.8
Paldang dam	1,402.0* (50.5)
Sum	2,423.7

\*Including annual water intake volume in Paldang reservoir.

2020년(20년) 기간의 자기유입량을 이용하여, 연간 방류-이수안전도 95%를 만족하는 용수공급능력(상시방류가능량)을 산정한 결과, 약 23.3 m<sup>3</sup>/s의 방류량을 유지할 수 있어 연간 약 734.8 백만 m<sup>3</sup>의 용수공급능력을 갖는 것으로 분석되었다.

반면, 비저류형 발전용댐에 해당하는 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐을 대상으로 동일한 기간의 자기유입량 자료를 이용하여 연간 수위-이수안전도 95%를 만족하는 용수공급능력(상시취수가능량)을 산정한 결과, 각각 약 3.4, 0.6, 5.1, 44.5 m<sup>3</sup>/s의 취수량을 유지할 수 있어, 이를 연간 체적으로 환산할 경우 약 107.2, 18.9, 160.8, 1,402.0 백만 m<sup>3</sup>의 용수공급능력을 갖는 것으로 분석되었다. 이때, 팔당댐의 총 용수공급능력은 팔당댐에서의 취수량을 포함한 것으로, 취수량을 제외한 용수공급능력은 약 50.5 백만 m<sup>3</sup>에 해당한다. Table 4는 적용대상 발전용댐의 용수공급능력을 각각 정리하여 나타낸 표이며, 자기유입량 및 개별 저수지 모의운영에 따른 이들 발전용댐군의 용수공급능력 합계는 약 2,423.7 백만 m<sup>3</sup> 수준인 것으로 나타났다.

#### 4.3.2 연결모의에 따른 발전용댐군 총 용수공급능력 산정 결과

본 연구에서는 북한강수계에 위치한 다섯 개 발전용댐군의 실제 활용가능한 용수공급능력을 산정하기 위해, 상류댐의 초과방류량이 하류댐에 유입되는 연결모의 방법을 통해 각 발전용댐의 용수공급능력을 재차 산정하였다.

최상류댐인 화천댐의 경우, 상류댐 초과방류량이 없으므로, 연결모의를 통한 용수공급능력은 개별모의 시 용수공급능력과 동일하다. 중·하류댐의 경우, 화천댐의 초과방류량이 반영된 연결모의를 통해 춘천댐의 용수공급능력을 산정한 후, 연결모의된 춘천댐의 초과방류량을 다시 하류댐(의암댐)에 반영하는 등, 순차적으로 연결모의를 모두 수행한 결과, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐의 용수공급능력은 각각 연간 107.2, 34.7, 170.3, 1,439.8 백만  $m^3$ 으로 나타났으며, 이는 개별모의 시 용수공급능력에 비해 각각 0, 15.8, 9.5, 37.8 백만  $m^3$  증가한 결과이다. Table 5를 살펴보면, 초과방류량을 반영함으로써 댐별 유입량은 크게 증가하였으나, 그에 비해 댐별 용수공급능력의 증가는 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 상류댐의 초과방류량이 하류댐의 연간 이수안전도 개선에 크게 기여하지 않았기 때문인 것으로 분석되었다. 즉, 각 댐의 용수공급능력은 모의기간 내 연간 이수안전도 95% 수준의 상시 방류량(혹은 상시취수량)을 바탕으로 산정되므로, 용수공급능력의 증가는 연간 이수안전도를 위협하는 갈수기간에 유입량이 추가되어야 이루어질 수 있다. 그러나, 갈수기간에는 대부분의 댐에서 유입량 부족을 겪게 되므로 해당기간의 초과방류량은 크지 않으며, 대부분의 초과방류량은 풍수기에 댐의 상시만수위를 유지하기 위해 발생하므로 하류댐의 용수공급능력 증가에 크게 기여하지 못하는 것으로 이해할 수 있다.

또한, 의암댐과 청평댐의 경우 비교적 큰 저류공간을 활용하여 연결모의에 따른 초과방류량 중 일부를 저류함으로써 각각 15.8, 9.5 백만  $m^3$ 의 용수공급능력 증가 효과를 보였으나, 상대적으로 저류공간이 작은 춘천댐의 경우 유입되는 초과방류량을 그대로 방류하는 등 갈수기간에 활용하지 못하여 연결모의로 인한 용수공급능력 증가 효과가 없는 것으로 나타났다. 팔당댐의 경우 최하류 발전용댐으로써, 화천댐부터 팔당댐에 이르기까지 중·하류댐인 춘천댐, 의암댐, 청평댐에서 활용하지 않은 모든 초과방류량이 기여할 수 있어 용수공급능

력 증가 효과가 가장 크게 나타난 것으로 분석되었다. 최종적으로, 연결모의에 따른 북한강수계 발전용댐군의 총 용수공급능력은 개별모의 용수공급능력 대비 약 63.1 백만  $m^3$  증가한 2,486.8 백만  $m^3$ 에 해당하는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서는 국내 발전용댐 이수능력 검토의 일환으로, 북한강수계 다섯 개 발전용댐의 개별 댐 및 댐군 총 용수공급능력을 평가하고, 비교·분석하였다. 먼저 상·하류댐의 영향을 제외한 개별 발전용댐의 용수공급능력을 평가하기 위해 각 댐 자체유역에 의한 자기유입량을 산정하였다. 저류형댐과 달리 수위 유지 목적이 큰 비저류형 발전용댐의 용수공급특성을 고려한 하한운영수위 기반의 연간 수위-이수안전도 방법을 새롭게 제시함으로써, 각각 저류형댐과 비저류형댐을 구분하여 용수공급능력을 산정하였다. 또한, 수계 구조에 따른 상·하류댐의 연결 효과를 고려한 발전용댐군 용수공급능력을 평가하기 위해 상류댐의 용수공급능력에 포함되지 않는 초과방류량을 하류댐에서 활용하도록 하는 연결모의 방법을 제시하여, 북한강수계 발전용댐군의 총 용수공급능력을 산정하고 개별 댐 용수공급능력과 비교·분석하였다. 본 연구에서 산정된 북한강수계 발전용댐별 자기유입량 및 용수공급능력, 그리고 발전용댐군의 총 용수공급능력은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 북한강수계에 위치한 발전용댐별 자기유입량 산정 결과, 댐 자기유입량은 상·하류에 관계없이 댐 유역면적에 비례하여 관측유입량과는 큰 차이를 보였으며, 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐에 대하여 각각 연간 0.96, 0.92, 0.91, 0.68, 0.80 백만  $m^3/km^2$ 의 비자기유입량을 갖는 것

Table 5. Results of water supply yield calculation using connected reservoirs simulation

Dams	Water supply yield (million $m^3$ /yr)	Connected simulation effects	
		Water supply yield increment (million $m^3$ /yr)	Dam inflow increment (million $m^3$ /yr)
Hwacheon dam	734.8	0.0	0.0
Chuncheon dam	107.2	0.0	930.1
Uiam dam	34.7	15.8	1,535.1
Cheongpyeong dam	170.3	9.5	1,756.9
Paldang dam	1,439.8* (88.3)	37.8	3,120.5
Sum	2,486.8	63.1	-

\*Including annual water intake volume in Paldang reservoir.



로 분석하였다.

- 2) 연간 방류-이수안전도 기준에 따른 저류형 발전용댐(화천댐) 및 연간 수위-이수안전도 기준에 따른 비저류형 발전용댐(춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐)의 개별 용수공급 능력을 산정한 결과, 각각 연간 734.8, 107.2, 18.9, 160.8, 1,402.0 백만 m<sup>3</sup>의 용수공급능력을 갖는 것으로 분석하였다. 이때, 팔당댐의 용수공급능력은 연간 팔당댐 취수량을 포함한 것으로, 이를 제외한 용수공급능력은 50.0 백만m<sup>3</sup>에 해당하는 것으로 나타났다.
- 3) 상류댐의 초과방류량을 활용한 연결모의 방법을 통해 다섯 개 발전용댐의 용수공급능력을 산정한 결과, 최상류댐인 화천댐 및 저류공간이 작은 춘천댐을 제외한 의암댐, 청평댐, 팔당댐에서 각각 연간 15.8, 9.5, 37.8 백만 m<sup>3</sup>의 용수공급능력이 증가하는 것으로 나타났으며, 북한강수계 전체적으로 총 63.1 백만 m<sup>3</sup>의 용수공급능력이 증가하는 것으로 분석되었다.

현재까지 국내 댐 용수공급능력 평가 관련 연구는 다목적댐을 중심으로 수행되었으며, 비저류형 발전용댐의 운영 특성을 고려한 용수공급능력 산정 연구는 폭넓게 이루어진 바 없다. 본 연구에서는 저수지 운영모의를 통한 기존 댐 용수공급능력 산정 방법을 바탕으로, 비저류형 발전용댐의 하한운영수위 유지 효과 등을 반영함으로써 현실적인 발전용댐 용수공급능력을 산정하고자 하였다. 그러나, 이수안전도를 이용한 용수공급능력 평가 방법은 분석대상 기간의 수문 상황(즉, 유입량 변동)에 크게 영향을 받기 때문에, 보다 객관적인 평가 기법의 개발이 필요할 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

- Ahn, J., Lee, Y., and Yi, J. (2016). "Improving the water yield capabilities using reservoir emergency storage and water supply adjustment standard." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 12, pp. 1027-1034.
- 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., and Yi, J. (2020). "Water yield evaluation of a reservoir system based on a deficit supply in the Han river basin." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 40, No. 5, pp. 477-484.
- Jeong, G., Choi, S., and Kang, D. (2019). "Development and application of hydro-economic optimal water allocation and management model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 10, pp. 707-718.
- K-water (2012). *Study on designed water yield evaluation of water resources system*, Research Report, KIWE-WR-12.
- 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.
- Lee, D.R., Moon, J.W., and Choi, S.J. (2014). "Performance evaluation of water supply for a multi-purpose dam by deficit-supply operation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 2, pp. 195-206.
- Ministry of Construction and Traffic (MOCT) and K-water (1997). *Reevaluation of existing dams (Han river basin)*.
- Ministry of Construction and Traffic (MOCT) and K-water (2010). *Reevaluation of existing dams and optimum allocation of the capacity*.
- Ministry of Construction and Traffic (MOCT) and K-water (2011). *The national river basin investigation 2011*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) and K-water (2016). *Efficient utilization of existing water resources*.
- 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.
- Vogel, R.M., Sieber, J., Archfield, S.A., Smith, M.P., Apse, C.D., and Huber-Lee, A. (2007). "Relations among storage, yield, and instream flow." *Water Resources Research*, Vol. 43, No. 5.
- Zeraebuk, K.N., Mayabi, A.O., and Gathanya, J.M. (2017). "Assessment of water resources and analysis of safe yield and reliability of surface water reservoirs of asmara water supply system." *Environment and Natural Resources Research*, Vol. 7, No. 1.