



Classification of hydropower dam in North-han River based on water storage characteristics

Choi, Jeongwook^a · Jeong, Gimoon^b · Kang, Doosun^{c*} · Ahn, Jeonghwan^d · Kim, Taesoon^e

^aPh.D candidate, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea

^bResearch doctor, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea

^cProfessor, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea

^dSenior manager, Hangang Hydro Power Site, Korea Hydro & Nuclear Power Co.,LTD., Chuncheon, Korea

^eSenior manager, Hangang Hydro Power Site, Korea Hydro & Nuclear Power Co.,LTD., Chuncheon, Korea

Paper number: 21-037

Received: 18 May 2021; Revised: 13 June 2021; Accepted: 13 June 2021

Abstract

Climate change threatens the security of domestic water resources in South Korea. To overcome the potential water shortage, various approaches are being studied by alternating the operation of dams or by integrated operation of multiple dams and reservoirs. However, most of the related researches were developed and applied for multi-purpose dams, and few studies were conducted for the hydropower dams. The main purpose of the hydropower dam is to generate electric energy; however, the potential water shortage due to prolonged droughts brings the idea to supply water from the hydropower dam in the basin. To that end, it is required to estimate the water supply ability of the hydropower dams. In this study, we proposed a methodology to classify the hydropower dam into a “storage-type” and “run-of-river type” dam. The proposed approach was demonstrated using the hydropower dams located in North-han River basin. The results of this study are expected to contribute for further analysis of the hydropower dams, such as evaluation of water supply capacity and drought mitigation purpose operation of the hydropower dams.

Keywords: Climate change, Hydropower dam, Run-of-river type, Storage type

저류특성을 고려한 북한강수계 발전용댐의 유형 구분방안 제시

최정욱^a · 정기문^b · 강두선^{c*} · 안정환^d · 김태순^e

^a경희대학교 사회기반시스템공학과 박사과정, ^b경희대학교 사회기반시스템공학과 연구박사, ^c경희대학교 사회기반시스템공학과 교수,

^d한국수력원자력(주) 한강수력본부 수력운영실 수자원관리부 차장, ^e한국수력원자력(주) 한강수력본부 수력운영실 수자원관리부 차장

요 지

최근 국내에서는 기후변화로 인해 수자원의 안정적인 확보가 위협받고 있으며, 그 대안으로 기존 수공시설물을 활용한 추가 수자원 확보를 추진하고 있다. 그러나, 이를 위한 댐 시설물의 재평가 및 연계운전을 통한 용수공급능력 확보는 대부분 다목적댐 및 용수공급댐을 중심으로 검토되어 발전용댐을 대상으로 한 분석 연구는 상대적으로 미흡하다. 특히 발전용댐의 특성을 고려한 정확한 용수공급능력 산정 기법이 요구되고 있으나, 그에 앞서 수력발전에 목적을 둔 발전용댐의 저류특성을 먼저 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 발전용댐의 저류용량, 저류활동빈도, 용수공급기여도 등의 저류특성을 고려하여 발전용댐의 유형을 구분하는 방안과 판단 기준을 제안하고, 북한강수계 발전용댐을 대상으로 그 적용 결과를 도출하였다. 본 연구 결과는 발전용댐의 정확한 저류특성 파악과 함께, 향후 발전용댐 특성에 적합한 용수공급능력 평가 체계 및 운영방안 마련에 기여할 것으로 기대된다.

핵심용어: 기후변화, 발전용댐, 비저류형댐, 유형구분, 저류형댐

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

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

1. 서론

최근 기후변화로 인해 지역별·계절별 강수편차가 커짐에 따라 상습가뭄지역(충남 서부, 경기 남부, 전라 등)의 가뭄 피해가 증가하고 있으며, 국내 수자원의 안정적인 공급을 위협하고 있다. 특히 2014년과 2015년에는 우리나라 연평균 강수량(1,263 mm) 보다 현저히 낮은 809 mm, 792 mm의 연 강수량을 기록하였으며, 연속적인 강우부족으로 극심한 가뭄이 발생하였다. 해당 가뭄으로 인해 충남·경기지역 일부에서 수 개월간 생·공용수 공급이 제한되었으며 장기간 사회적, 경제적 피해가 발생한 바 있다. 이에 기후변화에 대비한 국내 수자원의 추가 확보 및 효율적인 활용 방안의 필요성이 증가하고 있으나, 신규 수공시설물(댐, 저수지 등)을 건설하기 힘든 국내 개발 여건상, 기존 수공시설물을 최대한 활용하기 위한 다양한 방안이 연구되고 있다.

Kang and Park (2005)의 연구에서는 저수지 용수수요 증가에 대응하기 위한 추가 용수공급능력을 평가할 수 있는 모의·최적화 모형을 개발하였으며 개발 모형은 섬진강댐에 적용하여 그 적용성을 검증한 바 있다. Lee *et al.* (2012)은 안동댐과 인하댐의 추가용수공급 가능 여부 판단을 위한 용수공급능력 재평가를 수행하였으며, 추가용수공급 가능량을 산정하였다. 또한 Jang and Kim (2016)의 연구에서는 낙동강수계의 주요 다목적댐 5개소를 대상으로 용수공급능력을 재산정하고 연계운영을 통한 용수공급계획의 개선 방안을 제안하였다. 한편, 국내 기후변화의 영향을 고려하여, Chae *et al.* (2017)은 CMIP5 GCM 기후변화 시나리오에 따른 합천댐의 용수공급능력을 분석한 바 있으며, Kang *et al.* (2017)의 연구에서는 최근 발생한 가뭄이 낙동강 다목적댐의 용수공급에 미치는 영향을 검토하고 AR5 RCP 시나리오(4.5/8.5)와 댐 용수부족 대비 용수공급조정기준(MOLIT, 2016) 적용을 통한 다목적댐의 미래 물 공급 안정성을 평가하였다. 최근 Choi *et al.* (2020)의 연구에서는 저수지 운영방법 중 하나인 부족분 공급방식을 적용한 한강수계 저수지 시스템의 용수공급능력을 평가하고 분석하여 부족분 공급방식을 향후 기후변화 위기에 대응한 저수지 운영방식으로 제안하였으며, Jeong *et al.* (2019)의 연구에서도 부족분 공급방식을 이용하여 하천수 및 댐 용수를 이용한 최적 물 배분 모형을 개발하고, 국내 남한강 유역에 적용함으로써 확보 가능한 용수공급능력을 추정한 바 있다.

이처럼 기후변화에 대비한 기존 댐의 용수공급능력 재평가 및 연계운영을 통한 용수공급능력 추가 확보 등 기존 수공시설물을 활용한 국내 수자원 추가 확보와 관련한 연구는 향후 국내 수자원 관리에서 중요한 역할을 수행할 것으로 기대된다. 하지만 대부분의 관련 연구들은 다목적댐 및 용수공급

댐을 대상으로 수행되었으며, 발전용댐을 대상으로 용수공급능력을 평가하고 분석하는 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 특히 발전용댐의 경우 발전용수 공급을 주목적으로 건설되었으며, 다목적댐은 수력발전뿐만 아니라 이수, 치수, 환경유지 등 다양한 용도를 목적으로 하므로 댐 운영 또한 그 배경이 상이하다. 즉, 발전용댐은 건설 시, 이수 및 치수를 위한 저류능력(물을 저류하여 활용할 수 있는 능력)을 크게 고려하지 않았기 때문에 발전용댐의 정확한 수문학적 능력 검토는 다목적댐과 다른 방향에서 접근할 필요가 있다. 이러한 댐 시설의 이·치수능력은 댐의 저류능력에 따라 크게 좌우되므로, 본 연구에서는 발전용댐의 정확한 용수공급능력 검토에 앞서 발전용댐의 유형을 저류능력이 큰 저류형(Storage type) 댐과 저류능력이 상대적으로 낮은 비저류형(Run-of-river type, R.O.R.) 댐으로 먼저 구분하고자 하였다.

본 연구에서는 북한강수계 발전용댐들을 대상으로, 댐의 저류용량, 저류활동 빈도, 그리고 용수공급 기여도 등 세 가지의 용수공급 관점에서의 저류특성들을 분석하고, 각 저류특성을 고려한 발전용댐 유형(저류형 및 비저류형) 구분방법을 제안하였다. 본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2.1절 및 2.2절에서는 댐 운영의 기본적인 배경과 댐의 용수공급능력을 평가하기 위한 저수지 모의운영 기법에 대해 소개하였다. 2.3절에서는 저류형 및 비저류형 발전용댐 판단을 위한 구체적인 구분방법을 제안하였으며, 2.4절에서 주요 다목적댐에 해당 구분방안을 적용하여 정량적인 기준을 수립하였다. 3장에서는 북한강수계의 다섯 개 발전용댐의 세 가지 구분방안 적용결과와 함께 최종적인 저류형 및 비저류형 판단 결과를 제시하였다. 마지막으로 4장에서는 본 연구결과를 요약하고, 향후 관련 연구의 발전방향에 대하여 제안하였다.

2. 방법론

2.1 댐 운영의 개요

댐은 건설 목적에 따라 치수(홍수조절), 이수(용수공급), 수력발전 등 다양한 기능을 수행한다. 댐의 운영은 홍수기 홍수조절능력과 이수기 용수공급능력 확보에 큰 영향을 미치며, Fig. 1에 나타난 것과 같이 미리 설계된 댐 운영수위와 수문현황을 바탕으로 댐을 운영할 수 있다. 각 운영수위에 대하여 Maximum Design Level은 최고수위이며, Normal Operation Level은 상시만수위, Flood Control Level은 홍수조절수위, Minimum Water Intake Level은 취수제약수위, Minimum Operation Level은 저수위이다. 저수위부터 상시만수위까지의 저수량을 유효저수량(Effective Storage Capacity)이라 하

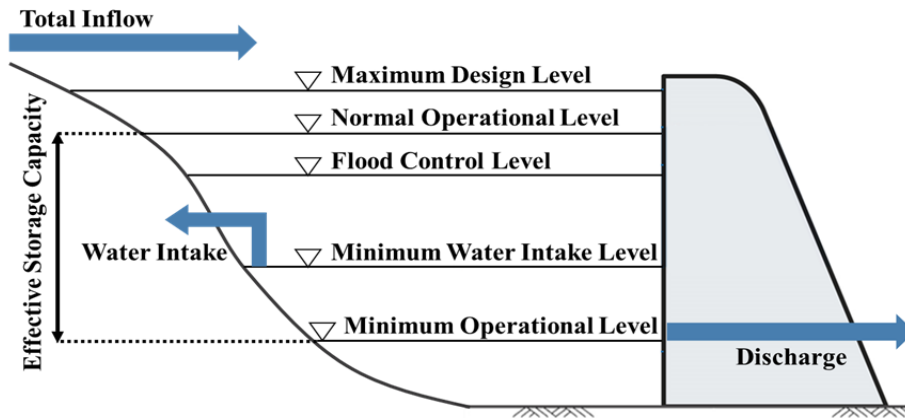


Fig. 1. Structure of reservoir operation water levels

며 댐 운영(수위조절)을 통해 이수목적으로 이용할 수 있는 유효공간을 뜻한다.

댐 저류공간으로 유입된 유입량은 평상시 상시만수위, 홍수기 홍수조절수위를 넘지 않도록 방류되며, 저류공간 내 취수활동 등에 사용되기도 한다. 이때, 일반적으로 댐의 유입량은 관측된 댐 저류수위의 변화와 동시간대 방류량을 바탕으로 산정할 수 있으며, 직접적인 유입량 관측값은 아니지만 관측된 저류수위와 방류량을 바탕으로 도출된다는 측면에서 “관측 유입량”으로 구분하고 있다. 그러나, 관측된 저류수위의 변화에서는 저류공간 내 취수활동으로 인한 물 사용량이 이미 반영되어 있으므로, 실제 댐의 “총 유입량”은 앞서 산정된 관측 유입량에 동시간대 취수량을 합산함으로써 산정할 수 있다.

한편, 댐의 방류량은 앞서 언급한 수위조절(상시만수위 및 홍수조절수위 유지)의 목적 이외에도 댐 하류에서의 물 이용을 위한 용수공급 목적까지 함께 고려하여 결정된다. 즉, 상시만수위와 홍수조절수위를 초과하는 저수량을 방류하는 것은 물론이고, 필요에 따라 하류의 용수수요량(하천유지용수 포함)을 공급할 목적으로 댐의 취수제한수위(Minimum water Intake level), 또는 저수위(Minimum operational level)까지 댐 수위를 낮추어 용수공급에 기여한다. 따라서 댐의 운영이란 곧 방류량을 결정하는 과정인 것으로 이해할 수 있으며, 이수기 용수공급에 중점을 두어 댐 운영을 모의할 경우, 저류시설로써 댐의 역량을 파악할 필요가 있다.

2.2 저수지 모의운영 기법

저수지 모의운영 기법은 운영수위 등 댐 제원과 유입량 데이터, 방류조건 등을 바탕으로 일정한 모의기간 동안의 댐 운영과정을 모의하는 방법이다. 본 연구에서는 발전용댐 운영 모의를 위해, 대표적인 저수지 운영 모형 중 하나인 HEC-ResSim (Reservoir system simulation) 모형(USACE, 2013)을 이용하

여 용수공급 관점에서 발전용댐의 운영을 모의하였다. 저수지 모의운영은 2000년 1월 1일부터 2019년 12월 31일까지 총 20년의 기간에 대하여 수행하였으며, 그 구체적인 운영 조건은 다음과 같이 구성하였다.

- 1) 비홍수기의 경우, 유입량으로 인해 댐 저류수위가 상시만수위를 초과하는 경우, 우선 상시만수위 이상의 저류량을 방류량으로 결정하며, 해당 방류량이 댐의 상시방류량(Required flow)보다 작은 경우 상시방류량을 방류량으로 결정한다. 이때, 비홍수기에 해당하는 기간은 매년 9월 20일부터 6월 19일까지의 기간에 해당한다.
- 2) 홍수기의 경우, 유입량으로 인해 댐 저류수위가 홍수조절수위를 초과하는 경우, 홍수조절수위 이상의 저류량을 방류량으로 결정하며, 해당 방류량이 상시방류량보다 작은 경우 마찬가지로 상시방류량을 방류량으로 결정한다. 이때, 홍수기에 해당하는 기간은 매년 6월 20일부터 9월 19일까지의 기간에 해당한다.
- 3) 댐 저수량이 부족하여 상시방류량을 만족시킬 수 없는 경우, 잔여 저수량을 모두 방류하며(즉, 댐 저류수위가 저수위에 도달) 해당 기간은 용수공급부족 발생기간으로 구분한다.
- 4) 댐별 상시방류량은 용수공급의 연간-이수안전도 및 기간-이수안전도를 기준으로 결정한다. 이때, 이수안전도는 Eqs. (1) and (2)에 나타난 것과 같이 전체 모의기간 대비 용수공급부족이 발생하지 않은 기간의 비율을 의미한다. 연간-이수안전도는 모의간격(Time step)과 관계없이 전체 20년 중 용수공급부족이 발생하지 않은 연도의 비율을 의미하며, 기간-이수안전도는 전체 모의기간 중 용수공급부족이 발생하지 않은 모의기간의 비율이다.

$$R_Y = \left(1 - \frac{N_Y}{T_Y}\right) \times 100 \quad (1)$$

여기서, R_Y : 저수지 모의운영에 따른 댐 용수공급의 연간-이수 안전도(%), N_Y : 저수지 모의운영 시 용수공급부족이 발생한 연도의 개수, T_Y : 총 저수지 모의운영 연도의 개수.

$$R_P = \left(1 - \frac{N_P}{T_P}\right) \times 100 \quad (2)$$

여기서, R_P : 저수지 모의운영에 따른 댐 용수공급의 기간-이수 안전도(%), N_P : 저수지 모의운영 시 용수공급부족이 발생한 모의기간의 개수, T_P : 총 저수지 모의운영 모의기간의 개수.

위와 같이 용수공급 위주의 모의방법을 적용할 경우 Fig. 2에 나타난 것과 같이, 홍수기 및 풍수기에는 주로 댐 수위가 높으므로 대부분의 유입량이 방류량으로 결정되고, 갈수기에는 댐 저류수위가 점차 낮아지며 상시방류량만큼만 방류하거나, 저수량이 부족하여 방류량이 상시방류량을 충족시키지 못하는 양상의 댐 운영이 나타날 것으로 예상할 수 있다.

2.3 발전용댐의 유형 구분방안

국내 발전용댐의 경우 수력발전 목적에 주목하였기 때문에 일반적으로 다목적댐에 비해 댐 저류공간이 작은 경우가 많다. 댐의 저류공간이 여유가 있는 경우 다목적댐과 유사하게 유효저수량(Effective storage capacity)을 활용한 용수공급이 가능하기 때문에 저류형 발전용댐으로 구분할 수 있으며, 반면 댐의 유효저수량이 작은 경우 대부분의 유입량을 그대로 방류하는 특성이 두드러지는 비저류형 발전용댐으로 구분할 수 있다. 즉, 비저류형 발전용댐의 경우, 필요에 따라 댐 용수를 저류하거나, 방류하는 “저류활동(능력)”이 부족한 것으로 판단할 수 있다. 본 연구에서는 북한강수계 발전용댐들의 저수지 모의운영 결과를 바탕으로, 1) 댐의 상대적 저류용량, 2) 댐 저류활동의 빈도, 3) 댐 운영에 따른 용수공급 기여도 등 세 가지 측면에서 댐의 저류특성을 분석하였으며, 각각의 구체적

인 저류형/비저류형 발전용댐 유형 구분방안은 다음과 같다.

2.3.1 구분방안 1 - 상대적 저류용량

가장 기본적인 댐의 저류능력은 댐 용수를 저류할 수 있는 용량을 통해 판단할 수 있다. 그러나 댐의 절대적인 저류용량은 댐이 설치된 하천의 규모 및 강우-유출 특성에 따라 달라질 수 있으므로, 댐의 유효저수량이 큰 것이 무조건 댐의 저류능력이 큰 것을 의미하지는 않으며, 댐 유입량과의 비교를 통해 판단할 수 있다. 따라서 댐의 정확한 저류능력을 파악하기 위해서는 해당 댐의 유입량 규모를 고려한 상대적인 저류용량을 살펴볼 필요가 있으며, 본 연구에서는 발전용댐별 연간 총 유입량 대비 유효저수량의 비율(즉, 유효저수량 / 연간 총 유입량)을 산정함으로써 각 댐의 저류특성을 분석하였다. 여기서 연간 총 유입량은 모의기간에 해당하는 20년 동안의 연평균 유입량을 의미하며, 이를 저류하기 위한 유효저수량이 클수록 저류형 특성이 큰 것으로 판단하였다. 이 때, 저류형 및 비저류형 유형을 판단하기 위한 기준은 댐의 저류활동이 주요 목적인 다목적댐의 적용 결과를 바탕으로 수립하였으며, 대상 다목적댐과 각 구분방법별 기준값 수립 결과는 2.4절에 정리하였다.

2.3.2 구분방안 2 - 저류활동 빈도

한편, 댐의 저류 및 방류 활동이 빈번하게 나타날수록 댐 운영에 따른 저류공간의 활용능력이 크게 나타나는 것으로 판단할 수 있다. 여기서 댐의 저류 및 방류 활동은 유입량과 방류량이 상이하게 나타난 기간을 통해 파악할 수 있다. 예를 들어, Fig. 3(a)은 산점도(Scatter plot)의 형태로 댐의 관측유입량과 관측방류량을 비교한 예시이며, 그래프의 x축과 y축은 각각 관측유입량과 관측방류량을 의미한다. 따라서 점선으로 표시된 중심선보다 아래에 위치한 점은 관측유입량보다 관측방류량이 적은 “저류” 활동을 의미하며, 반대로 중심선보다 위에 위치한 점은 관측유입량보다 관측방류량이 큰 “방류” 활동을 의미한다. 그러나, 실제 댐 운영 실적에 해당하는 관측방류량의 경우, 다양한 댐의 운영 목적 및 외부 환경에 의한 운영 활동이 포함된 결과이므로 용수공급능력에 주목한 저류활동의 결과와는 다르게 나타날 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3(b)와 같이 저수지 모의운영 결과를 바탕으로, 관측유입량과 모의방류량이 상이한 비율(즉, 관측유입량과 모의방류량이 상이한 기간 / 전체 모의기간)을 산정함으로써 각 댐의 저류특성을 분석하였다.

해당 구분 방법을 적용하기 위한 저수지 모의운영의 경우, 일(Day) 단위 모의운영을 수행하였으며, 용수공급에 요구되는 상시방류량은 연간-이수안전도 95%를 기준으로 결정하

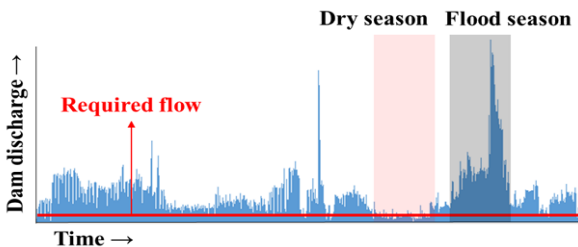


Fig. 2. Seasonal change of dam discharge

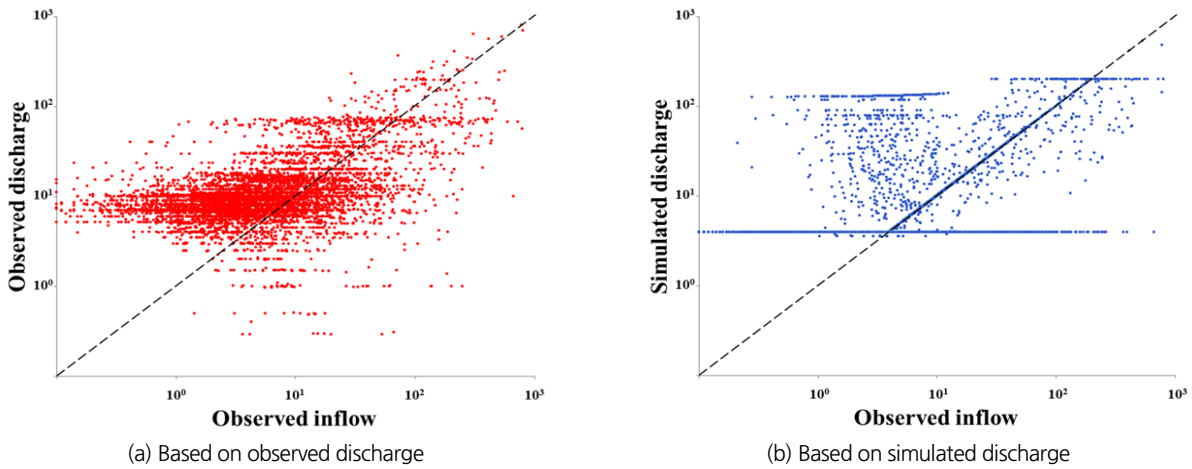


Fig. 3. Scatter plot of dam inflow and discharge

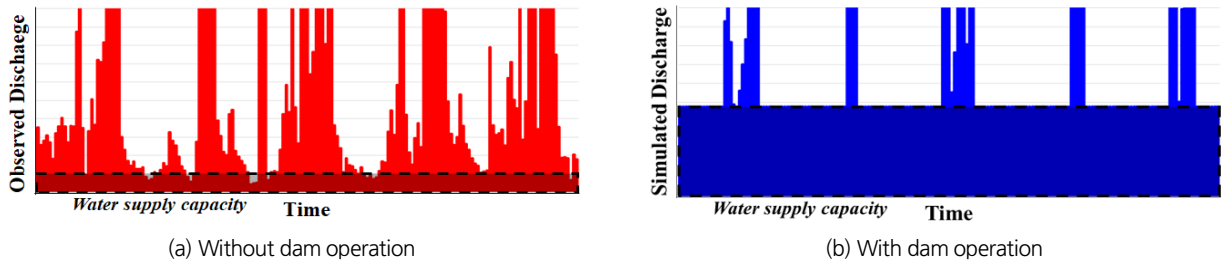


Fig. 4. Stream discharge comparison of with and without dam operation

였다. 따라서, 일 관측유입량과 모의방류량이 상이한 기간이 많을수록 해당 댐은 저류 및 방류활동이 활발한 저류형 특성을 갖고 있는 것으로 판단할 수 있다.

2.3.3 구분방안 3 - 용수공급 기여도

마지막으로 댐 운영 여부에 의해 증가하는 용수공급능력이 클수록 해당 댐의 저류능력이 큰 것으로 판단할 수 있다. 만약 댐 운영에 전혀 관여하지 않을 경우, 해당 댐의 방류량은 댐 체고(Dam crest)를 월류하는 월류량이 되므로 곧 댐의 유입량과 완벽하게 동일한 것으로 이해할 수 있다. 예를 들어, Fig. 4는 동일한 댐 및 유입량 조건에서 단순 방류량과 댐 운영을 통해 결정된 모의방류량을 비교한 예시이다. Fig. 4(a) (단순방류량)에서는 댐 저류활동이 관여하지 않으므로 방류량의 편차가 매우 큰 것을 알 수 있으며, 반대로 Fig. 4(b) (모의방류량)에서는 댐 저수량을 이용하여 유입량이 적은 기간에도 일정한 방류량을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 기존 다목적댐의 용수공급 능력 산정방법에 따르면, 댐의 용수공급능력(즉, 상시방류량)은 이수안전도 95%(즉, 전체 모의기간의 95%에 해당하는 기간)에 대하여 항상 공급할 수 있는 유량을 바탕으로 산정되며,

본 연구에서는 해당 방법을 이용하여 관측유입량을 그대로 방류하는 경우와 댐 운영이 개입한 경우의 용수공급능력 변화(즉, 댐 운영으로 인해 증가한 용수공급능력 / 댐 운영 시 용수공급능력)를 산정함으로써 각 댐의 저류특성을 분석하였다.

2.4 발전용댐 유형 구분(저류형 및 비저류형)을 위한 기준 수립

앞서 설명한 세 가지 방안을 적용하고 실제 발전용댐의 유형을 구분하기 위해서는 각 방법별 기준 값이 필요하다. 본 연구에서는 저류형댐으로 분류할 수 있는 국내 대표 다목적댐을 대상으로 제안된 구분방안을 적용함으로써, 발전용댐의 유형 분류를 위한 정량적인 판단기준을 수립하였다. 적용대상 다목적댐은 북한강수계의 소양강댐 및 남한강수계의 충주댐, 횡성댐 등 세 개의 댐을 활용하였으며, 다목적댐 모의운영을 위한 운영수위 및 수위-저수량 곡선 등의 제한, 유입량 데이터는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS, 2000)의 관측자료를 활용하였다. Table 1은 대상 다목적댐의 주요 운영수위 및 유효저수량을 간략히 정리한 표이다.

Table 1. Specification of applied multi-purpose dams

	Soyanggang Dam	Chungju Dam	Hoengseong Dam
Normal operational level (El. m)	193.5	141.0	180.0
Flood control level (El. m)	190.3	138.0	178.2
Minimum operational level (El. m)	150.0	110.0	160.0
Effective storage capacity (million m ³)	1,900.0	1,789.0	73.4

Table 2. Relative storage capacity of the applied multi-purpose dams

	Soyanggang Dam	Chungju Dam	Hoengseong Dam
Effective storage capacity (million m ³) [A]	1,900.0	1,789.0	73.4
20 year-averaged annual inflow (million m ³ /yr) [B]	2,087.8	4,855.4	157.3
Relative storage capacity (%) [A / B]	91.0	36.8	46.6

Table 3. Active-storage periods ratio of the applied multi-purpose dams

	Soyanggang Dam	Chungju Dam	Hoengseong Dam
No. of simulation periods (day) [A]	7,305		
No. of periods with inflow ≠ discharge (day) [B]	7,204	6,467	6,342
Active-storage periods ratio (%) [B / A]	98.6	88.5	86.8

Table 4. Water supply contribution of the applied multi-purpose dams

	Soyanggang Dam	Chungju Dam	Hoengseong Dam
Water supply capacity with dam operation (million m ³ /yr) [A]	1,270.9	1,252.0	69.4
Water supply capacity without dam operation (million m ³ /yr) [B]	15.8	173.4	0.0
Increment of water supply capacity by dam operation (%) [(A - B) / A]	98.8	86.1	100.0

2.4.1 상대적 저류용량에 따른 저류형담 분류 기준

먼저 상대적 저류용량을 이용한 유형 구분 방법을 다목적담에 적용한 결과는 Table 2와 같다. 소양강담의 경우 연간 총 유입량의 약 91%를 저류할 수 있으므로 저류능력이 매우 높은 것을 알 수 있다. 충주담과 횡성담의 경우 각각 36.8%, 46.6%의 상대적 저류능력이 있는 것으로 산정되었으며, 이는 소양강담에 비해 낮은 값이지만 연간 총 유입량의 1/3 이상을 저류할 수 있음을 의미한다. 세 개의 다목적담 모두 30% 이상의 비율을 나타냈으나, 분석 대상기간에 따라 연간 총 유입량이 달라질 수 있는 점, 그리고 연평균 유입량이 비교적 짧은 기간인 홍수기에 집중되는 점 등을 감안하여 연간 총 유입량의 약 10% 수준의 유효저수량을 갖는 경우 상대적인 저류용량이 충분히 큰 저류형 담으로 구분하도록 하였다.

2.4.2 저류활동 빈도에 따른 저류형담 분류 기준

다음으로 저류활동 빈도를 이용한 유형 구분 방법을 다목적담에 적용한 결과는 Table 3과 같다. 소양강담의 경우 일유입량과 방류량이 상이한 기간이 전체 모의기간의 98.6%로 높은

비율이 산정되었으며, 이는 담 유입량이 높은 홍수기 대부분의 기간에서도 저류가 가능할 정도로 담의 저류능력이 큰 것으로 판단할 수 있다. 충주담과 횡성담의 경우 각각 88.5%, 86.8%의 비율이 산정되었으며, 소양강담 대비 홍수기 저류활동이 감소하였으나 모의기간 대부분에 걸쳐 저류활동이 일어난 것으로 저류능력이 큰 것으로 판단할 수 있다. 이처럼 저류형 특성이 큰 담인 경우 홍수기를 제외한 대부분의 기간에서는 저류활동을 기대할 수 있으므로 전체 모의기간 중 80% 이상의 기간에서 저류활동이 나타날 경우 저류형 담으로 구분하도록 하였다.

2.4.3 용수공급 기여도에 따른 저류형담 분류 기준

마지막으로 용수공급 기여도를 이용한 유형 구분 방법을 다목적담에 적용한 결과는 Table 4와 같다. 분석 결과, 소양강담, 충주담, 횡성담 운영의 용수공급능력 기여도는 각각 98.8%, 86.1%, 100% 수준으로 나타났으며, 이는 다목적담을 건설하고 운영함으로써 용수공급 측면에서의 기여도가 매우 높은 것으로 이해할 수 있다. 특히 횡성담의 경우, 담을 운영하지 않을 경우(즉, 단순 방류량을 이용할 경우) 기간-이수안전

Table 5. Dam type classification criteria

Classification approach	Storage type	Run-of-river type
Relative storage capacity (%)	≥ 10	< 10
Active-storage periods ratio (%)	≥ 80	< 80
Increment of water supply capacity (%)	≥ 80	< 80

도 95%를 달성할 수 없는 것으로 나타났으며, 이는 댐을 운영하지 않을 경우 상시 안정적인 용수공급이 전혀 불가능한 것을 의미한다. 본 연구에서는 이와 같은 다목적댐 적용 결과를 바탕으로, 댐 운영으로 인한 용수공급 기여도가 80% 이상 향상될 경우 저류형 댐으로 구분하도록 하였다.

따라서, 위와 같은 다목적댐 적용결과를 바탕으로, 발전용댐의 저류/비저류형 구분을 위한 세 가지 구분 방안별 분류 기준은 Table 5와 같이 요약할 수 있다.

3. 발전용댐 적용 및 결과

본 연구에서는 위와 같이 제안된 세 가지 발전용댐 유형 분류 방법 및 기준을 북한강수계에 위치한 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐 등 다섯 개 발전용댐에 적용하였다. 발전용댐 모의운영을 위한 운영수위 및 수위-저수량 관계곡선 등의 제원, 유입량 데이터는 관리주체인 한국수력원자력(주)에서 제공하는 자료를 활용하였으며, Table 6은 다섯 개 발전용댐의 주요 운영수위 및 유효저수량을 간략히 정리한 표이다.

3.1 상대적 저류용량에 따른 발전용댐 유형 구분 결과

먼저 상대적 저류용량을 이용한 유형 구분 방법을 발전용댐에 적용한 결과는 Table 7과 같다. 분석 결과, 화천댐에서 35.8%의 높은 비율을 보여 다목적댐인 충주댐과 유사한 수준의 저류형 특성을 보였다. 그 외 발전용댐의 경우, 모두 최대 저류능력이 3% 미만의 낮은 수준을 보였다. 이는 해당 댐으로 유입되는 유량 대부분을 저류할 수 없는 것을 의미하며, 특히 최하류댐인 팔당댐의 경우 0.1%로 비저류형댐의 특성이 큰 것으로 판단된다. 따라서 첫 번째 방법에 따른 발전용댐 유형 구분에서는 화천댐은 저류형댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐 등 네 개의 댐은 비저류형댐으로 분류되었다.

3.2 저류활동 빈도에 따른 발전용댐 유형 구분 결과

다음으로 저류활동 빈도를 이용한 유형 구분 방법을 발전용댐에 적용한 결과는 Table 8과 같다. 분석 결과, 화천댐에서

는 90.6%에 해당하는 기간에서 저류활동을 보였으며, 이는 다목적댐인 충주댐과 횡성댐보다도 저류형 특성이 더 큰 것을 의미한다. 춘천댐의 경우 46.3%에 해당하는 기간에 저류활동을 보였으나, 홍수기를 제외한 기간에서도 저류활동이 저조한 것으로 나타나 비저류형에 가까운 것으로 판단할 수 있다. 의암댐, 청평댐, 팔당댐 또한 모두 30% 미만의 수준을 보여 저류활동이 활발하지 못한 것으로 판단되며, 특히 팔당댐의 경우 모의기간 중 98.3%, 즉 대부분의 기간에서 유입량을 그대로 방류하였으므로 가장 큰 비저류형 특성을 보였다. 따라서 두 번째 방법에 의한 발전용댐 유형 구분에서는 첫 번째 방법과 마찬가지로 화천댐은 저류형댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐 등 네 개의 댐은 비저류형댐으로 분류되었다. 이러한 결과는 모의방류량과 관측유입량 산점도 분석 결과인 Fig. 5를 통해 보다 직관적으로 확인할 수 있다. 저류형 특성이 가장 높게 나타난 화천댐의 경우, 모의방류량과 관측유입량이 서로 상이한 양상을 많이 나타냈으며, 비저류형 특성이 가장 크게 나타난 팔당댐은 대부분의 기간에서 모의방류량과 관측유입량이 동일한 모습을 나타냈다.

3.3 용수공급 기여도에 따른 발전용댐 유형 구분 결과

마지막으로 용수공급 기여도를 이용한 유형 구분 방법을 발전용댐에 적용한 결과는 Table 9와 같다. 분석 결과, 화천댐과 춘천댐에서는 각각 90.7%, 87.7%의 용수공급능력이 댐 건설 및 운영에 의해 확보되는 것으로 나타났으며, 이는 다목적댐인 충주댐보다 저류형 특성이 더 큰 것을 의미한다. 의암댐과 청평댐은 각각 58.5%, 56.6%의 용수공급 기여도를 나타냈으며, 이는 모의기간 대부분을 차지하는 비홍수기 기간중에 댐 운영으로 인한 용수공급능력 증가 효과가 없는 기간이 많음을 의미하므로 저류형 댐에 비해 저류능력이 부족한 것으로 판단된다. 팔당댐의 경우, 마찬가지로 18.7% 수준의 낮은 기여도를 나타냈다. 따라서 세 번째 방법에 의한 발전용댐 유형 구분에서는 화천댐과 춘천댐은 저류형댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐 등 세 개의 댐은 비저류형댐으로 분류되었다.

본 연구에서는 앞서 적용한 세 가지 구분 방법 중, 두 가지 이상의 방법에 해당하는 유형을 대상 댐의 최종 유형으로 판단하였다. 분류 결과, Table 10에 나타난 것과 같이 화천댐은 세 가지 구분 방법에서 모두 저류형 특성이 큰 것으로 나타나 저류형댐으로 분류되었으며, 춘천댐은 두 가지 구분 방법에서 비저류형 특성을 보이고, 의암댐, 청평댐, 팔당댐은 모든 구분 방법에서 비저류형 특성을 보여, 네 개 발전용댐 모두 비저류형댐으로 분류되었다. 특히 화천댐의 경우, 일부 다목적댐을 상회하는 저류능력을 나타냄에 따라 홍수조절 및 용수공

Table 6. Specification of applied hydropower dams

	Hwacheon	Chuncheon	Uiam	Cheongpyeong	Paldang
Normal operational level (El. m)	181.0	103.0	71.5	51.0	25.5
Flood control level (El. m)	175.0	102.0	70.5	50.0	25.0
Minimum operational level (El. m)	156.8	98.0	66.3	46.0	25.0
Effective storage capacity (million m ³)	573.4	59.1	63.7	81.5	18.9

Table 7. Relative storage capacity of the applied hydropower dams

	Hwacheon	Chuncheon	Uiam	Cheongpyeong	Paldang
Effective storage capacity (million m ³) [A]	573.4	59.1	63.7	81.5	18.9
20 year-averaged annual inflow (million m ³ /yr) [B]	1,602.5	2,302.7	4,592.9	6,128.8	17,439.2
Relative storage capacity (%) [A / B]	35.8	2.6	1.4	1.3	0.1
Classification	Storage	R.O.R	R.O.R	R.O.R	R.O.R

Table 8. Active-storage periods ratio of the applied hydropower dams

	Hwacheon	Chuncheon	Uiam	Cheongpyeong	Paldang
No. of simulation periods (day) [A]	7,305				
No. of periods with inflow ≠ discharge (day) [B]	6,619	3,381	1,237	2,066	125
Active-storage periods ratio (%) [B / A]	90.6	46.3	16.9	28.3	1.7
Classification	Storage	R.O.R	R.O.R	R.O.R	R.O.R

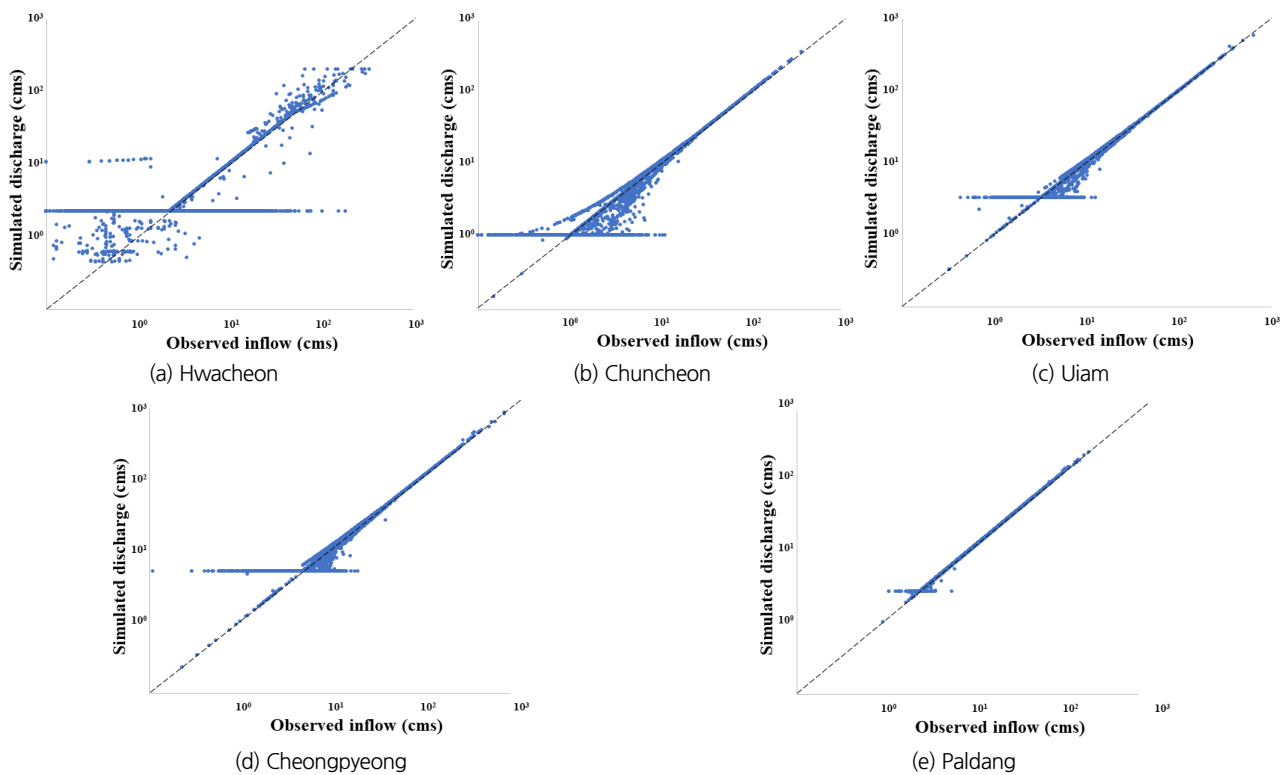


Fig. 5. Scatter plot of inflow and discharge of the applied hydropower dams

Table 9. Water supply contribution of the applied hydropower dams

	Hwacheon	Chuncheon	Uiam	Cheongpyeong	Paldang
Water supply capacity with dam operation (million m ³ /yr) [A]	709.6	359.5	1,040.7	1,636.7	2,012.0
Water supply capacity without dam operation (million m ³ /yr) [B]	66.2	44.2	432.0	709.6	1,636.7
Increment of water supply capacity by dam operation (%) [(A - B) / A]	90.7	87.7	58.5	56.6	18.7
Classification	Storage	Storage	R.O.R	R.O.R	R.O.R

Table 10. Comprehensive classification result of the applied hydropower dams

Dam	Approach 1	Approach 2	Approach 3	Classification result
Hwacheon	Storage	Storage	Storage	Storage
Chuncheon	R.O.R	R.O.R	Storage	R.O.R
Uiam	R.O.R	R.O.R	R.O.R	R.O.R
Cheongpyeong	R.O.R	R.O.R	R.O.R	R.O.R
Paldang	R.O.R	R.O.R	R.O.R	R.O.R

급능력이 클 것으로 판단된다. 반면, 나머지 네 개의 발전용댐은 최종 비저류형댐으로 분류됨에 따라 치수 및 이수 활용 능력은 상대적으로 미흡한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 기후변화 등 점차 높아지는 국내 수자원 확보 요구에 따라, 발전용댐의 용수공급능력 평가를 위해 먼저 발전용댐의 특성을 파악하고자 발전용댐의 유형분류(저류형 및 비저류형) 방법을 제안하였다. 제안된 발전용댐 유형 구분 방안에서는 상대적 저류용량, 저류활동의 빈도, 댐 운영을 통한 용수공급 기여도 등의 세 가지 저류특성 분석을 통해 발전용댐의 전반적인 저류능력을 파악하고자 하였으며, 저수지 모의운영 기법을 적용함으로써 용수공급 관점에서 모의된 댐 운영 결과를 활용하였다.

또한, 저류형 특성이 큰 다목적댐에 제안된 구분 방법들을 먼저 적용함으로써, 발전용댐의 저류형 및 비저류형 분류를 위한 정량적 기준을 수립하였으며, 각각 댐의 총 유입량 대비 유효저수량이 10% 이상인 경우, 모의기간 내 저류활동(저류 및 방류)이 발생한 기간이 80% 이상인 경우, 댐 용수공급능력 중 댐 운영에 의한 기여도가 80% 이상인 경우를 저류형 댐의 분류 기준으로 수립하였다.

최종적으로 제안된 방법 및 분류기준을 국내 북한강수계에 위치한 다섯 개 발전용댐(화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐)에 적용한 결과는 다음과 같다.

- 1) 화천댐은 세 가지 구분방법에서 모두 다목적댐을 상회하

는 저류능력을 보여 저류형댐으로 분류되었다.

- 2) 춘천댐의 경우 댐 운영으로 인한 용수공급 기여도는 높은 것으로 나타났으나, 유입량 대비 저류공간이 작고, 50% 이상의 모의기간에서 저류활동을 보이지 않아 비저류형 발전용댐에 해당하는 것으로 분류되었다.
- 3) 의암댐과 청평댐은 댐 운영에 의해 용수공급능력에 기여하는 효과는 어느정도 있는 것으로 나타났으나, 세 가지 방법 모두 전반적으로 저류능력이 미흡한 것으로 나타나 비저류형 발전용댐에 해당하는 것으로 분류되었다.
- 4) 팔당댐의 경우, 댐 저류공간을 활용하는 능력이 거의 없는 것으로 나타났으며, 세 가지 방법에서 모두 비저류형 특성이 큰 것으로 나타나 대표적인 비저류형 발전용댐에 해당하는 것으로 분석되었다.

현재 국내에서 적용 중인 수문학적 댐 능력 평가 기법들은 대부분 다목적댐을 중심으로 개발 및 발전되어 왔다. 하지만 국내에는 다목적댐과 다른 구조와 운영특성을 갖는 다수의 댐이 운영되고 있으며, 해당 댐에 대한 보다 적합한 용수공급 능력 평가 체계 및 운영방안 마련이 필요하다.

본 연구에서 제안한 저류형 및 비저류형 댐 구분방안은 댐 시설물의 저류특성 파악에 활용할 수 있으며, 더욱이 발전용댐의 용수공급능력 평가, 이수기 댐 운영기준 마련, 그리고 가뭄판단 기준 및 대응방안 마련 등 발전용댐을 대상으로 한 수문학적 안정성 평가연구에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 향후 연구에서는 본 논문에서 구분된 발전용댐의 유형(저류형 및 비저류형)에 따라 개별 발전용댐의 용수공급능력을 정량화하기 위한 평가방안을 마련하고 적용할 계획이다.

감사의 글

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

References

- Chae, H., Ji, J., and Yi, J. (2017). "Analysis of Hapcheon Dam water supply capacity according to climate change." *2017 Korea Water Resources Association Annual Conference*, KSCE, pp. 155-155.
- 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.
- Jang, C., and Kim, Y. (2016). "Improvement of water supply capability of the Nakdong River Basin Dams with weirs." *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 36, No. 4, pp. 637-644.
- 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.
- Kang, H., Park, J., Jin, H., Jang, S. Kim, J., and Lee, D. (2017). "Assessment of water supply reliability considering climate change on multi-purpose dams in Nakdong River Basin." *Korean Society of Civil Engineers 2017 Convention*, KWRA, pp. 161-162.
- Kang, M., and Park, S. (2005). "Assessment of additional water supply capacity using a reservoir operation model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 11, pp. 937-946.
- Lee, D., Choi, C., Yu, M., and Yi, J. (2012). "Reevaluation of multi-purpose reservoir yield." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 4, pp. 361-371.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2016). Dam Water Shortage Contrast Water Supply Adjustment Standard.
- 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.
- Water Management Information System (WAMIS) (2000). Korea, accessed on 22 March 2021, <<http://www.wamis.go.kr/>>.