



Estimating the water supply capacity of Hwacheon reservoir for multi-purpose utilization

Lee, Eunkyung^a · Lee, Seonmi^b · Ji, Jungwon^c · Yi, Jaeung^d · Jung, Soonchan^{e*}

^aResearch Professor, Department of Civil System Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

^bPh.D Candidate, Department of Civil System Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

^cResearch Professor, Department of Civil System Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

^dProfessor, Department of Civil System Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

^eExecutive director, Department of Water Resources, Dongbu Engineering Co., Seoul, Korea

Paper number: 22-031

Received: 28 April 2022; Revised: 12 May 2022; Accepted: 14 May 2022

Abstract

In April 2020, the Korean government decided to operate the Hwacheon reservoir, a hydropower reservoir to supply water, and it is currently under pilot operation. Through the pilot operation, the Hwacheon reservoir is the first among the hydropower reservoirs in Korea to make a constant release for downstream water supply. In this study, the water supply capacity of the Hwacheon reservoir was estimated using the inflow data of the Hwacheon reservoir. A simulation model was developed to calculate the water supply that satisfies both the monthly water supply reliability of 95% and the annual water supply reliability of 95%. An optimization model was also developed to evaluate the water supply capacity of the Hwacheon reservoir. The inflow data used as input data for the model was modified in two ways in consideration of the impact of the Innam reservoir. Calculating the water supply for the Hwacheon reservoir using the two modified inflows is as follows. The water supply that satisfies 95% of the monthly water supply reliability is 26.9 m³/sec and 24.1 m³/sec. And the water supply that satisfies 95% of the annual water supply reliability is 23.9 m³/sec and 22.2 m³/sec. Hwacheon reservoir has a maximum annual water supply of 777 MCM (Million Cubic Meter) without failure in the water supply. The Hwacheon reservoir can supply 704 MCM of water per year, considering the past monthly power generation and discharge patterns. If the Hwacheon reservoir performs a routine operation utilizing its water supply capacity, it can contribute to stabilizing the water supply during dry seasons in the Han River Basin.

Keywords: Hwacheon reservoir, Water supply reliability, Water supply capacity, Simulation technique, Optimization technique

다목적 활용을 위한 화천댐 용수공급능력 평가 연구

이은경^a · 이선미^b · 지정원^c · 이재응^d · 정순찬^{e*}

^a아주대학교 건설시스템공학과 연구교수, ^b아주대학교 건설시스템공학과 박사과정, ^c아주대학교 건설시스템공학과 연구교수,

^d아주대학교 건설시스템공학과 교수, ^e동부엔지니어링 수자원환경부 전문

요 지

2020년 4월, 한강수계의 유효저수용량이 비교적 큰 발전용댐인 화천댐을 용수공급에 활용하기 위한 협약이 체결되었고 현재는 시범운영 중이다. 화천댐은 시범운영을 통해 우리나라 발전용댐 중 최초로 하류부 용수공급을 위해 지속적으로 일정한 유량을 공급하고 있다. 본 연구에서는 화천댐의 규모와 유입량 실적자료를 활용하여 화천댐의 용수공급량을 산정하고 용수공급능력을 평가하였다. 월단위 95% 이수안전도와 연단위 95% 이수안전도를 충족하는 용수공급량을 산정하기 위한 모의 모형과 화천댐 용수공급능력을 산정하기 위한 최적화 모형을 개발하였다. 또한, 모형의 입력자료로 사용되는 유입량 자료는 임남댐의 영향을 고려하여 두 가지 방법으로 보정하였다. 두 가지 보정 유입량을 활용하여 화천댐 용수공급량을 산정한 결과는 다음과 같다. 월단위 95% 이수안전도를 만족하는 용수공급량은 26.86 m³/sec, 24.12 m³/sec, 연단위 95% 이수안전도를 만족하는 용수공급량은 23.88 m³/sec, 22.22 m³/sec이다. 용수공급 실패 없이 화천댐에서 연간 최대 공급할 수 있는 용수공급량은 776.8 MCM이며 과거 월별 발전방류패턴을 고려하여 방류하는 경우에는 연간 704.3 MCM을 공급할 수 있다. 화천댐의 용수공급능력을 활용한 체계적인 운영이 수행된다면 한강수계 갈수기 용수공급 안정화에 기여할 것으로 기대된다.

핵심용어: 화천댐, 이수안전도, 용수공급능력, 모의 기법, 최적화 기법

*Corresponding Author. Tel: +82-2-2122-6856

E-mail: sawshark@dbeng.co.kr (S. Jung)

1. 서론

우리나라는 중위도 온대성 기후대에 위치하여 사계절이 뚜렷하고 강우가 여름철에 편중되는 특성을 가진다. 전세계적으로 산업이 발달하고 환경이 파괴되어 지속적으로 기후변화가 심화되고 있으며 우리나라도 기후변화의 영향을 받고 있다. 우리나라의 연평균기온과 연평균강우는 모두 증가하는 추세이며 특히 여름철 강수량은 +11.6 mm/10년으로 뚜렷하게 증가하는 경향을 보인다(KMA, 2020). 우리나라는 일반적으로 용수공급 안정성 및 홍수방어의 역할을 위해 댐을 활용함으로써 수자원의 불확실성에 대응하고 있다. 특히, 전국적으로 2015~2017년에 극심한 가뭄을 겪으면서 전체 인구의 44%가 밀집된 수도권의 용수공급에 대한 불안감이 상승하였다. 기후변화에 의해 강우 패턴이 점점 불규칙해지고 가뭄 발생빈도가 증가하고 가뭄 심도가 심화됨에 따라 안정적인 용수공급을 위해 추가 용수공급능력의 확보가 필요한 실정이다. 2020년 4월 환경부와 한국수력원자력은 한강수계 용수공급 및 홍수조절 안정화를 위해 「한강수계 발전용댐 다목적 활용을 위한 협약」을 체결하였다. 본 협약은 새로운 댐을 건설하여 추가 수자원을 확보하는 것이 아니라 기존의 발전용댐을 활용하여 수자원을 확보하기 위해 체결되었다.

전세계적으로 많은 국가들이 막대한 예산을 소요하거나 환경을 파괴하는 신규댐 건설 대신 기존의 댐들을 적극 활용하는 방안을 추구하고 있다. OECD의 주요 국가들도 발전용댐을 다목적화 하려는 추세이다. 2012년 프랑스 마르세유에서 열린 6차 세계 물포럼에서 프랑스전력(Électricité de France, EDF)과 세계 물 위원회(World Water Council, WWC)는 기존 물 부족 해결을 위해 기존 수력댐의 다목적 활용을 제안하였다(ME and MOTIE, 2019). 또한, 페루, 코스타리카, 미국, 프랑스, 카메룬, 니제르, 인도-네팔, 중국, 오스트리아 등에서 이미 발전용댐을 다목적 활용하여 사용하고 있다(Branche, 2015). 대표적으로 프랑스의 Serre-Ponçon 댐은 Durance-Verdon 강의 유량을 이용하여 전력생산을 주목적으로 운영했지만 주변 지역의 용수공급, 관광 등의 부수적인 목적으로 추가 이용하고 있다. 또한, Serre-Ponçon 댐은 프로방스 지역의 가뭄 발생을 예방하고 홍수를 조절하는 역할을 병행하며 수자원을 관리하고 있다(Branche, 2017). Zarri *et al.* (2019)은 미국 캘리포니아 수력발전댐인 Keswick 댐을 대상으로 용수 수요 및 생태계 보존 등을 목적으로 발전용댐의 다목적화를 실행하였고 발전용댐의 최적 방류 시나리오를 개발하였다. 우리나라에서는 화천댐이 최초로 다목적 활용으로 전환되는 발전용댐으로, 발전생산 외에 용수공급 및 홍수방어 기능을 추가 수행하기로 결정되었다. 그

러나, 화천댐을 용수공급 목적으로 운영하기 위한 사전 연구가 부족한 실정으로 본 연구에서는 화천댐을 다목적으로 활용할 경우 용수공급능력을 검토하고자 한다.

댐은 설계 시 하류의 물 수요량을 분석한 후 규모가 정해지지만 이미 건설되어 사용되고 있는 댐을 활용하여 추가로 용수공급 목적으로 사용하기 위해서는 댐의 용수공급능력 평가가 필요하다. Lee and Kang (2006)은 확률론적 신뢰도 및 HEC-5 모형을 활용하여 산정한 보장공급량을 통해 이수안전도 평가 절차를 제시하고 소양강댐과 충주댐의 이수안전도를 평가하여 추가 공급가능량을 산정하는 연구를 수행하였다. 운영 중인 댐들에 대한 용수공급 관련 분석이 지속적으로 수행되는 것처럼 화천댐도 합리적인 용수공급을 하기 위해 이수안전도 분석 및 용수공급량 산정이 필요하다. Srivastava and Awchi (2009)등의 연구에서도 인도 Mula 댐을 대상으로 선형계획법, 동적계획법, 인공신경망, Hedging Rule 등을 기반으로 저수지 최적화 모형을 개발하여 댐 공급능력평가를 수행하였다. 일반적으로 댐의 용수공급능력 평가에는 Hashimoto *et al.* (1982)이 제안한 신뢰도, 회복도, 취약도 등이 이용된다. 이수안전도의 측면에서 용수공급 안정성만 고려한다면 용수 부족이 발생하지 않는 규모가 큰 댐을 건설하는 것이 가장 간단한 방법이다. 그러나, 수자원 이용의 효율성을 고려하여 감당할 수 있는 물 부족을 허용하는 신뢰도의 적용이 타당하다(Yi *et al.*, 2012). 우리나라에서 용수공급능력을 평가할 때는 연간단위 신뢰도 분석이 널리 활용되어 왔다. 연단위 신뢰도는 일년 중 한 번이라도 실패가 발생하는 경우에 해당 연도를 용수공급 실패로 간주하기 때문에 우리나라처럼 수문자료 보유기간이 짧은 경우에는 다른 기간 단위 분석이 추가로 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 연단위 95% 이수안전도와 월단위 95% 이수안전도에 해당되는 용수공급능력을 검토하였다. Lee *et al.* (2012)의 연구에서도 안동댐과 임하댐을 대상으로 하류 용수수요 증가에 따른 추가용수공급 가능여부 판단을 위해 HEC-ResSim을 활용한 신뢰도 96.7%, 95%를 기준으로 연단위, 월단위 이수안전도 평가를 수행하였다.

본 연구에서는 화천댐 상류에 위치하는 북한 임남댐의 영향을 고려하기 위해 유입량 보정을 수행하였다. 미계측 유역의 유량을 산정할 때 사용하는 비유량법과 계절적 특성이 고려된 월별 유입량 변화율을 이용하는 방법으로 유입량을 보정하였다. 보정된 유입량 자료들을 활용하여 일단위 모의운전을 실시하였고 화천댐에 적합한 용수공급량을 산정하기 위한 연단위, 월단위 이수안전도 분석을 수행하였다. 또한, 화천댐에서 연간 공급할 수 있는 용수공급능력을 검토하기 위한 최적화 모형과 전력생산 패턴을 고려한 최적화 모형도 개발하였

다. 본 모형은 과거 발전방류패턴을 고려한 월별 최적 용수공급량을 산정하는 모형으로 과거와 유사한 패턴으로 용수공급시 산정되는 화천댐의 연 용수공급량을 검토하였다.

2. 기본 이론

2.1 댐 운영 기법

댐 운영 모형을 구축하기 위해 사용되는 기본적인 기법으로 모의 기법과 최적화 기법이 있다. 모의 기법은 운영 목적에 적합한 제약조건을 적용하여 결과를 확인하는 과정을 되풀이하는 시행착오를 거쳐 댐 운영 결과를 도출한다. 모의운영은 복잡하거나 실제 운영에 가까운 제약조건 등을 모형에 반영할 수 있으며 모형 개발 단계별로 결과를 확인할 수 있어 복잡한 모형을 구성할 수 있다. 최적화 운영은 다양한 제약조건 하에 최적의 목적값을 찾고 최적해를 도출하는 방법으로 1개 또는 다수의 목적을 달성하기 위한 최적해를 제시한다. 또한, 최적해에 상응하는 최적 변수 그룹이 다양하게 존재하기 때문에 최적 변수는 실제 운영에 적절하지 않은 경우도 발생한다. 따라서, 연구 목적에 따라 모의 기법과 최적화 기법을 적절히 선택해서 사용해야 한다. 저수지 모형은 Excel 프로그램이나 다양한 프로그래밍 언어를 이용하여 직접 모형을 구축하거나 HEC-5(Cha and Park, 2004), HEC-ResSim (Ahn *et al.*, 2012; Osroosh *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2020; Ozkaya and Zerberg, 2021), ModSim (Berhe *et al.*, 2013; Chhuon *et al.*, 2016), CalSim (Draper *et al.*, 2004) 등 기존에 개발된 프로그램을 이용하여 구축할 수 있다. 최적화 기법은 전통적으로 선형계획법 (Tao and Lennox, 1991; Reis *et al.*, 2006), 비선형계획법 (Chu and Yeh, 1978; Arunkumar and Jothiprakash, 2012), 동적계획법 (Stedinger *et al.*, 1984; Zhao *et al.*, 2014) 등이 활용되고 있으며, 최근에는 heuristic 최적화 기법 (Labadie, 2004; Afshar *et al.*, 2007; Valeriano *et al.*, 2010)도 활용되고 있다.

2.2 유량 보정 방법

일반적으로 댐 또는 하천의 관측소는 국가하천과 지방하천에 집중되어 있고 소유역에는 관측소가 설치되지 않는 경우가 많다. 계측 지점 유량을 활용하여 부분계측 또는 미계측 지점 유량 산정에 대한 기초 연구는 2000년대부터 지속적으로 이루어지고 있다 (Oh *et al.*, 2021). 미계측 유역의 유량 산정 방법은 비유량법 (Drainage area ratio method), 지역회귀법 (Regional regression method), 기저유량상관법 (Baseflow correlation method) 등이 일반적이다.

2.2.1 비유량법 (Drainage area ratio method)

비유량법은 어느 유역에서 유량 기록이 없거나 자료 기간이 짧을 경우, 인근 계측 유역의 유량 자료를 이용하여 면적비에 의해 추정하는 방법으로 관련 식은 Eq. (1)과 같다 (Jung *et al.*, 2012). 비유량법은 미계측 유역과 다른 유역들의 수문학적 특성이 유사하여, 동질 지역의 유량은 면적에 정비례한다는 가정을 전제로 한다 (Yang and Choi, 2003).

$$Q_1 = Q_2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \quad (1)$$

여기서, Q_1 은 미계측 유역의 유량, Q_2 는 계측 유역의 유량, A_1 은 미계측 유역의 유역면적, A_2 는 계측 유역의 유역면적이다.

2.2.2 월별 유량 변화율

월별 유량 변화율은 동일 유역에서 특정 이유로 유량 특성의 변화가 뚜렷하게 발생하여 이전 자료를 현재와 동일한 상황의 자료로 사용하기 어려운 경우에 적용 가능하다. 우리나라는 계절에 따른 수문학적 특성이 뚜렷하기 때문에 일정 비율로 유량을 보정하는 방법 대신 특정 시점을 기준으로 월별 유량 변화율을 적용하는 방안을 적용했다. 월별 유량 변화율을 이용하여 유량을 보정하는 계산식은 Eq. (2)와 같다.

$$Q_{1,t} = Q_{2,t} \left(\frac{\frac{\sum_{t=1}^n Q_{1,t}}{n}}{\frac{\sum_{t=1}^m Q_{2,t}}{m}} \right) \quad (2)$$

여기서, $Q_{1,t}$ 는 t 월 보정 후 유량, $Q_{2,t}$ 는 t 월 보정 전 유량, n 은 특정 시점부터 현재까지의 t 개월 수, m 은 자료 수집 시점부터 특정 시점까지의 t 개월 수를 의미한다.

2.3 댐 용수공급능력 평가

댐은 용수공급 실패를 최소화하고 댐 하류에서 용수부족이 발생하지 않도록 운영해야 한다. 용수공급을 목적으로 설계되지 않은 댐은 댐 설계시 용수공급능력을 평가하지 않기 때문에 새롭게 용수공급을 목적으로 댐을 운영하기 위해서는 용수공급 평가가 필요하다. 일반적으로 공급계획을 평가하기 위해 신뢰도 (Reliability) 개념을 사용한다. 신뢰도 기준에 의한 용수공급능력 평가는 수문자료를 최대한 활용하여 저수

지 모의운영을 실시하고 일정 기준을 만족시키는 용수공급능력을 검토한다. 전체 기간에서 부족이 발생하지 않는 신뢰도 100%의 보장공급량을 채택하는 경우, 수자원 시설물의 이용 효율은 저하된다. 따라서, 합리적인 용수공급계획은 공급을 100% 보장하는 기준으로 수립하는 것보다 수자원 이용의 효율성과 신뢰도를 적절하게 고려하여 수립하여야 한다. 우리나라의 용수공급능력 평가에서는 대체적으로 연간단위 신뢰도(빈도 신뢰도)를 채택하고 있다(Jung and Yoon, 2021). 그러나, 우리나라는 자료 보유 기간이 짧아 부족년이 1년만 발생하여도 신뢰도가 많이 감소한다. 같은 유역의 다목적댐이라도 자료기간의 차이가 상당히 있는 경우에는 신뢰도가 서로 상이하게 산정되는 문제가 발생하기 때문에 다양한 분석 기간 단위를 이용한 신뢰도 분석이 필요하다.

2.4 신뢰도(Reliability)

신뢰도는 Hashimoto *et al.* (1982)이 제시한 이수안전도 평가지표로 분석 기간 내 안정적인 용수공급을 수행하는 정도를 의미하며 Eq. (3)과 같다.

$$\alpha = \text{Prob}[X_t \in S] \quad (3)$$

여기서, α 는 신뢰도, X_t 는 t 시간에 대한 용수공급 관련 무작위 변수, S 는 용수수요의 충족상태를 의미한다. 신뢰도는 운영단위 및 평가단위에 따라 발생 빈도 신뢰도(Occurrence-based reliability), 기간 신뢰도(Time-based reliability), 양적 신뢰도(Quantity-based reliability)로 구분된다(Votruba and Broža, 1989).

2.4.1 발생 빈도 신뢰도(Occurrence-based reliability)

발생빈도 신뢰도는 총 운영기간 중 용수공급실패가 발생하지 않은 기간(년) 수로 Eq. (4)와 같이 정의된다.

$$Rel_o = \frac{\sum F_s}{F_t} \quad (4)$$

여기서, Rel_o 는 빈도 신뢰도, F_s 는 총 운영 기간 중 용수공급 실패가 발생하지 않은 기간(년) 수, F_t 는 총 운영 기간(년)을 의미한다. 발생 빈도 신뢰도는 우리나라에서 용수공급능력 평가 시 일반적으로 사용하는 지표로 댐의 용수공급능력 분석 시 일단위 또는 월단위로 모의 운영을 실시하고 연단위로 이수안전도를 평가한다. 자료 기간이 짧은 경우에 발생하는 발생 빈도 신뢰도의 단점을 보완하기 위해 기간 신뢰도 분석을 함

게 실시하여 용수공급능력을 평가할 수 있다.

2.4.2 기간 신뢰도(Time-based reliability)

기간 신뢰도는 총 운영기간 중 용수공급이 가능한 기간(일, 반순, 순, 월) 수를 의미하며, Eq. (5)와 같이 표현된다(Choi *et al.*, 2014).

$$Rel_t = 1 - \frac{\sum T_f}{T_t} \quad (5)$$

여기서, Rel_t 는 기간 신뢰도, T_f 는 총 운영 기간 중 용수공급 실패가 발생한 기간(일, 반순, 순, 월), T_t 는 총 운영 기간 수를 의미한다.

2.4.3 양적 신뢰도(Quantity-based reliability)

양적 신뢰도는 총 운영기간 중 댐으로부터 공급해야 하는 계획공급량과 실제 용수공급량의 비로 정의할 수 있으며, Eq. (6)으로 표현된다.

$$Rel_q = 1 - \frac{\sum Q_r}{Q_t} \quad (6)$$

여기서, Rel_q 는 양적 신뢰도, Q_r 는 총 운영 기간 중 발생한 용수공급 부족량, Q_t 는 총 운영 기간의 용수공급계획량을 의미한다.

3. 연구범위 및 방법

3.1 대상 유역 및 댐 제원

화천댐은 홍수조절용댐인 평화의댐과 함께 한강수계 북한강 최상류에 위치하며 화천댐의 전체 유역면적은 3,901 km²이다. 화천댐은 1944년 10월에 준공되어 발전 단일 목적으로 운영되었으나, 1973년부터 다목적댐과 운영방식과 같이 홍수기와 갈수기를 구분하여 홍수방어 목적을 포함하여 운영되었다. 홍수기 북한의 무단방류에 대비하기 위해 화천댐은 댐 수위가 홍수기에는 홍수기 제한수위 175 El.m, 갈수기에는 상시만수위인 181 El.m를 초과하지 않도록 운영하고 있다. 화천댐의 유효저수용량은 갈수기 572.8 MCM, 홍수기 394.4 MCM으로 Fig. 1과 같다.

화천댐 유역에는 북한의 임남댐이 Fig. 2와 같이 포함되어

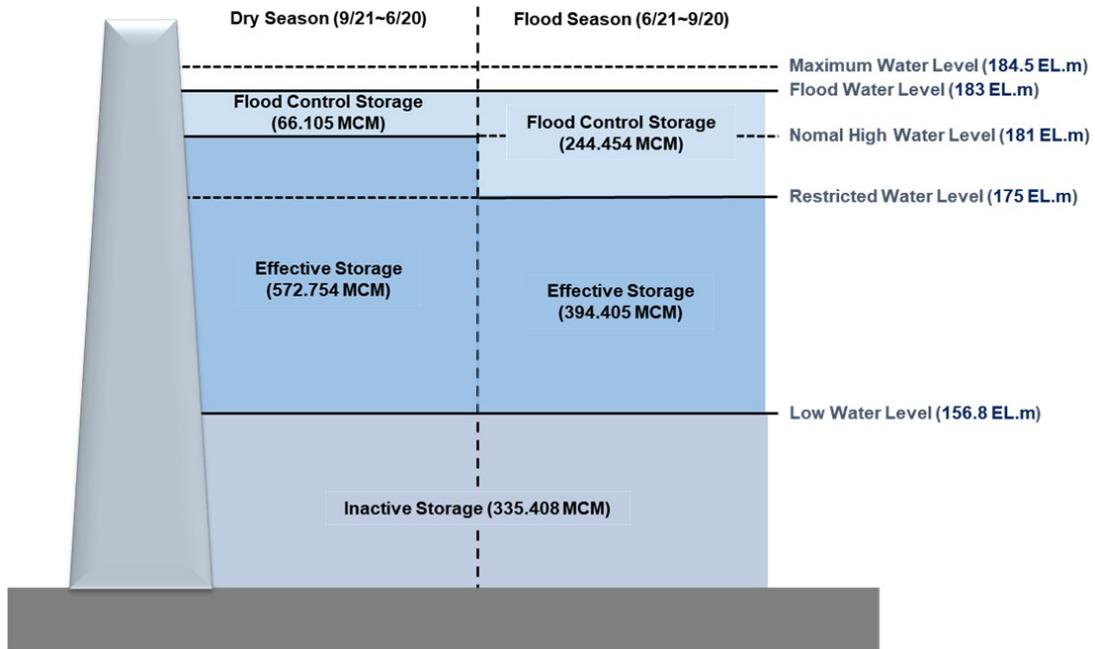


Fig. 1. Description of water level and capacity in Hwacheon reservoir

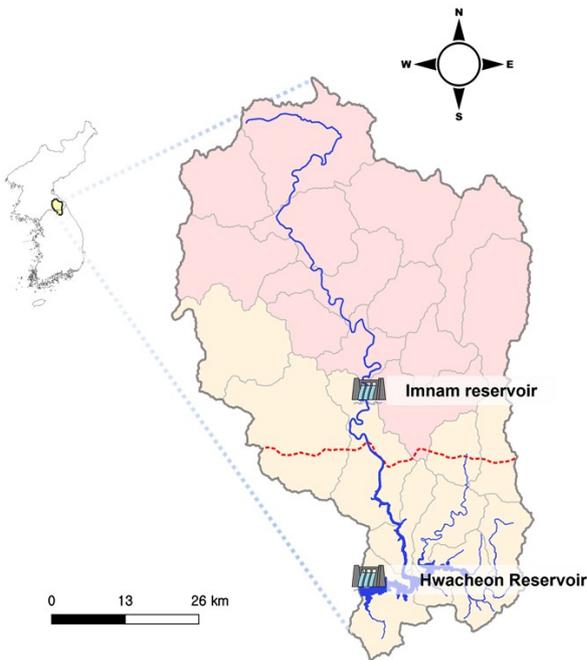


Fig. 2. Basin of Hwacheon and Imnam reservoir

있으며, 임남댐의 유역면적은 2,384.7 km²이다(ME, 2009). 1986년 10월, 북한은 전기를 생산하기 위해 북한강을 동해안으로 유역변경하는 임남댐을 건설하기 시작하였다(Kim *et al.*, 2005). 임남댐은 2000년 4월부터 물을 채우기 시작하였고 2001년부터 화천댐으로 들어오는 유입량이 상당히 감소하

여수도권 지역에서 추가 물부족이 발생하였다(Lee *et al.*, 2008).

3.2 유입량 자료 보정

화천댐의 연평균 유입량은 임남댐이 준공되어 담수하기 시작한 시점 이래로 현저히 감소하여 2001년 이전 유입량을 사용하기 위해서는 유입량 보정이 필요하다. 본 연구에서는 유입량을 보정하기 위해 비유량법과 월별 유량 변동률법을 활용하는 방법을 검토하였다. 첫 번째, 비유량법을 활용한 유입량 보정 방법은 임남댐을 포함한 화천댐 유역면적과 임남댐 유역면적을 제외한 화천댐 자기유역면적비를 산정하여 임남댐 준공 이전 유입량에 곱해서 보정한다. 유역면적비는 Eq. (7)과 같이 계산한다. 본 연구에서는 화천댐 유역 내 위치한 임남댐 유역면적을 제외한 비율 38.7%를 2001년 이전 유입량에 적용하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Drainage Area Ration}(\%) \\
 & = \frac{\text{Area}_{\text{Hwacheon}} - \text{Area}_{\text{Imnam}}}{\text{Area}_{\text{Hwacheon}}} \times 100 \quad (7)
 \end{aligned}$$

월별 유량 변화율을 적용한 유입량 보정은 다음과 같이 수행하였다. 2001년을 기준으로 2001년 이전과 이후의 월별 연평균 유입량의 변화율을 산정하였다(Table 1). 임남댐이 준공 이전과 이후의 월평균 유입량의 변화율은 35~90% 정도로 월별로 차이가 뚜렷하기 때문에 유역면적비로 일괄 적용하는 일반적인 방법 이외에 월별 유량 변화율을 적용한 방법도 함

계 검토할 필요가 있다. 유입량 변화율을 2001년 이전 유입량에 적용하여 보정한 결과는 Fig. 3과 같다. 유역면적비 38.7%를 일괄 적용한 보정 유량이 월별 유량 변화율을 적용한 보정 유량에 비해 과소 산정됨을 확인하였다. 2001년 이전의 유입량에 월별 유량 변화율을 적용하는 경우에는 실측 유입량의 약

55.6%, 유역면적비를 적용하면 실측유입량의 약 38.7%로 감소되었다.

4. 모형 구축 및 용수공급능력 검토

본 연구에서는 화천댐의 용수공급능력을 평가하기 위해 Python을 활용하여 화천댐의 모의 모형과 최적화 모형을 구축하였다. 모의 모형은 일단위 자료를 활용하여 댐 운영을 수행하되, 이수안전도는 월단위 또는 연단위로 분석하여 95% 이수안전도를 충족시키는 적정 용수공급량을 산정하는 모형이다. 과거 유입량 자료를 모형에 적용하여 화천댐의 일정 용수공급가능량을 산정함으로써 화천댐에서 다목적댐과 같이 공급할 수 있는 용수공급량을 산정하였다. 최적화 모형은 용수공급 부족이 발생하지 않게 하는 화천댐의 월별 변동 용수공급량을 산정하여 화천댐의 용수공급능력을 검토하였다. 본 연구에서 개발한 모형과 분석 단위는 Table 2와 같다. 여기서, 연단위 95% 이수안전도를 만족하는 유량을 도출하기 위해서는 분석기간 33년 중 1개년의 용수공급 실패만 허용한다. 33년 중 1년의 용수공급 실패하도록 하는 유량은 정확히 97.3%의 이수안전도를 만족하는 유량이다. 우리나라는 수문자료의

Table 1. Change ratio of monthly inflow in Hwacheon reservoir

Month	(1967.01~2000.12) Annual average inflow (m ³ /sec)	(2001.01~2022.03) Annual average inflow (m ³ /sec)	Change ratio of monthly inflow (%)
Jan.	13.53	12.20	90.12
Feb.	15.97	9.23	57.80
Mar.	34.44	14.39	41.78
Apr.	68.49	24.09	35.18
May.	68.82	29.94	43.50
Jun.	64.11	28.19	43.98
Jul.	248.67	183.77	73.90
Aug.	322.78	200.90	62.24
Sep.	182.66	78.25	42.84
Oct.	43.13	18.02	41.78
Nov.	35.07	13.27	37.83
Dec.	20.64	9.91	48.03

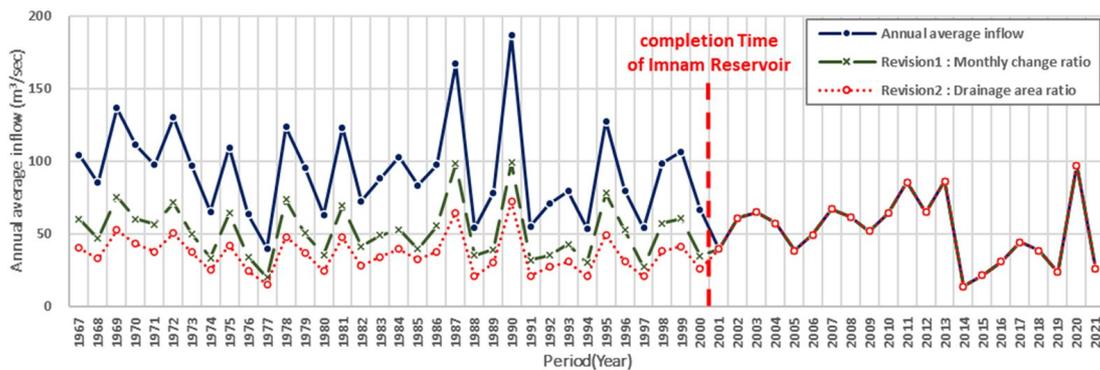


Fig. 3. Annual average inflow of Hwacheon reservoir

Table 2. Description of the models

	Simulation model		Optimization model	
	Model 1-1	Model 1-2	Model 2-1	Model 2-2
Object	Calculation of water supply that satisfies 95% of monthly water supply reliability	Calculation of water supply that satisfies 95% of annual water supply reliability	Maximum water supply capacity	Maximum water supply capacity considering past discharge patterns
Operation unit	Day	Day	Month	Month
Reliability unit	Month	Year	Month	Month
Water supply reliability	95%	95%	100%	100%
Decision variable	Constant water supply		Monthly variable water supply	

보유기간이 길지 않기 때문에 연단위 분석 시 이러한 오류가 발생하며, 이는 추후에 수문자료가 누적되어 분석기간이 길어지게 되면 보완될 사항이라 사료된다. 모의 모형과 최적화 모형에 사용된 유입량 자료는 충주댐이 준공된 시점(1986년) 이후의 435개월(13239일) 자료를 사용하였다. 남한강 본류에 건설된 충주댐은 한강수계 용수공급을 담당하는 다목적댐으로 충주댐의 준공이 화천댐의 운영에도 영향이 있었을 것으로 판단하였다.

4.1 화천댐 용수공급량 산정

화천댐의 월단위, 연단위 95% 이수안전도를 만족하는 용수공급량을 산정하기 위해 모의운영 모형을 Table 3과 같은 알고리즘을 작성하였다. 초기 변수로 용수공급량(Water Supply Capacity, *WSC*; m³/sec), 이수안전도(Water Supply Reliability, *WSR*; %), 초기 수위(Initial Water Level, *Ini WL*; El.m),

Table 3. A summary of simulation model algorithm

	Algorithm
Initial variable	<i>WSC</i> (m ³ /sec) = 20, <i>WSR</i> (%) = 100, <i>Ini WL</i> (El.m) = 174.01
Coding summary	while <i>WSR</i> ≥ 95 for <i>t</i> in range(0, Total Period) $S_t = S_{t-1} + I_t - Y - W_t$ if <i>Y</i> < <i>WSC</i> $Fail = 1$ $WSR = \frac{Total\ Period - \sum(Fail)}{Total\ Period} \times 100$ # Water supply reliability check if <i>WSR</i> ≥ 95 $WSC = WSC + 0.005$ else $break$
Variable summary	<i>WSC</i> : Water supply capacity, <i>WSR</i> : Water supply reliability, <i>Ini WL</i> : Initial water level, <i>S</i> : Storage, <i>I</i> : Inflow, <i>Y</i> : Water supply, <i>W</i> : Total discharge excluding water supply, <i>Fail</i> : Number of water supply failures, <i>t</i> : 1, 2, ..., Total Period

유입량 자료를 입력하면 모형에 의해 월단위 또는 연단위 95% 이수안전도를 만족하는 화천댐 용수공급량이 도출된다.

위와 같이 개발된 모형에 보정한 2가지 유입량을 입력하여 일단위 운영-월단위 95% 이수안전도, 일단위 운영-연단위 95% 이수안전도를 만족하는 용수공급량을 도출하였다 (Table 4). 유역면적비를 적용한 보정 유입량과 월별 유량 변화율을 적용한 보정 유입량을 통해 산정한 월단위 95% 이수안전도를 만족하는 용수공급량은 각각 24.1 m³/sec, 26.9 m³/sec이다. 같은 조건을 적용한 연단위 95% 이수안전도를 만족하는 용수공급량은 각각 22.2 m³/sec, 23.9 m³/sec가 산정되었다. 여기서 용수공급량 22.2 m³/sec는 현재 화천댐에서 시범운영 중인 용수공급량 22.2 m³/sec를 산정한 것과 동일한 조건(유역면적비 38.7%를 이용한 유입량 보정, 동일한 운영 기간)에서 모의한 결과이기 때문에 동일한 용수공급량이 도출되었는 것을 확인하였다. 연단위로 분석하는 경우 95% 이수안전도를 만족하기 위해서는 분석연도인 37년 중 1년만 실패하는 용수공급량을 산정해야 하고, 1년 중 1일이라도 실패가 발생하면 그 해는 실패한 해로 간주되기 때문에 보수적인 결과가 도출된다. 반면, 월단위로 분석하면 95% 이수안전도를 만족하기 위해 435월 중 21개월만 실패가 발생하는 용수공급량을 찾게 되므로 더 큰 용수공급량을 도출하게 된다.

4.2 화천댐 연 용수공급능력 산정

이수안전도 100%의 용수공급량을 사용하는 것은 수자원의 이용효율을 저감시키기 때문에 실무에 적용하는 경우는 드물다. 그러나, 화천댐은 우리나라에서 발전용댐이 다목적 활용되는 첫 사례로 다양한 용수공급능력 분석이 필요하다고 판단하여 검토하였다. 따라서, 본 연구에서는 화천댐의 최대 연 용수공급량과 과거의 월별 발전방류패턴을 적용한 연 용수공급량을 산정하는 최적화 모형을 개발하여 화천댐의 용수공급능력을 분석하였다. 최적화 모형의 목적함수와 제약조건은 Table 5와 같다. Model 2-1는 월별 변동 용수공급량을 산정하여 화천댐에서 연간 최대 공급할 수 있는 용수공급량을 산정하는 모형이다. 목적함수는 월별 용수공급량(*Y_k*) 합의 최대화이다. Model 2-2는 월별 발전방류패턴을 고려한 월별 용수공

Table 4. Analysis of water supply at Hwacheon reservoir using simulation models

	Model 1-1		Model 1-2	
	Drainage area ratio	Monthly change ratio	Drainage area ratio	Monthly change ratio
Revison inflow				
Analysis period	435 months		37 years	
Shortage period	21 months		1 years	
Water supply reliability (%)	95.2		97.3	
Water supply (m ³ /sec)	24.1	26.9	22.3	23.9

Table 5. A summary of optimization model algorithm

	Model 2-1	Model 2-2
Object function	$\max Y_k$	$\max Y$
Constraints	$S_t = S_{t-1} + I_t - Y_k - W_t$ $S_t \leq C_t, S_t \geq K_t$ $S_t, I_t, Y, W_t \geq 0$	$S_t = S_{t-1} + I_t - \beta_k Y - W_t$ $S_t \leq C_t, S_t \geq K_t$ $S_t, I_t, Y, W_t \geq 0$
Variable summary	S : Storage, I : Inflow, β : Average hydroelectric discharge ratio, Y : Water supply, W : Total discharge excluding water supply, C : Storage of normal high water level (Oct.~Jun.); Storage of restricted water level (Jul.~Sep.), K : Storage of low water level, t : 1, 2, ..., Total Period, k : 1, 2, ..., 12	

Table 6. Monthly average Hydroelectric discharge ratio in Hwacheon reservoir (1986.01~2022.03)

Month	Monthly average hydroelectric discharge ratio	Monthly average hydroelectric discharge (m ³ /sec)
Jan.	0.054	14.46
Feb.	0.049	13.12
Mar.	0.045	12.05
Apr.	0.056	14.99
May.	0.086	23.02
Jun.	0.085	22.76
Jul.	0.171	45.78
Aug.	0.216	57.83
Sep.	0.123	32.93
Oct.	0.051	13.65
Nov.	0.029	7.76
Dec.	0.036	9.64

Table 7. Analysis of water supply at Hwacheon reservoir using optimization model

Revision inflow	Model 2-1		Model 2-2	
	Drainage area ratio	Monthly change ratio	Drainage area ratio	Monthly change ratio
Water supply reliability (%)	100		100	
Total annual water supply capacity (MCM)	776.8		704.3	

급량을 산정하여 연 용수공급량을 산정한다. Model 2-2의 목적함수는 용수공급량 Y 의 최대화이며 제약조건에 Y 에 월별로 월평균 발전방류량 비(1986.01~2022.03)를 Table 6과 같이 적용하여 물수지 방정식을 포함하였다.

최적화 모형을 통해 산정한 이수안전도 100%를 만족하는 화천댐 최대 연 용수공급량은 776.8 MCM이다. 발전방류패턴

을 고려하여 산정한 월평균 용수공급량은 Table 6과 같으며 연평균 용수공급량으로 환산시 22.3 m³/sec이다. 22.3 m³/sec는 1년동안 화천댐에서 과거 발전방류패턴을 고려한 연 용수공급량이 704.3 MCM이라는 의미이다(Table 7). Model 2-2를 통해 산정된 연평균 용수공급량이 현재 시범운영에 이용되는 용수공급량 22.2 m³/sec (연단위 95% 이수안전도)와 비슷하다. 이는 과거 발전방류패턴을 적용하여 용수공급하는 것이 용수공급량 22.2 m³/sec로 일정량 방류하는 것과 1년 동안 총 용수공급량은 유사하고 이수안전도는 더 높게 안정적으로 용수공급 가능하다는 것을 나타낸다.

5. 결론

시범운영 이전, 화천댐은 발전 단일 목적으로 운영되었지만 극심한 가뭄이 지속되는 경우에 충주댐과 소양강댐을 지원하여 수도권 용수공급을 위한 방류를 실시한 경향이 있다. 그러나, 화천댐은 가뭄을 극복하기 위해 지원하는 역할이었으며 체계적인 용수공급은 2020년 4월부터 시작된 시범운영이 처음이다. 시범운영 기간 이후에 화천댐이 안정적인 용수공급을 할 수 있는 역할을 하기 위해서 화천댐의 용수공급능력을 다양한 측면에서 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 화천댐이 수력발전 외에 용수공급 목적을 포함하여 운영됨에 따라 화천댐의 용수공급능력을 검토하였다.

연구 목적에 따라 모의 모형과 최적화 모형을 개발하였으며 모형의 입력자료로 사용되는 화천댐의 유입량 실적자료를 보정하여 사용하였다. 유입량을 보정하기 위해 비유량법과 월별 유량 변화율을 활용하였다. 보정된 유입량을 일단위 모의 모형에 적용하여 95% 이수안전도를 만족하는 화천댐 용수공급량을 산정하였다. 그 결과, 월단위 95% 이수안전도를 만족하는 용수공급량은 각각의 보정된 유입량에 대해 26.9 m³/sec, 24.1 m³/sec였으며, 연단위 95% 이수안전도를 만족하는 용수공급량은 23.9 m³/sec, 22.2 m³/sec로 산정되었다. 동일한 분

석 방법을 이용하더라도 유입량 보정 방법에 의해 용수공급량 값이 다르게 산정되기 때문에 유입량 보정에 대한 심도깊은 연구가 필요하다. 또한, 현재 화천댐은 생·공용수 공급을 목적으로 일정량으로 용수를 공급하는 운영을 하고 있으나 본 연구에서 산정한 화천댐의 연 용수공급량은 화천댐에서 연간 최대로 공급할 수 있는 용수공급능력을 산정하기 위한 연구로 실제 공급량과는 차이가 있다. 현재 시범운영에서는 연간 700 MCM을 방류하는 것을 목표로 하고 있다. 본 연구에서 화천댐은 연최대 776.8 MCM의 용수공급능력이 있고 22.2 m³/sec로 일정량 방류시 연단위 95% 이수안전도를 만족할 수 있다는 것을 확인했다. 또한, 과거 발전방류패턴과 유사하게 용수 공급하는 최적 운영을 통해 산정된 704.3 MCM은 현재 22.2 m³/sec로 방류되는 용량과 거의 같은 공급량이다. 이후 화천댐이 생·공용수 외에 농업용수도 추가적으로 공급해야 하는 상황이 생긴다면 본 연구 결과를 함께 검토하여 합리적인 운영(안)을 검토 가능할 것이라 기대된다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Afshar, A., Haddad, O.B., Mariño, M.A., and Adams, B.J. (2007). "Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm for optimal reservoir operation." *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 344, No. 5, pp. 452-462.
- Ahn, J.M., Lyu, S., and Kim, J.C. (2012). "Study of operation rules for flood control to Seomjin river dam using HEC-ResSim." *Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 32, No. 2B, pp. 93-101.
- Arunkumar, R., and Jothiprakash, V. (2012). "Optimal reservoir operation for hydropower generation using non-linear programming model." *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, Vol. 93, No. 2, pp. 111-120.
- Berhe, F.T., Melesse, A.M., Hailu, D., and Sileshi, Y. (2013). "MODSIM-based water allocation modeling of Awash river basin, Ethiopia." *Catena*, Vol. 109, pp. 118-128.
- Branche, E. (2015). *Multipurpose water uses of hydropower reservoirs*. Electricite de France-World Water Council (EDF-WWC), France.
- Branche, E. (2017). "The multipurpose water uses of hydropower reservoir: The share concept." *Comptes Rendus Physique*, Vol. 18, No. 7-8, pp. 469-478.
- Cha, S.H., and Park, G.B. (2004). "A study on estimate of evaluation indices of water supply capacity for multipurpose dam." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 13, No. 3, pp. 197-204.
- Chhuon, K., Herrera, E., and Nadaoka, K. (2016). "Application of integrated hydrologic and river basin management modeling for the optimal development of a multi-purpose reservoir project." *Water Resources Management*, Vol. 30, No. 9, pp. 3143-3157.
- Choi, S.J., Kim, S.D., Lee, D.R., and Moon, J.W. (2014). "Comparison of water supply reliability by dam operation method." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 47, No. 6, pp. 523-536.
- Chu, W.S., and Yeh, W.W.G. (1978). "A nonlinear programming algorithm for real time hourly reservoir operations." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 14, No. 5, pp. 1048-1063.
- Draper, A.J., Munévar, A., Arora, S.K., Reyes, E., Parker, N.L., Chung, F.I., and Peterson, L.E. (2004). "CalSim: Generalized model for reservoir system analysis." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 130, No. 6, pp. 480-489.
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R., and Loucks, D.P. (1982). "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation." *Journal of Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20.
- Jung, J.H., and Yoon, Y.N. (2021). *Water resource design practice*. Goomibook, pp. 265-266.
- Jung, Y.H., Jung, C.G., Jung, S.W., Park, J.Y., and Kim, S.J. (2012). "Estimation of upstream ungauged watershed streamflow using downstream discharge data." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. Vol. 54, No. 6, pp. 169-176.
- Kim, J., Read, L., Johnson, L.E., Gochis, D., Cifelli, R., and Han, H. (2020). "An experiment on reservoir representation schemes to improve hydrologic prediction: Coupling the national water model with the HEC-ResSim." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 65, No. 10, pp. 1652-1666.
- Kim, Y.B., Lee, M.W., and Jo, J.C. (2005). *A study on the utilization of the Bukhan river basin through South-North Korea cooperation*. Korea Research Institute for Human Settlements.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2020), *Korean climate changes assessment report 2020*. pp. 4-5.
- Labadie, J.W. (2004). "Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 130, No. 2, pp. 93-111.
- Lee, D.H., Choi, C.W., Yu, M.S., and Yi, J.E. (2012). "Reevaluation of multi-purpose reservoir yield." *Journal of Korea Water Resource Association*. Vol. 45, No. 4, pp. 361-371.
- Lee, G.M., Kang, B.S., and Hong, I.P. (2008). "Cooperative framework for conflict mitigation and shared use of South-North Korean transboundary rivers." *Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 28, No. 5B, pp. 505-514.
- Lee, S.H., and Kang, T.U. (2006). "An evaluation method of water supply reliability for a dam by firm yield analysis." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 39, No. 5, pp. 467-478.
- Ministry of Environment (ME) (2009). *Water environmental management in mid-watershed*.

- Ministry of Environment (ME) and Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (2019). *A study on the optimal management of existing reservoirs to improve the water resource's system management.*
- Oh, J.O., Lee, J.J., and Jun, S.M. (2021). "Development of method of discharge estimate at ungauged watershed by drainage area ratio method considering watershed characteristics." *Journal of Crisisonomy*, Vol. 17, No. 4, pp. 43-55.
- Osroosh, M., Makenanizadeh, H., and Torfi, S. (2012). "HEC-Res sim model for simulating utilization from reservoir in the form of multiple-dam." *International Journal of Structronics & Mechatronics*, pp. 1-6.
- Ozkaya, A., and Zerberg, Y. (2021). "Water storage change assessment in the Seyhan reservoir (Turkey) using HEC-ResSim model." *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 14, No. 6, pp. 1-12.
- Reis, L.F.R., Bessler, F.T., Walters, G.A., and Savic, D. (2006). "Water supply reservoir operation by combined genetic algorithm-linear programming (GA-LP) approach." *Water Resources Management*, Vol. 20, No. 2, pp. 227-255.
- Srivastava, D.K., and Awchi, T.A. (2009). "Storage-yield evaluation and operation of mula reservoir, India." *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 135, No. 6, pp. 414-425.
- Stedinger, J.R., Sule, B.F., and Loucks, D.P. (1984). "Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 11, pp. 1499-1505.
- Tao, T., and Lennox, W.C. (1991). "Reservoir operations by successive linear programming." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 117, No. 2, pp. 274-280.
- Valeriano, O.C.S., Koike, T., Yang, K., and Yang, D. (2010). "Optimal dam operation during flood season using a distributed hydrological model and a heuristic algorithm." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 580-586.
- Votruba, L., and Broža, V. (1989). *Water management in reservoirs.* Elsevier, Amsterdam, Nederland.
- Yang, H.K., and Choi, H.C. (2003). "Estimation of water quality environment in Youngsan and Seumjin river basins." *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 38, No. 1, pp. 16-31.
- Yi, J.E., Lee, G.M., and Cha, K.U. (2012). "Idea on the improvement of water yield evaluation methodology." *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 12, pp. 51-57.
- Zarri, L.J., Danner, E.M., Daniels, M.E., and Palkovacs, E.P. (2019). "Managing hydropower dam releases for water users and imperiled fishes with contrasting thermal habitat requirements." *Journal of Applied Ecology*, Vol. 56, No. 11, pp. 2423-2430.
- Zhao, T., Zhao, J., and Yang, D. (2014). "Improved dynamic programming for hydropower reservoir operation." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 140, No. 3, pp. 365-374.