



Predictive analysis of minimum inflow using synthetic inflow in reservoir management: a case study of Seomjingang Dam

Lee, Chulhee^a · Lee, Seonmi^b · Lee, Eunkyung^c · Ji, Jungwon^d · Yoon, Jeongin^e · Yi, Jaeung^{f*}

^aMaster Student, Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

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

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

^dResearch Professor, Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

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

^fProfessor, Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

Paper number: 24-004

Received: 22 January 2024; Revised: 11 April 2024; Accepted: 15 April 2024

Abstract

Climate change has been intensifying drought frequency and severity. Such prolonged droughts reduce reservoir levels, thereby exacerbating drought impacts. While previous studies have focused on optimizing reservoir operations using historical data to mitigate these impacts, their scope is limited to analyzing past events, highlighting the need for predictive methods for future droughts. This research introduces a novel approach for predicting minimum inflow at the Seomjingang dam which has experienced significant droughts. This study utilized the Stochastic Analysis Modeling and Simulation (SAMS) 2007 to generate inflow sequences for the same period of observed inflow. Then we simulate reservoir operations to assess firm yield and predict minimum inflow through synthetic inflow analysis. Minimum inflow is defined as the inflow where firm yield is less than 95% of the synthetic inflow in many sequences during periods matching observed inflow. The results for each case indicated the firm yield for the minimum inflow is on average 9.44 m³/s, approximately 1.07 m³/s lower than the observed inflow's firm yield of 10.51 m³/s. The minimum inflow estimation can inform reservoir operation standards, facilitate multi-reservoir system reviews, and assess supplementary capabilities. Estimating minimum inflow emerges as an effective strategy for enhancing water supply reliability and mitigating shortages.

Keywords: Drought, Stochastic Analysis Modeling and Simulation (SAMS) 2007, Synthetic inflow, Firm yield, Minimum inflow

자료 발생 기법을 활용한 저수지 최소유입량 예측 기법 개발 : 섬진강댐을 대상으로

이철희^a · 이선미^b · 이은경^c · 지정원^d · 윤정인^e · 이재웅^{f*}

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

^d아주대학교 건설시스템공학과 연구교수, ^e아주대학교 건설시스템공학과 박사과정, ^f아주대학교 건설시스템공학과 교수

요 지

최근 국내에서는 이상기후로 인해 가뭄의 빈도 및 심도가 증가하고 있으며 장기간의 가뭄으로 인한 저수지의 저수량 감소로 전국적인 가뭄 피해가 발생하였다. 가뭄 기간 동안의 피해를 최소화하기 위해 관측자료를 이용한 최적의 저수지 운영 방법을 제안하는 다양한 연구가 수행되었지만, 실측 자료만을 활용할 경우 과거 가뭄 사상에 대해서만 분석이 가능하기 때문에 미래에 발생할 수 있는 극심한 가뭄을 예측하고 분석하기 위한 기술이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 최근 가뭄피해가 발생한 섬진강 유역에 위치한 섬진강댐을 대상으로 최소유입량 예측 기법을 제시하였다. 수문 분석 모형인 Stochastic Analysis Modeling and Simulation (SAMS) 2007을 이용하여 섬진강댐의 관측자료와 통계적 특성이 유사한 동일한 길이의 유입량을 다수 발생시키고, 저수지 모의운영에 따른 보장공급량 산정 결과를 활용하여 최소유입량을 예측하였다. 본 연구에서는 최소유입량을 대상 저수지의 관측자료와 동일한 기간을 갖는 다수의 발생유입량 중 보장공급량을 기준으로 95%는 이보다 작지 않은 값을 갖는 유입량으로 정의하였다. Case별 저수지 모의운영 분석 결과 섬진강댐 최소유입량의 보장공급량은 관측자료의 보장공급량인 10.51 m³/s 대비 평균 1.07 m³/s 낮게 분석되었다. 본 연구에서 산정한 최소유입량은 가뭄 시 저수지 운영 기준을 마련하는데 활용할 수 있을 것으로 판단되며 최소유입량을 활용하여 댐 연계운영, 추가 확보 가능한 용수공급량 등을 검토할 수 있다. 이는 가뭄 시 용수공급 안정성 확보 및 하류 물부족 문제 해소 등을 위한 대안 마련 시 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어: 가뭄, SAMS 2007, 발생유입량, 보장공급량, 최소유입량

*Corresponding Author. Tel: +82-31-219-2507

E-mail: jeyi@ajou.ac.kr (Yi, Jaeung)

1. 서론

최근 이상기후로 인해 가뭄의 빈도와 심도가 증가하고 있으며 전국적으로 피해가 발생하였다(Kim *et al.*, 2016a). 장기 가뭄 분석·평가 보고서에 따르면 2013년부터 2015년에는 경기도와 강원도에서 100년 빈도 이상의 가뭄이 발생하였고, 2017년에는 남부지역에서 평년 대비 70% 이하의 강우로 인해 20년 빈도의 가뭄이 발생하였다(K-water, 2018). 특히 2022년에는 섬진강 유역 내 강우량은 평년 대비 70% 정도 수준이었으며, 섬진강댐의 저수율은 평년 대비 55%에 불과하였다. 이처럼 섬진강 유역에서는 저수지의 유입량이 감소하여 수문학적 가뭄이 매우 심각하였으며 일부 지역에서는 크고 작은 피해가 발생하였다. 특히 공업단지가 위치한 여수와 순천에서는 농업용수 공급이 원활하지 않았으며, 보성군과 하동군에서는 비상급수와 제한급수 시행으로 인해 약 330명의 피해인구가 발생하였다(ME, 2023; ME and K-water, 2023).

현재 국내에서는 가뭄으로 저수지 유입량이 저조해짐에 따라 피해를 최소화하기 위한 최적의 저수지 운영 방법을 제안하는 연구가 다수 수행되었다. Jin *et al.* (2017)은 합천댐을 대상으로 이산화 용수 감량공급 운영 기법(Discrete hedging rule)을 이용하여 저수량 기준곡선을 작성하고 저수량 기준곡선을 이용한 저수지 모의운영의 결과와 과거 합천댐 운영 기록을 비교하였다. Seo *et al.* (2008)은 과거 저수지 운영을 바탕으로 운영곡선을 작성하고 시스템다이내믹스 모형인 STELLA (System Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation, High Performance Systems)를 이용하여 물 공급

모형을 구축하고 가상의 가뭄 시나리오별 저수지 모의운영을 통해 가뭄 기간 최적 저수지 운영 방안을 마련하였다. Park and Kim (2013)은 낙동강 수계 다목적댐인 임하댐과 안동댐을 대상으로 단독 저수지 운영과 저수지 연계운영의 효과를 회복도, 신뢰도 및 취약도에 대해 비교하고 용수공급 안정성을 검토하였다. Ryu *et al.* (2009)은 가뭄 시 한강 수계를 대상으로 효율적인 용수공급을 위해 저수지 연계운영 방법으로 Hedging Rule을 적용하고 모의운영을 통해 저수지 연계운영 최적 방안을 제시하였다. Kim *et al.* (2014)은 가뭄 발생 시 안정적인 물관리를 위해 저수지 연계운영 시스템을 구성하고 용수공급 최적화 모형을 개발하였으며 개발된 모형의 적용성을 검토하였다.

기존 연구에서는 과거에 발생했던 가뭄에 대해 분석하고 모의운영을 통해 용수 확보가능량 및 저수지 운영을 평가하는 연구가 주를 이루었다. 가뭄 분석 시 과거 관측자료만을 이용하면 이미 발생했던 가뭄 사상에 대한 분석만이 가능하다는 한계가 있다. 따라서 효율적인 저수지 운영 및 안정적인 용수공급을 위해 다양한 가뭄 사상을 고려하기 위한 저수지 유입량 예측 기술이 필요하다. Jin *et al.* (2016)은 가뭄에 대비하기 위해 앙상블 하천유량 예측 방법과 과거 강우자료를 이용하여 합천댐의 유입량을 예측하였다. Lee *et al.* (2020)은 가뭄 기간 저수지의 월 유입량과 기후 변화의 수문학적 관계를 기반으로 MLR, SVM, ANN 모형을 이용하여 유입량을 예측하였으며, Thatkiat *et al.* (2021)은 가뭄 발생 연도를 대상으로 Ensemble precipitation forecasts (EPF) 모델을 활용하여 1~2주 동안의 저수지 유입량을 예측하였다. Kim *et al.* (2019)은 가뭄에 대

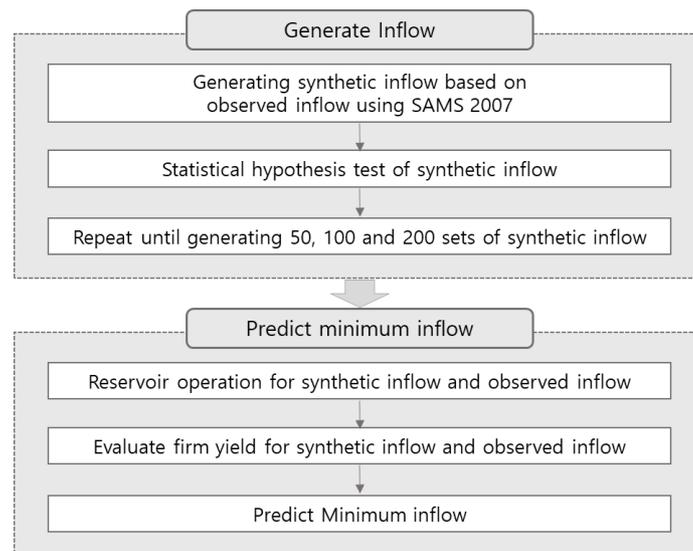


Fig. 1. Flow chart of the research process

비하거나 용수공급이 원활하게 이루어질 수 있도록 다목적댐을 대상으로 기상 관측 자료 및 장기 기상 전망 자료를 활용하여 4개의 강우-유출 모형을 구성하고 저수지 유입량을 예측하여 모델별 유입량 예측 정확도를 분석하였다. 또한, 관측유입량을 기반으로 가상의 유입량 자료를 생성하여 저수지 운영을 평가하고, 모의운영 결과를 분석한 연구들이 수행되었다. Anongrit et al. (2008)은 저수지 운영을 평가하기 위해 과거 관측자료 기반으로 MAR (Multivariate Autoregression) 모형을 활용하여 가상의 유입량을 생성하고 과거 관측유입량과 함께 저수지 모의운영을 수행하였다. 또한, Kim et al. (2016b)은 일 강우량 모의기법과 장기 강우-유출 모형인 SAC-SMA를 연계하여 소양강댐과 대청댐을 대상으로 유입량을 생성하는 방안을 제안하였다. Lee and Kang (2006)은 소양강댐 및 충주댐의 과거 유입량 자료를 기반으로 41개의 발생유입량을 생성하고 HEC-5 모델을 이용하여 보장공급량을 산정한 후 내림차순으로 정리하여 초과확률을 산정하고 과거 관측자료와 비교하여 물 공급 안전도를 평가하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 극심한 가뭄으로 인해 저수지 유입량이 최소로 유입되는 경우를 검토하기 위해 추계학적 기법을 활용하여 다양한 유입량 자료를 발생시키고 발생된 유입량을 활용하여 저수지의 최소유입량을 예측하기 위한 기술을 제안하고자 한다. 유입량 자료 발생 시 저수지 상류 유역의 특성을 반영하여 최소유입량을 예측하기 위해서 관측유입량과 동일한 자료길이의 통계적 특성이 유사한 다수의 유입량 세트를 발생시켰다. 발생유입량 세트의 개수에 따라 Case를 구분하고, Case별 저수지 모의운영을 통해 발생유입량에 대한 보장공급량을 산정하였으며, 이를 활용하여 용수공급 측면의 저수지 최소유입량을 예측하였다.

2. 연구 이론

2.1 발생 자료 구축

미공병단(US Army Corps of Engineers)은 수문자료의 보유 기간이 충분하지 않아 수문 분석에 한계가 있는 경우 관측 자료의 통계적 특성을 유지하는 수문자료를 발생시키는 방안을 제시하였다(USACE, 2021). 본 연구에서는 SAMS 2007 (Stochastic Analysis, Modeling, and Simulation 2007)을 활용하여 유입량 자료를 발생시키고, 평균, 분산, 그리고 1차 자기상관계수 등의 통계적 특성이 유사하도록 통계분석을 수행하였다.

2.1.1 SAMS 2007

SAMS 2007은 미 콜로라도 주립대학교(Colorado State University)와 USBR (US Bureau of Reclamation)에서 하천 흐름과 같은 시계열 수문 자료의 분석, 모델링 및 시뮬레이션을 수행하기 위해 개발된 모형이다. SAMS 2007은 1996년에 처음 개발되었으며 시계열 모델링 및 컴퓨터 그래픽이 발전하면서 보완 및 수정을 통해 SAMS 2000을 거쳐 SAMS 2007이 개발되었다. 이 모형은 확률분포 모형 또는 매개변수 추정방법에 따라 수문 분석이 가능하고, 계절별, 연도별, 월별 자료의 통계적인 분석 기능을 제공한다. 또한, 입력한 시계열 자료의 특성에 적합한 모형을 적용할 수 있고, 매개변수 추정을 통해 가상의 데이터를 생성할 수 있다(Sveinsson et al., 2007). SAMS 2007은 자료 생성의 개수와 길이에 대한 제약이 없어 방대한 자료를 생성하여 수문 분석에 활용할 수 있는 장점이 있다.

2.1.2 시계열 데이터 분석 모형 선정

우리나라의 수문학적 시계열 자료에는 계절성이 반영되어 있기 때문에 본 연구에서는 Periodic AutoRegressive Moving Average (PARMA) 모형을 활용하였다. PARMA 모형은 Eq. (1)와 같이 자기회귀 모형인 AutoRegressive (AR)와 이동평균 모형인 Moving Average (MA)를 합한 AutoRegressive and Moving Average (ARMA) 모형에서 계절성을 반영하기 위해 고안된 모형이다. 여기서, X_{nT+v} 는 기간과 계절에 따른 데이터이고 T 가 데이터의 기간일 때 v 는 계절성을 나타내는 값이며, $1 \leq v \leq T$ 이다. $n \in \mathbb{Z}$, ε_{nT+v} 는 일련의 랜덤 변수, $\phi_t(i)$ 는 자기회귀계수, $\theta_t(i)$ 는 이동평균계수이다(Basawa and Robert, 2002). PARMA 모형은 많은 연구로부터 계절성(주기성)을 띠는 데이터를 분석하는데 효율적인 모형으로 평가되었다(Lee et al., 2012b; Yonas et al., 2006).

$$X_{nT+v} - \sum_{i=1}^p \phi_i(v) X_{nT+v-i} = \varepsilon_{nT+v} - \sum_{i=1}^q \theta_i(i) \varepsilon_{nT+v-i} \quad (1)$$

2.1.3 자료의 통계적 특성 분석 방법

관측유입량과 통계적 특성이 유사한 자료를 얻기 위해 추가적으로 발생된 자료를 대상으로 T-test와 F-test를 수행하여 결과를 검증하였다. T-test는 두 집단의 평균을 비교하여 통계적 특성을 검증하는 방법이며, T-분포와 Eq. (2)로부터 구한 T 통계량에 따라 분석된다. Eq. (2)에서 n_1 과 n_2 는 비교하는 두 자료의 길이, s_1^2 과 s_2^2 는 각각 두 집단의 분산이며, \bar{X}_1 과 \bar{X}_2 는 두 집단의 평균이다. T-분포는 자유도 n_1+n_2-1 와 유의수준 α 에 따라 결정되는 확률분포이다. T-test는 p-value를 산정하

여 쉽게 검증할 수 있다. p-value는 T-분포에서 집단과 집단의 평균이 동일할 확률을 나타내며 통계량 T와 T-분포로부터 값을 산정할 수 있다. p-value가 유의수준 α 이상의 값이면 두 집단은 평균이 유사한 것으로 판단할 수 있다(Anthony, 2002).

$$T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (2)$$

F-test는 두 집단의 분산을 비교하여 통계적 특성을 검증하는 방법이며, F-분포와 Eq. (3)으로부터 구한 F 통계량에 따라 분석된다. F-분포는 자유도와 유의수준에 따라 결정되는 확률분포이다. 이 분포는 (n_1-1, n_2-1) 의 자유도를 따르고 n_1 과 n_2 는 비교하는 두 집단의 길이이며 s_1^2 과 s_2^2 는 각각 두 집단의 분산이다(Kim et al., 2009). 유의수준과 자유도에 따른 F-critical value를 산정하고 집단의 F 통계량이 이 값보다 작으면 분산은 유사한 것으로 판단할 수 있다.

$$F = \frac{s_2^2}{s_1^2} \quad (3)$$

2.2 보장공급량 및 최소유입량

본 연구에서는 다수의 발생유입량 자료를 이용하여 저수지 모의운영을 수행하고, 용수공급 측면의 최소유입량을 산정하

기 위해 각 유입량 시나리오별 보장공급량을 산정하였다. 여기서, 최소유입량은 대상 저수지의 관측유입량과 동일한 기간의 다수의 발생유입량 자료 중 각 유입량의 보장공급량을 기준으로 95%는 이보다 작지 않은 값을 갖는 유입량으로 정의하였다. 보장공급량(Firm yield)은 최악의 갈수기에도 저수지에서 100% 용수공급을 보장할 수 있는 최대공급량을 의미하며, 보장공급량 산정 방법은 특정한 갈수기간의 유입량 자료를 활용하여 결정하는 방식과 다년의 갈수기간의 유입량 자료를 활용하여 결정하는 방식으로 구분된다(Lee et al., 2012a). 보장공급량은 용수공급능력 평가 및 저수지 운영·관리의 재평가에 활용되며 과거에는 보장공급량을 저수지의 용수공급가능량으로 산정하였다(Lee et al., 2008; Choi et al., 2014). 보장공급량은 저수지에서 용수공급의 실패를 허용하지 않기 때문에 이수안전도 평가 시 공급량이 과소하게 산정될 수 있지만 용수공급의 안정성을 충분히 확보할 수 있다.

3. 연구범위 및 방법

3.1 대상 저수지 선정

본 연구에서는 섬진강댐을 대상으로 최소유입량 산정 방안에 대해 검토하였다. 섬진강댐은 Fig. 2와 같이 섬진강 수계 최상류에 위치한 다목적댐으로, 댐 제원은 Table 1과 같다. 섬진강댐의 용수는 한국수자원공사, 한국수력원자력(주), 한국농어촌공사에서 생활용수, 공업용수, 농업용수 등으로 배분

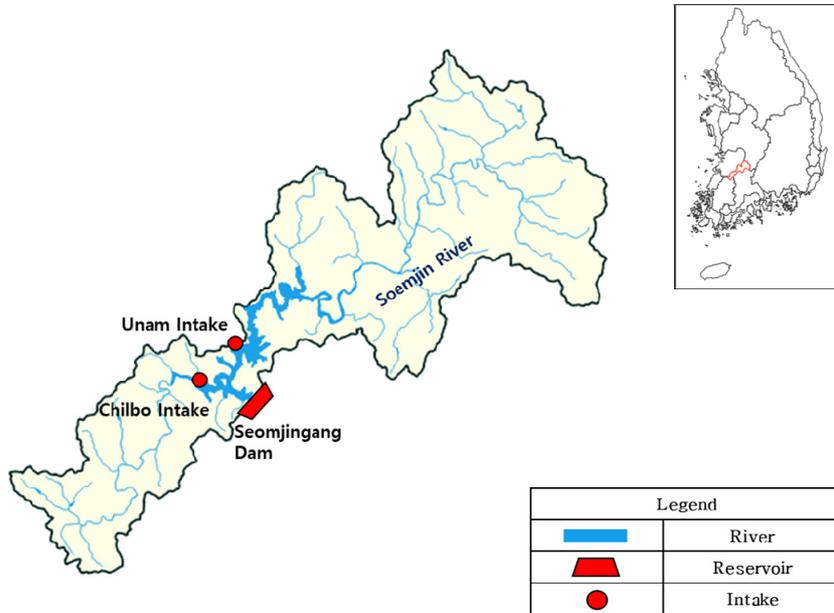


Fig. 2. Basin of the Seomjingang Dam

Table 1. Characteristics of Seomjingang Dam

Division	Unit	Characteristics
Area	km ²	763.5
Flood Water Level	EL.m	197.7
Normal High Water Level	EL.m	196.5
Restricted Water Level*	EL.m	194.0
Low Water Level	EL.m	154.5
Total Storage Capacity	10 ⁶ m ³	466.0
Effective Storage Capacity	10 ⁶ m ³	429.0

*The temporary operation from 2021 to 2024

하여 공급한다. 유역 외 용수공급을 위해 저수지 내 운암취수구는 한국농어촌공사가 관리하며 칠보취수구는 한국수력원자력(주)이 관리한다. 섬진강댐에서는 동진강 유역(호남평야)으로 농업용수 11.5 m³/s를 공급하고, 섬진강 하류로 생·공용수 2.06 m³/s, 농업용수 0.25 m³/s를 공급하고 있다. 이처럼 섬진강댐에서는 유역 외 공급이 큰 비중을 차지하기 때문에 섬진강 하류 지역에서는 하류 유출량 감소로 인해 염해피해, 생태계 서식지 변화 등 물 부족으로 인한 피해가 지속해서 제기되었다. 따라서, 본 연구에서는 섬진강댐을 연구 대상으로 선정하여 물공급 안정성 확보 및 가뭄 대응을 위한 최소유입량 예측 기술을 검토하고자 한다.

3.2 유입량 자료 발생

본 연구에서는 섬진강댐의 자료 보유 기간인 1975년 10월 1일부터 2022년 9월 30일까지 47년 동안의 일단위 관측유입량 자료를 적용하여 유입량 자료를 발생시켰으며, 이를 활용하여 섬진강댐의 최소유입량을 예측하였다. SAMS 2007에 47년 동안의 일단위 관측유입량을 입력하고 PARMA 모형을 적용하였으며, 동일 기간인 47년 동안의 일단위 유입량을 발생시켰다. 발생유입량은 관측유입량을 기반으로 생성되었기 때문에 과거 섬진강댐의 유입 특성 및 가뭄 사상과 유사한 자료를 발생하는 것이 가능하다.

섬진강댐 최소유입량의 다각도 분석을 위해 유입량 50개 세트를 발생시키는 경우, 유입량 100개 세트를 발생시키는 경우, 유입량 200개 세트를 발생시키는 경우로 구분하여 Table 2와 같이 세 가지 Case에 대해 분석을 수행하였다. 발생유입량은 섬진강댐의 과거 수문 자료의 수문학적 특성을 반영한 통계를 기반으로 한 자료이지만, 평균, 표준편차 및 최댓값 등의 통계 특성이 관측자료와 정확히 일치하지 않는다. 그러므로 발생유입량과 관측유입량의 통계적 유의성을 검증하기 위해 T-test와 F-test를 수행하였다. 본 연구에서는 유의수준 95%에 포함되도록 통계적 검증을 수행하였으며, Case별 발생유

Table 2. Classification according to number of synthetic inflow

Division	Number of synthetic inflow
Case 1	50
Case 2	100
Case 3	200

입량의 평균 및 표준편차는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. T-test는 유의수준 95%에 대해 수행하였으며 관측유입량과 발생유입량의 평균이 통계적으로 유사하였다. F-test 또한 유의수준 95%에 대해 수행하였으며 관측유입량과 발생유입량의 분산이 통계적으로 유사한 것으로 판단된다. 또한, Case별 발생유입량의 1차 자기상관계수(lag-1 autocorrelation)를 산정한 결과, Fig. 5와 같이 분석되었으며 발생유입량은 관측유입량의 1차 자기상관계수 값인 0.53보다 모두 크게 산정되었다.

3.3 최소유입량 산정 방법

본 연구에서는 발생유입량의 보장공급량을 기준으로 최소유입량을 예측하는 방안을 제안하였다. 최소유입량은 섬진강댐의 관측유입량과 동일한 기간의 다수의 발생유입량 자료 중 각 유입량의 보장공급량을 기준으로 95%는 이보다 작지 않은 값을 갖는 유입량으로 정의하였다. 보장공급량은 댐에서 용수공급의 실패를 허용하지 않기 때문에 용수공급의 안정성에 대한 보수적인 평가가 필요한 경우 사용된다. 본 연구에서는 가뭄이 발생하였을 때 용수공급 안정성을 충분히 확보할 수 있도록 섬진강댐의 최소유입량을 예측하고자 보장공급량의 개념을 활용하였으며, 최소유입량의 정의에 따라 보장공급량을 기준으로 95 percentile에 해당하는 발생유입량이 유입된 시나리오를 최악의 가뭄이라고 판단하여 최소유입량으로 선정하였다.

모의운영 기간 내 용수 부족이 발생하지 않도록 하는 유량을 산정하기 위해 Python을 이용하여 댐 운영 모형을 다음과 같이 구축하고 보장공급량을 산정하였다. 댐 운영 모형은 Eq. (4)와 같은 물수지 방정식을 기반으로 운영하되, 댐 수위가 저(低)수위와 상시만수위(또는 홍수기 제한수위) 범위 내에서 운영되도록 구축하였다. 또한, 2021년부터 2024년까지 시범 운영 중인 홍수기 제한수위를 고려하였으며 시작수위는 1975년 9월 30일의 수위를 적용하였다. 댐 모의운영 시 t 시간의 댐 수위가 저수위 이하로 운영되는 경우를 용수공급 실패로 간주하였으며, 용수공급 실패를 발생시키지 않는 유량을 산정하였다.

$$S_t = S_{t-1} + I_t - O_t - Sp_t \quad (4)$$

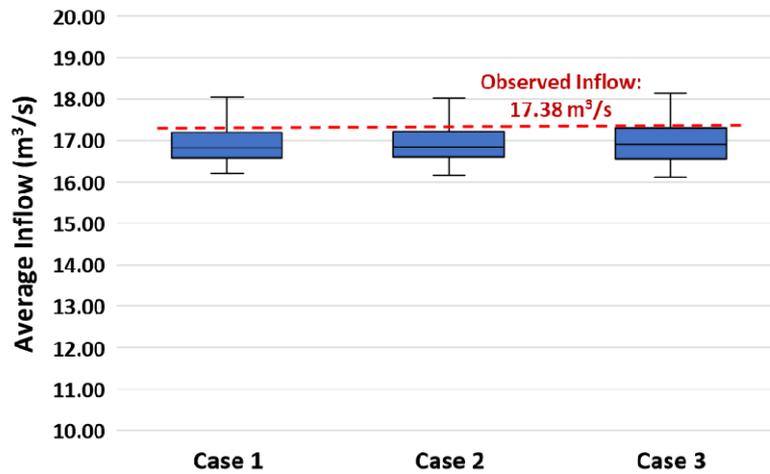


Fig. 3. Average inflow of observed and synthetic inflow

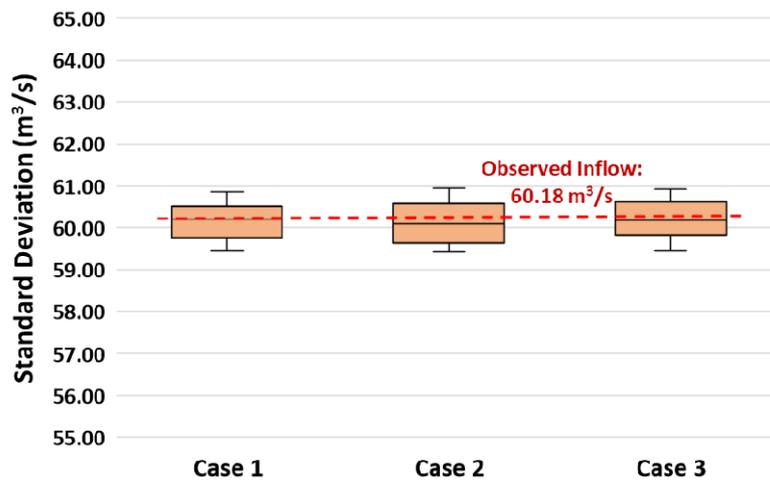


Fig. 4. Standard deviation of observed and synthetic inflow

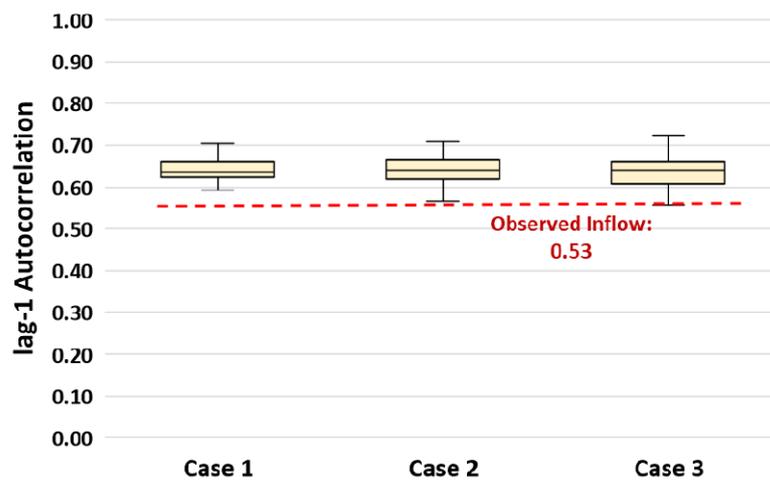


Fig. 5. Lag-1 autocorrelation of observed and synthetic inflow

여기서, S_t 와 I_t 는 t 시간에서의 댐 저류량과 유입량을 의미한다. O_t 는 보장공급량, S_{p_t} 는 보장공급량을 제외한 여수로 방류량을 의미한다.

4. 용수공급 측면의 최소유입량 산정 결과

본 연구에서는 섬진강댐의 다년간의 관측유입량을 기반으로 생성한 발생유입량의 보장공급량을 댐 모의운동을 통해 산정하였다. 댐 모의운동은 1975년 9월 30일 시작수위(184.56 EL.m)와 섬진강댐의 운영 조건을 고려하여 수행하였다. 댐 모의운동 결과 Case별 발생유입량의 보장공급량은 Fig. 6과 같이 산정되었으며, 발생유입량의 보장공급량을 내림차순으로 정렬했을 때 관측유입량의 보장공급량은 약 60 percentile에 해당하였다.

본 연구에서는 보장공급량을 내림차순으로 정렬하였을 때 95 percentile에 해당되는 유입량을 최소유입량으로 선정하였다. 일단위로 산정된 최소유입량의 댐 모의운동 결과 Case 1의 경우 보장공급량은 9.44 m³/s, Case 2의 경우 보장공급량은 9.42 m³/s, Case 3의 경우 보장공급량은 9.47 m³/s로 산정되었다. 세 개의 Case에 대한 최소유입량의 보장공급량은 관측유입량의 보장공급량인 10.51 m³/s보다 평균적으로 1.07 m³/s 낮은 값으로 분석되었다.

관측유입량과 최소유입량의 특성 및 월평균 유입량은 Table 3와 Table 4와 같으며, 최소유입량을 이용한 댐 모의운동 결과는 Figs. 7(a)~7(c)와 같다.

본 연구에서 최소유입량은 발생유입량의 개수를 조정하며 산정하였고 최소유입량의 보장공급량은 Case간 큰 차이 없이 평균 9.44 m³/s로 산정되었다. 분석을 위한 발생유입량의

개수를 더 증가시키거나 감소시켜도 최소유입량의 보장공급량은 유사할 것으로 판단된다. 산정된 최소유입량은 관측유입량의 보장공급량인 10.51 m³/s 및 실제 섬진강댐의 계획공급량인 13.81 m³/s보다 낮게 산정되었다. 이는 최소유입량이

Table 3. Characteristic of observed and minimum inflow

Division	Observed inflow (m ³ /s)	Minimum inflow (m ³ /s)		
		Case 1	Case 2	Case 3
Maximum inflow	2,000.97	1752.61	1,768.68	1766.47
Average inflow	17.38	16.73	16.59	16.86
Standard deviation	60.18	60.05	59.59	60.45
Firm yield	10.51	9.44	9.42	9.47

Table 4. Monthly average inflow of observed and minimum inflow

Month	Observed inflow (m ³ /s)	Minimum inflow (m ³ /s)		
		Case 1	Case 2	Case 3
1	4.34	3.76	4.60	4.2
2	7.40	6.87	8.54	6.87
3	10.38	10.32	10.56	8.97
4	12.49	12.89	10.99	13.11
5	9.34	8.02	10.59	10.22
6	17.67	17.99	17.28	16.36
7	54.43	47.79	49.13	49.31
8	49.94	52.41	39.24	45.59
9	27.34	25.28	31.91	31.94
10	5.35	5.62	6.35	5.94
11	3.89	4.34	4.09	4.20
12	4.82	4.35	4.96	4.54

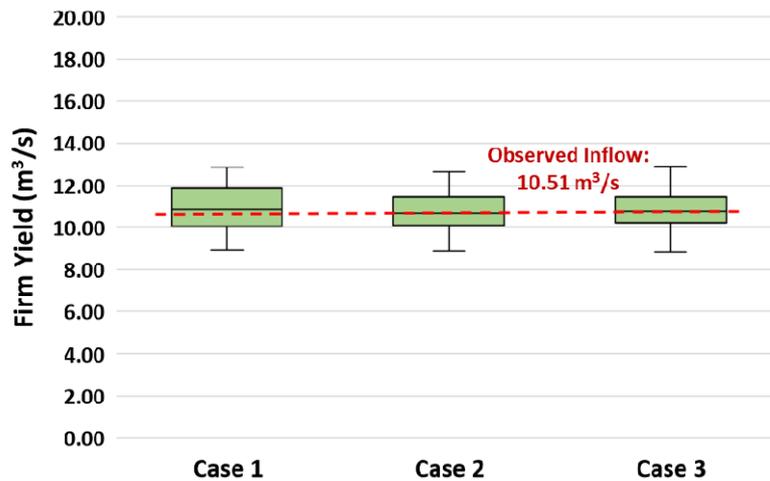


Fig. 6. Firm yield of observed and synthetic inflow

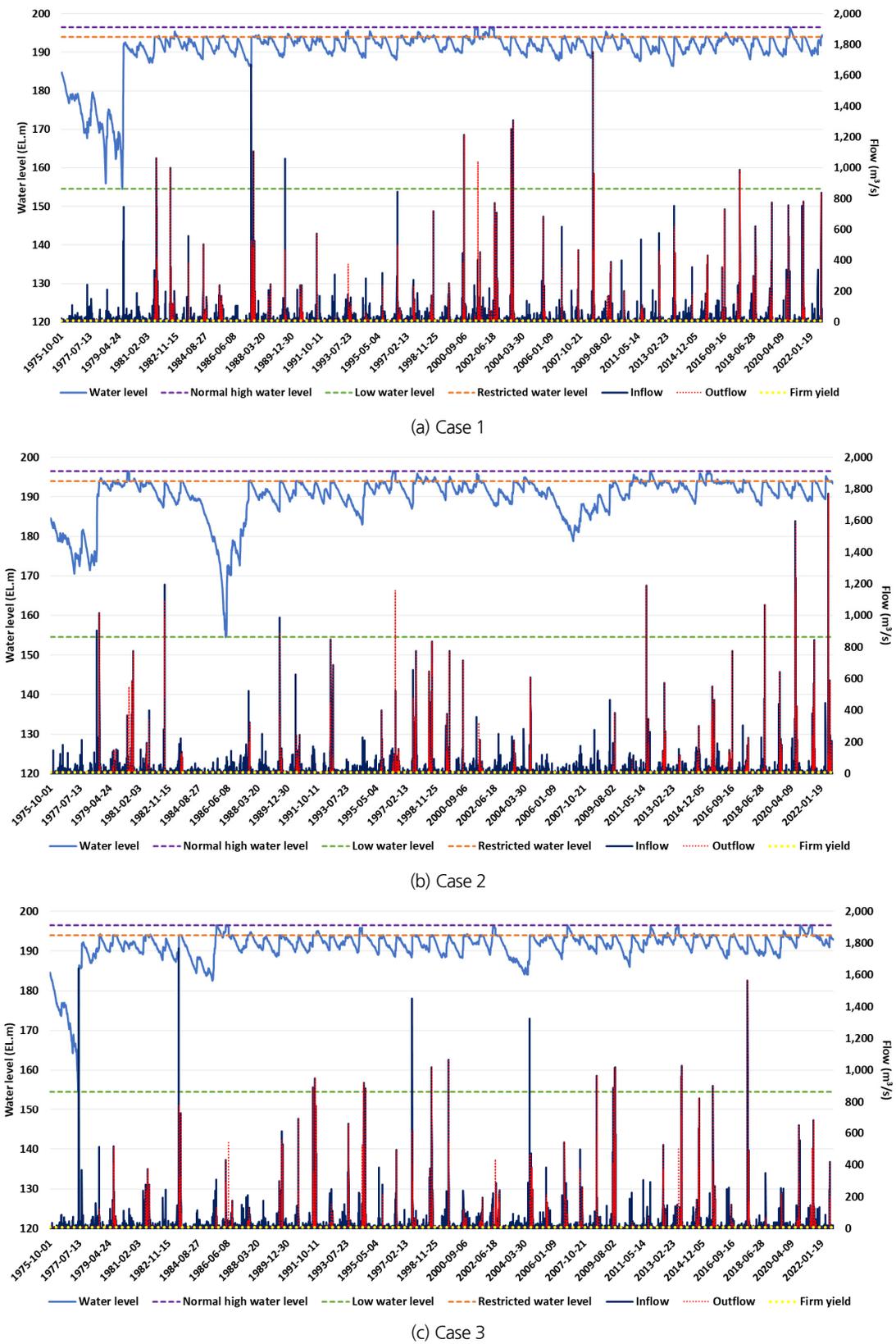


Fig. 7. Simulation results of dam operations

극심한 가뭄을 고려하기 위해 생성된 저수지의 유입량 시나리오이며 용수공급량 측면에서 가장 최악의 경우를 의미하기 때문이다. 이와 같은 최소유입량이 댐에 유입되어 단독 운영을 수행할 경우 계획공급량을 만족시키지 못해 하류에 물 부족 피해가 발생할 수 있다. 따라서 하류 피해방지 및 용수수요를 최대한 만족시킬 수 있도록 동일한 유역 내에 위치한 다른 다목적댐 또는 용수전용댐과의 연계운동을 통해 피해를 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

우리나라는 가뭄의 장기화, 용수수급 문제 발생 등 가뭄 피해가 빈번해짐에 따라 가뭄에 대응하기 위한 다양한 방안을 모색 중이다. 특히 2022년 섬진강 유역은 장기간 지속된 가뭄에 의해 하류부 지역 용수공급에 어려움을 겪었다. 가뭄의 피해를 저감시키기 위해 최적의 저수지 운영 방안을 마련하기 위한 다양한 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 관측자료 기반의 발생자료를 활용하여 다양한 가뭄 시나리오를 생성하고 가뭄을 대비한 저수지 운영 시 직접적인 관련이 있는 최소유입량을 예측하였다.

본 연구에서는 섬진강댐의 관측유입량을 활용하여 동일기간의 통계적 특성이 유사한 유입량을 다량 발생시킨 후, 저수지 모의운동을 통해 섬진강댐의 최소유입량을 예측하는 방안을 검토하였다. 대상 유역인 섬진강댐에 발생할 수 있는 다양한 수문학적 시나리오를 생성하기 위해 SAMS 2007을 활용하였고 섬진강댐의 과거 47년의 일단위 관측유입량을 기반으로 다수의 발생유입량을 생성하여 최소유입량을 예측하였다. 시계열 수문 데이터를 생성하기 위해 추계학적 분석 모형인 PARMA 모형을 적용하였다. 섬진강댐과 통계적 특성이 유사한 유입량 자료를 발생시키기 위해 통계 검증을 수행하였으며, 평균과 표준편차가 유사한 자료를 생성하고 발생유입량 세트의 개수에 따라 Case별로 구분하여 분석을 수행하였다. 또한, 발생유입량을 활용하여 저수지 모의운동을 통해 보장공급량을 산정하고 보장공급량을 기준으로 발생유입량을 비교 분석하여 최소유입량을 예측하였다.

최소유입량 선정 기준을 마련하기 위해 가뭄 기간 용수공급 안정성을 확보할 수 있는 보장공급량의 개념을 활용하였고 보장공급량 기준 95 percentile에 해당하는 발생유입량을 최소유입량으로 결정하였다. 저수지 모의운영 결과 관측유입량의 보장공급량은 $10.51 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 산정되었으며, Case별 95 percentile에 해당하는 최소유입량의 보장공급량은 Case 1의

경우 $9.44 \text{ m}^3/\text{s}$, Case 2의 경우 $9.42 \text{ m}^3/\text{s}$, Case 3의 경우 $9.47 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며 평균 $9.44 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 산정되었다. 위와 같이 유입량 세트의 개수를 조정하여도 최소유입량의 보장공급량은 큰 변동이 없을 것으로 판단된다. 본 연구에서 산정된 최소유입량은 최악의 가뭄이 발생하였을 경우 댐에 유입될 수 있는 유량을 의미하기 때문에 섬진강댐의 계획공급량인 $13.81 \text{ m}^3/\text{s}$ 와 관측유입량의 보장공급량인 $10.51 \text{ m}^3/\text{s}$ 보다 작게 산정되었다. 이와 같은 최소유입량이 유입될 경우 용수수요를 보장할 수 없어 피해가 발생할 수 있기 때문에 유역 내 물공급 시설물 간의 연계운영이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 섬진강댐의 유입 특성 및 과거 가뭄 사상을 반영한 발생자료에 대해 유의성 검토를 수행하여 자료를 검증함으로써 섬진강댐의 현 유역 상황을 직접적으로 반영한 수문 분석을 수행할 수 있다. 본 연구에서 제시한 최소유입량 산정 방법을 활용하여 극심한 가뭄 기간 하류의 필요유입량을 최대한 만족시키기 위해 유역 내 물공급 시설물의 연계운동을 통하여 최적 댐 운영 방법을 모색하고 가뭄대응 방안을 수립할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 따라 향후 섬진강 수계의 저수지 연계운영, 가뭄 시 추가 확보 가능한 용수공급량 등을 결정하기 위한 기초 자료로 사용할 예정이며, 최소유입량을 활용하여 댐 연계운영률 작성 및 평가에 대한 연구를 수행할 예정이다. 또한, 추가 연구를 수행하여 섬진강 수계의 용수공급 안정성 확보 및 하류 물 부족 문제 해소 등을 위한 대안을 마련할 것이다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 가뭄대응 물관리 혁신기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.(2022003610004)

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Anongrit, K.R., Anujit, P.P., and Witsanukorn, C.P. (2008). "Stochastic inflow simulation for searching rule curves." *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 5, No. 3, pp. 221-226.
- Anthony, J.H. (2002). *Probability and statistics for engineers and*

- scientists. Thomson Learning, Duxbury, MA, U.S., pp. 432-441.
- Basawa, I.V., and Robert, L. (2002). "Large sample properties of parameter estimates for periodic ARMA Models." *Journal of Time Series Analysis*, Vol. 22, No. 6, pp. 651-663.
- Choi, S.J., Lee, D.R., and Moon, J.W. (2014) "Comparison of water supply reliability by dam operation methods." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 47, No. 6, pp. 523-536.
- Jin, Y.K., Jung, T.H., Lee, S.H., and Kang, S.U. (2016). "Reservoir operations of Hapcheon Dam applying a discrete hedging rule and ensemble streamflow prediction to cope with droughts." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 1, pp. 93-101.
- Jin, Y.K., Lee, S.H., and Jung, T.H. (2017). "Reservoir operations applying discrete hedging rule curves depending on current storage to cope with droughts." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 1, pp. 107-115.
- Kim, B.S., Oh, D.K., and Jeong, W.S. (2009). "Comparison of the means of two samples from independent normal populations with unknown variances." *Journal of The Korean Data Analysis Society*, Vol. 11, No. 2, pp. 1079-1089.
- Kim, H.S., Kim, H.S., Jeon, G.I., and Gang, S.U. (2016a). "Assessment of 2014-2015 Drought." *Water for Future*, Vol. 49, No. 7, pp. 61-75.
- Kim, J.Y., Park, M.K., Lee, G.H., and Jung, G.S. (2014). "Development and assessment of hedging rule for Han River reservoir system operation against severe drought." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 47, No. 10, pp. 891-906.
- Kim, S.H., Nam, W.S., and Bae, D.H. (2019). "An analysis of effects of seasonal weather forecasting on dam reservoir inflow prediction" *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 52, No. 7, pp. 451-461.
- Kim, T.J., So, B.J., Ryou, M.S., and Kwon, H.H. (2016b). "Development of dam inflow simulation technique coupled with rainfall simulation and rainfall-runoff model." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 49, No. 4, pp. 315-325.
- K-water (2018). *2013-2018 sustained drought analysis & assessment report*. pp. 3-42.
- Lee, C.C., Jang, S.H., and Lee, C.H. (2008) "A study on the effective operating system for water supply of Andong Dam considering the flow of Nak-dong River" *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 8, No. 6, pp. 129-136.
- Lee, D.H., Choi, C.W., Yu, M.S., and Yi, J.E. (2012a). "Reevaluation of multi-purpose reservoir yield." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 45, No. 4, pp. 361-371.
- Lee, D.H., Kim, H.S., Jung, I.W., and Yoon, J.Y. (2020). "Monthly reservoir inflow forecasting for dry period using teleconnection indices: A statistical ensemble approach." *Journal of Applied Sciences*, Vol. 10, No. 10, pp. 1-21.
- Lee, S.D., Kim, J.G., and Kim, S.W. (2012b). "Estimation of layered periodic autoregressive moving average models." *Journal of The Korean Statistical Society* Vol. 19, No. 3, pp. 507-516.
- 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) (2023). *Integrated water management plan for Yeongsan River, Seomjin River and Jeju. [2021-2030]*. pp. 3-29.
- Ministry of Environment (ME) and K-water (2023). *Drought analysis for Yeongsan River and Seomjin River 2022-2023*, pp. 14-143.
- Park, J.H., and Kim, Y.O. (2013). "Coping with climate change through coordinated operations of the Andong & Imha Dams." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 46, No. 12, pp. 1141-1155.
- Ryu, G.H., Chung, G.H., Lee, J.H., and Kim, J.H. (2009). "Optimization of multi-reservoir operation with a hedging rule: Case study of the Han River basin." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 42, No. 8, pp. 643-657.
- Seo, H.D., Jeong, S.M., Kim, S.J., and Lee, J.H. (2008). "A study on the optimal water supply using virtual drought exercise with hydrological drought index." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 41, No. 10, pp. 1045-1058.
- Sveinsson, O.G.B., Salas, J.D., Lane, W.L., and Frevert, D.K. (2007). *Stochastic Analysis, Modeling, and Simulation (SAMS) version 2007 user's manual*. Technical Report No. 11, Colorado State University, Fort Collins, CO, U.S., pp. 1-33.
- Thatkiat, M., Yasuto, T., Yutaka, I., and Kazuaki, Y. (2021). "Real-time optimization of a large-scale reservoir operation in Thailand using adaptive inflow prediction with medium-range ensemble precipitation forecasts." *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 38, pp. 1-17.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2021). *Methods for Storage/Yield Analysis*. No. 2021-9, CECW-EC, Washington, DC, U.S., pp. 45-57.
- Yonas, G.T., Mark, M.M., and Paul, L.A. (2006). "Identification of periodic autoregressive moving average models and their application to the modeling of river flows" *Journal of Water Resources Research*, Vol. 42, No. 1, pp. 1-11.