

부산시 회동저수지의 안정적인 용수 공급가능량 분석

전창휘* · 원정은** · 김상단**

*국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공

Analyzing the potential for stable water supply at Hoedong Reservoir in Busan

Changhwi Jeon* · Jeongeun Won* · Sangdan Kim**

**Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University*

(Received : 20 January 2025, Revised : 14 February 2025, Accepted : 14 February 2025)

요약

수자원은 인간의 활동에 있어 필수적인 요소이기에 수자원의 관리는 매우 중요한 과제이다. 안정적인 수자원 관리를 위해서는 수원지의 유입량 예측이 매우 중요하다. 회동저수지는 부산의 유일한 자체 취수원으로 부산 시민의 안전한 먹는 물 확보에 중요한 역할을 하지만 현재 관측된 유입량 자료가 없다. 즉, 회동저수지 유역은 미계측 유역임에 따라 검·보정이 필요한 강우-유출 모델을 사용하여 장기간의 수문자료를 생성할 수 없어 수자원 관리에 어려움이 많다. 본 연구에서는 TANK 모델, 위성 자료를 이용한 Parsimonious Eco-Hydrologic Model (PEHM), 순환신경망과 의사결정나무 기반의 알고리즘을 결합한 데이터 기반 AI 모델 등 세 가지의 미계측 유역의 유출 예측 기법을 이용하여 회동저수지의 유입량을 예측하였다. 이를 활용하여 모의된 유입량 데이터를 K-최근접 이웃에 적용하여 500년 동안의 순(10일) 단위 유입량 시나리오를 생성하여 95% 이수안전도를 만족하는 용수 공급가능량을 계산하였다. 본 연구에서는 47,000m³/day에서 65,800m³/day를 회동저수지의 안정적인 용수 공급가능량으로 제안하였으며, 이러한 결과는 향후 부산의 안정적인 수자원 관리계획수립을 지원할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 부산, Tank 모델, 회동 저수지, 용수 공급가능량, 미계측 유역

Abstract

Water resources are essential for human activities, so managing water resources is a very important task. Predicting the inflow volume of the water source is very important for stable water resource management. Hoedong Reservoir is the only self-supplied water source in Busan, and plays an important role in ensuring safe drinking water for the citizens of Busan, but there is currently no observed inflow data. In other words, since the Hoedong Reservoir basin is an ungauged basin, it is difficult to manage water resources because long-term hydrological data cannot be generated using a rainfall-runoff model that requires calibration. In this study, three methods of estimating the inflow volume of the reservoir were used to predict the runoff of the ungauged basin, including the TANK model, the Parsimonious Eco-Hydrologic Model (PEHM) using satellite data, and a data-based AI model that combines a recurrent neural network and a decision tree-based algorithm. In addition, simulated inflow volume data were applied to the K-nearest neighbors to generate a scenario of inflow volume in 10-day increments for 500 years to calculate the water supply capacity that satisfies a 95% confidence level. In this study, 47,000m³/day to 65,800m³/day was proposed as the stable water supply capacity of the Hoedong Reservoir, and it is expected that these results will support the establishment of a stable water resource management plan in Busan in the future.

Key words : Busan, Tank model, Hoedong Reservoir, Water supply capacity, Ungauged basin

*To whom correspondence should be addressed.

Pukyong National University

E-mail : skim@pknu.ac.kr

• Changhwi Jeon kyong National University, Korea/Master Course(jchwcg@pukyong.ac.kr)

• Jeongeun Won kyong National University, Korea/Research Professor(won6922@pukyong.ac.kr)

• Sangdan Kim kyong National University, Korea/Professor(skim@pknu.ac.kr)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

기후변화와 인간 활동으로 인해 환경이 급격하게 변화하면서 수자원 관리의 어려움이 증가하고 있다. 이에 따라 안정적인 수자원 계획 및 운영을 위해 유역의 유출량 예측은 점점 더 중요한 과제로 주목받고 있다.

낙동강 유역은 다른 유역에 비해 본류에 대한 먹는 물의 의존도가 높지만, 수질 오염도가 비교적 높다. 지난 30년간 크고 작은 수질오염 사고들이 발생함에 따라 낙동강 하류 지역의 먹는 물에 대한 불신이 더욱 높아졌다. 이에 환경부는 낙동강 취수원 다변화 사업의 목적으로, 부산시의 먹는 물 공급을 위해 회동저수지를 계량하여, 일 10만^m³의 용수공급량을 확보하고자 하였다(ME, 2022; KDI, 2022). 또한 부산시는 회동저수지의 중요성을 인식하여, 회동저수지에 대한 관리를 강화하고자 하였다. 그러나 회동저수지 유역에서 자체적으로 유입되는 유입량에 대한 자료가 부족하여, 수질관리를 비롯한 다양한 관리 및 정책 수립과 안전한 먹는 물 추가 확보에 대한 기본적인 정보가 부족한 실정이다(Busan, 2014).

합리적인 유출 예측을 위해서는 정확한 입력자료 및 관측자료가 필요하지만(Guo et al., 2021), 회동저수지와 같은 미계측 유역에는 관측된 유입량이 없어 전통적인 모형화 과정에 의한 장기간 유출 자료를 확보할 수 없다. 이를 해결하기 위해 많은 연구에서 지역화 과정이라는 방법을 통해 미계측 유역의 유출을 예측하였다(Zhang and Chiew, 2009). 지역화 과정은 계측된 유역과 대상 미계측 유역의 환경 및 기후가 같다는 가정하에 계측된 유역에서 보정된 수문 모델의 매개변수를 대상 미계측 유역의 모델로 전이시켜 미계측 유역의 유출량을 예측하는 것이다(Hrachowitz et al., 2013; Hundecha & Bardossy, 2004; Li and Zhang, 2017; Merz and Blöschl, 2004; Post and Jakeman, 1999; Zhang and Chiew, 2009). Oudin et al.(2008)은 공간적 근접성에 기반한 지역화가 최상의 해결책을 제공한다는 것을 보여주었으나, 지역화 거리가 증가함에 따라 공간 근접성의 성능이 점차 저하되며(Li & Zhang, 2017), 유량 관측소가 제한적 지역에서의 지역화 접근법은 적합하지 않다는 한계를 보였다(Haung et al., 2020). 또한, 전이 유역의 선택에 있어 사용자의 주관성이 지역화에 미치는 영향도 무시할 수 없다(Choi et al., 2021). 이에 본 연구에서는 전통적인 지역화 접근법뿐만 아니라 다양한 미계측 유역의 유출량 예측 방법을 이용하여 회동저수지의 장기간 유입량을 생산하여 이에 따른 용수 공급가능량을 분석하고자 하였다.

위성 기반 원격탐사 데이터는 미계측 유역의 수문 정보 부족 문제를 해결하기 위한 주요 대안으로 주목받고 있으며, 최근 연구에 따르면 모델 보정을 위한 자료로 위성 자료만을 이용하여 우리나라 미계측 유역의 유출 예측에 생태수문모델(Parsimonious Eco-Hydrologic Model, PEHM)이 성공적으로 적용되었다(Choi et al., 2023). PEHM은 Choi et al. (2021)에 의해 제안된 개념적 수문 모델로, Tank 모델의 개념을 차용하여 유역이 표면층(또는 차단층), 토양층 및 대수층의 세 층으로 구성된 것으로 가정하였으며, 식생 정보로 엽면적지수(Leaf Area

Index, *LAI*)를 이용하였다. MODIS *LAI* 시계열을 사용한 보정 체계는 미계측 유역의 유출량을 허용할 수 있는 정확도로 예측할 수 있는 탁월한 대안임을 보여준다(Choi et al., 2023).

수문 분야에서 딥러닝을 이용한 하천유출 모형화 및 지역화 연구는 Kratzert et al. (2018)의 연구로 상당한 진전을 보였다. 최근 연구에 따르면 순환신경망(Recurrent Neural Network, RNN)과 의사결정나무(Decision Tree, DT) 기반 알고리즘이 결합된 지역화 구현이 한국의 25개 유역에 걸쳐 수행되어 만족스러운 결과를 얻을 수 있음이 보고되었다(Won et al., 2023).

이에 본 연구에서는 (1) Tank 모델을 이용한 전통적인 지역화, (2) 위성 자료를 이용한 PEHM, (3) RNN과 DT 기반 알고리즘이 결합된 자료 기반 학습 등 세 가지 방법을 이용하여 회동저수지의 장기간 유입량 모의와 그에 따른 용수 공급가능량을 분석하여 비교하였다.

현재 다목적댐의 용수 공급능력을 평가하는데 적용되는 이수안전도는 갈수기 동안에도 용수공급을 보장할 수 있는 최대 공급량을 의미하는 보장공급량 기준과 일정 비율로 물 부족을 허용하는 방법을 의미하는 안전도, 통계적 지표인 회복도, 취약도 등의 기준을 사용하고 있다(Moon et al., 2012; Choi et al., 2014; Lee, 2014; Lee and Yi, 2014). 이수안전도 지표의 분석단위 설정에서 댐 설계기준(MLTM, 2011)에 의하면 저수지 모의 운영 시 유입량 자료는 일 단위 기준으로 하며, 유역 및 수문 특성 등을 고려하여 필요시에는 일, 반 순(5일), 순(10일) 단위로 분석할 수 있다(Sung et al., 2022). 본 연구에서는 회동저수지의 이수안전도 분석을 위해 순 단위 분석을 적용하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구 범위

회동저수지는 낙동강 취수원 다변화 사업을 통해 취수량을 추가 확보하고자 하는 부산의 유일한 자체 상수원이다. 회동저수지 유역은 부산과 양산 일부에 걸쳐있으며, 유역면적은 93.28km²이다. 회동저수지 유역은 수영강의 상류 유역이며, 수계는 수영강과 철마천으로 구분된다. 수영강으로 범기천, 임기천, 여락천이 차례로 유입되고, 철마천에는 이곡천과 구칠천이 유입된다(Fig. 1). 회동저수지 유역은 1964년 유역 전체가 상수원보호구역으로 지정되었으나, 일부 해제된 약 88.502km²가 상수원 보호구역으로 현재 지정되어 있다. 회동저수지는 1940년 착공 시작하여 1946년 12월에 준공된 후, 시설 확장을 거쳐 총저수용량은 18,507,000m³이며, 유효저수용량은 15,153,000m³이다(Busan, 2024). 그러나, 부산시의 수영강 하천기본계획(2014)에 따르면 댐 준공 이후부터 많은 양의 퇴적량이 쌓여 기존 유효저수용량의 수치는 현재의 유효저수용량과 차이가 있을 것으로 추측된다. 따라서 본 연구에서는 최근 준공된 영주댐을 기준으로 총저수용량의 약 75%인 14,000,000m³를 유효저수용량으로 간주하였다.

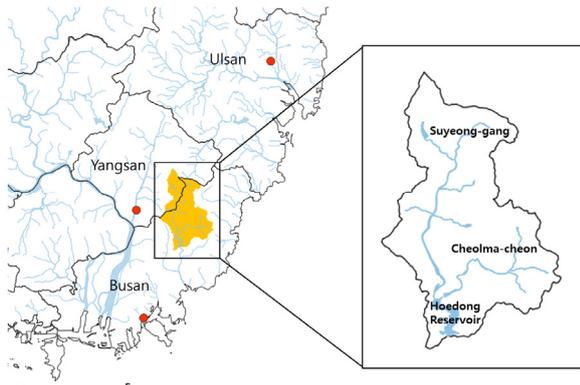


Fig. 1. Hoedong Reservoir watershed

최근 10년 동안의 연 평균 강수량은 1,553mm이며, Penman-Monteith(PM) 방법으로 산정된 연 잠재증발산량(Potential Evapotranspiration, PET)은 1,185mm로, 이 유역은 PET보다 강수가 많은 비교적 습윤한 지역이다. 최근 10년의 월 평균 기온은 최저 3°C(1월), 최고 27°C(8월)이며, 연 평균 기온은 17°C로 나타났다. 회동저수지의 지형적 특성은 다음과 같이 나타났다. Curve Number(CN)는 73.53이며, 포화투수계수(Saturated Hydraulic Conductivity, K_s)는 106.00으로, 불투수율(Impervious Rate, R_i)은 0.06로 나타났다. 본 연구에서는 기상청에서 운영 중인 부산, 양산, 울산 관측소에서 관측된 ASOS(Automated Synoptic Observing System) 일 기상자료를 바탕으로, 회동저수지 유역을 대상으로 티센 가중치 방법으로 면적 평균된 기상자료가 적용되었다. 해당 기상관측소들의 위치는 Fig. 1에서 빨간 점으로 표시하였다. 본 연구에서는 1974년부터 2023년까지의 50년의 장기간 수문 모의를 실시하였으며 1973년은 초기 예열기간으로 설정하였다.

2.2 미계측 유역에서 유출 모의 방법

수문 모델의 구축은 매개변수의 보정단계와 검증단계로 나누어진다. 보정단계에서는 보정 기간의 기상 및 수문자료를 활용하여 매개변수를 보정하고, 이후 검증단계에서 검증 기간의 기상 및 수문자료를 통해 매개변수가 적절하게 보정되었는지 검증한다. 하지만 회동저수지 유역은 미계측 유역으로 수문자료(유입량)가 관측되지 않아서 이러한 일반적인 방법으로는 모델을 구축할 수 없다. 이에 본 연구에서는 세 가지의 미계측 유역에서 유출을 예측하는 방법을 이용하여 회동저수지의 장기간 일 단위 유입량을 예측하여 비교하였다.

2.2.1 전통적인 수문 모델의 지역화

미계측 유역의 유출을 예측할 때는 인근 유역을 대상으로 수문 모델의 매개변수를 추정된 후 미계측 유역의 매개변수와 같다는 가정을 하고 미계측 유역으로 수문 모델의 매개변수를 전이시키는 지역화 과정이 필요하다.

Tank 모델은 유역을 여러 개의 탱크로 구성하여 많은 수의 매개변수를 포함하는 개념적인 비선형 수문 모델이다(Sugawara, 1979; Kim et al., 2005; Kim and Kim, 2007; Kim et al.,

2009). 또한 보정에 충분한 관측자료가 있는 유역에는 적용성이 높아서 수자원 장기종합계획 등에 활용되고 있는 모델이기도 하다(Lee et al., 2013; Lee et al., 2014; Lee et al., 2019; Kim et al., 2020).

본 연구에서는 여러 Tank 모델 중 Fig. 2와 같이 4개의 저장 탱크와 5개의 유출공, 3개의 침투공이 있는 4단 탱크로 구성된 형태의 Tank 모델을 이용하였다. 해당 Tank 모델은 유역의 말단부에서 장기적인 일 유출량을 효과적으로 모의하는데 적합한 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2020). 지역화를 위한 계측 유역으로는 합천댐 유역이 선정되었다. 합천댐의 Tank 모델의 매개변수를 보정하여 회동저수지의 Tank 모델로 전이시켜 회동저수지의 일 단위 유입량을 추정하였다.

앞서 언급했듯이, 지역화 대상 간의 환경 및 기후 조건도 중요하지만 거리에 따른 공간적 접근성 또한 지역화 과정에 영향을 미친다(Oudin et al., 2008). 밀양댐 유역은 공간적 접근성이 가장 우수했으나, 제공되는 유출량 자료의 신뢰도가 낮다(Choi et al., 2020). 한편, 기후 조건이 유사한 남강댐 유역은 회동저수지에 비해 유역면적이 20배 이상 차이나는 특성을 보였다. 이에 따라, 회동저수지와 공간적 접근성이 우수하며 환경 및 기후 조건이 유사한 합천댐 유역을 선정하였다. 합천댐 유역은 최근 10년의 연 평균 강수량은 1,200mm이며 연 평균 잠재증발산량은 1,057mm로 회동저수지와 같이 강수량이 잠재증발산량보다 많은 습윤한 지역이며, 안정적이고 신뢰도가 높은 유출량 자료를 충분히 제공하는 유역이다.

Tank 모델의 매개변수들은 MH(Metropolis-Hastings) 알고리즘으로 추정되었다. 보정 기간은 2013년부터 2023년이며,

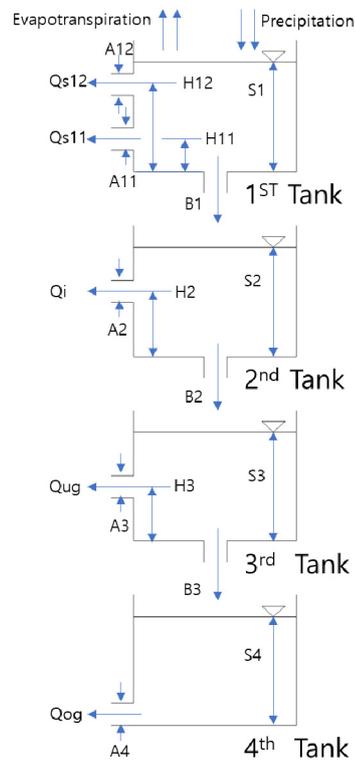


Fig. 2. Schematic diagram of Tank model

검증은 2003년부터 2013년 자료가 이용되었다. 보정 및 검증 과정에서 초기 1년, 즉 2013년과 2003년의 자료는 모델 구축의 초기 예열기간으로 적용되었다. MH 알고리즘을 이용해 모의된 매개변수 사후분포의 평균이 Tank 모델의 매개변수로 사용되었다. Tank 모델의 매개변수 추정에 대한 자세한 설명은 Kim et al. (2020) 및 관련 참고문헌에서 살펴볼 수 있다.

2.2.2 위성 자료를 이용한 PEHM

지역화 과정의 한계를 극복하기 위한 여러 연구 중 위성 자료만을 모델의 보정에 이용하여 미계측 유역의 유출을 성공적으로 예측한 연구 사례가 있다(Choi et al., 2023). 이러한 연구 결과를 바탕으로 본 연구에서는 PEHM을 적용하여 화동저수지의 일 유입량을 추정하였다. PEHM은 Choi et al. (2021)에 의해 제안된 개념적 수문 모델로, Fig. 3과 같이 유역이 표면층(또는 차단층), 토양층 및 대수층의 세 층으로 구성된 것으로 가정하였다. 식생과 다른 수문 성분들 사이의 상호작용을 설명하기 위한 식생 정보로 엽면적지수(LAI)를 이용하였으며, 모델 구동을 위한 유역 특성들은 공간적으로 평균된 Curve Number(CN), 포화투수계수(K_s), 불투수율(R_i)이다. 이러한 특성들은 모두 토양도 및 토지피복도로부터 추정된다. 일 강수량 및 PET 자료를 모델에 입력하여 일 유출, 실제 증발산, 토양수분, LAI 등과 같은 다양한 수문 정보를 모으할 수 있다.

보정 기간은 2013년부터 2023년이며, 검증은 2001년부터 2012년 자료가 이용되었다. 보정과 검증에서 초기 1년(2013년과 2001년)의 자료는 모델 구축의 초기 예열기간으로 두었다. SCEM(Shuffled Complex Evolution Metropolis) 알고리즘(Vrugt et al., 2003)에 의해 생성된 앙상블의 평균이 모델의 예측치로 사용되었다. PEHM과 매개변수 추정에 대한 자세한 설명은 Choi et al. (2021), Choi et al. (2023) 및 이들의 참고문헌에서 살펴볼 수 있다.

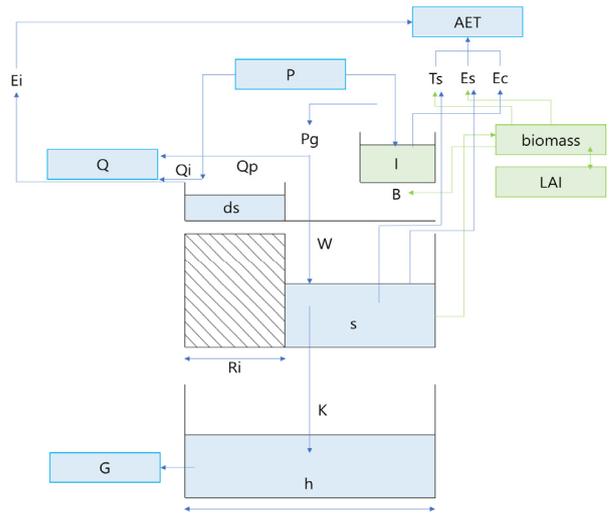


Fig. 3. Schematic diagram of PEHM

2.2.3 자료 기반 학습을 이용한 AI 모델

Won et al., (2023)은 RNN과 DT 기반 알고리즘이 결합된 자료 기반 학습을 이용하여 미계측 유역의 유출을 성공적으로 예측하였다. 그들의 연구에 따르면 지역화 접근법에서 착안한 미계측 유역의 하천 유량을 예측하기 위해, 계측 유역의 정보를 통합하여 RNN과 DT 기반 알고리즘의 결합 모델을 학습하였고, 학습된 모델로부터 미계측 유역의 유출을 예측하였다. Leave-one-out cross validation (LOOCV) 방법을 활용한 25개 유역의 교차검증을 통해 예측 성능을 살펴봄으로써 미계측 유역의 유출을 활용할 수 있는 정확도로 예측할 수 있음을 확인하였다.

Schmidhuber (2015)의 연구에 따르면 특정 훈련 데이터 세트보다 방대한 훈련 데이터 세트가 모델이 더 일반적이고 추

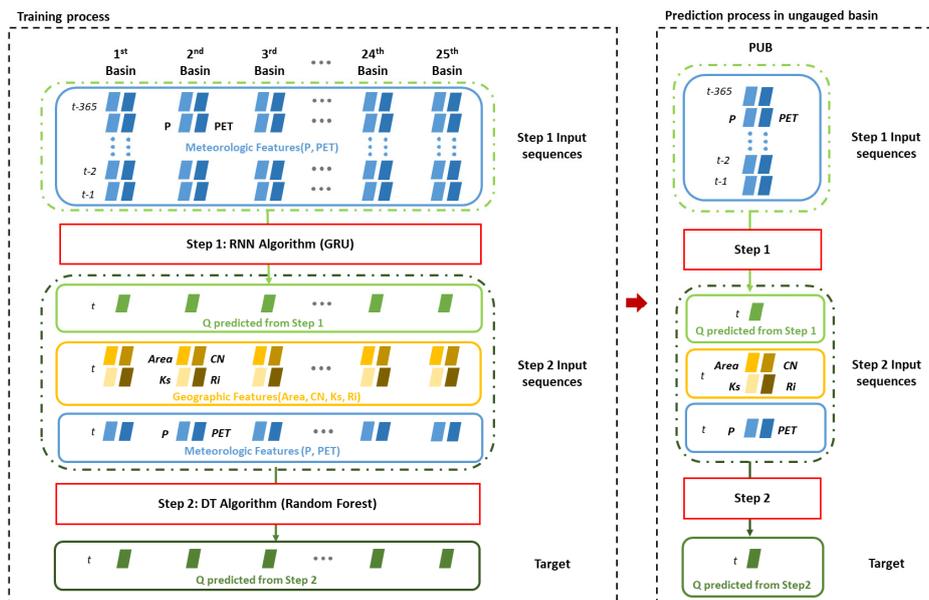


Fig. 4. Schematic diagram of the AI model

상적인 패턴을 보이는 입출력 관계를 학습하는 것에 도움이 된다. 본 연구에서는 Won et al. (2023)의 접근법을 이용하여 우리나라 25개의 계측 유역의 정보를 모두 학습시킨 자료 기반 모델이 미계측 유역인 회동저수지의 유입량 예측에 유용할 것으로 판단하였다. Fig. 4와 같이 RNN과 DT 기반 알고리즘을 결합하여 25개 계측 유역의 정보를 모두 학습하는 AI 모델을 구성하였다.

2016년부터 2020년까지의 자료를 활용하여 25개 유역에 대한 AI 모델을 학습시켰다. 각 유역의 특성은 Table 1에 정리하였다. 이후 학습된 모델을 통해 회동저수지의 기상 및 지형 자료를 입력하여 1973년부터 2023년까지의 50년간 일 유입량을 추정하였다. RNN과 DT 기반 알고리즘의 결합 모델에 대한 자세한 설명은 Won et al. (2023) 및 이들의 참고문헌에서 살펴볼 수 있다.

2.2.4 이수안전도 분석

이수안전도 평가를 위해서 먼저 모델로부터 모의된 유입량 자료를 활용하여 장기간(500년)의 순(10일) 단위 유입량을 모의 발생하였다. 이후, 500년 모의 유입량과 저수지로부터 공급해야 하는 수량을 적용하여 저수지를 모의 운영하고, 500년 모의 기간 중 목표 이수안전도 이상으로 용수공급이 가능한 최소의 공급가능량을 계산하였다. 저수지는 500년 동안 모의 운영되며, 500년의 순 단위 시나리오 중 초기 1년은 두 번 반

복된다. 이는 초기 수위를 결정하기 위한 예열기간으로 첫 번째 해는 용수를 공급하지 않고 운영하고 이수안전도 계산에서는 제외된다. 두 번째 해부터는 용수공급을 시작하여 500년을 연속적으로 모의하게 된다.

공급량은 유효저수용량 범위 내에서만 가능하므로 모의 운영 시에 저수량이 유효저수용량 아래로 떨어지지 않게 조절해야 한다. 저수량이 유효저수용량 아래로 떨어지게 된다면 공급량을 계획보다 낮게 조절하여 저수지의 수위가 적어도 저수위 이상으로 유지되도록 한다. 이를 통해 1년 중 공급량이 계획량보다 작은 기간이 하루라도 발생하면, 그 해는 실패로 보았으며, 전체 모의 년 중 계획된 공급량이 모두 만족한 년의 백분율을 이수안전도라 하였다.

본 연구에서는 K-최근접 이웃(K-Nearest Neighbor, KNN) 알고리즘을 적용하여 500년의 순 단위 유입량 시나리오를 생성하였다. 이때, 이수안전도 산정에 중요한 갈수기 유입량의 연속성을 유지하기 위해 9월 1일부터 다음 해 8월 31일까지를 1년으로 순 단위 자료를 정리해 KNN 알고리즘을 적용하였다. KNN 알고리즘을 통해 생성된 500년의 순 단위 유입량 시나리오를 바탕으로, 이수안전도 95% 이상으로 추정되는 충분히 작은 용수공급량을 기준으로 하루 공급량을 점진적으로 증가시키며 이수안전도를 분석하였다. 시행착오를 통해 이수안전도 95%를 만족하는 적절한 용수공급량을 도출하였다. 먼저, 하루 40,000m³의 공급량을 계획했을 때 이수안전도는 100%로

Table 1. Summary of hydro-meteorological information for the 25 selected basins (2016~2020)

Basins	Area(km ²)	CN(-)	K_s (mm/day)	R_f (-)	Precipitation(mm/yr)	PET(mm/yr)
Seomjingang Dam	763.461	67.096	133.763	0.075	1,354	1,006
Namgang Dam	2281.692	63.031	156.434	0.058	1,487	1,077
Andong Dam	1590.687	59.080	177.492	0.058	1,104	1,020
Goesan Dam	676.717	67.186	132.498	0.046	1,315	1,043
Hapcheon Dam	928.922	56.732	191.814	0.063	1,259	1,054
Guangdong Dam	120.728	68.946	127.728	0.036	1,250	934
Unmun Dam	301.949	66.841	134.378	0.052	1,155	1,136
Yeosu	519.504	61.916	179.911	0.081	1,188	1,048
Daejeon	609.114	60.393	176.877	0.131	1,295	1,023
Okcheon	491.194	63.120	168.130	0.056	1,362	1,023
Hwasun	410.969	62.094	153.072	0.065	1,403	1,032
Namyangju	201.500	60.414	178.345	0.088	1,219	1,045
Yesan	221.406	70.022	129.117	0.092	1,235	1,088
Boryeong Dam	162.291	55.900	187.080	0.073	1,065	952
Hampyeong	114.568	71.651	115.807	0.088	1,034	895
Yeongwol	1615.638	59.708	171.402	0.042	1,151	1,024
Mungyeong	612.449	61.854	162.737	0.047	1,328	1,129
Buyeo(Jicheon)	208.604	61.719	161.727	0.057	1,228	992
Cheongju	167.599	65.498	158.884	0.122	1,186	1,079
Jangheung	152.481	64.682	153.567	0.071	1,399	1,026
Yongdang Dam	930.424	61.289	174.590	0.078	1,449	1,010
Hoengseong Dam	207.877	51.846	216.665	0.046	1,159	1,025
Buyeo(Seokdong)	155.869	67.595	122.398	0.077	1,247	1,000
Soyanggang Dam	2694.310	50.871	207.959	0.059	1,231	1,038
Chungju Dam	6661.490	62.369	156.519	0.049	1,205	1,040

나타났으며, 이후 하루 100m³씩 공급량을 증가시키며 회동저수지의 적절한 일일 용수공급량을 찾는 과정을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

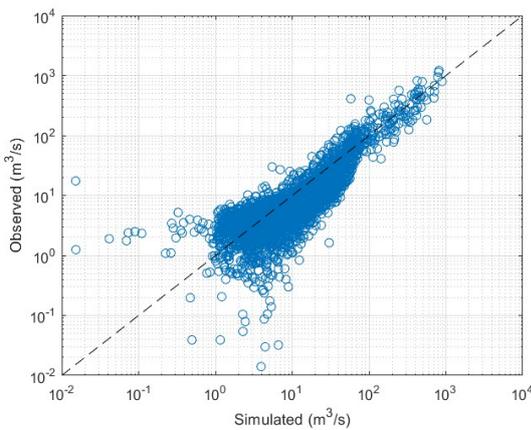
3.1 모델의 예측 성능 평가

회동저수지의 유입량 모의를 위해 Tank 모델, PEHM, AI 모델을 구성하였다. 일반적으로 일 단위의 모의에서 R^2 가 0.6 이상, NSE 가 0.65 이상 그리고 KGE 가 0.6 이상이면 관측자료를 합리적으로 묘사하는 것으로 판단한다(Nash and Sutcliffe, 1970; Engel et al., 1993; Ritter, A., & Muñoz-Carpena, R., 2013; Patil and Stieglitz, 2015).

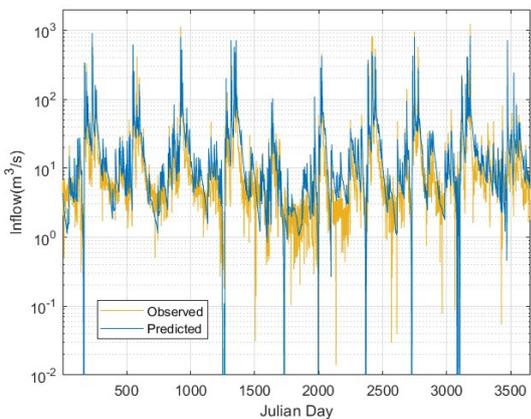
먼저, Tank 모델의 검증 기간의 관측된 합천댐의 유입량 자료와 모의된 합천댐의 유입량 자료를 Fig. 5와 같이 비교하여 모델의 예측 성능을 확인하였다. Tank 모델은 보정과 검증 두 기간에서 모두 세 성능 지표가 0.8 이상으로 유효한 범위 내에서 유입량 모의가 수행됨을 확인하였다. 이후 보정된 합천댐의 Tank 모델의 매개변수를 회동저수지의 Tank 모델로 전이시켜 유입량 모의 및 이수안전도 분석을 진행하였다.

두 번째로, LAI 를 이용하여 보정된 PEHM의 유입량 예측 성능을 확인하였다. Fig. 6과 같이 보정 및 검증 기간에 대해

PEHM에 의해 모의된 LAI 와 위성으로부터 관측된 LAI 의 시계열을 비교하였다. 두 기간에서 LAI 의 예측 성능 지표는 모두 0.5 이상으로 나타났다. 모델의 LAI 모의 성능은 만족스럽지 못한 것으로 평가할 수 있으나, 대부분의 선행 연구에서도 본 연구와 유사한 LAI 예측 성능을 보여주었으므로(Naseem et al. 2015; Naseem et al. 2016; Ha et al. 2018; Echeverra et al. 2019), 본 연구에서는 PEHM을 이용한 회동저수지의 유입량 모의 및 이수안전도 분석을 계속 진행하였다.

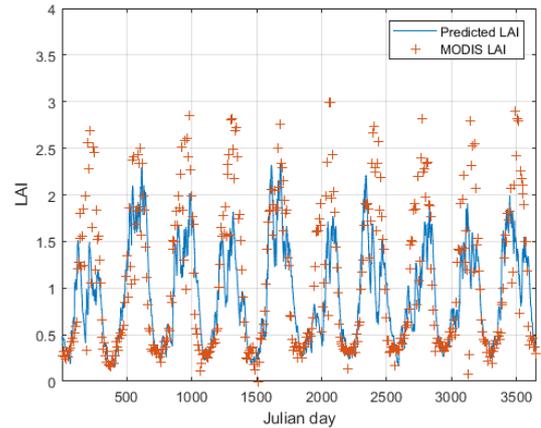


(a) Scatter plot

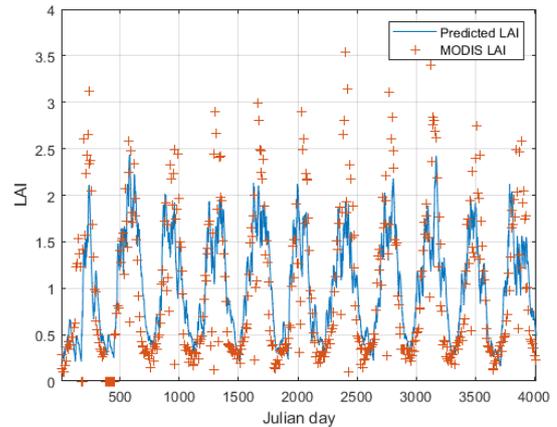


(b) Time series

Fig. 5. Streamflow prediction performance of Tank model



(a) Calibration (2013-2023)

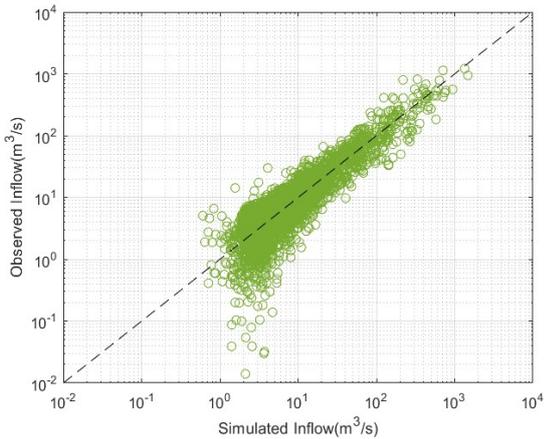


(b) Validation (2001-2012)

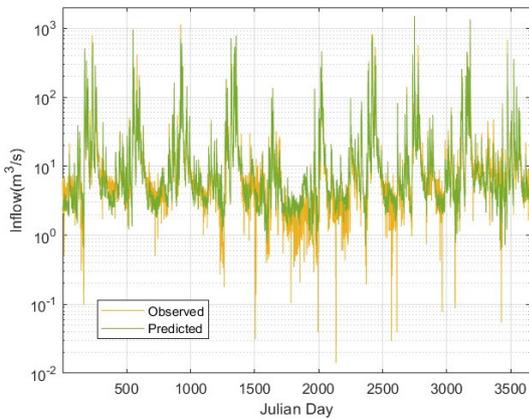
Fig. 6. MODIS LAI and Predicted LAI time series

마지막으로, 한반도 남부의 25개 유역의 2016년부터 2020년의 기상 및 지형 정보를 RNN 알고리즘 중 하나인 Gated Recurrent Unit(GRU)와 DT 기반 알고리즘 중 하나인 Random Forest(RF)를 결합한 AI 모델에 학습시켰다. 검증을 위해 2004년부터 2013년 관측된 합천댐의 유입량 자료와 모의된 합천댐의 유입량 자료의 비교를 통해 AI 모델에서의 유입량 예측 성능을 확인하였다. 3개의 성능 지표 모두 0.79 이상으로 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다.

Tank 모델은 회동저수지의 연평균 유입량을 896.1mm로 모의하였다(연평균 강수량의 약 59.3%가 유출). PEHM은 연평균 유입량을 1,008.5mm로 모의하였으며, AI 모델에 의한 연평균 유입량은 718.3mm이다. PEHM이 가장 큰 연평균 유입량을 모의하였으며, AI 모델에 의한 연평균 유입량이 가장 적었다.



(a) Scatter plot



(b) Time series

Fig. 7. Streamflow prediction performance of AI model

모델별 회동저수지의 유입량의 유행곡선을 낙동강 주요 다섯 개 댐(남강, 밀양, 안동, 임하, 합천)의 유행곡선과 비교하였다 (Fig. 8). Table 2에서 알 수 있듯이, 풍수량(Q95), 평수량(Q185), 저수량(Q275)은 Tank 모델은 상대적으로 큰 값을 보였지만, 갈수량(Q355) 부근에서는 AI 모델이 가장 큰 값을 보였다. 하지만 풍수량에서는 AI 모델이 3개 모델 중 가장 작은 값을 모의하였다. 3개 모델 중 AI 모델만이 5개 댐의 유행곡선의 전체 범위 안에 들어오고 있으며, Tank 모델은 갈수량만 전체 범위 안에 있고 풍수량, 평수량, 저수량은 5개 댐에 의한 범위를 웃도는 것으로 나타났다. PEHM은 풍수량이 5개

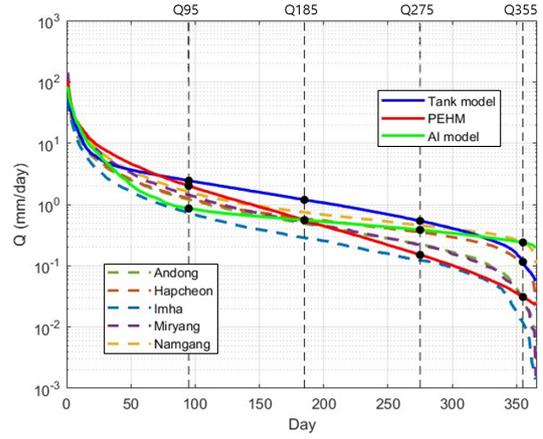


Fig. 8. Flow-duration curves of Hoedong Reservoir and Nakdong River's major dams (2001-2023)

댐 범위를 초과하였으며, 평수량, 저수량, 갈수량은 범위 이내였다. 하지만 이러한 결과는 모델을 적용하는 목적에 맞게 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다. AI 모델은 갈수량에서 3개 모델 중 가장 큰 값을 모의하였으나, 연평균 유입량은 가장 적게 모의하였다. 즉, AI 모델은 연중 유입량의 편차가 3개 모델 중 가장 작다. 반대로 PEHM은 갈수량에서 3개 모델 중 가장 적은 값을 모의하였으나, 연평균 유입량은 가장 크게 모의하였다. 이러한 모델 사이의 특성은 500년 모의 발생을 이용한 이수안전도 분석에 영향을 미칠 가능성이 매우 높다.

3.2 회동저수지 모의 유입량 분석 및 공급가능량 산정 결과

회동저수지의 1973년부터 2023년까지의 강수량과 잠재증발산량(PET)을 입력하여, 각각의 모델별로 1974년부터 2023년까지의 50년간 장기간 일 유입량을 모의하였다. 이 모의 결과를 통해 유입량이 적게 발생한 시기를 분석할 수 있었다. Tank 모델에 의한 유입량은 2017년 6월이 극심한 가뭄으로 인해 가장 적은 월 유입량(0.09mm/month)이 발생하였다. 2022년 1월(0.43mm/month)과 1988년 12월(0.63mm/month), 1984년 2월(0.78mm/month), 1984년 1월(1.11mm/month)에도 적은 유입량이 발생하였다. 연간 유입량 역시 극심한 가뭄이 발생했던 2017년의 유입량이 331.83mm/year로 가장 적었으며, 1988년(388.88mm/year), 1994년(432.91mm/year), 2022년(437.44mm/year) 순으로 적게 나타났다.

Table 2. Q95, Q185, Q275, Q355 of Hoedong Reservoir and Nakdong River's major dams (mm/day)

Major Basins		Q95	Q185	Q275	Q355
Hoedong Reservoir	Tank model	2.4467	1.1891	0.5389	0.1153
	PEHM	2.0156	0.5529	0.1499	0.0306
	AI model	0.8581	0.5565	0.3848	0.2402
Andong Dam		1.2069	0.4869	0.2232	0.0269
Imha Dam		0.7212	0.2859	0.1230	0.0117
Hapcheon Dam		1.2738	0.5846	0.3552	0.1106
Namgang Dam		1.5939	0.7482	0.4547	0.2419
Miryang Dam		1.4349	0.5147	0.2193	0.0284

PEHM에서는 1977년 2월에 가장 적은 월 유입량(0.34mm/month)이 발생하였다. 1995년 12월(0.48mm/month)과 2022년 2월(0.57mm/month), 1988년 11월(0.67mm/month), 2007년 1월(0.80mm/month)에도 적은 유입량이 발생하였으며, 연간 유입량은 Tank 모델과 마찬가지로 2017년의 유입량이 362.14mm/year로 가장 적었다. 2017년 이후 1988년(488.16mm/year), 2022년(536.42mm/year), 1976년(542.90mm/year) 순으로 적게 나타났다.

AI 모델에서는 1977년 2월에 가장 적은 월 유입량(5.36mm/month)이 발생하였다. 2000년 2월(5.47mm/month)과 1996년 2월(5.69mm/month), 1988년 2월(5.90mm/month), 1984년 2월(6.06mm/month)에도 적은 유입량이 발생하였으며, AI 모델 역시 앞의 두 모델과 마찬가지로 최소 연간 유입량은 2017년(213.40mm/year)이 가장 적었다. 2017년 이후로는 1988년(284.36mm/year), 1994년(288.90mm/year), 1976년(329.12mm/year) 순으로 연간 유입량이 적게 나타났다.

모델별 월 유입량 분석 결과, 가장 낮은 월 유입량이 발생한 시기는 대체로 겨울철에 집중되었으나, Tank 모델에서는 예외적으로 2017년 6월에 최저 유입량이 기록되었다. 2017년의 경우, 봄철 강수량이 부족하여 전국적으로 강수 부족 현상이 확산되었으며, 남부 지역을 중심으로 6월부터 심각한 강수 부족이 지속되었다. 이러한 기상학적 영향으로 인해, 낙동강 수계의 안동-임하댐, 합천댐 및 밀양댐은 가뭄에 대비하여 용수 비축 조치가 시행되었다. 이와 같이 2017년은 남부 지역에서 기상학적 및 수문학적 가뭄이 극심했던 해로, 모든 모델에서 연간 유입량이 최소로 기록된 해로 분석되었다. 또한, 세 모델에서 공통적으로 낮은 유입량을 보였던 1988년 역시 낙동강 유역을 중심으로 강수량이 부족했던 해로, 이전의 연구에서도 가뭄 규모가 가장 컸던 해로 평가되었다(Jang et al., 2016). 한편, PEHM과 AI 모델에서 공통적으로 낮은 연간 유입량을 기록한 1994년은 영호남 지역을 중심으로 극심한 가뭄이 발생하였으며, 이는 이듬 해 중반까지 지속되었다. 이와 같이, 본 연구에서 도출된 유입량 감소 시기는 기존에 보고된 주요 가뭄 사례와 일치하는 경향을 보이며 연구 결과의 신뢰성을 확보할 수 있음을 시사한다.

회동저수지의 경우 미계측 유역이므로, 모의된 유입량이 계측 유역에서와 같이 정확하다고 볼 수는 없을 것이다. 회동저수지의 수문 모델은 회동저수지의 실제 관측자료를 이용하여 구축되는 것이 아니라, 인근 유역의 관측자료를 이용하여 모델을 구성하거나 위성 자료만을 이용하는 등 실제 회동저수지의 유입량을 이용하여 모델을 구축하는 것이 아니기 때문에 모의된 유입량 결과는 실제 회동저수지의 유입량과는 차이가 있다. 이 때문에 본 연구에서는 다양한 모델을 이용하여 유입량을 모의하여 비교하고자 하였으며, 모델별로 다양한 유입량 모의 결과를 도출하였다. 각 모델 사이의 유입량 모의 결과는 분명한 차이가 있다.

모델 별로 모의된 회동저수지의 50년 일 유입량 자료를 순(10일) 단위 유입량 자료로 변환하여, KNN 알고리즘을 통해 500년의 순 단위 유입량 자료를 모의 발생하였다. Fig. 9은 생성

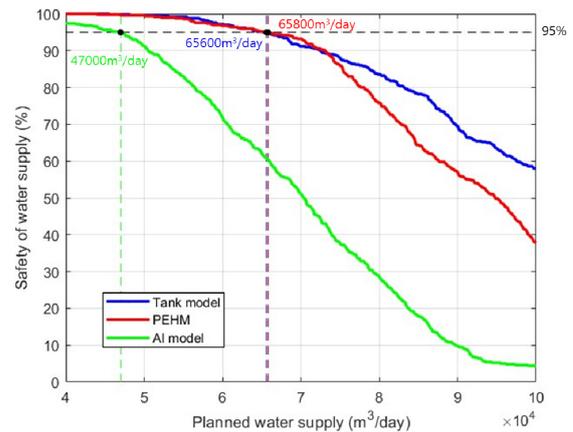


Fig. 9. Safety of water supply for planned water supply

된 순 단위 유입량 시나리오를 바탕으로 목표한 물 공급량에 따른 공급 성공 비율을 나타낸 것이다. 생성된 유입량 시나리오를 이용하여 추정된 이수안전도 95%를 만족하는 회동저수지 공급가능량은 Tank 모델의 경우 65,600m³/day, PEHM의 경우 65,800m³/day로 나타났다. AI 모델의 경우 47,000m³/day를 안정적으로 공급이 가능할 것이라고 나타났다.

3.3 용수 공급가능량 결과에 대한 고찰

일반적으로 미계측 유역의 유출 예측은 많은 연구가 진행되었으며, 현업에서도 수문 모델의 지역화는 활발히 사용된다. 본 연구에서는 3개의 수문 모델을 사용하여 미계측 유역인 회동저수지의 유입량을 예측하고 이를 바탕으로 용수 공급가능량을 산정하였다. 실제 유입량 관측의 부재로 인해 회동저수지의 실제 유입량을 정확하게 모델링하였는지는 명확하게 확인할 방법이 없으므로, 추정된 용수 공급가능량 역시 큰 불확실성이 내재하여 있을 수밖에 없다.

모델별 유입량의 모의 결과가 다르므로 인해 이수안전도 95%를 만족하는 용수 공급가능량 역시 모델별로 다르게 나타났다. 유입량 모의 결과를 토대로 추정된 회동저수지의 안정적인 용수 공급가능량은, 보수적으로는 AI 모델로 추정된 47,000m³/day이며, 최대한으로는 PEHM을 이용해 추정된 65,800m³/day까지 공급이 가능한 것으로 추정되었다. Tank 모델은 PEHM과 유사하지만 그보다는 작은 65,600m³/day를 안정적으로 공급할 수 있는 양으로 추정하였다.

본 논문에서 언급한 바와 같이, AI 모델은 국내 25개 유역을 학습하여 다른 유역의 기상 및 지형 특성이 반영된 결과로, 서로 유사한 공급가능량을 보여준 Tank 모델 및 PEHM에 비해 전체적으로 적은 공급가능량을 나타냈다. AI 모델로 모의된 유입량은 다른 모델에 비해 전반적으로 작게 나타났으며, 변동 폭이 작아 저수지의 유효 저수 용량을 가득 채우는 데 오랜 시간이 소요되었다. 이에 따라 저수량과 갈수량이 다른 두 모델에 비해 크게 모의되었음에도 가장 작은 용수 공급가능량이 계산되었다. 반면, 갈수량이 가장 작은 PEHM의 용수 공급가능량이 가장 크게 분석되었는데, 이는 PEHM이 전체적으로 다른 두 모델에 비해 큰 유출률을 보이며, 한 번에 많은 유입량이

들어와 저수지의 줄어든 용량이 빠르게 회복되었기 때문이다.

본 연구의 결과는 비유량법 등을 통한 추가적인 장기유입량 모의 결과와 비교하여 신뢰성을 높일 수 있으며, 대상 유역을 확대하여 회동저수지 하류의 유량 관측지점을 대상으로 검토하고 유입량을 추정하는 것도 효과적일 수 있다. 다만, 회동저수지 하류의 유량 관측이 2017년부터 시작되어 자료의 수가 부족해 용수 공급가능량을 파악하기 위한 장기간 유입량 모의를 진행하기 어렵다. 이렇듯 회동저수지의 유입량 자료의 부재는 정확한 유입량 모의에 어려움이 있으며, 이는 회동저수지의 정확한 용수 공급가능량을 파악하는 데에도 불확실성을 초래하게 된다. 용수 공급가능량뿐만 아니라 수질관리를 비롯한 회동저수지의 다양한 정책 수립을 위해 회동저수지의 실제 유입량 관측이 우선되어야 할 것으로 판단된다. 더불어, 실측을 통하여 회동저수지의 유효저수용량을 파악하는 것도 정확한 용수 공급가능량을 추정하는 것에 데 큰 역할을 할 것이다.

본 연구에서는 다양한 방법으로 용수 공급가능량을 추정하였으며, 47,000m³/day에서 65,800m³/day를 회동저수지의 안정적인 용수 공급가능량으로 제안하고자 한다.

4. 결론

본 연구에서는 낙동강 취수원 다변화 사업에 따라 부산의 유일한 자체 취수원인 회동저수지의 용수 공급가능량을 조사하였다. 미계측 유역인 회동저수지는 장기간의 유입량 자료가 존재하지 않기 때문에 다양한 모델로부터 장기간 유입량 자료를 모의하고, 이를 기반으로 이수안전도 분석을 통해 회동저수지의 안정적인 용수 공급가능량을 추정하였다. 이를 위해 세 가지의 미계측 유역 유출 예측 방법(지역화를 이용한 Tank 모델, 위성 자료를 이용한 PEHM, 자료 기반 학습을 통한 AI 모델)을 이용하여 회동저수지의 일 유입량을 모의하고, 이수안전도를 분석하여 모델별 적절한 용수 공급가능량을 추정 및 비교하였다.

세 가지 모델로 모의된 유입량과 추정된 용수 공급가능량은 각기 다른 결과를 나타냈으며, 이는 관측자료의 부재로 인하여 도출된 결과에 큰 불확실성이 있음을 보여준다. 일반적으로는 현업에서 많이 적용하고 있는 Tank 모델로부터 도출된 65,600m³/day를 회동저수지의 안정적인 용수 공급가능량으로 간주하는 것이 타당할 것이다. 또한 회동저수지를 대상으로 관측된 위성 자료에 근간하는 PEHM에 의한 결과도 이와 유사한 결과(65,800m³/day)를 주고 있으므로, Tank 모델로부터 추정된 용수 공급가능량은 타당성이 있다고 판단할 수 있다. 그러나 우리나라 25개 유역을 대상으로 학습된 AI 모델로부터 도출된 47,000m³/day의 결과를 간과하기는 어려울 것이다. 이러한 불확실성은 모두 회동저수지 유입량에 대한 최소한의 관측자료의 필요성을 강조하고 있다.

사사

이 논문(저서)은 2024년도 부산녹색환경지원센터의 연구사업비 지원을 받아 연구되었음(24-1-20-22).

References

- Busan (2014), *The basic plan for the Suyeong River*
- Busan Water Authority (2024). *Busan water authority statistical yearbook*.
- Choi, J., Kim, U., & Kim, S. (2023). "Ecohydrologic model with satellite-based data for predicting streamflow in ungauged basins." *Science of The Total Environment*, Vol. 903, pp. 166617.
- Choi, J., Lee, O., Won, J., & Kim, S. (2020). "Stochastic Simple Hydrologic Partitioning Model Associated with Markov Chain Monte Carlo and Ensemble Kalman Filter." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 36(5), pp. 353-363.
- Choi, J., Won, J., Lee, O., & Kim, S. (2021). "Usefulness of global root zone soil moisture product for streamflow prediction of ungauged basins." *Remote Sensing*, Vol. 13(4), pp. 756.
- Choi, S. J., Lee, D. R., & Moon, J. W. (2014). "Comparison of water supply reliability by dam operation methods." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47 (6), pp. 523-536.
- Echeverria, C., Ruiz-Perez, G., Puertes, C., Samaniego, L., Barrett, B., & Frances, F. (2019). "Assessment of remotely sensed near-surface soil moisture for distributed eco-hydrological model implementation." *Water*, Vol. 11 (12), pp. 2613.
- Engel, B. A., Srinivasan, R., Arnold, J., Rewerts, C., & Brown, S. J. (1993). "Nonpoint source (NPS) pollution modeling using models integrated with geographic information systems (GIS)." *Water Science and Technology*, Vol. 28(3-5), pp. 685-690.
- Guo, Y., Zhang, Y., Zhang, L., & Wang, Z. (2021). "Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: A comprehensive review." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, Vol. 8 (1), pp. e1487.
- Ha, L. T., Bastiaanssen, W. G., Van Griensven, A., Van Dijk, A. I., & Senay, G. B. (2018). "Calibration of spatially distributed hydrological processes and model parameters in SWAT using remote sensing data and an auto-calibration procedure: A case study in a Vietnamese river basin." *Water*, Vol. 10(2), pp. 212.
- Hrachowitz, M., Savenije, H. H. G., Blöschl, G., McDonnell, J. J., Sivapalan, M., Pomeroy, J. W., ... & Cudennec, C. (2013). "A decade of predictions in ungauged basins (PUB)—a review." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 58(6), pp. 1198-1255.
- Huang, Q., Qin, G., Zhang, Y., Tang, Q., Liu, C., Xia, J.,

- ... & Post, D. (2020). "Using remote sensing data-based hydrological model calibrations for predicting runoff in ungauged or poorly gauged catchments". *Water Resources Research*, Vol. 56(8), pp. e2020WR028205.
- Hundecha, Y., & Bardossy, A. (2004). "Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model." *Journal of Hydrology*, Vol. 292 (1-4), pp. 281-295.
- Jang, H. W., Cho, H. W., Kim, T. W., & Lee, J. H. (2016). "Quantitative characterization of historical drought events in Korea—focusing on outlier analysis of precipitation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49(2), pp. 145-153.
- Kim, J. C., & Kim, S. (2007). "Flow duration curve analysis for Nakdong River basin using TMDL flow data." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 23(3), pp. 332-338.
- Kim, M., Ko, I., & Kim, S. (2009). "An analysis of the effect of climate change on Nakdong River flow condition using CGCM's future climate information." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 25(6), pp. 863-871.
- Kim, R., Won, J., Choi, J., Lee, O., & Kim, S. (2020). "Application of bayesian approach to parameter estimation of TANK model: Comparison of MCMC and GLUE methods." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 36(4), pp. 300-313.
- Kim, S., Lee, K. H., & Kim, H. S. (2005). "Low flow estimation for river water quality models using a long-term runoff hydrologic model." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 21(6), pp. 575-583.
- Korea Development Institute (2022). *Project to build a safe drinking water supply system in the Nakdong River basin*.
- Kratzert, F., Klotz, D., Brenner, C., Schulz, K., & Herrnegger, M. (2018). "Rainfall-runoff modelling using long short-term memory (LSTM) networks." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 22(11), pp. 6005-6022.
- Lee, A., Cho, S., Kang, D. K., & Kim, S. (2014). "Analysis of the effect of climate change on the Nakdong River stream flow using indicators of hydrological alteration." *Journal of Hydro-Environment Research*, Vol. 8(3), pp. 234-247.
- Lee, A., Cho, S., Park, M. J., & Kim, S. (2013). "Determination of standard target water quality in the Nakdong River basin for the total maximum daily load management system in Korea." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 17(2), pp. 309-319.
- Lee, G. M. (2014). "Water supply performance assessment of multipurpose dams using sustainability index." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47(5), pp. 411-420.
- Lee, G. M., & Yi, J. (2014). "Analysis of problems of water supply capacity determination in water resources systems." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47(4), pp. 331-342.
- Lee, J., Kim, U., Kim, L. H., Kim, E. S., & Kim, S. (2019). "Management of organic matter in watersheds with insufficient observation data: The Nakdong River basin." *Desalination and Water Treatment*, Vol. 152, pp. 44-57.
- Li, H., & Zhang, Y. (2017). "Regionalising rainfall-runoff modelling for predicting daily runoff: Comparing gridded spatial proximity and gridded integrated similarity approaches against their lumped counterparts." *Journal of Hydrology*, Vol. 550, pp. 279-293.
- Merz, R., & Blöschl, G. (2004). "Regionalisation of catchment model parameters." *Journal of Hydrology*, Vol. 287(1-4), pp. 95-123.
- Ministry of Environment (2022). *The 1st Nakdong River basin water management master plan(2021~2030)*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime affairs (2011). *Dam design criteria*.
- Moon, J. W., Choi, S. J., Kang, S. K., & Lee, J. J. (2012). "An evaluation of water supply reliability using AWS data in Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45(8), pp. 743-753.
- Naseem, B., Ajami, H., Cordery, I., & Sharma, A. (2015). "A multi-objective assessment of alternate conceptual ecohydrological models." *Journal of Hydrology*, Vol. 529, pp. 1221-1234.
- Naseem, B., Ajami, H., Liu, Y., Cordery, I., & Sharma, A. (2016). "Multi-objective assessment of three remote sensing vegetation products for streamflow prediction in a conceptual ecohydrological model." *Journal of Hydrology*, Vol. 543, pp. 686-705.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10(3), pp. 282-290.
- Oudin, L., Andreassian, V., Perrin, C., Michel, C., & Le Moine, N. (2008). "Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments." *Water Resources Research*, Vol. 44(3),

- pp. e2007WR006240.
- Patil, S. D., & Stieglitz, M. (2015). "Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters." *Journal of Hydrology*, Vol. 525, pp. 409–417.
- Post, D. A., & Jakeman, A. J. (1999). "Predicting the daily streamflow of ungauged catchments in SE Australia by regionalising the parameters of a lumped conceptual rainfall–runoff model." *Ecological Modelling*, Vol. 123(2–3), pp. 91–104.
- Ritter, A., & Muñoz-Carpena, R. (2013). "Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments." *Journal of Hydrology*, Vol. 480, pp. 33–45.
- Schmidhuber, J. (2015). "Deep learning in neural networks: An overview." *Neural Networks*, Vol. 61, pp. 85–117.
- Sugawara, M. (1979). "Automatic calibration of the tank model/L'etalonnage automatique d'un modele a cisterne." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 24(3), pp. 375–388.
- Sung, J., Kang, B., Kim, B., & Noh, S. (2022). "Development and application of integrated indicators for assessing the water resources performance of multi-purpose and water supply dams." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 55(9), pp. 687–700.
- Vrugt, J. A., Gupta, H. V., Bouten, W., & Sorooshian, S. (2003). "A Shuffled complex evolution metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters." *Water Resources Research*, Vol. 39(8), pp. e2002WR001642.
- Won, J., Seo, J., Lee, J., Choi, J., Park, Y., Lee, O. and Kim, S. (2023). "Streamflow predictions in ungauged basins using recurrent neural network and decision tree-based algorithm: application to the southern region of the Korean Peninsula," *Water*, Vol. 15(13), pp. 2485.
- Zhang, Y. Q., & Chiew, F. H. S. (2009, July). "Evaluation of regionalisation methods for predicting runoff in ungauged catchments in southeast Australia." *In 18th World IMACS/MODSIM Congress*, Cairns, Australia. pp. 3442–3448.