



이설쌍기 둑높임 저수지의 연계 물수지 분석을 위한 DIROM 모형의 적용성 평가

Application of DIROM Model for Water Balance Analysis of Consecutively Linked Reservoir System

이정은^a · 최지은^b · 황세운^{c,†}

Lee, Jeongeun · Choi, Jieun · Hwang, Syewoon

ABSTRACT

Water balance analysis in heightened reservoirs, which have been raised to ensure a stable supply of irrigation water and secure water against floods and heavy rainfall, is essential for evaluating water supply capacity and reservoir maintenance. The consecutively linked reservoir system, which involves preserving the existing embankment while constructing a new one, affects the water balance between the existing and new reservoirs. This study aims to analyze the linked water balance between reservoirs in a consecutively linked reservoir system using the DIROM (Daily Irrigation Reservoir Operation Model) model. Surveys were conducted to investigate actual water use, and multiple water supply quantities were estimated based on these findings. Methods to supplement missing data and improve the limitations of simulated inflow were proposed and applied, and the performance of the daily storage simulation was evaluated. By supplementing the missing water use data, the NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) of the Sonhang reservoir storage rate simulation improved by approximately 30%. Additionally, result of using inflow coefficients significantly enhanced the simulation performance for the Sonhang2 and Sonhang reservoirs. This study confirms the necessity of incorporating appropriate inflow coefficients in reservoir design to overcome the model's tendency to overestimate inflow, highlighting the critical importance of quality control in observational data. The findings are expected to be useful for the design and analysis of future reservoir systems through embankment heightening.

Keywords: K-HAS; DIROM; water balance analysis; agricultural reservoir; heightened reservoir

1. 서론

기후변화는 전 지구적 극한 기후를 초래하여 식량 및 물 안보에 중대한 악영향을 미치며, 농업 · 임업 · 어업 · 에너지 및 관광 등 기후에 노출된 분야에 광범위한 경제적 피해를 발생시키고 있다 (IPCC, 2021). 특히, 농업분야는 타 산업에 비해 기후변화에 의한 영향을 크게 받는 산업으로 작물 재배 적지 변화, 작물 생산량 저하 등의 문제를 초래하며, 농업수자원 공급에 대하여 직접적인 피해를 받는 분야이다 (Kim et al., 2024).

농업활동의 전반적인 측면에서 농업용수는 주요 자원 중

하나이다. 이상기후로 인하여 가뭄과 홍수 같은 기상재해가 발생하면서 가용수자원 확보와 농업용수 공급의 안정성에 대한 문제가 중요시되고 있다. 이에 용수수요량 증대와 가용수자원 부족, 급격한 도시화 및 산업화로 인한 수질오염 등의 문제를 해결하고자, 정부에서는 2009년 4대강 살리기 마스터 플랜을 수립하였으며, 4대강과 섬진강 본류 및 주요 지류 국가하천을 대상으로 하천정비사업, 댐건설사업, 농업용 저수지 증고사업 등을 시행하였다 (MOLIT, 2009). 농업용 저수지 증고사업은 기존 110개 저수지를 대상으로 약 2.7억 m³의 추가 저수량 확보를 통해 용수공급능력 확대 및 집중호우와 태풍으로 인한 제방 붕괴 위험 방지 등을 목적으로 2009년 이래 지속적으로 수행되어왔다. 증고를 위한 시공방법은 제체의 중심점토를 이어쌓는 제체 덧쌓기, 저수지 하류에 제체를 쌓아 기존 저수지와 이어쌓는 후면 덧쌓기, 별도로 하류에 신규 제체를 설치하는 이설쌍기가 있다 (Sim, 2012).

이처럼 원활한 농업용수 공급을 위한 농업용 저수지 둑높이기 사업과 더불어, 기후변화로 인한 가뭄 빈도 및 강도 심화에 대응하기 위한 저수지 설계기준의 변경이 진행되고 있다 (Lee et al., 2023). 미래 환경변화에 대응하기 위한 방법으로, 설계 당시 또는 기존 기상여건을 바탕으로 산정된 저수지의 용수공급능력을 최근 기상상황 및 미래 이상기후를 반영하여

^a Graduate Student, Department of Agricultural Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Republic of Korea

^b Graduate Student, Department of Agricultural Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Republic of Korea

^c Professor, Department of Agricultural Engineering (Institute of Agriculture and Life Science), Gyeongsang National University, Jinju, Republic of Korea

[†] Corresponding author

Tel.: +82-55-772-1934, Fax: +82-55-772-1939

E-mail: swhwang@gnu.ac.kr

Received: July 15, 2024

Revised: August 29, 2024

Accepted: September 04, 2024

재검토할 필요성이 대두되고 있다. 이러한 농업용 저수지의 시설 및 환경적 변화에 대한 영향평가를 위해서는 다양한 시나리오에 대한 저수지의 기능 및 용수공급능력 추정이 이루어져야 하며, 이러한 저수지의 용수공급능력 평가는 저수지 배후유역에서의 물의 유입과 유출의 균형 상태를 의미하는 물수지 분석을 통해 수행된다. 이는 장래 예상되는 수요에 대한 대응 능력을 평가하고 그에 따른 대책 수립을 위하여 필수적이며 (Choi et al., 2022), 현재 농업용 저수지의 물수지 분석을 수행하기 위하여 다양한 형태의 시뮬레이션 모형과 최적화 모형이 활용되고 있다 (Labadie, 2004).

모형을 활용하여 농업용 저수지의 물수지 분석을 수행한 선행연구를 살펴보면, Song et al. (2016)은 컴포넌트 기반 물순환 모델링 프레임워크 COMFARM (COmponent-based Modeling Framework for Agricultural water-Resources Management)을 활용하여 농업용 저수지 유역을 대상으로 수문 모델링 시스템을 구축하고 적용성을 평가하였으며, Jeong et al. (2023)은 나주호를 대상으로 하한 저수율을 설정하고 CAT (Catchment Hydrologic Cycle Assessment Tool) 프로그램 내 4단 TANK 모형을 활용하여 운영기준에 따른 농업용수와 환경용수의 안정적인 공급 가능성을 평가하고 고찰한 바 있다. Ahn et al. (2009)은 네트워크 물수지 모형인 MODSIM (Modified SIMYLD)을 활용하여 금강권역 내 물수지 분석을 통해 농업용수 부족량 및 공급가능량을 산정하고 농업용 수리시설물 고려 유무에 따른 기여도를 평가하였으며, Kim et al. (2023)은 금강·영산강·섬진강 권역 내 이수관련 시설들의 용수공급능력을 평가하고 K-HAS (KRC Hydraulics & Hydrology Analysis System)를 활용한 물수지 분석을 통해 비상연계 용수공급량을 산정한 바 있다. Song et al. (2022)은 저수지 유입량과 방류량의 미계측 유역에 대해, 저수지 수위 관측 자료를 기반으로 전문가 지식과 수문 모형을 연계하여 저수지 물수지 부정정 문제를 풀이하는 연구를 수행한 바 있으며, Jung (2021)은 K-HAS를 활용하여 국내 농업용 저수지 13개소에 대한 저수율 최적화를 수행한 결과, DIROM (Daily Irrigation Reservoir Operation Model) 모형을 통해 추정된 일별 유입량이 전반적으로 과다하게 산정되는 경향을 지적하였다. 이때, Lee et al. (2020)의 RCFs (Ratio Correction Factors) 기법을 활용하여 모의 저수량 보정을 시도한 바 있으며, 모의 오차를 최소화하기 위하여 월별 비율보정계수를 유입량과 공급량에 각각 적용하여 모의 성능 개선 효과를 보였다 (Jung et al., 2021; Kim et al., 2023).

독높임 저수지를 대상으로 물수지 분석을 수행한 선행연구로는, Kim et al. (2012)이 금사저수지를 대상으로 과거 30개년 이상 물수지 분석결과를 이용하여 해당 저수지 운영기준곡선

을 작성하고 농업용수 및 하천유지용수 공급량을 모의한 바 있으며, Lee and Noh (2015)는 국가표준 기후변화 시나리오인 RCP 시나리오를 적용한 독높임 사업 전·후의 저수지 물수지 분석을 수행하여 이수안전도 기반 독높임 사업 이후 미래 농업용수 공급은 안정적인 것으로 분석한 바 있다. Park et al. (2013)은 HOMWRS (Hydrological Operation Model for Water Resources System) 모형을 활용한 물수지 분석을 통하여 하천유지용수 공급 가능량을 산정하였으며, 특성분석을 통해 분류한 4개 군집의 각 대표 저수지 4개소에 대하여 다중용수공급능력을 평가하고 이수운영기준곡선을 도출하였다. 또한 Shin et al. (2023)은 준분포모형 SWAT (Soil & Water Assessment Tool)을 활용하여 저수지 독높이기 전·후의 강우, 유출, 침투, 증발산, 토양수분 등 수문요소를 모의한 결과, 독높이기 사업이 하천 건천화 방지 및 지하수 함량 증대 등 유역 물순환 측면에 있어 긍정적인 영향을 가져올 것으로 분석한 바 있다.

현재까지 독높임 저수지에 대한 연구는 덧쌓기 방법으로 인한 독높임 저수지를 대상으로 하여 증고에 따라 변화한 사업 전·후 수문 특성 및 용수공급능력 비교 분석, 재해 안정성 검토 등에 관한 것이며, 이설쌍기 방법에 의하여 신규로 제당이 생긴 경우 기설 저수지와 신설 저수지의 연계 시스템에 관한 연구는 부족한 실정이다. 또한 향후 용수 수요량 증대 및 치수 목적 용수 확보 등 저수지 독높이기 사업의 수립 전망에 따라 이설쌍기 독높임 저수지의 연계 시스템에 관한 물수지 분석은 증설될 저수지의 용수공급능력 평가와 유지관리 측면에서 필수적이다.

본 연구에서는 이설쌍기 독높임 저수지인 경남 산청군 소재 손항·손항2 저수지를 대상으로, 농업용 저수지 설계를 위해 개발·운영중인 K-HAS 내 탑재되어 있는 DIROM 모형을 활용하여 저수지 연계 시스템 저수율 모의에 대한 적용성을 평가하였다. 현장 답사와 저수지 관리원 면담을 통해 대상 저수지 시스템의 실제 물관리 현황을 조사하고 이를 반영하여 모형의 모의 성능을 평가하였으며, 이를 개선하기 위한 수집 자료 및 모형 산출물 보완 등의 방법론에 대한 모의 정확도 개선 효과와 한계점을 제시하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

본 연구에서는 선정 기준에 맞는 이설쌍기 독높임 농업용 저수지를 대상으로, 물관리 현황 상세 조사 내용을 바탕으로 추정된 용수 공급 방식별 용수공급량을 통해 DIROM 모형의 입력자료를 구축하였다. DIROM 모형을 활용한 연계 물수지 분석을 통해 저수지 저수율 모의를 수행하였으며, R^2 , RMSE

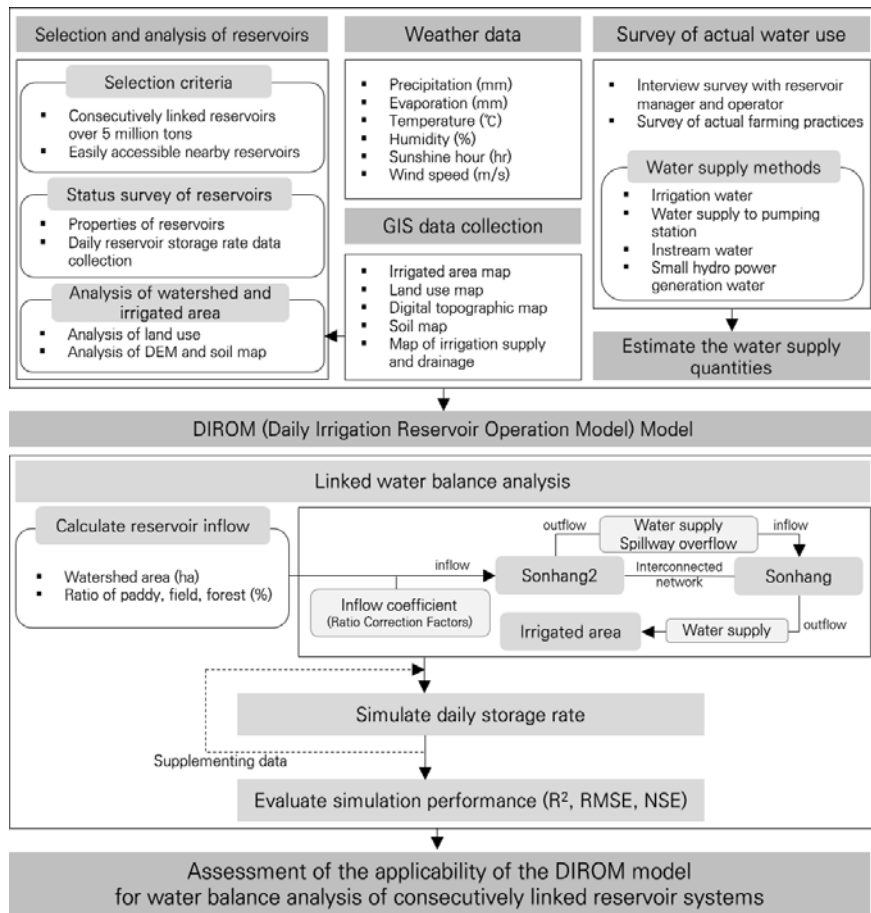


Fig. 1 Structural framework of the study

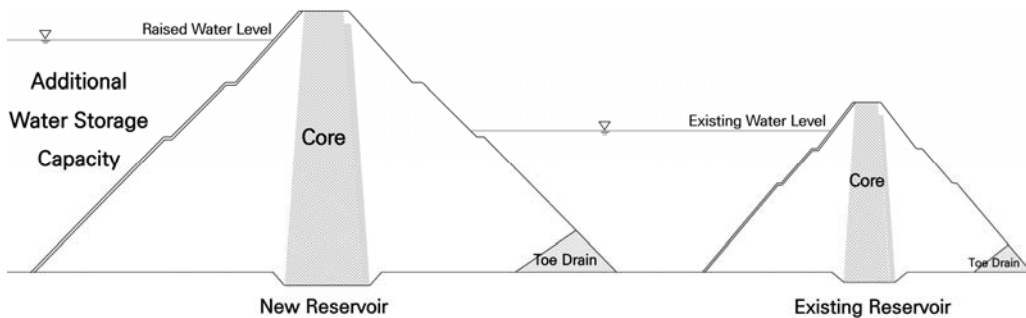


Fig. 2 A cross sections of the consecutively linked reservoir

(Root Mean Square Error), NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) (Nash and Sutcliffe, 1970)를 바탕으로 모형의 적용성을 평가하고 한계점을 고찰하였다. Fig. 1은 본 연구의 절차와 입력 자료를 정리한 흐름도이다.

1. 대상 유역 및 저수지

저수지 독높이기 방법은 대상 저수지의 유역특성 및 제반

여건 등을 고려하여 결정되며, 독높임 이전 기존 제체를 이어 쌓는 덧쌓기 방식과는 달리 이설쌓기 독높임 저수지는 하류 또는 상류에 별도의 저수지를 설치하는 방식으로 시공된다 (Fig. 2). 본 연구에서는 이설쌓기 독높임 저수지 중 기설 저수지 및 신설 저수지에 대한 일단위 실시간 계측 저수율 자료를 한국농어촌공사의 농촌용수종합정보시스템 (Rural Agricultural Water Resource Information System, RAWRIS)을 통해 정보

획득이 가능한 곳을 대상 저수지로 선정하였다. 이설쌓기에 의한 독높임 농업용 저수지는 총 18개소 (낙동강 12개소, 금강 5개소, 영산강 1개소)로, 기존 저수지를 보존하고 시설 저수지와 신설 저수지가 각각 운영되는 저수지는 경남 손항·손항2 및 울현·철수, 충남 방동·봉곡 총 3개소이다. 또한물관리 현황조사를 위해 대상지로의 이동이 용이하고, 2023년 한국농어촌공사에서 수행한 농업용 저수지 내한능력 조사 용역 당시 대상 저수지 선정 기준인 500 만³ 이상 농업용 저수지에 해당하여 내용적 실측 대상 저수지로 선정된 바 있는 경남 산청군 신등면 장천리 소재의 손항·손항2 저수지를 대상 저수지로 선정하였다.

가. 대상 저수지 현황

손항2 저수지는 2011년 손항 저수지의 독높이기 사업으로 2016년 완공되었으며, 유효저수량이 약 600 만³으로 농업용 저수지 독높이기 사업에 의한 추가 저류량이 가장 많은 저수지이다. 손항2 저수지는 손항 저수지의 상류에 위치하여 손항 저수지와 직렬로 연결되어 있으며 취수탑을 통한 취수량 및 여수토 월류량이 손항 저수지로 직접 유입되어 손항 저수지의 저수량을 보충하는 구조로 시공되었다. 또한 수혜구역 내 보조수원공인 양수장으로서의 공급, 소수력발전 및 비관개기

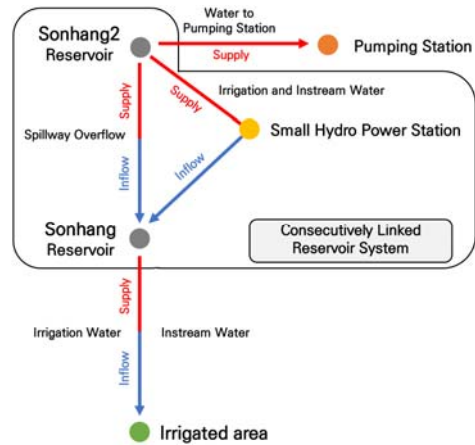


Fig. 3 Schematic diagram of inflow and outflow components in a reservoir system for study

하천유지수 등에 활용되는 등 다중의 용수 공급 방식이 적용되고 있는 사례이다 (Fig. 3). 본 연구의 분석 기간은 2018, 2019년 손항2 저수지의 소수력 발전소 공사 및 손항 저수지의 취수탑 수문 공사로 인해 인위적인 방류가 실시된 시기 이후, 손항2 저수지의 소수력 발전기 가동이 시작된 2019년 4월부터 2022년 12월까지이다. 대상 저수지 제원 및 관측 저수율은 Table 1 및 Fig. 4와 같다.

Table 1 Properties of the reservoirs for study

Reservoir	Location	Irrigated area (ha)	Watershed area (ha)	Total water storage volume (10 ³ m ³)	Effective water storage volume (10 ³ m ³)
Sonhang	Sancheong	133.7	1,600	576.5	531.5
Sonhang2	Sancheong	-	1,494	6,034	6,010

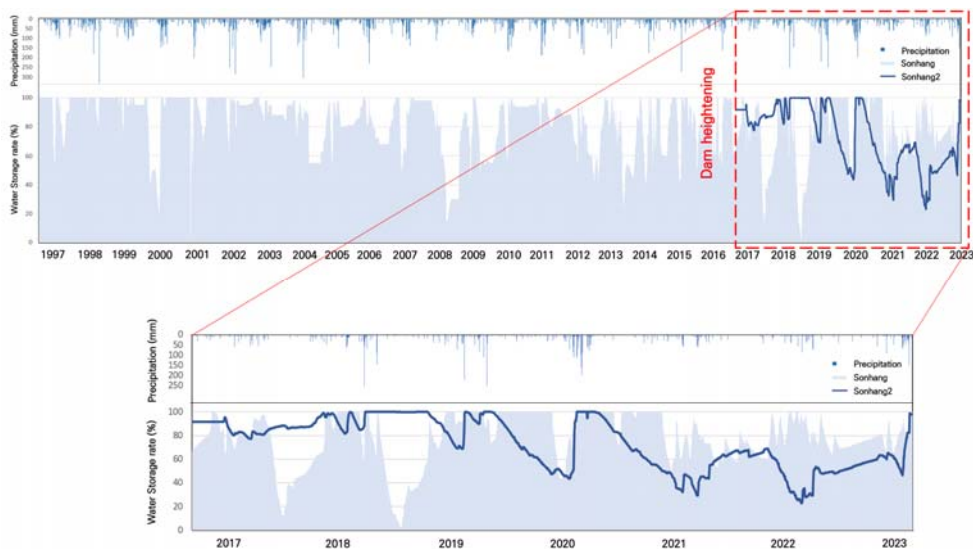


Fig. 4 Observed reservoir storage rates and precipitation data for study

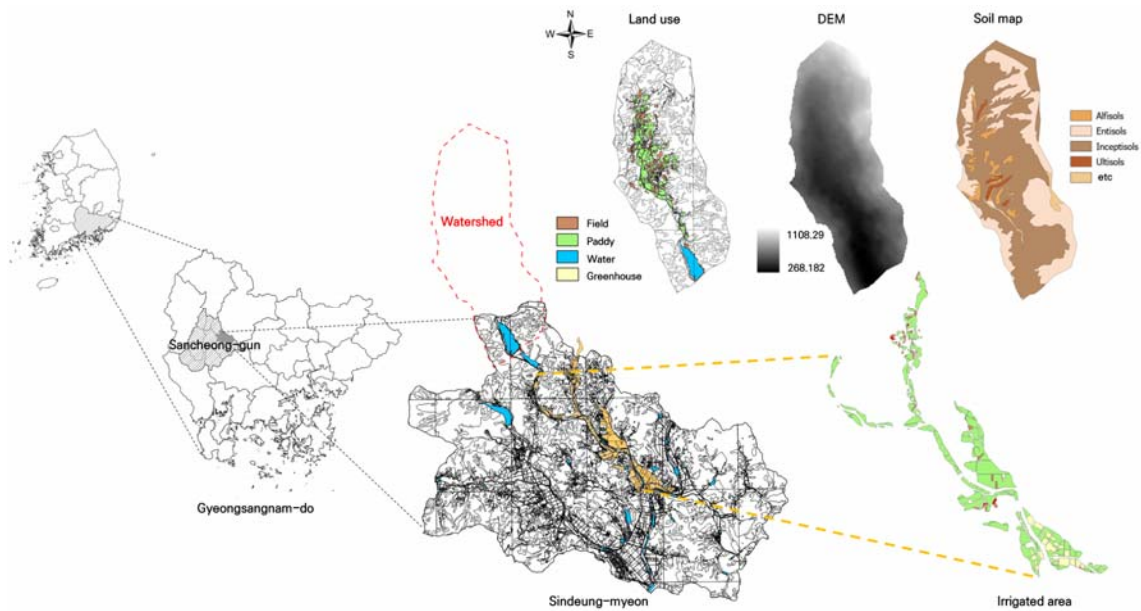


Fig. 5 The analysis of land use in the watershed and irrigated area, and DEM and soil map of the watershed

나. 대상 유역 기초분석

대상 저수지의 수혜구역 및 배후유역에 대한 기초분석을 수행하였으며, Fig. 5는 관련 자료와 기초분석 결과를 보여주고 있다. 손항2 저수지는 유역면적 1,494 ha 중 논 6.33%, 밭 2.00%, 산림 78.87%을 차지하며, 유역 내 평균고도 688 m로 나타났다. 유역 내 토양도 분석 결과, 모암·모재의 경우 변성암 (51.8%)과 산성암 (45.0%)이 주를 이루며 표토토성의 경우 사양토 (49.9%)와 양토 (48.6%), 심토토성의 경우 사양질 (49.8%)과 식양질 (48.1%)로 구성되어있다. 또한 유효토심 (cm)은 <20 (15.2%), 20-50 (18.4%), 50-100 (57.7%), >100 (7.3%)의 범위를 가지며, 배수등급은 매우양호 (49.4%), 양호 (39.0%)로 나타났다. 수혜구역 분석 결과, 2022년 기준 저수지 수혜면적 133.7 ha 중 논 83.5%, 밭 6.3%, 시설재배 15.2%를 차지하는 것으로 나타났으며, 밭작물은 양파, 마늘, 고추 중 양파가 주를 이루고, 시설재배작물은 대부분 딸기인 것으로 조사되었다.

2. DIROM 모형의 물수지 분석

본 연구에서는 이설쌍기 둑높임 저수지 시스템에 대한 연계 물수지 분석을 위하여 한국농어촌공사의 K-HAS 시스템 내 DIROM 모형을 활용하여 저수지 저수율 모의를 실시하였다. 한국농어촌공사의 K-HAS는 이수·치수·수리 분석이 모두 가능한 통합 수리·수문 설계시스템으로, 이수 분석의 경우 DIROM 모형을 활용하여 농업용 저수지의 유입량과 수혜

구역의 작물 필요수량을 산정한 후 물수지 분석을 실시한다. DIROM 모형은 농업용 저수지의 일별 유입량 모의를 위하여 Sugawara (1978)의 4단 TANK 모형을 국내 농업용 저수지 유역 특성에 맞게 3단의 형태로 단순화한 것으로, 농업용 저수지의 일별 유입량과 공급량을 추정하여 일별 저수율을 산정함으로써 저수지 저수율 모의가 가능한 모형이며 농업용수 공급계획 수립에 활용된다.

DIROM 모형은 유역유출량 즉, 저수지 유입량 산정시 유역 특성인자 (논·밭·산림 비율, 유역면적)를 고려하여 미계측 유입량에 대한 모형의 매개변수 값을 추정할 수 있도록 설계되었다 (Kim and Park, 1988a). DIROM 모형에서 산정한 저수지 유입량 및 필요수량을 바탕으로 물수지 분석 시 사용되는 연속방정식은 식 (1)과 같다 (Kim and Park, 1988b).

$$S_t = S_{t-1} + I_t + U_t + P_t - (R_t + O_t + E_t + G_t + D_t) \quad (1)$$

여기서, S_{t-1} 은 $t-1$ 일의 저수량, I_t 는 유입량, U_t 는 지하수 유입량, P_t 는 수면강수량이며, R_t 는 방류량, O_t 는 여수토 월류량, E_t 는 수면증발량, G_t 는 지중침투량, D_t 는 제방침투량 등이다. 그러나 이 중 지하수 유입량, 지중침투량, 제방침투량은 물수지에 미치는 영향이 매우 적으므로 고려하지 않는다.

본 연구에서는 환경부의 토지피복도 자료를 활용하여 GIS 분석을 통해 유역 내 논·밭·산림 비율, 저수지 수혜면적 등을 산정하였다. 또한 모형에서 이설쌍기 둑높임 저수지 시스템의 연계 물수지 분석을 위하여 상류에 위치한 손항2 저수지

의 보조수원공 공급량은 구역외 유출량으로 설정하고, 농업 용수 및 하천유지용수량은 손항 저수지의 간접 유입량으로 설정해줌으로써 손항2 저수지의 보조수원공 공급량을 제외한 용수공급량 및 여수토 월류량이 손항 저수지로 유입되도록 연계 네트워크를 구축하였으며, 이때 각 저수지에서의 용수공급량은 현장조사 내용을 바탕으로 추정하였다.

국내외 수문·수질 모형의 성능 평가를 위하여 이용 목적에 따라 다양한 통계적 지표가 이용되어왔다 (Song and Kang, 2016). 본 연구에서는 DIROM 모형의 성능 평가를 위하여 주로 이용되는 R², RMSE, NSE를 채택하였으며, 표고별 저수지 내용적에 따른 수위 변동률의 차이를 고려하여, 고수위뿐만 아니라 저수위 및 평수위에 대한 모의 성능을 구분하여 평가하기 위해 저수율 50% 미만, 50% 이상~70% 미만, 70% 이상~95% 미만, 95% 이상 각 구간에 대해 모의 성능 지표를 산정하여 제시하였다.

3. 물관리 현황조사

DIROM 모형은 이론적으로 계산된 유입량 및 필요수량을 바탕으로 저수지 저수율 모의를 실시하므로 농민의 요구와 기상여건에 따른 공급 중단 여부 등을 고려한 저수지 관리자의 관행적인 운영조건에 따른 실제 물이용 상황과는 다르게 분석될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 DIROM 모형의 저수지 저수율 모의 최적화를 위하여 대상 저수지 한국농어촌공사 담당 지사 관계자 및 저수지 관리자로부터 면담을 통해 저수지의 실제 용수 공급 방식 및 수혜구역 내 영농현황 조사를 수행하였다. 면담을 통해 대상 저수지 용수는 수혜구역 내 양수장으로의 도수, 소수력 발전용수 및 하천유지용수, 농업용수에 활용되는 것으로 조사되었다. 물관리 현황 상세조사 내용과 자료를 바탕으로 관계식과 수리식을 적용하였으며 이

를 통해 용수 공급 방식별 저수지 용수공급량을 추정하였다. 하천유지용수의 경우, 관개기 농업용수 공급 후 손항2 저수지의 저수율이 60% 이상으로 회복되면 조사 내용을 바탕으로 산정한 용수량만큼 공급하고, 저수율이 회복되지 않는 경우 영농기 농업용수 확보를 위해 산정된 하천유지용수량의 1/3에 해당하는 양을 공급하는 것으로 설정하였다.

III. 결과 및 고찰

본 연구에서는 이설쌍기 독높임 저수지 연계 시스템을 대상으로, 물관리 현황조사를 기반으로 산정된 용수 공급 방식별 용수공급량을 모형에 적용함으로써 해당 모형의 적용성을 보다 면밀히 평가하고자 하였다. 용수공급량 추정에 있어 자료 누락으로 판단되는 시기의 자료 보완을 수행하고, 저수지 유입량 과다 산정 경향에 대해 합리적인 규칙을 적용한 유입량 조정 결과를 도출하여 모형의 성능 개선 정도를 평가하였다.

1. 실제 물관리 현황의 모델링 적용

가. 물관리 현황 적용 방법론

다중의 용수 공급 방식이 적용되고 있는 손항2 저수지와 손항 저수지의 용수 공급 방식별 용수공급량 추정을 위하여 물관리 현황조사 내용 및 자료를 바탕으로 구축한 수리식과 관계식은 다음과 같다 (Table 2).

Table 2의 관계식에서, Q₂는 손항2 저수지의 농업용수량 및 하천유지용수량 (m³/sec), P_d는 일 발전량 (kWh), Q_{pump}는 손항2 저수지에서의 보조수원공 공급용수량 (m³/sec), Q는 손항 저수지의 농업용수량 (m³/sec), Q_{river}는 손항 저수지의 하천유지용수량 (m³/sec)이다.

Table 2 The water supply methods and estimated water supply quantities from the survey

Reservoir	Water supply methods	Period	Methods for estimating water supply quantities	Equation	Result (10 ³ m ³ /day)
Sonhang2	Irrigation and instream water	4/27 ~ 9/21	Standard capacity-maximum generation relationship* for small hydro power generator	$Q_2(m^3/sec) = 0.4 \times \frac{P_d}{3770.94}$	-
	Water to pumping station	4/15 ~ 10/20	Hazen-Williams eq.°	$Q_{pump}(m^3/sec) = A \times 0.849 \times C_{HW} \times R_h^{0.63} \times S^{0.54}$	9.11
Sonhang	Irrigation water	4/27 ~ 9/21	Water intake capacity of intake tower of Sonhang	$Q(m^3/sec) = 0.18$	15.55
	Instream water	10/10 ~ 4/10	2/3 of irrigation water	$Q_{river} = Q \times \frac{2}{3}$	10.37

* standard capacity 0.4 m³/sec, maximum generation 3770.94 kWh

° d=0.3 m, C_{HW} = 120 (galvanized steel pipe)

물관리 현황조사 결과, 손항2 저수지로부터 하단의 손항 저수지로 공급되는 농업용수 및 하천유지용수는 소수력 발전에 이용된다. 본 연구에서는 한국농어촌공사에서 취득한 소수력 발전소 가동일보를 바탕으로, 소수력 발전기 가동률에 따라 수문 개도를 조절하는 현장상황을 반영하여 발전량과 용수공급량은 선형비례한다고 가정하였다. 해당 발전기의 정격수량과 가동일보 기간 내 가장 높게 관측된 최대발전량과의 관계식을 구축하였으며, 이를 통해 손항2 저수지에서의 용수공급량을 추정하였다. 이때 발전기의 정격수량은 34.56 천 m^3/day , 최대발전량 및 최소발전량은 각각 3,770.94 kWh, 24.04 kWh로 관측되었다. 또한 손항2 저수지에서 전용 수문과 연결된 별도의 관을 통해 손항 저수지를 거치지 않고 수해구역 내 이교마을 양수장으로 일정 기간동안 도수되는 보조 수원공 공급량은 조사된 수로관의 종류와 관경, 고도차를 고려한 Hazen-Williams 방정식을 활용하여 공급 기간 내 약 9.11 천 m^3/day 로 산정되었다. 반면 손항 저수지에서 공급되는 하천유지용수량은 농업용수량의 약 2/3에 해당하는 것으로 조사되었다. 이때 손항 저수지의 농업용수량은 저수지 취수탑 제한 중 일 취수능력을 활용하여 일 15.55 천 m^3 으로 분석되었

으며, 이에 따라 하천유지용수량은 10.37 천 m^3/day 로 분석되었다.

나. 물관리 현황 정보를 적용한 모델링 결과

소수력 발전량 자료의 경우 현장의 통신불량, 기기오작동 등의 문제로 발전소 가동일보 자료 내 오·결측이 존재할 수 있다. 이로 인해 자료 기반 손항2 저수지의 용수공급량이 과소추정되어 2021년 4월 이후 모의 저수율이 관측 저수율에 비해 과대모의되는 경향을 보였다 (Fig. 6). 손항 저수지 역시 같은 시기에 용수공급량 대비 상당의 손항2 저수지로부터의 용수 보충 부족으로 인해 사수위까지 도달하며, 이후 손항2 저수지가 만수위까지 도달하여 발생한 여수토 월류량에 의하여 빠르게 저수율이 차오르는 것을 확인할 수 있다. 따라서 손항2 저수지의 용수가 하류의 손항 저수지로 공급될 필요가 있어 저수지 시스템의 관측 및 모의 저수율간 오차가 분명한 2021년, 2022년 발전량이 없는 것으로 기록된 시기의 자료가 결측일 가능성이 크며 발전소 가동일보 자료 내 보완이 필요한 시기가 판단되었다.

대상 저수지 시스템에 대한 모형의 저수율 모의 성능을 저

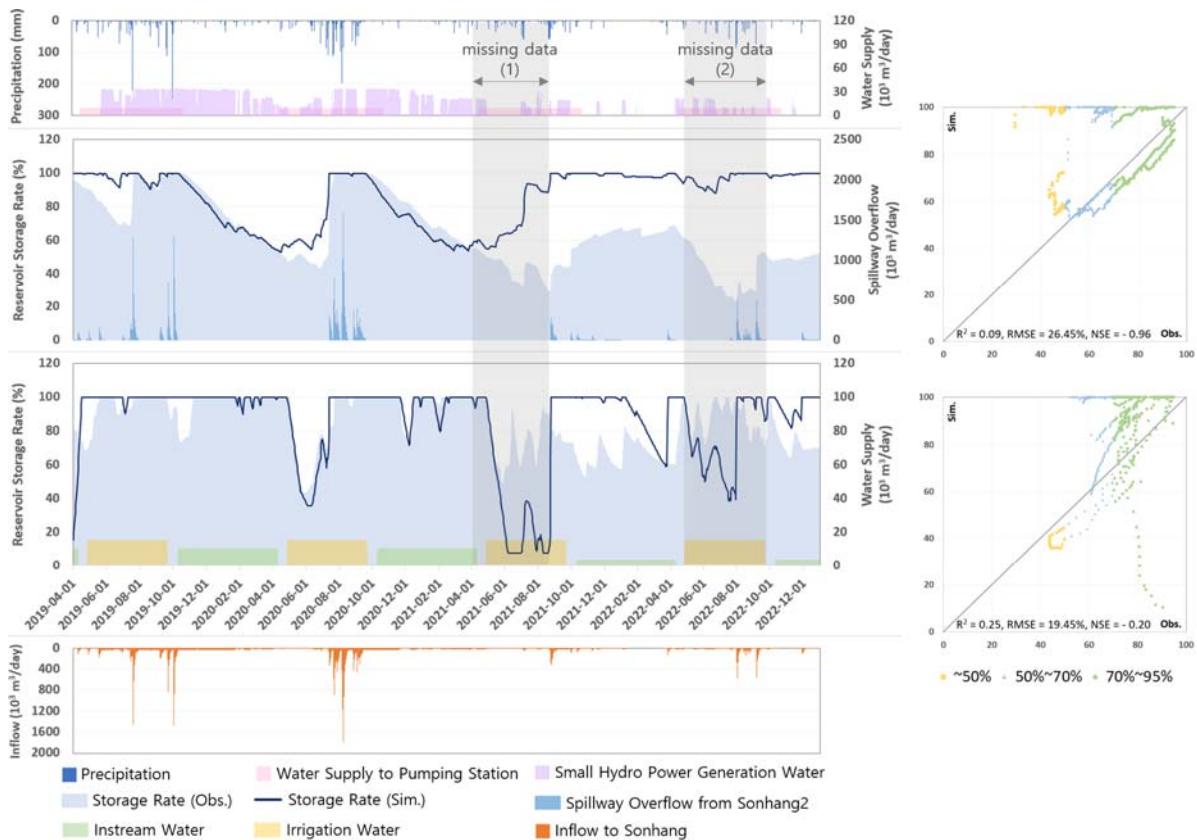


Fig. 6 Water level simulation results by reflecting actual water use status

수율 구간별로 평가하여 Table 3에 나타내었다. 모의 평가 결과, 저수율 50% 미만에서 손항2 저수지와 손항 저수지의 R²가 각각 0.00 및 0.01로 나타나 저수위에서의 유의성이 떨어지는 것에 반해 저수율 95~100%에서의 R²가 0.42 및 0.17로 분석되어 고수위에서의 유의성이 상대적으로 높게 평가되었다 (Table 3). 이는 자료 결측이 발생하여 관측 및 모의 저수율 간 오차가 큰 2021년 4월 이후 손항2 저수지의 저수율이 70% 미만이며, 결측 시기 이전 손항 저수지의 저수율이 고수위에 가깝기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 자료 결측이 모형의 모의 성능에 영향을 미친 것을 확인할 수 있다.

2. 물이용 자료 보안을 통한 모델 성능 개선

앞서 물관리 현황조사 당시 취득한 손항2 저수지의 소수력 발전소 가동일보 자료 내 결측이 존재함에 따라 관측 및 모의 저수율간 큰 오차가 발생하여 모형의 성능이 낮게 평가되었다. 따라서 2021년 (04.03~08.20)과 2022년 (04.27~09.23) 자료 결측이라 판단되는 시기에 적정 발전용수량 대입을 통해 자료를 보완하여 모형의 성능을 개선할 필요가 있다. 이에 발전량이 관측되지 않은 시기를 제외하고 일평균 발전용수량인 24.18 천m³을 기준으로 2.4 천m³ 단위로 조정하여 결측 구간 내 발전량이 관측되지 않은 시기에 일괄적으로 적용하였다. 결과 분석을 통해 해당 시기 손항2 저수지와 손항 저수지의

Table 3 Comparative analysis of errors by water level in the DIROM simulation performance by reflecting actual water use status

Reservoir storage rate	R ²		RMSE (%)		NSE	
	Sonhang2 (18~22)	Sonhang (18~22)	Sonhang2 (18~22)	Sonhang (18~22)	Sonhang2 (18~22)	Sonhang (18~22)
~50%	0.00	0.01	43.7	8.2	-163.06	-14.03
50~70%	0.05	0.00	28.0	30.2	-22.13	-43.10
70~95%	0.20	0.02	11.2	20.3	-1.14	-6.52
95~100%	0.42	0.17	3.4	3.5	-2.08	-9.38
Total	0.09	0.25	26.5	19.5	-0.96	-0.20

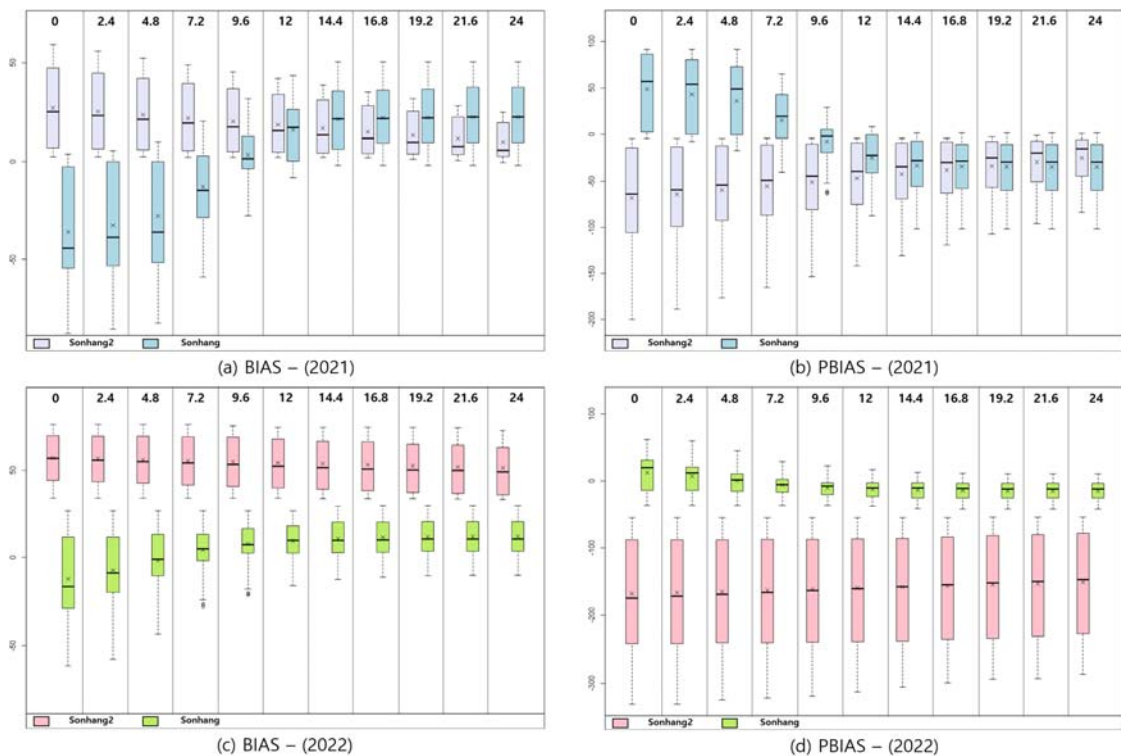


Fig. 7 Comparative analysis of BIAS and PBIAS of the simulation results based on power generation capacity assumptions for 2021 and 2022

BIAS와 PBIAS가 최소가 되는 적정 보완 발전용수량을 도출하였다 (Fig. 7).

오차 분석 결과, 2021년 손항2 저수지와 손항 저수지의 BIAS가 각각 18.45%, 15.85%, PBIAS가 -46.55%, -25.09%로 분석되었으며, 2022년 BIAS가 54.39%, 9.39%, PBIAS가 -159.99%, -12.13%로 나타나 대상 기간 일별 적정 발전용수량은 12 천³으로 추정되었다. 또한 손항2 저수지의 소수력 발전기 가동이 시작된 시기인 2019년 4월부터 5월까지 자료가 누락된 시기에 해당년도 발전용수 공급 경향을 고려하여 34.56 천³/day 을 적용함으로써 자료 결측을 보완하였다.

물이용 자료 보완 결과, 손항2 저수지에서 발전용수량이

추가로 공급됨에 따라 손항 저수지의 저수율이 회복되어 상대적으로 저수율 모의 성능이 개선됨을 확인하였다 (Fig. 8). 그림에도 불구하고 손항2 저수지의 저수율이 급격하게 차오르는 경향을 보이며 이는 저수지로의 과다유입 때문인 것으로 판단된다. 모의 결과의 개연성에 의하여, 2021년 이후 만수위에 도달한 손항2 저수지에서 발생한 여수로 월류량이 손항 저수지로 유입되어 손항 저수지의 모의 성능에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 모형의 저수지 유입량을 조절할 필요가 있음을 확인하였다.

모의 평가 결과, 물이용 자료 보완 전·후 저수율 구간별 R², RMSE, NSE 값에 큰 차이는 없으나 저수율 70~95% 구간

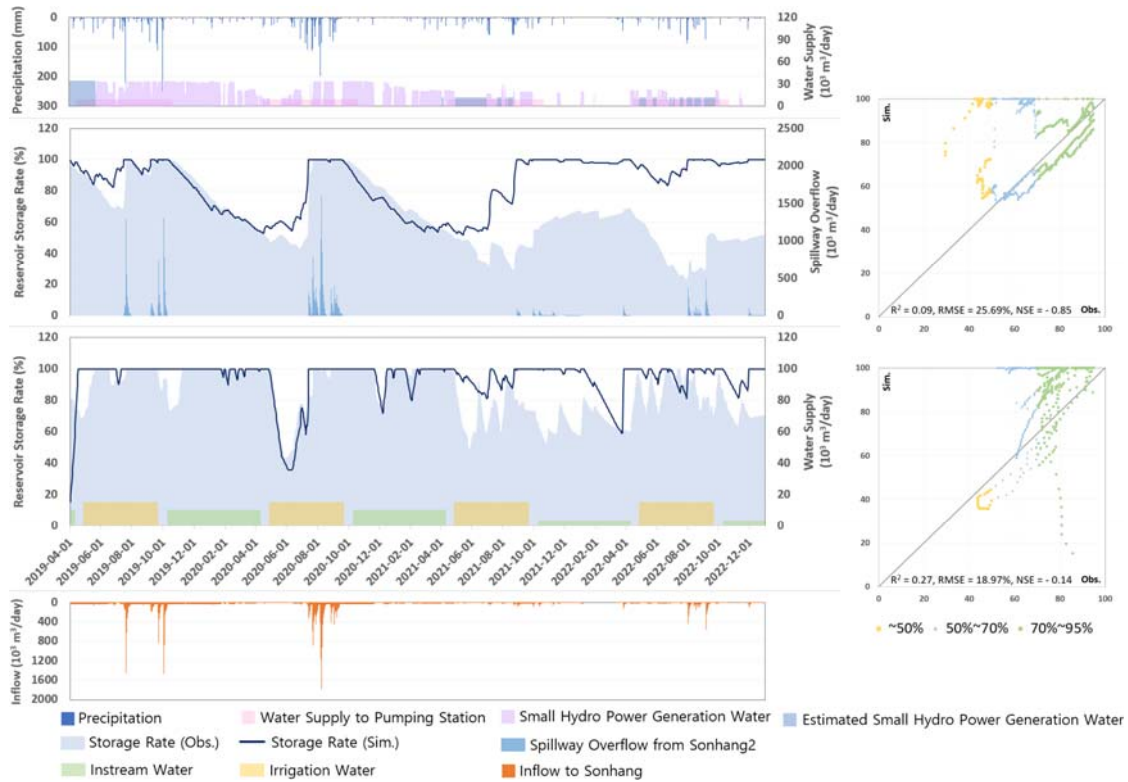


Fig. 8 Water level simulation results by supplementing missing water use data

Table 4 Comparative analysis of errors by water level in the DIROM simulation performance by supplementing missing water use data

Reservoir storage rate	R ²		RMSE (%)		NSE	
	Sonhang2 (18~22)	Sonhang (18~22)	Sonhang2 (18~22)	Sonhang (18~22)	Sonhang2 (18~22)	Sonhang (18~22)
~50%	0.01	0.01	42.4	8.2	-153.94	-14.03
50~70%	0.04	0.00	27.7	30.2	-21.73	-43.10
70~95%	0.36	0.04	8.3	19.1	-0.16	-5.68
95~100%	0.49	0.17	3.3	3.5	-1.90	-9.38
Total	0.09	0.27	25.7	19.0	-0.85	-0.14

에서의 상관성이 향상되는 결과를 확인하였다 (Table 4). 2019년 4월~5월 손항2 저수지의 용수공급량이 발생함에 따라 고수위에서의 모의값과 관측값의 오차가 줄어든 것으로 보이며, 2021·2022년 물이용 자료가 보완되었음에도 불구하고 과다 유입으로 인해 손항2 저수지가 여전히 빠르게 만수위에 도달하므로 저수율 70% 이하에서의 성능 평가 결과에는 큰 변화가 없는 것으로 판단된다. 물이용 자료 보완을 통해 손항 저수지의 R^2 가 0.25에서 0.27로, RMSE가 19.5%에서 19.0%로, NSE가 -0.20에서 -0.14로 개선되었다.

3. 저수지 유입량 보정을 위한 유입계수 도출 및 적용

본 연구에서는 모형의 유입량 과다 산정 결과에 따라 Lee et al. (2020)의 비율보정계수 기법 중 유입계수를 적용하여 대상 저수지 유입량을 조정하였다. 단, 물관리 현황조사를 통해 현장의 실제 공급량을 합리적으로 산정하였으므로 임의의 공급량 조정을 최소화하고자 공급계수는 고려하지 않았으며, DIROM 모형의 강우특성에 따른 유입량 모의 성능의 차이는 전체적인 유입량 오차에 비해 작다고 판단하고 전체 분석기간에 대한 평균적 유입계수를 도출하여 적용하였다.

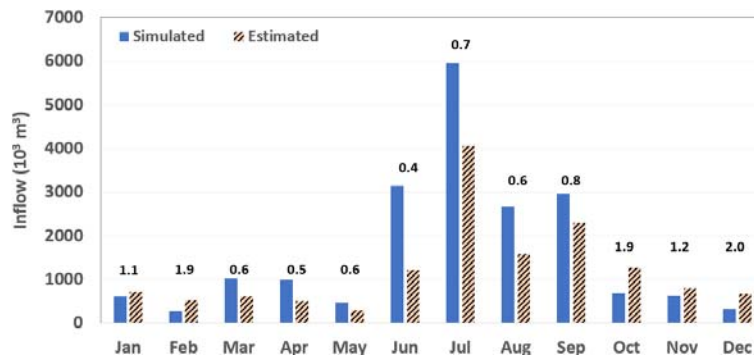


Fig. 9 Monthly comparison of simulated inflow compared to arbitrarily estimated inflow considering water level fluctuations

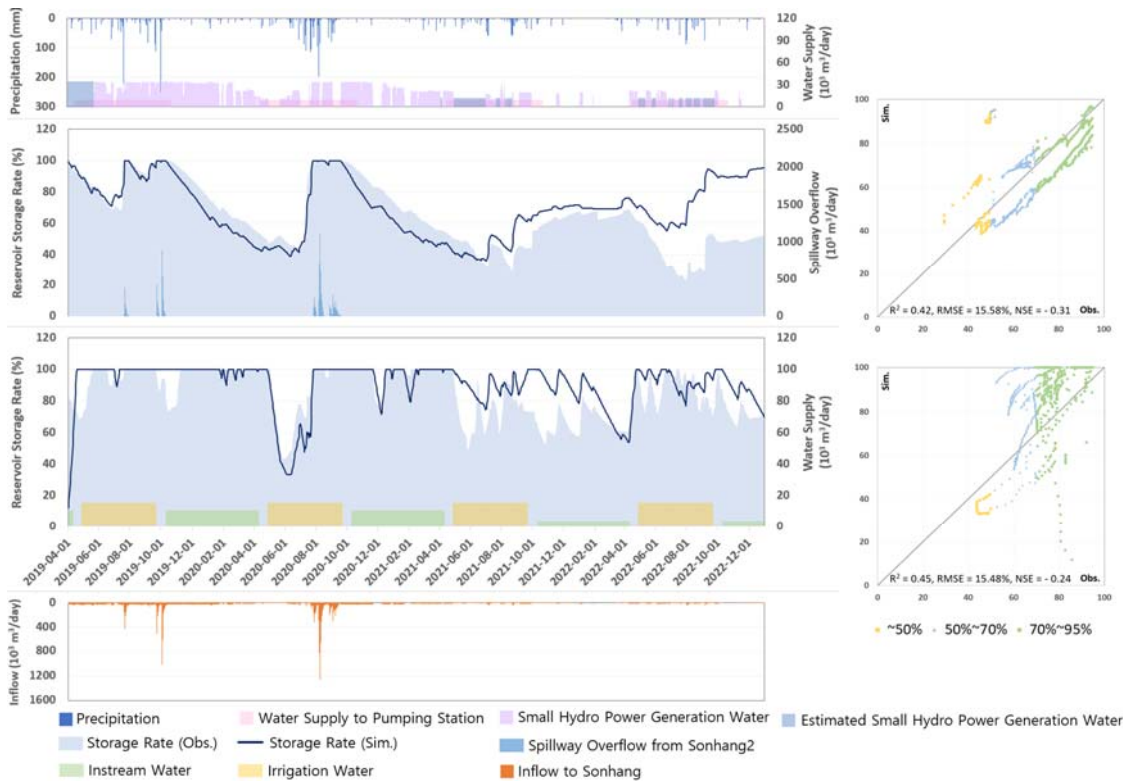


Fig. 10 Water level simulation results by adjusting inflow by applying inflow coefficient

Table 5 Comparative analysis of errors by water level in the DIROM simulation performance by adjusting inflow by applying inflow coefficient

Reservoir storage rate	R ²		RMSE (%)		NSE	
	Sonhang2 (18~22)	Sonhang (18~22)	Sonhang2 (18~22)	Sonhang (18~22)	Sonhang2 (18~22)	Sonhang (18~22)
~50%	0.18	0.00	28.3	10.6	-67.97	-24.20
50~70%	0.01	0.02	14.0	21.5	-4.83	-21.41
70~95%	0.62	0.07	9.2	17.8	-0.44	-4.81
95~100%	0.50	0.14	4.8	3.8	-5.66	-11.89
Total	0.42	0.45	15.6	15.5	0.31	0.24

강우가 발생한 시기, 소수력 발전량이 기록되지 않았거나 만수위인 시기를 제외하고, 물관리 현황조사 내용을 바탕으로 추정된 용수공급량과 관측된 일별 저수량 변화를 통해 일별 유입량을 추정하였다. DIROM 모형에서 산정한 유입량에 대한 추정된 유입량의 비율은 월별 0.4에서 2.0의 범위로 나타났으며 (Fig. 9), 기간 내 총 유입량에 대한 평균적 비율을 적용하여 적정 유입계수 0.7을 도출하고 모형에 적용한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

모형이 산정한 유입량에 유입계수를 적용하여 과다산정된 유입량을 조정함으로써 2021년 이후 저수지 시스템의 저수율 회복 속도가 관측과 유사해진 것을 확인할 수 있다. 유입계수 적용 전·후 손항2 저수지의 R²가 0.09에서 0.42로 약 367%, RMSE가 25.7%에서 15.6%로 약 39%, NSE가 -0.85에서 0.31로 136% 개선되고, 손항 저수지의 경우 R²가 0.27에서 0.45로 약 67%, RMSE가 19.0에서 15.5로 약 18%, NSE가 -0.14에서 0.24로 약 271% 상관성이 향상되는 개선 효과를 확인하였다 (Table 5). 저수율 구간별 평가 결과에서 고수위에서의 모의 성능이 상대적으로 높게 평가되었으며, 평수위 및 저수위에서의 R², RMSE, NSE 값이 높은 상관성을 보이지는 않았으나, 유입계수를 적용함에 따라 상관성이 향상되는 결과가 나타났다.

IV. 요약 및 결론

이수·치수 개선을 위한 추가 조수공간 및 용수 확보를 목적으로 증설되는 독높임 저수지에서의 물수지 분석은 저수지의 용수공급능력 평가 및 저수지 유지관리 측면에서 필수적이다. 본 연구에서는 경남 산청군 소재 이설쌍기 독높임 저수지를 대상으로, DIROM 모형을 활용하여 저수지 시스템 간 연계 물수지 분석을 수행하였다. 모형의 저수율 모의 성능의 합리적 평가를 위하여 현장 답사와 물관리자 면담을 통해 물 이용 현황을 조사하였으며, 이를 바탕으로 다중의 용수공급

량을 추정하였다. 실제 물관리 현황 적용을 위하여 상단 저수지의 용수공급량 즉, 하단 저수지로의 유입량을 시계열 단위로 고려하고, 결측자료의 보완 및 저수지 유입량의 모의 한계를 고려하여 개선하는 방법론을 제안·적용하고 모형의 저수율 모의 성능을 평가하였다.

물이용 자료의 결측기간 보완을 통해 손항 저수지의 저수율 모의 결과 중 NSE가 약 30% 향상되는 등 개선된 결과를 확인하였으며, 유입계수를 적용하여 유입량을 조정한 결과 손항2 저수지와 손항 저수지의 저수율 모의 성능을 크게 개선할 수 있었다. 그러나 자료 내 결측, 실측 자료의 오류 및 불확실성 등 용수공급량 추정 과정의 한계를 확인하였으며, 강수량 대비 저수지 유입량이 과다산정되는 경향을 보였다. 또한 저수율 모의 결과의 연속성으로 인해 분석기간이 경과함에 따라 누적되는 오차가 모의성능에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

K-HAS가 설계홍수량 및 유효저수량 등 저수지의 적정 용량 결정을 위한 설계시스템으로 고안된 모델이기 때문인 것으로 사료되며, 물관리를 위한 장기 저수율 모의를 위한 적용에는 한계가 있다. 본 연구결과는 최적 물관리를 위한 합리적인 저수율 모의를 위해서는 유입 및 방류와 관련된 모니터링 시스템 구축과 농업 물이용 자료의 질 관리가 요구되며, 저수지 설계시 적정 유입계수를 도입하여 저수지 유입량이 과다산정되는 모형의 한계를 극복할 필요가 있음을 시사한다. 금회 수행한 DIROM 모형의 저수지 시스템 연계 물수지 분석은 독높임 2단 연계 저수지 시스템의 설계 및 물관리 운영을 위한 저수율 모의에 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 저수지의 효율적인 운영·관리 및 재해 예방을 위하여 저수지 유입 및 공급량 산정 모형 개발을 위한 연구가 필요하며, 저수율 모의에 적용할 관행적 물관리 방식과 실제 물관리 현황에 대한 기록 및 자료의 관리가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 (사)한국농공학회의 재원으로 2024년 신진연구자 학술연구사업의 지원을 받아 연구되었음.

REFERENCES

- Ahn, S. R., G. A. Park, Y. H. Shin, and S. J. Kim, 2009. Assessment of the potential water supply rate of agricultural irrigation facilities using MODSIM - For Geum River basin -. *Journal of Korea Water Resources Association* 42(10): 825-843. doi: 10.3741/JKWRA.2009.42.10.825. (in Korean).
- Choi, S. J., S. K. Kang, and D. R. Lee, 2022. Case study of water balance analysis and improvement measures in South Korea. *Magazine of Korea Water Resources Association* 55(1): 15-24. (in Korean).
- Intergovernment Panel on Climate Change (IPCC), 2021. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the six assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jeong, J., M. Jeung, J. Beom, M. Park, J. Lee, S. H. Yoo, and K. S. Yoon, 2023. A study on the potential of agricultural water and environmental flow supply according to regulating lower control storage rate for the irrigation reservoir. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 65(2): 21-33. doi: 10.5389/KSAE.2023.65.2.021. (in Korean).
- Jung, H. M., 2021. Optimization and application of water storage rate by regionalization coefficients of agricultural reservoirs. Ph.D. Dissertation, Chonnam University.
- Jung, H. M., S. H. Lee, K. Kim, Y. C. Kwak, E. Choi, S. Yoon, R. Na, D. Joo, S. H. Yoo, and G. S. Yoon, 2021. Evaluation of agricultural reservoirs operation guideline using K-HAS and ratio correction factor during flood season. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 63(4): 97-105. doi: 10.5389/KSAE.2021.63.4.097. (in Korean).
- Kim, H. D., K. Y. Lee, J. Y. Park, G. H. Han, and H. C. Lim, 2012. Analysis of operation plan by multipurpose supply for heightened agricultural reservoir. *KCID Journal* 19(1): 77-86. (in Korean).
- Kim, H. Y., and S. W. Park, 1988a. Simulating daily inflow and release rates for irrigation reservoirs (I): modeling inflow rates by a linear reservoir model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 30(1): 50-62. (in Korean).
- Kim, H. Y., and S. W. Park, 1988b. Simulating daily inflow and release rates for irrigation reservoirs (III): model application to daily reservoir operations. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 30(3): 95-105. (in Korean).
- Kim, H. Y., S. H. Lee, R. Na, D. Joo, and S. H. Yoo, 2023. Analysis of the emergency water supply capacity in agricultural reservoirs using K-HAS and ratio correction factors. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 65(2): 59-71. doi: 10.5389/KSAE.2023.65.2.059. (in Korean).
- Kim, S., M. W. Jang, and S. Hwang, 2024. Assessment of the potential impact of climate change on the drought in agricultural reservoirs under SSP scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 66(2): 35-52. doi: 10.5389/KSAE.2024.66.2.035. (in Korean).
- Labadie, J. W., 2004. Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management* 130(2): 93-111. doi: 10.1061/ASCE.2004.130.2.93.
- Lee, B., B. Shin, J. Koo, Y. Kwak, S. Park, H. Lee, and C. Park, 2023. Revision of design standard for agricultural dam (KDS 67 10 00) in response to agricultural disasters and climate change. *Magazine of Korea Water Resources Association* 65(4): 2-8. (in Korean).
- Lee, J., and J. Noh, 2015. Evaluating water supply capacity of embankment raised reservoir on climate change. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(4): 73-84. doi: 10.5389/KSAE.2015.57.4.073. (in Korean).
- Lee, S. H., S. T. Shin, J. Y. Choi, J. H. Park, and S. H. Yoo, 2020. Assessing the resilience of agricultural reservoirs in ungaged catchments under climate change using a ratio correction factors-based calibration and run theory. *Water* 12(6): 1618. doi: 10.3390/w12061618.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2009. Master plan of the four major rivers restoration project. Seoul, Korea: MOLIT. (in Korean).
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3):

282-290.

18. Park, J. Y., I. K. Jung, K. Y. Lee, and S. J. Kim, 2013. Development of operating rule curve for multipurpose water supply in heightened agricultural reservoir. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 33(4): 1389-1400. doi: 10.12652/Ksce.2013.33.4.1389. (in Korean).
19. Shin, H., J. Lee, H. Lim, S. Kim, J. Han, and J. Joo, 2023. Hydrological analysis before and after embankment-raising project of agricultural reservoir watershed: a case study of Suyang reservoir. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 23(6): 289-298. doi: 10.9798/KOSHAM.2023.23.6.289. (in Korean).
20. Sim, J. K., 2012. Agricultural reservoir dam raise status and future challenges. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(3): 2-10. (in Korean).
21. Song, J. H., and M. S. Kang, 2016. Performance measures and calibration methods for hydrologic and water quality models. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58(2): 11-22. (in Korean).
22. Song, J. H., J. Park, K. Kim, J. H. Ryu, S. M. Jun, J. T. Kim, T. Jang, I. Song, and M. S. Kang, 2016. Hydrologic modeling for agricultural reservoir watersheds using the COMFARM. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58(3): 71-80. doi: 10.5389/KSAE.2016.58.3.071. (in Korean).
23. Song, J. H., Y. Her, and M. S. Kang, 2022. Estimating reservoir inflow and outflow from water level observations using expert knowledge: dealing with an ill-posed water balance equation in reservoir management. *Water Resources Research* 58(4). doi: 10.1029/2020WR028183.
24. Sugawara, M., 1978. Generation of runoff data by Tank model.