

SCE-UA 기법을 활용한 감천 유역 물 이용 순환과정 에너지 소비량 및 하천유지유량 공급 가능성 평가

최시중^{1*} · 강성규² · 김원진³ · 노희성⁴ · 박기홍⁵

¹한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 수석연구원 ²한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 연구위원

³한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 박사후 연구원 ⁴한국건설기술연구원 연구전략기획본부 수석연구원

⁵한신대학교 AI·SW대학 교수

Evaluation of Energy Consumption in the Water Use Cycle and the Feasibility of Supplying Instream Flow in the Gamcheon Watershed Based on Optimization Method

Si-Jung Choi^{1*} · Seong-Kyu Kang² · Won-Jin Kim³ · Hui-Seong Noh⁴ · Ki-Hong Park⁵

¹Senior Researcher, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

²Research Fellow, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

³Post-doctoral Fellow, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

⁴Senior Researcher, Research Strategic Planning Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

⁵Professor, School of Computing and Artificial Intelligence, Hanshin University, Osan 18101, Korea

[요약]

본 연구는 감천 유역을 대상으로 현실적인 물 공급 네트워크를 반영한 물수지 분석을 수행하고 SCE-UA 기법을 통해 일물적인 회귀율을 적용한 기존 계획과는 달리 생활용수 및 공업용수는 45.0~72.1%, 농업용수에 대해서는 15.2~35.1%로 수요처마다 서로 다른 회귀율을 추정하였다. 또한, 물 이용 순환 과정별 에너지 소비량을 분석하였으며 취수과정과 농업용수 이용에서 감천시 연간 전력 소비량의 약 2.8%를 차지하는 가장 많은 에너지를 사용하는 것으로 분석되었다. 이외에도 수자원 공급시설물에 최적화 기법을 적용하여 방류량을 결정함으로써 고시된 하천유지유량의 공급 가능성을 평가하였다. 평가 결과, 수자원 공급시설물을 최적 운영하더라도 하천유지유량을 만족시키지 못하는 것으로 분석되어 하천유지유량에 대한 검토가 필요할 것으로 판단되었다. 본 연구 결과는 향후 수자원 계획 및 탄소중립 전략을 수립함에 있어 물 이용 순환과정과 에너지 소비 분석의 중요성을 강조하며 합리적인 하천수 관리를 위한 하천유지유량의 사전 검토에 대한 필요성을 제시하고자 하였다.

[Abstract]

In this study, a water budget analysis was performed in the Gamcheon watershed with a realistic water supply network, and return flow rates for each demand site using the SCE-UA method were estimated. Contrary to the conventional approach with uniform values, the estimation showed differentiated rates: 45.0~72.1% for domestic and industrial water use and 15.2~35.1% for agricultural water use. The analysis also considered energy consumption at each stage of the water use cycle, and the highest consumption was observed during the intake process and agricultural water use, with a value of 2.8% of Gimcheon City's annual electricity consumption. In addition, optimization techniques were applied to determine the releases from hydraulic structures and assess the feasibility of predefined instream flow. The results revealed that, even under optimal operation, the instream flow could not be satisfied, highlighting the need to reconsider instream flow. The overall findings underscore the importance of water use cycle and its energy consumption in planning water resource management and carbon-neutral strategies while providing the necessity of pre-evaluation for reasonable instream flow.

색인어 : 물수지 분석, 에너지 소비, 회귀율, 하천유지유량, SCE-UA 기법

Keyword : Water Balance Analysis, Energy Consumption, Return Flow Rate, Instream Flow, SCE-UA Method

<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2024.25.11.3365>

Received 30 October 2024; Revised 20 November 2024

Accepted 25 November 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

*Corresponding Author; Si-Jung Choi

Tel: +82-31-910-0664

E-mail: sjchoi@kict.re.kr

1. 서론

최근 하천환경의 변화와 기상이변에 따른 가뭄 등 물 관련 재해 위험의 증가로 물관리 여건은 갈수록 악화될 전망이다. 또한 인간이 사용할 물뿐만 아니라 자연이 필요로 하는 물을 함께 공급해야 한다는 의견들이 꾸준히 제기되고 있다. 하지만 한정적인 물을 활용하여 모든 지역적 요구를 충족시키기에는 무리가 있으며 국내에서는 다양한 수자원 계획을 수립하여 이를 해결하려고 노력하였다[1],[2].

이와 같은 노력에도 불구하고 지속적으로 발생하는 물 공급의 문제에 있어 여러 가지 요인이 있을 수 있으며 그 중 지역적 특성을 반영하지 못한 계획수립도 하나의 원인이라 할 수 있다. 최근 들어 지역수자원관리계획을 수립하여 지역적 물 공급 문제를 해결하려고 노력하고는 있으나 아직 그 실효성이 나타나고 있지는 않다. 따라서 지역 특성을 반영한 물 이용 순환 해석이 동반된 계획수립은 필요하다고 할 수 있다. 대표적인 지역 특성을 반영한 물 이용 순환 해석으로는 회귀율 산정 및 조사이며 몇몇 연구자들에 의해 회귀율을 유역 특성과 기상 상황에 따라 다를 수 있으며[3] 기계학습모형, 경사하강법, 현장조사 및 물수지 방법을 통해 생활용수 및 농업용수에 대한 회귀율을 추정한 바 있다[4]-[6]. 미국 캘리포니아의 수자원 계획은 지역별 물 공급 전망을 통해 문제점을 예측하고 이에 대한 정책 및 대안을 제시하고 있다.

국외 연구자들은 물 이용 순환과정에서는 많은 양의 에너지가 사용되고 있다고 추정하였으나[7],[8], 국제적으로 탄소중립 이행 전략은 산업, 수송, 건물 및 에너지 등을 중심으로 수립되었으며 물 관련 분야에 대한 정책 수립은 활발하지 않은 편이다. 특히 국내에서는 국가 온실가스 인벤토리에 물 분야가 존재하지 않으며 탄소중립 추진에 물 관련 분야에 대한 감축 수단 반응이 미비한 실정이다. 국내의 몇몇 연구자들에 의해 물과 에너지 관계를 분석하여 제시하고는 있으나[9]-[11], 물-에너지 관련 자료가 부족하며 물 이용 순환과정에서 소비되는 에너지가 크지 않다는 인식으로 인해 관련 연구가 미비한 실정이다. 하지만 물 이용 순환과정을 통해 소비되는 에너지를 줄일 수 있는 여건이 많다고 판단되며 이에 대한 사전연구가 필요한 상황이다.

하천의 기능을 물 이용과 홍수방어로 인식되었으나 최근 들어 삶의 질 향상과 자연환경 보호를 위한 하천환경 기능도 중요하게 인식됨으로써 하천유지유량의 개념과 관리는 매우 중요하게 되었다[12]. 최근 들어 하천의 정상적인 기능 유지를 위해 하천에 흘러야 하는 유량인 하천유지유량을 산정하여 고시함으로써 하천관리를 위해 다양한 노력을 기울이고 있다. 이에 몇몇 연구자들은 하천유지유량 공급에 따른 수질 및 수생태계 건강성에 미치는 영향 및 하천유지유량 공급에 대한 효율성에 대해 제시하였으나[13]-[15], 고시 및 설정된 하천유지유량의 적정성에 대한 검토는 미비하다.

따라서, 본 연구에서는 합리적인 수자원 계획과 관리를 지원할 수 있도록 보다 현실적인 물수지 분석을 수행하고자 하

였다. 이를 위해 지역 특성을 반영한 수요처의 회귀율 최적화를 수행하고 물 이용 순환과정에 따른 에너지 소비량을 산정함으로써 탄소중립 관련 정보를 제공하고자 하였으며, 마지막으로 하천유지유량 공급 가능성을 평가하여 고시된 하천유지유량의 적정성을 평가하였다.

II. 연구 방법

2-1 대상 유역

본 연구의 대상 유역을 감천 유역으로 선정하였다(그림 1). 감천 유역은 김천산업단지가 조성 및 운영되고 있으며 구미광역시도를 통한 유역 물 이동 등 다양한 용수 수요량(생활용수, 공업용수, 농업용수)이 필요하고, 많은 수자원 공급시설물(김천부항댐과 260개의 농업용 저수지)이 있는 유역이다. 또한 구미시(선주교) 지점에 하천유지유량이 고시되어 있어 본 연구의 목적에 부합되는 유역이라 할 수 있다. 감천 유역은 1개의 중권역, 8개의 표준유역 및 5개의 농촌용수구역으로 구성되어 있다.

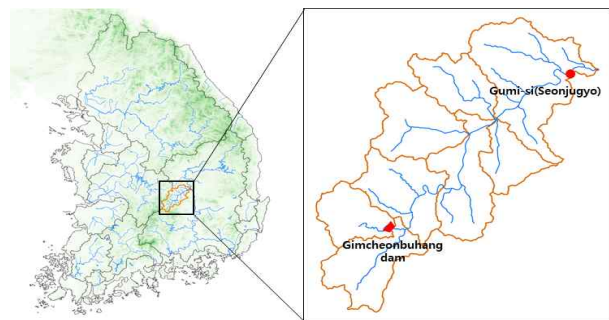


그림 1. 대상 유역
Fig. 1. Description of study area

2-2 물 수급 네트워크 구축

감천 유역에 대해 건설되어 운영 중인 시설물의 위치를 반영한 물 수급 네트워크를 구축하였다. 물수지 분석은 K-WEAPwen (Korea Water Evaluation And Planning System - Water Energy Nexus)을 활용하였으며 모형을 통해 구축된 물 수급 네트워크는 그림 2와 같이 복잡한 구조를 가진다.

현재 국내 여러 기관과 시스템에서 제공되는 신뢰성 있고 공식적인 물 이용 관련 자료를 2013~2021년에 대해 일별로 조사하여 물 수급 네트워크에 반영하였다. 생활 및 공업용수는 환경부의 상수도통계와 하천수사용관리시스템에서 제공되는 취수실적자료를 이용하였다. 농업용수는 하천수 사용실적자료와 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 수요량을 이용하였으며 제공되는 연간 수요량을 한국농어촌공사의

K-HAS (KRC Hydraulics & Hydrology Analysis System)를 이용하여 일별 수요량으로 변환한 후 농촌용수구 역별로 구축하였다. 김천부항댐 운영자료는 물 포털을 통해 구미 광역상수도 공급량 자료는 한국수자원공사의 수도관리 연보 자료를 이용하였다. 일별 하수처리시설 방류량 자료는 환경부 국립환경과학원의 전국오염원조사를 통해 획득하였다. 하천수 사용실적 자료가 없는 미보고 대상 시설물에 대해서는 인근 취수실적 자료가 있는 동일 용도 시설물의 취수율(취수량/허가량)과 취수 일수를 반영하여 일별 하천수 사용자 자료를 추정하였다.

감천 유역에 존재하는 260개의 농업용 저수지 전부를 물 공급 네트워크에 반영하기 어렵기 때문에 저수용량 100,000 m³ 이상인 저수지만을 네트워크에 직접 반영하였고 소규모 농업용 저수지에 대해서는 표준유역별로 총저수량, 유효저수용량 및 유역면적을 종합한 대표 저수지 개념으로 표준유역별로 고려하였다. 공급량 중 하나인 자연유출량에 대해서는 SWAT (Soil & Water Assessment Tool)을 활용하여 분석 기간에 대해 일별로 산정하여 물수지 분석 모형에 입력하였다.

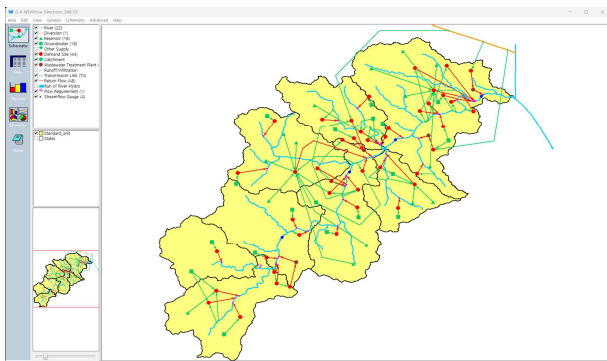


그림 2. 대상 유역의 물 공급 네트워크
Fig. 2. Water supply and demand network of study area

2-3 수요처 회귀율 최적화

국내 수자원 계획에서의 물수지 분석은 수요처의 회귀율을 생활용수와 공업용수에 대해서는 65%, 농업용수의 회귀율은 35%로 일률적으로 설정하여 수행되고 있다[1],[2]. 지역 특성에 따라 수요처의 회귀율은 상이하지만 이를 반영하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 관측유량을 더 잘 모의할 수 있는 수요처의 회귀율을 최적화 방법을 통해 산정하였다.

최근 수자원 분야에서는 모형의 매개변수 최적화 및 수자원 모의 결과의 최적화를 위해 전역최적화 기법 중 SCE-UA (Shuffled Complex Evolution - University of Arizona) 기법을 적용하고 있다[16]-[18]. SCE-UA 기법은 다차원 매개변수 공간을 탐색하여 최적해를 찾는다. 초기 단계부터 해가 존재하는 다차원 매개변수 공간으로부터 표본을 생성하고 이는 Complex로 분할된다. 각 Complex는 Downhill Simplex 알고리즘을 통해 독립적으로 진화되며, 진화를 거친

Complex는 다시 혼합되며 새로운 Complex가 생성된다. 이상의 진화와 혼합의 과정은 수렴조건을 충족할 때까지 반복 계산한다[18]. SCE-UA 기법을 사용하여 관측유량과 모의 유량 간의 오차를 최소화하기 위해 평균제곱오차 (RMSE; Root Mean Square Error)를 목적함수로 설정하였으며 이는 식 (1)과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (q_{obs}^i - q_{sim}^i)^2 / N} \quad (1)$$

여기서, N 은 전체 자료의 수를 나타내며, q_{obs} 는 관측유량, q_{sim} 은 모의유량을 의미한다.

회귀율 최적화 결과의 적합도를 평가하기 위해 몇 개 지표를 사용하여 분석하였다. 적합도 평가지로는 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)와 체적비 (ROV; Ration of volume) 및 결정계수를 이용하였으며 NSE는 관측값의 표본 분산에 대한 오차 분산의 상대적 크기를 의미하며 최적값은 1이고, ROV의 최적값 또한 1이다. 적합도 평가 지표의 계산은 식 (2)와 식 (3)과 같다.

$$NSE = 1 - \left\{ \sum_{i=1}^N (q_{obs}^i - q_{sim}^i)^2 \right\} / \left\{ \sum_{i=1}^N (q_{obs}^i - \overline{q_{obs}})^2 \right\} \quad (2)$$

$$ROV = \sum_{i=1}^N q_{sim}^i / \sum_{i=1}^N q_{obs}^i \quad (3)$$

여기서, $\overline{q_{obs}}$ 는 관측유량의 평균을 나타낸다.

기존 수자원 계획에서 적용하고 있는 일률적 회귀율을 적용하여 분석한 경우(Case 1)와 수요처 회귀율의 최적화를 통해 분석한 경우(Case 2)를 비교·평가하였다.

2-4 물 이용 순환 과정별 에너지 소비량

물 이용 순환은 물이 취수과정을 거쳐 정수과정, 가압과정 및 하·폐수처리과정을 거쳐 하천으로 회귀하는 일련의 과정을 거친다. 각 과정을 통해 에너지가 소비되며 대부분이 전력을 소비하게 된다. 따라서 본 연구에서는 대상 유역인 감천 유역의 물 이용 순환과정에서 소비되는 전력 소비량을 산정하여 제시하고자 하였다. 과정별 소비되는 전력 소비량은 기존 연구에서 제시한 단위유량당 전력 소비량 자료를 활용하였으며 표 1과 같다.

대상 유역의 수요처 회귀율 최적화를 수행한 후 이를 반영한 물수지 분석을 수행하고 물 이용 순환 과정별 물 이동량을 산정한 결과에 표 1의 물 이용 순환 과정별 단위유량당 전력 소비량을 고려함으로써 식 (4)와 같이 전력 소비량을 산정하였다.

$$ES = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M EE_{ij} \times q_{ij} \quad (4)$$

여기서, ES 는 물 이용 순환 과정별 에너지 소비량(kWh), EE_{ij} 는 i 번째 모의 시간 단위에서 j 번째 물 이용 순환과정(취수, 정수, 가압, 하·폐수처리)에 대한 에너지 소비율(kWh/m³)을 의미하며, q_{ij} 는 i 번째 모의 시간 단위의 j 번째 물 이용 순환과정을 통해 이동된 물의 양(m³)을 나타낸다.

표 1. 물과 에너지 관계[7]

Table 1. Water and energy relations[7]

Water cycle	Water resources facilities	Water and energy relations
Intake	Domestic and industrial intake	$Y = 0.2448X_1$ ($R^2: 0.8477$)
	Water pumping and distribution system (agricultural)	$Y = 0.2778X_1$ ($R^2: 0.8176$)
	Groundwater intake	$Y = 0.7947X_1$ ($R^2: 0.7356$)
Distribution	Pumping station	$Y = 0.2472X_2$ ($R^2: 0.8145$)
Purification	Purification plant	$Y = 0.1794X_3$ ($R^2: 0.6519$)
Treatment	Sewage treatment plant	$Y = 0.2598X_4$ ($R^2: 0.7988$)
	Wastewater treatment plant	$Y = 0.5356X_4$ ($R^2: 0.7196$)

Y: Electricity consumption (10⁶ kWh/y), X_1 : Water intake (10⁶ kWh/y), X_2 : Water pumping (10⁶ kWh/y), X_3 : Water purification (10⁶ kWh/y), X_4 : Water treatment (10⁶ kWh/y)

2-4 하천유지유량 공급 가능성

감천 유역에는 구미시(선주교) 지점에 하천 생태계를 고려한 필요 유량 항목을 통해 산정된 8.00 m³/s의 하천유지유량이 고시되어 있으며 감천 유역 상류 부향천에는 김천부향담이 건설되어 운영하고 있고 김천부향담에서 하류로 하천유지유량 0.16 m³/s를 공급하는 것으로 계획되어 있다. 본 연구에서는 고시된 하천유지유량을 충분히 공급할 수 있는지 여부를 검토하였다. 기존 하천유지유량 산정 관련 과업[19]에서는 구미시(선주교) 지점에 대해 하천 수질보전을 위한 필요 유량 항목을 통해 4.03 m³/s를 산정하여 제시한 바 있어 하천유지유량 고시 값에 이를 반영한 분석도 포함하였다.

공급 가능성 평가를 위한 물수지 분석은 다음과 같다.

(Case 3) 댐이 건설되지 않았을 경우를 가정하여 하천유지유량 고시 값 8.00 m³/s를 만족하는지 여부

(Case 4) 과거 댐의 운영 실적을 반영하여 하천유지유량 고시 값 8.00 m³/s를 만족하는지 여부

(Case 5) 일별 수자원 시설물 최적 운영을 통해 하천유지유량 고시 값 8.00 m³/s를 만족하는지 여부

(Case 6) 일별 수자원 시설물 최적 운영을 통해 하천유지유량 고시 변동 값 4.03 m³/s를 만족하는지 여부

(Case 7) 전체기간 수자원 시설물 최적 운영을 통해 하천유지유량 고시 값 8.00 m³/s를 만족하는지 여부

(Case 8) 전체기간 수자원 시설물 최적 운영을 통해 하천

유지유량 고시 변동 값 4.03 m³/s를 만족하는지 여부

분석에 있어 일별 수자원 시설물 최적운영과 전체기간 수자원 시설물 최적 운영은 식 (5)와 식 (6)을 목적함수로 설정하여 최적화 기법을 적용하여 분석하였다.

$$\text{Objective function: maximize } \sum_{j=1}^M S_{ij}/D_{ij} \tag{5}$$

$$\text{Objective function: maximize } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M S_{ij}/D_{ij} \tag{6}$$

여기서, S_{ij} 는 i 번째 모의 시간 단위에 대해 수요처 j 에 공급된 양(m³), D_{ij} 는 i 번째 모의 시간 단위의 수요처 j 의 수요량(m³)을 나타낸다. 따라서 식 (5)는 분석하고자 하는 모의 시간 단위에 대한 각 수요처의 총족률(공급량/수요량)을 최대화하는 목적함수를 적용하였으며, 식 (6)은 분석 기간 전체에 대해 수요처의 총족률 합계를 최대화한다는 것이다. 이처럼 두 가지 경우로 구분한 것은 일별 수요총족률을 최대화하기 위해 각 수자원 공급시설물에서 지나치게 큰 유량을 공급하게 되면 다음 모의 시간 단위에서 시설물의 저수량이 적어 하류로 공급하지 못할 경우가 발생할 수 있기 때문이다.

III. 연구결과

3-1 수요처 회귀율 최적화 산정

대상 유역에 대해 2013~2021년 일별 물수지 분석을 수행한 후 구미시(선주교) 지점의 관측유량과 모의유량의 오차를 줄이기 위해 SCE-UA 기법을 적용하여 각 수요처의 회귀율을 재산정하였다. 재산정된 각 수요처의 회귀율은 표 2와 같다.

수요처 회귀율 최적화 결과의 적합성을 평가하기 위해 구미시(선주교) 지점에 대해 평가 지표를 통한 통계량을 계산하여 표 3에 나타내었다. Case 1의 경우 ROV 1.05, NSE 0.50, R² 0.52로 분석되었으며 Case 2에 대해서는 ROV 1.04, NSE 0.78, R² 0.80으로 나타나 일률적으로 회귀율을 적용한 경우보다 지역 특성을 반영한 수요처의 회귀율을 최적화하여 분석한 결과가 관측값을 더 잘 모의하는 것으로 분석되었다. 구미시(선주교) 지점에 대한 관측유량과 Case에 따른 모의유량을 그림 3에 도시하였다.

SCE-UA 기법은 지역 최소해(Local minimum) 수렴을 피할 수 있다는 장점이 있으나 계산량이 증가하여 분석 시간이 길다는 단점도 가지고 있다. 본 연구에서 추정한 수요처 회귀율은 현실적으로 시간과 공간에 따라 다르므로 수요처별로 분석 시간별로 회귀율을 추정하는 것이 합리적이라 할 수 있다. 하지만 시간에 따라 변하는 회귀율을 장래 수자원 계획에 적용하기는 어렵기 때문에 전체 분석 기간에 대해 관측유량을 잘 모의할 수 있도록 수요처별 회귀율을 산정하여 제시함으로써 향후 수자원 평가 및 계획에 활용할 수 있도록 하였다.

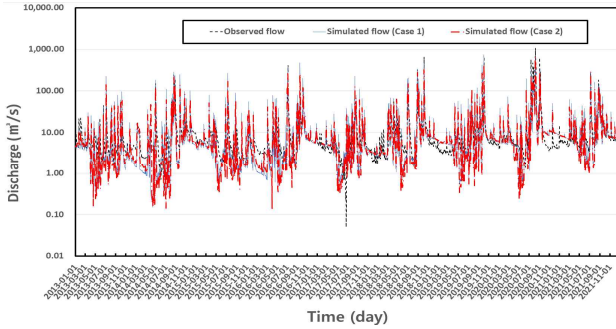


그림 3. 관측유량과 모의유량의 시계열 비교 (구미시(선주교))
 Fig. 3. Comparison of observed and simulated flow time series (Gumi-si(Seonjugo))

표 2. 수요처 회귀를 최적화

Table 2. Optimizing demand return flow rate

Demand site	Existing return flow rate(%)	SCE-UA method(%)
<Outer-supply area>		
Gammun, Gamcheon, Gaeyeong, Goa, Guseong, Daedeog, Mueul, Bongsan, Seonsan, Apo, Eomo, Ogseong, Joma, Kilye	65.0, 65.0, 65.0, 65.0, 65.0, 65.0, 65.0, 65.0, 65.0, 65.0	45.0, 50.5, 45.5, 50.9, 71.1, 66.2, 72.1, 45.9, 51.7, 66.1, 45.8, 56.3, 48.3, 67.1
<Facilities with river water use permits>		
Industrial: 201003, 201005 standard unit basin	65.0, 65.0	68.7, 60.1
Agricultural: 201005, 201008 standard unit basin	35.0, 35.0	15.4, 29.6
<Agricultural demand>		
Irrigation: 201001, 201002, 201003, 201004, 201005 rural water district	35.0, 35.0, 35.0, 35.0, 35.0	35.1, 15.2, 15.6, 15.2, 28.5
Non-irrigation: 201001, 201002, 201003, 201004, 201005 rural water district	35.0, 35.0, 35.0, 35.0, 35.0	33.2, 15.6, 15.8, 15.2, 20.9

표 3. 관측유량과 모의유량의 통계치

Table 3. Statistics of observed and simulated flow

Gauged station	Mean (m³/s)			Std. (m³/s)			ROV		NSE		R²	
	Obs.	Case 1	Case 2	Obs.	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
Gumisi (Seonjugo)	12.1	12.6	12.3	43.3	31.8	36.5	1.05	1.04	0.50	0.78	0.52	0.80

3-2 물 이용 순환 과정별 에너지 소비량 평가

수요처 회귀를 최적화 결과를 반영한 후 대상 유역에 대한 물수지 분석을 통해 물 이용 순환 과정별 물 이동량을 분석하였다. 물 이용 순환 과정별 이동량, 표 1 및 식 (4)를 활용하여 대상 유역에 대한 물 이용 순환 과정별 전력 소비량을 연도별로 산정하였으며 이를 표 4에 나타내었다.

감천 유역의 경우 연간 물 이용 순환과정을 통해 61.8백만 kWh를 사용하는 것으로 분석되었으며 취수과정 > 하-폐수처

리과정 > 정수과정 > 가압과정 순으로 전력을 소비하는 것으로 나타났다. 김천통계연보에서 제공되는 김천시 연간 전력 소비량과 간접적으로 비교하였을 때 물 이용 순환과정을 통해 소비되는 전력이 김천시의 연간 전력 소비량의 약 2.8%를 차지하는 것으로 나타났다. 물 이용 순환 과정별 전력 소비량을 용도별로 종합하여 표 5에 제시하였다. 감천 유역의 경우 농업용수 이용에 가장 많은 전력을 사용하며, 공업용수 이용에 적은 전력을 소비하는 것으로 분석되었다.

표 4. 물 이용 순환 과정별 전력 소비량

Table 4. Electricity consumption by water use cycle

Year	Annual electricity consumption (106 kWh/y)					Gimcheon-si [20]
	Intake	Purification	Pumping	Treatment	Total	
2013	41.2	8.0	1.0	10.9	61.2	1,920.9
2014	37.0	7.8	1.1	12.0	58.0	1,918.6
2015	37.5	7.6	1.1	9.3	55.5	2,023.4
2016	41.3	8.7	1.2	10.0	61.3	2,172.1
2017	46.5	8.2	1.2	10.0	65.9	2,314.1
2018	41.7	8.9	1.2	12.3	64.1	2,437.3
2019	45.0	6.6	1.3	9.9	62.8	2,316.2
2020	47.2	7.6	1.3	12.7	68.9	2,267.8
2021	36.7	7.2	1.3	13.5	58.6	2,403.3
Total	374.1	70.6	10.7	100.6	556.0	19,773.7
Average	41.6	7.9	1.2	11.2	61.8	2,197.1

표 5. 용도별 물 이용 관련 전력 소비량

Table 5. Electricity consumption by water use sector

Year	Annual electricity consumption (106 kWh/y)			
	Domestic use	Industrial use	Agricultural use	Total
2013	25.2	2.8	33.1	61.2
2014	24.7	2.9	30.4	58.0
2015	21.8	3.1	30.6	55.5
2016	23.7	3.5	34.1	61.3
2017	23.8	3.5	38.6	65.9
2018	25.8	4.1	34.3	64.1
2019	22.2	2.6	38.0	62.8
2020	25.5	3.5	39.8	68.9
2021	25.3	3.8	29.5	58.6
Sum	217.9	29.9	308.3	556.0
Average	24.2	3.3	34.3	61.8

3-3 하천유지유량 공급 가능성 평가

하천유지유량 공급 가능성 평가를 위해 6개 Case를 가정하여 분석을 수행하였다. 수요처 회귀를 최적화 결과를 반영한 물수지 분석 결과를 활용하여 하천유지유량이 고시된 구미시(선주교) 지점의 모의유량을 통해 고시 값을 얼마나 만족하였는지를 신뢰도를 통해 평가하였다. 신뢰도는 식 (7)을 통해 계산할 수 있다.

$$Rel^i = \frac{No. of times D_i^i = 0}{N} \tag{7}$$

여기서, Rel^i 는 수요처 i 의 신뢰도, D_i^i 는 수요처 i 의 물 부족량, N 은 전체 모의 기간 수를 나타낸다.

구미시(선주교) 지점의 하천유지유량에 대한 신뢰도 평가 결과는 표 6과 같으며 각 Case별로 운영된 김천부항댐의 저수량 곡선을 그림 4에 나타내었다. 또한 Case별 수요처의 물 부족량을 연도별로 합산하여 표 7에 제시하였다. Case 3과 Case 4의 비교를 통해 김천부항댐의 건설로 인해 하천유지유량 공급 신뢰도는 다소 낮아지며 부족량도 증가한 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 통해 김천부항댐은 주로 용수 공급 위주로 운영되고 있으며 하천유지유량에는 오히려 악영향을 끼친 것으로 분석되었다. 김천부항댐의 최적 운영을 통한 결과에서 구미시(선주교) 지점의 하천유지유량 고시 값인 8.00 m³/s를 고려하였을 때 일별 최적 운영을 통해 하천유지유량을 더 공급할 수 있는 것으로 분석되었으나 생활용수, 공업용수 및 농업용수 부족량은 증가하였다. 이는 그림 4를 통해서도 확인할 수 있으며 Case 5의 경우 일별 수요처 총족률(공급량/수요량)을 최대화하기 때문에 김천부항댐 저수량이 사수위까지 하강하여 하류로 물을 공급하기 어려운 기간이 늘어났다. 반면 Case 7의 경우 전체기간의 수요처 총족률을 최대화하므로 하천유지유량 공급이 적을지라도 생활용수, 공업용수 및 농업용수를 더 공급하여 물 부족량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 구미시(선주교) 지점의 하천유지유량 고시 변동 값인 4.03 m³/s를 고려하였을 때도 비슷한 양상을 나타내었다. Case 6이 Case 8보다 더 많은 하천유지유량을 공급하였으나 생활용수, 공업용수 및 농업용수에 대해서는 적은 양의 물을 공급한 것으로 나타났다.

분석 결과 김천부항댐을 최적으로 운영한다고 하더라도 구미시(선주교)의 하천유지유량을 만족시키기 어렵다는 것을 확인하였으며 최적 운영에 따라 전체기간 신뢰도는 43.6%와 63.9%로 분석되었다. 하천 생태계를 고려한 필요유량 항목이 아닌 하천 수질보전을 위한 필요유량 항목을 통해 산정된 4.03 m³/s를 공급할 때는 최적 운영에 따라 전체기간 신뢰도가 66.0%와 90.8%로 분석되었다. 하지만 본 연구에서 분석된 최적 운영이 아닌 김천부항댐의 하천유지유량 계획공급량 0.16 m³/s를 고려하였을 경우(Case 3) 분석 전체기간 공급 신뢰도는 31.4%로 구미시(선주교) 지점에 대한 하천유지유량을 약 70% 정도 공급하지 못하는 것으로 분석되었다. 따라

표 6. 분석 경우별 하천유지유량 공급 신뢰도

Table 6. Water supply reliability of Instream flow by case

Year	Case 3 (%)	Case 4 (%)	Case 5 (%)	Case 6 (%)	Case 7 (%)	Case 8 (%)
2013	22.2	15.3	19.5	56.4	15.3	44.4
2014	30.1	32.1	65.2	89.9	40.0	71.0
2015	20.5	15.3	46.6	92.6	18.6	54.8
2016	34.7	29.0	62.6	78.7	37.4	51.9
2017	23.0	17.8	40.5	100.0	19.7	54.8
2018	40.0	37.5	71.8	100.0	47.9	60.3
2019	34.0	29.0	78.9	100.0	48.2	78.9
2020	56.0	57.9	89.9	100.0	79.0	87.7
2021	42.5	48.5	100.0	100.0	86.3	90.1
Entire period	33.7	31.4	63.9	90.8	43.6	66.0

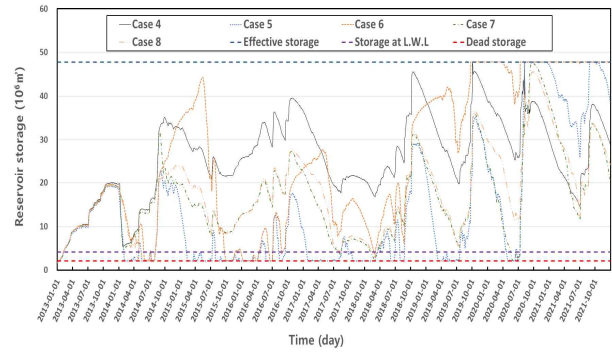


그림 4. 분석 경우별 모의 저수량

Fig. 4. Simulated reservoir storage by case

표 7. 분석 경우별 물 부족량 평가

Table 7. Evaluation of water shortage by case

Year	Case 3 (10 ⁶ m ³)		Case 4 (10 ⁶ m ³)		Case 5 (10 ⁶ m ³)	
	Dom.+Hnd.+Agr.	Instream flow	Dom.+Hnd.+Agr.	Instream flow	Dom.+Hnd.+Agr.	Instream flow
2013	26.5	104.7	11.0	131.3	26.5	111.2
2014	58.2	104.2	49.6	112.1	57.0	65.7
2015	53.7	114.9	29.2	125.0	51.2	90.1
2016	29.7	96.1	8.3	110.5	27.6	72.8
2017	14.0	100.4	2.7	114.6	14.0	83.9
2018	14.4	72.7	3.5	82.0	10.9	48.9
2019	14.3	70.6	3.4	75.8	14.0	29.8
2020	5.9	45.4	0.2	52.8	5.4	16.8
2021	1.4	36.5	0.0	43.0	0.4	0.0
Total	217.9	745.5	107.8	847.1	207.0	519.1
Year	Case 6 (10 ⁶ m ³)		Case 7 (10 ⁶ m ³)		Case 8 (10 ⁶ m ³)	
	Dom.+Hnd.+Agr.	Instream flow	Dom.+Hnd.+Agr.	Instream flow	Dom.+Hnd.+Agr.	Instream flow
2013	22.6	23.8	10.7	131.3	10.7	38.7
2014	49.6	10.1	49.1	103.1	45.1	22.9
2015	14.8	4.8	28.8	124.3	26.1	32.9
2016	16.4	16.8	8.1	107.9	8.0	36.9
2017	3.7	0.0	2.6	114.0	2.2	26.1
2018	2.2	0.0	3.3	80.0	3.3	22.5
2019	2.8	0.0	3.3	69.1	3.1	16.8
2020	1.1	0.0	0.4	40.0	0.2	10.1
2021	0.1	0.0	0.0	27.0	0.0	7.2
Total	113.3	55.4	106.2	796.7	98.8	214.0

서 하천유지유량 산정 및 고시는 사전에 공급 가능 여부 등 다양한 분석이 동반되어야 할 것으로 판단된다. 하천유지유량은 하천수 허가 등에 영향을 미치는 인자로 잘못된 하천유지유량 산정은 하천관리에 악영향을 끼칠 수 있기 때문이다.

IV. 결론

최근 인간 삶의 질 향상과 자연환경 보호를 위한 하천유지유량 관리에 많은 관심이 집중되고 있다. 또한 탄소중립과 탄소배출 저감을 위한 다양한 노력을 기울이고 있다. 따라서 물 이용 순환과정에 소비되는 에너지량을 정량적으로 평가할 필요가 있으며 하천유지유량 공급에 문제가 없는지 분석할 필

요가 있다. 본 연구에서는 현실적인 수요와 공급 연계를 반영한 감천 유역 위치기반 물 공급 네트워크를 구축하고 물수지 분석을 수행하여 물 이용 순환 과정별 에너지 소비량을 평가하고 하천유지유량 공급 가능성을 평가하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 기존 수자원 계획의 용도별 일률적인 수요처 회귀율 적용의 문제점을 해결하고 지역 특성을 반영한 물수지 분석을 위해 SCE-UA 기법을 적용하여 관측유량과 모의유량의 오차를 최소화할 수 있는 감천 유역 수요처의 회귀율을 재산정하였다. 비교 대상지점은 하천유지유량이 고시된 구미시(선주교) 지점으로 선정하였으며, 일률적 회귀율 적용을 통한 물수지 분석 결과와 수요처 회귀율 최적화를 반영한 물수지 분석 결과에 대한 적합도 평가 결과 ROV는 1.05에서 1.04로, NSE는 0.50에서 0.78로, R^2 은 0.52에서 0.80으로 분석되어 수요처 회귀율 최적화를 통한 분석이 관측유량을 보다 잘 재현하는 것으로 나타났다.

2) 물수지 분석을 통해 물 이용 순환 과정별 물 이동량을 분석하였으며 이에 단위유량당 전력 소비량을 반영함으로써 물 이용 순환 과정별 전력 소비량을 산정하였다. 감천 유역의 경우 취수과정과 농업용수 이용에 가장 많은 전력을 사용하는 것으로 분석되었다. 물 이용 순환 과정별 전력 소비량은 김천시 연간 전력 소비량의 약 2.8%를 차지하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 향후 탄소배출, 에너지 소비를 고려한 수자원 대책 마련을 위한 중요한 분석 도구 및 사례로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 최근 물 이용 순환 과정별 에너지 소비량을 지역별로 조사하여 제시하고 있다. 따라서 향후 이를 수집하여 물과 에너지 관계에 대한 다각적 분석을 통해 지역별 물 이용 순환 과정별 에너지 소비량을 산정함으로써 지역 특성에 맞는 탄소 배출 저감 방안을 마련할 필요가 있다.

3) 감천 유역 구미시(선주교) 지점에 고시된 하천유지유량의 공급 가능성을 평가하였다. 이를 위해 김천부항댐의 최적 운영과 하천유지유량 변동 값을 고려하여 6개 Case에 대한 분석을 수행함으로써 하천유지유량 공급 신뢰도 및 물 부족량을 분석하였다. 김천부항댐 건설로 인해 생활용수, 공업용수 및 농업용수 공급은 증가하였으나 하천유지유량 공급은 감소한 것으로 나타났다. 고시된 $8.00 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 하천유지유량 공급을 위해 김천부항댐을 최적 운영한다면 공급 신뢰도는 최대 63.9%로 분석되었으며 하천 수질보전을 위한 필요 유량 항목을 통해 산정된 $4.03 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 하천유지유량 고시 값이 작아진다면 최적 운영을 통해 최대 90.8%까지 증가할 수 있는 것으로 나타났다. 김천부항댐의 하천유지유량 계획공급량을 고려하였을 경우 하천유지유량에 대한 공급 신뢰도는 31.4%로 분석되어 구미시(선주교) 지점의 하천유지유량이 크게 산정되어 고시된 것으로 분석되었다. 따라서 하천유지유량 산정 및 고시를 위해서는 사전에 공급 가능 여부 등 다양한 분석이 동반되어야 할 것으로 판단된다.

최근 정부는 하천 공간정보를 3차원 가상 세계에 구축하고, 가뭄 등 위험 상황을 시뮬레이션하여 현실 세계의 물 재

해 예측 및 대응 방안 마련을 위한 디지털 트윈 물관리 플랫폼 구축을 위해 노력하고 있다. 향후 이를 활용하고 다양한 데이터가 추가적으로 수집된다면 물 이용 관련 다양한 사전 분석을 통해 효율적인 하천관리가 가능할 것으로 판단되며 안정적인 하천유지유량 공급을 위한 다양한 정보 등을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비 지원(주요사업) 사업으로 수행되었습니다(과제번호 20240166-001, 디지털 뉴딜 기반 통합물관리 기술 융합 플랫폼(TWRM-K) 개발).

참고문헌

- [1] Ministry of Environment, The 1st Master Plan for National Water Management (2021~2030), Sejong, April 2021.
- [2] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, National Water Resources Plan (2011~2020), Gwacheon, 11-1611000-002114-13, February 2011.
- [3] H.-Y. Kim, W.-H. Nam, Y.-S. Mun, N.-K. Bang, and H.-J. Kim, "Estimation of Irrigation Return Flow on Agricultural Watershed in Madun Reservoir," *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 63, No. 2, pp. 85-96, March 2021. <https://doi.org/10.5389/KSAE.2021.63.2.085>
- [4] H. J. Yoo, S. O. Lee, S. H. Choi, and M. H. Park, "Development of a Data-Driven Model for Forecasting Outflow to Establish a Reasonable River Water Management System," *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, Vol. 13, No. 4, pp. 75-92, December 2020. <https://doi.org/10.21729/ksds.2020.13.4.75>
- [5] H.-Y. Kim, W.-H. Nam, Y.-S. Mun, H.-U. An, J. Kim, Y. Shin, ... and K.-Y. Lee, "Estimation of Irrigation Return Flow from Paddy Fields on Agricultural Watersheds," *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 55, No. 1, pp. 1-10, January 2022. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2022.55.1.1>
- [6] W. Kim, S. Choi, S. Kang, H. Noh, and C. Choi, "Estimating Return Flow Rate from Water Demand Using Optimization Approach," *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 24, No. 3, pp. 181-189, June 2024. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2023.24.3.181>
- [7] M. Arora, L. Aye, H. Malano, and T. Ngo, "Water-Energy-GHG Emissions Accounting for Urban Water Supply: A Case Study on an Urban Redevelopment

- in Melbourne,” *Water Utility Journal*, Vol. 6, pp. 9-18, 2013.
- [8] Global Water Forum. Quantifying the Energy Embedded in the US Water System [Internet]. Available: <https://www.globalwaterforum.org/2013/01/08/quantifying-the-energy-embedded-in-the-us-water-system/>.
- [9] J. H. Ahn, J. H. Lee, H. J. Kim, and D. H. Han, Potential Consequences to Climate Change and Water Management Strategy 1, Korea Environment Institute, Seoul, Green Growth Research 2009-11, December 2009.
- [10] E. S. Cho, I. Y. Song, D. H. Han, and C. Y. Lee, A Study on the Improvement of Energy Management for Wastewater Utilities, Korea Environment Institute, Seoul, Research Report 2011-18, December 2011.
- [11] S. Choi, J. H. Kim, S. Kang, and D. Lee, “Evaluation of a Water Resources System based on Energy Efficiency,” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 7, pp. 597-604, December 2018. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.7.597>
- [12] S. Kang, C. Yoo, D. Lee, and S. Choi, “Improvement of Instream Flow Evaluation Methodology and Application,” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 1, pp. 295-304, February 2016. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2016.16.1.295>
- [13] S. Y. Woo, S. J. Kim, S. J. Hwang, and C. G. Jung, “Assessment of Changes on Water Quality and Aquatic Ecosystem Health in Han River Basin by Additional Dam Release of Stream Maintenance Flow,” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. S-2, pp. 777-789, October 2019. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2019.52.S-2.777>
- [14] J. Noh and J. Lee, “Operation Rule Curve for Supplying Urban Instream Flow from Reservoir,” *CNU Journal of Agricultural Science*, Vol. 38, No. 1, pp. 163-172, March 2011.
- [15] S. H. Jang, J.-K. Lee, and J. W. Jo, “Evaluation of Instream Flow in the Imjingang River according to the Operation of Hwanggang Dam in North Korea,” *Crisisonomy*, Vol. 16, No. 6, pp. 105-118, June 2020. <https://doi.org/10.14251/crisisonomy.2020.16.6.105>
- [16] Y. Xu, C. Liu, Q. Yu, C. Zhao, L. Quan, and C. Hu, “Study on a Hybrid Hydrological Forecasting Model SCE-GUH by Coupling SCE-UA Optimization Algorithm and General Unit Hydrograph,” *Water*, Vol. 15, No. 15, 2783, August 2023. <https://doi.org/10.3390/w15152783>
- [17] G. Chung, H.-S. Park, J. Y. Sung, and H.-J. Kim, “Determination and Evaluation of Optimal Parameters in Storage Function Method Using SCE-UA,” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 11, pp. 1169-1186, November 2012. <https://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2012.45.11.1169>
- [18] G. H. Lee, M. H. Yeon, Y. H. Kim, and S. H. Jung, “Analysis of the Effect of Objective Functions on Hydrologic Model Calibration and Simulation,” *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-12, March 2022. <https://doi.org/10.21729/ksds.2022.15.1.1>
- [19] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Evaluation, Calculation and Securing of Regional Instream Flow Considering Natural and Social Environment Improvement (Nakdong River Basin), Gwacheon, 2010.
- [20] Gimcheon-Si. Gimcheon Statistical Year Book (2014-2022) [Internet]. Available: <https://www.gc.go.kr/portals/bbs/list.do?ptIdx=2046&mPid=1205050000>.



최시중(Si-Jung Choi)

1999년 : 고려대학교 대학원 (공학석사)
2016년 : 고려대학교 대학원 (공학박사-수공학)

1999년~2001년: 금호엔지니어링(주) 건설기술연구소
2001년~현 재: 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 수석연구원
※관심분야: 물수지 분석, 수자원 평가, 수자원 계획 등

강성규(Seong-Kyu Kang)



2002년 : 고려대학교 대학원 (공학석사)
2012년 : 고려대학교 대학원 (공학박사-수공학)

2006년~현 재: 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 수석연구원
※관심분야: 물배분, 하천수관리, 하천유지유량 등

김원진(Won-Jin Kim)



2018년 : 한양대학교 대학원 (공학석사)
2023년 : 건국대학교 대학원 (공학박사-수공학)

2023년~현 재: 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 박사 후 연구원
※관심분야: 수자원 평가, 하천 건천화 등

노희성(Hui-Seong Noh)



2011년 : 한경대학교 대학원 (공학석사)
2015년 : 인하대학교 대학원 (공학박사-수자원/지형정보)

2007년~2008년: 한국시설안전공단 시설안전네트워크연구단
2015년~현 재: 한국건설기술연구원 연구기획전략본부
※관심분야: 수재해, 레이더영상처리, 머신러닝(딥러닝), 데이터마이닝, 사물인터넷(IoT) 등

박기홍(Ki-Hong Park)



2010년 : 목원대학교 대학원 (공학박사-IT공학)

2010년~2012년: ㈜인코맥스 선임연구원
2012년~2022년: 목원대학교 컴퓨터공학과 교수
2022년~2024년: 오산대학교 컴퓨터정보계열 교수
2024년~현 재: 한신대학교 AI·SW대학 교수
※관심분야: 영상처리, 컴퓨터비전, 재해 예방 등