



Development and application of hydro-economic optimal water allocation and management model

Jeong, Gimoon^a · Choi, Sijung^b · Kang, Doosun^{c*}

^aPhD student, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea

^bSenior researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil engineering and building Technology, Goyang, Korea

^cProfessor, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea

Paper number: 19-071

Received: 23 August 2019; Revised: 27 September 2019; Accepted: 27 September 2019

Abstract

The optimal water allocation pursues a reliable and economic supply of water resources to meet various interests in socio-economic-environmental aspects. The global water shortage has intensified due to climate change and population growth with limited water resources. Thus, the water management scheme has shifted to improve water use efficiency by proper demand management and water allocation planning. Here, a hydro-economic water allocation model, called WAMM (Water Allocation and Management Model) is introduced. The WAMM is equipped with an improved linear programming algorithm for optimal water allocation and estimates economic value of water supply as an objective of water allocation decision. The model is expected to be used as an engineering decision support tool for optimal water allocation and management.

Keywords: Climate change, Hydro-economic model, Optimal water allocation, Water valuation

수자원-경제 통합 물 배분 최적화 모형의 개발 및 적용

정기문^a · 최시중^b · 강두선^{c*}

^a경희대학교 사회기반시스템공학과 박사과정, ^b한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원, ^c경희대학교 사회기반시스템공학과 교수

요 지

최적화된 물 공급 계획은 물을 둘러싼 이해관계와 사회-경제-환경적 요구사항을 충족시킬 수 있는 합리적이고 경제적인 수자원의 배분 및 활용 방안을 의미한다. 하지만, 전 세계적으로 기후변화와 인구증가 등의 다양한 요인에 의해 물 부족 현상이 심화되고 있다. 최근의 수자원 공급 계획은 수원의 다변화와 더불어 수요 관리 및 물이용 효율을 높이는 방향으로 변화하고 있다. 따라서 한정된 수자원의 이용 효율을 높이고, 물 부족에 따른 분쟁을 해소하기 위한 공학적 도구로서 다양한 물 배분 모형이 개발되어 활용되고 있다. 본 연구에서는 수자원의 용도에 따른 경제적 가치와 물공급 안정성을 기반으로 물 배분 계획을 수립하는 수자원-경제 통합 물 배분 모형을 개발하였다. 개발 모형은 기존 물 배분 모형의 최적화 알고리즘을 개선하고, 목적함수를 다양화함으로써 효율적인 물 배분을 위한 의사결정도구로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어: 기후변화, 수자원 가치평가, 최적 물 배분, 수자원-경제통합 모형

1. 서 론

수자원의 관리란, 이용자에게 용수를 안정적으로 공급하기 위한 예측, 계획, 운영, 분석, 평가 등 일련의 과정을 의미한다

다. 물 자원은 인류 생존에 필수적이며, 따라서 안정적인 수자원의 확보와 합리적인 배분이 이루어져야 한다. 용수 사용량은 인구 증가, 생활 패턴의 변화 등의 영향으로 점차 증가하는 반면, 빈번히 발생하는 가뭄과 한정된 공급 가능량으로 인해 사용처 간 물 분쟁이 심화될 것으로 전망된다. 전 세계적으로 이러한 물 분쟁을 중재하기 위해 사회, 공학적 측면에서 많은 연구가 수행되어 왔으며, 이들 중 공학적 해결 방안의 일환으

*Corresponding Author. Tel: +82-31-201-2513
E-mail: doosunkang@khu.ac.kr (D. Kang)

로 다양한 형태의 물 배분 모형(Water allocation model)이 개발된 바 있다. 물 배분 모형의 핵심적인 역할은 한정된 물 자원을 생활, 농업, 공업용수 등 다양한 용수 이용 목적에 따라 가장 효율적인 이용 방안을 제시하는 것으로서, 형평성, 경제성, 사회적 중요도 등에 따라 배분 결과는 서로 달라질 수 있다. 물 배분 모형의 개발과 활용은 과거 양적 효율(Quantitative efficiency)을 중심으로 수자원을 배분하였던 초기 물 배분 모형을 기반으로, 사회-경제적 이익을 극대화하기 위한 수자원-경제 통합 물 배분 모형(Hydro-economic water allocation model)으로 발전해왔다.

국내외 물 배분 모형의 개발 및 활용과 관련된 주요 연구 사례를 살펴보면 다음과 같다. Strzepek and Lenton (1978)의 연구에서는 가장 초기의 물 배분 모형들 중 하나로 알려진 MITSIM 모형을 개발하였으며, 이후 Strzepek (1981)의 연구를 통해 물 배분 모의 기능을 개선하여 스웨덴 South Western Skane 지역의 농업용수 공급 안정성 및 부족량 평가에 활용한 바 있다. Shafer and Labadie (1978)의 연구를 통해 개발된 MODSIM 모형 또한 대표적인 초기 물 배분 모형의 하나로 알려져 있다. 이후 물 배분의 효율을 극대화하기 위해 선형계획법(Linear Programming) 및 2차계획법(Quadratic Programming) 등 최적화 기능을 갖춘 최적 물 배분 모형(Optimal water allocation model)이 개발되었다.

최적화 기법을 바탕으로 보다 개선된 형태의 최적 물 배분 모형의 개발 및 적용과 관련된 주요 연구 사례는 다음과 같이 요약할 수 있다. Andreu *et al.* (1991)의 연구를 통해 개발된 AQUATOOL 모형, Raskin *et al.* (1992)의 연구를 시작으로 Yates *et al.* (2005)에 의해 사용자 친화성을 강화하여 개발된 WEAP 모형, Diaz *et al.* (1997)에 의해 개발된 AQUARIUS 모형 등은 모두 공급신뢰도(Reliability)를 최대화하거나, 물 부족량을 최소화하기 위한 대표적인 양적 물 관리 목적의 최적 물 배분 모형들로 알려져 있다. 특히, WEAP 모형의 경우 우리나라의 과학기술부와 건설교통부에서 지원한 21세기 프론티어 사업을 통해 국내 적용성을 강화한 K-WEAP 모형으로 개선되어 수자원장기종합계획 등 국내 물 관리 계획에 활용된 바 있다(Choi *et al.*, 2010). 또한, Zagona *et al.* (2001)에 의해 개발된 Riverware 모형은 추계학적 시나리오 기능 등을 통해 물 배분 모형의 최적화 기능을 더 강화하고자 하였으며, 기존에 개발된 모형들 또한 장기 최적화 측면을 개선한 Optimization horizon 등의 기능을 추가하여 현재까지 다양한 국가에서 활용 중에 있다.

한편, 수자원의 경제적 가치를 고려한 최적 물 배분 모형인 수자원-경제 통합 모형으로는 Howitt *et al.* (1999)의 연구를 통해 개발된 CALVIN 모형이 가장 대표적이며, CALVIN 모

형은 미국 캘리포니아를 대상으로 50년에 달하는 자료 수집을 통해 수자원의 경제적 가치를 고려하였다. 수자원-경제 통합 모형은 주로 용수 공급을 위해 소비되는 비용을 최소화하거나, 용수 공급의 편익을 최대화하기 위한 물 이용 방안을 제시하기 위해 활용되어 왔으며, Newlin *et al.* (2002), Pulido *et al.* (2004)의 연구를 통해 캘리포니아 남부에서 주 단위 수자원 계획(State-wide water resources planning) 수립 시 핵심적인 역할을 수행하는 등 수자원-경제 통합 모형의 다양한 활용 가능성을 제시하였다.

수자원의 경제적 가치를 산정하고자 한 국내 주요 연구 사례는 다음과 같이 정리할 수 있다. Hwang *et al.* (1999)은 조건부가치평가법을 통해 가뭄에 대비하기 위한 지하수의 잠재적 가치를 산정하였으며, Park *et al.* (2014)의 연구에서는 가뭄 시 댐 용수 활용을 대상으로 수자원 활용 측면에서 봄 시즌에 내린 강우의 경제적 가치를 평가한 바 있다. 이러한 연구들이 용수 공급원의 가치 평가에 주목한 반면, K-water (2008)의 연구에서는 국내 수자원의 전반적인 가치를 평가하기 위해 수자원의 용도별 가치산정을 위한 다양한 기법을 활용한 바 있다. 관련 연구에서는 조건부가치평가법에 의해 조사된 지불의사액을 바탕으로 산정된 생활용수 공급 편익, 주요 공업 분야별 생산함수에 의해 추정된 한계생산가치를 바탕으로 산정된 공업용수 공급 편익, 농작물 예산 분석법을 바탕으로 산정된 농업용수 공급 편익 등을 제시하였으며, 현재까지도 가장 넓은 관점에서 국내 수자원의 경제적 가치를 추정한 대표적인 연구 사례로 알려져 있다. 한편, Lim and Lee (2001)의 연구에서는 미국 작물의 생산에 한정하여, 한계생산가치 추정을 바탕으로 한 농업용수의 공급 편익을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 국내외 물 배분 모형 및 수자원-경제 통합 모형의 개발 사례와 국내 수자원의 경제적 가치평가 등 선행 연구를 바탕으로, 국내 적용에 적합한 수자원-경제 통합 물 배분 모형, 이른바 WAMM (Water Allocation and Management Model)을 개발하였다. 개발 모형은 장기간의 물 부족 상황을 고려할 수 있는 최적화 기능의 개선과 수자원의 용도별 경제적 가치를 고려한 물 배분 기능을 추가함으로써 기존 모형의 활용성을 개선하였다. 본 연구에서는 개발 모형을 국내 남한강 유역에 적용하여 검증 및 시나리오 기반 모의를 실시하고 결과를 분석하였다.

2. 선형계획법 기반 물 배분 알고리즘의 개선

유역단위 물 배분 모형은 유역 내 물 수급 계획을 합리적으로

로 수립할 수 있도록 돕는 공학적 지원도구를 의미한다. 물 공급 과정에서 고려해야 할 사항들을 살펴보면 다음과 같다. Fig. 1은 가상의 하천 유역으로, 하천 본류로부터 농업, 공업, 생활용수 등을 취수하며, 댐을 통해 하천의 유지유량과 저수 시설 내 저수량을 조절한다. 여기서 하천의 유량 및 댐의 저수량은 해당 유역 내에서 사용할 수 있는 가용 수자원의 총량으로 가능할 수 있다(지하수 제외). 이 때, 직접적으로 수요처에 공급할 수 있는 실제 공급가능량은 가용 수자원에서 하천의 유지유량과 댐 제한저수량 등을 제외한 양으로 제한된다. 물 배분 계획의 중요성은 바로 배분 가능한 실제 공급가능량이 필요수량을 충족하지 못할 때 부각되며, 다양한 이해관계자를 고려하여 결정해야 한다.

과거에는 물 공급 계획을 비교적 간단히 수립할 수 있었으나, 최근 들어 고려해야 할 요소가 많아지고, 이해관계가 복잡해지면서 물 배분 계획의 중요성과 물 배분 모형 등 관련 공학 기술의 역할이 점차 확대되고 있다. 앞서 살펴본 바와 같이, 현재까지 개발된 대부분의 기존 물 배분 모형들은 선형계획법 또는 2차계획법을 통해 최적 물 배분을 수행한다. 선형계획법은 수학적 최적화 기법의 하나로써, 목적함수(Objective function) 및 제약조건(Constraints) 등이 모두 선형함수로 구성될 때 적용할 수 있는 기법이다. 이로 인해 선형계획법은 비교적 제한적인 문제에서만 적용할 수 있는 단점이 있는 반면, 선형관계 사이에서 등호 제약조건(Equality constraints) 및 부등호 제약조건(Inequality constraints)에 의해 정의된 가능해(Feasible solutions) 중에서 목적함수를 가장 잘 만족시키는 전역 최적해(Global optimal solution)를 탐색할 수 있는 장점이 있어 현재까지도 널리 활용되고 있다.

수자원 계획 및 물 배분과 같은 시스템 최적화 문제에서는 전체 운영 효율을 극대화시키기 위한 비용의 최소화 및 편익의 최대화, 또는 목표 성능의 최대화 등을 목적함수로 활용하고 있으며, 국내에서 활용 중인 K-WEAP 모형에서는 목표 성

능 최대화의 일환으로 수요량 대비 물 부족량의 최소화를 목적함수로 최적 물 배분을 수행한다. 이 때, 수자원의 용도별 중요도를 반영하기 위해 수요처별 물 공급 우선순위를 설정하는 기능을 제공하고 있으며, 이는 가중치 기반의 물 공급 만족도를 최대화하는 측면에서 Eq. (1)과 같은 목적함수로 간략히 표현할 수 있다.

$$Maximize : Reliability = \sum_{j=1}^{N_d} \frac{P_j S_{j,t}}{D_{j,t}} \tag{1}$$

여기서, N_d : 유역 내 수요처의 수, P_j : 수요처 j 의 우선순위에 따른 가중치, $S_{j,t}$: 모의 시점 t 에서 수요처 j 의 용수 공급량(m^3), $D_{j,t}$: 모의 시점 t 에서 수요처 j 의 용수 수요량(m^3).

수자원의 경제성을 고려하여 물 배분을 수행하는 수자원-경제 통합 물 배분의 경우, 경제적 가치를 목적함수로 설정하여 편익의 최대화 또는 경제적 비용 최소화를 위한 최적화를 수행할 수 있으며, 본 연구에서는 수자원의 용도별 가중치를 단위 용수 공급에 의한 경제적 가치로 적용함으로써 용수 공급의 편익을 최대화하도록 목적함수를 Eq. (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$Maximize : Benefit = \sum_{j=1}^{N_d} V_j S_{j,t} \tag{2}$$

여기서, V_j : 수요처 j 의 단위 용수 공급에 따른 경제적 편익($원/m^3$)

용수공급계획을 수립하는 경우, 이처럼 물 공급 방안에 따라 다양한 사회-경제적 영향이 발생하게 되므로, 보다 합리적인 용수공급계획을 수립하기 위해서는 폭 넓은 목적함수의 산정이 요구된다. 본 연구에서는 용수 공급원으로부터 각 수요처까지의 공급 과정 및 수요처에서의 용수 사용 분류를 통해 지속가능성, 공급안정성 등의 사회적 지표 또는 공급 편익,

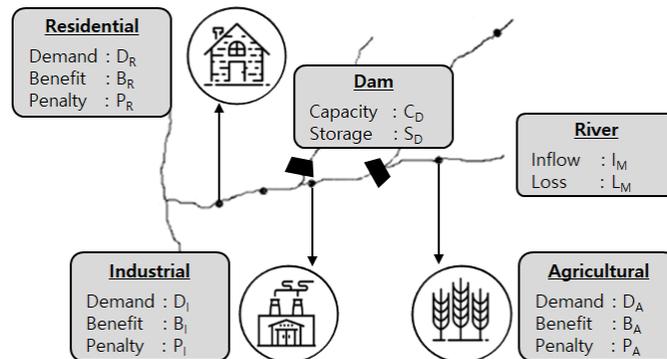


Fig. 1. Scheme of water allocation in river basin

공급 비용 등의 경제적 지표를 최적 물 배분 모형의 목적함수로 고려할 수 있는 것으로 판단하였다. 그러나 현재까지 이와 같은 물 배분의 다양한 특성을 정량화하기 위한 이론적 배경은 미흡한 실정이며, 따라서 본 연구에서는 용수공급의 안정성과 경제적 편익에 따른 최적 물 배분을 수행할 수 있는 물 배분 목적함수를 구성하고 적용하였다.

이 때, 기존 K-WEAP 모형에서는 선형계획법을 이용한 최적 물 배분 시, 전체 모의기간을 단위 모의시간 간격에 따라 여러 개의 모의 구간으로 구분하여 각각의 시간 구간별로 선형계획 구조를 수립한다(Single Step Linear Programming, SSLP). Fig. 2(a)에 표현한 것과 같이, 구분된 모의 간격 중 시간상으로 앞선 모의시간부터 최적화를 수행하며, 댐 저수율 등의 앞선 물 배분 결과를 다음 모의시간의 초기값으로 적용하여, 최적화를 연속적으로 수행한다. 이러한 모의 방법은 앞선 모의시간의 결과를 수정할 수 없기 때문에, 모의 후반으로 갈수록 물 부족이 발생하거나, 댐의 저수율 유지를 위한 탄력적인 물 배분 계획을 수립할 수 없는 단점이 있다. 금회 개발한 WAMM에서는 이러한 단점을 개선하여 전체 모의시간을 동시에 고려한 최적 물 배분을 수행하도록 알고리즘을 수정하였다(Full Step Linear Programming, FSLP). 즉, Fig. 2(b)와 같이 전체 모의시간의 물 배분량을 한 번의 최적화 수행으로 동시에 결정할 수 있도록 함으로써, 장래에 발생 가능한 물 부족을 미연에 대비할 수 있는 물 배분이 가능하다. 기존의 SSLP 방식은 물 공급 환경의 불확실성을 감안했을 때, 이후의 모의 기간에서 발생할 수 있는 물 부족 및 경제적 손실을 앞선 모의 시간에서 고려할 수 없으므로 환경 변화에 대응할 수 없는 단

점이 존재한다. 반면, FSLP 방식은 물 배분 과정에서 발생하는 모든 물 부족 또는 경제적 손실이 모든 시기의 물 배분에 관여하므로, 전체 모의시간에 걸쳐 발생하는 손실을 가장 최소화할 수 있는 물 배분 결과를 도출할 수 있다. 따라서 환경 변화에 능동적이고 탄력적으로 대응할 수 있는 물 배분이 가능하다.

따라서, 용수공급 안정성 및 편익의 최대화는 단위 모의시간이 아닌 전체 모의시간을 바탕으로 산정되므로, 기존의 목적함수 Eqs. (1) and (2)는 Eqs. (3) and (4)와 같이 개선된 형태로 표현할 수 있다.

$$Maximize : Reliability = \sum_{t=1}^{t_{sim}} \sum_{j=1}^{N_d} \frac{P_j S_{j,t}}{D_{j,t}} \tag{3}$$

$$Maximize : Benefit = \sum_{t=1}^{t_{sim}} \sum_{j=1}^{N_d} V_j S_{j,t} \tag{4}$$

여기서, t_{sim} : 물 배분 수행 시 전체 모의시간의 수

3. 수자원의 경제적 가치 평가

수자원의 경제성을 고려한 물 공급 모의를 수행하기 위해서는 우선적으로 수자원의 용도별 경제적 가치평가가 선행되어야 한다. 자원의 가치는 각 자원 별 특성과 국가 및 지역에 따라 크게 달라질 수 있는 가변적 요소이며, 기타 외부의 경제

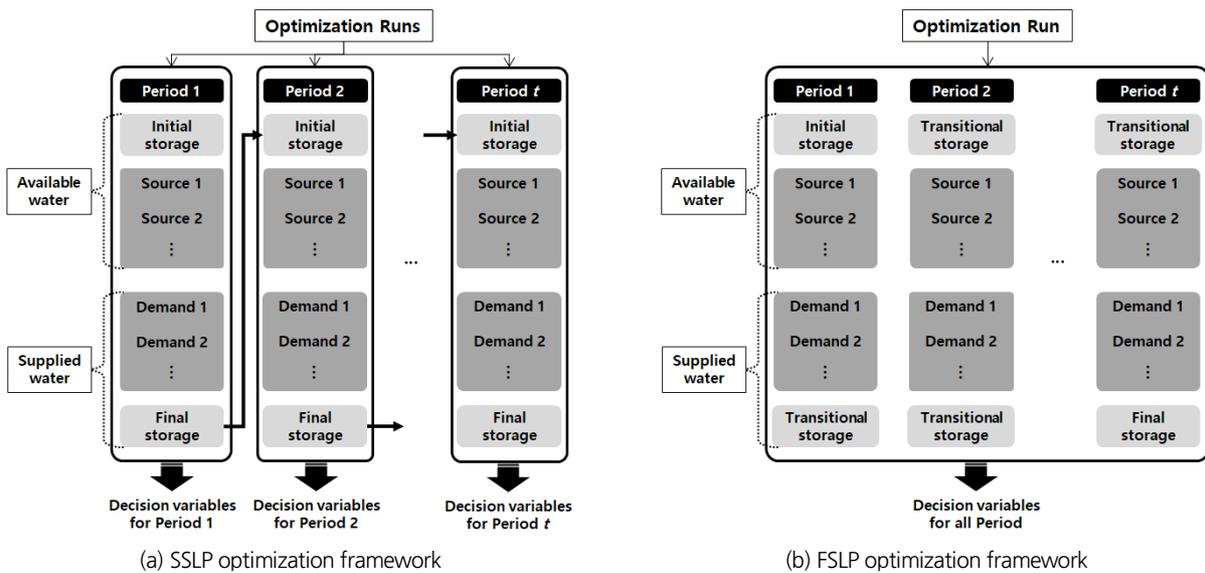


Fig. 2. Comparison of long-term optimization framework

적 요소에 의해 일시적인 변동이 나타날 수 있어, 이를 정량화 하기 위한 노력이 이미 다양하게 시도된 바 있다. 자원의 가치란 특정 자원의 존재나 그 상태의 변화로 인해 발생하는 편익 또는 손실(부족)에 대한 화폐가치로 정의할 수 있다. 특히, 수 자원은 공공재의 성격을 지니고 있어 일반적인 시장 경제와는 차이를 보이기 때문에 유효한 가치평가 기법의 마련이 어려운 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 수자원의 경제적 가치를 평가하고 적용한 기존 연구사례를 토대로 WAMM의 개발에 반영하고자 하였다.

3.1 생활용수의 경제적 가치 추정

K-water (2008)에서는 가격에 의해 수요량이 결정되는 것과 마찬가지로, 단위 수요량에 대한 사용자의 지불의사액 (Willingness To Pay, WTP)을 추정함으로써 사용자에게 공급된 생활용수의 편익을 산정한 바 있다. 지불의사액은 수요자가 특정 재화에 얼마만큼의 가치를 부여하는지를 나타내고 할 수 있으며, 본 연구에서는 K-water (2008)의 연구에서 측정된 지불의사액과 추정된 수요함수를 통해 생활용수의 공급편익을 산정하였다. 여기서, 수요함수(Demand function)란 가격과 수요량 사이의 관계를 정의하는 함수로서, 재화의 가격 수준에 따라 소비자들이 구매하고자 하는 수량의 변화를 나타낸다. 일반적으로, 다른 공급 조건이 동일한 경우 대체효과(Substitution effect) 및 소득효과(Income effect)에 의해 수요함수의 곡선은 점차 하향하는 형태를 갖는다.

생활용수 공급편익함수 추정 절차는 먼저 소비자 설문조사를 통해 생활용수 수량에 대한 최대 지불의사액을 바탕으로 요금상승률에 따른 용수사용 절감량을 조사한 후, 개인별 응답결과를 전체 응답자의 지불의사 형태로 반영하여 Fig. 3과

같은 개별 수요함수와 시장 수요함수를 산정함으로써 최종적인 공급편익함수를 도출할 수 있다. 여기서 공급편익함수의 종속변수는 생활용수의 지불의사액이고 설명변수는 지불의사액에 영향을 미칠 수 있는 1인당 월평균 수요량, 1인당 월평균 소득, 가구 형태에 따른 구성원수 등을 선택할 수 있다. 선형식으로 표현한 생활용수 공급편익함수는 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있으며, K-water (2008)에서는 이들 중 소득변수를 제외하고, 수집된 데이터를 바탕으로 회귀분석한 결과 Eq. (6)과 같이 생활용수 공급편익함수를 도출하였다.

$$P_M = \beta_0 + \beta_1 Q + \beta_2 I + \beta_3 F + \epsilon \tag{5}$$

여기서, P_M : 지불의사액으로 측정되는 생활용수의 1인당 단위가격(원/ m^3 /인), Q : 1인당 월평균 생활용수의 수요량(m^3 /월/인), I : 1인당 월평균 소득(원/인), F : 가구당 구성원수

$$P_M = 516.336 - 2.716Q - 65.137F \tag{6}$$

반면, 물을 공급받지 못함으로써 발생할 수 있는 잠재적 피해 또한 용수의 경제적 가치에 해당하는 것으로 판단할 수 있으며, 본 연구에서는 공급 부족으로 인한 생활용수의 잠재 피해액(Penalty cost)을 대체비용을 통해 산정하였다. 가정에서 대체하기 쉬운 용수는 음용수이며, K-water에서 제공하는 “물정보포털(MyWater, 2019)”에 따르면 국내 가정용수의 약 21%가 음용수에 해당하는 것으로 조사된 바 있다. 본 연구에서는 생활용수의 공급 부족이 발생하는 경우, 부족량을 생수 구매를 통해 대체하는 것으로 가정하여 잠재 피해액을 산정하였다.

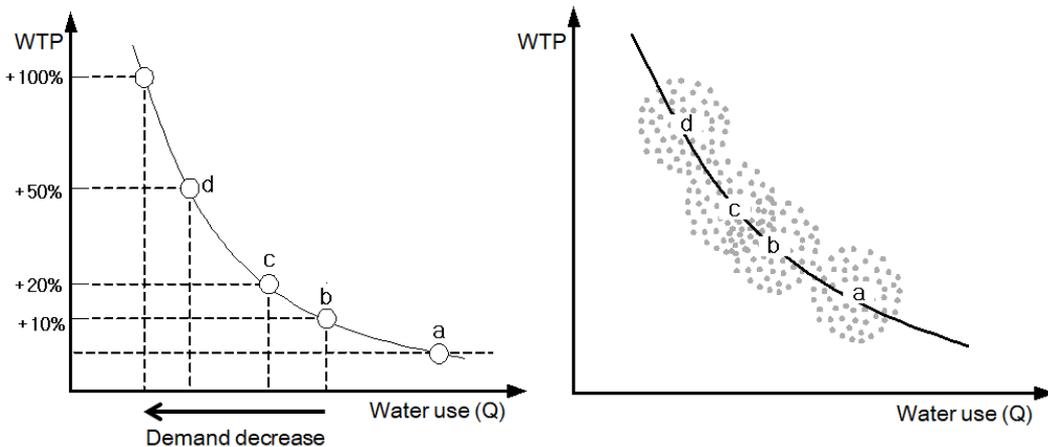


Fig. 3. Demand function between WTP and water use (K-water, 2008)

3.2 공업용수의 경제적 가치 추정

또한, K-water (2008)의 연구에서는 공업용수의 공급과 산출물 생산 관계에 따른 생산함수(Production function)를 기반으로, 산출물에 대한 한계생산가치로서 공업용수의 경제적 편익을 산정하였다. 생산함수란 제품 생산에 있어 투입물이 산출물로 변형되는 관계를 수학적으로 나타낸 것이며, K-water (2008)는 Eq. (7)과 같이 생산물의 부가가치액을 종속변수로, 생산량에 영향을 미칠 수 있는 투입노동, 중간투입액, 자본금, 용수공급량 등을 설명변수로 고려한 바 있다.

$$P_I = f(L, W_I, M_I, K) \quad (7)$$

여기서, P_I : 공업 생산물의 부가가치액(원), L : 월평균 종사자 수(인), W_I : 상수도 또는 전용 공업용수도로부터 공급된 용수량(m^3), M_I : 원재료비, 연료비, 전력비를 포함하는 제조원가(원/단위생산량), K : 연말 유형자산의 잔액(원/년)

부가가치액에 대한 각 설명변수의 탄력성을 반영한 Cobb-Douglas 생산함수 추정 방법을 바탕으로, 국내 수자원장기종합계획(MLTM, 2006)에서 분류한 산업분야 별 각각의 한계생산가치를 추정할 수 있으며, 이들 중 전체 산업분야에 대해 평균적인 기술통계치로 추정한 공업용수 한계생산가치는 Eq. (8)과 같이 도출할 수 있다.

$$\ln P_I = 2.02 + 0.73 \ln L + 0.05 \ln W_I + 0.27 \ln M_I + 0.05 \ln K \quad (8)$$

3.3 농업용수의 경제적 가치 추정

한편, Lim and Lee (2001)의 연구에서는 농업용수의 한계생산가치 분석을 위해, 농업용수의 투입량과 연차별 미곡 생산액에 따른 생산함수를 기반으로 농업용수의 경제적 편익을 산정하였다. 이 과정은 공업용수의 한계생산가치 분석 시 사용된 방법론과 동일하며, 선정된 종속변수는 미곡 생산물의 부가가치액, 설명변수로는 농업용수 총 공급량, 농업 경영비, 논외 식부면적, 한발연도 등으로 고려하여 Eq. (9)와 같은 생산함수식의 형태로 제시되었다.

$$P_A = f(A, W_A, M_A, D) \quad (9)$$

여기서, P_A : 미곡 생산물의 부가가치액(원), A : 연도별 수도 식부면적(천ha), W_A : 연도별 농업용수 공급량(100만 m^3), M_A : 미곡경영비(원), D : Dummy 변수(한발연도)

미곡 생산물의 생산함수 또한, 부가가치액에 대한 각 설명변수의 탄력성을 반영한 Cobb-Douglas 생산함수 방법과 국

내 미곡 총 생산액 및 농업용수 공급량 현황을 바탕으로 한계생산가치를 추정할 수 있으며, Lim and Lee (2001)의 연구에서는 약 35년에 걸쳐 수집된 데이터를 통해 농업용수의 한계생산가치를 Eq. (10)과 같이 도출하였다.

$$\ln P_A = 2.97 + 0.10 \ln A + 0.28 \ln W_A + 0.36 \ln M_A + 0.18 \ln D \quad (10)$$

공업용수 및 농업용수의 경우, 실제 생산물의 시장가치를 반영한 한계생산가치를 통해 경제적 편익을 산정하였으므로 용수의 공급은 직접적인 편익 창출로 연결된다. 따라서 공급 부족이 발생할 경우 작물 및 상품의 생산과 판매가 감소하게 되어 경제적 편익이 감소하므로, 본 연구에서는 이를 경제적 손실로 가정하여 공업용수 및 농업용수의 공급량 부족에 대한 별도의 잠재 피해액은 적용하지 않았다.

4. 적용결과 및 분석

4.1 적용구역 개요

본 연구에서는 수자원장기종합계획(MLTM, 2011) 수립 시 활용되었던 남한강 유역을 대상으로 개발 모형(WAMM)의 적용 및 개선효과 분석을 수행하였다. 특히, 수자원장기종합계획의 물 수급 전망 분석 시, 기존 물 배분 모형에서 용수 부족이 발생하는 것으로 분석되었던 1981년 6월의 모의 기간은 비교적 긴 시간동안 여러 수요처에서 물 부족이 발생하였고, 생·공용수 부족과 농업용수 부족이 동시에 나타나고 있어 개발 모형의 개선효과 비교 분석에 적합한 것으로 판단되었다. 따라서, 해당 기간의 모의 결과에 대하여 유역 내 초기 하천 유량 및 강우-유출량, 인근 수요처에서의 수요량 등 동일한 데이터를 개발 모형에 적용하였으며, 이 때 모의 간격은 반순(5일), 총 모의기간은 1981년 6월 1일부터 25일까지 총 25일에 걸쳐 수행되었다. 유역 내 용수 공급원은 하천유량, 지하수, 댐, 농업용 저수지 등이 고려되었으며, 수요처는 유역 내 농업용수, 생활용수, 공업용수 등을 고려하였다. 이 때, 수자원장기종합계획(MLTM, 2011) 수립 시 적용된 물수지 분석 과정에 따르면, 생·공용수 수요처에서는 수요량의 65%에 해당하는 용수를 하수처리한 후 하류의 하천지점으로 회귀하여 재이용수로 공급하는 것으로 조사되었으며, 농업용수의 경우 실제 수요량 중 순물소모량인 65%만을 수요량으로 적용함으로써 실제 물수지 모의에서는 농업용수의 회귀수를 고려하지 않는 것으로 조사되었다. Fig. 4는 적용 유역인 남한강 유역의 물 공급 시스템 모식도를 나타내며, Table 1은 각 수요처의 모

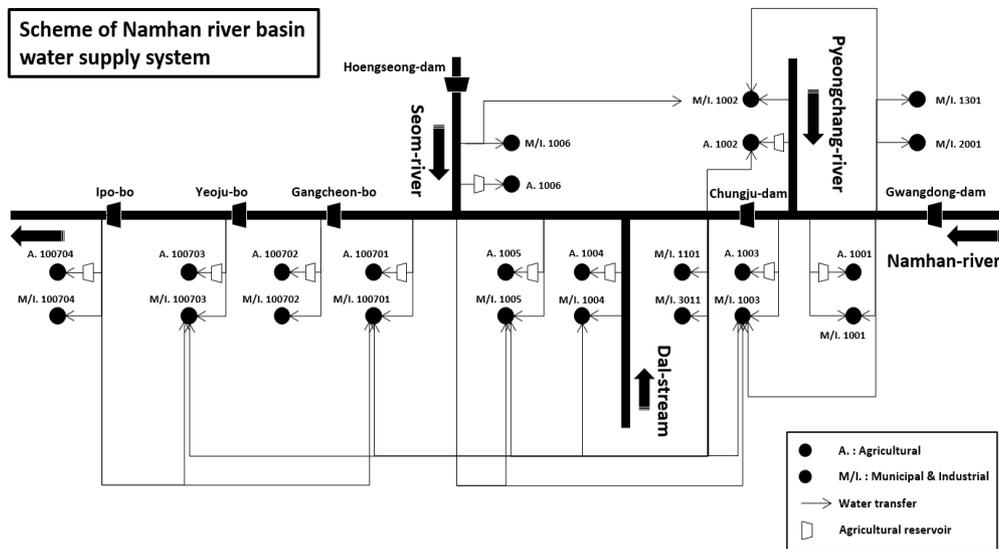


Fig. 4. Schematic diagram of Namhan river basin water supply network

Table 1. Water demand of individual sectors in Namhan river basin

Demand sites	Water demand (10,000 m ³)				
	June 1~5	June 6~10	June 11~15	June 16~20	June 21~25
A. 1001	84.1	90.8	86	73.4	55.7
A. 1002	176.2	185.5	152.3	123.2	98.9
A. 1003	275.9	282	226.2	183.8	154.8
A. 1004	633.7	641.6	639.5	527.4	416.3
A. 1005	286.8	284.1	225.6	177.7	153.8
A. 1006	468.2	494.1	365.6	279.8	248.2
A. 100701	192.6	195.8	151.4	114.7	110.4
A. 100702	81.1	82.8	66.2	51.9	49.8
A. 100703	1288.1	1302.7	959.9	689.9	665.1
A. 100704	112.9	115	91.2	71	68.3
M/I. 1001	61.8	61.8	61.8	61.8	61.8
M/I. 1002	19.1	19.1	19.1	19.1	19.1
M/I. 1003	83.5	83.5	83.5	83.5	83.5
M/I. 1004	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3
M/I. 1005	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3
M/I. 1006	121.9	121.9	121.9	121.9	121.9
M/I. 100701	56.4	56.4	56.4	56.4	56.4
M/I. 100702	39.2	39.2	39.2	39.2	39.2
M/I. 100703	137.6	137.6	137.6	137.6	137.6
M/I. 100704	57.5	57.5	57.5	57.5	57.5
M/I. 1101	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
M/I. 1303	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
M/I. 2001	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6
M/I. 3011	63.4	63.4	63.4	63.4	63.4

Note) A : Agricultural sector, M/I : Municipal/Industrial sector

의기간 별 수요량을 정리하였다. 적용 대상 유역은 10개의 농업용수 수요처 및 14개의 생·공용수 수요처 등 총 24개의 수요처에서 물을 이용하고 있으며, 공급원의 경우 남한강을 본류로 평창강, 달천, 섬강 등 3개의 지류가 합류하는 구조로 이루어져 있다. 물 공급 계통의 경우, 본류인 남한강에서 평창강 합류에 앞서 광동댐을 통해 유량을 조절하고, 평창강 합류 이후 충주댐을 통해 다시 한번 본류의 유량을 조절한다. 다음으로 남한강에는 달천이 합류한 이후 섬강이 합류하며, 섬강 상류에는 황성댐이 위치하여 섬강의 유량을 조절한다. 섬강 합류 이후, 남한강 하류에는 강천보, 여주보, 이포보 등 3개의 보가 설치되어 운영 중에 있다. 각각의 농업용수 수요처는 본류와 지류에 걸쳐 별도의 농업용 저수지를 통해 용수를 공급받으며, 따라서 적용유역에는 총 6개의 주요 저수시설(댐 및 보 각각 3개소) 및 10개의 농업용 저수지를 통해 용수를 미리 확보할 수 있도록 대비하고 있음을 알 수 있다.

4.2 수자원의 용도별 경제적 가치평가 결과

본 연구에서는 수자원장기종합계획(MLTM, 2011)에서 보고된 생활용수 사용량, 가구형태 등의 용수 이용현황을 K-water (2008)의 연구에서 도출한 생활용수 공급편익함수(Eq. (6))에 대입함으로써 생활용수의 원단위 가치(1 m³당 1,283원)를 산정하였다. 반면, 공업용수 및 농업용수의 경우 한계생산가치 추정식에 대입하기 위한 제조원가, 자산, 경영비 등의 통계자료를 확보할 수 없어, K-water (2008) 및 Lim and Lee (2001) 등 기존 연구에서 산정한 공업용수 5,583원/m³, 생활용수 384원/m³의 원단위 가치를 동일하게 적용하였

다. 또한, 용수공급 부족에 따른 사회적 피해가 크게 발생할 것으로 예상되는 생활용수의 경우 단위용수 공급부족에 따른 잠재적 피해액을 고려하였으며, 국토교통부(MOLIT, 2018)의 조사에 따르면 음용수의 대체 비용은 단위용수(m³)당 약 455,000원으로 산정된 바 있다. 단, 생활용수와 공업용수의 경우, 동일한 용수공급 과정을 거쳐 공급되는 관계로, 모형 내 생·공용수 수요처는 함께 고려되며, 이에 따른 물 배분 및 경제적 가치는 Table 2에 나타난 것과 같이 각 수요처의 생·공용수 사용 비중을 고려한 단위용수당 잠재적 가치 및 피해액을 산정하여 적용하였다. 참고로, 농업용수의 경우 단일수요처에 단위용수당 384원의 가치로 평가되며 용수부족으로 인한 피해액은 고려하지 않았다.

4.3 WAMM 사용자 화면 구성

본 연구에서 개발된 WAMM 모형의 사용자 편의를 위해 GUI (Graphic User Interface) 구조를 갖춘 플랫폼을 구성하였다. 사용자는 물 공급 시스템의 자료 입력을 위해 WAMM 전용 입력모듈 파일(엑셀 시트 형태)을 이용할 수 있다. Fig. 5의 (a)와 (b)는 이러한 입출력 모듈의 사용자 화면을 나타낸다. WAMM에서는 프로젝트(Project) 단위로 물 배분 모의를 관리하며 해당 프로젝트에는 물 수급 계획수립을 위한 각종 구성요소의 제원 및 운영정보, 모의결과를 모두 포함한다. Fig. 5(c)는 일례로 댐 운영모의를 위한 관련 변수를 확인할 수 있으며, 여기서 사용자는 각각 저수위, 관리수위, 조절수위, 사수위에 해당하는 댐 저수용량 정보를 변경함으로써 다양한 댐 운영 시나리오를 모의할 수 있다. 또한, 최적 물 배분을

Table 2. Economic valuation of municipal/industrial water sectors

Demand sites	Municipal user ratio (%)	Industrial user ratio (%)	Unit economic value (Won/m ³)	Unit penalty value (Won/m ³)
M/I. 1001	38	62	3,949	172,900
M/I. 1002	92	8	1,627	418,600
M/I. 1003	69	31	2,616	313,950
M/I. 1004	80	20	2,143	364,000
M/I. 1005	63	37	2,874	286,650
M/I. 1006	92	8	1,627	418,600
M/I. 100701	61	39	2,960	277,550
M/I. 100702	61	39	2,960	277,550
M/I. 100703	61	39	2,960	277,550
M/I. 100704	61	39	2,960	277,550
M/I. 1101	100	0	1,283	455,000
M/I. 1303	100	0	1,283	455,000
M/I. 2001	100	0	1,283	455,000
M/I. 3011	100	0	1,283	455,000

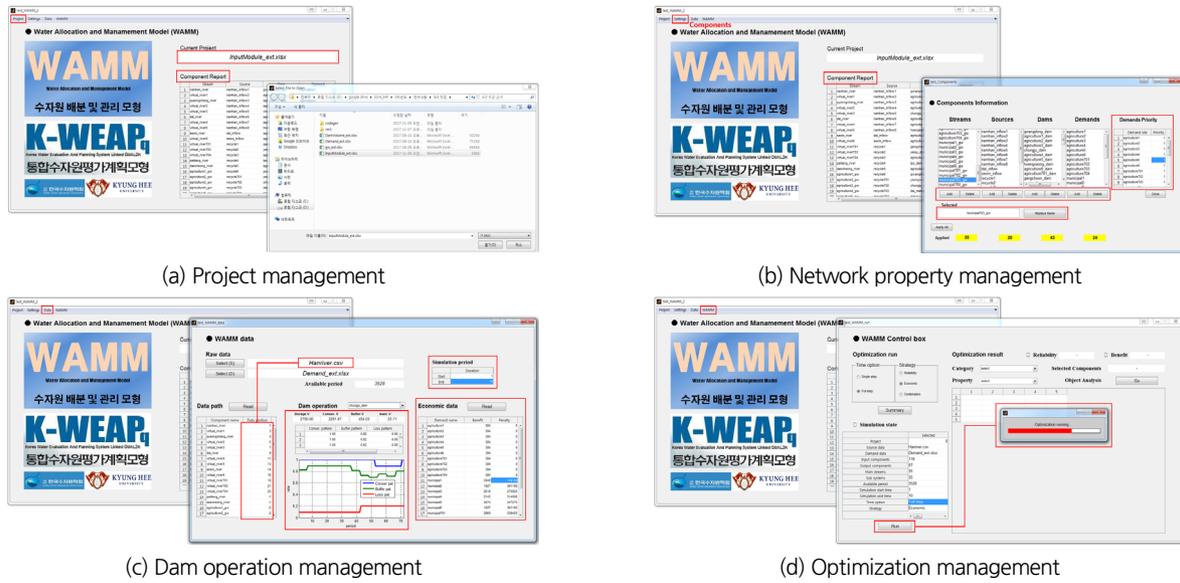


Fig. 5. Graphical user interface of WAMM

Table 3. Water allocation results comparison between SSLP and FSLP

Demand sites	Unsupplied demand volume (10,000 m ³)									
	June 1~5		June 6~10		June 11~15		June 16~20		June 21~25	
	SSLP	FSLP	SSLP	FSLP	SSLP	FSLP	SSLP	FSLP	SSLP	FSLP
A. 1002	0	0	26.0	0	0	0	0	0	0	0
A. 1004	0	0	0	0	0	0	59.1	0	0	0
Sum	0	0	26.0	0	0	0	59.1	0	0	0
M/I. 1002	0	0	2.1	0	0	0	0	0	0	0
M/I. 1004	0	0	0	0	0	0	4.0	0	0	0
Sum	0	0	2.1	0	0	0	4.0	0	0	0
Total	0	0	28.1	0	0	0	63.1	0	0	0

위한 목적함수(공급안정성 혹은 경제성)를 사용자의 목적에 맞게 선택할 수 있으며, Fig. 5(d)는 이와 같은 최적화 모의 설정 과정을 나타내고 있다. 사용자는 SSLP와 FSLP 등 2가지 최적화 모의방법, 공급안정성 및 경제성 등 2가지 목적함수를 조합하여 총 네 가지 조합의 최적 물 배분 모의를 수행할 수 있다.

4.4 최적화 알고리즘 개선효과 분석(SSLP vs. FSLP)

개발 모형의 최적화 알고리즘 개선효과 분석을 위해, 기존 물 배분 모형에서 주로 적용하였던 SSLP 모의와 본 연구에서 새롭게 제안한 FSLP 모의를 수행하고 각각의 최적화 결과를 비교, 분석하였다. 모의기간은 1981년 6월 1일부터 25일까지 총 25일에 걸쳐 수행하였으며, 최적 물 배분을 위한 목적함수는 경제성을 배제한 수요처의 용수공급 안정성으로 동일하게

설정하였다.

Table 3은 SSLP와 FSLP의 물 배분 결과 각 수요처에서 발생한 물 부족량을 기간별로 정리한 표이다. SSLP의 경우, 농업용수 수요처인 A. 1002에서는 6월 6일부터 10일까지의 기간 동안 약 26만 m³의 용수 부족량이 발생하였으며, 동일한 소유역 내에 위치한 생·공용수 수요처 M/I. 1002 또한 같은 기간 내 2.1만 m³의 용수 부족이 발생하였다. 한편, 소유역 1004 내에 위치한 농업용수 수요처 A. 1004에서는 6월 16일부터 20일까지의 기간 동안 59.1만 m³의 용수 부족이 발생하였으며, 생·공용수 수요처 M/I. 1004 또한 동일 기간 내 4.0만 m³의 용수 부족이 발생하여, 기간별 수요처 간 상이한 용수부족 양상을 보였다. 반면, 개발 모형의 FSLP를 적용한 물 배분 결과 적용 유역 내 모든 수요처에서 물 부족이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 즉, 1002 소유역과 1004 소유역에 위치한 수

요처의 용수 수요량이 모두 충족되었으며, 이는 FSLP 방법이 물 배분 시 전체 모의기간을 고려함으로써 물 부족이 발생하는 수요처 인근 상류에 위치한 저수시설을 보다 탄력적으로 활용하기 때문인 것으로 분석되었다. 이때, 저수지에서 사전에 물을 확보하고자 하는 양상은 물 부족 발생 전후 저수량의 증감을 통해 파악할 수 있다(Table 4).

Table 4는 SSLP 및 FSLP 방법의 물 배분 모의결과로부터, 모의기간 동안 네트워크 내 저수시설 중 소유역 1002 및 1004의 용수공급에 영향을 미치는 주요 저수시설의 저수용량을 비교한 표이다. Table 4에 정리된 저수시설 중, 보다 상류에 위치한 소유역 1002의 농업용 저수지(A. 1002 Res.)에서는 1차 물 부족 발생기간(6월 6일~10일)에 앞서 SSLP 대비 FSLP 방식에서 약 130만 m³의 용수를 추가로 저수하고 있으며, 소유역 1004의 농업용 저수지(A. 1004 Res.)에서는 2차 물 부족 기간(6월 16일~20일)에 앞서 약 460만 m³의 용수를 추가로 저수하는 등 충분한 저수량을 확보하고 있음을 알 수 있다. 즉, FSLP에서는 전체기간 모의를 한 번에 수행함으로써 추후 발생할 수 있는 용수부족을 미연에 방지하기 위한 용수공급 계획을 수립하는 것으로 분석되었다. 흥미로운 결과는, 상류에 위치한 농업용 저수지의 저류량은 FSLP의 결과가 SSLP에 비해 모두 증가한 반면, 남한강 하류에 위치한 강천

보, 여주보, 그리고 이포보의 저류량은 모든 기간에서(용수부족이 해소된 6월 21일~25일 기간은 제외) FSLP의 결과가 SSLP에 비해 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 하류 지역의 용수공급에 영향을 미치지 않는 범위에서 용수부족이 발생하는 상류지역에 우선적으로 용수를 공급을 하기 때문인 것으로 분석되며, 시공간적으로 용수공급 안정성을 극대화하기 위한 용수배분 계획을 수립하는 것으로 나타났다. 비교 분석을 통해, 단위 모의기간만을 고려하는 SSLP 방법 대비, 전체기간을 고려하는 FSLP 방법의 물 배분이 장기 물 배분 시 보다 효과적인 물 배분 방안을 제시할 수 있음을 알 수 있다. 즉, FSLP 기반 물 배분에서는 전체 모의기간에 대한 물 부족 발생을 최소화하기 위해, 다양한 저수시설을 활용한 탄력적인 물 배분을 수행하였으며, 따라서 SSLP에 비해 용수공급의 안정성을 개선시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4.5 목적함수에 따른 물 배분 효과 분석(공급안정성 vs. 경제성)

일반적인 물 배분 모형에서는 주로 수요처의 용수공급 안정성을 극대화하기 위한 목적으로 용수공급이 이루어졌으나, 본 연구에서는 국내 용수의 경제적 가치 산정 결과를 토대로 경제성을 고려한 물 배분을 수행하였다. 공급안정성 및 경

Table 4. Storage volume comparison between SSLP and FSLP

Storage Facility	Available storage volume (1,000,000 m ³)									
	June 1~5		June 6~10		June 11~15		June 16~20		June 21~25	
	SSLP	FSLP	SSLP	FSLP	SSLP	FSLP	SSLP	FSLP	SSLP	FSLP
A. 1002 Res.	0	1.3	0	0.8	0	0.7	0	0.5	2.9	3.0
A. 1004 Res.	17.9	19.4	10.8	13.9	3.7	8.3	0	4.0	3.3	7.3
Gangcheon-bo	8.6	7.7	8.5	7.0	8.5	6.7	8.4	6.4	8.7	8.7
Yeosu-bo	11.2	10.8	11.1	10.4	11.1	10.3	11.0	10.0	11.3	11.3
Ipo-bo	14.1	13.0	14.0	12.6	13.8	12.4	13.7	12.6	14.3	14.3

Table 5. Water allocation results comparison between max. Reliability and max. Economic benefit optimization (with SSLP simulation)

Demand sites	Unsupplied demand volume (10,000 m ³)									
	June 1~5		June 6~10		June 11~15		June 16~20		June 21~25	
	max. R	max. E	max. R	max. E	max. R	max. E	max. R	max. E	max. R	max. E
A. 1002	0	0	26.0	28.1	0	0	0	0	0	0
A. 1004	0	0	0	0	0	0	59.1	63.1	0	0
Sum	0	0	26.0	28.1	0	0	59.1	63.1	0	0
M/I. 1002	0	0	2.1	0	0	0	0	0	0	0
M/I. 1004	0	0	0	0	0	0	4.0	0	0	0
Sum	0	0	2.1	0	0	0	4.0	0	0	0
Total	0	0	28.1	28.1	0	0	63.1	63.1	0	0

제성 기반의 물 배분 결과를 비교, 분석하기 위해서는 경제적 편익이 상이한 다수의 수요처에서 물 부족이 발생하는 경우를 선정해야 한다. 따라서 앞서 소개한 물 부족 기간인 1981년 6월 1일부터 25일까지의 모의기간을 동일하게 적용하였다. 이때, FSLP 방식의 물 배분을 수행하는 경우 해당 기간의 물 부족이 모두 해소되는 것으로 나타나기 때문에, 용수부족이 발생하는 SSLP 방식의 물 배분을 수행하였다. Table 5는 두 가지 목적함수를 각각 적용한 SSLP 물 배분 결과 각 수요처에서 발생한 물 부족량을 기간별로 정리한 표이다. 두 가지 결과 모두 총 용수부족량은 동일한 것을 알 수 있다. 그러나, 경제적 편익을 목적함수로 설정한 모의에서는 생·공용수 부족량을 해소하는 대신 해당 부족량만큼 농업용수의 부족량을 가중시키는 물 배분 결과를 제시하는 것으로 나타났다. 즉, 보다 높은 경제적 편익을 확보하기 위해 농업용수 공급을 우선적으로 포기하는 양상을 보였다. 시스템 전체 용수공급량이 동일한 상태에서 이러한 물 배분은 공급안정성을 목적함수로 설정한 물 배분에 비해 약 9,600만원의 추가적인 경제적 편익이 발생하는 것으로 분석되었다. 이러한 물 배분이 자칫 상대적으로 경제성이 낮은 농업용수의 공급을 위축하는 결과를 유도할 수 있으나, 각 수요처별 최소공급량을 제약조건으로 설정한다면, 공급안정성과 경제적 편익을 동시에 고려한 물 배분 모의가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 국내유역의 적용에 적합한 수자원-경제 통합 물 배분 모형인 WAMM (Water Allocation and Management Model)을 개발하고 적용하였다. 개발 모형은 기존 물 배분 모형에서 주로 활용하였던 SSLP (Single Step Linear Programming) 방식의 단일기간 최적화 기법을 개선하여 전체 모의기간을 한번에 고려하는 FSLP (Full Step Linear Programming) 방식을 제안하였다. 이를 통해 유역 내 시공간적으로 발생 가능한 물 부족을 사전에 탄력적으로 대비할 수 있는 용수계획 및 물 배분이 가능하도록 하였다. 또한, 개발 모형은 수요처의 공급 안정성을 최대화하기 위한 물 배분뿐만 아니라, 용수공급의 경제적 편익을 극대화할 수 있는 경제성 기반 최적 물 배분 기능을 추가하였다. 이 때 수자원의 용도별 경제적 편익은 국내에서 수행된 연구결과를 토대로 산정하여 모형에 적용하였다.

국내 남한강 유역을 대상으로 개발 모형을 적용하고, 제안된 2가지 추가기능의 개선점을 정량적으로 분석하였다. 첫째, FSLP 방식의 최적 물 배분은 기존의 SSLP 방법 대비 시공간

적으로 용수공급 안정성을 극대화하는 효과적인 물 배분 방안을 제시할 수 있음을 확인하였다. 둘째, 경제적 편익을 고려한 물 배분에서는 공급안정성 기반의 물 배분에 비해 생·공용수 부족을 선제적으로 해소하려는 경향이 높았으며, 따라서 상대적으로 경제성이 낮은 농업용수의 공급 부족을 가중하는 양상을 보였다. 따라서, 보다 합리적인 용수공급을 위해서는 각 수요처별 최소공급량을 제약조건으로 설정함으로써 공급안정성과 경제적 편익을 동시에 고려한 모의가 가능할 것으로 판단된다. 마지막으로, 합리적 물 배분 계획 수립을 위해 개발된 WAMM 모형은 사용자 편의성 확보를 위해 GUI 기반 플랫폼으로 개발되었다. 해당 모형은 데이터 입력 및 물 배분 결과와 공급 구조에 대한 이해가 쉽도록 개발되었으므로, 향후 물 분쟁 및 갈등 해소를 위한 의사결정도구로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 1) 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물 관리사업(과제번호 83079)과 2) 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(NRF-2016R1A2B4014273)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Andreu, J., Capilla, J., and Sanchis, E. (1991). "AQUATOOL: A computer-assisted support system for water resources research management including conjunctive use." *In Decision Support Systems*, Vol. G26, pp. 333-355.
- Choi, S., Lee, D., Moon, J., and Kang, S. (2010). "Application of integrated water resources evaluation and planning system (K-WEAP)." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 7, pp. 625-633.
- Diaz, G. E., Brown, T. C., and Sveinsson, O. (1997). *AQUARIUS: A modeling system for river basin water allocation*. General Technical Report RM-GTR-299. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, CO.
- Howitt, R. E., Lund, J. R., Kirby, K. W., Jenkins, M. W., Draper, A. J., Grimes, P. M., Ward, K. B., Davis, M. D., Newlin, B. D., Van Lienden, B. J., Cordua, J. L., and Msangi, S. M. (1999). *Integrated economic-engineering analysis of california's future water supply*. Project completion report, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis.

- Hwang, S., Um, M., and Kim, T. (1999). "The valuation of the reliability of municipal water supply using contingent valuation method in Korea." *Environmental and Resource Economics Review*, Vol. 8, No. 1, pp. 109-126.
- K-water (2008). *Improving measures of feasibility study for water resources projects*. Research Report, K-water.
- Lim, J., and Lee, M. (2001). "Marginal benefit-cost analysis of irrigation water in rice production." *Korean Journal of Agricultural Science*, Chungnam National University, Korea, Vol. 28, No. 2, pp. 132-146.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2018). *Nature for water*, Republic of Korea.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2006). *National water resources plan (2006-2020)*, Republic of Korea.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2011). *National water resources plan (2011-2020)*, Republic of Korea.
- MyWater (2019). K water, accessed 16 August 2019, <https://www.water.or.kr/wstatic/easy/easys030101.do?seq=1002&p_group_seq=53&menu_mode=1>.
- Newlin, B. D., Jenkins, M. W., Lund, J. R., and Howitt, R. E. (2002). "Southern california water markets: potential and limitations." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 128, No. 1, pp. 21-32.
- Park, S., Ryoo, K., Kim, J., and Kim, B. (2014). "The case study of economic value assessment of spring rainfall in the aspect of water resources." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 23, No. 2, pp. 193-205.
- Pulido-Velazquez, M., Jenkins, M. W., and Lund, J. R. (2004). "Economic values for conjunctive use and water banking in southern California." *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 3.
- Raskin, P., Hansen, E., Zhu, Z., and Stavisky, D. (1992). "Simulation of water supply and demand in the Aral Sea Basin." *Water International*, Vol. 17, No. 2, pp. 55-67.
- Shafer, J., and Labadie, J. (1978). *Synthesis and calibration of a river basin water management model*. Completion Report No. 89, Colorado Water Resources Research Institute, Colorado State University, Ft. Collins.
- Strzepek, K. M. (1981). *MITSIM-2 a simulation model for planning and operational analysis of river basin systems*. WP-81-124.
- Strzepek, K. M., and Lenton, R. L. (1978). *Analysis of multipurpose river basin systems: Guidelines for simulation modelling*. Technical Report No. 236 Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., and Huber-Lee, A. (2005). "WEAP21-A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics." *Water International*, Vol. 30, No. 4, pp. 487-500.
- Zagona, E. A., Fulp, T. J., Shane, R., Magee, T., and Goranflo, H. M. (2001). "Riverware: A generalized tool for complex reservoir system modeling." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 37, No. 4, pp. 913-929.