에너지 효율을 고려한 수자원시스템 평가

Evaluation of a Water Resources System based on Energy Efficiency

최시중* · 김중훈** · 강성규*** · 이동률****

Choi, Sijung*, Kim, JoongHoon**, Kang, Seongkyu***, and Lee, Dongryul****

Abstract

In this study, we used electricity consumption data by the water cycle process provided in Korea. Through the data, we indirectly investigated the relationship between water and energy. A water supply and demand network was constructed to estimate the energy consumption for the water cycle process in the Geum River basin. Future water supply and demand prospects were modelled by configuring 15 possible scenario paths. An optimal water distribution method considering energy efficiency was suggested as an alternative to reduce areas and the magnitude of water shortage. The results of this study confirm that the expected magnitude of water shortages in the future and the amount of electricity consumed in the water cycle process can be significantly reduced. The relationship between water and energy and optimal water distribution methods considering energy efficiency proposed in this study are expected to be able to provide useful related information for future water resources planning.

Key words : Water and Energy Relation, Scenario Path, Energy Efficiency, Optimal Water Distribution

요 지

본 연구에서는 국내에서 제공되고 있는 물 순환 과정별 전력 소비량 자료를 활용하여 물과 에너지 관계를 간접적으로 규명하였다. 금강유역을 대상으로 물 순환 과정에 대한 에너지 소비량을 산정하기 위해 물 수급 네트워크를 구축하고 미래에 발생 가능한 상황을 15개의 시나리오 경로로 구성하여 물 수급 전망을 수행하였다. 물 부족 예상지역 및 부족량을 줄이기 위한 대안으로 에너지 효율을 고려한 최적 물 배분 방식을 제안하였으며 이를 통해 미래의 예상되는 물 부족량과 함께 물 순환 과정에서 소비되는 전력량을 현저히 줄일 수 있다는 것을 확인하였다. 본 연구에서 제안된 물과 에너지 관계식과 에너지 효율을 고려한 최적 물 배분 방법은 향후 수자원계획 수립 시 다양한 관련 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 물과 에너지 관계, 시나리오 경로, 에너지 효율, 최적 물 배분

1. 서 론

최근 들어 물-에너지-식량 연계(Water-Energy-Food Nexus, WEF Nexus)에 대한 중요성이 높아지고 있다. 이는 자원

간의 효율성을 높이고자 하는 것으로 국내외의 많은 기관과 연구자들에 의해 연구되고 있다. 국내에서 각 자원에 대한 관리 및 운영은 비교적 잘 이루어지고 있으나 이들에 대한 연계 관리 및 기술 관리는 부족한 실정이다.

*정회원, 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원(E-mail: sjchoi@kict.re.kr)

Member, Senior researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil engineering and building Technology

**교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수(Tel: +82-2-3290-3316, Fax: +82-2-3290-4722, E-mail: jaykim@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

***정회원, 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원(E-mail: skkang@kict.re.kr)

Member, Senior researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil engineering and building Technology

****정회원, 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구원(E-mail: dryi@kict.re.kr)

Member, Senior Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil engineering and building Technology

인간은 물을 사용하는데 있어 많은 양의 에너지를 사용하고 있으며, 수력발전 등을 통해 에너지를 생산하기도 한다. 이와 같이 물과 에너지는 서로 밀접한 관계가 있으나 아직까지 물의 순환 과정에서 어느 정도의 에너지가 소비되는지에 대한 관련 정보나 자료가 부족하며, 물과 에너지 관계를 규명하는 분석 방법도 명확히 제시되어 있지 않은 상황이다.

최근 들어 정부는 기후변화 대응을 위해 온실가스 배출 저감을 위한 다양한 정책을 진행 중에 있으나 물 분야에 있어서는 전술한 바와 같은 이유로 효율적인 대안이 제시되지 못하는 실정이다. 따라서 물 순환 과정의 에너지 소비량을 파악하고 보다 효율적인 에너지 소비를 위한 물 관리가 이루어질 수 있다면 향후 온실가스 배출을 저감할 수 있을 뿐만 아니라 기후변화에 대응할 수 있을 것으로 기대된다.

Arora et al. (2013)는 지역별 물 공급을 위해 전 지구에서 소비되는 에너지의 7%가 사용되고 있다고 추정한 바 있으며, Sanders and Webber (2013)는 불을 밝히는데 소비되는 에너지보다 물을 이용하고 공급하는데 소비되는 에너지가 25% 더 많다고 제시하였다. 이와 같이 적지 않은 에너지가 사용되고 있음에도 불구하고 이를 인식하지 못할 뿐만 아니라 이에 대한 대책도 제시되지 못하고 있다.

국외에서는 물과 에너지 관계를 규명하기 위한 많은 연구가 활발히 진행되어 왔다. Plappally and Lienhard (2012)는 세계 각국에서 제공되는 문헌을 통해 물 순환 과정에 대해 도시와 농업 부문에서 소비되는 에너지 강도를 분석하였으며 관련된 다양한 식을 제시하였다. Griffiths-Sattenspiel and Wilson (2009)은 물 순환 과정에 대한 에너지 소비를 조사하여 각 과정별(취수, 운반, 정수, 배분, 처리, 방류 등) 소비되는 에너지 강도를 제시하였으며 과정별 특성 및 환경에 따라 폭넓은 변화가 있다고 하였다. Shimizu et al. (2012)은 물과 에너지 관계를 규명하기 위해 일본의 정수시설에 대한 자료를 분석하여 정수된 양과 에너지 소비량은 비례관계가 있다고 주장하였다. 이 외에도 많은 연구자들이 물과 에너지 관계를 규명하여 타국과의 비교를 통해 자국의 물 순환

과정 중 에너지 소비율을 분석한 바 있다(Cheng et al., 2012; Thames Water, 2012; Toyosada et al., 2012).

Ahn et al. (2009)은 국내 상수도시스템(광역상수도 및 공업용수도 취수시설, 정수시설 및 가압시설)에 대한 에너지 소비량을 조사하여 분석하였으며, Cho et al. (2011)은 국내 하수처리장의 에너지 소비량을 조사·분석하여 하수처리장에 대한 에너지 효율 개선에 대한 연구를 수행한 바 있다. 국내의 경우 몇몇 연구자들에 의해 물 순환 과정 중 일부 시설물에 대한 물과 에너지 관계를 규명하였을 뿐 물 순환 과정 전체에 대한 연구는 수행되지 못하고 있으며 더 나아가 에너지 효율을 고려한 수자원시스템에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 물 순환 과정에 대한 물과 에너지 관계를 관련 자료 조사를 통해 규명하고 미래 다양한 상황을 시나리오 경로로 구성하여 물 수급 전망을 수행한 후 물 부족 해소 및 에너지 절감을 위한 물 배분 시스템을 제안함으로써 향후 에너지 효율적인 수자원시스템을 평가하고자 하였다.

2. 물 순환 과정별 에너지 소비

물 순환 과정별 에너지 소비를 분석하는데 있어 Griffiths-Sattenspiel and Wilson (2009)이 제안한 바와 같이 과정별 특성 및 환경에 따라 에너지 소비 강도는 큰 변화가 있으며 다양한 인자에 의해 에너지 소비 형태가 다를 수 있다. 따라서 본 연구에서는 물-에너지 관계에 영향을 미치는 모든 인자를 고려하기에는 무리가 있다고 판단하여 국내에서 제공하고 있는 물-에너지 관련 자료를 조사하여 물 순환 과정별 에너지 소비량을 추정하였다.

국내의 경우 환경부, 농림수산식품부, 한국수자원공사 등에서 물 순환 과정별 시설물별 에너지 소비량 자료를 제공하고 있으며 이 자료를 활용하여 물 순환 과정의 주요 에너지인 전력 소비량을 통해 회귀분석을 수행함으로써 물과 에너지 관계를 간접적으로 산정하여 Table 1과 같이 제시하였다.

Table 1. Water and Energy Relations by Water Cycle Process

Water cycle	Water resources facilities	Water and energy relations	
Intake	Domestic and Industrial intake	$Y = 0.2448X_1$ ($R^2: 0.8477$)	Y: Electricity consumption (million kWh/y) X_1 : Water intake (million m ³ /y) X_2 : Water pumping (million m ³ /y) X_3 : Water purification (million m ³ /y) X_4 : Water treatment (million m ³ /y)
	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	$Y = 0.5356X_5$ ($R^2: 0.7196$)	

대부분 물 순환 과정에 대한 물-에너지 관계는 비교적 높은 결정계수를 보이고 있으며 물과 전력 소비는 비례관계가 있음을 알 수 있다(Fig. 1). 가장 높은 에너지 소비율을 나타내는 물 순환 과정은 지하수 취수과정으로 1 m³의 지하수를 취수하기 위해서는 평균적으로 0.795 kWh의 전력이 소비되는 것으로 분석되었다. 물 순환 과정별 에너지 소비는 지하수취수, 폐수처리시설, 양·배수장, 하수처리시설, 가압시설, 취수시설, 정수시설 순으로 분석되었으며 제시된 물-에너지 관계식을 통해 국내에서 물 순환 과정 중 소비되는 에너지를 간접적으로 분석할 수 있다.

Fig. 1. Water-energy Relation of Intake Station

3. 대상지역 선정 및 물 수급 네트워크 구축

본 연구의 대상유역으로는 금강유역을 선정하였으며, 이 유역은 다양한 수자원이시설물이 존재하고, 다양한 용도별 용수를 이용하고 있어 물 순환 과정에 대한 전반적인 분석이 용이한 지역이라 할 수 있다(Fig. 2).

Fig. 2. Study Area

국내에서 제공되고 있는 각종 통계자료를 활용하여 실제 물 순환 과정을 재현하도록 물 수급 네트워크를 구축하였다. 이때 생활 및 공업용수 수요량에 대해서는 행정구역별로, 농업용수의 경우 중권역별로 수요처를 구성하였다. 생활 및 공업용수는 주로 행정구역별로 용수추정이 이루어지고 있으며 수도시설이 행정구역 단위로 계획되기 때문이며, 농업용수는 수요와 공급이 대체로 유역 내에서 이루어지므로 이와 같은 공간단위를 설정하였다.

에너지 소비량을 계산하기 위해 물 순환 과정을 물 수급 네트워크에 반영하여 취수과정, 정수과정, 처리과정 등으로 구분하였으며 각 수요처별 회귀율을 통계자료를 활용하여 산정하였다. 또한 기존 물수지 분석 방법에서 지역공급원으로 고려되었던 농업용저수지와 지하수를 물 수급 네트워크에 반영하여 보다 현실적인 물수지 분석을 수행하고자 하였다. 에너지 소비량 관련 자료를 제공하는 물 순환 과정에 대해서는 자료를 활용하였으며 자료가 없는 공급계통에 대해서는 Table 1에서 산정한 평균 전력 소비량 자료를 이용하였다. Fig. 3은 물 수급 전망을 위해 구축된 네트워크를 나타낸 것이며, 분석을 위해 MLTM (2011)의 수자원장기종합계획에서 이용하였던 K-WEAP 모델을 활용하였다.

4. 미래 시나리오 구성 및 경로별 분석

4.1 미래 시나리오 구성

수자원 평가 및 계획은 미래에 발생할 수 있는 위험을 사전에 감지하고 이를 대처할 수 있는 방안을 제시하는 것이다. 이를 위해서는 의사결정자에게 합리적인 전략을 수립할 수 있도록 미래에 발생가능하고 다양한 상황에 대한 분석 정보를 제공할 필요가 있다. 본 연구에서는 미래에 물 수요 및 공급에 대해 발생 가능한 상황을 15가지 시나리오를 구성하여 분석을 수행하였다. 미래 물 공급과 관련해서는 기상청에서 생산 및 제공하고 있는 RCP 2.6/4.5/6.0/8.5 시나리오와 함께 과거 기상상황이 미래에도 그대로 재현된다는 가정 하에 총 5가지 시나리오를 구성하였으며, 물 수요에 대해서는 MLTM (2011)에서 제시하고 있는 장래 목표연도별 고수요/기준수요/저수요 시나리오 자료를 활용하였고 2025년 이후 미래에는 수요가 변하지 않는다고 가정하였다. 본 연구에서 구축한 시나리오별 경로에 대한 기준은 Table 2와 같다.

각 시나리오는 독립적이고 발생확률이 동일하다고 가정하였다. 분석 전체 기간은 2016년부터 2060년으로 설정하였으며 이를 계획기간 1(2016~2030), 계획기간 2(2031~2045), 계획기간 3(2046~2060)으로 구분하여 분석을 수행하였다. 수자원 계획 수립을 통한 물 부족 해소 및 완화 대안을 반영하기 위해서는 단기간이 아닌 중장기적인 시간이 필요하기 때문에 15년을 계획기간을 설정하였다. 분석 방법으로는 현재 건설 및 운영 중인 수자원이시설물만을 반영하였으며

Fig. 3. Water Demand and Supply Network (Geum river basin)

Table 2. Selection Criteria of Scenario Paths

Scenario path	Scenario group
1	Past climate + High demand
2	RCP 2.6 + High demand
3	RCP 4.5 + High demand
4	RCP 6.0 + High demand
5	RCP 8.5 + High demand
6	Past climate + Medium demand
7	RCP 2.6 + Medium demand
8	RCP 4.5 + Medium demand
9	RCP 6.0 + Medium demand
10	RCP 8.5 + Medium demand
11	Past climate + Low demand
12	RCP 2.6 + Low demand
13	RCP 4.5 + Low demand
14	RCP 6.0 + Low demand
15	RCP 8.5 + Low demand

과거 기상상황 재현 및 미래 기후변화 시나리오를 활용하여 강우-유출 모형인 Tank 모형을 통해 자연유출량을 산정하였고 유역별 농업용저수지의 유입량을 별도로 반영하였다. 수자원시설물 중 다목적댐의 경우 현재 댐별로 설정되어 있는 월별 공급계획량을 미래에도 동일하다고 가정한 후 물 수급 전망을 수행하였으며 물 순환 과정별 에너지 소비율은 미래에도 동일하다고 가정하였다.

4.2 시나리오 경로별 물 수급 전망 및 에너지 소비량

구성된 15개의 미래 시나리오 경로별 물수지 분석을 수행

하였다. Yoo (2005)는 물 부족은 유역 물 공급의 안전도를 평가하는 방법 중 가장 대표적인 방법으로 이는 물수지 분석을 통해 가능하다고 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 미래 시나리오 경로별 물수지 분석을 통해 수요처별 용도별 물 부족량을 산정하여 제시하였으며 물 순환 과정을 통해 소비되는 에너지 소비량을 분석하였다.

계획기간별, 시나리오 경로별, 용도별 예상되는 물 부족량을 Table 3과 같이 분석하여 제시하였다. 생활 및 농업용수의 경우 계획기간 2에서 많은 지역의 물 부족이 예상되었으며 계획기간 1과 3에서는 보령시, 예산군, 태안군에서만 물 부족이 발생할 것으로 전망되었다. 생활 및 농업용수의 부족이 나타날 것으로 예상되는 지역은 모두 광역상수도 및 농업용수도를 통해 용수를 공급받는 지역으로 주요 수원인 용담댐, 보령댐, 부안댐이 기후변화 등으로 인해 저수량이 크게 감소할 것으로 예상됨에 따라 물 부족이 발생할 것으로 나타났다. 특히 유역면적이 작고 연간 용수공급계획량이 큰 보령댐의 경우 향후 기후변화에 의해 안정적인 용수공급이 어려울 것으로 예상됨에 따라 이를 주요 수원으로 하는 보령시와 태안군은 장래 큰 물 부족이 발생할 것으로 전망되었다. 반면에 농업용수의 경우 3101 중권역과 3303 중권역에서만 물 부족이 예상되었다.

물수지 분석을 통해 물 부족량뿐만 아니라 전력 소비량도 함께 분석할 수 있다. 물 수급 네트워크 구축 시 입력되었던 물 순환 과정별 에너지 소비율과 함께 물수지 분석 결과 중 용수공급계통을 통해 취수, 정수, 가압, 처리과정을 거친 양을 Eq. 1에 대입하여 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{전력 소비량} = & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (E_{ij} \times q_{ij}) + \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^O (E_{ik} \times q_{ik}) + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^P (E_{il} \times q_{il}) \end{aligned} \quad (1)$$

Table 3. Water Shortage Prospects by Scenarios (unit: million m³)

Water sector	Period	Demand site	Scenario path														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Domestic & Industrial	1	Boryeong-si	0.0	2.0	18.0	7.0	6.0	0.0	2.0	15.0	6.0	6.0	0.0	2.0	14.0	4.0	6.0
		Yesan-gun	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		Taeon-gun	0.0	3.0	15.0	8.0	6.0	0.0	2.0	12.0	7.0	6.0	0.0	2.0	12.0	6.0	6.0
	2	Gochang-gun	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		Gunsan-si	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		Gimje-si	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		Boryeong-si	0.0	7.0	38.0	16.0	20.0	0.0	6.0	34.0	15.0	18.0	0.0	6.0	31.0	13.0	17.0
		Buan-gun	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		Yesan-gun	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0
		Wanju-gun	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		Jeonju-si	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		Taeon-gun	0.0	4.0	45.0	11.0	11.0	0.0	4.0	40.0	10.0	11.0	0.0	4.0	37.0	10.0	10.0
		Hongseong-gun	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0
	3	Boryeong-si	0.0	25.0	1.0	20.0	23.0	0.0	21.0	1.0	17.0	19.0	0.0	20.0	1.0	16.0	18.0
		Yesan-gun	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
		Taeon-gun	0.0	14.0	1.0	13.0	12.0	0.0	13.0	1.0	13.0	12.0	0.0	12.0	1.0	11.0	12.0
Agricultural	1	3101	0.0	0.0	0.0	23.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	3101	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		3303	0.0	0.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3	3101	0.0	0.0	0.0	57.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.0	0.0

여기서, E_{ij} 는 i 번째 모의단위에서 j 번째 취수과정에 대한 에너지 소비율(kWh/m³)을 나타내며, q_{ij} 는 i 번째 모의단위의 j 번째 취수과정을 통해 취수된 양(m³), E_{ik} 는 i 번째 모의단위에서 k 번째 정수과정에 대한 에너지 소비율(kWh/m³), q_{ik} 는 i 번째 모의단위의 k 번째 정수과정을 통해 정수된 양(m³)을 의미한다. E_{il} 은 i 번째 모의단위에서 l 번째 처리과정에 대한 에너지 소비율(kWh/m³)을, q_{il} 은 i 번째 모의단위에서 l 번째 처리과정을 통해 처리된 양(m³)을 나타낸다.

산정된 시나리오 경로별 에너지 소비량은 Table 4에 제시하였다. 분석된 시나리오 경로별 연평균 전력 소비량은 물 부족이 예상되는 기간을 제외한 결과이다. 물 부족이 발생할 수 있는 연도의 경우 물 순환 과정(취수, 정수, 배분 및 처리)에서 물 부족량만큼 전력소비가 감소하기 때문이다. 전력 소비량은 특별한 경향을 나타내고 있지는 않지만 강수가 많은 기간의 경우 전력 소비율이 적은 하천을 통해 용수를 공급할 수 있기 때문에 연평균 전력 소비량이 적게 분석되었으며 비교적 강수가 적은 시나리오 경로의 경우 하천 취수 이외에 에너지 소비율이 큰 지하수로부터의 물 공급이 증가하기 때문에 전력소비량이 증가할 것으로 전망되었다.

Table 4. Electricity Consumption by Scenarios & Periods

Scenario path	Annual average electricity consumption (10 ⁸ kWh/y)		
	Period 1	Period 2	Period 3
1	43.91	45.31	45.54
2	44.17	45.53	45.71
3	43.32	45.83	45.70
4	43.67	45.81	45.42
5	43.67	45.81	45.42
6	41.81	42.81	43.05
7	42.12	43.01	43.17
8	41.51	43.27	43.15
9	41.68	43.26	42.89
10	42.01	42.93	43.23
11	39.86	40.58	40.83
12	40.26	40.77	40.90
13	39.66	41.03	40.90
14	40.07	41.02	40.65
15	40.11	40.71	40.96
Ave.	41.86	43.18	43.17

5. 에너지 효율을 고려한 최적 물 배분 시스템

5.1 에너지 효율 고려한 물 배분 시스템

본 연구에서는 에너지 효율을 고려하여 장래 물 부족을 완화 또는 해소 즉, 최소화할 수 있는 물 배분 시스템을 제안하였다. 분석에 활용한 K-WEAP 모형은 선형계획법을 통해 수요처의 수요량(D_i)을 취수량 혹은 공급량(W_i)으로 나눈 수요충족률(Cov_i)을 최대화하도록 물을 배분하며 이때 제약조건으로는 하천지점, 하도구간에 대한 연속방정식으로 구성된다. 여기에 에너지 효율과 관련된 제약조건을 추가함으로써 미래 예상 물 부족을 줄이고 물 순환 과정에서 소비되는 에너지량을 감소시킬 수 있는 물 배분 시스템을 고려할 수 있다. 수자원시스템의 목적함수 및 제약조건은 다음과 같다.

목적함수: $Max(Cov_F)$

제약조건

$$Q_{Ni(in)} - Q_{Ni(out)} + Q_{Ni(re)} - W_i = 0$$

$$Q_{Lj(in)} - Q_{Lj(out)} - Q_{Lj(loss)} = 0$$

$$S_{tk(begin)} - S_{tk(end)} + Q_{Sk(in)} - Q_{Sk(out)} = 0$$

$$W_i = \begin{cases} q_{i,1} & \text{if } W_i - q_{i,1} = 0 \\ \sum_{l=1}^N q_{i,l} & \text{if } W_i - \sum_{j=1}^{N-1} q_{i,l} > 0 \end{cases}$$

$$\text{if } E_{i,l} < E_{i,l+1}, \quad l = 1, \dots, N-1$$

$$q_{i,l} \leq L_{i,l}$$

$$W_i \leq D_i$$

$$Cov_i = W_i / D_i$$

$$Cov_F \leq Cov_i$$

여기서, Cov_F 는 0에서부터 1 사이의 값을 가지는 최종 수요충족률을 나타낸다. $Q_{Ni(in)}$ 은 하천지점 i 로의 유입량(m^3)을, $Q_{Ni(out)}$ 은 하천지점 i 로부터의 유출량(m^3), $Q_{Ni(re)}$ 은 하천지점 i 로의 회귀수량(m^3)을 의미한다. $Q_{Lj(in)}$ 은 상류로부터 하도구간 j 로의 유입량(m^3), $Q_{Lj(out)}$ 은 하도구간 j 에서 하류로의 유출량(m^3)을, $Q_{Lj(loss)}$ 은 하도구간 j 에서의 침투 등으로 인한 손실량(m^3)을 나타낸다. $S_{tk(begin)}$ 은 모의단위

시작시점에서의 저수지 k 의 저수량(m^3), $S_{tk(end)}$ 은 모의단위 말기에 대한 저수지 k 의 저수량(m^3)을, $Q_{Sk(in)}$ 은 저수지 k 로의 유입량(m^3), $Q_{Sk(out)}$ 은 저수지 k 로부터 하류로의 방류량(m^3)을 의미한다. $E_{i,l}$ 은 수요처 i 에 대한 l 번째 공급시설의 전력 소비율(kWh/m^3)을, $q_{i,j}$ 는 각 모의단위에 대한 l 번째 공급시설에 의해 수요처 i 로 공급된 양(m^3)을 나타내며, $L_{i,l}$ 은 수요처 i 로의 l 번째 공급시설에 대한 시설용량(m^3)을 의미한다.

제시된 목적함수와 제약조건을 통해 수요처로의 물 공급을 늘려 수요충족률을 극대화함으로써 물 부족을 최소화할 수 있도록 물 배분을 모의하게 된다. 제약조건으로 제시된 전력 소비율은 수요처로 공급되는 여러 개의 수원이 있을 경우 전력 소비율이 낮은 공급계통을 통해 먼저 물을 공급받고 수요처의 수요충족률이 만족되지 않을 경우 두 번째로 낮은 전력 소비율을 나타내는 공급계통을 통해 물을 공급함으로써 물 배분을 통해 소비되는 전력량을 줄이고자 하였다.

5.2 최적 물 배분을 통한 물 수급 전망 및 에너지 소비량

에너지 효율을 고려한 최적 물 배분을 적용하여 미래 시나리오 경로별 물 수급 전망을 수행한 후 시나리오 경로별 물 부족 전망치를 Table 5에 제시하였다. 최적 물 배분을 고려하지 않았을 경우 즉 기존의 운영 방식인 계획공급량을 하류로 공급할 경우와 에너지 효율을 고려한 최적 물 배분을 반영할 경우의 장래 물 부족량은 큰 차이로 나타났다. 또한 물 부족 예상지역도 현저히 줄어들 것으로 전망되었다. 생활 및 공업용수도의 경우 보령시, 고창군, 군산시, 부안군, 완주군, 전주시, 홍성군 등 여러 시군에서 물 부족이 예상되었으나 최적 물 배분을 통해 이들 지역의 물 부족은 해소될 것으로 전망되었다. 농업용수의 경우도 3303 중권역의 물 부족을 최적 물 배분을 통해 해소할 수 있을 것으로 예상되었다. 태안군의 경우 기존 운영 방식을 반영할 경우 최대 45백만 m^3 의 물 부족이 전망되었으나 에너지 효율을 고려한 최적 물 배분을 반영할 경우 5백만 m^3 으로 감소함에 따라 별도의 공급시설물을 신설할 필요 없이 수유관리 등과 같은 비구조적 대책으로도 이를 해소할 수 있을 것으로 분석되었다.

Table 5. Water Shortage Prospects by Scenarios (optimal water distribution)(unit: million m^3)

Water sector	Period	Demand site	Scenario path														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Domestic & Industrial	1	Yesan-gun	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	Taeon-gun	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0
	3	Yesan-gun	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
Agricultural	1	3101	0.0	0.0	0.0	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	3101	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3	3101	0.0	0.0	0.0	46.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.0	0.0

Eq. 1을 통해 에너지 효율을 고려한 최적 물 배분을 적용하였을 경우의 에너지 소비량을 산정하였다. Table 6은 각 시나리오 경로별, 계획기간별 연평균 전력 소비량을 나타낸 것으로 이는 Table 4의 결과와 동일하게 물 부족이 발생한 기간을 제외한 것이다. 분석 결과 에너지 효율을 고려한 물 배분을 제약조건으로 추가하여 수요처가 전력 소비율이 낮은 공급계통을 통해 먼저 물을 공급받기 때문에 Table 4의 전력 소비량보다 적은 연평균 전력 소비량을 나타내고 있다.

Table 6. Electricity Consumption by Scenarios & Periods (optimal water distribution)

Scenario path	Annual average electricity consumption (10 ⁸ kWh/y)		
	Period 1	Period 2	Period 3
1	41.49	42.84	43.03
2	41.53	42.93	43.07
3	41.38	42.91	43.36
4	41.49	42.80	42.61
5	41.45	42.71	42.88
6	39.39	40.33	40.46
7	39.42	40.34	40.57
8	39.31	40.46	40.79
9	39.57	40.33	40.08
10	39.33	40.32	40.43
11	37.47	38.12	38.27
12	37.50	38.08	38.34
13	37.45	38.35	38.54
14	37.67	38.08	37.88
15	37.44	38.08	38.23
Ave.	39.46	40.45	40.57

최적 물 배분을 고려하지 않은 경우보다 에너지 효율을 고려한 최적 물 배분을 적용할 경우 계획기간별 시나리오 경로별 차이는 있을 수 있으나 평균적으로 2.40~2.73억 kWh/년을 절감할 수 있는 것으로 분석되었다. 이 전력 소비 절감량은 국내 연간 전력 소비량의 0.06%나 차지하는 양으로 매년 이만큼의 전력을 절감할 수 있다면 향후 국내 전력수급에 많은 영향을 미칠 것으로 기대되며 더 나아가 전력 소비를 통한 온실가스 배출 저감에도 큰 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

지금까지 국내에서 제공하고 있는 물 순환 과정별, 수자원 시설물별 전력 소비량 자료를 활용하여 물과 에너지 관계를

규명하여 제시하였다. 분석을 통해 국내에서는 물 순환 과정에서 지하수 취수에 가장 많은 에너지를 소비하는 것으로 나타났으며 양·배수장, 처리시설 등은 적지 않은 에너지를 소비하는 것으로 분석되었다.

회귀분석을 통해 제시된 물과 에너지 관계식은 관련 자료가 없는 물 순환 과정에 대한 에너지 소비량을 추정하는데 유용하게 이용될 수 있으며 분석 대상 유역에서 물 공급, 처리 등에 소비되는 에너지를 간접적으로 산정함으로써 향후 에너지 효율적인 물 관리에 관한 다양한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 향후 수자원계획 수립 시 다양한 대안 평가에 있어 중요한 기준으로 적용될 수 있을 것이다.

금강유역을 대상으로 미래에 발생 가능한 상황을 15개의 시나리오 경로로 구성하고 각 시나리오 경로별, 계획기간별 물 수급 전망을 수행하여 장래 물 부족 예상지역, 물 부족량 및 에너지 소비량을 전망하여 제시하였다. 이를 위해 우선적으로 기존의 수자원시설물 운영 방식인 계획공급량만을 댐으로부터 공급할 경우에 대해 분석하여 결과를 도출한 후 예상되는 물 부족을 완화 및 해소하기 위해 최적 물 배분 방법을 제시하였다. 이 때 에너지 효율과 관련된 제약조건을 추가로 고려함으로써 물 부족 감소 및 에너지 소비 절감을 목적으로 하는 최적 물 배분 시스템을 제안하였다. 제안된 방법에 의해 미래에 물 부족 지역 및 부족량을 대폭 줄일 수 있다는 것을 확인할 수 있었으며, 향후 제안된 방법을 적용한 수자원시스템을 운영한다면 연간 약 2.5억kWh의 전력을 절감할 수 있다는 결과를 얻었다. 이는 국내 연간 전력 소비량의 0.06%에 해당하는 값으로 결코 적지 않은 양이라 판단된다.

본 연구에서 수행한 에너지 효율을 고려한 최적 물 배분 시스템은 미래 수문기상 예측, 수문분석 정확도 향상, 용도별 수요량 예측, 통합 댐 운영 개발 등의 기술개발이 이루어져야 가능하다는 한계점을 가지고 있다. 또한 향후 몇몇 시나리오에 국한된 것이 아니라 현재의 기술로 예측할 수 있는 미래의 다양한 시나리오에 대한 분석을 수행함으로써 불확실성을 해결할 필요가 있다.

다양한 관련 자료가 조사되어 제공된다면 물과 에너지 관계를 보다 명확하게 규명할 수 있을 것으로 기대되며 본 연구를 통해 제시된 물-에너지 관계와 에너지 효율을 고려한 최적 물 배분 방법은 향후 예상되는 물 부족 완화 및 해소, 보다 효율적인 에너지 소비를 위한 물 관리에 대한 수자원계획 수립 시 적용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 18AWMP-B083066-05).

References

- Ahn, J. H., Lee, J. H., Kim, H. J., and Han, D. H. (2009). *The assessment of the vulnerabilities in water management systems and formulation of water 1*. Korea Environment Institute.
- Arora, M., Aye, L., Malano, H., and Ngo, T. (2013). 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.
- Cheng, C.L., Liao, W.J., Liu, Y.C., Tseng, Y.C., and Chen, H.J. (2012). Evaluation model of CO₂ emission for saving water strategies. *Proceedings of 38th International Symposium of CIB W062 on Water Supply and Drainage for Buildings*, Edinburgh, UK, 27-30 August 2012.
- Cho, E.S., Song, Y.I., Han, D.H., and Lee, C.Y. (2011). *A study on the improvement of energy management for wastewater utilities*. Research Report 2011-18, Korea Environment Institute.
- Griffiths-Sattenspiel, B., and Wilson, W. (2009). *The carbon footprint of water*. A River Network Report, River Network.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2011). *National water resources plan (2011~2020)*.
- Plappally, A.K., and Lienhard V, J.H. (2012). Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 4818-4848.
- Sanders, K.T., and Webber, M.E. (2013). *Quantifying the energy embedded in the US water system*. Global Water Forum, UNESCO, 8 January 2013.
- Shimizu, Y., Dejima S., and Toyosada, K. (2012). The CO₂ emission factor of water in Japan. *Water* 2012, Vol. 4, pp.759-769.
- Thames Water. (2012). *Corporate Responsibility Report 2009/10*. Thames Water.
- Toyosada, K., Shimizu, Y., Dejima, S., Yoshitaka, M., and Sakaue, K. (2012). Evaluation of the potential of CO₂ emission reduction achieved by using water-efficient housing equipment in Dalian, China. *Proceedings of 38th International Symposium of CIB W062 on Water Supply and Drainage for Buildings*, Edinburgh, UK, 27-30 August 2012.
- Yoo, J. H. (2005). Suggestion of the water budget analysis method by MODSIM for the assessment of the water supply reliability. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25 No. 1B, pp. 9-17.

Received	October 10, 2018
Revised	October 10, 2018
Accepted	October 16, 2018