

유출지하수를 활용한 발전용수 사업에 대한 경제적 타당성 분석

이선욱* · 이철용**†

*한국남부발전(주) 부산빛드림본부 화학팀 대리, **부산대학교 경영학과 부교수 / 부산대학교 미래지구환경연구소

Economic feasibility analysis of power generation water project using leaked groundwater

Lee, Seon-Uk* and Lee, Chul-Yong**†

*Associate Manager, Busan Combined Cycle Power Site Division Chemical Team, Korea Southern Power Co., Ltd., Busan, Korea

**Associate Professor, School of Business, Pusan National University, Busan, Korea / Institute for Future Earth, Pusan National University, Busan, Korea

ABSTRACT

This study aims to utilize discarded leakage groundwater as a resource for electricity generation in order to create social and economic value, contribute to carbon neutrality, and generate future benefits. The research analyzes the water quality characteristics of leakage groundwater from Cheonmasan Tunnel and designs facilities for its industrial use, alongside conducting economic feasibility studies and cost-benefit analyses. It estimates expected costs by calculating investment, operating costs, and treatment capacity while assessing the benefits of reducing associated tap water usage. The study evaluates the CO₂ damage costs associated with tap water treatment to assess the social benefits. Internal rate of return (IRR), net present value (NPV), and payback periods are calculated to analyze economic feasibility. Sensitivity analysis identifies key factors affecting the project's viability, while environmental effects, such as the reduction in tap water usage and carbon damage costs due to groundwater utilization, are quantitatively assessed. If 70,000 cubic meters of leakage groundwater are utilized for power generation over a 30-year period, the project yields a B/C ratio of 1.68, an NPV of 809.16 billion won, and an IRR of 13.60%. The cumulative cash flow turns positive from the ninth year onward, indicating revenue generation and economic feasibility. This study confirms the potential of leakage groundwater as a valuable resource for achieving carbon neutrality and suggests various methods for future utilization.

Key words : Power Generation, GHG Emission, Groundwater Discharge, Economic Feasibility Analysis, Sustainability

1. 서론

도시의 수평적 확장이 공간적 제약과 자원의 한계로 어려워지며 수직적으로 지하공간을 개발하며 확장하고 있다. 이와 같은 지하 지형의 변화로 다양한 문제를 초래하고 있으며, 지하공간 개발은 도심지역의 건축물 확장과 교통 혼잡 완화에 기여하고 있다. 특히, 지하로의 확장은

별도의 교통 기반 시설을 구축할 수 있게 한다. 그러나 지하 개발 사업의 증가로 지하 환경에 대한 영향도 커지며, 지하수의 유출이 발생하고 있다. 이처럼 인위적인 행위로 자연스럽게 흘러나오는 지하수를 유출지하수로 정의하고 있다. 유출지하수는 지하철, 터널, 대형 건축물 등과 같은 지속적인 건설 활동으로 발생하며, 이는 기후 변화가 가져오는 강수량 변화와 함께 지하수의 수량을 감소시키고

†Corresponding author : cylee7@pusan.ac.kr (2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Korea. Tel. +82-51-510-2568) ORCID 이선욱 0009-0006-9277-3781 이철용 0000-0003-0870-0039

버려지는 유출지하수의 증가로 이어지고 있다.

유출지하수는 지하수법에 따라 관리되고 있다(Ministry of Environment, 2023b). 유출지하수의 지속적인 발생은 지하철역, 터널, 건물의 침수 위험 증가와 지반 침하를 초래할 수 있으며, 오염물질과의 접촉으로 토양 및 지하수 오염의 원인이 된다. 유출지하수는 자연적인 정화작용을 통해 안정적인 수질을 유지할 수 있으나, 활용 방안이 부족하여 하수관로를 통해 배출되거나 제한적인 용도로만 사용되고 있다(Lee, 2009). 이에 따라, 2020년부터 환경부는 유출지하수 활용을 위한 정책적 노력을 기울이고 있으며, 다양한 활용 방안을 제시하고 있다(Ministry of Environment, 2022). 그러나 제시된 활용 방안은 공공용수와 생활용수에 한정되어 있으며, 산업용수로의 활용은 고려하지 않았다.

본 논문은 유출지하수를 발전용수로 활용하여 사회적·경제적 가치를 창출하고 탄소중립에 기여하는 방안을 모색한다. 연구 대상 지역은 A 발전회사의 B 본부로, LNG 복합화력 발전설비를 운영하며, 유출지하수가 190 m³/일 발생하고 있다. 유출지하수를 발전용수로 활용하는 방안을 제시하며, 경제적 타당성을 검증하여 다양한 산업 분야에서의 활용 가능성을 확인한다.

본 논문이 가지는 기여점은 다음과 같다: 첫째, 유출지하수 활용 방안이 기존 연구에서는 공공용수와 생활용수에 한정되었으나 본 연구에서는 발전용수로의 활용을 분석하였다. 둘째, 다양한 경제성 분석을 시행하고 현장 조사 데이터를 바탕으로 비용편익 분석을 수행하였다. 셋째, 유출지하수 활용에 따른 온실가스 저감과 같은 환경적 영향을 고려하여 경제성을 분석하였다.

본 연구를 통하여 유출지하수의 산업용수로 활용 방안을 발굴하고, 버려지는 수자원의 가치 확장을 위한 기초 연구를 마련하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 국내 법규와 정부 정책을 다루고 국내외 활용 사례를 정리하며 선행연구와의 차별성을 정의한다. 3장에서는 연구 방법을 설명한다. 4장에서는 경제성 분석과 민감도 분석을 통해 설비비와 처리량의 변수를 검토한다. 5장에서는 연구의 결론과 유출지하수 활용을 위한 정책적 제언 및 향후 연구 과제를 논의한다.

2. 선행연구 고찰

한국은 좁은 국토와 높은 인구밀도로 인해 물 부족 국

가로 분류되고 있다. 연간 강수량은 세계 평균보다 많지만, 1인당 수자원 강수량은 세계 평균의 12%에 불과한 실정이다(Ministry of Construction and Transportation, 2006). 지하수법 제2조 제1의 2호에서 지하 시설물이나 건축물의 공사 등과 같은 인위적인 행위로 인하여 자연스럽게 흘러나오는 지하수를 유출지하수로 정의하고 있다. 정부는 유출지하수를 활용하기 위한 관리체계를 구축하고 시범 사업을 통하여 탄소중립을 실천하고 건전한 도시 물순환에 기여하겠다고 발표하였다(Ministry of Environment, 2022). 정부는 2025년 GTX-A 개발로 발생한 유출지하수의 활용을 위해 40억 7,000만 원을 투입하여 시설 관리용수 및 하천용수, 클린로드 시스템 유출지하수 이용시설을 설치를 추진하고 있다.

국내 활용 사례로 서울과 대구에서 도로 미세먼지 저감을 위하여 유출지하수를 살수하는 클린로드 시스템을 구축하여 운영하고 있으며 지하철 역사에서 철로와 터널의 청소 및 역사와 화장실 청소용수로 활용하고 있다. 서울과 부산의 경우, 지하철 역사에서 철로와 터널의 청소 및 역사와 화장실 청소용수로 활용하고 지하철 역사의 냉난방 에너지원으로 활용하고 있다. 또한, 미세먼지 저감을 위한 도로 살수 차량 운영에 활용하고 있으며 생태공원과 친수공간의 분수와 폭포, 실개천과 같은 인공 친수공간을 조성하며 서울의 우이천과 청계천, 부산의 온천천의 유지용도로 활용하고 있다.

일본의 경우 도심의 수변공간으로 활용한 사례가 있으며 미국은 하수처리 하거나 하천유지용수로 활용하고 있으며, 프랑스의 경우 지하철에서 발생하는 유출지하수를 하수처리 하거나 차량 세척으로 활용하고 있다. 독일은 적극적으로 활용하고 있는데 음용수와 산업용수 그리고 지열에너지로 활용하고 있다.

유출지하수의 경제성과 관련된 선행연구는 다음과 같다. Kim et al. (2014)은 양도 초등학교의 강우량과 집수면적 등을 고려하여 내구연수 10년을 설정하여 빗물이용시설의 수질과 경제성을 평가하였으며 Kim et al. (2015)은 지하수를 이용한 지열 냉난방 시스템과 보일러의 작동 방식에 따라 비교하여 경제성과 이산화탄소 저감량을 분석하였다. Park and Lee (2007)는 히트펌프 시스템을 통해 유출지하수를 난방에 활용하는 효율성을 분석했다. Lee (2009)는 터널 굴착으로 인한 유출지하수가 도심 지하수 흐름에 미치는 영향을 연구하며 저감 및 활용 방안의 중요성을 강조했다. Lee and Kim (2008)은 터널 굴착이 환경에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고 저감 방안을 제

안했다. Kim and Lee (2010)는 대형 건축물에서 유출지하수의 활용 평가 프로세스를 구축했다. Ko (2014)는 철도 터널 유출지하수를 하천 유지에 활용할 수 있는 방안을 제시했다. Lee and Yoon (2019)은 서울시의 유출지하수 현황을 분석하고 다양한 활용 방안을 모색했다. Kim et al. (2020)은 도심지역 유출지하수 관리제도의 개선 필요성을 강조했다. Jung (2018)은 광주 도시철도의 유출지하수 활용 가능성을 분석하였고 Choi and Lim (2021)은 유출지하수를 활용한 커뮤니티 가든 설계의 긍정적 영향을 논의했다. Kim (2022)은 유출지하수를 냉난방 및 인공합양 시스템에 활용할 것을 제안하였다. 이와 같은 연구는 유출지하수의 효과적인 활용과 관리 방안 마련의 필요성을 강조하고 있다.

이를 바탕으로 본 연구는 유출지하수를 발전용수로 활용하는 방안을 분석하며, 기존 연구와의 차별성을 갖는다. 첫째, 공업용수 중 발전용수로의 활용 가능성을 검증하는 연구는 부족하며, 유출지하수의 잠재성을 파악하여 국가적 수자원의 효율적 이용과 경제성을 확보할 것으로 기대된다. 둘째, 현장 조사 데이터를 바탕으로 종합적인 경제성 분석을 수행하고, 민감도 분석을 통해 결과의 신뢰성을 높였다. 셋째, 연구 지역 유출지하수 수질 특성을 고려한 정수처리 공정을 설계하여 경제성 분석에 반영하였다. 넷째, CO₂ 배출 감소 효과를 정량적으로 분석하여 환경적 영향을 최소화하는 방안을 제시하였다. 다섯째, 현장 적용 가능성을 높이기 위해 실무적 접근을 취하여 A 발전회사의 B 본부에서 사업을 추진할 가능성이 있는 연구이다. 여섯째, 본 연구는 특정 지역을 대상으로 실증 분석으로 차별화된 결과를 도출하였다.

3. 연구 방법론

3.1. 경제성 분석 방법론

본 연구의 비용편익 분석 등 3가지의 경제성 분석방법론을 활용하여 유출지하수의 발전용수 활용에 관한 경제성 분석을 수행하였다. 먼저, 비용편익 분석(Benefit-Cost Analysis, BCA)은 아래 식과 같이 총 사업기간 동안 비용의 현재가치에 대한 편익의 현재가치 비율로 추정한다.

$$B/C = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

식 (1)에서 B_t 는 t 시점의 편익, C_t 는 t 기의 비용, r 은 할인율, n 은 내용연수를 의미한다. 본 연구는 공공기관 사업 예비타당성조사 일반지침(Korea Development Institute, 2023)에 따라 이를 활용한다.

다음으로 순현재가치(Net Present Value, NPV)는 편익과 비용 간의 차액을 현재가치로 계산한 것이다. 이 방법은 투자의 현재가치를 반영하고 미래 현금흐름을 할인하여 측정한다.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (2)$$

다음으로 내부수익률(Internal Rate of Return, IRR)은 투자에 소요되는 지출액의 현재가치가 투자로 기대되는 현금 수입액의 현재가치와 동일한 할인율(R)을 의미한다.

$$\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+R)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+R)^t} \quad (3)$$

본 연구에서는 추가적으로 투자회수기간(Payback Period, PP)도 산출하고자 한다.

3.2. 변수

본 연구는 설비 투자 비용(Capital Expenditure, CAPEX) 등 4가지의 항목을 변수로 선정하였다. 먼저, 설비 투자 비용(CAPEX)은 유출지하수 처리설비의 처리량과 수질 특성에 따라 변동 될 수 있다. 다음으로 운영비용(Operating Expenditure, OPEX)은 인건비(A 발전회사의 2023년도 신입사원 평균연봉), 약품비, 필터 교체 비용, 기타 운영 및 유지 비용으로 구성된다.

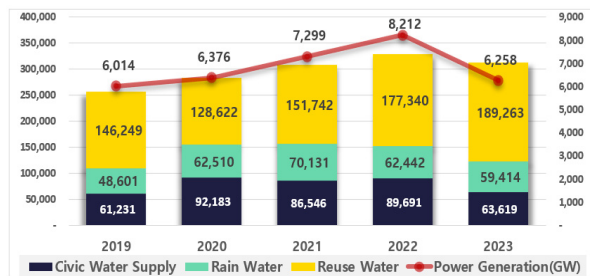
본 연구는 버려지는 수자원에 대한 활용을 통한 국가적 관점의 경제성 분석을 목적으로 한국개발연구원(KDI)은 공기업 및 준정부기관 사업에 대하여 4.5%의 실질 사회적 할인율을 적용한다.

환경부는 지하수관리기본계획에 따라 전국적인 유출지하수 발생량을 체계적으로 관리하고 있으며 제4차 지하수 관리기본계획에 보고된 A 발전회사의 B 본부의 약 190 m³/일의 유출량을 활용하여 70,000 m³/년을 적용하여 분석한다. 유출지하수는 강우 및 강설 등의 기상현상으로 지표면에 유입되어 강우량과 강설량에 따라 유출지하수

의 발생량은 변동할 수 있다. 내용연수 n은 Korea Development Institute (2023)의 가이드라인에 따라 30년으로 가정하였다.

3.3. 비용 및 편익 항목

본 연구의 비용항목은 설비 투자 비용(CAPEX)과 운영 비용(OPEX)으로 구성되며 편익 항목은 상수도 사용 절감 편익으로 구성된다. A 발전회사의 B 본부는 액화천연가스 연소열로 전력을 생산하고 있다. 발전용수는 초순수를 사용하며 중수도, 빗물, 상수도를 활용하고 있다. 초순수의 사용량과 비율은 발전량에 따라 일정하게 유지되며, 중수도와 빗물을 활용함으로써 Fig. 1과 같이 약 20%의 상수도를 사용하고 있다. A 발전회사의 B 본부에서 발생하는 유출지하수의 수질분석 결과에 따라 현재 A 발전회사의 B 본부에서 활용하고 있는 중수도 요구 수질과의 유사성을 보여 투자 비용의 절감과 경제성 향상을 위해 중수도 설비 요구 수질을 만족시키는 부대 시설로 유출지하수 처리설비를 구성하였다.



Source: Lee (2024)

Fig. 1. Annual water consumption for power generation

수처리 엔지니어링 전문업체의 자문을 받아 중수처리 설비의 요구 수질 기준의 만족을 위한 여과설비의 설비 설치 비용과 설비 운영에 필요한 부대 시설의 비용을 포함하였으며, 기존에 설치된 지하집수조와 중수처리설비의 이격거리를 고려하여 배관을 설치하는 비용을 건설비로 추정하였다. 이에 따라, 설비 투자 비용(CAPEX)은 Table 1과 같이 배관 매립 및 설치의 건설비는 40,000 천원으로 산정하고 설비비는 500,000천 원으로 산정하였다. 운영비용(OPEX)은 Table 2와 같으며 약품비용과 필터 교체 비용, 부대비용 등으로 산정하였다. 유출지하수 처리설비는 모든 공정을 자동화로 구성하여 설비의 조작이 불필요하

고 일상적인 설비 점검만이 필요로 하기 때문에 A 발전회사의 2023년도 신입사원 초임 평균 연봉의 10%를 가정하였다. 약품비는 설비의 응결 및 침전 과정에서 필요한 폴리 염화알루미늄(Poly Aluminum Chloride, PAC) 8%의 단가인 200원/kg에 연간 예비 사용량 9,000 kg을 적용하여 약품 사용 비용을 산정하였다. 본 수치는 수처리 엔지니어링 전문업체의 자문으로 도출되었다.

Table 1. Configuration and investment items of discharged groundwater treatment facilities

Cost	Content	Specification	Amount (KRW)
Construction	Pipe installation	450 m, 12 m ³ /hr	40,000,000
	Reservoir	25 m ³	35,000,000
Equipment	Coagulation	6 m ³	40,000,000
	Flocculation	6 m ³	40,000,000
	Thickener	12 m ³	70,000,000
	Treatment	25 m ³	50,000,000
	Filtration	Cubic fiber filter	50,000,000
	Accessory	Walkway and other	110,000,000
	Control panel	Automatic control	105,000,000
Total			540,000,000

Note: These are the figures produced by commissioning an engineering company for this project

운영비용(OPEX)은 Table 2와 같으며 약품비와 여재 교체 비용, 부대비용으로 산정하였다. 인건비는 자동운전으로 인력 소요가 적어 신입사원 초임 연봉의 10%를 적용하였다. 여재 교체 비용은 물리적 처리를 담당하는 CFF (Cubic Fiber Filter)의 교체에 소요되는 비용으로 필터 최소 수명으로 고려하여 3년에 1회 교체하는 비용인 900,000원을 산정하였다. 전력 요금 등 기타 부대비용을 반영한 운영비의 경우 설비비의 0.1%를 산정하였고 유지 보수비는 설비비의 5%로 설정하였다.

본 연구는 비용 저감 편익의 관점으로 유출지하수를 활용하여 상수도 생산으로 발생하는 비용 회피와 상수도 처리에서 발생하는 CO₂ 환경 피해 비용 회피를 편익으로 설정하여 사회적 편익을 고려하였다. 상수도 비용 회피에 따라 발생하는 환경적 편익은 Table 3과 같다. 상수도를 1 m³를 생산할 경우 0.000512 Ton/CO₂가 발생하며 수도 요금 절감 편익은 국가적 관점으로 상수도 생산 단가인 1,366원을 적용하였고 CO₂ 환경 피해 비용인 43,000원/ton을 적용하였다(Kim et al., 2022).

Table 2. Annual operating expenses (OPEX) details

Cost	Content	Amount (KRW)
OPEX	Labor costs	4,530,000
	Pharmaceutical costs	1,800,000
	Replacement cost of filter media	900,000
	Operation cost	500,000
	Maintenance cost	25,000,000
Total		32,730,000

Note: These are the figures produced by commissioning an engineering company for this project

Table 3. Annual benefit calculation details

Content	Unit	Amount (KRW)
Water supply cost savings	Ton	1,366
CO ₂ environmental damage avoidance cost	Ton	43,000

Source: Kim et al. (2022)

4. 분석 결과

4.1. 비용편익 분석

분석 기간은 2024년부터 2053년까지 30년이며, 연간 70,000 m³의 유출지하수를 활용하는 것으로 가정했다. 유출지하수 처리설비에 따른 비용과 편익을 추정하기 위해 4.5%의 실질 사회적 할인율을 적용하였다. 분석 결과, 내부수익률(IRR)은 13.60%로 확인되었고, B/C 비율은 1.68, 투자회수기간은 8년으로 계산되었으며, 순현재가치(NPV)는 809,155천 원으로 유출지하수 발전용수 활용 사업의 경제성을 확인하였으며 내용은 Table 4와 같다.

비용항목은 건설비와 설비비가 45.1%를 차지하고 운영비가 54.9%를 차지하였다. 운영비용 중에서는 유지보수비가 78.5%로 가장 큰 비율을 차지하고 인건비는 14.2%로 두 번째로 큰 비율을 보였다. 기타 비용항목으로 약품비가 4.8%, 운영비가 1.6%, 여재 교체 비용이 0.9%를 차지하였다. 이에 따라, 설비 투자 비용보다 운영비용이 더 큰 비중을 차지한다는 것을 확인하였으며 운영비용 중 유지보수비용과 인건비가 주요 요인으로 작용하였다.

편익 측면에서는 상수도 요금 절감 효과가 전체 편익의

1,974,998.3원으로 98%를 차지하고, CO₂ 환경 피해 비용 절감은 31,831.3원으로 2%를 차지하였다. 대부분의 편익이 상수도 요금 절감으로 발생하나 CO 환경 피해 비용 감소는 환경적 측면과 정부 권장 정책 이행에 의미를 가진다. 또한, 본 연구가 사회적인 편익을 발생시킨다는 점을 주목할 수 있으며 내용은 Table 5와 같다.

현금흐름 분석 결과, 투자 회수 기간은 운영 9년 이후부터 양수로 전환되며 수익이 발생하였다. 유출 지하수를 지속적으로 발전용수로 활용할 경우 상수도 요금 절감 효과가 지속적으로 발생하며, 누적 현금흐름이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 8년 차부터 누적 현금흐름이 19,607천 원으로 양수로 전환되며 경제성을 확인할 수 있었다.

Table 4. Benefit-cost analysis (BCA) results of drainage groundwater treatment facility

IRR	B/C	PP	NPV (1,000 KRW)		
			Cost	Benefit	Total
13.60%	1.68	8y	-1,197,675	2,006,830	809,155

Table 5. Net present value by benefit factors

Content	NPV	Amount (KRW)
Water supply cost savings		1,974,998.3
CO ₂ environmental damage avoidance cost		31,831.3

4.2. 민감도 분석

설비비는 자재 가격의 변동 및 수질을 포함한 설치 조건에 따라 변동하며, 유출 지하수 처리량은 강수량에 따라 변화한다. 이에 따라, Table 6과 같이 설비비와 처리량을 변수로 설정하여 민감도를 분석하였다. 비용편익 비율(Benefit-Cost Ratio, B/C)은 설비비 500,000 천원 기준으로 유출지하수 50,000 m³/년을 활용할 경우 1.20이었으며 70,000 m³/년을 활용할 경우 1.68로 나타났으며, 90,000 m³/년 처리할 때 2.15로 증가하였다. 설비비와 처리량의 증감에 따라 B/C는 최소 1.02에서부터 2.60까지 증가하며 경제성을 확인하였다. 분석 결과에 따라 유출지하수 처리량의 증감이 설비비 변화보다 민감하다는 것을 확인하였으며 내용은 Table 7과 같다.

Table 6. Sensitivity analysis based on equipment costs and throughput

Throughput	Cost	Change in equipment cost (1,000 KRW)				
		-20% (400,000)	-10% (450,000)	0% (500,000)	10% (550,000)	20% (600,000)
50,000 m ³	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	
60,000 m ³						
70,000 m ³						
80,000 m ³						
90,000 m ³						

Table 7. Sensitivity analysis result of benefit-cost Ratio (B/C)

Throughput	Cost	-20%	-10%	0%	10%	20%
		(400,000)	(450,000)	(500,000)	(550,000)	(600,000)
50,000 m ³		1.44	1.31	1.20	1.10	1.02
60,000 m ³		1.73	1.57	1.44	1.32	1.23
70,000 m ³		2.02	1.83	1.68	1.54	1.43
80,000 m ³		2.31	2.09	1.91	1.76	1.63
90,000 m ³		2.60	2.36	2.15	1.98	1.84

또한 수명 기간과 사회적 할인율과 수도 요금, CO₂ 환경 피해 비용에 대한 민감도 분석을 시행하였는데 설비비 500,000천 원으로 연간 70,000 m³의 유출 지하수를 활용하는 것을 기준으로 설정하여 분석하였다. 수명 기간의

경우 30년을 기준으로 10년씩 증감하였고 사회적 할인율은 4.5%에서 1%씩 증감하여 분석하였다. 또한, 편익에 관한 민감도 분석을 위하여 상수도 요금은 20%씩 증감하였고 2024년 EU 탄소배출권 가격이 평균 71유로/tCO₂e로 산출되어 있음에 따라 연구에 활용한 CO₂ 피해 비용과 2024년도 탄소배출권 거래가격의 사잇값으로 43,000원을 설정하여 20%씩 증감하여 민감도 분석을 수행하였고 이에 따른 민감도 분석 결과는 Table 8과 같다.

경제성은 수명 기간에 비례하여 지속적으로 증가하였으며 운영 기간 9년 차를 기점으로 B/C는 1.0을 상회하며 운영 기간 동안 지속적인 경제성을 확인하였다. 또한 편익 증가 속도가 비용 증가 속도보다 빨라 수명 기간이 길어질수록 경제성이 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 할인율을 2%를 감소시킨 2.5%일 경우 B/C는 1.88이었으며 2%를 증가시킨 6.5%의 경우 B/C는 1.49로 할인율의 증감에도 경제성이 확보가 되었으며, 할인율이 증가할수록 편익의 현재가치가 낮아져 B/C는 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. CO₂ 피해 비용은 20%씩 증감하였는데 40%를 감소시킨 25,800원에서 1.66으로 나타났으며 40%를 증가시킨 60,200원에서 1.69로 나타나며 편익의 변화와 경제성을 확인할 수 있었다. 하지만 CO₂ 피해 비용이 전체 편익에서 차지하는 비중이 크지 않아 B/C의 변화가 크지 않음을 확인하였다. 상수도 요금이 인하되는 경우에는 경제성이 감소하였음에도 불구하고 B/C 1.0을 상회하며 경제성을 확인할 수 있었다. 다만, B 본부가 위치한 지역은 상수도 요금 현실화율은 91.9%로 요금 인상의 가능성이 있으며 전국적으로도 상수도 요금 현실화율은 72.8%로 상수도 요금 인상 가능성이 높으므로 상수도 요금 인하로 인

Table 8. Sensitivity analysis results regarding the benefit

Result	Life span	10y	20y	30y	40y	50y
	B/C	1.03	1.45	1.68	1.81	1.91
Result	Discount rate	-2% (2.5%)	-1% (3.5%)	0% (4.5%)	+1% (5.5%)	+2% (6.5%)
	B/C	1.88	1.78	1.68	1.58	1.49
Result	CO ₂ cost (KRW)	-40% (25,800)	-20% (34,400)	0% (43,000)	+20% (51,600)	+40% (60,200)
	B/C	1.66	1.67	1.68	1.68	1.69
Result	Water cost (KRW)	-40% (820)	-20% (1,093)	0% (1,366)	+20% (1,639)	+40% (1,912)
	B/C	1.02	1.35	1.68	2.01	2.34

한 편익의 감소는 어렵다고 판단된다. 또한 상수도 요금 이 증가할수록 본 사업의 경제성은 향상된다.

5. 결론 및 시사점

본 연구는 터널 공사로 A 발전회사의 B 본부 용지에서 지속적으로 발생하는 유출 지하수를 발전용수로 활용하는 사업에 관하여 경제성을 분석하였다. 연구를 통하여 A 발전회사의 B 본부에서 발생하는 유출 지하수의 수질 특성을 분석하고 발전용수 요구 수질에 부합하는 유출 지하수 처리설비를 구성하였다. 설비 투자 비용과 운영비용으로 비용을 산출하였고 유출지하수 발전용수 활용으로 발생하는 상수도 요금 회피와 상수도 처리로 발생하는 CO₂ 환경 피해 비용 회피를 편익으로 산출하며 사회적 편익을 고려하였다. 유출 지하수 발전용수 활용 사업의 B/C 비율과 순현재가치(NPV), 내부수익률(IRR)을 산출하여 경제적 타당성을 분석하고 민감도 분석을 통하여 사업의 경제성에 영향을 미치는 주요 변수들을 분석하였다.

설비 투자 비용 중 설비비는 500,000천 원, 유출지하수 처리량은 70,000 m³/년을 산정하여 유출지하수 처리설비에 관한 경제성을 분석하였다. 분석 결과에 따라, 유출지하수 발전용수 활용 사업은 B/C 비율은 1.68로 분석되었고 순현재가치(NPV)는 809,155천 원, 내부수익률(IRR) 13.66%, 투자회수기간은 8년으로 분석되었다. 또한, 운영 기간 30년 동안 62,520천 원의 CO₂ 환경 피해 비용이 회피되며 사업의 시행으로 환경적 편익도 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 분석 결과로 실질 사회적 할인율을 웃도는 내부수익률로 운영 기간 내에 투자 회수가 가능하여 사업의 경제적 타당성을 확인하였다. B 본부가 위치한 지역의 상수도 요금 현실화율은 91.9%이며 전국적으로 72.8%에 머무르고 있다(Ministry of Environment, 2023a). 그에 따라, 상수도 요금 현실화율의 상승을 위하여 요금을 인상할 때 경제성은 더욱 증가할 것으로 판단된다.

본 연구는 국가적으로 버려지는 수자원을 효율적으로 이용함으로써 상수도 요금 절감으로 전력 생산 단가 절감의 기업적 편익을 창출하기도 하며 유출 지하수의 활용 범위를 산업용수로 확대하며 버려지는 물이 가진 수자원으로서의 가치를 실증적으로 확인하였다. 기후변화의 중요성이 대두되는 현재의 시점에서 정부의 친환경 정책을 선제적으로 이행하기 위한 기업의 방안을 제시하며 사회적 가치 실현에 관한 발전 기업의 역할과 책임의 의미도 가진다.

현재 정부는 물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률에

해당하는 빗물이용시설이나 중수도 처리시설을 운영하는 경우 수도 사용량의 100분의 10에 해당하는 사용 요금에 대하여 감면하고 있다. 유출지하수는 지하수법에 따라 하수도 사용료 감면으로 한정하고 있어 정책적인 관심에 비해 법률적인 지원책과 유인책이 미흡하다. 이에 따라, 유출지하수 활용시설에 대하여 빗물이용시설과 중수도 처리 시설에 준하는 상·하수도 사용료의 감면이나 유출지하수 활용시설에 관한 지방세 등의 감면과 같은 법률적인 지원이 필요할 것으로 보인다. 또한, 유출지하수는 수자원으로 지하수와 동일하게 연중 일정한 수온을 유지하는 특성을 가져 국내·외에서는 이를 활용하여 지하수열로 냉·난방 에너지원으로 활용하고 있다. 이처럼 화석연료 및 전력 사용량 절감의 환경적인 편익이 발생하므로 지역에 준하는 신·재생에너지원으로 인정하는 것도 검토할 필요가 있으며 나아가 배출권 거래제의 진입과 같은 정책적 혜택을 적용하는 방안을 검토하는 것을 미래 연구로 제안한다.

본 연구는 유출지하수 처리설비를 구성하였지만, 지역별 특성에 따른 일반적인 정수처리 설비의 구성 및 시공 방법, 설비 용량과 운영 방식을 반영한 구체적인 설비의 구성과 설비 투자 비용 기준을 제시하지 못하였다는 한계가 있다. 또한, 본 연구는 지하에서 지상으로 자연적으로 유출되는 유출지하수를 고려하며 활용에 따라 지하 구조의 변화와 주변 지역에 대한 환경적 영향과 사회적 영향에 대하여 고려하지 않았다. 또한 유출지하수를 발전용수로 활용하며 발생하는 CO₂ 발생량 산정과 유출지하수를 발전용수로 활용하며 CO₂ 발생의 부편익이 발생할 수 있지만 이를 고려하지 못한 한계가 있다. 제도적으로 300 m³/일 초과하여 발생할 경우 필요한 행정 처리에 따른 제도적 쟁점이나 행정력의 소요와 그 비용 등에 대하여 고려하지 않은 한계가 존재한다. 따라서 본 연구의 한계점을 고려한 향후 연구가 필요하다.

본 연구는 유출지하수의 산업 활용방안을 모색한 연구로 버려지는 수자원의 용도를 확대하는 정책적인 의의가 있으며 현재까지 부족한 유출지하수에 관한 후행 연구의 기틀을 마련할 수 있는 연구적 가치를 포함하고 있어 다양한 유출지하수 활용 방안과 연구 방법의 방향성을 제시할 것으로 기대된다.

사사

이 논문은 환경부 「기후변화특성화대학원사업」 및 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 G-랩

프(LAMP) 사업(No. RS-2023-00301938)의 지원을 받아 수행된 연구임. 또한 본 논문은 부산대학교 석사학위 논문 ‘유출지하수 발전용수 활용사업에 대한 경제성 분석: 천마산 터널 유출지하수를 중심으로’의 일부 내용을 발전시킨 연구입니다.

Reference

- Choi YS, Lim YH. 2021. A study on complex community garden design using runoff-groundwater. Proceedings of the Autumn Annual Conference of AIK, 2021; 2021 Oct 28~Oct 30; Yeosu Expo Covention Center, Yeosu Venezia Hotel & Resort. Yeosu, Korea: Architectural Institute of Korea. p. 556-559.
- Jung JG. 2018. A study on the utilization strategy of ground water outflow for urban railways in Gwangju [thesis]. Chonnam National University.
- Kim HJ, Jeong DH, Ko YE, Oh SD, Lee CY. 2022. An economic feasibility analysis of hydrogen refueling stations project considering uncertainty. *Innovation Stud* 17(4): 47-67. doi: 10.46251/INNOS.2022.11.17.4.47
- Kim JS, Song SH, Jeong GC, Cha JH. 2015. Analysis of economic feasibility and reductions of carbon dioxide emission of geothermal heating and cooling system using groundwater. *J Eng Geol* 25(4): 599-612. doi: 10.9720/KSEG.2015.4.599
- Kim JY, Lee DJ. 2010. A study on the evaluation process development for the use of outflowing groundwater in large-scale buildings. *J Korea Inst Build Constr* 10(3): 91-97.
- Kim KH, Ji MG, Cha EJ, Kim KB, Lee BG, Han HJ. 2020. Research on institutional improvements regarding the utilization and management of groundwater discharge in urban areas. Korea Environment Institute.
- Kim KY, Park HJ, Kim TI, Han MY. 2014. Evaluation of stored rainwater quality and economic efficiency at Yangdo elementary rainwater harvesting system. *J Korean Soc Environ Eng* 36(5): 333-341. doi: 10.4491/KSEE.2014.36.5.333
- Kim SH. 2022. Proposal for a groundwater utilization system for heating and cooling and artificial recharge to achieve carbon neutrality. *J Korean Soc Mech Eng* 51(4): 60-68.
- Ko JW. 2014. A study on the utilization of the outflowing groundwater from railroad tunnel - Focused on the New Ansan Line [thesis]. Woosong University.
- Korea Development Institute. 2023. Study on the revision and supplementation of general guidelines for conducting preliminary feasibility studies on public enterprise and quasi-governmental organizations, 4th edn.
- Lee CJ. 2009. Effect of groundwater discharge from underground tunnel to groundwater flow in urban area [thesis]. Dong-A University.
- Lee JH, Kim HM. 2008. Study on environmental impact and mitigation plan for groundwater outflow during tunnel excavation. *J Environ Policy* 7(1): 31-52. doi: 10.17330/joep.7.1.200803.32
- Lee SM, Yoon HM. 2019. A study on the improvement of underground water leakage utilization in Seoul. The Seoul Institute.
- Lee SU. 2024. Economic analysis of power generation water utilization project: Focusing on groundwater from Cheonmasan tunnel [thesis]. Pusan National University.
- Ministry of Construction and Transportation. 2006. Long-Term Comprehensive Water Resources Plan.
- Ministry of Environment. 2022. Guidelines for Groundwater Discharge Operations.
- Ministry of Environment. 2023a. 2022 Water supply statistics.
- Ministry of Environment. 2023b. Groundwater Law.
- Park GW, Lee EY. 2007. Heating performance of ground source heat pump using effluent ground water. *New Renewable Energy* 3(2): 40-46.