ISSN(Print): 1225-7672 / ISSN(Online): 2287-822X
DOI https://doi.org/10.11001/jksww.2024.38.2.69

수열에너지 입지 선정을 위한 계층화분석법의 적용

Application of analytic hierarchy process technique for selecting a hydrothermal energy site

안주현[1] · 박수완[2,*] · 오창현[2]
Joohyun Ahn[1] · Suwan Park[2,*] Changhyun Oh[2]

[1]한국수자원공사 수변사업처
[2]부산대학교 사회환경시스템공학과
[1]Department Waterfront City Business, Korea Water Resources Corporation
[2]Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

ABSTRACT

In this study, an evaluation system that can be used to evaluate the feasibility of developing and supplying hydrothermal energy for the operation of large-scale complex facilities was developed. To this end, this study derived factors to be considered when selecting a location for the use of hydrothermal energy using raw water from multi-purpose dams and regional water supply systems through literature survey and expert interviews. The evaluation indicators derived from this study are divided into four sectors: hydrothermal energy utilization factors, location factors, planning factors, and disaster safety factors, and are composed of 10 mid-level indicators and 34 detailed planning indicators. The relative importance of all factors was derived using the Analytic Hierarchy Process (AHP) technique, and the developed evaluation indicators and relative importance were applied to four multi-purpose dam regions in the country. As a result, it was found that in the development and use of hydrothermal energy utilizing regional raw water supply line the urban planning conditions of the supply site can have a greater impact on the location selection results than the hydrothermal energy development itself. Due to the characteristics of the evaluation indicators developed in this study and their nature as comprehensive indicators, it is believed that the results should be applied to determine the overall adequacy of site selection in the early stages of hydrothermal energy development. In the future, it is believed that it will be necessary to analyze the problems in supplying and operating hydrothermal energy using raw water from multi-purpose dams

Received 26 January 2024, revised 7 March 2024, accepted 14 March 2024.

*Corresponding author: Suwan Park (E-mail: swanpark@pusan.ac.kr; Fax. 82-51-513-9596, Tel. 82-51-510-2734)

1 안주현 (차장) / Joohyun Ahn (Senior Manager)
대전광역시 대덕구 신탄진로 200, 34350
200, Sintanjin-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34350, Republic of Korea

2 박수완 (교수) / Suwan Park (Professor)
부산광역시 금정구 부산대학로63번길 2, 46241
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

2 오창현 (석사과정) / Changhyun Oh (Master Student)
부산광역시 금정구 부산대학로63번길 2, 46241
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

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.

pp. 061-068
pp. 069-081
pp. 083-093
pp. 095-107
pp. 109-117

and regional water resources. Based on the analysis the evaluation system developed in this study is expected to be improved and supplemented.

Key words: Hydrothermal energy, Analytic hierarchy process, Evaluation indicator, Site selection, Large-scale complex facilities, Regional water supply systems

주제어: 수열에너지, 계층화분석법, 평가지표, 입지선정, 대규모 복합시설, 광역상수도

1. 서 론

지속적인 지구온난화에 따른 이상기온으로 인한 기후변화에 대응하기 위하여 에너지 개발과 공급의 구조 전환은 세계적인 흐름으로 자리 잡았으며, 세계 각국은 기후변화에 대응하기 위한 주요 수단으로 탄소중립 정책과 함께 신재생에너지 개발을 적극적으로 육성하고 있다. 정부는 이러한 흐름 하에서 '제5차 신재생에너지 기술개발 및 이용・보급 기본계획(2020～2034)'을 통해 총 에너지 소비량 중 신재생에너지 비중을 13.7%까지 확대하기 위한 계획을 수립하였다(Ministry of Trade, Industry and Energy, 2020). 이에 따라 신재생에너지 부문에 대한 구체적인 실행계획의 필요성이 부각되고 있다.

수열에너지는 물을 열원으로 해서 생산되는 친환경 에너지로, 일반적으로 수열에너지를 활용한 히트펌프 시스템의 에너지 절감효과는 기존 냉난방시스템에 비해 20～50%까지 다양한 것으로 보고되고 있으며, 국내에서 가장 대표적인 수열 에너지 활용사례로 언급되는 롯데월드타워의 경우 동일용량의 흡수식 냉온수기 대비 연간 에너지 절감률과 이산화탄소 감축 효과가 각각 약 35.8% 및 약 37.7%인 것으로 보도되었다(The Seoul Institute, 2020; HVAC&R Journal, 2021). 또한 다른 신재생에너지에 비해 날씨의 영향을 덜 받아 안정적 공급이 가능하다(Gyeongnam Newspaper, 2022). 북미, 유럽, 일본 등 선진국에서는 해수, 하천수 등 대부분의 수자원을 수열에너지 활용이 가능한 신재생에너지로 인정하고 있으며, 캐나다 온타리오 호수의 심층수를 활용한 토론토시 320만m^2 면적의 에너지 다소비 빌딩의 냉난방 공급과 같은 대규모 에너지 수용처의 냉난방에 활용하고 있다.

우리나라에서는 2020년부터 하천수를 활용하여 부산 에코델타 스마트시티, 인천 종합환경연구단지, 한강물환경연구소에 수열에너지 시범공급을 단계적으로 추진하였으며, 한국수자원공사가 관리하는 광역상수도 원수를 활용하여 한강홍수통제소, 광명시흥 도시첨단산업단지과 같은 공공분야를 비롯해 삼성서울병원 등의 민간 대형건축물에도 수열에너지 활용이 확대되고 있는 추세이다. 최근 환경부는 하천수를 활용한 수열에너지 적용 사업의 확대를 위해서 물이용부담금 납부 면제, 하천수 사용료 감면 등 관련 제도를 개선하기도 하였다.

수열에너지와 관련된 연구로 Jung (2018)은 4대강 수계에 위치한 댐들 가운데 저수용량이 가장 큰 댐에 대하여 월별 댐 저 수량 및 댐의 수온과 대기온도의 차이를 바탕으로 월별 가능 최대 공급 수열에너지를 산정하였으며, Jung et al. (2018)은 국내 하천수 열원에 대하여 허가 기준 유량 확보에 대한 안정성을 검토한 다음 각 권역별로 하천수 유량을 활용할 수 있다고 판단되는 구간을 대상으로 건물규모와 관로 이격거리를 기준으로 하천변 예상 수요지를 조사하였다.

광역상수도 원수로부터 수열에너지를 공급하기 위한 연구로는 Lee et al. (2019)이 37개 데이터센터 및 사무용 빌딩의 냉난방에 광역원수를 이용한 수열에너지 공급의 타당성을 검토한 연구가 있으며, 수열에너지 개발 입지 선정과 관련된 연구로는 한국수자원공사(K-water)의 K-water가 관할하는 다목적댐, 용수댐 그리고 광역 취수시설이 갖는 수열에너지의 이론적, 지리적, 기술적 및 시장 잠재량을 조사하고, 시장 잠재량을 중심으로 한 경제성 평가를 통해 건축물 냉난방 활용에 적합한 38개 수열에너지 개발 적지를 선정한 연구가 있다(K-water, 2020a). K-water (2020a)는 이 과정에서 사업 추진 가능성이 높은 순으로 적지 선정을 위해 선행 연구를 참고하여 건물과 관로의 이격거리, 공사여건(지장물 등), 설비교체시기, 건물규모, 건축용도, 도입 경제성, 수열 도입 의향을 평가 항목으로 설정하였고, 수열에너지 전문가 5명의 인터뷰를 통

하여 각 항목의 배점을 설정하였다. 이외에도 수열에너지와 관련된 연구로 Huh et al. (1998), Park and Chang (2002), Park et al. (2005), K-water (2009), Kim et al. (2015) 및 Ham et al. (2019)와 같이 주로 원수의 수열에너지 잠재량 또는 공급 가능량을 산정한 연구가 많이 이루어졌으며, Ahn et al. (2016), Oh and Kim (2018), Kwon and Nam (2022), Jung and Lee (2019), K-Water (2019), Yang et al. (2012) 및 Jung et al. (2019)와 같은 히트펌프 시스템의 성능, 경제성 및 환경영향 평가에 관한 연구가 진행되어 왔다.

한편 Lee et al. (2022)은 광역원수 관망이 관통하고 있는 약 190만평 규모의 하남교산 지구에 대한 수열에너지 적용성 및 사업성을 검토하기 위한 수열에너지 수요 추정 모델링을 통해 평가항목, 영향인자, 가중치 및 배점기준을 수립하였으며, 평가항목으로 보급환경, 용도 및 규모, 인프라, 경제적/공간적 및 환경/정책적 요소들을 이용하였다. 그러나 이러한 대규모 도시 지구에 대한 수열에너지의 적용성 및 사업성을 검토한 연구사례에서도 수열에너지의 개발과 이용의 타당성 평가에 활용될 수 있는 종합적인 평가체계는 제시되지 않아 수열에너지 개발과 관련된 수열에너지 취득 및 활용의 경제성, 개발지 주변 환경에의 영향, 도시계획과 관련되어 고려해야 할 사항 및 재해에 대한 안전도 등이 고려된 수열에너지의 개발과 이용의 타당성 평가시에 활용될 수 있는 총체적이고 보편적인 평가체계를 마련할 필요가 있다.

계층화분석법(Analytic Hierarchy Process, AHP)은 1970년대 초반 T. Saaty에 의해서 개발된 의사결정지원 방법의 하나로써, 운하, 공항, 지하철, 도로 등 공공 기반시설 사업의 타당성 여부를 판별하는데있어 비용-편익(B/C) 분석과 함께 가장 많이 쓰이는 분석기법 중 하나이며 상반된 기준과 불완전한 정보하에서 다수 대안들의 우선순위를 선정하는데 적용된다(Cho et al., 2003). 수열에너지 개발 및 공급의 목적이 단위 건축물 수준을 넘어서 대규모 복합시설의 운영에 있을 경우 고려해야 할 요소들은 다양할 뿐만 아니라 정량화하기 어렵고 복합적이므로 어떤 요인들을 우선적으로 고려되어야 하는지에 대한 분석이 쉽지 않다. 이와 같이 정성적인 요소들이 혼재해 있고 평가기준이 다수일 경우에는 AHP를 이용하여 요소들을 계층화하고 주요인들을 세부 요인으로 구체화 하여 분석함으로써 각 요소들에 대한 상대적 영향력을 합리적으로 도출할 수가 있다. 발전단지 입지선정을 위한 평가체계 개발을 위해 AHP를 이용한 사례는 Jeon et al. (2011)의 GIS와 AHP를 이용하여 우리나라에 적합한 풍력발전단지 입지요인들을 선정한 연구와 Lee et al. (2017)의 미세먼지와 기상정보 기반의 AHP 분석을 통하여 태양광 발전소 최적 입지선정에 대한 사례연구 및 Joo and Choi (2012)의 대구시 태양광 발전시설의 최적 입지선정에 관한 연구가 있으나, 수열에너지 개발과 이용의 입지선정을 위한 평가체계 수립을 위해 AHP를 활용한 연구는 부재한 실정이다.

본 연구에서는 대규모 복합시설의 운영을 위한 수열에너지 개발 및 공급의 타당성 평가시 사용할 수 있는 평가체계를 개발하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 문헌연구와 전문가 인터뷰를 통해 다목적댐 및 광역상수도 수자원 기반의 상수도 원수를 활용한 수열에너지 이용 입지선정 시 고려해야 할 요소들을 도출하였다. 또한 AHP기법을 이용하여 도출된 모든 요소들간의 상대적 중요도를 결정하였으며, 개발된 평가지표와 상대적 중요도를 국내의 4개 지역에 적용하였다.

2. 연구방법

2.1 수열에너지 개발 및 공급 입지 평가지표

본 연구에서는 수열에너지 입지 선정 평가지표의 개발 과정에서 수열에너지 자체의 개발 여건에 관한 지표들 뿐만 아니라 해당 수열에너지 수요처의 수용성을 평가할 수 있는 도시계획과 연계한 지표들도 고려하였다. 이를 위해 기존 문헌인 Ministry of Environment (2019), K-water (2020a), K-water (2020b) 및 Ministry of Government Legislation (2016)의 분석을 통해 수열에너지 개발시 고려해야할 인자들을 설정하기 위한 기본적인 방향을 설정하였으며, 이를 바탕으로한 K-water 수열담당자 3명과의 전문가 인터뷰를 통해 평가지표들을 수열에너지의 안정적인 공급 가능성을 평가하기 위한 수열에너지 개발 여건 또는 '수열에너지 활용(Hydrothermal energy utilization)', 수열에너지 공급 단지 조성에 필요한 인프라 확보 및 환경적 규제를 고려하기 위한 '입지(Location)', 도시개발을 위

한 상위 법령이나 계획과의 적합성을 고려하기 위한 '계획(Planning)' 및 입지가 지진, 풍수해 등으로부터 안전한지 여부를 판단하기 위한 '안전(Safety)'의 4개 그룹으로 분류하였다. 이들 중 '입지', '계획' 및 '안전'은 도시계획 부문 지표들로 구성하였다.

수열에너지 활용(Hydrothermal energy utilization) 요소 관련 지표들을 선정하기 위해 Ministry of Environment (2019), K-water (2020a) 및 K-water (2020b)의 초기 투자비용 및 운영비를 고려한 수열에너지 개발 규모의 경제성 분석 내용과 수온분석 내용을 기초로 하여 취수방식, 수열에너지 활용 가능량 및 수온 관련 지표들을 선정하였다. 이러한 요소들이 현장에서도 실제로 고려되고 있는지 확인하기 위하여 K-water 수열담당자 3명과의 전문가 인터뷰를 통하여 위에서 도출된 요인들이 실제 입지선정시 고려되고 있는 요인들임을 확인하였다. 또한 수열공급의 경제성과 관련된 지표로 Ministry of Environment (2019), K-water (2014) 및 K-water (2020b)의 수열에너지 시스템 데이터 취득 및 분석내용으로부터 수열에너지 활용 가능량, 공사비, 운영비, 수온변화로 인한 환경영향을 고려요인으로 도출하였다.

입지적(Location) 요소 관련 지표들을 선정하기 위하여 자연적 여건(Natural condition), 공적 규제성(Public regulation), 인프라 연계성(Infrastructure) 및 전문인력 수급요건(Professional manpower)을 고려하였다. 자연적 여건으로는 Ministry of Government Legislation (2016)의 국토교통부훈령 제725호 '토지의 적성평가에 관한 지침'의 '[별표 1] 평가지표군 및 평가지표'에서 제시한 '개발적성 평가지표' 중 도시개발 여건 고려시 가장 기본이 되는 '경사도(Slope)' 및 '표고차(Elevation difference)'를 선정하였으며, 공적 규제성 부문에서는 환경부와 한국환경정책평가연구원에서 운영하는 환경정보 포털인 '국토환경성평가지도(https://ecvam.neins.go.kr/)'와 Ministry of Government Legislation (2016)의 '토지적성평가'시 적용하는 '개발적성'과 '보전적성' 평가지표들을 분석하여 수열에너지 개발과 가장 큰 연관이 있다고 사료되는 '국토환경성 평가등급', '생태자연도 개발불가비율', '임상도' 등과 같은 개발로 인한 자연보전 관련 인자들을 고려요인으로 도출하였다.

인프라 연계성 부문은 수열에너지 개발의 안정성 및 경제성과도 연계되는 부문으로서 Ministry of Environment (2019) 및 K-water (2020a)을 분석하여 수열에너지 발전 시스템의 운영에 필수적인 통신 및 전력 공급의 용이성, 수열에너지 개발과 시스템 운영의 용이성과 관련된 교통 및 접근성 등과 같은 인자들을 도출하였다. 계획적(Planning) 요소 관련 지표들을 선정하기 위하여 Ministry of Government Legislation (2011)에서 제시한 도시계획시 기본적으로 고려해야 하는 요소들을 고려하여 계획의 적합성, 토지확보 용이성 및 지자체 의지 및 주민 수용성 등을 평가인자로 선정하였으며, 재해안전(Safety) 요소 관련 지표들을 선정하기 위하여 지진, 산사태 및 홍수와 관련된 재해 위험을 평가할 수 있는 인자들을 고려하였다. Fig. 1은 이러한 개념하에 구축된 수열에너지 이용 입지선정시 고려요인의 계층구조와 선정된 평가인자들을 나타낸다.

2.2 평가지표의 상대적 중요도 산정 방법

본 연구에서 도출된 수열에너지 이용 입지선정 지표에 대한 우선순위를 알아보고, 각 지표에 대한 상대적 중요도 산출을 위해 계층화분석법(Analytic Hierarchy Process, AHP)을 사용하였다. AHP는 평가기준이 다수이며 상호관련성이 적은 배타적인 대안들의 체계적인 평가를 지원하는 의사결정 지원기법의 하나로, 정성적 요소를 포함하는 다기준 의사결정에 널리 사용되고 있다.

AHP 분석법은 문제를 구성하는 다양한 평가요소들을 주요 요소와 세부 요소로 나누어 계층화하고, 계층별 요소들에 대해 쌍대비교를 통해 상대적 중요도를 도출할 수 있어, 서로 연관된 요소들을 비교하여 전략적 의사결정을 위한 근거를 제공하며, 쉽게 계량화되지 않고 구조적으로 복잡한 의사결정 문제에 강점이 있다. 또한, 문제를 하나의 전체적인 시스템으로 간주하고, 시스템이 처한 환경과 시스템의 각 구성 부분의 상호 관계를 종합적으로 고려하고 비교해서 의사결정을 하는데 도움을 줄 수 있다. 이러한 방법은 목표가 많은 상대적으로 복잡한 여러 가지 문제를 해결하는 방안이 될 수 있다(Kim and Lee, 2015).

AHP 분석의 일반적인 절차는 우선 평가목표, 평가요소, 대안, 제약조건, 평가자 등 평가대상에 관한 개

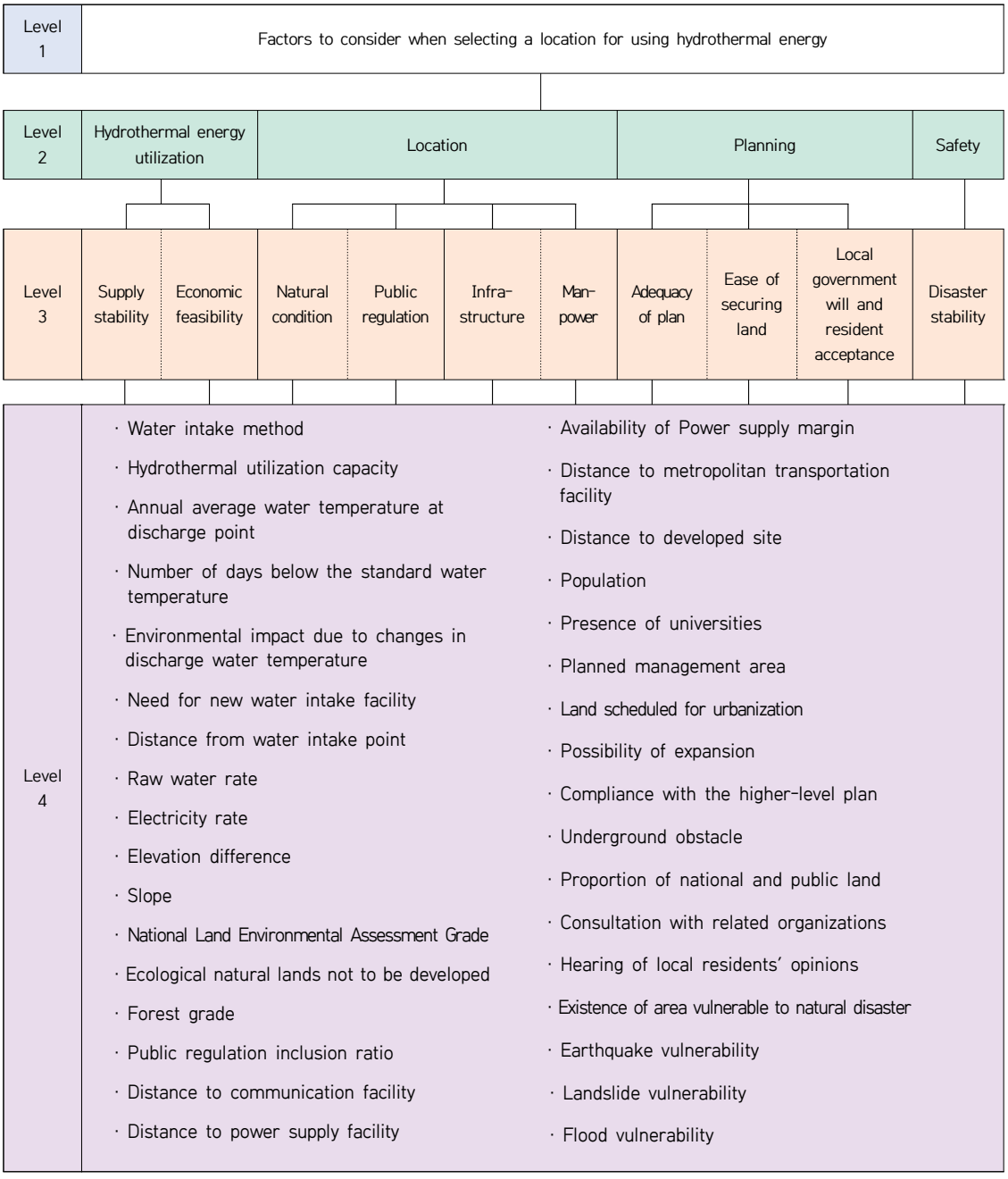

Fig. 1. Hierarchy of the factors to consider when selecting a location for using hydrothermal energy.

념을 형성하고, 평가기준 및 계층구조를 설정한 후 평가지표들 간의 상대적 중요도 산출 및 일관성 검증의 순으로 이루어진다. 설문은 평가대상에 대한 충분한 지식을 가진 전문가 등을 선정하여 시행하며, 개별 설문자들의 평가항목 및 중요도 등을 부여하도록 설문지를 작성한다. 실질적인 평가점수가 계산되는 최하부 계층의 세부평가지표의 상대적 중요도(Relative importance)는 식(1)과 같이 세부평가지표가 속한 모든 계층에서의 상대적 중요도를 곱하여 구해진다.

$$RIFI = \prod_{i=1}^{n} RI_i \quad (1)$$

pp. 061-068
pp. 069-081
pp. 083-093
pp. 095-107
pp. 109-117

여기서 *RIFF*는 최하부 계층의 세부평가지표의 상대적 중요도(Relative importance of final factor), RI_i는 i번째 계층의 상대적 중요도, n은 계층의 개수를 나타낸다.

2.3 자료수집 및 분석대상 선정

Fig. 1의 계층구조를 기반으로 지표 간 중요도 분석을 위한 설문지를 작성하였으며, 도시사업의 계획, 수열에너지, 환경 등 각 분야별 종사자를 대상으로 설문조사를 실시하였다. 전체 설문부수는 50부를 배부하였고 그 중 37부가 회수되어 74%의 회수율을 보였다. 설문 응답자들의 특성은 Table 1과 같다.

설문조사 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 평가지표의 계층에 대해 일관성 비율(Consistency Rate, CR)을 검토한 결과, 일관성 비율이 0.14에서 0.25 사이의 값으로 산정되어 설문응답자들의 평가지표에 대한 상대적 중요도는 일관성이 있는 것으로 판단되었다.

설문조사 결과를 이용하여 각 요인들의 상대적 중요도를 산출한 결과, Level 1에서 제1순위는 '수열에너지 활용(Hydrothermal energy utilization) 요소'(0.358), 2순위 '입지적(Location) 요소'(0.288), 3순위 '안전(Safety) 요소'(0.235), 4순위 '계획(Planning) 요소'(0.119)의 순으로 도출되어, 요소들 간에 중요도의 현격한 차이는 없는 것으로 산출되었다. Level 2의 요소별 중요도는 수열에너지 활용요소에서는 수열공급 안정성(Stability of hydrothermal energy supply)이 수열공급 경제성(Economic feasibility of hydrothermal energy supply)보다 중요도가 높게 나타났으며, 입지적 요소에서는 인프라(Infrastructure), 공적 규제성(Public regulation), 자연적 여건(Natural condition), 전문인력(Professional manpower) 순으로 중요도가 높게 나타났다. 계획적 요소에서는 지자체 의지 및 주민 수용성(Local government will and resident acceptance), 토지확보 용이성(Ease of securing land), 계획의 적합성(Suitability of plan) 순으로 높은 중요도를 나타내었다. AHP 기법에 따라 도출된 모든 Level에 대한 평가지표별 중요도를 정리하면 Table 2와 같다. Table 2에서 괄호

Table 1. Characteristics of the survey respondents

Category		No. of respondents	Percentage (%)
Gender	Male	28	76
	Female	9	24
Education	College graduate	28	76
	Graduate school or higher	9	24
Age	Under 31 years old	3	8
	31-40 years old	13	35
	41-50 years old	18	49
	Over 51 years	3	8
Field	Urban planning/design/construction	24	65
	Environment/Energy/Facility	11	30
	Management/Economy/Systems	2	5
Experience	Less than 5 years	6	16
	5 to 9 years	4	11
	10-14 years	14	38
	15-19 years	5	14
	More than 20 years	8	22

Table 2. Relative importance of the factors

Level 2	Level 3	Level 4
Hydrothermal energy utilization (0.358)	Stability of hydrothermal energy supply (0.628)	Environmental impact due to changes in discharge water temperature (0.306)
		Hydrothermal utilization capacity (0.301)
		Water intake method (0.136)
		Number of days below the standard water temperature (0.133)
		Annual average water temperature at discharge point (0.124)
	Economic feasibility of hydrothermal energy supply (0.372)	Electricity rate (0.356)
		Distance from water intake point (0.280)
		Raw water rate (0.254)
		Need for new water intake facility (0.110)
Location (0.288)	Natural condition (0.210)	Slope (0.505)
		Elevation difference (0.495)
	Public regulation (0.255)	Ecological natural lands not to be developed (0.334)
		National Land Environmental Assessment Grade (0.285)
		Public regulation inclusion ratio (0.242)
		Forest grade (0.139)
	Infrastructure (0.339)	Distance to developed site (0.247)
		Distance to metropolitan transportation facility (0.238)
		Distance to power supply facility (0.220)
		Availability of Power supply margin (0.196)
		Distance to communication facility (0.099)
	Professional manpower (0.196)	Population (0.517)
		Presence of universities (0.483)
Planning (0.119)	Suitability of plan (0.277)	Compliance with the higher-level plan (0.398)
		Planned management area (0.208)
		Land scheduled for urbanization (0.200)
		Possibility of expansion (0.194)
	Ease of securing land (0.335)	Proportion of national and public land (0.509)
		Underground obstacle (0.491)
	Local government will and resident acceptance (0.388)	Consultation with related organizations (0.535)
		Hearing of local residents' opinions (0.465)
Safety (0.235)	Risk of natural disaster (1.000)	Existence of area vulnerable to natural disaster (0.336)
		Flood vulnerability (0.271)
		Landslide vulnerability (0.216)
		Earthquake vulnerability (0.177)

안의 값이 각 지표의 상대적 중요도를 나타낸다.

3. 개발된 지표의 적용사례

개발된 평가지표들을 이용하여 우리나라 다목적댐 지역에 대해 수열에너지 개발 입지선정의 적정성을 평가 및 비교하였다. 주요 20개 다목적댐 중 개발지표의 적용을 위한 댐지역 선정을 위해 수열에너지 개발에 있어서 가장 기본적인 고려 요소인 댐의 저수량을 고려하였으며, 이에 따라 각 수계별로 연평균 저수량이 최대인 다목적댐을 선정하여 한강수계의 소양강댐, 낙동강수계의 안동댐, 금강수계의 대청댐 및 섬진강수계의 주암댐을 적용 대상으로 수열에너지 개발 입지선정의 적정성을 평가 및 비교하였다.

소양강댐 수열에너지 공급지역은 강원도청과 춘천시청이 입지한 춘천 도심에서 북동측 6 ㎞ 지점에 입지하는 것으로 가정하였으며, 이러한 경우 '춘천시 맑은물 공급사업'을 통해 소양강댐에서 춘천시에 생활용수 및 하천유지용수를 공급하기 위해 설치된 D1,500 mm 공급관로를 이용하여 원수를 공급할 수 있다. 취수지점인 소양강댐 도수터널에서 대상지까지의 거리는 4.7 km 정도 떨어져 있으며, 북춘천변전소 등 2개의 변전소 및 KT 춘천지사가 인근에 입지하고 있어 전력공급, 통신망 공급이 수월할 것으로 예상된다.

대청댐 수열에너지 공급지역은 충청북도 청주시에 위치하는 것으로 가정하였다. 대청댐과 연계된 광역상수도는 대청댐계통 광역상수도가 있으며, 현도(취)~청주, 천안(정) 등으로 연결되는 D300~D2,600 mm 도수관로, 대청(취)~청주(정)으로 연결되는 D1,650 mm 도수관로가 존재하기 때문에 기존 도수관로를 활용한 관로분기를 통하여 원수를 공급할 수 있다. 취수지점에서 후보지까지의 거리는 0.6 km 정도 떨어져 있으며, 세종 변전소 등 2개의 변전소 및 KT 충남본부가 인근에 입지하고 있어 전력공급, 통신망 공급이 수월할 것으로 예상된다.

안동댐 수열에너지 공급지역은 경상북도 안동시에 위치하는 것으로 가정하였다. 안동댐과 연계된 광역상수도가 없음에 따라 신규 하천취수가 필요하다. 후보지와 인접하여 신규 취수시설을 설치할 경우 취수지점에서 후보지까지의 거리는 0.5 km 이내로 계획이 가능하며, 안동변전소 및 KT 서안동지사가 인근에 입지하고 있어 전력공급, 통신망 공급이 수월할 것으로 예상된다.

주암댐 수열에너지 공급지역은 전라남도 순천시에 위치하는 것으로 가정하였다. 주암댐과 연계된 광역상수도는 주암댐 광역상수도가 있으며, 시설용량 596,000 m^3/일의 주암취수장으로부터 연결되는 D2,600~2,800 mm 도수관로가 존재하기 때문에, 기존 도수관로를 활용한 관로분기를 통하여 원수를 공급할 수 있다. 취수지점에서 후보지까지의 거리는 0.9 km 정도 떨어져 있으며, 서순천변전소 등 2개의 변전소 및 KT 화순지점이 30 km 내에 입지하여 관련 인프라는 양호한 것으로 판단된다. Table 3과 Table 4는 소양강댐, 대청댐, 안동댐 및 주암댐 지역에 대해 평가지표값들을 산출한 결과를 나타낸다.

수립된 평가지표를 네 개 지역에 적용한 결과, 평가지표의 총점은 소양강댐 지역이 90.77, 대청댐 지역이 86.52, 안동댐 지역이 74.65, 그리고 주암댐 지역이 78.19로 소양강댐 수열에너지 공급지역이 가장 높은 점수로 산출되어 이 지역이 다른 지역들보다 나은 입지 조건을 가지는 것으로 나타났다. 소양강댐 수열에너지 공급지역과 대청댐 지역은 비슷한 점수로 산정되었는데, 도시계획 부문이 수열에너지 개발 여건 부문보다 높은 점수 차이를 보였다. 이러한 결과가 나온 이유는 수열에너지 개발여건 부문과 달리 도시계획 부문은 평가지표값(Score) 산정시 최하등급이 '0'점이 되는 지표가 다수 존재하기 때문인 것으로 사료된다.

Table 3과 Table 4에서 각 평가인자(Factor)의 가중치(Weight)는 기본적으로 최고값 '1.0'을 기준으로 각 평가인자의 산정기준(Evaluation criteria)의 개수에 따라 균등하게 분배되도록 설정하였으나, 생태자연도 개발불가비율(Ecological natural lands not to be developed), 임상도(Forest grade), 공적규제포함비율(Public regulation inclusion ratio) 등의 일부 도시계획 부문 평가인자들은 가중치의 최고값을 '1.0', 최저값을 '0.0'으로 설정한 상태에서 각 평가인자의 산정기준의 개수에 따라 균등하게 분배되도록 설정하였다. 일부 도시계획 부문 평가인자들의 가중치의 최저값을 '0.0'으로 설정하므로써 수열에너지 개발 가능성이 도시계획 부문의 공적규제에 저촉되는지의 여부에 큰 영향을 받는 점을 평가체계에 고려하였다.

Table 3. Results of the estimation of the factors for hydrothermal energy utilization

Factor	Relative importance	Evaluation criteria	Weight	Score	So-yang	Dae-cheong	An-dong	Ju-am
Water intake method	3.058	Pipeline branch	1.00	3.058	○	○		○
		River intake	0.50	1.529			○	
Hydrothermal energy capacity (ton/day)	6.767	> 271,000	1.00	6.767		○		
		170,000～271,000	0.80	5.414	○		○	
		47,000～170,000	0.60	4.060				○
		20,000～47,000	0.40	2.707				
		< 20,000	0.20	1.353				
Annual average water temperature at discharge point (℃)	2.791	< 13.5	1.00	2.791	○	○		
		13.5～14.9	0.67	1.870			○	
		> 14.9	0.33	0.921				○
Number of days below water temperature 16℃ (days)	2.987	> 209	1.00	2.987	○	○		
		184～209	0.67	2.001			○	○
		< 184	0.33	0.986				
Environmental impact by water temperature	6.880	Pipeline branch	1.00	6.880	○	○		○
		Discharge to river	0.50	3.440			○	
Need for new water intake facility	1.465	Not needed	1.00	1.465	○	○		○
		Water intake facility needed	0.50	0.732			○	
Distance from water intake point (km)	3.729	< 0.25	1.00	3.729	○			
		0.25～0.5	0.80	2.983			○	
		0.5～0.75	0.60	2.238		○		
		0.75～1.0	0.40	1.492				○
		> 1.0	0.20	0.746				
Raw water rate for water intake and discharge point	3.388	Same	1.00	3.388	○	○	○	○
		Different	0.50	1.694				
Electricity utilization method	4.736	Dam water level and existing water intake facilities	1.00	4.736	○			
		Existing water intake facilities	0.67	3.173		○		○
		New water intake facilities	0.33	1.563			○	
		Total			34.45	32.75	22.92	26.44

Table 4. Results of the estimation of the factors for urban planning

Factors	Relative importance	Evaluation criteria	Weight	Score	So-yang	Dae-cheong	An-dong	Ju-am
Elevation difference	2.994	< 50	1.00	2.994		○	○	
		50～150	0.67	2.006	○			○
		> 150	0.33	0.988				
Slope	3.054	< 15	1.00	3.054	○	○	○	○
		15～20	0.67	2.046				
		> 20	0.33	1.008				
National Land Environmental Assessment Grade (land not to be developed) (%)	2.093	< 10	1.00	2.093	○	○	○	○
		> 10	0.50	1.047				
Ecological natural lands not to be developed (%)	2.453	< 10	1.00	2.453	○	○	○	○
		10～25	0.50	1.226				
		> 25	0.00	0.000				
Forest grade	1.021	1st or 2nd	1.00	1.021		○	○	○
		3rd or 4th	0.50	0.510	○			
		> 5th	0.00	0.000				
Public regulation inclusion ratio (%)	1.777	< 10	1.00	1.777	○			○
		10～15	0.50	0.889				
		> 15	0.00	0.000		○	○	
Distance to communication facility (km)	0.967	<5	1.00	0.967	○			
		5～10	0.67	0.648			○	○
		> 10	0.33	0.319		○		
Distance to power supply facility (km)	2.148	< 10km	1.00	2.148	○	○		
		10km～20km	0.67	1.439			○	○
		> 20km	0.33	0.709				
Availability of Power supply margin	1.914	Available	1.00	1.914	○	○	○	
		Not available	0.00	0.000				○
Distance to metropolitan transportation facility (km)	2.324	< 5	1.00	2.324		○	○	○
		5～10	0.67	1.557	○			
		> 10	0.33	0.767				
Distance to developed site (km)	2.411	< 10km	1.00	2.411		○		○
		5km～10km	0.67	1.616	○		○	
		> 10km	0.33	0.796				
Population (number)	2.918	> 300,000	1.00	2.918		○		
		100,000～300,000	0.67	1.955	○		○	○
		< 100,000	0.33	0.963				
Presence of universities	2.726	Exist	1.00	2.726	○	○	○	○
		Does not exist	0.50	1.363				

Factors	Relative importance	Evaluation criteria	Weight	Score	So-yang	Dae-cheong	An-dong	Ju-am
Planned management area (%)	0.686	> 50	1.00	0.686		○		○
		< 50	0.50	0.343	○		○	
Land scheduled for urbanization	0.659	Available	1.00	0.659	○	○	○	○
		Not available	0.50	0.330				
Possibility of expansion	0.639	Available	1.00	0.639	○	○	○	○
		Not available	0.50	0.320				
Compliance with higher-level plan	1.312	Compatible	1.00	1.312	○			
		Non-compatible	0.00	0.000		○	○	○
Underground obstacle compenation fee (won)	1.957	< 500 million	1.00	1.957		○	○	○
		> 500 million	0.50	0.979	○			
Proportion of national and public land (%)	2.029	> 10	1.00	2.029	○	○	○	○
		< 10	0.50	1.015				
Consultation with related organizations	2.470	Performed	1.00	2.470	○			
		Not performed	0.00	0.000		○	○	○
Hearing of local residents' opinions	2.147	Performed	1.00	2.147	○			
		Not performed	0.00	0.000		○	○	○
Existence of area vulnerable to natural disaster	7.896	Does not exist	1.00	7.896	○	○	○	○
		Exist	0.00	0.000				
Earthquake vulnerability level	4.160	II	1.00	4.160	○			
		I	0.50	2.080		○	○	○
Landslide vulnerability	5.076	Negilgible	1.00	5.076		○	○	○
		Not negilgible	0.50	2.538	○			
Flood vulnerability	6.368	Negilgible	1.00	6.368	○	○	○	○
		Not negilgible	0.50	3.184				
Total					56.32	53.77	51.73	51.75

4. 결 론

본 연구에서는 다목적댐 및 광역상수도 수자원 기반의 상수도 원수를 활용한 수열에너지 이용 입지선정 시 고려해야 할 평가지표들을 도출하고, 이를 적용할 수 있는 평가방법을 제시하였다. 기존의 수열에너지와 관련된 연구는 주로 개별 건축물의 냉난방 에너지 공급을 목적으로 원수의 수열에너지 잠재량 또는 공급 가능량을 산정한 연구가 대부분이었으나, 본 연구에서는 대규모 복합시설의 운영을 위한 수열에너지 개발 및 공급의 타당성 평가시 고려해야 할 수열에너지 개발과 관련된 수열에너지 취득 및 활용의 경제성, 개발지 주변 환경에의 영향, 도시계획과 관련되어 고려해야 할 사항 및 재해에 대한 안전도 등이 고려된 총체적이고 보편적인 평가체계를 마련하였다.

본 연구에서 도출된 평가지표는 '수열에너지 활용', '입지', '계획' 및 '안전'의 4개 그룹 지표들이며, 그룹별 10개의 상위지표와 34개의 세부 지표로 구성되어 있다. 이러한 지표들의 상대적 중요도를 AHP기법으로 산출하기 위하여 수열에너지 산업과 정책 입안 관련 종사자에 대한 설문조사를 실시하였다.

또한 개발된 평가지표와 상대적 중요도를 국내의 4개 지역에 적용하여 그 결과를 분석하였다. 국내의 4개 지역에 적용한 결과 안동댐 지역과 주암댐 지역은

가장 높은 점수를 받은 강원도 소양강댐 인근 춘천지역과 수열에너지 활용요소 즉 수열에너지 개발 여건에서 비교적 큰 점수 차이를 보였고, 총점이 비슷한 소양강댐 지역과 대청댐 지역 사이에는 도시계획 부문의 점수차이가 수열에너지 개발 여건 부문보다 점수 차이가 커서 실제 상수도 원수기반의 수열에너지의 개발과 이용에 있어서 수열에너지 개발 여건 자체보다 공급지의 도시계획적 여건이 입지 선정 결과에 더 큰 영향을 끼칠 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발된 수열에너지 개발 및 공급을 위한 입지 선정 평가지표들은 기존 문헌들에 대한 분석과 전문가 인터뷰를 통해 개발된 것으로서 상수도 원수를 기반으로 하는 수열에너지 개발 타당성을 평가하기 위한 기본적인 지표들로 설정되었다. 따라서 본 연구에서 개발된 지표들의 보편성과 종합적인 지표로서의 특성상 그 적용 결과는 수열에너지 개발의 초기 단계에서 입지선정의 개략적인 적정성을 판단하는데 사용되어야 할 것으로 사료된다. 그에 따라 본 연구에서 시범적으로 적용한 결과와 같이 그 적정성 평가의 결과값에 큰 차이가 없을 경우에는 수열에너지 개발과 이용의 경제성 및 사회적인 영향을 보다 심층적으로 분석 및 비교하여야 할 것으로 사료된다. 또한 향후 다목적댐 및 광역상수도 수자원 기반의 상수도 원수를 활용한 수열에너지 공급 및 운영상의 문제점을 분석하여 본 연구에서 제시된 평가지표들을 개선 및 보완하여 수열에너지 입지선정 적정성 평가방법을 고도화해야 할 것으로 사료된다.

또한 본 연구의 지표들을 적용한 사례의 결과와 같이 최종적인 평가결과는 지표값의 산정시 적용되는 가중치(Weight) 설계 내용에 영향을 받으므로 향후 추가적인 사례 분석을 통해 본 연구에서 설정한 지표값의 범위에 따른 가중치의 타당성, 적합성 및 범용성을 검토할 필요가 있는 것으로 사료된다.

사 사

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

Ahn, S.G., Choi, G.S. and Park, S.Y. (2016). “Application case of heating and cooling system using the temperature difference of raw water in a dam”, *Proceedings of KIEE 2016 Summer Conference,* 13-15 July, 2016, Yongpyeong, Korea, The Korean Institute of Electrical Engineers.

Cho, G.T., Cho. Y.G., and Kang, H.S. (2003). *Hierarchical decision-making by leading leaders*, Dong-Hyun Publishing Company.

Gyeongnam Newspaper, [Completion of carbon neutrality with hydrothermal energy] (1) Hydrothermal energy concept and domestic status (2022). https://www.knnews.co.kr/news/articleView.php?idxno=1379893 (February 25, 2024).

Ham, S. Lee, K. and Yun, R. (2019). “Prediction of technical hydrothermal energy reserves”, *Proceedings of SAREK 2019 Summer Annual Conference*, 19-21 June, 2019, Yongpyeong, Korea, The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea.

Huh, J.Y., Park, J.T., and Kim, S. (1998). “Heat energy potentials of river water in South Korea”, *Proceedings of SAREK 2022 Winter Annual Conference*, 18 November, 2022, Seoul, Korea, The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea.

HVAC&R Journal, Lotte P&D World Mall & World Tower Energy Center Technology Safety Department Mall Technology Team Assistant Manager Choi Jae-won (2021). https://www.hvacrj.co.kr/news/articleView.html?idxno=20855 (February 25, 2024).

Jeon, S., An, S., Choi, Y., and Sung, H. (2011). A study on the site selection for wind power using GIS, Korean Soc. New Renew. Energy, 7(3), 83-91.

Joo, S.M. and Choi, J.H. (2012). A study on the selection of optimal location for the photovoltaic power generation facilities in Daegu metropolitan city, J. Daegu Gyeongbuk Dev. Inst., 11(2), 173-183.

Jung, Y. (2018). Estimation of the probable maximum water thermal energy in Korean dams based on the water-energy nexus concept, J. Korean Soc. Agric. Eng., 60(2), 45-53.

Jung, Y. and Lee, H. (2019). “Energy and environmental investigation of river source heat pump systems”, *Proceedings of SAREK 2019 Winter Annual Conference*, 22 November, 2019, Seoul, Korea, The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea.

Jung, J., Nam, J., Jung, S., Kim, J., and Kim, H.S. (2018). Feasibility study on the use of river water hydrothermal

energy in Korea : (1) Estimation of the permitted standard discharge and determination of the potential water intake area, New Renew. Energy, 14(4), 27-37.

Jung, J., Nam, J., Kim, J., Jung, S., and Kim, H.S. (2019). Feasibility study on the use of river water hydrothermal energy in Korea : (2) Impact assessment of the change in water temperature of return flow on the river environment, New Renew. Energy, 15(1), 9-17.

Kim, B.S, and Lee, M.J. (2015). A study on development strategy of industrial complex using SWOT/AHP analysis theory - The case of the firms in Seoul digital industrial complex, J. Inf. Syst. Korea Assoc. Inform. Syst., 24(4), 61-81.

Kim, J., Ryoo, Y., and Park, M. (2015). Analysis of available capacity and relevant legal system for the use of temperature difference energy in a rural community, New Renew. Energy, 11(3), 21-27.

K-water. (2009). The study on heat source of raw water in Hangang area water supply system, YF-WEB-440142, 74-80.

K-water. (2014). Temperature difference cooling and heating business model development and feasibility study, 255-270.

K-water. (2019). Evaluation of impacts on water treatment efficiency and conveyance & transmission by utilzing water thermal energy, 2020-WS-RR-38-75, 83-85.

K-water. (2020a). The analysis on the hydrothermal energy capacity and survey on possible application sites, 2020-RE-RR-20-1038, 3-56, 119-136, 216.

K-water. (2020b). Study on the cooling and heating effect of water thermal energy system using stream water, KIWE-WEI-20-2, 40-80.

Kwon, Y. and Nam, Y. (2022). Annual performance snalysis of river water source heat pump system according to building type and local condition, Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng. 34(4), 163-171.

Lee, G.J, Lee, G.H. and Kang, S.W. (2017). A case study for analyzing the optimal location for a solar power plant via AHP analysis with fine dust and weather information, J. Korea Saf. Manag. Sci., 19(4), 157-167.

Lee, T.G., Kang, H.K., Lee, J.S., and Kim, D.R. (2019). “Feasibility study for applying cooling and thermal storage system using raw water”, *Proceedings of SAREK 2019 Winter Annual Conference*, 22 November, 2019, Seoul, Korea, The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea.

Lee, T.G., Kang, H.K., Moon, J.H., and Park, Y.S. (2022). “Feasibility analysis of hydrothermal energy and demand forecast in the urban development stages”, *Proceedings of SAREK 2022 Winter Annual Conference*, 18 November, 2022, Seoul, Korea, The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea.

Ministry of Environment. (2019). Research on measures to foster the hydrothermal industry, 11-1480000-001624-01, 121-135.

Ministry of Government Legislation, Korean Law Information Center (2011). https://www.law.go.kr/LSW/admRulInfoP.do?admRulSeq=2000000061231&lsId=33590&chrClsCd=010202 (February 25, 2024).

Ministry of Government Legislation, Korean Law Information Center (2016). https://www.law.go.kr/LSW/admRulInfoP.do?admRulSeq=2100000051379 (February 25, 2024).

Ministry of Trade, Industry and Energy (2020). The 5th Basic Plan for Development and Use of Renewable Energy Technology, 9-36.

Oh, K.M. and Kim., L.H. (2018). A study on the utilization of potential heat sources for heat pumps to district heating system in urban, Korean Chem. Eng. Res., 56(6), 841-855.

Park, J.T. and Chang, K.C. (2002). An investigation on quantity of unused energy using temperature difference energy as heat source and its availability, J. Energy Eng., 11(2), 106-113.

Park, I.H., Yoon, H.K., Park, J.T., Chang, K.C., and Lee, Y.S. (2005). A study on the potential energy reserve amount of domestic river water as unutilized energy resource, Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng., 17(6), 521-529.

The Seoul Institute (2020). A Study on Supply Strategy of Hydrothermal Energy in Seoul, 2020-PR-09, 3.

Yang, C.H, Kim, Y and Chung, K.S. (2012). “Economical Analysis of a Small Capacity Water Source Heat Pump utilizing Unused Energy of Underground Water Tank”, *Proceedings of SAREK 2012 Summer Annual Conference*, 18 November, 2012, Seoul, Korea, The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea.