



하수열에너지 공급 대상지 선정 방법론 개발: 잠재적 수요처의 연면적을 중심으로

Development of a methodology for selecting wastewater heat energy supply: Focusing on the gross floor area of potential demand

박기홍¹ · 전창현¹ · 오재일^{2,*}

Kihong Park¹ · Changhyun Jun¹ · Jeill Oh^{2,*}

¹고려대학교 건축사회환경공학부

²중앙대학교 사회기반시스템공학부

¹*School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University*

²*School of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University*

pp. 265-276

pp. 277-282

pp. 283-294

pp. 295-305

ABSTRACT

To mitigate carbon emissions, the government aims to transition to renewable energy sources including hydrothermal energy, specifically through wastewater heat recovery. This process involves extracting heat from wastewater or treated water. However, assessments of demand sources for local cooling and heating have predominantly focused on the proximity of nearby facilities, without conducting comprehensive demand analyses or defining explicit supply areas. This study proposes a methodology for prioritizing suitable wastewater treatment plants (WWTPs) for the implementation and expansion of renewable energy. The methodology is based on the gross floor area of potential wastewater heat demand surrounding WWTPs. Initially, potential supply and demand sources were identified based on the capacity of WWTPs and the gross floor area of buildings capable of utilizing wastewater heat. In the Republic of Korea, 330 WWTPs with a capacity of 5,000 m³/day or more have been recognized as demand sources for wastewater heat recovery. The provision of treated wastewater to structures located within a 500 m radius of the WWTPs for heat recovery is considered a feasible option. The potential wastewater heat demand and renewable energy cluster were identified among the surrounding buildings and complexes. A total of 13 potential supplies were identified, provided that the gross floor exceeded 60,000 m².

Received 20 March 2024, revised 28 August 2024, accepted 30 August 2024.

*Corresponding author: Jeill Oh (E-mail: ohjeill@cau.ac.kr; Tel. 82-2-820-5339)

1 박기홍 (박사과정) / Kihong Park (Ph. D. Student)

서울특별시 성북구 안암로 145, 02841

145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

1 전창현 (부교수) / Changhyun Jun (Associate Professor)

서울특별시 성북구 안암로 145, 02841

145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

2 오재일 (교수) / Jeill Oh (Professor)

서울특별시 동작구 흑석로 84, 06974

84, Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, 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.

Finally, after prioritizing based on WWTPs with these conditions, the underground plant located in the downtown area was ranked as the highest priority. If further analysis of economic feasibility, CO₂ reduction, and energy efficiency are conducted, this approach can be expanded and applied within the framework the Water-Energy Nexus. Wastewater heat can be utilized not only as a renewable energy source but also as a means to enhance wastewater reuse through the supply of treated wastewater.

Key words: Wastewater heat, Potential demand, Wastewater treatment plant, Prioritization, Gross floor area

주제어: 하수열에너지, 잠재적 수요처, 하수처리시설, 우선순위 결정, 연면적

1. 서 론

산업화 이전 대비 지구 평균 기온의 상승을 2℃ 이하로 유지하고, 1.5℃ 이하로 제한하기 위한 목적으로 2015년 유엔 기후변화 회의에서 파리협정을 채택하였다 (UNFCCC, 2015). 또한, 파리협정에 참여하는 모든 국가는 탄소 배출 감축을 통해 지구 평균 기온의 상승을 제한하고자 국가별 5년 단위의 탄소 배출 감축 목표를 결정하였다. 국가별로 결정한 감축 목표는 5년 주기의 이행 점검을 통해 목표달성 여부를 평가하고 있다. 이러한 국제적 흐름에 따라 국내에서는 ‘2050 탄소중립’을 목표로 6가지의 사회 부문별 시나리오를 선정하고, 재생에너지 발전 비율 확대, 전기·수소차 보급확대, 제로에너지 건축물, 그린리모델링 등을 통해 기후위기로부터 안전하고 지속가능한 탄소중립사회를 실현하고자 하였다 (2050 CNC, 2021). 국내 화석연료 대체 방안으로는 ‘신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법’(신재생에너지법)을 시행하여 신재생에너지 산업의 활성화를 위한 에너지원의 다양화와 신재생에너지의 안정적인 공급 등을 통해 신재생에너지 기반의 성장을 뒷받침하고 있다. 산업통상자원부에서 발표한 ‘제5차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획’에 따르면, 국내 신재생에너지의 비중은 2019년 1차 에너지 및 발전량 기준의 목표치를 초과 달성하였다. 하지만, OECD 36개 주요국 중 1차 에너지 기준 재생에너지의 비중은 2.4%로 최하위이며, 발전량 기준 재생에너지의 비중은 5%로 35위이다 (MOTIE, 2020). 2019년 IEA에서 발표한 ‘World Energy Outlook’에 따르면, OECD 국가 발전량 중 재생에너지의 점유율은 한국 4.5%로 OECD 평균의 4분의 1 정도로 최하위에 해당한다 (IEA, 2019).

신재생에너지 중 수열에너지는 물과 대기 온도의 차이를 이용하는 온도차 에너지로 물로부터 방출되거

나 얻은 열을 히트펌프를 통해 냉·난방 열원으로 이용이 가능하다. 하수열에너지는 수열에너지 중 하나로 미처리 하수 또는 하수처리수로부터 채열하여 생산 가능한 재생에너지를 의미하며, 냉·난방, 급탕용 열원으로 이용이 가능하다 (Jeong et al., 2017). 국외에서는 하수처리수로부터 하수열에너지 생산 및 공급 가능성을 판단하기 위해 하수처리수의 방류량, 수온, 위치 등을 기반으로 하수열에너지 공급지 선정 연구들이 진행되었다. Đurđević et al. (2019)은 크로아티아 레에카 지역 내 위치한 하수처리시설을 대상으로 하수열에너지를 활용하기 위해 수온, 부유물, 총인, 총질소 등 하수처리수의 특징과 히트펌프 성능계수 (Coefficient of performance) 분석을 통해 하수열에너지 공급 가능성을 평가하였다. Spriet et al. (2020)의 연구에서는 아일랜드의 킬러모어를 대상으로 에너지적 측면에서 하수처리수의 수온과 유량을 통한 하수열에너지 공급 가능량, 공간적 측면에서 하수처리시설을 중심으로 2 km 이내의 하수열에너지 공급이 가능한 지역, 그리고 시간적 측면에서 열 공급 시간과 수요로 하는 시간을 비교하여 하수열에너지 공급이 가능한 하수처리시설을 평가하였다.

국내 역시 하수열에너지 도입을 위한 연구가 진행되었다. Lee (2009)는 서울특별시 마곡지구 내 하수열에너지의 이용에 대한 타당성 검토를 위해 서남물재생센터 하수처리수 온도와 유량 분석을 진행하고, 하수처리시설로부터 하수열에너지 공급을 통한 지역 냉·난방 시설의 연계 및 활용방안을 제시하였다. Kim and Seung (2010)은 인천광역시의 하수처리시설들을 방류수량, 방류수 온도, 열 공급 대상 수요처 여부를 기준으로 재이용시설과 연계한 하수열에너지 도입이 가능한 하수처리시설의 우선순위를 선정하였다. 기존에 진행된 하수처리시설로부터 하수열에너지 공급 가능성을 평가한 연구들은 공급처 측면에서 하수처리수



의 온도와 유량, 수질 등 하수열에너지 생산량을 결정하는 주요한 인자들을 중심으로 다양한 분석이 진행되었다. 반면, 하수열에너지의 수요처는 하수처리시설로부터 가까운 거리에 위치한 시설들의 존재로만 평가하여 하수열에너지의 수요량 분석과 공급 가능 지역에 대한 설정이 미흡하다.

하수열에너지 생산 및 공급 과정은 하수처리시설을 중심으로 하수열에너지 공급이 가능한 지역에 대한 설정과 수요처의 규모를 통한 열에너지의 수요량에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 국내 하수처리시설의 시설용량과 하수처리시설 주변 건축물의 공간적 위치 및 연면적 기반의 하수열에너지 공급 대상지를 선정하고 하수열에너지 도입이 가능한 하수처리시설을 판단하기 위한 하수열에너지 공급 대상지 선정 방법을 제시하였다.

2. 연구방법

본 연구는 잠재적 하수열에너지의 공급 대상지역 선정, 잠재적 하수열에너지의 공급처 및 수요처 선정, 우선순위 결정을 통한 하수열에너지 공급 대상지 선정 3단계로 구분된다 (Fig. 1).

2.1 잠재적 하수열에너지 공급 대상지역 선정 방법

하수열에너지 생산과정에서 하수처리수의 수온과 유량은 열 부존량을 결정하는 데 중요한 역할을 하며, 유량에 따라 제공할 수 있는 열 부존량 결정식은 식 (1)과 같다.

$$P = \Delta T \times c \times \rho \times Q \quad (1)$$

여기서, P 는 하수열에너지 부존량, ΔT 는 하수처리수로부터 회수할 온도, c 는 하수의 비열, ρ 는 하수의 밀도, Q 는 하수의 유량을 의미한다. 회수 온도를 5°C , 하수의 비열과 밀도는 일반적인 물의 비열인 $1 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$, 밀도는 1 g/cm^3 로 하였을 때, $5,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 용량의 하수처리시설에서 생산 가능한 열에너지는 25 Gcal/day 이다. 해당 열에너지는 한국지역난방공사에서 작성된 ‘열사용시설기준’에 따라 일반 건물의 단위난방 부하기준에 따라 $12,112.4 \text{ m}^2$ 면적의 업무시설로 충분한 열공급이 가능하다 (KDHC, 2020).

환경부 ‘하수열에너지 활용 방안 연구’에 따르면, $500 \text{ m}^3/\text{day}$ 이상의 국내 하수처리장 난지물재생센터와 해운대사업소를 대상으로 하수처리수 수온을 조사한 결과는 강수로 인한 수온 감소를 제외하면 일정한 수온분포를 유지하여 수열에너지 생산이 가능한 것으로 판단되었다 (KECO, 2021). 또한, Kim and Seung (2010)은 $500 \text{ m}^3/\text{day}$ 이상의 인천광역시 공공하수처리시설에서 처리된 하수처리수의 온도를 조사한 결과 약 $10 \sim 27^{\circ}\text{C}$ 로 하수처리수를 공급하는 데 있어 적정 온도분포를 보였다. 따라서, 국내 $5,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 이상의 하수처리시설은 충분한 하수처리수 공급 및 하수열에너지 생산이 가능한 시설로 잠재적 하수열에너지 공급처 역할이 가능하다.

일본 ‘하수열에너지 매뉴얼’은 하수처리시설과 수요처 간의 거리 관계를 분석하였으며, 연면적 $30,000 \text{ m}^2$ 호텔로 하수열에너지를 공급하는 거리가 100 m 내외인 경우에는 약 47%의 에너지 절감효과와 약 41.8%의 경비 절감효과를 보여주었다 (MILT, 2015). 하수처리시설과 수요처 간의 거리가 500 m 일 경우에는 약 40.8%의 에너지를 절감할 수 있으며, 약 12.1%의 경비 절감효과를 보여주었다. 하지만, 500 m 보다 먼 거리에 위치할 경우에는 기존 보일러 사용과 큰 차이가 존재하지 않아 하수처리시설로부터 500 m 이내 위치한 수요처에 열 손실을 최소화하여 효과적으로 공급할 수 있다. 따라서, 잠재적 하수열에너지 공급 대상지역은 $5,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 하수처리시설들을 중심으로 500 m 거리 내 지역을 선정하였다.

2.2 잠재적 하수열에너지 공급처 및 수요처 선정 방법

대상지역 내 잠재적 하수열에너지 수요처는 건축물의 연면적을 기준으로 수요처를 선정하였다. 국내 신재생에너지법은 군사시설을 제외한 공공시설, 문교·사회시설, 상업용 시설 중 신축·중축·개축하는 각 건축물의 연면적 $1,000 \text{ m}^2$ 이상을 설치의무 대상건축물로 선정하였다 (MOTIE, 2021). 더하여 하수처리수 재이용은 물재이용법 내 시설물의 연면적이 $60,000 \text{ m}^2$ 이상 건축물에 대해 하수처리수 재이용을 의무화하였다 (MOE, 2022a). 하수처리수 공급을 통한 하수열에너지 생산과 물 재이용은 물 측면(Water for energy)과 에너지 측면(Energy for water)의 상호의존적 관계를 통한 지속가능한 이용 방법으로 Water-Energy Nexus

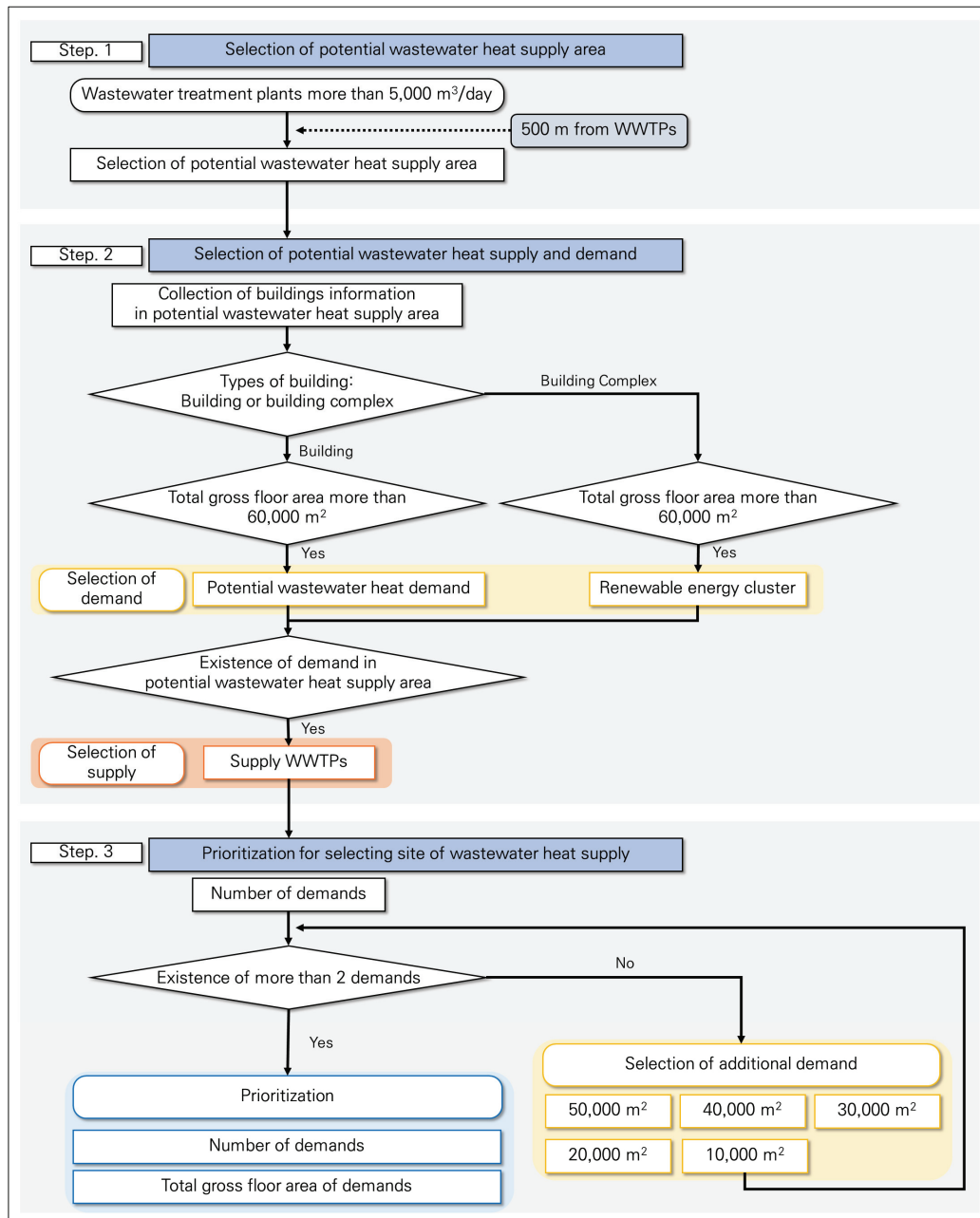


Fig. 1. Flowchart of wastewater treatment plant prioritization for applying wastewater heat recovery.

관점의 접근이 가능하다 (IEA, 2012). 60,000 m² 연면적의 업무용 시설은 ‘열사용시설기준’에 따르면 연간 45,201.6 Gcal에 해당하는 열 부하량이 필요하다 (KDHC, 2020). 이는 2021년도 한국지역난방공사에서 판매한 업무용 열의 2.5%에 해당하며, 해당 연면적을 보유한 건축물은 많은 열을 수요로 한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 연면적 60,000 m² 이상의 건축물은

법률에 근거하여 신재생에너지 및 물 재이용 의무적 도입이 가능하고, 연간 많은 열을 수요로 하므로 연면적 60,000 m² 이상의 건축물을 잠재적 하수열에너지 수요처로 선정하였다.

재생에너지 클러스터는 하수처리수 장외공급 범위를 넓히고자 동일한 관리처에서 관리하는 시설물 단지 중 잠재적 수요처로써 하수열에너지 추가 활용이 가능

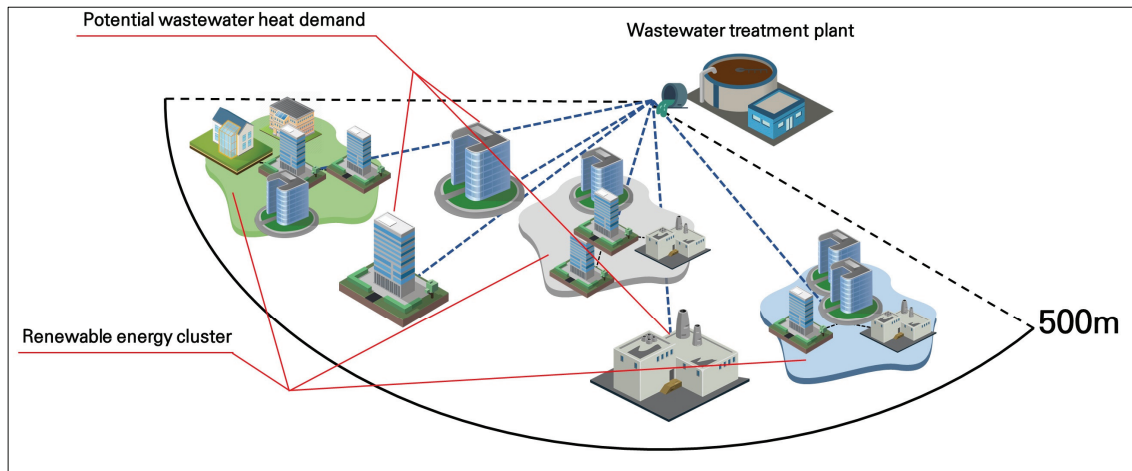


Fig. 2. Schematic diagram of wastewater heat demand.

한 수요처들의 집합체를 의미한다. 재생에너지 클러스터는 시설물 단지의 총 연면적 조건이 $60,000 \text{ m}^2$ 이상을 만족하는 수요처를 대상으로 공간 분석을 진행하였다 (Fig. 2). 잠재적 수요처로 선정된 시설물과 재생에너지 클러스터가 1곳인 하수처리시설은 추가적인 하수처리수 및 하수열에너지 공급을 위하여 $60,000 \text{ m}^2$ 보다 작은 연면적 조건인 $50,000 \text{ m}^2$, $40,000 \text{ m}^2$, $30,000 \text{ m}^2$, $20,000 \text{ m}^2$, $10,000 \text{ m}^2$ 연면적을 보유한 건축물을 추가 잠재적 수요처 및 재생에너지 클러스터로 선정하였다. 잠재적 수요처 기준 연면적 변화에 따라 신재생에너지법에 충족하며, 기존 물재이용법 법률에서 벗어나 확대 적용할 경우를 고려하였다.

2.3 우선순위 결정을 통한 하수열에너지 공급 대상지 선정 방법

본 연구에서는 충분한 하수처리수 공급을 통한 하수열에너지 공급과 수요가 가능한 잠재적 하수처리시설 및 수요처를 선정하였다. 하수열에너지 공급 대상지 선정은 잠재적 하수열에너지 공급처로 선정된 잠재적 수요처 및 재생에너지 클러스터 결과를 바탕으로 $60,000 \text{ m}^2$ 이상의 연면적을 보유한 잠재적 수요처와 재생에너지 클러스터가 2곳 이상일 경우를 하수열 도입 최우선 하수처리시설의 우선순위 결정을 통해 선정하였다. 또한, 우선순위 결정방법은 수요처 관점에서 하수열에너지 활용이 충분한 수요처 수 및 연면적을 보유하고 있는지 평가하였다. 먼저, 수요처의 수를 통한 우선순위 결정방법은 $60,000 \text{ m}^2$ 이상의 연면적

을 보유한 잠재적 수요처가 2곳 이상 존재하는 시설에 대해 총 수요처의 수가 많은 순으로 우선순위를 선정하였다. 앞선 결정방법으로 우선순위가 동일할 경우, 우선순위 결정방법은 잠재적 수요처와 재생에너지 클러스터 내 수요처의 총 연면적 합이 넓은 순으로 선정하였다. 또한, 잠재적 수요처의 수가 1곳인 수요처는 추가 잠재적 수요처 및 재생에너지 클러스터의 수와 연면적을 통해 동일한 방법으로 추가 수요처의 우선순위를 선정하였다.

3. 결 과

3.1 대상지역

본 연구는 국내 시설용량 $5,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 이상의 하수처리시설 330곳을 대상으로 진행하였다 (Fig. 3). 330개 시설의 총 시설용량은 $25,963,600.0 \text{ m}^3/\text{day}$ 이며, 방류량은 총 $19,211,165.8 \text{ m}^3/\text{day}$ 이다. 서울 4곳, 부산 12곳, 대구 7곳, 인천 13곳, 광주 3곳, 대전 1곳, 울산 8곳, 세종 3곳, 경기도 101곳, 강원도 22곳, 충청도 41곳, 전라도 38곳, 경상도 69곳, 제주 8곳으로 전국에 위치하며, 서울·인천·경기지역에 집중되어 있다.

3.2 잠재적 하수열에너지 공급 대상지역 선정결과

하수처리수 공급이 가능한 시설용량 $5,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 이상 하수처리시설의 정보를 고려하기 위하여 환경부에서 제공한 최근 10년간 '하수도 통계'를 통해 국내

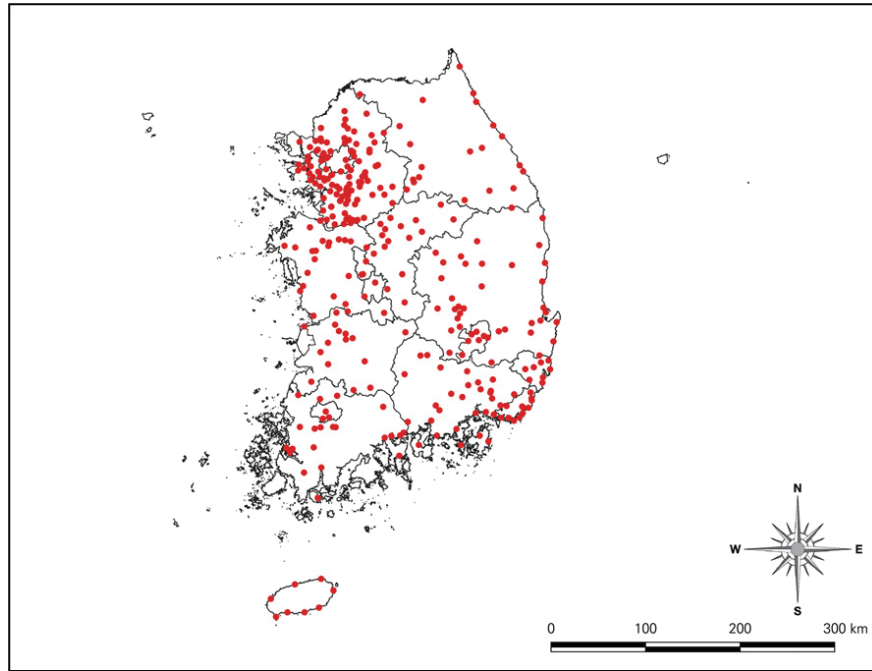


Fig. 3. Location of the wastewater treatment plants more than 5,000 m³/day in the Republic of Korea.

하수처리시설 정보를 수집하였다. ‘2013 하수도 통계’부터 ‘2022 하수도 통계’ 자료를 활용하여 하수처리시설별 설계된 시설용량, 실제 연평균 방류량 정보를 수집하였다 (Table 1). 최근 10년간 시설용량 5,000 m³/day 이상 하수처리시설의 수와 총 시설용량은 증가하였다. 시설용량 5,000 m³/day 이상 하수처리시설의 총 연평균 방류량은 평균 약 19,122,047.3 m³/day로 일정하였다. 최근 10년간 작성된 ‘하수도 통계’자료 중 본 연구에서는 최근 하수처리시설의 정보가 반영된 ‘2022

하수도 통계’를 활용하여 잠재적 하수처리시설 공급처로 선정하였다. 공간적 정보 형성을 위해 ‘2022 하수도 통계’ 자료에서 하수처리시설의 위치정보인 소재지를 수집하였다.

잠재적 하수열에너지의 수요처 정보를 확인하고자 국토교통부에서 제공하고 있는 ‘용도별 건물정보’를 통해 건축물의 연면적 정보와 위치정보를 수집하였다. 또한, 단일 건물이 아닌 동일한 관리처에서 관리하는 건축물 단지들의 정보를 수집하고자 건물명, 건

Table 1. The number of wastewater treatment plants with a facility capacity of 5,000 m³/day or more, along with the total facility capacity and the total average daily discharge over the past decade

Year	Number of WWTP more than 5,000 m ³ /day	Total facility capacity (m ³ /day)	Total average daily discharge (m ³ /day)
2013	277	24,599,200.0	19,493,343.0
2014	286	24,234,600.0	19,170,381.0
2015	290	24,602,400.0	18,060,323.2
2016	306	24,847,400.0	19,221,737.2
2017	307	25,2764,640.0	18,810,594.0
2018	310	25,269,240.0	19,350,891.3
2019	319	25,493,200.0	18,834,779.1
2020	325	25,648,400.0	19,495,421.2
2021	329	25,885,600.0	19,571,837.6
2022	330	25,963,600.0	19,211,165.8

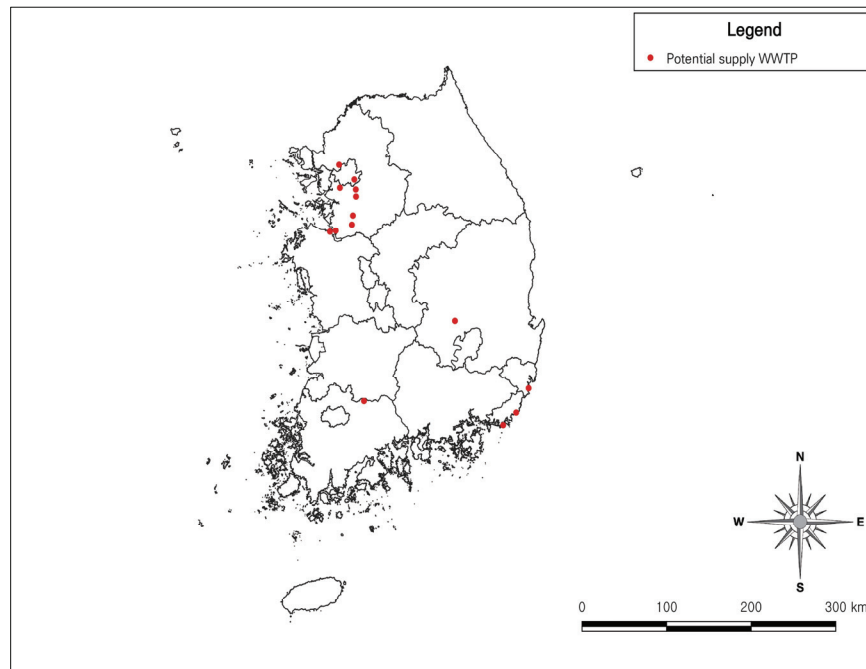


Fig. 4. Location of the potential wastewater heat supply.

물주부구분코드, 지번, 건물식별번호를 이용하여 하나의 건축물 단지로 그룹화하였다.

3.3 잠재적 하수열에너지 공급처 및 수요처 선정결과

국내 시설용량 5,000 m³/day 이상의 하수처리시설을 대상으로 500 m 이내 시설물 존재를 확인하여 하수처리시설로부터 하수처리수 공급하는 과정에서 에너지 소비와 포함된 열의 온도 감소를 최소화할 수 있는 공급 조건의 공급 대상지역을 선정하였다. 또한, 공급 대상지역 내 건물 중 연면적 60,000 m² 조건을 부합하는 건물을 하수열에너지 수요처로 선정하였다. 공급 대상지역 내 수요처가 존재하는 하수처리시설을 공급처로 활용이 가능한 본 연구의 최종 평가대상 하수처리시설로 선정하였다. 국내 법률에 대한 확대 적용을 위해 추가 연면적 조건에 해당하는 시설물 존재를 확인하고 선정하였다 (Fig. 4). 500 m 내 연면적 60,000 m² 이상의 수요처가 존재하는 하수처리시설은 총 13 곳이며, 이 중 경기도 내 7곳의 하수처리시설이 포함되어 있다.

본 연구에서는 잠재적 수요처와 동일한 관리처의 건축물 단지를 재생에너지 클러스터로 정의하였다. 잠재적 수요처와 재생에너지 클러스터를 모두 동일한

조건의 수요처로 통합하여 결과를 도출하였다 (Fig. 5). 하수열에너지 수요량을 알아보기 위하여 잠재적 수요처와 재생에너지 클러스터 내 건축물 연면적 총합을 계산하였다 (Table 2). Neugebauer et al. (2015)은 하수처리시설 중심의 하수열에너지 공급 평가 사례로 오스트리아의 하수처리시설을 대상으로 하수처리시설의 시설용량과 거리에 따라 하수열에너지 공급원의 잠재적 평가를 진행하였다. 하수처리시설에서 150 m에서 1,000 m 내 수요처가 위치한 경우 수요를 초과하는 하수열에너지 공급에 적합하다고 평가하였다. 또한, Spriet et al. (2020)의 연구에서는 에너지적, 공간적, 시간적 측면에서 아일랜드 하수처리시설로부터 2 km 이내 지역 단위의 난방 공급 가능성을 평가한 결과, 연간 기준의 소비된 열보다 더 많은 열 생산이 가능한 것을 확인하였다. 본 연구에서는 앞선 사례와 달리 지역 단위의 수요처보다 작은 연면적 조건을 만족하는 일부 건축물 혹은 건축물 단지의 수요처로 공급하여 충분한 열 공급이 가능할 것으로 판단된다.

선정된 하수처리시설들의 일평균 방류량을 통해 방류된 하수처리수에서 5℃의 열을 회수한 결과를 산정하였다 (Table 3). J 하수처리시설을 제외한 공급 가능한 연간 열 부존량은 전체면적 60,000 m² 이상의 건축물에 충분한 열 공급이 가능하다. J 하수처리시설의

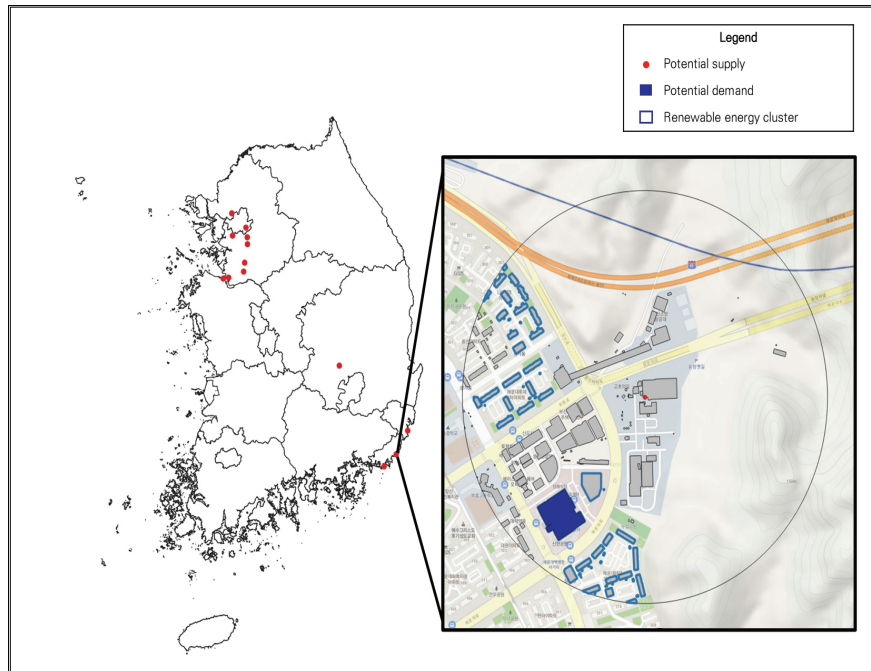


Fig. 5. Example of potential demand and renewable energy cluster.

Table 2. The number and total gross floor areas of the potential demand larger than 60,000 m² within 500 m from the potential supply

Wastewater treatment plant	Administrative district	Number of demands	Total gross floor area (m ²)
A	Anyang, Gyeonggi-do	1	84,933.7
B	Dangjin, Chungcheongnam-do	1	146,106.7
C	Gumi, Gyeongsangbuk-do	1	169,095.0
D	Busan	4	359,046.5
E	Pyeongtack, Gyeonggi-do	1	66,560.6
F	Busan	1	83,794.1
G	Ulsan	1	67,377.1
H	Osan, Gyeonggi-do	2	261,765.2
I	Sungnam, Gyeonggi-do	6	571,027.6
J	Pyeongtak, Gyeonggi-do	1	100,913.6
K	Goyang, Gyeonggi-do	1	100,072.6
L	Yongin, Gyeonggi-do	3	257,717.1
M	Seoul	1	66,486.0

열 부존량은 연면적 60,000 m² 이상의 건축물이 요구하는 열 수요량의 약 97% 정도로 하수열에너지 공급 및 활용에 충분한 활용이 가능할 것으로 판단된다.

하수처리시설별 수요처 선정결과에 따라 4곳의 D 하수처리시설, H 하수처리시설, I 하수처리시설, L 하수처리시설을 제외한 시설들에서 각각 한 개의 잠재적 수요처 혹은 재생에너지 클러스터가 생성되었다.

물의 재이용이 법적으로 의무화된 연면적 60,000 m² 이상의 건물이 1곳씩 존재한다는 것을 확인할 수 있다. 반면, 4곳의 하수처리시설은 2곳 이상의 잠재적 수요처 및 재생에너지 클러스터가 존재한다. 잠재적 수요처와 재생에너지 클러스터의 수에 따라 시설물의 연면적의 합 역시 증가하였으나, H 하수처리시설의 수요처 중 넓은 연면적의 창고시설로 인해 수요처의



Table 3. Average daily discharge and annual heat load from the potential supply

Wastewater treatment plant	Average daily discharge (m ³ /day)	Annual heat load (Gcal)
A	169,748.7	309,791.4
B	19,114.7	34,884.3
C	129,789.7	236,866.2
D	36,363.7	66,363.8
E	60,514.1	110,438.2
F	49,131.7	89,665.4
G	92,411.0	168,650.1
H	76,333.2	139,308.1
I	34,793.9	63,498.9
J	24,004.3	43,807.8
K	17,460.9	31,866.1
L	121,065.1	220,943.8
M	753,754.2	1,375,601.4

수가 적으나 수요처 연면적의 넓이가 더 넓은 것을 확인할 수 있다. 연면적이 넓을수록 냉·난방 사용량이 많아져 열 수요가 증가함에 따라 해당 4곳의 하수처리시설들은 충분한 열 수요처가 존재하여 공급처 역할이 가능한 것으로 판단된다. 나머지 하수처리시설들은 잠재적 수요처 및 재생에너지 클러스터의 수가 1곳으로 수요처 조건 변화를 통해 하수열에너지 활용 범위를 확대하고자 하였다.

신재생에너지 사용 범위 확대를 위해 설정된 추가 잠재적 수요처와 재생에너지 클러스터는 50,000 m² 이상, 40,000 m² 이상, 30,000 m² 이상, 20,000 m² 이상,

10,000 m² 이상의 연면적을 보유한 추가 잠재적 수요처와 재생에너지 클러스터로 설정하였다. 해당 추가 잠재적 수요처 내 공급 가능한 시설물들의 총 연면적 결과를 비교·분석하였다 (Table 4). 대체로 연면적 기준이 감소함에 따라 이를 만족하는 추가 잠재적 수요처와 재생에너지 클러스터의 수는 증가하였으며, 기존 60,000 m² 이상의 연면적 건물의 수가 1곳이었던 시설 중 A 하수처리시설과 B 하수처리시설을 제외한 하수처리시설들은 기준 감소에 따라 하수처리수 공급을 통한 하수열에너지 활용이 가능한 수요처의 증가를 보였다.

Table 4. The number and total gross floor areas of the potential demand larger than 50,000 m², 40,000 m², 30,000 m², 20,000 m² and 10,000 m² within 500 m from the wastewater treatment plants

Wastewater treatment plant	≥ 50,000 m ²		≥ 40,000 m ²		≥ 30,000 m ²		≥ 20,000 m ²		≥ 10,000 m ²	
	Number of demands	Total gross floor area (m ²)	Number of demands	Total gross floor area (m ²)	Number of demands	Total gross floor area (m ²)	Number of demands	Total gross floor area (m ²)	Number of demands	Total gross floor area (m ²)
A	1	84,933.7	1	84,933.7	1	84,933.7	1	84,933.7	1	84,933.7
B	1	146,106.7	1	146,106.7	1	146,106.7	1	146,106.7	1	146,106.7
C	1	169,095.0	1	169,095.0	1	169,095.0	1	169,095.0	6	238,204.0
E	1	66,560.6	1	66,560.6	1	66,560.6	3	117,488.1	4	130,535.1
F	1	83,794.1	1	83,794.1	1	83,794.1	2	109,060.9	2	109,060.9
G	1	103,270.6	1	103,270.6	2	143,255.7	2	143,255.7	2	143,255.7
J	1	100,913.6	1	100,913.6	1	100,913.6	2	125,251.0	4	15,489.1
K	1	199,678.4	2	245,712.0	3	284,616.8	3	284,616.8	5	313,466.3
M	1	66,486.0	2	110,231.4	2	110,231.4	3	136,798.8	5	19,172.6

3.4. 우선순위 결정을 통한 하수열에너지 공급 대상지 선정결과

선정된 하수처리시설별 결과를 바탕으로 하수열에너지 도입이 가능한 하수처리시설을 평가하고 우선순위를 선정하였다. 먼저, 물재이용법과 신재생에너지법의 적용을 통해 해당 조건을 만족하는 하수처리시설 주변으로 하수열에너지 잠재적 수요처 및 재생에너지 클러스터 수가 2곳 이상 존재하는 연면적 조건에 따라 하수처리시설 간 비교 및 평가를 진행하였다. 만약 해당 조건의 결과가 동일한 경우 잠재적 수요처와 재생에너지 클러스터 내 연면적의 총합을 통해 평가하여 하수처리시설을 우선순위로 선정하였다. 또한, 1개의 잠재적 수요처가 존재하는 하수처리시설은 추가 잠재적 수요처를 통해 동일한 방법으로 우선순위를 결정하였다. 상위 13개의 하수처리시설에 대한 수요처 중심의 우선순위를 결정하였다 (Table 5). 지역에너지 생산을 위해 사전평가를 진행한 사례에서 Neugebauer et al. (2022)은 오스트리아, 체코, 독일, 크로아티아 및 이탈리아의 하수처리시설들을 대상으로 하수처리시설의 용량에 따른 에너지적 관점, 수요처와의 거리에 따른 공간적 관점과 화석연료 대신 활용하여 환경적 관점으로 평가하였다. 에너지적 관점과 공간적 관점의 평가 내용에서 본 연구의 조건은 에너지 생산을 위한 적합한 조건으로 판단되며, 수요처의 수요량을 추가로 고려함에 따라 하수열에너지를 활용하는 수요

처 관점에서 평가할 수 있다.

I 하수처리시설은 60,000 m² 이상의 수요처 및 재생에너지 클러스터가 6곳으로 가장 많은 잠재적 수요처가 존재하여, 하수열에너지 도입에 가장 적합하다고 판단된다. I 하수처리시설은 하수처리시설이 지하에 설치됨으로써 기존 하수처리시설들과 달리 도심지 내에 위치한다. 도시에 위치하기 때문에 다른 건물들과 인접하여 하수처리수를 공급하는 데 있어 도심지와 거리가 있는 다른 하수처리시설들에 비해 거리상 제약이 존재하지 않는다. I 하수처리시설의 열 부존량은 연간 63,498.9 Gcal로 모든 잠재적 수요처에 대한 열 공급이 부족하나 주변 시설이 대부분 업무시설로 사용이 많은 특정 시간 동안 활용과 보조 열원으로써 추가 활용이 가능하다고 판단된다. 다음으로 선정된 D 하수처리시설은 조건을 만족하는 시설물들이 다수 존재할 뿐만 아니라 열의 이용이 많은 대형 의료시설과 다수의 공동주택 단지가 위치하여 하수열에너지를 이용하는 수요처로써 적합하다고 판단된다.

3.5. 하수열에너지 도입을 위한 추가적 고려사항

본 연구에서는 하수열에너지 도입 가능성 및 우선순위 선정을 위해 하수처리시설의 시설용량을 통해 잠재적 공급처를 판단하였다. 잠재적 공급처를 중심으로 건축물의 연면적 조건을 만족하는 건물을 잠재적 수요처와 동일한 관리처의 건물 단지에 대해 재생

Table 5. Priority of the wastewater treatment plants

Rank	Wastewater treatment plant	Cluster condition (m ²)	Number of demands	Total gross floor area (m ²)
1	I	≥ 60,000	6	571,027.6
2	D	≥ 60,000	4	359,046.5
3	L	≥ 60,000	3	257,717.1
4	H	≥ 60,000	2	261,765.2
5	K	≥ 40,000	2	245,712.0
6	M	≥ 40,000	2	110,231.4
7	G	≥ 30,000	2	143,255.7
8	E	≥ 20,000	3	117,488.1
9	J	≥ 20,000	2	125,251.0
10	F	≥ 20,000	2	109,060.9
11	C	≥ 10,000	6	238,204.0
12	B	≥ 10,000	1	146,106.7
13	A	≥ 10,000	1	84,933.7



에너지 클러스터를 선정하였다. 하지만, 최하위로 선정된 A 하수처리시설의 경우, 클러스터의 수와 총 수요처 연면적이 적으나 해당 클러스터를 구성하는 시설물의 종류가 지하철역으로 하수열에너지를 활용하기 위한 지역으로 구분되기에 적절하다. 또한, 기존 진행된 Nagpal et al. (2021)의 연구에서는 하수열에너지 활용을 위하여 기기 수준, 건물 수준, 하수관 수준, 하수처리시설 수준으로 나누어 하수열에너지 도입방안을 제안하였으며, 각 수준에 따른 하수 온도, 하수량, 하수 조건을 평가하였다. 정확한 부존량을 평가하기 위해서는 Lokietek et al. (2022) 및 Shelton and Hays (2022)의 연구와 같이 하수처리시설의 일일 방류량에 대한 검토와 방류량에 따른 공급 가능 수요처에 대한 분류 그리고 히트펌프의 성능과 연계된 연구가 필요하다. 또한, Golzar and Siveria (2021)는 수요량에 대한 평가를 위해 연면적 기반의 평가뿐만 아니라 해당 건물의 용도에 따라 수요량이 변화하기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 추가로, Kretschmer et al. (2021) 및 Neugebauer et al. (2022)의 연구에서는 하수열에너지 활용 시 기존 열에너지 생산방법과 비교해 CO₂ 저감량 및 에너지 효율에 대한 분석과 하수열에너지 설치에 대한 경제성 분석을 통해 우선순위를 선정하는 탄소 배출 및 에너지 효율 관점의 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 하수처리시설을 중심으로 하수열 에너지 공급 대상지를 선정하기 위해 국내 5,000 m³/day 이상의 시설용량을 보유한 하수처리시설을 대상으로 500 m 내 위치한 잠재적 수요처를 확인하였다. 연면적 60,000 m² 이상의 건축물과 건축물 단지를 잠재적 수요처 및 재생에너지 클러스터를 선정하였다. 또한, 신재생에너지 범위 확대 방안으로 수요처 선정의 기준을 확대하여 50,000 m²부터 10,000 m²에 해당하는 시설물을 추가 잠재적 수요처와 재생에너지 클러스터로 설정하였다. 최종적으로, 잠재적 수요처의 수와 총 연면적의 합을 기반으로 하수열에너지 도입이 가능한 하수처리시설의 우선순위를 선정하여, 하수열에너지의 우선 도입이 가능한 하수처리시설을 판단하였다.

총 13곳의 하수처리시설이 잠재적 공급처로써 활용

이 가능하다. 잠재적 수요처가 1곳인 공급처들을 대상으로 잠재적 수요처의 연면적 범위를 확대하여 수요 기반의 추가 잠재적 수요처를 확인하였다. 60,000 m² 이상의 수요처 및 재생에너지 클러스터를 기준으로 I 하수처리시설은 6곳으로 가장 많은 잠재적 수요처가 존재하였다. 해당 하수처리시설은 지하에 설치된 하수처리시설로 기존 하수처리시설들과 달리 도심지 내에 위치하여 다른 건물들과 인접한 조건을 보유하고 있어 하수열에너지 공급 대상지로 적합하다. 추가 잠재적 수요처 및 재생에너지 클러스터로 설정하여 더 넓은 범위에서 활용 가능한 수요 기반의 하수처리시설 우선순위 결정이 가능하였다.

본 연구에서 제안한 수요처 연면적 기반의 하수열 에너지 공급 대상지 선정 방법은 기존 화석연료를 대체할 에너지원으로 하수열에너지 활용에 대해 신도시 개발 및 택지개발 등 도시재생 사업 추진과 공공하수처리시설 연계를 통한 에너지 활용방안이다. 또한, 장외용수 활용방안으로 본 연구의 하수열에너지 생산 및 공급을 통한 하수열 에너지의 충분한 활용이 가능하다. 물 재이용과 신재생에너지 이용을 동시에 적용하여 물과 에너지의 지속가능한 이용과 두 자원 간의 상호의존적 관계를 고려한 Water-Energy Nexus 관점에서 하수처리수 장외 재이용과 신재생에너지 범위의 하수열에너지 이용이 가능하다. 또한, 하수처리시설을 중심으로 하수처리수 재이용 및 하수열에너지 활용을 위한 지역 선정에도 주요 평가방법으로 고려될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 상하수도 혁신 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2020002700015).

References

- 2050 Carbon Neutrality and Green Growth Comission (2050 CNC). (2021). 2050 Carbon Neutral Scenario, 1-146.
- Đurđević, D., Balić, D., and Franković, B. (2019). Wastewater heat utilization through heat pumps: The case study of City of Rijeka, J. Clean. Prod., 231, 207-213.

pp. 265-276

pp. 277-282

pp. 283-294

pp. 295-305

- Golzar, F., and Silveira, S. (2021). Impact of wastewater heat recovery in buildings on the performance of centralized energy recovery - A case study of Stockholm, *Appl. Energy*, 297, 117-141.
- International Energy Agency (IEA). (2012). Water for Energy: Is Energy Becoming a Thirstier Resource?, *World Energy Outlook 2012*(4), 501-508.
- International Energy Agency (IEA). (2019). *World Energy Outlook 2019*, 1-180.
- Jaramillo, M.F., and Restrepo, I. (2017). Wastewater reuse in agriculture: A review about its limitations and benefits, *Sustain.*, 9(10), 1734.
- Jeong, J.W., Nam, J.S., and Kim, H.S. (2017). Examples of hydrothermal energy use of domestic sewage and river water, *Water for future*, 50(10), 50-58.
- Kim, S.W., and Seung, E.H., Incheon Development Institute (IDI). (2010). Schemes for using heat energy from sewage treatment plants in Incheon Metropolitan City, 63-65.
- Kim, Y.I. (2016). A plan to establish a sustainable water reuse system, *J. Water Policy Econ.*, 27, 19-30.
- Korea District Heating Corp. (KDHC). (2020). Heat-using facility standards, 3-101.
- Kretschmer, F., Hrdy, B., Neugebauer, G., and Stoeglehner, G. (2021). Wastewater treatment plants as local thermal power stations—modifying internal heat supply for covering external heat demand, *Processes*, 9(11), 1981.
- Lee, G.O., and Park, J.Y. (2020). A case study on utilization of industrial wastewater reuse, *J. Korea Soc. Ind. Converg.*, 23(1), 17-24.
- Lee, Y.S. (2009). Feasibility study on district heating Magok area by sewage water heat source, *Mag. Soc. Air-Cond. Refrig. Eng. Korea*, 357-362.
- Lokietek, T., Tuchowski, W., Leciej-Pirczewska, D., and Głowacka, A. (2022). Heat Recovery from a Wastewater Treatment Process—Case Study, *Energies*, 16(1), 44.
- Ministry of Environment (MOE). (2011). Master plan for water reuse (2011~2020), 4-7.
- Ministry of Environment (MOE). (2021). 2nd Master plan for water reuse (2021~2030), 7-9.
- Ministry of Environment (MOE). (2022a). Promotion of and support for water reuse act, 8-10.
- Ministry of Environment (MOE). (2022b). Enforcement decree of promotion of and support for water reuse act, 12.
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT). (2015). *Wastewater heat manual*, 1-139.
- Ministry of Trade Industry and Energy (MOTIE). (2020). 5th Master plan for technology development using and dissemination of renewable energy, 1-54.
- Ministry of Trade Industry and Energy (MOTIE). (2021). Act on the promotion of the development, use and diffusion of new and renewable energy, 12.
- Nagpal, H., Spriet, J., Murali, M.K., and McNabola, A. (2021). Heat recovery from wastewater—A review of available resource, *Water*, 13(9), 1274.
- Neugebauer, G., Kretschmer, F., Kollmann, R., Narodoslawsky, M., Ertl, T., and Stoeglehner, G. (2015). Mapping thermal energy resource potentials from wastewater treatment plants, *Sustain.*, 7(10), 12988-13010.
- Neugebauer, G., Lichtenwoehr, P., Huber, F., Stoeglehner, G., and Kretschmer, F. (2022). Potentials and integrated suitability pre-assessment of wastewater treatment plants as local energy cells, *Front. Environ. Sci.*, 9, 785557.
- Park, H.J., Kim, T.I., and Han, M.Y. (2014). Determinant factor analysis for the spread of water reuse, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 36(4), 271-276.
- Shelton, J., and Hays, K. (2022). Assessment of the exergy and power density potential in the effluent flow of wastewater treatment plants, *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 53, 102456.
- Spriet, J., McNabola, A., Neugebauer, G., Stoeglehner, G., Ertl, T., and Kretschmer, F. (2020). Spatial and temporal considerations in the performance of wastewater heat recovery systems, *J. Clean. Prod.*, 247, 119583.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCC). (2015). ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT, 1-32.
- Wester, J., Timpano, K. R., Cek, D., Lieberman, D., Fieldstone, S. C., and Broad, K. (2015). Psychological and social factors associated with wastewater reuse emotional discomfort, *J. Environ. Psychol.*, 42, 16-23.