

## 제주도 용천수의 수열에너지 잠재량 분석: 현황과 전망

김도희<sup>1</sup> · 이진용<sup>1,†</sup> · 김남주<sup>2</sup> · 이재욱<sup>3</sup> · 장지욱<sup>1</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지질학과

<sup>2</sup>㈜지오엔지니어링

<sup>3</sup>한국수자원공사

### Analysis of hydrothermal energy potential of spring water in Jeju Island: Current status and perspectives

Dohee Kim<sup>1</sup> · Jin-Yong Lee<sup>1,†</sup> · Namju Kim<sup>2</sup> · Jae-Uk Lee<sup>3</sup> · Jiwook Jang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

<sup>2</sup>Geo Engineering, Jeju 63125, Republic of Korea

<sup>3</sup>Korea Water Resources Corporation, Jeju 63309, Republic of Korea

#### 요 약

최근 온실가스의 증가로 이상기후가 빈번하게 일어나고 있다. 이를 해결하기 위해서 신·재생에너지의 사용량을 점차 늘리고 있다. 신·재생에너지 중 수열에너지는 물의 열에너지를 이용하는 것으로, 기존의 난방기보다 20-50% 이상 감축시키는 장점이 있다. 제주도에는 용천수가 넓게 분포하고 있으며, 유출량도 많기 때문에 수리지질학적 특성을 이용하여 수열에너지에 대한 잠재량을 평가하였다. 제주도 내 용천수는 약 646개소이며, 이 중 유출량이 확인된 용천수에 대한 수열에너지의 잠재량을 산정하였다. 용천수의 총유출량은 480,504 m<sup>3</sup>/day이며, 이론적 잠재량은 27,807 MW이고, 기술적 잠재량은 난방의 경우 27,807 MW, 냉방의 경우 22,561 MW로 산정되었다. 제주도는 용천수에 대한 수열에너지의 잠재량이 냉·난방 에너지에 대한 수요를 감당할 수 있지만, 실제 사용하기 위해서는 추가적인 제도 보완 및 용천수의 관리가 필요하다.

**주요어:** 수열에너지, 신·재생에너지, 용천수, 잠재량, 제주도

**ABSTRACT:** Recently, abnormal climate events are occurring more frequently due to the increase in greenhouse gases. To solve this problem, we are gradually increasing the amount of new and renewable energy used. Among new and renewable energies, hydrothermal energy has the advantage of using the thermal energy of water, reducing energy consumption by up to 20-50% compared to conventional heating equipment. Since spring water is widely distributed on Jeju Island and there is a large amount of runoff, the potential amount for hydrothermal energy was evaluated using the hydrogeological characteristics. There are approximately 646 spring waters on Jeju Island, and we calculated the potential amount of hydrothermal energy for the spring waters that have been confirmed to have leaked. The total discharge of spring water was 480,504 m<sup>3</sup>/day, the theoretical potential was 27,807 MW, and the technical potential was estimated to be 27,807 MW for heating and 22,561 MW for cooling. Although Jeju Island has the potential amount of hydrothermal energy for spring water, it can easily handle the demand for cooling and heating energy, but in order to actually use it, additional institutional support and management of spring water are required.

**Key words:** hydrothermal energy, new and renewable energy, spring water, potential, Jeju Island

<sup>†</sup>Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: [hydrolec@kangwon.ac.kr](mailto:hydrolec@kangwon.ac.kr)

## 1. 서론

온실가스의 증가로 인해 지구온난화가 진행되었고, 2021년 지구 평균기온이 산업화 이전보다 약 1.11°C가 높아졌다(WMO, 2021). 국내에서도 겨울과 봄에는 가뭄이 심화되었고 여름에는 집중호우가 증가하였으며 태풍의 발생 빈도도 증가하였다(KMA, 2020). 기상청의 지역기후 예측모델에서 2050년도에는 기온이 현재보다 약 1.3-1.9°C가 증가할 것으로 전망하였다.

전 세계적으로 기후변화에 대응하기 위해서 2015년 파리기후협정을 체결하였다(UNFCCC, 2015). 우리나라는 2050 탄소중립을 목표로 재생에너지를 확대 방안을 마련하였다. 탄소배출량을 2017년 대비 2025년까지 40-75% 감축하는 '2050 장기 저탄소 발전전략' (5가지 시나리오)를 제출했다(Park *et al.*, 2022a). 탄소중립은 각 나라들뿐만 아니라 국제적 기업에서도 노력하고 있으며, 2050년까지 기업에서 사용되는 전력 100%를 재생에너지로 대체하는 RE100 (Renewable Energy 100) 글로벌 캠페인을 진행하고 있다(Lee *et al.*, 2023). RE100 공식 홈페이지에 따르면 2023년 2월 현재 RE100에 가입되어 있는 기업은 총 398개이며, 처음에는 애플, 구글 등의 주요 글로벌 기업이 주로 참여하였으나, 최근에 참여 기업이 크게 증가하였다. 현재는 우리나라를 포함한 아시아 국가들의 참여도 증가하고 있다.

탄소 저감 관련 정책 수행에 있어 에너지 수급 공백을 채우려면 신·재생에너지의 사용량을 늘리는 것이 필요하다. 신·재생에너지의 종류로는 태양광, 태양열, 풍력, 수열, 지열 등이 있으며, 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」 제5조에 따라 우

리나라는 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획을 5년마다 수립하여야 한다. 2020년 '제5차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획'에 따르면 2034년 에너지 발전량 중 신·재생에너지 비중을 25.8%로 목표하였고, 이 중 신·재생 열에너지 활용 및 공급 확대를 세부 추진계획으로 설정하였다(MOTIE, 2020).

신·재생에너지 중 수열에너지는 물의 열에너지를 이용하는 것으로 여름에는 대기보다 차가운 수온을 이용하여 건물의 열을 물을 통해 대기로 방출하고, 겨울에는 대기보다 따뜻한 수온을 이용하여 건물 내부에 열을 공급한다(그림 1). 수열에너지는 다른 신·재생에너지에 비해 주변에 풍부한 자원을 가지고 있으며, 날씨나 계절의 영향을 덜 받고, 기존 난방기보다 이산화탄소의 발생량을 약 20-50% 감축시키는 장점이 있다(Hyeon *et al.*, 2020). 국외에서는 1960년대부터 수열에너지를 사용해왔고, 특히 일본은 수열에너지의 핵심 설비인 히트펌프 기술을 활발히 개발하였다(Jung *et al.*, 2017; Cho and Yoon, 2020). 또한 히트펌프를 이용한 냉·난방도 재생에너지로 인정해주는 등 수열에너지의 범위가 넓고, 정책적으로 지원하고 있어 대규모의 수열에너지 개발이 가능하다. 대표적인 나라는 프랑스 파리, 스웨덴 스톡홀름 등이며 이 지역에서는 수열에너지를 지역단위의 냉·난방시스템으로 이용하여 해수, 하천수, 지하수를 수열원으로 사용하고 있다. 하지만 국내는 아직 수열에너지에 대한 인식이 부족하여, 냉·난방시스템은 수열에너지보다 지열에너지에 더욱 활성화가 되어있고, 법령으로도 수열원의 범위가 해수의 표층수와 하천수로 한정되어 있는 등 수열에너지의 보급과 활성화에 제한적이다.

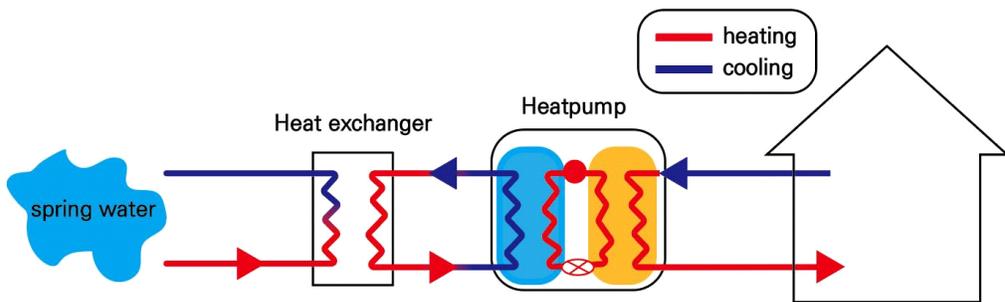


Fig. 1. Concept of supplying hydrothermal energy using spring water.

현재 국내에서는 지하수 및 호수 등의 다양한 수열원을 수열에너지 범위에 포함하기 위해 제도개선을 추진 중에 있으며, 최근에는 유출지하수를 활용한 냉·난방시스템을 수열에너지로 인정받기 위해 노력 중이다. 또한, 지역에너지계획을 수립할 때 수열에너지의 활용방안을 넣는 등의 정책적으로도 수열에너지의 활성화를 위해 노력하고 있다. 국내에서는 다양한 제품의 히트펌프를 개발하여 수출되고 있으며(Lee, 2023), 2006년 주암댐 발전소 건물을 시작으로 수열에너지가 점차 확대되고 있다(Jung *et al.*, 2018). 국내의 대표적인 수열에너지 사업으로는 부산 롯데타운, 잠실 롯데월드타워 등이 있고, 환경부에서 주관하는 총 9곳의 시범대상지가 2023년 착공에 들어갈 예정이다.

제주도에서도 다양한 수열원을 활용한 냉·난방 시스템 연구가 수행 중이다(Park *et al.*, 2014a; Kang *et al.*, 2018; RDA, 2018). 농촌진흥청에서는 용천수를 활용한 시설하우스의 난방시스템 시범사업을 진행하여 온풍난방기에 비해 74.1%의 에너지소비 비용이 감소하는 것을 실증하였다(RDA, 2020). 제주도에는 용천수가 넓게 분포하고 유출량이 많기 때문에 용천수를 수열에너지로 활용할 수 있는 가능성이 매우 높다. 본 연구는 제주도 용천수를 수열에너지로 활용할 수 있는 가능성과 잠재량 평가하기 위해서 수행하였다.

## 2. 연구지역 및 연구방법

### 2.1 연구지역

제주도는 한반도의 남서쪽에 위치한 화산섬으로 총 면적은 1,850.28 km<sup>2</sup>이다. 제주도의 인구수는 1992년 505,784명에서 2021년 697,476명으로 꾸준히 증가하고 있으며, 72.7%가 제주시에 거주한다(Jeju, 2022). 지형적 특성으로는 동서 방향의 길이가 길고 남북방향의 길이가 짧아 긴 타원형의 모양이며, 동서 사면은 경사가 완만하지만, 남북 사면은 상대적으로 급한 경사를 보인다. 해발고도는 200 m 이하인 저지대가 55.3%, 1,000 m 이상인 고산지대는 4.5%이며, 평균고도 283.3 m이다. 제주도는 국내 다른 지역에 비해 겨울철에도 온화하고, 겨울이 짧으며 여름이 가장 길고, 8월 평균기온이 가장 높다. 제주 평균기온은 16.2°C, 고산 15.7°C, 성산 15.6°C, 서귀

포 16.9°C로 서울 연평균 기온 12.8°C에 비해 약 2.8-4.1°C 높다.

제주도에는 중앙부에 한라산(해발고도 1,950 m)이 있으며, 약 368개의 오름이 다양한 화산암체로 산재하고 있다. 제주도는 크게 4단계의 화산활동을 거쳐 형성된 섬으로 많은 분화구에서 다양한 형태의 분출이 이루어져 지질 및 지질구조가 복잡하다(Lee, 1982; Lee and Yun, 2012). 기반암은 중생대 백악기 화강암과 산성 화산암으로 구성되어 있으며(Kim *et al.*, 2002), 이를 U층이 피복한다(Koh, 1997). 화산활동은 신생대 제4기 수성 화산활동과 함께 시작되었으며(Sohn and Yoon, 2010), 수성 화산활동은 약 1백만 년 넘도록 지속되어 서귀포층이 만들어졌고, 이로 인해 제주도가 해수면 위로 성장하면서 높은 섬이 만들어졌다(Sohn *et al.*, 2008). 이후 화성활동으로 인해 용암대지 및 순산화산이 만들어졌으며, 이들의 K-Ar 연령이 3만-80만년 사이이므로 제주도의 형성은 홀로세 이전에 거의 끝났다(Tamanyu, 1990; Lee *et al.*, 1994). 주 구성암석은 현무암류로 제주도 전체의 90% 이상을 차지하며, 이외에 조면암, 조면질 안산암, 쇠철성 퇴적암으로 구성되어 있다(Park *et al.*, 2000)(그림 2).

## 2.2 연구방법

### 2.2.1 자료수집

이번 연구에서는 수열에너지에 관한 선행 연구로부터 수집된 기초자료와, 최근 30년간의 기후자료를 이용하여 지역별 기후변화를 분석하고, 기후변화가 용천수에 미치는 영향 및 수열에너지로서의 용천수 잠재량을 분석하였다. 기상 자료는 제주(북부), 고산(서부), 서귀포(남부), 성산(동부) 기상관측소에서 1991년부터 2021년까지 측정된 자료를 수집하였다. 제주도에 분포하는 용천수는 2016년과 2022년의 제주특별자치도 용천수 관리계획에서 용천수의 위치 및 용출량, 수온 등의 자료를 수집하여 수열에너지로서의 잠재량 분석에 이용하였다. 2023-2100년까지의 강수량을 추정하기 위해 IPCC 5차 보고서에서 사용한 대표농도경로(RCP, Representative Concentration Pathways) 시나리오 중 온실가스의 저감 정책이 실현된 RCP 4.5와 현재 추세로 온실가스가 배출되는 RCP 8.5로 계산된 강수량 자료를 수집하여 지하수 함양량을 산정하였다(KMA, 2023).

2.2.2 자료분석

용천수는 지하수가 지표면으로 용출되는 것으로, 기후변화에 따른 용천수의 변화량을 산정하기 위해서는 제주도의 지하수 함양량의 변화를 산정할 필요가 있다. 현재의 지하수 함양량은 제주도 지하수 관측연보(JRI, 2021)에 제시되어 있는 1,603.60 백만 m<sup>3</sup>/year 값을 사용하였다. 향후 30년 후의 지하수 함양량은 RCP 4.5 시나리오와 RCP 8.5의 자료로부터 강수량을 산정하였고, 함양률은 현재와 같은 40.58%를 적용하였다.

제주도 용천수의 고도, 온도, 용출량을 평균, 최대값, 최소값을 고려하여 관측자료의 결과치를 분석하였고, 관측된 데이터의 범위에서 벗어난 이상값들은 제거하였다. 또한 QGIS 3.22 버전을 이용하여 제주도에 용천수의 분석항목별 공간적인 특성을 분석하였다.

2.2.3 잠재량 종류 및 분석방법

한국에너지공단에서 제공한 신재생에너지 백서에 따르면 신재생에너지에 대한 잠재량 산정은 이론적 잠재량(Theoretical potential), 기술적 잠재량(Technical potential), 시장 잠재량(Market potential)로 구분할 수 있다. 이론적 잠재량은 현재의 과학적 지식에서 다른 제약이 존재하지 않았을 때 활용가능한 에너지의 양을 말한다. 잠재량 분석 방법은 일본 NEDO의 「최신 미이용 에너지 활용 매뉴얼」(Park and Chang,

2002; Park *et al.*, 2005; KWRS, 2009)에서 사용한 공식을 적용하였다.

$$E = \Delta t \cdot C \cdot Q$$

여기서  $E$ 는 잠재량(Mcal/month)이며,  $\Delta t$ 는 열의 온도차(°C),  $C$ 는 물의 비열(1 Mcal/m<sup>3</sup>·°C),  $Q$ 는 유량(m<sup>3</sup>/month)을 나타낸다.  $\Delta t$ 는 환경변화와 에너지 효율을 고려하여 5°C로 가정하였다. 기술적 잠재량은 이론적 잠재량에 환경적, 기술적 효과 등 동적 특성을 고려하였을 때 활용가능한 에너지의 양으로 지리적 제약을 받게 된다. 또한, 원수의 온도변화가 열펌프 성능에 미치는 영향이 있으므로 히트펌프 시스템의 COP (Coefficient of Performance, 성능 계수)가 기술적 잠재량 계산법에 반영된다. 이번 연구에서 유출지하수 COP는 신재생에너지 설비심사 GT101 물대물 지열 열펌프 유닛을 참조하여 용천수 COP의 냉방 4.3을 적용하였으며(Park *et al.*, 2014b), 「수열에너지 잠재량 분석 및 적지조사」(Park *et al.*, 2020)에 따라 난방은 이론적 잠재량과 기술적 잠재량이 동일한 계산법을 사용하였다.

$$Cooling: E_c = \frac{COP}{COP+1} E_a$$

$$Heating: E_H = E_a$$

시장 잠재량은 경제적, 정책적 영향요인 등을 적

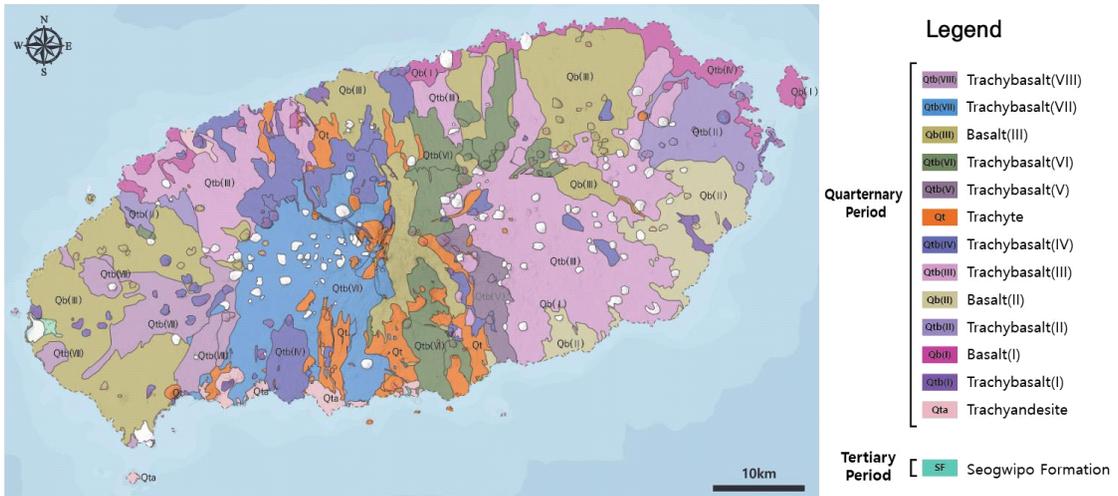


Fig. 2. Geological map of Jeju Island modified from Park *et al.*, 2000.

용하였을 때 활용 가능한 에너지의 양을 말한다. 정부의 신재생에너지 정책 및 지원, 규제가 큰 영향인 자이므로 잠재량은 매우 유동적이다. 본 연구에서 잠재량 평가 시 이론적 잠재량과 기술적 잠재량을 산정하였고, 시장 잠재량은 제외하였다. 평가에 사용된 용천수는 하천수와 동일하게 온도 변화량 5°C, 비열은 1 kcal로 설정하였다(Park *et al.*, 2020).

잠재량의 단위는 *TJ/year*와 *MW*로 표기하였다.

$$1 \text{ TJ/year} = 0.031710 \text{ MW}$$

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 강수량

최근 30년간 강수량은 증가와 감소를 반복하며 소

폭 상승 중이며(그림 3a), 각각의 기상대에 측정된 평균 강수량은 제주 1,502.2 mm, 고산 1,183.0 mm, 성산 2,030.0 mm, 서귀포 1,989.6 mm로 서쪽지역보다 동쪽지역, 북쪽지역보다 남쪽지역의 강수량이 더 많았다. 2013년은 제주도에서 가뭄이 일어나 모든 지역에서 연평균 강수량 대비 약 57-67%의 적은 강수량을 보였으며, 1999년에는 평균강수량이 2,425 mm으로, 연평균강수량 대비 약 114-168%로 가장 많았다. 월별로 보면 6-9월의 강수량이 집중되어 있으며 이 기간의 연 강수량은 53-58%를 차지한다. 강수량이 가장 적은 계절은 12-2월이며 평균 43-79.8 mm이다. 지역별 강수량 편차는 강수량이 적은 겨울에 편차가 크지 않았고, 봄과 가을에 강수 편차가 매우 크게 나타났으며, 최대 편차는 128 mm이다(그림 3b). 2022-2052년까지 기후변화 시나리오 RCP 4.5로

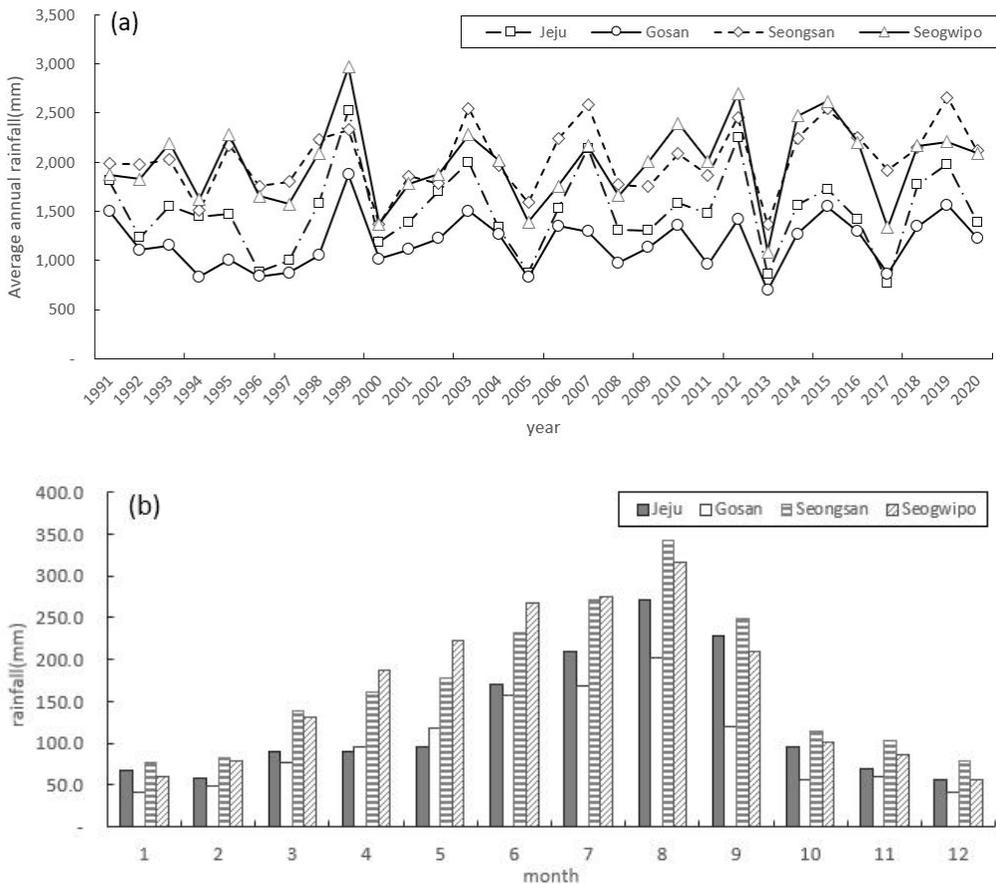


Fig. 3. Average precipitation for 30 years at the synoptic observation stations in Jeju island. (a) rainfall change by year, (b) rainfall change by monthly.

계산된 제주도의 강수량은 2,356.8 mm이며, RCP 8.5는 2,645.1 mm이다(KMA, 2023). 두 시나리오 모두 2023년의 강수량보다 상승하였으며, RCP 8.5 시나리오의 상승률이 더 높았다. RCP 4.5와 8.5의 시나리오로 2100년까지 분석한 결과 RCP 8.5 시나리오의 강수량이 조금 더 상승하는 추세를 보였으며, 전체적으로 강수량은 RCP 4.5와 8.5 모두 증가하는 추세를 보였다(그림 4).

### 3.2 용천수

제주도는 현무암류로 구성된 수리지질학적 특성에 용천수가 잘 발달하였다. 지하수가 개발되기 이전까지 제주도에서는 물이 귀한 존재로 여겨졌고, 과거 용천수는 제주도에서 중요한 상수원으로 활용되어 용천수를 따라 마을을 형성되기도 하였다. 이후 상수도 및 지하수 개발이 이뤄지면서, 수원으로서의 활용도가 떨어지고 용천수가 체계적으로 관리되지 않아 수질이 악화되는 등의 문제점이 야기되고 있다. 이에 제주도는 2016년 용천수 관리계획을 수립하고, 전수조사를 실시하여 용천수의 보전 및 관리를 시행하고 있다. 제주연구원에서 수행한 2022년 용천수 전수조사 결과 646개소로 확인되었으며, 2016년 전수조사 이후 추가로 발견된 용천수는 17개소, 수량이 고갈되거나 매립된 용천수는 31개소이다. 용천수는 제주도 385개소(59.6%), 서귀포시 261개소(40.4%)로 각각 동쪽 지역에 많이 분포한다. 고도가 100m 이내에 위치하는 용천수는 528개소(81.7%)로 대부분 저지대에 위치하며 고도가 높아질수록 용

천수의 분포가 감소하는 경향을 나타낸다(표 1). 제주도 내 용천수 중 현재까지 이용되는 곳은 160개소이고, 미사용 용천수는 484개소이며 대부분의 미사용 용천수는 용출되는 즉시 하천이나 바다로 유출되고 있다. 현재 이용되고 있는 용천수는 대부분 생활용과 농업용으로 이용되며 세부용도로는 물놀이시설, 목욕탕, 공원, 도로유지용수, 소화용 등으로 사용되고 있다(Park *et al.*, 2022b)(그림 5).

#### 3.2.1 용출량

제주도에 분포하는 용천수는 서귀포시 동지역이 130개소로 가장 많이 분포하며, 표면면이 14개소로 가장 적게 분포하고 있다. 또한, 고도별로 살펴보면 200 m 이하인 저지대에 위치하는 용천수는 580개소로 전체 용천수 중 89.8%를 차지하며, 이 중 공유수면에 위치하는 용천수는 231개소이다. 200-500 m 지대는 32개소, 500 m 이상인 고지대는 34개소의 용천수가 분포한다. 용천수 646개소의 용출량 측정 결과는 0-19,401 m<sup>3</sup>/day의 넓은 범위를 보이며, 총 용출량은 480,504 m<sup>3</sup>/day이다(표 2). 지역별로 분류한 결과 서귀포 동 지역이 106,560 m<sup>3</sup>/day로 가장 많았으며, 제주도 한경면이 2,091 m<sup>3</sup>/day로 가장 적었다. 용출량은 측정 불가능한 지점이 219개소로 간조 시 해수와 혼합되거나 물이 고여있어 유량 측정이 불가능한 지점이 219개소이며 이들은 공유수면과 해안선 밖에 위치하는 용천수이다. 용출량이 500 m<sup>3</sup>/day 이하인 용천수는 261개소 501-1,000 m<sup>3</sup>/day 46개소, 1,001-2,000 m<sup>3</sup>/day 45개소이다. 용출량이 2,000 m<sup>3</sup>/일

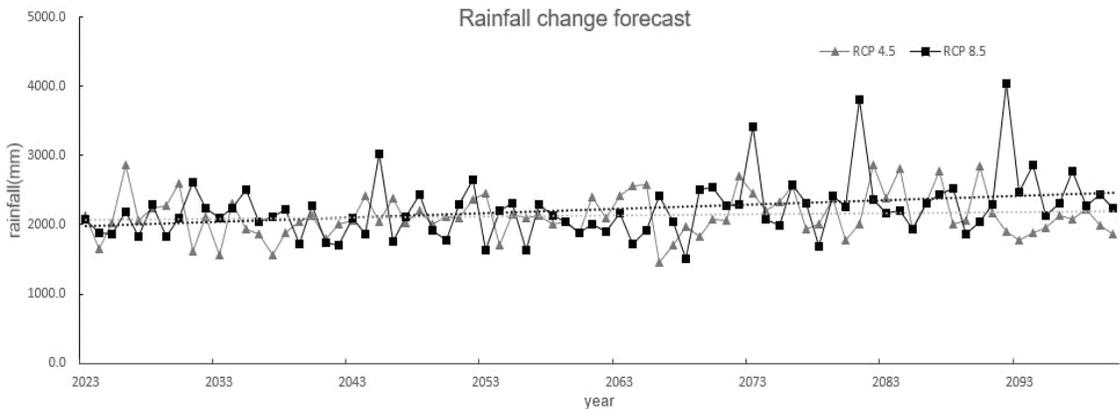
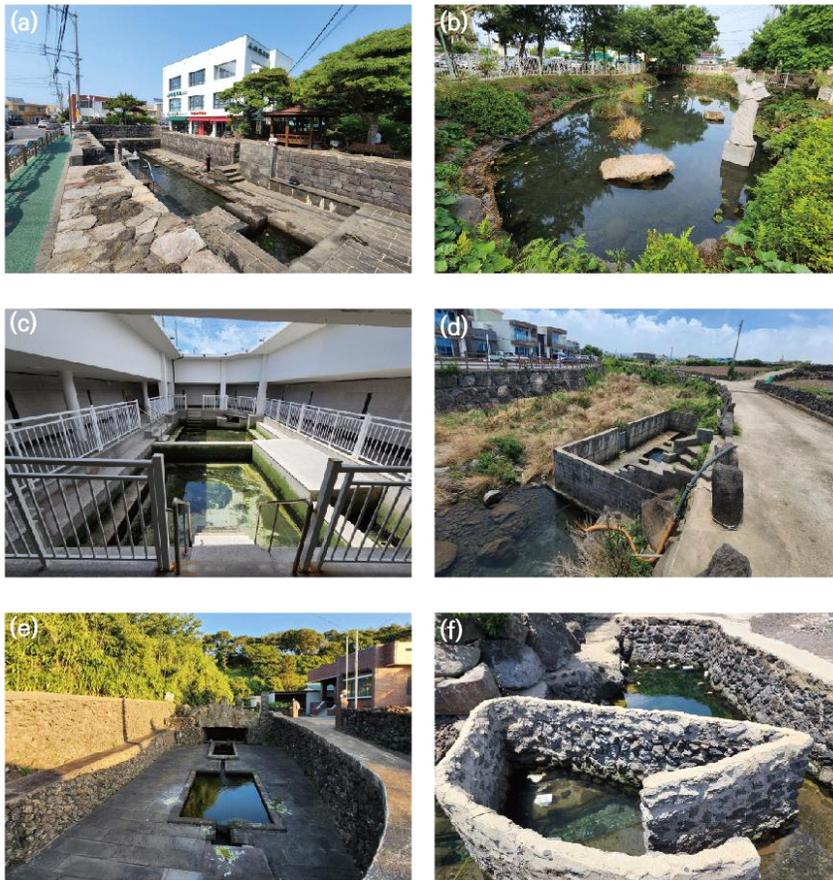


Fig. 4. Rainfall changes with climate change scenarios of RCPs 8.5 and 4.5. Data are from Korea Meteorological Administration.

**Table 1.** Number of spring water according to altitude.

Area		0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-1,000	1,000 over
Total		528	52	20	9	3	17	17
Jeju -si	Jejusi-dong	82	7	7	3	1	11	6
	Gujwa-eup	46	1	2	1	-	-	-
	Aewol-eup	54	12	4	-	1	3	3
	Jocheon-eup	62	-	2	1	-	-	-
	Hangyeong-myeon	25	-	-	-	-	-	-
	Hallim-eup	48	2	-	1	-	-	-
Seogwipo -si	Seogwiposi-dong	101	13	4	2	1	2	7
	Namwon-eup	20	5	1	-	-	1	1
	Daejeong-eup	21	-	-	-	-	-	-
	Seongsan-eup	27	-	-	-	-	-	-
	Andeok-myeon	28	12	-	1	-	-	-
	Pyoseon-myeon	14	-	-	-	-	-	-



**Fig. 5.** Jeju spring water status (a) spring water used as a swimming pool, (b) spring water used as a park, (c) Spring water used as a public bathhouse, (d) spring water used as a agricultural water, (e) unmanaged spring water, (f) well managed spring water.

초과인 지점은 75개소로 서귀포시 동쪽 지역이 15개소, 제주시 조천읍이 13개소로 많다(그림 6).

3.2.2 수온

용천수의 수온은 기온, 계절 등의 영향을 받기 때

Table 2. Spring water output by discharge.

Area	No vaule	0-500	500-1,000	1,000-1,500	1,500-2,000	2,000 over	
Total	219	261	46	28	17	75	
Jeju -si	Jejusi-dong	40	47	9	7	4	10
	Gujwa-eup	20	13	2	3	3	9
	Aewol-eup	27	36	5	2	-	7
	Jocheon-eup	14	26	4	5	3	13
	Hangyeong-myeon	15	8	2	-	-	-
	Hallim-eup	15	16	6	2	2	10
Seogwipo -si	Seogwiposi-dong	33	63	11	5	3	15
	Namwon-eup	10	12	1	1	1	3
	Daejeong-eup	12	5	3	-	-	1
	Seongsan-eup	16	2	2	1	1	5
	Andeok-myeon	11	27	1	1	-	1
	Pyoseon-myeon	6	6	-	1	-	1

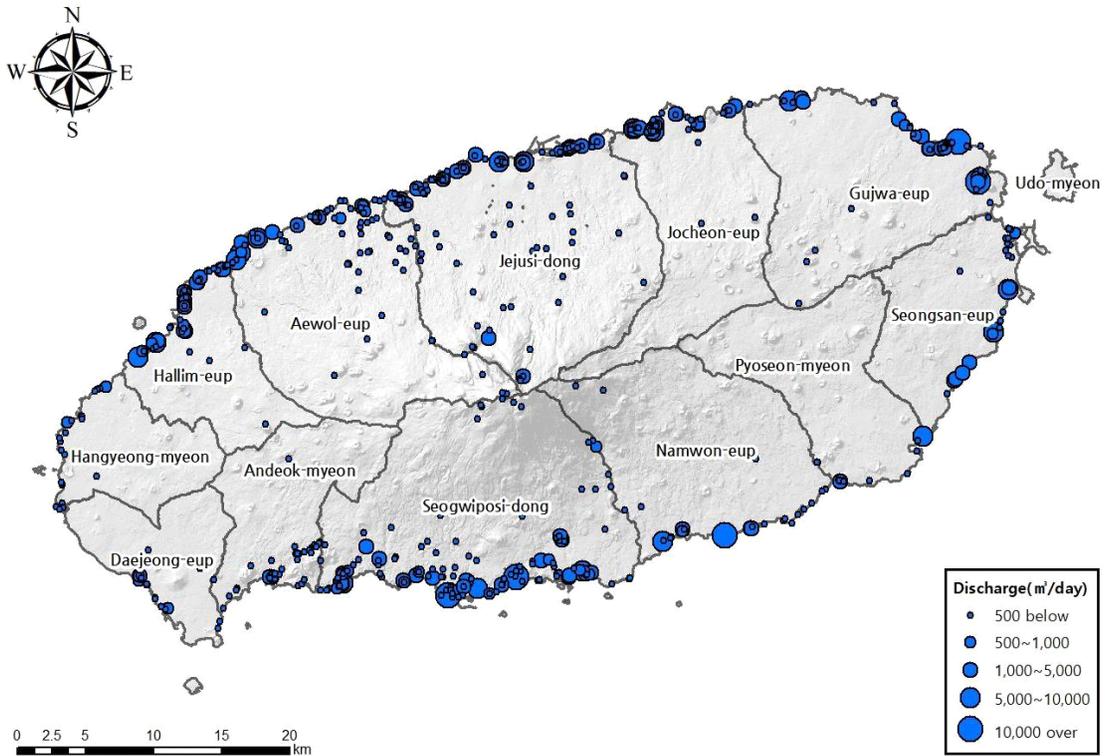


Fig. 6. Distribution of spring water discharge measured in 2021.

문에 측정시기에 따라 차이가 날 수 있다. 전수조사 시 측정된 수온의 범위는 1-25°C를 보이며 평균 온도는 16°C이고, 수온 측정이 불가능한 지점은 61개소이다. 10°C 이하의 용천수는 총 21개소이며 애월읍이 9개소로 가장 많고 남북 방향으로 분포하며 대부분 한라산과 인접한 곳의 수온이 가장 낮았다. 10-14°C의 온도를 보이는 용천수는 총 57개소이며, 제주시 동지역이 가장 많이 분포하며 주로 중산간지역에 위치한다. 가장 많이 분포하는 온도는 14-18°C이며 459개소로 전체 용천수 중 71.1%를 차지한다. 대체적으로 한라산 중심부에서 멀어지면서 용천수의 수온이 상승하는 경향을 보인다(그림 7).

### 3.3 잠재량 평가

#### 3.3.1 이론적 잠재량

위치가 확인된 용천수 646개소는 총용출량이 480,504 m<sup>3</sup>/day이며, 연간으로 산정하면 총용출량은 175.4 백만m<sup>3</sup>/year이다. 최근 지하수의 함양량은 1,603.6 백만m<sup>3</sup>/year이므로 지하수의 약 0.11%가 용출되는

것으로 산정되었다. 단순히 현재의 용출량으로만 계산한 이론적 잠재량은 27,807 MW이며, 서귀포 동지역이 6,167 MW으로 잠재량이 가장 크고, 제주시 한경면이 121 MW로 가장 작다. RCP 4.5의 시나리오를 이용한 지하수 함양량은 1,856.7 백만m<sup>3</sup>/year이며, 이때 용출량은 203.1 백만m<sup>3</sup>/year로 예상된다. 앞으로 온실가스 저감 정책이 실현되었을 경우 용천수의 이론적 잠재량은 32,196 MW이다. RCP 8.5 시나리오를 이용한 지하수 함양량은 2,083.9 백만m<sup>3</sup>/year이며, 이때 용출량은 227.9 백만m<sup>3</sup>/year로 예상되고 용천수 잠재량은 36,135 MW이다. RCP 4.5보다 RCP 8.5의 잠재량이 크게 산정되었는데, 이는 현재 상태로 계속해서 기후변화가 일어난다면 집중호우가 빈번해지면서 강수량이 늘기 때문이다. 강수량만을 고려하면 수열에너지의 잠재량은 점차 증가하는 경향을 보였지만 집중호우 등이 발생하는 경우에는 지표 유출량이 증가하기 때문에 수열에너지의 잠재량은 감소할 수도 있다. 그러나 이번 연구에서는 집중호우를 고려하지 않았다. 그러므로 추후에 세부적인 예

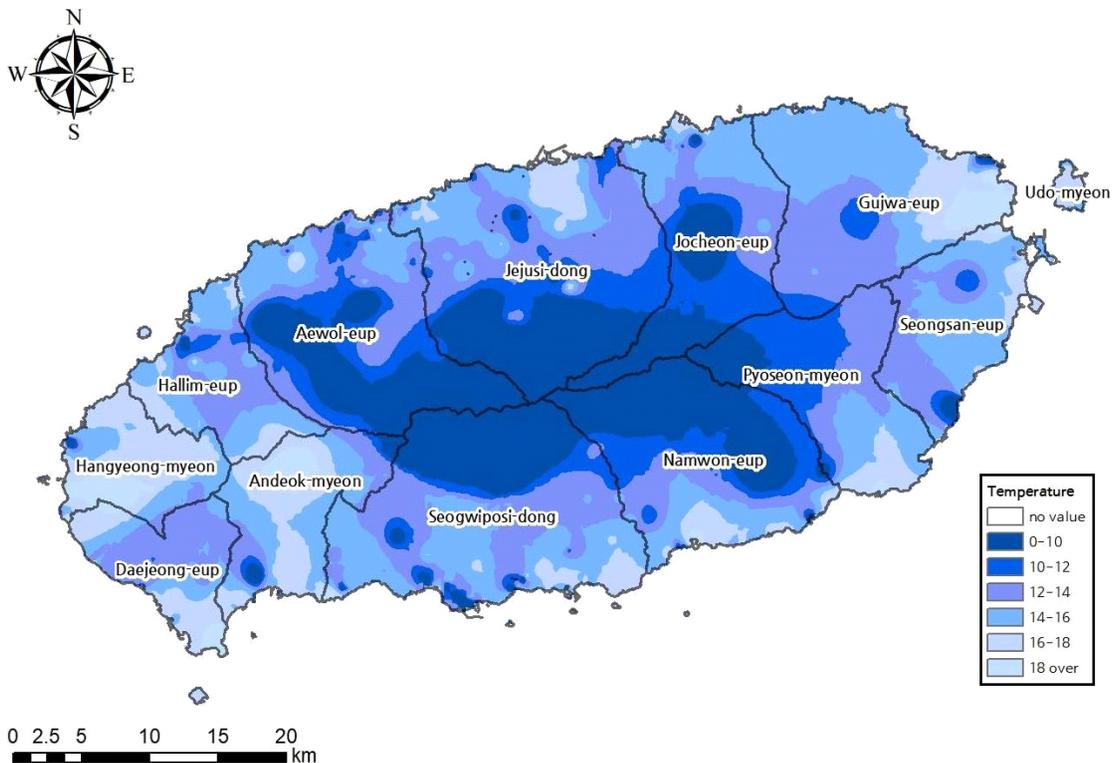


Fig. 7. Distribution of spring water temperature measured in 2021.

**Table 3.** Hydrothermal energy potential by region of spring water in Jeju island.

Area	Output (m/year)	Theoretical potential (MW)	Technical potential of cooling (MW)	Technical potential of heating (MW)
Total	480,504	27,807	27,807	22,561
Jeju -si	Jejusi-dong	65,618	3,797	3,081
	Gujwa-eup	65,765	3,806	3,088
	Aewol-eup	43,717	2,530	2,053
	Jocheon-eup	68,809	3,982	3,231
	Hangyeong-myeon	2,091	121	98
	Hallim-eup	50,101	2,899	2,352
Seogwipo -si	Seogwiposi-dong	106,560	6,167	5,003
	Namwon-eup	27,392	1,585	1,286
	Daejeong-eup	5,866	339	275
	Seongsan-eup	30,514	1,766	1,433
	Andeok-myeon	6,508	377	306
	Pyoseon-myeon	7,563	438	355

측 강수량을 이용하여 강우 형태를 고려한 수열에너지의 잠재량을 분석하는 것이 필요하다.

### 3.3.2 기술적 잠재량

기술적 잠재량은 모든 용천수가 기술적으로 이용 가능하다는 가정으로 계산하였으며, 난방과 냉방의 경우를 각각 구분하여 계산하였다. 난방의 경우 제주도 용천수의 총 기술적 잠재량은 이론적 잠재량과 동일한 27,807 MW이고 이중 제주시는 17,136 MW, 서귀포시 10,671 MW이다(표 3). 제주시가 서귀포시의 약 1.6배 크며, 지역별로 살펴보면 서귀포시 동쪽 지역이 6,167 MW로 가장 크다. RCP 4.5 시나리오로 계산한 기술적 잠재량은 32,196 MW이며, RCP 8.5 시나리오는 36,135 MW로 산정되었다. 냉방의 경우 제주도 용천수의 기술적 잠재량은 22,561 MW이며 제주시에서 한경면이 98 MW로 가장 작고 조천읍이 3,231 MW로 가장 크다. 서귀포시에서는 대정읍이 275 MW로 가장 작게 분석되었으며, 서귀포 동지역이 5,003 MW로 가장 크다. RCP 4.5 시나리오로 계산한 냉방의 경우 기술적 잠재량은 26,122 MW이며, RCP 8.5는 29,317 MW로 산정되었다. 난방의 기술적 잠재량은 이론적 잠재량에 비해 같으며, 냉방의 기술적 잠재량이 이론적 잠재량에 비해

0.81배 낮게 산정되었다.

기술적 잠재량은 히트펌프의 성능에 따라 잠재량이 다르게 계산된다. 따라서 향후 30년 후에는 히트펌프의 성능에 대한 연구가 이루어지고 COP가 향상되어 기술적 잠재량의 변화가 클 것으로 예상된다.

## 4. 결론

제주도는 주변에 수열원으로 사용할 수 있는 자원이 풍부하나 아직 수열에너지의 활용이 미약하다. 이번 논문에서는 제주도에 넓게 분포되어 있는 용천수에 대한 분포 특성과 수열원으로서의 잠재량 평가를 실시하였다.

제주도의 용천수 분포는 전수조사를 통해 새롭게 발견되는 용천수가 추가되어 현재 총 646개소가 존재한다고 되어있으며, 이 중 해안가에 위치하는 용천수이거나 용출량이 파악하기 어려운 용천수와 유출량이 500 m<sup>3</sup>/day 이하인 용천수를 제외한 164개소의 용천수가 수열원으로 사용할 수 있을 것으로 판단한다. 수열에너지로 사용할 수 있는 용천수가 가장 많은 곳은 서귀포 동쪽 지역 34개소, 제주시 동쪽 지역 28개소, 제주시 조천읍 25개소이다. 또한 용천수의 수온은 14-18°C가 대부분으로 수열원으로 적

합할 것으로 판단된다.

용천수의 용출량을 이용하여 잠재량을 계산한 결과 이론적 잠재량은 121-6,167 MW이며, 기술적 잠재량 난방의 경우 이론적 잠재량과 동일하고, 냉방의 경우 98-5,003 MW의 범위이다. 지역별로 큰 차이를 보이며 용출량이 가장 많은 서귀포 동쪽 지역에서 큰 잠재량을 보였다(그림 8). 하지만 현재 용천수의 용출량 측정방법은 유속·면적법과 위어 공식으로 산정하는데 용출 방식이 모두 달라 특정지점으로만 유출되지 않고 계곡수로 유입되거나 산발적으로 흩어진다. 따라서 정확한 수열에너지의 잠재량 산정에는 한계가 있으므로 용천수의 용출량을 측정하는 방법을 표준화할 필요가 있다.

RCP 4.5와 RCP 8.5를 고려하여 향후 30년간의 용천수 잠재량을 계산한 결과 수열에너지의 잠재량이 점차 증가할 것으로 예측되므로, 향후에도 수열에너지를 안정적으로 보급할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 이번 연구에서 계산한 용천수의 총 잠재량은 매우 많지만, 이는 모든 용출수를 활용하는 것을 가

정한 것으로 용천수의 용출량은 주변 환경에 따라 큰 범위를 보이므로 용천수를 수열에너지로 사용할 경우 용천수의 용출량 변화를 고려해야 한다. 또한, 강수 형태에 따라서 용출량이 큰 변화를 보일 수 있으므로 수열에너지 이용 시 용출량을 고려한 활용방안을 마련하는 것이 필요하다.

현재 제주도에서 방지로 인해 용천수의 수질이 악화되는 사례가 많고, 대부분 바다로 유출되는 경우가 많다. 하지만 제주도의 용천수는 거주지 및 농경지 등 인간이 생활하는 저지대 주변에 골고루 분포하여, 수열에너지에 적용할 수 있는 교육시설, 하우스 시설, 마을회관, 주민센터 등에 이격 거리를 고려하면 수열에너지를 적용할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2022년 한국수자원공사에서 진행한 “제주도 수열원 자원·적지 조사 및 제도개선” 용역을 발의시켜 게재함을 밝힙니다. 논문에 도움을 주신 모

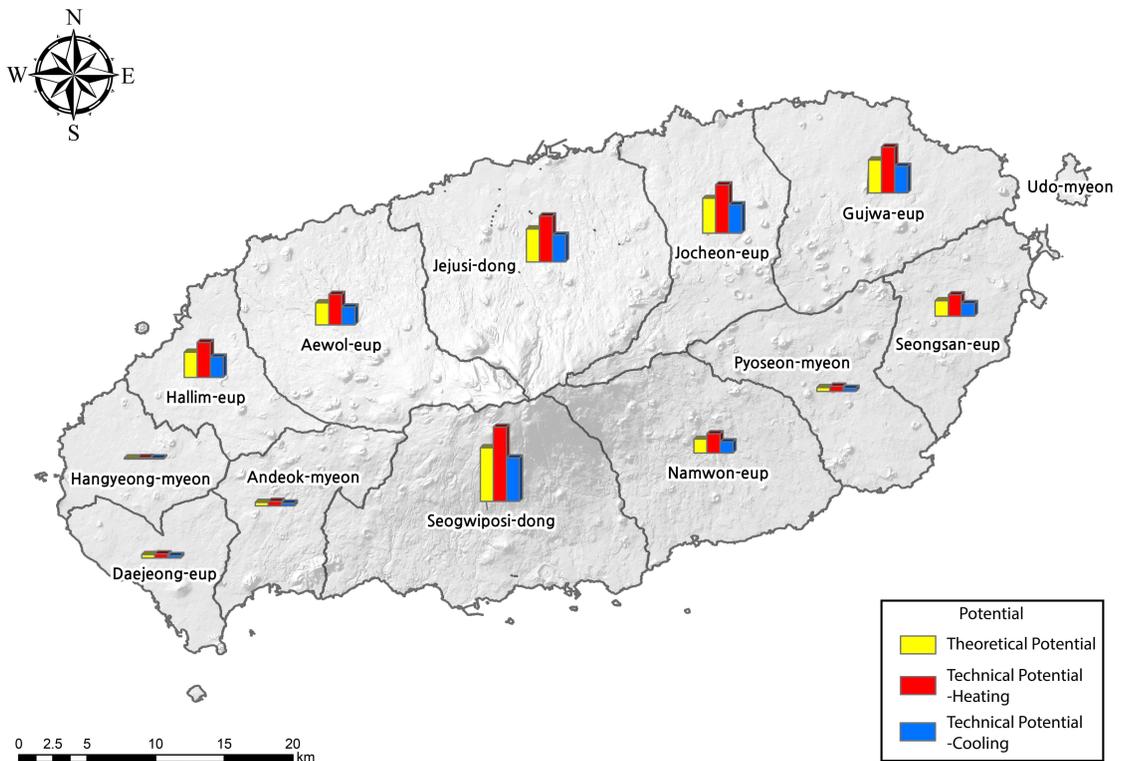


Fig. 8. Hydrothermal energy theoretical and technical potential of Jeju island.

든 분들께 감사의 말씀을 드립니다.

## REFERENCES

- Cho, H.M. and Yoon, C.R., 2020, A study on supply strategy of hydrothermal energy in Seoul. The Seoul Institute, 138 p (in Korean with English abstract).
- Hyeon, J.J., Oh, Y.R., Jeong, J.H., Jo, Y.J., Bae, K.H., Kim, Y.J., Jeong, S.Y., Jo, H.J., Lee, S.H., Jang, J.H. and Ahn, D.W., 2020, Study on the cooling and heating effect of water thermal energy system using stream water. K-water, 83 p (in Korean with English abstract).
- Jeju, 2022, <http://www.jeju.go.kr/> (September 13, 2023).
- JRI (Jeju Research Institute), 2021, Groundwater observation yearbook. Jeju Special Self-Governing Province, 242 p (in Korean).
- Jung, J.W., Nam, J.S. and Kim, H.S., 2017, Examples of use of hydrothermal energy from domestic sewage and river water. *Water for future*, 50, 50-58 (in Korean).
- Jung, J.W., Nam, J.S., Kim, J.W. 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 & Renewable Energy*, 14, 27-37 (in Korean with English abstract).
- Kang, Y., Kim, S. and Moon, J., 2018, Analysis of flow rate and temperature distribution of spring water and cooling COP of heat pump using spring water in Jeju. *Korean Society for New and Renewable Energy (Abstracts)*, Jeju, November 19-21, 228 p (in Korean).
- Kim, K.H., Tanaka, T., Suzuki, K., Nagao, K. and Park, E.J., 2002, Evidence of the presence of old continental basement in Cheju volcanic island, South Korea, revealed by radiometric ages and Nd-Sr isotopes of granitic rocks. *Geochemical Journal*, 36, 421-441.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2020, Korean climate change assessment report. Korea Meteorological Administration, 334 p (in Korean).
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2023, <http://www.climate.go.kr/home/> (September 13, 2023).
- Koh, G.W., 1997, Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguipo Formation in Cheju Island. Ph.D. thesis, Pusan National University, Busan, 26 p (in Korean with English abstract).
- KWRS (Korea Water Resources Corporation), 2009, The study on heat source of raw water in Hangang area water supply system. Korea Water Resources Corporation, 81 p (in Korean).
- Lee, J.H. and Yun, S.H., 2012, Study on the distributional characteristics and classification of quaternary monogenetic volcanoes in Jeju Island, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 385-396 (in Korean with English abstract).
- Lee, M., Lee, P., Jeong, D., Han, M. and Jung, S.P., 2023, RE100 for 100% renewable electricity: Status and prospects. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 45, 161-169 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.W., 1982, Geology of Jeju volcanic island, Korea. *Journal of the Rock Mineral Deposits of Japan*, 77, 55-64 (in Japanese with English abstract).
- Lee, M.W., Won, C.K., Lee, D.Y., Park, G.H. and Kim, M.S., 1994, Stratigraphy and petrology of volcanic rocks in Southern Cheju Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 521-541 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.B., 2023, Current address of heat pump technology and near future challenges: from the perspective of energy efficiency policy. *Korean energy society (Abstracts)*, Busan, April 26-28, 57 p (in Korean).
- MOETI (Ministry of Trade, Industry and Energy), 2020, The 5th basic plan for use, supply and technology development of new and renewable energy, Sejong, Korea.
- Park, C.Y., Lee, H.S., Nam, Y.J., Jo, H.H., Shin, Y.C. and Moon, H.J., 2020, The analysis on the hydrothermal energy capacity and survey on possible application sites. *K-water*, 362 p (in Korean).
- Park, H., Song, H. and Hwang, J., 2022a, Estimation of Greenhouse gas emissions strategy-based on the estimation of emission liabilities through scenario analysis, *Journal of Korea Technology Innovation Society*, 25, 881-896.
- Park, I.W., 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 Journal of Air-conditioning and Refrigerating Engineering*, 17, 521-528 (in Korean with English abstract).
- 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. *Journal of Energy Engineering*, 11, 106-113 (in Korean with English abstract).
- Park, J.Y., Park, J.H., Kim, S.U. and Chang, K.C., 2014a, Application of load by purpose of buildings for application of seawater district cooling and heating system in Jeju area. *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigerating Engineering*, 26, 86-90 (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Lee, B.J., Cho, D.L., Lee, S.R., Choi, Y.S., Park, D.W., Lee, S.R., Choi, Y.S., Yang, D.Y., Kim, J.Y., Seo, J.Y. and Shin, H.M., 2000, Explanatory Note of the Jeju (Baekado, Jinnampo Sheet) (1:250,000). Korea Institute of Geology, Mineral Resources, Daejeon, 59 p (in Korean with English abstract).
- Park, M.R., Ryoo, Y.S., Kim, J.W., Lee, Y.U., Bae, S.D. and

- Chae, K.B., 2014b, A study on analysis of reserves and available capacity of unutilized energy in rural community. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 34, 19-25 (in Korean with English abstract).
- Park, W.B., Kang, B.R., Kho, C.S., Kang, S.K., Kim, Y.S. and Kim, M.J., 2022b, Jeju spring water management plan and supplementary plan (2022~2026). Jeju Special Self-Governing Province, 216 p (in Korean).
- RDA (Rural Development Administration), 2018, Study on cooling and heating energy cost saving and carbon dioxide emission reduction using rainwater storage facilities in Jeju. Rural Development Administration, 128 p (in Korean with English abstract).
- RDA (Rural Development Administration), 2020, Development of agricultural energy technology for underground spring water. Rural Development Administration, 69 p (in Korean with English abstract).
- Sohn, Y.K., Park, K.H. and Yoon, S.H., 2008, Primary versus secondary and subaerial versus submarine hydro-volcanic deposits in the subsurface of Jeju Island, Korea. *Sedimentology*, 55, 899-924.
- Sohn, Y.K. and Yoon, S.H., 2010, Shallow-marine records of pyroclastic surges and fallouts over water in Jeju Island, Korea, and their stratigraphic implications. *Geology*, 38, 763-766.
- Tamanyu, S., 1990, The K-Ar ages and their stratigraphic interpretation of the Cheju Island volcanics, Korea. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 41, 527-537 (in Japanese with English abstract).
- UNFCCC, 2015, Adoption of the Paris agreement, Paris, France.
- WMO (World Meteorological Organization), 2021, State of the Global Climate. Number of spring water according to altitude, 1290, 47 p.

---

Received : September 18, 2023

Revised : October 12, 2023

Accepted : October 16, 2023