

제주도에 설치된 지열 열펌프 시스템용 제주형 지중열교환기의 열특성 연구

김민준
한국냉동공조인증센터

A Study on the Thermal Characteristics of Jeju type Ground Heat Exchanger for Ground Source Heat Pump System applied to Jeju Island

Min-Jun Kim
Korea Refrigeration and Air-conditioning Assessment Center (KRAAC)

요약 본 연구는 제주도에 설치된 제주형 지중열교환기의 열적 특성을 분석하기 위해서 시험 방법 및 평가 방법을 정립하고, 열응답시험 (TRT)을 통하여 다양한 지역에 설치된 지중열교환기의 지중온도와 열적 특성을 분석하였다. 제주도는 화산암반층으로 이루어져 지하수의 유동이 잘 발달되어 있으며, 제주형 지중열교환기는 보어홀을 굴착 한 이후에 지하수 수위로 부터 30 m 까지 지중열교환기를 설치할 수 있다. 지중열교환기는 여러개의 파이프가 보어홀 내부에 삽입 되는 구조로 되어있다. 제주형 지중열교환기의 특성을 살펴보기 위해 제주도 관내 4곳 (표선, 제주, 남원, 한림)에 설치된 지중열교환기에 대한 시험을 수행하였다. 분석결과 제주형 지중열교환기의 경우 열교환기에 열량을 투입 후 1 ~ 3시간 안에서 지중 순환수 온도가 안정화 되었으며, 열교환기가 설치된 지역에 따라서 투입열량에 따른 지중 순환수 온도 상승 이 다르게 나타났다. 한림의 경우 지중열교환기 용량이 73.4 kW (냉방) / 82.8 kW (난방)로 가장 높게 나타났으며, 제주의 경우 34.1 kW (냉방) / 23.3 kW (난방)로 가장 작게 계산되었다.

Abstract This study summarizes test methods and evaluation methods for examining the thermal characteristics of Jeju-type ground heat exchangers (GHXs) installed on Jeju Island, and analyzes the ground temperature and thermal characteristics of ground heat exchangers installed in various regions by using thermal response tests (TRT). Jeju Island is composed of volcanic rock layers, and the groundwater flow is well developed. A Jeju-type GHX can be installed up to 30 m from groundwater level after drilling a borehole. The ground heat exchanger has a structure in which several pipes are inserted into the borehole. In order to examine the characteristics of the Jeju-type GHX, tests were conducted on ground heat exchangers installed in four places on Jeju Island (Pyoseon, Jeju, Namwon, and Hallym). As a result of the analysis of the Jeju-type ground heat exchanger, the ground circulating water temperature stabilized according to the heat injection, depending on the installed location, and was formed within one to three hours. The ground heat exchanger capacity in Hallym was highest at 73.4 kW (cooling) and 82.8 kW (heating), and the Jeju-type calculation was lowest at 34.1 kW (cooling) and 23.3 kW (heating).

Keywords : Ground Temperature, Thermal Characteristics, Ground Heat Exchangers, Groundwater Level, Borehole

본 연구는 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 에너지기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (과제번호 : 20183010141220)

*Corresponding Author : Min-Jun Kim(KRAAC)

email: mjkim@kraac.or.kr

Received October 4, 2019

Accepted February 7, 2020

Revised December 6, 2019

Published February 29, 2020

1. 서론

지열 열펌프 시스템은 연중 일정하게 유지되는 지중열원(국내의 경우 15 ~ 18 ℃) 온도를 이용하여 건물의 냉난방을 담당하는 시스템으로, 지중 약 100 m 이상에서 지중 열원과 열교환을 하기 때문에 열원이 매우 안정적이며, 시스템이 고효율이다[1]. 그중 지중열교환기는 지중에서 채열된 열원을 열펌프 유닛으로 공급해주는 장치이다. 현재 국내에서는 수직밀폐형, 지중수평형, 에너지파일형, 스탠딩컬럼웰형의 4가지 지중열교환기가 보급되고 있다[2]. 이러한 지중열교환기는 지열 열펌프 시스템이 설치될 현장에 설치되어 현지의 지중온도 및 지중 열전도율을 측정하여 사용하고 있으며, 지중 열전도율은 지중특성(지중암반 종류, 대수층 등)에 많은 영향을 받는다[3].

그러나 제주도의 경우 육지와 멀리 떨어진 곳에 위치한 화산활동에 의해 형성된 섬으로 섬을 구성하고 있는 지질의 경우 다공질의 화산암류가 지배적으로 발달한 지역이다. 또한 제주도의 지질은 습곡 이라는 지하 중공이 발달하여 지하수 함량이 좋고 지하수의 유동 또한 잘 발달되어 있다. 또한 해양성 퇴적층인 서귀포층이 지하층에 형성되어 지하수가 그 위로 부존하고 있는 형태를 보인다.[3] 그러므로 제주도의 지중상태는 육지의 지중상태와 많은 차이를 보이며, 제주도에 지열냉난방 시스템을 적용하기 위해서는 제주특별자치도 지하수관리 조례에 의해 지열이용공 굴착방법 및 지하수 이용 깊이가 제한되어 있는 실정이다[4].

최근 제주도 지역 하우스 농가에 지열냉난방시설이 보급되고 있으며, 제주특별자치도 지하수관리 조례에 따른 지중열교환기가 설치되고 있다.

따라서 본 연구에서는 제주도에 설치된 제주형 지중열교환기에 대한 열특성을 분석하기 위하여 시험방법 및 평가방법을 정립하고 다양한 지역에 설치된 제주형 지중열교환기의 적정 열용량을 산정해보고자 한다.

2. 시험방법 및 분석

2.1 제주형 지중열교환기

제주도에서 온실하우스용 지열냉난방시설을 설치하기 위해서는 제주특별자치도 지하수관리 조례에서 지정한 방법에 따른 지열이용공을 굴착해야 한다[4]. 현재 제주특별자치도 지하수관리 조례에 의한 지열이용공의 설치 방법은 다음과 같은 순서에 의해서 이루어지고 있다.

- ① 지열이용공의 굴착지점을 중심으로 최소 3 m (가로) × 3 m (세로) 지역을 두께 30 cm 의 콘크리트로 타설하고, 최소 24시간 이상 양생시킨 후 굴착공사를 진행한다.
- ② 지열이용공 굴착 전에 지표하 50 m 까지 케이싱 구경보다 최소 140 mm 이상의 넓은 구경으로 굴착한 후, 시멘트몰탈 등의 그라우트 재료로 되메움(채움 그라우팅) 시공을 하고 최소 48시간 이상 양생시킨 후 케이싱 구경으로 재 굴착한다.
- ③ 채움 그라우팅 구간은 반드시 로터리식 코어회수 공법으로 착정하고, 회수된 시추코어 확인을 실시하며, 회수된 시추코어는 회수 순서대로 매 3 m 구간 또는 지층변화 구간마다 심도를 정확히 기록하여 배열하고 준공검사시까지 유지·관리하여야 한다.
- ④ 또한 채움 그라우팅 구간 내부를 공내영상촬영 등을 실시하여 오염방지 그라우팅이 적절하게 이루어졌는지를 확인한 후 후속작업을 이행하여야 한다.
- ⑤ 지열이용공의 굴착심도는 해당지역 연평균 지하수위 하부로 30 m 를 초과할 수 없다.
- ⑥ 굴착공 내부 전체 구간에는 배관시 공내 봉괴방지 및 유지보수 등이 용이하도록 케이싱(무공관 또는 유공관)을 설치한다.

위와 같은 과정으로 지열이용공이 완성되면 보어홀 내부로 지중열교환기를 삽입한다. 현재 제주도에 설치된 열교환기의 재료 및 형태로는 다발의 PE 파이프를 삽입하고 PE 파이프를 입구와 출구 헤더에 각각 연결방식과 여러개의 STS 파이프를 삽입한 방식이 이용되고 있다. Fig. 1은 제주형 지중열교환기 형상들과 시추코어로 회수된 지하암반 구조 형상사진을 보여주고 있다.



Fig. 1. Photograph of Jeju type GHXs and rock constructions

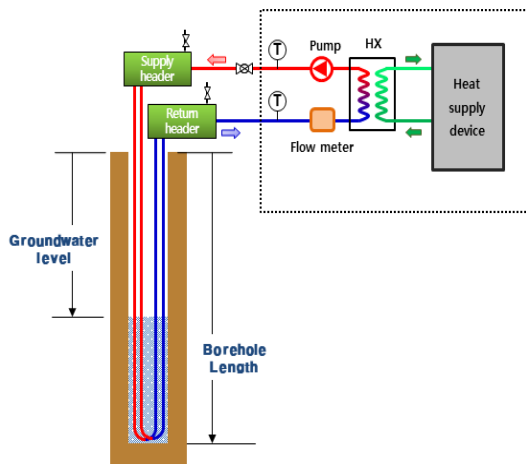


Fig. 2. Schematic of an in-situ TRT apparatus

2.2 시험방법

제주도에 설치된 제주형 지중열교환기의 열적특성을 분석하기 위한 방법으로 현장 열응답시험 (In-Situ Thermal Response Test)을 이용하였다. 현장 열응답시험은 수직 밀폐형, 지중수평형, SCW형 등 다양한 지중열교환기 시험에 사용되고 있다[1][5]. 제주형 지중열교환기의 경우 지중에서 지하수가 보어홀 내부로 통과하여 흐르기 때문에 내륙에서의 시험방법(수직형 2관식의 경우 50 ~ 80 W/m)처럼 일정열량을 일정시간동안(48시간) 투입하여 지중 순환수의 온도 변화량을 측정하고 이를 이용한 지중 열전도율을 측정하는 방식은 이용할 수 없다. 따라서 제주형 지중열교환기로 일정시간 동안 열량을 단계적으로 투입하여 지중 순환수의 온도 상승 변화를 살펴보았으며, 시험순서는 다음과 같다.

- ① 시험기와 지중열교환기를 연결하고 지중열교환기 내부에 물을 가득 채운다.
- ② 순환펌프를 이용하여 시험기와 지중열교환기 내부에 물을 순환하면서 열교환기 내부에 존재하는 공기를 완전히 제거 후 지중온도를 측정한다.
- ③ 지중열교환기를 순환하는 순환수의 유량을 일정하게 하고, 지중열교환기로 열량을 주입한다. 처음 열량을 투입할 때는 순환수의 입출구 온도차가 약 1 ℃를 유지하도록 투입한다.
- ④ 순환수온도 상승이 10분당 0.1 ℃ 이하로 유지되는 구간에 들어서면, 이후 30분 이상의 데이터를 취득한다.
- ⑤ 지중열교환기로 투입되는 열량을 증가시켜 순환수 온도차가 약 2 ℃를 유지하도록 한다. 순환수온도

가 0.1 ℃이하로 유지될 때까지 관찰한다. 이때, 순환수 평균온도는 안정화 구간에서의 마지막 5분 평균데이터를 사용하여 산출하였다.

- ⑥ 이러한 과정을 반복하여 순환수 입출구 평균온도가 32 ℃ 이상이 될 때까지 단계적으로 열량을 투입한다.

2.3 시험분석방법

현재 한국에너지공단 신재생에너지센터에서 운영하는 “신재생에너지설비의 지원 등에 관한 지침”에 지열에너지설비 관련 설계방법이 정리되어 있다[2]. 제주형 지중열교환기는 순환수가 파이프 내부를 순환하므로 수직밀폐형 지중열교환기와 동일한 방식이나 제주도 지하수조레에 의해 지중 순환수를 순수 물만을 이용하므로 스텐딩컬럼웰과도 동일한 방식으로 볼 수 있다.

따라서 본고에서는 제주형 지중열교환기의 열용량을 산정하기 위한 방법을 다음과 같이 정의하였다. 냉방 설계기준은 수직밀폐형의 설계온도인 지열 열펌프 부하측 입구온도(EWT : Entering Water Temperature) 30.0 ℃와 부하측 출구온도(LWT : Leaving Water Temperature) 35.4 ℃(인증기준 COP적용)의 평균온도 32.7 ℃ 이므로 32.0 ℃($T_{mean-cooling}$), 난방 설계기준은 EWT 7.0 ℃와 LWT 3.8 ℃(인증기준 COP적용)의 평균온도 5.4 ℃ 이므로 5.0 ℃ ($T_{mean-heating}$)로 산정하였으며, 열용량은 지중온도(T_i)와 설계 평균온도(T_{mean})의 차(ΔT)에 따른 열교환기 용량(Q)으로 각각 산정하였다.

$$\Delta T = T_{mean} - T_i \quad (1)$$

$$Q = a \cdot \Delta T + b \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 제주형 지중열교환기의 열특성을 살펴보기 위해 선정된 4곳의 site의 위치를 보여주고 있으며, Table 1은 시험이 수행된 제주형 지중열교환기의 제원을 보여주고 있다. 표에서 보여지는 것처럼 표선면, 제주시, 남원읍의 경우는 지중열교환기파이프로 PE 파이프가 삽입되었으며, 한림읍의 경우는 STS 파이프가 삽입되었다.

Fig. 4는 4개의 site에서 수행된 제주형 지중열교환기의 시간에 따른 지중열교환기의 순환수 입구온도(EST : Entering Source Temperature)와 출구온도(LST : Leaving Source Temperature), 순환수 평균온도, 순

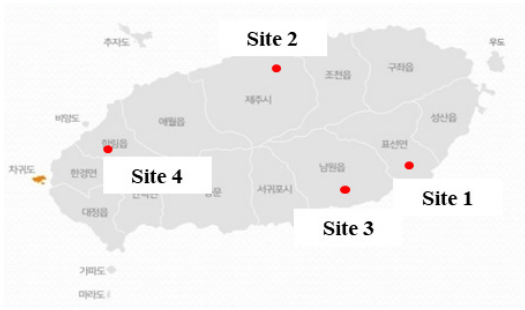


Fig. 3. Location of test beds in Jeju island

환수 유량 및 투입열량 변화를 보여주고 있다. (a) site 1의 경우 지중열교환기의 지중온도(T_i)는 약 15.6 °C로 측정되었다. 또한 지중열교환기 순환수 유량을 약 180 L/min으로 일정하게 유지한 상태에서 최초 지중열교환기로 11.9 kW의 열량을 일정하게 투입하였다. 열량투입 후 지중 순환수의 온도가 초기 급격하게 상승하다가 열량투입 후 100분 경과 후 19.6 °C에 도달하고부터 온도 상승이 거의 나타나지 않았으며, 50분 경과후 19.6 °C를 확인하였다. 따라서 본 시험에서는 각 단계에서 열량투입 후 150분 이상 시험을 수행하였다. 지중온도 측정 후 지

Table 1. Parameters of tested Jeju type ground heat exchanger

	unit	Site 1(Pyoseon)	Site 2(Jeju)	Site 3(Namwon)	Site 4(Hallym)
Groundwater level	m	80	35	67	48
Grouting	m	50	35	50	50
Borehole length	m	110	65	90	75
pipe diameter & number	in/out	25A(8EA) * 25A(8EA)	25A(8EA) * 25A(8EA)	25A(8EA) * 25A(8EA)	50A(1EA) * 20A(8EA)
Pipe material	-	PE Pipe	PE Pipe	PE Pipe	STS Pipe

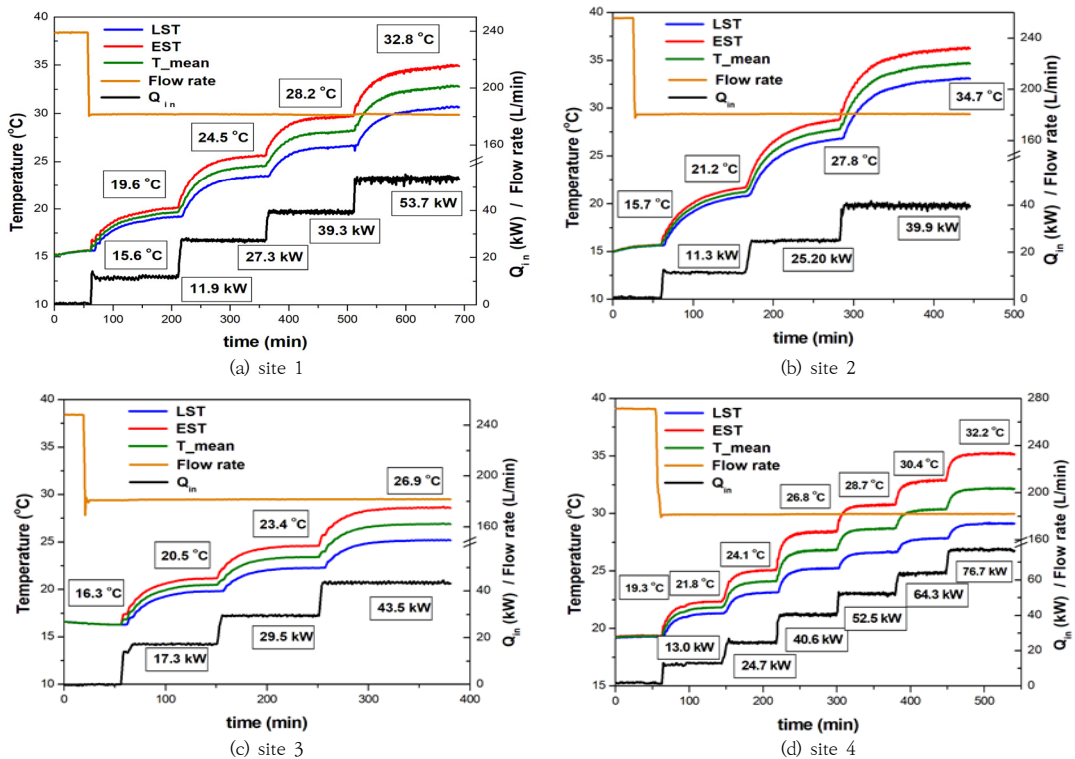


Fig. 4. Variation of the circulation water temperature, Q_{in} , flow rate with operating time

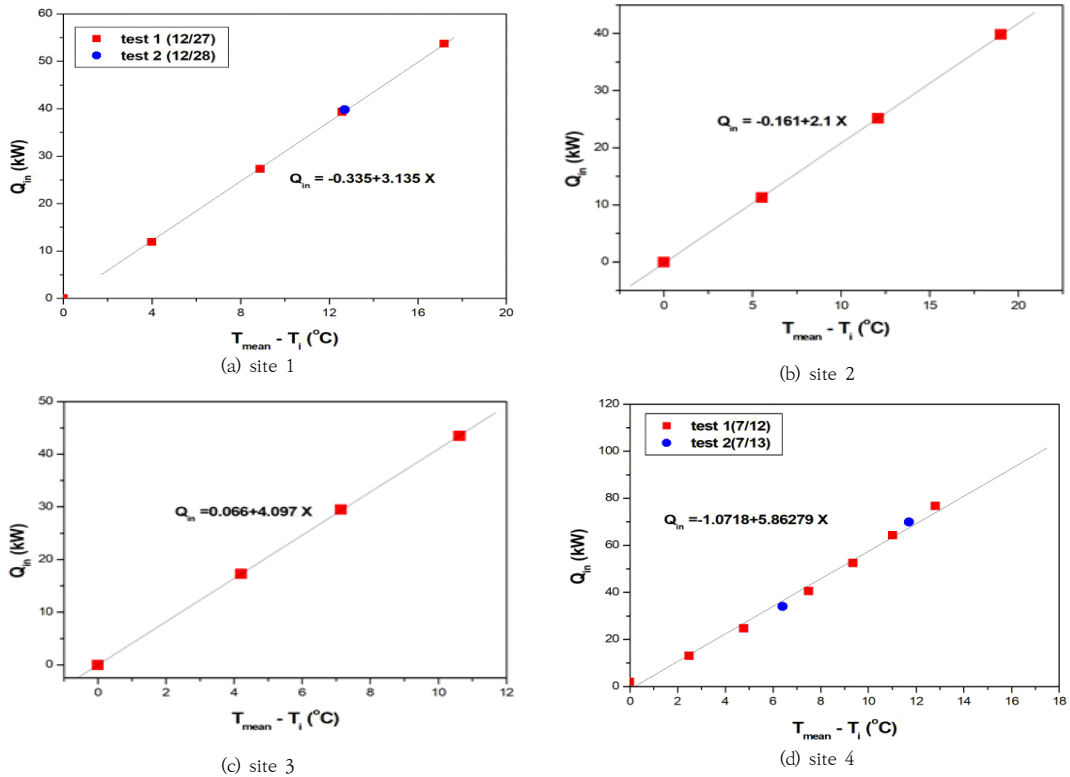


Fig. 5. Variation of Q_{in} with circulating water temperature difference($T_{mean} - T_i$)

중열교환기로 열량을 11.9 kW/ 27.3 kW/ 39.3 kW/ 53.7 kW로 각각 투입하였을 때, 지중 순환수 평균온도는 각각 19.6 °C/ 24.5 °C/ 28.2 °C/ 32.8 °C에서 순환수 온도가 일정하게 유지되는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 시험 종료 15시간 경과 후에 지중열교환기로 39.3 kW 열량을 투입하여 순환수의 온도를 측정하고 지중 순환수 평균온도는 28.2 °C를 유지하였으며, 전날 수행된 시험값과 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

site 2 ~ 4번의 경우 지중온도는 15.7 °C/ 16.3 °C/ 19.3 °C로 각각 측정되어 지역적으로 서로 다른 온도를 보였으며, 지중온도 측정 후 지중열교환기에 11.3 kW/ 17.3 kW/ 13.0 kW 열량을 투입 후 관찰한 결과 각각 120분/ 70분/ 50분 경과 후에 지중 순환수 온도가 일정하게 유지되었다. 이는 제주도 지역의 지중특성(지하수 유속, 유량)에 따른 것으로 지하수의 유동이 좋을수록 단계시험시간이 짧게 나타났으며, 순환수 평균온도 상승도 작게 나타났다. site 1에 설치된 지중열교환기는 4번의 단계시험을 행하였을 때 지중 순환수 평균온도가 32.0 °C 이상의 값을 보였으며, site 2는 3단계, site 4는 6단계 시험에서 32.0 °C 이상의 값을 보였다. site 3의 경우

3단계시험 진행 후 4단계시험 진행중 배관누설로 시험이 중단되어 32.0 °C 이하에서 시험이 종료되었으나 직선식을 유도함에 문제가 없어 데이터로 정리하였다. 따라서 제주도 지중열교환기의 경우 투입열량에 따른 지중 순환수의 온도가 안정화되는 시간이 지역적으로 다르게 나타남을 알 수 있었으며, 각 단계별 시험을 진행하기 위해서는 최초 시험에서 온도 안정화 시간을 정의해야 할 필요가 있을 것으로 생각된다.

Fig. 5는 각각의 site에서 측정된 지중 순환수 온도 상승에 따른 지중열교환기 열량 변화를 보여주고 있다. 제주도의 경우 지중열교환기로 일정열량을 투입하면 지중 순환수 온도가 시간이 지남에 따라 거의 일정하게 유지되므로, 지중온도의 변화가 없다는 가정에서 지중 순환수 온도 상승에 따른 투입열량을 Eq. (2)를 통하여 계산할 수 있다. 제주형 지중열교환기에 열용량을 산정하기 위해 단계적 열량 투입에 따른 안정화 된 지중 순환수 온도 값을 이용하여 직선식을 산출하였으며, 그래프에서 0은 지중온도를 의미한다. (a) site 1과 (d) site 4에서 test 1과 test 2는 단계시험 종료후 다음날 임의 값을 통한 재시험을 진행하여 직선식의 열용량과 같은 값이 나타나는지

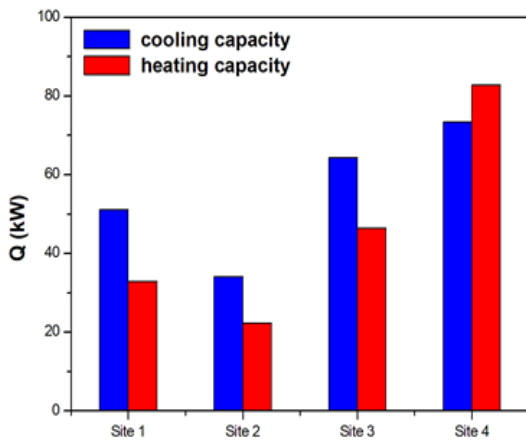


Fig. 6. Jeju type GHXs capacity by sites

확인하기 위한 시험을 진행한 것으로 전날에 수행된 값과 상당히 일치하였다.

Fig. 6은 4개의 site에서 진행된 제주형 지중열교환기의 열용량 특성을 보여주고 있다. 그래프에서 지중열교환기의 냉방운전시 용량과 난방운전시 용량산정은 지열 열펌프 입출구 평균온도와 지중온도의 차로 산정하였으며, 냉방의 경우 지열 열펌프입출구 평균온도 32.0 °C 난방의 경우 지열 열펌프 입출구 평균온도 5.0 °C를 기준으로 계산하였다.

제주형 지중열교환기의 경우 STS로 제작된 4번 site(한림)가 지중열교환기 용량이 73.4 kW(냉방) / 82.8 kW(난방)로 가장 높게 계산되었다. 또한 PE 파이프로 제작된 3번 site(남원)의 경우도 지중열교환기 용량이 64.4 kW(냉방) / 46.4 kW(난방)로 높게 계산되었다. 이는 국내에서 보급되고 있는 SCW형 지중열교환기 400 m의 공당 설계용량과 거의 비슷한 용량으로 제주형 지중열교환기의 경우 공당 열용량이 매우 큰 것을 의미한다.

또한 지중열교환기의 용량이 가장 작게 나타난 2번 site(제주시)의 경우도 34.1 kW(냉방) / 23.3 kW(난방)로 용량을 이용할 수 있는 것으로 분석되었다.

3. 결론

본 연구에서는 제주도에 적용된 지열 열펌프 시스템용 제주형 지중열교환기 열특성을 살펴보기 위하여 제주도 4곳에 설치된 제주형 지중열교환기에 대한 열응답시험을 수행하고 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제주지역에 설치된 제주형 지중열교환기의 경우 설치된 지역에 따라서 초기 지중온도 값이 상이하게 측정되었으며, 열량시험을 수행 시 지중 순환수가 안정화되는 시간이 차이를 보이긴 하지만 열량투입 후 1 ~ 3시간 내에서 안정화 되는 것을 확인하였다.
- (2) 제주지역 4곳에서 수행된 제주형 지중열교환기의 용량을 분석해본 결과 4번 site(한림)의 지중열교환기 용량이 73.4 kW(냉방) / 82.8 kW(난방)로 가장 높게 나타났으며, 가장 작게 나타난 2번 site(제주시)의 경우도 34.1 kW(냉방) / 23.3 kW(난방)로 계산되었다.
- (3) 본 연구의 분석 사례를 이용하여 제주지역에 설치된 제주형 지중열교환기의 냉방/난방 용량을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] M. J. Kim, A Study on the Thermal Performance Evaluation of a Borehole Ground Heat Exchange using In-Situ Thermal Response Test, Ph.D thesis, Sunmoon University, Korea, 2017. <http://www.riss.kr/link?id=T14447807>
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy Announcement 2015-263, Standards of Support, Installation and Management for New and Renewable Energy System, 2015.
- [3] G. W. GO, "Groundwater characteristic and water resources management in jeju(ii) - Jeju groundwater hydrogeological characteristics", *Magazine of korea water resources association*, Vol.39, No.8, pp.80-89, 2006. <http://www.riss.kr/link?id=A100588177>
- [4] Jeju special self-governing province ground water management ordinance, Jeju special self-governing province ground water management ordinance enforcement regulations, Appendix 5, 2017.
- [5] Chang, K.S. and Kim, M.J., "An experimental study on the thermal performance evaluation of SCW ground heat exchanger", *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol.25, No.1, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1142/S2010132517500067>

김민준(Min-Jun Kim)

[정회원]



- 2004년 2월 : 명지대학교 기계공학과 (공학사)
- 2007년 8월 : 한국기술교육대학교 산업공학과 (공학석사)
- 2017년 2월 : 선문대학교 기계공학과 (공학박사)

- 2005년 6월 ~ 2008년 8월 : 한국생산기술연구원 연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 한국냉동공조인증센터 책임연구원

<관심분야>

냉동공조 시스템 및 지열 히트펌프 시스템 설계, 지중열교환기, 축열식 냉난방설비, 축전식 냉난방설비