KIEAE Journal, Vol. 18, No. 5, Oct. 2018, pp.55-61

KIEAE Journal

Korea Institute of Ecological Architecture and Environment

93

수치해석을 이용한 수직밀폐형 지열 시스템 영향인자의 민감도 분석
- 난방운전을 중심으로

Sensitivity Analysis of the Design Factor for Vertical Closed-loop Geothermal System using Numerical Analysis

- Focused on Heating Operation -

배상무* · 김홍교** · 전재영*** · 남유진***

Bae, Sangmu* · Kim, Hongkyo** · Jeon, Jae-Young** · Nam, Yujin***

* *Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (trapezeb@naver.com)*

** *Coauthor, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (ghdry4095@gmail.com)*

*** *Coauthor, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (jeonjy0702@naver.com)*

**** *Corresponding author, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (namyujin@pusan.ac.kr)*

ABSTRACT

Purpose: Recently, in order to realize eco-friendly buildings, studies on renewable energy technologies have conducted in field of building energy. Among these technologies, a ground source heat pump (GSHP) system can achieve higher performance than conventional air source system. However, the GSHP system has been delayed due to high initial cost and lack of guidelines for performance analysis of various design factor. Therefore, this paper aims to proposed design and operation method to improve the performance of the GSHP system and to minimize the additional cost. **Method:** In this study, numerical simulation was conducted to accurately predict the heat exchanger rate (HER) and entering water temperature (EWT) of the GSHP system. The numerical simulation was coupled with soil model, ground heat exchanger (GHX) model and ground surface heat flux model. Furthermore, the performance of GSHP system was analyzed according to the operation method of the system such as flow rate, operation time, and limit temperature. **Result:** As a result, the HER and the EWT of base case were 34.3W/m, 10.26℃ respectively in the condition of 9.3lpm flow rate, 9 hours per day operation, and 5℃ limit temperature.

© 2018 KIEAE Journal

KEYWORD

지열 히트펌프 시스템
수치 시뮬레이션
운전방법
지중 채열량

Ground Heat Pump (GSHP) System
Numerical Simulation
Operation Method
Heat Exchange Rate (HER)

ACCEPTANCE INFO

Received Aug 26, 2018
Final revision received Oct 15, 2018
Accepted Oct 20, 2018

1. 서론

에너지 및 자원 고갈과 더불어 이상기후로 인한 생태환경의 변화에 대응하기 위해 글로벌 사회는 온실가스 감축 목표 및 저탄소 성장정책 등을 시책하였다. 이에 따라, 우리나라는 2009년 '저탄소 녹생성장 기본법'을 시행하여 기후변화에 대한 종합대책과 지속가능한 경제성장 전략을 수립하였다 [1]. 특히, 건물부문에서는 '녹색건축물 조성 지원법', '에너지이용 합리화법' 등을 통해 에너지 소비량을 절감시키고, 저탄소 친환경 건축물을 구현할 수 있는 제로에너지빌딩(ZEB, Zero Energy Building)을 도입하고 있다. 건물 에너지 자립화가 가능한 제로에너지빌딩은 건축적 요소를 통해 손실되는 에너지를 최소화하고, 건물 기능에 필요한 에너지를 생산하기 위한 태양광과 지열 시스템과 같은 신재생에너지 설비를 활용하고 있다.

이러한 신재생에너지 설비 중에서 지열 히트펌프 시스템은 종래의 공기열원 시스템보다 우위에 있는 지중열원을 이용하여 냉난방 에너지 효율이 높다. 또한, 유지관리가 편리하고 기후조건에 영향을 받지 않고 항시 운전이 가능하기 때문에 타 신재생에너지 시스템과 달리 건물의 기저부하에 대응할 수 있다.

한편, 건물 냉난방 시스템으로서 지열 히트펌프 시스템은 우수한 공조 설비로 각광받고 있으나 높은 초기투자비용, 시스템 장기운전에 따른 성능저하와 더불어 설계 가이드라인 부족으로 인해 도입이 지연되고 있는 실정이다. 이를 해결하기 위해, 태양열이나 공기열원과 같은 타 열원과의 융합을 통해 시스템 성능을 향상시키는 연구 [2~4]가 진행되고 있으며, 한국에너지공단에서는 신재생에너지 설비 원별 설계기준을 제시하고 있다. 그러나 융합 시스템은 추가적인 설비 설치비용과 제어방안이 필요하며 세심한 관리가 필요하다. 또한, 신재생에너지 원별 설계기준에서는 설계 및 시공에 대한 일반사항만 규정하고 있어 대부분의 설계자는 건물의 피크부하에 대응하는 일률적인 시스템 설계를 수행하고 있으며, 실제로 부분부하 운전 등으로 인한 시스템 성능저하를 야기하는 경우가 많다.

따라서, 본 연구에서는 수직밀폐형 지열 히트펌프 시스템의 운전방법 제어를 통해 추가적으로 소비되는 비용을 최소화하고 시스템 성능을 향상시킬 수 있는 방안을 제시하고, 설계 가이드라인 개발을 위한 데이터베이스를 구축하고자 하였다. 수직밀폐

pISSN 2288-968X, eISSN 2288-9698
http://dx.doi.org/10.12813/kieae.2018.18.5.055

형 지열 히트펌프 시스템을 대상으로 다양한 운전방법 적용을 통해 시스템 성능검토와 에너지 이용 효율개선 및 최적화수법 개발에 관한 연구는 다양한 분야에서 수행되고 있다.

설계변수에 따른 수직밀폐형 지중열교환기의 설계길이 변화를 고찰하고 설계조건과 지중열교환기 길이에 대한 상관관계를 분석한 연구 [5,6]는 주로 지중열교환기 설계 프로그램을 이용하여 수행되고 있다. 또한, 순환수 유량변화에 히트펌프 성능계수 분석과 시스템 에너지 효율을 평가하고 순환수 유량제어의 필요성을 제시하고 있다 [7,8]. 이 외에도, 실증 실험 데이터베이스와 동적해석 시뮬레이션을 통해 조건변화에 따른 지열 히트펌프 시스템의 성능 예측에 관한 연구 [9~11]가 수행되고 있으며, 지열 히트펌프 시스템의 효율개선 및 최적화 방안에 대한 연구도 [12,13] 수행되고 있다. 이처럼, 수직밀폐형 지열 시스템의 설계조건에 따른 지중열교환기 영향도 분석과 순환수 유량제어에 의한 시스템 에너지 효율평가 및 최적화 방안에 관한 연구는 활발히 수행되고 있다. 그러나 동일한 설계 및 부하조건에서 다양한 운전방법에 따른 채열 성능을 정량적으로 검토한 연구는 드물다.

따라서 본 연구에서는 기존에 경험적인 수치를 바탕으로 수행되던 시스템 설계방법에 대해 설계 가이드라인을 구축하고자 공학적 관점에서 수치해석을 활용한 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 수직밀폐형 지열 시스템을 대상으로 운전시간, 순환수 유량 및 제한온도를 설계변수로 설정하여 민감도 분석을 수행하였다. 분석 결과를 통해 난방운전기간 동안의 시스템 채열 성능을 정량적으로 비교분석하였다.

2. 수치해석 시뮬레이션

2.1. 시뮬레이션 개요

수직밀폐형 지열 시스템의 채열 성능을 정확하게 예측하기 위해서는 토양과 지중열교환기 상호 간 물질 및 열이동에 대한 해석이 필요하다. 본 연구에서는 선행연구 [14]에서 개발한 해석 툴(FEFLOW)과 유저 서브루틴(User Subroutine)을 이용하여 수직밀폐형 지열 시스템의 수치해석 모델을 구축하였다. 본 해석 툴은 지중열환경을 동적으로 해석할 수 있으며 토양 모델, 지중열교환기 모델 및 지표면 열유속(Heat Flux) 모델을 결합하여 수치해석을 수행한다. 한편, 수치해석 방법 및 모델의 신뢰성은 선행연구 [14]에서 실증 실험과 시뮬레이션 해석결과의 비교분석을 통해 검증하였다.

Fig. 1.은 시뮬레이션 해석방법의 흐름도를 나타낸다. 지중열교환기 파이프 내 순환수 온도는 입구에서부터 레이어 깊이별로 순차적으로 계산되며 순환 시 파이프 외벽과의 열교환량을 계산하여 각 레이어(Layer)에 위치한 열원온도가 산출된다.

열원온도 산출을 위해 먼저 건물의 난방 부하량을 계산하고, 지중열교환기의 순환수 입수온도 T_{w1}를 결정한다. 결정된 순환수의 입구온도는 토양 모델, 지중열교환기 모델 및 지표면 열유속 모델이 통합된 결합모델을 통해 지중온도와 지중열교환기 파이프 외벽과의 열교환량을 계산하여 순환수 출구온도 $T_{w(n+2)}$를 결정한다. 순환수 입·출구 온도차 ΔT를 통해 실제와 같은 운전조건을 가정하고 제한온도 내에서 최대로 지중에서 추출할 수 있는 지중 채열량 Q을 계산한다. 계산된 지중 채열량과 순환수 출수온도를 통해 히트펌프의 난방성능계수 $H.COP$를 산출한다. 이러한 계산과정을 통해 수직밀폐형 지열 시스템의 성능특성을 비교분석하여 시스템 최적설계수법을 결정할 수 있다.

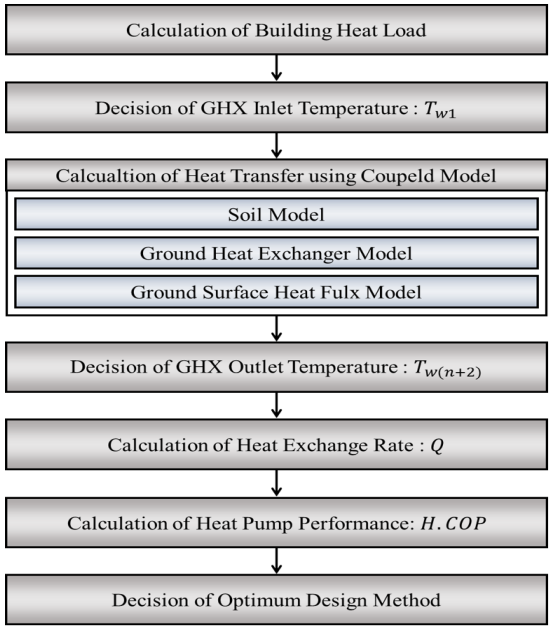

Fig. 1. Flow chart of numerical analysis method

2.2. 시뮬레이션 조건

Fig. 2.는 수직밀폐형 지중열교환기 해석영역, 보어홀 및 레이어 경계조건의 개요를 나타낸다. 해석영역 20m × 20m × 100m 중심에 직경 0.2m의 보어홀 모델을 구축하였다. 보어홀 중심에 관경 32A(내경 0.026m, 외경 0.032m) 지중열교환기를 삽입하고 파이프 간 이격거리는 0.1m로 설정하였다.

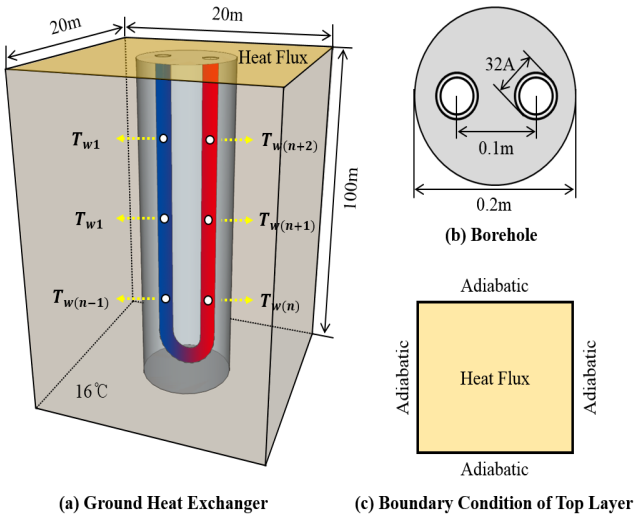

Fig. 2. Analysis domain of ground heat exchanger, Borehole and Boundary condition of top layer [15]

수치해석 모델의 최상부 레이어 경계면을 단열조건으로 설정하였고, 태양장파복사, 단파복사, 기온, 풍속 등을 고려한 지표면 열유속 모델의 계산결과를 열플럭스의 형태로 최상부 레이어의 전체면에 입력하였다.

Fig. 3.은 본 연구에서 이용된 수치해석 모델을 나타낸다. 지중열교환기의 채열 성능을 정밀하게 예측하기 위해 Tetra-mesh를 이용하여 토양 및 지중열교환기, 보어홀 형상을 재현하였다. 모델의 형상 구현을 위한 메쉬 요소(Mesh Element)의 크기는 토양, 지중열교환기, 보어홀 별로 다르게 구성되어있다.

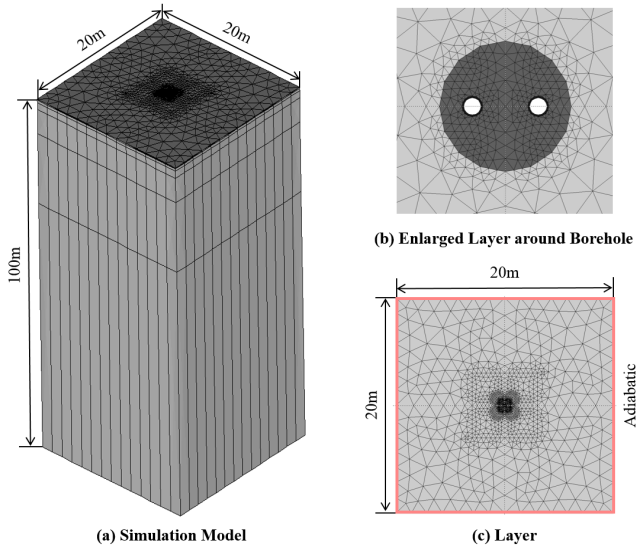

Fig. 3. Numerical analysis model

가장 작은 크기의 요소는 정밀한 해석이 요구되는 지중열교환기에 0.003m로 구현되어 있으며, 해석영역의 경계면으로 갈수록 크기는 점차 증가한다. 하나의 레이어 당 메쉬 요소의 개수는 3,409개로 구축하였다.

Table 1. Simulation conditions

Parameter	Condition
Calculation Tool	FEFLOW + User Subroutine
Ground Heat Exchanger	Single U-tube, 32A
Borehole	Concrete Grouting, depth : 100m
Analysis Domain	20m × 20m × 100m
Operation Period	12/1 ~ 2/28 (3month)
Operation time	09:00 ~ 18:00 (9hour)
Flow Rate	9.3 lpm
Circulation Water	Limit Temp. 5℃, Initial ΔT. 10℃
Initial Ground Temperature	16 ℃

Table 1.은 시뮬레이션 조건을 나타낸다. 본 연구에서는 수직밀폐형 지열 시스템이 사무용 건물에 설치되었다고 가정하여 시스템 운전시간을 오전 9시부터 오후 6시까지 총 9시간으로 설정하였으며, 운전기간은 겨울철 3개월 난방운전을 실시하였다.

시스템 장기운전으로 인한 지중온도 감소 및 채열 성능 저하 방지와 공기열원 시스템에 대한 비교우위를 가지는 온도를 고려하여 순환수 제한온도를 5℃로 설정하였다. 순환수의 초기 온도차는 10℃로 설정하여 지중열교환기의 열교환 성능을 최대한 발휘 할 수 있도록 설정하였다. 토양의 초기 지중온도는 선행연구 및 문헌 [16~18]을 참고하여 국내 평균 지중온도인 16℃로 적용하였다.

Table 2. Thermal properties of soil, grout and U-tube

	Porosity	Conductivity (W/m·K)	Heat Capacity (MJ/㎥·K)
Soil	0.01	3.5	2.92
Grout	0.001	1.5	2.80
U-tube	0.001	0.41	2.30

Table 2.는 토양, 그라우트 및 지중열교환기 모델의 열물성 조건을 나타낸다. 토양의 암석종류는 국내에 가장 널리 분포되어 있는 화강암으로 설정하였으며, 화강암의 열전도도 조건은 시료채취를 통한 분석 데이터와 실제 TRT(Thermal Response Test) 테스트를 통해 측정된 데이터 [19]를 참고하여 시뮬레이션 모델에 적용하였다. 또한, 그라우트의 재료는 일반적으로 이용되고 있는 콘크리트로 가정하였으며, 지중열교환기는 HDPE 파이프로 가정하여 열물성 조건을 각각 입력하였다 [20].

Table 3. Case Study Condition

	Operation Time (hour)	Flow Rate (LPM)	Limit Temp. (℃)
Case 1	9	9.3	5
Case 2	6		
Case 3	3		
Case 4	1		
Case 5	9	4.65	
Case 6		18.6	
Case 7		9.3	
Case 8			0
Case 9			2
Case 10			-2

Table 3.은 시뮬레이션 Case Study 조건을 나타낸다. Case Study 조건은 시스템 운전시간, 순환수 유량 및 순환수 제한온도로 구분하였다. 시스템 운전시간은 건물의 냉난방 부하에 의존하며 현실적으로 제어할 수 있는 여지가 적다. 하지만, 선행연구 [21,22]에 의하면 지열 시스템 설계 용량 대비 실제 시스템 운전시간은 설계 사양을 크게 하회하고 있으며, 운전조건에 따른 시스템 성능에 대한 공학적 근거를 마련할 필요가 있으므로 본 해석 케이스를 설정하였다.

순환수 유량에 대한 조건은 미국냉동공조학회(ASHRAE)에

ⓒCopyright Korea Institute of Ecological Architecture and Environment

서 시스템 용량 1RT당 9.3lpm에서 11.3 lpm까지로 권장하고 있다. 이는, 오래전부터 냉각탑에서 냉각수의 순환유량으로 활용되어온 경험적인 수치이며 실제 설계 용량에 근거한 값이 아닌 건물의 피크부하에 의해 산출된 필요 유량이다 [23,24]. 따라서 지열 히트펌프 시스템은 대부분 부분부하 운전을 수행하기 때문에 정격부하 조건에서 설계된 순환수 유량 조건외의 범위에 대해서도 고려해야할 필요가 있다. 또한, 순환수 제한온도는 지중온도 감소 및 채열성능 저하를 방지하기 위해 설정하지만, 지중온도 회복이 빠른 토양조건일 경우 지중에서 추출할 수 있는 가능성(Potential)이 증가된다.

본 연구에서는 이러한 설계조건을 통해 수직밀폐형 지열 시스템의 영향인자와 채열량 및 순환수 출수온도에 미치는 영향을 검토하고, 정량적 회귀식을 도출함으로써 시스템 설계 및 운전에 필요한 가이드라인을 제시하고자 하였다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1. 운전시간에 따른 성능특성

Fig. 4.는 시스템 운전시간에 따른 지중 채열량 및 순환수 출구온도를 나타낸다. 시스템 운전시간이 가장 적은 Case 4(1hour)의 채열량은 52.0W/m로 확인되었으며, 운전시간 가장 많은 Case 1(9hour)의 채열량은 34.3W/m로 산출되었다. Case 4는 Case 1 보다 채열 성능이 51.6% 높았으며, 17.7W/m 차이를 나타냈다. 한편, 시스템 운전시간에 따른 채열량의 회귀식은 아래의 (식1)과 같이 도출되었다.

$$y_{her,t} = 0.32x_t^2 - 5.22x_t + 56 \cdots\cdots\cdots\cdots (식1)$$

여기서, $y_{her,t}$는 운전시간에 따른 채열량(W/m), x_t는 운전시간(hour)을 나타낸다. (식3)을 통해 시스템 운전시간이 증가할수록 지중 채열 성능이 저하되는 것을 확인하였다. 이는, 시스템이 부하에 대응하는 운전시간이 증가할수록 지중에서 더 많은 열교환을 수행하고, 이에 따라 지중온도 회복 시간은 감소되어 채열 성능이 저하되는 것으로 판단된다.

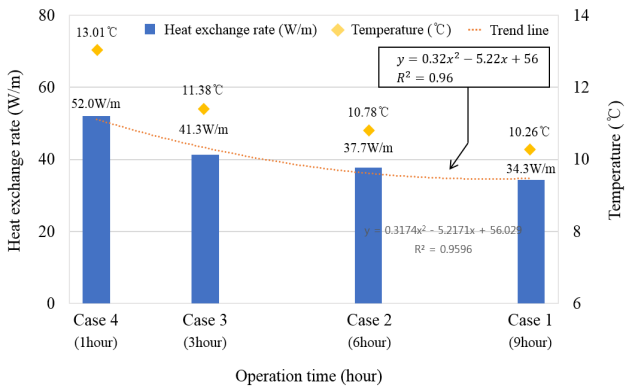

Fig. 4. HER and EWT according to operation time

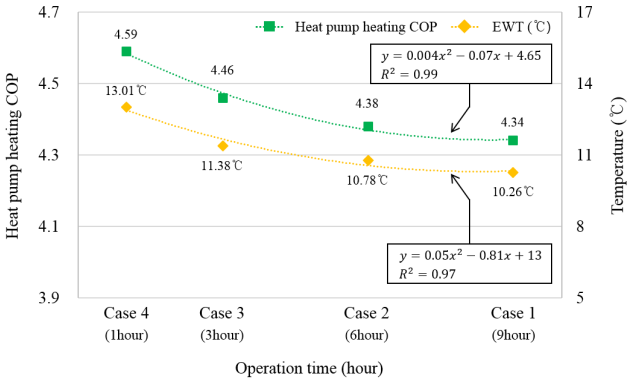

Fig. 5. Heating COP and EWT according to operation time

Fig. 5.는 시스템 운전시간에 따른 히트펌프 난방성능계수와 순환수 출구온도를 나타낸다. 히트펌프 난방성능계수와 순환수 출구온도는 운전시간에 따른 채열량 변화 양상과 비슷하게 확인되었다. 시스템 운전시간이 가장 적은 Case 4(1hour)의 히트펌프 난방성능계수는 4.59, 순환수 출구온도는 13.01℃로 확인되었다. Case 4의 히트펌프 난방성능계수와 순환수 출구온도는 Case 1 보다 각각 6%, 27% 향상되었다. 운전시간이 작을수록 순환수 출구온도와 히트펌프 난방성능계수는 향상되었다.

$$y_{cop,t} = 0.004x_t^2 - 0.07x_t + 4.65 \cdots\cdots\cdots\cdots (식2)$$

$$y_{ewt,t} = 0.05x_t^2 - 0.81x_t + 13 \cdots\cdots\cdots\cdots (식3)$$

여기서, $y_{cop,t}$는 히트펌프의 난방성능계수, $y_{ewt,t}$는 순환수 출구온도(℃), x_t는 시스템 운전시간(hour)를 나타낸다. 운전시간에 따른 히트펌프 난방성능계수 및 순환수 출구온도의 변화량은 (식2)와 (식3)을 통해 예측할 수 있다. 시스템 운전시간이 1시간 증가할수록 히트펌프 난방성능계수와 순환수 출구온도는 각각 0.058, 0.66℃ 감소하는 것을 확인하였다.

3.2. 순환수 유량에 따른 성능특성

Fig. 6.은 순환수 유량에 따른 지중 채열량 및 순환수 출구온도를 나타낸다. 순환수 유량이 가장 많은 Case 6(18.6LPM)의 채열량은 43.4W/m, 유량이 가장 작은 Case 5(4.65LPM)의 채열량은 23.3W/m로 확인되었다. 순환수 유량 조건에 따라 Case 6은 Case 5 보다 채열 성능이 약 86% 증가하였으며, 최대 20.1W/m의 차이를 나타냈다. 한편, 순환수 유량 조건에 따른 채열량 회귀식은 아래의 (식4)와 같이 도출되었다.

$$y_{her,f} = -0.085x_f^2 + 3.3x_f + 11.4 \cdots\cdots\cdots\cdots (식4)$$

여기서, $y_{her,f}$는 순환수 유량에 따른 채열량(W/m), x_f는 순환수 유량(LPM)을 나타낸다. 순환수 유량이 증가할수록 채열량은 향상되는 양상을 확인하였다. (식4)를 통해 순환수 유량 1LPM 증가에 따라 채열량은 약 3.05W/m 향상되는 것을 확인하였다.

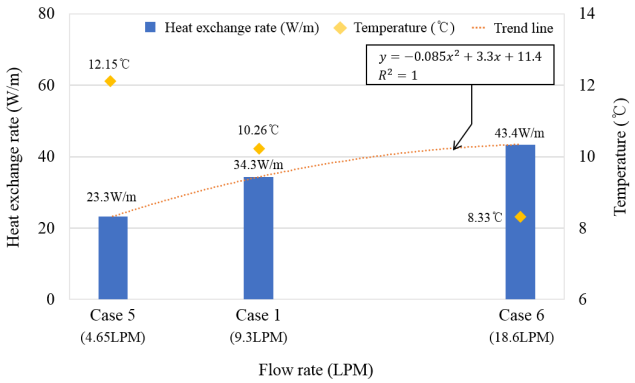

Fig. 6. HER and EWT according to flow rate

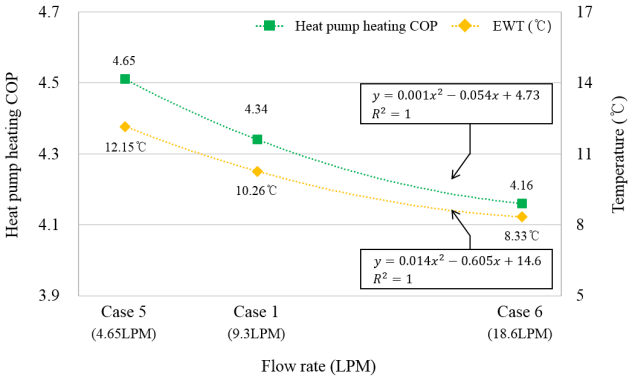

Fig. 7. Heating COP and EWT according to flow rate

Fig. 7.은 순환수 유량에 따른 히트펌프 난방성능계수와 순환수 출구온도를 나타낸다. 채열량 변화 양상과 다르게 순환수 유량이 증가함에 따라 히트펌프 난방성능계수와 순환수 출구온도는 감소하였다. 순환수 유량이 가장 작은 Case 5(4.65LPM)가 Case 6(18.6LPM)보다 히트펌프 난방성능계수와 순환수 출구온도가 각각 12%, 46% 높게 확인되었다. 한편, 순환수 유량에 따른 히트펌프 난방성능계수와 순환수 출구온도는 아래의 (식5)와 (식6)과 같이 도출되었다.

$$y_{cop,f} = 0.001x_f^2 - 0.054x_f + 4.73 \cdots\cdots \text{(식5)}$$

$$y_{ewt,f} = 0.014x_f^2 - 0.605x_f + 14.6 \cdots\cdots \text{(식6)}$$

여기서, $y_{cop,f}$는 순환수 유량에 따른 히트펌프 난방성능계수, $y_{ewt,f}$는 순환수 출구온도(℃), x_f는 순환수 유량(LPM)을 나타낸다. (식5)와 (식6)을 통해 순환수 유량이 1LPM 증가할수록 히트펌프 난방성능계수와 순환수 출구온도가 각각 0.051, 0.563℃ 감소되는 것을 확인하였다. 한편, 순환수 유량이 증가할수록 지중열교환기와 토양 간 열교환량이 향상되나, 연속운전으로 인해 순환수의 평균 출수온도가 감소되어 히트펌프의 성능계수가 저하되는 것으로 판단된다.

3.3. 순환수 제한온도에 따른 성능특성

Fig. 8.은 순환수 제한온도에 따른 지중 채열량 및 순환수 출구온도를 나타낸다. Case 10(-2℃)의 채열량은 55.3W/m로 확인되었으며, Case 1(5℃)의 채열량은 34.3W/m로 계산되었다.

순환수 제한온도에 따라 Case 10은 Case 1 보다 채열량이 21W/m 높게 확인되었으며, 순환수 제한온도 조건에 의해 채열성능은 최대 61% 차이를 나타내었다. 한편, 순환수 제한온도에 따른 채열량의 회귀식은 아래의 (식7)과 같이 계산된다.

$$y_{her,l} = -3.01x_l + 49.44 \cdots\cdots \text{(식7)}$$

여기서, $y_{her,l}$는 순환수 제한온도에 따른 채열량(W/m), x_l은 순환수 제한온도(℃)를 나타낸다. (식7)을 통하여 순환수 제한온도가 1℃ 증가함에 따라 지중 채열량은 3.01W/m 감소되는 것을 확인하였다.

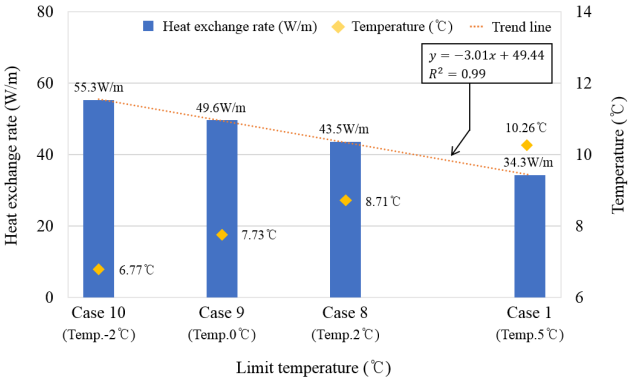

Fig. 8. HER and EWT according to limit temperature

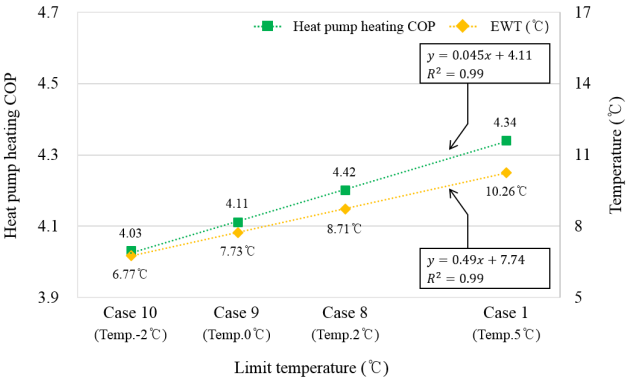

Fig. 9. Heating COP and EWT according to limit temperature

Fig. 9.는 순환수 제한온도에 따른 히트펌프 난방성능계수와 순환수 출구온도를 나타낸다. Fig. 8.의 채열량 결과와는 반대로, 순환수 제한온도가 높을수록 히트펌프 난방성능계수와 순환수 출구온도는 증가하는 양상을 나타내었다.

순환수 제한온도가 가장 높은 Case 1(5℃)의 히트펌프 난방성능계수 및 순환수 출구온도는 각각 4.34, 10.26℃로 확인되었다. 반면, 순환수 제한온도가 가장 낮은 Case 10(-2℃)의 히트펌프 난방성능계수 및 순환수 출구온도는 각각 4.03, 6.77℃로 나타났다. 히트펌프 난방성능계수와 순환수 출구온도는 Case 1이 Case 10 보다 각각 8%, 52% 높게 확인되었다.

ⓒCopyright Korea Institute of Ecological Architecture and Environment

순환수 제한온도에 따른 히트펌프 난방성능계수와 순환수 출구온도에 대한 회귀식은 아래의 (식8), (식9)와 같이 1차 방정식으로 도출되었다.

$$y_{cop,l} = 0.045x_l + 4.11 \cdots\cdots (식8)$$

$$y_{ewt,l} = 0.49x_l + 7.74 \cdots\cdots (식9)$$

여기서, $y_{cop,l}$는 순환수 제한온도에 따른 히트펌프 난방성능계수, $y_{ewt,l}$는 순환수 출구온도(℃), x_l는 순환수 제한온도(℃)을 나타낸다. (식8)과 (식9)를 통해 순환수 제한온도가 1℃ 증가할수록 히트펌프 난방성능계수와 순환수 출구온도가 각각 0.045, 0.49℃ 감소되는 것을 확인하였다.

이를 통해, 순환수 제한온도가 낮을수록 지중에서 채열할 수 있는 포텐셜이 증가하여 지중열교환기가 더 많은 열교환을 수행할 수 있다. 그러나 열교환량이 많아질수록 지중 열원온도는 감소하게 된다. 이로 인해, 순환수 출구온도 및 히트펌프 난방성능계수가 저하되는 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 수직밀폐형 지열 시스템을 대상으로 영향인자에 대한 민감도 분석을 수행하여 각 설계인자가 시스템 채열 성능 및 히트펌프 성능계수에 미치는 영향을 정량적으로 검토하고, 이에 관한 회귀식을 도출하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약하였다.

(1) 시스템 운전시간이 적을수록 채열 성능과 히트펌프 난방성능계수는 증가하였다. Case 4(1hour)와 Case 1(9hour)의 채열량과 히트펌프 성능은 각각 51.6%, 6%의 차이를 나타냈다. 이를 통해, 운전시간이 많을수록 지중온도 회복시간이 감소되고 지중열교환기의 열교환 작동시간이 증가되어 시스템 성능이 저하되는 것으로 판단된다.

(2) 순환수 유량이 증가할수록 채열량은 최대 86% 증가하였으나, 히트펌프의 난방성능계수는 약 12% 감소하였다. 이는, 순환수 유량이 증가할수록 지중으로부터 더 많은 열을 채열하기 때문에 열교환량은 향상되나, 순환수의 평균 출수온도가 감소되어 히트펌프의 성능계수가 저하되는 것으로 사료된다.

또한, 순환수 제한온도에 따른 시스템 성능특성은 제한온도가 낮을수록 채열량이 증가하고, 히트펌프 난방성능계수는 감소되었다. Case 10(-2℃)은 Case 1(5℃)보다 채열량이 약 61% 증가하였으나, 히트펌프 난방성능계수는 약 8% 감소되었다. 이는, 제한온도가 낮을수록 지중에서 채열할 수 있는 포텐셜이 향상되므로 채열 성능이 증가되는 것으로 판단된다.

(3) 수직밀폐형 지열 시스템이 채열량에 대해 최대 성능을 발휘하기 위해서는 건물부하에 대응하는 운전시간이 작고, 지중온도 회복시간이 충분히 확보되어야한다. 더불어, 순환수 유량의 증가와 순환수 제한온도 감소를 통해 지중 채열에 대한 열교환량과 포텐셜이 향상되어야한다.

(4) 본 연구의 해석적 검토는 실제 시스템 설계에서 충분히 변화될 수 있는 범위에서 검토하였으며, 설계인자별 해석범위 내에서는 회귀식의 이용이 크지않는 오차범위 내에서 신뢰될 수 있다. 그러나, 해석검토의 범위를 넘어서는 조건에서는 회귀식의 적용이 어려울 수 있다.

향후, 수직밀폐형 지열 시스템의 최적설계법 및 설계가이드라인 구축을 위해 다양한 설계인자를 이용하여 성능검토 및 도입타당성 분석을 수행할 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부 (MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20163030111350), 본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “국제공동기술개발사업(N062000014_태양광열-지열 이용 Trigeneration 시스템 개발 및 사업화)”의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

Reference

[1] 국가법령정보센터, “저탄소 녹색성장 기본법”, 국무조정실, 2018 // (National Law Information Center, "Framework Act on Low Carbon, Green Growth", Office for Government Policy Coordination, 2018)

[2] 전상현, 안장원, 김원우, 조승연, 태양광발전, 태양열 급탕, 지열시스템의 신재생에너지설비 조합에 관한 LCC 분석, 한국생태환경건축학회 논문집, 제 12권, 제 1호, 2012, pp.105~112 // (Chun, Sang-Hyun, Ahn, Jang-Won, Kim, Wonwoo, Cho, Seung-Yun, Life Cycle Cost Analysis about Renewable Energy Facilities Combination of Photovoltaic System, Solar Thermal System and Geothermal System, The International Journal of The Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, Vol.12, No.1, 2012, pp.105~112)

[3] 남유진, 채호병, 공기 및 지열 이용 Dual-Source 히트펌프 시스템의 성능실험 및 경제성 분석, 설비공학논문집, 제 26권, 제 5호, 2014, pp.212~217 // (Nam, Yujin, Chae, Ho-Byung, The Performance Test and the Feasibility Study for a Dual-Source Heat Pump System Using the Air and Ground Heat Source, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol.26, No.5, 2014, pp.212~217)

[4] 전종길, 이동건, 백이, 김형권, 시설원예용 지열 및 태양열 이용 하이브리드 히트펌프 시스템의 난방성능에 관한 연구, 한국태양에너지학회 논문집, 제 35권, 제 5호, 2015, pp.49~56 // (Jeon, Jong-Gil, Lee, Dong-Geon, Paek, Yee, Kim, Hyung-Gweon, Study on Heating Performance of Hybrid Heat Pump System Using Geothermal Source and Solar Heat for Protected Horticulture, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol.35, No.5, 2015, pp.49~56)

[5] 민경천, 최재호, 설계변수가 수직밀폐형 지중열교환기 설계길이에 미치는 영향, 한국지열에너지학회논문집, 제 7권, 제 2호, 2011, pp.10~15 // (Min, Kyong-Chon, Choi, Jae-Ho, Effect of the Design Parameters of Geothermal Heat Exchanger Design Length, Transactions of the Korea society Geothermal Energy Engineers, Korea, Vol. 7, No. 2, 2011, pp.10~15)

[6] 박종일, 박경순, 설계조건 변화에 따른 지중열교환기 길이 변화 연구, 한국지열에너지학회논문집, 제 9권, 제 4호, 2013, pp.8~13 // (Park, Jong-Il, Park, Kyung-Soon, Study on Capacity Alteration of Geothermal Heat Exchanger by Changing Design Condition, Transactions of the Korea society of Geothermal Energy Engineers, Korea, Vol. 9, No. 4, 2013, pp.8~13)

[7] 이준엽, 정진택, 우정선, 최종민, 지중 순환수 유량 변화에 따른 지열원 히트펌프 시스템의 성능 특성 연구, 설비공학논문집, 제 22권, 제 10호, 2010, pp.649~656 // (Lee, Jun-Yub, Chung, Jin-Taek, Woo, Jung-Son, Choi, Jong-Min, Influence of the Secondary Fluid Flow Rate on the Performance of a GSHP system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 22, No. 10,

2010, pp.649~656)
[8] 정영주, 조재훈, 김용식, 조영흠, 지열순환펌프 유량변화에 따른 지열 히트펌프시스템의 에너지 성능 평가, 한국태양에너지학회 논문집, 제 34권, 제 6호, 2014, pp.103~109 // (Jung, Yong-Ju, Jo, Jae-Hun, Kim, Yong-Shik, Cho, Young-Hum, A Study on the Geothermal Heat Pump System Performance Analysis according to Water Flow Rate Control of the Geothermal Water Circulation Pump, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 34, No. 6, 2014, pp.103~109)
[9] 신지현, 조영흠, 인공신경망을 활용한 지열 히트펌프 시스템의 성능 예측에 관한 연구, 한국생활환경학회지, 제 24권, 제 5호, 2017, pp.562~567 // (Shin, Ji-Hyun, Cho, Young-Hum, Predicting of the Geothermal Heat Pump System Coefficient of Performance uisng Artificial Neural Network, Journal of The Korean Society of Living Environmental System, Vol. 24, No. 5, 2017, pp.562~567)
[10] 우상우, 황광일, 김중헌, 신승호, CFD 해석에 의한 수직형 지열교환기의 성능예측, 한국태양에너지학회 논문집, 제 27권, 제 3호, 2007, pp.117~125 // (Woo, Sang-Woo, Hwang, Kwang-Il, Kim, Joong-Hun, Shin, Seung-Ho, A Performance Prediction of a Vertical-type Geothermal Heat Exchanger by CFD Analysis, Journal of the Korea Solar Energy Society, Vol. 27, No. 3, 2007, pp.117~125)
[11] 손병후, 권한솔, 업무용 건물의 지열 히트펌프 시스템에 대한 성능 예측, 설비공학논문집, 제 26권, 제 9호, 2014, pp.409~415 // (Sohn, Byong-Hu, Kwon, Han-Sol, Performance Prediction on the Application of a Ground-Source Heat Pump(GSHP) System in an Office Building, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 26, No. 9, 2014, pp.409~415)
[12] 강경우, 신지현, 김상현, 조영흠, 지열히트펌프 시스템 효율 향상을 위한 설계 개선방안에 관한 연구, 한국생활환경학회지, 제 24권, 제 2호, 2017, pp.238~244 // (Kang, Kyung-Woo, Shin, Ji-Hyun, Kim, Sang-Hyun, Cho, Young-Hum, A Study on Design Improvement Method of Geothermal Heat Pump System for Energy Efficiency, Journal of The Korean Society of Living Environmental System, Vol. 24, No. 2, 2017, pp.238~244)
[13] Pu, Liang, Qi, Di, Xu, Lingling, Li, Yanzhong, Optimization on the Performance of Ground Heat Exchangers for GSHP uisng Kriging Model based on MOGA, Applied Thermal Engineering, Vol. 118, 2017, pp.408~489.
[14] Yujin, Nam, Ryozo, Ooka, Suckho, Hwang, Development of a Numerical Model to Predict Heat Exchange Rates for a Ground-source Heat Pump System, Energy and Buildings, Vol. 40, Issue. 12, 2008, pp.2133~2140.
[15] Wonjun, Choi, Ryozo, Ooka, Yujin, Nam, Impact of Long-term Operation of Ground-source Heat Pump on Subsurface Thermal State in Urban Areas, Sustainable Cities and Society, Vol. 38, 2018, pp.429~439.
[16] 류형규, 정민호, 이병석, 류효준, 최현준, 최항석, 지중온도 경사를 이용한 효율적 지중에너지 이용 방안에 관한 연구, 설비공학논문집, 제 29권, 제 9호, 2014, pp.401~408. // (Ryu, Hyungkyu, Chung, Minho, Lee, Byungseok, Rhew, Hyojun, Choi, Hyunjun, Choi, Hangseok, A Study on Effective Energy Use of the Open Type Ground Heat Exchanger Using Underground Temperature Gradient, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 26, No. 9, 2014, pp.401~408)
[17] 정재훈, 김규범, 박승기, 김형수, 김태형, 천층 토양 내 지중온도 변동 특성과 수치모델 평가, 한국지반환경공학회 논문집, 제 16권, 제 5호, 2015, pp.35~42. // (Jeong, Jaehoon, Kim, Gyoobum, Park, Seoungki, Kim, Hyungsoo, Kim, Taehyung, Fluctuation Features and Numerical Model for Underground Temperature in Shallow Subsurface Soil, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 16, No. 5, 2015, pp.35~42)
[18] 한정상, 한혁상, 한찬, “지열에너지(지열냉난방·지열발전)”, 한림원, 2010 // (Hahn, Jeong-Sang, Han, Hyok-Sang, Hahn, Chan, Geothermal Energy, hanrimwon, 2010)
[19] B.O., Shim, C.-H., Park, Ground Thermal Conductivity for (Ground Source Heat Pumps) GSHPs in Korea, Energy, Vol. 56, 2013, pp.167~174.
[20] 박영신, 김정호, 전현규, 서치호, 규조토 미분말과 경량골재를 사용한 콘크리트의 열전도 특성에 관한 연구, 대한건축학회 논문집-구조계, 제 30권, 제 5호, 2014, pp.65~72 // (Park, Young-Shin, Kim, Jung-Ho, Jeon, Hyun-Kyu, Seo, Chee-Ho, Study on the Thermal Conduction Characteristics of Concrete with Calcined Diatomite Powder and Lightweight Aggregate, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 30, No. 5, 2014, pp.65~72)
[21] 백길남, 송윤호, 이태종, 송영수, 설계자료와 모니터링 자료 분석을 통한 지열히트펌프의 지열에너지 이용량 비교, 신재생에너지, 제 11권, 제 1호, 2015, pp.3~11 // (Paek, Kil-Nam, Song, Yoonho, Lee, Tae-Jong, Song, Young-Soo, A Comparison of Geothermal Energy Utilized by GSHP between Real Monitoring Data and the Design Criteria, New & Renewable Energy, Vol.11, No.1, 2015, pp.3~11)
[22] 공형진, 권순기, 지승규, 지열이용검토서 분석을 통한 지열 히트펌프 시스템 사례 연구, 대한설비공학회 학술발표대회논문집 : 2015.06, pp.561~564 // (Kong, Hyung-Jin, Kwon, SoonKi, Ji, Seoung-Gyu, A Case of GSHP Systems by Analyzing Geothermal Energy Assessment Report, Conference Journal of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers, 2015.06, pp.561~564)
[23] Steve, Kavanaugh, Kevin, Rafferty, "Geothermal Heating and Cooling Design of Ground-Source Heat Pump Systems", ASHRAE, 2014
[24] 지열인력양성센터, “지열설계사”, 건기원, 2011 // (Geothermal Energy Education Center, "Geothermal System Design", Kunkiwon, 2011)

ⓒCopyright Korea Institute of Ecological Architecture and Environment