

# 하이브리드 열원이 연결된 보어필드 장기 성능의 기초적 분석

## Preliminary Analysis of Long-Term Performance of Borefield Connected to Hybrid Sources

박영준(Young-Joon Park), 김의종(Eui-Jong Kim)\*<sup>†</sup>

인하대학교 건축공학과 석사과정, \*인하대학교 건축학부 교수

Master Course of Graduate School, Department of Architectural Engineering Inha University, Incheon 22212, Korea

\*Professor, Department of Architectural Engineering Inha University, Incheon 22212, Korea

### Abstract

In this study, the performance of a ground heat exchanger (GHE) for domestic hot water loads was evaluated using an FLS (Finite Line Source) model with various configurations. The evaluation compared two scenarios: using the GHE alone and using a hybrid system combining the GHE with solar thermal modules, operated in both group and individual modes. The results indicated a continuous decrease in ground temperature when only the GHE was used. However, in the group/individual operation modes, the ground temperature showed a slight decrease but maintained a more stable level. Over a long-term operation of 20 years, the hybrid group/individual operation with solar thermal modules showed that the average temperature of the fluid discharged from the GHE was approximately 0.7°C higher than when only the GHE was used. Providing a higher temperature fluid on the heat source side suggests the potential to improve the COP (Coefficient of Performance) of the heat pump. Moreover, the proposed hybrid group/individual operation mode demonstrated the ability to mitigate ground temperature imbalances caused by load imbalances, and confirmed the possibility of reducing the number of GHE installations by half, thereby lowering initial investment costs. In conclusion, the simulation verified that the group/individual operation mode utilizing hybrid heat sources is an effective alternative for enhancing the performance and cost-efficiency of ground source heat pump systems.

**Key words:** Ground heat exchanger(지중열교환기), Group/Individual operation(그룹/개별 운전), Photovoltaic thermal module(태양광열 모듈), Thermal interference(열간섭), Load imbalance(부하 불균형), Ground temperature recovery(지중온도 회복)

<sup>†</sup>Corresponding author

E-mail: [ejkim@inha.ac.kr](mailto:ejkim@inha.ac.kr)

접수일: 2024년 05월 21일; 심사일: 1차:2024년 06월 28일, 채택일: 2024년 06월 28일

### 기호 설명

- $B$  : 지중열교환기의 간격 [m]  
 $C_s$  : 지중의 체적 열용량 [ $J/m^3\text{°C}$ ]  
 $C_f$  : 지중 순환 유체의 비열 [ $J/kg\text{°C}$ ]  
 $C_{PVT}$  : 태양광열 모듈 순환 유체의 비열 [ $J/kg\text{°C}$ ]  
DST : 지중열 저장고(Duct Storage)  
 $D_b$  : 지중열교환기 지름 [m]

$D_{p,i}$	: 지열관 내부 지름 [m]
$D_{p,o}$	: 지열관 외부 지름 [m]
erfc	: 상보 오차 함수
$F_o$	: 푸리에 상수
FLS	: 유한 선원 모델
$H$	: 지중열교환기의 매설 깊이 [m]
$h_i$	: 관내 열전달 계수 [ $W/m^2\text{°C}$ ]
$k_g$	: 그라우트 열전도율 [ $W/m^2\text{°C}$ ]
$k_p$	: U자형 지열관 열전도율 [ $W/m^2\text{°C}$ ]
$k_s$	: 지중 열전도율 [ $W/m^2\text{°C}$ ]
$\dot{M}$	: 지중열교환기 순환 유체의 유량 [kg/s]
$\dot{M}_{PVT}$	: 태양광열 모듈 순환 유체의 유량 [kg/s]
$N$	: 지중열교환기의 개수
$n$	: 시점
PVT	: 태양광열 모듈
$q$	: 열교환기 단위 길이 당 평균 열류 [W/m]
$q_i$	: $i$ 번째 시점에서의 열교환기 단위 길이 당 평균 열류 [W/m]
$R_b$	: 열저항 [ $m^2\text{°C/W}$ ]
$r_{p,i}$	: 지열관 내부 반지름 [m]
$r_{p,o}$	: 지열관 외부 반지름 [m]
$r_{i,j}$	: $i$ 에서 $j$ 번째 교환기 사이의 거리[m]
$S_b$	: 지중열교환기 형상 계수
$T_b$	: 지중열교환기 평균 벽면 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{f,in}$	: 유체의 입구 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{f,out}$	: 유체의 출구 평균 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_f$	: 유체의 입출구 평균 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_s$	: 초기 지중 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_g$	: 지중 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_i, T_j$	: $i$ 및 $j$ 번째 시점에서의 지중열교환기 평균 벽면 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$t$	: 시간 [sec]
$t_n, t_i$	: $n$ 및 $i$ 번째 시점에서의 시간 간격 [sec]

## 그리스 문자

$\alpha_s$  : 열확산계수 [ $m^2/\text{day}$ ]

## 1. 서 론

지열 히트펌프 시스템을 설계하기 위해선 냉/난방 부하 불균형에 대한 이해가 필요하다. 연중 냉/난방 부하, 정확히는 냉난방 지중부하의 크기가 동일한 건물인 경우, 지중에 투입 및 추출되는 열의 양이 차이가 없으므로 장기간 높은 효율로 지열 히트펌프를 사용할 수 있다. 하지만 일반적으로 건물은 냉/난방 부하의

크기가 연중 상이하게 나타나며, 한쪽에 치우친 지배적인 부하가 생긴다. 이러한 부하 불균형 현상은 지중에 지속적인 열 투입 혹은 열 추출로 인해 지중온도( $T_g$ ) 불균형을 야기시켜 점차 시스템 성능을 저하시킨다[6]. 또한, 지열 히트펌프 시스템을 설계할 때 건물의 부하는 예측을 바탕으로 시뮬레이션을 진행하기 때문에 예측되지 않은 과도한 부하 불균형 상황은 적절히 대응하기 힘들다. 따라서, 지열 히트펌프를 장기간 안정적으로 사용하기 위해선 이러한 부하 불균형 현상을 고려한 적절한 설계가 필요하며 이를 위해, 지금까지 다양한 연구들이 수행되었다.

하이브리드 열원(보조 열원)을 활용한 하이브리드 지열 히트펌프 시스템은 지중온도( $T_g$ ) 변화를 완화하는데 매우 효율적인 시스템이다. Xu et al.[7]은 부하 불균형을 대응하기 위해 하이브리드 열원과 결합한 지열 히트펌프 시스템에 대한 전반적인 개요 및 방안을 제시하였다. 이를 통해, 지중온도( $T_g$ ) 변화를 완화하여, 장/단기적인 히트펌프 COP 감소를 낮출 수 있음을 확인하였다. Bae[8]는 건축물에 주로 사용되고 있는 하이브리드 열원인 태양광열 모듈(PVT)의 폐열을 활용하여 급탕 부하를 담당하는 하이브리드 지열 히트펌프 시스템에 관한 연구를 진행하였다. 태양광열 모듈을 순환하는 유체가 집열을 통해 온도가 상승되면 이를 활용하여 급탕부하를 일부 감당할 수 있다. 뿐만 아니라, 급탕 부하로 인해 온도가 낮아진 지중온도( $T_g$ )를 높이기 위해 집열을 통해 상승된 유체가 지중열교환기를 순환하며 지중온도( $T_g$ )를 회복하였다. Park[9]은 하이브리드 열원으로 미활용 에너지원인 영구배수를 활용하여 직렬 및 병렬운전 방안을 제시하였다. 이를 통해, 건물의 최대 부하량의 10%를 영구배수로 감당하여 지중온도( $T_g$ ) 회복을 통한 히트펌프 COP를 늘릴 수 있었고 지중열교환기 길이를 줄여 초기 설치비용이 높은 지중열교환기 시공비를 획기적으로 줄일 수 있었다. Baek et al.[10] 및 Bae and Nam[11]은 간헐적 운전 조건으로 지열 히트펌프 운전 상황을 평가하였고 지중의 회복 시간이 길어짐에 따라 지중온도( $T_g$ ) 불균형이 완화되어 열교환 효율이 상승함을 확인하였다. 그러나, 언급된 대부분의 시스템은 동일한 지중열교환기의 조건에 따라 열원을 하이브리드 방식으로 연결하여 시스템을 구성한 것이다.

한편, 건물의 필요로 하는 부하의 크기가 큰 경우 다수의 지중열교환기를 통해 건물 부하를 감당한다. 이때, 지중열교환기 간의 열간섭 현상이 발생하고 열간섭을 크게 받는 지중열교환기는 더욱 과열 혹은 과냉이 가속화되어 인접한 지중열교환기에 비해 열교환 효율이 현저히 떨어지게 된다. Bayer et al.[12]는 다수의 지중열교환기 사이에 열간섭이 심한 지중열교환기를 순차적으로 사용을 중단하고, 건물이 필요로 하는 냉/난방 부하를 만족하는 최적의 지중열교환기 설치 개수를 도출하였다. 이를 통해, 특정 지중열교환기의 과열 혹은 과냉되는 것을 방지하여 보다 높은 효율로 냉/난방 부하를 감당할 수 있었다. 또한, Mingzhi et al.[13]는 연중 여름철 난방부하 크기가 겨울철 난방부하 크기보다 큰 상황에서의 지열 히트펌프 구역(Zoning) 운영 전략을 제시하였다. 여름철엔 전체의 지중열교환기로 부하를 감당하고 겨울철에는 열간섭이 심한 중앙 부분의 지중열교환기를 활용하여 난방부하를 감당하였다. 이를 통해, 특정 지중열교환기의 과열 상태를 방지할 수 있었고 부하 불균형으로 인한 지중의 열적 축적을 효과적으로 완화할 수 있음을 확인하였다.

일반적으로 지중열교환기는 개별운전이 아닌 병렬 운전 즉, 전체 지중열교환기에 동일 조건의 유체가 순환하는 방식으로 운전되는데 다수의 지중열교환기가 설치된 경우라면 열간섭으로 인해 특정 지중열교환의 과열 혹은 과냉되는 상황을 피할 수 없기 때문에 이를 해결하기 위해선 공별 지중온도( $T_g$ ) 특성을 고려한 그룹/개별 운전 방안이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 그룹/개별 운전이 가능한 FLS 기반의 모델을 개발하여 건물의 급탕 부하와 태양광열 모듈 부하를 서로 다른 지중열교환기가 감당하는 하이브리드 보어필드 타입의 지열 히트펌프 시스템을 제안한다. 기존의 병렬운전 방식으로 지중열교환기만을 활용하여 급탕 부하를 감당했을 경우와 제안하는 운전 방식(그룹/개별)으로 급탕 부하 및 태양광 모듈 부하를 감당했을 경우를 비교하여 평가를 진행하였다.

## 2. 열원 모델

### 2.1 FLS (Finite line source) 모델

본 연구에서 사용한 지중열교환기 모델은 Zenget et al.[14]에 의해 제안된 FLS(Finite line source) 모델이다. FLS 모델은 해석적 모델(Analytical model)로써 다양한 배열 및 운전 상황을 구현할 수 있어 자유도 높은 설계가 가능한 특징을 가지고 있다. 지중은 방대한 열용량( $C_s$ )을 지니고 있어 장기간 축적된 열에너지의 양에 따라 열교환 효율에 지대한 영향을 미친다. 따라서 정확한 성능 평가를 위해 10년 이상의 장기간 시뮬레이션이 필수적이다. 하지만 Zenget et al.[14]의 FLS 모델은 두 개의 적분항으로 이루어져 있어 비교적 계산 속도가 느리기 때문에 장기간 시뮬레이션에 많은 시간이 소요된다. 이를 개선하고자 Lamarche and Beauchamp[15]는 적분항의 수를 줄여 기존 FLS 모델 보다 빠른 계산 속도를 나타내는 FLS 모델을 제안하였다.

FLS 모델은, 라인 소스(Line source)로부터 특정 거리( $r$ )에 위치한 지점에서의 평균 온도 변화를 예측하는 것으로 열교환을 통해 변화하는 지중열교환기의 평균 벽면 온도 ( $T_b$ )를 계산하기 위해 사용된다. 이는, 식 (1)을 의미하며 단위 길이당 일정한 열류( $q$ ) 즉, 지중열교환기가 감당하는 지중부하에 따른 지중열교환기의 평균 벽면 온도 ( $T_b$ )를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 FLS(q,t) = T_b - T_s &= \frac{q}{2\pi k_s} \left( \int_{\beta}^{\sqrt{\beta^2+1}} \frac{erfc(\gamma z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - D_A - \int_{\sqrt{\beta^2+1}}^{\sqrt{\beta^2+4}} \frac{erfc(\gamma z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - D_B \right) \\
 D_A &= \sqrt{\beta^2+1} erfc(\gamma\sqrt{\beta^2+1}) - \beta erfc(\gamma\beta) - \frac{e^{-\gamma^2(\beta^2+1)} - e^{-\gamma^2\beta^2}}{\gamma\sqrt{\pi}} \\
 D_B &= \sqrt{\beta^2+1} erfc(\gamma\sqrt{\beta^2+1}) - 0.5(\beta erfc(\gamma\beta) + \sqrt{\beta^2+4} erfc(\gamma\sqrt{\beta^2+4})) \\
 &\quad - \frac{e^{-\gamma^2(\beta^2+1)} - 0.5(e^{-\gamma^2\beta^2} + e^{-\gamma^2(\beta^2+4)})}{\gamma\sqrt{\pi}} \\
 a_s &= \frac{k_s}{C_s}, \beta = \frac{r_b}{H}, F_o = \frac{a_s t}{H^2}, \gamma = \frac{1}{2\sqrt{F_o}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

### 2.2 DST (Duct storage) 모델

Hellström[16]가 제안한 DST (Duct-storage) 모델은 지중 축열 해석 모델을 기반으로 구축된 수치 해석 모델이다. 이 모델은 뛰어난 계산 속도를 가지고 있으며, 동적 에너지 시뮬레이션 프로그램 TRNSYS의 Type 557 컴포넌트로 제공되기 때문에 장기간의 시뮬레이션을 필요로 하는 지열 히트펌프 설계에 있어 가장 널리 사용되는 모델 중 하나이다.

식 (2)는 DST 모델의 지열 저장 용량을 계산하는 식으로, 간단한 매개변수를 통해 계산이 가능하다. 여기서,  $N$ 은 지중열교환기 개수,  $B$ 는 지중열교환기간의 간격 그리고  $H$ 는 지중열교환기의 매설 깊이를 의미한다.

$$V_{DST} = \pi \times N \times H \times (0.525 \times B)^2 \tag{2}$$

DST 모델은 FLS 모델과는 달리 일정한 원통형(Cylindrical) 배열로 제한되어 있어 다양한 배열

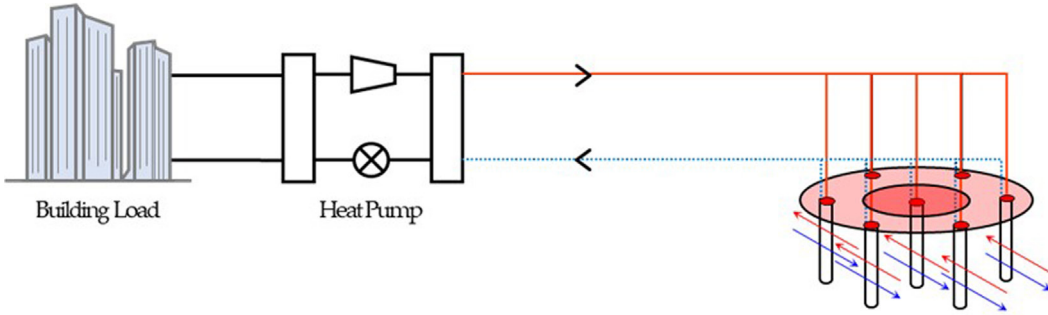


Fig. 1. Parallel operation of ground heat exchangers set for DST model.

설계가 불가능한 특징을 가지고 있다. 또한, Fig. 1과 같이 병렬운전 상황만 구현할 수 있기에 특정 지중열교환기를 그룹으로 연결하여 서로 다르게 운전하는 상황을 묘사할 수 없는 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 다양한 운전이 가능한 FLS 모델을 구현하여 모델의 적합성 판단 및 검증을 위해 DST 모델을 레퍼런스(Reference)모델로 활용하였다.

### 2.3 태양광열(Photovoltaic thermal, PVT) 모듈

태양광열(Photovoltaic thermal, PVT) 모듈은 태양광 패널과 태양열 집열기를 결합한 형태로서 태양복사 에너지를 받아 전력 생산 및 집열을 동시에 하는 시스템이다. 태양복사 에너지로 인한 태양광 패널의 온도 상승은 전력 생산 효율을 낮추고 시스템 성능 문제를 야기시킬 수 있으므로 적절한 냉각을 통한 안정적인 운전이 필요한 시스템이다. 본 연구에서는 TRNSYS Type 563 컴포넌트[17]로 제공되는 액체식 태양광열 모듈을 하이브리드 열원으로 활용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 아래의 식(3)은 태양광열 모듈에서 발생하는 집열량 즉, 태양광열 모듈의 부하를 나타내며 여기서,  $\dot{M}_{PVT}$ 은 태양광열 모듈을 순환하는 유체의 유량,  $C_{pvt}$ 는 순환 유체의 비열 그리고  $T_{PVT,in}$ 과  $T_{PVT,out}$ 는 냉각을 위해 태양광열 모듈 들어가고 나오는 유체의 온도를 의미한다.

$$Q_{PVT} = \dot{M}_{PVT} \times C_{pvt} \times (T_{PVT,out} - T_{PVT,in}) \quad (3)$$

## 3. 지중열교환기 모델링

### 3.1 지중열교환기 열저항

U자형태의 지열관과 그라우트(채움재)의 특성에 따라 지중열교환기 열저항은 식 (4)[18]로 나타낼 수 있다. 여기서  $R_p$ 는 파이프의 열저항을 의미하고  $R_g$ 는 그라우트의 열저항을 의미한다. 식 (5)의 지열관의 열저항에서  $k_p$ 는 지열관의 열전도율,  $h_i$ 는 지열관내 열전달 계수 그리고  $D_{p,i}$ 와  $D_{p,o}$ 는 각각 지열관의 내외부의 지름을 의미한다. 또한 식 (6)의 그라우트의 열저항에서  $k_g$ 는 그라우트의 열전도율을 의미하고  $S_b$ 는 지열관의 위치에 따라 결정되는 형상계수를 의미한다[19].

$$R_b = \frac{R_p}{2} + R_g \quad (4)$$

$$R_p = \frac{\ln(D_{p,0}/D_{p,i})}{2\pi k_p} + \frac{1}{\pi D_{p,i} h_i} \quad (5)$$

$$R_g = \frac{1}{S_b k_g} \left( S_b = \beta_0 \left( \frac{D_b}{D_{p,0}} \right)^{\beta_1} \right) \quad (6)$$

### 3.2 공간중첩(Spatial superposition)

지중부하의 크기가 큰 경우 단일 지중열교환기가 아닌 다수의 지중열교환기를 통해 부하를 감당해야 한다. 이때, 지중열교환기 간의 열간섭(Thermal interference) 현상이 일어나는데 앞선 식 (1)은 단일 지중열교환기에 대한 상황을 묘사하는 것으로 다수의 지중열교환기로 인한 열간섭 현상을 반영하기 위해선 공간중첩(Spatial superposition)을 적용해야 한다. 공간중첩은 아래의 식 (7)을 통해 나타낼 수 있으며 인접한 지중열교환기로 인해 열간섭을 받은  $i$ 번째 지중열교환기의 평균 벽면 온도( $T_b$ )를 도출할 수 있다[20]. 여기서,  $N$ 은 전체 지중열교환기 개수,  $r_{i,j}$ 는  $i$ 번째 지중열교환기와  $j$ 번째 지중열교환기의 간격을 의미한다.

$$T_i - T_s = T_i(r_b, t) - T_s + \sum_{j=1, i \neq j}^N (T_j(r_{i-j}) - T_s) \quad (7)$$

### 3.3 시간중첩(Temporal Superposition)

FLS (Finite line source) 모델 식 (1)은 매시간 일정한 지중 부하 상황만을 다룰 수 있어 다양한 지중부하 상황에 대한 계산이 불가하다. 하지만, 부하는 매시간 지속적으로 변화하므로 이러한 다양한 부하를 FLS 모델에 적용하기 위해선 별도의 방안이 필요하다. 따라서, 시간중첩(Temporal superposition)을 적용하여 매시간별 다양한 부하 상황 즉, 다중 부하 상황(Multiple load)에 대한 계산을 진행하였다. 시간중첩은 아래의 식 (8)[21]을 의미하며  $n$ 시점에서의 지중열교환기 평균 벽면 온도를 구하기 위해서  $i$ 번째 시점과  $i-1$ 번째 시점의 지중열교환기 단위 길이 당 열류( $q$ )의 차이( $q_i - q_{i-1}$ )를  $n$ 시점과  $i$ 번째 시점의 시간 간격만큼 식 (1)에 적용하여 계산한다.

$$T_b - T_s = \sum_{i=1}^n FLS(q_i - q_{i-1}, t_n - t_{i-1}) \quad (8)$$

### 3.4 다중 부하 집계 알고리즘(Multiple load aggregation algorithm)

시간중첩을 통한 다중 부하 계산은 시뮬레이션 기간이 늘어남에 따라 계산량의 증가로 CPU Time이 현저히 느려지게 된다. 앞서 언급했듯이 지중의 열용량( $C_s$ )은 매우 크기 때문에 장기간의 시뮬레이션을 통한 지중에 축열 정도를 고려한 설계는 필수적이다. 따라서, 다중 부하 집계 알고리즘(Multiple load aggregation algorithm)을 적용하여 20년의 시뮬레이션을 진행하였다. FLS 모델에 적용한 Fossa and Paietta[22]의 MLAA17방식은 5가지의 집계 기간을 나타내며 집계 구간인 하루( $X_d$ ), 일주일( $X_w$ ), 한 달( $X_m$ ), 반기( $X_{sem}$ ) 그리고 연( $X_y$ )과 비집계( $X_h$ )기간으로 구성되어 있다. 집계 구간 별 시간 길이는 Table

**Table 1.** Time length of MLAA17

	$X_y$	$X_{sem}$	$X_m$	$X_w$	$X_d$	$X_h$
Time length (hr)	-	2880	360	168	48	12

1로 나타냈고 시뮬레이션 기간이 설정된 시간 길이에 도달 시 단일 평균화하여 지속적으로 늘어가는 계산 부하를 줄일 수 있었다.

## 4. 시뮬레이션 방법 및 조건

### 4.1 FLS 모델 검증 방안

본 시뮬레이션은 구현한 FLS (Finite line source) 모델의 정합성 판단 및 검증을 위한 것으로, 지중열교환기에 일정한 온도 및 유량의 유체를 순환시켰을 때 토출되는 유량의 온도( $T_{f,out}$ )를 레퍼런스 모델인 DST 모델의 결과와 비교하는 것을 목표로 하였다. 하지만, FLS 모델은 단위 길이 당 열류( $q$ )를 주었을 때 지중열교환기 평균 벽면 온도( $T_b$ )를 도출하므로 토출되는 유량의 온도( $T_{f,out}$ )를 계산하기 위해선 별도의 방안이 필요하다.

**Table 2.** Simulation parameters for FLS model validation and group/individual operation

Material	Parameter	Value
Borehole	Radius, m	0.05
	Distance, m	4.806
	Depth, m	100
	Resistance, m°C/W	0.1885
	Number of boreholes	7
U-tube	Inner radius, m	0.013
	Outer radius, m	0.016
	Model coefficients	17.4427
	Model coefficients	-0.6052
Ground	Thermal conductivity, W/m°C	2
	Thermal diffusivity, m <sup>2</sup> /day	0.08
	Thermal heat capacity, kJ/m <sup>3</sup> °C	2160.5
Grout	Undisturbed temperature, °C	10
	Volumetric heat capacity, kJ/kg°C	2160.5
	Thermal conductivity, W/m°C	2
Fluid	Density, kg/m <sup>3</sup>	1022
	Specific heat capacity, J/kg°C	3960
	Specific heat capacity for PVT, J/kg°C	4190
	Mass flow rate per borehole, kg/s	0.2
	Mass flow rate per PVT module, kg/s	0.05
	Film coefficient inside the tube, W/m <sup>2</sup> °C	857
PVT	Number of PVT	22
	Collector length, m	2.037
	Collector width, m	1.077
	Absorber plate thickness, m	0.0003
	Thermal conductivity of the absorber, W/m°C	204



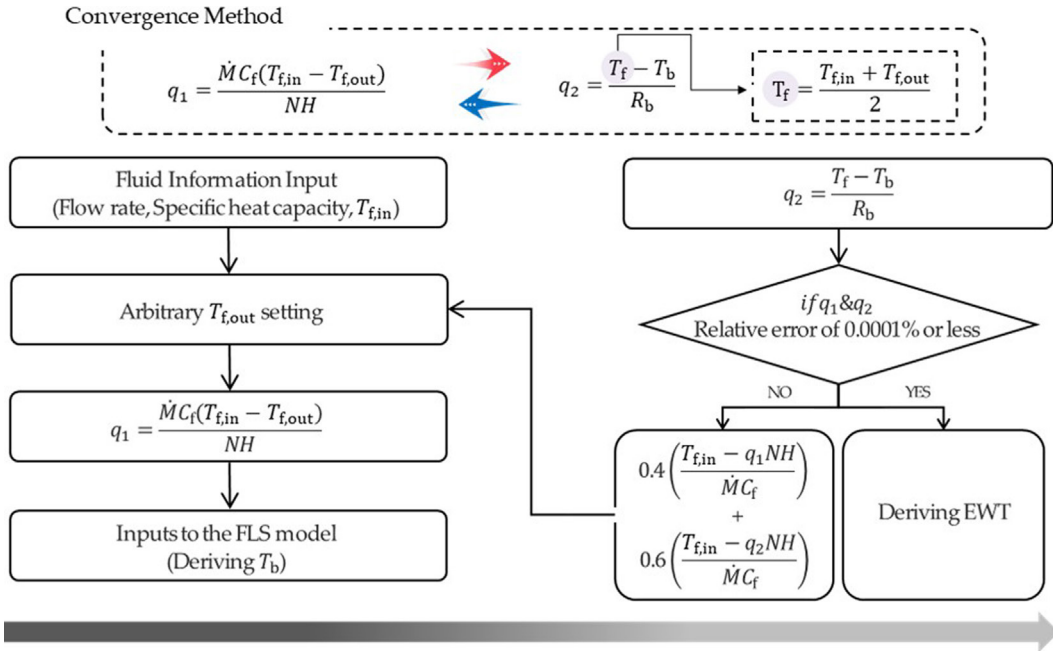


Fig. 2. Simulation algorithm for FLS model validation.

Fig. 2는 식 (1)와 식 (2)을 통해 계산되는 단위 길이 당 열류( $q$ )의 값이 설정한 상대오차 범위 내에 수렴하도록  $T_{f,out}$ 을 계산하여 값을 도출하는 과정을 나타낸다. 시뮬레이션은 매트랩(Matlab) 환경으로 구축한 FLS 모델을 활용하여 Table 2에 나타난 바와 같이 7개의 DST 배열(원통형 배열)을 구현하였고 지중열교환기별 0.2 kg/s의 유량으로 40°C온도의 유체를 넣어 20년의 시뮬레이션을 진행하였다.

$$q = \frac{\dot{M}C_f(T_{f,in} - T_{f,out})}{NH} \tag{9}$$

$$qR_b = T_f - T_b \tag{10}$$

#### 4.2 급탕 및 태양광열 모듈 그룹/개별 운전 방안

검증을 완료한 FLS(Finite line source) 모델을 활용하여 급탕 부하에 대한 지중열교환기 성능 평가를 진행하였다. 평가는 두 가지 경우로 나누어 진행하였다. 첫 번째는 지중열교환기만을 사용했을 경우와 두 번째는 가운데 지중열교환기로 태양광열 모듈에서 승온된 유체를 통해 지중 축열을 진행하고 나머지 지중열교환기로 급탕 부하를 감당하는 경우 즉, 하이브리드 보어필드의 그룹/개별 운전 상황을 의미한다(Fig. 3 참조). 하이브리드 보어필드는 태양광열 모듈을 활용한 축열과 급탕 부하를 동시에 처리함으로써 지중에 열이 투입 및 추출이 일어나 지중에 상반되는 열적 영향을 미치게 된다. 결국, 시간이 지남에 따라 열간섭이 발생하고 점차적으로 지중온도( $T_g$ )가 회복되며 불균형이 완화될 것으로 판단하였다. 시뮬레이션을 위해 급탕 및 태양광열 모듈 부하 계산이 사전에 필요하여 ISO 18523-1[23]를 참고하여 시간별 급탕 부하를 산정하였고, TRNSYS를 Type 563을 활용하여 시간별 태양광열 모듈 부하 계산을 진행하였다.

본 시뮬레이션의 목적은 급탕 부하에 따른 지중열교환기 성능 평가를 하는 것이며, 열교환을 마치고



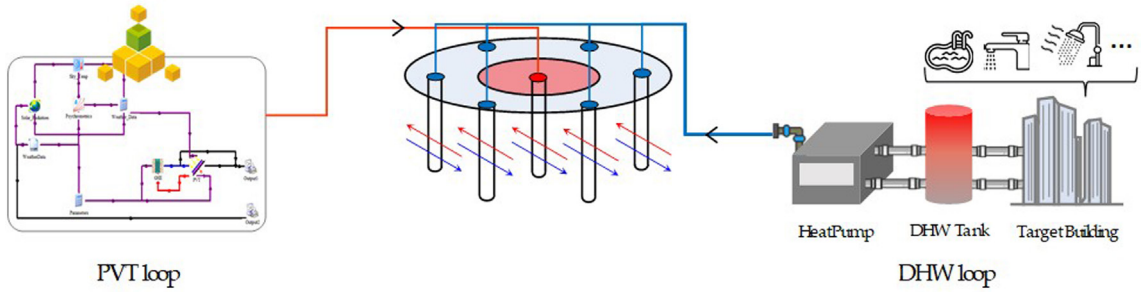


Fig. 3. Schematic of DHW & PVT group/individual operation.

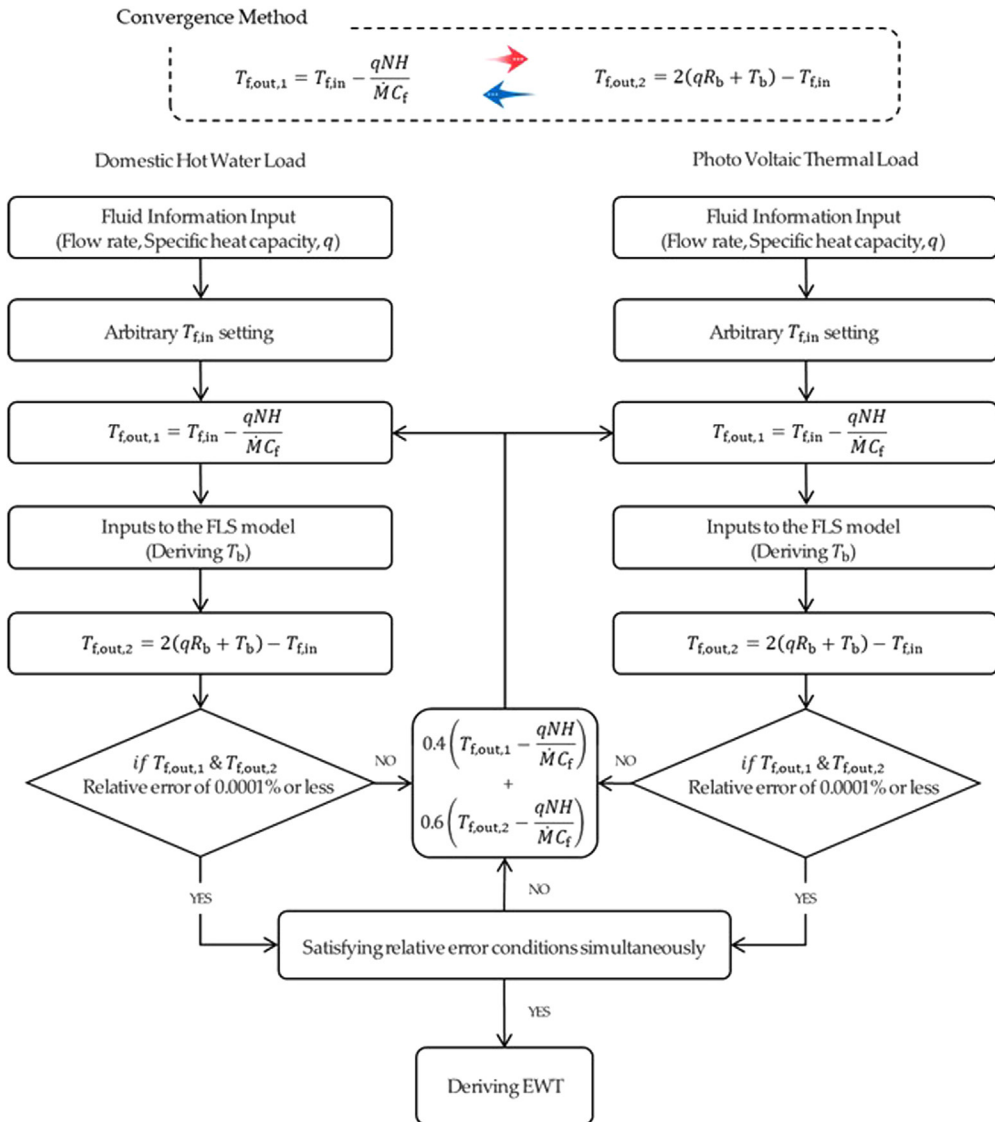


Fig. 4. Simulation algorithm for DHW & PVT group/individual operation.

토출되는 유체의 온도( $T_{f,out}$ )가 전 사용기간 동안  $5^{\circ}\text{C}$  이상이 되는 것을 기준으로 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 4은 시뮬레이션 계산 과정을 나타내며, 위의 FLS 검증에 활용한 계산 과정과 유사하다. 다른 점은 본 시뮬레이션은 사전에 예측된 부하에 따른 토출되는 유체의 온도를 도출하는 것으로 예측된 부하 즉, 단위길이 당 열류( $q$ )에 따른  $T_{f,out}$ 가 설정한 수렴조건 내에 도달 시 값을 도출하였고  $T_{f,in}$ 은 식(11)에 의해 계산된다. 또한, 가운데 지중열교환기와 바깥의 지중열교환기는 서로 다른 조건으로 운전되기 때문에, 두 그룹(가운데 및 바깥의 지중열교환기)의  $T_{f,out}$ 값이 동시에 수렴 조건에 도달했을 때 최종 값을 도출하였다. Table 2는 시뮬레이션 조건을 의미하며 이를 활용하여 20년의 시뮬레이션을 진행하였다.

$$T_{f,in} = T_{f,out} + \frac{NHq}{MC_f} \quad (11)$$

## 5. 시뮬레이션 결과

### 5.1 FLS 모델 검증 결과

본 시뮬레이션은 구현한 FLS 모델의 적합성 판단 및 검증을 위해 TRNSYS (Type 557)의 DST 모델을 활용하여 동일 조건 상황에서 도출되는 결과 즉, 지중열교환기를 순환하며 열교환을 마친 유체의 온도( $T_{f,out}$ )를 비교하였다. 두 모델의 최대 오차 및 절대 평균 오차(Mean Absolute Error, MAE)는 각각 약  $0.44^{\circ}\text{C}$ , 약  $0.15^{\circ}\text{C}$ 를 나타냈고 산점도는 Fig. 5와 같이 거의 유사한 분포를 가지고 있음을 확인하였다. 수치상 약간의 오차가 있었지만 이는, 모델링 방법 자체가 다른 두 모델의 계산 과정에서의 발생한 오차이며, 무의미할 정도로 작은 오차를 보였기 때문에 FLS 모델 구축 과정에서의 오류는 없는 것으로 판단하였다.

### 5.2 급탕 및 태양광열 모듈 그룹/개별 운전 결과

본 시뮬레이션은 급탕 부하를 감당하는 상황에서 열교환을 마친 유체의 온도( $T_{f,out}$ )를 도출하는 것을 목적으로, 지중열교환기만 사용했을 경우와 태양광열 모듈을 결합한 그룹/개별 운전했을 경우를 비교·분석하였다. 이때, 시뮬레이션 조건은 열교환을 마친 유체의 온도( $T_{f,out}$ )가 기준 온도  $5^{\circ}\text{C}$  이상을 만족하도록 설정하였다. 지중열교환기만으로 급탕 부하를 감당할 시 총 14개의 지중열교환기가 필요하였고, Table 3에 나타난 바와 같이 최저  $T_{f,out}$ 은  $5.25^{\circ}\text{C}$ , 평균  $T_{f,out}$ 은  $6.67^{\circ}\text{C}$ 를 나타냈다. 태양광열 모듈을 결합한

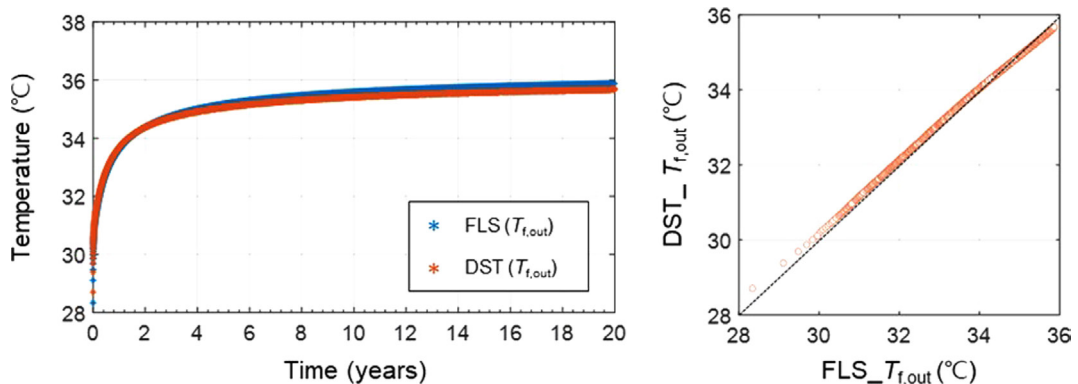


Fig. 5. Simulation comparative results between the proposed FLS model and DST model.

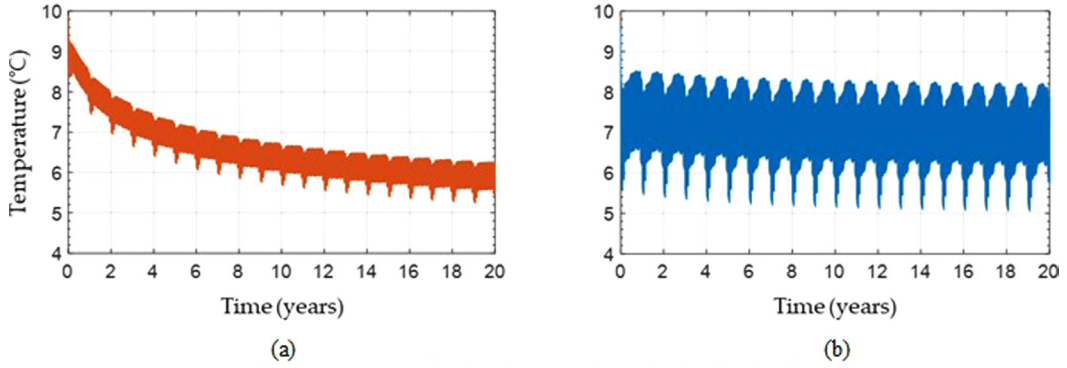


Fig. 6. Simulation results of the fluid temperature to HPs: (a) GSHP, (b) HYGSH.

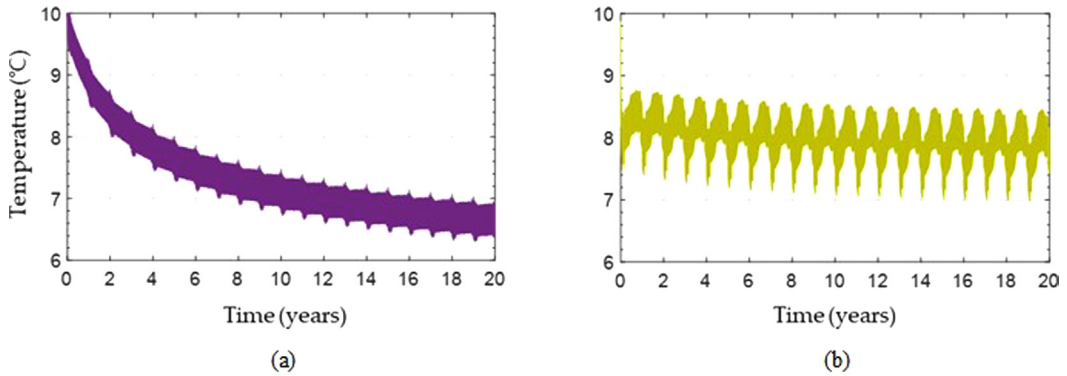


Fig. 7. Simulation results of the ground temperature: (a) GSHP, (b) HYGSH.

그룹/개별 운전 시 총 7개의 지중열교환기가 필요하였고, 최저  $T_{f,out}$ 는 5.04°C, 평균  $T_{f,out}$ 는 7.37°C를 나타냈으며 약 0.7°C 더 높은 온도를 보임을 확인하였다. Fig. 6(a)를 통해 알 수 있듯이 열교환을 마친 유체의 온도( $T_{f,out}$ )는 지중열교환기만 사용했을 경우 지속적으로 낮아지는 경향을 보였다. 반면에 Fig. 6(b)의 태양광열 모듈을 결합한 그룹/개별 운전인 경우에는  $T_{f,out}$ 가 소폭 낮아지는 경향성을 보였지만, 일정 수준의 온도를 유지하고 있음을 확인하였다. 이는 태양광열 모듈의 부하를 감당하는 가운데 지중열교환기로 인해 전도(열간섭 현상)되는 고온의 열이 급탕 부하를 감당하는 바깥 지중열교환기의 지중온도( $T_g$ )를 회복한 것으로 판단된다.

추가적으로 열교환을 마친 유체의 온도( $T_{f,out}$ )에 따른 지중온도( $T_g$ ) 변화를 분석하였다. Fig. 7(a)의 지중열교환기만을 사용했을 경우 최저 지중온도( $T_g$ )는 6.3°C, 평균 지중온도( $T_g$ )는 7.26°C가 나타났고

Table 3. Simulation results of fluid temperature after the ground heat and average ground temperature

	Number of GHE	Min. fluid temperature, $T_{f,out}$ , °C	Ave. fluid temperature, $T_{f,out}$ , °C	Min. ground temperature, $T_g$ , °C	Ave. ground temperature, $T_g$ , °C
GSHP	14	5.25	6.67	6.3	7.26
HYGSH	7	5.04	7.37	6.98	8.07

Fig. 7(b)의 태양광열 모듈을 결합한 그룹/개별 운전인 경우 최저 지중온도( $T_g$ )는 6.98°C, 평균 지중온도( $T_g$ )는 8.07°C를 나타냈다. 제안하는 그룹/개별 운전인 경우 평균 약 0.8°C 더 높은 온도를 나타냈으며, 이는 앞선 결과와 마찬가지로 하이브리드 열원인 태양광열 모듈의 영향으로 인해 일정부분 지중온도( $T_g$ )를 회복하여 나타난 결과인 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

지열 히트펌프로 급탕 부하를 감당할 때 지중열교환기만 사용했을 경우와 하이브리드 열원을 활용하여 그룹/개별 운전을 했을 경우 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 지중열교환기만 사용했을 경우 지중의 열 추출로 인해 지중온도( $T_g$ )가 지속적으로 낮아지는 경향을 보였다. 반면에, 하이브리드 열원인 태양광열 모듈을 결합한 그룹/운전의 경우 태양광열 모듈의 부하를 감당하는 가운데 지중열교환기로 인해 급탕 부하를 감당하는 지중열교환기의 지중에 고온의 열이 전도(열간섭 현상)되어 지중온도( $T_g$ )를 회복할 수 있었다. 지중열교환기만 사용했을 경우 지중온도( $T_g$ )가 지속적으로 낮아지는 경향을 보였으나, 그룹/개별 운전인 경우 소폭 낮아지는 경향성은 보이지만, 일정 수준을 유지하고 있는 경향성을 보였다.

(2) 20년의 장기 운전에 대한  $T_{f,out}$ 의 평균 온도는 지중열교환기만 사용했을 경우 6.67°C를 나타냈지만 그룹/개별 운전인 경우 7.37°C를 나타냈다. 이는, 그룹/개별 운전으로 사용했을 시 평균 약 0.7°C 더 높은 온도의 유체를 히트펌프로 제공할 수 있음을 의미하며 지중열교환기만 사용했을 경우보다 더 높은 히트펌프 COP를 나타낼 수 있음을 예측할 수 있었다.

(3) 하이브리드 열원을 활용한 그룹/개별 운전으로 부하 불균형 상황에서 지중온도( $T_g$ ) 불균형 완화 및 지중온도( $T_g$ ) 회복이 가능함을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 또한, 지중열교환기만 사용했을 경우 총 14개의 지중열교환기가 필요했으나, 본 시뮬레이션 조건에서는 총 7개의 지중열교환기로 충분함을 확인하였다. 따라서 초기 투자비용이 높은 지중열교환기의 설치 개수를 줄여 비용 절감의 가능성을 확인할 수 있었다.

## References

1. Nam, Y. J. and Chae, H. B., 2013, Prediction of the heat exchange rate for a horizontal ground heat pump system using a ground heat transfer simulation, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, No. 6, pp. 297-302.
2. Rybach, L. and Sanner, B., 2000, Ground source heat pump systems, The European Experience, Vol. 21, No. 1, pp. 16-26.
3. Pambou, C. H. K., Raymond, J., Miranda, M. M., and Giordano, N., 2022, Estimation of in situ heat capacity and thermal diffusivity from undisturbed ground temperature profile measured in ground heat exchangers, Geosciences, Vol. 12, No. 5, pp. 180.
4. Sohn, B. H. and Choi, J. M., 2012, Performance prediction of geothermal heat pump (GHP) system with energy piles using simulation approach, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24 No. 2, pp. 155-163.
5. Luo, J., Rohn, J., Bayer, M., Priess, A., Wilkmann, L., and Xiang, W., 2015, Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in southern germany, Geothermics, Vol. 53, pp. 57-66.
6. Yavuzturk, C. and Spitler, J. D., 2000, Comparative study of operating and control strategies for hybrid ground-source heat pump systems using a short time step simulation model, Ashrae Transactions, Vol. 106, pp. 192.
7. Xu, L., Pu, L., Zhang, S., and Li, Y., 2021, Hybrid ground source heat pump system for overcoming soil thermal imbalance: A review, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 44, pp. 101098.

8. Bae, S. M., 2022, Performance prediction method of integrated system using photovoltaic-thermal and ground source heat pump, Ph.D. Thesis, Pusan University.
9. Park, S. H., 2023, Design and operating strategy of a Novel hybrid ground source heat pump system, Ph.D. Thesis, Inha University.
10. Baek, S. H., Yeo, M. S., and Kim, K. W., 2017, Effects of the geothermal load on the ground temperature recovery in a ground heat exchanger, *Energy and buildings*, Vol. 136, pp. 63-72.
11. Bae, S. M. and Nam, Y. J., 2022, Economic and environmental analysis of ground source heat pump system according to operation methods, *Geothermics*, Vol. 101, pp. 102373.
12. Bayer, P., de Paly, M., and Beck, M., 2014, Strategic optimization of borehole heat exchanger field for seasonal geothermal heating and cooling, *Applied Energy*, Vol. 136, pp. 445-453.
13. Yu, M., Zhang, K., Cao, X., Hu, A., Cui, P., and Fang, Z., 2016, Zoning operation of multiple borehole ground heat exchangers to alleviate the ground thermal accumulation caused by unbalanced seasonal loads. *Energy and Buildings*, Vol. 110, pp. 345-352.
14. Zeng, H. Y., Diao, N. R., and Fang, Z. H., 2002, A finite line source model for boreholes in geothermal heat exchangers, *Heat Transfer—Asian Research: Co sponsored by the Society of Chemical Engineers of Japan and the Heat Transfer Division of ASME*, Vol. 31, No. 7, pp. 558-567.
15. Lamarche, L. and Beauchamp, B., 2007, A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. *Energy and Buildings*, Vol. 39, No. 2, pp. 188-198.
16. Hellström, G., 1989, Ground heat storage : thermal analyses of duct storage systems, Ph.D. Thesis, Lund University.
17. TRNSYS 17, TESSLibs 17 - Electrical Library Mathematical Reference, Vol. 03, pp. 38-41.
18. Bernier, M. A., 2001, Ground-coupled heat pump system simulation/Discussion, *ASHRAE transactions*, Vol. 107, pp. 605.
19. Remund, C. P., 1999, Borehole thermal resistance: laboratory and field studies, *ASHRAE transactions*, Vol. 105, pp. 439.
20. Kim, E. J., 2018, TRNSYS g-function generator using a simple boundary condition, *Energy and Buildings*, Vol. 172, pp. 192-200.
21. Yavuzturk, C. and Spitler, J. D., 1999, A short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers, *ASHRAE transactions*, Vol. 105, No. 2, pp. 475-485.
22. Fossa, M. and Paietta, E., 2013, Comparison of multiple load aggregation algorithms for annual hourly simulations of geothermal heat pumps, In *European Geothermal Congress*
23. ISO 18523-1:2016, Energy performance of buildings -- Schedule and condition of building, zone and space usage for energy calculation – Part 1: Non-residential buildings.