

건물의 냉난방 운전을 고려한 3차원 동적 지중 열교환기 열해석 모델

Three-dimensional Equivalent Transient Ground Heat Exchanger Thermal Analysis Model by Considering Heating and Cooling Operations in Buildings

백승효¹

Seung Hyo Baek¹

(Received November 1, 2018 / Revised November 14, 2018 / Accepted December 5, 2018)

ABSTRACT

Application of geothermal energy in buildings has been gaining popularity as it provides the benefits of both heating and cooling a building. Among the various types of geothermal energy systems, ground-coupled heat pump system is the most commonly applied one in South Korea. A ground heat exchanger plays an important role as a heat source in winter and a heat sink in summer. For the stable operation of a ground-coupled heat pump system, a ground heat exchanger should be sized so that it provides sufficient heating and cooling energy. Heating and cooling energies generated in ground heat exchangers mainly depend on the temperature difference between the heating medium in ground heat exchangers and the surrounding ground. In addition, the performance of ground heat exchangers influences the change in ground temperature. Therefore, it is necessary to consider this interrelation between the change in the ground temperature and the performance of ground heat exchanger for an accurate estimation of its performance. However, previous thermal analysis models for ground heat exchangers are not competent enough to allow a complete understanding of this interrelation. Therefore, this study proposes a three-dimensional equivalent, transient ground heat exchanger analysis model. First, a previous thermal analysis model for ground heat exchangers, including an analytical model, a g-function, and a numerical model are analyzed. Next, to overcome the limitations of the previous models, a three-dimensional equivalent, transient ground heat exchanger model is proposed. Finally, this study validated the proposed model with the measurement data of the thermal response test, sandbox test, and TRNSYS DST model. All validation results showed a good agreement. These findings helped us to investigate the thermal performance of ground heat exchangers more accurately than the analytical models, and faster than the numerical models. Furthermore, the proposed model contributes to the design of ground heat exchangers by considering the different operation conditions of buildings.

Key words : 지열 에너지(Geothermal Energy), 지중 열교환기(Ground Heat Exchangers), 열해석(Thermal Analysis), 냉난방 운전(Heating and Cooling Operations)

1. 서론

1.1. 연구배경과 목적

지열 에너지는 대표적인 신재생 에너지원으로 물, 지하수 및 지하의 열 등의 온도차를 활용하여 냉난방에 활용하는 기술로써, 국내에서는 지중 열교환기와 히트펌프가 결합된 지열 히트펌프 시스템이 일반적으로 건물 단위에서 적용되고 있다. 지중 열교환기는 열교환기 내부를 순환하는 열매체와 지중과의 열교환을 통해 냉난방에 필요한 에너지를 생산하는데, 냉방기에는 건물에서 발생하는 잉여의 열을 지중으로 버리고, 반대로 난방기에는 건물에서 필요로 하는 난방열을 지중에서 채열하여 건물로 공급한다. 이러한 지중 열교환기의 역할을 고려하여 볼 때 지열 히트펌프 시스템의 설계 및 성능 평가를 위해서는 지중 열교환기 단위에서의 성능 평가가 중요하다고 볼 수 있다.

지중, 그라우트 재료, 열매체의 열적 물성치, 지중 열교환기의 단면 구성 및 크기 등과 같은 설계 변수와 성능 영향인자들은 지중 열교환기 설치 이후에는 변하지 않는 상수로 볼 수 있지만, 지중 온도는 지중 열교환기에서의 에너지 생산에 따라 크게 변화하는 동적 변수로 볼 수 있다. 지중 온도는 지중 열교환기에서의 에너지 생산에도 큰 영향을 미치므로 에너지 생산과 지중 온도 변화간의 상호 열적 영향을 고려한 성능 평가가 필요하다. 또한, 지중 열교환기로 공급되는 열매체 온도와 유량은 히트 펌프 시스템의 운전에 따라서 달라지고, 이는 건물의 냉난방 운전에 의한 영향을 받게 되므로 건물의 냉난방 운전 조건 역시 열교환기의 열성능 해석에 있어

1) * Postdoctoral Fellow, Division of Building Science and Technology, City University of Hong Kong, 공학박사, (seunbaek@cityu.edu.hk)

반드시 고려해야 하는 인자이다.

이러한 지중 온도 해석의 중요성으로 인해 지중 열교환기를 건물 단위에서 적용하기 시작했던 시점부터 지중 온도 해석에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 초기에는 수식을 이용하여 직관적으로 지중 온도를 계산할 수 있는 해석적 모델 (Analytical model)이 주로 이용되었고, 컴퓨터를 이용한 수치 해석이 가능해지면서 수치해석 모델(Numerical model) 또한 이용되고 있다. 하지만 해석적 모델의 경우 경계 조건을 가정함으로 인해 변화하는 열매체 온도와 유량 조건을 해석에 반영하기 어렵고, 수치해석 모델의 경우 해석에 오랜 시간이 소요되어 장기간의 지중 온도 해석이 사실상 불가능하다는 문제점이 존재한다. 이에 본 연구에서는 해석적 모델과 수치해석 모델의 한계를 극복하기 위한 목적으로 등가 모델에 기반한 3차원 동적 지중 열교환기 열해석 모델을 제안하고자 한다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

다양한 지중 열교환기 유형 중에서 수직 밀폐형 단일 유류브 지중 열교환기를 대상으로 연구를 수행하며, 이를 위해 우선적으로 기존의 대표적인 지중 열교환기 열해석 모델에 대한 분석을 수행하였다. 다음으로 지중 열교환기 열해석 알고리즘을 개발한 뒤 이를 바탕으로 3차원 동적 지중 열교환기 열해석 프로그램을 개발하였다. 단기간의 연속 운전 조건에서의 프로그램 해석 정확도를 검증하기 위해 현장 열영답 시험 데이터를 이용하였고, 단기간의 비연속 운전 조건에서의 프로그램 해석 정확도를 검증하기 위해 샌드박스 테스트 데이터를 이용하였다. 또한 장기간 운전에 따른 성능 해석을 검증하기 위한 목적으로 TRNSYS의 DST 모듈을 이용하여 동일한 조건에서 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

2. 기존 지중 열교환기 열해석 모델 분석

2.1. 해석적 모델

해석적 모델은 지중 열교환기를 선형 또는 원통형으로 가정하고 지중 열교환기에서 일정한 열류가 지중으로 전달될 때, 시간과 지중 열교환기 중심에서 떨어진 거리에 따른 온도 함수로 표현되는 모델이다. 최초의 해석적 모델은 무한 선형 열원 모델(Infinite Line Source Model)로, 1940년대 Ingersoll(1948)⁴⁾에 의해서 정립된 해석 모델이다. 상세한 해석식은 다음 식 1과 같다.

지중 열교환기를 무한한 선형 열원으로 가정했다는 점에서 지중 열교환기를 기준으로 위, 아래 방향으로의 열전달의 해석이 어렵다는 단점이 존재한다. 지표면에서 일사열의 획득

특, 대기와의 열전달이 발생하기 때문에 이러한 열전달 현상이 지중 온도와 지중 열교환기에서의 냉난방 에너지 생산에 영향을 미칠 수 있다. 특히, 장기간 운영에 대한 해석 시 지표면 열전달을 무시하는 경우 지중 열교환기 성능의 과대 또는 과소 평가가 이루어질 수 있다.

$$T(r,t) - T_{t0} = \frac{q}{4\pi k} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \tag{식 1}$$

여기서,

- $T(r,t)$: 보어홀에서 r 만큼 떨어진 지점의 t 초 뒤의 온도, $^{\circ}\text{C}$
- r : 보어홀에서 떨어진 거리, m
- t : 시간, s
- T_{t0} : 지중 초기온도, $^{\circ}\text{C}$
- q : 보어홀에서 지중으로 전달되는 열유량, W
- k : 지중 열전도율, W/mK
- α : 지중 열확산율, m^2/s

지중 열교환기를 선형이 아닌 원통형의 형태로 가정하여 지중 온도를 해석하는 원통형 열원 모델(Cylindrical Heat Source Model)은 Carslaw와 Jaeger⁵⁾에 의해서 제안되었다. 원통형 열원 모델 역시 무한 선형 열원 모델과 유사하게 원통 표면에서 일정한 열류가 지중으로 전달되는 조건을 가정하여 지중온도를 해석한다. 원통형 열원 모델 역시 지중 열교환기 위, 아래 방향으로의 열전달 해석이 어려워 무한 선형 열원 모델과 동일한 문제점을 가지고 있다.

무한 선형 열원 모델과 원통형 열원 모델 모두 지중 열교환기를 무한한 길이의 열원으로 가정하고 이로 인해 지표면에서의 열손실을 반영하기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Zeng 등(2002)⁶⁾은 지중 열교환기를 유한한 길이의 열원으로 가정하여 지중 열교환기 위, 아래 방향으로의 열전달 까지 모두 고려할 수 있는 유한 선형 열원 모델(Finite Line Source Model)을 제안하였다. 유한 선형 열원 모델은 지중 열교환기에서 일정한 열류가 지중으로 전달될 때 시간과 지중 열교환기 중심에서 떨어진 거리, 지표면에서의 깊이에 대한 계산식으로 제안되고 있다.

2.2. 응답 함수 모델

스웨덴의 룬드 대학교의 Eskilson(1987)은 복수의 보어홀

4) Ingersoll, L. R., & Plass, H. J. (1948). Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. ASHVE transactions, 47(7), 339-348.

5) Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1986). Conduction of Heat in Solids (Second). Oxford University Press.

6) Zeng, H. Y., Diao, N. R., & Fang, Z. H. (2002). A finite Line-Source Model for Boreholes in Geothermal Heat Exchangers. Heat Transfer - Asian Research, 31(7), 558-567.

이 설치된 지중 열교환기를 대상으로 장기간에 따른 지중 온도 분포를 해석하기 위한 목적으로 응답 함수 형태를 가지는 g-function⁷⁾을 제안하였다. Eskilson은 유한 차분법을 이용하여 동적 시뮬레이션 프로그램을 개발하고, 개발한 프로그램을 이용하여 지중 열교환기의 다양한 배치에 따른 성능 데이터를 생성하였다. 생성된 데이터를 이용하여 g-function을 제안하였고 지중 열교환기의 다양한 배치에 대해서도 장기간의 지중 온도 해석이 가능하도록 하였다. g-function을 이용한 지중 온도 계산식은 다음 식 2와 같고, 데이터 세트의 예시는 다음 Fig. 1과 같다.

$$T = T_g - \frac{q}{2\pi k} g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}, \frac{B}{H}\right) \quad \text{식 2}$$

여기서,

- T : 보어홀 영역의 평균 온도, °C
- T_g : 지중의 온도, °C
- q : 보어홀에서 지중으로의 열유속, W/m
- k : 지중 열전도율, W/mK
- t : 시간, s
- t_s : time-scale factor, s
- r_b : 보어홀 반지름, m
- B : 보어홀 간 간격, m
- H : 보어홀 깊이, m⁸⁾

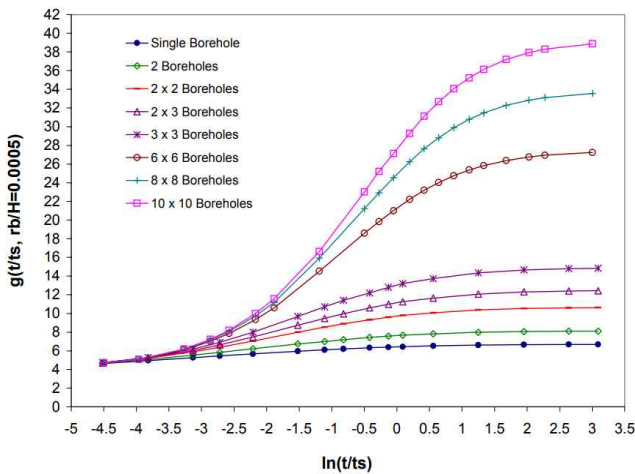


Fig. 1. g-function for various multiple borehole configuration compared to the temperature response curve for a single borehole

7) Eskilson, P. (1987). Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. University of Lund.
 8) Xu, X., & Spitler, J. D. (2006). Modeling of vertical ground loop heat exchangers with variable convective resistance and thermal mass of the fluid. In Proceedings of the 10th International Conference on Thermal Energy Storage. Ecstock.

2.3. 수치해석 모델

해석적 모델과 응답 함수 모델의 경우 계산식 또는 데이터 세트를 이용하여 간단하게 지중 온도를 계산할 수 있다는 큰 이점이 존재한다. 하지만 지중 열교환기 외부의 지중에 대한 온도 해석만 하기 때문에, 지중 열교환기 내부에서의 열적 거동에 대한 평가가 어렵다. 또한 시간에 따른 일정한 열류가 지중으로 전달된다는 가정에서 해석을 수행한다는 한계 또한 존재한다.

Shirazi와 Bernier⁹⁾의 연구에 따르면, 지중 열교환기에서 연속적으로 에너지를 생산할 때는 지중 열교환기에서의 축열 효과의 반영 여부가 성능 해석에 큰 영향을 미치지 않지만, 간헐적으로 운전이 이루어지는 경우에는 축열 효과의 반영여부에 따라서 성능 해석 결과의 차이가 커진다는 결과가 발견되었다. 또한 지중 열교환기와 지중에 대해서 3차원 열전달 해석을 할 때 지중 열교환기에서의 수직, 수평 방향으로의 열전달, 지중 열교환기 내부에서의 배관 사이 열간섭에 의한 영향을 완전히 반영할 수 있다.

기존 연구에서 3차원 동적 열해석이 가능한 유한 요소법, 유한 체적법과 같은 정밀 수치해석 모델을 이용하여 지중 열교환기의 열해석을 수행하려는 시도가 진행되었다. 하지만 지중 열교환기 한 홀과 주변 지중을 모두 포함하여 해석할 경우 계산에 많은 시간이 소요되므로 현실적으로 성능 평가에 이용하기 어렵다. 정밀 수치해석 모델을 이용하되 메시의 크기를 조절하여 생성되는 노드의 개수를 줄여 해석 시간을 단축하는 시도도 이루어지고 있지만, 이 또한 장기간의 냉난방 운전전에 따른 지중 온도 해석에는 적합하지 않다고 볼 수 있다. 최근에는 이러한 정밀 수치해석 모델의 한계점을 보완하기 위해 간략화된 3차원 열전달 해석 모델이 제안되고 있다. 대표적인 해석 모델로 TRNSYS에 탑재된 Duct Storage Model (DST)¹⁰⁾과 thermal resistance (RC) model¹¹⁾을 들 수 있다. 지중 열교환기 형상을 그대로 두고 메시를 부채꼴 형태로 하는 pie-sector model¹²⁾ 또한 제안되었다.

9) Shirazi, A. S., & Bernier, M. (2013). Thermal capacity effects in borehole ground heat exchangers. Energy and Buildings, 67, 352-364.
 10) Chapuis, S., & Bernier, M. (2009). Seasonal storage of solar energy in borehole heat exchangers. In Eleventh International IBPSA Conference (pp. 599-606).
 11) Zarrella, A., Scarpa, M., & De Carli, M. (2011). Short time step analysis of vertical ground-coupled heat exchangers: The approach of CaRM. Renewable Energy, 36(9), 2357-2367.
 12) Yavuzturk, C. (1999). A Transient Two-Dimensional Finite Volume Model for the Simulation of Vertical U- Tube Ground Heat Exchangers. ASHRAE Transactions, 105(2), 465-474.

3. 3차원 동적 지중 열교환기 열해석 모델

3.1 3차원 동적 지중 열교환기 열해석 알고리즘 제안

정밀 수치해석 모델의 한계를 극복하고 지중 열교환기와 주변 지중에서 발생하는 열전달 현상을 완전히 반영할 수 있는 등가 모델에 기반한 3차원 동적 지중 열교환기 열해석 알고리즘을 제안하였다. 다음 Fig. 2와 같이 배관과 지중 열교환기 모두 원형의 단면 형상을 가지므로, 지중 열교환기 내부에서의 열해석을 위해 원통형 좌표계를 적용하는 것이 가능하다. 하지만 co-axial 유형을 제외한 다른 유형의 지중 열교환기에서는 두 개 이상의 배관이 지중 열교환기 내에 위치하여 각 배관의 중심을 기준으로 좌표를 설정하게 된다면 중첩되는 부분이 존재하게 된다. 이는 수치해석 시 검사 체적 (control volume)을 정의하기 어렵게 만드는 요인이다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 원형의 지중 열교환기 단면 형상을 정사각형 단면 형상으로 치환하는 등가 모델을 제안하였다. 등가 모델에서는 다음 Fig. 2와 같이 원통형 좌표계가 아닌 직교형 좌표계가 적용된다. 등가 모델로 변환한다고 하더라도 열매체, 배관, 그라우트 재료의 총 체적, 재료간 접촉 면적은 동일하게 설정하였다.

열매체에 대해서는 단면상에서 하나의 노드가 온도를 대표한다고 가정하였고, 그라우트 재료에 대해서는 직사각형 형태로 검사 체적을 생성하고 검사 체적의 크기와 개수는 사용자가 원하는 해석 정밀도에 따라서 직접 설정할 수 있도록 구성하였다. 지중 열교환기 외부 영역에 대해서도 역시 직사각형 형태의 단면을 가지는 검사 체적으로 정의하여 지중 영역을 분할하였고, 각 체적의 크기는 지중 열교환기의 지름을 기준으로 정의하였다. 지중 영역에서의 메시 생성과 관련하여서는, 지중 열교환기 인접 지중 영역에 대해서는 세밀하게 영역을 분할하고, 지중 열교환기에서 멀어질수록 성글게 영역을 분할하였다.

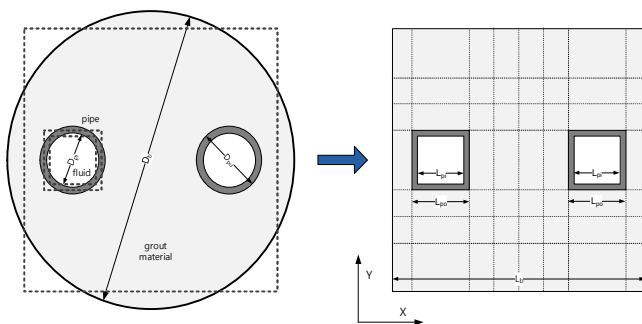


Fig. 2. Approximation of ground heat exchanger section

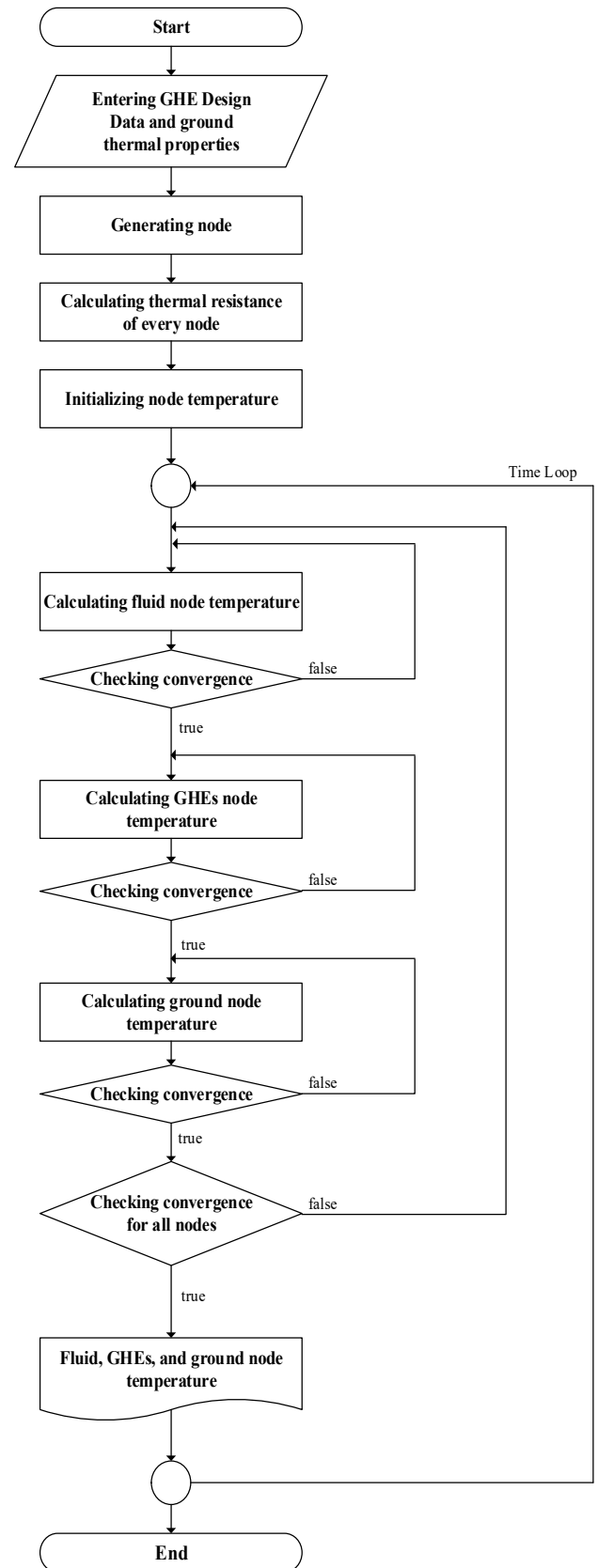


Fig. 3. Flow chart of the three-dimensional equivalent transient GHEs analysis program

3.2 3차원 동적 지중 열교환기 열해석 프로그램 개발

3차원 동적 지중 열교환기 열해석 프로그램은 Microsoft의 .net framework 4 Visual Basic을 이용하여 개발하였다. 해석 프로그램은 크게 입력 변수 처리 부분, 전처리 부분, 계산 부분, 후처리 부분의 4가지 요소로 구성된다. 입력 변수 처리 부분에서는 계산 조건의 입력과 지중 열교환기의 모델링에 대한 부분이 구현이 되어있으며, 전처리 부분에서는 동적 계산에 앞서 입력 받은 데이터를 바탕으로 계산에 필요한 메시의 생성, 각 제어 체적의 체적, 질량, 표면적과 같은 주요 데이터 계산과 노드와 노드 사이의 열저항 계산이 주로 수행된다. 계산 부분에서는 열매체, 그라우트 재료, 지중을 구성하는 모든 노드의 온도 계산을 수행하며, 후처리 부분에서는 계산된 데이터를 텍스트 파일의 형태로 출력하는 것으로 구성된다. 프로그램의 계산 흐름은 위 Fig. 3과 같다.

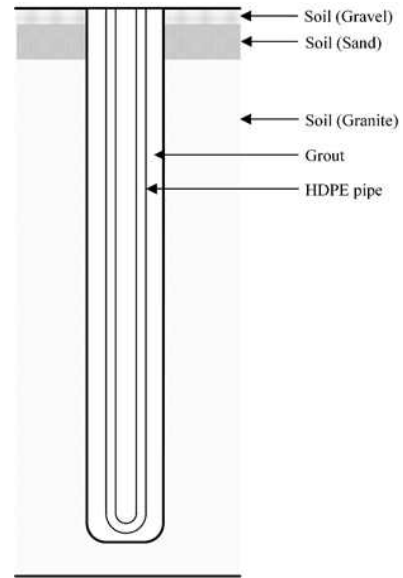


Fig. 4. Ground layers of the site

4. 실측 데이터를 이용한 3차원 동적 지중 열교환기 열해석 모델 검증

4.1 현장 열응답 시험 데이터를 이용한 검증

단기간의 연속 운전 조건에서 지중 열교환기의 온도 해석 정확도를 검증하기 위해 현장 열응답 시험 데이터를 이용하였다. 현장 열응답 시험은 지중 열교환기를 설치하기에 앞서 지반의 열전도 특성을 측정하는 시험이다. 현장 열응답 시험은 서울의 OO 대학교 건물에서 수행되었다.

지표면으로부터 1.5m 깊이까지는 자갈층, 4.5m 깊이까지는 모래층으로 구성되어 있으며, 4.5m 깊이 이상은 화강암으로 구성되어 있다. 대지의 지반 구성과 지중 열교환기 구성은 아래 Fig. 4와 같고 각 지반에 대한 열전도율, 밀도, 비열과 같은 열적 물성치 자료는 다음 Table 1에 수록되어 있다.

현장에서는 150m 길이의 지중 열교환기 한 홀이 천공되었고, 지중 열교환기의 지름은 0.15m이다. 열매체로는 물이 사용되었고, 48시간 동안 연속적으로 순환하면서 일정한 열을 지중으로 공급하였다. 측정 기간 중에 공급, 환수 온도를 측정하였으며, 측정된 환수 온도를 검증에 이용하였다. 지표면에서의 열손실 계산을 위해서 2010년 1월 5일에서 7일 사이의 기상청 측정 데이터를 활용하였다. 지표면 초기 온도 조건 입력을 위해 역시 기상청에서 제공하는 데이터를 참고하였으며, 지표면에서 15m 이상 깊은 영역의 초기 지중 온도는 서울의 연평균 외기온을 이용하였다. 검증을 위한 상세 입력 데이터는 Table 2에 수록되어 있다.

Table 1. Thermal properties of the ground

Parameters		Unit	Value
Gravel	Depth below the ground surface	m	1.5
	Thermal conductivity	W/mK	0.52
	Density	kg/m ³	2000
	Specific heat	J/kgK	1840
Sand	Depth below the ground surface	m	4.5
	Thermal conductivity	W/mK	1.28
	Density	kg/m ³	1460
	Specific heat	J/kgK	880
Granite	Depth below the ground surface	m	150
	Thermal conductivity	W/mK	3.8
	Density	kg/m ³	2600
	Specific heat	J/kgK	840

Table 2. Simulation input data for the verification

Parameters		Unit	Value
Site location		-	Seoul
Measurement period		-	Jan. 5 th -7 th , 2010
Borehole length		m	150
Borehole diameter		m	0.15
Pipe outside diameter		m	0.04
Pipe inside diameter		m	0.032
Pipe spacing		m	0.08
Fluid	Thermal conductivity	W/mK	0.6
	Density	kg/m ³	1000
	Specific heat	J/kgK	4179
Pipe	Thermal conductivity	W/mK	0.49
	Density	kg/m ³	550
	Specific heat	J/kgK	2250
Grout	Thermal conductivity	W/mK	0.75
	Density	kg/m ³	1600
	Specific heat	J/kgK	800
Design fluid flow rate		kg/s	0.61
Initial ground surface temperature		°C	0
Initial ground temperature		°C	14.5

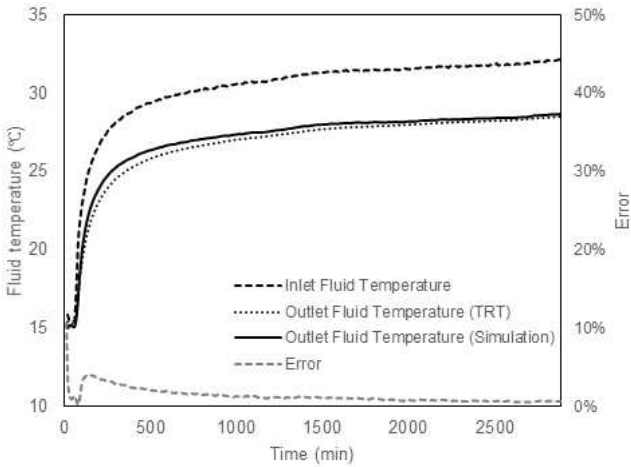


Fig. 5. Comparison between the simulation results and TRT results

검증을 위해 측정 데이터의 환수 온도와 시뮬레이션에 의해 계산된 환수 온도를 비교하였다. 그 결과는 Fig. 5와 같다. 전체적으로 두 데이터 간의 온도차는 존재하는데, 평균적으로 시뮬레이션에 의한 계산 결과가 측정 데이터에 비해 0.35°C 더 높다. 운전을 시작하고 나서 24시간 이후의 평균 온도차는 0.24°C로 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 두 데이터간의 오차 또한 비교하였는데, 운전 초기에는 약 5%의 오차가 발생하였지만, 그 차가 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 모델링에 필요한 입력 변수의 값들이 현장 열응답 시험에서는 충분하게 제공되지 않기 때문에 다소 오차가 발생하는 것으로 추정된다. 그럼에도 불구하고, 오차가 크지 않다고 볼 수 있으므로, 연속 운전조건에서의 성능 계산의 정확도가 검증되었다고 볼 수 있다.

4.2 샌드박스 테스트 데이터를 이용한 검증

현장 열응답 시험에서는 기상 조건, 지중 온도와 같은 지중 열교환기 주변 조건에 대한 실측하지 않는 경우가 대부분이다. 이러한 이유로 제안하는 모델의 검증 시 주변 조건에 대한 정확한 조건을 모델링하기 어렵다. 또한 연속 운전조건에서의 검증만 수행할 수 있어, 이를 보완하기 위해 샌드박스 테스트 데이터를 이용하여 비연속 조건에서의 지중 온도 해석의 정확도 또한 검증하였다.

샌드박스 테스트는 현장이 아닌 실험실에서 지중 열교환기의 열성능을 측정하는 방법으로 Beier¹³⁾에 의해서 제안된 방법이다. 저자는 실험실에 길이 18m, 한 변의 길이가 1.8m 크기의 직육면체 샌드박스를 제작하고 샌드박스 내부에 지중 열교환기를 설치한 뒤 그 주변을 모래로 채워 실험실에서 지

중을 모사하였다. 지중 열교환기의 그라우트 재료와 샌드박스 내부를 채우는 모래의 열전도율을 측정하여 재료의 정확한 물성치를 확인할 수 있게 하였고, 샌드박스 내부에 온도 측정을 위한 센서를 다수 설치하여 샌드박스 내부의 각 지점에서의 온도 변화 또한 확인할 수 있게 하였다. 입력 조건은 다음 Table 3과 같다. 지중 열교환기에 공급되는 열매체에 열을 주입하기 위한 실험 장치는 아래 Fig. 6과 같이 구성된다. 실험은 총 50시간동안 수행되었다. 초기의 9시간동안에는 연속적으로 지중열을 추출하고, 2시간동안 운전을 중지한 뒤 다시 연속적으로 지중열을 추출하였다.

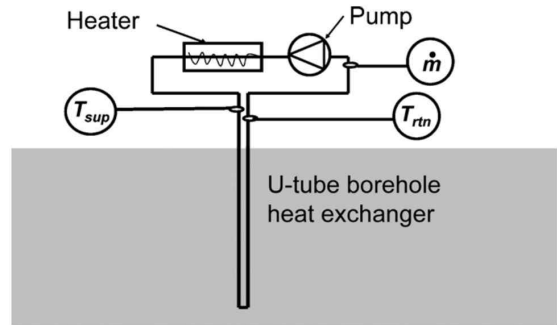


Fig. 6. In situ thermal response test setup

Table 3. Parameters for a sandbox test

Parameters		Unit	Value
Borehole diameter	Inner diameter of aluminum pipe	m	0.0126
Borehole pipe thickness	Wall thickness of aluminum pipe	m	0.0002
U-tube length	SDR 11 (1-in.)	m	18.3
U-tube pipe outer radius	SDR 11 (1-in.)	m	0.0334
U-tube pipe inner radius	SDR 11 (1-in.)	m	0.02733
Distance between centers of pipe	Centers of U-tube pipes	m	0.053
Pipe wall thermal conductivity	HDPE	W/mK	0.39
Soil thermal conductivity	Wet sand	W/mK	2.82
Grout thermal conductivity	Bentonite grout 20% solids	W/mK	0.73
Average fluid volumetric flow rate	Water	W/mK	0.197
Average heat input rate	Electric heater	W	1056

샌드박스 테스트의 측정 조건과 동일하게 프로그램에서 모델링한 뒤 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과를 샌드박스 테스트의 측정 결과와 비교하면 다음 Fig. 7과 같다. 위 Fig. 7에서 확인할 수 있듯이, 샌드박스 테스트에 의한 환수 온도와 시뮬레이션에 의해 계산된 환수 온도가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 다만, 운전이 중지되는 되는 시점에 두 데이터 간에 약 3%의 오차가 존재한다. 운전이 중지 되는 동안에 측열에 대한 영향을 반영하기 위해서는 각 재료의 열전도

13) Beier, R. A., Smith, M. D., & Spitler, J. D. (2011). Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models and thermal response test analysis. *Geothermics*, 40(1), 79-85.

을 뿐만 아니라 비열과 밀도 또한 제공되어야 한다. 하지만 샌드박스 테스트 데이터셋에서는 열전도율만 제공되어 시뮬레이션 시 나머지 인자의 값을 가정하였는데, 여기서 두 데이터 간의 오차가 발생하는 것으로 판단된다. 하지만 오차가 크지 않다고 볼 수 있으므로, 역시 비연속 운전 조건에서의 성능 계산의 정확도 또한 검증되었다고 판단된다.

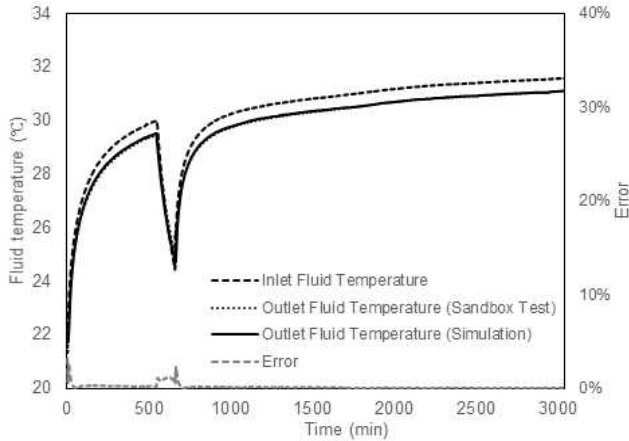


Fig. 7. Comparison between the simulation results and sandbox test results

4.3. 트랜시스 DST 모델을 이용한 검증

현장 열응답 시험과 샌드박스 테스트는 48시간 동안 지중 열을 추출하는 조건에 대한 측정 데이터로 장기간의 운전 조건에 대한 검증을 수행하기 어렵다. 본 연구에서는 TRNSYS 17에 탑재된 Duct Storage(DST) 모델을 이용하여 장기간의 지중열 추출량 계산 정밀도를 검증하였다.

TRNSYS 17의 type 557로 탑재된 DST 모델은 수직 밀폐형 지중 열교환기 타입을 해석하기 위해 개발된 3차원 동적 열해석 모델로 새롭게 개발되는 모델의 벤치마킹 용도로 널리 사용되고 있다. 지중 열교환기 내부의 열해석을 위해서 보어홀 열저항 모델이 적용되어 있고, 지중 열교환기 외부의 열해석을 위해서 유한 차분 기법에 의한 수치해석 모델이 적용되어 있다. 지중 열교환기 내부의 열용량을 무시하여 계산하기 때문에 지중열의 추출과 중단이 빈번하게 발생하는 조건에서는 다소 계산의 오차가 발생할 수 있지만 장기간의 연속 운전 조건에 대한 해석에 대해서는 계산 결과의 정확도가 높은 모델이다.

1년 동안 연속적으로 일정한 온도와 유량 조건의 열매체가 공급될 때 지중열 추출량 계산의 정확도를 검증하였고, DST 모듈에서 계산된 열매체 환수 온도와 시뮬레이션 프로그램에서 계산된 열매체 환수 온도를 비교하였다. 검증을 위한 시뮬레이션 입력 조건은 Table 4와 같다.

TNSYS 17의 DST 모듈에 의해 계산된 결과와 3차원 동적

시뮬레이션 프로그램에 의해 계산된 결과를 시간에 따라서 비교하면 다음 Fig. 8과 같다. 두 결과 모두 운전 초기에 급격하게 온도가 감소하고 시뮬레이션 전체 기간에 대해서 열매체 온도가 서서히 감소하는 양상이 나타난다. 전체 시뮬레이션 기간에 대해 두 결과간의 오차는 1% 내외로 발생하여 계산 결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 운전 시작 시점에 오차가 크게 나타나는데, 이는 DST 모듈에서 지중 열교환기 내부의 열용량을 고려하지 않음으로써 나타나는 오차라 판단할 수 있다.

Table 4. Simulation input data for the verification against TRNSYS DST

Parameters		Unit	Value
Borehole length		m	150
Borehole diameter		m	0.15
Pipe outside diameter		m	0.04
Pipe inside diameter		m	0.032
Pipe spacing		m	0.08
Ground	Thermal conductivity	W/mK	3.8
	Density	kg/m ³	2640
	Specific heat	J/kgK	880
Fluid	Thermal conductivity	W/mK	0.574
	Density	kg/m ³	1000
	Specific heat	J/kgK	4211
Pipe	Thermal conductivity	W/mK	0.45
	Density	kg/m ³	940
	Specific heat	J/kgK	2250
Grout	Thermal conductivity	W/mK	1.6
	Density	kg/m ³	1500
	Specific heat	J/kgK	960
Design fluid flow rate		kg/s	0.25
Initial ground surface temperature		°C	13
Initial ground temperature		°C	1

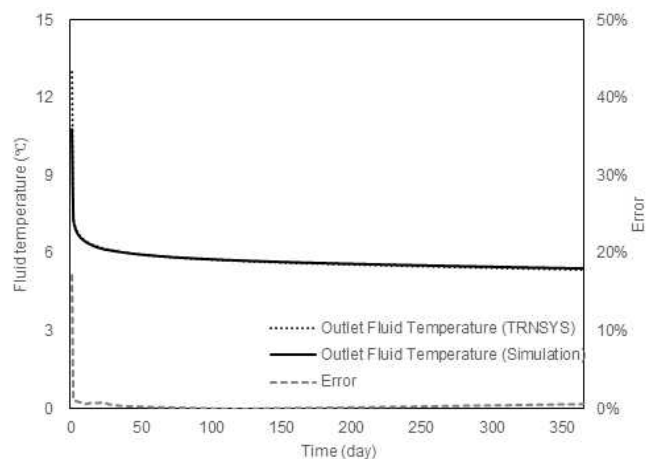


Fig. 8. Comparison between the results of propose model and TRNSYS DST

5. 결론

지열 히트펌프의 지중 열교환기 성능 해석과 지중 온도 해석을 위해 등가 모델에 기반한 3차원 동적 지중 열교환기 해석 모델에 제안하였다. 장기간의 운영에 따른 성능 변화 또한 평가하기 위해 등가 모델을 적용하였고, 실측 데이터 및 동적 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 제안한 모델을 검증하였다. 단기간 동안 지중 열교환기 내부와 인근 지중 영역에서의 열해석 정밀도를 검증하기 위해 현장 열응답 시험 데이터와 샌드박스 테스트 측정 데이터를 이용하였다. 연속적으로 지중열을 추출하는 현장 열응답 시험 데이터의 경우 기상 조건과 지중의 열적 특성이 정확히 모델링되지 않았지만, 시뮬레이션 결과와 측정 데이터간의 오차가 평균적으로 0.24°C 인 것을 확인할 수 있었다.

시험체 주변의 조건과 토양의 열적 물성치를 정확하게 모델링할 수 있으면서 비연속으로 지중열을 추출하는 샌드박스 테스트의 경우에는 운전 중지를 하는 기간 동안에 측정 데이터와 시뮬레이션 결과 간의 오차가 존재하였지만, 측정 기간 전반에 걸쳐서 결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

장기간 운전에서 지중 온도 변화와 지중열 추출량 변화 계산의 정밀도를 검증하기 위한 목적으로 트랜시스 17에 탑재된 Duct Storage (DST) 모델을 이용하였다. DST 모델이 본 연구에서 제안하는 모델에 비해서 간략화된 모델이긴 하지만 새롭게 개발되는 모델의 벤치마킹 용도로 활용되어 본 연구에서도 검증에 이용하였다. 운전 시작 후 몇 시간 동안에는 약 10% 정도의 오차가 존재하였지만, 그 이후 기간 동안에는 결과가 거의 일치하여 장기간에 대해서도 지중열 추출량 계산과 지중 포텐셜 에너지 계산이 타당한 것을 확인하였다.

제안된 3차원 동적 지중 열교환기 열성능 해석 모델이 연속 운전 조건 뿐만 아니라 비연속 운전 조건에서의 검증 또한 수행되었고, 1년동안의 운전에서 검증이 이루어져 실제 건물에서의 냉난방 운전을 반영한 해석이 가능할 것이라 판단된다. 성능 해석 뿐만 아니라 시뮬레이션 모델의 활용으로 실질적인 운전 조건을 반영한 지중 열교환기의 설계 또한 가능할 것이라 판단된다.

참고문헌

1. Ingersoll, L. R., & Plass, H. J. (1948). Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. *ASHVE transactions*, 47(7), 339-348.
2. Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1986). *Conduction of Heat in Solids (Second)*. Oxford University Press.
3. Zeng, H. Y., Diao, N. R., & Fang, Z. H. (2002). A finite Line-Source Model for Boreholes in Geothermal Heat

- Exchangers. *Heat Transfer - Asian Research*, 31(7), 558-567.
4. Eskilson, P. (1987). *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*. University of Lund.
5. Xu, X., & Spitler, J. D. (2006). Modeling of vertical ground loop heat exchangers with variable convective resistance and thermal mass of the fluid. In *Proceedings of the 10th International Conference on Thermal Energy Storage*. Ecstock.
6. Shirazi, A. S., & Bernier, M. (2013). Thermal capacity effects in borehole ground heat exchangers. *Energy and Buildings*, 67, 352-364.
7. Chapuis, S., & Bernier, M. (2009). Seasonal storage of solar energy in borehole heat exchangers. In *Eleventh International IBPSA Conference* (pp. 599-606).
8. Zarrella, A., Scarpa, M., & De Carli, M. (2011). Short time step analysis of vertical ground-coupled heat exchangers: The approach of CaRM. *Renewable Energy*, 36(9), 2357-2367.
9. Yavuzturk, C. (1999). A Transient Two-Dimensional Finite Volume Model for the Simulation of Vertical U- Tube Ground Heat Exchangers. *ASHRAE Transactions*, 105(2), 465-474.
10. Beier, R. A., Smith, M. D., & Spitler, J. D. (2011). Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models and thermal response test analysis. *Geothermics*, 40(1), 79-85.