

CFD 해석을 이용한 현장 열응답 시험의 출구온도 예측

심용섭¹, 이희상^{*}

¹인천대학교 기계시스템공학부

The Outlet Temperature Prediction of In-Situ Thermal Response Test using CFD Analysis

Yong-Sub Sim¹, Hee-Sang Lee^{*}

¹Department of Mechanical Engineering, University of Incheon

요약 지열원 히트펌프 시스템에서 지중 열교환기 설계를 위해 수행하는 현장 열응답 시험은 많은 시간과 비용이 수반되기 때문에 조건 변화에 따른 출구온도 예측이 어려운 실정이다. 본 연구에서는 국내에서 주로 사용하는 수직형 지중 열교환기의 열전달 성능을 예측하기 위한 방안으로 3차원 CFD 해석 기법을 제안하고, 2개소의 현장 열응답 시험의 출구온도와 기울기 값을 비교하여 CFD 해석 방법의 신뢰성을 확인하였다. CFD 해석 결과, 2개소의 현장 열응답 시험의 출구온도는 0.5°C 이내에서 예측하였고, 기울기 값은 1.6% 이내에서 적절히 예측하였다. 이를 통해 CFD 해석 방법의 신뢰성을 확인하고, 2개소의 현장 열응답 시험의 유량 및 지중 유효 열전도도 조건을 각각 $\pm 20\%$ 변화시키면서 현장 열응답 시험의 출구온도를 예측하였다. 첫 번째 현장(Case 1)의 경우 유량 변화에 따라 28.0°C(-20%)와 29.6°C(+20%), 지중 유효 열전도도 변화에 따라 29.6°C(-20%)와 28.0°C(+20%)로 현장 열응답 시험의 출구온도를 예측하였으며, 두 번째 현장(Case 2)의 경우 유량 변화에 따라 28.4°C(-20%)와 29.8°C(+20%), 지중 유효 열전도도 변화에 따라 29.7°C(-20%)와 28.4°C(+20%)로 현장 열응답 시험의 출구온도를 각각 예측하였다.

Abstract The in-situ thermal response test for the design of a ground heat exchanger of geothermal heat pumps have difficulty in predicting the outlet temperature according to the variation of conditions due to the expense and time. This paper suggests a 3-D CFD analysis method to predict the heat transfer performance of vertical type ground heat exchanger, which is mostly used in national, and the outlet temperature and the slope of two in-situ thermal response tests were compared to test the proposed CFD reliability. The results of CFD analysis showed that the outlet temperature was predicted to within 0.5°C of the actual value and the slope was predicted to within 1.6%. The reliability of the CFD analysis method was confirmed using this process, and the outlet temperature prediction of the two in-situ thermal response tests was obtained by changing $\pm 20\%$ of the flow rate and the effective thermal conductivity conditions, respectively. The results of CFD analysis showed that the outlet temperature of Case 1 was 28.0 (-20%) and 29.6°C (+20%) for the flow rate variation and 29.6°C (-20%) and 28.0°C (+20%) for the effective thermal conductivity variation, and the outlet temperature of Case 2 was 28.4 (-20%) and 29.8°C (+20%) for the flow rate variation and 29.7°C(-20%) and 28.4°C(+20%) for the effective thermal conductivity variation.

Keywords : CFD(Computational Fluid Dynamics), Geothermal Heat Pump, Ground Heat Exchanger, In-Situ Thermal Response Test, Outlet Temperature.

본 논문은 2014년도 인천대학교 자체연구비로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Hee-Sang Lee (Incheon Univ.)

Tel: +82-32-835-8682 email: hslee@incheon.ac.kr

Received August 6, 2015

Revised (1st November 20, 2015, 2nd January 4, 2016)

Accepted January 5, 2016

Published January 31, 2016

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근 신재생에너지 이용에 대한 관심의 증가로 관련 기술개발과 보급 사업이 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 지열에너지를 활용한 지열원 히트펌프 시스템에 대한 연구와 설치 사례도 증가하고 있다.

지열원 히트펌프 시스템은 지중을 히트싱크(heat sink) 또는 열원(heat source)으로 이용하여 건물 냉·난방에 필요한 에너지를 공급하는 시스템으로, 지중의 토양을 이용하는 밀폐형 시스템과 지하수를 이용하는 개방형 시스템으로 구분된다.

국내에서는 주로 수직형 지중 열교환기를 사용하는 밀폐형 시스템이 이용되고 있다. 수직형 지중 열교환기는 수직으로 천공된 보어홀(borehole)에 지중과 열교환을 위한 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 재질의 U자형 열교환기를 삽입한 후, 열교환기와 보어홀 벽면 사이의 빈 공간을 그라우팅 재료(grouting material)를 채워 시공한다. 여기서 수직형 지중 열교환기는 전체 지열원 히트펌프 시스템의 성능과 초기 투자비를 결정하는 중요한 요소 중 하나이다.

수직형 지중 열교환기를 최적 설계하기 위해 지중 유효 열전도도를 정확하게 산정한 후 설계에 적용하는데, 실무적으로 현장 열응답 시험(In-Situ Thermal Response Test)을 수행하고 시험결과를 선형 열원 모델(Line-Source Model)로 해석하는 방법으로 얻게 된다 [1].

하지만 현장 열응답 시험은 보어홀 설치에 필요한 천공 비용과 보어홀 설치 후 주위와 열평형이 이루어진 시험(보통 1주일 이상)에서 48시간 이상 실시해야 하는 등 비용과 시간 투자가 수반되어야 한다.

CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 활용한 지중 열교환기의 해석에 관한 연구로는 이용범 등이 수직형 지중 열교환기와 그 주위의 열거동을 해석하기 위해 제시한 1차원 열전달 모델의 타당성을 실험을 통해 검증하였다[2]. 김성수는 2차원 CFD 해석 결과를 실측 데이터와 비교하여 거의 유사하게 예측함을 보였고[3], 우상우 등은 3차원 CFD 해석 방법을 제안하여 수직형 지중 열교환기 출구온도의 실측값을 예측하였다[4].

본 연구에서는 대칭조건을 이용한 3차원 CFD 해석 기법을 제안하여 직경 및 깊이가 서로 다른 2개소의 수

직형 지중 열교환기 현장 열응답 시험과의 정확성을 비교·평가하고, 현장 열응답 시험에서 유량변화 및 지중 유효 열전도도 변화에 따른 지중 열교환기의 출구온도를 각각 예측하였다.

2. 본론

2.1 현장 개요

본 연구에서 제안한 CFD 해석 기법의 신뢰성을 확인하기 위한 2개소의 현장 개요는 다음과 같다.

첫 번째 현장(Case 1)은 충남에 위치하고, 지중 열교환기 매설 깊이는 150m, 관경은 32mm이다. 두 번째 현장(Case 2)은 강원도에 위치하고, 매설 깊이는 200m, 관경은 40mm이다. 2개소 모두 HDPE 재질의 열교환기를 사용하였으며, Table 1과 같다.

Table 1. Outline of sites

	Case 1	Case 2
Location	ChungNam	KangWon
Depth	150 m	200 m
Diameter	32 mm	40 mm
Material	HDPE U-tube	

2.2 현장 열응답 시험

Fig. 1에 현장 열응답 시험의 개략도를 나타내었다. 현장 열응답 시험장비는 열원(히터), 순환펌프, 온도 및 소비전력 측정장치, 데이터 로거로 구성된다. 시험 방법은 지중에 U자형 지중 열교환기를 설치하고 지중 열교환기 내에 순환유체인 물을 주입한다. 펌프를 가동하여 열교환기 내의 이물질 및 공기를 완전히 제거한다. 그 후 히터를 가동시키지 않은 채 일정 시간동안 지속적으로 유체를 순환시켜 지중온도가 안정상태에 도달하면, 열원을 투입하고 온도 및 유량, 에너지 투입량을 측정하면서 현장 열응답 시험을 수행하게 된다.

지중 유효 열전도도를 산정하기 위한 이론으로 선형 열원 모델을 적용하였으며 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{Q}{(4 \times \pi \times L \times S)} \quad (1)$$

여기서, Q는 투입된 열량, L은 보어홀의 깊이, S는 로그변환 시간-온도 그래프의 기울기 값이다.

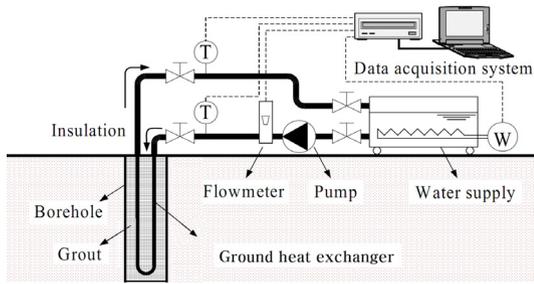


Fig. 1. Schematic of in-situ thermal response test

2.3 현장 열응답 시험 결과

2개소의 현장 열응답 시험 결과를 Table 2에 나타내었다. 48시간 동안 시험 데이터를 취득하였고, 작동유체의 입·출구온도 평균값과 시간을 선형화한 방정식의 기울기는 Case 1이 1.8781, Case 2가 1.8151이었다. 지중 유효 열전도도의 값은 Kelvin의 선형 열원 모델을 적용하여 단순화된 선형 방정식을 사용하여 계산하였으며, Case 1이 2.53, Case 2는 2.41 [W/m·K]을 얻었다.

Table 2. Results of In-Situ Thermal Response Tests

	Case 1	Case 2
Measured Time [hr]	48	
Initial Ground Temp. [°C]	14.5	16.0
Water Flow Rate [LPM]	24.3	35.1
Heat Transfer Rate [W]	8,947	11,016
Slope [-]	1.8781	1.8151
Ground Conductivity [W/m·K]	2.53	2.41

2.4 모델링 및 시뮬레이션

2개소의 실험 현장에 대한 모델링은 매설된 지중 열교환기와 지중을 반(half)으로 단순 형상화하여 대칭(symmetry) 조건을 사용하였다. 지중 열교환기의 주변 열환경을 분석하고 표현하기 위해 지중을 직경 10m, 깊이는 각각 155m(Case 1), 205m(Case 2)의 반(half) 원기둥 형태로 형상화하였고, 그 중심에 지중 열교환기를 모델링하였다. 형상 모델링은 격자생성 프로그램인 GAMBIT 2.2.30을 이용하였다. Case 1의 경우 35만개, Case 2의 경우 50만개의 격자로 구성되었으며, 격자의 skewness는 0.81 이하로 확인하였다. Fig. 2~4은 수직형 지중 열교환기와 지중의 형상을 모델링하고 격자를

생성한 그림이다.

상용코드인 FLUENT 6.3.35를 사용하여 CFD 해석을 수행하였으며, 비정상 유동에 대한 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식 그리고 k-epsilon 난류 모델을 이용하였다.

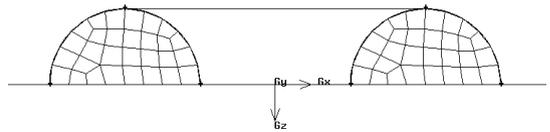


Fig. 2. 2D View of heat exchanger

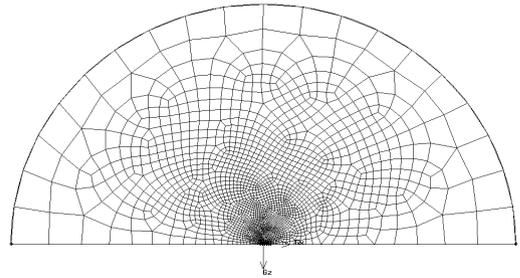


Fig. 3. 2D View of heat exchanger and ground

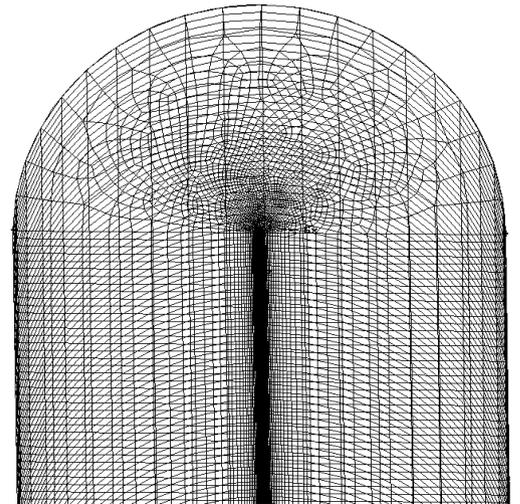


Fig. 4. 3D View of heat exchanger and ground

2.5 물성치 및 경계조건

2.5.1 물성치

2개소 현장 열응답 시험에서 지중 열교환기를 순환하는 작동유체는 물이 사용되었다. 지중의 밀도와 비열은

일반적 암석의 평균값을 물성치로 설정하였고, 지중의 열전도도는 Table 2에서와 같이 2개소의 현장 열응답 시험을 통해 얻은 지중 유효 열전도도를 사용하였으며, Table 3과 같다.

Table 3. Properties

	Density [kg/m ³]	Specific heat [J/kg · K]	Conductivity [W/m · K]	Viscosity [kg/m · s]
Water	995.3	4183	0.6045	0.000781
Ground	2800	860	2.53 (Case 1) 2.41 (Case 2)	-

2.5.2 지중온도

현장 열응답 시험 전에 매설된 지중 열교환기에 물을 채워 물의 온도가 지중 온도와 동일해질 때 까지 약 30 분 동안 무부하 상태로 물을 순환시키는 과정을 거치게 되는데, 이를 통해 지중 초기온도를 측정하게 된다. 이렇게 측정된 2개소의 지중 초기온도는 Table 2에서와 같이 Case 1이 1.45℃, Case 2가 16.0℃이며, CFD 해석을 위한 지중온도의 경계조건으로 설정하였다.

2.5.3 입구온도

시간에 따른 지중 열교환기 입구온도는 2개소의 현장 열응답 시험을 통해 측정된 입구온도를 profile로 작성하여 CFD 해석에 사용하였다.

Profile로 작성된 입구온도는 실제 측정된 입구온도와 0.1℃ 이내에서 일치하였다. 2개소의 설정된 profile을 그래프로 표현하여 Fig. 5에 나타내었다.

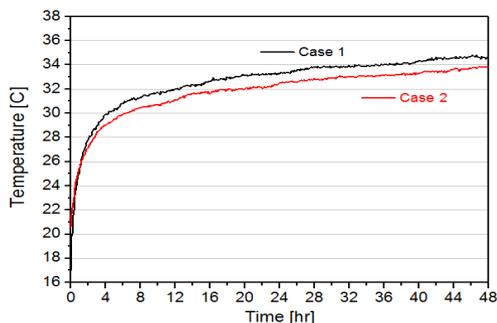


Fig. 5. Graph of Inlet water temperature profiles

2.6 현장 열응답 시험의 CFD 결과

CFD 해석 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 2.5절의

물성치와 경계조건을 이용하여 CFD 해석을 수행하였다. Fig. 6와 7에서 CFD 해석을 통해 얻은 지중 열교환기의 입·출구온도를 실제 현장 열응답 시험의 입·출구온도와 비교하였고, Fig. 8과 9에는 CFD 결과값을 이용하여 입구온도와 출구온도의 평균값과 시간을 선형화한 방정식의 기울기를 나타내었다.

2.6.1 출구온도 비교

2개소 CFD 해석 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 12 시간 간격으로 각각의 출구온도를 비교하고 온도차를 Table 4에 나타내었다.

Case 1에서 12시간 후의 측정값은 26.7℃, CFD 결과값은 26.2℃로 0.5℃의 온도차를 보였다. 그후 24시간부터 48시간까지 측정값과 CFD 결과값은 온도차는 0.4℃로 일정하였다. Case 2에서 12시간 후의 실측값은 26.6℃, CFD 결과값은 26.4℃로 0.2℃의 온도차를 보였고, 48시간까지 0.2℃의 온도차를 일정하게 유지하였다.

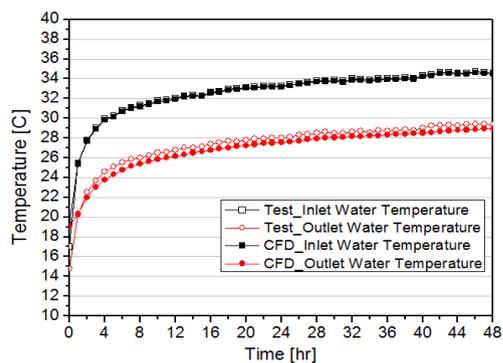


Fig. 6. Test data and CFD result of Case 1

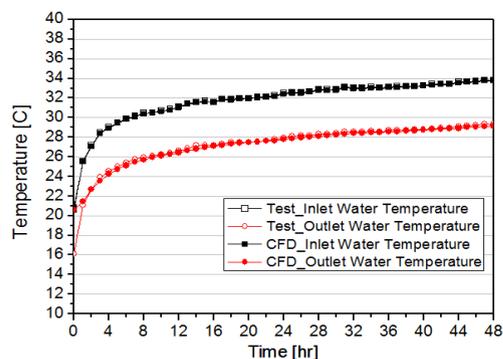


Fig. 7. Test data and CFD result of Case 2

Table 4. Test data and CFD results of water temperature

	Case 1			Case 2		
	Test	CFD	ΔT	Test	CFD	ΔT
12 [hr]	26.7	26.2	0.5	26.6	26.4	0.2
24 [hr]	28.0	27.6	0.4	27.9	27.7	0.2
36 [hr]	28.7	28.3	0.4	28.7	28.5	0.2
48 [hr]	29.3	28.9	0.4	29.3	29.1	0.2

2.6.2 기울기 비교

현장 열응답 시험 초기에는 열용량이 일정하게 공급 되지 않아 약간의 오차를 나타내는 것으로 알려져 있다. 이세균 등은 현장 열응답 시험시 주요 오차는 대략 초기 12시간 내에 발생되며, 시험 시작 후 초기 12시간을 해석결과 분석에서 제외하는 것이 무난하다고 제안하였다[5].

이에 초기 12시간을 제외한 측정값과 CFD 결과값을 사용하여 2개소의 기울기를 Table 5에 나타내었다. 단순 선형 회귀분석 결과 분산분석 F값의 유의수준은 모두 0.05 이하로 회귀분석의 적합성을 확인하였다. Case 1의 경우 측정값의 기울기는 1.8781이고, CFD 결과값의 기울기는 1.9080으로 1.6%의 차이를 보였고, Case 2의 경우 측정값의 기울기는 1.8151, CFD 결과값의 기울기는 1.8394로 1.3%의 차이를 보였다.

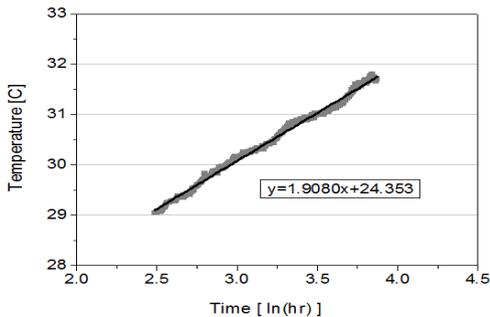


Fig. 8. Slope from CFD result of Case 1

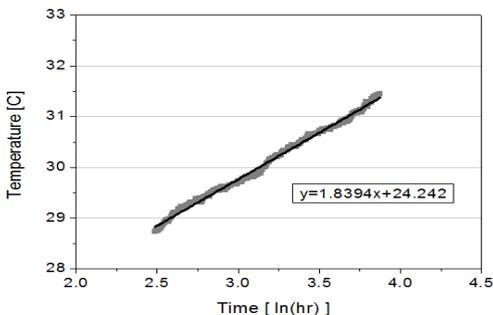


Fig. 9. Slope from CFD result of Case 2

Table 5. Test data and CFD results of slope

Case 1			Case 2		
Test	CFD	%	Test	CFD	%
1.8781	1.9080	1.6	1.8151	1.8394	1.3

현장 열응답 시험 결과와 CFD 결과값 비교를 통해 본 연구에서 제안한 3차원 수직형 지중 열교환기 해석 기법이 높은 신뢰성을 갖는 것으로 판단할 수 있다.

2.7 조건변화에 따른 출구온도 예측

CFD 해석 결과의 신뢰성을 확인한 후, 현장 열응답 시험의 유량 및 지중 유효 열전도도 조건을 기준 대비 $\pm 20\%$ 로 각각 변화시켜 CFD를 수행한 후 조건변화에 따른 현장 열응답 시험의 출구온도를 예측하였다.

2.7.1 유량 변화에 따른 출구온도 예측

2개소의 현장 열응답 시험에서 순환유량은 Case 1이 24.3 l/min, Case 2가 35.1 l/min이었다. 순환유량을 기준으로 $\pm 20\%$ 로 각각 변경하여 CFD를 수행한 후 출구온도를 Fig. 10와 Fig. 11에 나타내었으며, 12시간 간격으로 각각의 출구온도를 Table 6에 나타내었다.

Case 1의 경우 순환유량이 19.5 l/min(-20%), 24.3 l/min(기준), 29.2 l/min(+20%)으로 증가함에 따라 48시간 후의 지중 열교환기 출구온도는 28.0°C, 28.9°C, 29.6°C로 상승하였으며, Case 2의 경우 순환유량이 28.1 l/min(-20%), 35.1 l/min(기준), 42.2 l/min(+20%)으로 증가함에 따라 출구온도는 28.4°C, 29.1°C, 29.8°C로 상승하였다.

지중 열교환기의 열저항은 관내측 대류 열저항과 열교환기 파이프, 그라우팅 및 지중을 포함한 전도 열저항으로 구분할 수 있는데, 지중 열교환기의 순환유량이 증가함에 따라 관내측 대류 열저항은 감소하여 출구온도가 증가하게 되는 것으로 판단된다.

또한, Case 1에서 12시간 후의 출구온도는 25.3°C(-20%), 26.2°C(기준), 26.8°C(+20%)로 기준유량 대비 온도차는 0.9°C(-20%)와 0.6°C(+20%)의 온도차를 보였다. 그후 24시간부터 48시간까지 0.9°C(-20%)와 0.7°C(+20%)의 온도차로 일정하게 유지하였다. Case 2에서 12시간 후의 출구온도는 25.7°C(-20%), 26.4°C(기준), 27.1°C(+20%)로 기준유량 대비 온도차는 0.7°C(-20%)

와 0.7°C(+20%)의 온도차를 보였다. 그후 24시간부터 48시간까지 0.7°C(-20%)와 0.7°C(+20%)의 온도차로 일정하게 유지하였다.

Torikoshi 등은 평판관 열교환기에서 관경의 영향을 수치해석으로 검토하고 관경의 증가가 열전달에 미치는 영향은 미미하다고 보고하였는데[6], Case 2의 지중 열교환기 직경은 40mm로 Case 1의 직경 32mm 보다 크지만 두 곳의 관경차이에 따른 입·출구 온도차이가 미미한 결과와 유사함을 확인할 수 있다.

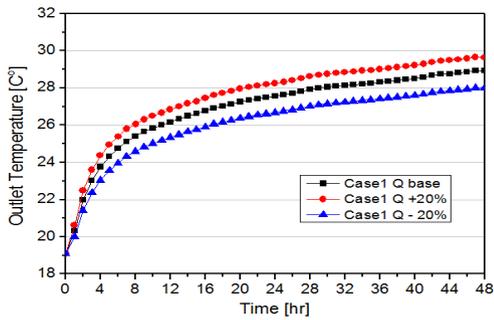


Fig. 10. Effect of the flow rate for Case 1

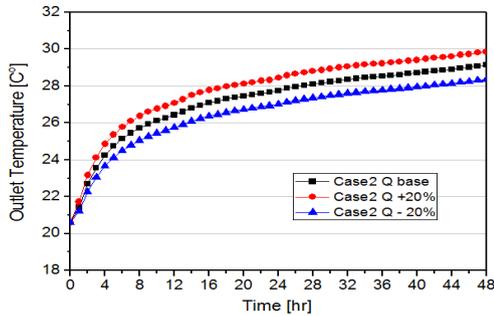


Fig. 11. Effect of the flow rate for Case 2

Table 6. CFD results of the flow rate variation

Q	Case 1			Case 2		
	-20%	Base	+20%	-20%	Base	+20%
12 [hr]	25.3	26.2	26.8	25.7	26.4	27.1
24 [hr]	26.7	27.6	28.2	27.0	27.7	28.4
36 [hr]	27.4	28.3	29.0	27.8	28.5	29.2
48 [hr]	28.0	28.9	29.6	28.4	29.1	29.8

2.7.2 지중 유효 열전도도 변화에 따른 출구온도 예측

2개소 현장 열응답 시험을 통해 도출된 지중 유효 열

전도도는 Case 1이 2.53 W/m·K, Case 2는 2.41 W/m·K이었다. 각각의 지중 유효 열전도도를 기준으로 ±20%로 변경하여 CFD를 수행한 후 출구온도를 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었으며, 12시간 간격으로 각각의 출구온도를 Table 7에 나타내었다.

Case 1은 지중 유효 열전도도가 2.02 W/m·K(-20%), 2.53 W/m·K(기준), 3.04 W/m·K(+20%)으로 증가함에 따라 48시간 후의 지중 열교환기 출구온도는 29.6°C, 28.9°C, 28.0°C로 감소하였으며, Case 2의 경우는 지중 유효 열전도도가 1.93 W/m·K(-20%), 2.41 W/m·K(기준), 2.89 W/m·K(+20%)으로 증가함에 따라 48시간 후의 지중 열교환기 출구온도는 29.7°C, 29.1°C, 28.6°C로 감소하는 것으로 예측하였다.

지중 열교환기 출구온도는 지열원 히트펌프 COP 및 지중 열교환기 길이 설계에 중요한 인자로, 지중 유효 열전도도가 높은 경우 지중으로부터의 흡열량과 지중으로의 방열량에 대한 회복이 상대적으로 빠르기 때문에 지열원 히트펌프 시스템의 성능이 증가하여 지중 열교환기의 길이를 줄일 수 있으므로 설치비용을 절약할 수 있음을 확인할 수 있다.

또한, Case 1에서 12시간 후의 출구온도는 26.8°C(-20%), 26.2°C(기준), 26.4°C(+20%)로 기준 유효 지중 열전도도 대비 온도차는 0.6°C(-20%)와 0.8°C(+20%)의 온도차를 보였다. 그후 24시간부터 48시간까지 0.7°C(-20%)와 0.9°C(+20%)의 온도차를 일정하게 유지하였다. Case 2에서 12시간 후의 출구온도는 26.9°C(-20%), 26.4°C(기준), 26.0°C(+20%)로 기준 유효 지중 열전도도 대비 온도차는 0.5°C(-20%)와 0.6°C(+20%)의 온도차를 보였다. 그후 24시간부터 48시간까지 0.6°C(-20%)와 0.5°C(+20%)의 온도차를 일정하게 유지하였다.

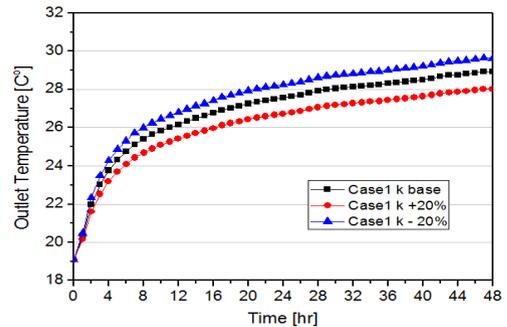


Fig. 12. Effect of effective thermal conductivity for Case 1

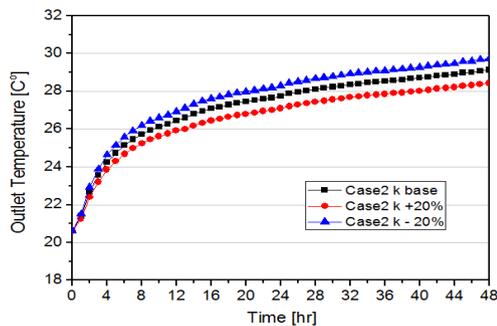


Fig. 13. Effect of effective thermal conductivity for Case 2

Table 7. CFD results of effective thermal conductivity variation

k	Case 1			Case 2		
	-20%	Base	+20%	-20%	Base	+20%
12 [hr]	26.8	26.2	25.4	26.9	26.4	26.0
24 [hr]	28.2	27.6	26.7	28.3	27.7	27.3
36 [hr]	29.0	28.3	27.4	29.1	28.5	28.0
48 [hr]	29.6	28.9	28.0	29.7	29.1	28.6

본 CFD 해석 결과는 실제 현장의 보어홀 내의 지중 열교환기 위치, 그라우팅 상태의 불균일성 그리고 지중 내의 지하수 유동의 정확한 파악이 어려운 점등으로 인해 열유동 거동이 현장 열응답 시험 결과와 다소 차이가 발생할 수 있음을 고려해야 한다.

3. 결론

본 연구에서는 대칭조건을 이용한 3차원 CFD 해석 기법을 제안하여 직경 및 깊이가 서로 다른 2개소의 수직형 지중 열교환기의 현장 열응답 시험과의 정확성을 비교·평가하고, 현장 열응답 시험에서 유량변화 및 지중 유효 열전도도 변화에 따른 지중 열교환기의 출구온도를 예측하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 현장 열응답 시험의 3차원 열전달 유동에 대해 제안한 CFD 해석 기법을 이용하여 수직형 지중 열교환기에 대해 적절히 모사할 수 있음을 확인하였다.
- 2) CFD 해석 결과 2개소의 지중 열교환기 출구온도는 0.5°C 범위 내에서 예측하였고, 기울기는 1.6% 이내에서 적절히 예측함을 보였다.

- 3) 현장 열응답 시험의 유량 조건을 기준 대비 ±20% 변화시켜 CFD를 수행한 결과, Case 1의 경우 28.0°C(-20%)와 29.6°C(+20%)로 예측하였고, Case 2의 경우 28.4°C(-20%)와 29.8°C(+20%)로 예측하였다.
- 4) 현장 열응답 시험의 지중 유효 열전도도 조건을 기준 대비 ±20% 변화시켜 CFD를 수행한 결과, Case 1의 경우 29.6°C(-20%)와 28.0°C(+20%)로 예측하였고, case 2의 경우 29.7°C(-20%)와 28.6°C(+20%)로 예측하였다.

References

- [1] S. K. Yim, "The Practical Study of Geothermal Heat Pump System", 2002-N-GE11-P-030, 2005.
- [2] Y. B. Lee, S. I. Cho, C. H. Kang, I. K. Jung, C. G. Lee, J. H. Sung, S. O. Chung, Y. B. Kim, "Analysis of Heat Transfer Characteristics in Soil for Development of a Geothermal Heat Exchanger System", Korean Society for Agricultural Machinery, Vol. 30, No. 3, pp. 185-191, 2005.
- [3] S. S. Kim, "A Study on the Heat Pump System by using Geothermal Energy", Gyeongsang National University, Doctoral dissertation, 2010.
- [4] S. W. Woo, J. H. Kim, S. H. Shin, K. I. Hwang, "The Comparison of the EWT&LWT between Field Measurement and CFD of Vertical-type Geothermal Heat Exchanger", Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 3, No. 1, pp. 11-16, 2007.
- [5] S. K. Lee, J. S. Woo, D. K. Kim, "A Study of Determining Initial Ignoring Time of Line Source Model used in Estimation the Effective Soil Formation Thermal Conductivities", Journal of Energy Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 167-174, 2008.
- [6] K. Torikoshi, G. N. Xi, "Numerical study of flow and thermal fields in finned tube heat exchangers", Proceedings of the IMECE, HTD-317-1, pp. 453-458. 1995.

이 희 상(Hee-Sang Lee)

[정회원]



- 1978년 2월 : 숭실대학교 공학사
- 1982년 2월 : 숭실대학교 (공학석사)
- 1999년 2월 : 국민대학교 (공학박사)
- 1980년 2월 ~ 2010년 1월 : 인천전문대학 교수
- 2010년 2월 ~ 현재 : 인천대학교 전임교수

<관심분야>
지열 냉난방 System

심 용 섭(Yong-Sub Sim)

[정회원]



- 2003년 2월 : 인천대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 인천대학교 기계공학과 박사

<관심분야>

열전달, 신재생에너지