

수직밀폐형 지중열교환기의 설계인자가 보어홀 전열저항에 미치는 영향에 관한 연구

장근선^{1*}, 김민준²

¹선문대학교 기계공학과, ²한국냉동공조인증센터

A Study on the Effects of Design Parameters of Vertical Ground Heat Exchanger on the Borehole Thermal Resistance

Keun Sun Chang^{1*}, Min-Jun Kim²

¹Department of Mechanical Engineering, Sunmoon University

²Korea Refrigeration and Air-conditioning Assessment Center

요 약 현재 지열 열펌프 시스템에 수직밀폐형 지중열교환기가 가장 많이 적용되고 있으며, 수직밀폐형 지중열교환기의 성능에 영향을 미치는 주요 인자로는 지중 열전도율(k)과 보어홀 전열저항(R_b)이 있다. 본 연구에서는 현장에서 측정된 열응답시험 데이터를 이용하여 보어홀 전열저항을 계산하였으며 지중열교환기 개별 설계인자들(순환수유량, 파이프 수, 그라우팅제)이 보어홀 전열저항에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 도출된 그라우팅 열저항은 문헌에 제시된 다양한 상관식과 비교 분석하였다. 시험데이터를 통해 본 시험에서의 지중열교환기 보어홀 전열저항은 0.1303 W/m.K로 나타났으며, 보어홀 전열저항에서 그라우트 열저항이 66.6 %, 파이프 열저항이 31.5 %, 순환수 대류열저항이 1.9 %를 차지하여 그라우트가 보어홀 열전달에 가장 큰 영향을 미치는 인자임을 확인하였다. 또한 각 설계인자의 설계변수가 보어홀 전열저항에 미치는 영향을 분석한 결과 실리카샌드를 혼합하여 그라우트 열전도율을 높이는 방법이 파이프 수 증가나 순환수 유량증가보다 열전달 증진에 더 효과적임을 알 수 있었다.

Abstract Currently, vertical closed ground heat exchangers are the most widely utilized geothermal heat pump systems and the major influencing parameters on the performance of ground heat exchangers are the ground thermal conductivity(k) and borehole thermal resistance(R_b). In this study, the borehole thermal resistance was calculated from the in-situ thermal response test data and the individual effects of design parameters (flow rate, number of pipe, grout composition) on the borehole thermal resistance were analyzed. The grout thermal resistance was also compared with the correlations in the literatures. The borehole thermal resistance of the investigated ground heat exchanger results in 0.1303 W/m.K and the grout thermal resistance (66.6% of borehole thermal resistance) is the most influencing parameter on borehole heat transfer compared to the other design parameters (pipe thermal resistance, 31.5% and convective thermal resistance, 1.9%). In addition, increasing the thermal conductivity of grout by adding silica sand to Bentonite is more effective than the other design improvements, such as an increase in circulating flowrate or number of tubes on enhancing borehole heat transfer.

Keywords : Geothermal Heat Pump System, GHE : Ground Heat Exchanger, Ground Thermal Conductivity, Borehole Thermal Resistance, TRT: Thermal Response Test

본 논문은 2018년 선문대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Keun Sun Chang(Sunmoon Univ.)

Tel: +82-41-530-2336 email: chang@sunmoon.ac.kr

Received July 18, 2018

Revised August 10, 2018

Accepted October 5, 2018

Published October 31, 2018

1. 서론

지열 열펌프 시스템(Geothermal Heat Pump System)은 신재생에너지의 활용 및 시스템 고효율이라는 큰 장점을 가지고 있으며, 국내의 경우 대체에너지 이용법에 의하여 공공부문에서 신재생에너지 설치가 의무화되면서 신축건물의 냉난방설비로 지열 열펌프 시스템의 보급이 증가하고 있는 추세이다. 지열 열펌프 시스템은 연중 일정하게 유지되는 지중 열원(국내의 경우 15 °C ~ 18 °C) 온도를 이용하기 때문에 계절에 따라서 외기온도 변화가 큰 폭으로 변화되는 공기열원 열펌프 시스템보다 높은 시스템효율을 보인다[1].

지열 열펌프 시스템에서 지중열교환기(GHE : Ground Heat Exchanger)는 지중에서 채열된 열원을 지열 열펌프 유닛으로 공급해 주는 장치로서 국내의 경우 수직밀폐형 지중열교환기가 가장 많이 적용되고 있다. 이러한 수직밀폐형 지중열교환기의 성능에 영향을 미치는 인자로는 크게 지중 열전도율(Ground Thermal Conductivity : k)과 보어홀 전열저항(Borehole Thermal Resistance : R_b)이 있으며, 지중 열전도율의 경우 시스템이 설치될 지역에 열응답시험(TRT: Thermal Response Test)을 통해 산출된 값을 사용하고 있으며 보어홀 전열저항의 경우 현지에서 측정된 열응답시험 데이터와 보어홀 내부를 구성하는 인자들(순환수 유량, 파이프, 그라우팅제)의 물성치 및 형상을 이용하여 산출하고 있다[2].

따라서 본 연구에서는 지중에 설치된 지중열교환기에 대해 열응답시험을 수행하여 지중 열전도율 및 보어홀 전열저항을 산출하고 지중열교환기 개별 설계인자들(순환수 유동, 파이프, 그라우팅제)이 보어홀 전열저항에 미치는 영향을 수치적으로 계산하였다. 도출된 그라우팅 열저항은 문헌에 나와 있는 다양한 그라우팅 열저항 상관식들과 비교하였고 실험값에 가장 근접한 상관식을 이용하여 지중열교환기 설계프로그램(GLD : Ground Loop Design)[9]의 보어홀 전열저항 값과 비교하였으며, 또한 실제 지중열교환기의 보어홀 설계시 설계인자들이 보어홀 전열저항에 미치는 영향도를 분석하였다.

2. 시험방법 및 분석

2.1 열응답시험 방법

Fig. 1은 수직밀폐형 지중열교환기의 지중 열전도율

측정시험의 개략도를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 현장에 설치된 지중열교환기와 시험기를 연결한 후 초기에 열량공급 없이 펌프를 이용하여 지중열교환기 내부의 물을 1시간 동안 순환시켜 지중 초기온도를 구하였다. 이후 지중열교환기로 일정한 열량을 48시간 동안 투입하여 시간에 따른 지중열교환기의 입·출구 온도를 측정하였다. 이때 입출구의 온도차는 3.5 ~ 7.0 °C 범위에서 일정하게 유지하였다. 본 연구에서는 경기도 안산에 보어홀 150 mm, 깊이 150 m, 그라우팅제는 물+벤토나이트(80:20), HDPE 30A와 40A 파이프가 삽입된 지중열교환기 2본을 제작하였다.

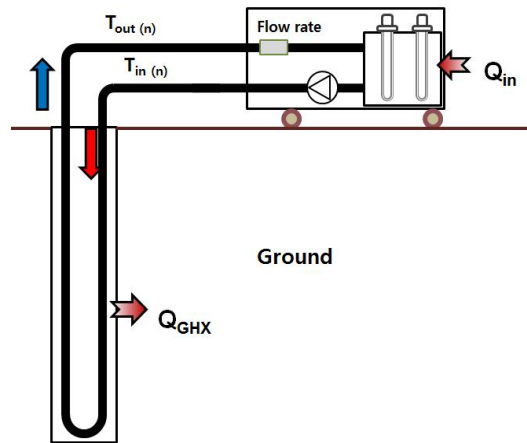


Fig. 1. Schematic of an in-situ TRT apparatus

2.2 데이터 분석방법

지중 열전도율(k)은 산업통상자원부 고시[2]에서 권장하고 있는 계산방식을 따라 식 (1)과 같이 산출하였다.

$$k = \frac{Q}{4\pi \cdot a \cdot L_v} \quad (1)$$

여기서 Q 는 투입열량, a 는 로그시간에 대한 순환수 평균 온도의 기울기, L_v 는 수직밀폐형 지중열교환기의 깊이를 말한다.

지중 열전도율을 계산하고 나면 열응답시험에서 획득한 시험데이터를 이용하여 보어홀 전열저항을 계산할 수 있으며, 해석을 위해 다음과 같이 가정하였다.

- ㉠ 지반 매질은 동질성과 등방성으로 보았다.

- ㉠ 지중에서의 열전달은 반경방향으로 1차원으로 가정한다.
- ㉡ 지중 열전달 과정은 보어홀 안에서 지연시간 응답(Late-Time Responses)의 경우 준-평형상태(Quasi-Steady State)로 가정한다.
- ㉢ 보어홀에서 주위의 지중 온도는 거리와 깊이에 관계없이 일정한 값을 갖는다.
- ㉣ 보어홀 끝단에서 나타나는 양단효과(Ends Effect)는 무시하였다.

보어홀 전열저항은 식 (2)를 이용하여 계산하였다[3].

$$R_b = \frac{L_v}{Q} [T_f - \frac{Q/L_v}{4\pi k} (\ln \frac{4\alpha t}{r_b^2} - 0.5772) - T_o] \quad (2)$$

여기서 T_f 는 시간에 따른 지중 순환수 평균온도이며, α 는 지중 암반의 열확산계수($\frac{k}{\rho C_p}$), r_b 는 보어홀의 반지름, T_o 는 지중 초기온도를 말한다.

본 연구에 사용된 지중열교환기는 시추기가 굴착하면서 육안으로 확인한 결과 지중암반은 화강암(Granite)로 확인되었으며, 토사층이 25 m가 존재하였으나 전부 암반으로 가정하였다. 따라서 지중 토양의 체적비열은 $\rho C_p : 2.4 \text{ MJ/m}^3\text{K}$ 값을 사용하였다.

수직밀폐형 지중열교환기에서 보어홀 전열저항에 영향을 미치는 인자들로써는 파이프 내부의 순환유체에 의한 대류열전달과 보어홀 내부에 삽입되는 HDPE 파이프 전도열전달, 파이프와 암반의 간극을 메워주는 그라우팅제에 의한 전도열전달로 이루어진다.

파이프의 열저항(R_t)과 지중 순환수의 열저항(R_c)은 식 (3)과 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$R_t = \frac{1}{2\pi k_i} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \quad (3)$$

$$R_c = \frac{1}{2\pi h_i r_i} \quad (4)$$

여기서 k_i 는 HDPE파이프의 열전도율이며, h_i 는 순환수의 대류열전달계수로 매끈한 원형관 내의 완전발달된 난류흐름으로 Dittus-Boelter의 식(5)를 사용하였다[4].

$$h_i = 0.023Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot \left(\frac{k}{d_i}\right) \quad (5)$$

$$\left[\begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 160 \\ Re \geq 10000 \\ \frac{L}{d} \geq 10 \end{array} \right]$$

그라우팅제의 열저항은 앞서 구해진 보어홀 전열저항 값에서 파이프 전도 열저항과 순환수 대류 열저항을 뺀 값으로 계산되며, 식(6)과 같이 표현된다.

$$R_g = R_b - \frac{R_t}{N_t} - \frac{R_c}{N_t} \quad (6)$$

여기서 N_t 는 삽입된 파이프의 개수를 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수직밀폐형 지중열교환기의 열저항 특성

본 연구에서는 깊이 150 m, 보어홀 관경 150 mm에 HDPE 2관식 30A 파이프를 삽입하고 그라우팅제로 벤토나이트(20 wt%)와 물(80 wt%) 혼합물로 제작된 수직 밀폐형 지중열교환기의 특성을 살펴보았다.

Fig. 2는 시간변화에 따른 지중열교환기의 순환수 입·출구 온도변화, 평균온도 변화, 투입열량 변화를 보여주고 있다. 지중열교환기의 지중온도는 15.6 °C로 측정되었으며, 지중열교환기로 투입된 열량은 단위길이당 63 W/m (9.35 kW)로 시험이 진행되는 48시간 동안 투입열량은 표준편차가 1.0 %보다 적은 변동율로 안정적으로 투입됨을 보여준다. 지중열교환기에 열량투입 후 12시간이 지났을 때 순환수의 평균온도는 약 29.1 °C를 보였으며, 이후 순환수의 온도곡선의 증가율도 선형적으로 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 3은 로그시간에 대한 지중 순환수 평균온도 변화를 보여주고 있다. 순환수 평균온도 곡선을 이용하여 직선의 기울기를 구한 결과 기울기(a)는 1.66으로 계산되었으며, 식 (1)을 사용하여 지중 열전도율을 산출한 결과 $k = 3.03 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 로 계산되었다.

Fig. 4는 시간 변화에 따른 보어홀 전열저항 값의 변화를 보여주고 있다. T_f 가 시간 변화에 따라 변화하는 값이므로 R_b 또한 시간에 따라서 다소변화를 보이나, 보

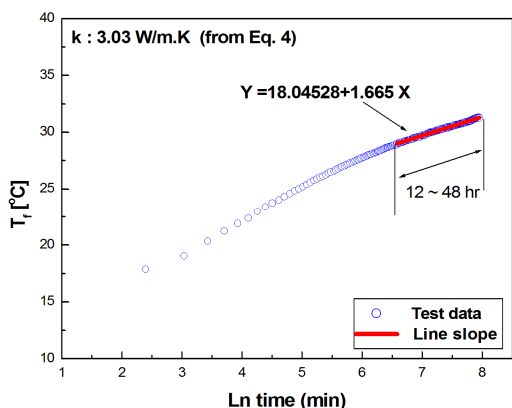


Fig. 3. Ln time vs. T_f

어홀의 길이(L)가 보어홀의 직경(D)에 비해 충분히 크고

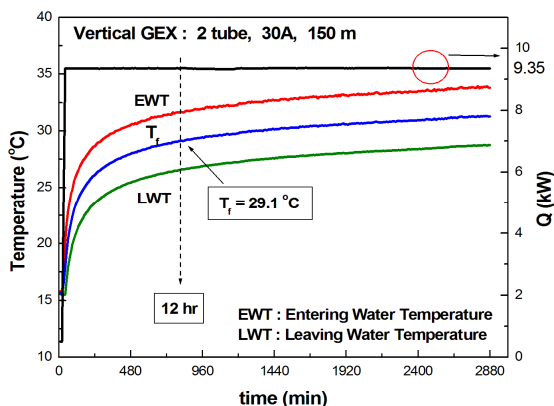


Fig. 2. Variation of the circulation water temperature, Q with operating time

($D/L = 0.001$), 수직방향 지중온도 구배가 충분히 작을 경우에 지중열교환기 내부에서 열전달은 반경방향(Radial)으로만 이루어진다고 가정할 수 있다. 따라서 지중열교환기에서 후기 시간(Late time response) 동안의 보어홀 내부 열적 반응은 준평형상태 열전달(Quasi-Steady State Heat Transfer)로 나타나 보어홀 전열저항도 거의 일정한 값을 보여준다.

본 시험에서 보어홀 전열저항은 지중열교환기로 열량 투입 후 12 ~ 48시간에서 평균하여 산출하였으며, 보어홀 전열저항은 0.1303 (m.K)/W로 계산되었다.

Fig. 5는 보어홀 전열저항에 영향을 미치는 인자들의 전열저항 값과 영향도를 보여주고 있다. 보어홀 전열저항에 영향을 미치는 인자 중에서 지중 순환수의 경우 전체 전열저항 중에서 약 1.9%로 영향도가 가장 낮게 나

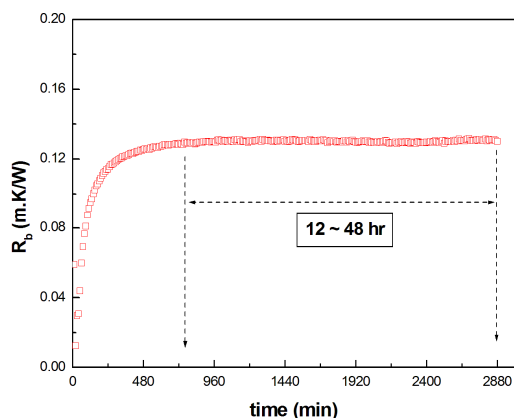


Fig. 4. Variation of the borehole thermal resistance with operating time

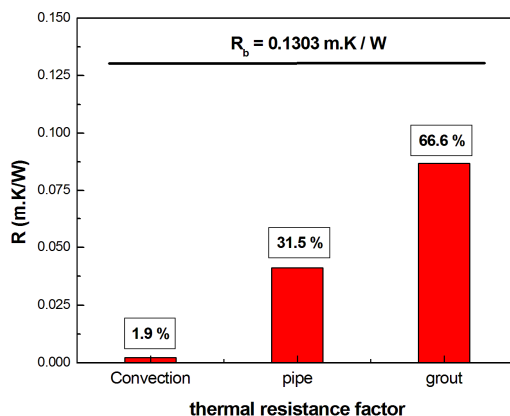


Fig. 5. Contribution of individual thermal resistance

타났으며, HDPE 파이프는 약 31.5%, 그라우팅재는 약 66.6%로 가장 크게 영향을 미쳤다.

3.2 상관식과 그라우팅 열저항 비교

지중열교환기 보어홀 내부에 채워지는 그라우트는 일반적으로 벤토나이트 계열의 그라우트를 가장 많이 사용되고 있다. 그라우트에 관련된 열저항을 계산하기 위한 많은 연구들이 진행되었으며, 이와 관련된 상관식이 도출되었다. 본 연구에서는 발표된 상관식들과 시험에서 계산된 그라우트 열저항과 비교·분석해 보았다.

그라우트 열저항에 가장 일반적으로 사용되는 상관식은 Remund[5]의 식으로 식 (7)과 같다.

$$R_g = \frac{1}{S_{bh} \cdot k_g} \tag{7}$$

여기서 k_g 는 그라우트의 열전도도이며, S_{bh} 는 보어홀 내부에서 파이프가 배치된 형상에 따른 값으로 식 (8)로 표현된다.

$$S_{bh} = \beta_1 \times \left(\frac{d_{bh}}{d_{pipe,o}} \right)^{\beta_2} \quad (8)$$

여기서 d_{bh} 는 보어홀 관경이며 $d_{pipe,o}$ 는 파이프 외경이다. 그리고 β_1, β_2 는 형상계수로 Fig. 6와 Table 1과 같이 정의된다.

Lamarche et al.[6]는 식 (9)와 같은 그라우트 열저항 상관식을 발표하였다.

$$R_g = \frac{1}{4\pi \cdot k_g} \left[\text{Ln} \left(\frac{\chi_1 \cdot \chi_2^{1+4\sigma}}{2(\chi_2^4 - 1)^\sigma} \right) - \frac{\chi_3^2 \left[1 - \left(\frac{4\sigma}{(\chi_2^4 - 1)} \right) \right]}{1 + \chi_3^2 \left[1 + \left(\frac{16\sigma}{\left(\frac{\chi_2^2 - 1}{\chi_2^2} \right)^2} \right) \right]} \right] \quad (9)$$

$$\chi_1 = \frac{r_{bh}}{r_{pipe,o}}, \chi_2 = \frac{2r_{bh}}{S_{pipe}}, \chi_3 = \frac{\chi_2}{2\chi_1}, \sigma = \frac{k_g - k_{soil}}{k_g + k_{soil}}$$

여기서 r_{bh} 는 보어홀 반경, $r_{pipe,o}$ 는 파이프의 외경, k_{soil} 은 지중 열전도율이고, S_{pipe} 는 보어홀 중앙에서 파이프 중앙까지의 이격거리(m)이다.

Sharqawy et al.[7]는 식 (10)과 같은 상관식을 수립하였으며,

$$R_g = \frac{1}{2\pi \cdot k_g} \cdot \left[\frac{-1.49}{\chi_2} + 0.656\text{Ln}(\chi_1) + 0.436 \right] \quad (10)$$

Shonder and Beck[8]은 식 (11)과 같은 상관식을 정립하였다.

$$R_g = \frac{1}{2\pi \cdot k_g} \cdot \text{Ln} \left(\frac{\chi_1}{\sqrt{2}} \right) \quad (11)$$

또한 Gu and O'Neal[9]은 식 (12)와 같이 그라우트 상관식을 수립하였다.

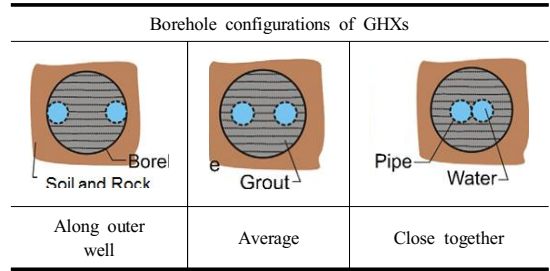


Fig. 6. Borehole configurations of GHXs made with a single U-pipe.

Table 1. Borehole configurations coefficients

Configuration	β_1	β_2
Along outer well	21.91	-0.3796
Average	17.44	-0.6052
Close together	20.1	-0.9447

Table 2. Parameter value

Parameter	Symbol	Unit	Value
Borehole radius	r_{bh}	m	0.075
Pipe in radius	$r_{pipe,i}$	m	0.0175
Pipe out radius	$r_{pipe,o}$	m	0.021
From borehole center to pipe center	S_{pipe}	m	0.037
Pipe thermal conductivity	k_{pipe}	W/(m·K)	0.389
Soil thermal conductivity	k_{soil}	W/(m·K)	3.03

$$R_g = \frac{1}{2\pi \cdot k_g} \cdot \text{Ln}(\chi_1 \sqrt{\chi_2}) \quad (12)$$

본 연구에서 계산된 그라우트 열저항값과 상관식의 값을 비교분석하기 위하여 상관식을 이용한 그라우트 열저항을 계산하였다. 그라우팅 열저항을 산출하기 위해서는 그라우트의 열전도율과 보어홀 내부의 형상을 알아야 한다.

본 실험에 사용된 그라우트는 벤토나이트 계열(Bentonite)과 물의 혼합물로 배합비는 중량비로 2 : 8로 배합하였다. 또한 그라우트의 열전도도를 높이기 위한 방법으로 벤토나이트 계열에 실리카샌드(Silica Sand, 규사)를 같이 배합하는 경우가 늘어나고 있다. 따라서 벤토나이트계열과 실리카샌드의 배합비에 대한 열전도율은 산업통상자원부 고시[2]에 정의된 물질 중에서 Thermal Grout Select와 Vokey Grout의 평균값을 사용하였다. 본 해석에 사용된 각각의 변수들의 값은 Table 2에 정리

하였다. 또한 k_{soil} 은 보어홀 대표암반의 값으로 본 해석에서는 실험에서 측정된 지중 열전도율 $k_{soil} = 3.03$ W/(m·K)를 적용하였다.

Fig. 7은 본 시험에서 산출된 계산값에 대한 상관식에서 산출된 그라우트 열저항의 비율을 보여주고 있다. 그래프에서 사용된 그라우트는 벤토나이트와 물만을 이용한 값이다. 2관식 30 mm와 40 mm에서 Sharqawy et al.[7] 상관식이 본 시험 결과와 가장 유사한 값을 보였으며, 상관식을 이용한 그라우트 열저항 값은 Gu and O'Neal[9] 가장 높게 나타났으며, Shonder and Beck[6] 가장 낮게 나타났다.

현재 수직밀폐형 지중열교환기의 보어홀 전열저항을 계산하는 방법으로 GLD(Ground Loop Design)[9] 프로그램이 사용되고 있다. 따라서 앞에서 정의된 그라우트 상관식(Sharqawy et al.[7])을 이용한 지중열교환기의 보어홀 전열저항 값을 계산하고 GLD 프로그램에서 계산된 값과 비교하여 보았다. 상세한 열응답시험 방법과 이를 이용한 GLD 프로그램 계산 방법은 참고문헌[1, 3, 11]에 나타나 있다.

Fig. 8은 GLD 프로그램에서 계산된 수직밀폐형 지중열교환기에 대한 보어홀 전열저항과 상관식을 이용한 보어홀 전열저항 값을 보여주고 있다. GLD 프로그램에서는 보어홀 내부에서의 파이프 위치에 따라서 보어홀 전열저항이 계산되고 있다. Fig. 8에서 보면 GLD 프로그램에서 계산된 값의 경우 실험식과 가장 유사한 상관식에서 계산된 값 보다 높은 값을 보였으며, 프로그램에서 보어홀 벽면에 파이프가 배치되는 경우보다 상관식에서 계산된 값이 더 낮게 나타났다. 또한 벤토나이트 계열에 실리카샌드 비율이 증가하는 경우 상관식의 변화량보다 GLD 프로그램에서 변화량이 더 크게 나타났다. 이는 현재 GLD 프로그램을 통한 지중열교환기 길이를 산출할 경우 건물부하에 대한 지중열교환기 길이가 더 많이 산출됨을 의미하며, 실제 데이터보다 프로그램을 이용시 실리카샌드 비율변화에 따른 지중열교환기 길이변화량이 더 크게 나타남을 의미한다. 따라서 현재 국내에서 설계된 지열 열펌프 시스템에 적용된 지중열교환기 길이가 필요 이상으로 적용되고 있음을 유추할 수 있다.

그러므로 지열 열펌프 시스템을 설계할 경우 보어홀 전열저항 계산은 GLD 프로그램에서 보어홀 벽면에 파이프가 배치된 형상(Along outer well)을 적용해도 무방할 것으로 보여진다.

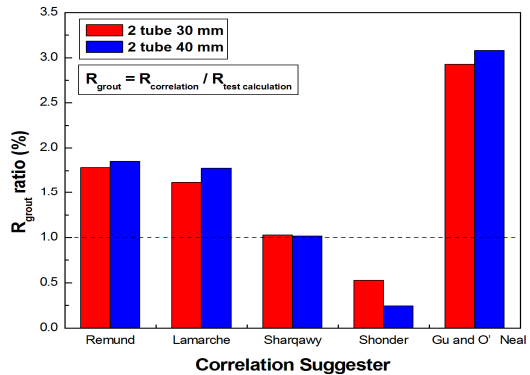


Fig. 7. Variation of the grout thermal resistance with correlation equation and pipe diameter.

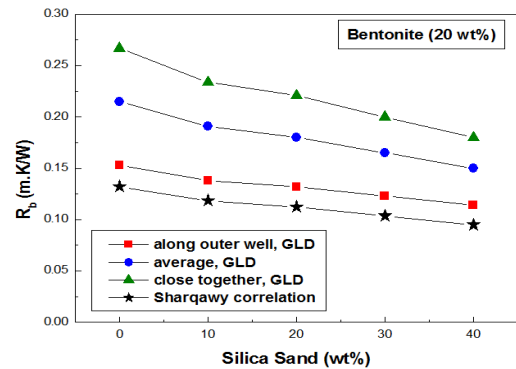


Fig. 8. Variation of the R_b with silica sand.

Fig. 9는 보어홀 전열저항에 영향을 미치는 세가지 인자의 개별 설계변수가 보어홀 전열저항에 미치는 영향도를 보여주고 있다. Table 3은 각각의 열저항 인자들의 변수를 정의한 것이다. 그라우팅 재료 벤토나이트 20 wt%에 실리카샌드를 0 ~ 30 wt% 혼합할 경우 열전도도는 0.7995 W/(m·K)에서 1.1791 W/(m·K)까지 증가하며 이에 따라 보어홀 전열저항은 표준조건 0.1303 (m.K)/W으로부터 최대 21.6 % 감소되어 그라우트 설계변수가 보어홀 열전달에 가장 큰 영향을 줄을 알 수 있다. 또한 파이프 삽입 개수를 증가시킬 경우 열저항이 15.5 % 감소하는 것으로 나타났으며, 지중 순환수 유량 증가의 효과는 무시할 정도로(0.7 % 감소)로 나타났다. 결과적으로 보어홀 전열저항을 낮추기 위해서는 그라우팅 재료를 바꾸거나 파이프 삽입 개수를 늘려야 큰 효과를 볼 수 있음을 알 수 있다.

Table 3. Variable of individual thermal resistance

Parameter	Unit	Value
Circulation flow rate	L/min	25*, 35, 45
HDPE pipe No.	tube	2*, 4
Grout material	W/(m·K)	0.7995* ~ 1.1791

* standard condition

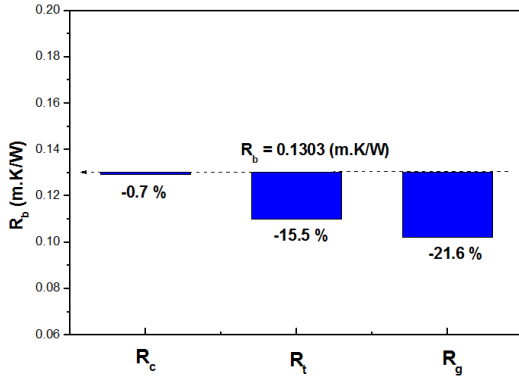


Fig. 9. Contribution of individual thermal resistance

3. 결론

현재 지열 열펌프 시스템에 적용되고 있는 수직밀폐형 지중열교환기의 설계인자들(순환수유량, 파이프 수, 그라우팅재)이 보어홀 전열저항에 미치는 영향을 살펴보기 위해 열응답시험을 수행하였으며, 시험데이터를 통하여 도출된 그라우팅 열저항과 문헌의 상관식을 이용한 그라우팅 열저항 계산값과 비교 분석하였다. 또한 각 설계인자의 설계변수 변화가 지중열교환기의 열저항 감소에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 주요 결론을 얻었다.

1. 본 연구에 사용된 수직밀폐형 지중열교환기의 지중 열전도율은 3.03 W/(m.K)로 측정되었으며, 보어홀 전열저항은 0.1303 (m.K)/W로 계산되었다. 보어홀 전열저항에 영향을 미치는 인자들을 분석한 결과 지중 순환수가 1.9 %, HDPE 파이프가 31.5 %, 그라우팅재가 66.6 % 영향을 미치는 것으로 분석되었다.
2. 시험데이터를 이용하여 계산된 그라우팅 열저항 값과 다양한 그라우팅 열저항 상관식 값을 비교한

결과 Sharqawy et al.[7]의 상관식이 가장 근사한 것으로 나타났으며, GLD 프로그램과 비교해 본 결과 시험값보다 프로그램의 보어홀 전열저항이 전체적으로 높게 나타났다.

3. 수직밀폐형 지중열교환기의 설계인자의 변화가 보어홀 전열저항에 미치는 영향을 분석한 결과 그라우팅의 열전도율을 증가시키는 방법(열저항 21.6 % 감소)이 파이프 수를 늘리는 방법(열저항 15.5 % 감소)보다 열저항 감소에 보다 효과적이며, 지중 순환수 유량증가(열저항 0.7 % 감소)는 거의 효과가 없는 것으로 분석되었다.

References

- [1] Kim, M. J., A study on the thermal performance evaluation of a borehole ground heat exchanger using in-situ thermal response test, Ph.D thesis, Sunmoon University, KOREA, 2017.
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy Announcement 2015-263, Standards of Support, Installation and Management for New and Renewable Energy System, (2015).
- [3] K. S. Chang, M. J. Kim, "Thermal performance evaluation of vertical U-loop ground heat exchanger using in-situ thermal response test", *Renewable Energy*, Vol.87, Part 1, pp.585-591, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.059>
- [4] Incropera, F. P. and Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th Edition, 1996, John Wiley and Sons, Inc.
- [5] Remund, C.P., Borehole thermal resistance: laboratory and field studies, 1999, ASHRAE Transactions, 105(1): pp. 439-445.
- [6] L. Lamarche, S. Kaji, B. Beauchamp, "A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat pump systems", *Geothermics*, Vol.39, No.2, pp.187-200, 2010. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.03.003>
- [7] M. H. Sharqawy, E. M. Mokheimer, H. M. Badr, "Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchanger", *Geothermics*, Vol.38, No.2, pp.271-277, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.02.001>
- [8] Shonder, J.A. and Beck, J.V., Determining effective soil formation thermal properties from field data using a parameter estimation technique, 1999, ASHRAE Transactions Vol. 105, part 1, pp 458-466.
- [9] Gu, Y., O'Neal, D., Development of an equivalent diameter expression for vertical U-tubes used in ground-coupled heat pumps. ASHRAE Transactions, (1998) 104(2): pp. 1-9.

- [10] Ground Loop Design User's Manual, Gaia Geothermal, USA, 2007, pp. 1-136.
- [11] K. S. Chang, M. J. Kim, "Analysis and thermal response test for vertical ground heat exchanger with two U-loop configuration", *International Journal of Energy Research*, Vol.40, No.2, pp.189-197, 2016.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/er.3448>

장 근 선(Keun-Sun Chang)

[정회원]



- 1979년 2월 : 서울대학교 기계공학 (공학사)
- 1986년 5월 : 루이지애나주립대 기계공학 (공학석사)
- 1989년 8월 : 미루이지애나주립대 기계공학 (공학박사)
- 1989년 10월 ~ 1995년 2월 : 한국 원자력 연구소 선임연구원(실장)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

냉동공조 열교환기 및 시스템 설계

김 민 준(Min-Jun Kim)

[정회원]



- 2004년 2월 : 명지대학교 기계공학과 (공학사)
- 2007년 8월 : 한국기술교육대학교 산업공학과 (공학석사)
- 2017년 2월 : 선문대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2005년 6월 ~ 2008년 8월 : 한국 생산기술연구원 연구원

• 2008년 9월 ~ 현재 : 한국냉동공조인증센터 책임연구원

<관심분야>

냉동공조 시스템 및 지열 히트펌프 시스템 설계, 지중열교환기