

2000m 단일 시추공에서 밀폐 동축 방식 지중 열교환기의 취득온도 성능평가

류연수*, 김재혁**, 정상화**.#

*한국농어촌공사 농어촌연구원, **조선대학교 기계공학과

Performance Evaluation of Closed Co-axial Ground Heat Exchanger in the case of 2000m-Depth Single Well

Yeon-Su Ryoo*, Jae-Hyeok Kim**, Sang-Hwa Jeong**.#

*Rural Research Institute., **Department of Mechanical Engineering, Chosun UNIV.

(Received 18 May 2016; received in revised form 1 July 2016; accepted 4 July 2016)

ABSTRACT

The Korean government has been making efforts to use renewable energy to reduce the consumption of fossil fuels for the heating system in greenhouses. The number of greenhouses that installed a geothermal heat pump system is 201 EA with the volume of 132.8 ha and 108,467 kW from 2010–2014. The geothermal system, called a shallow geothermal system, with the temperature of 10–20°C has accessories composed of a BHE and heat pump. Moreover, it is necessary to have a wide area to install the BHE and to drill to the depth of 200 m. On the other hand, even though the deep geothermal system needs a high drilling cost to obtain the temperature of 40–150°C, the system has the advantages of the small area required for the BHE and operation without a heat pump.

In this study, the temperature of the return water and heat capacity were measured to obtain the geothermal energy efficiently on the condition of the water flow being changed in the BHE. The temperature according to the return water changes through the heat conduction based on the increase of ground temperature up to the underground depth has been calculated to conduct a simulation and is compared with the field experiment test results.

Key Words : Deep Geothermal(심부지열), Heat Exchanger(열교환기), Heat Gain(취득열량), Flow Velocity(유속), Green House(시설원예)

기호설명

U_t = coefficient of heat transfer (w/mk)

A = pipe surface area (m²)

ρ = water density (kg/m³)

W = flux (m³/h)

R = pipe radius (mm)

V = flow rate (m³/s)

L = pipe length (m)

C_p = specific heat (kJ/kg · k)

T_i = inlet water temperature (°C)

Corresponding Author : shjeong@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7178, Fax: +82-62-230-7178

T_o = outlet water temperature (°C)
 T_{ao} = soil temperature around the pipe (°C)
 q = acquisition calory (kJ/h)
 G = quantity of flow (kg/h)
 ΔT = temperature difference (°C)
 BHE = Borehole Heat Exchange

1. 서 론

화석연료 사용량을 줄이고 신재생에너지를 이용하기 위한 국가 주도의 농업에너지 이용효율화사업은 시설비의 지원제도와 함께 난방비용의 절감과 편리성으로 꾸준히 확대 보급되고 있다. 특히, 경유 보일러나 온풍기를 사용하는 현대화된 온실을 중심으로 지열히트 펌프를 이용한 난방설비로 전환되었다. 2010년부터 2014년까지 최근 5년간 지열히트 펌프 시스템을 설치하여 난방으로 사용하는 농업용 온실은 201개소에 면적은 132.8 ha이며, 히트펌프 설비규모는 108,467 kW이다^[1].

지열에너지의 이용은 지중깊이에 따라 달라지는데 대략 10 ~ 20 °C를 이용하는 천부지열과 40 ~ 150 °C 이상의 심부지열을 이용하는 시스템으로 구분된다^[2]. 지금까지 한국의 원예시설에 보급된 것은 주로 천부지열을 이용하여 히트펌프 난방설비를 갖춘 시스템이다.

천부지열은 대부분 천공 깊이가 200 m 내외이며, 온실의 난방부하에 대응하는 지중 열교환 보어홀의 수량이 많아 넓은 부지가 확보되어야 하고, 다소 복잡한 히트펌프설비의 구축에 따른 비용과 유지관리가 요구되는 단점이 있다. 이에 비하여 심부지열은 보어홀 시공에 천공의 수직도 확보 및 대규모 장비투입 등에 따른 초기 시추비용이 많이 소요되지만 하나의 열교환기 보어홀에서 고온의 열을 취득하여 난방용으로 직접 이용할 수 있어, 소요 부지면적이 작으며, 히트펌프설비가 없어도 되는 장점을 가지고 있다. 또한, 저렴한 전기요금이 소요되며 편리한 유지관리가 가능하다.

본 연구에서는 심부지열의 수직밀폐형 보어홀 내부 열교환기에서 지열에너지를 효과적으로 취득하기 위해, 열교환기 관로 내부의 유속을 가변시키고

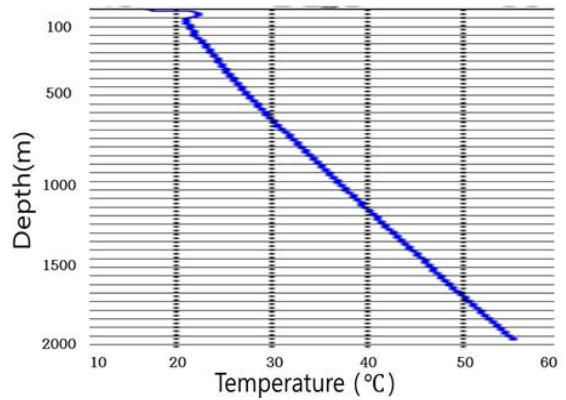


Fig. 1 Depth of ground and soil temperature

회수되는 물의 온도와 열량을 분석하였다. 이를 위해 지중깊이에 따른 지온 증가를 고려하여 열전도를 통한 출구온수 온도 관계식을 유도하고 시뮬레이션을 하였으며, 현장 측정실험을 통해 비교 분석하였다.

2. 이론 고찰

2.1 심도와 지온

한반도의 지중 20 m 심도지온 평균값은 Kringing 법의 산술평균을 이용할 때 14.1 °C이며^[3], 지역에 따라 다소 차이는 있지만 일반적으로 지중심도 3,000 m 에서는 44.2 ~ 110.9 °C로 조사되었다^[4].

Fig. 1에 나타난 바와 같이 전남 나주시 산포면에 위치한 실험현장의 지중 2,000 m 시추공에 대한 물리검층한 결과 시추 이수온도는 55.3 °C이었으며, 추정 증가율 고려온도를 15 °C로 하면, 지층온도는 70.3 °C로 추정해 볼 수 있다.

2.2 전열량 평형방정식과 심부지열 취득 열량

지층배관 외부의 온도가 일정하다고 가정하였을 때, Fig. 2와 같이 관속에 흐르는 물의 온수유동에 대한 전열량(q)의 평형방정식은 다음과 같다^[5].

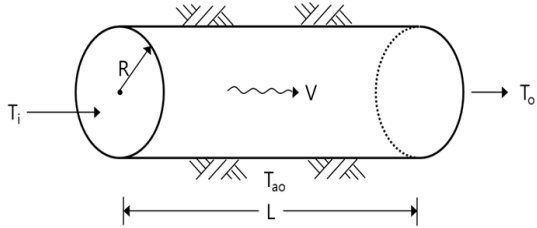


Fig. 2 Underground heat water pipe

$$q = U_t A \frac{(T_{ao} - T_i) - (T_{ao} - T_o)}{\ln[(T_{ao} - T_i)/(T_{ao} - T_o)]}$$

$$= \rho W C_p (T_o - T_i) \quad (1)$$

지중에 매설된 배관의 입구에 주입된 물은 관로 내부를 흐르는 동안 지온과 더불어 관의 형상, 열 전달 성능, 물의 이동속도 등에 영향을 받아 배관 출구로 나오는 물의 온도 달라지는데, 식(1)을 배관 출구온도를 중심으로 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_o = T_i + (T_{ao} - T_i) \cdot [1 - \exp(-\frac{U_t A}{\rho W C_p})]$$

$$= T_i + (T_{ao} - T_i) \cdot [1 - \exp(-\frac{U_t \cdot 2\pi R \cdot L}{\rho \cdot \pi R^2 \cdot V \cdot C_p})]$$

(2)

심부지열을 이용한 수직밀폐형 열교환기의 배관 내부에 흐르는 물은 땅속 깊이에 따라 점점 상승하는 지중온도의 영향을 받게 되므로, 임의의 깊이에서의 지중온도(T_{as})에 의해 관 내부의 임의의 지점에서 흐르는 물의 온도(T_{xn})는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{xn} = (1 - (1 - \exp(-\frac{U_t \cdot 2\pi R \cdot L}{\rho \cdot \pi R^2 \cdot V \cdot C_p}))^n) T_i$$

$$+ \sum_{s=1}^n (1 - \exp(-\frac{U_t \cdot 2\pi R \cdot L}{\rho \cdot \pi R^2 \cdot V \cdot C_p}))$$

$$\cdot (1 - (1 - \exp(-\frac{U_t \cdot 2\pi R \cdot L}{\rho \cdot \pi R^2 \cdot V \cdot C_p}))^{n-s}) T_{as} \quad (3)$$

여기에서, U_t 와 R_c , R_p , R_s 는 다음과 같다.

$$U_t = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_c + R_p + R_s} \quad (4)$$

$$R_c = \frac{1}{2\pi r_1 L h_c} \quad (5)$$

$$R_p = \frac{1}{2\pi L k_p} \ln \frac{r_1 + r_2}{r_1}$$

$$R_s = \frac{1}{2\pi L k_s} \ln \frac{r_1 + r_2 + r_3}{r_1 + r_2}$$

여기에서,

R_c : 파이프에서 유체 및 파이프 내면 사이에서 일어나는 대류 열전달에 대한 열 저항(°C/W)

R_p : 파이프 재질을 통해 일어나는 전도 열전달에 대한 열 저항(°C/W)

R_s : 파이프 외부와 토양에서 일어나는 전도 열 전달에 대한 열저항(°C/W)

r_1 : 파이프 내부 반지름(mm)

r_2 : 파이프 두께(mm)

r_3 : 파이프 외부표면과 토양사이의 거리(mm)

L : 파이프 길이(m)

h_c : 내관 표면에서의 대류 열전달 계수

k_s : 토양의 열전도율(W/m°C)

k_p : 파이프의 열전도율(W/m°C)

식(5)에 나타난 내관 표면에서의 대류 열전달계수 (h_c)는 레이놀즈수(Re_c)와 너셀수(Nu_c)를 이용하여 다음식에 의해 계산된다.

$$h_c = \frac{N_u k_w}{2r_1} \quad (6)$$

$$N_u = \frac{(f_w/2)(R_e - 1000)Pr}{1 + 12.7(f_w/2)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$$

$$f_w = (1.58 \ln Re - 3.28)^{-2}$$

k_w : 물의 열전도율(W/m°C)

R_e : 레이놀즈 수

Nu : 너셀 수

Pr : 프란틀 수

취득열량(q)은 지열로부터 물이 얻은 온도와 관을 통과한 물의 질량의 함수로서 일반식은 식 (2), (3), (6)으로부터 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} q &= C_p G \Delta T \\ &= C_p G (T_o - T_i) \quad [\text{kJ/h}] \end{aligned} \quad (7)$$

3. 심부지열 취득온도 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 방법과 조건

지하 2,000 m를 시추한 보어홀에 지중열교환기는 Fig. 3과 같이 Closed Co-Axial방식이다. 물이 보어홀에 주입되어 지중 맨 아래부분까지 내려가면서 지열을 흡수하고 온도가 올라가는 구간과 내부의 하부관(Inner Pipe)를 통하여 되돌아오는 구간에서 관외부 물의 온도차에 의하여 열을 빼앗기는 부분으로 나누어 MATLAB Program을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. Table 1에 시뮬레이션 매개변수를 나타내었다.

3.2 지중심도 2000 m 열교환 온수온도

시추공 보어홀에 공급수의 온도를 각각 15 °C, 25 °C, 35 °C로 하여 주입하고 유속을 0 ~ 10 %로 가변하면서 지중심도 2000 m에 이르렀을 때 지열과 열교환을 마친 물의 온도를 시뮬레이션하여 Fig.

4에 나타내었다.

여기에서 보어홀 내부의 지중과 열교환하는 구간에서 유속(V)이 0.11 %와 0.21 %일 때 공급수 온도 차이에 따른 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다. 유속이 0.11 %일 때 지중심도가 2000 m에 이르렀을 때 물의 온도는 65 °C가 되며, 0.21 %로 증가하게 되면 59 °C 내외로 나타났다.

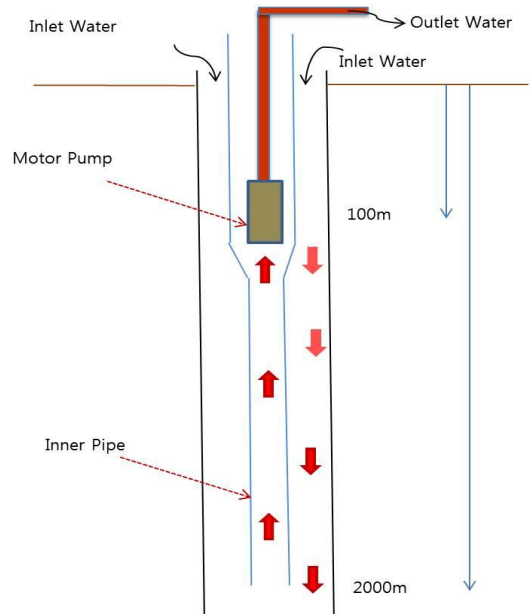


Fig. 3 Closed co-axial type borehole

Table 1 Simulation parameters

| Item | Description |
|-------------------|--|
| T_{ao} [°C] | 17 ~ 70 |
| T_i [°C] | 15, 25, 35 |
| V [%s] | 0 ~ 10 |
| R [mm] | Borehole : 107.95 Inner Pipe : 30(t15) |
| ρ [kg/m³] | 1,000 |
| C_p [kJ/kg · k] | 4,184 |
| k [w/m°C] | Borehole(granite) : 2.9 Inner Pipe(HDPE) : 0.37 |
| L [m] | 2,000 |

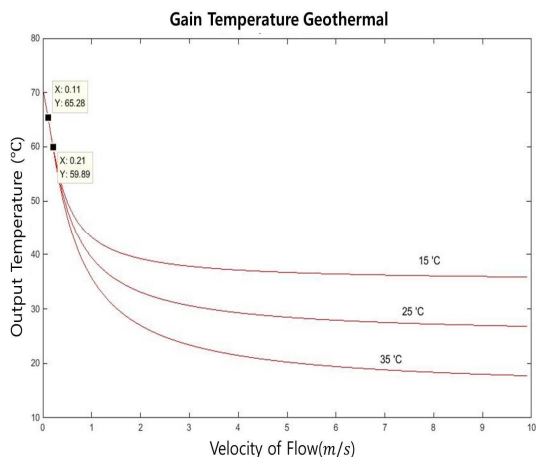


Fig. 4 Temperature and velocity at depth 2000m

Table 2 Water temperature of vicinity

| Input Water Temperature [°C] | V (Flow Velocity) [m/s] | Water Temperature at 2000m [°C] |
|------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 15 | 0.11 | 65.28 |
| | 0.21 | 59.70 |
| 25 | 0.11 | 65.28 |
| | 0.21 | 59.79 |
| 35 | 0.11 | 65.28 |
| | 0.21 | 59.89 |

유속 0.5 ㎎ 이상에서는 유속이 증가됨에 따라 공급되는 물의 온도에 의해 온도차가 커짐을 알 수 있다. Table 2 는 두 유속지점의 근처에서 지중심도 2000 m의 물의 온도를 나타낸 상세 데이터이다.

3.3 지중 열교환 후 지상 출구 환수온도

유속(V)이 0.11 ㎎로 지중심도 2000 m에 이르러 물이 65 °C가 된 후, 하부의 내부관을 통하여 지상으로 환수되었을 때 출구 온도를 산정하여 Fig. 5에 나타내었다. 이때 환수되는 구간의 유속은 내부관의 규격에 의해 산정되며 지열을 얻는 보어홀 구간에 비하여 유속이 빨라진다.

35 °C의 물이 보어홀 내에 공급되어 2000 m의

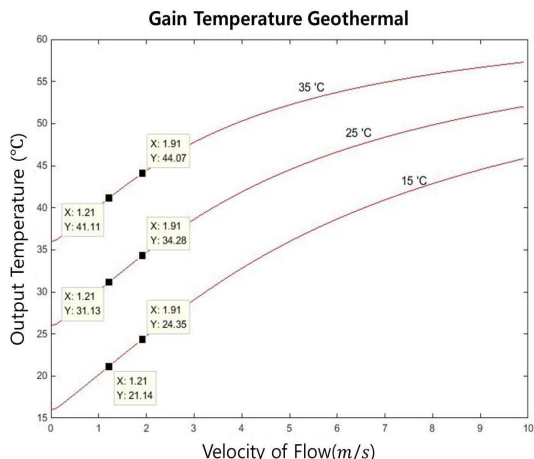


Fig. 5 Temperature and velocity of return at 65 °C

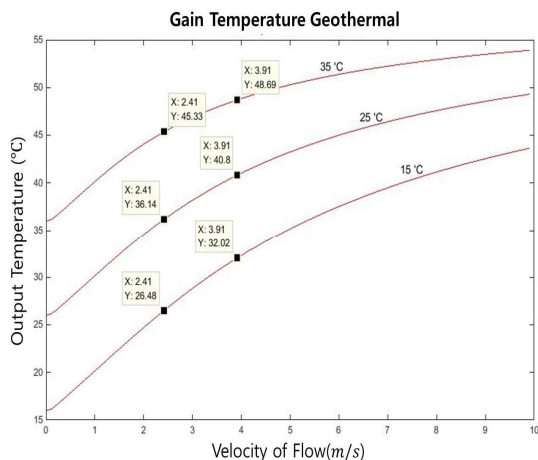


Fig. 6 Temperature and velocity of return at 59 °C

시추공을 0.11 ㎎로 지나면서 지열을 흡수하여 65 °C로 상승한 후 내부관을 통하여 1.21 ㎎로 지상으로 되돌아올 때 최종 물의 온도는 41 °C로 계산되었으며, 유속이 증가할수록 취득되는 온도는 높아지는 것을 알 수 있다.

공급되는 물의 온도가 25 °C, 15 °C로 낮아지면 최종 출구에서 얻어지는 온도도 낮아지는 것으로 나타났다.

보어홀 지중 열교환 구간의 유속을 0.21 ㎎로 하여 지중심도 2000 m에서 물이 59 °C로 되고 내부관을 2.41 ㎎의 유속으로 통과하여 지상으로 환수

되었을 때 취득된 물의 온도는 Fig. 6과 같이 45 °C로 나타났다.

또한, 공급되는 물의 온도를 각각 25 °C, 15 °C로 낮추었을 때 최종 취득온도도 비례하여 낮아지고, 유속을 증가를 증가시켰을 때는 온도가 높아지는 것을 알 수 있다.

지중 보어홀 열 교환 구간에서의 유속이 느린 경우 지하 2000 m에서의 물의 온도는 높지만 회수되어 돌아오는 구간에서의 열손실로 인하여 유속이 빠른 경우에 비하여 최종 취득되는 물의 온도가 낮음을 Fig. 5와 Fig. 6에 의해 알 수 있다.

4. 현장 측정 실험

4.1 실험장치 및 방법

현장실험은 전남농업기술원 내에 2000 m 깊이로 시추한 심부지열용 보어홀과 작물재배용 유리온실에서 진행하였다.

시추공 내부에 설치된 수중모터펌프는 지중과 열 교환하는 물을 끌어올려 지상의 열교환기와 연결된 관로를 통하여 순환시키는 역할을 수행한다. 온실은 지상 열교환기와 연결되어 온수를 공급받고, 온실 온도가 상승된다. 온실을 통과한 온도가 낮아진 물은 관로를 통하여 지상 열교환기로 순환된다.

배전반과 제어반의 인버터는 수중모터펌프에 전원공급과 더불어 주파수를 가변하고 회전속도를 변화시키며, 관로상의 유속을 증감 할 수 있게 한다. 관로에는 유량계와 온도센서를 부착하고, 컨트롤러를 통하여 데이터를 취득하였으며, 수중모터펌프의 소비전력은 전력분석기를 이용하여 측정하였다. 측정 시스템의 개략도를 Fig. 7에 나타내었다.

시추 보어홀 내부에 설치된 수중펌프 모터를 운전하여 지상 열교환기에 온수를 순환시키고, 이 열교환을 통하여 실험온실에 난방온수를 공급하여 가온하면서 장기간 각 부분 온도 및 유량을 측정하였다. 그리고, 지상 열교환기 전단에서 U-Turn 배관을 이용하여, 지중열교환으로 온도가 상승된 물을 바로 다시 지중으로 공급하며 각 지점의 온도를 측정하였다. Fig. 8에 실험장치의 사진을 나타내었으며, Table 3에 각 장치의 사양을 나타내었다.

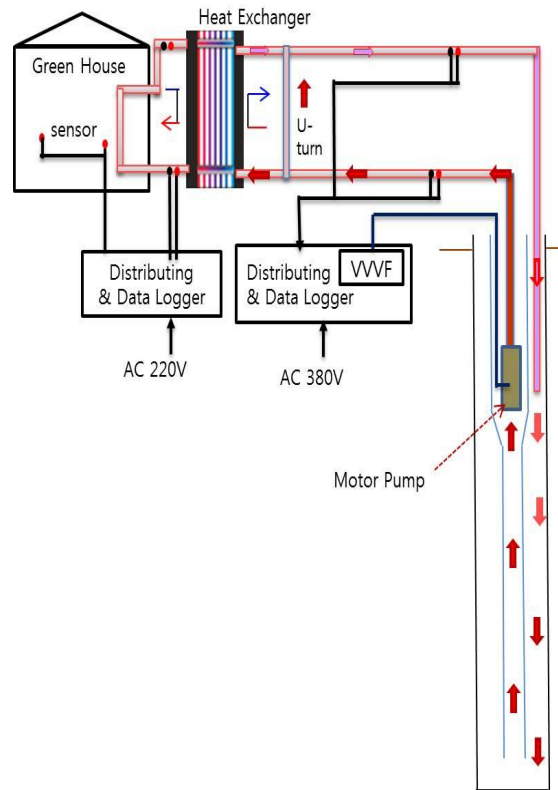


Fig. 7 Configuration diagram of measuring system

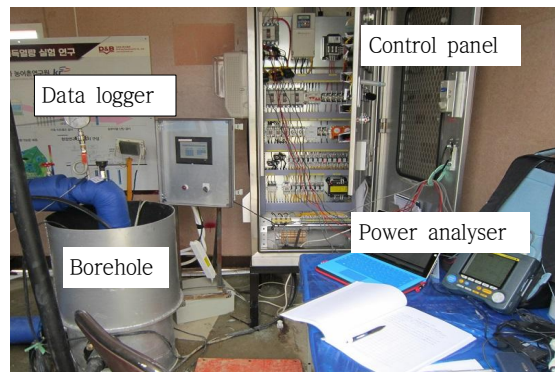


Fig. 8 Photograph of experimental apparatus

Table 3 Device specification

| Device | Description |
|-------------------------|--|
| Green house | Experimental group : 256 m ² |
| Submersible motor pump | 3phase 380V 7.5kW |
| Flowmeter | Pulse type 50mm |
| Temperature sensor | PT100, 3-wire system |
| Controller | AI, DI, AO, DO |
| Inverter | MOSCON-F500 |
| Electric power analyzer | YOKOGAWA CW240 |

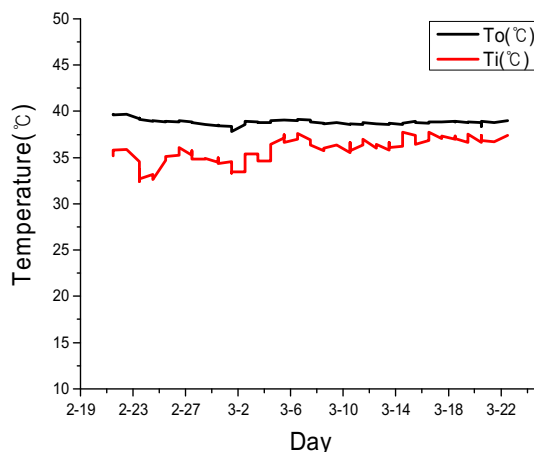


Fig. 9 Long term temperature variation

4.2 실험결과 및 고찰

4.2.1 실험 1

2월 22일부터 3월 23일까지 한 달 동안 보어홀의 수중모터를 지속적으로 가동하였다. 보어홀의 지중 열교환 구간에서 평균 유속 0.1157 %, 유량 12.6 m³/h로 심부지열을 취득한 온수를 지상 열교환기를 통하여 실험 온실에 난방에너지로 공급하였다. 실험 온실에 열을 제공하고 시추공 측에 공급되는 물의 온도와 지열을 취득하고 나오는 물의 온도를 측정하여 Fig. 9에 나타내었다.

실험온실 내부에 난방열을 공급하여 보어홀로 들어가는 물의 온도가 35 °C 이하로 유지되던 2월 23일부터 3월 2일까지 보어홀의 토출부로 나오는 심부지열 생산온도는 39.7 °C에서 점차로 낮아져 38.2 °C로 나타났다.

이후 실험온실 난방사용량이 줄어들면서 보어홀에 주입되는 수온이 36.7 °C 내외를 유지하면서, 지중에서 돌아오는 구간 열손실이 줄어들어 토출 수온은 38.8 °C 이상으로 상승하는 패턴을 보였다.

2월 26일 보어홀에 주입되는 수온이 35 °C 이상 상승했지만 토출되는 물의 온도는 경미하나마 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 보어홀에 주입되는 수온이 상승한 3월 6일부터 수온은 토출 수온은 38.8 °C로 상승하고 거의 일정한 온도를 유지하는

것으로 나타났다.

보어홀에 주입되는 물의 온도가 35 °C 이하에서 하강하는 경우 토출수온이 내려가고, 주입수온이 35 °C 이상에서 상승 또는 하강되는 변화에 대하여 토출수온이 일정한 패턴으로 나타났으며, 심부지열에서 열을 취득한 온수가 회수관로를 통하여 지상으로 돌아오면서 관로 주변의 공급수온의 영향을 받는 것으로 확인되었다.

보어홀 토출구와 주입구의 물 온도차 6.5 °C와 12.6 m³/h의 유량에서도 일정기간 토출 수온이 39 °C를 유지하였고, 이때의 취득열량은 81,900 kcal/h 이상이 되어, 동절기 실험온실의 필요열량이 25,721 kcal/h인 점을 감안할 때 가온하기에 충분하였다.

4.2.2 실험 2

보어홀에서 토출되는 물을 U-Turn 배관을 통하여 보어홀에 주입하면서 수중펌프 모터를 변속 운전하였다.

Case 1 : 수중모터펌프에 공급되는 전원 주파수를 60 Hz로 1시간 동안 운전하고, 보어홀 지중열교환 구간의 평균유속을 0.1323 %로 하였으며 이때 토출수온은 Fig. 10과 같이 점차 상승하다가 43.2 °C로 유지되었다.

수중모터펌프를 50 Hz로 운전하여 보어홀의 지중

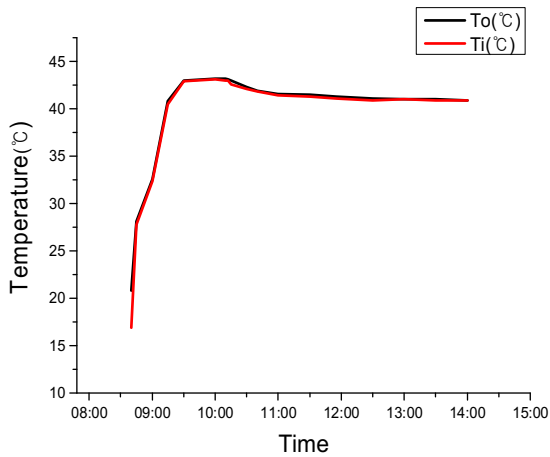


Fig. 10 Temperature variation at Case 1

열교환 구간의 평균유속을 0.1047 %로 약 20% 낮추었을 때, 28분 후 토출수온이 1.2 °C 낮아져 41.9 °C로 측정되었고, 이후 41 °C이하로 유지되었다. 수중모터펌프의 공급주파수를 50 Hz로 낮추었을 때 소비전력은 7.4 kW에서 4.7 kW로 감소하였다.

지중 열교환구간의 유속을 낮추었을 때 지열 흡수가 증가하여 수온이 높아질 수 있지만 회수되어 돌아오는 구간의 유속도 느려짐에 따라 이때의 열따라 지열을 손실 증가로 인하여 최종 출구에서의 취득온도가 낮아지는 것으로 보였다.

Case 2 : 수중모터펌프를 60 Hz로 2시간동안 운전하여 토출수온을 43.6 °C로 유지하였으며, 이때 보어홀 지중열교환 구간의 평균유속은 0.1378 %이었다. 수중모터펌프의 전원 주파수를 70 Hz로 변속하여 유속을 0.1543 %로 빠르게 하였을 때 토출수온의 측정된 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

70 Hz로 운전하여 토출수온이 1.2 °C 하락하여 42.3 °C로 측정된 시각은 실험시작으로부터 127분이 경과한 후이며, 이후 점차 감소하여 42 °C이하를 유지하였다. 전원공급 주파수를 70 Hz로 높였을 때 보어홀 지중열교환 구간의 평균유속은 0.1543 %로 약 12 % 빨라졌으며, 수중모터펌프의 소비전력은 7.4 kW에서 10.9 kW로 증가하였다.

지중 열교환구간의 유속이 빨라짐에 따라 취득하는 능률이 떨어져 수온이 낮아질 수 있지만, 돌아오는 구간의 유속도 빨라져 열손실이 줄어들어 취

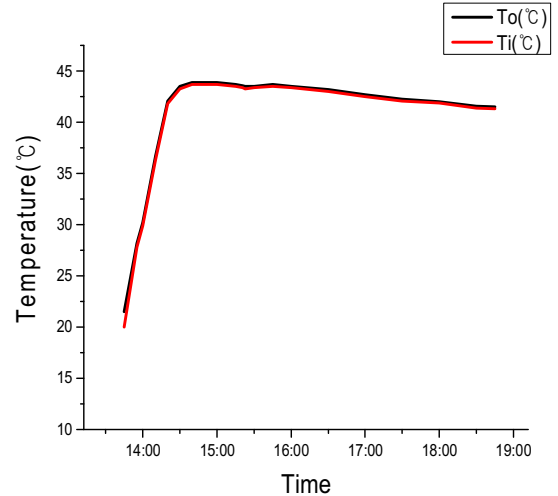


Fig. 11 Temperature variation at Case 2

득온도의 저감이 완만함을 알 수 있다.

시뮬레이션에서 유속이 빠를수록 최종 취득온도는 점점 증가했던 것에 비하여 실제 현장실험에서는 유속의 증가가 감소에 비하여 취득온도 하강이 느려지는 패턴은 보였으나 증가하지는 않았다. 이는 보어홀 내부로 지하수의 유입과 이로 인한 손실의 증가가 발생한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 지중심도가 깊어질수록 온도가 높아지는 지하 시추공을 심부지열 열교환기로 이용하였다. 보어홀에 물을 주입하여 지열과 열교환 후 출구로 회수되는 물의 온도를 산출하기 위한 관계식을 유도하고 시뮬레이션을 실시하였다. 시추심도 2000 m 보어홀에 대한 현장실험에서 장기 운전과 유속가변 등의 실증 실험연구를 통하여 이용 가능한 심부지열 온수온도와 취득열량을 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 나주지역 지중심도 2000 m에서의 이수온도는 55.4 °C 이었으며, 여기에 추정 증가온도 15 °C 고려한 지층온도를 통하여 시뮬레이션한 결과 지중열교환 구간 순환수의 유속에 따라 41 °C

~ 45 °C 정도의 환수되는 토출수온을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 또한 유속에 따른 지열의 취득과 지상으로 돌아오는 구간에서의 손실의 증감 등으로 인하여 빠른 유속이 최종적으로 높은 온도의 물을 얻을 수 있는 것으로 나타나 적정온도의 취득에는 유속 가변과 함께 회수관로의 단열이 매우 중요함을 알 수 있었다.

2. 60 Hz 장기간 현장실험에서 나타난 토출 수온은 38 °C ~ 39 °C로 시뮬레이션에서의 41 °C에 비하여 낮았는데, 이는 보어홀 중간에 지하수의 유입이나 회수관로에서의 열손실 증가 등의 요인으로 추정된다.
3. 현장실험에서 보어홀의 지중 열교환구간에서 유속을 높였을 때는 낮았을 때에 비하여 토출수온이 증가되거나 하강이 지연되는 것으로 나타나 유속 증가에 의한 회수구간에서의 열손실이 줄어드는 효과가 있는 것으로 나타났다. 다만, 시뮬레이션에서의 토출수온 증가 패턴과는 달라 보어홀 지중의 지하수 유입 등 다양한 온도저감 요인이 있음을 알 수 있었다.
4. 수중모터펌프의 전원공급 주파수를 16 % 낮추었을 때 유속은 20 % 감소하고 소비전력은 36 % 줄어들었다. 또한 주파수를 16 % 높였을 때 유속은 12 % 증가하고 소비전력은 47 % 늘어났다. 따라서 유속의 증감으로 취득온도와 함께 소비전력을 비교하여 종합효율을 향상시키는 방법을 제시하였다.
5. 실험기간 중 최대 81,900 kcal/h의 지열 열량을 얻어 실험온실 난방공급을 함으로서 히트펌프 시스템 설비 없이 순수한 지열 난방이용으로 가능함을 증명하였다.

후 기

“이 논문은 2014년 농림수산식품기술기획평가원 (iPET)의 지원에 의하여 수행되었습니다.(과제번호 : 314037-02-1-HD020)”

REFERENCES

1. Ryoo, Y. S., “A Study on the Loadsharing for Geothermal Heatpump System and Boiler in Horticultural Greenhouse,” Rural Research Institute, 11-D150769-000025-01, pp.8-13, 2012.
2. Kim, S. S., ‘A Study on the Heat Pump System by Using Geothermal Energy’, A Thesis for Master Degree, Gyeong Sang National University , Republic of Korea, 2010.
3. Thoe, B., Aspinwall, K. and Wise, H., “Review on Ultrasonic Machining,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 38, No. 4, pp. 239-255, 1998.
4. Kim, H. C., Lee, Y, M., ‘Heat flow in the Republic of KOREA’, Journal of Geophysical Research, Vol. 112, pp. 266. 2007.
5. Song, J. Y., "A Study on Control Characteristic and Thermal Environmental Analysis of Automatic Thermostatic Valves for Radiant Panel HEATING System in Residential Apartments", A Thesis for a Master Degree, Kyung Won University, 2006.
6. Jang, B. H., and Lee, K. H., “A Numerical Analysis for the Performance Improvement of a Channel Heat Exchanger,” Translation of International Standard Book, Vol. 978-1, pp. 158-162, 2012.
7. Lee, C. H., Kim, D. M., Yang, H. S., and Kim, S. H., “Design and Analysis of Cryogenic Turbo Expander for HTS Power Cable Refrigeration System,” Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 3, pp. 141-148, 2015.
8. Park, S., Kim, K. G., Kim, D. J., Park, H. Y., and Kwak, H. S., “Computational Thermo-Fluid Analysis for the Effects of Helium Injection Method on Glass Fiber Cooling Process in an Optical Fiber Manufacturing System,” Journal of The Korean Society of Manufacturing Process

- Engineers, Vol. 13, No. 2, pp. 124-130, 2014.
9. Chung, S. W., "Thermal Insulation Property due to Internal Air-layer Content of Warm Multi Layer Materials By using Numerical Analysis," Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 4, pp. 97-103, 2012.
 10. Chung, S. W., Kim, D. K., and Gong, S. H., "Development of Electrical and Oil Heater for Energy Saving," Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 5, pp. 38-43, 2011.