

지중열교환기의 지중열전도도 성능 분석

김 영 준, 최 재 상*, 강 용 태**

경희대학교 대학원 기계공학과, *가진기업(주), **경희대학교 기계·산업시스템공학부

Performance Analysis of Ground Thermal Conductivity by Ground Heat Exchanger

Young Jun Kim, Jae Sang Choi*, Yong Tae Kang**

Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yong In, Gyeong-gi 449-701, Korea

*Ka Jin Engineering Co., Ltd, Seoul 153-783, Korea

**School of Mechanical and Industrial Engineering, Kyung Hee University, Yong In, Gyeong-gi 449-701, Korea

ABSTRACT: The objectives of this paper are to estimate the ground thermal conductivity by ground heat exchangers in two different places - Chooncheon and Wonjoo, and to analyze the effect of ground thermal conductivity on the ground thermal diffusivity and the size of the ground heat exchanger. In Chooncheon area, a single-U type HDPE pipe (25mm diameter) with borehole diameter of 150mm, length of 150m is installed. In Wonjoo area, a single-U type HDPE pipe (40mm diameter) with borehole diameter 150mm, length of 200m is installed. It is found that the ground thermal conductivities are estimated as 2.69 W/m°C and 2.99 W/m°C in Chooncheon and Wonjoo, respectively. It is also found that the ground heat exchanger size is reduced by 8.6% with 25% increase of ground thermal conductivity, and increase by 11.8% with 25% decrease of ground thermal conductivity.

Key words: Ground heat exchanger(지중열교환기), Ground thermal conductivity(지중열전도도), Ground thermal diffusivity(지중열확산도)

기 호 설 명

- D : 시추공 직경 [mm]
- L : 시추공 길이 [m]
- m_{TR} : 시추공 열저항 [$m^{\circ}C/W$]
- T : 온도 [$^{\circ}C$]
- \dot{Q} : 단위 길이당 열량 [W/m]
- Q : 열량 [W]
- r : 직선열원으로부터 반경 [m]
- R : 시추공 반경 [m]
- k : 열전도도 [W/m°C]

- t : 시간 [s]
- α : 열확산도 [m^2/hr]
- β : 적분변수

1. 서 론

현재 고유가에 따른 에너지 절약 및 신·재생 에너지 개발에 관한 활발한 연구가 수행되고 있고, 그 결과로 관련기술 및 제품들이 개발·보급되고 있다.

신·재생에너지는 태양열, 태양광, 바이오, 풍력, 소수력, 지열, 연료전지 등 11개 분야로 구분이 되고, 화석연료 사용에 따른 CO₂ 발생이 없어 환경친화적 자원이라 할 수 있으며, 무제한 공급이 가능하고 재생이 가능한 에너지자원이다.

† Corresponding author
Tel.: +82-31-201-2990; fax: +82-31-201-2990
E-mail address: ytkang@khu.ac.kr

지열 열펌프시스템(Ground source heat pump)은 연중 일정하게 저장되는 지중열을 지중열교환기(Ground heat exchanger)를 이용하여 냉·난방 및 급탕에 적용하는 시스템이다. 냉난방 방식 중에서 가장 효율이 높고, 환경 친화적이며, 온실가스 배출절감 효과가 매우 높은 시스템이다⁽¹⁾.

지열 열펌프시스템은 열펌프 유닛과 지중열교환기로 구성이 되며, 지중열교환기 내를 열매체가 순환하면서 지중으로부터 열을 흡수하거나 방출하는 시스템이다. 지중열교환기는 전체 시스템의 성능과 설치비를 결정하는 가장 중요한 부분이며, 열매체를 이송하는 관으로 말단이 U자(U-bend) 모양으로 연결된 2개의 고밀도폴리에틸렌 파이프(High density polyethylene pipe), 파이프와 지반과의 열전달을 촉진하고 지하수의 오염을 방지하기 위해 시추공과 파이프 사이의 빈공간을 채우는 그라우트(Grout), 열매체로 사용되는 음용수기준의 물이나 부동액수용액 및 시추공 주변의 토양/암석이나 기타 물질이 지중열교환기의 중요 구성요소이다⁽¹⁾.

지중열교환기의 성능은 시추공의 열저항과 토양/암석의 열전도성에 따라 영향을 받는다. 지층의 종류, 함수비, 지하수의 이동 등을 정확하게 예측하지 않으면 경제적인 설계를 할 수 없으며, 지층의 상태에 따라 전혀 다른 성능을 얻게 된다. 수직형 지중열교환기를 설계할 경우 깊이에 따른 지층의 열물성치(열전도도, 열확산도 및 열용량)가 변하는데, 깊이에 따른 평균 열물성치를 구하여 설계를 하는 것이 가장 효과적이다⁽²⁻⁴⁾.

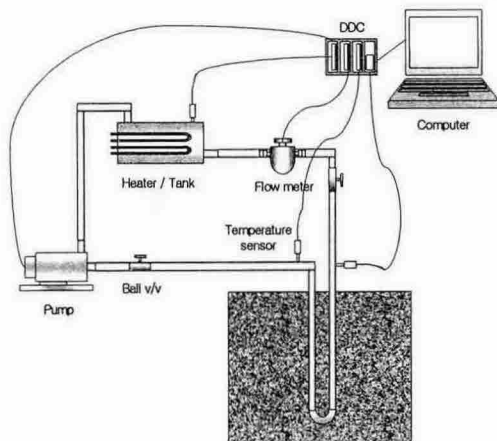


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental unit.

지중열전도도는 현장 열전도시험 (In-situ thermal conductivity test)을 수행하여 산정할 수 있으며, 현장에서 실제와 동일한 조건으로 시험공을 천공하여 지중열교환기를 매설하고 열전도시험을 수행하여 측정된 데이터를 라인소스모델(Line source model)에 적용하여 계산할 수 있다⁽²⁻³⁾. 라인소스모델은 최초 Load Kelvin에 의해 개발되었으며, Ingersoll 과 Plass(1948)⁽⁵⁾가 이론을 지중열교환기에 적용하였고, Mogensen⁽⁶⁾(1983)에 의해 지중열전도를 측정하는 모델로 더욱 발전되었다.

본 연구에서는 현장 열전도시험을 수행하고, 측정된 데이터를 라인소스이론을 적용하여 지중열전도도를 계산한다. 또한 지중열교환기 설계 프로그램을 사용하여 열전도도가 열확산도와 지중열교환기 설계에 미치는 영향을 분석한다.

2. 실험 장치 및 방법

지중열교환기의 열전도도 측정을 위한 전체 시스템의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 시스템은 열원장치, 순환장치, 계측장치로 구성되며, 열원장치는 지중열교환기에 일정한 열량을 주입하도록 전기히터와 탱크로 구성된다. 본 실험에 사용된 열원은 2개의 전기히터로 구성되어 있으며, 각각 2 kW의 발열량을 가진다. 순환장치는 열매체가 지중열교환기와 열원장치를 순환하면서 열을 전달할 수 있도록 순환펌프(CH2-30, Grundfos)와 배관으로 구성된다. 계측장치는 열매체의 유량 측정을 위해 터빈유량계(B110-750, Blancett)를 설치하였으며, 열매체의 순환 온도 측정을 위해 지중열교환기의 입·출구와 탱크에 온도센서(Pt 1000Ω)를 설치하였다. 또한 데이터 취득을 위해 제어판넬 내부에 DDC(Direct Digital Controller)를 설치하여 전기히터의 열량, 온도, 유량이 제어판넬에 표시되도록 구성하였으며, 전기히터의 보호를 위해 써모미터(Thermometer)를 설치하였다. 지중열교환기의 열전도도를 측정하기 위하여 춘천과 원주지역에 실제와 동일한 지열시스템의 설계깊이, 파이프재료 및 그라우트재를 사용하여 지중열교환기를 시공하였다.

실험장치는 시험공에 가까이 설치하고, 지중열교환기와 실험장치에 부착되는 배관은 보온을 하

Table 1 Parameters and Experimental errors

Parameters	Experimental errors
System temperature, T	±0.2°C
Power, P	±3.0%
Water flow rate, \dot{m}	±2.0%

여 온도의 손실을 최소화 하였다. 본 실험전 물을 순환시켜 지중열교환기 내에 존재하는 이물질이나 공기를 완전히 제거하였다. 순환유체가 정상상태가 되었을때 전기히터를 켜지 않은 상태에서 시추공의 초기온도를 측정하였으며, 펌프 모터에 의한 열주입을 방지하기 위하여 측정시간은 20분으로 하였다. 그 후에 전기히터를 가동하였고 온도, 소비전력, 유량등의 데이터를 10분 간격으로 측정한 후, 데이터 취득 시스템에 기록하여 성능분석을 하였다⁽²⁾.

실험에 사용된 온도센서는 동일한 온도를 측정할 수 있도록 정밀도 0.1°C의 표준온도계를 이용하여 보정하였다. 펌프에서 지중열교환기로 공급되는 유량을 정밀하게 측정하기 위해 비이커와 스톱워치, 전자저울을 이용하여 최소시간 60초로 측정하여 유량 공급시 유량계로 측정된 값과 비교하여 보정하였다. 실험에 사용된 온도, 전력량, 유량의 오차는 Table 1에 나타내었다.

3. 데이터 해석

지중열교환기의 열전도도는 지중열교환기로 열이 주입되거나 추출될 때 지중열교환기의 온도변화로부터 구해진다. 본 연구에서는 지중열교환기를 하나의 직선열원(Line source)으로 가정하여 지중열전도를 해석하는 라인소스모델을 적용하여 평가를 수행하였다. 라인소스모델은 식(1)로 표현되며, 주입열량이 일정한 직선열원으로부터 특정 시간 t 에서 임의의 반경 r 에서의 온도변화를 나타낸다⁽²⁻³⁾.

$$\Delta T(r, t) = \frac{\dot{Q}}{2\pi k} \int_{\frac{r}{2\pi k}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \quad (1)$$

여기서, ΔT 는 온도변화, r 은 직선열원으로부터 임의의 반경, t 는 측정시간, \dot{Q} 는 단위 길이당 열주입량, k 는 열전도도, β 는 적분변수이다. Mogensen⁽⁶⁾은 식(1)에서 적분식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\int_{\frac{r}{2\pi k}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \ln\left(\frac{4\alpha t}{R^2}\right) - C \quad (2)$$

여기서, α 는 열확산도, C 는 오일러상수(0.5772...)이다.

이때 지중열교환기의 순환유체와 시추공 벽면 사이의 열저항을 포함하는 식을 쓰면 다음과 같다.

$$\Delta T(R, t) = \dot{Q}m_{TR} + \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{R^2}\right) - C \right] \quad (3)$$

여기서, R 는 시추공 반경, m_{TR} 은 순환유체와 시추공 벽면사이의 열저항이다.

지중열전도도의 평가를 위한 최종 결과식은 아래와 같다.

$$\Delta T(R, t) = \dot{Q}m_{TR} + \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{R^2}\right) - C \right] + \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \ln(t) \quad (4)$$

식(4)에서 열주입량이 일정할 경우 우변에서 $\ln(t)$ 를 제외한 나머지 항은 모두 상수이므로 ΔT 와 $\ln(t)$ 사이의 선형관계식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \ln(t) + b \quad (5)$$

$$\dot{Q} = \frac{Q}{L} \quad (6)$$

$$k = \frac{Q}{4\pi L \times Slope} \quad (7)$$

여기서, b 는 상수, Q 는 지중열교환기에 주입된

열량, L 은 시추공 길이, $Slope$ 는 평균 온도의 시간변화에 따른 기울기를 나타낸다. 측정된 지중 열교환기의 입·출구 온도변화, 측정시간, 열주입량과 대수시간(Logarithmic time)에 대한 평균 온도변화 곡선의 기울기를 이용하여 식(7)로 열전도도를 계산한다.

4. 실험 결과 및 고찰

지열 열펌프시스템 성능에 영향을 미치는 가장 중요한 요인은 지중열교환기의 열교환 능력이라고 할 수 있다. 지중열교환기가 지중으로부터 열을 흡수하거나 방출하는 과정은 지중열교환기 내를 순환하는 열매체와 지중의 온도차에 기인한다.

본 연구에서는 춘천지역(Case I)과 원주지역(Case II)으로 나누어 열전도 측정 실험을 수행하여 열전도도를 계산하였다.

Fig. 2는 춘천지역에 설치한 시추공 직경 150mm, 깊이 150m, Single-U type HDPE 파이프 25mm의 지중열교환기에 전기히터 2kW 열량을 사용하여 열전도 측정실험을 수행한 지중 열교환기의 입·출구 온도 변화와 라인소스 이론을 적용하기 위한 지중열교환기의 입·출구 평균 온도 변화를 나타낸다.

전기히터의 열량을 주입하기 전 지중의 초기온도는 16.6°C로 나타났다. 전기히터를 통해 열이 주입되면서 지중열교환기 입·출구의 온도는 10시간이 경과될 때 까지 급격히 상승을 한 후, 점

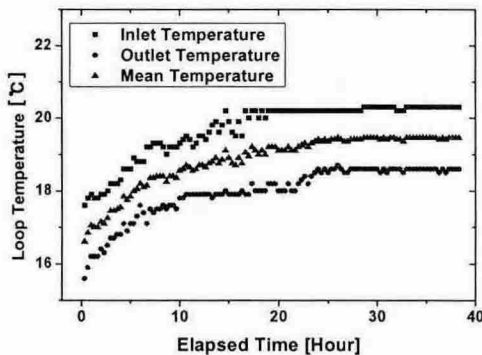


Fig. 2 Variation of inlet and outlet temperature of the GHEX by Chooncheon.

점 완만한 기울기를 유지하고 있다. 열전도도 측정 10시간에서 22시간 구간에서 오차가 상대적으로 크게 나타났지만 이후부터 안정적인 결과를 보이고 있다.

Fig. 3은 지중 열교환기 온도변화 곡선에 대하여 대수시간(Logarithmic time)에 대한 평균온도 변화 곡선을 나타낸다. 온도변화곡선에서 지중열교환기를 통해 순환유체와 지중에서의 열전달이 안정화되어 기울기가 일정해지는 22시간 이후부터의 측정값을 가지고 기울기를 구하였다. 식(5)와 (7)을 통해 기울기와 열전도도 값을 계산하였고, 이때 기울기는 0.605의 값을 가진다.

원주지역의 지중열교환기 입·출구 온도 변화와 평균온도를 Fig. 4에 나타내었다. 원주지역의 실험조건은 시추공 직경 150mm, 깊이 200m, Single-U type HDPE 파이프 40mm의 지중열교환기에 전기히터 4kW 열량을 사용하였다.

Fig. 4에서 지중의 초기온도는 16.2°C로 춘천지역과 동일한 경향을 보이고 있다. 측정 초기에는 온도가 급격히 상승한 후, 측정 4시간 이후부터 완만한 상승을 하고 있다. 측정 4시간에서 10시간의 구간 및 31시간 이후의 구간에서 오차가 발생했지만, 그 이외의 구간에서는 안정적인 결과를 나타내었다. 두 지역에서 공사용 전력을 공급받아 열전도 측정을 수행하던중 전력공급이 불안정하게 이루어져 열주입량의 변동으로 오차가 발생되었다.

열전도도(k)를 계산하기 위해 대수시간에 대한 평균온도 변화 곡선을 Fig. 5에 나타내었다.

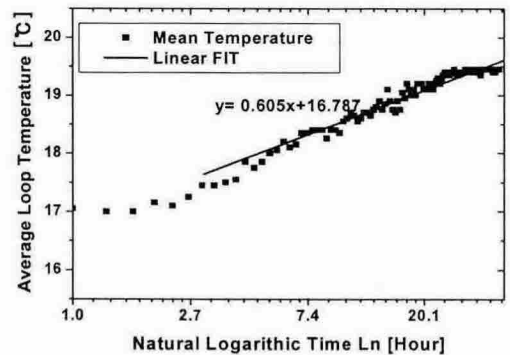


Fig. 3 Log time - temperature plot with equation.

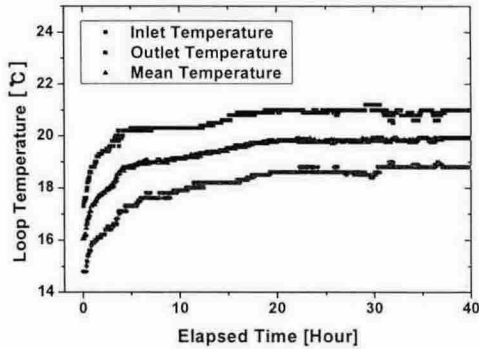


Fig. 4 Variation of inlet and outlet temperature of the GHEX by Wonjoo.

지중에서의 열전달이 안정화되어 기울기가 일정해지는 13시간에서 30시간 구간에서의 측정값을 가지고 기울기를 구하였다. 식(5)와 (7)을 통해 기울기와 열전도도 값을 계산하였고, 이때 기울기는 0.672의 값을 가진다.

춘천지역과 원주지역의 시험결과를 Table 2에 정리 하였다. 춘천지역(Case I)의 열전도도 $k=2.69[W/m^{\circ}C]$, 원주지역(Case II)의 열전도도 $k=2.99[W/m^{\circ}C]$ 로 평가되었다.

지중열교환기 설계프로그램(GLD, Ground loop design)을 이용하여 열전도도의 증감에 따른 열확산도와 지중열교환기 길이 관계를 Fig. 6과

Table 2 Experimental results

	Case I (Chooncheon area)	Case II (Wonjoo area)
Borehole dia. D	150[mm]	150[mm]
Borehole depth L	150[m]	200[m]
Grouting material	silica sand+bentonite	
Test duration, t	38hrs	48hrs
Injected heat rate, Q	2963[W]	5057[W]
Thermal conductivity k	2.69 [W/m $^{\circ}C$]	2.99 [W/m $^{\circ}C$]

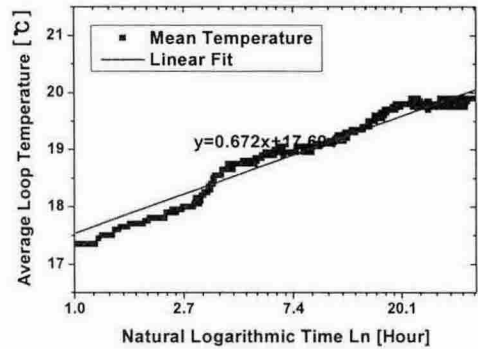


Fig. 5 Log time - temperature plot with equation.

Fig. 7에 각각 나타내었다. 열전도도는 식(5)와 (7)을 통해 계산된 값을 사용하였으며, 5%씩 증감을 통해 -25%에서 +25%의 범위내에서 비교하였다. 열확산도는 열전도도의 증감에 따라 선형적으로 변화한다.

Fig. 7에서 지중열교환기의 길이는 열전도도가 25% 감소하면 춘천과 원주지역에서 각각 13.7%, 11.8%의 증가를 나타낸다. 반면 열전도도가 25% 증가하게 되면 춘천과 원주지역에서 각각 10.2%, 8.64% 감소한다. 춘천지역 열전도도 $k=2.69[W/m^{\circ}C]$, 지중열교환기 길이는 152.7[m]이며, 10% 증가한 열전도값은 $k=2.96[W/m^{\circ}C]$, 지중열교환기의 길이는 145.8[m]로 약 4.5%의 감소를 나타낸다. 원주지역 열전도도 $k=2.99[W/m^{\circ}C]$, 지중열교환기 길이는 13,465.2[m]이며, 10% 증가한 열전도값은 $k=3.29[W/m^{\circ}C]$, 지중열교환기의 길이는 12,940.4[m]로 약 3.9%의 감소를 나타내었다. 이 결과는 Outside the Loop⁽⁷⁾에서 제시한 4.5%의 감소 값과 대략적으로 일치한다.

5. 결론

본 연구에서는 지중열교환기의 현장 열전도도 시험을 춘천과 원주지역에서 수행하고 측정된 데이터를 라인소스이론을 적용하여 지중열전도도를 계산하였다. 또한 지중열교환기 설계 프로그램을 사용하여 열전도도가 열확산도와 지중열교환기 설계에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결

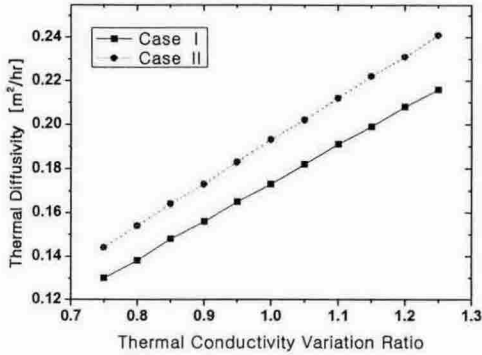


Fig. 6 Thermal Diffusivity vs Thermal Conductivity ratio.

과를 얻을 수 있었다.

(1) 춘천과 원주지역의 열전도도는 각각 $k=2.69[W/m^{\circ}C]$, $k=2.99[W/m^{\circ}C]$ 의 값으로 평가되었다.

(2) 열전도도의 증감에 따라 열확산도는 선형적인 비례관계를 가진다.

(3) 열전도도와 지중열교환기 길이는 열전도도가 10%증가함에 따라 춘천과 원주지역에서 각각 4.5%, 3.9%의 감소를 나타내었으며, 열전도도가 최대 25%감소하면 지중열교환기는 11.8% 증가하였으며, 열전도도가 최대 25%가 증가하면 지중열교환기 길이는 8.6% 감소한다.

본 연구는 두 지역에 대한 열전도도를 측정하여 열전도도가 열확산도와 지중열교환기 길이에 미치는 영향을 분석하였고, 더많은 지역에서 열전도도를 현장 측정하면 지열 열펌프시스템의 성능향상과 경제성 확보에 크게 기여할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. IGSHPA, 1988, Closed-loop/Ground-Source heat pump systems : Installation Guide, Oklahoma university.
2. Gehlin, S., 2002, Thermal response test - Method development and evaluation, Doctor thesis, Luleå University of Technology, Sweden.

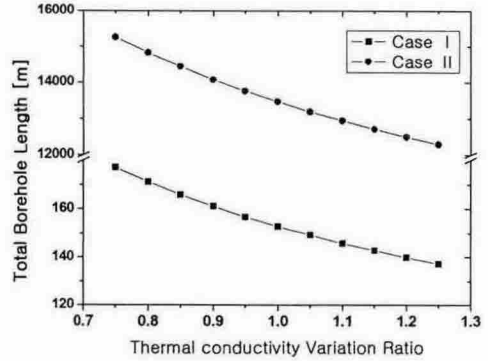


Fig. 7 Total Borehole Length vs Thermal Conductivity ratio.

3. Austin, W. A., 1998, Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties., Master of Science Thesis, Oklahoma State University, Stillwater.
4. Kavanaugh, P. and Rafferty, K., 1997, Ground-source heat pumps : Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings, ASHRAE.
5. Ingersoll, L. R. and Plass, H. J., 1948, Theory of the ground pipe heat source for the heat pump, ASHVE Transactions, Vol. 54, pp. 339-348.
6. Mogensen, P., 1983, Fluid duct wall heat transfer in duct system heat storage, Proceedings of International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice, Stockholm, Sweden, pp. 652-657.
7. A Newsletter for Geothermal Heat Pump Designers and Installers, Proceeding of the Outside the Loop ' Summer 1999, Vol 2.