

저심도 대구경 지중열교환기의 설치조건에 따른 성능 연구

유 규 상[†], 박 일 문, 최 재 호*, 신 현 준**

벽산건설, *코텍엔지니어링, **한국건설기술연구원

Performance Evaluation of Large Borehole Ground-Loop Heat Exchanger

Gyu Sang Yoo[†], Il Mun Park, Jae Ho Choi*, Hyun-Joon Shin**

ABSTRACT: A ground-loop heat exchanger for the ground source heat pump system is the core equipment determining the thermal performance and initial cost of the system. The size and performance of the heat exchanger is highly dependent on the ground thermal properties - the ground effective thermal conductivity, the borehole thermal resistance and the undisturbed ground temperature.

Nowadays, precast concrete piles using steel reinforced precast concrete piles - energy piles - are used to reduce the installing cost of the ground-loop heat exchanger.

We were carried out some tests to investigate the effects of some parameters such as borehole length, grouting materials and U-tube configuration of the energy piles. 4 concrete piles, each measuring 250mm~400mm in diameter and approx. 10m in length, and rigged with single spiral and 3 U-tube loop of 16mm X 2.3mm PB piping. The thermal response tests were conducted using a testing device for 4-different ground-loop heat exchangers.

During the heating period, the energy piles absorb the heat of 0.89kW to 1.37kW.

Key words: Ground-loop heat exchanger(지중열교환기), Ground effective thermal Conductivity (지중 유효 열전도도), Large Borehole Ground-Loop Heat Exchanger(대구경 지중 열교환기)

기 호 설 명

- $\Delta T(r,t)$: 시간에 따른 온도 변화 [°C]
- α : 열확산율 [m^2/s]
- Q : 보어홀에 투입한 열량 [W]
- k : 열전도도 [W/mK]
- L_b : 보어홀의 깊이 [m]
- m : 대수변환한 온도-시간 그래프의 기울기
- R_b : 총합 열저항 [°C/W]
- γ : 오일러 상수

1. 서 론

우리나라는 총에너지 사용량의 93%이상을 수입에 의존하고 있다. 그 동안 에너지의 해외의존도를 낮추기 위하여 신재생에너지의 보급 등과 같이 대체에너지자원의 확보를 위하여 다각적인 노력을 기울여 왔으며, 특히, 최근의 지구온난화 문제에 대한 전 세계적인 대응환경의 변화, 고유가와 고환율로 인한 국가경제의 지속적인 발전방안 모색 등은 신재생에너지의 중요성을 더욱 높이는 계기가 되었다.

이에 정부에서는 2030년까지 총 에너지 사용량의 11%를 신재생에너지로 대체하기 위한 목표를 설정하고 이를 달성하기 위해 노력하고 있으며,

[†] Corresponding author
 Tel.: +82-2-767-5332; fax: +82-2-767-5301
 E-mail address: gsyoo@becc.co.kr

이중 지열원 열펌프를 이용한 냉난방시스템(이하 “지열 냉난방시스템”)은 열원이 안정적이고, 투자 대비 에너지 이용효율이 높으며, 유지관리비가 저렴하여 그린홈 100만호 보급정책의 실현을 위하여 가장 중요한 대상으로 부각되고 있다.

지열 냉난방시스템은 에너지의 유효이용 측면에서는 가장 경쟁력이 있으나, 지중열교환기의 시공비로 인하여 기존 냉난방 시스템에 비해 2배 이상의 초기투자비가 소요되기 때문에 보급에 걸림돌로 작용하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 외국에서는 건축물의 기초파일을 열교환기로 이용하는 등 대구경 지중열교환기의 이용에 많은 관심을 가져왔으며, 국내에서도 이에 대해 다수의 연구실적을 가지고 있다.

본 연구에서는 기존의 선행기술 내용을 파악하고, 이들과 차별화된 구조를 도출하기 위하여 수

행한 저심도 대구경 지중열교환기의 설치조건에 따른 성능평가 결과를 제시하고자 한다.

2. 지중열교환기 설치조건

Fig. 1은 실험에 사용된 저심도 대구경 지중열교환기의 설치 단면도이다. 초기공사비를 절감시키기 위하여 건축물 기초공사용 파일(PHC)을 설치한 후 내부구멍을 이용하는 기존의 선행연구자들이 시도했던 방법과 PHC삽입용 홀을 천공하여 직접이용 하는 새로운 구조에 대해 검토하였다. CASE 1, CASE 2 및 CASE 3은 PHC파일의 내부 홀에 열교환기를 삽입하여 이용하는 경우이고, CASE 4는 PHC 파일 설치용으로 천공한 홀을 직접이용 하는 구조에 대한 것이다. 열교환기 재질은 신축성이 높은 Polybutylene을 사용하였

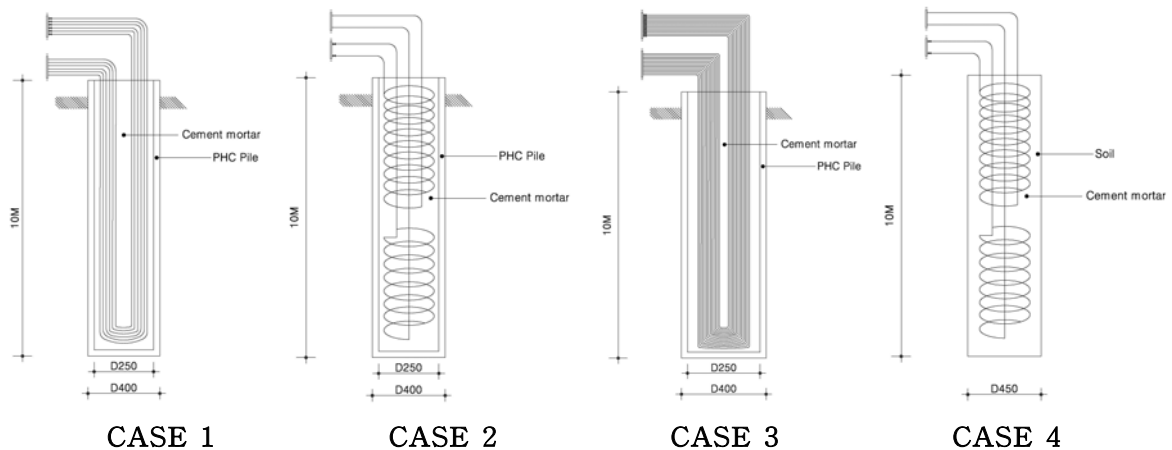


Fig. 1 Layout of Ground-loop Heat Exchanger Borehole

Table 1 Specifications of Testing Piles

		CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
Type		U-tube	Roll	U-tube	Roll
Diameter		16 mm	15 mm	16 mm	22 mm
Pipe Spec.	Line	20 m × 6 EA	100 m + 130 m	20 m × 15 EA	163 m + 132 m
	Length	120 m	230 m	300 m	295 m
	Depth	10 m	10 m	10 m	10 m
Hole condition		■ PHC pile - inside diameter : 250 mm - outside diameter : 400 mm			■ Ground - diameter : 400 mm
Grout		Cement mortal			
Pipe material		Polybutylene			

으며, 관의 연결은 전용 연결구를 사용하였다.

실험에 사용된 지중열교환기는 그림과 같이 U-tube 타입과 Roll 타입으로 구분되며, 시멘트 그라우팅을 수행하였다. 설치된 지중열교환기의 세부사항은 Table 1과 같다.

3. 지중 유효 열전도도 측정

3.1 지중 유효 열전도도 산정

지중 열전도도를 산정하는 방법에는 원통열원 모델(cylinder source model)과 선형열원 모델(line-source model)이 있다. 이 중에서 선형열원 모델이 원통열원모델보다 상대적으로 적용하기 쉽기 때문에, 현장에서 측정된 데이터를 이용하여 지중 열전도도를 산정할 때 주로 적용된다. 선형열원 모델은 Kelvin의 무한 선형열원 이론(infinite line-source theory)에 기초를 두고 있으며, 다음과 같다.^(3,4)

$$\Delta T(r,t) - T_i = \frac{Q}{4\pi kL} \int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du + \frac{QR_b}{L} \quad (1)$$

식(1)에서 R_b 는 순환유체, 파이프, 그라우팅 재료 등의 열저항이 모두 포함된 총합 열저항(overall thermal resistance)이다. 여기서 지수적분함수를 다음과 같이 근사식으로 표현할 수 있다.

$$\int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \approx -\gamma - \ln x_0 + Ax_0 - Bx_0^2 + Cx_0^3 - Dx_0^4 + Ex_0^5 \quad (2)$$

식(2)에서 A, B, C, D, E는 각각 0.99999193, 0.24991055, 0.05519968, 0.00976004, 0.00107857이며, γ 는 Euler 상수로서 0.5772다. 식(1)과 식(2)에서 적분변수 $x_0(r^2/4\alpha t)$ 가 매우 작기 때문에 식(2)를 식(3)과 같이 더 단순화할 수 있다. 다시 식(3)을 식(1)에 대입하여 정리하면 식(4)의 단순 선형열원 모델을 얻을 수 있다.

$$\int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \approx \ln \frac{1}{x_0} - \gamma \quad \text{for } \frac{\alpha t}{r^2} \geq 5 \quad (3)$$

$$\Delta T(r,t) - T_i \approx \quad (4)$$

$$\frac{Q}{4\pi kL} \ln \left(\frac{4\alpha t}{\gamma_1 r^2} \right) + \frac{QR_b}{L}, \quad \gamma_1 = 1.78$$

여기서 시간의 자연로그 값(ln t)에 대하여 온도 변화를 도시할 경우, 식(4)는 직선 형태를 보인다. 따라서 식(4)의 기울기, 평균 열 입력량, 보어홀 길이 등을 다음 식(5)에 대입하면 지중 유효 열전도도를 계산할 수 있다.

$$k = \frac{Q}{4\pi m L_b} \quad (5)$$

3.2 지중 유효 열전도도 측정 결과

지중열교환기의 설치조건 및 테스트 시간의 증가에 따른 지중 유효 열전도도 변화를 고찰하기 위해 시험용 지중열교환기를 시공한 후, 열응답 시험을 수행하였다. Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, 및 Fig. 5는 48시간동안 열응답시험을 수행하였을 때의 측정결과를 나타낸 그래프이며, Table 2는 이들의 실험결과를 정리한 것이다.

CASE 2와 같은 Roll 타입의 지중열교환기는 Roll 외부에 열전도도가 낮은(0.69 W/mk) 콘크리트로 구성된 PHC 파이프가 위치하며, 원형으로 구성되어 있기 때문에 중심부에 열이 축적되기 쉬워 PHC 파이프에 설치된 3종류의 열교환기 형태 중에서 유효 열전도도가 가장 낮은 값을 보였다.

CASE 1보다 U-tube 타입의 지중열교환기 파이프 삽입개수를 2.5배 증가시킨 CASE 3은 PHC 파이프 내벽에 위치하는 지중열교환기 파이프의 간격을 감소시켜 CASE 2와 유사한 양상을 보였다.

토양과 열교환기가 직접 접촉하도록 지중에 대구경 보어홀을 천공하고 Roll 타입의 지중열교환기 파이프를 삽입한 CASE 4는 PHC 파이프 내부에 지중열교환기 파이프를 설치한 경우보다 열응답 시험 시간의 증가에 따른 유효 열전도도 변화 폭이 가장 낮았다. 이는 PHC 파이프에 지중열교환기를 설치하는 것보다 지중이 안정적인 열전달 성능을 보여주고 있음을 뜻하는 것으로 해석된다. 하지만 모든 CASE에서 열응답 시험 시간 증가에 따른 지중 유효 열전도도는 열응답 시험 시간이 길어짐에 따라 지중에 축적되는 열이 많아

Table 2 Thermal Conductivities for the 4 Testing Conditions

CASE	Test period		48hr VS 78hr
	48hr (w/mk)	72hr (W/mk)	
1	3.37	3.14	6.8%
2	2.77	2.45	11.5%
3	3.28	2.88	12.1%
4	3.34	3.17	5.0%

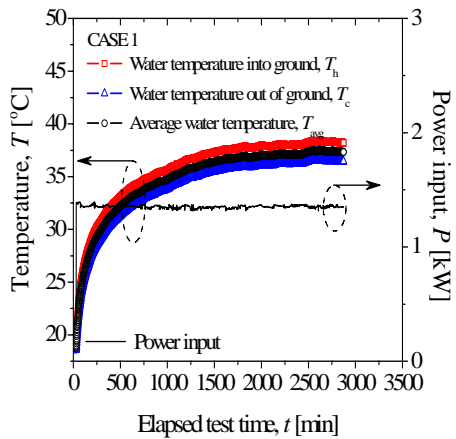


Fig. 2 Temperature Variations with Elapsed Test Time for CASE1

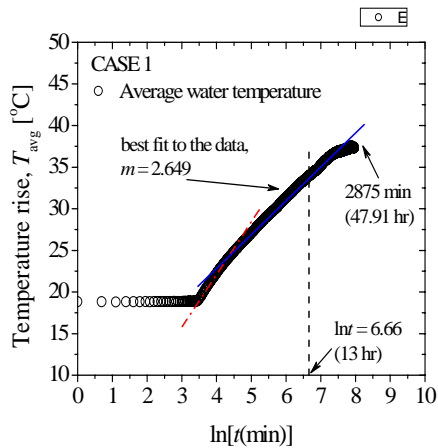


Fig. 3 Slope for CASE1

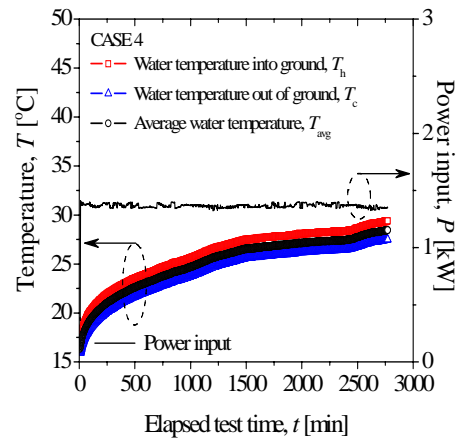


Fig. 4 Temperature Variations with Elapsed Test Time for CASE4

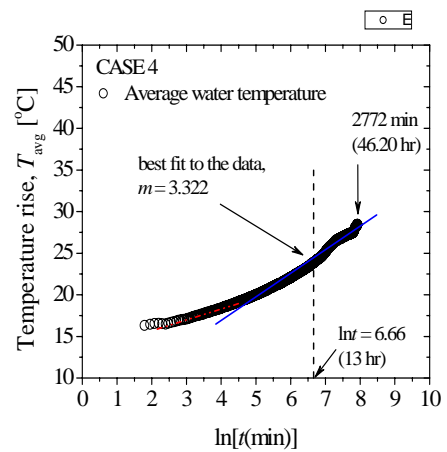


Fig. 5 Slope for CASE4

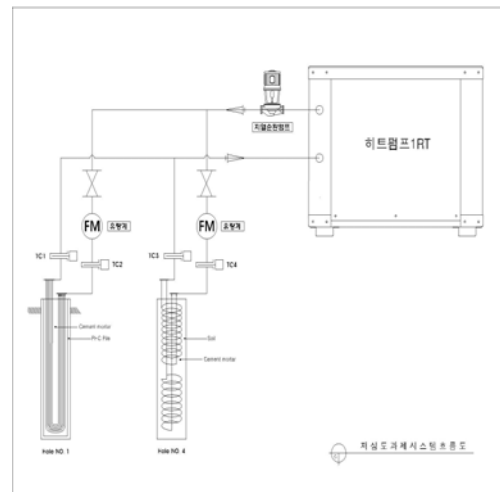


Fig. 6 Block Diagram of Experimental Apparatus for Field Test

저 감소하였다.

위와 같은 결과를 바탕으로 유효 열전도도가 비교적 높고, 장시간의 열응답 테스트에서도 안정적인 결과를 보인 CASE 1 과 CASE 4를 실증 테스트를 위한 현장시공 구조로 선정하였다.

4. 실증 테스트

4.1 실험조건

지중 유효 열전도도 측정은 결국 지중 열교환기를 설계하기 위한 조건을 산출하기 위한 것이다. 그러므로 실제로는 열응답 시험 시와 같이 지중열교환기에 48시간 이상의 연속적인 부하가 걸리지 않으며, 난방 시에는 지중열교환기에 냉수가 인입된다. 그러므로 지중열교환기에 실제로 적용되는 부하를 이용하여 실증 테스트를 수행하면 실제 지중열교환기의 거동을 확인할 수 있다. 이에 본 연구에서는 10시간의 평균 냉난방 시간 동안 지열히트펌프를 가동하여 지중열교환기의 성능을 확인하였다.

실증 테스트는 1 RT의 히트펌프에 CASE 1과

CASE 4의 지중열교환기를 연결하고 동일한 열량을 투입하기 위해 유량을 동일하게 고정하였다. 순환수는 물 80%, 에탄올 20%의 혼합비를 적용하였고, 지상에 노출된 배관 및 히트펌프의 열교환기는 두께 25mm의 고무발포 보온재를 이용하여 단열하였다. EWT, LWT, 외기온도, 유량 및 전력량은 10분 간격으로 측정하였다. 히트펌프는 10시간(08:00~ 18:00) 동안 1 RT의 난방부하를 감당하도록 운전하였다. Fig. 6은 실험장비의 구성도를 나타낸 것이다.

Fig. 7은 실증 테스트를 통하여 취득된 데이터를 나타낸다. CASE 1의 EWT는 실험 시작 후 최고 11.5°C이며, 히트펌프 가동 6일 후 7.0°C부근에서 안정된다. LWT는 실험 시작 후 최저 5°C이며, 히트펌프 가동 6일 후 -3.0°C부근에서 안정된 것으로 나타났다. 히트펌프가 정지된 시간(14시간)동안 약 9.7°C의 온도 복원력을 보였으며, 평균온도차는 2.0°C이다. CASE 4는 CASE 1과 유사한 양상을 보이며, 평균 3.2°C의 온도차를 보였다.

히트펌프가 난방운전을 할 때 지중열교환기를 순환하는 순환수는 지중의 열을 흡열하게 되며,

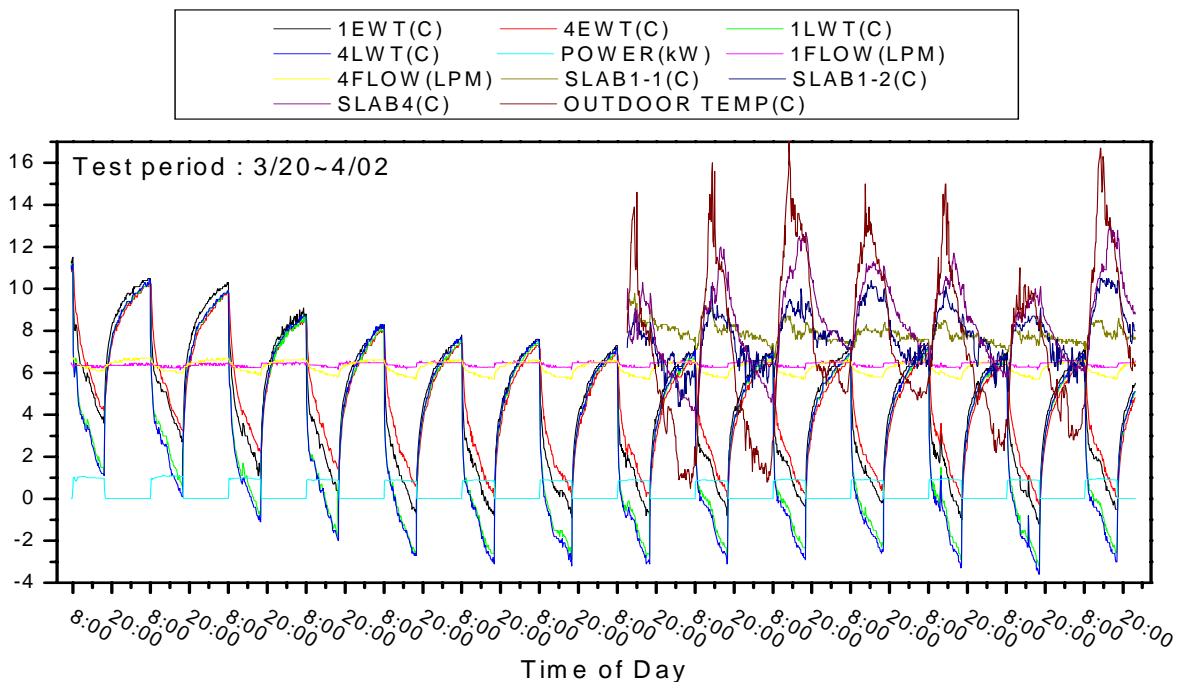


Fig. 7 Measured Data of Field Test

Table 3. Data Analysis of Field Test

	CASE 1	CASE 2
Average flow (LPM)	6.30	5.99
Surface area (m ²)	6.02	20.30
Velocity (m/s)	0.09	0.13
Re	778.38	1614.73
Stay time (min)	3.80	18.60
ΔT_{avg} (°C)	2.03	3.27
Average heat absorption (kW)	0.89	1.37
Average input power (kW)	0.91	
Average COP	3.48	

CASE 1과 CASE 4의 평균 흡열량은 각각 0.89, 1.37 kW를 보였다. 그러므로 CASE 1과 CASE 4의 총 흡열량은 2.26 kW이며, 히트펌프의 평균 투입전력이 0.91 kW이므로 히트펌프에서 방열(난방)되는 열량은 3.17 kW, 약 0.9 RT에 해당된다.

Table 3은 실증 테스트를 통하여 얻어진 데이터를 평균유량, 지중열교환기 파이프의 표면적, 순환수의 유속, Re, 순환수의 지중열교환기 체류시간, 평균온도차 등으로 정리한 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 저심도 대구경 지중열교환기의 열적 성능을 지중 유효 열전도도 및 실증시험을 통하여 고찰하였다. 이를 위해 설치조건이 다른 4종류의 저심도 대구경 지중열교환기를 시공하였으며, 동시에 일정한 부하를 가하여 열펌프를 운전하는 실증시험을 실시하였다. 본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) PHC 파일 내부에 U-tube 타입 지중열교환기 파이프의 삽입개수를 2.5배 증가하였을 때 지중 유효 열전도도는 48시간 열응답 시험 시 약

3%, 72시간 열응답 시험 시 약 9% 감소하였다.

(2) PHC 파일 내부에 U-tube 타입의 지중열교환기 파이프를 삽입하였을 때 Roll 타입 지중열교환기 파이프를 삽입한 경우보다 지중 유효 열전도도가 높았다.

(3) 토양과 열교환기가 직접접촉 하도록 지중에 Roll 타입의 지중열교환기 파이프를 삽입하였을 때 장시간의 열응답 시험에서도 5.0% 차이의 안정적인 지중 유효 열전도도 변화를 나타내었다.

(4) 히트펌프를 난방운전 하였을 때 순환수의 온도는 가동 6일후 -3.0°C 부근에서 안정되었다.

(5) CASE 1과 CASE 4의 평균온도차는 각각 2.0°C, 3.2°C를 나타내었다.

(6) 순환수의 평균 흡열량은 CASE 1과 CASE 4가 각각 0.89 kW, 1.37 kW를 나타내었다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단 신·재생에너지센터의 2007년 신·재생에너지기술개발사업(2007-N-GE02-P-03)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. IGSHPA, 2000, Grouting for Vertical Geothermal Heat Pump Systems: Engineering Design and Field Procedures Manual, International Ground Source Heat Pump Association, Stillwater, Oklahoma.
2. Lee, S. K., Woo, J. S., Ro, J. D. and Kim, D. K., 2006, A study on the estimation of soil formation thermal conductivities and borehole resistances with one-dimensional numerical model and in-situ field tests, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 18, No. 10, pp. 783-790.
3. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1947, Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Oxford University Press.
4. Ingersoll, L. R. and Plass, H. J., 1948, Theory of the ground pipe heat source for the heat pump, Heating, Piping & Air Conditioning, July, pp. 119-122.