

이층지반과 단일지반의 열전달 거동 특성 평가

윤 석, 박스칸, 박현구, 고규현, 이승래[†]
한국과학기술원 건설및환경공학과

Evaluation of Heat Transfer Characteristics in Double-Layered and Single-Layered Soils

Seok Yoon, Skan Park, Hyun-Ku Park, Gyu-Hyun Go, Seung-Rae Lee[†]
Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

Abstract

This paper presents how to analyze heat transfer characteristics of double-layered soils. Thermal response tests were conducted to measure the ground thermal conductivities of Joomunjin sand and double layered soils filled in a steel box of which the size is 5m x 1m x 1m. Double-layered soils were composed of Joomunjin sand and Kaoline clay. Each thermal conductivity of Joomunjin sand and Kaloine clay was measured by using Heat Flow Meter considering different void ratio. The ground thermal conductivity of double-layered soils was 15% smaller than that of Joomunjin sand.

Key words : Thermal conductivity(열전도도), Heat transfer(열전달), Thermal response test(열응답 시험), Double-layered soil(이층지반)

기 호 설 명

- A : 단면적, [m²]
- c : 비열, [J/kg·°C]
- L : 지중열교환기 길이, [m]
- Q : 열전달량, [W]
- r : 반경 또는 반경방향으로의 거리, [m]
- T : 온도, [°C]
- t : 시간, [s]

- ρ : 밀도, [kg/m³]
- α : 열확산계수(= $\lambda/\rho c$), [m²/s]

하 첨 자

- b : 보어홀

1. 서 론

최근 들어 지구온난화, 화석에너지의 고갈로 인하여 에너지를 저장할 수 있는 신재생에너지원의 필요성이 날이 증대되고 있다. 지열 냉난방 시스템은 비교적 일정한 온도를 유지하는 지중을 열원으로 이용하며 지중열교환기를 이용하여 여름철에는 열에너지를 방출하고 겨울철에는 열에너지를 흡수하는 시스템이다. 지열 냉난방 시스템은 이산화탄소 발생 저감 및 에너지 절약형 기술

그리스 문자

- λ : 열전도도, [W/mK]

[†] Corresponding author
Tel: +82-42-350-3617, Fax: +82-42-350-3610
E-mail: srlee@kaist.ac.kr
접수일 : 2011년 10월 14일
심사일 : 2011년 10월 14일
채택일 : 2011년 11월 21일

로써 국내 어디서나 이용할 수 있는 유니쿼터스(ubiquitous) 에너지이고 안전하고 효율적인 청정 신재생에너지이다. 또한 최근 들어서는 수직 밀폐형 지중열교환기의 단점을 보완하기 위하여 에너지 파일형으로 불리는 새로운 타입의 지중열교환기가 적용되어지고 있는데 이는 구조물의 기초 말뚝에 지중열교환기를 매입한 형태로써 초기 투자비가 저렴하며 건축 공정상 별도의 공사기간이 필요 없는 등 1990년대 이후 유럽의 오스트리아, 독일, 일본 등에서 활발히 연구되고 시공되어지고 있다.

이와 같이 지중열교환기 시스템의 대중화로 인하여 가장 중요한 특성인 지반의 열전도도의 측정방법에 대해 많은 해석 방법들이 연구되어지고 있다. 그 중에서 설계에 널리 적용되고 있는 선형 열원 모델, 원통형 열원 모델 등의 이론해 대부분은 균질한 물성을 갖는 지반에서 전도(conduction)에 의한 열 흐름을 고려하고 있다. 그러나 실제 지반은 불균질한 지층으로 구성되어져 있으며 지하수 흐름 등의 복잡한 지반 거동 특성은 지중열교환기의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다(Preene & Powrie^[7]). 대부분의 지중열교환기는 각기 다른 열 특성을 갖는 다층(multi-layer)으로 구성된 지반에 설치되기 때문에 위에서 언급한 이론해를 직접적으로 적용하는 것은 적합하지 않다. 위와 같은 이론해를 적용하기 위해서는 지중열교환기가 설치된 깊이까지의 지반의 열특성을 나타낼 수 있는 등가의 대표 열전도도 측정이 요구되며, 이때 열응답 시험(thermal response test)을 수행하게 된다. 열응답 시험은 이론해가 가정하는 지중열교환기에서의 등열 유속 조건(constant heat flux condition)하에서 시험을 수행하며 이로부터 얻어지는 지중열교환기의 입출구 온도의 평균값 - 시간 그래프를 구한 후 선형 열원 모델을 이용하여 지반의 열전도도를 측정하는 시험 방법이다.

본 연구에서는 단일지반과 이층지반의 열전달 거동 특성을 분석하기 위하여 5m x 1m x 1m 크기의 모형 토조 내에 지반을 조성하였다. 코일형 지중열교환기가 설치된 단일지반과 이층지반에서 실내 열응답 시험을 수행하고 열전달 거동 특성을 살펴보았다. 실험에 앞서 주문진 표준사, 카울

린 점토에 대하여 Heat Flow Meter 방법을 이용하여 각각의 열전도도를 측정하였다. 그리고 실내 모형 토조 내에 주문진 표준사로만 구성된 단일지반과 카울린 점토와 주문진 모래로 구성된 이층지반을 조성하여 열응답 시험을 수행한 후 열전달 거동 특성을 상호 비교하였다.

2. 지중열교환기의 열전달 메커니즘

지중열교환기의 열전달 메커니즘은 열전달 유체가 보어홀 내의 파이프 내를 이동하면서 그라우트 재료와 주변의 지반으로 열을 흡수 또는 방출하는 과정이다. 지중열교환기와 주변 지반으로의 열전달 거동은 복잡하고 복잡한 메커니즘이 필요하지만 일반적으로 지반으로의 열전달은 전도에 의해 이루어진다(Brandl^[2]). 지반에서의 전도에 의한 열전달 지배 방정식은 다음과 같다.

$$-\frac{d}{di}(\lambda \frac{dT}{di}) + \rho c \frac{dT}{dt} + q_i = 0 \quad (i = x, y, z) \quad (1)$$

이러한 열전달 방정식의 해를 구하는 방법은 선형 열원 모델(line source model), 원통형 열원 모델(cylindrical source model) 그리고 수치해석 모델 등이 있으며 이 중 선형 열원 모델과 원통형 열원 모델이 비교적 많이 사용되고 있다. 우선 선형 열원 모델은 지중열교환기를 무한히 긴 열원으로 가정한다. 즉, 무한히 길고 열유속이 일정한 선형 열원이 초기온도 T_0 의 균일한 무한 매질속에 매설되어 있는 경우 다음의 해가 성립한다.

$$T(r, t) - T_0 = \frac{Q/L}{4\pi\lambda} \int_{r^2}^{\infty} \frac{e^{-u} du}{u} \quad (2)$$

식 (2)는 무한히 긴 선형 열원에 적용되는 완전해이지만 열응답 시험 수행 시간을 충분히 길게 하여 파이프나 그라우트의 열저항을 무시할 수 있게 되면, 다음과 같이 단순화시킬 수 있다고 Mogensen^[6]은 제안하였다.

$$\int_{r_b^2}^{\infty} \frac{e^{-u} du}{u} \approx \ln \frac{1}{r_b^2} - 0.5772 \quad \text{for } \frac{\alpha t}{r_b^2} \geq 5 \quad (3)$$

$$\Delta T(r,t) = \frac{Q}{4\pi\lambda L} [\ln t - 0.5772] \quad (4)$$

식 (3)으로 표현되는 근사해는 $\alpha t/r_b^2 \geq 5$ 의 조건으로부터 적용 가능한 시험 시간 기준을 삼을 수 있다. 또한 원통형 열원 모델은 Carslaw와 Jaeger[3]에 의해 개발되었으며 Ingersoll[4] 등에 의해 확장 변화되었다. 열교환 방식이 선형 열원이 아닌 실린더 열원을 사용한 것으로 해는 다음과 같다.

$$T(\tilde{r}, \tilde{t}) - T_o = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty (e^{-\beta^2 \tilde{t}} - 1) \frac{J_0(\beta \tilde{r}) Y_1(\beta) - Y_0(\beta \tilde{r}) J_1(\beta)}{\beta^2 (J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta))} d\beta \quad (5)$$

$\tilde{r} = r/r_b$, $\tilde{t} = \alpha t/r_b^2$ 이며 J 와 Y 는 각각 Bessel 함수이다. 위의 두 모델은 열원의 직경에 비하여 길이가 무한히 긴 수직밀폐형 지중열교환기 타입의 지중 열전도도를 구하는 데에는 비교적 무난하게 사용될 수 있지만 코일형 지중열교환기를 사용한 에너지파일에는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다(Man et al^[5]).

3. 실험 원리 및 방법

3.1 Heat Flow Meter를 이용한 열전도도 측정

불교란 시료를 이용해 지반의 열전도도를 측정하는 실내 실험 방법은 크게 정상 상태법(steady state method)과 비정상 상태법(transient method)이 있다. 정상 상태법은 채취된 시료를 실험실에서 열을 가하여 정상 상태 온도 경사를 이루게 하고 가한 열량을 측정하여 Fourier의 열전도 방정식에 의하여 열전도도를 구하는 방식이다. 이 방법은 주로 낮은 열전도도를 갖는 고체 단열재의 열전도도 측정에 사용되며 정상 상태 온도 경사가 이루어질 때까지 많은 시간이 소요된다. 비정상 상태법은 선형 열원 이론에 기반한 탐침법이 가장 많이 사용된다. 탐침법은 탐침을 시료에 넣고 가열하면 시료의 열전도도에 따라 탐침의

온도 증가가 달라지는 성질을 이용한 방식으로서 빠른 시간 내에 열전도도의 측정이 가능하다는 장점이 있다(Al-Ajlan^[1]).

본 연구에서는 정상 상태법의 한 종류인 HFM (Heat Flow Meter) 방법을 이용하여 흙의 열전도도를 측정하였다. 시료는 hot plate와 cold plate 사이에 위치하며 열은 시료를 통해 heat flux transducer로 전달되고 그 열이 voltage로 변화하게 된다. 정상 상태에서의 voltage를 이용하여 열전도도를 추정한다(Fig. 1). 일련의 과정이 끝나게 되면 다음 단계의 온도로 다시 가열되어 다른 온도에서의 열전도도를 계속해서 측정한다. 전도에 의해서 일어나는 단위 시간당 열전달량 즉 열류(heat flow)는 시료 표면 양면간의 온도차(ΔT)와 단면적(A)에 비례하고 두께(t)에 반비례한다.

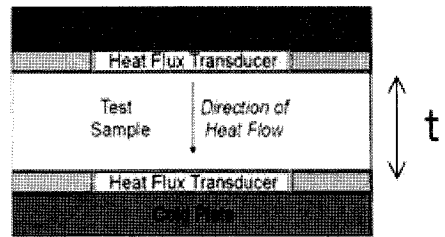


Fig. 1 Diagram of HFM method.


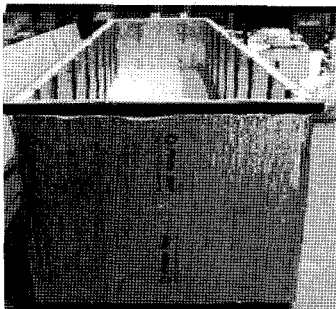
3.2 모형 토조 열응답 시험

본 연구에서는 5m x 1m x 1m의 모형 토조에 단일 및 이층지반을 조성하여 열응답 시험을 수행하였다. 모형 토조는 열원 코일형 철판 5mm의 두께로 제작하였으며 10mm의 폴리에틸렌폼으로 토조 내부, 외부 및 바닥에 이중으로 단열처리하였다. 또한 보다 확실한 단열을 위하여 토조 및 열응답 시험기의 외부를 천막으로 두른 후 원적외선 히터를 가동하여 천막 내 온도가 일정하게 유지될 수 있도록 하였다. 본 실험에는 광섬유 기반 열응답 시험기가 사용되었으며 본 시험기는 RTD 센서 외에 광섬유 온도 센서(Yoon & Lee, [8])도 실시간적으로 측정할 수 있는 시스템으로 구성되어 있다. 열응답 시험기의 제원 및 사진은 Table 1과 같다. 지중열교환기는 모형 토조 크기

의 한계로 인하여 U자형 교환기가 아닌 지반과의 열접촉 면적이 넓은 PB(PolyButylene)재질의 코일형 열교환기가 사용되었다. Fig. 2의 (a)~(f)는 주요 실험과정을 나타낸다. 모형 토조내에 조성된 코일형의 지중열교환기에는 800W의 열량을 가진 순환수를 난류(turbulent) 조건으로 흐르게 하여 시료에 공급하였다. 단일지반의 경우 초기온도는 9.7°C로 설정하였고 이층지반의 경우 초기온도는 13°C로 설정하였다. 단일지반의 실험을 먼저 수행한 후 일정 시간이 지나 온도를 식힌 후에 이층지반에 대한 실험을 수행하였기에 온도를 동일하게 맞추기에는 한계가 있었다.

Table 1. Thermal response test equipments

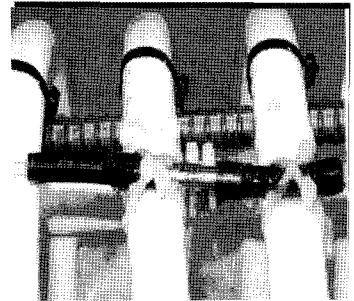
Item	Properties
Heater	Capacity 10kW
Water Tank	50L (SUS 304)
Flow meter	2~120 lpm
Pump	40 lpm, 50m head
Sensor	RTD, FBG
Recorder	4ch interrogator

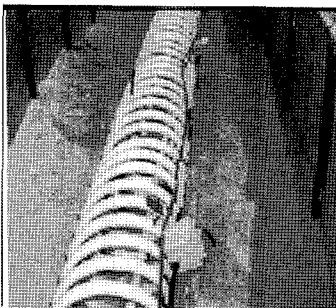
(a) Installation of steel box



(b) Preparation of specimens



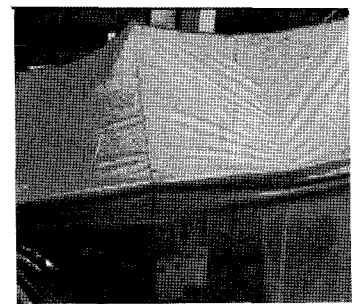
(c) Attachment of sensors



(d) Installation of pipe



(e) Connection to TRT equipment



(f) Completion of preparation

Fig. 2 Procedure of thermal response test.

본 연구에서는 주문진 표준사로만 이루어진 단일지반과 주문진 표준사와 카울린 점토로 구성된 이층지반을 구성하였다. 주문진 표준사로만 조성된 단일지반의 물리적 특성은 Table 2와 같으며 토조 내 시료는 완전 건조 상태로 건조단위중량(γ_d) 13.97 kN/m³에 맞추어 조성되었다. 또한 이

층지반은 완전 건조된 주문진 표준사와 카울린 점토를 이용하여 토조 내 지중열교환기 길이 방향으로 각각 2.5m 두께로 구성되었으며, 시료 조성 시 분산체를 사용하여 토조 내에 비교적 균질하게 조성하였다. Table 3은 토조 내 조성된 카울린 점토와 주문진 표준사의 물리적 특성을 나타

낸다. 온도센서는 지중열교환기의 입출구 부위와 지반별 열전달 거동을 파악하기 위하여 Fig. 3과 같이 토조 내 지중열교환기로부터 각각 일정한 거리에 설치되었다.

Table 2. Properties of Joomunjin sand

Properties	Value
Uniformity Coefficient, c_u	2.06
Curvature Coefficient, c_c	1.05
Specific Gravity, G_s	2.65
Maximum Dry Density, γ_{dmax} (kN/m ³)	16.17
Minimum Dry Density, γ_{dmin} (kN/m ³)	13.49
Water Content, w (%)	0

Table 3. Properties of double-layered soils

Soil	Water content (%)	Dry density (kN/m ³)	Void ratio	Specific Gravity
Kaoline	0.01	10.15	1.56	2.60
Joomunjin	0.00	13.60	0.91	2.65

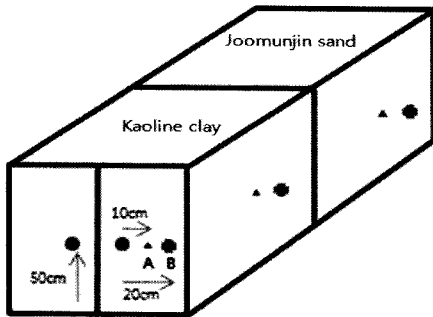


Fig. 3 Location of sensors.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 HFM 실험 결과

HFM 방법을 통해 실내 열응답 시험에 사용될 주문진 표준사와 카올린 점토의 건조단위중량에 따른 열전도도 실험을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같다. 주문진 표준사의 건조단위중량을

13.5~16.2 kN/m³에 맞추어 각각의 단위중량에 따라 열전도도를 산출하였으며 그 결과는 0.25~0.28 W/mK의 값이 도출되었다. 한편 카올린 점토는 건조단위중량 5.8~10.0 kN/m³ 구간에서 0.10~0.13 W/mK 크기의 열전도도가 측정되었다. HFM 실험결과 주문진 표준사가 카올린 점토층에 비해 2배 이상의 열전도도를 갖는 것으로 추정할 수 있다.

4.2 모형 토조 열응답 시험 결과

Fig. 5의 (a)와 (b)는 단일지반과 이층지반에서의 각각 시간에 따른 지중열교환기의 입출구 온도의 평균값의 변화를 보여주고 있다. 단일지반의 경우 입출구 온도 초기온도는 9.7°C에서 시작하여 59°C가 될 때까지 약 44시간동안 실험이 수행되었으며 이층지반의 경우 입출구 초기온도는 13°C에서 시작하여 62°C가 될 때까지 약 30시간 동안 실험이 수행되었다.

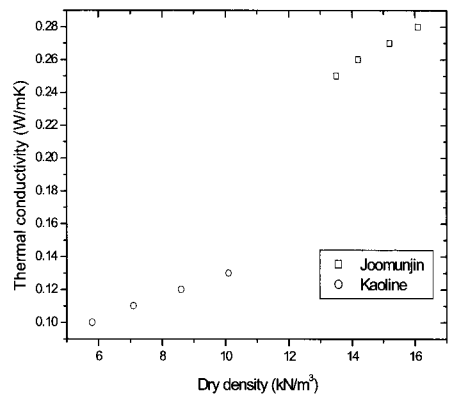
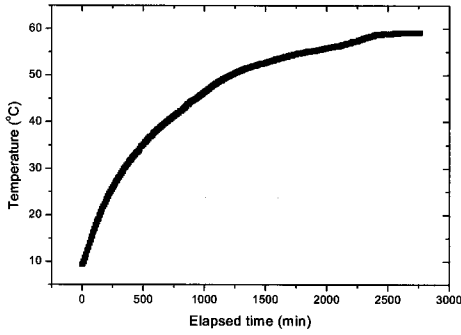
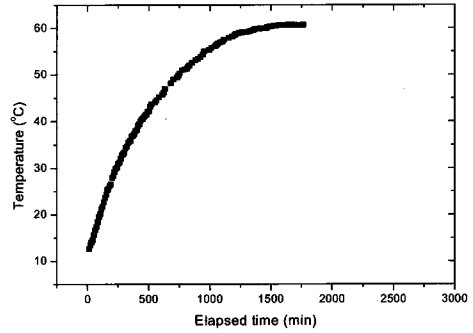


Fig. 4 Results of HFM method.

또한 열응답 시험 중 지중열교환기로부터 10cm (Fig. 3의 A점) 및 20cm (Fig. 3의 B점) 떨어진 지점의 온도값의 변화는 Fig. 6과 Fig. 7과 같다. Fig. 6은 단일지반의 온도변화이며 Fig. 7의 (a)와 (b)는 이층지반인 카올린 점토와 주문진 표준사의 온도 변화이다. 단일지반일 때의 주문진 표준사의 온도는 이층지반에서의 온도보다 약 5°C 가량 높았다. 또한 이층지반의 지점별 온도 측정 결과 주문진 표준사의 온도가 카올린 점토보다 5~



(a) Single-layered soil



(b) Double-layered soil

Fig. 5 Temperature variation of fluids.

10°C 높은 것으로 나타났다. 이는 주문진 표준사의 열전도도가 카올린 점토에 비해 더 크기 때문에 열확산이 더 빠르게 나타난 것으로 이해할 수 있다. 이에 반해, 카올린 점토와 주문진 표준사의 A 및 B 지점의 온도차는 각각 10~12°C 내외의 온도차를 보였다.

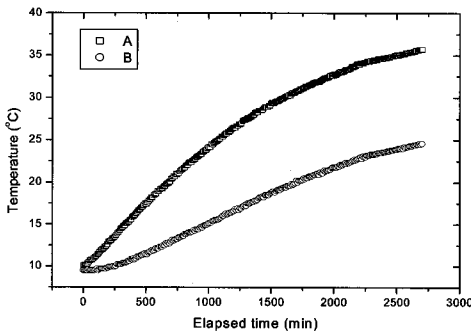
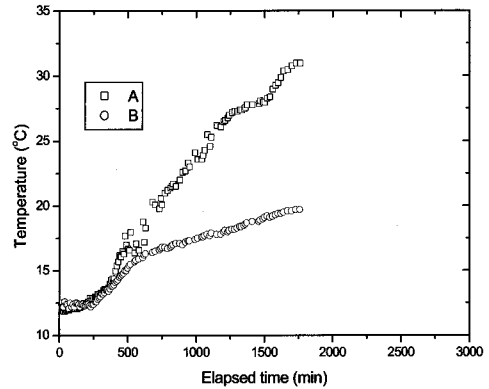
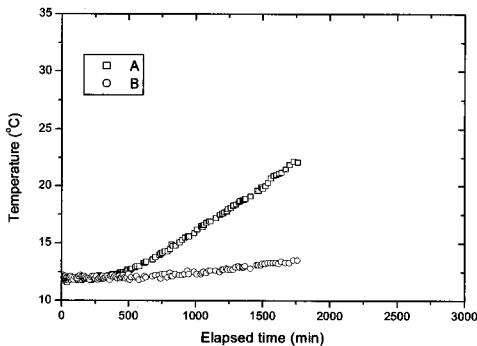


Fig. 6 Temperature variation in single-layered soil.



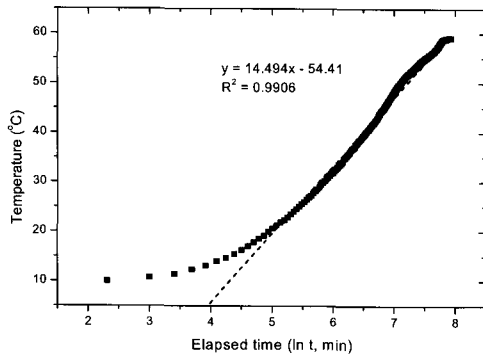
(b) Joomunjin sand

Fig. 7 Temperature variation in double-layered soil.

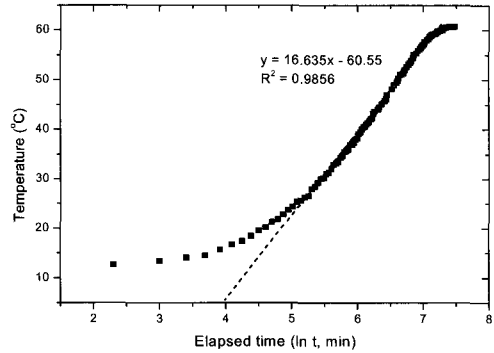


(a) Kaoline clay

열응답 시험 온도 변화값을 가지고 지중 열전도도 산출모델인 선형 열원 모델과 원통형 열원 모델을 코일형 타입의 지중열교환기에 적용하는 것은 적절치 않지만 단일지반과 이층지반에 대한 단순한 열전달 거동 비교를 위하여 비교적 간편하게 사용될 수 있는 모델인 식 (3)의 선형 열원 모델을 이용하여 Fig. 8의 (a)와 (b)에 도시된 지반의 열전도도를 산출하였다. 단일지반과 이층지반에 대한 열응답 시험 결과 선형 열원 모델을 이용한 지반의 열전도도 값은 각각 0.98 W/m·K와 0.85 W/m·K로 산출되었다. 하지만 이 둘 값은 실제 각 지반의 열전도도 값과는 매우 상이한 값이다.



(a) Single-layered soil



(b) Double-layered soil

Fig. 8 Temperature variation of fluids with respect to logarithmic time.

이처럼 이층지반의 경우 주문진 표준사만 존재 하였을 때보다 열전도도 값이 대략 15% 가량 감소하였다. 즉, 이층지반의 경우 지반의 열전달 효율이 감소하였으며 이는 보다 열전도도가 낮은 카울린 점토로 인해 전체적인 지반의 열전달 효과가 감소된 것으로 해석할 있다. 따라서 지반의 비균질성을 고려한 열전달 거동은 균질한 지반과는 분명한 차이를 보이며 지반의 비균질성을 고려한 열전도도 모델이 개발되어야 할 것으로 생각된다.

5. 결론

경제적인 지반의 열 해석이나 설계 문제를 위하여 신뢰도 높은 지반의 열전도도 평가 및 예측 모델의 개발이 필요하다. 하지만 실제의 지반은 균질한 조건이 아닌 다층으로 구성된 불균질한 지반임에도 불구하고 현재까지의 모델들은 단순하고 균질한 지반조건하에 여러 이론식들이 개발되었다. 본 연구에서는 코일형 지중열교환기를 사용하여 주문진 표준사로 구성된 단일지반과 주문진 표준사와 카울린 점토로 구성된 이층지반에 대한 열응답 시험을 수행하였다. 열응답 시험 결과 이층지반의 열전도도는 단일지반에 비해 15% 정도 감소됨을 알 수 있었다. 따라서 다층지반으로 구성된 지반의 열전도도는 단일지반의 값과 비교하였을 때 분명한 차이를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 또한 코일형 지중열교환기를 사용한

지반의 열전도도 모델 산출시 선형 열원 모델을 사용하는 것은 적합하지 않기에 U-type 지중열교환기를 사용하여 다층지반에 대한 열전도도 모델을 개발하는 것이 적합할 것이며 아울러 코일형 지중열교환기에 적합한 열전도도 모델 개발이 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 한국연구재단의 기초과학연구사업(2011-00180541)과 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신산업(11기술혁신E04) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Al-Ajlan, S.A.(2006), "Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique", *Applied Thermal Engineering*, 26, pp. 2184 - 2191.
2. Brandl, H. (2006), "Energy foundations and other thermo-active ground structures", *Geotechnique* 56, No. 2, pp 81-122.
3. Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C. (1946), *Conduction of heat in solids*, Clarendon Press, Oxford.
4. Ingersoll, L.R. (1948), "Theory of the ground pipe heat source for the heat pump", *ASHVE Transaction*, Vol. 47, pp. 119-122

5. Man, Y., Yang, Hongxing., Diao, N., Liu, Junhong., and Fang, Z. (2010), "A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers", *Heat and Mass Transfer* 53, pp. 2593-2601
6. Mogensen, P., (1983), "Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages", Proceedings of the International Conference on Surface Heat Storage in Theory and Physics, pp. 652-657, Swedish Council for Building Research.
7. Preene, M. and Powrie, W. (2009), "Ground energy systems: from analysis to geotechnical design", *Geotechnique* 59, No. 3, pp. 261-271
8. Seok Yoon, and Seung-Rae Lee (2011), Integrity of Optical Fiber Sensor for Measurement of Ground Thermal Conductivity. *Proc. 6th Int. Workshop on ANCRiSST 2011*. July, Dalian, China.