

에너지 파일의 현장 열응답 시험에 관한 연구

Evaluation of Thermal Response Test of Energy Pile

윤 석¹ Yoon, Seok 이 승 래² Lee, Seung-Rae
김 민 준³ Kim, Min-Jun 고 규 현⁴ Go, Gyu-Hyun

Abstract

Use of geothermal energy has been increased for its economical application and environmentally friendly utilization. Particularly, for energy piles, a spiral coil type ground heat exchanger (GHE) is more preferred than line type GHEs such as U and W shaped GHEs. A PHC energy pile with spiral coil type GHE was installed in an area of partially saturated dredged soil deposit, and a thermal response test (TRT) was conducted for 240 hours under a continuous operation condition. Besides, remolded soil samples from different layers were collected in the field, and soil specimens were reconstructed according to the field ground condition. Non-steady state probe methods were conducted in the lab, and ground thermal conductivity and thermal diffusivity were measured for the different soil layers. An equivalent ground thermal conductivity was calculated from the lab test results and it was compared with the field TRT result. The difference was less than 5%, which advocates the use of an equivalent ground thermal conductivity for the multi-layered ground. Furthermore, this paper also represents an equivalent ground thermal diffusivity evaluation method which is another very important design parameter.

요 지

최근 들어 경제적인 지열에너지 활용을 위하여 에너지 파일의 적용이 확대되고 있다. 특히 더 높은 열 교환 효율을 확보하고자 에너지 파일의 경우 통상적인 U자형 또는 W자형과 같은 라인형 지중 열교환기가 아닌 코일형 지중 열교환기를 매입하는 경우가 늘어나고 있다. 본 연구에서는 매립지 부지에 PHC 코일형 열교환기 형태의 에너지 파일을 설치하고 240시간 동안 현장 열응답 시험(thermal response test)을 실시하였다. 또한 현장에서 지층별로 시료를 채취하여 실내에서 현장 지층 물성으로 시료를 재조성한 후 비정상 탐침법(non-steady state probe method)을 이용하여 지층별 열전도도와 열확산계수를 측정하였고 등가의 열물성으로 환산하였다. 실험 결과 현장 열응답 시험에 의한 지반의 열전도도와 실내 탐침법으로 측정된 지반의 열전도도는 5%내에서 일치하였으며 아울러 지반의 또 하나의 중요한 설계인자인 등가 열확산계수의 측정방법도 제시하였다.

Keywords : Energy pile, Spiral coil, Thermal response test, Non-steady state probe method

1 정회원, KAIST 건설및환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST)
2 정회원, KAIST 건설및환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST, Tel: +82-42-350-3617, Fax: +82-42-350-7200, srlee@kaist.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)
3 비회원, KAIST 건설및환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST)
4 비회원, KAIST 건설및환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 10월 31일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 들어 신·재생에너지 이용에 대한 관심과 수요가 늘어나면서 지열원 열펌프 시스템(ground source heat pump systems)의 필요성이 나날이 증대되고 있다. 지열 에너지는 연중 일정하게 유지되는 지중의 온도를 활용하는 친환경 에너지원으로서 최근에 화두가 되고 있는 신재생 에너지 정책에 잘 부합하며 태양에너지, 풍력에너지 등과 함께 대체 에너지로서 각광을 받고 있다(Go et al., 2013). 지열원 히트펌프 시스템은 크게 지열 히트펌프(geothermal heat pump)와 지중 열교환기(ground heat exchanger)로 구성된다. 지중에 설치된 지중 열교환기는 이를 통해 유체를 순환하여 열을 추출 또는 배출하는 시스템으로 비교적 일정한 온도를 유지하는 지반을 열원으로 이용하여 여름철에는 열에너지를 방출하고 겨울철에는 열에너지를 흡수하는 역할을 한다(Jun et al., 2009; Yoon et al., 2013). 또한 지중 열교환기는 전체 시스템의 성능과 초기 설치비를 결정하는 중요한 요소이며 일반적으로 깊이 150~200m의 수직밀폐형 타입이 가장 많이 사용되고 있다. 수직밀폐형 지중 열교환기는 수직으로 천공된 보어홀과 지중과의 열교환 파이프, 그리고 보어홀과 파이프 사이의 빈 공간을 채우는 그라우트로 구성된다(Sohn et al., 2005; Jonston and Narsilio, 2011). 하지만 수직밀폐형은 수십미터에서 수백미터에 달하는 시추공을 설치해야 하는 이유로 과도한 초기 시공비 문제가 야기될 수 있다. 이에 대한 대안으로써 최근에는 말뚝, 슬라브 등 구조물의 기초 설치 시 열교환기를 매입하는 방안이 적용되고 있으며 이 중에서 말뚝 기초에 지중 열교환기를 매입하는 에너지 파이프가 널리 사용되고 있다(Laloui et al., 2006; Gao et al., 2010; Park et al., 2013; Park et al., 2013; Yoon et al., 2013).

이렇듯 에너지 파이프의 보급이 증대됨에 따라 신·재생 에너지 설비의 지원 등에 관한 기준 및 지침에도 에너지 파이프 적용시 지반의 열전도도와 열확산계수와 같은 열물성을 측정할 수 있는 방법이 제시되어져 있다. 지열원 열펌프 시스템 설계에 있어서 지반의 유효 열전도도와 같은 지반의 열물성은 상당히 중요한 인자이기에 현장 열전도도 측정실험을 통하여 지반의 유효 열전도도를 측정할 수 있다(Sohn et al., 2005; Lim et al., 2011). 하지만 지침에 의하면 에너지 파이프 적용시 지반의 열물성은 현장 실험이 아닌 현장에서 시료를 채취한 후 실내에서 실험을 하도록 되어있다. 기본적으로 지반의 시료를 채

취하여 실험실로 시료를 운반하는 과정에서 지반의 고유한 성질을 잃고 교란이 될 수밖에 없기에 보다 정확하고 합리적인 설계 인자를 도출하기 위해서는 현장 실험이 요구되는 것이 현실이다.

따라서 본 연구에서는 인천국제공항 건설시험소 부지에 PHC 에너지 파이프를 설치한 후 현장 열응답 시험을 통하여 지반의 유효 열전도도를 측정하고자 하였다. 또한 현장에서 상이한 지층별로 시료를 채취하여 실내에서 비정상 탐침법(non-steady state probe method)을 이용하여 지반의 열전도도와 열확산계수를 측정하여 현장 열응답 시험 결과와 비교 분석하여 보다 합리적인 지반의 열물성을 측정하는 방법을 제시하고자 하였다.

2. 현장 열응답 시험

2.1 지중 열교환기 설치 조건

본 연구에서는 인천국제공항 매립지 부지에 코일형 타입의 열교환기가 관입된 PHC 에너지 파이프를 직경 500mm 내에 수직 깊이 15m로 설치하였다. 지중 열교환기는 PB(polybutylene) 소재의 파이프(외경/내경: 20mm/16mm)가 사용되었고 보어홀 내부는 시멘트 그라우트를 채운 형태로 구성되어 있다. 또한 코일형 열교환기 직경은 28cm이고 코일의 양 끝에서의 피치 간격은 5cm 정도로 유지되었으며 열교환기 입출구 부위에 RTD(resistance

Table 1. Drilling log of the test site

Depth (m)	Layer	Description	USCS
1.0	Reclamation layer (I)	Medium dense sand Wetting Light brown Dense sand with gravel	SP
4.6	Sedimentary layer (II)	Silty clay Wetting Light brown Soft w=30.6%, e=0.908	CL
8.8	Sedimentary layer (III)	Clay Wetting Dark gray Very soft w=28.5%, e=0.912	CL
15	Weathered granite soil (IV)	Silty sand Wetting Light brown Medium dense w=30.6%, e=0.615	SM

temperature detector)센서를 설치하였다. 실험지역에 대해 지반조사를 수행한 결과 실트 및 모래질 퇴적층과 풍화토 등으로 구성되어 있었으며 암반은 GL(-) 21m 깊이에서 출현하였고 지하수위는 지표면에서 GL(-) 3.5m 심도에 위치해 있었다. Table 1은 에너지 파일이 설치된 지반의 특성 및 지반 조사 결과를 나타내고 있다. 본 지역의 토질의 비중은 2.664~2.678의 값을 보였으며 함수비는 21.8%~30.6%의 값을 나타내고 있다.

2.2 열응답 시험 원리

지중 열교환기의 열전달 메커니즘은 열전달 유체가 보어홀 내의 파이프 내를 이동하면서 그라우트 재료와 주변의 지반으로 열을 흡수 또는 방출하는 과정이다. 지중 열교환기와 주변 지반으로의 열전달 거동은 복잡하고 복합적인 메커니즘이 필요하지만 일반적으로 지반으로의 열전달은 전도에 의해 이루어진다(Brandl, 2006). 열전달 방정식의 해를 구하는 방법은 선형 열원모델(line source model), 원통형 열원 모델(cylindrical source model) 그리고 수치해석 모델 등이 있으며 이 중 무한 선형 열원 모델(infinite line source model)은 해석의 간편성과 편리성으로 인해 가장 많이 사용되고 있다. 무한 선형 열원 모델을 이용한 유효 열전도도 도출 과정은 여러 문헌에서 제시되고 있다(Pahud et al., 2001; Lee et al., 2010). 무한 선형 모델을 통한 지중 열전도도(λ)는 식 (1)과 같은 간편식을 사용하여 열응답 시험을 통해 시간에 따른 유체온도를 측정하고 그 결과를 $T_f - \ln t$ 의 반대수 관계로 도시한 그래프의 기울기(A)를 통해 산출할 수 있다.

$$\lambda = \frac{Q/L}{4\pi A} \quad (1)$$

여기서 Q 는 단위 시간당 주입된 열량, L 은 보어홀의 길이, T_f 는 유체의 평균 온도, t 는 시간을 뜻한다. 또한 Yoon et al.(2014)은 다층 지반으로 구성된 열전도도를 등가로 환산할 수 있는 등가 열전도도 식을 식 (2)와 같이 제시한 후 현장 열응답 시험값을 근거로 등가 열전도도 식을 검증하였다. 이는 지층별 열전도도를 깊이별로 가중 평균한 값이며 h 는 지반의 두께를 뜻한다.

$$\lambda_{eq} = \frac{(h_1\lambda_1 + \dots + h_n\lambda_n)}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (2)$$

2.3 열응답 시험 결과

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 PHC 에너지 파일 내의 열교환기에 열응답 시험기를 연결하여 열응답 시험을 실시하였다. 일반적인 수직밀폐형의 경우 열응답 시험은 48시간 동안 진행되지만 이러한 조건을 에너지파일에 그대로 적용할 수는 없다. 열응답 시험 시간은 열교환기의 직경 및 지반의 조건에 따라 준 정상상태에 도달되는 시간이 달라질 수 있기 때문이다(Florides and Kalogirou, 2008). 따라서 본 연구에서는 파일의 직경과 일반적인 지반의 열확산도 범위를 가정하여 240시간 동안 연속으로 열응답 시험을 실시하였다. 무한 선형 열원 이론을 적용하기 위한 L/D (L :길이, D :직경), 즉 열원의 길이와 직경의 비가 25~30이상이면 충분하기에 본 에너지파일도 식 (1)과 같은 무한 선형 열원 이론을 적용하는데 큰 무리가 없을 것으로 판단된다. Fig. 2는 240시간 동안의 열응답 시험으로부터 구해진 시간에 따른 순환수의 분포를 보여주고 있으며 Fig. 3은 실험 시간을 로그 스케일로 변환된 순환수 온도 분포를 보여주고 있다. 실험 전 30분간의 무부하 운전을 통하여 계측된 지



(a) GHE installation



(b) Cement grouting



(c) TRT operation

Fig. 1. Construction process of energy pile

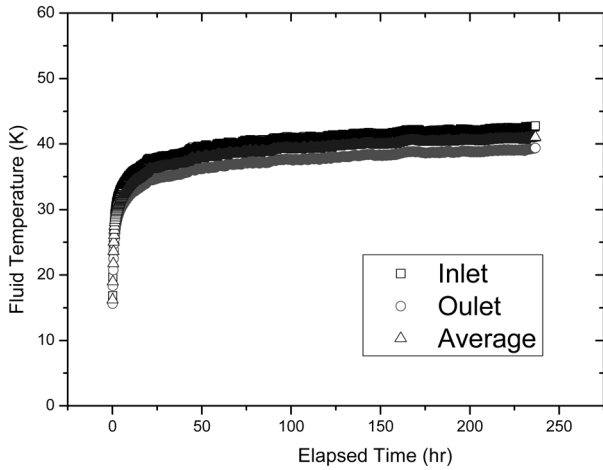


Fig. 2. Temperature variation of fluids

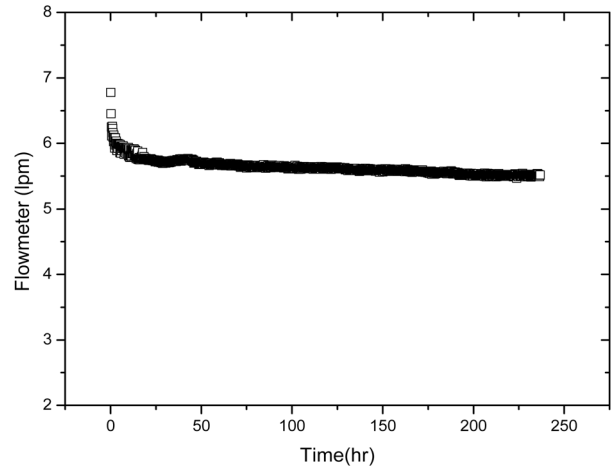


Fig. 4. Flowmeter variation during TRT

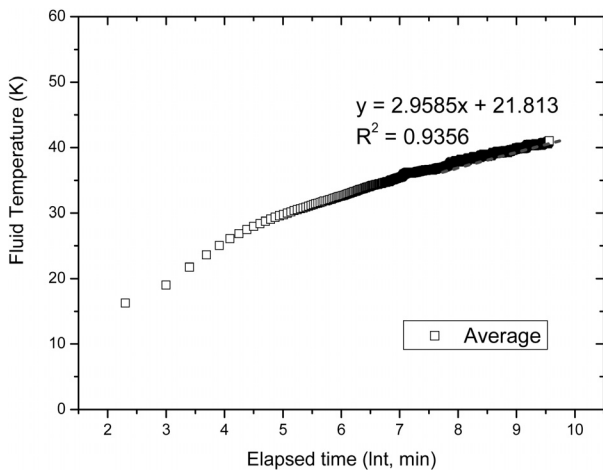


Fig. 3. Temperature variation of fluids with respect to logarithmic time

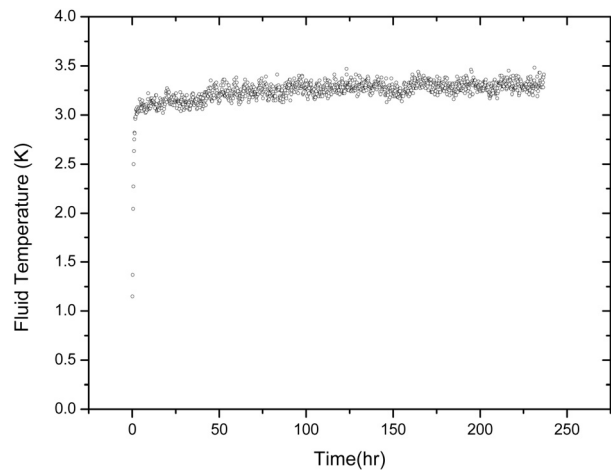


Fig. 5. Temperature difference between inlet and outlet during TRT

반의 초기온도는 15.65°C였으며 순환수의 입출구 온도는 10분 간격으로 계측되었다. 지반으로 투입된 전력은 1,200W였으며 그라우트 및 지반과의 원활한 열전달을 위한 난류의 흐름을 유발하였으며 이에 대한 평균 유량은 5.64lpm(liter per minute)였다(Fig. 4). 또한 Fig. 5는 열응답 시험 동안 입출구 온도차를 보여주고 있다. 240 시간 동안의 열응답 시험 데이터를 이용하여 비정상 상태의 초기 100시간 데이터는 제외한 후 식 (1)을 이용한 지반의 열전도도는 2.145W/m·K으로 측정되었다.

3. 실내 열전도도 실험

3.1 비정상 탐침법

현장 열응답 시험으로부터 산출된 지반 열전도도 값의

적합성을 검증하기 위하여 Table 1에 제시된 지층별로 시료를 채취하여 실내 탐침법으로 각 지층별 지반의 열전도도와 열확산계수를 측정하였다. SPT(standard penetration test) 시험시 교란 시료를 실내로 운반하여 현장 물성에 맞게 시료를 성형하였다. 본 실험에서는 Decagon사의 비정상 탐침 장비인 KD2 Pro가 사용되었으며 비정상 상태법은 선형 열원 이론에 기반하여 매우 가는 금속선에 전류를 흘려 시간에 따른 금속선의 온도 상승 경향으로부터 열전도도를 측정하는 방법으로써, 시험방법이 간편하고 측정시간이 짧은 장점이 있다(Park et al., 2012). 비정상 탐침법은 짧은 비정상 상태 후, 공급된 열량 Q로 인해 발생한 온도변화 ΔT 와 자연로그 스케일 시간의 선형관계로부터 열전도도를 구한다. 이는 무한한 매체 속의 가늘고 길이가 무한한 열선에 열량 Q가 공급될 때 에너지 전달은 오직 반경 방향의 열전도에 의해서만 일

어난다는 선형 열원 이론에 기반한다. 즉 온도 변화 ΔT 와 매체의 열전도도(λ)의 관계는 식 (3)과 같다(Park, 2011).

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi\lambda} (\ln t + B) \quad (3)$$

여기서 B는 상수이다. 측정시간 t_1 과 t_2 사이의 온도변화 ΔT 와 공급된 열량 Q로부터 식 (4)와 같이 열전도도를 구할 수 있다.

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi\Delta T} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (4)$$

3.2 실내 열전도도 실험 결과

본 연구에서는 크게 네 개 층으로 구성된 시료 중 지표면에서 1m의 매립층의 경우 현장에서 탐침장비를 지반에 꽂아 열물성을 측정하였으며 그 밖에 세 개 지층은 현장 물성에 맞게 시료를 성형하여 실내에서 열물성을 측정하였다. 지하 4.6m까지의 두 번째 퇴적층의 경우 함수비를 달리하며 탐침 실험을 수행하였으며 이로부터 현장 함수비 30.6%일 때의 현장 열물성 값을 채택하였다(Table 2). 세 번째 지층의 경우 현장 함수비 28.5%에 맞춰서 열물성을 측정하였으며 열전도도는 1.863W/m·K,

Table 2. Ground thermal conductivity with different water contents

Water content	Thermal conductivity (W/mK)	Thermal diffusivity (mm ² /s)
15%	1.618	0.431
18%	1.643	0.518
20%	1.720	0.651
30.6%	1.783	0.685

Table 3. Thermal conductivity of weathered granite soils varying with water content

Water content	Thermal conductivity measurement (W/mK)	Thermal conductivity (W/mK) Lee (2010)	Thermal diffusivity (mm ² /s)
0%	0.407	0.2633	0.297
5%	1.071	0.6283	0.722
6.8%	1.474	0.7597	1.078
10%	1.839	0.9933	1.290
21%	1.958	1.7963	1.411
22.4%	2.063	1.8985	1.458
30.6% (No specimen)		2.4971	

열확산계수는 0.848mm²/s로 측정되었다. 하지만 네 번째 지층인 화강풍화토의 경우 건조단위중량이 매우 높아 현장 함수비와 간극비에 맞게 시료를 조성하는데 어려움이 있었다. 따라서 화강풍화토의 경우도 현장 함수비를 달리하면서 열물성을 측정하였으며 다른 기존 연구 결과와 상호 비교하여 현장에 맞는 열물성을 예측하고자 하였다. Table 3은 함수비에 따른 실험결과와 경험식에 의한 결과값을 보여주고 있다. Lee(2010)는 식 (5)와 같이 화강풍화토의 함수비와 건조밀도를 독립변수로 하여 열전도도 값을 예측할 수 있는 경험식을 제시하였다.

$$\lambda = (0.42\rho_d - 0.62)w + 0.2633 \quad (5)$$

여기서 ρ_d 는 건조밀도이며 w는 함수비를 뜻한다. 함수비 10%까지는 실험값과 경험식 간의 차이가 발생하였지만 20%이상에서는 거의 일치함을 알 수 있다(Fig. 6). 따라서 현장 함수비인 30.6%일 때의 열전도도는 Lee

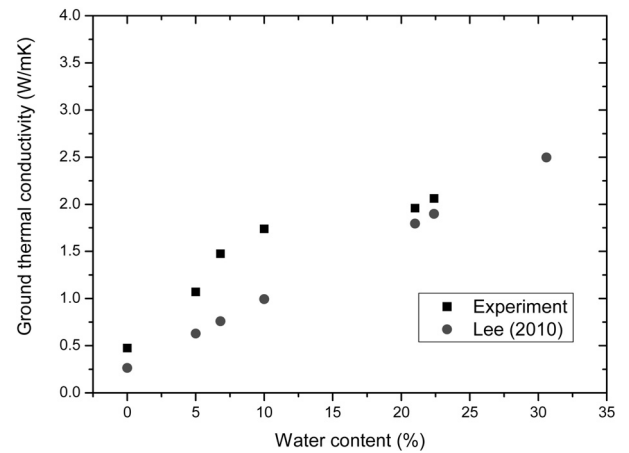


Fig. 6. Thermal conductivity of weathered granite soils varying with water content

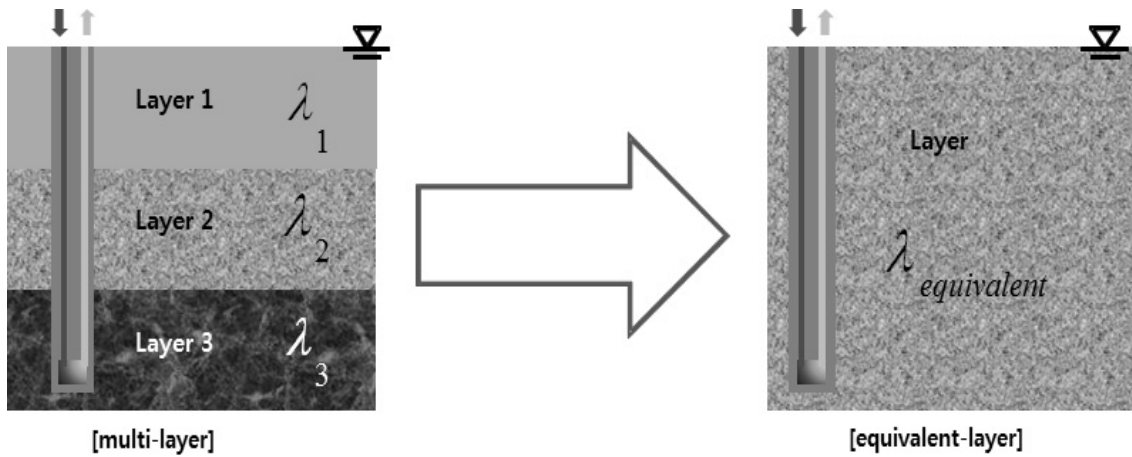


Fig. 7. Diagram of equivalent ground thermal conductivity

Table 4. Thermal properties of different ground layers

Layer (depth)	Thermal properties	Measurement method
layer I (0~1 m) SP	$\lambda_s = 1.1 \text{ W/mK}$ $\alpha = 1.151 \text{ mm}^2/\text{s}$	Field measurement
layer II (1~4.6 m) CL	$\lambda_s = 1.783 \text{ W/mK}$ $\alpha = 0.685 \text{ mm}^2/\text{s}$	Non-steady probe & estimation
layer III (4.6~8.8 m) CL	$\lambda_s = 1.863 \text{ W/mK}$ $\alpha = 0.848 \text{ mm}^2/\text{s}$	
layer IV (8.8~15 m) SM	$\lambda_s = 2.497 \text{ W/mK}$ $\alpha = 1.620 \text{ mm}^2/\text{s}$	
Equivalent properties	$\lambda_s = 2.055 \text{ W/mK}$ $\alpha = 1.148 \text{ mm}^2/\text{s}$	Field TRT $\lambda_s = 2.145 \text{ W/mK}$

(2010) 모델을 이용하여 추정하였다. 또한 열확산계수는 계측된 실험 데이터를 근거로 외삽을 이용한 회귀분석을 수행하였다. 외삽을 이용한 회귀 분석은 부정확할 수도 있지만 함수비 30.6%일때의 값은 $1.62\text{mm}^2/\text{s}$ 로 추정하였다. 4개의 지층으로 구성된 다층 지반은 단일지반으로 환산하여 식 (2)와 같이 등가의 열물성 값을 도출할 수 있다(Fig. 7). Table 4는 지층별 열물성 값과 등가 열물성 값을 보여주고 있다.

신·재생에너지 설비의 지원 등에 관한 기준 및 지침에 의하면 에너지 파일 이용시 열전도도 측정기준은 ‘파일 설치 위치의 토양에 대해 서로 상이한 공학적 특성을 가진 모든 층에 대해 채취한다’ 라고 기술되어져 있으며 열확산계수의 경우 ‘열확산계수를 측정한다’ 라고만 서술되어져 있다. 하지만 본 연구에서와 같이 에너지 파일을 이용했을 경우도 현장 열응답 시험을 통해 충분히 지반의 등가 열전도도를 도출할 수 있는 것을 알 수 있다. 또한 상이한 지층에 대해 시료를 채취하더라도 각 지층에 따라 열전도도와 열확산계수를 동시에 계측하

여 식 (2)와 같이 지층별 두께에 따른 가중 평균한 열물성 값을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 열확산계수의 경우도 임의 지점의 값을 계측하는 것이 아닌 열전도도와 마찬가지로 지층별로 계측된 값을 근거로 등가로 환산된 값을 설계에 적용한다면 보다 정확하고 합리적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 인천국제공항 건설시험소 부지에 PHC 에너지 파일을 설치한 후 현장 열응답 시험을 통하여 지반의 유효 열전도도를 도출하였다. 또한 현장에서 상이한 지층별로 시료를 채취하여 실내에서 비정상 탐침법을 이용하여 지반의 열전도도와 열확산계수를 측정하였고 현장 열응답 시험 결과와 비교 분석하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 240시간 동안 현장 열응답 시험이 수행되었으며 초기 100시간을 제외한 후 무한 선형 열원 이론을 통해 지반의 열전도도는 $2.145\text{W/m}\cdot\text{K}$ 로 산출되었다. 무한 선형 열원 이론을 적용하기 위한 L/D (L:길이, D:직경), 즉 열원의 길이와 직경의 비가 25~30이상이면 충분하기에 본 에너지파일도 무한 선형 열원 이론을 적용하는데 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.
- (2) 현장 열응답 시험으로부터 산출된 지반 열전도도 값의 적합성을 검증하기 위하여 지층별 시료를 채취하여 실내 비정상 탐침법을 이용하여 각 지층별로 지반의 열전도도와 열확산계수를 측정하였다. 크게 네 개 층으로 구성된 시료중 지표면에서 1m의

매립층의 경우 현장에서 탐침장비를 지반에 꽂아 열물성을 측정하였으며 그 밖에 세 개 지층은 현장 물성에 맞게 시료를 조성하여 탐침 실험을 수행하였다. 하지만 네 번째 지층인 화강풍화토의 경우 건조단위중량이 높기에 현장 함수비와 간극비에 맞게 시료를 조성하는데 어려움이 있었다. 따라서 화강풍화토의 경우, 현장 함수비를 달리하면서 열물성을 측정하였으며 다른 기존 연구 결과와 상호 비교하여 현장에 맞는 열물성을 예측하였다. 이렇게 얻어진 네 개 지층 각각의 열전도도를 등가의 단일 지반 열전도도로 환산하여 계산된 값은 2.055W/m·K였으며 이는 현장 열응답 시험값과 오차범위 5% 내에서 일치하였음을 알 수 있다.

- (3) 신·재생에너지 설비의 지원 등에 관한 기준 및 지침에 의하면 에너지 파일 이용시 열전도도 측정기준은 ‘파일 설치 위치의 토양에 대해 서로 상이한 공학적 특성을 가진 모든 층에 대해 채취한다’ 라고 기술되어 있으며 열확산계수의 경우 ‘열확산계수를 측정한다’ 라고만 서술되어 있다. 하지만 본 연구에서와 같이 에너지 파일을 이용했을 경우도 현장 열응답 시험을 통해 충분히 지반의 등가 열전도도를 도출할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 상이한 지층에 대해 시료를 채취하더라도 각 지층에 따라 열전도도와 열확산계수를 동시에 계측하여 지층별 두께에 따른 가중 평균한 열물성 값을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 열확산계수의 경우도 임의 지점의 값을 계측하는 것이 아닌 열전도도와 마찬가지로 지층별로 계측된 값을 근거로 등가로 환산된 값을 설계에 적용한다면 보다 정확하고 합리적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 건설기술혁신사업(11기술혁신E04)과 한국연구재단의 핵심개인연구 지원사업으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Brandl, H. (2006), “Energy foundations and other thermo-active ground structures”, *Geotechnique*, Vol.56, No.2, pp.81-122.
2. Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K., and Yang, J. (2008), “Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy

3. Go, G. H., Yoon, S., Park, D. W., and Lee, S. R. (2013), “Thermal behavior of energy pile considering ground thermal conductivity and thermal interference between piles”, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.33, No.6, pp.2381-2391.
4. Johnston, I.W, Narsilio, G.A., and Colls, S. (2011), “Emerging geothermal energy technologies”, *KSCE Journal of Civil Engineers*, Vol.15(4), pp.643-653.
5. Jun, L., Xu, Z., Jun, G., and Jie, Y. (2009), “Evaluation of heat exchange rate of GHE in geothermal heat pump systems”, *Renewable energy*, Vol.34, pp.2898-2904.
6. Laloui, L., Nuth, M., and Vulliet, L. (2006), “Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.30, pp.763-781.
7. Lim, H. J., Kong, H. J., Kang, S. J., and Choi, J. H. (2011), “The effect of the installation condition of ground loop heat exchanger to the thermal conductivity and borehole resistance”, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.23, No.2, pp.95-102.
8. Lee, K. (2010), “Study on thermal characteristics of backfill materials for horizontal ground heat exchanger”, Master thesis, Korea University.
9. Lee, C., Park, M., Min, S., Choi, H., and Sohn, B. (2010), “Evaluation of performance of grouts and pipe sections for closed-loop vertical ground heat exchanger by in-situ thermal response test”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.7, pp.93-106.
10. Pahud, D. and Matthey, B. (2001), “Comparison of the thermal performance of double U-pipe borehole heat exchangers measured in situ”, *Energy and Building*, Vol.33, pp.503-507.
11. Park, H. (2011), “Thermal conductivities of unsaturated Korean weathered granite soils”, Master thesis, KAIST.
12. Park, H., Park, H., Lee, S. R., and Go, G. H. (2012), “Estimation of thermal conductivity of weathered granite soils”, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.32, No.2C, pp.69-77.
13. Park, H. K., Lee, S. R., Yoon, S., and Choi, J. C. (2013), “Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: Field experiments and numerical simulation”, *Applied Energy*, Vol.103, pp.12-24.
14. Park, S., Sohn, J. R., Park, Y. B., Ryu, H. K., and Choi, H. (2013), “Study on thermal behavior and design method for coil-type PHC energy pile”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.8, pp.37-51..
15. Sohn, B. H., Shin, H. J., and Park, S. K. (2005), “Evaluation of effective thermal conductivity and thermal resistance in ground heat exchanger boreholes”, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.17, No.8, pp.695-703.
16. Yoon, S., Lee, S. R., Park, H. K., Park, D. W., and Go, G. H. (2013), “Prediction of heat exchange rate in PHC energy piles”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.9, pp.31-41.
17. Yoon, S., Lee, S. R., Go, G. H., Jianfeng, X., Park, H., and Park, D. (2014), “Thermal transfer behavior in two types of W-shaped ground heat exchangers installed in multilayer soils”, *Geomechanics and Engineering*, Vol.6, No.1, pp.79-98.

Received : March 12th, 2014

Revised : April 1st, 2014

Accepted : April 7th, 2014