

# 지중 열전도도 측정을 위한 광섬유 센서의 건전성

## Integrity of Optical Fiber Sensor for Measurement of Ground Thermal Conductivity

윤 석\* · 최 정 찬\*\* · 이 승 래\*\*\* · 리 마이클 명섭\*\*\*\*

Yoon, Seok · Choi, Jung-Chan · Lee, Seung-Rae · Lee, Michael-Myungsub

### 요 약

본 연구에서는 광섬유 센서 기반 스마트 모니터링 시스템이 지중 열전도도 측정에도 효율적으로 적용될 수 있는지를 분석하였다. 이를 위해 광섬유 온도센서를 이용하여 지반의 열전도도를 측정할 수 있는 열응답 시험기가 개발되었다. 개발된 열응답 시험기는 기존의 RTD(Resistance Temperature Detector) 온도 센서 외에 광섬유 센서의 한 종류인 FBG(Fiber Bragg Grating) 센서도 실시간적으로 측정할 수 있는 시스템으로 구성되어 있다. 개발된 장비의 적용성 검증을 위하여 주문진 표준사를 이용하여 모형토조 내에 일정한 간극비에 맞추어 시료가 조성되었으며 지중열교환기는 U자형 파이프가 사용되었다. 20시간동안 열응답 시험을 통하여 광섬유 센서와 RTD 센서를 동시에 이용하여 온도값을 측정하여 표준사의 열전도도 값을 산출하였다. 그 결과 모형실험을 통한 열전도도 값은 탐침법을 통해 얻어진 열전도도 값과 선형 열원 모델(line source model) 해석해와 거의 유사하게 나타났으며 광섬유 센서와 RTD 센서와의 온도차는 0.1~0.3°로써 유사한 값을 나타내었다. 따라서 본 연구에서 개발된 광섬유 기반 열응답 시험기는 지반의 열전도도를 측정하는데 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있었으며 향후 지열시스템 가동에 따른 지중열교환기의 손상도 평가 및 경보시스템 개발을 위해 지중열교환기의 거동을 실시간으로 모니터링 하는데 있어서도 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

**keywords** : 열응답 시험기, 지중 열전도도, 광섬유 센서, FBG 센서

## 1. 서 론

최근 들어 지구온난화, 화석에너지의 고갈로 인하여 에너지를 저감할 수 있는 신재생에너지원의 필요성이 날이 증대되고 있다. 지중열교환기 시스템은 비교적 일정한 온도를 유지하는 지층을 열원으로 이용하여 여름철에는 열에너지를 방출하고 겨울철에는 열에너지를 흡수하는 시스템이다. 지중열교환기 시스템은 이산화탄소 발생 저감 및 에너지 절약형 기술로써 국내 어디서나 이용할 수 있는 유비쿼터스(ubiquitous) 에너지이고 안전하고 효율적인 청정 신재생에너지이다. 지반의 열전도도는 지중열교환기 시스템에 큰 영향을 미치는 지반의 열 특성 중 하나로써 보다 넓은 지반의 열특성을 연속적으로 계측할 필요성도 대두되고 있다.

\* 한국과학기술원(KAIST) 건설및환경공학과 석사과정 busybeeyoon@kaist.ac.kr

\*\* 한국과학기술원(KAIST) 건설및환경공학과 박사후 연구원 tymfor@kaist.ac.kr

\*\*\* 한국과학기술원(KAIST) 건설및환경공학과 교수 srlee@kaist.ac.kr

\*\*\*\* 싸이트로닉(주) 대표이사·공학박사 michael.lee@cytroniq.com

따라서 본 연구에서는 최근 교량, 터널 및 사면안정 등과 같이 광범위한 분야의 연속적이고 실시간 계측에서 큰 연구 성과를 보이고 있는 광섬유 센서 기반 스마트 모니터링 시스템이 지중 열전도도 측정에도 효율적으로 적용될 수 있는지를 분석하였다. 이를 위해 광섬유 센서 기반 열응답 시험기를 개발하였으며 이의 적합성을 검증하기 위하여 모형토조 내 시료를 조성하여 열응답 시험을 실시하여 지중 열전도도를 측정하였다. 측정된 결과는 실내 탐침법과 선형 이론식 해석해와 비교하여 광섬유 센서가 지중 열전도도 측정에 효과적으로 사용될 수 있는지를 검토하였다.

## 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 복합적인 메커니즘이 필요하지만 일반적으로 지반으로의 열전달은 전도에 의해 이루어진다(Brandl, 2006). 지반에서의 전도에 의한 열전달 지배 방정식은 다음과 같다.

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

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $c$ 는 비열,  $\lambda$ 는 열전도도,  $T$ 는 온도,  $t$ 는 시간 그리고  $q_i$ 는 내부에서 발생하는 열량이다. 이러한 열전달 방정식의 해를 구하는 방법은 선형 열원 모델, 원통형 열원 모델(cylindrical source model) 그리고 수치해석 모델이 있으며 이 중 선형 열원 모델이 사용 방법의 편리성 때문에 비교적 많이 사용되고 있다. 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.

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

식 (2)에서  $T(r, t)$ 는 열원으로부터의 거리  $r$ , 시간  $t$ 에서의 온도이며  $k$ 는 지반의 열전도도,  $Q$ 는 토양으로 전달되는 열량,  $L$ 은 보어홀의 길이이며 따라서  $Q/L$ 은 보어홀 단위 길이 당 열량이 된다. 또한  $a$ 는  $k/\rho c$ 로 정의되는 지반의 열확산율이다. 식 (2)는 무한히 긴 선형열원에 적용되는 완전해이지만 열응답 시험 수행 시간을 충분히 길게 하여 파이프나 그라우트의 열저항을 무시할 수 있게되면, 라인소스 모델을 다음과 같이 단순화시킬 수 있다고 Mogensen(1983)은 제안하였다.

$$\int_{\frac{r_b^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u} du}{u} \approx \ln \frac{1}{\frac{r_b^2}{4at}} - 0.5772 \quad \text{for } \frac{at}{r_b^2} \geq 5 \quad (3)$$

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

$r_b$ 는 보어홀의 직경이며 식 (3)으로 표현되는 근사해는  $at/r_b^2 \geq 5$  의 조건으로부터 적용 가능한 시험 시간을 기준으로 삼을 수 있다.

### 3. 실험수행 및 결과분석

#### 3.1. 실험 방법

본 연구에서 개발된 열응답 시험기는 기존에 사용되고 있는 RTD 센서 외에 광섬유 온도 센서도 실시간적으로 측정할 수 있는 시스템으로 구성되어 있다. 열응답 시험기의 제원 및 사진은 표 1과 같다.

표 1 열응답 시험기의 제원 및 사진

부품명	비고	
Heater	순환 열유체 가열 (총 용량10kW)	
Water Tank	50L (SUS 304)	
Flow meter	2~120 lpm Model: M10ASP	
Pump	40lpm, 50m 양정 Model: Grundfos UPS40	
Temp. Sensor	RTD, FBG	
Recorder	4ch interrogator	

열응답 시험기 안에 소프트웨어 프로그램이 설치되어 있어 실시간적으로 온도를 측정하고 저장할 수 있으며 투입전력, 유량 및 측정 시간 등을 제어할 수 있다. 특히 광섬유 온도 센서는 파장값과 온도값이 동시에 출력된다. 또한 원하는 시간 간격을 설정하여 출력된 데이터는 자동으로 저장될 수 있다.

광섬유 기반 열응답 시험기의 적용성 검증을 위하여 주문진 표준사를 5m x 1m x 1m 모형토조에 조성하였다(그림 1). 안형준과 백성권(2003)은 실내 탐침법을 이용하여 함수비와 건조밀도에 따라 표준사에 대한 열전도도 값을 측정하였다(표 2). 표 2에 제시된 결과와의 비교를 위하여 모형토조 내 시료는 건조단위중량 ( $\gamma_d$ )  $13.97kN/m^3$ 에 맞추어 조성되었다.



그림 1 모형 토조

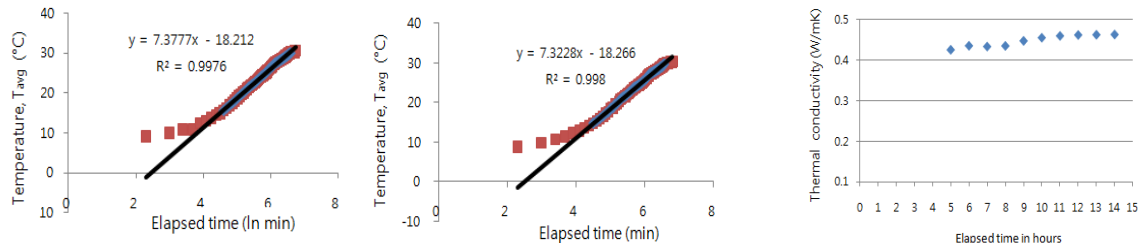
Soil No	Water Content w (%)	Dry Density $\gamma_d$ ( $kN/m^3$ )	Thermal Conductivity k ( $W/m \cdot K$ )
1-1	0.00	13.10	$0.42 \pm 0.01$
1-2	0.00	13.70	$0.46 \pm 0.03$
1-3	0.00	14.10	$0.52 \pm 0.02$
1-4	0.00	14.70	$0.64 \pm 0.02$

표 2 표준사의 열전도 측정결과 (안형준 & 백성권, 2003)

#### 3.2. 실험 결과 및 고찰

위와 같이 조성된 시료에 U 타입 지중열교환기를 설치하여 200W의 열량을 순환수를 통하여 모래에 공급하였으며 순환수 초기온도는  $7.8^\circ C$ 에서 시작하여  $30^\circ C$ 가 될 때까지 20시간동안 실험이 수행되었다. RTD 센

서와 FBG 센서를 파이프 입출구에 동시에 부착하여 시간에 따른 온도 변화를 측정하였으며 이를 식 (4)의 line source model 간편식에 대입하여 주문진 표준사의 열전도도 값을 산출하였다. 그림 2는 열응답 시험 수행 시간을 로그좌표로 하여 도시된 지중열교환기의 입출구 온도의 평균값을 나타낸 것이다.



(a) RTD 센서의 ln 시간-온도분포 (b) FBG 센서의 ln 시간-온도분포      그림 3 해석해의 열전도도 분포  
그림 2 ln 시간에 따른 온도분포

표 3 지중 열전도도 산출값

RTD 열응답시험 k (W/m·K)	FBG 열응답시험 k (W/m·K)	Line Source Model k (W/m·K)
0.479	0.483	0.462

실험 결과 RTD 센서와 FBG 센서의 온도차는 0.1~0.3°C 정도 었다. 열응답 시험에 의한 표준사의 열전도도 값은 대략 0.48W/m·K 값을 보였다. 또한 식 (2)로 제시된 line source 해석 모델을 이용하여 시간에 따른 열전도도 값을 산출하였다(그림 3). RTD 센서와 FBG 센서의 열응답 시험 결과 열전도도 값은 안형준과 백성권(2003)이 수행한 실내 탐침법 결과와 본래의 line source 해석 모델에 따른 열전도도 값과 매우 유사한 값을 보여주고 있다(표 3). 따라서 본 연구에서 개발된 광섬유 기반 열응답 시험기와 광섬유 센서는 현장 지반의 열전도도를 측정하는데 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있었다. 또한 향후 지열시스템 가동에 따른 지중열교환기의 손상도 평가 및 경보 시스템 개발을 위해 지중열교환기의 거동을 실시간으로 모니터링 하는데 있어서도 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초과학연구사업 (2010-0001381)과 (2010-001463)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

안형준, 백성권 (2003), “표준사의 열전도 특성에 관한 연구“, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp. 4118-4123.

Brandl, H., (2006), “Energy foundations and other thermo-active ground structures”, *Geotechnique* 56, No. 2, pp. 81-122.

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.