

비정상면열원법을 이용한 지반물질의 열전달 특성 평가

Thermal measurement of Geomaterials using Transient Plane Source

김영진¹⁾, Young Jin Kim, 윤태섭²⁾, T.S. Yun

¹⁾ 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

²⁾ 연세대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

SYNOPSIS : Thermal properties of geomaterial are overlooked with other geomechanical properties. The transient line-source (TLS) method is one of the most used testing methods for measuring the thermal conductivity (K) and thermal diffusivity (α) of materials. But more recently, Transient Plane-Source method was developed to measure these. It has several advantage of comparing with TSL method, but there has not been documented application in geomaterial. A Resistance Temperature Detector is used to construct sensor. For durability of Probe, Adopt a new technique that two probes are bonded in exact matching. For standard materials, such as glycerin, and ice the measured K and a values of these materials were generally within 2-5% from the standard values in the literature. This document present to evaluate the thermal properties of geomaterials and its application was tested for varying degree of saturation using the Transient Plane Source method. The result of this study suggests that it is an comparatively accurate method for simultaneously measuring thermal conductivity and thermal diffusivity and can identify the feasibility to geomaterial.

Keywords : Thermal properties, Transient Plane Source method, Geomaterial

1. 서 론

지반물질에 대한 열전도에 관한 연구는 다른 지반 물성에 대한 연구와 비교해 많은 연구가 되어있지 않다. 하지만 최근들어 지반물질에 대한 열 물성치에 대한 연구가 국내에서 진행되고 있고 그 측정 기법에 대해서도 정확도의 향상이 이루어지고 있다. 지반 물질에 대한 열전도특성은 여러 분야에서 사용되고 있다. 예로 도로포장재료나 CO₂ 지중저장 기술, 에너지 파일 시스템 설비 등에서 적용되고 있다. 지반은 흙과 공기, 그리고 물로 이루어진 3상 구조로 되어있다. 따라서 지반은 상재하중과 입도분포, 공극비, 포화도등에 의해 그 특성의 영향을 크게 받는다. 지반의 열 특성 또한 그러한 것들의 영향을 받게 된다. 지반에서 중요하고 가장 기본적인 열물성치로는 열전도도와 열확산율, 그리고 비열을 들 수 있다. 열전도도 K는 열확산율 α 는 다음과 같은 식(1), (2)에 의해서 지배된다.

$$\frac{dQ}{dt} = -KA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} \quad (2)$$

기존까지는 주로 열물성치의 획득을 위하여 Transient Line Source(여기부터 TSL로 표기) 방법이 널리

사용되었다. 이는 ASTM (ASTM D5334-00, 2000)에 명기된 열전도를 산정하는 표준실험 방법이고 가장 널리 사용되어 온 방법이다 [2]. 하지만 이 방법은 센서의 길이가 3cm 이상이고 약 2분 정도로 비교적 길게 측정을 해야 하므로 오랜 시간 열이 가해질시 교란을 받을 수 있는 시료에 대해서는 즉각적인 실험이 불가능하다는 단점이 있다[Al-Ajlan, Saleh A. (2006)].

따라서 본 연구에서는 비교적 최근에 개발된 Transient Plane Source (여기서부터 비정상면열원법)를 사용하였다. 이 비정상면열원법은 1979년 스웨덴의 Gustafsson에 의해서 등방성의 균질성을 지닌 물질에 사용하도록 개발되었다[Lihan Huang; Lin-Shu Liu (2009), Almanza, O et.al (2004), Bentz, D. P. (2007)]. 이 논문에서는 비정상면열원법을 이용하여 특정시료의 포화도를 달리하여 실험을 수행하였고 해석 알고리즘의 작성을 통하여 이를 해석하였다.

2. 기본 해석과 센서의 수립

2.1 알고리즘

전술한 것과 같이 TSL 방법은 이제까지 가장 널리 사용되어 온 방법이다. 이 방법은 1mm 지름의 작은 칩을 시료에 삽입하여 사용한다. 이 칩안에 열을 발생시키는 저항과 열에 따라 미세한 전압의 변화를 일으키는 Thermocouple이 같이 삽입된다. 열저항에 직류전원이 가해지면 열이 발생하고 그 열이 재료로 소산된다. 그에 따른 시간 대 온도 변화를 Thermocouple로 측정한다. 이 때의 지배방정식은 다음과 같다[Yun, T.S.; Santamarina, J.C. (2006)].

$$\Delta T = T - T_0 \cong \frac{Q_L}{4\pi K} \left[\ln(t) - 0.5772 - \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha}\right) \right] \quad (3)$$

이와 비슷한 과정으로 비정상면열원법도 해석이 된다. 하지만 비정상면열원법은 TSL 방법과 비교하여 몇 가지 장점을 가지고 있다. 전술한대로 TSL 방법의 경우는 비교적 긴 센서의 길이와 2분이라는 측정 시간이 필요하지만, 비정상면열원법은 정사각형에서 열이 발산되는 요건만 만족하면 되기 때문에 크기에 제약을 받지 않는다. 또한 측정 시간은 15-20초면 해석하는데 충분한 자료가 얻어진다. 본 연구에서는 비정상면열원법에서 Resistance Temperature Detector (여기서부터 RTD)라 불리는 센서를 사용하였다. 기본적으로 온도에 따라서 저항이 변하는 과정을 측정함으로써 (Thermocouple의 역할과 같이) 열전도도나 열확산율 같은 열물성치를 구하게 된다. 직류전원을 가하면 저항에서 면을 따라서 에너지가 발생하고 이 열은 시료로 확산되어 시간에 따른 온도 변화를 일으킨다. 시간에 따른 온도 변화는 식(4)에 의하여 지배된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{Q_p}{\rho C_p} \quad (4)$$

면을 따라 열이 소산되는 과정은 다음과 같은 식에 의하여 표현된다[Gustafsson et.al (1979), Gustafsson; Silas E. (1991)].

$$\begin{aligned} \Delta T(\tau) &= T(\tau) - T_0 \\ &= \frac{P}{4aK\sqrt{\pi}} \int_0^\tau \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\nu}\right) - \frac{\nu}{\sqrt{\pi}} \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\nu^2}\right) \right] \right\}^2 d\nu \end{aligned} \quad (5)$$

식. 5에서 P는 열원으로부터 방출된 파워를 나타낸다. 정사각형의 열원에 대해서는 P는 $4a^2Q_p$ 이다. Q_p 는 단위 부피로부터 생성되는 열에너지이고 K는 열전도도, a 는 열확산율, a 는 정사각형 모양의 센서의 절반을 나타낸다. erf는 error function이다. τ 값은 무차원화된 시간 값인데 이는 열을 가한 실험시간으로

부터($t-t_c$) 결정된다. t_c 는 센서에서 발생한 열이 센서를 뚫고 나오는데 걸리는 임의의 시간이고 v 는 0에서 τ 까지 변화하는 독립변수이다.

$$\tau = \frac{\sqrt{(t-t_c)\alpha}}{a} \quad (6)$$

$$H(\tau) = \int_0^\tau \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{1}{v}\right) - \frac{v}{\sqrt{\pi}} \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{v^2}\right) \right] \right\}^2 dv \quad (7)$$

식(7)을 식(5)에 대입하여 간단히 표기하면 다음과 같다.

$$\Delta T(\tau) = \frac{P_{av}}{4aK\sqrt{\pi}} H(\tau) \quad (8)$$

P_{av} 와 a 값 등은 모두 상수이므로 결국 $\Delta T(\tau)$ 와 $H(\tau)$ 는 선형관계가 되도록 식이 구성되어 있다는 걸 알 수 있다. $\Delta T(\tau)$ 와 $H(\tau)$ 의 선형관계는 수치반복계산을 통하여 찾아낸다[Gustafsson;Silas E. (1991),Rosenbaum,Eilis J. et.al(2007)]. 이러한 과정은 본 연구에서는 상용 프로그램 MATHCAD를 이용하여 수행하였다. $P_{av}/4aK\sqrt{\pi}$ 는 이러한 과정 후에 구해진 선형관계의 기울기로써 열전도도 K 를 산정하기 위해 사용된다.

2.2 센서 수립

본 연구에서 사용된 비정상면열원법의 센서는 앞서 기술한 것과 같이 RTD센서를 이용하였다. RTD센서는 Vishay micro measurement사의 ETG-50B/W를 사용하였다 [그림. 1]. 센서내부의 열이 실제로 발생하는 저항은 가로,세로 각각 3.18mm의 정사각형 모양이고 두께 0.13 mm의 고순도 니켈로 제작되어 있다.

RTD센서의 저항변화를 측정하기 위해 휘트스톤브리지 회로를 사용하였다. 이 회로는 그림. 2와 같이 정밀한 저항3개와 하나의 RTD센서로 구성되어 있다. RTD센서가 온도에 따라 저항이 변하고 회로의 평형상태가 무너지면서 V_{out} 에서 전압의 변화가 측정된다[Boumaza,T; Redgrove,J.(2003)]. 가한 전압과 저항들의 관계는 식(9)와 같다. V_{ex} 는 가한 전압, R_0 는 설치된 정밀 저항치, 그리고 R_w 는 선의 저항치이다.

$$R(\tau) = R_o \frac{V_{EX} + 2V_{Out}}{V_{EX} - 2V_{Out}} - R_W \quad (9)$$

하지만 이 연구에서는 두 개의 RTD센서를 정밀하게 부착하여 사용하였다. 이는 두 개의 저항을 맞붙임으로써 다수의 실험에도 내구성을 가질 수 있을 것이라 판단되었다. RTD센서가 모래나 진흙과 같은 지반재료에 삽입될 시 지반재료 실험 특성상 상재하중을 가한다든지, 다짐이나 진동을 주어야 할 경우가 많다. 실험 중에 그러한 과정에서 자칫 조금이나마 휘어질 가능성이 있고 이는 비정상면열원법의 핵심



그림. 1 RTD센서

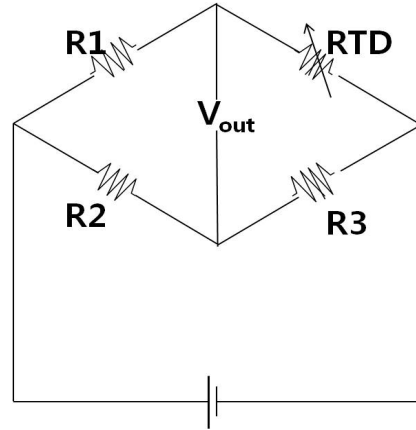


그림. 2 실험에 사용된 휘트스톤 브리지 회로

인 평면의 열원 해석에 오차를 초래 할 수도 있다. 또한 두 개의 평면에서 동시에 열이 퍼져나가게 되므로 t_c 로 인한 작은 오차도 상쇄할 수 있다고 판단된다. 그림. 2에 표시된 정밀저항 R2를 또하나의 같은 저항의 RTD로 대체하였다. 두 개의 센서를 사용하므로 실제로 저항에 가해진 열원은 두배가 된다. 이를 고려하여 위의 식을 수정하여 유도하였다 [식(10)].

$$R(\tau) = R_o \frac{V_{EX} + V_{Out}}{V_{EX} - V_{Out}} - R_W \quad (10)$$

2.3 센서 보정

RTD센서는 열 발생과 온도센서 두가지의 기능을 수행한다. RTD센서 자신도 정밀저항이므로 여기서 열 에너지가 발생하고 이 에너지가 측정을 위한 시료로 퍼져나가면서 열전도도와 열확산율을 측정하게 된다. 이러한 열 소산은 RTD센서의 온도변화, 즉 저항변화로 측정이 가능하며 이를 위하여 온도에 따른 저항변화 관계식을 산출하였다. 센서는 0.01도의 분해능으로 온도 조절이 가능한 순환조에 직접 설치하여 측정되었다. 일반적인 실험조건이라 생각되는 영상 30에서 영하 -10까지의 온도 범위에 대하여 측정을 수행하였다. 결과는 식(11)과 그림. 3과 같다.

$$T = 3.82475R - 173.27072, \quad R^2 = 0.99986 \quad (11)$$

2.4 열물성치 산정

열전도도와 열확산율을 구하기 위한 식(5)는 측정 후 전술한대로 상용 코딩프로그램 MATHCAD를 이용, 반복계산을 통하여 구해낸다. 이에 관한 과정은 다음과 같다.

- 전압을 가한 후 온도 변화에 따른 V_{out} 을 데이터로거로 측정한다. V_{out} 은 RTD의 온도변화에 의해서 일어난다. 0.1초 단위로 20초간 로깅하여 총 200개의 데이터를 얻는다. 데이터로거는 Agilent technology사의 34972A 제품을 사용하였다.
- 측정동안에 멀티미터를 이용하여 회로에 흐르는 전류를 측정, 기록한다. 이는 V_{ex} 와 함께 P_{av} 를 산정하는데 사용된다.
- 시간에 따라 측정된 V_{out} 을 식(11)을 통하여 온도로 환산하고 환산된 온도를 통해 식(5)의 좌변, ΔT 를 산정한다. 식(6)에서의 초기 열확산율을 가정하고 이를 식(7)에 대입한다.

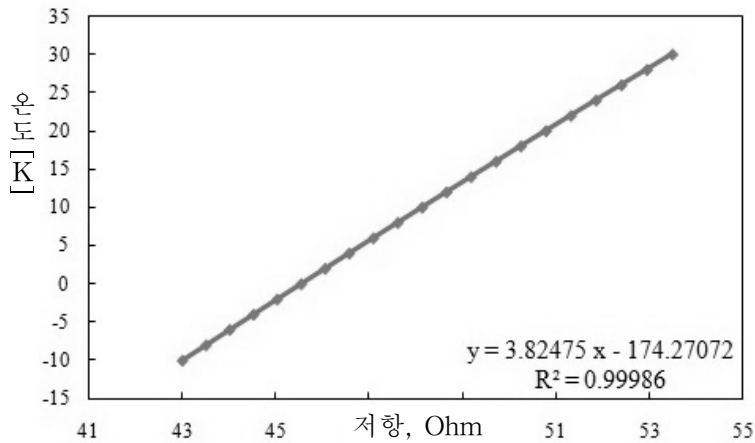


그림. 3 센서의 온도에 따른 저항치의 변화 관계식 수립

- 초기 열확산율 값을 1%씩, 2000% 까지 증가시켜 2000개의 가정된 열확산율에 따라 반복계산, 식(7)의 $H(\tau)$ 의 값을 계산한다.
- 위에서 산정된 ΔT 와 $H(\tau)$ 가 최적으로 선형회귀되는 지점의 열확산율을 선택한다. 2000번의 반복계산중 최적의 R2 값을 나타낸 열확산율이 택해진다.
- 선형으로 회귀된 ΔT 와 $H(\tau)$ 의 관계에서 기울기 $P_{av}/4aK\sqrt{\pi}$ 가 구해지고 여기서 열전도도 K가 구해진다.

3. 실험 및 결과

3.1 센서의 검증 실험

지반재료를 이용하여 실험하기에 앞서 이미 열 물성치가 표준화 되어 있는 물질에 대하여 검증을 실시하였다. 검증을 위하여 액체인 글리세린과 고체인 얼음을 선택하였다. 실험용으로 정제되어 생산된 글리세린을 이용하였고 얼음은 탈기된 물을 사용하여 용기에 담은 후 순환조 내부의 온도를 영하 -10도로 설정하였다. 센서는 얼리기 이전에 미리 담근 후 충분한 냉각시간 후에 측정하였다. 문헌에 기록된 각각의 열전도도 K와 열확산율 α 는 글리세린 $K=0.286 \text{ W/mK}$, $\alpha=9.47 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 그리고 얼음은 $K=2.22 \text{ W/mK}$, $\alpha=12.6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 이다 (Appendix A of Heat transfer, J.holman[tenth edition]).

측정결과 각각 글리세린의 경우 $K=0.296 \text{ W/mK}$, $\alpha=9.92 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 으로, 얼음의 경우 $K=2.2248 \text{ W/mK}$, $\alpha=12.85 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 측정되었다. 이는 모두 문헌의 값과 2-5% 이내의 차이를 보이는 것이다. 측정시 온도의 변화에 따른 그래프는 그림. 4와 같다.

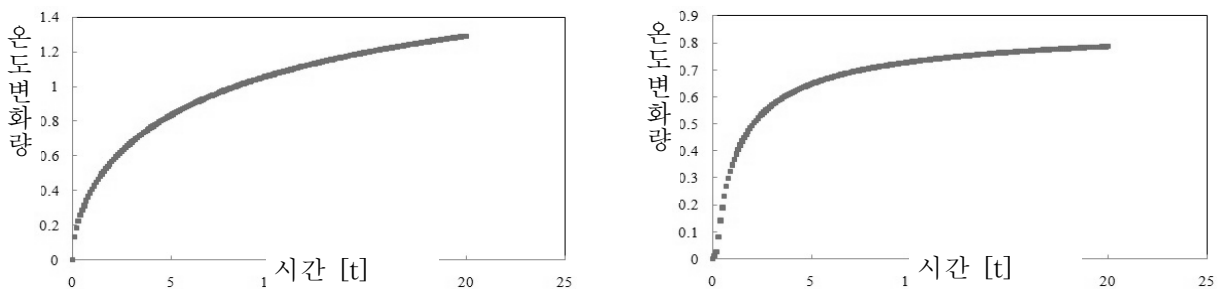


그림. 4 데이터로거로 측정된 글리세린과 얼음에 대한 측정시간 20초동안의 온도 변화

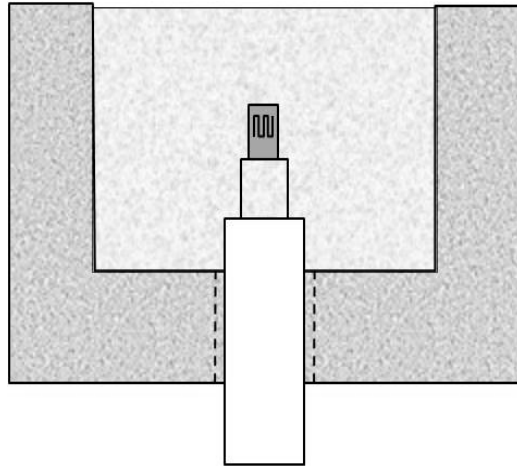


그림. 5 셀에 설치된 RTD센서 도시

3.2 실험 설치

지반재료의 기본적인 열전도도 특성 파악을 위하여 실트질 모래를 이용하여 열전도 측정실험을 수행하였다. 시료는 동해에서 시추된 약간의 점착력이 있는 실트질 모래를 사용하였다. 지반재료는 공극비나 포화도, 입도분포에 따라 크게 물성이 좌우되므로 본 실험에서는 공극비를 통제된 상태에서 포화도를 변화시켜 실험을 진행하였다. 공극비는 0.467로 정교하게 제어하여 실험을 하였다. 포화도는 각각 0%, 15%, 30%, 75%, 100%로 맞추었다. 센서고정을 위해 RTD 센서를 3/8 inch의 스테인리스강 튜브안에 삽입한 후 에폭시로 채워넣었다. 또한 스테인리스강 튜브에 온도 경계가 닿을 것을 우려하여 추가로 폴리에틸렌 필름튜브를 스테인리스강 튜브 끝에 5 mm 만큼 돌출되도록 하였다. 필름 튜브에도 에폭시를 채워, 그 위에 RTD를 설치하였다. 이렇게 만들어진 센서 세트는 실험을 위한 원통형 셀에 튜브 피팅을 사용하여 바닥면을 관통, 완전히 밀봉하여 설치하였다 [그림. 5].

실험용 셀은 지름 40 mm에 30 mm 높이의 원통으로 제작하였다. 이 정도의 크기는 20초간의 실험중에 열소산의 경계가 셀 벽면에 닿지 않을 만큼 충분히 크다고 사료된다. 센서는 시료를 성형하기 전 미리 삽입하였다. 이는 센서를 후에 강제로 삽입할 경우 자칫 센서의 휨을 유발할 수 있고 삽입하면서의 교란으로 인하여 센서주변의 시료가 연속적으로 형성되지 않을 수 있기 때문이다.

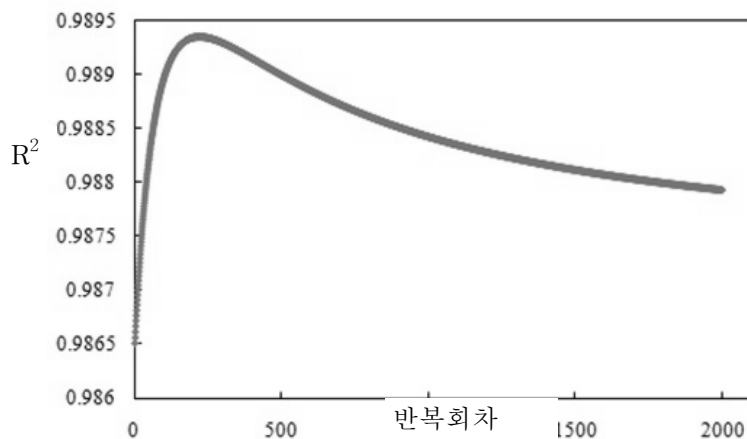


그림. 6 최적의 R² 값의 산출 그래프

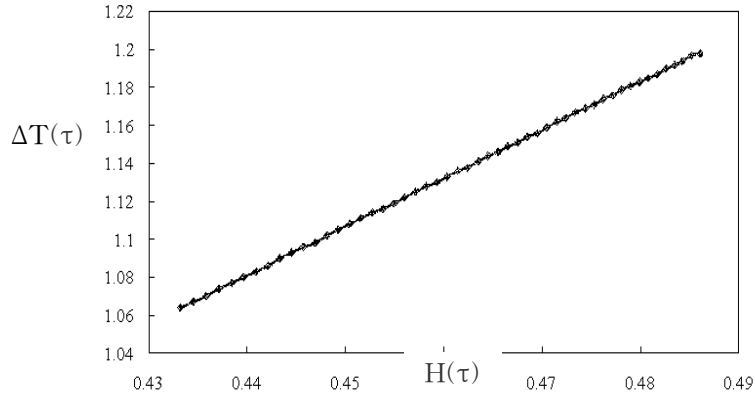


그림. 7 $\Delta T(\tau)$ 와 $H(\tau)$ 의 선형관계 도식

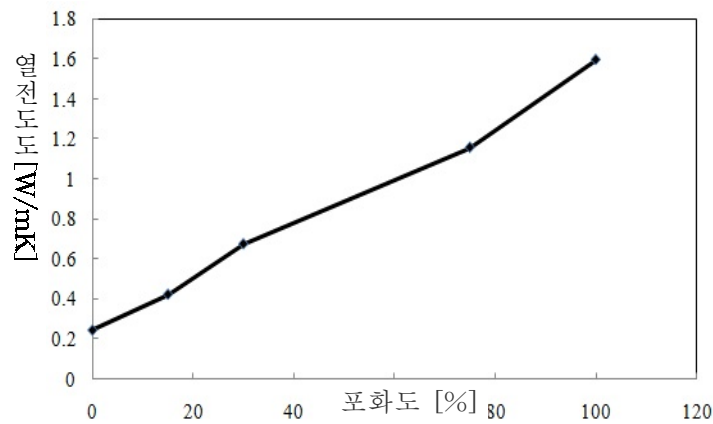


그림. 8 포화도에 따른 시료의 열전도도 변화

3.3 시료의 열전도도

전원은 1.5V를 가하였다. 두 개의 RTD를 부착하는 형식으로 센서를 제작하였기 때문에 충분한 열원으로 확인한 온도변화와 깨끗한 신호를 관찰할 수 있을 것으로 판단되었다. 실험결과, 2.4에서 설명한 알고리즘에 따라 두 변수의 최적의 선형회귀 과정을 그림. 6에 나타내었다. 확인한 ΔT 와 $H(\tau)$ 의 선형관계가 그림. 7와 같이 관찰되었다. 측정된 열전도도는 포화도가 증가함에 따라 함께 증가하는 것이 확인하게 관찰되었다. 각각의 포화도에 따른 실험결과는 그림. 8과 같다.

흡 입자 자체의 열전도도는 입자 구성물질에 따라 다르지만 공기의 열전도도 0.024 W/mK과 0.58 W/mK 에 비하여 3에서 8.4 W/mK의 큰 값을 나타낸다[Clauser,Christoph;Huenges,Ernst.(1995)]. 포화도에 따른 열전도도 증가는 공기로 채워져 있던 간극이 물로 대체되면서 흡 입자와의 열전달의 가교 역할을 하였기 때문으로 생각된다. 적용한 비정상면열원법은 물론 지반 물질에 대해서는 물, 공기, 입자의 혼합물의 등가적인 열전도도를 구한 것이다.

4. 결론

비정상열원면법은 비교적 기존에 사용하는 방법들 비해서 최근에 개발된 이론이다. 이는 기존의 방법과 비교하여 열전도도와 열확산율을 보다 빠른시간에 간단하게 구할 수 있는 방법이다. 본 연구에서는 RTD센서의 온도에 따른 저항변화를 이용하여 에리함수를 통한 시간에 따른 열전도의 지배방정식을 수립하였다. 수립된 지배방정식을 상용프로그램인 MATHCAD를 이용하여 수치반복계산을 하였다. 0.1초

의 간격으로 20초동안 측정하여 문헌 등에 이미 알려진 물질인 글리세린과 얼음에 대해 5% 오차범위 이내의 열물성치를 산출할 수 있었다. 기반재료에 이 방법에 대한 적용을 시도하기 위하여 두 개의 RTD센서를 정교하게 부착하여 내구성을 향상시켰다. 본 실험에서는 동해에서 시추된 실트질 모래를 대상으로 포화도를 0-100 %로 달리하여 수행하였다. 기반재료의 열전도도는 공극에 따라서 종류에 따라 값이 민감하게 변화할 수 있기 때문에 정교하게 공극비를 제어하여 실험을 수행하였다. 실험결과 포화도의 증가에 따른 열전도도의 향상을 뚜렷히 관찰할 수 있었다. 열전도도가 증가하는 경향에 대한 평가가 이루어지기 위해서는 시료의 입자에 대한 열전도도 평가가 혼합물질에 대한 기존연구들을 통해 간접적으로 면밀히 이루어져야 할 것으로 생각된다. 또한 정확도 향상을 위하여 다양한 종류의 기반재료에 대해서 실험이 추가로 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Lihan Huang and Lin-Shu Liu (2009). "Simultaneous determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of food and agricultural materials using a transient plane-source method" *Journal of Food Engineering* 95, pp179 - 185
2. Yun , T. S. and Santamarina , J. C. (2006), "Fundamental study of thermal conduction in dry soils" *Granular matter* 10, pp197-207
3. Almanza, O. Rodríguez-Pérez,MA. and Saja,JA de (2004). "Measurement of the thermal diffusivity and specific heat capacity of polyethylene foams using the transient plane source technique." *Polymer International* 53, pp2038 - 2044
4. Bentz, D. P.(2007). "Transient plane source measurements of the thermal properties of hydrating cement pastes" *Materials and Structures* 40, pp1073 - 1080
5. Boumaza,T. and Redgrove,J.(2003). "Use of the Transient Plane Source Technique for Rapid Multiple Thermal Property Measurements" *International Journal of Thermophysics* 24(2), pp501-512
6. Gustafsson , Silas E., Karawacki,Ernest. and Khan, M. Nazim (1979). "Transient hot-strip method for simultaneously measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of solids and fluids" *Journal of Physics*12, pp1411
7. Gustafsson , Silas E. (1991). "Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials" *Review of Scientific Instruments* 62(3), pp797 - 804
8. Rosenbaum,Eilis J., English,Niall J., Johnson, Karl., Shaw, David W., and Warzinski,Robert P.(2007). "Thermal Conductivity of Methane Hydrate from Experiment and Molecular Simulation" *Journal of Physical Chemistry* 111(46), pp13194-13205
9. Al-Ajlan,Saleh A.(2006). "Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique" *Applied Thermal Engineering* 26, pp2184 - 2191
10. Clauser,Christoph. and Huenges,Ernst.(1995). "Thermal Conductivity of Rocks and Minerals" *Rock Physics and Phase Relations* 3