

TPS를 통한 열물성치 획득 및 네트워크모델을 이용한 열해석 Measurement of thermal properties by TPS-technique and thermal network analysis

윤태섭¹⁾, Tae Sup Yun, 김영진²⁾, Young Jin Kim

¹⁾ 연세대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

²⁾ 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

SYNOPSIS : Thermal characterization of geomaterials has significant implication on the geothermal energy, disposal of nuclear wastes, geological sequestration of carbon dioxides and recovery of hydrocarbon resources. Heat transfer in multiphase materials is dominated by the thermal conductivity of consisting components, porosity, degree of saturation and overburden pressure, which have been investigated by the empirical correlation at macro-scale. The thermal measurement by Transient Plane Source (TPS) and associated algorithm for interpretation of thermal behavior in geomaterials corroborate the robustness of sensing techniques. The method simultaneously provides thermal conductivity, diffusivity and volumetric heat capacity. The newly introduced thermal network model enables estimating thermal conductivity of geomaterials subjected to the effective stress, which has not been evaluated using previous thermal models. The proposed methods shows the applicability of reliability of TPS technique and thermal network model.

Keywords : thermal property, transient plane source, network model, geomaterials

1. 서론

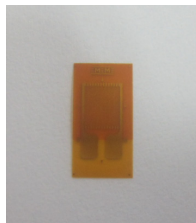
지반물질 내에서의 열전달 현상은 지열에너지의 이용, 이산화탄소의 지중저장, 핵폐기물의 처리등 열과 관련된 공학적 응용분야에서 중요한 물리적 현상이다. 지반물질은 공기, 물, 입자로 구성되어 있는 다상물질로 열전달 현상은 입자의 크기 및 형태, 입자를 구성하는 미네랄, 공극률, 공극수의 특징 및 유효응력등의 인자들에 의해 결정된다. 실험에 의한 열전달 현상 측정은 열탐침에 의한 흙과 암석의 열전도도 측정에 대한 표준실험법(ASTM D5334-00)을 주로 이용해왔다. 탐침에 의한 측정법은 발열을 위한 열저항과 온도측정을 위한 열센서(thermocouple)가 직경 1-2mm 가량의 금속탐침내에 봉인되어 탐침이 삽입된 주변 물질의 열전도 특성에 따라 주어진 열에너지의 확산정도가 측정되는 방식으로 열전도도를 산출한다. 이 기법은 방사상으로 열을 발산시키기 때문에 탐침이 반드시 재료에 삽입되어야 하며 측정시간이 최소 2분 이상이 되어야 하므로 재료내 삽입이 곤란한 경우에는 사용에 제약을 받으며 측정시간 역시 길다는 단점이 있다. 반면, transient-plane source (TPS) 에 의한 열물성치 측정기법은 Gustafsson등 (1979)에 의해 제안된 다양한 종류의 센서 형태에 따른 실험기법이 꾸준히 발전해왔다. 본 기법은 2차원 평면으로 가정된 열저항에서 발열을 시키고 동시에 주변물질에 따른 온도 변화를 짧은 시간내에 (10초이내)에 측정할 수 있으며, 열탐침법과는 달리, 열전도도 뿐만 아니라, 열확산률 및 체적비열을 동시에 산출이 가능하다는 장점이 있다. 실험에 의한 측정법 이외에 열전도 현상에 대한 지금까지의 해석은 대부분 구성 인자들을 바꾸어가며 획득된 실험값에 기초한 경험식을 제안하거나 지반 물질을

구성하고 있는 구성체의 체적비를 이용한 혼합재료 모델등을 통해 수행되어 왔다. 하지만 경험식은 쉽게 획득하기 어려운 계수들을 포함하고 있어 범용으로 사용이 제한되고 물리적 현상이 반영되어 있으며, 혼합재료모델은 체적비만을 사용하기 때문에 유효응력증가에 따른 지반물질의 변화를 반영하지 못한 채 상,하위 경계만을 제안하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 지반물질에 적용가능한 TPS 기법을 이용한 새로운 실험기법 및 결과의 해석법, 그리고 3차원 네트워크 모델을 이용한 열전도 현상의 해석법에 대한 내용을 제시한다.

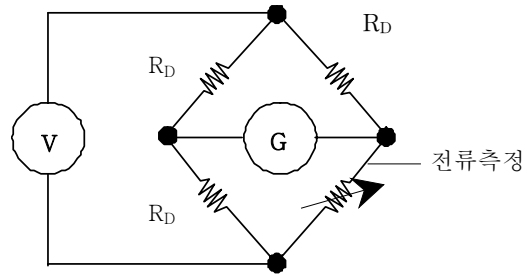
2. Transient Plane Source에 의한 열전달 현상 측정법

2.1 센서의 구성

TPS 기법을 이용한 열전달 계수(열전도도, 열확산률, 체적비열)를 산출하기 위해 본 연구에서는 Resistance Temperature Detector(RTD, Micromesurement, Inc. ETG-50B)를 사용하였다 (그림 1-a). 50ohm의 자체저항값을 갖는 본 연구에서 사용된 RTD센서는 내부에 니켈로 구성된 열저항선이 있으며, 온도에 따른 저항값이 선형으로 증가한다. RTD센서는 휘트스톤 브릿지를 사용하여 50ohm의 정밀저항과 아래와 같이 구성하였다 (그림 1-b). 회로에 적용되는 DC전압은 약 1-2V로 했으며 검류계(G)에서 측정되는 전압차는 매 0.1초마다 측정하였다. RTD센서내로 들어가는 전류를 측정하여 RTD에서 발휘되는 에너지를 산출할 수 있다.



(a) RTD 센서



(b) 휘트스톤 브릿지의 RTD 센서

그림 1. TPS기법 적용을 위한 RTD센서 회로

2.2 해석 알고리즘

정사각형 형태의 얇은 막 형태의 열원이 무한한 등방성 매질내에 있다고 가정할 경우 시간에 따른 온도의 변화는 식(1)에 따라 정의된다 (Gustaffson, 1991).

$$\Delta T(\tau) = T(\tau) - T_0 = \frac{P}{4aK\sqrt{\pi}} H(\tau), \quad H(\tau) = \int_0^\tau \left\{ \text{erf}\left(\frac{1}{v}\right) - \frac{v}{\sqrt{\pi}} \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{v^2}\right) \right] \right\}^2 dv \quad (1)$$

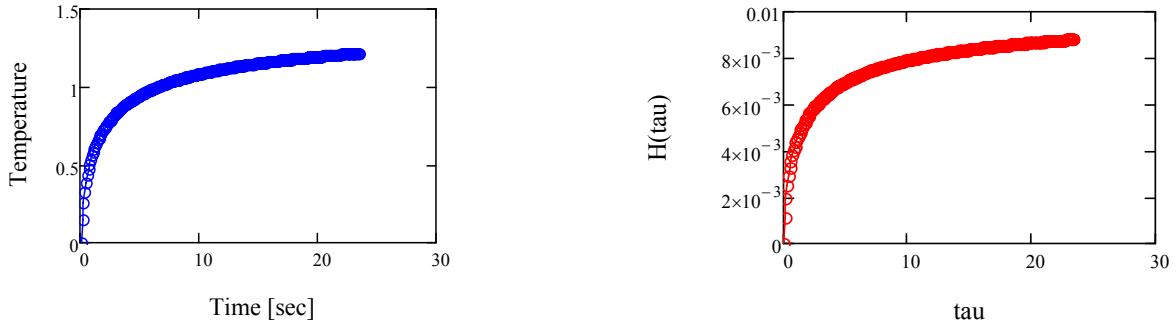
$$\tau = \frac{\sqrt{t_{\text{measured}} \cdot \alpha}}{a} \quad (2)$$

여기서 P는 센서에서 발휘되는 열량, K는 열전도도, a는 센서크기의 1/2, a는 열확산률, t는 시간을 나타낸다. H-함수는 열확산률에 따라 정의되는 τ 값에 따라 결정된다. 따라서 실험을 통해 구한 시간에 따른 온도 변화의 양상 ΔT 와 임의로 가정된 다양한 열확산률 값에 따른 H(τ)값을 순차적으로 비교하여, 최

소에러가 발생할때의 α 값을 측정에 사용된 매질에서의 열확산률로 정의한다. 또한 식(1)를 재배열하면, 열전도도 K ,와 체적비열 c_{p_volume} 은 식(3)과 같이 구할 수 있다.

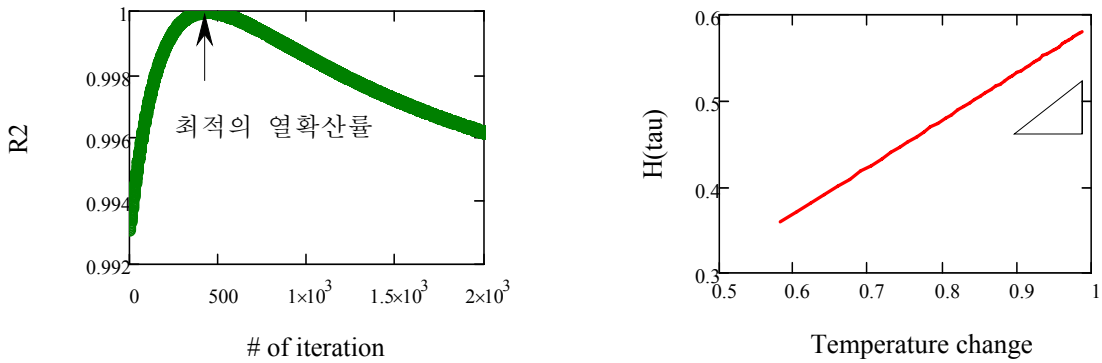
$$K = \frac{P}{4a\sqrt{\pi}} \frac{H(\tau)}{\Delta T(\tau)}, \quad c_{p_volume} = K/\alpha \quad (3)$$

시간에 따라 획득된 시간에 따른 온도변화, $H(\tau)$ 함수의 경향, 순차적 연산을 통해 최적의 열확산률에서의 R2값, 그리고 최적의 열확산률에서의 H 함수와 온도변화의 선형적 관계를 나타낸다.



(a) 시간에 따른 온도 증가 양상

(b) H함수값의 변화 양상



(c) 순차연산을 통한 최소에러 산출

(d) 온도증가와 H함수간의 선형관계

그림 2. 실험 및 해석을 통해 획득된 온도변화 및 H함수와와의 관계

실험간 측정은 약 20초가량 진행되었으며 해석시에는 1-6초에서의 온도측정값을 사용하였다. 그림 2(d)의 기울기는 식(3)의 두 번째항에 적용되며 회로에 가해진 전압과 RTD센서로 들어가는 전류의 측정값을 통해 얻어지는 열에너지P를 통해 열전도도가 산출된다.

3. 네트워크 모델을 이용한 열전도 해석

열전도 네트워크 모델을 적용하기 위해서는 지반 재료를 대표할 수 있는 3차원 입자구조내에서의 열흐름을 수치적으로 표현하는 것이 필요하다. 3차원내 입자들에서의 열흐름은 입자들간의 접촉점을 통해 주로 발생하며 공극을 채우고 있는 물질에 따라 좌우된다. 따라서, 입자들을 통해 전파되는 열전달 현상은 3차원 입자 시스템에서 입자(node)들이 열전도 스프링(bond)에 의해 서로 유기적으로 연결되어 있다는 가정하에 에너지 보존법칙을 적용하면, 입자(node) i 와 j 간에 흐르는 열에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{i \rightarrow j} q_{ij} = C_{ij}(T_i - T_j) = 0 \quad (4)$$

여기서 q_{ij} 는 입자 i 와 j 간에 흐르는 열, C_{ij} 는 열전도력(thermal conductance, W/K), T_i , T_j 는 입자 i 와 j 에서의 온도이다. 식(4)는 시스템내의 모든 입자들간의 관계를 표현할 수 있는 다음과 같은 매트릭스 형태로 표현된다.

$$\Phi \cdot \mathbf{T} = \mathbf{W} \quad (5)$$

$$\Phi_{ij} = \delta_{ij} \sum_{k \rightarrow i} C_{ki} - C_{ij} = 0 \quad (6)$$

여기서 Φ 는 시스템내의 입자수와 같은 크기를 같은 전도력 대칭매트릭스, \mathbf{T} 는 입자들의 온도 매트릭스, \mathbf{W} 는 경계조건에 따라 일정한 상수값을 갖는 고정된 온도값 매트릭스, δ_{ij} 는 크로네커 델타이다. 따라서 경계조건에 의해 부여된 온도차에 의해 입자가 갖는 온도 T 매트릭스는 순차적으로 연산이 가능하며 이는 가우스-시텔 기법에 의해 구해진다. 연산은 매 스텝마다의 온도차비율이 0.01보다 작을때까지 계산되었다. 그림 3와 같이 입자의 접촉정도는 분리되어 있는 경우와 일정한 오버랩을 가지고 겹쳐있는 경우로 나눌 수가 있으며 두 개 입자 사이의 열전도력은 입자 i 와 j 의 전도력과 접촉점에서의 전도력을 시리즈(series)형태로 합한 유효 열전도력(C_{eff})으로 표현이 가능하다.

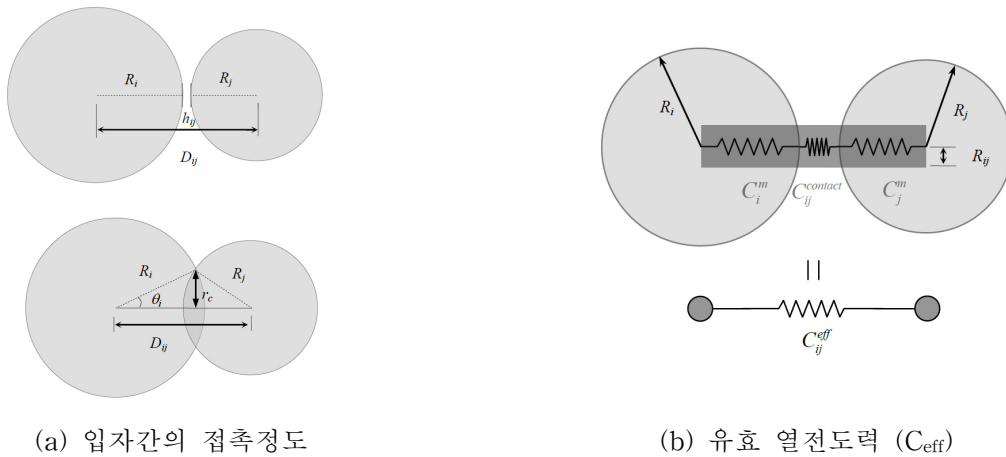


그림 3. 입자의 접촉정도에 따른 유효 열전도력 산출

입자접촉정도에 따른 열전도력 매트릭스 구성은 Batchelor와 O'Brien(1977)이 제안한 2개 입자간의 열전도현상에 대한 유도식을 적용하였다. 수렴된 입자에서의 온도를 결정한 후 2개 입자간의 열량(q_{ij})은 두 값의 곱으로 표현되며 주어진 단면적 A 를 통해 흐르는 전체 열량을 합한후, 입자시스템에서의 열전도도 (K_{eff})는 푸리에 법칙을 사용하여 산출하였다.

$$K_{eff} = \sum q_{ij} \frac{L}{A} \frac{1}{\Delta T} \quad (7)$$

여기서 L 는 시스템의 길이이고 ΔT 는 경계조건간의 온도차이다. 해석에 사용된 연산코드는 MATLAB을 이용하여 구성되었다.

그림 5는 약 2000개 입자를 갖는 2차원에서의 열전도력 네트워크를 개념적으로 보여준다. 각각의 선은 입자를 연결하는 유효 열전도력을 나타내며 굵은선은 큰 값을 갖는 전도력을 표현한다(실제 수치해석은 3차원에서 수행되었으며 2차원 네트워크는 랜덤하게 분포한 입자간의 결합정도에 따른 전도력의 분포를 보여주기 위해 임의로 생성된 모사 이미지이다).

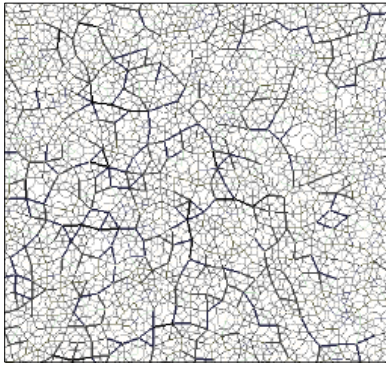


그림 4. 2차원에서의 열전도력 분포도

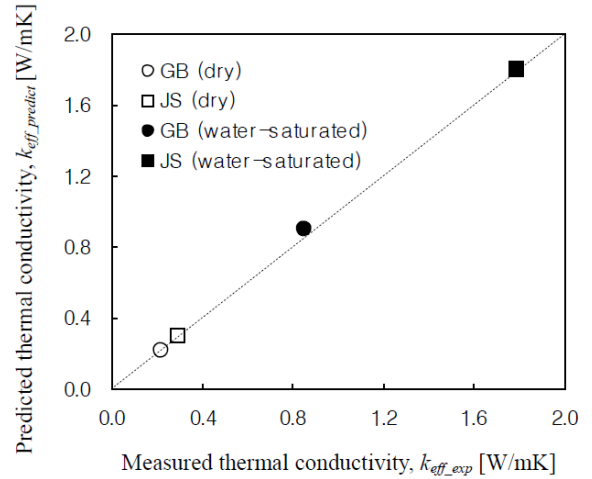


그림 5. 실험값과 수치해석값과의 비교

4. 실험결과 및 모델 검증

건조 상태와 100% 포화상태의 글라스비드(GB)와 주문진 표준사(JS)에 RTD센서를 직접 삽입하여 위에 기술한 바대로 실험을 수행하였다. 또한 유한요소법 (PFC3D)를 사용하여 실험에 사용된 시료와 동일한 입자분포도 및 공극률을 갖는 모사시료를 생성하였다. 그림 5는 유한요소법으로 생성된 모사시료 및 열전달이 평형상태에 이르렀을 때의 입자내 온도분포도이다. 상하부의 온도차는 4도로 일정하게 유지되어 경계조건을 부여하였다.

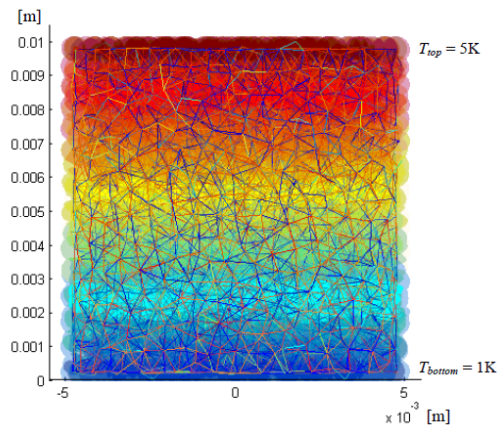
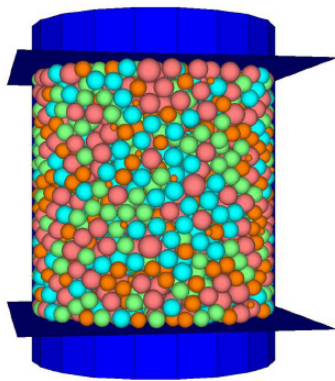


그림 5. 2500개 입자로 구성된 모사시료 및 네트워크모델을 이용한 입자내 온도 분포양상

TPS기법을 통해 측정된 열전도도와 열전도 네트워크 모델을 사용하여 수치적으로 획득된 값과의 관계는 그림 5에 나타난 바와 같다. 실험값이 물리적인 의미를 갖는 한계값은 최소값은 series, 최대값은 parallel 모델로 제한된다. 특히 100% 포화된 글라스 비드의 경우 고체물질의 열전도도가 1.1W/mK이고 물이 0.6W/mK를 갖기 때문에 최소-최대값의 범위가 0.85-0.93W/mK으로 정확한 실험값은 이 범위내에 위치해야 한다. 본 실험의 경우 측정된 값이 0.894W/mK으로 실험기법의 적용성을 검증할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구는 지반물질의 열전달 현상 측정을 위한 TPS기법을 사용하였고, 입자상 물질내에서의 열전도 해석을 위해 네트워크모델을 개발하였다. TPS기법은 발열과 온도측정이 동시에 가능한 정사각형 형태의 RTD센서를 휘트스톤 브릿지로 구성하여 구현하였다. TPS기법은 열전도도 뿐만 아니라 열확산률 및 체적비열을 짧은 시간에 산출할 수 있어 기존의 열탐침법에 비해 넓은 적용성을 갖는다. 2개입자간의 접촉정도에 따른 열전도력을 산출하는 유도식에 기반하여 실제 지반물질의 입자간 역학적 관계를 모사한 시료를 통해 열전달 네트워크 모델의 적용성을 검증하였다. 네트워크모델의 경우 지반물질의 구성물질간의 체적비에 의존하지 않고 입자간의 접촉정도 및 공극을 채우는 유체의 열전도도에 기반하기 때문에 공극률 뿐만 아니라 유효응력에 따라 증가되는 입자간 접촉면 증가, 그에 따른 열전도현상 변화를 평가할 수 있다. 글라스비드와 주문진 표준사를 통한 실측값과 실험에 사용된 시료와 동일한 공극률을 갖는 모사시료에 기반한 네트워크 모델의 비교 분석을 통해 실험과 수치해석 기법의 상호보완성 및 적용성 검증을 수행하였다.

참고문헌

1. ASTM D5334-00 Standard test method for determination of thermal conductivity of soils and soft rock by thermal needle probe procedure.
2. Gustafsson, S., Karawacki, E., and Khan, M.N. (1979). "Transient hot-strip method of simultaneously measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of solids and fluids" *Journal of Physics D: Applied Physics*, 12 p. 1411-1421.
3. Batchelor GK, and O'Brien RW. Thermal or electrical conduction through a granular material. *Proceedings of The Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences* 1977; 355(1682): 313-333.
4. Gustaffson, S.E. (1991). Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. *Rev. Sci. Instru.* 62, p. 797-804.