한국지반공학회논문집 제27권 9호 2011년 9월 pp. 77 ~ 86

하중 조건이 지반의 열전도도에 미치는 영향: 입자 스케일에서의 연구

Loading Effects on Thermal Conductivity of Soils: Particle-Scale Study

이 정 훈[1] Lee, Jung Hwoon
주 진 현[2] Choo, Jinhyun
윤 태 섭[3] Yun, Tae Sup
이 장 근[4] Lee, Jangguen
김 영 석[5] Kim, YoungSeok

Abstract

The stress condition mainly dominates the thermal conductivity of soils whereas governing factors such as unit weight and porosity suggested by empirical correlations are still valid. The 3D thermal network model enables evaluation of the stress-dependent thermal conductivity of particulate materials generated by discrete element method (DEM). The relationship among dominant factors is analyzed based on the coordination number and porosity determined by stress condition and thermal conductivity of pore fluid. Results show that the variation of thermal conductivity is strongly attributed to the enlargement of inter-particle contact area by loading history and pore fluid conductivity. This study highlights that the anisotropic evolution of thermal conductivity depends on the directional load and that the particle-scale mechanism mainly dictates the heat transfer in soils.

요 지

지반 물질의 열전도도는 경험식이 제안하는 단위 중량, 간극률 등의 영향 인자 이외에도 하중조건에 따라 크게 좌우된다. 본 논문에서는 개별요소법에 의해 생성된 입자상 지반재료의 열 전달 특성을 열 네트워크 모델로 해석하여 하중이 열전도도에 미치는 영향을 평가하였다. 하중의 변화에 의한 개별 입자들간의 접촉수 및 간극률, 간극수의 전도도에 따른 열전도도를 산출하여 영향 요소들간의 관계를 분석하였다. 전도도의 변화 양상은 전단강성도 분석과 유사하게 열전달 방향 및 하중 크기에 따른 멱함수 형태로 회귀분석이 가능하였다. 해석 결과 하중에 따른 입자간 접촉 면적의 증가 및 간극수의 전도도가 전체 입자상 물질의 열 흐름에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 열전도도의 이방성은 하중 방향에 의해 좌우되며 입자 스케일에서의 매커니즘이 열 흐름을 좌우하는 중요한 인자임을 보였다.

Keywords : Discrete element method, Thermal conductivity, Thermal network model

1. 서 론

건설 공사의 환경이 다양해지고 지반공학의 적용 범위가 점차 확장되면서 지반의 열전도도(thermal conductivity)가 주요 고려사항이 되는 공학적 문제가 증가하고 있다. 예를 들면, 동토 지반의 거동 특성은 온도 변화에 따라 변화하기 때문에, 극한지에서의 기반시설 건설 혹은 지구온난화에 따른 영구동토 지반의 거동 변화 예측 등은 지반의 열전도도를 핵심적으로 고려해야 하는 대표적인 문제들이다(Andersland과 Ladanyi, 2004). 또한 지열

1 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ.)
2 정회원, 한국건설기술연구원 전임연구원 (Member, Research Specialist, Korea Institute of Construction Technology, jinhyun@kict.re.kr, 교신저자)
3 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 조교수 (Member, Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ.)
4 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology)
5 정회원, 한국건설기술연구원 연구위원 (Member, Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

발전, 고압 저온 환경에 존재하는 가스 하이드레이트의 회수 등 에너지 및 환경과 관련된 다양한 연구 영역 역시 지반에서의 열전도 특성과 밀접한 관련을 갖고 있다(Cortes 등, 2009; Johnston 등, 2011). 이러한 필요에 의하여 최근 다양한 조건에서 신뢰성 있는 지반의 열전도 특성을 평가하고 예측하기 위한 연구들이 활발하게 진행되고 있다(Chen, 2008; Yun과 Santamarina, 2008; Cote 등, 2011; Fillion 등, 2011; Yun 등, 2011).

입자상 물질(particulate material)로 구성된 지반 내에서 열 흐름은 주로 입자와 입자 간 접촉면에서의 전도(conduction)에 의하여 전달되며, 열전도도는 입자 간의 접촉의 개수와 접촉 조건에 따라 변화한다(Yagi와 Kunii, 1957; Yun과 Santamarina, 2008). 이러한 원리 및 실험결과로부터 지반의 열전도도를 예측하기 위한 다양한 경험식들이 도출되어 사용되고 있으며, 이들은 열전도도를 건조단위중량(dry unit weight), 포화도(saturation), 간극률(porosity)에 의해 결정되는 특성으로 고려하고 있다(Johansen, 1975; Becker 등, 1992; Esch, 2004; Chen, 2008). 이는 지반을 입자와 간극으로 구분하고 각 물질의 열전도도 및 부피비에 따라 열전도도가 달라진다는 가정에 근거하고 있다. 그러나 실험 결과 지반의 열전도도는 하중, 입도분포, 교결(cementation)등 경험식에서 고려하지 않는 다른 조건들에 의해서도 변화한다(Singh과 Devid, 2000, Tarnawski 등, 2002; Vargas와 McCarthy, 2002; Esch, 2004). 따라서 다양한 조건에서의 열전도도를 보다 합리적으로 평가하고 예측하기 위해서는, 기존의 경험식에서 고려하지 않는 영향인자들에 대한 심층적인 연구가 필요하다.

지반의 공학적 활용은 대부분 하중 조건의 변화를 유발한다. 입자상 물질내 하중이 증가하면 간극률의 큰 변화 없이 열전도도가 변화함이 실험적으로 입증된 바 있으나(Vargas와 McCarthy, 2002) 다양한 하중조건에서 변하는 열전도도에 대한 특성화 연구는 아직 미흡한 실정이다. 특히, 조립토의 경우 하중 재하에 따른 간극률의 변화는 작은 반면 열전도도는 크게 증가할 수 있으므로 하중 재하 시 간극률 등의 기본 물성치를 동시에 고려한 열전도도의 변화에 대한 복합적인 평가가 필요하다. 본 논문에서는 입자 스케일에서의 수치실험을 통하여 조립질 지반의 열전도도에 대한 하중의 영향을 연구하였다. 개별요소법(discrete element method, DEM)으로 다양한 입자크기, 입도분포, 상대밀도, 하중 조건하에서 입자상 물질을 생성하고 3차원 열 네트워크 모델(thermal network model)을 이용하여 열전도도를 평가하였다.

2. 개별요소법과 열 네트워크 모델

본 연구에서는 입자 스케일에서 지반의 열전도도를 연구하기 위하여 수치적으로 입자상 물질의 역학적 거동을 구현하는 방법인 개별요소법과 임의로 배열된 입자들(random particle packing)의 열전도도 산정을 위한 3차원 열 네트워크 모델을 이용하였으며 각각에 대한 설명은 다음과 같다.

2.1 개별요소법

개별요소법(Cundall과 Strack, 1979)은 입자상 물질의 거동을 수치적으로 모사하기 위하여 개발된 방법으로, 입자 간 접촉 힘(contact force)으로부터 입자들의 운동을 시간 단계(time step)에 따라 반복 계산하여 입자상 물질의 거동을 구현한다. 이 접근법은 입자 간의 역학적 상호작용을 직접적으로 고려할 수 있기 때문에 연속체 구성 모델에서 모사할 수 없는 지반의 거동을 유사하게 재현할 수 있는 것으로 입증되었으며, 현재 다양한 목적으로 입자상 물질의 거동 특성 연구에 널리 사용되고 있다(O'Sullivan, 2011). 하중 조건에 따라 비선형적으로 변화하는 지반의 입자 간의 접촉 힘과 접촉 면적의 관계(contact constitutive relationship)는 Hertz-Mindlin 모델로 모사될 수 있으며(Yimsiri와 Soga, 2000; Holtzman 등, 2010), 접촉수직강성(contact normal secant stiffness)은 다음과 같이 정의된다(Mindlin과 Deresiewicz, 1953).

$$K^n = \left(\frac{2G\sqrt{2R}}{3(1-\nu)^2} \right) \sqrt{U^n} \tag{1}$$

그리고 접촉전단강성(contact shear tangent stiffness)은 식 (2)와 같다.

$$k^s = \left(\frac{2G^2 3(1-\nu)R}{(2-\nu)} \right)^{1/3} \left| F_i^n \right|^{1/3} \tag{2}$$

여기서 U^n은 접촉 입자 간 중첩되는 면적, $|F_i^n|^{1/3}$는 수직접촉력(normal contact force)의 크기이다. 식 (1)과 (2)에서 상수 R, G, ν는 각각 접촉 상태에 있는 입자의 반경(radius), 전단탄성계수(shear modulus), 포아송비

(Poisson's ratio)로 산정되는 값이며 입자 간 접촉일 때는 접촉 상태에 있는 두 입자의 특성을, 입자와 벽체의 접촉일 때는 입자의 값만을 고려한다.

2.2 열 네트워크 모델

열 네트워크 모델은 입자상 물질에서의 열전도도를 평가하기 위한 방법으로, 개별요소법으로 생성된 물질의 지반의 열전도도 및 변화를 실험 결과와 매우 유사하게 재현할 수 있다(Yun과 Evans, 2010). 네트워크 모델에서는 우선 단위 입자를 열 에너지가 모이는 노드(node), 입자간 접촉을 열이 흐르는 채널(channel)로 가정하여 3차원 공간에 배열된 입자들이 노드와 채널로 구성된 네트워크를 형성하도록 한다. 입자 i와 j간의 온도차이($T^i - T^j$)와 두 입자간의 열전도력(C^{ij})에 의해 열량(q^{ij})이 평형상태에 이루었을 경우 상태방정식은 에너지 보존 법칙에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{i \to j} q^{ij} = \sum_{i \to j} C^{ij}(T^i - T^j) = 0 \tag{3}$$

초기상태의 경우 3차원으로 배열된 입자들의 상하부에 일정한 온도를 갖는 경계조건을 부여하고 나머지 입자들의 온도를 평형상태에 이를 때까지 반복 연산을 통해 전체 입자의 온도분포를 계산한다. 두 입자간 열 에너지는 입자 내부에서의 열전도력(C_m^i)과 입자간 접촉점에서의 열전도력(C_c^{ij})에 따라 좌우되며 식 (4)에 의해 산출된다.

$$q^{ij} = C_{eff}^{ij} \cdot \Delta T = \left[\frac{1}{C_m^i} + \frac{1}{C_c^{ij}} + \frac{1}{C_m^j} \right]^{-1} \left[T^i - T^j \right] \tag{4}$$

3차원상에 분포한 입자의 경우 하중조건 및 입자의 탄성계수에 따라 입자가 상호 중첩하거나 다소 떨어져 있는 경우가 발생한다. 따라서 주어진 입자를 기준으로 인접한 입자들간의 접촉 정도를 평가하여 열 전달이 발생하는 범위를 영향계수 ε을 통해 설정한다. 입자간 거리(h)는 식 (5)를 통해 평가한다.

$$h^{ij} = D - (r^i + r^j) \quad if \ \ h \le 0, \ overlap \quad otherwise \ \ separated \tag{5}$$

여기서 D는 입자 중심간의 거리, r^i와 r^j는 각각 입자 i, j의 반지름이다. 입자간 거리가 양수일 경우 입자가 중첩되지 않은 경우이고 h^{ij}가 식 (6)에 의해 산출된 ϵ_{eff} 보다 작을 경우 열 전달이 일어나는 영향 범위에 있다고 가정한다.

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon \cdot \frac{2 r_1 r_2}{r_1 + r_2} \tag{6}$$

영향범위가 결정되면 Batchelor와 O'Brien(1977) 및 Yun과 Evans(2010)에 제시된 열전도력 산출식에 따라 식 (3)을 반복 연산하여 3차원에서 임의로 배열된 입자들 내의 입자 온도를 산출하고 식 (4)에 따라 열량을 계산한다. 마지막으로 전체 입자들의 열전도도(k_{eff})는 식 (7)과 같이 푸리에 법칙에 의해 주어진 단면에 흐르는 열량(Q)과 높이(h)의 곱을 단위면적(A)과 경계에서의 온도차($\triangle T$)로 나누어 산출한다.

$$k_{eff} = \frac{Q \cdot h}{A} \cdot \frac{1}{\Delta T} \left[\frac{W}{mK} \right] \tag{7}$$

3. 하중 조건에 따른 입자의 접촉 상태 및 열전도도의 수치 모델링

하중에 따라 발생하는 입자의 접촉상태 변화를 수치적으로 모델링하기 위하여 개별요소법 프로그램인 PFC^{3D}(Itasca, 2003)로 강성 벽체(rigid wall)로 구성된 정육면체 내부에 구형 입자들을 생성하였다. 입자는 약 3,000개를 생성하여 구속압 증감에 따른 거시적 거동 변화 및 네트워크 모델에 의한 열전도도 결과가 실제 지반과 유사하게 나타나도록 하였다(Holtzman 등, 2010; Yun과 Evans, 2010). 입자의 물성은 기존 문헌에 제시된 석영(quartz) 입자의 값(Santamarina, 2001; Ng, 2006)을 참조하여 단위중량을 2.65, 전단탄성계수를 29 GPa, 포아송비를 0.31로 설정하였다. 다만 입자 간 마찰계수(inter-particle friction coefficient)는 Proctor와 Barton(1974)이 석영에서 측정한 계수 0.31보다 조금 큰 0.5로 설정하였는데, 이는 구형 입자를 사용할 경우 입자 간 흔들림(rolling)이 과도하게 발생하여 실측값보다 큰 마찰계수 값을 높이는 것이 실제 사질토와 더 유사한 거시적 거동을 나타내기 때문이다(Yimsiri와 Soga, 2000, 2010).

입자들은 목표 간극률을 만족하도록 작은 입자들을 만들고 이후 입자를 팽창시켜 안정화 시키는 방법으로

표 1. 열전도도 해석 조건

시료번호	입자크기범위 [mm]	하중 조건						영향인자
		등방 ($\sigma_z=\sigma_x=\sigma_y$), I			1차원 압밀 ($\varepsilon_x=\varepsilon_y=0$), K_0			수평응력비
		Dense	Medium	Loose	Dense	Medium	Loose	상대밀도
A	0.48−0.52 (C_u=1.04)	O	O	O	O	O	−	입도분포
B	0.30−0.70 (C_u=1.60)	O	O	O	O	O	−	
C	0.20−0.80 (C_u=2.19)	O	O	O	O	O	−	
A1	0.96−1.04 (C_u=1.04)	−	O	−	−	−	−	입자크기
A2	1.92−2.08 (C_u=1.04)	−	O	−	−	−	−	

* 실험명은 시료번호−하중조건−상대밀도 순으로 표기함
(예: 0.48−0.52 mm 크기의 입자들을 중간 밀도로 조성하고 등방하중을 가하는 실험: A−I−M)

생성하였으며, 이 방법은 개별요소법에서 사용하는 입자 생성법 중 가장 균일한 배열을 안정적으로 얻을 수 있다(Itasca, 2003). 입자들은 열전도도에 대한 하중 효과를 다양한 조건에서 분석하기 위하여 다양한 초기 조건별로(입자 크기, 입도분포, 상대밀도) 생성하였다. 입자의 직경은 정해진 최대값과 최소값 내에서 균등한 분포를 갖도록 하여 균등계수(C_u), 평균 입자크기(D_{50}), 최대 입자크기(D_{100})가 다른 총 5 종류의 시료를 생성하였다. 각 시료의 상대밀도는 입자 팽창 전 목표 간극률 및 마찰계수를 다르게 하여 조절하였다. 즉, 조밀(dense)과 중간(medium) 상태는 상대밀도에 따른 목표 간극률에 맞춰 입자를 팽창시킨 후 하중 재하 직전까지 입자 간 마찰이 없는 상태에서 안정화하여, 조밀한 경우 단위입자가 접촉하고 있는 입자 수의 평균값인 접촉수(coordination number)가 5 이상, 중간인 경우 3 이하가 되도록 하였다. 그리고 느슨한(loose) 상태는 입자들이 서로 느슨하게 맞물리도록 팽창 전에 마찰을 주어 접촉수가 1에서 2 사이의 값을 갖도록 생성하였다. 이러한 방법으로 상대밀도를 조절한 입자들의 전단시 응력-변형률 거동 및 부피 변형의 경향은 실제 지반에서 상대밀도에 따라 나타나는 딜라턴시(dilatancy) 차이와 동일하다(Thornton, 2000; Zhao와 Evans, 2009)

입자 생성 후에는 각 벽체에 작용하는 입자들의 접촉력의 합으로 하중을 측정하고 벽체들의 속도로 하중을 제어하는 방식(servo-control)으로 등방(isotropic) 혹은 1차원 압밀(K_0) 조건에서 1500 kPa까지 재하를 수행하였다. 단, 개별요소법에서 팽창 전 미리 마찰을 주어 생성한 느슨한 시료의 경우 K_0 압밀 거동이 실제 지반과 유사하지 않기 때문에 등방 압밀만 수행하였다. 3차원 개별요소법에서 Hertz-Mindlin 모델을 적용할 경우 개별요소법의 시간 단계에 따른 안전율은 충분히 작아야 하기 때문에, O'Sullivan과 Bray(2004) 및 Ng(2006)의 연구를 참조하여 안전율을 PFC^{3D}의 기본값인 0.8에서 0.17로 변경하였다. 그러나 이처럼 입자의 전단탄성계수가 크고 시간 단계를 감소시킨 경우 해석에 매우 많은 시간이 소요되기 때문에, 유사정적(quasi-static) 상태에서 결과에 영향을 주지 않으면서도 해석 시간을 합리적으로 감소시킬 수 있는 밀도 조정(density scaling) 방법을 적용하였다(Thornton, 2000; Jang 등, 2010). 본 연구에서는 지반의 기본물성(입도분포, 상대밀도, 입자크기) 및 수평응력비(등방 및 K_0)에 따라 하중의 영향을 분석하였으며, 입자 및 하중 조건과 각 조건에서 고려한 영향인자는 표 1에 정리된 바와 같다.

전체 입자들의 하중에 따른 열전도도 변화는 각 하중조건에서 단계별로 추출한 입자들의 3차원 위치 정보를 MATLAB으로 구현한 열 네트워크 모델로 해석하였다. 해석 시 열전도도 값은 문헌(Incropera와 Dewitt, 1996; Sundberg, 2009)에 제시된 바와 같이 입자는 3 W/mK, 공기는 0.025 W/mK로 설정하여 건조상태 사질토를 가정하였다. 여기서 W/mK는 물질에서 열 에너지가 흐르는 속도를 나타내는 열전도도의 단위로 W는 열량(watt), m은 길이(meter), K는 절대온도(kelvin)이다. 열 네트워크 모델의 유효반경계수는 Yun과 Evans(2010)의 연구를 참조하여 실험 결과와 유사한 값을 나타내는 0.5로 결정하였다. 그림 1은 개별요소법에 의해 생성된 입자들과 열전도 해석 시 각 입자간 온도가 주어진 경계조건

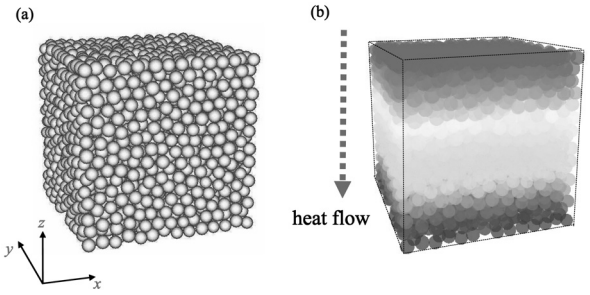

그림 1. 입자 스케일에서의 열전도도 평가 (실험명: A-I-M, 하중 50 kPa)
(a) 개별요소법에 의한 입자 생성 (b) 열 네트워크 모델을 이용한 열전도 해석

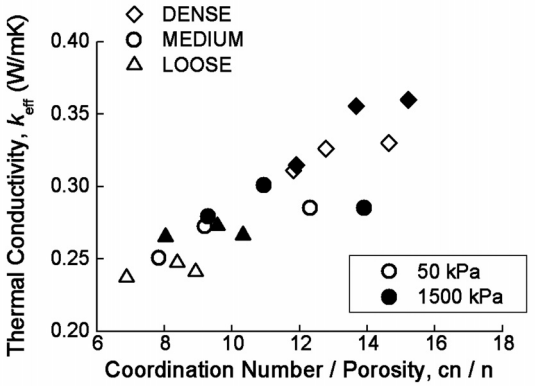

그림 2. 하중 50 kPa 및 1500 kPa에서의 열전도도 (실험명: A-I, B-I, C-I)

에서 평형에 도달한 상태의 온도분포이다.

4. 열전도도에 대한 하중의 영향 분석

4.1 하중 크기

열전도도의 변화를 야기하는 입자 스케일 메커니즘(접촉수 및 접촉면적 증가)은 거시 스케일에서의 외적 요인(하중 및 간극률)에 의해 좌우되고 각각의 영향 인자들이 상호 복합적으로 변하므로 각 요인별 영향 범위를 독립적으로 분석하는 것은 불가능하다. 네트워크 모델의 관점에서는 간극률의 감소와 접촉수의 증가는 열이 전달될 수 있는 유효 통로가 증가하는 경우로, 접촉면적의 증가는 네트워크의 크기가 커지는 경우로 구분해서 생각할 수 있다. 그러나 하중 재하 시 지반상태의 변화는 입자종류, 입자크기, 입도분포, 상대밀도 등에 따라 다르게 나타나며, 따라서 어떤 요인이 열전도도에 대한 하중의 영향과 밀접하게 관련되어있는지, 또한 지반 조건에 따른 열전도도의 증가 차이를 파악하는 것이 필요하다.

그림 2는 모든 밀도의 A, B, C 시료에 대해 등방 하중 재하 시 초기(50 kPa) 및 최종(1500 kPa) 상태에서의 열전도도 변화를 나타낸 것으로, 간극률과 접촉수는 서로 연관된 값이기 때문에 접촉수를 간극률로 정규화하여 네트워크 수의 증가와 열전도도의 관계를 살펴보았다. 실험 결과 동일한 하중에서는 밀도가 조밀할수록, 그리고 같은 밀도에서는 하중이 증가할 수록 접촉수/간극률 값이 증가하며, 열전도도는 이와 비례해서 증가하는 경향이 나타났다. 개별요소법으로 생성한 시료는 1500 kPa까지 재하하는 동안 간극률 변화가 0.01 내외로 작게 나타났는데, 이는 조립토는 하중 재하 시 매우 높은 하중(1~10 MPa 이상)에서 입자 파쇄가 발생하지 않는 한 간극률 감소가 거의 발생하지 않기 때문이다(Coop과 Lee, 1993; Pestana 등, 2002). 따라서 열전도도 증가에 대한 간극률 변화는 매우 작아 그 영향을 사실상 무시할 수 있으며, 열전도도는 접촉수와 선형적인 관계가 있다.

그림 3은 하중 증가 시 접촉수와 열전도도의 변화 경향을 입자크기, 입도분포, 상대밀도에 따라 나타낸 것으로, 시료마다 초기 접촉수와 열전도도가 다르기 때문에 이들을 동일하게 비교하기 위하여 50 kPa에서의 값으로 정규화하였다. 표 2에 각 시료 별로 50 kPa에서의 상태를 정리하였으며, 알려진 바와 같이 같은 하중에서 지반의 열전도도는 접촉수에 따라 결정됨을 확인할 수 있다. 하중 재하 시 접촉수는 그림 3a와 같이 입자크기에 상관없이 동일한 경향으로 증가하나, 그림 3b 및 3c에 나타난 바와 같이 입도분포 및 상대밀도에 따라서는 다른 경향을 나타내며 특히 입자의 크기가 균일하거나 밀도가 조밀한 경우 접촉수의 변화가 작아진다. 반면 열전도도는 입자들 조건에 따른 접촉수의 경향과 상관없이 모두 하중 재하 초기에 전도도가 급격히 증가하고 하중이 증가할수록 점차 수렴하는 일정한 경향을 나타낸다. 즉, 접촉수가 크게 변하지 않는 경우에도 열전도도는 접촉수가 증가하는 경우와 동일하게 증가하여 실질적으로 접촉수가 아닌 입자간 접촉 면적의 변화가 하중 재하 시 열전도도의 증가의 원인으로 판단된다.

동일한 하중에서 지반 종류에 따른 열전도도는 접촉수와 밀접한 관련이 있지만 하중 재하 시 접촉수의 증가가 열전도도 경향과 큰 상관성을 보이지 않는 이유는 다음과 같이 생각된다. 미시역학적 연구 결과에 의하면 전체 물질이 평형인 상태에서는 각 입자의 접촉 중 약 3개 정도를 제외하고는 잉여(redundancy)의 개념으로 존

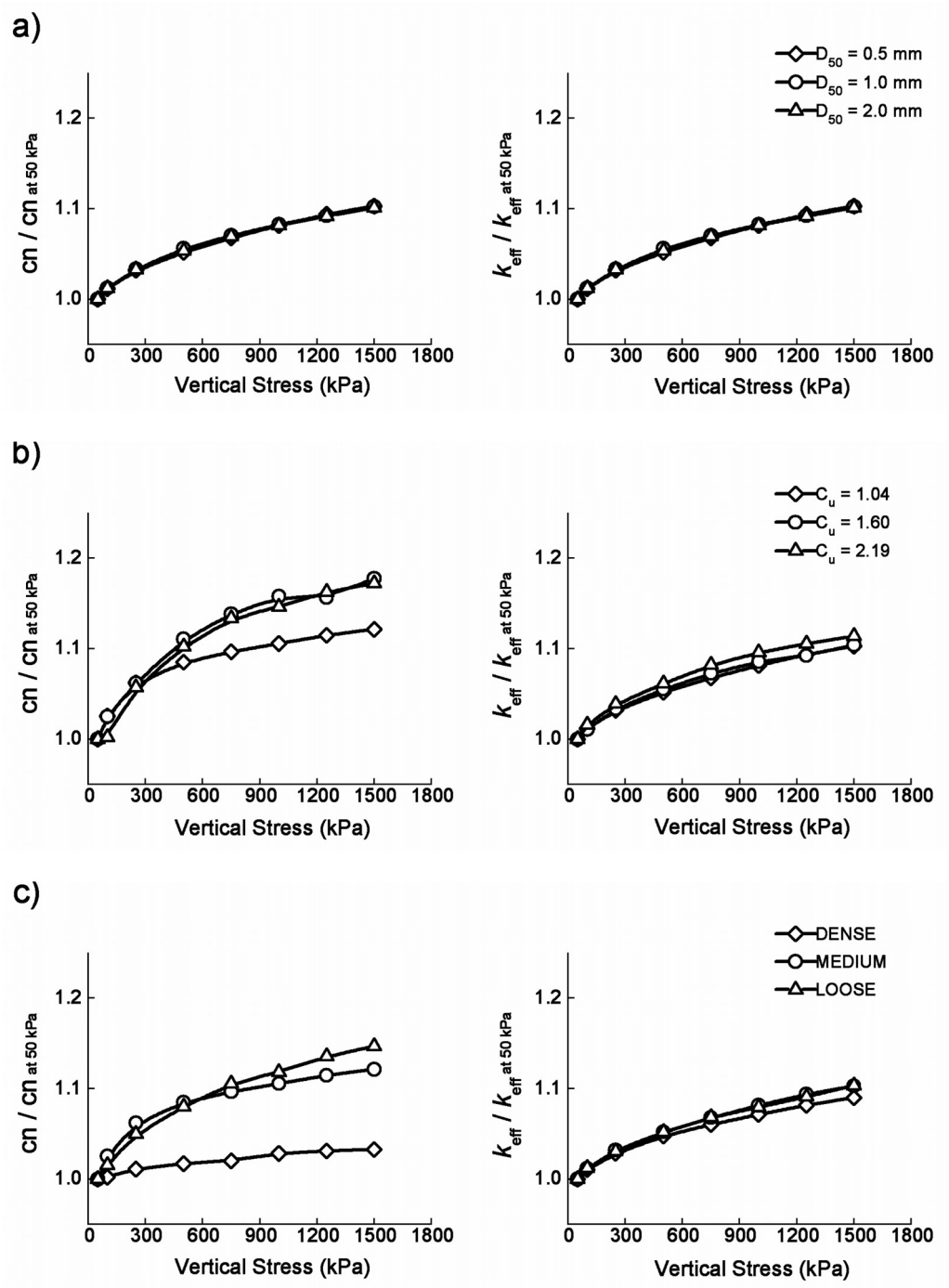

그림 3. 입자특성에 따른 하중 재하 시 접촉수 및 열전도도 a) 평균입자크기(실험명: A-I-M, A1-I-M, A2-I-M) b) 입도분포(실험명: A-I-M, B-I-M, C-I-M) c) 상대밀도 (실험명: A-I-D, A-I-M, A-I-L)

재한다(Rothenburg와 Kruyt, 2004). 즉, 일반적으로 약 3개까지의 접촉들만 입자간 힘을 전달하는 거시적 역학 상태와 관련이 있으며 그 이상의 접촉은 없어지더라도 평형 상태에 영향을 주지 않는 접촉들이다. 따라서 하중 재하 시 중간/느슨한 상태에서는 조밀한 상태와는 달리 접촉수가 증가하지만, 이 때 새로 발생하는 접촉들은 대부분 잉여 접촉이기 때문에 열전도도에는 큰 영향이 없으며, 따라서 하중에 의한 열전도도의 증가는 접촉수의 경향과 상관없이 주로 입자 간 접촉 면적의 증가에만 밀접한 관련을 갖는 것으로 판단된다. 특히 본 연구에서는 입자의 강성이 동일하였기 때문에 하중에 따른 접촉 면적의 증가 정도가 유사하게 나타나 정규화 시 열전도도의 변화 양상이 매우 유사하게 나타난 것으로 생각되며, 실제 조립토에서도 입자들의 강성이 크게 차이가 나

표 2. 하중 50 kPa에서의 열전도도 및 접촉수 결과

실험명	영향인자	접촉수	열전도도(W/mK)
A-I-M	입자크기	4.808	0.285
A2-I-M		4.711	0.283
A3-I-M		4.648	0.281
A-I-M	입도분포	4.808	0.285
B-I-M		3.587	0.272
C-I-M		3.004	0.251
A-I-D	상대밀도	5.810	0.334
A-I-M		4.808	0.285
A-I-L		3.810	0.241

지 않기 때문에 본 연구의 수치실험의 경향과 유사하게 나타날 것으로 판단된다.

하중 증가에 따른 열전도도 경향이 입자 조건(크기, 입도분포, 밀도)과 관계없이 모두 유사하게 나타났기 때문에 하중 효과는 모두 동일한 형태의 식으로 평가할 수 있다. 열전도도의 비선형 증가 양상은 식 (8)과 같이 멱함수(power function) 형태로 회귀분석될 수 있다.

$$k_{eff} = a \cdot \left(\frac{\sigma}{1\ \mathrm{kPa}} \right)^{n} + b \tag{8}$$

여기서 σ는 열전달이 발생하는 방향과 평행한 방향의 하중을, 지수 n은 하중에 따라 변하는 열전도도의 증가 양상을 나타내며 a와 b는 각각 상수로 (a+b)는 하중 1 kPa에서의 전도도 값을 의미한다. 그림 4는 A-I-M 실험 결과를 식 (8)로 회귀분석한 예시로 제안된 형태의 멱함수가 하중에 따른 열전도도의 증감 및 초기값을 나타내는 적절한 형태임을 알 수 있다. 회귀분석 결과 모든 실험에서 R^2 값이 0.99 이상으로 나타났으며, 계수 n은 0.3 ~ 0.5 사이의 값을 나타내었다.

지반의 열전도도에 대한 하중 효과는 지반 내 열 흐름 중 입자 간의 전도 현상을 증대시킨 결과이며, 입자와 간극수의 열전도도의 상대적인 크기에 따라 입자 간 전도 현상의 기여도가 달라지므로 하중의 영향은 간극수의 전도도에 의해 달라질 수 있다. 간극수의 전도도에 따른 하중 효과의 차이를 살펴보기 위하여 간극유체의 열전도도를 공기인 경우(건조)인 0.025 W/mK부터 물인 경우(포화)인 0.56 W/mK까지 변화시키며 식 (8)의 상수 a+b 및 지수 n 값을 산정하였다. 해석 결과 그림 5와 같이 간극유체의 열전도도가 증가할수록 초기 열전도도 값(a+b)은 로그 스케일에서 선형적으로 증가하지만,

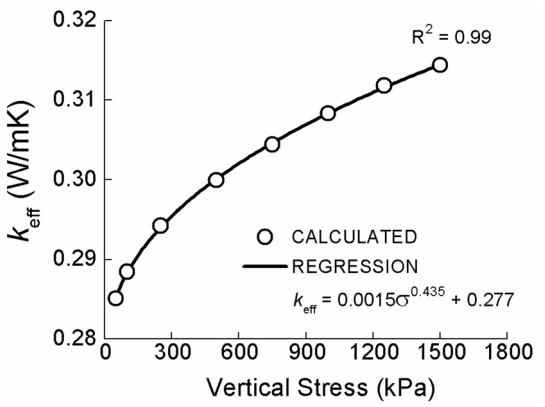

그림 4. 멱함수를 이용한 회귀분석 예(실험명: A-I-M)

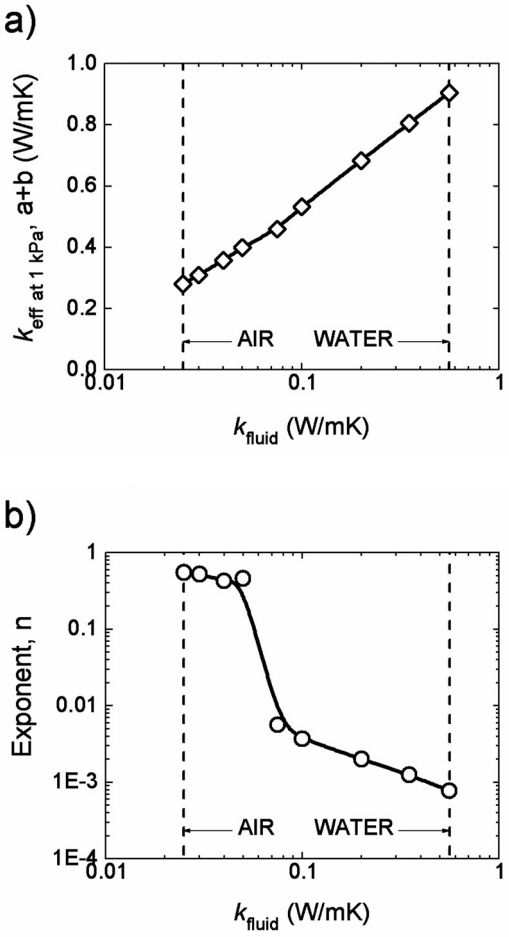

그림 5. 간극수의 열전도도에 따른 식 (8)의 계수 (a) 1 kPa에서의 열전도도 초기값 a+b (b) 지수 n

하중에 따른 열전도도의 증가 양상을 나타내는 계수 n은 유체의 열전도도가 0.05 ~ 0.07 W/mK 범위에서 급격히 감소한다. 이는 높은 전도도를 갖는 간극수의 경우 주된 전도 현상이 입자간 접촉뿐만 아니라 입자-간극수-입자를 통하는 방향으로도 발생하여 하중 효과가 작아짐을 의미한다.

4.2 응력비

입자 간 접촉 상태는 하중의 크기가 동일하더라도 응력비에 따라 달라진다. 특히 접촉력의 이방성은 응력비에 매우 의존적이기 때문에(Oda 등, 1985), 열전도도 역시 응력비에 따라 방향 별로 다르게 나타날 수 있다. 실제로 공학적으로 관심이 되는 열전도도는 여러 방향에서의 열 흐름과 관련되어 있기 때문에, 응력비에 따른 열전도도의 차이를 살펴보기 위하여 등방 및 K_0 조건에서 재하 중 열전도도를 수직응력(σ_Z)이 동일한 상태에서 x축, y축, z축 3방향으로 산정하고 결과를 비교하였다. 그림 6은 중간밀도의 A시료에서 등방 및 K_0 조건에서 재하 시 방향별 열전도도의 증가 양상을 보여준다. 실험 결과 z방향 열전도도는 응력비에 상관없이 동일하게 증가하지만, K_0 조건에서 x방향 및 y방향 열전도도의 증가량은 z축보다 작게 증가하였으며, 다른 모든 시료에서 동일한 경향이 나타남을 확인하였다.

그림 7은 그림 6의 결과 중 K_0 조건에서 재하 시 열전도도의 이방성 변화를 보여준다. 그림 7a에서와 같이 수평응력비(K_0) 값은 초기에 0.68에서 시작하여 약 0.52 정도에서 감소하였으며, 하중이 증가함에 따라 x축 및 y축 열전도도가 z축 열전도도에 비해 점차 감소하였다. 재하시 열전도도의 증가 경향을 방향에 따라 비교하기 위하여 열전도도의 증가량을 비교하기 위한 상대 열전도도(relative thermal conductivity)를 상대밀도의 개념과 유사하게 식 (9)와 같이 정의하였다.

$$k_{relative} = \frac{k - k_{\min}}{k_{\max} - k_{\min}} \tag{9}$$

여기서 $k_{\max}$는 1500 kPa까지 재하 시 3방향 열전도도 중 최대값, $k_{\min}$은 최소값이며 k는 각 하중단계에서의 열전도도다. 그림 7b는 하중 증가에 따른 상대 열전도도 변화를 보여준다. 그림에 나타난 바와 같이 x축 및 y축 방향 열전도도는 초기에는 z축 열전도도와 유사한 값을

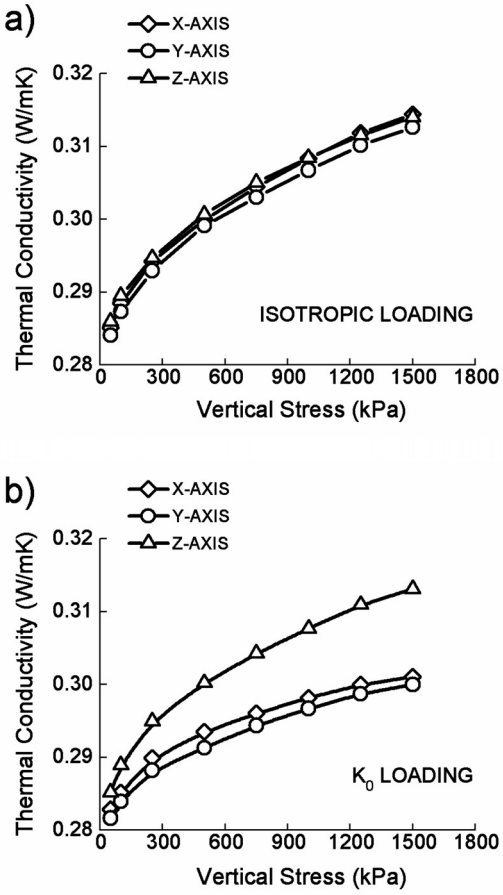

그림 6. 하중의 수평응력비에 따른 방향 별 열전도도 a) 실험명: A-I-M b) 실험명: A-K_0-M

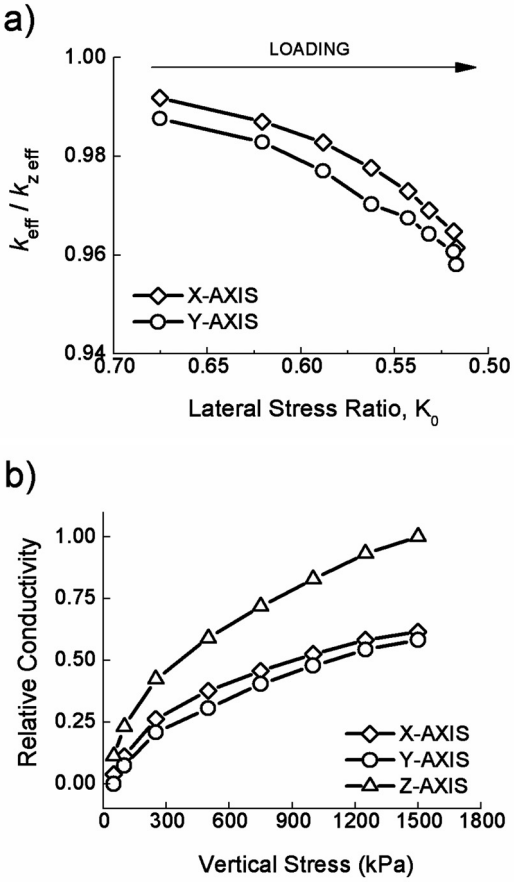

그림 7. 하중 증가에 따른 열전도도의 이방성 변화 a) z방향 열전도도에 대한 x,y 방향 열전도도 b) x,y,z 방향의 상대 열전도도 (실험명: A-K_0-M)

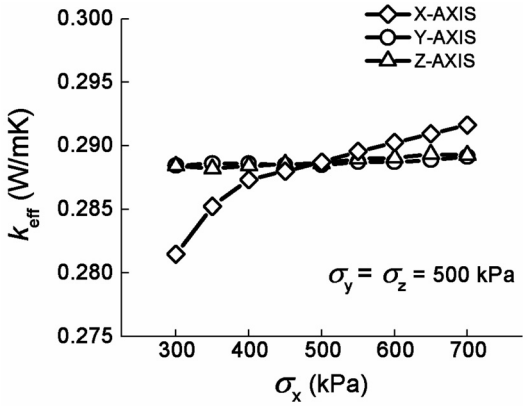

그림 8. x축 하중 재하 시 축방향 별 열전도도 변화 (실험명: A-I-M)

나타내나 이후 z축 방향에 비해서는 50 ~ 60% 정도밖에 증가하지 않는 것으로 나타났다. 이를 통해 응력비는 열전도도의 이방성과 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있다.

그림 8은 등방 하중 상태에서 500 kPa로 압밀한 중간 밀도의 A시료에 대하여 y축 및 z축 하중은 일정한 값을 가진 상태에서 x축 방향 하중만 변화시켰을 경우 3방향의 열전도도를 평가한 결과이다. 시험 결과 재하 방향(x축)의 열전도도에만 증감이 나타났으며, 하중을 일정하게 유지시킨 방향(y축 및 z축)의 열전도도는 변화가 없었다. 따라서 열전도도는 열 흐름 방향의 하중에만 영향을 받는다. 이를 통해 K_0 조건에서는 수평방향 하중이 연직방향보다 작기 때문에 열전도도의 이방성이 두드러지며 등방 하중의 경우와 다르게 나타났다고 결론지을 수 있다. 하중의 변화에 따른 최대전단강성도의 경우 식 (8)과 유사한 형태로 표현되고 전단파의 진행방향과 그에 수직한 진동방향의 평균 응력에 의해 강성도가 변하는 반면, 온도차에 의해 열 흐름이 발생하는 방향과 평행한 축의 응력상태만이 열전도도 값에 영향을 미침을 알 수 있다. 이로 인해 동일한 지반 조건하에서의 열 흐름 해석시 응력 및 온도차의 이방성 고려가 필수적인 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 지반의 열전도도에 대한 하중의 영향을 연구하기 위하여 입자 스케일에서 다양한 시료에 대한 수치실험을 수행하고 결과를 분석하였다. 개별요소법을 이용하여 입자크기, 입도분포, 상대밀도가 다른 시료들을 생성하고 등방 하중 및 K_0 조건에서 재하를 실시하였고, 하중 조건에 따라 변화한 입자 간 접촉 정보를 3차원 열 네트워크 모델로 해석하여 하중에 의한 열전도도의 변화 및 영향 인자간 상관성을 평가하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 기존에 제시된 경험식과는 달리 하중 재하 시 지반의 열전도도는 간극률 및 접촉수의 변화가 거의 없더라도 증가한다. 하중에 따른 지반 상태와 열전도도의 변화 양상을 비교한 결과, 열전도도에 대한 하중의 영향은 주로 열이 흐르는 입자들 간의 접촉면적이 증가되기 때문인 것으로 나타났다. 하중 재하 시 열전도도의 증가 경향은 입자크기, 입도분포, 상대밀도에 크게 관계없이 유사하게 나타났다.

(2) 하중 재하 시 지반의 열전도도 증가는 멱함수 형태로 표현할 수 있으며, 열전도도에 대한 하중 효과는 간극수의 열전도도가 감소할수록 뚜렷해지는 것으로 나타났다.

(3) 동일한 시료를 등방 하중 및 K_0 조건에서 재하시키고 열전도도를 x축, y축, z축 3방향으로 평가한 결과 수평응력비에 따라 지반 열전도도의 이방성이 변화하는 것으로 나타났다. 1축 재하 시험 결과 이는 열전도도가 열흐름 방향의 하중에만 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

(4) 결론적으로 지반에 작용하는 하중의 범위가 큰 경우 열전도도는 기존에 알려진 영향인자 외에도 반드시 하중의 영향을 고려해서 평가해야 한다. 특히 열 흐름이 다양한 방향으로 발생하는 경우, 지반 응력 및 온도차의 이방성 고려가 필수적인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구단의 지원(No.2011-0005593), 한국지질자원연구원(No. 2011-8-0261), 한국건설기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Andersland, O. B. and Ladanyi, B., (2004), *Frozen Ground Engineering*. 2nd ed: John Wiley & Sons, Inc.
2. Barchelor, G. K. and O'Brien, R. W., (1977), "Thermal or Electrical Conduction Through a Granular Material", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and*

Physical Sciences, pp.313-333.
3. Becker, B. R., Misra, A., and Fricke, B. A., (1992), "Development of correlations for soil thermal conductivity", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 19(1), pp.59-68.
4. Chen, S., (2008), "Thermal conductivity of sands", *Heat and Mass Transfer*, 44(10), pp.1241-1246.
5. Coop, M. R. and Lee, I. K., (1993), "The behaviour of granular soils at elevated stresses", *Predictive soil mechanics, Proceedings of the C.P.Wroth Memorial Symposium*: Thomas Telford, pp.186-198.
6. Cortes, D. D., et al., (2009), "Thermal conductivity of hydrate-bearing sediments", *Journal of Geophysical Research*, 114 (B11).
7. Cote, J., Fillion, M.-H., and Konrad, J.-M., (2011), "Estimating Hydraulic and Thermal Conductivities of Crushed Granite Using Porosity and Equivalent Particle Size", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
8. Cundall, P. A. and Strack, O. D. L., (1979), "A discrete numerical model for granular assemblies", *Geotechnique*, 29(1), pp.47-65.
9. Esch, D. C., (2004), *Thermal Analysis, Construction and Monitoring Methods for Frozen Ground*. Vol.492. Resteon, VA: American Society of Civil Engineers.
10. Fillion, M.-H., Cote, J., and Konrad, J.-M., (2011), "Thermal radiation and conduction properties of materials ranging from sand to rock-fill", *Canadian Geotechnical Journal*, 48(4), pp.532-542.
11. Holtzman, R., Silin, D. B., and Patzek, T. W., (2010), "Frictional granular mechanics: A variational approach", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 81(10), pp.1259-1280.
12. Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., (1996), *Fundamentals of heat and mass transfer*: John Wiley & Sons.
13. Itasca, (2003), *PFC3D (Particle Flow Code in three dimensions) Version 3.0*. Minneapolis, MN.
14. Jang, E.-R., Jung, Y.-H., and Chung, C.-K., (2010), "Stress ratio-fabric relationships of granular soils under axi-symmetric stress and plane-strain loading", *Computers and Geotechnics*, 37(7-8), pp.913-929.
15. Johansen, O., (1975), *Thermal conductivity of soils*. University of Trondheim, Trondheim, Norway.
16. Johnston, I., Narsilio, G., and Colls, S., (2011), "Emerging geothermal energy technologies", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4), pp.643-653.
17. Mindlin, R. D. and Deresiewicz, H., (1953), "Elastic spheres in contact under varying oblique forces", *Journal of Applied Mechanics, ASME*, 20(3), pp.327-344.
18. Ng, T.T., (2006), "Input parameters of discrete element methods", *Journal of Engineering Mechanics*, 132(7), pp.723-729.
19. O'Sullivan, C. and Bray, J. D., (2004), "Selecting a suitable time step for discrete element simulations that use the central difference time integration scheme", *Engineering Computations*, 21(2-4), pp.278-303.
20. O'Sullivan, C., (2011), *Particulate Discrete Element Modelling - A Geomechanics Perspective*. Applied Geotechnics: Spoon Press.
21. Oda, M., Nemat-Nasser, S., and Konishi, J., (1985), "Stress-induced anisotropy in granular masses", *Soils and Foundations*, 25(3), pp.85-97.
22. Pestana, J. M., Whittle, A. J., and Salvati, L. A., (2002), "Evaluation of a constitutive model for clays and sands: Part I - sand behaviour", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 26(11), pp.1097-1121.
23. Proctor, D. C. and Barton, R. R., (1974), "Measurements of the angle of interparticle friction", *Geotechnique*, 24(4), pp.581-604.
24. Rothenburg, L. and Kruyt, N. P., (2004), "Critical state and evolution of coordination number in simulated granular materials", *International Journal of Solids and Structures*, 41(21), pp.5763-5774.
25. Santamarina, J. C., (2001), *Soils and waves*. New York: J. Wiley & Sons. xix, 488 p. : ill. ; 25 cm.
26. Singh, D. N. and Devid, K., (2000), "Generalized relationships for estimating soil thermal resistivity", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 22(3-4), pp.133-143.
27. Sundberg, J., (2009), "Estimation of thermal conductivity and its spatial variability in igneous rocks from in situ density logging", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(6), pp.1023-1028.
28. Tarnawski, V. R., et al., (2002), "Inter-particle contact heat transfer in soil systems at moderate temperatures", *International Journal of Energy Research*, 26(15), pp.1345-1358.
29. Thornton, C., (2000), "Numerical simulations of deviatoric shear deformation of granular media", *Geotechnique*, 50(1), pp.43-53.
30. Vargas, W. L. and McCarthy, J. J., (2002), "Stress effects on the conductivity of particulate beds", *Chemical Engineering Science*, 57(15), pp.3119-3131.
31. Yagi, S. and Kunii, D., (1957), "Studies on effective thermal conductivities in packed beds", *AIChE Journal*, 3(3), pp.373-381.
32. Yimsiri, S. and Soga, K., (2000), "Micromechanics-based stress-strain behaviour of soils at small strains", *Geotechnique*, 50(5), pp.559-571.
33. Yimsiri, S. and Soga, K., (2010), "DEM analysis of soil fabric effects on behaviour of sand", *Geotechnique*, 60(6), pp.483-495.
34. Yun, T. S. and Santamarina, J. C., (2008), "Fundamental study of thermal conduction in dry soils", *Granular matter*, 10(3), pp.197-207.
35. Yun, T. S. and Evans, T. M., (2010), "Three-dimensional random network model for thermal conductivity in particulate materials", *Computers and Geotechnics*, 37(7-8), pp.991-998.
36. Yun, T. S., Dumas, B., and Santamarina, J. C., (2011), "Heat transport in granular materials during cyclic fluid flow", *Granular matter*, 13(1), pp.29-37.
37. Zhao, X. and Evans, T. M., (2009), "Discrete simulations of laboratory loading conditions", *International Journal of Geomechanics*, 9(4), pp.169-178.

(접수일자 2011. 6. 23, 심사완료일 2011. 9. 21)