

글라스 비즈 - 고무 분말 혼합물의 열전달 특성 연구

Characterization of Thermal Properties for Glass Beads - Rubber Mixture

이 정 훈¹ Lee, Junghwoon

윤 태 섭² Yun, Tae Sup

매튜 에반스³ Evans, T. Matthew

Abstract

This study presents the thermal behaviors of glass beads-rubber mixtures depending on the volumetric fraction of each constituent and relative size between them. The transient plane source method is used to measure the effective thermal conductivity of mixtures. The discrete element method (DEM) and the thermal network model are integrated to investigate the particle-scale mechanism of heat transfer in granular packings. Results show that 1) the effective thermal conductivity decreases as the rubber fraction increases, and 2) the relative size between two solid particles dominates the spatial configuration of inter-particle contact condition that in turn determines the majority of heat propagation path through particle contacts. For the mixtures whose volumetric fraction of rubber is identical, the less conductive materials (e.g., rubber particles) with a large size facilitate heat transfer in granular materials. The experimental results and particle-scale observation highlight that the thermal conduction behavior is dominated not only by the volumetric fraction but also the spatial configuration of each constituent.

요 지

본 연구는 글라스 비즈와 고무 혼합재의 부피비와 상대적인 크기 비에 따른 열적 거동에 관해 다루고 있다. 혼합 물질의 열전도도를 측정하기 위하여 비정상면열원법이 사용되었다. 개별요소법과 열 네트워크 모델을 결합하여 입상 체 모사 시료에서 입자 단위의 열전달 매커니즘을 분석하였다. 실험 및 해석의 결과는 다음과 같다. 유효 열전도도는 고무의 부피비가 증가할수록 감소한다. 두 물질의 상대적인 크기는 열 전파경로의 대부분을 결정하는 입자간 접촉 상태의 공간적 구성을 지배한다. 같은 부피비를 갖는 혼합물질 중에서, 열이 잘 흐르지 않는 물질(여기에서는 고무)의 입자 크기가 큰 경우 열전달이 더 원활하게 이루어진다. 이상의 실험결과와 입자 단위의 관찰은 물질의 열적 거동이 부피비 뿐 아니라 구성 성분의 공간적인 구성에도 영향을 받음을 보여준다.

Keywords : DEM, Mixture, Network model, Size ratio, Thermal conductivity, Transient plane source method

1. 서 론

페타이어는 물리 화학적으로 안정되어 있어 처리하

기가 힘들며, 국토면적이 작은 우리나라에서는 페타이어의 야적장 확보가 쉽지 않다. 그러나 페타이어는 대부분 판매점이나 정비업소, 또는 폐차장에서 대부분 수

1 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ.)

2 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 조교수 (Assistant professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ., taesup@yonsei.ac.kr, 교신저자)

3 노스캐롤라이나대학교 토목환경공학과 조교수 (Assistant professor, Dept. of Civil, Construction and Environmental Engineering, North Carolina State Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

거가 가능하므로 다른 폐자원과 비교하여 재활용 및 재사용이 유리한 측면이 있어 다양한 활용방안에 대한 연구가 진행되고 있다(김영진, 1998). 지반공학에서는 분쇄된 고무와 모래 혼합재가 옹벽 또는 사면 안정, 침출수 제어, 도로의 보조 기층 및 뒷채움재 등으로 활용될 수 있다(Garga and O'Shaughnessy, 2000; Ahmed et al., 1993; Humphrey and Eaton, 1995). Lee 등(1999)은 실험과 유한요소 해석을 통해 상대적으로 작은 밀도를 갖는 고무-모래 혼합재의 기존 뒷채움재와의 유사한 강도 발현을 보였으며, Youwai와 Bergado(2003)은 혼합재료 내 모래의 함량이 증가함에 따라 단위 중량, 전단 강도 등이 커지고 압축력은 감소함을 보였다. 또한 고무 함량에 따른 배수마찰각 및 크리프(creep) 정도의 변화 (Ghazavi, 2004; Anh and Valdes, 2007), 최적 고무 함량에 따른 최대전단 강성도 및 감쇄비의 산출(Pamukcu and Akbulut, 2006), 모래 함량의 증가에 따른 강성도의 증가(이창호 등, 2008), 혼합재료에서의 탄성과 전달 양상 변화(kim and Santamarina, 2008) 등이 연구되고 있다. 고무가 가진 낮은 열전도도를 활용하여 시멘트의 첨가재로서 단열효과 증대를 위한 연구가 진행되는 반면(Khedari et al., 2000; Bederina et al., 2005; Benazzouk et al., 2008), 지반물질에서의 연구는 다소 미흡한 편이다. 하지만 지반재료에서의 열전달 특성은 에너지 저장을 위한 저장 공간, 열교환기 및 차단재 등을 연구하는데 있어 중요한 인자로 열적 거동에 대한 연구가 필요하다. 그러나 현재까지의 혼합재 연구는 주로 구성 물질의 비율 변화에 의한 열 특성의 변화에 그 초점이 맞추어져 있었다.

본 연구에서는 고무와 글라스비드(모래의 대체제) 혼합재료의 열전도 특성을 비정상면열원법을 사용하여

실험적으로 규명하였다. 이종재료간의 부피비와 크기비율의 변화에 따른 실험을 수행하여 입자들의 공간적 분포에 따른 열 네트워크 양상 및 그에 따른 전도도를 획득하였다. 또한 2차원 개별요소법과 열 네트워크 모델을 결합하여 입자간 열전달 경로를 수치적으로 모사하여 입자내 열전달 현상을 실험과 비교 분석하였다.

2. 혼합 재료의 열전도도 측정

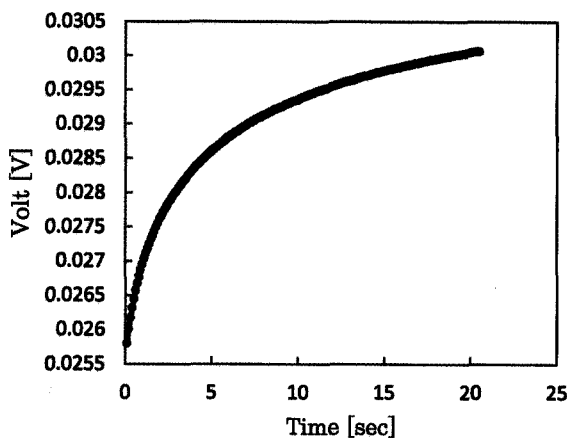
2.1 비정상면열원법

지반물질의 열전도도 측정을 위해 널리 사용되는 열탐침을 이용한 방법과 비교하여(ASTM D5334-08) 비정상면열원법은 적은 량의 시료를 이용하여 측정이 가능하고 측정 시간이 10초 이내로 짧은 장점이 있다. 비정상면열원법은 열원을 통해 공급되는 열에너지가 주변 물질의 열전도 특성에 따라 다르게 소산되는 점을 이용한다. 정사각형의 열원을 사용할 경우, 일정한 에너지(P_{av}) 공급시 시간에 따른 온도의 증가는 식 (1)과 같이 표현된다(Gustafsson 등, 1979).

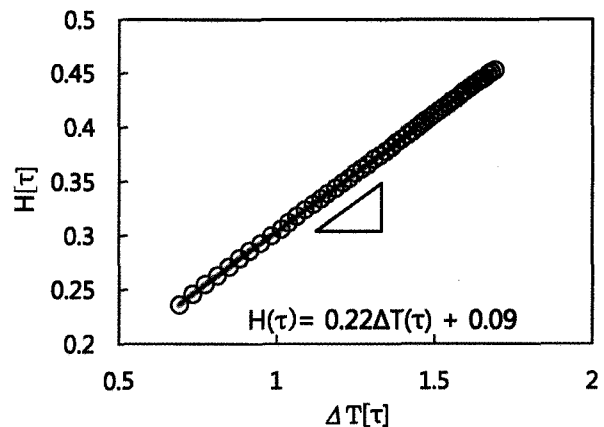
$$\Delta T(\tau) = \frac{P_{av}}{4aK\sqrt{\pi}} H(\tau),$$

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

여기서 τ 는 $\sqrt{t \cdot \alpha / a}$, P_{av} 는 센서에서 공급되는 열량, K 는 열전도도, a 는 센서 크기의 1/2, α 는 열확산율, t 는 시간을 나타낸다. 그림 1은 case 3의 글라스비드 80% 조건에서 측정된 결과이다. 열원에서 발열이 됨에 따라



(a) 시간에 따른 전압 변화 양상



(b) $\Delta T(\tau)$ 와 $H(\tau)$ 의 선형 관계

그림 1. 시간에 따른 전압 변화 양상 및 $\Delta T(\tau)$ 와 $H(\tau)$ 의 선형 관계

주변 재료의 열전도 특성에 따라 전압의 변화 양상은 그림 1(a)와 같이 나타나며 기울기는 주변 재료의 특성에 따라 바뀐다. 전압의 변화는 저항으로, 다시 온도의 변화로 환산할 수 있다. 따라서 열전도 양상의 이론적인 $H(\tau)$ 와 온도 증가 양상은 $P_{av}/4aK\sqrt{\pi}$ 를 계수로 하는 선형적 관계가 된다. 그림 1(b)와 같이 임의의 α 값에 따라 $\Delta T(\tau)$ 와 $H(\tau)$ 의 오차가 최소화되는 경우의 K 를 최소 제곱법을 이용하여 식 (2)를 통해 산출한다.

$$K = \frac{P_{av}}{4a\sqrt{\pi}} \frac{H(\tau)}{\Delta T(\tau)} \quad (2)$$

2.2 시료 선정 및 실험 설치

본 연구에서는 균일한 입자 크기비율과 차후 수치해석간의 원활함을 위해 글라스 비드를 사용하였다. 실험에 사용된 글라스 비드와 페타이어 고무의 비중은 각각 2.51, 1.05이다. 본 연구의 주된 목적인 혼합재료간의 크기 차이에 따른 열전달 양상 변화를 관찰하기 위하여 글라스 비드는 직경 212~300 μm 크기의 시료를 사용하였고, 고무는 각각 0~112.5 μm (case 1), 250~300 μm (case 2), 850~1150 μm (case 3) 크기의 시료를 사용하였다. 고

무는 페타이어 분말을 체분석을 통해 원하는 크기의 입자를 선택하였으며 형상은 글라스 비드와 달리 불규칙한 모양을 띤다. 글라스 비드와 고무의 입자 크기비가 각각 1:0.25, 1:1, 1:4의 비율이 된다(그림 2).

표 1과 표 2는 실험에 사용된 고무와 글라스 비드의 부피비에 따라 측정된 간극률 및 건조밀도를 보여준다. 재료간의 혼합비에 따라 달라지는 간극률은 주로 고무 재료의 형상에 의해 좌우되며, 고무의 부피비가 증가함에 따라 간극률이 증가한다. 시료에 따라 일정한 간극률을 얻기 위해 시료에 압력을 가할 경우 고무의 압축에 따라 입자간 접촉정도가 변하고 이것이 열전도도에 미치는 영향 역시 예측이 불가능하므로 글라스 비드와 고무를 일정비율로 균질하게 섞은 후 하중을 가하지 않은 상태에서 열전도도를 측정하였다. 혼합은 시료의 각 부분이 전체와 같은 부피비를 갖도록 관찰하며 혼합하였고, 같은 부피비의 시료에 대해 반복 실험을 통해 대푯값을 선정하였다.

비정상면열원법에 의한 열전도도 측정은 온도에 따라 저항값이 변하는 RTD(Resistance Temperature Detector) 센서(ETG 50B/W, Vishay micro measurement)를 휘트스톤 브리지 형태로 연결하여 수행한다(그림 3). 두 개의

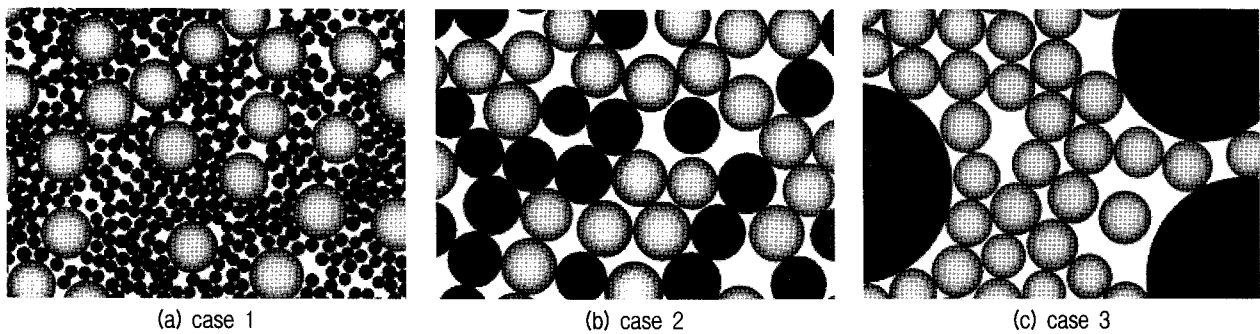


그림 2. 입자의 크기비에 따른 연결 양상 예시

표 1. 고무와 글라스 비드의 부피비에 따른 간극률

글라스 비드 부피비[%]	0	10	22	39	63	80	100
case 1	0.64	0.59	0.62	0.56	0.49	0.40	0.40
case 2	0.66	0.66	0.62	0.56	0.52	0.38	0.40
case 3	0.60	0.55	0.58	0.48	0.44	0.39	0.40

표 2. 고무와 글라스 비드의 부피비에 따른 건조밀도

건조 밀도[g/cm ³]	0	10	22	39	63	80	100
case 1	0.36	0.41	0.52	0.71	0.94	1.37	1.49
case 2	0.38	0.49	0.52	0.71	1.00	1.32	1.49
case 3	0.42	0.53	0.57	0.83	1.08	1.34	1.49

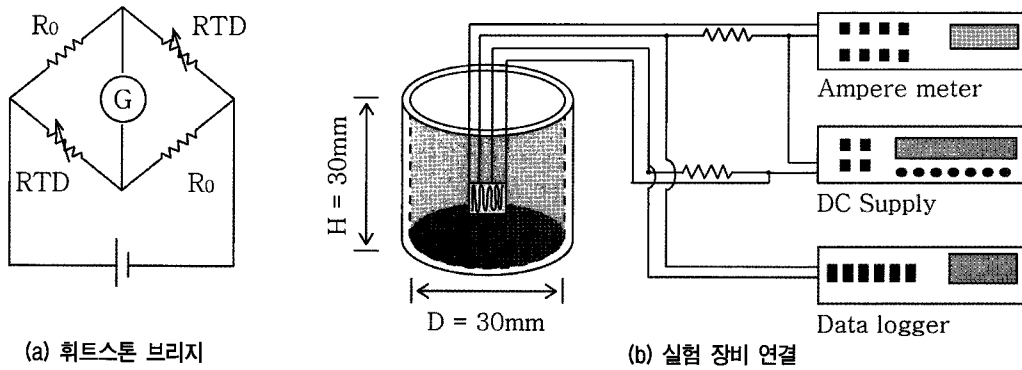


그림 3. (a) 휘트스톤 브리지 (b) 실험 장비 연결

RTD 센서 겹쳐 열원이 양방향으로 균일하게 전파되도록 하였다. 시료가 위치하는 셀은 직경 30mm, 높이 30mm의 아크릴 원통을 사용하였으며 각 시료를 절반가량 채운 후 RTD 센서를 넣고 나머지 부분을 채웠다. 직류 전압을 가하면 RTD 센서에서 열이 발생하며(식 1의 P_{av}) 온도에 따라 RTD 센서의 저항 값이 변하게 된다. 브리지 회로에서의 전위차를 통하여 저항의 변화를 측정할 수 있으며, 시간에 따른 저항의 변화는 다음과 같다. 이 때 V_{EX} 는 가해진 전압, R_0 는 정밀 저항치(50Ω)이다.

$$R(t) = R_0 \frac{V_{EX} + V_{Out}}{V_{EX} - V_{Out}} \quad (3)$$

식(4)는 측정된 저항을 온도로 환산하기 위한 보정식이며 보정온도 범위 내에서($0^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$) 뚜렷한 선형관계를 보여준다.

$$T = 3.82R - 173.27, \quad R^2 = 0.999 \quad (4)$$

전압은 Agilent Technology 사의 U8001A를 사용하여 1.5V를 가하였으며 0.1초 간격으로 20초간 Agilent Technology 사의 34972A 데이터로거와 34401A 멀티미터를 사용해 전압과 전류를 기록하였다. 센서에 의해 영향을 받는 범위가 좁기 때문에 혼합이 균질하지 못 할 경우 비율이 왜곡될 수 있어 실제 실험에서는 동일 시료에 대하여 3회 혼합하였고 각 혼합에 대해 3회 측정하여 총 9번씩 측정하였다. 또 한 실험 후 시료의 열이 충분히 소산될 수 있도록 각 실험 간에 5분의 대기 시간을 가졌다.

2.3 수치해석

실내실험을 통해 획득한 열전도도의 양상을 분석하기 위해 상용프로그램인 PFC를 사용하여 글라스 비드

와 고무 혼합재료의 2차원 및 3차원 모사시료를 생성하였다. 2차원 시료는 $200\text{mm} \times 150\text{mm}$ (case 2, 3) 또는 $75\text{mm} \times 57\text{mm}$ (case1)의 셀을 준비하였고 입자 크기는 글라스비드 1mm, 고무는 0.25mm, 1mm, 4mm를 사용하여 위 실험과 마찬가지로 4:1, 1:1, 1:4의 비율을 유지하였다. 입도 분포는 최소 및 최댓값이 위 크기로부터 $\pm 5\%$ 가 되는 정규분포가 되도록 설정하였다. 입자를 먼저 생성한 생성된 시료를 이용하여 각 글라스비드 입자당 연결된 글라스비드 입자의 수를 관찰하였고 열 네트워크 모델을 적용해 정상상태에 도달한 2차원 공간 내에서 열이 전달되는 양상을 모사하였다.

Yun과 Evans(2010)가 제시한 열전도도 산출을 위한 열 네트워크 모델은 실제 실험에서 사용된 입자와 동일한 조건의 모사시료에 대해 정성적 분석이 아닌 실제 열전도도 계산에 적용이 된다. 네트워크 모델은 각 입자 내에서의 열전도도, 입자간 거리에 따른 열전도도를 각각 계산하여 두 입자간의 열 흐름을 세 가지 열전도도의 합성으로 나타낸다. 이 때 입자간 거리에 따른 열전도도는 열이 전달되는 범위 이내로 간격이 떨어진 것과 직접 접촉한 것을 구분하며 간극을 채우고 있는 물질의 열전도도를 고려하여 계산하게 되어 건조 상태와 포화상태의 열전도도를 계산할 수 있다. 결국 네트워크 모델은 입자간의 접촉정도를 열전도도로 환산한 후 주변 입자들로 통하는 열량을 계산하고 단위 면적을 통해 흐르는 전체 열량으로 전체 열전도도를 계산한다(Yun and Evans, 2010). 수치해석 과정에서 두 가지 변수가 결과에 중요하게 작용하는데, 하나는 각 입자로부터 열이 유효하게 전달되는 범위를 결정하는 변수 ϵ 이고 다른 하나는 입자의 평균 곡률반경의 비율을 평가하는 χ 이다. 두 매개변수는 전체 시료에서의 열 흐름 차원이 아닌 각 입자에서 근접한 입자로 열이 전달되는 양을 결정하

표 3. 개별요소법에 사용된 고무와 글라스비드의 물성치

	수직강성[Pa]	전단강성[Pa]	비중	마찰계수
고무	8.7×10^7	2.9×10^7	1.05	0.5
글라스 비드	7.598×10^{10}	2.9×10^{10}	2.51	0.31

(Evans 등, 2011)

기 때문에 전체 시료의 혼합율에 무관하게 같은 값을 가져야 하며, 때문에 두 매개변수는 모든 부피비에서 동일하게 0.30과 0.75를 사용하였다. 또한 각 구성물질의 열전도도 값은 글라스비드는 제조사의 매뉴얼대로 1.124 [W/mK]을 사용하였고 고무, 공기에 대해 각각 0.250, 0.025 [W/mK]을 사용하였다.

3차원 시료는 높이 8.4mm, 직경 7.0mm의 원통형으로 제작되었으며 고무 및 글라스비드 입자의 최대 및 최소 입경은 실험과 동일하게 설정하였다. 모사 시료는 입자가 고무 또는 글라스비드인지 무작위로 결정되었으며 입자의 입경은 최소 및 최대값 사이에서 균등하게 분포되었고 시료 내에서 각 입자의 위치 역시 무작위로 결정되었다. 최초 간극률 0.5의 상태에서 중력과 5kPa의 낮은 수준 압력을 작용하여 간극률 0.433~0.419 사이 값에서 정적 평형상태로 시료를 조절하였다. 모사시료는 실험 시료와 완전히 일치하지는 않는다. 먼저 간극률은 실제 시료와 차이가 있는데 이것은 실제 실험에서 고무의 불규칙적인 형상이 시료가 조밀하게 구성되는 것을 방해하기 때문이다. 또한 실제 실험에서는 5kPa의 낮은 수준압력이 가해지지 않았는데, 고무의 비율이 높은 시료에서 차이가 나게 된다. 따라서 실험과 수치해석이 가장 근접한 결과를 얻은 것은 글라스비드 100%인 시료이다.

개별요소법을 통한 시료 제작에 사용된 고무와 글라스비드의 물성치는 표 3에 나타내었다(2차원과 3차원 모사시료의 물성치는 동일).

3. 실험 결과 분석

그림 4는 비정상면열원법에 의해 실측된 3가지 경우에 따른 실험결과를 보여준다. 글라스 비드의 크기가 3가지 경우에 따라 동일하므로 글라스 비드가 100%일 경우 약 0.22W/mK의 동일한 값을 보이며 0% 글라스비드, 즉 고무 100% 시료의 경우 고무 입자의 크기가 상이한 경우에도 약 0.1W/mK의 일정한 값을 보인다. 간극에 존재하는 공기와 입자간 접촉점에서의 열저항

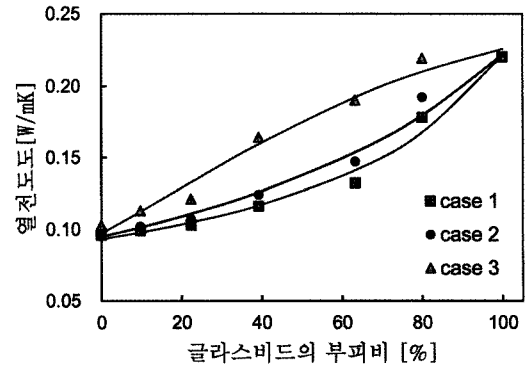


그림 4. 입자 크기비에 따른 열전도도의 변화

에 의해, 글라스 비드와 고무로 이루어진 재료의 열전도도가 각각 1.024W/mK와 0.25W/mK인 반면 입자상으로 존재할 경우 약 20%~50%로 열전도도 값이 줄어든다. 낮은 열전도도를 갖는 고무가 혼합재료에 존재할 경우 열전도 효과를 감소시키므로 입자간 크기비와 무관하게 고무의 비율이 증가할수록 열전도도는 감소한다. 하지만, 입자간 크기비에 따라 열전도도의 감소 양상은 뚜렷이 다를 수 있다. 큰 고무 입자가 글라스비드 내에 존재할 경우(case 3) 고무에 의한 차단 효과가 적게 나타나 글라스 비드 입자를 통한 대부분의 열전달은 원활하게 진행된다. 고무의 크기가 작아질수록 글라스비드간의 접촉 수를 줄이는 효과가 우세하여 약간의 고무가 포함되어도 열전도도 감소폭이 case3에 비해 큼을 알 수 있다. 실선은 세 실험 결과에 대하여 가장 잘 맞도록 logistic function을 이용하여 표현한 것이다. 이 식은 다음과 같이 나타내지며,

$$k(F_{GB}) = \frac{a}{b + e^{-cF_{GB}}} \quad (5)$$

계수 a, b, c는 각 실험에 따라 case 1은 -0.0795, -1.8519, -0.004, case 2는 0.0443, -0.5334, 0.0041, case 3는 0.1573, 0.6186, 0.0254이다.

그림 5는 2D 모사시료로부터 전체 입자 수에서 각 글라스비드 입자들이 몇 개의 글라스비드 입자와 직접 접촉(overlap)하고 있는지 나타낸 곡선이다. 같은 비율에서 case 1에서 case 3로 갈수록 곡선의 중심축이 우측으로 이동하는 것으로 case 3에서 글라스비드간 연결이 가장 원활하게 이루어짐을 확인할 수 있다. 연결도 평가 곡선에서는 case 2, 3이 유사한 데 반해 열전도도는 case 1과 2가 유사한 경향을 갖는다. case 1과 2의 입자 수 차이는 case 3과 case 2의 그것보다 훨씬 크기 때문에

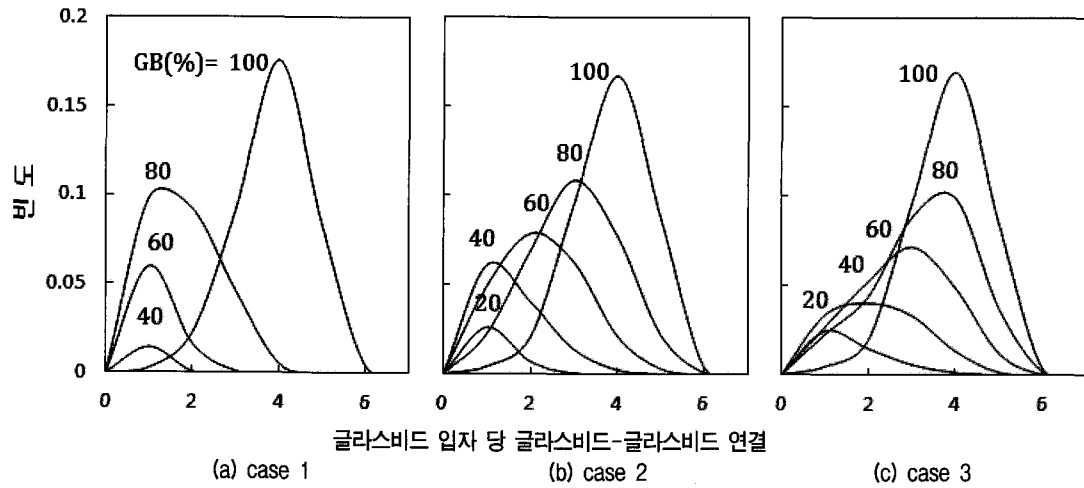


그림 5. 부피비 및 크기비에 따른 글라스비드 입자 당 글라스비드-글라스비드 연결 분포

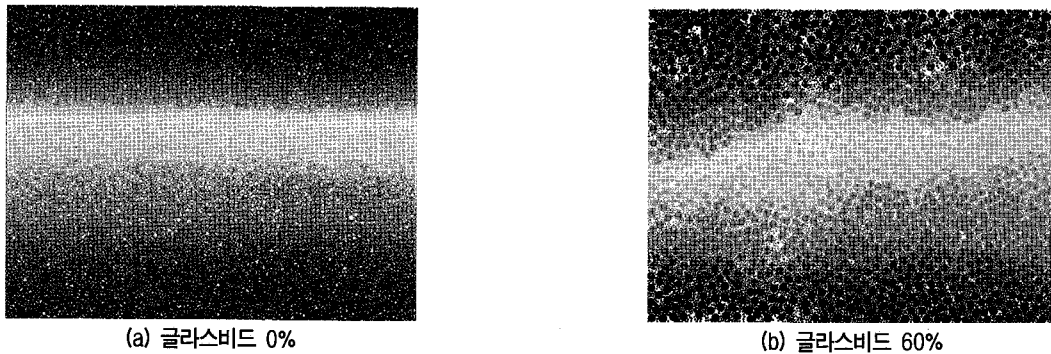


그림 6. 글라스비드의 비율에 따른 열 전달 통로 변화

연결도 평가에서 case 1과 2가 더 큰 차이를 보이게 되지만, 실제로는 글라스비드와 글라스비드 사이에 case 1의 고무와 같은 매우 작은 입자가 끼어 있는 경우는 열의 전달을 방해하는 정도가 작기 때문에 글라스비드의 연결도의 차이가 그대로 열전도도에 반영되지 않는다고 가정할 수 있다. 또한, 고무 입자 들이 작은 경우 간극을 채워 실제로 차단하는 역할을 하는 입자의 수는 감소하게 되며, 네트워크 모델에서도 입자 크기가 작을 경우 고무에 의해 직접 접촉이 차단되어도 글라스비드 간의 거리가 열이 전달되는 유효반경 내에 있게 되기 때문이다.

그림 6은 case 1에 대해 개별요소법을 통해 2차원 입자를 생성하고, 열 네트워크 모델을 적용하여 정상상태에 이르렀을 때의 입자내 온도 분포를 보여준다.

글라스 비드 100%, 고무 100%에서는 열이 전체 공간에서 고르게 전달되어 온도의 분포가 선형으로 나타난다. 그러나, 혼합물질의 경우 고무와 글라스비드의 공간적 배치에 따라 열이 전달되는 양상이 국소적으로 다르게 나타나, 같은 수평선상에서도 온도 차이를 보이게 된다.

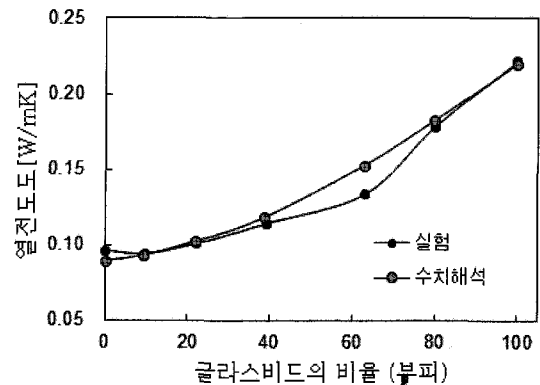


그림 7. case 2 열전도도의 실험과 수치해석 비교

글라스 비드와 고무의 불균질한 분포로 인하여 입자내 온도 분포가 다르게 나타나는 것은 고무 입자가 열전달 통로를 끊는 것을 직접 검증한다.

3차원 모사시료를 앞서 기술한 열 네트워크 모델을 이용하여 case 2에 대한 실험값을 예측한 결과는 그림 7에 나타나 있다. 수치해석 결과 실험 결과와 마찬가지로 고무의 비율이 증가함에 따라 열전도도가 감소하게 된다. 열 네트워크 모델이 단일 입자상 물질에 기반하여

개발되었음에도 불구하고 각 입자 차원에서 열 흐름을 설명하는 모델이기 때문에 이중 혼합재료가 불균질하게 분포한 경우에도 각 물질에 따른 입자의 물성치를 입력하여 재료간 비율에 따른 열전도도 값의 변화를 실측값과 유사하게 평가할 수 있음을 실험과의 비교를 통해 확인하였다.

4. 결론

본 연구는 비정상면열원법을 이용하여 고무와 글라스비드 혼합 물질의 열전도도를 측정하였고, 부피비 뿐 아니라 입자 크기비에 따른 열전도도의 변화 양상을 관찰하였다. 고무의 부피비가 증가할수록 열전도도는 감소하는데, 열전도도가 낮은 고무 입자가 글라스비드의 연결로 이루어진 열전달 통로를 끊는 역할을 하기 때문이다. 같은 부피비에서도 입자의 크기비에 따라 열전달 통로가 생성되는 양상이 달라진다. 고무 입자가 작은 경우에는 소량의 고무 입자만으로도 열전도도의 감소가 두드러지나, 고무 입자가 큰 경우에는 소량의 고무 입자가 연결을 차단하는 데 큰 역할을 하지 못하기 때문이다. 고무 입자의 크기가 큰 경우에 열전도도가 더 높게 나타나며, 입자가 작을수록 효과적으로 열의 전달 통로를 차단하고 있다.

개별요소법과 네트워크모델을 활용한 수치해석을 통하여 공간적 분포에 따른 열전달 현상을 분석하고 실험 결과와 비교하여, 네트워크 모델이 비균질한 혼합재료에서도 적용될 수 있는 방법임을 보였다. 고무의 부피비가 낮을수록, 고무 입자의 크기가 클수록 글라스비드간 연결이 활발해지며 높은 열전도도를 갖게 된다. 또 한 글라스비드와 고무의 국소적인 배치에 따라 열의 전도가 불균질하게 나타나며, 이것은 부피비 뿐 아니라 입자 크기비와 공간적 배치가 열전도도에 직접적인 영향을 미치는 글라스비드의 연결도를 결정하는 인자임을 증명한다.

참고 문헌

1. 김영진 (1998), “페타이어의 건설재료 재활용”, 대한토목학회지, Vol.46, pp.32-35.
2. 이창호, 윤형구, 김래현, 이우진, 이종섭 (2008), “입자크기비에 따른 강-연성 혼합체의 공학적 특성”, 한국지반공학학회논문집, Vol.24, pp.125-135.

3. ASTM D5334-08 Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure
4. Ahmed, I. and Lovell, C. W. (1993), “Rubber Soils as Light Weight Geomaterials”, *Transportation research record* 1422. pp.61-70.
5. Anh, T. Ngo and Valdes, Julio R. (2007), “Creep of Sand-Rubber Mixtures”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, pp.1101-1105.
6. Bederina, M., Marmoret, L., Mezreb, K., Khenfer M. M., Bali, A. and Queneudec, M. (2005), “Effect of the Addition of Wood Shavings on Thermal Conductivity of Sand Concretes: Experimental Study and Modeling”, *Construction and Building Materials*, Vol.21, pp.662-668.
7. Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K. Laidoudi, B. and Queneudec, M. (2008), “Thermal Conductivity of Cement Composites Containing Rubber Waste Particles: Experimental Study and Modeling”, *Construction and Building Materials*, Vol.22, pp.573-579.
8. Evans, T. M., Lee, JungHwoon, Yun, Tae Sup, and Valdes, Julio R. (2011), “Thermal Conductivity in Granular Mixtures: Experimental and Numerical Studies”, *Proc. International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, 2011, Seoul, Korea.
9. Garga, V. K. and O’Shaughnessy, V. (2000), “Tire-Reinforced Earthfill. Part 1: Construction of a Test Fill, Performance, and Retaining Wall Design”, *Can. Geotech. J.*, 37(1), pp.75-96.
10. Ghazavi, M. (2004), “Shear Strength Characteristics of Sand-Mixed with Granular Rubber”, *Geotechnical and Geological Engineering*, 22, pp.401-416.
11. Gustafsson, S. E., Karawacki, E. and Khan, M. N. (1979), “Transient Hot-strip Method for Simultaneously Measuring Thermal Conductivity And Thermal Diffusivity of Solids and Fluids”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.12, No.9, pp.1411-1421.
12. Humphrey, D. N. and Eaton, R. A. (1995), “Field Performance of Tire Chips as Subgrade Insulation for Rural Roads”, *Proc., 6th Int Conf. on Low-Volume Roads*, pp.77-86.
13. Khedari, J., Suttisonk, B., Pratinthong, N. and Hirunlabh, Jongjit (2000), “New lightweight composite struction materials with low thermal conductivity”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.24, pp.65-70.
14. Kim, H. K. and Santamarina, J. C. (2008), “Sand-Rubber Mixtures (Large Rubber Chips)”, *Canadian Geotechnical Journal*, Can. Geotech. J. 45. pp.1457-1466
15. Lee, J. H., Salgado R., Bernal, A., and Lovell, C. W. (1999), “Shredded Tires and Rubber-Sand as Lightweight Backfill”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 125(2), pp.132-141.
16. Pamukcu, S. and Akbulut, S. (2006), “Thermoelastic Enhancement of Damping of Sand Using Synthetic Ground Rubber”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 132(4), pp.501-510.
17. Youwai, S. and Bergado, D. (2003), “Strength and Deformation Characteristics of Shredded Rubber Tire-Sand Mixtures”, *Can. Geotech. J.*, 40(2), pp.254-264.
18. Yun, T. and T. Evans (2010), “Three-dimensional random network model for thermal conductivity in particulate materials”, *Computers and Geotechnics.*, Vol.37, pp.991-998.

(접수일자 2011. 4. 29, 심사완료일 2011. 11. 17)