

구조모델을 이용한 다공성 매질의 유효열전도도 분석

차장환 · 구민호* · 김영석

공주대학교 지질환경과학과

An Experimental Analysis of Effective Thermal Conductivity of Porous Materials Using Structural Models

Jang-Hwan Cha · Min-Ho Koo* · Young-Seuk Keehm

Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

ABSTRACT

The effective thermal conductivity of porous materials is usually determined by porosity, water content, and the conductivity of the matrix. In addition, it is also affected by the internal structure of the materials such as the size, arrangement, and connectivity of the matrix-forming grains. Based on the structural models for multi-phase materials, thermal conductivities of soils and sands measured with varying the water content were analyzed. Thermal conductivities of dry samples were likely to fall in the region between the Maxwell-Eucken model with air as the continuous phase and the matrix as the dispersed phase (ME_{air}) and the co-continuous (CC) model. However, water-saturated samples moved down to the region between the ME_{wat} model and the series model. The predictive inconsistency of the structural models for dry and water-saturated samples may be caused by the increase of porosity for water-saturated samples, which leads to decrease of connectivity among the grains of matrix. In cases of variably saturated samples with a uniform grain size, the thermal conductivity showed progressive changes of the structural models from the ME_{air} model to the ME_{wat} model depending on the water content. Especially, an abrupt increase found in 0-20% of the water content, showing transition from the ME_{air} model to the CC model, can be attributed to change of water from the dispersed to continuous phase. On the contrary, the undisturbed soil samples with various sizes of grains showed a gradual increase of conductivity during the transition from the ME_{air} model to the CC model.

Key words : Thermal conductivity, Porous materials, Structural models, Porosity, Water content

1. 서 론

암석 및 토양의 유효열전도도는 지반의 열 흐름계를 결정하는 가장 중요한 열물성으로, 최근 전력선의 지중매설, 방사성폐기물의 지하저장, 오일 및 가스의 지중저장 그리고 지열에너지 추출과 관련된 분야에서 그 평가의 중요성이 강조되고 있다. 매질의 유효열전도도는 공극률, 함수비, 구성광물의 함량 및 열전도도, 온도, 압력, 입자크기 및 배열, 입자의 모양과 방향성 그리고 입자 사이의 접촉저항과 같은 많은 요인에 의해 지배받는다. 이들 인자에 따른 유효열전도도 연구는 주로 경험식 개발, 이론적인 모델 그리고 수치모사 등을 통하여 수행되어 왔다.

열전도도를 추정하는 경험식 개발에 관한 연구는 오래 전부터 시작되어 최근까지도 다수의 연구자에 의하여 진행되고 있다. Kersten(1949)과 Singh and Devid(2000)는 토양을 대상으로 함수비와 건조밀도를 변수로 하는 열전도도 산정식을 제시하였다. Lu et al.(2007)은 토성(soil texture)에 따른 토양의 열전도도와 포화도를 이용한 경험식을 개발하였으며 건조토양에서 공극률과 열전도도의 관계식을 제시하였다. 또한, Cote and Konrad(2009)는 두 개의 상(two-phase)을 갖는 다공성 매질에서 매질구조가 유효열전도도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 준경험식을 개발하였다. 차장환 외(2008)는 국내 토양에 대한 열물성 실험을 통하여 공극률과 함수비로부터 토양의 열전

*Corresponding author : koo@kongju.ac.kr

원고접수일 : 2010. 10. 6 심사일 : 2010. 10. 12 게재승인일 : 2010. 10. 13
질의 및 토의 : 2011. 2. 28 까지

도도를 예측하는 회귀모형을 제시한 바 있다.

구조모델(structural model)은 다공성 매질의 물리적인 구조에 적합한 방정식을 이용하여 각 구성성분의 열전도도와 함량에 따른 유효열전도도 변화를 예측하는 해석 모델이다. Carson et al.(2005)은 다공성 매질의 공극구조를 크게 내부공극(internal porosity)과 외부공극(external porosity)으로 구분하여 이에 따라 다공성 매질의 유효열전도도가 어떻게 달라지는지 분석하였다. 내부공극 구조는 벌집(honeycombs)과 같이 연속적으로 응집된 기질 내부에 공극이 존재하는 경우이며, 외부공극 구조는 토양과 같이 기질이 입자로 구성되어 기질 외부에 공극이 연속상으로 존재하는 경우에 해당된다. Wang et al.(2006)은 다양한 구조모델들을 통합하는 단일(unifying) 방정식을 유도하였으며, 구조모델들을 결합하여 불균질 매질의 열전도도를 예측하는 다중 구조모델을 제시하였다. Wang et al.(2008)은 구조모델 중 Maxwell-Eucken모델과 유효매질 이론(EMT)을 이용하여 상호연속적인 구조모델(CC)을 유도하였으며 불균질 매질의 유효열전도도를 예측하는데 적용하였다.

수치모사를 통한 유효열전도도 연구에서 Carson et al.(2003)은 2차원 유한요소 모사를 수행하여 유효열전도도에 대한 공극률의 상대적인 영향을 검증하였다. Kohout et al.(2004)은 임의의 입자(solid), 공기 및 물로 구성된 3상의 매질에 대한 수치모사를 실시하여 유효열전도도를 예측하였으며, 구성성분의 함량, 매질의 미세구조 및 구성성분의 열전도도에 대한 영향을 제시하였다. 수치모사는 실제 매질의 미세구조를 구현하여 Laplace 방정식의 해로부터 계산된 온도분포를 이용하여 유효열전도도를 계산하는 것으로 수행되었다. Jessop(2008)은 수치모사를 통하여 광물의 함량과 분포에 따른 결정질 화성암 및 변성암의 유효열전도도에 대한 특성을 파악하였다.

이 논문은 다공성 매질의 유효열전도도에 대한 연구로써 토양 및 모래 시료들을 대상으로 함수비를 변화시키면서 열전도도를 측정하였으며, 구조모델을 이용하여 공극률과 함수비에 따라 매질의 열전달 구조가 어떻게 달라지는지 분석하였다.

2. 이론 및 실험방법

다공성 매질의 유효열전도도는 주로 공극률, 함수비 및 기질을 구성하는 물질의 종류에 따라 달라지며, 동시에 물리적인 구조의 영향을 받는다. 다공성 매질의 열전도도를 설명하는 구조모델로는 직렬(series)모델, 병렬(parallel)모

Table 1. Several fundamental structural effective thermal conductivity models for multi-phase materials

Model	Equation
Series model	$k_e = \frac{\sum v_i}{\sum \frac{v_i}{k_i}}$
Parallel model	$k_e = \frac{\sum k_i v_i}{\sum v_i}$
Maxwell-Eucken (ME) model	$k_e = \frac{\sum k_i v_i \frac{3k_{cont}}{2k_{cont} + k_i}}{\sum v_i \frac{3k_{cont}}{2k_{cont} + k_i}}$
Effective medium theory (EMT) model	$k_e = \frac{\sum k_i v_i \frac{3k_e}{2k_e + k_i}}{\sum v_i \frac{3k_e}{2k_e + k_i}}$
Co-continuous (CC) model	$\sum v_i \frac{(k_i - k_e)(2k_i + k_e)}{k_i} = 0$
Geometric mean (GM) model	$k_e = \prod k_i^{v_i}$

델, Maxwell-Eucken(ME)모델, 유효매질이론(effective medium theory; EMT)모델, 기하평균(geometric mean; GM)모델 그리고 상호연속적인 구조모델(co-continuous structural model; CC model) 등이 있다(Table 1).

Series모델(Fig. 1a)과 parallel모델(Fig. 1b)은 열 흐름이 매질의 층상구조와 수직 또는 수평 방향으로 발생하는 형태이다. ME모델(Fig. 1c)은 매질을 구성하는 여러 성분 중 하나가 연속상(continuous phase)으로 존재하며 나머지 성분들은 연속상 내에 분산되는(dispersed) 구조를 갖는다. ME모델의 종류는 연속상과 그 내부에 분산되어 있는 알갱이가 갖는 열전도도의 차이(contrast)에 따라 두 가지로 분류되며 이 연구에서는 공기와 물을 연속상으로 이용하였다. EMT모델(Fig. 1d)은 ME모델과 같이 매질의 구성성분이 연속적이거나 분산되어 나타나는 것이 아니라 완전히 무작위(random)로 분포하는 구조를 갖는다. GM모델은 각 구성성분들이 임의의 방향과 분포를 갖는 형태로 매질의 유효열전도도를 구하는데 가장 적합한 방법으로 알려져 있다(Beardsmore and Cull, 2001). Wang et al. (2008)은 ME모델과 EMT모델을 이용하여 CC모델을 제시하였으며 이는 매질을 구성하는 각각의 구성성분이 서로 연속적

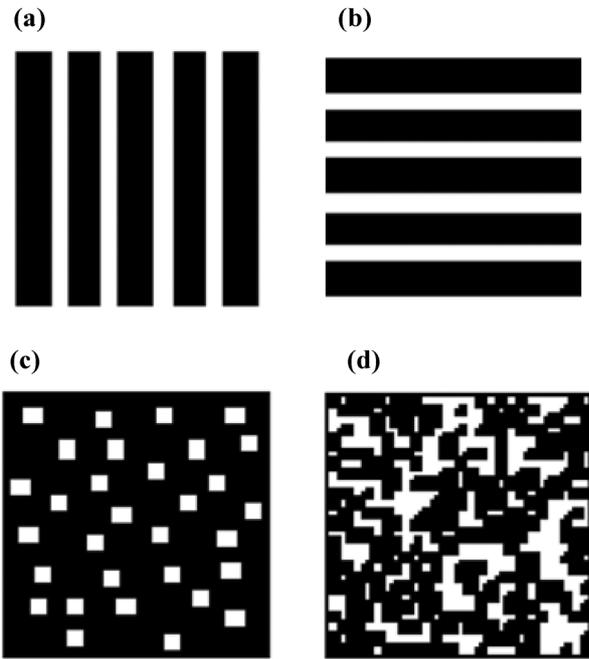


Fig. 1. Fundamental structural effective thermal conductivity models for two-phase materials (Wang et al., 2008): (a) serial, (b) parallel, (c) ME, and (d) EMT models.

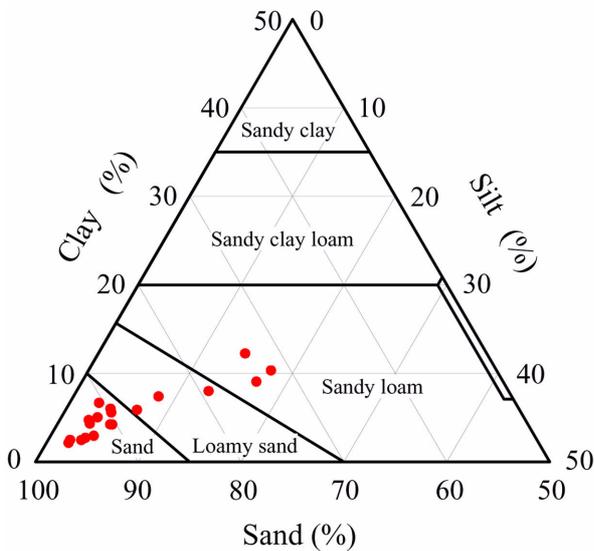


Fig. 2. Soil texture triangle showing the USDA classification system based on grain size for 19 soil samples.

으로 배열되어 있는 형태이다. 다상(multi-phase)으로 구성된 다공성 매질에 대한 각 구조 모델을 설명하는 방정식은 Table 1과 같다. 여기서, k_c 는 매질의 유효열전도도(W/mK), k_i 와 v_i 는 각각 i 번째 상의 열전도도와 함량(volume fraction), k_{cont} 는 연속적인 상의 열전도도를 나타낸다.

본 연구에서는 19개 토양 시료와 6개 모래 시료를 대상으로 함수비를 변화시키면서 열전도도를 측정하였다. 실험에 이용된 토양시료는 국내 기상관측소의 천부토양에서 채취된 시료(차장환 외, 2008)의 일부로, Fig. 2와 같이 모래질양토(sandy loam), 양질모래(loamy sand) 그리고 모래(sand)로 분류되는 입도분포 특성을 나타낸다. 모래시료는 충남 공주시에 위치한 금강 둔치에서 채취한 모래를 표준체에 통과시켜 일정한 크기의 입자를 갖는 시료로 만든 것이다. 시료의 열전도도는 탐침방식의 장비인 KD2와 KD2Pro(Decagon Device Inc.)를 이용하여 측정하였다. 각 시료의 공극률과 밀도는 실내실험을 통하여 측정하였으며, 시료의 구성광물 및 함량은 XRD 정량분석을 통하여 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 건조 및 포화시료의 열전도도 변화

Table 2는 열물성 실험에 이용된 토양시료의 XRD 정량분석 결과를 나타낸 것이다. 실험에 이용된 토양시료는 주로 조장석, 정장석 및 미사장석의 장석류와 백운모 및 녹니석 등의 운모류, 일라이트 및 카올리나이트의 점토광물, 석영 그리고 각섬석 등으로 구성되어 있으며, 열전도도가 가장 큰 광물인 석영(7.69 W/mK)의 함량은 30.42~70.41%의 범위를 갖는다. Table 3은 토양 및 모래시료를 대상으로 측정된 공극률 및 열전도도를 나타낸 것이다. Table 3에서 k_m 은 시료를 구성하는 기질의 열전도도를 나타내는데, 이는 시료를 구성하는 광물들의 조성비와 각 광물의 열전도도를 이용하여 공극이 없는 상태를 가정하고 EMT모형을 적용하여 산정하였다. 토양 및 모래시료의 공극률은 0.44~0.61과 0.42~0.45이며 기질의 열전도도는 각각 3.90~5.66, 4.39~5.34 W/mK의 범위를 갖는다.

Fig. 3은 토양 시료, S16을 대상으로 측정된 열전도도와 2상(two-phase)의 구조모델(기질과 공기 또는 기질과 물)에 의해 계산된 유효열전도도를 공극률 변화에 따라 도시한 것이다. 그림에서 유효열전도도는 기질과 공기 또는 기질과 물의 열전도도를 이용하여 정규화하여 표현하였다. 공기와 물의 열전도도는 각각 0.025, 0.59 W/mK이며, 전술한 비와 같이 기질의 열전도도(k_m)는 기질을 구성하는 각 광물들의 조성비로부터 EMT모형을 적용하여 구하였다.

Fig. 3a는 건조상태의 열전도도를 도시한 것으로 측정된 시료의 열전도도는 ME_{air}와 CC모델 사이의 영역에 위치한다. 즉, 건조 시료의 열전도도는 공극에 존재하는 공

Table 2. Mineralogical compositions of the soils determined from X-ray diffraction (volume fraction, v%)

ID	Albite	Orthoclase	Microcline	Muscovite	Chlorite	Illite	Kaoline	Quartz	Hornblende
S1	10.66	4.97	–	7.18	23.99	2.49	1.30	46.35	3.06
S2	19.59	6.31	–	3.27	22.69	1.29	–	43.48	3.38
S3	22.20	5.07	–	3.73	29.58	1.97	0.20	35.22	2.02
S4	17.34	5.17	–	4.03	30.97	1.38	0.07	38.52	2.53
S5	10.01	–	30.01	2.47	1.79	6.21	11.05	38.35	–
S6	9.52	8.75	–	8.95	3.80	8.39	5.35	55.24	–
S7	4.02	1.08	9.83	5.09	4.77	4.31	9.88	61.04	–
S8	14.45	11.65	–	4.89	2.86	6.88	5.72	53.55	–
S9	5.51	–	5.81	11.17	6.08	5.01	–	66.42	–
S10	9.85	6.95	–	9.85	2.46	6.62	8.11	56.16	–
S11	3.52	2.46	–	19.30	3.22	7.16	3.05	61.29	–
S12	24.96	11.14	–	4.29	5.70	5.42	2.35	46.14	–
S13	5.81	2.27	–	9.99	7.21	7.29	–	66.50	–
S14	10.49	–	24.59	5.16	2.58	5.21	6.96	45.01	–
S15	14.92	8.06	–	8.77	4.50	5.17	4.12	54.46	–
S16	–	–	19.33	10.45	0.00	5.68	7.60	56.94	–
S17	8.00	–	8.79	8.22	4.21	6.47	3.35	60.95	–
S18	3.75	6.98	–	6.49	2.61	6.28	3.48	70.41	–
S19	–	–	33.52	11.42	11.72	1.96	2.15	30.42	–
TC*	2.14	2.31	2.49	2.28	5.15	1.80	2.60	7.69	2.81

TC* : Thermal conductivity(W/mK), Clauser et al.(1995), Vassueur et al.(1995)

Table 3. Measured porosity and thermal conductivity of samples

ID	Porosity	Measured		Calculated	ID	Porosity	Measured		Calculated
		TC _{sat}	TC _{dry}	TC _m			TC _{sat}	TC _{dry}	TC _m
S1	0.59	1.04	0.33	5.66	S14	0.44	1.34	0.26	4.27
S2	0.61	1.01	0.17	4.82	S15	0.52	1.05	0.18	4.81
S3	0.60	0.91	0.15	5.10	S16	0.47	1.37	0.49	5.74
S4	0.55	0.95	0.14	4.88	S17	0.55	1.17	0.20	5.22
S5	0.59	0.92	0.17	4.63	S18	0.52	1.17	0.27	4.86
S6	0.58	0.95	0.17	4.88	S19	0.51	1.10	0.50	4.25
S7	0.53	1.04	0.36	3.90	SD1	0.42	1.70	0.19	5.34
S8	0.53	1.35	0.31	4.68	SD2	0.42	1.67	0.19	5.25
S9	0.50	1.19	0.34	4.82	SD3	0.44	1.75	0.19	5.31
S10	0.48	1.28	0.40	5.24	SD4	0.45	1.66	0.19	5.29
S11	0.44	1.17	0.44	5.19	SD5	0.45	1.49	0.18	4.59
S12	0.45	1.18	0.14	4.36	SD6	0.42	1.56	0.27	4.39
S13	0.58	0.85	0.14	5.76					

Unit of TC: W/mK

기가 연속상의 역할을 하고 그 내부에 상대적으로 높은 열전도도를 갖는 입자가 분산되어 존재하는 모델(ME_{air})과 매질을 구성하는 입자와 공기가 상호 연속적인 상으로 존재하는 모델(CC모델)의 중간 영역에 위치하는 분포 특성을 보인다. Fig. 3b는 물로 포화된 시료의 열전도도 측정

값과 구조모델을 이용하여 계산된 유효열전도도를 도시한 것이다. 포화 시료는 건조 시료와 비교할 때 공극을 채우는 상이 공기에서 물로 바뀌었을 뿐, 공극구조의 변화는 발생하지 않으므로 열전도도 역시 동일한 구조모델에 의해 해석되어야 할 것으로 예상된다. 하지만 Fig. 3b와 같

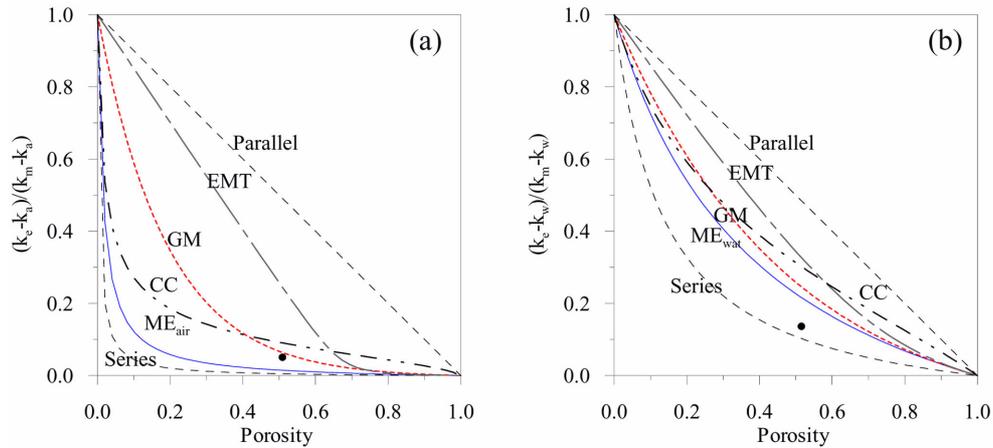


Fig. 3. Comparison of measured effective thermal conductivity with fundamental structure models for S16: (a) dry and (b) saturated conditions.

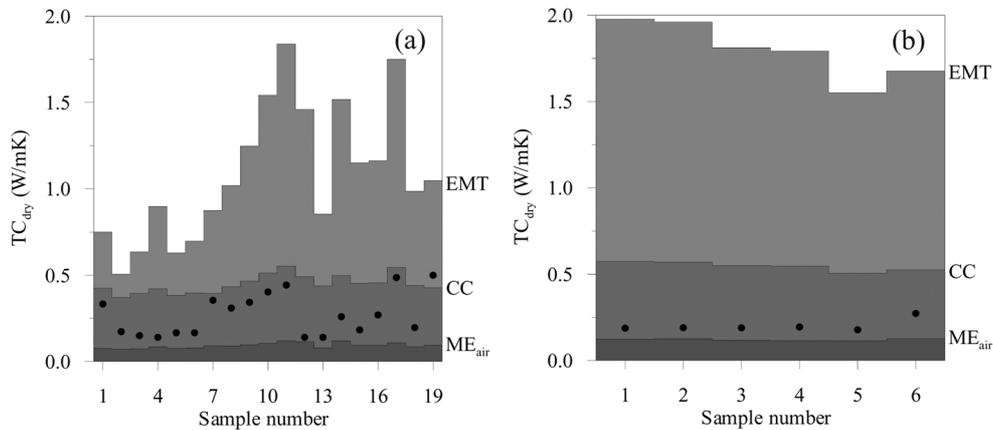


Fig. 4. Comparison of measured effective thermal conductivity with fundamental structure models for dry materials: (a) soils and (b) sands.

이 포화 시료의 열전도도 측정값은 건조 시료와 달리 series와 ME_{wat} 모델 영역 사이의 다소 낮은 값을 나타냈다. 이는 물로 포화되는 과정에서 열전달을 방해하는 물리적 기작에 의하여 구조적 변화가 발생한 것으로 해석되며, 이는 차장환 외(2008)의 분석과 같이 주로 공극률 변화와 관련된 것으로 추정된다. 즉, 시료가 포화되면서 공극률이 증가하고, 공극률 증가는 토양 기질의 연결성(connectivity)을 감소시켜 결과적으로 함수비 증가에 따른 토양의 유효 열전도도 증가를 둔화시킨 것으로 해석된다.

Fig. 4와 Fig. 5는 모든 토양 및 모래 시료에 대하여 측정된 열전도도와 구조모델 계산값을 비교한 것으로 Fig. 4는 건조 시료를 Fig. 5는 포화 시료를 나타낸다. 건조 시료의 경우 측정된 열전도도는 대부분 ME_{air}와 CC모델 영역에 위치하며, 이는 Carson et al.(2005)과 Wang et al.(2008)의 연구 결과와 잘 일치한다. Fig. 4a는 토양의

열전도도를 도시한 것으로 ME_{air}와 CC모델 영역에서 넓게 분포한다. 토양 시료의 경우 토양을 구성하는 모래, 실트 및 점토가 혼합되면서 큰 입자 사이에 작은 입자가 채워짐으로써 공극간의 연결성 또는 입자간의 연결성이 시료에 따라 다르게 나타나며, 그 결과 구조모델에서 ME_{air}와 CC모델 사이에서 넓은 영역을 차지한 것으로 해석된다. 반면, 입자의 크기가 고른 모래 시료의 열전도도는 ME_{air}와 CC모델 영역에 동일하게 위치하지만 주로 ME_{air} 모델 부근에 분포하는 특징을 보인다(Fig. 4b). 분급이 양호한 모래 시료의 경우 상대적으로 공극의 연결성이 우세한 공극 구조를 가지게 되며, 이는 열전달 측면에서 기질이 불연속상(dispersed phase)으로 존재하게 하는 역할을 하므로 ME_{air} 모델에 근접한 열전도도를 나타낸 것으로 해석된다.

Fig. 5는 물로 포화된 시료에 대하여 측정된 열전도도

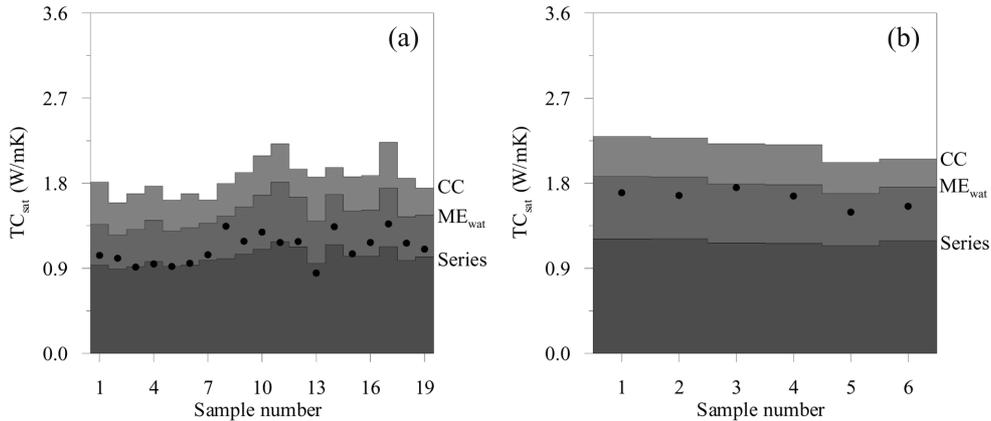


Fig. 5. Comparison of measured effective thermal conductivity with fundamental structure models for saturated materials: (a) soils and (b) sands.

와 구조모델 계산값을 비교한 것으로 series와 ME_{wat}모델 영역에 위치한다. 토양시료의 경우 series모델 부근에 분포하며(Fig. 5a), 이는 전술한 바와 같이 포화과정에서 발생한 공극을 증가가 입자간의 연결성을 감소시켜 건조시료에 비하여 기질을 통한 열전달이 약화되었기 때문인 것으로 해석된다. 한편, 모래시료의 경우 ME_{wat}모델 부근에 분포하는 특징을 보이는데, 모래시료는 시료 준비과정에서 공극을 증가를 발생시키는 실트 및 점토를 제거한 것이므로 포화에 따른 공극률 변화가 거의 없을 것으로 예상되며, 그 결과 Fig. 5b와 같이 ME_{wat}모델 부근에 분포하는 공통적인 특징을 보인 것으로 해석된다. 하지만 이러한 추론에도 불구하고 모든 포화시료의 열전도도가 물이 연속상으로 존재하고 그 내부에 기질이 분산되어 존재하는 모델인 ME_{wat}의 값보다 낮게 나타난 것은 Carson et al.(2005)이 제시한 다공성 매질의 열전도도 한계(bounds)를 벗어난 결과이다. Carson et al.(2005)은 건조시료에 대한 기존의 실험 결과를 통하여 EMT모델과 ME모델에 의해 다공성 매질의 열전도도 범위가 제한된다는 한계 가설을 검증하였는데, 본 연구의 건조시료의 결과도 이와 잘 일치한다. 하지만 동일한 공극구조를 가짐에도 불구하고 포화시료의 열전도도는 EMT모델과 ME모델에 의해 제한되는 한계 가설에 위배되는지 현재의 실험 결과만으로는 알 수 없으며 추후 연구과제로 남겨둔다.

3.2. 함수비에 따른 열전도도 변화

전술한 바와 같이 다공성 매질의 유효열전도도는 매질의 구조, 즉 매질을 구성하는 입자와 공극의 모양에 영향을 받는다. 비포화 매질의 경우 공극을 차지하는 유체, 즉 물과 공기는 각각 습윤상(wetting phase)과 비습윤상(non-

wetting phase)으로 존재하므로 공극에서 이들의 공간적 분포는 열전달 측면에서 서로 상이한 구조적 특성을 가진다고 할 수 있다. 본 연구에서는 물과 공기의 이러한 유체역학적 특성차이가 열전달에 어떻게 반영되는지 규명하기 위하여 다공성 매질을 대상으로 함수비에 따른 열전도도 변화를 측정하였으며 구조 모델을 통하여 이를 분석하였다.

Fig. 6은 불교란 토양시료 S18과 분급이 양호한 모래시료 SD1을 대상으로 함수비를 변화시키면서 측정된 열전도도와 구조모델에 의해 계산된 값을 도시한 것이다. 각 구조모델의 유효열전도도는 3상(공기, 물, 기질)의 열전도도와 함량비를 이용하여 계산하였는데, 기질의 열전도도는 전술한 바와 같이 기질을 구성하는 각 광물들의 조성비로부터 EMT모델을 적용하여 구하였다. Fig. 6과 같이 불포화 시료의 열전도도는 포화도가 커질수록 증가하며 구조모델에 적용한 결과 ME_{air}와 ME_{wat}모델 사이의 영역에서 변화하는 특징을 보인다. 열전도도는 포화도 0.2이하의 건조 상태에서 함수비에 따라 비교적 빠르게 커지면서 ME_{air}모델에서 CC모델로의 전이가 발생하였으며 이후 대부분의 포화도 영역(0.2-0.8)에서 열전도도가 완만히 증가하면서 CC모델에 잘 일치하였다. 이와 같이 열전도도의 증가가 크게 둔화되는 변곡점이 포화도 0.2 이하에서 발생하였는데 이는 공극에서의 물의 공간적 분포와 관련이 있다. 즉, 낮은 포화도에서 습윤상의 물은 주로 기질을 구성하는 입자들의 접촉점 주변에 위치하면서 입자간의 열전달 통로(bridge) 역할을 하게 되며, 결과적으로 매질의 열전도도를 효율적으로 증가시키게 된다. Lu et al.(2007)은 모래 함량이 40% 이상인 토양에서 포화도가 13% 이하일 때 열전도도가 포화도에 따라 급격하게 증가하는 현

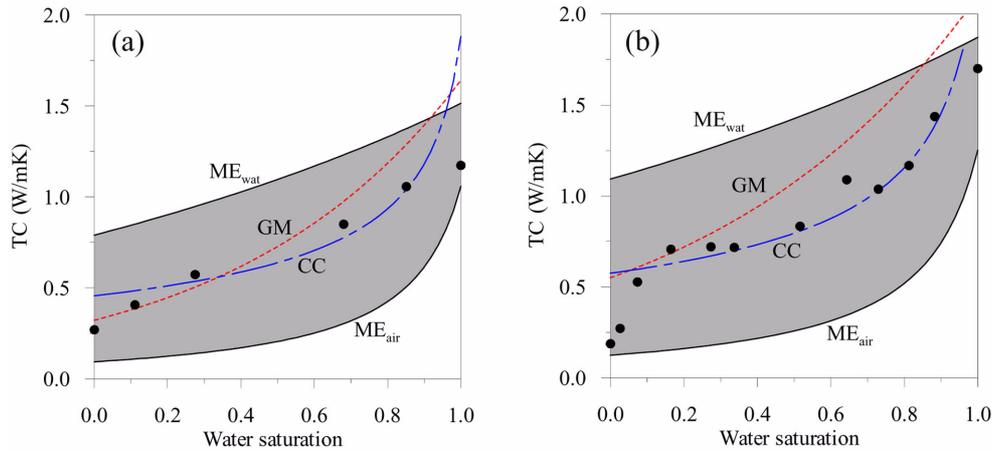


Fig. 6. Comparison of measured effective thermal conductivity with fundamental structure models for variably saturated materials: (a) S18 and (b) SD1.

상을 보고하였다. 따라서 불포화 시료는 물에 의해 입자들이 효과적으로 연결되는 임계포화도(critical water saturation)가 존재하며, 실험 결과와 같이 주로 0.2 이내의 값을 나타낸다. 임계포화도 이하의 건조 토양에서는 함수비에 따라 열전도도가 급격하게 증가하며, 임계포화도 이상에서는 완만하게 증가하는 양상을 보인다.

임계포화도 이하에서의 열전도도 변화는 시료의 분급 정도에 따라 다른 양상을 보였다. 분급이 불량한 토양시료의 경우(Fig. 6a) 열전도도 변화가 점진적으로 발생한 반면 입자크기가 고른 모래 시료의 경우(Fig. 6b) 건조 시 ME_{air} 모델에 더 근접한 낮은 값에서 출발하여 매우 빠르게 증가하는 양상을 보였다. 즉, Fig. 6은 입도분포특성이 임계포화도 및 임계포화도 이하에서의 열전도도 변화에 영향을 미치는 것을 잘 보여준다. 한편, 포화도가 매우 높은 경우(0.9 이상) 측정된 열전도도는 물이 연속적인 상으로 존재하며 그 내부에 공기와 기질 분산되어 나타나는 ME_{wat} 모델에 근접한 값을 보였다. 이상과 같이 다공성 매질의 열전도도는 포화도가 증가할수록 증가하는 양상이 뚜렷하게 나타나며 구조모델에 의해 계산된 값과 비교할 경우 ME_{air} , CC 및 ME_{wat} 모델에 의해 제한되는 영역 내에 도식된다. 이는 다공성 매질의 공극을 채우는 물과 공기가 함수비에 따라 연속상에서 비연속상으로, 비연속상에서 연속상으로, 또는 상호 연속상으로 존재하면서 이러한 상(phase) 구조적 특성에 부합하는 열전도도 변화를 보인 것으로 해석된다.

4. 결 론

다공성 매질의 유효열전도도는 주로 공극률, 함수비 및

기질을 구성하는 입자의 종류에 따라 달라지며, 동시에 입자의 배열, 연결성 등과 같은 물리적인 구조의 영향을 받는다. 이 연구에서는 토양 및 모래를 대상으로 함수비를 변화시키면서 열전도도를 측정하였으며, 함수비에 따라 불포화 매질의 열전도도 변화가 어떻게 발생하는지 구조모델을 통하여 규명하였다.

건조시료의 열전도도는 공기가 연속상인 모델(ME_{air})과 공기와 기질이 모두 연속상인 모델(CC모델)의 중간 영역에 해당하는 측정값을 보였으며, 포화시료의 열전도도는 Series와 ME_{wat} 모델 영역에 위치하였는데 이는 포화과정에서 발생한 공극률 증가가 입자간의 연결성을 감소시켜 건조시료에 비하여 기질을 통한 열전달이 약화되었기 때문인 것으로 해석된다. 건조시료의 실험 결과는 EMT모델과 ME모델에 의해 제한되는 2상 매질의 열전도도 한계(Carson et al., 2005) 내에 잘 부합하는 반면, 포화시료의 열전도도는 ME_{wat} 의 모델값보다 낮게 나타나 한계 이론에 위배된 결과이다. Carson et al.(2005)의 한계 이론에 적용할 때 건조시료와 포화시료가 서로 불일치하는 결과를 보인 이유는 현재의 실험 결과만으로는 알 수 없으며 포화시료에 대한 실험 오류, Carson et al.(2005) 한계 이론의 적용 한계(limitation) 가능성 등이 검토 중이다.

습윤상의 물은 포화과정에서 기질을 구성하는 입자들의 연결점에서 입자간의 열전달 통로가 되면서 매질의 열전도도를 효율적으로 증가시키는 역할을 한다. 이러한 현상은 여러 문헌을 통하여 이미 보고된 바 있으며(Lu et al., 2007), 본 실험에서도 물에 의해 입자들이 효과적으로 연결되는 임계값이 포화도 0.2 이내에서 잘 나타났다. 매질의 입도분포특성은 임계포화도 이하에서의 열전도도 변화에 영향을 주었는데, 분급이 불량한 토양시료의 경우 열

전도도 변화가 점진적으로 발생한 반면 입자크기가 고른 모래 시료의 경우 건조 시 ME_{air} 모델에 더 근접한 낮은 값에서 출발하여 매우 빠르게 증가하는 양상을 보였다.

불포화 매질 내 공극을 채우는 물과 공기는 함수비에 따라 연속상에서 비연속상으로, 비연속상에서 연속상으로, 또는 상호 연속상으로 변하게 되며, 이러한 현상은 열전도도의 비선형적인 변화를 발생시킨다. 본 실험 결과는 연속상 또는 불연속상의 관점에서 유효열전도도를 설명하는 구조모델이 지질 매체에도 잘 적용됨을 보여주었다.

사 사

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 2009T100200058).

참 고 문 헌

차장환, 안선준, 구민호, 김형찬, 송윤희, 서명석, 2008, 토양의 공극률 및 함수비가 열전도도에 미치는 영향, *지하수토양환경*, **13**(3), 27-36.

Beardsmore, G.R. and Cull, J.P., 2001, *Crustal heat flow : A guide to measurement and modelling*, Cambridge Univ. Press, USA, p. 324.

Carson, J.K., Lovatt, S.J., Tanner, D.J., and Cleland, A.C., 2003, An analysis of the influence of material structure on the effective thermal conductivity of theoretical porous materials using finite element simulations, *Int. J. of Refrigeration*, **26**, 873-880.

Carson, J.K., Lovatt, S.J., Tanner, D.J., and Cleland, A.C., 2005,

Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **48**, 2150-2158.

Cote, J. and Konrad, J., 2009, Assessment of structure effects on the thermal conductivity of two-phase porous geomaterials, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **52**, 796-804.

Jessop, A.M., 2008, Models of thermal conductivity of crystalline rocks, *Int. J. of Earth Sci*, **97**, 413-419.

Kersten, M.S., 1949, Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils, Research laboratory Investigations, Engineering Experiment Station, Technical Report 23, University of Minnesota, Minneapolis, Minn.

Kohout, M., Collier, A.P., and Stepanek, F., 2004, Effective thermal conductivity of wet particle assemblies, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **47**, 5565-5574.

Lu, S., Ren, T., Gong, Y., and Horton, R., 2007, An Improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **71**, 8-14.

Singh, D.N. and Devid, K., 2000, Generalized relationships for estimating soil thermal resistivity, *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, **22**, 133-143.

Vasseur, G., Brigaud, F., and Demongodin, L., 1995, Thermal conductivity estimation in sedimentary basins, *Tectonophysics*, **244**, 167-174.

Wang, J., Carson, J.K., North, M.F., and Cleland, D.J., 2006, A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **49**, 3075-3083.

Wang, J., Carson, J.K., North, M.F., and Cleland, D.J., 2008, A new structural model of effective thermal conductivity for heterogeneous materials with co-continuous phases, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **51**, 2389-2397.