

단일 탐침법을 이용한 수평형 지중열교환기 뒤채움재의 열확산계수 산정

손 병 후[†], 최 항 석^{*}

한국건설기술연구원 설비플랜트연구실, ^{*}고려대학교 건축사회환경공학과

Thermal Diffusivity Evaluation of Backfilling Materials for Horizontal Ground Heat Exchanger Using Single-Probe Method

Byonghu Sohn[†], Hangseok Choi^{*}

Plant Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

^{*}School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

(Received March 7, 2011; revision received April 20, 2011)

ABSTRACT: Storage and transfer heat in soils is governed by the soil thermal properties and these properties are therefore needed in many engineering applications, including horizontal ground heat exchanger for ground-coupled heat pumps. This paper presents the evaluation results of the thermal diffusivity of soils (silica, quartzite, limestone, sandstone, granite, and two masonry soils) used for the trench backfilling materials of the horizontal ground heat exchanger. To assess this thermal property, we (i) measure the soil thermal conductivities using single-probe method and (ii) use the de Vries method of summing the heat capacities of the soil constituents. The results show that the thermal diffusivity tends to increase as dry soil begins to wet, but it approaches a constant value or even decreases as the soil continues to wet. Combined algorithm with an improved model for the thermal conductivity of soils and the constituent equation provides accurate estimates of the soil thermal diffusivity.

Key words: Thermal diffusivity(열확산계수), Backfilling materials(뒤채움재), Horizontal ground heat exchanger(수평형 지중열교환기), Single-probe method(단일 탐침법)

기 호 설 명

c	: 비열 [kJ/kgK]
k	: 열전도도 [W/mK]
q	: 열선의 단위 길이당 발열량 [W/m]
r	: 열선 반경 또는 반경방향으로 거리 [m]
S_r	: 포화도 [-]

T	: 온도 [K]
ΔT	: 온도차 또는 열선의 온도 상승 [K]
t	: 시간 [s]
v	: 체적분율 [%]
w	: 수분함량 또는 함수비 [%]

그리스 문자

α	: 열확산계수 [m ² /s]
γ	: Euler 상수 (= 0.5772)
ϕ	: 간극률(porosity) [-]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-910-0495; fax : +82-31-910-0246

E-mail address: byonghu@kict.re.kr

ρ : 밀도 [kg/m³]

하첨자

d : 건조 상태(dry state)

s : 고체 입자(solid particle)

sat : 포화 상태(saturated state)

1. 서 론

토양(soil) 열물성(thermal properties)은 도로와 건축물 시공을 포함하여 지중에 매설되는 각종 배관이나 구조물 등의 설계 과정에서 중요한 입력 정보다. 다양한 열물성 중 열전도도와 체적열용량(volumetric heat capacity) 그리고 열확산계수(thermal diffusivity) 등이 핵심이다. 열전도도도와 체적열용량은 각각 토양의 열전달 특성과 열저장(heat storage) 능력을 대변한다. 아울러 열확산계수는 열전도도도에 대한 체적열용량의 비율을 의미한다. 이러한 토양 열물성은 구성성분, 밀도, 입자 형상, 수분함량(water content) 등에 영향을 받는다.

최근 들어 신·재생에너지 활용에 대한 관심 증가와 함께 지열 히트펌프(ground-coupled heat pump) 시스템도 많은 관심을 받고 있다. 시스템 구성요소 중 지중열교환기는 전체 시스템의 성능과 초기 투자비를 결정하는 중요 기기이며, 현재 수직 밀폐형과 수평 밀폐형이 주로 적용된다. 두 방식은 모두 열교환기 순환 유체와 열교환기 주위 토양(또는 암반층) 간의 열전달이 원활할 때 최적 성능을 발휘할 수 있다. 이 경우에도 지중 토양 또는 암반층의 열물성치가 중요한 변수다.⁽¹⁾

지중열교환기 설계 시, 트랜치 뒤택음재(수평형)와 보어홀 주변 토양(수직형)의 열물성치가 필요하다. 수직형인 경우, 현장 열응답 시험(in-situ thermal response test)을 주로 적용하며 이와 관련된 다양한 연구결과들이 국내에서도 발표되었다.⁽²⁻⁴⁾ 수직형과 달리, 수평형은 현장에서 탐침법으로 측정하거나 시료를 채취하여 실험실에서 측정한다. 하지만 트랜치 뒤택음재의 열확산계수 측정이나 이 값들이 수평형 지중열교환기의 성능에 미치는 영향을 분석한 연구는 상대적으로 미흡한 수준이다.

토양 열전도도 측정이나 수평형 지중열교환기의 성능 분석 등과 관련하여 일부 연구가 수행되었다.

대표적으로 열확산계수를 포함한 토양 열물성 측정 방법과 정확도 개선에 대한 연구⁽⁵⁾가 있었다. 또한 수평형 지열 히트펌프 시스템에서 지중열교환기 주변 토양의 열전도도와 수분함량 등이 시스템 성능에 미치는 영향 분석^(6, 7) 등이 최근에 발표되었다. 국내에서 Sohn^(8, 9)은 천연규사(silica sand)를 포함하여 트랜치 뒤택음재로 사용되는 모래-물 혼합물을 대상으로 열전도도를 측정하였다. 비정상 탐침법을 적용하였으며, 간극률·수분함량·입자 열전도도 등이 혼합물의 열전도도에 미치는 영향을 고찰하였다.

지금까지 지중열교환기 설계나 성능 분석과 관련하여 열전도도가 주된 관심 대상이었다. 하지만 Fig. 1에서 보듯이, 열확산계수에 따라 지중열교환기 설계 길이가 크게 변함을 확인할 수 있다. 참고로 Fig. 1은 가상 건물(107 m²)을 대상으로 수평형 지중열교환기와 수직형 지중열교환기를 적용했을 때, 각각의 설계 길이를 계산한 것이다. 따라서 본 논문에서는 수평형 지중열교환기의 뒤택음재로 사용되는 모래-물-공기 불포화 혼합물(이하 ‘토양’ 또는 ‘시료’)의 열확산계수를 산정하였다. 이를 위해 단일 탐침법(single-probe method)으로 측정할 열전도도 값과 각 성분의 열용량의 합으로 표현되는 de Vries 상관식⁽¹⁰⁾을 적용하였다. 아울러 간극률·수분함량·입자 열전도도 등이 열확산계수에 미치는 영향을 고찰하였다.

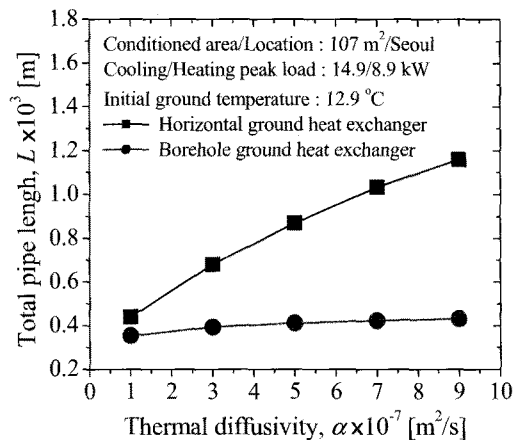


Fig. 1 Effect of soil thermal diffusivity on horizontal and borehole ground heat exchanger design length.

2. 측정 이론

단일 탐침법은 시료에 삽입된 탐침(열선)에 열량을 일정하게 공급할 때, 직선으로 나타나는 시간 대 열선의 온도상승 관계($\ln t$ 대 ΔT)에서 직선의 기울기와 공급 열량 등을 이용하여 열전도도를 구하는 방법이다. 이 방법은 무한 선형열원 이론(infinite line-source theory)⁽¹¹⁾에 기초를 두고 있으며, 열선으로부터 반경방향으로 전도에 의해서만 열이 전달되는 1차원 열전도 문제로 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (1)$$

여기서, 열선의 단위 길이당 발열량(공급 열량)이 q 일 때, 반경방향 임의 지점의 온도를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4\pi k} \int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2)$$

식(2)에서 적분변수 $x_0(r^2/4\alpha t)$ 가 매우 작을 경우 지수적분 항을 식(3)의 근사식으로 표현할 수 있으며, 다시 식(3)을 식(2)에 대입하여 정리하면 식(4)의 선형열원 모델을 얻을 수 있다.

$$\int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \approx \ln \frac{1}{x_0} - \gamma \quad \text{for } \frac{\alpha t}{r^2} \geq 5 \quad (3)$$

$$\Delta T(r, t) \approx \frac{q}{4\pi k} \ln \left(\frac{4\alpha t}{cr^2} \right), \quad c = e^\gamma = 1.78 \quad (4)$$

따라서 직선 형태를 보이는 식(4)의 기울기와 평균 열 공급량 등을 식(5)에 대입하면 토양 시료의 열전도도를 산정할 수 있다.

$$k = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

토양의 체적열용량(ρc)은 토양 성분들의 열용량의 합으로 계산되며, 식(6)과 같다.⁽¹⁰⁾

$$\rho c = (\rho c)_m v_m + (\rho c)_a v_a + (\rho c)_o v_o + (\rho c)_w w \quad (6)$$

식(6)에서 하첨자 m, a, o, w 는 각각 광물질(mineral), 공기, 유기물질(organic matter), 수분을

의미한다. 여기서 공기의 영향을 무시하고 광물질과 유기물질을 고체성분으로 통합하면 식(6)을 식(7)로 표현할 수 있다.

$$\rho c \approx (\rho c)_s (1 - \phi) + (\rho c)_w w = \rho_a c_s + (\rho c)_w w \quad (7)$$

따라서 단일 탐침법으로 측정된 열전도도 값과 식(7)로 계산된 열용량 값을 적용하면, 토양 시료의 열확산계수를 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (8)$$

3. 측정 장비 및 토양 시료

3.1 측정 장비 및 방법

본 연구에서는 Fig. 2에 도시한 상용 측정 장비(TPSYS02, Hukseflux)를 이용하여 토양의 열전도도를 측정하였다. 측정 장비는 제어기 역할을 하는 본체(MCU, Hukseflux), 열선(heating wire)과 열전대(K-type thermocouple)가 내장된 탐침(TP02, Hukseflux), 토양 시료(samples) 그리고 데이터 저장용 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 탐침에서 시료와 접촉하는 부분의 길이와 직경은 각각 150 mm와 1.5 mm이며, 재질은 스테인리스강이다. 이 탐침

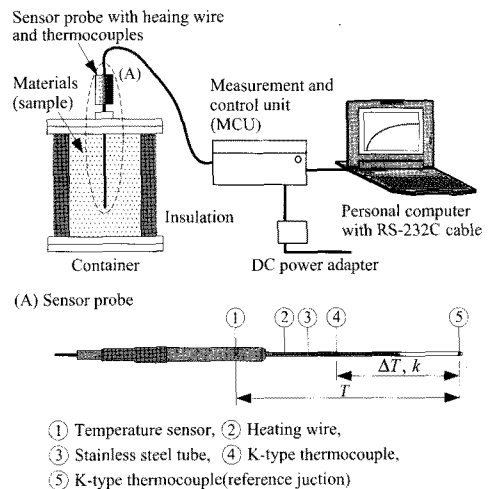


Fig. 2 Experimental apparatus and sensor probe for measuring thermal conductivity of sand-water mixtures.

안에 2개의 열전대 접점이 용접되어 있다.

측정 중, 열선에 공급되는 열은 열선 주변으로 전파되며, 이때 두 열전대 접점에서 온도를 측정한다. 최종적으로 시간 경과와 온도차 그리고 공급 열량을 식(5)에 대입하여 시료의 열전도도를 산정하게 된다. 아울러 초기 측정 결과는 탐침에 의한 열저항의 영향을 받기 때문에, 10초 전의 데이터는 제외하였다.

토양 시료의 열전도도 측정에 앞서, 측정 장비의 신뢰성과 결과의 재현성을 확인하였다. 이를 위해 기준 시료를 대상으로 상온에서 열전도도를 측정 한 후, 문헌⁽¹²⁾에 제시된 값과 비교하였다. 각 기준 시료의 열전도도 값은 $\pm 2.5\%$ 내에서 문헌 값과 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 시료 제조 방법과 측

정 순서 그리고 장비의 신뢰성 확인을 위한 기준 시료 등은 Sohn⁽⁸⁾의 논문에 상세히 언급되었기 때문에 본 논문에서는 생략한다.

3.2 토양 시료

Table 1은 각각의 시료에 대하여 모래 입자의 밀도(ρ_s)와 열전도도(k_s), 건조밀도(ρ_d), 간극률(ϕ), 수분함량(w) 범위, 측정횟수 등을 정리한 것이다. 본 연구에서는 토양의 주재료인 모래로 천연규사(silica sand), 인조규사(quartzite sand), 인조석회사(limestone sand), 인조사암사(sandstone sand), 인조 화강사(granite sand) 그리고 두 종류의 건축용 강모래(masonry sand)를 사용하였다. 가능한 한 균

Table 1 Mass-volume properties of the materials tested and conditions of the tests

Materials	ρ_s [kg/m ³]	k_s [W/mK]	ρ_d [kg/m ³]	ϕ [-]	Water content range, w[%]	Number of tests	$\rho_d C_s^{(1)}$ [kJ/m ³ K]
Silica sand	2650.0	6.95	1985.5	0.25	0~12.62	8	2396.6
			1875.9	0.29	0~15.56	8	
			1764.3	0.33	0~18.93	9	
			1652.8	0.38	0~22.76	10	
Quartzite sand	2650.0	5.38	1933.4	0.27	0~13.98	9	1805.9
			1862.8	0.30	0~15.94	9	
			1759.3	0.34	0~19.10	9	
			1634.3	0.38	0~23.44	10	
Limestone sand	2735.0	3.09	1993.7	0.27	0~13.59	9	1359.7
			1878.5	0.31	0~16.66	8	
			1763.4	0.36	0~20.14	9	
			1678.7	0.39	0~22.99	10	
Sandstone sand	2803.0	2.72	1987.6	0.29	0~14.63	9	1258.5
			1866.2	0.33	0~17.90	8	
			1768.2	0.37	0~20.87	9	
			1689.2	0.40	0~23.51	10	
Granite sand	2750.0	2.53	2033.6	0.26	0~12.81	8	1306.8
			1859.9	0.32	0~17.40	8	
			1686.2	0.39	0~22.93	10	
Masonry sand-A	2650.0	5.01	1931.7	0.27	0~14.03	9	1764.7
			1792.2	0.32	0~18.05	8	
			1708.6	0.36	0~20.78	9	
			1597.0	0.40	0~24.87	10	
Masonry sand-B	2650.0	2.31	2008.2	0.24	0~12.05	8	1297.5
			1903.8	0.28	0~14.78	9	
			1852.3	0.30	0~16.24	8	
			1809.3	0.32	0~17.53	8	
			1702.4	0.36	0~21.00	9	
			1601.9	0.40	0~24.68	10	

일한 크기(0.02~2 mm)의 모래를 사용하기 위해 체분석(sieve analysis)을 수행하였다.

Kline⁽¹³⁾이 제안한 방법에 따라 측정 결과에 영향을 미치는 데이터와 변수의 편차들을 조합하여 상대 불확실도(uncertainty)를 계산하였으며, 각각의 시료에 대한 열확산계수와 열전도도의 불확실도는 $\pm 5.32\%$ 와 $\pm 3.03\%$ 였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 불포화 토양의 열확산계수

Fig. 3은 불포화 토양(모래-공기-물로 구성된 3 성분 혼합물)의 열확산계수에 대한 전형적인 산정 결과를 수분함량의 함수로 표현한 것이다. 여기서 수분함량은 불포화 토양의 간극에 존재하는 물의 질량을 건조 토양의 질량으로 나눈 값으로 백분율(%)로 나타낸다. 그림에서 수분함량 값이 0인 경우는 완전 건조 상태(건조 토양)를 의미하며, w_{sat} 은 완전 포화 상태(포화 토양)의 수분함량 값을 의미한다.

Fig. 3에 나타낸 결과를 포함하여 모든 시료에 대해 열확산계수는 건조 토양과 포화 토양의 열확산계수 값 사이에 있음을 확인할 수 있었다. 또한 간극률이 유사한 경우(silica 대 limestone), 모래 입자의 열전도도가 그리고 입자 열전도도가 유사한 경우(limestone 대 masonry-B), 간극률이 불포화 시료의 열확산계수 변화에 크게 영향을 미쳤다. 여

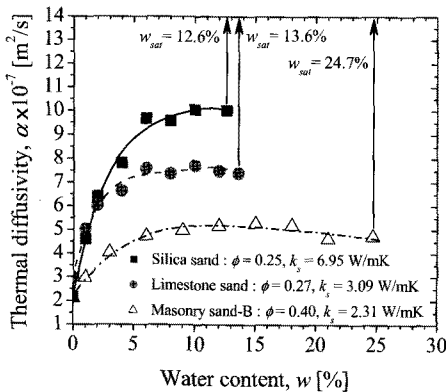


Fig. 3 Typical evaluation results of thermal diffusivity with respect to water content.

기서 주목할 점은 토양의 열확산계수는 일정 수분함량(5~8%)까지 증가한 후, 일정한 값을 보이거나 또는 감소한다는 것이다. 이는 일정 수분함량 이상에서는 불포화 시료의 열용량 증가에 의한 영향이 열전도도 증가에 의한 영향보다 더 크게 작용했기 때문이다.

4.2 열확산계수에 대한 수분함량의 영향

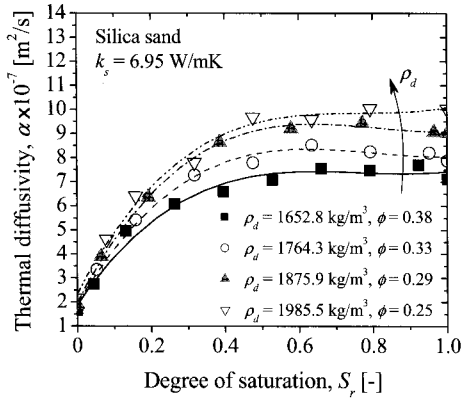
Fig. 4는 불포화 토양의 열확산계수를 포화도(S_r)와 건조밀도(또는 간극률)의 함수로 나타낸 것이다. Fig. 3과 Table 1에서 보듯이, 간극률에 따라 완전 포화 상태의 수분함량 값은 토양 시료마다 다른 값을 보인다. 따라서 전체 간극에서 물이 차지하는 체적 비율을 포화도로 정의한 후, 이 값을 적용하여 비교하는 것이 일반적인 방법이다. 여기서 포화도는 다음과 같이 정의된다.

$$S_r = \frac{w}{100} \frac{\rho_d}{\phi \rho_w} \quad (9)$$

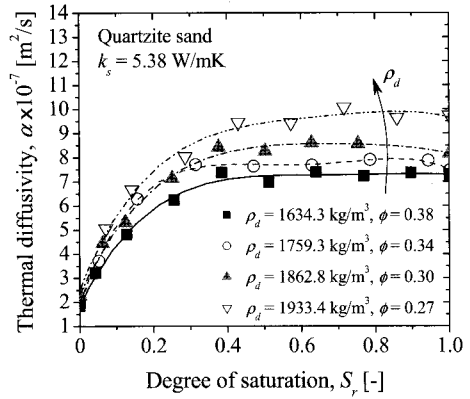
아울러 간극률은 시료의 전체 체적에 대한 간극 체적의 비로 정의되며, 다음 식으로 계산된다.

$$\phi = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (10)$$

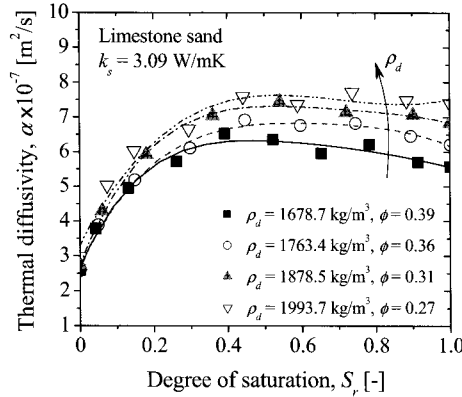
Fig. 4에서 불포화 토양의 열확산계수는 일정 수준의 포화도(0.4~0.5, 수분함량 5~8%)까지 증가한 후, 일정한 값을 보이거나 다소 감소하였다. 이러한 경향은 토양 입자의 열전도도(k_s)에 따라 구분되는데, 인조석회사(limestone)를 포함하여 입자 열전도도가 작은 시료들의 열확산계수는 일정 포화도 이상에서 감소하는 경향을 보였다. 이는 수분함량이 증가함에 따라 시료의 간극에 존재하는 공기를 수분이 대체하면서 열전도도와 열용량이 함께 증가하지만, 일정 포화도 이상에서는 수분 증가에 의한 열용량 증가의 영향이 열전도도 증가보다 더 크기 때문이다. 아울러 포화도가 같을 경우, 건조밀도가 증가할수록 열확산계수는 크게 나타났다. 또한 포화도가 낮은 영역($S_r < 0.2$)에서의 증가율과 큰 영역($S_r > 0.2$)에서의 증가율이 다소 차이가 있음을 볼 수 있다. 이 역시 포화도가 큰 영역에서는 수분함량 증가에 의한 열용량 증가의 영향이 더 크게



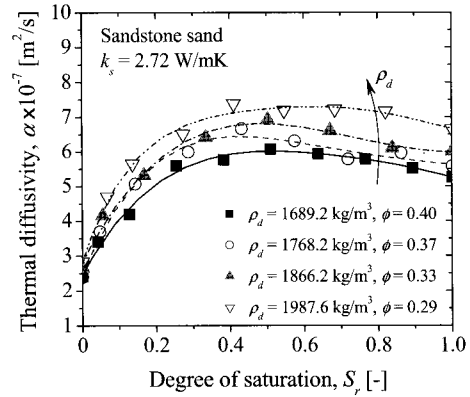
(a) Silica sand



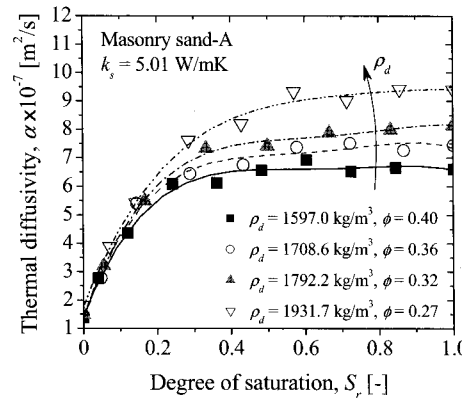
(b) Quartzite sand



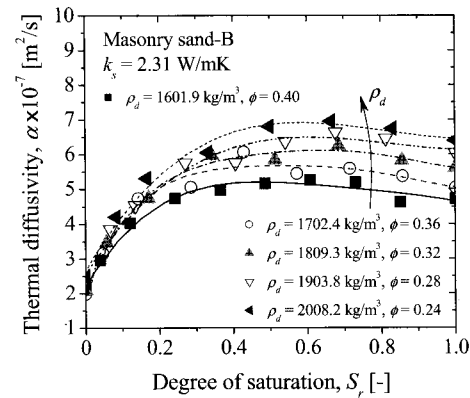
(c) Limestone sand



(d) Sandstone sand



(e) Masonry sand-A



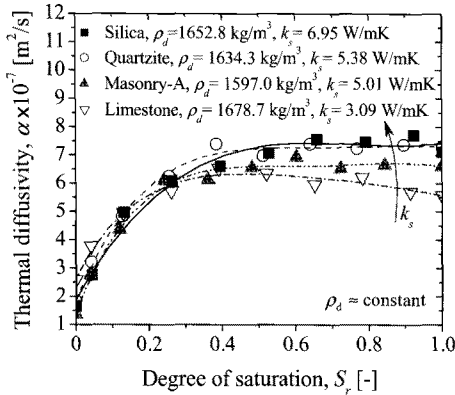
(f) Masonry sand-B

Fig. 4 Thermal diffusivity of soils as a function of degree of saturation and dry density(ρ_d).

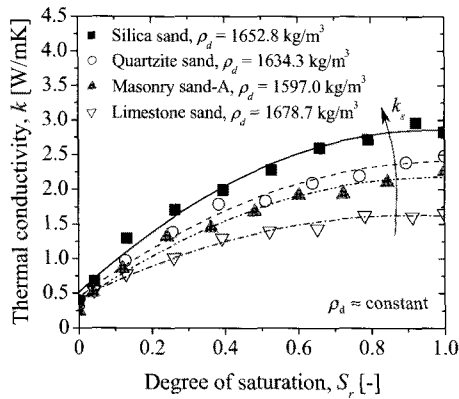
작용했기 때문이다.

Fig. 5는 불포화 토양의 열확산계수 변화를 포화도와 입자 열전도도의 함수로 표현한 것이다. 또한

비교를 위해 열전도도 측정 결과도 함께 도시하였다. 그림에서 보듯이 포화도가 동일하고 건조밀도가 유사할 경우, 불포화 토양의 열확산계수와 열전



(a) Thermal diffusivity



(b) Thermal conductivity⁽⁸⁾

Fig. 5 Thermal diffusivity and conductivity of soils as a function of degree of saturation and thermal conductivity of solid particles(k_s).

도도는 입자 열전도도에 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 따라서 각 시료의 열물성 차이는 결국 주재료인 고체 입자의 열전도도와 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있다.

4.3 열전도도 상관식에 의한 열확산계수 비교

본 논문에서는 토양의 열전도도를 예측할 수 있는 기존 모델과 de Vries 상관식⁽¹⁰⁾을 조합하여 열확산계수를 계산한 후, 본 결과와 비교하였다. 현재 토양과 같은 불포화 매질의 열전도도를 예측할 때 주로 언급되는 방법이 Johansen⁽¹⁴⁾ 모델이다. 이 모델은 미동결 사질토(unfrozen sandy soil)의 포화도가 0.2보다 큰 영역에서는 토양의 열전도도를 정확

하게 예측할 수 있는 것으로 평가된다.⁽¹⁵⁾

Johansen⁽¹⁴⁾은 불포화 토양의 열전도도(k)를 예측하기 위해 건조 토양과 포화 토양의 열전도도 값을 이용하였으며, 또한 포화도의 함수로 표현되는 무차원 열전도도 상관식을 적용하였다.

$$k_n = \frac{k - k_d}{k_{sat} - k_d} \tag{11}$$

$$k_n = 0.71 \log(S_r) + 1 \tag{12}$$

식(11)에서 건조 상태의 토양 시료가 분쇄시료(crushed rocks)인 경우 식(13)을 그리고 천연시료(natural mineral soils)인 경우에는 식(14)를 적용한다. 아울러 포화 토양의 열전도도 계산에는 식(15)를 적용한다.

$$k_d = 0.039\phi^{-2.2} \pm 25\% \tag{13}$$

$$k_d = \frac{0.135\rho_d + 64.7}{2700 - 0.947\rho_d} \pm 20\% \tag{14}$$

$$k_{sat} = k_s^{(1-\phi)} k_w^\phi \tag{15}$$

식(15)에서 k_w 는 물의 열전도도(0.60 W/mK)이며, k_s 는 고체 입자(모래 입자)의 열전도도로서 석영(quartz) 함량에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$k_s = k_q^q \times 2.0^{(1-q)} \text{ for } q > 20\% \tag{16}$$

$$k_s = k_q^q \times 3.0^{(1-q)} \text{ for } q \leq 20\% \tag{17}$$

위 식에서 k_q 는 석영의 열전도도(7.69 W/mK)다.

Sohn⁽⁹⁾은 건조 토양의 열전도도를 예측할 수 있는 상관식을 도출한 후, 이를 이용하여 불포화 토양에 대한 열전도도 예측 모델(식(20))을 제시하였다. 토양 시료를 분쇄 모래(crushed sand)와 천연 모래(natural sand, 강모래)로 구분하였으며, 각각에 대한 상관식은 식(18)과 식(19)에 주어져 있다.

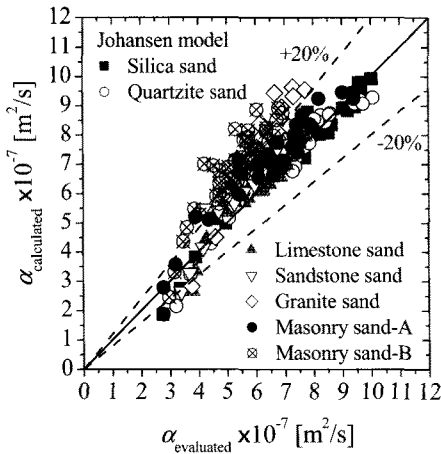
$$k_d = 1.62 \times 10^{-1.76\phi} \tag{18}$$

$$k_d = 0.65 \times 10^{-1.02\phi} \tag{19}$$

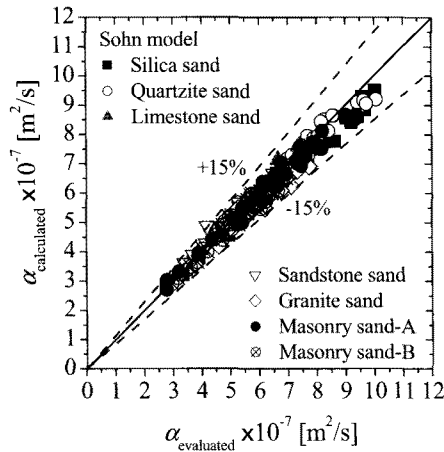
$$k_n = \frac{3.52S_r}{1 + (3.52 - 1)S_r} \tag{20}$$

Fig. 6은 열전도도 예측 모델과 de Vries 상관식⁽¹⁰⁾

을 조합하여 계산한 열확산계수와 단일 탐침법에 의한 산정 결과를 비교한 것이다. 일부 잘 일치하는 시료도 있지만, 전체적으로 Johansen 모델에 의한 계산 결과는 본 결과와 큰 차이를 보였다. 이는 포화도가 낮은 영역에서는 공기가 불포화 시료의 열확산계수에 지배적인 영향을 미치는데, Johansen 모델은 이에 대한 영향을 제대로 반영하지 못한 결과로 볼 수 있다. 반면 Sohn 모델에 의한 열확산계수는 단일 탐침법에 의한 산정 결과와 ±15% 내에서 잘 일치하였다.



(a) Johansen model



(b) Sohn model

Fig. 6 Comparison of thermal diffusivity evaluation results using the single-probe and calculated values of the predicting models for soil thermal conductivity.

5. 결 론

본 연구에서는 수평형 지중열교환기의 트렌치 뒤편체로 사용되는 토양(모래-물-공기 혼합물)의 열확산계수를 산정하였다. 이를 위해 단일 탐침법으로 측정된 토양 시료의 열전도도 값과 각 성분의 열용량의 합으로 표현되는 de Vries 상관식을 적용하였다. 아울러 간극률·수분함량·입자 열전도도 등이 열확산계수에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 불포화 토양의 열확산계수는 전체적으로 건조 토양과 포화 토양의 열확산계수 값 사이에 있음을 확인할 수 있었다.

(2) 불포화 토양의 열확산계수는 일정 수준의 포화도까지 증가한 후, 일정한 값을 보이거나 다소 감소하였다. 특히, 입자 열전도도가 작은 시료들의 열확산계수는 일정 포화도 이상에서 감소하는 경향을 보였다.

(3) 포화도가 같을 경우, 건조밀도가 증가할수록 열확산계수는 크게 나타났다. 또한, 포화도가 낮은 영역에서의 증가율과 큰 영역에서의 증가율이 다소 차이가 있었다.

(4) 포화도가 동일하고 건조밀도가 유사할 경우, 토양 입자의 열전도도가 증가할수록 불포화 토양의 열확산계수는 증가하였다. 따라서 시료의 열물성 차이는 주재료인 고체 입자의 열전도도와 밀접한 관련이 있음을 확인하였다.

(5) 열전도도 예측 모델인 Johansen 모델과 de Vries 상관식을 조합하여 계산한 열확산계수는 본 결과와 큰 차이를 보였다. 반면, Sohn 모델에 의한 열확산계수는 단일 탐침법에 의한 산정 결과와 ±15% 내에서 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20093020110010).

참고문헌

1. Kavanaugh, S. P. and Rafferty, K., 1997, Ground-Source Heat Pumps : Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings, American Society of Heating,

- Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, US.
2. Lee, C., Park, M., Min, S., Choi, H., and Sohn, B., 2010, Evaluation of performance of grouts and pipe sections for closed-loop vertical ground heat exchanger by in-situ thermal response test, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 7, pp. 93-106.
 3. Sohn, B., 2007, Evaluation of ground effective thermal conductivity and borehole effective thermal resistance from simple line-source method, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 19, No. 7, pp. 512-520.
 4. Sohn, B. H., Shin, H. J. and Park, S. K., 2005, Evaluation of effective thermal conductivity and thermal resistance in ground heat exchanger boreholes, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 695-703.
 5. Bristow, K. L., White, R. D. and Kluitenberg, G. J., 1994, Comparison of single and dual probes for measuring soil thermal properties with transient heating, *Aust. J. Soil Res.*, Vol. 32, pp. 447-464.
 6. Leong, W. H., Tarnawaski, V. R. and Aittomaki, A., 1998, Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 21, No. 8, pp. 595-606.
 7. Yari, M. and Javani, N., 2007, Performance assessment of a horizontal-coil geothermal heat pump, *Int. J. Energy Research*, Vol. 31, pp. 288-299.
 8. Sohn, B., 2008, Thermal conductivity measurement of sand-water mixtures used for backfilling materials of vertical boreholes or horizontal trenches, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 20, No. 5, pp. 342-350.
 9. Sohn, B., 2008, Predicting the effective thermal conductivity of some sand-water mixtures used for backfilling materials of ground heat exchanger, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 20, No. 9, pp. 614-623.
 10. de Vries, D. A., 1963, Thermal properties of soils : Physics of Plant Environment, (Ed. W. R. Van Wijk), North-Holland, Amsterdam.
 11. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1947, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed., Oxford University Press.
 12. Rohsenow, W. M., 1973, *Handbook of Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York.
 13. Kline, S. J., 1985, The purpose of uncertainty analysis, *J. Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 153-160.
 14. Johansen, O., 1975, *Thermal Conductivity of Soils*, Ph.D. thesis, University of Trondheim, Trondheim, Norway(CRREL Draft English Translation 637, US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, USA).
 15. Farouki, O. T., 1982, Evaluation of methods for calculating soil thermal conductivity, CRREL Report 82-8, US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, USA.