

이중탐침법을 이용한 수평형 지중열교환기 뒤채움재의 열확산계수 측정

손명후[†], 최항석*

한국건설기술연구원 그린빌딩연구실, *고려대학교 건축사회환경공학과

Thermal Diffusivity Measurement of Backfilling Materials for Horizontal Ground Heat Exchanger Using Dual-Probe Method

Byonghu Sohn[†], Hangseok Choi*

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

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

Abstract

Storage and transfer heat in soils are 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 measured results of the thermal diffusivity of soils(silica, quartzite, limestone, sandstone, and 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 and volumetric heat capacities using dual-probe method and (ii) compare the estimates from 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. Measurements made by using the dual-probe method agreed well with independent estimates obtained using the single-probe method.

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

기호설명

- c : 비열 [J/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 [%]

* Corresponding author

Tel: +82-31-910-0495, Fax: +82-31-910-0246

E-mail: byonghu@kict.re.kr

접수일 : 2011년 11월 4일

심사일 : 2011년 11월 7일

채택일 : 2011년 11월 24일

그리스 문자

- α : 열확산계수 [m^2/s]

- ϕ : 간극률(porosity) [-]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]

하 침 자

- DP : 이중탐침(dual-probe)
 d : 건조 상태(dry state)
 SP : 단일탐침(single-probe)
 s : 고체 입자(solid particle)
 sat : 포화 상태(saturated state)
 w : 혼합물 구성성분 중 수분(water)

1. 서 론

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

최근 신·재생에너지 활용에 대한 관심 증가와 함께 지열 히트펌프(geothermal 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 트렌치 뒤채움재(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 트렌치 뒤채움재의 열물성 측정이

나 이 열물성 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 측정방법과 정확도 개선에 대한 연구^[5]가 있었다. 또한 수평형 지열 히트펌프 시스템에서 지중 열교환기 주변 토양의 열전도도와 수분함량 등이 시스템 성능에 미치는 영향을 분석한 결과^[6,7] 등이 최근에 발표되었다. Sohn^[8,9]은 천연규사를 포함하여 트렌치 뒤채움재로 사용되는 모래-물 혼합물을 대상으로 열전도도를 측정하였다. 비정상 탐침법을 적용하였으며, 간극률·수분함량·입자 열전도도 등이 혼합물의 열전도도에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 Sohn and Choi^[10]는 단일탐침법(transient single-probe method)에 의한 열전도도 값과 시료의 체적열용량 값을 적용하여 뒤채움재의 열확산계수를 산정하였다.

본 논문에서는 이중탐침법(dual-probe method)을 적용하여 수평형 지중열교환기의 트렌치 뒤채움재로 사용되는 모래-물-공기 불포화 혼합물(이하 ‘시료’ 또는 ‘뒤채움재’)의 열확산계수를 측정하였다. 아울러 실험 결과를 바탕으로 간극률·수분함량·입자 열전도도 등이 열확산계수에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 본 측정 결과와 기존 단일탐침법에 의한 열확산계수 산정 결과^[10]를 비교하였다.

2. 측정 이론

뒤채움재를 포함하여 토양과 같은 다공성 물질(porous material)의 열물성을 측정할 때 정상상태 측정법 또는 과도상태(transient) 측정법을 적용할 수 있다. 과도상태 측정법은 주로 탐침(heat probe)을 이용하여 단일탐침법과 이중탐침법이 있다. 단일탐침법은 하나의 열물성(열전도도)만 측정할 수 있는 반면, 이중탐침법은 열원 역할을 하는 탐침과 이 탐침과 일정 간격을 유지한 센서 탐침을 이용하여 열전도도를 포함하여 열확산계수와 체적 열용량 등을 측정할 수 있다. 측정 방법에서 다소 차이는 있지만, 두 방법은 모두 무한

선형열원(infinite line-source) 이론^[11]에 기초를 두고 있으며 열선으로부터 반경방향으로 전도에 의해서만 열이 전달되는 1차원 열전도 문제로 표현할 수 있다.

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

무한 매질 속의 무한 선형열원에 열량 $Q(\text{J}/\text{m})$ 가 순간적으로 가해질 때, 식(1)의 해인 열응답 특성은 다음과 같이 지수함수로 표현된다.^[11]

$$\Delta T(r,t) = \frac{Q}{4\pi\alpha t} e^{(-r^2/4\alpha t)} \quad (2)$$

식(2)의 순간 열펄스 해는 열원에 의해 발생하는 열이 매우 짧은 시간에 지속적으로 매질에 전달되는 경우를 의미한다. 하지만 순간 열펄스 해를 실제 측정 장비에 적용하는 것은 물리적으로 불가능하다. 따라서 열펄스가 일정 시간(t_1) 동안 연속적으로 열선에 가해진다는 가정 하에 식(1)을 풀면 다음과 같다.^[5,12,13]

$$\Delta T(r,t) = \frac{q}{4\pi k} \int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = -\frac{q}{4\pi k} Ei\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) \quad (3)$$

for $0 < t \leq t_1$

$$\Delta T(r,t) = \frac{q}{4\pi k} \left[-Ei\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) + Ei\left(\frac{-r^2}{4\alpha(t-t_0)}\right) \right] \quad (4)$$

for $t > t_1$

식(3)과 식(4)는 Fig. 1에서 보듯이, 선형열원에 열이 가해지는 동안($0 < t \leq t_1$)과 가열 종료 후 냉각되는 동안($t > t_1$)에 대한 각각의 온도 응답을 의미한다. 아울러 q 는 열선의 단위 길이당 발열량(W/m)이다. 이때 식(3)과 식(4)로 주어지는 온도응답에 대한 비선형 최소 제곱법(non-linear least square method)^[14]을 적용하여 열전도도와 열확산계수를 측정하게 된다.

3. 측정 장비 및 뒤채움재 시료

3.1 측정 장비 및 방법

본 연구에서는 Fig. 2에 도시한 상용 측정 장비

인 KD2 Pro(Decagon Devices, Inc.)를 이용하여 열확산계수와 체적열용량을 측정하였다. 측정 장비는 제어기 역할을 하는 본체, 열선과 열전대(K-type)가 내장된 탐침(SH-1), 시료 그리고 데이터 저장용 컴퓨터 등으로 구성되어 있다.

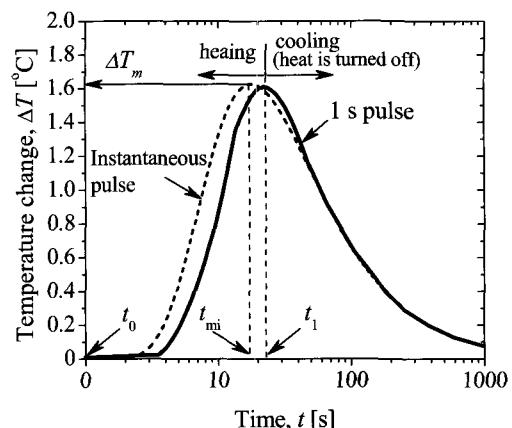


Fig. 1 Typical temperature variation during thermal diffusivity measurement.

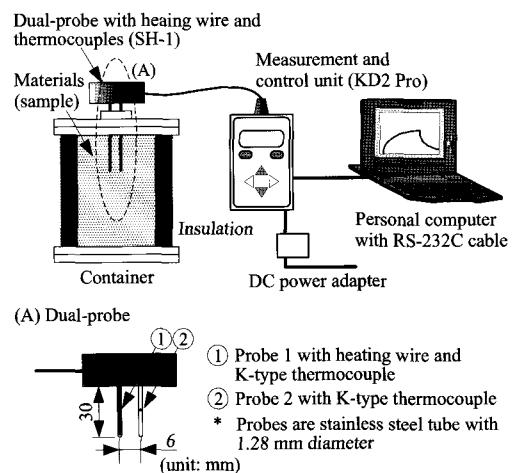


Fig. 2 Experimental apparatus for measuring thermal diffusivity of soils.

탐침의 재질은 스테인리스강이며, 시료와 직접 접촉하는 부분의 길이와 직경은 각각 30 mm와 1.28 mm다. 아울러 측정 결과의 정확성에 영향을 미치는 탐침 사이의 간격은 6 mm다.

측정 중, 열선에 공급되는 열은 열선 주변으로 전파되며, 이때 두 열전대 접점에서 온도를 측정

한다. 최종적으로 시간 경과와 온도차 그리고 공급 열량을 식(3)과 식(4)에 대입하여 시료의 열화산계수와 열전도도를 산정하게 된다. 아울러 초기 측정 결과는 탐침에 의한 열저항의 영향을 받기 때문에, 10초 전의 데이터는 제외하였다.

뒤채움재 시료의 열화산계수 측정에 앞서, 장비의 신뢰성과 결과의 재현성을 확인하였다. 이를 위해 기준 시료를 대상으로 상온에서 열화산계수와 열전도도를 측정한 후, 문헌^[15]에 제시된 값과 비교하였다. 각 기준 시료의 열화산계수와 열전도도 값은 각각 $\pm 4.17\%$ 와 $\pm 2.11\%$ 내에서 문헌 값과 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 시료 제조 방법과 측정 순서 그리고 장비의 신뢰성 확인을 위한 기준 시료 등은 Sohn^[8]의 논문에 상세히 언급되었기 때문에 본 논문에서는 생략한다.

3.2 뒤채움재 시료

Table 1은 각각의 시료에 대하여 모래 입자의 밀도(ρ_s) · 열전도도(k_s) · 건조밀도(ρ_d) · 간극률(ϕ) · 수분함량(w) 범위 · 측정 횟수 등을 정리한 것이다. 본 연구에서는 뒤채움재의 주재료인 모래로 천연규사(silica sand), 인조규사(quartzite sand), 인조석회사(limestone sand), 인조사암사(sandstone sand) 그리고 두 종류의 건축용 강모래(masonry sand)를 사용하였다. 가능한 한 균일한 크기(0.02~2 mm)의 모래를 측정시료로 사용하기 위해 체분석(sieve analysis)을 수행하였다.

Kline^[16]이 제안한 방법에 따라 측정 결과에 영향을 미치는 데이터와 변수의 편차들을 조합하여 상대 불확실도(uncertainty)를 계산하였으며, 각각의 시료에 대한 열화산계수와 열전도도의 불확

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 [-]	Range of water content, w [%]	Number of tests
Silica sand	2650.0	6.95	1985.5	0.25	0~12.62	8
			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
			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
			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
			1866.2	0.33	0~17.90	8
			1768.2	0.37	0~20.87	9
			1689.2	0.40	0~23.51	10
Masonry sand-A	2650.0	5.01	1931.7	0.27	0~14.03	9
			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
			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

실도는 $\pm 5.32\%$ 와 $\pm 3.03\%$ 였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 불포화 시료의 열확산계수

Fig. 3은 불포화 시료(모래-공기-물)로 구성된 3성분 혼합물의 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. 그럼에서 수분함량 값이 0인 경우는 완전 건조 상태(건조 토양)를 의미하며, w_{sat} 은 완전 포화 상태(포화 토양)의 수분함량 값을 의미한다.

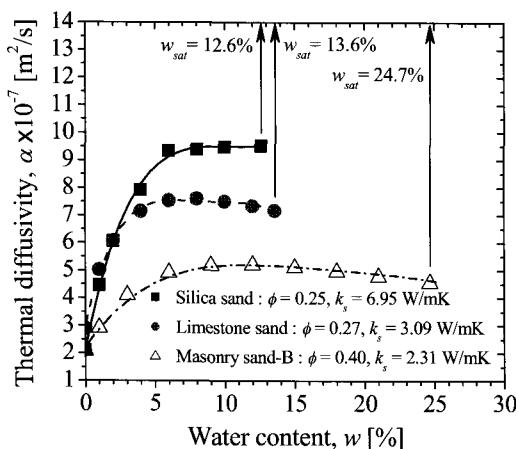


Fig. 3 Typical measurement results of thermal diffusivity with respect to water content.

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 lime-stone)에는 모래 입자의 열전도도가 그리고 입자 열전도도가 유사한 경우(limestone 대 masonry-B)에서는 간극률이 불포화 시료의 열확산계수 변화에 크게 영향을 미침을 볼 수 있다. 여기서 주목할 점은 뒤채움재 시료의 열확산계수는 일정 수분함량(5~8%)까지 증가한 후, 일정한 값을 보이거나 또는 감소한다는 것이다. 이에 대해서는 다음 절에

기술하였다.

4.2 열확산계수에 대한 수분함량의 영향

Fig. 4는 불포화 시료의 열확산계수를 포화도(S_r)와 건조밀도(또는 간극률)의 함수로 나타낸 것이다. Fig. 3과 Table 1에서 보듯이, 간극률에 따라 완전 포화 상태의 수분함량 값은 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.

$$S_r = \frac{w}{100} \cdot \frac{\rho_d}{\phi \rho_w} \quad (5)$$

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

$$\phi = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (6)$$

Fig. 4에서 불포화 시료의 열확산계수는 일정 수준의 포화도(0.4~0.5, 수분함량 5~8%)까지 증가한 후, 일정한 값을 보이거나 다소 감소하였다. 이러한 경향은 시료 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 시료의 열전도도와 체적열용량(volumetric heat capacity)이 함께 증가하지만, 일정 포화도 이상에서는 수분 증가에 의한 체적열용량 증가의 영향이 열전도도 증가보다 더 크기 때문이다. 아울러 포화도가 같을 경우 건조밀도가 증가할수록, 즉 간극률이 감소할수록 열확산계수는 크게 나타났다. 또한 포화 도가 대략 0.3보다 낮은 영역에서의 증가율과 큰 영역(0.3 이상)에서의 증가율이 다소 차이가 있음을 볼 수 있다. 이 역시 포화도가 큰 영역에서는 수분함량 증가에 의한 열용량 증가의 영향이 더 크게 작용했기 때문이다.

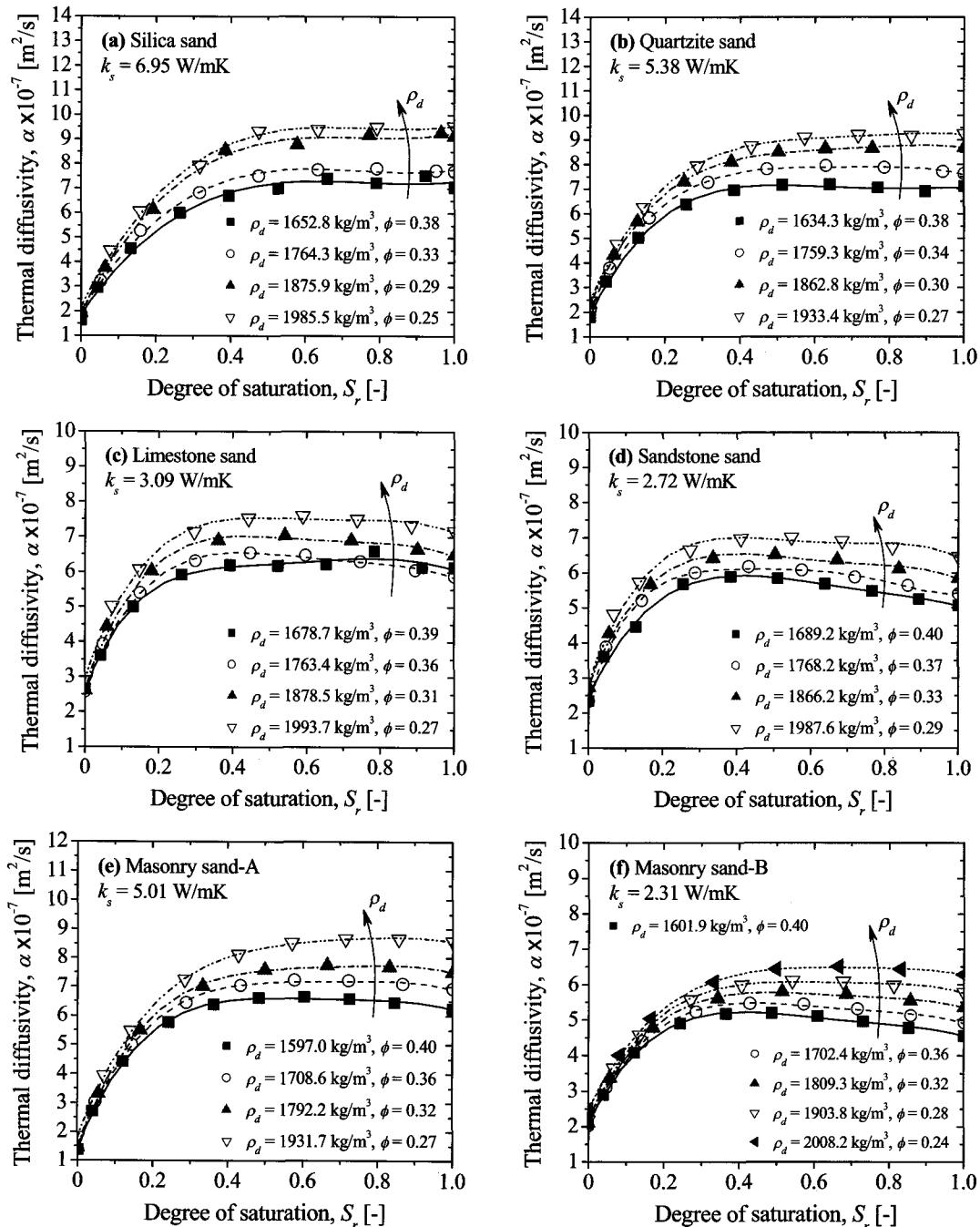


Fig. 4 Thermal diffusivity of soils as a function of degree of saturation and dry density(ρ_d).

Fig. 5는 불포화 시료의 열확산계수 변화를 포화도와 입자 열전도도의 합수로 표현한 것이다. 또한 비교를 위해 열전도도 측정 결과^[8]도 함께

도시하였다. 그림에서 보듯이 포화도가 동일하고 건조밀도가 유사할 경우, 불포화 시료의 열확산계수와 열전도도는 입자 열전도도에 영향을 받는

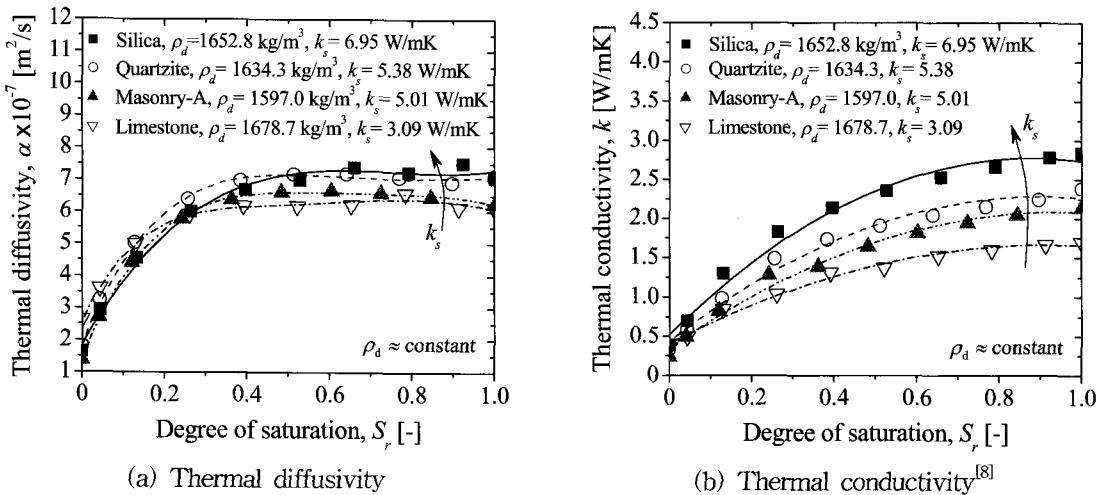


Fig. 5 Thermal diffusivity and conductivity of soils as a function of degree of saturation and thermal conductivity of solid particles(k_s).^[8]

것을 볼 수 있다. 따라서 각 시료의 열물성 차이는 결국 주재료인 고체 입자의 열전도도와 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 본 측정 결과와 기존 단일탐침법에 의한 열확산계수 산정 결과^[10]를 비교한 것이며, 참고로 열전도도 측정 결과에 대한 비교도 함께 도시하였다. 여기서 단일탐침법에 의한 열확산계수

는 앞서 식(3)을 적용하여 측정한 열전도도 값과 다음 식(7)로 주어지는 시료의 체적열용량(ρc) 값을 적용하여 산정한 결과[식(8)]다.

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

$$\alpha_{SP} = k_{SP}/\rho c \quad (8)$$

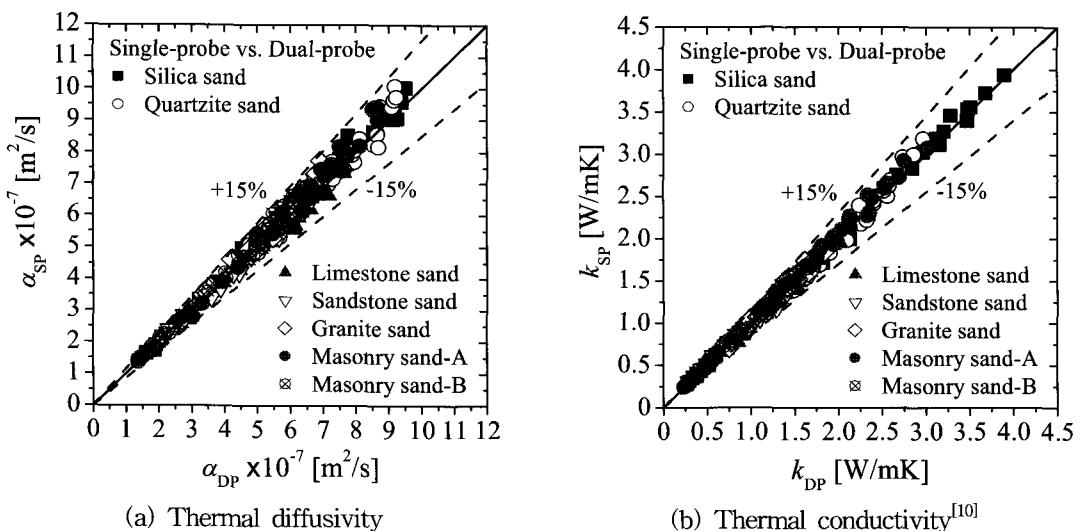


Fig. 6 Comparison of measured thermal diffusivity and thermal conductivity values using single-probe and dual-probe methods.^[10]

그림에서 보듯이 이중탐침법에 의한 열확산계수 값들이 단일탐침법에 의한 값들보다 다소 작았으나, 전체적으로 $\pm 15\%$ 범위 내에서 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 단일탐침법을 적용하여 토양이나 뒤채움재의 열확산계수를 산정할 경우, 식(8)에서 보듯이, 각 구성 성분에 대한 정확한 정보가 필요하다. 하지만 현장에서 이를 얻는 데에는 한계가 있다. 따라서 이중탐침법을 적용하여 수평형 지중열교환기 트렌치 뒤채움재나 파이프 주변 토양의 열확산계수와 열전도도를 측정한 후, 설계에 적용하는 것이 더 쉬울 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 수평형 지중열교환기의 트렌치 뒤채움재로 사용되는 모래-물-공기 불포화 시료를 대상으로 이중탐침법을 적용하여 열확산계수를 측정하였다. 아울러 실험 결과를 바탕으로 간극률·수분함량·입자 열전도도 등이 열확산계수에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 본 측정 결과와 기존 단일탐침법에 의한 열확산계수 산정결과를 비교하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 불포화 시료의 열확산계수는 전체적으로 건조 시료와 포화 시료의 열확산계수 값 사이에 있음을 확인할 수 있었다.
- (2) 불포화 시료의 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 증가율은 다소 차이를 보였다.
- (4) 포화도가 동일하고 건조밀도가 유사할 경우, 시료입자의 열전도도가 증가할수록 불포화 시료의 열확산계수는 증가하였다. 따라서 시료의 열물성 차이는 주재료인 고체 입자의 열전도도와 밀접한 관련이 있음을 확인하였다.
- (5) 이중탐침법에 의한 열확산계수 측정 결과와 단일탐침법에 의한 산정 결과는 $\pm 15\%$ 내에

서 일치하였다.

- (6) 본 결과는 수평형 지중열교환기 설계 시 필요한 트렌치 뒤채움재의 열확산계수 데이터를 제공함과 동시에, 더 나아가 수평 파이프 주변 토양의 열물성을 측정하는 데 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(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, D. C., Yang, H. J., Jeon, J. K., Seo, S. S. and Choi, Y. M., 2011, Development of high-performance cement grout for ground heat exchangers, Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 7, No. 1, pp. 10-16.
3. Lee, C., Lee, K., Choi, H. and Choi, H., 2009, Thermal conductivity and viscosity of graphite-added bentonite grout for backfilling ground heat exchanger, Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 5, No. 1, pp. 19-24.
4. Lee, T. J., Shim, B. O. and Song, Y., 2010, Monitoring of subsurface temperature variation as geothermal utilization, Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 6, No. 1, pp. 29-35.
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 Aittomäki, 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. Sohn, B. and Choi, H., 2011, Thermal diffusivity evaluation of backfilling materials for horizontal ground heat exchanger using single-probe method, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 361-369.
11. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1947, Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Oxford University Press.
12. de Vries, D. A., 1963, Thermal properties of soils: Physics of Plant Environment,(Ed. W. R. Van Wijk.), North-Holland, Amsterdam.
13. Kluitenberg, G. J., Ham, J. M. and Bristow, K. L., 1993, Error analysis of the heat-pulse method for measuring the volumetric heat capacity of soil, Soil Science Society of America Journal, Vol. 57, pp. 1208-1215.
14. Marquardt, D. W., 1963, An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, Journal of Soc. Indust. Appl. Math. Vol. 11, pp. 431-441.
15. Rohsenow, W. M., 1973, Handbook of Heat Transfer, McGraw-Hill, New York.
16. Kline, S. J., 1985, The purpose of uncertainty analysis, J. Fluids Engineering, Vol. 107, pp. 153-160.