

국내 토양의 열전도도 실험 연구

차장환, 안선준, 구민호,¹⁾ 송운호, 김형찬²⁾

The experimental study of the thermal conductivity for the soil in South Korea

Janghwan Cha, Sunjoon An, Min-Ho Koo, Yoonho Song, Hyengchan Kim

Key words : 열전도도(thermal conductivity), 공극률(porosity), 함수비(water content), 다중회귀식(multiple regression)

Abstract : 16개 기상관측소에서 채취한 토양 시료에 대한 토양 물성 및 열특성을 측정하였으며 이를 통하여 공극률, 함수비, 용적밀도, 입도 분포, 유기물 함량, 토양구성광물의 종류 및 함량이 열전도도에 미치는 영향을 파악하였다. 상관성 분석결과 입도분포, 유기물함량 및 토양 구성광물의 종류 및 함량은 낮은 상관성을 보였으며 용적밀도($R^2=0.60$), 함수비($R^2=0.54$)와 공극률($R^2=0.56$)은 높은 상관성을 보였다. 또한 함수비(2%)와 토양의 종류에 따른 다중회귀 분석을 통하여 토양의 열전도도를 추정할 수 있는 회귀식을 제시하였다.

Nomenclature

TC_{moi} , TC_{dry} : thermal conductivity at moist phase and dry, respectively, W/mK

Θ : water content, %

n : porosity, m^3/m^3

a, b, c, d : constant, dimensionless

subscrip

KMA : Korea meteorological administration

XRD : X-ray diffraction

C_c : curvature coefficient

1. 서론

화석 연료의 고갈과 전력부하 급증 및 온실가스배출 문제 등으로 인한 심각한 환경오염 문제에 직면함에 따라 우리나라는 신재생 에너지자원의 보급 확대를 위한 정부차원의 노력이 증가하고 있으나 지열 에너지자원에 대한 인식이 부족한 실정이다. 천부 지반의 지열을 열원으로 이용하는 지열원 열펌프(GSHP, ground source heat pump) 시스템의 설계나 성능 분석을 위해서는 지중 온도의 심도별 분포 및 시간적 변화에 대한 정보가 매우 중요하며, 이는 열전도도 및 열확산계수와 같은 지반의 열물성에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있다. 그러나 국내의 경우 이를 위한 자료 축적이 미비한 상태이다. 따라서 국내 지하

열 자원의 경제적 활용성에 대한 종합적인 평가를 위해서는 국내 지반의 열특성에 관한 자료 축적이 절실히 요구된다.

토양의 열특성에 관한 연구는 지반공학, 에너지공학 및 농공학 분야에서 많은 연구자들에 의해 활발하게 진행되고 있다. 또한 최근 천부지열을 이용한 시스템의 개발·보급이 점차 활성화되고 이에 따라 지속가능한 청정에너지 자원의 최적 활용을 위하여 국내 여건에 적합한 기술개발이 필요하다.¹⁾

현재 열전도 특성을 파악하기 위해 많은 경험식²⁾과 물리적 모델이 제시되고 있으나 이 식들 사이의 오차가 크고, 토양의 물리적 특성에 따른 값을 결정하기에 어려움이 크다. 또한 이 값은 설계에 가장 직접적인 영향을 주는 계수로서, 초기에 계수 산정에 문제가 있으면 설계 전체에 큰 영향을 미친다.³⁾ 암반의 경우는 토양에 비해 균질

1) 공주대학교

E-mail : hydro@kongju.ac.kr

Tel : (041)850-8510 Fax : (041)850-8953

E-mail : asj3514@nate.com

E-mail : koo@kongju.ac.kr

Tel : (041)850-8515 Fax : (041)850-8953

2) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부

E-mail : song@kigam.re.kr

Tel : (042)868-3175 Fax : (042)868-3358

E-mail : khc@kigam.re.kr

Tel : (042)868-3074 Fax : (042)868-3358

하여 이 계수를 적용하기에는 큰 문제가 없지만 토양의 경우 현재 국제 지열원 열펌프협회(IGSHPA)에서 제시한 값은 순수한 모래나 점토, 자갈에 대한 범위 값만을 나타낸 상태이므로 일반적인 혼합토사 또는 높은 함수비의 지반에 적용하려면 시공 기술자의 경험에 따라 적당한 값을 선택하여야만 하는 비합리성이 존재한다.

천부 지반은 일반적인 열전달 매체와는 다른 물리적 특성인 공극률, 함수비, 토양 입자 밀도, 비열, 입도 분포, 유기물 함량, 염분농도, 토양 구성광물의 종류 및 함량으로 인해, 해석뿐만이 아니라 측정에도 상당한 어려움이 있다.⁴⁾

본 연구에서는 16개 기상관측소를 대상으로 토양 시료를 채취하여 토양의 물성 및 열특성을 측정하였으며 이들의 상관성을 분석하여 국내 천부 지반이 나타내는 열특성의 통계적 분석 자료를 제시하였다.

2. 본 론

2. 1. 실험 방법

본 연구는 58개 국가 기상관측소 중 16개소(Fig. 1)를 대상으로 토양시료 채취용 오거를 이용하여 천부 1m 심도의 불교란 시료를 채취하였다. 현장에서 채취한 시료는 Fig. 2와 같은 과정을 통해 실험을 실시하였다. 실험 전 채취한 시료는 길이와 전석 유무, 풍화 상태, 쪼개짐 등 개략적인 시료의 상태를 파악하였으며 그 결과 대부분의 시료는 0.80-0.95 m로 5-20% 정도의 압밀된 상태를 보였다. 또한 암석 및 나무뿌리 등 이물질이 많은 경우 실험에서 제외하였다.

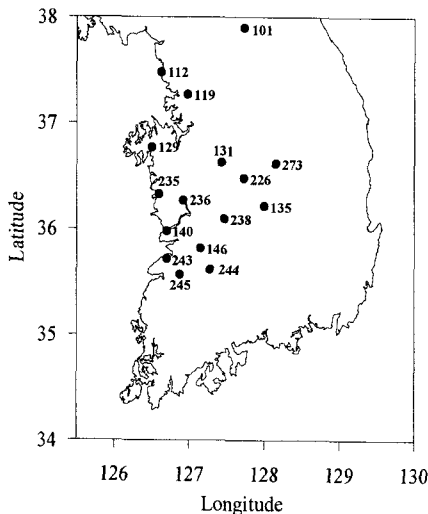


Fig. 1. Location of 16 surface synoptic stations of KMA.

본 실험은 토양이나 분말의 과도상태에 대한 가장 일반적인 방법인 탐침을 이용한 열특성 실험

장치(Decagon device KD2)를 이용하여 수행하였다. 측정원리는 열선 부분을 가열하기 시작하면 열선부의 열전대(Thermocouple)와 탐침 선단부의 열전대가 온도를 동시에 측정하기 시작하고 열은 탐침을 따라 상대적으로 저온인 선단부로 향하게 되며, 이때 접촉하고 있는 흙 입자에 열 손실을 발생시키며 선단부에 도달하게 된다. 최종적으로 시간에 따른 열 손실은 토양의 종류 및 특성에 따라 달라지며 이를 근거로 열 특성을 계산한다. 실험 장비의 열전도도 측정범위는 0.02-2.0 W/mK로 5%의 정밀도를 가진다.⁵⁾

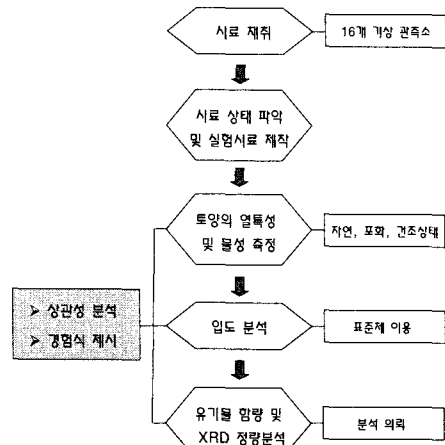


Fig. 2. Flow chart of the experimental process.

토양의 열특성 측정은 채취 시료를 10등분으로 절단한 후 자연상태와 포화 및 건조 상태에 따라 실시하였다. 시료의 포화는 시료 용기에 일정량의 물을 넣은 후 25℃의 진공오븐에서 진공상태와 대기상태를 반복하며 2일간 수행하였다. 건조는 103℃의 드라이오븐에서 3, 6, 9, 12, 20, 40 시간 간격으로 실시하였으며 경과 시간에 따른 시료의 열전도도는 건조시료를 3시간 동안 상온에서 식힌 후 측정하였다. 또한 측정오차를 최소화 하기 위해 1회 측정 시 3곳의 열전도도 값을 평균하였다.

입도분석은 11개의 표준체와 입도 분석기(Mastersizer 2000)를 이용하여 수행하였으며 유기물 분석과 XRD 정량분석은 한국지질자원연구원에 분석을 의뢰하였다.

2. 2. 실험 결과 및 고찰

실험 시료의 입도분석 결과를 균등계수는 1.55-37.77의 범위를 가지고 전체시료의 83%는 분급이 불량한 것으로 나타났다. 곡률계수는 0.38-2.40의 범위를 가지며 좋은 입도 분포($1 \leq C_c \leq 3$)를 보이는 시료는 전체시료의 58%를 차지한다. 또한, 미국 농무성(USDA) 분류법에 의해 토양 분류표에 도시하면 주로 Sand의 영역에 해당되며(79.5%), 일부는 Loamy sand(19.9%)에 해당한다(Fig. 3).

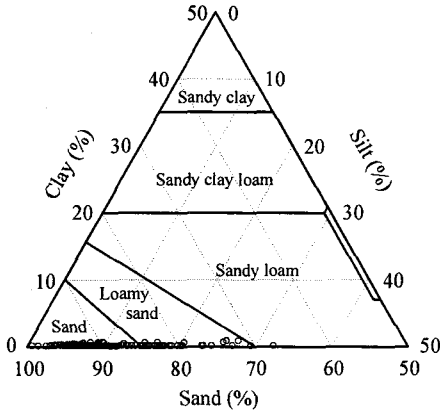


Fig. 3. Triangular diagram of texture classes according to USDA.

토양 시료의 공극률은 0.36-0.69로 다소 큰 값을 보이며 이는 시료에 대공극의 존재 및 부피 측정 시 시료와 용기 사이에 틈이 발생하여 나타난 것으로 판단된다. 또한 용적밀도는 1.09-1.78 g/mL의 범위를 갖는다. 시료의 열전도도는 포화 및 완전건조 시 각각 0.85-1.62, 0.10-0.71 W/mK의 범위를 나타내며 평균과 표준편차는 포화 시 1.17 및 0.17 W/mK, 완전 건조 시 0.31 및 0.13 W/mK의 값을 보였다. 이는 독일기술자협회(VDI)에서 제시한 값(0.3-2.4 W/mK) 보다 다소 작음을 알 수 있다.⁶⁾ 유기물 분석 및 XRD 정량 분석은 156개의 제작된 시료 중 20개에 대하여 실시하였다. 그 결과 유기물 함량은 2% 미만으로 나타났으며 이는 유기물 함량의 영향을 무시해도 될 것으로 판단된다. 또한 XRD 정량분석 결과 Silica group(석영), Mica group(녹니석, 백운모, 일라이트, 고령토), Amphibole group(각섬석), Feldspar group(조장석, 정장석, 미사장석) 및 Oxides(적철석)로 구성되어 있으며 그 중 석영(30.42-66.42 v%), 조장석(3.52-24.96 v%) 및 녹니석(1.79-30.97 v%)이 대부분을 차지하고 있다.

토양의 열전도도에 미치는 인자를 파악하기 위해 토양의 물성과의 상관성 분석을 수행하였다. 상관성 분석결과 토양 입도의 분급성과 균등성을 나타내는 균등계수($R^2=0.04$), 곡률계수($R^2=0.08$), 토양 구성광물인 석영($R^2=0.10$) 등은 낮은 상관성을 보인다. 본 실험 결과 석영은 높은 열전도도(7.69 W/mK)를 가지며 토양 구성비 또한 높게 나타났으나 암석에 비해 토양의 열전도도에 미치는 영향은 미흡한 것으로 판단된다. 용적밀도, 함수비 및 공극률의 경우 상관성은 각각 $R^2=0.60$, $R^2=0.54$ 및 $R^2=0.56$ 로 높은 상관관계를 보인다(Fig. 4). 열전도도는 함수비가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이며 낮은 함수비(18%이하)에서는 급격한 증가를 보이지만 일정함수비 이상에서는 함수비 증가에 따른 열전도도의 증가세는 둔화되는 현상을 볼 수 있다(Fig. 4c).⁷⁾ 이는 낮은 함수비에서는 공극을 채우는 물(0.591 W/mK)이 열전달 매체로 중요하게 작용하지만 일정 함수비 이상에서는 물의 역할이 상대적으로 작게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

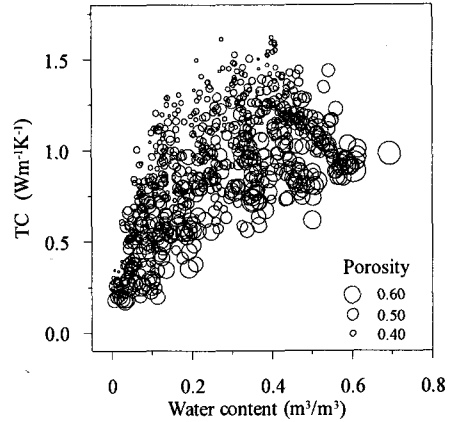


Fig. 4. Comparison of thermal conductivity and water content : the effect of porosity(b)

토양의 열전도도는 토양을 구성하는 매질, 물 그리고 공기의 구성비에 따라 달라진다. 따라서 측정된 열전도도 결과를 물리적 모델인 혼합법칙(Mixing law)과 Kersten(1949)과 Naidu and Singh(2004)에 의해 제시된 경험식에 적용하였다. 물리적 모델의 적용은 XRD 정량분석을 실시한 20개 시료에 대해 수행하였으며 Clauser and Huenges(1995)에 의해 제시된 토양 구성광물의 열전도도 값을 이용하여 함수비에 따른 열전도도를 계산하였다.⁸⁾ Fig. 5a는 모델에 의해 계산된 값과 실험에 의한 측정값을 도시한 것으로 기하평균모델은 잘 일치($R^2=0.71$)하지만 다른 모델은 잘 맞지 않는 것을 알 수 있다. 이는 기하평균이 서로 다른 구성비를 갖는 혼합물에서 적합한 모델이기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 포화상태의 시료에는 적용하기가 힘든 것으로 나타났다.

Kersten(1949)과 Naidu and Singh(2004)이 제시한 경험식은 함수비와 건조밀도에 의한 함수로 표현하였다. 이들 경험식을 이용하여 계산된 값과 측정값을 도시하면 Fig. 5b와 같으며 계산값이 측정값보다 큰 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 열전도도 측정 자료를 이용하여 함수비와 공극률에 대한 다중회귀분석을 실시하였다. 추정된 회귀식은 토양의 종류와 함수비에 따라 분류하였으며 함수비가 2% 이상일 경우 식(1)로 표현되며 2% 미만일 경우 식(2)로 표현된다.

$$TC_{\text{moist}} = [0.35 \log \theta + a] 10^{0.62 \times (1-n)} + b(1)$$

$$TC_{\text{dry}} = c \times 10^{0.62 \times (1-n)} + d \quad (2)$$

여기서, 변수(a, b, c, d)는 토양의 종류에 따라 Table 1과 같다. 따라서 국내 천부 지반의 물성을 알 경우 추정된 회귀식을 통하여 토양의 열특성을 계산할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1. Value of parameter for type of soil

Soil type	a	b	c	d
Sand	0.30	-0.72	0.20	-0.10
Loamy sand	0.39	-0.91	0.45	-0.65

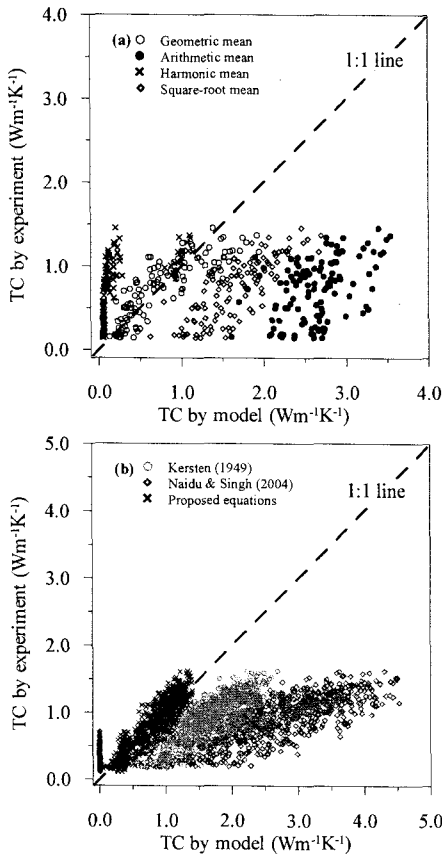


Fig. 5. Comparison of measured and predicted thermal conductivities of soil samples : (a) physical models, (b) empirical equations.

3. 결론

지반의 열 특성은 천부 지반의 지열을 열원으로 이용하는 지열원 열펌프시스템의 설계 및 성능 분석에 있어 중요한 요소로 작용한다. 그러나 국내의 경우 아직 지반의 열특성 자료가 미미한 정도이다. 본 연구의 목적은 국내 천부 토양의 물리적 특성과 열특성과의 상관관계를 규명하는데 있으며 이를 위해 16개 기상관측소의 토양시료를 채취하여 토양의 물성과 열 특성을 측정하였다.

1) 토양의 열전도도는 입도분포 특성, 유기물 함량, 토양 구성광물의 영향은 미비한 것으로 파악되며 공극률이 증가함에 따라 감소하는 부의 상관성($R^2=0.56$)을 보이며 함수비의 증가에 따라

증가하는 정의 상관성($R^2=0.54$)을 갖는다. 함수비의 경우 열전도도는 낮은 함수비에서는 급격한 증가를 보이지만 일정 함수비 이상에서는 함수비 증가에 따른 열전도도의 증가세는 둔화되는 현상을 볼 수 있다.

2) 토양의 열전도도는 물리적 모델에 적용한 결과 서로 다른 구성비를 갖는 혼합물에 적합한 기하평균모델에 잘 맞는 것을 알 수 있다($R^2=0.71$). 기존에 제시된 경험식의 경우 측정값보다 높게 계산되었다. 본 연구에서는 공극률 및 함수비를 주요 변수로 하였으며 함수비($\theta=2\%$)와 토양의 종류(Sand, Loamy sand)에 따라 다중회귀식을 제시하였다. 실험에 의한 측정값과 제시된 회귀식에 의한 계산값을 비교한 결과 결정계수(R^2)가 0.82로 높게 나타났다.

후기

본 연구는 에너지관리공단의 에너지·자원기술 개발 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었다.

References

- [1] 안형준, 2002, 저온지열을 이용한 지열 히트펌프 시스템, 터널과 지하공간, 41, pp. 229-236
- [2] Kersten, M. S., 1949, Thermal properties of soil, Bulletin of the university of minnesota, Institute of technology 52, pp. 1-225
Naidu, A. D., Singh, D. N., 2004, A generalized procedure for determining thermal resistivity of soils, International Journal of Thermal Sciences 43, pp. 43-51
Singh, D. N., Devid, K., 2000, Generalized relationships for estimating soil thermal resistivity, Experimental Thermal and Fluid Science 22, pp. 133-143
- [3] 백성권, 박용부, 박종배, 2006, 지열 냉난방 시스템에서 지중열교환기의 설계 및 시공, 한국지반공학회지, 5, pp. 31-43
- [4] Abu-Hamdeh, N., Reeder, R. C., 2000, Soil thermal conductivity : effects of density, moisture, salt concentration and organic matter, Soil sci. Soc. Am. J., 64, pp. 1285-1290
Ochsner, T. E., Horton, R., and Ren, T., 2001, A new perspective on soil thermal properties, Soil Sci. Soc. Am. J., 65, pp. 1641-1647.
- [5] Fontana, A. J., Wacker, B., Campbell, C. S., Campbell, G. S., 2001, Simultaneous thermal conductivity, thermal resistivity, and thermal diffusivity measurement of selected foods and soils. 2001 ASAE annual international meeting.
- [6] VDI 4640, 2000, Thermal use of the underground; fundamentals, approvals, environmental aspects, verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, pp. 157.
- [7] Krishnaiah, S., Singh, D. N., 2003, Determination of influence of various various oarameters on thermal properties of soils, Int. Comm. Heat Transfer, Vol. 30, No. 6, pp. 861-870
- [8] Clauser, C., Huenges, E., 1995, Thermal conductivity of rocks and minerals, A Handbook of Physical Constants