

국내 암석의 암종별 열물성 특성 분석

차 장환, 명 대원, 구 민호¹⁾, 송 윤호, 김 형찬²⁾

Analysis for the thermal properties by rock type in South Korea.

Jang-Hwan Cha, Dae-Won Myoung, Min-Ho Koo, Yoonho Song, Hyengchan Kim

Key words : Thermal conductivity(열전도도), Thermal diffusivity(열확산계수), Rock type(암종), Porosity(공극률)

Abstract : 본 연구에서는 국내 암석을 암종별로 총 292개 채취하였으며 열물성 측정 장비를 이용하여 이들 암석의 열물성을 측정하였다. 이와 더불어 암석의 물리적 특성을 측정하였으며 일부 시료의 경우 XRD 정량분석을 실시하였다. 이들 결과를 이용하여 암석의 열물성 특성과 열물성에 영향을 주는 인자를 파악하였다. 암석의 열물성 측정 결과 열전도도와 열확산계수는 화강암에서 가장 낮은 값을 보였으며 퇴적암, 변성암 순으로 나타났다. 또한 암종별 열물성 값의 범위를 살펴보면 변성암과 퇴적암에서 넓게 분포한다. 암석의 물성과 열물성과의 상관성 분석 결과 공극률이 증가함에 따라 열전도도와 열확산계수가 감소하나 상관성은 미약한 것으로 나타났다. XRD 분석 결과 암석의 열전도도는 석영(SiO₂)의 함량에 따른 선형의 비례관계를 보였다. 이로써 암석의 열전도도는 암석을 이루는 광물의 종류에 의하여 영향을 받을 수 있다. 차후 암석의 구성 광물입자의 배열 상태에 따른 열물성 특성과 퇴적암 및 변성암 시료에 대한 이방성 실험을 통해 편리, 층리 및 엽리 등에 따른 열물성의 이방성 정도를 분석할 예정이다.

Nomenclature

TC : thermal conductivity, W/mK
TD : thermal diffusivity, mm²/sec

subscrip

GSHP : ground source heat pump
TRT : thermal response test
XRD : X-ray diffraction

1. 서론

전 세계적으로 에너지자원의 가격 상승과 더불어 지구온난화의 주범인 온실가스의 감축에 대한 당위성은 국제사회의 중요한 화두가 되고 있다. 이에 따라 친환경에너지 중의 하나인 지열에너지는 선진국에서 많은 연구가 진행되고 있으며, 미국, 일본, 유럽 등에서는 지역난방, 산업이용 및 첨단 영농단지 조성 등에 활용하고 있다. 우리나라의 경우 신재생에너지 개발·이용·보급 촉진법에 의하여 3,000 m² 이상의 공공건물에서는 총건축 공사비의 5% 이상을 신재생에너지 설비

설치에 투자토록 의무화하고 있으며, 이에 따라 지열에너지를 활용한 지열펌프(GSHP)시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 지열펌프시스템의 운전성능에 큰 영향을 미치는 지중에 매설된 지열교환기의 열교환 능력에 대한 정확한 정보가 부족한 상태이다.⁽¹⁾ 지열교환기의 열교환 능력은 지반(토양, 암석), 유체 및 설비자재 등의 열물성에 의해 결정되며 그 중 지반의 열물성에 대한 연구가 절실하다. 암석의 열물성은 열전도도(TC)와 열확산계수(TD) 및 열용량 등이 있으며 이 중 열전도도는 지열류량 조사에서 필수적인 매개변수이며 지질공학, 지열공학 분야에서 중요성이 대두됨에 따라 암석의 물리적인 성질과

1) 공주대학교 지질환경과학과
E-mail : hydro@kongju.ac.kr
Tel : (041)850-8510 Fax : (041)850-8953
E-mail : gosea35@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

함께 많은 연구가 이루어지고 있다.⁽²⁾ Andersson et al.은 방사성 폐기물 처리장에 대한 모델링 및 핵폐기물 처리지역에서 폐기물에 의해 발생하는 열의 분산에 대한 연구에서 열물성 자료를 이용하였다.⁽³⁾ 또한, 최근에는 암석의 이방성에 따른 열전도도의 변화에 관한 연구⁽⁴⁾ 및 열물성과 P파 속도와의 상호 관계에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.⁽⁵⁾

지반의 열물성 산정 방법은 암종별로 알려진 대표값을 이용하는 방법, 시추코어 시료를 채취하여 측정하는 방법, 지중 온도 관측 자료를 해석하여 구하는 방법, 열반응 시험(TRT)을 이용한 원위치 산정법 등이 있다. 본 연구에서는 시료를 채취하여 측정하는 방법을 이용하여 국내 암반의 암종별 물성과 열물성에 관한 실험을 실시하였으며 이들의 특성을 파악하고 열물성에 영향을 주는 요인을 분석하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 국내에 산재되어 있는 화성암(130), 퇴적암(60) 및 변성암(102) 등 292개의 암석 시료를 채취하여 암석의 물성 및 열물성에 대한 실험을 실시하였다. 화성암의 경우 화성암의 육안적 분류 기준을 적용하여 석영함량에 따라 산성암, 중성암, 염기성암으로 분류하였다. 퇴적암은 셰일, 역암, 석회암, 사암으로 구분하였으며 변성암은 대리암, 각섬암, 편마암, 규암으로 구분하였다. 채취한 암석 시료는 직경 25.4 mm, 두께 3 mm의 disk 형태로 제작하였고, 제작된 시료는 열물성 측정장비(Nanoflash LFA-447)를 활용하여 건조상태의 암석 열물성을 측정하였다. 열물성 실험에 앞서 제작된 disk를 대상으로 시료의 무게와 아르키메데스의 원리를 이용하여 부피를 측정하였으며 이로부터 암석의 밀도 및 공극률을 계산하였다. 또한, 열물성 측정 후 일부 화강암, 사암 및 편마암 시료의 XRD 정량분석을 실시하였다.

3. 연구결과 및 고찰

측정된 암석의 물성과 열물성 특성을 살펴보면, 공극률은 화성암의 경우 0.002~0.120이며 평균 0.019의 값을 보인다. 퇴적암은 0.003~0.132의 범위로 평균 0.023이며 변성암은 0.002~0.058로 평균 0.013의 값을 갖는다. 암종에 따른 공극률은 퇴적암의 경우 값의 범위가 넓게 분포하며 이는 암석 생성기원에 따른 요인에 의한 것이다. 건조밀도의 평균값은 화성암, 퇴적암 및 변성암에서 각각 2.64, 2.65, 2.69 g/cm³의 값을 보인다. 화성암의 열전도도는 1.73~4.59 W/mK의 값을

보이며 퇴적암 및 변성암은 각각 1.84~5.59, 1.61~8.38 W/mK의 값을 가진다. 암종별 평균값은 각각 2.68, 3.06 및 3.62 W/mK이다. 이는 VDI에서 제시한 암종별 열전도도 값의 범위에 있음을 알 수 있다.⁽⁶⁾ 그러나 일부 변성암의 경우 높은 값을 보이는데 이는 열전도도 값이 큰 석영(7.69 W/mK)으로 구성된 사암이 변성작용을 받아 생성된 규암에서 나타난다. 열확산계수는 화성암의 경우 0.78~2.45 mm²/sec (평균 1.29)의 범위를 가지며 퇴적암 및 변성암은 각각 0.80~2.92 (평균 1.43), 0.80~3.32 (평균 1.68) mm²/sec의 값을 보인다. 암종별 비열의 평균값은 각각 0.79(화성암), 0.81(퇴적암) 및 0.80 kJ/kgK(변성암)이다.

암석의 열물성에 영향을 주는 물리적 요인을 파악하기 위해 실험 자료를 이용하여 상관성 분석을 실시하였다. 그 결과 공극률이 증가함에 따라 열전도도는 감소하나 상관성은 미약한 것으로 나타났다. 이는 Surma et al.이 암석의 공극률이 0.1 이하에서는 경향성이 없는 것으로 보고한 것과 일치한다.⁽⁷⁾ 그러나 셰일의 경우 공극률과 열전도도 간의 비선형적인 상관성이 비교적 잘 나타났다으며 이는 셰일의 경우 공극률이 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 1은 암종에 따른 암석의 열전도도와 열확산계수의 관계를 도시한 것으로 정의 상관성을 보인다. Fig. 1a는 화성암을 석영(SiO₂)의 함량에 따라 육안분류 한 것으로 염기성암에서 산성암으로 갈수록, 즉 석영의 함량이 증가할수록 열전도도가 커짐을 알 수 있다. 또한, 산성암의 경우 염기성암 또는 중성암에 비하여 넓은 범위의 열전도도 변화를 보인다. Fig. 1b는 셰일, 역암, 석회암 및 사암에 대한 결과를 도시한 것이다. 암석에 따른 열물성 값은 모든 암석에서 넓은 범위를 보이는데 이는 암석의 구성광물과 퇴적암에서 나타나는 엽층리(foliation) 구조에 따른 이방성의 영향으로 판단된다. 또한 사암과 석회암의 열물성에 있어 구성광물의 영향을 잘 보여주고 있다. Fig. 1c는 변성암에 대해 도시한 것으로 각섬암은 낮은 값을 갖는다. 이는 비교적 열전도도가 낮은 각섬석과 사장석 등으로 구성되어 있기 때문인 것으로 보인다. 규암의 경우 주로 석영으로 구성되어 있어 높은 열전도도를 보인다. 편마암은 편리(schistosity) 구조에 따른 이방성의 영향으로 광범위한 열물성 값을 갖는 것으로 판단된다.

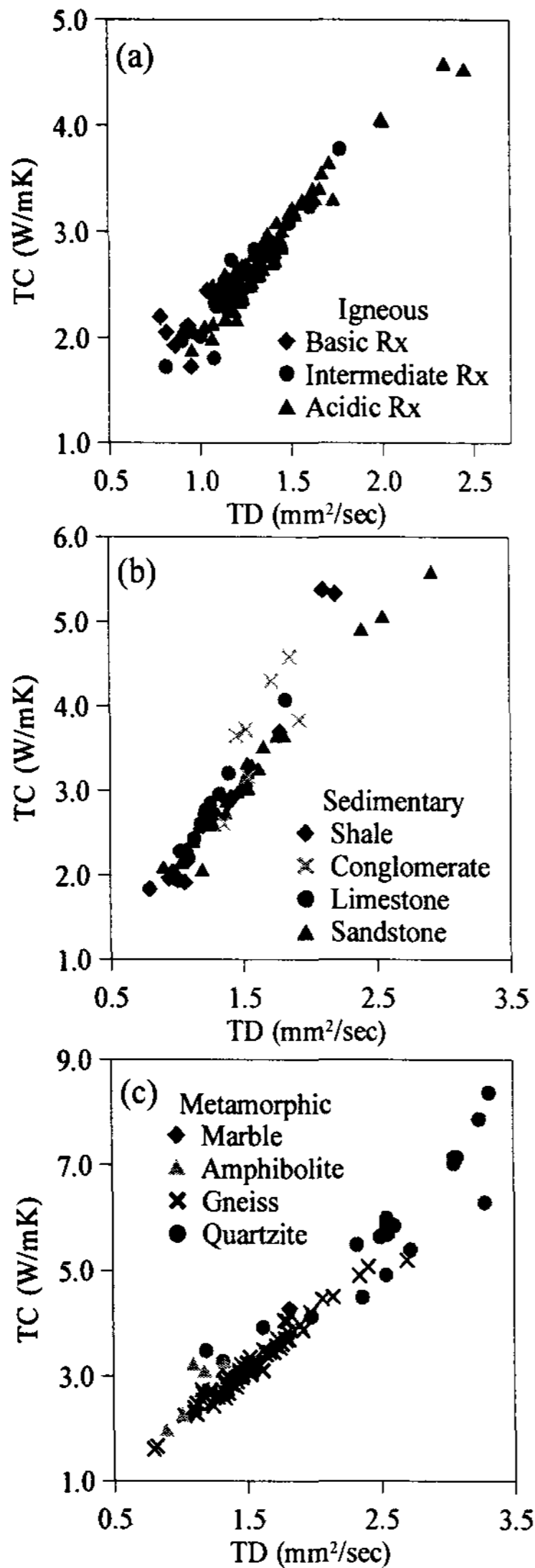


Fig. 1 Comparison of thermal conductivity and thermal diffusivity for different types of rock : (a) igneous, (b) sedimentary and (c) metamorphic rocks.

앞에서 살펴본 바와 같이 공극률이 작은 암석의 경우 암석의 열물성에 영향을 미치는 것은 주로 구성광물과 이방성일 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 일부 열물성 측정 시료에 대하여 XRD 정량분석을 실시하였다. 그 결과 실리카류, 운모류, 각섬석류, 장석류, 탄산염 및 산화물로 구성되어 있으며 그 중 석영과 조장석이 대부분을 차지한다. Fig. 2는 석영 함량에 따른 열전도도를 도시한 것으로 결정계수가 0.79인 정의 상관성을 보인다.

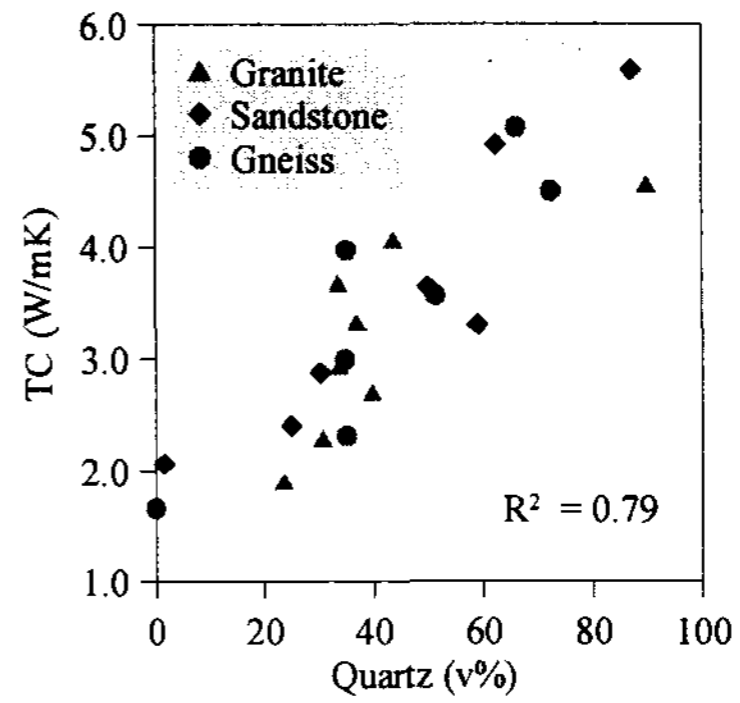


Fig. 2 Comparison of thermal conductivity and quartz content for different types of rock.

암석의 열물성은 암석을 구성하는 매질, 물 그리고 공극의 구성비에 따라 달라진다. 따라서 공극률과 XRD분석 결과를 이용하여 물리적 모델인 혼합법칙(Mixing law)에 적용하여 열전도도를 계산하였다. 구성광물의 열전도도는 Clauser and Huenges에 의해 제시된 값을 이용하였다.⁸⁾ Fig. 3은 모델에 의해 계산된 값과 실험에 의한 측정값을 도시한 것으로 기하평균모델이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 기하평균이 서로 다른 구성비를 갖는 혼합물에서 적합한 모델이기 때문인 것으로 판단된다.

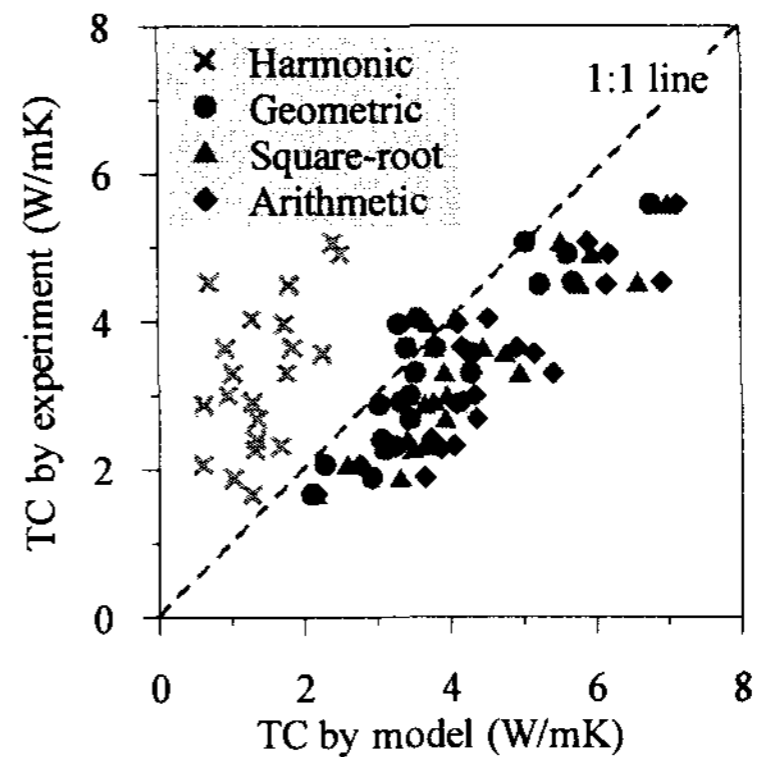


Fig. 3 Comparison of measured and predicted thermal conductivities.

4. 결 론

본 연구의 목적은 국내 암석의 암종별 열물성과 물성에 대한 특성을 파악하고 열물성에 영향을 미치는 요인을 규명하는데 있다. 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 측정된 암석의 공극률 평균은 0.019(화성암), 0.023(퇴적암) 및 0.013(변성암)으로 0.14 이하의 값을 보이며, 평균 열전도도 값은 각각 2.69, 2.89 및 3.23 W/mK이다. 또한 화성암, 퇴적암 및 변성암의 열확산 계수 평균값은 각각 1.29, 1.43 및 1.68 mm²/sec이며 비열 평균은 각각 0.79(화성암), 0.81(퇴적암) 및 0.80 kJ/kgK(변성암)의 값을 보인다. XRD 분석 결과 대부분 석영(-90 v%)과 조장석(-77 v%)으로 구성되어 있다.

2) 암석의 물성과 열물성과의 상관성 분석 결과 공극률이 증가함에 따라 열물성은 감소하나 상관성은 미약한 것으로 나타났으며 이는 공극률이 작기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 암석의 건조밀도와의 연관성은 나타나지 않았으나 석영 함량에 따른 상관성($R^2=0.79$)은 높게 나타났다.

3) 암석의 열전도도는 물리적 모델에 적용한 결과 서로 다른 구성비를 갖는 혼합물에 적합한 기하평균모델에 잘 맞는 것을 알 수 있다

후 기

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

References

- [1] Shin, U. C., Baek, N. C., Kim, O. J., Koh, D. Y., 2006, "Analysis of thermal performance of ground-source heat pump system", J. of KSES, Vol. 26, No. 2, pp. 95-101.
- [2] Singh, T.N., Sinha, S. and Singh, V.K., 2007, "Prediction of thermal conductivity of rock through physico-mechanical properties", Building and Environment, 42, 146-155.
- [3] Andersson, J., Strom, A., Svemar, C., Almen, K.E. and Ericsson, L.O., 2000, What requirements does the KSB-3 repository make on the host rock? Geoscientific Suitability Indicators and Criteria for Siting and Site Evaluation. Technical Report, TR-00-12, April 2000.
- [4] Vosteen, H. D. and Schellschmidt, R., 2003, "Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock". Physics and Chemistry of the Earth, 28, 499-509.
- [5] Ozkahraman, H.T., Selver, R. and Isik, E.C., 2004, "Determination of the thermal conductivity of rock from P-wave velocity", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41, 703-708.
- [6] VDI, 2000, Thermal use of the underground: fundamentals, approvals, environmental aspects, 157.
- [7] Surma, F. and Geraud, Y., 2003, "Porosity and thermal conductivity of the Souzous-Forets Granite", Pure and applied geophysics, 160, 1125-1136.
- [8] Clauser, C., Huenges, E., 1995, "Thermal conductivity of rocks and minerals", A Handbook of Physical Constants