

## 경기도, 강원도, 충청도 일대의 암석 열물성 특성 연구

박정민<sup>1</sup> · 김형찬<sup>2</sup> · 이영민<sup>2\*</sup> · 송무영<sup>1</sup>

<sup>1</sup>충남대학교, <sup>2</sup>한국지질자원연구원 지하수지열연구부

### A Study on Thermal Properties of Rocks from Gyeonggi-do Gangwon-do, Chungchung-do, Korea

Jeongmin Park<sup>1</sup>, Hyoung Chan Kim<sup>2</sup>, Youngmin Lee<sup>2\*</sup> and Moo Young Song<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

<sup>2</sup>Groundwater and Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

We made 712 thermal property measurements on igneous, metamorphic and sedimentary rock samples from Gyeonggi-do, Gangwon-do and Chungchung-do, Korea. The average thermal conductivities of igneous, metamorphic and sedimentary rocks are 3.58 W/m-K, 4.16 W/m-K and 4.53 W/m-K, respectively. Thermal conductivity of granite and gneiss are 2.13-5.87 W/m-K and 2.26-6.67 W/m-K, with average values of 3.57 W/m-K and 3.945 W/m-K, respectively. The average of thermal diffusivities are 1.43 mm<sup>2</sup>/sec and 1.55 mm<sup>2</sup>/sec, respectively; the average of specific heat values are 0.914 J/gK, 0.912 J/gK for granite and gneiss samples, respectively. The thermal conductivity of a rock type generally have a wide range because it depends on various factors such as dominant mineral phase, micro-structure, anisotropy, and so on.

**Key words :** Thermal conductivity, Thermal diffusivity, Specific heat, Mineral composition

경기도, 강원도, 충청도 일대에서 화성암, 변성암, 퇴적암의 총 712개의 암석을 채취하여 열물성을 측정하였다. 측정 결과로 화성암의 평균 열전도도는 3.58 W/m-K, 변성암은 4.16 W/m-K, 퇴적암은 4.53 W/m-K이다. 우리나라의 경우 화강암과 편마암이 주를 이루고 있는데 이에 대한 열물성값을 보면 화강암의 열전도도는 2.13-5.87 W/m-K의 범위를 가지며, 평균 열전도도는 3.57 W/m-K, 편마암은 2.26-6.67 W/m-K의 범위를 가지며, 평균 열전도도는 3.945 W/m-K이다. 화강암의 평균 열확산율은 1.43 mm<sup>2</sup>/sec, 비열은 0.914 J/gK, 편마암의 평균 열확산율은 1.55 mm<sup>2</sup>/sec, 비열은 0.912 J/gK로 나타났다. 일반적으로 같은 암석의 열전도도 값의 범위가 큰 이유는 암석의 구성광물, 이방성 등에 영향을 받기 때문이다.

**주요어 :** 열전도도, 열확산율, 비열, 구성광물

## 1. 서 론

최근에 화석 연료의 사용에 따른 환경오염문제로 인해 친환경 에너지 및 재생 가능한 대체 에너지의 개발의 필요성이 강조되게 되었다. 선진국의 재생 에너지별 사용량을 보면 바이오매스와 대수력을 제외한 기타 재생에너지 사용량에서 지열에너지가 월등함이 보고되었다(European Renewable Energy Council, 2004).

그러나 우리나라의 경우 지열에너지는 다른 재생 에너지보다 일반인의 인식이 적고, 이에 대한 연구도 비교적 최근에 진행되고 있다. 이러한 지열에너지 자원의 효과적인 개발을 위해서는 지열류량(heat flow)이 높은 지역을 선정해야 한다. 지열류량 계산은 온도검층으로 얻어지는 지온경사와 시추공 암석의 열전도도 자료를 이용하여 산출되기 때문에 암석의 열전도도 측정과 그에 대한 특성분석은 지열류량을 결정하는데 중요한 요소가

\*Corresponding author: ymlee@kigam.re.kr

된다. 또한, 열전도도는 지구내부의 온도를 파악하는데 가장 중요한 요소이다(Herrin and Deming, 1996).

외국의 경우, Birch and Clark(1940)에 의해 암석 열전도도에 대한 연구가 시작되었으며, Williams and Anderson(1990)에 의해 시추공에서의 열물성과 열생산을 등에 관한 연구, Blackwell and Steele(1989)은 퇴적암의 열전도도 측정, Clauser and Huenges(1995)는 암석의 열물성 상관관계, Norden and Frster(2006)는 독일의 Northeast German Basin에서의 열전도도 측정 등 암석의 열전도도 측정과 열물성의 특성에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 반면, 우리나라는 국내 일부석재의 열전달 특성 연구(Song *et al.*, 1996)가 있었지만, 2000년에 들어서야 지열열펌프의 보급이 시작되었고(Song *et al.*, 2005), 이에 따라 국내 암석 열물성 측정의 중요성이 부각되었으며, Kim(2004)에 의해 217개의 암석 시료에 대해 box probe를 이용한 열전도도를 측정, Cha(2006) 등에 의해 토양의 공극율이 열전도도에 미치는 영향 등의 연구가 이루어지게 되었다.

암석의 열전도도는 한 지역의 열원을 알기 위하여 지온경사와 더불어 반드시 측정되어야 하는 물성이지만, 아직 국내에 존재하는 여러 암석에 대한 열전도도 및 열물성에 대한 고찰이 이루어지지 않고 있는 것이 현실이다.

따라서 본 연구에서는 우선 Fig. 1과 같이 경기, 강

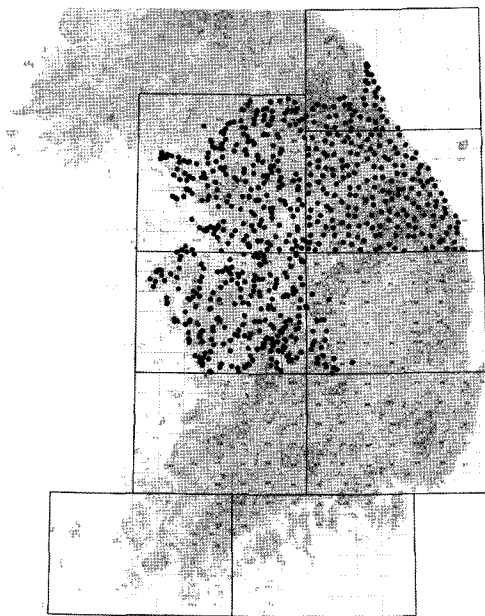


Fig. 1. Location map of rock samples.

원 및 충청지역의 총 712개의 암석 샘플에 대해 Parker *et al.*(1961)에 의해 제안된 flash method로 열물성을 측정하였다. 암석의 열전도도는 같은 암석일지라도 열전도도의 범위가 크기 때문에 특정 지역에서의 열전도도의 산출이 필요하다. 또한 열전도도 이외에 열전도도에 영향을 주는 공극율, 밀도, 열확산율, 비열을 측정하였으며, 열물성 상호간의 관련성을 고찰하였다.

## 2. 암석의 열물성 측정

암석은 퇴적된 환경, 변성 작용과 같이 특정 환경에 우세한 조건에서 3개의 기본 그룹인 화성암, 변성암, 퇴적암으로 나뉜다. 각각의 그룹에서 암석의 다양한 열물성(열전도도, 열확산율, 비열, 공극율)과 암석 열전도도의 통계학적 수치(평균, 표준편차)를 구하였다. 암석의 열전도도는 구성광물, 공극율, 암석의 미세구조와 기하학적인 면(이방성)등에 영향을 받으며, 추가로 압력과 온도에 영향을 받는다(Lee and Deming, 1998). 암석의 열전도도 측정방법은 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 나뉜다. 직접적인 방법은 암석 시료를 이용한 실험실에서의 측정이며, 간접적인 방법은 검층 등에 의해 검출된 물성으로부터 열물성을 간접적으로 계산하는 방법을 말한다. 최근에는 직접적인 방법이 높은 정확도를 갖기 때문에 거의 직접적인 방법을 이용하고 있다. 직접적으로 열물성을 측정하는 실험기기로는 divided bar, needle probe, half-space device,

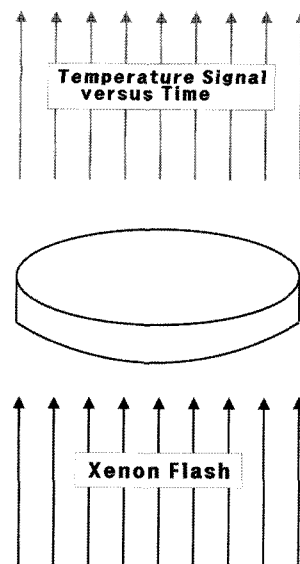


Fig. 2. Principle of fresh method(LFA 447).

QTM, flash method 등이 있다. 본 연구에서는 flash method를 사용하였다.

Fig. 1과 같이 총 712개의 암석시료를 채취하여 Parker *et al.*(1961)에 의해 제안된 flash method를 사용하는 Netzsch사의 LFA 447 NanoFlash를 이용하여 암석 열물성 값을 측정하였다. 이 방식은 작은 크

기의 시료(직경 1 inch, 두께 3-5 mm의 디스크)를 사용할 수 있으며 빠른 측정시간, 열확산율의 높은 정확도( $\pm 5\%$ )와 재현성( $\pm 3\%$ )등의 특징과 비접촉식으로 측정할 수 있는 장점이 있다. LFA 447 NanoFlash는 열확산율을 측정하며, 비열은 이미 값이 알려져 있는 표준시료(Pyroceram 9606)를 이용하여 LFA 447의 자체

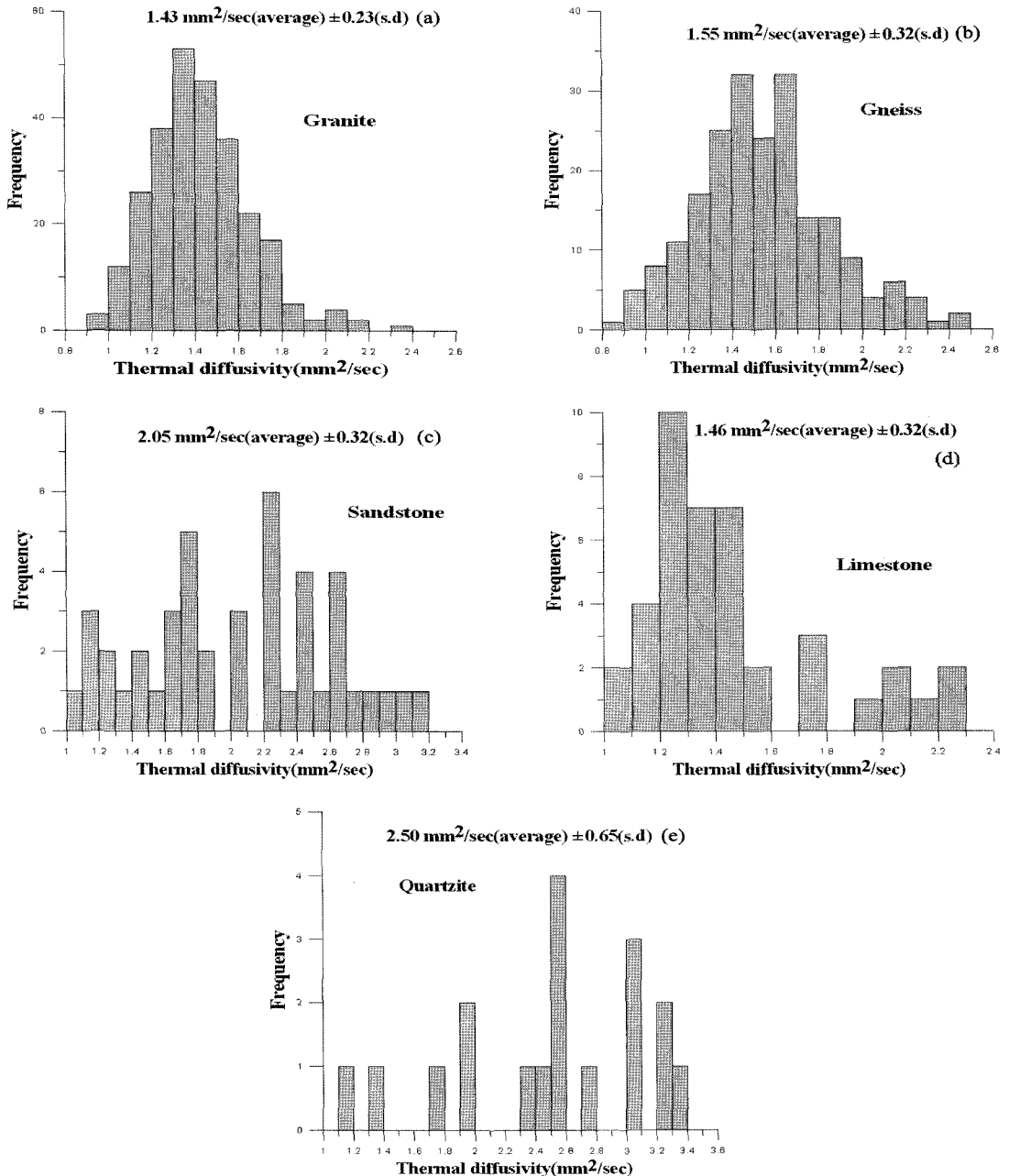


Fig. 3. Thermal diffusivities of granite(a), gneiss(b), sandstone(c), limestone(d), and quartzite(e) samples.

소프트웨어로 비교 분석하여 산출한다. 표준시료는 두께 3.017 mm, 직경 25.38 mm의 디스크 모양이며, 상온에서 밀도는 2.61 g/cm<sup>3</sup>, 열확산율은 1.926 mm<sup>2</sup>/sec, 열전도도는 4.008 W/m·K이다. 암석시료의 측정이전에 표준시료(Pyroceram 9606)를 이용하여 LFA 447의 정확성을 확인하였다. LFA 447의 기본원리는 Fig. 2에서 보듯이 시료의 한쪽 면에 laser를 투사하면 일정시간 후에 반대편에 열이 전달되며, 적외선 센서가 온도변화를 측정된 후 시간에 대한 함수로 열확산율을 계산한다.

### 2.1. 열확산율

본 연구에서 측정된 열확산율은 Fig. 3과 같다. 전체 암석 중에서 많은 개수를 차지하는 5개 암석을 도시하였다. 측정된 화강암의 시료는 268개로 평균 열확산율이 1.43 mm<sup>2</sup>/sec, 편마암이 212개로 1.55 mm<sup>2</sup>/sec, 사암이 44개로 2.05 mm<sup>2</sup>/sec, 석회암이 42개로 1.46 mm<sup>2</sup>/sec, 규암이 20개로 2.50 mm<sup>2</sup>/sec의 결과를 보여준다.

Fig. 4는 암석을 화성암, 변성암, 퇴적암으로 나누어 열확산율을 box-whisker plot으로 도시한 그림이다. Box-whisker plot은 이상값(그림에서 X 점)을 지시해주거나 데이터군 비교를 위한 유용한 방법이다(Swan and Sandilands, 1995).

각 암종별 평균 열확산율은 화성암이 1.42 mm<sup>2</sup>/sec, 변성암이 1.66 mm<sup>2</sup>/sec, 퇴적암이 1.75 mm<sup>2</sup>/sec이다. 퇴적암의 열확산율이 높게 나온 이유는 높은 열확산율을 갖는 사암(2.56 mm<sup>2</sup>/sec)의 비율이 높기 때문인 것

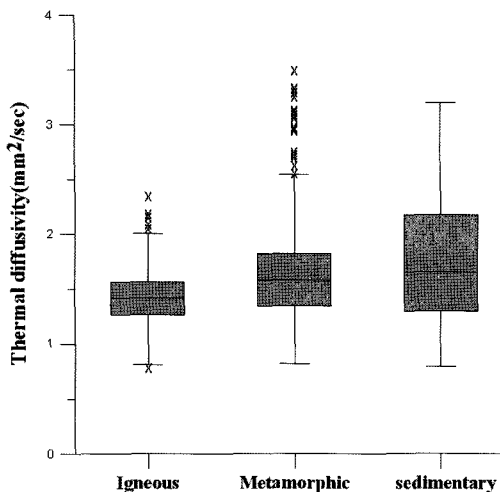


Fig. 4. Thermal diffusivities of igneous, metamorphic, and sedimentary rocks.

로 판단된다. 변성암의 경우 높은 열확산율을 갖는 규암(2.50 mm<sup>2</sup>/sec), 천매암(1.69 mm<sup>2</sup>/sec), 편암(1.77 mm<sup>2</sup>/sec)의 영향에 의한 것으로 판단된다.

### 2.2. 비열

비열은 1 Kg의 단위질량의 물질을 1°C 올리는데 필요한 에너지의 양으로 정의되며, 체적열용량을 구하는데 이용되는 변수 값이다. 체적열용량은 비열과 밀도의 곱으로 표현된다. 본 연구에서 측정된 각 암종별 평균 비열 값은 화성암이 0.916 J/gK, 변성암이 0.902 J/gK, 퇴적암이 0.921 J/gK로 나타났다(Fig. 5). 비열 값은 세 가지의 암종이 비슷한 평균값을 보이고 있다. 이는 외국의 경우 화성암이 0.75-1.22 J/gK, 변성암이 0.75-1.47 J/gK 0.82-1.47 J/gK로 큰 차이가 없다(Cermak and Rybach, 1982).

### 2.3. 밀도와 공극율

밀도와 공극율을 구하기 위하여 시료를 포화시켜 포화시료의 무게와 액상에서의 포화 시료 무게를 구하였고, 이를 다시 건조시의 무게를 확인하기 위하여 강제순환건조기에 103°C의 일정한 온도로 24시간 건조시켜 건조시료의 무게를 구하였다.

본 연구에서 712개의 암석 시료를 이용하여 측정된 결과, 화성암의 밀도는 2.48-2.91 g/cm<sup>3</sup>, 변성암은 2.52-3.16 g/cm<sup>3</sup>, 퇴적암은 2.52-2.98 g/cm<sup>3</sup>의 범위를 가지며, 평균은 각각 2.63 g/cm<sup>3</sup>, 2.71 g/cm<sup>3</sup>, 2.72 g/cm<sup>3</sup>이다. 외국의 경우 화강암의 밀도는 2.4-3.0 g/cm<sup>3</sup>,

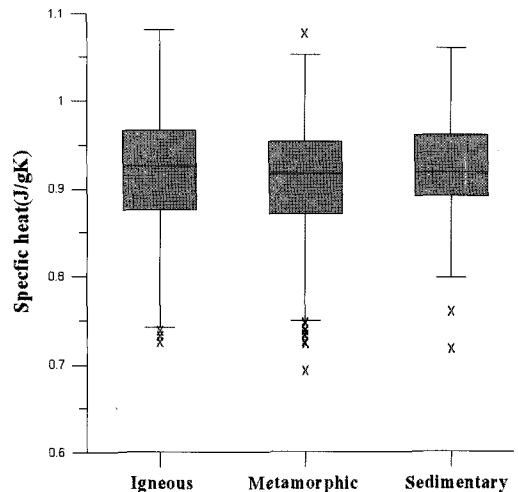


Fig. 5. Specific heat values of igneous, metamorphic, and sedimentary rocks.

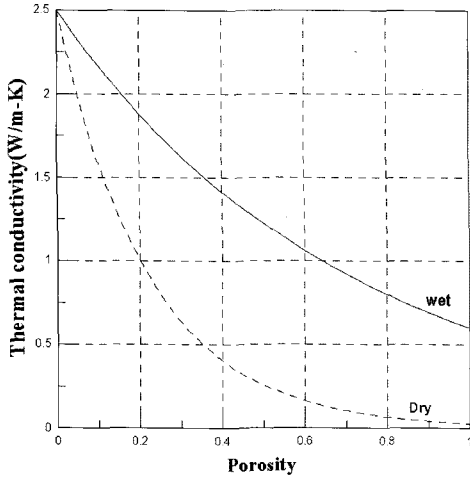


Fig. 6. Geometric mean model(Woodside and Messmer, 1961).

편마암은 2.4-2.7 g/cm<sup>3</sup>, 사암의 경우 2.2-2.7 g/cm<sup>3</sup>이며(VDI, 2000), 본 연구의 퇴적암은 신선한 암석으로써 높은 범위의 밀도 값을 갖는 암석으로 판단된다. 공극율은 화성암의 평균 공극율이 0.014, 변성암이 0.011, 퇴적암이 0.012이다.

2.4. 열전도도

열전도도는 열확산율, 비열, 밀도값을 구한다면 암석의 열전도도는 이들로부터 아래의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\lambda = \alpha \rho C_p \tag{1}$$

이때,  $\lambda$ 는 열전도도(W/m-K),  $\alpha$ 는 열확산율(mm<sup>2</sup>/sec),  $\rho$ 는 밀도(g/cm<sup>3</sup>),  $C_p$ 는 비열(specific heat, J/gK)이다.

열전도도는 건조상태와 포화상태에서 공극율이 증가할수록 열전도도의 변화양상이 크게 다르다(Fig. 6). 본 연구에서 이용한 실험은 건조시료를 대상으로 구한 값이기 때문에 공극율을 알면 다음과 같은 기하평균 식으로 포화 함수된 상태의 열전도도 값을 계산할 수 있다.

$$\lambda_{dry} = \lambda_{matrix}^{1-\phi} \lambda_{air}^{\phi} \tag{2}$$

$$\lambda_{matrix} = \left( \frac{\lambda_{dry}}{\lambda_{air}^{\phi}} \right)^{\frac{1}{1-\phi}} \tag{3}$$

$$\lambda_{in-situ} = \lambda_{matrix}^{1-\phi} \lambda_{water}^{\phi} \tag{4}$$

$\lambda_{in-situ}$ 는 포화 함수된 상태의 열전도도,  $\lambda_{dry}$ 는 측정

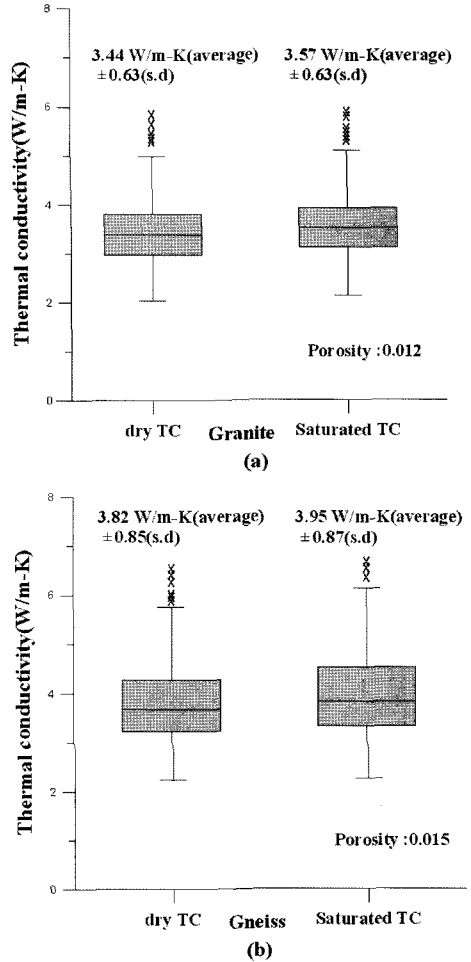


Fig. 7. Distributions of dry thermal conductivity(TC) and corrected TC of granite(a) and gneiss(b) samples.

된 열전도도,  $\lambda_{water}$ 는 물의 열전도도(상온에서 0.62 W/m-K),  $\lambda_{air}$ 는 공기의 열전도도(0.024 W/m-K),  $\lambda_{matrix}$ 는 암석 matrix의 열전도도이며,  $\phi$ 는 공극율이다.

Fig. 7은 화강암과 편마암의 각각의 건조상태의 열전도도와 공극 보정된 포화상태의 열전도도 값을 도시한 그림이다.

화강암의 공극 보정된 포화상태의 열전도도는 2.13-5.87 W/m-K의 범위를 가지며, 평균 열전도도는 3.57 W/m-K이다. 편마암의 공극 보정된 포화함수 상태의 열전도도 범위는 2.26-6.67 W/m-K이며, 평균 열전도도는 3.95 W/m-K이다. 화강암과 편마암의 열전도도 범위가 큰 이유는 열전도도가 구성광물, 이방성 등의 영향에 열전도도 값이 좌우되기 때문이다(Kim, 2004). 특히, 석영광물의 열전도도는 7.7 W/m-K(Beardsmore

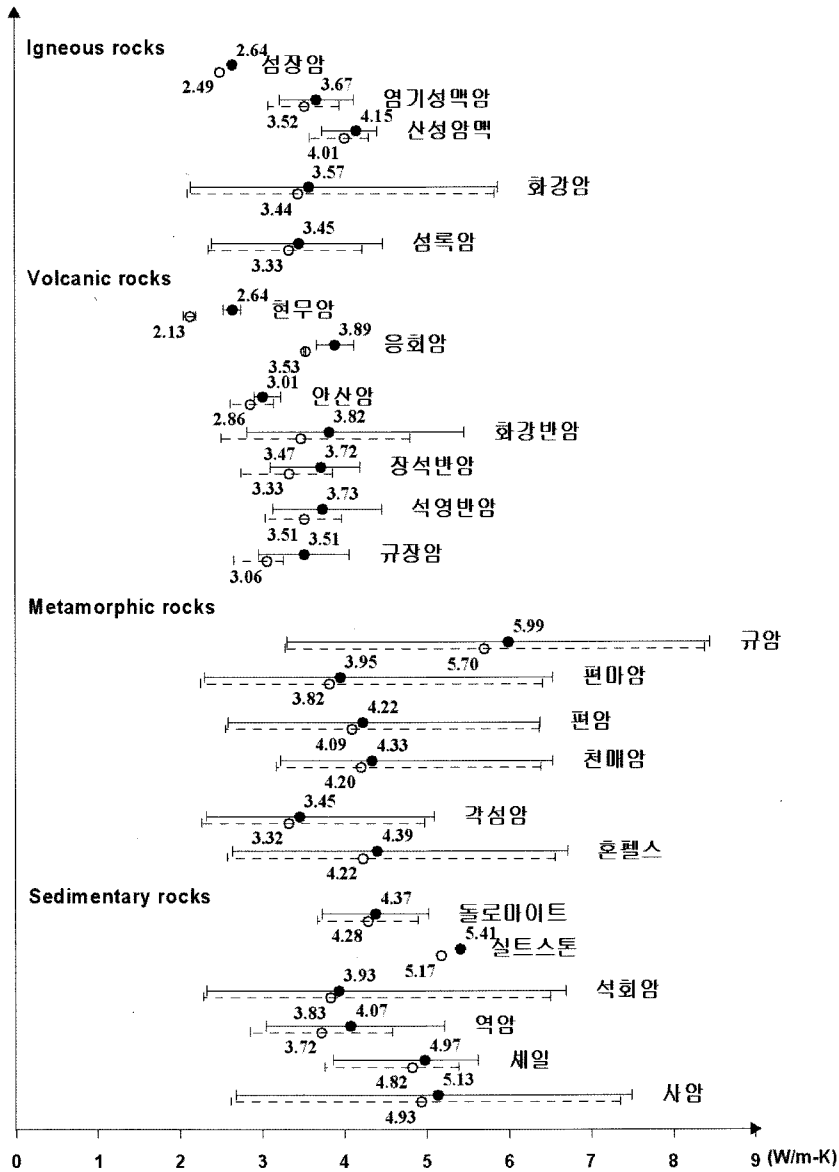


Fig. 8. Thermal conductivities of different rocks at room temperature.

and Cull, 2001)으로 석영광물의 함유량에 따라 열전도도값이 크게 달라질 수 있다.

Fig. 8은 본 연구에서 측정된 모든 암석별 열전도도를 나타내었다. 점선과 속이 빈 동그라미는 건조상태의 열전도도의 범위와 평균을 나타낸 것이며, 실선과 검은 동그라미는 측정된 공극율을 이용하여 기하평균식(식4)을 이용하여 포화함수로 계산된 열전도도의 범위와 평균을 나타낸 것이다. 퇴적암의 경우 열전도도값이 높은 이유는 측정된 퇴적암 시료 중에 열전도도

가 높게 나오는 사암(5.13 W/m-K) 및 석회암(3.93 W/m-K)의 비율이 높기 때문이다. 석회암의 경우 외국의 사례(2.55 W/m-K, Kappelmeyer and Haenel, 1974)에 비해 높은 편인데 본 연구에서 측정된 석회암중 일부가 돌로마이트화 되어가는 과정에 있는 암석일 것으로 판단된다. 화성암중 염기성 암맥(3.67 W/m-K)보다 더 많은 규산염광물을 포함하는 산성암맥(4.15 W/m-K)이 열전도도가 높게 나타난다.

변성암중 규암은 편마암, 편암, 천매암, 각섬암, 혼펠스

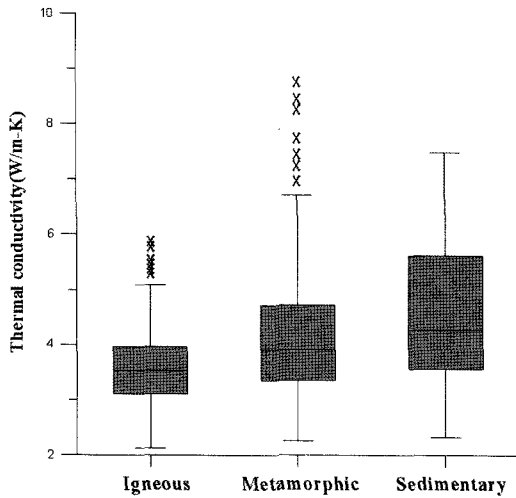


Fig. 9. Thermal conductivities of igneous, metamorphic, and sedimentary rocks.

스 보다 높은 석영함량을 갖고 있어 열전도도가 높은 경향을 보인다. 따라서 광물조성과 열물성과의 상관관계는 구성광물의 분석 후에 실시돼야 할 것으로 사료된다.

측정된 암석을 화성암, 변성암, 퇴적암의 3가지 암종 별로 분류하여 그 분포 및 평균을 구하였으며, 그 결과는 Fig. 9에 도시하였다. 화성암의 열전도도는 2.13-5.87 W/m-K의 범위를 가지며 평균 열전도도는 3.58 W/m-K이며, 변성암의 경우, 2.26-8.76 W/m-K의 범위를 가지며, 평균 열전도도는 4.16 W/m-K이며, 퇴적암의 경우, 2.32-7.49 W/m-K의 범위를 가지며, 평균 열전도도는 4.53 W/m-K이다.

본 연구에서 측정된 화강암의 열전도도와 공극율은 뚜렷한 상관관계는 보이지 않는다(Fig. 10(a)). 그 이유 중의 하나는 측정에 사용된 대부분의 화강암시료의 공극율이 0.02 내외로 상관관계의 적용에는 무리가 있다

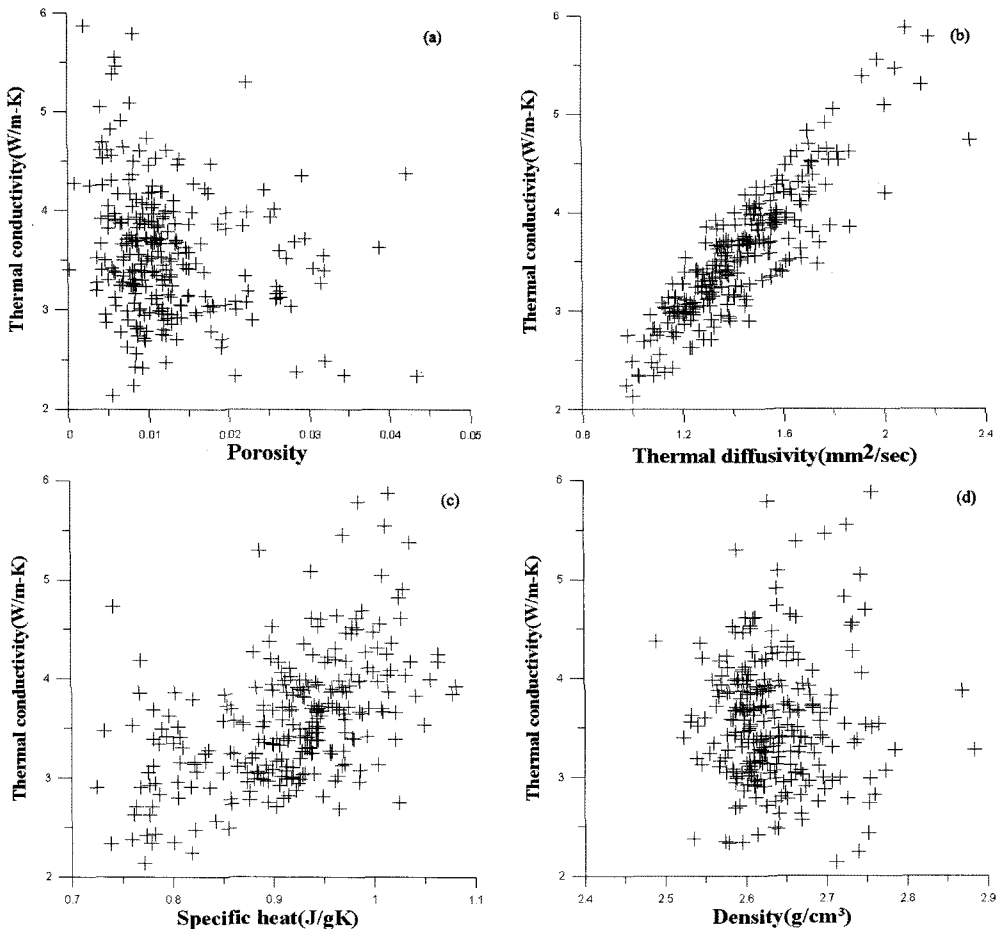


Fig. 10. Thermal conductivity vs. porosity(a), thermal diffusivity(b), specific heat(c), density(d) of granite.

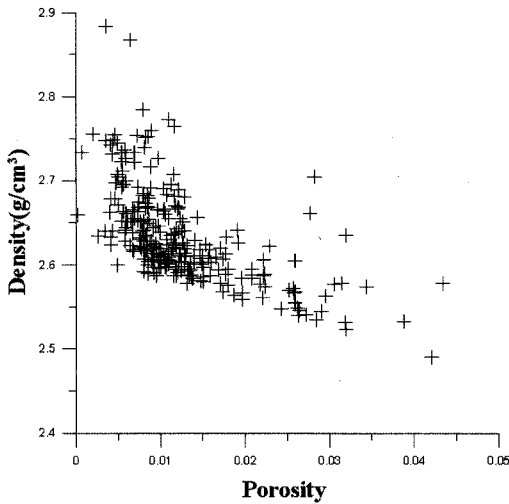


Fig. 11. Density vs. porosity of granite.

는 점이다. 퇴적암의 경우 일반적으로 공극율이 증가할수록 열전도도는 감소하는 경향을 보여야 하지만 (Clauser and Huenges, 1995), 본 연구에서 측정된 퇴적암의 경우도 암석의 공극율이 대부분 0.02 미만 (평균 0.012)이기 때문에 상관관계를 파악하기 힘들다. 그리고 측정된 화성암과 변성암의 경우 광물구성 성분이 열전도도에 미치는 영향이 공극율에 의한 영향보다 더 우세하다. 특히, 결정질 암석의 경우 석영광물(7.7 W/m-K)의 함량에 따라 암석의 열전도도 값이 다양하게 나타나기 때문에 공극율 0.02 내외의 결정질 암석에서 공극율과 열전도도의 상관관계를 도출하는 것은 어렵다고 판단된다. 열전도도와 열확산율은 Fig. 10(b)에서 선형의 상관관계를 보이나 비열과 밀도는 열전도도와는 명확한 상관관계를 보이지 않는다(Fig. 10(c), (d)).

측정된 화강암의 공극율과 밀도는 공극율이 증가할수록 밀도가 감소하는 경향을 보인다(Fig. 11).

### 3. 결 론

열전도도는 암석을 구성하는 광물성분에 따라 변화양상이 다르기 때문에 같은 암석일지라도 열전도도 값의 범위가 크다. 따라서 암석의 열전도도 값은 그 지역에서의 측정된 암석 열전도도 값을 적용시켜야 한다.

암석의 열전도도는 공극율, 비열, 밀도와는 뚜렷한 상관관계는 보이지 않는다. 이는 암석의 열전도도가 광물조성, 이방성, 구조 등에 주로 영향을 받기 때문으로 이에 대한 분석이 필요할 것으로 판단된다. 하지만 열

확산율과 열전도도는 선형의 상관관계를 보이며 공극율과 밀도는 공극율이 증가할수록 밀도는 감소하는 경향을 보인다.

암석의 열전도도 값은 지열유량을 계산하는데 이용되며, 천부 지중열을 이용한 지중열 교환기 설계에 중요한 입력변수로 사용될 수 있다.

### 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업(GP2007-002)과 에너지관리공단 중대형 과제(NP2005-024)의 연구비 지원에 의해 수행되었다. 특별히 암석 샘플 및 성형을 해주신 이병태 선생님과 암석 샘플에 참여해주신 박덕원 박사님, 심병완 박사님, 이창범 선생님, 이철우 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- Beardsmore, G. R. and Cull, J. P., (2001) *Crustal heat flow: A guide to measurement and modeling*, Cambridge Univ. Press, 324p.
- Birch, F. and Clark, H., (1940) The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition, *Am. J. Sci.*, v.238, no. 8, p. 529-558.
- Blackwell, D. D. and Steele, J. L., (1989) *Thermal conductivity of sedimentary Rocks: Measurement and significance*, p. 14-34.
- Cermak, V. and L. Rybach., (1982) Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks, in *Physical properties of rocks*, vol. 1-a, Landolt-Bornstein, edited by G. Angenheister, Springer-Verlag, New York p. 305-403.
- Cha, J., An, S., Koo, M.-H., Song, Y. and Kim, H. C. (2007) The effect of porosity and water content on thermal conductivity of soils, *Journal of KoSSGE.*, in review.
- Clauser, C. and Hueges, E. (1995) Rock physics & phase relations: A handbook of physical contents, in T. J. Ahrens, (ed.), AGU, p. 105-125.
- European Renewable Energy Council (2004) *Renewable energy scenario to 2040*, <http://www.erec-renewables.org/>.
- Herrin J, M. and Deming, D. (1996) Thermal conductivity of U.S. coals, *J. Geophys. Res.*, v. 101, no. B11, p. 25381-25386.
- Kappelmeyer, O. and Haenel, R. (1974) *Geothermics with special reference to application*, Gebrüder Borntraeger, 238p.
- Kim, H. C. (2004) *Interpretation of geothermal anomaly using heat flow and geological data in south Korea*, Ph. D, thesis, Chungnam Nat. Univ, 123p.
- Lee, Y. and Deming, D. (1998) Evaluation of thermal conductivity temperature corrections applied in terrestrial heat flow studies, *J. Geophys. Res.*, v. 103, no. B2, p.



- 2447-2454.
- Norden, B. and Frster, A. (2006) Thermal conductivity and radiogenic heat production of sedimentary and magmatic rocks in the Northeast German Basin, AAPG Bull., v. 90, no. 6, p. 939-962.
- Parker, W. J., Jenkins, R. J., Buter, C. P. and Abbott, G. L. (1961) Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity, J. Appl. Phys., v. 32, no. 9, p. 1679-1684.
- Song, M. Y., Kim, H. C. and Jun, U. S. (1996) The measurements of heat transfer on some rock specimens in Korea, Jour. Korean Earth Science Society, v. 17, no. 6, p. 458-464.
- Song, Y., Kim, H. C. and Lee, S.-K. (2006) Geothermal research and development in Korea, Econ. Environ. Geol., v. 39, no. 4, p. 485-494.
- Swan, A. R. H. and Sandilands, M. (1995) Introduction to geological data analysis, Blackwell Science Ltd, 446p.
- VDI. (2000) Thermal use of the underground; fundamentals, approvals, environmental aspects, 157p.
- Williams, C. F. and Anderson, R. N. (1990) Thermophysical properties of the Earth's crust: In situ measurements from continental and ocean drilling, J. Geophys. Res., v. 95, no. B6, p. 9209-9236.
- Woodside, W. H. and Messmer, J. H. (1961) Thermal conductivity of porous media: 2. Consolidated rocks, J. Appl. Phys., v. 32, p. 1699-1706.

---

2007년 8월 14일 원고접수, 2007년 12월 13일 게재승인.