

화강암 열물성에 관한 연구

김종찬^{1)*} · 이영민²⁾ · 구민호¹⁾

1. 서론

지열은 맨틀 상부에서부터 지표까지 전도에 의해 이동하는 지각내부의 열과 지각내부의 방사성 동위원소 붕괴에 의한 열 등으로 구성된다. 지각의 지열류량에 관한 연구는 지구의 생성 초기 역사(Schubert et al., 1980)와 해양 및 대륙지각의 운동(Morgan, 1982) 등을 이해하는데 크게 공헌 해 왔다. 최근 들어 지열이 중요한 재생에너지자원의 하나로 인식되면서 지열 열펌프를 이용한 냉난방 시스템의 보급이 폭발적으로 증가하고 있다. 따라서 지하 암반의 열물성에 관한 정량적인 정보는 시스템 설계의 주요변수로서 그 필요성이 증가되고 있다.

한편, 한반도 지질은 주로 화강암과 화강편마암으로 이루어져 있으므로 선진국에서 시험단계에 있는 enhanced geothermal system (EGS)부지와 고준위 방사성 폐기물 처리장 부지의 기반암이 화강암일 가능성성이 높다. 따라서 화강암의 열물성 연구는 다른 암종의 열물성 연구보다 중요하다고 할 수 있다. 이 연구에서는 우리나라 중생대 쥬라기 화강암에 대한 실험을 통하여 공극률, 밀도, 비열, 체적열용량 및 열확산율 등의 물성이 암석의 열전도도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

2. 연구방법

분석에 이용된 시료는 총 206개로, 한국지질자원연구원 내 중생대 쥬라기 백운모 화강암 57개, 행정중심복합도시 선정부지 내 중생대 쥬라기 반상 화강암 149개이다.

시추코어는 두께 3.0 mm, 지름 1 inch인 동전 모양의 시료로 성형된 후, 부피, 포화밀도, 건조밀도 및 공극률 등의 물성을 측정하기 위해 진공상태에서의 포화과정과 103°C에서의 건조과정을 각각 24시간씩 거치게 된다.

시료의 열전도도 측정은 독일 Netzsch사의 LFA-447를 이용하여 수행하였다. LFA-447은 암석시료의 한쪽에서 xenon-flash lamp를 통해 열을 가한 후에 반대편에 전달되는 온도를 측정하여 열확산율을 구하는 장비이다. 비열은 이미 알고 있는 표준시료를 이용하여 측정하려는 시료의 실제 온도 상승과 비교분석하여 간접적으로 산출하며 다음 관계식을 이용하면 최종적으로 열전도도를 구할 수 있다.

$$\lambda = \alpha \rho Cp$$

여기서, λ 는 열전도도(W/mK)이고, α 는 열확산율(m²/sec), ρ 는 밀도(Kg/m³), Cp 는 비열 (J/KgK)이다.

주요어 : 화강암, 열물성, 열전도도, 열확산율, 공극률, 밀도

1) 공주대학교 지질과학과 (geotherm01@hanmail.net, koo@kongju.ac.kr)

2) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부 (ymlee@kigam.re.kr)

3. 연구결과

이 실험은 총 206개의 반상화강암과 백운모 화강암을 이용하였으며 실내 실험을 통하여 각 시료의 물성(공극률, 밀도)과 열물성(비열, 체적열용량, 열확산율, 열전도도)을 측정하였다. Table 1은 총 206개 시료의 측정값을 평균한 암석의 물성과 열물성 수치를 보여준다.

Table 1. Results of physical and thermal properties of 206 granite samples.

Porosity (%)	Dry density (g/cm ³)	Sat. density (g/cm ³)	C_p^* (J/gK)	Vol. heat capacity (J/cm ³ K)	α^{**} ($10^{-6} \text{m}^2/\text{sec}$)	λ^{***} (dry) (W/mK)	λ^{***} (in-situ) (W/mK)
1.044	2.662	2.673	0.816	3.450	1.296	2.813	2.900

* Specific heat, ** Thermal diffusivity, *** Thermal conductivity

3.1 열전도도

Fig. 1은 전체 시료(206개)에 대한 열전도도 분포를 히스토그램으로 도시한 것이다. Fig. 1a는 건조시료를 통하여 얻은 열전도도 값으로 1.962~3.867 W/mK의 분포를 보이며 평균과 표준편차는 각각 2.813 W/mK, 0.335 W/mK로 나타났다. Fig. 1b는 건조시료의 열전도도와 공극률을 이용하여 원위치(in-situ) 상태의 열전도도로 보정하여 도시하였다.

자연 상태에서 지각내부의 암석은 일반적으로 지하수면 아래에 분포하므로 암석의 공극은 물로 포화되어 있음을 고려해야 한다.

원위치 상태의 열전도도는 기하평균 모델을 통하여 계산된다(Beardsmore and Cull, 2001). 실내 실험에 의해 산출된 건조시료의 열전도도는 시료의 공극 내에 공기가 채워진 상태에서 측정된다.

$$K_{mat+air} = K_{mat}^{1-\phi} K_{air}^{\phi} \quad (1)$$

식 (1)로부터 시료 기질만의 열전도도 값을 계산 할 수 있다.

$$K_{mat} = \left(\frac{K_{mat+air}}{K_{air}^{\phi}} \right)^{\frac{1}{1-\phi}} \quad (2)$$

식 (2)와 (3)을 통하여 원위치 상태의 열전도도 값을 계산 할 수 있다.

$$K_{in-situ} = K_{mat}^{1-\phi} K_{water}^{\phi} \quad (3)$$

여기서 ϕ 는 공극률, K_{mat} 는 기질의 열전도도, K_{air} 는 공기의 열전도도(0.0263 W/mK), K_{water} 는 물의 열전도도(0.613 W/mK), $K_{in-situ}$ 는 원위치 상태의 열전도도를 나타낸다.

3.2 열확산율

10개의 시료는 온도상승에 따른 열확산율의 변화를 확인하기 위해 25°C에서 200°C 까지 온도를 25°C 간격으로 상승시키면서 열확산율을 측정하였다. Fig. 2a는 전체시료에 대한 상온에서의 열확산율을 도시한 것으로 0.932×10^{-6} ~ 1.787×10^{-6} m²/sec 의 분포를 보이며, 평균과 표준편차는 각각 1.296×10^{-6} m²/sec, 0.154×10^{-6} m²/sec 로 나타났다. Fig. 2b는 온도에 따른 열확산율의 변화를 도시한 것으로 온도가 증가함에 따라 열확산율이 감소하는 반비례관계를 보인다. 200°C에서는 25°C에 비해 약 26% 정도 열확산율이 감소하였다.

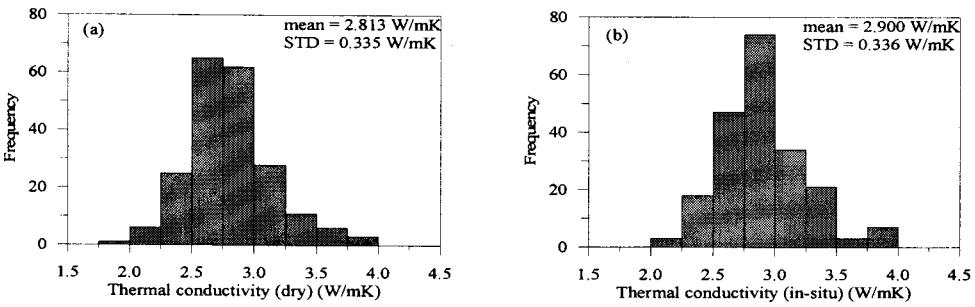


Fig. 1. Histogram of the thermal conductivity: (a) dry condition, (b) in-situ condition.

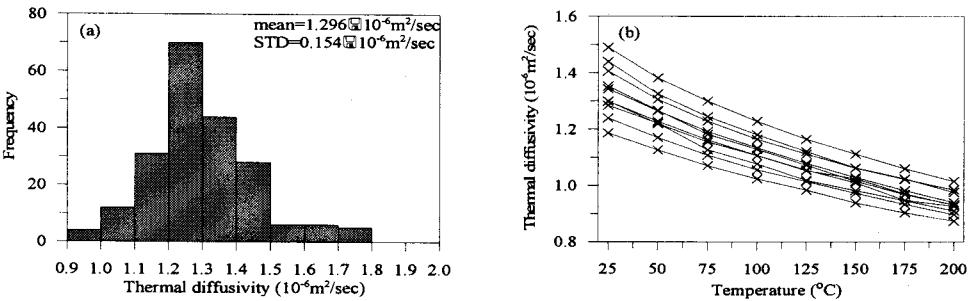


Fig. 2. (a) Histogram of thermal diffusivity and (b) plots of the thermal diffusivity with increasing temperature.

3.3 공극률과 밀도

결정질암의 공극률은 0~5% 정도의 범위를 갖는 것으로 알려져 있다. Fig. 3a는 전체시료에 대한 공극률을 도시한 것으로 0.215~4.075%의 분포를 보이며, 평균과 표준편차는 각각 1.044%, 0.503%로 나타났다.

Fig. 3b는 전체시료에 대한 습식 밀도를 도시한 것으로 2.547~2.771 g/cm³의 분포를 보이며, 평균과 표준편차는 각각 2.673 g/cm³, 0.032 g/cm³로 나타났다. 자연 상태에서 화강암의 밀도는 2.50~2.76 g/cm³의 범위를 갖는다.

3.4 상관관계 분석

Fig. 4는 열전도도와 공극률, 체적비율, 열확산율간의 상관관계를 보여주고 있다. Fig. 4a는 공극률이 커질수록 열전도도 값이 낮아지는 경향을 확인 할 수 있다. 이는 공극률이 클수록 암석의 공극에 광물보다 열전도도가 낮은 공기나 물이 채워져 있기 때문이다. Fig. 4b는 열확산율과 열전도도의 상관관계를 나타내고 있으며 두 물성의 비례관계를 잘 보여주고 있다. 상관계수는 0.898로 나타났다. Fig. 4c는 열전도도와 체적열용량과의 상관관계를 나타내고 있으며 역시 비례관계를 잘 보여주고 있다. 상관계수는 0.920으로 나타났다.

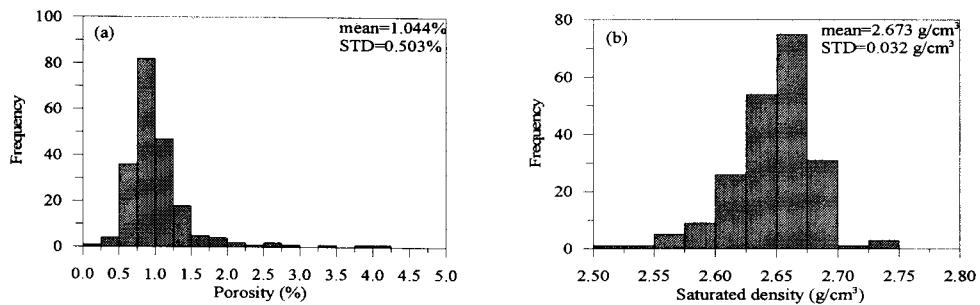


Fig. 3. Histogram of the (a) porosity and (b) saturated density.

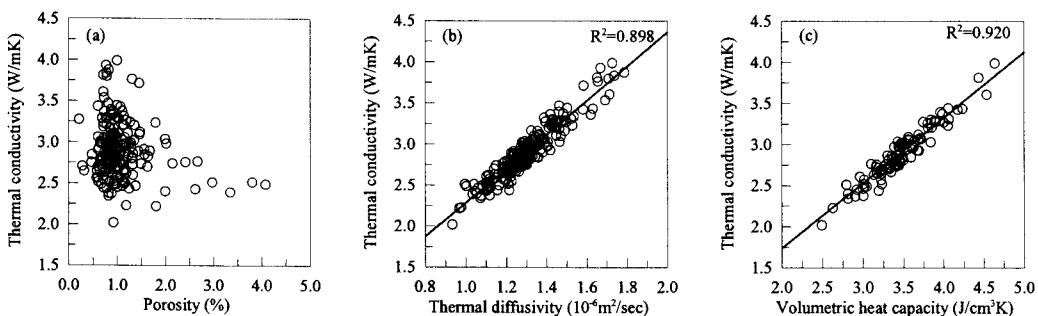


Fig. 4. Correlation of (a) thermal conductivity vs. porosity, (b) thermal conductivity vs. thermal diffusivity and (c) thermal conductivity vs. volumetric heat capacity.

4. 결론

이 실험은 대전과 충남 연기지역 중생대 쥐라기 화강암(206개)의 물성과 열물성을 측정하였다. 공극률, 습식밀도, 비열, 체적열용량, 열확산율, 기질의 열전도도 및 원위치 열전도도의 평균은 각각 1.044%, 2.673 g/cm^3 , 0.816 J/gK , 3.450 $\text{J}/\text{cm}^3\text{K}$, $1.296 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$, 2.813 W/mK , 2.900 W/mK 으로 산출되었다.

열확산율은 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 200°C에서는 25°C에 비해 약 26% 정도의 열확산율이 감소하였다. 상관관계분석에서 체적열용량과 열확산율이 증가함에 따라 열전도도는 커지는 경향을 보였으며, 공극률이 증가함에 따라 열전도도는 작아지는 경향을 보였다.

앞으로의 과제는 광물 조성비에 따른 암석의 열전도도 변화에 대한 연구가 진행되어야 하겠다.

참고문헌

- Beardmore, G. R., and Cull, J. P., 2001, *Crustal Heat Flow*, Cambridge, 324pp.
- Morgan, P., 1982, *Heat flow in rift zones*, in *Continental and Oceanic Rifts*, Geodyn. Ser., vol. 8, edited by G. Palmason, p107-122.
- Schubert, G., Stevenson, D., and Cassen, P., 1980, Whole planet cooling and the radiogenic heat source content of the Earth and Moon, *Rev. Geophys.*, **18**, 269-311.