

경기도, 강원도, 충청도 일대의 암석 열물성 특성 연구

박정민^{1)*} · 김형찬²⁾ · 이영민²⁾ · 송무영³⁾

1. 서론

최근에 화석 연료의 사용에 따른 환경오염문제로 인해 친환경 에너지 및 재생 가능한 대체 에너지의 개발의 필요성을 강조하게 되었다. 선진국의 재생 에너지별 사용량을 보면 바이오매스와 대수력을 제외한 기타 재생에너지 사용량에서 지열에너지가 월등히 사용함이 보고되었다(European Renewable Energy Council, 2004). 그러나 우리나라의 경우 지열에너지는 다른 재생 에너지보다 일반인에 대한 인식이 적고, 이에 대한 연구도 최근에 진행되었다.

이러한 지열에너지 자원의 효과적인 개발을 위해서는 지열류량(heat flow)이 높은 지역을 선정해야 한다. 지열류량 계산은 온도검층의 지온경사와 시추공 암석의 열전도도 자료를 이용하기 때문에 암석의 열전도도 측정과 특성분석은 지열류량을 결정하는데 중요한 요소가 된다. Blackwell and Steele(1989)은 퇴적암의 열전도도 측정, Ahrens(1995)는 암석의 열물성 상관관계, Norden and Förster(2006)는 독일의 Northeast German Basin에서의 열전도도 측정 등 암석의 열전도도 측정과 열물성의 특성에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 우리나라의 경우, 김형찬(2004)은 217개의 암석 샘플에 대해 box probe 법을 이용하여 열전도도를 측정하기도 하였다.

본 연구에서는 그림 1과 같이 경기, 강원 및 충청지역의 총 712개의 암석 샘플에 대해 Parker(1961) 등에 의해 적용된 flash method 방법으로 열전도도를 측정하였다. 암석의 열물성 측정은 열전도도 이외에 열전도도 특성이 영향을 주는 공극률, 밀도, 열확산률, 비열, 체적열용량을 측정하였으며 열물성 상호간의 관련성을 고찰하였다.

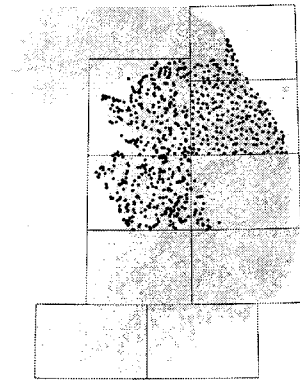


그림 1. 암석 샘플 위치도.

2. 본론

본 연구에서 암석을 퇴적암, 화성암, 심성암, 변성암으로 분류하여 각각의 그룹에서의 암석에서의 다양한 열물성 값(열전도도, 열확산률, 비열, 공극률)과 암석 열전도도의 통계학적 수치(평균, 표준편차)를 구하였다. 이 중 암석의 열전도도는 한 지역의 열원을 알기 위하여 지온경사와 더불어 반드시 측정되어야 하는 물성값이다(Beardsmore and Cull, 2001).

암석의 열전도도는 구성광물, 공극률, 암석의 미세구조와 기하학적인 면(이방성)등에 영향을 받으며, 추가로 압력과 온도에 영향을 받는다(Schön, 1996). 암석의 열전도도 측정은 최근에는 직접적인 방법인 실험에 의한 측정으로 산출한다. 실험에 의한 암석의 열전도도 측정 방법으로 divided bar, needle probe, QTM 등이 있지만, 현재 우리나라에는 측정기기가 없거나 상당한 측정시간을 필요로 하기 때문에 본 연구에서는 flash method 방식의 LFA 447 NanoFlash를

주요어 : 지열, 열전도도, 열확산률, 공극률, geometric mean model

1) 충남대학교 지질학과 (min2000u@naver.com)

2) 한국지질자원연구원 지열자원연구실 (khc@kigam.re.kr, ymlee@kigam.re.kr)

3) 충남대학교 지질학과 (mysong@cnu.ac.kr)

사용하여 총 712개의 암석시료를 측정하였다. 이 방식은 작은 크기의 시료를 사용할 수 있으며 빠른 측정시간, 높은 정확도(열확산률±5%)와 재현성(±3%)등의 특징과 비접촉식 측정의 장점이 있다. 암석시료는 두께 3 mm, 직경 25 mm 내외의 디스크 모양으로 성형을 하며 포화 함수와 일반조건을 거쳐 공극률과 밀도(bulk density)를 구하였으며, flash method방식으로 열확산률을 측정하였다. flash method의 기본원리는 시료의 한쪽 면에 laser를 투사하면 일정시간 후에 반대편에 열이 전달되며, 적외선 센서가 온도변화를 측정한 후 시간에 대한 함수로 열확산정도를 계산한다. 열확산정도는 열확산계수로 표시되며 시료의 반대편으로 열이 완전히 전달될 때까지의 시간의 1/2이 되는 시간에 대한 두께의 제곱으로 정의된다(Parker et al., 1961). 비열은 이미 알려져 있는 표준시료(Pyroceram9606)을 이용하여 산출한다. 그리고 암석시료의 열전도도는 식(1)을 이용하여 계산된다.

$$\lambda = \alpha \rho C_p \quad (1)$$

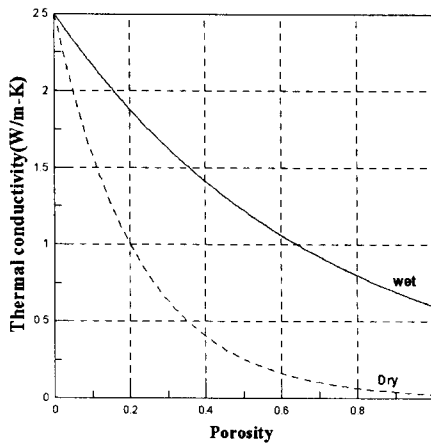


그림2. Geometric mean model을 이용한 포화시료와 건조시료의 열전도도(Woodside and Messmer, 1961).

열전도도(λ)는 W/m-K, 열확산률 α 는 mm²/sec, ρ 는 밀도(g/cm³), C_p 는 비열(specific heat, J/gK)이다.

본 연구에서 LFA 447을 이용하여 획득한 열전도도 값은 건조시료를 대상으로 구한 값이다. 열전도도는 건조상태와 포화상태에 따라 공극률이 증가할수록 열전도도의 변화양상이 크게 다르다(그림2). 이에 따른 보정으로 Geometric mean model(Woodside and Messmer, 1961) 식(2)를 이용하여 공극보정을 할 수 있다. 물의 열전도도는 상온에서 0.62 W/m-K, 공기의 경우 0.024 W/m-K임을 알고 있으므로 공극률을 측정하면 포화 함수된 상태의 열전도도 값을 계산할 수 있다.

$$K_{in-situ} = K_{water}^{\phi} K_{matrix}^{1-\phi} \quad (2)$$

$K_{in-situ}$ 는 포화 함수된 상태의 열전도도, K_{water} 는 물의 열전도도, K_{matrix} 는 암석 matrix의 열전도도이며, ϕ 는 공극률이다.

3. 결론

암석시료를 화성암, 변성암, 퇴적암, 화산암으로 분류하였으며 화성암의 열전도도 평균은 3.56 W/m-K, 변성암은 4.16 W/m-K, 퇴적암은 4.53 W/m-K, 화산암은 3.64 W/m-K이다(표1).

표1. 암종에 따른 열물성 평균.

암종	밀도 (g/cm ³)	공극률 (%)	열확산률 (mm ² /sec)	비열 (J/gK)	열전도도 (W/m-K)	암석시료 개수	표준편차
화성암	2.65	1.23	1.422	0.917	3.56	286	0.64
변성암	2.72	1.09	1.66	0.902	4.16	300	1.13
퇴적암	2.73	1.23	1.753	0.921	4.53	100	1.30
화산암	2.60	3.14	1.431	0.907	3.64	26	0.63

퇴적암의 평균 열전도도 값이 높은 이유는 측정된 퇴적암 중 열전도도가 높게 나오는 사암(5.13 W/m-K)과 석회암(3.93 W/m-K)의 비율이 높기 때문이다. 석회암의 열전도도는 외국의 사례(2.55 W/m-K, Kappelmeyer and Haenel, 1974)에 비해 높은 편인데 본 연구에서 측정된 석회암이 돌로마이트화 되어가는 과정에 있는 암석일 것으로 판단된다. 돌로마이트의 경우 열전도도가 퇴적암 중에서 높은 편에 속하며 본 연구에서 측정된 돌로마이트의 열전도도는 4.37 W/m-K이다. 화성암중 산성암맥(4.15 W/m-K)이 염기성 암맥(3.67 W/m-K)보다 열전도도가 높다. 특히, 우리나라의 경우 화강암과 편마암이 주를 이루고 있는데 이에 대한 열물성 값을 보면 화강암의 암석시료의 열전도도는 2.13-5.87 W/m-K의 범위를 갖으며, 평균 열전도도는 3.57 W/m-K, 평균 열확산은 1.426 mm²/sec, 평균 밀도는 2.645 g/cm³이다. 편마암의 열전도도는 2.26-6.67 W/m-K의 범위를 갖으며, 평균 열전도도는 3.945 W/m-K, 평균 열확산률은 1.553 mm²/sec, 평균 밀도는 2.712 g/cm³이다. 같은 암석의 열전도도의 범위가 큰 이유는 같은 암석이라도 구성광물의 비율에 따라 열전도도가 큰 영향을 받기 때문이다. 예를 들면, 석영(~7.7 W/m-K)을 많이 함유한 암석은 높은 열전도도를 보이는데, 측정된 규암의 경우 5.99 W/m-K이며, 측정된 석영편암의 경우 6.41 W/m-K이다. 우리나라의 경우 석영은 조암광물로써 약 12%를 차지하며 따라서 석영을 많이 함유한 결정질 암석이 높은 열전도도를 가지는 경향을 보인다. 이와 같이 구성광물에 따라 같은 암석의 경우에도 열전도도 값이 달라지기 때문에 광물성분에 따른 분석이 필요하다고 판단된다. 그리고 그 외 측정된 암석의 열전도도는 편암은 4.22 W/m-K, 섬록암은 3.45 W/m-K, 장석반암은 3.71 W/m-K 등이다.

공극률에 따른 열전도도값은 같은 암석에 한하여 대체적으로 공극률이 커질수록 열전도도값은 감소하는 경향을 보이며, 열전도도와 체적열용량은 비례하는 상관관계를 보여준다. 밀도와 열전도도는 정확한 관계를 보이지 않는다. 암석의 열전도도 값은 지열류량을 계산하는데 이용되며, 천부 지중열을 이용한 지중열 교환기 설계에 중요한 입력변수로 사용될 수 있다.

참고문헌

- 김형찬, 2004, 남한의 지열류량과 지질자료를 이용한 지열 이상대 해석, 박사학위논문, 충남대학교, p. 123.
- Ahrens, T. J., 1995, *Rock physics & Phase relations-A Handbook of Physical Contents*, p. 105-125.
- Beadsmore, G. R., and Cull, J. P., 2001, *Crustal heat flow-A guide to measurement and modeling*, Cambridge Univ. Press, p.324.
- Blackwell D. D., and Steele, J. L., 1989, *Thermal conductivity of Sedimentary Rocks: Measurement and Significance*, p. 14-34.
- European Renewable Energy Council, 2004, Renewable energy scenario to 2040, <http://www.erec-renewables.org/>.
- Kappelmeyer, O. and Haenel, R., 1974, *Geothermics with special reference to application*, Gebrüder Borntraeger, p. 238.
- Norden, B., and Förster, A., 2006, Thermal conductivity and radiogenic heat production of sedimentary and magmatic rocks in the Northeast German Basin, *AAPG Bulletin*, 90, 939-962.
- Parker, W. J., Jenkins, R. J., Buter, C. P., Abbott, G. L., 1961, Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal conductivity, *Journal of applied physics*, 32, 1679-1684.

- Schön, J. H., 1996, *Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics*, in K. Helbig and S. Teitel, eds., *Handbook of geophysical exploration: Section 1. Seismic exploration*: Oxford, United Kingdom, Pergamon, v. 18, p. 583.
- Woodside, W. H., and Messmer, J. H., 1961, Thermal conductivity of porous media. 2. Consolidated rocks, *J. Appl. Phys.*, **32**, 1699-1706.