

지중 열교환기 설계를 위한 화강암의 열물성 연구

김 종찬¹⁾, 이 영민²⁾, 구 민호¹⁾

Thermal Properties of Granite for Installation of Underground Heat Exchanger

Jongchan Kim, Youngmin Lee, Min-ho Koo

Key words : Granite(화강암), Thermal property(열적특성), Thermal conductivity(열전도도), Underground heat exchanger(지중 열교환기), Heat extraction rate(열추출율)

Abstract : Thermal conductivities (TC) of 57 Jurassic muscovitic granite samples (KIGAM) and 149 porphyritic granite samples (Yeonki: BE-2, BE-3) were measured with LFA-447. Ranges of TC values are 2.429~3.878 W/mK (KIGAM), 2.220~3.767 W/mK (Yeonki, BE-2) and 2.019~3.990 W/mK (Yeonki, BE-3); arithmetic means are 2.924 W/mK (KIGAM), 2.907 W/mK (Yeonki, BE-2), and 2.881 W/mK (Yeonki, BE-3), respectively. In this study, harmonic mean values were calculated to estimate the average value of TC. Harmonic mean values are 2.883 W/mK (KIGAM), 2.886 W/mK (Yeonki, BE-2), and 2.866 W/mK (Yeonki, BE-3), respectively. Heat extraction rates of a borehole heat exchanger strongly depend on TC values. Heat extraction rates from TC values are expected to be a little lower than 84 W/m in all sites. However, considering ground water flow, it is expected that actual heat extraction rate would be higher than the expected value.

Nomenclature

λ : Thermal conductivity, W/mK
 Q : Heat extraction rate, W/m

subscript

TC : thermal conductivity
TRT : thermal response test

1. 서 론

지열에너지는 친환경청정에너지로써 지구온난화의 주범인 온실가스 배출과 화석연료의 사용을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 때문에 지열을 이용한 냉난방 시스템과 지열 발전 등의 활용이 전 세계적으로 증가하는 추세에 있다. 우리나라 또한 최근에 지열에 대한 정부의 관심으로 많은 투자와 연구가 진행 중에 있다¹⁾.

지열에너지의 활용은 다른 신재생에너지에

비해 가동효율이 높다는 장점이 있지만 초기투자 비용이 많이 드는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서는 설계부지 내 지반을 구성하고 있는 암석의 열적특성 정보를 미리 확보하여야 한다. 하지만 현재 지중열교환기 설계 시 사용되고 있는 암석의 열적특성 정보는 일부 대표 암종의 자료를 이용하고 있는 실정이다²⁾. 암석의 열적특성(혹은 암석의 열물성)이란 암석의 열전도도, 열확산율, 비열 및 체적열용량 등을 의미한다. 이 중에서 암석의 열전도도 자료는 지중열교환기 설계 시 열추출율을 결정하는 중요한 설계 변수로 사용된다. 또한 암석의 열전도도 자료는 장기적으로 운용될 지중 열교환기 시스템의 지중 열

-
- 1) 공주대학교
E-mail : geotherm01@hanmail.net
Tel : (011)9410-3222 Fax : (042)868-3358
E-mail : koo@kongju.ac.kr
Tel : (041)850-8515 Fax : (041)850-8953
 - 2) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : ymlee@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3069 Fax : (042)868-3358

거동 모델링에서 중요한 입력변수로 사용되며, 열전도도와 지온구배의 함수인 지열류량과 지중 열교환기 설계 시 중요 변수인 열추출율(Q) 등을 산출하는데 사용되어진다.

암석의 열전도도를 측정하는 방법에는 실내 실험과 원위치 실험(예, TRT) 이 있다. 실내 실험은 설계부지 내 시추조사에서 얻어진 시추코어를 성형하여 상온에서 Divided bar, Laser flash 및 Needle probe 등의 장비를 이용하여 암석의 열전도도를 측정하는 방법이다. 원위치 실험은 시추공 내에 설치되어 있는 U-tube 내에 열원을 공급하고 일정시간이 흐른 뒤 입,출구의 온도차를 측정하여 원위치 상태의 유효 열전도도를 측정하는 방법이다.

이 연구에서는 대전과 연기군 지역의 중생대 쥐라기 화강암에 대한 실내 실험을 통하여 암석의 열전도도 값을 정량적으로 분석하였으며, 암석의 열전도도와 열확산율 및 공극률 간의 상관관계분석을 수행하였다. 마지막으로 지중열교환기 설계 시 중요 변수인 지반의 열추출율을 실내 실험을 통한 암석의 열전도도 자료로부터 산정하였다.

2. 본 론

2.1 연구 방법

분석에 사용된 시료는 총 206개로, 한국지질자원연구원(KIGAM) 내 중생대 쥐라기 백운모 화강암 57개, 행정중심복합도시 선정부지 내 중생대 쥐라기 반상 화강암 149개(BE-2호공, 62개; BE-3호공, 87개)이다. 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-447을 이용하여 수행하였다. LFA-447은 암석 시료의 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 관계식 (1)을 이용하면 최종적으로 열전도도를 구할 수 있다.

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

여기서, λ 는 열전도도(W/mK)이고, α 는 열확산율(m^2/sec), ρ 는 밀도(kg/m^3), C_p 는 비열(J/kgK)이다.

2.2 연구 결과 및 고찰

이 실험은 총 206개의 백운모 화강암과 반상 화강암을 사용하였으며, 실내 실험을 통하여 각 시료의 열전도도, 물성 및 열물성을 측정하였다.

Fig. 1은 한국지질자원연구원내 57개 백운모 화강암의 공극 보정된 열전도도 분포를 히스토그램으로 도시한 것이다. 열전도도 값은 2.429~3.878 W/mK의 범위를 보이며, 평균은 2.924 W/mK으로 나타났다. Fig. 2의 그래프는 행정중심복합도시 선정 부지 내 BE-2호공에서 채취하여 성형한 62개의 반상화강암과 BE-3호공에서 채취하여 성형한 87개의 반상화강암의 공극 보정된 열전도도 분포를 히스토그램으로 도시한 것이다. 열전도도 값은 각각 2.220~3.767 W/mK(BE-2)와 2.019~3.990 W/mK(BE-3)의 범위를 보이며, 평균은 각각 2.907 W/mK(BE-2)와 2.881 W/mK(BE-3)으로 나타났다. 이처럼 같은 암종임에도 불구하고 열전도도의 범위가 크게 나타나는 것은 일반적인 현상으로 암석의 열전도도가 구성광물, 구조 및 공극률에 의해 영향을 받기 때문이다³⁾.

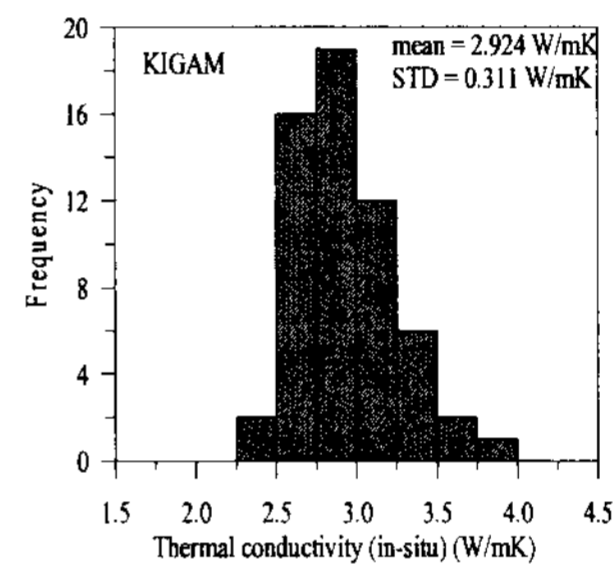


Fig. 1. Histogram of the corrected thermal conductivity of granite (KIGAM).

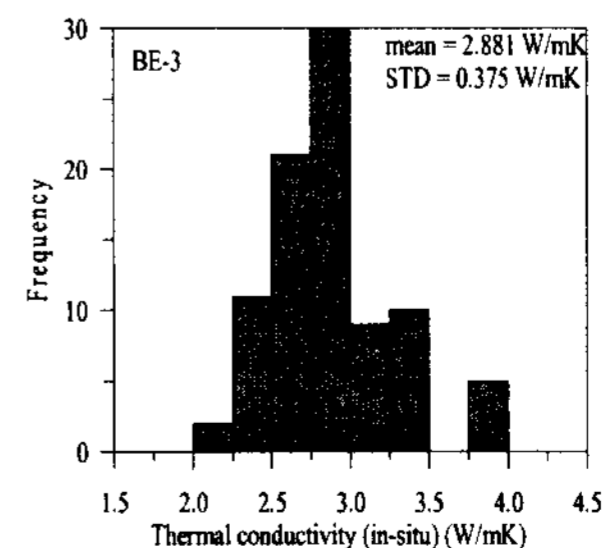
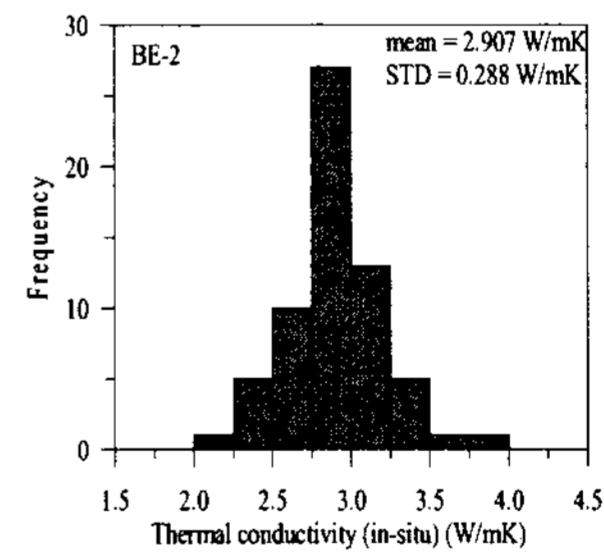


Fig. 2. Histogram of the corrected thermal conductivity of granite (BE-2 and BE-3, Yeonki).

Fig. 1과 Fig. 2 에 도시한 원위치 상태의 열전도도 자료는 공극보정을 통한 값으로 기하평균 모델을 통하여 계산된 값이다. 일반적으로 지하 내 암석은 지하수면 아래 존재하므로 공극 내 물이 채워져 있을 가능성이 높기 때문에 물에 대한 영향을 고려하기 위해 공극보정을 실행하였다.

실내 실험에 의해 산출된 건조시료의 열전도도는 시료의 공극 내에 공기가 채워진 상태에서 측정된다.

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

식 (2)로 부터 시료 기질만의 열전도도 값을 계산할 수 있다.

$$K_{mat} = \left(\frac{K_{mat+air}}{K_{air}^{\phi}} \right)^{\frac{1}{1-\phi}} \quad (3)$$

식 (3)과 (4)를 통하여 공극의 영향을 고려한 원위치 상태의 열전도도 값을 계산할 수 있다.

$$K_{in-situ} = K_{mat}^{1-\phi} K_{water}^{\phi} \quad (4)$$

여기서 ϕ 는 공극률, K_{mat} 는 기질의 열전도도, K_{air} 는 상온에서의 공기의 열전도도(0.026 W/mK), K_{water} 는 상온에서의 물의 열전도도(0.613 W/mK), $K_{in-situ}$ 는 공극 보정된 원위치 상태의 열전도도를 나타낸다.

암석의 열전도도 값을 평균하는 방법에는 산술, 조화, 기하 및 제곱근 평균 등이 있다. 각각의 방법은 이론적 원리에 의해 달리 사용된다⁴⁾. 즉, 열이 암석의 층리 방향에 수평으로 전달 될 때는 산술평균을, 암석의 층리 방향에 수직으로 전달 될 때는 조화평균을, 그리고 암석에 층리가 없이 광물입자가 무질서하게 배열돼 있을 때는 기하평균이나 제곱근평균을 각각 사용한다. 이 경우는 암석의 층과 수직으로 열이 전달되는 경우이므로 조화평균을 이용하였다. 조화평균을 이용한 KIGAM, BE-2 및 BE-3의 평균 열전도도 값은 각각 2.883 W/mK, 2.886 W/mK 그리고 2.866 W/mK로 나타났다. Fig. 3 은 깊이에 따른 열전도도의 분포와 조화평균을 보여준다.

Fig. 4 는 백운모 화강암과 반상 화강암의 열전도도의 차이를 확인하기 위하여 box-whisker 로 도시하였다. 그림에서 보듯이 반상 화강암이 백운모 화강암보다 조금 더 넓은 열전도도 범위를 보이지만, 평균 열전도도는 백운모 화강암이 2.924 W/mK, 반상 화강암이 2.892 W/mK 으로 큰 차이를 보이지는 않는다.

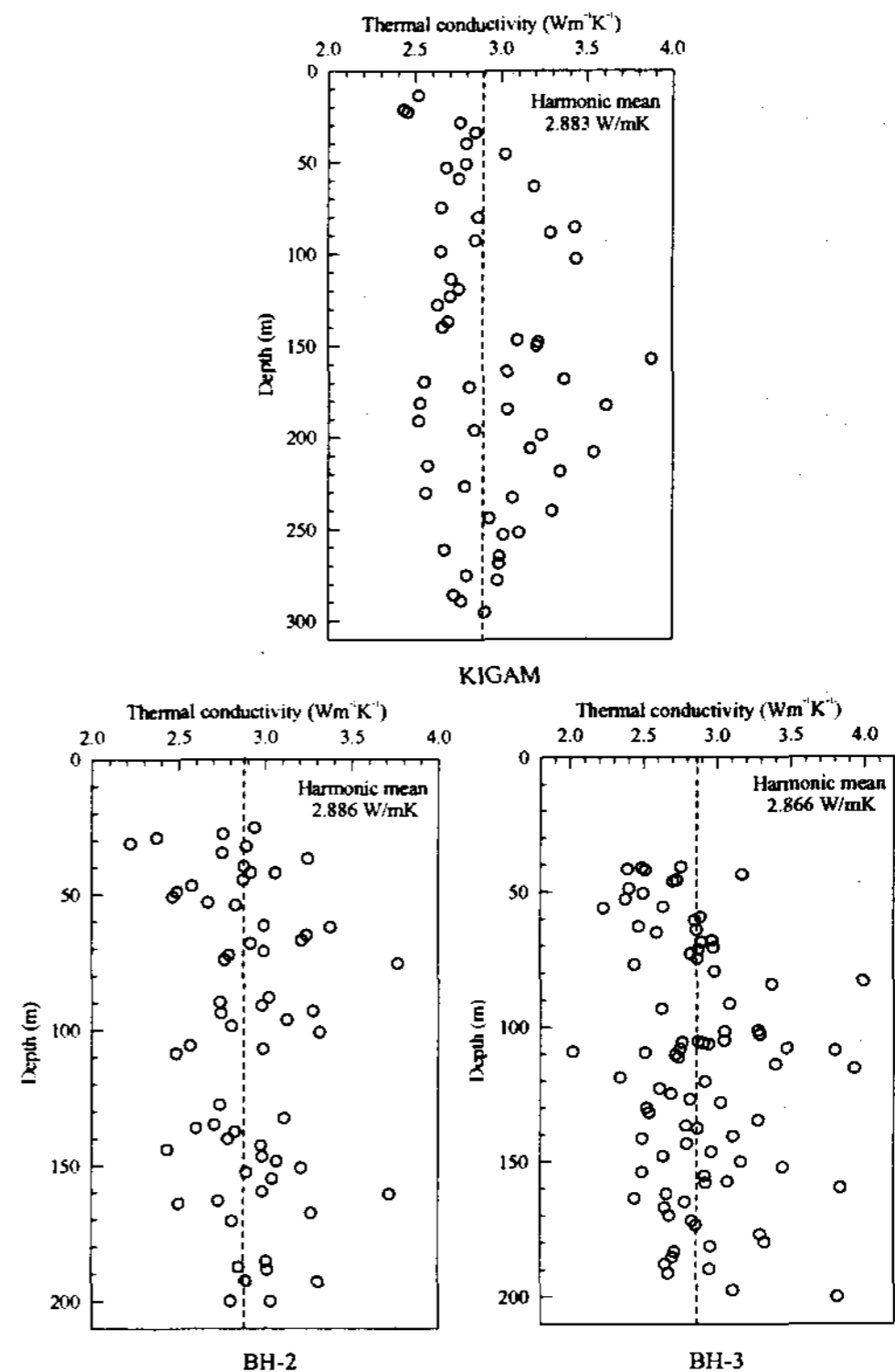


Fig. 3. Distribution of thermal conductivity with depth and harmonic mean of thermal conductivity of granite.

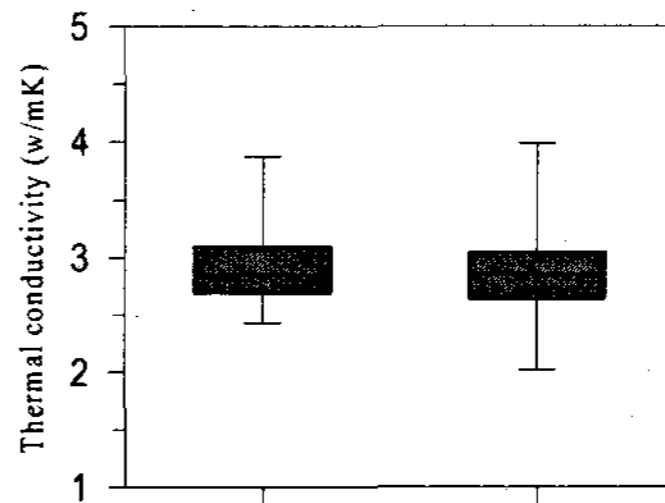


Fig. 4. Box-whisker plot of the muscovitic granite and porphyritic granite.

Fig. 5 는 암석의 열전도도와 열확산율 및 공극률간의 상관관계를 보여준다. 열전도도와 열확산율은 상관관계수(R^2)가 0.898로 높은 상관관계를 보였다. 열전도도와 공극률간의 상관관계는 공극률이 커짐에 따라 열전도도가 낮아지는 경향을 보였다. 0.5-1.5% 사이의 공극률 범위에서 열전도도의 분포 범위는 상당히 넓게 나타났다. 이는 암석의 공극률이 작을 경우 암석의 열전도도에 더 큰 영향을 미치는 요소는 암석을 구성하고 있는 광물의 조성비인 것으로 보여진다.

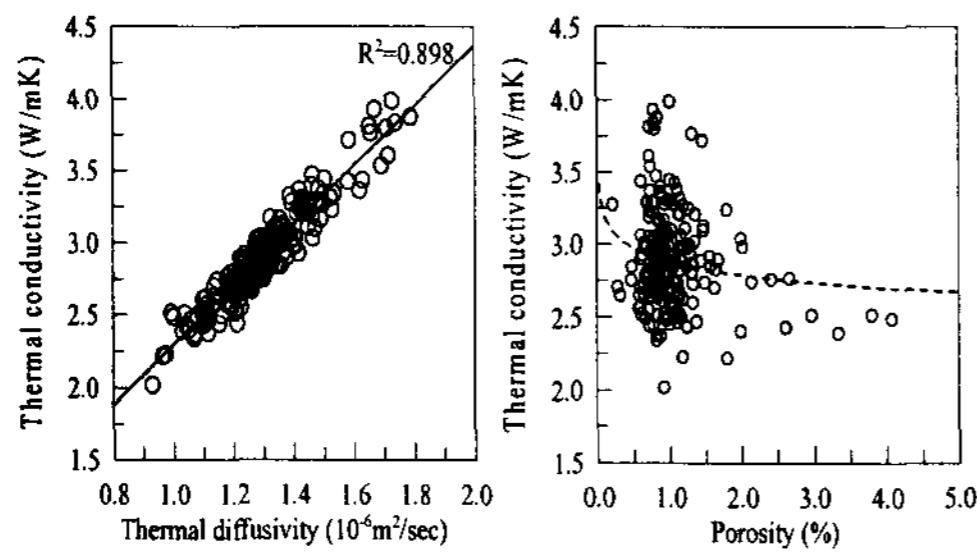


Fig. 5. Correlation of thermal conductivity vs. thermal diffusivity and porosity.

실험에 의한 결과인 암석의 열전도도 자료는 독일 기술자 협회에서 발간한 지중 열교환기 설계 지침서에 의해 열추출율을 산정할 수 있다⁵⁾. 지침서에 의하면 연간 1,800시간 동안 열추출을 할 경우 열전도도가 3.0 W/mK 이상의 결정질 암석은 84 W/m의 열을 추출할 수 있다고 나와 있으며, 화강암과 같은 siliceous magmatite의 경우에는 65~85 W/m의 열을 추출할 수 있다고 나와 있다. 따라서 이 연구에서 얻어진 3개 지역의 열전도도는 3.0 W/mK 보다 약간 작은 값을 보이므로 예상되는 열추출율은 84 W/m 보다 약간 낮을 것으로 보인다. 하지만 이 값은 지하 암반이 균질한 결정질 암반으로 가정하고 있으므로 암반 내에 존재하는 절리나 파쇄대 내를 따라 이동하는 지하수의 영향을 고려하면 84 W/m 보다 훨씬 높은 열추출율을 보일 것으로 예상된다.

3. 결론

지중 열교환기 설계 시 지반의 열적특성 정보는 지중 열교환기의 성능을 향상시키고 초기 투자비용을 약 30% 이상 절감 할 수 있을 것으로 기대된다. 국내에서는 아직까지 우리나라 조건에 맞는 암석의 열적특성 정보가 없기 때문에 지중 열교환기 설계 시 외국의 일부 대표 암종의 열적특성 정보를 이용해 왔다.

이 연구에서는 대전과 연기지역의 중생대 쥐라기 화강암의 열적특성을 실내 실험을 통하여 정량적으로 분석하였으며, 암석의 열적특성인 열전도도를 이용하여 지중열교환기 설계 시 중요 변수인 열추출율을 산정하였다.

한국지질자원연구원내 공극보정을 통한 백운모 화강암 57개 열전도도의 조화평균값은 2.883 W/mK로 나타났다. 행정중심복합도시 선정지역 내 공극보정을 통한 반상 화강암 149개(BE-2호공 62개, BE-3호공 87개) 열전도도의 조화평균값은 각각 2.886 W/mK, 2.866 W/mK로 나타났다.

암석의 열전도도와 열확산율의 상관관계분석에서는 상관계수(R^2)가 0.898로 높은 상관관계를 보였다. 열전도도와 공극률간의 상관관계분석에서는 공극률이 커질수록 열전도도가 낮아지는 경향을 보였다.

실내 실험에서 얻어진 암석의 열전도도 자료는 독일기술자 협회에서 발간한 지중 열교환기 설계 지침서에 의해 연간 1,800시간 동안 열추출을 할 경우 84 W/m의 열추출율이 가능할 것으로 산정되었다. 그러나 이 값은 지하 암반이 균질한 결정질 암반일 경우로 가정한 수치이므로 실제 열추출율은 84 W/m 보다 더 높을 것으로 예상되었다.

앞으로의 과제는 암석을 구성하는 광물의 조성비에 따른 열전도도의 변화에 관한 연구가 진행되어야 하겠다. 또한 암석의 열전도도를 통하여 우리나라 지질조건에 적합한 열추출율을 산정할 수 있는 연구가 진행되어야 하겠다.

사 사

이 논문은 한국지질자원연구원 기본사업인 지열수 자원 실용화 기술 개발(GP2007-002-01)의 지원에 의해 수행되었습니다. 암석 시료성형에 도움을 주신 한국지질자원연구원 지하수지열연구부 이병태 선생님께 감사드립니다.

References

- [1] 송윤호, 이영민, 2006, 지열에너지자원 개발, 활용 기술의 동향 및 전망, 한국신·재생에너지학회 2006 추계학술대회 논문집, p. 20-23.
- [2] 한정상, 한규상, 한혁상, 한찬, 2004, 친환경, 대체에너지인 천부 지중 열을 이용한 지열펌프 냉난방 시스템, 14-69pp, 한림원.
- [3] Lee, Y., and Deming, D., 1998, "Evaluation of thermal conductivity temperature corrections applied in terrestrial heat flow studies." Journal of geophysical research, Vol. 103, No. B2, p.2447-2454.
- [4] Beardsmore, G. R., and Cull, J. P., 2001, Crustal Heat Flow, 324pp, Cambridge.
- [5] VDI, 2000, Thermal use of the underground fundamentals, approvals, environmental aspects. Part 1 ~Part 4, VDI 4640.