

상온 환경에서 PEDB를 이용한 울릉도 시추코어의 열전도도 예비 측정

이상규 · 이태종*

한국지질자원연구원 지열자원연구실

Thermal Conductivity Measurement of Rock Cores from Ulleung Island Using PEDB System at Room Temperature

Sang Kyu Lee and Tae Jong Lee*

Geothermal Resources Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

요약: 다양한 지름의 암석코어에 대해 비교적 간편하고 정확하게 열전도도를 측정할 수 있는 divided bar형 열전도도 측정 시스템인 PEDB (portable electronic divided bar system)를 도입·이용하여 열전도도 측정시 고려해야 할 요소에 대해 검토하였다. 또한, 지열조사를 위해 울릉도에서 채취한 70개의 코어시료에 대해 적용하고 그 특성을 살펴보았다. 열전도도 측정에 있어서 실내온도의 변화가 가장 큰 영향을 미치므로 되도록 실내온도의 변화가 적거나 항온 환경에서 측정하는 것이 바람직하다. 열원(heat source)의 온도, 안정된 상태에서 평균하는 온도의 구간 등에 의한 영향은 실내온도 변화에 비해 미미하다. 열접촉 보조제인 바셀린을 사용하면 시편의 열전도도가 다소 높게 평가되고 특히 접촉면이 고르지 않은 암석시편에서는 그 차이가 더 크게 나타난다. 하나의 시편에 대해 반복 측정할 때, 실내온도가 1°C 이내로 유지된다면 표준시편에서는 $\pm 0.3\%$ 이내, 암석시편에서는 $\pm 4\%$ 이내의 좋은 반복성을 얻을 수 있다. 울릉도의 두 지열 조사공에서 얻은 암석코어의 열전도도는 심도 증가에 따라서 대체로 열전도도가 커지는 경향이 있으나 암종 변화와 특별한 상관성을 보이지는 않았다.

주요어: PEDB, 열전도도, 울릉도, 암석코어, divided bar

Abstract: Several factors are discussed that should be considered in measuring thermal conductivity of rock cores with a PEDB (portable electronic divided bar) system, which is relatively accurate and easy to operate, and can measure the thermal conductivity of rock cores for various diameters. Then the system is applied to measure thermal conductivity of 70 rock cores from Ulleung Island. Air temperature affects most on the thermal conductivity measurements, so that it is very important to minimize the temperature change during the measurement. Other factors such as the temperature of heat source, averaging time window on the thermal conductivity measurements do not affect much compared to air temperature. Slightly higher thermal conductivity is measured when using the thermal contact paste between the sample and heat source or heat sink. Especially, rock cores with irregular surface showed bigger difference. Repeatability showed less than $\pm 0.3\%$ for standard samples and less than $\pm 4\%$ for rock samples, respectively, when the room temperature changes within 1°C during the measurements. Thermal conductivity of the rock cores from Ulleung Island roughly increases as depth increases but does not show any dependency on the rock types.

Keywords: PEDB, thermal conductivity, Ulleung Island, rock cores, divided bar

Received: 9 July 2016; Revised: 10 August 2016;

Accepted: 11 August 2016

*Corresponding author

E-mail: megi@kigam.re.kr

Address: KIGAM, Gwahangno 124, Yuseong, Daejeon 34132, Korea

©2016, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

지열자원의 조사에 있어서 매우 중요한 파라미터 중 하나가 지열류량(geothermal heat flow)이며, 지열류량은 지표면을 통해 우주로 방출되는 단위면적당 열에너지의 양을 나타낸다. 지구 내부의 내핵에서는 온도가 6,000°C 이상인 것으로 알려져 있으며 따라서 지구 내부는 깊이 들어갈수록 점점 온도가 올라가는데 이를 지온증가율(geothermal gradient)이라 부르며, 화산이 없는 우리나라는 평균적으로 약 25°C/km의 지온증가율을 보이는 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2015).

지표면의 특정 지점에서의 지열류량은 이 지온증가율에 구성암석의 고유한 성질인 열전도도(thermal conductivity)를 곱해서 구할 수 있는데, 이때 지온증가율은 시추공에서의 온도검층 자료로부터 심도에 따른 온도기울기로부터 구할 수 있고, 열전도도는 동일 시추공에서 채취한 코어시료를 이용해 실험실내에서 측정하여 얻을 수 있다.

Pollack *et al.* (1993)은 전 세계의 대륙지각 및 해양지각에서 측정된 총 20,201개의 지열류량을 수집해서 D/B화 하였으며, 이로부터 전 세계 지열류량은 평균적으로 $87 \pm 2 \text{ mW/m}^2$ 이고 특히 해양 지각에서는 평균 $101 \pm 2.2 \text{ mW/m}^2$, 대륙 지각에서는 평균 $65 \pm 1.6 \text{ mW/m}^2$ 의 지열류량을 보임을 제시했다. 우리나라는 한국지질자원연구원에서 비교적 심도가 깊은 약 400 m 이상의 시추공에 대한 온도검층 자료를 종합하고, 전국적인 암석의 샘플을 채취하여 열전도도를 비롯한 여러 열물성을 측정하여 D/B로 구축하고 현재 Web에서 쉽게 찾아볼 수 있도록 서비스하고 있다(Kim *et al.*, 2015; <http://kggris.kigam.re.kr>).

실내에서 암석 코어의 열전도도를 측정하는 방식에는 침형 열전도도 측정기(needle probe), 반무한 공간법(half-space device), 그리고 divided bar 등 여러 가지가 있다. 이중, divided bar 시스템은 정상상태에서 비교적 정확하게 열전도도를 측정할 수 있다는 장점 때문에 세계적으로 많은 교육 및 연구기관 그리고 조사기관에서 사용되고 있다. 미국의 경우만 해도 SMU, Utah, Michigan, Maine 대학 등의 교육기관과 USGS (United State Geological Survey) 등에서 사용하고 있으며, 호주의 Monash 대학, 그리고 캐나다의 Pacific Geoscience Center 등에서 사용하고 있다. 국내에서는 한국지질자원연구원과 서울대학교 에너지자원공학과에서 자체적으로 제작하여 사용하고 있다.

암석 시편의 원형단면과 접촉하는 열판(hot plate)에 열을 공급할 때 항온순환수조(heating bath circulator)를 사용하는 기존의 divided bar 유형의 열전도도 측정기는 몇 가지의 단점을 갖고 있다. 이 단점들은 대부분 항온을 유지하기 위한 열원으로 물을 사용함으로써 발생하는 것으로, 측정기의 위와 아래에 각각 위치한 두 개의 열판에 서로 다른 일정한 온도의 물을 공급하기 위해서는 항온순환수조 내의 물이 일정한 온도에 도달할 때까지 예열을 위해 많은 시간이 소요되며 따라서 4개의

열전대(thermocouple)의 편차를 보정하는 데에도 상당한 시간이 소요된다. 실내온도보다 낮은 온도를 유지해야 하는 저온부 순환 파이프에 이슬이 맺히는 것도 측정 작업에서 피할 수 없는 단점이다. 측정기 구조상 시편의 직경과 두께가 상당한 범위로 허용되지 않고 일정해야 하는 제약 또한 시편의 전처리를 어렵게 한다.

이 논문에서는 전자적(electronic)으로 조절되는 열원(heat source)과 열싱크(heat sink)를 사용하고 암석시편의 열전도도를 환산할 때 2종의 재질, 18개의 서로 다른 규격(두께 및 직경)을 갖는 표준시편의 fitting curve의 사이채움을 이용함으로써 이러한 단점들을 해소했다는 PEDB (Portable Electronic Divided Bar)를 도입·이용하여 울릉도에서 지열조사(Lee *et al.*, 2015)를 위해 시추한 두 개의 조사공(GH-3 및 GH-4)에서 얻은 70 개 시추코어의 열전도도를 측정하고 그 활용성 검증과 함께 울릉도 암석의 열전도도 특성을 개괄적으로 살펴보고자 하였다.

실험장치 및 시험편

Divided bar 유형의 열전도도 측정기는 열전도도를 알고 있는 물체와 측정하고자 하는 시편을 직렬로 배열하고 이들을 관통하는 정상상태의 열 기울기(steady-state thermal gradient)를 적용함으로써 시편의 열전도도를 측정하는 장치이다. Fig. 1은 divided bar 방식의 열전도도 측정기의 구성을 보이는 모식도이며, 이 연구에서 사용하는 PEDB의 경우도 기본적인 원리는 동일하다. 즉, 암석 시편은 한 쌍의 ‘황동-고분자 탄산염-황동’의 원형판 조립체(brass-polycarbonate-brass plates) 사이에 밀착된다. 이 원형판 조립체의 위쪽에는 실내온도 보다 높은 약 40°C의 물 혹은 액체를 지속적으로 흐르게 하여 상대적으로 고온을 유지토록 하고, 아래쪽에는 실내온도보다 낮은 약 10°C의 액체를 지속적으로 흘려 저온부를 형성하도록 한다. 이렇게 함으로써 고온부에서 저온부로 일정량의 열류량(heat flow)이 형성되도록 한 후, 안정된 상태(steady-state)에서 각 부위의 온도 및 시험편의 두께 등으로부터 열전도도를 산출하는 방식이다.

Fig. 1의 상부 및 하부의 원형판에 깊숙이 꽂아 넣은 열전대(thermocouple)로부터 측정되는 온도를 T_1 , T_2 , T_3 , T_4 라 하고, 각각의 온도 차이를 다음과 같이 정의할 때,

$$\Delta T = (\Delta T_s) / ((\Delta T_{top}) + (\Delta T_{btm})) \quad (1)$$

여기서, ΔT_{top} ($= T_1 - T_2$) 과 ΔT_{btm} ($= T_3 - T_4$)은 각각 시편의 상부와 하부의 원형판에서 고분자 탄산염(PC)을 통과하는 온도 차이를 나타내고, ΔT_s ($= T_2 - T_3$) 는 시편을 통과하는 온도 차이를 의미한다.

시험편의 열전도도(λ_s)는 시편을 관통하는 상하 온도차(ΔT_s)와 참조 물질(고분자 탄산염)의 상하 온도차(ΔT_{top} , ΔT_{btm}) 합

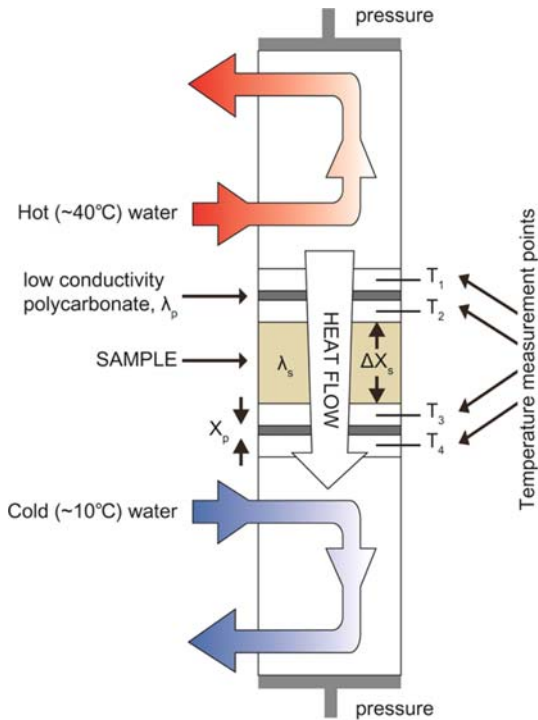


Fig. 1. Schematic of PEDB (Modified from Beardsmore and Cull, 2001).

의 비인 (1)식의 ΔT 로부터 다음의 식 (2)와 같은 관계를 갖는다.

$$\lambda_s = \Delta X_s \times C \times (1/\Delta T) \quad (2)$$

여기서, ΔX_s 는 시편의 두께이고 C 는 ‘황동-고분자 탄산염-황동’ 조립체의 열 특성을 대변하는 상수로서, 사전에 열전도도를 알고 있는 몇 가지 표준시료를 이용하여 계측함으로써 calibration을 통해서 결정되는 시편 표면적의 함수이다.

PEDB는 제작사에서 제공하는 재질과 규격(직경 및 두께)이 다른 2종 18개의 표준시편을 calibration 하여 얻은 열저항 곡선에 암석시편의 규격과 ΔT 를 사이채움하여 열전도도를 산출한다. 특히, 기존에 국내에서 사용되는 divided bar 시스템을 이용할 경우 NX 혹은 NQ 시추코어를 실험실내에서 다시 1 inch 구경으로 재성형해야 하는 불편함이 있었는데, PEDB는 일반적인 시추코어 직경인 NX 혹은 NQ 직경의 시험편에 대해서도 측정이 가능하도록 설계되어 있어, 시추코어를 적절한 두께로 잘라서 측정하면 되므로 실험실 전처리 작업이 매우 편리하다.

PEDB의 또 다른 특징은 가열한 물 대신에 전자 조절장치를 열원(heat source)과 열싱크(heat sink)의 열 조절 수단으로 이용하는 것인데, 이를 통하여 기존의 측정 장치가 갖고 있던 많은 단점들을 해소할 수 있을 뿐 아니라 열원과 열싱크의 평균 온도를 주변 온도보다 약간 높거나 낮도록 용이하게 조절할 수 있다. 열원과 열싱크의 온도는 기존의 divided bar 시스템

에서처럼 항온수조내 물온도를 조절함으로써 사용자가 특정 온도를 지정(setting)하는 방식으로 조절되는 것이 아니라, 두 개의 토글 스위치(toggle switch)로 열원과 열싱크의 온도 차이를 기준온도(reference temperature)로부터 열원은 +10, +5°C로 열싱크는 -10, -5°C의 두 가지로 조절할 수 있고, 한 개의 knob으로는 기준온도를 올리고 내리는 단계를 지정함으로써 측정기 스스로 주변 온도를 참조하여 열원과 열싱크의 온도를 전자적으로 조절하도록 설계되어 있는 것이 특징이다.

이 연구에서 사용한 암석시편(Table 3 참조)은 율릉도 지열 조사를 위해 2014년과 2015년에 획득된 코어시료이다. 즉, 율릉도 남쪽 남양리에 위치한 GH-3 시추공의 600 ~ 1000 m에서 얻은 23개 암석코어와 북쪽 추산리에 위치한 GH-4 시추공의 20 ~ 1000 m에서 얻은 47개 암석코어이며, 실험을 위해 이들은 모두 calibration에서 사용한 2종 18개 표준시편들의 규격(두께 및 직경)의 중간 범위에 분포하도록 성형한 다음 상온에서 한 달 간 자연 건조하였다.

예비실험

암석시편의 열전도도를 측정하기에 앞서 PEDB의 특성 파악과 이를 이용하여 얻게 되는 열전도도의 정밀도에 대한 정보를 얻기 위하여 여러 가지의 예비실험을 수행하였다. 즉, 시험편과 황동사이에서 열접촉을 좋게 하기 위해 열접촉 보조제(thermal contact paste)를 바르기도 하는데 그 영향은 어떠한지, 실내온도에 따른 영향은 있는지, 열원의 온도에 따른 영향은 있는지, 동일한 시료에 대한 반복성은 어떠한지 등에 대한 고찰이다.

열접촉 보조제의 영향

시편의 열전도도를 측정할 때 시편과 상하 열판(열원, 열싱크) 사이의 열접촉을 좋게 하기 위하여 통상 시편의 상하면에 열접촉 보조제를 바르도록 권장한다. 열접촉 보조제로서 바셀린(vaseline)을 바른 경우와 바르지 않은 경우 얼마나 큰 차이를 보이는지 확인하기 위한 실험을 수행하였는데, PEDB 제작사에서 제공한 표준시편, KU_HQ25을 이용하여 각 경우 3회씩을 연달아 측정하고 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 표준시편의 고유번호에서 맨 앞의 영문 KU는 재질(fused quartz)을 나타내고, 두 번째 영문 HQ는 표준시편의 직경, 그리고 마지막 숫자 25는 두께(mm)를 나타낸다.

Fig. 2에서 가로축은 열전대 온도 모니터링을 시작한 시점($t = 0$)으로부터의 경과시간이며 세로축은 ΔT (식 (1))이다. 바셀린을 바른 경우보다 바르지 않은 경우의 ΔT 가 약 4% 정도 크게 측정되는 것을 볼 수 있어서 바셀린을 바르면 열전도도가 다소 높게 평가됨을 알 수 있다. 이것은 바셀린이 열을 공급하는 상하 판(plate)과 시편 간의 열 접촉을 좋게 만들기 위하여 사용하는 것이므로 타당한 결과라고 하겠다.

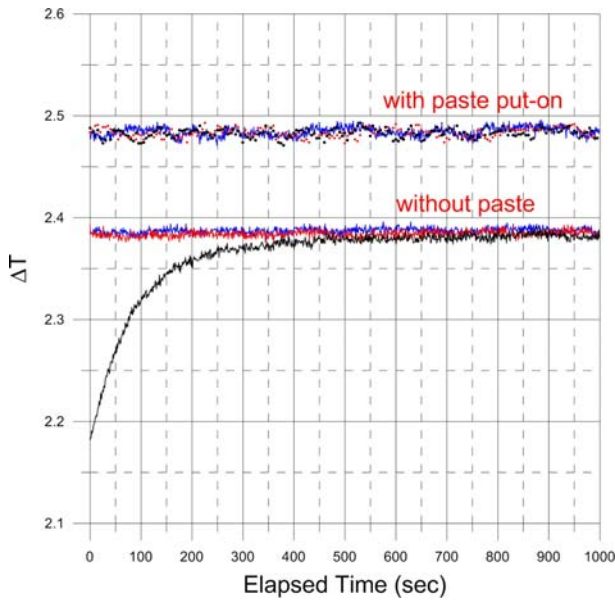


Fig. 2. Comparison of ΔT in equation (1) when putting on the thermal contact paste (vaseline) or not.

실내 온도의 영향

상온 환경에서 열전도도를 측정할 때 실내 온도가 다르면 열전도도가 얼마나 영향을 받는가를 확인하기 위하여 서로 다른 시점에서 표준시편, KU_HQ8의 ΔT 를 1,000 sec 동안 1 sec마다 기록하였다(Fig. 3). 그림에서 검정색 선은 어떤 날 아침 10시부터 측정된 것이고 빨강색 선과 파랑색 선은 측정 시작시간이 유사한 7시 44분과 8시 4분부터 측정된 것이다. 3회 측정된 날짜가 실내 온도의 일변화가 크게 차이나지 않을 정도로 짧은 기간 내에 있으면 동일 시간대에는 비슷한 ΔT 를 얻

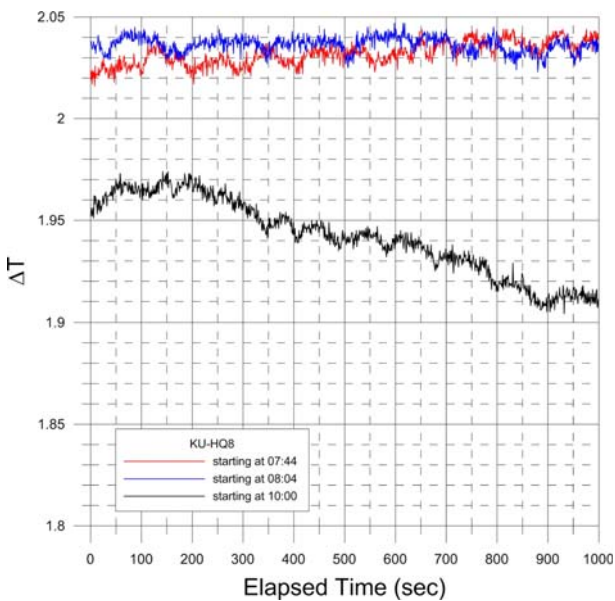


Fig. 3. Monitoring of ΔT in different room temperature.

을 수 있음을 볼 수 있으나 측정 시간대가 다르면 ΔT 가 약 7% 정도로 크게 차이 남을 볼 수 있다. 더욱이 외기 온도가 급격히 상승하는 아침 10시경에는 1,000 sec 동안에도 ΔT 가 1.97 ~ 1.91까지 3% 이상 차이날 수 있으므로 상온환경에서 열전도도를 측정하는 경우에는 실내온도가 안정적이고 유사한 시간대에 측정하여야 좋은 결과를 얻을 수 있다.

열원의 온도에 따른 영향

직경과 두께가 다른 4종의 표준시편, KU_BQ8, KU_HQ25, QZ_BQ12, QZ_HQ12에 대하여 열원의 온도를 25.5, 29.5, 33.5, 37.5, 41.5, 45.5°C로 달리하며 측정된 ΔT 를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 QZ는 표준시편의 재질이 석영(quartz)임을 나타낸다. 실험은 실내 온도가 17 ~ 21°C인 시간대에서만 수행하였다. 그림에서 가로축은 열원의 온도이며 왼쪽 세로축 ($\Delta T_{30_Average}$)은 1,000 sec 동안 매 1 sec마다 측정된 ΔT 시계열 중에 마지막 30 sec의 평균을 나타낸 것이고, 오른쪽 세로축(ΔT_{30_Avedev})은 30 sec 동안 측정된 ΔT 의 ‘절대편차의 평균(average deviation)’을 나타낸다.

Fig. 4(a)에서 25.5, 29.5, 33.5, 37.5°C에서의 3 회 측정된 $\Delta T_{30_Average}$ 의 편차가 41.5, 45.5, 49.5°C에서 보다 크거나 KU_HQ25, QZ_BQ12, QZ_HQ12 등 다른 표준시편(Fig. 4(b), (c), (d))에서보다 큰 것은 측정된 날짜가 달라서 주변온도의 차이가 많았기 때문이다. 따라서 전체적으로 볼 때 ΔT 는 열원의 온도 변화보다 주변온도 변화에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있어서 시편의 열전도도를 정밀하게 측정하기 위해서는 열원나 열싱크의 온도를 달리하는 것 보다 주변의 온도가 일정하게 유지되는 환경이 중요함을 알 수 있다. 한편, 열원 온도가 같을 때(41.5, 45.5°C) 세 번 측정된 ΔT_{30_Avedev} 가 KU_BQ8에서보다 KU_HQ25에서 더 분산되어 나타나는 것은 같은 재질(KU)일 때 25 mm 두께의 표준시편이 8 mm의 표준시편보다 주변온도의 영향을 더 많이 받을 수밖에 없는 넓은 원주 표면적을 갖기 때문이다. 재질(QZ: Quartz)과 두께가 12 mm로 같고 직경이 다른 QZ_BQ12와 QZ_HQ12의 같은 열원 온도에서 ΔT_{30_Avedev} 에 큰 차이를 보이지 않는 것은 시편의 원형단면이 열원과 열싱크 판에 밀착되어 있어서 단면의 직경(즉, 면적) 변화가 주변 온도의 변화에 영향 받지 않고 있음을 보이는 것이며, 영향을 많이 받을 수 있는 시편의 원주는 두께가 12 mm로 같았기 때문이다.

상온 환경에서 반복성을 높이려면

암석시편의 열전도도 측정을 위한 본 실험을 염두에 두고 올롱도 코어 시료 GH-4_21을 이용하여 열전도도 측정의 반복성을 확인하고자 하였는데, 측정은 3일 간격의 서로 다른 날에 실내온도가 유사한(거의 동일한) 환경이 되었을 때 연달아 3회씩 측정하고 그 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 여기서 (a)는 총 6회의 ΔT 시계열을 보인 것이고 (b)는 1000 sec 동안 6회

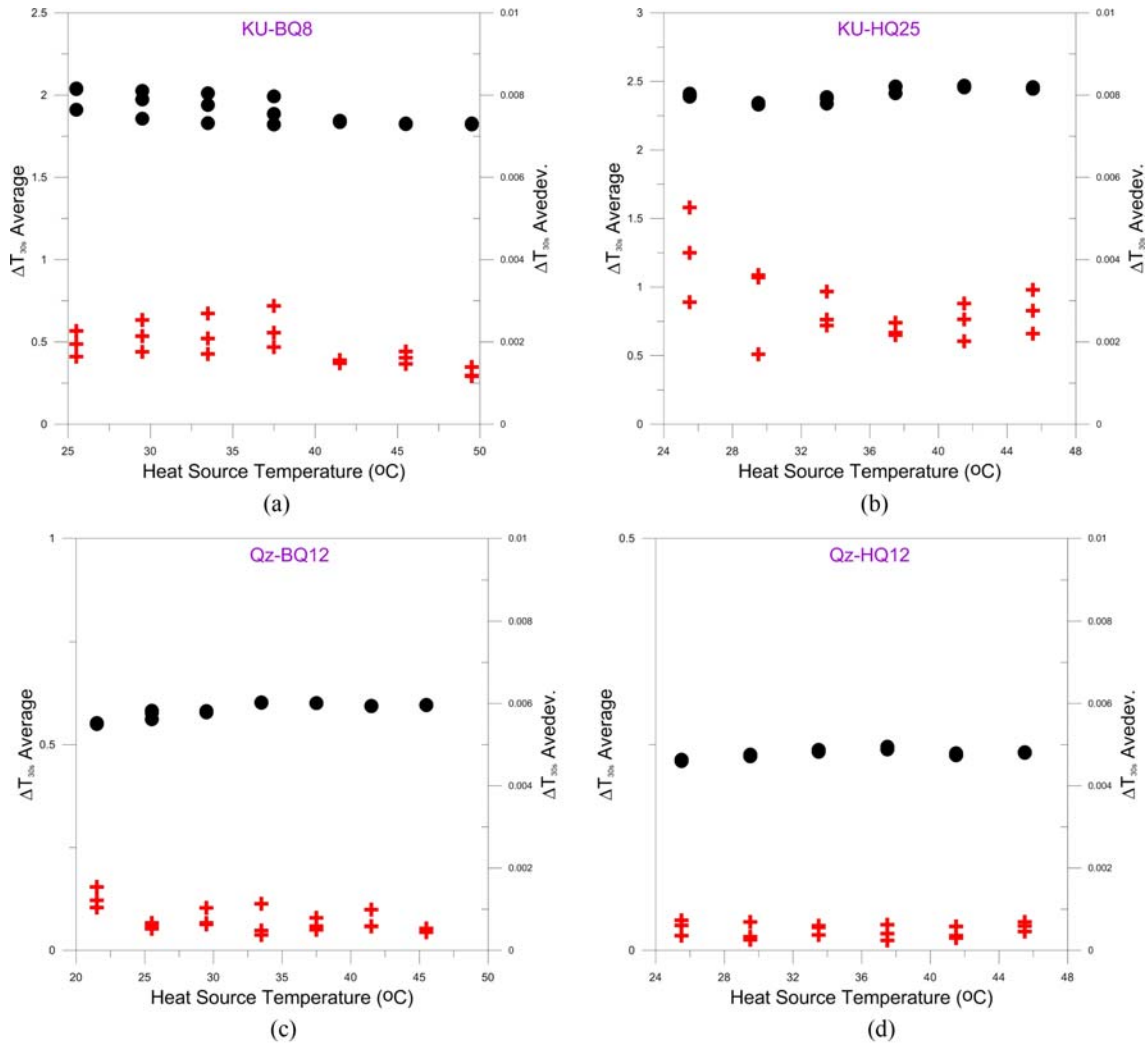


Fig. 4. ΔT_{30} Average (closed circles) as a function of heat source temperature for various standard samples; (a) KU_BQ8, (b) KU_HQ25, (c) QZ_BQ12, and (d) QZ_HQ12.

측정하여 얻은 ΔT_{100} Average와 환산한 열전도도(λ)를 보인 것이다. 6번 측정된 ΔT_{100} Average는 1.6674 ~ 1.6892 범위에 있어서 평균값 1.6757으로부터 ± 0.0135 ($\pm 0.81\%$) 내에 있고 절대편차의 평균(aveDev)은 0.0084이다. 이를 열전도도로 환산하면 2.1255 ~ 2.1575 W/mK로서 6회 평균 열전도도인 2.1453 W/mK의 $\pm 0.92\%$ 내에 분포하여 좋은 반복성을 보인다. 결론적으로 측정된 날짜에 어느 정도 차이가 있다 하더라도 실내 온도가 안정적인 시간대 중 거의 유사한 실내 온도에서 열전도도를 측정하면 반복성이 매우 양호한 열전도도를 얻을 수 있음을 보이고 있다.

상온 환경에서 표준시편 및 암석시편 ΔT 의 반복성 종합

표준시편(KU_HQ25)과 암석시편(GH-4_21)의 열전대 온도를 실내 온도의 변화가 가장 작은 09:50 ~ 14:20 시간대(1°C 이내)에서 여러 날에 걸쳐서 각각 11회씩 반복 모니터링하고

창, $t = 100$ sec의 평균값, ΔT_{100} Average를 열전도도(λ)와 함께 Table 1에 정리하였다.

바셀린을 사용하지 않은 경우에 KU_HQ25 표준시편의 ΔT_{100} Average는 2.4782 ~ 2.4865 범위에 있고 평균 2.4836, 절대편차의 평균은 0.0017이다. 11회의 ΔT_{100} Average는 평균값으로부터 ± 0.0054 ($\pm 0.22\%$) 내에 있다. 바셀린을 사용한 경우에는 2.3816 ~ 2.3903 범위에 있고 평균 2.3871, 절대편차의 평균은 역시 0.0017이다. 11회의 ΔT_{100} Average는 평균값으로부터 ± 0.0055 ($\pm 0.23\%$) 내에 있어서 ΔT_{100} Average는 바셀린을 사용했을 때보다 사용하지 않았을 때 약 4% 정도 크지만(따라서 열전도도는 낮아짐) 11번 측정의 편차 즉, 변화폭은 유사하다.

암석시편(GH-4_21)의 경우에는 바셀린을 사용하지 않으면 ΔT_{100} Average는 11회 평균이 1.6910으로부터 ± 0.0096 ($\pm 0.57\%$) 내에 있다. 이를 열전도도로 환산하면 1.9698 ~

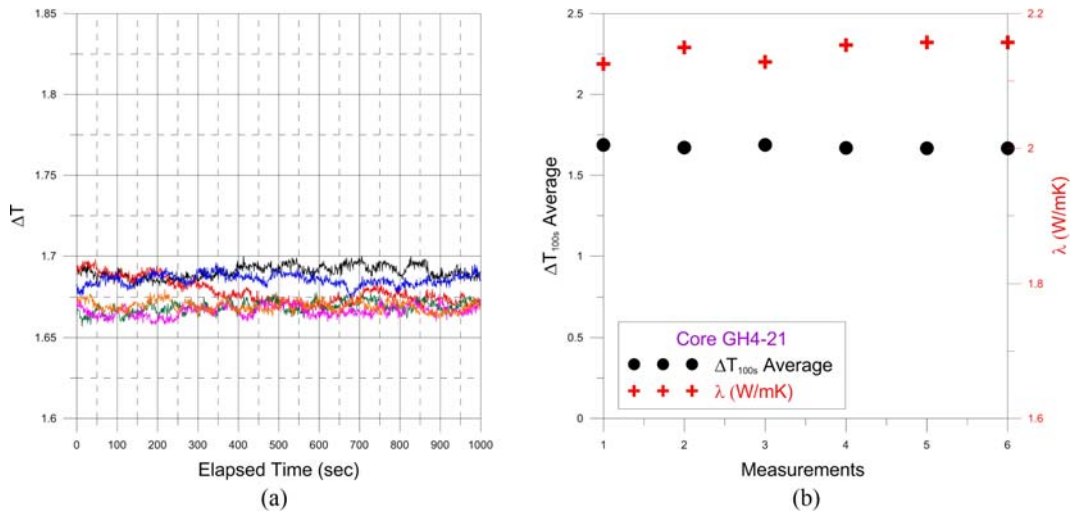


Fig. 5. Repeatability test using the PEDB system for the core sample GH-4-21. The room temperature remains similar for all the 6 times measurements; (a) ΔT time series, and (b) $\Delta T_{100_Average}$ and thermal conductivity λ for the 6 times repeated measurements. Note that the measured thermal conductivity varies only $\pm 0.92\%$ difference between the repeated measurements.

Table 1. Results of repeatability test for a standard sample (KU_HQ25) and a core sample (GH-4_21).

Measurements	KU_HQ25				GH-4_21			
	Without paste		With paste put-on		Without paste		With paste put-on	
	$\Delta T_{100_Average}$	λ	$\Delta T_{100_Average}$	λ	$\Delta T_{100_Average}$	λ	$\Delta T_{100_Average}$	λ
1	2.4842	1.3628	2.3816	1.4296	1.6822	1.9945	1.5543	2.1845
2	2.4857	1.3619	2.3859	1.4267	1.6837	1.9925	1.5784	2.1461
3	2.4848	1.3625	2.3870	1.4259	1.6846	1.9913	1.5929	2.1236
4	2.4830	1.3636	2.3881	1.4252	1.6874	1.9875	1.6082	2.1003
5	2.4865	<i>1.3614</i>	2.3885	1.4249	1.6919	1.9814	1.6152	2.0899
6	2.4859	1.3618	2.3886	1.4249	1.6953	1.9769	1.6189	2.0844
7	2.4819	1.3643	2.3883	1.4251	1.6926	1.9805	1.6343	2.0618
8	2.4829	1.3636	2.3845	1.4276	1.6945	1.9779	1.6367	2.0568
9	2.4826	1.3638	2.3884	1.4250	1.6916	1.9818	1.6383	2.0560
10	2.4782	1.3666	2.3872	1.4258	1.6961	1.9758	1.6404	2.0530
11	2.4834	1.3633	2.3903	<i>1.4237</i>	1.7006	<i>1.9698</i>	1.6378	2.0568
Average (ave)	2.4836	1.3632	2.3871	1.4259	1.6910	1.9827	1.6141	2.0921
Average deviation (avedev)	0.0017	0.0011	0.0017	0.0012	0.0047	0.0064	0.0223	0.0338
avedev/ave $\times 100$ (%)	0.068	0.081	0.071	0.084	0.278	0.320	1.382	1.617

1.9945 W/mK로서 평균, 1.9827 W/mK, 절대편차의 평균은 0.0064 W/mK를 보인다. 바셀린을 사용하면 $\Delta T_{100_Average}$ 는 11회 평균 1.6141, 절대편차의 평균은 0.0223이다. 이것은 평균값 1.6141의 ± 0.0598 ($\pm 3.70\%$) 내에 분포하는 것으로 역시 바셀린을 사용했을 때보다 사용하지 않았을 때 약 4% 정도 크지만(따라서 열전도도는 낮아짐) 편차 즉, 변화폭은 바셀린을 사용하지 않았을 때 현저히 작게 나타난다.

이와 같은 특징은 시편의 재질과 깊은 관계가 있는 것으로 보이는데 표준시편은 내부가 균질할 뿐 아니라 바셀린이 시편 내부로 침투할 수 없는데 반하여 암석시편은 균질하지 않을 뿐 아니라 시간이 경과함에 따라서 바셀린이 암석시편의 내부로 침투함으로써 시편의 열물성을 변화시키는 것으로 해석된다.

평균할 창(t) 길이를 달리할 경우

실내 온도의 변화(1°C 이하)가 가장 작은 09:50 ~ 14:20 시간대에서 표준시편(KU_HQ25)을 이용해서 11회 모니터링 한 열전대 온도 시계열에서 열전도도 환산에 사용할 온도 변수(ΔT)의 창(t, 평균할 구간)의 결정에 필요한 정보를 얻고자 하였다. 창은 평형상태를 보장할 수 있도록 1,000 sec 동안 충분히 길게 모니터링하고 끝 부분 안정화된 시간대에서 길이(t)를 30, 50, 100, 150, 200 sec로 달리하며 $\Delta T_Average$ 를 계산하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림의 (a)는 열 접촉 보조제인 바셀린을 바르지 않고 측정된 경우이고 (b)는 바르고 측정된 경우이다. 바셀린을 사용하면(b) 사용하지 않았을 때(a) 보다 $\Delta T_Average$ 가 다소 작게 나타나는 것(즉, 열전도도가 높다는

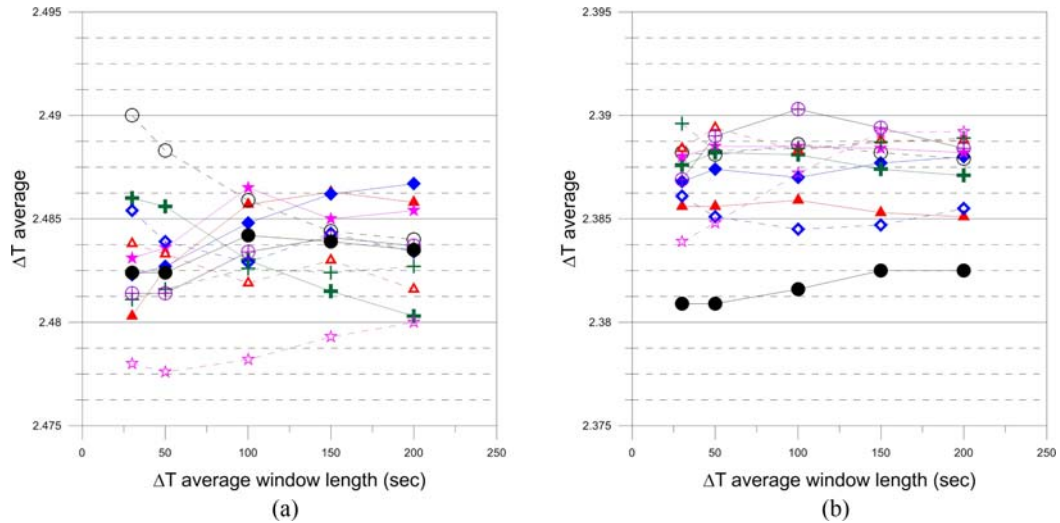


Fig. 6. Variation of ΔT average according to 5 different averaging window length ($t = 30, 50, 100, 150, 200$ sec) for the 11 times repeated measurements; (a) without paste and (b) with paste put-on.

앞에서 살펴본 결과와 같으며 무작위 잡음이 상대적으로 평균에 크게 기여하게 되는 짧은 창(30 sec)의 경우를 제외하면 측정 시점이 다른 11회의 변화 폭은 거의 유사함을 볼 수 있다. 따라서 창 길이(t)를 결정할 때 $\Delta T_{Average}$ 의 통계적 수치(예를 들면 절대편차의 평균)를 근거로 결정하기 보다는 ΔT 시계열 상의 변화의 주기성을 시각적으로 관찰한 다음 적어도 한 주기가 포함될 수 있는 충분한 길이로 결정하는 것이 타당한 것으로 해석된다.

울릉도 시추코어의 수직적 열전도도 분포

울릉도 내에서 지열조사를 위해 시추한 두 개의 시추공에서 깊이에 따라 약 20 m 간격으로 샘플을 취해 얻은 70개 시추코어(Table 3 참조)의 열전도도를 상온환경의 실험실에서 PEDB를 이용하여 측정하고 PEDB의 적용성 검증과 함께 울릉도 암석의 열전도도 특성을 살펴보고자 하였다.

이번 연구에서 사용한 70개의 암석시편은 수포화와 완전 건조 때의 열전도도를 측정하고자 하는 후속 실험 계획이 수립

되어 있었으므로 열접촉 보조제(바셀린)이 암석시편의 내부로 침투하여 시편의 열물성을 교란시키지 않도록 하려는 의도에서 바셀린을 사용하지 않았으며 따라서 실험의 일관성 확보를 위해 표준시편의 calibration에서도 바셀린을 사용하지 않았다. 열원과 열싱크의 온도는 그 평균온도가 주변온도보다 한 클릭 높도록 하고, 온도차는 각각 +10, -10°C가 되도록 설정하였다. 각 열전대온도(T_1, T_2, T_3, T_4) 모니터링에서는 시편을 장착한 후 1,000 sec 동안 1 sec 마다 온도를 저장하였는데, 반복성과 정밀도를 높이기 위하여 전체 측정기간 동안 실내온도가 1°C 이내로 변하는 일정한 시간(09:50 ~ 14:20)에만 수행하였다. 열전도도 환산에 사용할 온도 시계열의 창(t)은 전체 모니터링 구간 1,000 sec 중 마지막 100 sec로 하고 이 구간의 온도를 평균하여 사용하였다.

먼저, PEDB 제작사에서 제공한 18개 표준시편(Table 2 참조)의 열전대온도를 모니터링하고 calibration 곡선을 얻었다. 표준시편의 직경과 길이는 버니어 캘리퍼스로 시편마다 9번 측정하고 평균하여 사용하였다.

표준시편의 열전대온도로부터 곡선접합으로 얻은 calibration

Table 2. Nominal and measured dimension of the standard samples.

	Nominal thickness (mm)	BQ		NQ		HQ	
		Diameter (mm)	Thick (mm)	Diameter (mm)	Thick (mm)	Diameter (mm)	Thick (mm)
QZ (quartz)	12	36.85	12.07	48.00	12.09	64.94	12.12
KU (fused quartz)	8	37.01	8.36	48.00	8.35	59.90	8.36
	12	36.92	12.32	47.90	12.29	60.01	12.27
	16	36.88	16.30	47.98	16.28	60.03	16.30
	20	36.92	20.22	47.88	20.21	60.00	20.24
	25	36.92	25.31	47.85	25.31	59.99	25.34

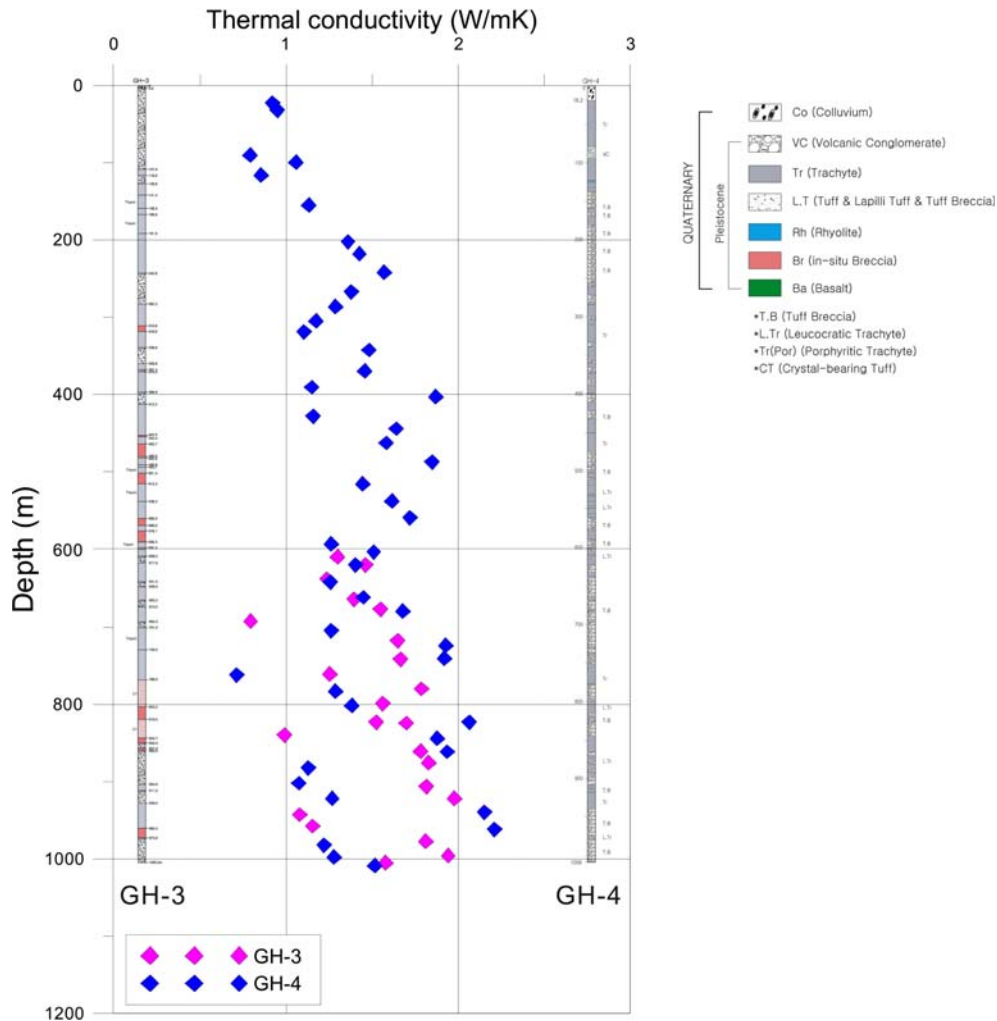


Fig. 7. Thermal conductivity of the samples from GH-3 and GH-4 in Ulleung Island as a function of depth. Columnar geological sections of the two boreholes are superimposed on the figure.

곡선은 곡선접합에 의해 다음의 식으로 집합(fitting)된다.

$$R = 1.84734 X^2 + 0.598296 X - 8.6486 \times 10^{-4} \quad (3)$$

여기서, R 은 열비저항(thermal resistivity; mK/W)으로 열전도도의 역수이며, $X = A^x \times \Delta T$; A 는 단면적 (m^2); x 는 제작사에서 제공하는 formation factor이고, ΔT 는 식 (1)로 표현되는 온도차 함수이다. 집합도(R^2)은 99.9048%로 매우 양호하였다.

울릉도 내 두 개의 시추공(GH-3, GH-4)에서 얻은 70개의 암석코어를 직경이 두께보다 긴 디스크 형태로 성형하고 각각의 열전대온도를 표준시편에서와 동일한 방법으로 모니터링한 후 시편의 두께, 직경 및 ΔT 를 표준시편으로부터 얻은 집합곡선에 내삽하여 열전도도를 산출하고 Table 3에 정리하였다.

Fig. 7은 심도 변화에 따른 열전도도를 나열하고 암석명을 기재한 주상도와 함께 보인 것인데, 암종과 열전도도와는 특별한 상관성을 보이지 않는다. 두 개 시추공에서 얻은 암석시편 열전도도의 유일한 특징은 심도 증가에 따라서 대체로 열전도

도가 커지는 경향이 있다는 것이며 이 특징도 군데군데 예외적으로 낮은 열전도도를 나타내는데 이렇게 낮은 열전도도를 보이는 시편의 암종에도 일관성은 없다. 암종별로 유의할 만한 차이가 발견되지 않는 것으로 보아 열전도도 변화의 주요인은 암석을 구성하는 광물학적 차이로부터 기인한다기보다 기계적인 구조 차이에서 기인하는 것으로 추정된다.

결론

가열한 물을 열원으로 사용하는 기존의 divided bar형 열전도도 측정기에 비해 여러 장점을 갖고 있다는 PEDB를 도입·이용하여 울릉도 시추공(GH-3 및 GH-4)에서 얻은 70개 시추코어의 열전도도를 측정하고 그 활용성 검증과 함께 울릉도 시추코어의 열전도도 특성을 개괄적으로 살펴보았다.

열접촉 보조제인 바셀린을 사용하는 경우보다 사용하지 않는 경우의 ΔT 가 약 4 ~ 5% 크게 측정되어 바셀린을 사용하

Table 3. Thermal conductivity of the core samples from Ulleung Island.

(LT: Lapilli Tuff, Tr: Trachyte, PTr: Pophyry Trachyte, Tf: Tuff, TB: Tuff Breccia)

Borehole GH-3				Borehole GH-4			
Core ID	Depth (m)	Rock type	TC (W/mK)	Core ID	Depth (m)	Rock type	TC (W/mK)
GH-3-01	609.4	LT	1.298	GH-4-01	23.7	PTr	0.923
GH-3-02	620	Tr	1.462	GH-4-02	32.85	PTr	0.950
GH-3-03	638	Tr	1.238	GH-4-05	90.55	LT	0.794
GH-3-04	664.3	LT	1.397	GH-4-06	100.2	PTr	1.057
GH-3-05	677	Tr	1.550	GH-4-07	116.6	PTr	0.856
GH-3-06	692.5	PTr	0.795	GH-4-09	155.15	TB	1.134
GH-3-07	717.6	PTr	1.647	GH-4-11	202.5	LT	1.359
GH-3-08	742	Tr	1.664	GH-4-12	218.15	TB	1.426
GH-3-09	761	Tr	1.253	GH-4-13	241.8	TB	1.570
GH-3-10	780	Tf	1.786	GH-4-14	267.25	PTr	1.378
GH-3-11	799	Tf	1.560	GH-4-15	286.7	PTr	1.288
GH-3-12	821.5	Tf	1.696	GH-4-16	304.55	PTr	1.176
GH-3-13	823	Tf	1.522	GH-4-17	319.25	Tr	1.105
GH-3-14	840	Tf	0.992	GH-4-18	342.4	PTr	1.481
GH-3-15	860.5	LT	1.781	GH-4-19	369.75	LT	1.457
GH-3-16	875.5	LT	1.826	GH-4-20	390.45	PTr	1.151
GH-3-17	906	Tf	1.814	GH-4-21	402.85	LT	1.870
GH-3-18	922	LT	1.977	GH-4-22	427.5	TB	1.158
GH-3-19	942.5	Tf	1.078	GH-4-23	443.85	PTr	1.64
GH-3-20	957.5	Tf	1.155	GH-4-24	462.5	PTr	1.581
GH-3-21	977	LT	1.809	GH-4-25	487.05	TB	1.848
GH-3-22	996	LT	1.941	GH-4-27	515.45	TB	1.446
GH-3-23	1004.5	LT	1.578	GH-4-28	537.85	PTr	1.615
				GH-4-29	559.15	Tr	1.719
				GH-4-30	592.7	TB	1.262
				GH-4-31	603.15	LT	1.509
				GH-4-32	620	LT	1.403
				GH-4-33	642	LT	1.256
				GH-4-34	662	LT	1.447
				GH-4-35	680	TB	1.677
				GH-4-36	704.5	LT	1.262
				GH-4-37	724	LT	1.928
				GH-4-38	741	LT	1.918
				GH-4-39	762.3	PTr	0.712
				GH-4-40	783.3	LT	1.286
				GH-4-41	801.5	PTr	1.381
				GH-4-42	823	LT	2.062
				GH-4-43	844	LT	1.878
				GH-4-44	861.5	LT	1.937
				GH-4-45	882	PTr	1.131
				GH-4-46	902	LT	1.074
				GH-4-47	922	PTr	1.268
				GH-4-48	939.5	PTr	2.151
				GH-4-49	962	TB	2.208
				GH-4-50	982	TB	1.221
				GH-4-51	997.2	TB	1.279
				GH-4-52	1008.7	PTr	1.515

면 시편의 열전도도가 다소 높게 평가된다. 표준시편에서보다 접촉면이 고르지 않은 암석시편에서는 그 차이가 더 크게 나타난다. 열원의 온도를 달리하는 경우의 영향은 실내온도 변화의 영향에 비해 미미한 수준이며, 상온환경에서 측정하는 경우에 3 ~ 4일 동안에도 측정 시간대가 다르면 $\Delta T_{30_Average}$ 에서 약 7% 정도 크게 차이를 보일 수 있고 외기 온도가 급격히 상승하는 시간대에는 열전대 온도를 한번 모니터링 하는 짧은 동안(예: 1000 sec)에도 ΔT 가 3% 이상 차이날 수 있으므로 상온환경에서 열전도도를 측정할 때는 하루 중 실내온도가 안정화된 후 유사한 시간대에 측정하는 것이 좋다. 실내온도의 영향은 당연히 시편의 두께가 두꺼운 때에 크게 나타난다. 하나의 시편에 대해 다른 날짜에, 여러 번(여기서는 11회) 반복 측정 하더라도 실내온도가 안정적인 시간대(여기서는 09:50 ~ 14:20) 중 거의 유사한 실내온도(여기서는 1°C 이내)에서 열전도도를 측정하면 표준시편에서는 $\pm 0.3\%$ 이내, 암석시편에서는 $\pm 4\%$ 이내의 좋은 반복성을 얻을 수 있다. ΔT 를 평균할 창 길이(t)는 ΔT 시계열의 주기성을 시각적으로 관찰하여 적어도 한 주기가 포함될 수 있는 길이로 결정하는 것이 타당하다. 울릉도의 두 지열 조사공에서 얻은 암석코어의 열전도도는 심도 증가에 따라서 대체로 열전도도가 커지는 경향이 있었으나 암종 변화와 특별한 상관성을 보이지는 않았다. 따라서 열전도도 변화의 주요인은 암석을 구성하는 광물학적 차이

보다 기계적인 구조 차이에서 기인하는 것으로 추정된다.

감사의 글

이 연구는 한국에너지기술평가원 기술혁신사업(과제번호: 20143030110950과 20123010110010)의 지원을 받아 수행되었다.

References

- Beardsmore, G. R. and Cull, J. P., 2001, *Crustal heat flow – A guide to measurement and modelling*, Cambridge Univ. Press, 324p.
- Kim, H. C., Kim, S.-K., Park, D.-W., Park, I. H., Park, C. H., Baek, S.-K., Song, Y., Shim, B. O., Oh, J.-H., Lee, S. K., Lee, Y., Lee, C.-W., Lee, T. J., and Hwang, J.-H., 2015, *Korea geothermal atlas*, Korea Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), ISBN 979-11-85861-13-5.
- Lee, T. J., Lee, S. K., and Yun, K.-H., 2015, Electrical Resistivity at Room Temperature and Relation between Physical Properties of Core Samples from Ulleung Island, *Geophysics and Geophysical exploration*, **18**(4), 171-180.
- Pollack, H. N., Hurter, S. J., and Johnson, J. R., 1993, Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set, *Reviews of Geophysics*, **31**(3), 267-280.