

지하처분연구시설 부지 화강암의 열전도도

조원진^{1)*}, 권상기¹⁾, 최종원¹⁾

Thermal Conductivity of Granite from the KAERI Underground Research Tunnel Site

Won-Jin Cho, Sang-Ki Kwon and Jong-Won Choi

Abstract To obtain the input data for the design and long-term performance assessment of a high-level waste repository, the thermal conductivities of several granite rocks which were taken from the rock cores from the declined borehole were measured. The rock specimens were sampled at the various depths from the surface, and the thermal conductivity was measured under the dry and water-saturated conditions. Under the dry condition, the thermal conductivities of the granite rocks decrease with increasing porosity and range from 2.1 W/mK to 3.1 W/mK . The water-saturated rock samples showed greater thermal conductivities than the dry samples, and the thermal conductivities of the granite rocks range from 2.9 W/mK to 3.6 W/mK . The anisotropy effects on the thermal conductivity of granite of the site seem to be insignificant.

Key words granite, thermal conductivity, porosity

초 록 고준위폐기물처분장의 설계 및 장기 성능평가를 위한 입력자료를 확보하기 위해, 한국원자력연구원 지하 처분연구시설 부지에서 실시된 경사시추에서 얻은 암석 코어를 이용하여 화강암의 열전도도를 측정하였다. 측정을 위한 시료는 다양한 지표면으로부터의 심도에서 채취되었으며, 건조 조건과 물로 포화된 조건에서 열전도도가 측정되었다. 건조 조건에서 화강암의 열전도도는 공극률이 증가함에 따라 감소하였으며, 2.1 W/mK 에서 3.1 W/mK 사이의 범위에 있었다. 동일 암석 코어에서 얻은 화강암 시료에 대해 포화 조건에서 측정된 화강암의 열전도도는 건조 조건에서 측정된 값보다 큰 값을 나타내어 2.9 W/mK 에서 3.6 W/mK 사이의 범위에 있었다. 조사부지 내 화강암의 열전도도에 대한 이방성의 영향은 작은 것으로 나타났다.

핵심어 화강암, 열전도도, 공극률

1. 서 언

열전도도는 물질을 통한 열전달을 결정하는 물리적 파라미터로서, 열에너지의 수송 및 교환이 이용되는 다양한 산업 분야에서 매우 중요시되고 있는 물성이다. 암석의 열전도도는 지하에 매설된 스팀 및 온수 배관으로부터의 열손실률을 추정하거나, 암반층에서의 온도 분포를 해석하기 위해 필요하다. 또 지열 에너지의 개발을 위한 지열 유량의 산출과 퇴적 구조의 온도를 모델링하는데도 암석의 열전도도에 관한 지식이 요구된

다. 원자력산업 분야에서는 암석의 열전도도가 고준위 폐기물 처분장의 중요 설계인자 중의 하나로 고려되고 있다.

고준위폐기물 처분장은 지하 수백 미터 깊이에 있는 심부 지층에 건설된 여러 개의 처분동굴들과 이를 연결하는 터널로 구성된다. 현재 제안되고 있는 고준위폐기물 처분장의 설계개념[강 등, 2003; Simmons and P. Baumgartner, 1994]에 따르면, 처분동굴 바닥에 수직으로 처분공을 굴착하고, 그 속에 방사성폐기물을 밀봉한 처분용기를 넣은 후 처분용기와 처분공의 암반 벽 사이의 공간은 완충재(buffer material)로 충전시킨다. 처분동굴 내의 처분공들이 모두 폐기물로 채워지면, 처분동굴과 연결 터널들은 뒷채움재(backfill material)로 채운 후 폐쇄한다. 고준위폐기물 처분장이 폐쇄된 후, 완충재 및 근계영역(near-field) 암반 내에서는 폐기물로부터 붕괴열의

¹⁾ 한국원자력연구원, 고준위폐기물처분연구부

* 교신저자 : wjcho@kaeri.re.kr

접수일 : 2008년 5월 30일

심사 완료일 : 2008년 6월 24일

게재 확정일 : 2008년 6월 24일

방출, 주위 암반으로부터 지하수의 침투, 지하수의 침투에 따른 완충재의 팽윤과 이로 인한 응력변화가 동시에 일어난다. 이 열-수리-역학적 복합거동(coupled thermal, hydraulic and mechanical behavior)은 고준위폐기물처분장의 설계 및 장기 성능평가에 중요한 영향을 미치므로 이를 규명하기 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 근계영역 암반의 열전도도는 열-수리-역학적 복합거동을 좌우하는 중요 인자로서, 고준위폐기물로부터 발생하는 붕괴열을 주위 암반으로 발산시키는 것을 좌우하여, 처분장 및 주위의 온도 분포를 결정하는 역할을 한다. 따라서 고준위폐기물처분장의 설계 및 장기 성능 평가를 위해 암석의 열전도도에 대한 지식이 요구된다.

여러 산업 분야에서 암석의 열전도도의 중요성이 높아짐에 따라 국내외 여러 연구자들에 의해 암석의 열전도도가 측정되어 왔다. 박 등(2007)은 경기도, 강원도, 충청도 일대에서 채취된 화성암, 변성암 및 퇴적암의 열물성을 측정하였으며, Boynton(1966)은 백색 대리석, 석회석 및 돌로마이트(dolomite)의 열전도도를 보고하였다. Weast(1972)는 석회석의 열전도도를, Thomas 등(1973)과 Zierfuss(1969)는 탄산염암(carbonate rock)의 열전도도를 보고하였으며, Bloomer(1981)와 Midttoomme 등(1998)은 이암의 열전도도를 측정하였다. Brigaud and Vasseur(1989)는 퇴적암의 열전도도를 보고하였다. 그러나 보고된 열전도도 데이터는 주로 퇴적암에 치우쳐 있고, 그 양도 제한되어 있으며, 특히 우리나라에서 고준위폐기물처분장의 건설을 위해 고려되고 있는 지층의 암종인 화강암에 대한 열전도도 데이터가 보고된 사례는 상대적으로 드물다.

따라서 이 연구에서는 한국원자력연구원의 지하처분

연구시설(KURT)의 부지의 다양한 지표면으로부터의 심도에서 채취된 화강암의 열전도도를 측정하고, 화강암의 열전도도에 미치는 중요인자들의 영향을 분석하고자 하였다.

2. 연구 대상 부지

한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)은 2006년 11월에 대전에 위치한 연구원 부지 후면 산지에 지하처분연구시설(KURT, KAERI Underground Research Tunnel)을 건설하였다. 지하처분연구시설에서는 심부 암반에 건설된 고준위폐기물처분장의 환경을 모사할 수 있으므로, 방사성폐기물처분과 관련된 다양한 연구를 수행할 수 있으며, 방사성물질을 전혀 사용하지 않는 비방사성시설이므로, 주위환경에 대한 악영향은 없다[Cho et al. 2008]. 지하처분연구시설 부지의 암종은 우리나라에서 고준위폐기물처분장 대상 암종으로 고려되고 있는 화강암이다. 부지 주위의 지질은 그림 1과 같다. 부지의 지층의 상태와 지반공학 특성, 기반암의 분포상태 및 풍화도 등을 파악하고, 설계에 필요한 지반 자료를 얻기 위하여 지표지질조사, 물리탐사, 수직 및 경사시추조사가 실시되었다(Kwon et al., 2006). 경사시추는 하향경사 10%로 지하처분연구시설 진입터널의 진행방향과 동일하게 252 m 시추하였다. 경사시추 결과, 시추공 입구에서 4 m까지는 풍화토, 14 m까지는 풍화암, 28 m까지는 연암이 나오며 그 이후에는 경암이 나타난다. 시추공을 따른 암반의 상태는 입구에서 90 m까지는 절리가 많으나, 90~110 m 구간에는 양호한 암반이 나타난다. 110~125 m 구간은

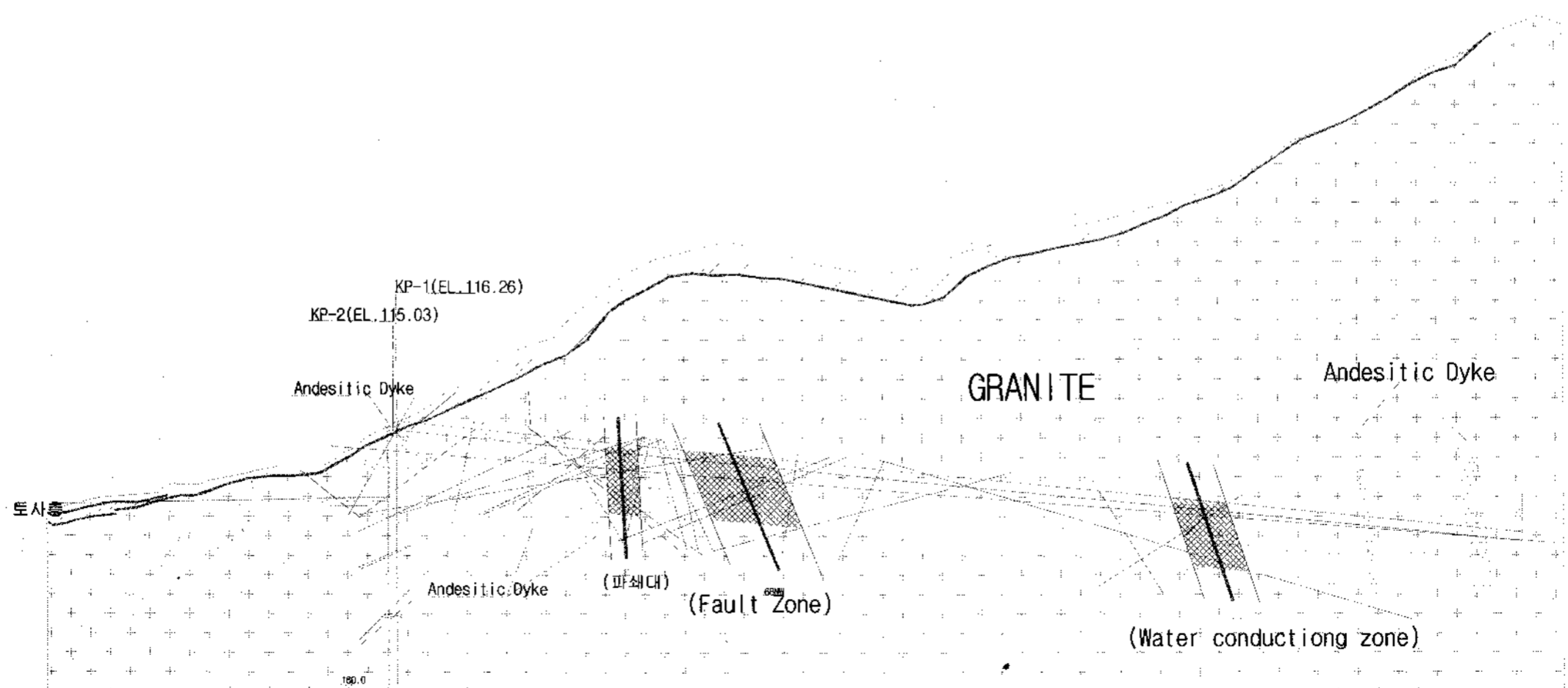


Fig. 1. Topography and geological condition of the KURT site

절리가 많으며, 이후 180 m까지 양질의 경암 구간이 계속되다가 180~190 m에서 파쇄대가 나타나며, 그 이후에는 252 m까지 양호한 암반이 나타났다. 지표로부터 70 m 및 75 m인 두 지점에서 폭 0.8 m 및 2 m인 단층이 확인되었으며, 1차 및 2차 파쇄대는 각각 NW 및 NE 방향이었다. 세 개의 단층과 파쇄대(F-3, F-4, F-5)가 경사 시추공을 교차하였다(그림 1). 경사 시추공을 따른 암반 상태의 변화는 그림 2와 같이 RMR의 변화로 나타낼 수 있다. 경사 시추공을 따른 암반의 분류는 RMR이 41보다 큰 영역은 전체 범위의 85%이었으며, RMR이 81보다 큰 영역은 전체 범위의 약 24%였다. RMR을 기준으로 한 암반의 분류에 따르면 RMR이 61에서 80인 경우는 “good rock”으로, 81 이상인 경우는 “very good rock”으로 구분된다(Bieniawski, 1989). 암반층의 평균 RMR은 64이었다. 암반의 RQD는 35에서 79 사이로, 평균값은 71이었다[Kwon et al., 2006].

지하처분연구시설의 모암은 복운모 화강암으로서 국지적으로 흑운모가 우세한 흑운모 화강암의 양상을 보이며, 시설의 일부 구간에서는 편리가 발달한 편상 흑운모 화강암의 양상을 보이기도 한다. 시추 코어에서 관찰되는 일부구간에서는 세립의 황철석의 산출과 함께 열수변질양상이 관찰되며 일부 단열대에서는 산화철광물이 세맥상으로 산출된다. 신선한 모암의 장석은 알바이트에서 올리고클레이스까지의 조성을 보이고 흑운모는 엔나이트와 흑운모사이의 좁은 범위의 조성을 보이면서 Al이 결핍된 조성을 보인다. 전체적인 연구지역 화강암의 SiO₂의 함량은 66.4~75.0%로 산성암에 해당되며, 지화학적으로 칼크-알칼린계열 및 I-type에 속하면서 과알루미나 성질을 나타내고, 0.96~1.21범위의 알루미늄 포화지수를 갖는다[김 등, 2007].

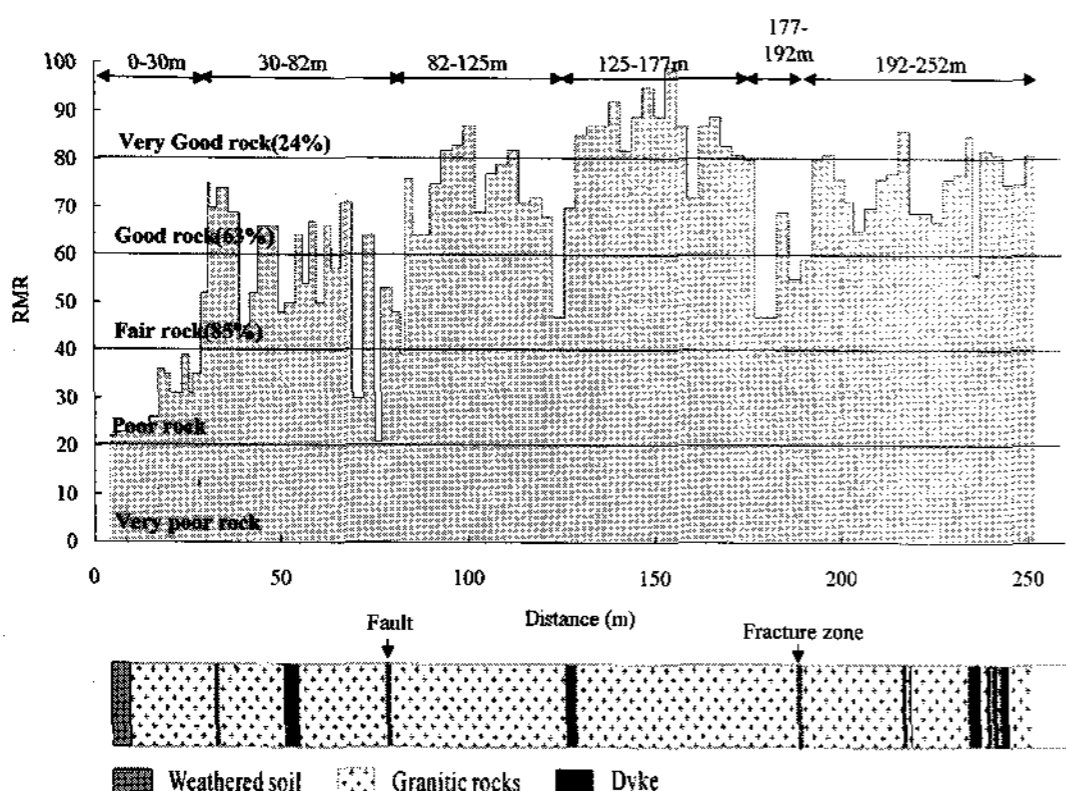


Fig. 2. Variation of the RMR along the declined boreholes

3. 실험

3.1 화강암 시료

화강암의 열전도도 측정을 위한 시료는 경사시추공에서 얻은 암석 코어로 부터 채취하였다. 경사 시추공으로부터 얻은 여러 지표면으로부터의 심도의 화강암 암석 코어 14개로부터 각 1개의 시료를 채취하여, 총 14개의 시료에 대해 유효공극률(effective porosity)과 밀도를 ASTM C 97-02 방법으로 측정하였다.

3.2 열전도도 측정

열전도도를 측정하기 위해, 경사 시추에서 얻은 원통형 암석 코어 시료를 150×40×20 mm 크기의 직육면체형 시편으로 가공하였다. 화강암의 열전도도는 건조 조건과 포화 조건에서 측정하였다. 건조조건에서 측정하기 위해 화강암 블록을 대류오븐 내에서 110℃로 48시간 동안 건조시킨 다음, 데시케이터에서 측정온도까지 냉각시켜 사용하였다. 포화 조건에서의 열전도도 측정을 위해 화강암 블록을 증류수에 48시간 담근 후, 꺼내어 표면을 종이 타월로 닦아 물기를 제거한 직후 측정하였다. 모든 측정은 25℃에서 행하여졌다. 화강암의 열전도도 측정에는 순간열전도측정계(Kyoto Electronics, QTM-500)가 사용되었다(그림 3). 이 기기는 비정상세선가열법(transient line source method)을 이용하며, 시편의 열전도도는 다음 식으로부터 구한다.

$$k = q \cdot \ln(t_2/t_1) / 4\pi(T_2 - T_1)$$

여기서 k : 시편의 열전도도 (W/mK)

q : 단위시간 당 발열량 (W)

t₁, t₂ : 측정시간

T₁, T₂ : 시간 t₁, t₂에서의 온도 (℃)



Fig. 3. Thermal conductivity meter and granite specimens

열전도도는 화강암 블록 면의 한 면에서 다른 면으로 열을 흐르게 하여 정방향 열전도도를 측정하고, 블록 면의 방향을 반대로 하여 열을 흐르게 하여 역방향 열전도도를 측정하였다. 이 두 값 중, 작은 것을 k_1 , 큰 것을 k_2 라 하고 두 값의 산술평균을 구하여 시편의 열전도도 값으로 하였다.

4. 결과 및 토의

암석은 금속이나 기타 인공 재료와는 광물 조성, 조직, 구조 등에서 큰 차이가 있는 비균질성, 이방성 매질이다. 이에 따라 보고된 암석의 열전도도 사이에는 많은 차이가 있고, 심지어는 비슷한 조성을 가진 암석들 사이에도 열전도도 값에 상당한 차이를 나타내기도 한다. 암석의 열전도도에 영향을 미치는 주요 인자들은 광물 및 화학 조성의 차이, 암석 조직 및 구조, 공극률 및 포화 유무 등이다. 여기서는 이런 인자들의 영향을 고려하였다.

화강암 시료의 채취심도와 밀도 및 유효공극률을 표 1에 나타내었으며, 경사 시추공 깊이 증가에 따른 화강암의 공극률 변화를 그림 4에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 깊이가 증가할수록 화강암의 공극률은 전반적으로 감소한다. 이것은 지표면으로부터의 심도가 증가할수록 지표로부터 멀리 떨어져 암석의 풍화가 적어지기 때문에 일반적으로 예상되는 경향이다. 건조조건과 포화조건에서 측정된 화강암의 열전도도를 표 1에 나타내었다. 건조조건에서의 화강암의 열전도도는 공극률이 큰 암석에서의 2.1 W/mK 과 공극률이 작은 경우

의 3.1 W/mK 사이의 값을 나타내었다. 포화조건에서는 화강암의 열전도도는 2.9 W/mK 와 3.6 W/mK 사이에 있었다. 물로 포화된 암석의 열전도도가 건조암석의 경우보다 큰 것은, 암석을 물로 포화시키면 암석의 공극 내에 들어 있는 열전도도가 작은 공기가 열전도도가 큰 물로 치환되기 때문이다.

화강암의 열전도도에 대한 유효공극률의 영향을 보기 위해 유효공극률과 열전도도 사이의 관계를 나타내면 그림 5 및 6과 같다. 그림 4에서 보는 바와 같이 화강암의 열전도도는 건조조건에서 일반적으로 시편의 유효공극률이 증가할수록 감소한다. 이것은 암석을 구성하

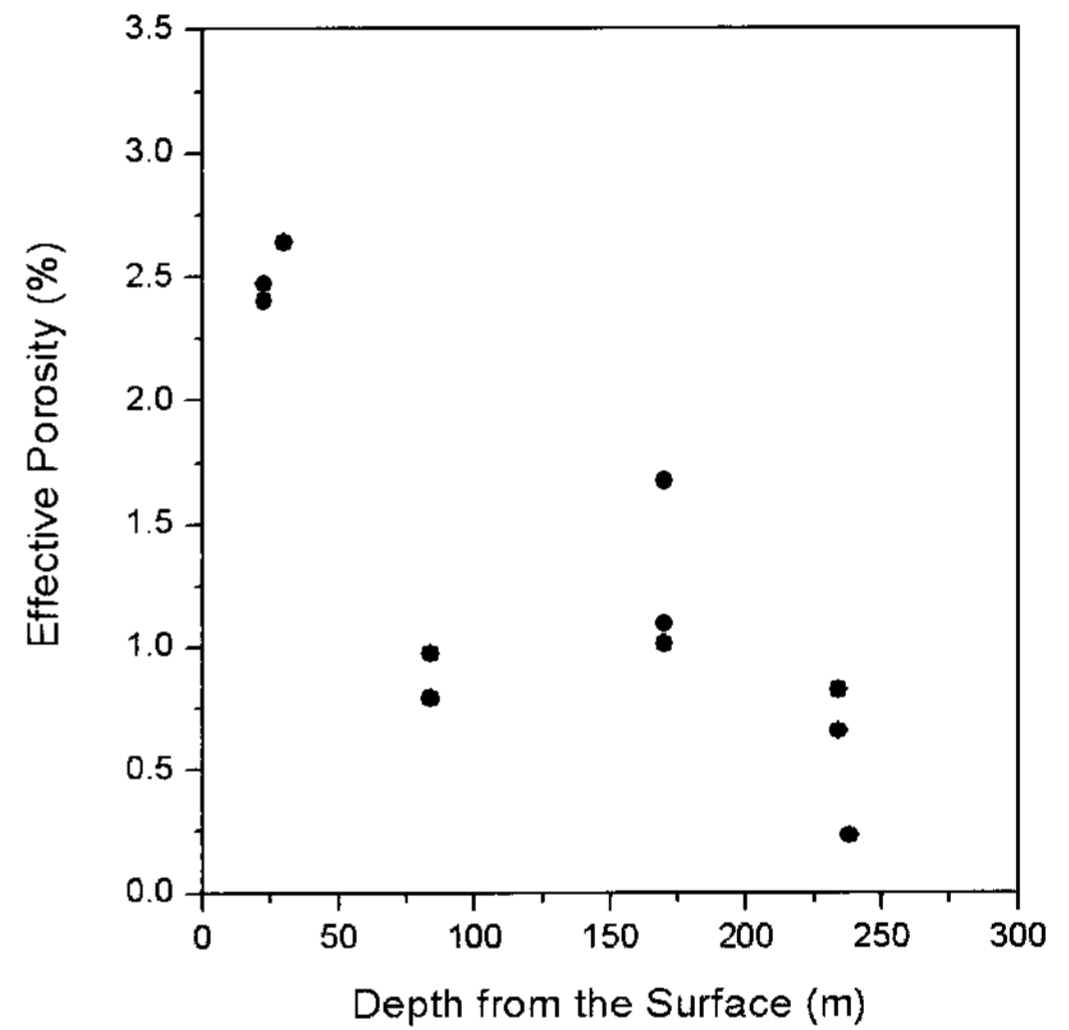


Fig. 4. Change in the porosity of granite with increasing depth

Table 1. Physical properties and thermal conductivities of the granite samples

sample No.	depth from the surface (m)	density (Mg/m^3)	effective porosity (%)	dry thermal conductivity (W/mK)			water-saturated thermal conductivity (W/mK)		
				k_1	k_2	average	k_1	k_2	average
GR1	23	2.64	2.40	2.187	2.361	2.274	3.118	3.363	3.240
GR2	23	2.63	2.47	2.048	2.200	2.124	3.160	3.243	3.202
GR3	30	2.61	2.64	2.320	2.571	2.446	3.610	3.636	3.623
GR4	84	2.63	0.97	2.977	3.114	3.045	3.288	3.384	3.336
GR5	84	2.64	0.79	2.999	3.013	3.006	3.257	3.478	3.367
GR6	134	2.68	0.56	2.510	2.837	2.674	3.018	3.242	3.135
GR7	134	2.69	0.51	2.657	2.697	2.677	2.887	2.968	2.927
GR8	134	2.68	0.56	2.680	2.768	2.724	2.957	3.027	2.992
GR9	134	2.68	0.56	2.667	2.980	2.824	2.874	3.015	2.945
GR10	170	2.66	1.67	2.999	3.246	3.122	3.180	3.464	3.322
GR11	170	2.67	1.01	2.977	3.094	3.036	3.145	3.257	3.201
GR12	170	2.61	1.09	3.041	3.054	3.047	3.339	3.467	3.403
GR13	234	2.63	0.66	3.001	3.012	3.007	3.177	3.213	3.195
GR14	234	2.63	0.66	3.090	3.017	3.053	3.188	3.282	3.235

는 광물들의 열전도도가 큰데 반해 공극을 채우고 있는 공기의 열전도도는 실온에서 $0.03 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 정도에 불과하기 때문으로 생각된다. 암석의 구성광물의 열전도도는 실온에서 $1\sim 7 \text{ W/mK}$ (Horai 1971)로 매우 차이가 큰데 반해, 그림 5에서 보는 바와 같이 화강암의 열전도도는 유효공극률이 비슷한 경우에는 차이가 크지 않다. 이로부터 화강암에 있어서는 열전도도에 미치는 구성광물의 영향이 그다지 크지 않다고 판단된다. 퇴적암의 경우에는 이와 달리 열전도도는 공극률과 수분함량 외에도 구성광물이 중요한 영향을 미친다고 보고되었다[Zierfuss 1969

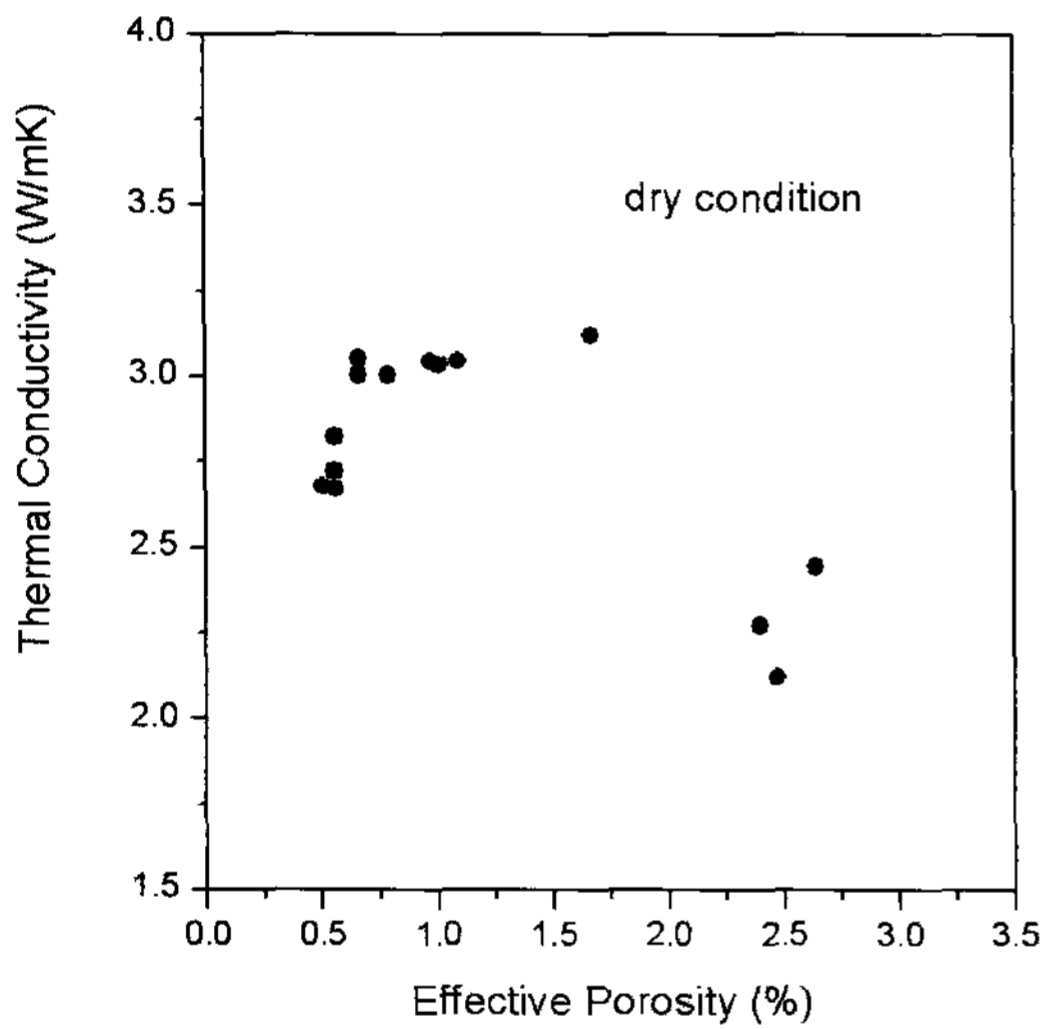


Fig. 5. Thermal conductivities of the granite samples under dry condition as a function of the effective porosity

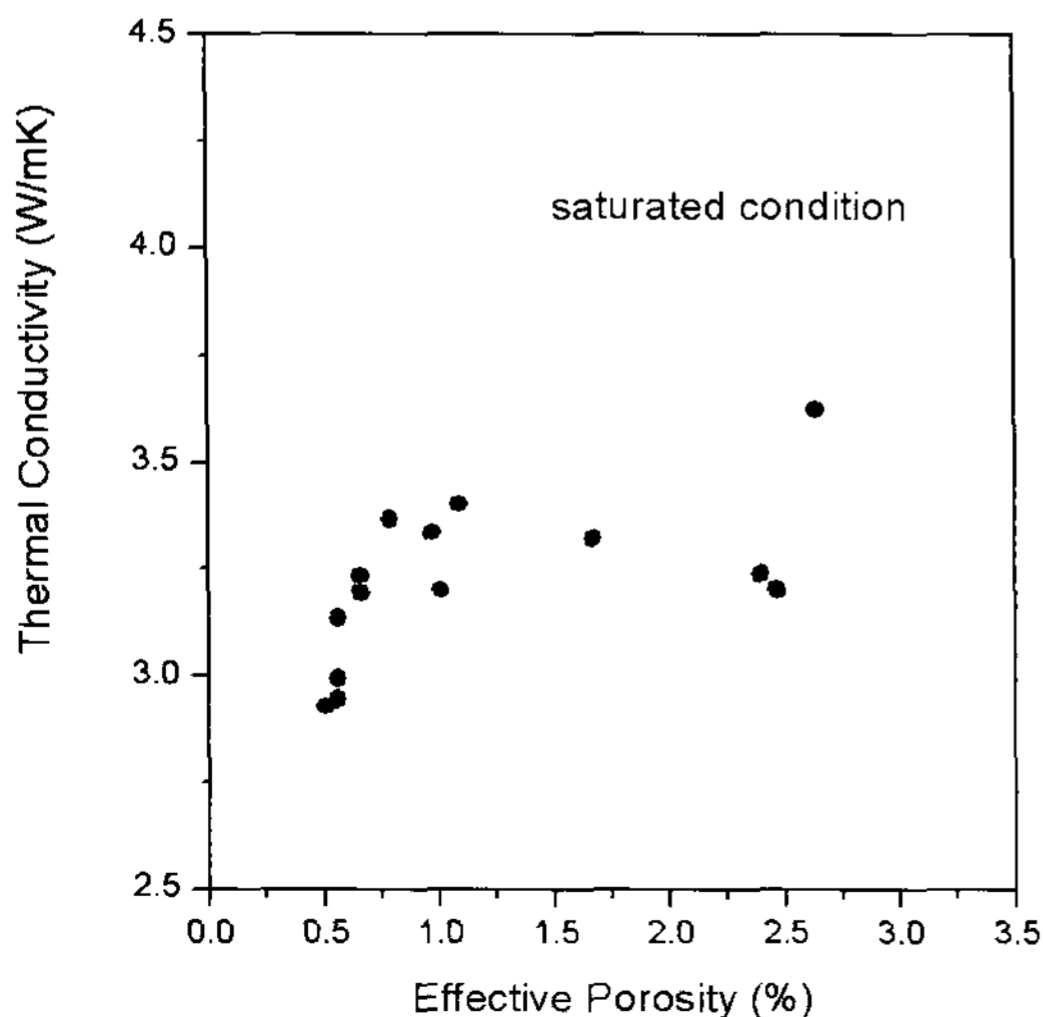


Fig. 6. Thermal conductivities of the granite samples under water-saturated condition as a function of the effective porosity

Horai 1971; Anand et al. 1973; Brigaud and Vasseur 1989]. 물로 포화된 조건에서 유효공극률 변화에 따른 화강암의 열전도도 변화를 그림 6에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 포화 화강암의 열전도도는 유효공극률의 증가에 따라 큰 차이가 없고, $3.2\sim 3.4 \text{ W/mK}$ 사이의 값을 나타낸다. 이것은 물의 열전도도가 실온에서 0.6 W/mK 정도로 상당히 커서, 화강암 시편에서 관측되는 유효공극률 정도에서는 공극이 물로 충전되어도 열전도도에 큰 영향을 주지 않기 때문인 것으로 추정된다. 건조조건에 비해 포화조건에서 열전도도가 증가하는 정도는 공극률이 작은 경우보다 공극률이 큰 경우에 더 크다.

퇴적암의 경우에는 열전도도가 이방성(anisotropic)인 특성을 보이며, 이것은 퇴적암의 층리 때문에서 비롯되는 것으로 보고되었다[Brigaud and Vasseur, 1989; Deming, 1994]. 퇴적암에서 수평 열전도도는 항상 수직열전도도보다 크며, 이방성 단일 결정에서도 열전도도의 방향에 따른 차이가 관측되었다[Thomas et al., 1973]. 연구에 사용된 화강암 시편에 대해 얻은 두 열전도도 값의 비 (k_2/k_1)를 그림 7과 8에 나타내었다. 그림들에서 보는 바와 같이, 열전도도의 이방성은 건조시편에서 비교적 크게 나타났고, 포화시편에서는 거의 나타나지 않았다. 또 건조시편에서는 유효공극률이 증가할수록 이방성이 증가하는 경향을 보였다. 이것은 화강암에서는 퇴적암과 달리 구성입자가 층을 이루지 않고, 다결정이 랜덤하게 배열되어 있기 때문에 이방성이 크지 않은 것으로 생각된다. 시편 내의 공극이 증가할수록, 공극의 기하학

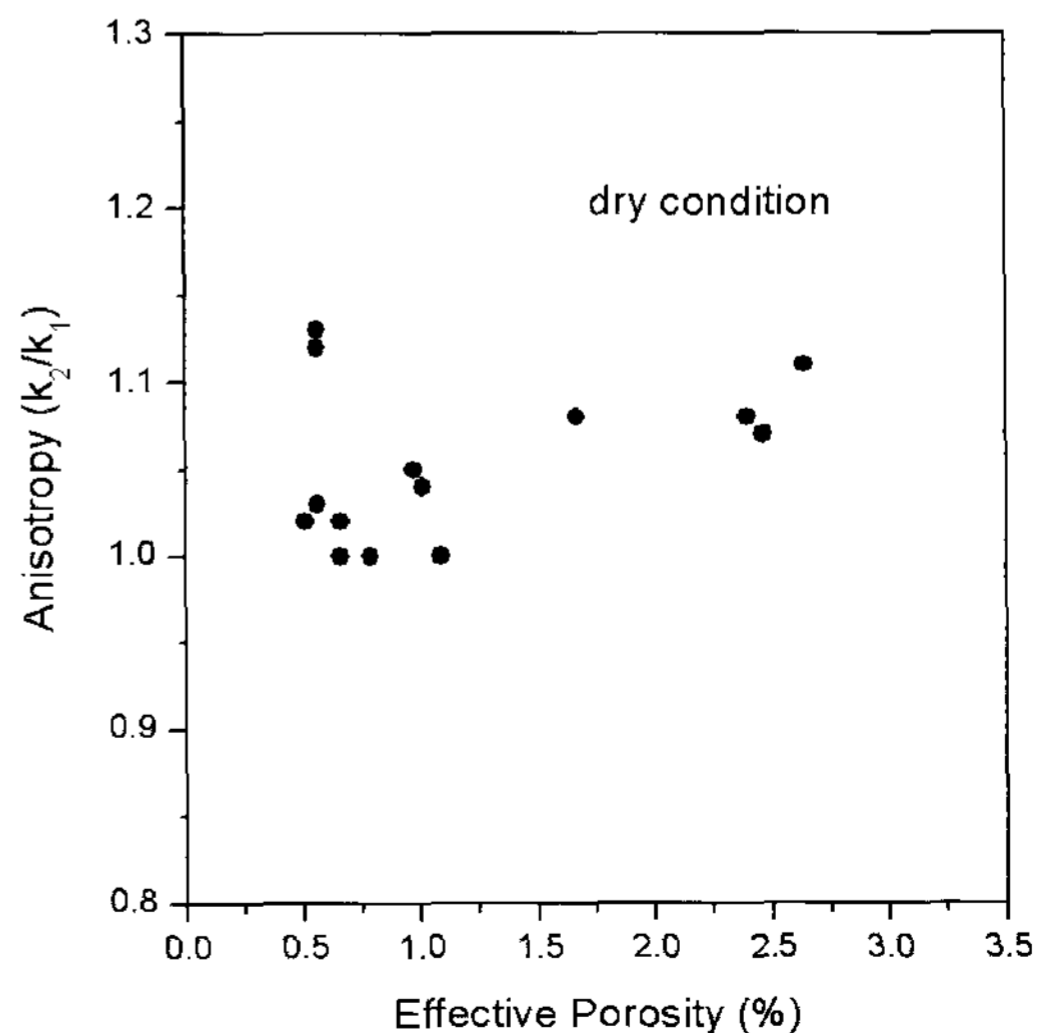


Fig. 7. Anisotropy of thermal conductivities of the granite samples under dry condition

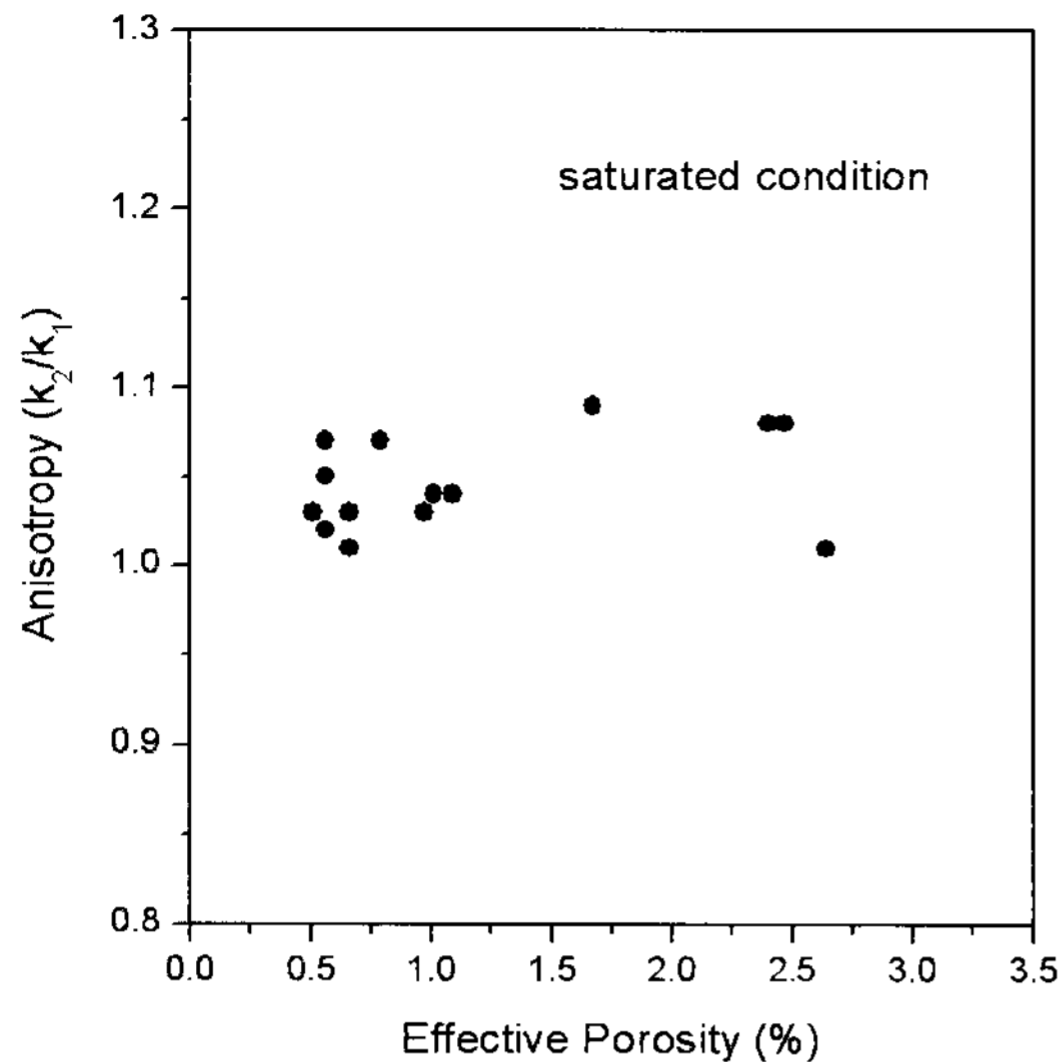


Fig. 8. Anisotropy of thermal conductivities of the granite samples under water-saturated condition

적 구조의 영향이 커져 이방성이 커지는 것이다. 물로 포화된 시편의 경우에는 화강암 내에 존재하는 불규칙한 형태의 공극이 상당한 열전도도를 가진 물로 채워져서 균일 매질처럼 되기 때문에 이방성이 현저하게 줄어드는 것으로 추정된다. 최근에 Davis 등[2007]은 화강암은 열전도 측면에서 등방성이라고 보고한 바 있다. 암석의 열전도도에 영향을 미치는 인자는 이 외에 온도가 있으나, 25~100°C의 온도 범위에서 화강암의 열전도도가 거의 일정하다고 보고되었다[Hasan, 1978]. 고준위폐기물처분장 주변 암반의 온도는 100°C 이하인 점을 고려하면, 고준위폐기물처분장 열해석 관점에서 열전도도에 미치는 온도의 영향은 중요하지 않다고 할 수 있다.

5. 결론

한국원자력연구원 지하처분연구시설 부지의 다양한 지표면으로부터의 심도에서 채취한 화강암의 열전도도를 건조 조건과 물로 포화된 조건에서 열전도도가 측정된 결과, 건조 조건에서 열전도도 값은 2.1 W/mK ~ 3.1 W/mK 사이의 범위에 있었으며, 포화 조건의 경우에는 화강암의 열전도도는 2.9 W/mK ~ 3.6 W/mK 사이로 동일 암석시편에 대해 건조 조건에서 측정된 값보다 큰 값을 나타내었다. 화강암의 열전도도는 건조조건에서는 공극률의 증가에 따라 감소했으나, 포화조건에서는 큰 영향이 없었다. 또 화강암의 열전도도에 대한 이방성의 영향이 중요하지 않은 것으로 나타났다. 이 결과는 고

준위폐기물처분장 설계 및 열 해석, 열-수리-역학적 복합 거동 해석을 위한 입력변수로 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 원자력증장기연 구개발사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. 강철형 외, 2003. 고준위폐기물처분기술개발-심지층처분 시스템개발, 최종보고서, KAERI/ RR-2336/2002, 한국 원자력연구소.
2. 김건영, 고용권, 최종원, 최병열, 신선호, 2007. 한국원자력연구원 지하처분연구시설의 암석, 광물, 지하수, 지하학 특성. 2007 한국방사성폐기물학회 추계학술대회 논문 요약집, 196-197.
3. 박정민, 김형찬, 이영민, 송무영, 2007. 경기도, 강원도, 충청도 일대의 암석 열물성 특성 연구. 자원환경지질, 제 40권 제6호, 761-769.
4. Anand, J., Sommerion, W. H., Goma, E., 1973. Predicting thermal conductivities of formations from other known properties. Soc. Petrol. Eng. J., 13, 267-273.
5. American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.07, 2002.
6. Boynton, R. S., 1966. Chemistry and Technology of Lime and Limestone, Wiley, New York, N. Y., p. 520.
7. Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications, Willey, New York.
8. Bloomer, J.R., 1981. Thermal conductivities of mudstones in the United Kingdom. Q. J. Eng. Geol., 14, 357-362.
9. Brigaud, F., Vasseur, G., 1989. Mineralogy, porosity and fluid control on thermal conductivity of sedimentary rocks. Geophysical Journal, 98, 525-542.
10. Cho, W.J., Kwon, S. and Park, J.H., 2008. KURT, A Small-Scale Underground Research Laboratory for the Research on High-Level Waste Disposal. Annals of Nucl. Energy, 35, 132-140.
11. Davis, M.G., Chapman, D.S. and Van Wagoner, T.M., 2007. Thermal conductivity anisotropy of metasedimentary and igneous rocks. J. Geophys. Research, 112, B05216.
12. Deming, D., 1994. Estimation of the thermal conductivity anisotropy of rock with application to the determination of terrestrial heat flow. J. Geophys. Research, 99, 22087-22091.
13. Hasan, S. E., 1978. Thermophysical properties of rocks, Symp. rock mechanics, 3, 210-214.
14. Horai, K., 1971. Thermal conductivity of rock-forming minerals, J. Geophys. Research, 76, 1278-1308.
15. Kwon, S., Cho, W.J. and Hahn, P.S., 2006. Concept development of an underground research tunnel for validating the Korean reference HLW disposal system. Tunnel. and Underground Space Tech., 21, 203-217.
16. Midttoo, T., Roaldset, E., and Aagaard, P., 1998.

- Thermal conductivity of selected claystones and mudstones from England. Clay Minerals, 33, 131-145.
17. Simmons G.R. and Baumgartner, P., 1994. The disposal of Canada's nuclear fuel waste: engineering for a disposal facility, Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-10715, COG-93-5.
 18. Thomas, Jr., I., Frost, R. R. and Harvey, R. D., 1973. Thermal conductivity of carbonate rocks. Eng. Geol., 7, 3-12.
 19. Weast, R.C., 1972. Handbook of Chemistry and Physics. The Chemical Rubber Co., Cleveland, Ohio, 52nd ed., p. E-5.
 20. Zierfuss, H., 1969. Heat conductivity of some carbonate rocks and clayey sandstones. Bull. Am. Assoc. Pet. Geol., 53(2): 251-260.

조원진



1979년 고려대학교 화학공학과 공학사
 1984년 한국과학기술원 핵공학과 공학석사
 1990년 한국과학기술원 핵공학과 공학박사

Tel: 042-868-8122
 E-mail: wjcho@kaeri.re.kr
 현재 한국원자력연구원 고준위폐기물처분 연구부

권상기



1987년 서울대학교 자원공학과 공학사
 1989년 서울대학교 자원공학과공학석사
 1996년 University of Missouri-Rolla, Mining Eng. 공학박사

Tel: 042-868-8914
 E-mail: kwonsk@kaeri.re.kr
 현재 한국원자력연구원 고준위폐기물처분 연구부

최종원



1980년 한양대학교 원자력공학과 학사
 1982년 한양대학교 원자력공학과 석사
 1992년 한양대학교 원자력공학과 박사

Tel: 042-868-8198
 E-mail: njwchoi@kaeri.re.kr
 현재 한국원자력연구원 고준위폐기물처분 연구부 부장