

터널과 지하공간, 한국암반역학회
Vol. 1, 1991, pp. 49~65

放射性 廢棄物 貯藏을 위한 火成岩의 熱力學的 舉動特性

申僖淳¹⁾, 鄭小杰²⁾

Thermomechanical characteristics of igneous rocks for the design of radioactive waste repositories

Hee Soon Shin and So Keul Chung

ABSTRACT

9 nuclear power plants are presently in operation in Korea.

They produce radioactive waste of which the most long-lived radioactive elements need to be safely stored for hundreds of thousands of years, isolated from humanity and the environment.

The safe disposal of high level radioactive waste in mined cavities requires knowledge of the mechanical, thermal, and fluid flow characteristics of rock as perturbed by a thermal pulse.

The literature review was performed to assemble data on the following properties : modulus, tensile strength, compressive strength, thermal expansion, specific heat, thermal conductivity, thermal diffusivity and permeability.

1. 序 論

放射性 廢棄物은 주로 原子力發電所, 核燃料
再處理施設과 산업체, 병원, 연구소 등 630여개
의 放射性 同位元素 이용기관으로 부터 나온다.

放射性 廢棄物은 放射能 및 發熱정도, 처리
방법에 따라 低準位 방사성 폐기물(LLW :
Low Level Waste), 中準位 방사성 폐기물(ILW
: Intermediate Level Waste), 高準位 방사성
폐기물(HLW : High Level Waste)로 나눈다.

* 1991年 5月 接受.

1) 正會員. 韓國動力資源研究所 岩盤工學研究室 선임연구원.

2) 正會員. 韓國動力資源研究所 岩盤工學研究室 室長.

輕重水爐 原子爐 9기를 가동하고 있는 우리나라에서는 연간 230~270톤의 使用後 核燃料가 발생하고 있으며 中·低準位 폐기물은 연간 6,250드럼 정도이다. 放射性 廢棄物이 계속 쌓여 가고 있는데 현재 폐기물을 임시 저장하고 있는 발전소내 저장시설이 거의 포화상태에 이르고 있다.

1978년 4월에 가동된 古里 원자력 발전소의 경우 中·低準位 폐기물은 1990년 9월말 현재 2백리터짜리 22,693드럼이 3개 저장고에 보관되고 있는데 91년에는 총 저장능력인 32,906드럼을 초과하게 되며 사용후 핵연료인 高準位 폐기물도 91년이면 古里 1호기의 水中 貯藏槽가 포화상태가 되어 3호기의 水中 貯藏槽로 이송해야 하는 다급한 실정에 있다.

정부는 국내의 각종 방사성 폐기물을 저장할 수 있는 시설을 만든다는 계획으로 中·低準位 폐기물은 높이 5~10m의 人工防壁을 만들어 폐기물을 淺層 처분방식으로 저장하며 이를 壓縮, 燒却, 中性子 조사 등을 통해 폐기물량과 방사능 半減期를 줄이고 폐기물로 부터 稀貴金屬을 추출해 자원으로 재활용 하는 방식을 택하고 있다.

현재 정부에서 추진하고 있는 방사성 폐기물 處分場은 中·低準位 處分場이지만 멀지않은 장래에 처리해야 할 高準位 폐기물이나 반감기가 지난 長壽命 폐기물이 문제로 대두될 것이다. 사용연한이 지난 核燃料에는 미처 연소되지 않은 核分裂 가능물질이 남게되는데 이를 분리 核燃料로 다시 쓰기위해 재처리한 뒤에도 남게되는 찌꺼기가 대부분 長壽命 高準位 폐기물이다.

高準位 방사성 폐기물을 지하 岩盤내에 안전하게 폐기하기 위해서는 岩盤의 熱膨脹, 彈性係數, 透水率 등을 포함한 力學的, 熱的, 流體流動 특성 등에 관한 자료가 필요하다.

熱的, 力學的 荷重에 대한 암반의 반응을 정확하게 예측하기 위해서는 岩石物性에 대한 입력자료로서 물리 화학적 과정에 기초한 數値모델이 포함되어 있다. 이들 物性들은 예상되는 深度의 조건하에서 반드시 결정 되어져야 한다.

방사성 폐기물의 경우 심도 2 km까지의 굴착된 처분장이 외국에서 고려되고 있으며 結晶質 火成岩이 이러한 처분장 후보지 중에 속한다.

본 연구에서는 방사성 폐기물 地下 處分場 설계에 입력자료로 사용될 수 있도록 기존 발표된 火成岩의 物性資料를 통하여 彈性係數, 引張強度, 壓縮強度, 熱膨脹, 比熱, 熱傳導, 熱擴散, 透水率 등에 대하여 다루고자 한다.

2. 放射性 廢棄物 處分에 관한 최근 경향

中·低準位 방사성 폐기물 처분장으로 스웨덴은 1988년 부터 처분장을 건설, 가동중에 있고, 핀란드, 헝가리, 유고슬라비아에서도 敷地를 선정 중에 있다. 高準位 放射性 폐기물 처분장으로는 스웨덴, 캐나다, 독일, 프랑스, 일본 등 대부분의 국가가 結晶質岩류를 對象 岩體로 선정하여 조사중에 있다.

스웨덴의 Stripa, 스위스의 Grimsel, 캐나다의 Underground Research Laboratory 등이 結晶質岩인 花崗岩을 대상으로 地下實驗室을 설치하여 岩盤의 熱力學的 특성, 岩盤力學, 採掘方法, 뒷채움방법, 地質特性, 地球物理 조사방법, 地下水流動, 地化學 核種移動 등에 관한 광범위한 연구를 국제연구 등을 통하여 실시하고 있다.

국내의 경우는 폐기물은 상태에 따라 蒸發, 濃縮, 燒却 및 固化과정을 거쳐 처리되고 있는

데 氣體 또는 허용치 이하의 液體 폐기물은 여과, 회석시킨 다음 大氣 또는 海洋으로 방출시키고 액체 폐기물을 농축시킨 것을 포함한 固體 폐기물은 鐵製 드럼통에 시멘트나 아스팔트로 固化시켜 원자력발전소내에 저장하여 두었다가 처분장으로 수송, 永久處分 된다.

原子力 發電에서 나오는 폐기물의 양은 發電 爐형과 폐기물 처리계통에 따라 다르지만 加壓 輕水爐형 原子爐의 경우는 1000MWe당 연간 1,670드럼, 加壓重水爐형 원자로의 경우 연간 840 드럼이며 폐기물의 구성은 雜固體가 50%, 증발기 농축액 固化體가 약 40%이며 기타 폐이온 교환수지, 폐필터 등으로 구성된다. 방사

능 함유량은 폐이온 교환수지가 가장 높아 전체 방사능의 약 90% 이상을 차지한다.¹⁾

使用後 核燃料저장시설은 古里 1호기가 이미 포화상태이고 月城 1호기가 1991년에, 古里 3호기가 1996년, 古里 4호기와 靈光 1호기가 1997년에 저장능력의 한계에 이르게 된다. (Table 1참조)

1988년 7월 제202차 原子力委員會에서 中·低準位 폐기물은 1995년 말까지 地下 50m에 길이가 200m인 동굴 18개를 굴착하여 25만드럼, 2000년까지 1백만드럼을 영구저장하고 使用後 核燃料는 깊이가 14m의 特殊貯藏水槽를

Table 1 放射性 廢棄物 발생현황(1990년 10월말 현재)²⁾

가. 中·低準位 放射性 廢棄物

(단위 : 200리터/드럼)

부 지	저장능력	연간 발생량	누계 발생량	예상 포화년도
古 里	32,906	3,000	22,693	1991
月 城	9,000	250	1,276	2020
靈 光	13,300	1,500	3,009	1997
蔚 珍	5,000	1,500	1,321	1993
計	60,206	6,250	28,299	

나. 使用後 核燃料

(단위 : 톤)

부 지	저장능력	연간 발생량	누계 발생량	예상 포화년도
古 里	1,233	78	445	1997
月 城	923	95	681	1991
靈 光	632	44	129	1997
蔚 珍	578	44	24	1999
計	3,366	261	1,279	

다. 放射性 同位元素 廢棄物

(단위 : 드럼)

발생기관수	연간 발생량	누 적 량	저 장 능 력
633	400	2,500	3,000

1997년말까지 건설하여 3000천톤을 중간저장할 방침을 세웠다.

中·低準位 방사성 폐기물은 陸地處分을 원칙으로 하고 있으나 외딴 섬에서의 처분도 고려하고 있다.

3. 熱應力下에서의 火成岩의 舉動 특성

방사성폐기물 地下貯藏所 설계를 위해서는 방사성폐기물의 熱荷重에 의해 岩石物性이 변화하는 양상을 파악할 필요가 있다.

발표된 문헌 조사를 통하여 高準位 방사성폐기물과 관련된 250°C 이상의 溫度範圍에서의 물성변화들을 다루었다.

3.1 彈性係數

13종의 花崗岩에 대해 常溫에서 실시된 시험에서는 압력이 52 MPa에서 4 MPa로 낮아지면 영률(Young's modulus, E)과 體積彈性率(Bulk modulus, K)은 대략 50% 감소하며 7종의 花崗岩에서는 0.1 MPa~52 MPa의 압력하에서 온도가 25°C에서 200°C로 증가하면 E와 K가 감소되는 양상을 보였다.^{3),4)}

McLarren와 Titchell⁵⁾는 花崗岩에 대한 최근 연구에서 압력이 0.1MPa인 조건하에서 550°C까지 加熱하면 動的 E는 11배 감소함을 발견하였는데 이를 構成鑛物사이의 熱膨脹차이로 인해 Crack이 형성된 때문으로 보았다. 靜的 E는 動的 E보다 균열의 폐쇄에 의한 영향을 더 크게 받으므로 온도 및 압력의 증가에 따른 靜的 E의 변화는 이보다 더 클것으로 예상된다.

여러 花崗岩에 대한 자료들^{3,5-9)}로 부터 Fig. 1, Fig. 2와 같이 E/E₀를 온도만의 함수로 표시하였다. 여기서 E₀는 常溫에서의 영률을 나타낸다.

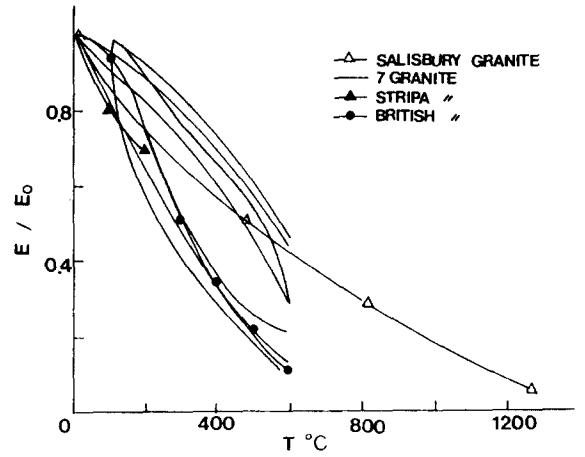


Fig. 1 Normalized modulus vs temperature at atmospheric pressure for several granites (After Heuze, 1983)

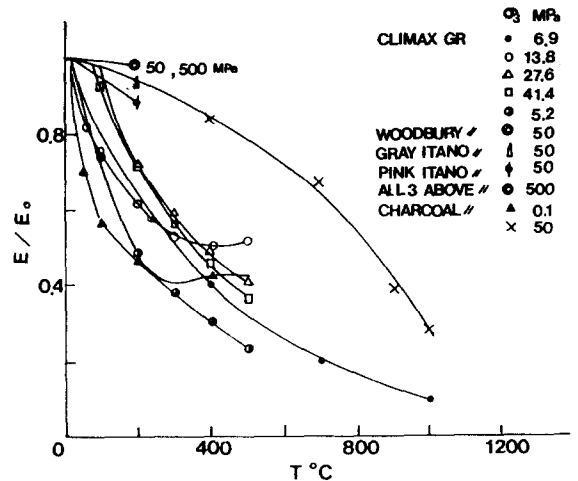


Fig. 2 Normalized modulus vs temperature, as influenced by pressure for several granites (After Heuze, 1983)

Charcoal 花崗岩에서 명확히 볼수 있는바와 같이 온도가 증가할 때 압력이 증가하면 E/E₀의 감소율이 줄어드는 경향이 있다.

Fig. 3은 압력이 7.6, 13.8, 27.6, 41.4, 55.2 MPa와 온도가 19~300°C의 조건에서 Westerly 花崗岩의 E를 구한것을 나타내고 있다.

E/E₀는 19°C와 55.2MPa에서 측정된 초기값

에 대한 압력 및 온도에 따른 영률의 변화정도를 나타낸다.

이그림은 조사된 압력 및 온도범위내에서 압력상의 48MPa 감소는 온도상에 280 °C 증가하는 것보다 영률을 더 낮추는데 효과적임을 보여준다.

Fig. 4는 Stripa 花崗岩의 경우인데 조사된 온도 및 압력범위는 19~350°C, 5.9~55.2MPa였다. Fig. 3과 Fig. 4를 비교하면 E에 대한 압력 및 온도의 영향은 두 花崗岩이 대략 유사하지만 Stripa 花崗岩이 압력의 변화에 좀더 민감한 것으로 보인다. Stripa花崗岩이 높은 압력하에서 온도에 의해 더욱 강하게 영향을 받지만 낮은 압력에서는 영률이 온도에 거의 의존하지 않는 것으로 보인다.

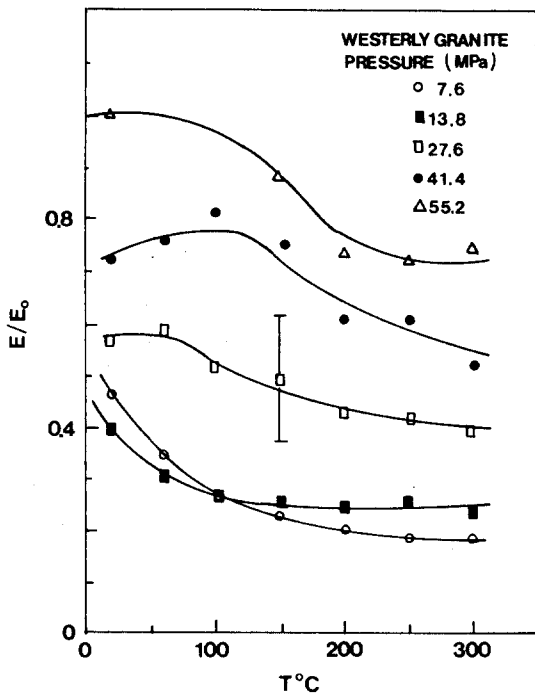


Fig. 3 Normalized Young's modulus E/E_0 vs temperature for Westerly granite (E_0 determined at 55.2 Mpa, 19°C) (After Heatd & page, 1982)

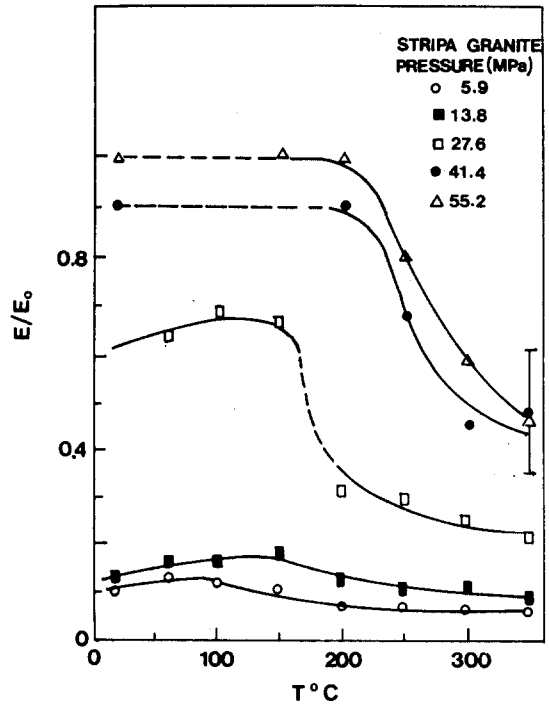


Fig. 4 Normalized Young's modulus E/E_0 vs temperature for Stripa granite (E_0 determined at 55.2 MPa, 19°C) (After Heard & Page, 1982)

최근 Meyer¹⁰⁾는 2~55MPa과 25~175°C에서 Stripa 花崗岩에 대하여 靜의 E를 구하였는데 가장 높은 압력에서는 온도에 따른 E의 변화를 발견치 못하였다. 5MPa에서는 25~175°C 범위에서 15% 감소함을 밝힌바 있다.

Westerly 花崗岩에서 K의 압력 및 온도에 따른 변화양상을 Fig. 5에 표시하였다. 여기서 K_0 는 19°C와 41.1~55.2 MPa상에서 취해진 값이다. 그림에서의 평탄한 곡선은 조사온도 범위에서 압력변화에 따라 K상에 70%까지의 매우 커다란 감소를 보인다.

Fig. 6은 Stripa花崗岩의 경우인데 낮은 온도에서는 Westerly 花崗岩보다는 Stripa 花崗岩의 K값이 압력의 증가에 따라 더 감소하지만 높은 온도에서는 민감도는 거의 같다.

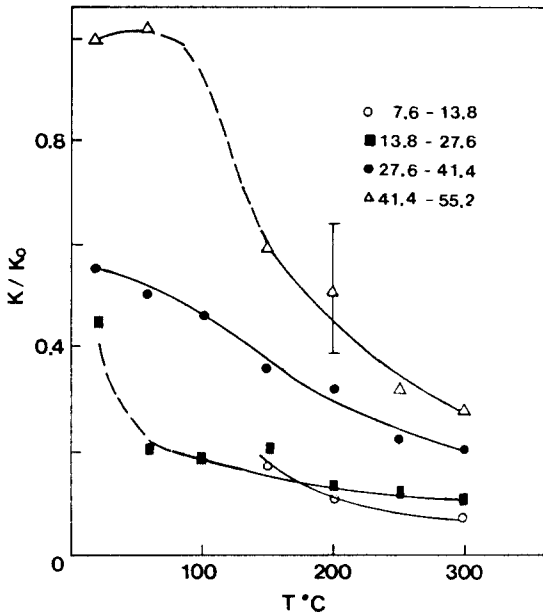


Fig. 5 Normalized bulk modulus K/K_0 vs temperature for Westerly granite (K_0 determined at 41.4–55.2 MPa, 19°C) (After Heard & page, 1982)

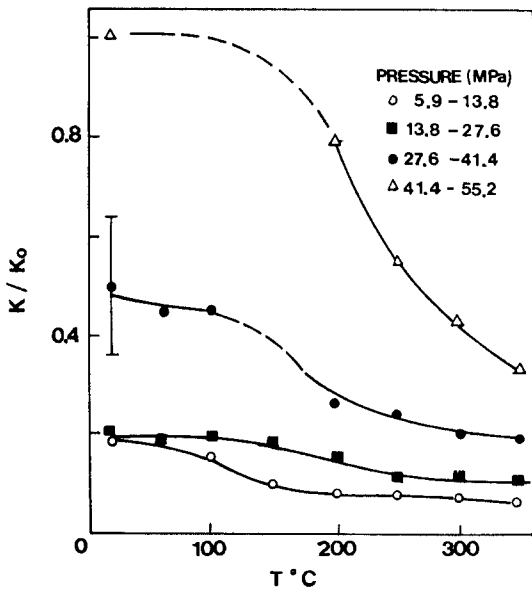


Fig. 6 Normalized bulk modulus K/K_0 vs temperature for Stripa granite (K_0 determined at 41.4–55.2 MPa, 19°C) (After Heard & page, 1982)

두 花崗岩에 있어서 모든 압력조건에서 온도가 K 값에 미치는 영향은 유사하다.

3.2 引張 強度 및 壓縮強度

Westerly 花崗岩과 Charcoal 花崗岩에 있어서 온도에 따른 引張強度 변화는 Fig. 7과 같다.⁹⁾

건조한 Westerly 花崗岩에 대하여 23~900 °C 온도조건하에서 三縮壓縮試驗을 실시한 결과는 다음 Fig. 8에서와 같다.¹¹⁾

이들 실험자료들을 사용하여 無次元 형태로 온도에 따른 摩擦(Friction)과 粘着力(Cohesion)의 변화를 산정하였다(Fig. 9, Fig. 10).

Stesky의¹²⁾는 摩擦力에 있어서 톱으로 자른 Westerly 花崗岩의 경우는 300°C까지, faulted Westerly 花崗岩은 600°C까지 온도에 영향을 받지 않았다고 발표한 바 있다. 또한 그는 300 MPa의 有效壓力(Effective pressure)에서 300 °C까지 faulted Westerly 花崗岩은 물에 대한 영향을 거의 받지 않는다고 결론지었었는데 이 사실은 건조 및 습윤 花崗섬록암에 대해 Bauer의¹³⁾에 의해 얻어진 실험결과와 잘 일치한다.

이상의 자료들은 Intact rock(新鮮岩)에 대

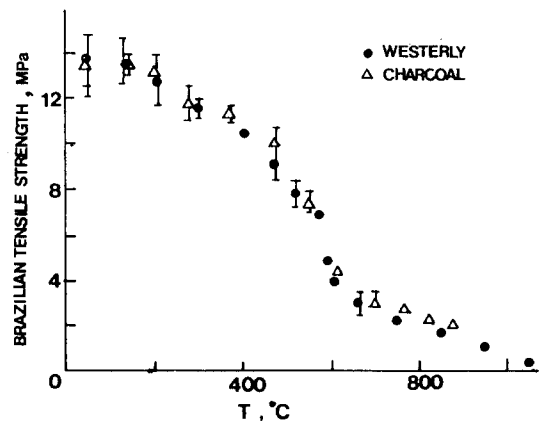


Fig. 7 Tensile strength of granites vs temperature (After Bauer & Johnson, 1979)

한 것으로 실제 암반의 變形특성과 強度는 節理와 균열 등에 의한 크기 효과(Scale effect) 때문에 상기한 자료들 보다 더 작을 것으로 예상된다.¹⁴⁾

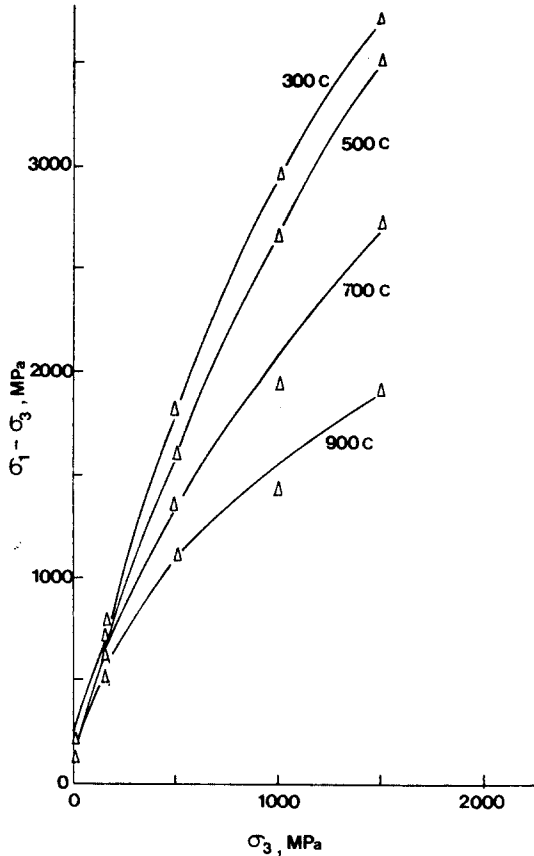


Fig. 8 Ultimate strength vs confinement, for dry Westerly granite, as a function of temperature (Aftet Heuze, 1983)

3.3 比熱 및 熱膨脹

Fig. 11은 알파(α)-베타(β) 변환에 의해 발생하는 온도에 따른 比熱(C_p)의 증가에 불연속을 보여주고 있다. 비열에 대해 기 제안된 First power law는 이러한 특징을 나타내지 못하며 Lindroth와 Krawaza¹⁵⁾의 연구에서는 大氣壓하에서 온도가 573°C 이상의 경우와 573

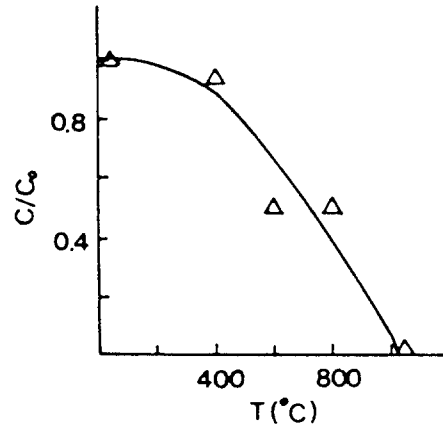


Fig. 9 Dimensionless cohesion vs temperature, obtained from the results of Fig. 8 for Westerly granite(After Heuze, 1983)

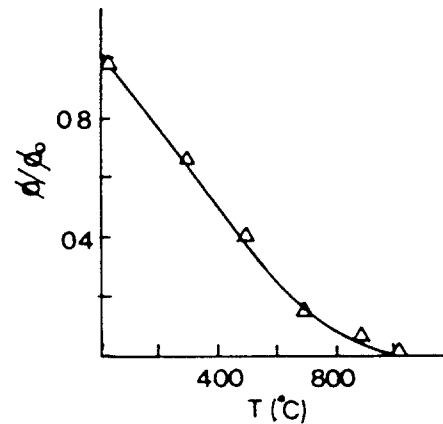


Fig. 10 Dimensionless friction angle vs temperature, obtained from the results of Fig. 8 for Westerly granite(After Heuze, 1983)

°C 이하의 경우를 표현하는 2가지 법칙을 제안하였다.¹⁶⁾

結晶質 Silicate 암석의 평균 熱膨脹 係數(α)는 0.1 MPa과 20~100°C에서 $5 \sim 11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 이며 石英과 長石의 경우 結晶(Crystal)의 방향에 따라 달라지는데 0.1MPa와 20~350°C에서 $1 \sim 19 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 의 범위에 있다.

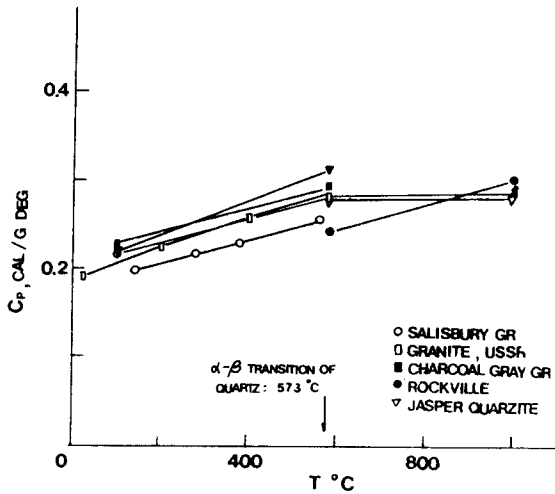


Fig. 11 Specific heat vs temperature for several granites (After Heuze, 1983)

Cooper와 Simmons¹⁷⁾는 4종의 花崗岩, Felsite, Quartz monzonite에 대한 연구를 통하여 0.1 MPa의 조건하에 熱膨脹 係數는 25°C에서 $6\sim 8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 이고 400°C에서 $13\sim 24 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 임을 발표하였다.

Wong와 Brace¹⁸⁾, Heard¹⁹⁾는 花崗岩, Aplite, Quartz monzonite에 대한 실험결과로부터 α 는 균열(Crack)의 형성과 진행이 발생하는 온도 범위내에서 압력에 크게 좌우됨을 밝혔다.

Fig. 12는 Westerly 花崗岩에 대하여 5개 압력과 7개 온도 19~300°C에서 행한 실험결과를 나타냈는데 α 는 압력에 따라 $\sim 9 \times 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ 감소하며 온도에 따라 $\sim 1 \times 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 증가한다. 그림에서 모든 온도와 압력에서 측정된 α 는 균열이 없는 Aggregate의 경우보다 더 큰데 이러한 차이는 균열의 空隙(Crack porosity)이 온도에 따라 증가하며 압력에 따라 감소하기 때문 인것으로 판단된다.²⁰⁾

Fig. 13는 Stripa 花崗岩의 경우를 나타내고 있다.

Fig. 12과 Fig. 13에서 Westerly 花崗岩과 Stripa 花崗岩은 서로 다른 양상을 보이는데

Westerly 花崗岩은 모든 온도에서 압력에 따른 열팽창 상에 규칙적인 감소를 보이며 모든 압력상에서 온도에 따른 α 가 서서히 증가함을 보이고 있으나 Stripa 花崗岩에는 그러한 규칙적인 거동은 보이지 않고 가장 낮은 압력에서 α 는 130°C까지 압력에 독립적이며 130~230°C까지에서 α 는 온도에 따라 훨씬 급격히 증가하며 압력에 크게 영향을 받음을 보인다.

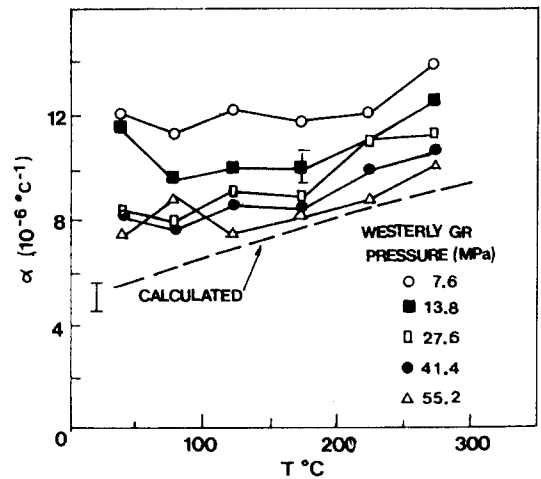


Fig. 12 Coefficient of thermal linear expansion vs temperature for Westerly granite (After Heard & Page, 1982)

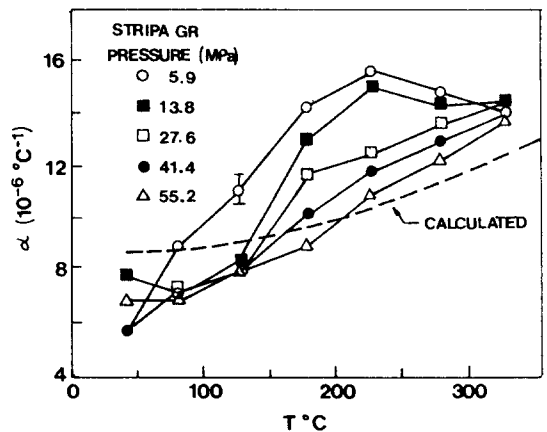


Fig. 13 Coefficient of thermal linear expansion vs temperature for Stripa granite (After Heard & Page, 1982)

5.9MPa와 13.8MPa의 압력에서 α 는 온도에 따라 감소하며 반면에 27.6, 41.4, 55.2 MPa에서 α 는 온도에 따라 계속적인 증가를 하였다. 낮은 온도에서 압력에 따라 $6 \sim 8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 까지의 범위를 지닌다. 230 $^\circ\text{C}$ 부근에서 $11 \sim 16 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 중간온도에서는 $8 \sim 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 가장 높은 온도에서는 $10 \sim 14 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 였다 (Fig.12 참조).

여러 화강암에 대한 온도에 따른 綿 膨脹係數(Linear thermal expansion coefficient, α)의 변화를 Fig. 14에 표시하였다.^{6,10,17,18,19,21,22)}

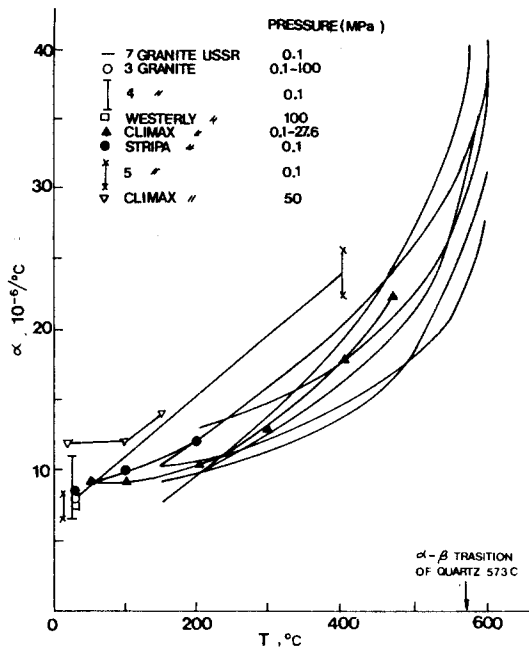


Fig. 14 Linear thermal expansion of several granites vs temperature (After Heuze, 1983)

그림에서 曲線들의 경사에 비례하는 綿 膨脹係數는 Transition(遷移)온도 이상에서 크게 감소됨이 보이는데 이 감소는 압력이 증가하면 더욱 크게 된다.

반면에 熱的 Cracking을 방지하기에 충분히 큰 압력과 500 $^\circ\text{C}$ 이하의 온도에서 熱膨脹의

압력 의존성은 Westerly 花崗岩¹⁸⁾과 Climax 花崗岩¹⁹⁾에 대한 실험에서는 아주 작은 것으로 나타났다.

용해(Melting)에서 8~10%의 팽창이 花崗岩들에 대해 보고되었다.²³⁾

1,250 $^\circ\text{C}$ 에서 액체상태의 Diorite의 體積 膨脹(Volumetric expansion)이 4.5×10^{-5} 되는 것으로 보고 되었다.²⁴⁾

3.4 熱傳導 및 熱擴散

7종 花崗岩에 대한 온도에 따른 熱傳導의 변화를 Fig. 15에 표시하였다.^{8,22,25,26)} 그림에는 경험식(Clark, 1966)이 점선으로 표시 되었는데 이 식은 다음 형태를 지닌다.

$$k = 6.30 \times 10^{-3} - (6.7 \times 10^{-6}T) + (3.41 \times 10^{-9}T^2) \text{ cal/cm sec deg}$$

여기서 $T = ^\circ\text{C}$

Maine 花崗岩에 대해 90MPa까지의 압력에서 시험을 실시하였는데 압력에 따라 熱傳導度 k는 완만한 증가를 보여 90MPa 이상에서는 10% 정도 증가하였다.²⁶⁾

Climax 花崗岩²²⁾에서 20~200 $^\circ\text{C}$ 사이에서 행한 실험들은 3 MPa에서는 k값이 온도에 둔감하지만 50MPa하에서 온도가 20에서 200 $^\circ\text{C}$

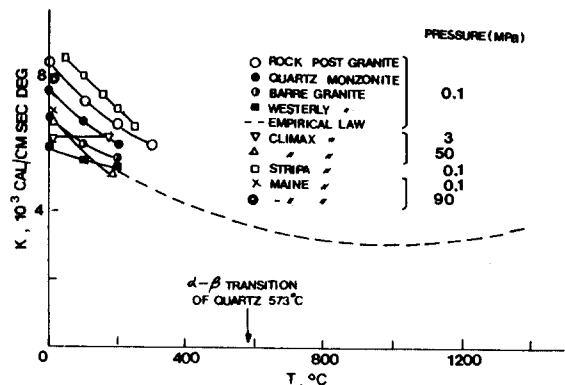


Fig. 15 Thermal conductivity vs temperature for several granites (After Heuze, 1983)

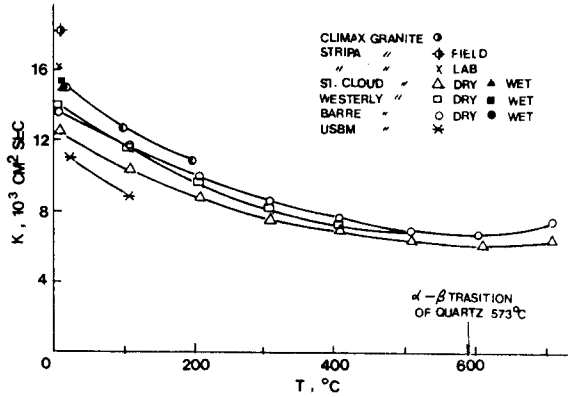


Fig. 16 Thermal diffusivity vs temperature for several granites (After Heuze, 1983)

로 증가하면 k값은 약 22% 감소하였다.¹⁶⁾

대기압하에서의 열확산에 대한 실험결과들^{22, 25, 26)}이 Fig. 17에 표시되었다. 모든 k 값들이 석영의 $\alpha-\beta$ 遷移 온도에서 최소값을 보이고 있다. Stripa 花崗岩의 k 값은 실험실보다는 현장에서 12% 더 높은 경향을 보였다.²⁵⁾

USBM 花崗岩에 대한 여러 실험들은 압력이 10~11 MPa인 조건에서의 K 값은 27°C에서는 대기압에서의 값보다 30% 감소되고 110°C

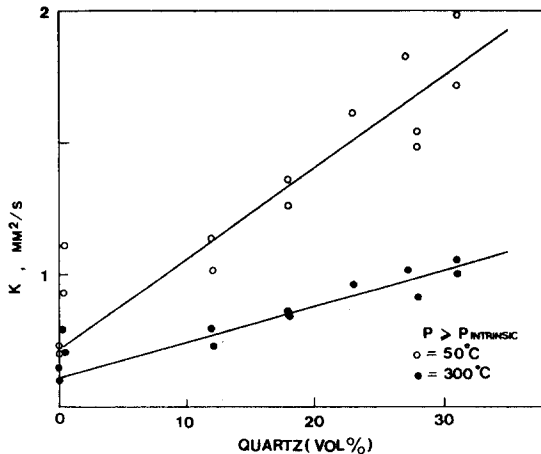


Fig. 17 Diffusivity in the pressure-independent region($P \geq P_{intrinsic}$) as a function of quartz content for the rocks at different temperature(After Durham외, 1987)

가 되면 20%의 감소를 보였다.¹⁶⁾

Durham외²⁷⁾은 7개 火成岩에 대한 열확산 측정 시험을 400°C와 200 MPa에서 실시하였는데 모든 岩石의 열확산은 온도의 逆에 線形的인 의존성을 보이며 岩石體積의 0~31%까지 함유한 石英함유량에 線形的으로 의존함을 보였다. 모든 경우의 확산은 封壓이 증가하면 오르거나 일정하게 유지되며 압력의 영향은 가장 낮은 압력에서 가장 세고 岩種에 따라 10~100 MPa 사이의 수준에서 없어진다.

等方 物體의 열移動 성질은 열확산 α 와 열傳導率 r 로 특징지워 질수 있다. 확산과 傳道率은 일정한 압력 C_p 과 密度 ρ 에서 Heat capacity에 의해 관련된다.

$$\alpha = r / \rho C_p$$

岩石의 경우 열移動 성질은 구성 舉動들과 空隙을 채우고 있는 流體의 熱的性質, 鑛物들의 배열, 그리고 岩石內 空隙과 均열의 양상의 함수이다.²⁷⁾

Stripa 花崗岩의 열확산 값은 $\alpha = 1.84 \text{ mm}^2/\text{s}$ 로 심도 350m의 坑道 바닥에서 現場 Heater 試驗으로 부터 구한 값²⁵⁾으로 이때 압력은 약 10MPa 이고 온도는 11~70°C 사이였다.

암석내 열확산 정도는 일반적으로 온도가 증가하면 떨어지며 압력이 증가하면 올라가며 압력이 감소할 때 더욱 압력에 민감함을 보인다. (Table 2 참조)

열확산의 온도 의존성은 $1/T$ 상에서 線形的인 데 대략 다음과 같은 형태로 표시될 수 있다.

$$\alpha = \alpha_0 + C T^{-1}$$

여기서 α_0 와 C 는 常數이며 T 는 Kelvins온도이다.

Table. 3은 岩石試驗片에 대한 常數들이다.

Table 2 Thermal diffusivity of granites

Rock	P, MPa	T, °C	α , mm ² /S		
			Durham(1987)	Hanley(1978)	Jeffry(1979)
Westerly granite	0.1	100	1.00-1.05	1.17	
"	0.1	200	0.82-0.85	0.96	
"	0.1	300	0.67-0.73	0.83	
"	0.1	400	0.57-0.61	0.74	
Stripa granite	10	11-70	1.65-2.10		1.84

Table. 3 The constants for rock samples

Sample No.	α_0 , mm ² /s	c, mm ² K/s
Westerly granite N.1	0.24	350
Westerly granite N.2	0.32	300
Stripa granite N.1	-0.07	660
Srtipa granire N.2	0.13	510

熱擴散은 Fig. 17에서와 같이 石英 함유량과 관련이 있는 데 이는 石英과 Quartzites의 비교적 높은 熱擴散 특성으로 부터 예상될 수 있다.

石英함유량과 1/T에 대한 熱擴散의 線形的 관계에 대하여 Durham 등²⁷⁾은 Westerly, Stripa 花崗岩 등 7종의 火成岩에 대해 다음의 간단한 Constitutive law로 표시하였다.

$$\alpha(\text{mm}^2/\text{s}) = 0.47 + 78T^{-1} - 1.31Q + 1,540QT^{-1}$$

Fig. 18과 Table 3에서 보는 바와 같이 Westerly 花崗岩은 다른 암석에 비하여 압력의 영향을 크게 받는데 온도가 올라가면 압력의 영향은 더욱 커진다. 온도가 60°C에서 α 는 0.12 mm²/s(10%)이고 온도가 400°C가 되면 0.17mm²/s(25%)가 변화한다.

封壓을 가하지 않고 균일하게 가열된 West-

erly 花崗岩에서는 熱的 Cracking이 構成礦物의 서로 다른 熱的膨脹으로 인해 75°C와 같이 낮은 온도에서 발생한다는 사실이 Acoustic emission 연구를 통하여 밝혀졌다.²⁸⁾

Srtipa 花崗岩은 매우 높은 熱擴散 특성을 지

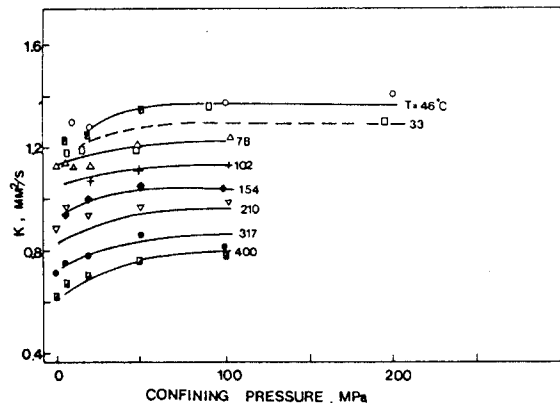


Fig. 18 Thermal diffusivity results for two samples of Westerly granite (After Durham, 1987)

났는데 이는 높은 石英 함유량과도 일치한다.

3.5 透 水 率

花崗岩의 透水率은 固體입자경계와 균열로부터 비롯된다.

新鮮岩에 대한 측정결과는 물과 암석사이의 상호작용에 좌우된다.

Page와 Heard⁷⁾는 Climax 花崗岩을 대상으로 한 500°C까지의 空隙측정결과를 통하여 透水率 k 를 산정하였으며 k 는 온도가 올라가면 증가하는 것으로 추정되었다.

Summers²⁹⁾는 Westerly 花崗岩의 경우 400°C까지의 시험에서 여러날 발생하는 침전으로 인해 透水率상에 커다란 감소를 보였는데 대체로 花崗岩에서의 熱的膨脹은 존재하던 절리를 폐쇄시키고 전체 透水率을 감소시킴을 보였다.

Idaho springs 花崗岩과 片磨岩에서 41°C에서 73°C까지의 32°C의 온도 증가로 인해 現場岩盤 측정시험에서 透水率 상의 10배의 감소가 관찰되었다.³⁰⁾ Stripa 花崗岩에서는 온도 25°C 증가에 현장에서 4배의 감소가 있었다.³¹⁾

수백도의 온도와 압력하에서 花崗岩에 Creep이 발생하고 균열이 폐쇄되면 透水率은 입자 경계를 따라 운반되는 수준으로 떨어질 것이다.³²⁾

Brace외³³⁾, Kranz외³⁴⁾, Trimmer외³⁵⁾는 여러 花崗岩에 있어서 압력이 5에서 25MPa로 증가할 때 透水率은 2~6배 감소함을 밝혔다.

Potter³⁶⁾는 3~35MPa의 압력조건에서 측정된 花崗岩 및 Quartz monzonite의 透水率이 100~150°C 가까이까지 감소하다가 216°C까지 증가하였는데 이러한 감소/증가의 간격과 크기는 岩種뿐아니라 압력에 따라 크게 변함을 보고 하였다.

Summers외²⁹⁾는 Westerly 花崗岩에 대한 100~400°C까지의 加熱은 熱的 cracking 때문

에 透水率이 증가됨을 발견하였다.

Westerly 花崗岩의 破壞 強度의 50%까지의 압력증가는 透水率이 약간 감소되고 더 높은 압력에서는 크게 증가됨이 관찰 되었다.^{33, 37)} 이들은 이러한 透水率의 변화를 낮은 압력에서의 미세균열의 폐쇄와 높은 압력에서 파괴가 가까웠을 때 증가되는 體積 膨脹(Dilatancy)과 관련 시켰다.

Brace외^{33, 38)}는 流體만의 Resistivity(Formation factor, F)에 대한 流體로 포화된 암석의 Resistivity를 空隙率 ϕ 에 관련시키는 Archie's 경험식($F \propto \phi^{-n}$)을 사용하여 花崗岩과 화강섬록암의 경우 n^{-2} 이 적합하며 透水率 k 는 結晶質 火成岩에서 " $F^{-2}\phi^{-1}$ "에 비례함을 밝힌 바 있다.

Bauer와 Johnson⁹⁾는 2종의 花崗岩質 암석에 대하여 $K \propto \phi^3$ 의 관계를 제안한 바 있다.

Fig. 19는 Westerly 花崗岩에 있어서 압력과 온도에 따른 ϕ 와 k 의 변화양상을 보여준다.

Crack의 空隙率은 온도에 따라 증가하며 압력이 증가함에 따라 완만한 일정한 형태로 감소하였다.

압력에 의한 초기 균열의 폐쇄로부터 k 상의 약간의 감소가 19°C에서 예측되는 데 이 영향은 온도에 따른 균열의 Opening으로 인한 k 의 증가에 비교하면 크지 않다.

이 그림은 花崗岩이 7.6MPa에서 300°C까지 가열 되었을 때 k 가 3배이상 증가하고 중간압력에서는 1.6에서 2.4배까지 증가하며 이에 반하여 55.2 MPa에서는 단지 25% 정도의 증가만이 있음을 나타내고 있다.

Potter³⁶⁾는 11MPa의 압력하의 26~198°C까지 가열될 때 이 花崗岩의 k 는 거의 80°C가까이에서 최소값까지 서서히 감소되다가 198°C에서 7배 만큼 극적으로 증가함을 보고하였다. 이와같은 차이점은 균열(Crack)의 불균일한

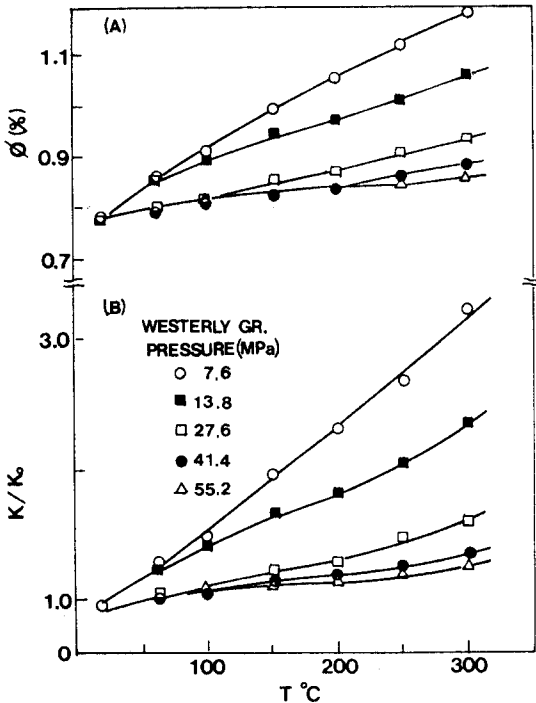


Fig. 19 Porosity and permeability in Westerly granite (a), Calculated porosity vs temperature for Westerly granite (b), Normalized permeability(calculated) k / k_0 vs temperature for Westerly granite(After Heard & Page, 1982)

폐쇄, 流體 흐름 통로를 부분적으로 막는 岩石破片의 이동, 鑛物溶解 및 沈澱 등으로 인한 것으로 추정된다.²⁰⁾

Fig. 20a는 Stripa 花崗岩의 경우인데 압력과 온도에 따른 산정된 空隙率의 변화를 나타내고 있는데 여기서 압력과 온도는 空隙率 ϕ 에 비선형적인 영향을 미친다고 보여진다.

온도의 영향을 고려하면 저·중간온도에서의 균열폐쇄는 모든 압력에서 순수한 ϕ 의 감소를 나타낸다. 예를들어 이 감소는 5.9MPa에서는 작고 80°C까지 최대이며 55.2MPa에서는 ϕ 가 계속적으로 200°C까지 감소한다.

Fig. 20 b는 ϕ 의 압력과 온도 의존성, $k \propto \phi^3$ 관계로부터 계산된 바와 같이 Stripa 花崗岩에

대한 k/k_0 를 나타내고 있다.

k/k_0 는 압력과 온도에 따라 非線形 거동을 보이고 있는데 5.9MPa의 압력하의 180°C 이상, 13.8MPa 하에서의 240°C 이상의 압력과 온도 조건을 제외하면 k 는 감소한다. 5.9MPa에서 k 는 전체적으로 1.8배까지 증가하고 27.6 ~ 55.2MPa의 압력에서는 압력으로 인해 초기

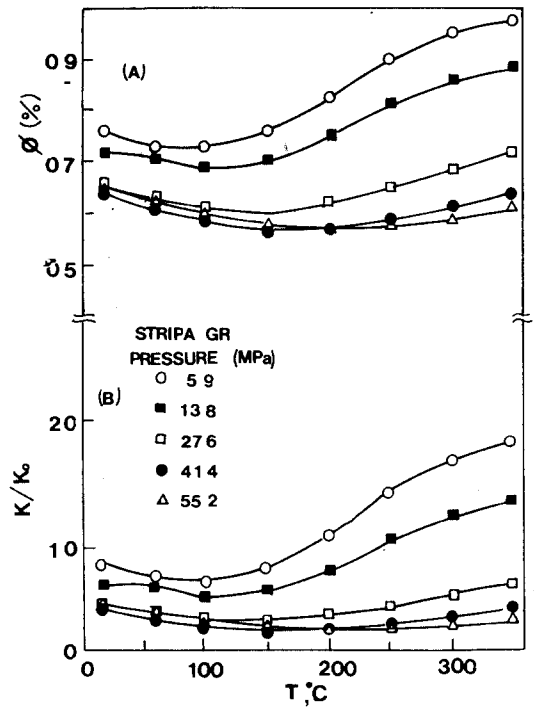


Fig. 20 Porosity and permeability in Stripa granite (a), Calculated porosity vs temperature for Stripa granite (b), Normalized permeability (calculated) k/k_0 vs temperature for Stripa granite(After Heard & Page, 1982)

감소가 일어난 후 온도에 거의 독립적이다.

Kranz 외³⁴⁾는 Barre 花崗岩에 대해 행한 실온에서의 실험에서 압력이 17~49MPa까지 올라가면 k 는 5배 감소함을 보고한 바 있다.

Fig. 19와 Fig. 20의 비교는 모든 압력에서 온도의 증가는 Stripa 花崗岩에서 보다 Westerly 花崗岩에서 k 에 더 큰 영향을 끼침을 보

여준다.

Tiren 외³⁹⁾는 화강 섬록암내 암반의 투수율에 관한 자료를 발표한 바 있는데 Fig. 21과 같이 심도에 따른 투수율의 변화 관계는 매우 양호하였다.

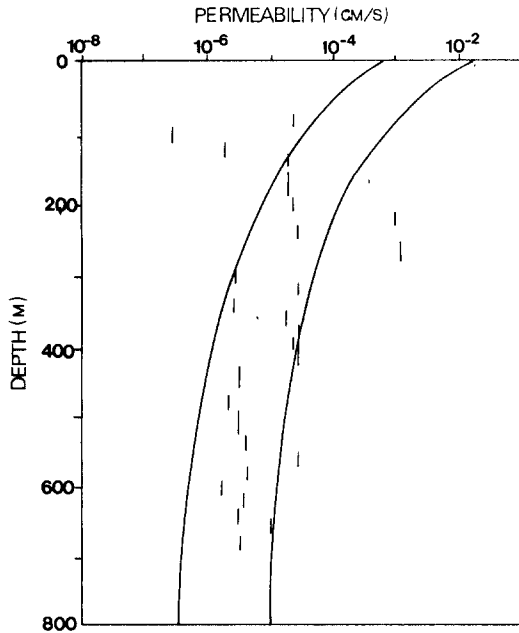


Fig. 21 Comparison of measured permeability data with depth from Tiren et al. (1985) with estimated relations for borehole F16 in granodiorite. Assumed average JCS=95.8 MN/m² : JRC=7.4(After Tiren외, 1985)

4. 結 論

地下 放射性 폐기물 處分場 주변 암반의 熱力學的 反應과 지하수 이동을 예측하기 위한 연구는 방사성 폐기물 처분사업의 성공적 수행에 필수적이다.

직접적인 관련 경험 없이도 處分場의 설계, 위험 평가는 이와 같은 연구를 통해 개발되는 수치해석 모델을 이용하면 좋은 결과가 기대될 것이다.

본 연구에서는 高準位 방사성 폐기물을 차단하는 母岩으로서 火成岩, 특히 花崗岩의 열적, 수문학적 특성 등을 기 발표된 자료들을 중심으로 다루었다. 이중에서 몇가지 일반적인 주요 사항은 다음과 같다.

- 1) 強度, 영률과 體積彈性率은 비선형적으로 온도가 높아지면 감소되며 압력이 커지면 증가된다.
- 2) 熱膨脹係數는 일정치 않으며 압력이나 온도의 單調函數가 아니다.
- 3) 모든 균열은 流體이동에 영향을 준다고 가정하여 압력 및 온도에 따른 透水率의 변화는 $K \propto \phi^3$ 의 관계로부터 대략적으로 산정될 수 있다.

熱荷重하의 彈性係數, 引張強度, 壓縮強度 등의 변화 양상과 熱膨脹, 熱擴散, 比熱, 熱傳導, 透水率 및 岩盤 및 암반 節理의 특성 등에 관한 자료는 개념과약과 함께 기본적인 처분장 설계자료로서 사용 가능할 것으로 판단된다.

지하 처분장 설계시 大氣壓하에서 측정된 자료를 사용하는 것보다는 실제 처분장 주변과 동일한 조건하에서 구한 시험자료가 더 효과적이며 특히 現場試驗이 요구된다.

Reference

1. 강병무, 1989, 방사성 폐기물의 지층처분 방향과 천연방벽 : 방사성 폐기물 처분에 있어서의 지질학의 역할 학술강연회집, 1~10.
2. 신종오, 1990, 안면도 사태계기로 알아본 방사성폐기물 실태, 중앙일보 11월 13일 자 기사.
3. Swan., G, 1978, The mechanical properties of Stripa granite, Rep. LBL 7074, Sac 03, Lawrence Berkeley Lab., Berkeley, California.

4. Warren, N., 1981, Rock physics characterization of Conway granite from ERDA broehole, Conway, New Hampshire, Rep, LA 8102, Los Alamos Natl. Lab., Los Alamos, N. M.
5. McLaren, J. P., & Titchell, I., 1981, Physical properties of granite relevant to near field conditions in a nuclear waste repository, AERE, Harwell, Report AERE-R-10046.
6. Dmitriyev, A. P., Kuzyayev, L. S., Protasov, V. S., 1972, Physical properties of rocks at high temperatures, NASA Technical Translation, N72-26286.
7. Page, L. & Heard, H. C., 1981, Elastic moduli, thermal expansion, and inferred permeability of Climax quartz monzonite and Sudbury gabbro to 500°C and 55 MPa, Proc. 22nd Symp. on Rock Mech., Cambridge, Ma.
8. Clark, S. P. Jr(Editor), 1966, Handbook of physical constants, Geological Society of America, New York, Memoir 97.
9. Bauer, S.J. & Johnson, B., 1979, Effects of slow uniform heating on the physical properties of the Westerly and Charcoal granites, Proc. 20th Symp. on Rock Mech., Austi 7~18, ASCE, New York.
10. Meyer, L., 1981, Laboratory investigations of thermo mechanical properties of Stripa granite, Rep. LBL 13435, SAC 40, Lawrence Berkeley Lab., Berkely, California.
11. Friendman, M., Handin, J., Higgs, N. G. & Lantz, J. R., 1979, Strength and ductility of four dry igneous rocks at low pressures, and temperatures to partial melting, Proc. 20th Symp.
12. Stesky, R. M., Brace, W. F., Riley, d. K., & Robin P. Y. F., 1974, Friction in faulted rock at high temperature and pressure, Tectono physics, 23, 177~203.
13. Bauer, S. J. & Handin, J., 1981, Thermal expansion of three water saturated igneous rocks to 800°C at effective confining pressures of 5 and 50 MPa, Eos Trans, AGU. 62, 393.
14. Heuze, F. E., 1980, Scale effects of the determination of rock mass strength and deformability, Rock Mech., 12, 167~192.
15. Lindroth, D. P. & Krawza, W. G., 1971, Heat content and specific heat of six rock types at temperatures to 1000°C, U. S. Bureau of Mines Report of Investigations, RI 7503.
16. Heuze, F. E., 1983, High-temperature mechanical, physical and thermal peoperities of granitic rocks-Review, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 20, 3~10.
17. Cooper H. W., & Simmons, G., 1977. The effects of cracks on the thermal expansion of rocks, Earth Planet, Sci. Lett., 36, 404.
18. Wong, T. F., & Brace, W. F., 1979, Thermal expansion of rock, -Some measurments at high pressure, Tectonophysics, 57, 95-117.
19. Heard, H. C., 1980, Thermal expansion and inferred permeability of Climax quartz monzonite to 300°C and 27.6MPa, Int. J. Rock Mech, Min Sci. & Geomecth. Abstr., 17, 298~296.
20. Page, L., 1982, Elastic moduli, thermal expansion, and inferred permeability of two granites to 350°C and 55 Megapascals, Jr.

- of Geophys. Res, 87, N. B11, 9340–9348.
21. Richter, D. & Simmons, G., 1974, Thermal expansion behaviour of igneous rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 11, 403–411.
 22. Durham, W. B. & Abey, A. E., 1981, The effect of pressure at temperature on the thermal properties of a salt and a quartz monzonite, *Proc. 22nd Symp. on Rock Mech, Cambridge, Ma*, 79–84.
 23. Klett, R. D., 1974, Deep rock nuclear waste disposal test—design and operation, Sandia Natl. Lab., Albuquerque, SAND-74-0042.
 24. Skinner, B. J., 1966, Thermal expansion—in the Handbook of physical constants, Geological Society of America, New York, Memoir 37, Section 6, 75–96.
 25. Jeffry, J. A. et al., 1979, Determination of in-situ thermal properties of Stripa granite, methods and preliminary results, Lawrence Berkeley Lab., LBL-8423.
 26. Walsh, J. R. & Decker, E. R., 1966, Effect of pressure and saturating fluids on the thermal conductivity of compact rock, *J. Geophys. Res.*, 71, 3053–3061.
 27. Durham, W. B., Mirkovich, V. V., & H. C. Heard, 1987, Thermal diffusivity of igneous rocks at elevated pressure and temperature, *J. Geophys. Res.*, 92, N. B11, 11615–11634.
 28. Johnson, B., Gangi, A. F., & Handin, J., 1978, Thermal cracking of rock subjected to slow, uniform temperature changes, *Proc. 19th U. S. Symp, on Rock Mech.*, 257–267.
 29. Summers, R., Winkler, K., & Byerlee, J., 1978, Permeability changes during the flow of water through Westerly granite at temperatures of 100–400°C, *J. Geophys. Res.*, 83, 339–334.
 30. Voegele, M., Hardin, E., Lingle, d., Board M. & Bartonn, 1981, Site characterization of joint permeability using the heated block test, *Proc. 22nd Symp. on Rock Mech., Cambridge, MA*, 120–127.
 31. Lundstrom, L, & Stille, H, 1978, Large scale permeability test in the granite of the Stripa mine, Lawrence Berkeley Lab., LBL-7052.
 32. Bracé, W. F., 1980, Permeability of crystalline and argillaceous rocks, *Int. J. Rock Mech Min. Sic & Geomech. Abstr.*, 17, 241–251.
 33. Walsh, J.B. & Frangos, W. T., 1968, Permeability of granite under high pressure, *J. Geophys. Res.*, 73, 2225.
 34. Kranz, R, L., Frankel, A, D., Engelder, T., & Scholz C. H., 1979, The permeability of whole and jointed Barre granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sic. & Geomech. Abstr.*, 16, 225–234.
 35. Trimmer, D., Bonner, B., Heard, H. C., & Duba, A., 1980, Effect of pressure and stress on water transport in intact and fractured gabbro and granite, *J. Geophys. Res.*, 85, 7059–7071.
 36. Potter, J. M., 1978, Experimental permeability studies at elevated temperature and

- pressure of granitic rocks, Rep LA-7224-t, Los Alamos, N. M.
37. Zoback, M.D. & Byerlee, J.D., 1975, The effect of microcrack dilatancy on the permeability of Westerly granite, *J. Geophys. Res.*, 80, 752-755.
38. Brace, W.F., Orange, A. S., & Madden, T. R., 1965, The effect of pressure on the electrical resistivity of water-saturated crystalline rock, *J. Geophys. Res.*, 70, 5669.
39. Tiren, S., Aulbom, K., & Strahle, A., 1985, Investigation of fracture zones in the Brandan area, Northern Uppland, Sweden, geological and hydrogeological characterization, *Proc. Int. Symp. on Fund. of Rock Joints, Bjorkliden*, 57-64.