

## 열응력이 포천화강암의 투수성에 미치는 영향

윤 용 균<sup>1)</sup>

### The Effect of the Thermal Stress on the Transport Property of Pocheon Granite

Yong-Kyun Yoon

**ABSTRACT** A transient pulse method has been used to measure the permeability of Pocheon granite pre-heated from 25°C to 600°C at effective pressure up to 32MPa. The permeability of whole rock ranged from 0.72  $\mu$ d at 10MPa to 0.20  $\mu$ d at 32MPa. The permeability of rock heated to 600°C ranged from 18.07  $\mu$ d at 10MPa to 6.39  $\mu$ d at 32MPa. Confining pressure has greater effects on the rocks thermally treated to lower thermal-cycle temperatures than on the higher thermally treated rocks. The increase of permeability is most pronounced between 400°C and 600°C. Below 400°C, permeability increase is expected to be associated with the formation of new cracks and widening of preexisting cracks, whereas above 400°C, permeability increase is expected to reflect widening of cracks. Using the equivalent channel model, author shows that the exponent n in the relationship relating the permeability(k) to porosity( $\phi$ ) by  $k \propto \phi^n$  falls in the range  $2.7 \leq n \leq 3.0$ .

## 1. 서 론

암석이 열을 받으면 기존균열이 확장되고, 새로운 균열이 형성되어, 암석의 수리적 특성에 큰 영향을 미치게 된다(Bauer 등, 1979; Page 등, 1981; Heard 등, 1982; Gèraud; 1994). 따라서, 방사성 폐기물 처분장, 지열에너지 회수시설, 열수에너지 저장시설 등과 같이 고온의 열을 방출하는 구조물의 수리적 특성을 예측하기 위해서는 온도와 압력에 따른 암석의 투수성을 파악하는 것이 필수적이다.

지하공간 구조물의 설계 온도는 구조물의 종류에 따라 달라진다. 방사성 폐기물 처분장의 설계온도는 약 200°C를 기준으로 하고 있으나(Wai 등, 1982), 현지암반에 대한 원위치 가열시험 결과 공동 주변암반의 온도가 300°C 이상까지 도달하는 것으로 나타나고 있다(Page 등, 1981; Heard 등, 1982; Hocking 등, 1990). 고온조건암반을 이용한 지열에너지 회수의 경우에는 200~400°C의 설계온도가 요구된다(강대우, 1991). 상기와 같은 구조물의 설계온도에서 암석의 수리적 특성을 정확히 결정하기 위해서는 온도뿐만 아니라 지압, 공극수압과 같은 현지조건을 실험에 반영하는 것이 필

요하다.

본 연구에서는 온도가 암석의 투수성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 포천화강암을 200, 300, 400, 500, 600°C로 예열처리하였으며, 투수계수의 측정은 순간증압법(Transient pulse method)을 이용하였다(윤용균 등, 1993). 시험편에 가해진 봉압은 20~40 MPa, 공극수압은 8, 10 MPa로 하여 유효압력이 10~32 MPa이 되도록 하였다.

## 2. 시험편 제작 및 예열처리

본 투수시험에 사용된 원주형 시험편은 직경 41~42 mm, 길이 50~55 mm 로서 단일 포천화강암 암석블록으로부터 동일한 방향으로 채취하였으며, 자동연마기를 사용하여 시험편 상, 하면의 평행도가  $\pm 0.05$  mm 이내가 되도록 정형하였다.

제작된 시험편의 예열처리(Pre-heating)시 시험편에 열충격(Thermal shock)이 발생하는 것을 방지하기 위하여 가열속도는  $\leq 3^\circ\text{C}/\text{min}$ 이 되게 하였으며(이형원 등, 1995), 최고온도의 유지시간은 120분으로 하였다.

1) 정회원, 세명대학교 자원환경공학과 조교수

열균열의 대부분은 1차 가열단계에서 발생한다는 기존 연구결과를 참조하여(Bauer 등, 1979), 시험편의 반복 가열은 1회로 하였으며, 시험편의 냉각은 시험편을 전기로내에 그대로 방치하여 상온으로 자연냉각되도록 하였다. 시험편의 예열은 200°C에서 600°C 까지 100°C 간격으로 하여 각 최고 예열온도가 200, 300, 400, 500, 600°C가 되도록 하였다. 예열처리가 끝난 시험편은 공극이나 미세균열내에 존재하는 기포를 제거하기 위하여 48시간동안 진공상태에서 완전포화시킨후 실험이 시작될때까지 물속에 보관하였다.

상온시험편(R.T) 및 예열시험편에 대한 현미경 관찰 결과는 윤용균 등(1996)의 결과를 참조하였다.

### 3. 실험절차

순간증압법은 투수성이 아주 낮은 결정질 암석의 투수계수를 측정하기 위하여 Brace 등(1968)이 제안한 방법으로서, 원주형 시험편의 한 끝단에 가해진 증분공극수압의 감소를 시간에 따라 측정하는 방법이다. 본 실험에서는 순간증압법을 응용하여 제작된 투수시험장치를 사용하였으며, 실험방법은 윤용균 등(1993)에 의한 방법과 동일한 방법을 사용하였다. 실험은 먼저 시험편의 상, 하부에 동일한 크기의 공극수압을 일정 시간 동안 가하여 상부저수조-시험편-하부저수조 사이에 압력평형 상태가 이루어지도록 한 후 시험편의 상부에 증분공극수압을 가한다. 이때, 증분공극수압의 크기는 초기 공극수압의 10% 이내가 되도록 한다(Brace 등, 1968). 시험편 상부에 가해진 증분공극수압에 의해 시험편 상부의 공극수압이 증가하게 되면, 공극수는 시험편을 통하여 시험편 하부로 이동하게 되고, 시험편 상, 하부에서의 공극수압차는 다음 식과 같이 지수함수적으로 감소하게 된다.

$$P = \Delta P e^{-\alpha t} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{kA(V_1 + V_2)}{\mu \beta L(V_1 V_2)} \quad (2)$$

여기서, P는 실험이 시작된후 시험편 상, 하부의 공극수압차를,  $\Delta P$ 는 시험편 상부에 가해진 증분공극수압을 나타내며, t는 경과시간이다. 또한, k는 투수계수, A는 시험편의 단면적,  $\mu$ 는 공극수의 점성계수,  $\beta$ 는 공극수의 압축계수, L은 시험편의 길이,  $V_1$ 과  $V_2$ 는 시험편의 상, 하부 저수량이다.

$V_1$ 과  $V_2$ 는 각기 시험편의 상, 하부에 연결된 물탱크, 배관, 밸브, 압력변환기에 차있는 공극수를 합친 것으로 본 시험장치의 상부 저수량은 109 cm<sup>3</sup>, 하부 저수량은 74 cm<sup>3</sup>이다. 공극수의 점성계수는 온도에 따라 달라지는 관계로 경험식을 이용하여 계산하였으며(조강래 등, 1990), 압축계수는 문헌을 참조하였다(Brace 등, 1968). 투수계수를 구하기 위하여 (1) 식에 자연로그를 취하면 시험편 상, 하부의 공극수압차는 시간에 따라 선형적으로 감소하며, 그때의 기울기  $\alpha$ 는 (2)식에서 보는 바와 같이 투수계수의 함수로 표시된다.

상온시험편 및 각 최고 온도별 예열시험편에 가해지는 봉압은 20~40 MPa 범위에서 5 MPa 간격으로 단계적으로 증가시켰다. 공극수압은 예비실험 결과를 토대로 하여 각 봉압단계에서 8 MPa과 10 MPa의 2단계로 증가시켰다.

실험은 먼저 완전포화된 시험편을 Hoek Cell에 투입한후 20 MPa의 봉압을 가한 다음 8 MPa의 공극수압을 가한다. 시험편과 투수시험장치가 압력평형상태에 도달하도록 10분 정도 압력을 일정하게 유지한 후 초기 공극수압의 10%에 해당하는 증분공극수압을 시험편 상부에 가하여 시간에 따른 시험편 상, 하부에서의 공극수압변화를 압력변환기를 통하여 측정한다. 이때, 시험편 상, 하부의 공극수압차가 증분공극수압의 30% 이내로 감소할 때 까지 측정을 계속한다. 측정이 완료되면 봉압을 20 MPa로 유지하면서 공극수압을 10 MPa로 증가시켜 측정을 계속하고, 이후에는 봉압을 단계적으로 증가시키면서 앞의 과정을 반복한다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 온도 및 공극수압이 투수계수에 미치는 영향

이전의 연구 결과(Bauer 등, 1979)와 마찬가지로 본 연구에서도 온도가 결정질 암석의 투수성에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 연구 결과에 사용된 투수계수는 고유투수계수로서 면적의 차원을 가지며, 1 darcy를 1×10<sup>-8</sup>cm<sup>2</sup>로 하여  $\mu d(1 \times 10^{-14} \text{cm}^2)$ 로 표시하였다. 온도 및 봉압에 따른 투수계수의 변화가 Fig. 1에 표시되어 있다. Fig. 1(a)는 공극수압이 8 MPa, Fig. 1(b)는 공극수압이 10 MPa인 경우이다. 그림을 보면 투수계수는 온도가 증가함에 따라 전반적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 각 봉압단계마다 유사한 변화 양상을 보여준다. 200°C 시험편의 투수계수가 상온시험편

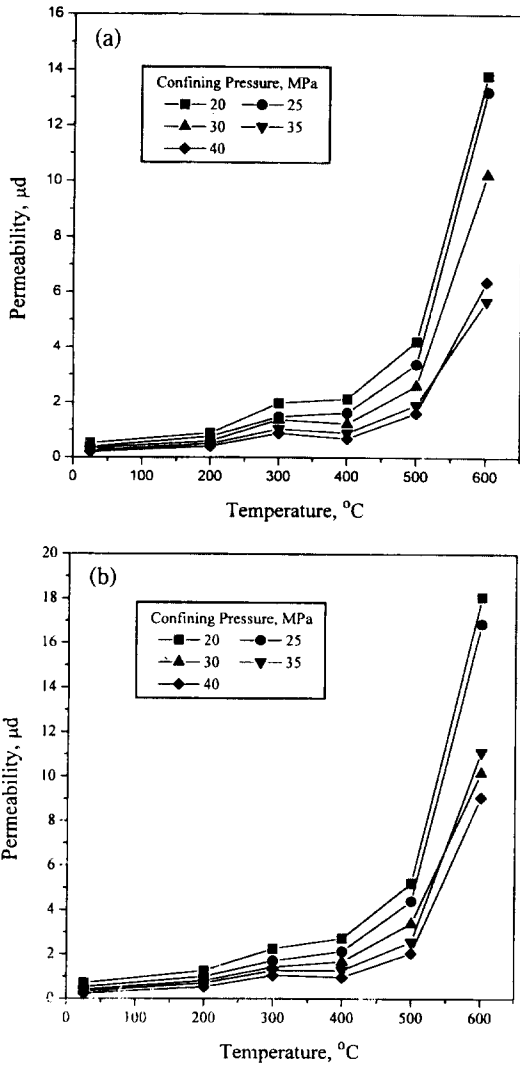


Fig. 1. Permeability changes as a function of maximum thermal cycle temperature.  
 (a) The case pore pressure in 8 MPa  
 (b) The case pore pressure is 10 MPa

의 투수계수에 비해 증가하였다는 것은 가열시에 발생한 열균열이 상온으로 냉각하여도 원래의 상태로 회복되지 않고 잔류열팽창으로 남았다는 것을 의미하며, 이것은 잔류열팽창이 발생하는 포천화강암의 임계열과괴온도가 200°C 부근이라는 기존의 탄성과 속도 결과(윤용균 등, 1996)와 부합한다. 온도에 따라 투수계수가 증가한다는 것은 기존균열의 연결성이 증가하고, 새로운 열균열이 발생하여 공극수의 유동통로가 많아지며, 균열간극이 증대하여 공극수의 유동이 용이해졌다는

것을 뜻한다. 예열시험편에 대한 현미경 관찰 결과에 따르면 400°C 까지는 대부분의 입자경계에 균열이 발생하여 연결성이 증가한 것으로 나타났으며, 400°C 이후에서는 균열간극의 크기가 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 투수계수가 400°C까지는 완만하게 증가하다가 400°C 이후에서 급격하게 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 400°C 이하의 낮은 온도에서는 균열의 연결성이 증가하거나 새로운 균열의 발생 및 기존 균열의 확장이 투수계수에 영향을 많이 미치고, 400°C 이후의 높은 온도에서는 균열간극의 증가가 투수계수 증가에 지배적인 영향을 미치는 것으로 생각된다.

Fig. 2는 공극수압이 투수계수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 상온시험편과 500°C 시험편에 대한 투수시험 결과를 봉압에 따라 도시한 것이다. 그림을 보면 동일한 시험편에 대해서는 압력에 따른 투수계수의 변화양상이 공극수압의 크기에 관계없이 유사한 양상을 보이고, 온도에 따라 절대적인 값의 차이만을 나타낸다. 공극수압을 증가시키에 따라 투수계수가 증가하는 것은 공극수압이 시험편내에 존재하는 균열의 간극을 증가시키기 때문이다. 균열을 통한 유체의 유동은 3층 법칙에 따르기 때문에(Witherspoon 등, 1980) 공극수압에 의한 균열간극의 변화량이 미소할지라도 투수계수의 변화는 크게 나타나게 된다. 따라서, 암석의 투수성은 일정한 것이 아니고 압력과 공극수압에 따라 달라짐을 알 수 있으며, 높은 공극수압을 받는 암석의 경우

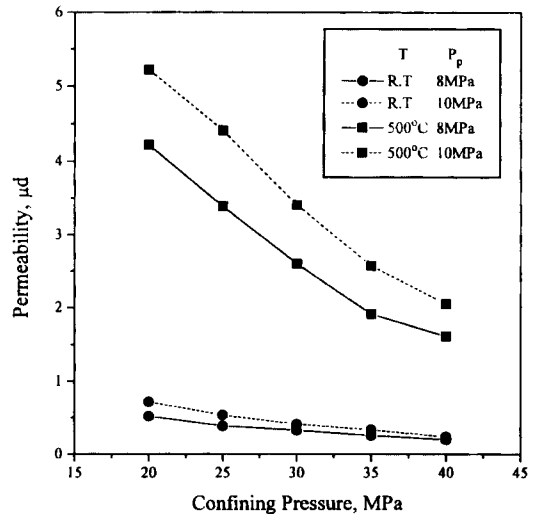


Fig. 2. Effect of pore pressure on permeability.

상대적으로 투수성이 증가할 것으로 생각된다.

4.2 온도에 따른 유효공극율 증가가 투수계수에 미치는 영향

각 유효압력에서 유효공극율에 따른 상온 및 예열 시험편의 투수계수 변화가 Fig. 3에 나타나 있다. 유효압력(P<sub>a</sub>)은 봉압(P<sub>c</sub>)에서 공극수압(P<sub>p</sub>)을 뺀 것이다. 상온, 300, 400, 500, 600°C 시험편의 유효공극율은 각기 0.62, 0.85, 0.99, 1.06, 2.13(%) 로 나타났(윤용근 등, 1996). 그림에서 보듯이 500°C 이상에서는 유효공극율의 증가량에 비해 투수계수의 증가량이 급격히 증가하는 것으로 나타났는데, 이러한 결과를 3승법칙과 연관하여 생각하면 400°C 이하에서 유효공극율의 증가는 새로운 균열의 형성이나 기존균열의 확장에 의하며, 400°C 이후에서 유효공극율의 증가는 균열간극의 증가에 기인함을 알 수 있다.

Walsh 등(1984)이 유도한 등가채널모델(또는, Kozeny-Carman 모델) 관계식에 따르면 투수계수는 다음 식과 같이 유효공극율의 3승에 비례하는 것으로 나타난다.

$$k = \frac{\phi^3}{bs^2\tau^2} \quad (3)$$

여기서,  $\phi$ 는 유효공극율,  $b$ 는 형상계수(공극이 원형인 경우에는 2, 균열인 경우에는 3),  $\tau$ 는 만곡도(Tortuo-

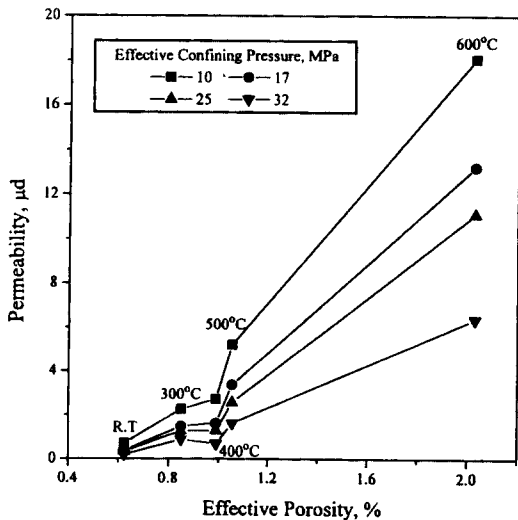


Fig. 3. Relationships between permeability and effective porosity.

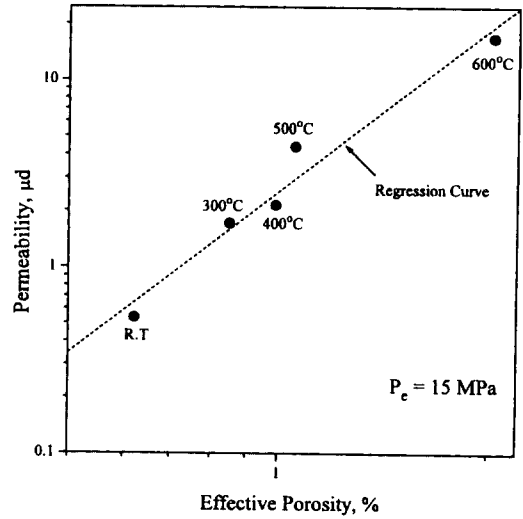


Fig. 4. Permeability as a linear function of the logarithm of effective porosity.

sity),  $s$ 는 비표면적으로서 단위체적당의 공극의 표면적을 나타낸다. 등가채널모델은 암석내에 존재하는 복잡한 유동망을 대표적인 단일 채널로 표시하여 암석의 투수성을 예측하는 모델로서, 공극이 원형인 경우에는 원형관으로 균열인 경우에는 평행관으로 모델화한다. 등가채널모델에서와 같이 예열시험편의 투수계수가 유효공극율의 3승에 비례하는 가를 알아보기 위하여, 투수계수와 유효공극율에 상용로그를 취하고 최소자승법에 의한 선형 회귀분석을 실시한 결과가 Fig. 4에 표시되어 있으며, 유효압력이 15 MPa인 경우를 대표적으로 나타내었다. 그림에서 점선은 선형회귀선을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이  $\log k$ 는  $\log \phi$ 에 비례적으로

Table 1. Regression curve constants for relationships between  $k$  vs.  $\phi$   $k=A\phi^n$ ,  $R$ =Correlation coefficient

Effective pressure (MPa)	A	n	R
10	0.50	2.7	0.980
12	0.39	2.7	0.971
15	0.41	2.9	0.981
17	0.30	2.9	0.977
20	0.28	2.6	0.969
22	0.21	2.8	0.972
25	0.21	2.9	0.981
27	0.06	2.5	0.958
30	0.10	3.0	0.976
32	-0.01	2.8	0.966

증가하는 것으로 나타났으나, 기울기가 2.9로서 기울기가 3인 등가채널모델과 완전히 부합하지는 않는다. Table 1에는 각 유효압력에서 구한 회귀분석 결과가 표시되어 있다. 표에서 보는 바와 같이 투수계수는 공극율의 3승에 정확히 비례하지는 않으며, 상관계수가 낮은 자료를 제외하는 경우 n은 2.7에서 3사이의 값을 갖는 것으로 나타났다. 이상의 결과를 볼 때 등가채널 모델을 이용하여 암석의 투수성을 정량적으로 예측할 수는 없지만, 투수계수의 측정이 어려운 경우 등가채널 모델을 이용하여 공극율의 측정만으로도 온도에 따른 암석의 투수계수 증가율을 예측하는 것이 가능할 것으로 생각된다.

4.3 압력이 투수계수에 미치는 영향

유효압력에 따른 투수계수의 변화가 Fig. 5에 표시되어 있다. 그림을 보면 투수계수는 온도에 관계없이 지속적으로 감소하는 것으로 나타나고 있다. 압력에 따른 투수계수의 변화율은 낮은 압력 단계에서는 크게 나타나고 압력이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있으며, 더 높은 압력을 적용하면 투수계수의 감소율은 0이 될 것으로 예상할 수 있다. 압력에 따라 투수계수가 감소하는 것은 균열이 폐쇄됨에 따라 균열간극이 작아지고 균열내의 접촉점이 증가함에 따라 유체의 유동로가 길어지기 때문이며, 그중에서도 균열간극의 감소가 지배적인 영향을 미친다(Walsh, 1981). 균열의 폐쇄는 종횡비(Aspect ratio)가 낮은 균열에서 제일 먼저 발생하고,

종횡비가 큰 균열일수록(즉, 종횡비가 1에 가까운 원형관의 형태를 가진 공극) 외부압력에 저항하는 힘이 강하여 폐쇄되기 어렵게 된다. 따라서, 종횡비가 큰 공극이 많이 발생하는 암석일수록 압력에 따른 투수계수의 변화율이 낮게 되고, 종횡비가 낮은 균열이 지배적인 암석일수록 압력에 따른 투수계수의 변화가 클 것으로 예상할 수 있다. Fig. 5를 보면 예열온도가 높을수록 압력에 따른 투수계수의 감소가 비선형적으로 크게 감소하고 있으며, 이는 낮은 압력하에서도 폐쇄가 쉽게 일어나는 종횡비가 낮은 열균열의 발생이 온도에 따라 증가한다는 것을 나타낸다. 봉압이 온도에 따른 예열시험편의 투수계수 변화에 미치는 영향 정도를 파악하기 위하여  $k^{1/3}$ 은  $\log P_e$ 에 선형적으로 변한다는(Jones & Owens, 1979; Walsh, 1981) 사실을 이용하여 Fig. 5의 그림을 다시 그린 것이 Fig. 6에 나와 있으며, 대표적으로 300°C 시험편만을 나타내었다. 예열온도에 따른 투수계수의 크기에 관계없이 봉압의 영향을 직접적으로 비교하기 위하여 투수계수는 유효압력이 10 MPa 일때의 투수계수를 기준으로 하여 정규화시켰으며, 기울기를 결정하기 위하여 선형 회귀분석을 실시하였다. Table 2에는 각 예열시험편에 대한 회귀분석 결과가 나와 있다. 상온에서 300°C까지는 기울기가 0.612에서 0.488로 감소하였고, 400°C에서는 기울기가 0.663으로 증가하였다가 온도가 증가함에 따라 다시 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 볼 때, 일반

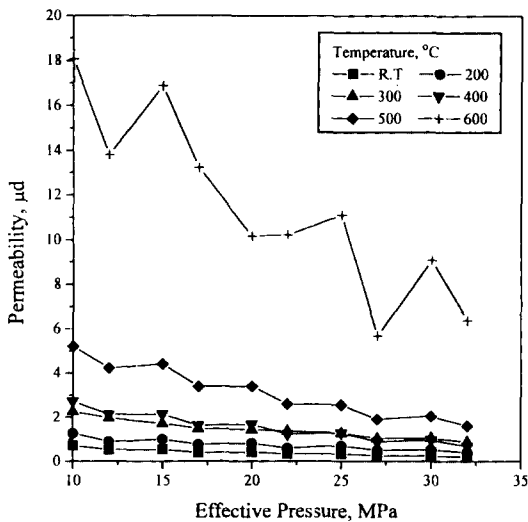


Fig. 5. Effect of effective pressure on permeability.

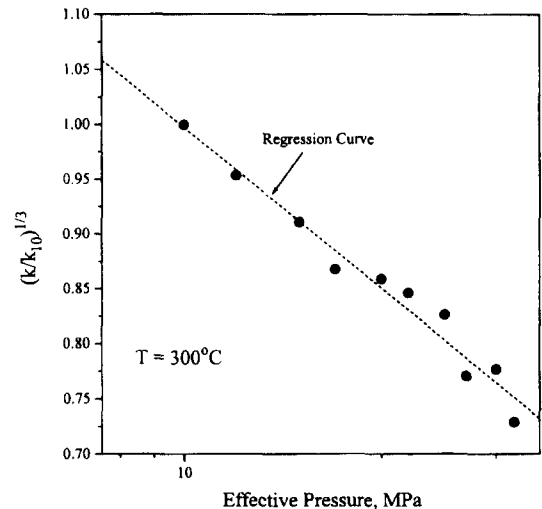


Fig. 6. Cube root of permeability of a linear function of the logarithm of effective pressure.

Table 2. Regression curve constants for relationships between  $k^{1/3}$  vs.  $\log P_e$ .  $(k/k_{10})^{1/3} = A - B \log P_e$ . R=Correlation coefficient

Temperature (°C)	A	B	R
R.T	1.60	0.612	0.968
200	1.50	0.521	0.927
300	1.49	0.488	0.984
400	1.67	0.663	0.962
500	1.62	0.611	0.966
600	1.55	0.540	0.878

적으로 투수계수가 낮은 암석이 투수계수가 높은 암석보다 봉압의 영향을 더 많이 받는 것으로 생각된다. 400°C에서 기율기가 다시 증가한 것은 대부분의 입자 경계에 열균열이 발생한 것과 관련이 있는 것으로 생각된다.

#### 4.4 열응력이 역학적 특성과 투수계수에 미치는 영향 정도

암석에 열을 가하면 암석내에 열균열이 발생하여 강도, 탄성계수 등의 역학적 특성은 저하되고, 투수계수는 증가하게 된다. Fig. 7(a)는 열응력이 암석의 역학적 특성과 수리적 특성에 미치는 영향 정도를 결정하기 위하여 윤용균 등(1996)이 구한 탄성과속도, 정탄성계수, 동탄성계수, 단축압축강도, 포아송비 등의 역학적 특성 중에서 온도에 따른 물성의 감소가 가장 큰 동탄성계수와 본 연구에서 구한 투수계수를 정규화 상태로 표시한 것이다. 동탄성계수의 정규화는 상온시험편( $E_{D0}$ )을 기준으로 하였고, 투수계수는 600°C 시험편( $k_{600}$ )을 기준으로 하였다. 동일한 조건하에서 동탄성계수와 투수계수를 비교하기 위하여 유효압력이 0 일때의 투수계수를 구하였다. 투수계수는 압력에 따라 지수적으로 감소한다는 기존 연구 결과(Kranz 등, 1979; Bernabe, 1986)와 본 연구 결과에 따라 Fig. 5에 나와있는 그래프를 지수함수로 근사시켜 유효압력이 0 일때의 투수계수를 계산하였다. 계산 결과 유효압력이 0일 때 상온, 200, 300, 400, 500, 600(°C) 시험편의 투수계수는 각기 1.33, 2.00, 3.88, 4.44, 7.00, 26.09 ( $\mu d$ )인 것으로 나타났다. 그림을 보면 상온에서 400°C 까지의 구간에서 동탄성계수는 약 2배 감소하였으나, 투수계수의 경우에는 약 3배정도 증가하는 것으로 나타났다. 400~600(°C) 구간에서는 동탄성계수는 약 3.5배 정도 감소한 반면에 투수계수는 약 6배 증가하여 급격한 증가 양상을 보여준다. 암석의 투수계수는 균열간극의 3승에

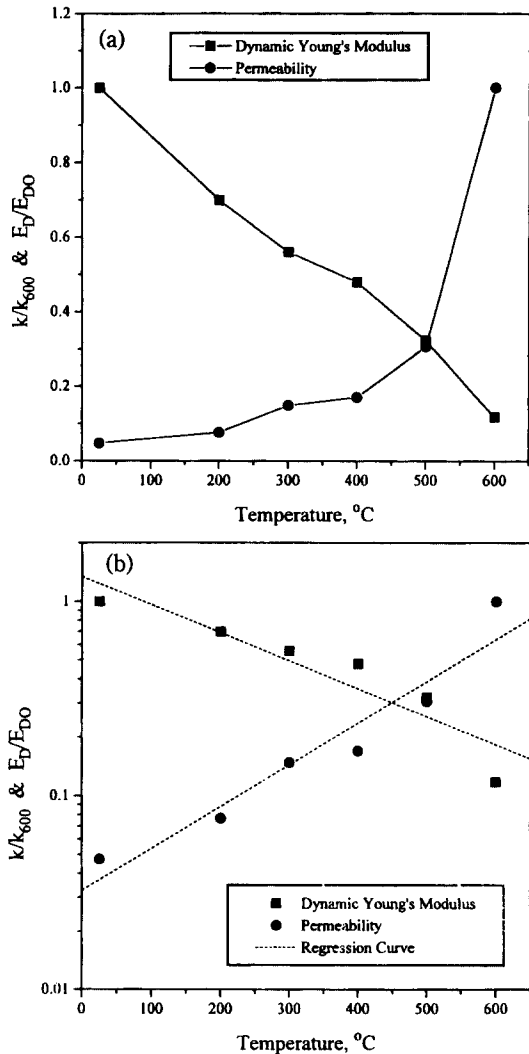


Fig. 7. Normalized dynamic Young's modulus & permeability as a function of maximum thermal cycle temperature.

비례하기 때문에 모든 온도범위에서 동탄성계수보다는 큰 영향을 받을 것으로 예상되며, 500°C 이후 구간에서 투수계수의 증가가 동탄성계수의 감소보다 급격히 증가하는 것은 500°C에서부터 균열간극의 크기가 증대하는 것과 관련있는 것으로 생각된다. Fig. 7(b)는 온도가 역학적 특성 및 수리적 특성에 미치는 영향 정도를 명확히 구분하기 위하여 Fig. 7(a)의 정규화값에 사용로 그를 취한후 선형회귀분석한 결과이다. 그림에서 보듯이 온도에 따른 동탄성계수의 감소보다는 투수계수의 증가가 큰 것으로 나타났으며, 이로부터 열응력에 의한

영향이 역학적 특성보다는 수리적 특성에 크게 작용한다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 온도가 암석의 수리적 특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 상온, 200, 300, 400, 500, 600(°C) 예열시험편에 대한 투수계수를 측정하였다.

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 온도에 따라 투수계수는 지수적으로 증가하는 것으로 나타났다. 유효압력이 10 MPa일 때 600°C 시험편의 투수계수는 상온시험편에 비해 25배 정도 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 400°C 이후에서 투수계수의 급격한 증가가 발생하였다. 균열을 통한 유체의 유동은 3승법칙에 따르는 것으로 알려져 있다. 따라서, 400°C 이후에서 투수계수가 급격히 증가하였다는 것은 균열간극의 크기가 증대하였다는 것을 의미한다. 400°C 이하에서는 완만한 투수계수의 증가가 나타났는데 이는 균열의 상호 연결성이 증가하거나 새로운 균열의 발생에 의한 것으로 생각된다.

2. 공극수압을 증가시키면 유효압력이 감소함에 따라 투수계수는 증가하는 것으로 나타났다. 투수계수는 유효압력에 따라 달라지기 때문에 높은 공극수압을 받는 암석은 상대적으로 투수성이 클 것으로 생각된다.

3. 온도에 따른 유효공극율과 투수계수의 증가가 등가채널모델과 부합하는가를 알아보기 위하여  $k \propto \phi^n$  관계에 대한 선형 회귀분석을 실시한 결과, n은 2.7-3.0 사이의 값을 나타내어 등가채널모델과 완전히 부합하지는 않는 것으로 나타났다.

4. 봉압에 따라 투수계수는 지수적으로 감소하는 것으로 나타났다. 유효압력 10 MPa에서 상온시험편과 600°C 시험편의 투수계수는 0.72, 18.07 ( $\mu\text{d}$ )이고, 유효압력 32 MPa에서는 각각 0.20, 6.39 ( $\mu\text{d}$ )로 감소하여, 온도가 증가할수록 절대적인 투수계수의 변화가 심한 것으로 나타났다.

4. 상온시험편은 투수성이 낮은 암석으로, 예열시험편은 투수성이 높은 암석으로 가정하여  $k^{1/3} \propto \log P$  관계를 이용한 분석 결과, 예열온도가 낮은 시험편일수록 봉압의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 따라서, 일반적으로 투수성이 낮은 암석이 투수성이 높은 암석보다 봉압의 영향을 더 많이 받을 것으로 생각된다.

6. 암석내에 열균열이 발생하면 역학적 특성은 저하

되고 투수성은 증가하게 된다. 투수계수와 역학적 특성 중에서 열응력에 가장 영향을 많이 받는 것으로 판단된 동탄성계수를 상호 비교한 결과, 온도에 따른 동탄성계수의 감소보다는 투수계수의 증가가 더욱 큰 것으로 나타났다. 따라서, 열응력에 의한 영향이 역학적 특성보다는 수리적 특성에 크게 작용한다는 것을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. 강대우, 1991, 고온암체의 에너지개발을 위한 세계 기술 동향, 터널과 지하공간(한국암반역학회지), 1(2): 241-249.
2. 윤용균, 이회근, 1993, 하중조건과 절리의 거칠기가 암석의 투수성에 미치는 영향, 한국자원공학회지, 30(3): 238-247.
3. 윤용균, 이회근, 1996, 열응력이 암석의 역학적 거동과 투수성에 미치는 영향-I. 역학적 거동, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 6(1): 1-9.
4. 이형원, 이정인, 1995, 고온하에서 암석의 열충격, 열팽창 및 열파괴에 관한 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 5(1): 22-40.
5. 조강래, 유정열, 강신영, 1990, 유체역학, 개문당.
6. Bauer, S. J. and Johnson, B., 1979, Effects of slow uniform heating on the physical properties of the Westerly and Charcoal granites, *Proc. 20th U.S. Symp. Rock Mechanics*: 7-18.
7. Bernabe, Y., 1986, The effective pressure law for permeability in Chelmsford granite and Barre granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 23(3): 267-275.
8. Brace, W. F., Walsh, J. B., and Frangos, W. T., 1968, Permeability of granite under high pressure, *J. Geophys. Res.*, 73(6): 2225-2236.
9. G raud, Y., 1994, Variations of connected porosity and inferred permeability in a thermally cracked granite, *Geophys. Res. Lett.*, 21(11): 979-982.
10. Heard, H. C. and Page, L., 1982, Elastic moduli, thermal expansion, and inferred permeability of two granites to 350°C and 55 Megapascals, *J. Geophys. Res.*, 87(B11): 9340-9348.
11. Hocking, G., Williams, J. R., and Mustoe, G. G. W., 1990, Post-test assessment of simulations for in situ heater tests in basalt-Part II. Comparison of predicted and measured response, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 27(3): 161-174.
12. Jones, F. O. and Owens, W. W., 1980, A laboratory study of low-permeability gas sands, *J. Pet. Tech.*, 1631-1640.
13. Kranz, R. L., Frankel, A. D., Engelder, T., and Scholz, C.H., 1979, The permeability of whole and jointed Barre granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 16: 225-234.

14. Page, L. and 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 U.S. Symp. Rock Mechanics: 103-110.
15. Wai, R. S. C., Lo, K. Y., and Rowe, R. K., 1982, Thermal stress analysis in rocks with non-linear properties, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **19**: 211-220.
16. Walsh, J. B., 1981, Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **18**: 429-435.
17. Walsh, J. B. and Brace, W. F., 1984, The effect of pressure on porosity and the transport properties of rock, *J. Geophys. Res.*, **89**(B11): 9425-9431.
18. Witherspoon, P. A., Wang, J. S. Y., Iwai, K., and Gale, J. E., 1980, Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, *Water Resour. Res.*, **16**: 1016-1024.