

암반의 수리인자에 미치는 열적·역학적 영향에 대한 실험적 검증

Experimental Study of Thermal-mechanical Influence on the Hydraulic Properties of Rock

전 석 원*¹ Jeon, Seok-Won

홍 창 우*² Hong, Chang-Woo

이 주 현*³ Lee, Ju-Hyun

강 주 명*⁴ Kang, Joe-Myung

배 대 석*⁵ Bae, Dae-Seok

Abstract

In this study, the change in hydraulic conductivity according to the changes in the contact area, aperture, confining pressure and temperature was observed to improve the reliability of the analysis of underground water flow. Also, the mechanical and thermal properties of domestic crystalline rocks in a great depth were obtained. It was found that the averaged initial aperture ranged from 544.33 μm to 898.62 μm and it followed a log-normal distribution. The hydraulic conductivity decreased with the increase of normal stress on the fracture surface and the hydraulic conductivity decreased as temperature increased. The change in hydraulic conductivity was strongly correlated with the change in contact area. It was verified by experiments that hydraulic conductivity was inversely proportional to the contact area. The measured mechanical and thermal properties were very close to the existing typical properties of domestic granites.

요 지

본 연구에서는 지하수 유동 특성 해석의 신뢰도 증진을 위해서 우리나라 심부결정질 암석의 접촉 면적과 간극의 변화양상, 구속압과 온도에 따라 유체투과율의 변화 양상을 살펴보고자 하였다. 또한 역학적 물성과 열적 물성을 측정하여 모델링의 입력자료에 대한 신빙성을 높일 수 있도록 하였다. 실험 결과 초기 평균 간극은 544.33 μm ~ 898.62 μm 범위를 보였으며 분포특성은 로그-정규분포 형태를 보였다. 구속압 변화에 따라 유체투과율은 감소하는 경향이 나타나고 온도 증가에 따라 유체투과율이 감소하는 경향을 보였으며 접촉 면적이 커지면 유체투과율 변화 폭이 작아짐을 이론과 실험을 통해 규명하였다. 암석의 역학적, 열적 물성을 측정한 결과 기존에 측정된 우리나라 화강암의 물성치와 근사한 값을 가지는 것으로 나타났다.

Keywords : Aperture, Contact area, Hydraulic conductivity, THM coupling

1. 서 론

원자력발전소 운영시 필연적으로 발생하는 고준위폐

기물의 처분에 있어서 처분지역 암반(심부결정질 암석)의 역학적, 열적, 수리적 특성을 규명하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 암반의 지하수 유동 특성에

*1 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., School of Civil, Urban and Geosystem Eng., Seoul National Univ., sjeon@rockeng.snu.ac.kr)

*2 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Urban and Geosystem Eng., Seoul National Univ.)

*3 전국경제인연합회 조사본부 연구원 (Researcher, Research Division, The Federation of Korean Industries)

*4 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Prof., School of Civil, Urban and Geosystem Eng., Seoul National Univ.)

*5 한국원자력연구소 책임연구원 (Senior Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute)

대한 해석은 수치모델링에 의하여 수행되고 있는데, 모델링 결과에 대한 불확실성은 암석의 역학적, 열적 물성 등의 입력 자료의 부정확성과 암석의 역학적, 열적 변형에 의한 수리전도도 변화, 균열의 형태적 특성 단순화에 의한 부정확성에 기인하고 있다. 따라서 지하수 유동 특성 해석의 신뢰도 증진을 위해서는 입력자료의 신빙성을 높이고, 입력자료에 미치는 인자들의 영향에 대한 정확한 평가가 필수적이라 볼 수 있다.

단일 균열에서의 유체투과율은 균열 간극의 삼승에 비례하는 것으로 알려져 있고 균열 간극의 국부적 변화를 통해 다양한 값을 가질 수 있다고 알려져 있다(Snow, 1965; Jeon 등, 1999; Kim 등, 2000; Cheon 등, 2001). 특히 다양한 압력 조건하에서의 균열의 유체 유동 특성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 균열의 간극 특성이다. 간극의 특성을 규명하기 위한 기존의 연구에서는 간극 분포를 고려하지 않은 채 구속압 변화에 따른 균열의 유체투과율을 측정하였다. 또한 전산 모사를 통해 균열면에 작용하는 수직하중의 변화에 따른 유체투과율의 변화를 예측하였으나 실험을 통한 검증은 이루어지지 않았고 각 시료의 서로 다른 유체투과율 변화 양상에 대하여 설명할 수 없었다. 온도 및 압력의 변화에 따른 유체투과율의 변화는 암종에 따른 열균열의 발전 양상과 열팽창 차이에 따른 공극률의 변화, 광물의 화학 반응에 따라 달라진다.

본 연구에서는 무구속압하에서 3차원 레이저 측정기로 실측한 간극의 분포가 수리학적인 간극 분포와 동일하다고 가정하여, 전산 모사를 통해 각각의 구속압 상태에 대한 접촉 면적과 간극 모형을 예측하였고, 간극 분포에 따른 유체투과율 변화를 관찰하였다. 그리고 접촉 면적과 구속압, 온도 변화에 따른 유체투과율의 변화 양상을 실험적으로 살펴보았다.

또한 우리나라 심부결정질 암석의 역학적, 열적 물성에 대한 기초자료를 제시하여 수치 해석에서의 입력값을 산정하는데 참고자료로 이용할 수 있도록 하였다. 대전 및 고성 지방의 결정질 암석을 대상으로 밀도, 공극률, 탄성파 속도, 일축압축강도, 영률, 포아송비, 인장강도, 전단강도 등의 역학적 물성과 열전도율, 열팽창계수, 비열 등의 열적 물성을 측정, 제시하였다.

2. 연구내용 및 실험방법

2.1 실험장치

연구에 사용된 실험 장치는 온도 및 구속압에 따른

유체투과율을 측정하기 위하여 제작되었다. 일정 유량을 주입할 수 있도록 정량 주입 펌프를 사용하였고, 온도를 조절하기 위하여 오븐을 사용하였으며, 구속압 변화를 위하여 Syringe Pump(ISCO Model 500)를 사용하였다. 또한 간극 측정을 위하여 3차원 레이저 측정기를 사용하였다.

2.1.1 3차원 레이저 측정기

3차원 레이저 측정기의 각 부분을 도해적으로 Fig. 1에 나타내었다. 3차원 레이저 측정기는 레이저 변위계(laser profilometer), 위치 지정 시스템(positioning system), 자료 출력과 전체 시스템을 제어할 수 있는 컴퓨터 등에서 부분으로 되어 있다. 위치 지정 시스템은 위치 지정 제어부와 작업 테이블로 나뉜다. 레이저 파장의 최소 측정한도는 0.5 μm 이고 센서헤드로부터 5 cm 떨어진 지점을 중심으로 ± 8 mm 사이가 가능 측정 범위가 된다(배기윤, 1999).

2.1.2 유체 유동 실험 장치

구속압 변화에 따른 유체투과율 측정을 위한 장치를 Fig. 2에 나타내었다. 유체 유동 실험 장치는 구속압을 변화시켜 주는 부분과 일정 유량으로 유체를 주입시키

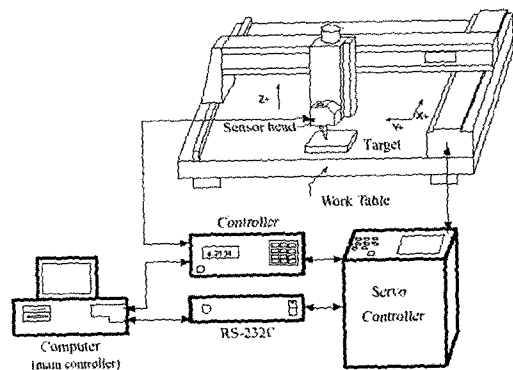


Fig. 1. Schematic diagram of coordinate measuring machine(배기윤, 1999)

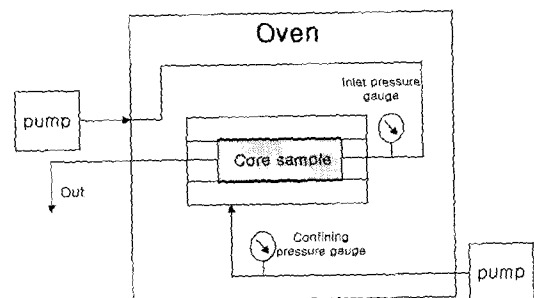


Fig. 2. Schematic diagram of fluid flow testing apparatus

는 부분, 지하 심부 암반의 균열에 해당하는 코어홀더 등 세 부분으로 되어 있다.

Syringe Pump ISCO(Model 500)를 사용하여 구속압을 변화시키고, 이후 구속압의 크기는 일정하게 유지하였다. 일정한 유량으로 유체를 주입하기 위하여 펌프를 사용하였고, 물의 온도를 일정하게 유지하여 물의 점성도를 일정하게 유지하기 위하여 오븐을 사용하였다. 증류수만을 사용할 경우 균열 내부에서 미생물에 의한 클로킹 현상이 발생하기 때문에 염소(NaOCl) 1 ppm을 투여하여 클로킹 현상을 방지하였다(이석민, 1999). 또한 주입수가 코어홀더에 주입되기까지 온도 변화를 막기 위하여 파이프를 길게 하여 온도 변화에 의한 오차 요인을 제거하였다. 코어홀더에 주입수가 주입되기 전에 압력 게이지를 설치하여 시료 양단의 압력 차이를 측정하였다.

2.2 시료의 제작

실험에 사용한 시료는 고성 지역 지하 심도 0 m~500 m 지점에서 시추한 화강암을 성형한 후 인공 인장균열을 낸 시료이다. 또한 균열 간극 분포의 변화를 위하여 전단 시험기를 사용하여 1 mm 전단 변형을 가하였다. 시료의 기초 물성은 Table 1과 같다. Table 1의 fracture volume과 mechanical aperture는 표면표고법(Iwano and Einstein, 1993)으로 측정한 결과이다.

2.3 실험방법

2.3.1 균열 간극의 측정

이 연구에서는 Iwano와 Einstein(1993)의 방법과 유사한 레이저 변위계를 이용한 표면 표고법을 이용하여 균열 간극을 측정하였다. 균열의 상 하면이 정확히 일치하도록 위치시키고 상 하면에 대해서 X, Y 방향으로 각각 0.5 mm 간격으로 최소 측정한다 0.5 μm 의 한계로 균열 표면의 상대 높이를 측정하였다. 균열 간극 계산 방법은 Borland C++ 프로그램으로 작성된 간극 계산 프로그램

을 통해 두 표면 높이를 수치적으로 중첩시켰다. 여기에서 계산되는 균열 간극은 두 표면들 사이의 단순한 산술 차이이다. 하지만 균열 표면 측정값은 측정시 모든 표면이 정확한 경사로 측정될 수 없고 특정한 방향으로 기울어 측정되기 때문에 생기는 추세값(trend)을 포함하고 있다. 그러므로 이 추세값을 다중 회귀 분석에 의해 제거하고 나머지 잔차 값들을 사용하여 간극을 계산하면 표준화된 간극 값을 구할 수 있다. 다중 회귀 분석의 방법을 사용하여 2차원 평면 추세면은 최소 제곱법을 통해 구할 수 있다.

2.3.2 구속압 및 온도 변화에 따른 유체투과율의 측정

준비된 시료의 기초 물성(시료의 지름, 길이, 공극률 등)을 측정한 다음 코어홀더에 시료를 넣고 구속압을 가한다. 여기서 구속압은 균열의 간극에 영향을 미쳐 초기 유체압력을 변화시키기 때문에 0.34 MPa(50 psi)로 일정하게 유지한다. 시료 내부를 물로 완전히 포화시키기 위하여 균열 내부를 진공펌프를 이용하여 충분히 진공상태가 유지되도록 한다. 화강암 시료는 공극 부피가 매우 작기 때문에 약 2~3시간 동안 진공상태를 유지하면 충분하다.

염소(NaOCl) 1 ppm을 투여한 물을 사용하여 시료를 포화시키고 나면 염소 1 ppm을 투여한 물을 일정 유량으로 주입하여 압력이 안정화될 때까지 기다린 후 유체 투과율과 주입 유량에서 시료 양단에 걸리는 초기 압력을 결정한다. 이 때 오븐을 이용하여 각 시스템의 온도를 30 $^{\circ}\text{C}$ /60 $^{\circ}\text{C}$ /90 $^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지시키고 구속압을 각각 단계별로 증가시키면서 시료 양단에 걸리는 압력을 측정한다. 이렇게 한번의 실험이 완료되면 다른 시료에 대해서도 같은 방법을 적용하여 모두 5개의 시료에 대하여 실험을 수행하였다.

2.4 전산모형

실험을 통해 얻어진 균열 초기 간극과 유량을 입력 자료로 하여 압력장(pressure field)과 유동장(flow field)을 계

Table 1. Core data

Specimen	Length (cm)	Diameter (cm)	Fracture volume (cm ³)	Mechanical aperture (μm)
S1	6.72	3.78	1.52	600.69
S2	7.18	3.78	1.82	670.06
S3	6.95	3.78	1.45	550.45
S4	6.28	3.78	1.29	544.33
S5	6.36	3.78	2.13	898.62

산하고 구속압에 따라 균열 간극의 변화를 예측하는 전산 모형을 개발하였으며 사용한 언어는 Borland C++ Builder 5.0이다. 이를 통해 간극에서의 접촉면적을 구하였다.

지배방정식은 레이놀즈 방정식(Reynolds equation)을 사용하였으며, 2차원 유동의 경우에 레이놀즈 방정식은 다음 식과 같이 쓸 수 있다(Tsang and Tsang, 1989; Zimmerman and Bodvarsson, 1996).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{b(x,y)^3 g}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{b(x,y)^3 g}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right] = 0 \quad (1)$$

여기서 b 는 균열 간극(cm), p 는 압력(psig), μ 는 유체의 점성도(cp), g 는 중력가속도(cm/s^2)이다. 위 식을 블럭 중심으로 유한 차분화(block centered finite difference discretization) 시키면 다음과 같은 최종 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\Delta y \frac{b^3_{i+1/2,j} g}{12\mu} \left[\frac{p_{i+1,j} - p_{i,j}}{\Delta x} \right] - \Delta y \frac{b^3_{i-1/2,j} g}{12\mu} \left[\frac{p_{i,j} - p_{i-1,j}}{\Delta x} \right] + \Delta x \frac{b^3_{i,j+1/2} g}{12\mu} \left[\frac{p_{i,j+1} - p_{i,j}}{\Delta y} \right] - \Delta x \frac{b^3_{i,j-1/2} g}{12\mu} \left[\frac{p_{i,j} - p_{i,j-1}}{\Delta y} \right] = 0 \quad (2)$$

여기서 Δx 와 Δy 는 각각 x , y 방향으로의 격자 간격이고 $b^3_{i+1/2,j}$ 와 $b^3_{i-1/2,j}$ 등의 항들은 연결투과율이다. 2차원 균열에서 각각의 격자들은 고유한 균열 투과율을 갖게 되는데 인접한 두 격자의 균열 투과율들의 평균값이 바로 연결투과율이다. 여기서 두 격자의 균열 투과율을 평균화하는 방법에 따라 연결투과율을 다양하게 정의할 수 있다. 본 연구에서는 균열의 기하학적 특징을 반영하고 있는 대칭 썸기를 이용하여 전산 모사를 수행하였다.

$$b^3_{i+1/2,j} = \frac{2 b^2_{i,j} b^2_{i+1,j}}{b_{i,j} + b_{i+1,j}} \frac{3(1 - \theta \cot \theta)}{4 \tan^2(\theta/2)} \quad (3)$$

여기서 θ 는 썸기의 경사각이다.

개발된 전산 모형에서 단위 격자는 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 로 하였으며 외부 경계 조건은 비유동 경계 조건이다. 초기 간극 분포값을 이용하여 수리 간극을 계산하고 실

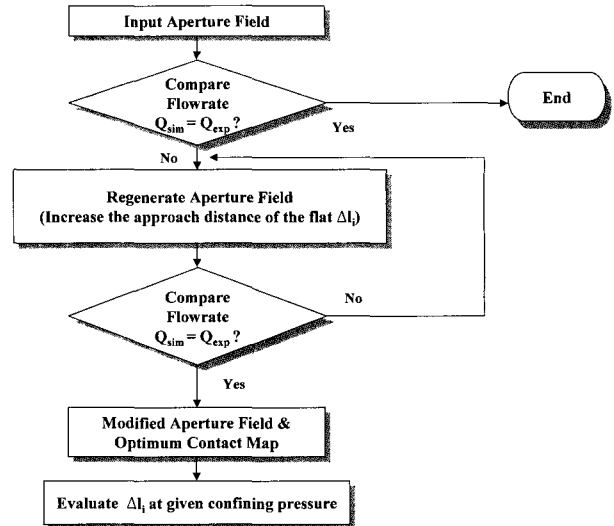


Fig. 3. Flowchart of calculating the optimum contact map

험에서 구한 구속압하의 수리 간극과 비교하여 다를 경우에 Hertz의 접촉 이론(Timoshenko and Goodier, 1951)을 이용하여 간극 분포 값을 변화시켜 일치할 때까지 반복적으로 계산하였다. 여기에서 초기 간극 분포와 수리 간극 분포가 일치한다는 가정을 하였다. 구속압하의 수리 간극 분포를 계산하여 구속압-간극 분포를 살펴보고 접촉 면적에 따른 유체투과율 변화를 통해 접촉 면적이 유체투과율 변화에 미치는 영향을 살펴본다.

개발된 전산 모형에서의 계산과정을 Fig. 3에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 간극 분포 특성

3차원 레이저 측정기를 이용하여 측정된 균열 간극 분포의 통계치는 Table 2와 같으며 균열 간극 분포는 Fig. 4와 Fig. 5와 같다. 여기서는 대표적으로 시료 S1의 결과만을 나타내었다. 각 시료 균열 간극의 평균은 $544.33 \mu\text{m} \sim 898.62 \mu\text{m}$ 이고 이는 기존의 실험값인 Esaki 등(1998)

Table 2. Statistical parameters of several initial aperture distributions

	S1	S2	S3	S4	S5
Emean (μm)	600.69	671.62	550.45	544.33	898.62
Standard deviation (μm)	365.40	362.57	298.53	361.46	602.83
Coeff. of variation	0.6083	0.5398	0.5423	0.6640	0.6708
Coeff. of skewness	1.6566	1.8687	2.0735	2.2475	1.9967
Covariance	0.1335	0.1315	0.0891	0.1307	0.3634
Correlation length (mm)	18.15	5.074	12.37	7.1	14.1

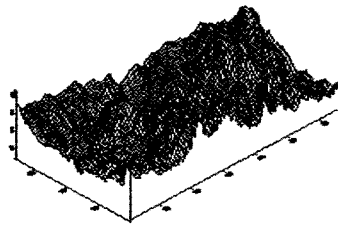


Fig. 4. Maps of the fracture wall asperities of the fracture sample S1(unit : mm)

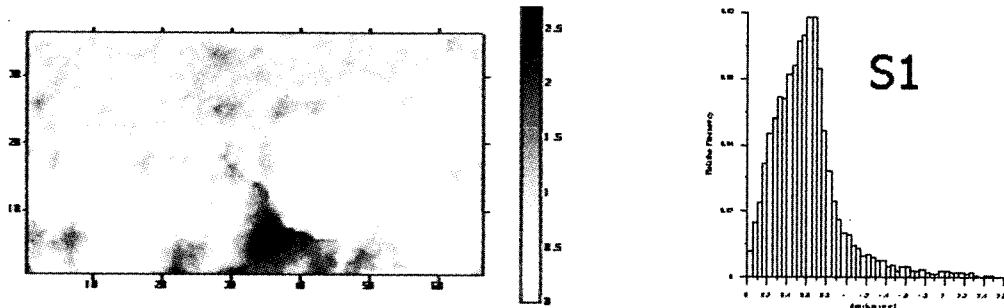


Fig. 5. Map and frequency histograms of the apertures of the fracture sample S1(unit : mm)

의 $615 \mu\text{m}$, Lespinasse와 Sausse(2000)의 $448 \mu\text{m} \sim 748 \mu\text{m}$ 와 비슷한 결과이다. Table 2에서의 공분산(covariance)과 상관길이(correlation length)는 간극의 변화에 대한 베리오그램(variogram) 분석을 통해 얻은 결과이다.

3.2 구속압에 따른 유체투과율의 변화

구속압을 50~2000 psi까지 변화시키면서 구속압에 따

른 유체 투과율을 측정하였다. 구속압의 증가에 따라 유체투과율은 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 구속압이 증가함에 따라 시료의 균열이 압축을 받아서 균열의 간극이 전체적으로 줄어들고, 실제로 유체가 흐를 수 있는 공간이 줄어들며, 유동 경로가 복잡해지기 때문이다. 측정 결과를 Gangi(1978), Gale(1982) 그리고 Swan(1983)의 모델을 이용하여 비선형 회귀 분석을 실시하였다. 각 시료에 대한 모델 상수를 Table 3에 나타내었으며 각 모델

Table 3. Flow properties and parameters in various hydraulic models

	Gangi(1978) $k = k_0 \left\{ 1 - \left(\frac{p_c}{D} \right)^{1/n} \right\}^3$		Gale(1982) $k = \beta p_c^{-\alpha}$		Swan(1983) $k = k_0 (c - m \ln p_c)^2$	
	D	n	α	β	c	m
S1	14370.40	2.68	793.79	0.45	1.44	0.14
S2	1356.15	1.58	9034.32	1.04	2.28	0.34
S3	3542.85	1.33	3722.83	0.47	1.73	0.18
S4	1352.88	1.19	8821.16	0.78	2.11	0.27
S5	2818.70	1.46	4886.28	0.56	1.77	0.20

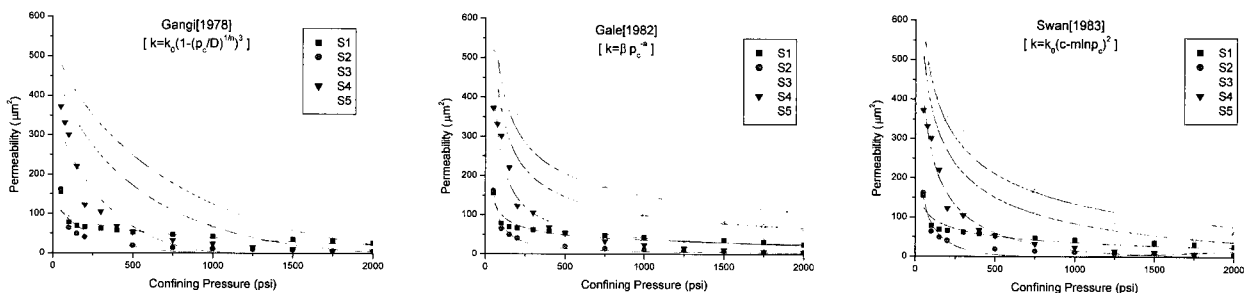


Fig. 6. Permeability-confining pressure data compared with hydraulic model of Gangi(1978), Gale(1982), and Swan(1983)

별 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 대부분의 모델이 실험 결과와 잘 근사하였다.

3.3 온도에 따른 유체투과율의 변화

온도를 30°C/60°C/90°C로 변화시키면서 온도 변화에 따른 유체 투과율의 변화 양상을 측정하였다. 측정시 일정 온도에서 구속압을 변화시키면서 유체투과율을 측정하였고 온도 변화시 실험 장치의 온도가 안정화 될 때까지 3시간 정도의 시간이 경과한 후 측정하였다. Suzuki 등(1998)은 장기간의 유체 유동 실험을 통해 1,000일이 지날 경우 미세 균열에 의해 균열 발전이 급격히 증가한다고 보고하였다. 또한 Summers 등(1978)은 장기간의 유체 유동이 있을 경우 광물 입자와 물의 화학 반응으로 인하여 침전물들이 생기게 되어 유체투과율의 감소가 일어난다고 보고하였다. 본 실험에서는 미세 균열에 의한 영향과 화학 반응에 의한 영향을 무시하기 위하여 5일 이내의 단기간의 실험을 수행하였다.

실험 결과 온도 증가에 따라 유체투과율은 감소하는 경향이 나타났다. 이는 온도 증가에 따라 암석이 열팽창을 하므로 암석 입자 사이의 체적 팽창이 일어나서 균열 간극이 닫히는 효과가 발생하기 때문이다. Darcy 법칙에서 온도 증가에 따라 물의 점성도 값이 30°C일 때의 0.798에서 90°C일 때는 0.315로 작아져서 발생하는 유체 투과율의 증가보다 간극이 닫히는 효과가 훨씬 더 큰 영향을 끼쳤다. 각 온도별 유체투과율 측정 결과는 Fig. 7에 나타내었으며, 각 온도별 물의 점성도는 Table 4와 같다.

3.4 접촉면적에 따른 유체투과율의 변화

구속압에 따른 접촉 면적의 변화는 실험을 통해서 직접 측정이 불가능하다. 이 연구에서는 Hertz의 접촉 이론(Timoshenko and Goodier, 1951)을 이용한 전산해석의 결과를 사용하여 구속압에 따른 접촉 면적을 계산하였다. 접촉 면적과 유체투과율의 변화를 분석하기 위하여 정규화된 값을 사용하였고 이를 Fig. 8에 도시하였다.

Table 4. Viscosity of water at different temperatures

	30°C	60°C	90°C
Viscosity (centi-poise)	0.798	0.466	0.315

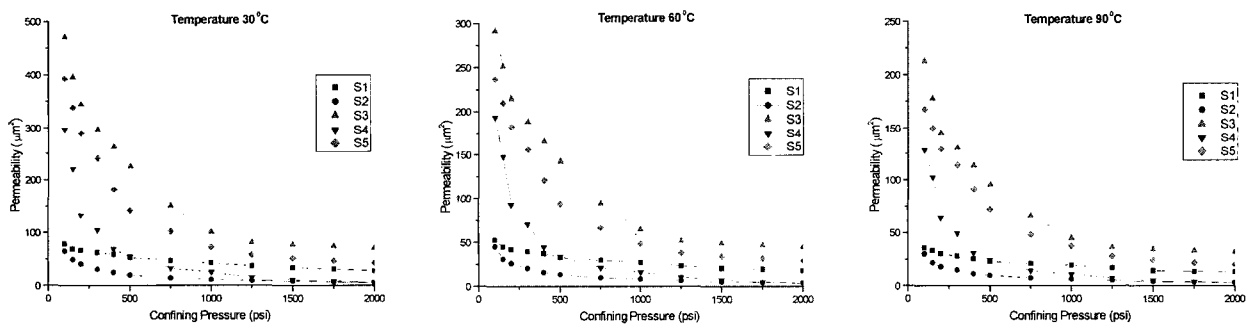


Fig. 7. Permeability-confining pressure data at temperature, 30°C, 60°C, and 90°C

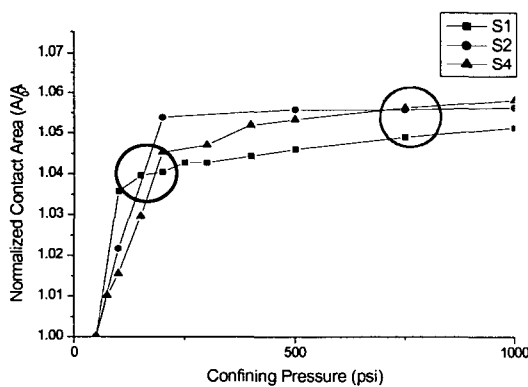


Fig. 8. Confining pressure-normalized contact area data

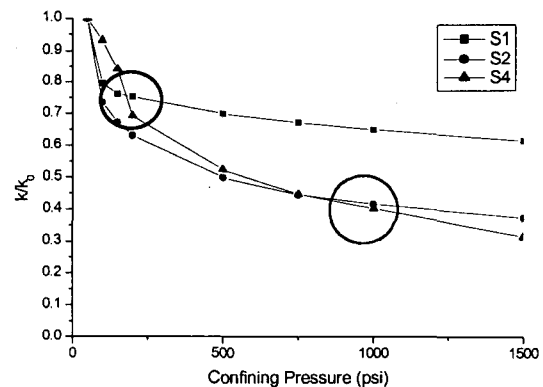


Fig. 9. Confining pressure-normalized permeability data

Table 5. Confining pressure and normalized contact area data

		Confining pressure								
		50	100	150	200	300	400	500	750	1000
Normalized contact area (A/A ₀)	S1	1	1.03567	1.03949	1.04032	1.04264	1.04430	1.04596	1.04895	1.05127
	S2	1	1.04378	1.04881	1.05383	1.05448	1.05535	1.05578	1.05578	1.05632
	S4	1	1.01542	1.02952	1.04521	1.04694	1.05186	1.05332	1.05625	1.05811

계산된 접촉 면적의 변화를 통하여 S1, S2, S4시료의 유체투과율 변화 양상을 분석할 수 있다. S1시료와 S4시료의 유체투과율은 구속압이 1.03 MPa(150 psi)에서 1.38 MPa(200 psi) 사이에서 값의 변화 폭이 다르게 나타난다. 이는 S4시료의 접촉 면적 변화가 S1시료의 접촉 면적 변화보다 크므로 S4시료의 유체투과율 감소 폭이 S1시료보다 더 크게 나타나기 때문이며, 이를 Fig. 9에 제시하였다. 같은 방법으로 S2시료와 S4시료의 유체투과율 변화를 비교해보면 S2시료와 S4시료의 유체투과율은 구속압이 750 psi 전후에서 값의 변화 폭이 다르게 나타난다. 이는 마찬가지로 S4시료의 접촉 면적 변화가 S2시료의 접촉 면적 변화보다 크므로 S4시료의 유체투과율 감소 폭이 S2시료보다 더 크게 나타나기 때문

이며, 이는 Fig. 9에 제시하였다. 구속압과 정규화된 접촉 면적 값은 Table 5와 같다.

4. 시료의 역학적, 열적 물성 측정

4.1 역학적 물성 측정 결과

대전 및 고성 지방의 화강암 시료(심도 350 m)에 대한 역학적 물성을 측정한 결과를 도표로 나타내면 다음과 같다. 비교 자료로 사용한 황등화강암 물성은 안경문(1997), 거창화강암은 장수호(1998)를 참조하였다. 역학적 물성은 이희근(1997)과 Brown(1981)이 제시한 실험 과정에 따라 실험하였다. Table 6에는 밀도, 공극률, 탄성과 속도,

Table 6. The mechanical properties of experimental specimens

	전라북도 황등 화강암	경상남도 거창 화강암	대전 화강암		고성 화강암	
			평균 (시료개수)	상한 하한	평균 (시료개수)	상한 하한
Bulk specific gravity	2.65	2.62	2.64 (27)	2.81 2.49	2.63 (12)	2.65 2.60
Apparent porosity (%)	0.70	0.66	0.90 (27)	1.81 0.42	0.71 (12)	0.76 0.63
P-wave velocity (m/sec)	3,130	3,710	2,920 (27)	5,650 1,900	3090 (12)	3,320 2,830
S-wave velocity (m/sec)	1,950	1,850	1,790 (27)	2,190 1,220	1710 (12)	1,790 1,630
Uniaxial compressive strength (MPa)	187	166	138 (27)	182 71	100 (12)	152 70
Young's modulus (GPa)	56.7	64.8	45 (27)	63 16	44 (12)	69 13
Poisson's ratio	0.19	0.21	0.21 (27)	0.29 0.14	0.25 (12)	0.31 0.19
Brazilian tensile strength (MPa)	9.1	10.0	8.8 (8)	10.8 6.3	8.5 (4)	9.0 8.1

Table 7. The results of shear test

	시험횟수	Average peak friction angle (°)	Average residual friction angle (°)	Average apparent peak cohesion (MPa)
대전 화강암	22	41.4	32.9	0.04
고성 화강암	11	42.9	33.3	0.03

일축압축강도, 영률, 포아송비, 인장강도에 대한 결과를 제시하였으며, Table 7에는 절리면 직접전단시험에 대한 결과를 제시하였다. Table 7의 결과는 11번의 실험을 종합하여 얻은 값의 평균으로 전체 자료를 종합한 값이다.

4.2 열적 물성 측정 결과

4.2.1 열전도도

대전과 고성지방의 화강암 모두 심도 300 m의 시료를 대상으로 열전도율을 측정하였으며, 방법은 열선법을 이용하였다(Robert, 1994; 통상산업부, 1997). 시험 결과는 Table 8에 나타내었다. 두 시료 모두 일반적으로 화강암이 갖는 열전도도(상온에서 1.73 ~ 3.98 W/mK) 범위에 속하는 값을 보였다. 측정 자료 처리는 LabView 프로그램을 사용하였다.

4.2.2 열팽창계수

대전, 고성 각각 심도 0 m와 300 m 시료에 대한 온도

에 따른 길이 변화 결과를 컴퓨터에 내장된 열팽창계수 측정 프로그램으로 분석하여 각 시료에 대한 열팽창계수를 구하였다. 열팽창계수는 평균 체적팽창계수(mean coefficient of volumetric thermal expansion, Robert, 1994; 통상산업부, 1997)값을 제시하였다. 측정결과는 Table 9에 나타내었다. 일반적으로 열팽창계수를 측정 한 온도 구간에 따라 열팽창계수의 측정값에 차이가 나므로 측정 온도구간을 표시하였다.

4.2.3 비열

비열은 입력보상(power-compensated) 방법을 사용하여 측정을 하였으며, 이 방법으로 구해진 비열값은 측정된 온도 범위에서의 평균값이다(Robert, 1994; 통상산업부, 1997). 결과는 Table 10에 나타내었다.

5. 결론

접촉 면적과 간극의 변화양상에 따라 유체투과율의

Table 8. The thermal conductivity of experimental specimens

시료명	심도 (m)	온도 (°C)	열전도도(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
대전 화강암	300	22	2.589
고성 화강암	300	22	2.776

Table 9. The thermal expansion of experimental specimens

시료명	심도 (m)	온도 (°C)	열팽창계수 (10 ⁻⁶ / K)
대전 화강암	0	0 ~ 50	4.996
		50 ~ 100	9.963
		0 ~ 500	16.551
	300	0 ~ 50	3.928
		50 ~ 100	10.473
		0 ~ 500	19.312
고성 화강암	0	0 ~ 50	5.851
		50 ~ 100	10.891
		0 ~ 500	20.094
	300	0 ~ 50	4.415
		50 ~ 100	12.062
		0 ~ 500	19.244

Table 10. The specific heat of experimental specimens

시료명	심도 (m)	비열 (J/g°C)
대전 화강암	0	0.97694
	300	1.21246
고성 화강암	0	1.07509
	300	1.57583

변화 양상을 살펴보기 위한 실험 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- (1) 화강암 인공 균열의 간극 측정 결과, 초기 평균 간극은 544.33 μm ~ 898.62 μm 범위를 보였으며, 간극 크기의 분포특성은 로그-정규분포 형태를 보였다.
- (2) 구속압 변화에 따라 유체투과율은 감소하는 경향이 나타나고 기존의 Gangi(1978), Gale(1982), 그리고 Swan(1983)의 모델을 이용하여 비선형 회귀분석을 실시한 결과 세 가지 모델이 모두 실험 결과와 비슷하였다.
- (3) 온도 증가에 따라 유체투과율이 감소하는 경향을 보였으며 이는 열팽창으로 인한 균열 간극 감소 때문인 것으로 추정된다.
- (4) 접촉 면적이 커지면 유체투과율 변화 폭이 작아짐을 이론과 실험을 통해 규명하였다.
- (5) 영동 및 영서 지방 화강암을 대상으로 역학적, 열적 물성을 측정된 결과 기존에 측정된 우리나라 화강암의 물성치와 근사한 값을 가지는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력연구소 원자력연구개발사업비 지원(과제번호 KAERI/CM-494/2001)으로 이루어졌으며, 연구비를 지원해 주신 관계기관에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 배기운(1999), 레이저 변위계를 이용한 암석절리면의 3차원 거칠기 측정기 개발, 석사학위논문, 서울대학교, pp.14-27.
2. 신승현, 강주명, 최종근, 전석원(2000), "지하저장 비축기지의 안정적 운영을 위한 주입수 유분함량에 관한 실험적 고찰", 한국자원공학회지, 제37권 4호, pp.225-231.
3. 안경문(1997), 저온하에서의 화강암, 사암의 역학적 거동에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교, pp.17.
4. 이석민(1999), 탄화수소 지하 비축기지의 안정적인 운영을 위한 주입용수 수질에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교, pp.21-29.
5. 이희근(1997), 응용암석역학, 서울대학교 출판부, 서울, pp.3-12.
6. 장수호(1998), 인장, 전단 및 혼합모드에서 암석의 파괴인성 측정에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교, pp.46.
7. 통상산업부(1997), 에너지 절약형 지하 냉방 및 냉동저장 설계기술개발에 관한 최종보고서, 통상산업부, 서울, pp.75, pp.86-89, pp.98.
8. Brown, E. T.(1981), *Rock Characterization Testing and Monitoring*

: *ISRM suggested methods*, Pergamon, Oxford, pp.73-140.

9. Cheon, D., Lee, H., Jeon, S., and Lee, C.(2001), "A Study of Hydromechanical Behaviors of Rock Joints using Torsional Shearing System", *Proc. of 2001 ISRM International Symposium*, Beijing, China, pp.185-188.
10. Esaki, T., S. Du, Y. Jiang, Y. Wada, and Y. Mitani(1998), "Relation between Mechanical and Hydraulic Apertures during Shear-Flow Coupling Test", *Proc. of 10th Japan Symp. on Rock Mech.*, Japan, pp.91-96.
11. Gale, J.E.(1982), "The Effects of Fracture Type (Induced versus Natural) on the Stress-Fracture Closure-Fracture Permeability Relationships", *Proc. of 23rd U.S. Rock Mechanics Symp.*, Berkeley, U.S.A., pp.290-298.
12. Gangi, A.F.(1978), "Variation of Whole and Fractured Porous Rock Permeability with Confining Pressure", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.15, pp.249-257.
13. Iwano, M. and H.H. Einstein(1993), "Stochastic Analysis of Surface Roughness, Aperture and Flow in a Single Fracture", Eurock '93, *Proc. of the ISRM Int. Symp. on Safety and Environmental Issues in Rock Eng.*, Lisbon, Finland, pp.135-141.
14. Jeon, S., Kim, J.I.(1999), "Influence of the Mechanical Loading on the Change of Permeability", *Proc. of the 99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering*, Fukuoka, Japan, pp.447-453.
15. Kim, J., Cheon, D., Shin, J., Park, D., and Jeon, S.(2000), "The Influence of Uniaxial Loading on the Change in Radial Permeability in Saturated Granite", *Proc. of the International Conference on Geotechnical & Geological Engineering (GeoEng2000)*, Melbourne, Australia, pp.219.
16. Lespinasse, M. and J. Sausse(2000), "Quantification of Fluid Flow : Hydro-Mechanical Behavior of Different Natural Rough Fractures", *Journal of Geochemical Exploration*, Vol.69-70, pp.483-486.
17. Robert F. Speyer(1994), *Thermal Analysis of Materials*, New York: Marcel Dekker, pp.227-249.
18. Snow, D.T.(1965), *A Parallel Plate Model of Fractured Permeable Media*, Ph. D. thesis, Univ. of Calif., Berkeley, pp.331.
19. Summers, R., K. Winkler, and J. Byerlee(1978), "Permeability Changes during the Flow of Water through Westerly Granite at Temperatures of 100-400°C", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 83, No.B1, pp.339-344.
20. Suzuki, K., M. Oda, M. Yamazaki, and T. Kuwahara(1998), "Permeability Changes in Granite with Crack Growth during Immersion in Hot Water", *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.35, No.7, pp.907-921.
21. Swan, G.(1983), "Determination of Stiffness and Other Joint Properties from Roughness Measurements", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.16, pp.19-38.
22. Tsang, Y.W. and C.F. Tsang(1989), "Flow Channeling in a Single Fracture as a Two-Dimensional Strongly Heterogeneous Permeable Medium", *Water Resources Research*, Vol.25, No.9, pp.2076-2080.
23. Timoshenko, S.P. and J.N. Goodier(1951), *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York, pp.409-420.
24. Zimmerman, R.W. and G.S. Bodvarsson(1996), "Hydraulic Conductivity of Rock Fractures", *Transport in Porous Media*, Vol.23, pp.1-30.

(접수일자 2003. 1. 10, 심사완료일 2003. 9. 24)