

압력에 따른 균열 간극변화와 수리전도도 변화 관찰

채병곤^{1*} · 이철우² · 정교철³ · 김용제²

¹한국지질자원연구원 지질환경재해 연구부

²한국지질자원연구원 지하수 · 지열자원 연구부

³안동대학교 지구환경과학과

The Changes of Aperture Variation and Hydraulic Conductivity for Compression Variability

Byung-Gon Chae^{1*} · Cheol-Woo Lee² · Gyo-Cheol Jeong³ · Yongje Kim²

¹Geological and Environmental Hazards Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Groundwater and Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

³Department of Earth and Environmental Sciences, Andong, National University

ABSTRACT

In order to measure aperture variation dependent on normal stress and to characterize on relationship between aperture variation and hydraulic conductivity this study measured apertures of rock fractures under a high resolution confocal laser scanning microscope (CLSM) with application of five stages of uniaxial normal stresses. From this method the response of aperture can be continuously characterized on one specimen by different loads of normal stress. The results of measurements showed a rough geometry of fracture bearing non-uniform aperture. They also revealed different values of aperture variations according to the load stages on each position along a fracture due to the fracture roughness. Laboratory permeability tests were also conducted to evaluate the changes of permeability coefficients related to the aperture variations by different loads. The results of permeability tests revealed that the hydraulic conductivity was not reduced at a fixed rate with increase of normal load. Moreover, the rates of aperture variations did not match to those of hydraulic conductivity. The hydraulic conductivity calculated in this study did not follow the cubic law, representing that the parallel plate model is not suitable to express the fracture geometry corresponding to the results of aperture measurements under the CLSM.

Key words : confocal laser scanning microsocope (CLSM), aperture variation, fracture roughness, hydraulic conductivity, hydraulic aperture

요약문

압축력의 변화에 따른 균열 간극변화 양상을 측정하고 간극변화와 수리전도도와의 관계를 파악하기 위해 이 연구에서는 다섯 단계의 수직 일축압축력을 균열면에 연속적으로 가하면서 고해상도의 공초점 레이저 스캔 현미경 (confocal laser scanning microscope; CLSM)을 이용하여 간극의 크기를 측정하고 디지털 이미지를 획득하였다. 기존의 연구들과는 달리 이 연구의 측정방법은 압력변화에 대한 동일시료 간극의 반응을 연속적으로 파악할 수 있는 점이 특징이다. 측정결과는 간극크기가 일정하지 않은 불평탄한 균열형태를 매우 잘 나타내었다. 균열 조도(roughness)로 인해 압력에 따른 간극 변화량은 일정하지 않고 부분마다 다름을 보였다. 각 압력단계에서 간극변화에 따른 투수성 변화양상을 파악하고자 실내투수시험을 병행하여 실시한 결과, 각 압력단계에서의 투수성 변화도 일정한 감소율을 나타내지 않고 간극 변화율이 크더라도 투수율은 오히려 작은 경우도 관찰되었다. 현미경을 통해 측정한 물리적 간극과 실제 유체유동 경로가 되는 수리간극의 크기 차이를 파악하기 위해 계산을 한 결과, 미미한 값이지만 물리적 간극보다

*Corresponding author : bgchae@kigam.re.kr

원고접수일 : 2003. 05. 22 계재승인일 : 2003. 09. 02

질의 및 토의 : 2004. 3. 30 까지

작은 크기의 수리간극이 구해졌다. 또한, 실내투수시험 결과를 이용하여 구한 투수계수는 삼승법칙을 따르지 않는 것으로 드러났으며, 이러한 사실들은 균열 양쪽이 서로 평행하지 않고 불평탄한 양상을 가짐을 의미하는 것으로서, 현 미경을 통해 직접 관찰한 간극양상과 잘 일치하는 것이다.

주제어 : 공초점 레이저 스캔 현미경, 간극변화, 조도, 수리전도도, 수리간극

1. 서 론

암반 균열을 따른 유체유동에 큰 영향을 미치는 요소는 균열 방향, 간극(aperture), 거칠기(roughness), 그리고 상호연결도(connectivity) 등으로 알려져 있다. 이 중 간극은 유체유동에 필요한 공간역할을 하기 때문에 간극변화는 단일균열 내에서 투수계수 결정에 가장 중요한 역할을 한다. 간극 크기와 형태에 따른 균열 내 유체유동, 특히 투수계수와의 관계를 밝히기 위해 초창기에는 잘 알려진 바대로 평행판(parallel plate) 모델을 가정한 삼승법칙(cubic law)을 사용하였다¹⁾. 그러나, 삼승법칙은 다수의 연구에 의해 균열을 따른 유체유동을 더 이상 정확하게 해석할 수 없음이 입증되었다²⁻⁵⁾. 이는 균열이 불평탄한 형태를 가지므로 유동경로 전체의 간극을 일정하게 산정할 수 없기 때문이다. 또한, 균열에 압력을 가하면서 이에 기인한 간극변화와 투수계수에 대한 실험적 연구들도 다수 진행되었다^{2,6-9)}. 이 연구들도 불평탄한 균열을 따른 유체유동은 삼승법칙을 벗어나는 경향이 있으며, 특히 간극 폭이 좁을 경우는 이 현상이 더욱 두드러짐을 주장했다. 또한, 유체의 흐름은 균열 전체에 고루 퍼져있는 것이 아니라 불평탄한 면이 서로 맞닿는 부분에서는 흐름이 없고 틈을 이루고 있는 부분들을 따라서만 유체가 흐르는 소위 채널 흐름(channel flow)이 발생하는 것으로 알려졌다¹⁰⁻¹⁴⁾.

그러므로, 평탄하지 않은 균열의 형태와 이에 기인한 간극변화를 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 정확한 균열 기하양상을 파악하여 간극을 측정하기 위한 많은 연구가 있었다. 초창기에는 profilometer를 이용하여 균열 양쪽의 거칠기를 측정하고 이를 통해 간극을 계산하였다^{15,16)}. 또한, 간극 변화양상을 직접 관찰하고 측정하기 위해서는 균열 내에 레진(resin), 에폭시(epoxy), 또는 Wood's metal을 주입하는 방법을 가장 많이 사용하였다¹⁷⁻²⁰⁾. 이 방법에 있어서는 균열 양쪽의 형상을 복제한 후, 이 복제된 것을 모울더(moulder)로 사용하여 균열의 투명 복제품(replica)을 제작함으로써 균열의 거칠기나 간극 폭을 측정하였다²¹⁻²³⁾.

이 연구는 저 투수수성 암반에서 폐기물 지층 처분시설 표에서부터 폐기물 처분설 부근까지 암반에서의 봉암에 따른 간극과 투수성 변화를 살펴보기 위해 실시하였다.

즉, 지표 하 심도에 따른 봉암상태를 실험실에서 재현하고 봉암에 따른 균열간극의 변화양상을 기준에 개발된 측정방법보다 더욱 정밀한 장비를 통해 측정한 후, 측정된 간극 변화 값을 토대로 수리전도도를 계산하여 간극변화에 따른 수리전도도 변화특성을 파악하고자 하였다. 이 연구에서는 과거 실험들에서 사용했던 것보다 더 높은 해상도의 공초점 레이저 스캔 현미경(confocal laser scanning microscope; CLSM)을 이용하여 5단계의 수직 일축압축력 변화에 따른 간극 변화량을 직접 측정하였다. 이 방법은 resin 등의 이물질을 주입할 경우 동일시료를 이용한 연속적인 간극변화 측정이 불가능한 것과는 달리 동일시료에 다른 단계의 압력을 가하면서 간극의 연속적 변화를 관찰할 수 있음이 특징이다. 또한, 동일한 일축압축력을 가하면서 실내투수시험을 실시하여 압력변화에 따른 투수계수의 변화를 살펴보고, 이를 통해 압력에 따른 간극크기의 연속적인 변화와 투수계수의 관계를 비교하였다.

2. 균열 간극 및 수리전도도 측정

2.1. 암석 시료

이 연구에 사용한 암석시료는 익산지역에서 시추를 통해 채취한 쥬라기 조립질 화강암이다. 시료는 채취된 코어 중에서 코어 장축에 대체로 평행한 단일 균열을 갖는 신선한 부분을 선택하여 길이 11 cm, 폭 5.5 cm의 크기로 총 7개(GRA~GRG) 제작하였다(Fig. 1). 이 중 GRG는

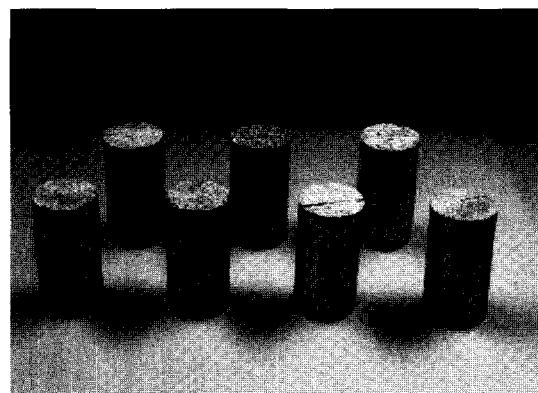


Fig. 1. Core specimens used for the study.

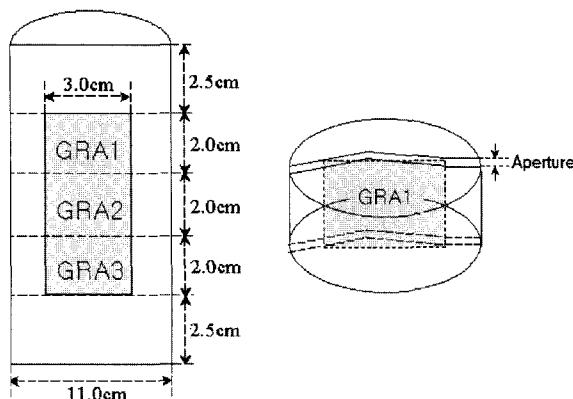


Fig. 2. Schematic description of slices of a specimen for aperture measurement.

사전 예비실험을 위해 제작한 시료로써 실제 데이터 해석에는 포함되지 않았으며, GRA~GRF의 6개 시료를 최종적으로 이용하였다.

제작된 시료는 먼저 실내투수시험에 사용하였으며, 실내투수시험을 실시한 후 CLSM을 이용한 간극측정을 위해 이 시료를 길이 2 cm로 5등분하였다. 간극측정은 5개의 절단시료 중 가운데 3개 부분만 이용하여 실시하였다. 또한, 폭 5.5 cm 중 코어 중심, 즉 균열 중심에서 양쪽으로 폭 3 cm 이내의 영역만을 대상으로 간극을 측정했다. 그 이유는 11 cm 길이의 시료 상단과 하단부분, 코어 폭 가장자리 부분은 시료절단 과정에서 균열 일부가 깨어져 인위적으로 간극 폭이 넓어진 부분들이 있으므로 이 부분을 제외하기 위해 가운데 3개 부분과 폭 3 cm 영역만 측정하였다(Fig. 2).

2.2. 실내투수시험 및 간극측정

길이 11 cm의 공시체를 대상으로 압력변화에 따른 투수성 변화를 파악하기 위해 실내투수시험을 실시하였다. 실내투수시험은 암석시료에 봉압과 투수압을 동시에 가하면서 투수시험을 수행할 수 있는 장비(ELE 70-5130 series)를 이용하여 안동대학교 지구환경과학과에서 수행하였다²⁴⁾. 투수시험을 먼저 실시한 이유는 CLSM 하에서 시료에 압력을 가하면서 간극을 측정하려면 공시체를 길이 2 cm로 절단하여야 하므로, 시료가 절단될 경우 투수시험을 할 수 없기 때문이다. 이 실험에서는 시료에 가하는 봉압을 10 MPa부터 20 MPa까지 1 MPa씩 증가시키고 투수압은 150 KPa로 고정시킨 상태에서 투수성을 파악하였다. 이는 공시체의 균열에 가해지는 압력의 크기에 따라 투수성의 변화양상을 조밀한 압력간격으로 파악하기 위한 것이다.

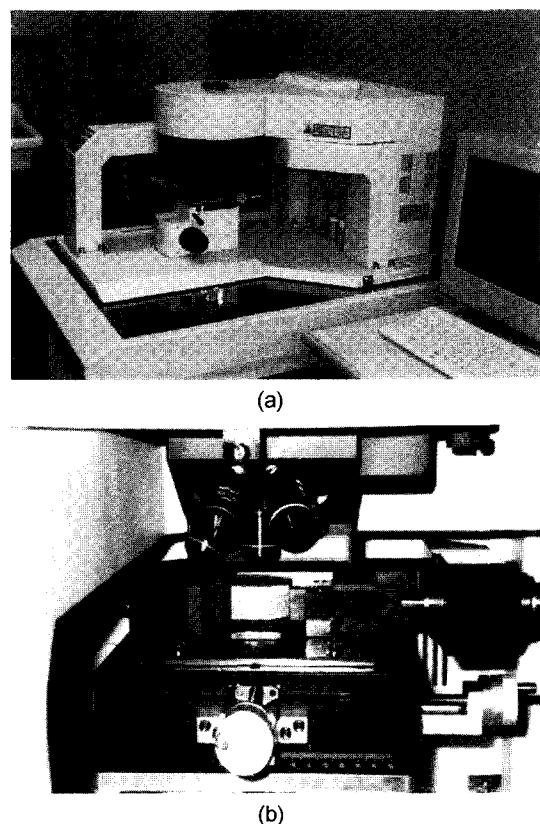


Fig. 3. (a) Confocal laser scanning microscope(CLSM), Olympus OLS 1100. (b) The specially manufactured compression device set on the stage of the CLSM.

균열간극은 공초점 레이저 스캔 현미경(confocal laser scanning microscope(CLSM); Olympus OLS 1100)을 이용하여 일본 나고야대학 환경학연구과에서 측정하였다(Fig. 3a). 이 장비는 confocal optics를 사용하므로 광축(light axis) 방향에서 해상도를 크게 개선하였다. 측정시스템에 적용한 프로그램을 이용해 균열의 다양한 기하양상 측정은 물론 2차원과 3차원 이미지를 자유롭게 획득할 수 있음이 큰 특징이며, 기존에 개발된 측정장치 중 가장 높은 해상도를 갖는다. 또한, 기존의 측정장치와는 달리 고배율 현미경 렌즈를 통한 시료관찰 및 측정이 가능하므로 빠른 시간 내 균열 기하정보의 획득은 물론, 지질학적 관점에서의 광물감정, 기하양상 관찰 등이 동시에 이루어질 수 있다²⁵⁾.

현미경을 이용한 시료측정은 5배와 10배 두 종류의 대물렌즈를 이용하였다. 이 실험에서 x와 y방향의 측정 해상도는 $1,024 \times 1,024$ pixel로 설정하였으며 5배 렌즈 사용 시 1회 측정범위는 2.56×2.56 mm, 10배 렌즈 사용 시의 범위는 1.28×1.28 mm이다. 먼저 균열 전체의 양상을 관찰하고 이미지를 얻기 위해 5배 대물렌즈를 이용해 촬영하였다. 또한, 균열 간극은 그 틈이 매우 좁기 때문에

5배 대물렌즈에서 측정할 경우 오차가 매우 커질 우려가 있으므로, 정확한 간극측정을 위해 10배 대물렌즈를 이용하였다. 측정간격은 2 mm로서 모두 15개 지점에서 2차원 균열간극 측정, 이미지 획득 그리고 표면 스캐닝을 실시하였다. 표면 스캔은 측정면에 대한 2차원 단면과 3차원 형상을 제공해 준다.

하나의 압력단계에서 측정대상 영역 전체에 대해 촬영과 스캔이 끝나면 시료를 측정 시작점으로 이동시킨 후, 압력을 그 다음 단계로 높이고 위에서 설명한 과정을 다시 반복하며 간극에 대한 정보를 획득하였다. 이때 각 압력단계 별로 균열의 간극 변화 뿐만 아니라 균열 주변의 기하양상 변화도 주의하여 관찰하였다.

CLSM의 스테이지에 시료를 장착시킨 상태에서 시료에

임의의 압축력을 가하기 위해 특수 제작한 압축장비를 사용하였다(Fig. 3b). 이 압축장비는 유압을 이용하여 균열에 일축압축을 가하는 것으로서 1 MPa 단위로 최대 200 MPa 까지 압력을 가할 수 있다. 이 실험은 기존의 실험들과는 달리 공시체에 압력을 다양하게 가한 상태에서 현미경을 통해 직접 간극을 측정할 수 있음이 큰 특징이다. 그러나도, 이 실험은 동일 간극을 대상으로 현미경 하에서 압력 변화에 따른 간극 변화를 연속적으로 측정할 수 있기 때문에 훨씬 효과적인 결과를 도출해 낼 수 있다.

예비 공시체를 이용하여 10~20 MPa 범위에서 1 MPa씩 압력을 증가시키며 간극변화를 측정해 보았을 때, 압력 증가량에 비해 간극의 변화가 거의 나타나지 않았다. 따라서, 이 실험에서는 공시체에 수동으로 조절 가능한 최저 압

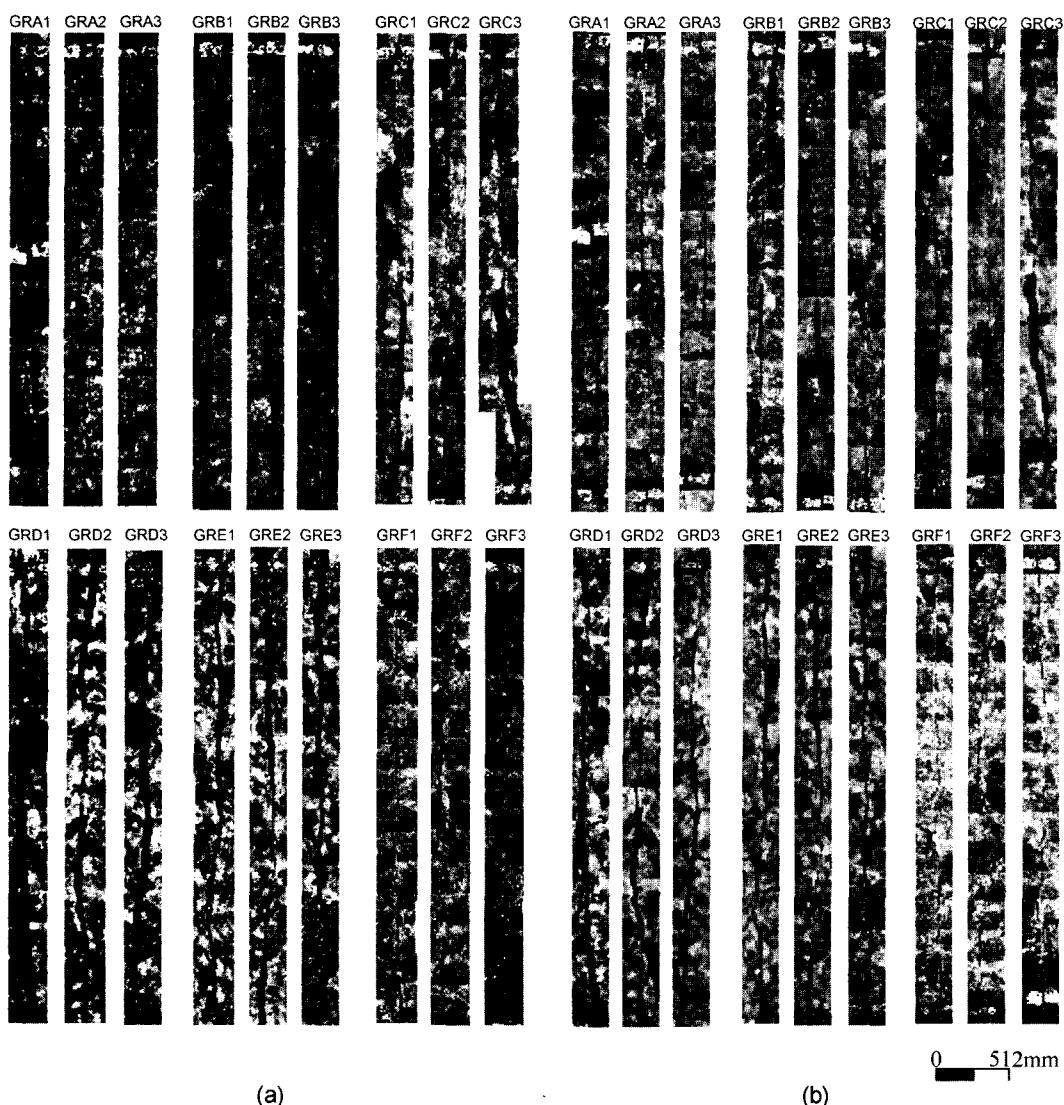


Fig. 4. Images of fractures acquired using the five times of magnification lens. (a) 0 MPa, (b) 70 MPa.

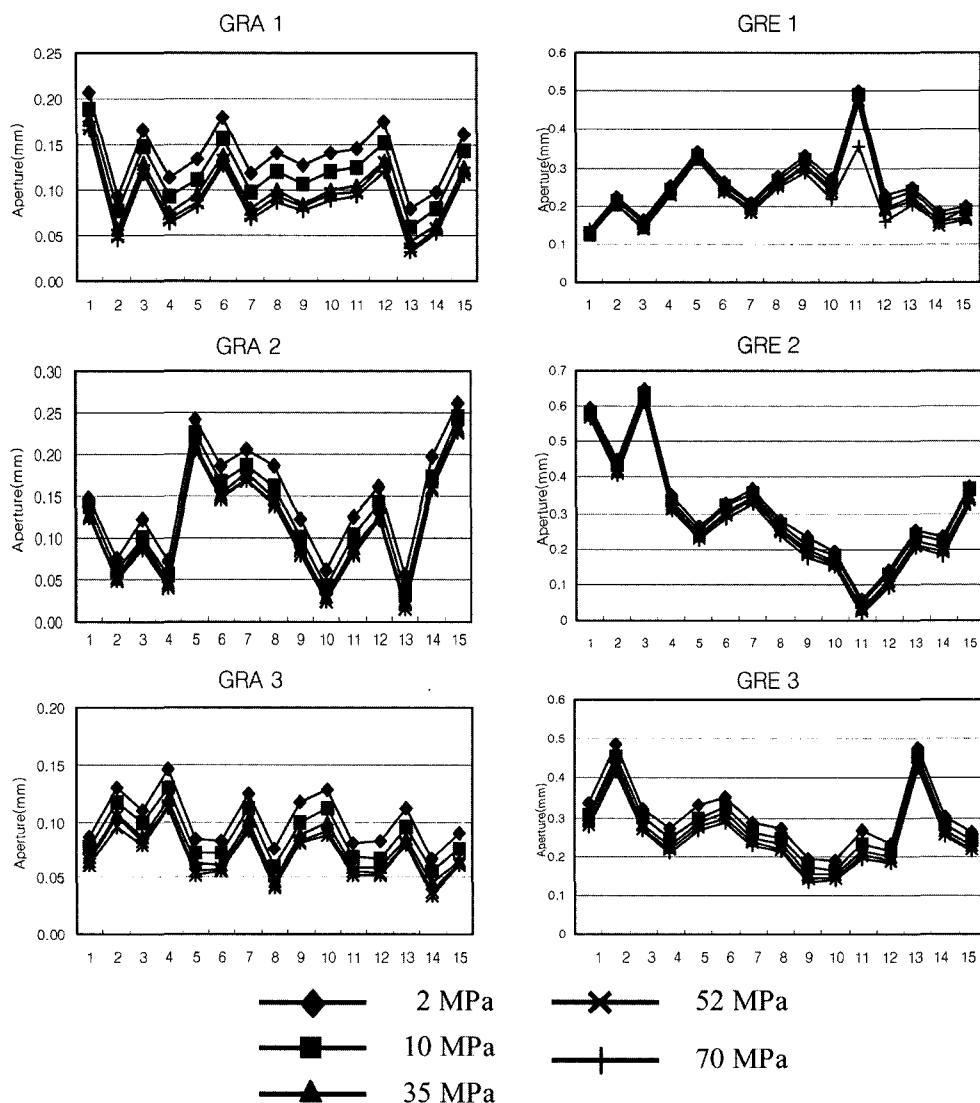


Fig. 5. Examples of aperture values measured with the five stress level (GRA and GRE).

력인 2 MPa, 10 MPa, 35.17 MPa, 52.76 MPa, 70.34 MPa의 압축력을 5단계에 걸쳐 가하면서 상위 세 단계의 압축력을 가하여 균열 간극변화 양상을 살펴보았다. 저압의 두 단계는 지표 하의 아주 얇은 심도에 해당하는 것으로서, 이는 천심도 암반의 압력에 따른 간극변화를 유추하기 위한 것이다.

3. 압력에 따른 간극변화 특성

5단계의 일축압축력을 위한 전반적인 균열 기하양상을 살펴보기 위해 5배 확대렌즈를 이용해 측정면적 전체에 대해 2차원 공초점 이미지를 획득하였다. 5배 확대렌즈로 촬영한 이미지는 압력을 가지 않은 0 MPa에서의 균열

간극의 양상과(Fig. 4a) 마지막 압력단계인 70 MPa에서의 균열 상태이다 (Fig. 4b). 촬영한 이미지를 보면 균열의 형태가 직선이거나 균열 양쪽이 평행하지 않으므로 동일 시료 내에서도 간극의 크기는 동일하지 않다. 또한 압력을 가지 않은 상태에서도 간극 폭은 매우 좁은 상태를 유지하고 있으며, 일부분은 이미 거의 접촉해 있는 상태이다. 마지막 압력단계의 경우, 전반적으로 간극은 감소한 양상을 보여준다. 그러나, 초기 상태부터 주변에 비해 매우 좁은 간극을 갖거나 불평탄한 균열 기하형상으로 인해 이미 접촉해 있던 균열들은 간극이 거의 감소하지 않았다 (GRC3, GRD1, GRD2 in Fig. 4b).

5단계의 일축압축력을 가하면서 각 시료에 등간격으로 설정한 15개의 간극 측정지점에서는 10배 확대 대물렌즈

Table 1. Maximum and minimum variation of the apertures on each specimen

Specimen	Max	Min	Specimen	Max	Min	
GRA	GRA1	0.054	0.041	GRD	GRD1	0.048
	GRA2	0.048	0.023		GRD2	0.106
	GRA3	0.040	0.001		GRD3	0.179
GRB	GRB1	0.139	0.091	GRE	GRE1	0.146
	GRB2	0.094	0.025		GRE2	0.061
	GRB3	0.063	0.045		GRE3	0.071
GRC	GRC1	0.034	0.018	GRF	GRF1	0.026
	GRC2	0.035	0.015		GRF2	0.024
	GRC3	0.028	0.001		GRF3	0.025

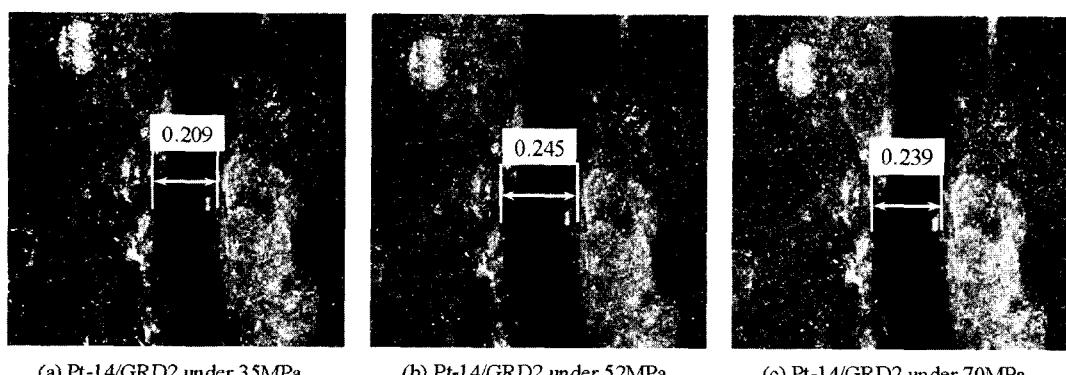
**Fig. 6.** Contacted fracture walls under 2 MPa at the 15th point of GRC 3.

를 이용해 간극크기를 측정하였다(Fig. 5). 각 시료별 최고 압력과 최저 압력간 간극 변화량을 살펴보면 시료에 따라 매우 다양하게 나타난다(Table 1). 이중 GRC3의 15번째 지점에서는 0.001 mm의 변화량을 보여 간극변화가 거의 없었던 것으로 나타났다. 이 지점은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 압력을 가하지 않은 상태에서도 균열 양

쪽 면이 거의 맞붙어 있는 양상을 보이고 있으므로, 시료에 압력을 가하더라도 간극의 변화가 발생할 여유가 거의 없는 상태이다.

GRD는 기타 시료와 달리 압력이 증가함에 따라 간극의 폭이 줄어들지 않고 오히려 증가하는 양상이 나타났다. GRD2의 14번째 지점과 15번째 지점의 경우 세 번째 압력단계까지는 간극이 각각 0.01 mm씩 감소하였으나, 네 번째 압력단계부터 간극크기가 오히려 증가하였다(Fig. 7). GRD2 13번째 측정지점은 압력이 작용하지 않는 초기단계부터 균열 양쪽이 거의 맞닿아 있는 상태이었으며, 압력증가에 따라 이 부분에서 미세한 전단변이가 발생한 관계로 14번째와 15번째 지점의 간극이 오히려 증가한 것이다. 그러나, 14번째 지점의 경우 5번째 압력단계에서는 다시 간극 감소가 발생하였다. 한편, GRD2 6번째 측정지점은 압력초기 단계에서는 균열이 서로 맞닿아 있지 않지만 압력이 증가하면서 간극이 감소하다가 최종 압력단계에서는 이들이 서로 마주치면서 균열상의 다른 부분에 새로운 미소균열(microcrack)이 발생하는 양상을 보였다(Fig. 8).

GRE1의 11번째 지점은 주변 측정지점에서의 값보다 월등히 높은 변화량을 보였다. 이 지점은 주변과는 달리 균

**Fig. 7.** Aperture increase with increasing stress level.

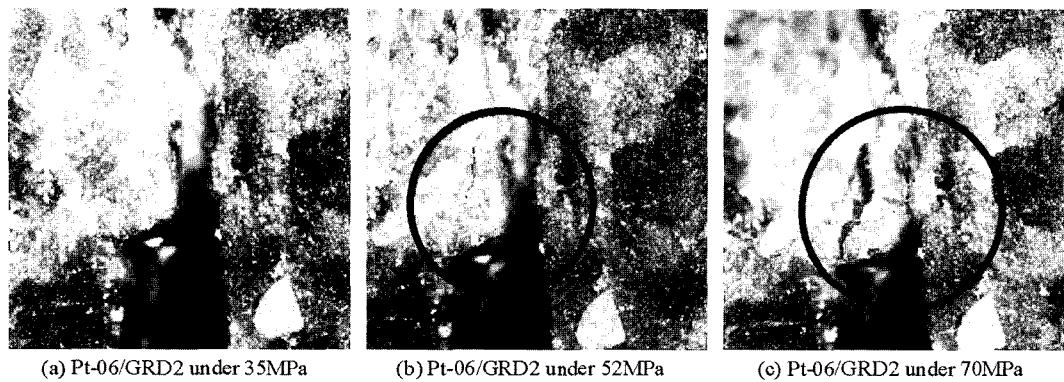


Fig. 8. Decrease of aperture with increasing stress level and development of new crack.

열 양쪽면이 비교적 평행하게 발달하고 있으며 초기 간극도 넓은 편이었으므로, 압력이 증가함에 따라 간극의 감소가 주변에 비해 크게 발생할 수 있는 기하학적 조건을 갖추었기 때문이다. 한편, GRE1의 1번째와 2번째 측정지점에서도 압력이 증가함에 따라 간극이 증가하는 양상이 관찰되었다(Fig. 5). 이들은 네번째 압력단계까지는 각각 0.01 mm와 0.02 mm의 간극 변화량을 보였으나, 다섯번째 압력단계에서 0.02 mm와 0.03 mm의 간극 폭 증가현상이 발생하였다. 이 지점들은 압력이 작용하지 않은 최초 상태에서도 간극이 매우 좁은 상태였으며, 압력이 증가함에 따라 균열 양쪽면이 완전 접촉하게 되고, 더 이상의 간극 폭 감소가 불가능하게 되면서 압력을 해소하기 위해 새로운 균열이 발달하게 되었다. 새로운 균열의 틈이 벌어지면서

시료 내부에 미세한 전단변이가 발생하였으며 이에 따라 최초 균열이 서로 상응하는 지점과는 다른 새로운 부분이 서로 대응됨에 따라 간극 폭이 증가하게 된 것이다.

각 시료별 간극 변화량은 전반적으로 일정한 경향을 보이지 않고 측정지점에 따라 값의 변화가 심함을 알 수 있다. 이처럼 각 지점별 간극이 시료 전체에 동일한 압력이 작용함에도 불구하고 다양하게 변화한 이유는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 균열의 양쪽면이 서로 평행하지 않아서 균열 간극이 모두 다르게 분포하며, 따라서 압력이 증가하면서 원래 간극이 좁은 부분이 넓은 부분에 비해 균열의 일부분이 서로 맞닿게 되면서 전체적으로 동일한 간극 변화량을 가질 수 없기 때문이다. 이는 균열의 분포형태를 재현하기 위해 평행판 모델을 사용하는 것은 적절하

Table 2. Hydraulic conductivity calculated by mechanical aperture and hydraulic apertures and roughness effect

Specimen	P _{conf.} (MPa)	b _m (cm)	b _h (cm)	K _m (cm/sec)	K _h (cm/sec)	C(ξ) ⁿ
GRA	10	0.0098	0.0096	2.780E-04	2.845E-04	2,627
	15	0.0094	0.0091	1.367E-04	1.404E-04	4,776
	20	0.0090	0.0088	6.687E-05	6.884E-05	9,001
GRB	10	0.0183	0.0179	9.430E-04	9.630E-04	2,692
	15	0.0170	0.0166	7.616E-04	7.794E-04	2,873
	20	0.0163	0.0159	6.821E-04	6.970E-04	2,950
GRC	10	0.0312	0.0292	1.311E-02	1.401E-02	490
	15	0.0308	0.0287	9.066E-03	9.718E-03	685
	20	0.0305	0.0284	6.358E-03	6.830E-03	951
GRD	10	0.0425	0.0422	3.845E-02	3.872E-02	371
	15	0.0417	0.0414	3.424E-02	3.446E-02	402
	20	0.0385	0.0379	3.480E-02	3.533E-02	327
GRE	10	0.0263	0.0262	1.382E-02	1.390E-02	397
	15	0.0255	0.0254	2.122E-03	2.134E-03	2,436
	20	0.0248	0.0247	4.109E-05	4.132E-05	118,915
GRF	10	0.0113	0.0112	8.464E-06	8.541E-06	117,828
	15	0.0110	0.0109	1.699E-07	1.715E-07	5,601,406
	20	0.0108	0.0107	1.494E-08	1.508E-08	61,023,787

지 않음을 잘 지시해 준다.

4. 간극변화와 수리전도도 변화와의 관계

실내 투수시험을 통해 균열에 압력을 가하면서 시료를 거쳐 일정량의 물이 유출될 때까지의 경과시간을 측정하고, 이 결과와 간극측정결과를 이용하여 10 MPa, 15 MPa 그리고 20 MPa 세 단계에서 Darcy 법칙에 근거하여 투수계수를 산정하였다(Table 2). 각 시료마다 측정된 부분별 균열 간극의 평균을 계산하고 이를 물주입 면적계산에 이용하였다.

투수계수 계산 결과 GRA와 GRB는 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/sec의 범위에 해당하는 투수계수를 나타냈고, GRC와 GRD 시료는 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ cm/sec 범위의 투수계수를 보인다. GRE 시료는 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ cm/sec, GRF 시료는 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ cm/sec의 투수계수 범위를 나타냈다. 따라서, GRC와 GRD 시료가 다른 시료들에 비해 비교적 높은 투수계수를 가져 원활하게 물이 흐르는 것으로 판단된다.

GRA~GRD 시료들은 압력변화에 따른 투수계수 변화가 그리 크지 않은 것으로 나타난 반면, GRE와 GRF의 경우는 10 MPa과 20 MPa의 투수계수가 각각 10^{-3} cm/sec과 10^{-2} cm/sec 씩 차이가 발생하였다. 따라서, GRE와 GRF의 경우는 다른 시료에 비해 압력이 증가함에 따라 시료 내 균열 간극의 감소가 크게 발생한 것으로 생각된다. 이와 같은 양상을 압력에 대한 균열 간극변화와 비교해 보면 균열 간극 변화량이 가장 큰 것은 GRB와 GRD로서 각각 0.002cm와 0.004cm로 나타났고, 이들의 표준 편차도 0.001, 0.0021로 다른 시료들에 비해 크게 나타났다. 반면, GRE와 GRF 시료는 0.0015 cm, 0.0005 cm의 간극 변화량을 보여 다른 시료에 비해 그리 크지 않은 변화량을 가진다(Table 3). 그러나, 투수계수 산정결과 이들이 오히려 높은 투수계수 변화량을 보이는 것은 균열의 물리적 간극(mechanical aperture)과 실제 물의 흐름이 발

Table 3. Average, difference and standard deviation of the aperture under the normal stress from 10 to 20 MPa

Specimen	Average (cm)	Difference under stress (cm)	Standard Deviation
GRA	0.0094	0.0008	0.0004
GRB	0.0172	0.0020	0.0010
GRC	0.0308	0.0007	0.0004
GRD	0.0409	0.0040	0.0021
GRE	0.0255	0.0015	0.0008
GRF	0.0110	0.0005	0.0002

생하는 수리간극(hydraulic aperture)의 크기가 서로 다르며, 이들이 압력 변화에 대한 반응정도도 다름을 암시하는 것이다.

물리적 간극과 차이가 있는 수리간극의 크기를 살펴보기 위해 Zimmerman과 Bodvarsson(1996)⁵⁾이 제안한 다음 식을 이용하여 동일 시료내 크기가 다른 간극에 대한 수리간극을 구하였다.

$$b_h^3 = \langle b \rangle^3 \left[1 - 1.5 \left(\frac{s}{\langle b \rangle} \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서 $\langle b \rangle$ 는 간극평균, s 는 간극의 표준편차이다

식 (1)에서 수리간극, b_h^3 은 물리적 간극 b 를 대신해 삼승법칙을 만족시킬 수 있도록 한 간극이다. 식 (1)은 간극의 표준편차가 증가할수록, 즉 균열 거칠기가 증가할수록 수리간극이 감소하는 것을 나타낸다. 이 식을 이용해 수리간극을 계산한 결과에 따르면 각 시료의 수리간극은 물리적 간극에 따라 0.0088 cm~0.0422 cm의 범위 내에서 다양한 값을 가지고, 수리간극은 최소 0.0001 cm에서 최대 0.0021 cm 만큼 물리적 간극보다 작은 값을 나타낸다 (Table 2). 계산을 통해 구한 수리간극을 이용하여 Darcy 법칙에 근거한 투수계수를 구해 보면 물리적 간극을 통해 구한 수리전도도와 동일한 값의 범위를 갖는다.

Darcy 법칙에 근거한 투수율과 투수계수 산정은 다공질 연속매질을 통해 대수층의 모든 부분이 균질하게 연결되어 흐름이 유지된다고 가정한 것이다. 그러나, 이 실험은 투수성이 낮고 균열의 기하양상에 큰 영향을 받는 암반균열을 통한 유체 흐름이므로, 균열 기하양상 중 간극의 영향을 크게 받는 것으로 볼 수 있다. 따라서, 이 실험에서 사용한 매질을 통한 투수율은 균열 간극의 3승에 비례하는 소위 삼승법칙을 바탕으로 하여 간극과의 관계를 살피는 것이 더 적절하고 할 수 있다.

그러나, 실내 투수시험을 통해 실제 측정한 투수율(flow rate)과 수리간극의 관계를 그래프로 나타낸 결과 투수율은 간극의 3승에 비례하지 않는 것으로 나타났다(Fig. 9). GRA의 경우는 거의 삼승법칙에 근접한 관계를 나타내고 있지만 그 외 시료들은 삼승법칙과는 다른 양상을 나타내고 있다. 특히, GRD, GRE, GRF의 경우는 삼승법칙과는 상당한 차이를 갖는 관계를 보이므로, 간극의 변화양상과 투수율과의 관계는 다른 요인이 함께 작용함을 알 수 있다. 즉, 삼승법칙은 평행판 모델을 가정한 상태에서의 간극과 투수율과의 관계를 나타낸 식이므로, 이번 실험에서 와 같이 평행하지 않은 균열일 경우에는 그 식을 그대로 적용하는 것은 적절하지 않다⁵⁾. 그러므로, 이 실험에서

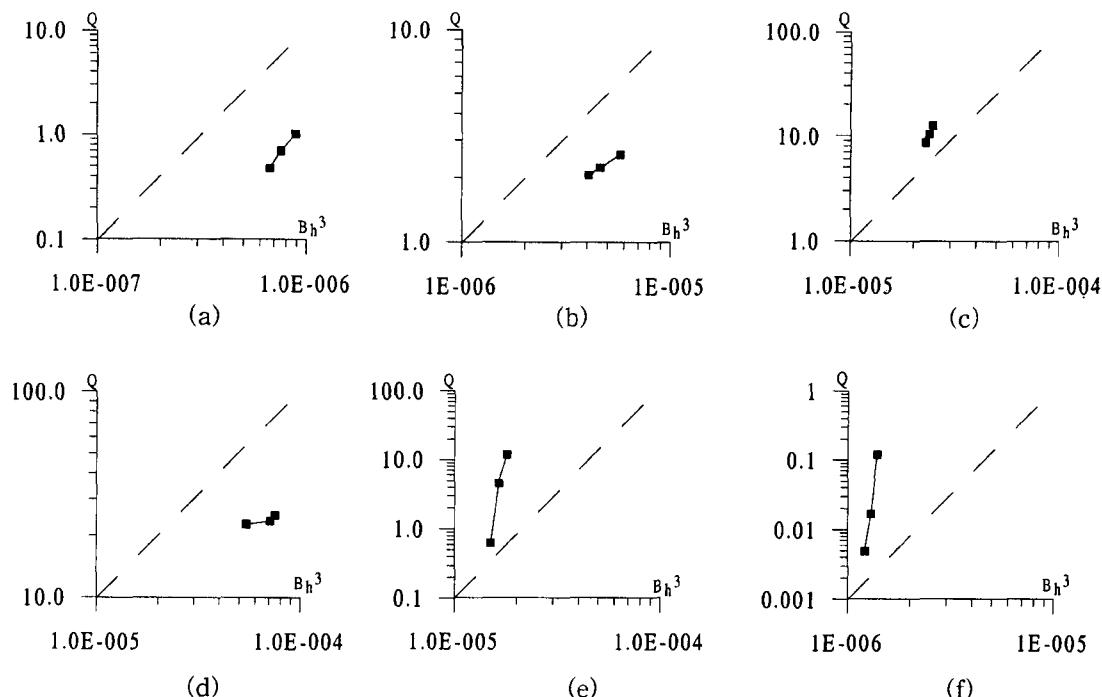


Fig. 9. Relationship between cube of hydraulic aperture and flow rate. (a) GRA, (b) GRB, (c) GRC, (d) GRD, (e) GRE, (f) GRF.

측정한 간극과 투수율, 그리고 투수계수의 관계를 정확히 표현하기 위해서는 평행하지 않은 균열의 기하양상, 즉 거칠기의 영향을 다음과 같이 고려하여야 한다²⁶⁾.

$$K = \frac{\rho_w g b^2}{12\mu [1 + C(x)^n]} \quad (2)$$

여기서 C 는 상수, x 는 거칠기를 나타내는 변수 그리고 n 은 1보다 큰 데(power)^o이다.

Fig. 9에서 보듯이 실제 투수시험 결과와 삼승법칙을 만족하지 않는 이유는 위에서 설명한 것처럼 일정하지 않은 간극크기에 기인한 거칠기 영향때문이므로, 이를 고려하기 위해 실험에서 구한 수리전도도와 수리간극을 이용하여 $C(x)^n$ 을 계산하였다(Table 2). 계산결과에 의하면 수리전도도와 $C(x)^n$ 의 값은 대체로 선형적인 반비례관계를 가진다. 특히, 수리전도도가 가장 낮은 GRF의 경우 $C(x)^n$ 값이 매우 높음을 알 수 있다. 이를 통해 $C(x)^n$ 은 간극과 수리전도도 관계에 있어 간극 증가에 따른 수리전도도 증가에 장애물의 역할을 하고 있으며, 이는 거칠기의 개념으로 생각할 수 있다. 이처럼 압력에 대한 간극크기 변화량과 투수성 변화량이 유사한 경향을 보이지 않고 다소 간 차이가 있고, 물리적 간극과는 다른 크기의 수리간극이 존재하며, 투수계수 또한 삼승법칙을 따르지 않음은 압력단계에 따라 불평탄한 균열의 변형이 발생하고 이때 조

금씩 다른 형태의 채널이 형성되어 유체유동 특성이 달라짐을 암시한다.

5. 토 의

엄밀히 말해 식 (1)은 균열의 형태가 평행하지 않은 경우에 대해 수리간극을 계산하기에 부적합하다. Zimmerman과 Bodvarsson(1996)⁵⁾, Yeo(2021)²⁷⁾는 균열상의 기하형태를 관찰하여 물의 흐름에 장애물 역할을 하는 균열의 맞닿은 부분을 C 값으로 나타내었다. 그들은 C 값의 계수를 설정함으로써 불평탄한 균열 상의 수리간극을 보다 정확히 보정하기 위해 노력하였다. 그러나, 이와 같은 시도는 시료자체의 국부적 특성에 영향을 받았을 가능성이 있으므로 이 연구에서는 그들이 제안한 식을 따르지 않았다. 또한, 본 실험은 단면상에서 압력에 따른 간극 변화를 살피고자 한 것이므로 다른 연구에서처럼 균열상에서의 2차원적 기하양상 관찰은 시도하지 않았다.

투수계수를 계산하는 방법은 그 동안 여러 연구논문에서 제안되어 왔다. 특히 암반 균열을 따른 투수계수의 계산은 평행판 모델을 가정한 삼승법칙을 이용하여 계산하려는 시도가 많았으나, 대부분의 암석 균열은 평행하지 않으므로 삼승법칙은 투수계수 값을 과장하는 경향이 있고 일부 구간에서는 삼승법칙을 따르지 않는다⁸⁾. 이를 보정

하기 위한 많은 노력이 있었으나^{5,27,28)}, 실제 균열의 기하양상을 충분히 고려하여 투수계수를 정확히 계산하는 것은 아직 완벽히 이루어지지 않고 있다. 따라서, 이번 실험에서와 같은 불규칙적 기하양상을 갖는 균열을 따른 투수계수는 Darcy 법칙이나 삼승법칙을 따른 계산법으로는 정확히 계산할 수 없다.

본 저자들은 이 실험에서 획득한 균열 간극 자료와 Chae *et al.*(2002)²⁹⁾이 수행한 거칠기 측정결과를 이용하여 균질화법(homogenization method)에 기초한 새로운 방법을 통해 균열을 따른 투수계수 계산을 시도할 계획이다. 균질화법은 임의의 기하양상을 가진 불균질한 균열을 대상으로 미소 스케일(microscale)의 균질한 요소의 투수계수를 계산한 후, 이를 거시 스케일(macroscale)로 확장하여 투수계수를 구함으로써 전체 대상체의 투수계수를 정확히 계산할 수 있다³⁰⁾. 따라서, 이 연구에서 대상으로 한 균열을 따른 투수계수의 정확한 계산은 균질화법 기초로 하여 추후에 수행할 예정이다.

6. 결 론

이 연구는 지표 하 심도에 따른 봉압상태를 실험실에서 재현하고 봉압에 따른 균열간극의 변화양상을 기준에 개발된 측정방법보다 더욱 정밀한 장비를 통해 측정한 후, 측정된 간극 변화 값을 토대로 수리전도도를 계산하여 간극변화에 따른 수리전도도 변화특성을 파악하고자 수행하였다. 이 연구에서는 과거 실험들에서 사용했던 것보다 더 높은 해상도의 공초점 레이저 스캔 현미경(confocal laser scanning microscope; CLSM)을 이용하여 5단계의 수직 일축압축력 변화에 따른 간극 변화량을 직접 측정하였다. 이 방법은 resin 등의 이물질을 주입할 경우 동일시료를 이용한 연속적인 간극변화 측정이 불가능한 것과는 달리 동일시료에 다른 단계의 압력을 가하면서 간극의 연속적 변화를 관찰할 수 있음이 특징이다. 또한, 동일한 일축압축력을 가하면서 실내투수시험을 실시하여 압력변화에 따른 투수계수의 변화를 살펴보고, 이를 통해 압력에 따른 간극크기의 연속적인 변화와 투수계수의 관계를 비교하였다.

간극 측정결과는 간극의 크기가 일정하지 않으며, 이로 인해 압력이 가해짐에 따라 간극의 변화량이 일정하지 않고 부분마다 다름을 보여주었다. 즉, 초기상태의 불평탄한 균열 기하양상에 따라 간극 감소정도가 달라짐을 확인하였다.

실내투수시험결과를 보면 각 압력단계에서의 투수성 변

화도 일정한 감소율을 나타내지 않았다. 또한, 압력에 대해 어떤 시료의 간극 변화율이 크더라도 투수율은 오히려 큰 변화를 나타내지 않는 경우도 관찰되었다. 이는 물리적 간극과는 다른 크기의 수리간극이 존재함을 지시하는 것으로서, 실제 계산을 해 본 결과 작은 값이지만 물리적 간극보다 작은 크기의 수리간극이 구해졌다. 또한, 실내투수시험 결과를 이용하여 투수계수를 구해본 결과, 투수계수는 삼승법칙을 따르지 않는 것으로 나타났다. 이러한 사실들은 균열 양쪽이 서로 불평탄한 양상을 가짐을 의미하는 것으로서, 현미경을 통해 직접 관찰한 간극의 양상과 잘 일치하는 것이다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-2-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Snow, D. T., "A parallel plate model of fractured permeable media", Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, U.S.A., p. 331 (1965).
2. Raven, K. G. and Gale, J. E., "Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, **22**(4), pp. 251-261 (1985).
3. Brown, S. B., "Fluid flow through rock joints: the effect of surface roughness", *J. Geophys. Res.*, **92**(B2), pp. 1337-1347 (1987).
4. Gale, J. E., "Assessing the permeability characteristics of fractured rock", GSA Special Paper 189, pp. 163-181. (1982).
5. Zimmerman, R. W. and Bodvarsson, G. S., "Hydraulic conductivity of rock fractures", *Transport in Porous Media*, **23**, pp. 1-30 (1996) .
6. Gale, J. E. "The effects of fracture type (induced versus natural) on the stress-fracture closure-fracture permeability relationships", In Proc. 23rd U.S. Rock Mech. Symp., pp. 290-298 (1982).
7. Olsson, W. A. and Brown, S. R., "Hydromechanical response of a fracture undergoing compression and shear", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, **30**(7), pp. 845-881 (1993).
8. Durham, W. B. and Bonner, B. P., "Self-propagating and fluid flow in slightly offset joints at high effective pressures", *J. Geophys. Res.*, **99**(B5), pp. 9391-9399 (1994).
9. Hakami, E. and Larsson, E., "Aperture measurements and flow experiments on a single natural fracture", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, **33**(4), pp. 395-404

- (1996).
10. Neretnieks, I., "A note on fracture flow dispersion mechanisms in the ground", *Water Resources Res.*, **19**(2), pp. 364-370 (1983).
 11. Rasmuson, A. and Neretnieks, I., "Radionuclide transport in fast channels in crystalline rock", *Water Resources Res.*, **22**(8), pp. 1247-1256 (1986).
 12. Tsang, Y. W. and Tsang, C. F., "Channel model of flow through fractured media", *Water Resources Res.*, **23**(3), pp. 467-479 (1987).
 13. Tsang, Y. W., Tsang, C. F., Neretnieks, I. and Moreno, L., "Flow and tracer transport in fractured media: A variable aperture channel model and its properties", *Water Resources Res.*, **24**(12), pp. 2049-2060 (1988).
 14. Berkowitz, B. and Braester, C., "Solute transport in fracture channel and parallel plate models", *Geophys. Res. Letters*, **18**(2), pp. 227-230 (1991).
 15. Brown, S. R., Kranz, R. L. and Bonner, B. P., "Correlation between the surfaces of natural rock joints", *Geophys. Res. Letters*, **13**, pp. 1430-1433 (1986).
 16. Brown, S. R. and Scholz, C. H., "Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces", *J. Geophys. Res.*, **90**(B14), pp. 12575-12582 (1985).
 17. Gale, J. E., "Comparison of coupled fracture deformation and fluid flow models with direct measurements of fracture pore structure and stress-flow properties", *Proc. 28th U.S. Rock Mech. Symp.*, pp. 1213-1222 (1987).
 18. Pyrak-Nolte, L. J., Myer, L. R., Cook, N. G. W. and Witherpoon, P. A., "Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock", *Proc. 6th Int. Rock Mech. Symp.*, pp. 225-231 (1987).
 19. Gentier, S., Billaux, D. and Vliet, L., "Laboratory testing of the voids of a fracture", *Rock Mech. Rock Eng.*, **22**, pp. 149-157 (1989).
 20. Hakami, E. and Stephansson, O., "Experimental technique for aperture studies of intersecting joints", *Proc. ISRM Int. Symp. Eurock '93*, pp. 301-308 (1993).
 21. Hakami, E. and Barton, N., "Aperture measurements and flow experiments using transparent replicas of rock joints", In *Rock Joints*, Barton Stephansson (Eds), Balkema, Rotterdam, pp. 383-390 (1990).
 22. Hakami, E., "Joint aperture measurements; An experimental technique", In *Proc. Int. Symp. Fractured and Jointed Rock Masses*, Lake Tahoe, California, U.S.A. (1992).
 23. Persoff, P. and Pruess, K., "Two-phase flow visualization and relative permeability measurement in natural rough-walled rock fractures", *Water Resources Res.*, **31**(5), pp. 1175-1186 (1995).
 24. 정교철, 채병곤, 김만일, 서용석, "화강암의 손상과정에 따른 투수계수 특성 연구", *지질공학*, **11**(3), pp. 315-325 (2001).
 25. 채병곤, 송재용, 정교철, "콘포컬 레이저 현미경을 이용한 불연속면의 거칠기 측정 연구", *지질공학*, **12**(4), pp. 405-419 (2002).
 26. Domenico, P. A. and Schwartz, F. W., "Physical and Chemical Hydrogeology", second edition, John Wiley & Sons, (1998).
 27. Yeo, I. W., "Effect of contact obstacles on fluid flow in rock fractures", *Geosciences Journal*, **5**(2), pp. 139-143 (2001).
 28. Zimmerman, R. W., Chen, D. -W. and Cook, N. G. W., "The effect of contact area on the permeability of fractures", *Journal of Hydrology*, **139**, pp. 79-96 (1992).
 29. Chae, B.-G., Ichikawa, Y., Jeong, G.-C., Seo, Y.-S., "Roughness measurement of rock discontinuities using a confocal laser scanning microscope and the Fourier spectral analysis", *Engineering Geology*, In press (2002).
 30. Ichikawa, Y., Kawamura, K., Uesugi, K., Seo, Y.-S. and Fujii, N., "Micro- and macrobehavior of granitic rock: observation and viscoelastic homogenization analysis", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **191**, pp. 47-72 (2001).