

## 압축과 전단 하중을 받는 인공 암석 절리의 수리적 거동에 관한 실험적 연구

이희석<sup>1)</sup> · 박연준<sup>2)</sup> · 유광호<sup>2)</sup> · 이희근<sup>3)</sup>

### An Experimental Study for the Hydraulic Behavior of Artificial Rock Joint under Compression and Shear Loading

Hee-Suk Lee, Yeon-Jun Park, Kwang-Ho You, Hi-Keun Lee

**ABSTRACT** Cyclic shear test system, which is capable of measuring flow rate inside rock joint, was established to investigate the hydraulic behavior of rough rock joints under various loading conditions. Laboratory hydraulic tests during compression and shear were conducted for artificial rough rock joints. Prior to tests, aperture characteristics of specimens were examined by measuring surface topography. Permeability changes under compression were well approximated with several hydraulic model. Hydraulic behavior conformed to dilation characteristics in the first stage, and permeability increased with increase of dilation. As the shear displacement progressed, flow rate became somewhat constant due to gouge production and offset of apertures. Hydraulic behavior under cyclic shear loading was also influenced by the degradation of asperities and gouge production. In addition, the relation between hydraulic aperture and mechanical aperture under compression and shear loading was investigated and compared.

**Key words** : Rock Joint, Cyclic Shear, Permeability, Aperture, Gouge

**초 록** 다양한 하중 조건하의 암석 절리에 대한 수리적 거동을 규명하기 위해서 수리-전단 시험이 가능한 주기 전단 시험 시스템을 설계, 제작하였다. 실험실에서 인공 절리 시료에 대한 압축, 전단 조건하의 수리 시험을 실시하였다. 시험 전의 시료에 대한 3차원 간극 측정을 통해 절리의 간극 분포 특성을 규명하였다. 수직응력에 따른 투수계수 변화는 기존 수리 모델과 잘 일치하였다. 전단 하중하의 수리적 거동은 초기에는 팽창 특성을 따랐으며, 팽창의 증가에 따라 투수계수가 커졌다. 전단이 진행됨에 따라 유동물은 충전물 생성과 간극의 엇갈림으로 인해 다소 일정해졌다. 주기전단 하의 수리 거동 역시 돌출부 손상과 충전물 생성의 영향을 받았다. 또한 압축과 전단 하중하의 수리 간극과 역학 간극의 관계가 조사, 비교되었다.

**핵심어** : 암석 절리, 주기전단, 수리-전단 시험, 투수계수, 간극, 충전물

## 1. 서 론

절리의 수리학적 특성은 암반 사면, 지하비축기지, 터널 그리고 석유 저류층과 같은 문제에서 중요하게 대두되어 왔지만, 최근 방사성 폐기물 처분과 핵종 이동 누출 문제를 정확히 평가하기 위해 더욱 관심이 고조되고 있다. 특히 절리의 수리학적 특성은 그 자체로서 파악되는 것이 아니라 다양한 역학적 조건의 변화에 의해 민감하게 변하고 상호 영향을 주므로 이러한 수리-역학적 상호작용(hydro-mechanical coupling)을 규명하는 것이 중요한 과제이다(Stephansson & Jing, 1995). 하지만

실험적으로 상호작용 현상을 완전히 구현하는 것은 불가능하므로 대부분 역학 조건 변화에 따른 수리적 특성의 거동에 대한 실험이 주로 관심 대상이 된다.

Witherspoon 등(1980)이 수직응력 하의 인공 절리면에 대한 유동 실험을 통해 삼승법칙의 타당성을 조사한 이래로 Raven & Gale(1985), Barton 등(1985), Pyrak

1)정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 Post Doc.

2)정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

3)정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수  
원고 접수일 : 2000년 2월 18일

원고 심사 완료일 : 2000년 3월 17일

-Nolte 등(1987), Zhao & Brown(1992) 등에 의해 수직응력 하의 절리의 수리적 거동과 삼승법칙의 타당성 여부 그리고 역학 간극(mechanical aperture)과 수리 간극(hydraulic aperture)의 관계 등에 관한 많은 연구결과가 보고되었다. 이에 비해 전단하중 하의 절리면의 수리적 거동에 대해서는 상대적으로 보고된 연구 결과가 상당히 적은 편인데, 이는 실험상 측정의 어려움 뿐 아니라 절리면 팽창, 돌출부 마모, 충전물 거동과 같은 다양한 인자들로 인해 해석상의 어려움이 크기 때문이다. Makurat(1985)는 이축압축 셀에서 유압팩으로 전단시 절리의 수리전도도 변화를 측정하였으며, Teufel(1987)은 삼축압축 셀에서 사암시료의 전단하의 수리전도도 변화를 보고하였다. Esaki(1991, 1999)는 직접전단시험기를 사용하여 인공 절리면에 대해 수리-전단 시험을 최초로 실시하였으며, 여러 수직응력 하에서의 투수계수 변화를 보고하였다. 하지만 직사각형 시료의 방사형 유동에 대한 것이었으며 유동방향과 전단 방향이 일치하지 않았다. Ahola 등(1996)은 수리-전단 시험장치를 제작하여 직접전단시의 수리 실험 결과를 보고하였지만 수리-전단 거동을 제대로 해석할만한 풍부한 내용을 얻는데 실패하였다. 최근 천대성 등(1999)은 회전식 전단 시험기를 이용한 수리적 특성을 연구했으나, 일반적인 직접전단과의 관련성이 적어서 실제적인 적용에 한계가 있다.

절리의 수리적 특성 변화에 큰 영향을 미치는 요소는 절리의 간극(aperture) 특성이다. Gentier(1986)가 단면계(profilometer)로 측정한 두 절리면을 서로 맞추어서 절리 간극을 직접 측정하려는 시도를 한 이래로 Hakami(1995)에 의해 절리 간극 특성과 채널링 유동 특성에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 하지만 실제 압축, 전단이

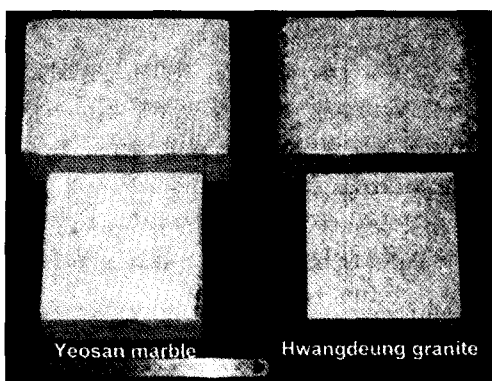
발생하는 동안 간극의 변화를 제대로 측정하는 것은 실험상 거의 불가능하다. 따라서 절리의 수리적 특성을 파악하기 위해서는 초기 간극 구조를 파악하여 이를 토대로 다양한 조건에서의 간극 분포의 특성을 예측하는 기법이 필요하다.

본 연구에서는 압축과 전단하중하의 암석 절리면의 수리적 특성을 규명하기 위해 직접전단시험과 수리시험을 동시에 수행할 수 있는 직접전단시험장치를 설계, 제작하였으며, MTS 815 암석역학 시험 시스템에 이들을 부착하였다. 시험 전에 절리의 거칠기와 간극 특성을 정량화하기 위해 3차원 레이저 단면계를 이용하여 황등화강암과 여산 대리석 인공 절리 시료에 대한 3차원 단면을 측정하였다. 인공절리 시료에 대한 압축과 주기전단 하중하의 수리 시험을 실시하였으며, 암석 절리면의 압축과 전단 및 주기전단에 따른 수리 특성을 조사하였다.

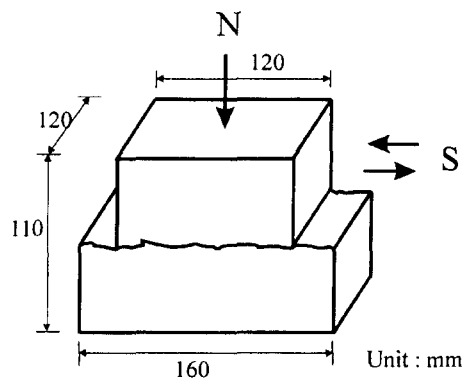
## 2. 시료, 실험장치 및 실험방법

### 2.1 시료의 특성 및 준비

본 연구에 사용된 암석 시료는 국내의 대표적인 석재로 사용되는 황등화강암과 재료 자체의 강도가 작은 여산대리석이다. 황등화강암은 전북 황등 지방에서 산출되는 중생대 쥐라기의 화강암이며, 여산대리석은 전북 여산에서 산출되는 유백색의 조립질 대리석이다. 대상 암석시료의 물리적, 역학적 특성을 파악하기 위하여 ISRM 기준에 의거하여 각종 물성시험을 실시하였으며 그 자세한 결과는 이희석 외(1999)에 나와 있다. 각 시료의 단축압축강도는 화강암이 151 MPa, 대리석이 72 MPa으로서 화강암의 단축압축강도가 대리석의 약 2.1배로 나타났다.



(a) A view of fractured joint specimens



(b) A schematic view and dimensions

Fig. 1. A view and dimension of representative rough joint specimens

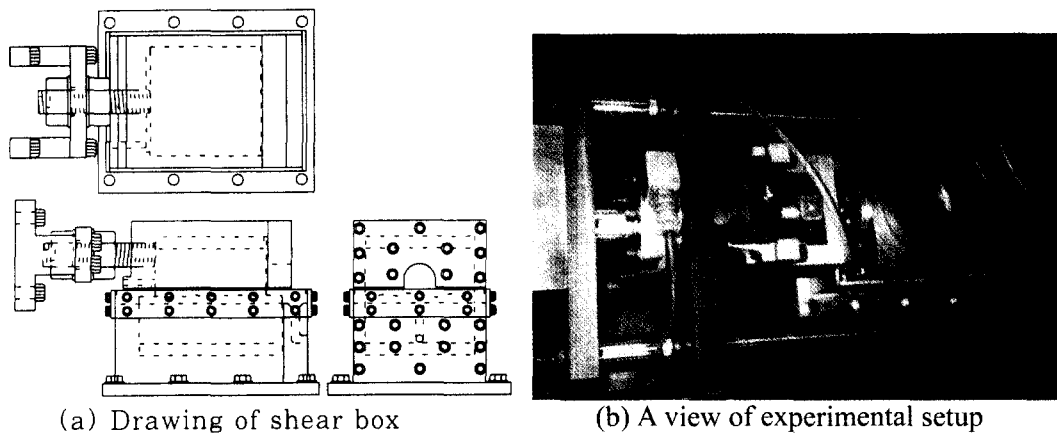


Fig. 2. A drawing and a view of experimental setup for hydro-shear test

절리 시료는 실험실에서 인위적인 균열을 형성시켜 제작하였다. 우선 결함이 없는 3가지 암종의 암석 덩어리를 다이아몬드 톱을 사용하여 가로×세로×높이가 160×120×120 mm가 되도록 절단하였다. 싱형한 시료를 전단시에 가압면이 되는 양쪽 면을 표면연삭기로 연삭한 후 인장균열 발생장치의 양쪽 가압판 사이에 놓고 하중을 가하여 인위적으로 절리면을 생성하였다. Fig. 1은 시험에 사용된 시료의 크기와 모습을 보여준다. 앞으로 GH 시료는 화강암 절리틀, MH 시료는 대리석 절리틀을 나타낸다. 모든 시료는 상부 절리면의 양쪽 끝부분을 약 20 mm 정도 잘라내어 전단하중이 가해지는 동안 절리의 접촉면적이 일정하게 유지되도록 하였다.

## 2.2 실험 장치

### 2.2.1 3차원 단면 측정기

절리 시험편의 3차원 단면과 거칠기를 측정하기 위하여 배기윤(1999)이 사용한 3차원 측정기를 사용하였다. 이 3차원 측정기는 레이저 변위계(laser profilometer), 위치 지정 시스템(positioning system) 및 자료 출력과 전체 시스템을 제어할 수 있는 컴퓨터의 세 부분으로 구성된다. X축은 좌우로 지정된 대로 움직이고 Y축은 테이블 앞뒤로 이동하며 Z축은 상하 운동을 한다. 레이저 변위계는 변위계가 레이저를 측정 지점에 쏘아 그 측정 지점에서 반사된 빛의 각도에 의해 변위를 측정한다. 최소 측정한도는 0.5  $\mu\text{m}$ 이고 센서헤드로부터 5 cm 떨어진 지점을 중심으로  $\pm 8$  mm 사이가 측정 가능 범위가 된다.

### 2.2.2 수리전단 시험 상자

수리시험을 실시하기 위해, MTS 815 만능재료 시험

기에 설치된 직접전단 시험장치(이희석 외, 1999)에 수리전단 시험을 할 수 있는 전단상자를 설계, 제작하였다. Fig. 2는 수리시험용 전단 상자의 도면과 시험시 설치된 시료의 모습을 보여주고 있다. 이 전단상자는 전단 과정시에 발생하는 수직 팽창을 허용하면서 물의 누수를 막을 수 있게 설계되었다. 이를 위해서 시료의 앞부분과 양편에 각각 탄성이 매우 큰 생고무를 대고 하부 전단상자에 물 주입공과 양 측면 모두에 2줄의 렌치볼트로 고무 받침대를 제작하였다. 전단 상자는 철재로 제작하였으며 모두 렌치볼트로 조립이 가능하도록 했다. 상부상자의 왼쪽에  $\phi 8$  mm의 주입공이 설치되어 있으며 물 주입공에서 절리면으로 나오는 부분은 물이 절리면에 걸쳐 고르게 분포하도록 길이 폭 5 mm의 홈을 내었다. 물 배출구는 하부 상자의 오른쪽 끝에  $\phi 10$  mm로 내어서 상자의 중심부에서 호스로 빠져나가도록 했다. 배출공 윗부분에 반원형의 홈을 내어 물이 고이지 않고 바로 배출될 수 있도록 했으며 배출구는 개방되어 0의 수두를 갖도록 했다. 하중을 가하는 가압봉은  $\phi 35$  mm의 나사형태로 상부 상자 중심부에 일치하도록 하였으며 지지대에 두 개의 너트를 사용하여 절리면을 먼저 고정시킨 후 설치가 가능하도록 했다. 이러한 너트의 삽입은 상부전단상자의 미소한 회전과 기울어짐을 허용할 수 있다.

### 2.2.3 유동률 측정 장치

투수 가압 장치는 (주)MNT Korea에서 제작되었으며 유동률을 측정하기 위한 전자저울은 일본 AND사의 FX-3000을 사용하였다. 이 전자저울은 0.01g의 정밀도로 최대 3100g을 측정할 수 있다. 절리를 통해 배출된 물 유동량이 시간에 따라 디지털 형태로 기록되어 퍼스

널 컴퓨터 상에서 저장되도록 하였다. 수압장치는 공기압과 수압의 두 개의 압력실로 이루어져 있고 공기압실은 공기 압축기(compressor)에 연결되어 있다. 공기압력을 측정할 수 있는 아날로그 형태의 압력 변환기와 가해진 수압을 측정할 수 있는 아날로그 형태의 압력 변환기가 달려있다. 물 주입공에 설치된 호스는 투수 가압 장치로 연결되어 공기 압축기의 압축공기를 통해 피스톤으로 수압을 가한다. 수압 장치에는 압력 조절장치(regulator)가 있어서 일정한 수압을 유지할 수 있도록 하였으며 가할 수 있는 수압의 범위는 0.005~5 kg/cm<sup>2</sup>이다.

2.3 실험 방법

2.3.1 절리 3차원 단면 측정

본 연구에서는 기본적으로 Iwano와 Einstein(1993)에 의해 사용된 것과 유사한 표면표고법을 이용하여 절리 간극을 측정하였다. 절리 표면의 측정은 레이저 변위계를 이용하여 측정하였다. 레이저 변위계 측정판 위의 정확한 X, Y 좌표 위치에 상 하부 시료를 놓은 다음, 1 mm 측정 간격으로 각각 X, Y 방향에 대해 10 cm×10 cm 범위의 표고를 측정하였다. 총 측정 점의 숫자는 10201 점이며 한 단면당 측정시간은 약 2시간 정도가 소요되었다. 화강암 인공절리 15개 시료, 대리석 인공절리 11개 시료 그리고 대리석 평면절리 1개 시료에 대해 측정 결과를 얻었으며, 총 27개 시료에 대한 간극 분포를 해석하였다. 이들 시료는 이후에 전단-수리시험에 다시 활용되었다.

측정된 결과를 ASCII 파일로 저장한 후 간극 계산용 프로그램을 이용하여 두 표면 높이를 수치적으로 중첩시켰다. 두 맞닿은 표면들에 의해 형성되는 절리 간극은 두 표면들 사이의 단순한 산술차이의 점분포이다. 하지만 절리 표면 측정값은 시료 세팅시의 회전과 이동에 관련된 추세 값(trend)을 포함하고 있다. 이 추세 값이 다중 회귀 분석(multiple linear regression)에 의해 제거되고 나머지 잔차 값들을 사용하여 간극을 계산하였다(Davis, 1986). 본 연구에 사용된 간극 측정법의 기본원리를 Fig. 3에 도해적으로 나타내었다.

2.3.2 압축과 전단 하중하의 수리시험

전단-수리 시험시 지수(止水)의 기본 원리를 Fig. 4에 도해적으로 나타내었다. 절리면 주위의 3면을 천연고무로 대고 누수를 막기 위해 이들 천연 고무를 렌치볼트로 적당한 힘으로 눌러서 빈 공간을 없게 한다. 전단 상자는 다이아스톤 몰딩으로 완전히 틈을 없애고 모든 마찰면

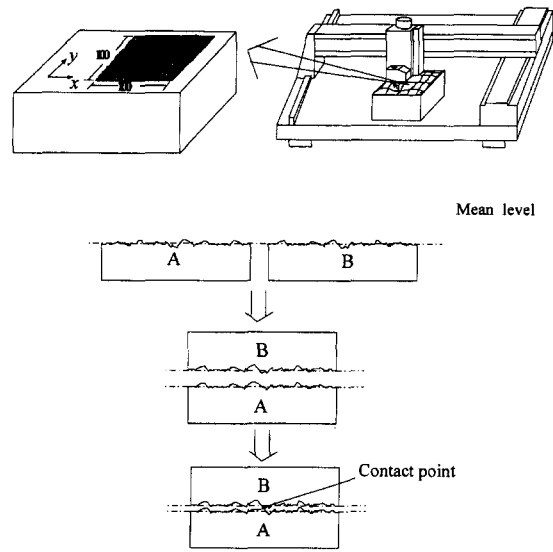


Fig. 3. The diagram showing procedure for aperture determination

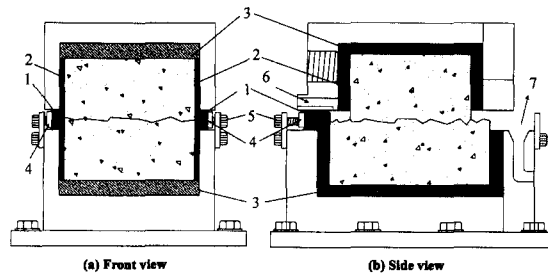


Fig. 4. Schematic diagram showing principle of hydraulic tests and sealing. (1) natural rubber, (2) diastone grout, (3) platen, (4) reaction rod, (5) wrench bolt, (6) inlet, (7) outlet

부분은 실리콘 그리스를 발라서 마찰을 최소화하였다.

전단-수리 시험을 하기에 앞서 5 MPa까지 수직하중을 재하한 상태에서 수리 시험을 실시하였다. MTS 시험장치 제어판을 이용하여 축하중을 5 MPa이 되도록 2회 반복 재하, 재하를 하면서 각 반복동안 0.5 MPa 간격으로 자동으로 순간정지(hold)시키고 수압을 가하여 나오는 유량이 일정한 시점부터 측정을 시작하여 약 2분간의 평균 유량을 취한다. 이 때 가해진 수압은 0.05~0.5 kg/cm<sup>2</sup> (수두로 50~500 cm)였다. 하중과 변위는 모두 MTS 프레임에 내장된 장치들을 이용하여 측정하였다. 평균 시험시간은 한 시료당 약 3시간 가량 소요되었다.

수직응력-수리 시험이 끝난 후에 콘트롤러 제어 프로

그림에 저장되어 있는 주기전단 시험용 절차 파일 (parameter file)을 열어 곧바로 전단-수리 시험을 실시한다. 총 ±15 mm의 주기 전단에 대해서 2-4주기 반복을 하면서 전단시험을 실시하였다. 전단을 하는 동안 수동으로 약 1 mm 간격으로 시스템을 순간정지시킨 상태에서 수압을 가하고 유량이 일정해지면 약 1분간 측정을 하여 평균 유동률을 구한다. 가해진 수압의 범위는 0.05~0.2 kg/cm<sup>2</sup>으로서 이 정도의 수압은 절리면 사이에서 층류 유동을 보장하는 것으로 알려져 있다(Iwai, 1976). 시험시간은 한 시료당 약 5시간 정도 소요되었다. 총 11개 시료에 대하여 결과값을 얻었다. 전단-수리 시험시 가해진 수직응력은 각각 1, 2, 3 MPa였으며 최대 전단변위는 15 mm 였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

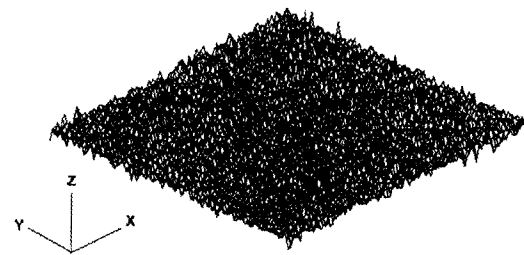
#### 3.1 절리 초기 간극 분포

레이저 변위계로 측정된 절리 표면 표고 결과를 수치적으로 중첩시켜 1%의 접촉점을 가졌을 때를 초기 간극 상태로 가정하고 간극 분포를 해석하였다. Table 1은 대표적인 측정 결과의 통계치들을 보여준다. 비교를 위해 틈으로 절단후 표면연삭기로 연마한 평면 절리에 대한 결과를 함께 나타냈다.

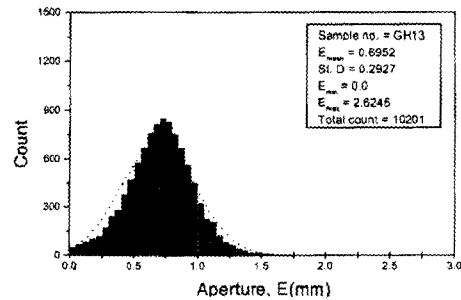
화강암 인공 절리 전체 시료의 평균과 표준편차는 각각 0.78 mm, 0.34 mm이고 대리석 인공 절리 전체 시료의 경우 0.57 mm, 0.26 mm로서 대리석의 간극이 더 작고 균질하게 나타났다. 이는 이희석 등(1999)에서 나타난 바와 같이 전반적으로 화강암의 거칠기가 더 크므로 상하면의 접촉점이 닿을 확률이 대리석 보다 더

Table 1. Statistics of initial apertures for artificial tensile and flat samples

Sample No.	$E_{mean}$ (mm)	$\sigma$ , Standard deviation (mm)	$E_{max}$ (mm)	Coefficient of variation
GH4	0.7733	0.3444	2.1136	0.4454
GH13	0.6952	0.2927	2.6245	0.4210
GH21	0.5213	0.2096	1.7280	0.4021
GH41	0.5363	0.2373	2.6061	0.4425
MH11	0.543	0.2460	1.5369	0.4530
MH27	0.5834	0.2669	1.625	0.4575
MH32	0.6708	0.3122	1.8801	0.4654
Flat joint	0.11	0.0488	0.35	0.4160



(a) Aperture distribution



(b) Histogram plot

Fig. 5. A typical aperture distribution and histogram plot for artificial tensile joint surfaces of granite

크기 때문이다. 대부분의 평균 간극은 Esaki 등(1998)의 인공절리 시료에 대한 측정결과와 비슷한 범위를 보였으며, Hakami 등(1996)의 자연절리에 대한 측정결과보다는 약간 큰 값을 보였다. 평면 절리 시료는 거칠기 높이 변이가 거의 없으므로 간극 분포의 평균과 표준편차가 인공절리 시료에 비해 훨씬 작고 균질하게 나타났다.

Fig. 5는 화강암 절리 시료의 초기 간극 분포 표면의 3차원 형상 분포와 히스토그램을 나타낸 것이다. 초기 간극 분포가 전체 절리면에 걸쳐 무작위적으로 분포하고 있음을 알 수 있다. 모든 절리 표면의 히스토그램은 점선으로 나타난 정규 분포에 의해 잘 근사될 수 있었으며 이는 Hakami(1995)가 천연 절리에 대해 보고한 내용과 일치한다.

#### 3.2 압축하중하의 수리적 거동

Fig. 6은 대표적인 수직응력에 따른 단위수두당 유동률의 관계들을 보여준다. 그림에서 Q는 유동률을 H는 가해진 수두를 각각 나타낸다. 모든 구간에서 수직응력 증가에 따라 유동률이 감소하였다. 압축 초기에는 간극 공간이 급격하게 작아지므로, 유동률은 급격하게 감소하였으며 응력 증가에 따라 감소폭이 점점 작아졌다. 감소

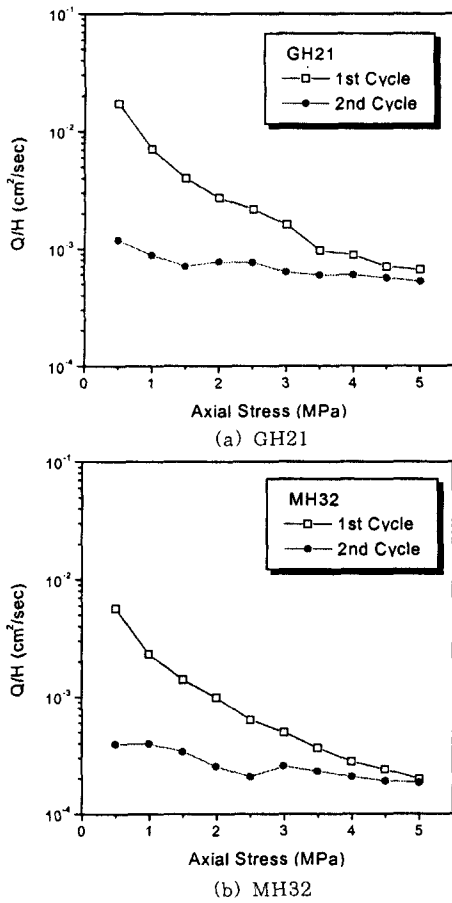


Fig. 6. A typical hydraulic test results under normal compression

폭은 0.5 MPa에서 5 MPa까지의 범위에서 화강암의 경우 20~30배 정도 감소하였으며, 대리석의 경우 15~30 배 정도 감소하였다. 대부분 대리석의 초기 유동률이 화

강암보다 다소 작게 나타났다. 1번째 주기에 비해 2번째 주기는 유동률이 초기부터 크게 감소한 상태로 시작하여 감소폭 역시 작게 나타났다. 삼승법칙이 유효하다고 가정 한다면 암석 절리의 수리전도도는 직선 유동의 경계조건 이 명확하므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_j = \frac{(e)^2 \rho g}{12\mu} \quad (1)$$

여기서  $K_j$ 는 절리 수리전도도,  $e$ 는 수리 간극,  $\rho$ 는 유 체 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $\mu$ 는 물의 점성도이다.

$$Q/\Delta h = C(e)^3 \quad (2)$$

여기서  $Q/\Delta h$ 는 단위 수두당 유동률,  $C$ 는 직선유동의 경우 다음과 같이 정의된다.

$$C = \left(\frac{W}{L}\right) \left(\frac{\rho g}{12\mu}\right) \quad (3)$$

여기서,  $W$ 는 절리면 유동 채널의 너비이고,  $L$ 은 길이이 다. 절리 수리전도도는 유체의 특성까지 포함된 값이므로, 본 연구에서는 이를 고유 투수계수(intrinsic permeability) 로 변경하여 해석하였다.

수직응력 대 절리 고유 투수계수 곡선을 기존에 제안 된 모델들 중 비교적 변수들이 적은 Gangi(1978), Gale(1982) 그리고 Swan(1983)이 제안한 수직응력-수리 모델(Table 2 참조)을 사용하여 비선형 회귀분석(non-linear regression analysis)을 실시하였다. 대표적인 시료 에 대한 모델 상수들을 Table 2에 수록하였으며 응력에 따른 절리 고유 투수계수 곡선과 회귀분석한 모델 결과 를 Fig. 7에 도시하였다. 대부분의 모델이 실험결과와 잘

Table 2. Properties and parameters in several hydraulic models

Model	Gangi(1978)			Gale (1982)		Swan (1983)		
	$K_0$	$D$	$n$	$\beta$	$a$	$K_0$	$C$	$M$
GH13	0.00035	2059	9.95	0.00005	0.28	0.00007	0.87	0.11
GH21	0.00013	18.26	5.77	7.34E-6	0.91	0.00003	0.53	0.20
MH27	0.00003	3.62	2.53	1.62E-6	1.68	9.56E-6	0.48	0.33
MH32	0.00024	23.84	11.0	3.52E-6	0.91	5.19E-6	0.87	0.34

\*In these models,  $K_j$  is Joint permeability,  $K_0$  is initial permeability,  $\sigma_n'$  is effective normal stress, and all others are fitting constants.

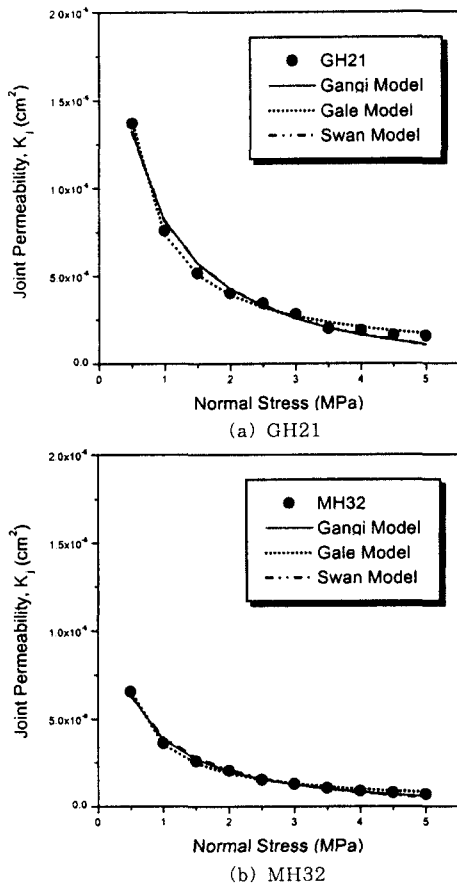


Fig. 7. Normal stress versus joint permeability data fitted with several hydraulic models

근사하였다. 대부분 경험적인 추론에 의한 것이므로 모델 값과 실험값은 자료군의 최적 적합 함수이므로 이들 모델 모두 어느 정도 수직응력에 따른 수리-역학 상호작용을 반영한다고 볼 수 있다.

위의 식들로부터 각 실험결과에 대한 수리간극과 역학간극의 관계를 구할 수 있다. 수리 간극은 식 (1)로부터 구할 수 있다. 역학 간극은 수리 시험에서 측정된 축방향 변위에서 무결압과 기타 실험상의 오차를 제거하여 순 절리변형을 측정하여 초기 역학 간극에서 빼주면된다. 하지만 초기 역학 간극을 구하는 방법에 따라서 영향을 많이 받게 되므로 보다 정확한 초기 역학 간극 자료가 필요하다. 시험 결과를 해석하기 위해서 다음과 같은 세 가지 방법으로 초기 간극 값을 구하였다. 먼저 3차원 단면 측정에서 구한 간극분포 자료를 이용하여 초기 평균 간극 값을 초기 간극으로 가정하여 추정할 수 있다. 다

Table 3. Comparison of several initial apertures

Sample no.	By laser profile	By Barton	By fitting			
	$E_0$ (mm)	$E_0$ (mm)	1st cycle		2nd cycle	
			$E_0$ (mm)	$e_0$ (mm)	$E_0$ (mm)	$e_0$ (mm)
GH13	0.695	0.282	1.311	0.296	1.161	0.256
GH21	0.521	0.289	0.349	0.162	0.315	0.054
MH27	0.646	0.271	0.223	0.108	0.172	0.023
MH32	0.583	0.277	0.347	0.103	0.412	0.039

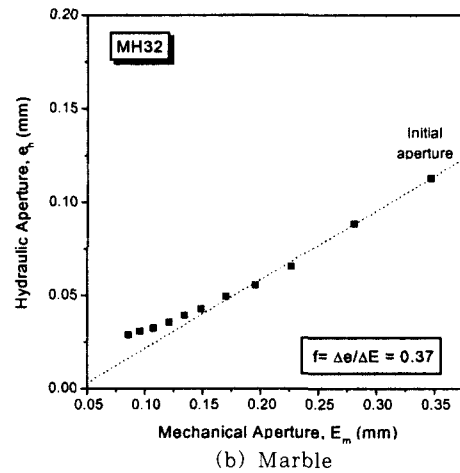
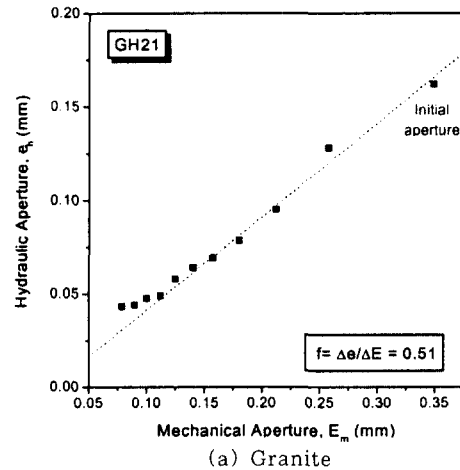


Fig. 8. Relation between mechanical aperture and hydraulic aperture for representative joint specimens under compression

음으로 Barton 등(1985)은 절리거칠기수(JRC)와 절리압축강도(JCS)에 기초한 교란된 비하중 작용 절리의 초기 역학 간극을 추정하는 다음과 같은 경험적인 식을 제안

하였다.

$$E_0 = \frac{JRC}{5} \left( 0.2 \frac{\sigma_c}{JCS} - 0.1 \right) \quad (4)$$

여기서  $\sigma_c$ 는 무결암의 단축압축강도이다. 절리가 교란되지 않고 풍화되지 않았다면 초기 간극은 단지 거칠기만의 함수가 된다. 마지막으로, Zhao와 Brown(1992)은 절리 닫힘과 수리간극과의 그래프에서 이들 자료를 외삽(extrapolation)하여 각각 초기 역학 간극( $E_0$ )과 초기 수리 간극( $e_0$ )을 추정하는 방법을 제안하였다.

Table 3은 이들 세 가지 방법을 통해 구한 초기 간극 값을 비교하고 있다. 세 가지 방법 중에 레이저 측정을 통해 직접 간극 분포를 결정한 값이 가장 크게 나왔고 그 다음으로 회귀로 구한 값, Barton 경험식 값 순이었다. 이들 중 실험치를 외삽해서 구한 초기 간극 값이 평균 값의 범위 내에 있고, 실험결과와 가장 좋은 선형관계를 이루므로, 이 값을 기준으로 역학간극과 수리간극의 관계를 구하였다.

Fig. 8은 대표적인 화강암과 대리석 절리 시험 자료의 역학 간극에 대한 수리 간극의 관계를 나타낸다. 대부분의 시료에서 초기에는 선형 관계를 이루었지만, 수직응력이 증가함에 따라 수리적 간극의 변화가 작아져서 선형 관계에서 많이 벗어남을 보였다. 천연 절리에 대한 높은 수직응력에서의 유동이 삼승법칙에서 벗어남은 Raven과 Gale 등의 연구(1985)에서도 보고된 바 있다. 이러한 선형성으로부터 벗어남은 거칠기 특성과 관련된 간극 분포와 관련이 있는 것으로 보인다. 대부분의 시료에서 측정된 역학 간극과 수리 간극의 비는 0.5~0.7로서, 이는 Benjelloun(1993)이 거친 절리에 대해 측정한 결과와 비슷한 범위를 보였다.

### 3.3 전단하중하의 수리적 거동

Fig. 9는 수리-전단 시험을 하는동안 화강암과 대리석 인공절리 시료에 대한 수직응력 1, 2, 3 MPa에서의 전단변위-전단응력 곡선과 팽창 곡선을 나타낸다. 최대 전단강도를 지난 후에 잔류 수준으로 감소하는 전형적인

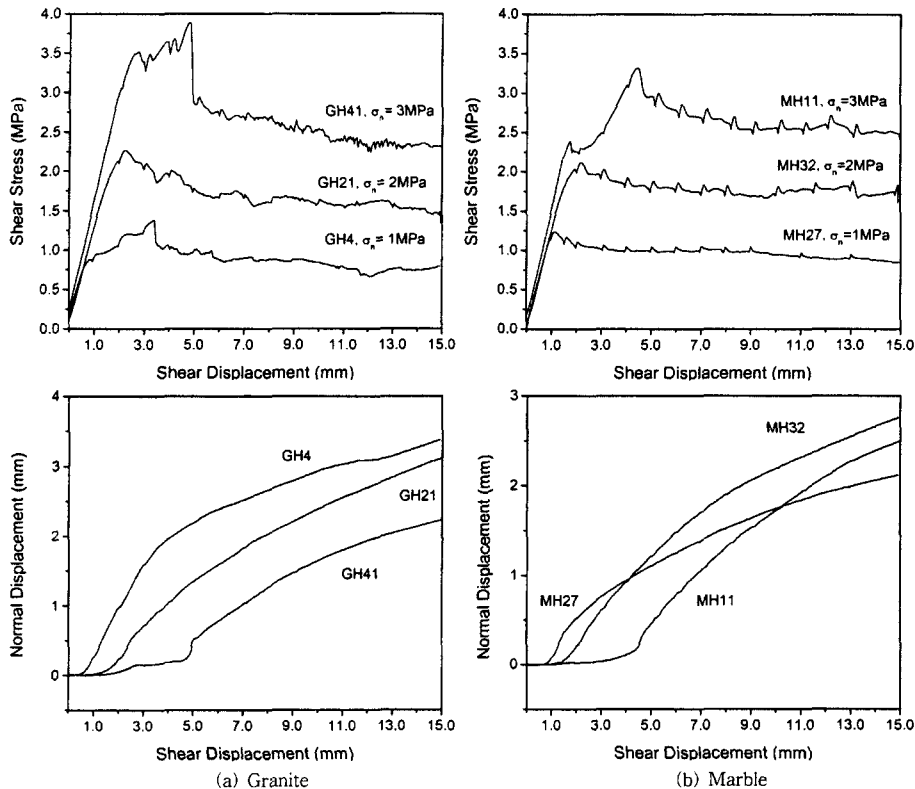


Fig. 9. Joint shear behavior during hydraulic tests



거친 절리의 거동을 보였으며 팽창 거동은 모두 상당히 크게 일어나서 전형적인 거친 절리의 팽창 거동을 보였다. 하지만 신선한 시료에 대해 예상되는 충분한 최대 전단강도를 나타내지 않았는데, 수리-시험을 위해 물딩을 하고, 전단하중 이전의 수직압축-수리 시험을 한 결과라고 생각된다. 또한 유동률 측정을 위해 전단 하중을 정지시켰다가 다시 가했기 때문에 구간별 응력곡선의 진동을 보였다. 화강암 절리는 수직응력 증가에 따라 뚜렷하게 팽창성이 감소하는 경향을 보였지만, 대리석은 1 MPa 수직응력에서 제일 작게 나타났다. 이는 시료 자체의 거칠기 특성 및 맞물림 조건의 차이 때문에 생긴 것으로 생각된다.

Fig. 10은 화강암과 대리석 시료에 대한 전단변위에 따른 단위수두당 유동률의 변화양상을 나타낸 그래프들이다. 유동률은 기본적으로 Fig. 9의 팽창 곡선과 비슷한 거동을 보였다. 즉 초기 절리가 압축되는 상태에서는 유동률이 일정하다가 2 mm의 전단 변위 이후의 최대 전단 강도 근처에서 팽창이 시작되면서부터 급격하게 증가하였

다. 이후에 8 mm 이상의 전단 변위에서 유동률이 거의 일정해지는 경향을 보였다. 이러한 경향은 Makurat 등 (1985), Esaki 등(1991, 1999)이 거친 절리에 대해 측정된 결과에서도 관찰되며 유동률의 변화 양상은 서로 비슷하다. 하지만 Esaki(1991)의 시험에서는 전단변위가 시작됨에 따라 바로 급격하게 수리전도도가 증가한다고 보고하였지만, 여기서의 시험결과는 대부분의 시료가 최대 전단강도에 도달한 이후에 팽창이 어느 정도 더 발생한 후부터 유동률이 급격하게 증가함을 보여준다. 이러한 결과는 시험조건이 다르므로 직접적으로 비교될 수 없지만 본 실험과의 유동시험 경계조건의 차이가 작용했을 것으로 생각된다. 즉 Esaki(1991, 1999)의 경우 방사형 유동으로 실험하였으므로 약간의 팽창에 대해 민감하게 반응하여 바로 유동률이 증가하지만, 이 시험은 직선 유동이며 전단방향과 유동방향이 같으므로 어느 정도 이상의 팽창이 생기기 전까지는 기존 돌출부들이 서로 역물려 간극을 막고 있을 가능성이 있다.

화강암 절리의 경우 초기 유동률 값은 수직응력이 증가할수록 감소하였으며 최대 전단강도 이후 팽창이 일어나면서 모든 수직응력 조건에서 급격하게 증가하였다. 하지만 8 mm 이후 모든 수직응력에서 대부분 0.4~0.5 cm<sup>2</sup>/sec 정도 값의 일정한 경향을 보였다. 이는 화강암절리의 거칠기들이 전단이 진행됨에 따라 손상되면서 수직응력의 영향을 거의 받지 않고 비슷한 거동을 나타냄을 의미한다. 화강암 절리는 절리면의 거칠기와 시험 조건에 따라 차이는 있겠지만 유동률 증가폭은 103 배 정도를 보였으며 수직응력이 증가함에 따라 약간씩 증가폭이 커졌다.

대리석 절리는 화강암 절리와 기본적으로는 비슷한 경향을 보였지만 초기 유동률 값들이 상당히 작다. 이는 수직 응력-수리 시험 결과와 일치한다. 하지만 8 mm 전단 변위 이후 일정해지는 유동률 크기가 수직응력 증가에 따라 작아졌다. 대부분 전단변위에 따른 유동률 증가폭은 103 배를 넘지 않아서 화강암에 비해 작게 나타났다. 이러한 이유는 화강암의 팽창이 더 많이 일어난 것과 더불어 대리석의 충전물이 화강암에 비해 훨씬 많이 생겨서 전단변위 8 mm 이후에 간극 공간을 많이 채우기 때문이라 생각된다.

Esaki(1999)는 Barton(1985)이 제안한 거칠기의 함수로서의 수리간극 예측식과 실험결과를 비교하여 전단변위 진행에 따른 고유 투수계수 증가폭이 둔화되는 것이 충전물의 영향임을 밝힌 바 있다. 하지만 본 실험 결과에 나타난 8 mm 이후에 유동률의 증가가 일어나지 않고 일

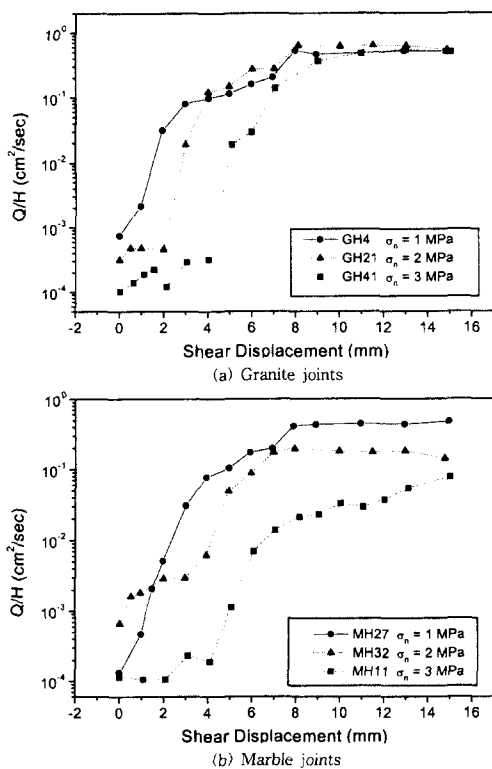


Fig. 10. Flow rate per unit head vs. shear displacement curves of tested joints during hydro-shear tests

정해지는 것은 모두 충전물의 영향으로만 고려하기엔 문제가 있다. 특히 화강암의 경우 대리석에 비해 충전물 생성 정도가 작은 편임을 고려할 때 생각해볼 문제이다. Power & Durham(1997)이 인공 절리 시료의 포고 측정 자료를 이용하여 엇갈림이 일어났을 때의 충전물을 고려하지 않은 간극분포 변화에 대해 예측한 자료가 이에 대한 실마리를 제공한다. 일반적으로 엇갈림(offset)이 일어났을 때 간극 크기의 최대 값은 증가하지만, 평균 간극은 엇갈림 증가에 따라 일정해지거나 오히려 감소하는 경향을 보고하고 있다. 즉 직접전단시험시 측정되는 팽창은 계속 증가하더라도 엇갈림이 계속 증대된다. 따라서 실제 간극 분포의 크기는 어느 정도 전단변위 이후에는 일정해져서 유동률이 더 이상 증가하지 않는 것으로 생각된다.

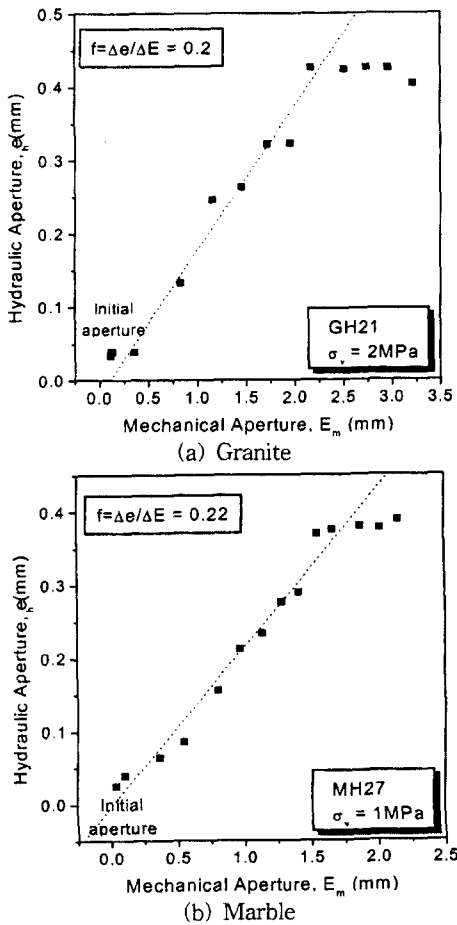


Fig. 11. A typical relation between mechanical aperture and hydraulic aperture under shear loading

전단에 따른 수리 간극 역시 실험결과를 통해 추정될 수 있다. 수리 간극은 삼승법칙이 유효하다고 가정하고 이 때의 수리 간극 값을 구할 수 있다. 전단시의 역학 간극은 다음과 같이 구할 수 있다(Esaki, 1999).

$$E_m = E_m^0 - \Delta E_m^n + \Delta E_m^s \quad (5)$$

여기서  $E_m^0$ 는 초기 역학 간극,  $\Delta E_m^n$ 은 수직압축에 의한 역학 간극 변화 그리고  $\Delta E_m^s$ 은 전단에 따른 역학 간극 변화를 나타낸다. 수리-전단 시험을 통해 얻은 자료들과 식(5)를 이용하여 역학 간극에 대한 수리 간극의 변화를 조사하였다.

Fig. 11은 대표적인 시료들에 대한 전단시 역학 간극에 대한 수리 간극의 관계를 보여준다. 대부분 역학 간극과 수리 간극이 선형인 구간과 그렇지 않은 구간으로 뚜렷이 나눌 수 있다. 초기의 선형이 아닌 구간은 역학 간극 증가에도 불구하고 수리 간극이 거의 변하지 않은 경우이고 선형 구간은 팽창이 어느 정도 개시된 후 팽창에 따라 수리 간극이 급격히 증가하는 구간이며 후기의 비선형 구간은 8mm 전단 변위 이후 팽창은 꾸준히 증

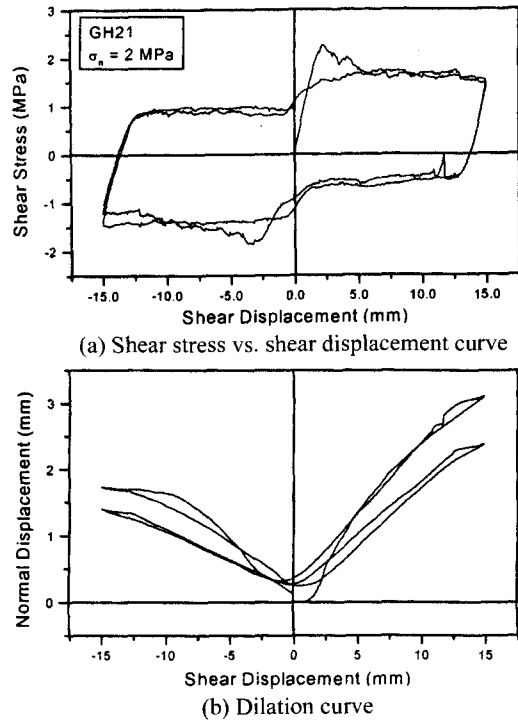


Fig. 12. A typical cyclic shear behavior of granite joint during hydro-shear tests

가함에도 불구하고 수리간극의 증가가 없는 구간이다. 역학 간극에 대한 수리 간극의 비인  $f(\Delta e/\Delta E)$ 는 0.1~0.3 정도로서 모든 시료에 대해 상당히 작게 나타났다. 이는 실제 간극 변화에 비해 팽창성이 크게 평가되어서  $f$  값이 매우 작게 나타난 것으로 생각된다. 거칠기와 겉보기 팽창에만 의존하여 간극변화로 예측하면 역학 간극을 실제 간극 공간보다 더 과대 평가하는 경향이 있다. 실험 결과들은 절리면 팽창에 따른 간극변화, 돌출부 마모, 충전물 생성과 같은 여러 가지 요인들을 제대로 고려해야 제대로 전단에 따른 절리의 수리 거동을 기술할 수 있음을 보여주고 있다.

3.4 주기전단 하중하의 수리적 거동

주기 전단시 전단변위에 따른 수리 특성의 변화를 살펴보기 위하여 모든 시료에 대해 2~4 주기까지 단위수두당 유동률을 측정하였다. Fig. 12는 대표적인 화강암 시료에 대한 주기 전단시의 전단변위-전단 응력, 전단변

위-수직변위 곡선을 나타낸다. 전형적인 거친 절리의 주기 전단거동 형태를 보여주고 있다. 첫번째 주기에서 최대 전단강도에 도달한 후 두 번째 주기에서는 바로 잔류 전단강도 수준으로 일정해졌다. 잔류전단강도와 역전단시의 마찰력의 차이 역시 뚜렷하게 나타났다.

Fig. 13은 2 MPa의 수직응력 하의 화강암과 대리석 절리 시료에 대해 2주기까지의 주기 전단시 단위수두당 유동률 측정결과이다. 화강암의 경우, 주기 증가에 따라 지속적으로 유동률이 증가하였지만, 대리석은 다소 복잡하게 증감하였다. 이는 화강암의 경우, 주기 증가에 따라 간극 공간이 점점 더 커지지만, 대리석의 경우 주기 증가에 따라 충전물 생성이 많이 생겨서 간극 공간의 형태가 훨씬 복잡해졌기 때문이라 생각된다. 첫 번째 주기에서의 유동률 곡선은 기본적으로 팽창 곡선과 유사하게 나타났다. 즉 원점 부근 팽창이 최저일 때 유동률이 가장 적고 ±15 mm 전단변위 부근에서 큰 유동률을 보인다. 주기전단시 전단방향이 바뀔 때 즉 제하시의 유동률

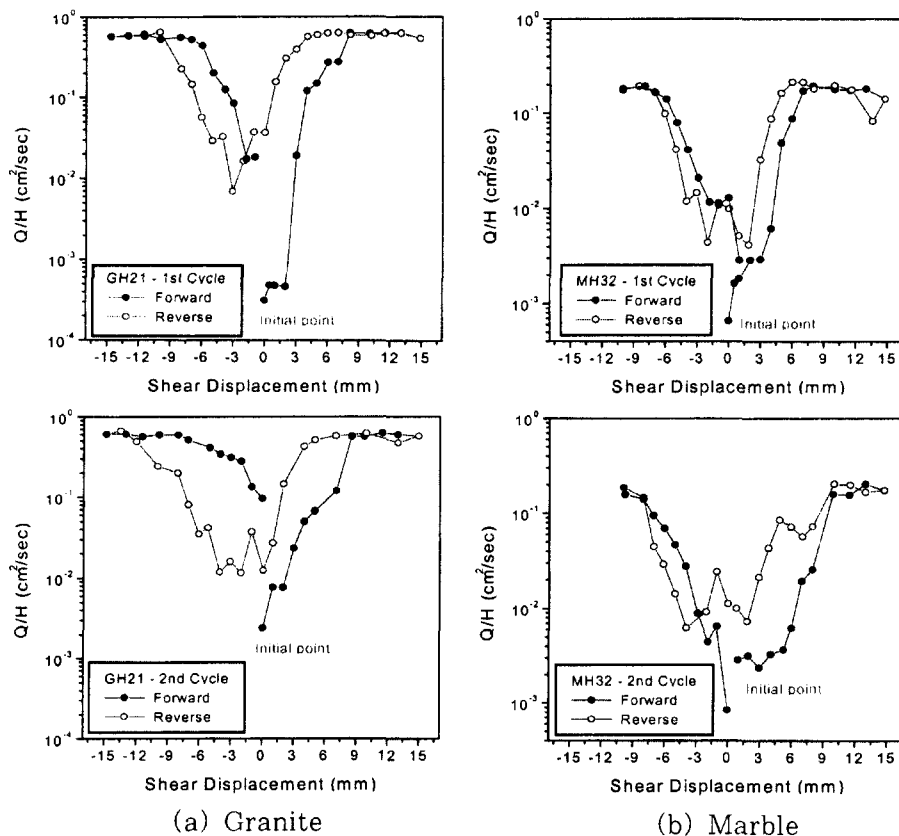


Fig. 13. A typical hydraulic behavior of rock joints under cyclic shear loading

이 더 증가하였으며 절리면이 맞물리면서 발생하는 유동률의 감소 역시 팽창곡선과 일치하지 않고 지연되는 경향을 보였다. 전반적인 주기 증가에 따라 충전물 생성의 효과와 간극 공간의 엇갈림의 복잡성으로 인해 팽창곡선과의 관련성이 적어졌다. 하지만 낮은 응력에서 화강암 절리에서처럼 충전물 생성이 상대적으로 적은 경우에는 주기 증가에 따른 절리면의 손상의 많은 부분이 고유 투수계수의 증가로 나타날 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 거친 절리의 수리적 거동을 이해하기 위하여 절리 시료에 대해 간극 측정 및 압축과 직접전단하의 실험실 수리 시험을 실시하였다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 거친 인공 절리의 간극 측정 결과, 대부분의 초기 평균 간극은 0.5~0.8 mm 범위였으며 모두 정규분포 형태의 무작위적인 간극 분포를 보였다.
- 2) 수직응력-고유 투수계수 변화 양상은 몇 가지 수리 모델로 잘 근사될 수 있었으며 이 때의 모델 변수들의 범위를 구하였다. 이들 변수들은 수리-역학 모델링의 입력 자료로 사용될 수 있을 것이다. 수직 압축시 역학 간극과 수리 간극의 관계는 초기 선형을 보이다가 응력 증가에 따라 점점 비선형적인 양상을 보였으며 두 간극 사이의 비는 대부분 0.5~0.7 정도를 보여서 거칠기의 영향으로 인해 유동채널이 실제 역학 간극보다 훨씬 길어짐을 알 수 있다.
- 3) 전단-수리 시험 결과, 유동률은 초기에는 절리면 팽창 거동의 형태와 유사하게 변화하였으며 전단변위 8 mm 이후부터는 거의 일정해졌다. 이러한 사실은 절리를 통한 유체 유동이 절리면의 수직 팽창에 계속 비례하는 것이 아니라 전단 진행에 따라 충전물 생성과 간극 공간의 엇갈림으로 인해 일정해짐을 의미한다. 전단시의 역학 간극과 수리 간극의 관계는 유동률이 급격하게 증가하는 일부 구간에서만 선형을 보였으며 두 간극 사이의 비는 0.1-0.3 정도로 매우 작았다.
- 4) 주기 전단에 따른 수리적 거동은 충전물 생성과 간극 공간 형태가 복잡성으로 인해 팽창 곡선과의 관련성이 점점 없어지며 특정한 경향을 띠지 않고 불규칙해졌다. 또한 전단 방향과 유동방향의 차이와 시험 경계 조건 차이로 인한 전단방향 의존성을 뚜렷이 보여서 동일 변위에서 정방향 전단 하중시보다 역방향 제하시의 유동

이 훨씬 크게 나타났다.

#### 사 사

본 연구는 건설교통부 과제 R&D/970007 "산지 사면과 급경사면 안정성 평가 및 보강대책 시스템 개발" 중 제 3세부과제 "절리 암반사면의 안정성 평가 및 보강대책 개발 연구"의 지원에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해 준 건설교통부 관계자 여러분께 깊이 감사드리는 바이다. 아울러 삼성중공업 등 연구 관계자 여러분들과 실험 기자재를 제공하여 주신 삼성물산(주) 건설기술원 소장 및 관계자 여러분들에게 감사드리는 바이다.

#### 참 고 문 헌

1. 배기운, 1999, 레이저 변위계를 이용한 암석절리면의 3차원 거칠기 측정기 개발, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
2. 이희석, 박연준, 유광호, 이희근, 1999, 주기전단 하중하의 암석 절리의 역학적 거동에 관한 실험적 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 9.4, 350~363.
3. 천대성, 이희석, 이정인, 이희근, 1999, 회전식 전단시험기를 이용한 암석절리의 수리-역학적 거동에 관한 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 9.4, 328~336.
4. Ahola, M. P., Mohanty, S. and Makurat, A., 1996, Coupled mechanical shear and hydraulic flow behavior of natural rock joints, Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Process of Fractured Media, Elsevier, 393~423.
5. Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K., 1985, Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 22, 121~140.
6. Benjelloun, Z. H., 1993, Etude experimentale et modelisation du comportement hydrom canique des joint rocheux', Th se de doctorat, Universit Joseph Fourier, Grenoble 1.
7. Davis, J. C., 1986, Statistics and Data Analysis in Geology, 2nd ed., John Wiley & Sons.
8. Esaki, T., Du, S., Jiang, Y., Wada, Y. and Mitani, Y., 1998, Relation between mechanical and hydraulic apertures during shear-flow coupling test, Proc. of 10th Japan Symp. on Rock Mech., 91~96.
9. Esaki, T., Du, S., Mitani, Y., Ikusada, K., and Jing, L., 1999, Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 36, 641~650.
10. Esaki, T., Hojo, H., Kimura, T. and Kameda, N., 1991, Shear-flow coupling test on rock joints. Proc. 7th Int. Congr. Rock Mech., 389~392.
11. Gale, J. E., 1982, The effects of fracture type(induced-

- versus natural on the stress-fracture closure-fracture permeability relationships, Proc. 23rd U.S. symp. on Rock Mechanics, University of California, Berkeley, Aug. 25-27, 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., 15, 249 ~ 257.
  13. Gentier, S., 1986, Morphologie et comportement hydromechanique d'une fracture naturelle dans une granite sous contrainte normale, Ph. D. thesis, l'universite d'Oreleans.
  14. Hakami, E., 1995, Aperture distribution of rock fractures, Doctorial thesis, Division of Eng. Geol., Royal Inst. of Technology, Stockholm.
  15. Hakami, E., Larsson, E., 1996, Aperture measurements and flow experiments on a single natural fracture, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 33.4, 395 ~ 404.
  16. Iwai, K., 1976, Fundamental studies of fluid flow through a single fracture, Doctorial thesis, Univ. Calif. Berkeley.
  17. Iwano, M. and Einstein, H. H., 1983, Stochastic analysis of surface roughness, aperture and flow in a single fracture, Eurock '93, Proc. ISRM Int. Symp. on Safety and Environmental Issues in Rock Eng., Lisbon, 135 ~ 141.
  18. Makurat, A., 1985, The effect of shear displacement on the permeability of natural rough joints, Proc. Hydrogeology of Rocks of Low Permeability, Tucson, Arizona, 99 ~ 106.
  19. Power, W. L., and Durham, W. B., 1997, Topography of natural and artificial fractures in granitic rocks: Implications for studies of rock friction and fluid migration, Int. J. Rock mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 34.6, 979 ~ 989.
  20. Pyrak-Nolte, L. T. Myer, L. R., Cook, N. G. W. and Witherspoon, P. A., 1987, Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock, Proc. 6th ISRM Congress, Montreal, Vol. 1, 225 ~ 231.
  21. Raven, K. and Gale, J. E., 1985, Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22, 251 ~ 261.
  22. Stephansson, O. and Jing, L., 1995, Testing and modeling of rock joints, Mech. of Jointed and Faulted Rock, Rossmanith(ed.), 37 ~ 47.
  23. Swan, G., 1983, Determination of stiffness and other joint properties from roughness measurements, Rock Mech. Rock Eng., 16, 19 ~ 38.
  24. Teufel, W. T., 1987, Permeability changes during shear deformation of fractured rock, 28th U.S. Symp. on Rock Mech., Tucson, Arizona, A.A. Balkema, 473 ~ 480.
  25. Witherspoon, P. A., Wang, J. S. Y., Iwai, K., Gale, J. E., 1980, Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, Water Resour. Res., 16.6, 1016 ~ 1024.
  26. Zhao, J. and Brown, E. T., 1992, Hydro-thermo-mechanical properties of fractures in the Carnmenellis granite, Quart. J. Eng. Geol., 25, 279 ~ 290.

**이 희 석**



1993년 서울대학교 공과대학  
자원공학과, 공학사  
1995년 서울대학교 대학원  
자원공학과, 공학석사  
1999년 서울대학교 공과대학  
자원공학과, 공학박사

Tel : 02-880-7234

E-mail : ichsuk@rockeng.snu.ac.kr

현 재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 Post  
Doc.

**박 연 준**



1981년 서울대학교 공과대학  
자원공학과, 공학사  
1983년 서울대학교 대학원  
자원공학과, 공학석사  
1992년 미국 Minnesota 대학교  
대학원 토목공학과, 공학박사

Tel : 0331-220-2580

E-mail : yjpark@mail.suwon.ac.kr

현 재 수원대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

**유 광 호**



1984년 연세대학교 공과대학  
토목공학과, 공학사  
1986년 연세대학교 대학원  
토목공학과, 공학석사  
1992년 미국 Minnesota 대학교  
대학원 토목공학과, 공학박사

Tel : 0331-220-2566

E-mail : khyou@mail.suwon.ac.kr

현 재 수원대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

**이 희 근**



1970년 서울대학교 공과대학  
자원공학과, 공학사  
1973년 서울대학교 대학원  
자원공학과, 공학석사  
1977년 일본 교토대학교(京都大學)  
교 대학원 자원공학과,  
공학박사

Tel : 02-880-7234

E-mail : irram@rockeng.snu.ac.kr

현 재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수