

회전식 전단시험기를 이용한 암석절리의 수리-역학적 거동에 관한 연구

천대성¹⁾ · 이희석²⁾ · 이정인³⁾ · 이희근³⁾

A Study on Hydro-mechanical Behaviors of Rock Joints using Rotary Shear Testing Apparatus

Dae-Sung Cheon, Hee-Suk Lee, Chung-In Lee and Hi-Keun Lee

ABSTRACT To characterize the hydro-mechanical behavior of a rock joint, a rotary shear testing apparatus was devised in this study. Shear stress was driven by twisting the end of a sample in the rotary shear testing apparatus. The test results show that the rotary shear test underestimates the peak shear strength of a rock joint. The torque is known as a function of the radial distance from the axis of rotation, resulting in the radial variation of the shear stress. Fluid flow through rock joints is mainly dependent on the joint roughness, contact area, initial aperture. To examine the dependency, the relationship between the hydraulic and the mechanical apertures for shear-flow was established by measuring the initial aperture. It shows that the mechanical aperture and the hydraulic aperture increase linearly with the dilatancy. The difference between the hydraulic and mechanical apertures describes the deviation from the behavior predicted by the parallel plate model.

Key words : rotary shear test, hydraulic aperture, mechanical aperture

초 록 본 연구에서는 암석절리에 대한 수리-역학적 거동이 동시에 가능한 실내시험장치로서 회전식 전단시험기를 제작하였다. 회전식 전단시험기는 시료의 양 끝에 비틀림 모멘트를 가함으로써 전단응력을 발생시키도록 하였다. 실험결과 회전식 전단시험에 의한 절리의 최대전단강도는 직접전단시험에 의한 값보다 과소평가되었다. 이는 비틀림에 의한 전단응력이 회전축의 반경에 따라 변하며 특히 회전축 중심부에서는 전단응력이 거의 작용하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 절리에서의 유체유동은 절리 거칠기, 접촉 면적, 초기간극 등에 의해 주로 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 초기간극의 측정을 통하여 전단-유동에 대한 수리 간극과 역학적 간극사이의 관계를 알아보았다. 초기간극의 측정과 전단-유동 상호작용시험의 결과에 근거하여, 역학적 모델과 삼승법칙으로부터 계산된 역학적 간극과 수리 간극은 체적 팽창이 발생함에 따라 증가하며 이들 사이에는 좋은 선형관계가 있음을 보였다. 그러나 수리 간극과 역학적 간극사이에는 다소 차이가 발생하였는데 이는 평행 평판모델에 의해 예측된 거동으로부터 수리 간극이 벗어남을 나타낸다.

핵심어 : 회전식 전단시험, 수리 간극, 역학적 간극

1. 서 론

최근 원유저장 및 방사성 폐기물 처분부지와 같은 다양한 심부 지하이용에 관심이 집중되고 있다. 이들의 적절한 개발을 위해서는 암석절리의 역학적, 수리적 특성을 평가하고 조사하는 것이 매우 중요하다.

암석 절리의 수리적 특성은 균열 간극과 표면 거칠기에 의해 크게 좌우됨이 잘 알려져 있으며 이전부터 평행 평판을 통한 층류유동(laminar flow)을 가정한 삼승법칙(cubic law)과 같이 수리적 특성을 모델링하려는 시도가 이루어 졌다.¹⁾

하지만, 실제로 절리들은 평평하지 않아 삼승법칙의 적

용성, 절리의 유동에 대한 역학적 간극의 영향과 같은 몇 가지 불일치가 존재한다.

수직응력 하에서 변형 가능한 암석 절리의 수리-역학적 거동은 Tsang & Witherspoon²⁾과 Cook³⁾ 등 몇몇 연구자들에 의해 조사되었으며, 최근에는 주로 절리의 전단변위가 발생하는 동안 투수계수의 변화를 조사하기 위한 실험적 연구들이 수행되고 있다.^{4,6)}

국내에서는 암석절리의 수리-역학적인 거동에 대한 수

- 1) 학생회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정
 - 2) 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 Post Doc.
 - 3) 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수
- 원고 접수일 : 1999년 2월 18일
원고 심사 완료일 : 1999년 11월 7일

치해석적 연구는 이루어지고 있으나 실험적 연구는 거의 없었다. 다만 윤용균⁷⁾에 의한 암석 절리의 투수실험이 있었으나 이 또한 절리에 대한 수직응력만을 고려한 실험이었다.

본 연구에서는 암석절리의 수리-역학적 실험이 가능한 회전식 전단시험기를 제작하여 절리에 수직 및 전단하중이 작용하는 경우의 수리-역학적 거동에 대해 연구하였다. 이를 위해 레이저 측정장치를 이용하여 초기간극을 측정 한 후 전단-유동시험(shear-flow test)을 통해 전단변위에 따른 전단응력과 유동률의 변화를 알아보고 암석절리의 역학적, 수리적 간극사이의 관계를 알아보았다.

2. 이론적 배경

2.1 단일절리에서의 유체유동

암석의 균열을 통한 유체유동에 대한 이론은 거리 e 만큼 떨어진 두 평행 평판사이의 1차원 층류유동(laminar flow)을 기초로 하여 Darcy법칙으로부터 유도된 삼승법칙(cubic law)이라 불리는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{Q}{\Delta h} = Ce^3 \tag{1}$$

여기서 Q 는 유동률, Δh 는 수리 수두의 차이, e 는 균열간극, C 는 기하학적 형상과 유체특성에 의해 좌우되는 상수이다. 방사상 층류유동의 C 에 대한 표현은

$$C = \left(\frac{2\pi}{\ln(r_e/r_w)} \right) \left(\frac{\rho g}{12\mu} \right) \tag{2}$$

이다. 위 식에서 μ 는 유체점성도, ρ 는 유체의 밀도이며 g 는 중력가속도, $2r_e$ 는 외경, $2r_w$ 는 내경이다.

2.2 비틀림 응력

상단이 고정된 환형단면축(hollow cylinder bar)의 하단에 비틀림 모멘트가 작용하는 경우 비틀림 모멘트에 의해 발생하는 최대전단응력은

$$\tau_{\max} = \frac{2M_t}{\pi(b^3 - a^3)} \tag{3}$$

이 되며 반경의 최외곽에서 발생한다.

전체 면적에 작용하는 평균 전단응력 $\bar{\tau}$ 는

$$\bar{\tau} = \frac{3M_t}{2\pi(b^3 - a^3)} \tag{4}$$

이며 작용점은 전단응력분포의 도심에서 작용한다. 여기서 M_t 는 비틀림 모멘트, $2a$ 는 내경, $2b$ 는 외경을 나타낸다.

2.3 회전식 전단시험

절리의 강도시험에 사용되는 일반적인 시험법으로 삼축 전단시험과 직접전단시험이 있다. 삼축셀을 이용하여 절리의 전단강도를 얻는 삼축전단시험의 경우 매우 작은 전단 변위하에서만 측정이 가능하다는 단점이 있다. 반면 직접 전단시험의 경우 널리 알려진 변형반응과 전단강도의 거동, 장치의 용이성 등의 장점을 가지고 있으며 삼축전단 시험에 의한 전단변위보다 더 큰 전단변위를 허용할 수 있다. 그러나 그 허용정도에는 한계가 있으며 수리거동에 관한 실험을 하기 위하여 전단상자에 고무 등으로 패킹을 하는 경우 그 범위에 더욱 제한이 따르게 된다.

이에 비해 원주형 시료나 환형시료의 상·하면에 비틀림 모멘트를 가하여 원주방향으로 전단하는 회전식 전단 시험은 무제한적인 큰 전단변위에서의 전단거동을 알아볼 수 있으며 전단이 일어나는 동안 전단면적을 일정하게 유지할 수 있다. 또한 전단-유동거동을 구현하기 쉽다는 장점을 가지고 있다. 그러나 회전식 전단시험은 회전에 의한 전단변위가 반경방향에 따라 변하며 최대전단강도의 평가에 있어서 다소 의심의 여지가 있다.

3. 시험편, 실험장치 및 시험방법

3.1 시료 및 시험편 제작

본 연구에서 사용된 시료는 황동화강암과 여산대리석으로 신선한 암괴로부터 암심을 채취하여 암석 절단기를 이

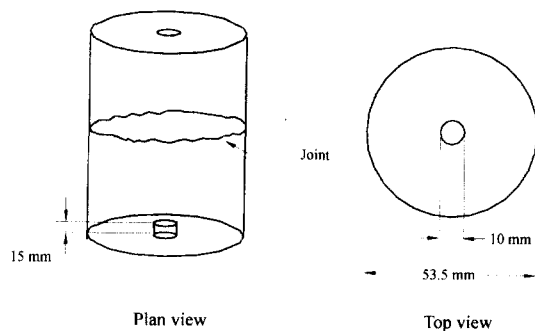


Fig. 1. A schematic diagram of specimen

Table 1. Physical and mechanical properties of rock specimens

Sample Properties	Hwangdeung granite	Yeosan marble
Bulk specific gravity	2.72	2.76
Apparent porosity (%)	0.49	0.19
P-wave velocity (m/sec)	3650	3080
S-wave velocity (m/sec)	1970	1710
Uniaxial compressive strength (kg/cm ²)	1510	720
Young's modulus ($\times 10^5$ kg/cm ²)	5.41	4.8
Poisson's ratio	0.29	0.31
Brazilian tensile strength (kg/cm ²)	140	110

용하여 직경 대 길이의 비가 1:1.7~1.9의 크기로 절단한 후 연마기를 이용하여 양단면을 연마한 후 Fig. 1과 같이 수리시험을 위하여 직경이 10 mm의 드릴로 상부를 천공한 다음 인위적으로 인장균열을 생성하였다. 또한 암석과 전단상자의 일체화된 거동을 위하여 석고(gypsum cement)를 사용하여 전단상자에 몰딩하였다. 대상시료의 기본적인 물성은 Table 1에 나타나 있다.

3.2 초기 간극의 측정

절리면의 초기 간극 측정을 위하여 레이저 변위계를 이용한 3차원 측정기를 사용하였다. 이 3차원 측정기는 레이저 변위계, 위치지정 시스템, 자료출력과 전제시스템 제어용 컴퓨터로 구성되었으며 제작된 프로그램에 따라 특정 위치에 레이저 변위계를 위치시키고 레이저 변위계에서 읽어들이는 측정값을 문서파일로 자동저장 되도록 하였다. 절리면 형상의 측정은 회전식 전단시험을 하므로 원주형 모양으로 측정하였으며 상부와 하부면을 동시에 측정하여 초기간극을 구할 수 있도록 하였다. 초기 간극의 측정은 평균전단응력이 작용하는 부분에 대하여 이루어졌으며, 화강암의 경우 대략 0.8 mm, 대리석의 경우 대략 0.6 mm의 값을 나타내었다.

3.3 회전식 전단장치 및 시험방법

몸체는 최대 수직 하중 및 비틀림 모멘트를 충분히 견딜 수 있는 강재로 제작되었으며 주요 구성부는 수직 하중을 가할 수 있는 유압실린더와 비틀림 모멘트를 가하는 모터, 그리고 모터의 회전력을 웹 및 웹 기어에 의해 수직 압축축에 전달하는 부분으로 구성되었다. 또한 시

험편을 시험기에 부착하기 위한 전단상자가 있다.

전단상자는 비틀림 모멘트가 작용할 때 시료 본체와의 분리 및 미끄러짐이 발생하지 않도록 전단상자 하단에 걸림쇠를 제작하였으며 상부는 시험기 본체에 고정되며 하부는 수직 압축을 받는 회전축에 고정되어 모터의 작동에 따라 회전하도록 되어 있다. 상부에는 투수시험이 가능하도록 급수공(내경 6 mm, 외경 8 mm)이 설치되어 있다 (Fig. 1 참조).

시험기의 회전속도는 0.4~0.6°/min이며 속도조절이 가능하도록 되어 있고 좌·우 회전이 모두 가능하다. 본 실험의 경우는 계산된 값과 예비실험을 통하여 얻은 0.56°/min의 속도를 가지고 시험하였다. 수직하중은 유압 서보방식으로 하중을 가하며, 하중작용 및 하중제거, 시험기의 구동, 각 조정 등은 시험기 본체에 부착된 조절기를 이용하여 조절할 수 있도록 하였다. 시험기의 최대재하능력은 수직하중 15 ton, 전단하중 15 ton으로 하였다. 대략적인 시험장치의 모습은 Fig. 2에 나타나 있다.

3.4 투수가압장치 및 시험방법

투수시험은 정수위법으로 수행하였다. 물의 공급은 일정 압의 질소를 이용하여 물탱크의 피스톤을 밀게 하여 물탱크 내에 차있던 물이 공급되도록 되어 있다. 질소의 공급은 on/off 밸브와 조절밸브를 이용하여 일정 기압을 유지하도록 하였으며 수압은 수압 게이지를 이용하여 측정하였다. 물탱크의 용량은 약 1100 cm³이다. 본 실험에서 사용된 수압은 예비실험과 수압탱크의 용량을 고려하여 범위를 0.3~0.6 kg/cm²으로 하였다.

3.5 계측, 제어장치부 및 계측방법

회전식 전단시험장치에 부착된 로드셀(load cell), 토크셀(torque cell), LVDT에서 나온 자료는 자료 획득 장치를 이용하여 디지털화된 값을 원하는 시간간격으로 얻을 수 있다. 본 실험에서는 2초의 시간간격으로 자료를 획득하였다. 전단하중의 측정은 최대 용량 490 Nm의 비틀림 모멘트와 0.5%의 정밀도의 리액션토크셀(reaction torque cell)을 사용하여 측정하였으며 수직하중의 측정은 5 ton의 로드셀을 이용하여 측정하였다. 수직변위의 계측은 25 mm 용량의 스트레인 게이지 타입의 변위 변환기(LVDT) 2개를 180° 간격으로 설치하여 측정하였다. 투수량의 계측은 투수계수의 수 승(order)의 변화에 대응하기 위해, 전자저울(AND사의 FX3000, 정밀도 0.01g, 최대 측정하중 3100g)을 사용하여 RS-232C에 의해 PC에 접속시켰다.

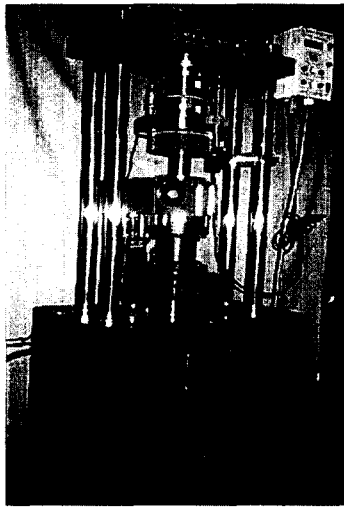
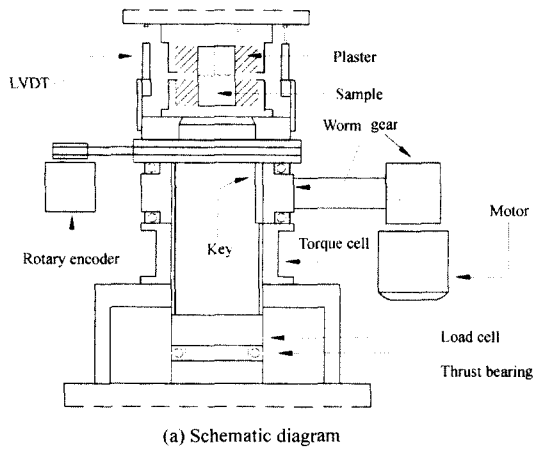


Fig. 2. Rotary shear testing apparatus

측정은 매초마다 질량을 얻을 수 있는 프로그램을 작성하여 사용하였으며 투수량의 측정은 일정 회전 각변위의 전단시험 후 단계마다 60~90초간 측정하였다. 측정된 자료를 컴퓨터를 통하여 일정 증가율을 보이는 부분의 값을 평균 유량으로 사용했으며 측정된 값은 평균 유량의 중량이었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 회전식 전단시험과 직접전단시험의 비교

회전식 전단시험에 의한 결과를 본 연구에 사용된 동종의 화강암과 대리석에 대한 이상돈⁹⁾의 직접전단시험의 결과와 비교한 것을 Table 2에 제시하였다. 회전식 전단시

Table 2. Comparison of τ_{max} vs. σ_n by rotary shear test and in direct shear test for Hawangdeung granite

Rotary shear test			Direct shear test (After Lee ⁹⁾)		
σ_n (kg/cm ²)	τ_{max} (kg/cm ²)	τ_{max} / σ_n	σ_n (kg/cm ²)	τ_{max} (kg/cm ²)	τ_{max} / σ_n
6.6	1.42	0.215	1.92	59.9	3.12
9.5	1.81	0.191	4.81	12.53	2.6
9.6	1.95	0.203	4.81	13.18	2.74
11.3	2.09	0.185	9.62	20.99	2.18
15	2.80	0.193	9.62	28.27	2.93
15	1.95	0.13	19.24	48.88	2.54
15.3	3.56	0.23	19.24	48.9	2.54
20.1	2.99	0.185	32.07	79.35	2.47
22.2	3.61	0.149	48.1	90.56	1.88

험의 경우 최대전단강도/수직응력의 비가 대략 0.2를 나타낸 반면 직접전단시험의 경우는 그 비가 화강암과 대리석에 대하여 각각 2.57과 2.74로 회전식 전단시험에 의한 최대전단강도가 직접전단시험에 비해 상당히 작음을 알 수 있다. 이는 사용된 시료가 같더라도 거칠기가 서로 다름에 기인할 수 있으며, 특히 비틀림에 의해 발생하는 전단응력이 반경에 따라 변하기 때문으로 생각된다. 즉, 비틀림을 받는 전체면적 중 회전축 부근의 면적은 실제 거의 힘을 받지 않는 부분으로 작용하여 전단응력 도출시 면적의 과대 평가로 인한 전단응력의 감소를 야기하는 것으로 생각된다. 따라서 외경/내경의 비를 크게 할수록 전단강도의 과소평가는 줄어들게 될 것이며, 이를 위해서는 외경/내경의 비의 변화에 따른 실험연구가 더 진행되어 적절한 외경/내경의 비를 제시하고 그에 따른 보정계수를 사용해야 할 것으로 생각된다.

4.2 수직응력의 변화에 따른 수리거동

암석절리의 각 시료에 대해 수직응력을 변화시키면서 유체유동을 측정하였다. 단계적으로 일정수직응력을 유지한 채 일정수압을 가하면서 60~90초 동안 측정하여 평균적인 유체유동률을 구한 것이 Fig. 3와 Fig. 4에 나타났다.

화강암의 경우 유체유동률은 수직응력이 0에서 60 kg/cm² 까지 변함에 따라 10⁻² ~ 10⁻⁴ cm²/sec 범위를 가지며 대리석의 경우는 10⁻³ ~ 10⁻⁵ cm²/sec의 범위를 가지면서 변화였다. Tsang과 Iwai¹⁰⁾ 등의 실험 결과와 비추어볼 때 대략적인 유동률의 범위는 잘 일치하나 본 실험에서의 유동률의 변

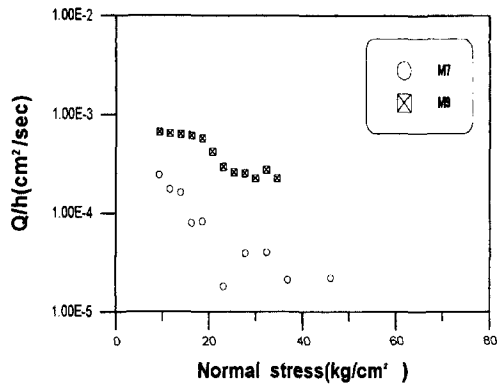


Fig. 3. Flow rate per unit head vs. normal stress for Hwangdeung granite joints

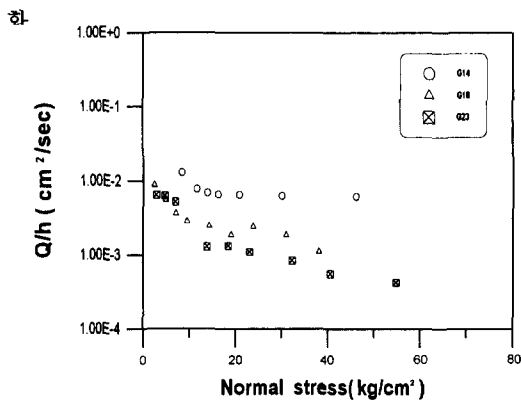


Fig. 4. Flow rate per unit head vs. normal stress for Yeosan marble joints

가 다소 완만한 기울기를 가지는 경향이 있다. 이는 실

험에 사용된 시료의 크기가 그들이 실험한 시료에 비해 상대적으로 작아 절리내의 유동경로가 짧아지기 때문이다. 즉, 유동경로가 짧을수록 절리가 수직응력을 받게 됨에 따라 증가하는 접촉면적의 영향이 덜 작용하기 때문이다.

4.3 암석절리의 수리 간극

본 연구에서는 물 유동이 원형의 균열 표면의 중심에 위치한 구멍으로부터 가장자리로 유동하는 방사상유동을 사용하였으며 수리간극은 측정된 유체유동량을 삼승법칙으로부터 역산하여 구하였다.

4.4 암석절리의 역학적 간극

Bandis⁽¹⁰⁾ 등은 암석절리의 수직응력과 수직변위거동을 기술하기 위한 다음과 같은 쌍곡선모델을 제안하였다.

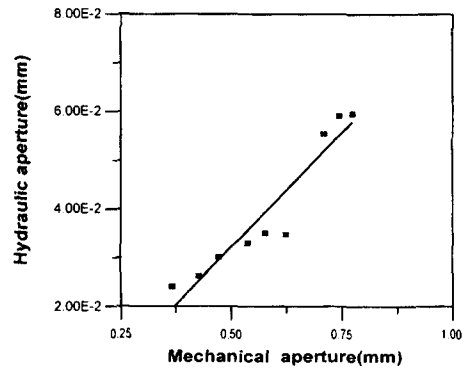
$$\Delta E_m^{(n)} = \frac{V_m \sigma_n}{K_{ni} V_m \sigma_n} \tag{5}$$

여기서, $\Delta E_m^{(n)}$ 은 절리 수직 변형, σ_n 은 수직응력, V_m 은 최대수직단합이고, K_{ni} 는 초기수직강성이다. 이 쌍곡선 모델은 맞물린 암석절리의 수직변형성을 상당히 정확하게 기술할 수 있다.

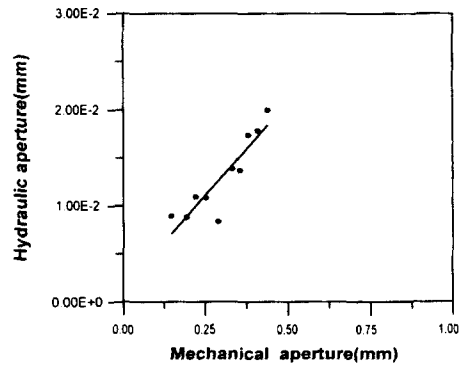
식 (5)에 사용되는 V_m 과 K_{ni} 를 구하기 위하여 무절합과 절리가 있는 시료에 대하여 수직응력에 따른 변형실험을 수행하여 화강암의 경우 각각 0.806 mm와 5.23 GPa/m를, 대리석의 경우 각각 0.833 mm와 4.66 GPa/m를 얻었다.

초기 역학적 간극($E_m^{(0)}$)을 고려하면 역학적 간극(E_m)은 다음 형태로 주어진다.

$$E_m = E_m^{(0)} - \Delta E_m^{(n)} \tag{6}$$



(a) Hwangdeung granite no. 18



(b) Yeosan marble no. 7

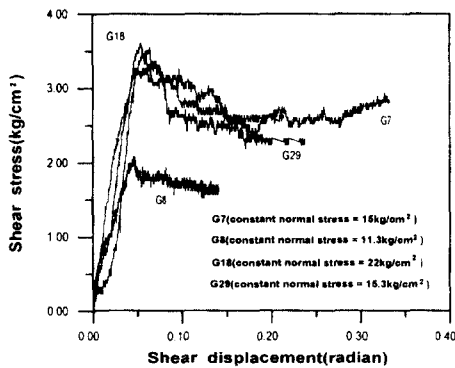
Fig. 5. Relationship between hydraulic and mechanical aperture under various normal stresses

수직응력의 변화에 의한 유체유동률로부터 구한 수리 간극과 역학적 간극사이의 관계를 Fig. 5에 도시하였다. 수직응력에 따른 닫힘이 발생함에 따라 역학적 간극과 수리 간극은 감소하며 이들 사이에는 선형관계가 있음을 알 수 있었다. 그러나 역학적 간극이 수리 간극보다 10배 정도 큰 것을 볼 수 있는데 이는 평행평판으로 가정할 수리 간극이 실제로 절리의 거칠기 형상에 의해 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

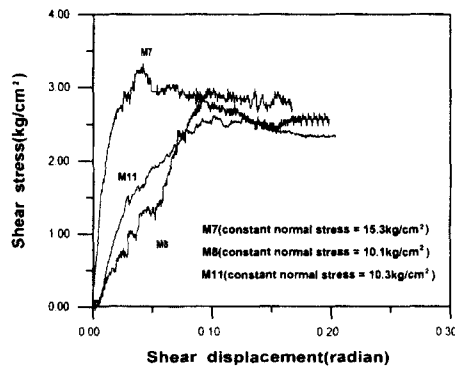
4.5 전단-유동 상호작용 시험결과

4.5.1 전단응력 대 전단변위곡선

전단응력-전단변위곡선이 Fig. 6에 제시되었다. 일반적으로 전단응력은 거의 선형으로서 상대적으로 작은 전단 변위에서 날카로운 상대치에 도달하며 대체로 전단변위가 증가함에 따라 잔류값으로 향하였다. 같은 수직응력하에서 화강암과 대리석의 최대전단강도의 차이는 거의 없었다.



(a) Hwangdeung granite no. 18



(b) Yeosan marble no. 7

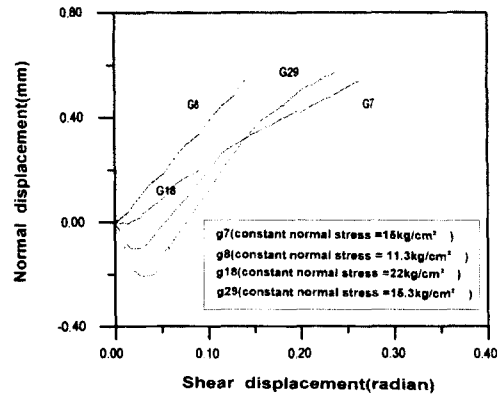
Fig. 6. Shear stress vs. shear displacement curves under constant normal stress

이는 재하된 수직응력의 범위가 5 ~ 25 kg/cm²으로 낮아 전단강도에 영향을 주는 요인으로 거칠기가 크게 작용하였기 때문이라고 생각된다.

4.5.2 체적팽창곡선

전단변위가 진행됨에 따라 발생하는 수직변위인 팽창곡선의 형태는 Fig. 7에 제시되었다. 그림에서 수직변위는 초기 간극을 고려하지 않은 값들이다. 몇 개의 시험편의 경우 초기 맞물림이 정확히 이루어지지 않아 전단변위의 초기부분에서 닫힘 현상이 발생한 후 점차로 증가하기 시작하였다. 결과에서 알 수 있듯이 전단변위에 따른 수직 팽창 증가율의 변화는 거의 없거나 그다지 크지 않았다. 기존 연구에 따르면 수직응력이 증가함에 따라 팽창의 정도는 감소하는 경향이 있으나 본 연구 결과는 어떤 특정한 경향을 보이지 않았다. 이는 재하된 수직응력이 작아 거칠기 영향이 크게 작용한 결과라 생각된다

4.5.3 단위수두 당 유동을 대 전단변위곡선



(a) Hwangdeung granite no. 18

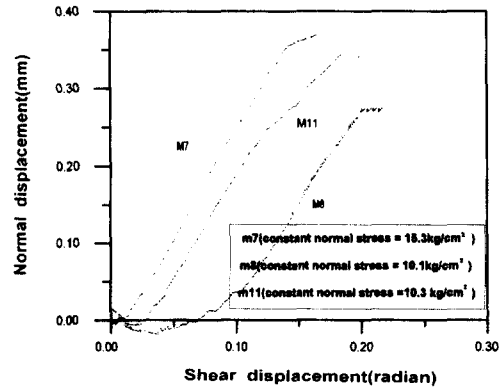
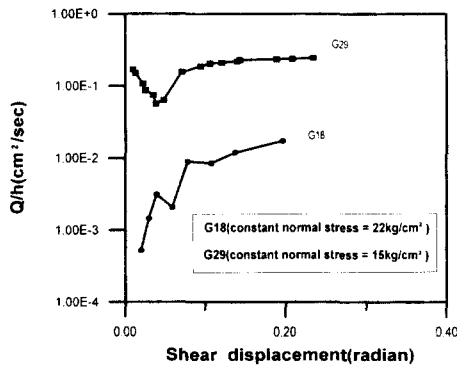
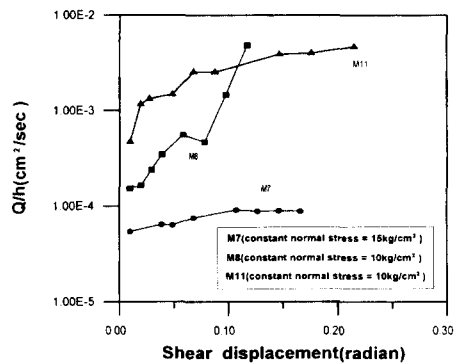


Fig. 7. Normal displacement vs. shear displacement curves under constant normal stress



(a) Hwangdeung granite no. 18



(b) Yeosan marble no. 7

Fig. 8. Flow rate per unit head vs. shear displacement curves under constant normal stress

단위수두 당 유동율의 변화는 대략 체적 팽창의 변화와 비슷한 경향을 따른다. 절리의 체적팽창이 일어남에 따라, 단위 수두당 유동율은 유동경로가 점차적으로 연결됨에 따라 급격하게 증가한다. 본 실험 결과는 Fig. 8와 같이 대략 5 ~ 50배 정도의 증가를 보였다.

4.5.4 수리 간극 대 역학적 간극

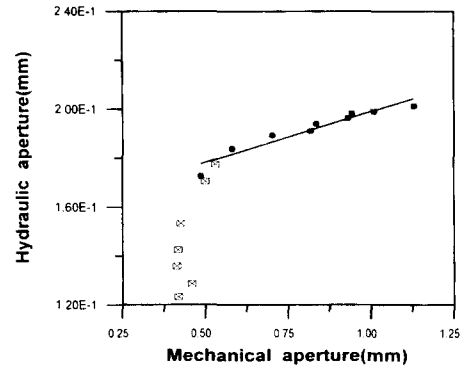
이 절에서는 전단동안 체적 팽창에 의한 절리 간극의 증가로 인한 역학적 간극을 고려하여 수리 간극과의 관계를 알아보았다.

체적 팽창에 의한 수직변위를 $\Delta E_m^{(s)}$ 이라하면 식 (6)은

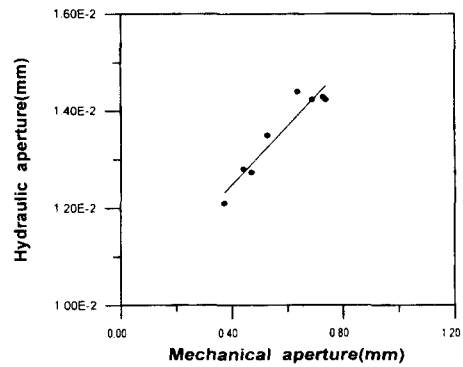
$$E_m = E_m^{(0)} - E_m^{(n)} + E_m^{(s)} \tag{7}$$

으로 변환된다.

Fig. 9은 전단-유동시험동안 암석절리의 역학적 간극과 수리 간극사이의 관계를 보여준다. 체적팽창이 일어남에 따라, 역학적 간극과 수리 간극이 증가하며 이들 역시 선형관계를 보였다.



(a) Hwangdeung granite no. 18



(b) Yeosan marble no. 7

Fig. 9. Relationship between hydraulic and mechanical aperture during shear-flow

화강암시료의 경우 전단-유동 시험에 사용된 시험편의 맞물림이 완전하지 않아 발생한 수직변위의 단합에 의해 역학적 간극과 수리 간극사이의 선형관계가 많이 어긋남을 보인다. 그러나 시료가 완전히 맞물린 이후의 전단-유동거동의 경우를 살펴보면(그림에서 회귀한 점들) 좋은 선형관계가 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 암석절리에 대한 전단-유동특성을 알아보기 위하여 수리-역학적 시험이 가능한 회전식 전단시험기를 제작하여 황동화강암과 여산대리석을 가지고 역학시험을 수행하고 이미 수행되어진 동종의 시료에 대한 직접 전단시험 결과와 비교하여 보았다.

암석절리에서의 유동에 관한 초기 간극을 얻기 위하여 레이저 변위계를 이용하여 거칠기를 측정하였으며 이 결과를 토대로 전단-유동시험 동안의 수리 간극과 역학적

관계에 대하여 알아보았다.

본 실험에 의한 연구결과는 다음과 같다.

1) 회전식 전단시험에 의하여 구해진 최대전단강도는 직접전단시험 결과의 10%에 해당하는 값을 보였다. 이는 비틀림 모멘트를 받는 전단면적 중심부근의 전단저항이 작아져서 되어 실제 작용하는 비틀림 모멘트에 대한 전단면적이 과대평가된 것에 기인한 결과로 판단된다.

2) 수직응력에 의한 절리의 닫힘에 따른 역학적 간극의 변화와 이에 따른 투수량의 변화는 대략 10배 내지 100배 범위에서 변화하였으며, 초기 간극의 측정과 절리 닫힘모델에 의해서 구해진 역학적 간극과 삼승법칙을 가정한 유동율로부터 구한 수리 간극사이에는 좋은 선형 관계가 있음을 알 수 있었다. 수리 간극과 역학적 간극사이의 차이는 평행평판 모델에 의해 예측된 거동과 실제 절리사이의 수리 거동과의 차이를 나타낸다.

3) 전단-유동 상호작용 시험에서 단위수두 당 유동률의 변화는 전단에 의한 절리의 체적팽창곡선과 유사한 경향을 보이며 최대전단강도에 도달할 때까지 급격한 증가를 보이다가 점차 완만한 증가를 보였다. 이러한 이유는 절리의 체적팽창이 일어남에 따라 유동경로가 점차적으로 연결되는 현상의 결과라 여겨진다.

4) 전단-유동 시험동안 암석절리의 역학적 간극과 수리 간극사이에 체적팽창이 일어남에 따라 역학적 간극이 증가하며 절리의 닫힘모델 및 체적팽창을 사용하여 구한 역학적 간극과 수리 간극사이에는 좋은 선형관계를 보였다.

사 사

본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소

과제 연구비에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

1. Bandis, S. C. & Makurat, A. & Vik, G., 1985, Predicted and measured hydraulic conductivity of rock joints, Proc. Int. Symp. on Fundamentals of Rock Joints, 269-280
2. Tsang, Y. W. & Witherspoon, P. A., 1981, Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress, J. Geophys. Res. 86, 9287-9298
3. Cook, N. G. W., 1988, Natural joints in rock : Hydraulic and seismic behavior and properties under normal stress, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 29, 198-223
4. Makurat, A & Barton, N. & Rad, N. S. & Bandis, S., 1992, Joint conductivity variation due to normal and shear deformation, Proc. Int. Symp. on Rock Joints, 535-540
5. Esaki, T. & Du, S. & Jiang, Y. & Wada, Y. & Mitani, Y., 1998, Relationship between mechanical and hydraulic apertures during shear-flow coupling test, 10th Japan Rock Mech. Symp., 91-96
6. Olsson, W. A. & Brown, S. R., 1993, Hydromechanical response of fracture undergoing compression and shear, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 30, 845-851
7. 윤용균, 1992, 하중조건과 절리의 거칠기가 암석의 투수성에 미치는 영향, 공학박사 학위논문, 서울대학교, 116p
8. 이상돈, 1996, 절리형상의 정량적 측정을 통한 각종 거칠기 파라미터의 비교분석 및 전단거동 해석, 공학박사 학위논문, 서울대학교, 196p
9. Iwai, K., 1976, Fundamental studies of fluid flow through a single fracture, Ph. D. thesis, Univ. of Calif., Berkeley, 208p
10. Bandis, S., Lumsden, A. C. and Barton, N., 1983, Fundamentals of rock joint deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 20, 249-268

천 대 성



1997년 서울대학교 공과대학 자원
공학과 공학사
1999년 서울대학교 공과대학 자원공
학과 공학석사

Tel : 02-880-7230

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

현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사
과정

이 회 석



1993년 서울대학교 공과대학 자원공
학과 공학사
1995년 서울대학교 공과대학 자원공
학과 공학석사
1999년 8월 서울대학교 공과대학
자원공학과 공학박사

Tel : 02-880-7234

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

현재 서울대학교 지구환경시스템 공학부 Post Doc.

이 정 인



1963년 서울대학교 공과대학 광산학
과, 공학사
1965년 서울대학교 대학원 광산학
과, 공학석사
1974년 일본 동북대학 대학원 자원
공학과, 공학박사

TEL : 02-880-7221, 8708

E-mail : cilee@plaza.snu.ac.kr

현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수
현재 서울대학교 에너지·자원신기술연구소 소장

이 회 근



1970년 서울대학교 공과대학 자원
공학과, 공학사
1973년 서울대학교 대학원 자원공
학과, 공학석사
1977년 일본 교오또대학(京都大學)
대학원 자원공학과, 공학박
사

Tel : 02-880-7222

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

현재 서울대학교 지구환경시스템 공학부 교수
