

일정 수직강성 조건하 화강암 인장절리의 전단거동 특성

박병기¹⁾, 이창수²⁾, 전석원³⁾*

Shear Behavior of Rough Granite Joints Under CNS Conditions

Byung-Ki Park, Chang-Soo Lee and Seokwon Jeon

Abstract Stability and mechanical deformation behavior of rock masses are highly dependent on the mechanical characteristics of contained discontinuities. Therefore, mechanical characteristics of the discontinuities should be considered in the design of tunnel and underground structures. In this study, direct shear tests for rough granite joints were carried out under constant normal stiffness conditions. Effects of initial normal stress, shear velocity, and surface roughness on the characteristics of shear strength and deformation behaviors were examined. Results of shear testing under constant normal stiffness conditions reveal that shear behaviors could be classified into two categories, based on the amount of decrease in shear stress at the first peak shear stress. With initial normal stiffness increasing, it turned out that shear displacement at peak stress and the first peak shear stress increased, however friction angle and friction coefficient showed decrease. In case of shear stiffness and average friction coefficient, it turned out that they are not dependent on the initial normal stress. Minor effects of shear velocity on rough joints were observed in several shear quantities. However, the effects of shear velocity were insignificant regardless of the normal stress increase. Change of shear strength and deformation characteristics on joint roughness were examined, however, it turned out that the variations were attributed to deviation of shear test specimens.

Key words Constant normal stiffness (CNS), Shear behavior, Rough granite joints, Shear velocity, Roughness

초 록 암반의 역학적 변형거동과 안정성은 불연속면의 역학적 특성에 크게 좌우되기 때문에 터널이나 암반 구조물의 안정성 해석 및 설계를 위해서는 반드시 암반 불연속면의 역학적 성질을 규명할 필요가 있다. 지하 암반 절리면의 실제 거동을 실내에서 정확히 모사하기 위해 본 연구에서는 일련의 일정 수직강성 조건하 직접 전단시험을 수행하여 초기 수직응력, 전단속도 그리고 절리면의 거칠기가 거친 화강암 절리면의 전단거동특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 일정 수직강성 조건에서 거친 암석절리에 대한 시험 결과 전단거동은 일반적으로 1차 정점 전단응력에서의 전단응력 감소 정도에 따라 크게 두 가지 형태의 전단거동을 보이는 것으로 구분되었다. 초기 수직응력이 증가함에 따라 정점 전단변위와 1차 정점 전단응력은 증가하지만 마찰각과 정점 마찰계수의 경우 감소하는 것으로 나타났으며, 전단강성과 평균마찰계수의 경우는 초기 수직응력에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 거친 절리에 대한 전단속도의 영향은 초기 수직응력이 낮은 경우 일부 전단변수들에서 약간 관찰되었으나 수직응력이 증가함에 따라 대부분의 전단시험 결과변수들에서 전단속도의 영향은 미미하였다. 거칠기에 따른 전단거동의 변화를 분석하였으나 명확한 관련성이 나타나는 경우보다 시료간의 편차가 심한 경우가 많았다.

핵심어 일정 수직강성, 전단거동, 거친 화강암 절리, 전단속도, 거칠기

1. 서 론

단층, 절리, 균열 등의 불연속면을 포함하고 있는 현지 암반의 역학적 변형거동과 안정성은 이러한 불연속면의 분포특성과 역학적 특성에 크게 좌우된다. 따라서 터널이나 암반 구조물의 안정성 해석 및 설계를 위해서는 반드시 암반 불연속면의 역학적 성질을 규명할 필요가 있다.

¹⁾ 산업자원부 에너지자원개발본부 광물자원팀 사무관

²⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

³⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수

* 교신저자 : sjeon@snu.ac.kr

접수일 : 2007년 4월 17일

심사 완료일 : 2007년 5월 29일

일반적으로 직접전단시험에서 암석 절리면의 전단강도를 측정하는 방법으로는 전단변위가 발생하는 동안 수직하중을 일정하게 유지하는 일정 수직하중(Constant Normal Load, CNL) 조건하의 직접 전단시험법과 전단변위에 의해 발생하는 수직팽창에 따라 수직하중을 일정하게 증가시키는 일정 수직강성(Constant Normal Stiffness, CNS) 조건하의 직접 전단시험법이 있다.

지하 암반 절리에서 거친 절리면의 경우, 전단변위 발생 시 불연속면이 거칠기를 타고 올라가 팽창이 발생하고, 이때 주위 암반의 강성이 높아 변위가 구속될 경우에는 전단이 진행되는 동안 수직응력이 증가하게 된다. 기존의 일정 수직하중조건 전단시험은 수직응력이 증가하는 현장조건을 모사할 수 없어 정확한 전단거동을 파악할 수 없다.

이러한 수직팽창-수직응력증가의 상호작용이 일어나는 지하 암반 절리면의 실제 거동을 실내에서 모사하기 위해서는 일정 수직강성 경계 조건에서 실험이 필요하다. 그러나 일정 수직강성 조건에서 암석절리면의 전단거동에 관한 연구는 일정 수직강성을 모사하기 위한 전단시험장치가 용이하지 않아 아직도 그 연구는 많지 않다. 초기의 일정 수직강성 조건의 직접 전단시험 장치에서는 스프링이 수직하중 가압판과 암석절리 시편 사이에 삽입되어 일정 수직강성 효과를 모사하였으나 주변 암반의 물성 변화에 따른 스프링 교체가 어렵고, 수직강성이 너무 강하면 절리면이 쉽게 손상되었다(Johnston et al., 1987; Indraratna et al., 1998). 최근 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 피드백이 가능한 서보밸브 제어 시스템을 갖춘 시험기를 이용하여 일정 수직강성 조건을 모사하고 있으나, 아직도 실제 암석절리를 이용한 연구는 거의 없는 실정이다(Mouchaorab & Benmokrane, 1994; Seidel & Haberfield, 2002; Jiang et al., 2004).

이에 본 연구에서는 일정 수직강성 조건하에서 초기 수직응력, 전단속도, 거칠기에 따른 화강암 인장 절리면의 거동특성을 알아보고자 직접 전단시험을 수행하였다. 초기 수직응력의 경우 0.2, 0.5, 1.0 MPa의 세 조건으로, 전단속도는 0.1, 1, 10, 100 mm/min의 네 단계로 변화시켰으며, 수직강성은 1 MPa/mm로 동일하게 적용하여 총 57회의 시험을 수행하였다.

2. 일정 수직강성 조건에서의 전단거동

2.1 경계조건에 따른 절리면 전단거동

일반적으로 암반 절리면의 전단거동을 측정하기 위한 시험은 크게 일정 수직하중 조건과 일정 수직강성 조건

의 시험으로 구분된다.

일정 수직하중 조건은 전단변위가 발생하는 동안 수직응력이 일정하게 유지되는 상태로서 암반사면에서 블록이 미끄러질 때가 그 대표적인 경우라고 할 수 있다. 일정 수직강성 조건은 전단변위에 따라 수직응력이 변하는 상태로서 암반 내에 구속된 절리면에서 전단변위가 발생할 때 절리면의 거칠기로 인해 블록이 팽창되게 되고, 이 때 주위 암반의 구속효과에 의한 암반의 강성과 팽창량의 곱에 비례하여 수직응력이 증가되는 경우에 해당한다. 이러한 일정 수직강성 조건은 지하 암반 내 공동 주위에서 평행한 절리 사이의 암석 블록이 거동하는 경우나 콘크리트 플러그, 그라우트된 락볼트 등의 거동이 대표적이다.

일정 수직하중 조건의 직접 전단시험은 일정 수직강성 조건에 비해 구현 요소가 적고 시험방법이 비교적 간단하여 암반 사면의 거동 해석뿐만 아니라 암반 내 절리의 거동을 해석하는 시험법으로도 널리 적용되어 왔다. 그러나 지하 암반 절리의 전단거동을 보다 실제와 가깝게 고려하기 위해서는 주변 암반의 강성요소를 통해 절리면과 주위 암반의 상호작용을 고려하여야 한다. 실험실 시험에서 일정 수직강성 조건은 일정한 강성을 가지는 스프링을 시료와 하중기 사이에 삽입하거나, 피드백이 가능한 서보 제어 시험기를 이용하여 구현 가능하다.

2.2 일정 수직강성 조건하 전단시험 사례

Johnston et al.(1987)은 암반 내에 관입된 콘크리트 파일의 거동을 모사하기 위하여 규칙적인 톱니 모양의 암석-콘크리트 시료를 이용한 일정 수직강성 실험을 수행하였다. 실험을 통해 일정 수직강성에서의 콘크리트-암석의 전단거동이 전단변위-전단응력 곡선상에서 크게 4단계로 구분된다고 하였다(Fig. 1).

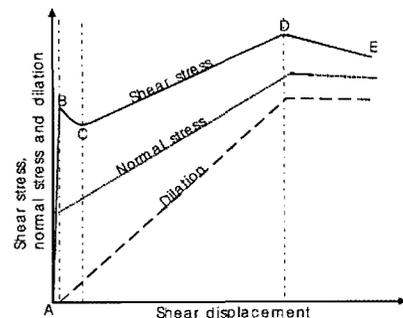


Fig. 1. Idealized CNS test results for artificial saw-tooth (after Johnston et al., 1987)

Ohnishi & Dharmaratne(1990)는 경계조건에 따른 절리면의 전단특성을 파악하기 위해서 JRC가 각각 8, 10, 12인 암석절리로부터 복제한 인공절리에 대해서 일정 수직하중과 일정 수직강성 조건에 대하여 실험을 수행하였다. 각 조건에서의 실험을 비교한 결과 전단응력은 일정 수직강성 조건에서 더 크게 나타났고, 수직변위는 일정 수직하중 조건의 경우가 더 크게 나타났다. 그리고 일정 수직하중 조건에서 구한 파괴 포락선의 경로와 일정 수직강성 조건에서의 응력경로가 거의 유사함을 관찰하였다. 그러나 Van Sint Jan(1990)은 자연 절리면 복제 시료를 이용한 일정 수직강성 시험에서 구한 응력 경로가 일정 수직하중 시험에서 구한 응력 경로보다 작게 나타남을 보고하였다. Skinas et al.(1990)은 시멘트 모르타르 시료를 이용하여 일정 수직강성 시험을 수행한 결과, 수직강성이 클수록 동일한 전단변위에서 수직응력과 전단응력이 크게 나타나고 수직팽창은 억제된다고 하였다.

Moucharab & Benmokrane(1994)은 시멘트 모르타르로 규칙적인 삼각형 및 사각형 절리를 제작하고 일정 수직강성 시험을 실시하였다. 그들은 틈니의 경사각에 대한 영향을 분석하여 경사각이 증가함에 따라 15~25°까지는 정점 전단응력, 최대 수직응력 및 최대 수직변위가 증가하다가 그 이후에는 감소하는 경향을 보이며 경사각이 40°를 넘어서면 대체로 일정해지는 경향을 보인다고 하였다.

Indraratna et al.(1998)은 규칙적인 틈니 모양의 석고 시료를 이용하여 일정 수직강성 시험과 일정 수직하중 시험 결과를 비교하였다. 시험 결과 일정 수직하중 조건의 수직팽창은 일정 수직강성 조건의 수직팽창보다 크게 나타났으며, 수직응력-전단응력 관계에서 일정 수직하중 조건의 파괴포락선은 이중 선형적인 거동을 보이는 반면에 일정 수직강성 조건의 응력변화는 선형에 가까운 응력경로를 보이는 것으로 나타났다. 이들은 시험 결과에 기초하여 일정 수직강성 조건에 대해 Barton (1973)의 식을 수정한 식을 제안하였다.

Seidel & Haberfield(2002)는 균질하고 등방성인 유사 암석 재료를 이용하여 암석-콘크리트 절리면의 일정 수직강성 조건 전단시험을 수행하였다. 시료의 형태는 규칙적인 삼각형과 자연 절리면 형상에 가까운 프랙탈 형태이다. 삼각형 시료의 거동은 Patton(1966)의 식으로 예측할 수 있었으며, 거칠각의 크기가 커질수록 전단변위-전단응력 곡선이 취성 거동을 보임을 관찰하였다. 또한 프랙탈 형태의 절리면 거동은 같은 평균 거칠각의 삼각형 시료에 비하여 낮은 전단응력 값을 보이고 있으며, 보다 연성적인 거동을 보였다.

3. 거친 절리 시료에 대한 일정 수직강성시험

3.1 CNS 직접전단시험기

본 연구에서 사용된 서보제어 직접 전단 시험기는 서울대학교 암반공학연구실에서 설계하고 (주)연엔지니어링에서 제작한 것으로 일정 수직하중(constant normal load, CNL) 및 일정 수직강성(constant normal stiffness, CNS) 조건에서의 전단시험이 가능하다. 전단 시험기는 크게 시험기 본체(main frame), 유압 펌프(hydraulic power unit), 신호 증폭기(signal amplifier), A/D 변환기(Analog-Digital converter), 그리고 시험기를 제어하는 프로그램(control program) 등으로 구성되어 있다. 직접 전단 시험기의 전체적인 모습이 Fig. 2에 제시되어 있다.

3.2 인장절리시료의 거칠기 특성

본 연구에 이용된 암석 시료는 포천화강암이며, 대상 암석시료의 기본적인 물리적, 역학적 특성은 박과 전(2006)에 제시되어있다. 일정 수직강성 전단시험에 사용된 시료는 인공적인 균열을 발생시켜 거친 절리를 갖도록 하였으며, 상하부 블록의 크기는 동일하게 149×118×65 mm으로 제작하였다.

인장균열 절리면의 표면 거칠기 정보를 수치적으로 측정하고 이를 정량화하기 위해서 배와 이(2002)가 제작한 3차원 레이저 거칠기 측정기를 이용하였다. 본 연구에서는 Tse & Cruden(1979), Lam & Johnston(1985) 등에 의해 제시된 절리면의 기술기와 관련된 파라미터인 절리면의 평균 거칠각(micro average inclination

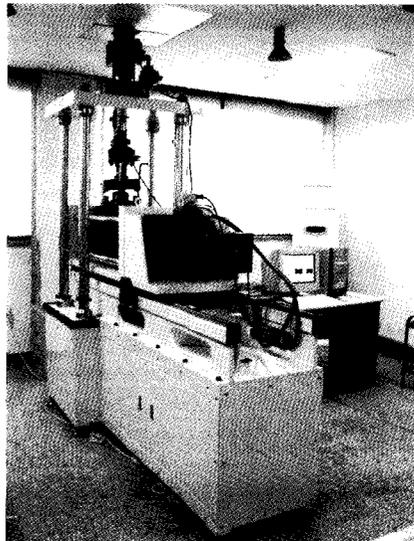


Fig. 2. A general view of direct shear test machine

angle, i_{ave}), 절리면 기울기의 평방평균값(root mean square of the first derivative of the profile, Z_2), 거칠기 형상지수(roughness profile index, R_p) 등과 절리면의 돌기 진폭에 관련된 파라미터인 절리면 돌기 평균 높이에 대한 표준편차(standard deviation of height, SDH) 등 총 4개의 파라미터를 산정하였다.

가로 및 세로 방향 모두 1 mm 간격으로 측정된 데이터를 거칠기 계산 프로그램에 입력하여 거칠기 파라미터를 결정하였으며 그 값들의 평균값에 대한 파라미터들의 범위와 통계치들을 Table 1에 정리하였다.

포천화강암 시료의 평균 거칠각의 경우 $15.62^\circ \sim 17.99^\circ$ 의 범위로 나타나 인공적으로 생성된 인장 절리면이 상당히 거칠다는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 일정 수직강성 조건에서 거친 암석절리의 전단거동 특성

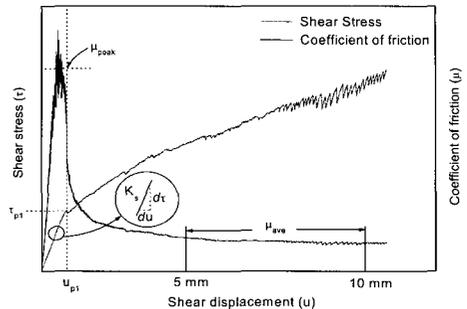
거친 절리면의 경우 각 시료의 거칠기 특성이 모두 다르므로 그에 따라 전단거동 특성도 크게 달라진다. 각 시료마다의 편차가 존재하기 때문에 똑같은 조건에서 실험한다는 것은 불가능하여 실험결과를 분석함에 있어 특정 시료간의 거동을 직접적으로 비교하는 것은 큰 의미가 없어 보이므로 동일한 외부 조건하에서 여러 번의 시험을 통해 얻어진 평균적인 데이터를 비교하였다.

초기에 설정되는 외부 조건으로 초기 수직응력은 0.2, 0.5, 1.0 MPa의 세 가지 조건으로, 전단속도는 0.1, 1, 10, 100 mm/min의 4단계로 하였다. 시험 횟수는 전단속도가 0.1 mm/min인 경우 4회이고 나머지 전단속도에 대해서는 5회씩으로 총 57회 수행하였다. 모든 시험에 대해 수직강성은 1 MPa/mm로 통일하였다.

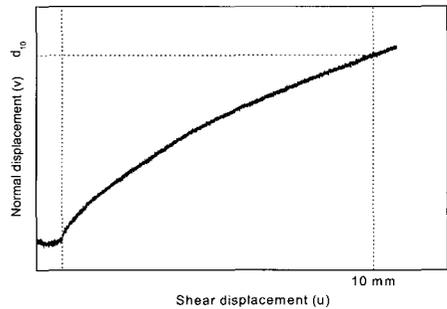
3.3.1 전단상수 기호규정

시험 데이터의 해석을 위한 각종 변수들은 Fig. 3에 도시된 방법에 의해 결정되었다. 1차 정점 전단응력(first peak shear stress, τ_{p1})은 전단응력 대 전단변위 그래프에서 초기에 전단응력이 탄성적으로 증가하다가 감소하는 순간, 혹은 그 기울기가 꺾이는 지점에서의

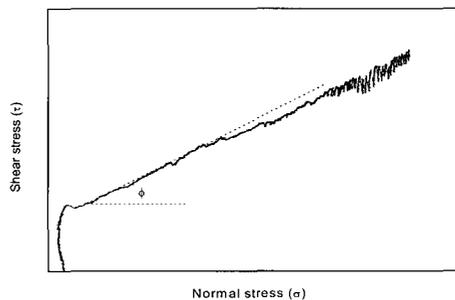
전단응력에 해당된다. 또한 1차 정점 전단응력은 수직변위-전단변위 곡선에서 초기에 압착되었던 절리면이 수직팽창하기 시작하는 순간으로 볼 수 있다. 그리고 이때의 전단변위와 수직응력을 각각 1차 정점 전단변위(shear displacement at first peak shear stress, u_{p1})와 1차 정점 수직응력(normal stress at first peak shear stress, σ_{np1})으로 결정하였다. 전단강성(shear stiffness, K_s)은 전단응력 대 전단변위 그래프에서 초기에 전단응력이 탄성적으로 증가하다가 감소하는 순간, 혹은 그 기울기가 꺾이는 지점에서의 전단응력 대 전단변위 그래프에서 초기에 전단응력이 탄성적으로 증가하다가 감소하는 순간, 혹은 그 기울기가 꺾이는 지점에서의



- (a) τ_{p1} : First peak shear stress (MPa)
- u_{p1} : Shear displacement at first peak shear stress (mm)
- σ_{np1} : Normal stress at first peak shear stress (MPa)
- K_s : Shear stiffness (MPa/mm)
- μ_{peak} : Coefficient of friction at first peak shear stress
- μ_{ave} : Average coefficient of friction in the range between 5 and 10 mm shear displacement



- (b) d_{10} : Dilation at 10 mm shear displacement (mm)



- (c) ϕ : Friction angle ($^\circ$)

Table 1. Summary of roughness parameters for test specimens.gc

	i_{ave} ($^\circ$)	Z_2	R_p	SDH (mm)
Min	15.62	0.37	1.063	1.17
Max	17.99	0.44	1.083	3.02
Mean	17.24	0.42	1.076	1.83
SD*	0.51	0.01	0.005	0.47

*SD: standard deviation

Fig. 3. Notation for analysis of direct shear test results

K_s)은 1차 정점 전단응력에 도달하기 전 전단변위와 전단응력의 비가 거의 일정한 선형적인 구간에서 구한 접선 기울기이다. 마찰계수(coefficient of friction)는 전단응력과 수직응력의 비로 정의되는데, 본 연구에서는 1차 정점 전단응력에서의 마찰계수인 정점 마찰계수(μ_{peak})와 전단변위 5~10 mm 구간에서의 평균값인 평균 마찰계수(μ_{ave})를 해석에 이용하였다(Fig. 3(a)).

Fig. 3(b)의 전단변위-수직변위 곡선에서는 전단변위가 10 mm일 때의 수직변위 d_{10} 만을 구하였다. 일반적으로 일정 수직하중 조건에서의 전단거동을 묘사하는 경우 팽창각 성분이 최대 전단강도를 기술하는데 유용한 파라미터가 될 수 있으나, 본 연구에서는 1차 정점 전단응력에서 돌출부의 파괴가 발생한 경우가 상당수 있었고 그에 따라 수직팽창이 순간적으로 튀는 경우가 많아 팽창각을 측정할 수 없었기 때문에 팽창각은 결정하지 않았다.

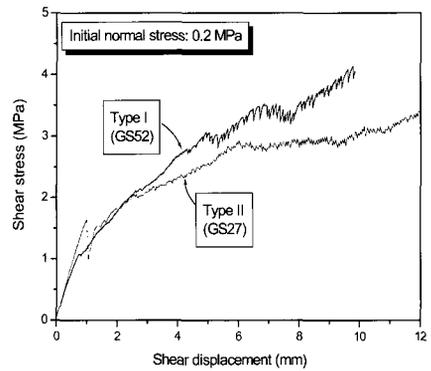
Fig. 3(c)에서 마찰각(friction angle, ϕ)은 수직응력 대 전단응력 그래프에서 선형 구간에서의 기울기로 결정하였는데, 수직응력이 큰 구간에서는 대부분 1차 거칠기의 전단(shearing)이 발생하거나 stick-slip 같은 불규칙한 거동을 보이므로 최대 수직응력에 비해 50% 이내의 수직응력 구간에서 결정되었다.

3.3.2 CNS 직접전단시험 결과

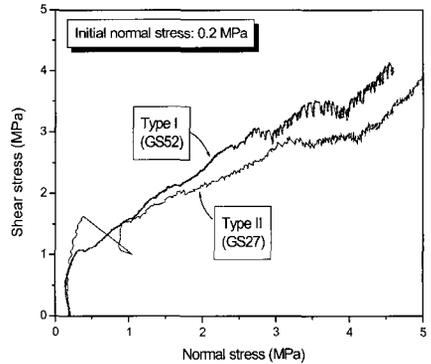
일정 수직강성 조건에서 거친 암석절리에 대한 시험 결과 전단거동은 1차 정점 전단응력에서의 전단응력 감소 정도에 따라 크게 두 가지 형태로 구분되었다. 첫 번째 타입(타입 I)의 거동은 1차 정점 전단응력에서 전단응력의 감소가 없거나 미미한 경우인데, 이 경우 1차 정점 전단응력과 그때의 1차 정점 전단변위가 작은 편이다. 그리고 1차 정점 전단응력 이후 수직응력의 증가에 따른 전단응력의 증가 양상이 대체로 선형적이며 수직변위-전단변위 곡선 역시 부드럽게 증가하는 경향을 보인다. 타입 I 시료의 마찰각은 대략 40° 내외의 범위를 나타내었다.

두 번째 타입(타입 II)의 거동은 1차 정점 전단응력에서 돌출부의 현저한 파괴(shearing)로 인해 전단응력이 순간적으로 급격히 떨어지는 경우이다. 타입 II의 경우 1차 정점 전단변위 이전에 돌출부들이 과도한 전단하중을 받다가 갑작스런 거칠기 파괴가 발생하여 응력감소가 일어나게 되므로 대체로 1차 정점 전단응력과 1차 정점 전단변위가 큰 경향을 보인다. 이 경우 1차 정점 전단응력에서 전단응력과 수직응력 모두 현저한 감소가 일어났고 이후의 전단응력 대 수직응력 곡선이 다소 불규칙적이고 선형성이 부족한 경우가 많았으며 평균적으로 약 35° 정도의 마찰각을 나타내어 타입 I에 비

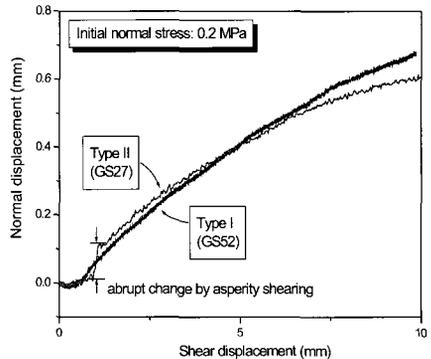
해 대체로 마찰각이 작게 산정되었다. 또한 돌출부의 갑작스런 파괴로 인해 수직변위-전단변위 곡선에서도 순간적인 변화가 발생되었다. 이러한 타입 II의 거동은 초기 수직응력 수준이 높을수록 나타나는 빈도가 증가하였다. 이상에서 언급한 일정 수직강성 조건하에서의 거친 암석 절리시료에 대한 두 가지 대표적인 전단거동을 Fig. 4에 제시하였다.



(a) Shear stress vs. shear displacement



(b) Shear stress vs. normal stress



(c) Normal displacement vs. shear displacement

Fig. 4. Two types of general shear behavior of rough rock joint under CNS conditions

일정 수직강성 조건에서 1차 정점 전단응력은 초기에 전단응력이 탄성적으로 증가하다가 감소하는 순간이며, 압착에 의해 수축되었던 절리면의 수직변위가 회복되면서 수직팽창이 일어나기 시작하는 지점에 해당하므로 수직응력이 초기 수직응력과 거의 비슷하게 유지된 상태이다. 따라서 이 지점까지의 거동은 일정 수직하중 하에서의 전단거동과 비슷하므로 1차 정점 전단응력과 이때의 수직응력을 도시하면 최대 마찰각을 구할 수 있다. Fig. 5는 전체 시료에 대해 1차 정점 전단응력과 수직응력을 도시하고 선형회귀를 통해 최대 마찰각을 구한 결과를 보여준다. 선형 회귀식의 기울기인 최대 마찰각은 61.75°로 나타났고, y축 절편인 겹보기 점착력은 0.51 MPa이다.

3.4 초기 수직응력의 영향

초기 수직응력은 0.2, 0.5, 1.0 MPa의 세 단계로 구분되었으며, 초기 수직응력의 변화에 따른 영향을 전단강성, 1차 정점 전단응력, 마찰계수, 마찰각 등의 주요 전단변수에 대해서 알아보았다.

3.4.1 1차 정점 전단변위와 전단강성

일반적으로 수직응력에 따른 절리의 거동은 일정 전단강성 모델과 일정 정점 전단변위 모델로 표현할 수 있다(Goodman, 1976). 일정 정점 전단변위 모델은 시험기의 강성이 매우 크고 절리면을 제외한 부분이 완전한 강체 운동을 하는 경우에 적합하며, 그에 비해 일정 전단강성 모델은 시험기의 강성이 그다지 크지 않고 시험체의 변형이 어느 정도 허용되는 경우에 타당하게 적용될 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7에 초기 수직응력에 따른 전단강성과 1차 정점 전단변위(u_{p1})를 박스

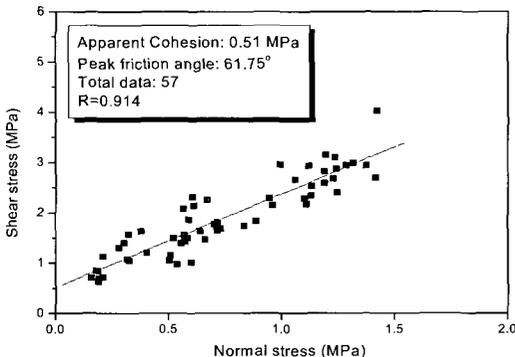


Fig. 5. Determination of peak friction angle for whole sample

차트 형태로 제시하였으며, 각각의 의미가 함께 표시되어 있다. 일정 수직강성 조건에서의 실험은 초기에 가해진 수직응력이 고정되어 있지 않고 수직팽창에 따라 변하게 되지만 1차 정점 전단응력의 경우 거의 수직팽창이 일어나지 않은 상태에서 결정되어 1차 정점 전단응력에서의 수직응력이 초기 수직응력과 큰 차이를 보이지 않게 되므로 초기 수직응력에 대하여 값을 도시하였다. 본 실험에서의 결과를 살펴보면 전단강성이 초기 수직응력에 큰 영향을 받지 않는 반면 (Fig. 6), 정점 전단변위는 수직응력이 증가함에 따라 확연히 증가하는 경향을 보이고 있다(Fig. 7). 이를 통해 실험에 이용된 직접 전단시험기의 강성이 그다지 크지 않음을 유추할 수 있으며, 이는 본 전단시험기를 사용한 이전 연구자(임홍래, 2004; 권종찬, 2005)들의 결과와도 일치한다.

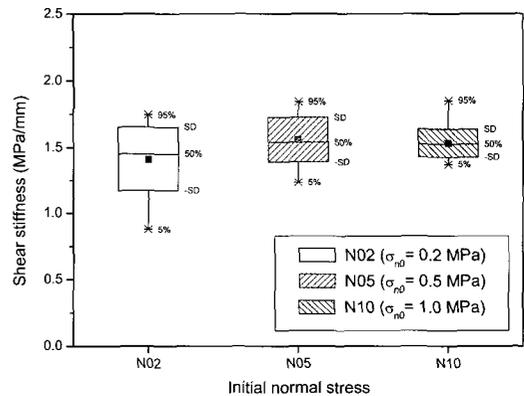


Fig. 6. Effect of initial normal stress on shear stiffness

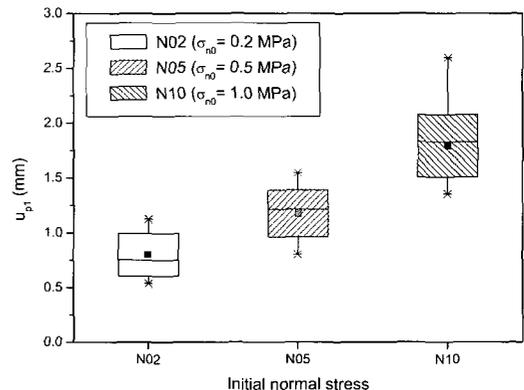


Fig. 7. Effect of initial normal stress on shear displacement at 1st peak shear stress

3.4.2 1차 정점 전단응력

초기 수직응력이 증가함에 따라 1차 정점 전단응력도 증가하며(Fig. 8), Fig. 9에서 나타나듯이 1차 정점 전단응력에서의 정점 전단변위 또한 증가하는 것으로 나타났다. 이는 연구에 사용된 시험기가 강성이 그리 크지 않으므로 일정 전단강성 모델로 표현될 수 있고, 따라서 1차 정점 전단응력이 커질수록 전단변위가 증가하게 됨을 알 수 있다.

3.4.3 마찰각

초기 수직응력이 0.2, 0.5, 1.0 MPa일 때 마찰각의 평균은 각각 40.4°, 39.1°, 36.5°로 나타나 초기 수직응력이 증가함에 따라 마찰각이 감소하는 경향을 보였다(Fig. 10). 일정 수직강성 조건에서는 일반적으로 1차 정점 전단응력에서 2차 거칠기의 국부적 파괴로 인해 전

단응력이 약간 감소하였다가 절리면의 굴곡을 따라서 수직팽창이 발생되게 되고, 그 결과 수직응력과 전단응력이 증가하게 된다. 한편 초기 수직응력이 높은 경우에는 낮은 경우에 비해 1차 정점 전단응력에서의 돌출부 파괴가 더 많이 발생되므로 절리면이 상대적으로 편평해지는 효과가 나타나게 되고 이로 인해 전단응력-수직응력 곡선에서의 기울기인 마찰각이 감소하게 된다. 따라서 본 실험의 결과도 이러한 현상을 반영하는 것으로 판단되며, 권종찬(2005)의 연구에서 언급되었듯이 초기 수직응력이 증가함에 따라 발생하는 응력 연화 현상과 정도의 차이는 있지만 일맥상통한다고 볼 수 있다.

3.4.4 마찰계수

1차 정점 전단응력에서의 마찰계수를 정점 마찰계수라 하고, 전단변위 5~10 mm 구간에서의 마찰계수를 평균하여 구한 마찰계수를 평균 마찰계수라 정의하였다. 평균 마찰계수를 구함에 있어 전단변위 구간을 5~10 mm로 결정한 이유는 전단변위가 대략 5 mm에서부터 비교적 일정한 잔류값으로 수렴하는 결과를 보였으며, 또한 전단속도가 0.1 mm/min인 실험에서는 시간적 제약으로 인해 전단변위를 10 mm 정도로 하였기 때문이다. 초기 수직응력에 따른 정점 마찰계수와 평균 마찰계수를 Fig. 11에 나타내었다. 정점 마찰계수의 경우 초기 수직응력이 증가함에 따라 감소하였는데, 이로부터 수직응력이 낮을수록 1차 정점 전단응력에 도달하기 위해 상대적으로 더 많은 비율의 전단응력의 증가가 필요함을 유추할 수 있다. 평균 마찰계수의 경우에는 초기 수직응력에 관계없이 비교적 일정한 값을 나타내고 있는데, 이는 일정 수직하중 조건에서 2차 거칠기가 거의 파괴된 이후의 잔류 전단저동과 비슷한 개념으로 이해된다.

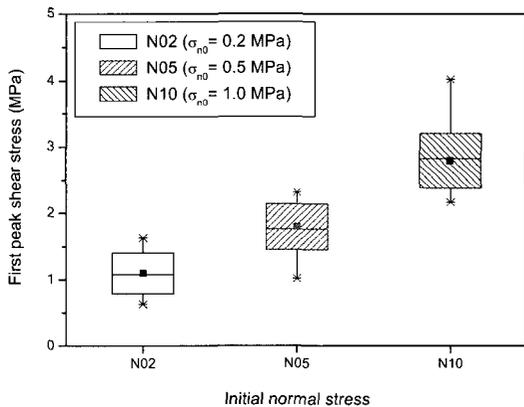


Fig. 8. Effect of initial normal stress on first peak shear stress

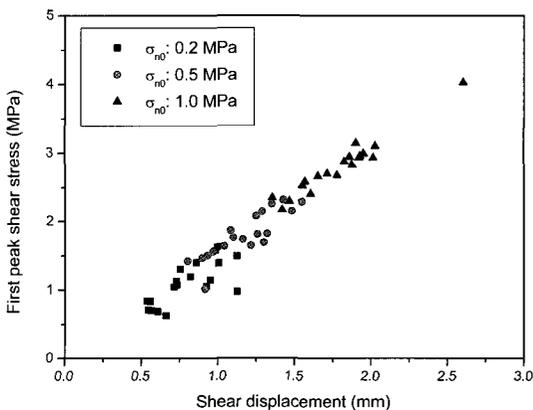


Fig. 9. Relationship between first peak shear stress and shear displacement

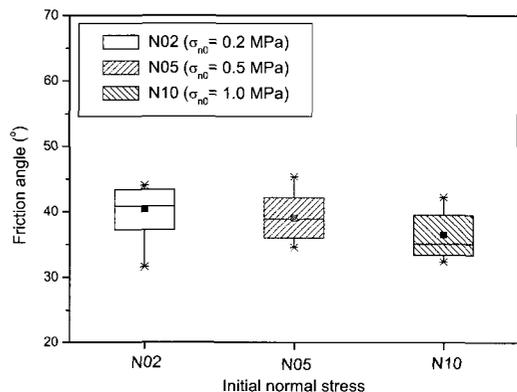


Fig. 10. Effect of initial normal stress on friction angle

3.4.5 팽창량

초기 수직응력에 따른 전단변위 10 mm에서의 팽창량이 Fig. 12에 제시되어 있다. 일반적으로 절리면의 팽창 거동은 수직응력에 민감한 것으로 보고되고 있으나(Bandis et al., 1983), 실험 결과에 의하면 가해진 초기 수직응력 수준에는 무관한 것으로 보인다. 이

는 시험조건에 따른 영향으로써, 일정 수직강성 조건에서 전단변위에 따른 수직팽창으로 인해 그에 해당하는 수직응력의 증가가 일어나게 되므로 시험구간에서 수직응력이 계속 커지게 된다. 따라서 초기 가해진 수직응력은 큰 의미가 없어지게 되고, 이 경우 초기 수직응력보다는 거칠기 특성, 특히 1차 정점 전단응력 이후의 1차 거칠기 특성이 더 중요한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

3.5 전단속도의 영향

전단속도는 0.1, 1, 10, 100 mm/min의 네 단계로 구분되었으며, 전단속도의 변화에 따른 영향을 1차 정점 전단응력, 마찰각, 마찰계수 등의 전단변수에 대해서 알아보려고 하였다.

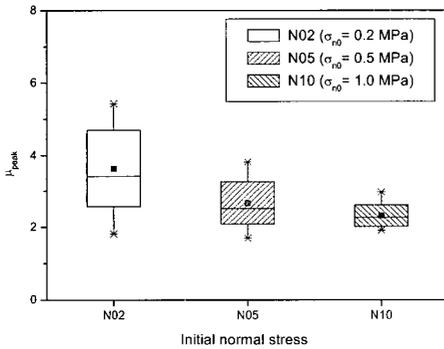
3.5.1 1차 정점 전단응력

1차 정점 전단응력은 초기 수직응력 수준에 큰 영향을 받는 인자이므로 수직응력에 관계없이 전단속도에 대해서만 도시하였을 경우 그 경향성을 판단하기가 어렵게 된다. 따라서 각 초기 수직응력별로 1차 정점 전단응력과 전단속도를 도시하여 Fig. 13에 나타내었다. 초기 수직응력이 낮은 경우(0.2 MPa), 전단속도가 10에서 100 mm/min으로 증가할 때 1차 정점 전단응력이 약간 감소하는 현상을 보이나, 수직응력이 높아지게 되면 이런 현상이 나타나지 않거나 오히려 증가하는 경향을 보이기도 한다. 이는 수직응력이 낮아질수록 전단 초기에 거칠기의 파괴 없이 순수 미끄러짐만 발생할 가능성이 높아지게 되므로, 박병기 외(2007)가 보고한 평면 절리에 대한 시험에서와 비슷하게 10 mm/min의 전단속도 이후에서 속도의존적인 경향이 나타나게 되는 것으로 보인다.

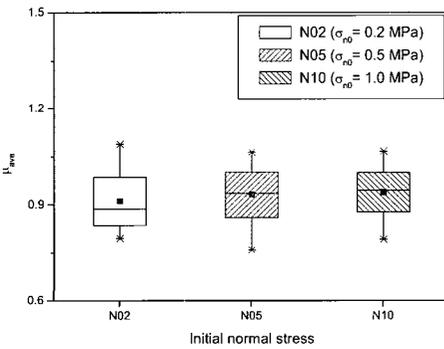
반면 높은 수직응력을 받고 있는 거친 절리면의 경우, 절리면의 마찰특성보다는 절리면 압축강도와 같은 매질의 특성에 더 큰 영향을 받게 된다. 따라서 이러한 경우 전단속도의 증가가 일축 압축하중 하에서의 하중속도의 증가 효과와 비슷한 영향을 미치게 될 것으로 판단된다.

3.5.2 마찰각

전체 결과를 도시한 Fig. 14에서 나타나듯이 마찰각은 시험한 전단속도의 구간에서 전단속도의 변화에 특별한 영향을 받지 않는 것으로 보인다. 수직응력별로 구분하여 도시하여도 넓은 범위에 걸쳐 폭넓게 산포하여 별다른 경향성을 발견할 수 없었다.



(a) μ_{peak} vs. σ_{n0}



(b) μ_{ave} vs. σ_{n0}

Fig. 11. Effect of initial normal stress on coefficient of friction

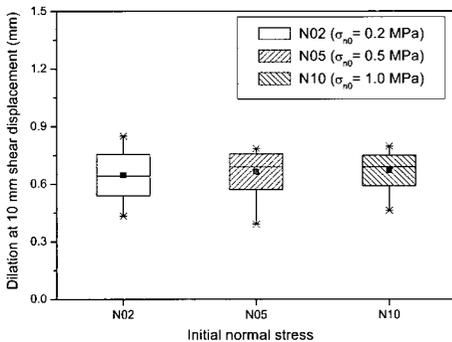


Fig. 12. Effect of initial normal stress on dilation at 10 mm shear displacement

3.5.3 마찰계수

전단속도에 따른 정점 및 평균 마찰계수의 변화를 Table 2 및 Fig. 15에 나타내었다. 전단속도가 증가함에 따라 정점 마찰계수의 평균값은 조금씩 감소하는 경향을 보이나 값의 범위와 편차를 고려할 때 경향성을 단정하기는 어렵다. 평균 마찰계수는 전단속도에 별다른 영향을 받지 않는 것으로 보인다.

3.6 거칠기의 영향

3.2에서 구한 거칠기 파라미터 중 기울기와 관련된 대표적 파라미터인 평균 거칠각(i_{ave})과 진폭과 관련된 파라미터인 절리면 평균 높이에 대한 표준편차(SDH)를

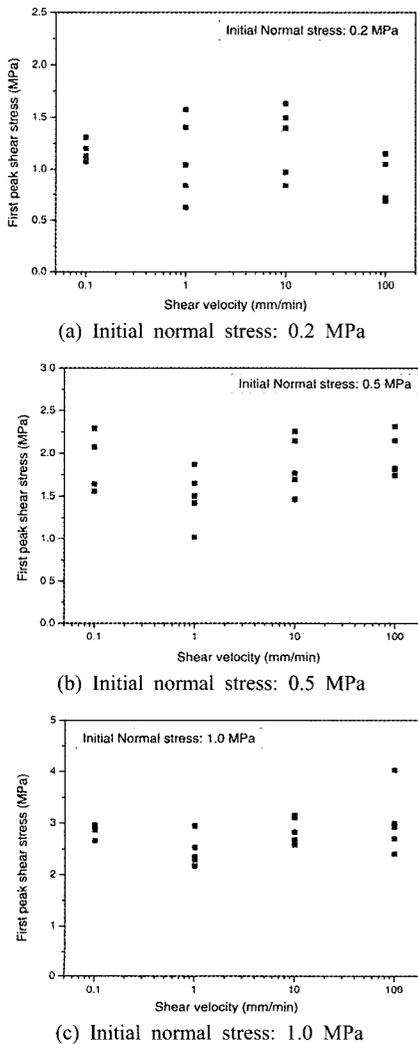


Fig. 13. Effect of shear velocity on first peak shear stress

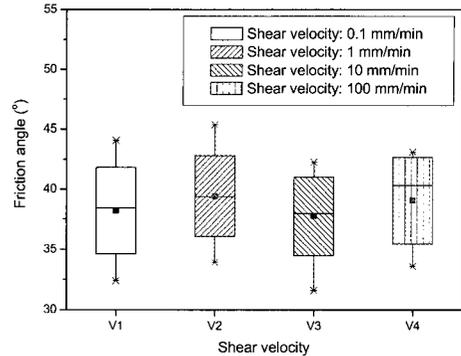


Fig. 14. Effect of shear velocity on friction angle

Table 2. Mean and standard deviation of coefficient of friction with respect to shear velocity

Shear velocity (mm/min)	0.1	1	10	100
μ_{peak} (mean)	3.19	2.92	2.80	2.64
μ_{peak} (S.D.)	0.97	1.03	0.83	0.80
μ_{ave} (mean)	0.96	0.93	0.91	0.92
μ_{ave} (S.D.)	0.06	0.08	0.07	0.05

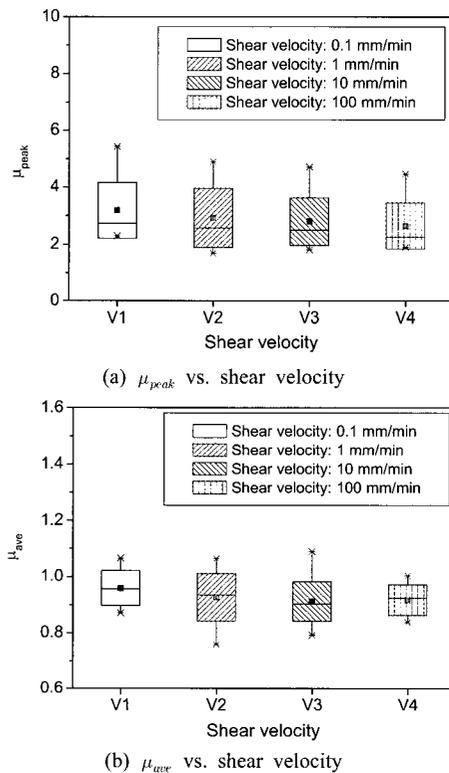


Fig. 15. Effect of shear velocity on coefficient of friction

선정하여 이들 거칠기 파라미터가 전단시험 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 기율기와 관련된 파라미터에는 여러 가지가 있으나 상호간에 직접적인 관련이 있는 파라미터가 많고, 또한 거칠기 파라미터들 간의 상관관계 분석 결과 거의 선형에 가까운 상관성을 보였기 때문에 대표적인 하나의 파라미터만을 분석에 이용하더라도 충분히 경향성을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다 (박병기, 2005).

3.6.1 1차 정점 전단응력

거칠기 파라미터에 따른 1차 정점 전단응력을 Fig. 16에 도시하였다. 초기 수직응력의 영향이 확연히 드러나는데 비해 i_{ave} 나 SDH 등 거칠기 파라미터의 변화에 따른 영향은 거의 없어 보인다. 실험에서의 초기 수직응력 수준은 전반적으로 암석의 일축압축강도에 비해 상당히 낮은 편인데 이처럼 수직응력이 낮은 경우에는 1

차 정점 전단응력이 거칠기에도 영향을 받지만 절리면의 밀착정도나 표면상태 등 시험조건 미세한 변동에도 큰 영향을 받을 수 있으므로 결과의 산포도가 크며 따라서 경향성을 파악하기 힘들다고 볼 수 있다. 또한 거칠기의 범위가 좁은 것도 한 원인으로 보인다. 한편 1차 정점 전단변위나 전단강성 역시 산만하게 분포하여 특별한 경향성을 판단하기 어려웠다.

3.6.2 마찰각

마찰각에 대한 거칠기 파라미터의 영향을 Fig. 17에 나타내었다. i_{ave} 가 모든 초기 수직응력 수준에서 마찰각과 특별한 관계를 보이지 않는 반면, SDH는 낮은 초기 수직응력에서 어느 정도 상관성이 있는 것으로 나타났다. 일정 수직강성 조건에서 마찰각은 1차 정점 전단응력 이후 수직팽창이 발생함에 따라 증가하게 되는 수직응력과 전단응력 곡선 상에서의 기율기를 통해 산정

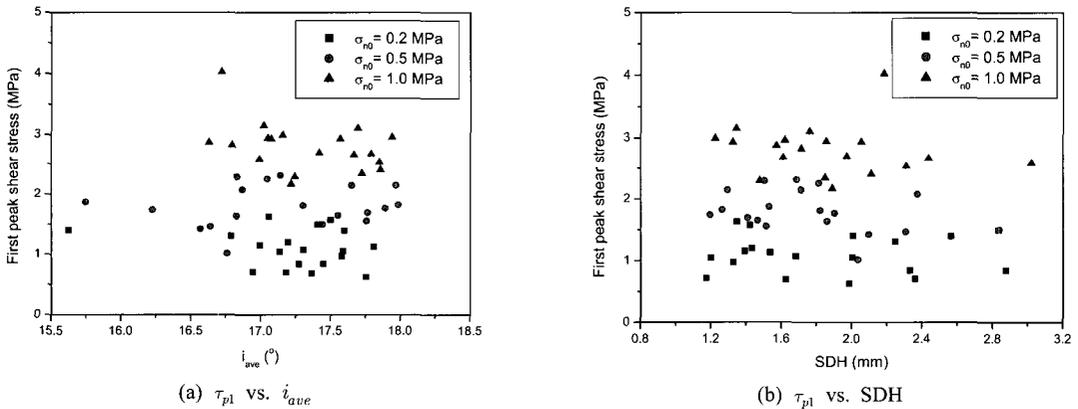


Fig. 16. Effect of roughness parameters on first peak shear stress

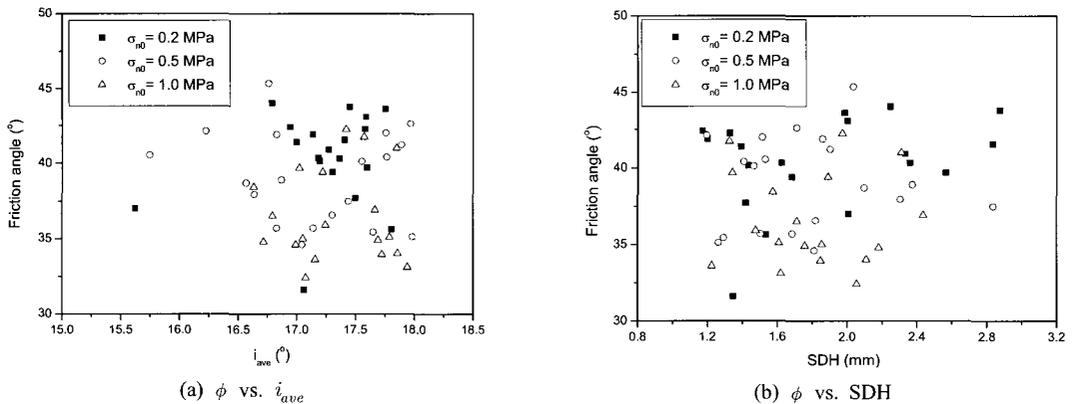


Fig. 17. Effect of roughness parameters on friction angle

되므로, 잔류응력 상태의 수직팽창에 밀접한 관련이 있을 것으로 여겨지는 1차 거칠기의 영향을 많이 받을 것으로 보인다. 따라서 거칠기의 진폭에 관련되어 있으며 1차 거칠기를 반영하고 있는 파라미터인 SDH의 경우 마찰각과 연관성을 가지는 것으로 판단된다. 하지만 높은 초기 수직응력 수준에서는 1차 정점 전단응력에서 돌출부의 전단파괴가 상대적으로 많이 일어나고 전체적으로 응력 연화 현상이 발생되어 이러한 경향이 잘 드러나지 않는 것으로 보인다.

3.6.3 마찰계수

1차 정점 전단응력에서의 마찰계수인 정점 마찰계수는 전단변위 1 mm 내외의 초기상태에서의 값이므로 거칠기 파라미터의 평균값보다는 최대값에 더 많은 영향을 받을 것으로 추정된다. 이에 비해 잔류 상태의 마찰계수인 평균 마찰계수는 돌출부의 마모가 어느 정

도 일어난 상태에서의 값이므로 최대값보다 평균값에 더 의존할 것으로 예측된다. 그러나 정점 마찰계수의 경우 i_{ave} 나 SDH의 최대값 및 평균값 어느 쪽과도 별다른 상관관계를 보이지 않았다. 정점 마찰계수는 1차 정점 전단응력에서의 마찰계수이므로 1차 정점 전단응력과 양의 상관관계를 가지는데 1차 정점 전단응력이 거칠기 파라미터와 그다지 상관관계가 없었으므로 정점 마찰계수 역시 같은 경향을 나타내는 것으로 판단된다. 그러나 평균 마찰계수의 경우 i_{ave} 의 최대값보다 평균값에 대해 어느 정도 상관성이 있는 것처럼 보이며(Fig. 18(a), (b)), SDH의 평균값과는 상당한 상관관계를 보이고 있다(Fig. 18(c), (d)). 평균 마찰계수는 전단변위 5~10 mm 구간, 즉 2차 거칠기의 파괴가 일어난 이후 잔류 상태의 마찰계수이므로 1차 거칠기에 많은 영향을 받는 것으로 보이며 따라서 SDH와 좋은 상관관계를 보였다.

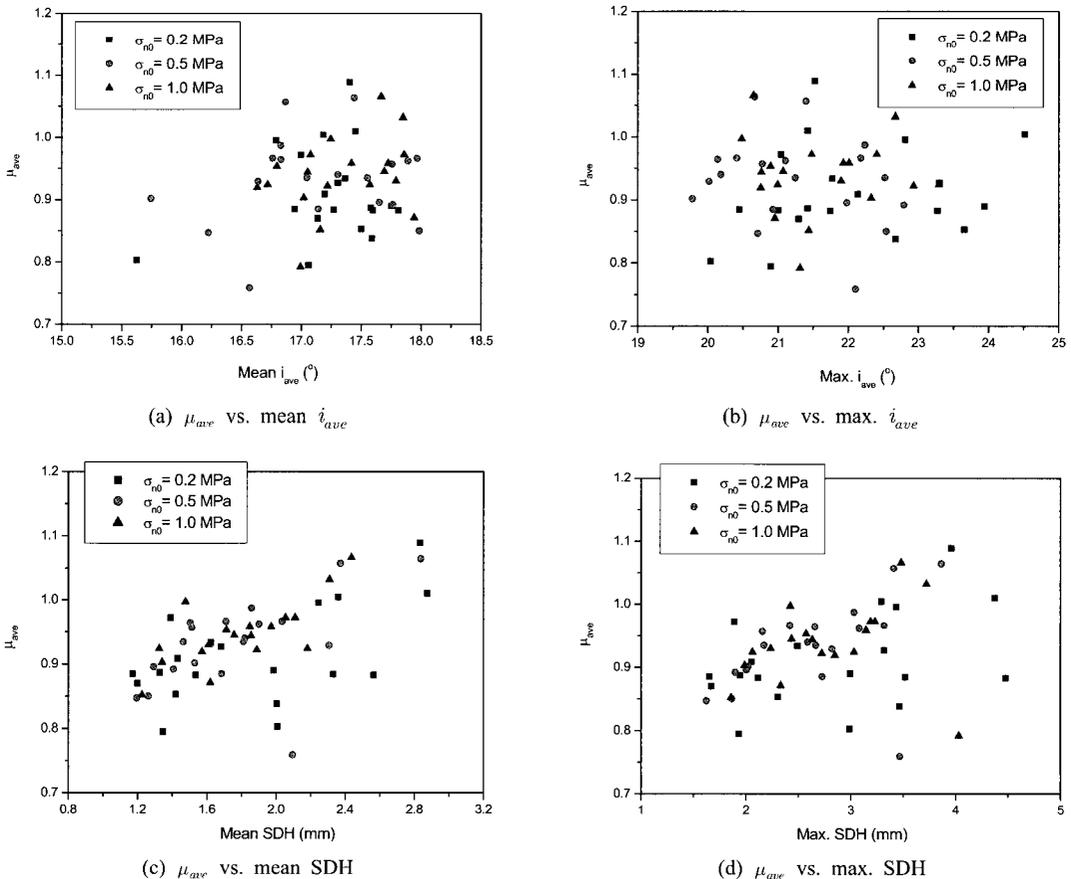


Fig. 18. Effect of roughness parameters on coefficient of friction

4. 결 론

일정 수직강성 조건하에서 화강암 인장절리에 대한 전단시험을 수행하여 초기 수직응력, 전단속도 그리고 거칠기가 주요 전단변수에 미치는 영향을 살펴보았다. 본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같이 요약된다.

- 1) 일정 수직강성 조건에서 거친 암석절리의 전단거동은 1차 정점 전단응력에서의 전단응력 감소 정도에 따라 크게 두 가지 형태의 전단거동을 보이는 것으로 구분되었다. 첫 번째 타입의 거동은 1차 정점 전단응력에서 전단응력의 감소가 없거나 미미하고 1차 정점 전단응력이 작은 편이며, 두 번째 타입의 거동은 1차 정점 전단응력에서 돌출부의 현저한 파괴로 인해 전단응력이 순간적으로 급격히 떨어지는 경우로써 대체로 1차 정점 전단응력이 크지만 마찰각은 첫 번째 타입에 비해 작은 경향을 보였다.
- 2) 초기 수직응력의 영향으로는 정점 전단변위와 1차 정점 전단응력의 경우 초기 수직응력이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타난 반면, 마찰각과 정점 마찰계수의 경우 초기 수직응력이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 전단강성과 평균마찰계수의 경우는 초기 수직응력에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
- 3) 거친 절리에 대한 전단속도의 영향은 초기 수직응력이 낮은 경우 일부 전단변수들에서 약간 관찰되었으나 수직응력이 증가함에 따라 대부분의 전단 시험 결과변수들에서 전단속도의 영향은 미미하였다. 이는 시험한 전단속도의 범위가 거칠기나 수직응력에 의한 영향을 극복할 수 있을 만큼 폭 넓지 못했기 때문이며, 구속된 암석 절리의 경우 실제로 전단속도의 영향이 그다지 크지 않다는 사실을 의미할 수도 있다.
- 4) 거칠기에 따른 전단거동의 변화를 분석하였으나 명확한 관련성이 나타나는 경우보다 시료간의 편차가 심한 경우가 많았다. 이는 본 시험이 인공적으로 생성되는 인장절리의 한계로 인해 넓은 범위의 값을 가지는 거칠기 파라미터를 획득하지 못하고 특정한 범위에서의 제한된 값들만 획득하였기 때문으로 판단된다. 암석 시료의 거칠기를 인위적으로 제어할 수 있는 방법이 개발된다면 거칠기 변수들이 암석 절리의 전단거동에 미치는 영향을

좀 더 명확히 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Johnston, I.W., Lam, T.S.K., Williams, A.F., 1987, Constant Normal stiffness direct shear testing for socketed pile design in weak rock, *Geotechnique*, 37, 83~89.
2. Indraratna, B., Haque A. and Aziz N., 1998, Laboratory modelling of shear behaviour of soft joints under constant normal stiffness conditions, *Geotechnical and Geological Engineering*, 16, 17~44.
3. Mouchaorab, S.K., Benmokrane, B., 1994, A new combined servo-controlled loading frame/direct-shear apparatus for the study of concrete or rock joint behavior under different boundary and loading conditions, *Geotechnical Testing Journal*, 17(2), 233~242.
4. Seidel, J.P., Haberfield, C.M., 2002, Laboratory testing of concrete-rock joints in constant normal stiffness direct shear, *Geotechnical Testing Journal*, 25(4), 1~14.
5. Jiang, Y., Xiao, J., Tanabashi, Y. and Mizokami, T., 2004, Development of an automated servo-controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 41, No. 2., pp. 275~286.
6. Ohnishi, Y., Dharmaratne, P.G.R., 1990, Shear behaviour of physical models of rock joints under constant normal stiffness conditions, *Proceedings of the International Symposium on Rock Joints*, Loen, Norway, Balkema, Rotterdam, 267~273.
7. Van Sint Jan, M.L., 1990, Shear tests of model rock joints under stiff normal loading, *Proceedings of the International symposium on Rock Joints*, Loen, Norway, Balkema, Rotterdam, 323~327.
8. Skinas, C.A., Bandis, S.C., Demiris, C.A., 1990, Experimental investigations and modelling of rock

- joint behavior under constant stiffness, Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen, Norway, Balkema, Rotterdam, 301~308.
9. Barton, N., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints, Engineering Geology, 7, 287~332.
 10. Patton, F.D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock, Proceedings of the 1st Congress of the ISRM, Lisbon, 509~513.
 11. 박병기, 전석원, 2006, 진동대 시험에 의한 편평한 암석 절리면의 동적 마찰거동 특성, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 16.1, 58-72
 12. 배기윤, 이정인, 2002, 레이저 변위계를 이용한 암석절리면의 3차원 거칠기 측정기 개발, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 12.4, 268-276.
 13. Tse, R., Cruden, D.M., 1979, Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 16, 303-307.
 14. Lam, T.S.K, Johnston, I.W., 1985, A scanning device to quantify joint surface roughness, Geotechnical Testing Journal 8.3, 117-124.
 15. Goodman, R.E., 1976, Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, West Publishing Company, New York.
 16. 임홍래, 2004, 암반 절리의 일정 수직 강성 조건하의 전단 거동에 관한 실험적 연구, 공학석사학위논문, 서울대학교
 17. 권종찬, 2005, 전단시험방법에 따른 암석 절리면의 전단거동특성에 관한 비교연구, 공학석사학위논문, 서울대학교
 18. Bandis, S.C., Lumsden, A.C., Barton, N., 1983, Fundamentals of rock joint deformation, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 20(6), 121~140.
 19. 박병기, 이창수, 전석원, 2007, 편평한 암석절리면의 속도 의존적 전단거동 특성, 터널기술(터널공학회지) 게재예정.
 20. 박병기, 2005, 암석 절리면의 동적 마찰거동 특성, 공학박사학위논문, 서울대학교

박 병 기



1998년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2005년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사
 Tel: 02-2110-5436
 E-mail: bkpark@mocic.go.kr
 현재 산업자원부 에너지자원개발본부 광물자원팀 사무관

전 석 원



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1996년 미국 아리조나 주립대학 공학박사
 Tel: 02-880-8807
 E-mail: sjeon@snu.ac.kr
 현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수

이 창 수



2004년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사
 2007년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사수료
 Tel: 02-873-8766
 E-mail: kidgang@rockeng.snu.ac.kr
 현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 석박사 통합과정