

## 암반의 경계조건을 고려한 절리면 직접전단시험기 개발

### Development of a New Direct Shear Apparatus Considering the Boundary Conditions of Rock Joints

이 영 휘<sup>\*1</sup> Lee, Young-Huy

김 용 준<sup>\*2</sup> Kim, Yong-Jun

#### Abstract

The characteristics of a rock joint which influence the stability of rock mass structures such as cut slopes and tunnels are largely controlled by the conditions of the rock joint as well as its boundary conditions. The conditions of rock joints comprise asperity strength, roughness, and filling materials. Boundary conditions can be represented by assuming that the deformability(or stiffness) of the rock mass surrounding the joints is modelled by a spring with stiffness. A new direct shear apparatus was developed in this study, which adapts a servo control system using PID algorithm. This apparatus can be used to investigate the various aspects of shear characteristics of the rock joints at conditions of constant normal stress and constant normal stiffness and so on. The test results for saw-cut teeth joints show that shear strength should be evaluated by considering its specific boundary conditions for the design of tunnels and cut slopes.

#### 요 지

사면이나 터널과 같은 암반 구조물의 안정성에 영향을 미치는 절리면은 크게 절리면의 상태(돌기 강도, 충전재, 돌기 경사)와 주위 암반에 의해 구속되는 경계조건에 따라 지배된다. 본 연구에서는 암반 구조물에 작용하는 경계조건과 절리상태에 따른 전단특성을 규명하기 위하여 PID 알고리즘에 의해 서보제어가 되는 절리면 전단시험 장비를 개발하였다. 그리고 돌기 경사가 일정한 톱니형 형상의 절리면에 대하여 일련의 실험을 수행하여 시험장비의 제어성을 확인하고 사면이나 터널과 같이 경계조건이 다른 암반구조물에서는 전단강도 평가방법을 달리하여야 함을 알 수 있었다.

**Keywords :** Boundary conditions, Constant normal stiffness, Constant normal stress

#### 1. 서 론

댐, 사면, 지하공동과 같은 암반 구조물 내에 존재하는 불연속면의 존재는 지표하의 유체의 이동을 초래하고 전단하중을 지탱할 능력을 감소시킨다. 이러한 구조물들의 거동과 안정성을 이해하기 위해서는 불연속면이 처해있는 현장상황에 부합하는 시험과 해석방법이

기술자들에게 중요한 연구과제로 부각되고 있다. 이들 암반 구조물의 안정해석에 사용되는 매개변수들은 주로 절리면에 대한 직접전단시험으로부터 얻은 값들을 이용한다. 현재까지 암반 구조물의 안정성 평가를 위한 절리면의 전단강도와 변형특성은 거칠기(roughness), 충전물(filling material), 돌기강도(asperity strength)와 같은 절리면의 상태에 대해서만 주로 수행되었다. 최

\*1 정회원, 영남대학교 공과대학 토목도시환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., YeungNam Univ., younghuy@yu.ac.kr)

\*2 정회원, 대림산업(주) 토목사업부, 과장 (Member, Deputy Section Chief, Civil Project T/K Team, Daelim Industries)

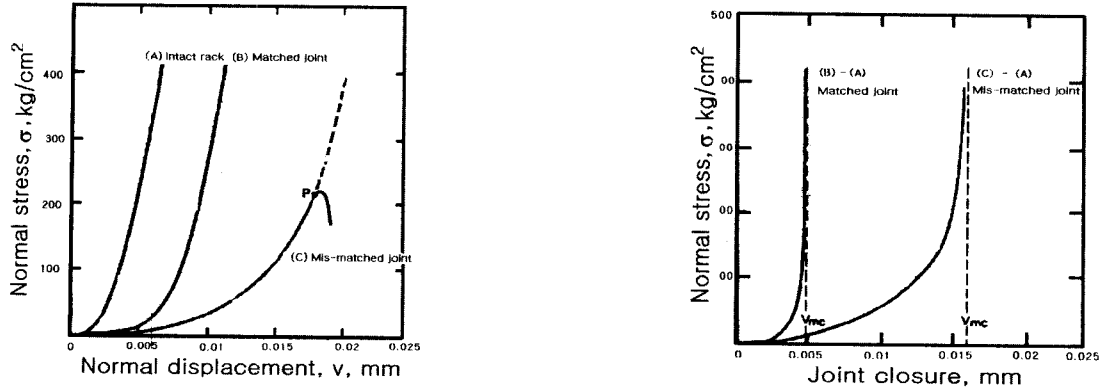


그림 1. 절리면의 수직압축시험 결과 (Goodman, 1974)

근 들어 Leichnetz(1985), Ohnishi (1990) 등은 터널과 같이 활동하는 블록의 이동이 주변의 암반에 의해 구속될 때 발생하는 경계조건(boundary conditions)에 대한 중요성을 강조하고 있다. 이에 본 연구에서는 활동하는 블록의 이동이 자유로운 사면이나 블록의 이동이 주변의 암반에 의해 구속된 터널과 같이 경계조건이 다른 경우에 있어서 절리면의 역학적 특성과 암반 구조물의 안정성을 평가하기 위한 절리면 전단시험기를 개발하였다. 그리고 시험장비의 사용성을 평가하기 위하여 일정한 경사각을 가진 틈니형 시료에 대하여 일련의 실내시험을 수행하고 경계조건에 따른 최대 전단강도와 전단특성을 살펴보았다.

## 2. 절리면의 역학적 특성

### 2.1 변형특성

응력조건의 변화에 따른 절리면 변형은 불연속 암반의 해석을 수행하는 기본적 요소이다. 지표면 근처의 굴착과 같이 상대적으로 낮은 응력수준에서의 절리면의 변형은 무결암의 탄성처짐이지만 지하공동과 같이 큰 응력수준에서는 절리면의 활동, 폐합(closure) 등이 암반의 변형에 큰 영향을 끼친다. 이러한 암반 변형의 중요한 2가지 요소는 불연속면의 수직압축변위와 전단변위이다(Bandis et al., 1983).

절리면의 변형은 응력변형 곡선에 의해 기술될 수 있다. Goodman(1974)은 수직변위( $v$ )에 대한 수직응력( $\sigma_n$ )의 변화와 전단변위( $u$ )에 대한 전단응력( $\tau$ )을 설명하기 위하여 수직강성( $k_n$ )과 전단강성( $k_s$ )의 개념을 도입하였다. 절리면의 변형과 수직응력 및 전단응력 사이에는 식 (1)과 같은 관계가 있다. 그리고  $k_{ns}$ 와  $k_{sn}$ 은 비접선

계수로써 탄성범위에서는 일반적으로 0으로 둔다. 절리면의 수직압축 특성은 수직응력과 절리면 폐합량의 관계로 표시하는데, 절리면의 수직 압축곡선은 일반적으로 응력 의존성이 있으며 쌍곡선의 형태를 나타내고 있다. 이 관계를 그림 1에 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_n \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & k_{ns} \\ k_{sn} & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ u \end{bmatrix} \quad (1)$$

Bandis(1983)는 절리면 수직압축시험 결과로부터 수직응력 수준에 따른 절리면의 수직강성( $k_n$ )을 최대 폐합량( $v_{mc}$ )과 초기 수직강성( $k_{ni}$ )을 이용하여 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$k_n = k_{ni} \left[ 1 - \frac{\sigma_n}{v_{mc} k_{ni} + \sigma_n} \right]^{-2} \quad (2)$$

그리고 절리면의 전단강성( $k_s$ )은 전단시험으로부터 얻어지며, Barton(1976)은 절리면 전단시험으로부터 얻은 인장 절리면의 전단응력 - 전단변위와 팽창의 관계를 그

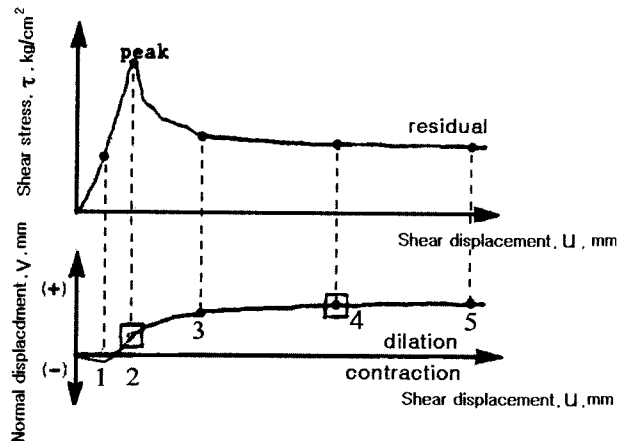


그림 2. 전형적인 전단시험결과 (Barton, 1976)

림 2와 같이 나타내었다. 전단이 발생할 때 절리면의 수직변위는 최대전단강도 이전 부분에서 좀 더 밀착한 후, 최대전단강도에서 최대 팽창각( $d_n$ )을 나타내며, 전단강성은 최대전단강도 이전 부분의 전단응력-전단변위의 기울기이다. 일반적으로 수직강성( $k_n$ ), 전단강성( $k_s$ )과 최대 팽창각( $d_n$ )은 수직응력 수준에 따라 변하는 값이다.

## 2.2 절리면의 최대전단강도

절리면의 최대전단강도에 영향을 끼치는 인자로는 거칠기, 돌기강도, 충전물 등과 같은 절리면의 상태 이외에 가장 중요한 외부요소는 절리면에 작용하는 유효 수직응력 수준이다. Lam & Johnston(1989)는 절리면의 전단강도를 수직응력의 크기에 따라 3가지 영역으로 구분하여 그림 3과 같이 나타내었다. 구간 I은 수직응력 수준이 낮아서 편평한 절리면의 기본 마찰각( $\phi_b$ )과 지형학적인 요소( $i$ )에 의한 팽창각( $\beta$ )에 의해 전단강도가 발휘되며, 구간 II는 초기 마찰력과 전단변위에 따라 감소된 면적에서 시료가 파괴될 때의 전단력을 합한 값이다. 구간 III은 수직응력이 커서 초기 팽창 없이 돌기의 파괴에 의한 전단력으로 나타난다.

수직응력 수준에 따른 파괴포락선의 비선형성은 Patton(1966), Ladanyi & Archambault(1970)와 Barton(1976)의 식에서 잘 나타나고 있다. Patton(1966)은 수직응력 수준에 따른 절리면의 최대전단강도 특성을 이중선형성 모델로써 식 (3)과 같이 나타내었다. 이 모델은 낮은 수직응력 수준에서 전단면의 마찰특성과 높은 수직응력에서 돌기의 전단파괴는 완전히 분리된다는 가정에 기초하였다.

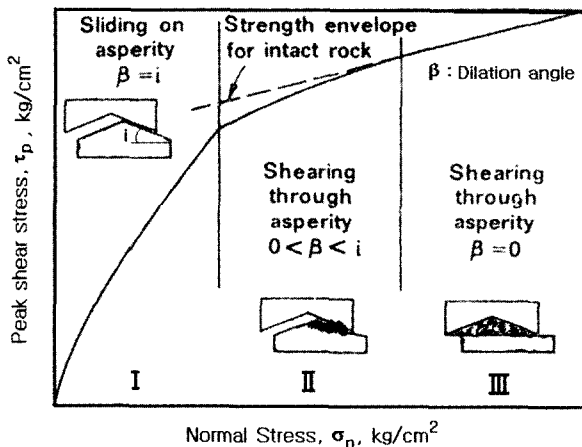


그림 3. 수직응력 수준에 따른 파괴포락선의 예 (Lam & Johnston, 1989)

$$\begin{aligned} \tau &= \sigma_n \tan(\phi_b + i) & \sigma_n < \sigma_T \\ \tau &= c + \sigma_n \tan \phi_r & \sigma_n > \sigma_T \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\phi_b$ 는 기본 마찰각,  $i$ 는 돌기의 경사,  $\phi_r$ 은 잔류 마찰각이다. 그리고,  $\sigma_T$ 는 두 식의 경계를 나타내는 전이응력이다.

Ladanyi & Archambault(1970)는 좀 더 일반적인 파괴 모델을 개발하기 위해서 이중 선형성과 같은 순수 통계적 접근보다는 Rowe 등(1964)이 모래에 대한 직접전단 시험을 분석한 방법인 에너지효과에 근거를 둔 해석을 실시하였다. 그는 Rowe의 전단강도 이론에 돌기의 전단에 따른 요소를 고려하여 식 (4)로 나타내었다.

$$\tau = \frac{\sigma_n (1 - a_s)(\dot{v} + \tan \phi_b) + a_s s_r}{1 - (1 - a_s) \dot{v} \tan \phi_b} \quad (4)$$

$$a_s \approx 1 - \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_T}\right)^{k_1} \quad (5)$$

$$\dot{v} \approx \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_T}\right)^{k_2} \tan i \quad (6)$$

여기서  $s_r$ 은 돌기의 전단강도이며,  $a_s$ 와  $\dot{v}$ 는 전체면적에 대한 전단된 돌기의 면적비와 전단시험중 파괴시의 팽창비를 나타낸다. Ladanyi & Archambault(1970)는  $a_s$ 와  $\dot{v}$ 에 대한 경험적인 관계를 식 (5), (6)에 나타내었다. 위의 식에서  $k_1 \approx 3/2$ ,  $k_2 \approx 4$ 인 것으로 알려져 있으나, 절리면 거칠기 특성과 돌기 강도에 따라 그 특성이 변화하므로 상수 결정을 위한 연구의 필요성이 있다.

Barton(1971)은 암석시료에 대해 인장균열을 유도하여 얻어진 200여개 이상의 모델절리들에 대해서 낮은 수직응력에서 전단시험을 수행하고 아래와 같은 경험적 관계를 나타내었다. Barton(1973)은 최대 팽창각( $d_n$ )은 최대전단강도에서 발휘된다는 것을 발견하고  $\tan^{-1}(\tau/\sigma_n)$ 와  $d_n$ 의 관계로 묘사하고 여러 가지 가정을 통하여 실험 자료들을 최적화 하여 식 (7)과 같이 나타내었다. 여기서 JRC는 절리 거칠기 계수이고 JCS는 돌기의 일축압축강도이다.

$$\tau_f = \sigma_n \tan \left[ \text{JRC} \cdot \log_{10} \left( \frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \quad (7)$$

이들 모델의 특징은 수직응력 수준에 따른 돌기의 마찰과 전단에 의한 전단강도의 비선형성을 묘사하기 위한 것이다. 이에 Hoek & Bray(1981)는 암반 구조물의

극한평형해석에 사용되는 전단강도 파괴규준식을 적용할 때 절리면이 거칠지 않고 수직응력 수준이 낮은 경우는 돌기의 전단을 고려하지 않고 절리면의 마찰만을 고려하여 Mohr-Coulomb의 전단강도 모델을 이용하고, 거친 절리면의 경우는 Ladanyi & Archambault(1970), Barton (1971)의 전단강도 모델을 사용하도록 제안하고 있다.

### 2.3 경계조건

전단하중을 받는 팽창성 절리의 전단특성은 절리면의 구조적인 특징 뿐만 아니라 주위 암반에 의한 경계조건에 의해서도 영향을 받는다. 예를들어 암반 사면과 같이 파괴면 위에서 움직이는 블록이 수직방향으로 자유로운 경우와 락앵커가 정착되어 블록의 팽창이 구속된 경우는 경계조건이 다르며, 락앵커에 의해 수직변위가 구속된 경우는 블록이 파괴면을 따라 이동함에 따라 수직응력은 앵커체의 강성에 따라 증가할 것이다. 또한 터널의 경우도 팽창성 절리가 지하공동 벽면 사이에서 구속되면 자유롭게 움직이지 않고 주위 암반에 의해 구속되거나 주위 암반의 강성에 따라 거동이 달라진다. 이때 활동하는 블록에 작용하는 수직응력은 암반의 강성에 따라 변화하며 이때의 전단강도도 다르게 나타난다. 이러한 암반의 변형성이나 락앵커와 같은 보강 시스템에 의한 경계조건은 강성 스프링으로 묘사될 수 있다. 적용된 강성(K)은 보강되지 않은 사면과 같은 경우  $K=0$ (일정수직응력)에서 아주 높은 수직응력에서 변위가 없는 경우인  $K=\infty$ (무한수직강성) 사이에서 변화한다. 만약 수직응력 증가가 수직변위의 변화에 비례

적( $K=constant$ )이면 일정수직강성이라 한다. 그림 4는 경계조건에 일반적인 경우로서 일정수직응력(constant normal stress) 조건과 일정수직강성(constant normal stiffness) 조건을 나타내었다. 일정수직응력 조건은 암반사면의 경우로서 활동하는 블록이 구속되지 않고 절리면에 작용하는 수직응력이 일정하게 유지되는 경우이다. 이러한 조건은 실험동안 수직하중이 접촉된 면적의 중심에 작용하기 위하여 횡 방향으로 이동하며, 절리면에 작용하는 수직응력은 전단동안에 일정하게 유지되어야 한다. 일정수직강성 조건은 터널, 암반에 근입된 말뚝, 그라우팅 된 락 앵커와 같이 전단면이 팽창할 때 주위 암반의 강성으로 인해 전단되는 절리면에 작용하는 수직응력의 증가를 유발하는 경우이다. 이러한 경우는 활동하는 전단면이 받고 있는 초기 수직응력에 전단시 발생하는 팽창량과 주위 암반의 강성에 의해 증가된 수직응력을 더하여 실험적으로 묘사할 수 있다.

그림 5는 Ohmish(1990)가 절리면 전단시험기에 일정한 강성을 가진 스프링을 설치하여 일정수직강성 조건에서 실험한 결과를 나타낸 것으로서 일정수직응력 조건과 동일한 초기 수직응력에서 실시한 시험결과에 비하여 전단응력이 더욱 크게 나타나고 수직응력도 증가되는 것으로 나타났다. 따라서, 지하 공동과 같이 2개의 평행한 절리 사이에서 암석 블록이 미끄러지는 경우는 증가된 수직응력에 대하여 전단강도가 증가하지만, 일반적으로 수행되는 일정수직응력 조건에서의 직접전단 시험결과를 이용할 경우 너무 낮은 전단강도 값을 나타내게 되므로 이에 대한 적절한 전단강도를 평가할 필요성이 있다.

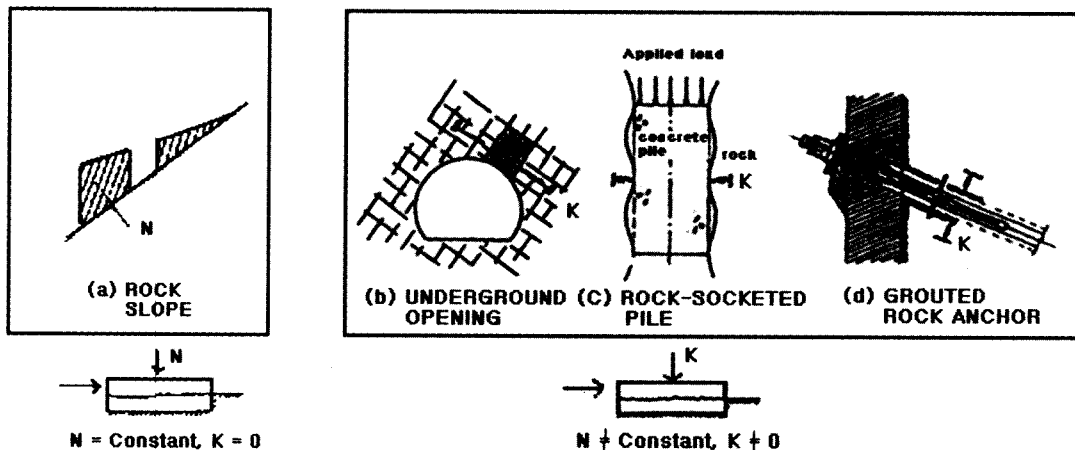


그림 4. 경계조건의 예

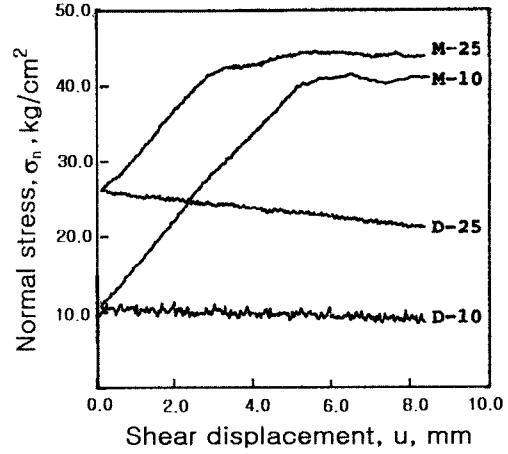
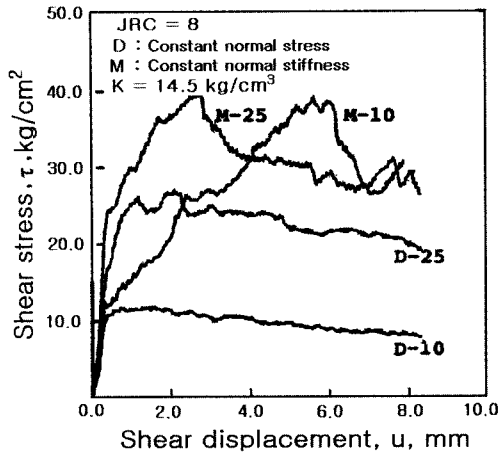


그림 5. 경계조건에 따른 전단특성 (Ohnishi, 1990)

### 3. 절리면 전단시험장비

#### 3.1 특징

절리면의 전단강도와 변형특성을 측정하는데 이용할 수 있는 방법은 여러 가지가 있다. 이 중에서 직접전단 시험은 주로 연구용이나 현장적용에 있어서 가장 널리 쓰이고 있으며, 시험에 사용되는 시료길이는 대략 10~40cm 범위에 있다. 전단시험 원리는 모든 기법에서 근본적으로는 동일하다. 예를 들어 전단변위에 따른 수직 하중, 전단하중, 수직변위를 측정하는 것이다. 그러나 실험장비의 사용에 있어서 직접적으로 도출되는 문제는 암반 구조물의 현장조건을 실내에서 적절하게 모사하는 것이다. 본 연구에서 개발한 시험장비는 암반 구조물의 안정성 평가에 요구되는 절리면의 강성과 강도정수를 얻기 위해서 절리면 수직압축시험, 전단시험, 주기 전단시험 등을 할 수 있도록 제작되었으며, 주위 암반의 구속에 따른 경계조건을 고려할 수 있다.

그리고 점토나 모래 등으로 충전된 절리면의 전단특성을 고려하기 위하여 충전재를 포함한 내부전단상자를 시험기 자체에 부착된 외부전단상자 속에 포함시키도록 하였다. 내부전단상자는 크기가 다른 여러 가지 암석 절리의 시험을 수행하기 위하여 3가지 크기(60×60, 100×100, 150×150mm)로 제작하였으며, 내부전단상자 속에 고정되는 시편은 epoxy, hydrostone 등을 사용하지 않고 내부 전단상자 내에 장착된 고정 장치에 의해서 시료를 고정할 수 있도록 하여 시료준비 과정을 간단하게 하였다.

#### 3.2 제원 및 작동원리

본 시험기는 압력을 발생시키는 유압펌프, 수직하중과 수평하중을 가하는 액추에이터(actuator), 액추에이터에서 발생한 하중들을 지지하는 하중 프레임, 시료에 발생하는 불필요한 마찰을 제거하기 위하여 특별히 제작된 전단상자, 시험기에 장착된 여러 계측장비로부터 입·출력 신호를 제어하기 위한 콘트롤러(controller), 시험기를 제어하고 데이터를 받아 저장하는 컴퓨터로 구성된 암석 절리면 직접전단시험기이다. 직접전단장비의 세부명칭을 그림 6에 나타내었다.

그림 6에 나타난 장비 모식도에서 수직방향과 수평방향의 하중 프레임은 10ton의 압축하중과 인장하중을 지탱할 수 있도록 각 방향으로 직경 40mm의 강봉(steel bar)을 4개씩 설치하였다. 그리고 프레임의 미소변형을 제거하기 위하여 상부와 중앙에 두께 35mm의 강판(steel plate)을 설치하였다. 이때 수직 프레임을 형성하는 강봉과 강판의 마찰을 없애기 위하여 선형 볼 베어링(linear ball bearing)을 강판에 설치하였다.

이때 액추에이터는 상부와 중앙 플레이트 사이에서 고정되었으며, 액추에이터 앞부분에 하중계(load cell)가 장착되어 있다. 하중 프레임 아래에는 210kg/cm<sup>2</sup>의 작동압력을 유발하는 유압펌프가 장착되어 있으며, 유압펌프는 2개의 유압 서비스 다기관(hydraulic service manifold)을 통해 수직과 수평 액추에이터에 연결되어 있다.

전단시험시 상부상자의 수평이동에 따른 수직하중의 편심을 억제하고 동일한 위치에서의 수직하중을 재하하기 위하여 상부전단상자와 하중계 사이에 10ton의 수

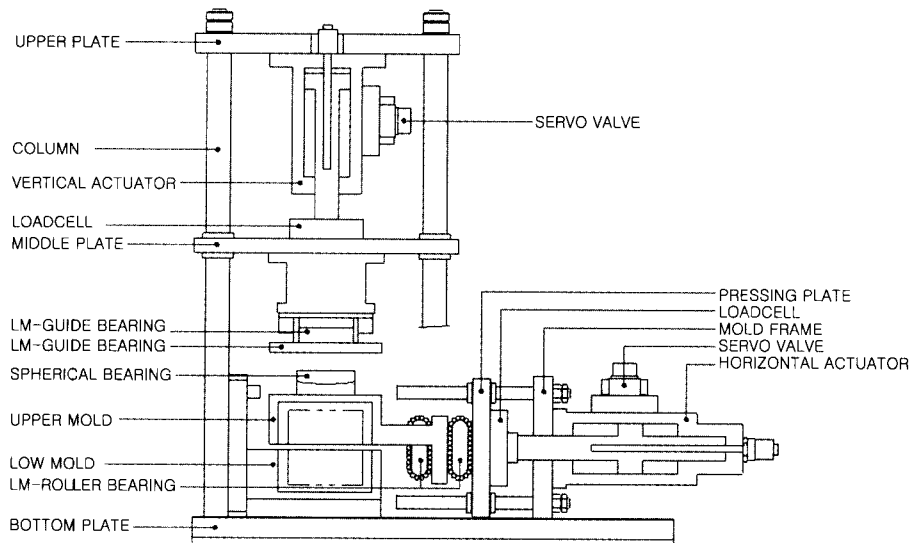


그림 6. 직접전단시험장비

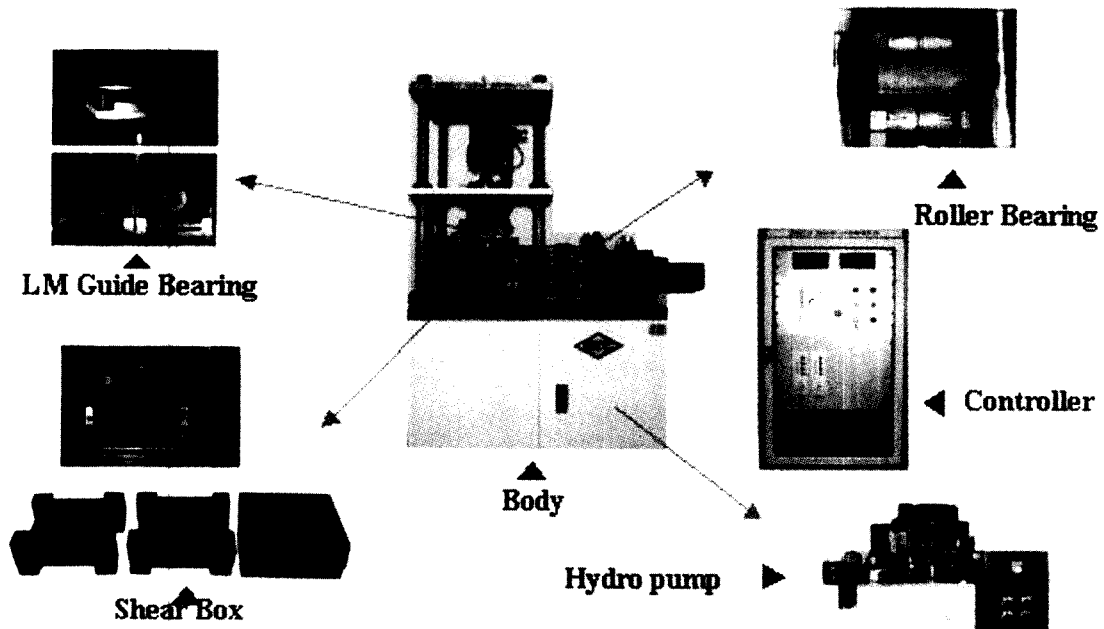


그림 7. 직접전단시험장비 전경

직하중을 지탱하면서 0.0001이하의 아주 작은 마찰계수를 가진 LM 가이드 베어링을 2개 장착하였다. 그리고 수평방향으로는 주기 전단시험을 수행하기 위하여 외부전단상자 축의 끝 부분은 2개의 롤러 베어링 사이에 끼워진 십자 모양의 판에 체결되어 있다. 시험장비의 입·출력을 제어하는 콘트롤러는 2개의 하중 앰프와 각 방향에 대하여 하중과 변위에 대한 서보 제어를 위해서 4개의 서보 앰프를 장착하고 있다. 그리고 이러한 제어를 수행하는데 필요한 A/D, D/A 카드는 미국의 National Instrument사 제품을 이용하였으며, 전단시험에 사용되

는 각종 측정 센서는 고정밀도와 내구성이 확보된 제품을 사용하였다. 직접전단시험장비의 실제 전경을 그림 7에 나타내었다.

그리고 변위 측정과 제어에 사용된 계측장비는 액추에이터 내부에 장착된 내장형 변위계(50mm)이외에 직접전단시험기 바닥에 부착된 마그네틱 스탠드에 외장형 변위계(수직:5mm, 수평:10mm)를 설치하여 전단상자의 거동을 직접적으로 측정하여 시험의 정밀도를 높였다.

본 직접전단 시험기의 제어방식은 컴퓨터에서 지시

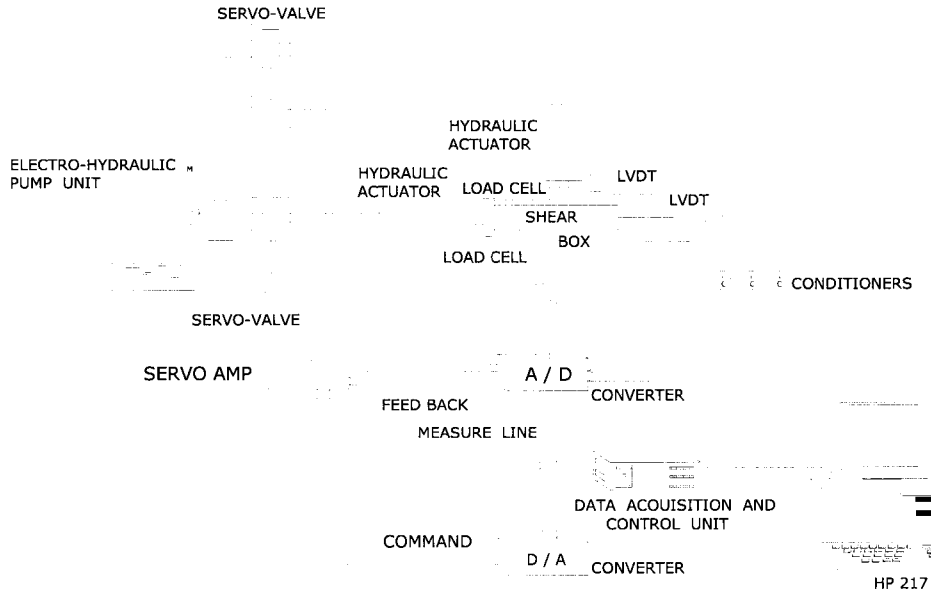


그림 8. 직접전단시험장비의 제어도

한 명령어를 실제 발생한 변위나 하중에 응답(feedback)하여 그 차이를 최소화하는 PID(Proportional - Integral-Derivative) 알고리즘에 의한 제어 방식을 사용하였다. 직접전단시험 장비의 제어시스템은 그림 8에 나타내었다.

### 3.3 운용프로그램

장비 운용 프로그램은 모든 명령어를 한글로 만들어 사용자의 편리성을 추구하였다. 그리고 일반적으로 암석 절리면에서 수행되는 시험조건인 수직압축시험, 일정수직응력시험, 일정수직하중시험, 일정수직강성시험, 주기전단시험은 각각의 메뉴창에서 작동되도록 하여 편리성을 가하였다. 그리고 각 시험조건은 일반 시험조건과 별 차이가 없지만 일정수직응력 시험과 일정수직

강성시험 시험에는 특별한 시험 조건식을 이용하여 프로그래밍 하였으며, 그 특징은 아래와 같다. 그리고 2가지 시험의 경우 메뉴창을 그림 9에 나타내었다.

(1) 잔류 전단강도 시험을 할 경우 상당한 전단변위를 필요로하기 때문에 일정한 수직력에서는 변위가 증가됨에 따라 전단면적이 감소되어 응력이 증가되는 경향이 있다. 따라서 잔류강도를 측정하기 위해서는 변위의 증가에 따라 수직응력을 일정하게 유지할 필요성이 있다. 시험기는 서보 제어(servo control)가 되는 액추에이터를 사용하므로, 전단변위에 따라 감소하는 면적만큼 수직력을 감소시켜 절리면에 작용하는 수직응력을 항상 일정하게 유지하도록 프로그래밍 하였다.

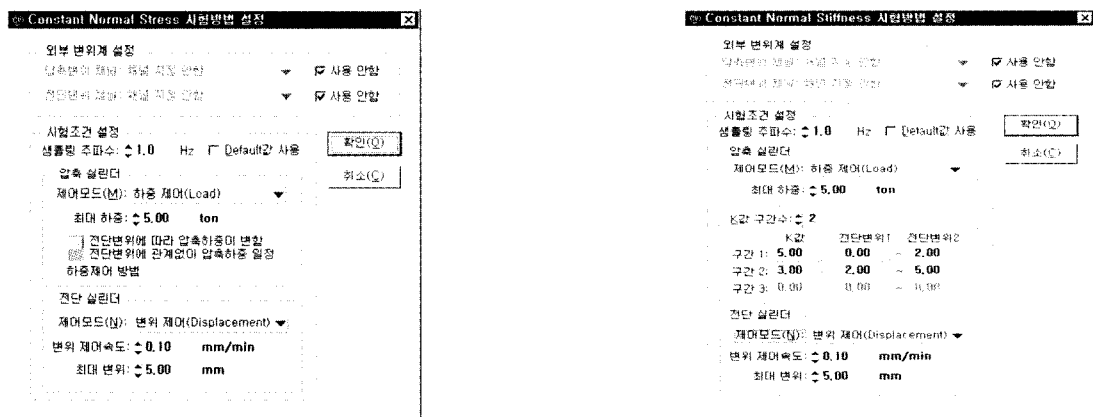


그림 9. 제어프로그램의 메뉴창

$$\sigma = \frac{\Delta P}{B \times (L - \Delta L)} \quad (8)$$

(2) 절리면의 경계조건의 변화에 따른 실험을 수행하기 위하여, 전단시 절리면의 팽창이 발생하는 동안 경계강성의 크기만큼 증가된 수직응력이 절리면에 가해지도록 프로그래밍 하였다. 그리고 전단 중에 강성(K)의 비선형성을 고려하기 위하여 3가지 구간으로 나누어 강성의 크기를 바꿀 수 있게 하였다.

$$K = \frac{d\sigma}{dv} \quad (9)$$

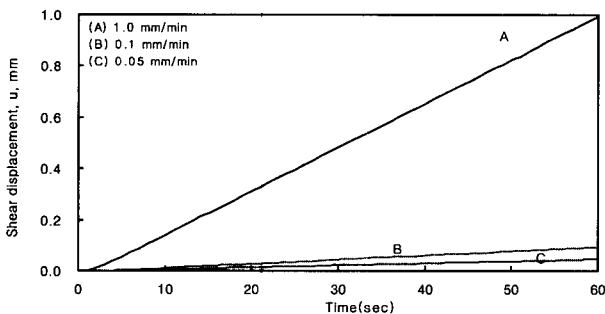
그리고 실험중 전단특성치를 실시간으로 화면에 나타내도록 하여 시험과정을 확인할 수 있으며, 실험 결과를 분석하거나 여러 가지 그래픽 프로그램에 사용할 수 있도록 하기 위하여 ASCII 화일로 변환할 수 있도록 하였다.

### 3.4 제어능력

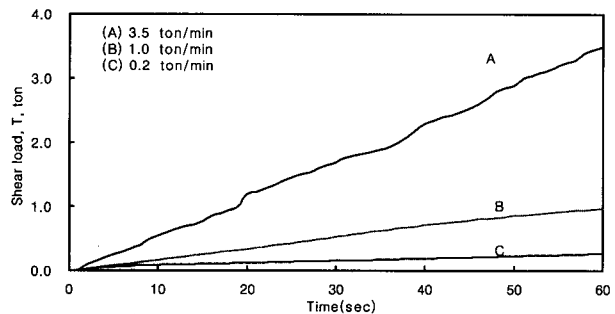
본 연구에서 개발된 시험장비의 제어방식은 변위제

어와 하중제어가 가능하며, 각각의 경우에 있어 변위제어는 0.05~1.0mm/min, 하중제어는 0.2~3.5ton/min의 범위까지 일정하게 제어가 가능하다. 제어방법에 따른 장비의 제어 성능을 그림 10에 나타내었으며, 하중제어의 경우 3.5ton/min의 제어속도에서는 돌기의 파쇄 등으로 인해 부분적으로 차이는 있었으나 전체적으로는 선형적으로 나타났다.

사면에서 절리면을 따라 발생하는 암반의 안정성을 평가하기 위해서 수행되는 보편적인 전단시험기는 수직하중 조절이 되지 않아서 전단 동안 감소된 면적만큼 수직응력이 증가하는 모순점이 있다. 이러한 모순점은 감소된 면적에 비례하여 수직하중을 감소시킴으로써 극복할 수 있다. 각각의 경우인 일정수직하중(constant normal load) 조건과 일정수직응력(constant normal stress)에 대해서 초기 수직응력( $\sigma_{ni}$ )을 변화시켜 가면서 시험을 수행하고 그 특성을 그림 11에 나타내었다. 각각의 조건에서 수행한 시험결과를 살펴보면, 일정수직하중(constant normal load) 조건에서는 전단 동안 수직력이 일정하게 유지되었으나 일정수직응력(constant normal

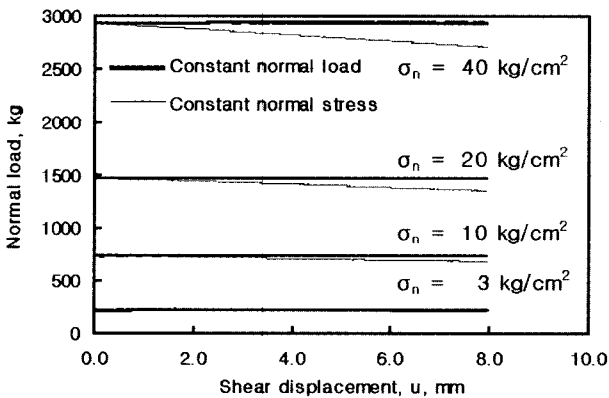


(a) 변위제어

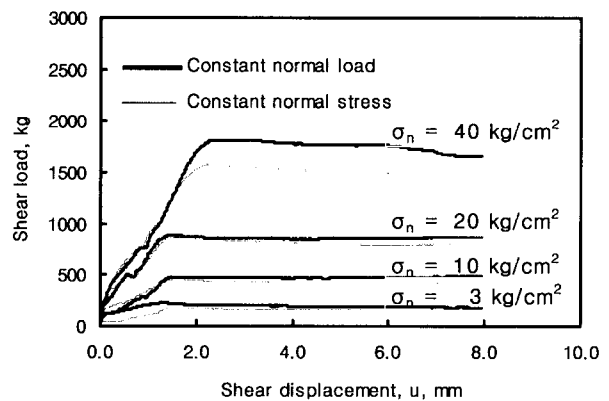


(b) 하중제어

그림 10. 직접전단시험장비의 제어능력



(a) 수직하중-전단변위



(b) 전단하중 - 전단변위

그림 11. 하중조건별 전단특성



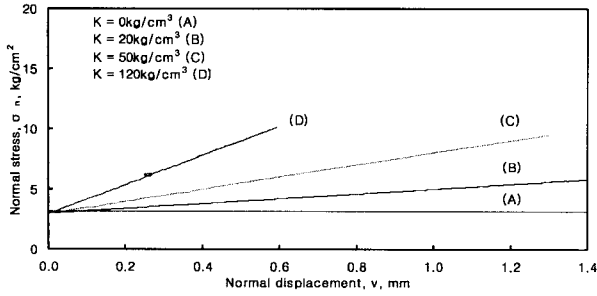


그림 12. 강성의 크기에 따른 전단특성

stress) 조건에서는 전단변위가 증가함에 따라 수직력이 감소하였다. 그 경향은 초기 수직력이 클수록 감소 폭이 더 크게 나타났으며, 수직력의 감소폭이 클수록 전단력의 감소도 크게 나타났다. 따라서 기존의 시험방법에 의해 평가되는 절리면 전단강도는 다소 과대 평가되는 것으로 나타났다.

일정수직강성 조건에서 강성의 크기에 따른 제어성을 그림 12에 나타내었다. 강성의 크기가 일정한 일정 수직강성 조건에서 시험결과, 주어진 강성의 크기에 따라 수직변위와 수직응력이 선형적으로 나타났으며 그 기울기는 주어진 강성과 잘 일치하였다.

#### 4. 시험결과 및 고찰

##### 4.1 시료제작

본 연구에서 사용한 절리면 시료는 (시멘트 : 모래) : 물 = (1 : 0.3) : 0.2(중량비)을 믹서기에서 잘 혼합하여

몰드(길이×폭×높이 = 495mm×170mm×150mm)에 붓고 몰드 내에서 1일간 양생한 후 몰드를 제거하고 자연상태에서 60일 이상 양생한 후 시험에 사용하였다. 그리고 절리면의 거칠기는 몰드 중앙의 홈을 따라 끼워진 강판( $t=3\text{mm}$ , amplitude=10mm,  $i=0^\circ, 9^\circ, 15^\circ$ )에 광유를 도포하여 몰드 제거시 상하 블록의 면을 고르게 하였다. 그림 13은 본 연구에서 사용한 인공 절리면의 단면과 형상을 나타낸 것이다.

그리고 인공 절리면 시료에 대해서 10회 반복 시험한 공시체의 일축압축강도의 평균값은  $379.6\text{kg/cm}^2$ (표준편차  $29.2\text{kg/cm}^2$ )이며, 변동계수가 7.69%로 시료의 동질성을 확보하였다. 시료의 물리·역학적 특성은 표 1에 나타내었다.

##### 4.2 최대 전단강도

본 시험장비를 이용하여 일정한 경사각을 가진 시료에 대해서 실험을 수행하고 얻은 최대전단강도를 Patton과 Barton의 규준식으로 비교하였다. Patton의 규준은 기본 마찰각 시험에서 얻은 값( $\phi_b = 33.1^\circ$ )에 돌기 경사( $i$ )를 이용하여 정의되어 질 수 있고, Barton의 전단강도 규준에 필요한 거칠기 파라미터인 JRC는 식 (10)에 나타난 Tse & Cruden(1979)의 선형관계 함수를 이용하여 산정할 수 있다. 여기서  $Z_2$ 는 절리 profile의 중심선에서 표준편차의 최소자승근(root mean square)의 1차 미분값이며 절리가 일정한 형상을 가진 경우에는  $Z_2 = \tan i$ 가 된다. 여기서  $M$ 은 측정간격의 개수,  $D_x$ 는 측정간격 그

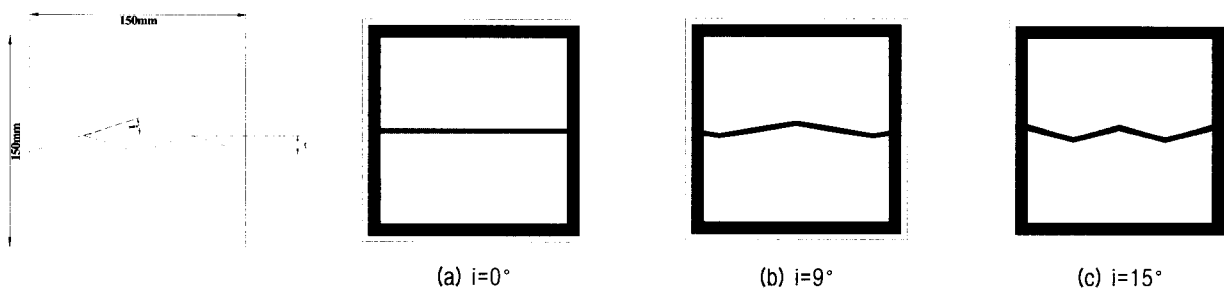
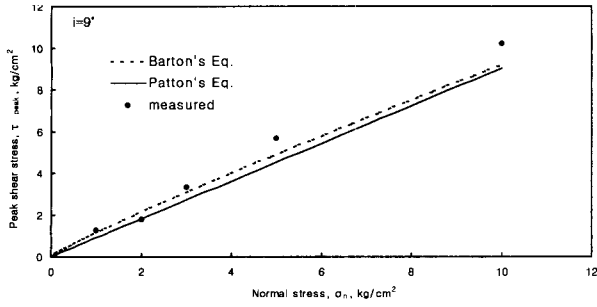


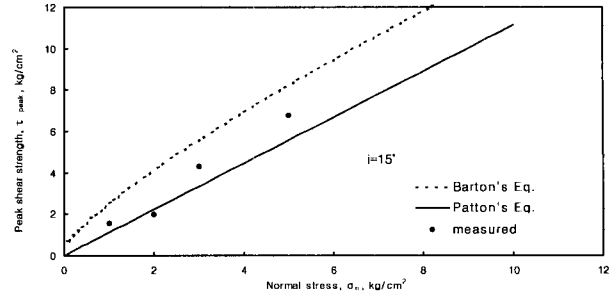
그림 13. 인공 절리면의 형상

표 1. 인공 절리면 시료의 물리·역학적 특성

혼합 재료	일축압축강도 $\sigma_c(\text{kg/cm}^2)$	탄성파 속도		$I_s(50)$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	슈미트헤머 반발치( $R_o$ )	
		P파(km/s)	S파(km/s)		wet	dry
(시멘트 : 모래) : 물 (1 : 0.3) : 0.2	379.6	3.27	2.30	22.7	36.9	39.8



(a)  $i=9^\circ$



(a)  $i=15^\circ$

그림 14. 최대전단강도의 비교

리고  $y_{i+1}$ 와  $y_i$ 는 각각  $i+1$ 와  $i$ 번째 돌기의 높이 (amplitude)를 나타낸다.

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log Z_2 \quad (10)$$

$$Z_2 = \left[ \frac{1}{M (D_x)^2} \sum_{i=1}^M (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

위의 방법으로 Patton과 Barton의 최대전단강도 특성을 살펴본 결과 절리경사각이 낮은 경우( $i = 9^\circ$ ,  $JRC = 6$ )는 큰 차이가 없었으나 경사각이 큰 경우( $i = 15^\circ$ ,  $JRC = 14$ )는 두 모델의 최대전단강도 차이가 크게 나타났다. 본 연구에서 실험한 절리면은 일정한 형상의 절리면으로써 Patton(1966)의 균준식과 잘 부합하는 것으로 나타났으며, 본 연구에서 개발한 시험장비를 이용하여 절리면의 최대전단강도를 산정할 수 있는 것으로 판단된다.

### 4.3 강성조건에서의 전단특성

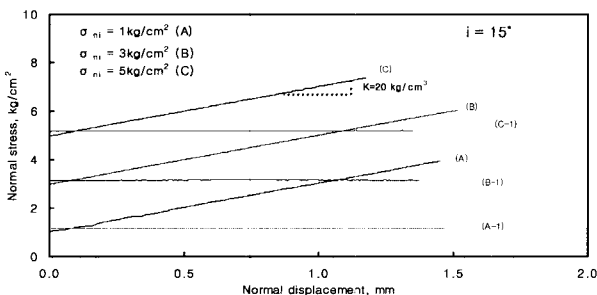
강성조건에서의 전단강도 특성을 알아보기 위하여 돌기 경사각  $15^\circ$ 인 시료에 대해서 강성(K)을  $0, 20\text{kg/cm}^3$ 로 일정하게 유지한 상태에서 초기 수직응력( $\sigma_{ni}$ )을  $1, 3, 5\text{kg/cm}^2$ 로 변화시켜서 시험한 결과를 그림 15에 나타

내었다. 일정수직강성조건(A, B, C)에서는 전단변위가 진행됨에 따라 발생한 수직변위(v)와 강성(K)의 크기에 비례하여 수직응력이 증가하였다. 이때 전단강도는 일정수직응력 조건(A-1, B-1, C-1)에 비하여 더 크게 나타났다.

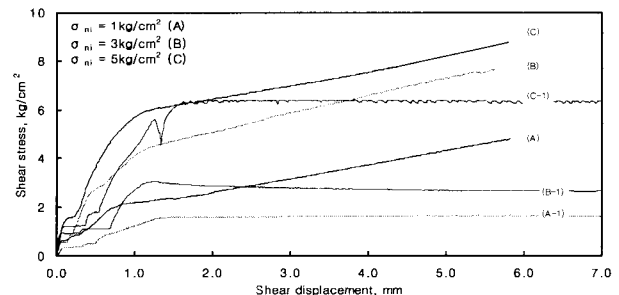
### 5. 결론

활동하는 블록의 이동이 자유로운 사면이나 블록의 이동이 주변의 암반에 의해 구속된 터널과 같이 경계조건이 다를 경우에 있어서 암반 구조물의 안정성을 평가하기 위한 절리면 전단시험장비를 개발하고 일련의 시험을 수행한 후 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 암반 구조물이 받고있는 경계조건이나 하중조건에 따른 강도정수를 산정하기 위하여 컴퓨터에서 지시한 명령어를 실제 발생한 변위나 하중을 응답(feedback)하여 그 차이를 최소화하는 PID(Proportional - Integral - Derivative) 알고리즘에 의한 서보제어(servo control) 방식의 절리면 전단시험장비를 새로이 개발하였다.
- (2) 장비의 성능을 알아보기 위하여 톱니형 시료에 대



(a) 수직변위-수직응력



(b) 전단변위 - 전단응력

그림 15. 경계조건에 따른 전단특성

하여 일련의 시험을 수행한 결과 최대전단강도는 Patton의 모델과 잘 부합하였으며, 전단변위에 따른 수직하중 제어나 강성에 따른 제어도 충분한 것으로 나타났다.

- (3) 사면에서 절리면을 따라 발생하는 암반의 안정성을 평가하기 위하여 보편적인 전단시험기를 이용할 경우는 수직하중 조절이 되지 않아서 전단변위가 증가함에 따라 감소된 면적만큼 수직응력이 증가한다. 이에 전단시 감소된 면적에 비례하여 수직하중을 감소시켜 수직응력을 일정하게 유지하여 전단시험을 수행한 결과, 전자에 비해 전단강도 값이 작게 산정되었다. 따라서 기존의 시험에 의해 평가되는 절리면의 전단강도는 다소 과대 평가되는 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 응력수준이 높은 경우 더 크게 나타났다.
- (4) 경계조건에 따른 시험결과에 의하면 일정수직강성 조건에서는 전단변위가 진행됨에 따라 발생한 수직 변위( $v$ )와 강성( $K$ )의 크기에 비례하여 수직응력이 증가하였으며, 이때 전단강도도 증가하였다. 터널과 같이 활동하는 블록이 주위 암반에 구속된 경우는 일반적으로 수행되는 절리면의 전단강도 보다 더 큰 전단강도를 발휘하므로 사면이나 터널과 같이 경계 조건이 다른 암반구조물에서는 전단강도 평가기법을 달리하여야 함을 알 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 2002학년도 영남대학교 학술연구조성비에 의한 것임.

### 참 고 문 헌

1. Bandis, S. C., Lumsden, A. C. and Barton, N. R.(1983), "Fundamentals of rock joints deformation", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol.20, No.6, pp.249-268.
2. Barton, N.(1973), "Review of a new shear strength criterion for rock joints", *Engineering Geology*, Vol.7, pp.287-332.
3. Barton, N.(1976), "The shear strength of rock and rock joints", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geonech. Abstr.* Vol.13, pp. 255-279.
4. Hoek, E. and Bray, J. W.(1981), "*Rock Slope Engineering*", The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp.83-126.
5. Ladanyi, B. and Archambault, G.(1970), "Simulation of shear behaviour of a jointed rock mass", *Theory and practice, 11th U. S. Symp. on Rock Mech, Berkeley, California, Society of Mining Engineering of AIME*, pp.105-125.
6. Moucharab, K. S. and 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, GTJODJ*, Vol.17, No.2, pp.233-242.
7. Obert, L., Brady, B. T. and Schemechel, F. W.(1976), "The effect of normal stiffness on the shear resistance of rock", *Rock Mech.*, Vol.8, pp.57-72.
8. Ohnishi, Y.(1990), "Shear behaviour of physical models of rock joints under constant normal stiffness conditions", *Proc. Int. Conf. on rock joints*, Leon, Norway, pp.267-273.
9. Patton, F. D.(1966), "Multiple modes of shear failure in rock", *Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, pp.509-513.
10. Rowe, P. W., Barden, L. and Lee, I. K.(1964), "Energy components during the triaxial cell and direct shear tests", *Geotechnique* 14, pp.247-261.
11. Johnston I. W. and Lam Thomas S. K.(1989), "Shear Behavior of Regular Triangular Concrete Rock Joint - Evaluation", *Journal of Geotechnical Eng.*, Vol.115 No.5, ASCE, pp.728-740.
12. Tse, R. and Cruden, D. M.(1979), "Estimating joint roughness coefficients", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol.16, pp.303-307.

(접수일자 2002. 11. 11, 심사완료일 2003. 2. 11)