

# Graphic 방법을 이용한 암반의 경계조건에 따른 절리면 전단거동 예측

## Prediction for Shear Behavior of the Rock Joints with Boundary Conditions using the Graphic Method

김용준\*                      이정학\*\*                      송범\*\*\*                      염형진\*\*\*\*  
Kim, Yong-Jun              Lee, Jeong-Hark              Song, Pum                      Yeom, Hyeong-Jin

---

### ABSTRACT

The characteristics of a rock joint which influence the stability of rock mass structures, such as the cut slopes and the tunnels, are largely controlled by the conditions of the rock joint as well as its boundary conditions. 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 is 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. It is possible that the behavior under the constant normal stiffness condition can be predicted by the normalized graphic method with results obtained from the tests in the constant normal stress condition.

---

### 1. 서론

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. 최근들어 Leichnitz(1985), Ohnish (1990) 등은 터널과 같이 활동하는 블록의 이동이 주변의 암반에 의해 구속될 때 발생하는 경계조건(boundary conditions)에 대한 중요성을 강조하고 있다. 그러나 암반의 경계조건을 모사할 수 있는 시험장비의 부재로 인해 이 분야의 연구가 다소 제한적이었으며, 일부 연구자들은 절리면 상부에 강성을 가진 스프링을 설치하여 이들의 조건을 모사하고자 하였다.

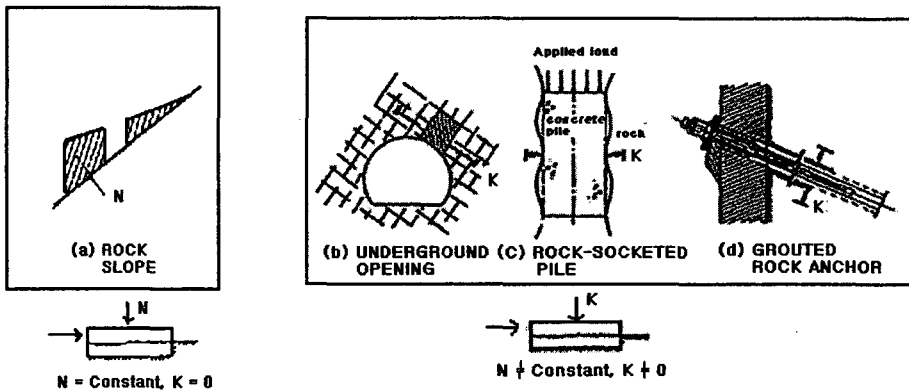
이에 본 연구에서는 활동하는 블록의 이동이 주변의 암반에 의해 구속된 터널과 같이 경계조건이 암반사면과 다른 경우에 있어서 절리면의 역학적 특성과 암반 구조물의 안정성을 평가하기 위한 절리면 전단시험기를 개발하였다. 그리고 일정한 경사각을 가진 톱니형 시료에 대하여 일정수직응력 조건에서 시험을 수행하고 Saeb & Amadei(1990)의 graphic 방법을 이용하여 일정수직응력 시험결과를 이용하여 여러 가지 강성(K)에 따른 전단거동을 예측하고 실험결과와 비교한 결과 실험치와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

---

\* 대림산업(주) 토목사업부 설계지원팀, 과장, 공학박사, 정회원  
\*\* 대림산업(주) 토목사업부, TF팀, 차장, 공학박사, 정회원  
\*\* 대림산업(주) 토목사업본부, 상무, 정회원  
\*\*\*\* 대림산업(주) 토목사업본부, 선우대교 소장, 정회원

## 2. 경계조건

전단하중을 받는 팽창성 절리의 전단특성은 절리면의 구조적인 특징뿐만 아니라 주위 암반에 의한 경계 조건에 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 비례적( $K=constant$ )이면 일정수직강성이라 한다. <그림 1>은 경계조건의 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 전단동 안에 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.

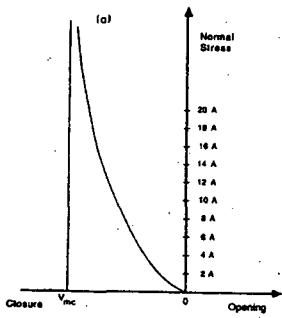


<그림 1> 경계조건의 예(Mouchaorab & Benmokrane, 1994)

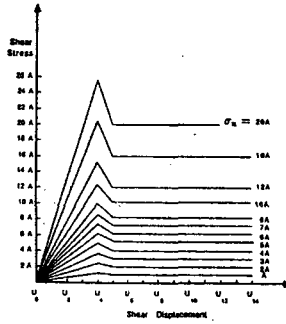
## 3. Graphic Method

Saeb & Amadei(1990)는 일정수직응력 조건에서의 거동을 알고 있다면 일정하거나 변하는 수직강성 조건에서의 절리의 반응을 modelling하는 방법을 제안하였다. <그림 2>의 (a)는 압축시험에서 절리면의 수직응력과 폐합의 관계를 나타내고 있다. 여기서 A는 임의의 수이다.

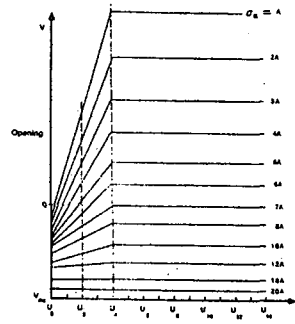
<그림 2>의 (b)는 전단응력과 전단변위의 관계를 일정 최대전단변위 모델로 나타낸 것이며, (c)는 (a)의 실험결과 중에서 전단변위에 따른 절리면의 팽창(dilation)을 수직응력 수준에 따라 나타낸 것이다. <그림 2>에서 각각의 수직응력에서 최대전단강도는 전단변위가  $U_4$ 일 때 발생하며,  $U_4$ 이후의 수직변위는 변화가 없다고 가정하였다. <그림 3>은 전단변위에 따른 수직응력과 수직변위의 관계를 나타낸 것으로 <그림 2>의 결과를 이용한 것이다. <그림 3>에서 곡선  $U_0, U_1, U_2, U_3, U_4$ 는 <그림 2>의 (c)에서 수직변위(v)와 전단변위(u) 사이의 교차점에서 수직응력( $\sigma_n$ )과 수직변위(v)를 읽어서 구성된 것이다.



(a) 절리면 압축곡선

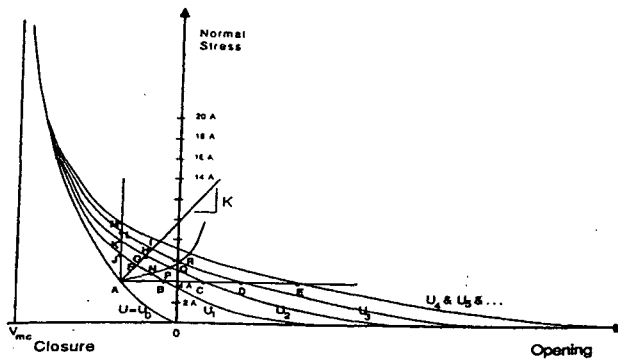


(b) 전단응력-전단변위



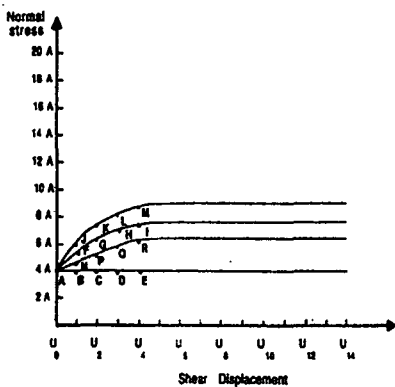
(c) 수직변위-전단변위

<그림 2> 정규화된 절리면 전단거동

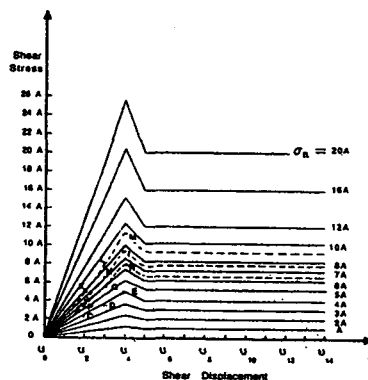


<그림 3> 전단변위에 따른 절리면의 수직응력-수직변위 관계

<그림 3>에서 절리면의 경계조건인 강성계수(K)를 0에서  $\infty$ 까지 일정하게 하거나 변화시키는 경우의 전단특성을 <그림 4>에 나타내었다. <그림 4>에서 (a)는 일정수직강성조건에서 동일한 초기 수직응력 ( $\sigma_{ni}$ )에서 강성의 크기에 따라 전단시 발생하는 팽창에 따라 증가하는 수직응력을 나타낸 것이며, (b)는 일정수직강성조건에서 전단시 발생하는 다이런터시에 의해 증가된 수직응력에 따른 전단강도를 나타낸 것이다. 일정수직강성조건에서의 전단응력이 일정수직응력보다 더 크게 나타났다.



(a) 수직응력-전단변위

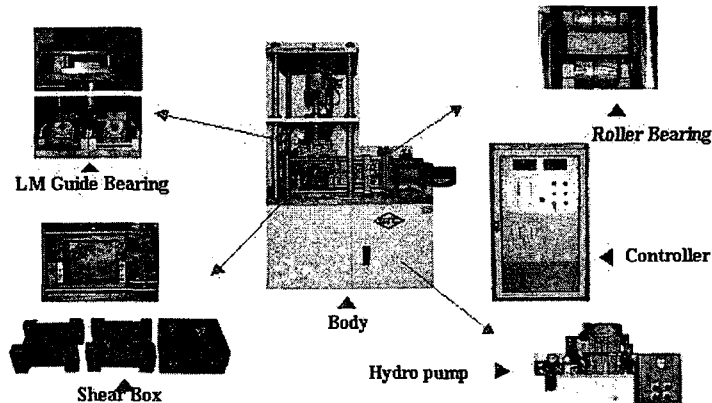


(b) 전단응력-전단변위

<그림 4> graphic 방법에 의한 전단거동 예측(Saeb & Amadei, 1990)

### 3. 시험장비

절리면의 경계조건의 변화에 따른 실험을 수행하기 위하여 전단시 절리면의 팽창이 발생하는 동안 경계강성의 크기만큼 증가된 수직응력이 절리면에 가해질수 있는 시험장비를 새로이 개발하였다. 본 시험기는 압력을 발생시키는 유압펌프, 수직하중과 수평하중을 가하는 액츄에이터, 액츄에이터에서 발생한 하중들을 지지하는 하중 프레임, 시료에 발생하는 불필요한 마찰을 제거하기 위하여 특별히 제작된 전단상자, 시험기에 장착된 여러 계측장비로부터 입출력 신호를 제어하기 위한 콘트롤러(controller), 시험기를 제어하고 데이터를 받아 저장하는 컴퓨터로 구성된 암석 절리면 직접전단시험기이다. 그리고 전단시험시 상부상자의 수평이동에 따른 수직하중의 편심을 억제하고 동일한 위치에서의 수직하중을 재하하기 위하여 상부전단상자와 하중계 사이에 0.0001이하의 아주 작은 마찰계수를 가진 LM 가이드 베어링을 2개 장착하였으며, 수평방향으로는 주기전단시험을 수행하기 위하여 외부전단상자 축의 끝 부분을 2개의 롤러 베어링 사이에 끼워진 십자 모양의 판에 체결되어 있다. 또한 원활한 제어를 위해 시험장비의 입출력을 제어하는 콘트롤러는 2개의 하중앰프와 각 방향에 대하여 하중과 변위에 대한 제어를 위해서 4개의 서보 앰프를 장착하였으며, 직접전단시험장비의 실제 전경을 <그림 5>에 나타내었다.

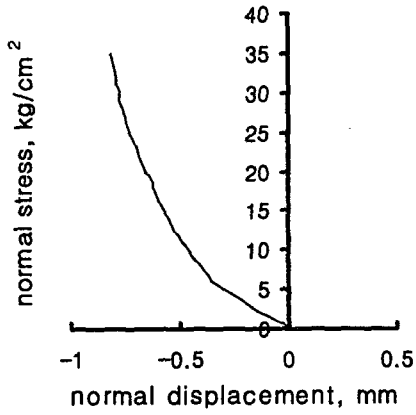


<그림 5> 직접전단시험장비 전경

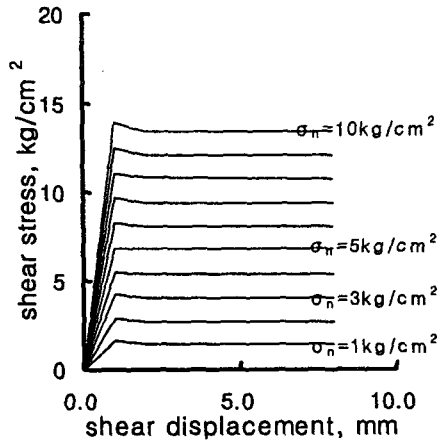
### 4. 절리면의 전단거동 예측

Ohnishi(1990)의 강성시험 결과에 의하면 초기수직응력( $\sigma_m$ ), 강성(K)의 변화에 상관없이 전단시 발생하는 팽창량에 대하여 증분되는 수직응력과 전단응력에 의한 응력경로는 직선적으로 증가하다가 절리면의 파괴포락선에 근접하여서는 이 경로를 따라가는 것으로 나타났다. 또한 Dight & Chiu(1983), Skinas et al.(1990), Saeb & Amadei(1990)는 보편적으로 수행되는 일정수직응력 시험을 이용하여 암반의 경계조건에 의한 강성(K)의 크기에 따른 전단강도를 예측하고자 하였다. 이들 연구의 공통점은 일정수직강성 조건에서 전단시 발생하는 팽창량에 따라 연속적으로 증가하는 수직응력에 의해 발휘되는 전단강도는 일정수직응력조건에서 해당 수직응력에서 최대전단강도와 같다는 것이다. 본 연구에서는 Saeb & Amadei(1990)의 graphic 방법을 이용하여 일정수직응력 시험결과를 이용하여 여러 가지 강성(K)에 따른 전단거동을 예측하고 실험결과와 비교하여 그 적용성을 살펴보았다.

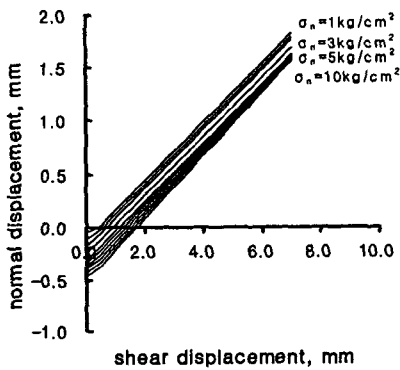
본 연구에서는 일정한 경사각( $i=30^\circ$ )을 가진 인공 절리시료( $\sigma_c=360\text{kg/cm}^2$ )에 대해서 수직응력을 1, 3, 5,  $10\text{kg/cm}^2$ 으로 일정하게 유지하는 일정수직응력 조건의 전단실험을 수행하고 <그림 6>과 같이 표준화 하였다. 여기서, (a)는 절리면 압축시험 결과이고, (b)와 (c)는 각각 일정수직응력 시험의 결과에서 전단응력 - 전단변위, 수직변위 - 전단변위의 관계를 나타낸 것이다. 그리고 (b)는 일정최대전단변위 모델로 전단응력 - 전단변위의 관계를 표준화한 하였다. 또한 (d)는 (b), (c)에서 각각의 전단변위에서 수직응력과 수직변위를 읽어 나타낸 것이다.



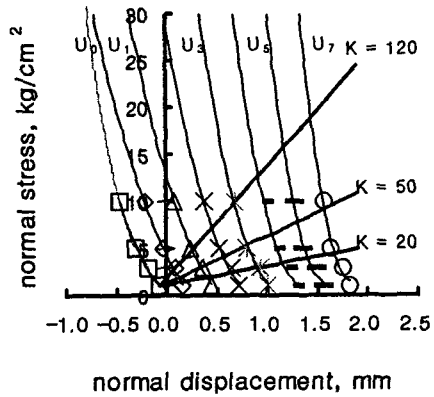
(a) 수직응력-수직변위(압축시험)



(b) 전단응력-전단변위

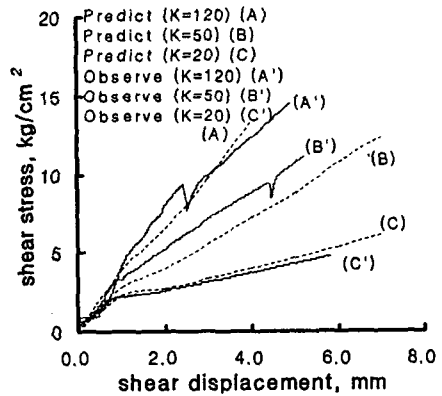
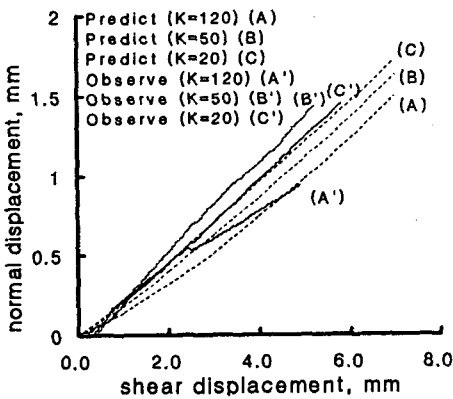


(c) 수직변위-전단변위



(d) 전단변위에 따른 수직응력-수직변위

<그림 6> graphic 방법에 의한 실험결과의 표준화



<그림 7> graphic method에 의한 일정 수직강성 거동 예측

graphic 방법을 이용하여 일정 수직강성 조건의 거동 예측에 있어서, 수직강성(K)은 수직용력과 수직변위의 비이기 때문에 (d)에서처럼 임의의 초기 수직용력에서 수직강성에 따른 수직변위, 전단변위, 수직용력을 읽고 (b)에서 전단용력을 읽어 전단특성을 예측 할 수 있다. <그림 7>에는 graphic 방법을 이용하여 예측한 일정수직강성 조건의 거동을 실험치와 같이 나타낸 것으로 예측결과는 실험치와 거의 유사하게 나타났다.

## 5. 결론

활동하는 블록의 이동이 주변의 암반에 의해 구속된 터널과 같이 경계조건이 일반적인 조건과 다를 경우에 있어서 암반 구조물의 안정성을 평가하기 위한 절리면 전단시험장비를 새로이 개발하고 일정수직강성조건에서의 전단특성을 고찰하고 일정수직용력 시험결과에 대해서 graphic 방법을 이용하여 일정수직강성조건에서의 전단거동을 예측하고 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 (Propotional - Integral - Deriative) 알고리즘에 의한 서보제어(servo contral) 방식의 절리면 전단시험장비를 새로이 개발하였다.
- 2) 일정수직강성 조건에서의 거동은 일정수직용력 시험결과를 규준화한 graphic 방법을 이용하여 그 거동을 예측할 수 있었으며, 예측결과는 실험치와 거의 유사하게 나타났다.
- 3) 터널과 같이 활동하는 블록이 주위 암반에 구속된 경우는 일반적으로 수행되는 절리면의 전단강도 보다 더 큰 전단강도를 발휘하므로 사면이나 터널과 같이 경계조건이 다른 암반구조물에서는 전단강도 평가 방법을 달리하여야 함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Mouchaorab, 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.
2. Dight, P.M. and Chiu H.K.(1981), "Prediction of shear behaviour of joints using profiles". *Int. J. Rock Mech. Min Sci. & Geom. Abstr.*, 18: pp. 386-396.
3. Leichnitz(1985), "Mechanical properties of rock joints", *Int. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 22. No. 5, pp. 313-321.
4. 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.
5. Saeb and Amadei(1990), "Modelling joint response under constant or variable normal stiffness boundary conditions", *Int. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 27. No. 3, pp. 213-217.
6. Skinas, C. A.(1990), Bandis, S. C. and Demiris, C. A., "Experimental investigations and modelling of rock joint behaviour under constant stiffness", *Proc. Int. Conf. on rock joints*, Leon, Norway, pp. 301-308.