

하중조건에 따른 암석 절리면 전단 거동

손봉기, 이정인 (서울대학교)

박연준 (수원대학교)

이연규 (군산대학교)

1. 서 론

터널이나 암반 구조물의 역학적 안정성 해석 및 설계 기술의 향상을 위하여 암석절리면의 변형거동 및 파괴특성을 실험적으로 규명하고 이를 불연속체 암반구조물 설계에 반영할 수 있는 정량적인 해석에 관한 연구가 필요하다. 암석절리면의 변형거동 및 파괴특성은 현장에서 다양한 응력과 절리의 기하학적 조건에 따라 실험하기가 어렵기 때문에 실험실 직접 전단시험을 통하여 연구되고 있다.

현재까지 실험의 간편성과 용이성으로 절리면의 전단거동에 관한 실험 및 구성 방정식 연구는 대부분이 일정수직하중(Constant Normal Load, CNL) 경계 조건으로 수행되어왔다. 전단 변형시 절리면에 가해지는 수직하중이 일정한 경계 조건은 지보가 없는 사면과 같은 경우에 적합하지만, 불연속 암반내에 굴착되는 터널 및 지하공동의 측벽이나 천단부 암반 블록이 미끄러지는 경우나 암반에 관입된 파일의 구조적 접촉면의 경우에는 실제 역학적 현상과 일치하지 않다(그림 1). 지하공동의 경우 전단변형이 발생하는 동안 절리면의 거칠기에 의하여 수직 팽창 (dilation)하려는 성질이 있고, 이러한 수직 팽창성은 주변 암반의 구속으로 수직하중을 증가시킨다. 이러한 수직팽창-수직하중의 상호작용이 일어나는 지하 암반 절리면의 실제 거동을 실내에서 정확히 모사하기 위해서는 일정수직강성(Constant Normal Stiffness, CNS) 경계 조건에서 실험을 수행해야한다 (Jiang et al., 2004).

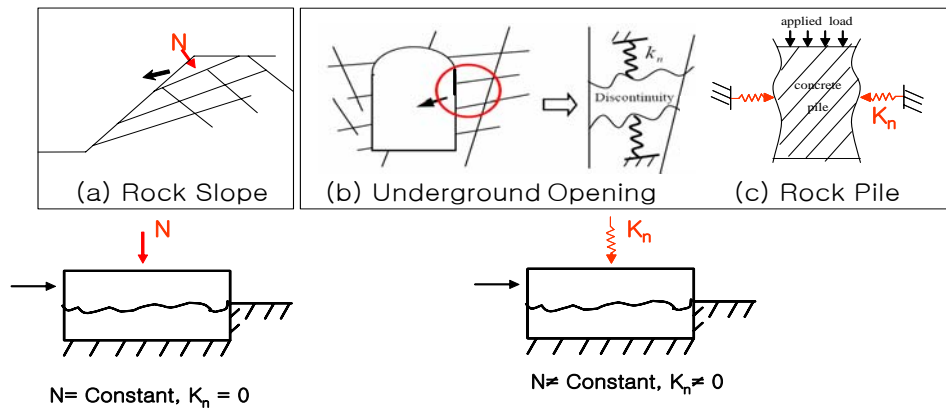


그림 1. 일정수직하중 조건과 일정수직강성 조건의 예
(after Mouchaorab & Benmokrane, 1994).

본 연구에서는 서보 제어 유압식 직접 전단 시험기를 이용하여 일정수직강성 조건에서 암석절리와 시멘트 복제시료에 대하여 전단 시험을 수행하였다. 전단 시험 중 미소파괴음 측정을 통하여 시험 경계 조건과 시료 모양에 따른 미소파괴음 특성을 분석하고, 음원 추적을 통하여 거칠기 손상과 거칠기 파라미터의 관계를 규명하였다. 또한 시험 결과에 기초하여 초기 조건과 거칠기에 따라 절리 거동을 세 가지 형태로 분류하였고, Barton의 경험식과 비교 분석하였다.

2. 시료 및 실험 장치

2.1 시료 준비

이 연구에서는 석재로 사용되고 있는 균질한 화성암인 황등화강암을 암석 재료로 이용하였으며, 거칠기가 동일한 절리면 시료를 복제하기 위한 암석 유사 재료 (rock like material)로는 시멘트 모르타르를 사용하였다. 시멘트 모르타르는 (주)유니온의 ‘고강도 그라우트 (HS)’를 사용하였으며, 시멘트 모르타르의 배합비는 재료의 중량비로 물 : 시멘트 : 모래 = 13 : 40 : 60 이고, 완제품에 대한 물의 중량비는 13%이다. 시험 재료의 기본 물성을 구하기 위해 5개의 4일간 양생한 시멘트 모르타르와 4개의 화강암 시료를 사용하여 실험을 수행한 결과 단축 압축강도는 화강암이 138.5 MPa, 시멘트 모르타르가 29.5 MPa이고, 간접인장 강도는 화강암이 8.5 MPa, 시멘트 모르타르가 3.5 MPa의 평균값을 보이고 있었다.

인장절리 시료와 자연절리 시료의 절리면을 복제하기 위해 신에츄사의 KE-1600 고정밀 본뜨기 실리콘을 사용하였다. 실험에 사용된 시멘트 복제 시료의 제작 과정은 다음과 같다.

- (1) 실리콘과 경화제 혼합액을 이용하여 화강암 인장절리 또는 자연절리 표면을 복제한다.
- (2) 복제된 실리콘을 성형틀에 고정시킨 후 시멘트 모르타르를 높이 10 mm까지 채우고, 기포를 제거한 후 65 mm 되는 높이까지 채워 12시간 양생하여 하부 절리면을 제작한다.
- (3) 하부 절리면을 이용하여 같은 방법으로 상부 절리면을 제작하였다. 그림 2는 시멘트 모르타르로 성형한 인공 절리면의 모습을 보여주고 있다.

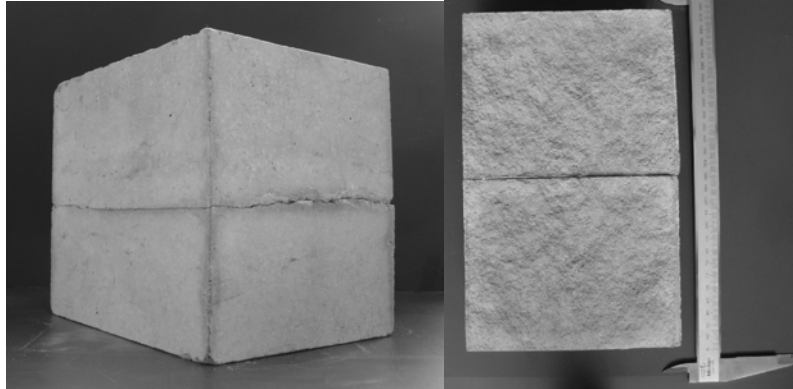


그림 2. 완성된 시멘트 모르타르 복제 절리 시료

2.2 실험 장치

본 연구에서 사용한 직접 전단 시험기는 서울대학교 암반공학 연구실에서 설계하고 (주) 연엔지니어링에서 제작하였다. 시험기는 수직·전단방향으로 독립적인 서보 제어가 가능하며 규칙적인 톱니모양 시료를 이용하여 Rim et al. (2005)에 의해 성능이 검증되었다. 절리면 거칠기의 수치 데이터를 얻기 위해서 3차원 레이저 거칠기 측정기를 사용하였고, 전단 시험 동안 미소파괴음을 측정하기 위해서 미국 Physical Acoustic Corporation의 MISTRAS 2001 시스템을 이용하였다.

전단 시험기는 크게 시험기 본체 (main frame)와 시험기를 제어하는 프로그램 (control program), 그리고 유압 펌프 (hydraulic power unit), 신호 증폭기 (signal amplifier), A/D변환기 (Analog-Digital converter) 등으로 구분할 수 있다. 그림 3은 직접 전단 시험기에서 신호의 흐름을 나타내며, 각각의 센서에서 읽어 들인 변위 변환기 및 하중 변환기의 신호 및 서보 밸브의 신호는 증폭기를 거치면서 증폭되어 컴퓨터에서 처리된다.

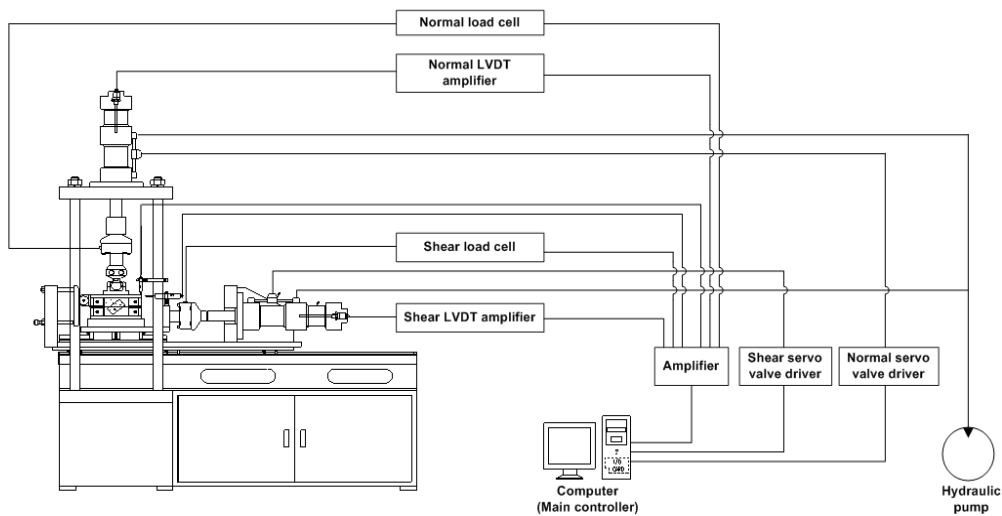


그림 3. 직접전단시험기의 신호 흐름도

2.3 실험방법

일정수직하중 조건에서는 수직응력을 0.2, 0.5, 1.0 그리고 1.5 MPa로 바꾸어가며 실험을 수행하였다. 일정수직강성 조건에서는 주변 암반의 강성을 나타내는 수직 강성을 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 그리고 1.5 MPa/mm로 바꾸어 가면서 수직강성변화에 따른 전단 거동 특성을 조사하였고, 초기 수직응력을 0.1, 0.2, 0.5 MPa로 바꾸어 가면서 실험을 수행하였다. 또한 전단 시험을 하는 동안 발생하는 미소파괴음의 특성을 관찰함으로써 거칠기 손상과 거칠기 파라미터의 관계를 규명하고자 하였다. 표 1은 실험에서 사용한 시료의 종류와 하중 조건을 나타내고 있다.

표 1. 시료의 종류와 하중 조건

일정수직하중(CNL) 조건			일정수직강성(CNS) 조건		
모르타르	평면절리 시료	수직응력변화 (MPa) (0.2, 0.5, 1.0, 1.5)	모르타르	규칙적인 톱니모양 시료*	초기수직응력 변화 (MPa) (0.1, 0.2, 0.5)
	인장절리 복제시료	수직응력변화 (MPa) (0.2, 0.5, 1.0, 1.5)		인장절리 복제시료	수직강성 변화 (MPa/mm) (0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5) 초기수직응력 변화 (MPa) (0.1, 0.2, 0.5)
	자연절리 복제시료	수직응력변화 (MPa) (0.2, 0.5, 1.0, 1.5)		자연절리 복제시료	수직강성 변화 (MPa/mm) (0.2, 1.5) 초기수직응력 변화 (MPa) (0.1, 0.5)
화강암	평면절리	수직응력변화 (MPa) (0.2, 0.5, 1.0, 1.5)	화강암	인장절리 시료	수직강성 변화 (MPa/mm) (0.2, 0.5, 1.0) 초기수직응력 변화 (MPa) (0.1, 0.5)

* 규칙적인 톱니모양 시료: 전단변위 방향의 단변이 규칙적인 이등변 삼각형 모양의 요철을 갖는 시료를 의미함.

3. 일정수직강성 (CNS) 조건하의 절리면 전단거동

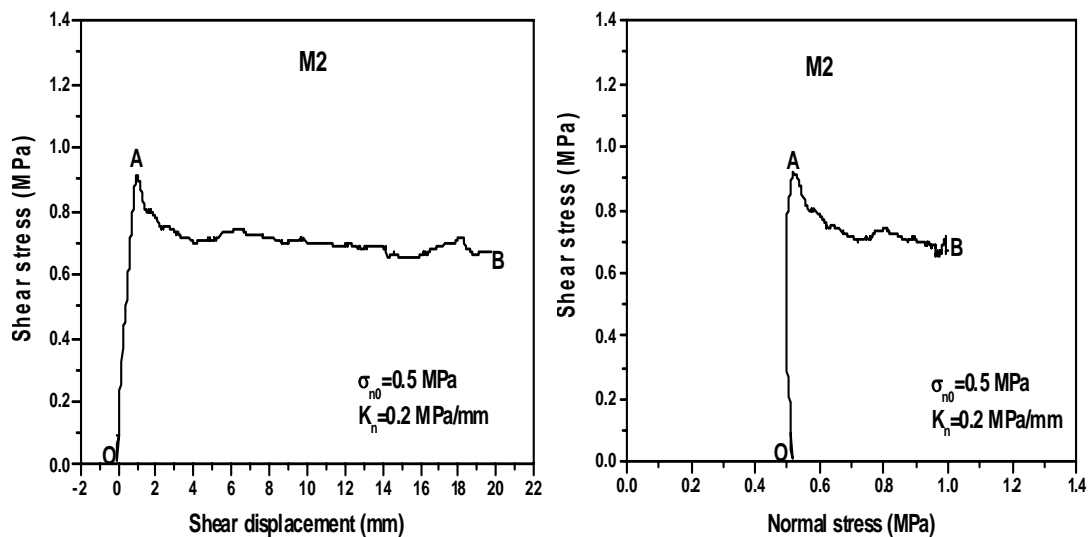
일정수직하중 조건에서는 정점 전단 강도 이후 거칠기의 파쇄와 절리면 엇물림에 의하여 전단 변위가 증가하면서 전단 응력이 감소하는 응력 연화 현상이 나타난다. 그러나 일정수직강성 조건에서는 일차 정점 전단강도 이후 거칠기의 파쇄와 절리면 엇물림과 같은 전단 응력을 감소시키는 요인과 수직 변위의 발생으로 생기는 수직응력의 증가로 전단 응력을 증가시키는 요인이 서로 복합적으로 작용하여 초기 조건인 수직 강성과 초기 수직응력에 따라 전단 거동이 다르게 나타난다.

이러한 전단거동의 특징을 연구하기 위하여 인장절리 복제 시료, 자연 절리 복제 시료 그리고 화강암 인장절리 시료를 이용하여 일정수직강성 조건에서 서로 다른 초기 조건을 설정하여 100회 이상의 전단 실험을 수행하였다. 이러한 서로 다른 초기 조건하에서 전단 거동은 크게 세 가지 형태의 다른 거동을 보이고 있었으며, 따라서 본 연구에서는 뚜렷하게 구분되는 전단 거동을 Type I, Type II 그리고 Type III으로 나누어 특징을 살펴보았다.

3.1 일정수직강성 조건의 전단거동 Type I

규칙적인 톱니모양 시료의 경우 비교적 높은 초기 경사각을 가지고 있고, 일차 정점 전단 응력 이후 거칠기 파쇄보다는 경사각을 따라 미끄러짐이 주로 발생하여 전단응력의 연화 현상이 나타나지 않았다. 그러나 자연 절리면 형태를 가진 절리면의 경우 수직변위에 의한 수직응력 증분이 초기 조건에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 그림 4와 같이 일정수직하중 조건과 비슷하게 일차 정점 전단응력 이후 전단응력의 연화 현상이 보이는 전단 거동을 Type I으로 정의하였다.

Type I은 본 연구의 시험 조건 중 초기 수직응력이 비교적 높은 0.5 MPa과 수직강성이 낮은 0.1 MPa/mm 또는 0.2 MPa/mm인 초기 조건에서 주로 나타났다. 높은 초기 수직응력에서는 높은 일차 정점 전단응력을 가지게 되고 이는 많은 거칠기 파쇄를 의미한다. 이후 낮은 수직 강성으로 수직응력의 증가가 크지 않아 거칠기의 손상과 엇물림에 의한 전단응력을 감소시키는 경향이 수직응력 증가에 따른 전단응력을 증가시키는 경향보다 더 크기 때문에 전단응력-전단변위 곡선의 AB 구간에서 전단응력의 증가가 거의 없거나 오히려 감소하는 거동을 보이고 있다. 전단응력-수직응력 곡선에서 점 A까지는 일정한 수직응력을 유지하다가 수직 변위의 발생으로 수직응력은 증가하나 전단응력이 점점 감소하는 경향을 보이고 있다.



(a) 전단응력-전단변위

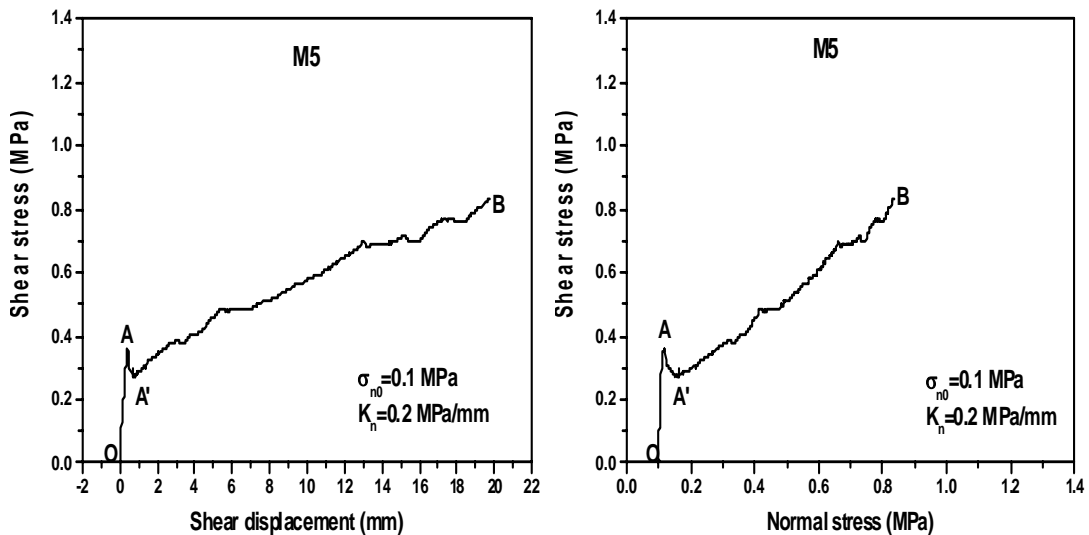
(b) 전단응력-수직응력

그림 4. 일정수직강성 조건하 Type I의 전단 거동

3.2 일정수직강성 조건의 전단거동 Type II

일정수직강성 조건의 Type II의 전단거동은 Type I에서 Type III으로 넘어가는 중간 단계의 거동을 보이고 있다. 본 연구의 시험 조건 중 비교적 낮은 초기 수직응력과 낮은 수직강성의 초기 조건에서 Type II의 전단거동이 거칠기가 거친 인장절리 복제시료에서 나타나고 있으며, 초기 수직응력이 0.1 MPa 또는 0.2 MPa이고, 수직강성이 0.2 MPa/mm 또는 0.5 MPa/mm일 경우 주로 나타났다. 그러나 거칠기가 작은 자연 절리면 복제 시료의 경우 초기 수직응력이 0.1 MPa이고, 수직강성이 0.2 MPa/mm에서 Type I의 거동을 보였다. 이는 CNS 조건에서 절리면 거동의 특성은 거칠기 손상과 수직응력 증가량에 영향을 받기 때문에 거칠기가 작을 경우 거친 절리면 보다 상대적으로 수직응력 증가량이 작아 거친 절리면서 Type II를 보이는 같은 초기조건에서 Type I의 거동이 나타난 것으로 판단된다.

그림 5는 일정수직강성 조건에서 Type II에 대한 대표적인 전단거동을 보여주고 있다. 전단응력-전단변위 곡선에서 Type II의 특징은 일차 정점 전단응력 A 이후에 전단 응력이 A'까지 감소한 이후 다시 A'B 구간에서는 전단응력이 증가하는 것이다. 일차 정점 전단강도 이후 2차 거칠기의 파쇄와 절리면 엇물림이 일어나 전단 응력을 감소시키는 요인이 전단 응력을 증가시키는 요인보다 우세하게 작용하여 A'까지 전단응력이 감소하나 이후 수직응력의 증가로 다시 전단응력이 증가하는 현상을 보이고 있다. Johnston et. al (1987)은 톱니 모양의 시료에 대하여 이러한 전단응력 저하 현상을 절리면 사이의 점착 결속력(cohesive bond)이 사라지는 것으로 설명하고 있다. 전단응력-수직응력 곡선에서도 이러한 점착 결속력이 사라져서 AA' 구간에서는 Type I과 같이 감소하는 거동을 보이다가 다시 A'B 구간에서는 증가하는 거동을 보이고 있다.



(a) 전단응력-전단변위

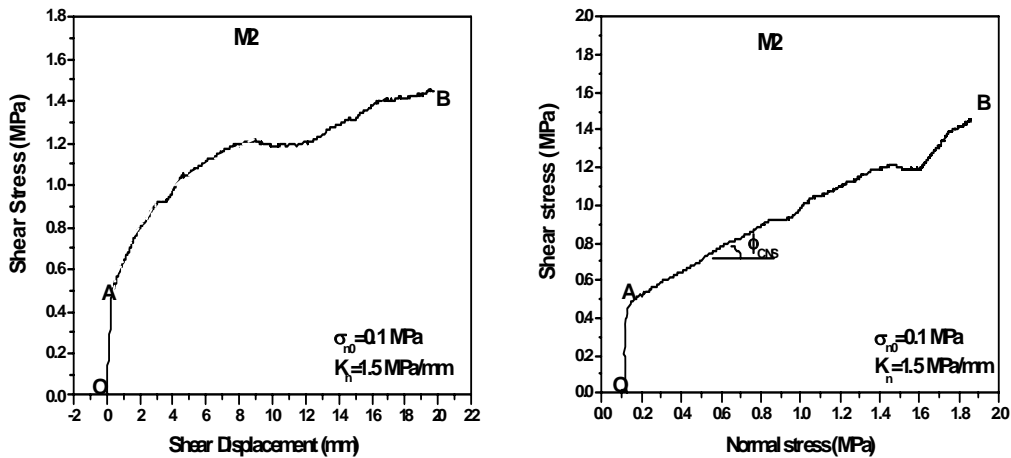
(b) 전단응력-수직응력

그림 5. 일정수직강성 조건하 Type II의 전단 거동

3.3 일정수직강성 조건의 전단거동 Type III

본 연구의 시험 조건 중 초기 수직응력이 낮고, 수직 강성이 높을 경우 일정수직강성 조건에서 Type III의 거동이 주로 나타났다. 즉 초기 수직 응력이 0.1 MPa이고, 수직 강성이 0.5 MPa/mm, 1.0 MPa/mm 그리고 1.5 MPa/mm인 경우 인장절리 복제시료에서 주로 Type III의 거동이 나타났다. 자연 절리 복제시료의 경우 거칠기가 작기 때문에 수직 강성이 높아도 증가되는 수직응력이 작아 주로 수직 강성이 1.5 MPa/mm인 경우에 Type III의 거동을 보이고 있다. Type III의 거동은 그림 6과 같이 일차 정점 전단응력이후 전단응력의 감소 없이 바로 증가하는 형태를 보이고 있으며, 다른 두 거동에 비하여 AB 구간에서 전단응력-수직응력 곡선이 비교적 선형에 가까운 거동을 보이고 있다.

Patton (1966)은 규칙적인 톱니모양 시료를 이용한 일정수직하중 조건에서의 이중 선형모델을 제시하였으며, 전단 강도 포락선은 식 (1)과 같다.



(a) 전단응력-전단변위

(b) 전단응력-수직응력

그림 6. 일정수직강성 조건하 Type III의 전단 거동

$$\text{For asperity sliding: } \tau_p(CNL) = \sigma_n(CNL) \cdot \tan(\phi_b + i_0)$$

$$\text{For asperity shearing: } \tau_p(CNL) = c + \sigma_n(CNL) \cdot \tan(\phi_b) \quad (1)$$

위의 식은 일정수직하중 조건에서 정점 전단강도의 전단응력만으로 표현이 되었기 때문에 지속적인 거칠기 파쇄가 일어나는 일정수직강성 조건에서의 전단응력-수직응력 포락선과는 다소 차이를 보일 수 있다. 또한 규칙적인 톱니모양의 시료와는 달리 인장절리 시료와 자연절리 복제 시료와 같은 불규칙한 절리면의 경우 미끄러짐과 거칠기 파쇄가 동시에 일어남을 미소파괴음을 통해 알 수 있었다(Rim et al., 2005). 따라서 이 연구에서는 Coulomb의 마찰 모델을 가정하여 Type III에 대하여 식 (2)와 같이 전단응력을 전단 변위의 함수로 표현하여 제시하였다.

$$\begin{aligned} \tau &= K_s \cdot u, & u &\leq u_{peak} \\ \tau &= c + \sigma_n(u) \cdot \tan(\phi_{CNS}), & u &\geq u_{peak} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\tan(\phi_{CNS})$ 는 CNS 조건의 전단응력-수직응력 곡선에서 AB 구간을 대표하는 직선 기울기 값이며 c 는 겔보기 점착력(apparent cohesion)으로 전단 변위가 0일 때의 값을 의미한다. 전단변위에 따라 변화하는 수직응력은 식 (3)과 같이 전단변위가 독립 변수로 표현되는 수직변위의 함수로 표현 가능하다.

$$\sigma_n(u) = \sigma_{n0} + K \cdot v(u) \quad (3)$$

여기서 K 는 일정수직강성 조건에서의 주변 암반의 수직강성 값을 나타낸다. 따라서 식 (3)을 식 (2)에 대입하고 정리하면 수직변위 함수로 표현되는 전단 응력 식이 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \tau_{CNS} &= K_s \cdot u, & u &\leq u_{peak} \\ \tau_{CNS} &= c + (\sigma_{n0} + K \cdot v(u)) \cdot \tan(\phi_{CNS}), & u &\geq u_{peak} \end{aligned} \quad (4)$$

4. 경계 조건에 따른 전단거동 비교

4.1 CNS 실험 결과와 Barton 모델과의 비교

Barton의 전단강도 식과 실험결과를 비교하기 위하여 전단응력을 수직응력으로 나눈 값인 마찰 계수(coefficient of friction)를 이용하였다. 같은 거칠기와 절리면 벽면 강도를 갖는 동일한 절리면의 경우 전단응력은 수직응력과 전단변위에 영향을 받기 때문에 전단시험 도중 수직응력이 변화하는 일정수직강성 조건의 실험 결과와 일정수직하중 조건의 Barton 모델과 비교하기 위해 전단변위에 따른 마찰 계수를 비교하였다. 전단변위에 따른 거칠기 감소를 고려하기 위하여 그림 7과 같이 JRC_m (Barton et al., 1985) 개념을 도입하였으며, Barton 모델의 마찰 계수(μ)는 수직응력과 JRC_m 을 식 (5)에 대입하여 구하였다.

$$\mu_{BB\ model} = \tan(JRC_m \cdot \log_{10}(JCS/\sigma_n) + \phi_r) \quad (5)$$

여기서, $\mu_{BB\ model}$ 은 Barton 모델에서의 마찰 계수를 의미하며 ϕ_r 은 잔류 마찰각으로 본 연구에서는 33° 로 가정하였다.

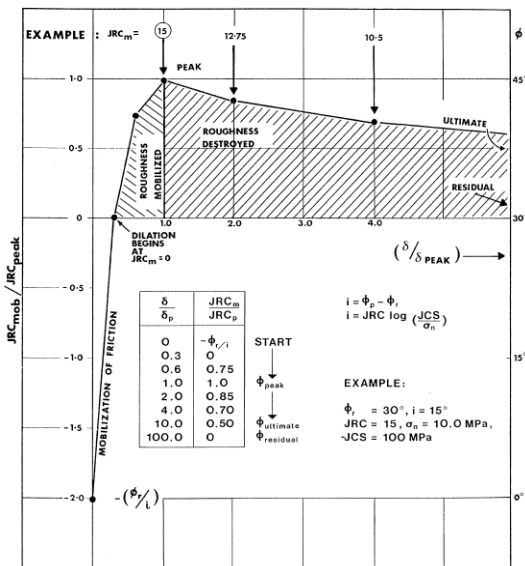


그림 7. 절리면 전단 거동의 Barton 모델 (after Barton et al., 1985)

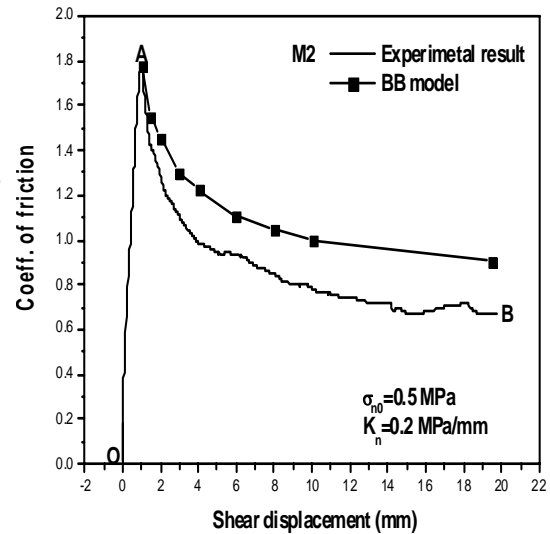


그림 8. Type I의 실험결과 Barton 모델과의 비교

그림 8은 Type I의 실험 결과와 Barton 모델을 마찰 계수-전단변위 곡선으로 나타낸 것이다. Barton 모델의 마찰 계수가 일정수직강성 조건의 Type I 실험 결과 보다 높게 평가되었다. 이는 일정수직하중 조건에서 만들어진 Barton 모델은 일정수직강성 조건에서 재평가 되어 수정할 필요가 있음을 의미한다.

4.2 일정수직강성 조건하의 미소파괴음 측정

절리면 거칠기 파라미터와 미소파괴음 음원 발생 위치의 상관관계를 알아보기 위해 절리면 평균 거칠기 높이에 대한 표준 편차 (SDH)와 절리면 평균거칠각 (i_{ave}) 그리고 거칠각의 평방평균값 (i_{rms})을 음원의 위치와 비교해 보았다. 그림 9는 미소파괴음 음원 추적을 통하여 얻은 결과와 계산된 거칠기 파라미터를 거칠기를 측정한 열 (horizontal location)에 대하여 나타낸 것으로 30 mm ~ 50 mm 사이에서 전체 40 % 이상의 음원이 집중적으로 발생하였다.

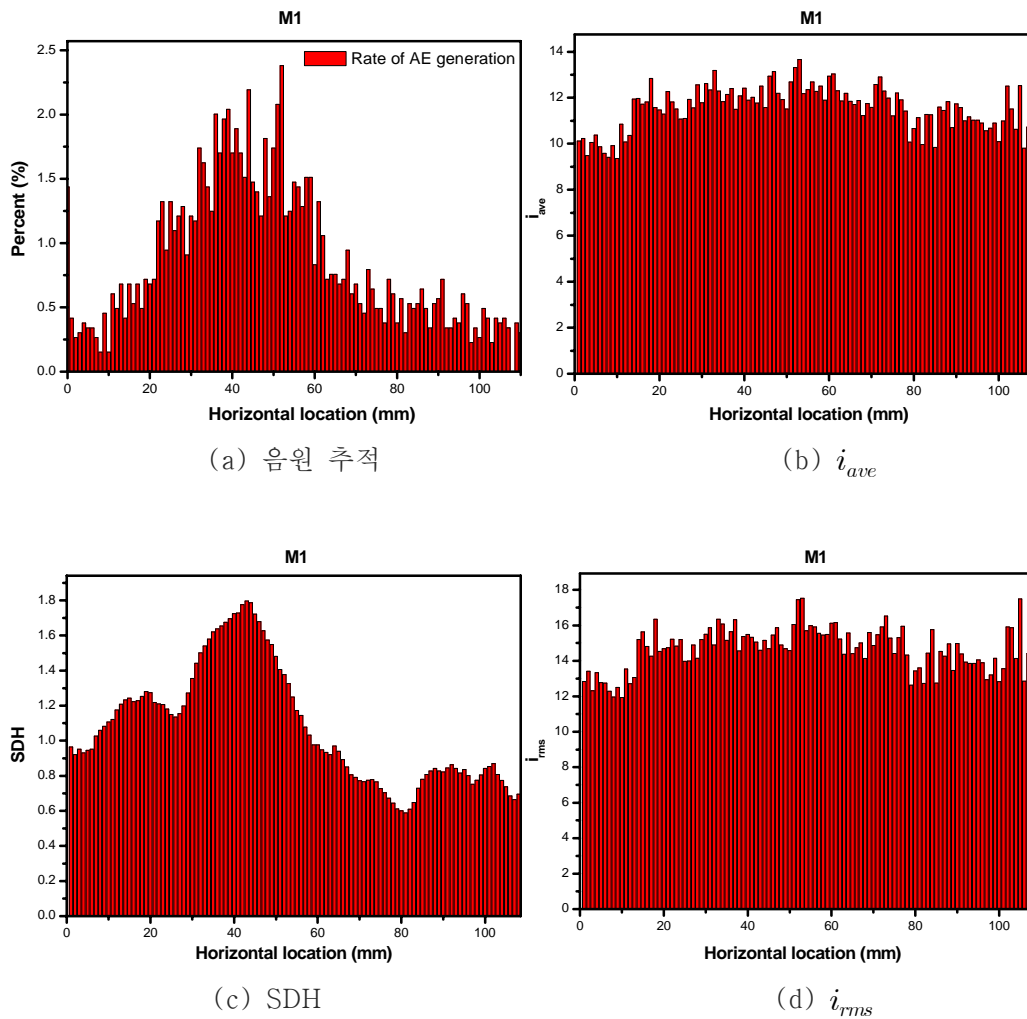


그림 9. 미소파괴음 음원 추적과 거칠기 파라미터와의 관계

음원 위치의 결과와 거칠기 파라미터의 분포 결과를 비교해 보면 거칠기 높이에 대한 표준 편차 (SDH)와 상당히 비슷한 모습을 보이고 있다. 일반적으로 일정수직하중 조건에서 정점 진단강도는 거칠기 파라미터의 기울기와 높은 상관관계를 가지고 있는 것으로 알려져 있다(이상돈, 1996). 그러나 일정수직하중 조건에서 일차 정점 진단응력 이후 거칠기 손상과 관련해서 기울기와 관련된 거칠기 파라미터보다 진폭과 관련된 거칠기 파라미터가 보다 많은 영향을 줄 것으로 판단된다. 즉 거칠기 파쇄는 거칠기 각 보다는 거칠기의 높이 편차가 큰 곳에서 더 많이 발생되고, 진단강도의 크기에 보다 많은 영향을 준다고 할 수 있다.

4.3 CNS-CN1 실험 결과 비교

경계 조건에 따른 절리면 거동을 비교하기 위하여 동일한 거칠기를 가진 모르타르 복제 시료에 대하여 일정수직하중 조건과 일정수직하중 조건에서 실험을 하여 결과를 비교하였다.

그림 10은 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 MPa의 일정수직하중 조건의 실험 결과와 초기수직응력이 0.1

MPa 그리고 수직강성이 1.5 MPa/mm인 일정수직강성 조건의 실험 결과를 나타내고 있다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 일정수직강성 조건의 Type III 전단거동의 경우 전단응력-수직응력의 경로는 일정수직하중 조건의 최대전단강도 포락선과 잔류전단강도 포락선 사이에 존재함을 알 수 있고, 이는 Johannes et al. (1995)의 실험 결과와 일치한다. 또한 CNS 조건의 전단응력-수직응력 곡선은 기본 마찰각을 나타내는 직선 보다 항상 위에 존재 한다는 Olsson & Barton (2001)의 결과와도 일치한다. 전단변위 초기에는 CNS의 전단응력과 CNL의 정점 전단강도가 비슷한 값을 보이고 있으나 전단변위가 증가함에 따라 CNS의 전단응력은 CNL의 잔류강도에 접근하고 있다. Coulomb의 마찰 법칙을 가정할 경우 포락선의 기울기는 마찰각 성분을 의미하므로 Type III의 마찰각 ϕ_{CNS} 는 일정수직하중 조건에서 구한 잔류 마찰각 보다 작은 값을 보이고 있다. 이전의 연구 결과와 그림 10에서 나타나듯이 경계 조건에 따라 절리면 전단거동은 서로 다른 특성을 보이고 있어 현장 경계 조건에 맞는 실내 전단시험을 선택 하는 것이 중요하다.

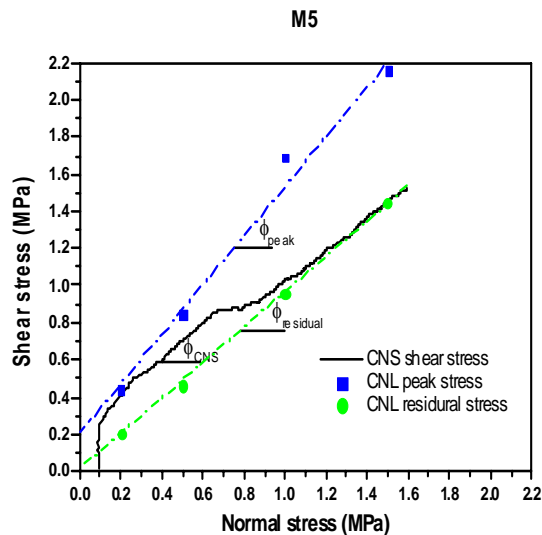


그림 10. CNL 조건과 CNS 조건하의 실험 결과 비교

5. 결 론

서보 제어 유압식 직접전단 시험기를 이용하여 일정수직강성과 일정수직하중 조건에서 전단 시험을 수행하고, 전단시험 중 미소파괴음 측정을 통하여 시험 경계 조건과 시료 모양에 따른 미소파괴음 특성을 분석하였다. 이상의 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) CNS 조건에서 초기 조건과 거칠기에 따라 절리 거동을 세 가지 형태로 분류하였다. Type I은 높은 일차 정점 전단응력을 보이며 높은 전단응력으로 거칠기 손상이 심하게 발생하여 일차 정점 전단응력 이후 수직응력이 증가해도 전단응력이 증가하지 않는 절리 거동이다. Type II는 일차 정점 전단응력 이후 2차 거칠기의 파쇄와 접촉 결속력 (cohesive bond)이 사라져 전단응력 저하가 일시적으로 생기나 계속되는 수직응

력의 증가로 전단응력이 다시 증가하는 절리 거동이다. Type III은 일차 정점 전단응력 이후 높은 수직응력의 증가로 전단응력 저하 없이 전단응력이 증가하는 절리 거동이다.

- 2) CNS 조건에서 절리면 거동의 특성은 거칠기 손상과 수직응력 증가량에 영향을 받기 때문에 거칠기가 작을 경우 거친 절리면 보다 상대적으로 수직응력 증가량이 작아 거친 절리면에서 Type II를 보이는 초기조건에서 Type I의 거동이 나타났다.
- 3) 음원의 분포는 거칠기의 진폭과 관련된 절리면 높이의 표준편차(SDH)와 유사한 분포를 보이고 있어 거칠기 손상은 거칠기의 진폭과 상관관계가 높다고 판단되었다.
- 4) CNS 조건의 경우 일차 정점 전단응력은 CNL 조건의 정점 전단강도와 비슷한 값을 보이고 있으나, 이후 거칠기의 손상으로 CNL 조건의 잔류 전단강도에 접근하기 한다. Coulomb의 마찰 모델을 가정할 경우, Type III의 마찰각(ϕ_{CNS})은 CNL 조건의 잔류 마찰각(ϕ_r)보다 작게 계산되어 현장 하중 조건을 정확히 모사하는 실내 전단시험이 중요하다고 판단된다.

■ 참고문헌 ■

1. 이상돈, 1996, 절리형상의 정량적 측정을 통한 각종 거칠기 파라미터의 비교분석 및 전단거동 해석, 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
2. Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K., 1985, Strength deformation and conductivity coupling of rock joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, pp. 121~140.
3. 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.
4. Johannes, T. W., Amadei, B., Sture, S., Robertson, A. B. and Price, R., 1995, Shear response of a rock joint under different boundary conditions: An experimental study, Proceedings of the International Symposium on Fractured and Jointed Rock Masses, Myer, Cook, Goodman and Tsang (Ed.), Balkema, A.A. Rotterdam, pp. 425~430.
5. Johnston, I. W., Lam, T. S. K. and Williams, A. F., 1987, Constant normal stiffness direct shear testing for socketed pile design in weak rock, Geotechnique, Vol. 37, pp. 83~89.
6. Mouchaorab, S. K. 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, Vol. 17, No. 2, pp. 233 ~ 242.
7. Olsson, R., Barton, N., 2001, An improved model for hydromechanical

coupling during shearing of rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 38, pp. 317~329.

8. Rim, H.-R., Choi, H.-J., Son, B.-K., Lee, C.-I., Song, J.-J, 2005, Experimental study for shear behavior of pseudo rock joint under constant normal stiffness condition, *Proceedings of the 31st ITA-AITES World Tunnel Congress on Underground Space Use*, Istanbul, Turkey, pp. 175~181.