

마찰 전단면의 전단거동과 에너지방출률

박치현^{1)*}

The Initiation of Slip on Frictional Fractures

Chi Hyun Park

Abstract Slip along a frictional fracture can be approached as initiation and propagation of a mode II crack along its own plane. Fracture mechanics theories predict that under pure mode II loading initiation will occur when the energy release rate of the fracture attains a critical value (G_{IIc}), which is generally taken as a material property. For the past few years the rock mechanics group at Purdue University has investigated experimentally the dependence of G_{IIc} on normal stress and on the frictional characteristics of a fracture. A number of experiments has been conducted first on acrylic, a material that, using photoelastic methods, allows visualization of the stress field ahead of the fracture tip; and later on gypsum, a rock model material with relatively low unconfined compression strength. The experimental investigation has been expanded to include other frictional materials with higher unconfined compression strength. Direct shear tests have been conducted on specimens made with cement paste. New observations together with previous experiments indicate that G_{IIc} can only be considered a material property when the peak friction angle of the discontinuity is similar to the residual friction angle; otherwise the critical energy release rate increases with normal stress.

Key words Shear Behavior, Limited Energy Release Rate, Mode II, Fracture Mechanics

초 록 단한 균열을 따라 발생하는 전단거동을 Mode II 크랙의 시작과 진행으로 묘사할 수 있다. 파괴역학 이론에서는 순수 Mode II 재하에서 일반적으로 고유물성으로 인식되는 에너지 방출률(G_{II} , Energy Release Rate)이 한계점(G_{IIc})에 도달했을 때 전단거동이 시작된다고 예측한다. 지난 몇 년간 퍼듀대학의 암반공학그룹은 한계 에너지 방출률(G_{IIc})의 구속응력(normal stress)과 단한 균열의 거칠기에 대한 관계를 실험적으로 접근해왔다. 먼저 많은 실험들이 아크릴 재료를 대상으로 실행되었는데, 이는 광탄성(Photoelastic) 방법을 이용한 균열 끝(fracture tip)의 응력 집중 영역을 시각화하는 것을 가능케 해 주었다. 그 다음 실험 연구는 비교적 낮은 압축강도를 지닌 균질한 석고에 시행되었고, 최근에는 더 높은 압축강도를 지닌 재료를 대상으로 실험연구를 수행하였다. 그 예로 시멘트로 만든 시료 블록에 직접 전단 실험을 하였는데, 이전의 실험들과 마찬가지로 불연속면의 최대 마찰각(Peak Friction Angle)이 잔류 마찰각(Residual Friction angle)과 비슷할 때만이 G_{IIc} 가 재료의 고유물성으로 간주 될 수 있다는 점을 확인할 수 있었다. 그렇지 않은 경우에 한계 에너지 방출률(G_{IIc})은 구속응력과 함께 증가한다.

핵심어 전단거동, 한계에너지방출률(G_{IIc}), Mode II, 파괴 역학

1. 서 론

암반의 변형 및 파괴에 대한 중요한 메카니즘 중의 하나는 기존의 불연속면, 또는 균열면을 따라 발생하는

전단거동(Slip) 현상이다. 전단이력이 없는 균열은 미끄러짐이 발생하면서 전단강도가 최고치(τ_p)에서 잔류치(τ_r)로 감소한다. 이때, 전단거동은 균열(Fracture)의 전 영역에서 동시에 발생하지 않고, 특정 영역에 집중되어 전단 하중의 증가에 따라 전파하게 된다. 이런 현상은 근본적으로 두 가지 요인이 존재하는데, 첫번째는 불연속면을 따라 구속응력이 다양하게 분포하는 경우이고, 두번째는 불연속면의 마찰특성이 면을 따라 비균

¹⁾ Schnabel Engineering, Geosturctural Group 엔지니어

* 교신저자 : joychi@gmail.com

접수일 : 2010년 9월 13일

심사 완료일 : 2010년 10월 13일

게재 확정일 : 2010년 10월 22일

질하게 분포하는 경우이다. 예를 들어, 불연속면이 과거에 부분적인 전단거동을 경험하였다 하더라도 거동을 경험하지 않은 영역이 있다면, 이 경우에 강도 특성을 살펴보면 전단거동을 경험하지 않은 영역에서는 여전히 최고 강도에 도달 할 수 있는 반면, 전단거동이 이미 발생한 영역은 잔류 강도에 머물게 될 것이다.

취성 재료에서 불연속면을 따라 발생하는 부분적인 전단거동의 직접적 결과는 이론상 전단거동이 발생된 영역의 경계에서 발생하는 응력과 변형의 양립이 커다란 응력 집중을 야기한다는 것인데, 이것은 아직 전단거동이 발생하지 않은 불연속면을 따라 파괴가 점진적으로 전파되는 닫힌 균열(Frictional closed crack)의 개념과 상당히 일치한다. 그러므로, 선형 탄성 파괴역학(Linear Elastic Fracture Mechanics: LEFM)에서 전단거동은 그 면을 따라 발생하는 모드 II 크랙의 전파로 간주할 수 있다. 크랙 생성을 예측 할 수 있는 많은 이론들이 있는데, 최대 에너지 방출률(Maximum energy release rate) 이론은 닫힌 균열[1,2]의 생성과 전파를 예측하는데 사용되어 왔다. 그 이론에 따르면 에너지 방출률이 한계 값에 도달했을 때 크랙이 생성된다.

한계 에너지 방출 이론을 재료의 물성으로 간주할 수 있는지 아닌지에 관해서 여전히 논쟁이 되고 있다. G_{IIC} 가 물성으로 간주 될 수 있다는 연구결과[3-6] 들도 있는 반면, 그렇지 않을 수도 있다는 증거를 제시한 연구 결과들도 찾아볼 수 있다[7-11].

지난 몇 년간 퍼듀대학의 암반공학그룹은 불연속면에 작용하는 구속응력과 균열면 마찰성질이 G_{IIC} 에 미치는 영향에 관한 실험적, 수치해석적 연구를 해오고 있다. 암반의 파괴거동과 관련된 다양한 변수들의 영향을 파악하고 이론화 하기 위하여 암반에 비해서 균질한 취성

재료들을 사용하여 연구를 진행하여 왔다. 먼저 많은 실험들이 아크릴 재료를 가지고 실행되었는데, 이는 광탄성 방법을 이용해 균열 경계면(전단거동이 일어난 균열 영역과 그렇지 않은 영역 사이) 경계에서의 응력 분포를 시각화 하는것을 가능케 해주었다. 그 다음 실험은 상대적으로 압축강도가 낮고 균질한 암반 모델 재료인 석고에 대해 시행되었고, 이번 실험에서는 두 개의 시멘트 블럭으로 만들어진 시료를 가지고 전단 실험을 실시하였다. 두 개의 블럭은 완전히 접촉되어 있는데, 접촉면의 절반은 매끈한면(Smooth surface)을 지니도록 하고 나머지 절반은 거친면(Rough surface)을 갖도록 하였다. 블럭 사이의 접촉면은 각기 다른 단계의 구속하중 하에서 전단하중을 받게 된다. 이 실험으로부터 최고강도에서 잔류강도로 전환하는데 필요한 한계슬립(Critical slip) 값, δ_c 와 한계 에너지 방출률, G_{IIC} 을 측정하였다.

Fig. 1은 석고 실험에서 측정된 수직응력 증가에 따른 한계 에너지 방출률을 보여주고 있다. Table 1에서 보여주는 것처럼 네 가지 다른 형태의 Rough area의 접촉면 성질을 갖는 시료를 준비하여 마찰강도를 증가시키면서 전단강도 실험을 하였다. Fig. 1은 G_{IIC} 가 재료의 고유물성이 아니고 전적으로 구속응력에 의존함을 나타내주고 있다. 실제로 Fig. 1에서 최고 마찰각과 잔류 마찰각의 차이가 크면 클수록 한계 에너지 방출률의 구속응력에 대한 의존성은 더 커짐을 알 수 있다.

흥미로운 것은 최대 마찰각과 잔류 마찰각이 비슷한 시료인 Type IV의 경우 G_{IIC} 가 구속응력의 크기에 관계 없이 일정한 값을 보인다는 사실이다. 더욱이 한계 슬립, δ_c 의 측정 결과도 이와 비슷한 패턴을 보여주었다. 마찰 표면에서의 최대 마찰각과 잔류 마찰각이 서로 다른 시료에서는 한계 슬립이 구속응력의 증가에 따라 직선상으로 증가한 반면, 같은 시료에서는(Type IV) 한계 슬립이 구속응력의 변화와 관련성이 없었다.

다른 연구들에서도 이와 비슷한 결과를 찾아볼 수 있다. 예를 들면, Fig. 2는 Westerly 화강암에 대한 구속응력의 증가에 따른 한계 에너지 방출률[7, 12-14]의 변화를 보여주고 있는데 구속응력이 증가함에 따라 G_{IIC} 가 증가함을 볼 수 있다.

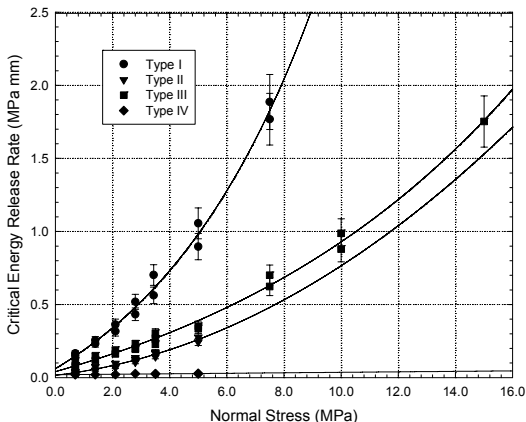


Fig. 1. Critical Energy Release Rate, G_{IIC} . Gypsum [11]

Table 1. Four types of contact surfaces of strong area [11]

Type	ϕ_p (°)	ϕ_r (°)	C (MPa)
I	51.5	23.2	0
II	38.5	20.5	0
III	38.5	20.5	1
IV	23.5	23.5	0.85

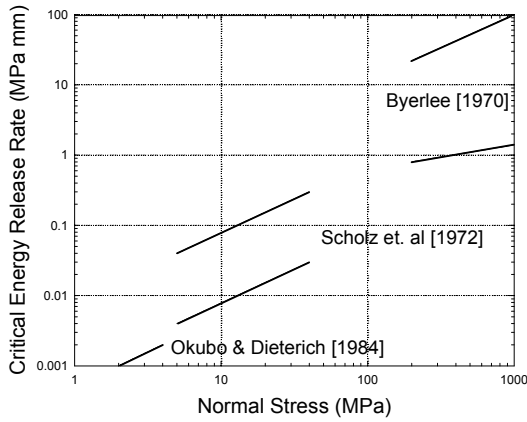


Fig. 2. Critical Energy Release Rate, GIIC. Westerly Granite [14]

따라서, 다른 재료를 이용한 기존의 연구 결과[7, 12-14]와 아크릴과 석고에 대한 사전 실험으로부터 다음과 같은 결론에 도달하게 되었다. 압축하에서 한계 에너지 방출률은 단힌 불연속면의 최대 마찰각과 잔류 마찰각이 동일할 때만 고유물성으로 간주될 수 있고, 그 경우 한계 슬립 또한 구속응력에 영향을 받지 않는다. 전단 강도 약화현상($\phi_p > \phi_r$)을 보이는 불연속면에 대해서는 한계 에너지 방출률과 한계 슬립 모두 구속응력 변화에 영향을 받는다. 그리고 그 영향 정도는 마찰각의 최고치와 잔류치의 차이가 클수록 증가한다. 이러한 결론이 실험과 현장 관찰, 이론적 연구[9-11, 15]에 의해 잘 뒷받침되고 있지만 결과를 일반화하기 위해서는 더 다양한 재료에 대한 실험이 요구된다.

따라서, 이 논문에서는 아크릴과 석고를 이용한 이전의 연구를 확장하여 강도가 약한 암석을 모사하기 위해 단축압축강도가 더 높은 시멘트 반죽에 대해 비슷한 실험이 행해졌고 그 분석 결과를 제시하였다. 그 결과 석고와 아크릴 전단 실험에서 관찰되었던 한계 에너지 방출률의 변화현상이 시멘트 반죽을 이용한 실험에서도 비슷하게 나타남을 알 수 있었다.

2. 실험과정

준비된 시료는 두 개의 동일한 기둥 모양의 블럭으로 높이가 152.4 mm, 너비 127 mm, 두께 50.8 mm로 이루어져 있다. 이 블럭은 기존에 연구되었던 석고 블럭과 같은 크기이다[9].

시료는 시멘트, 물, 초강력 가소제를 섞어 만든 것이다. 시멘트를 재료로 선택한 이유는 석고보다 단축압축

강도도 크고 마찰 특성이 서로 다른 표면을 형성하게 해주기 때문이다. 시료 제작을 위해 사용된 재료의 성분비는 다음과 같다.

- 물/시멘트 = 0.35
- 물/초강력 가소제 = 70

위 재료의 비율은 상대적으로 높은 압축강도와 균질한 마찰면을 구하기 위한 여러번의 시행착오 끝에 결정되어진 것이다. 초강력 가소제의 첨가는 물/시멘트 비율을 감소시킴으로써 반죽의 강도를 증가시키고 동시에 균질한 거칠기를 가진 블럭사이의 접촉면이 생성될 수 있도록 혼합물의 유동성을 유지시킨다. 이러한 방법으로 준비된 두 블럭은 마찰특성이 다른 두 면을 가지도록 제작하는데, 접촉면의 절반은 마찰각이 작고 점착력이 없는 반면(매끈한면), 다른 절반은 상대적으로 높은 전단강도를 갖게한다(거친면). 또한, 거친면의 특성이 매끈한 면과 비슷한 시료를 준비하였는데 즉, 거칠기와 점착력이 있는 Type I의 시료와 거칠기는 없고 점착력만 있는 Type II 시료이다. 다시 말해서, Type I 시료는 최대 마찰각과 잔류마찰각이 서로 다른 값을 갖게 하였고 Type II 시료는 최대마찰각과 잔류마찰각이 비슷한 값을 갖도록 제작되었다. 두 블럭은 서로 완벽하게 접하게 된다. 시료 전체의 접촉면의 전단특성을 Table 2에서 보여주고 있다.

시료에 대해 가능한 파괴 모형이 두가지 있다. 하나는 신선한 시료에서 파괴가 발생하는 것이고, 또 다른 하나는 접촉면을 따라 파괴가 발생하는 것이다. 많은 예비 실험에서 전단 파괴는 항상 접촉면을 따라 슬립현상에 의해 발생됨을 발견하였고, 이에 따라 시멘트 반죽의 강도와 접촉면의 특성이 결정되었다.

시료 준비 과정의 면밀한 검토를 통해 시료 제작 과정 중 재료의 변화성을 최소화하고 실험중에 발생할 수 있는 오류의 요인을 감소시켰으며, 시료들의 평균 물성은 다음과 같다.

- 단축압축강도, σ_c : 65.5 MPa
- 탄성계수, E : 2.45 GPa

Fig. 4는 시료에 하중을 가하기 위해 사용된 직접 전단 실험기의 도식을 보여주고 있다. 이 실험 장치는 석

Table 2. Frictional properties of specimens

Type	ϕ_p (°)	ϕ_r (°)	C (MPa)
I	42	37	0.33
II	28	28	0.75

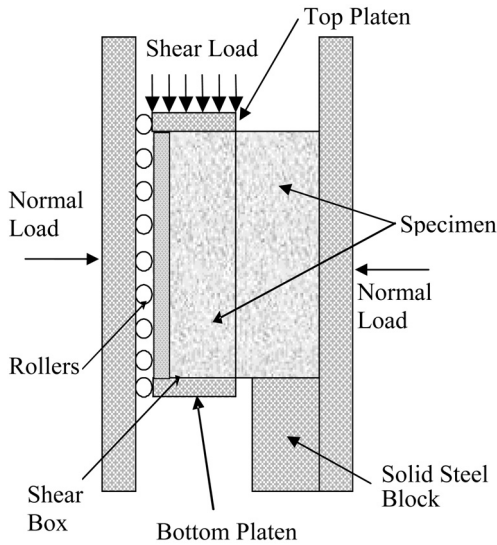


Fig. 4. Schematic of direct shear test set-up

고 실험에 이용된 것과 같은 것이다[9-11]. 두 시멘트 블럭을 두 개의 견고한 철판(Steel plate) 사이에 위치한 전단 박스에 장착한다. 플랫폼은 수평방향으로 자유로이 움직일 수 있도록 오른쪽 철판 뒤에 설치하고 왼쪽 철판은 고정시켜 둔다. 플랫폼에 압력을 가함에 따라 압축력이 강철판에 가해져서 시료에 전달되고, 반발력(Reaction force)은 수평 프레임에 의해 지지된다. 전단 방향에 따라 전단 박스와 수평프레임 사이에 발생하는 마찰을 최소화하기 위해 전단 박스의 좌측에 강철 롤러를 위치시킨다. 전단하중 프레임은 MTS 하중기에 놓여지게 되는데 여기서 하중 재하기는 전단박스의 윗부분과 MTS 윗쪽 하중판을 연결시킨다. 재하기는 하중의 방향과 시료가 일직선상이 되지 않았을 때 발생하는 모멘트를 최소화 할 수 있는 구면좌를 포함한다. 또한 플랫폼이 구면좌 역할을 하여, 시료의 수평방향 회전을 약간 허용함으로써, 인위적 경계 구속으로 인한 예기치 않은 하중 발생을 방지하게 된다.

실험은 다음과 같은 과정을 따라 이루어졌다. 시료를 전단 박스안에 위치시키고 나면 플랫폼에 압력을 가하여 일정한 구속응력을 가한다. 그런 후에 0.0004 mm/s의 일정한 변형률로 MTS를 통해 전단응력을 가한다. 플랫폼의 압축시스템은 자동으로 조절되어 압력이 일정하게 유지된다. 다시 말해 포아송 효과로 인한 시료의 수평 변위가 보상되어 구속응력이 추가로 발생하지 않게 한다. 전단 하중은 MTS기계의 로드셀($\pm 0.5\%$)에서 측정하고, 구속하중은 플랫폼에 부착된 압력 변환기($\pm 0.25\%$)에 의해 측정된다. 또한 시료의 전단 변위는 MTS 상판 아래

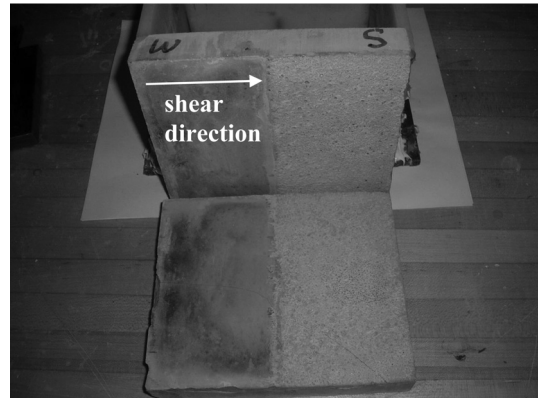


Fig. 5. Specimen after testing

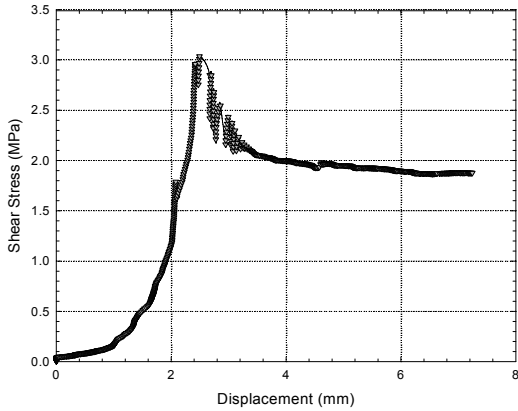
에 부착된 LVDT($\pm 0.5\%$)로 측정하게 된다.

실험에서 전단 하중은 두 블럭 간에 완전한 전단거동이 일어날 때까지 증가하게 된다. LVDT를 이용한 전단 변위의 측정을 통해 매끈한 면에서 시작한 전단거동이 거친면으로 전파되는 것을 측정한다. 이때, 매끈한면과 거친면 사이의 경계면에 큰 응력 집중이 발생하게 된다. 점차 전단 응력이 경계면에서 증가하고, 어느 시점에서 거친면을 향해 불안정한 미끄러짐(Unstable slip)이 발생하게 되고, 전체적인 전단거동을 유발하게 된다.

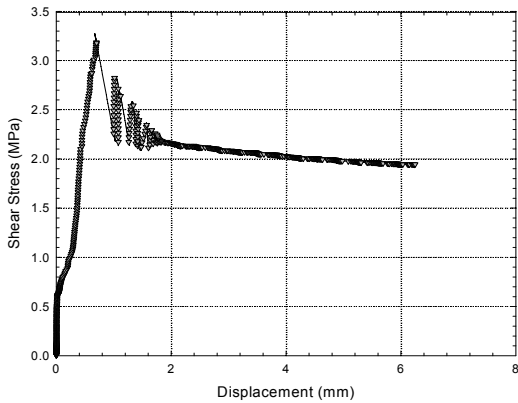
Fig. 5는 실험 후 접촉면이 완전히 분리된 시료 블럭을 보여주고 있다. 수직으로 세워진 블럭의 “W”와 “S”는 거친면과 매끈한면을 보여주며, 전단면의 색과 질감으로도 각각의 영역을 확인 할 수 있다. Fig. 5에서 화살표는 전단거동의 방향을 나타낸다.

3. 실험 결과

실험이 진행되는 동안 시료의 전단거동에 대한 응력-변위 그래프가 저장된다. Fig. 6은 구속응력이 3.3 MPa 일 때, Type 1 (a)와 구속응력이 4.1 MPa 일 때, Type 2 (b) 시료에 대한 응력-변위 곡선을 나타내고 있다. Fig. 6 (a)의 곡선의 시작 부분은 초기 전단 하중이 가해지면서 발생하는 시료의 정착(Seating) 변위를 보여주고 있으며 그 후 변위는 일직선으로 증가한다. 응력-변위 그래프는 1.8MPa에서 작은 평탄면이 관찰되는데 이것은 매끈한면을 따라 발생한 전단변위와 일치한다. 일단 매끈한 면의 전단변위가 발생하면 추가 전단 하중이 거친면에 전달되고 직선상의 응력-변위 곡선이 복원된다. 그리고 전단응력이 약 3.0 MPa 도달했을 때 거친면을 따라 불안정한 슬립이 발생한다. 그 후 최고치에 도달한 응력곡선은 잔류마찰 조건이 형성 될 때까지 응력의



(a) Type I specimen, with $\sigma_n = 3.3$ MPa



(b) Type II specimen, with $\sigma_n = 4.1$ MPa

Fig. 6. Shear stress versus displacement plot

감소를 보여준다. 잔류마찰값에 도달하는 동안 스틱슬립(Stick-slip)현상이 관찰될 수도 있다. Fig. 6에서 보여준 전반의 과정은 실제 값을 제외하고 석고와 아크릴 실험에서 발견된 것과 일치한다[9-11].

Fig. 6에서 보여진 것과 비슷한 전단응력-변위 그래프에서 한계 에너지 방출률, G_{lc} 과 한계 변위, δ_c 를 구할 수 있다. 한계에너지 방출률은 전단응력이 최고치에서 잔류치에 이르는 곡선 아래 영역이고[9, 15], 한계 변위는 응력이 최고치에서 잔류조건까지 전이하는 동안 발생한 슬립의 크기가 된다.

Fig. 7은 Type I과 Type II 시료의 한계 에너지 방출률을 보여주고 있다. Type I 시료의 경우 G_{lc} 가 구속응력의 증가에 따라 증가하지만, Type II의 경우 일정하게 유지된다. 이것은 접촉면의 마찰 특성과 관련있는데, Type I 시료는 최고마찰각과 잔류마찰각이 서로 다른 반면, Type II의 경우 두 마찰 각의 크기가 같다. 그러

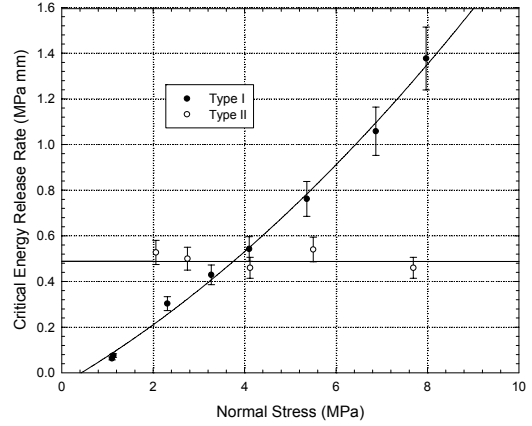


Fig. 7. Critical energy release rate versus normal stress

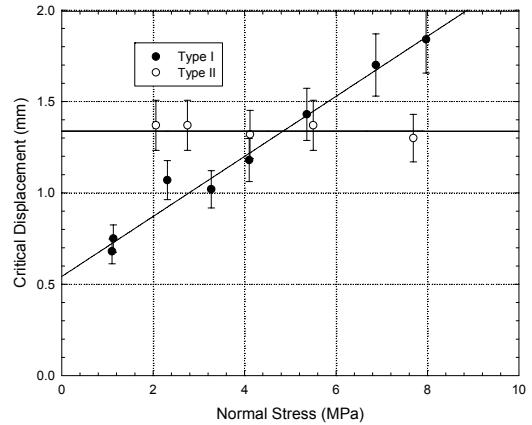


Fig. 8. Critical displacement versus normal stress

므로 에너지방출률은 최대 마찰각과 잔류마찰각이 다른 시료에서만 구속응력의 증가와 함께 증가하게 된다. 이러한 결과는 석고(Fig. 1)와 아크릴[10]에서의 연구 결과를 뒷받침해주고 있다. 낮은 구속응력에서 Type II의 에너지 방출률이 Type I 보다 큰 것은 점착력의 차이로 볼 수 있다(Table 2).

Fig. 8은 실험에서 측정된 수직응력 증가에 따른 한계 변위를 나타내고있다. Type I 시료의 경우 δ_c 는 수직응력과 함께 증가하는데, Type II의 경우에는 구속응력에 대해 영향을 받지 않고 있다. 한계 변위 또한 한계 에너지 방출률과 비슷한 결과를 보이고 있는데 즉, 최대 마찰각과 잔류마찰각이 서로 다른 시료에서는 한계 변위가 구속응력과 함께 증가하는 반면, 두 마찰각이 서로 비슷한 시료에서 한계변위는 구속응력의 변화와 무관하다. 이러한 실험 결과는 석고[9, 11]와 아크릴[11]에

서 얻어진 결과와 아주 잘 일치한다. 실제로 Type I 시료에 대한 한계 변위 증가는 선형으로 간주될 수 있는데, 이것 또한 석고 시료[11]의 결과와 일치한다.

Fig. 7과 8에 도시된 값들은 최소 두 번 이상의 실험 결과의 평균을 나타내고 있다. 이미 결정된 접촉면과 구속응력하에서 얻어진 값들의 범위는 각 데이터 점 주위 오차로 나타내어, 다소의 실험 오류성과 반복성을 고려하고 있다. 실험 데이터를 연결하는 선(Solid line)은 선형회귀분석으로 구한것으로, 한계에너지 방출률은 2차식으로 한계변위는 1차식으로 구하였다.

4. 토론

실험에서 이용된 것과 같은 취성재료에서 거친면(Rough area)을 따라 발생하는 전단거동을 통한 시료의 파괴는 이미 존재하는 마찰 균열(매끈한면, Smooth area)로부터 파괴가 시작된다. 그러므로 파괴 역학 이론으로 실험을 설계하고 실험 결과를 설명하는 접근이 가능하다. 이론에서는 균열 생성의 지표로 변수 G_{IIC} 를 사용하였는데 Palmer와 Rice의 연구[15]에 기초해, 마찰 크랙 끝에서의 에너지 방출률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_{IIC} = \int_0^{\delta_c} [\tau(\delta) - \tau_r] d\delta \quad (1)$$

여기에서 δ 는 마찰면을 따라 발생하는 슬립, δ_c 는 한계 슬립, $[\tau(\delta) - \tau_r]$ 는 슬립 발생시 최대치에서 잔류치까지의 전단응력 감소를 나타낸다. 식 (1)에서의 적분 값은 Fig. 6에서 최대전단응력 이후 응력-변위 곡선과 잔류 응력을 나타내는 수평선 사이의 영역에 상응한다.

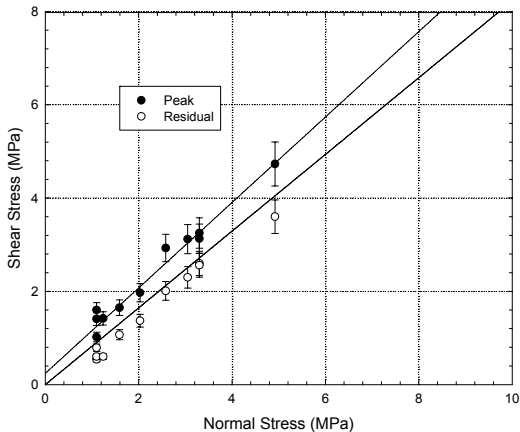


Fig. 9. Frictional properties of Type I specimens

시료 Type I과 Type II의 전단면의 마찰 특성은 앞에 설명된 과정에 따라 준비된 새로운 한 세트의 시료로 실험하여 구하였다. 이 시료는 블럭간 접촉을 균질하게 하고 거칠기는 Type I과 Type II 시료와 일치 시켰다.

접촉면이 균질한 시료에 직접 전단 실험을 하여 마찰 각과 점착력 등의 접촉면 특성을 구하였다. Fig. 9는 균질의 Type I 시료에 대한 직접전단실험 결과를, Fig. 10은 Type II 시료에 대한 결과를 보여주고 있다.

식 (1)에서 적분은 거친면의 마찰 특성을 이용해 이론적으로 계산해 낼 수 있다. 석고 실험의 경우, 최고치에서 잔류치까지의 응력 감소는 1차함수로 가장 잘 묘사할 수 있었다. 시멘트실험에서는 최고치에서 잔류치까지의 응력 감소 형태(Fig. 6) 를 지수함수로 나타낼 수 있다. 그러므로 식 (1)을 마찰 특성을 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G_{IIC} = \int_0^{\delta_c} f(\tau_p - \tau_r) d\delta = \int_0^{\delta_c(\sigma_n)} f[c + \sigma_n(\tan \phi_p - \tan \phi_r)] d\delta \quad (2)$$

여기서 f 는 파괴 후 전단응력감소함수를 나타낸다. Fig. 11은 실험과 Fig. 9와 10에서 얻은 전단 특성을 적용한 식 (1)에서 얻은 한계 에너지 방출률을 비교한 것이다. 그 결과 값들이 상당히 근접하며 실험 오차 내에 존재한다.

이와 같은 결과를 토대로 한계 에너지 방출률은 고유 물성이 아님을 보여 주었다. 실제로 구속 응력에 대한 최대/잔류 마찰각 간의 선형 종속성(Linear dependency) (Fig. 9, 10)과 한계변위와 구속응력 간의 선형관계(Fig.

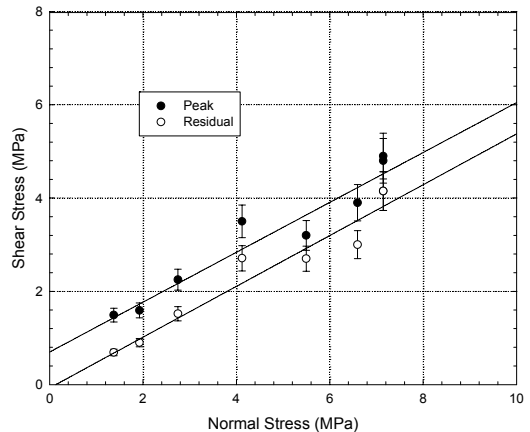


Fig. 10. Frictional properties of Type II specimens

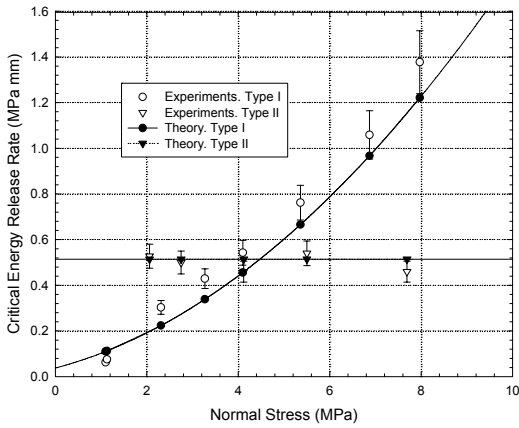


Fig. 11. Critical energy release rate versus normal stress. Comparison between fracture mechanics theory and experiments

8)를 고려해보면, 한계 에너지 방출률은 구속응력의 2차 함수로 접근할 수 있다.

그러나 마찰각의 최대치와 잔류치의 크기가 비슷한 시료들에 대해서 식 (2)의 에너지 방출률식은 다음과 같이 간소화 될 수 있다.

$$G_{IIc} = c\delta_c \quad (3)$$

따라서 식 (3)에서 G_{IIc} 는 구속응력과 무관하게 된다. 이것은 식 (1)과 (2)에서 최고전단강도에서 잔류전단강도로 감소 원인이 단순히 접착력의 손실로 인한 것이고, Fig. 8에서 보여주는 것처럼 한계 변위가 구속응력과 무관하기 때문이다. 따라서, G_{IIc} 는 마찰면의 최고/잔류 마찰 각이 같을 경우에만 고유물성으로 간주 할 수 있다.

4. 요약 및 결론

구속응력에 대한 G_{IIc} 의 연관성을 규명하기 위해 시멘트로 만든 불력 시료를 이용하여 많은 실험이 시행하였다. 그 실험들은 석고와 아크릴[9-11]에 시행된 이전의 실험들과 마찬가지로 G_{IIc} 이 고유물성이 아니며, 구속응력의 증가에 따라 2차 함수 관계로 증가함을 보여주었다. 석고와 아크릴을 사용한 이전 연구 결과가 적어도 정성적으로는 화강암에서 얻은 실험결과[13, 14]와 일치하였다. 이러한 결과를 확인 위해서는 추가적 실험이 요구되었고, 이에 본 연구는 이전의 결론을 확증하기 위해 다른 물질에 대한 실험과 그 결과를 제시하고 있다.

시멘트 시료는 접촉면이 완벽하게 일치하는 불력 두 개로 이루어진다. 접촉면은 두 개의 다른 전단 특성을 가진 면으로 이루어 졌는데, 절반은 마찰력이 작고 점착력이 없는 반면, 나머지 절반은 점착력이 있고 마찰력이 높다. 접촉면은 일정한 구속응력 하에서 슬립현상이 일어남과 동시에 전단 파괴가 발생된다. 매끈한면에서 먼저 슬립이 시작되어 전단 응력이 증가함에 따라 거친면으로 전파된다. 매끈한면의 슬립이 완전히 일어난 이후 추가 전단 하중의 증가는 거친면으로 전이된다. 매끈한면과 거친면 간의 전단강도와 변위의 부조화로 인해 두 영역간 접촉부분에 큰 응력 집중이 일어나게 된다. 매끈한면은 거친면을 따라 잠재 전파 가능성이 있는 모드 II 하에서 발생된 균열과 같은 역할을 하게 된다. 하중을 가하는 도중 파괴의 시작은 불안정하게 발생하여 전체적인 파괴를 유발하게 된다.

응력-변위 관계로부터 한계에너지방출률 G_{IIc} 와 한계 변위, δ_c 를 측정하였다. 최대마찰각과 잔류마찰각 간에 상당한 차이를 보이는 시료에서는 G_{IIc} 와 δ_c 모두 구속응력과 함께 증가하는 것으로 나타났다. 한계 에너지 방출률은 구속응력의 2차 함수로, 한계 변위는 1차 함수로 근사할 수 있다. 이러한 결과는 석고와 아크릴에 대한 기존 연구에서의 결과와 아주 잘 일치한다.

한계 에너지 방출률은 마찰각의 최고치와 잔류치가 일치할 때만이 고유물성으로 간주될 수 있다. 이 경우 최고치에서 잔류치로의 크기 감소는 단지 점착력의 감소에 의한 것으로 판단된다. 이때 한계 변위는 구속응력과 무관하고, 결과적으로 G_{IIc} 또한 구속응력과 아무런 관련이 없게 된다.

다른 재료들에 대해 더 많은 실험이 요구되지만, 이 논문의 결론은 이전 연구들과 함께 압축하에서 G_{IIc} 는 고유물성으로 고려할 수 없음을 강하게 시사하고 있다.

참고문헌

- Pollard, D.D., S. Zeller, J. Olson, and A. Thomas, 1999. Understanding the process of jointing in brittle rock masses, In *proceedings of 31st US Symposium on Rock Mechanics*, A.A. Balkema, Rotterdam, 447-454.
- Olson, E., and D.D. Pollard, 1989. Inferring paleostresses from natural fracture patterns: A new method. *Geology*. 17:345-348.
- Marone, C. 1997. On the Rate of Frictional Healing and the Constitutive Law for Time- and Slip-Dependent Friction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 34:5-14.
- Dieterich, J.H. 1979. Modeling of rock friction I: Experimental results and constitutive equations. *Journal of Geophysical Research*. 84: 2161-2168.

5. Ruina, A. 1983. Slip instability and state variable friction laws. *Journal of Geophysical Research*. 88: 10359-10370.
6. Dieterich, J.H. 1978. Time-dependent friction and the mechanics of stick-slip. *Pure Applied Geophysics*. 116: 790-805.
7. Okubo, P.G, and J.H. Dieterich, 1984. Effects of Physical Fault Properties on Frictional Instabilities Produced on simulated Faults. *Journal of Geophysical Research*. 89 (B7): 5817-5827.
8. Backers, T., O. Stephansson, and E. Rybacki, 2002. Rock Fracture Toughness Testing in Mode II Punch Through Shear Test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 39:755-769.
9. Mutlu, O. and A. Bobet, 2005. A fracture mechanics approach to slip along frictional discontinuities. In *Proceedings of 40th U. S. Rock Mechanics Symposium, Alaska Rocks 2005, Alaska, 25 - 29 June 2005*, CD-ROM, eds. Gang Chen et al, ARMA/USRMS 05-685.
10. Mutlu, O. and A. Bobet, 2005, Slip initiation on frictional fractures. *Engineering Fracture Mechanics* 72: 729-747.
11. Mutlu, O. and A. Bobet, 2006, Slip propagation along frictional discontinuities. *International Journal of Rock mechanics and Mining Sciences* Vol. 43, pp. 860-876.
12. Scholz, C.H., P. Molnar, and T. Johnson, 1972. Detailed Studies of Frictional Sliding of Granite and Implications for the Earthquake Mechanism. *J. Geophys. Res.* 84:6392-6406.
13. Byerlee, J.D. 1970. Static and Kinetic Friction of Granite at High Normal Stress, *International Journal of Rock mechanics*. 7:577-582.
14. Wong, T.F. 1986. Shear Fracture energy of Westerly Granite from Post-Failure Behavior. *Journal of Geophysical Research*. 87(B2): 990-1000..
15. Palmer, A.C. and J.R. Rice, 1973. The Growth of Slip Surfaces in the Progressive Failure of Over-consolidated Clay. *Proceedings of the Royal Society of London, A series*. 332: 527-548.

박치현

1996년 전남대학교 자원공학과 학사
 1999년 서울대학교 자원공학과 석사
 2004년 퍼듀대학교 토목공학과 석사
 2008년 퍼듀대학교 토목공학과 박사



Tel: 240-599-6449
 E-mail: joychi@gmail.com
 현재 Schnabel Engineering, Geosturctural
 Group 엔지니어
