

국내에 분포하는 주요 암석의 절리면 전단강도에 대한 공학적 성질

The Engineering Properties of Shear Strength of Rock Joints in Korea

김 대 복^{*1} Kim, Dae-Bok
이 상 근^{*2} Lee, Sang-Geun
이 정 인^{*3} Lee, Chung-In

Abstract

This study is to investigate the various engineering properties of rock joint in Korea, by analyzing laboratory direct shear tests on 802 rock joint specimens that had been performed in the last five years. The peak and residual friction angles obtained from direct shear tests were investigated statistically, which were classified by tectonic provinces and rock types. We measured JRC and JCS that are the input parameters of Barton's empirical shear strength criterion and examined the applicability of Barton's empirical shear strength criterion. As a result, according to tectonic provinces and main rock type, peak and residual friction angles that can be utilized as the basic data for design of rock structures were shown. Also, the variations of friction angle, shear stiffness and dilation angle of rock joint were analyzed by terms of JRC, JCS and normal stress. Finally, the results of comparing the theoretical shear strength with the experimental shear strength showed that Barton's criterion had good predictability for shear strength of rock joint.

요 지

본 연구에서는 최근 5년간 국내 각 지역에서 채취한 802개의 절리면 시료에 대하여 전단시험을 실시하여 얻은 결과를 이용하여, 절리면의 여러 공학적 성질들을 조사, 연구하였다. 절리면 전단시험에서 얻어진 최대마찰각 및 잔류마찰각을 지체구조별, 암종별로 분류하고 통계적으로 구하였으며, Barton의 전단강도식의 입력변수인 JRC, JCS를 측정하고 Barton식의 적용성에 대해서도 검토하였다. 그 결과 설계의 기초자료로 활용할 수 있는 지역별, 주요 암종별 최대마찰각, 잔류마찰각을 제시하였다. 또한, JRC, JCS, 수직응력에 따른 마찰각과 전단강성 및 팽창각의 변화를 분석하였다. 마지막으로, Barton의 식에서 구한 이론적 전단강도와 이 실험에서 얻어진 전단강도를 비교한 결과, Barton의 경험식은 높은 상관도로 암석 절리면 전단강도를 예측할 수 있음을 확인하였다.

Keywords : Barton's empirical shear strength criterion, Direct shear test, Rock joint, Rock type, Tectonic province

1. 서 론

우리 나라와 같이 인구 밀도가 높고 국토의 대부분이 산악지대인 나라에서는 지하공간의 활용을 통해 조밀한 도심지의 유효공간을 극대화하고, 산악지대를 활용

하여 가용 국토면적을 확대시키는 노력이 매우 중요하다. 이와 함께 지하암반이 가지는 여러 이점들을 고려해 각종 도로터널 및 철도터널, 지하철, 고속철도 터널(총 연장의 43%), 원유 및 가스 지하저장시설, 식품저장 시설, 양수발전소 등이 현재 운영 중이거나 설계 또는

*1 동명기술공사 구조부/터널팀

*2 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

*3 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

시공 중이다. 또한 사회적으로 기피대상인 폐기물 처리시설을 건설하기 위한 공간의 확보로써 하수 및 핵폐기물을 포함한 각종 폐기물 지하처분시설이 계획 중에 있다.

지하암반구조물의 설계 및 시공 시 암반의 특성은 지역적 편차가 크게 발생할 수 있으므로 각 공사구간에서의 세밀한 지질조사 및 물성시험 등의 지반조사를 필요로 한다. 특히, 지하에 존재하는 암반은 암반구조물의 안정성에 결정적인 영향을 미치는 단층이나 절리, 균열 등을 포함하는 불연속체로, 이들의 변형 및 파괴거동과 여러 물성 등을 조사, 연구하는 것은 매우 중요하다. 근래 들어 암반구조물의 거동해석에 이용되고 있는 수치해석 방법에서도 연속체 모델보다는 불연속체 모델을 사용하여 절리의 여러 특성을 직접 고려하는 방법들이 개발, 이용되고 있으며, 이러한 수치해석 프로그램의 입력자료로 활용하기 위해서도 절리면의 상태 및 변형·파괴거동에 관한 각종 물성의 획득이 중요하다.

이에 따라, 근래 들어 국내 전역에 걸친 건설사업을 통해 이루어지는 지반조사에서는 시추조사를 통해 얻어진 현장의 자연절리에 대한 전단시험의 중요성이 부각되어, 많은 수의 자연절리면 전단시험이 수행되고 있다. 시험을 통하여 얻어지는 물성으로는 절리면 최대마찰각, 잔류마찰각, 전단강성, 팽창각, 절리면의 압축강도, 표면거칠기, 기본마찰각 등이 있다. 그러나, 각 공사에서 이들 시험은 제한된 시료에 한하여 수행될 뿐만 아니라 우리 나라에서 설계기초로 사용할 수 있는 각 지역, 각 암종별 자료가 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 지난 5년간 국내 각 지역의 암반내 절리면에 대한 전단시험 결과를 이용하여, 지체구조별, 암석 종류별로 절리면의 최대마찰각, 잔류마찰각과 전단강성, 팽창각 등의 공학적 성질을 구하였으며 절리거칠기계수(Joint Roughness Coefficient, JRC), 절리압축강도(Joint Compressive Strength, JCS) 등을 측정하여 Barton(1976)의 경험적 전단강도식의 적용성을 검토하였다. 이를 통해, 국내 암반절리의 지역별, 암석 종류별 전단특성에 관한 자료를 제시하였다.

2. 이 론

2.1 절리면 전단강도

절리면의 전단강도는 절리면에 평행한 방향으로 작용하는 전단응력에 대한 최대 저항응력을 의미한다. 절

리면의 전단강도는 절리면의 거칠기와 충전상태 및 절리면에 수직인 방향으로 작용하는 수직응력의 크기에 따라 변화하는 특징을 보인다. 지금까지의 많은 연구자들에 의해 최대 전단강도 추정식이 제안되고 있으며 가장 간단한 형태의 최대전단강도 추정식은 (1)식으로 표시되는 수직응력과 최대전단강도가 선형의 관계를 갖는 Mohr-Coulomb 식이다. 이 식에서는 절리면의 전단강도에 영향을 미치는 요인으로 절리면에 작용하는 수직응력과 절리면 사이의 마찰각 그리고 절리면 사이에 충전물이 있을 경우에 발생하는 점착력을 꼽는다. Mohr-Coulomb식은 절리의 직접전단시험 결과 나타나는 일반적인 현상인 수직응력과 전단응력사이의 비선형성을 설명하지 못하는 단점에도 불구하고 그 간편성 때문에 지금도 수치해석에서 항복조건식으로 자주 이용되고 있다.

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi_p \quad (1)$$

여기서, τ_p 는 최대전단강도, c 는 걸보기 점착력, σ_n 은 유효수직응력, ϕ_p 는 최대마찰각이다.

최대전단강도를 나타낸 이후에 절리면의 변위를 일으키는 데 필요한 전단응력은 급격히 떨어지며 잔류전단강도라고 하는 일정한 값에서 전단응력이 유지된다. 잔류전단강도는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_r \quad (2)$$

여기서, τ_r 은 잔류전단강도, ϕ_r 은 잔류마찰각이다.

Barton(1976)은 인공절리면에 대한 일련의 전단시험을 통하여 다음의 경험적 관계를 도출하였다.

$$\tau = \sigma_n \tan [JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b] \quad (3)$$

이 식의 입력변수인 JRC, JCS, ϕ_b 등은 간단한 시험이나 경험적으로 결정될 수 있어 가장 널리 이용되고 있다.

2.2 절리의 전단강성과 수직팽창

일정 수직응력하에서 전단응력에 대한 절리의 거동 특징은 전단응력 (τ)와 전단변위 (u)의 관계로 설명되며 일반적으로 그림 1과 같은 곡선형태를 보인다. 즉, 최대전단강도 τ_b 에 이르기 전까지의 탄성구간과 τ_b 에

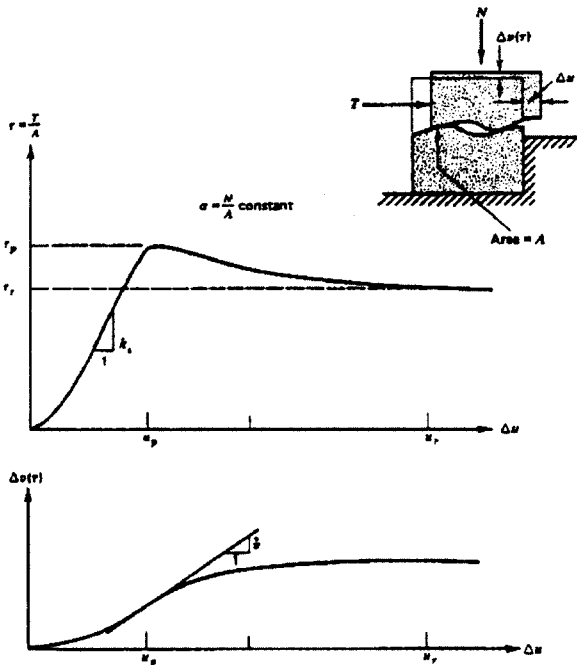


그림 1. 암석 절리면의 전단거동(Goodman, 1989)

도달한 이후 전단변위가 증가함에 따라 잔류전단강도 τ_r 에 도달하는 소성구간을 보여주는 형태이다.

절리의 전단강성 K_s 는 최대전단강도에 이르기 전의 이 곡선의 기울기로 정의된다. 절리의 전단거동곡선의 형태는 수직응력의 크기, 시료의 크기, 절리면의 거칠기와 마찰특성, 그리고 절리면의 강도와 충전물의 특성에 따라 변화를 보인다. 특히 절리의 전단거동 곡선은 수직응력에 큰 영향을 받는다.

Barton과 Choubey(1977)는 절리의 전단강성이 시료의 길이에 크게 영향을 받는 것을 발견하였다. 이것은 시료의 크기가 커짐에 따라 전단강도는 작아지고 정점 전단변위(u_p)가 작아지기 때문이다. 이들은 전단변위가 시료길이의 약 1% 일 때 최대전단강도 값에 도달할 경우 절리의 전단강성에 대한 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$K_s = \frac{100}{L} \cdot \sigma \cdot \tan[JRC \cdot \log_{10}(JCS/\sigma) + \phi_r] \quad (4)$$

여기서 L 은 시료의 길이(mm), ϕ_r 은 절리의 잔류마찰각을 나타낸다.

절리면의 평행한 방향으로 전단응력을 받을 때 절리면에 평행한 방향으로의 전단변위 뿐만 아니라 그림 1과 같이 절리면에 수직인 방향으로의 팽창이 발생한다. 이러한 수직팽창 현상은 일반적으로 다음 식에 의한 팽

창각(d_p')에 의해 정량적으로 표시된다.

$$d_p' = \arctan\left(\frac{dv}{du}\right) \quad (5)$$

팽창각은 최대전단강도 값에서 최대가 되며 전단응력이 잔류전단강도에 도달하면 0이 되는 특징을 보인다. 그리고 수직응력이 증가할수록 팽창량은 감소하며 팽창각도 감소하는 경향을 보인다. 이것은 전단변위와 수직응력이 커질수록 절리면의 거칠기면이 파괴되는 정도가 커지기 때문이다. Barton과 Choubey(1977)는 136개의 절리면 시료에 대한 실험을 통해 최대팽창각은 $0.5JRC \log(JCS/\sigma_n) \sim 2JRC \log(JCS/\sigma_n)$ 의 범위 내에 존재한다고 제시하였으며, 평균적으로 $JRC \log(JCS/\sigma_n)$ 의 값을 가진다고 보고하였다.

3. 시료 및 시험방법

3.1 국내 지질개요와 시료 및 시험편

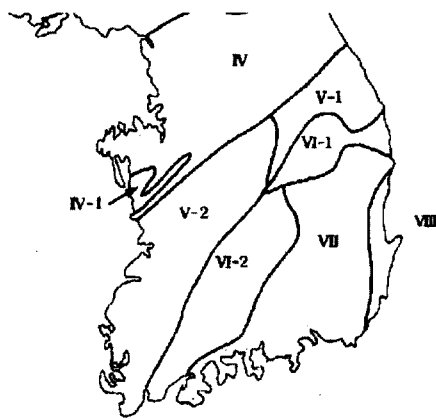
본 연구를 위한 암석시료는 최근 5년간 국내에서 이루어진 각종 지반조사에서 서울대학교 지구환경시스템공학부 암반공학연구실에 의뢰된 암석을 대상으로 하였다.

국내 전지역에 걸쳐 시료가 채취되었으며, 이에 대한 분포특성을 살펴보기 위해 구성암석의 성인, 변형작용의 특성, 구조구 형성 시기 등의 공통성을 감안한 지체구조별 분류를 이용하였다. 일반적으로, 그림 2와 같이 한국의 지체구조구를 구분할 수 있다(대한지질학회, 1999).

경기육괴(IV)는 시생대와 원생대 편마암 복합체와 편암복합체, 충남 대천지역과 강화-전곡지역에 분포하고 있는 주라기 퇴적층, 저반상의 주라기 대보화강암 등으로 구성된다고 보고되고 있다. 본 연구에서 시험된 시료는 화강암과 편마암, 편암 등으로 구성된다.

충남분지(IV-1)은 주라기 퇴적층이 분포되고 있으며 충남 예산-광천-보령을 잇는 지역에 위치한다. 기반암으로는 선캄브리아기의 편마암, 편암류로 구성되며, 중생대 퇴적암이 부정합으로 덮고 있다. 이 지역은 분포면적이 작기 때문에 본 연구에서의 시험자료는 많지 않다.

육천대(V)는 선캄브리아기의 편마암류와 편암복합체를 기반암으로 한다. 태백산지구(V-1)은 태백산맥을 중



- IV. 경기육괴 IV-1. 충남분지
- V. 옥천습곡대 (V-1. 태백산지역, V-2. 옥천대지역)
- VI. 소백산육괴 (VI-1. 소백산지역, VI-2. 지리산지역)
- VII. 경상분지
- VIII. 환태평양알칼리화산지구

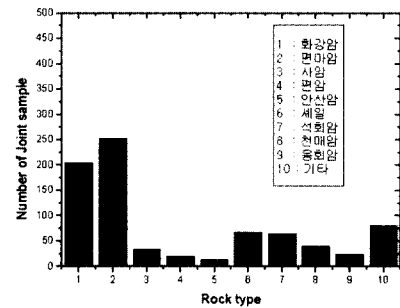
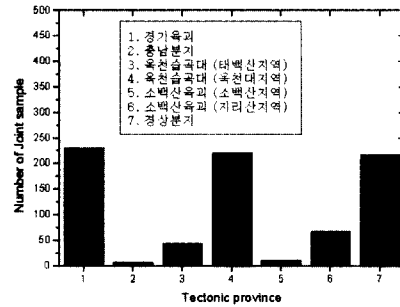


그림 2. 한국의 지체구조구 및 시험시료의 지체구조별, 암종별 분포

심으로 하고 강원도 동남부 지역과 충북 북부지역에 해당하며 변성퇴적암류를 기반암으로 하고, 전기 및 후기 원생대 화강암질암이 이를 관입하였다. 본 연구에서의 시험암종은 사암, 석회암 등이다. 옥천지구(V-2)는 주로 변성퇴적암류와 변성 염기성 및 산성 화산암류로 구성된 옥천 누층군이 분포하는 지역으로 이 지역의 시험된 자료는 화강암, 편마암, 편암, 석회암, 천매암 등 다양한 암종으로 구성되어 있다.

소백산육괴(VI)의 소백산지역(VI-1)은 선캠브리아기의 변성암류의 기반암을 가지며, 편마암복합체, 편암, 화강암질암으로 구성된다. 소백산육괴 남부의 지리산을 중심으로 한 지리산 지역(VI-2)은 선캠브리아기의 변성암류, 변성퇴적암류, 고생대의 퇴적암류, 중생대의 편상 화강암류와 괴상 화강암류 등이 분포한다. 이 지역에서는 화강암과 편마암이 실험되었다.

한반도 남동부에 위치한 경상분지(VII)는 쥐라기 말과 백악기 초의 육성 퇴적층과 화산암류와 화산쇄설성 퇴적암의 호층으로 구성되며, 후기 백악기 내지 제3기 초기의 산성암류에 관입당하고 있다. 불국사화강암류와 경상분지 동편의 포항-장기 지역일대에 퇴적층과 화산암류로 구성된 제 3기 퇴적분지가 발달하고 있다. 본 연구에서 이 지역의 자료에는 화강암, 편마암 이외에 셰일, 응회암, 안산암이 다수 분포한다. 환태평양알칼리화산지구(VIII)는 한반도와 일본열도 사이의 동해 연변에 알칼리 암석들이 분포하는 좁은 지역으로 현무암과 쇠

설성암, 화산암이 분포한다(대한지질학회, 1999).

본 연구에서 시험된 802개의 자료는 그림 2와 같이 주로 경기육괴, 옥천대(옥천지역), 경상분지에서 채취된 자료로 대부분 구성되어 있으며(각각 231, 222, 218개로 전체의 84%), 이는 각 지체구조의 분포면적을 고려할 때 국내 암반에 대해 골고루 분포되어 있다고 판단된다. 전체 802개의 자료 중 시료수가 많은 9종의 암석에 대해 조사하였으며 기타 암종은 개별적인 조사에서 제외하고 전체 자료에만 결과치를 이용하였다. 화강암과 편마암이 전체 802개 중 456개(57%)로 가장 많은 수를 차지하였으며, 셰일, 석회암, 천매암 등이 40개 이상의 자료 수를 보였다.

한편, 본 연구에 이용된 시료는 대부분 현장에서 NX 시추코어로 채취되었다. 채취된 시추코어 내 존재하는 자연절리면을 이용하여 직접전단시험을 실시하였다. 채취된 시료의 절리면이 가능한 한 교란되지 않아야 하나, 절리면 내 고화되지 않은 충전물이 있는 경우는 대부분 교란이 심하게 발생하여 시험에 이용되지 못했다. 시료의 대부분이 현장함수비를 유지하도록 채취되지 못했으므로 실내에서 자연건조된 상태로 약 7일 이상 보관하였으며, 절리면을 포함한 상하부 시료를 예폭시 수지를 이용하여 직육면체 형태의 전단상자에 맞추어 몰딩하고, 시험시의 전단면과 시편의 절리면이 평행하도록 성형하였다.

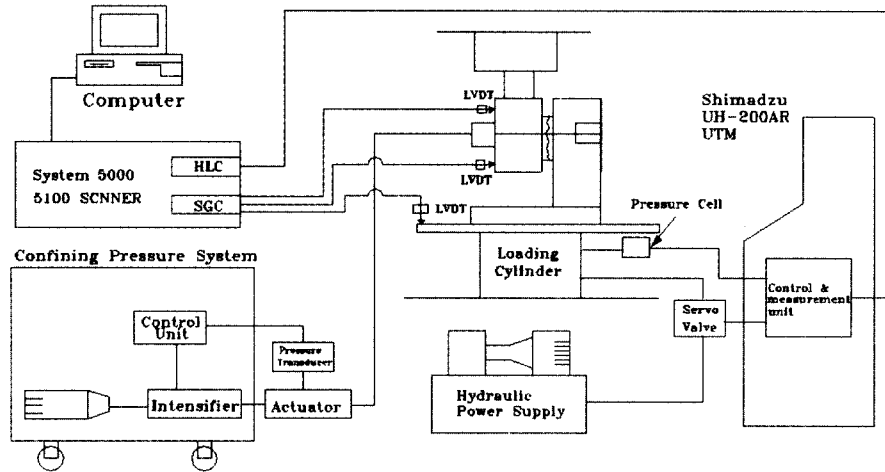


그림 3. 직접 전단시험 시스템의 개략도

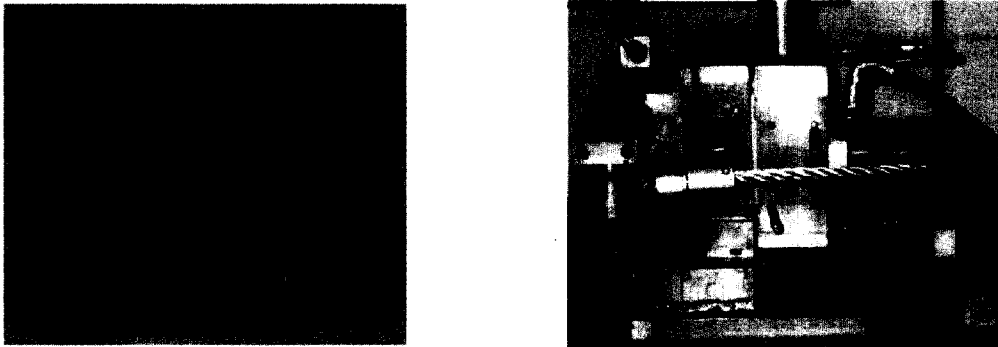


그림 4. 절리면 시험편과 직접 전단시험 장면

3.2 시험방법 및 시험기기

본 연구에서 시행된 자연절리면 직접전단시험은 암반절리의 전단거동을 결정하기 위한 가장 보편적인 실내시험기법으로 기본적으로 최대전단강도를 구하여 최대마찰각, 잔류마찰각, 전단강성, 팽창각 등의 절리면의 변형, 파괴 거동에 관한 물성을 얻었다. 국제암반역학회 추천법(Brown, 1981)에 의거하여 시험을 실시하였다.

본 연구에서는 직접전단시험에 일본 Shimadzu사의 만능재료시험기(UDH-200AR)를 이용하도록 제작된 일면 직접전단시험기를 사용하였다. 시험편에 대한 전단하중은 만능재료시험기를 이용하여 재하하였으며, 하중이 정확히 전달되도록 압축기의 가압판과 전단상자 사이에 구좌(spherical seat)를 설치하였다. 전단변위와 수직변위의 측정을 위해 일본 Tokyo Sokki Kenkyujo(TML)사에서 제작한 스트레인게이지 타입 LVDT(Linear Variable Differential Transducer)를 사용하였으며, 이 측정기의 측정 최대변위는 25mm까지이다. 시편의 변위와 하중측

정을 위하여 측정시스템인 System 5000을 사용한다. 이 측정 시스템은 미국 Measurement Group사 제품으로 만능재료시험기에 들어오는 하중을 전압형태로 받아들여 처리하며, 시편의 변위는 외부에 장착된 LVDT로부터 측정하여 변위와 하중을 숫자로 변환시켜 이를 컴퓨터로 전송한다. 수직하중은 20 톤 용량의 유압램에 의하여 yoke와 로프를 통해 수평으로 가해지는데 정도정밀에서 제작한 유압식 자동펌프를 사용하여 수직하중을 가하였으며, 수직변위는 전단변위와 마찬가지로 외부에 장착된 스트레인 게이지타입 LVDT로부터 측정하여 저장하였다. 그림 3과 그림 4는 직접 전단시험의 전체적인 제어시스템과 시험장면을 보여주고 있다.

직접전단시험 방법은 다음과 같다.

- a) 시험편의 길이, 폭, 두께 등을 측정하고 전단면적을 구한다.
- b) 압축기의 바닥 면에 전단 프레임에 설치한 후 하부 전단상자를 프레임에 고정시킨다.
- c) 하중기의 영점을 조절하고 이를 측정시스템이 저

장한다.

- d) 준비된 시험편을 내부전단상자에 넣은 후 시험편이 움직이지 않도록 고정장치를 고정시킨다.
- e) 내부전단상자에 장착한 시험편을 하부전단상자에 밀어 넣고 상부전단상자를 상부로부터 밀어넣어 두 전단상자를 완전히 밀착시킨다.
- f) 상부전단상자에 유압램과 yoke를 설치하고 로프를 부싱에 연결한 다음, 자동펌프를 이용하여 수직하중을 가한다.
- g) 상부가압판을 적정위치까지 내린 후, 전단변위와 수직변위를 측정할 LVDT를 설치한다.
- h) 전단변위와 수직변위의 영점을 조절하고 실험조건을 입력한다.
- i) 만능재료시험기를 이용하여 전단하중을 가한다. 전단시험시 전단변위가 시간에 따라 일정하게 증가하도록 전단변위를 0.5mm/min 로 일정하게 유지하였다.
- j) 전단하중을 가하는 동안 수직하중은 자동펌프를 이용하여 2% 범위로 일정하게 유지하였다.
- k) 전단하중이 최대값을 지나 전단변위가 10mm 이상 일어났는데도 전단하중의 변화가 거의 없으므로 나타나면 잔류전단강도 수준에 이르는 것으로 보고 시험을 중단한다.

일정수직응력하의 각 시험결과로부터 구한 전단변위-전단응력 곡선과 전단변위-수직변위 곡선으로부터 최대전단강도, 잔류전단강도, 전단강성, 최대팽창각을 구했다. 여기에서 최대전단강도는 측정된 전단변위-전단응력 곡선 상에서 나타난 최대값으로부터 구하며, 잔류전단강도는 전단응력이 최대값을 지난 이후에 전단변위가 계속되는 동안에도 전단응력 변화가 거의 없는 구간의 평균값으로 정의하였다. 전단강성은 전단응력이 최대값에 도달하기전의 50% 응력부근에서 비교적 선형인 구간의 전단응력/전단변위의 비로 정할 수 있다. 최대팽창각은 일정수직응력에서의 전단변위에 대한 수직변위곡선에서 구했다. 팽창각은 전단변위가 증가됨에 따라 변하게 되는 데 최대팽창각은 최대전단응력에 해당하는 전단변위 부근에서 보이는 전단변위-수직변위 곡선에 대한 접선 중 가장 큰 크기의 값으로 결정하였다.

이밖에, JRC와 JCS는 각각 프로파일계이지와 Schmidt 해머를 이용하여 측정한다. JRC의 경우 프로파일계이지를 이용하여 측정된 거칠기를 Barton과 Choubey (1977)에 의해 제안된 거칠기프로파일(그림 5)과 정성

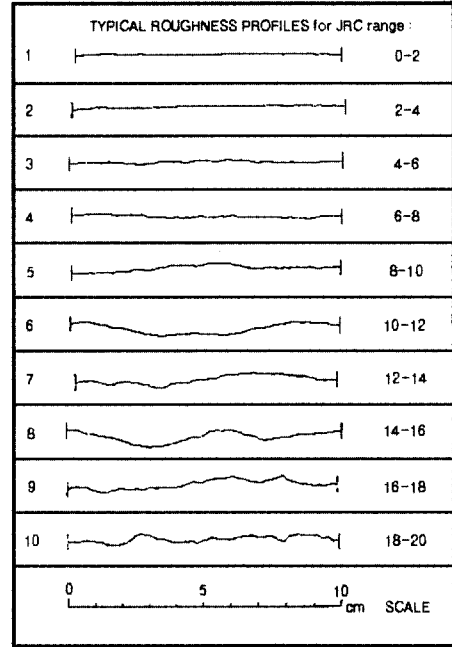


그림 5. 절리면 거칠기프로파일과 대응하는 JRC값(Barton and Choubey, 1977)

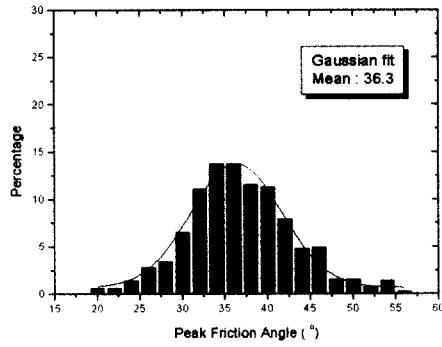
적으로 비교하여 구하였다. JCS의 경우 일본 Kamekura사의 Schmidt 해머(L형)를 이용하여 평균반발경도를 구한 후 이를 Deere와 Miller(1966)에 의해 제시된 보정압축강도식을 사용하여 JCS를 구하였다.

4. 실험결과 및 분석

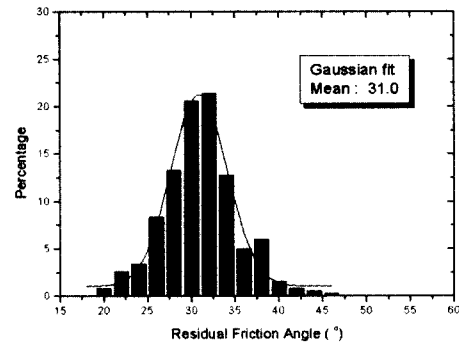
4.1 개요

앞장에서 서술된 실험방법에 의거하여 자연절리면의 최대전단강도, 잔류전단강도, 전단강성, 팽창각, JRC, JCS 등을 측정하였다. 단, 실험항목은 각 시료마다 상이하므로, 시료별로 언급된 모든 항목을 측정하지는 않았다. 측정된 최대전단강도는 일반적으로 간단히 식 (1)의 Mohr-Coulomb식을 이용할 경우, 최대마찰각과 겉보기 점착력의 값을 가지게 된다. 그러나, 본 연구에서는 겉보기 점착력을 0으로 처리하고, 겉보기 점착력의 마찰저항을 최대마찰각에 포함시켰다. 즉, 개별적 실험결과에 \tan^{-1} (전단강도/수직응력)를 최대마찰각이라 정의하였다. 이는 각 자료별로 절리면 거칠기, 절리면 압축강도, 수직응력 등이 상이한 상황에서 도출되는 겉보기 점착력을 배제하고 각 자료값의 비교를 가능하도록 하기 위함이다.

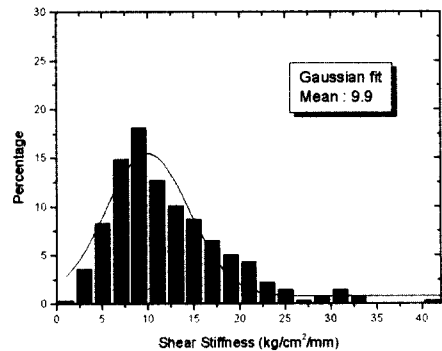
전단시험시 일정하게 유지되는 수직응력의 경우, 대



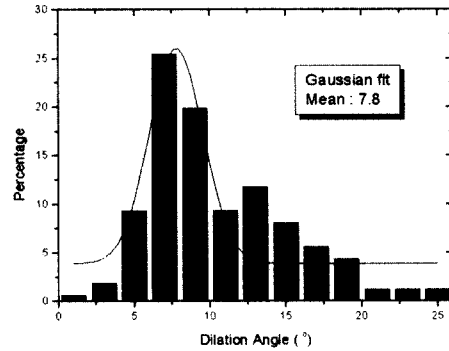
(a) 최대마찰각



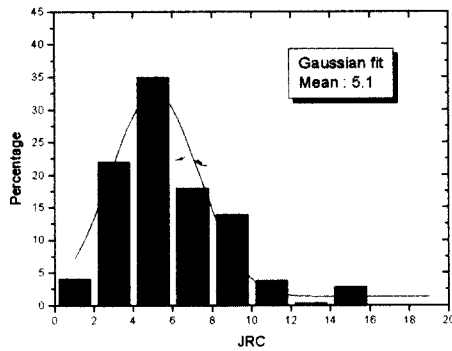
(b) 잔류마찰각



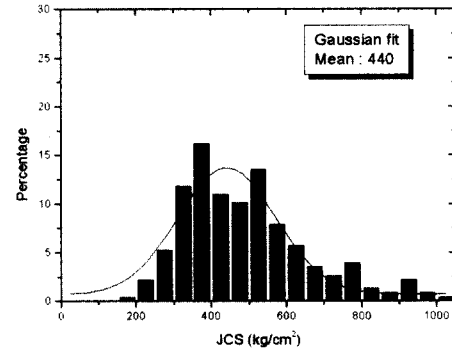
(c) 전단강성



(d) 팽창각



(e) JRC



(f) JCS

그림 6. 절리면의 물성치 분포

부분 10~35kg/cm²의 응력이 가해졌으며, 채취된 시료의 심도를 고려하여 수직응력범위를 설정하였다.

다음으로, 기본시험항목인 최대마찰각(시료수 802개)과 선택시험항목인 잔류마찰각(시료수 383개), 전단강성(시료수 241개), 팽창각(시료수 164개), JRC(시료수 308개), JCS(시료수 230개)의 분포를 살펴보았다(그림 6). 최대마찰각과 잔류마찰각의 경우, 약 20~60°까지의 분포를 보였으며, 비교적 가우스분포(정규분포)에 가까워, 가우스평균을 구해보면, 각각 36.3°, 31.0°의 값을 나타내었다. 전단강성과 최대팽창각은 다소 한 방향으로

치우치는 경향은 있었으나 마찬가지로 가우스평균을 구하면 각각 9.9kg/cm²/mm, 7.8°로 나타났다. JRC는 5.1, JCS는 440kg/cm²의 값을 나타내었다.

4.2 최대마찰각

다음으로, 최대전단강도에 대해 지체구조별로 정리하였다. 이때, 최대전단강도는 앞서 언급했듯이 최대마찰각으로 환산하여 제시하였다(표 1).

경기육괴의 경우, 편마암과 화강암이 주종을 이루었

표 1. 지체구조와 암종에 따른 최대마찰각

지체구조 암종	최대마찰각(°) [절리면 시료 수]						
	경기육괴	충남분지	옥천습곡대 (태백산지역)	옥천습곡대 (옥천대지역)	소백산육괴 (소백산지역)	소백산육괴 (지리산지역)	경상분지
화강암	32.9 [41]			39.8 [61]	38.9 [11]	36.3 [21]	39.9 [70]
편마암	37.4 [170]	39.7 [5]		36.3 [28]		35.9 [34]	38.3 [15]
사암		36.5 [3]	35.1 [21]				36.8 [9]
편암	36.7 [7]			35.4 [14]			
안산암							41.0 [14]
세일			27.2 [3]	37.3 [5]			33.1 [59]
석회암			34.8 [20]	36.3 [45]			
천매암				36.6 [41]			
응회암							41.3 [24]
계	36.6 [231]	36.8 [8]	34.7 [44]	36.5 [222]	38.9 [11]	35.4 [68]	38.1 [218]

으며, 편마암 37.4°, 화강암 32.9°, 총 36.6°의 최대마찰각을 보였다. 옥천대-옥천의 경우, 화강암, 석회암, 천매암, 편마암, 편암 등의 순으로 다양한 암종분포를 가지며, 화강암 39.8°, 석회암 36.3°, 천매암 36.6°, 편마암 36.3°, 편암 35.4°, 총 36.5°의 최대마찰각을 나타냈다. 경상분지의 경우, 화강암과 세일이 주종을 이루나, 화산암 계열의 안산암, 응회암도 시험이 실시되었다. 화강암의 경우 39.9°, 세일 33.1°, 그리고 안산암과 응회암은 41.0°, 41.3°의 값을 가졌으며 시료 수가 많은 3대 지체구조 중 가장 높은 마찰각인 38.1°의 최대마찰각을 보였다.

802개의 전체 시료의 최대마찰각은 36.8°로 나타났다. 그림 7(a)에서와 같이 21~55°의 최대마찰각 범위 내에 대부분의 시료가 포함되었다. 선형회귀 시 상관계수 R은 0.82를 나타내었고, 멱승식($\tau = A(\sigma_n)^B$)으로 회귀시 A=1.121, B=0.881의 값을 보여 다소의 수직응력의 증가에 따른 전단강도 증가율의 저하를 볼 수 있으나, 자료에서 수직응력에 따른 전단강도의 비선형성은 그

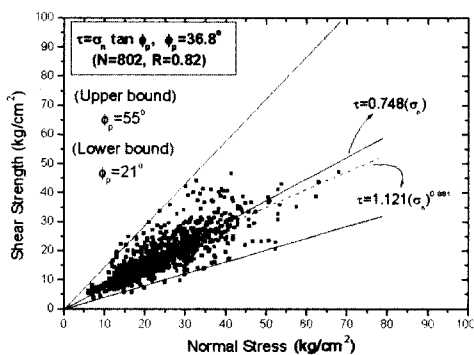
표 2. 암종별 최대마찰각

암종	최대마찰각 (°)	절리면 시료 수	상관계수 (R)
화강암	37.5	204	0.79
편마암	37.1	252	0.85
사암	35.9	33	0.91
편암	35.7	21	0.82
안산암	41.0	14	0.72
세일	33.4	67	0.74
석회암	35.5	65	0.96
천매암	36.6	41	0.88
응회암	41.3	24	0.96
계	36.8	802	0.82

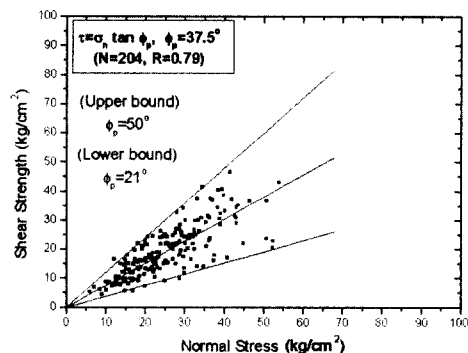
다지 크지 않다.

암종별 최대마찰각은 표 2와 같으며, 암종별 수직응력 대 전단강도 분포도는 그림 7과 같다.

화강암은 37.5°, 편마암은 37.1°로 나타났으며, 그 외 사암 35.9°, 편암 35.7°, 안산암 41.0°, 세일 33.4°, 석회암 35.5°, 천매암 36.6°, 응회암 41.3°의 마찰각을 가졌다. 이

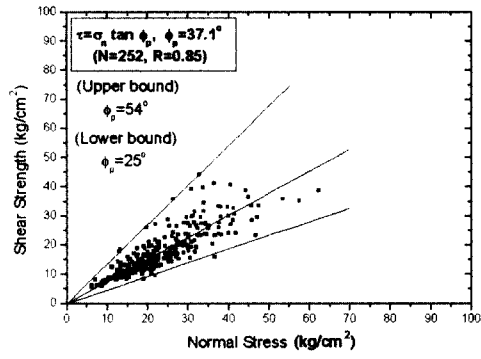


(a) 전체

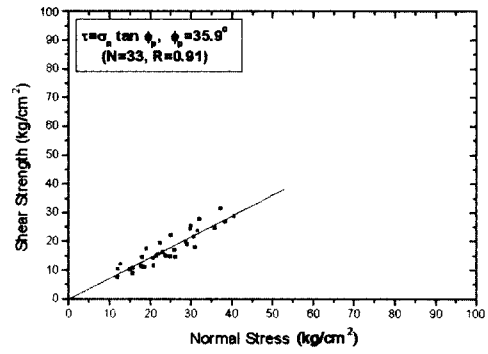


(b) 화강암

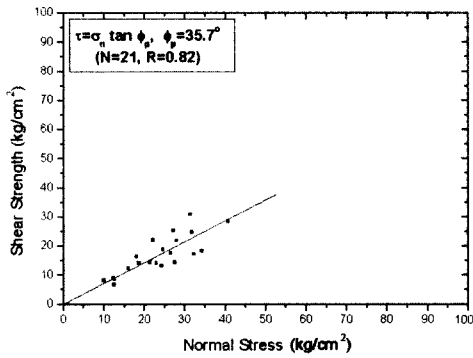
그림 7. 암종별 수직응력 대 최대전단강도 분포



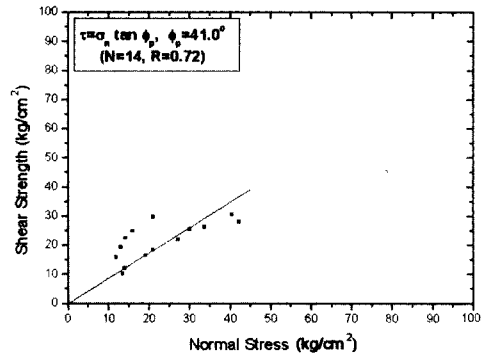
(c) 편마암



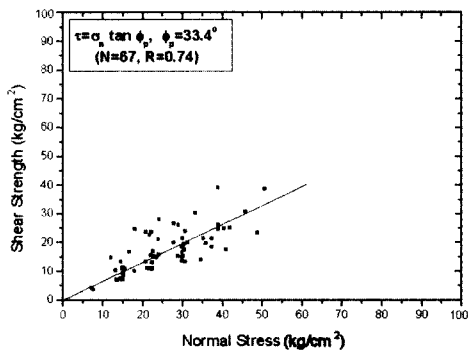
(d) 사암



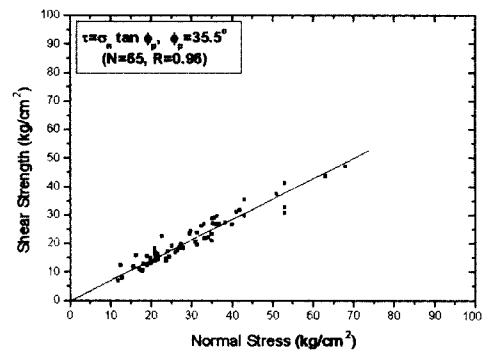
(e) 편암



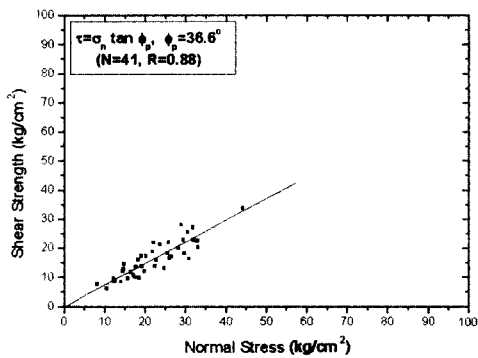
(f) 안산암



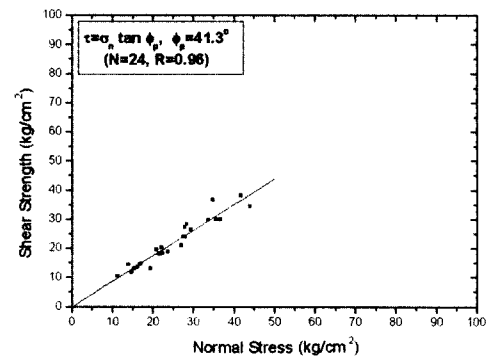
(g) 셰일



(h) 석회암



(i) 천매암



(j) 응회암

그림 7. 암종별 수직응력 대 최대전단강도 분포

를 정리하면 안산암, 응회암, 화강암이 37.5~41.3°의 높은 마찰각을 보였고, 변성암인 편마암, 천매암, 편암이 35.7~37.1°의 마찰각을 나타내었으며 퇴적암인 사암, 석회암, 세일이 가장 낮은 수준인 33.4~35.5°를 나타내었다.

절리의 전단파괴거동에 영향을 미치는 인자는 대개 절리면 거칠기, 수직응력, 절리면의 풍화 정도, 기본마찰각 등 많은 요인이 존재한다. 따라서, 한 인자의 영향을 파악하기 위해서는 다른 인자들이 동일 조건으로 주어져야 한다. 그러나, 이는 자연절리면에 대해서 불가능하므로 어려움을 겪게 된다. 우선, 건조시 비풍화된 화강암의 기본마찰각은 31~35°, 편마암은 26~29°로 알려져 있어(Barton and Choubey, 1977) 다른 조건들이 유사하다면, 화강암의 최대마찰각이 5~6° 가량 더 높을 것이나, 본 자료에서는 비슷한 값을 나타내었다. 이는, 화강암의 경우 일부 시료에서 나타난 강한 풍화현상에 기인한 것으로 판단된다. 화강암은 안정질, 현정질이기 때문에 각 구성광물의 열전달 및 팽창계수의 차이로 인해 풍화를 받기 쉬운 것으로 알려져 있다. 화강암의 경우, 일부 시료가 무결암의 강도가 400kg/cm²이하이며 절리면의 최대마찰각이 극히 낮은 수준을 보인다. 실제 이들 절리면의 절리면압축강도는 조사되지 못했지만, 일반적으로 절리면압축강도의 경우 무결암의 압축강도에 비해 1/4 수준까지도 저하되기 때문에, 절리면압축강도(JCS)가 극히 낮을 것으로 예상된다. 무결암압축강도 400kg/cm²이하인 19개의 시료들을 제외하고 화강암의 최대마찰각을 계산하면, 39.6°로 계산된다.

4.3 잔류마찰각

잔류마찰각의 경우 전체시료에 대해 30.8°로 나타났으며 상관계수 R=0.93으로 최대마찰각에 비해 매우 우수한 상관관계를 보였다. 이는 최대마찰각의 경우, 시료의 거칠기 등에 의해 그 값의 범위가 크게 변화되는 데 반해, 잔류마찰각의 경우는 비교적 거칠기에 의한 영향이 적게 되기 때문이다. 암종별 잔류마찰각은 표 3과 같다.

4.4 JRC에 따른 최대마찰각

4.2절에 살펴본 암종별 최대마찰각에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 절리면의 거칠기(JRC)이다. 따라서, 이 절에서는 JRC에 따른 최대마찰각의 변화를 암종별로

표 3. 암종별 잔류마찰각

암종	잔류마찰각 (°)	절리면 시료 수	상관계수 (R)
화강암	31.9	68	0.90
편마암	30.5	115	0.94
사암	32.6	15	0.93
편암	27.6	13	0.96
안산암	-	-	-
세일	28.7	35	0.79
석회암	31.3	59	0.96
천매암	31.1	35	0.89
응회암	-	-	-
계	30.8	383	0.93

살펴보았다.

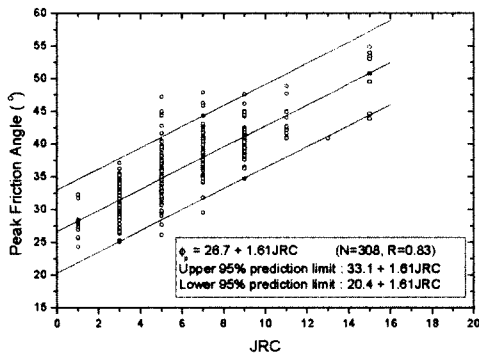
이 때, JRC의 값은 0~2 와 같이 측정되는데, 대표값으로 중간값을 취하였다. JRC가 측정된 308개의 시료 중 암종별, 지체구조별 JRC의 평균은 표 4에 표시된다. 표 4에서는 암종별, 지체구조별 JRC의 평균 뿐 아니라, 최대마찰각이 제시되고 있다. 이 때, 제시된 최대마찰각의 값은 표 2(총 802개 전체시료)에 제시된 값과 비교할 때 화강암을 제외하고는 별 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 화강암의 경우, 전체시료 중 JRC가 측정된 시료가 최대마찰각이 높은 옥천대와 경상분지의 시료만 존재하기 때문이다. 암종별 JRC는 화강암 5.80, 편마암 5.48, 사암 5.19, 편암 5.38, 세일 3.77, 석회암 5.02, 천매암 5.11의 값을 나타냈다. 화강암이 가장 높은 JRC를 나타내었고, 변성암인 편마암, 편암, 천매암이 중간 수준, 퇴적암인 사암, 석회암, 세일이 낮은 JRC를 나타내었다. 세일의 경우, 전체적인 JRC 분포에 비해 크게 낮은 JRC 값을 보이는데, 이는 세일의 경우, 층리가 매우 강하게 발달, 이 층리면을 따른 쪼개짐으로 절리가 발생하기 때문이다. 이러한 JRC의 차이는 최대마찰각에 직접적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

JRC에 따른 최대마찰각은 그림 8과 같다. 암종별로 도시되어 있다.

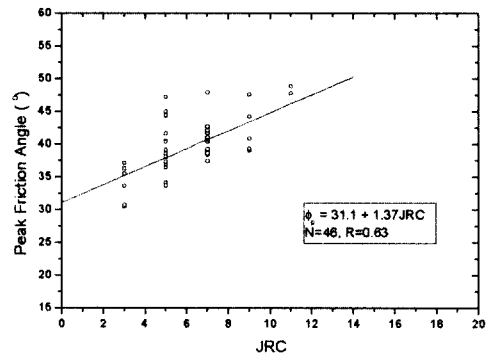
전체 자료수는 308개이며, 최대마찰각은 $\phi_b = 26.7 + 1.61JRC$ 의 관계를 보인다. 상관계수, R은 0.83으로, JRC의 증가에 따른 최대마찰각의 증가를 보인다. 그러나, 예를 들어 JRC가 4~6인 경우(중간값 5), 최대마찰각은 25도에서 47까지 변화하게 되어, 시료별로 큰 차이를 보일 수 있다. 95% 신뢰도로 예측시 최대마찰각의 상한과 하한은 $\phi_b = 20.4 + 1.61JRC \sim 33.1 + 1.6JRC$ 의 범위를 가진다.

표 4. 암종, 지체구조별 JRC와 최대마찰각

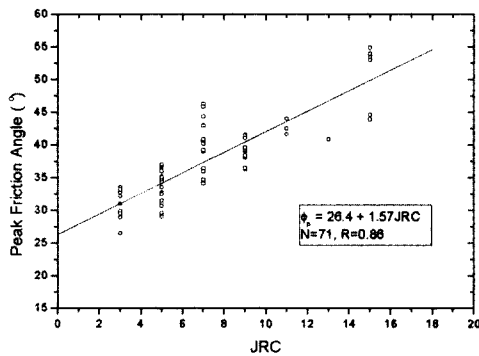
암종	지체구조 JRC [절리면 시료 수]							계
	경기육괴	충남분지	옥천습곡대 (태백산지역)	옥천습곡대 (옥천대지역)	소백산육괴 (소백산지역)	소백산육괴 (지리산지역)	경상분지	
화강암				5.60 [12]			5.90 [34]	5.80 [46]
				39.6			39.9	39.8
편마암	5.90 [50]			7.67 [6]		3.79 [15]		5.48 [71]
	37.7			38.0		34.0		37.2
사암			3.87 [21]				7.00 [9]	5.19 [30]
			35.1				36.8	35.8
편암	7.00 [4]			3.57 [9]				5.38 [13]
	39.2			34.7				35.6
세일			1.00 [3]				4.09 [35]	3.77 [38]
			27.2				33.1	32.8
석회암			5.38 [14]	4.86 [31]				5.02 [45]
			34.6	35.5				35.0
천매암				5.11 [30]				5.11 [30]
				37.0				37.0
계	6.03 [54]		4.32 [38]	5.53 [103]		3.77 [24]	4.85 [92]	5.08[308]
	37.8		34.5	36.6		34.9	36.0	36.0



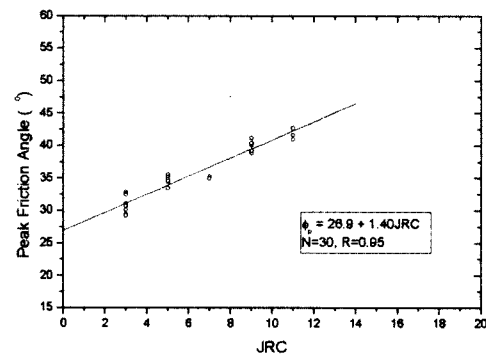
(a) 전체



(b) 화강암

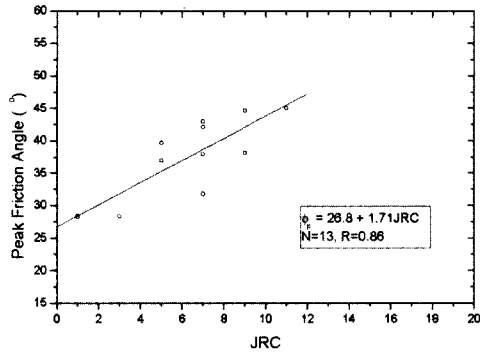


(c) 편마암

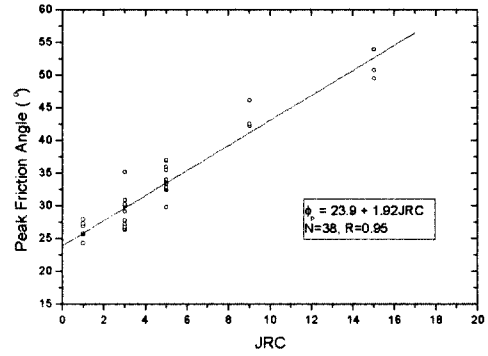


(d) 사암

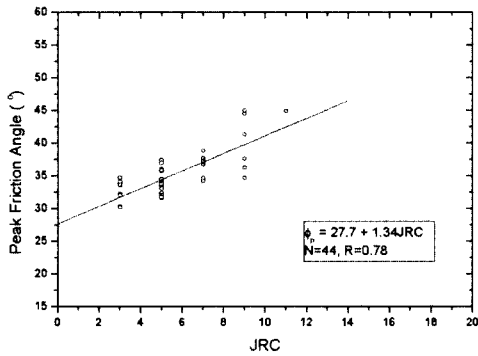
그림 8. JRC에 따른 암종별 최대마찰각



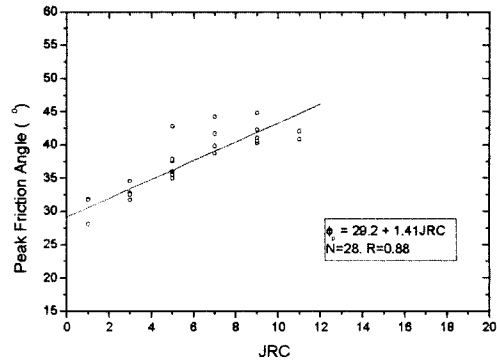
(e) 편암



(f) 세일



(g) 석회암



(h) 천매암

그림 8. JRC에 따른 암종별 최대마찰각

화강암의 경우에는 46개의 자료에 대해 $\phi_p = 31.1 + 1.37JRC$ 이며 $R=0.63$ 이고,

편마암은 71개의 자료에 대해 $\phi_p = 26.4 + 1.57JRC$ 이며 $R=0.83$,

사암: 30개, $\phi_p = 26.9 + 1.40JRC$, $R=0.95$, 편암: 13개, $\phi_p = 26.8 + 1.71JRC$, $R=0.86$,

세일: 38개, $\phi_p = 23.9 + 1.92JRC$, $R=0.95$, 석회암: 44개, $\phi_p = 27.7 + 1.34JRC$, $R=0.78$,

천매암: 28개, $\phi_p = 29.2 + 1.41JRC$, $R=0.88$ 의 값을 나타내었다.

화강암의 경우에 상관도가 가장 떨어지는 데, 이는 화강암의 풍화에 대한 저항이 작기 때문에 JRC값 이외에도 JCS의 영향을 많이 받았기 때문으로 판단된다.

이와 같은 JRC와 최대마찰각의 관계를 통해 어느 정도 실험에 이용된 시료들의 암종별 기본마찰각 수준을 예상할 수 있다. 즉, $JRC=0$ 일 때의 마찰각이 암종별 기본마찰각과 비슷할 것으로 예측할 수 있다. 이 값들과 뒤에 Barton의 경험식에 입력변수로 들어갈 기본마찰각과 비교할 것이다.

4.5 전단강성

전단강성은 “매우 가변적이며 예측하기가 극히 어렵다”고 알려져 있으며, 절리면의 교란여부, 시험기법, 시험편 크기, 수직강성에 의존한다(Brady and Brown, 1985). 특히, 시험기의 강성 등 시험조건에 많이 의존하고, 절리면의 맞물림 등 보존 상태가 불량한 경우가 많은 현장절리에서는 전단강성값이 적게 평가될 우려가 많은 값이다. 따라서, 본 실험에 이용된 시험장비의 특성을 반영하기 때문에 그 값의 적용에 있어서 주의해야 할 것이다. 먼저 수직응력에 따른 전단강성은 그림 9와 같다.

수직응력에 따라 전단강성이 증가하며 선형회귀할 경우,

K_s ($kg/cm^2/mm$) = $0.52\sigma_n$ (kg/cm^2), $N=241$, $R=0.72$ 로 나타났다. 이를 지수함수나 멱함수로 회귀할 경우에도 상관계수는 그다지 증가하지 않으므로, 간편한 선형회귀식으로 표시한다. JRC에 따른 전단강성은 회귀시 회귀계수가 0.5이하로 나타나 수직응력에 비해 전단강성에 대한 영향이 작았다.

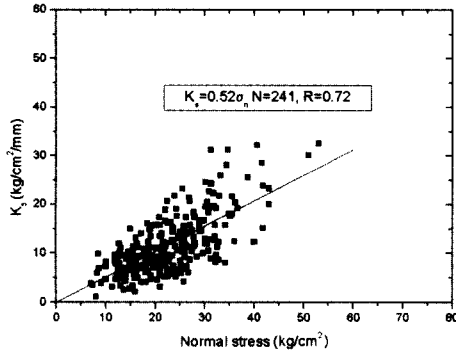


그림 9. 수직응력에 따른 전단강성

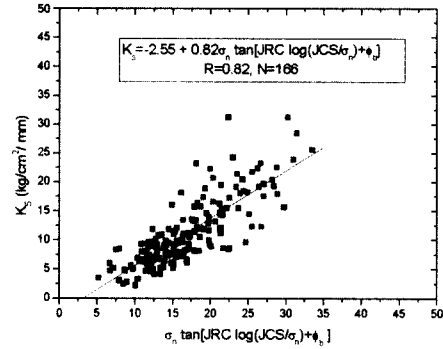


그림 10. Barton식에 의해 예측된 전단강도와 전단강성사이의 관계

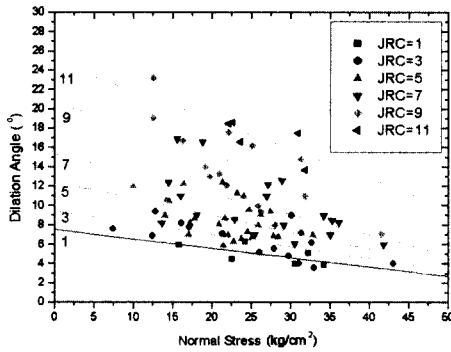


그림 11. 수직응력에 따른 팽창각 변화

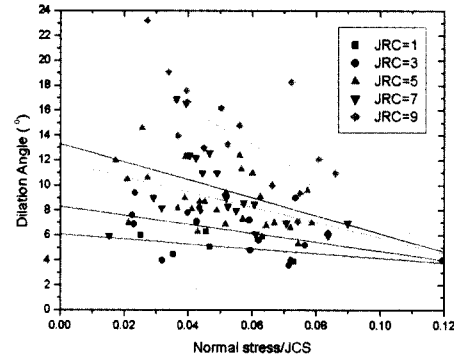


그림 12. 수직응력/JCS에 따른 팽창각 변화

그러나, JRC와 수직응력, 그리고 JCS와 같은 인자들이 모두 다소간 전단강성에 영향을 끼칠 것이므로, Barton식으로 계산되는 전단강도를 계산하여 전단강성과의 관계를 알아보았다(그림 10).

이 때, 상관계수 0.82(N=166)로 수직응력만 고려할 경우보다 상관계수가 높아지는 것을 알 수 있다. 이 때의 선형회귀식은 $K_s = -2.55 + 0.82 \tan [JRC \log (JCS / \sigma_n) + \phi_b]$ 이다.

4.6 최대팽창각

최대팽창각은 JRC가 클수록 수직응력이 작을수록 큰 값을 가지는 것으로 알려져 있다. 그림 11의 자료는 팽창각과 JRC가 동시에 측정된 자료군(N=86)에 대한 결과로 JRC의 증가에 따른 팽창각의 증가, 수직응력의 증가에 따른 팽창각의 감소가 잘 나타나고 있다.

이를 JRC에 따라 회귀된 식들은 다음과 같다.

$$JRC=1 : \phi_d = 7.54 - 0.097\sigma_n$$

$$JRC=3 : \phi_d = 9.52 - 0.124\sigma_n$$

$$JRC=5 : \phi_d = 12.47 - 0.173\sigma_n$$

$$JRC=7 : \phi_d = 15.41 - 0.211\sigma_n$$

$$JRC=9 : \phi_d = 20.69 - 0.272\sigma_n$$

$$JRC=11 : \phi_d = 24.84 - 0.300\sigma_n$$

즉, JRC가 크면 클수록 최대팽창각의 수준이 높게 나오나, 수직응력에 따른 감소율 역시 커진다는 것을 알 수 있다.

이를 수직응력과 JCS의 비에 대해 다시 도시할 경우, 그림 12와 같다.

여기서, 수직응력 대 JCS의 비가 12%이상일 경우, 각 JRC(1~9)군의 팽창각의 차이가 미미해짐을 확인할 수 있다. 현재의 자료보다 더 큰 범위의 JRC와 수직응력을 가지는 자료가 없고, 상관도 역시 높지 않기 때문에 팽창각의 차이가 없어지는 지점을 명확히 할 순 없지만, 수직응력 대 JCS의 비가 증가함에 따라, 거칠기 요소의 손상이 급격히 증가됨을 알 수 있다.

한편, Barton식의 팽창성분인 $JRC \log (JCS / \sigma_n)$ 과 최대팽창각과의 관계는 그림 13과 같다. Barton(1977)이 언급한 바와 같이 본 실험자료들의 최대팽창각은 $0.5JRC \log (JCS / \sigma_n) \sim 2JRC \log (JCS / \sigma_n)$ 의 범위 내에 대부분 분포함을 알 수 있으나, 측정된 최대팽창각의 경우, 전단변위-수직변위 곡선에 대한 접선 중 가장 큰 크기의 값을 결정하였기 때문에, Barton이 예측한 평균치

표 5. 암종별 기본마찰각

	역산된 기본마찰각 (°)	절리면 시료 수	R	문헌상의 기본마찰각 (°)
화강암	31	46	0.67	31 ~ 35
편마암	27	59	0.95	26 ~ 29
편암	28	13	0.87	-
석회암	29	39	0.85	31 ~ 37
천매암	30	28	0.93	-

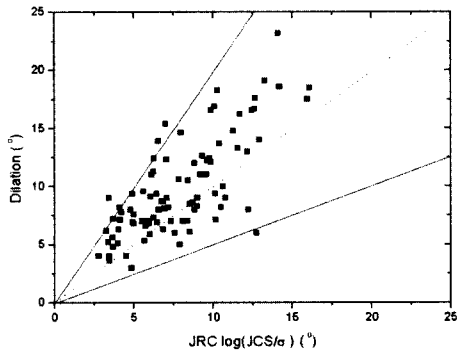


그림 13. Barton 식의 팽창성분과 팽창각 사이의 관계

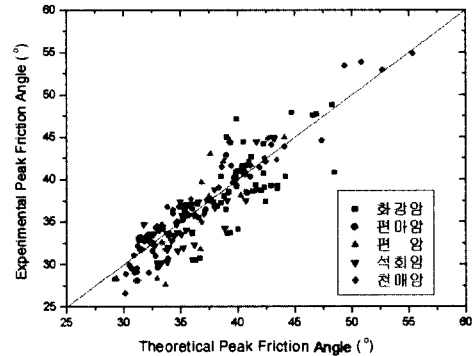


그림 14. Barton 식에 의해 예측되는 최대마찰각과 실험에 의한 최대마찰각 사이의 관계

인, $JRC \log(JCS/\sigma_n)$ 에 비해 큰 $1.37JRC \log(JCS/\sigma_n)$ 값을 보였다.

4.7 최대전단강도의 예측

최근 들어 가장 널리 이용되고 있는 절리면의 비선형 강도식인 Barton식을 이용하여 실험결과와 계산치를 비교하였다. 이 경우, Barton식의 입력변수인 JRC와 JCS가 동시에 측정된 자료(N=190)에 국한하였다. 한편, Barton식의 입력변수인 기본마찰각은 일반적으로 문헌상의 자료를 참고한다. 그러나, 문헌상의 자료는 범위가 좁아 주어진게 되어 적용에 있어 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 각 암종별로 실험치와 Barton식을 이용한 계산치를 기본마찰각을 변화시켜가며 비교하여 최적 기본마찰각을 계산하였다. 이를 통해 구한 기본마찰각과 문헌상(Barton and Choubey, 1977)의 기본마찰각(건조상태)은 표 5와 같다.

실험상의 기본마찰각은 문헌상에서 범위로 주어지는 기본마찰각 하한선 근방의 값을 나타내고 있다. 실제 현장의 풍화를 받은 절리면의 특성상 이러한 값은 합리적인 값으로 판단된다. 또한, 이를 4.4절의 JRC에 따른 최대마찰각 회귀식과 비교하면, 화강암의 경우, $31.1^\circ(-0.1^\circ)$, 편마암 $26.4^\circ(+0.6^\circ)$, 편암 $26.8^\circ(+1.2^\circ)$, 석회암 $27.7^\circ(+1.3^\circ)$,

천매암 $29.2^\circ(+0.8^\circ)$ 와 같이 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있으며, 따라서 관심대상 지역의 동종암종에 대해 JRC값과 최대마찰각의 관계를 통해 기본마찰각을 비교적 정확하게 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같이 추정된 기본마찰각을 이용하여 Barton식으로부터 최대마찰각을 구하여 이를 실험을 통한 최대마찰각과 비교하였다(그림 14). 0.89의 상관계수로 실험치와 이론치가 비교적 잘 일치하여, Barton식의 적용성이 입증된다.

5. 결론

본 연구에서는 국내에 분포하는 자연절리면의 역학적 특성을 규명하기 위하여 최근 5년간 서울대학교 지구환경시스템공학부 암반공학연구실에서 수행된 자연절리면 직접전단시험을 지체구조별, 암종별로 분석하였다. 이를 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 국내 절리면의 최대마찰각은 36° , 잔류마찰각은 31° 의 값을 보였으며, 절리면거칠계수(JRC)는 5.1, 절리면압축강도(JCS)는 440kg/cm^2 의 평균값을 보였다.
- (2) 시험된 자료를 지체구조별로 살펴보면, 경기육괴의 경우 편마암과 화강암이 다수 분포하며, 평균 최대마찰각은 36.6° 를 보였고, 옥천대(옥천)의 경우 화강

암과 석회암, 천매암 등이 다수 분포하며, 평균 최대 마찰각 36.5°를 보였다. 경상분지의 경우, 화강암, 셰일, 응회암, 안산암 등이 분포하며 평균최대마찰각 38.1°로 시료수가 많은 3대 지체구조 중 가장 높은 마찰각을 보였다.

- (3) 암종별 최대마찰각은 화강암 37.5°, 편마암 37.1°로 나타났으며, 그 외 사암 35.9°, 편암 35.7°, 안산암 41.0°, 셰일 33.4°, 석회암 35.5°, 천매암 36.6°, 응회암 41.3°의 값을 가졌다. 화산암계열의 안산암, 응회암과 화성암인 화강암이 37.5~41.3°의 높은 마찰각을 보였고, 변성암인 편마암, 천매암, 편암이 35.7~37.1° 마찰각을 나타내었으며 퇴적암인 사암, 석회암, 셰일이 가장 낮은 수준인 33.4~35.5°를 나타내었다. 한편, 화강암의 경우, 전체 204개의 자료 중 무결압강도 400kg/cm² 이하의 자료 19개를 제외하면 39.6°의 값을 나타내었다.
- (4) 절리면거칠계수(JRC)에 따른 전체 자료의 최대마찰각은 $\phi_p = 26.7 + 1.61JRC$ ($R=0.83$)의 관계를 보여 JRC의 증가에 따른 최대마찰각의 증가를 보였으며, 암종별 회귀식을 제시하였다. 그리고, 전단강성과 팽창각의 수직응력, JRC, JCS에 따른 상관관계를 조사하였다. 전단강성은 수직응력의 변화에 가장 큰 영향을 받으며, 수직응력의 증가에 따라 증가되었으며, 수직응력, JRC, JCS 등의 영향을 받는 최대 전단강도의 값과 가장 상관성이 높은 것으로 판단

된다. 팽창각은 JRC값에 큰 영향을 받으나, 수직응력 내지 수직응력 대 JCS의 비의 증가에 따른 감소되며, 점차 JRC의 영향이 감소되는 것으로 드러났다. Barton(1977)이 제시한 바와 같이 최대팽창각은 $0.5JRC \log(JCS/\sigma_n) \sim 2JRC \log(JCS/\sigma_n)$ 의 범위 내에 대부분 분포함을 알 수 있었다. Barton식을 이용한 이론치와 실험치는 적절한 기본마찰각을 이용할 경우, ($R=0.89$)의 상관계수로 회귀되어 Barton식을 통한 최대전단강도 예측의 적용성을 입증할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 대한지질학회(1999), "한국의 지질", 시그마프레스, pp.323-342.
2. Barton N.(1976), "Rock mechanics review. The shear strength of rock and rock joints", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.13, pp.255-279.
3. Barton N. and Choubey V.(1977), "The shear strength of rock joints in theory and practice", Rock Mechanics Vol.10, pp.1-54.
4. Brady B.H.G and Brown E.T.(1985), "Rock Mechanics for underground mining (2nd Ed.)", Chapman & Hall.
5. Brown E.T.(1981), "Rock Characterization Testing & Monitoring (ISRM suggested method)", ISRM.
6. Deere D.U. and Miller R.P.(1966), "Engineering classification and index properties of rock", Technical Report No. AFNL-TR-65-116. Albuquerque, NM: Air Force Weapons Laboratory.
7. Goodman R.E.(1989), "Introduction to rock mechanics", John Wiley & Sons.

(접수일자 2001. 5. 24)