

## 암석 절리의 3차원 거칠기 특성화와 수정 전단강도 관계식의 제안

장보안<sup>1\*</sup> · 김태호<sup>2</sup> · 장현식<sup>1</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지구물리학과, <sup>2</sup>(주)넥스지오

### Characterization of the Three Dimensional Roughness of Rock Joints and Proposal of a Modified Shear Strength Criterion

Bo-An Jang<sup>1\*</sup>, Tae-Ho Kim<sup>2</sup> and Hyun-Sick Jang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Geophysics, Kangwon National University, <sup>2</sup>Nexgeo Inc.

19개의 절리면에 대해 레이저 스캐너를 이용하여 형상을 측정된 후, 각 절리면의 30개 단면에 대하여 절리 거칠기 계수 (Joint Roughness Coefficient)를 계산하였다. JRC 값은 단면의 위치에 따라 매우 큰 차이를 보이고 있으나 3개의 단면에서 측정된 JRC의 평균값은 절리면 전체의 JRC 평균값을 잘 대표할 수 있을 것으로 판단된다. 9개의 절리면에 대해서 석고를 이용한 복제 시료를 제작하여 절리면 전단시험을 실시하였다. 최대마찰각( $\phi_p$ )은 JRC의 평균값과  $\phi_p = 41.037 + 1.046/JRC$ 의 직선의 관계를 보인다. 그러나 절리면 전단시험에서 측정된 전단강도는 절리면에서 측정된 JRC의 평균값을 사용하여 Barton의 관계식에서 추정된 전단강도보다 상당한 오차를 보여, 절리면 전단시험에서 역산된  $JRC_R$ 과 JRC의 관계를  $JRC_R = f \cdot JRC$ 로 정의하고 회귀분석하여 수정계수  $f = 3.15JRC^{-0.5}$ 를 도출하였고, 이 수정계수를 적용하여 Barton의 전단강도 관계식을  $\tau = \sigma_n \cdot \tan(3.15JRC^{0.5} \cdot \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_p)$ 로 수정하여 제안하였다. 이 관계식은 강도가 비교적 낮고 연성의 특성을 보이는 풍화암이나 연암의 절리면 전단강도 추정에 적용될 것으로 기대된다.

**주요어** : 절리면, 거칠기, JRC, 절리면 전단시험, 전단강도 관계식

Surface roughness profiles were measured from 19 joint samples using a laser scanner, and Joint Roughness Coefficient (JRC) values were calculated from 30 sections in each sample. Although JRC values varied with the location of the section, the average JRC values from any three sections provides an adequate representation of the average JRC value for the entire surface well. Direct shear tests were performed on nine joints reproduced using molds of real joints in samples of gypsum. The peak friction angles ( $\phi_p$ ) showed a linear relationship with the average JRC values, yielding the following relationship:  $\phi_p = 41.037 + 1.046/JRC$ . However, the shear strengths measured by direct shear tests differed from those calculated using Barton's criterion. The relationship between calculated from direct shear tests and JRC measured from joint surfaces is defined as  $JRC_R = f \cdot JRC$ , and the correction coefficient  $f$  is was calculated as  $f = 3.15JRC^{-0.5}$ , as calculated by regression. A modified shear-strength criterion, is proposed using the correction coefficient,  $\tau = \sigma_n \cdot \tan(3.15JRC^{0.5} \cdot \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_p)$ . This criterion may be effective in calculating the shear strength of moderately weathered rock joints and highly weathered rock joints with low strength and ductile behavior.

**Key words** : Joint, Roughness, JRC, Direct shear test for joints, shear strength criterion.

### 서론

일반적으로 절리면의 전단강도는 무결암의 전단강도에 비하여 현저히 낮기 때문에, 암반의 전단거동은 절리면의

거동이 거의 지배하고 있다. 그러므로 사면이나 터널과 같은 암반의 전단거동과 관련된 지질공학적인 문제에서 절리면의 전단거동 특성은 매우 중요한 요소 중의 하나이다. 충전물이 없는 절리면의 전단강도는 매우 다양한 요인에

\*Corresponding author: bajang@kangwon.ac.kr

의하여 영향을 받으며, 현재까지 연구된 요인들로는 ① 암석의 종류, ② 절리면에 작용하는 수직응력의 크기, ③ 절리면의 거칠기, ④ 절리면의 크기, ⑤ 풍화의 정도 ⑥ 절리면의 강도, ⑦ 습기 ⑧ 공극 수압 등이 있다 (Kulatilake et al., 1995). 이들 요인 중에서도 절리면의 거칠기는 절리면의 전단강도뿐만 아니라 변형거동 및 지하수의 흐름에도 매우 큰 영향을 끼치는 요소로 알려져 있다. Barton and Choubey (1977)는 절리면의 거칠기를 처음으로 정량화하여, 절리면에서 일차원적인 선을 따라 측정된 단면의 형상을 10개의 표준거칠기 단면과 육안으로 비교하여 절리 거칠기 계수(Joint Roughness Coefficient, 이하 JRC) 값을 결정하였다. 그러나 이러한 JRC 결정방법은 조사자의 주관과 경험에 따라 결과가 달라지며 많은 오차를 발생시킬 수 있으므로, 최근에는 레이저 스캐너나 디지털 프로파일 게이지 등의 기기를 이용하여 측정된 단면의 수치화된 데이터를 통계적 방법, 프랙탈 방법 등으로 분석하여 보다 정확한 절리면 거칠기를 측정하고 있다(Tse and Cruden, 1979; Krahn and Morgenstern, 1979; Lee et al., 1990; 장현식 외, 2005).

절리면의 전단강도는 수직응력과 직선의 관계인  $\tau = c + \sigma \tan \phi$ 로 표현되어 절리면의 거칠기는 마찰각  $\phi$ 에 포함되어 이해되었으나, Barton (1973)은 전단강도와 수직응력의 관계를  $\tau = \sigma_n \tan(\phi)$ 의 곡선의 관계로 발표하였고, 이러한 곡선의 관계가 더욱 현실적인 것으로 인식되고 있으며 점차 사용이 증가되고 있는 추세이다. Barton의 관계식을 이용하면 절리면 전단시험을 통하여 JRC를 측정할 수도 있으며, 역으로 절리면의 JRC를 측정하여 절리면의 전단강도를 추정할 수도 있다. 절리면의 JRC를 측정하여 절리면의 전단강도를 추정하기 위해서는 정확한 JRC의 측

정이 필수적이거나, JRC는 일차원적인 선을 따라 측정되는 반면에 절리면 전단시험은 절리면 전체를 포함하는 3차원적이므로, 측정된 JRC 값이 전체 절리면을 대표하지 못하는 경우가 발생하고, 따라서 정확한 전단강도를 추정하지 못하는 경우가 발생할 수 있게 된다. Fig. 1은 이 연구에서 사용된 시료 G-12 절리면의 3차원 형상을 나타낸 것으로, 중앙 부근에는 산과 같은 높은 지형을 이루고 있으나 좌측과 우측은 평지나 계곡의 형상을 이루고 있기 때문에 JRC를 측정하는 단면의 위치에 따라 JRC 값은 상당히 큰 차이를 보일 것으로 판단된다. 그러면 이러한 절리면에서 정확한 전단강도를 추정할 수 있게 하는 JRC 값은 무엇인가? 라는 의문이 남게 된다.

Hsuing et al. (1993)은 미국의 Apache Leap tuff에서 16개의 절리면을 채취한 후, 각 절리면에 140개의 단면을 설정하여 JRC를 측정하였다. 모든 시료에서 JRC는 상당히 분산된 값을 보이고 있으며, 특정 시료에서는 JRC가 0에서 20까지 분포하고 있음을 보고하기도 하였다. 또한 140개의 단면에서 구한 JRC 값의 산술평균은 절리면 전단시험에서 역산된 JRC 값보다 모든 시료에서 작은 값을 나타내고 있어서, 절리면에서 측정된 JRC 값의 산술적 평균이 절리의 표면 거칠기를 정확히 나타내는 계수가 아닐 수도 있음을 보고하였다. Kulatilake et al. (1995)과 Huang and Doong (1990)은 절리면의 전단 방향에 따라 전단강도가 이방성을 나타냄을 보고하였고, 특히 Kulatilake et al. (1995)은 Barton의 관계식에서 JRC를 대신하여 SRP (stationary roughness parameter)를 써야하고, SRP에는 프랙탈 차원과 절편이 조합된 새로운 계수를 제안하였다.

이 연구에서는 하나의 절리면 내에서 표면의 형상이 다양한 높이를 보여서 측정되는 단면의 위치에 따라 JRC의

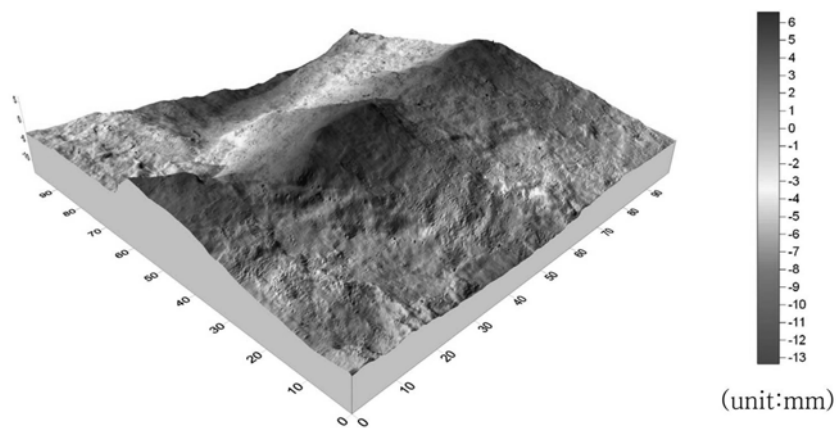


Fig. 1. Three-dimensional profile of sample G-12. Colors were added to clearly show the relief.

값이 달라지는 시료를 대상으로, 이 절리면을 대표하는 JRC 를 결정하는 방법을 분석하였다. 또한 이렇게 구해진 절리면을 대표하는 JRC 값을 이용하여 Barton의 관계식에서 절리면의 전단강도를 추정하였고, 절리면 전단시험에서 구한 전단강도와 비교, 분석하였다. 절리면에서 구한 JRC 값으로 추정한 전단강도는 절리면 전단시험에서 측정된 전단강도와 상당한 차이를 보이기 때문에, 절리면에서 구한 JRC를 이용하여 정확한 전단강도를 추정할 수 있는 새로운 관계식을 제안하였다.

**연구 방법**

강원도 춘천시, 홍천군 일대에 분포하는 편마암, 편암 및 화강암의 절리면을 대상으로 현장에서 프로파일 게이지 (profile gage)를 이용하여 개략적인 거칠기를 측정 한 후, Barton and Choubey (1977)의 표준 거칠기 단면(standard roughness profile)에 대비하여 측정된 JRC를 파악하여, JRC가 0~20의 10개 범위에 고르게 분포하는 10 cm × 10 cm 넓이의 19개의 절리면 시료를 채취하였다. 이후 채취된 시료에 대하여 실험실에서 정밀도 10의 레이저 스캐너 (laser scanner)를 이용하여 가로 및 세로가 각각 0.1 mm 인 측정간격으로 정밀하게 절리면의 형상을 수치화하여 측정하였다(Fig. 1). 모든 시료에 30개의 일차원적인 평행 선을 그은 후, 각 선의 단면형상에 대하여 Tse and Cruden (1979)이 제시한 관계식을 이용하여 정확한 JRC를 계산하였으며, 30개 단면의 JRC 산술평균이 가장 낮은 G-1부터 가장 높은 G-19까지 순차적으로 시료에 번호를 부여하였다. 채취된 19개의 시료 중에서 JRC가 낮은 시료에서 높은 시료까지 고르게 분포하는 9개의 시료를 선택한 후, 각각의 시료에 대하여 실리콘 및 석고를 이용하여 절리면 전

단시험을 위한 시료를 8개씩 복제하였다(Fig. 2). 시료 복제에는 취급하기가 용의하고, 압축강도가 매우 높으며, 일정기간 이후에는 강도의 변화가 없으며 표면이 정밀하게 복제되는 치과용 경석고(dental stone)가 사용되었으며, 절리면 복제와 동시에 3개의 일축압축강도 시험용 코아 시료를 제작하였다.

절리면 전단시험은 일정한 수직하중 하에서 절리면 상반을 수평 방향으로 정변위 전단을 시키면서 수행되었고, 시료가 전단변형하는 동안 전단변위에 따른 전단응력을 기록하였다. 각각의 시료에는 약 0.05 MPa, 0.12 MPa, 0.17 MPa, 0.22 MPa, 0.33 MPa, 0.38 MPa, 0.43 MPa 및 0.51 MPa 정도의 8단계의 수직응력을 적용하였으며, 전단응력이 최대를 보인 후 최소한 5 mm 이상의 전단변위를 발생시킨 후 시험을 종료하였다. 단일 시료에 대하여 여러 단계의 수직응력을 가하면 전단변형 시 시료의 거칠기가 파괴되어 높은 수직응력 단계에서는 아주 낮은 전단응력이 측정될 수 있으므로, 각 수직응력 단계마다 새로운 복제 시료를 사용하여 동일한 거칠기 상태에서 모든 전단시험을 실시하였다.

**연구 결과**

**레이저 스캐너를 통한 거칠기 분석**

Fig. 3a는 레이저 스캐너를 이용하여 측정된 G-17 절리면의 3차원 형상을 보여준다. 시료의 우측 일부는 높은 지형을 보이고 있으며 좌측 및 중앙 부분은 낮은 지형을 이루고 있어서 표면의 형상이 비교적 불규칙한 형태를 보인다. 이러한 형상의 절리면에서는 거칠기를 측정하는 위치에 따라 매우 다른 JRC 값을 보일 수 있기 때문에, 먼저 시료의 중앙에(50 mm 지점) 하나의 단면(scan line)을 설정

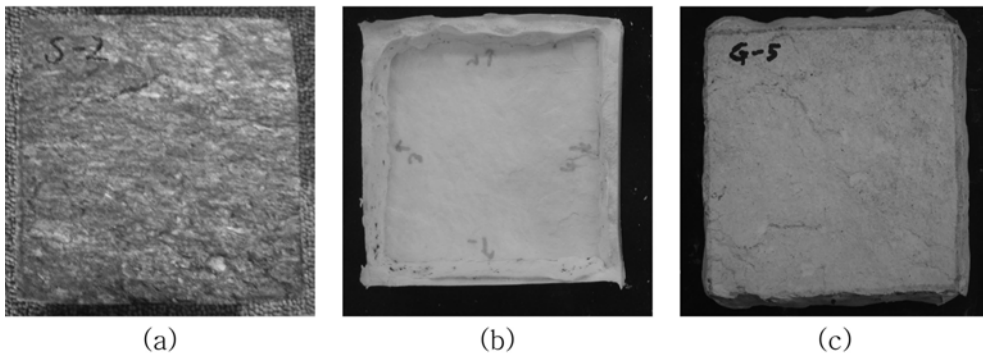


Fig. 2. Procedure followed in reproducing a joint specimen. (a) Natural joint specimen, (b) casting frame of silicone, (c) joint specimen reproduced using dental stone.

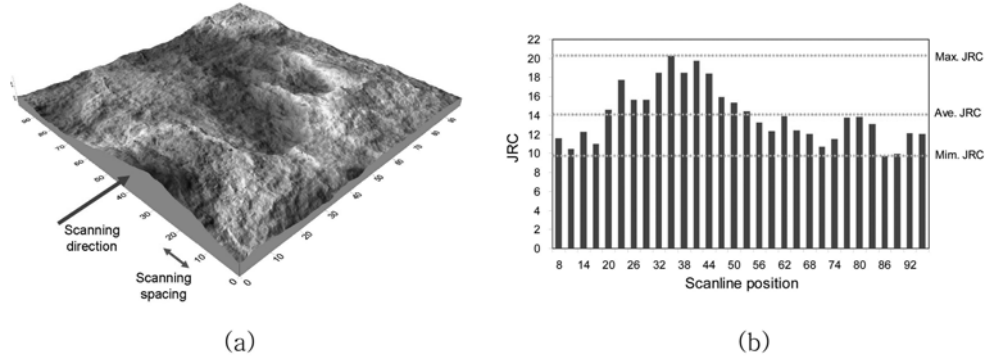


Fig. 3. (a) Three-dimensional profile of sample G-17, and (b) JRC values measured along 30 sections. Colors in (a) were added to clearly show the relief.

한 후, 양쪽으로 3 mm 씩 이동하며 새로운 단면을 설정하여 함께 30개의 단면을 설정하였고, 각 단면에 대하여 Tse and Cruden (1979)의 관계식을 통한 JRC 값을 계산하였다(Fig. 3b). JRC 값은 단면의 위치에 따라 상당한 차이를 보여 35 mm 지점에서 최대인 20을, 86 mm 지점에서 최소인 9.7를 보여, 단일 절리면에서도 측정 위치에 따라 JRC 값이 매우 큰 차이가 날 수 있음을 보여준다.

모든 시료의 중앙에 해당하는 15번째 단면(50 mm 지점)과 중앙에서 양쪽으로 중간지점인 8번(29 mm 지점)과 22번 단면(71 mm 지점)의 JRC 값을 평균하여 3단면의 JRC 평균값으로 계산하였고, 위의 방법을 확대하여 7단면, 15단면, 30단면의 JRC 평균값을 계산하였다. Table 1은 모든 시료에서 측정된 JRC의 최대값 및 최소값, 3 단면, 7 단면, 15 단면 및 30 단면의 JRC 평균값을 보여준다. JRC의 최대값과 최소값의 차이는 G-1 시료에서 0.3으로 가장 작은 반면에 G-11 및 G-17 시료에서 10.3의 가장 큰 차이를 보여, 하나의 절리면에서도 측정 위치에 따라 JRC 값이 매우 큰 차이가 날 수 있음을 보여준다. 그러나 3 단면의 JRC 평균값은 0.0~17.2의 범위를, 7 단면에서는 0.0~16.3의 범위를, 15 단면에서는 0.0~16.2의 범위를, 30 단면에서는 0.0~16.1의 범위를 보여, 단면 수가 증가하여도 거칠기의 범위는 차이가 크지 않음을 보여준다. 또한 모든 시료에서 3 단면의 JRC 평균값과 30 단면의 JRC 평균값의 차이는 1.0 이하의 차이를 보여, 하나의 절리면에 대하여 3개 정도의 단면에서 JRC 값을 구하여 평균값을 구하면 비교적 정확한 JRC의 평균값을 측정할 수 있음을 나타낸다.

절리면 전단시험을 통한 거칠기 분석

9개의 절리면을 대상으로 복제된 석고시료에 대하여

Table 1. Average JRC values measured from various numbers of sections, and maximum and minimum JRC values in analyzed samples.

| No.No. | Average JRC |      |      |      | Max. JRC | Min. JRC |
|--------|-------------|------|------|------|----------|----------|
|        | 3           | 7    | 15   | 30   |          |          |
| G-1    | 0.0         | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.3      | 0.0      |
| G-2    | 0.7         | 0.7  | 0.5  | 0.6  | 2.9      | 0.0      |
| G-3    | 3.1         | 3.4  | 4.0  | 4.2  | 7.6      | 1.2      |
| G-4    | 5.9         | 6.1  | 5.6  | 5.4  | 8.8      | 1.0      |
| G-5    | 5.4         | 5.6  | 5.4  | 5.5  | 9.6      | 0.6      |
| G-6    | 6.4         | 6.0  | 5.8  | 5.8  | 9.3      | 2.4      |
| G-7    | 7.4         | 6.9  | 7.4  | 7.2  | 10.7     | 3.0      |
| G-8    | 7.4         | 7.7  | 7.8  | 7.7  | 10.6     | 4.6      |
| G-9    | 7.9         | 8.2  | 8.1  | 8.1  | 13.5     | 5.1      |
| G-10   | 8.0         | 7.9  | 8.3  | 8.3  | 11.6     | 5.9      |
| G-11   | 11.6        | 11.9 | 11.9 | 12.0 | 17.9     | 7.6      |
| G-12   | 12.1        | 12.0 | 12.0 | 12.1 | 16.0     | 9.5      |
| G-13   | 11.9        | 12.0 | 12.3 | 12.2 | 14.7     | 9.4      |
| G-14   | 13.1        | 13.0 | 13.3 | 13.3 | 16.2     | 10.2     |
| G-15   | 13.2        | 13.5 | 13.3 | 13.4 | 15.0     | 11.7     |
| G-16   | 13.5        | 13.8 | 13.8 | 13.8 | 15.8     | 10.9     |
| G-17   | 14.2        | 13.9 | 14.1 | 14.0 | 20.0     | 9.7      |
| G-18   | 14.8        | 13.9 | 14.4 | 14.4 | 19.2     | 11.4     |
| G-19   | 17.2        | 16.3 | 16.2 | 16.1 | 20.0     | 10.9     |

최대 수직응력을 0.5 MPa 정도로 하여 8 단계의 수직응력 수준에서 직접전단시험을 실시하였다. Fig. 4는 각각의 수직응력 단계에서 측정된 G-10 시료의 전단응력-전단변위

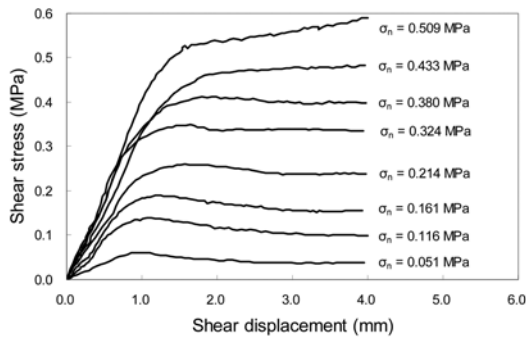


Fig. 4. Shear stress vs. shear displacement at each level of normal stress for sample G-10.

곡선을 보여준다. 수직응력이 증가할수록 절리면의 전단에 필요한 최대전단응력이 증가하고 있으며, 수직응력이 낮은 경우 전단응력은 최대 전단강도를 보인 후 점차 감소하여 일정한 잔류 전단강도를 보여주고 있으나, 수직응력이 높은 경우에는 최대전단강도를 보이지 않고 일정한 전단강도를 보이거나 변위가 증가하면서 전단강도가 커지는 변위 경화(hardening) 현상을 보이고 있다.

절리면이 전단될 때 전단응력과 수직응력의 관계는 Mohr-Coulomb의 직선의 관계가 현재까지 주로 쓰이고 있으나, 곡선의 관계를 보이는 Barton (1973)의 전단강도식이 더욱 현실적인 것으로 인식되고 있으며 점차 사용이 증가되고 있는 추세이다. Fig. 5는 거칠기가 낮은 G-3 시료, 중간인 G-7 시료 및 거칠기가 높은 G-15 시료에서 측

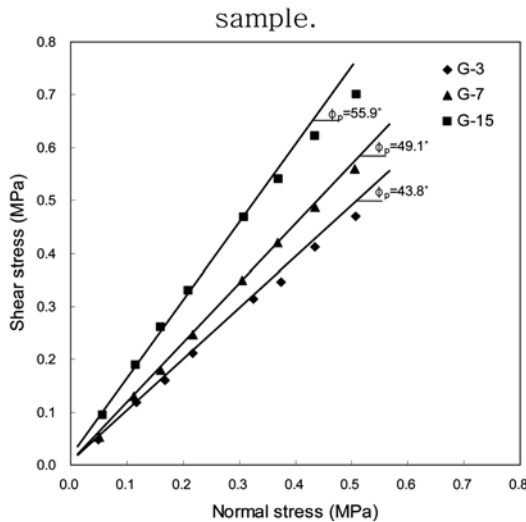


Fig. 5. Data from direct shear tests and best-fit curves of the Mohr-Coulomb criterion.

정된 전단응력 및 수직응력에 Mohr-Coulomb의 관계식  $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$ 를 적용한 것으로, 수직응력이 낮을 때에는 직선의 관계를 보이고 있으나 수직응력이 높아지면서 전단강도가 직선의 관계보다 낮은 값으로 분포하여 일반적으로 알려진 절리면 전단시험의 결과와 잘 부합한다 (Barton and Choubey, 1977). 각각의 시료에서 구한 최대 마찰각은 Table 2와 Fig. 6에서 보여지며, 절리면에서 측정된 JRC의 평균과 최대 마찰각( $\phi_p$ )은  $\phi_p = 41.037 + 1.046/JRC$ 의 직선의 관계를 보이며 상관도( $R^2$ )가 약 0.9255 정도로 비교적 양호한 상관성을 갖고 있으나, JRC가 큰 경우 다소 분산되거나 일치하지 않는 형태도 보인다.

Barton이 제시한 전단응력-수직응력 관계식에는 절리 거칠기 계수(JRC), 절리 벽면강도(JCS)와 기본마찰각( $\phi_b$ )을 포함하고 있으며, 식 1과 같이 표시된다.

Table 2. friction angles measured by the direct shear test for joints.

| No.  | Ave. JRC | peak friction angle ( $\phi_p$ ) |
|------|----------|----------------------------------|
| G-2  | 0.6      | 41.0                             |
| G-3  | 4.2      | 43.8                             |
| G-4  | 5.4      | 48.4                             |
| G-7  | 7.2      | 49.1                             |
| G-10 | 8.3      | 50.3                             |
| G-12 | 12.1     | 56.3                             |
| G-15 | 13.4     | 55.9                             |
| G-17 | 14.0     | 54.7                             |
| G-19 | 16.1     | 56.0                             |

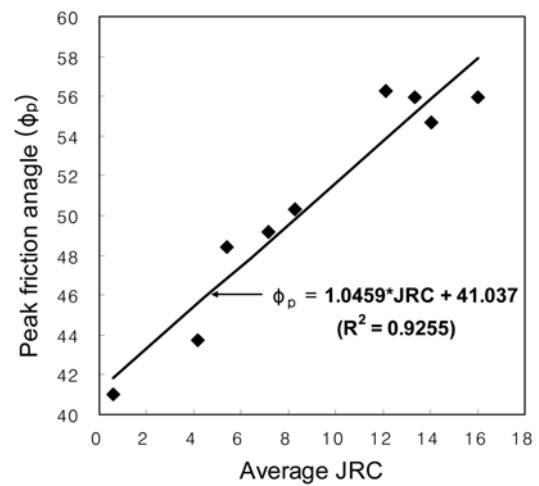


Fig. 6. Relationship between the peak friction angle and average JRC values measured from joint surfaces.

$$\tau = \sigma_n \tan\left(\phi_b + JRC \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n}\right) \quad (1)$$

Fig. 7은 9개의 시료에서 측정된 전단응력 및 수직응력에 Barton이 제시한 전단응력-수직응력 관계식을 적용한 것으로, JRC는 Table 1의 30 단면의 평균값을, 절리면 벽면 강도(JCS)값은 코아시료에 대한 일축압축강도 시험을 통해서 측정된 값인 51.57 MPa을, 또한 기본마찰각( $\phi_b$ )은 매끈한 면에 대한 직접전단시험을 통하여 측정된 값인 30.7°를 적용하였다. JRC가 낮은 G-2, G-3 및 G-4 시료에서 측정된 전단응력은 Barton의 관계식에서 추정된 전단강도보다 높은 값을 보이고, JRC가 중간인 G-7, G-10 및 G-12 시료에서 측정된 전단응력은 Barton의 관계식과 비교적 잘 일치하는 반면에, JRC가 높은 G-15, G-17 및 G-19 시료에서 측정된 전단응력은 Barton의 관계식보다 낮은 값을 보인다. 이러한 현상을 보다 면밀히 분석하기 위하여 각각의 수직응력 단계에서 측정된 전단응력에서 식 2를 사용하여 JRC를 역산하였다.

$$JRC = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right) - \phi_b}{\log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)} \quad (2)$$

Fig. 8은 G-3, G-7 및 G-15 시료의 각 수직응력 단계에서 계산된 JRC(이하  $JRC_C$ )를 보여준다. G-3에서 계산된  $JRC_C$ 는 4.5~6.0의 범위를, G-7 시료에서는 5.3~8.5의 범위를, G-15 시료에서는 10.3~13.0의 범위를 보이며, 전체적으로 낮은 수직응력 수준에서는 수직응력이 증가하면 값이 증가하다가, 일정한 수직응력 이상에서는 값이 수렴하는 형태를 보인다. 각각의 시료에서 계산된 의 평균값은 Table 3과 같으며, Fig. 9는 거칠기 측정에 의하여 계산된 JRC와 의 차이를 보여준다. JRC가 중간 정도인 G-7, G-10, G-12 시료에서는 JRC와 가 거의 일치하는 반면에, JRC가 낮아지거나 높아질수록 차이가 증가한다.

Barton의 전단강도 관계식은 전단강도 시험 시 획득된 모든 수직응력-전단응력 자료에 최적인 곡선의 식으로

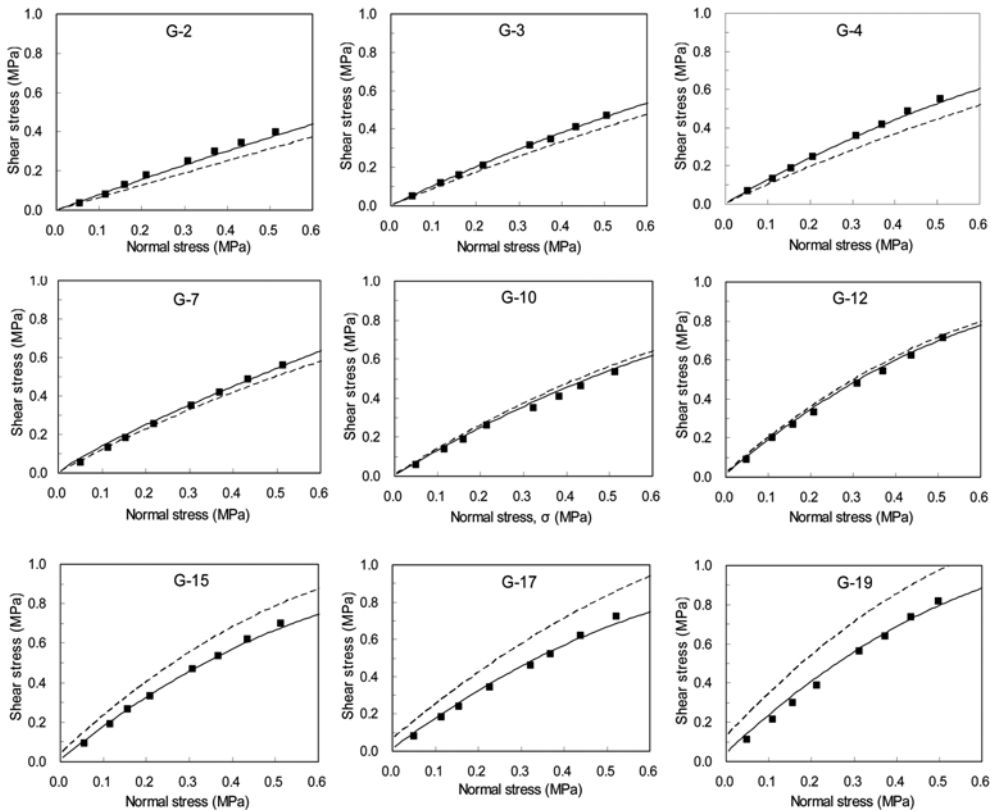


Fig. 7. Data from direct shear tests and best-fit curves obtained using Barton's criterion (dashed lines) and modified Barton's criterion (solid lines).

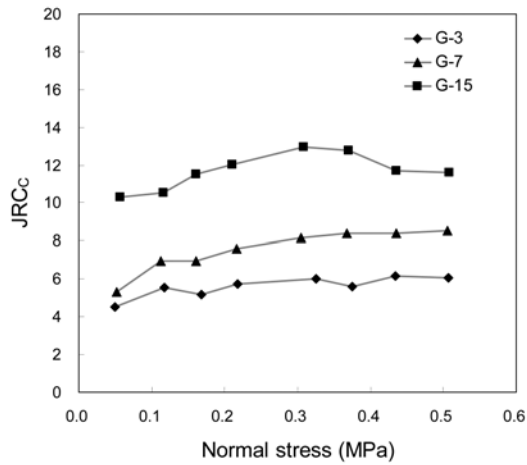


Fig. 8. values calculated at each level of normal stress.

Table 3. JRC values measured by various methods.

| No.  | JRC  | $JRC_C$ | $JRC_R$ |
|------|------|---------|---------|
| G-2  | 0.6  | 3.1     | 3.9     |
| G-3  | 4.1  | 5.6     | 6.0     |
| G-4  | 5.5  | 7.5     | 7.5     |
| G-7  | 7.3  | 7.5     | 8.4     |
| G-10 | 8.3  | 8.1     | 8.5     |
| G-12 | 12.1 | 12.0    | 11.2    |
| G-15 | 13.3 | 11.7    | 11.6    |
| G-17 | 14.1 | 11.8    | 12.0    |
| G-19 | 16.2 | 13.0    | 13.7    |

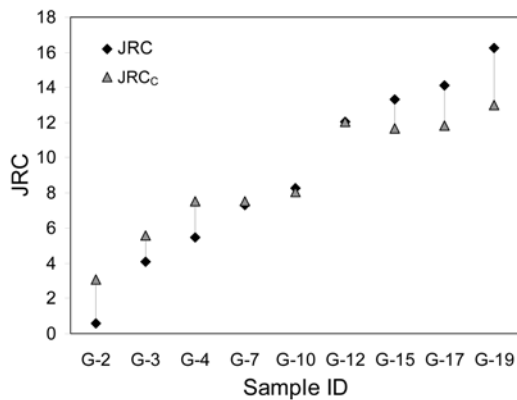


Fig. 9. Differences between average JRC and values.

정의되므로, 절리면 직접전단시험 결과에 가장 잘 맞는 Barton의 전단강도 곡선의 JRC 값을 계산하였고, 이때의 JRC 값을 로 정의하였다. 각 시료에서 구해진 은 Table 3 과 같으며 와는 0.8 이내에서 유사하여, JRC가 낮은 시료에서는 높은 값을 보이는 반면에 JRC가 높은 시료에서는

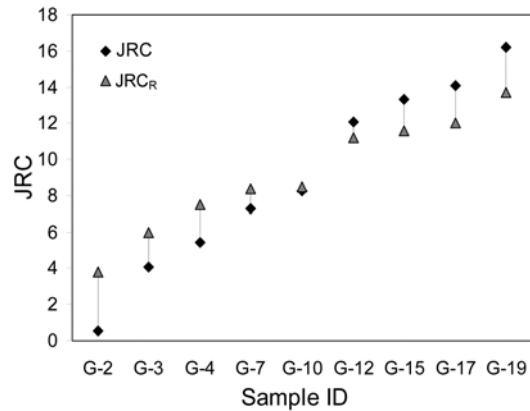


Fig. 10. Differences between average JRC and values.

낮은 값을 보인다(Fig. 10). 또한 JRC가 낮아지거나 높아질수록 차이가 증가하여 와 유사한 상관관계를 보인다.

#### 수정된 절리면 전단강도 관계식의 제안

앞 절에서 설명한 바와 같이 절리면에서 측정된 JRC를 사용하여 Barton의 관계식에서 추정된 전단강도는 절리면 직접전단시험에서 측정된 전단강도와 약간의 차이를 보여, JRC가 낮은 시료에서는 추정된 전단강도가 측정된 전단강도보다 작은 반면에, JRC가 높은 시료에서는 추정된 전단강도가 측정된 전단강도보다 크다(Fig. 7). 절리면 전단시험이 시행된 시료는 석고를 이용하여 동일한 조건에서 복제된 시료이므로 JCS와  $\phi_b$ 는 모든 시료에 동일한 값을 적용하였고, JRC에 따라 전단강도가 크거나 낮은 오차가 발생하기 때문에 절리면에서 측정된 JRC 값이 정확한 전단강도의 추정에 오차를 발생시키는 것으로 판단되었다 그러므로 Barton의 관계식을 이용하여 정확한 전단강도를 추정하기 위해서는 절리면에서 측정된 JRC 값을 수정할 필요가 있다.

Barton and Choubey (1977)가 제안한 표준 거칠기 단면과 각 단면에 대한 JRC 값을 수정하는 것은 이 논문의 범위를 벗어나는 것으로 판단하여, 절리면에서 표준거칠기 단면을 이용하여 측정된 JRC 값과 절리면 전단시험에서 측정된  $JRC_R$ 을 비교하여 수정계수를 제안하고자 한다. 먼저 절리면 전단시험에서 역산된 거칠기 계수인  $JRC_R$ 은 전단강도를 정확히 반영하고 있으므로  $JRC_R$ 과 JRC의 관계를  $JRC_R = f \cdot JRC$ 로 정의하고,  $f$ 를 수정계수라고 하였다.  $JRC_R$ 과 JRC의 차이는 절리 거칠기가 낮은 시료에서는 큰 반면에 중간인 시료에서는 일치하고 절리 거칠기가

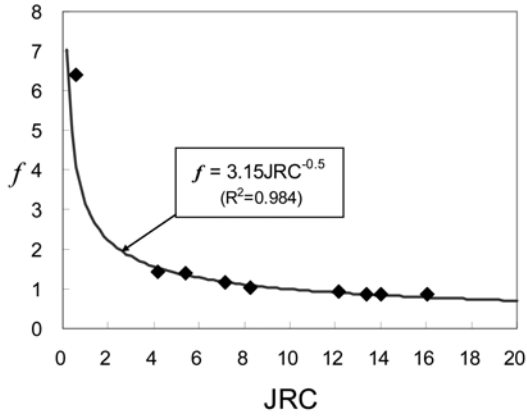


Fig. 11. Relationship between the correction coefficient,  $f$ , and JRC.

높은 시료에서는 다시 커지는 양상을 보이므로(Fig. 10), 수정계수는 JRC와 상관관계가 있을 것으로 판단하였다. 가로축을 JRC로 세로축에 수정계수를 놓은 후, 수정계수와 JRC를 거듭제곱 관계로 회귀 분석한 결과는 Fig. 11과 같으며,  $f = 3.15JRC^{-0.5}$ 로 회귀분석되었다(식 3). 이 때 상관계수  $R^2 = 0.984$ 로 좋은 상관관계를 보여준다. 이 관계식을 이용하여 수정한 Barton의 관계식은 식 4와 같다.

$$JRC_R = 3.15JRC^{-0.5} \cdot JRC \quad (3)$$

$$= 3.15JRC^{0.5}$$

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan\left(3.15JRC^{0.5} \cdot \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_b\right) \quad (4)$$

절리면 전단시험이 수행된 9개의 시료에서 측정된 전단강도 값과 식 4의 수정된 전단강도 관계식에서 추정된 전단강도 값을 비교하였다(Fig. 7). 기존의 Barton의 관계식에서 보이는 오차는 거의 사라지고 수정된 관계식에서 추정된 전단강도는 전단시험에서 측정된 전단강도와 잘 일치함을 보여준다.

이 연구와 유사한 연구를 수행한 Hsuing et al. (1993)은 절리면에서  $Z_2$  및 프랙탈 차원을 이용하여 측정된 JRC가 절리면 전단시험에서 역산된 JRC보다 항상 낮은 값을 보였으며, 이러한 차이에 대한 원인이나 어떠한 대안도 제시하지 못하였다.  $Z_2$ 는 측정간격에 종속적이고 프랙탈 차원 또한 교차길이(crossover length)의 문제가 있으나(Miller et al., 1990; 천병식과 김대영, 2001; 장현식 외, 2005), Hsuing et al. (1993)은 1.27 mm의 너무 넓은 측정간격으로 절리면을 측정하여 모든 시료에서 낮은 JRC 값이 측정되었으며, 따라서 전단시험에서 역산된 JRC와 어떤 상

관관계도 제시하지 못하였다. 그러나 이 연구에서는 0.1 mm의 매우 좁은 간격으로 절리면을 측정하여  $Z_2$ 의 측정간격 문제나 프랙탈 차원의 교차길이 문제를 해결하여 수정된 전단강도 관계식의 제시가 가능하였을 것으로 판단된다.

한편, 이 연구에서 사용된 절리면 시료는 석고를 이용하여 복제된 시료로, 석고는 암석에 비하여 연성(ductile)이 높으며 강도가 낮다. 또한 최대 수직응력이 0.5 MPa로 비교적 낮다. 그러나 Barton and Choubey(1977)는 대부분의 암반공학적인 문제는 0.1~2.0 MPa 범위의 수직응력이면 충분하다고 기술하고 하고 있으므로, 이 연구에서 사용된 수직응력인 0.5 MPa는 충분한 지질공학적 의미를 갖는다고 할 수 있다. 또한 신선할 경우 강도가 높고 취성을 보이는 암석이라도 풍화를 받으면 연성의 특성을 가지게 되고 강도가 낮아진다. 그러므로 석고를 사용하여 이 연구에서 제시된 수정된 전단강도 관계식은 풍화암이나 연암의 특성을 보이는 절리면이나 수직응력이 비교적 낮게 작용되는 암반사면에서 전단강도의 예측에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

## 결론 및 고찰

절리면의 JRC를 정량적으로 분석하기 위하여 레이저 스캐너를 이용하여 19개 절리면의 형상을 수치화하여 정밀하게 측정된 후, 각 시료에서 30개의 일차원 단면에서  $Z_2$ 를 이용하여 JRC를 계산하였다. JRC 값은 단면의 위치에 따라 매우 큰 차이를 보이고 있으나 3개 이상 단면의 JRC 평균값은 단면 수가 증가하여도 거의 유사하여, 3개의 단면에서 측정된 JRC의 평균값은 절리면 전체의 JRC 평균값을 잘 대표할 수 있을 것으로 판단된다.

절리면의 거칠기에 따른 전단강도 특성을 고찰하기 위하여 9개의 절리면에 대해서 석고를 이용하여 각각 8개 씩의 복제 시료를 제작한 후, 최대 수직응력을 0.5 MPa 정도로 하고 8단계의 수직응력 하에서 절리면 전단시험을 실시하였다. 수직응력이 증가됨에 따라 전단강도도 증가하는 비교적 직선의 관계를 보이거나 수직응력이 높아지면 전단강도가 직선의 관계보다 낮은 값을 보여, 일반적으로 알려진 절리면의 직접전단시험의 결과와 잘 부합한다. 최대마찰각( $\phi_p$ )은 JRC의 평균값과  $\phi_p = 41.037 + 1.046JRC$ 의 직선의 관계를 보이며 상관도( $R^2$ )가 약 0.9255 정도로 비교적 양호한 상관성을 보인다. 그러나 절리면 전단시험에서 측정된 전단강도는 절리면에서 측정된 JRC의 평균값을 사용하여 Barton의 관계식에서 추정된 전단강도보다 JRC가 낮은 시료에서는 높고, JRC가 중간인 시료에서는 거의 일치하는 반면에, JRC가 큰 시료에서는 낮은



값을 보인다. 이러한 현상을 보다 면밀히 분석하기 위하여 각각의 수직응력 단계에서 역산된 거칠기 계수,  $JRC_C$ 와 직접전단시험결과에 가장 잘 맞는 Barton의 전단강도 곡선을 만들어내는 거칠기 계수,  $JRC_R$ 을 산출하였다.  $JRC_C$ 와  $JRC_R$ 은 0.8 이내의 차이로 유사하나,  $JRC$ 가 낮아지거나 높아질수록  $JRC_C$  및  $JRC_R$ 과  $JRC$ 의 차이가 증가하여, 절리면에서 계산한  $JRC$ 를 이용하여 Barton의 관계식에서 전단강도를 추정하면 부정확한 값이 추정될 수 있음을 지시한다.

절리면에서 측정된 거칠기 계수인  $JRC$ 를 이용하여 Barton의 관계식에서 정확한 전단강도를 추정하기 위하여, 절리면 전단시험에서 역산된  $JRC$ 의 관계를  $JRC_R = f \cdot JRC$ 로 정의하고 회귀분석한 결과,  $f = 3.15JRC^{-0.5}$ 로 분석되었다. 이 수정계수  $f$ 를 적용하여 Barton의 전단강도 관계식을  $\tau = \sigma_n \cdot \tan(3.15JRC^{-0.5} \cdot \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_b)$ 로 수정하여 제안하였고, 수정된 Barton의 전단강도 관계식은 이 연구에서 측정된 전단강도와 매우 잘 일치한다. 그러나 이 연구에서 실시된 절리면 전단시험은 암석에 비해 매우 연성인 석고 시료를 사용하였고 수직응력도 0.5 MPa 이하의 비교적 낮은 응력부에서 실시되었으므로, 풍화되어 벽면의 강도가 저하된 절리면이나 수직응력이 비교적 낮게 작용되는 암반사면에 수정된 전단강도 관계식이 유효하게 적용될 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: 2009-0074363).

참고문헌

장현식, 장보안, 김열, 2005, 수정 분할자법을 이용한 절리 거칠기 계수(JRC)의 정량화, 지질공학, 15, 269-280.  
 천병식, 김대영, 2001, 암석 절리면 거칠기의 정량화에 대한 수치적 연구, 한국지반공학회논문집, 17, 85-97.  
 Barton, N., 1973, Review of a new shear-strength criterion for rock joints, Eng. Geol., 7, 255-279.  
 Barton, N. and Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mech., 10, 1-54.  
 Hsiung, S.M., Ghosh, A., Ahola, M.P. and Chowdhury, A.H., 1993, Assessment of conventional methodologies for joint roughness coefficient determination, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 30, 825-829.

Huang, T.H. and Doong, Y.S., 1990, Anisotropic shear strength of rock joints, Proc. of the Int. Symp. on Rock Joints, Loen, Norway, 211-218.  
 Krahn, J. and Morgenstern, N. R., 1979, The ultimate frictional resistance of rock discontinuities. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16, 127-133.  
 Kulatilake, P.H.S.W., Shou, G., Huang, T.H. and Morgan, R.M., 1995, New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 32, 673-697.  
 Miller, S.M., McWilliams, P.C. and Kerkering, J.C., 1990, Ambiguities in estimating fractal dimensions of rock fractal surfaces, Proc. of the 31st Symp. on Rock Mech., Golden, Co. U.S.A., 471-478.  
 Lee, Y.H., Carr, J.R., Barr & D.J. and Hass, C.J., 1990, The fractal dimension as a measure of roughness of rock discontinuity profile, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 27, 453-464.  
 Tse, R. and Cruden, D.M., 1979, Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16, 303-307.

2010년 8월 13일 원고접수, 2010년 9월 17일 게재승인

장보안

강원대학교 지구물리학과  
 200-701 강원도 춘천시 효자동 192  
 Tel: 033-250-8583  
 Fax: 033-244-8580  
 E-mail: bajang@kangwon.ac.kr

김태호

주식회사 넥스지오  
 305-710 대전광역시 유성구 봉명동 흥인오피스텔 1001호  
 Tel: 070-7094-4615  
 Fax: 042-828-6966  
 E-mail: kth1911@nexgeo.com

장현식

강원대학교 지구물리학과  
 200-701 강원도 춘천시 효자동 192  
 Tel: 033-244-9275  
 Fax: 033-244-9276  
 E-mail: whitennull@kangwon.ac.kr