

암석 절리면 거칠기의 새로운 3차원 정량화 계수

박정욱¹⁾, 이용기²⁾, 송재준^{2)*}, 최병희¹⁾

A New Coefficient for Three Dimensional Quantification of Rock Joint Roughness

Jung-Wook Park, Yong-Ki Lee, Jae-Joon Song, Byung-Hee Choi

Abstract Roughness of rock joint has generally been characterized based upon geometrical aspects of a two-dimensional surface profile. The appropriate description of joint roughness, however, should consider the features of roughness mobilization at contact areas under normal and shear loads. In this study, direct shear tests were conducted on the replicas of tensile fractured gneiss joints and the influence of the shear direction on the shear behavior and effective roughness was examined. In this procedure, a joint surface was represented as a group of triangular planes, and the steepness of each plane was characterized using the concepts of the active and inactive micro-slope angles. The contact areas at peak strength which were estimated by a numerical method showed that the locations of the contact areas were mainly dependent on the distribution of the micro-slope angle and the shear behavior of joint was dominated by only the fractions with active micro-slope angles. Therefore, a three-dimensional coefficient for the quantification of rock joint roughness is proposed based on the distribution of active micro-slope angle: active roughness coefficient, C_r . Comparison of the active roughness coefficient and the peak shear strength obtained from the experiment suggests that the active roughness coefficient is the effective parameter to quantify the surface roughness and estimate the shear behavior of rock joint.

Key words Rock joint, Contact area, Roughness quantification, Micro-slope angle, Active roughness coefficient

초 록 암석 절리면의 거칠기는 대부분 2차원 프로파일의 기하학적 특징에 초점을 맞추어 기술되어 왔다. 그러나 거칠기를 합리적으로 평가하기 위해서는 수직 및 전단하중하에서 실제 접촉 상태에 놓여 발휘되는 유효 거칠기 특성을 적절히 반영할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 편마암 인장 절리의 복제 시험편에 직접전단시험을 수행하고 전단 방향에 따른 강도 및 거칠기 특성을 고찰하였다. 이 과정에서 절리면의 3차원 형상을 삼각형 요소의 집합으로 재구성하고, 각 요소의 거칠기를 전단 방향에 따른 활성, 비활성 미세거칠각을 이용하여 정의하였다. 수치적 알고리즘을 이용하여 최대전단강도 발현 시 접촉면의 위치와 면적을 예측한 결과, 접촉면의 분포는 미세 거칠각의 분포와 밀접한 관계를 보였으며, 활성거칠각을 갖는 요소만이 전단 거동에 주도적인 역할을 수행하였다. 따라서 활성거칠각의 분포 특성을 모사할 수 있는 확률밀도함수를 제시하고, 이 과정에서 얻어지는 활성거칠기 계수 C_r 을 암석 절리면의 새로운 거칠기 정량화 계수로 제안하였다. 각 시험편에 대한 전단방향에 따른 C_r 과 실험 결과를 비교한 결과, C_r 이 절리면의 거칠기를 정량화하고 전단 강도를 예측하는 데 있어 매우 유용한 파라미터임을 확인하였다.

핵심어 암석 절리면, 접촉면, 거칠기 정량화, 미세거칠각, 활성거칠기계수

¹⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부

²⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부

* Corresponding Author: songjj@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-9043 / Fax: +82-2-871-8938

Address: Department of Energy Resources Engineering,
Seoul National University 599 Gwanak-ro, Gwanak-
gu, Seoul 151-744 Korea

Received: March 20, 2012

Revised: April 6, 2012

Accepted: April 9, 2012

1. 서론

암반에 분포하는 균열, 단층 그리고 절리와 같은 불연속면은 암반의 역학적, 수리학적 특성에 큰 영향을 미치며, 암반물성의 불확실성을 야기한다. 단일한 불연속면의 강도 및 변형특성은 보통 암석 절리(rock joint)에 기초하여 기술되며, 이는 과거의 영구 전단변위가 거의

일어나지 않은 판상형 불연속면을 의미한다(Priest, 1993). 암석 절리는 생성과정에서 암종과 지질환경에 따라 다양한 거칠기를 나타내며, 이로 인해 전단 시 수직 팽창과 돌출부의 파쇄(asperity failure), 접촉면의 변화 등 복잡한 현상을 수반하게 된다. 따라서 절리면의 전단 거동을 이해하고 예측하는 데 있어, 거칠기의 정량적 기술은 매우 중요한 사항이다.

현재까지 절리면의 거칠기를 정량화하기 위하여 많은 파라미터들이 제안되어 왔으며, 이 중에서 Barton(1973)에 의해 제안된 절리거칠계수(joint roughness coefficient, JRC)가 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 JRC는 직접 전단시험 결과로부터 역산된 경험적 계수로 물리적 개념에서 도출된 값이 아니며, Barton & Choubey(1977)가 제시한 대표곡선과의 비교를 통한 JRC의 산정은 측정자의 주관적 판단이 개입될 수 있다는 문제점을 갖는다. 이를 해결하기 위하여 많은 연구자들은 통계적 파라미터를 이용하여 거칠기를 표현하고자 하였다(Myers, 1962, Tse & Cruden, 1979, Maerz, 1990). 통계적 파라미터는 본래 기계공학이나 금속공학 분야에서 주로 사용되던 값으로 2차원 프로파일의 기울기나 진폭(amplitude) 등과 관련된 통계치를 의미한다. 이같은 통계 파라미터들은 프로파일의 측정간격과 길이에 크게 의존하며, 한 가지의 통계적 파라미터만으로 절리면의 거칠기 특성을 온전히 표현할 수 없다는 단점을 갖는다(McWilliams, 1993). 한편, Mandelbrot(1968)이 발표한 프랙탈 이론을 토대로 암석 절리면의 거칠기를 표현하고자 하는 연구도 활발히 진행되어 왔다. 많은 연구자들은 프랙탈 차원의 절리 거칠기 파라미터로서의 잠재적 가능성을 보고하였다(Kulatilake et al., 1995, Fardin et al., 2001). 그러나 최근까지 프랙탈과 관련된 많은 논의와 연구가 진행되었음에도 불구하고, 프랙탈 차원의 습득절차가 매우 복잡하고 측정방법에 따라 서로 다른 결과를 얻게 되며(Shirono & Kulatilake, 1997, Kulatilake & Um, 1999), 초기의 연구결과와는 달리 프랙탈 차원과 JRC간에 음의 상관관계가 보고되는 등, 연구자들간에도 암석 절리면의 적용성에 대한 의견이 양분되어 있는 상태이다(Huang et al., 1992, Odling, 1994).

현재까지 제안된 거칠기 파라미터들을 살펴보면, 몇몇의 연구결과를 제외하고 대부분이 2차원 프로파일의 형상에만 초점을 맞추고 있다. 하지만 2차원 프로파일로는 암석 절리면의 비정상성이나 이방성을 충분히 대표할 수 없다. 또한 거칠기 정량화의 주목적이 전단 거동에 대한 이해에 있음을 고려해 볼 때, 거칠기는 기하학적인 관점이 아닌 역학적 관점에서 기술될 필요가 있다. 실험실에서 직접전단시험 후 절리면의 상태를 살펴

보면, 접촉을 통하여 하중을 지지했거나 파쇄가 일어난 흔적은 일부 영역에서만 관찰되며, 합리적인 거칠기 정량화를 위해서는 위와 같은 실제 접촉 상태에서 발현되는 거칠기 특성을 고려할 수 있어야 한다. 앞서 논의된 대부분의 파라미터들은 절리면의 기하학적 특성을 하나의 통계치나 지수로 표현함으로써, 이러한 '유효' 거칠기의 특성을 적절히 반영하지 못하고 있다.

한편, 박정욱과 송재준(2011)은 전단 및 수직응력하에서 암석 절리면의 접촉점을 판별할 수 있는 수치 알고리즘을 제시하고 이를 PFC^{2D} 모델링을 통해 검증하였다. 이는 전단시험을 통해 얻어진 상하 블록의 상대변위를 통하여 상하부 절리면의 위치정보를 역해석함으로써 각 전단변위에서의 접촉면의 위치, 면적 등을 판별하는 방법이다. 여기서 절리면은 삼각형 요소들의 집합으로 재구성되고, 각 요소의 거칠기 특성은 전단 방향에 따라 활성 또는 비활성 미세거칠각(active or inactive micro-slope angle) 개념을 통해 정의된다. 그들의 연구에서는, 전단변형 시 암석 절리면의 접촉 과정이 미세 거칠각의 분포와 밀접한 관계를 보이며, 특히 활성거칠각을 갖는 요소들은 최대전단강도 발현 시뿐만 아니라 잔류상태에 이를 때까지 접촉 상태를 유지하며 전단거동에 지배적인 영향을 미친다고 결론지었다.

본 연구에서는 편마암 인장 절리의 복제 시험편에 대한 직접전단시험 결과에 위 기법을 적용하여 전단 중 절리 접촉면의 분포와 거칠기의 발현 특성을 고찰하였다. 또한, 이를 토대로 암석 절리면의 역학적 거동 특성 및 전단 방향을 고려한 3차원 거칠기 정량화 계수를 제안하였다.

2. 암석 인장 절리의 복제 시험편에 대한 직접전단시험

본 연구에서는 암석의 인장 절리면에 대한 복제 시험편을 제작하고, 직접전단시험을 수행하여 전단 방향에 따른 거칠기 특성을 고찰하였다. 이를 위하여 가로×세로×높이가 150 mm × 118 mm × 130 mm인 온양편마암 블록의 중심에 인공 균열을 발생시켰다. Fig. 1은 인장 균열 발생 장치의 개략도를 나타내는 것으로, 양쪽 가압판 사이에 암석 블록을 위치시키고 상하 방향으로 하중을 가하면 인장 균열이 유도된다. 온양편마암의 경우, 암석 내에 뚜렷한 편리 구조가 발달하여 있는데, 편리면에 수직인 방향으로 하중을 가하여 전단 방향에 따른 거칠기의 이방성이 극대화되도록 하였다. Fig. 2는 생성된 인장 절리의 단면을 보여주는 것으로서 편리에 평행한 방향과 직각인 방향으로의 거칠기 차이를 육안으로도 쉽게 구별할 수 있었다.

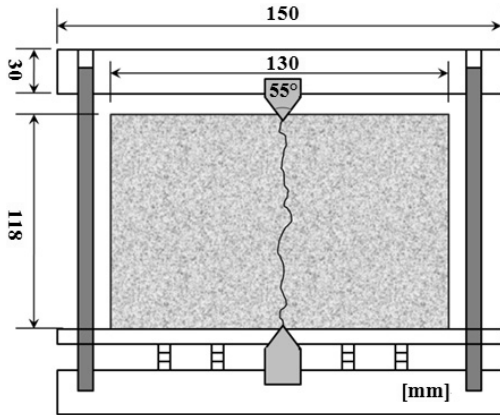


Fig. 1. Splitting rock sample to create a tensile fractured joint.

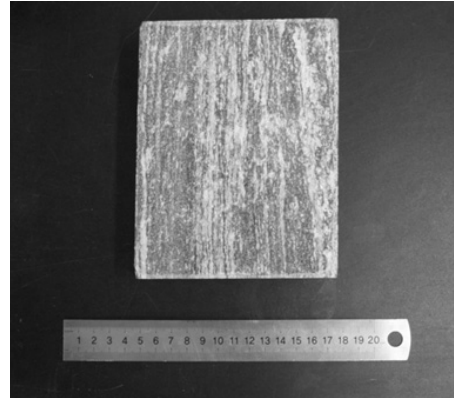


Fig. 2. Tensile fractured gneiss block.

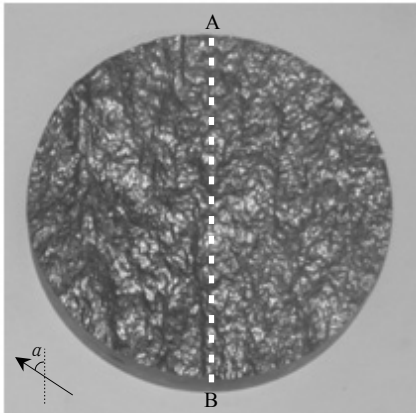


Fig. 3. Aluminum mold and cylindrical molding frame for circular replicas of the gneiss joint.



이와 같이 생성된 인장 절리면 중에서 거칠기의 이방성이 비교적 뚜렷이 나타난 세 가지 단면을 선택하고, 시험편의 복제를 위한 알루미늄 주형을 제작하였다. 이때, 전단면의 형상과 면적이 실험 결과에 미치는 영향을 배제할 수 있도록 각 주형을 108 mm의 지름을 갖는 원형으로 절삭하였고, 각 복제 시험편은 GN-1, GN-2, GN-3라는 명칭을 사용하여 구별하였다. Fig. 3은 GN-3 시료를 제작하기 위한 알루미늄 주형과 철제 성형 틀을 보여준다. 성형 틀은 높이, 내경, 외경이 각각 81, 108, 138 mm인 원통의 형태로, 복제 시험편의 탈형 시 분리가 쉽도록 두 부분으로 제작되었다. 알루미늄 주형은 성형 틀의 내경에 일치하도록 정밀하게 절삭된 것이므로 108 mm보다 약간 작은 직경을 갖는다. 그림에서 점 A, B를 잇는 직선은 편리의 선구조와 평행한 방향을 나타내며, α 는 전단 방향(화살표 방향)과 편리의 선구조가

반시계 방향으로 이루는 각으로서 30° 간격으로 총 12가지 값을 갖는다. 여기서 전단 방향이란 정확히 상부 블록에 대한 하부 블록의 상대적인 이동 방향을 뜻한다.

복제 시험편의 재료로는 ㈜유니온의 '무수축고강도그라우트 HS'를 이용하였다. 이는 양생 중 수축이 발생하지 않아 알루미늄 주형과 동일한 형태의 복제 시험편을 여러 차례 제작하기에 적합하며, 시멘트, 파쇄사, 무수 석고 그리고 기타 첨가제가 중량비 32:50:15:3의 일정 비율로 섞여 완제품 형식으로 출고되므로 실험자에 의한 배합오차를 최소화할 수 있다. 완제품에 대한 물의 중량비는 100:15를 적용하였다.

복제 절리 시험편 제작을 위해서는 다소 복잡한 과정이 소요되었는데, 이는 전단시험기의 전단박스가 직사각형으로 고정되어 있을 뿐만 아니라, 시료의 전단 방향과 편리 방향을 12방향으로 조정해야 했기 때문이다.

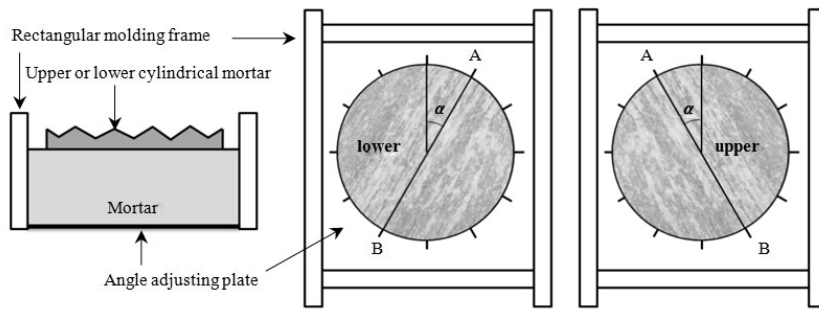


Fig. 4. Procedure to manufacture circular joint replica.

Table 1. Physical and mechanical properties of mortar specimen.

Curing time	Uniaxial compressive strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Brazilian tensile strength (MPa)	Basic friction angles (°)
3 days	74.03	30.31	0.27	5.67	31.93
4 days	75.00	31.10	0.24	5.04	31.96

Fig. 4는 시험편의 제작 과정을 나타낸 것으로, 점 A와 B를 잇는 직선은 편리의 선구조와 평행한 방향을 나타낸다. 두 점은 알루미늄 주형 제작 시 미리 표기한 것으로 방향 회전 시 기준점이 될 수 있도록 하였다. 그림에서 각도 조절판(angle adjusting plate)에는 사각형 성형틀과 원기둥 시편의 위치가 표시되어 있고, 원 주위를 따라 30° 간격으로 각도가 기재되어 있다. 이를 참조하여 시료 제작과정을 설명하면 다음과 같다.

- 1) 알루미늄 주형을 원통 성형 틀에 설치하고, 알루미늄 모형 표면에 이형제를 도포한다.
- 2) 그라우트와 물의 중량을 계측하고 소형 교반기를 이용하여 2~3분 정도 교반한 후 수작업으로 교반작업을 마무리한다.
- 3) 교반한 시멘트 모르타르를 주형의 표면으로부터 20 mm 높이까지 채우고 다짐 막대를 이용하여 기포를 제거한 후, 다시 65 mm 높이까지 채운다.
- 4) 습도를 80% 이상 유지하기 위하여 비닐을 덮어 12 시간 양생한다.
- 5) 하부 절리면이 균으면 A와 B지점을 시료 옆면에 표기하고 주형을 제거한 후, 하부 절리면을 이용하여 같은 방식으로 상부 절리면을 제작한다.
- 6) 1일간 양생 후 상부 모르타르 시험편 옆면에 A와 B 지점을 표기하고, 상 하부 모르타르 시험편을 탈형 및 분리한다.
- 7) 각도 조절판 위에 아크릴 사각성형 틀과 원기둥 모

르타르 시편을 위치시킨다. 원기둥 모르타르는 A와 B지점을 기준으로 각도 α 를 조정하여 위치시키되, 상부와 하부 시편이 맞물리기 위해서 α 가 반대방향으로 조정되어야 함에 주의한다.

- 8) 아크릴 성형 틀과 시편 사이의 공간에 55 mm 높이 까지 시멘트 모르타르를 채운 후, 습도를 유지하며 3일 동안 양생한 후 탈형한다.

시험편의 물리적, 역학적 특성을 파악하기 위하여 단축압축강도시험, 간접인장강도시험, 편평한 면에 대한 직접전단시험 등의 물성시험을 수행하였다. 복제 절리면의 제작 과정을 고려하여 양생 3일째와 4일째의 시험편에 대해 시험하였고, 각 시험마다 3~5회의 실험을 반복하여 평균을 취하였다. Table 1은 기본 물성시험 결과를 요약한 것이며, 양생 기간에 따른 물성치의 차이는 무시할 수 있는 수준으로 판단할 수 있었다. ㈜유니온社의 홈페이지에 따르면, 본 연구에서 사용된 제품은 물의 중량비가 15%일 때, 양생기간이 1일, 3일, 7일인 경우 각각 28일 재령강도의 56, 75, 88%에 해당하는 단축압축강도가 발현된다.

본 연구에서 수행된 직접전단시험에는 서울대학교 암반공학연구소가 보유한 유압식 직접전단시험기를 이용하였다. 이는 서보제어를 통하여 일정수직하중(constant normal load, CNL) 및 일정수직강성(constant normal stiffness, CNS) 조건의 전단시험이 가능한 시험기로, 권중찬(2005), 손봉기(2005) 등에 의하여 그 성능이 검

증된 바 있다.

모든 시험편에 대하여 0.5 MPa의 수직응력을 적용하였으며, 전단 방향으로 1.0 mm/min의 일정한 속도를 유지하며 잔류 상태에 이를 때까지 직접전단시험을 수행하였다. 시험 횟수는 각 시험편별로 12회, 총 36회이다.

Fig. 5는 직접전단시험으로부터 얻어진 각 시험편의 최대전단강도를 전단 방향에 따라 나타낸 것이다. 그림에 표시된 각도는 전단 방향과 편리의 선구조가 반시계

방향으로 이루는 각(Fig. 3의 a)을 의미한다. 세 시료에서 모두, 전단 방향과 편리 방향이 평행일 때($\alpha=0$ 또는 $\alpha=180$)에서 수직일 때($\alpha=90$ 또는 $\alpha=270$)로 가까워짐에 따라 전단강도가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 서로 정반대의 전단 방향을 갖는 경우 2차원상에서 같은 프로파일 형상을 가짐에도 불구하고, 상이한 전단강도를 보이는 경우도 관찰할 수 있다. 예를 들면, GN-2과 GN-3 시료에서 모두 전단 방향이 90인 경우가 270인 경우에 비해 상당히 큰 전단강도를 나타내었다(GN-2: 1.07 MPa > 0.91 MPa, GN-3: 1.04 MPa > 0.86 MPa).

3. 암석 절리의 거칠기 모델링

3.1 절리면의 미세거칠각

실내에서 암석 절리면의 전단시험을 관찰하면, 전단 중 접촉이 발생하는 지점이 일정한 방향으로 기울어져 있음을 관찰할 수 있다. 상부 블록의 전단 방향을 기준으로, 상향(上向)의 기울기를 갖는 지점은 접촉이 발생할 확률이 높지만, 반대로 하향(下向)의 기울기를 갖는 지점은 비접촉 상태에 놓일 확률이 높다. 이 같은 접촉면의 방향성은 이미 많은 선행연구와 실험들에서 보고된 바 있다(Yeo et al., 1998, Yang & Chiang, 2000, Haberfield & Johnson, 1994, Grasselli & Egger, 2003).

박정욱과 송재준(2011)은 접촉면에서의 거칠기 발현 특성을 모델링하기 위하여 ‘미세거칠각(micro-slope angle)’이라는 개념을 제안하였다. 이는 Grasselli와 Egger(2003)의 위경사(apparent slop) 개념을 확장한 것으로서 절리면의 3차원 좌표를 토대로 삼각형 절리망을 구성하고 각 삼각형 요소의 전단 방향에 따른 거칠기를 표현하는 방법이다.

Fig. 6은 미세거칠각의 정의와 계산 과정을 설명하기 위한 모식도이다. 다음의 논의에서, 전단방향평면이란 전단 방향과 Z축을 동시에 포함하는 평면을 뜻한다. 절리면을 이루는 각 삼각형 요소는 공간상에서 단일한 진경사(true dip) 값을 갖지만, 전단 방향에 따라 다양한 위경사(apparent angle)를 나타낼 수 있으며 그 값은 항상 진경사보다 작거나 같다. 예를 들면, Fig. 6(a)과 같이, 공간상에서 θ 의 진경사를 갖는 Δabc 의 경우, 만약 X축과 평행한 방향으로 전단이 일어난다면 전단방향평면(XZ 평면)에서 θ 만큼의 기울기를 모두 발현할 것이다. 하지만 Y축과 평행한 방향으로 전단이 일어난다면 전단방향평면(YZ 평면) 내에서 Δabc 는 0°의 기울기를 갖게 되며 여기서의 전단 저항력은 기본마찰각에만 의존하게 될 것임을 직관적으로 예상할 수 있다.

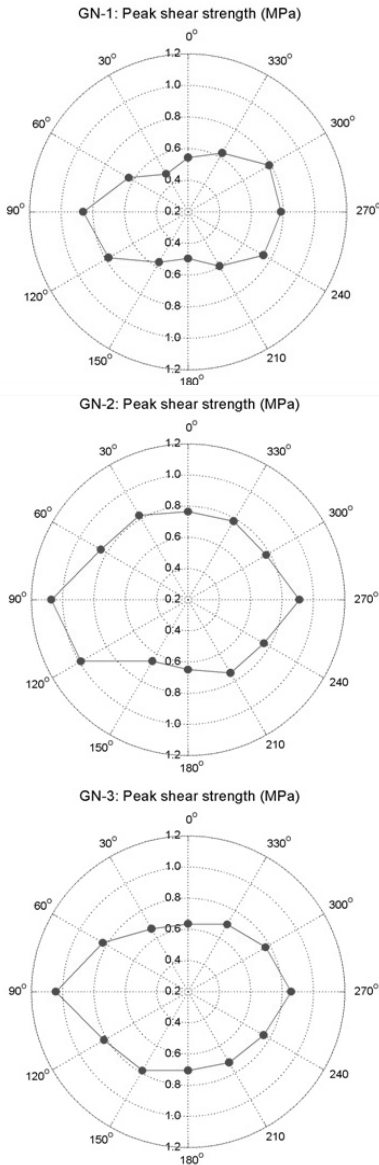


Fig. 5. Peak shear strength according to shear direction.

Fig. 6(b)는 절리면의 형상을 2차원의 전단방향평면에 단순화하여 나타낸 그림으로, \vec{s} 는 전단 방향을 나타내는 벡터이다. 전단방향평면 내에서 절리면의 삼각형 요소 E가 취하는 위경사를 $\vec{\theta}_E$ 로 표현하면, $\vec{\theta}_E$ 는 전단 방향의 함수이다. 삼각형 요소의 법선 벡터 중 시료 외부로 향하는 벡터를 전단방향평면으로 투영한 벡터 \vec{e}_E 를 구하면, \vec{e}_E 가 \vec{s} 와 이루는 각 β_E 로부터 위경사 $\vec{\theta}_E$ 의 크기를 계산할 수 있다. 이때 A와 같이 상향 기울기를 갖는 요소들은 90° 보다 작은 크기의 β_E 를 갖게 되며, 반대로 B와 같은 경우 둔각의 β_E 를 갖게 된다. 따라서 요소 E의 위경사 θ_E 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\theta_E = |90^\circ - \beta_E| \quad 0^\circ \leq \beta_E \leq 180^\circ \quad (6)$$

미세거칠각은 위경사에 부호를 부여하여, 전단 방향에 따른 접촉 가능성 여부를 표현한 것으로 요소 E의 미세거칠각 θ_E^* 는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\theta_E^* = 90^\circ - \beta_E \quad 0^\circ \leq \beta_E \leq 180^\circ \quad (7)$$

미세거칠각의 범위는 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 로서 절대값의 크기는 요소의 거칠기 정도를, 부호는 전단 방향과 관련된 방향 정보를 내포하게 된다. 즉, Fig. 6(b)의 A와 같이 접촉

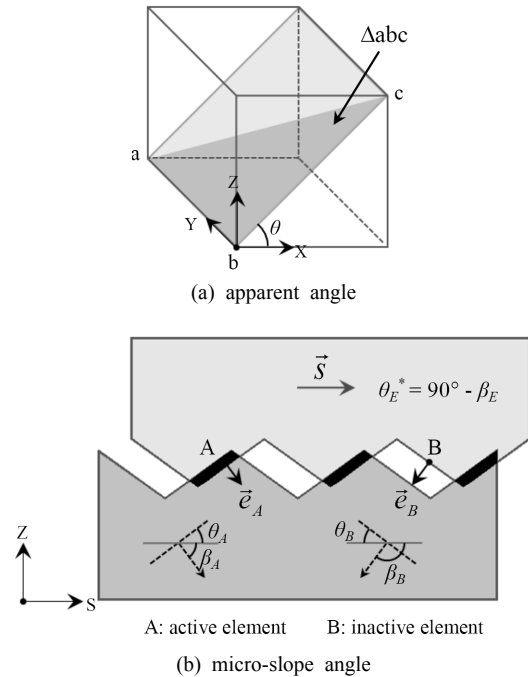


Fig. 6. Definition of active and inactive micro-slope angles (Park and Song, 2011).

에 유리한 방향으로 놓인 삼각형 요소(활성요소, active element)는 양의 미세거칠각을, B와 같이 접촉에 불리한 방향으로 놓인 삼각형 요소(비활성요소, inactive element)는 음의 미세거칠각을 갖게 되며, 이를 각각 활성거칠각(active micro-slope angle)과 비활성거칠각(inactive micro-slope angle)으로 표현하기로 한다.

본 연구에서는 3차원 레이저 프로파일러를 이용하여 각 시험편의 하부 절리면 형상을 0.2 mm 간격으로 측정하였다. 이를 토대로 절리면을 삼각형 요소의 집합으로 재현한 뒤, 전단 방향에 따른 미세거칠각을 계산하였다. 본래 시험편의 단면은 약 54 mm의 반경을 갖도록 제작되었으나, 데이터 분석 시에는 경계부의 노이즈를 제거하기 위해 중심에서 반경 52 mm 영역 내에서 측정된 좌표만을 이용하였다. Fig. 7은 GN-2 시료의 (a)표고 및 (b)~(d)전단 방향에 따른 미세거칠각을 XY 평면상에 등치선으로 표현한 것이다. Fig. 7(b)~Fig. 7(d)의 우측 하단에 표시된 점선과 화살표는 각각 편리 방향 및 전단 방향(이동 방향)을 의미한다. 여기서 활성거칠각은 붉은 계열, 비활성거칠각은 푸른 계열의 색으로 표현하였으며, 활성, 비활성요소의 경계를 뚜렷이 나타내기 위하여 미세거칠각의 크기가 작을수록 더 어두운 색으로 표시하였다. 두 계열 색의 경계에 해당되는 지점은 요소의 위경사가 0° 에 가까운 지점으로 2차원 프로파일 상에서 극대점이나 극소점에 해당한다. 푸른 색에서 붉은 색으로 변화하는 지점은 극대점 또는 언덕의 형태를, 붉은 색에서 푸른 색으로 변화하는 지점은 극소점 또는 계곡의 형태를 나타낸다. 활성, 비활성요소들은 각각 군집하여 서로를 둘러싼 섬 형태로 분포하며, 전단 방향보다 전단 방향의 수직 방향으로 더 높은 연속성을 보인다. 군집한 각 영역에서 미세거칠각은 점진적으로 변화하며, 미세거칠각의 크기가 큰 요소들이 각 영역의 중심에 위치하는 형태를 나타낸다.

동일한 절리면이라 하더라도 전단 방향에 따라 각 절리면 요소가 갖는 위경사가 달라지므로, 미세거칠각의 분포 역시 상이하다. 전단 방향이 반대인 경우, 거칠각의 활성, 비활성 여부가 정반대가 되어 서로 반전된 형상을 갖게 됨을 알 수 있다(Fig. 7(e)와 Fig. 7(f)). 전단 방향이 편리의 선구조 방향의 직각으로 다가감에 따라 거칠각의 분포가 뚜렷한 연속성과 경계를 나타내었으며, 평행한 경우에는 편리에 의한 영향이 거의 나타나지 않고 다소 불규칙한 형상을 보이는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 8은 GN-2 시험편의 절리면을 구성하는 삼각형 요소들의 면적 분포를 나타낸 것으로, 각 삼각형 요소를 미세거칠각의 크기에 따라 2° 간격으로 분류하고 해당 거칠각 구간의 면적합을 Y축에 표시하였다. 전체 표

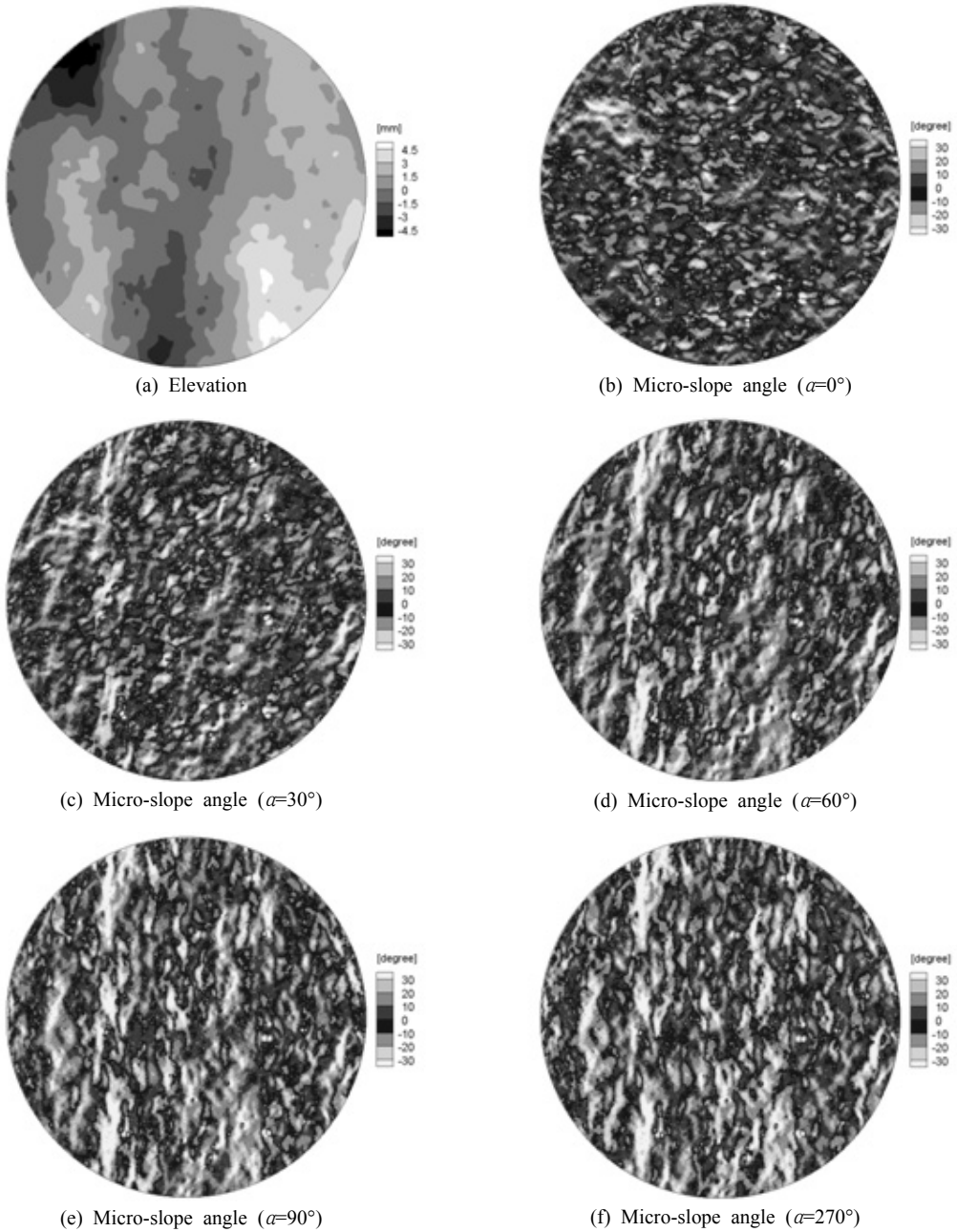


Fig. 7. Contour plots of the elevation and the micro-slope angles according to shear direction (GN-2).

면적은 $8,991\text{mm}^2$ 로 동일하지만 전단 방향에 따라서 상이한 면적 분포를 보이는 것을 관찰할 수 있다. 전반적으로 약 0° 를 중심으로 좌우가 대칭인 종모양의 분포를 나타내며, 미세거칠각의 크기(절대값)가 0° 에 가까운 요소들이 가장 큰 면적을 차지하고 있음을 알 수 있

다. 한편, 전단 방향이 편리 방향과 이루는 각(α)이 커짐에 따라 미세거칠각의 크기가 큰 요소의 면적이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 흡사 정규분포에서 분산이 증가하는 경향과 유사하다.

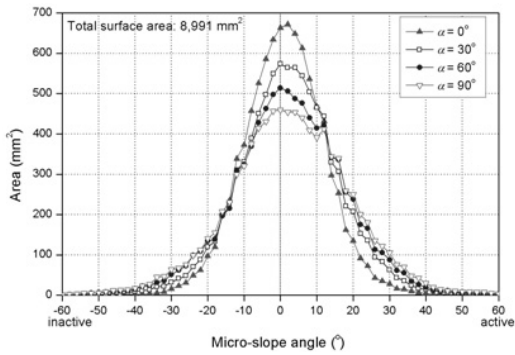


Fig. 8. Areal distribution of micro-slope angles to shear direction (GN-2).

3.2 최대전단강도 발현 시의 접촉면 분포

Fig. 9는 GN-2 시료에 대한 직접전단시험 결과로부터 최대전단강도 발현 시의 접촉면을 그 미세거칠각과 함께 도시한 것으로, 여기서 접촉면의 위치는 박정욱과

송재준(2011)이 제안한 접촉면 판별 알고리즘을 통해 추정된 것이다. 그림에서 흰 색으로 표시된 부분은 해당 위치의 삼각형 요소가 비접촉 상태에 있음을 의미한다. 접촉면은 대부분 활성거칠각을 갖는 요소(활성요소)들로 구성되며, 일부 작은 크기의 미세거칠각을 갖는 비활성요소들이 접촉을 유지하고 있다. 전단 방향과 관계없이, 접촉면의 분포는 활성거칠각의 분포와 거의 일치하며, 이에 따라 전단 방향이 정반대인 경우 접촉, 비접촉 여부도 반전된 형상을 보임을 관찰할 수 있다.

Fig. 10은 최대전단강도 발현 시 접촉면의 미세거칠각 분포를 막대그래프로 표현한 것으로서 GN-2 시료에 대한 실험 중 전단 방향이 α 가 90°와 270°인 경우의 결과이다. 전단 방향이 서로 정반대인 경우, 삼각형 요소의 미세거칠각 크기(절대값)은 동일하되 부호가 정반대가 되므로, 전체 절리면의 미세거칠각 분포는 서로 Y축에 선대칭인 형태를 갖게 된다. 접촉면의 미세거칠각 분포를 살펴보면, 두 경우에서 모두 활성거칠각을 갖는 요소는 대부분 접촉 상태를 유지하는 반면, 비활성거칠

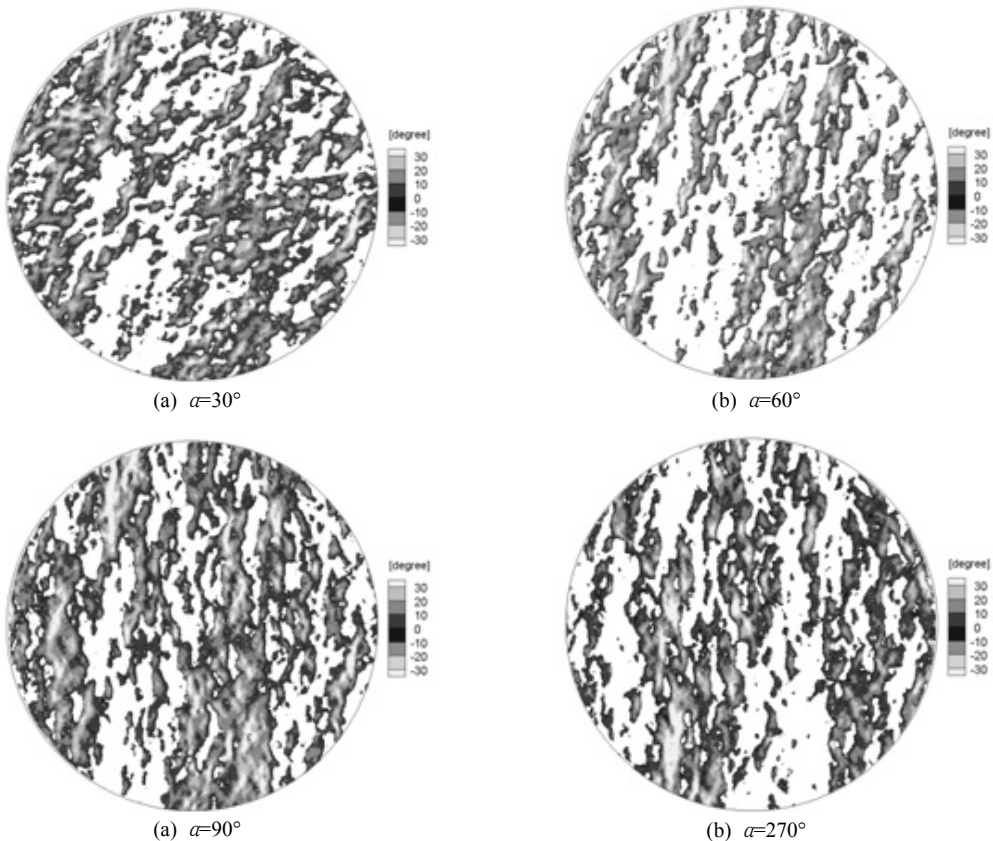


Fig. 9. Contact areas and their micro-slope angles estimated at peak stage (GN-2); the white denotes non-contact areas

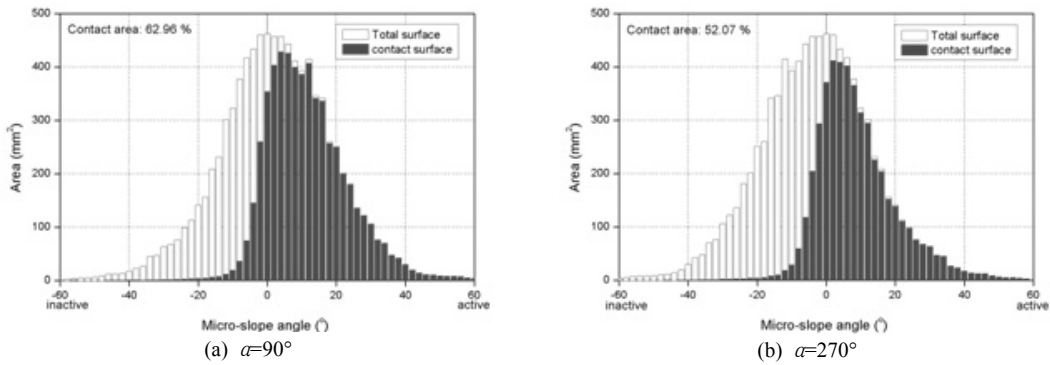


Fig. 10. Areal distributions of micro-slope angles of contact areas at peak stage (GN-2).

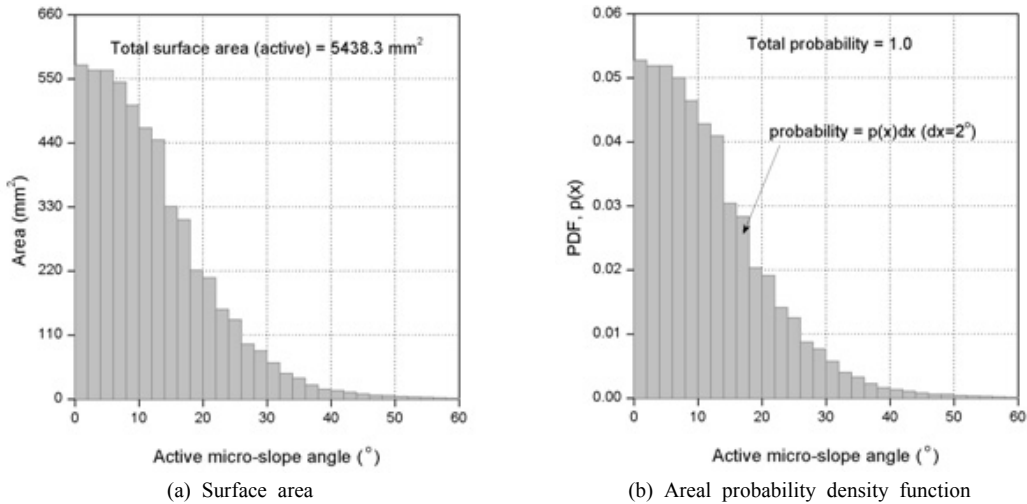


Fig. 11. Areal distribution of active micro-slope angle (GN-2, $\alpha=30^\circ$).

각을 갖는 요소는 대부분 접촉 상태에서 벗어나 있는 것을 알 수 있으며, 이는 이미 Fig. 9를 통해 살펴본 바와 같다. 접촉면의 넓이는 α 가 90° 인 경우와 270° 인 경우 각각 전체 표면적의 62.96%, 52.07%로 나타났다. 본 연구의 실험에서 최대전단강도 발현 시의 접촉면적은 전체 표면적의 42.58~63.3% 범위를 갖는 것으로 나타났으며, 전반적으로 55% 전후의 접촉면적비를 보이는 경우가 많았고, 이와 관련하여 전단 방향의 영향을 찾기는 어려웠다.

4. 암석 절리면의 3차원 거칠기 정량화

4.1 활성거칠각의 면적 분포

앞서 제3장에서 살펴본 바와 같이, 전단 및 수직하중하에서 암석 절리의 접촉면은 미세거칠각의 면적 분

포와 밀접한 관계를 갖는다. 특히, 전단강도 발현 시 접촉면의 분포는 활성거칠각의 분포와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 일부 영역에서 활성요소가 비접촉 상태에 있거나 비활성요소가 접촉 상태에 있는 경우가 관찰되지만, 대부분 활성, 비활성 영역의 경계에 위치한 작은 크기(절대값)의 미세거칠각을 갖는 요소들로서 이들의 영향은 무시할 수 있는 수준이라 판단할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 활성거칠각의 면적 분포를 이용하여 3차원 거칠기 정량화 계수를 도출하고자 하였다.

Fig. 11은 GN-2 시료의 전단 방향(α)이 30° 인 경우의 활성거칠각 면적 분포를 나타낸 것으로 대부분의 절리면이 이와 유사한 형태를 보인다. Fig. 11(a)는 활성거칠각을 2° 간격으로 분류하고 해당거칠각을 갖는 요소들의 면적합을 막대그래프의 높이로 표현한 것으로 활

성요소의 총면적은 5438.2 mm²이다. 대부분의 활성요소(99.8% 이상)가 50° 미만의 미세거칠각을 나타내며, 미세거칠각의 크기가 증가함에 따라 전체 면적에서 차지하는 비율이 작아진다. 16°~20° 부근에서 변곡점이 나타나고 변화율이 감소하는 경향을 보인다.

만약 Fig. 11(a)에서 막대그래프의 높이를 조정하여, 각 막대그래프의 면적합이 1.0이 되도록 상대적인 수치로 표현하면 Fig. 11(b)와 같다. 이때 각 막대그래프의 면적은 절리면 상에 존재하는 임의의 활성요소가 각 구간의 미세거칠각을 가질 기하학적인 확률을 의미하게 된다. 즉, Fig. 11(b)는 미세거칠각 x 를 확률변수로 갖는 확률밀도함수 $p(x)$ (probability density function, PDF)와 동일한 의미를 가지며, x 의 확률 $P(x)$ 는 $p(x)dx$ 로 계산할 수 있다. 여기서는 미세거칠각은 2° 간격으로 분류되었으므로 $dx=2$ 가 성립하며, 막대그래프의 총면적합은 1.0이다.

본 연구에서는 활성거칠각 x 의 분포 특성을 모델링하기 위하여 다음과 같은 확률밀도함수 $p(x)$ 를 제안하였다.

$$p(x)=Ae^{-x^2/C_r^2} \quad x \geq 0, C_r > 0 \quad (8)$$

여기서 A 항은 전구간에서의 적분이 1.0이 되는 조건을 통하여 계산할 수 있으며, 이 과정에서 다음과 같이 가우스 적분이 이용된다.

$$\begin{aligned} \left(\int_0^\infty p(x)dx\right)^2 &= \left(\int_0^\infty Ae^{-x^2/C_r^2}dx\right)^2 \\ &= \left(\int_0^\infty Ae^{-x^2/C_r^2}dx\right)\left(\int_0^\infty Ae^{-y^2/C_r^2}dy\right) \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty Ae^{-(x^2+y^2)/C_r^2} dx dy \\ &= \int_0^{\pi/2} \int_0^\infty A^2 e^{-r^2/C_r^2} r dr d\theta \\ & \quad (\because x = r \cos\theta, y = r \sin\theta, dx dy = r dr d\theta) \\ &= \int_0^{\pi/2} A^2 \left[-\frac{C_r^2}{2} e^{-r^2/C_r^2}\right]_0^\infty d\theta \\ &= \int_0^{\pi/2} A^2 \frac{C_r^2}{2} d\theta = \frac{\pi}{4} A^2 C_r^2 \\ \therefore \int_0^\infty p(x)dx &= \frac{\sqrt{\pi}}{2} A C_r = 1.0, A = \frac{2}{C_r \sqrt{\pi}} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 구한 A 를 식 (8)에 대입하면, 다음과 같이 단일한 상수 C_r 을 갖는 확률밀도함수가 정의된다.

$$p(x) = \frac{2}{C_r \sqrt{\pi}} e^{-x^2/C_r^2} \quad x \geq 0, C_r > 0 \quad (10)$$

위 확률밀도함수의 평균 $E(x)$, 분산 $V(x)$, 표준편차 σ

(x), 변곡점의 x 값 x_0 는 각각 식 (11)~(14)로 표현할 수 있으며, 이때 x_0 는 $p(x)$ 의 2계 도함수가 0이 될 때의 x 값으로부터 구한 것이다.

$$E(x) = \int_0^\infty p(x)x dx = \frac{C_r}{\sqrt{\pi}} \approx 0.564 C_r \quad (11)$$

$$V(x) = \int_0^\infty p(x)x^2 dx - [E(x)]^2 = C_r^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi}\right) \quad (12)$$

$$\sigma(x) = \sqrt{V(x)} C_r \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi}} \approx 0.426 C_r \quad (13)$$

$$x_0 = \frac{C_r}{\sqrt{2}} \approx 0.717 C_r \quad (14)$$

즉, 제안된 확률분포의 모든 특징은 오직 하나의 상수 C_r 만으로 정의가 가능하다. 단, 이를 활성거칠각의 분포에 적용하기 위해서는 확률변수의 범위에 대한 검토가 필요하다. 위 분포는 0과 모든 양의 실수를 확률변수 x 로 취하는 반면, 활성거칠각은 0 이상 90 이하의 실수 범위에서 정의되기 때문이다.

만약, 누적확률이 99.99%가 될 때의 확률변수를 x_c 라 하면, x_c 는 식 (15)에 의해 식 (16)과 같이 계산할 수 있으며, 물리적으로 확률변수 x 의 최대값으로 간주할 수 있다.

$$\int_0^{x_c} p(x)dx = \sqrt{1 - e^{-2x_c^2/C_r^2}} = 0.9999 \quad (15)$$

$$x_c = C_r \sqrt{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{1 - 0.9999^2}\right)} \approx 2.064 C_r \quad (16)$$

식 (16)에 따르면, C_r 이 약 43.6 이하가 되면, x 가 90 이상이 될 확률은 거의 0에 가깝다. 본 연구에서 고려된 모든 활성거칠각 분포를 분석한 결과, C_r 의 최대값은 27.2로 나타났으므로 대부분의 암석 절리면에 적용하여도 무방할 것으로 판단된다. 자세한 회귀분석 결과는 다음 절에서 논의하기로 한다. Fig. 12는 상수 C_r 에 따른 확률분포의 형태를 보여준다. Fig. 11(b)에서 보인 일반적인 형태의 활성거칠각 면적 분포와 비교할 때, 상당히 유사한 형태를 가짐을 알 수 있으며, C_r 이 증가함에 따라 x 의 평균과 분산이 모두 증가하는 형태를 보인다.

4.2 암석 절리면의 활성거칠기계수

Fig. 13은 GN-3 시료의 활성거칠각 분포를 제안된 확률밀도함수에 대하여 회귀분석한 결과로, 전단 방향과 관계없이 모두 0.98 이상의 높은 결정계수(R^2)를 보였다. a 가 0, 30, 60, 90°로 증가함에 따라서 상수 C_r 의

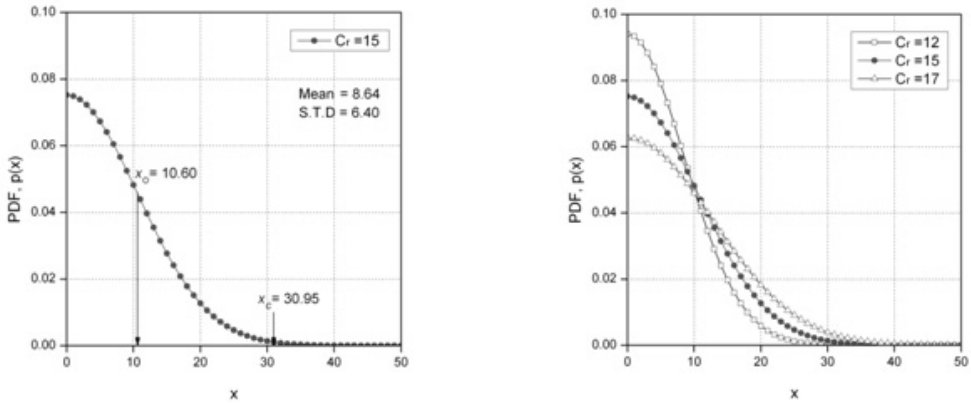


Fig. 12. Probability distributions with different C_r values.

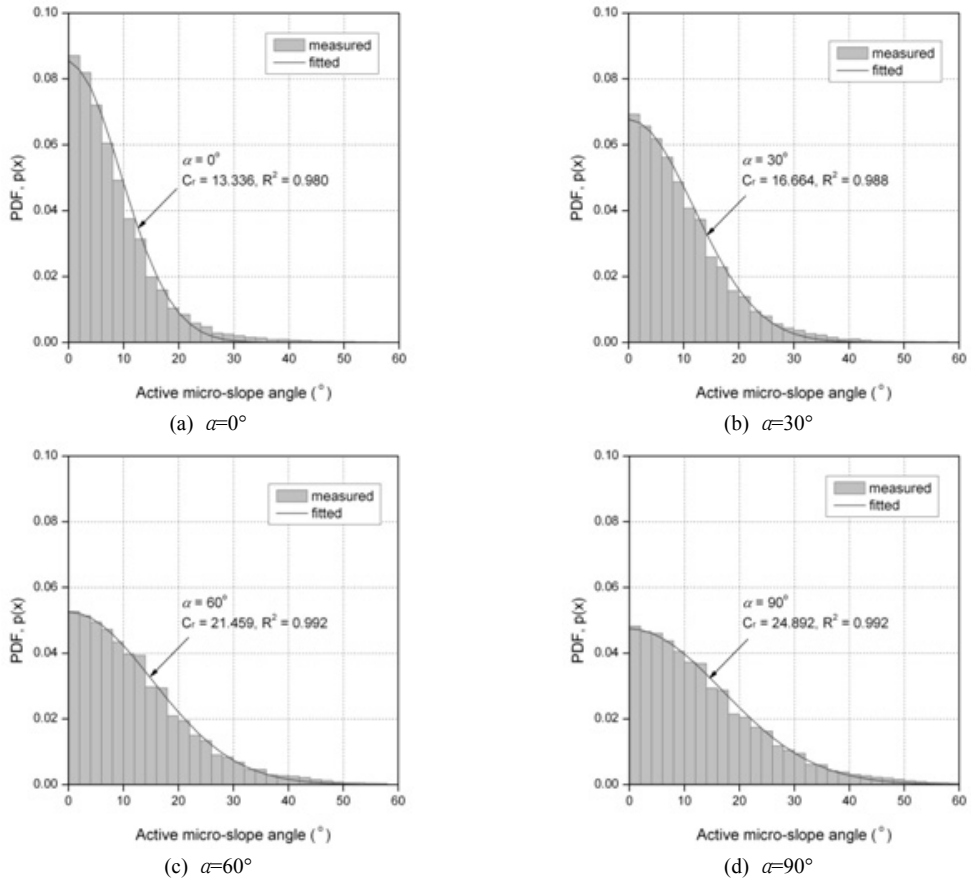


Fig. 13. Determination of active roughness coefficient C_r from the probability distribution of active micro-slope angle in different shear directions (GN-3).

값이 13.336, 16.664, 21.459, 24.892로 나타났으며, 이를 통해 C_r 이 절리면의 거칠기 변화를 잘 반영하고 있

음을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 상수 C_r 을 활성거칠기계수(active roughness coefficient)로 정의하였으

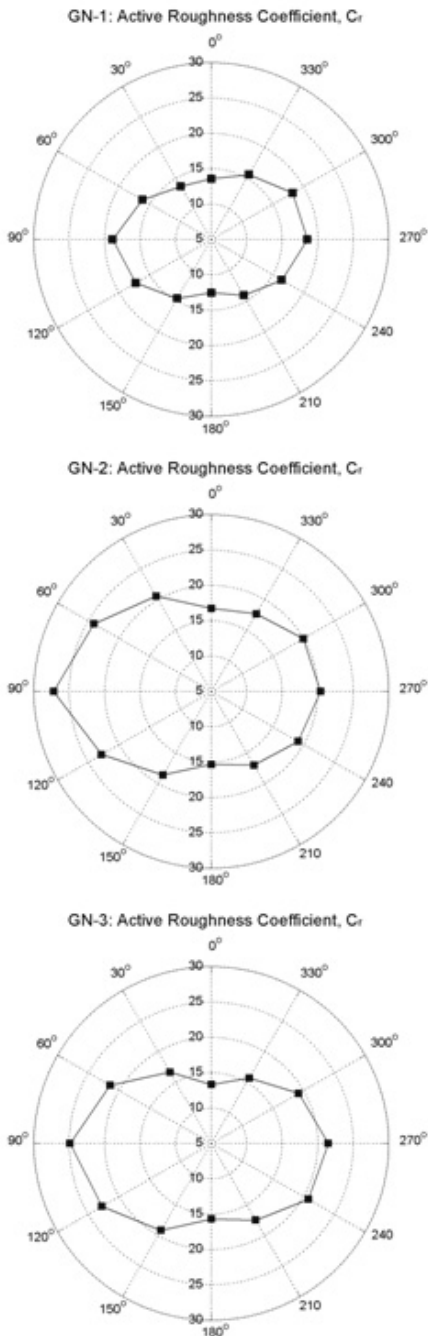


Fig. 14. Active roughness coefficient according to shear direction.

며, 이를 절리면 거칠기의 3차원 정량화 파라미터로 제안하고자 한다.

Fig. 14는 각 시험의 전단 방향에 따른 절리면의 활성

거칠기계수 C_r 을 도시한 것으로, 활성거칠각의 면적 분포를 구한 후, 식 (10)에 대해 회귀분석을 실시하여 가장 높은 결정계수를 보일 때의 C_r 을 계산한 결과이다. 모든 경우에서 절리면의 활성거칠각 분포는 0.98 이상의 높은 결정계수를 보이며 제안된 확률분포를 따르는 것으로 나타났다. C_r 값은 GN-1, GN-2, GN-3의 경우 각각 12.54 ~ 18.90, 15.31 ~ 27.20, 13.35 ~ 24.89 범위에 분포하였다.

Fig. 14의 결과를 Fig. 5에 나타난 최대전단강도와 비교하여 살펴보면, C_r 이 전단 방향에 따른 전단강도의 이방성 및 거칠기의 발현 특성을 적절히 반영하고 있음을 확인할 수 있다. 여기서 이방성은 30 간격의 전단 방향에 따라 거칠기가 달라지는 것 이외에도, 정반대의 전단 방향에서 서로 다른 거칠기가 발현되는 개념을 포함한다. Fig. 5에서 GN-2와 GN-3의 결과를 살펴보면, 모두 270 방향에서보다 90 방향에서 더 높은 전단강도가 측정되었는데, C_r 의 값 역시 동일한 경향을 경향을 보인다. 암석역학 분야에서 널리 사용되는 파라미터인 JRC의 경우, 2차원 프로파일의 전체 형상을 통해 거칠기를 평가하므로, 정반대의 전단 방향에서 동일한 전단강도를 예측하게 되어 이 같은 이방성을 고려할 수 없다.

Fig. 15는 거칠기 파라미터 C_r 과 JRC가 최대전단강도와 갖는 관계를 나타낸 것으로, 각 시험편 별로 결과를 구분하여 도시하였다. 여기서 JRC는 전단 방향과 평행한 2차원 프로파일의 좌표로부터 Z_2 를 계산한 뒤, Yu & Vayssade(1991)가 제안한 Z_2 와 JRC의 관계식을 이용하여 구한 것으로 각 수식은 다음과 같이 표현된다.

$$Z_2 = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

여기서, N 은 데이터 개수, (x_i, y_i) 는 i 번째 측정값

$$JRC = 61.79 \times Z_2 - 3.47 \quad (R^2 = 0.973): \quad (18)$$

sampling interval = 0.50 mm

Fig. 16에는 각 거칠기 파라미터와 최대전단강도의 선형 관계식이 표시되어 있다. 본 연구에서는 수직응력이나 시험편의 물성 등 실험 조건들이 매우 제한적일 뿐만 아니라, 데이터의 개수가 충분치 않아 두 값의 관계식을 도출하는 것은 사실상 큰 의미를 지니지 못한다. 그러나 36회의 많지 않은 실험 횟수에도 불구하고, C_r 이 최대전단강도와 매우 뚜렷한 양의 상관관계를 나타내는 것을 알 수 있으며, JRC에 비하여 더 높은 결정계수를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 C_r 이 절리면의 거칠기를 정량화하는 데 매우 효과적인 파라미터임을 시사하는 것으로, 향후 보다 다양한 조건에서의 여러

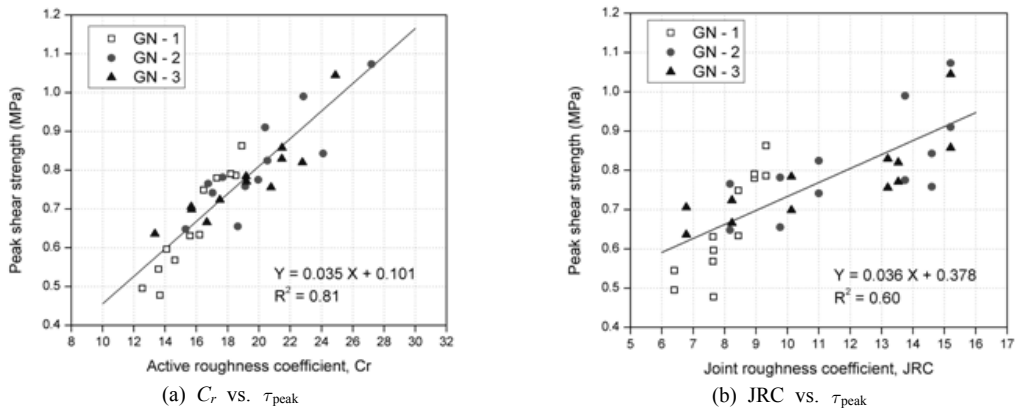


Fig. 16. Relationship between the roughness parameters and peak shear strength.

실험 데이터를 바탕으로 분석이 이루어진다면 전단거동을 예측하는 데에 있어 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 암석 절리면의 전단 거동을 반영할 수 있는 새로운 3차원 거칠기 정량화 계수를 제안하였다. 이를 위하여 편마암 인장 절리의 복제 시험편에 대한 직접전단시험을 수행하고, 전단 방향에 따른 절리 접촉면의 분포와 거칠기의 발현 특성을 살펴보았다. 이 과정에서 절리면의 형상을 삼각형 요소의 집합으로 재구성하고, 각 요소의 거칠기를 전단 방향에 따른 미세거칠각을 통해 모델링하였다. 최대전단강도의 발현 시 절리면의 접촉은 미세거칠각의 분포와 밀접한 관계를 보였으며, 활성거칠각을 갖는 일정 방향의 요소들만이 전단거동에 지배적인 역할을 하는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 활성거칠각의 분포를 통하여 절리면의 거칠기를 특성화하고자 하였다. 활성거칠각의 기하학적 확률분포를 모사하기 위한 확률밀도함수를 제안하였고, 그 특징을 결정하는 단일 상수 C_r 을 활성거칠기계수로 정의하였다. 활성거칠기계수 C_r 은 실험에서 측정된 최대전단강도와 뚜렷한 양의 상관관계를 보였으며, 전단 방향에 따른 거칠기의 이방성을 적절히 반영하는 것으로 나타났다. 향후 보다 다양한 조건에서의 여러 실험 데이터를 바탕으로 분석이 이루어진다면, 전단강도 및 거동과 관련된 구성모델 내에서 절리면의 거칠기를 정량적으로 반영하기 위한 파라미터로서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 ‘지하암반내 열에너지 저장을 위한 핵심기술 개발(과제코드 GP-2012-001)’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Barton, N., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, Vol. 7, 287-332.
- Fardin, N., Stephansson, O. and Jing, L., 2001, The scale dependence of rock joint surface roughness, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 38, No. 5, pp. 659-669.
- Grasselli, G. and Egger, P., 2003, Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 40, No. 1, pp. 25-40.
- Haberfield, C. M. and Johnston, I. W., 1994, A mechanically-based model for rough rock joint *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 31, pp. 279-292.
- Huang, S. L., Oelfke S. M. and Speck, R. C., 1992, Applicability of fractal characterization and modeling to rock joint profiles, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 29, No. 2, pp. 89-98.
- Kulatilake, P., Shou, G., Huang, T. and Morgan, R., 1995, New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 33, No. 7, pp. 673-697.
- Kulatilake, P., and Um, J., 1999, Requirements for accurate quantification of self-affine roughness using the roughness-length method, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 36, pp. 5-18.

8. Kwon, J. C., 2005, Analysis on shear behavior of rock joint under different shear test methods, Master's Thesis, Seoul National University.
9. Maerz, N. H., Franklin, J. A. and Bennett, C. P., 1990, Joint roughness measurement using shadow profilometry, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 27, No. 5, pp. 329 - 343.
10. Mandelbrot, B. and Van Ness, J.W., 1968, Fractional Brownian motions, fractional noises and applications, SIAM review, Vol. 10, No. 4. pp. 422-437.
11. McWilliams, P. C., Kerkering, J. C. and Miller, S. M., 1993, Estimation of shear strength using fractals as a measure of rock fracture roughness, Report Investigation 9447, Bureau of Mines, USA.
12. Myers, N., 1962, Characterization of surface roughness, Wear, Vol. 5, No. 3, pp. 182-189.
13. Odling, N., 1994, Natural fracture profiles, fractal dimension and joint roughness coefficients, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.27, No.3, pp. 135-153.
14. Park, J. W. and Song, J. J., 2011, Numerical method for the determination of contact areas of a rock joint under normal and shear loads, Proceedings of the 97th conference of the Korean Society for Geosystem Engineering, Jeongseon, pp. 98-100.
15. Priest, S. D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, London.
16. Shirono, T. and Kulatilake, P., 1997, Accuracy of the spectral method in estimating fractal/spectral parameters for self-affine roughness profiles, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 34, No.5, pp. 789-804.
17. Son, B. K., 2006, Shear behavior of rock joint under constant normal stiffness condition, Ph.D. Thesis, Seoul National University.
18. Tse, R. and Cruden, D. M., 1979, Estimating joint roughness coefficients, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 16, pp. 303-307.
19. Yang, Z. Y. and Chiang, D.Y., 2000, An experimental study on the progressive shear behavior of rock joints with tooth-shaped asperities International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 37, pp. 1247-1259.
20. Yeo, I. W., De Freitas, M. H. and Zimmerman, R. W., 1998, Effect of shear displacement on the aperture and permeability of a rock fracture, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 35, No. 8, pp. 1051-1070.

박정옥



2003년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사
2006년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학석사
2011년 서울대학교 대학원 에너지시스
템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3249
E-mail: jwpark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구
본부 Post-Doc

송재준



1993년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1995년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사

Tel: 02-880-9043
E-mail: songjj@snu.ac.kr
현재 서울대학교 에너지시스템공학부
교수

이용기



2009년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사
2011년 서울대학교 대학원 에너지시스
템공학부 공학석사

Tel: 02-880-7230
E-mail: yonggi12@snu.ac.kr
현재 서울대학교 에너지시스템공학부
박사과정

최병희



1988년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
2002년 전남대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2005년 전남대학교 대학원 지구시스템
공학과 공학박사

Tel: 042-868-3237
E-mail: bhchoi@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구
본부 책임연구원