

레이저 변위계를 이용한 암석 절리면의 3차원 거칠기 측정기 개발

배기윤¹⁾, 이정인²⁾

Development of a 3D Roughness Measurement System of Rock Joint Using Laser Type Displacement Meter

Ki-Youn Bae and Chung-In Lee

Abstract. In this study, a 3D coordinate measurement system equipped with a laser displacement meter for digitizing rock joint surface was established and the digitized data were used to calculate several roughness parameters. The parameters used in this study were micro average inclination angle(i_{ave}), average slope of joint asperity(SL_{ave}), root mean square of i-angle(i_{rms}), standard deviation of height(SDH), standard deviation of i-angle(SD_i), roughness profile index(R_p), and fractal dimension(D). The relationships between the roughness parameters based on the digitization of the surface profile were analyzed. Since the measured value varied according to the degree of reflection and the variation of colors at the measuring point, rock joint surface was painted in white to minimize the influence of the surface conditions. The comparison of the measured values and roughness parameters before and after painting revealed the better consequence from measurement on the painted surfaces. Also, effect of measuring interval was studied. As measured interval was increased, roughness parameters were exponentially decreased. The incremental sequence of degree of decrease was SDH, i_{ave} , i_{rms} , SD_i and R_p-1 . As a result of comparison of parameters from pin-type measurement system and laser type measurement system, all value of parameters were higher when laser-type measurement system was used, except SDH.

KeyWords: 3D Laser Roughness Measurement System, Digitization, Roughness Parameter

초 록. 본 연구에서는 암석 절리면 거칠기의 수치화를 위해 레이저 변위계를 이용한 3차원 절리면 측정기를 개발하였고, 수치화된 자료를 바탕으로 거칠기 파라미터를 계산하였다. 계산된 파라미터는 평균 거칠기 각, 평균 기울기, 평방평균 거칠기각, 절리면 높이의 표준편차, 거칠기각의 표준편차, 거칠기 형상지수, 프랙탈 차원 등이며, 절리 단면의 수치화를 통해 계산된 거칠기 파라미터 상호간의 관계를 분석하였다. 측정점의 반사 정도와 색에 의한 영향을 최소화하기 위해 암석 절리면을 흰색으로 칠한 후 측정을 실시하였다. 색을 칠하기 전후의 측정값과 거칠기 파라미터값을 비교한 결과 색을 칠한 경우 더 좋은 측정 결과를 얻을 수 있었다. 측정 간격이 넓어짐에 따라, 거칠기 파라미터는 지수함수적으로 감소하였다. 거칠기 파라미터값은 SDH, i_{ave} , i_{rms} , SD_i , R_p-1 의 순으로 감소량이 증가하였다. 동일한 절리면에 대해 평형 측정기와 레이저 측정기에서 얻어진 거칠기 파라미터값을 비교한 결과 SDH를 제외하고 레이저 측정기를 통해 얻어진 모든 파라미터값이 크게 나옴을 확인할 수 있었다.

핵심어: 3차원 레이저 거칠기 측정기, 수치화, 거칠기 파라미터

1. 서 론

지하에 존재하는 암반은 전체적으로는 연속체라 볼 수 있지만, 세부적으로는 단층이나 절리, 균열 등을 포

함하는 불연속체이다. 특히 단층이나 절리는 암반 구조물의 안정성에 결정적인 영향을 미치므로 이들의 변형 및 파괴거동과 여러 물성 등을 조사, 연구하는 것은 매우 중요하다.

Barton과 Choubey¹⁾에 의해 제안된 절리면의 전단 강도식에서 절리면의 거칠기를 나타내는 지수인 절리 거칠기 계수(JRC, Joint Roughness Coefficient)는 육안으로 기준표와 비교하여 결정할 수 있으나, 관찰자

¹⁾서울대학교 자원공학과 석사

²⁾정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

접수일: 2002년 10월 17일

심사 완료일: 2002년 12월 20일

의 주관적 판단이 개입되므로 절리면의 거칠기를 객관적으로 표현하는 방법이 여러 연구자들에 의해 고안되었다.

절리면 거칠기를 객관적으로 표현하기 위해서는 우선 절리면의 표면형상을 수치화해야 한다. 프로파일 게이지를 이용하는 방법²⁾, Shadow Profilometry를 이용하는 방법³⁾, 측정침을 직접 절리 표면에 접촉시켜 측정하는 방법^{4,6)}, 레이저를 이용하는 방법⁷⁻⁹⁾ 등이 절리면의 수치화에 사용되어왔고, 정밀도와 측정 시간 면에서 유리한 점이 있기 때문에 최근에는 레이저를 이용하는 방법에 대한 관심이 높아지고 있다.

표면 거칠기를 나타내는 지수가 거칠기 파라미터인데, 이는 거칠기를 특정한 수치로 표시한 것이며, 여기에는 절리형상의 평균 거칠기각, 평방평균 거칠기각, 절리면 높이의 표준편차, 거칠기각의 표준편차 등이 있다.

본 논문에서는 절리면 거칠기를 정밀하게 수치화하기 위해 레이저 변위계를 이용한 3차원 거칠기 측정기를 구동시키는 프로그램 제작 및 여러 가지 상태의 절리면에 대해 수치화를 실시하여 각종 거칠기 파라미터를 결정 후 오차분석을 실시하여 이 기계를 이용한 측정의 타당성을 검증하였고, 레이저 측정기에 의해 수치화된 절리면 거칠기 파라미터 사이의 상관관계 및 측정간격에 따른 파라미터값의 변화를 연구하였다. 또한, 편형 거칠기 측정기와 레이저 거칠기 측정기 사이의 측정결과를 비교하였다.

2. 기초이론

2.1 전단강도에 대한 경험식

절리면의 전단강도를 나타내는 경험식으로 가장 간단하면서도 널리 쓰이고 있는 것이 Mohr-Coulomb의 경험식이다. 이 식은 절리면에 작용하는 수직응력과 절리면 사이의 마찰각 그리고 절리면 사이에 충전물이 있을 경우에 발생하는 점착력으로 구성되어 있다. 최대전단강도(Peak Shear Strength)는 식 (1)과 같이 정의된다.

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

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

최대전단강도를 나타낸 이후 전단응력은 급격히 떨어지며 잔류전단강도(Residual Shear Strength)에서 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.

Barton과 Choubey¹⁾는 인공절리면에 대한 일련의 전단시험을 통하여 다음의 경험적 관계를 도출하였다.

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

여기서 JRC는 절리 거칠기 계수, JCS는 절리면의 압축강도(Joint-wall Compressive Strength), ϕ_b 는 기본마찰각(Basic Friction Angle)이다.

2.2 거칠기 파라미터

본 연구에 사용된 거칠기 파라미터로는 평균 거칠기각(i_{ave} , Micro Average Inclination Angle), 절리면의 평균기울기(SL_{ave} , Average Slope of Joint Asperity), 평방평균 거칠기각(i_{rms} , Root Mean Square of i-angle), 절리면 높이의 표준편차(SDH, Standard Deviation of Height), 거칠기각의 표준편차(SD_i, Standard Deviation of i-angle), 거칠기 형상지수(R_p , Roughness Profile Index), 프랙탈 차원(D, Fractal Dimension)의 7가지이다. 평균 거칠기각과 절리면의 평균 기울기는 다음의 식으로 정의된다.

$$\begin{aligned} \tan i_{ave} &= \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} (\frac{dy}{dx}) dx \\ &= \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N-1} |y_{i+1} - y_i| = SL_{ave} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 y 는 평균 절리면 높이를 기준으로 측정된 높이이고, Δx 는 측정간격이다.

평방평균 거칠기각은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tan i_{rms} &= [\frac{1}{L} \int_{x=0}^L (\frac{dy}{dx})^2 dx]^{1/2} \\ &= [\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i})^2 \Delta x_i]^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

절리면 높이의 표준편차에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} SDH &= [\frac{1}{L} \int_{x=0}^L y^2 dx]^{1/2} \\ &= [\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N-1} (y_{i+1}^2 + y_i^2) \frac{(x_{i+1} - x_i)}{2}]^{1/2} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 y 는 평균 절리면 높이를 기준으로 측정된 높이, Δx 는 측정간격이다.

거칠기각의 표준편차는 아래와 같이 나타낸다.

$$SD_{SL} = \left[\frac{1}{L} \int_{x=0}^L \left(\frac{dy}{dx} - SL_{ave} \right)^2 dx \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left[\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} - SL_{ave} \right)^2 \Delta x_i \right]^{\frac{1}{2}} = \tan SD_i \quad (7)$$

거칠기 형상지수는 절리 표면을 따라 측정된 절리면의 총길이를 절리면에 투영한 직선거리(L)로 나눈 무차원량으로서 다음과 같이 표시된다.

$$R_p = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} [(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2]^{\frac{1}{2}}}{L} \quad (8)$$

프랙탈 차원(Fractal Dimension, D)은 분할법을 이용하여 구하였다. 분할법은 절리형상을 일정한 분할자 길이(Divider Length, r)로 연속적으로 분할하였을 때 분할된 구획개수(N)를 분할자 길이에 대하여 로그-로그 그래프로 표시하여 아래의 식에서와 같이 그 기울기로부터 D값을 결정하는 방법이다.

$$D = - \frac{\log N}{\log r} \quad (9)$$

3. 시료, 실험장치 및 실험방법

3.1 3차원 거칠기 측정기

3.1.1 개요

3차원 거칠기 측정기는 레이저 변위계(Laser Displacement Meter), 위치지정 시스템(Positioning System), 자료출력과 전체 시스템을 직접 제어할 수 있는 컴퓨터

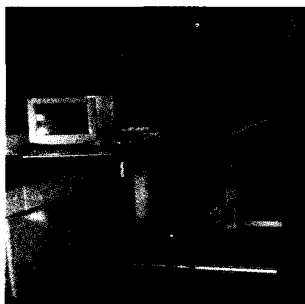


Fig. 1. General view of coordinate measuring machine.

등 세 부분으로 구성된다. 위치지정 시스템은 다시 위치지정 제어부와 작업 테이블로 나뉜다. 레이저 변위계는 일본 Keyence사에서 만든 LC-2450이다. 측정기의 전체적인 모습은 Fig. 1, 개념도는 Fig. 2와 같다. 컴퓨터는 위치지정 시스템 작업 테이블의 레이저 변위계를 특정 위치에 이동시킨 후 레이저 변위계에서 측정된 값을 저장하는데, 이 과정은 절리면의 전체 형상이 측정될 때까지 능동적으로 반복된다.

3.1.2 레이저 변위계

레이저 변위계는 측정하고자 하는 위치에 레이저를 방출한 다음 측정점에서 반사되는 빛의 각도를 이용하여 변위를 측정한다. 이 측정기는 난반사를 일으키는 표면의 변위를 측정하는 데 사용된다. Fig. 3은 센서헤드 내부 구조의 개념도이다. 방출렌즈를 통과한 레이저는 측정위치에서 반사되어 수신렌즈를 지나 검출기에 도달하게 되는데, 검출기에서 빛이 도달하는 위치에 따라 측정지점의 상대높이가 결정된다. 기준 높이에서 목표물이 가까워지면(A 방향) 검출기의 A' 부분에, 멀어

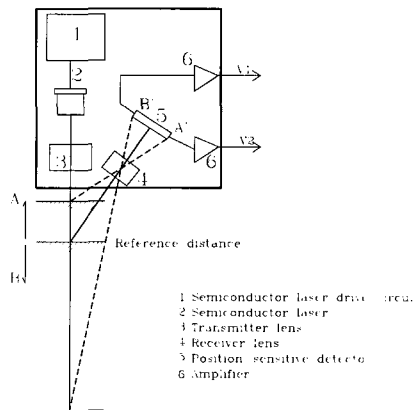


Fig. 3. Operating principle of laser displacement meter.

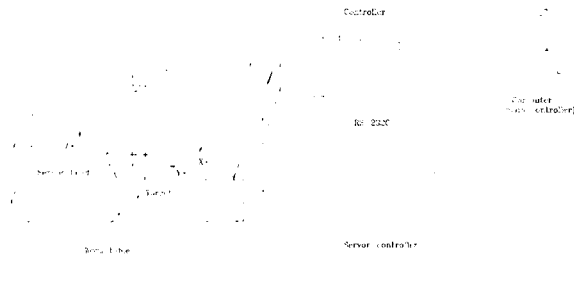


Fig. 2. Schematic diagram of coordinate measuring machine.

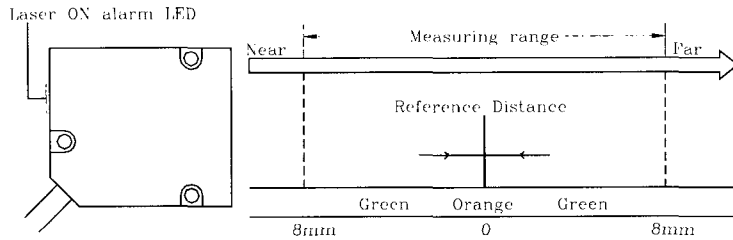


Fig. 4. Measuring range of laser displacement meter.



Fig. 5. Spot diameter according to the distance from the center of the measuring range.

지면(B 방향) B' 부분에 빛이 도달한다. 검출기에 도달한 빛은 전기신호로 바뀌어 디지털 신호로 제어기에 보내진다.

센서헤드에서 방출되는 레이저는 가시 반도체 레이저(Visible Semiconductor Laser)로서 파장은 670 nm, 최대출력은 1.9 mW이다. 레이저는 펄스 형태로 방출되는데, 펄스의 지속시간은 10 μs이고, 초당 50,000펄스가 방출되어 초당 20,000개의 데이터가 출력된다. 측정시 결과값에 약간의 떨림이 발생하는데 그것에 따른 오차를 줄이기 위하여 지정된 수만개의 데이터를 평균하는 기능이 내장되어 있다. 최소 측정 한도는 0.5 μm이고, 센서헤드로부터 5 cm 떨어진 지점을 중심으로 ±8 mm 사이가 측정 범위가 된다. Fig. 4는 측정범위를 나타낸 그림이다.

센서헤드에서 방출된 레이저는 센서로부터의 거리에 따라 지름이 달라진다. 지름의 변화 양상은 Fig.5에 도시되어 있는데, 최소지름은 측정범위의 중앙부 근처에서 나타나고 중앙부에서 멀어질수록 지름이 증가한다. 레이저의 최소지름은 45×20 μm이다. 따라서 중앙부에서 보다 정밀한 측정을 할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 인공절리 시험편의 준비

본 연구에 사용된 시료는 황등 화강암과 여산 대리석

이다. 절리면 거칠기의 측정과 직접전단시험을 위한 절리 시료는 인위적인 균열을 형성시켜 제작하였다. 우선 결함이 없는 암석 덩어리를 화강암은 150×100×100 mm, 대리석은 100×100×100 mm의 직육면체로 절단하여 시험편을 제작하였다. 이렇게 준비된 시료는 Fig. 6과 같이 인장균열 발생장치의 양쪽 가압판 사이에 놓고 하중을 가하여 인위적으로 절리면을 형성하였다. 대리석의 경우는 결에 수직인 방향으로 절리면을 형성하였다.

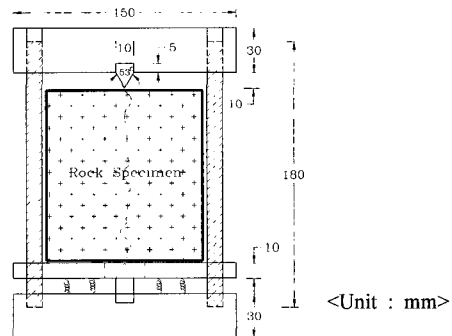


Fig. 6. Splitting rock sample to create artificially fractured joint.

4. 측정기 검증 및 거칠기 측정

측정점의 색 및 반사 정도에 따른 측정값의 영향을 최소화하기 위해 측정하고자 하는 위치에 물감을 칠하였다. 이는 시료 표면의 색을 최대한 유사하게 하여 색의 변화에 따른 오차를 최소화할 수 있다. 여기에 사용된 물감은 아크릴 물감으로 매끄러운 면에 대한 부착 성질이 좋을 뿐 아니라 가격이 비교적 저렴한 이점이 있다. 이 장에서의 모든 측정 간격은 0.2 mm이다.

4.1 빛의 반사에 의한 영향

재료 표면에서 빛의 반사정도의 측정치에 대한 영향을 조사하기 위해 정반사의 경향을 나타내는 장식용 대리석 표면과 그 표면에 흰 색 물감을 칠했을 때의 거칠기를 측정하였다. 측정 길이는 150 mm이고 상대높이가 0인 지점에 초기 측정점을 두어 측정을 수행하였다. Fig. 7은 색을 칠하지 않은 면과 칠한 면 각각에 대한 측정 결과이다. Fig. 8은 색칠되지 않은 면의 파라미터값을 1로 두었을 때 흰 색으로 칠해진 면에서의 값을 상대적으로 비교한 것이다. 이 결과는 조암광물의 정반사 정도 및 색에 따라 동일 높이에 대한 측정값의 변화가 심함을 나타내는 것으로, 측정면의 색을 일정하게 유지하기 위해 표면에 색을 칠해야 한다는 사실을 나타낸다.

4.2 도료의 색에 의한 영향

색의 종류에 따른 측정치의 영향을 알아보기 위하여 다이아몬드 시편연마기로 깨끗하게 연마된 대리석 면에 흰 색, 검은 색 칠을 하여 거칠기 측정을 해 보았다. 또한 색을 칠하지 않은 면에 대해서도 측정을 실시하였는데, 시료의 길이는 100 mm이고, 상대높이 0인 위치

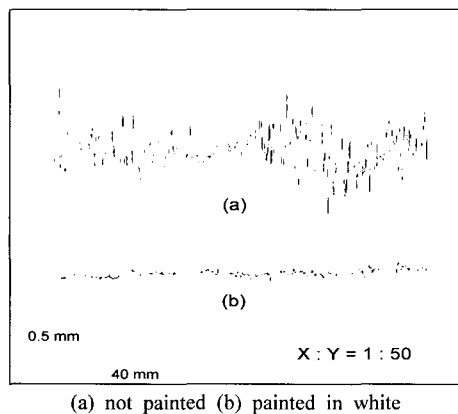


Fig. 7. Measured profile on the well-reflective marble surface.

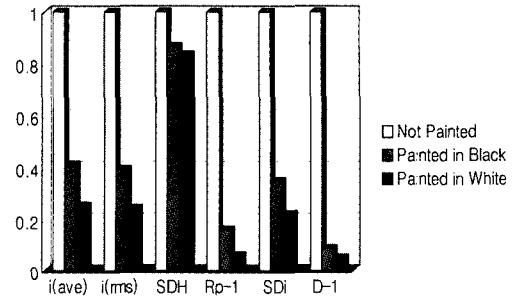


Fig. 9. Relative value of roughness parameters on the saw-cut marble surface.

에 초기 측정점을 두었다.

Fig. 9는 색칠되지 않은 면의 파라미터값을 1로 두었을 때 흰 색으로 칠해진 면, 검정 색으로 칠해진 면에 대한 파라미터값의 상대적인 비를 나타낸 것이다. 이 실험 결과 흰 색 칠을 한 면의 값이 더 0에 가까움을 확인할 수 있다.

4.3 물감의 채색에 의한 영향

물감을 절리면에 칠하게 되면 절리면의 틈 사이에 물감이 스며들어 절리면의 형상을 왜곡시키게 되므로 이것 역시 오차의 요인이 된다. 순수하게 물감이 절리면의 틈에 스며드는 효과만을 살펴보기 위하여 하이드로스톤을 이용하여 모형을 제작하였다. 이 모형의 단면 형상은 Fig. 10과 같다.

이 면에 흰색 물감을 두껍게 칠한 후 거친 사포로 무작위로 미세한 틈을 내어 거칠기를 측정하고, 그 위에 물감을 칠해서 거칠기를 측정하였다. 총 5줄을 측정하

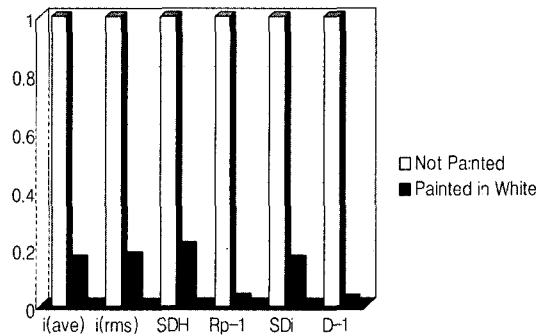


Fig. 8. Relative value of roughness parameters on the well-reflective rock surface.

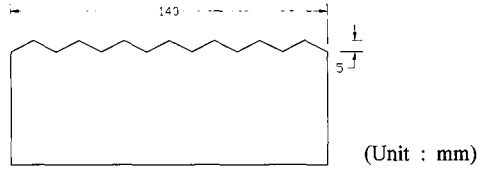


Fig. 10. A view of joint model.

였으며, 물감을 덧칠하기 전후의 측정위치는 동일하다. Table 1은 5줄에 대한 평균값이고, Fig. 11은 덧칠을 하기 이전의 파라미터를 1로 두었을 때 덧칠 전과 후의 파라미터값의 상대적인 비교이다. 실험 결과 절리면 표면의 물감 도포에 의한 거칠기 왜곡 효과는 2.5% 이내임을 확인할 수 있었다.

4.4 절리면의 거칠기 측정

암석 절리면 전체를 3차원적으로 측정하였다. 시료는 100x100 mm의 크기를 갖는 대리석 인공절리면이다. 면 전체에 흰색 물감을 고르게 바른 후, 가로 세로 각각의 간격을 0.5 mm로 하여 측정하였다. Fig. 12는 거칠기를 측정하는 모습이며, 대리석 시료에 대한 측정 결과는 Fig. 13과 같다.

거칠기 파라미터의 분석에 사용된 인공절리면 시료는 면 전체의 거칠기를 측정하지 않고 시료당 3줄을 측정하였다. Fig. 14는 측정 줄에 칠을 한 시료를 나타낸 것이며, Fig. 15는 동일 시료에서 측정한 3줄의 절리단면 측정 결과를 나타낸 것이다.

본 거칠기 측정기는 정밀한 거칠기 측정에 유용할 것으로 판단되고, 절리면에 색을 칠하기 전에 암석 부스

Table 1. Calculated roughness parameter and its standard deviation for a model surface.

	$i_{ave}(^{\circ})$	$i_{rms}(^{\circ})$	SDH(mm)	R_p-1	$SD_i(^{\circ})$	D-1
Before Painting	22.468	23.747	1.411	0.0912	8.532	0.00507
After Painting	22.373	23.623	1.396	0.0903	8.409	0.00494
Error(%)	0.423	0.522	1.063	0.987	1.442	2.564

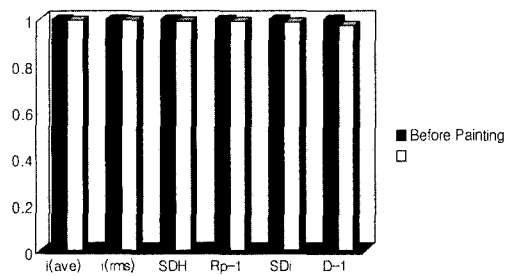


Fig. 11. Relative values of roughness parameters on the model surface.



Fig. 12. A view of measuring the joint roughness.

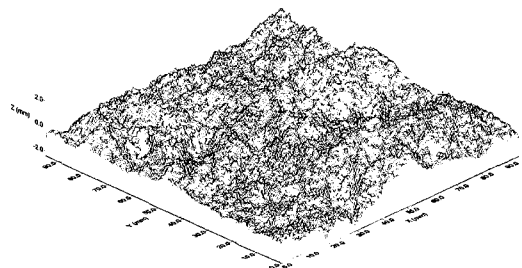


Fig. 13. 3-D plot of fracture surface.

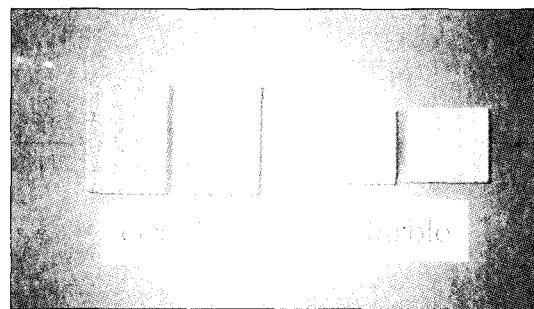


Fig. 14. A view of artificially jointed rock specimen painted in white on the measured lines.

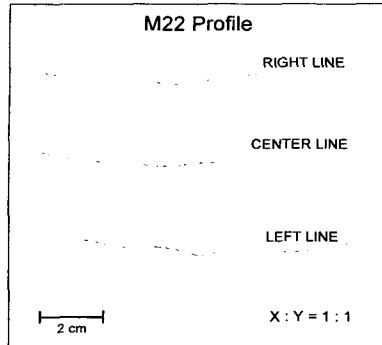


Fig. 15. Measured joint profile.

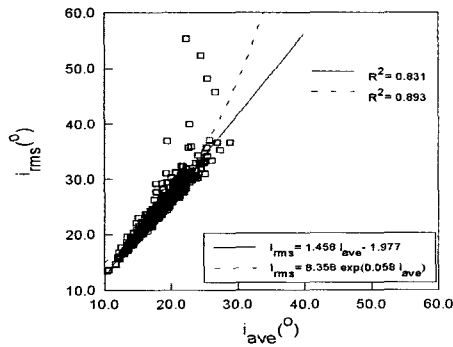
러기 등이 절리면을 왜곡하지 않도록 바람 등으로 표면을 처리할 필요가 있으며, 색을 칠한 절리면에 대한 전단시험을 실시할 경우 전단거동의 역학적 특성이 변할 수 있으므로 거칠기를 측정할 부분에 대해서만 색을 칠해야 한다고 판단된다.

5. 거칠기 파라미터 분석

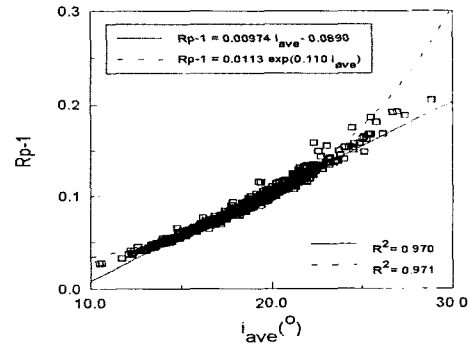
화강암 94개, 대리석 73개 등 총 167개 시료에서 시료마다 3개의 기준선을 간격 0.2 mm로 총 501개의 절리단면에 대해 측정된 자료를 바탕으로 거칠기 파라미터간의 상관관계를 분석하였다. 또한, 측정간격에 따른 거칠기 파라미터의 변화양상을 조사하였다.

5.1 거칠기 파라미터간의 상관관계

i_{ave} , i_{rms} , SD_i , R_p , D 등 5가지 파라미터의 상관관계를 선형함수와 지수함수를 이용하여 회귀분석을 실시하였고, 거칠기 형상지수와 프랙탈 차원은 (R_p-1) 과 $(D-1)$ 을 사용하여 분석하였다. 회귀분석의 결과는 Fig. 16과 Table 2에 제시하였다. 두 종류의 회귀함수에 대한 결정계수는 각각의 관계에 대해서 비슷한 값을 나타내었으며, R_p 와 i_{ave} , SD_i 와 i_{rms} , R_p 와 i_{rms} 순으로 상관관계가 좋은 것으로 나타났다.



(a) Root mean square of i-angle



(b) Plot of roughness profile index vs. micro average i-angle vs. micro average i-angle

Fig. 16. Correlation of roughness parameters.

Table 2. Summary of regression analysis.

Linear regression equation	Coefficient of determination(R^2)	Exponential regression function	Coefficient of determination(R^2)
$i_{rms} = 1.458i_{ave} - 1.977$	0.831	$i_{rms} = 8.353 \exp(0.058i_{ave})$	0.893
$R_p - 1 = 0.00974i_{ave} - 0.0890$	0.970	$R_p - 1 = 0.0113 \exp(0.110i_{ave})$	0.971
$SD_i = 1.253i_{ave} - 5.173$	0.647	$SD_i = 4.937 \exp(0.0683i_{ave})$	0.779
$D - 1 = 0.00108i_{ave} - 0.00586$	0.637	$D - 1 = 0.00323 \exp(0.0771i_{ave})$	0.647
$R_p - 1 = 0.00586i_{rms} - 0.0553$	0.898	$R_p - 1 = 0.0170 \exp(0.0649i_{rms})$	0.867
$SD_i = 0.950i_{rms} - 5.744$	0.952	$SD_i = 5.355 \exp(0.0473i_{rms})$	0.956
$D - 1 = 0.000674i_{rms} - 0.00279$	0.639	$D - 1 = 0.00410 \exp(0.0476i_{rms})$	0.629
$SD_i = 136.901(R_p - 1) + 5.517$	0.755	$SD_i = 9.062 \exp(7.204(R_p - 1))$	0.847
$D - 1 = 0.112(R_p - 1) + 0.00381$	0.678	$D - 1 = 0.00657 \exp(7.878(R_p - 1))$	0.659
$D - 1 = 0.000652SD_i + 0.00231$	0.576	$D - 1 = 0.00595 \exp(0.0454SD_i)$	0.544

5.2 절리형상의 측정 간격에 따른 거칠기 파라미터 값의 변화 양상

Fig. 17은 i_{ave} , i_{rms} , SDH, R_p-1 , SD_i 의 측정 간격에 따른 변화모습을 비교한 그림이다. 각 파라미터 값들의 감소비율을 비교하기 위해 0.2 mm 간격일 때의 파라미터 값을 1로 하였다. 거칠기 파라미터 값은 SDH, i_{ave} , i_{rms} , SD_i , R_p-1 순으로 감소량이 증가함을 알 수 있는데, 이 사실은 이상돈 등⁴⁾의 결과와 일치한다.

6. 측정 방법에 따른 파라미터 값의 변화

6장에서는 이상돈 등⁴⁾의 연구에 이용된 측정 핀을 절리면에 직접 접촉시켜 거칠기를 정량화하는 측정기, 즉 핀형(pin-type) 측정기에서 측정된 결과와 본 논문에서 개발된 레이저 거칠기 측정기에 의해 측정된 결과를 비교하였다. 이상돈 등의 연구에 이용된 핀형 측정기에서 직접 암석 표면에 접촉하는 부분인 루비 볼 스타일러스

(ruby ball stylus)의 지름은 0.69 mm이다. 비교 시 사용된 핀형 측정기의 측정 간격은 0.26 mm, 레이저 측정기의 측정 간격은 0.25 mm이다.

동일한 시료에서 얻어진 측정값을 비교한 결과 i_{ave} , i_{rms} , R_p-1 , SD_i , D-1에서 레이저 측정기의 측정값이 핀형 측정기에서 얻어진 측정값보다 크게 나타났다. 이는 레이저의 지름이 핀의 지름에 비해 작기 때문이라고 판단된다. 반면, SDH는 측정법에 관계없이 거의 동일한 측정값을 나타내었다. Fig. 18은 측정방법에 따른 거칠기 파라미터 값을 비교한 그래프이다.

7. 결 론

본 연구에서는 암석 절리면의 거칠기를 수치적으로 나타낼 수 있는 3차원 레이저 거칠기 측정기를 구동시키는 프로그램을 제작하였다. 절리면의 물감 채색 전후의 거칠기 파라미터 값을 비교하였으며, 물감의 채색으

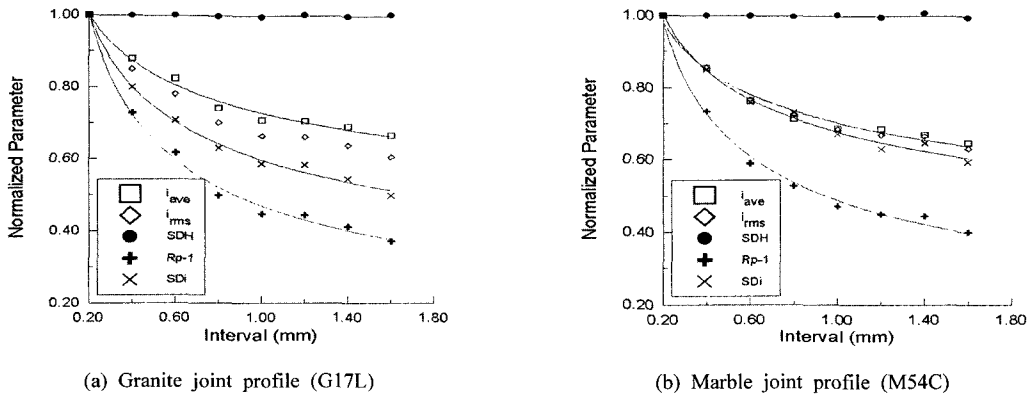


Fig. 17. Variation of roughness parameters with sampling interval.

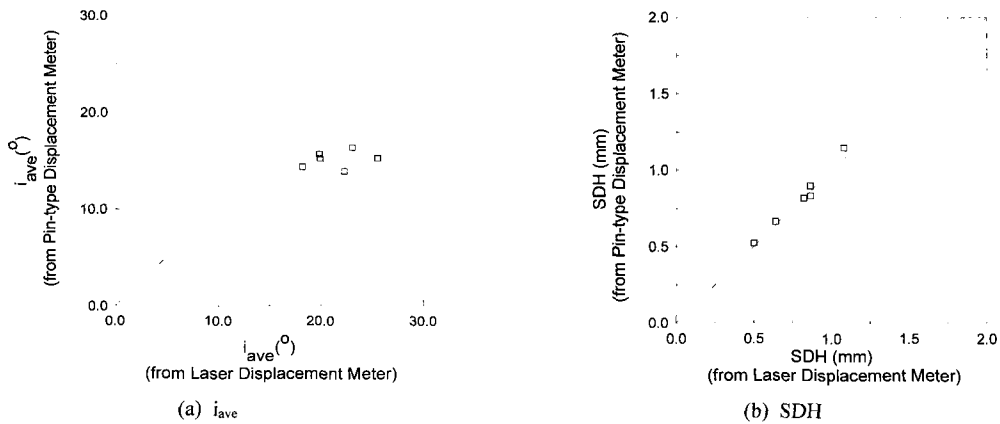


Fig. 18. Comparison of parameters obtained from different measuring methods.

로 인해 발생하는 절리면의 왜곡에 의한 오차의 분석도 실시하였다. 절리의 단면형상을 수치화하여 거칠기 파라미터를 산출한 후 각 파라미터 사이의 상관관계를 분석하였고, 측정간격에 따른 영향을 분석하였다.

본 연구에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

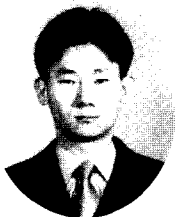
- 1) 정반사의 경향을 보이는 면은 거칠기가 과장되게 나타났고, 색을 칠한 면에서는 미세한 거칠기를 나타내었다. 또한, 흰색 물감을 칠할 경우 가장 이상적인 결과를 나타냈다.
- 2) 물감의 채색에 의한 거칠기 왜곡 효과는 거칠기 파라미터에 따라 0.5~2.5% 정도의 파라미터값 감소로 나타났다.
- 3) i_{ave} , i_{rms} , SD_i , R_p , D 의 5가지 파라미터를 선형함수, 지수함수를 이용하여 회귀분석을 실시한 결과 양호한 상관성을 보였고, R_p -1과 i_{ave} , SD_i 와 i_{rms} , R_p -1과 i_{rms} 순으로 상관관계가 좋은 것으로 나타났다.
- 4) 측정 간격이 증가함에 따라 파라미터는 지수함수적으로 감소하였고, SDH , i_{ave} , i_{rms} , SD_i , R_p -1 순으로 감소량이 증가하였다.
- 5) 동일한 시료에 대한 편형 거칠기 측정기와 레이저 거칠기 측정기의 측정 결과 SDH 값은 거의 동일하였으나 i_{ave} , i_{rms} , R_p -1, SD_i , D -1에서는 레이저 측정기에서 얻어진 결과값이 크게 나옴을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Barton, N. & Choubey, V., 1977, The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, *Rock Mech. Rock Eng.*, 10, 1-54.
2. Stimpson, B., 1982, A Rapid Field Method for Recording Joint Roughness Profiles, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 19, 345-346.
3. Maerz, N. H., Franklin, J. A. & Bennett, C. P., 1990, Joint Roughness Measurement Using Shadow Profilometry, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 27.5, 329-343.
4. Lee, S. D., Lee, C. I. & Park, Y., 1997, Characterization of Joint Profiles and Their Roughness Parameters, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 34:3-4, paper No. 174.
5. Lee, Y. H., Carr, J. R., Barr, D. J. & Haas, C. J., 1990, The Fractal Dimension as a Measure of the Roughness of Rock Discontinuity Profiles, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 27.6, 453-464.
6. Swan, G., 1983, Determination of Stiffness and Other Joint Properties from Roughness Measurements, *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 16, 19-38.
7. Huang, S. L., Oelfke, S. M. & Speck, R. C., 1992, Applicability of Fractal Characterization and Modelling to Rock Joint Profiles, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 29.2, 89-98.
8. Jermy, C. A., 1995, A Laser Scanning Device to Measure Joint Surface Roughness, *Proc. Int. Conf. on Mech. of Jointed and Faulted Rock*, Rossmanith P.(Ed.), Balkema, 169-174.
9. Lanaro, F., Jing, L. & Stephansson, O., 1998, 3-D Laser Measurements and Representation of Roughness of Rock Fractures, *Proc. Int. Conf. on Mech. of Jointed and Faulted Rock*, Rossmanith P.(Ed.), Balkema, 185-189.

배기윤

1997년 서울대학교 자원공학과 공학사
1999년 서울대학교 자원공학과 공학석사



Tel: 02-880-8701(507)
E-mail: kybae@rockeng.snu.ac.kr
현재 서울대학교 자원공학과 석사

이정인

1963년 서울대학교 공과대학 광산학과 공학사
1965년 서울대학교 대학원 광산학과 공학석사
1974년 일본 도호쿠대학(東北大學) 대학원 자원공학과 공학박사
Tel: 02-880-7221
E-mail: cilee@plaza.snu.ac.kr
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

