

레이저 변위계를 이용한 암석 절리면의 3차원 거칠기 측정기 개발

이정인¹⁾ · 배기윤²⁾ · 김태혁²⁾

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

Chung-In Lee, Ki-Yoon Bae and Tae-Hyuk Kim

1. 서 론

본 논문에서는 절리면 거칠기를 정밀하게 수치화 하기 위해 레이저 변위계를 이용한 3차원 거칠기 측정기를 구동시키는 프로그램 제작 및 여러 가지 상태의 절리면에 대해 수치화를 실시하여 각종 거칠기 파라미터를 결정한 후 오차분석을 실시하여 이 기계를 이용한 측정의 타당성을 검증하였다. 동일한 절리면에 대해 물리적인 접촉에 의한 3차원 거칠기 측정기로부터 얻어진 거칠기 파라미터와 레이저 변위계를 이용한 측정기로부터 얻어진 것들 사이의 관계를 살펴보고, 레이저 측정기에 의해 수치화된 절리면 거칠기 파라미터 사이의 상관관계를 조사하였다. 연구에 사용한 시료는 황등화강암, 여산대리석의 2종류이며, 절리형상 측정을 위한 절리는 인장균열 발생장치를 이용하여 인공적으로 제작하였다.

2. 거칠기 파라미터

평균 절리면 높이에 대한 표준편차(SDH, standard deviation of height)에 대한 관계식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SDH = \left[\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} y^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N-1} (y_{i+1}^2 + y_i^2) \frac{(x_{i+1} - x_i)}{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

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

거칠각의 평방평균(i_{rms})는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$Z_2 = \left[\frac{1}{L} \int_{x=0}^L \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \tan i_{rms}$$

여기서 i_{rms} 는 거칠각의 평방평균값으로, Z_2 와 위와 같은 관계를 갖고, N 은 측정점의 개수이다.

절리면의 평균거칠각(i_{ave})은 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$SL_{ave} = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L \left(\frac{dy}{dx} \right) dx = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} |Y_{i+1} - y_i| = \tan i_{ave}$$

1) 정회원, 서울대학교 자원공학과 교수

2) 서울대학교 자원공학과

절리 거칠기의 표준편차(SDi)는 다음과 같다.

$$SD_{SL} = \left[\frac{1}{L} \int_{x=0}^L \left(\frac{dy}{dx} - SL_{ave} \right)^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} - SL_{ave} \right)^2 \Delta x_i \right]^{\frac{1}{2}}$$

거칠기 형상지수(roughness profile index, R_p)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

본 논문에서 프랙탈차원(fractal dimension)은 분할법을 사용하여 구하였는데, 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 D 값을 결정하는 방법이다.

$$D = - \frac{\log N}{\log r}$$

평균진폭(mean amplitude)은 ISRM¹⁾에서 제시한 방법을 사용하여 구하였다.

3. 3차원 거칠기 측정기

이 3차원 측정기는 레이저 변위계(laser Displacement Meter), 위치지정 시스템(Positioning System), 자료출력과 전체 시스템을 직접 제어할 수 있는 컴퓨터 이렇게 세 부분으로 구성된다. 위치지정 시스템은 다시 위치지정 제어부와 작업 테이블로 나뉜다. 레이저 변위계는 일본 Keyence 사에서 만든 LC-2450이고, 위치지정 제어기는 일본 OHM 사에서 만든 PS-20T, PS-101C인데, X축, Y축 방향의 제어는 PS-20T에 의해, Z축 방향의 제어는 PS-101C에 의해 이루어진다.

작업 테이블은 실제 측정작업을 수행하는 부분이다. Z축의 끝에는 레이저 변위계가 연결되어 있다. 이것은 3차원 측정기의 가장 핵심적인 부분으로서 변위계가 레이저를 측정지점에 쏠 때, 그 측정지점에서 반사된 빛의 각도에 의해 변위를 측정한다.

레이저 변위계, 위치지정 제어부 전체를 제어하는 컴퓨터 프로그램은 직접 제작하였다.

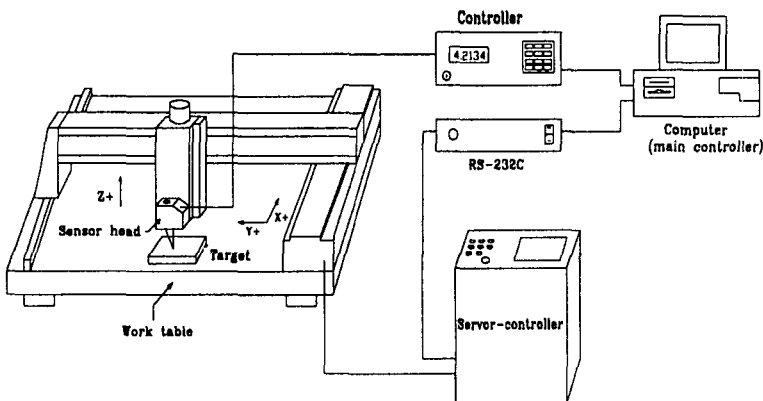


그림 1. 3차원 레이저 측정기의 개략도

4. 측정기 검증 및 거칠기 측정

4.1 도료의 색깔에 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 실시하였다.

그림 2는 색칠되지 않은 면의 파라미터값을 1로 두었을 때 색칠되지 않은 면의 파라미터값과 흰 색으로 칠해진 면, 검정 색으로 칠해진 면에서의 파라미터값과의 상대적인 비교를 나타낸 것이다. 검은 색을 칠한 면과 흰 색 칠을 한 면에 대한 파라미터값을 비교해보면, 흰 색 칠을 한 면의 값이 더 0에 가까움을 확인할 수 있다. 검은 색은 명도가 가장 낮고 흰 색은 명도가 가장 높은 색이므로, 이는 비록 두 가지 색에 대한 측정이지만 명도가 높은 도료일수록 좋은 측정값을 나타낸다고 추정할 수 있다.

4.2 센서헤드의 상대높이에 따른 비교

레이저의 지름은 측정간격 내의 중앙부에서 작고 주변부로 갈수록 커지므로 레이저의 지름이 작을수록 보다 정밀한 측정을 할 수 있다고 추정할 수 있다.

대리석에 흰 물감을 칠한 면에 대해 동일한 측정선을 측정범위 내의 상대높이를 변화시켜가며 측정하였다. 예상한 대로, 대부분의 파라미터에서 측정범위의 중간지점에서 측정한 결과는 최대값을 나타내고 중간지점에서 벗어날수록 작은 값을 나타내었다.

4.3 반복 측정에 대한 정확도 비교

다이아몬드 연마기로 연마된 대리석 면, 화강암과 대리석의 인공절리면 각 시료의 동일한 측정선에 대해서 물감을 칠하기 전과 후 각각에 대해서 5번 반복측정하였다. 반복측정한 결과 얻어진 데이터는 측정 단면의 좌표값 자체에 의해, 그리고 좌표값을 바탕으로 구해진 파라미터에 의해 비교되었다.

좌표값 자체의 비교를 위해 평균표준편차(Mean Standard Deviation, MSD)를 사용하였다.

표 1. Saw-cut 대리석 시료에 대한 거칠기 파라미터값

	i_{ave}	i_{rms}	SDH	Rp-1	SDi	D-1
Not Painted	18.616	24.807	0.232	0.0899	17.549	0.00955
Painted in Black	7.636	9.737	0.201	0.0146	6.115	0.00084
Painted in White	4.709	6.088	0.194	0.0056	3.876	0.00050

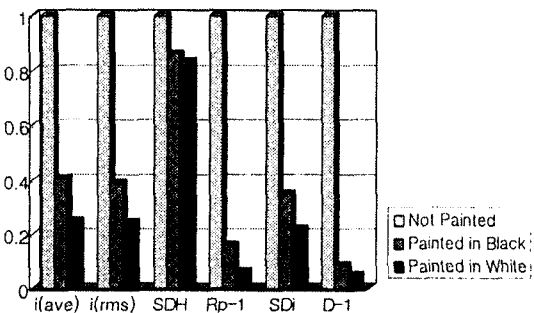


그림 2. saw-cut 대리석 시료에 대한 거칠기 파라미터 값의 상대적 비교

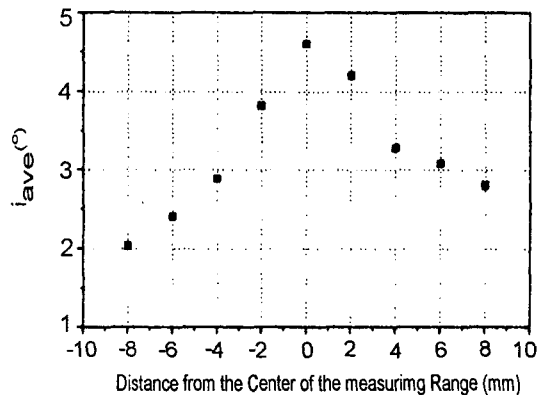


그림 3. 측정범위의 중앙으로부터의 거리에 따른 i_{ave} 값의 변화

표 2. MSD의 비교

Sample	MSD (mm)
Flat Marble not Painted	0.01802
Flat Marble Painted in White	0.00419
G20 not Painted	0.00937
G20 Painted in White	0.00828
M34 not Painted	0.01211
M34 Painted in White	0.00986

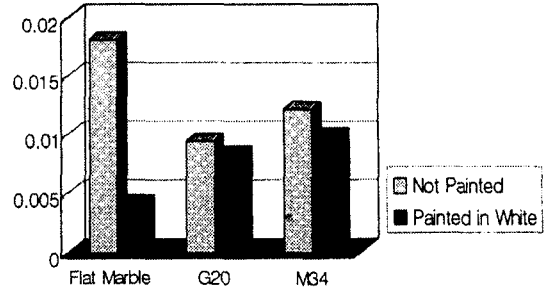


그림 4. MSD의 비교

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}$$

여기서 n은 각 측정선에서의 측정점의 개수, m은 반복측정 횟수, y는 측정값, \bar{y}_j 는 한 측정점에서 측정값의 평균을 나타낸다.

4.4 물감의 채색에 의한 거칠기 왜곡

물감이 절리면의 틈에 스며드는 효과를 살펴보기 위하여 하이드로스톤을 이용하여 모형을 제작하였다. 이 모형의 단면의 형상은 그림 5와 같다.

이 면에 흰색 물감을 두껍게 칠한 후 거친 사포로 미세한 틈을 내어 측정을 실시하였다. 그 위에 다시 압석의 절리면에 물감을 칠하듯이 얇게 동일한 물감을 칠해서 거칠기를 측정하였다. 표 3은 5줄에 대한 평균값이고, 오차는 덧칠을 하기 이전값을 기준으로 이후값을 비교했을 때의 오차이다.

4.5 절리면의 거칠기 측정

압석 절리면 전체를 3차원적으로 측정해 보았다. 그림 6은 거칠기를 측정하는 모습이며, 대리석 시료에 대한 측정 결과는 그림 7과 같다.

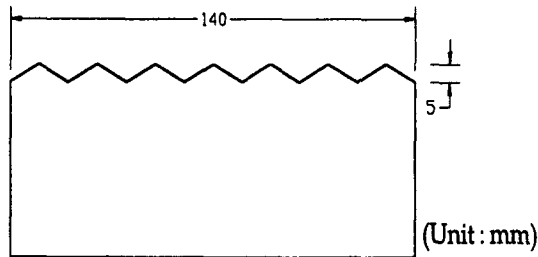


그림 5. 절리 모형

표 3. 절리 모형에 대한 거칠기 파라미터와 표준편차

	i_{ave} (°)	i_{rms} (°)	SDH (mm)	Rp-1	SDi(o)	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

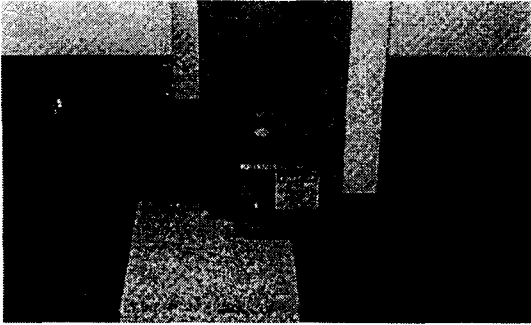


그림 6. 절리면 거칠기 측정 모습

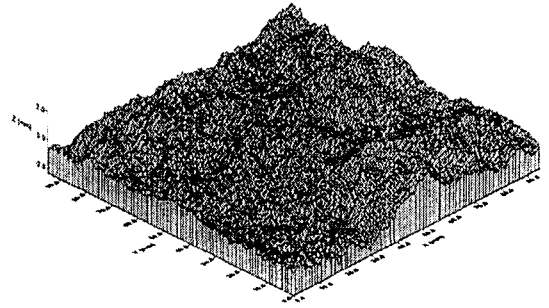


그림 7. 절리면의 3차원 그래프

5. 거칠기 파라미터간의 비교 및 상관관계 고찰

시료당 3줄, 측정 간격은 0.2 mm으로 절리면의 거칠기를 수치화하였다. 각 절리 단면에 대해 i_{ave} , i_{rms} , R_p , SDi , D , 평균 진폭 이렇게 7개의 파라미터를 앞에서 서술된 방법에 의해 구하였으며, 이들을 분석 대상 파라미터로 하였다.

5.1 거칠기 파라미터의 상관관계

절리면 높이의 표준편차와 평균진폭을 제외한 5가지 파라미터의 상관관계를 선형함수와 지수함수를 이용하여

표 4. 거칠기 파라미터 사이의 상관관계

Linear regression equation	R^2	Exponential regression equation	R^2
$R_p-1=0.00974i_{ave}-0.0890$	0.970	$R_p-1=0.0113\exp(0.110i_{ave})$	0.971
$SDi=0.950i_{rms}-5.744$	0.952	$SDi=5.355\exp(0.0473i_{rms})$	0.956
$R_p-1=0.00586i_{rms}-0.0553$	0.898	$R_p-1=0.0170\exp(0.0649i_{rms})$	0.867
$i_{rms}=1.458i_{ave}-1.977$	0.831	$i_{rms}=8.353\exp(0.058i_{ave})$	0.898
$SDi=136.901(R_p-1)+5.517$	0.755	$SDi=9.062\exp(7.204(R_p-1))$	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

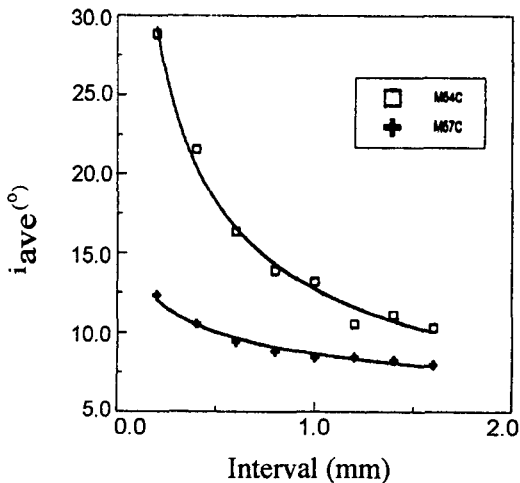


그림 8. 측정간격에 따른 i_{ave} 값의 변화

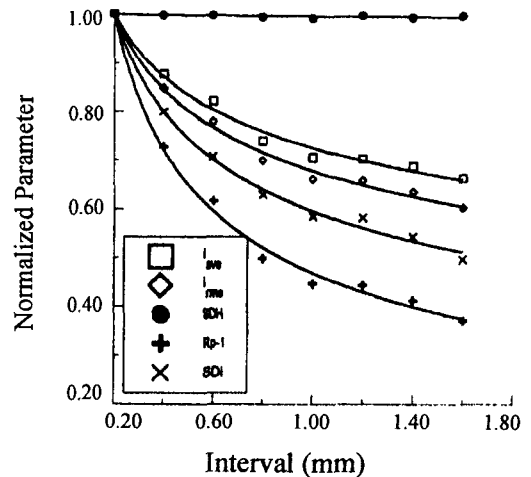


그림 9. 측정간격에 따른 거칠기 파라미터 값의 변화

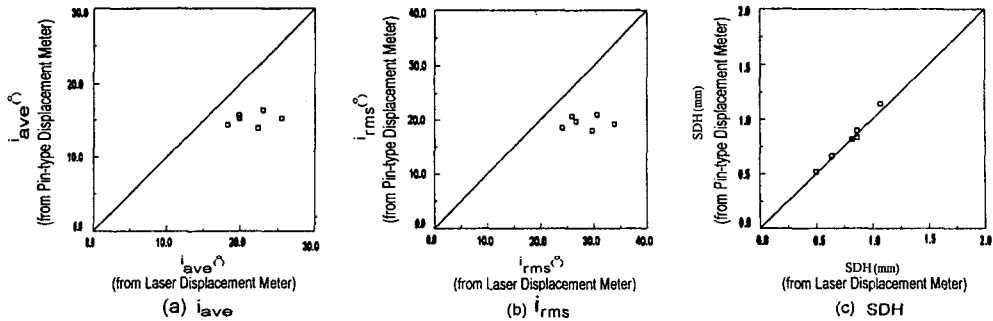


그림 10. 측정 방법에 따른 거칠기 파라미터값의 비교

회귀분석을 실시하였다.

5.2 절리형상의 측정간격에 따른 거칠기 파라미터값의 변화양상

절리형상의 측정간격에 따른 영향을 조사하였다. 그림 8은 대리석의 거칠기 단면중 거칠기가 큰 것과 작은 것의 평균 기울기의 측정간격에 따른 변화양상을 비교한 것이다.

6. 측정 방법에 따른 파라미터값의 차이

본 논문에서는 동일한 거칠기 단면들에 대해 바늘을 직접 절리면 표면에 접촉시키는 방법 즉 pin-type 거칠기 측정기와 레이저 거칠기 측정기에 의한 측정 결과를 비교하였다. pin-type 측정기는 이상돈²⁾의 연구에 이용된 기계인데, 직접 압착 표면에 접촉하는 부분인 루비 볼 스타일러스(ruby ball stylus)의 지름은 0.69 mm이다.

그림 10은 대리석 절리면에 대한 측정 결과의 비교이다. 측정 간격은 레이저 측정기의 경우 0.25 mm, pin-type 거칠기 측정기의 경우 약 0.26 mm이다.

7. 결 론

1) 다이아몬드 연마기로 연마된 대리석 표면에 대한 측정에서 색을 칠하지 않은 경우가 칠한 경우보다 큰 거칠기를 나타내었다. 또한 흰 색과 검은 색의 비교를 통해 흰 색을 칠한 경우에 보다 이상적인 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다.

2) 측정면이 측정범위의 중앙부에 가까울수록 거칠기 파라미터값이 크게 나오는 것으로 나타났다.

3) 측정값 변동에 의한 오차는 흰 색칠을 하지 않은 경우에 0.01~0.02 mm, 칠한 경우에 0.005~0.01 mm 정도로 나타났다. 따라서 측정면의 경사에 의한 오차를 포함할 경우 측정값에 대한 오차는 약 0.06 mm이다.

4) 모형을 제작하여 측정면에 흰 색 물감을 칠한 후 인위적으로 미세한 거칠기를 낸 후 거칠기를 측정하였고, 그 위에 다시 물감을 칠하여 거칠기를 측정하였다. 측정 후 구해진 파라미터값을 비교해본 결과, 0.5-3% 정도 파라미터값의 감소를 보였다.

5) 수치화된 데이터를 바탕으로 계산된 거칠기 파라미터간의 상관관계를 분석한 결과 거칠기 형상지수와 절리형상의 평균거칠기, 거칠기의 표준편차와 평방평균 거칠기, 거칠기 형상지수와 평방평균 거칠기 순으로 상관관계가 좋은 것으로 나타났다.

6) 측정 간격이 증가함에 따라 파라미터는 지수함수적으로 감소하였고, SDH, i_{ave} , i_{rms} , SDi, Rp-1 순으로 감소량이 증가하였다.

7) 레이저 측정기에 의한 파라미터값이 pin-type 측정기에 의한 값보다 크게 나옴을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Brown, E.T., 1977, Rock Characterization Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods, Pergamon Press, Oxford
2. Lee, S.D., Lee, C.I. and Park, Y., 1997, Characterization of Joint Profiles and Their Roughness Parameters, *Int. J. Rock. Mech. Min.*, 34:3-4, parar No. 174