

암반 절리 거칠기의 정량화에 대한 연구현황 분석

박병윤¹⁾ · 권상기¹⁾

Current Status of the Characterization of the Rock Joint Surface

Byoung-Yoon Park and Sangki Kwon

1. 서 론

암반의 거동을 이해하는데 어려움을 주는 항목 중의 하나가 암반절리에 대한 구성모델(constitutive model)의 불확실성이다. 즉, 거칠기의 특성화, 전단시 생성되는 암석 부스러기의 영향, 틈새변화 예측 및 균열의 진행에 의한 장기변화 등의 모델링이 어렵다는 것이다. 전단응력을 받는 절리면의 들뜸(dilation)과 변위는 절리면의 거칠기에 좌우된다. 또한 최대전단강도와 균열의 수리적 유동특성도 절리면의 거칠기에 지배를 받게 된다. 따라서 단일 암반절리의 수리-역학적 상호작용을 파악하기 위해서는 절리면의 거칠기를 정량화 하여야 보다 정확한 해석이 가능하다.

암반 절리의 거칠기는 보통 절리거칠계수(Joint Roughness Coefficient: JRC)의 항으로 기술된다. 많은 전문가들은 통계적인 방법으로 암반 절리면의 거칠기와 마찰거동 간의 상관관계를 알아내려고 노력하였으며, 여러 가지 통계적 파라미터와 Barton⁴⁾이 제시한 거칠단면선의 JRC 계수간의 상관관계를 조사하려고 노력하였다. 최근에는 프랙탈 차원(fractal dimension)이 절리 거칠기를 정량화 하는데 유용한 파라미터라는 것도 보고되었다.^{13,16)}

본 연구에서는 절리면 거칠기를 정량화 하는 여러 가지 기법들에 대한 연구현황을 비교, 분석하였다.

2. 절리면 거칠기 파라미터

암반절리의 전단거동은 거칠기에 매우 영향을 받는다. 그러나 절리 거동에 대한 이해도가 현저히 높아졌음에도 불구하고 절리 거칠, 들뜸 및 전단거동간의 관계는 단지

실험실 수준에서 해답을 얻는데 머무르고 있다. 이는 외관상 암반 절리면의 불규칙한 성질과 전단 변위가 일어나는 동안 절리 접촉면에서 발생하는 미끄러짐과 전단 메커니즘 사이의 복잡한 상호작용 때문인 것으로 결론지을 수 있다.¹⁾ Feker and Rengers²⁾는 미소의 전단변위를 받는 절리는 1차로 미소한 스케일의 거칠기에 영향을 받는다는 것을 인식하였다. 그러나, 같은 절리가 큰 전단 이동을 받을 경우 대규모 굴곡각에 의해 지배받는다.

현재까지 암반 절리의 거칠기를 정량화하기 위해 다음과 같은 파라미터들이 제안되었다.

- 암반 절리의 선형 단면선(linear profiles)을 따른 절리거칠계수(JRC)

- 각종 재래의 통계적인 파라미터

- 프랙탈 차원(D)

특히, 경험적인 모델과 관련된 문제점을 인식하고, 여러 전문가들은 절리 거칠기를 조사하는데 프랙탈 형상을 적용하였다.

2.1 절리거칠계수(JRC)

공학적으로 가장 널리 사용되는 거칠파라미터는 Barton에 의해 제안된 절리거칠계수이다.³⁾ Barton과 Choubey는 거칠기에 따라 10개의 대표적인 단면곡선 군을 만들고 거칠어질수록 각각 0에서 20까지의 계수를 할당하였다.⁴⁾ 거칠단면선은 약 100 mm 길이의 시료로 수행된 일련의 136회의 절리전단시험으로부터 구한 것이다. 시료는 가장 완만한 곡선에서 가장 거친 곡선까지의 JRC 0-2, 2-4, ..., 18-20 등 10개 범주로 묶었다(Fig.

1) 정회원, 한국원자력연구소
접수일 : 2000년 6월 12일
심사 완료일 : 2000년 8월 28일

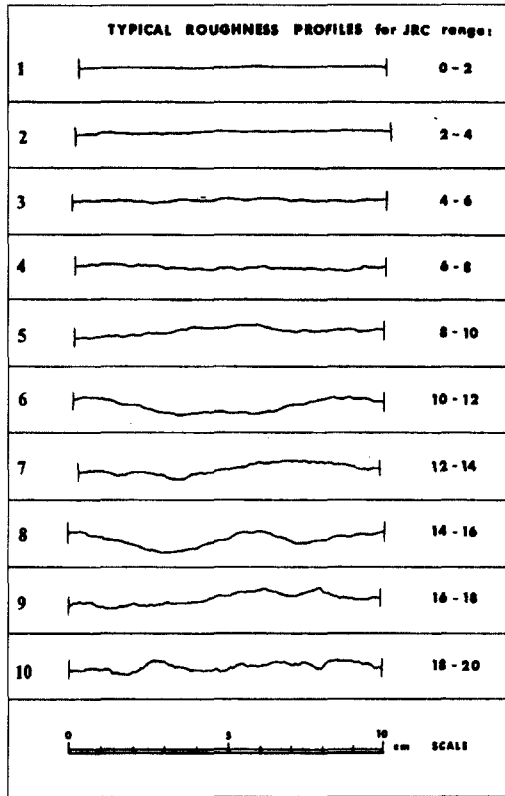


Fig. 1. Roughness profiles and corresponding range of JRC values associated with each one.⁵⁾

1). 각 시험 그룹으로부터 대표적인 하나의 단면곡선이 ISRM에 의해 표준화된 그룹을 대표하도록 선정되었다.⁵⁾

2.2 재래의 통계적 파라미터

절리면의 거칠기는 다음과 같은 여러 가지 통계적 파라미터들을 이용해 정량화가 시도되었다.

- 중심선 평균치(centerline average value: CLA)
- 제곱평균 값(mean square value: MSV)
- 제곱평균자승근 값(root mean square value: RMS)
- 1차 미분의 제곱평균 값(mean square of the first derivative value)
- 1차 미분의 RMS (Z_2)
- 2차 미분의 RMS (Z_3)
- 거리초과 백분율(percentage excess of distance: Z_4)
- 자기상관함수(auto-correlation function: ACF)
- 스펙트럼밀도함수(spectral density function)
- 구조함수 (structure function : SF)

• 거칠기단면지수 (roughness profile index : R_p)

• 미소-평균 i 각 (A_i)

이들 통계적 파라미터들 중 거칠기를 정량화 하는 데에는 어느 것이 가장 낫다는 확실한 결론을 내리기는 어렵다. 다만, Kulatilake et al.는 Z_2 가 모든 재래의 통계적 파라미터들 중 가장 좋은 것처럼 보인다고 했다.⁶⁾

2.2.1 제곱평균자승근(RMS)

RMS는 마무리된 금속표면을 검사하기 위해 처음 기계공학에서 사용되었으며 중심선으로부터의 평균편차를 이용한다. 중심선은 일반적인 단면의 방향과 평행하고, 설정한 단면 폭의 한계 내에 있으며 이 중심선을 기준으로 거칠기의 높낮이가 측정된다. 평균편차의 측정치는 제곱평균자승근으로 다음과 같이 정의된다.⁷⁾

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{M} \int_{x=0}^{x=M} y^2 dx} \quad (1)$$

여기서, M = 중심선을 따라 측정된 값들의 개수,

y = 중심선에 대한 거칠기의 높낮이,

dx = 두 인접한 진폭 판독 점간의 일정한 미소 거리

2.2.2 중심선 평균(CLA)

CLA는 RMS와 비슷한 방법으로 다음과 같이 정의된다.⁸⁾

$$CLA = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} |y| dx \quad (\text{units of length}) \quad (2)$$

여기서, L = 평균값이 취해지는 거리

2.2.3 1차 미분의 RMS (Z_2), 2차 미분의 RMS (Z_3), 거리초과 백분율(Z_4)

Myers⁸⁾는 표면 거칠기를 특성화하기 위해 RMS와 함께 단면선의 1차 미분의 RMS, Z_2 , 2차 미분의 RMS, Z_3 , 그리고, 기울기가 양인 단면선을 따라 측정된 거리가 기울기가 음인 단면선의 거리보다 초과한 양의 전체 길이에 대한 백분율, Z_4 를 사용할 것을 제안하였다. 이들 파라미터는 다음과 같이 정의된다.

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx} \quad (3)$$

$$Z_3 = \sqrt{\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)^2 dx} \quad (4)$$

$$Z_4 = \frac{\sum (X_i)_{\text{positive}} - \sum (X_i)_{\text{negative}}}{L} \quad (5)$$

여기서, $x_i = L$ 의 i 번째 조각

$$L = \sum (x_i)_{\text{positive}} + \sum (x_i)_{\text{negative}}$$

Z_2 는 금속표면의 빛의 산란 특성치를 측정하는데 사용되며 Z_3 와 Z_4 는 각각 마모된 정도나 돌출부의 무더진 정도를 측정하거나 거칠기의 방향성을 규정한다. Myers⁸⁾은 철재 디스크의 마찰계수와 파라미터 RMS, Z_2 및 Z_3 간의 상관관계를 규명하였으며, 마찰과 가장 좋은 상관관계를 갖는 것이 Z_2 임을 밝혔다. Krahn⁹⁾은 암반 절리면 거칠기를 연구하는 과정에서 전체 마찰각과 임의의 들뜨지 않은(non-dilatant) 절리면에 대한 Z_2 사이에 선형관계가 있다는 것을 밝혔다.

2.2.4 제곱평균값(MSV), 자기상관함수(ACF), 구조함수(SF)

절리면 거칠기를 특성화하기 위해 단면선에서 불규칙한 현상으로 나타나는 돌출부 높이에 대한 분포를 통계적으로 해석 할 수 있다.¹⁰⁻¹²⁾

MSV와 ACF는 다음과 같이 정의된다¹³⁾:

$$MSV = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} y^2 dx \tag{6}$$

$$ACF = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} f(x)f(x+D_x)dx \tag{7}$$

여기서, $f(x)$ 는 길이 L 방향을 x 축으로 놓았을 때 x 에 따른 돌출부 높이의 진폭이고, D_x 는 지연거리(lag distance)이다.

Sayles와 Thomas¹⁴⁾는 ACF와 단순히 관련되는 또 다른 절리면 파라미터를 제안하였다. 이 파라미터는 다음과 같이 정의되는 구조함수(SF)로 알려져 있다:

$$SF = \int_{x=0}^{x=L} (f(x) - f(x+D_x))^2 dx \tag{8}$$

여기서, $f(x)$ 는 길이 L 을 따른 거리 x 에서의 거칠기의 진폭함수이다. SF는 절리면 결의 변화량을 정량화 하는데 사용된다.

2.3 프랙탈(Fractal)

2.3.1 프랙탈 형상

프랙탈 형상이란 자연계에 존재하는 형태 즉 리아스식 해안의 해안선, 구름, 눈의 결정, 동물체내 혈관의 분포 형태, 나뭇가지의 형태 등과 같이 수학의 초등기하학에서 다루는 원·삼각형·구·직육면체 등과는 달리 불규칙적

이며 복잡한 도형을 나타내기 위한 수학적인 형상을 말한다.

원둘레는 전체적으로는 휘어 있지만 만약 이것을 작은 원호로 세분하고 다시 미세하게 분해하면 세분된 원호의 각 부분은 선분에 근사하게 된다. 결과적으로 세분됨에 따라 전체적으로 휘어있다는 성질을 잃어간다. 그러나 리아스식 해안은 꽃이나 만이 무수히 뒤얽혀 있어 전체가 갖는 복잡함은 부분이 되어도 없어지지 않는다. 그러므로 이를 표현하기 위해 자기상사(self-similar: 自己相似)하는 수학적인 도형을 가정한다. 자기상사도형은 전체가 몇 개의 부분으로 분리될 수 있고 그 때 부분은 전체의 축소상이 되며, 무한히 세분될 수 있는 도형을 말한다.¹⁵⁾

예를 들어, 평면 위의 집합에서 정의된 간단한 자기상사도형은 코흐곡선(Koch Curve)으로, 그 자기상사성은 Fig. 2에서 보는 바와 같다. B. B. Mandelbrot는 자기상사도형이나 자기상사성을 가진 도형을 프랙탈이라고 하였다.¹⁷⁾

2.3.2 프랙탈 차원(Fractal Dimension, D)

유클리드 기하학은 정수차원에서 묘사될 수 있는 객체를 취급한다. 직선은 1차원(D=1), 사각형 혹은 삼각형은 2차원, 그리고 육면체는 3차원이다. 단위 길이의 직선은 길이 r 인 선분으로 나뉜다. 그러면 선분 수 N 과 선분의 길이 r 은 다음 식으로 쓸 수 있다(Fig. 3).

$$N = 1/r^1 \tag{9}$$

파라미터 D 가 차원을 나타낸다면, 다음의 일반적인 관계식이 성립된다:

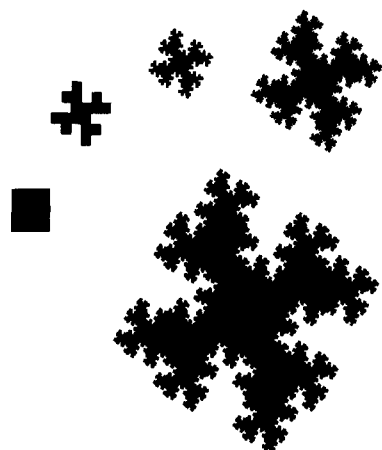


Fig. 2. A Quadric Koch Island¹⁷⁾ (Coastline Dimension $D=3/2=1.5000$).

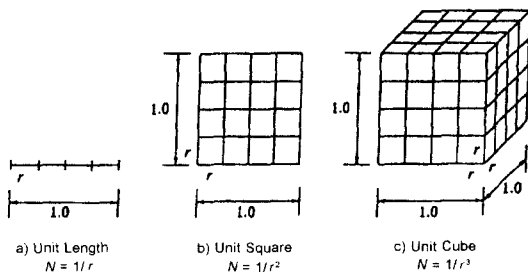


Fig. 3. The concept of dimension in Euclidean geometry¹³⁾.

$$N = 1/r^D \text{ or } Nr^D = 1 \quad (10)$$

프랙탈 차원은 측정구간에 걸쳐 행하는 세밀 혹은 조약함의 상대적인 총량을 측정한다. 거칠기는 평균에 대한 평균편차(average variation)로서 측정되고 거칠스케일이나 측정 스케일의 변화와는 관계없다. 프랙탈 차원은 측정구간의 스케일의 변화로 길이, 면적 혹은 체적의 변화를 정량화 하는데 사용된다.¹⁶⁾

식 (10)을 다시 쓰면, 프랙탈 차원은:

$$D = -\frac{\log(N)}{\log(r)} \quad (11)$$

가 되며, 도식적으로 로그-로그 스케일에서 스텝 길이 r 에 대한 스텝 수 N 의 기울기로 얻을 수 있다. r 에 대한 추적길이(trace length) L 의 로그-로그 그래프는 $1-D$ 의 기울기를 갖는다.^{13,16)}

2.3.3 자기유사(Self-Affine)

Mandelbrot는 자연상태의 균열 면이 자기상사라기보다는 자기유사(self-affine)에 더 가깝다고 제안하였다.¹⁷⁾ 자기상사는 시각적으로 다양한 스케일 확대 및 축소를 통하여도 그것의 통계적인 특성치를 유지하는 기하학적 형태인 반면 자기유사는 특정 방향에 따라 스케일을 다르게 했을 때만 통계적인 상사가 유지된다는 차이가 있다.⁶⁾ 즉 자기상사면은 양 축과 횡단방향에서의 눈금이 동등할 때 통계적으로 등가인 반면, 자기유사면은 통계적으로 상사성을 유지하기 위해서 수직방향은 다른 크기의 눈금을 사용해야 한다. 자연상태 표면의 수평등고선은 자기상사이지만 수직단면선은 대개 자기유사이다. 자기상사 프랙탈 집합에 대해서는 단 하나의 프랙탈 차원이 있는 반면, 자기유사 프랙탈 집합에는 서로 다른 여러 개의 프랙탈 차원이 있으며, 어떤 것은 국부적이고 어떤 것은 전체적이다.¹⁸⁾

프랙탈 차원을 사용하여 암반 균열의 거칠기를 측정하는 방법이 연구되었는데 이러한 연구는 천연 암반 균열의 표면이 자기상사 또는 자기유사 프랙탈 모델로 묘사될 것이라는 가정에 근거한다. 자기유사 프랙탈 모델은 자기상사 프랙탈 모델보다 지질학적 현상에 더 잘 적용할 수 있다.

2.3.4 교차길이(Crossover Length)

자기유사 단면이 스텝길이 r 을 이용해 근사되었다면 r 보다 작은 해상도의 모든 자세한 사항은 잃게 된다. r 이 작아지면 단면을 더 좋게 근사할 수 있지만, 이보다 더 작은 차원은 여전히 존재한다. 작성된 자기유사 프랙탈의 통계적인 모멘트가 자기상사 프랙탈의 것과 비슷하게 되고, D 의 값을 실제로 얻을 수 있는 어떤 임계의 미소스텝 길이를 교차길이이라 한다. 천연 암반절리에서 교차길이는 10^{-2} mm에서 10 mm의 범위를 갖는다.⁶⁾ 천연 암반의 거친 표면에 대하여, D 는 단일 단면선을 따라 측정된 스케일이 변함에 따라 달라진다는 것이 밝혀졌다.¹⁹⁻²¹⁾ 이 의미는 천연 절리면의 거칠기가 자기상사 특성을 만족하지 않는다면, 이 절리면에 대한 D 값이 하나만 존재하지 않으며, 거칠스케일과 상관 있는 측정 스케일에 좌우된다. 측정스케일이 거칠스케일 정도일 때, 자기유사 단면선의 특징을 나타내는 천연 절리면에 대하여 D 의 정확한 계산치가 얻어진다.⁶⁾

3. 프랙탈 차원에 의한 거칠파라미터

3.1 프랙탈 차원의 측정기법

절리면의 프랙탈 차원은 절리면 거칠기와 높이간의 특정한 상관관계를 분석하는 여러 가지 방법에 의해 결정된다. 프랙탈 차원을 계산하기 위한 방법은 다음 두 가지 그룹으로 나눌 수 있다.

1. 기하학적 방법(geometric method) : 분할자법, 박스집계법, 삼각형법, 슬릿 아일랜드법 및 칸토어법 등으로 등고선, 경계선, 곡선, 단면선의 길이를 직접 측정하거나 면적을 측정한다.

2. 기능적 방법(functional method) : 적분변환을 이용한 스펙트럼법, 통계적인 측정방법인 배리오그램(variogram)법 및 크기분포법 등이 있다.

3.1.1 분할자법(Divider Method)

분할자법은 가장 오래되고 기하물리학자들간에 프랙탈 차원을 측정하는 가장 대중적인 방법이다. 이 측정 기법은 "프랙탈"이란 단어가 나오기에 앞서 이미 사용되었다.²²⁾

기본 방법은 서로 다른 해상도 또는 치수가 다른 자로 한 곡선의 길이를 측정한다.

단면 전체를 분할자 스텝으로 얼마가 되는가를 집계하고, 단면 길이(L)를 계산하기 위해 그 집계된 수에 분할자의 스패를 곱한다. 분할자 한 스패를 서로 다른 값으로 설정하여 분할자의 스패가 달라짐에 따라 단면선 길이가 어떻게 변하는지를 측정하기 위하여 이 과정을 여러 차례 반복한다(Fig. 4).

이 과정에 의해 단면선 전체 길이와 해당하는 각 스패 값의 좌표를 로그-로그 그래프에 그렸을 때 그 점들이 직선을 따라 그려진다면, 측정된 단면선은 프랙탈 형상이다(Fig. 4d). 데이터에 가장 수렴하는 선의 기울기를 결정하고 그 기울기로부터 프랙탈 차원을 계산한다.

$$L = r^{1-D} \tag{12}$$

여기서 L은 단면선 길이 (N·r)이고, r은 분할자의 한 스패, D는 프랙탈 차원이며 로그-로그 그래프로부터 얻을 수 있다.

$$D = 1 - \text{slope} \tag{13}$$

절리면의 프랙탈 차원을 결정할 때, 절리면을 통과하는 여러 단면선을 측정할 필요가 있다. 모든 단면선의 데이터는 프랙탈 차원을 결정하기 위해 하나의 그래프로 그릴 수 있다. 또 다른 방법은 모든 단면선의 개개의 그

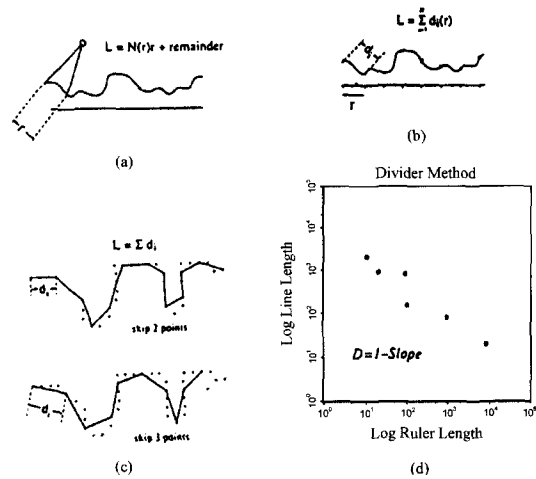


Fig. 4. (a) Divider method: divider applied to profile; (b) modified divider: straight line between divisions along base are measured, (c) digitised ruler method using point counting, (d) example of plotted measurements.¹⁶⁾

림을 만들고, 각 단면선의 프랙탈 차원의 평균과 절리면의 프랙탈 차원을 관련짓는 것이다. 전문가들은 절리면의 프랙탈 차원을 얻기 위해 각 단면선의 프랙탈 차원에 1을 더하였다.²³⁾ 평평한 절리면은 2차원이고 굴곡이 없는 단면선은 1차원이기 때문이다.

3.1.2 박스집계법(Box-counting Method)

박스집계법은 곡선의 길이, 선의 밀도 또는 일정 면적을 덮고 있는 점의 수를 측정하기 위해 집계 도구로 조그마한 사각형 박스를 사용한다.^{17,24-27)} 절리면을 잘라서 얻은 수평 슬라이스로부터 구한 등고선과 수직으로 자른 단면선을 측정한다.

한 번의 길이가 r인 박스를 선택하고 박스의 개수(N)는 단면선이나 등고선을 완전히 커버할 수 있도록 한다. 박스의 크기를 달리해서 일련의 작업을 반복한다.^{6,16)}

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N_r}{-\log r} \tag{14}$$

박스의 개수 대 박스크기의 역수간의 관계를 로그-로그 용지에 그린다. 프랙탈 차원 D는 그래프의 기울기가 된다(Fig. 5).

$$D = \text{slope} \tag{15}$$

정사각형 대신 원을 사용할 수도 있으며 이때 원의 직경은 박스의 크기와 대등한 것이다.²⁸⁾

자기유사 단면선에 대하여, 전체 크기보다 더 큰 박스 사이즈를 선택하면, 한번에 단면선을 커버하여, 생긴 모

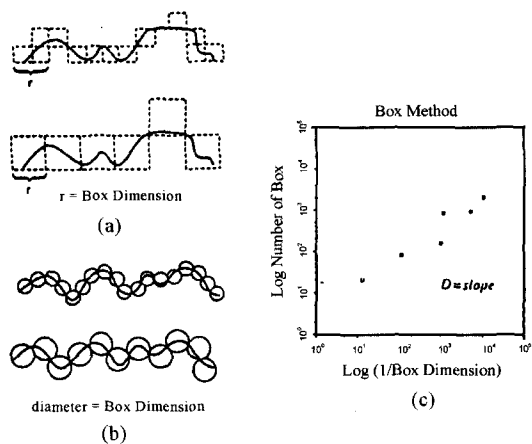


Fig. 5. Box method; (a) Profile is covered with square boxes, (b) with circles, (c) example of data plot, $D = \text{slope}$.¹⁶⁾

양이 간단히 무시되고, 그 사이즈 범위에 대해서 $D = 1$ 인 결과를 얻게 된다. 또한 박스가 단일 픽셀 정도로 작게 된다면, 어떤 봉우리끼리나 골짜기끼리 바로 연결되는 법이 없이 단면선을 실질적으로 추적할 수 있다. 그러므로 그 사이즈 범위에 대하여도 다시 $D = 1$ 에 접근하게 된다. 이 두 경우의 사이에서 D 가 1보다 크게 된다.

3.1.3 칸토어법(Cantor Method)

칸토어법은 Mandelbrot에 의해 이미 제안된 기법중의 하나이다.^{17,29)} 칸토어법은 단면선 혹은 절리면의 각 점에서 반경 δ 의 원이나 구를 그리고 만들어진 면적 혹은 체적을 측정하고 다음 극한값(limit)을 결정한다:

$$D = n - \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log vol_{\delta}^n}{\log \delta} \quad (16)$$

여기서, n 은 단면선에 대해서는 1이고 절리면에 대해서는 2이다.²⁹⁾

3.1.4 삼각형법(Triangle Method)

삼각형법¹⁶⁾은 절리면을 삼각형 격자망으로 덮어 거친 표면을 분석하는 방법 중의 하나이다. 프랙탈 해석은 격자간의 크기가 변함에 따라 절리면 면적이 달라지는 것

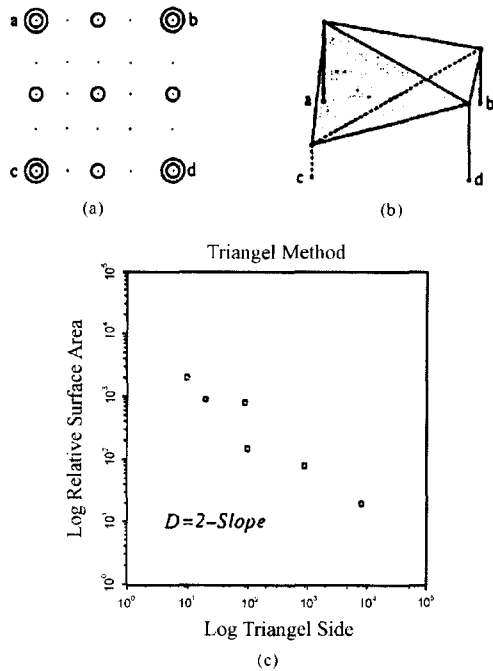


Fig. 6. Triangle method; (a) Plan view of the wurface covered with triangles of consecutively smaller size, (b) choice of diagonal may give a different surface area, (c) example of the data plot.¹⁶⁾

에 근거한다. 격자망을 구성하는 삼각형은 직각이등변삼각형이어서 삼각형 두 개는 정사각형을 만든다. 삼각형의 면적은 표준벡터공식에 의해 알 수 있다:

$$A = \frac{|(b-a)(c-a)|}{2} \quad (17)$$

여기서, a, b, c는 x-y-z 공간에서 세 개의 주어진 삼각점의 벡터이다.

모든 삼각형들의 세 개의 꼭지점들이 하나의 평면에 있다면, 전체 면적은 최소가 된다. 거친 표면일 경우 세 꼭지점은 각각 다른 높이에 있게 되고, 삼각형들의 면적의 합은 최소 값(평면의 경우)보다 더 커진다. 각 경우의 전체 표면 면적을 y값으로, 그 때의 격자 점간의 거리를 x값으로 하여 로그-로그 용지에 그리면 프랙탈 차원을 계산할 수 있다. 데이터 그림이 일직선상에 있다면, 그 절리면은 프랙탈 면으로 정의되고, 그래프의 기울기는 다음식에 의하여 프랙탈 차원과 관련지어진다(Fig. 6):

$$D = 2 - \text{slope} \quad (18)$$

분할자법과 다른 점은 단면선의 길이를 취급하는 것이 아니라 절리면의 면적을 직접 취급한다는 것이다.

3.1.5 슬릿-아일랜드법(Slit-island method)

슬릿-아일랜드법은 Mandelbrot에 의해 처음 소개되었다.³⁰⁾ 이 기법에서는 절리면을 수평으로 잘라서 절리면 등고선을 만들면 "섬(islands)"과 "호(lakes)"의 두 가지 종류의 형상으로 나뉘인다(Fig. 7, 8). 각 섬에 할당된 둘레와 면적을 구하기 위해 각각의 섬들이 측정된다. 그러면 이 파라미터들이 면적 대 둘레로 로그-로그 용지에 그려지고, 그려진 선의 기울기에 의해서 프랙탈 차원이 결정된다:

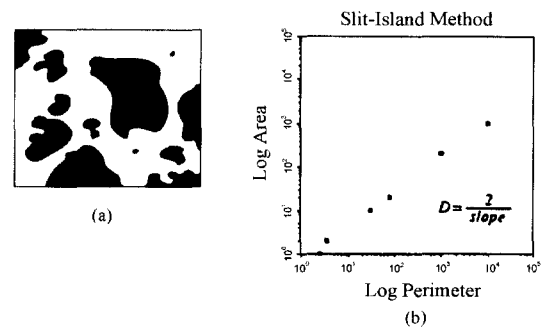


Fig. 7. Slit-island method; (a) Dark regions illustrate islands in a horizontal cut through the surface, (b) example of the data plot.¹⁶⁾

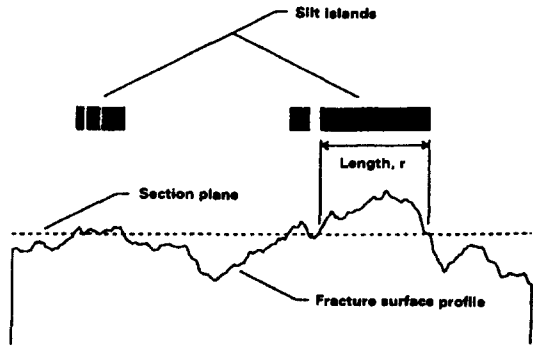


Fig. 8. Illustration of slit-island analysis applied to a surface profile.³¹⁾

$$D = \frac{2}{\text{slope}} \quad (19)$$

3.1.6 배리오그램법(Variogram Method)

프랙탈 차원을 측정하는 배리오그램법은 공간 데이터 집합의 기하통계적인 분석이다.³²⁻³⁶⁾ 절리면 형상의 기하 통계학적 해석은 절리면의 거칠기와 높낮이의 공간적인 상관관계 모두를 묘사할 수 있다. 변수 z의 공간적인 분포는 반-분산 함수(semi-variance function)의 배리오그램으로 특성화 될 수 있다. 단면선을 따르는 배열 z(x_i)에 대해 반-분산 v는 다음과 같이 계산될 수 있다:

$$v(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (20)$$

여기서, v는 반-분산, Z(x_i)는 단면선을 따르는 배열, N은 거리 h로 분리된 점의 쌍의 개수이다.^{16,23)}

추정된 반-분산을 h에 대해서 그리면, 일정한 값(sill)에 접근하고 h가 증가함에 따라 증가한다. 추정된 반-분산의 로그값이 h 로그값의 함수로 그려진다면(Fig. 9), 배리오그램 추세선의 기울기는 프랙탈 차원과 다음과 같은 관계가 있다.

$$D = 2 - \frac{\text{slope}}{2} \quad (21)$$

배리오그램법의 문제점은 샘플링 간격 h를 어떻게 선택하는가에 따라 프랙탈 차원 값이 달라진다는 것이다.¹⁶⁾

3.1.7 파워스펙트럼법(Power Spectral Method)

이 기법은 분할자법 이후 프랙탈 차원을 측정하는 가장 대중적인 방법이 되었다.¹⁶⁾ 파워스펙트럼밀도함수(power spectral density function)는 랜덤 데이터를 서

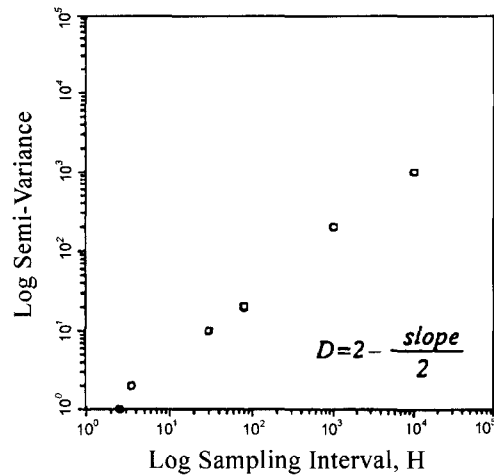


Fig. 9. Variogram method; compute semi-variance as a function of sampling interval and plot on a log-log graph.¹⁶⁾

로 다른 진동수의 제곱평균값의 스펙트럼밀도의 향으로 나타난다.³⁷⁾ 절리면의 단면선을 Fast Fourier Transform (FFT)을 수행하여 각 진동수에서 진폭을 제공하고 단면선 길이로 정규화 하면 파워스펙트럼밀도를 계산할 수 있다.¹⁶⁾

스펙트럼 밀도 대 공간 진동수를 로그-로그 용지에 그리고, 이 그래프에 맞는 직선을 구하면 D = (5-slope)/2로 프랙탈 차원을 계산할 수 있다(Fig. 10).^{16,28)}

스펙트럼법의 문제점은 대단한 양의 복잡한 데이터 사전처리과정이 필요하고, 추세선의 오차가 로그-로그 스펙트럼 그래프에서 아주 클 수 있다는 점이다.^{16,31)}

3.1.8 크기 분포법 (Size Distribution Method)

이 접근법은 프랙탈 이론을 크기 분포 또는 히스토그램에 적용하는 것이다.³⁹⁻⁴⁶⁾ 어떤 형상(광물입자, 동굴 등)의 크기(길이, 면적, 체적, 혹은 어떤 물리적 화학적 측정치)는 크기 등급(size classes)에 따라 분류된다. 각 크기 범주(category)보다 더 큰 객체의 수가 로그-로그 그래프(개수 대 크기등급)로 그려진다.¹⁶⁾

x축 파라미터가 면적이고 데이터가 직선을 따라 찍어진다면, 그 선의 기울기가 프랙탈 차원과 다음과 같은 관계를 갖는다(Fig. 11).¹⁶⁾:

$$D = -2(\text{slope}) \quad (22)$$

배리오그램법의 문제점과 비슷한 이 방법의 문제점은 사이즈 등급 간격의 선택이 프랙탈 차원 값에 영향을 준

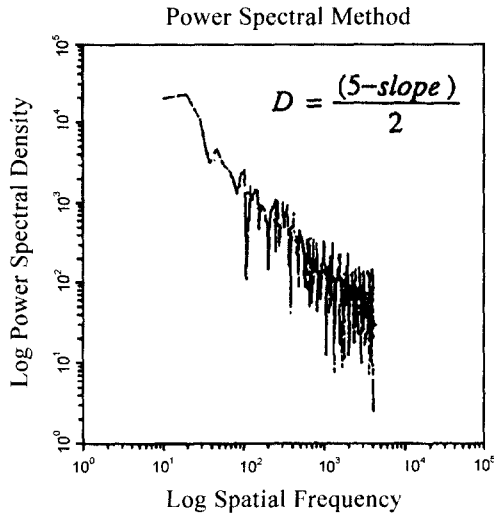


Fig. 10. Spectral method; compute spectral density of the profile as a function of frequency and plot on a log-log graph.¹⁶⁾

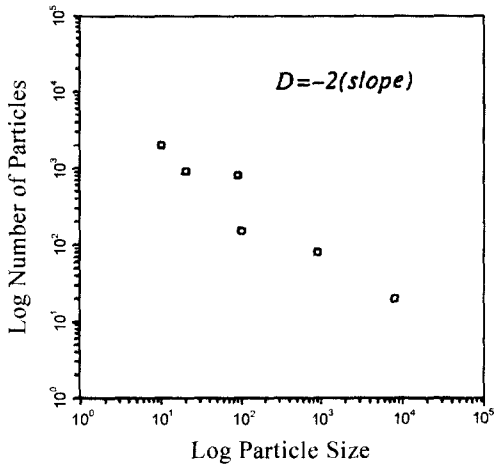


Fig. 11. Size distribution method; determine the size distribution and plot the log of the size class versus the log of the number of counted particles which are greater than the size class. Size is an area.¹⁶⁾

다는 것이다.¹⁶⁾

3.2 프랙탈 측정 기법들 간의 비교

Mandelbrot가 프랙탈 차원에 대한 두 권의 책^{17,29)}을 발간한 이후 천연 표면에 대한 프랙탈 차원의 측정에 관한 다수의 논문들이 쏟아져 나왔다.

Table 1은 본 연구에서 인용한 7가지 각 방법에 관련된 논문과 적용대상, 그리고 프랙탈 차원 값을 요약

정리한 것이다. 프랙탈 차원은 위상기하학적 혹은 유클리드 기하학적 차원과 프랙탈 차원간의 차이를 차원의 증분으로 표시하여 나타내었다.¹⁶⁾ 평평하지 않은 표면의 프랙탈 차원은 2보다 크고 3보다 작다. 만약 차원이 2.4인 경우 이것의 단면선의 프랙탈 차원은 1.4이고 프랙탈 차원의 증분 Dinc는 0.4가 된다.⁴⁷⁾ Table 2는 7가지 기법에 대한 공식과 그래프 파라미터를 요약한 것이다.

같은 절리면을 두고 분할자법으로 측정된 대부분의 프랙탈 차원은 기타의 방법으로 측정된 것보다 더 낮다. 분할자법은 1에 가까운 프랙탈 차원이 자주 나타난다. 낮은 차원을 나타내는 이유는 절리면의 스케일이 수평방향과 수직방향에 따라 다르고, 수평해상도가 교차길이에 가까울 때, 프랙탈 차원 증분이 0에 가까워지기 때문이다.

같은 절리면을 두고 스펙트럼법으로 측정된 대부분의 프랙탈 차원은 기타의 방법으로 측정된 것보다 더 높은 차원을 나타낸다. 스펙트럼법은 적분변환을 사용한 반면 분할자법은 직선으로 곡선 조각을 근사하는 일종의 미분변환을 사용한다. 적분측정법과 미분측정법간의 차이가 두 방법간의 차이를 가져온다고 추측된다.

박스집계법과 슬릿-아일랜드법에 의한 프랙탈 차원은 분할자법과 비교한다면 더 높은 차원을 나타내고, 스펙트럼법과 비교한다면 더 낮은 차원을 나타낸다. 박스법과 슬릿-아일랜드법은 모두 수평단면을 사용하기 때문에 이 두 가지 방법은 비교가 가능하다. 기본적인 차이는 슬릿-아일랜드법은 형상의 모질단의 크기 분포에 자기상사를 반영한 반면, 박스집계법은 서로 다른 스케일에서 모든 형상을 측정해야 한다는 점이다. Table 3은 여러 전문가들에 의해 여러 가지 표면을 4가지 측정방법에 의해 구한 프랙탈 차원을 비교 정리한 것이다.

Table 4는 Barton⁴⁾이 제안한 절리거칠계수에 해당하는 곡선을 각 전문가들이 제안한 방법에 의해 측정된 프랙탈 차원을 비교한 것이다. Lee *et al.*⁶⁸⁾과 Turk *et al.*⁶⁹⁾는 분할자법을 이용하여 ISRM 표준 절리 단면선 (Fig. 1)의 프랙탈 차원을 결정하였다.

4. 절리거칠계수의 결정

절리면의 JRC를 결정하는데는 다음 2가지 방법이 있다¹⁾:

- 측정된 거칠단면선을 ISRM의 표준 단면선과 비교하여 절리거칠계수를 추정하는 것이다. 그러나 JRC 값을

Table 1. Fractal dimensions measure by 7 methods (for surfaces $D = 2 + F.D.Incr.$).^[6]

Method	Researcher	Application	F. D. Increment	Ref.
Divider	Norton et al., 1989	Granite Mountain Profile	0.15 to 0.28	[48]
	Snow, 1989	Stream Channels	0.04 to 0.38	[49]
	Aviles et al., 1987	San Andreas Fault Trace	0.0008 to 0.1910	[50]
	Brown, 1987	Rock Fracture Surface	0.50	[51]
	Carr, 1989	Rock Fracture Surface	0.0000 to 0.0315	[52]
	Miller et al., 1990	Rock Fracture Surface	0.580 to 0.261	[53]
	Underwood et al., 1986	Steel Fracture	0.351 to 0.512	[54]
	Akbarieh et al., 1989	Erosion of Ca-oxal, crystals	0.025 to 0.106	[55]
	Kaye, 1986	Carbon particles	0.32	[56]
	Kaye, 1986	unpolished Cu surface	0.47	[56]
Kaye, 1986	polished Cu surface	0.00	[56]	
Box	Barton et al., 1985	Rock Fracture Network	0.12 to 0.16	[25]
	La Pointe, 1988	Rock Fracture Network	0.37 to 0.69	[26]
	Miller et al., 1990	Rock Fracture Profile	0.041 to 0.159	[53]
	Hirata, 1989	Japan Fault Network	0.05 to 0.60	[24]
	Okuba and Aki, 1987	San Andreas Fault Trace	0.2 to 0.4	[28]
	Sreenivasan et al., 1989	Turbulent Flow Interface	0.35	[57]
	Langford et al., 1989	Epoxy Fracture	0.35	[58]
	Langford et al., 1989	MgO Fracture	0.16	[58]
Triangle	Denley, 1990	Gold Film Surface	0.04 to 0.46	[59]
Slit-island	Mecholsky et al., 1988	Chert Fracture	0.15 to 0.32	[60]
	Schlueter et al., 1991	Sandstone Pores	0.31 to 0.40	[61]
	Schlueter et al., 1991	Limestone Pores	0.20	[61]
	Huang et al., 1990	Steel Fracture Surface (lakes)	0.20 to 0.30	[62]
	Huang et al., 1990	Steel Fracture Surface (islands)	0.33 to 0.40	[62]
	Mandelbrot et al., 1984	Steel Fracture Surface	0.28	[63]
	Pande et al., 1987	Titanium Fracture Surface	0.32	[64]
	Langford et al., 1989	Epoxy Fracture Surface	0.32	[58]
Spectral	Gilbert, 1989	Sierra Nevada Topography	(-).835 to 0.47100	[38]
	Brown et al., 1985	Rock fracture	0.26 to 0.68	[65]
	Carr, 1989	Rock Fracture	(-).880 to 0.46700	[52]
	Miller et al., 1990	Rock Fracture	0.124 to 0.383	[53]
	Mandelbrot et al., 1984	Steel Fracture	0.26	[63]
	Langford et al., 1989	Photon Emission from Epoxy Fracture	0.45	[58]
Variogram	Burrough, 1989	Soil pH Variation	0.6 to 0.8	[66]
	Burrough, 1989	Soil Na Variation	0.7 to 0.9	[66]
	Burrough, 1989	Soil Elec. Resist. Variation	0.4 to 0.6	[66]
	Armstrong, 1986	Soil Microtopography	0.64 to 0.90	[34]
Distribution	Curl, 1986	Cave Length, Volume	0.4 to 0.8	[41]
	Krohn, 1988	Sandstone Pores	0.49 to 0.89	[42]
	Katz, et al., 1985	Sandstone Pores	0.57 to 0.87	[67]
	Krohn, 1988	Carbonate and Shale Pores	0.27 to 0.75	[43]
	Avnir et al., 1985	Carbonate Particles	0.11 to 0.97	[40]
	Avnir et al., 1985	Soil Particles	0.43 to 0.99	[40]

Table 2. Fractal measurements by 7 methods: Formulae.^[6]

Method	Log X-axis	Log Y-axis	Formula for D
Divider	Ruler length	Sum of ruler lengths	$D = 1 - (\text{slope})$
Box	1/Box side	Total number of boxes	$D = (\text{slope})$
Triangle	Grid spacing	Total area/mim. area	$D = 2 - (\text{slope})$
Slit-island	Perimeter	Area	$D = 2 / (\text{slope})$
Spectral	Frequency	Spectral density	$D = (5-\text{slope}) / 2$
Variogram	Distance between measurements,(h)	Semi-variance, v(h)	$D = (4-\text{slope}) / 2$
Distribution	Number above cutoff size	Area	$D = 2 * (\text{slope})$

Table 3. The application and fractal dimension increments of the fractal measurements[16].

Application	Divider	Box	Slit-island	Power Spectral	Reference
San Andreas Fault Traces	0.008-0.019	0.120-0.430	-	0.100-0.500	[28], [50], [74]
Rock Fracture	0.410-0.500	-	-	0.510	[75]
Joints in Welded Tuff	0.000-0.020	-	-	0.500	[52]
Steel Fracture (vert. section)	0.105-0.155	0.330-0.395	-	-	[62]
Steel Fracture (sec. electron)	0.180-0.310	0.330-0.395	-	-	[62]
Epoxy Fracture	-	0.350	0.320	0.450	[62]
Steel Fracture	-	-	0.280	0.260	[63]
Rock Fracture	0.058-0.261	0.041-0.150	-	0.124-0.383	[53]
Titanium Fracture	0.099-0.126	-	0.320	-	[64]

Table 4. Fractal dimension of the ISRM standard roughness profile.¹³⁾

JRC	Lee et al.[68]	Turk et al.[69]	Seidel et al.[13]
0 - 2	1.000446	1	1.00009
2 - 4	1.001687	1.0019	1.00054
4 - 6	1.002805	1.0027	1.00072
6 - 8	1.003974	1.0049	1.0014
8 - 10	1.004413	1.0054	1.0018
10 - 12	1.005641	1.0045	1.004
12 - 14	1.007109	1.0077	1.0053
14 - 16	1.008055	1.007	1.0081
16 - 18	1.009584	1.0104	1.0096
18 - 20	1.013435	1.017	1.012

시각적으로 비교하여 추정하는 것은 너무 주관적이기 때문에 신뢰할 수 없다.⁷⁰⁾

• JRC 값을 다음 식들과 같이 실험적 통계적 관계식을 이용하여 거칠차원의 함수로 추정하는 것이다.

여기서 각 식의 D는 프랙탈차원을 나타낸다.

Wakabayashi and Fukushige (1995)⁷¹⁾;

$$JRC = \sqrt{\frac{D-1}{4.413 \times 10^{-5}}} \quad (23)$$

Xie and Pariseau (1995)⁷²⁾;

$$JRC = 85.2671(D-1)^{0.5679} \quad (24)$$

Tse and Cruden(1979)⁷³⁾;

$$JRC = 32.20 + 32.47 \log Z_2 \quad (25)$$

여기서, Z_2 는 기울기 통계치 (단면선의 1차 미분의 RMS, 식 (3) 참조). Z_2 파라미터는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{MD_x^2} \sum_{i=1}^M (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (26)$$

여기서, M은 돌출부(asperity) 높이가 측정된 구간들의 수, D_x 는 표본추출 구간 (lag), y는 돌출부들의 높이를 나타낸다(Fig. 12).

또한, 파라미터 SF(structure function)와 JRC의 관계식이 개발되었다.⁷³⁾

$$JRC = 37.28 + 16.58 \log SF \quad (27)$$

여기서, SF는 이미 언급한 바와 같이 식 (8)로 정의된다.⁷³⁾

Lee et al. (1990)⁶⁸⁾;

$$JRC = -0.87804 + 37.7844 \left(\frac{D-1}{0.0015} \right) - 16.9304 \left(\frac{D-1}{0.0015} \right)^2 \quad (28)$$

여기서, D는 프랙탈 차원

Barton and Bandis(1982)는 거칠기의 스케일 종속성을 발견하였다. 그들은 실험적으로 얻은 스케일에 따른 JRC의 오차보정식을 다음과 같이 발표하였다⁷⁶⁾:

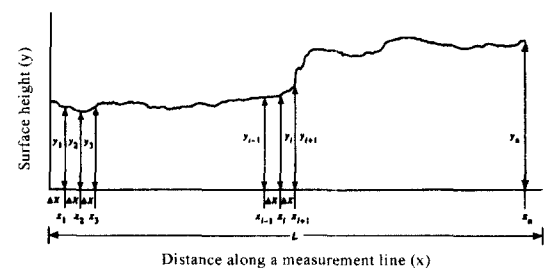


Fig. 12. The diagram used to define statistical parameters for a joint surface profile.⁶⁾

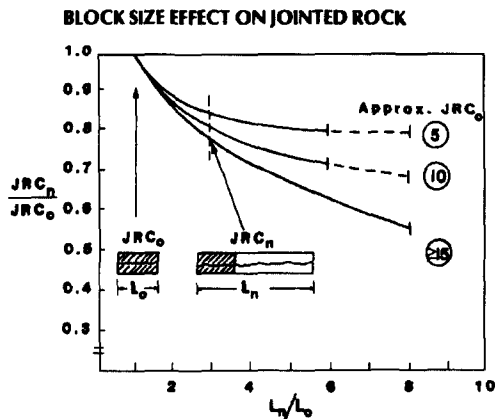


Fig. 13. Parameters of Eq.(29)⁷⁶⁾

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02JRC_0} \quad (29)$$

여기서, 파라미터들에 대한 설명은 Fig. 13에 도시하였다.

Williams⁷⁷⁾는 절리 굴곡면 각의 표준편차와 JRC간의 상관관계를 인지하였다. 그는 해석을 통하여 ISRM 표준 거 단면선의 다음과 같은 경험 관계식을 제안하였다:

$$JRC = 0.83s_\theta \quad (30)$$

여기서, s_θ 는 굴곡면 각들의 표준편차

5. 결 론

Barton and Choubey⁴⁾은 절리 거칠기 계수(JRC)의 함의로 거칠기를 나타내었다. JRC는 들뜸각을 실험적으로 구하기 위해 사용되는 파라미터이다. 많은 전문가들이 통계적 방법에 의해서 절리의 마찰거동과 절리면의 거칠기 사이의 관계를 알아내려고 노력하였다.

최근, 다수의 연구자들은 천연절리의 단면에 프랙탈 기하의 개념을 적용해 왔다. 프랙탈 차원은 절리 거칠기를 정량화 하는데 유용한 파라미터임이 입증되었다.

거친 절리면의 프랙탈 차원을 측정하는 많은 방법들이 있다. 분할자법, 박스집계법, 슬릿-아일랜드법, 칸토어법, 삼각형법, 배리오그램법, 스펙트럼법 및 사이즈분포법 등이 그것이다. 프랙탈 차원은 여러 측정방법들 내에서도나 한 가지 측정 기법 내에서도 시스템 적으로 변한다. 절리면의 프랙탈 차원을 측정하는데 가장 유용하고 대중적

인 방법은 분할자법, 배리오그램법 및 스펙트럼법이다.

현재까지 발표된 절리면 거칠기의 정량화 방법에는 나름대로의 문제점들을 내포하고 있다. 절리면 측정의 어려움, 데이터를 처리하는 과정에서 나타나는 복잡함과 불확실성의 증가, 실험 데이터와의 불일치 등이 그것이다. 이 논문이 보다 간단하고 합리적인 절리면 정량화 기법을 개발하기 위한 향후 연구에 기초자료가 되었으면 한다.

사 사

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구비에 의해 이루어진 연구결과로서 관련자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

참 고 문 헌

1. Seidel, J. P., Haberfield, C. M., 1995, The Use of Fractal Geometry in a Joint Shear Model, Mechanics of Jointed and Faulted Rock, A. A. Balkema., Rotterdam, 529-534.
2. Feker, E., Rengers, N., 1971, Measurement of Large Scale Roughness of Rock Planes by Means of Profilograph and Geological Compass, Rock fracture, Proc. Int. Symp. Rock Mech., Nancy.
3. Barton, N. R., 1973, Review of a New Shear Strength Criterion for Rock Joints, Engineering Geology, Elsevier, 7, 287-332.
4. Barton, N., Choubey, V., 1977, The Shear Strength of Rock Joints in the Theory and Practice, Rock Mechanics, Springer, Vinna, NGI-Publ. 119, 1/2, 1-54.
5. ISRM, 1978, Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Pergamon Press Ltd., 15, 319-368.
6. Kulatilake, P. H. S. W., Shou, g., Huang, T. H., Morgan, R. M., 1995, New Peak Shear Strength Criteria for Anisotropic Rock Joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Elsevier Science Ltd., 32.7, 673-697.
7. Am. Standards Assoc., 1995, Surface Roughness, Waviness and Lay, ASA B46.1.
8. Myers, N. O., 1962, Characteristics of Surface Roughness, Wear 5, 182-189.
9. Krahn J., 1974, Rock Slope Stability, Ph.D. Thesis. Univ. of Alberta, Edmonton, Alberta.
10. Moore D. F., 1969, A History of Research on Surface Texture Effects, Wear 13, 381-412.
11. Bendat, J. S., Piersol, A. G., 1971, Random Data Analysis and Measurement Procedures, Wiley Interscience, Toronto.
12. Wu, T. H., Ali, E. M., 1978, Statistical representation

- of Joint Roughness, *Int. J. Rock Mech. Min. sci. & Geomech. Abstr.* 15, 263-266.
13. Seidel, J. P., Haberfield, C. M., 1995, Towards and Understanding of Joint Roughness, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Springer-Verlag, 28.2, 69-92.
 14. Sayles, R. S., Thomas, R. R., 1977, The Spatial Representation of Surface Roughness by Means of the Structure Functions, a Practical Alternative to Correlation, *Wear* 42, 263-276.
 15. 야후백과사전, 한메 파스칼 대백과 사전", <http://kr.encycl.yahoo.com/search.html?word=fractal>, 2000.
 16. Cox, B. L., Wang, J. S. Y., 1993, Fractal Surfaces : Measurement and Applications in the Earth Sciences, *symmetry: culture and science*, 4.3, 243-283.
 17. Mandelbrot, B. B., 1983, *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, New York, NY.
 18. Mandelbrot, B. B., 1986, Self-affine Fractal Sets, I: The Basic Fractal Dimensions, In: Pietronero, L. and Tosatti, E., eds, *Fractals in Physics*, North Holland: Elsevier Science Publishers, 3-15.
 19. McWilliams, P. C., Kerkering, J. C., Miller, S. M., 1993, Estimation of Shear Strength using Fractals as a Measure of Rock Fracture Roughness, *Bureau of Mines RI 9447*.
 20. Andrie, R., Abrahams, A. D., 1989, Fractal Techniques and the Surface Roughness of Talus Slopes, *Earth Surface Processes and Landforms* 14, 197-209.
 21. Chesters, S., Wen, H. Y., Lundin, M., Kasper, G., 1989, Fractal Based Characterization of Surface Texture, *Appl. Surface Sci.* 40, 185-192.
 22. Recharadson, L. F., 1961, The Problem of Contiguity: An Appendix of Statistics of Deadly Quarrels, *General systems Yearbook*, 6, 139-118.
 23. Vuopio, J., P II, J., 1997, Characterization of the Rock Joint Surface, a Contribution to DECOVALEX II Task 3 - Constitutive Relationships of Rock Joints, STUK-YTO-TR138, STUK, Dec.
 24. Hirata, T., 1989, Fractal Dimension of Fault Systems in Japan: Fractal Structure in Rock Fracture Geometry at Various Scales, *Pure and Applied Geophysics*, 131(1/2), 157-170.
 25. Barton, C. C., Larsen, E., 1985, Fractal Geometry of Two-dimensional Fracture Networks at Yucca Mountain, Southwestern Nevada, *Proceedings of the International Symposium on Fundamentals Rock Joints*, 15-20 September, 1985, 77-84.
 26. La Pointe, P. R., 1988, A Method to Characterize Fracture Density and Connectivity through Fractal Geometry, *International Journal of Rock Mechanics, Mineralogical Science and Geomechanics Abstracts*, 25(6), 421-429.
 27. Sreenivasan, K. R., Prasad, R. R., Meneveau, C., Ramshankar, R., 1989, The Fractal Geometry of Interfaces and the Multifractal Distribution of Dissipation in Fully Turbulent Flows, *Pure and Applied Geophysics*, 131(1/2), 43-60.
 28. Okuba, P. G., Aki, K., 1987, Fractal Geometry in the San Andreas Fault System, *Journal of Geophysical Research*, 92 (B1), 345-355.
 29. Mandelbrot, B. B., 1977, *Fractals, Form, Chance and dimension*, W. H. Freeman, New York.
 30. Mendelbrot, B. B., Passoja, D. E., Paullay, A. J., 1984, Fractal Character of Fracture Surfaces of Metals, *Nature*, 308, 721-722.
 31. Piggott, A. R., Elsworth, D., 1995, A Comparison of Methods of Characterizing Fracture Surface Roughness, *Fractured and Jointed Rock Masses*, A. A. Balkema, Rotterdam, 471-477.
 32. Burrough, P. A., 1983, Multiscale Sources of Spatial Variation in Soil, I: The Application of Fractal Concepts to Nested Levels of Soil Variation, *Journal of Soil Science*, 34, 577-597.
 33. Burrough, P. A., 1983, Multiscale Sources of Spatial Variation in Soil, II: A Non-Brownian Fractal Model and its Application in Soil Survey, *Journal of Soil Science*, 34, 599-602.
 34. Armstrong, A. C., 1986, On the Fractal Dimensions of Some Transient Soil Properties, *Journal of Soil Science*, 37, 641-652.
 35. Wang, J. S. Y., Narasimhan, T. N., Schoiz, C. H., 1988, Aperture Correlation of a Fractal Fracture, *Journal of Geophysical Research*, 93(B3), 2216-2224.
 36. Klinkenberg, B., Goodchild, M. F., 1992, The Fractal Properties of Topography: A Comparison of Methods, *Earth Surface Processes and Landforms*, 17, 217-234.
 37. Bendat, J. S., Piersol, A. G., 1966, *Measurement and Analysis of Random Data*, New York: John Wiley and sons, 390.
 38. Gilbert, L. E., 1989, Are Topographic Data Sets Fractal?, *Pure and Applied Geophysics*, 131(1/2), 241-254.
 39. Turcotte, D. L., 1992, *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge: Cambridge University Press.
 40. Avnir, D., Farin, D., Pfeifer, P., 1985, Surface Geometric Irregularity of Particulate Materials: The Fractal Approach, *Journal of Colloid and Interface Science*, 103(1), 112-123.
 41. Curl, R. L., 1986, Fractal Dimensions and Geometries of Caves, *Mathematical Geology*, 18(8), 765-783.
 42. Krohn, C. E., 1988, Sandstone Fractal and Euclidean Pore Volume distributions, *Journal of Geophysical Research*, 93(B4), 3286-3296.
 43. Krohn, C. E., 1988, Fractal Measurements of Sandstones, Shales, and Carbonates, *Journal of Geophysical Research*, 93(B4), 3297-3305.
 44. Rieu, M., Sposito, G., 1991, Fractal Fragmentation, Soil Porosity, and Soil Water Properties, I: Theory, *Soil Science Society of America Journal*, 55, 1231-1238.
 45. Rieu, M., Sposito, G., 1991, Fractal Fragmentation, Soil Porosity, and Soil Water Properties, II: Applications, *Soil Science Society of America Journal*, 55, 1239-1244.

46. Turcotte, D. L., 1992, *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge: Cambridge University Press.
47. Peitgen, H. O., Saupe, D., eds., 1988, *The Science of Fractal Images*, New York: Springer Verlag.
48. Norton, D., Sorenson, S., 1989, Variations in Geometric Measures of Topographic Surfaces Underlain by Fractured Granitic Plutons, *Pure and Applied Geophysics*, 131(1/2), 77-97.
49. Snow, R. S., 1989, Fractal Sinuosity of Stream Channels, *Pure and Applied Geophysics*, 131(1/2), 99-109.
50. Aviles, C. A., Scholz, C. H., Boatwright, J., 1987, Fractal Analysis Applied to Characteristic Segments of the San Andreas Fault, *Journal of Geophysical Research*, 92(B1), 331-344.
51. Brown, S. R., 1987, A Note on the Description of Surface Roughness using Fractal Dimension, *Geophysical Research Letters*, 14(11), 1095-1098.
52. Carr, J. R., 1989, Fractal Characterization and Joint Surface Roughness in Welded Tuff at Yucca Mountain, Nevada, In: Khair, A. W., ed., *Proceedings of the 30th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, Morgan-town, West Virginia, Rotterdam: Balkema, 193-200.
53. Miller, S. M., McWilliams, P. C., Kerkering, J. C., 1990, Ambiguities in Estimating Fractal dimensions of Rock Fracture Surfaces, In: Hustrulid and Johnson, eds., *Rock Mechanics: Contributions and challenges* Rotterdam: Balkema.
54. Underwood, E. E., Banerji, K., 1986, Fractals in Fractography, *Materials Science and Engineering*, 80, 1-14.
55. Akbarieh, M., Tawashi, R., 1989, Surface Studies of Calcium Oxalate Dihydrate Single Crystals during Dissolution in the Presence of Stone-formers' Urine, *Scanning Microscopy*, 3(1), 139-146.
56. Kaye, B. H., 1986, The Description of Two-dimensional Rugged Boundaries in Fineparticle Science by Means of Fractal Dimensions, *Powder Technology*, 46, 245-254.
57. Screenivasan, K. R., Prasad, R. R., Meneveau, C., Ramshankar, R., 1989, The Fractal Geometry of Interfaces and the Multifractal Distribution of dissipation in Fully Turbulent Flows, *Pure and Applied Geophysics*, 131(1/2), 43-60.
58. Langford, S. C., Zhenyi, M., Dickinson, J. T., Photon Emission as a Probe of Chaotic Processes Accompanying Fracture, *Journal of Materials Research*, 4(5), 1272-1279.
59. Denley, D. R., 1990, Practical Applications of Scanning tunnelling Microscopy, *Ultramicroscop.*, 33, 83-92.
60. Mecholsky, J. J., Mackin, t. J., 1988, Fractal Analysis of Fracture in Ocala Chert, *Journal of Materials Science Letters*, 7, 1145-1147.
61. Schlueter, E. M., Zimmerman, R. W., Cook, N. G. W., witherspoon, P. A., 1991, Fractal Dimensions of Pores in Sedimentary Rocks and Relationship to Permeability, LBL Report #LBL-30853.
62. Huang, Z. H., Tian, J. F., Wang, Z. G., 1990, A Study of the Slit Island Analysis as a Method for Measuring Fractal dimension of Fractured Surface, *Scripta Metallurgica et Material*, 24, 967-972.
63. Mandelbrot, B. B., Passoja, D. E., Paullay, A. J., 1984, Fractal Character of Fracture Surfaces of Metals, *Nature*, 308, 721-722.
64. Pande, C. S., Smith, S., Richards, L. R., 1987, Fractal Characteristics of Fractured Surfaces, *Journal of Materials Science Letters*, 6, 295-297.
65. Brown, S. R., Scholz, C. H., 1985, Broad Bandwidth Study of the Topography of Natural Rock Surfaces, *Journal of geophysical Research*, 90 (B14), 12575-12582.
66. Burrough, P. A., 1989, Fractals and Geochemistry, In: Avnir, D., ed., *The Fractal Approach to Heterogeneous Chemistry*, New York: John Wiley and Sons, 383-440.
67. Katz, A. J., Thompson, A. H., 1985, Fractal Sandstone Pores: Implications for Conductivity and Pore Formation, *Physical Review Letters*, 549120, 1325.
68. 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. Sci. & Geomech. Abstr.*, Pergamon Press plc, 27(6), 453-464.
69. Turk, N., Greg, M. J., Dearman, W. R., Amin, F. F., 1987, Characterization of Rock Joint Surfaces by Fractal Dimension, In: *Proc., 28th U.S. Symp. on rock Mechanics*, Tucson, Balkema, Rotterdam, 1223-1236.
70. Maerz, N. H., Franklin, J. A., Bennett, C. P., 1990, Joint Roughness Measurement using Shadow Profilometry, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & geomech. Abstr.* 27:5, Pergamon Press, 329-343.
71. Wakabayashi, N., Fukushige, I., 1995, Experimental Study on the Relation between Fractal Dimension and Shear Strength, Fractured and Jointed Rock Masses, Myer, Kook, Goodman & Tsang (eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 54105917, 119-124.
72. Xie, H., Pariseau, W. G., 1995, Fractal Estimation of Joint Roughness Coefficients, Fractured and Jointed Rock Masses, Myer, Cook, Goodman & Tsang (eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 54105917.
73. Tse, R., Cruden, D. M., 1979, Estimating Joint Roughness Coefficients, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.*, Pergamon Press Ltd., 16(5), 303-307.
74. Scholz, C. H., Aviles, C. A., 1986, The Fractal geometry of Faults and Faulting, In: Das, S. Boatwright, J., and Scholz, C. H., eds., *Earthquake source Mechanics*, Monography 37, Washington, D.C.: American Geophysics Union, 147-155.
75. Brown, S. R., 1987, A Note on the Description of Surface Roughness using Fractal Dimension, *Geophysical Research Letters*, 14(11), 1095-1098.
76. Barton, N. R., Bandis, S., 1982, Effect of the Block Size on the Shear Behaviour of Jointed Rock, 23rd

U.S. Symp. on Rock Mech. Berkeley, 739-760.
77. Williams, A. F., 1980, The Design and Performance

of Piles Socketed into Weak Rock, PhD Dissertation,
Dept. Civil Engng., Monash University.

박 병 운



1982년 서울대학교 공과대학, 원자
핵공학과, 공학사
1985년 서울대학교 대학원 토목공
학과, 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공
학과, 공학박사

Tel : 042-868-8376

E-mail : bypark@kaeri.re.kr

현 재 한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구팀, 선임
연구원

권 상 기



1987년 서울대학교 공과대학, 자원
공학과, 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공
학과, 공학석사
1996년 미국 Missouri-Rolla 대학
교 Mining Engineering,
공학박사

Tel : 042-868-2632

E-mail : kwonsk@kaeri.re.kr

현 재 한국원자력연구소 고준위폐기물 처분기술개발팀,
선임연구원
