

## Fractal 차원과 Variogram을 이용한 암반 불연속면의 굴곡도 특성 서술

이 영 훈\*

### Surface Roughness Characterization of Rock Masses Using the Fractal Dimension and the Variogram

Young-Hoon Lee\*

**ABSTRACT:** There has been considerable research dealing with the influence of surface roughness along surfaces of rock discontinuities in relation to the peak shear strength of rock masses. Concepts accepted recently for measuring such strength include estimation of a roughness coefficient such as developed by Barton's studies. The method for estimation the Joint Roughness Coefficient (JRC) value of a measured roughness profile is subjective. The aim of this research is to estimate the JRC value of the roughness of a surface profile in a rock mass system using an objective method. The study of roughness of surfaces has included measurement of fractal geometric characteristics. Once the irregularity of the surface has been described by the fractal dimension, the spatial variation of the surface irregularities can be described using variogram and drift analysis. An empirical relationships between the roughness profiles of selected JRC ranges and their fractal dimension with variogram and drift were derived. The application of analyses of fractal dimension, variogram and drift was novel for the analysis of roughness profiles. Also, an empirical equation was applied to experimental data.

## 서 론

불연속면은 암반의 변형 특성에 중요한 영향을 갖는다. 불연속면의 특성은 면의 방향, 연장성, 평평한 정도, 굴곡도, 암반벽의 강도 등을 포함한다. 불연속면은 일반적으로 몇개의 일정한 방향으로 나열되어 있으며 이는 다른 종류의 암반에서도 마찬가지로 현상을 보이고 있다. 이러한 주제는 통계적으로 또는 그래픽으로 적절히 평가되어질 수 있다.

암석의 마찰각, 팽창성, 최대전단강도 (peak shear strength)에 영향을 주는 굴곡도 (roughness)는 작은 스케일 또는 큰 스케일에 따라 평평한 정도에서 언급한다 (Patton, 1966, Goodman, 1976). 일반적으로 불연속면의 굴곡도는 파형도 (waviness)와 고저도 (unevenness)로 특성화할 수 있다. 파형도는 큰 스케일에서의 파도모양이며, 이는 너무 커서 전단될 수 없기 때문에 전단변위 (shear displacement) 동안에 팽창을 일으킨다. 한편 고저도는 불연속면의 벽이 강하거나 주어진 응력이 약하지 않는 한 전단변위

동안에 손상되는 경향이 있는 작은 스케일의 굴곡도이다. 실제적으로 파형도는 평균 불연속면과 관계된 전단 변위의 초기 영향에 미친다. 한편 고저도는 실험실 또는 중간 스케일의 현장에서 직접전단시험을 위한 시편 크기의 전단강도에 영향을 미친다.

면 굴곡도의 영향에 대한 많은 연구가 있었다. 많은 굴곡도의 연구 목적은 궁극적으로 전단 강도와 팽창성의 평가 또는 계산을 위한 것이다. Patton (1966)은 외전상점착력 (i)가 표면이 서로 겹쳐진 굴곡에 의한 것을 모델 시험에서 보였다. 이를 위해서 일차와 이차의 굴곡도를 측정해야 한다. 일차 투영은 불연속면의 주요 파도모양과 일치하며, 이차 투영은 표면의 작은 용기와 잔물결 모양에 해당된다.

이후의 연구 중에 Barton (1973)은 Patton의 결과가 사면에서 층리면을 따라 작용하는 수직 응력과 관계가 있음을 보였다. Barton의 본래 연구는 지극히 낮은 수직 응력하에서 나온 것이고, 방정식은 범위  $0.01 < \sigma/\sigma_v < 0.3$ 에서 대부분 적용되어진다. 여기서  $\sigma$ 는 수직 응력이고  $\sigma_v$ 는 일축압축강도이다. 대부분의 암석의 사면안정에서 나타나는 응력 수준은 이 범위내이기 때문에 Barton의 방정식은

\* 연세대학교 이과대학 지질학과 (Department of Geology, College of Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea)

암석사면 공학에서 매우 유용하게 쓰이고 있다 (Hoek, 1981). 그러나 측정된 굴곡도 단면의 JRC (Joint Roughness Coefficient, 절리면 굴곡계수)를 평가하는 이 방법은 분명하게 주관적이다. 단면을 분석하는 객관적인 방법은 나침판과 원형 경사계 (disc-clinometer) 방법과 사진측량 (photogrammetric) 방법이 있다. 그러나 이 방법들 조차도 표면의 굴곡도에 대해 고유치를 주지는 못하는 점이 지적된다.

비교적 최근에 Mandelbrot (1983)은 특별한 기하학적 특성을 가지고 있는 일종의 면 곡선 (fractal curves)에 대해 언급하였다. 더 자세히 말하면 어떤 곡선의 측정된 전체 길이는 길이를 측정하는데 사용된 측정단위의 크기에 함수이고, 측정단위의 크기가 영으로 접근하면 외견상의 전체 길이는 무한대가 된다. Fractal 차원은 이상적인 기하학적 모양에 대한 곡선, 표면, 부피에 대하여 변형의 정도를 서술하는 것이다. 따라서, 암석의 표면의 거칠음에 대한 연구는 이러한 fractal 특성을 포함한다.

Fractal 차원에 의해서 표면의 불규칙성이 서술된다면, 표면의 불규칙성의 공간적 변화는 variogram과 draft로 표현될 수 있다. Variogram은 어떤 종류의 자연 데이터의 공간적 연속성과 본질성 관계를 서술한다. 한편 draft는 자료의 관찰된 척도에서 random 함수의 규칙성과 계속적인 변화를 표현한다.

본 연구에서는 JRC 범위를 평가하기 위해서 fractal 차원, variogram, draft를 사용하였다. 암석표면의 roughness의 정량적 표현을 만들어 냈으며, 이로부터 암석표면의 불규칙의 특성을 유도할 수 있게 된다.

## Fractal 차원과 그의 측정

Mandelbrot (1983)는 물리, 수학의 특별한 분야에서 일찍부터 발전된 개념인 부분적 차원의 개념을 소개하였다. 그가 명명한 fractal이란 용어는 새로운 것이나, 개별적인 fractal의 개념은 수학자들에게는 아주 오래전부터 알려져 왔다. Fractal의 어원은 fraction과 fragment의 같은 어근인 fractus이고, 그 의미는 불규칙 또는 조각난 뜻을 나타낸다. Fractal은 일차적으로 수학적인 fractal set에 적용되고 더 나아가서는 자연적 fractal을 표현하는데 사용된다. 예를 들어 물리적인 Brownian 운동에 대한 곡선은 fractal set의 예일 뿐만 아니라 natural fractal의 좋은 예이다 (Mandelbrot, 1977).

수학분야에서 잘 정의된 분야인 위상수학 (topology)은 특정한 모양 또는 그림으로 목적체의 배열을 표현하는데, 분명히 해안선이나 암석의 표면과 같은 자연적 곡선을

연구하는 데 적당치 않다. 차원 (dimension)의 정의에는 두 종류가 있는데 그 하나는 위상수학적인 차원이 있고 두번째 차원은 1922년 Hausdorff에 의해 공식화된 차원이 있다. 위상수학적인 차원은 항상 정수이어야 하나, 다른 하나는 정수일 필요가 없다. Mandelbrot는 fractal을 다음과 같이 정의하였다. Fractal은 Hausdorff 차원이 위상수학적 차원보다 큰 set이다. 예를 들어서 본래의 Koch curve의 차원을 평가하기 위한 한 방법을 제안했는데 이 fractal 차원 ( $D$ )은 다음과 같다.

$$D = \frac{\log N}{\log\left(\frac{1}{r}\right)}$$

여기서  $N$ 은 직선의 각 변의 숫자이고,  $r$ 은 각 변의 길이에 대한 모서리 길이의 비로서 Koch 곡선 (눈입자)의 경우  $N$ 은 4이고,  $r$ 은 1/3이다. 그러므로 Koch triadic island의 차원이 1.2618이고, 위상수학적 차원 1보다 크기 때문에 fractal로 정의된다 (Mandelbrot, 1983).

Fractal로 접근의 한 주요점은 self-similarity (자체유사성)인데 이는 곡선의 각 부분은 전체로부터 구별이 안되는, 즉 어떤 곡선의 특성 또는 스케일에 대하여 불변하는 곡선의 형태로 정의된다. 그러므로 fractal 차원은 모든 스케일 위에서 일정해야 한다. 다시 말해서 불연속면의 야의 측정에서 보여지는 거칠음의 단면과 똑같은 것을 현미경 상에서도 보게된다는 의미가 된다. 그러므로 암석 표면의 단면의 경우에 자체유사성 (self-similarity)가 통계학적으로 해석되어야 한다. 다시 말하면 곡선의 각 부분이 전체로부터 통계학적으로 불변해야 한다. Mandelbrot에 의한 "fractional Brownian surface"로서 fractal 표면을 통계학적 특성을 통해서 암석의 표면으로 고려하는 것이다. 그러나 다른 스케일에 따라 다른 차원이 나올 수 있다 (Lee 외, 1990). 다른 연구에서도 fractal 차원의 변화는 디지털 모델과 컴퓨터에 표현하기 위한 자료 추출 (sampling) 밀도에 따라 달라질 수 있다. 또한 어떤 척도의 기준을 지나면 척도와 더불어 차원은 다양해질 수 있다 (Goodchild, 1980; Mark and Arnsion, 1984).

본 연구의 fractal 차원의 측정방법은 일상생활에서 어떤 길이를 잴 때와 같이 일정 길이 ( $r$ )의 자를 가지고 암석 표면의 단면을 따라 숫자 센다. 그리하여 자길이 ( $r$ )에 단계의 숫자를 곱하면 암석표면의 단면의 길이 ( $L(r)$ )가 된다. 자의 길이를 점점 작게하여 위의 과정을 반복하므로서 암석표면의 단면의 길이를 측정할 수 있고, 그 결과는 참 길이 (true length)로  $L(r)$ 이 접근하다고 배워 왔다. 사실상 관찰된 총길이  $L(r)$ 은 무한대로 증가하는 경향이

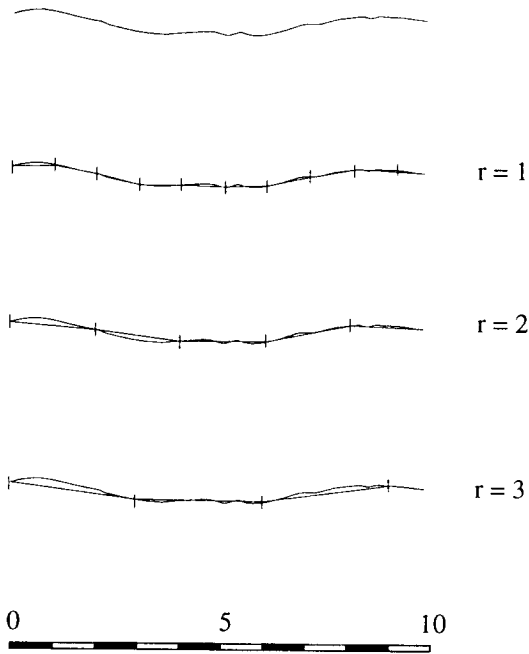


Fig. 1. Interaction of an irregular curve and the measuring "ruler length".

있다. Mandelbrot는 이것을 콤팩스 차원이라 말하였고, 그 특성은  $L(r) \propto r^{-D}$ 과 같이 나타난다. 그러므로,

$$r(D) = \frac{1}{N^{1/D}}$$

$$N_r^D = 1$$

고로,

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

이것이  $r$ 과  $N$  사이의 일정한 관계를 보인다. 만약에  $r$ 의 로그값에 대한  $N$ 의 로그값을 좌표에 그리게 되면, 이 그래프의 기울기는 직선인  $-D$ 가 된다. 그러므로 전체 길이  $L$ 의 발산하는 특성에도 불구하고, fractal 차원은 일정하게 된다.

이와같이 암석표면의 단면을 수치화 할 수 있기 때문에 fractal 차원의 측정을 정산화 하였다. 이 프로그램은 표준 포트란 77으로 쓰여졌고 개인 컴퓨터에서부터 거의 전기종의 컴퓨터까지 사용될 수 있다. Fig. 1은 fractal 차원의 측정하는 과정을 보이는 것으로 불연속면 단면의 길이가 어떻게 측정하는 단위 ( $r$ )와 관계가 되는지를 보인다.

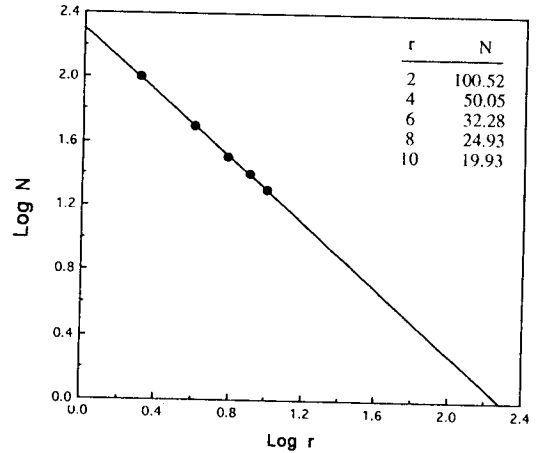


Fig. 2. Log  $r$  vs. log  $N$  plot for roughness profile (JRC range 10-12) with fractal dimension calculations.

또한 Fig. 2는 fractal 차원을 계산하는 예를 공급하고 있다. 이 그래프에서 암석 표면의 거칠음에 대한 단면의 fractal 차원은 1.0056이다.

### Variogram과 Drift 분석

지구과학 또는 다른 자연과학에서는 공간적인 변화와 관계된 현상이 많이 있다. 예를 들어서 위치에 따른 광상 품위의 변화, 지하수 흐름과 관계되는 투수계수의 변화, 탄성파에 의한 지표의 움직임의 변화 등이 있는데 이들을 광역화된 변수 (regionalized variables)로 간주할 수 있다. 일반적으로 공간에 분포하고 있는 광역화된 변수의 정의는 순수하게 서술적이고, 확률적 해석은 포함하지 않는다 (Journel and Huijberts, 1978). 광역화된 변수가 함수로서 고려될 때, 너무 복잡하여서 아마도 일반적인 수학적 분석을 통해서 서술하기 힘들게 될 수 있다. 그러나 지질현상과 관계된 이런 변수들은 random한 성분과 구조화된 성분의 양면을 가질 수 있다. 다시 말해서 국부적인 스케일에서는 random하고 이상한 특성을 보이고, 광역적 스케일에서는 일반적인 구조적 관점을 보인다. 자연현상과 관계된 광역화된 변수에서는 구조적인 관점이 어떤 자연 법칙에 의해서 우세함을 보인다. 지구통계학은 이러한 두 관계들을 규명하는 것에 의해서 발전되는 것이다.

두 변수가 거리 벡터 ( $h$ )에 의해서 표현된다면, 이들은 서로 독립적이지 않게되며 분리된  $h$ 에 종속되는 구조적 관점에 의해서 관계가 된다 (Carr, 1983). Randomness와 구조적 관점을 묶음으로서 random 함수는 공간적 변화를 표현할 수 있는 것을 공급하고 이로서 자연문제의 해답을

이끌 수 있게 된다. 광역화된 변수의 공간적 구조는 변수간의 거리를 증가시킴으로서 변수사이의 변화를 분석하여 관계됨을 밝힐 수 있다. 광역화된 변수의 구조적 성분은 변수의 공간적 상관관계 (correlation)로 정의한다. 이 구조적 관점을 특성화하는 한 방법은 실험적 variogram이다. 이는 다음과 같이 정의된다.

$$2\gamma(h) = E\{[z(x) - z(x+h)]^2\}$$

또는 semi-variogram은

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E\{[z(x) - z(x+h)]^2\}$$

통계학적으로 한세트의 데이터가 광역화된 변수로 취급되어질 때, semi-variogram은 사용할 수 있는 데이터로부터 다음의 식으로 평가될 수 있다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum [z(x+h) - z(x)]^2$$

여기서  $N$ 은 선정된 거리 벡터  $h$ 에 대한 쌍들의 수이다. 구조적 관계가 존재하면  $h$ 의 증가로  $\gamma(h)$ 의 값이 증가한다. 이러한 사실은 서로가 가까이 위치한 변수들은 먼 거리에 의해 분리된 것들보다 더 유사함을 보인다는 것을 의미한다. Fig. 3에서 보여주는 것 같이,  $\gamma(h)$ 가  $h$ 의 증가하고 거리  $R$  이상에서는 거의 일정해지는데, 이는 거리가  $R$ 보다 멀게 떨어진 변수들은 그들 사이의 공간적 구조가 존재하지 않음을 말한다. Fig. 3은 variogram의 성분을 일반화한 것으로,  $0 \leq h \leq R$  범위에서  $\gamma(h)$ 은 증가하며,  $h > R$ 에서는  $\gamma(h)$ 이 일정하고 이를 sill이라 한다. Sill은 샘플의 variance와 거의 같고 이는 다음과 표시할 수 있다.

$$\text{sill} \cong \text{Var} \{z(x)\} = \text{Cov} (0)$$

여기서 Var은 variance를 말하며, Cov는 covariance이다.

지구통계학에서, 데이터의 set이 광역화된 변수로 고려되어지면, random 함수의 stationarity는 데이터의 stationarity와 같은 것이다. 일차 stationarity는 variogram의 범위 (range)에 의해 결정된 local area내에서는 수학적인 기대치가 불변함을 의미하고, 이차 stationarity는 range 내에서 covariance가 존재하고 분리된 거리 벡터  $h$ 의 함수가 된다는 것이다. 일반적으로 variogram에서 sill이 있고 range 이후의 값이 유지되면 전반적인 stationarity는 존재한다. 또한 이는 무한대로 가면서  $|h|^2$ 의 증가보다 천천히 증가하게 된다 (Journel and Huijbregts, 1978).

$$\lim_{h \rightarrow \infty} \frac{\gamma(h)}{|h|^2} = 0$$

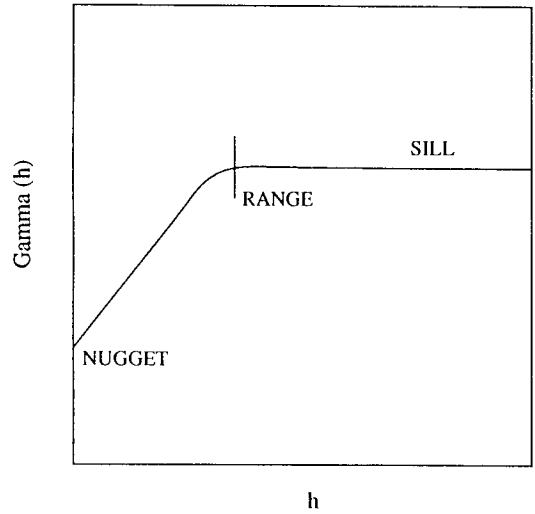


Fig. 3. Components of a variogram.

만약에 샘플 데이터가 stationary가 아니면 drift가 존재한다. 이로서  $\gamma(h)$ 가  $|h|^2$ 보다 빠르게 증가시키는 원인이 되고 위의 식을 만족시키지 않게 된다. 이의 결과로는 variogram이 parabolic 성장을 보이게 된다. Variogram으로부터 drift의 존재를 해석하는데 포함된 불확실성을 이해하기 위해서 drift를 실제로 계산하는 것이 한 방법이 된다. Drift 방정식의 형태는 변수사이의 차이값에 제곱을 하지 않은 것을 제외하고는 semivariogram과 유사하다.

$$\text{Drift} (h) = \frac{1}{N} \sum [z(x) - z(x+h)]$$

데이터의 stationarity가 존재하면  $h$ 의  $T$  만큼 증가에 대해 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{T} \sum \text{Drift} (h_T) = 0$$

### 절리면굴곡계수와 fractal 차원, 절리면굴곡계수와 variogram과 drift와의 관계

암석 표면의 거칠음은 불연속면이 존재하는 암반에서의 shear strength가 결정되는 요소들 중에서 중요한 성분이 된다. 암석표면의 거칠음의 영향에 대한 많은 연구들이 있었다. 그 중에 암반의 사면안정에 유용하게 쓰이는 식으로 Barton (1973)은 다음과 같은 실험적인 (empirical) 방정식을 유도하였다.

$$\tau = \sigma \tan \left( \phi + \text{JRC} \times \log \frac{\sigma_j}{\sigma} \right)$$

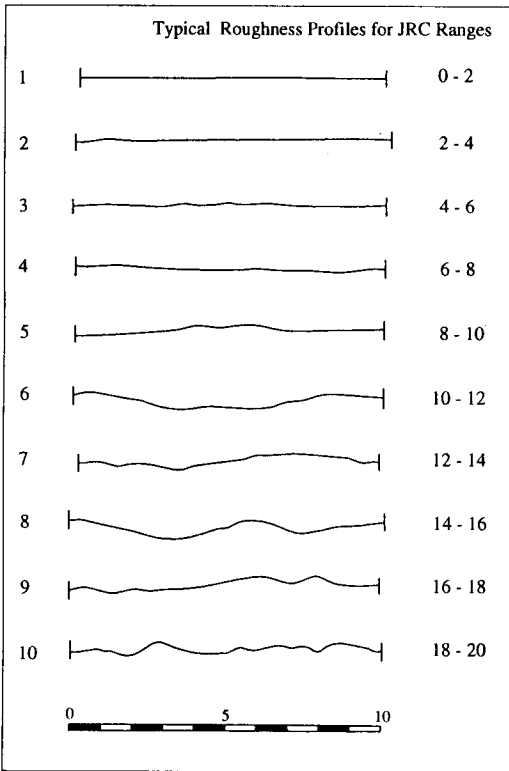


Fig. 4. Roughness profiles and corresponding range of JRC values (ISRM, Vol. 15, p.345).

여기서  $\tau$ 는 최대전단강도,  $\sigma$ 는 수직응력,  $\phi$ 는 마찰각,  $\phi_0$ 는 일축압축강도, JRC는 절리면 굴곡계수를 표시한다. Barton은 굴곡도를 증가시킨 10개의 전형적인 단면들을 만들고 0에서 20까지 범위로 계수를 만들었다. 응용하는 방법은 먼저 측정된 굴곡 단면을 Fig. 4에서 주어진 전형적인 굴곡단면과 비교하여 공학적 판단과 경험을 사용하여 적절한 JRC의 값을 평가하고, 다음 순서로 위의 식을 이용하여 불연속면의 굴곡도에 대한 전단강도를 예상하는 것이다. 이와같이 암석표면의 굴곡도 단면의 JRC 값을 정하는 방법은 분명히 주관적이고 공학적 경험에 따라서는 다른 평가가 될 수 있다. 본 연구의 목적은 암체에서 불연속면의 굴곡도를 분석하는 객관적인 방법을 발견하는 것이다.

전형적인 10개의 굴곡도 단면의 특성은 단순하게 수치화 테블을 이용하여  $(x, y)$  좌표로 쉽게 얻어진다. 이 단면들에 fractal 차원의 계산은 컴퓨터를 이용하여 만들어진 프로그램 사용했다. 각 단면들에 대해서 일정하게 비율로 작아지는 길이로 5개의 자를 선택하였다. 이는 10 cm가 단위 길이가 없는 200으로 하였을 때, 2, 4, 6, 8, 10이다. 이들은

Table 1. Fractal dimension calculation for JRC range.

JRC Range	r=2	r=4	r=6	r=8	r=10	Fractal Dimension
0~ 2	98.098	49.028	32.681	24.509	19.605	1.000446
2~ 4	99.878	49.849	33.229	24.899	19.922	1.001687
4~ 6	100.281	50.031	33.297	24.955	19.977	1.002805
6~ 8	99.427	49.627	33.037	24.75	19.746	1.003974
8~10	98.599	49.182	32.7	24.494	19.587	1.004413
10~12	100.519	50.046	32.281	24.932	19.927	1.995641
12~14	97.799	48.601	33.361	24.207	19.327	1.007109
14~16	103.67	51.595	34.282	25.652	20.459	1.008055
16~18	102.328	50.612	33.786	25.215	20.129	1.009584
18~20	103.866	51.497	34.112	25.489	20.336	1.013435

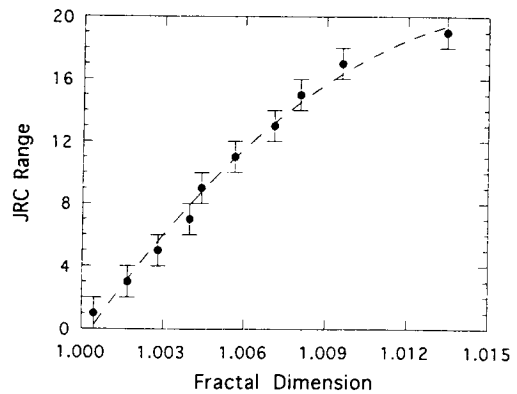


Fig. 5. Plot of fractal dimension vs. JRC range.

임의로 선택된 것이고 본 연구에 적합하게 보여진다. 10개의 전형적인 굴곡도 단면들에 대한 fractal 차원 계산의 결과는 Table 1에 정리하였다. 굴곡도 단면이 평평하게 보이는 낮은 JRC 값들에서는 작은 fractal 차원을 보인다. 또한 높은 JRC 값으로 갈수록 큰 fractal 차원을 보인다. 따라서 fractal 차원의 값은 표면의 굴곡도에 정비례함을 보이는, 즉 fractal 차원이 커질수록 표면의 굴곡도가 심해진다. fractal 차원은 표면의 굴곡도를 정량적으로 서술할 수 있음을 알 수 있다.

각 JRC 범위의 중간치와 그의 fractal 차원 사이의 실험적 관계는 regression분석에 의해서 얻어졌다. 실험적 방정식은 다음과 같다.

$$JRC = -0.87804 + 37.7844 \left( \frac{D-1}{0.015} \right) - 16.9304 \left( \frac{D-1}{0.015} \right)^2$$

여기서  $D$ 는 fractal 차원을 의미한다. 상관관계 계수 (correlation coefficient)와 표준오차를 계산하여 신뢰도가 큰 2차 다항식으로 선정하였다. fractal 차원과 JRC 범위의

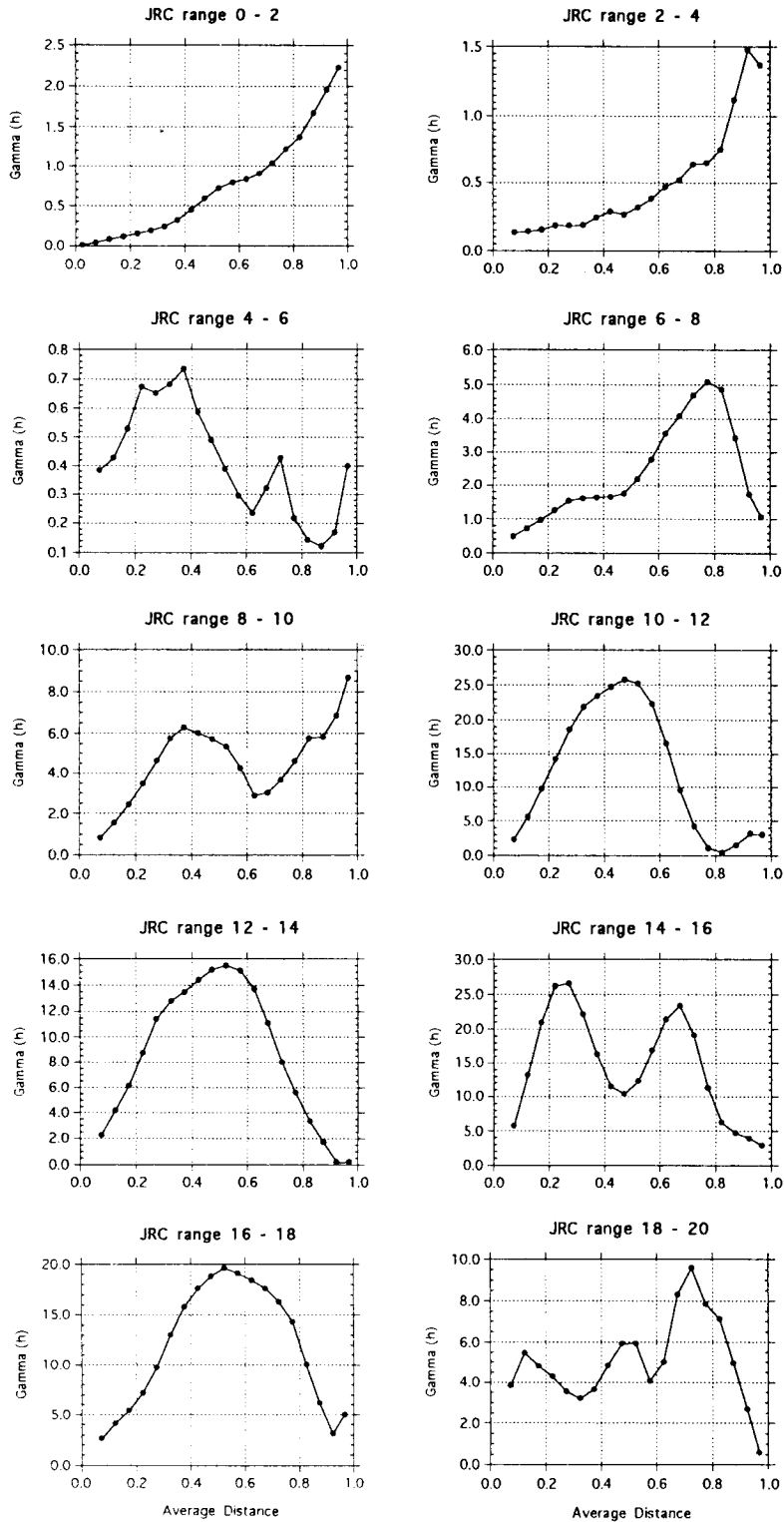


Fig. 6. Drift for JRC range 0~20 of roughness profiles.

도표는 Fig. 5에서 보여준다. Fig. 5에서 각 점 경계의 상한치는 굴곡도 단면의 JRC 값의 최대치를 또 경계의 하한치는 최소치를 표현한 것이고, 각 점 자체는 JRC 값의 평균치를 표현한다.

Variogram 분석은 절리 굴곡도 단면의 공간적 상관관계와 계속성을 서술하는데 사용되었다. 특히 variogram은 굴곡도의 불규칙한 여러 크기를 나타내는데 도움을 준다. 국부적인 굴곡의 크기는 variogram 계산에서 class size의 변화에 의해서 보여진다. 본 연구에서는 본래의 수치화된 데이터로부터 총거리가 1이 되게 하는 단위가 없는 거리로 전환시켰다. 단위가 없는 거리를 사용한 이유는 표면단면의 전체 고저도를 보일 뿐만 아니라 다른 표면단면과 비교가 가능하게 하기 위한 것이다. 10개의 JRC 굴곡도 단면에 대한 variogram들은 Fig. 6에 표현하였다. 불연속면의 표면을 따른 불규칙한 고저도는 공간적으로 상관관계가 있음을 보인다. JRC 범위 10~12에 대하여는 variogram이 0.8의 평균 간격으로 두번째 큰 불규칙 그룹을 확인할 수 있다. JRC 범위 12~14에서는 variogram으로부터 큰 불규칙 간격이 0.5이다. Table 2에서 variogram의 특성을 종합하여 놓았다. JRC 범위 0에서 10까지 variogram의 sill 값들은 서서히 증가하고 있다. 각 variogram의 range는 불규칙 굴곡 값의 공간적 계속성을 보인다. 데이터의 소음(noise)의 정도를 보이는 nugget 값은 영임을 보이는 것으로 보아 굴곡도를 측정할 고저도를 정확한 것으로 기대되어짐을 보인다.

분명하게 variogram이 불연속면을 따라 불규칙한 고저도가 공간적으로 상관관계가 있음을 보이지만 고저도의 위치에 대하여는 분명한 정보를 나타내지는 않는다. 또한 불연속면에 대한 많은 variogram들은 parabolic 또는 위로 볼록한 모양을 보인다. 이에 가능한 해석은 데이터 자체가 매우 규칙적인 공간구조를 가지고 있거나, drift가 존재한다는 할 수 있다. drift의 존재는 분리거리  $h$ 와 더불어 drift의 값이 일정하게 증가함을 의미한다. drift는 데이터의 관찰하는 scale에서 random 함수의 규칙적이고 계속적인 변화를 표현한다 (David, 1977). JRC 범위의 drift 특성들도 Fig. 7에 표현하였다. JRC 범위 0~2, 2~4, 8~10과 같은 낮은 값에서는 전반적인 drift가 보이는데 이는 수치화 데이터가 아주 작은 경사값을 포함한 것으로 고려되어진다. 일종의 non-stationary 성분이 포함된 것을 의미하는데 이는 간단한 수학으로 손쉽게 제거할 수 있다. 그러나 본 연구에서 drift 분석에서 필터된 값을 사용하지 않았다. 그 이유는 필터링을 하지 않아도 drift 특성이 쉽게 보이기 때문이다. drift는 불규칙면을 따른 고저도의 체계적인 변화를 표현하는데 사용하였고 이것이 drift의 활용의

Table 2. Properties of variogram and drift for JRC range.

JRC Range	Sill	Range	Drift Order
0~ 2	0.00804	0.35	1
2~ 4	0.267	0.48	1
4~ 6	0.457	0.13	3
6~ 8	1.7	0.45	4
8~10	3.57	0.23	1
10~12	13.1	0.22	3
12~14	8.71	0.22	3
14~16	15.2	0.56	3
16~18	10.3	0.3	5
18~20	4.55	0.1	6

가치를 나타낸다. 다시 말해서 drift는 불규칙면의 상대적인 크기와 함께 파형도를 서술하는 데 유용하다. Table 2는 다항식의 차원으로 표현하므로서 이들 drift의 특성과 관계시켰다.

여기서 각기 계산된 fractal 차원, variogram, drift의 병합적인 관계에서 열거된 불연속면의 특성을 결정할 수 있다. fractal 차원은 표면의 굴곡을 서술하는데 독특한 방법임을 보이고, variogram과 drift는 실험적 관계 하나만으로는 표면의 굴곡을 정의하는데 사용될 수 없음을 보인다. 단지 이들은 불규칙함의 공간적 특성으로 표면의 굴곡을 서술할 수 있고 fractal 차원을 이용하는 방법을 보조함으로써 그 가치가 부여된다. 결과적으로 JRC 범위에 대한 전형적인 굴곡도 단면의 정량적인 서술은 fractal 차원, variogram, drift에 의해서 가능하였다.

## 직접 전단시험에의 응용

하중하에서 암석과 암석볼트의 종류 사이의 작용 연구 (Haas, et al., 1980)에서 행해진 직접 전단시험은 전단면에 자연적 굴곡을 가진 블록에서 이루어졌다. 많은 경우 전단면은 평탄치 않고 파형도와 고저도를 가지고 잘 접합되어 있을 수 있다. 자연적 파쇄면은 한변이 61 cm인 정육면체인 인디애나 석회암을 반으로 쪼개므로서 만들어졌다. 석회암은 거의 등방성을 보이고 있으나 전반적인 층리와 평행으로 파쇄면을 선택하였다. 파쇄면은 작은 척도에서 그 굴곡도가 심함을 보인다. 파쇄면을 5.1 cm 간격으로 격자망을 따라 단면을 기록하였다 (Lee, et al., 1990). 본 연구를 위하여 6쌍의 블록이 준비되었고, 각 블록의 불연속면에서 기록된 13개 단면 중에서 가장 불규칙하게 보이는 두 단면씩을 선정하였다 (Fig. 8). 각 블록의 쌓은 떨어져 있는 상태이고, 이를 잘 접합시킨 후에 단 한번의 직접전단시험이 행해졌다. 그 이유는 전단되는

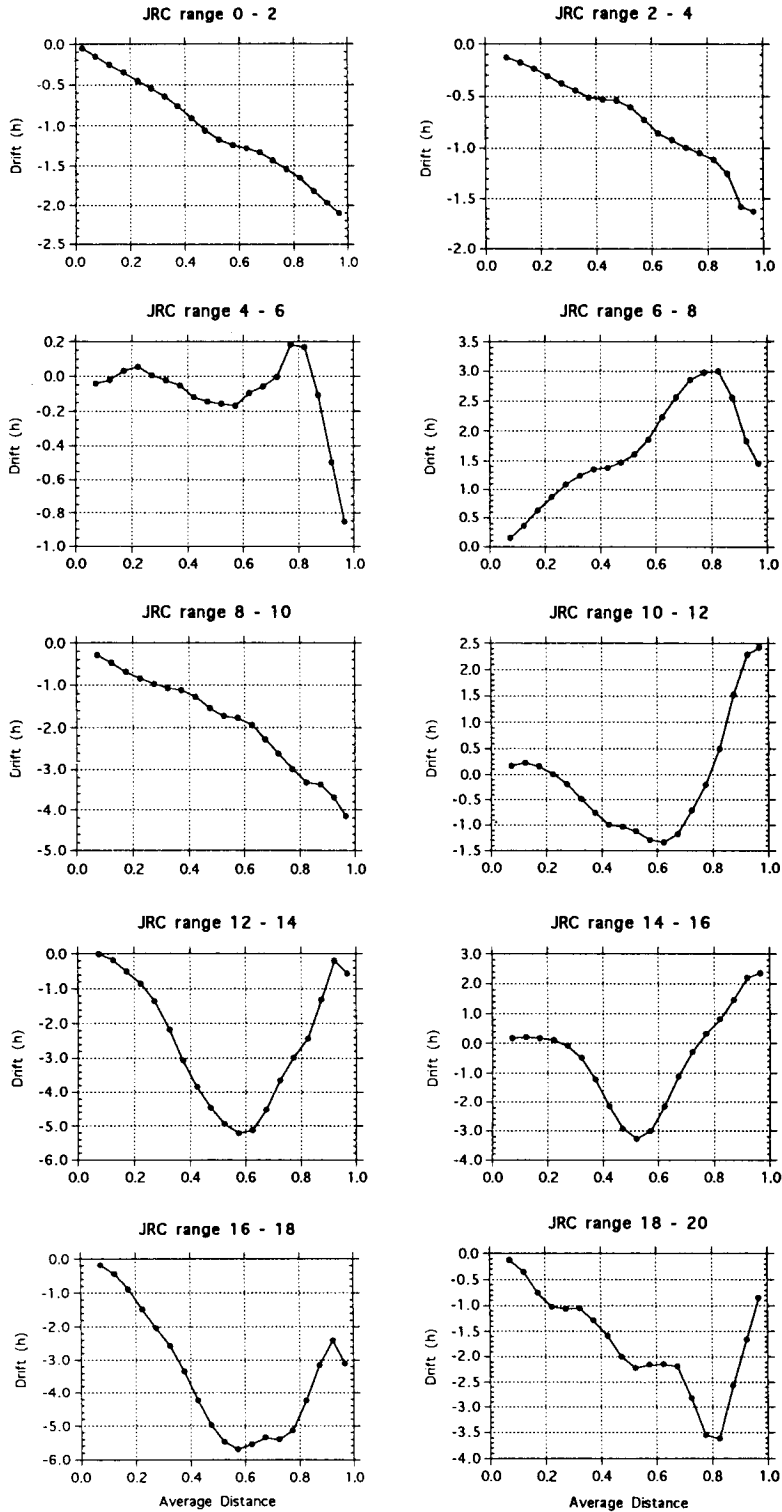


Fig. 7. Drift for JRC range 0~20 of roughness profiles.



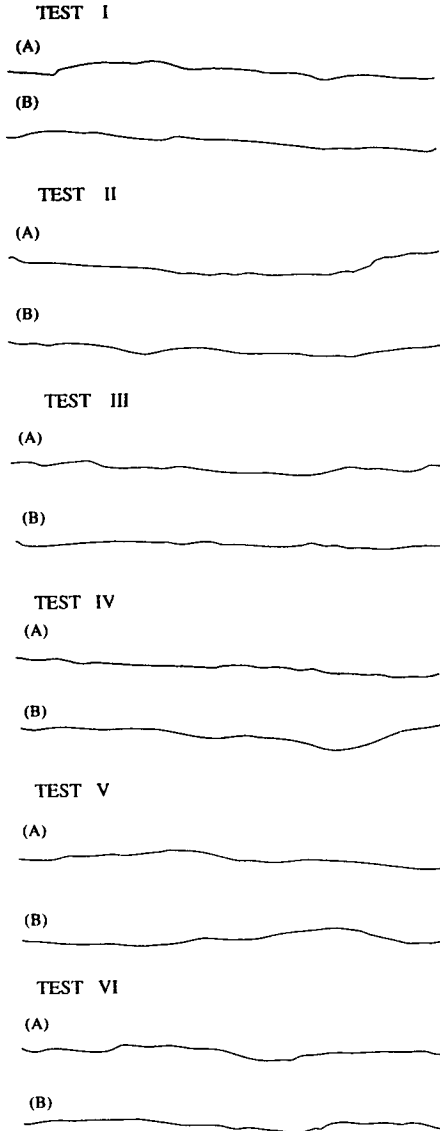


Fig. 8. Roughness profiles of fracture surface for test, plotted for fractal dimension calculation.

동안에 표면의 굴곡의 특성이 심하게 변하기 때문에 반복되는 블록에 대한 전단시험은 인정될 수 없기 때문이다.

6번의 직접 전단시험이 자연 파쇄면의 전단강도를 결정하기 위해서 행해졌다. 그 중 3번의 시험에서는 수직응력을 0.17 MPa (25 psi)로, 나머지 3번의 시험에서는 1.72 MPa (250 psi)를 사용하였다. 전단강도는 낮은 수직응력 0.17 MPa인 경우 약 0.41 MPa (60 psi), 높은 수직응력 1.72 MPa인 경우 약 2.76 MPa (250 psi)로 초기에는 매우 높았다. 매우 작은 전단변위에서 높은 전단강도가 발달되고

Table 3. The peak shear stresses for each direct shear test with normal pressure of 0.17 MPa and 1.72 MPa.

Test	Normal stress (MPa)	Peak shear stress (MPa)
I	0.17	0.39
II	0.17	0.46
III	0.17	0.42
IV	1.72	2.91
V	1.72	2.71
VI	1.72	3.01

Table 4. Fractal dimension calculation for the fracture surface of the shear test.

JRC Range	r					Fractal Dimension
	r=.2	r=.4	r=.6	r=.8	r=.10	
I-A	118.785	59.305	39.525	29.581	23.622	1.003252
I-B	118.386	59.028	39.315	29.450	23.552	1.003330
II-A	119.158	59.416	39.530	29.599	23.625	1.005178
II-B	119.618	59.652	39.668	29.704	23.731	1.005064
III-A	118.201	59.970	39.191	29.370	24.510	1.003953
III-B	118.664	59.181	39.394	29.527	23.583	1.003739
IV-A	117.892	58.826	39.181	29.366	23.470	1.002748
IV-B	118.585	59.182	39.406	29.526	23.612	1.002842
V-A	119.896	59.869	39.865	29.880	23.910	1.002004
V-B	117.112	58.457	38.930	29.177	23.332	1.002449
VI-A	117.044	58.336	38.836	29.084	23.237	1.004465
VI-B	115.644	57.677	38.377	28.775	22.970	1.004014

Table 5. Properties of drifts and JRC ranges of the fracture surface of the direct shear test, determined by the empirical equation.

Profile No.	Drift order	Fractal Dimension	JRC range
I-A	3	1.003252	7.5
I-B	2	1.003330	7.6
II-A	3	1.005178	11.2
II-B	3	1.005064	11.0
III-A	4	1.003953	8.9
III-B	3	1.003739	8.5
IV-A	3	1.002748	6.5
IV-B	5	1.002842	6.7
V-A	5	1.002004	5.0
V-B	6	1.002449	5.8
VI-A	7	1.004456	9.9
VI-B	5	1.004014	9.1

이 전단변위는 0.013 cm (0.05 in)를 넘지 않았다. 각 시험에 대한 최대전단강도는 Table 3에 보여진다. 전단변위가 좀더 증가하므로서 전단강도는 빠르게 떨어진다. 감소되는 경향은 변위가 약 7.7 cm (3 in)에서 시험이 끝날 때까지 연속된다.

전단시험에 사용된 6개의 불연속면의 평가를 위해서 선정된 12개의 단면은 전단변위의 방향에 평행하다. 각

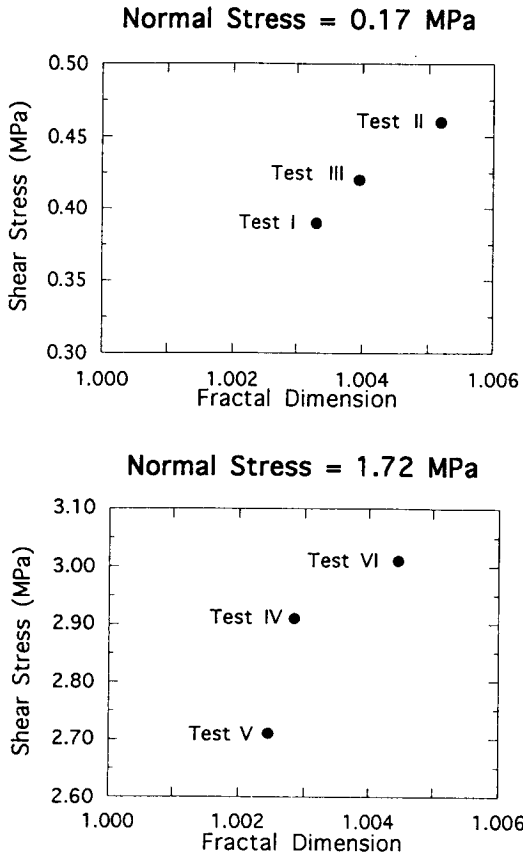


Fig. 9. Plot of the fractal dimension vs the peak shear strength for each shear test.

불연속면의 단면의 fractal 차원은 개발한 컴퓨터 프로그램을 이용하여 정확하게 계산되었다. 단면 전체길이 61 cm를 단위가 없는 24로 했으며, 계산에 필요한 자길이  $r$ 은 일정하게 작아지는 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0을 선정하였으며, 모든 12개의 단면에 대한 fractal 차원은 Table 4에 종합하였다. 시험 II와 IV에 사용된 불연속면의 단면에 대한 fractal 차원은 다른 시험의 것들보다 큼을 보인다. 또한 낮은 굴곡도를 보이는 단면은 작은 fractal 차원을 보이고 있다. Fractal 차원은 불연속면의 굴곡도에 직접적으로 비례함을 다시 한번 보이고 있다. 한 불연속면에서 선정된 두개의 단면의 fractal 차원은 단지 약간의 차이만을 보인다. 한 면에서의 단면들은 모양에 있어서 유사함을 보이고 있는 지질학적인 관점에서도 인정된다.

Variogram은 12개의 불연속면의 단면에 대하여 만들어졌고 그 중 몇개는 주기적인 특성을 보였다. 이는 단면의 데이터가 약간의 규칙적인 구조를 가지고 있기 때문으로 해석될 수 있다. Variogram에서 초기에는 원점으로부터

증가하고 고평부 (sill)에 이르고 그후 두번째 고평부로 다시 증가함을 보이기도 한다. Variogram의 원점에서 두 번째까지의 거리는 거시적으로 불연속면에서 두 굴곡점들 사이의 거리를 표현한다. 이는 작은 굴곡사이의 공간적 상관관계 또는 큰 굴곡사이의 상관관계를 표현하고 있다. 앞에서 언급한 것과 같이 고저도의 공간적인 상관관계는 보이고 있으나 분명한 정보를 나타내지는 못하고 있다. Drift의 특성 또한 각 불연속면의 단면에 대해서 만들어졌다. 이는 면을 따른 불규칙한 고저도의 체계적인 변화를 표현하는데 또는 불규칙면의 파동모양을 서술하는데 사용하였다. 12개의 불연속면의 단면에 대한 drift의 특성은 다항식의 차순으로 Table 5에 첨부하였다.

Fractal 차원, variogram, drift를 사용하여 불연속면의 단면들의 JRC 값들을 결정하였고 이를 Table 5에 보였다. 이 값들은 주로 본 연구에서 만들어진 실험 방정식에 의해서 결정되었다. 왜냐하면 이들 단면들의 drift의 차원을 JRC 범위에 대한 굴곡도 단면들의 값과 거의 유사하기 때문이다. 더우기 JRC 값의 작은 차이는 최대전단강도에 큰 영향을 미치지 못한다. 그러므로 불연속면의 단면에 대한 JRC 값을 평가하는데 있어서는 variogram과 drift 분석 없이도 가능한 것으로 보인다. 그러나 자연현상에 나타나는 불연속면의 단면 자체의 특성을 서술하는데에는 variogram과 drift가 필요한 것으로 사료된다.

이런 실험결과를 더욱 의미있게 하기 위해서, JRC 값과 직접전단시험의 최대전단강도의 관계를 비교하면, 각 시험에 대한 JRC 값이 커질수록 더 큰 최대전단강도 값을 보인다. 또한 fractal 차원과 최대전단강도의 값 사이의 관계를 Fig. 9에 보였다. 여기서 강조되는 것은 JRC 값을 사용하지 않았다는 점이다. fractal 차원과 전단시험에서 최대전단강도의 값 사이에 어떤 관계를 보이고 있기 때문에 앞으로 실험적 연구가 JRC 값을 사용하지 않고 어떤 관계가 있는지 발견할 필요가 있다.

## 결론

불연속면 표면의 굴곡도는 접합면을 따른 전도강도에 기여하는 중요한 요소이다. Barton이 발전시킨 JRC를 포함하는 암석의 전단강도를 측정하는 개념이 널리 인정되고 있다. 측정된 굴곡단면의 JRC 값을 평가하는 방법이 주관적인 것이 단점이 된다. 본 연구의 목적은 객관적인 방법으로 암석표면의 굴곡도에 대한 JRC 값을 평가하는 것을 유도하는 것이다.

Fractal 차원, variogram, drift가 표면의 굴곡의 특성을 정량화하는 서술 방법으로 선정하였다. Mandelbrot가 제

안한 fractal 차원은 표면의 변화정도를 서술하므로 불연속면의 굴곡도의 연구에 응용하였다. 굴곡도의 단면들은 수치테이블에서 측정되었고 컴퓨터 프로그램을 이용하여 fractal 차원을 정확하게 계산하였다. 그 결과, 굴곡단면이 평탄하게 나타나는 JRC의 낮은 범위에서는 작은 fractal 차원을 보이고, 큰 범위에서는 큰 차원을 보임을 발견하였다. Fractal 차원의 값은 표면의 굴곡도에 직접 비례한다. JRC 범위의 중간값과 그의 fractal 차원 사이의 실험적인 관계가 다항적 회귀 분석에 의해서 얻어졌다.

한편 불연속면의 요철의 공간적인 변화는 variogram과 drift을 이용하여 서술하였다 Variogram은 불연속면의 공간적 연속성과 본질성 관계를 규명하고 drift는 굴곡도의 특성을 서술하는데 이용하였다. Variogram은 굴곡의 불규칙의 크기를 분석하는데 가치가 있으나 굴곡의 위치들을 정확히 표현치 못하였다. Drift의 경우 불연속면의 단면을 따라 불규칙한 고저도의 체계적인 변화를 표현하는데 사용하였다. 비록 variogram과 drift가 불연속면의 굴곡도와 분명한 관계를 보이지 못하고 있지만 JRC 값 자체가 범위를 갖고 있기 때문에 JRC 값을 평가하는데 보조의 역할하는데 사용되었다.

Variogram, drift의 보조역할과 더불어 fractal 차원을 보였고, 한편 굴곡의 크기가 커질수록 큰 fractal 차원을 보였다. 불연속면의 JRC값을 평가하는데 본 연구에서 만들어진 실험적인 방정식은 매우 유용함이 나타났다. 더우기 직접전단시험의 최대전단강도와 fractal 차원의 관계에서 볼 때, 큰 fractal 차원의 면일수록 높은 최대전단강도를 가짐을 보였다. 불연속면을 정량화하는 요소로서 drift가 보조하는 fractal 차원을 이용하여 불연속면의 최대전단강도를 평가하는 새로운 기준을 발견하기 위한 앞으로의 실험과 연구가 필요함을 강조된다.

## 사 사

본 연구는 전략광물자원 연구센터의 연구비 지원에

의해 수행되었으며, Nevada-Reno대학 지질공학 교수로 있는 Dr. James Carr의 조언에 감사드리고, 연세대학교 민경덕 교수님께 감사를 드린다.

## 참고문헌

- Carr, J.R. (1983) Application of the theory of regionalized variable to earthquake parametric estimation and simulation. Ph.D. Dissertation, University of Arizona, p. 13-26.
- David, M. (1977) Geostatistical ore reserve estimation. Elsevier, New York, p. 73-174.
- Goodchild, M. F. (1980) Fractal and the accuracy of geographical measures, *Math. Geol.*, v. 12, p. 85-88.
- Goodman, R. E. (1976) *Methods of Geological Engineering*. West St. Paul, Minn., 472p.
- Hass, C. J. et al. (1980) An investigation of the interaction of rock and types of rock bolts for selected loading conditions. Second Annual Report, U. S. Bur. Mines contract H0122110.
- Hoek, E. and Bray, J. W. (1981) *Rock slope engineering*. Inst. of Mining & Metallurgy, 358p.
- Journel, A. G. and Huijbregts, C. J. (1978) *Mining geostatistics*. Academic Press, London, p. 26-302.
- Lee, Y. H., Carr, J. R., Barr, D. J. and Haas, C. J. (1990) The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles. *I. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* v. 27, p. 453-464.
- Mandelbrot, B. B. (1983) *The fractal geometry of nature*. Freeman, San Francisco, 468p.
- Mandelbrot, B. B. (1977) *Fractals-form, chance, and dimension*. W. H. Freeman & Company, p. 1-94.
- Mark, D. M. and Aronson, P. B. (1984) Scale-dependent fractal dimensions of topographic surfaces: an empirical investigation, with applications in geomorphology and computer mapping. *Math. Geol.*, v. 16, p. 671-683.
- Patton, F. D. (1966) Multiple modes of shear failure in rock. *Proc. 1st Int. Congr. of Rock Mech.* Lisbon, v. 1, p. 509-513.

1993년 12월 23일 원고접수