

# 암석 절리면 거칠기의 정량화에 대한 수치적 연구

## A Numerical Study on the Quantification of Rock Joint Roughness

천 병 식\*<sup>1</sup> Chun, Byung-Sik  
김 대 영\*<sup>2</sup> Kim, Dae-Young

### Abstract

Statistical parameters, fractal dimension and spectral analysis were suggested to quantify rock joint roughness after the study on the quantification of joint roughness coefficients by Tse and Cruden(1979). These methods of statistical parameters and fractal dimension have scale dependent problems and crossover dimension problems respectively. Spectral analysis was proposed to make up for these problems and a number of studies about spectral analysis were performed. Typical roughness profile suggested by Barton and Choubey(1977) was digitized using the AutoCAD and statistical analysis, fractal dimension analysis and spectral analysis were carried out. It is found out that spectral analysis gives a problem regarding the phase-changed profile. To solve these problems linear regression analyses about sampling interval and statistical parameters that are related to inclination of profile were performed. Slopes and intercepts of these linear relations are strongly correlated with the values of the JRC. Using these slopes and intercepts, scale dependent and phase-changed problems were solved.

### 요 지

Tse와 Cruden(1979)에 의해 암석 절리면 거칠기 정량화에 대한 연구가 시작된 이후 통계적인 정량화방법, 프랙탈 차원을 이용하는 방법 그리고 스펙트럼 분석을 이용하는 방법이 제안되었다. 이러한 통계적 정량화방법은 치수의존적이라는 단점이 있으며, 프랙탈 차원을 이용하는 방법은 크로스오버 차원이라는 문제점이 있는 것으로 평가되고 있다. 이 문제점들을 보완하는 방법으로 스펙트럼 분석법이 제시되어 많은 연구가 이루어졌다. 본 연구에서는 Barton과 Choubey(1977)가 제안한 10개의 절리면 프로파일을 수치화하고 통계적 분석, 프랙탈 차원 분석 그리고 스펙트럼 분석을 실시하여 이들 문제점을 살펴보고 스펙트럼 분석법이 위상이 변조된 프로파일에 대하여 문제가 있음을 확인하였다. 이들 문제점을 해결하기 위하여 측정간격과 프로파일의 기울기를 의미하는 통계적 파라미터의 관계를 선형으로 회귀분석하였다. 이렇게 구한 10개의 1차식의 기울기와 절편은 JRC와 매우 상관성이 높게 나타났다. 이 기울기와 절편을 거칠기 정량화의 변수로 사용하므로써 통계적 분석법에서의 치수의존적인 문제와 스펙트럼 분석에서의 위상변조의 문제를 해결하였다.

**Keywords :** Fractal dimension, Roughness, Scale dependent, Spectral analysis

### 1. 서론

암반의 역학적 거동은 암반 내에 존재하는 균열, 절리, 층리, 단층과 같은 불연속면의 기하학적 형태와 역학적 성질에 크게 좌우된다. 단일 암석 절리면의 전단거동과 침

투 전단강도의 파악은 암반의 역학적 거동을 이해하는데 있어서 기본이 된다. 단일 암석 절리면의 전단 특성은 절리표면의 거칠기에 의존한다. 절리면의 거칠기는 Barton과 Choubey(1977)가 제시한 절리 거칠기 계수(JRC)로 표현이 되나 계수의 산정이 주관적이어서 이를 정량화 하려는

\*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*2 정회원, 현대건설기술연구소 선임 연구원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사수료

많은 연구들이 발표되었다.

본 논문에서는 Barton과 Choubey가 제안한 JRC 추정을 위한 10가지 프로파일(profile)을 종전의 방법들보다 정확히 수치화한 뒤 거칠기 정량화의 방법인 통계적 분석법, 프랙탈 차원을 이용하는 방법 그리고 스펙트럼 분석법을 사용하여 분석을 하였다. 이 분석을 통하여 기존의 연구에서 밝혀진 통계적 방법에서의 측정간격에 따라 다른 JRC 값을 산정하는 문제점이 있음을 확인하였다. 또한 스펙트럼 분석법에서 주파수 영역에서의 위상(phase)에 대한 정보를 고려하지 못하여 위상이 변화했을 경우에 대하여도 동일한 JRC 값을 나타낸다는 모순이 존재한다는 사실을 발견하였으며 이들 문제점을 해결할 수 있는 새로운 절리면 거칠기 정량화 방법을 제시하였다.

## 2. 연구 동향

암석 절리면의 전단저항은 평평한 면과 면이 미끄러질 때의 마찰저항과 암석 표면의 기하학적 불규칙성으로 인한 저항으로 나눌 수 있음을 고려하여 Patton(1966, a, b)은 암석 절리면의 침투 전단강도  $\tau$  를 예측하기 위한 경험식(1)을 제안하였다.

$$\tau = \sigma_n \tan(i + \phi_b) \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_n$  = 유효 수직응력

$i$  = 거칠각(asperity angle)

$\phi_b$  = 암석의 광물조성과 관련된 기본마찰각

그 이후 발표된 절리의 마찰 거동 및 팽창 거동을 고려한 전단강도 식들중에 Barton(1973)의 전단강도식이 널리 사용되고 있다. Barton은 인장 절리시편에 대한 시험에서 식(1)의  $i$ 를 수정하여 식(2)를 제안하였으며 Barton과 Choubey(1977)는 JRC 값을 나타내는 그림 1과 같은 도표를 발표하였다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \quad (2)$$

여기서, JRC = 절리 거칠기 계수(joint roughness coefficient)

JCS = 절리면 압축강도(joint compressive strength)

JRC는 물리적 개념의 파라미터(parameter)가 아니라 전단시험의 결과와 Barton의 경험식을 적용하여 역산된 계수이다. JRC는 도표와 비교하는 방법, 절리 시편의 단순 기울

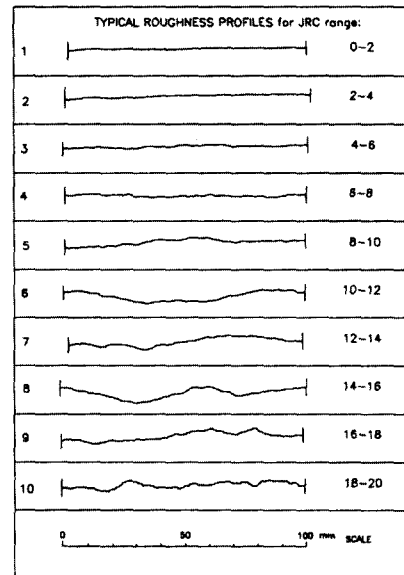


그림 1. JRC 추정을 위한 100mm 길이의 표준 절리 프로파일 (Barton과 Choubey, 1977)

임시험(simple tilt test)법 그리고 전단시험에 의한 Barton 식으로부터의 역산법에 의하여 결정하는데, 이들 방법은 객관적이지 못하여 많은 오차를 포함한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 절리면 거칠기를 정량화 하고자하는 연구는 통계적 파라미터를 이용하는 방법, 프랙탈 차원(fractal dimension)을 이용하는 방법 그리고 스펙트럼(spectrum) 분석을 이용하는 방법으로 발전하여 왔다.

Tse와 Cruden(1979)은 그림 1의 프로파일(profile)을 수치화한 후 프로파일 기울기의 평방평균(root mean square, RMS)인 Z2와 JRC 사이 그리고 구조함수(structure function, SF)와 JRC 사이에 상관성을 발견하였다. Maerz 등(1990)은 거칠기형상지수(roughness profile index, Rp)가 JRC와 상관관계가 있음을 밝혔다. Miller 등(1990)은 수개의 자연절리를 조사하여 Z2가 JRC와 높은 상관성이 있으나 Z2만으로 거칠기를 표현하는데 충분하지 않고 측정간격에 종속적이라는 것을 밝혔다. 이상돈(1996)은 암석 인장균열면의 프로파일을 측정하여 거칠기 파라미터들이 측정간격에 영향을 받는다고 하였다.

Turk 등(1985)은 분할자 방법(divider method)을 적용하여 Barton의 거칠기 프로파일에 대하여 프랙탈 차원, D가 1에서 1.017의 범위에 있다고 하였으나 Lee 등(1990)은 D가 1.000446에서 1.013435의 범위에 있다고 하였다. Carr와 Warriner(1989) 그리고 Carr(1989)는 암석 표면에 대한 프랙탈 차원을 결정하고 1.0001과 1.022 사이에 있다고 하였다. Miller 등(1990) 수정 분할자방법(modified divider method)

으로 구한 프랙탈의 대수 그래프에서 절편이 육안등급과 잘 일치한다고 하였다. Huang 등(1992)은 부적절한 분할자극, 측정간격이 커서 앞의 연구들에서 낮은 차원을 산출하였다고 하였다.

파워 스펙트럼 밀도(power spectral density)의 기울기가 프랙탈차원과 관계가 있다는 Berry와 Lewis(1980)의 연구 이후 스펙트럼 분석을 이용하는 많은 연구가 이루어졌다. Brown과 Scholz(1985)는 자연 암석 표면의 거칠기를 공간 주파수의 광역밴드로 분석하여 프랙탈 차원이 주파수에 따라 변함을 보였다. McWilliams 등(1993)은 같은 프로파일에 대하여 필터(filter)형식에 따라 다른 D값을 얻었다. Kulatilake 등(1995)은 파워 스펙트럼 밀도의 대수 그래프의 기울기와 절편을 조합하여 거칠기의 이방성을 포함한 진단강도식의 가능성을 제시하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 현재까지의 연구에서는 통계적 파라미터에서의 치수 의존적인 문제와 프랙탈 차원에서의 크로스오버 차원(crossover dimension)의 문제점이 지적되어 스펙트럼 분석에 의한 거칠기의 정량화가 가장 발전된 방법으로 인식되고 있다.

### 3. 절리면 거칠기 파라미터의 고찰

#### 3.1 통계적 파라미터

통계적인 파라미터로는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 프로파일 높이의 표준편차를 나타내는 평방평균 RMS, 프로파일 기울기의 RMS인  $Z_2$ (Myers, 1962), 프로파일 기울기를 나타내는 거칠기 형상지수  $R_p$ (roughness profile index), 평균거칠각  $A_i$ (micro average i angle) 그리고 표면 조직의 변화를 정량화하는 구조함수 SF(structure function)를 거칠기를 정량화에 사용하였다(그림2).

$$RMS = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$SF = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} (y_i - y_{i+1})^2 \quad (4)$$

$$Z_2 = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \left( \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$A_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} I_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \tan^{-1} \left( \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) \quad (6)$$

$$R_p = \frac{1}{\cos(A_i)} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (\Delta x_i^2 - \Delta y_i^2)^{1/2}}{L} \quad (7)$$

여기서,  $n = y$ 의 측정수,  $\bar{y}$  = 프로파일 진폭의 평균

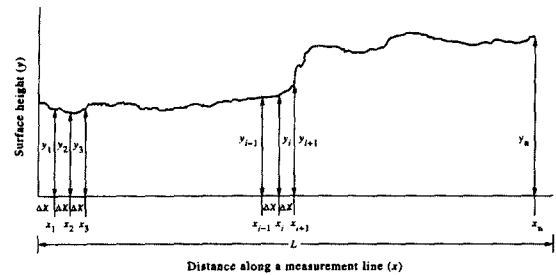


그림 2. 통계적 파라미터의 정의를 위한 절리 표면 프로파일

#### 3.2 프랙탈 차원(Fractal dimension)

프랙탈은 불규칙한 자연물의 형태 그리고 선의 기하를 분수차원의 용어로서 설명하는 새로운 수학적 개념으로 Mandelbrot(1967)가 소개하였다. 그것은 자체유사성(self-similarity)을 나타내는 자연적인 파편이나 불규칙한 구조를 설명하는데 사용되며, 자체유사성은 어떤 곡선에서 곡선의 각 부분이 전체의 형태와 구별이 불가능한 곡선의 성질을 나타내는 것으로 정의된다. 유클리드 기하학의 관점에서 점은 0-D, 완벽한 직선은 1-D, 이상적인 면은 2-D, 이상적인 구는 3-D이다. 그러나 실제 물체의 기하학적 형태는 대부분 이러한 범주에 들지 않으며, 점과 대위로 구성된 선은 0과 1사이의 차원을, 표면 거칠기 프로파일 같은 불규칙한 선은 1과 2 사이의 차원을, 거친 표면등은 2와 3사이의 차원을 갖는다.

절리면의 프랙탈 차원을 결정하는 방법으로는 분할자 방법(divider method)이 있다. 프로파일의 길이를 자를 이용해서 측정한다면 프로파일의 길이 L은 식(8)과 같으며, 더욱 짧은 자를 사용한다면 길이 L은 더욱 길어져 총 측정수와 측정자의 길이 사이에는 식(9)와 같은 관계가 된다.

$$L = Nr \quad (8)$$

$$N = ar^{-D} \quad (9)$$

여기서, r = 자의 길이, N = 자의 수,

D = 프랙탈 차원(Mandelbrot, 1982)

식(8)을 식(9)에 대입하면

$$L/r = ar^{-D} \quad (10)$$

식 (9)의 양변에 로그를 취하면 식(11)이 되고 식 (10)의 양변에 로그를 취하여  $\log r$ 을 더하고  $\log L$ 에 대해 정리하면 식(12)가 된다.

$$\log N = \log a + (-D) \log r \quad (11)$$

$$\log L = \log a + (1-D) \log r \quad (12)$$

불규칙한 선은  $D > 1$ 이기 때문에  $\log r$ 에 대한  $\log L$ 의 그래프는  $(1-D)$ 과 같은 음의 경사를 갖는 직선이 된다. 실제 프랙탈에 대해서  $D$ 는 측정자 모든 길이에 대하여 일정하다.

Brown(1987)은 프로파일을 따르는 분할자  $r$ 보다는 수평 분할간격  $\Delta x$ 를 사용하는 수정된 분할자 방법(modified divider method)을 제안하였다. 추정된 프로파일 총 길이  $L$ 과 수평분할 간격  $\Delta x$  사이에 관계는 식 (10)과 같지만 추정된 프랙탈 차원은 조금 다르며 프랙탈차원을 산출하는 프로그램 작업이 쉽다.

### 3.3 스펙트럼 분석(spectral analysis)

스펙트럼 분석 방법은 프랙탈 차원을 결정의 새로운 방법으로 사용되었다. 스펙트럼 분석의 기본 개념은 시계열(time series)이 그림 3과 같이 각 주파수에서 다른 주파수와 다른 진폭과 위상을 갖는 사인파의 합으로 표현될 수 있으며 절리면 프로파일은 시계열로 간주된다.

$$y = f(x) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_i} x + \theta_i\right) \quad (13)$$

$$y = f(x) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \sin(2\pi f_i x + \theta_i) \quad (14)$$

여기서,  $A$ = 진폭,  $\lambda$ = 파장,  $f$ = 주파수,  $\theta$ = 초기 위상

스펙트럼 분석과정은 이산(discrete) 주파수에서 사인곡선의 계수를 얻기위해 푸리에 변환(Fourier transform)을 수행한다. 스펙트럼 분석에서 시간 변수는 공간 변수로 대체하여 절리 프로파일의 높이를 1차원 공간변수의 함수로 취급하여 스펙트럼 분석을 한다. 푸리에 변환후 각 사인파에서 진폭의 자승을 파워라고 하고 주파수 대 파워의 도시를 파워 스펙트럼이라 한다. 스펙트럼은 밀도(주파수 간격당량)라고도 표현하는데 이산된 주파수로서보다는 연속된 주

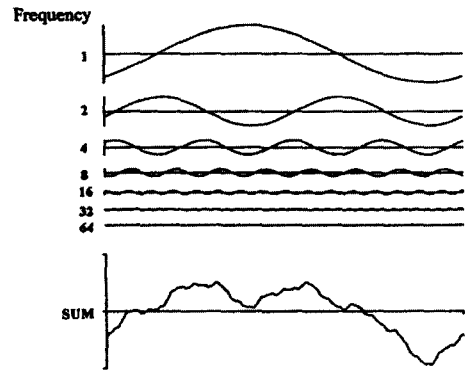


그림 3. 다른 주파수, 진폭과 파장의 사인파의 합으로 생성된 프로파일(Power와 Tullis, 1991)

파수의 함수로 간주되기 때문이다. 파워 스펙트럼과 프랙탈 차원의 관계는 프로파일을 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density),  $S(f)$ 로 가정하면

$$S(f) = Cf^{\beta} \quad (15)$$

여기서,  $f$ = 주파수,  $C$ 와  $\beta$ = 상수

Berry와 Lewis(1980)는 파워 스펙트럼 밀도 대 주파수의 대수 그래프의 기울기  $\beta$ 와 프랙탈 차원  $D$ 와의 관계를 식 (16)과 같이 유도하였다.

$$\beta = 5-2D \quad (16)$$

거칠기 프로파일은  $1 < D < 2$ 이므로  $\beta$ 는 1에서 3의 범위에 있다. 식 (15)는 정상(stationary) 프로파일에 대해서만 만족한다. 그러나 자연 암석 절리 프로파일은 비정상(non-stationary) 프로파일인 경우가 많으므로 프로파일의 파워 스펙트럼 계산전에 비정상 부분을 제거하여야한다.

Chatfield(1975)는 자체유사 프로파일 거칠기의 RMS는 파워 스펙트럼 밀도 함수  $S(f)$ 아래 면적의 제곱근과 같다고 하여 프랙탈 차원  $D$ 뿐 아니라 절편  $C$ 도 거칠기와 관련이 있다는 것을 증명하였다.

$$\sigma_{rms} = \left[ \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f) df \right]^{1/2} = \left( \frac{C}{4-2D} \right)^{1/2} l^{2-D} \quad (17)$$

여기서,  $f$ = 공간 주파수,  $f_{min}$ = 최저 주파수,

$f_{max}$ = 최고 주파수,  $l$ = 프로파일의 직선 길이

#### 4. 거칠기의 정량화

##### 4.1 Barton 거칠기 프로파일의 수치화

Barton의 프로파일에 대한 거칠기 파라미터의 계산을 위해서는 수치화된 데이터가 필요하였다. 정밀하게 프로파일을 수치화하기 위하여 NGI(Norwegian Geotechnical Institute)로부터 입수한 Barton과 Choubey(1977)의 전형적인 거칠기 프로파일을 600 dpi(dot-per-inch) 분해능의 스캐너로 5배 확대하여 주사(scan)하였다. 이것을 트레이서(tracer)라는 소프트웨어를 사용하여 벡터화한 뒤 오토캐드(AutoCAD)를 이용하여 스캐닝된 10개의 거칠기 프로파일의 축척을 100mm로 재조정하였다(그림 1). 횡좌표는 0.1mm 간격으로 분할하고, 종좌표는 프로파일과 분할선이 교차하는 중심점을 자동 포착하여 수치화하였다. 이 방법으로 각 프로파일에 대하여 약 1000여개의 정밀도 높은 이산 데이터를 획득하였다.

##### 4.2 JRC와 통계적 파라미터의 상관관계

수치화된 Barton과 Choubey의 프로파일 데이터에 대하여 거칠기 파라미터를 구하기 위한 프로그램을 작성하였다. 우선 각 프로파일의 비정상(non-stationary)부분을 제거하고 거칠기 파라미터값은 측정간격을 0.1mm에서부터 10mm까지 0.1mm씩 증가시켜가며 각 파라미터를 계산하도록 하였다. 비정상 부분의 제거는 각 프로파일을 선형으로 회귀하여 제거하였다. 거칠기 파라미터로는 진폭을 나타내는 RMS, 기울기의 표준편차인  $Z_2$ , 프로파일의 거칠각의 평균  $A_i$ , 프로파일 양(+)의 거칠각의 평균  $A_{i+}$ , 프로파일 음(-)의 거칠각의 평균  $A_{i-}$ , 프로파일 거칠기 형상지수  $R_p$  그리

표 1. 통계적 파라미터와 JRC 값과의 관계

측정간격 (mm)	Regression Equation	R <sup>2</sup>	파라미터 의미
0.1	JRC=6.89347(RMS)+3.87025	0.520	진폭
1.0	JRC=6.91941(RMS)+3.88705	0.517	
0.1	JRC=10495.9(SF)+3.70248	0.808	
1.0	JRC=145.383(SF)+3.53920	0.882	
0.1	JRC=54.7335( $Z_2$ )-2.20010	0.915	기울기
1.0	JRC=63.4351( $Z_2$ )-2.10976	0.974	
0.1	JRC=1.56050( $A_i$ )-4.21770	0.936	
1.0	JRC=1.57937( $A_i$ )-2.99982	0.984	
0.1	JRC=1.35280( $A_{i+}$ )-3.56321	0.911	
1.0	JRC=1.39926( $A_{i+}$ )-2.01485	0.934	
0.1	JRC=1.37095( $A_{i-}$ )-2.48949	0.887	
1.0	JRC=1.42260( $A_{i-}$ )-1.94232	0.946	
0.1	JRC=248.642( $R_p$ )-245.414	0.843	
1.0	JRC=323.013( $R_p$ )-319.788	0.898	

고, 표면 조직의 변화를 정량화하는 SF의 값을 계산하여 측정간격이 0.1mm일 경우와 1.0mm일 경우의 관계를 표 1에 나타내었다. 여기서 프로파일의 양(+)의 거칠각의 평균을 나타내는  $A_{i+}$ 는 그림 1의 Barton과 Choubey의 프로파일에서 각 프로파일의 왼쪽 시작점을 기준으로 측정할 경우에 양의 기울기를 의미하므로 하부절리면이 좌측으로 전단 되는 것을 의미하며  $A_{i-}$ 는 이와 반대이다. 표 1에서 알수 있듯이 기울기 관련 파라미터들이 진폭 관련 파라미터들보다 JRC 값과의 상관성이 좋은 것으로 나타났다. 이들 중 RMS는 측정간격의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났으나 다른 파라미터들은 모두 측정간격에 따라 상당히 다른 JRC를 나타낼 수 있어 치수의존적인 파라미터임이 확인되었다. 그림 4에는 프로파일의 평균경사각  $A_i$ 를 측정간격별로 나타내었다. 프로파일의 경사각  $A_i$ 는 +각과 -각을 절대값으로 계산한 것이다. 측정간격이 증가함에 따라 경사각이 작아짐을

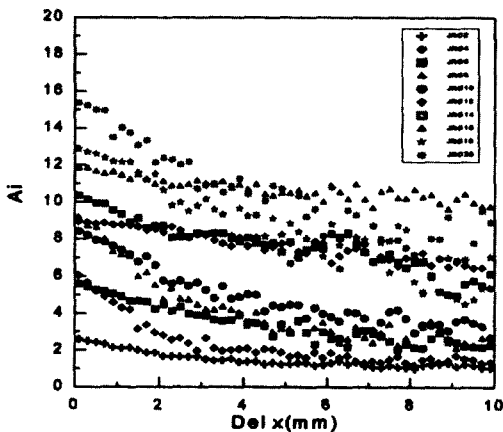


그림 4. 측정간격과  $A_i$ 의 관계 그림

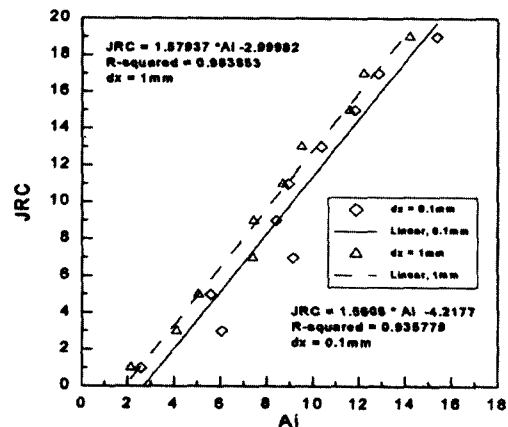


그림 5. JRC와  $A_i$ 의 관계

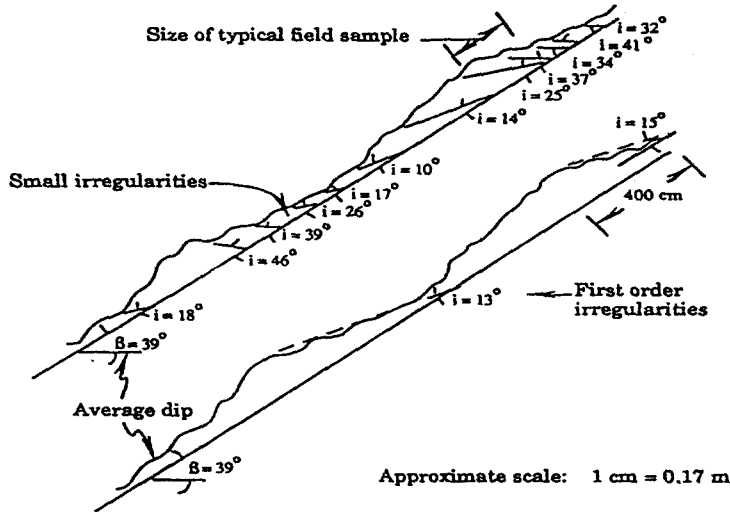


그림 6. 1차 거칠기와 2차 거칠기(Patton, 1966, b)

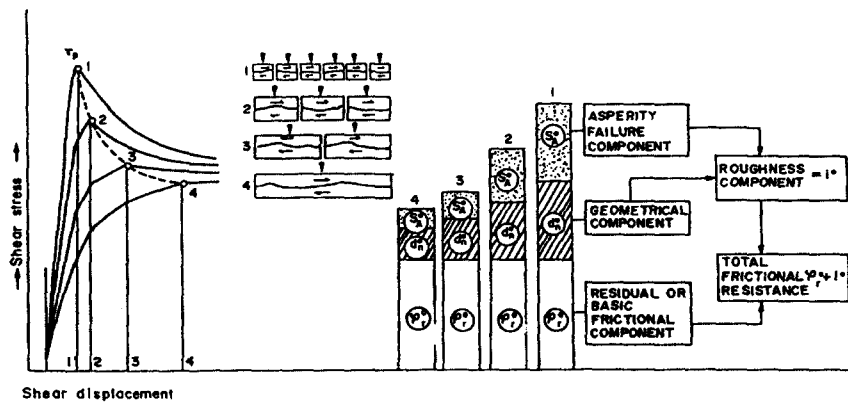


그림 7. 시편 크기에 영향을 받는 3가지 전단강도 요소 (Bandis 등, 1981)

알 수 있다. 그림 5에 측정간격이 0.1mm인 경우와 1.0mm인 경우의  $A_i$ 의 1차 회귀곡선을 나타내었다. 측정간격이 0.1mm인 경우보다 1mm인 경우에 더 좋은 상관성을 나타내었는데 이는 Barton과 Choubey의 프로파일 자체가 0.1mm 이상의 분해능 즉, 정밀도가 낮은 상태로 그려졌을 것으로 판단되기 때문이다.  $JRC=6\sim 12$ 까지의 3개의 프로파일은  $A_i$  값의 차이가 크지 않으며, 측정간격이 좁은 경우에  $JRC=6\sim 8$ 의 프로파일이  $JRC=8\sim 12$ 의 프로파일보다 큰  $A_i$  값을 나타내는데 이러한 경향은 기울기와 관련된 파라미터에서 모두 나타나는 현상이다. 기울기와 관련된 파라미터들이 진폭관련 파라미터보다  $JRC$  값과의 상관성이 좋은 이유는 기울기 관련 파라미터가 측정간격이 작을 때는 2차 거칠기를 측정간격이 클 때는 1차 거칠기를 잘 표현하기 때문이다. 1차 거칠기와 2차 거칠기는 그림 6과 같이 설명된다.

Patton(1966, b)은 큰 규모의 암석 절리에서는 2차 거칠기보다는 1차 거칠기가 전단거동을 좌우한다고 하였다.

본 연구에서 다루는  $JRC$  프로파일은 10cm 길이의 절리이므로 그림 6의 절리가 10cm 길이로 축소되었을 때를 의미하므로 Patton의 1차, 2차 거칠기는 여기서 다루는 1차, 2차 거칠기와는 축척(scale)이 다르다. 작은 규모의 암석절리의 침투 전단강도의 침투 마찰각에는 기본 마찰각과 침투 팽창각 그리고 부분적인 거칠기 손상이 기여한다(Bandis, 1981).

그림 7에서 절리 시편의 크기가 작을수록 거칠기 요소에 거칠기 손상 요소와 기하학적 요소가 크게 기여함을 알 수 있다. 여기서 거칠기 손상 요소는 2차 거칠기의 손상으로 볼 수 있으므로 전단강도에 영향을 미치는 거칠기에는 1차 거칠기와 2차 거칠기가 조합되어 있음을 알 수 있다. 따라서 거칠기를 정량화하기 위해서는 측정간격에 영향을 받지 않고

1차 거칠기와 2차 거칠기를 반영할 수 있으며 전단 방향에 따른 거칠기를 표현할 수 있는 파라미터를 찾아야한다. 조사된 파라미터들 중에서 전단 방향에 따른 거칠기를 표현할 수 있는 파라미터는  $A_i$ 와  $A_i$ 이다.

### 4.3 프랙탈 차원에 의한 JRC 정량화

본 연구에서는 수정된 분할자 방법(modified dividermethod)을 적용하여 프랙탈 차원과 절편을 구하였다. 통계적 분석에서와 동일하게 프로파일에서 비정상(non-stationary)부분을 제거하고 측정간격(dx)을 0.1mm에서 1.0mm까지 넓혀가면서 각 측정간격에 대한 전체 프로파일 길이를 구하고 측정수를 구하였다. 그림 8와 9에는  $JRC=0\sim 2$ 과  $JRC=18\sim 20$ 의 분할자와 측정길이를 log-log 그래프로 나타내어 각각 프랙탈 차원을 구한 것이다. 분할자의 길이가 커짐에 따라 프로파일 길이가 상당히 넓게 변하여 분할자의 크기를  $\log(dx)=-1.0\sim 0.3$ 까지의 범위를 1차식으로 나타내어 프랙

표 2. Barton과 Choubey의 프로파일의탈차원(D)과 절편(A)

JRC	D	A	R <sup>2</sup>
0-2	1.00294338	1.98760	0.3169
2-4	1.00641895	2.00067	0.5998
4-6	1.00491946	1.99918	0.6721
6-8	1.01317200	1.99667	0.7526
8-10	1.00720594	1.99559	0.7300
10-12	1.00595359	1.99864	0.5664
12-14	1.00754564	1.98854	0.7676
14-16	1.00636327	2.01352	0.6067
16-18	1.00967179	2.00770	0.7495
18-20	1.01386630	2.01860	0.8774

탈 차원을 구하였다. 표 2에 그외의 JRC를 나타내는 프로파일의 프랙탈 차원과 절편을 나타내었다. 이 프랙탈 차원과 JRC와의 관계는 그림 10과 같다. 상관성이 상당히 낮은 것으로 나타났다. 그림 11은 JRC와 프랙탈 절편과의 관계를

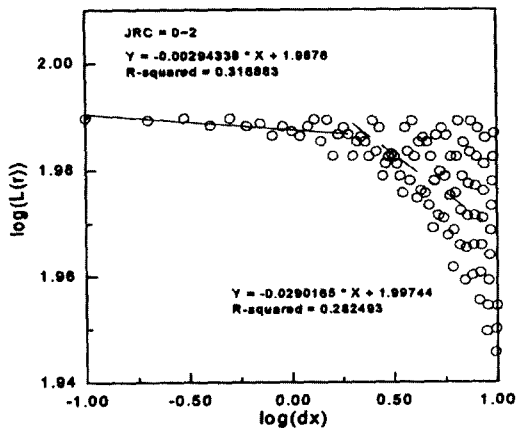


그림 8. JRC=0~2의 프랙탈 차원과 절편그림

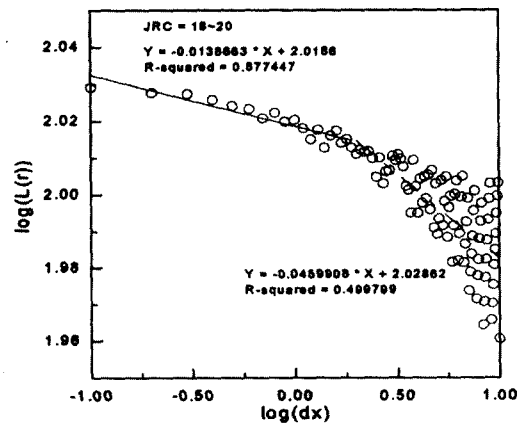


그림 9. JRC=18~20의 프랙탈 차원과 절편

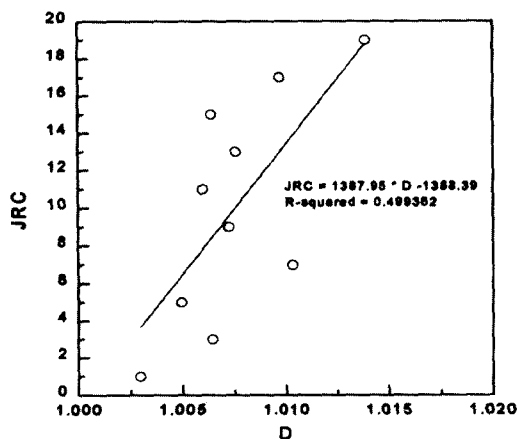


그림 10. JRC와 프랙탈차원 D와의 관계그림

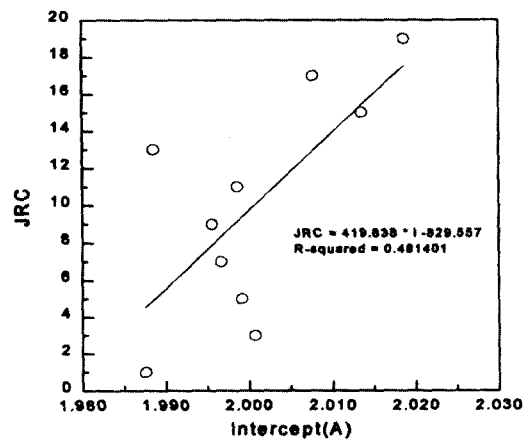


그림 11. JRC와 프랙탈 절편(A)와의 관계

나타내었다. 이 관계도 역시 상당히 낮은 상관성을 나타내고 있다. 프랙탈 차원이 상당히 작게 산출되고 JRC 값과 상관성이 낮은 이유는 측정간격, 즉 분할자 dx가 크로스오버 차원(crossover dimension)보다 크기 때문이다. 절리면에 대한 크로스오버 차원 이하의 측정은 현재의 측정기들로는 거의 불가능한 것으로 알려져 있다.

#### 4.4 스펙트럼 분석에 의한 JRC 정량화

스펙트럼 분석을 수행하기 위하여 Barton과 Choubey의 프로파일을 수치화한 데이터에서 비정상 부분을 제거하고 이에 대하여 FFT(fast fourier transform)를 실시하였다. 스펙트럼 분석에서 프로파일의 최장 파장은 프로파일의 길이이며, 최단 파장은 샘플링간격의 2배, 즉 나이퀴스트 주파수(Nyquist frequency)의 역수와 같다. 나이퀴스트 주파수란 알리아싱(aliasing) 현상을 발생시키지 않는 최대의 주파수를 말한다. 알리아싱은 프로파일에 나이퀴스트 주파수 이상의 주파수가 존재할 경우 중첩을 일으키는 현상을 말한다. 본 연구에서 샘플링 간격은 0.1mm이므로 나이퀴스트 주파수는 5Hz(1/0.2mm)이다. 종축과 횡축을 진폭과 주파수의 대수 그래프로 각각의 프로파일에 대하여 표시하고 이를 선형으로 표시하여 기울기와 절편을 구하였다. 푸리에 변환을 실시한 결과에 대하여 노이즈를 제거하기 위한 필터는 사용하지 않았다. 푸리에 변환 결과에 영향을 줄 정도의 노이즈가 섞이지 않았으며, 필터에 의해 결과가 달라질 수 있기 때문이다. 그림 12, 13은 JRC=0~2와 JRC=18~20인 프로파일에 대한 푸리에 변환을 실시한 후 진폭과 주파수에 대하여 대수 그래프로 나타낸 뒤 선형으로 회귀분석한 것이다. 여기서 기울기(slope, S)는 프로파일의 각 주파수(1/파장) 성분에서의 진폭의 크기를 나타내므로 기울기를 통해서 거칠

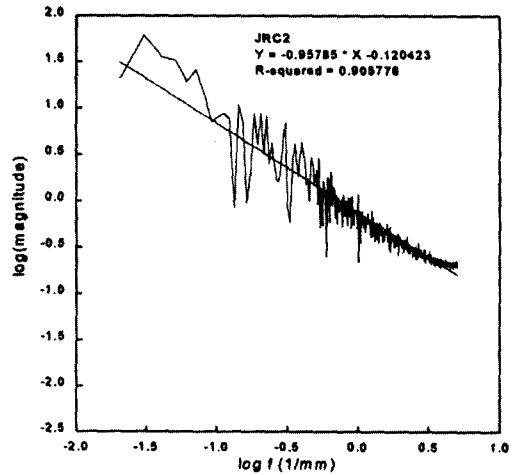


그림 12. JRC=0~2인 프로파일의 스펙트럼

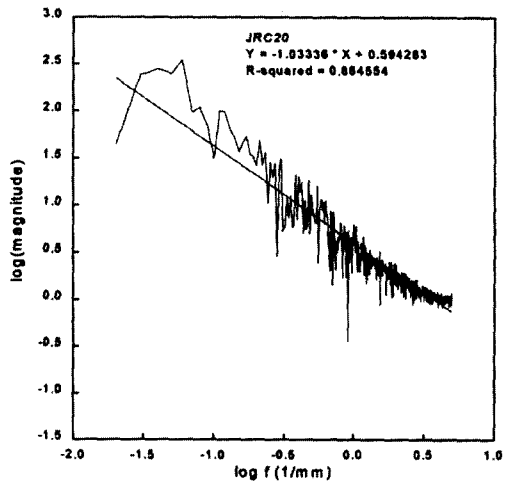


그림 13. JRC=18~20인 프로파일의 스펙트럼

$$\ln JRC = 7.8507015 - 2.9456089 / S^2 - 3.8465863 e^{-1} \\ r^2 = 0.95593806 \quad DF \text{ Adj } r^2 = 0.9339071 \quad FkStdErr = 1.4412514 \quad Fstat = 75.933641$$

표 3. JRC 값과 진폭스펙트럼의 기울기(S)와 절편(I)

JRC	기울기(S)	절편(I)
0-2	-0.9578	-0.1205
2-4	-1.1767	-0.3724
4-6	-1.1422	-0.0715
6-8	-1.0539	0.2851
8-10	-1.6163	-0.1693
10-12	-0.9586	0.5065
12-14	-0.9608	0.6535
14-16	-1.0014	0.5277
16-18	-1.0222	0.5351
18-20	-1.0334	0.5943

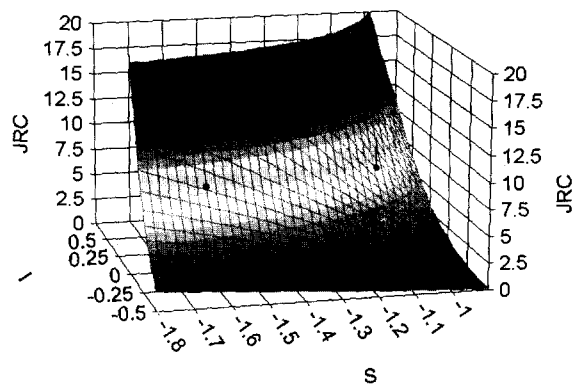


그림 14. JRC와 스펙트럼의 기울기와 절편의 관계



기를 알 수 있으며, 기울기가 작을수록 긴 파장과 짧은 파장에 있어서 고르게 거칠다. 절편(intercept, I)은 어떤 특정 파장에서의 절리면의 경사(굴곡)를 나타낸다.

표 3에는 JRC를 나타내는 10개의 프로파일에 대한 진폭스펙트럼에 대하여 log-log 곡선의 기울기와 절편을 구한 것이다. 이 기울기와 절편을 변수로하여 다중회귀분석을 통하여 JRC와의 관계를 구한 결과를 그림 14에 나타내었으며 식(18)에 JRC와 기울기 S 그리고 절편 I와의 관계식을 나타내었다.

$$\ln JRC = 7.850715 - 2.9456089/S^2 - 3.8465863e^{-I} \quad (18)$$

여기서,

S = 진폭스펙트럼의 기울기, I = 진폭스펙트럼의 절편

Kulatilake 등(1995)은 진폭의 제곱과 주파수의 log-log 그래프인 파워스펙트럼의 기울기와 절편으로 R<sup>2</sup> 값 0.8423을 얻은바 있다. 식 (18)에서의 JRC 값과 진폭스펙트럼의 기울기와 절편 사이의 상관성은 R<sup>2</sup> 값이 0.956으로 매우 높게 나타났다.

프로파일의 위상과 주파수로 나타낸 위상스펙트럼은 매우 불규칙하여 위상과 주파수의 관계를 끌어내기 곤란하

다. JRC를 표현하는 10개의 프로파일의 위상스펙트럼에서 음의 위상을 양의 위상으로 나타내어( $\pi$ -위상) 위상과 주파수와의 관계를 유도하여 보았지만 일관성을 찾지는 못하였다. 각 사인파의 최초 정점의 위치를 알려주는 정보인 위상은 변화되어도 진폭과 주파수에 전혀 영향을 미치지 않으므로 위상이 고려되지 않은 스펙트럼 분석에 의한 거칠기의 정량화는 큰 문제점을 안고 있다. 위상의 변화에 따라 프로파일의 형상이 크게 바뀔 수 있기 때문이다. 이를 확인하기 위하여 프로파일의 푸리에 변환 결과를 진폭과 주파수는 변동 없이 위상만  $-\pi \sim \pi$  까지 불규칙하게 변화시키고 역푸리에 변환(Inverse Fourier Transform)에 의하여 프로파일을 생성하는 프로그램을 작성하였다. 그림 15에는 JRC 14~16의 원 프로파일의 위상스펙트럼을 나타내었다. 그림 16은 작성된 프로그램에 의해 그림 15의 위상을  $-\pi \sim \pi$  까지 불규칙하게 변조한 위상스펙트럼이다. 이 프로그램에 의해 역푸리에 변환을 실시하여 생성된 변조 프로파일을 원 프로파일과 함께 그림 17에 나타내었다. 변조된 프로파일은 원래의 프로파일과는 상당히 달라져 있음을 알 수 있다. 원 프로파일의 진폭-주파수의 대수 그래프와 변조된 프로파일의 진폭-주파수의 대수 그래프를 그림 18에 나타내었다. 두 그래프는 동일하며, 동일한 기울기와 절편을 가진다. 따라서 식 (18)에 의해 동일한 JRC를 산출한다. 이러한 오류는 파워스

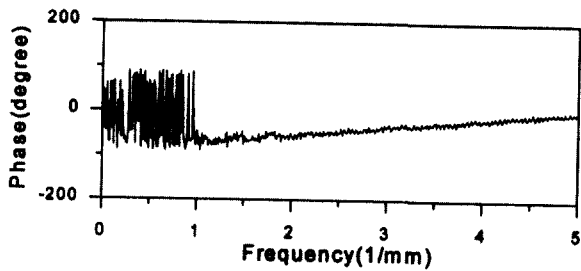


그림 15. JRC=14~16인 프로파일의 위상스펙트럼그림

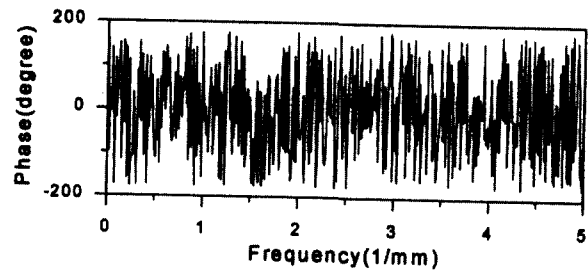


그림 16. 위상 변조된 위상스펙트럼

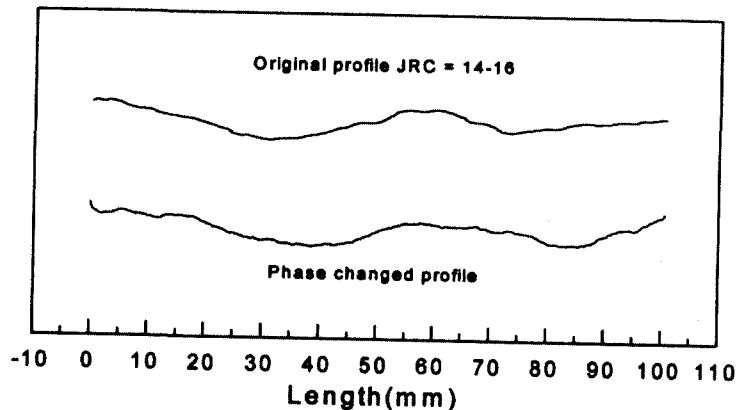


그림 17. JRC=14~16인 원 프로파일과 위상이 변조된 프로파일

표 4. JRC와 통계적 파라미터의 기울기(S)와 절편(I)의 회귀식

Statistical Parameter	Regression Equation	R <sup>2</sup>	Fstat
Z <sub>2</sub>	JRC=-0.1975+339.3661I <sup>1.5</sup> +153.263I/lnI	0.994	629.7
ln(Z <sub>2</sub> )	lnJRC=3.3844+72.2743S <sup>3</sup> -0.3687I <sup>2</sup>	0.997	1176.9
Ai	JRC-1=0.0292+9.38e-5/S <sup>2</sup> +4.59901/I <sup>2</sup>	0.996	856.2
ln(Ai)	lnJRC=-3.0249+64.8456S <sup>3</sup> +3.6731I <sup>0.5</sup>	0.998	1401.5
Ai+	JRC-1=0.0111-0.0202S <sup>3</sup> +5.7561/I <sup>2</sup>	0.995	714.9
ln(Ai+)	lnJRC=3.753+1.717S-10.5907e <sup>-1</sup>	0.984	217.6
Ai-	JRC-1=0.0201+0.00098./S <sup>2</sup> +1.6637/I <sup>1.5</sup>	0.972	122.3
ln(Ai-)	JRC-1=-2.8594-9.099e-5/S <sup>2</sup> +3.5493/I0.5	0.972	120.6
Rp	JRC=8131.426+20932.95lnS-8130.36I <sup>2.5</sup>	0.993	488.6
ln(Rp)	JRC=-0.1481-53.9311I+25.842I <sup>0.5</sup>	0.993	515.4

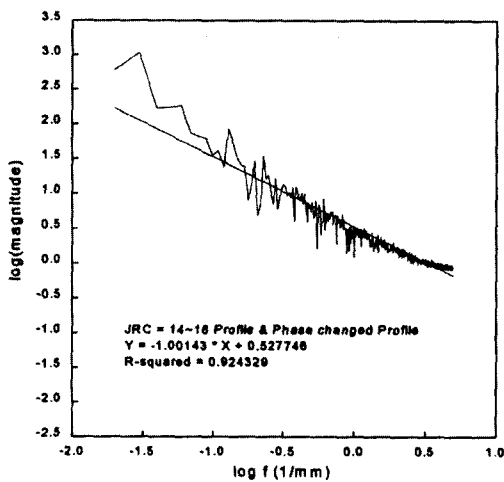


그림 18. JRC=14~16인 원프로파일과 위상변조 프로파일의 진폭-주파수의 log-log 도시

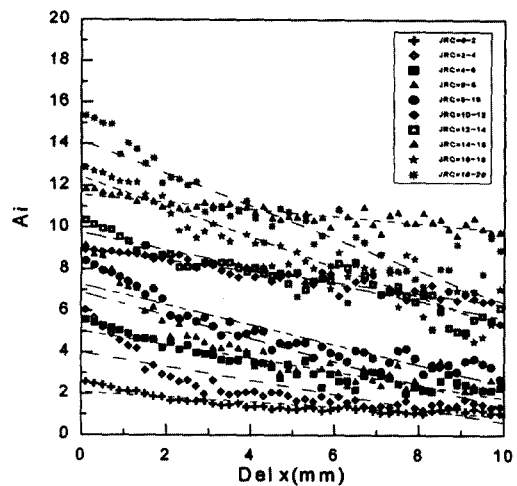


그림 19. 측정간격별 평균 거칠기 Ai의 1차 회귀

팩트럼을 이용하여 거칠기를 정량화하는 모든 연구에 포함되어 있다.

#### 4.5 새로운 JRC의 정량화

JRC와 상관성이 높고, 측정간격에 영향을 받지 않고 위상변조된 프로파일에 대해서도 그에 상응하는 JRC 값을 나타낼 수 있는 파라미터를 찾기 위하여 통계적 분석과 스펙트럼 분석방법을 살펴보았다. 스펙트럼 분석에서 진폭스펙트럼의 진폭 대 주파수의 대수 그래프에서 기울기는 각 주파수 성분에서의 진폭의 크기를 나타내므로 기울기가 작을수록 장파장과 단파장에서 진폭 대 파장비가 고르다는 것을 나타낸다. 즉 측정간격에 따라 거칠기가 어떻게 바뀌는지를 의미한다. 절편은 어떤 특정 파장에서 프로파일의 진폭을 나타내므로 절편이 클수록 프로파일이 전체적으로 굴곡이 심하다. 따라서 진폭스펙트럼의 절편이 크고 기울기가 작으

면 프로파일의 굴곡(1차 거칠기)이 심하고 큰 굴곡내에 작은 거칠기들(2차 거칠기)이 존재하는 것을 의미한다. 스펙트럼 분석에서는 이 기울기와 절편의 두 변수를 사용하여 측정간격에 독립적이나 위상정보의 누락이 문제가 되었다. 통계적 분석에서 프로파일의 기울기와 관련된 파라미터는 공간영역에서의 정보이므로 위상정보가 필요 없다. 따라서 기울기 관련 통계적 파라미터의 측정 간격별 그래프에서 기울기와 절편을 JRC 정량화의 변수로 사용하므로써 문제가 해결될 수 있다. 즉 측정간격별 통계적 파라미터의 그래프를 1차식으로 회귀분석하여 기울기와 절편을 찾아내고 이 기울기와 절편과 JRC 값과의 관계를 구하면 JRC의 정량화가 이루어 질 수 있다. 여기서의 기울기는 1차 거칠기와 2차 거칠기의 정도를 나타낸다. 측정간격이 작은 구간에서는 1차 거칠기와 2차 거칠기를 동시에 표현하며, 측정간격이 큰 구간에서는 1차 거칠기만을 표현한다. 절편은 측정간격이 0일때

$$JRC^{-1} = 0.020137373 + 0.00098143553/S^2 + 1.6637062/I^{1.5}$$

$$r^2 = 0.97217348 \quad DF \text{ Adj } r^2 = 0.95826021 \quad \text{FitStdErr} = 1.1453479 \quad \text{Fstat} = 122.27928$$

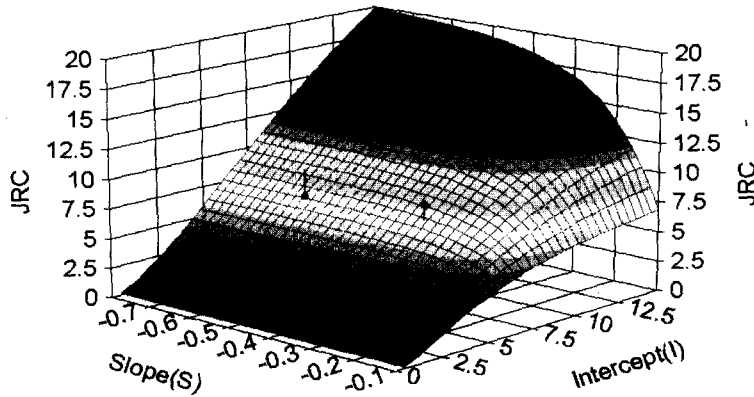


그림 20. JRC와 측정간격에 따른 Ai-곡선의 기울기(S)와 절편(I)의 관계

표 5. 각 JRC 프로파일의 ln(Ai)와 Ai-의 기울기(S)와 절편(I)

JRC	ln(Ai)			Ai-		
	$\ln JRC = -3.0249 + 64.8456S^2 + 3.6731I^{0.5}$			$JRC^{-1} = 0.0201 + 0.00098/S^2 + 1.6637/I^{1.5}$		
	기울기(S)	절편(I)	JRC Predict	기울기(S)	절편(I)	JRC Predict
0~2	-0.0754	0.7383	1.109	-0.0468	1.8814	1.388
2~4	-0.1325	1.3903	3.175	-0.0985	3.8671	4.054
4~6	-0.0950	1.6535	5.169	-0.0988	4.7152	5.151
6~8	-0.1274	1.9629	7.295	-0.1076	7.2499	9.279
8~10	-0.0968	2.0157	8.425	-0.1236	6.5481	7.727
10~12	-0.0357	2.2043	11.309	-0.0300	9.7142	11.748
12~14	-0.0553	2.3024	12.649	-0.0702	10.2929	12.804
14~16	-0.0159	2.4484	15.215	-0.0151	13.7545	15.077
16~18	-0.0850	2.5682	16.805	-0.1073	13.2868	17.493
18~20	-0.0751	2.6736	19.174	-0.0881	13.8872	18.509

의 기울기 관련 파라미터 값을 나타내고 절편이 크면 1차와 2차 거칠기가 크다는 것을 뜻하므로 절편만으로도 JRC의 정량화가 가능할 수 있다는 의미를 포함한다. 그러나 명확한 물리적 의미를 가지려면 기울기와 절편이 모두 클수록 프로파일의 굴곡이 심하고 거칠다고 말할 수 있다.

그림 19에는 절리면 평균 거칠각인 Ai에 대하여 기울기와 절편을 구하는 예를 나타내었다. 그림 19와 같이 3.2절에서 수행한 통계적 파라미터들과 측정간격과의 관계 곡선에서 1차식으로 회귀분석하여 기울기(S)와 절편(I)과 이를 JRC와 다중회귀 분석한 결과를 표 4에 나타내었다. 표 4에서 알 수 있듯이 통계적 파라미터의 기울기와 절편은 JRC와 매우 높은 상관성을 나타내고 있다. Z<sub>2</sub>와 R<sub>p</sub> 그리고 ln(R<sub>p</sub>)는 절

편으로만 JRC를 잘 나타내고 있어 위에서 언급한 절편만으로 JRC의 정량화가 가능할 것이라는 것을 뒷받침 해준다. 그러므로 절편과 기울기가 모두 큰 쪽이 프로파일의 굴곡이 크고 거칠다는 즉, 절편과 기울기가 모두 클 때 큰 JRC 값을 나타내는 관계식이 가장 정확히 거칠기를 표현할 수 있다는 것은 명확하다.

한편 전단강도는 전단방향에 따라 다른 값을 나타내므로 거칠기를 나타내는 파라미터가 이를 표현할 수 있어야 한다. JRC는 이러한 이방성을 표현하지 못하고 있다. 앞에서 조사한 파라미터들 중에서 이방성을 표현할 수 있는 것은 Ai+와 Ai-이다. Ai-는 하부시편이 우측으로 전단되는 경우를 나타낸다. 그림 20에 나타낸 Ai-의 기울기와 절편의 JRC 값과의

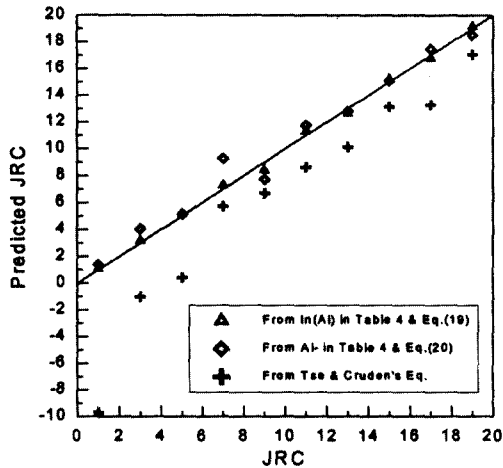


그림 21. JRC 값과 JRC 예측값과의 관계

관계를 살펴보면 절편(I)이 클 때 JRC가 크고 기울기(S)가 클 때 JRC가 큰 값을 나타낸다. 이것은 JRC와의 상관성은  $R^2$ 이 0.972로 다른 파라미터에 비해 조금 낮으나 조사한 결과들 중에서 물리적 의미를 가장 잘 충족하고 있다. 따라서 그림 1의 Barton과 Choubey의 프로파일은 하부시편을 우측으로 전단시험하여 얻은 값이라고 판단된다.

표 4에서 JRC 값과 가장 상관성이 높은  $\ln(A_i)$ 와 물리적 의미가 잘 맞는  $A_i$ 에 대하여 기울기(S)와 절편(I) 그리고 JRC 예측값을 표 5에 나타내었고 그림 21에 이들의 JRC와 JRC 예측값과의 관계 그리고 Tse와 Cruden(1979)의 회귀식 ( $JRC = 32.2 + 32.471 \log Z_2$ )으로 구한 JRC 값을 나타내었다. Tse와 Cruden의 회귀식은 1.27mm의 측정간격에서 구한 것이므로 본 연구에서는 그와 가장 근접한 측정간격인 1.3mm로 구한  $Z_2$  값을 대입하여 JRC를 계산하였다. 새로이 제안된 식(19)와 식(20)에 의해 예측된 JRC는 Tse와 Cruden의 식으로 예측한 것보다 정확히 예측함을 알 수 있다. JRC=8~10을 나타내는 프로파일은 예상 JRC 값이 두 방법 모두 Barton의 값보다 작은 값이 산출되었다. 이는 Barton과 Choubey의 일부 프로파일에서 JRC 등급에 문제점이 있을 수 있다는 의미이기도 하다. 이는 Kulatilake 등(1995)의  $R_p$  값의 비교에서 JRC=6~8의 프로파일은 JRC=8~10의 프로파일보다 큰 값을 나타내는 것에서도 잘 나타난다.

앞의 조사에서 JRC 값과 가장 상관관계가 높은 것은 식(19)이며, 거칠기의 물리적 의미에 가장 부합되는 것은 식(20)과 같다.

$$\ln JRC = -3.0248601 + 64.845596 S^3 + 3.6730795 I^{1.5} \quad (19)$$

여기서,  $S = \ln A_i$ 와 측정간격(dx)의 그래프에서 기울기  
 $I = \ln A_i$ 와 측정간격(dx)의 그래프에서 절편

$$JRC = \frac{1}{0.020137373 + (9.81436e-4)/S^2 + 1.6637062/I^{1.5}} \quad (20)$$

여기서,  $S = A_i$ 와 측정간격(dx)의 그래프에서 기울기  
 $I = A_i$ 와 측정간격(dx)의 그래프에서 절편

위의 식으로 3.4 절의 JRC=14~16인 프로파일을 위상변조한 프로파일(그림 17)에 대하여 JRC 값을 산출하였다. 식(19)에 의해서는  $S = -0.0388$ ,  $I = 2.6664$ 이며 계산된 JRC 값은 19.4747이다. 식(20)에 의해서는  $S = -0.7074$ ,  $I = 14.9209$ 이며 계산된 JRC 값은 19.6214이다. 여기서 하부시편을 좌측으로 전단시험한다면 이때의  $S = -0.2382$ ,  $I = 15.2618$ 로 식(20)에 의해 JRC=15.3048를 산출하여 방향에 따른 거칠기의 이방성을 나타낼 수 있다. Barton과 Choubey의 프로파일 이외의 프로파일에 대하여 산출되는 값이 정확한지는 실험을 통하여 규명되어야 하며 여러 실험데이터의 분석에 의해 JRC가 아닌 정량화된 파라미터와 전단강도를 직접 관계시켜 거칠기에 따른 전단강도를 규명할 수 있을 것이다.

## 5. 결론

Barton과 Choubey에 의해 제안된 10개의 JRC 프로파일은 측정된 프로파일과 시각적인 비교에 의해서 값을 정하므로 매우 주관적이다. 이 거칠기 계수를 정량화하기 위해 10개의 프로파일을 주사(scan)하고 이를 벡터화하여 AutoCad로 0.1mm 간격으로 수치화하였다. 기존의 연구된 방법들인 통계적 분석법, 프랙탈 차원에 의한 방법 그리고 스펙트럼 분석법에 대하여 비교, 분석하였으며, 기존 방법들의 문제점을 제시 하였으며 이들 분석방법을 토대로 기존 방법의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 정량화 방법을 제시하였다. 그 내용은 다음과 같다.

- (1) 전단강도와 관련된 절리 거칠 계수는 1차 거칠기와 2차 거칠기를 모두 표현할 수 있어야 한다. 큰 굴곡의 정도가 크고 그 속에 작은 거칠기가 커야 큰 전단강도를 나타낼 수 있다.
- (2) 통계적인 분석 방법은 프로파일의 기울기를 의미하는 파라미터가 JRC 값과 상관성이 높다. 이들 파라미터는 모두 측정간격에 영향을 받는다.
- (3) 수정 분할자 방법은 크로스오버 차원보다 큰 측정간격

으로 측정하여 JRC 값과의 상관성이 매우 낮게 나타났다. 현재의 거칠기 측정장비로는 분해능이 작아 크로스 오버 차원보다 작은 간격으로 측정하는 것은 거의 불가능하다.

- (4) 스펙트럼 분석에 의한 JRC의 정량화는 진폭스펙트에서 진폭과 주파수(1/파장)의 대수 그래프의 기울기와 절편을 사용하여 측정간격의 영향은 받지 않으나 위상정보의 누락으로 위상이 변화했을 경우의 프로파일의 변화에 적절한 JRC값을 산출하지 못한다. 현재까지의 스펙트럼 분석에 의한 연구들은 모두 이러한 오류를 포함하고 있다.
- (5) 새로운 거칠기의 정량화 방법은 프로파일 기울기와 관련된 통계적 파라미터와 측정간격과의 그래프에서 선형회귀분석을 하여 구한 기울기와 절편을 JRC 정량화의 변수로 사용하므로써 치수 의존적인 문제와 위상변조의 문제를 해결하였다.
- (6) 새로운 거칠기의 정량화 방법에서 기울기는 1차 거칠기와 2차 거칠기의 정도를 의미하며 측정간격이 큰 구간에서는 1차 거칠기를 표현하며, 측정간격이 작은 구간에서는 1차와 2차 거칠기를 동시에 표현한다. 절편은 1, 2차 거칠기를 의미하나 주로 1차 거칠기를 표현하여 프로파일의 큰 굴곡의 정도를 나타낸다. 따라서 S와 I가 동시에 클수록 프로파일은 굴곡이 심하며 거칠다고 할 수 있다.
- (7) 기울기와 관련된 통계적 파라미터들 중  $A_i$ -곡선의 기울기와 절편에서 구해진 JRC와의 관계식은 1차 거칠기와 2차 거칠기가 모두 거칠수록 큰 전단강도를 나타낸다는 물리적 의미와 가장 잘 부합되며 전단방향에 따른 이방성을 표현할 수 있다.
- (8) 본 연구에서 제시된 새로운 거칠기 정량화 방법은 기존의 거칠기 정량화의 문제점인 치수 의존적인 문제와 위상변조된 프로파일에 대하여 동일한 JRC를 산출하는 문제점을 해결하였으며, 향후 전단시험 결과와  $A_i$ -의 기울기와 절편을 직접 비교를 통하여 새로운 전단강도 모델이 제시될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. 이상돈(1996), "절리형상의 정량적 측정을 통한 각종 거칠기 파라미터의 비교분석 및 전단거동 해석", 서울대학교 박사학위 논문, pp.1~90.
2. Bandis, S. C., Lumsden, A. C. and Barton, N. R.(1981), "Experimental studies of scale effects on the shear behavior of rock joints", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp.1~21.
3. Barton, N. R.(1973), "Review of a new shear-strength criterion for rock joints", Engineering Geology, 7, pp.287~332.
4. Barton, N. and Choubey, V.(1977), "The shear strength of rock joints in theory and practice", Rock Mech. Vol. 10, pp.1~54.
5. Berry, M. V. and Lewis, Z. V.(1980), "On the weierstrass-Mandelbroit

- fractal function", Proc. of the Royal Society of London, A370, pp.495~484.
6. Brown, S.R., (1987), "A note on the description of surface roughness using fractal dimension", Geophys. Res. Lett. Vol. 14, pp.1095~1098.
7. Brown, S.R. and Scholz, C.H., (1985), "Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces", J. Geophys. Res. Vol. 90, pp.12,575~12,582.
8. Carr, J. R. and Warriner, J. B.(1989), "Relationship between the fractal dimension and joint roughness coefficient", Bull. Assoc. Engng. Geol. 26, pp.253~264.
9. Carr, J. R.(1989), "Fractal characterization of joint roughness in welded tuff of Yucca mountain, Nevada", Proc. 30th U.S. Symp. Rock Mech., Morgantown, West Virginia, pp.193~200.
10. Chatfield, C.(1975), "The analysis of time series: Theory and practice", John Wiley, New York, pp. 263.
11. Huang, S. L.(1992), "Applicability of fractal characterization and modelling to rock joint profiles", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 29, No. 2, pp.89~98.
12. Kulatilake, P. H. S. W., Shou, G. Huang, T. H. and Morgan, R. M.(1995) "New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 32, No. 7, pp.673~697.
13. Ladanyi, B. and Archambault, G.(1970), "Simulation of shear behavior of a jointed rock mass", proc. 11th Symp. on Rock Mech., AIME, New York, pp.105~125.
14. Lee, Y. H., Carr, J. R., Barr, D. J. and Hass, C. J.(1990), "The fractal dimension as a measure of roughness of rock discontinuity profile", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 27, No.5, pp.329~343. Symp. on Rock Mech., pp.1223~1236.
15. Maerz, N. H., Franklin, J. A. and Bennet, C. P.(1990), "Joint roughness measurement using shadow profilometry", Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 27, No. 5, pp.329~343.
16. Maksimovic M.(1992), "New description of the shear strength for rock joints", Rock Mech. Rock Eng., Vol. 25, pp.275~284.
17. Mandelbrot, B. B.(1967), "How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and the fractal dimension", Science 156, pp.636~638.
18. Mandelbrot, B. B.(1982), "The Fractal Geometry of Nature", Freeman, San Francisco, pp.468.
19. Miller, S. M., McWilliams, P. C. and Kerkerling, J. C.(1990), "Ambiguities in estimating fractal dimensions of rock fracture surfaces", Proceedings, Rock Mechanics Contribution and Challenges, eds: Hustruid & Johnson pp.471~478.
20. Myers, N. O.(1962) "Characteristics of surface roughness", Wear 5, pp.182~189.
21. Patton, F. D.(1966, a), "Multiple modes of shear failure in rock", Proc. 1st Congr. ISRM, Lisbon, 1, pp.509~513.
22. Patton, F. D.(1966, b), "Multiple modes of shear failure in rock and related materials", Ph.D thesis, Univ. of Illinois
23. Power, W. L. and Tullis, T. E.(1991), "Euclidean and fractal model for the description of rock surface roughness", J. of Geophy. Res., Vol. 96, No. B1, pp.415~424.
24. Schneider, H. J.(1976), "The friction and deformation behavior of rock joints", Rock Mech. 8, pp.169~184.
25. Tse, R. and Cruden, D. M.(1979), "Estimating joint roughness coefficients", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 16, pp.303~307.
26. Turk, N., Gerd, M. J., Dearman, W. R. and Amin, F. F.(1987), "Characterization of rock joint surfaces by fractal dimension", Proc. 28th U.S

(접수일자 2000. 10. 7)