

## 절리면 거칠기의 정량화에 대한 연구

김 열

강원대학교 지구물리학과

장보안

강원대학교 지구물리학과

장현식

강원대학교 지구물리학과

### 1. 서 론

지하구조물의 안정성에 영향을 미치는 중요한 요소 중의 하나가 절리면 거칠기이다. 그러나 절리면 거칠기는 측정자의 주관적인 오차 등 많은 문제점이 제시됨에도 불구하고 Barton과 Choubey(1977)가 제안한 표준 절리 모델을 이용하여 절리면 거칠기 정도를 표현하고 있다. 이를 보완하기 위해 많은 연구자들에 의해 절리면 거칠기 정량화에 대한 연구는 통계적 파라미터를 이용하는 방법, 프랙탈 차원(fractal dimension)을 이용하는 방법 그리고 스펙트럼(spectrum) 분석을 이용하는 방법으로 발전하여 왔다.

Tae와 Cruden(1979)은 Barton과 Choubey(1977)가 제안한 표준 절리 프로파일을 수치화한 후 프로파일 기울기의 평방평균(root mean square, RMS)인 Z2와 JRC 사이에 상관성을 발견하였다. Milier 등(1990)은 수개의 자연절리를 조사하여 Z2가 JRC와 높은 상관 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 암석표면에 대한 프랙탈 차원을 결정하고 1.0001과 1.022사이에 있다고 하였다. Miller 등(1990) 수정 분할자 방법(modified divider method)으로 구한 프렉탈의 대수 그래프에서 절편이 육안등급과 잘 일치한다고 하였다.

본 연구에서는 인공 거칠기 모델과 자연 절리를 대상으로 통계적 파라미터와 프랙탈 차원을 이용한 거칠기 정량화 방법과 JRC와 통계적 파라미터, 프랙탈 차원과의 유효한 상관관계식을 유도 하였다.

### 2. 연구 방법

절리면 거칠기에 대한 정량적 측정과 측정된 파라미터와 JRC와의 상관성을 분석하기 위해 Baton과 Choubey(1977)의 표준 거칠기 프로파일과 26개의 자연절리 시료를 0.1mm 간격으로 정밀하게 수치화 하여 분석하였다(Figure 1.a). 또한 통계적 파라미터의 측정에 있어 유효한 측정간격의 범위와 프렉탈차원 측정시 크로스오버(crossover) 길이를 규명하기 위해 인공 거칠기 모델을 구성하였다. 인공 거칠기 모델은 1차 거칠기의 높이를 0.6, 0.8, 1, 2, 4mm로 나누었으며 2차 거칠기의 높이를 0, 0.1, 0.2, 0.4mm로 각각 주어서 총 20개를 만들었다(Figure 1.b).

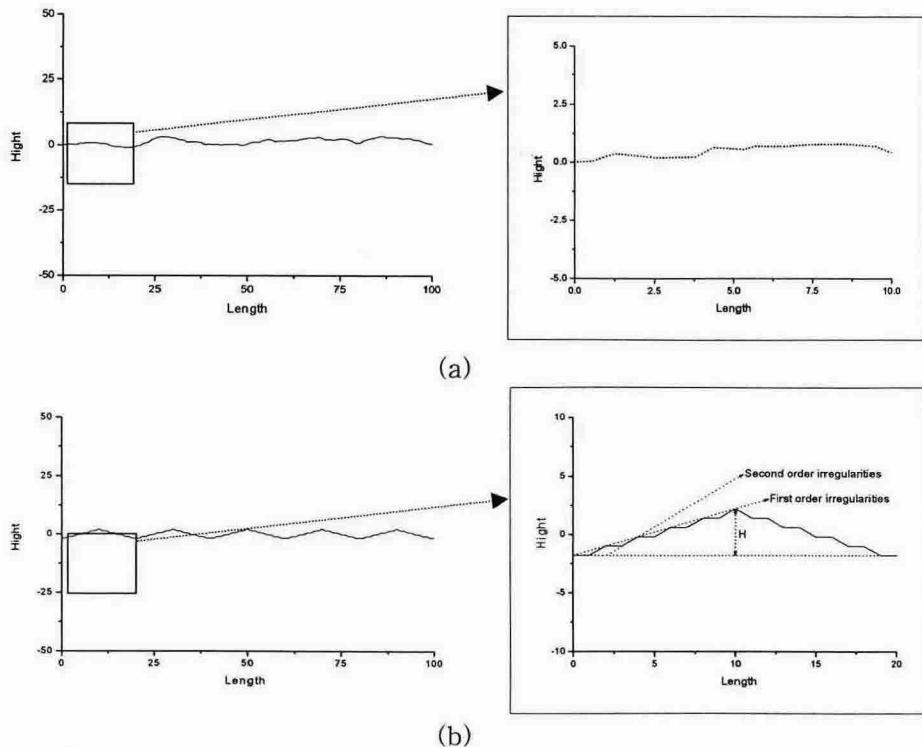


Figure 1. ISRM standard roughness profile(18~20) (a) and artificial roughness profile(4, 0.4) (b)

### 3. 거칠기의 정량화 방법

#### 3.1. 통계적 파라미터 방법

통계적인 파라미터로는 거칠기 높이의 표준 편차를 나타내는 평방평균 RMS(root mean square), 프로파일의 기울기의 표준편차를 나타내는  $Z_2$ (Myers, 1962), 프로파일 기울기를 나타내는 거칠기 형상지수  $R_p$ (roughness profile index), 평균 거칠각  $A_i$ (micro average angle), 표면 조직의 변화를 정량화하는 구조함수 SF(structure function) 등 많은 방법이 있다. 본 연구에서는 절리면 거칠기 측정에 가장 많이 쓰이는 방법인  $Z_2$ 와 천병식 등(2001)에서 통계적 파라미터 방법 중 상관도가 가장 좋다고 보고된바 있는  $A_i$ 에 대하여 연구를 하였다.

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

$$A_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \tan^{-1} \left( \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) \quad (2)$$

#### 3.2. 프렉탈 차원에 의한 방법

프렉탈 차원은 불규칙하고 복잡한 프렉탈 형상을 수학적이고 기하학적인 형태로 표현하는 방법이다. 쉬운 예로 직선은 1차원이고, 사각형이나 원과 같은 도형은 2차원, 육면체나 구와 같은 입체 도형은 3차원으로 프렉탈 차원(D)의 1차원은 1, 2차원은 2와 같이 정수로 표현된다. 또한 직선보다 복잡한 형태의 선, 즉 1차원의 직선과 2차원의 도형 사이의 선은 1과 2 사이의 프렉탈 차원

을 갖는다. 이러한 프렉탈 차원을 이용한 절리면 거칠기 측정 방법에는 분할자법(divider method), 박스집계법(box counting method), 배리오그램법(variogram method)등 여러 가지 방법이 있는데 본 연구에서는 분할자법과 배리오그램법을 연구하였다.

분할자 방법은 자를 이용하여 프로파일의 길이를 측정한다는 가정 하에 프로파일의 총 길이  $L$ 은 식(3)이 되며 짧은 자를 이용할수록 더욱 길어져 총 측정수와 측정자의 길이 사이에는 식(4)와 같은 관계가 된다. 여기서  $r=$ 자의 길이,  $N=$ 자의 수,  $D=$ 프렉탈 차원이다.

$$L=Nr \quad (3)$$

$$N=ar^{-D} \quad (4)$$

식(3)을 식(4)에 대입하면 식(5)가 되고 양변에 로그를 취하여 정리하면 식(6)이 된다. 절리면 거칠기와 같이 불규칙한선의 프렉탈 차원은 1보다 크기 때문에  $\log L$ 과  $\log N$ 에 대한 그래프는 음의 경사를 갖는 직선이 된다(Figure 2 a). Brown(1987)은 프로파일에 따른 분할자  $r$ 보다 수평 분할간격을 사용하는 수정된 분할자 방법(modified divider method)를 제안하였고 본 연구에서도 수정 분할자 방법을 사용하였다.

$$L/r=ar^{-D} \quad (5)$$

$$\log L=\log a+(1-D)\log r \quad (6)$$

배리오그램 방법은 공간 데이터 집합의 기하통계적인 분석이다. 절리면 형상의 기하 통계적 해석은 절리면의 거칠기와 높낮이의 공간적인 분포는 반-분산 함수(semi-variance function)의 배리오그램으로 특성화 될 수 있다. 단면선을 따르는 배열  $Z(X_i)$ 에 대해 반-분산  $v$ 는 식(7)과 같이 계산될 수 있다.

$$v=\frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i+h)]^2 \quad (7)$$

여기서  $Z(X_i)$ 는 단면선에 따른 배열,  $N$ 은 거리  $h$ 로 분리된 점의 개수이다. 추정된 반-분산을  $h$ 에 대해서 그리면 일정한 값에 접근하고  $h$ 가 증가함에 따라 증가한다. 추정된 반-분산의 로그 값이  $h$  로그 값의 함수로 그려진다면 배리오그램 추세선의 기울기는 식(8)과 같은 관계가 있다 (Figure 2 b).

$$D=2-\frac{slope}{2} \quad (8)$$

배리오그램의 문제점은 샘플링 간격  $h$ 를 어떻게 선택하는가에 따라 프렉탈 차원 값이 달라지는데 본 연구에서 이러한 문제점의 해결방안에 대하여 연구 하였다.

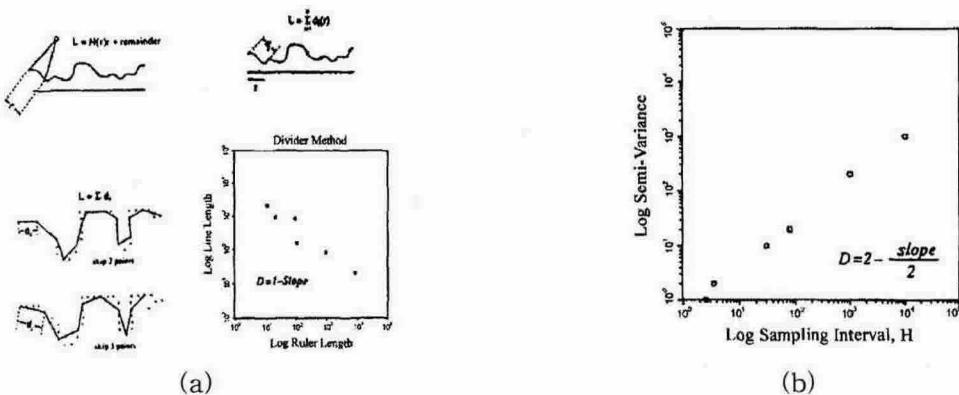


Figure 2. (a) Divider method, (b) Variogram method; compute semi-variance as a function of sampling interval and plot on a log-log graph.

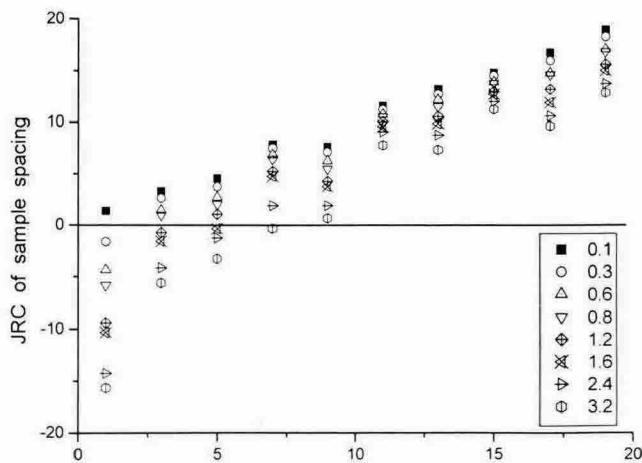
#### 4. 연구 결과

##### 4.1. 통계적 파라미터 방법( $Z_2$ )에서 측정간격에 따른 JRC의 상관성 분석

통계적 파라미터 방법은 측정간격에 따라 영향을 받는 문제가 있다. 따라서 측정 장비의 제약이 없고 정확한 JRC값을 산출하기 위해 알맞은 측정간격을 찾아야 한다. 본 연구에서는 대표적인 통계적 파라미터인  $Z_2$  파라미터 사용하여 표준 프로파일을 대상으로 거칠기 수치화시 측정간격에 따른 파라미터의 변화를 분석하였다. 거칠기 측정에 사용된 측정간격은 0.1, 0.3, 0.6, 0.8, 1.2, 1.6, 2.4, 3.2mm로 하였으며, 각 측정간격별로 구하여진  $Z_2$  파라미터는 Tse와 Cruden(1979)이 제시한  $Z_2$ -JRC 관계식(식 9)을 이용하여 JRC를 구하였다.

$$JRC = 32.2 + 32.471(\log Z_2) \quad (9)$$

Figure 3은 JRC 0~20까지 10개의 표준프로파일을 각각의 측정간격별로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 표준 프로파일 JRC 값이 작을수록 측정간격이 넓을 경우  $Z_2$  파라미터로 계산된 JRC는 신뢰도가 많이 떨어짐을 알 수 있다. 측정간격이 가장 작은 0.1로 측정하였을 때의 값이 표준 프로파일 JRC값과 가장 잘 맞지만 0~2의 프로파일을 제외하고 0.1간격과 0.3간격으로 측정된 JRC값은 비슷한 결과 값을 보인다. 0.1mm 간격으로 측정할 수 있는 장비가 있다면 문제가 없지만 그렇지 않다면 0.3mm 간격으로 측정을 하여 JRC값을 산출해도 큰 무리는 없을 것으로 판단된다.

Figure 3. Variation of JRC by sample spacing ( $Z_2$ ).

#### 4.2. $Z_2$ 파라미터와 JRC의 상관성 분석

Tse와 Cruden(1979)의 식은 가장 간편하면서도  $Z_2$ 와 JRC값 사이에 상당히 좋은 상관관계를 보이기 때문에 JRC측정에 가장 많이 사용된다. 그러나 Tse와 Cruden의 식은 거칠기가 거의 없는 자연 절리 시료에서 음(-)의 값을 보이는 단점이 있다. JRC가 -3인 시료와 -5인 시료가 있다고 가정하면 두 시료 사이에는 분명한 JRC의 차이를 보이지만 두 시료 모두 0의 값으로 표기 된다. 따라서 음(-)의 값을 줄일 수 있는 회귀식에 대한 연구를 10개의 표준 프로파일과 26개의 자연 절리 시료를 대상으로 실시하여 새로운  $Z_2$ -JRC 상관관계식(식 10)을 도출하였다.

$$JRC = 129.3(Z_2) - 134.2(Z_2)^2 - 11.2 \quad (10)$$

식(10)은 상관도( $R^2$ )가 0.9866이고, 식(9)는 상관도( $R$ )가 0.9857으로 거의 비슷한 상관도를 보인다. 그러나 식(10)은 식(9)로 구한 JRC값 보다 음(-)의 값을 보이는 경향이 적다. 자연 절리 시료 중에 식(9)로 구한 JRC값이 -4.8로 계산되는 시료를 식(10)으로 계산하면 -2.5가 된다. 이론상 0 이하의 값이 나오면 안되지만  $Z_2$ 와 JRC값 사이에 상관도를 높이면서 음(-)의 값을 나타내지 않는식을 제시하지는 못했다. 그러나 식(10)은 음의 JRC값을 줄이는 장점이 있으나 JRC가 20이상에서는 오히려 JRC 값이 감소하는 형태를 보이는 단점도 있다. 예를 들면 자연 절리 시료에서 식(9)식으로 계산하여 24의 JRC 값을 보인 시료를 식(10)으로 계산해 보면 19로 계산된다. 그러므로 식(10)은 JRC가 20 이상에서는 신뢰도가 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 이를 보완하기 위하여 식(11)을 제안한다.

$$JRC = \frac{-117.85}{1 + e^{Z_2 + 0.13/0.17}} + 24.09 \quad (11)$$

JRC 0~20 구간에서 식(11)의 상관도( $R^2$ )는 0.9852로 식(9), 식(10)과 비교하여 상관도가 떨어지지 않으며 식(9)에서 -4.8의 값을 보이는 시료를 식(11)로 구하였을 때 -3의 값을 보이며 24의 값을 보이는 시료는 22의 값을 보인다. Figure 4는 식(9), 식(10), 식(11)로 각각 계산한 JRC 값을 도시한 것이다. Figure 4를 보면 식(9)은 JRC값이 작을 때 음(-)의 값에 많이 치우치며 식(10)은 JRC 20 이상에서 낮은 값을 보이므로 다소 식이 복잡하지만 음(-)의 값을 적게 보이며 JRC 20 이상에서도 JRC를 잘 나타낼 수 있는 식(11)이  $Z_2$ -JRC 상관관계식으로 가장 적절하다고 판단된다.

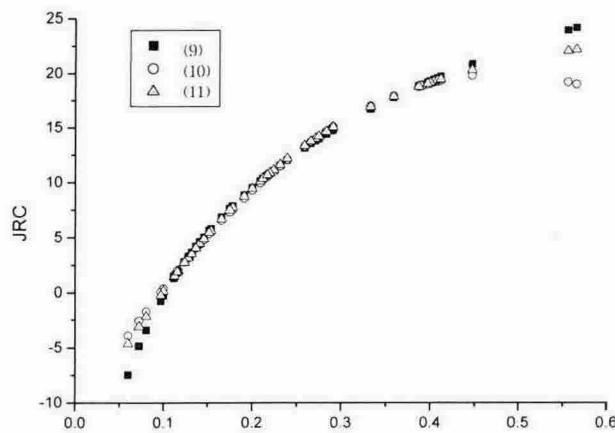


Figure 4. Relationship between Tse and Cruden's equation and new equation.

#### 4.3. Ai와 JRC의 상관관계

천병식 등(2001)은 평균 거啻각  $Ai$ 가 JRC와 가장 좋은 상관관계를 보인다고 하였다. 본 연구에서도 10개의 표준 프로파일을 대상으로 측정간격 0.1~3.2 까지 각각  $Ai$ 를 구하고  $Ai$ 와 JRC간의 상관관계를 분석하였다. Figure 5.에서와 같이 측정간격 0.1일때의  $Ai$ 와 표준프로파일의 JRC와의 상관관계  $R$ 은 0.992로 아주 좋게 나타났으며, 1.2일때의 상관관계  $R$  또한 0.980로 좋은 상관관계를 보였다. 하지만 천병식 등(2001)은 측정간격 0.1일때 보다 측정간격 1.0일때 더 좋은 상관성을 보인다고 하였다. 본 연구에서는 측정간격을 1.0을 사용하지 않고 1.2일 때를 측정하였지만 물리적 의미에서 볼 때 측정간격이 작을수록  $Ai$  값은 JRC와 더 좋은 상관성을 갖는 것으로 판단된다.

본 연구에서는  $Ai$ -JRC 상관성 분석을 통하여 JRC환산 공식을 측정간격 0.1 일 때, 식(12)와 측정간격 1.2일 때, 식(13)을 제시하였다.

$$JRC = 2.56(Ai) - 3.27 \quad (12)$$

$$JRC = 1.61(Ai) - 2.49 \quad (13)$$

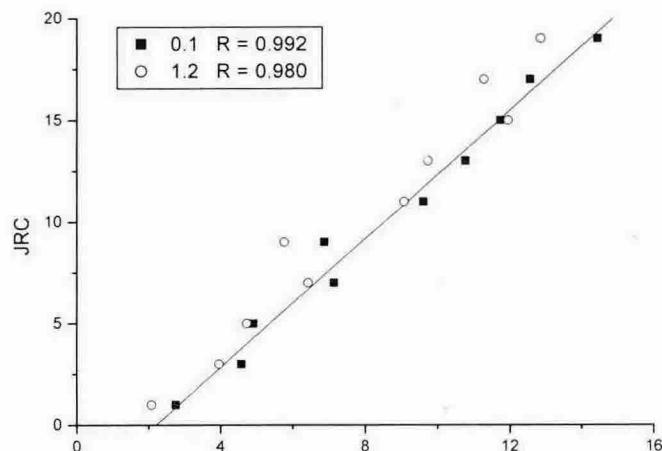


Figure 5. Comparison between Ai and JRC.

#### 4.4. 분할자 방법에 의한 JRC 분석

분할자 방법은 프렉탈 차원방법 중 가장 대표적인 방법이다. 본 연구에서는 분할자 방법에서 시료의 길이가 절편에 미치는 영향과 정량적인 JRC 산출을 위한 식을 도출 하였다. 연구를 위해 수정된 분할자 방법을 사용하였으며 자의 길이는 0.1~3.2mm 까지의 길이를 사용하였고 각 자의 길이별로 절리면의 총 길이를 구하여 자길이( $r$ )와 절리길이( $L$ )를 log-log그래프에 도시하여 절편(I)과 기울기(S)를 구하였다. 또한 분할자 방법은 다른 방법과 다르게 시료의 길이가 절편에 영향을 미치므로 절편을 표준화 할 수 있는 방법이 필요하다. 이에 시료의 길이와 절편을 회귀 분석하여 식(14)를 도출 하였다. 그러나 본 연구에서는 시료의 길이가 100mm 이하인 시료만을 사용하였으므로 식(14)는 100mm 이하의 시료에서만 적용이 가능하다.

$$I = 2.008 - (1.199 + 0.012L - 0.0000415L^2) + K_d \quad (14)$$

여기서  $I$ =표준화된 절편,  $L$ =시료의 길이,  $K_d$ =절편 이다.

분할자 방법에서 프렉탈 차원( $D$ )는 1-S로 구하여지고  $D$ 와 표준화된 절편( $I$ )를 곱한 값과 JRC와의 관계를 Figure 6.에 나타내었다. 상관도 분석 결과  $R^2=0.990$ 으로 매우 좋은 상관성을 보였으며 이러한 상관관계를 바탕으로 프렉탈 차원과 JRC간의 상관식을 아래와 같이 제안한다.

$$JRC = \frac{-248.69}{1 + e^{D*I - 1.96/0.017}} + 22.4 \quad (15)$$

식(15)에 의해 구해진 JRC와  $Z_2$ 를 사용하여 계산한 표준 프로파일의 JRC와 비교한 결과  $R$ 이 0.988로 좋은 상관도를 보인다. 분할자법을 이용한 JRC 상관도 분석은 자연 절리 시료에서도 좋은 상관관계를 보이지만 인공 거칠기 모델에서는 상대적으로 낮은 상관성을 보였다. Figure 7의 두 개의 그림은 자연절리와 인공 거칠기 모델을 표준프로파일 JRC와 비교한 것이다. 자연 절리는  $R$ 이 0.981로  $Z_2$ 에 의한 표준 프로파일과 비슷한 결과 값을 보이지만 인공 절리는  $R$ 이 0.951로 상대적으로 분산된 형태를 보인다. 이 결과는 크로스오버 길이의 문제라고 보여 지는데 인공 절리는 Figure 1. a.와 같이 자기상사(self similar)한 형태로 만들었고 자연 절리는 Figure 1. b.와 같이 특성상 자기유사(self affine)한 형태이다. 크로스오버 길이(crossover length)는 자기유사(self affine)한 형태보다 자기상사(self similar)한 형태가 더 짧기 때문에 본 연구에서 적용한 0.1~3.2mm의 크로스오버 길이가 자기유사한 인공 거칠기 모델에 적용하기에는 다소 넓은 것으로 판단된다. 여기서 자기상사(self similar)는 시각적으로 다양한 스케일 확대 및 축소를 통하여도 그것의 통계적인 특성치를 유지하는 기하학적 형태인 반면 자기유사(self affine)는 특정 방향에 따라 스케일을 다르게 했을 때만 통계적인 상사가 유지된다는 차이가 있다.

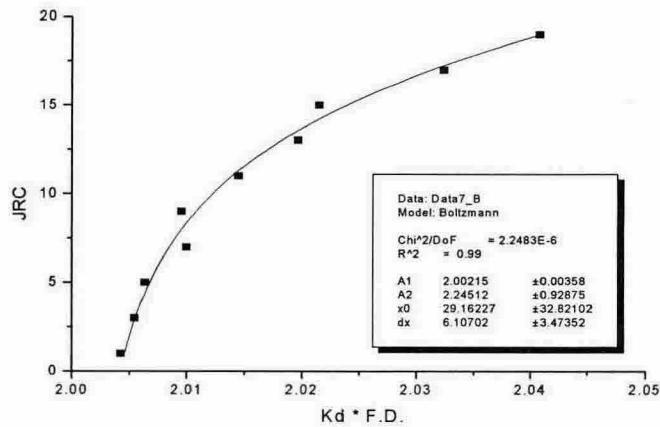


Figure 6. Relationship between  $I^*F.D.$  and JRC.

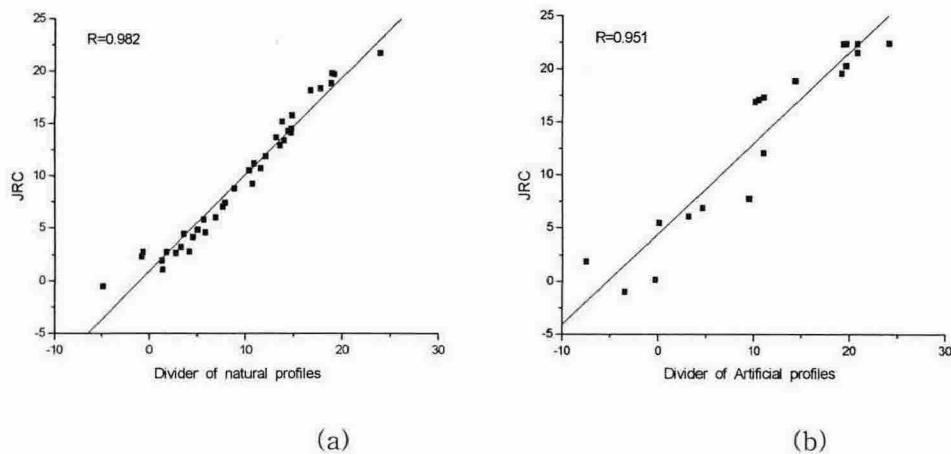


Figure 7. Comparison between JRC of  $Z_2$  and JRC of Divider method  
; (a) natural joint profile (b) artificial roughness profile

#### 4.5. 배리오그램에 의한 JRC 분석

배리오그램 방법도 프랙탈 차원 방법 중에서 많이 쓰이는 방법 중에 하나이다. 배리오그램 방법 또한 측정 간격을 어떻게 선택하는가에 따라 프렉탈 차원 값이 달라지는 문제점과 JRC를 정량화 할 수 있는 추정식에 대하여 연구 하였다. 배리오그램 방법도 측정간격을 0.1~3.2mm로 하였고 각 측정간격별로 구해진 반-분산과 측정간격을 log-log로 도시하여 기울기(S)와 절편(Kd)을 구하였다. 이 과정에서 측정간격별 수치를 직선으로 연결하여 기울기를 구하였고 이들의 상관성이 모두 0.98 이상인 것으로 보아 거의 모든 점들이 직선상에 위치한 것을 알 수 있다. 이러한 결과로 볼 때 본 연구에서 사용된 측정간격 0.1~3.2사이에서는 배리오그램 방법을 사용 할 때 문제가 없다고 판단된다. Figure 8에 배리오그램 절편(Kd)과 JRC와의 상관관계를 나타내었고 이를 바탕으로 식(16)을 도출하였다.

$$JRC = 3(3 + Kd^{2.2})D^{1.6} \quad (16)$$

JRC 0~20 구간에서 상관도  $R=0.989$ 로 상당히 높은 값을 보이고 식(16)에 의한 JRC는 자연 절리 시료 26개를 측정한 결과  $Z_2$ 에서 보이는 낮은 절리에서의 음(-)의 값을 보이는 문제가 나타

나지 않았다. 이 결과를 보아  $Z_2$ 방법에서의 음(-)의 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

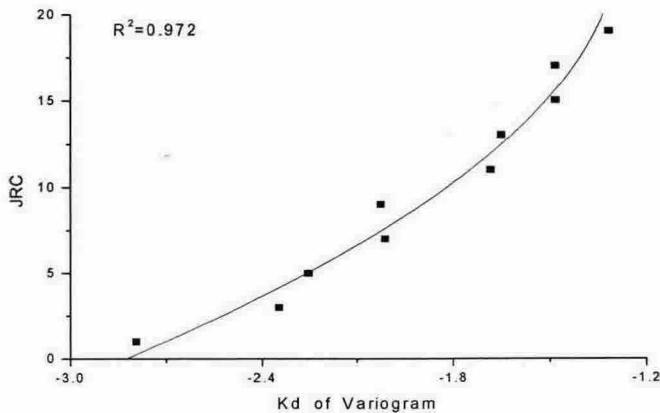


Figure 8. Relationship between Kd of Variogram and JRC.

## 5. 결 론

JRC의 정량적인 측정을 위해 통계적 파라미터와 프렉탈 차원을 이용하여 JRC의 상관성 분석을 하였다. 본 연구를 하기위해 인공 거칠기 모델 20개와 자연절리 26개의 시료를 사용하였고 표준프로파일을 수치화 하여 연구에 함께 사용하였다. 모든 방법에서 측정간격은 0.1, 0.3, 0.6, 0.8, 1.2, 1.6, 2.4, 3.2mm로 하여 실용적이고 장비의 제약이 없는 측정간격에 대하여 연구 하였고, 기존에 쓰이던 추정식의 문제점과 해결 방안을 모색하였으며 프렉탈 차원에서는 새로운 상관식을 제안하여 보다 정확하고 정량적인 JRC를 추정하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 통계적인 분석 방법은 모두 측정간격에 영향을 받는다. 알맞은 측정간격을 찾기 위하여  $Z_2$  파라미터 방법으로 표준 프로파일을 여러 개의 측정간격으로 각각 구한 결과 측정간격이 넓어짐에 따라 JRC값은 신뢰할 수 없는 값을 보이고 측정간격이 가장 작은 0.1로 측정하였을 때의 값이 표준 프로파일과  $Z_2$ 로 구한 JRC값과 가장 잘 맞는다. 하지만 0.1간격과 0.3간격의 JRC값은 비슷한 결과 값을 보이므로 측정 장비의 제약을 따져볼 때 0.3 간격으로 측정을 하여 JRC값을 산출해도 무방할 것으로 판단된다.
- $Z_2$  파라미터 방법을 사용할 때 간단하고 비교적 정확한 Tse와 Cruden(1979)의 식을 많이 사용하고 있으나 이 식은 JRC가 작은 값에서는 모두 음(-)의 값을 보이는 문제점이 있다. 이에 식(11)을 제안하였다.
- 프로파일 평균 거啻각인  $A_i$ 값은  $Z_2$ 와 비교하여 좋은 상관성을 보이고 측정간격이 작을수록 더욱 정확한 JRC값을 나타낸다. 또한  $A_i$  상관식은 다른 식에 비하여 간단하고 거칠기 이방성을 표현 할 수 있는 방법이므로 거칠기 정량화 연구에 유용할 것으로 판단된다.
- 분할자 방법은 다른 방법과 다르게 시료의 길이가 절편에 영향을 미치기 때문에 절편을 표준화 할 수 있는 식(14)를 제안하였고, 프렉탈 차원과 절편을 이용한 JRC추정식(15)를 제안하였다. 또한 시료의 모양이 자기상사(self similar)한 형태의 시료가 자기유사(self affine)한 형태의 시료보다 크로스오버 길이(crossover length)가 더 짧다고 판단된다.
- 배리오그램 방법을 이용하여 프렉탈 차원과 절편으로 식(16)을 제안하였다. 자연시료 26개를

측정한 결과 식(16)에 의한 JRC는 Z<sub>2</sub>방법에서의 음(-)의 문제를 보이지 않았다. 또한 측정간격 0.1~3.2mm사이에서는 프렉탈 차원을 구하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- 천병식, 2001, 암석 절리면 거칠기의 정량화에 대한 수치적 연구, 한국지반공학회 논문집 제17권 제1호 85-97.
- 박병윤, 2000, 암반 절리 거칠기의 정량화에 대한 연구현황 분석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회 Vol 10, 566-579
- 이상돈, 1996, 절리형상의 정량적 측정을 통한 각종 거칠기 파라미터의 비교분석 및 전단거동 해석, 서울대학교 박사학위 논문, 1-90.
- Baton, N. and Choubey, V. 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mech. Vol. 10, 1-54.
- Carr, J. R. and Warriner, J. B. 1989, Relationship between the fractal dimension and joint roughness coefficient, Bull, Assoc. Engng. Geol. 26, 253-264.
- 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, 329-341 Symp. on Rock Mech., 1223-1236.
- 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, p 329-343.
- Miller, S. M., Mcwilliams, P. C. and Kerkering J. C. 1990, Ambiguities in estimating fractal dimensions of rock fractal surfaces, proceedings, Rock Mechanics Contribution and Challenges, eds: Hustruid & Johnson, 147-478.
- Patton, F. D. 1966a, Multiple modes of shear failure in rock, Proc. 1st Congr. ISRM Lisbon, 1 , 509-511.
- Tse, R. and Cruden, D. M 1979, Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 16, 303-307.
- 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.