

랜덤중점변위법에 의한 거칠기의 생성 및 활용에 관한 연구

서현교, 엄정기*

Generation of Roughness Using the Random Midpoint Displacement Method and Its Application to Quantification of Joint Roughness

Seo Hyeonkyo, Jeong-Gi Um*

Abstract Quantification of roughness plays an important role in modeling strength deformability and fluid flow behaviors of rock joints. A procedure was suggested to simulate joint roughness, and characteristics of the roughness was investigated in this study. Stationary fractional Brownian profiles with known input values of the fractal parameter and other profile properties were generated based on random midpoint displacement method. Also, a procedure to simulate three dimensional roughness surface was suggested using the random midpoint displacement method. Selected statistical roughness parameters were calculated for the generated self-affine profiles to investigate the attribute of roughness. Obtained results show that statistical parameters applied in this study were able to consider correlation structure and amplitude of the profiles. However, effect of data density should be tackled to use statistical parameters for roughness quantification.

Key words Joint roughness, Fractional Brownian profile, Random midpoint displacement method, Fractal parameters, Statistical parameters

초 록 거칠기에 대한 정량화는 암석 절리의 강도 및 변형, 수리특성 등을 연구함에 있어서 매우 중요하다. 이 연구는 절리 거칠기를 모사하고 거칠기의 속성을 고찰하였다. 프랙털 파라미터와 프로파일 특성치를 입력변수로 설정하여 랜덤중점변위법에 기반한 이차원적 정상성 브라운 프로파일이 생성되었다. 또한, 랜덤중점변위법을 사용하여 삼차원적 거칠기 면을 모사하는 절차가 제시되었다. 이 연구의 거칠기 모사기법은 절리 거칠기와 관련된 해석적 연구를 수행하기 위한 요소 기술로 활용될 수 있다. 자기유사 거칠기 프로파일에 대하여 통계적 거칠기 파라미터를 적용한 결과 미소 거칠기의 기울기와 관련된 Z_2 , SL_{ave} , SD_{SL} 등의 통계적 파라미터는 상관구조, 진폭 등의 거칠기 속성을 고려할 수 있으나 측정간격의 변화에 영향을 받는 것으로 나타났다.

핵심어 절리면 거칠기, 브라운 프로파일, 랜덤중점변위법, 프랙털 파라미터, 통계적 파라미터

1. 서 론

불연속면은 암반의 강도 및 변형, 수리특성 등에 결정적인 영향을 미친다. 암반은 불연속면에 의하여 불연속

성 및 이방성 등의 특성을 지니며 이에 따른 강도 및 변형 특성의 변화는 암반의 역학적 거동에 대한 평가를 어렵게 한다. 또한, 불연속면은 지하수의 유동통로로 쉽게 활용될 수 있으며 풍화 및 파괴 등이 우선적으로 일어날 수 있는 분리면으로 작용한다. 따라서 암반의 역학적 및 수리적 특성을 고찰함에 있어서 불연속면에 대한 확고한 이해는 매우 중요하다.

불연속면의 전단강도는 절리성 암반의 역학적 특성을 규명하는데 있어서 가장 중요한 요소 중 하나이며 불연속면의 전단강도를 추정하기 위해서는 불연속면의 기하학적 및 역학적 특성에 대한 정밀한 기제가 필요하다. 불연속면에 대한 기제는 방향성, 간격, 연장성, 거칠기, 틈새,

Received: Jun. 11, 2012

Revised: Jun. 19, 2012

Accepted: Jun. 21, 2012

*Corresponding Author: Jeong-Gi Um

Tel) +82516296559, Fax) +82516296553

E-Mail) jum@pknu.ac.kr

Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

충전물, 지하수 및 벽면강도 등의 기하학적 및 역학적 특성을 포함하는데, 이들 중 절리면 거칠기는 충전물, 틈새, 벽면강도와 더불어 전단강도에 지대한 영향을 미친다.

그동안 절리면 거칠기에 대한 정량적 지수로 절리 거칠기 계수(Barton, 1973), 통계적 거칠기 파라미터(Wu and Ali, 1978; Tse and Cruden, 1979; Krahn and Morgenstern, 1979; Jones and Guirguis, 1979; Dight and Chiu, 1981; Maerz et al., 1990; Reeves, 1990; Lee et al., 1990; Bae and Lee, 2002), 프랙털 파라미터(Brown and Scholz, 1985; Malinverno, 1990; Miller et al., 1990; Power and Tullis, 1991; Huang et al., 1992; Odling, 1994; Den Outer et al., 1995; Kulatilake et al., 1995) 등이 암석 절리면의 이차원적 프로파일을 통하여 제안되었다. 또한, 최근에는 삼차원적 거칠기 정량화에 대한 연구(Lee et al., 2011; Park et al., 2012)가 활발히 수행되고 있다.

Barton(1973)이 제안한 절리 거칠기 계수(JRC)는 자연 절리면의 이차원적 거칠기 프로파일을 0-20 범위의 표준 거칠기 단면(Barton and Choubey, 1977)과 비교하여 결정되거나 또는 자연 절리면에 대한 경사시험(tilt test)을 통한 역산에 의해 산정된다. 여러 연구자들은 표준 거칠기 단면과의 비교를 통한 방법이 주관적이고 신뢰성이 낮으며 경사시험에 의한 JRC 추정법 역시 상한인 20 이상의 JRC 값을 도출하는 경우가 대부분이므로 실효성에 의문을 제기하였다(Maerz et al., 1990; Miller et al., 1990; Hsiung et al., 1994; Kodikara and Johnston, 1994; Kulatilake et al., 1995).

거칠기 정량화를 위해 제안된 통계적 거칠기 파라미터로는 제곱평균자승근(RMS), 일차미분의 제곱평균자승근(Z_2), 이차미분의 제곱평균자승근(Z_3), 평균기울기(SL_{ave}), 기울기의 표준편차(SD_{SL}), 거칠기 높이의 표준편차(SDH), 거칠기 형상지수(R_p), 거칠기 확률밀도함수, 자기상관함수, 스펙트럼 밀도함수, 구조함수 등이 있다. 그러나 상기 통계적 파라미터가 자연 절리면의 거칠기를 정량화하는데 얼마나 효과적인지에 대해서는 현재까지도 뚜렷한 결론이 도출되지 못한 실정이다. 이에선 대부분의 통계적 파라미터가 거칠기의 속성인 기울기, 상관구조, 진폭 등을 동시에 고려하기 어렵기 때문이다. 현재까지 제안된 통계적 파라미터 중 Z_2 가 가장 효과적인 파라미터로 인식되고 있으나 이 역시 프로파일의 측정간격에 영향을 받는다는 단점이 있다. 또한, 정상성(stationary) 부분과 및 비정상성(non-stationary) 부분을 동시에 포함하는 자연 절리면의 거칠기 프로파일을 통계적 거칠기 파라미터로 정량화하는 데에는 의문의 여지가 있다.

프랙털 파라미터에 의한 거칠기 정량화는 절리면의

거칠기 프로파일이 자기유사(self-affinity) 특성을 갖는다는 가정에 기반을 둔다. 분할자법(divider method) 또는 박스집계법(box counting method)을 이용하여 거칠기에 대한 프랙털 파라미터를 산정하려는 기존의 시도가 효과를 보지 못한 것은 분할자법 또는 박스집계법이 자기상사(self-similarity) 프랙털에만 적용 가능하기 때문이다. 자연 절리면의 거칠기 프로파일은 자기상사 프랙털 프로파일로 취급하기 어려우며 자기유사 프랙털 프로파일에 적용 가능한 파라미터 산정기법을 사용해야한다. 프랙털 파라미터는 통계적 파라미터와 비교하여 거칠기 프로파일의 진폭, 상관구조, 측정간격(측정밀도)을 동시에 고려할 수 있는 장점이 있다.

이 연구는 브라운함수(fractional Brownian function)를 이용한 이차원적 자기유사 프랙털 프로파일의 생성기법을 소개하고 이를 확장하여 삼차원적 거칠기 면을 모사하였다. 또한, 이 연구는 생성된 이차원적 브라운 프로파일에 대한 통계적 거칠기 파라미터의 적용을 통하여 거칠기의 속성을 고찰하였다.

2. 랜덤중점변위법에 의한 이차원적 거칠기 프로파일

브라운함수에 의해 생성된 거칠기 프로파일은 자기유사 프랙털의 대표적인 사례이다(Saupe, 1988; Voss, 1988). 브라운 프로파일을 생성하기 위해 빈번하게 사용되는 방법은 랜덤중점변위법(random midpoint displacement)과 스펙트럼합성법이다(Fournier et al., 1982; Fox, 1987; Saupe, 1988; Voss, 1988). 이 연구에서는 랜덤중점변위법을 사용하여 이차원적 거칠기 프로파일을 생성하였다.

브라운 프로파일을 생성하기 위한 초기 단계에서 일정 거리의 두 점 P_1 과 P_2 가 x-y 평면에 위치한다(Fig. 1). 이때 정상성 프로파일을 생성하기 위해서는 두 점의

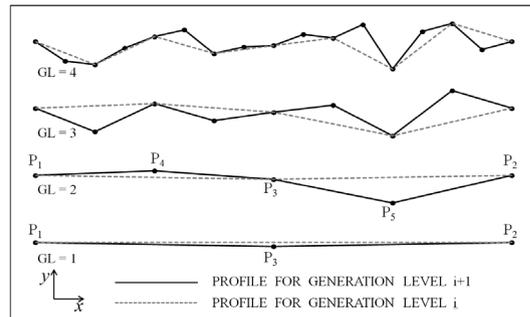


Fig. 1. Generation of a stationary fractional Brownian profile using the random midpoint displacement method.

높이가 동일하게 설정되어야 한다. 한편, 두 점의 높이가 다르게 설정되면 비정상성 프로파일이 생성된다. Fig. 1의 첫 번째 생성단계(GL; generation level)에서 P_3 의 x, y 좌표는 다음과 같다.

$$x(3) = \frac{1}{2}[x(1) + x(2)] \quad (1a)$$

$$y(3) = \frac{1}{2}[y(1) + y(2)] + D_1 \quad (1b)$$

Eq. (1b)에서 D_1 은 정규 난수로 평균은 0이며 분산(Δ_1^2)은 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta_1^2 = \frac{\sigma^2(1-2^{2H-2})}{2^{2H}} \quad (1c)$$

여기서, 초기 입력변수인 σ 와 H 는 각각 표준편차와 허스트지수(Hurst exponent)이다. 참고로 프랙털차원(D)은 H 와 관련하여 $D=2-H$ 이며 H 는 0에서 1까지의 범위를 갖는다. 두 번째 GL에서 P_4 와 P_5 는 다음과 같이 생성된다.

$$x(4) = \frac{1}{2}[x(1) + x(3)] \quad (2a)$$

$$y(4) = \frac{1}{2}[y(1) + y(3)] + D_2 \quad (2b)$$

$$x(5) = \frac{1}{2}[x(3) + x(2)] \quad (2c)$$

$$y(5) = \frac{1}{2}[y(3) + y(2)] + D_2 \quad (2d)$$

여기서, 정규 난수 D_2 의 평균은 0이며 분산(Δ_2^2)은 다음과 같다.

$$\Delta_2^2 = \frac{\sigma^2(1-2^{2H-2})}{(2^2)^{2H}} \quad (2e)$$

상기와 같은 절차를 입력변수 σ 및 H 를 사용하여 n 회 반복하면 n 번째 GL의 정상성 브라운 프로파일이 생성된다. 이는 브라운 프로파일을 생성하기 위해 두 개의 파라미터가 필요함을 의미한다. H 는 생성된 프로파일에서 점들 간의 상관관계를, 또한, σ 는 생성된 프로파일의 진폭을 지시한다. n 번째 GL에서 정규 난수 D_n 의 평균은 0이며 분산(Δ_n^2)은 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta_n^2 = \frac{\sigma^2(1-2^{2H-2})}{(2^n)^{2H}} \quad (3)$$

n 번째 GL에서 생성된 프로파일은 2^{n+1} 개의 점으로 구성된다. Fig. 2는 열한 번째 GL에서 H 와 σ 의 변화에 따른 정상성 브라운 프로파일을 보여주며, 각각의 거칠기 프로파일은 총 2049개의 점으로 이루어져 있다. 이

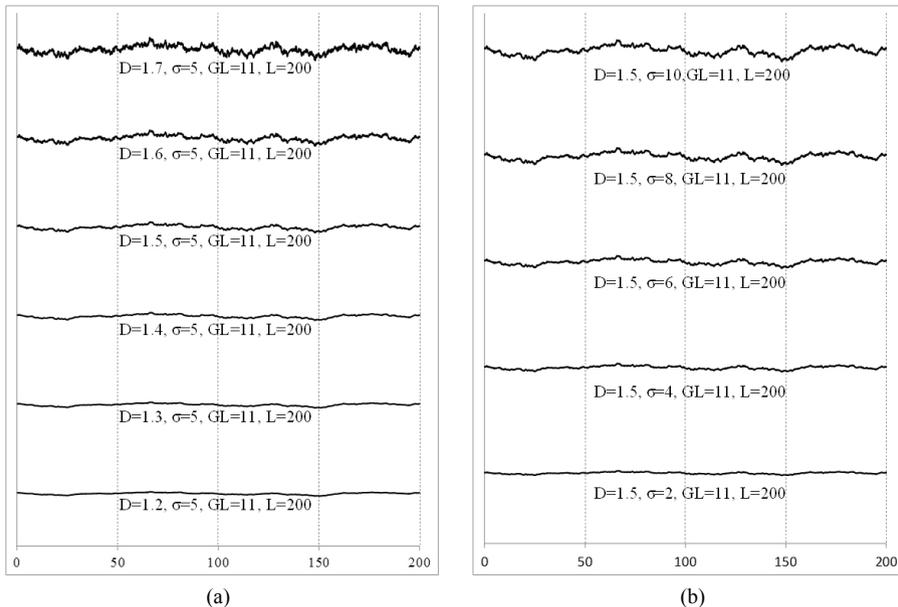


Fig. 2. Examples for stationary fractional Brownian profiles with different (a) D and (b) σ .

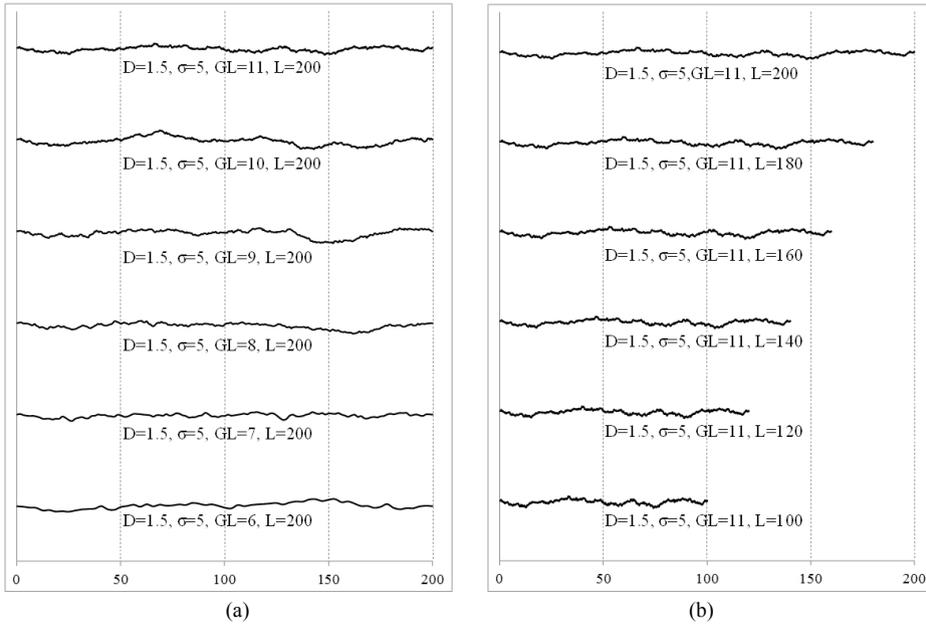


Fig. 3. Examples for stationary fractional Brownian profiles with different (a) GL and (b) L.

연구에서 브라운 프로파일의 길이(L)는 200으로 설정하였는데, L의 단위는 사용자의 필요에 따라 mm로 정하거나 또는 km와 같이 대규모 스케일로도 적용할 수 있다. 이와 같이 GL=11, L=200인 경우 브라운 프로파일에서 생성된 점의 빈도수(d)는 단위길이 당 10.25이다. D가 증가할수록, 또는 σ 가 증가할수록 생성된 브라운 프로파일의 거칠기가 더욱 거칠어짐을 육안으로도 확인할 수 있다. Fig. 3은 H=0.5(D=1.5) 및 $\sigma=5$ 로 고정된 경우에 GL과 L을 변화시키면서 생성한 브라운 프로파일이다. GL이 증가하거나 L이 감소함에 따라 d값은 증가하게 되며, 이를 반영한 거칠기도 더욱 거칠어짐을 알 수 있다.

이와 같이 랜덤중점변위법에 의한 이차원적 브라운 프로파일은 입력변수인 D, σ , GL, L에 따라 다양하고 정교하게 구현될 수 있다. 이는 암석 절리면의 거칠기와 관련된 해석적 연구를 수행하기 위한 요소 기술로 활용될 수 있다고 판단되며, 표준 거칠기 단면으로 활용도 가능하리라 사료된다.

3. 랜덤중점변위법에 의한 삼차원적 거칠기 면

이 연구에서 소개한 랜덤중점변위법의 개념은 이차원적 브라운 프로파일을 삼차원적 거칠기 면으로 확장하는 데에 이용할 수 있다. Fig. 4는 랜덤중점변위법에 기

초하여 삼차원적으로 정상성 거칠기 면을 생성하는 절차를 나타낸 것이다. 삼차원 직교좌표계에서 일정 간격으로 같은 높이의 Q₁, Q₂, Q₃, Q₄가 설정되면 첫 번째 GL에서 Q₅, Q₆, Q₇, Q₈, Q₉이 생성되는데, x-y 평면상에서 Q₁과 Q₂의 중점에 위치하는 Q₅의 x, y, z 좌표는 다음과 같다.

$$x(5) = \frac{1}{2}[x(1) + x(2)] \tag{4a}$$

$$y(5) = \frac{1}{2}[y(1) + y(2)] \tag{4b}$$

$$z(5) = \frac{1}{2}[z(1) + z(2)] + D_1 \tag{4c}$$

같은 방법으로 Q₆의 공간좌표는 Q₁과 Q₃의 x-y 중점에서 z값에 정규 난수 D₁을 합하여 얻을 수 있다. 또한, Q₇, Q₈의 공간좌표 역시 같은 방식의 랜덤중점변위법을 사용하여 구할 수 있다. Q₁, Q₂, Q₃, Q₄의 중앙에 생성되는 Q₉의 x, y, z 좌표는 다음과 같다.

$$x(9) = \frac{1}{4}[x(1) + x(2) + x(3) + x(4)] \tag{5a}$$

$$y(9) = \frac{1}{4}[y(1) + y(2) + y(3) + y(4)] \tag{5b}$$

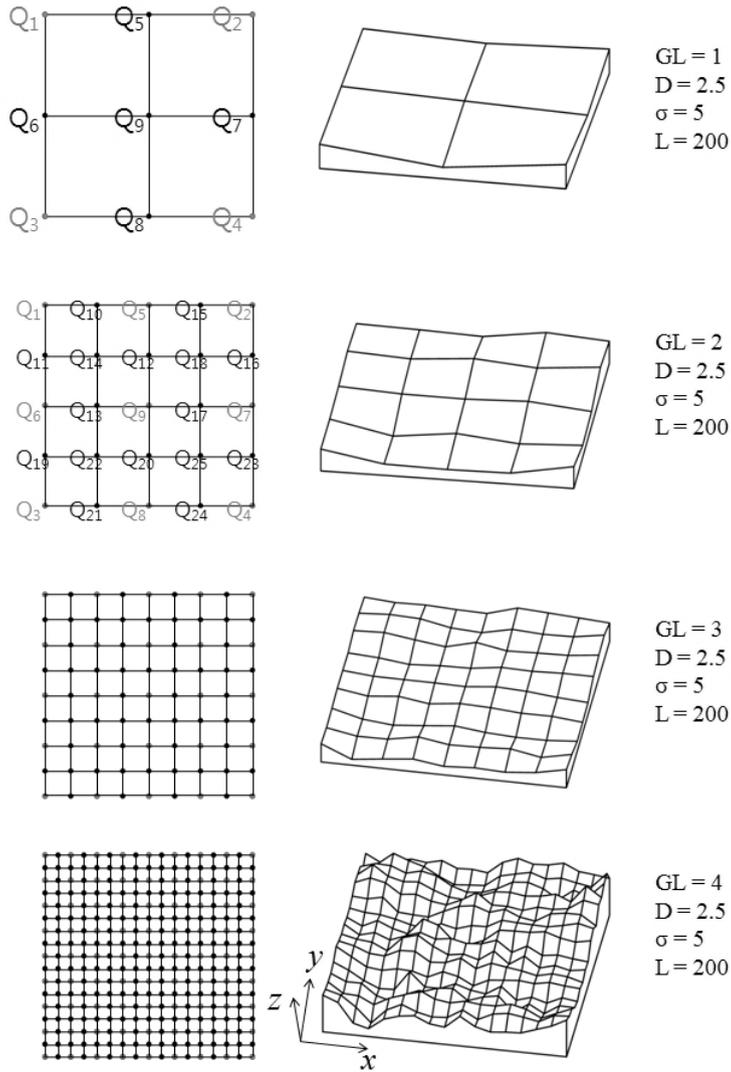


Fig. 4. Generation of a stationary roughness surface using the random midpoint displacement method.

$$z(9) = \frac{1}{4}[z(1) + z(2) + z(3) + z(4)] + D_1 \quad (5c)$$

여기서, D_1 은 앞에서 사용한 Eq. (1c)와 같다. 다만 프랙털차원(D)은 0에서 1 범위의 H와 관련하여 $D=3-H$ 이다. 즉, 상기와 같은 방법으로 생성된 거칠기 면은 이차원과 삼차원 사이의 프랙털차원을 갖는다.

Fig. 4의 두 번째 GL에서 생성된 거칠기 면은 첫 번째 단계에서 생성된 Q_1 에서 Q_9 까지의 9점을 바탕으로 랜덤중점변위법으로 생성한 25개의 점 좌표로 구성된 것이다. 앞의 이차원적 브라운 프로파일의 경우와 같이

초기 입력변수 σ 및 H를 사용하여 n 번 반복하면 n 번째 GL의 삼차원적 거칠기 면이 생성된다. n 번째 GL에서 D_n 은 정규 난수로 평균은 0이며 분산(Δ_n^2)은 Eq. (3)과 같다. 또한, 생성된 거칠기 면은 $(2^n+1)^2$ 개의 점으로 구성된다. Fig. 5는 여섯 번째 GL에서 D 및 σ 의 변화에 따라 모사된 거칠기 면의 사례이다. 그림에 나타난 표면 거칠기는 D 및 σ 가 증가할수록 더욱 거칠어짐을 확인할 수 있다. 이와 같은 삼차원적 거칠기 모델링 기법이 자연 절리면을 모사하는 데에 효과적으로 사용될 수 있기 위해서는 일련의 모형시험과 결합된 연구가 뒷받침되어야 할 것이다.

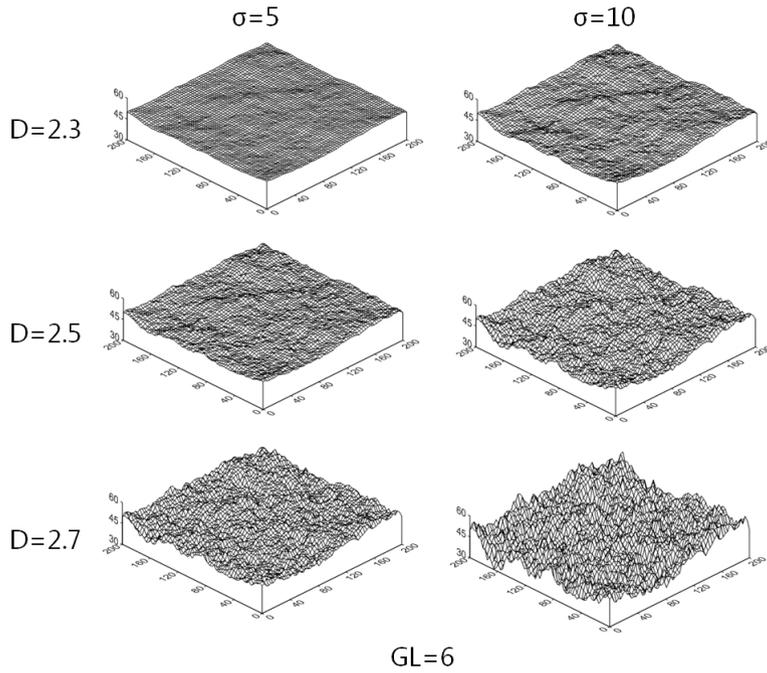


Fig. 5. Examples for stationary roughness surfaces at 6th generation level with different D and σ .

4. 이차원적 브라운 프로파일에 대한 통계적 파라미터의 적용

이 연구는 랜덤중점변위법을 사용하여 생성된 브라운 프로파일에 대하여 미소 거칠기의 기울기와 관련된 통계적 파라미터인 일차미분의 제곱평균자승근(Z_2), 평균 기울기(SL_{ave}), 기울기의 표준편차(SD_{SL}) 등의 통계량을 산정하고 거칠기 프로파일을 생성하기 위한 입력변수의 변화가 통계적 거칠기 파라미터에 미치는 영향을 분석하였다. 측정간격(Δx)이 일정하고 측정수가 N 일 때 각각의 통계량을 산정하는 식은 다음과 같다.

$$Z_2 = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$SL_{ave} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left| \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right| \quad (7)$$

$$SD_{SL} = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left(\left| \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right| - SL_{ave} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

앞에서 생성한 이차원적 브라운 프로파일(Fig. 2-3)은 정규 난수 D_n 을 산출하기 위하여 모두 동일한 초기 시

드 값을 사용하였다. 여기서 초기 시드 값은 사용자가 임의로 부여하므로 초기 시드 값을 다르게 사용하면 생성된 브라운 프로파일의 형상도 달라진다. Fig. 6은 입력변수가 같은 값으로 고정되었을 때 시드 값의 변화에 따라 생성된 이차원적 브라운 프로파일을 도시한 것이다. 그림과 같이 시드 값에 따라 다양한 형상의 프로파일이 생성될 수 있지만 D , σ 등의 입력변수가 같으므로 프로파일의 거칠기에 대한 통계적 속성은 이론적으로 같아야 한다. Fig. 7은 Fig. 6의 프로파일에 대하여 Eq. (6)-(8)을 적용하여 통계적 거칠기 파라미터를 산정한 결과이다. 평탄한 프로파일(Fig. 6(a)) 및 거친 프로파일(Fig. 6(b)) 모두 Z_2 , SL_{ave} , SD_{SL} 이 프로파일의 초기 시드 값에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

Fig. 2 및 Fig. 3의 정상성 브라운 프로파일에 대하여 통계적 거칠기 파라미터를 산정한 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 8(a)는 $\sigma=5$, $GL=11$, $L=200$ 인 경우 D 의 변화에 따라 산정된 Z_2 , SL_{ave} , SD_{SL} 인데, D 가 증가함에 따라 Z_2 , SL_{ave} , SD_{SL} 는 모두 지수함수적으로 증가하였다. 이는 이 연구에서 적용한 통계적 거칠기 파라미터가 D 의 증가에 따른 거칠기의 변화를 고려할 수 있음을 의미한다. Fig. 8(b)는 $D=1.5$, $GL=11$, $L=200$ 인 경우 σ 의 변화에 따라 산정된 Z_2 , SL_{ave} , SD_{SL} 인데, σ 가

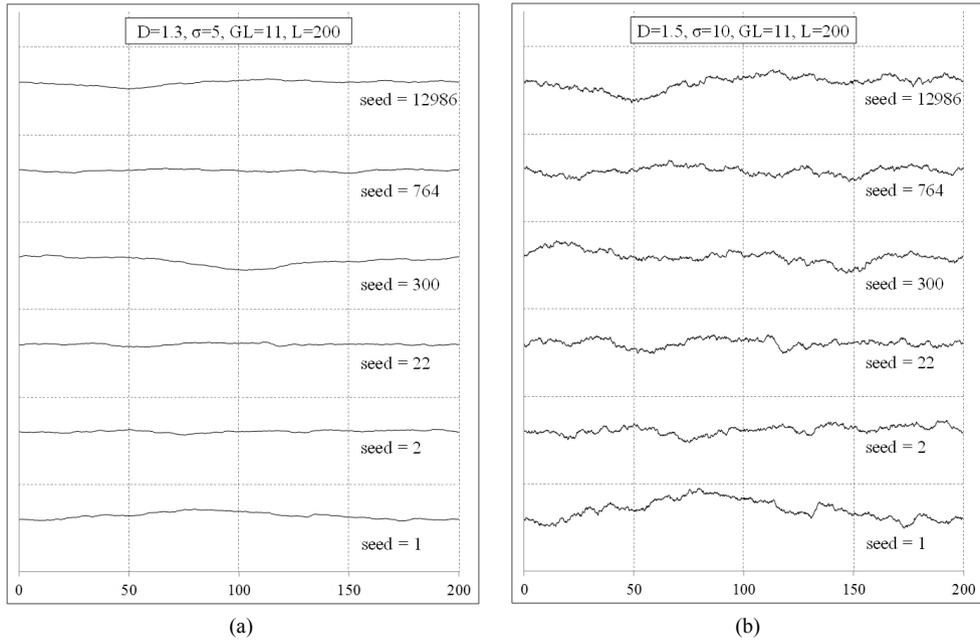


Fig. 6. Fractional Brownian profiles at 11th generation level with different seed values.

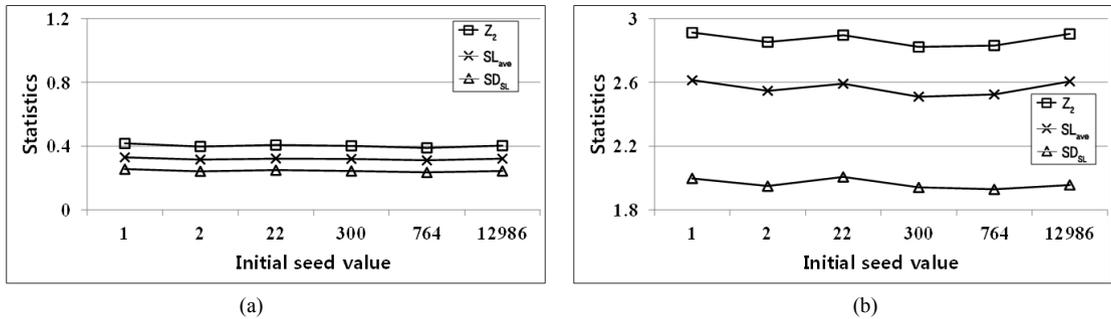


Fig. 7. Plots between estimated statistical parameters and seed value for stationary fractional Brownian profiles at 11th generation level having different D and σ ; (a) $D=1.3, \sigma=5$ and (b) $D=1.5, \sigma=10$.

증가함에 따라 Z_2, SL_{ave}, SD_{SL} 은 모두 선형으로 증가하였다. 이에선 적용한 거칠기 파라미터가 진폭과 관계된 거칠기 특성을 잘 반영할 수 있음을 의미한다. 특히, Z_2 는 SL_{ave}, SD_{SL} 에 비하여 더욱 큰 증가를 나타내며 거칠기 변화에 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 이는 Z_2 가 여타 다른 거칠기 파라미터에 비하여 거칠기의 정량적 지수로 더욱 효과적이라는 기존의 연구결과를 입증한다.

Fig. 8(c) 및 Fig. 8(d)는 $D=1.5, \sigma=5$ 로 고정된 경우 GL과 L의 변화에 따른 통계적 거칠기 파라미터의 산정 결과를 도시한 것이다. 같은 프로파일 길이에서 GL이

증가하거나 또는 같은 GL에서 프로파일 길이가 감소하는 경우는 단위길이 당 측정수가 증가함을 의미한다. 단위길이 당 측정수가 증가하면 통계적 거칠기 파라미터를 산정하기 위한 입력변수인 측정간격(Δx)은 줄어든다. 즉, Fig. 8(c)와 (d)에 나타난 결과는 상관구조 및 진폭 등의 거칠기 속성이 같아도 Δx 의 변화에 따라 거칠기의 기울기가 다르게 산정됨을 지시한다. 또한, GL 또는 L의 변화에 따라 통계적 거칠기 파라미터 값이 규칙적인 패턴으로 산정되었음을 알 수 있는데, 이는 측정간격의 변화에 따른 문제를 해결하는 단초가 될 수 있다고 사료된다.

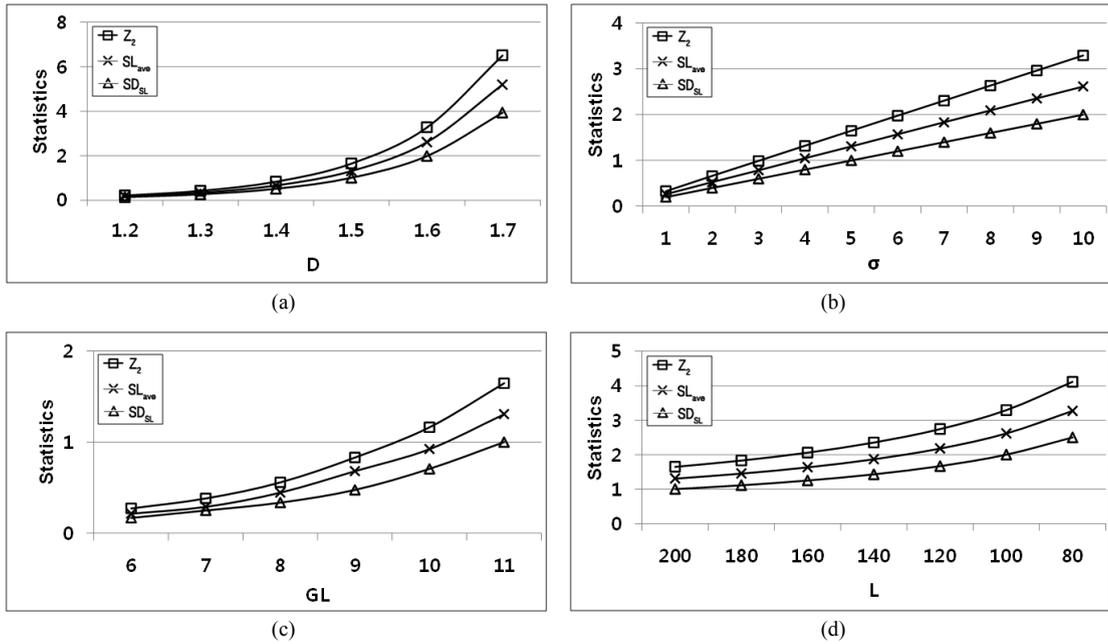


Fig. 8. Plots between estimated statistical parameters and input parameters for stationary fractional Brownian profiles; (a) D , (b) σ , (c) GL and (d) L .

이 연구에서 수행된 수치실험은 거칠기의 속성이 상관구조, 진폭, 기울기 모두에 관련되어 있음을 제시한다. 따라서 거칠기를 정량화하기 위해서는 거칠기의 다양한 속성을 동시에 고려할 수 있는 파라미터에 대한 연구가 뒷받침 되어야 할 것이다.

5. 결론

이 연구는 자연 절리의 거칠기를 모사하고 거칠기의 속성을 분석하기 위한 수치실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 랜덤중점변위법에 의해 생성된 이차원적 및 삼차원적 거칠기는 상관구조, 진폭 등의 다양한 거칠기 속성을 고려할 수 있으며 암석 절리면의 거칠기와 관련된 해석적 연구를 수행하기 위한 요소 기술로 활용 가능하다.
2. 미소 거칠기의 기울기와 관련된 Z_2 , SL_{ave} , SD_{SL} 등과 같은 통계적 파라미터는 정상성 프로파일에 대한 상관구조, 진폭 등의 거칠기 속성을 고려할 수 있다. 특히 Z_2 는 이 연구에서 적용한 다른 통계적 파라미터에 비하여 거칠기의 변화에 가장 민감하게 반응한다.
3. 이 연구에서 적용한 통계적 파라미터는 측정간격의

변화에 영향을 받으므로 통계적 파라미터를 거칠기의 정량적 지수로 사용하기 위해서는 표준적용법의 제정 또는 후속 연구가 필요하다.

사 사

이 논문은 2011학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임.(PK(PKS)-2011-0192)

REFERENCES

1. Bae, K. Y. and C. I. Lee, 2002, Development of a 3D roughness measurement system of rock joint using laser type displacement meter, Tunnel and Underground Space, Vol. 12, pp. 268-276.
2. Barton, N., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints. Engrg. Geology 7, pp. 287-332.
3. Barton, N. and V. Choubey, 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics (Springer-Verlag), Vol. 10, pp. 1-54.
4. Brown, S. R. and C. H. Scholz, 1985, Broad band width study of the topography of natural rock surfaces, J. Geophys. Res. 90, pp. 12575-12582.
5. Den Outer, A., J. F. Kaashoek and H. R. G. K. Hack, 1995, Difficulties with using continuous fractal theory for discontinuity surfaces, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. &

- Geomech. Abstr., Vol. 32, pp. 3-10.
6. Dight P. M. and H. K. Chiu, 1981, Prediction of shear behavior of joints using profiles, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp. 369-386.
 7. Fournier A., D. Fussel and L. Carpenter L, 1982, Computer rendering of stochastic models, Commun. ACM., Vol. 25, pp. 371-384.
 8. Fox C. G., 1987, An inverse Fourier transform algorithm for generating random signals of a specified spectral form, Comput. Geosci., Vol. 13, pp. 369-374.
 9. Hsiung S. M., D. D. Kans, M. P. Ahola, A. H Chowdhury and A. Ghosh, 1994, Laboratory characterization of rock joints, Center for Nuclear Waste Regulat pp. 71-113.ory Analyses, U.S. Nuclear Regulatory Commission.
 10. Huang, S. L., S. M. Oelfke and R. C Speck, 1992, Applicability of fractal characterization and modeling to rock joint profiles, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 29, pp. 89-98.
 11. Jones R. A. and B. Guirguis, 1979, Spectral analysis applied to the characterization of a surface profile, 3rd Int. Conf. on Appl. of Prob. & Stat. for Soil & Structural Engr., Vol. 1, pp. 39-45.
 12. Kodikara J. K. and I. W. Johnston, 1994, Shear behavior of irregular triangular rock concrete joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 31, pp. 313-322.
 13. Krahn J. and N. R Morgenstern, 1979, The ultimate frictional resistance of rock discontinuities, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 16, pp. 127-133.
 14. Kulatilake P. H. S. W., G. Shou, T. H Huang and R. M Morgan, 1995, New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 32, pp. 673-697.
 15. Lee Y. H., J. R. Carr, D. J Barr and C. T Haas, 1990, The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 27, pp. 453-464.
 16. Lee, D. H., S. J. Lee and S. O. Choi, 2011, A study on a 3D roughness analysis of rock joints based on surface angularity, Tunnel and Underground Space, Vol. 21, pp. 494-507.
 17. Malinverno A., 1990, A simple method to estimate the fractal dimension of a self affine series, Geophysical Research Letters, Vol. 17, pp. 1953-1956.
 18. Maerz N. H., J. A. Franklin and C. P Bennett, 1990, Joint roughness measurement using Shadow Profilometry, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 27, pp. 329-343.
 19. Miller S. M., P. C McWilliams and J. C Kerkering, 1990, Ambiguities in estimating fractal dimensions of rock fracture surfaces, Proc. 31st U.S. Symp. on Rock Mech., pp. 471-478.
 20. Odling N. E., 1994, Natural fracture profiles, fractal dimension and joint roughness coefficients, Rock Mech. & Rock Engrg., Vol. 27, pp. 135-153.
 21. Park, J. W., Y. K. Lee, J. J. Song and B. H. Choi, 2012, A new coefficient for three dimensional quantification of rock joint roughness, Tunnel and Underground Space, Vol. 22, pp. 106-119.
 23. Power W. L. and T. E. Tullis, 1991, Euclidean and fractal models for the description of rock surface roughness, J. Geophys. Res., Vol. 96, pp. 415-424.
 24. Reeves M. J., 1990, Rock surface roughness and frictional strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 28, pp. 429-442.
 25. Saupe D., 1988, Algorithms for random fractals, The Science of Fractal Images(edited by Peitgen H-O and D. Saupe), Springer Verlag, New York, pp. 71-113.
 26. Tse R. and D. M Cruden, 1979, Estimating Joint Roughness Coefficients, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 16, pp. 303-307.
 27. Voss R. F., 1988, Fractals in nature: from characterization to simulation, The Science of Fractal Images(edited by Peitgen H-O and D. Saupe), Springer Verlag, New York, pp. 71-113.
 28. Wu T. H. and E. M. Ali, 1978, Statistical representation of joint roughness, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Abstr., Vol. 15, pp. 259-262.

서현교

2011 부경대학교 에너지자원공학과 공학사



Tel: 051-629-6550

E-mail: sehyky@nate.com

현재 부경대학교 에너지자원공학과 석사과정

엄정기

1988년 연세대학교 이과대학 지질학과 이학사

1990년 연세대학교 대학원 지질학과 이학석사

1997년 University of Arizona 자원지질공학과 공학박사



Tel: 051-629-6559

E-mail: jum@pknu.ac.kr

현재 부경대학교 에너지자원공학과 교수
