

암반 불연속면의 거칠기 특성

- 조·중·세립질 화강암을 중심으로 -

김종태¹⁾·정교철^{*1)}·김만일¹⁾·송재용²⁾·박창근³⁾

¹⁾안동대학교 지구환경과학과, ²⁾(주)산하이엔씨, ³⁾관동대학교 토목공학과

Characterization of Fracture Roughness in Coarse-medium-fine Grained Granite

Jong-Tae Kim¹⁾·Gyo-Cheol Jeong^{*1)}·Man-Il Kim¹⁾
Jae-Yong Song²⁾·Chang-Kun Park³⁾

¹⁾Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

²⁾SANHA Engineering & Construction Co.

³⁾Dept. of Civil Engineering, Kwandong University

이 연구는 지하수유동에 영향을 주는 조·중·세립질 화강암 불연속면 거칠기의 특성을 비교한 것이다. 공초점 레이저 현미경으로 관찰된 거칠기 데이터는 스펙트럼 분석과 고속푸리에변환에 의해 해석되었다. 또한 노이즈가 제거된 거칠기 데이터에 대하여 거칠기 특성을 정량화하기 위하여 프랙탈 해석에 적용해 보았다. 이를 위해 조·중·세립질 화강암 코어를 대상으로 브라질리안 시험으로 인공 단열을 발생시켰다. 측정은 전체 12개의 공시체에서 36개의 조사선에서 실시되었다. 공초점 레이저 현미경을 사용하여 연속적인 거칠기를 이산 데이터로 표현할 수 있으며, 이렇게 하여 얻어진 이산데이터를 바탕으로 고속 푸리에 변환을 실시한 결과 제2 고조파 성분이 가장 큰 값을 보이고 있다. 또한 스펙트럼 에너지 분포는 조립질 공시체에서 0.9853, 중립질 공시체에서 1.0792, 세립질 공시체에서 0.6794의 평균값을 보이고 있으며, 이는 프랙탈 해석에서와 마찬가지로 거칠기가 클수록 저주파수 영역대에서 고조파의 에너지 분포가 높게 나타남을 알 수 있다.

주요어: 거칠기, 공초점 레이저 현미경, 스펙트럼 분석, 고속 푸리에 변환

Purpose of this study is to quantitatively characterize the fracture roughness which was measured with a confocal laser scanning microscope. The roughness discrete data measured by confocal laser microscope were analyzed by spectral analysis and fast Fourier transform (FFT). The roughness data by used noise reduction filter were applied for fractal analysis to describe roughness features quantitatively. Artificial fractures created by Brazilian test on granites were used to measure fracture roughness under the confocal laser scanning microscope. Measurements were performed along three scan lines on each fracture surface. 36 scan lines were determined on 12 specimens in total. Features of roughness showed that coarse and medium grained granites tend to more rough features than those of fine grained granites. Continuous analog data of roughness is possible to described as discrete data of measure roughness with a fixed interval under the confocal laser microscope. Results of FFT with the measured data showed the highest values on the second harmonics. Distribution of average amplitude of second harmonics was observed 0.9853 in coarse grained granite, 1.0792 in medium grained granite and 0.6794 in fine grained granite. This indicates

* Corresponding author : jeong@andong.ac.kr

that the larger roughness has the higher energy of harmonics as the result of fractal analysis in low frequency zone.

Key words : Roughness, Confocal laser microscope, Spectral analysis, Fast Fourier transform(FFT)

서 론

불연속성 암반에 있어서의 수리학적 특성은 단열의 방향성, 연결성, 간극, 밀도 등과 같은 단열망의 기하학적 특성 및 거칠기(roughness)와 같은 불연속면의 형태에 주로 의존하며, 또한, 불연속면에서의 거칠기는 암반의 변형 특성에 중요한 영향을 미친다.

표면 거칠기에 대한 연구로는 대부분 금속 표면과 같은 매우 작은 표면 분석에서, 광학적이고 시각적인 방법들이 개발되었다. 이들 방법은 나노크기(nano-scale) 측정이 가능해야 하기 때문에 금속 표면의 거칠기 평가에 대하여 기계적인 방법들보다 바람직한 방법이라고 할 수 있다. Lin and Peng(1998)은 나노크기의 거칠기 측정에서 정밀도를 증가시키기 위하여 스캐닝 탐침 현미경법(scanning probe microscopy)를 사용하였다. Wyant and Schmit(1998)과 Gleyzes et al. (1998)은 같은 목적으로 간섭 현미경을 사용하였다.

암반에서 거칠기의 연구 목적은 궁극적으로 암반 내 유체 유동 평가 및 전단 강도와 팽창성의 평가를 위한 것이다. 비교적 최근에 Mandelbrot(1983)은 특별한 기하학적 특성을 가지고 있는 일종의 면곡선(fractal curves)에 대해 언급하였다. 프랙탈차원은 이상적인 기하학적 모양에 대한 곡선, 표면, 부피에 대하여 변형의 정도를 서술하는 것이다. 따라서 암석의 표면의 거칠음에 대한 연구는 이러한 프랙탈특성을 포함한다. 이와 같이 단열 표면의 정량화는 어떤 단열계(fracture system)의 수리학적 및 역학적인 거동을 판단하는데 매우 중요한 기초가 된다.

이 연구의 목적은 레이저 현미경을 이용하여 입자의 크기가 다른 화강암의 3차원 화상 데이터 처리를 수행함으로써 하나의 연속된 단면데이터를 작성하고 공시체 불연속면의 특징을 정밀 관찰하여 거칠기의 특성을 정량적으로 평가하는 것이다. 또한 그 레이저 현미경에 의해 측정된 이산 데이터를 이용하여 스펙트럼 분석을 실시함으로써 거칠기에 영향을 미치는 주파수의 분포를 파악하여 화강암의 조·중·세립으로 구성된 단열면을 정량적으로 비교하고, 마지막으로,

프랙탈차원을 분석함으로써 암반 거칠기의 정량적 평가를 제안하는 것을 목적으로 한다(Fig. 1).

공시체 및 시험방법

암석 공시체의 제작은 거칠기의 측정 오차를 줄이기 위하여 이에 부합되는 신선한 암석인 조립질, 중립질, 세립질 혹은모화강암을 선정하여 공시체 제작을 실시하였다. 또한, 이들 공시체에 단일 절리를 형성시키기 위하여 압열인장시험을 실시하였다. 압열 인장시험에 의해 단일 절리를 생성시킨 화강암 공시체에 대하여 거칠기를 측정하기 위하여 조사선(scanline)을 설정하였다. 먼저 입도별로 각각 두 개의 공시체를 제작하였다. 전체 6개의 공시체에 대하여 압열 인장시험을 실시하여 2개로 분리시켰으며, 따라서 12개의 거칠기 측정 공시체를 제작하였다. 이들 12개의 공시체에 대하여 각각 세 개씩의 조사선을 설정하였으며, 설정 기준은 공시체의 중심부와 이를 기준으로 하여 우측부와 좌측부에서 해당 공시체에서 거칠기를 가장 잘 표현하고 있는 부분을 선정하여 조사선으로 설정하였다. 전체 조사선의 개수는 조립, 중립 및 세립질 공시체에서 각각 12개의 조사선을 설정하여 총 36개로 하였다. 공시체에 적용한 세 개의 조사선은 각 공시체의 좌측에 설정된 조사선을 Scan 1으로 하고, 중심부를 Scan 2, 그리고 우측부를 Scan 3으로 하였다. 또한 36개의 개별적인 조사선은 공시체의 입도분포를 기준으로 하여 조립질 공시체를 C(Coarse), 중립질 공시체를 M(Medium), 세립질 공시체를 F(Fine)로 하였으며, 각 그룹에 속하는 조립, 중립, 세립질 공시체가 각각 두 개씩 있으므로, 이들 공시체를 공시체 A, 공시체 B로 나누어 조사선 이름의 중간 글자로 표기하였다. 그리고 마지막 글자에 해당하는 L과 R은 공시체 A와 공시체 B에 대하여 압열인장시험을 실시하였으므로, 이를 우측부와 좌측부로 나누어 표현한 것이다. Fig. 2는 거칠기를 측정하기 위하여 조사선을 설정한 예를 암석의 입도분포에 따라 도시한 것이다.

단일 절리가 형성된 공시체에 대하여 공초점(confocal) 레이저 현미경을 이용하여 공시체의 거칠

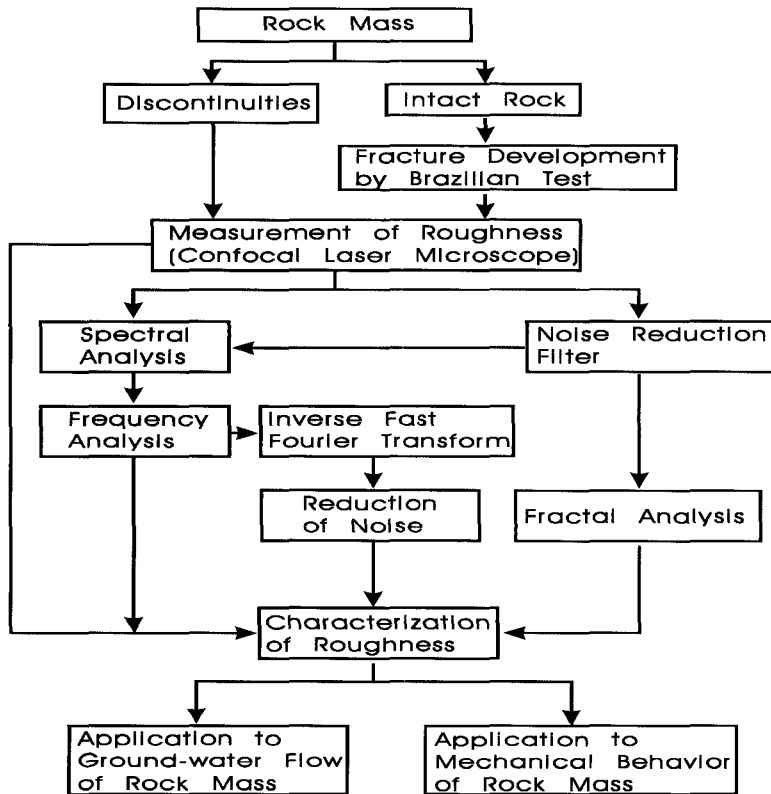


Fig. 1. Flow chart for method of this study.

기를 정밀 측정하였다. 공초점 레이저 현미경에 의해 측정된 공시체는 많은 수의 노이즈(noise) 성분을 포함하고 있으므로 이를 제거하기 위하여 Savitzky-Colay Smoothing(SCS) 필터를 이용하여 노이즈 성분을 효과적으로 제거하였다. 노이즈가 제거된 데이터를 이용하여 고속푸리에변환을 실시하였으며, 고속푸리에 변환에 의해 생성된 데이터에 대한 주파수 특성을 비교 검토하였다.

또한 거칠기를 정량화 시키기 위하여 공초점 레이저 현미경에서 측정된 데이터에 대하여 SCS필터를 사용하여 노이즈를 제거한 뒤 이를 박스카운팅(box counting)방법을 이용하여 프랙탈차원을 계산하였다.

공초점 레이저 현미경은 OLYMPUS사에서 개발한 OLS1100의 기기명을 가지고 있으며, OLS1100은 공초점 광학계를 이용하여 고해상도를 얻을 수 있고 광축

방향의 해상도를 비약적으로 향상시킨 주사형 공초점 레이저 현미경이다. 또한, 이차원 및 삼차원 화상을 취급할 수 있으며, 관찰한 화상의 화질을 개선하고 선폭, 형상의 계측 등 여러 가지 관찰표시기능을 가지고 있다. 또한, X-Y방향에서 공시체를 주사하여 이를 검출기에서 추출하여 모니터상에 시료상을 출력하는 레이저 현미경이다. 공초점 레이저 현미경 OLS1100은 매우 정밀한 측정 장치이다. 따라서 이산데이터의 샘플링율이 너무 낮으면 거칠기의 변화를 효과적으로 파악할 수 없기 때문에 측정된 데이터 사이의 길이는 2.5 μm간격으로 설정하여 측정하였으며, 이에 대한 높이 데이터의 최소단위는 10μm로 설정하였다. 측정된 거칠기 데이터는 실제 거칠기의 정보를 매우 정밀하게 표현하고 있다.

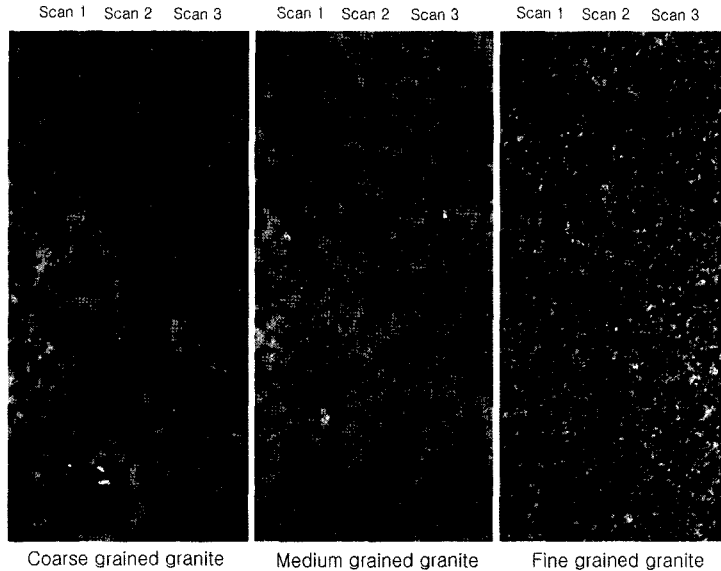


Fig. 2. Setting of rock specimen scanline.

거칠기 측정 결과

Raw data를 이용한 data plot

공초점 레이저 현미경상에서 길이에 대한 거칠기 측정간격은 $2.5 \mu\text{m}$ 로써 36개 조사선 모두에 동일한 간격으로 실시하였다. 0.0025mm 에 한번씩 측정되는 전체 데이터의 수는 Scan 1에서 30540~33360개로 이를 mm로 계산하면, 조사선 CAL에서 가장 작은 76.35mm 로 측정되었으며, MBL에서 가장 큰 83.4mm 가 측정되었다. Scan 2에서의 데이터 수는 31130~35200개로 이를 mm로 계산하면, 조사선 CBR에서 가장 작은 77.825mm 로 측정되었으며, FBL 및 FBR에서

가장 큰 88.00mm 로 측정되었다. 마지막으로 Scan 3에서의 데이터 수는 32500~34830개로 이를 mm로 계산하면, 조사선 MBR에서 가장 작은 81.25mm 로 측정되었으며, CAR에서 가장 큰 87.075mm 로 측정되었다. 이를 Scan 그룹별로 종합하면, 평균 데이터 수는 Scan 1에서 약 31786개, Scan 2에서 약 33629개, Scan 3에서 약 33412개의 평균 데이터 수를 가지며, 길이단위로 계산하면 공초점 레이저 현미경에 의해 측정된 조사선의 평균 길이는 Scan 1에서 79.47mm , Scan 2에서 84.07mm , Scan 3에서 83.53mm 로 측정되어 Scan 2에서 가장 큰 측정 범위를 가지고 있다.

Fig. 3~5는 이들 측정 데이터를 바탕으로 하여 실제 거칠기를 재현한 것이다.

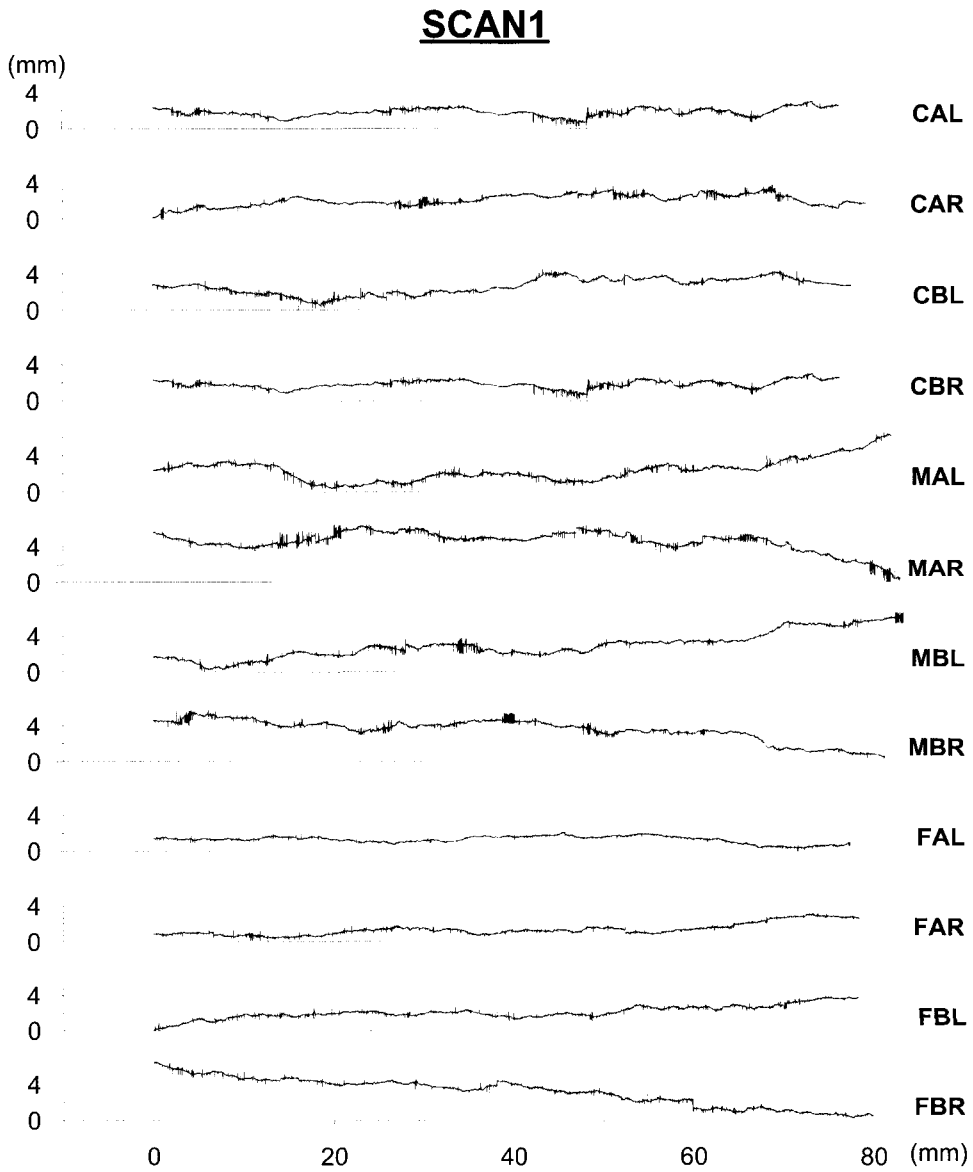


Fig. 3. Data plot of raw data by measured OLS1100 (Scan 1).

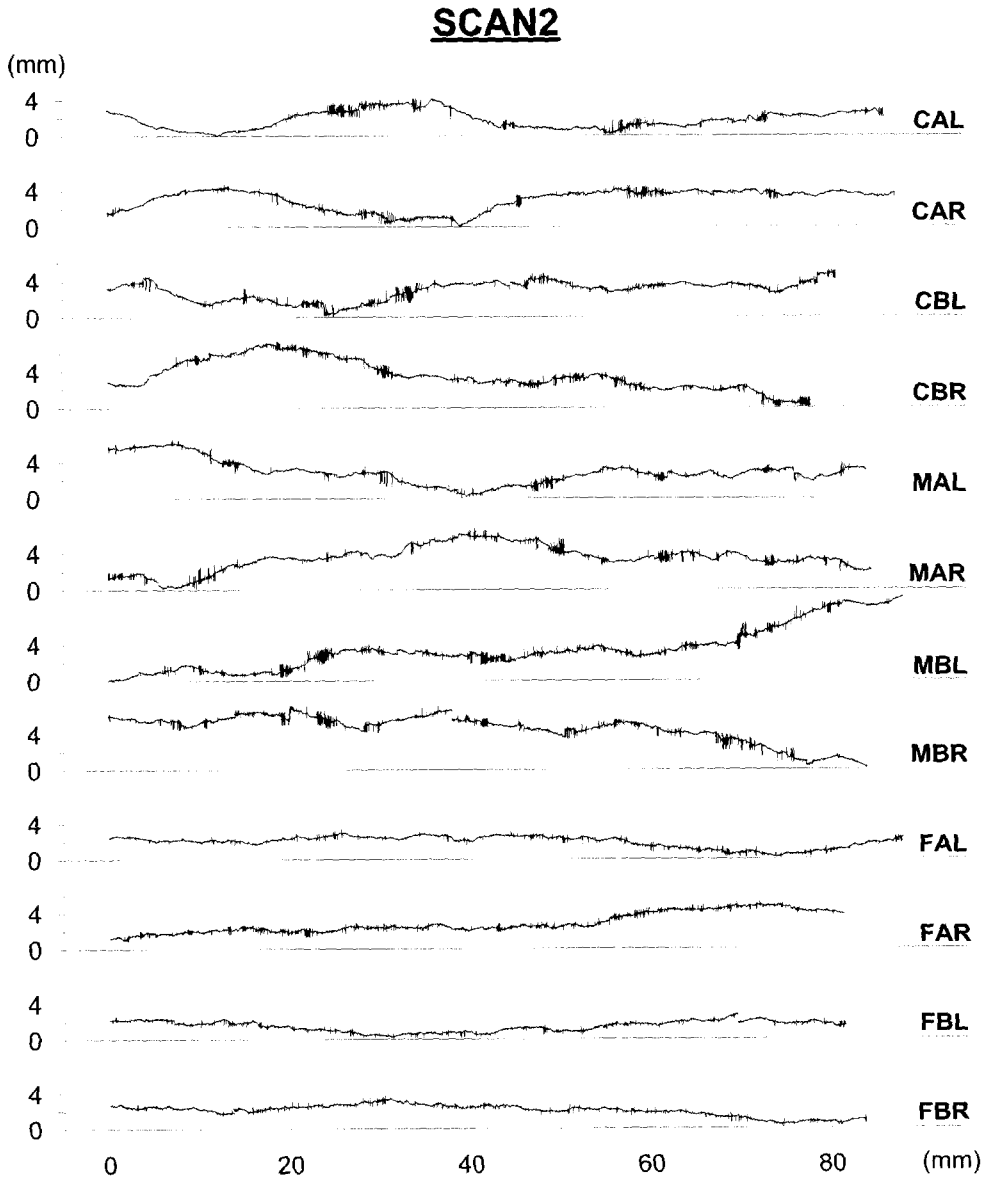


Fig. 4. Data plot of raw data by measured OLS1100(Scan 2).

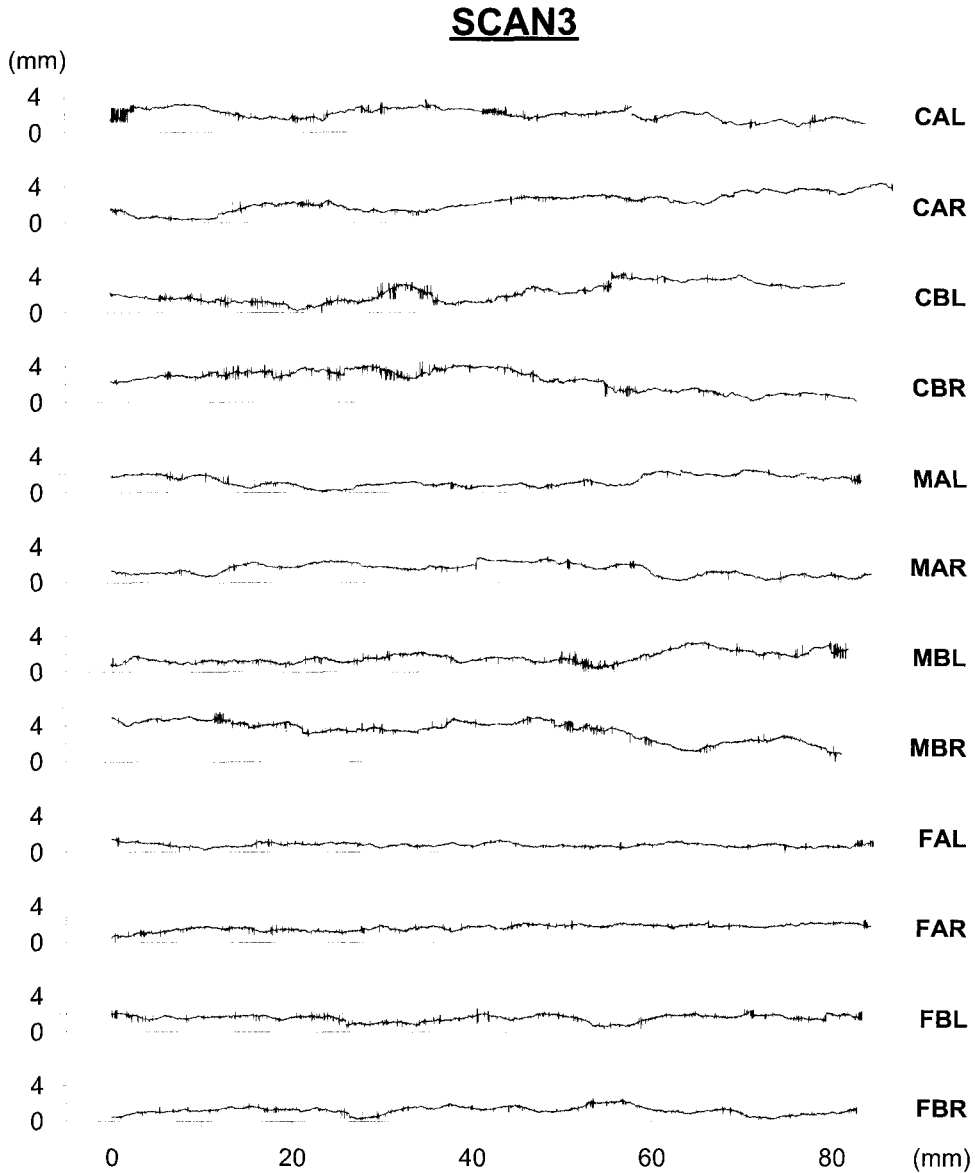


Fig. 5. Data plot of raw data by measured OLS1100(Scan 3).

측정된 데이터를 바탕으로 재현한 거칠기에서 조사선에 대한 거칠기의 특성을 전체적으로 살펴보면, Scan 1에서는 예외적인 경우는 있으나 중립질의 진폭이 대체적으로 크게 나타나고 세립질에서 완만하게 나타남을 알 수 있다. Scan 2 및 Scan 3에서도 역시 조립질, 중립질 공시체의 조사선에서 세립질 공시체의 조사선에 비해 비교적 거칠게 나타남을 볼 수 있다. 중립질 및 조립질 공시체를 비교하면 거칠기에서 큰 차이를 볼 수 없으며, 이는 중립질 공시체의 입자 크기가 조립질에 가깝고 따라서 조립질 공시체의 입자 크기와 차이가 크지 않은 것에서 기인한 것으로 보인다. 하지만 세립질 공시체는 입자 크기가 조립 및 중립질 공시체에 비해 확연한 차이를 보이고 있음을 볼 수 있다. 즉, 암석의 거칠기는 광물의 입자 크기에 영향을 받으며 이는 하중 또는 어떤 역학적 힘에 의하여 불연속면을 형성하는데 있어 입자간의 작은 미세균열에 의해 파괴형상이 좌우되기 때문이다.

측정된 데이터를 바탕으로 재현한 거칠기는 실제 거칠기 특성을 전체적으로 잘 반영되고 있지만, 측정된 데이터를 재현한 거칠기 표면에서 매우 급하게 변하는 이른바 노이즈 현상이 많이 관찰된다. 이는 측정되는 공시체 자체가 매우 불규칙한 특성을 포함하고 있으며, 서로 다른 물성을 가진 광물의 함량 및 배열, 이들 광물의 반사정도 등의 영향에 기인한 것으로 생각된다. 따라서, 데이터들의 해석에 있어 이들 노이즈를 제거해 주어야 하며, 노이즈에 해당하는 값들을 효과적으로 제거하기 위해서는 적절한 처리가 필요하다. 노이즈 처리에는 SGS방법을 사용하였다.

Savitzky-Golay Smoothing(SGS) 방법

SGS필터를 사용하여 3개의 Scan 그룹에 포함되는 36개의 모든 조사선에 적용하여 필터링을 실시하였다. 36개 조사선에 사용된 구간과 차수는 모두 동일하게 적용하였으며, 이에 적용된 차수와 구간은 $d=2$, $N=51$ 이다. 이렇게 하여 36개 조사선에 대하여 필터링한 결과는 Fig. 6~8과 같다. 그 결과 필터링 되기

이전과 전체적인 형상은 유사하나 노이즈가 효과적으로 제거된 형태를 볼 수 있다. 또한, 노이즈가 제거됨으로 인하여 공초점 레이저 현미경에 의해 측정된 데이터에서 노이즈로 인하여 구분하기 힘든 세밀한 부분을 정밀하게 파악할 수 있으므로, 거칠기의 특징을 보다 잘 표현하고 있음을 볼 수 있다.

거칠기의 스펙트럼 분석

SGS필터를 사용하여 분석한 이산데이터를 바탕으로 주파수 영역에서의 푸리에 변환을 실시하였다. 주파수 영역에서의 푸리에 분석을 하는 이유는 거칠기와 같이 사인파와 지수 신호를 포함하지 않은 신호이더라도 그 주파수 성분을 통하여 분석할 수 있다는 점에서 중요한 의미를 가지고 있다. 따라서, 이산푸리에 변환에서 얻어진 이들 주파수 성분을 이용하여 거칠기가 가지고 있는 본래의 성질을 파악하고 이를 데이터화하여 여러 가지 해석에 이용할 수 있으며, 역푸리에 과정을 거치면 다시 본래의 신호로 되돌릴 수 있다는 점에서 매우 유용하게 사용될 수 있다.

이산 푸리에 변환(DFT)

신호에 어떠한 주파수 성분이 포함되어 있는가를 분석하는 것이 주파수 분석이다. 주파수 분석에는 연속적인 방법과 이산적인 방법이 있다. 연속적인 방법으로는 대역이 서로 다른 대역통과 필터를 여러 개 연결한 대역필터 뱅크(band filter bank)를 이용한 주파수 분석 처리장치를 들 수 있는데 음성 분석에 널리 이용되고 있다. 이러한 방법으로는 성능이 좋은 필터를 사용하면 어느 정도의 효과는 있지만 복잡한 신호의 주파수 분석은 곤란하다. 정밀도가 높은 주파수 분석을 위해서는 컴퓨터에 의한 이산적인 처리가 필요한데, 컴퓨터를 사용하여 주파수 분석을 하고자 할 때 이산푸리에변환(discrete Fourier transform, DFT)이 중요한 도구가 된다.

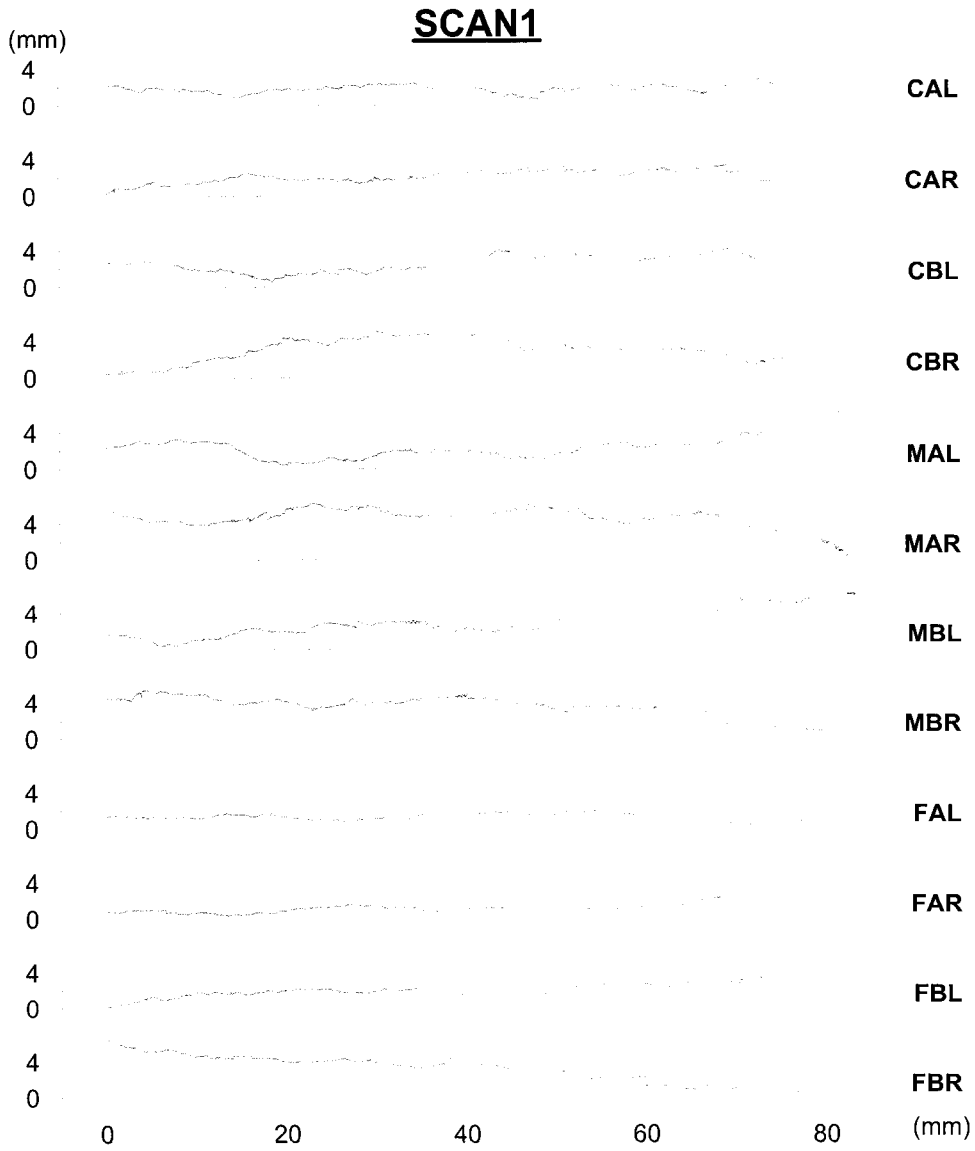


Fig. 6. Data plot of smoothed data by SGS method(Scan 1).

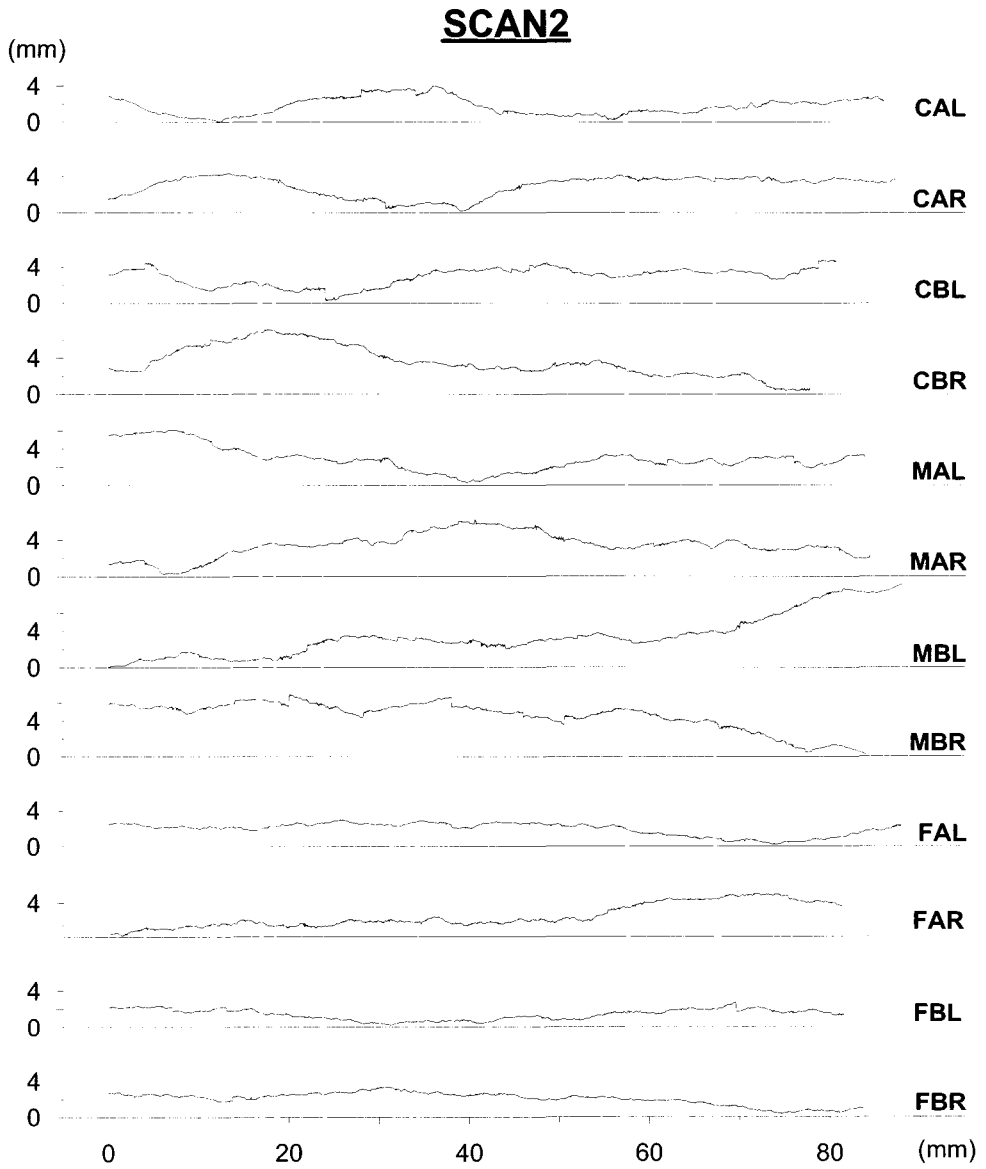


Fig. 7. Data plot of smoothed data by SGS method(Scan 2).

이산푸리에변환은 연속신호의 푸리에변환, 즉 연속 푸리에변환에 대응하는 것으로 서로 유사한 관계를 가지고 있다. 그러나 응용에 있어서는 큰 차이가 있다. 연속푸리에 변환은 시간영역의 신호를 처리 가능하게 하는 것에 반하여, 이산푸리에변환은 디지털 필터 설계를 비롯한 여러 방면에 디지털 신호처리 알고리즘에서 중요한 역할을 한다. 이것은 이산푸리에변환을 고속으로 할 수 있는 고속푸리에변환(fast Fourier transform, FFT) 알고리즘이 존재하기 때문이다.

N 개의 이산신호 $x(n)$ ($n=0, 1, \dots, N-1$)이 주어질 때 $x(n)$ 의 이산푸리에변환은 다음과 같이 정의된다.

$$X(k) = D[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn}$$

$k=0,1,2,\dots,N-1$ (1)

여기서, $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ 이며, 스펙트럼 계수 $X(k)$ 는 구간 $0 \leq k \leq (N-1)$ 에서 정의된다. 그리고 이산 역푸리에변환(inverse discrete Fourier transform)은

$$x(n) = \frac{1}{N} D^{-1}[X(k)]$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)W_N^{-kn}$$

$n=0,1,2,\dots,N-1$ (2)

로 표시된다.

식 1과 2는 N 개의 연립방정식을 구성하기 때문에 $x(n)$ 또는 $X(k)$ 의 어느 쪽이든 주어지면 다른 쪽은 구할 수 있다. 따라서 $X(k)$ 가 주어지면, 다음과 같이 연립방정식이 성립되므로 $x(n)$ 이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & e^{-j2\pi/N} & \dots & e^{-j2\pi(N-1)/N} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{-j2\pi(N-1)/N} & \dots & e^{-j2\pi(N-1)(N-1)/N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ \vdots \\ X(N-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$x(n)$ 을 복소신호라 가정하면

$$x(n) = x_r(n) + jx_i(n) \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 여기에서 $x_r(n)$ 은 실수부, $jx_i(n)$ 은 허수부를 나타내고 있다. $x(n)$ 의 DFT를 $X(k)$ 로 하면, $e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$ 의 관계를 이용하여

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} (x_r(n) + jx_i(n))X(k)W_N^{-kn}$$

$$= \sum (x_r(n) + jx_i(n))(\cos(2\pi nk/N) - j \sin(2\pi nk/N))$$

$$= \sum \{ (x_r(n) \cos(2\pi nk/N) + x_i(n) \sin(2\pi nk/N) + j(x_i(n) \cos(2\pi nk/N) + x_r(n) \sin(2\pi nk/N)) \} \quad (5)$$

로 된다. $X(k)$ 의 실수부를 $X_R(k)$ 또는 허수부를 $X_I(k)$ 로 하면,

$$\begin{aligned}
 X_R(k) &= \sum \{ (x_r(n) \cos(2\pi nk/N) \\
 &\quad + x_i(n) \sin(2\pi nk/N)) \} \\
 X_I(k) &= \sum \{ -x_r(n) \sin(2\pi nk/N) \\
 &\quad + x_i(n) \cos(2\pi nk/N) \}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

로 나타낼 수 있다.

여기에서 이산푸리에변환을 하기 위하여 $X(k)$ 를 역변환 하고 원래의 $x(n)$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 x(n) &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) W_N^{kn} \\
 X(k) &= \sum_{l=0}^{N-1} x(l) X(k) W_N^{-kn} \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\sum_{l=0}^{N-1} x(l) e^{-j\frac{2\pi kl}{N}} \right] e^{-j\frac{2\pi kl}{N}} \\
 &= \sum_{l=0}^{N-1} x(l) \left[\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi k l (n-1)}{N}} \right]
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

여기에서 $\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi k l (n-1)}{N}}$ 은 $l=n$ 일 때,

$e^0 = 1$ 이 되기 때문에 $\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} = 1$ 이 된다.

$l \neq n$ 일 때,

$$1 - e^{j\frac{2\pi N l (n-1)}{N}} = 1 - e^{j2\pi l (n-1)} = 1 - 1 = 0$$

으로 되기 때문에

$$\begin{aligned}
 &\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi k l (n-1)}{N}} \\
 &= \frac{1}{N} \frac{1 - e^{j\frac{2\pi N l (n-1)}{N}}}{1 - e^{j\frac{2\pi l (n-1)}{N}}} = 0
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

에 의해, $l = n$ 일 때만 1이 되므로 결과적으로는

$$\sum_{l=0}^{N-1} x(n) \left[\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi k l (n-1)}{N}} \right]$$

$$\begin{aligned}
 &= x(0) \cdot 0 + x(1) \cdot 0 + \dots \\
 &\quad + x(n) \cdot 1 + \dots + x(n-1) \cdot 0 \\
 &= x(n)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

로 된다.

스펙트럼 분석 결과

이 연구에서 실시한 스펙트럼 분석을 통해 얻어진 데이터는 -200 Hz에서 200 Hz까지의 주파수 범위를 가지며, 총 32769개의 데이터 개수를 가지고 있다. 주파수는 0을 중심으로 허수부와 실수부로 나누어지며 이들은 서로 대칭을 이루고 있다. 거칠기의 길이와 높이에 따른 FFT 변환에 의하여 생성된 주파수의 크기는 스펙트럼 분석을 하기 위한 거칠기의 길이 데이터에 의해 좌우되지만, 신호의 크기는 일정하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 9는 고속 푸리에 변환을 실시한 36개 조사선에 대한 하나의 예로서, 조립질 공시체의 Scan 2 그룹에 속하는 FAR에 대하여 SCS를 이용하여 노이즈를 제거한 데이터를 바탕으로 하여 고속 푸리에 변환을 실시한 데이터를 도시한 것이다. 30000개 이상의 매우 많은 데이터 수를 포함하고 있으므로 Fig. 9에서와 같이 매우 복잡한 형태로 나타나고 있다. x축은 주파수를 나타내며, y축은 스펙트럼 에너지 분포를 나타내고 있으며, 그래프가 log-log 형식으로 되어 있으므로 실제 저주파수 영역에서는 고주파수 영역에 비해 매우 높은 스펙트럼 에너지 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

스펙트럼 분석 값이 매우 많은 데이터 수를 포함하고 있으므로, 이를 일일이 도시하는 것은 매우 번거롭고 불필요한 작업을 요하게 된다. 따라서 이 연구에서는 이들 데이터의 분포가 확연히 구별되는 구간을 선정하여 그 구간을 비교대상으로 하였다. 선정 기준은 주파수 영역 0을 중심으로 신호의 크기가 대칭을 이루므로 0 미만의 허수부는 그래프 도시에서 제외하였다. 또한 신호의 크기를 나타내는 amplitude의 변화를 판단하여 비교할만한 가치를 가지고 있는 부분이라 여겨지는 0~0.5Hz의 주파수 범위를 선정하여 비교하였다.

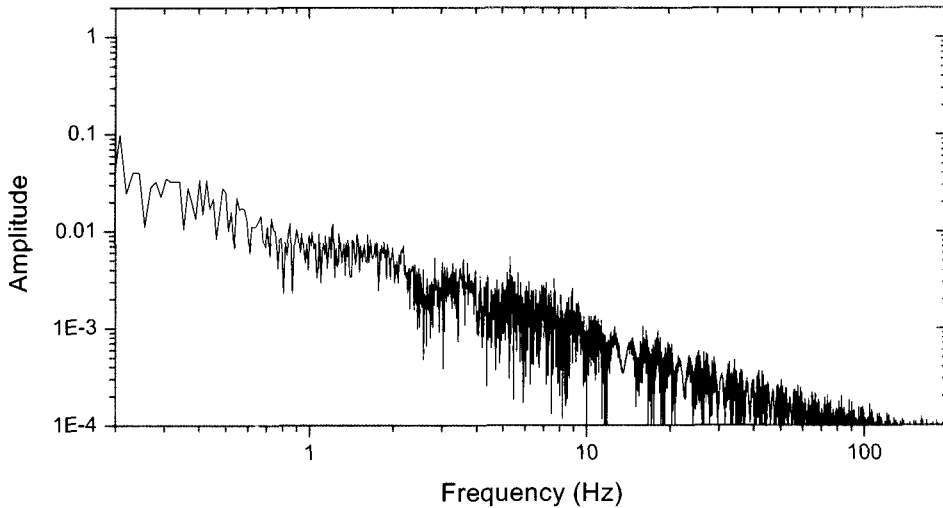


Fig. 9. FFT plot of SGS data to raw data measured OLS1100.

Scan 1에서 0.5Hz 이하의 스펙트럼 에너지 분포를 보면, 제2 고조파에서 가장 큰 스펙트럼 에너지를 나타내고 있으며, 주파수가 증가할수록 스펙트럼 에너지는 지수적으로 감소하는 양상을 나타내고 있다. 또한 중립질에서 가장 큰 에너지 스펙트럼 분포를 보이고 있다(Fig. 10). Scan 2에서 0.5Hz 이하의 스펙트럼 에너지 분포를 보면, Scan 1과 마찬가지로 제2 고조파에서 가장 큰 스펙트럼 에너지를 나타내고 있으며, 중립질에서 가장 큰 에너지 스펙트럼 분포를 보이고 있다(Fig. 11). Scan 3에서 0.5Hz 이하의 스펙트럼 에너지 분포를 보면, 제2 고조파에서 가장 큰 스펙트럼 에너지를 나타내고 있으며, 조립질에서 가장 큰 에너지 스펙트럼 분포를 보이고 있다(Fig. 12).

스펙트럼 분석 결과를 보면 주파수가 0에 가까울수록 지수적으로 증가하는 스펙트럼 에너지 분포를 볼 수 있으며, 이 에너지 분포가 조립, 중립, 세립질 공시체에 대해 0에 가까운 저주파에서 보다 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 스펙트럼 에너지 분포 데이터에서 가장 높은 분포를 보이는 제2 고조파를 비교하면, Scan 1에 해당하는 12개의 조사선의 스펙트럼 에너지 분포는 0.0949~1.6438 사이의 값을 나타내고 있다. 이 중 조사선 FBR이 가장 높은 값을 보이고 있으며, CAL에서 가장 낮은 값을 나타내고 있다. Scan 2에 해당하

는 12개의 조사선에 대한 제2 고조파의 스펙트럼 에너지 분포는 0.5276~2.0130 사이의 값을 나타내고 있고 이 중 조사선 CBR이 가장 높은 값을 보이고 있으며, 가장 낮은 값은 CAL에서 나타내고 있다. Scan 3은 12개의 조사선을 포함하고 있으며, 제2 고조파의 스펙트럼 에너지 분포는 0.0640~1.4584 사이의 값을 나타내고 있다. 이 중 조사선 CBR이 가장 높은 값을 보이고 있으며, 중립질에 해당하는 FAL에서 가장 작은 값을 나타내고 있다. Fig. 13은 36개 조사선에 대하여 실시한 고속 푸리에 변환에서 제2 고조파에 대한 스펙트럼 에너지 분포를 도시한 것이다.

Scan 1에 해당하는 값을 암석의 입도별로 비교하면, 조립질 공시체에서 0.8219, 중립질 공시체에서 1.1086 그리고 세립질 공시체에서 0.7472의 평균값을 보이며, 중립, 조립, 세립질 공시체 순으로 에너지 분포가 낮아짐을 알 수 있다. Scan 2의 값을 암석의 입도별로 비교하면, 조립질에서 1.1544, 중립질에서 1.4338 그리고 세립질에서 1.0731로 나타나며 Scan 1과 마찬가지로 중립질 공시체에서 가장 크고 세립질 공시체에서 가장 작은 평균값을 보이고 있다. Scan 3의 값을 암석의 입도별로 비교하면, 조립질에서 0.9795, 중립질에서 0.6951 그리고 세립질에서 0.2179의 평균값을 보이고 있으며, 조립, 중립, 세립질 공시체 순으로 스펙트럼

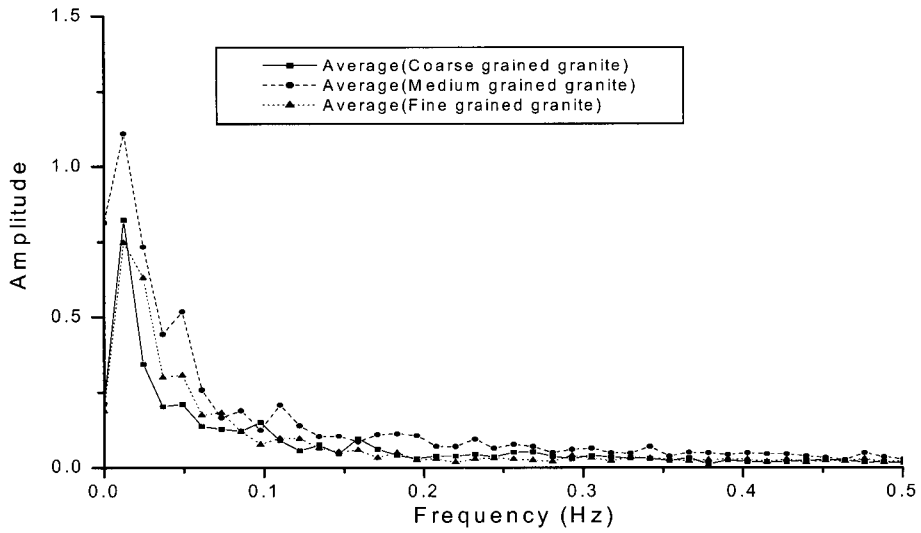


Fig. 10. Graph showing average amplitude with low frequency below 0.5 Hz(Scan 1).

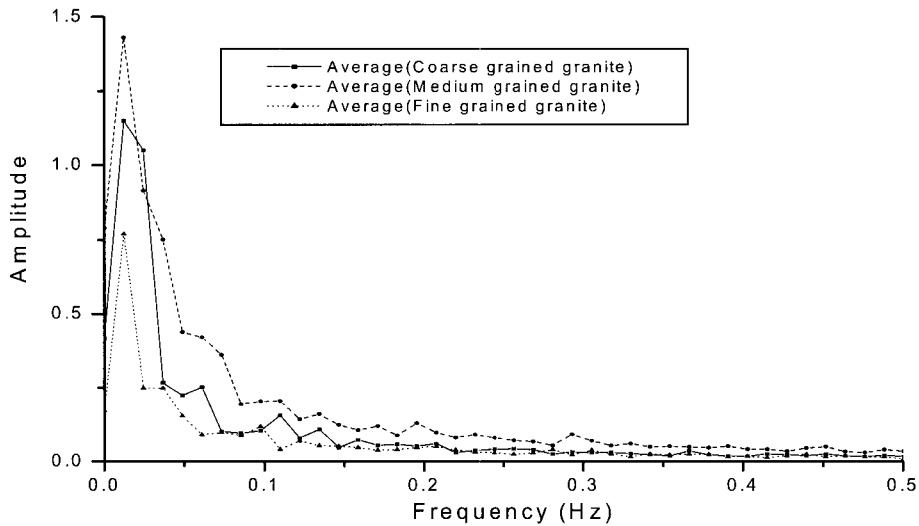


Fig. 11. Graph showing average amplitude with low frequency below 0.5 Hz(Scan 2).

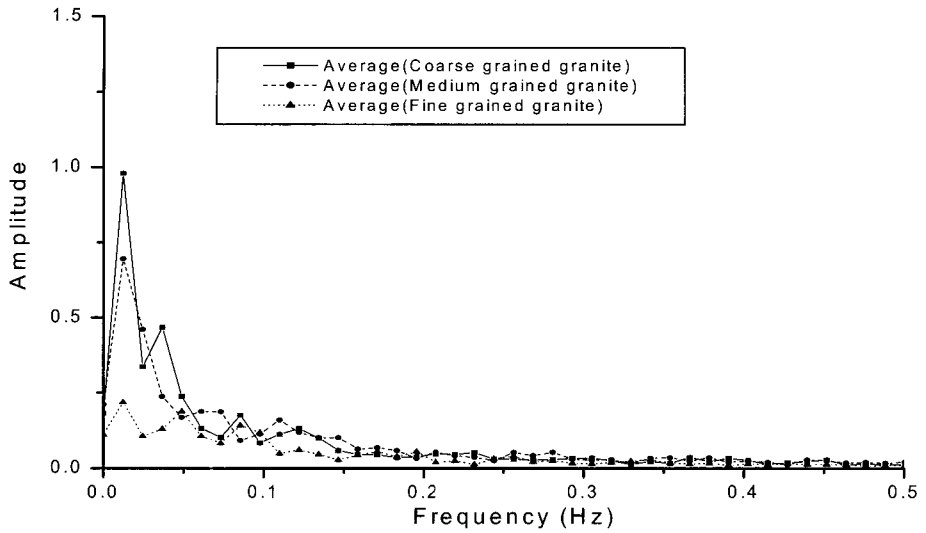


Fig. 12. Graph showing average amplitude with low frequency below 0.5 Hz(Scan 3).

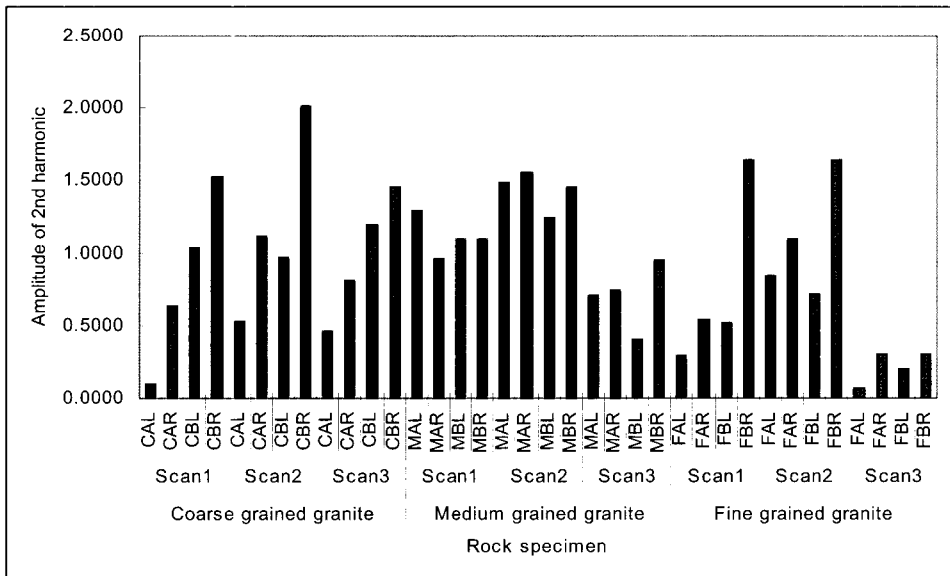


Fig. 13. Amplitude of 2nd harmonic for FFT(Scan 1,2,3).

에너지 분포가 낮아지고 있다. 전체적인 경향을 살펴 보면, 조립질 및 중립질에서 세립질 공시체에 비해 비교적 큰 스펙트럼 에너지 분포를 보인다. 36개 조사선에 대한 제2 고조파의 입도별 평균을 보면, 조립질과 중립질에서 0.9853과 1.0792로 비슷한 양상을 보이고 있는 반면, 세립질에서는 0.6794로 조립 및 중립질에 비해 매우 낮은 스펙트럼 에너지 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 공시체의 거칠기와 직접적인 관련이 있는 것으로 보이며, 거칠기가 큰 조립질 및 중립질 공시체의 조사선에서 저주파에 해당하는 제2 고조파 부분에서 높은 값을 가짐을 알 수 있다.

이 연구에서 제시한 주파수에 해당하는 값은 항상 일정한 값을 보이는 것이 아니라 측정 거칠기의 데이터에 대한 x축을 어디에 두는가에 따라 스펙트럼 에너지 분포 값 및 영향을 크게 미치는 고조파 성분 분포 역시 변화하게 된다. 본 연구에서는 측정 거칠기 데이터의 최고 높이와 최저 높이의 중간값에 해당하는 부분을 x축으로 간주하여 고속 푸리에 변환을 실시한 것이다. 하지만, x축을 측정 데이터의 최저값을 기준으로 설정할 경우 각 주파수에 대한 에너지 스펙트럼 분포는 커지게 되며, 반대로 x축을 측정 데이터의 최대값을 기준으로 설정하였을 경우에는 스펙트럼 에너지 분포는 이 연구에서 측정된 값들보다 작은 값을 보이게 된다. 따라서, 거칠기에 대한 주파수 특성을 파악하고자 할 경우 x축에 대한 기준 및 방향 설정이 먼저 선행되어야 한다.

거칠기의 프랙탈 해석

프랙탈차원을 구하기 위하여 박스카운팅을 실시하였다. 이에 이용된 데이터는 공초점 레이저 현미경에서 측정된 실제 데이터를 Origin프로그램에서 51점의 SGS방법을 이용하여 노이즈를 제거한 데이터를 사용하였다. 공초점 레이저 현미경에 의해 측정된 시료 길이는 2.5 μ m에 1회씩의 측정 범위를 가지고 있으며 높이는 10 μ m단위로 측정된 매우 세밀하고 방대한 수의 데이터를 포함하고 있기 때문에 이 데이터를 효율적으로 이용하기 위해서는 이에 알맞은 박스카운팅 방법을 적용하여야 한다. 이 세밀한 부분들을 박스카운팅에 포함하기 위해서는 수작업으로 일일이 수행할 수 없으므로 엑셀프로그램을 이용하여 해당 격자의 수를 계산하였다.

먼저 격자의 최소길이 l 을 공초점 레이저 현미경에

서 측정된 최소 높이단위인 10 μ m로 하여 해당 격자의 수를 계산하였으며, 박스 한 변의 크기를 2ⁿ배로 늘려가면서 최소 격자 한번의 길이보다 256배 큰 한번의 길이 2.56mm의 격자까지 총 9단계에 걸쳐 해당 격자의 수를 계산하였다. 예를 들어, 한 변이 10 μ m의 길이를 갖는 격자에 대하여 측정된 단면 데이터를 적용할 경우 가로축 10 μ m에 대한 세로축에 해당 격자의 수를 계산하여 이를 전체길이에 대하여 합산하면 전체 길이에 대한 10 μ m의 길이를 갖는 정방형 해당 격자의 수를 계산할 수 있다. 따라서, 프랙탈차원을 계산하기 위하여 적용된 격자 한 변의 길이 변화는

$$l(mm) = 0.01 \times 2^n \quad (n = 0, 1, 2, \dots, 7, 8) \quad (10)$$

로 변화를 주었다.

격자의 단위길이(mm)에 대한 세로축에 포함되는 해당 격자의 수를 계산하기 위해서는 x축의 단위길이 상에 있는 y축 최대값에서 최소값을 뺀 후, 이를 격자의 단위 길이로 나누어주고 그 나눈 수의 소수점 부분을 제외한 값에 1을 더하면 해당 격자의 개수가 된다. 즉, 박스의 최초 단위길이에 포함될 수 $N_i(l)$ 은

$$N_i(l) = \frac{Max[f(x, x + (0.01 \times 2^n))]}{0.01 \times 2^n} - \frac{Min[f(x, x + (0.01 \times 2^n))]}{0.01 \times 2^n} + 1 \quad (11)$$

이 된다.

따라서, 측정된 단면 데이터에 포함하는 해당 격자의 수 $N(l)$ 을 계산하면 다음과 같이 된다.

$$N(l) = \sum_{i=X_m}^{X(m+1)} \left[\left\{ \frac{Max[f(X_m, X(m+1))]}{X} \right\} - \left\{ \frac{Min[f(X_m, X(m+1))]}{X} \right\} + 1 \right] \quad (m = 0, 1, 2, \dots, \infty) \quad (12)$$

여기서, X는 격자의 단위길이가 되며, 이 연구의 프랙탈차원에 사용된 격자 한번의 길이 X는 0.01mm, 0.02mm, 0.04mm, ..., 1.28mm, 2.56mm 가 된다.

이렇게 하여 얻어진 측정된 단면 데이터를 포함하는 해당 격자의 수 $N(l)$ 와 격자의 길이 l 을 가지고 다음 식에 의해 프랙탈차원을 구할 수 있다.

$$D = -\Delta \log N(l) / \Delta \log l \quad (13)$$

프랙탈차원을 해석하기 위하여 적용된 거칠기에서의 조사선은 공초점 레이저 현미경으로 측정된 3개의 조사선그룹에 포함되는 36개의 모든 조사선을 적용하여 실시하였다. 공초점 레이저 현미경을 이용하여 측정된 데이터를 볼 때, 노이즈를 많이 포함하고 있는 것을 볼 수 있으며, 따라서 이들 노이즈를 SGS방법을 이용하여 실제 거칠기에 근사시킨 후 이 데이터를 이용하여 프랙탈차원을 계산하였다. 프랙탈차원 계산에서 크기를 달리하는 격자의 크기는 총 9개로 하였고, 최소길이를 0.01mm로 하여 0.01×2^n 배로 증가시키면서 계산하였다.

Fig. 14는 박스카운팅 방법을 사용하여 36개 조사선에 대한 프랙탈차원을 구하는 방법을 나타낸 하나의 예로서, 조립질 공시체의 Scan 1 그룹에 속하는 CAL에 대하여 SGS방법을 이용하여 노이즈를 제거한 데이터를 바탕으로 하여 해당길이에 포함되는 해당 격자

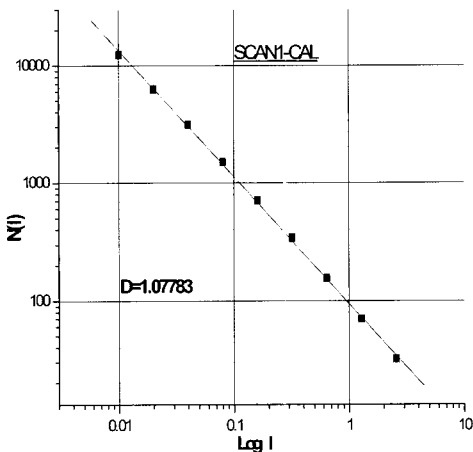


Fig. 14. Fractal dimension used box counting method.

수를 계산하여 그 기울기에 해당하는 프랙탈차원을 계산한 것이다. x축은 격자의 길이를 나타내고 있으며, y축은 해당 격자의 수를 나타내고 있다.

Scan 1에 해당하는 12개의 조사선은 1.0540~1.0779 사이의 프랙탈차원을 나타내고 있다. 이중 조사선 MAR이 가장 높은 값을 보이고 있으며, 가장 낮은 값은 MBL에서 나타나고 있다. Scan 1의 프랙탈차원을 암석의 입도별로 비교하면, 조립질에서 1.0685, 중립질에서 1.0663 그리고 세립질에서 1.0592등으로 나타나며, 세립질에서 가장 작은 평균값을 보이고 있다. Scan 2는 12개의 조사선을 포함하고 있으며, 1.0331~1.0830 사이의 프랙탈차원을 나타내고 있다. 이중 조사선 MBL이 가장 높은 값을 보이고 있으며, 가장 낮은 값은 FBR에서 나타나고 있다. Scan 2의 프랙탈차원을 암석의 입도별로 비교하면, 조립질에서 1.0692, 중립질에서 1.0660 그리고 세립질에서 1.0492로 나타나며, Scan 1과 마찬가지로 조립질에서 가장 크고 세립질에서 가장 작은 평균값을 보이고 있다. Scan 3에서는 1.0469~1.0917 사이의 프랙탈차원을 나타내고 있다. 이중 조사선 FBL이 가장 높은 값을 보이고 있으며, 가장 낮은 값은 CAR에서 나타나고 있다. Scan 3의 프랙탈차원을 암석의 입도별로 비교하면, 조립질에서 1.0635, 중립질에서 1.0714 그리고 세립질에서 1.0753로 나타나며, Scan 1 및 Scan 2와는 달리 세립질에서 가장 크고 조립질에서 가장 작은 평균값을 보이고 있다(Table 1). 이를 이용하여 그래프로 도시하면 Fig. 15와 같다.

각 조사선그룹별 입자 크기에 대한 평균 프랙탈차원으로써 Scan 1과 Scan 2를 보면, 입자 크기가 작아질수록 평균 프랙탈차원 또한 낮아지는 것을 볼 수 있다. 하지만, Scan 3은 Scan 1, Scan 2와는 대조적으로 입자 크기가 작은 세립질에서 높은 값을 보이고 조립질로 갈수록 프랙탈차원이 낮아짐을 알 수 있다. Scan 3에서 세립질이 특히 높은 값을 보이는 이유는 다른 조사선에 비해 세립질 조사선 FBL이 매우 높은 프랙탈차원을 가지고 있기 때문이라 해석된다. 36개 조사선의 전체적인 프랙탈차원을 비교해 볼 때, 조립질에서 평균 프랙탈차원은 1.0671로 나타났으며, 중립질 및 세립질에서는 각각 평균 1.0679, 1.0612의 값을 보이고 있다. 따라서, 평균 프랙탈차원은 중립, 조립, 세립질 순으로 작아지는 경향, 즉, 중립 및 조립질 암석의 거칠기가 크을 나타내고 있으나 개별적으로 분석 할 때, 중립, 세립, 조립에서 뚜렷한 차이를 보이지는 않는다.

Table 1. Fractal dimension of each scanline.

| Group | Scanline | Number of box | | | | | | | | | Fractal Dimension |
|-------|----------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| | | l=0.01 | l=0.02 | l=0.04 | l=0.08 | l=0.16 | l=0.32 | l=0.64 | l=1.28 | l=2.56 | |
| Scan1 | CAL | 12399 | 6318 | 3129 | 1510 | 712 | 343 | 156 | 70 | 32 | 1.07783 |
| | CAR | 13127 | 6747 | 3324 | 1569 | 744 | 336 | 165 | 81 | 41 | 1.05532 |
| | CBL | 12525 | 6416 | 3183 | 1542 | 737 | 342 | 169 | 74 | 34 | 1.06763 |
| | CBR | 13010 | 6703 | 3300 | 1587 | 750 | 349 | 161 | 74 | 36 | 1.07321 |
| | MAL | 13873 | 7110 | 3484 | 1651 | 776 | 363 | 175 | 85 | 42 | 1.05742 |
| | MAR | 15282 | 7807 | 3853 | 1840 | 842 | 391 | 184 | 81 | 43 | 1.07794 |
| | MBL | 13791 | 7008 | 3474 | 1678 | 786 | 369 | 176 | 84 | 43 | 1.05398 |
| | MBR | 13785 | 7047 | 3444 | 1642 | 775 | 368 | 179 | 80 | 35 | 1.07597 |
| | FAL | 10935 | 5578 | 2787 | 1331 | 629 | 304 | 144 | 73 | 31 | 1.05494 |
| | FAR | 11630 | 5912 | 2928 | 1428 | 677 | 321 | 152 | 79 | 32 | 1.05647 |
| Scan2 | FBL | 12212 | 6257 | 3102 | 1490 | 699 | 321 | 156 | 75 | 38 | 1.05502 |
| | FBR | 12551 | 6402 | 3184 | 1528 | 718 | 338 | 160 | 74 | 34 | 1.07038 |
| | CAL | 13888 | 7092 | 3543 | 1712 | 818 | 396 | 186 | 90 | 41 | 1.05219 |
| | CAR | 14338 | 7323 | 3638 | 1753 | 810 | 379 | 175 | 92 | 38 | 1.06912 |
| | CBL | 14058 | 7117 | 3516 | 1655 | 778 | 366 | 172 | 80 | 35 | 1.08181 |
| | CBR | 13779 | 6992 | 3453 | 1648 | 772 | 375 | 172 | 75 | 38 | 1.07379 |
| | MAL | 13700 | 6992 | 3466 | 1667 | 769 | 369 | 178 | 87 | 46 | 1.04335 |
| | MAR | 14437 | 7383 | 3629 | 1744 | 806 | 379 | 177 | 86 | 39 | 1.07195 |
| | MBL | 15877 | 8134 | 3981 | 1905 | 869 | 396 | 187 | 87 | 42 | 1.08300 |
| | MBR | 14899 | 7582 | 3744 | 1789 | 827 | 393 | 190 | 91 | 41 | 1.06585 |
| Scan3 | FAL | 13126 | 6695 | 3306 | 1598 | 779 | 364 | 173 | 85 | 46 | 1.03619 |
| | FAR | 13002 | 6645 | 3253 | 1549 | 715 | 334 | 162 | 78 | 41 | 1.05571 |
| | FBL | 12347 | 6309 | 3106 | 1489 | 713 | 341 | 162 | 70 | 33 | 1.07200 |
| | FBR | 12514 | 6379 | 3124 | 1526 | 723 | 343 | 176 | 83 | 43 | 1.03309 |
| | CAL | 13946 | 7113 | 3508 | 1689 | 790 | 376 | 169 | 84 | 41 | 1.06284 |
| | CAR | 13205 | 6809 | 3369 | 1632 | 774 | 364 | 177 | 88 | 41 | 1.04687 |
| | CBL | 13819 | 7088 | 3477 | 1678 | 794 | 367 | 170 | 86 | 37 | 1.06960 |
| | CBR | 14200 | 7249 | 3578 | 1711 | 803 | 370 | 182 | 86 | 36 | 1.07484 |
| | MAL | 12357 | 6331 | 3127 | 1527 | 715 | 341 | 161 | 71 | 33 | 1.07254 |
| | MAR | 12611 | 6458 | 3209 | 1546 | 734 | 352 | 164 | 75 | 37 | 1.06086 |
| Scan3 | MBL | 14206 | 7225 | 3553 | 1679 | 768 | 358 | 170 | 86 | 37 | 1.07528 |
| | MBR | 13637 | 6958 | 3409 | 1646 | 769 | 362 | 162 | 79 | 36 | 1.07698 |
| | FAL | 12569 | 6436 | 3200 | 1522 | 744 | 363 | 180 | 71 | 34 | 1.06665 |
| | FAR | 13022 | 6674 | 3276 | 1586 | 744 | 344 | 168 | 76 | 33 | 1.07737 |
| | FBL | 13632 | 6937 | 3407 | 1619 | 765 | 343 | 162 | 73 | 33 | 1.09166 |
| | FBR | 12393 | 6336 | 3151 | 1518 | 733 | 333 | 160 | 80 | 33 | 1.06536 |

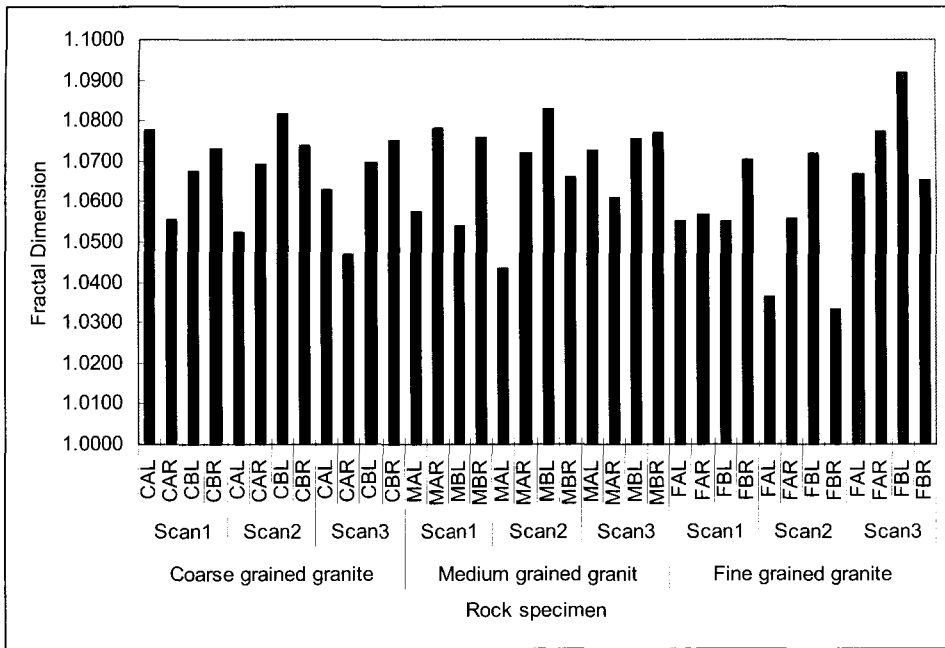


Fig. 15. Fractal dimension in each scanline.

결 언

거칠기의 평가를 보다 정량화하기 위하여 레이저 현미경을 이용하여 하나의 단면데이터를 작성하고 공시체의 불연속면의 특징을 관찰하였다. 레이저 현미경에 의해 측정된 이산 데이터를 이용하여 스펙트럼 분석을 실시하였으며 측정된 거칠기의 주파수 특성을 비교 및 분석함으로써 거칠기에 영향을 미치는 주파수의 분포를 파악하였다. 또한 거칠기의 값을 정량화하기 위하여 프랙탈해석을 적용하였다.

공조점 레이저 현미경을 사용하여 연속적인 거칠기를 이산 데이터로 표현할 수 있으며, 이렇게 하여 얻어진 이산데이터를 바탕으로 고속 푸리에변환을 실시한 결과 제2 고조파 성분이 가장 큰 값을 보이고 있다. 또한 스펙트럼 에너지 분포는 조립질 공시체에서 0.9853, 중립질 공시체에서 1.0792, 세립질 공시체에서 0.6794의 평균값을 보이고 있으며, 이는 거칠기가 클수록 저주파수 영역대에서 고조파의 에너지 분포가 높게 나타남을 알 수 있다.

프랙탈 해석에 있어서는 거칠기가 큰 공시체, 즉 조립질 및 중립질 공시체에서에서 일반적으로 프랙탈

차원이 큰 값을 보이고 있다. 하지만 실제 거칠기 분포와는 잘 일치되지 않으며, 측정방법에 따라 매우 가변적인 결과를 가진다. 이는 박스카운팅 방법에서 격자의 길이가 커질수록 정확성이 결여되기 때문이다.

사 사

이 연구를 수행하는 동안 많은 편의를 제공해주었으며, 특히 내용 중 부분적으로 중요한 지적을 해준 Prof. C. Derek Martin(Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Canada)에게 감사드린다. 이 논문은 2003학년도 안동대학교 학술연구조성비(과건연구)에 의하여 수행되었다. 이에 감사한다.

참고문헌

정교철, 김영기, 1994, 암반의 손상역학 해석에 있어서 Fractal 차원의 적용에 관한 연구, 대한지질공학회,

Vol. 4, No. 2, p. 139-142.

Barnsley, M. F., 1993, *Fractals everywhere* second edition, Academic Press Professional, p. 208-230.

Develi, K., Babadagli, T., 1998, Quantification of natural fracture surfaces using fractal geometry. *Mathematical Geology* 30 (8), p 971-998

Develi, K., Babadagli, T., Comlekci, C., 2001, A new computer-controlled surface-scanning device for measurement of fracture surface roughness, *Computer & Geosciences* 27, p265-277

Field, E. H., Clement, A. C., Jacob, K. H., Aharonian, V., Hough, S. E., Friberg, P. A., Babaian, T. O., Karapetian, S. S., Hovanessian, S. M., Abramian, H. A., 1995, Earthquake Site-Response Study in Giumri (Formerly Leninakan), Armenia, Using Ambient Noise Observations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 1, p. 349-353

Genabeek, O., Rothman, D. H., 1999, Critical behavior in flow through a rough-walled channel, *Physics Letter A* 255, p. 32-33

Kulatilake P. H. S. W., Fiedler R., Panda B. B., 1997, Box fractal dimension as a measure of statistical homogeneity of jointed rock mass, *Engineering Geology* 48, p. 217-220.

Lee, J. Y., Lee, K. K., 2000, Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system, *Hydrology* 229, p. 194-198.

Lanaro, F., 2000, A random field model for surface roughness and aperture of rock fractures, *Rock Mechanics & Mining Sciences* 37, p 1195

Lanaro, F., Tolppanen, P., 2002, 3D characterization of coarse aggregates, *Engineering Geology* 65, p. 17-30

Lee, J. Y., Miller, C. J., 2000, Fractal dimension for the cracks of compacted clay liners in the landfill cover system in winter condition, *Geosciences Journal* Vol. 4, No. 2, p. 89-93.

Odling N. E., 1994, Natural fracture profiles, fractal dimension and joint roughness coefficients, *Rock Mech. Rock Engng.* 27(3), p. 135-153.

Olsson, R., Barton, N., 2000, An improved model

for hydromechanical coupling during shearing of rock joints, *Rock Mechanics & Mining Sciences* 35, p. 318

Orfanidis, S. J., 1996, *Introduction to Signal Processing*, Prentice-Hall, Inc., p. 434-462

Outer A. D., Kaashoek J. F., Hack H. R. G. K., 1995, Difficulties with using continuous fractal theory for discontinuity surfaces, *Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol 32, No. 1, p. 3-9.

Padilla, A., Pulido-Bosch, A., 1995, Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis, *Hydrology* 168, p 73-89.

Plouraboue F., Kurowski P., Boffa J. M., Hulin J. P., Roux S., 2000, Experimental study of the transport properties of rough self-affine fractures, *Journal of Contaminant Hydrology* 46 p. 295-318.

Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., 1989, *Numerical Recipes in Pascal*, Cambridge University Press KALA Corporation p. 423~472

Turcotte, D. L., 1992, *Fractals and chaos in geology and geophysics*, Cambridge University Press, p. 17,

투 고 일 2004년 5월 12일

심 사 일 2004년 5월 13일

심사완료일 2004년 6월 7일

김종태
 안동대학교 지구환경과학과
 경북 안동시 송천동 388
 TEL : 054-820-5753
 Email : jongtae98@empal.com

정교철
 안동대학교 지구환경과학과
 경북 안동시 송천동 388
 TEL : 054-820-5753
 Email : jeong@andong.ac.kr

김만일
안동대학교 지구환경과학과
경북 안동시 송천동 388
TEL : 054-820-5753
Email : mikim@andong.ac.kr

박창근
관동대학교 토목공학과
210-701 강릉시 내곡동 522
TEL : 033-670-3320
Email : ckpark@kwandong.ac.kr

송재용
(주) 산하이앤씨
서울시 서초구 서초동 1337-3 삼동빌딩
TEL : 02-3474-2146
Email : sjy1010@hanmail.net