

조사선을 이용한 화강암의 미세 불연속면 분포성상 평가

이상은¹⁾ · 조상호²⁾ · 양형식³⁾ · 박홍민⁴⁾

Estimation of Micro-discontinuity Distribution Using Scanline Survey in Granites

Lee Sang-Eun, Cho Sang-Ho, Yang Hyung-Sik and Park Hong-Min

ABSTRACT In this paper, mechanical characteristics of micro-defects in granitic rock was studied. Crack spacing and length were investigated by scanline survey in specimen of granite. To estimate the direction and distribution of potential microcrack in granite, thin sections were made for three direction of Rift, Grain and Hardway axis of the rock specimen. The density and length of microcrack were investigated quantitatively. Three directions of microcracks are comparatively perpendicular. Crack density varies as direction differs, but crack length doesn't show influence of direction.

Key words : scanline survey method, microcrack, crack density, crack length

초 록 우리나라의 대표적인 암석의 하나인 화강암에 대하여 내부결합에 의한 역학적 특성을 고찰하였다. 조사선(scanline)을 이용하여 암석 내에 존재하는 불연속면의 간격과 길이를 평가하였다. 화강암에 잠재적으로 존재하는 미소균열의 선택적 배향성과 분포성상을 관찰하기 위해서 암석시편을 Rift, Grain 및 Hardway 축의 3방향으로 구분하여 각각의 박편을 제작하여 균열밀도와 균열길이를 정량적으로 평가하였다. 그 결과 균열은 결의 세 방향에 대하여 직교하는 경향이였다. 균열 밀도는 방향에 따라 달랐으나 길이는 큰 영향이 없었다.

핵심어 : 조사선, 결, 균열밀도, 균열길이

1. 서 론

불연속면이란 암반 내에 존재하는 인장강도가 작거나 또는 전혀 없는 역학적 불연속면의 총칭으로 미소균열, 층리, 엽리, 절리, 시임(seam), 단층, 파쇄대 및 구조선 등으로 분류할 수 있다. 이중 미소균열, 층리, 엽리는 다른 불연속면과 비교할 때 충분히 작기 때문에 암반문제보다는 오히려 암석적 성질로 취급되고 있다. 절리, 단층 및 파쇄대는 암반거동에 직접적인 영향을 미치는 불연속면으로 작용하기 때문에 암반의 역학적 거동을 예측하는데 매우 중요하다.

한편 암석이나 암반 내에 존재하는 불연속면의 간격과 길이에 대한 평가는 조사선(scanline)을 이용해서 평가할 수 있다.^{2)~6)} 그러나 조사선 군과 교차하는 불연속면의 표본추출에 의한 조사는 표본을 얻는 매우 편리한 방법이지만 표본값의 평가에 대한 정밀도가 얻어져야 하고, 조사선을 이용하는데 선행추출에 의해 발생된 편이(bias)는 반드시 제거되어야 한다. 따라서 직선의 조사선을 사용한 방법의 오차를 감소시키기 위해서 더욱 많은 표본수를 확

득해야 한다. 또한 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 표준 통계적 기법이 요구된다.

본 연구에는 조사선에 의한 불연속면 간격 및 길이의 측정값이 통계적으로 어느 정도의 정밀도를 획득할 수 있는가에 대해서 고찰하였으며 화강암의 조암광물 내에 선택적으로 배향된 미소균열의 분포밀도 및 길이를 비교분석 하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 화강암의 미소결합구조

화강암의 역학적 특성에 가장 큰 영향을 미치는 미소균열은 그 형태에 따라서 開口균열(open crack)과 閉塞균열(Closed crack), 광물 입자와의 관계에 따라서 粒內균

- 1) 정회원, 한암건설 대표이사
 - 2) 학생회원, 전남대학교 자원공학과 석사과정
 - 3) 정회원, 전남대학교 자원공학과 교수
 - 4) 전북대학교 자원공학과 명예교수
- 원고 접수일 : 1999년 10월 20일
원고심사완료일 : 1999년 11월 30일

열과 纖維粒의 경계에서 인지되는 粒界균열 등으로 구분된다. 입내균열은 주로 석영과 장석 입내에서 나타나지만 석영 입내균열이 대부분을 차지하고 있다. 또한 단일 석영 입내에 존재하는 균열과 粒子群을 이루는 석영집합체 내에 연장되어 발달된 균열도 나타난다. 화강암의 대표적인 공극으로는 液體包有物이 있으며, 이 액체포유물이 단독으로 존재하는 경우와 群으로 존재하는 경우가 있다. 액립면은 액체포유물이 면상 집합체를 이루고 있는 것으로서 주로 장석 입내에 분포하고 있다. 입계 균열에 의해서도 이방성이 나타나지만 입계 균열에 의한 이방성의 정도는 입내 균열에 의한 이방성에 비해서 경미한 것으로 보고되고 있기 때문에 본 연구에서는 입내 균열을 주로 고찰하였다.¹¹⁾

2.2 미소균열의 분포성상

화강암 조암광물 내에 존재하는 미소균열의 성인에 대한 구체적 연구결과는 제시되지 않고 있으나, 화강암의 생성 당시 마그마 속에 포함되어 있던 공극이 고결과정에서 지압이나 측압을 받아 폐색되었으며, 固結時 압력의 방향에 따라서 규칙적인 배열을 하고 있다는 설이 제시되고 있다.¹⁰⁾ 이 주장에 따르면 미소균열은 개별적인 원반형태를 띠게 되며, Fig. 1 과 같은 3차원적 모델화가 가능하다. 따라서 가시적인 균열형태는 화강암의 절단면에서 선형으로 나타난다.

영어권에서는 화강암에 있어서 이와 같은 원반균열이 선택적으로 배향된 세 방향을 Rift plane, Grain plane, Hardway plane 등¹⁰⁾으로 칭하고 있으며, 이러한 강도 이방성을 초래하는 암석구조를 일반적으로 "Rift" 또는 "Bedding plane"이라 호칭하고 있다. 또한 일본에서는 화강암의 강도 이방성 면을 目, 二番目 등으로 칭하고 있으며¹¹⁾, 우리 나라에서는 이를 총칭하여 "결"이라는 용어를 사용하고 있다.

"결"은 파단이 용이한 강도 이방성면으로서 화강암 채석장에서 채석작업시 유용하게 이용되고 있는데, "파단이 용이하다"는 표현에는 '보다 작은 외력으로도 파단 가능하다'는 것과 파단면의 형상에 평면성이 높다는 의미가 내포되어 있다.

전자는 미소균열이나 액립면 등의 미소결함구조의 존재에 기인하는 것이고, 후자는 미소결함구조의 선택적 배향에 기인하는 것이며, 특히 미소결함구조의 선택적인 방향성은 화강암의 역학적 성질에 이방성을 초래하는 원인이 된다.

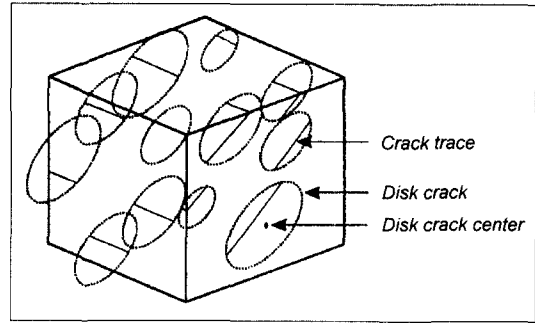


Fig. 1. Conceptual diagram of three-dimensional disk microcracks.

2.3 통계적 해석법 고찰

조사선을 사용한 방법은 불연속면의 특성을 조사하는데 있어서 효과적인 방법이지만 직선을 사용한 조사의 오차를 감소시키기 위해서는 더욱 많은 표본수를 획득해야 한다. 그러나 표본수의 증가가 결과의 신뢰도를 높인다고 단정하기 어렵기 때문에 표본을 얻는데 투자한 노력과 결과의 신뢰도 사이의 균형을 얻기 위해 표준 통계적 기법이 요구된다. 이를 위한 방법으로는 모집단의 평균, 분산, 표준편차 등의 모수를 추정하는 방법인 표본분포와 중심극한정리가 그 기초가 된다.¹⁴⁾

2.3.1 표본분포(sampling distribution)

표본분포의 표준편차(또는 표준오차, standard error) $\sigma_{\bar{x}}$ 는 일반적으로 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{n} \tag{1}$$

(1)식에서 표준오차는 표본의 크기 n 이 커질수록 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 다만 이 관계식은 모집단이 매우 클 경우에만 성립하며, 모집단의 크기가 작을 때는 근사적으로만 성립한다. 따라서 표본의 크기가 커지면 커질수록 표준오차가 감소하므로 표본평균 \bar{x} 는 표본분포의 평균 $\mu_{\bar{x}}$ 및 모집단의 평균 μ 에 점점 근접하게 된다.

$$\bar{x} \approx \mu_{\bar{x}} = \mu \tag{2}$$

2.3.2 중심극한정리(Central limit theorem)

모집단이 정규분포 $N(\mu, \sigma^2)$ 을 이룬다면 표본분포 또한 정규분포 $N(\mu_{\bar{x}}, \sigma_{\bar{x}}^2, 2)$ 를 이룬다. 그러나 모집단이 정규분포를 취하지 않는다 하더라도 표본분포는 정규분포에

가까운 형태를 취하며, 표본의 크기가 커질수록 표본분포는 점점 더 정규분포에 가까워진다. 특히 표본의 크기가 30개 이상인 경우 모든 표본분포는 모집단의 분포와 관계 없이 정규분포의 형태를 띠게 된다.

즉 표본이 충분히 클 때에는 $\frac{\bar{x}-\mu}{\sigma/\sqrt{n}}$ 의 값이 표준정규변수 Z값에 접근한다.

$$Z = \frac{\text{확률변수값} - \text{평균값}}{\text{표준오차}} = \frac{x - \mu_{\bar{x}}}{\sigma_{\bar{x}}} = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (3)$$

따라서 표준정규분포표를 이용해서 표본평균 \bar{x} 가 갖는 표준오차의 범위를 구할 수 있다.

2.3.3 신뢰구간의 설정

표본통계량으로부터 모집단의 모수를 추정하는 과정은 모집단의 표준편차가 알려져 있는 경우와 모집단의 표준편차가 알려져 있지 않은 경우로 구분하여 평가할 수 있다.

먼저 모집단의 표준편차가 알려져 있는 경우, 모집단으로부터 무작위 추출방식으로 30개 이상의 표본을 추출하게 되면 중심극한정리에 의해서 표본분포는 정규분포를 따르게 되므로 모집단의 평균 μ 의 신뢰구간은 (3)식을 정리하여 다음 식이 된다.

$$\mu = \bar{x} \pm (Z \times \text{표준오차}) = \bar{x} \pm \left(Z \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad (4)$$

여기에서 $Z\sigma/\sqrt{n}$ 을 오차한계라 한다.

그러나 표본조사에서는 대부분 모집단의 표준편차가 미지이므로 표본을 통해 추정된 값을 이용해야 하는데 이 과정에서 다소 오류를 범할 가능성이 있으므로 이를 이용해 설정한 신뢰구간의 오차한계는 모집단의 표준편차가 알려져 있는 경우보다 넓어져야 하고, 신뢰구간의 오차한계를 증가시키기 위해서는 추정과정에서 정규분포가 아닌 t분포(student t-distribution)를 사용해야 한다. 즉 모집단의 표준편차가 미지인 경우에는 표본의 표준편차를 이용하여 추정해야 하고, 이 경우 Z값 대신 t값을 사용해야 한다. 이때 모집단의 평균 μ 의 신뢰구간은 다음 식으로 구한다.

$$\mu = \bar{x} \pm (t \times \text{표준오차의 추정치}) = \bar{x} \pm \left(t \times \frac{\sigma_{\bar{x}}}{\sqrt{n}} \right) \quad (5)$$

동일 신뢰수준에서 t값은 Z값보다 크고, t값은 자유도가 커짐에 따라 작아지게 되며, 표본의 크기가 100 이상이 되면 t값은 Z값과 거의 비슷한 값을 가지게 되어 이 경우 t분포는 정규분포와 거의 같은 형태를 갖는다. 따라

서 표본의 크기가 매우 클 때는 어느 경우이나 정규분포를 이용해서 모집단의 평균과 표준편차 등의 모수를 추정할 수 있으며, 신뢰구간은 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$\mu = \bar{x} \pm \frac{Z_{\bar{x}}}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

여기에서 $\frac{Z}{\sqrt{n}}$ 은 허용 가능한 비례오차(proportionate error, ϵ)이며,

$$\epsilon = \frac{Z}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

로 놓으면 다음 식들이 얻어진다.

$$n = \left(\frac{Z}{\epsilon} \right)^2 \quad (8)$$

$$\mu = \bar{x} \pm \epsilon \bar{x} \quad (9)$$

(7)식에 의해서 표본크기에 의해서 주어지는 오차범위를 계산할 수 있으며, 역으로 (8)식은 요구되는 오차범위와 신뢰구간에 따른 표본크기를 계산하는데 사용할 수 있다.

2.4 불연속면의 분포성상 평가

평균 불연속면 간격 \bar{x} 는 표본평균으로 평가할 수 있으며, 조사선의 단위 길이 당 불연속면과의 교점수를 나타내는 불연속면 빈도 λ 는 \bar{x} 의 역수로 계산된다.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{1}{\lambda} \quad (10)$$

여기서 n 은 조사선과 불연속면의 교점에 의해서 구분된 조사선상의 구간수이며, x_i 는 i 번째 구간의 길이이다. 한편 불연속면의 간격은 규칙적이지 않고 확률적으로 분포하고 있으므로 불연속면 간격의 변수를 x 라 하면 x 의 확률밀도함수 $f(x)$ 는 다음과 같은 음의 지수분포로 표시된다.^{2),5)}

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (11)$$

또한 불연속면의 길이는 불연속면 간격의 경우와 마찬가지로 음의 지수분포로 표시되며, 불연속면 길이의 변수를 l 이라 하면 l 의 확률밀도함수 $f(l)$ 은 다음과 같이 표시된다.

$$f(l) = \frac{1}{l} e^{-\frac{1}{l}} \quad (12)$$

(2), (3)식에서 확률밀도함수의 의미는 모집단으로부터의 다수 표본에 의한 표본평균과 표준편차가 모집단의 평균과 표준편차와 같거나 동일한 기대값을 갖는 것이다.

3. 시험편 제작 및 조사방법

3.1 박편제작

암석시험편은 우리나라의 대표적 화강암 산지인 전북 익산군 함열과 낭산지역에서 채취하였으며 화강암내 미소균열의 선택적 배향성과 분포성상을 관찰하기 위해서, 채취된 화강암 시료로부터 R, G 및 H축 3방향의 코아로부터 각각 3개씩 총 18개의 박편을 제작하였다. 여기 R, G 및 H축은 각각 Rift plane, Grain plane, Hardway plane에 수직인 축을 의미한다. 제작에 있어서는 시료에서 채취된 코아로부터 장변과 단변이 "결"의 방향과 일치되도록 가로 × 세로가 10 × 15 mm인 직사각형 암편을 절단하여 1면을 정형하고 슬라이드글라스에 접착시킨 후 0.001 mm까지 연마하였다.

3.2 조사방법

화강암 조암광물 내 미소균열의 분포성상을 정량적으로 규명하기 위해 제작된 박편을 편광현미경(일본, Nikon, Opti photo-66)으로 촬영을 실시하였다. 일반적으로 불연속면 간격의 값은 조사선의 방위와 위치에 의해서 변화되므로 이와 같은 표본추출 과정에서의 편이를 제거하기 위해 본 연구에서는 Fig 2에서와 같이 조사선을 1mm 간격으로 균열과 거의 직각으로 교차되도록 설정하여 조사

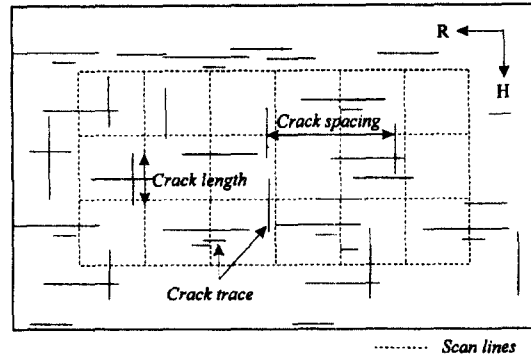


Fig. 2. Scanline for the survey of crack distribution.

하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 미소균열의 분포성상

편광 하에서의 박편관찰결과 사진을 Fig 3 ~ 4에 나타냈다. Fig 3(낭산화강암)과 Fig 4(함열화강암)의 (a), (b) 및 (c)는 각각 R, G, H축 코아로부터 제작한 박편사진을 나타낸다.

박편관찰 결과, 미소균열은 석영입내에 탁월하게 발달되어 있으며 전체적으로 일정한 배향성을 가지고 배향되어 있다. 또한 미소균열의 배향면은 각각의 R, G 및 H축 코아로부터 제작된 박편에서 직교하는 경향을 나타내고 있으나 대략 3 ~ 10°의 각도로 사교하고 있음을 알 수 있다. 또한 액립면은 주로 장석 입내에 분포되어 있으

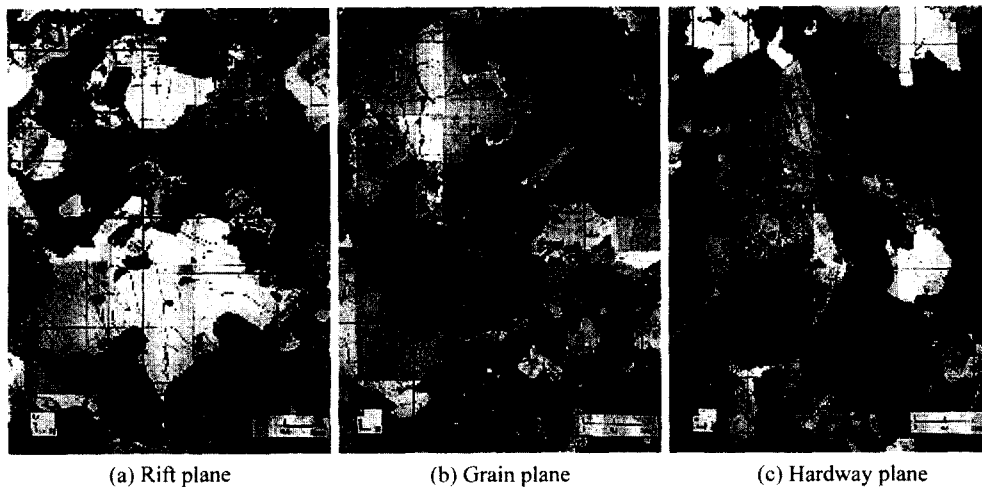


Fig. 3. Photograph of Plane in Nangsan granite (×20), closed nicol.

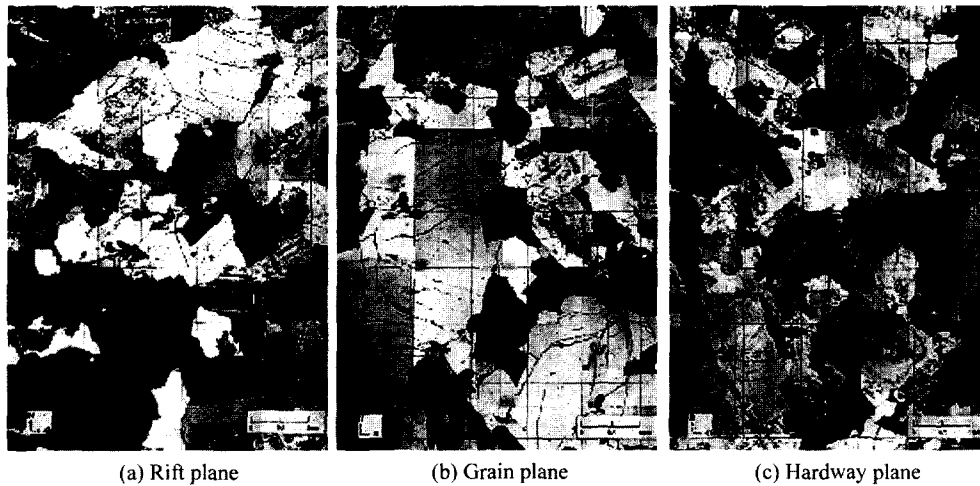


Fig. 4. Photograph of Plane in Hamyeol granite (×20), closed nicol.

나 그 정도는 매우 미약하다. 석영입내에 존재하는 균열은 주로 석영입자 전체를 관통하는 형태가 많고, 입자 경계를 통과하여 인접 광물내에까지 연장되는 균열도 간혹 볼 수 있다. 미소균열의 길이는 최대 1.5~2 mm의 것도 있지만 대부분 1 mm 이하의 길이로 나타나고 있다. 장식입내의 균열은 석영입내의 균열에 비해서 길이도 작고 그 분포량도 적으며, 주로 사장석 내에 분포되어 있고, 입자

전체를 관통하는 균열은 거의 볼 수 없다.

4.2 균열 간격 및 길이의 밀도분포

상대적 빈도(측선과 교차된 균열수 n과 각 구간별 빈도수 f_c 의 비율)를 도수분포표로 나타낸 것이 Table 2와 Table 3이고, 이를 Fig 5~6에 상대적 빈도(측선과 교차된 균열수와 각 구간별 빈도수의 비율)에 관한 확률밀도 함수를 지수감쇠식으로 나타내었다.

Table 1. Relative frequency distribution of crack spacing

Crackspacing(mm)	Relative frequency (fc/n)					
	Nangsan granite			Hamyeol granite		
	R-plane	G-plane	H-plane	R-plane	G-plane	H-plane
< 0.49	0.3939	0.3248	0.2982	0.4173	0.4194	0.3657
0.5 ~ 0.99	0.1919	0.2575	0.1228	0.2548	0.3115	0.0755
1.0 ~ 1.49	0.1515	0.1254	0.1567	0.1245	0.1225	0.1321
1.5 ~ 1.99	0.0505	0.1123	0.1328	0.0647	0.0806	0.1132
2.0 ~ 2.49	0.0707	0.0856	0.0702	0.0647	0.0645	0.0377
2.5 ~ 2.99	0.0404	0.0339	0.0702	-	-	0.0943
3.0 ~ 3.49	-	0.0508	0.0351	0.0360	-	0.0755
3.5 ~ 3.99	-	-	0.0526	0.0216	0.0242	-
4.0 ~ 4.49	0.0404	0.0169	0.0351	-	-	0.0524
4.5 ~ 4.99	0.0202	0.0339	0.0175	-	0.0081	-
5.0 ~ 5.49	-	-	0.0175	0.0072	-	0.0346
5.5 ~ 5.99	0.0303	0.0339	-	-	-	0.0245
6.0 ~ 6.49	0.0101	-	0.0351	-	-	0.0145
6.5 ~ 6.99	-	-	0.0526	-	-	-
7.0 ~ 7.49	0.0101	0.0169	0.0351	-	0.0081	-
7.5 ~ 7.99	-	0.0169	-	-	-0.0145	-

Table 2. Relative frequency distribution of crack trace length

Cracklength (mm)	Relative frequency (fc/n)					
	Nangsan granite			Hamyel granite		
	R-plane	G-plane	H-plane	R-plane	G-plane	H-plane
< 0.29	0.191	0.190	0.193	0.216	0.186	0.243
0.3 ~ 0.39	0.111	0.154	0.140	0.151	0.161	0.208
0.4 ~ 0.49	0.152	0.170	0.211	0.137	0.113	0.151
0.5 ~ 0.59	0.121	0.204	0.123	0.058	0.129	0.113
0.6 ~ 0.69	0.081	0.103	0.053	0.108	0.073	0.057
0.7 ~ 0.79	0.061	0.086	0.140	0.086	0.081	0.094
0.8 ~ 0.89	0.071	0.052	0.035	0.079	0.040	0.019
0.9 ~ 0.99	0.040	-	0.053	0.043	0.032	0.038
1.0 ~ 1.09	0.040	0.018	0.018	0.029	0.057	0.038
1.1 ~ 1.19	0.051	-	0.035	0.036	0.057	0.038
1.2 ~ 1.29	-	-	-	0.007	-	-
1.3 ~ 1.39	0.020	0.018	-	-	-	-
1.4 ~ 1.49	0.020	-	-	0.029	0.032	-
1.5 ~ 1.59	-	-	-	0.014	0.024	-
1.6 ~ 1.69	0.010	-	-	-	-	-
1.7 ~ 1.79	0.020	-	-	0.007	0.016	-
1.8 ~ 1.89	0.010	-	-	-	-	-

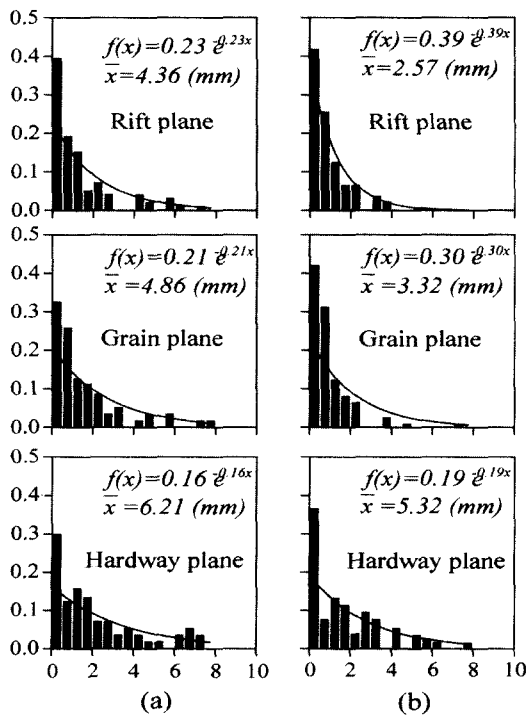


Fig. 5. Probability density distribution of crack spacing (a) Nangsan granite. (b) Hamyeol granite.

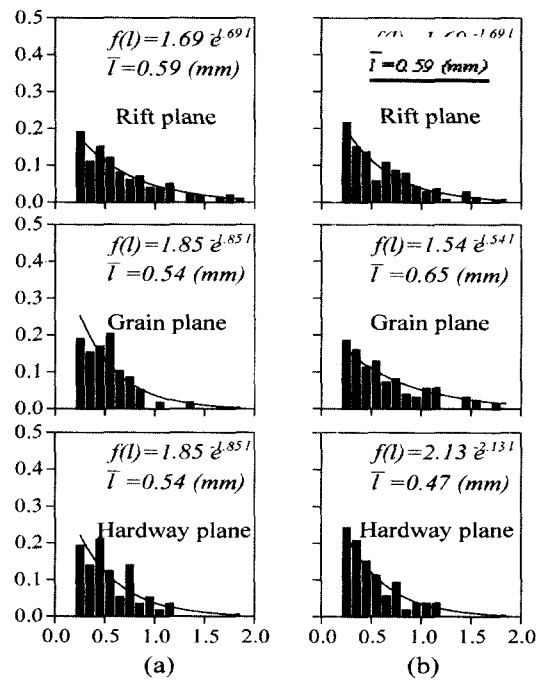


Fig. 6. Probability density distribution of crack trace length (a) Nangsan granite. (b) Hamyeol granite.

Table 3. Mean spacing, frequency and trace length of crack for each R, G, H plane

Items	Nangsan granite			Hamyool granite		
	Rift plane	Grain plane	Hardway plane	Rift plane	Grain plane	Hardway plane
Total scanline length (mm)	432	287	354	357	411	282
Number of crack (ea)	99	59	57	139	124	53
Sum of trace length (mm)	58.82	32.04	30.57	82.08	80.60	25.08
Mean spacing (mm)	4.36	4.86	6.21	2.57	3.32	5.32
Mean trace length (mm)	0.59	0.54	0.54	0.59	0.65	0.47
Crack frequency (ea/mm)	0.23	0.21	0.16	0.39	0.30	0.19

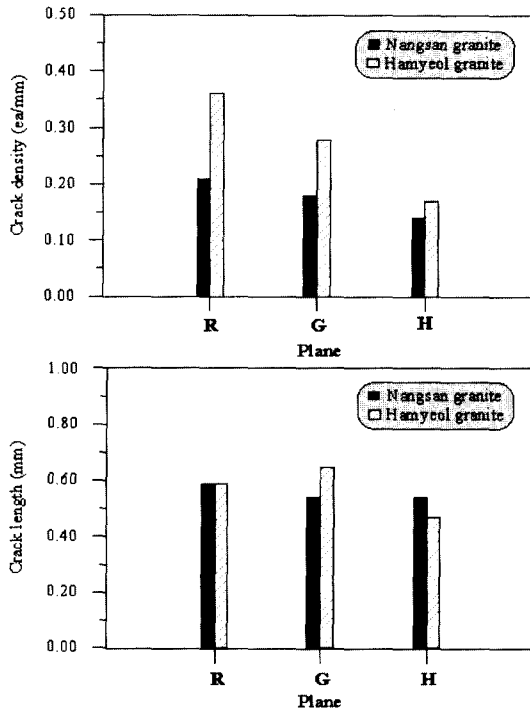


Fig. 7. Distribution of crack density and crack length.

Table 3 과 Fig 7에 두 지역의 R, G 및 H면에 따른 균열간격과 균열길이의 측정결과로부터 조사선의 총 길이, 조사선과 교차된 균열수, 조사선과 교차된 균열의 총길이 및 이들로부터 계산된 균열간격, 균열길이의 산술평균치 \bar{x} , \bar{l} 과 균열밀도 λ 를 나타내었다. 균열밀도 λ 는 R면이 가장 크고, H면이 가장 작게 나타나고 있으며, 전체적으로 1 mm의 축선에 0.16 ~ 0.39개의 균열이 교차하는 것으로 조사되었다. 즉 함열화강암의 균열밀도가 낭산화강암에 비하여 전반적으로 큰 값을 나타내고 있어 "결"에 따른 파단면 형성이 용이하다. 또 균열길이는 0.47 ~ 0.65 mm로 각 "결"에 따라서 큰 차이가 없으며, 두 지역에서

대체적으로 비슷한 값을 나타내고 있다.

이상의 결과로부터 균열밀도는 화강암에 있어서 "결"의 세방향인 R, G 및 H면을 특징짓는 중요한 요소로 관여하고 있으나 균열길이는 R, G 및 H면의 구별에 큰 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있다.

또한 균열밀도는 화강암의 산지에 따라 다르게 나타나지만 균열길이는 산지에 따른 변화가 작게 나타나고 있다.

5. 결 론

화강암내 미소균열의 분포성상에 대한 조사결과 미소균열은 "결"의 세방향을 따라서 대체적으로 직교하는 경향을 나타내었다. 균열밀도는 낭산화강암보다 함열화강암이 세방향에서 모두 높았다. 즉 함열화강암이 인공적인 파단면을 형성하기가 쉬웠다. 균열길이는 두 지역 화강암의 R, G 및 H면에 따라서 큰 변화가 없었다. 이상의 결과로부터 균열밀도는 화강암에 있어서 R, G 및 H면을 특징짓는 중요한 요소로 관여하고 있으나 균열길이는 R, G 및 H면의 구별에 큰 영향을 미치지 않았다. 본 연구에서 사용된 조사선(scanline)을 이용한 통계적 기법은 암석 내에 존재하는 불연속면의 간격과 길이를 평가하는데 충분하였다.

참 고 문 헌

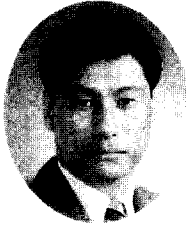
1. Brown, E. T., 1981, Rock characterization testing and monitoring, ISRM suggested methods, Pergamon Press.
2. Priest, S. D. & Hudson, J. A., 1976, Discontinuity spacings in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 13, 135-148.
3. Hudson, J. A. & Priest, S. D., 1979, Discontinuities and rock mass geometry, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16, 339-362.

4. Wallis, P. F. & King, M. S., 1980, Discontinuity spacings in a crystalline rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 17, 63-66.
5. Priest, S. D. & Hudson, J. A., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 18, 183-197.
6. 小島圭二, 大塚康範, 山田敏博, 1981, 斷層密度および規模の分布とその豫測の試, *應用地質*, 22(1), 88-103.
7. Peng, S. S., Johnson, A. M., 1972, Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 9, 37-86.
8. Anderson, D. L., Minster, B. & Cole, D., 1974, The effect of oriented cracks on seismic velocities, *J. Geophys. Res.*, 79, 4011-4015.
9. Soga, N., Mizutani, H., Spetzler, H. & Martin, R., 1978, The effect of dilatancy on velocity anisotropy in Westerly granite, *J. Geophys. Res.*, 83(III), 4451-4458.
10. Plumb, R., Engelder, T. & Yale, D., 1984, Near-surface in situ stress 3. Correlation with microcrack fabric within the New Hampshire Granite, *J. Geophys. Res.*, 89(B II), 9350-9364.
11. McWilliams, J. R., 1966, The role of microstructure in the physical properties of rock, In testing techniques for rock mechanics, *Am. Soc. Test Mat., STP 402*, 175~189
12. 박홍민, 이상은, 1993, 화강암 채석장에 있어서 화강암의 "결"의 방향성과 이방성, *한국자원공학회지*, 30(6), 463-468.
13. 片山信夫, 森本良平 編著, 1969, 新版 地學辭典 II, 古今書院, 日本, 東京, 29p.
14. 고왕경, 배종성, 손영숙, 심정욱, 조완현, 1991, 통계학 개론, 경문사, 309p

Nomenclature

- x : 불연속면 간격(Discontinuity spacing)
 \bar{x} : 평균 불연속면 간격(Mean discontinuity spacing)
 또는 표본평균(Mean of sampling)
 λ : 평균 불연속면 빈도(Mean discontinuity frequency)
 l : 불연속면 자취 길이(Discontinuity trace length)
 \bar{l} : 평균 불연속면 자취 길이(Mean discontinuity trace length)
 μ : 모집단의 평균(Mean of population)
 μ_s : 표본분포의 평균(Mean of sampling distribution)
 σ : 모집단의 표준편차(Standard deviation of population)
 σ_s : 표본분포의 표준편차(Standard deviation of sampling distribution) 또는 표준오차(Standard error)
 s : 표본의 표준편차(Standard deviation of sampling)
 n : 표본수(Number of sample)
 Z : 표준정규변수(Standard normal variable)
 t : Student t-distribution
 ϵ : 비례오차(Proportion error)

이 상 은



1986년 전북대학교 자원공학과, 공
학사
1992년 전북대학교 공과대학 토목공
학과, 공학석사
1996년 전북대학교 자원공학과, 공
학박사

Tel : 0652-227-4878

E-mail : hanam000@chollian.net

현 재 (주)한암건설 대표이사

조 상 호



1998년 전북대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사

Tel : 062-530-1724

E-mail : csh0724@netian.com

현 재 전남대학교 공과대학 자원공학과 석사과정

양 형 식



1979년 서울대학교 자원공학과, 공
학사
1981년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사
1987년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학박사

Tel : 062-530-1724

E-mail : hsyang@chonnam.chonnam.ac.kr

현 재 전남대학교 자원공학과 교수

박 흥 민



1954년 서울대학교 채광학과, 공학
사
1957년 전북대 자원공학과, 교수

Tel : 270-2359

E-mail : phm2359@moak.chonbuk.ac.kr

현 재 전북대학교 자원공학과, 명예교수
