

## 미세균열의 간격 분포를 이용한 결의 평가(I)

박덕원\*

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

### Evaluation for Rock Cleavage Using Distribution of Microcrack Spacings (I)

Deok-Won Park\*

Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,  
Gwahang-no 92, Yuseonggu, Daejeon, 305-350, Korea

**요약:** 거창지역의 주라기 화강암에 내재하는 결의 특성을 분석하였다. 미세균열의 간격에 대한 분포상은 박편의 확대사진( $\times 6.7$ )에서 도출하였다. 여섯 방향의 결에 대한 평가는 (1) 미세균열의 간격의 빈도수(N), (2) 총 간격의 빈도수(N:191) 대비 빈도율( $\leq 1$  mm 및  $4$  mm >), (3) 총 간격(118.49 mm) 대비 간격율( $\leq 1$  mm), (4) 평균 간격( $S_{mean}$ ), (5) 평균 간격과 중앙 간격( $S_{median}$ ) 사이의 차이값( $S_{mean}-S_{median}$ ), (6) 간격의 밀도, (7) 중앙 간격, (8) 길이의 빈도수 대비 간격의 빈도수의 감소비율 및 (9) 도표의 분포형과 관련된 지수( $\lambda$  and  $b$ )의 크기와 같은 9개의 파라미터를 이용하여 수행하였다. 특히 상기 간격의 파라미터 그리고 간격-누적빈도 도표에서 도출한 파라미터 사이의 밀접한 상관성을 도출하였다. 3개 결 그리고 3개 면에 대한 파라미터의 값 사이의 상관성 분석의 결과는 다음과 같다. (I) 파라미터(1, 2 및 3), (II) 파라미터(4, 5 및 6), (III) 파라미터(7), (IV) 파라미터(8) 및 (V) 파라미터(9)의 값은  $H(3$ 번 결,  $H_1+H_2) < G(2$ 번 결,  $G_1+G_2) < R(1$ 번 결,  $R_1+R_2)$ ,  $R < G < H$ ,  $R < H < G$ ,  $G < H < R$  및  $H < G < R$ 의 다양한 순서를 각각 보여준다. 반면에 3개 면에 대한 상기 4개 그룹(I-IV)의 파라미터의 값은 역순을 보여준다. 이러한 유형의 상관성 분석은 3개 채석면의 판별에 유용하다. 여섯 간격-누적빈도 도표를 주요 파라미터( $S_{mean}-S_{median}$ )의 값이 증가하는 순으로 배열하였다. 이들 도표들은 관계도에서  $R_2 < R_1 < G_2 < G_1 < H_2 < H_1$ 의 순을 보여준다. 즉, 상기 여섯 도표는 1번 결( $R_1+R_2$ ) < 2번 결( $G_1+G_2$ ) < 3번 결( $H_1+H_2$ )의 순으로 요약될 수 있다. 이러한 결과는 미세균열의 간격과 관련된 결의 상대적인 강도를 지시한다. 특히 상기 주요 파라미터는 도표 사이의 배열 순서의 예측에 대한 사전 정보를 제공할 수 있다.

**핵심어:** 주라기 화강암, 결, 미세균열의 간격, 9개 파라미터, 상관성 분석, 역순, 간격-누적빈도 도표, 배열 순서

**Abstract:** The characteristics of the rock cleavage inherent in Jurassic granite from Geochang were analysed. The phases of distribution of microcrack spacings were derived from the enlarged photomicrographs( $\times 6.7$ ) of the thin section. The evaluation for the six directions of rock cleavages was performed using nine parameters such as (1) frequency of microcrack spacing(N), (2) frequency ratio( $\leq 1$  mm and  $4$  mm >) to total spacing frequency(N:191), (3) spacing ratio( $\leq 1$  mm) to total spacing(118.49 mm), (4) mean spacing( $S_{mean}$ ), (5) difference value( $S_{mean}-S_{median}$ ) between mean spacing and median spacing( $S_{median}$ ), (6) density of spacing, (7) median spacing, (8) reduction ratio of spacing frequency to length frequency and (9) magnitude of exponent( $\lambda$  and  $b$ ) related to the distribution type of diagram. Especially the close dependence between the above spacing parameters and the parameters from the spacing-cumulative frequency diagrams was derived. The results of correlation analysis between the values of parameters for three rock cleavages and those for three planes are as follows. The values of (I) parameters(1, 2 and 3), (II) parameters(4, 5 and 6), (III) parameter(7), (IV) parameter(8) and (V) parameter(9) show the various orders of H(hardway,  $H_1+H_2) < G$ (grain,  $G_1+G_2) < R$ (rift,  $R_1+R_2)$ ,  $R <$

\*Corresponding author  
Tel: +82-42-868-3123  
E-mail: pdw@kigam.re.kr

$G < H$ ,  $R < H < G$ ,  $G < H < R$  and  $H < G < R$ , respectively. On the contrary, the values of the above four groups(I-IV) of parameters for three planes show reverse orders. This type of correlation analysis is useful for discriminating three quarrying planes. Six spacing-cumulative frequency diagrams were arranged in increasing order on the value of main parameter( $S_{mean}$ - $S_{median}$ ). These diagrams show an order of  $R2 < R1 < G2 < G1 < H2 < H1$  from the related chart. In other words, the above six diagrams can be summarized in order of rift( $R1+R2$ ) < grain( $G1+G2$ ) < hardway( $H1+H2$ ). These results indicate a relative magnitude of rock cleavage related to microcrack spacing. Especially, the above main parameter could provide advanced information for prediction the order of arrangement among the diagrams.

**Keywords:** Jurassic granite, rock cleavage, microcrack spacing, nine parameters, correlation analysis, reverse orders, spacing-cumulative frequency diagrams, order of arrangement

## 서론

화강암에서 발달하는 개개 미세균열의 간격 분포를 이용하여 3개 채석면에서 내재하는 여섯 방향의 결에 대한 평가를 실시하였다. 즉 간격 분포성을 도출해 여섯 방향의 결별 강도를 객관적으로 판단할 수 있는 근거를 제시하였다. 이러한 연구 수행을 통하여 각 석산별로 상이한 채석방향에 대한 보다 객관적인 인식이 가능하며, 더불어 채석 실수를 제고의 효과를 기대할 수가 있다.

화강암체의 상대적인 할석의 용이도는 일반적으로 1번 결(rift, 이하 리프트) > 2번 결(grain, 이하 그레인) > 3번 결(hardway, 이하 하드웨이)의 순으로 되며, 3 종류의 채석면은 일반적으로 상호 수직관계를 형성한다. 결의 발달은 국내외의 모든 화강암체에서 공통적인 현상이며, 특히 화강암의 생성시기 그리고 화강암 내부의 미세균열의 생성시기와 관련되어 수직 결의 방향성은 지역적으로 상이하다. 또한 석산별로 수평 및 수직상 미세균열(결)의 밀도 차이는 암체의 할석작업 시 상대적인 분리성을 의미하며, 단위 석산에 대한 유형분류(R-type, G-type, H-type)의 근거가 될 수 있다(Park, 2007). 한편 이 연구의 본문에서는 상기 결과 관련된 기존 용어의 기재 상, 리프트 및 리프트 면은 1번 결 및 1번 면, 그레인 및 그레인 면은 2번 결 및 2번 면 그리고 하드웨이 및 하드웨이 면은 3번 결 및 3번 면의 의미로 각각 기술하였다.

지질학적 단열의 자료에 대한 전통적인 해석은 전형적으로 단열에 대한 방향성의 분포(orientation distribution)에 국한되었다. 비록 스테레오넷 기법이 단열의 방향성에 대한 표현의 측면에서 유용하지만 단열의 간격에 대한 정보를 제공하지는 못한다(Gillespie *et al.*, 1993). 단열의 빈도수 및 길이에

대한 기존의 국내외 연구 사례에 비하여 단열의 간격에 대한 연구 사례는 상대적으로 제한적이다. 이러한 단열의 간격분포 그리고 스케일링(척도화)과 관련된 국내외 연구사례(Priest and Hudson, 1976; Baecher *et al.*, 1978; Rouleau and Gale, 1985; Kim and Ro, 1989; Gale *et al.*, 1991; Seok and Kim, 1991; Barton and Zoback, 1992; Rives *et al.*, 1992; Gillespie *et al.*, 1993; Miller, 1993; Gross and Engelder, 1995; Bloomfield, 1996; Olson *et al.*, 2001; Galla *et al.*, 2005; Sanderson *et al.*, 2008; Pearce *et al.*, 2011) 등에서는 단층, 절리 및 암맥의 간격에 대한 다양한 분포성 및 스케일링 특성을 규명하였다. 특히 화강암(리프트, 그레인 및 하드웨이)과 관련된 일부 연구사례(Park *et al.*, 2001, 2004; Park, 2011; Freire-Lista and Fort, 2015; Park, 2015a)에서는 3개 채석면 그리고 미세균열의 간격의 분포성 사이의 상관성을 도출하였다.

이 연구에서는 전체법에 의하여 도출한 여섯 방향별 미세균열의 ① 간격의 빈도수, 총 간격(1 mm ≥), 평균 간격, 중앙 간격(median spacing), (평균 간격-중앙 간격)의 값 및 밀도, ② 간격 및 길이 빈도수 사이의 감소비율, ③ 여섯 도표의 배열순에 따른 분포형의 변화 특성 등의 분석을 통하여 결의 발달상과 분포상을 규명하였다. 즉 여섯 결의 모식도에서 제시한 방향별 간격의 파라미터 그리고 간격-누적빈도 도표를 통하여 도출한 상관함수의 지수( $\lambda$ ,  $b$ ), 분포형 및 배열성 사이의 상관성을 도출하였다. 간격과 관련된 도표의 다양한 분포 특성을 통하여 가시적이며 객관적인 결의 판별요소의 도출을 시도하였다. 병행하여 기존의 길이 분포성을 이용하여 도출한 결의 판별요소들(Park, 2015b)과 상호 대비할 수 있는 계기를 마련하였다. 연구대상 암석은 거창지역의 유라기 화강암을 대상으로 하였다.

**시료 및 분석방법**

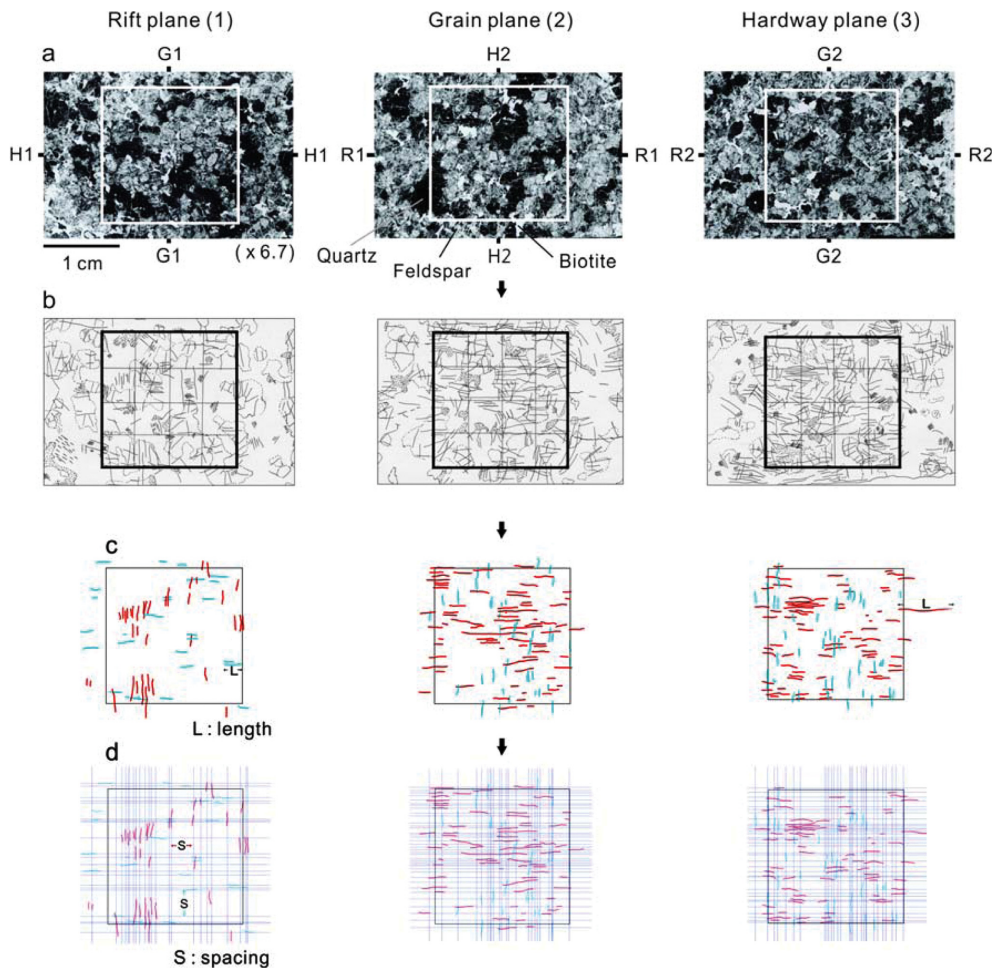
**암석시료**

경남 거창군 웅양면 산포리(구 범일석산)의 주라기 화강암(이하 거창화강암)에서 시료를 채취하였다. 거창화강암(Geochang granite)은 선캄브리아기의 반상변정편마암과 흑운모 호상편마암을 관입한 주라기 화강암이다(Kim *et al.*, 1998). 이 암석은 회백색(greyish white)을 띠고, 등립상의 중립질암으로 석영 및 장석의 입도는 2~6 mm이다. 연구대상 암석시료 채취심도는 약 20 m이다. 주구성광물의 모드 조성(vol. %)은

석영: 31.3%, 사장석: 39.5%, 정장석: 9.8%, 미사장석: 9.6%, 피다이트: 5.7%, 흑운모: 2.9%이며, 그외 백운모 등이 미량 확인된다. 이 암석은 분류상 흑운모 화강암(Streckeisen, 1976)에 속한다. 화강암 석산에서는 1번 면이 수평면을 형성하고, 수직의 2번 면은 ENE의 방향성을 지니며, 수직인 3번 면은 1번 면과 거의 직각을 형성하고 있는 것으로 인식되고 있다(Park *et al.*, 2001; Park, 2015a, 2015b).

**분석방법**

채취한 거창화강암의 암석시료에서 1번 면, 2번 면



**Fig. 1.** Sketch of microcracks parallel to the six directions of rock cleavages on rift plane (1), grain plane (2) and hardway plane (3). (a) Photomicrograph of thin section of the Geochang granite cut parallel to three planes. Black, mottled, and white areas represent quartz, feldspar and biotite, respectively. (b) and (c) Map of microcracks from scan line method (b) and total method (c). (d) Map of microcrack spacings from total method. The preferred orientation of microcracks in the quartz and feldspar parallel to the six directions of rock cleavages.

및 3번 면에 각각 평행하게 박편을 제작하였다. 제작된 박편의 크기는 2 cm×3 cm, 박편의 두께는 면구조의 측정을 용이하게 하기 위해 일반 박편의 3~4배(약 0.1 mm)로 제작하였다. 세 방향의 채석면과 평행하게 제작된 박편의 확대사진(×6.7)을 통하여 상호 직교하는 두 조의 미세균열(결)의 간격을 각각 측정할 수 있다.

석영내 미세균열 및 유체포유물, 장석내 미세균열 및 벽개면, 흑운모의 벽개면 그리고 입자경계 미세균열 등의 다양한 요소가 검출되었다. 그러나 석영 및 장석 입자 내부의 미세균열을 제외한 다른 요소는 결의 방향성과 상관성이 결여되었으며, 따라서 본문에서는 미세결구(microfabric), 특히 미세균열이 강조되었다. 따라서 박편의 확대사진을 통하여 석영 및 장석 입자의 내부에서 분포하는 미세균열의 간격(S), 간격의 빈도수(N)를 측정하였다(Fig. 1).

가로 및 세로 방향으로 각각 5개의 측선을 설정한 후, 이들 측선과 교차(조사선법)하는 동시에 측선과 ±7.5°이내의 방향각( $\theta$ )을 갖는 미세균열(1 mm 이상)을 측정할 수 있다(Fig. 2b). 그러나 이 연구에서는 측선으로 포획된 단위면적(3.2 cm<sup>2</sup>)의 내부에서 여섯 결의 방향과 평행 배열하는 미세균열(1 mm 이하 및 이상)을 모두 대상(전체법)으로 하였다(Fig. 2c). 즉 조사선법과 차별화하여 전체법에 의한 미세균열의 파라미터를 획득하였다. 엄밀한 의미에서 여섯 방향과 평행한 미세균열의 파라미터를 획득하여 여섯 방향의 결에 대한 보다 정확한 인식을 제고할 수가 있다(Park, 2015b). 이 연구에서 도출한 개개 미세균열의

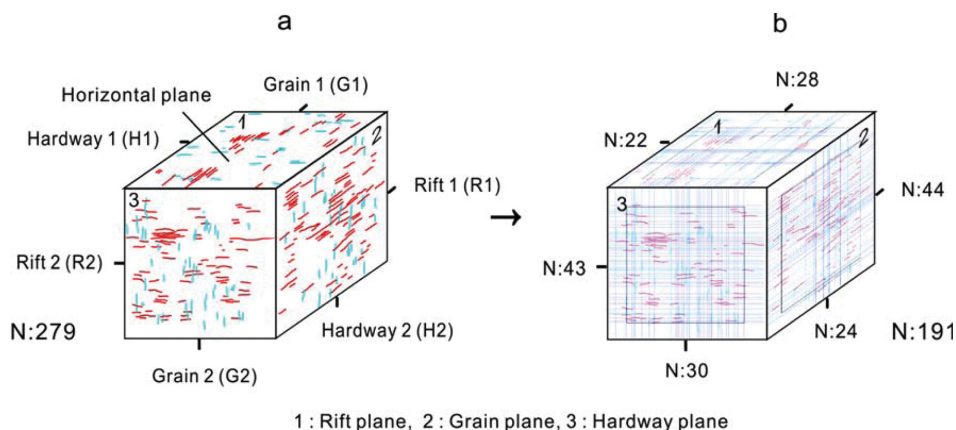
간격은 모두 프로그램을 통하여 도출하였다.

한편 거창화강암의 박편의 확대사진(Fig. 1a) 그리고 조사선법(Fig. 1b) 및 전체법(Fig. 1c)에 의하여 도출한 미세균열의 스케치 결과, 전체법에 의한 미세균열의 간격(Fig. 1d)의 스케치 결과가 Fig. 1에 도시되어 있다.

## 결의 모식도

세 방향의 채석면과 평행하게 제작된 박편 상에서 상호 직교하는 두 조의 미세균열을 도출하였다. 채석면과 미세균열의 길이와의 상관성을 나타내는 모식도(Fig. 2a)에서 1번 면에 평행하는 박편에서는 그레인 1(grain 1, G1)과 하드웨이 1(hardway 1, H1), 2번 면에 평행하는 박편에서는 리프트 1(rift 1, R1)과 하드웨이 2(hardway 2, H2) 그리고 3번 면에 평행하는 박편에서는 그레인 2(grain 2, G2) 및 리프트 2(rift 2, R2)의 미세균열을 각각 측정할 수가 있다(Park *et al.*, 2001, 2004; Park, 2007, 2011, 2015a, 2015b).

전체법에 의한 석영 및 장석 입자 내부의 미세균열의 간격을 종합하여 간격의 각종 파라미터를 도출하였다. 거창화강암의 내부에 잠재하는 결, 즉 미세균열의 간격에 대한 분포 특성을 모식도에서 제시한 여섯 방향과 연계하여 분석하였다. 특히 여섯 방향의 간격의 파라미터 그리고 간격-누적빈도 도표(그래프)와 관련된 파라미터 사이의 상관성을 비교 분석하였다. 결의 모식도에서 제시한 여섯 방향과 평행 배열하는 미



**Fig. 2.** Diagram of the six directions of rock cleavages on three planes. The distribution of lengths (a) and spacings (b) of microcracks are shown.

세균열(Fig. 2a) 및 미세균열의 간격(Fig. 2b)을 스케치한 결과를 제시하면 Fig. 2와 같다.

### 간격의 수

여섯 방향과 평행 배열하는 개개 미세균열의 길이(Park, 2015b)는 프로그램을 통하여 총 279개를 측정하였다. ① 미세균열의 간격은 총 191개를 측정하였다(Table 1). 각 면별로는 1번 면(G1+H1)에서 50개(H1(22) < G1(28)), 2번 면(R1+H2)에서 68개(H2(24) < R1(44)), 3번 면(R2+G2)에서 73개(G2(30) < R2(43))를 각각 측정하였다. 간격의 빈도수는 1번 면 < 2번 면 < 3번 면의 순이며, R2와 G2의 미세균열이 교차하는 3번 면에서 간격의 빈도수가 가장 많다.

② 각 결별로는 1번 결(R1+R2)에서 87개, 2번 결(G1+G2)에서 58개, 3번 결(H1+H2)에서 46개를 각각 측정하였다. 간격의 빈도수는 3번 결 < 2번 결 < 1번 결의 순이며, 1번 결에서 간격의 빈도수가 가장 많다. 3개 면별 빈도수의 순위(1 < 2 < 3) 그리고 3개 결별 빈도수의 순위(3 < 2 < 1) 사이에는 상호 역순의 상관성을 지닌다.

### 여섯 방향의 빈도율

여섯 방향의 빈도수에 대하여 8개 계급구간으로 구분, 간격의 빈도율을 도출하였다(Table 1). 전체적인 미세균열의 간격은 4 mm 이내이며, 1 mm 이하에서 집중한다. 총 빈도수(N:191) 대비 1 mm 이하의 빈도수(N:164)의 비율은 85.8 %이다.

① 총 빈도수 대비 여섯 방향별 4 mm 이하의 빈도수가 차지하는 빈도율(%)은 H1(11.5) < H2(12.6) < G1(14.7) < G2(15.7) < R2(22.5) < R1(23.0)의 순이다. ② 총 빈도수 대비 여섯 방향별 1 mm 이하

의 빈도수가 차지하는 빈도율(%)은 H1(7.33) < H2(9.42) < G1(12.04) < G2(12.57) < R2(21.99) < R1(22.51)의 순이다. 즉 총 빈도수 대비 여섯 방향별 4 mm(①) 및 1 mm(②) 이하의 빈도수가 차지하는 빈도율의 순위는 상호 부합하는 공통적인 규칙성을 도출하였다. 또한 2번 결 및 3번 결을 형성하는 G1, G2 및 H1, H2에서는 (1) < (2)의 순으로 되어 (2)의 빈도율이 높은 특성을 도출하였다. 특히 이들 양자간의 빈도율(%)의 차이(①-②)는 R1(0.49) < R2(0.51) < G1(2.66) < G2(3.13) < H2(3.18) < H1(4.17)의 순이다. 즉 1번 결(R1+R2, 1) < 2번 결(G1+G2, 5.79) < 3번 결(H1+H2, 7.35)의 순으로 증가하는 규칙성을 도출하였다(Table 1).

### 3개 면, 3개 결의 빈도율(0~1 mm 구간)

여섯 방향별 1 mm 이하의 빈도수는 Table 1과 같다. 3개 면별, 3개 결별 빈도율(1 mm 이하)을 도출하면 다음과 같다. ① 3개 면별 1 mm 이하의 빈도수(N) 그리고 총 빈도수(N:191) 대비 빈도율(%)을 보면, 1번 면(N:37, 19.3) < 2번 면(N:61, 31.9) < 3번 면(N:66, 34.5)의 순차적인 배열성을 도출할 수 있다. 빈도비는 1번 면(1) < 2번 면(1.64) < 3번 면(1.78)의 순이다.

② 3개 결별 1 mm 이하의 빈도수 그리고 총 빈도수 대비 빈도율(%)을 보면, 3번 결(N:32, 16.7) < 2번 결(N:47, 24.6) < 1번 결(N:85, 44.5)의 순차적인 배열성을 도출할 수 있다. 빈도비는 3번 결(0.37) < 2번 결(0.55) < 1번 결(1)의 순이다. 3개 결별 총 빈도수대비 1 mm 이하의 빈도율(%)의 차이는 0.5(G2-G1) < 0.6(R1-R2) < 2.1(H2-H1)의 순이다. 한편 3개 면별 빈도율(비)의 순위(1 < 2 < 3) 그리고 3개 결별 빈도율(비)의 순위(3 < 2 < 1) 사이에는 상호

Table 1. Frequency of microcrack spacing on three planes

Plane	Spacing (mm)	Spacing (mm)								Total	
		0~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	3.0~3.5	3.5~4.0	N	%
Rift	Grain 1	14	9	1	1	1		2		28	14.7
	Hardway 1	10	4	4	1	2			1	22	11.5
Grain	Rift 1	29	14	1						44	23.0
	Hardway 2	13	5	2	1	2	1			24	12.6
Hardway	Rift 2	29	13	1						43	22.5
	Grain 2	14	10	4	1		1			30	15.7
Total (%)		109 (57.0)	55 (28.8)	13 (6.81)	4 (2.0)	5 (2.6)	2 (1.05)	2 (1.05)	1 (0.52)	191 (100)	100

역순의 상관성을 지닌다.

**3개 면, 3개 결의 빈도율(전체구간, 0~4 mm 구간)**

여섯 방향별 8개 계급구간에 속하는 빈도수(4 mm 이하)를 정리하면 Table 1과 같다. 3개 면별, 3개 결별 빈도율을 도출하면 다음과 같다. ① 3개 면별 평균 빈도수(두 방향의 평균값), 빈도율(%)을 보면, 1번 면(N:25, 26.2) < 2번 면(N:34, 35.6) < 3번 면(N:36.5, 38.2)의 순차적인 배열성을 도출할 수 있다. 빈도비는 1번 면(1) < 2번 면(1.36) < 3번 면(1.46)의 순이다.

② 3개 결별 평균 빈도수, 빈도율(%)을 보면, 3번 결(N:23, 24.1) < 2번 결(N:29, 30.4) < 1번 결(N:43.5, 45.5)의 순차적인 배열성을 도출하였다. 빈도비는 3번 결(0.52) < 2번 결(0.66) < 1번 결(1)의 순이다. 3개 결별 전체구간(0~4 mm 구간)의 빈도율(%)의 차이는 0.5(R1-R2) < 1(G2-G1) < 1.1(H2-H1)의 순이다. 한편 3개 면별 빈도율(비)의 순위(1 < 2 < 3) 그리고 3개 결별 빈도율(비)의 순위(3 < 2 < 1) 사이에는 상호 역순의 상관성을 지닌다.

**총 간격**

**3개 면, 3개 결의 총 간격(0~1 mm 구간)**

여섯 방향의 간격의 자료에 대하여 8개 계급구간으로 구분, 총 간격(S) 및 비율을 도출하였다(Table 2). 3개 면에서 측정된 미세균열의 총 간격은 118.49 mm이며, 1 mm 이하의 간격(70.62 mm)이 차지하는 비율은 전체의 59.6%이다. 여섯 방향별 1 mm 이하의 총 간격(mm) 그리고 전체적인 총 간격(118.49 mm) 대비 비율(%)은 H1(6.05, 5.0) < H2(7.82, 6.5) <

G1(10.0, 8.3) < G2(11.42, 9.5) < R2(17.08, 14.2) < R1(18.25, 15.2)의 순이다. 여섯 방향별 1 mm 이하의 간격이 차지하는 3개 면별, 3개 결별 빈도율을 도출하면 다음과 같다.

① 3개 면별 1 mm 이하의 총 간격(두 방향의 평균값, mm) 그리고 전체적인 총 간격 대비 비율(%)을 보면, 1번 면(8.02, 13.5) < 2번 면(13.03, 22.0) < 3번 면(14.25, 24.0)의 순을 보인다. 총 간격의 비는 1번 면(1) < 2번 면(1.62) < 3번 면(1.77)의 순차적인 배열성을 도출할 수 있다.

② 3개 결별 1 mm 이하의 총 간격(두 방향의 평균값, mm) 그리고 전체적인 총 간격에 대비 비율(%)을 보면, 3번 결(6.93, 11.6) < 2번 결(10.71, 18.0) < 1번 결(17.66, 29.8)의 순차적인 배열성을 도출할 수 있다. 이중 2번 결(G1 < G2), 3번 결(H1 < H2)에서는 (1) < (2)의 규칙성이 있다. 총 간격의 비는 3번 결(0.39) < 2번 결(0.60) < 1번 결(1)의 순이다.

전체적인 총 간격(118.49 mm) 대비 1 mm 이하의 총 간격이 차지하는 ① 3개 면별 순위(1 < 2 < 3) 그리고 ② 3개 결별 순위(3 < 2 < 1) 사이에는 상호 역순의 상관성을 지닌다. 이러한 총 간격에 대한 순위의 상관성은 빈도수의 경우와 부합한다.

**평균 간격 및 중앙 간격**

**여섯 방향의 평균 간격**

전체법에 의한 여섯 방향별 간격의 빈도수, 간격의 범위, 총 간격(1 mm ≥), 평균 간격, 중앙 간격(값), (평균 간격-중앙 간격)의 값 및 간격의 밀도를 종합하였으며, 여섯 방향별 (길이)의 파라미터(Park, 2015b)를 병행 기재하였다(Table 3).

**Table 2. Measured value of total spacing on three planes**

Plane	Spacing (mm)	Spacing (mm)							Total	
		0~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	3.0~3.5		3.5~4.0
Rift	Grain 1	4.32	5.68	1.23	1.85	2.15		6.34		21.57
	Hardway 1	3.36	2.69	4.82	1.56	4.32			3.56	20.31
Grain	Rift 1	8.89	9.36	1.05						19.31
	Hardway 2	4.17	3.65	2.49	1.74	4.46	2.50			19.01
Hardway	Rift 2	8.66	8.42	1.14						18.22
	Grain 2	4.08	7.34	4.48	1.61		2.56			20.07
Total (%)		33.48 (28.3)	37.14 (31.3)	15.21 (12.8)	6.76 (5.7)	10.93 (9.2)	5.06 (4.3)	6.34 (5.4)	3.56 (3.0)	118.49 (100)

**Table 3.** Summary of microcrack spacing statistics for six directions

Plane	Rock cleavage	N	Spacing range (mm)	Total spacing (1 mm ≥)	Mean spacing (mm), (a)	Median spacing (mm), (b)	(a) - (b)	Density (ρ)
Rift	Grain 1	28 (32)	0.226 ~ 3.302	10.00	0.771 (1.99)	0.490 (1.84)	0.281	0.0199 (0.113)
	Hardway 1	22 (25)	0.159 ~ 3.562	6.05	0.924 (1.72)	0.523 (1.63)	0.401	0.0192 (0.064)
Grain	Rift 1	44 (72)	0.126 ~ 1.056	18.25	0.438 (2.20)	0.389 (2.14)	0.049	0.0073 (0.364)
	Hardway 2	24 (37)	0.168 ~ 2.506	7.82	0.793 (1.47)	0.444 (1.36)	0.349	0.0185 (0.063)
Hardway	Rift 2	43 (72)	0.142 ~ 1.140	17.08	0.423 (2.01)	0.385 (1.87)	0.038	0.0067 (0.287)
	Grain 2	30 (41)	0.142 ~ 2.564	11.42	0.669 (1.53)	0.519 (1.52)	0.150	0.0146 (0.094)
Total		191 (279)	0.126 ~ 3.562	70.62	0.620 (1.88)	0.444 (1.68)	0.176	0.0862 (0.985)

\*( ): Data on microcrack length (Park, 2015b)

전체적인 평균 간격은 0.620 mm이다. 여섯 방향의 평균 간격(mm)은 R2(0.423) < R1(0.438) < G2(0.669) < G1(0.771) < H2(0.793) < H1(0.924)의 순차적인 순이다. 즉 평균 간격은 1번 결(R) < 2번 결(G) < 3번 결(H)의 순이며, (2) < (1)의 순으로 되어 (2)의 평균 간격이 보다 조밀한 공통적인 규칙성을 도출하였다. 한편 두 방향 사이의 평균 간격의 비율(%)은 H2/H1(85.8) < G2/G1(86.7) < R2/R1(96.5)의 순이다.

**3개 면, 3개 결의 평균 간격**

여섯 방향의 평균 간격을 정리하면 Table 3과 같다. 3개 면별, 3개 결별 전체적인 평균 간격 및 평균 간격의 비를 도출하면 다음과 같다. ① 3개 면별 평균 간격(두 방향의 평균값, mm) 및 평균 간격의 비를 보면, 3번 면(0.546, 0.64) < 2번 면(0.615, 0.72) < 1번 면(0.847, 1)의 순차적인 배열성을 도출하였다.

② 3개 결별 평균 간격(두 방향의 평균값, mm) 및 평균 간격의 비를 보면, 1번 결(0.430, 1) < 2번 결(0.720, 1.66) < 3번 결(0.856, 1.98)의 순차적인 배열성을 도출하였다. 즉 3개 면별 평균 간격의 순위(3 < 2 < 1) 그리고 3개 결별 평균 간격의 순위(1 < 2 < 3) 사이에는 상호 역순의 상관성을 지닌다. 한편 1번 결(R1, R2)의 평균 간격(0.423~0.438 mm)은 전체적인 평균 간격(0.620 mm)보다 좁은 반면, 2번 결(G1, G2), 3번 결(H1, H2)의 평균 간격

(0.669~0.924 mm)은 보다 넓다.

**여섯 방향의 중앙 간격**

여섯 방향의 중앙 간격을 정리하면 Table 3과 같다. 전체적인 중앙 간격은 0.444 mm이다. 여섯 방향의 중앙 간격(mm)은 R2(0.385) < R1(0.389) < H2(0.444) < G1(0.490) < G2(0.519) < H1(0.523)의 순이다. 두 방향 사이의 중앙 간격의 비율(%)을 보면, H2/H1(84.0) < R2/R1(98.9) < G2/G1(105.9)의 순이다. 3번 결 및 1번 결에서는 공통적으로 (2) < (1)의 순위를 유지하며, (2)의 중앙 간격이 보다 낮다. 전체적인 중앙 간격(0.444 mm)에 비하여 1번 결(R1, R2)의 중앙 간격(0.385~0.389 mm)은 보다 좁은 반면, 2번 결(G1, G2) 및 3번 결(H1, H2)의 중앙 간격(0.444~0.528 mm)은 보다 넓다.

**3개 면, 3개 결의 중앙 간격**

3개 면별, 3개 결별 중앙 간격 및 중앙 간격의 비를 도출하면 다음과 같다. ① 3개 면별 중앙 간격(두 방향의 평균값, mm) 및 중앙 간격의 비를 보면, 2번 면(0.416, 0.82) < 3번 면(0.452, 0.89) < 1번 면(0.506, 1)의 순이다. ② 3개 결별 전체적인 중앙 간격(두 방향의 평균값, mm) 및 중앙 간격의 비를 보면, 1번 결(0.387, 1) < 3번 결(0.483, 1.24) < 2번 결(0.504, 1.30)의 순을 보인다. 즉 3개 면별 중앙 간격의 순위(2 < 3 < 1) 그리고 3개 결별 중앙 간

격의 순위(1 < 3 < 2) 중, 3번 면과 3번 결의 순위는 중간영역을 차지한다.

#### 여섯 방향의 평균 간격과 중앙 간격의 차이

여섯 방향에 대한 (평균 간격-중앙 간격)의 값을 정리하면 Table 3과 같다. 전체적인 (평균길이-중앙 간격)은 0.176 mm이며, 여섯 방향의 분포 특성을 도출하면 다음과 같다. 여섯 방향의 (평균 간격-중앙 간격, mm)은 R2(0.038) < R1(0.049) < G2(0.150) < G1(0.281) < H2(0.349) < H1(0.401)의 순차적인 순이다. 즉 1번 결 < 2번 결 < 3번 결의 순이며, 공통적으로 (2) < (1)의 순위를 유지하는 특성을 도출하였다. 한편 두 방향 사이의 (평균 간격-중앙 간격)의 비율(%)을 보면, G2/G1(53.3) < R2/R1(77.5) < H2/H1(87.0)의 순이다. 즉 (2) < (1)의 순위를 유지한다. 특히 여섯 방향의 평균 간격 그리고 (평균 간격-중앙 간격)의 순위는 상호 부합하는 특성을 도출하였다.

#### 3개 면, 3개 결의 평균 간격과 중앙 간격의 차이

3개 면별, 3개 결별 (평균 간격-중앙 간격)의 값 및 비를 도출하면 다음과 같다. ① 3개 면별 (평균 간격-중앙 간격)(두 방향의 평균값, mm)을 보면, 3번 면(0.094) < 2번 면(0.199) < 1번 면(0.341)의 순을 보인다. (평균 간격-중앙 간격)의 비는 3번 면(0.27) < 2번 면(0.58) < 1번 면(1)의 순이다. 3개 면 중에서 수평면에 해당되는 1번 면의 평균값이 가장 크다. 반면에 두 방향이 교차하는 3번 면의 평균값이 가장 낮다.

② 3개 결별 (평균 간격-중앙 간격)(두 방향의 평균값, mm)을 보면, 1번 결(0.043) < 2번 결(0.215) < 3번 결(0.375)의 순을 보인다. (평균 간격-중앙 간격)의 비는 1번 결(1) < 2번 결(4.95) < 3번 결(8.62)의 순이다. 즉 3개 면별 (평균 간격-중앙 간격)의 순위(3 < 2 < 1) 그리고 3개 결별 순위(1 < 2 < 3) 사이에는 상호 역순의 상관성을 지닌다. 이러한 면별, 결별 순위의 상관성은 평균 간격의 경우와 부합한다.

#### 간격의 범위

여섯 방향별 간격의 범위는 Table 3과 같다. 여섯 방향별 간격의 범위의 특성을 도출하면 다음과 같다. (평균 간격-중앙 간격) 및 평균 간격이 증가하는 순으로 여섯 방향별 간격의 범위(mm)를 나열하면,

R2(0.142~1.140), R1(0.126~1.056), G2(0.142~2.564), G1(0.226~3.302), H2(0.168~2.506), H1(0.159~3.562)의 순으로 된다. 이중 2번 면과 3번 면에서 측정된 가장 큰 간격의 값을 보면, G2(2.564) < G1(3.302), H2(2.506) < H1(3.562)의 순으로 되어 (2) < (1)의 배열성이 나타난다.

### 간격의 밀도

#### 여섯 방향의 밀도

여섯 방향의 미세균열의 간격은 총 191개가 측정되었다(Table 1). 간격의 밀도( $\rho$ )는 확대사진의 단면적(A), 균열간의 간격의 절반(half-spacing, C) 및 간격의 수(N)를 이용하여 다음 수학적식(Segall, 1984)을 통해 도출하였다. 간격의 밀도는 간격의 빈도수 그리고 간격의 함수이다. 이렇게 구한 여섯 방향의 간격의 밀도는 Table 3과 같다.

$$\rho = \frac{1}{A} \cdot N \cdot \sum_{i=1}^N C_i^2$$

3개 면에서 측정된 여섯 방향의 밀도는 총 0.0862이다. 여섯 방향의 밀도 그리고 총 밀도(0.0862) 대비 비율(%)은 R2(0.0067, 7.8) < R1(0.0073, 8.5) < G2(0.0146, 16.9) < H2(0.0185, 21.5) < H1(0.0192, 22.3) < G1(0.0199, 23.1)의 순으로 증가한다. 두 방향 사이의 밀도의 비율(%)을 보면, G2/G1(73.3) < R2/R1(91.7) < H2/H1(93.6)의 순이다. 공통적으로 (2) < (1)의 규칙적인 순위를 유지하며, (2)의 평균 간격이 보다 조밀하여 간격의 밀도는 상대적으로 감소한다.

#### 3개 면, 3개 결의 밀도

3개 면별, 3개 결별 간격의 평균밀도 및 밀도 비를 도출하면 다음과 같다. ① 3개 면별 밀도(두 방향의 평균값)를 보면, 3번 면(0.0106) < 2번 면(0.0129) < 1번 면(0.0195)의 순을 보인다. 밀도의 비는 3번 면(0.54) < 2번 면(0.66) < 1번 면(1)의 순이다. 수평면에 해당되는 1번 면의 밀도(G1+H1)가 가장 높다. 반면에 두 방향이 교차하는 3번 면의 밀도(R2+G2)가 가장 낮다.

② 3개 결별 밀도(두 방향의 평균값)를 보면, 1번 결(0.007) < 2번 결(0.0172) < 3번 결(0.0188)의 순



을 보인다. 밀도의 비는 1번 결(1) < 2번 결(2.46) < 3번 결(2.69)의 순이다. 즉 3개 면별 평균 밀도비의 순위(3 < 2 < 1) 그리고 3개 결별 평균 밀도비의 순위(1 < 2 < 3) 사이에는 상호 역순의 상관성을 지낸다.

### 간격 및 길이의 빈도수

#### 간격 및 길이의 빈도수 사이의 감소비율

여섯 방향별 간격의 빈도수(a) 그리고 길이의 빈도수(b)(Table 3) 사이의 감소비율( $[(a-b)/(a)] \times 100, \%$ )을 도출하였다. 여섯 방향을 대표하는 간격의 총 빈도수(N:191) 그리고 길이의 총 빈도수(N:279) 사이의 감소비율은 전체적으로 평균 -41.5%이다. 이러한 감소비율은 직선 형태로 축선과 평행 배열하는 미세균열의 빈도수와 비교하여 간격의 빈도수의 감소비율은 증가한다.

여섯 방향의 감소비율(%)을 보면, H1(-13.6) < G1(-14.2) < G2(-36.6) < H2(-54.1) < R1(-63.6) < R2(-67.4)의 순으로 증가한다. 이중 간격이 가장 조밀한 1번 결(-63.6~-67.4)의 감소비율(%)이 가장 크다. 3개 결에서는 공통적으로 (1) < (2)의 규칙적인 순위를 유지하여 (2)의 감소비율이 큰 규칙성이 있다. 한편 두 방향 사이의 감소비율(%)의 차이는 -3.8(R2-R1) < -22.4(G2-G1) < -40.5(H2-H1)의 순으로 증가이다. 이 순위는 “3개 면, 3개 결의 빈도율(전체구간, 0-4 mm 구간)’의 란에서 분석한 빈도율(%)의 차이의 순과 부합한다.

① 3개 면별 감소비율(두 방향의 평균값, %)은 1번 면(-13.9) ≪ 3번 면(-52.0) < 2번 면(-58.8)의 배열성을 보인다. ② 3개 결별 감소비율(두 방향의 평균값, %)은 2번 결(-25.4) < 3번 결(-33.8) ≪ 1번 결(-65.5)의 순이다. 즉 3개 면별 평균 감소비율의 순위(1 ≪ 3 < 2) 그리고 3개 결별 평균 감소비율의 순위(2 < 3 ≪ 1)사이에는 상호 역순의 상관성을 유지하는 특성을 도출하였다.

### 여섯 도표의 배열순에 따른 분포형의 변화

3개 면에서 존재하는 여섯 방향의 미세균열에 대한 간격-누적빈도 도표를 (평균 간격-중앙 간격)의 값, 평균 간격 및 중앙 간격(Table 3)이 증가하는 순으로

배열, 연속적인 분포형(Dunne *et al.*, 2002)의 변화 특성을 도출하였다. 여섯 도표(diagram)는 누적빈도, 기울기 및 분포형이 상이한 독립적인 6개 이하의 분절(segment)의 조합이다. 즉 지수함수형(선형) 또는 멱법칙함수형(상향곡선 형태) 등의 개개 분절이 모여서 도표의 전체적인 분포형을 지배한다. 각 도표의 좌측 → 우측으로 갈수록 이들 분절의 빈도수와 기울기는 연속적으로 감소한다. 각 도표에서는 편의상 빈도수, 기울기 및 분포형이 상이한 두 구간으로 대별하였다. 즉 빈도수가 밀집 분포하며 기울기가 상대적으로 큰 구간은 상부구간(upper section, ●), 빈도수 및 기울기가 감소하는 구간은 하부구간(lower section, ○)으로 설정하였다(Fig. 3).

한편 간격(X축)은 오름차순, 누적빈도(Y축)는 내림차순으로 각각 정리하였다. 여기서 누적빈도(수)는 순서수(ordinal number)에 해당된다. 여섯 도표의 상부구간과 하부구간 사이의 변화 특성은 반대수 좌표계(Fig. 3) 그리고 전체적인 분포형은 양대수 좌표계(Fig. 4)를 통하여 각각 도시하였다. 간격의 모집단(spacing population)을 여섯 방향으로 세분하여 이들 부집단(sub-population) 사이의 연속적인 분포형의 변화 특성을 상호 비교하였다(Fig. 3 및 4).

#### 여섯 도표의 분포형

R2: 상부구간(간격의 범위, 빈도수, 지수)의 분포형은 선형의 지수함수형(0.142~0.536 mm, N:30, λ: -2.80), 하부구간(0.536~1.14 mm, N:14, b:-3.44)의 분포형은 상향곡선 형태의 멱법칙함수형이다(Fig. 3a). 한편 전체구간의 분포형은 곡선형태의 지수함수형이며, 지수는 -3.86(R<sup>2</sup>=0.97)이다(Fig. 4a).

R1: 상부구간(0.126~0.603 mm, N:33, λ:-3.06) 그리고 하부구간(0.603~1.056 mm, N:12, λ:-5.19)의 분포형은 지수함수형이다. R2 → R1의 도표로 갈수록 하부구간(특히 말단부)의 분포형은 멱법칙함수형 → 지수함수형으로 변화한다(Fig. 3b). 한편 전체구간의 분포형은 지수함수형이며, 지수는 -3.90(R<sup>2</sup>=0.97)이다(Fig. 4b).

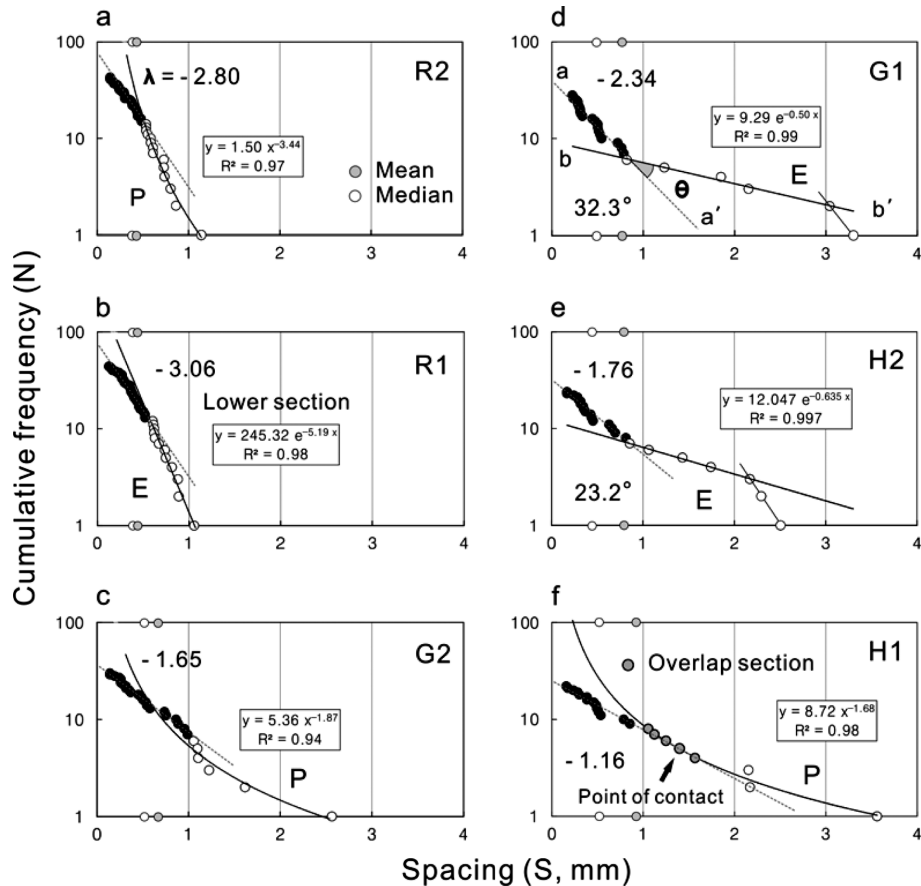
G2: 상부구간(0.142~1.056 mm, N:23, λ:-1.65)의 분포형은 지수함수형 그리고 하부구간(1.056~2.564 mm, N:6, b:-1.87)의 분포형은 전형적인 멱법칙함수형이다. R2 및 R1 → G2의 도표로 갈수록 상부구간 및 하부구간의 기울기가 급격하게 감소한다. 동시에 전체적인 분포 구간의 폭은 우측으로 증가한다. 하부

구간은 도표의 말단부, 즉 꼬리(tail)에 해당되어 빈도수 및 기울기가 보다 낮고 단속적이다(Fig. 3c). 한편 전체구간의 분포형은 지수함수형이며, 지수는 -1.60 ( $R^2=0.95$ )이다(Fig. 4c).

G1: 상부구간(0.226~0.821 mm, N:23,  $b$ :-1.07,  $\lambda_1$ :-2.34)의 분포형은 멱법칙함수형 그리고 하부구간(0.821~3.042 mm, N:5,  $\lambda_2$ :-0.50)의 분포형은 지수함수형이다. G2 → G1의 도표로 갈수록 상부구간의 기울기는 급격히 증가하는 반면에 하부구간의 기울기는 감소한다. 또한 하부구간의 분포형은 멱법칙함수형 → 지수함수형으로 변화하며, 간격 구간의 폭이 우측으로 증가한다. 한편 상부구간의 지수함수의 상관직선

(a-a') 그리고 하부구간의 지수함수의 상관직선(b-b') 사이의 교차각( $\theta$ )은  $32.3^\circ$ 이다. 교차각의 크기는 두 구간의 지수차( $\lambda_1 - \lambda_2$ )와 비례한다. 즉 여섯 방향 중, 교차각의 크기가 가장 큰 G1의 도표를 중심으로 하여 G1 → R1 그리고 G1 → H1으로 갈수록 교차각은 감소한다(Fig. 3d). 한편 전체구간의 분포형은 선형의 멱법칙함수형이며, 지수( $b$ )는 -1.07( $R^2=0.97$ )이다(Fig. 4d).

H2: 상부구간(0.168~0.855 mm, N:18,  $b$ :-0.75,  $\lambda$ :-1.76)의 분포형은 멱법칙함수형 그리고 하부구간(0.855~2.170 mm, N:5,  $\lambda$ :-0.63)의 분포형은 지수함수형이다. 상부구간 및 하부구간의 두 상관직선 사이의

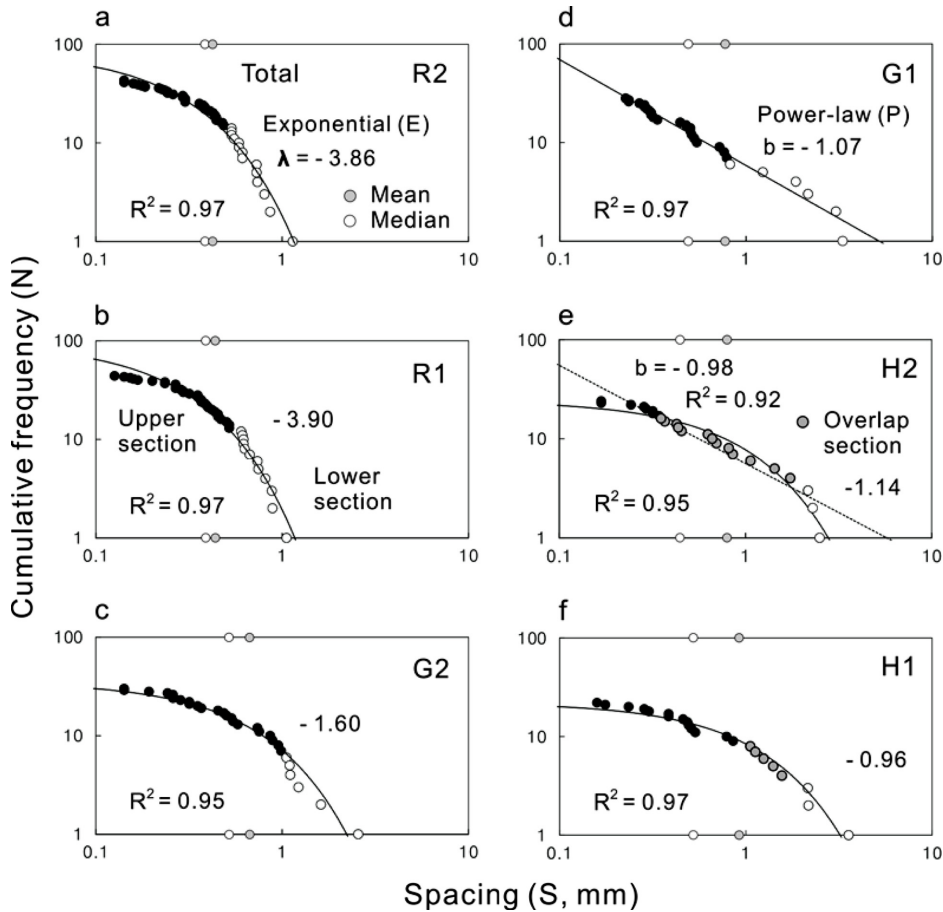


**Fig. 3.** Spacing-cumulative frequency diagrams arranged in increasing order on the value of main parameter ( $S_{\text{mean}} - S_{\text{median}}$ ). Linear-log plots showing successive transitions in distribution types for divided sections. Upper (●) and lower (○) sections divided by distribution type and slope are shown. The six directions of rock cleavages (R2~H1) are the same as ones in Fig. 2. R2, G2 and H1 (P): power-law decay (upward curved line). R1, G1 and H2 (E): exponential decay (straight line). G1 and H2: exponential cut-off in the tail.  $\theta$ : intersection angle,  $\lambda$  and  $b$ : exponent of exponential ( $\lambda$ ) and power-law ( $b$ ) equation,  $S_{\text{mean}}$ : mean spacing,  $S_{\text{median}}$ : median spacing.

교차각( $\theta$ )은  $23.2^\circ$ 이다. G1, H2의 도표의 하부구간은 공통적으로 지수함수형이며, 도표의 말단부는 지수절단(exponential cut-off)의 형태를 취한다(Fig. 3e). 한편 전체적인 형태를 보면, 선형의 멱법칙함수형 그리고 곡선의 지수함수형이 공존한다. 이러한 분포 특성은 G1(멱법칙함수형) 그리고 H1(지수함수형)의 도표 사이의 중간 형태이다. 두 상관선의 중첩구간(overlap section, 0.344~1.740 mm)(중앙구간)을 중심으로 하여 0.344 mm 이하의 구간은 상부구간, 1.740 mm 이상의 구간은 하부구간으로 분할된다. 전체구간의 지수함수는  $Y=24.33 \times e^{-1.14x}$  ( $R^2=0.95$ ) 그리고 멱법칙함수는  $Y=5.63 \times X^{-0.98}$  ( $R^2=0.92$ )이다(Fig. 4e).

H1: 상부구간(0.226~1.056 mm, N:15,  $\lambda$ :-1.16)의

분포형은 지수함수형 그리고 하부구간(1.056~3.562 mm, N:8,  $b$ :-1.68)의 분포형은 긴 멱법칙함수형이다. 두 상관선의 중첩구간(gray circle, 1.054~1.567 mm)에서는 선형의 지수함수형 그리고 상향곡선 형태의 멱법칙함수형이 공존한다. 따라서 최상위 영역인 H1의 도표의 분포형을 보면, 2 mm 이하의 구간에서는 지수함수형( $\lambda$ :-1.16,  $R^2=0.93$ ), 1 mm 이상의 구간에서는 멱법칙함수형( $b$ :-1.68,  $R^2=0.98$ )이다. 즉 이들 지수함수 및 멱법칙함수 구간은 1~2 mm의 구간에서 상호 중첩된다. H2 → H1의 도표로 갈수록 상부구간의 폭은 중첩구간과 더불어 현저히 증가하는 특성을 도출하였다. 이러한 분포 특성은 H1의 도표에서 특징적이다. 특히 지수함수의 상관직선 그리고 멱법칙함



**Fig. 4.** Spacing-cumulative frequency diagrams. Log-log plots showing successive transitions in distribution types for the whole range of the diagrams. The order of arrangement and the range of two sections for six diagrams are the same as ones in Fig. 3. R2, R1, G2 and H1: exponential distribution. G1: power-law distribution.  $\lambda$  and  $b$ : exponent of exponential ( $\lambda$ ) and power-law ( $b$ ) equation.

수의 상관곡선은 상호 접촉(간격 1.399 mm, point of contact)을 형성한다. 지수함수의 상관직선은 먹법칙함수의 상관곡선의 접선(tangent line)에 해당된다(Fig. 3f). 한편 전체구간의 분포형은 지수함수형이며, 지수는  $-0.96(R^2=0.97)$ 이다(Fig. 4f).

#### 구간별 3개 결의 지수( $\lambda$ , b)

**상부구간:** 상부구간의 분포형은 전체적으로 먹법칙함수형(G1, H2)에 비하여 지수함수형(R2, R1, G2, H1)이 우세하다. G1 → R1 그리고 G1 → H1으로 갈수록 상부구간 그리고 하부구간 사이의 교차각의 크기는 감소한다. 최상위 영역인 H1의 도표를 보면, 중첩구간과 더불어 상부구간의 폭이 증가한다. 한편 상부구간의 3개 결별 지수함수의 지수( $\lambda$ )의 범위 및 두 방향의 평균값을 보면, 3번 결(H1~H2, 1.16~1.76, 1.46) < 2번 결(G2~G1, 1.65~2.34, 1.99) < 1번 결(R2~R1, 2.80~3.06, 2.93)의 순으로 증가한다(Fig. 3).

**하부구간:** 하부구간의 분포형은 먹법칙함수형(R2, G2, H1)과 지수함수형(R1, G1, H2)이 공존한다. 한편 하부구간의 3개 결별 지수함수의 지수( $\lambda$ ) 그리고 먹법칙함수의 지수(b)를 보면, 2번 결(G1, 0.50) < 3번 결(H2, 0.63) < 1번 결(R1, 5.19)의 순 그리고 3번 결(H1, 1.68) < 2번 결(G2, 1.87) < 1번 결(R2, 3.44)의 순으로 증가한다(Fig. 3).

**전체구간:** 전체구간의 분포형을 보면, 최하위 영역 R2(지수함수형) < R1(지수함수형) < G2(지수함수형) < G1(먹법칙함수형) < H2(지수함수형과 먹법칙함수형의 중간형태) < 최상위 영역 H1(지수함수형)의 순으로 변화한다. 전체적으로 지수함수형이 우세하다. 한편 전체구간의 지수함수의 지수( $\lambda$ )는 H1(0.96) < H2(1.14) < G2(1.60) < R2(3.86) < R1(3.90)의 순으로 증가한다. 3개 결별 지수함수의 지수(두 방향의 평균값)를 보면, 3번 결(1.05) < 2번 결(1.60) < 1번 결(3.88)의 순으로 증가한다(Fig. 4). 상부구간 및 전체구간의 지수함수의 지수 그리고 하부구간의 먹법칙함수의 지수는 공통적으로 3번 결 < 2번 결 < 1번 결의 크기 순으로 요약할 수 있다(Fig. 3 및 4).

## 토 론

미세균열의 간격의 빈도수, 총 간격(1 mm ≥), 평균 간격, 중앙 간격, (평균 간격-중앙 간격) 및 밀도 그

리고 상관함수를 통한 여섯 방향의 결에 대한 평가를 수행하였다. 이러한 간격의 파라미터에 대한 3개 면의 순위 그리고 3개 결의 순위 사이의 상관성을 도출하였다. 이러한 분석 결과는 3개 면 및 3개 결의 객관적인 판별 기준이 될 수 있다. 특히 개개 간격의 분포성을 표현하는 간격-누적빈도 도표를 작성, 해당 암석의 3개 면별, 3개 결별 변화 특성을 가시적으로 도출하였다.

여섯 결의 상대적인 강도 평가에서 간격의 ① 발생 빈도수 그리고 총 간격 대비 빈도율(≤1 mm 및 4 mm >)이 높고, ② (평균 간격-중앙 간격)의 값, 평균 간격 및 중앙 간격이 낮으며, ③ 밀도가 낮으며, ④ 간격-누적빈도 도표에서 도출한 상관함수의 지수(기울기)가 크며, ⑤ 배열성의 측면에서 보면, 보다 우측 배열하는 상위영역보다 좌측 배열하는 하위영역일수록 해당 결의 상대적 강도를 높게 평가하는 것을 특징으로 한다.

결의 강도 평가에서 간격의 빈도수, 총 간격, (평균 간격-중앙 간격), 평균 간격, 중앙 간격, 밀도, 상관함수의 지수, 분포형 및 배열성 중 적어도 하나 이상으로 해당 결의 상대적인 강도와 상관성을 가지는 것을 특징으로 한다. 이중 (평균간격-중앙 간격) 및 평균 간격은 여러 도표의 배열성과 상관성이 높다.

이 연구에서는 개개 미세균열의 간격 분포를 통한 결별 강도를 도출하여 결의 방향성을 객관적으로 판단할 수 있는 근거를 제시하였다. 가시적이며 객관적인 간격-누적빈도 도표 그리고 다양한 파라미터 사이의 상관성을 도출하였다. 이러한 유형의 분석 절차는 결의 평가에 대한 신규성 내지는 진보성에 기여할 수 있다.

## 결 론

거창화강암의 박편의 확대사진을 통한 간격의 빈도수, 총 간격(1 mm ≥), 평균 간격, 중앙 간격, (평균 간격-중앙 간격) 및 밀도의 평가 결과와 병행, 여섯 방향의 간격-누적빈도 도표에서 추출한 파라미터와 상호 대비하였다. 이러한 대비를 통하여 거창화강암의 3개 채석면을 대변하는 주요 판별요소를 도출하였다. 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 전체법에 의한 여섯 방향의 간격은 총 191개를 측정하였다. 각 면별로는 1번 면에서 50개, 2번 면에서 68개, 3번 면에서 73개를 각각 측정하였다. 3개

면별 빈도수의 순위( $1 < 2 < 3$ ) 그리고 3개 결별 빈도수의 순위( $3 < 2 < 1$ ) 사이에는 상호 역순의 상관성을 지닌다.

2. 여섯 방향에 대하여 8개 계급구간으로 구분, 간격의 빈도율을 도출하였다. 전체적인 간격은 4 mm 이내이며, 1 mm 이하에서 집중한다. 총 빈도수(N:191) 대비 1 mm 이하의 빈도수(N:164)가 차지하는 빈도율은 85.8%이다. 여섯 방향별 총 빈도수 대비 빈도율 그리고 1 mm 이하의 빈도수가 차지하는 빈도율은 양자 모두  $H1 < H2 < G1 < G2 < R2 < R1$ 의 순으로 나타난다.

3. 총 빈도수 대비 1 mm 및 4 mm 이하의 빈도수가 차지하는 3개 면별 빈도율의 순위( $1 < 2 < 3$ ) 그리고 3개 결별 빈도율의 순위( $3 < 2 < 1$ ) 사이에는 상호 역순의 상관성을 지닌다.

4. 3개 면에서 측정된 총 간격은 118.49 mm이며, 1 mm 이하의 간격(70.62 mm)이 차지하는 비율은 전체의 59.6%이다. 총 간격 대비 1 mm 이하의 총 간격이 차지하는 여섯 방향의 비율(%)은  $H1(5.0) < H2(6.5) < G1(8.3) < G2(9.5) < R2(14.2) < R1(15.2)$ 의 순이다. 3개 면별 비율의 순위( $1 < 2 < 3$ ) 그리고 3개 결별 비율의 순위( $3 < 2 < 1$ ) 사이에는 상호 역순의 상관성을 지닌다. 이러한 순위의 상관성은 빈도수의 경우와 부합한다.

5. 여섯 방향의 평균 간격(mm)은  $R2(0.423) < R1(0.438) < G2(0.669) < G1(0.771) < H2(0.793) < H1(0.924)$ 의 순이다. 즉 평균 간격은 1번 결(R) < 2번 결(G) < 3번 결(H)의 순이며, 공통적으로 (2) < (1)의 순위를 유지한다. 3개 면별 평균 간격의 순위( $3 < 2 < 1$ ) 그리고 3개 결별 평균 간격의 순위( $1 < 2 < 3$ ) 사이에는 상호 역순의 상관성을 지닌다.

6. 여섯 방향의 중앙 간격(mm)은  $R2(0.385) < R1(0.389) < H2(0.444) < G1(0.490) < G2(0.519) < H1(0.528)$ 의 순이다. 3개 면별 중앙 간격의 순위( $2 < 3 < 1$ ) 그리고 3개 결별 중앙 간격의 순위( $1 < 3 < 2$ ) 중, 3번 면 및 3번 결의 순위는 중간영역을 차지한다.

7. 여섯 방향의 (평균길이-중앙 간격)의 값(mm)은  $R2(0.038) < R1(0.049) < G2(0.150) < G1(0.281) < H2(0.349) < H1(0.401)$ 의 순이다. 즉 1번 결 < 2번 결 < 3번 결의 순이며, 공통적으로 (2) < (1)의 순위를 유지한다. 3개 면별 (평균 간격-중앙 간격)의 순위( $3 < 2 < 1$ ) 그리고 3개 결별 순위( $1 < 2 <$

3) 사이에는 상호 역순의 상관성을 지닌다. 평균 간격의 경우와 부합한다.

8. 3개 면에서 측정된 여섯 방향의 밀도는 총 0.0862이다. 총 밀도 대비 여섯 방향의 밀도의 비율(%)은  $R2(7.8) < R1(8.5) < G2(16.9) < H2(21.5) < H1(22.3) < G1(23.1)$ 의 순이다. 두 방향 사이의 밀도의 비율(%)은  $G2/G1(73.3) < R2/R1(91.7) < H2/H1(93.6)$ 의 순이며, 공통적으로 (2) < (1)의 규칙적인 순위를 유지한다. 3개 면별 밀도비의 순위( $3 < 2 < 1$ ) 그리고 3개 결별 밀도비의 순위( $1 < 2 < 3$ )사이에는 상호 역순의 상관성을 지닌다.

9. 여섯 방향별 길이의 빈도수 대비 간격의 빈도수의 감소비율은 전체적으로 평균 -41.5%이다. 여섯 방향의 감소비율(%)은  $H1(-13.6) < G1(-14.2) < G2(-36.6) < H2(-54.1) < R1(-63.6) < R2(-67.4)$ 의 순이다. 3개 결에서는 공통적으로 (1) < (2)의 규칙적인 순위를 유지하여 (2)의 감소비율이 크다. 3개 면별 감소비율의 순위( $1 \ll 3 < 2$ ) 그리고 3개 결별 감소비율의 순위( $2 < 3 \ll 1$ ) 사이에는 상호 역순의 상관성을 지닌다.

10. 여섯 방향의 도표를 평균 간격, 중앙 간격 및 (평균 간격-중앙 간격)의 값이 증가하는 순으로 배열, 연속적인 분포형의 변화 특성을 도출하였다. 1) 상부구간의 분포형은 전체적으로 멱법칙함수형( $G1, H2$ )에 비하여 지수함수형( $R2, R1, G2, H1$ )이 우세하다.  $G1$ 의 도표를 중심으로 하여  $G1 \rightarrow R1$  그리고  $G1 \rightarrow H1$ 으로 갈수록 상부구간 그리고 하부구간 사이의 교차각의 크기는 감소한다. 즉 선형의 지수함수형으로 점차 변화한다. 최상위 영역인  $H1$ 의 도표를 보면, 멱법칙함수형 및 지수함수형 구간이 공존하는 중첩구간과 더불어 상부구간의 폭의 증가가 가장 크다. 2) 하부구간의 분포형은 멱법칙함수형( $R2, G2, H1$ )과 지수함수형( $R1, G1, H2$ )이 공존한다. 3) 여섯 도표의 전체구간의 분포형은 곡선형태의 지수함수형( $R2, R1, G2$ )  $\rightarrow$  선형의 멱법칙함수형( $G1$ )  $\rightarrow$  멱법칙함수형 및 지수함수형의 중간 형태( $H2$ )  $\rightarrow$  지수함수형( $H1$ )으로 변화한다.

11. 상부구간, 하부구간 및 전체구간의 분포형을 대변하는 상관함수의 지수의 크기를 3개 결별로 요약하였다. 상부구간 및 전체구간의 지수함수의 지수 그리고 하부구간의 멱법칙함수의 지수는 공통적으로 3번 결 < 2번 결 < 1번 결의 크기 순으로 증가하는 규칙성을 도출하였다.

## 사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 지구환경연구본부에서 수행하고 있는 '고온 고압 조건하 심부 지열특성 평가기술 개발' 과제에서 지원되었습니다. 본 논문의 심사과정에서 유익한 조언과 지적을 해주신 충북대학교의 서용석 교수님과 한국지질자원연구원의 홍세선 박사님께 깊은 사의를 표합니다.

## References

- Baecher, G.B., Lanney, N.A., and Einstein, H.H., 1978, Statistical description of rock properties and sampling. 18th US symposium on rock mechanics.
- Barton, C.A. and Zoback, M.D., 1992, Self-similar distribution and properties of macroscopic fractures at depth in crystalline rock in the Cajon Pass Scientific Hole. *Journal of Geophysical Research*, 97, 5181-5200.
- Bloomfield, J., 1996, Characterization of hydrogeologically significant fracture distributions in the Chalk: an example from the Upper Chalk of southern England. *Journal of hydrology*, 184, 355-379.
- Dunne, J.A., Williams, R.J., and Martinez, N.D., 2002, Food-web structure and network theory: The role of connectance and size. *Proceedings of the National Academies of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 99, 12917-12922.
- Freire-Lista, D.M. and Fort, R., 2015, Anisotropy in Alpedrete granite cutting (Rift, Grain and Hardway directions) and effect on bush hammered heritage ashlar. *Geophysical Research Abstracts*, 17, EGU2015-9426-1, EGU General Assembly.
- Gale, J.E., Schaefer, R.A., Carpenter, A.B., and Herbert, A., 1991, Collection, analysis, and integration of discrete fracture data from the Monterey Formation for fractured reservoir. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition Formation Evaluation and Reservoir Geology*.
- Galla, B.L., Tshosoa, G., Dymontb, J., Kampunzuc, A.B., Jourdand, F., Féraudd, G., Bertrande, H., Aubourgf, C., and Vétela, W., 2005, The Okavango giant mafic dyke swarm (NE Botswana): its structural significance within the Karoo Large Igneous Province. *Journal of Structural Geology*, 27, 2234-2255.
- Gillespie, P.A., Howard, C.B., Walsh, J.J., and Watterson, J., 1993, Measurement and characterisation of spatial distributions of fractures. *Tectonophysics*, 226, 113-141.
- Gross, M.R. and Engelder, T., 1995, Strain accommodated by brittle failure in adjacent units of the Monterey Formation, U.S.A.: scale effects and evidence for uniform displacement boundary conditions. *Journal of Structural Geology*, 17, 1303-1318.
- Kim, D.H., Hwang, J.H., Park, K.H., and Song, K.Y., 1998, Geological report of the Pusan sheet (1:250,000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials (KIGAM), 62p.
- Kim, Y.K. and Ro, B.D., 1989, Mechanical properties of discontinuous rocks in Upper Kyeongsang Supergroup. *Journal of the Geological Society of Korea*, 25, 392-404.
- Miller, N.C., 1993, Predicting flow characteristics of a lixiviant in a fractured crystalline rock mass. Report of investigations 9457, US Bureau of Mines, 24.
- Olson, J.E., Qiu, Y., Holder, J., and Rijken, P., 2001, Constraining the spatial distribution of fracture networks in naturally fractured reservoirs using fracture mechanics and core measurements. *Society of Petroleum Engineers(SPE). SPE annual technical conference and exhibition, New Orleans, Louisiana, SPE 71342*.
- Park, D.W., 2007, Orientations of vertical rift and grain planes in Mesozoic granites, Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 16, 12-26.
- Park, D.W., 2011, Characteristics of the rock cleavage in Jurassic granite, Hapcheon. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 20, 219-230.
- Park, D.W., 2015a, Characteristics of the rock cleavage in Jurassic granite, Geochang. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 24, 153-164.
- Park, D.W., 2015b, Evaluation for rock cleavage using distribution of microcrack lengths. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 24, 165-180.
- Park, D.W., Kim, H.C., Lee, C.B., Hong, S.S., Chang, S.W., and Lee, C.W., 2004, Characteristics of the rock cleavage in Jurassic granite, Pocheon. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 13, 133-141.
- Park, D.W., Seo, Y.S., Jeong, G.C., and Kim, Y.K., 2001, Microscopic analysis of the rock cleavage for Jurassic granite in Korea. *The Journal of Engineering Geology*, 11, 51-62.
- Pearce, M.A., Jones, R.R., Smith, S.A.F., and McCaffrey, K.J.W., 2011, Quantification of fold curvature and fracturing using terrestrial laser scanning. *AAPG Bulletin*, 95, 771-794.
- Priest, S.D. and Hudson, J.A., 1976, Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13, 135-148.
- Rives, T., Razack, M., Petit, J.P., and Rawnsley, K.D., 1992, Joint spacing: analogue and numerical simulations. *Journal of Structural Geology*, 14, 925-937.
- Rouleau, A. and Gale, J.E., 1985, Statistical characterization of the fracture system in the Stripa Granite, Sweden. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 22, 353-367.
- Sanderson, D.J., Roberts, S., Gumiel, P., and Greenfield, C.,

- 2008, Quantitative analysis of tin- and tungsten-bearing sheeted vein systems. *Economic Geology*, 103, 1043–1056.
- Segall, P., 1984, Formation and growth of extensional fracture sets. *Geological Society of America Bulletin*, 95, 454-462.
- Seok, C.K. and Kim, Y.K., 1991, Discontinuous properties of Jurassic and Cretaceous granites, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 123-135.
- Streckeisen, A.L., 1976, To each plutonic rocks and its proper name. *Earth-science reviews*, 12, 1-33.
- 
- 2016년 1월 20일 접수  
2016년 1월 22일 심사개시  
2016년 2월 11일 채택