

제3기 결정질 응회암에서 발달하는 미세균열의 길이 분포에 대한 통계적 분석

박덕원*

한국지질자원연구원 국토지질연구본부, 대전광역시 유성구 과학로 92, 305-350

Statistical Analysis on Microcrack Length Distribution in Tertiary Crystalline Tuff

Deok-Won Park*

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

요약: 제3기 결정질 응회암에서 발달하는 미세균열 모집단의 길이분포에 대한 스케일링 성질을 조사하였다. 15개 방향각 및 5개 그룹(I~V)에 대한 길이범위의 분포도에서 미세균열의 방향성에 따른 평균길이의 체계적인 변화가 나타난다. 분포도는 거의 남-북방향을 경계로 하여 좌우 대칭형태를 취하는 것이 특징이다. 미세균열의 모집단에 대한 길이-누적빈도 도표의 전 영역은 상관곡선의 분포양상에 의하여 3개 구간으로 구분할 수 있다. 특히, 5개 그룹에 대한 각 도표의 선형의 중앙구간은 멱함수 분포를 지시한다. 5개 그룹에 대한 중앙의 선형구간의 빈도비는 46.6%~67.8%의 범위이다. 한편 각 그룹에 대한 선형의 중앙구간의 기울기는 그룹 V(N60~90°E, -2.02) > 그룹 IV(N20~60°E, -1.55) > 그룹 I(N60~90°W, -1.48), 그룹 II(N10~60°W, -1.48) > 그룹 III(N10°W~N20°E, -1.06)의 순으로 나타난다. 거의 멱함수의 길이분포를 따르는 부집단(5개 그룹)에서는 지수(-1.06 ~ -2.02)의 범위가 넓다. 5개 그룹간의 이러한 지수의 상대적인 차이는 방향성 효과의 중요성을 강조한다. 또한, 곡선의 하부에서의 기울기의 분리는 보다 긴 미세균열의 급격한 발달을 대변하며, 멱함수 지수의 감소로 반영된다. 특히, 이러한 분포양식은 N10~20°E, N10~20°W 및 N60~70°W의 방향각에 대한 도표에서 볼 수 있다. 이들 3개 방향각은 연구지역 일대에서 발달한 단층의 주방향과 부합한다. 15개 방향각에 대한 길이-누적빈도 도표의 개개 특성을 보여주는 분포도를 작성하였다. 상기한 도표들을 3개 그룹(A, B and C)의 범주에 따라 배열함으로써 이들 그룹간 길이-빈도 분포의 차이를 용이하게 도출할 수 있다. 분포도는 미세균열 조들에 대한 개별적인 분리의 중요성을 보여준다. 관계도에서, 보다 짧은 미세균열의 출현빈도는 그룹 A > 그룹 B > 그룹 C의 순서를 보인다. 이들 3가지 유형의 분포양상은 미세균열이 성장하는 동안 발생한 과정들에 대한 중요한 정보를 드러낼 수 있다.

핵심어: 스케일링 성질, 길이-누적빈도 도표, 선형의 중앙구간, 부집단, 멱함수 지수

Abstract: The scaling properties on the length distribution of microcrack populations from Tertiary crystalline tuff are investigated. From the distribution charts showing length range with 15 directional angles and five groups(I~V), a systematic variation appears in the mean length with microcrack orientation. The distribution charts are distinguished by the bilaterally symmetrical pattern to nearly N-S direction. The whole domain of the length-cumulative frequency diagram for microcrack populations can be divided into three sections in terms of phases of the distribution of related curves. Especially, the linear middle section of each diagram of five groups represents a power-law distribution. The frequency ratio of linear middle sections of five groups ranges from 46.6% to 67.8%. Meanwhile, the slope of linear middle section of each group shows the order: group V(N60~90°E, -2.02) > group IV(N20~60°E, -1.55) > group I(N60~90°W,

*Corresponding author
Tel: 042-868-3123
E-mail: pdw@kigam.re.kr

-1.48), group II(N10~60°W, -1.48) > group III(N10°W~N20°E, -1.06). Five sub-populations(five groups) that closely follow the power-law length distribution show a wide range in exponents(-1.06 ~ -2.02). These differences in exponent among five groups emphasizes the importance of orientation effect. In addition, breaks in slope in the lower parts of the related curves represent the abrupt development of longer lengths, which is reflected in the decrease in the power-law exponent. Especially, such a distribution pattern can be seen from the diagram with N10~20°E, N10~20°W and N60~70°W directional angles. These three directional angles correspond with main directions of faults developed around the study area. The distribution chart showing the individual characteristics of the length-cumulative frequency diagrams for 15 directional angles were made. By arraying above diagrams according to the categories of three groups(A, B and C), the differences in length-frequency distributions among these groups can be easily derived. The distribution chart illustrates the importance of analysing microcrack sets separately. From the related chart, the occurrence frequency of shorter microcracks shows the order: group A > group B > group C. These three types of distribution patterns could reveal important information on the processes occurred during microcrack growth.

Key words: scaling property, length-cumulative frequency diagram, linear middle section, sub-population, power-law exponent

서론

다양한 기원에 의하여 생성된 단열(fracture)은 마이크로미터~킬로미터에 이르는 스케일의 길이 순위(order)를 갖는다. 이러한 단열은 단층, 절리, 열극(fissure) 및 균열을 포함하는 지질학적인 불연속면에 대한 일반적인 용어로 사용된다(Koike and Ichikawa, 2006). 또한 단열은 취성파괴로 발달한 지질구조이며, 지각 상부 10 km 이내에서 매우 광범위하게 분포한다(Ramsay and Huber, 1987). 단열의 형성은 암체의 정치(emplacement) 및 냉각, 지각의 운동 그리고 다양한 지질학적 단계들에서의 광역적인 응력장에 기인하는 것으로 알려져 있다. 여러가지 스케일을 갖는 단열계의 특성화(characterization), 단열 분포의 모델링 그리고 전체 단열계와 상관성이 있는 스케일링(scaling) 법칙은 과학 및 공학의 다양한 분야에서 중요성을 지닌다. 이와 같은 이유는 단열계의 성인적인 기구는 구조사(tectonic history)의 이해에 기여하기 때문이다. 또한 단열계는 특히 결정질 암석과 같은 지질학적인 매체의 기계적이며 수문학적인 거동에 영향을 미친다(Koike and Ichikawa, 2006).

한편 단열의 길이분포에 대한 스케일링(척도화)과 관련된 국외의 연구사례를 볼 수 있다(Marrett and Allmendinger, 1992; Wojtal, 1994; Cladouhos and Marret, 1996; Fossen and Røfnes, 1996; Watterson *et al.*, 1996; Odling, 1997; Koukouvelas *et al.*, 1999; Mansfield and Cartwright, 2001; Flodin and Aydin, 2004; Swanson, 2006). 특히 Koike and

Ichikawa(2006)는 스케일이 상이한 단열계, 즉 미세균열, 절리 및 단층에 대한 3자간의 스케일링 및 이들 단열분포의 모델링을 실시하였다. 국내 주요 단층 및 절리의 길이에 대한 스케일링의 연구사례는 장태우 외(2003, 2007) 그리고 박덕원과 이창범(2010)에서 볼 수가 있다.

상기한 바와 같이 단열의 길이에 대한 스케일링의 다양한 연구사례를 볼 수 있으나, 미세균열을 대상으로 한 국내의 연구사례는 희귀하다. 이러한 배경하에서 제3기 결정질 응회암의 석영에서 발달하는 미세균열의 방향각별 길이에 대한 스케일링을 시도하였다. 이 연구에서는 경상분지 북동부에 속하는 포항시 흥해읍 칠포리 및 오도리 일대에서 분포하는 결정질 응회암체에서 암석시료를 채취하였다. 암석시료의 수평면에 대한 박편의 확대사진을 통하여 도출한 134조의 미세균열에 대하여 18개 방향각별 빈도수, 총길이, 평균길이 및 밀도를 산출(박덕원과 이창범, 2009), 방향각별 길이-누적빈도 도표에서 도출된 스케일링 특성과 병행 기술하였다. 또한 도출된 미세균열의 길이 분포형과 연계, 연구지역 일대의 주요 단층과의 상관성을 기술하였다.

지질개요

연구지역은 행정구역상 포항시 흥해읍 칠포리 및 오도리 그리고 청하면 이가리에 각각 속하며, 1:50,000 축척의 포항도폭(엄상호 외, 1964) 및 청하도폭(김옥준 외, 1968)의 일부에 각각 해당한다. 연구

지역 일대에서는 제3기 에오세의 (용결)결정질 응회암과 이를 부정합으로 피복하는 마이오세의 연일층군에 속하는 학림층, 홍해층, 이동층, 두호층 및 여남층 등으로 구성된다. 포항분지를 형성하는 이들 암층의 분포특성을 기술하면 다음과 같다(박덕원, 2009).

결정질 응회암은 석영조면암(엄상호 외, 1964), 지경동화산암류의 일부(김옥준 외, 1968), 곡강동유문암(장기홍, 1985) 및 칠포응회암(윤성효, 1988) 등으로 기재되었다(이하 결정질 응회암). 연구지역 일대에서는 제3기 암층 중 최하위 암층에 속하여 포항분지의 기저를 형성한다. Shibata *et al.*(1979)는 곡강동 일대에서 분포하는 이 암석의 K-Ar 전암 연대가 44.7 ± 1.1 Ma로서 제3기 에오세 중기임을 보고하였다. 결정질 응회암의 암색은 전반적으로 적갈색이며, 국부적으로는 담회색을 띠는 곳도 관찰된다. 적갈색의 유리질 석기에 1~5 mm 크기의 석영과 K-장석 반정을 함유하는 반상조직을 나타내며, 소량의 부석편이나 암편을 포함한다. 이 암석은 전반적으로 용결조직이 발달하며, 표식지인 칠포해안 노두에서 확인된 층후는 약 200 m이다(윤성효, 1988). 한편 칠포 북부의 오도리 해안과 곡강동 남부의 구곡산 북측 일부 지역에서는 결정질 응회암을 덮고 있는 응회암/응회질 퇴적암의 호층대로 구성된 지층이 분포한다. 오도리 해안에 분포하는 퇴적암은 주로 사질암으로 구성된다. 이 퇴적암은 외견상 연일층군의 암석들보다 훨씬 더 강한 교결상태를 보이는 것이 특징이며, 수평층리의 발달이 현저하다(송윤호 외, 2004).

연일층군은 기저역암층에 해당되는 천북역암을 최하위층으로 하여 학림층, 홍해층, 이동층, 두호층 및 여남층 등의 지층으로 구성된다(엄상호 외, 1964). 천북역암의 일부 층준을 제외한 나머지 지층들은 모두 해성환경에서 퇴적된 것으로서 주로 반교결된 역암, 사암 및 이암 등의 채설성 퇴적암으로 구성된다(Hwang, 1993; Sohn *et al.*, 2001). 학림층은 천북역암층을 정합적으로 피복하며, 담회색 및 담갈색의 사암, 세일, 응회질 이암 그리고 역암 등으로 구성되어 있다. 이들 암층은 대부분 해저전상지 퇴적물 기원으로 해석된다. 홍해층, 이동층 및 두호층 등의 상위 지층들은 일부 박층의 역암을 협재하나 주로 사암과 이암의 호층 또는 두꺼운 괴상의 이암들로 구성된다. 홍해층은 학림층을 정합적으로 피복하며, 주로 사암과 이암으로 구성되어 있다. 사암 및 이암층 내에는 박층의 역암 및 세일이 협재한다. 암색은 학림층에 비하여 밝

은 백색 계통이다. 이동층은 홍해층을 정합적으로 피복하며, 암상분포는 학림층과 유사하다. 상부 및 하부는 주로 이암과 세일의 호층, 중부에서는 이암으로 구성되어 있다. 두호층은 여남층과 함께 상부연일층군에 속한다. 두호층은 이동층을 정합적으로 피복하며, 이암, 세일 및 사암의 호층으로 구성되어 있다. 암색은 홍해층과 유사하며, 간혹 박층의 역암 및 탄질물을 협재한다. 여남층은 제3기 지층 중 최상부에 속하는 지층으로, 타 지층에 비하여 분포면적이 좁다. 구성암석은 이암, 세일 및 사암으로 구성되며, 상하부는 녹색의 세일 그리고 중부에서는 거의 이암이 지배적이다(Fig. 1).

미세균열의 도출 및 그룹화

연구지역 일대에서 분포하는 결정질 응회암(6개소, 암석시료 번호:1~6)을 대상으로 암석시료를 채취하였다. 암체에서 석영의 결정이 비교적 풍부한 지점을 선정하였으며, 각 암석시료는 수평면을 형성하고 단층 및 절리가 발달하지 않는 신선한 노두 상에 방향을 표시한 후, 10×10 cm 정도의 크기로 채취되었다. 각 암석시료의 채취지점에 대한 행정구역, 지리좌표 등을 기재하면 Table 1과 같다(박덕원, 2009).

미세균열의 도출: 결정질 응회암(시료번호 1, 4, 및 5)의 수평면(horizontal plane)과 평행하게 박편을 제작하였다. 이들 박편의 확대사진 상에서 신상의 배열성이 뚜렷한 석영입자 내 미세균열(Intra-quartz microcrack)을 주대상으로 하였다. 이들 미세균열은 ① 석영의 외각부에서 내부로 전파되는 미세균열, ② 석영 입자의 외각부 및 내부에서 원형~타원형의 형태를 취하며, 산포상으로 분포하는 장경 50 μm~1 mm의 용식구조(corroded texture)를 형성하는 부위의 내부 및 경계부에서 분포하는 미세균열이다(박덕원, 2009).

암석시료 1, 4, 및 5에 대하여 각각 2장의 박편사진에서 대상이 된 22개의 석영입자 내에서 발달하는 총 134조의 미세균열에 대한 방향각(θ)과 길이를 측정하였다. 이들 개개 미세균열의 방향각은 박편사진 상에서 세로축의 중심을 택하여 시계방향(NE)과 반시계방향(NW)으로 구분, 10° 간격으로 18 등분하여 측정하였다. 18 등분한 방향각별로 미세균열의 빈도수(N) 및 길이를 측정한 후, 총길이(L_T), 평균길이(L_m, 총길이/빈도수) 및 밀도(ρ)를 다시 산정하였다(박덕원과 이창범, 2009). 또한 미세균열의 밀도는 단

Table 1. Localities of each rock sample location in the study area (Park, 2009)

Rock sample No.	Administrative district	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Color
1	Pohang-si	129° 23'46.14"	36° 07'40.17"	3	medium
	Heunghae-eup				light
	Chilpo-ri				gray
2	Pohang-si	129° 23'31.73"	36° 08'14.02"	11	light
	Heunghae-eup				brownish
	Chilpo-ri				gray
3	Pohang-si	129° 23'46.24"	36° 08'25.47"	7	light
	Heunghae-eup				gray
	Chilpo-ri				
4	Pohang-si	129° 23'56.76"	36°08'435.71"	24	dark
	Heunghae-eup				reddish
	Chilpo-ri				brown
5	Pohang-si	129° 24'03.84"	36° 08'59.24"	33	medium
	Heunghae-eup				light
	Odo-ri				gray
6	Pohang-si	129° 22'56.16"	36° 11'03.04"	5	reddish
	Cheongha-myeon				gray
	Iga-ri				brown

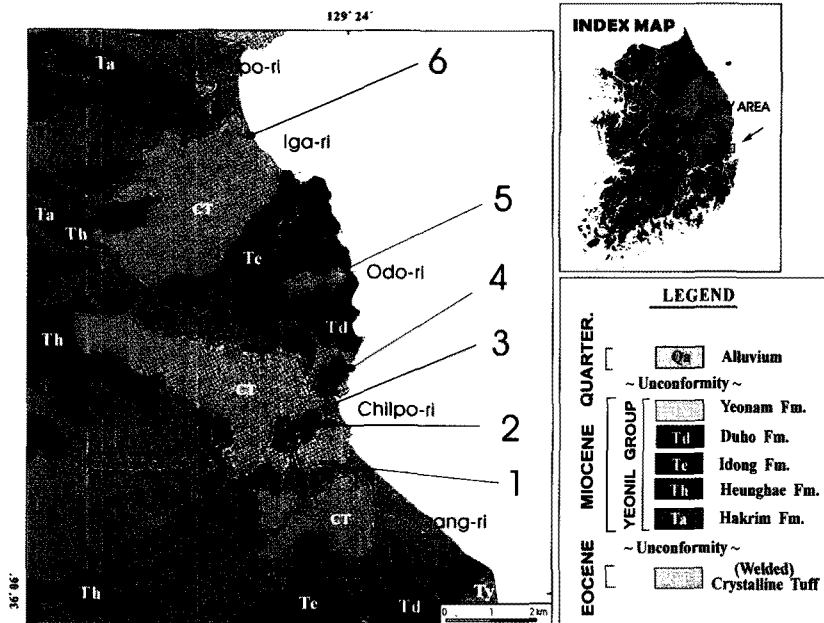


Fig. 1. Geologic map (after Eum *et al.*, 1964) and rock sample location in the study area. 108 sets of microcrack from image processing (1~6)(Park, 2009) and microcrack parameters from photomicrographs of thin sections (1, 4 and 5) were derived.

면적(A), 균열길이의 절반(half-length, C) 및 미세균열의 수(N)를 이용하여 다음 식(Segall, 1984)으로 구하였다. 미세균열의 밀도는 균열의 빈도수와 길이의 함수이다. 5개 그룹의 밀도는 개개 그룹에 해당되는 방향각별 밀도(박덕원과 이창범, 2009)를 합산, 산출하였다.

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

영상에서 도출한 미세균열의 그룹화: 6개 암석시료 (Fig. 1)의 수평면에서 발달하는 37개의 석영입자에 대한 실내 영상처리(image processing)를 실시, 모두

108조의 미세균열에 대한 방향각을 도출하였다. 이들 미세균열에 대한 5° 간격의 장미도를 작성한 결과, ① 서북서-동남동~동서 영역의 그룹 I(N57°W~EW 내외), ② 북북서-남남동~북서-남동 영역의 그룹 II(N57°W~N11°W 내외), ③ 남-북~북북동-남남서 영역의 그룹 III(N11°W~N24°E 내외), ④ 북동-남서 영역의 그룹 IV(N24°E~N64°E 내외) 및 ⑤ 동북동-서남서~동서 영역의 그룹 V(N64°E~E-W 내외) 등의 5개 방향각 구간의 그룹(I~V)으로 분대하였다. 각 그룹의 방향각 구간은 기재의 편의상, 그룹 I은 N60~90°W, 그룹 II는 N10~60°W, 그룹 III은 N10°W~N20°E, 그룹 IV는 N20~60°E, 그룹 V는 N60~90°E로 각각 설정하였다(박덕원, 2009).

방향각별 · 그룹별 길이 분포

수평면과 평행하게 제작된 박편의 확대사진과 22개 석영내에서 발달하는 미세균열을 스캔한 결과는 Fig. 2와 같다. 박편의 확대사진에서 도출한 134조의 미세균열(Fig. 2)에 대하여 방향각 구간별로 미세균열의 길이에 대한 분포특성을 도출하였다. 이 란에서는 15개 방향각 구간별 길이 분포도(박덕원과 이창범, 2009) 그리고 5개 그룹별 길이 분포도를 각각 작성, 분포특성을 상호 비교하였다(Fig. 3a, b). 15개 방향각 구간별 분포도에서는 빈도수(N:1)가 낮은 N20~30°E, N20~30°W 및 N30~40°W의 3개 방향각 구간은 대상에서 제외하였다.

방향각별 길이 분포도: 15개 방향각 구간에 대한 길이 범위의 전반적인 분포형을 보면 다음과 같다. 분포도에서는 길이가 가장 긴 영역을 표시한 상부한계선에 비하여 길이가 가장 짧은 영역을 표시한 하부한계선의 변화율이 상대적으로 크게 나타난다. 즉 하부한계선의 분포형을 보면, N0~10°W를 경계로 하여 N-W의 영역에서는 N80~90°W의 구간, N-E의 영역에서는 N80~90°E의 구간으로 갈수록 길이가 짧은 미세균열의 빈도수가 상대적으로 증가하여 상부한계선과 하부한계선의 폭이 점차 넓어지는 경향성을 보인다. 이와 같은 분포특성은 각 방향각 구간에 속하는 미세균열간의 생성시기에 대한 상대성을 시사한다. 한편 15개의 방향각 구간의 표준편차는 0.02~0.30의 범위를 보이며, N60~70°W(0.30) 및 N0~10°W(0.25)의 방향각 구간에서는 표준편차가 크게 나타난다(Fig. 3a)(박덕원과 이창범, 2009).

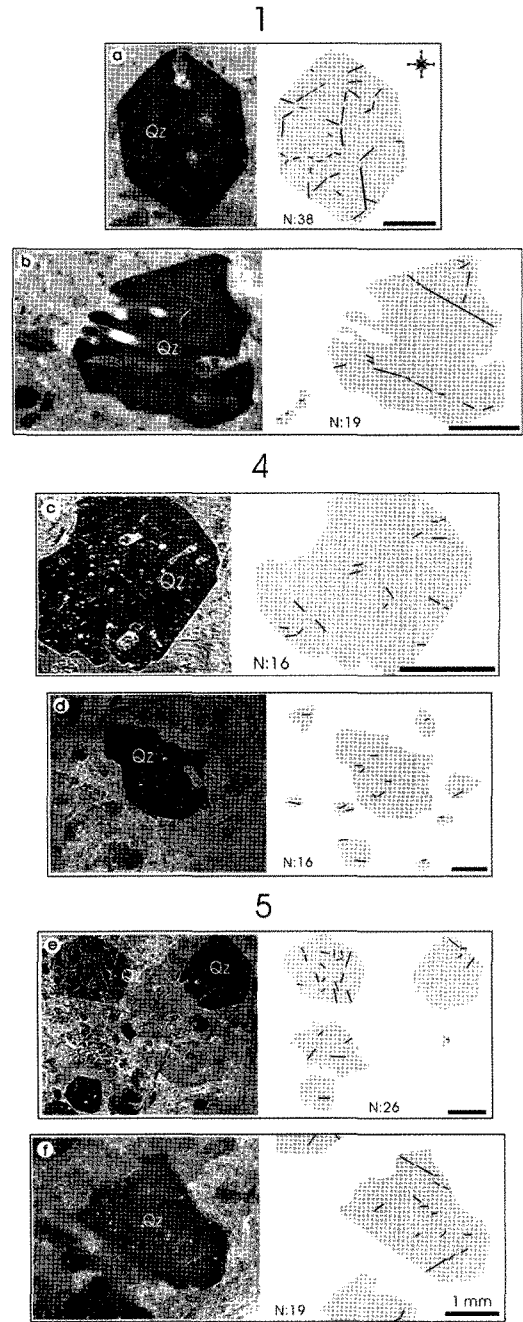


Fig. 2. The sketch of microcracks in a tiny quartz on horizontal plane of the crystalline tuff. 1, 4 and 5: Rock sample numbers are the same as ones in Fig. 1. Qz: quartz.

그룹별 길이 분포도: 이상 15개 방향각 구간에 대한 분포도에서 도출된 길이에 대한 분포특성을 도출하였다(Fig. 3a). 이 란에서는 18 등분한 방향각 구간에

Table 2. Summary of microcrack length statistics for five groups(I~V)

Group	Directional angle (°)	N	Length range (mm)	Mean length (mm)	Median (mm)	Standard deviation	Density (ρ) ($\times 10^{-3}$)
I	N60 ~ 90W	36	0.05 ~ 1.18	0.18	0.12	0.20	19.12
II	N10 ~ 60W	22	0.08 ~ 0.42	0.21	0.17	0.10	13.78
III	N10W ~ N20E	15	0.11 ~ 0.80	0.27	0.24	0.17	18.32
IV	N20 ~ 60E	28	0.06 ~ 0.43	0.18	0.14	0.09	14.86
V	N60 ~ 90E	33	0.05 ~ 0.37	0.15	0.14	0.10	11.07
Total		134	0.05 ~ 1.18	0.19	0.17	0.14	77.15

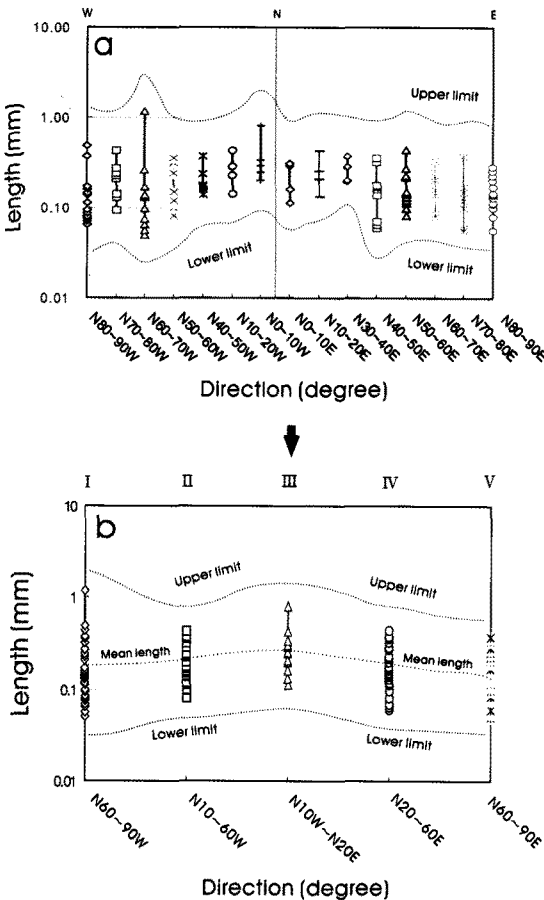


Fig. 3. Variations of microcrack length ranges for 15 directions (a; Park and Lee, 2009) and five groups (b). Mean length (mm) of five groups (I~V): I(0.18), II (0.21), III (0.27), IV(0.18) and V(0.15).

대하여 5개 그룹으로 요약, 그룹별 분포도(Fig. 3b)의 전반적인 분포특성을 기재하였다. 또한 18개 방향과 구간별 빈도수, 길이범위, 평균길이, 중앙값, 표준편차 및 밀도의 자료(박덕원과 이창범, 2009)를 5개 그룹별로 요약, 정리하면 Table 3과 같다.

분포도를 보면, 상부한계선과 하부한계선의 변화율은 전반적으로 유사하다. 다만 그룹 I(N60~70°W의 구간)의 구간에서는 134조의 미세균열 중, 숫적으로 매우 제한적이며 길이가 가장 긴 미세균열(N:1, L_{max} : 1.18 mm)에 기인되어 길이범위의 상부한계선은 증가하는 특성이 있다. 그룹별 분포도에서 도시한 ① 길이 범위의 분포형을 보면, 그룹 III의 구간(0.11~0.80 mm)을 경계로 하여 N-W의 영역에서는 그룹 I의 구간(0.05~1.18 mm), N-E의 영역에서는 그룹 V의 구간(0.05~0.37 mm)으로 갈수록 길이가 보다 짧은 미세균열의 빈도수가 점진적으로 증가한다. 그룹별 분포도의 분포형은 상기한 방향과 구간별 분포도(Fig. 3a)의 분포형에 비하여 대칭형태가 보다 뚜렷하다. ② 평균 길이의 분포형을 보면, 그룹 III(0.27 mm)을 기준으로 하여 시계의 반대방향인 그룹 II(0.21 mm) → 그룹 I(0.18 mm) 그리고 시계방향인 그룹 IV(N:18) → 그룹 V(N:15)로 갈수록 감소한다. ③ 빈도수는 그룹 III(N:15)을 기준으로 하여 그룹 II(N:22) → 그룹 I(N:38) 그리고 그룹 IV(N:28) → 그룹 V(N:33)로 갈수록 증가한다. 즉 그룹별 빈도수와 평균길이는 상호 반비례의 관계를 보인다. ④ 중앙값, 밀도 및 표준편차는 상기한 평균길이의 분포형과 유사하며, 다만 그룹 I의 구간에서는 증가하는 차이점이 있다. 5개 그룹 사이의 길이범위, 평균길이, 중앙값 및 밀도를 비교하면, 그룹 V에서 이들의 값이 가장 낮은 반면, 길이가 보다 짧은 미세균열의 빈도수는 높은 분포특성을 도출할 수 있다(Fig. 3b).

화강암 및 대리암에 대한 미세균열의 발생과정을 규명한 연구사례를 보면, 응력의 증가에 따른 균열작용의 진화(cracking evolution)는 대부분 새로운 균열의 발생(initiation)의 결과이며, 이러한 새로이 발생한 균열은 결합(coalescence)으로 인해 길이가 보다 긴 미세균열을 형성한다(Zhao, 1998; Homand *et al.*, 2000). 이와 같은 연구결과의 관점에서 보면, 그룹 V

Table 3. The values of constant(a) and exponent(b) in power-law equation for five groups

Directional angle (°)	Mean length (mm)	Median (mm)	Power-law equation ($N = a \times L^{-b}$)								
			Linear middle section						Upper section	Lower section	
			Length range (mm)	N	Frequency ratio (%)	a	b	R ²	b	b	
N-W	1 N80 ~ 90W	0.15	0.11	0.11~0.17	7	46.6	0.07	2.17	0.93	0.96	0.93
	2 N70 ~ 80W	0.21	0.22	0.21~0.27	4	50.0	0.02	3.49	0.99	0.60	1.52
	3 N60 ~ 70W	0.19	0.13	0.12~0.26	6	46.1	0.23	1.54	0.85	0.64	0.46
	Group I	0.18	0.12	0.12~0.43	18	50.0	0.83	1.48	0.98	0.60	0.77
	4 N50 ~ 60W	0.17	0.12	0.11~0.31	6	66.6	0.57	1.10	0.95	0.73	5.88
	5 N40 ~ 50W	0.20	0.17	0.16~0.23	5	71.4	0.03	2.54	0.84	1.15	1.56
	6 N10 ~ 20W	0.27	0.25	0.22~0.42	3	75.0	0.22	1.74	0.99	0.61	1.74
	Group II	0.21	0.17	0.14~0.35	14	63.6	0.91	1.48	0.99	0.49	7.10
	7 N0 ~ 10W	0.37	0.29	0.24~0.33	3	60.0	0.18	2.21	0.98	1.02	0.79
	8 N0 ~ 10E	0.20	0.16	0.16~0.29	3	60.0	0.46	1.17	0.99	0.62	12.82
N-E	9 N10 ~ 20E	0.25	0.23	0.20~0.42	3	75.0	0.27	1.48	0.99	0.63	1.48
	Group III	0.27	0.24	0.16~0.29	7	46.6	1.69	1.06	0.95	0.52	1.60
	10 N30 ~ 40E	0.26	0.24	0.19~0.37	4	100	0.11	2.19	0.99	2.19	2.19
	11 N40 ~ 50E	0.16	0.16	0.13~0.32	5	55.5	0.45	1.24	0.86	0.40	7.27
	12 N50 ~ 60E	0.16	0.14	0.11~0.43	12	80.0	0.23	1.71	0.97	0.64	1.71
	Group IV	0.18	0.14	0.11~0.32	19	67.8	0.74	1.55	0.99	0.43	4.72
	13 N60 ~ 70E	0.19	0.14	0.13~0.20	4	44.4	0.40	1.40	0.92	0.38	2.41
	14 N70 ~ 80E	0.14	0.12	0.12~0.16	4	50.0	0.02	2.52	0.98	0.52	0.88
	15 N80 ~ 90E	0.15	0.14	0.09~0.20	8	50.0	0.93	1.14	0.98	0.24	4.60
	Group V	0.15	0.14	0.12~0.33	20	66.6	0.35	2.02	0.97	0.33	8.45
Total	0.19	0.15	0.09~0.35	92	68.6	3.19	1.63	0.98	0.32	1.20~4.60	

*N: Cumulative frequency; L: Length (mm)

의 구간에서는 비교적 새로운 응력장과 부합하는 미세균열의 신규 발생작용과 더불어 생성시기가 상대적으로 고기인 기존 미세균열의 성장작용의 공존을 시사한다(Fig. 3b).

그 룹 1

이 란에서는 10° 간격의 15개 방향각 구간별 그리고 5개 그룹별로 길이-누적빈도 도표(diagram)를 작성, 결정질 응회암의 생성 이후 작용한 미세균열의 진화과정을 통하여 발달한 미세균열의 모집단(population)의 길이에 대한 분포특성을 도출하였다. 단열의 모집단을 여러 방향각으로 세분, 이들 부집단(sub-population) 사이의 분포특성을 상호 비교한 연구 사례에서는 방향성 효과를 강조한 바 있다(Fossen and Rørnes, 1996; 박덕원과 이창범, 2010). 한편 미세균열의 길이(L, mm)는 내림차순, 누적빈도(N)는 오

름차순으로 정리하였으며, 양대수 그래프에 도시하여 도표를 작성하였다(Yielding *et al.*, 1992; Mansfield and Cartwright, 2001). 양대수 그래프에서는 b를 기울기로 갖는 직선을 얻게 되며, 멱함수($N = a \times L^{-b}$)의 형태로 나타난다. 멱함수 분포에서는 평균 주위에 정점이 없고 계속 감소하는 모양을 갖는다(박덕원과 이창범, 2010). 한편 도표의 전체적인 형태를 보면, ① 중앙부의 선형구간(구간 B)을 중심으로 하여 완만한 곡선형태를 취하며 기울기가 상대적으로 낮은 ② 상부구간(구간 A) 그리고 변곡점이 형성되어 기울기가 급격히 증가(또는 감소)하는 ③ 하부구간(구간 C)으로 구분할 수 있다. 즉 방향각별 도표에서 곡선은 잠재적인 멱함수(potential power-law function)와 부합하는 직선구간으로 분할이 된다(Fig. 4). 이와 같은 경우는 야외에서 측정된 암맥의 폭과 누적빈도 사이의 스케일링 특성을 규명한 기존의 연구사례(Gall *et al.*, 2005)에서도 볼 수 있다. 5개 그룹(I~V)의 길이에

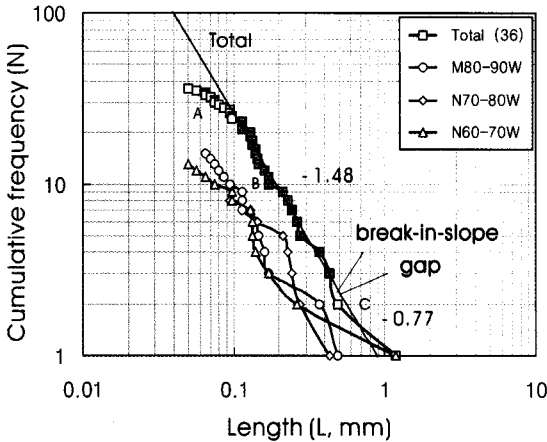


Fig. 4. Length-cumulative frequency diagram for microcrack populations in group I(N60~90°W). The linear middle section (filled squares) of all plots has a similar slope that gives an average power-law exponent of -1.48. A gap and break in a slope in the lower part of the curves represent the abrupt development of longer lengths that gives a lower average power-law exponent of -0.77. Slopes of linear sections: N60~70°W (-1.54), N70~80°W (-3.49) and N80~90°W (-2.17).

대한 스케일링 특성을 기재하면 다음과 같다.

N80~90°W: 박편의 확대사진 상에서 측정된 미세 균열(N:15, 분포율:11.1%)의 길이범위는 0.06~0.49 mm, 평균길이는 0.15 mm, 중앙값은 0.11 mm, 표준편차는 0.11이다. 3개 방향각 사이의 빈도수(N), 길이의 분포 범위(mm), 평균길이(mm) 및 중앙값(mm)을 상호 비교하였다. 평균길이 및 중앙값은 N70~80°W(0.21, 0.22) > N60~70°W(0.19, 0.13) > N80~90°W(0.15, 0.11)의 순서 그리고 표준편차는 N60~70°W(0.30) > N70~80°W(0.12) > N80~90°W(0.11)의 순으로 각각 나타난다. 이중 N80~90°W의 방향각 구간에서 평균길이, 중앙값 및 표준편차가 낮은 특성을 도출할 수가 있다. 한편 선형구간(N:7, 길이 0.11~0.17 mm의 구간, 빈도율:46.6%)에서의 음의 멱함수는 $N=0.07 \times L^{-2.17}$ ($R^2=0.93$)이다. 상부구간 → 선형구간 → 하부구간의 기울기는 -0.96 → -2.17 → -0.93의 순으로 나타난다. 그룹 I에 속하는 3개 방향각 구간 중, 상부구간의 기울기(-0.96)가 가장 크다(Fig. 4, Table 3).

N70~80°W: 미세균열(N:8, 분포율:5.9%)의 길이범위는 0.09~0.43 mm, 평균길이는 0.21 mm, 중앙값은 0.22 mm, 표준편차는 0.12이다. 한편 선형구간(N:4, 길이 0.21~0.27 mm의 구간, 빈도율:50.0%)에서의 음의 멱함수는 $N=0.02 \times L^{-3.49}$ ($R^2=0.99$)이다. 상부구간 → 선

형구간 → 하부구간의 기울기는 -0.60 → -3.49 → -1.52의 순으로 나타난다. 그룹 I에 속하는 3개 방향각 구간 중, 평균길이(0.21 mm)가 가장 길며, 분포도의 우측에 도시되어 비교적 상위영역에 해당된다(Fig. 4, Table 3).

N60~70°W: 미세균열(N:13, 분포율:9.7%)의 길이범위는 0.05~1.18 mm, 평균길이는 0.19 mm, 중앙값은 0.13 mm, 표준편차는 0.30이다. 15개의 구간 중, 길이범위 및 표준편차가 크다. 한편 선형구간(N:6, 길이 0.12~0.26 mm의 구간, 빈도율:46.1%)에서의 음의 멱함수는 $N=0.23 \times L^{-1.54}$ ($R^2=0.85$)이다. 상부구간 → 선형구간 → 하부구간의 기울기는 -0.64 → -1.54 → -0.46의 순으로 나타난다. 그룹 I에 속하는 3개 방향각 구간에 대한 선형구간의 기울기를 비교해 보면, N70~80°W(-3.49) > N80~90°W(-2.17) > N60~70°W(-1.54)의 순으로 감소한다(Fig. 4, Table 3).

그룹 I(N60~90°W)의 종합: 그룹 I에 속하는 미세 균열(N:36, 분포율:26.8%)의 길이범위는 0.05~1.18 mm, 평균길이는 0.18 mm, 중앙값은 0.12 mm, 표준편차는 0.20이다. 도표의 전체적인 형태를 보면, 중앙부의 전형적인 선형구간(N:21, 길이 0.12~0.43 mm의 구간)을 중심으로 하여 기울기가 상대적으로 낮은 상부구간(N:20, 길이 0.05~0.12 mm의 구간) 그리고 기울기가 감소하는 하부구간(N:3, 길이 0.43~1.18 mm의 구간)으로 구분할 수 있다.

상기한 선형구간은 길이와 누적빈도 사이의 전형적인 음의 멱함수 관계를 지시한다. 선형구간에서의 멱함수는 $N=0.83 \times L^{-1.48}$ ($R^2=0.98$)이다. 상부구간, 선형구간 그리고 하부구간의 기울기는 -0.60 → -1.48 → -0.77의 순으로 되며, 선형구간 → 하부구간으로 갈수록 기울기가 감소한다.

한편 중앙부의 선형구간과 하부구간 사이에는 공간적인 틈(gap)이 형성되어 기울기의 단절(break in slope) 현상이 발생하며, 선형구간에 비하여 기울기가 감소한다. 이러한 분포형태는 길이가 보다 긴 미세균열의 급격한 발달을 지시한다(Swanson, 2006). 3개 방향각 구간 사이에는 하부구간의 평균 기울기가 상이하하며, N70~80°W(-1.52) > N80~90°W(-0.93) > N60~70°W(-0.46)의 순으로 감소한다. 특히 표준편차(0.30)가 가장 큰 N60~70°W의 방향각 구간에 대한 도표의 하부구간에서는 기울기(-0.46)가 가장 급격히 감소한다. 연구지역 일대에서 분포하는 주요 단층의 방향과 도표의 분포형과 상호 대비한 결과, N60~70°W의

방향각 구간은 서북서-동남동의 가음단층의 주방향에 해당된다(Fig. 4, Table 3).

그 룹 II

N50~60°W: 미세균열(N:9, 분포율:6.7%)의 길이범위는 0.08~0.35 mm, 평균길이는 0.17 mm, 중앙값은 0.12 mm, 표준편차는 0.10이다. N-W의 영역에서는 N60~70°W 및 N70~80°W의 방향각 구간을 제외하면, N0~10°W → N80~90°W의 구간으로 갈수록 평균길이 및 중앙값은 점이적으로 감소한다. 도표의 전체적인 형태를 보면, N40~50°W의 도표와 유사하다. 한편 선형구간(N:6, 길이 0.11~0.31 mm의 구간, 빈도율:66.6%)에서의 음의 멱함수는 $N=0.57 \times L^{-1.10}$ ($R^2=0.95$)이다. 상부구간 → 선형구간 → 하부구간의 기울기는 -0.73 → -1.10 → -5.88의 순으로 나타난다. 선형구간 → 하부구간으로 갈수록 기울기가 급격히 증가하며, 길이가 보다 긴 미세균열의 급격한 발달이 미흡하다(Fig. 5, Table 3).

N40~50°W: 미세균열(N:7, 분포율:5.2%)의 길이범위는 0.14~0.37 mm, 평균길이는 0.20 mm, 중앙값은 0.17 mm, 표준편차는 0.08이다. 도표의 전체적인 형태는 선형에 근접한다. 한편 선형구간(N:5, 길이 0.16~0.23 mm의 구간, 빈도율:71.4%)에서의 음의 멱함수는 $N=0.03 \times L^{-2.54}$ ($R^2=0.84$)이다. 상부구간 → 선형구간 → 하부구간의 기울기는 -1.15 → -2.54 → -1.56의 순으로 나타난다(Fig. 5, Table 3).

N10~20°W: 미세균열(N:4, 분포율:2.9%)의 길이범위는 0.14~0.42 mm, 평균길이는 0.27 mm, 중앙값은 0.25 mm, 표준편차는 0.11이다. 도표의 전체적인 형태는 선형에 근접하며, 외견상 N70~80°W의 방향각 구간의 분포형과 유사하다. 한편 선형구간(N:3, 길이 0.22~0.42 mm의 구간, 빈도율:75.0%)에서의 음의 멱함수는 $N=0.22 \times L^{-1.74}$ ($R^2=0.99$)이다. 상부구간 → 선형구간 및 하부구간의 기울기는 -0.61 → -1.74의 순으로 나타난다. 한편 그룹 II에 속하는 3개 방향각 사이의 선형구간에 대한 기울기를 비교해 보면, N40~50°W(-2.54) > N10~20°W(-1.74) > N50~60°W(-1.10)의 순으로 감소한다. 특히, 하부구간의 평균 기울기를 보면, N50~60°W(-5.88)에 비하여 N40~50°W(-1.56) 및 N10~20°W(-1.74)의 방향각 구간에서는 상대적으로 낮다. 이중 N10~20°W의 방향각 구간은 북북서-남남동의 울산단층의 주방향에 해당된다(Fig. 5,

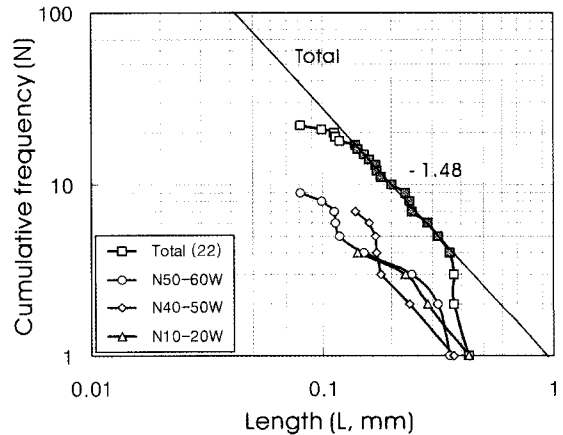


Fig. 5. Length-cumulative frequency diagram for microcrack populations in group II(N10~60°W). The linear middle section(filled squares) of all plots has a similar slope that gives an average power-law exponent of -1.48. Slopes of linear sections: N10~20°W (-1.74), N40~50°W (-2.54) and N50~60°W (-1.10).

Table 3).

그룹 II(N10~60°W)의 종합: 그룹 II에 속하는 미세균열(N:22, 분포율:26.8%)의 길이범위는 0.08~0.42 mm, 평균길이는 0.21 mm, 중앙값은 0.17 mm, 표준편차는 0.10이다. 평균길이 및 중앙값은 N10~20°W(0.27, 0.25) > N40~50°W(0.20, 0.17) > N50~60°W(0.17, 0.12)의 순으로 나타난다. 반시계 방향으로 갈수록 평균길이 및 중앙값은 감소하며, 총 빈도 그리고 길이가 보다 짧은 미세균열의 빈도는 증가하는 분포특성을 도출할 수 있다. 한편 도표에서는 N50~60°W → N40~50°W → N10~20°W의 순으로 배열되어 있으며, N10~20°W의 방향각 구간이 비교적 상위영역에 속한다. 선형구간(N:14, 길이 0.14~0.35 mm의 구간)에서의 멱함수는 $N=0.91 \times L^{-1.48}$ ($R^2=0.99$)이다. 상부구간 → 선형구간 → 하부구간로 갈수록 기울기는 -0.45 → -1.48 → -7.10으로 나타난다. 한편 3개 방향각 구간을 종합한 도표의 선형구간과 하부구간 사이에는 기울기(-1.48 → -7.10)가 급격히 증가한다. 이러한 분포형태는 그룹 I의 경우와 상이하며, 하부구간에 접시되는 길이가 보다 긴 미세균열의 발달이 미흡함을 지시한다(Fig. 5, Table 3).

그 룹 III

N0~10°W: 미세균열(N:5, 분포율:3.7%)의 길이범위는 0.20~0.80 mm, 평균길이는 0.37 mm, 중앙값은

0.29 mm, 표준편차는 0.25이다. 15개의 구간 중, 평균길이의 중앙값이 다른 구간에 비하여 크게 나타나며, N60-70°W(0.30)의 방향각 구간과 더불어 표준편차가 크다. 한편 도표의 형태를 보면, 그룹 III에 속하는 3개 방향각 구간의 미세균열을 종합한 도표의 형태와 거의 유사하다. 선형구간(N:3, 길이 0.24~0.33 mm의 구간, 빈도율:60.0%)에서의 음의 멱함수는 $N=0.18 \times L^{-2.21}$ ($R^2=0.98$)이다. 상부구간 → 선형구간 → 하부구간의 기울기는 -1.02 → -2.21 → -0.79의 순으로 나타난다. 특히, 하부구간에서는 길이의 변화 폭이 크다(Fig. 6, Table 3).

N0~10°E: 미세균열(N:5, 분포율:3.7%)의 길이범위는 0.11~0.30 mm, 평균길이는 0.25 mm, 중앙값은 0.16 mm, 표준편차는 0.10이다. 선형구간(N:3, 길이 0.16~0.29 mm의 구간, 빈도율:60.0%)에서의 음의 멱함수는 $N=0.46 \times L^{-1.17}$ ($R^2=0.99$)이다. 상부구간 → 선형구간 → 하부구간의 기울기는 -0.62 → -1.17 → -12.82의 순으로 나타난다(Fig. 6, Table 3).

N10~20°E: 미세균열(N:4, 분포율:2.9%)의 길이범위는 0.13~0.42 mm, 평균길이는 0.25 mm, 중앙값은 0.23 mm, 표준편차는 0.14이다. 도표의 전체적인 형태는 선형에 근접한다. 선형구간(N:3, 길이 0.20~0.42 mm의 구간, 빈도율:75.0%)에서의 음의 멱함수는 $N=0.27 \times L^{-1.48}$ ($R^2=0.99$)이다. 상부구간 → 선형구간 및 하부구간의 기울기는 -0.63 → -1.48의 순으로 나타난다. 한편 분포도에서는 N0~10°E → N10~20°E → N0~10°W의 도표 순으로 배열되어 있으며, 이 중 N0~10°W의 도표가 비교적 상위영역을 차지한다(Fig. 6, Table 3).

그룹 III(N10°W~N20°E)의 종합: 그룹 III에 속하는 미세균열(N:15, 분포율:11.1%)의 길이범위는 0.11~0.80 mm, 평균길이는 0.27 mm, 중앙값은 0.24 mm, 표준편차는 0.17이다. 선형구간(N:7, 길이 0.16~0.29 mm)에서의 멱함수는 $N=1.69 \times L^{-1.06}$ ($R^2=0.95$)이다. 상부구간 → 선형구간 → 하부구간으로 갈수록 기울기는 -0.52 → -1.06 → -1.60으로 나타난다. 선형구간의 기울기는 그룹 I 및 II(-1.48)에 비하여 그룹 III(-1.06)에서는 낮게 나타난다. 한편 하부구간의 기울기는 급격히 감소하며, 보다 긴 미세균열의 발달을 지시한다. 하부구간에서의 평균 기울기는 N0~10°E(-12.82) > N10~20°E(-1.48) > N0~10°W(-0.79)의 순으로 감소한다. 특히 N10~20°E의 방향각 구간은 북북동-남남서의 양산단층의 주방향에 해당된다(Fig. 6, Table 3).

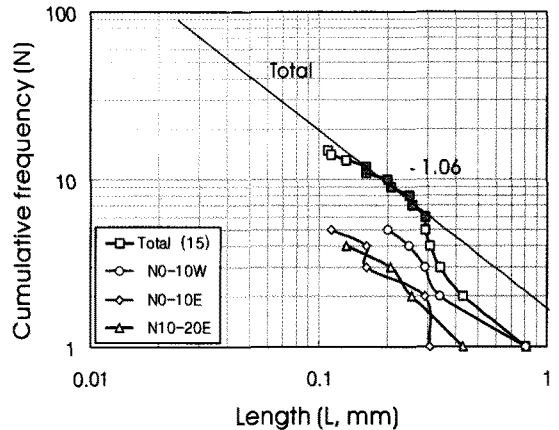


Fig. 6. Length-cumulative frequency diagram for microcrack populations in group III(N10°W~N20°E). The linear middle section(filled squares) of all plots has a similar slope that gives an average power-law exponent of -1.06. Slopes of linear sections: N0~10°W (-2.21), N0~10°E (-1.17) and N10~20°E (-1.48).

그 룹 IV

N30~40°E: 미세균열(N:4, 분포율:2.9%)의 길이범위는 0.19~0.37 mm이다. 평균길이는 0.26mm, 중앙값은 0.24mm, 표준편차는 0.09이다. 그룹 IV에 속하는 방향각 중, 빈도수가 가장 낮은 반면, 평균길이는 가장 길다. 도표의 전체구간은 선형에 근접하며, 멱함수는 $N=0.11 \times L^{-2.19}$ ($R^2=0.99$)이다(Fig. 7, Table 3).

N40~50°E: 미세균열(N:9)의 길이범위는 0.06~0.35 mm이다. 평균길이는 0.16 mm, 중앙값은 0.16 mm, 표준편차는 0.12이다. 한편 선형구간(N:5, 길이 0.13~0.32 mm)의 구간, 빈도율:55.5%에서의 음의 멱함수는 $N=0.45 \times L^{-1.24}$ ($R^2=0.86$)이다. 상부구간 → 선형구간 → 하부구간의 기울기는 -0.40 → -1.24 → -7.27의 순으로 나타난다(Fig. 7, Table 3).

N50~60°E: 미세균열(N:15)의 길이범위는 0.08~0.43 mm, 평균길이는 0.16 mm, 중앙값은 0.14 mm, 표준편차는 0.09이다. 분포도의 전체적인 형태를 보면, 상부구간을 제외한 구간은 선형에 근접한다. 그룹 IV에 속하는 3개의 방향각 중, 길이 0.1 mm 내외의 미세균열의 빈도수가 가장 높은 특성이 있다. 한편 선형구간(N:12, 길이 0.11~0.43 mm의 구간, 빈도율:80.0%)에서의 음의 멱함수는 $N=0.23 \times L^{-1.71}$ ($R^2=0.97$)이다. 상부구간 → 선형구간의 기울기는 -0.64 → -1.71의 순으로 나타난다(Fig. 7, Table 3).

그룹 IV(N20~60°E)의 종합: 그룹 IV에 속하는 미세

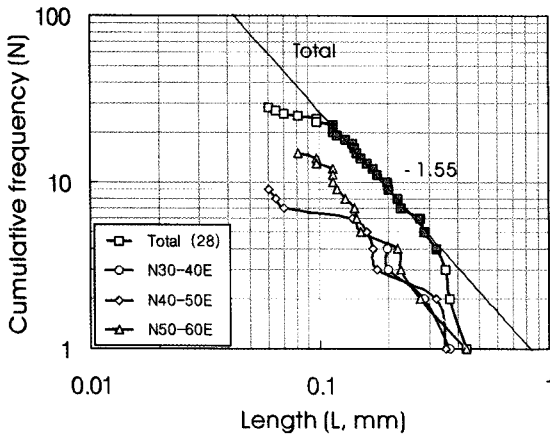


Fig. 7. Length-cumulative frequency diagram for microcrack populations in group IV(N20~60°E). The linear middle section(filled squares) of all plots has a similar slope that gives an average power-law exponent of -1.55. Slopes of linear middle sections: N30~40°E (-2.19), N40~50°E (-1.24) and N50~60°E (-1.71).

균열(N:28, 분포율:20.8%)의 길이범위는 0.06~0.43 mm, 평균길이는 0.18 mm, 중앙값은 0.14 mm, 표준편차는 0.09이다. 3개 방향각 사이의 빈도수(N), 길이의 분포 범위(mm), 평균길이(mm) 및 중앙값(mm)을 상호 비교하였다. 평균길이 및 중앙값은 N30~40°E(0.26, 0.24) > N40~50°E(0.16, 0.16) > N50~60°E(0.16, 0.14)의 순으로 나타난다. 즉 시계 방향으로 갈수록 평균길이 및 중앙값은 감소하며, 총 빈도수 그리고 길이가 보다 짧은 미세균열의 빈도수는 증가한다. 분포도에서는 N50~60°E → N40~50°E → N30~40°E의 도표 순으로 배열되어 있으며, 이 중 N30~40°E의 도표가 비교적 상위영역에 속한다.

한편 중앙부의 전형적인 선형구간(N:19, 길이 0.11~0.32 mm)에서의 멱함수는 $N=0.74 \times L^{-1.55}$ ($R^2=0.99$)이다. 상부구간 → 선형구간 → 하부구간으로 갈수록 기울기는 -0.43 → -1.55 → -4.72로 나타난다. 선형구간의 기울기(-1.55)는 그룹 I 및 II(-1.48) 그리고 그룹 III(-1.06)에 비하여 크게 나타난다. 하부구간의 기울기는 그룹 II(-7.10) < 그룹 IV(-4.72)의 순이다(Fig. 7, Table 3).

그 룹 V

N60~70°E: 미세균열(N:9, 분포율:6.7%)의 길이범위는 0.07~0.33 mm, 평균길이는 0.19 mm, 중앙값은 0.14 mm, 표준편차는 0.09이다. 다른 방향각 구간에

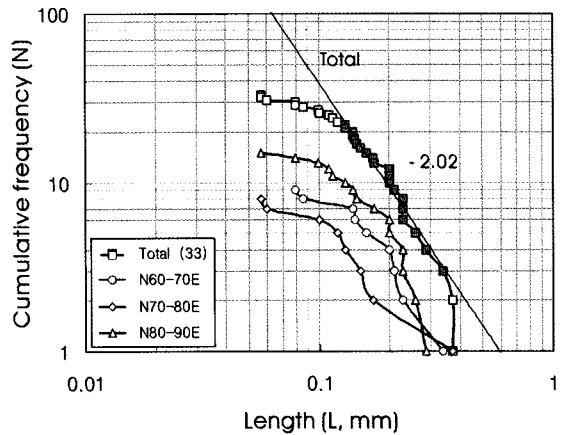


Fig. 8. Length-cumulative frequency diagram for microcrack populations in group V(N60~90°E). The linear middle section(filled squares) of all plots has a similar slope that gives an average power-law exponent of -2.02. Slopes of linear middle sections: N60~70°E (-1.40), N70~80°E (-2.52) and N80~90°E (-1.14).

비하여 표준편차가 낮다. 도표의 형태는 N70~80°E의 도표와 유사하다. 한편 선형구간(N:4, 길이 0.13~0.20 mm의 구간, 빈도율:44.4%)에서의 음의 멱함수는 $N=0.40 \times L^{-1.40}$ ($R^2=0.92$)이다. 상부구간 → 선형구간 → 하부구간의 기울기는 -0.38 → -1.40 → -2.41의 순으로 나타난다(Fig. 8, Table 3).

N70~80°: 미세균열(N:8)의 길이범위는 0.05~0.37 mm, 평균길이는 0.14 mm, 중앙값은 0.12 mm, 표준편차는 0.10이다. 한편 선형구간(N:4, 길이 0.12~0.16 mm의 구간, 빈도율:50.0%)에서의 음의 멱함수는 $N=0.02 \times L^{-2.52}$ ($R^2=0.98$)이다. 상부구간 → 선형구간 → 하부구간의 기울기는 -0.52 → -2.52 → -0.88의 순으로 나타난다. 선형구간에서 하부구간으로 갈수록 기울기는 감소하며, 보다 긴 미세균열이 발달한다(Fig. 8, Table 3).

N80~90°E: 미세균열(N:16, 분포율:11.9%)의 길이범위는 0.05~0.28 mm, 평균길이는 0.15 mm, 중앙값은 0.14 mm, 표준편차는 0.09이다. 평균길이는 N80~90°W (0.15 mm), N80~90°E(0.15 mm) 및 N70~80°E(0.14 mm)의 3개 방향각 구간에서 비교적 짧게 나타난다. 한편 선형구간(N:8, 길이 0.09~0.20 mm의 구간, 빈도율:50.0%)에서의 음의 멱함수는 $N=0.93 \times L^{-1.14}$ ($R^2=0.98$)이다. 상부구간 → 선형구간 → 하부구간의 기울기는 -0.24 → -1.14 → -4.60의 순으로 나타난다. 선형구간에서 하부구간으로 갈수록 기울기는 급격히 증가하며, 보다 긴 미세균열의 발달이 미흡하다.

한편 도표(선형구간의 기울기)에서는 N70~80°E (-2.52) → N60~70°E(-1.40) → N80~90°E(-1.14)의 순으로 배열되어 있으며, 이중 N70~80°E의 도표가 비교적 하위영역에 속한다. 특히 N80~90°E의 도표에서는 선형구간에 속하는 미세균열의 길이범위가 가장 넓고, 기울기가 가장 낮은 특징이 있다. 평균길이는 N60~70°E(0.19 mm) > N80~90°E(0.15 mm) > → N70~80°E(0.14 mm)의 순으로 나타나며, 이중 N60~70°E의 평균길이가 가장 긴 특성이 있다. 하부구간의 기울기는 N80~90°E(-4.60) > N60~70°E(-2.41) > N70~80°E (-0.88)의 순으로 감소한다(Fig. 8, Table 3).

그룹 V(N60~90°E)의 종합: 그룹 V에 속하는 미세균열(N:33, 분포율:24.6%)의 길이범위는 0.05~0.37 mm, 평균길이는 0.15 mm, 중앙값은 0.14 mm, 표준편차는 0.10이다. 평균길이는 선형구간의 길이범위 내에 속한다. 한편 선형구간(N:20, 길이 0.12~0.33 mm의 구간)에서의 멱함수는 $N=0.35 \times L^{-2.02}$ ($R^2=0.97$)이다. 상부구간 → 선형구간 → 하부구간으로 갈수록 기울기는 -0.33 → -2.02 → -8.45로 나타난다. 5개 그룹 중, 하부구간의 기울기(-8.45)가 가장 크다(Fig. 8, Table 3).

이상 기술한 15개 방향각 구간별 그리고 5개 그룹별 도표의 형태에 따라 구분한 중앙부의 선형구간에 대한 음의 멱함수의 방정식과 상관계수 그리고 상부구간 및 하부구간의 기울기를 정리하면 Table 3과 같다.

토 의

이상 10° 간격의 15개 방향각 구간 및 5개 그룹에 대한 길이 분포도를 각각 작성, 양자간의 분포형을 비교하였다(Fig. 3). 또한 5개 그룹별로 길이-누적빈도 도표를 작성, 개개 도표간의 상호 비교를 통한 분포 특성의 차이점을 도출하였다.

이 란에서는 15개 방향각 구간의 도표를 도시한 종합 분포도를 작성하였다. 종합 분포도의 전 영역은 길이-빈도 분포의 특성이 상이한 3개 그룹(A, B 및 C)의 영역으로 요약하였다(Fig. 9). 또한 5개 그룹(I~V)의 도표를 도시한 종합 분포도(Fig. 10)를 작성, 그룹간의 분포형을 상호 대비하였다. 이들 종합 분포도에서 도출된 전반적인 분포특성과 연계, 이들이 시사하는 지구조적 의의를 기재하였다.

15개 방향각 구간의 종합 분포도: 15개 방향각 구간의 도표(Fig. 4~8)를 도시한 결과, 고유의 영역에 따라

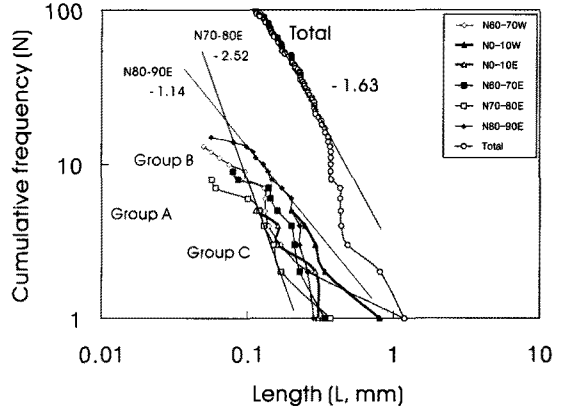


Fig. 9. Length-cumulative frequency diagram for micro-crack populations with directions. The entire populations are distributed between N70~80°E (-2.52) and N80~90°E (-1.14) reference lines. The difference in categories of three groups(A, B and C) is seen. The linear middle section of all plots (N=134) has a slope that gives a power-law exponent of -1.63. The diagrams for six directions are the same as ones in Fig. 4~8. The slope of linear middle section for N70~80°E (-2.52) and N80~90°E (-1.14) directions are the same as ones in Fig. 8.

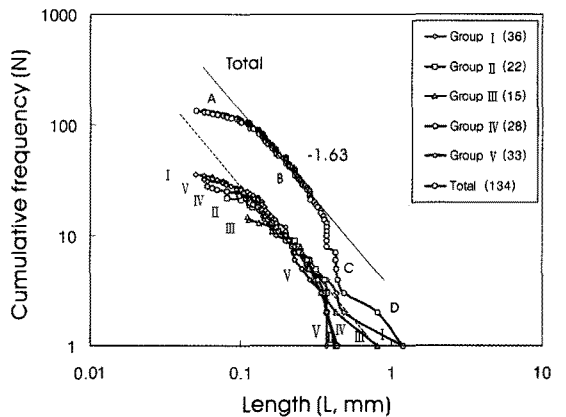


Fig. 10. Length-cumulative frequency diagram for micro-crack populations in each group (I~V). The entire slope of linear middle sections for five groups are similar to the slope of the linear middle section for all plots (Total: -1.63, N=134). Slopes of four sections: A (-0.32), B (-1.63), C (-4.60) and D (-1.20). Directional ranges of five groups are shown in Fig. 4~8.

그룹 A(6개 도표: N40~50°E, N60~70°E, N70~80°E, N40~50°W, N50~60°W 및 N70~80°W), 그룹 B(4개 도표: N50~60°E, N80~90°E, N60~70°W 및 N80~90°W) 그리고 그룹 C(5개 도표: N0~10°E, N10~20°E, N30~40°E, N0~10°W 및 N10~20°W)로 각각 분류하

였다. 상기한 그룹 A에 속하는 6개의 방향각 구간은 N70~80°E 및 N60~70°E의 도표 사이의 영역, 그룹 B에 속하는 4개의 방향각 구간은 N60~70°W 및 N80~90°E의 도표 사이의 영역, 그룹 C에 속하는 5개의 방향각 구간은 N0~10°E 및 N0~10°W의 도표 사이의 영역에 각각 속한다. 이들 3개 그룹의 영역은 점이적이며, 상호 중첩된다(Fig. 9).

그룹 A, B 및 C(15개 방향각 구간)의 전 영역을 보면, 하위영역의 하한선은 N70~80°E의 선형구간(-2.52) 그리고 상위영역의 상한선은 N80~90°E의 선형구간(-1.14)을 연결한 두 직선 사이에 놓인다. 특히 상위영역의 상한선은 N80~90°E(-1.14) → N0~10°W의 방향각 구간 순으로 자연스럽게 이어진다. 134조의 미세균열을 모두 종합한 도표의 선형구간의 대표적인 기울기는 -1.63이며, 상기한 전 영역의 하한선(-2.52)과 상한선(-1.14)의 기울기의 중간 정도이다(Fig. 9).

한편 종합 분포도에서는 그룹 A → 그룹 B의 영역으로 갈수록 길이가 보다 긴 미세균열 그리고 길이가 보다 짧은 미세균열의 빈도수가 공히 증가한다. 반면에 선형구간의 기울기는 점이적으로 감소하는 추세이다. 그룹 C의 영역을 보면, 그 상부구간은 그룹 A 및 그룹 B의 하부구간과 중첩되며, 종합 분포도의 가장 우측에 위치한다. 그룹 A 및 그룹 B에 비하여 빈도수가 급격히 감소하며, 곡선의 형태는 선형에 근접한다. 이러한 길이-누적빈도의 분포특성은 상호 영역을 달리하는 특정 방향각 구간의 미세균열에 대한 생성시기의 상대적인 차이, 나아가 상이한 진화특성을 가지는 부집단들의 성장경로를 시사한다(Fig. 9).

5개 그룹의 종합 분포도: 5개 그룹(I~V)의 도표(Fig. 4~8)를 모두 도시한 결과, 빈도수에 비례하여 그룹 III(N:15) < 그룹 II(N:22) < 그룹 IV(N:28) < 그룹 V(N:33) < 그룹 I(N:36)의 순으로 배열되어 있다. 이와 같은 배열성은 각 그룹의 상부구간의 빈도수와 비례하는 경향성이 있다. 5개 그룹의 선형구간을 종합적으로 고려한 직선의 기울기는 종합 도표(N:134)의 선형구간의 기울기(-1.63)에 근접한다. 각 그룹별 하부구간의 기울기를 보면, 그룹 V(-8.45) > 그룹 II(-7.10) > 그룹 IV(-4.72) > 그룹 III(-1.60) > 그룹 I(-0.77)의 순으로 나타난다. 이중 그룹 V에서 기울기가 가장 크게 나타나며, 길이가 보다 긴 미세균열의 발달이 상대적으로 미흡하다. 또한 그룹 V의 전체적인 분포형을 보면, 길이 0.05~0.2 mm의 구간에서 볼록한 형태를 취하여 빈도수가 높은 반면, 길이 0.2 mm 이상의 구간에서는

다른 그룹에 비하여 빈도수가 감소하는 특징을 도출할 수 있다. 반면에 그룹 I 및 그룹 III의 하부구간의 기울기는 급격히 감소하며, 이들 구간은 서북서-동남동의 가음단층 및 북북동-남남서의 양산단층의 주방향과 각각 부합하는 보다 긴 미세균열을 각각 내포한다(Fig. 10).

5개 그룹의 종합 분포도를 보면, 중앙부의 선형구간(구간 B, N:92, 길이 0.09~0.35 mm의 구간)을 중심으로 하여 상부구간(구간 A, N:28, 길이 0.05~0.09 mm의 구간), 기울기가 급격히 증가하는 하부구간(구간 C, N:11, 길이 0.35~0.49 mm의 구간) 그리고 구간 C에 비하여 기울기가 급격히 감소하는 하부구간(구간 D, N:3, 길이 0.49~1.18 mm의 구간)으로 구분할 수가 있다. 상기한 4개 구간 중, 선형구간에서의 빈도분포율(68.6%)이 가장 높다. 구간 D에서의 길이가 긴 미세균열은 숫적으로 제한적이다. 상부구간은 $N=52.14 \times L^{-0.32}$ ($R^2=0.96$), 선형구간은 $N=3.19 \times L^{-1.63}$ ($R^2=0.98$), 하부구간 C는 $N=0.11 \times L^{-4.60}$ ($R^2=0.82$), 하부구간 D는 $N=1.33 \times L^{-1.20}$ ($R^2=0.94$)로 각각 나타난다. 즉 상부구간 → 선형구간 → 하부구간 C → 하부구간 D로 갈수록 평균 기울기는 -0.32 → -1.63 → -4.60 → -1.20으로 나타난다.

한편 양대수 그래프 상에서 직선의 분절은 멱법칙 방정식의 지수(exponent of the power-law equation)로서 직선의 기울기를 프랙탈 차원이라 부를 때 멱법칙 스케일링을 의미한다(Mansfield and Cartwright, 2001; Flodin and Aydin, 2004). 상기한 5개 그룹의 개개 도표(지수:-1.06 ~ -2.02) 그리고 결정질 옹회암을 대표하는 종합 도표(지수:-1.63)에서 도출한 선형구간에서는 전형적인 멱법칙 관계를 보인다. 5개 그룹의 선형구간에서의 빈도분포율은 46.6~67.8%(평균 58.9%)이다(Fig. 10).

결론

경상분지 북동부에 속하는 포항시 흥해읍 칠포리 및 오도리 일대의 결정질 옹회암류에서 발달하는 미세균열에 대하여 방향각별 · 그룹별 길이 분포도 및 길이-누적빈도 도표를 각각 작성, 도출된 분포특성을 요약하였다.

1. 15개 방향각별 · 5개 그룹별 길이 분포도를 상호 비교하였다. 15개 구간별 분포도에서는 상부한계선에 비하여 하부한계선의 변화율이 상대적으로 크게 나타

난다. N0~10°W의 구간을 중심으로 하여 N80~90°W의 구간 및 N80~90°E의 구간으로 갈수록 길이가 짧은 미세균열의 빈도수가 증가하여 상부한계선과 하부한계선의 폭이 점차 넓어지는 분포형을 보인다. 5개 그룹별 분포도를 보면, 상부한계선과 하부한계선의 변화율은 유사하며, 상기한 방향각별 분포도의 분포형에 비하여 대칭형태가 보다 뚜렷하다.

2. 5개 그룹별 길이-누적빈도 도표를 작성, 도출된 분포특성을 기재하였다. ① 그룹 I(N60~90°W): N60~70°W의 도표를 보면, 중앙부의 선형구간에 비하여 하부구간에서는 기울기가 감소하며, 길이가 보다 긴 미세균열이 발달한다. 이 구간은 서북서-동남동의 가음단층의 주방향과 부합한다. ② 그룹 II(N10~60°W): 평균길이 및 중앙값은 N10~20°W > N40~50°W > N50~60°W의 순으로 되어 반시계 방향으로 갈수록 감소한다. 도표에서는 N50~60°W → N40~50°W → N10~20°W의 순으로 배열되어 N10~20°W의 방향각 구간이 상위영역에 속한다. 이 구간은 북북서-남남동의 울산단층의 주방향과 부합한다. ③ 그룹 III(N10°W~N20°E): 5개 그룹 중, 선형구간의 기울기(-1.06)가 가장 낮다. 3개 도표의 형태는 선형에 근접한다. ④ 그룹 IV(N20~60°E): 평균길이 및 중앙값은 N30~40°E > N40~50°E > N50~60°E의 순으로 되며, 시계 방향으로 갈수록 평균길이 및 중앙값은 감소한다. N50~60°E → N40~50°E → N30~40°E의 순으로 배열되어 N30~40°E의 구간이 상위영역에 속한다. ⑤ 그룹 V(N60~90°E): 하부구간의 기울기(-8.45)는 급격히 증가하며, 다른 그룹에 비하여 보다 긴 미세균열의 발달이 상대적으로 미흡하다. 5개 그룹의 선형구간에서의 빈도분포율은 46.6~67.8%이다.

3. 10° 간격의 15개 방향각 구간의 종합 분포도에서는 영역에 따라 그룹 A, B 및 C로 분류하였다. 그룹 A → 그룹 B의 영역으로 갈수록 미세균열의 길이 및 빈도수는 증가하며, 그룹 C의 영역에서는 빈도수가 급격히 감소한다. 이러한 분포특성은 그룹별 생성시기의 상대적인 차이, 후기 응력장에 부합하는 보다 짧은 미세균열의 신규발생과 더불어 기존 미세균열의 성장작용의 공존(생성 → 성장 → 결합)을 시사한다.

4. 5개 그룹(I~V)의 종합 분포도를 보면, 각 그룹의 선형구간을 종합적으로 고려한 직선의 기울기는 종합 도표(N:134)의 선형구간의 기울기(-1.63)에 근접한다. 종합 도표의 상부구간 → 선형구간 → 하부구간

C → 하부구간 D로 갈수록 기울기는 -0.32 → -1.63 → -4.60 → -1.20으로 나타난다. 이 중 선형구간에서의 빈도분포율(68.6%)이 가장 높다. 한편 상기한 5개 그룹의 도표(-1.06 ~ -2.02) 그리고 결정질 응회암을 대표하는 종합 도표(-1.63)에서 도출한 선형구간에서는 전형적인 멱법칙 관계를 보인다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 국토지질연구부에서 수행하고 있는 '저온 지열 열병합 발전에 활용가능한 심부 지열수 자원 확보 기술 개발' 과제에서 지원되었습니다. 또한 본 논문의 심사과정에서 유익한 조언과 지적을 해주신 한국지질자원연구원의 채병곤 박사님과 충북대학교의 서용석 교수님에게 깊은 사의를 표합니다.

참고문헌

- 김옥준, 윤선, 김영준, 1968, 한국지질도(1:50,000), 청하도폭. 국립지질조사소, 16p.
- 박덕원, 2009, 경상분지 북동부의 제3기 결정질 응회암에서 발달하는 미세균열의 방향성. 암석학회지, 2, 115-135.
- 박덕원, 이창범, 2009, 경상분지 북동부의 제3기 결정질 응회암에서 발달하는 미세균열의 분포특성. 암석학회지, 18, 315-336.
- 박덕원, 이창범, 2010, 강화군 석모도 일대의 선캄브리아기 변성암류 및 중생대 화강암류에서 발달하는 단열계의 분포특성. 암석학회지, 19, 123-139.
- 엄상호, 이동우, 박봉순, 1964, 한국지질도(1:50,000), 포함도폭. 국립지질조사소, 21p.
- 윤성호, 1988, 포항분지 북부(칠포-월포 일원)에 분포하는 화산암류에 대한 암석학적총서적 연구. 광산지질학회지, 21, 117-129.
- 송윤호, 이창범, 박덕원, 김형찬, 이철우, 이성근, 이종철, 이병태, 박인화, 이태종, 조병욱, 염병우, 이승구, 이봉주, 기원서, 박노옥, 박영수, 임무택, 현혜자, 손정술, 임형래, 황세호, 오재호, 김세준, 이운수, 김민규, 박찬, 정용복, 천대성, 김통권, 이진수, 임성근, 2004, 심부 지열에너지 개발 사업. 한국지질자원연구원 연구보고서, 일반-04(연차)-01, 226p.
- 장기홍, 1985, 한국지질론. 대우학술출판사 자연과학, 19, 272p.
- 장태우, 김천수, 배대석, 2003, 우리나라 단열구조의 특성. 지질공학회지, 13, 207-225.
- 장태우, 이현우, 채병곤, 서용석, 조용찬, 2007, 일광단층 인근 화산암 암반사면의 단열계 기하 분석 및 암반 분류수정안 제시. 지질공학회지, 17, 483-494.
- Cladouhos, T.T. and Marret, R., 1996, Are fault growth and

- linkage models consistent with power-law distributions of fault lengths?. *J. Struct. Geol.*, 18, 281-293.
- Flodin, E.A. and Aydin, A., 2004, Evolution of a strike-slip fault network, Valley of Fire State Park, southern Nevada. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 116, 42-59.
- Fossen, H. and Rørnes, A., 1996, Properties of fault populations in the Gullfaks Field, northern North Sea. *J. Struct. Geol.*, 18, 179-190.
- Gall, B.L., Tshoso, G., Dymant, J., Kampunzu, A.B., Jourdan, F., Fraud, G., Bertrant, H., Aubourg, C., and Vtel, W., 2005, The Okavango giant mafic dyke swarm (NE Botswana): its structural significance within the Karoo Large Igneous Province. *J. Struct. Geol.*, 27, 2234-2255.
- Homand, F., Hoxha, D., Belem, T., Pons, M., Hoteit, N., 2000, Geometric analysis of damaged microcracking in granites. *Mechanics of materials*, 32, 361-376.
- Hwang, I.G. 1993, Fan-delta systems in the Pohang basin (Miocene), SE Korea. PhD Thesis, Seoul Nat'l Univ. 973p.
- Koike, K., Ichikawa, Y. 2006, Spatial correlation structures of fracture systems for deriving a scaling law and modeling fracture distributions. *Computer & Geosciences*, 32, 1079-1095.
- Koukouvelas, I., Asimakopoulos, M. and Doutsos, T., 1999, Fractal characteristics of active normal faults: an example of the eastern Gulf of Corinth, Greece. *Tectonophysics*, 308, 263-274.
- Mansfield, C. and Cartwright, J., 2001, Fault growth by linkage: observation and implications from analogue models. *J. Struct. Geol.*, 23, 745-763.
- Marrett, R. and Allmendinger, R.W., 1992, Amount of extension on small faults: An example from the Viking graben. *Geology*, 20, 47-50.
- Odling, N., 1997, Scaling and connectivity of joint system in sandstones from Western Norway. *J. Struct. Geol.*, 19, 1257-1271.
- Ramsay, J.G. and Huber, M.I., 1987, The techniques of modern structural geology. Academic Press, 700p.
- Segall, P., 1984, Formation and growth of extensional fracture sets. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95, 454-462.
- Shibata, K., Uchiumi, S. and Nakagawa, T., 1979, K/Ar age results I. *Bull. Geol. Surv. Japan*, 30, 675-686.
- Sohn Y.K., Rhee, C.W. and Sohn, H., 2001, Revised stratigraphy and reinterpretation of the Miocene Pohang basin-fills, SE Korea: sequence development in response to tectonic and eustasy in a back-arc basin margin. *Sedimentary Geology*, 143, 265-285.
- Swanson, M.T., 2006, Late Paleozoic strike-slip faults and related vein array of Cape Elizabeth, Maine. *J. Struct. Geol.*, 28, 456-473.
- Watterson, J., Walsh, J.J., Gillespie, P.A. and Easten, S., 1996, Scaling systematics of fault sizes on a large-scale fault map. *J. Struct. Geol.*, 18, 199-214.
- Wojtal, S., 1994, Fault scaling laws and the temporal evolution of fault systems. *J. Struct. Geol.*, 16, 603-612.
- Yielding, G., Walsh, J. and Watterson, J., 1992, The prediction of small-scale faulting in reservoirs. *First Break* 10, 449-460.
- Zhao, Y., 1998, Crack pattern evolution and a fractal damage constitutive model for rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 35, 349-366.

2011년 1월 20일 접수

2011년 1월 21일 심사개시

2011년 2월 18일 채택