

## 강화군 석모도 일대의 중생대 화강암류 및 화강암질 암맥류에서 발달하는 미세균열의 분포특성

박덕원\* · 이창범

한국지질자원연구원 지하수지열연구부, 대전광역시 유성구 가정동 30, 305-350

## Characteristics of Microcrack Orientations in Mesozoic Granites and Granitic Dyke Rocks from Seokmo-do, Ganghwa-gun

Deok-Won Park\* and Chang-Bum Lee

Groundwater & Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30 Gajeongdong, Yuseonggu, Daejeon 305-350, Korea

**요약:** 강화군 석모도 일대의 중생대 화강암 및 세립질 흑운모화강암에서 분포하는 미세균열의 분포특성을 규명하였다. 14개소에서 채취한 암석시료의 수평면 상에서 발달하는 미세균열에 대하여 영상처리를 통하여 구별하였다. 미세균열의 방향성과 석모도의 중생대 화강암에서 발달하는 18조의 절리의 방향성과 대비하였다. 상관도에서 미세균열의 여러 조는 수직상의 일반적인 절리의 방향과 일치하는 강한 배향성을 보여 준다. 이러한 대비의 결과에서 거시적인 절리는 기존 미세균열의 성장 및 계단식 절리작용의 산물의 가능성을 시사한다. 또한 이 연구에서 수행한 방법론에 의하여 도출된 미세균열의 방향성을 전국의 주라기 및 백악기 화강암 석산에서 측정된 1번 및 2번 면의 방향성과 상호 대비하였다. 분포도에서 보논바와 같이, 미세균열과 이들 면과의 분포형태가 일치한다는 사실은 전국의 주라기 및 백악기 화강암에서도 이와 유사한 미세균열의 계가 광역적으로 나타날 가능성을 시사한다. 각 영역내에 속하는 이들 미세균열의 조들은 다른 지질 과정 및 변화하는 조건하에서 점차 형성된 복잡한 복합적인 미세균열의 계를 구성한다.

**주요어:** 미세균열, 수평면, 영상처리, 수직상의 일반적인 절리, 1번 및 2번 면, 16그룹

**Abstract:** We have studied orientational characteristics of microcracks in Mesozoic granites and granitic dyke rocks from Seokmo-do, Ganghwa-gun. Microcracks on horizontal surfaces of rock samples from 14 sites were investigated by image processing. Orientations of these microcracks compared with those of 18 sets of joints in Mesozoic granites from Seokmo-do. From the related chart, microcrack sets show strong preferred orientations which obviously are coincident with the direction of vertical common joints. It follows that the formation of macroscopic joints may be the results of further growth and step-wise jointing of pre-existing microcracks. Orientations of microcracks from this result also compared with those of vertical rift and grain planes for Jurassic and Cretaceous granite quarries in Korea. As shown in the distribution chart, the congruence of distribution pattern among microcracks and rift and grain planes suggests that similar microcrack systems probably occur regionally in Jurassic and Cretaceous granites from Korea. In particular, whole domain of the distribution chart was divided into 16 groups in terms of the phases of distribution of microcracks and planes. These microcrack sets in each domains construct complex composite microcrack systems which have formed progressively by different geologic processes and under varying conditions.

**Key words:** microcrack, horizontal plane, image processing, vertical common joint, rift and grain planes, 16 groups

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

## 서 론

화강암에서는 일반적으로 미세균열의 배열에 기인하는 이방성을 나타내는 특성이 있다. 층리 및 엽리 등은 야외조사를 통하여 쉽게 인지할 수가 있으나, 미세결함(microscopic defect), 즉 미세균열의 분포성은 모호하며 정밀한 계측이 없으면 확인하기 어렵다.

화강암의 미세균열은 다양한 요인에 의하여 생성되나, 그 중요성이 인식되어 화강암 석산의 채석면과 미세균열의 분포성과의 상관성 연구(Peng, 1970; Peng and Johnson, 1972; Solberg, 1975; Simmons and Richter, 1976; Holzhausen, 1989; 박덕원, 2007) 그리고 미세균열의 분포성을 이용한 화강암체의 응력장 해석(Plumber *et al.*, 1984; Lespinasse and Pecher, 1986; Vollbrecht *et al.*, 1991; 김영화 외, 1996; 장보안과 정해식, 2005; Wise, 2005) 등의 연구사례가 있다. 화강암의 미세균열과 관련된 국외의 연구결과에서는 특히, 석영입자 내부의 미세균열을 강조하고 있으며, 특히 심도별 응력 조건에 따른 미세균열의 연속적인 생성모델에서도 아문 미세균열 생성 후 비교적 천부에서 수직상의 열린 미세균열의 생성을 보여 주고 있다(Vollbrecht *et al.*, 1991; Wise, 2005).

한편 이러한 국내외의 연구사례에서는 주로 박편을 제작, 현미경 관찰 또는 박편의 확대사진(박덕원 등, 2004) 등에 의하여 미세균열의 분포성을 파악하나 많은 노력과 시간을 요한다. 이 연구에서는 강화군 석모도 일대의 중생대 화강암류 및 암맥상 세립질 흑운모 화강암의 노두에서 각각 채취한 암석시료의 수평면의 단면에 대한 영상처리를 실시, 미세균열의 조 및 방향 각에 대해서 실내 분석을 실시하였다. 이 연구에서 제시한 방법론에 의하여 암체별 미세균열의 분포성을 도출, 석모도 일대에서 발달하는 수직상의 일반적인 절리 그리고 전국의 주라기 및 백악기 화강암류 석산에서 측정된 수직 절의 방향성과 대비, 상관성을 규명하였다. 결론적으로 비교적 신속하고 간편한 연구절차를 통하여 도출된 미세균열의 분포성에 대한 신빙성을 검토하였다.

## 지질개요

연구지역은 행정구역상 인천광역시 강화군 강화읍 삼산면의 석모도이다. 석모도는 1:50,000 축척의 강화·온수리도폭(황재하 외, 2005) 그리고 광역적인 1:250,000 축척의 서울-남천점도폭(이병주 외, 1999)의 일부에 각각 해당한다. 이 지역은 경기편마암복합체에 속하는 선

캠브리아기의 장봉편암 및 화강편마암, 주라기의 반상 흑운모화강암 및 중립질 흑운모화강암, 백악기의 각섬 석흑운모화강암 및 세립질 흑운모화강암 등으로 구성되며, 이들 암체들은 석모도 일대의 기반암을 형성한다. 제4기층인 충적층은 주로 자갈과 모래로 구성된 퇴적층으로 제 지층을 피복한다.

① 장봉편암은 석모도 일대에서 하위층으로 삼산면 미범리 그리고 석모리 삼산저수지 및 매음리의 선착장 부근에서 소규모로 분포한다. 이 암석은 흑운모편암, 석회질편암, 결정질석회암 및 석영편암 등으로 구성되며, 일부 편마구조를 보이며 석류석 등의 변성광물도 발달한다. 특히 장봉편암 내에는 결정질석회암이 많이 협재한다. ② 화강편마암은 편암류를 관입한 중립질 내지 조립질의 화강암질암이다. 대부분 엽리 내지 편마구조를 갖는다. 부분적으로 편마구조가 미약한 부위에서는 일반적인 중생대 화강암류와 식별이 용이하지 않다. ③ 반상흑운모화강암은 석모도 북측의 상리 및 하리 그리고 내가면 황청리 일부 지역에서 분포한다. 이 암석의 장석반경은 10~20 mm이며, 주로 석영, 장석 및 흑운모 등으로 구성된다. 특히 상리 및 하리 지역에서는 중풍화암의 암상(moderately weathered rock facies)을 보이는 경우가 일반적이며, 석모도 지역의 중생대 화강암류 중 가장 고기의 암석임을 시사한다. ④ 중립질 흑운모화강암(이하 흑운모화강암)은 석모도의 중앙부의 북부암체 및 매음리의 해명산 일대의 남부암체로 구분되며, 이 암체들은 동서방향으로 길게 분포한다. 이 암체의 중앙부에는 백악기의 각섬석흑운모화강암이 관입하고 있다. 흑운모화강암의 북부암체에서는 입자의 크기가 2~3 mm인 중립질암이 주를 이루는 반면, 흑운모화강암의 남부암체에서는 중세립질암이 우세하며, 해명산 동측 능선에서는 일부 반상질의 화강암이 산출된다. 광물의 조성에 있어서도 흑운모의 비율이 북부암체에 비하여 높고 일부 남측의 흑운모화강암은 각섬석도 포함한다. 구성광물은 주로 석영, 사장석, 미사장석, 정장석과 흑운모이다. 부수광물에는 저어콘, 인회석, 갈럼석, 불투명 광물 등이 관찰된다. 상기한 흑운모화강암의 Rb-Sr 전암연대의 결과에서 상기한 북부암체는  $207 \pm 70$  Ma, 남부암체는  $132 \pm 50$  Ma이다(이승구 외, 2006). 따라서 시기적으로 북부암체에 비하여 남부암체가 후기임을 시사하며, 북부암체의 지질시대는 강화·온수리도폭의 주라기, 남부암체는 백악기로 각각 기재하고자 한다. ⑤ 각섬석흑운모화강암은 석모도의 중앙부에 분포하며, 강화도 건평리까지 분포한다. 대표적인 암상은 중립질 또는 조립질의 각섬석을 다량 함유하며, 흑운모는 적은 편이다. 각섬석은 자형 내지 반

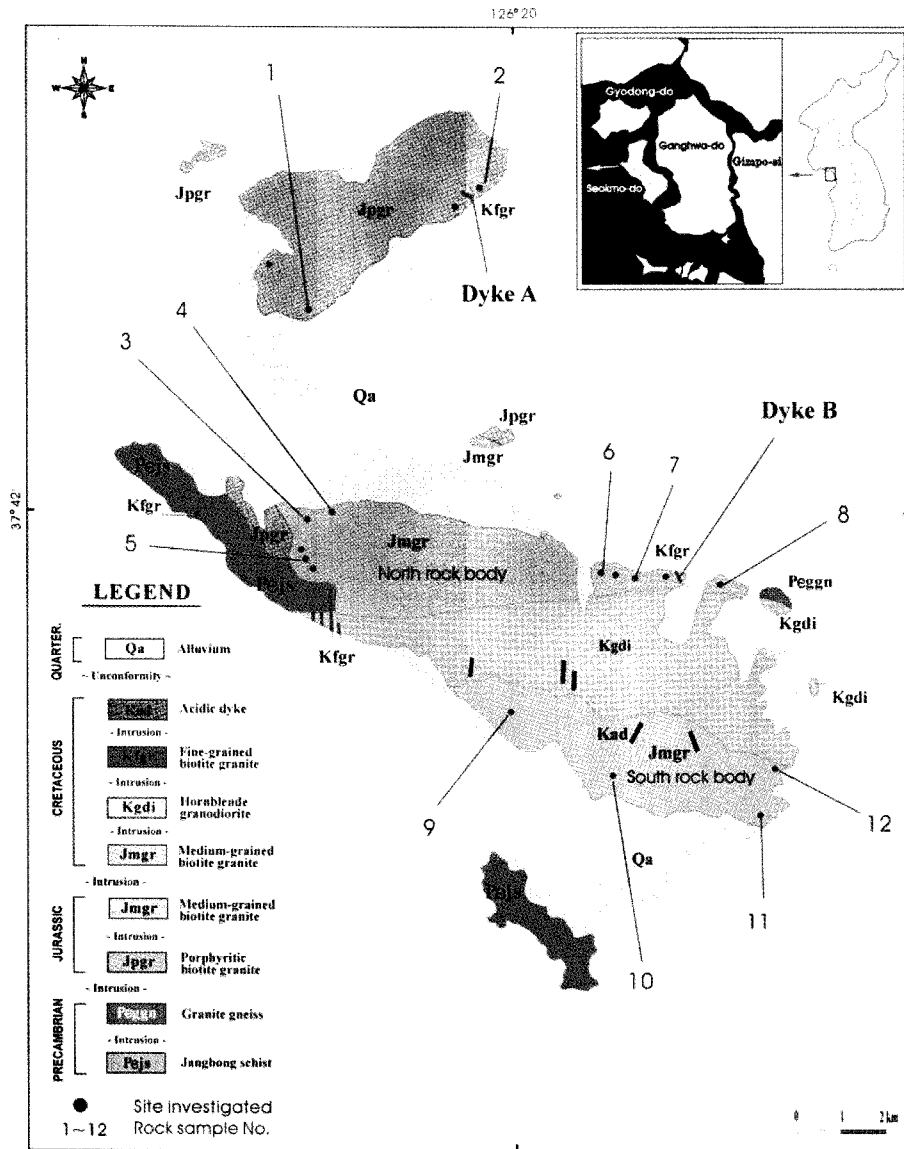


Fig. 1. Geologic and rock sample location map of the Seokmo-do, Ganghwa-gun (Modified from Hwang and Kihm, 2005).

자형으로 길이는 8 mm 내외이며, 약한 미문상 조직을 보인다. 이 암석에는 많은 양의 엽기성 포획암(mafic enclave)을 함유함이 특징적이다. SHRIMP-U-Pb 저어콘 연대측정 결과, 약 108 Ma 전후의 관입시기를 갖는 백악기 암체로 확인되었다. ⑥ 백악기의 세립질 흑운모화강암은 석모도 및 강화도 일대에서 모든 암층들을 암맥상으로 관입한다. 특히 석모도 상봉산 부근에 집중적으로 관입하고 있다. 따라서 암체별 생성시기는 반상흑운모화강암 > 북부암체 > 남부암체 > 암맥상 세립질

흑운모화강암(이하 암맥 A, 암맥 B)의 순으로 된다. ⑦ 그 외 후기의 산성암맥류로는 규장암맥, 유문암맥 및 석영맥 등이 있다(Fig. 1).

### 연구내용 및 분석방법

석모도 일대에서 분포하는 쥐라기의 반상흑운모화강암(2개소) 및 흑운모화강암(북부암체: 6개소, 남부암체: 4개소) 및 암맥 A 및 B(2개소)의 노두에서 총 14개의

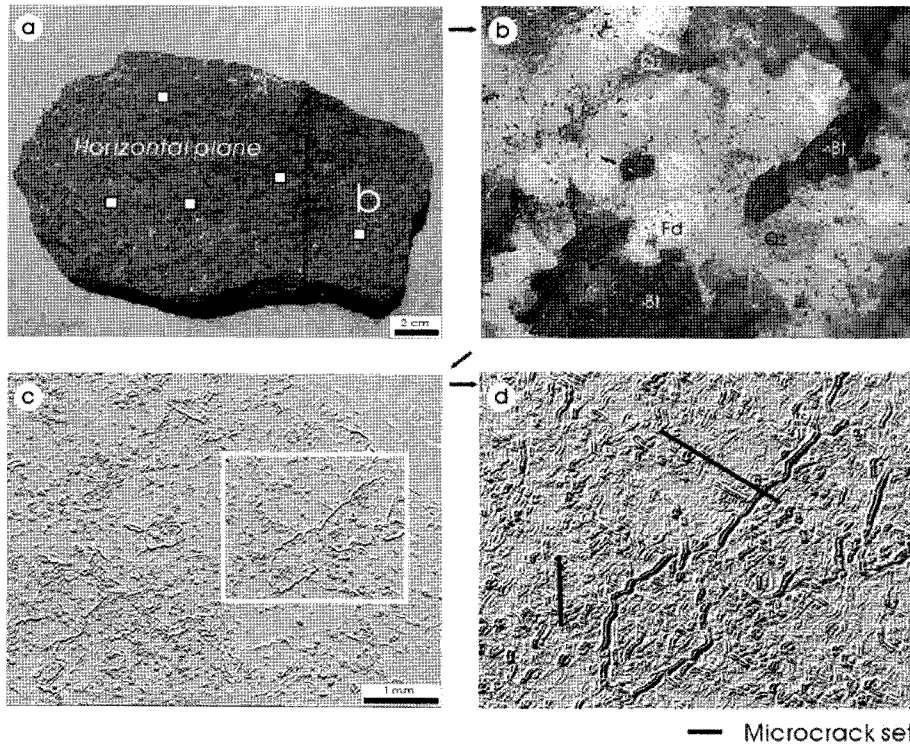


Fig. 2. Rock sample preparation and image processing for measurement the orientations of microcrack sets on horizontal rock surface (Rock sample No. 6).

암석시료를 채취하였다(Fig. 1). 각 암석시료는 수평면을 형성하며 절리가 발달하지 않는 신선한 노두에 방향을 표시한 후 10×10 cm 정도의 크기로 채취되었다.

실내에서 각 암석시료의 수평면 상에서 임의로 선택한 미소한 부분(6.1×4.5 mm)에 대한 영상처리(image processing)를 실시하였다. 각 암석시료에 대하여 5장의 영상에서 확인된 미세균열의 조(set) 및 방향각( $\theta$ )에 대하여 분석을 실시하였다. 중생대 화강암류의 경우, ① 5장의 영상 중에서 임의로 선택한 1장의 영상에서 모두 취합한 미세균열의 조 및 방향각의 자료(N: 82, 이하 자료 1), ② 5장의 영상에서 모두 취합한 미세균열의 조 및 방향각의 자료(N: 179, 이하 자료 2)를 상호 비교하였다. 암맥상 세립질 흑운모화강암의 경우, 암맥 A 및 B의 자료를 종합하여 자료 1(N: 15) 및 자료 2(N: 31)로 각각 구분, 상호 비교하였다. 자료 1과 자료 2의 분포형을 상호 비교하여 그 차이점을 도출, 차후 타 지역의 암체에 대한 적용 시 영상의 적절한 범위 설정에 대한 참고자료로 활용토록 하였다.

한편 각 영상에서는 분포성이 비교적 뚜렷한 미세균열을 대상으로 하였으며, 실제 분포하는 미세균열은 자

료 1 및 자료 2에 비하여 다소 증가할 가능성이 있다. 고려된 미세균열의 요소는 ① 석영 내부에서 산포상으로 분포하는 50~100  $\mu\text{m}$  크기의 미소한 장식 및 흑운모 등의 경계부에서 분포하는 미세균열, ② 석영 경계부의 미세균열이다. 미세균열의 분석절차는 Fig. 2와 같다.

석모도 일대의 중생대 화강암류에서 발달하는 18개소의 노두에서 연장성(>5~10 m)이 양호하며, 규칙적인 수직상(경사: >70°)의 일반적인 절리(common joint)의 방향 그리고 전국의 주라기 및 백악기 화강암류 석산에서 활용되는 결(미세균열)의 방향(박덕원, 2007)을 각각 측정, 이 연구의 방법론에 의하여 도출한 미세균열의 분포성과 상호 비교하였다.

### 미세균열의 유형

화강암을 구성하는 입자 경계부는 점 또는 선 접촉의 형태를 유지하며, 이러한 접촉면에서는 응력이 높게 집중되어 균열작용(microcracking)이 발생한다. 화강암의 주구성광물인 석영, 장식 및 흑운모 입자경계부

의 접촉 유형(type)에 따라 장식-석영 및 흑운모-석영 미세균열의 세분이 가능하다.

① 장식-석영 미세균열(장식-석영 접촉부에서 미세균열): 다른 성질을 갖는 광물이 외부의 응력을 받을 때, 상호간 탄성 차이에 의하여 입자경계부에서는 어느 한 광물 내부로 미세균열이 발생하는 경우(elastic mismatch induced microcracking)에 속한다(Kranz, 1983). ② 흑운모-석영 미세균열: 흑운모의 모서리에서 발생한 인장응력은 최대 압축 주응력 방향( $\sigma_1$ )에 수직으로 작용하며, 인장응력 유도 미세균열(tensile stress-induced microcrack)의 방향성은 거의 최대 압축 주응력 방향과 평행하다(Nishiyama *et al.*, 2002). 이러한 흑운모-석영 미세균열(biotite-quartz microcrack, B-Q)의 방향성과 주응력의 방향성이 상호 일치함을 보여 주는 다른 연구 사례는 Tapponier and Brace(1976), 서용석과 정교철(1999) 및 Seo *et al.*(2002) 등에서 볼 수가 있다(박덕원, 2007).

한편 미세균열을 양각으로 표현한 사진에서는 ① 흑운모와 석영 경계부 및 장식과 석영 경계부, ② 석영 내부에서 산포상으로 분포하는 미소한 흑운모 및 장식의 경계부에서 각각 선상 배열하는 다수의 미세균열의 분포성을 잘 나타내고 있다. 이 연구에서는 석영입자 내 미세균열(Intra-quartz microcrack)이 강조되었다(Fig. 2).

화강암의 석영은 일반적으로 장식에 포획된 형태를 취하며, 이러한 석영의 내부에서 발달하는 미세균열은 조립질암~극조립질암인 경우에는 육안식별이 비교적 용이하다. 그러나 석모도 일대의 중립질 화강암류를 포함한 강화도 일대의 암맥상의 세립질 화강암류에서 발달하는 미세균열의 밀도는 매우 낮아 야외에서 육안식별이 어렵다. 이러한 경우에는 실내 영상처리를 통한 미구조 해석이 보다 효과적인 것으로 생각된다.

### 미세균열의 방향성

중생대 화강암의 경우, 12 지점에서 채취한 각 암석 시료의 수평면에 대한 영상을 통하여 측정된 미세균열의 주향방향을 모두 취합,  $3^{\circ}$ ~ $10^{\circ}$  이하의 유사한 방향각의 차이를 보이는 미세균열간의 다양한 분포성을 정확히 제시하기 위하여  $2^{\circ}$  간격의 장미도로 표시하였다.

즉 ① 자료 1(시료 당 5장의 영상 중에서 임의로 선택한 1장의 영상에서 분석한 미세균열의 조 및 방향각을 종합한 자료, Fig. 3), ② 자료 2(시료 당 5장의 영상에서 분석한 미세균열의 조 및 방향각을 종합한 자료, Fig. 4)로 구분, 제시하였다.

미세균열의 방향각에 따른 조의 빈도비(자료 1/자료 2)를 압체별로 살펴 보면, 반상흑운모화강암(시료번호 1~2)이 40%, 흑운모화강암의 북부암체(시료번호 3~8)가 47.1%, 흑운모화강암의 남부암체(시료번호 9~12)가 47.2%, 전체(시료번호 1~12)가 45.8%를 각각 점한다.

한편 미세균열의 방향성에 대한 분포형태를 살펴보면, 자료 2의 경우 특정방향에 대하여 그룹을 형성하며, 각 그룹은 상호 독립적으로 분포하는 형태를 취한다. 자료 1의 경우에서도 이러한 경향성을 볼 수가 있으나, 자료 2에 비하여 그룹화 경향성이 상대적으로 낮다(Figs. 3, 4).

### 암석시료별 미세균열의 조

각 암석시료에서 분석한 미세균열의 조를 자료 1과 자료 2로 구분, 도시하였다(Fig. 5). 암석시료 1, 3, 4, 5, 9 및 10은 각 압체의 서부 그리고 암석시료 2, 6, 7, 8, 11 및 12는 각 압체의 동부에서 채취하였다(Fig. 1).

자료 1에 의한 미세균열의 조는 4~8조(평균 6.8조), 자료 2에 의한 미세균열의 조는 10~22조(평균 14.9조)의 범위를 보인다. 자료 1의 경우, 상기한 각 압체의 서부(N: 41)와 동부(N: 41)의 빈도수는 유사하나(Fig. 3), 자료 2의 암석시료 1 및 10에서는 타 암석시료에 비하여 상대적으로 빈도수가 높다(Fig. 4).

### 미세균열의 분포형

중생대의 암석시료(No. 1~12)에서 각각 분석한 미세균열의 방향을 모두 종합, ① 자료 1(Fig. 5a), ② 자료 2(Fig. 5b)로 구분, 미세균열 조의 주향을 표시하였다. 주향을 달리하는 미세균열의 조를 살펴보면, 자료 1에서는 약 39조, 자료 2에서는 약 45조로 각각 나타나며, 상호 유사한 분포상을 보인다. 미세균열 조의 빈도비(자료 1/자료 2)는 86.6%로서 비교적 높은 비율을 보이며, 자료 2와 더불어 자료 1도 미세균열의 전반적인 분포형 파악에 유용할 것으로 생각된다. 자료 2의 경우, N-E계는 23조, N-W계는 22조로 상호 유사하여 거의 모든 방향에서 발달하나 빈도수에서 차이를 보인다. 자료 1과 자료 2로 구분, 방향각별로 미세균열 조의 상호 분포성의 대비를 용이하게 하였다(Fig. 5c). 미세균열의 분포형을 살펴 보면, 자료 2에서는 밀집구간에 의하여 모두 16개의 방향각에 대하여 집중도가 높고 그룹화 현상이 뚜렷하다. 특히 영역-2와 9에서 높은 빈도수를 보인다. 자료 1의 경우에서도 분포형태는

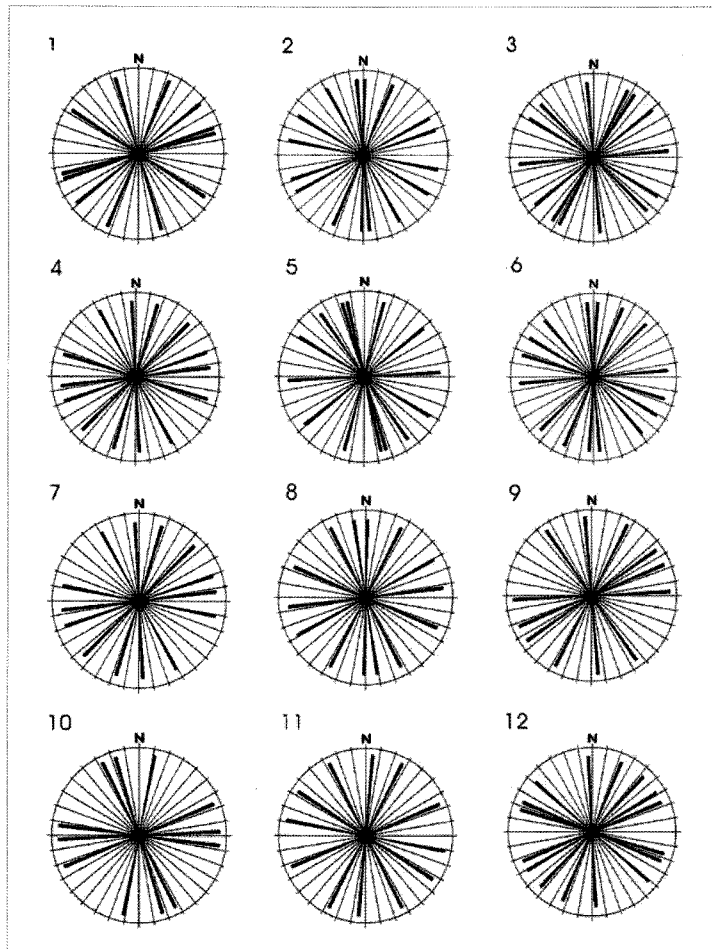


Fig. 3. Orientations of microcrack sets measured from 1 image for horizontal rock surface (N: 82). 1~2: Porphyritic biotite granite (N: 14), 3~8: Biotite granite (North rock body, N: 42), 9~12: Biotite granite (South rock body, N: 26), Rock sample numbers are same as in Fig. 1.

유사하며, 한 암체에 대한 미세균열의 전반적인 분포성을 반영하는 것으로 나타난다.

석모도의 상리 지역의 암맥 A는 폭이 약 10 m, 석포리 지역의 암맥 B는 폭이 20 cm 정도이다. 암맥 A 및 암맥 B에서 각각 분석한 미세균열의 방향성을 모두 종합, ① 자료 1(Fig. 6a), ② 자료 2(Fig. 6b)로 구분, 미세균열 조의 주향을 표시하였다. 주향을 달리하는 미세균열의 조를 살펴보면, 자료 1에서는 약 11조, 자료 2에서는 약 23조로 각각 나타나며, 미세균열 조의 빈도비(자료 1/자료 2)는 47.8%이다. 자료 2의 경우, N-W계는 9조, N-E계는 14조로 각각 나타난다. 암맥 A 및 암맥 B에 대하여 자료 1과 자료 2로 구분, 방향각별 미세균열 조의 상호 분포성을 대비하였다(Fig. 6c). 미세균열의 분포형태를 살펴 보면, 자료 2에서는 모두

17개의 영역을 형성한다. 특히 영역-1, 7, 9, 11, 13 및 17 등에서 높은 빈도수를 보이며, N60~89°W 구간에서는 미세균열의 분포성이 희박하다. 전반적으로 자료 1 및 2의 분포범위는 유사하다.

한편 후술할 석모도 일대의 절리 및 전국의 쥬라기 및 백악기 화강암류 석산에서 활용되는 결의 방향들에 대하여는 자료 2와 대비하고자 한다.

### 미세균열과 절리의 상관성

쥬라기의 반상흑운모화강암(4개소, N: 12) 및 흑운모화강암(북부암체: 9개소, N: 49, 남부암체: 4개소, N: 13)의 17개소(N: 74)에서 일반적인 수직상 절리의 방향을 측정, 한반구 투영 등면적망도(Fig. 7a) 및 장미도

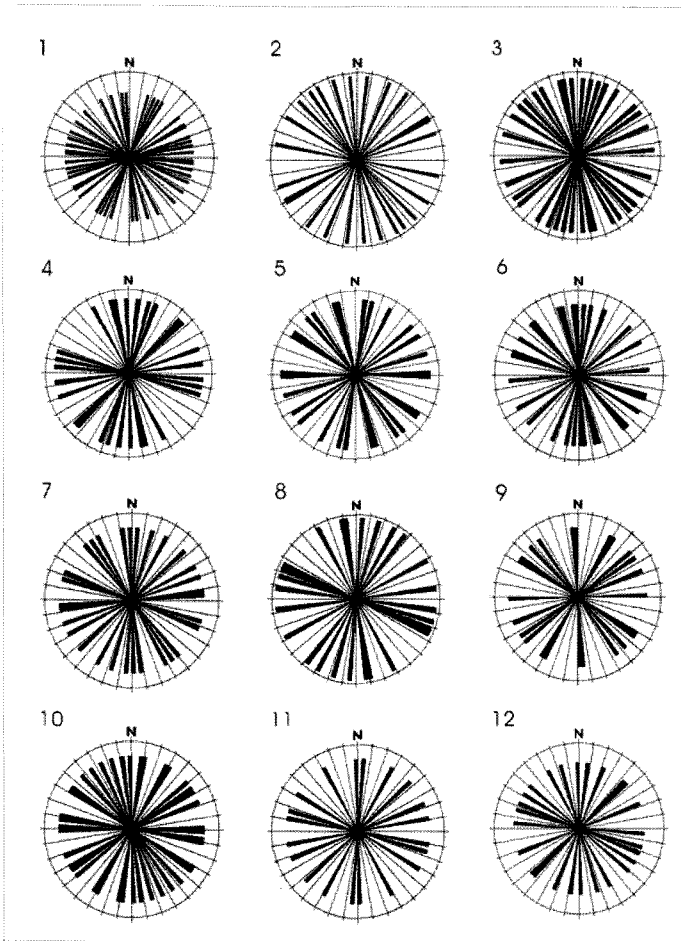


Fig. 4. Orientations of microcrack sets measured from 5 images for horizontal rock surface (N: 179). 1~2: Porphyritic biotite granite (N: 35), 3~8: Biotite granite (North rock body, N:89), 9~12: Biotite granite (South rock body, N: 55), Rock sample numbers are same as in Fig. 1.

(Fig. 7b) 그리고 미세균열의 방향에 대한 장미도(Fig. 7c)를 암체별로 구분, 작성하였다.

① 반상흑운모화강암의 분포지역에서는 분포성이 뚜렷한 6조의 절리가 분포한다. ② 흑운모화강암의 북부 암체에서는 모두 15조의 절리가 확인되며, N4°W~N42°E, N80~82°E, N38~40°W 및 N78~80°W의 방향에서 분포성이 높다. ③ 흑운모화강암의 남부암체에서는 모두 11조의 절리가 확인되며, N1~4°E, N20~22°E 및 N68~70°W의 방향에서 분포성이 높다.

한편 주라기의 반상흑운모화강암 그리고 흑운모화강암의 북부암체 및 남부암체의 절리 방향을 모두 종합한 장미도에서는 모두 18조의 절리가 확인된다(Fig. 7). 절리의 빈도수에 따른 4등급의 방향성, 즉 주방향성(1st-order), 2차적인 방향성(2nd-order) 및 3차적인 방향

성(3rd-order) 및 기타(The others) 등으로 분류하였다(Table 1).

4등급으로 분류된 절리의 방향(Fig. 7b, Table 1)과 자료 2에 의한 미세균열의 방향(Fig. 7c)을 상호 대비하였다. 즉 반상흑운모화강암체, 흑운모화강암의 북부 암체 및 남부암체로 구분, 미세균열의 분포양상을 지질시대 별로 도시하였다(Fig. 8).

미세균열-절리 상관도에서 18조의 수직상 절리는 분류한 16개 영역 즉, 유사한 방향의 미세균열의 조가 한 그룹을 형성하는 방향각의 구간 내에 분포한다. 다만 영역-2, 14 및 15에서는 타 영역에 비하여 절리의 분포성이 희박한 것으로 나타난다. 확인된 18조의 절리 중, 영역-1, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 12 및 15에 속하는 절리의 방향은 미세균열의 빈도수가 가장 밀집하는 침예한

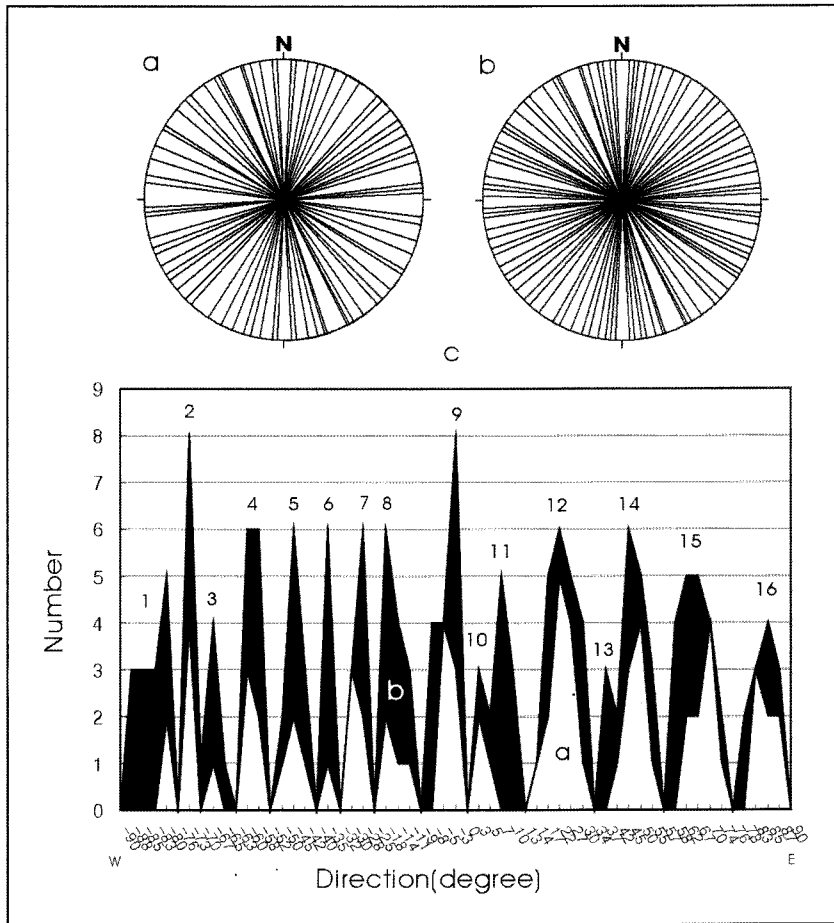


Fig. 5. Orientation data of microcrack sets measured from 1 image (a, N: 82) and 5 ones (b, N: 179) for horizontal rock surface, respectively. (a) (b) Trends of microcrack sets in Mesozoic granites. (c) Contrasts in directions of frequency of microcrack sets. 1~16: Domain.

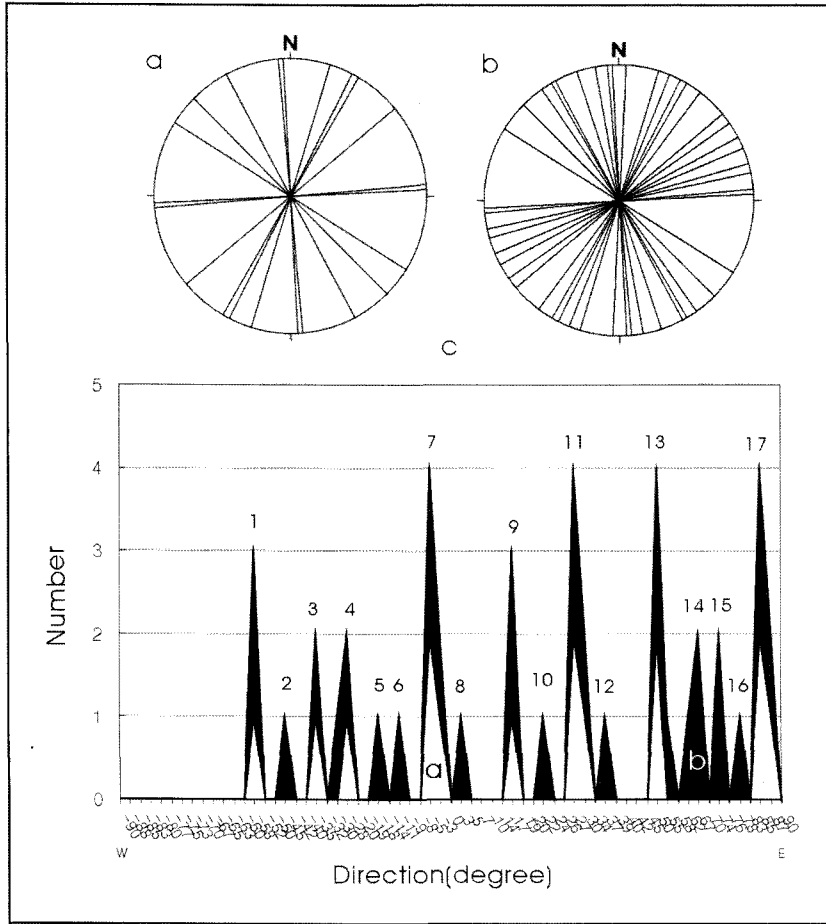
방향각과 일치하여 미세균열과 절리 상호간의 상관성을 시사한다. 한편 방향각의 분포범위가 가장 큰 N13~34°E의 구간에 속하는 영역-12 내에서는 3개 조의 절리가 분포하는 특성이 있으며, 영역-11의 경우와 같이 절리의 등급과 미세균열의 빈도수가 반드시 일치하지 않는 경우도 일부 나타난다. 한편 영역-5, 10~11 및 13~14에 속하는 절리의 방향은 미세균열의 빈도수가 가장 밀집하는 첨예한 방향각과 5° 내외의 각도 차이로 사교하여 방향성이 일치하지 않는 경우도 확인된다. 이는 기존에 형성된 절리에 비하여 시기적으로 후기에 생성된 미세균열의 존재성 그리고 지질시대를 통한 다양한 방향의 지구조 운동에 의한 기존 수직상 절리면의 완만한 방향 변화 등의 가능성을 고려해 볼 수가 있다.

화강암체 내에서 발달하는 미세균열의 연구사례에서, 거시적인 절리(macroscopic joint)의 분포성은 아문 미세균열의 분포성과 일치하는 반면, 아문 미세균열보다 시기적으로 후기에 생성된 열린 미세균열의 분포성과는 상관성이 보다 결여됨을 보여 주고 있다(Vollbrecht *et al.*, 1991). 따라서 미세균열의 분포성과 거의 일치하는 석모도 일대의 절리는 대체로 아문 미세균열(healed microcrack)과 성인적으로 상관성이 있음을 유추할 수가 있다.

### 미세균열의 영역 분대

- ① 자료 2에 근거한 석모도의 각 암체별 미세균열의 조,
- ② 전국의 주라기 및 백악기 화강암의 단위 석산





**Fig. 6.** Orientation data of microcrack sets measured from 1 image (a, N: 15) and 5 ones (b, N: 31) for horizontal rock surface, respectively. (a) (b) Trends of microcrack sets in dykes. (c) Contrasts in directions of cumulative frequency of microcrack sets. 1~17: Domain.

에서 채석면으로 이용되는 수직 결의 조를 시대별로 구분, 제시하였다. 즉 3°~10° 이하의 유사한 차이를 보이는 주향방향의 분포성을 가능한 모두 제시하기 위하여 2° 간격의 장미도를 작성, 석모도의 암체별 미세균열 및 시대별 수직 결의 조를 각각 결정하였다. 한편 석모도의 암체별 미세균열의 조 그리고 주라기 및 백악기 화강암의 수직 결의 조에 대하여 Set a, Set b, Set c 및 Set d로 구분하였다. (1) Set a: 석모도의 각 암체별로 구분, 도출된 미세균열 조의 단순 합계치 그리고 주라기 및 백악기의 단위 석산에서 측정된 결의 조의 단순 합계치, (2) Set b: Set a에 대한 2° 간격의 장미도를 작성, 주향방향을 달리하는 조, (3) Set c: Set b에 대한 2° 간격의 장미도를 작성, 주향방향을 달리하는 석모도 전체에 대한 미세균열의 조(45조) 그리고 전

국의 수직 결의 조(33조), (4) Set d: Set c에 대한 2° 간격의 장미도를 작성, 주향방향을 달리하는 조(50조)를 각각 의미한다. 한편 석모도 전체의 미세균열 및 전국의 화강암 석산에서 활용되는 결의 조를 종합, 최종적으로 주향방향을 달리하는 조는 모두 약 50조 내외로 산출되었다. 이들 각 조는 방향각에 따라 빈도수를 달리하며, 미세균열-결의 상관도 작성의 주요 근거가 된다(Table 2).

미세균열-결의 상관도에서 방향각에 따른 빈도수의 밀집구간에 의하여 크게 16개의 영역으로 분류하였다. 특히 영역-1, 8, 9, 12 및 16은 세분화하여 총 22개 영역으로 구분된다. Fig. 9에서 제시한 각 방향각 별 미세균열의 분포특성은 이러한 영역 세분화의 주요 근거가 될 수가 있다.

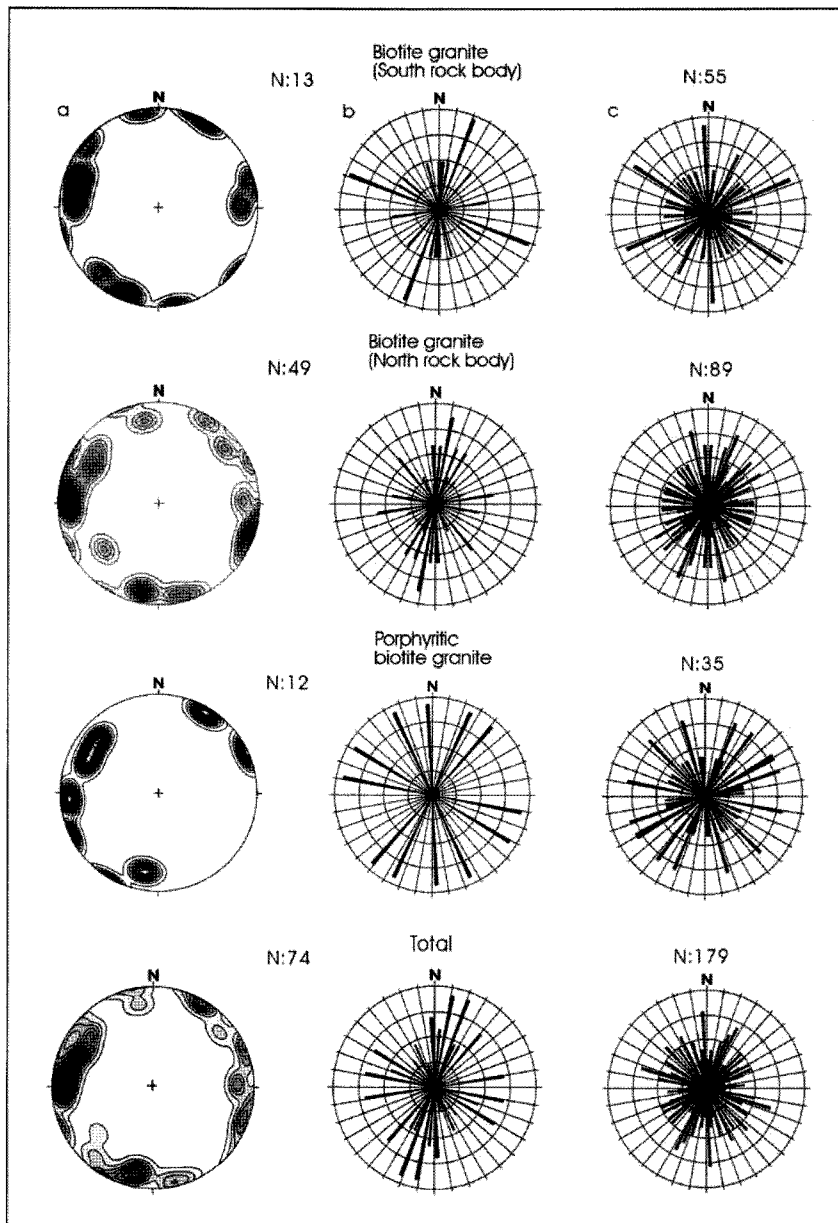


Fig. 7. Contrasts in orientations of microcrack sets with those of common joints by each rock body. (a) Lower-hemisphere equal-area projection of common joints, (b) (c) Rose diagram for orientations of common joints (b) and microcrack sets (c).

Table 1. Orientations of vertical joints in Jurassic granites by frequency orders.

1st-order (2 sets)	2nd-order (7 sets)	3rd-order (5 sets)	The others (4 sets)
N10~12°E, N20~22°E	N4~6°E, N40~42°E N80~82°E, N1~2°W, N2~4°W, N58~60°W, N78~80°W	N24~26°E, N30~32°E, N24~26°W, N38~40°W, N68~70°W	N1~2°E, N70~72°E, N16~18°W, N48~50°W

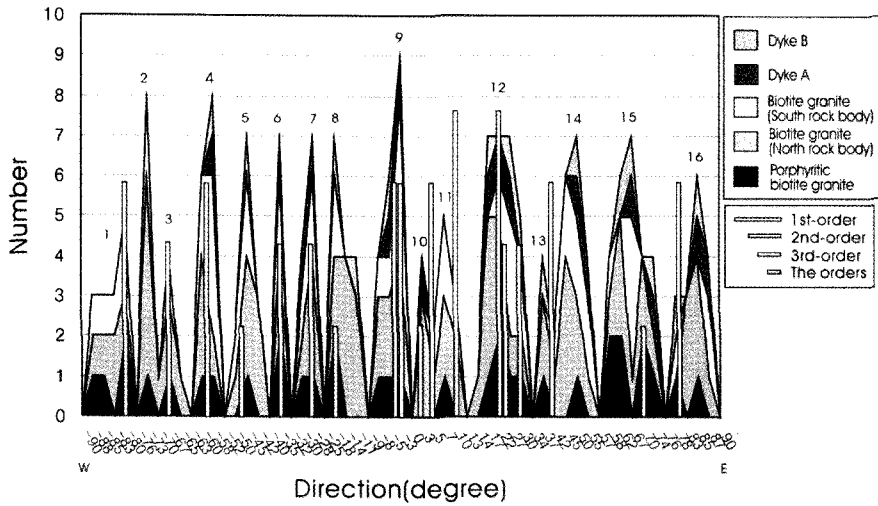


Fig. 8. Contrasts in directions of cumulative frequency of microcrack sets by each rock body with those of common joints by frequency orders. Rock body names are same as in Fig. 1. Directions of vertical joints by frequency orders are same as in Table 1 and Fig. 7b. 1~16: Domain.

석모도 일대의 중생대 화강암 내에는 시기적으로 후기인 암맥 A 및 B에서 생성된 미세균열을 내포하며, 석모도의 중생대 화강암의 각 영역 내에 자연스럽게 놓이는 분포특성을 보인다(Fig. 8).

한편 이 연구의 방법론에 의하여 도출된 미세균열의 방향(자료 2)은 암석시료에서 발달하는 미세균열의 다양한 방향을 측정 한 자료이다. 반면, 국내 주라기(27조) 및 백악기(17조) 화강암류의 수직 결(1번 및 2번 면, rift

and grain planes)의 방향은 전국의 단위 석산(N: 100)에서 가장 대표적인 한 방향만을 종합한 자료이다(박덕원, 2007). 전국의 주라기 및 백악기 화강암의 수직 결과 자료 2의 분포성을 상호 대비한 결과, 전반적으로 분포성이 거의 유사하다는 사실은 주목할 만하다. 다만 수직 결의 방향성은 석모도의 중생대 화강암에서 발달하는 다양한 방향성을 모두 대변하지는 못하는 것으로 나타난다. 그러나 이 연구의 방법론에 의하여 도출된 미세

Table 2. Microcrack sets in each rock body.

Rock type	Site No.	Microcrack				Remarks
		Set a	Set b	Set c	Set d	
Dyke B	1	16				
Dyke A	1	15	23			
Biotite granite	South rock body	4	55	30		Seokmo-do
	North rock body	6	89	42	45	
Porphyritic biotite granite	2	35	28		50	
Total	14	210	131			
Cretaceous granites	17	17	17			Vertical rift and grain planes in Jurassic and Cretaceous granite quarries, Korea
Jurassic granites	83	88	27	33		
Total	100	105	44			
Total	114	315	175	78	50	

\*Set a: All microcrack sets developing in each rock body, Set b: Microcrack sets showing different directions by each rock body, Set c: Microcrack sets showing different directions in Seokmo-do and Korea, respectively, Set d: All microcrack sets showing different directions.

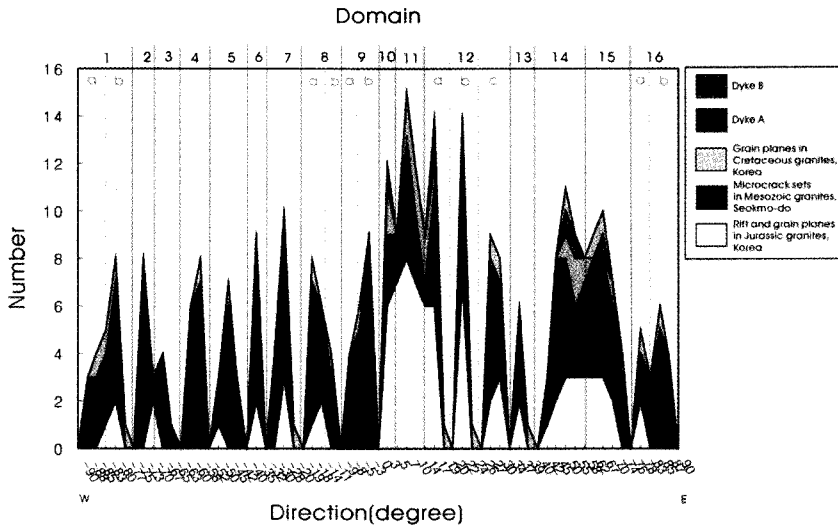


Fig. 9. Contrasts in directions of cumulative frequency of microcrack sets in Seokmo-do with those of vertical rift and grain planes in Korea. 1-16: Domain.

균열의 분포성과 전국의 단위 석산에서 측정된 수직 결의 분포성은 대체로 일치한다. 이들 양자는 거의 모든 방향으로 분포하나 특정 방향각에 대하여 빈도수가 급격히 증가하는 분포 특성을 보인다. 따라서 석모도의 중생대 화강암 및 암맥 A 및 B에서 발달하는 미세균열의 분포성은 석모도 주변부를 포함한 국내의 중생대 및 백악기 화강암에서 발달하는 미세균열의 분포성을 반영할 가능성이 크다고 볼 수 있다. 미세균열-결의 상관도에서는 시기적으로 중생대 이후에 생성된 모든 미세균열을 내포하므로 도출된 미세균열의 개개 조에 대하여 선후관계를 규명하기는 어렵으며, 여러 지역의 생성시기를 달리하는 화강암류 암체에 대한 미세균열의 분포형을 파악, 상호 대비해 볼 필요가 있다.

미세균열의 연구사례에서는 미세균열의 생성 당시에 작용한 응력장의 규명에 유용한 수단이 될 수 있음을 보여주고 있다(Plumber *et al.*, 1984; Lespinasse *et al.*, 1986; Vollbrecht *et al.*, 1991; 김영화 외, 1996; Wise, 2005). 따라서 석모도 일대의 미세균열 및 국내 수직 결의 상관도에서 제시한 미세균열의 방향은 광역적 또는 국지적인 최대 압축 주응력의 방향( $\sigma_1$ )을 의미하며, 분류한 16개 영역 내의 각 미세균열의 조는 특정시기의 응력장 또는 응력장의 중첩을 시사한다(Fig. 9).

토 의

기존의 연구사례에서 규명된 미세균열의 영역 대비:

한편 국내의 각 시대별 화강암체에서 발달하는 유체포 유물에 의한 아문 미세균열의 생성시기 및 방향을 규명한 연구사례를 통하여 미세균열-결의 상관도(Fig. 9)에서 제시한 각 영역 별 대비를 시도하였다. 각 지역의 단위 암체에 대한 미세균열의 분포형을 도출하면 보다 정확한 영역분대 및 대비가 예상된다.

① 소백산 육괴 동북부 영주 화강암 내의 아문 미세균열에 대한 연구에서는 가장 우세한 N20~30°W와 국부적인 N20~30°E 방향의 미세균열이 중생대 중기에 형성되었다(정해식과 장보안, 2004). 전자의 방향은 영역-7 그리고 후자는 영역-12b~c에 각각 속한다. ② 월악산-속리산 일대 화강암체 내의 아문 미세균열에 대한 연구에서, 월악산 지역에서는 N45°W 및 N5°E 방향 등의 미세균열이 120~90 Ma 무렵, 속리산 지역에서는 NS 방향 등의 미세균열이 110~80 Ma 무렵에 각각 형성되었다(장보완과 김정애, 1996). 월악산 지역의 경우, 전자의 방향은 영역-5, 후자는 영역-10~11에 각각 속한다. 속리산 지역의 경우, 영역 9~11에 각각 속한다. ③ 마산 및 양산 일대의 백악기 화강암류의 아문 미세균열에 대한 연구에서는 백악기-제3기의 초기에 이르는 기존의 응력장 해석의 연구 결과를 일목요연하게 정리한 도표를 볼 수가 있다. 특히 (1) 마산, (2) 진해, (3) 구포, (4) 양산 화강암 지역에서는 각각 (1) 87~78 Ma 무렵에 N75°W 및 N10°E, (2) 64~62 Ma 무렵에 N65°W, (3) 62~59 Ma 무렵에 N20°E, (4) 64~59 Ma 무렵에 N40°E 방향의 미세균열이 형성되었다

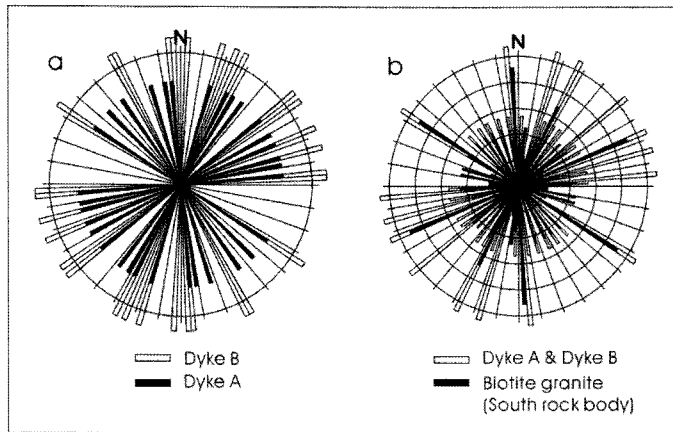


Fig. 10. Trend of microcrack sets in dyke A, dyke B and biotite granite. (a) Composite rose diagram for orientations of microcrack sets in dyke A and dyke B. (b) Composite rose diagram for orientations of microcrack sets by rock body.

(장보완과 정해식, 2005). 각 암체 별 미세균열의 방향을 대비하여 보면, (1) 마산 화강암 지역은 영역-1b~2 및 영역-11, (2) 진해 화강암 지역은 영역-3, (3) 구포 화강암 지역은 영역-12, (4) 양산 화강암 지역은 영역-13~14에 각각 속한다.

한편 16개의 영역 내에는 기존의 아문 미세균열을 포함하여 시기적으로 후기에 생성된 열린 미세균열을 모두 내포하여 빈도수는 증가한다. 따라서 기존의 연구에서 제시한 아문 미세균열만을 고려한 우세방향에 비하여 특정 방향각에 대한 집중도는 상대적으로 낮을 것으로 생각된다. 한편 각 영역의 미세균열에 대한 정확한 생성시기를 지질시대별로 정리하기는 어려우나, 각 영역에서는 기존의 연구에서 규명된 아문 미세균열의 분포성을 반영한다는 배경하에 상호 대비를 시도하였다. 최소한 특정방향의 미세균열에 대한 영역부여를 통하여 미세균열-결의 상관도에서 제시한 영역분대에 대한 적용성의 의미를 모색할 수가 있다.

**암맥과 남부암체의 비교:** 자료 2에 의한 암맥 A(15 조)와 암맥 B(16조)에서 상호 방향을 달리하는 미세균열의 분포성에 대하여 상호 비교하였으며, 흑운모화강암의 남부암체(30조)에서 분포하는 미세균열의 분포성 과도 비교하였다(Fig. 10). 한편 생성시기를 달리하는 다양한 암맥에 대한 미세균열의 분포성을 파악할 필요성도 내재한다. 이 연구에서는 9.5 km의 거리에 위치하는 2 암맥의 분포형을 상호 대비하여 차이점을 도출하였다. 이러한 대비를 통하여 타 지역의 암맥에 대한 적용 시 하나의 연구사례로 활용토록 하였다.

석모도 일대에서는 NS 방향의 암맥군이 일반적인

반면, 암맥 A의 주향은 N75°W(WNW), 암맥 B의 주향은 N18°W(NNW)로 암맥 A 및 B는 NW 방향의 암맥에 속한다. 암맥 A 및 B에서 발달하는 미세균열의 분포성은 상호 거의 유사하며, 공통적으로 N60~89°W 방향에서는 분포성이 희박하다. 전반적으로 NE 방향에서 우세한 분포 특성을 보이며, 특히 NW(9조) 보다는 NE(14조) 방향에서 미세균열 조 간의 간격이 조밀하게 나타난다(Fig. 10a). 이들 암맥의 경우, 지구조적 응력 뿐만 아니라 냉각에 의한 균열작용도 주요하게 작용하였을 것으로 판단된다.

한편 남부암체에서는 시기적으로 후기인 암맥 A 및 B에서 생성된 미세균열을 내재한다. 전반적으로 방사형의 분포성을 보이며, 특히 암맥 A 및 B에 비하여 N60~89°W 방향에서 미세균열의 분포를 보이는 차이점을 볼 수가 있다. 암맥 A 및 B 그리고 남부암체의 자료를 투영한 장미도에서도 NW 방향에 비하여 NE 방향에서 미세균열의 분포성이 뚜렷하다(Fig. 10b).

한편 ① 한반도 남동부에서 작용하는 현생 응력장의 연구에서 평균 최대 수평 주응력은 N66°±31°E의 방향(이준복과 장창동, 2007), ② 한반도 동남부 제3기 어일분지 및 와읍분지의 지구조 운동 연구에서 현생 응력장은 동-서 내지 동북동-서남서의 방향(5 Ma-현재)으로 각각 기재하였다(장태우 외, 2007). 암맥 및 남부암체 내의 NE 방향의 미세균열은 상기한 현생 응력장의 방향과 평행 내지는 예각으로 배열한다. 반면에 현생 응력장의 방향과 대체로 직교 또는 둔각으로 배열하는 NW 방향에 비하여 상대적으로 미세균열의 신규 생성 내지는 기존 미세균열의 성장을 반영한 것으로 생각된다. 즉, 상기한 연구사례에서 나타난 현생 응력

장의 방향들과 상호 유사한 방향의 미세균열의 생성 후, 점차적인 압력해방에 의한 기존 미세균열의 성장 과정을 거쳐 나타난 일련의 결과물일 가능성을 배제할 수 없다. 또한 전국의 백악기 화강암에서 발달하는 수직 결의 광역 분포도(박덕원, 2007)에서도 NE 방향에 비하여 NW 방향에서는 상대적으로 결의 분포성이 미약하여 상기한 암맥 내부의 미세균열의 분포성과 상호 유사한 분포특성을 도출할 수가 있다.

## 결 론

강화군 석모도 일대의 중생대 화강암 및 암맥상의 세립질 흑운모화강암에서 발달하는 미세균열의 조 및 방향을 측정, 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 미세균열의 분석 방법론에 의하여 자료 1과 자료 2로 구분, 미세균열의 방향각 별 분포성을 상호 비교하였다. 각 암석시료에서 도출된 미세균열의 평균 조를 보면, 자료 1에서는 약 7조, 자료 2에서는 약 15조로 각각 나타난다. 자료 1과 자료 2 사이의 미세균열의 분포형은 상호 유사하며, 측정치가 상대적으로 낮은 자료 1도 그 효용성을 반영한다.

2. 중생대의 반상흑운모화강암체, 흑운모화강암의 북부암체 및 남부암체에서 분포하는 18조의 수직상 절리와 자료 2에 의한 미세균열과의 분포성을 상호 비교하였다. 미세균열-절리 상관도에서 절리는 빈도수가 가장 높은 첨예한 방향각과 일치하는 경향성을 보여 상호간의 상관성을 유추할 수 있다. 이 연구에서 제시한 방법론에 의한 미세균열의 분포성은 한 암체에 대한 수직상 절리분포의 파악에 대한 유용성을 시사한다.

3. 자료 2에 의한 미세균열의 방향과 전국의 중생대 및 백악기의 화강암 석산에서 측정된 수직 결의 방향에 대한 상관도를 작성하였다. 상관도에서는 방향을 달리하는 약 50조의 미세균열 및 결의 방향각을 표시하였으며, 빈도수의 밀집구간에 의거 16개 영역으로 분류하였다. 이들의 분포형은 석모도 주변부를 포함한 국내의 중생대 및 백악기 화강암에서 발달하는 미세균열의 분포특성을 반영할 가능성이 있다.

4. 강화군 석모도 일대의 암체 별 미세균열의 분포형은 상이하며, 지질시대 별 응력성을 간접적으로 반영한다. 한편 국내의 각 시대별 암체에 대한 분포형과 보다 많은 대비가 필요하다.

## 사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 지하수지열연구부에

서 수행중인 ‘지열수 자원 실용화 기술 개발연구’와 관련하여 수행되었습니다. 또한 이 논문의 심사과정에서 유익한 조언과 문제점을 상세하게 지적해 주신 익명의 두 분 심사위원님에게 깊은 사의를 표합니다.

## 참고문헌

- 김영화, 장보안, 박상욱, 1996, 양산단층 지역의 화강암체 내에 분포하는 열린 미세균열과 경상분지의 고응력장. 대한지질학회지, 32, 367-378.
- 박덕원, 2007, 국내의 중생대 화강암류에서 발달하는 수직의 1번 및 2번 면의 방향성. 한국암석학회지, 16, 12-26.
- 박덕원, 김형찬, 이창범, 홍세선, 장세원, 이철우, 2004, 포천지역의 중생대 화강암에 발달된 결의 특성. 한국암석학회지, 13, 133-141.
- 서용석, 정교철, 1999, 수침삼축압축하에서 관찰되는 화강암의 미세 파괴. 대한지질공학회지, 9, 243-251.
- 이준복, 장찬동, 2007, 한반도 남동부의 현생 응력장. 대한지질공학회지, 17, 299-307.
- 이병주, 김유봉, 이승렬, 김정찬, 강필종, 최현일, 진명식, 1999, 한국지질도(1:250,000), 서울-남천점도폭 설명서, 과학기술부, 64p.
- 이승구, 김동권, 이진수, 송윤호, 2006, 강화 석모도 화강암류와 온천수의 지구화학: 온천수의 기원규명을 위한 Sr 동위원소의 응용. 한국암석학회지, 15, 61-71.
- 장보안, 김정애, 1996, 월악산-속리산 일대 화강암체내에 분포하는 아문 미세균열 및 유체포유물에 의한 중생대 백악기 고응력장. 지질학회지, 32, 291-301.
- 장보안, 정해식, 2005, 마산 및 양산 일대의 백악기 화강암류의 아문 미세균열과 유체포유물 연구를 통한 백악기 및 신생대 고응력장 분석. 지질학회지, 41, 59-72.
- 장태우, 정재혁, 장천중, 2007, 한반도 동남부 제3기 어일 분지 및 와읍분지의 지구조 운동. 대한지질공학회지, 17, 27-40.
- 정해식, 장보안, 2004, 소백산 육괴 동북부 영주 화강암 내의 아문 미세균열 및 유체포유물을 이용한 중생대 고응력장 연구. 지질학회지, 40, 179-190.
- 황재하, 김유홍, 2005, 한국지질도(1:50,000), 강화·온수리도폭 및 설명서, 한국지질자원연구원, 46 p.
- Holzhausen, G.R., 1989, Origin of sheet structure, 1. Morphology and boundary conditions. Engineering geology, 27, 225-275.
- Krantz, R.L., 1983, Microcracks in rocks. Tectonophysics, 100, 449-471.
- Lespinasse, M., Pecher, A., 1986, Microfracturing and regional stress field: a study of the preferred orientations of fluid-inclusion planes in a granite from the Massif Central, France. Journal of Structural Geology, 8, 169-180.
- Nishiyama, T., Chen, Y., Kusuda, Ito, T., Kaneko, K., Kita, H. and Sato, T., 2002, The examination of fracturing process subjected to triaxial compression test in Inada granite. Engineering Geology, 66, 257-269.

- Peng, S., 1970, Fracture and failure of Chelmsford granite. Ph. D. dissertation, Dept. Mineral Engineering, Stanford University.
- Peng, S. and Johnson, A.M., 1972, Crack growth and faulting in cylindrical specimens of chelmsford granite. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 9, 37-86.
- Plumb, R., Engelder, T. and Yale, D., 1984, Near-surface in-situ stress, 3. Correlation with microcrack fabric within the New Hampshire. Journal of Geophysical Research, 89, 9350-9364.
- Seo, Y.S., Jeong, Kim, G.C. and Ichikawa, Y., 2002, Microscopic observation and contact stress analysis of granite under compression. Engineering Geology, 63, 259-275.
- Simmons, G. and Richter, D., 1976, Microcrack in rock, in R. J. C. Sterns, ed., The physics and chemistry of minerals and rocks. Wiley-Interscience, Newyork, N. Y., 105-137.
- Solberg, P.H., 1975, The influence of microcracks on sheet jointing in four New England granites. Abstract Transamerica Geophysics Union, 56, 444.
- Tapponnier, P. and Brace, W.F., 1976, Development of stress-induced microcracks in Westerly granite. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts, 13, 103-111.
- Vollbrecht, A., Rust, S. and Weber, K., 1991, Development of microcracks in granites during cooling and uplift: examples from the Variscan basement in NE Bavaria, Germany. Journal of Structural Geology, 13, 787-799.
- Wise, D.U., 2005, Rift and grain in basement: thermally triggered snapshots of stress fields during erosional unroofing of the Rocky mountains of Montana and Wyoming. Rocky mountain geology, 40, 193-209.

---

(2007년 6월 14일 접수; 2007년 7월 18일 채택)