

경상분지 남서부 일대의 불국사 화강암류에서 발달하는 미세균열의 방향성

박 덕 원*

한국지질자원연구원 국토지질연구본부, 대전광역시 유성구 과학로 92, 305-350

Microcrack Orientations in Bulgugsa Granites from Southwestern Gyeongsang Basin

Deok-Won Park*

Geological Research Division

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

요약: 경상분지 남서부 일대의 불국사 화강암류에서 분포하는 미세균열의 전반적인 분포특성을 규명하였다. 사천시-고성군, 거제시 및 남해군 지역에서 채취한 11개 암석시료의 수평면 상에서 발달하는 131조의 미세균열은 영상처리를 통하여 구별하였다. 다음에 이들 미세균열 중, 뚜렷한 선상배열을 갖는 45조의 미세균열을 선별하였다. 이들 미세균열은 수직의 2번 면에 대비된다. 이들 45조의 미세균열의 방향성과 국내의 주라기 및 백악기 화강암류에서 발달하는 수직의 1번 및 2번 면의 방향성을 대비하였다. 분포도에서 45조의 미세균열과 이들 수직 면의 분포형태가 일치한다는 사실은 연구지역 일대에서 발달하는 미세균열의 계는 국내의 주라기 및 백악기의 화강암에서도 광역적으로 발달함을 시사한다. 방향각-빈도수 상관도의 전 영역은 미세균열의 분포상에 의하여 20개의 영역으로 분류할 수가 있다. 한편 45조의 미세균열이 속하는 18개의 방향각 영역과 기존의 연구결과에서 시사한 최대 압축 주응력의 방향과 상호 대비를 시도하였다. 최대 압축 주응력의 방향은 대부분 방향각 영역-1~2, 5~6, 11~15, 17~18 및 19~20에 각각 속하며, 이들 영역은 이들 45조의 미세균열의 장미도에서 제시한 주방향 및 2차적인 방향과 일치한다. 열린 미세균열의 대표적인 방향은 기존의 연구에서 시사한 최대 압축 주응력 방향을 반영한다.

주요어: 불국사 화강암류, 영상처리, 열린 미세균열, 최대 압축 주응력의 방향

Abstract: We have studied general orientational characteristics of microcracks distributed in Bulgugsa Granites of southwestern Gyeongsang Basin. Microcracks of 131 sets, which were developed on horizontal surfaces of 11 rock samples collected from Sacheon-Gosung, Geoje-si and Namhae-gun areas, were distinguished by image processing. Then, 45 sets with a distinct linear array on image were sorted out. These microcracks can be comparable with vertical grain planes. Orientations of these microcracks were compared with those of vertical rift and grain planes developed in Cretaceous and Jurassic granites of Korea. In the distribution chart, the agreement of the distribution pattern between microcracks of 45 sets and above vertical planes suggests that microcrack systems developed all over the study area also occur regionally in Cretaceous and Jurassic granites of Korea. Whole domain of the directional angle-frequency chart can be divided into 20 domains in terms of the phases of the distribution of microcracks. Meanwhile, 18 domains from 45 sets of microcracks were compared with the maximum principal stress orientations suggested from previous studies. The majority of maximum principal stress orientations pertain to domain-1~2, 5~6, 11~15, 17~18 and 19~20, and these domains are coincident with the orientation of the 1st and 2nd-frequency orders represented in a rose diagram for 45 sets of microcracks. Representative orientations of open microcrack reflect the maximum principal stress orientations suggested in previous studies.

Key words: Bulgugsa granites, image processing, open microcrack, maximum principal stress orientation

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

서 론

결정질암에서는 일반적으로 복잡한 지질학적 과정 및 변화하는 조건에 의하여 형성된 미세균열의 계(microcrack system)가 발달하며(Krantz, 1983), 미세균열에 대한 자세한 연구를 통하여 (최근) 지각진화(late crustal evolution)의 다양한 단계에 대한 정보를 얻을 수가 있다(Vollbrecht *et al.*, 1991). 특히 화강암질암류에 대한 심도별 응력 조건에 따른 미세균열의 연속적인 생성모델에서도 아문 미세균열(healed microcrack) 생성 후 비교적 천부에서 수직상의 열린 미세균열(open microcrack)의 생성을 보여 주고 있으며, 이를 미세균열은 생성 당시에 작용한 응력장의 규명에 유용한 수단이 된다(Vollbrecht *et al.*, 1991; Wise, 2005).

이와 같은 유사한 연구사례는 Plumber *et al.*(1984), I.espinasse *et al.*(1986), 김영화 외(1996), 장보안과 정해식(2005) 등에서도 볼 수가 있다. 위에서 제시된 화강암의 미세균열과 관련된 국내외의 연구에서는 석영입자 내부에 발달해 있는 미세균열을 대상으로 하고 있다.

이 연구에서는 경상분지 남서부에 속하는 사천시-고성군, 거제시 및 남해군 일대의 불국사 화강암류에서 채취한 암석시료의 수평면에 대한 영상처리를 실시, 미세균열의 조 및 방향각에 대해서 실내 분석을 실시하였다. 이 연구에서 수행한 신속하고 간편한 방법론에 의하여 도출된 지역별 미세균열의 분포성을 종합, 연구지역 일대의 전반적인 분포 특성을 도출하였다. 또한 각 영역에 속하는 빈도등급 별 미세균열과 전국의 중생대 화강암류 석산에서 발달하는 수직 결(박덕원, 2007a)과의 영역 대비를 실시, 분포성을 상호 비교하였다. 특히 박편관찰을 통하여 배열성이 뚜렷한 열린 미세균열의 방향과 아울러 연구지역과 인접하는 경상분지를 대상으로 한 기존의 연구결과에서 시사한 백악기 이후의 최대 압축 주응력의 방향(김영화 외, 1996; 장태우 외, 2007; 이민주 외, 2008)과의 상호 대비를 시도하였다. 이상 도출한 개개 미세균열의 존재 그리고 이들이 군집을 이루어 형성하는 다양한 분포형에 대한 신빙성의 검토를 위하여 미세균열의 다양한 계를 반영하는 각 영역의 지구조적 의미를 최종적으로 부여하였다.

지질개요

연구지역은 행정지역상 경상남도 사천시, 고성군, 거제시 및 남해군의 일부에 각각 속한다. 상기한 지역은 1:50,000 축척의 거제·울포도폭(원종관 외, 1980), 삼천포도폭(지정만 외, 1983), 충무도폭(장태우 외, 1983)

및 남해·서상도폭(장기홍 외, 1989) 그리고 광역적인 1:250,000 축척의 목포·여수도폭(최범영 외, 2002)의 일부에 각각 해당한다. 이 지역은 백악기 경상분지의 연장에 놓이며, 경상누층군을 이루는 지층들의 유형은 밀양소분지형의 것들로 이루어진다. 경상누층군은 하위로 부터 신동층군, 하양층군 및 유천층군으로 구분된다(장기홍, 1975, 1977).

연구지역 내에는 신동층군의 진주층, 하양층군의 칠곡층, 신라역암층, 함안층 및 진동층 그리고 유천층군의 고성층, 중성 산성화산암류, 장목리층 및 장평리층 그리고 산성화산암류 등이 분포한다. 주 연구대상암인 후기 백악기의 관입암류는 각섬석 화강암, 흑운모 화강암 및 알카리장석 화강암 및 반암류 등으로 대별된다(최범영 외, 2002). 이들 암층들은 연구지역 일대의 기반암을 형성하며, 제4기층인 충적층은 주로 자갈과 모래로 구성된 퇴적층으로 여러 지층을 피복한다(Fig. 1).

① 각섬석 화강암의 경우, 삼천포도폭 지역에서는 흑운모 화강섬록암 및 각섬석 화강섬록암 그리고 충무도폭 지역에서는 화강섬록암 및 섬록암 등으로 구분되었으나 구성광물에 각섬석이 함유되어 각섬석 화강암으로 설정하였다. 이 화강암의 주구성광물은 정장석, 미사장석, 사장석, 석영, 각섬석 및 흑운모 등이고 부성분광물은 녹나석, 백운모, 견운모, 저콘 및 인회석 등이다(최범영, 2002). 한편 사천시 와룡산(799 m) 일대에서는 마그마 불균질 혼합에 의하여 화강암류의 조성이 변화하며, 반상화강암, 반상 화강섬록암 및 세립질 화강암 등으로 세분된다. 이 중 와룡저수지 일대에서 분포하는 담홍색 반상화강암(암석시료: 1)의 반정은 사장석, 석영 및 각섬석 등으로 평균 41.4%의 함량비, 석기는 석영, 정장석 및 흑운모 등으로 58.6%의 함량비를 가진다(김건기 외, 2005).

② 흑운모 화강암은 거제시 일대에서 암주상의 관입체로 분포한다. 이 암석은 거제시 서부 및 남부 일대에서 남북으로 길게 분포하는 거제 화강암 그리고 거제시 동부에 속하는 장목면 및 일운면 일대의 지세포 화강암으로 세분된다. 거제 화강암과 지세포 화강암은 직접 접촉하지 않아 상호 선후관계를 파악하기는 곤란하다. 거제 화강암은 흑운모 화강암, 각섬석 화강암 및 화강섬록암 등으로 구분되며, 각섬석의 함량에 따라 흑운모 화강암은 각섬석-흑운모 화강암 또는 각섬석 화강암으로 점이적으로 변화한다. 지세포 화강암은 흑운모 화강암과 각섬석-흑운모 화강암으로 구성되며, 이들의 성질은 거제 화강암과 유사하다(원종관 외, 1980). 한편 거제도에 분포하는 화강암류에 대한 자세한 암석학적인 연구에서 거제 화강암에 속하는 흑운모-각섬석

화강암의 주구성광물은 정장석, 석영 및 사장석 등이며 소량의 각섬석, 흑운모, 녹니석, 녹염석 및 자철석 등을 함유한다.

지세포 화강암은 Q-P-A 삼각도에서 화강암류의 영역에 점시되며, 주구성광물은 사장석, 석영, 알칼리장석, 각섬석 및 흑운모이며, 소량의 녹니석, 녹염석 및 자철석 등이 함유되어 있다(이준희와 이상원, 1999). 거제도 화강암질암은 조직 및 함량에 따라 다양한 암상으로 변화하여 화강암류, 반상 화강암류, 반상 화강암, 등립질 화강암, 미문상 화강암 및 일칼리장석 화강암의 여섯 가지 암상으로 분류되며, 큰 특징으로는 염기성 미립 포유암(mafic microgranular enclave)을 함유한다. 이는 산성질 마그마에 염기성 마그마가 불균일하게 혼합(mingling)된 결과이다(김종선 외, 1998; 김

종선과 이준동, 2000). 거제도 지역의 화강암류에 대한 절대연대 측정자료는 아직 보고되어 있지 않기 때문에 정확한 생성연대를 확인할 수는 없다. 지리적 위치와 암석학적 유사성을 보이는 고성지역 화강암류의 Rb-Sr 연대(좌용주, 1998)는 71.3 ± 6.8 Ma로 알려져 있어 거제도 지역의 화강암류도 이와 유사한 시기에 관입한 것으로 생각된다(암석시료: 3, 4, 5, 6).

③ 알칼리장석 화강암은 남해도의 남부 일대에 분포한다. 암색은 전형적인 흥색 계통으로 중립 내지는 조립질의 암석 내에는 1~5 mm 크기의 정동이 분포한다(암석시료: 8, 9). 이 암석의 주구성광물은 석영, 정장석, 사장석 및 흑운모 등이다. 그외 소량의 각섬석, 자철석, 녹니석, 칼슘석 및 견운모 등을 함유한다. 석영은 반자형 내지 타형으로서 정장석과 함께 미문상 석

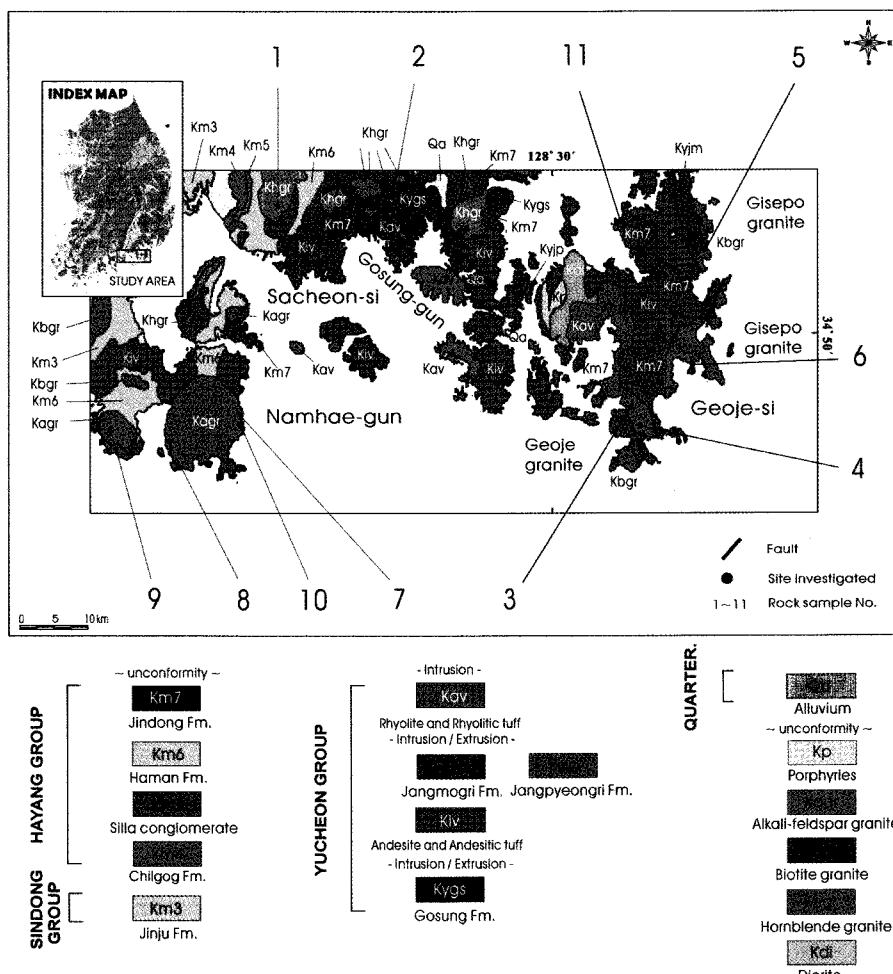


Fig. 1. Regional geological map (after Choi *et al.*, 2002) and rock sample location in the study area.

리를 잘 나타낸다. 한편 남해지역의 이 암석은 비교적 얕은 곳(5~7 km)에 정치되어 빠른 결정화작용에 의하여 형성되었다(김희남, 1992).

④ 반암류에는 석영반암, 화강반암 및 장석반암 등이며 소규모 관입체로 발달한다. 연구대상인 전형적인 장석반암에서는 0.5 mm 크기의 담홍색 장석의 반정이 발달한다. 노출단면에서 확인된 장석반암의 폭은 약 0.1~2 m 정도로 소규모이다(암석시료: 10, 11).

⑤ 그 외 석영백, 규장암류 및 페그마타이트질암 등으로 구성되는 산성암맥, 안산암질 암류로 구성되는 중성암맥 그리고 염기성 암맥이 발달한다.

경상분지 남서부 일대에서 채취한 암석시료의 밀집 지역에 따라 편의상 사천시-고성군 지역(암석시료 1, 2), 거제시 지역(암석시료 3, 4, 5, 6 및 11) 및 남해군 지역(암석시료 7, 8, 9 및 10)으로 구분하였다(Fig. 1).

암석시료 및 분석방법

연구지역 일대에서 분포하는 화강암체(9개소, 암석시료 번호: 1~9) 및 기존의 암체를 관입한 장석반암(2 개소, 암석시료 번호: 10, 11)을 대상으로 모두 11개소에서 암석시료를 채취하였다. 각 암석시료는 수평면을 형성하고 단층 및 절리가 발달하지 않는 신선한 노두 상에 방향을 표시한 후, 10×10 cm 정도의 크기로 채취되었다(Fig. 2). 각 암석시료의 채취지점에 대한 행정 지역, 지리좌표 등을 기재하였다. ‘지질개요’란에서 기술한 바와 같이 연구지역의 화강암체에서는 국지적으로 다양한 암상의 화강암류가 산출되므로 개개 암석시료의 암석명 및 색상에 대하여 가능한 자세히 기재하였다(Table 1).

실내에서 각 암석시료의 수평면 상에서 임의로 선택

Table 1. Localities of each rock sample in the study area.

Rock sample No.	Administrative district	Longitude	Latitude	Rock type	Color	Remark
1	Sacheon-si Waryong-dong	128°05'58"	34°57'25.14"	porphyritic granite	pale pink	
2	Gosung-gun Gosung-eup Idang-ri Geoje-si	128°35'32.08"	34°58'36.89"	hornblende granite	greenish grey	
3	Nambu-myeon Tappo-ri Geoje-si	128°36'20.36"	34°45'50.12"	hornblende granite	dark greenish grey	Geoje granite
4	Nambu-myeon Jeogu-ri Geoje-si	128°36'58.23"	34°44'21.82"	biotite-hornblende granite	greenish grey	Geoje granite
5	Jangmok-myeon Oepo-ri Geoje-si	128°42'56.33"	34°55'24.61"	biotite-hornblende granite	light gray	Jisepo granite
6	Ilun-myeon Gujora-ri Namhae-gun	128°42'03.95"	34°47'55.42"	hornblende granite	light dark grey	Jisepo granite
7	Samdong-myeon Mulgeun-ri Namhae-gun	127°03'05.75"	34°46'22.92"	hornblende granite	greenish grey	
8	Sangju-myeon Yanga-ri Namhae-gun	127°56'55.52"	34°44'05.23"	alkali-feldspar granite	light darkish pink	
9	Nam-myeon Impo-ri Namhae-gun	127°52'36.46"	34°44'35.14"	alkali-feldspar granite	pink	
10	Mijo-myeon Songjeong-ri Geoje-si	128°03'16.59"	34°45'35.28"	feldspar porphyry	dark grey	
11	Hacheong-myeon Seokpo-ri	128°35'39.03"	34°56'52.07"	feldspar porphyry	greenish grey	

* Rock sample numbers are the same as ones in Fig. 1.

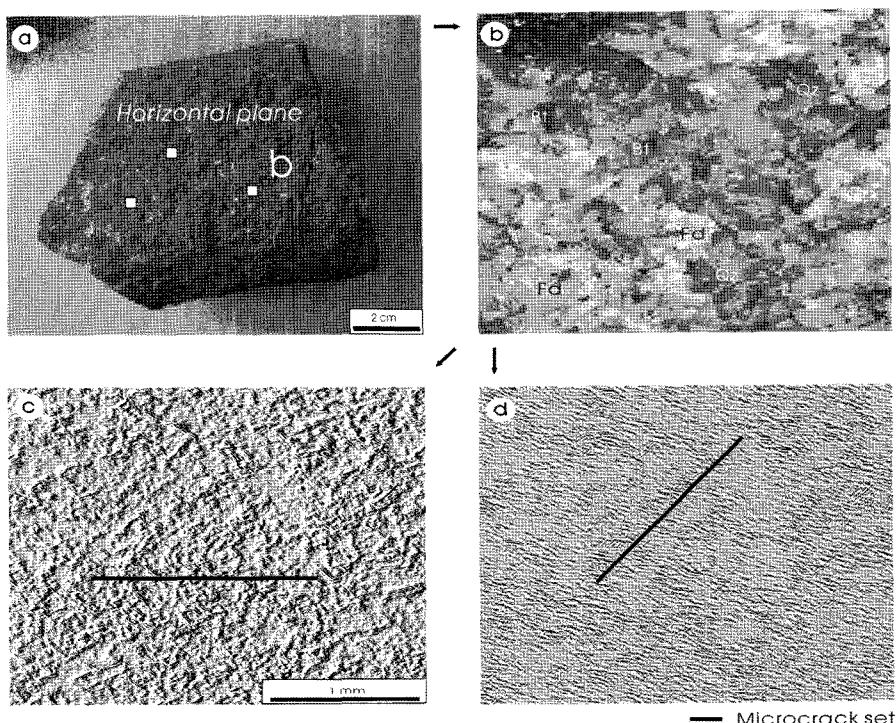


Fig. 2. Rock sample preparation and image processing for measuring the orientations of microcrack sets (Rock sample No. 8). (a) Horizontal plane of a rock sample, (b) Image of section b, (c) and (d) Image processing showing microcrack array. Qz:quartz, Fd:feldspar, Bt:biotite.

한 부분(6.1×4.5 mm)에 대한 영상처리(image processing)를 실시하였다. 각 암석시료에 대하여 3장의 영상에서 확인된 미세균열의 조(set) 및 방향각(θ)에 대하여 분석을 실시하였다. 영상에서 확인된 미세균열의 방향 각은 각도기를 이용하여 $\pm 1^\circ$ 의 오차내에서 측정되었다. 강화군 석모도 일대의 화강암류에서 발달하는 미세균열의 분석사례의 경우와 동일하다(박덕원, 2007b).

각 영상에서는 선상의 배열성이 뚜렷한 미세균열의 조를 대상으로 하였으며, 고려된 미세균열의 요소는 ① 석영 내부에서 산포상으로 분포하는 $50\sim100\text{ }\mu\text{m}$ 크기의 미소한 장석 및 흑운모 등의 경계부에서 분포하는 미세균열, ② 석영 경계부의 미세균열이다. 미세균열 중, 입자경계 미세균열은 대상에서 제외하였다. 한편 영상에서는 단힌 미세균열과 열린 미세균열의 식별이 곤란하며, 결에 대비될만한 열린 미세균열의 방향은 박편관찰을 통하여 결정하였다. 이 연구에서는 석영입자내 미세균열(Intra-quartz microcrack)이 강조되었다. 미세균열의 분석절차는 Fig. 2와 같다.

암석시료별 미세균열의 조 및 방향성

사천시-고성군 지역(암석시료 번호: 1, 2), 거제시 지역(암석시료 번호: 3, 4, 5, 6 및 11) 그리고 남해군 지역(암석시료 번호: 7, 8, 9 및 10)에서 채취한 11개 암석시료에 대한 미세균열의 방향각을 도출하였다. 암석시료의 수평면 상에서 발달하는 개개 미세균열의 주향방향을 모두 취합, $2^\circ\sim5^\circ$ 이하의 유사한 방향각의 차이를 보이는 미세균열간의 다양한 분포성을 제시하기 위하여 2° 간격의 장미도로 표시하였다(Fig. 3).

각 암석시료에서 도출한 미세균열의 분포형태를 살펴보면, 특정 방향각의 구간 내에서 미소한 방향각의 차이를 보이며 그룹을 형성한다. 각 그룹은 상호 독립적으로 분포하는 형태를 취하며, 이러한 경향성은 암석시료 1, 4, 5, 6, 8 및 10에서 볼 수가 있다. 암석시료 3, 7, 9 및 11에서는 그룹화 경향성이 상대적으로 낮다(Fig. 3).

연구지역의 11개 암석시료에서 도출한 미세균열의 조는 전체적으로 5~18조(평균 11.8조)의 범위를 보인

다. 사천시-고성군 지역에서는 25조(평균 12.5조), 거제시 지역에서는 50조(평균 10조) 그리고 남해군 지역에서는 56조(평균 14조)를 각각 도출하였다. 상기한 암석시료 별 미세균열의 조는 대체로 유사하나, 암석시료 10에서는 상대적으로 빈도수가 높다(Fig. 3).

분포형의 비교: 지역별로 비교하여 보면, 거제시 지역의 암석시료 5 그리고 남해군 지역의 암석시료 10에서는 거제시 지역의 암석시료 11의 방향성을 모두 내포하는 분포특성을 확인할 수가 있다. 특히 거리상으로 인접하는 암석시료 7과 10의 유형은 유사한 특성이 있다.

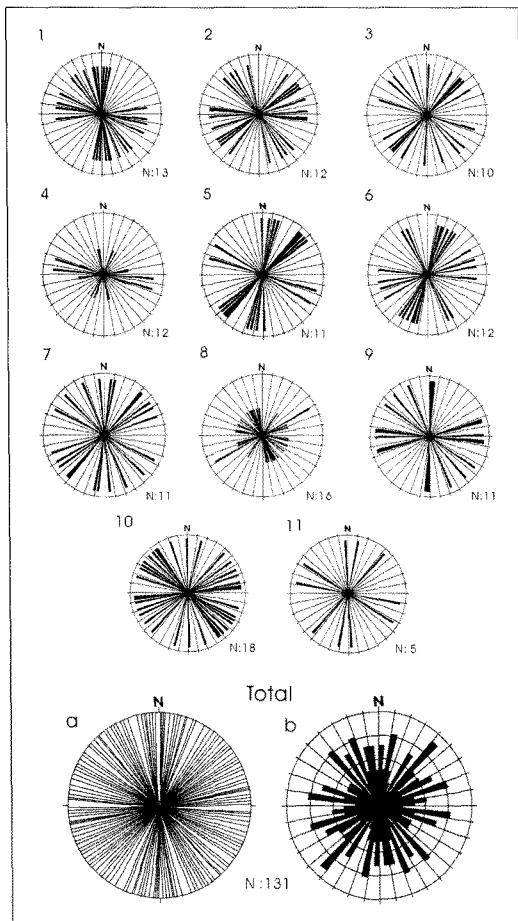


Fig. 3. Orientations of microcrack sets measured from 3 images for horizontal rock surface (N:131). 1~11: Rock sample numbers are the same as ones in Fig. 1 and Table 1.

미세균열의 전반적인 방향성

연구지역의 11개 암석시료(No. 1~11)에서 분석한 총 131개에 달하는 미세균열의 방향을 모두 종합, 방향성을 표시하였다. 주향을 달리하는 미세균열의 조를 살펴보면, 약 69조로 각각 나타나며, NE계는 36조, NW계는 33조로 상호 유사하다. 전반적인 분포형태에서 N24~30°E, N15~20°W, N50~54°W 및 N85~89°W의 구간 일대에서는 미세균열의 분포성이 상대적으로 미약하다. 이러한 분포특성은 차후 연구지역 일대의 미세균열과 관련된 분야의 연구에 대한 하나의 참고자료가 될 것으로 생각된다(Fig. 3a).

11개소의 암석시료에서 도출한 131조에 대하여 4 등급(order)으로 구분한 5° 간격의 빈도가중 장미도를 작성하였다. 전반적인 미세균열의 분포형을 살펴 보면, 빈도수가 높은 밀집구간에 의하여 모두 14개의 방향각 구간에 대하여 집중도가 높다. 한편 빈도가중 장미도에서는 미세균열의 빈도수에 따른 4 등급, 즉 주방향성(1st-order), 2차적인 방향성(2nd-order), 3차적인 방향성(3rd-order) 및 기타 등으로 세분하였다. 장미도에서는 N10~15°E, N40~45°E, N70~75°E, N20~25°W, N40~45°W 및 N80~85°W의 주방향 그리고 N1~5°E, N30~35°E, N45~50°E, N60~65°E, N80~85°E, N5~15°W, N30~35°W 및 N70~75°W의 2차적인 방향, 그 외 3차적인 방향을 포함하는 다양한 등급의 미세균열이 발달한다. 이중, N40~45°E의 방향을 나타내는 미세균열의 분포성이 상대적으로 뚜렷한 것으로 나타난다. 장미도에서는 연구지역 내의 암체에서 발달하는 미세균열의 방향각에 따른 상대적인 빈도 등급을 반영하고 있다(Fig. 3b).

미세균열의 지역별 분포형 및 영역

사천시-고성군 지역, 거제시 지역, 남해군 지역 그리고 시기적으로 후기인 장석반암(암석시료 10 및 11)의 분포형과 영역을 도출, 전반적인 분포특성을 기재하면 다음과 같다.

사천시-고성군 지역: 암석시료 1 및 2에 대한 미세균열의 방향각 및 조(N:25)를 종합하였다. 주향을 달리하는 미세균열의 조는 23조로 나타나며, NE계는 10조, NW계는 13조로 각각 나타난다(Fig. 4a). 장미도에서는 미세균열의 빈도수에 따라 4등급으로 구분하였으며, N55~60°E, N5~15°W, N30~35°W, N40~45°W 및 N80~85°W(5조)의 주방향을 비롯하여 3차적인 등급의 미세

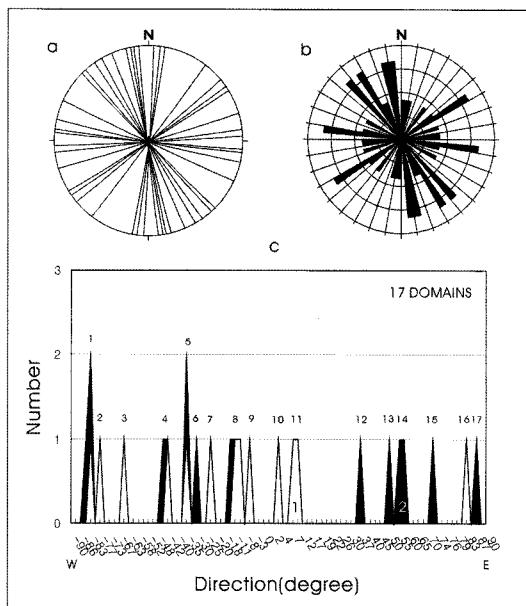


Fig. 4. Orientation data of microcrack sets measured from 3 images (N:25) for horizontal rock surface. (a) and (b) Trends of microcrack sets in Sacheon-si-Gosung-gun area. (c) Frequency of microcrack sets with respect to directions. Rock sample numbers (1 and 2) are the same as ones in Fig. 1 and Table 1.

균열(9조)도 발달한다(Fig. 4b). 각 암석시료에서 도출한 개개 미세균열의 방향각을 제시한 방향각-빈도수의 관계도에서는 밀집구간에 따라 모두 17개의 영역으로 세분되며, 영역-1, 4, 5, 8 및 14에서 빈도수 및 밀집도가 높다(Fig. 4c).

거제시 지역: 거제도 지역은 편의상 거제도 남부의 거제 화강암(암석시료 3, 4)과 동부의 지세포 화강암(암석시료 5, 6)으로 구분하였으며, 이를 암체에 대한 미세균열의 방향각 및 조(N:45)를 종합하였다. 거제 화강암에서는 주향을 달리하는 미세균열의 조는 19조로 나타나며, NE계는 9조, NW계는 10조로 상호 유사하다 (Fig. 5a). 장미도에서는 N70~75°W의 주방향을 비롯하여 N30~35°E, N45~50°E 및 N10~15°W의 2차적인 등급의 미세균열도 발달한다(Fig. 5b). 지세포 화강암에서는 주향을 달리하는 미세균열의 조는 21조로 나타나며, NE계는 15조, NW계는 6조로 나타난다(Fig. 5a). 장미도에서는 N15~20°E의 주방향을 비롯하여 N10~15°E, N30~35°E 및 N40~50°E의 2차적인 방향을 보이는 등급의 미세균열도 발달한다(Fig. 5b). 한편 거제 화강암과 지세포 화강암을 종합한 도면에서는 주향을 달리하는

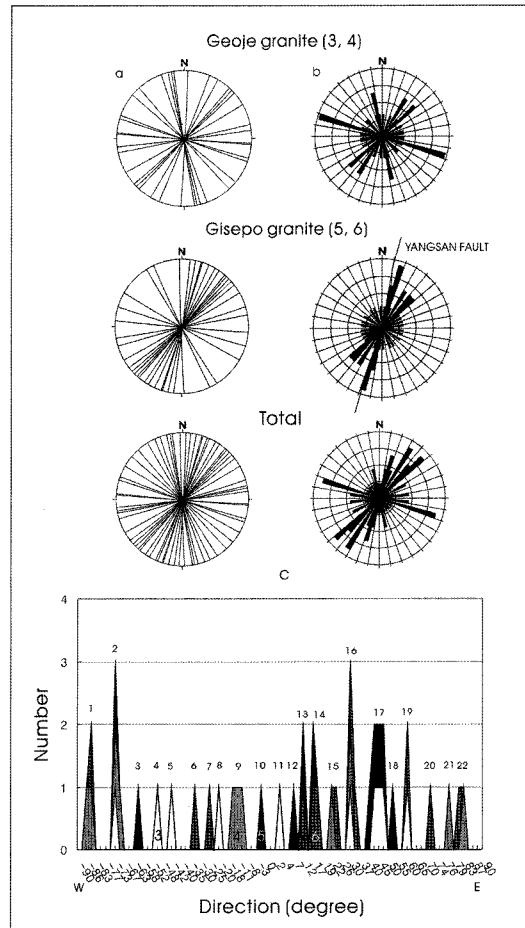


Fig. 5. Orientation data of microcrack sets measured from 3 images (N:45) for horizontal rock surface. (a) and (b) Trends of microcrack sets in Geoje-si area. (c) Frequency of microcrack sets to directions. Rock sample numbers (3, 4, 5 and 6) are the same as ones in Fig. 1 and Table 1.

리하는 미세균열의 조는 33조로 나타나며, NE계는 19조, NW계는 14조로 나타난다. 장미도에서는 N35~40° E, N45~50° E 및 N70~75° W의 주방향을 비롯하여 N15~20° E 및 N40~45° E의 2차적인 등급의 미세균열도 발달한다(Fig. 5b, Total). 방향각-빈도수의 관계도에서는 밀집구간에 따라 모두 22개의 영역으로 세분되며, 영역-1, 2, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 19 및 22에서 빈도수 및 밀집도가 비교적 높다(Fig. 5c).

남해군 지역: 암석시료 7, 8, 및 9에 대한 미세균열의 방향각 및 조(N:38)를 종합하였다. 주향을 달리하는

Table 2. Microcrack set, domain and orientation in each area.

Area	Rock sample No.	Microcrack					
		set	domain	orientation			
		1st-order	2nd-order	3rd-order			
Sacheon-si ~ Gosung-gun	1, 2	25	17	N55~60° E, N5~15° W, N30~35° W, N40~45° W, N80~85° W (5 sets)	-	N2~15° E, N35~40° E, N55~60° E, N50~55° E, N70~75° E, N80~88° E, N20~30° W, N60~65° W, N75~80° W (9 sets)	
Geoje-si	Geoje granite (3, 4)	22	22	N35~40° E, N45~50° E, N75~75° W (3 sets)	N15~20° E, N40~45° E (2 sets)	N10~15° E, N20~25° E, N60~65° E, N80~85° E, N10~15° W, N80~85° W, (6 sets)	
	Gisepo granite (5, 6)	23					
Namhae-gun	7, 8, 9	38	21	N20~25° W (1 set)	N1~5° E, N65~70° E, N70~75° E (3 sets)	N40~45° E, N5~10° W, N40~45° W, N50~55° W, N80~85° W (5 sets)	
Namhae-gun & Geoje-si (Feldspar porphyry)	10, 11	23	18	N10~15° E, N40~45° E, N55~60° W (3 sets)	-	N55~60° E, N65~88° E, N15~20° W, N30~55° W, N60~65° W, N70~80° W, (6 sets)	
Total		11	131	78	12 sets	5 sets	26 sets

*Microcrack set, domain and orientation by frequency orders are the same as ones in Figs. 4~7. Rock sample numbers are the same as ones in Fig. 1.

미세균열의 조는 23조로 나타나며, NE계는 15조, NW계는 16조로 상호 유사하다(Fig. 6a). 장미도에서는 N20~25°W의 주방향을 비롯하여 N1~5°E, N60~65°E 및 N70~75°E의 2차적인 등급의 미세균열도 발달한다(Fig. 6b). 방향각-빈도수의 관계도에서는 모두 21개의 영역으로 세분되며, 영역-2, 5, 9, 11, 12, 14, 16, 18 및 19에서 빈도수 및 밀집도가 높다(Fig. 6c).

장석반암: 약 60 km의 거리에 위치하는 암석시료 10과 11에 대한 미세균열의 방향각 및 조(N:23)를 종합하였다. 주향을 달리하는 미세균열의 조는 21조로 나타나며, NE계는 9조, NW계는 13조이다(Fig. 7a). 장미도에서는 N10~15°E, N40~45°E, N1~5°W 및 N55~60°W의 주방향을 비롯하여 3차적인 등급의 미세균열(6조)도 발달한다(Fig. 7b). 방향각-빈도수의 관계도에서는 모두 18개의 영역으로 세분되며, 영역-3, 4, 10, 13 및 18에서 빈도수 및 밀집도가 높다(Fig. 7c).

이상 각 지역별로 미세균열의 분포형을 도출한 결과, 전체적으로 17~22개 영역으로 세분되며, 사천시-고성군 지역에서는 5개 영역, 거제시 지역에서는 10개 영역, 남해군 지역에서는 8개 영역 그리고 장석반암에서는 5개 영역에서 각각 빈도수 및 밀집도가 높다(Figs. 4~7). 특히, 거제 화강암과 지세포 화강암을 종합한 거제시

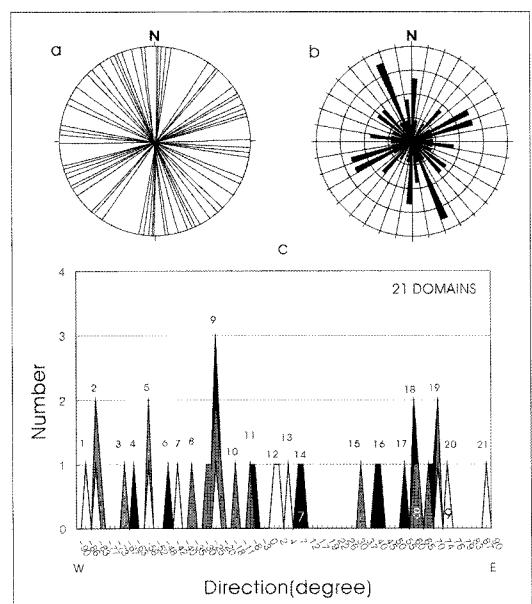


Fig. 6. Orientation data of microcrack sets measured from 3 images (N:38) for horizontal rock surface. (a) and (b) Trends of microcrack sets in Namhae-gun area. (c) Frequency of microcrack sets to directions. Rock sample numbers (7, 8 and 9) are the same as ones in Fig. 1 and Table 1.

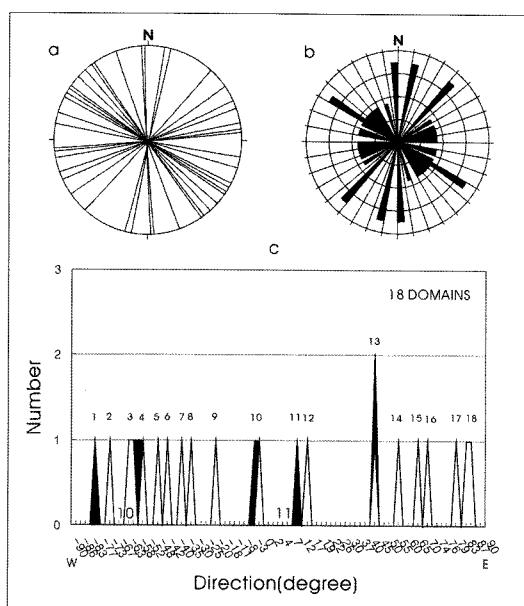


Fig. 7. Orientation data of microcrack sets measured from 3 images (N:23) for horizontal rock surface. (a) and (b) Trends of microcrack sets in feldspar porphyries. (c) Frequency of microcrack sets to directions. Rock sample numbers (10 and 11) are the same as ones in Fig. 1 and Table 1.

지역의 장미도에서 제시한 미세균열의 분포형은 국내 백악기 화강암류의 석산에서 측정한 수직 결(미세균열)의 분포형(박덕원, 2007a)과 유사하며, 상기한 수직 결의 빈도수는 N10~20°E의 방향에서 우세하다. 이와 동일한 방향성을 갖는 양산단층의 연장선상에서 가장 인접하는 지세포 화강암에서도 N10~20°E의 미세균열의 배열성이 뚜렷하다(Fig. 5b).

이상 각 지역별로 도출한 미세균열의 조 및 영역 그리고 장미도에서 분포성이 비교적 뚜렷한 주방향, 2차적인 방향 및 3차적인 방향을 정리하면 Table 2와 같다.

영상에서 강한 선상구조를 보이는 미세균열

연구지역 내에서 채취한 11개 암석시료의 영상에서 확인된 131조의 미세균열 중, 상대적으로 뚜렷한 선상 배열을 보이는 45조의 미세균열(34%)을 선별하였다. 이와 같은 미세균열 조는 암석시료 당 3~6조의 범위를 보이며, 전체적으로 NW계는 20조, NE계는 25조이다(Table 3). 사천시-고성군 지역, 거제시 지역 및 남해군 지역의 개개 지점에서의 미세균열의 방향을 도시하였으며, 광역적인 분포특성을 상호 비교하였다(Fig. 8). 이들 미세균열은 상호 생성시기를 달리하는 아문 미세

균열과 열린 미세균열로 구성된다.

사천시-고성군 지역: 암석시료 1 및 2에서는 주향을 달리하는 미세균열의 조는 9조로 나타나며, NE계는 2조, NW계는 7조로 각각 나타난다. 장미도에서는 북북서-남남동 및 서북서-동남동의 방향이 비교적 우세하며, 그외 동북동-서남서의 방향도 나타난다. 전반적으로 암석시료간의 분포성이 유사하다. 한편 이러한 동북동-서남서의 방향(N58°E)은 고성군 동해면 내곡리의 석산에서 측정한 가장 탁월한 수직 결(2번 면, grain plane)의 방향 그리고 전국의 백악기 화강암류에서 발달하는 수직 결의 2차적인 방향(박덕원, 2007a)과 거의 유사하다.

거제시 지역: 암석시료 3 및 4(거제 화강암)에서는 주향을 달리하는 미세균열의 조는 7조로 나타나며, NE계는 5조, NW계는 2조로 각각 나타난다. 장미도에서는 북동-남서의 방향이 비교적 우세하며, 그외 북서-남동 및 서북서-동남동 및 동북동-서남서의 방향도 나타난다. 암석시료 5 및 6(지세포 화강암)에서는 주향을 달리하는 미세균열의 조는 8조로 나타나며, NE계는 6조, NW계는 2조로 각각 나타난다. 장미도에서는 북북동-남남서, 북동-남서 및 동북동-서남서의 방향이 비교적 우세하며, 그외 남-북 및 서북서-동남동의 방향성도 나타난다. 거제시 전역에서 주향을 달리하는 미세균열의 조는 모두 18조로 나타나며, NE계는 12조, NW계는 6조로 각각 나타난다. 거제 화강암과 지세포 화강암에서는 NE의 방향이 비교적 우세하며, 남-북, 서북서-동남동 및 동북동-서남서의 방향도 뚜렷하다. 암석시료 11(장석반암)에서는 남-북, 북동-남서 및 서북서-동남동의 방향이 우세하며, 인접한 암석시료 5와 분포형이 거의 유사하다.

남해군 지역: 암석시료 7, 8 및 9에서는 주향을 달리하는 미세균열의 조는 12조로 나타나며, NE계는 8조, NW계는 4조로 각각 나타난다. 장미도에서는 대체로 북동-남서 및 북서-남동의 방향성이 비교적 우세하며, 그외 남-북, 서북서-동남동 및 동북동-서남서의 방향성도 나타난다. 암석시료 10(장석반암)에서는 주향을 달리하는 미세균열의 조는 6조로 나타난다. 장미도에서는 대체로 북서-남동, 북동-남서 및 동북동-서남서의 방향성이 비교적 우세하며, 그외 서북서-동남동 및 남-북의 방향성도 나타난다. 약 60 km의 거리에 위치하는 암석시료 10과 11(장석반암)에서는 공히 N42~43°E의 동일한 방향성을 보인다.

Table 3. Orientations of each microcrack set showing a distinct linear array on image.

Area	Rock sample No.	N-W	N-E	set
Sacheon-si	1	N11°W, N23°W, N83°W	N8°E	4
Gosung-gun	2	N14°W, N30°W, N35°W, N83°W	N58°E	5
	3	N42°W, N73°W	N42°E, N48°E	4
	4	-	N30°E, N78°E, N83°E	3
Geoje-si	5	N1°W, N73°W	N42°E, N52°E	4
	6	-	N17°E, N34°E, N73°E, N83°E	4
	11	N3°W, N79°W	N43°E	3
	7	N45°W	N7°E, N42°E, N55°E	4
Namhae-gun	8	N23°W, N28°W	N60°E, N62°E, N70°E	5
	9	N83°W	N4°E, N75°E	3
	10	N37°W, N42°W, N48°W	N42°E, N70°E, N79°E	6
Total	11	20 sets	25 sets	45 sets

* Rock sample numbers are the same as ones in Fig. 1.

비교적 뚜렷한 선상배열을 보이는 45조의 미세균열의 방향을 종합하였다. 주향을 달리하는 미세균열의 조는 23조로 나타나며, NE계는 19조, NW계는 15조로 각각 나타난다. 전반적으로 남-북, 북동-남서, 동북동-서남서, 북북서-남남동~북서-남동 및 서북서-동남동의 방향각 구간에서 밀집하는 분포성이 나타나는 반면, N20~30°E, N50~70°W 및 동-서의 방향각 구간 일대에서는 미세균열의 분포성이 상대적으로 미약하다(Fig. 8a). 장미도에서는 미세균열의 빈도수에 따라 4등급으로 구분하였으며, 전체적으로 약 13개 정도의 영역으로 세분할 수가 있다.

5° 간격의 장미도에서는 N42~43°E의 주방향(분포비: 11.1%) 그리고 N58~62°E, N83°E, N28~30°W, N42~48°W 및 N83°W의 2차적인 방향, 그 외 3차적인 방향을 포함하는 다양한 등급의 미세균열이 발달한다. 상기한 N42~43°E의 주방향은 Fig. 3b에서 도시한 N40~45°E의 주방향과 거의 동일하다(Fig. 8b).

미세균열의 영역 분대

① 사천시-고성군 지역, 거제시 지역 및 남해군 지역에서 채취한 11개의 암석시료에 대한 미세균열의 조(Fig. 3, N:131), ② 11개 암석시료에서 도출한 131조의 미세균열 중, 비교적 뚜렷한 선상배열을 보이는 미세균열의 조(Table 3, Fig. 8, N:45)로 각각 구분, 방향각-빈도수의 상관도를 작성하였다.

상관도에서는 유사한 방향의 미세균열이 밀집하여 한 그룹을 형성한다. 방향각에 따른 빈도수의 밀집구간에 의하여 편의상 20개의 영역으로 분류하였다. 총 20개의 영역 중, 비교적 뚜렷한 선상배열을 보이는 미

세균열의 조가 차지하는 영역(17개 영역)의 분포비는 85%로 비교적 높게 나타난다. 전반적으로 영역-1, 2, 5, 7 15, 18, 19 및 20에서 상대적으로 분포성이 뚜렷하다. Figs. 1 및 8에서 제시한 미세균열의 방향을 근거로 하여 영역을 세분화하였다. 한편 미세균열의 빈도선은 크게 서북서-동남동(영역-1, 2 일대), 북서-남동~북북서-남남동(영역-5, 6, 7 및 8 일대), 북동-남서(영역-15 일대) 및 동북동-서남서(영역-17, 18, 19 및 20 일대)의 방향에서 각각 상승하는 반면, 북북동-남남서(영역-11, 12 및 14 일대)에서는 상대적으로 미약한 분포특성을 보인다(Fig. 9a).

① 사천시-고성군 지역, 거제시 지역, 남해군 지역 및 장석반암으로 구분한 지역별, 암체별 미세균열의 조(Fig. 3, N:131), ② 국내의 쥐라기(N:83) 및 백악기(N:17) 화강암의 단위 석산에서 발달하는 수직 결과 미세균열에 대한 방향각-빈도수의 상관도를 작성하였다. 상관도에서는 Fig. 9a에서 설정한 20개 영역의 방향각 구간을 동일하게 적용하였다. 각 영역에서는 암체 내에서 다양한 시기를 통하여 생성된 미세균열의 방향성을 나타내고 있다. 광역적인 수직 결의 방향은 분류한 각 영역 내에서 비교적 자연스럽게 놓이는 분포특성을 보인다. 한편 분류한 총 20개의 영역 중, 쥐라기 및 백악기 화강암의 수직 결이 차지하는 18개 영역의 분포비는 전체 영역의 약 90%(18개 영역/20개 영역)에 달한다. 또한 뚜렷한 선상배열을 갖는 45조의 미세균열이 차지하는 18개 영역 내에는 쥐라기 및 백악기 화강암의 수직 결의 영역(18개 영역)이 대부분 중첩되며, 백악기 화강암에서 발달하는 수직 결이 차지하는 9개 영역의 분포비는 전체 영역의 약 50%(9개 영역/20개

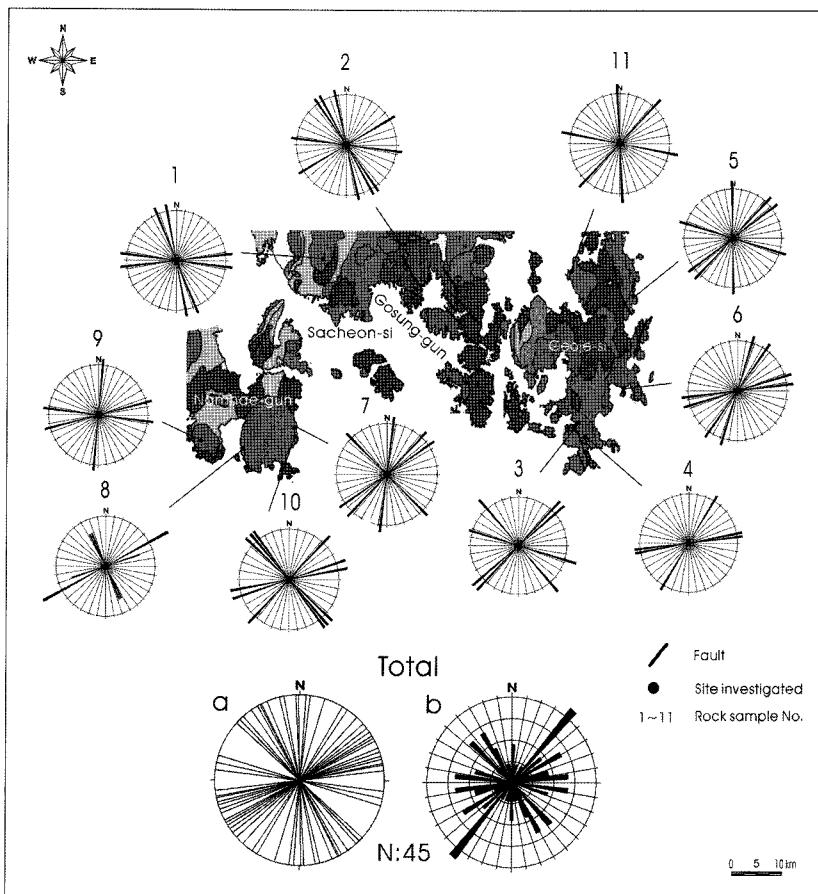


Fig. 8. Distribution of microcrack orientations showing a distinct linear array in each site. 1~11: Rock sample numbers are same as in Fig. 1 and Table 3.

영역)이다. 따라서 도출한 미세균열이 차지하는 영역은 전국의 중생대 화강암류에서 발달하는 결의 분포영역과 중첩되어 미세균열 계의 광역적인 분포성을 반영하는 것으로 나타난다(Fig. 9b).

Fig. 9a와 Fig. 9b 사이의 분포형을 비교하여 보면, NW계의 방향각 구간에서는 전반적으로 대칭형태를 취하는 반면, 동부동-서남서의 방향각 구간에서는 Fig. 9b에 비하여 Fig. 9a에서 상대적으로 분포성이 뚜렷한 차이점을 발견할 수가 있다. 연구지역에서 채취한 일부 암석시료의 수평면에서는 이러한 동북동-서남서 방향의 뚜렷한 미세균열을 관찰할 수가 있다. 따라서 강한 선상구조를 보이는 미세균열은 특정방향에 대하여 분리가 용이한 잠재성을 지닌 수직 결에 대비된다.

열린 미세균열의 분포특성

이상 영상처리를 통하여 분석한 미세균열의 분포성

을 분석하였다. 본 판에서는 암석시료 3, 5, 7, 8 및 9의 수평면에 대한 박편을 제작, 배열성이 뚜렷한 열린 미세균열을 선별하여 대표적인 방향을 파악하였다. 이들 미세균열은 아문 미세균열에 비하여 생성시기가 후기이며, 화강암이 냉각된 후에 생성된 것들이다. 지질시대를 통한 여러 번의 응력장의 반복에 의하여 이들 열린 미세균열의 방향은 다양하며, 기존의 아문 미세균열 및 열린 미세균열의 재균열작용의 산물임을 시사한다. 화강암의 입자 경계부에서는 점 또는 선 접촉의 형태를 취하며, 응력이 집중되어 균열작용이 발생한다.

Fig. 10에서는 석영입자 내에서 발달하는 열린 미세균열의 방향성을 도시하였다. 이들 미세균열은 석영, 장석 및 흑운모 등의 접촉유형에 따라 장석-석영 미세균열, 흑운모-석영 미세균열 등으로 세분하였다. 접촉하는 광물 상호간의 탄성차이에 의하여 입자경계부에서는 미세균열이 발생하여 어느 한 광물 내부로 전파

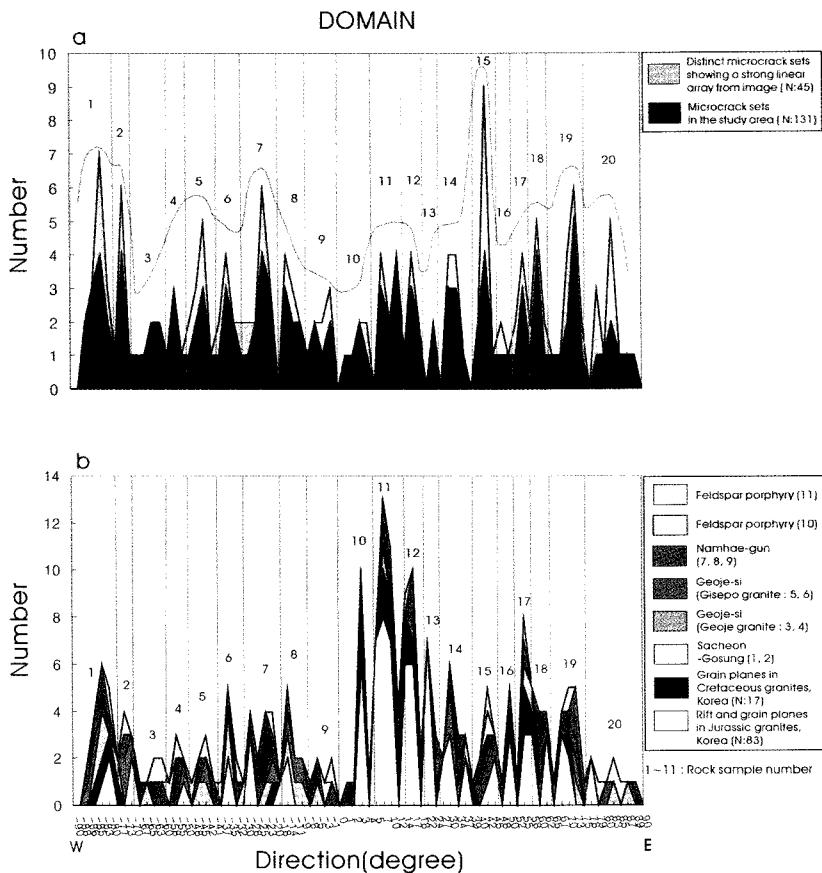


Fig. 9. Cumulative frequency distribution of microcrack sets with respect to directions. (a) Contrasts in directions of cumulative frequency of all microcrack sets in the study area (N:131, Fig. 3) with those of showing a distinct linear array (N:45, Fig. 8). (b) Contrasts in directions of cumulative frequency of microcrack sets by each area (N:131) with those of vertical rift and grain planes in Korea (N:100). 1~20: Domain.

되는 경우(elastic mismatch induced microcracking)에 속한다(Krantz, 1983).

암석시료 3에서 발달하는 장석 및 각섬석·석영 미세균열은 N39°W, N65°W 및 동~서방향으로 분포한다(Fig. 10a). 암석시료 5(Fig. 10b), 8(Fig. 10e) 및 9(Fig. 10g, h)에서 발달하는 전형적인 장석·석영 미세균열은 N2°E, N45°E, N60°E, N82~88°E, N58°W, N65°W의 방향으로 분포하며, 배열성이 뚜렷하다. 암석시료 8(Fig. 10d, f)에서 발달하는 전형적인 흑운모·석영 미세균열은 N15°W 및 N40°W의 방향으로 분포하며, 상기한 장석·석영 미세균열에 비하여 밀도가 낮다. 암석시료 7(Fig. 10c)에서는 동북동~서남서 방향의 수직 결에 대비될 만한 N73~75°E 방향의 열린 미세균열의 배열성이 뚜렷하다. 강한 선상구조를 보이는 미세균열을 종합한 장미도(Fig. 8b)에서는 이러한 열린 미세균열들을 내포한다.

토 의

광역적인 수직 결과 강한 선상구조를 보이는 미세균열과의 대비: 국내의 쥐라기 및 백악기 화강암류의 단위 석산에서 채석면으로 이용되는 수직 결(1번 및 2번면, rift and grain planes)의 광역 분포도(박덕원, 2007a)와 연구지역 내에서 강한 선상구조를 보이는 미세균열의 분포도(Table 3 및 Fig. 8)와 상호 대비하였다. 분포도에서는 미세균열의 빈도수에 따라 주방향성, 2차적인 방향성, 3차적인 방향성 및 기타 등으로 세분하였다(Fig. 11).

국내 수직 결의 방향성을 표시한 광역적인 분포도에서는 쥐라기 및 백악기 화강암으로 각각 구분하였다. 수직 결의 방향을 모두 종합한 분포도에서는 북북동~남남서, 북동~남서~동북동~서남서, 북북서~남남동~북서

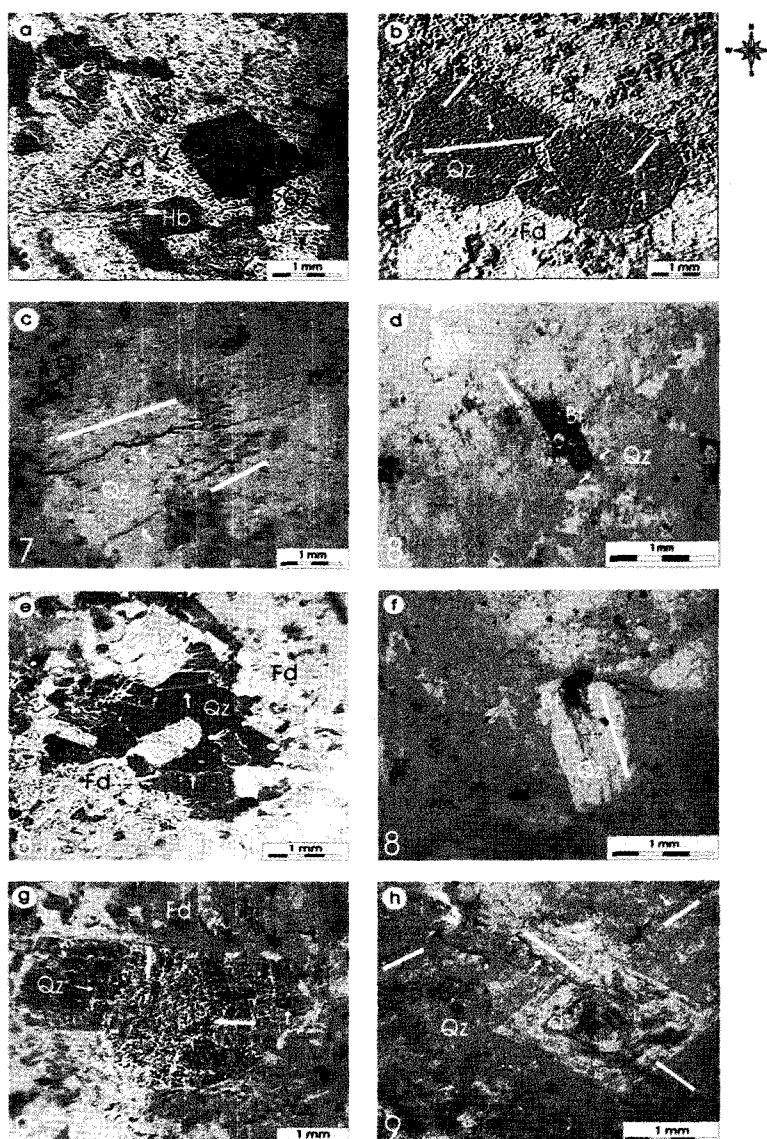


Fig. 10. Open microcrack array on horizontal plane of the Bulgugsa granites. a: Hornblende/Feldspar microcrack array in a quartz. b, e, g and h: Typical feldspar-quartz microcrack array in a quartz. c: Typical microcrack comparable with vertical grain plane. d and f: Typical biotite-quartz microcrack array in a quartz. 3, 5, 7, 8 and 9: Rock sample numbers are the same as ones in Fig. 1 and Table 1. Qz:quartz, Fd:feldspar, Bt:biotite, Hb:hornblende.

-남동 및 서북서-동남동 영역의 분포성이 뚜렷하다. 연구지역 내 미세균열의 분포도에서는 북북동-남남서(영역-10, 11, 12 및 14), 북동-남서(영역-15, 16), 동북동-서남서(영역-17, 18, 19 및 20), 북서-남동~북북서-남남동(영역-4, 5, 6, 7, 8 및 9) 및 서북서-동남동(영역-1 및 2)의 방향각 구간에 대하여 Fig. 9에서 분류한 총 18개의 영역과 대비할 수가 있다. 상기한 수직 결의 분

포도와 연구지역 내 미세균열의 분포도를 대비한 결과, 전반적으로 분포영역이 유사하며, 다양한 영역 중에서 특히 영역-11, 13, 16, 18 및 19에서는 주향각이 거의 일치한다. 이와 같은 분포특성을 비추어 볼 때, 연구지역 일대에서 발달하는 백악기 후기의 미세균열의 계는 전국의 쥐라기 및 백악기의 화강암에서도 광역적으로 발달함을 시사한다(Fig. 11).

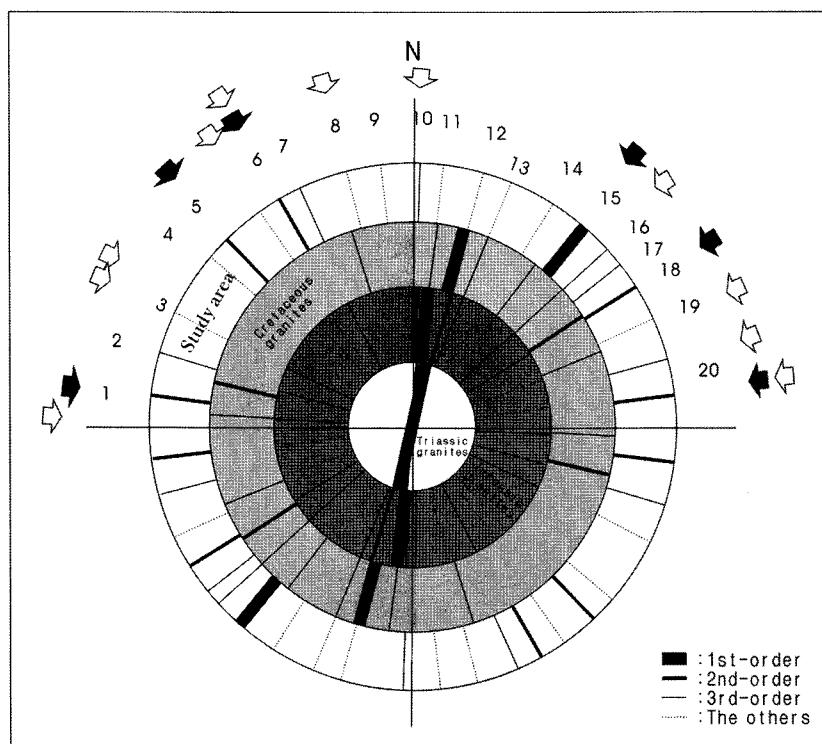


Fig. 11. Comparision of distribution pattern between vertical rift & grain planes in Cretaceous and Jurassic granites (N:100) and microcrack sets in the study area (N:45). Orientations of 6 black and 11 white arrows indicate those of the 1st and 2nd-frequency orders in Fig. 8b and open microcracks in Fig. 10, respectively. 1~20: Domain numbers are the same as ones in Fig. 9.

결론적으로 연구지역에서 강한 선상구조를 보이는 미세균열의 주방향 및 2차적인 방향은 영역-1, 5, 6, 15, 18 및 20(6개 영역, 검은 화살표), 그 외 분포성이 상대적으로 미약한 영역-8, 9 그리고 영역-10, 11 및 12 등으로 요약할 수 있다.

지구조적 의의: 미세균열의 연구사례에서는 미세균열의 생성 당시에 작용한 응력장의 규명에 유용한 수단이 될 수 있음을 보여주고 있다(Plumbler *et al.*, 1984; Lespinasse *et al.*, 1986; Vollbrecht *et al.*, 1991; Wise, 2005; 김영화 외, 1996; 장보안과 정해식, 2005). 따라서 도출된 미세균열 및 국내 수직 결의 분포도에서 제시한 개개 미세균열 조의 방향은 광역적 또는 국지적인 최대 압축 주응력의 방향(σ_1)을 의미하며, 18개 영역에 속하는 각 미세균열의 조는 특정시기의 응력장 또는 상호 시기를 달리하는 응력장의 중첩을 시사한다(Fig. 11).

경상분지 일대에 대한 기존의 미세균열 및 단열 발달사에 관한 연구사례에서 규명된 응력사와 이 연구에

서 도출된 미세균열의 분포도에서 제시한 각 영역(Fig. 11)에 대한 대비를 시도하였다. 가능한 연구지역과 인접한 지역에 대한 연구결과의 인용에 노력하였으며, 요약한 연구내용은 다음과 같다.

① 장보안과 정해식(2005)은 마산 및 양산 일대의 불국사 화강암류의 아문 미세균열과 유체포유물 연구를 통한 고응력장을 분석하여 백악기~제3기의 초기에 작용한 고응력장을 기준의 연구 결과와 비교하여 보고하였다. 경상분지에는 백악기 말에 서북서-동남동 방향의 최대 수평 주응력이 작용하였으며, 신생대 제3기 초(약 62 Ma)에 이르러 북북동-남남서의 방향으로 급격히 회전하였고, 이후 다시 북동-남서 방향으로의 순차적인 회전을 도시하였다. 이러한 회전을 시사한 연구사례는 강지훈과 류충렬(2004)에서도 볼 수가 있다.

이와 같은 연구사례들에 비추어, 거제시 지역의 미세균열을 종합한 장미도(Fig. 5b, Total)의 분포형에서는 상기한 북북동-남남서~북동-남서 방향으로의 순차적인 회전을 반영하는 것으로 생각된다. ② 양산단층 지역의 화강암체 내에 분포하는 열린 미세균열과 경상

분지의 고응력장의 연구에서는 북동-북서-서북서 방향의 순으로 최대 주응력의 방향이 회전하였음을 시사하였다(김영화 외, 1996). ③ 월성지역의 제3기 화강암체 내에서 발달하는 N55~60°E 방향의 아문 미세균열은 마이오세 때의 고응력장을 시사한다(강성승 외, 2007). ④ 부산 이기대 지역의 백악기 안산암질암에서 분포하는 단열의 발달사 해석에서는 신생대의 변형사를 규명하였다. 이 연구에서는 (1) 북동-남서 방향의 압축력(울리고세~마이오세), (2) 북서-남동 방향의 압축력(마이오세), (3) 서북서-동남동 방향의 압축력(마이오세 후기), (4) 동북동-서남서 방향의 압축력(플라이스토세 이후) 등의 응력 변화사를 해석하였다(이민주 외, 2008). 상기한 북동-남서 방향의 압축력은 황재하(1994) 및 Choi et al.(2002), 동북동-서남서 방향의 압축력은 Choi et al.(2002)의 연구결과와 일치한다. ⑤ 한반도 동남부 제3기 어일분지 및 와읍분지의 지구조 운동 연구에서 현생 응력장은 동-서 내지 동북동-서남서의 방향(5 Ma~현재)(장태우 외, 2007) 등으로 각각 기재하였다.

이상의 여러 연구결과들에서 나타난 최대 압축 주응력의 방향과 각 영역(Fig. 11)을 상호 대비하면 다음과 같다. ① 마산 및 양산 일대의 (1) 서북서-동남동 방향은 영역-1~2, (2) 신생대 제3기 초의 북북동-남남서~북동-남서 방향은 영역-11~15, ② 양산단층 지역의 (1) 북동 방향은 영역-15, (2) 북서 방향은 영역-5~6, (3) 서북서 방향은 영역-1~2, ③ 월성지역의 N55~60° E 방향은 영역-17, 18, ④ 부산 이기대 지역의 (1) 북동-남서 방향은 영역-15~16, (2) 북서-남동 방향은 영역-5~6, (3) 서북서-동남동 방향은 영역-1~2, (4) 동북동-서남서 방향은 영역-20, ⑤ 어일분지 및 와읍분지의 동-서 내지 동북동-서남서 방향은 영역-1, 20 및 (19) 일대 등에 각각 대비된다.

상기한 연구사례에서 시사한 최대 압축 주응력의 방향은 영역-1~2, 5~6, 11~15, 17~18 및 19~20 일대에 각각 속한다. 이들 영역의 방향은 Fig. 11에서 표시한 미세균열의 주방향 및 2차적인 방향과 거의 일치하여 이 연구에서 수행한 영역분대에 대한 적용성의 의미를 모색할 수가 있다.

한편 아문 미세균열보다 시기적으로 후기에 생성된 열린 미세균열의 방향(Fig. 10)을 종합한 결과, 이들 열린 미세균열의 방향은 강한 선상구조를 보이는 미세균열의 방향과 대부분 부합하여 영역-1, 3, 6, 8, 10, 15~16, 19 및 20(8개 영역, 흰 화살표)에 속한다. 또한 이들 열린 미세균열의 방향은 기존의 연구(김영화 외, 1996; 이민주 외, 2008; 장태우 외, 2007; 황재하, 1994 및 Choi et al., 2002)에서 도출한 최대 압축 주응력의

방향인 영역-1, 6, 15~16 및 20과 대비되어 최대 압축 주응력 방향의 광역성을 시사한다.

결 론

경상분지 남서부에 속하는 사천시-고성군, 거제시 및 남해군 일대의 불국사 화강암류에서 발달하는 미세균열의 조 및 방향을 측정, 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 연구지역 내의 131조의 미세균열의 방향을 모두 종합한 빈도가중 장미도를 작성한 결과, 6개의 주방향 및 8개의 2차적인 방향을 보여 모두 15개의 방향각 구간에서 집중도가 높다.

2. 지역별 미세균열의 방향각-빈도수의 관계도에서는 전체적으로 17~22개 영역으로 나타난다. 사천시-고성군 지역: 17개 영역 중, 5개 영역, 거제시 지역: 22개 영역 중, 10개 영역, 남해군 지역: 21개 영역 중, 8개 영역 그리고 장석반암: 18개 영역 중, 5개 영역에서 각각 빈도수 및 밀집도가 높다.

3. 131조의 미세균열 중, 비교적 뚜렷한 선상배열을 보여 결에 대비될 만한 45조의 미세균열에 대한 방향각-빈도수의 상관도에서 편의상 약 20개의 영역으로 분류하였다. 특히 이들 45조의 미세균열의 방향은 전국의 중생대 화강암류에서 발달하는 수직 결의 첨예한 방향각 구간과 자연스럽게 중첩되어 광역적인 분포성을 시사한다.

4. 45조의 미세균열이 차지하는 18개의 영역과 기존의 연구결과에서 시사한 최대 압축 주응력의 방향과 상호 대비를 시도하였다. 최대 압축 주응력의 방향은 대부분 영역-1~2, 5~6, 11~15, 15, 17~18 및 19~20에 각각 속하며, 이들 영역은 45조의 미세균열에 대한 빈도가중 장미도에서 제시한 주방향 및 2차적인 방향과 거의 일치한다. 열린 미세균열의 대표적인 방향은 기존의 연구에서 시사한 최대 압축 주응력 방향의 광역성을 반영한다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 국토지질연구본부에서 수행하고 있는 ‘지열수 자원 실용화 기술 개발’ 및 ‘Web GIS 기반 지하열자원 정보 D/B 구축’ 과제에서 지원되었습니다. 또한 이 논문의 심사과정에서 유익한 조언을 해주신 조선대학교의 강성승 교수님과 익명의 심사위원님에게 깊은 사의를 표합니다.

참고문헌

- 강성승, 윤건신, 김영석, 김정빈, 2007, 월성지역 단층대에 서 용력 변형사 및 단층 형태 예측. 지구시스템공학회지, 44, 95-105.
- 강지훈, 류충렬, 2004, 양산 통도사 불국사 화강암류내에 발달하는 단열계의 특성과 양산단층운동과 관련된 고용력장 해석. 자원환경지질학회 춘계학술발표회 논문집, 332-334.
- 김건기, 김종선, 좌용주, 2005, 경상분지 남서부 와룡산 일대에 분포하는 백악기 화강암류에 관한 암석학적 연구: 마그마 불균질 혼합에 의한 화강암류의 조성변화. 암석학회지, 14, 12-23.
- 김영화, 장보안, 박상우, 1996, 양산단층 지역의 화강암체 내에 분포하는 열린 미세균열과 경상분지의 고용력장. 지질학회지, 32, 367-378.
- 김종선, 이준동, 2000, 거제도 화강암질암의 지화학적 특성에 의한 마그마 불균질 혼합 증거. 지질학회지, 36, 19-38.
- 김종선, 이준동, 윤성효, 1998, 거제도 화강암질암의 마그마 불균질 혼합 증거: 1. 그 기재적 특성. 지질학회지, 105-121.
- 김희남, 1992, 우리나라의 남부지역에 분포하는 생산성 섬성암체에 대한 암석지화학적 연구: 광양, 돌산, 남해 지역을 중심으로. 지구과학회지, 13, 226-246.
- 박덕원, 2007a, 국내의 중생대 화강암류에서 발달하는 수직의 1번 및 2번 면의 방향성. 암석학회지, 16, 12-26.
- 박덕원, 이창범, 2007b, 강화군 석도모 일대의 중생대 화강암류 및 화강암질 암맥류에서 발달하는 미세균열의 분포 특성. 암석학회지, 3, 129-143.
- 이민주, 양석준, 최진혁, 김영석, 2008, 부산 이기대 지역의 단열발달사 해석. 지질학회지, 44, 259-271.
- 이춘희, 이상원, 1999, 거제도에 분포하는 화강암류에 대한 암석학 및 암석화학적 연구. 지구과학회지, 20, 61-79.
- 원종관, 지정만, 김수진, 윤선, 소칠섭, 김형식, 1980, 한국지질도(1:50,000), 거제·울포도폭 및 설명서. 자원개발연구소, 21p.
- 장기홍, 1975, 한국 동남부 백악계 층서. 지질학회지, 11, 1-23.
- 장기홍, 1977, 경상분지, 상부 중생계의 층서 퇴적 및 지구조. 지질학회지, 13, 76-90.
- 장기홍, 이영길, 김규한, 1989, 한국지질도(1:50,000), 남해·서상도폭 및 설명서. 한국동력자원연구소, 28p.
- 장보안, 정해식, 2005, 마산 및 양산 일대의 백악기 화강암류의 이문 미세균열과 유체포유물 연구를 통한 백악기 및 신생대 고용력장 분석. 지질학회지, 41, 59-72.
- 장태우, 정재혁, 장천중, 2007, 한반도 동남부 제3기 어일분지 및 와읍분지의 지구조 운동. 지질공학회지, 17, 27-40.
- 장태우, 황상구, 이동우, 오인섭, 김학천, 김의홍, 1983, 한국지질도(1:50,000), 충무도폭 및 설명서. 한국동력자원연구소, 18p.
- 지정만, 김형식, 오인섭, 김학천, 1983, 한국지질도(1:50,000), 삼천포도폭 및 설명서. 한국동력자원연구소, 12p.
- 좌용주, 1998, 경상분지 고성지역의 화성암류에 대한 암석학적 연구 II. 미량원소 지구화학과 Rb-Sr 방사성 연대. 자원환경지질학회지, 31, 473-426.
- 최범영, 황재하, 고희재, 이병주, 김정찬, 최현일, 기원서, 김유봉, 송교영, 최영섭, 2002, 한국지질도(1:250,000), 목포·여수도폭 설명서. 한국지질자원연구원, 45p.
- 황재하, 1994, 백악기초 이후 한반도 남동부에 적용한 고용력 복원. 지질학회지, 30, 27-34.
- Choi, P. Y., Kwon, S. K., Lee, S. R., Hwang, J. H., Angelier, J., An, G. O., 2002, Late Mesozoic-Cenozoic tectonic sequence of Southeast Korea. The 1st and 2nd Symposiums on the Geology of Korea, Special Publication No. 1, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources(KIGAM), 52-88.
- 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.
- 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.
- 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.

2008년 10월 13일 접수

2008년 10월 15일 심사개시

2008년 11월 21일 채택