

국내의 중생대 화강암류에서 발달하는 수직의 1번 및 2번 면의 방향성

박덕원

한국지질자원연구원 지하수지열연구부, 대전광역시 유성구 가정동 30, 305-350

Orientations of Vertical Rift and Grain Planes in Mesozoic Granites, Korea

Deok Won Park

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

요약: 12개 지역에서 분포하는 108개소의 중생대 화강암류의 석산에서 발달하는 수직의 1번 및 2번 면에 대한 분포 특성을 규명하였다. 각 지역에서 발달하는 수직 결의 방향성은 다양하다. 그러나 전국의 이들 수직 면은 전반적으로 북북동 방향이 우세하다. 수직 면의 방향을 종합한 광역 분포도에서 이들 면의 빈도 등급별 방향을 살펴보면 (1) N2~10°E(1st-order), (2) N15~25°E(2nd-order), (3) N45~70°E, N10~30°W 및 N70~80°W(3rd-order) 방향의 3조의 우세 배향을 보여준다. 수평 채석면과 수직 채석면의 상대적인 분리성에 의한 화강암 석산의 유형은 R-유형, G-유형 및 H-유형의 3 종류로 분류되었다. 1번 면이 수평면을 형성하고, 2번 및 3번 면이 수직면을 형성하는 유형(R-유형), 2번 면이 수평면을 형성하고, 1번 및 3번 면이 수직면을 형성하는 유형(G-유형), 3번 면이 수평면을 형성하고, 1번 및 2번 면이 수직면을 형성하는 유형(H-유형) 등이다. 트라이아스기 화강암류의 석산은 R-유형 및 G-유형, 쥬라기 화강암류의 석산은 R-유형, G-유형 및 H-유형 그리고 백악기 화강암류의 석산은 주로 R-유형으로 각각 분류되었다. 이러한 석산 유형 중, 쥬라기 화강암류의 석산에서 가장 다양한 유형이 확인되었다. 유형별 분포비율을 살펴보면, R-유형의 분포비율이 77.8%를 차지하여 22.2%를 차지하는 G-유형 및 H-유형에 비하여 분포비율이 높다. 일반적으로 화강암질암에서는 흔히 물성의 이방성이 확인되며, 할석면의 방향과 열린 미세균열의 방향과는 상호 밀접한 상관성이 있다. 한편 관련 연구사례를 통하여 미세균열의 우세한 방향은 최대 압축 주응력의 방향을 지시함을 알 수 있다.

주요어: 수직의 1번 및 2번 면, 화강암 석산, 방향성, 석산의 유형, 열린 미세균열

Abstract: We have studied orientational characteristics of vertical rift and grain planes developing in 108 quarries for Mesozoic granites. Orientations of these planes vary in different localities. In general, orientations of these planes are predominantly NNE in South Korea. From the regional distribution chart, orientations of these planes show three dominant sets in terms of frequency orders: (1) N2~10°E (1st-order), (2) N15~25°E (2nd-order), (3) N45~70°E, N10~30°W and N70~80°W (3rd-order). These granite quarries are classified by the relative difference in the easiness of rock splitting between horizontal and vertical quarrying planes into: R-type, G-type, and H-type. The results showed that quarries for Triassic granites belong to R and G-types; those for Jurassic granites belong to R, G and H-types. In addition, quarries for Cretaceous granites belong mainly to R-type. Among these quarry types, the most diverse type was identified in the quarries for Jurassic granites. R-type (77.8%) shows a higher distribution ratio compared with G and H-types (22.2%). In general, anisotropy of physical properties is found in granitic rocks and there exists close correlation between orientations of granitic rock splitting planes and those of the open microcracks. Meanwhile, it has been reported that preferred orientations of open microcracks suggest maximum principal stress orientations.

Key words: vertical rift and grain plane, granite quarry, orientation, quarry type, open microcrack

서 론

국내의 화강암 석산(granite quarry)에서는 암체 내부에 잠재하는 활석(rock splitting)이 용이한 소위 “결”(rock cleavage)을 이용하여 정방형의 암괴를 채석하고 있다. 결은 국내에서 “매”라는 단어로 사용되기도 하며, 이 “매”자는 틈이라는 의미의 일본어 “目”에서 그대로 사용된 것으로 우리 말의 “결”자를 사용하고 있다. 일본의 경우 가장 깨지기 쉬운 면을 1번 혹은 결(目), 이 면과 직교하는 2번째로 깨지기 쉬운 면을 2번, 이들 2면과 직교하는 면에 대하여 3번 등으로 호칭된다. 영어권의 채석장에서 상기한 1번, 2번 및 3번에 해당되는 용어로 리프트 면(rift plane), 그레인 면(grain plane) 및 하드웨이 면(hardway plane)으로 호칭되며, 이들 3개의 면은 상호 직교하는 것을 전제로 한다. 따라서 화강암체의 상대적인 활석의 용이도는 일반적으로 1번 결(rift, 이하 리프트) > 2번 결(grain, 이하 그레인) > 3번 결(hardway, 이하 하드웨이)의 순으로 되며, 3종류의 채석면은 일반적으로 상호 수직관계를 형성한다. 결의 발달은 국내외의 모든 화강암체에서 공통적인 현상이며, 특히 수직 결의 방향성은 지역적으로 상이하다. 이와 같은 결은 경험적으로 기원전에 이미 인식된 바가 있다(Dale, 1923). 한편 결은 활석이 용이한 면 구조를 형성하며, 역학적 이방성을 초래한다. 따라서 결의 방향성은 단위 석산 내에서 채석방향을 결정하는 주요 요인으로 작용하며, 채석 실수율에도 많은 영향을 미친다. 국내외의 많은 화강암 석산에서는 역학적 이방성을 인식하여 이를 이용하고 있다. 특히 화강암의 이방성을 초래하는 미세균열과 관련된 연구결과에서는 특히, 석염입자 내부의 열린 미세균열을 강조하고 있으며, 국내외의 관련연구를 사례별로 종합해 보면 다음과 같다.

리프트, 그레인 및 하드웨이의 존재성과 수직관계 규명(Herrmann, 1916; Dale, 1923; Ljungner, 1930; Jahns, 1943; Osborne, 1935; Wise, 1964), 탄성계수 중 Young율을 통한 이방성 연구(Rodrigues, 1966; Douglass and Voight, 1969; Tremmel and Widmann, 1970), 탄성과 속도의 이방성 연구(Duvall, 1965; Thill *et al.*, 1969; Bur and Hjelmstad, 1970; Thill *et al.*, 1973), 전기전도도 및 투수율의 이방성 연구(Nover *et al.*, 1989) 그리고 현미경 관찰에 의한 결의 규명(Peng, 1970; Peng and Johnson, 1972; Simmons *et al.*, 1976; Solberg, 1975; Holzhausen, 1989) 등이다. 한편 화강암의 역학적 이방성을 초래하는 미세균열과 관련된 국내 연구는 이병대 등(1999), 서용석과

정교철(1999), 장보안과 오선환(2001) 및 박덕원 등(2004)에서 볼 수가 있다.

한편 국내 화강암류의 석산에 대한 석재자원 측면에서의 연구가 과거 실시된 바가 있다. 그러나 기존 석산에 발달하는 결과 관련된 전반적인 연구가 이루어진 바 없어 그 현황 파악이 곤란한 실정이다. 이 연구에서는 전국에 걸쳐 산재하는 108개소의 중생대 화강암류의 석산을 답사, 단위 석산에서 채석면으로 이용되는 수직 결의 방향을 측정하였다. 측정된 결의 방향은 지질시대별 및 지역별로 구분, 결의 분포특성을 파악하는데 주목적을 두었다. 이와 아울러 각 석산에서 발달하는 수평 결과 수직 결의 상대적인 분리성에 기준한 석산의 유형 분류를 시도하였다. 또한 석산에서 활용하는 리프트 및 그레인과 관련된 응력장 해석에 관한 기존의 연구사례(Plumb *et al.*, 1984; Lespinasse *et al.*, 1986; Vollbrecht *et al.*, 1991; Wise, 2005)에 비추어 국내의 결이 갖는 지구조적 의의를 모색하였다. 국내의 결에 관한 자료를 종합적으로 검토분석하여 차후 석산과 관련된 여러 분야에 활용되도록 정리 및 종합하는데 그 의의가 클 것으로 본다.

수직 결의 방향성 측정

강경, 거창, 기산리, 김제, 남원, 논산, 목계, 무풍, 문경, 문막, 문산, 삼곡곡, 양구, 연천, 영동, 영월, 영주, 예안, 옥산동, 왜관, 용담, 용유리, 음성, 의정부, 이포, 장계, 지포리, 진동리, 청산, 춘천, 포천, 함양, 함열, 함창 및 화천 등 총 1/5만의 32개 지질도 내에서 분포하는 108개소의 화강암 석산에서 수직 결의 방향을 측정하였다.

국내의 단위 석산에서는 지하심도 약 10~80 m 구간에서 결의 주향방향과 평행한 수직 형태의 채석면이 형성되어 있으며, 박편 또는 압편을 대상으로 하는 경우에 비하여 상대적으로 결의 방향 측정이 용이하다. 그러나 일부 석산에서는 수직상의 단층면 및 절리면 등의 방향성에 좌우된 채석여건에 의하여 암체 내부에 잠재하는 수직 결과 사교하는 방향으로 채석하는 경우도 있다. 한편 수직 결의 확인이 용이하지 않은 경우와 특히 후술할 “석산의 유형 분류”의 경우에는 단위 석산에 대한 상당한 채석 경험이 필요하므로 현장 책임자의 자문을 구하였다. 또한 단위 석산 내에서 수평의 채석면이 1번 면인 경우에는 수직의 2번 면, 수평의 채석면이 2번 면인 경우에는 1번 면에 해당되는 한 방향의 대표적인 수직 결의 방향을 측정하였으며, 수평의 채석면이 3번 면에 해당되는 경우에는 수직 결에

해당되는 1번 및 2번 면의 2 방향을 모두 측정하였다.

측정된 수직 결의 주향방향은 석재산업이 번성한 80년대 중기~90년대 초기에 주로 측정된 자료이다. 대상이 된 단위 석산은 현재 폐업 또는 쇠석용으로 채석작업이 진행 중인 곳이 많으며, 측정 당시에 형성된 채석면의 형태를 유지하고 있는 석산은 드물다. 상기한 야외조사 및 이와 관련된 모든 연구는 모두 한국지질자원연구원에서 실시되었다.

국내 현황

국내 채석업계에서는 채석의 용이도에 따라 구분되는 1번 결, 2번 결 및 3번 결의 의미는 상기한 국외학자들에 의해 정의된 리프트, 그레인 및 하드웨이의 의미와 상호 일치하고 있다. 이 연구의 용어사용에 있어 리프트를 1번 결, 리프트 면을 1번 면, 그레인을 2번 결, 그레인 면을 2번 면, 하드웨이를 3번 결, 하드웨이 면을 3번 면의 의미로 각각 사용하고저 한다(박덕원 외, 2004). 화강암 석산의 개발 초기단계에서 결정되는 수직 결의 방향성 파악은 단위 석산의 전체적인 형태를 좌우하는 주요 요소에 속한다.

한편 결은 일반적으로 화강암체의 노두에서도 확인이 가능하나, 경험상 결의 방향과 평행하게 형성된 채석면에서 보다 식별이 용이하다. 암체 내에는 다수의 열린 미세균열 조(set)가 분포하며, 이중 가장 탁월한 방향의 열린 미세균열의 면이 채석면으로 이용된다. 수평의 채석면을 리프트 면으로 하는 문경지역의 백악기 화강암 및 포천지역의 유라기 화강암을 대상으로 하는 석산(1992년도 전경)에서는 수직의 2번 면에 해당되는 채석면의 방향은 N70°E이다(Fig. 1).

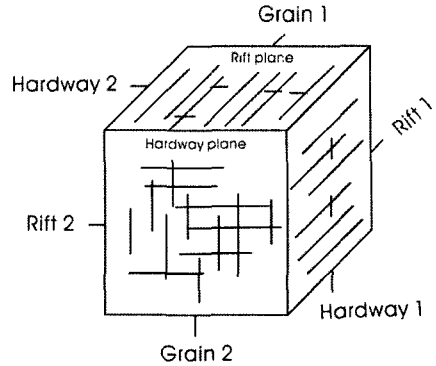


Fig. 2. Diagram of the six directions of microcrack on rift, grain and hardway planes.

미세균열의 분포 모식도

화강암에서는 일반적으로 세 방향의 단면 상에서 상호 직교하는 두 종류의 미세균열을 측정할 수 있다. 미세균열의 일반적인 분포성을 표시한 모식도(박덕원 외 2001; 박덕원 외, 2004; 박덕원, 2005)에서 1번 면의 단면 및 박편에서는 그레인 1과 하드웨이 2, 2번 면의 단면 및 박편에서는 하드웨이 1과 리프트 1 그리고 3번 면의 단면 및 박편에서는 그레인 2 및 리프트 2의 미세균열을 각각 측정할 수가 있다(Fig. 2).

미세균열의 유형별 분포특성

이 연구에서는 포천지역의 유라기 화강암을 대상으로, 수평의 1번 면에서 확인되는 수개 조의 미세균열 중에서 그레인 1을 형성하는 전형적인 미세균열의 분

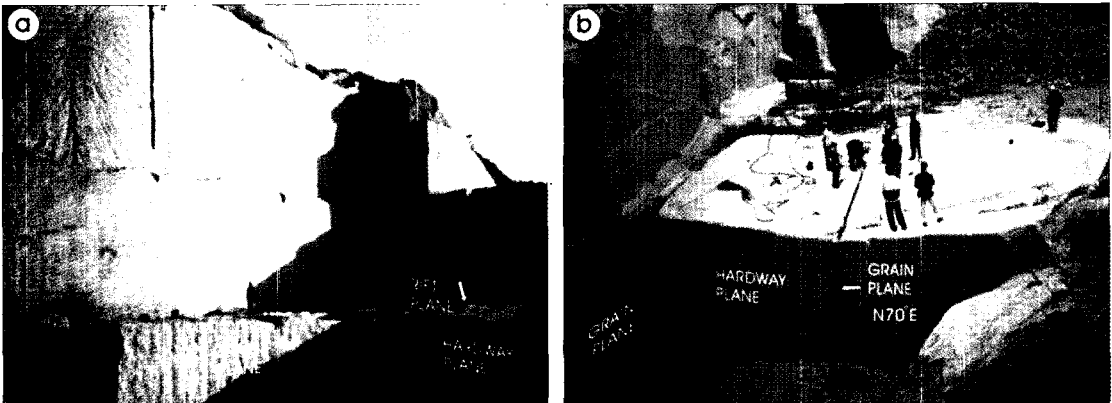


Fig. 1. Rift, grain and hardway planes in quarry operations (R type). a:Cretaceous granite in Mungyeong, (b) Jurassic granite in Pocheon.

포특성을 가지화하였다. 수평면에서 그레인 1을 잘 반영하는 요소를 유형별로 도출하였으며, 이중 석영입자 내 미세균열이 강조되었다(Fig. 3).

화강암을 구성하는 입자 경계부는 점 또는 선 접촉의 형태를 유지하며, 이러한 접촉면에서는 응력이 높게 집중되어 균열작용이 발생한다. 화강암의 주구성광물인 석영, 장석 및 흑운모 입자경계부의 접촉 유형에 따른 미세균열의 세분이 가능하다.

장석-석영 미세균열(장석-석영 접촉부에서 미세균열): 다른 성질을 갖는 광물이 외부의 응력을 받을 때, 상호간 탄성 차이에 의하여 입자경계부에서는 어느 한 광물 내부로 미세균열이 발생하는 경우에 속한다(Kranz, 1983). 전형적인 장석-석영 미세균열의 2가지 유형을 제시하였다. 장석에 포획된 1 mm 크기의 미세한 석영 내부에는 길이 250~500 μm , 간격 100~500 μm 내외의 미세균열이 발달하며, G1(2번 결)에 대체로 평행 배열한다. 반면에 하드웨이 방향으로는 미세균열의 분포성이 희박하다(Fig. 3a).

석영 내부에는 미소한 장석 입자가 산포상으로 분포하는 경우가 많다. 이러한 장석(장경: 750 μm)과 석영의 접촉부 또는 모서리 부분에서 미세균열이 발생한다. 이와 같은 유형의 미세균열은 석영 내부에서 발생하며, 다른 유형에 비하여 균열의 밀도가 낮고 육안으로 확인이 곤란하다. 미세균열은 인접하는 보다 더 미소한 장석과 연결(장석-석영-장석-석영-장석)되어 2번 결을 형성한다(Fig. 3b).

한편 화강암의 석영은 일반적으로 장석에 포획된 형태를 취하며, 이러한 석영의 내부에서 발달하는 미세균열은 조립질암인 경우 육안식별이 용이하며, 결의 방향성 판별에 효과적이다. 그러나 석영 내부의 미소한 장석 입자의 접촉부에서 발달하는 미세균열의 밀도는 매우 낮아 야외에서 육안식별이 어려운 반면, 실내에서 단일 석영입자 내부의 미세균열의 조, 방향성 측정을 통한 미구조 해석에 보다 효과적인 것으로 생각된다.

한편 석영 내 미세균열은 주위의 장석 내 미세균열에 비하여 식별이 용이하며, 배향성의 대비가 상대적으로 뚜렷하다. 석영을 양각, 장석 및 장석-석영 미세균열을 음각으로 표현한 사진에서는 석영 및 장석의 경계부에서 미세균열이 발생하여 석영 내부로 전파되는 분포특성을 잘 나타내고 있다(Fig. 3a, 3b).

흑운모-석영 미세균열: 압축력에 의한 미세균열의 발생 유형 중, 특히 흑운모와 접촉하는 석영 또는 장석 내부에서 미세균열이 확인되고 있다. 흑운모의 모서리

에서 발생한 인장응력은 최대 압축 주응력 방향(σ_1)에 수직으로 작용하며, 인장응력 유도 미세균열의 방향성은 거의 최대 압축 주응력 방향과 평행하다(Nishiyama *et al.*, 2002). 이러한 흑운모-석영/장석 미세균열의 방향성과 주응력의 방향성이 상호 일치함을 보여 주는 다른 연구사례는 Tapponier and Brace(1976), 서용석과 정교철(1999) 및 Seo *et al.*(2002) 등에서 볼 수가 있다(박덕원, 2005).

이 연구에서는 전형적인 흑운모-석영 미세균열의 유형을 제시하였다. 석영 내부에서는 길이 250~500 μm , 간격 200~500 μm 내외의 흑운모-석영 미세균열이 발달한다. 배열성은 인접하는 장석-석영 미세균열의 경우와 유사하며, G1에 대체로 평행하다. 반면에 하드웨이 방향으로는 분포성이 미약하다. 특히 석영입자 내부에 위치하는 흑운모의 상부 및 하부에서는 많은 미세균열이 발달하며, G1의 방향과 평행 배열한다(Fig. 3c, 3d).

한편 석영 입자 내부의 미소한 기공은 유체포유물이 빠져나간 자리이며, 선상의 흔적을 남긴다(Siegesmund, 1991). 석영내 유체포유물의 방향성은 G1 방향과 40~60° 내외로 사교하거나 일부는 하드웨이와 10° 내외로 사교하는 경우도 관찰된다(Fig. 3). 이러한 흔적은 아문 미세균열로 간주되며, 암체 내부의 응력성을 반영한다. 화강암체 내에서 발달하는 미세균열의 연구 사례에서, 거시적인 절리의 분포성은 아문 미세균열의 분포성과 일치하는 반면, 아문 미세균열보다 시기적으로 후기에 생성된 열린 미세균열의 분포성과는 상관성이 보다 결여됨을 보여 주고 있다(Vollbrecht *et al.*, 1991).

지역별 방향성

수직 결의 면을 측정한 단위 석산에 대한 행정구역, 광구번호, 석산명 및 채석대상 화강암류의 암상을 기재하였다. 또한 대상암석에 대하여 트라이아스기, 쥐라기, 백악기의 지질시대별로 구분하였으며, 편의상 석산의 밀집지역에 따라 포천-양주, 춘천-화천, 원주-여주-음성-충주, 제천, 문경-상주-괴산-보은, 영주-안동, 논산-익산-김제, 진안-완주, 거창-함양, 왜관, 남원 및 고성 등의 12개의 지역으로 구분하였다. 암체별 지질시대 구분은 축척 1:250,000의 대전지질도(이병주 등, 1996), 안동지질도(황재하 등, 1996), 광주지질도(이병주 등, 1997), 부산지질도(김동학 등, 1998), 서울-남천면 지질도(이병주 등, 1999) 및 강릉-속초지질도(김정찬 등, 2001)에 기준하였다(Tables 1, 2 및 3). 또한 측정된 수

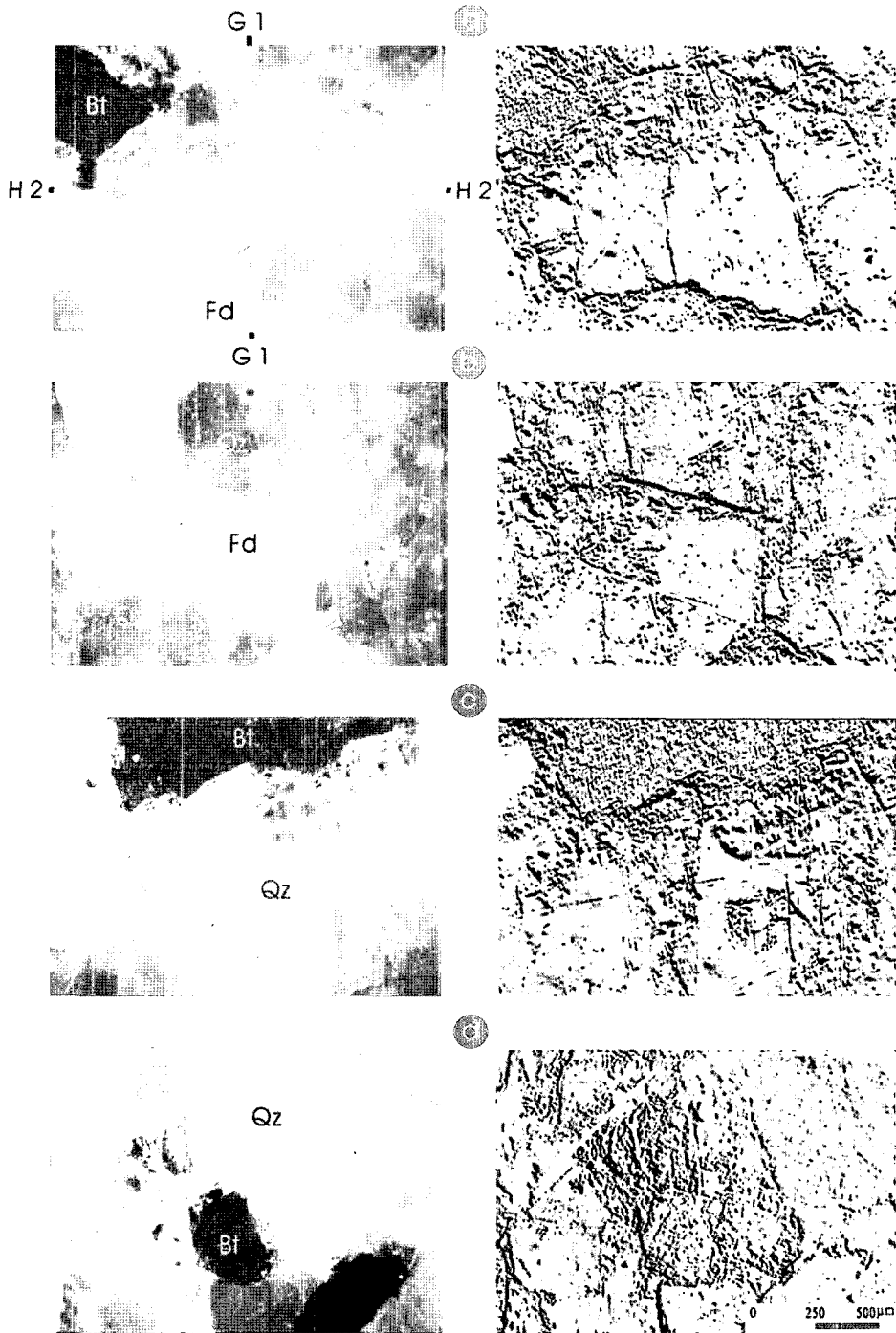


Fig. 3. G1 microcrack array on horizontal rift plane of the Pocheon granite. a, b: Typical feldspar-quartz microcrack array in a quartz. c, d: Typical biotite-quartz microcrack array in a quartz. A short microcrack array generated on feldspar and biotite edges, respectively. The preferred orientations of intra-quartz microcracks approximately parallel to the G1 plane. Symbols of the two directions are as same in Fig. 2. Qz:quartz, Fd:feldspar, Bt:biotite, F:fluid inclusion trails.

Table 1. List of the investigated quarries for the age unknown and Triassic granites

Administrative district	Clame No.	Quarry name	Grain size	Rock color	Area
Geochang-gun Wicheon-myeon Sangcheon-ri	Geochang 116	Geochang	medium~coarse	greyish white	Geochang-Hamyang (Triassic granites)
Geochang-gun Wicheon-myeon Sangcheon-ri	Geochang 117	Baewang	medium	greyish white	
Hamyang-gun Seoha-myeon Bongjeon-ri	Hamyang 12	Seogwang	medium	greyish white	
Hamyang-gun Seoha-myeon Bongjeon-ri	Hamyang 12	Youngdong	medium	greyish white	
Hamyang-gun Seoha-myeon Bongjeon-ri	Hamyang 13	Sejin	medium	greyish white	
Chilgok-gun Gisan-myeon Gagsan-ri	Waegwan 111	Wuseok	medium	grey	Waegwan (Age unknown)
Chilgok-gun Gisan-myeon Gagsan-ri	Waegwan 101	Yakmok	medium	grey	
Chilgok-gun Gisan-myeon Gagsan-ri	Waegwan 111	Hapgang	medium	grey	

직 결의 주향 방향을 1/100만 지질도상에 지역별, 암체별로 구분, 도시하였다(Fig. 4).

Fig. 4에 제시한 12개 지역에 대한 수직 결의 방향에 대하여 빈도가중 장미도로 표시하였다. 또한 각 지역별로 측정된 수직 결의 빈도수에 따른 3 등급의 방향성, 즉 주방향성, 2차적인 방향성 및 3차적인 방향성 등으로 구분하였다(Table 4).

① 포천지역의 수직 결의 방향성은 크게 3개 그룹으로 분류된다. 주방향은 N5~10°E이며, 2차적인 방향은 N25~30°E, N60~65°E 및 N25~30°W 그리고 3차적인 방향은 N15~20°E 및 N65~70°W 등이다. 대체로 방향성의 분산이 크다.

한편 포천지역에서는 “석산의 유형 분류”란에서 후술할 3-유형에 속하는 석산의 방향을 살펴보면, 신북면 및 군내면의 일부 석산에서는 1번 결이 N25~30°W, 2번 결이 N60~65°E 그리고 일동면의 일부 석산에서는 1번 결이 N25~30°E, 2번 결이 N65~70°W의 방향을 각각 보인다(Fig. 5). 이와 같은 경우는 탁월한 2조의 미세균열의 분포성을 의미하며, 외국의 경우에서도 그 예를 볼 수가 있다. 특히, 일본에서는 백악기 후기~고제 3기의 이나다 화강암(Inada granite)의 석산이 대표적인 3-유형에 속한다. 수직의 1번 결은 동북동, 수직의 2번 결은 북북서 방향이며, 이들 결의 방향은 석영입자 내의 미세균열의 배열 방향성과 일치한다(Sasada *et al.*, 2004).

② 춘천-화천지역의 주방향은 N20~25°E, N55~60°E 및 N65~75°E의 3개 그룹으로 나타낸다. ③ 원주-여주-음성-충주지역의 주방향은 N2~10°E이며, 2차적인 방향은 N75~80°W이다. 한편 3차적인 방향은 N10~20°W, N35~40°W 및 N30~80°E로 분산이 크다. ④ 제천지역의 주방향은 3개 그룹으로 분류되는데, N30~35°E, N50~55°E 및 N40~45°W이다. 대체로 방향의 분산이 크다. ⑤ 문경-상주-괴산-보은지역의 방향은 크게 3개 그룹으로 분류된다. 주방향은 N10~20°E 및 N75~85°W, 2

차적인 방향은 N55~60°E, 3차적인 방향은 N30~35°E, N65~70°E 및 N15~20°W 등이다. 이 지역의 N75~85°W의 방향은 12개 지역 중에서 이 지역에서 가장 우세한 분포성을 보이는 특성이 있다. 그 외 원주-여주-음성-충주지역 및 거창-함양지역에서 미약한 분포성을 보인다. ⑥ 영주-안동지역의 주방향은 N15~20°E이며, 2차적인 방향성은 N50~55°W이다. ⑦ 논산-익산-김제지역의 주방향은 N2~10°E이며, 2차적인 방향은 N20~25°E, 3차적인 방향은 N40~45°E이다. ⑧ 진안-완주지역의 주방향은 2개 그룹으로 분류되는데, N20~25°E 및 N35~40°E이다. ⑨ 거창-함양의 주방향은 N2~15°E이며, 2차적인 방향은 N45~50°E, 3차적인 방향은 N45~50°W 및 N80~85°W이다. ⑩ 왜관지역의 주방향은 N2~5°E이며, 2차적인 방향은 N10~15°E이다. ⑪ 남원지역에서는 2개 그룹으로 분류되는데, 주방향은 N5~10°E 및 N75~80°E이다. ⑫ 고성지역에서는 N50~55°E의 방향을 보인다(Table 4, Fig. 4).

암체별 방향성

시대미상의 왜관지역을 제외한 11개 지역의 단위 석산에서 측정된 수직 결의 방향을 트라이아스기, 쥐라기 및 백악기의 3개 화강암체별로 구분, 도시하였다(Fig. 6).

① 트라이아스기 화강암체는 2개 그룹으로 분류된다. 수직 결의 주방향은 N10~15°E, 2차적인 방향성은 N2~10°E이다. ② 쥐라기 화강암체에서는 크게 3개 그룹으로 분류된다. 수직 결의 주방향은 N2~10°E이며, 2차적인 방향은 N15~25°E 그리고 3차적인 방향은 N45~60°E, N25~30°W 및 N70~80°W 등이다. ③ 백악기 화강암체에서는 크게 3개 그룹으로 분류된다. 주방향은 N10~20°E이며, 2차적인 방향은 N55~60°E 및 N75~80°W이다. 이들 주방향 및 2차적인 방향은 양산 단층 지역 화강암체의 열린 미세균열의 방향(김영화

Table 2. List of the investigated quarries for Jurassic granites

Administrative district	Clame No.	Quarry name	Grain size	Rock color	Area
Wonju-si Gwiraе-myeon Gwiraе-ri	Munmak 76	Jinsung1	medium	greyish white	Wonju-Yeaju-Eumseong-Chungju
Wonju-si Gwiraе-myeon Gwiraе-ri	Munmak 76	Jinsung2	medium	greyish white	
Wonju-si Gwiraе-myeon Gwiraе-ri	Munmak 78	Daehan	medium	greyish white	
Wonju-si Gwiraе-myeon Gwiraе-ri	Munmak 77	Wonju	fine	greyish white	
Wonju-si Gwiraе-myeon Yongam-ri	Mokgae 101	Sinyoung	medium	grey	
Wonju-si Gwiraе-myeon Ungae-ri	Munmak 58	Haenam	medium-coarse	grey	
Wonju-si Buron-myeon Songog-ri	Munmak 118	Sinil	medium	greyish white	
Wonju-si Buron-myeon Songog-ri	Munmak 109	Cheongam	medium-coarse	greyish white	
Wonju-si Buron-myeon Songog-ri	Munmak 107	Okyang	fine	greyish white	
Chuncheon-si Sabuk-myeon Gosung-ri	Hwacheon 10	Daea	coarse	greyish white	Chuncheon-Whacheo
Chuncheon-si Sabuk-myeon Gosung-ri	Chuncheon 1	Dongsin	coarse	greyish white	
Chuncheon-si Sabuk-myeon Gosung-ri	Yanggu 150	Bosung	coarse	greyish white	
Hwacheon-gun Gandong-myeon Yuchon-ri	Yanggu 128	Taewha	medium	greyish white	
Hwacheon-gun Hanam-myeon Samwha-ri	Hwacheon 8	Hwacheon	medium	greyish white	
Gapyeong-gun Ha-myeon Sinsang-ri	Gisanri 109	Yuchang	coarse	greyish white	Pocheon-Yangju
Yangju-gun Gwangjeok-myeon Ganap-ri	Uijeongbu 141	Sindong1,2	medium	greyish white	
Yangju-gun Nam-myeon Ipam-ri	Munsan 8	Sinsang	coarse	greyish white	
Yangju-gun Eunhyeon-myeon Unam-ri	Pocheon 147	Unam	coarse	grey	
Yangju-gun Eunhyeon-myeon Hapye-ri	Pocheon 147	Jeongil	coarse	grey	
Yangju-gun Hoecheon-eup Hoeam-ri	Pocheon 100	Daeho	coarse	greyish white	
Yeouju-gun Daesin-myeon Sanggu-ri	Ipo 58	Daesung	coarse	greyish white	Wonju-Yeaju-Eumseong-Chungju
Yeouju-gun Buknae-myeon Sanggyo-ri	Ipo 58	Youngil	coarse	greyish white	
Yeouju-gun Buknae-myeon Jungam-ri	Ipo 30	Chungheun	coarse	pale pink	
Pocheon-si Gwanin-myeon Chogwa-ri	Yeonchon 12	Dongsan	coarse	pale pink	Pocheon-Yangju
Pocheon-si Gwanin-myeon Chogwa-ri	Yeonchon 3	Garak	coarse	greyish white	
Pocheon-si Gunnae-myeon Hasungbuk-ri	Pocheon 6	Sinbuk	coarse	greyish white	
Pocheon-si Naechon-myeon Nae-ri	Uijeongbu13	Naechon	coarse	greyish white	
Pocheon-si Sinbuk-myeon Giji-ri	Pocheon 5	Haesung	coarse	pink	
Pocheon-si Sinbuk-myeon Giji-ri	Pocheon 5	Dongin	coarse	pink	
Pocheon-si Youngbuk-myeon Jail-ri	Jipori 114	Sinmyeong	coarse	greyish white	
Pocheon-si Youngbuk-myeon Jail-ri	Jipori 114	Youngjin	coarse	greyish white	
Pocheon-si Youngjung-myeon Geosa-ri	Pocheon 12	Ilsin	coarse	greyish white	
Pocheon-si Youngjung-myeon Geosa-ri	Pocheon 12	Dongin	coarse	greyish white	
Pocheon-si Ildong-myeon Sajig-ri	Gisan-ri 82	Geumpung	coarse	greyish white	
Pocheon-si Ildong-myeon Sajig-ri	Gisan-ri 72	Gyeongseo	coarse	greyish white	
Pocheon-si Changsu-myeon Gayang-ri	Pocheon 13	Daegwang	coarse	greyish white	
Pocheon-si Changsu-myeon Gayang-ri	Pocheon 22	Samwoo	coarse	greyish white	
Pocheon-si Changsu-myeon Gayang-ri	Pocheon 22	Changsu	coarse	greyish white	
Pocheon-si Changsu-myeon Gayang-ri	Pocheon 12	Sinbuk	coarse	greyish white	
Geochang-gun Ungyang-myeon Gunam-ri	Mupung 50	Dongwoo	medium-coarse	greyish white	
Geochang-gun Ungyang-myeon Sanpo-ri	Geochang 31	Baekam	medium	greyish white	
Geochang-gun Ungyang-myeon Sanpo-ri	Geochang 32	Beumil	medium	greyish white	
Geochang-gun Wicheon-myeon Modong-ri	Geochang 74	Modong	medium-coarse	greyish white	
Geochang-gun Jusang-myeon Naeo-ri	Geochang 64	Samwon	coarse	greyish white	
Geochang-gun Jusang-myeon Naeo-ri	Geochang 64	Myeongbo	medium-coarse	greyish white	
Geochang-gun Jusang-myeon Naeo-ri	Geochang 64	Gyeongil	medium-coarse	greyish white	

Table 2. Continued

Administrative district	Clame No.	Quarry name	Grain size	Rock color	Area
Geochang-gun Jusang-myeon Yeonghyo-ri	Geochang 73	Haedong	coarse	greyish white	Geochang-Hamyang
Geochang-gun Jusang-myeon Yeonghyo-ri	Geochang 75	Hanguk	medium~coarse	greyish white	
Geochang-gun Jusang-myeon Yeonghyo-ri	Geochang 75	Ajin	medium~coarse	greyish white	
Geochang-gun Jusang-myeon Wandae-ri	Geochang 75	Numter	medium~coarse	greyish white	
Hamyang-gun Seosang-myeon Sangnam-ri	Janggye 47	Daeok	coarse	greyish white	
Hamyang-gun Seosang-myeon Sangnam-ri	Janggye 47	Deoknam	coarse	greyish white	
Sangju-si Gongsung-myeon Inchang-ri	Oksandong 101	Minsung	medium	greyish white	Mungyeong-Sangju-Goesan-Boeun
Sangju-si Modong-myeon Idong-ri	Youngdong 21	Gangjin	medium	greyish white	
Andong-si Nokjeon-myeon Juksong-ri	Yean 137	Youngchang	coarse	greyish white	Youngju-Andong
Youngju-si Anjeong-myeon Yeoreuk-ri	Youngju 133	Pungan	fine	grey	
Youngju-si Anjeong-myeon Yeoreuk-ri	Youngju 133	Taepyeong	fine	grey	
Youngju-si Jangsu-myeon Sunggok-ri	Youngju 133	Geumgwang	fine	grey	
Youngju-si Jangsu-myeon Sunggok-ri	Youngju 133	Youngjin	fine	grey	
Youngju-si Jangsu-myeon Sunggok-ri	Youngju 133	Seowon	fine	grey	
Youngju-si Jangsu-myeon Sunggok-ri	Youngju 143	Jeonghan	fine	grey	
Namwon-si Gwangchi-dong	Namwon 63	Ara	medium	greyish white	Namwon
Namwon-si Jusaeng-myeon Nakdong-ri	Namwon 117	Hakrim	medium	greyish white	
Buan-gun Baeksan-myeon Yonggye-ri	Gimje 118	Baeksan	medium	greyish white	Nonsan-Iksan-Gimje
Iksan-si Nangsan-myeon Nangsan-ri	Ganggyeong 128	Yongsan	medium	greyish white	
Iksan-si Nangsan-myeon Nangsan-ri	Ganggyeong 118	Naega	medium	greyish white	
Iksan-si Nangsan-myeon Nangsan-ri	Ganggyeong 128	Samgwang	medium	greyish white	
Iksan-si Nangsan-myeon Yonggi-ri	Hamycol 8	Hamycol	medium	greyish white	
Iksan-si Hamyeol-eup Heulsan-ri	Hamycol 17	Youngjin	medium	greyish white	
Iksan-si Hamyeol-eup Heulsan-ri	Hamycol 17	Iksan	fine	greyish white	
Jinan-gun Yongdam-myeon Waryong-ri	Yongdam 23	Youngwhacolor	coarse	pale pink	Jinan-Wanju
Jinan-gun Yongdam-myeon Waryong-ri	Yongdam 22	Pyeongchang-togeun	coarse	pale pink	
Nonsan-si Bujeok-myeon Gamgok-ri	Nonsan 48	Dongyang	medium	greyish white	Nonsan-Iksan-Gimje
Eumseong-gun Geumwang-eup Naesong-ri	Eumseong 101	Sinyoung	fine	grey	Wonju-Yeouju-Eumseong-Chungju
Eumseong-gun Eumseong-eup Pyeonggok-ri	Eumseong 24	Pyeonggok	fine	grey	
Jechon-si Songhak-myeon Songhan-ri	Yeongwol 148	Dongchun	medium	greyish white	Jaechon
Jechon-si Songhak-myeon Songhan-ri	Yeongwol 148	Yuwon	medium	greyish white	
Jechon-si Songhak-myeon Sigok-ri	Yeongwol 149	Sunchang	medium	greyish white	
Chungju-si Sancheok-myeon Songgang-ri	Mokgae 4	Songgang	medium	greyish white	Wonju-Yeouju-Eumseong-Chungju
Chungju-si Sancheok-myeon Songgang-ri	Mokgae 14	Beumsung	medium	greyish white	
Chungju-si Sancheok-myeon Youngdeok-ri	Mokgae 37	Youngdeok	medium	greyish white	
Chungju-si Eomjeong-myeon Gachun-ri	Mokgae 32	Tusugol	medium	greyish white	

등, 1996)과 상호 유사하다는 사실이 주목된다. 그 외 3차적인 방향은 N35~40°E, N45~50°E, N15~20°W 및 N82~88°W 등이며, 전반적으로 북동방향이 우세하다.

11개 지역에서 측정된 국내 수직 결의 방향을 종합한 결과, 모두 5개 그룹으로 분류된다. 국내 화강암류

에서 분포하는 수직 결의 대표적인 주방향은 N2~10°E이며, 2차적인 방향은 N15~25°E 그리고 3차적인 방향은 N45~70°E, N10~30°W 및 N70~80°W 등이다(Table 5, Fig. 6).

Table 3. List of the investigated quarries for Cretaceous granites

Administrative district	Clame No.	Quarry name	Grain size	Rock color	Area
Goseong-gun Donghae-myeon Naegok-ri	Jindongri 49	Jusin	fine	greenish grey	Goseong
Gimcheon-si Daedeok-myeon Dae-ri	Mupung 39	Jinheung	coarse	pale pink	Geochang-Hamyang
Mungyeong-si Nongam-myeon Galdong-ri	Hamchang 147	Samgwang	coarse	pale pink	Mungyeong-Sangju-Goesan-Boeun
Mungyeong-si Nongam-myeon Gunggi-ri	Yongyuri 32	Gomuchi	coarse	pale pink	
Mungyeong-si Dongno-myeon Noeun-ri	Sanggeumgok 134	Sejin	coarse	pale pink	
Mungyeong-si Mungyeong-eup Dangpo-ri	Mungyeong 45	Beuma	coarse	pale pink	
Mungyeong-si Mungyeong-eup Dangpo-ri	Mungyeong 45	Mungyeong	coarse	pale pink	
Mungyeong-si Sanbuk-myeon Geosan-ri	Mungyeong 6	Miro	coarse	pale pink	
Mungyeong-si Sanbuk-myeon Soya-ri	Sanggeumgok 136	Namwon	coarse	pale pink	
Mungyeong-si Sanbuk-myeon Jeondu-ri	Mungyeong 6	Mido	coarse	pale pink	
Sangju-si Oeseo-myeon Yeui-ri	Cheongsan 2	Samju	coarse	pale pink	
Sangju-si Euncheok-myeon Namgok-ri	Hamchang 139	Chilbong	coarse	pale pink	
Sangju-si Whabuk-myeon Jangam-ri	Yongyuri 56	Ssangyong	coarse	pale pink	
Sangju-si Whabuk-myeon Jangam-ri	Yongyuri 46	Whagwang	coarse	pale pink	
Wanju-gun Dongsang-myeon Sinweol-ri	Yongdam 103	Samik	coarse	pale pink	Jinan-Wanju
Goesan-gun Cheongcheon Sadam-ri	Yongyuri 104	Pungsan	coarse	pale pink	Mungyeong-Sangju-Goesan-Boeun
Boeun-gun Sanoe-myeon Sinjeong-ri	Yongyuri 126	Dongin	coarse	pale pink	

Table 4. Orientations of vertical rift and grain planes in each area by frequency orders

No.	Area	Quarry (N)	Vertical rift and grain plane		
			1st-order	2nd-order	3rd-order
1	Pocheon-Yangju	23	N5~10°E	N25~30°E N60~65°E N25~30°W	N15~20°E N65~70°W
2	Chuncheon-Whacheon	5	N20~25°E N55~60°E N65~75°E	-	-
3	Wonju-Yeouju-Eumseong-Chungju	18	N2~10°E N75~80°W	N10~20°W N35~40°W N30~80°E	
4	Jaecheon	3	N30~35°E N50~55°E N40~45°W	-	-
5	Mungyeong-Sangju-Goesan-Boeun	16	N75~85°W N10~20°E	N55~60°E	N30~35°E N65~70°E N15~20°W
6	Youngju-Andong	7	N15~20°E	N50~55°W	-
7	Nonsan-Iksan-Gimje	8	N2~10°E	N20~25°E	N40~45°E
8	Jinan-Wanju	3	N20~25°E N35~40°E	-	-
9	Geochang-Hamyang	19	N2~15°E	N45~50°E	N45~50°W N80~85°W
10	Waegwan	3	N2~5°E	N10~15°E	-
11	Namwon	2	N5~10°E N75~80°E	-	-
12	Gosung	1	N50~55°E	-	-

*1~12: Area numbers are same as in Fig. 4.

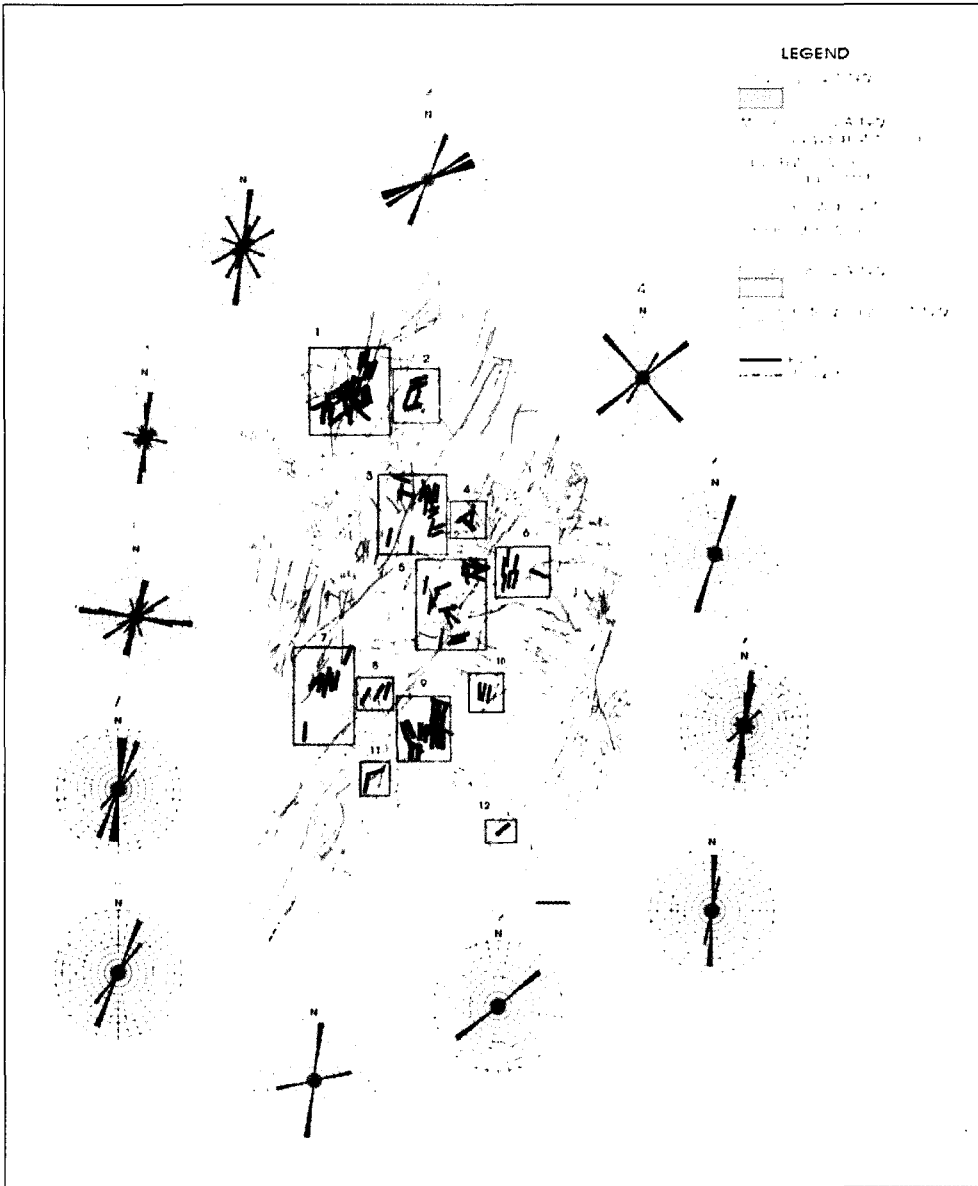


Fig. 4. Orientations of vertical rift and grain planes in 12 areas (N:108). 1: Pocheon-Yangju (N:23), 2: Chuncheon-Whacheon (N:5), 3: Wonju-Yeouju-Eumseong-Chungju (N:18), 4: Jaecheon (N:3), 5: Mungyeong-Sangju-Goesan-Boeun (N:16), 6: Youngju-Andong (N:7), 7: Nonsan-Iksan-Gimje (N:8), 8: Jinan-Wanju (N:3), 9: Geochang-Hamyang (N:19), 10: Waegwan (N:3), 11: Namwon (N:2), 12: Gosung (N:1).

석산의 유형 분류

국내 화강암류 석산에서 형성되어 있는 수평의 채석면을 기준으로 하여 다음의 3 가지의 유형으로 분류를 시도하였다. 석산의 유형은 ① 1번 면이 수평면을 형성하고, 2번 및 3번 면이 수직을 형성하는 유형(R-type,

이하 1-유형), ② 2번 면이 수평면을 형성하고, 1번 및 3번 면이 수직을 형성하는 경우(G-type, 이하 2-유형), ③ 3번 면이 수평면을 형성하고, 1번 및 2번 면이 수직을 형성하는 경우(H-type, 이하 3-유형) 등이다. 국내 화강암류 석산은 대부분 1-유형에 속하며, 트라이아스기 화강암류 석산의 일부에서는 2-유형, 쥬라기 화강

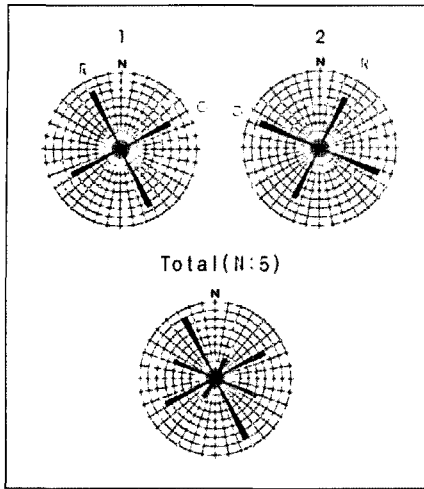


Fig. 5. Rose diagrams for orientations of vertical rift and grain planes in Jurassic granite (H-type). 1: Sinbuk and Gunnae areas, 2: Ildong area, R:rift plane, G:grain plane.

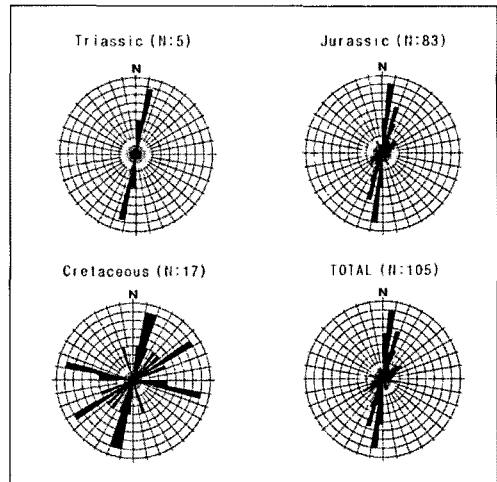


Fig. 6. Composite rose diagrams for orientations of vertical rift and grain planes by geologic age.

암류 석산의 일부에서는 2-유형 및 3-유형을 각각 형성한다. 특히 시기적으로 후기인 백악기 화강암류 석산은 대부분 1-유형에 속한다(Table 6).

한편 화강암체 내에서 수평 및 수직상으로 발달하는 미세균열의 분포특성에 관한 연구사례를 기재하면 다음과 같다. 4개소의 New England 화강암체에서 발달하는 수평의 미세균열은 층상절리와 밀접한 상관성이 있다. 층상 절리작용과 평행 배열하는 미세균열은 45% 이상에 달하며, 장석에 비하여 석영 내의 미세균열은 탁월한 우세 방향성을 보인다. 특히 Chelmsford 화강암을 대상으로 하는 석산의 지표부와 바닥부에서 각각 분석한 미세균열의 길이, 폭 등의 요소는 변화를 보이지 않는다(Solberg, 1975).

또한 국내의 1-유형에 속하는 쥐라기 화강암 석산에서 채취한 암석의 박편사진에서 분석한 미세균열의 밀도(ρ)의 분석 사례에서, 수평의 리프트를 형성하는 미세균열(rift microcrack, RM) > 수직의 그레인울을 형성하는 미세균열(grain microcrack, GM) > 수직의 하드웨이를 형성하는 미세균열(hardway microcrack, HM)의 순으로 나타난다. 즉 포천화강암에서 $0.14(RM) > 0.12(GM) > 0.03(HM)$, 거창화강암에서 $0.23(RM) > 0.08(GM) > 0.03(HM)$ 그리고 함천화강암에서 $0.17(RM) > 0.08(GM) > 0.03(HM)$ 의 순으로 각각 되고 있다(박덕원 등, 2001). 이와 같은 수평 및 수직상 미세균열의 상호 밀도차이는 암체의 활석작용 시 상대적인 분리성을 의미하며, 단위 석산에 대한 유형분류의 근거가 될 수가 있다.

Table 5. Orientations of vertical rift and grain planes by geologic age

Geologic age	Quarry (N)	Vertical rift and grain plane		
		1st-order	2nd-order	3rd-order
Cretaceous	17	N10~20°E	N55~60°E N75~80°W	N35~40°E
				N45~50°E
Jurassic	83	N2~10°E	N15~25°E	N65~70°E
				N15~20°W
				N82~88°W
Triassic	5	N10~15°E	N2~10°E	N45~60°E
				N25~30°W
				N70~80°W
Total	105	N2~10°E	N15~25°E	N45~70°E
				N10~30°W
				N70~80°W

Table 6. Classification of granite quarry type by geologic age

Geologic age	Horizontal quarrying plane			Quarry (N)
	Rift plane (R-type)	Grain plane (G-type)	Hardway plane (H-type)	
Cretaceous	17	-	-	17
Jurassic	63	15	5	83
Triassic	3	2	-	5
Age unknown	1	2	-	3
Total	84 (77.8%)	19 (17.6%)	5 (4.6%)	108 (100%)

*Age unknown: Waegwan area

Table 7. Location of each granite quarry type by geologic age

Geologic age	Horizontal quarrying plane	
	Grain plane (G-type)	Hardway plane (H-type)
Jurassic	Pocheon-gun Youngjung-myeon & Changsu-myeon, Wonju-si Gwirae-myeon, Gapyeong-gun, Jechon-si Songhak-myeon, Geochang-gun Wicheon-myeon	Pocheon-gun Sinbuk-myeon, Gunnedae-myeon & Ildong-myeon
Triassic	Geochang-gun Wicheon-myeon	-
Age unknown	Chilgok-gun Gisan-myeon	-

지역별 유형 분포

12개 지역에 대한 석산의 유형분포를 기재하면 다음과 같다. ① 포천지역은 주라기 화강암 분포지역인 포천, 지포리, 기산리, 연천, 문산 및 의정부 지질도에 해당된다. 23개 석산 중에서 1-유형이 12개소, 2-유형이 6개소 그리고 3-유형이 5개소로 나타나며, 타 지역에서 확인되지 않은 3-유형의 석산이 확인되었다. 따라서 포천지역에서 가장 다양한 유형의 석산이 분포한다. ② 춘천-화천지역은 주라기 화강암 분포지역인 화천, 양구 및 춘천 지질도에 해당되며, 5개 석산은 모두 1-유형으로 나타난다. ③ 원주-여주-음성-충주지역은 주라기 화강암 분포지역인 문막, 이포, 음성 및 목계 지질도에 해당된다. 18개 석산 중 1-유형이 16개소, 2-유형이 2개소로 확인된다. ④ 제천지역은 주라기 화강암 분포지역인 제천 지질도에 해당된다. 3개 석산 중 1-유형이 2개소, 2-유형이 1개소로 나타난다. ⑤ 문경-상주-괴산-보은지역은 주로 백악기 화강암류 분포지역인 문경, 용유리, 청산, 함창 및 상곡읍 지질도에 해당된다. 이 지역의 16개 석산을 비롯한 진안-완주지역의 백악기 화강암류의 석산에서도 모두 1-유형으로 나타나는 반면, 포천지역에서 나타난 2-유형 및 3-유형은 백악기 화강암 분포지역에서 확인되지 않음이 특징적이다. ⑥ 영주-안동지역은 주로 주라기 화강암류 분포지역인 영주 및 예안 지질도에 해당되며, 7개 석산은 모두 1-유형으로 나타난다. ⑦ 논산-익산-김제지역은 주라기 화강암지역인 함열, 강경, 김제 및 논산 지질도에

해당된다. 8개 석산 중 1-유형이 4개소, 2-유형이 1개소로 나타난다. ⑧ 진안-완주지역은 주라기 및 백악기 화강암지역인 용담 지질도에 해당된다. 3개 석산은 1-유형으로 나타난다. ⑨ 거창-함양지역은 주라기 및 트라이아스기 화강암류 분포지역인 거창, 함양, 장계 및 무풍 지질도에 해당된다. 19개 석산 중 1-유형이 15개소, 2-유형이 2개소로서 1-유형이 우세한 것으로 나타난다. ⑩ 왜관지역은 3개 석산 중 1-유형이 1개소, 2-유형이 2개소로 나타난다. ⑪ 남원지역은 주라기 화강암 분포지역인 남원 지질도에 해당되며, 2개 채석장 중 1-유형이 1개소, 2-유형이 1개소로 나타난다. ⑫ 고성지역은 백악기 화강암류 분포지역인 진동리 지질도에 해당되며, 1개 석산은 1-유형에 속한다. 한편 1-유형을 제외한 2-유형 및 3-유형의 산출지역을 지질시대별로 구분하면 다음과 같다(Table 7).

토 론

국내 수직 결의 종합: Table 4 및 5에 제시한 수직 결의 방향에 대하여 지질시대별로 주방향, 2차적인 방향, 3차적인 방향 및 기타 등으로 구분, 국내 결의 광역 분포도를 작성하였다(Fig. 7). 수직 결의 방향을 상호 대비, 검토한 결과 도출된 사항은 다음과 같다.

국내의 중생대 화강암체에서는 채석면으로 이용되는 소위 “결”의 존재가 인정된다. 특히 각 지역별로 국지적인 방향성의 변화가 있으나 포천지역, 원주-여주-음성-충주지역, 문경-상주-괴산-보은지역, 영주-안동지역,

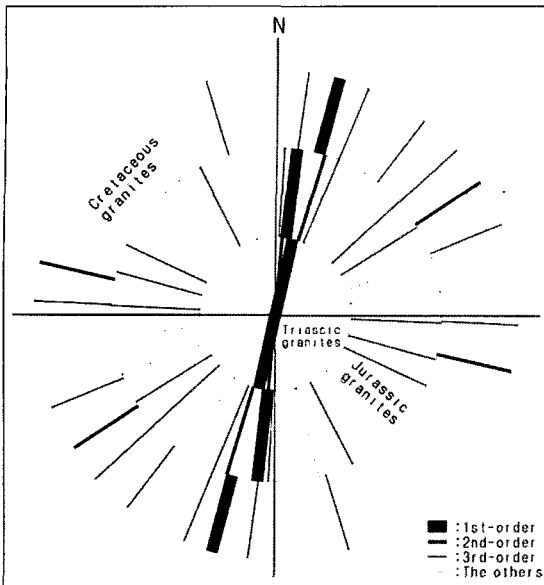


Fig. 7. Orientations of vertical rift and grain planes in Mesozoic granites by frequency orders.

논산-익산-김제지역, 진안-완주지역 및 왜관지역 등에서는 대체로 고유의 방향을 보이는 것으로 나타난다. 국내의 석산에서 활용되는 수직 결의 방향을 종합한 결과, 전반적으로 북서보다는 북동의 방향이 상대적으로 다소 우세하며, 서북서의 방향은 유라기 화강암보다 백악기 화강암에서 집중도가 높다.

한편 중생대 화강암체의 결을 형성하는 열린 미세균열의 방향은 지질시대별·지역별로 다양하다. 오랜 지질시대를 통한 여러 번에 걸친 응력장의 반복에 의한 기존 아문 미세균열 및 열린 미세균열의 재균열작용의 가능성이 있다. 특히 시기적으로 백악기 이후에 형성된 열린 미세균열의 존재의 가능성도 배제할 수가 없다. 따라서 열린 미세균열의 정확한 생성시기를 지질시대별로 일목요연하게 정리하기는 매우 어려운 일이다. 특히 포천, 거창 및 함천지역의 단위 석산에서는 가장 탁월한 밀도를 보이는 열린 미세균열(수직 결) 이외에도 수개 조의 미약한 밀도를 보이는 열린 미세균열이 분포한다(박덕원 외, 2001). 이러한 종류의 열린 미세균열은 일부 인접 석산 또는 노두에서 수직의 1번 또는 2번 결로 인식될 가능성이 있으며, 보다 복잡한 미세균열의 계(system)를 형성한다.

지구조적 의의: 미세균열은 형태에 따라서 아문 미세균열과 열린 미세균열로 나눌 수 있다. 화강암체가

초기 냉각된 이후에 지구조 운동에 의한 응력장으로 부터의 해방과 같은 여러 가지 원인에 의하여 미세균열이 생성되기도 한다. 이러한 미세균열들이 열수에 의하여 아물지 않으면 미세균열은 열린채로 존재하게 되고, 열린 미세균열들은 아문 미세균열이 생성된 이후의 응력장을 지시한다(김영화 등, 1996). 특히 화강암 질암류에 대한 심도별 응력 조건에 따른 미세균열의 연속적인 생성모델에서도 아문 미세균열 생성 후 비교적 천부에서 열린 미세균열의 생성을 보여 주고 있다(Vollbrecht *et al.*, 1991; Wise, 2005).

외국의 경우, 리프트가 수평이며 그레인 및 하드웨어가 수직인 3 개소의 화강암 석산에서 현지응력과 미세균열간의 상관성에 대한 연구를 한 사례가 있다. 이 연구에서는 측정된 최대 압축 주응력(σ_1)의 방향성은 그레인을 형성하는 열린 미세균열의 우세방향과 일치함을 밝히고 있다(Plumber *et al.*, 1984).

화강암 석산의 수평면에서 분포하는 수직상의 미세균열과 관련된 응력장 해석연구의 사례를 볼 수가 있다. 즉 탁월한 3 조의 방향은 단층운동을 유발한 3회의 연속적인 최대 압축 주응력의 방향과 일치함을 밝히고 있으며, 연속적인 광역 응력 궤적(successive regional stress trajectories)을 도출하였다(Lespinasse *et al.*, 1986).

한편 이러한 미세균열의 자세한 연구사례에서는 미세균열의 생성 당시에 작용한 응력장의 규명에 유용한 수단이 될 수 있음을 보여주고 있다. 따라서 국내 수직 결의 광역 분포도(Fig. 7)에서 제시한 이들 열린 미세균열의 방향은 국내의 광역적 또는 국지적인 최대 압축 주응력의 방향을 의미하며, 생성시기의 규명이 관건이 되고 있다.

결 론

전국의 12개 지역에서 분포하는 108개소의 중생대의 화강암류 석산에서 발달하는 수직 결의 방향을 측정, 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

국내 수직 결의 방향은 지역별로 다양하다. 지질시대별로 주방향을 살펴보면, 트라이아스기 화강암체에서는 N10~15°E, 유라기 화강암체에서는 N2~10°E 그리고 백악기 화강암체에서는 N10~20°E로 각각 나타난다. 다만 백악기 암체에서 발달하는 N75~80°W의 방향성은 트라이아스기 및 유라기 암체에 비하여 뚜렷하다. 국내 수직 결의 방향을 종합한 광역 분포도에서 북서보다는 북동의 방향이 상대적으로 우세하다.

수직 결과 수평 결의 상대적인 분리성에 근거한 석

산의 유형 분류를 시도하였으며, 유형은 1-유형, 2-유형 및 3-유형의 3 종류이다. 트라이아스기 화강암류의 석산은 1 및 2-유형, 주라기 화강암류 석산은 1, 2 및 3-유형 그리고 백악기 화강암류의 석산은 주로 1-유형으로 각각 분류되었다. 포천지역에서는 특유의 3-유형에 속하는 석산이 확인되는 반면, 백악기 화강암 석산에서는 1-유형의 석산이 우세하나 다른 유형의 분포 가능성도 배제할 수 없다.

한편 화강암 석산에서 활용되는 수직 결의 방향은 일반적으로 열린 미세균열의 방향을 의미하며, 관련 연구사례를 통하여 알 수 있듯이 광역적 또는 국지적인 최대 압축 주응력의 방향성을 지시함을 알 수가 있다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 ‘지하 열자원 정보 D/B 구축 및 평가연구’ 과제에서 지원되었습니다. 이 연구의 많은 부분은 전국의 석재분야와 관련된 분들의 도움으로 가능하게 된 것이며, 이에 깊은 감사를 표합니다. 또한 본 논문의 심사과정에서 유익한 조언과 지적을 해주신 안동대학교의 강지훈 교수님과 한국지질자원연구원의 홍세선 박사님께도 감사를 드립니다.

참고문헌

김동학, 황재하, 박기화, 송교영, 1998, 한국지질도(1:250,000), 부산도폭 및 설명서. 과학기술처, 62 p.
 김영화, 장보안, 박상욱, 1996, 양산단층 지역의 화강암체 내에 분포하는 열린 미세균열과 경상분지의 고응력장. 대한지질학회지, 32, 367-378.
 김정찬, 고희재, 이승렬, 이창범, 최성자, 박기화, 2001, 한국지질도(1:250,000), 강릉-속초도폭 및 설명서. 한국지질자원연구원, 76 p.
 박덕원, 2005, 포천화강암내 미세균열의 조직특성. 한국지질자원연구원 논문집, 9, 3-13.
 박덕원, 김형찬, 이창범, 홍세선, 장세원, 이철우, 2004, 포천지역의 주라기 화강암에 발달된 결의 특성. 한국암석학회지, 13, 133-141.
 박덕원, 서용석, 정교철, 김영기, 2001, 주라기 화강암내 발달하는 결의 현미경학적 분석. 대한지질공학회지, 11, 51-61.
 서용석, 정교철, 1999, 수침삼축압축하에서 관찰되는 화강암의 미세 파괴. 대한지질공학회지, 9, 243-251.
 이병대, 장보안, 윤현수, 이한영, 진명식, 1999, 문경지역에 분포하는 화강암의 미세균열 발달특성. 한국암석학회지, 8, 24-33.
 이병주, 김동학, 최현일, 기원서, 박기화, 1996, 한국지질도

(1:250,000), 대전도폭 및 설명서. 과학기술처, 59 p.
 이병주, 김유봉, 이승렬, 김정찬, 강필종, 최현일, 진명식, 1999, 한국지질도(1:250,000), 서울-남천점도폭 및 설명서. 과학기술부, 64 p.
 이병주, 김정찬, 김유봉, 조동룡, 최현일, 전희영, 김복철, 1997, 한국지질도(1:250,000), 광주도폭 및 설명서. 과학기술부, 82 p.
 장보안, 오선환, 2001, 포천화강암내 발달한 결의 역학적 이방성과 미세균열의 상관성. 대한지질공학회지, 11, 191-203.
 황재하, 김동학, 조동룡, 송교영, 1996, 한국지질도(1:250,000), 안동도폭 및 설명서. 과학기술부, 67 p.
 Bur, T. R. and Hjelmstad, K. E., 1970, Elastic and attenuation symmetries of simulated lunar rocks. Icarus 13, 44.
 Dale, T.N., 1923, The commercial granites of New England. U.S. Geological Survey Bulletin, 738, 488.
 Douglass, P. M. and Voight, B., 1969, Anisotropy of granites: A reflection of microscopic fabric. Geotechnique, 19, 376-398.
 Duvall, W. I., 1965, The effect of anisotropy on the determination of dynamic elastic constants of rock. Trans. Soc. Min. Eng. AIME, 232, dec., 309-316.
 Herrmann, O., 1916, Steinbruch-Industrie und Steinbruch-Geologie. Borntraeger, Berlin, 2nd ed., 312 p.
 Holzhausen, G. R., 1989, Origin of sheet structure, 1. Morphology and boundary conditions. Engineering Geology, 27, 225-275.
 Jahns, R. H., 1943, Sheet structure in granites: its origin and use as a measure of glacial erosion in New England. Journal of Geology, 51, 71-98.
 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.
 Ljungner, E., 1930, Spaltentektonik und morphologie der schwedischen Skagerrak-Kueste. Bull. Geol. Inst. Univ. Uppsala, 21, 478 p.
 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.
 Nover, G., Buntebarth, G., Kern, H., Pohl, G., Schopper, JR., Shult, A. & Will, G., 1989, Petrophysical investigations on core samples of the KTB Scientific Drilling 1, 135-142.
 Osborne, F. F., 1935, Rift, grain and hardway in some pre-Cambrian granite, Quebec. Economic Geology, 30, 540-551.
 Peng, S., 1970, Fracture and failure of Chemsford granite. Ph.D. dissertation, Dept. Mineral Engineering, Stanford University.

- Peng, S. and Johnson, A. M., 1972, Crack growth and faulting in cylindrical specimens of chemsford granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 9, 37-86.
- Plumb, R., Engelder, T. and Yale, D., 1984 b, Near-surface in-situ stress, 3. Correlation with microcrack fabric within the New Hampshire. *Journal of Geophysical Research*, 89, 9350-9364.
- Rodrigues, F. P., 1966, A anisotropy of granites. *Proc. 1st. Soc. Rock Mech., Lisbon*, 1, 721-731.
- Sasada, M. and Nishoka, Y., 2004, Tsukuba and Inada areas, Field guide book. 41st CCOP Annual Session.
- Seo, Y. S., Jeong, G. C., Kim, J. S. and Ichikawa, Y., 2002, Microscopic observation and contact stress analysis of granite under compression. *Engineering Geology*, 63, 259-275.
- Siegesmund, S., Kern, H., Vollbracht, A., 1991, The effect of oriented intragranular and boundary cracks on seismic velocities in an ultramylonite. *Tectonophysics*, 186, 241-251.
- 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.
- Taponnier, 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.
- Thill, T. E., Bur, T. R. and Steckley, R. C., 1973, Velocity anisotropy in dry and saturated rock spheres and its relation to rock fabric. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, 10, 535-557.
- Thill, R. E., Williard, R. J. and Bur, T. R., 1969, Correlation of longitudinal velocity variation with rock fabric. *Journal of Geophysical Research*, 74, 4898-4909.
- Tremmel, E. and Widmann, R., 1970, Deformation properties of gneiss. *Proc. 2nd Cong. Int. Soc. Rock Mech., Belgrade*, 1, 567-575.
- 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., 1964, Microjointing in basement, middle Rocky mountains of Montana and Wyoming. *Geological Society of America Bulletin*, 75, 287-292.
- 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. *Rock mountain geology*, 40, 193-209.

(2007년 1월 24일 접수; 2007년 2월 7일 채택)