합천지역의 쥐라기 화강암에 발달된 결의 특성

박덕원*

한국지질자원연구원 지구환경연구부

Characteristics of the Rock Cleavage in Jurassic Granite, Hapcheon

Deok-Won Park*

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

요 약: 합천지역의 쥐라기 화강암에 대하여 결의 특성에 대한 분석을 실시하였다. 미세균열의 분포상은 박편의 확대사진($\times 6.7$)에서 잘 확인되었다. 일차 우세 미세균열은 1번 면에 평행하고 이차 우세 미세균열은 2번 면에 평행하다. 이들 1번 결과 2번 결을 형성하는 미세균열은 3번 면상에서 상호 거의 수직을 이룬다. 결과적으로 연구대상 석산에서 채취한 쥐라기 화강암에서 발달하는 결은 미세균열의 배향성과 관련이 있다. 빈도수, 길이 및 밀도와 같은 미세균열의 매개변수들은 1번결 > 2번 결 > 3번 결의 순서로 우세하게 나타난다. 이러한 결과는 결의 상대적인 강도를 지시한다. 한편 6개 방향에 따른 압열 인장강도가 측정되었다. 암석의 강도와 상기한 미세균열 매개변수들 사이에는 밀접한 상관성을 보이고 있다.

핵심어: 쥐라기 화강암, 결, 확대사진, 미세균열의 매개변수

Abstract: Jurassic granite from Hapcheon was analysed with respect to the characteristics of the rock cleavage. The phases of distribution of microcracks were well evidenced from the enlarged photomicrographs($\times 6.7$) of the thin section. The planes of principal set of microcracks are parallel to the rift plane and those of secondary set are parallel to the grain plane. These rift and grain microcracks are mutually near-perpendicular on the hardway planes. Consequently the rock cleavage of Jurassic granite from the studied quarry can be related to the preferred orientation of microcracks. Microcrack parameters such as number, length and density show an order of rift > grain > hardway. These results indicate a relative magnitude of the rock cleavage. Meanwhile, brazilian tensile strengths were measured with respect to the six directions. The results revealed a strong correlation between mechanical property with microcrack parameters.

Key words: Jurassic granite, Rock cleavage, Enlarged photomicrograph, Microcrack parameters

서 론

국내의 화강암류 석산(granite quarry)에서는 암체 내부에 잠재하는 분리가 용이한 면을 이용하여 채석한다. 이러한 고유의 방향성은 소위 “결”(rock cleavage)이라고 지칭되며, 암석을 채석 또는 가공할 때 경험적으로 사용되는 용어이다.

결은 국내에서 “메”라는 단어로 사용되기도 하며, 이 “메”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 석산에서도 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.

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

따라서 화강암체의 상대적인 할석의 용이도는 일반적으로 1번 결(rift, 이하 리프트) > 2번 결(grain, 이하 그레인) > 3번 결(hardway, 이하 하드웨이)의 순으로 되며, 3 종류의 채석면은 일반적으로 상호 수직관계를 형성한다(박덕원, 2007).

이러한 3 종류의 채석면(quarrying plane)은 일반적으로 상호 직교관계를 이루며, 수직상 채석면의 방향성은 각 석산별로 상이하다. 이들 채석면의 방향성은 단위 석산내에서 채석방향을 결정하는 주요 요인으로 작용하며 또한 규격석을 위한 채석 실수율에도 많은 영향을 미친다. 따라서 이러한 수직의 결을 식별하는 능력은 화강암류 석산에서는 특히 중요하게 인식되고 있다.

한편 화강암 내부의 미세균열 및 미소공동과 같은 결함(defect)의 분포성은 모호하며 정밀한 계측이 없

으면 확인하기 어렵다. 특히 화강암의 결함 중 주요 인으로 작용하는 미세균열의 배향성과 상대적인 밀도의 차이에 따라 분리성은 달라진다. 결의 중요성이 인식되어 리프트, 그레인 및 하드웨이와 미세균열과의 상관성에 대한 연구 사례는 Douglass and Voight (1969), Thill *et al.*(1969), Peng and Johnson(1972), Thill *et al.*(1973), Plumb *et al.*(1984b) 그리고 국내에서는 장보안과 오선환(2001), 박덕원 외(2004) 및 박덕원(2007) 등에서 볼 수 있다.

한편 국외의 화강암 석산에서 발달하는 결과 관련하여 현미경 관찰을 통한 연구결과를 요약, 정리하였다. 이들 연구사례에서는 석영내 미세균열, 유체포유물 및 광축, 장석내 미세균열 및 벽개면, 흑운모의 벽개면 등의 다양한 요소가 검토되었다. 이중 석영 및 장석내 미세균열을 강조하고 있으며, 상대적인 분

Table 1. Correlation of quarrying planes with rock fabric observed under petrographic microscope

Rock mass (Quarry name)	Orientation of quarrying planes		Rock fabric							Reference
			Quartz			Feldspar			Mica	
			Micro-crack	Fluid inclusion	Optic axes	Micro-crack	Fluid inclusion	Cleavage (010)	Cleavage (001)	
Barre granite (Smith)	R	V	○	○	×				×	Douglass and Voight (1969)
	G	H	○	×	×				×	
	H	V	×	×	×				×	
Stanstead granite	R	H	○	×	×				×	
	G	V	△	×	×				△	
	H	V	×	×	×				×	
Laurentian granite	R	H	○	△	×				×	
	G	V	×	×	×				×	
	H	V	○	×	×				×	
Salisbury granite	R		○		×			×		Thill <i>et al.</i> (1969)
	G		○		×			×		
	H		×		×			×		
Chelmsford granite (Fletcher)	R	H	○		×	○			×	Peng and Johnson (1972)
	G	V	△		×	△			△	
	H	V	△		×	○			×	
Barre granite	R	V	○		×				×	Thill <i>et al.</i> (1973)
	G	H	○		×				×	
	H	V	△		×				×	
Milford granite (Barretto)	R	H						$\sigma_{1 \text{ in-situ}} \cong G \cong$		Plumber <i>et al.</i> (1984b)
	G	V	○	×		○	△	First preferred orientation of open microcrack		
	H	V	×	×		×	×			
Conway granite (Redstone)	R	H								
	G	V	○	○		○	○			
	H	V	×	△		△	△			
Milford granite (Fletcher)	R	H						$\sigma_{1 \text{ in-situ}} \cong$ Secondary preferred orientation of open microcrack,		
	G	V	△	○		△	○			
	H	V	×	×		×	×	$\sigma_{1 \text{ in-situ}} \neq G$		

*R: Rift plane, G: Grain plane, H: Hardway plane, H: Horizontal, V: Vertical, ○: Highly related, △: Moderately related, ×: Not related

리성, 즉 리프트 > 그레인 > 하드웨이를 제시하고 있다. 특히 Plumb *et al.*(1984b)은 화강암 석산의 리프트, 그레인 및 하드웨이를 활용하여 현지응력($\sigma_{\text{in-situ}}$)의 방향성을 제시하였다(Table 1).

화강암과 같은 결정질암에서는 차응력(differential stress)이 증가함에 따라 미세균열이 점차 성장하며, 이 미세균열들이 상호 연결되어 결국 암체 내부에 전단면이 발생하게 된다. 취성파괴(brittle failure)의 미소기구(micromechanism)에서 미세균열의 역할에 대한 많은 연구가 수행되었으며, 특히 화강암내 분포하는 미세균열의 수, 밀도, 방향성, 유형 및 응력과의 상관성 등과 관련된 실내연구의 사례는 Wawersik and Brace(1971), Peng and Johnson(1972), Sprunt and Brace(1974b), Simmon *et al.*(1975), Hadley(1976), Tapponier and Brace(1976), Kranz(1979a, 1980, 1983) 및 Wong(1982) 등에서 확인이 되고 있다. 이와 관련된 최근의 국내외 연구사례는 장보안 외(1998), 서용석과 정교철(1999), 이병대 외(1999), Nishiyama *et al.*(2002), Seo *et al.*(2002), Akesson *et al.*(2003) 및 Chae and Seo(2011) 등에서 찾아볼 수 있다.

상기한 바와 같이 3 방향의 결 중에서 수평면 상에서 잠재하는 수직 결의 방향성은 단위 석산 내에서 채석방향 설정에 주요한 요소로 작용하므로 국내외 화강암류 석산에서는 특히 중요한 의미를 지닌다. 따라서 이 연구에서는 수직면(vertical plane)인 1번 면 및 3번 면을 위시하여 수평면(horizontal plane)인 2번 면 상에서 잠재하는 두 조의 수직 결에 대한 미세균열 관련 조직 분석(microcrack-related fabric analysis)을 실시하였다. 세부사항으로는 미세균열의 물리량 및 강도시험을 통하여 결의 발달상과 분포상을 규명하였다. 또한 가시화 및 정량화된 미세균열의 분포특성을 통하여 효과적인 결의 판별요소의 도출을 시도하였다. 연구대상 암석은 합천지역의 화강암을 대상으로 하였다.

시료 및 분석방법

암석시료

경남 합천군 우곡리(신화석상)의 유라기 화강암(이하 합천화강암)에서 시료를 채취하였다. 합천화강암(Hapcheon granite)은 선캠브리아기의 미그마타이트질 편마암을 관입하며, 이들 암체를 피복한 백악기의 퇴적암류인 신동충군으로 이루어 진다(김동학 외, 1998).

Fig. 1. Diagram of the rift, grain and hardway planes showing their approximate orientations.

이 암석은 담회색(light grey)을 띠고, 등립상의 조립 질암으로 석영 및 장석의 입도는 2~9 mm이다. 연구 대상 암석시료 채취심도는 약 17 m이다. 주구성광물의 모드 조성(vol. %)은 석영: 30.5%, 사장석: 40.4%, 정장석: 8.4%, 미사장석: 12.1%, 페다이트: 5.2%, 흑운모: 2.6%이며, 그외 저어콘 및 인회석이 미량 확인된다. 이 암석은 분류상 흑운모 화강암(Streckeisen, 1976)에 속한다. 화강암 석산에서는 2번 면이 수평면을 형성하고, 수직의 1번 면은 ENE의 방향성을 지니며, 수직인 3번 면은 1번 면과 거의 직각을 형성하고 있는 것으로 인식되고 있다(Fig. 1).

분석방법

채취한 합천화강암의 암석시료에서 1번 면, 2번 면 및 3번 면에 각각 평행하게 박편을 제작하였다. 제작된 박편의 크기는 2 cm × 3 cm, 박편의 두께는 연구 조의 측정을 용이하게 하기 위해 일반 박편의 3~4배(약 0.1 mm)로 제작하였다. 석영내 미세균열 및 유체포유물, 장석내 미세균열 및 벽개면, 흑운모의 벽개면 그리고 입자경계 미세균열 등의 다양한 요소가 검토되었다. 그러나 석영 및 장석 입자 내부의 미세균열을 제외한 다른 요소는 결의 방향성과 상관성이 결여되었으며, 따라서 본문에서는 미세결구(microfabric), 특히 미세균열이 강조되었다.

한편 박편의 확대사진(× 6.7)상에서 가로 및 세로

방향으로 각각 5개의 측선과 교차(조사선법)하는 석영 및 장석입자 내부의 미세균열의 길이(L), 간격(S), 빈도수(N) 및 15° 간격의 방향각(θ)을 측정하였다. 이러한 미세균열의 길이는 측정상의 난이도를 고려하여 분포성이 뚜렷한 1 mm 이상인 것만 대상으로 하였다.

합천화강암의 결과 관련된 강도 이방성이 검토되었다. 강도시험으로는 직접적인 인장시험에 비하여 보다 용이한 압열 인장시험(Brazilian tensile test)을 실시하였다. 1번 면, 2번 면 및 3번 면에 각각 수직인 방향으로 NX 코어(직경 5.4 cm)를 채취하여 길이 대 직경의 비가 1:2가 되도록 시편을 제작하였다. 시편에 대하여 모두 6 방향의 결에 평행한 방향으로 압열 인장시험을 실시하였으며, 한 방향의 결에 대하여 모두 10개의 시편이 사용되었다. 상기한 분석방법은 포천화강암의 경우(박덕원 외, 2004)와 동일하다.

결의 모식도

화강암에서는 세 방향의 채석면과 평행하게 제작된 박편 상에서 상호 직교하는 2조의 결(미세균열)을 각각 측정할 수 있다. 채석면과 미세균열과의 상관성을 나타내는 모식도(Fig. 2)에서 1번 면에 평행하는 박편에서는 그레인 1(grain 1)과 하드웨이 2(hardway 2), 2번 면에 평행하는 박편에서는 하드웨이 1(hardway 1)과 리프트 1(rift 1) 그리고 3번 면에 평행하는 박편에서는 그레인 2(grain 2) 및 리프트 2(rift 2)의 미세균열을 각각 측정할 수가 있다(박덕원 외, 2004; 박덕원, 2007).

한편 조사선법에 의한 석영 및 장석 내부의 미세균열을 종합하여 길이, 간격, 빈도수 및 밀도 등을 측정, 합천화강암체 내부에 잠재하는 결 즉, 미세균열의

Fig. 2. Diagram of the six directions of rock cleavage on rift plane (1), grain plane (2) and hardway plane (3).

Fig. 3. (a) Photomicrograph of thin section of the Hapcheon granite cut parallel to grain plane. Black, mottled, and white areas represent quartz, feldspar and biotite, respectively. R: rift plane, H: hardway plane. (b) Map of microcracks in (a). The preferred orientation of microcracks in the quartz approximately parallel to the rift plane.

특성을 모식도에서 제시한 여섯 방향과 연계하여 분석하였다. 1번 면, 2번 면 및 3번 면에 평행하게 제작된 박편의 확대사진 및 미세균열에 대한 스케치 결과의 일부를 제시하면 Fig. 3과 같다.

미세균열의 유형별 분포특성

화강암내 주구성광물의 입자경계부는 점 또는 선 접촉의 형태를 유지하며, 응력이 높게 집중되어 균열 작용이 발생하는 역할을 담당한다. 한편 장석입자에 비하여 분포성의 식별이 용이한 석영입자 내 미세균열은 크게 2 가지 유형(type)으로 구분이 가능하다. 흑운모 입자 모서리 또는 주변부에서 시작하여 석영 입자 내부로 전파되는 ① 흑운모-석영 미세균열 (biotite-quartz microcrack), ② 장석과 석영입자의 경

Fig. 4. Orientation and magnitude of tensile stresses occurred outside the ellipsoidal biotite grain. Gray shaded portion represents distribution of the stresses acted along the latitudinal directions of the interface. Unshaded portion with several lines represents distribution of the stresses acted along the longitudinal directions across the interface. Line represents the predictive orientation of microcracks induced by the stress (Nishiyama *et al.*, 2002).

계부에서 시작하여 석영입자 내부로 전파되는 장석-석영 미세균열(feldspar-quartz microcrack) 등이다.

한편 흑운모-석영/장석 미세균열의 발생 모식도(Fig. 4) 및 합천화강암의 수평면에 대한 박편사진에서 확인되는 전형적인 흑운모-석영 미세균열 및 장석-석영 미세균열의 분포상(Fig. 5)을 제시하였다. 석영, 장석 및 흑운모입자 그리고 석영입자 내부의 미세균열을 양각(engraving in relief) 및 음각(intaglio)으로 각각 표현하여 식별이 용이하도록 표현하였다.

흑운모-석영 미세균열: 암석의 파괴전 단계(prefailure stage)에서 발생하는 흑운모 입자 주변의 응력 상태를 나타내는 모식도(Fig. 4)에서는 가장 큰 규모의 인장 응력은 흑운모 입자의 거의 정상부에서 발생하며, 최대 압축 주응력 방향에 수직으로 작용한다. 압축력에 의한 미세균열의 발생 유형 중, 흑운모 입자 주변부의 석영입자 내부에서 상당수의 미세균열이 확인되며, 흑운모 입자의 모서리(biotite edge)에서 발생한 이러한 인장응력 유도 미세균열(tensile stress-induced microcrack)의 방향성은 대략 최대 압축 주응력 방향과 평행하다(Nishiyama *et al.*, 2002). 미세균열의 방향성과 주응력의 방향성이 상호 일치함을 보여 주는 다른 연구사례는 Tapponier and Brace(1976), 서용석과 정교철(1999) 및 Seo *et al.*(2002) 등에서도 볼 수가 있다.

Fig. 5. Photomicrograph of the intra-quartz microcracks parallel to horizontal grain plane. (a) Significant numbers of biotite-quartz microcracks at biotite boundaries. Note tendency of microcracks to begin at biotite and die out in surrounding quartz. (b) Most of feldspar-quartz microcracks running from quartz-feldspar grain boundary into quartz. The formation of buckled columns of quartz bounded by subparallel microcrack arrays. (c), (d) Typical feldspar-quartz microcrack array in a tiny quartz. The preferred orientation of feldspar-quartz microcracks approximately parallel to the rift plane. Qz: quartz, Fd: feldspar, Bt: biotite, R: rift plane, H: hardway plane.

한편 Fig. 4의 모식도에서 제시한 전형적인 흑운모-석영 미세균열과 거의 유사한 형태의 미세균열을 제시하였다. 석영입자 내부에 위치하는 장경 약 2 mm 크기의 흑운모의 모서리에서 발달하는 흑운모-석영 미세균열의 길이는 0.5~2 mm 정도이다. 식별이 용이하고 연장성이 비교적 뚜렷하며, 리프트 1의 방향과 대체로 평행 배열한다(Fig. 5a).

장석-석영 미세균열(장석-석영 접촉부에서 미세균열): 다른 성질을 갖는 광물이 외부의 응력을 받을 때, 상호간의 탄성 차이에 의하여 입자경계부에서 어느 한 광물 내부로 미세균열이 발생하는 경우(elastic mismatch induced microcracking)에 속한다(Kranz, 1983). 따라서 이 유형은 상기한 흑운모-석영 미세균열의 유형과 유사하다. 화강암의 구성광물 중, 가장 높은 함량을 차지하는 장석 및 석영의 함량을 고려하여 볼 때, 흑운모-장석 미세균열에 비하여 장석-석영 미세균열의

분포비가 상대적으로 클 것으로 생각된다. 일반적으로 개개의 석영은 가장 높은 함량을 차지하는 장석입자에 의하여 포획된 분포형태를 취하며, 대체로 미세균열의 길이는 석영의 크기에 비례하는 경향성을 띤다. 미세균열의 길이는 대부분 1 mm 이상인 경우가 많고, 흑운모-석영 미세균열(Fig. 5a)에 비하여 빈도수의 대비가 뚜렷하다. 독립분포하는 각 석영 내부의 미세균열은 리프트 1의 방향과 대체로 평행 배열하는 경향성을 보인다. 박편의 확대사진 상에서는 석영내 미세균열의 연장성 및 식별이 장석내 미세균열의 경우보다 상대적으로 양호하여 결의 방향성을 잘 반영한다(Fig. 5b).

한편 장석 내부에서 포획체로 분포하는 장경 700 μm 의 미소한 석영 내에서도 리프트 1과 평행하는 미세균열이 발달한다(Fig. 5c). 또한 장석 및 석영입자의 경계부를 보다 확대한 사진에서는 리프트 1과 평행하게 발달하는 수조의 미세균열을 명확히 확인할 수가 있다(Fig. 5d).

미세균열의 길이

미세균열의 길이는 모두 333개를 측정하였다. 각 면별로는 1번 면에서 92개, 2번 면에서 112개 그리고 3번 면에서 129개를 각각 측정하였다(Table 2). 전체적인 미세균열의 길이는 1~8 mm 사이에 분포하나, 각 면에서의 분포범위에서는 상호간에 큰 차이가 없으며, 1~3 mm 사이에 집중한다. 총 측정치에 대한 1~3mm 사이의 균열이 차지하는 비율은 3번 면(30.9%) > 2번 면(26.7%) > 1번 면(19.2%)의 순을 보인다. 또한 합천화강암의 전체적인 평균길이는 2.39 mm이며, 각 면의 평균길이는 1번 면(2.56 mm) > 2번 면(2.37 mm) > 3번 면(2.31 mm)의 순으로 나타난다. 특히 1 및 2번 면에 비하여 3번 면에서 측정된 미세균열의 평균길이가 2.31 mm로서 가장 짧게 나타나며, 이러한 결과는 포천화강암의 사례(박덕원 외, 2004)와 동일하다.

Fig. 6. Plots of microcracks number (N) vs. length (L) on the rift, grain, hardway planes.

3개 면에서 측정된 미세균열의 길이(L)-수(N) 분포 양상은 $Y = ae^{-bx}$ 형의 음의 지수함수 곡선으로 나타나며, 이러한 결과는 Krantz(1983), Segall and Pollard (1983), Seo *et al.*(1999), 서용석(2000) 및 Takemura *et al.*(2003)의 결과와 거의 일치한다. 한편 최적 상관식의 상관계수(R^2)는 0.84~0.92로 비교적 높은 값을 보이며, 상수 a 및 b의 값은 3번 면 > 2번 면 > 1번 면의 순으로 되어 곡선의 구배도 이와 동일한 순서를 보인다(Fig. 6).

방향각별 총 길이

3개 면에서 측정된 미세균열의 총 길이(total length)는 736.3 mm이며, 3번 면(276.8mm) > 2번 면(247.5 mm) > 1번 면(212.0mm)의 순으로 나타난다(Table 3). 또한 각 면의 방향각(θ)별 미세균열의 총 길이분포를 도시하였다(Fig. 7). 방향성은 박편의 세로축의 중심을 택하여 시계방향(positive)과 반시계방향(negative)으로 구분하여 측정하였다. 3개 면에 대한 방향각 별 총 길이분포는 상이하며, 모식도(Fig. 2)에서 제시한 6개 방향과 관련하여 분포특성을 살펴 보면 다음과 같다. 1번 면에서는 $\pm 80^\circ \sim \pm 90^\circ$ 구간(그레인 1)에서 가장 높은 길이분포를 보이며, $+15^\circ$ 및 -60° 구간에

Table 2. Measured value of microcrack length on three planes

Plane	Length (mm)							Mean
	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	
Rift	39	25	13	13	2			2.56
Grain	49	40	16	4	1	2		2.37
Hardway	64	39	16	8	1		1	2.31 (2.39)
Total	Rift : 92 Grain : 112 Hardway : 129 (333)							

Table 3. Orientation (θ) and total length (mm) distribution on three planes

$\theta(^{\circ})$	Negative							Positive						
	82.5 ~ 90	67.5 ~ 82.5	52.5 ~ 67.5	37.5 ~ 52.5	22.5 ~ 37.5	7.5 ~ 22.5	0 ~ 7.5	0 ~ 7.5	22.5 ~ 37.5	37.5 ~ 52.5	52.5 ~ 67.5	67.5 ~ 82.5	82.5 ~ 90	
Rift	22.6	11.3	13.8	8.7	1.6	2.2	5.0	10.1	22.6	17.5	13.3	13.3	23.7	46.3
Grain	2.2	12.3	15.1	6.1	8.7	19.5	35.4	39.1	46.7	7.1	6.1	8.0	29.9	11.3
Hardway	13.4	8.0	8.7	5.1	6.1	24.7	40.1	68.2	29.9	8.0	5.0	17.5	28.8	13.3
Total	Rift : 212.0 Grain : 247.5 Hardway : 276.8 (736.3)

Fig. 7. Distribution of total length of microcracks relative to direction.

서 미약한 변곡점(diverging point)을 각각 형성하나, 전체적인 곡선의 형태는 Y축을 경계로 하여 대칭형태를 취하는 분포특성이 나타난다. 2번 면에서는 $0^{\circ} \sim \pm 10^{\circ}$ 구간(리프트 1)에서 가장 높은 길이분포를 보인다. $\pm 80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 구간(하드웨이 1)에서 변곡점을 각각 형성하며, 대칭형태를 보인다. 3번 면(리프트 2와 그레인 2가 교차하는 면)에서는 $0^{\circ} \sim \pm 10^{\circ}$ 구간(리프트 2)에서 가장 높은 길이분포를 보이며, $\pm 80^{\circ} \sim \pm 90^{\circ}$ 구간(그레인 2)에서 다시 변곡점을 형성하여 분포성이 뚜렷한 2조의 미세균열이 상호 수직에 가까운 분포형태를 보이고 있다. 이 그림은 3개 면의 방향각별 미

세균열의 총 길이에 대한 분포성을 나타낸다(Fig. 7).

미세균열의 간격

미세균열의 간격은 모두 409개를 측정하였다. 각 면에 대한 균열간격은 1번 면에서는 124개, 2번 면에서는 123개 그리고 3번 면에서는 162개를 각각 측정하였다. 합천화강암의 균열간격은 6.5 mm 이내의 범위에서 분포하고, 주로 1 mm 이내에 집중되어 있다. 균열의 전체적인 평균간격은 약 1.32 mm로 나타난다(Table 4).

각 면별로 1 mm 이하의 균열간격의 분포비를 살펴보면, 3번 면(25.4%) > 1번 면(17.6%) > 2번 면(15.8%)의 순으로 나타난다. 특히 각 면의 평균간격은 1번 면(1.45 mm) > 2번 면(1.43 mm) > 3번 면(1.15 mm)의 순으로 되며, 포천화강암의 경우(박덕원 외, 2004)와 동일하다. 각 면 별로 평균간격을 비교하여 보면, 1번 면과 2번 면 사이에는 큰 차이가 없으나 3번 면에서는 1번 면과 2번 면과 비교하여 상대적으로 간격이 조밀하다. 이와 같은 현상은 균열발달의 빈도수(N)에 상관성이 있다고 할 수 있다. 한편 균열의 간격(S)-수(N) 상관도의 분포형태는 Fig. 4의 경우와 거의 유사하게 음의 지수함수 곡선으로 나타난다. 간격이 0.5 mm 이하인 구간에서는 변곡점이 형성되어 감소 추세를 보이는 특성이 있다(Fig. 8).

Table 4. Measured value of microcrack spacing on three planes

Plane	Spacing (mm)														Mean
	0 ~ 0.5	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0	2.0 ~ 2.5	2.5 ~ 3.0	3.0 ~ 3.5	3.5 ~ 4.0	4.0 ~ 4.5	4.5 ~ 5.0	5.0 ~ 5.5	5.5 ~ 6.0	6.0 ~ 6.5		
Rift	31	41	13	3	11	7	3	4	5	3	2		1	1.45	
Grain	29	36	13	7	20	5	2	5	3		2		1	1.43	
Hardway	41	63	16	12	12	7	4	3	3	1				1.15 (1.32)	
Total	Rift : 124 Grain : 123 Hardway : 162 (409)

Fig. 8. Microcrack number (N) with respect to their spacing (S) on three planes.

Fig. 9. Distribution of microcrack number (N) with respect to direction in photomicrograph.

미세균열의 수

미세균열에 대한 방향별 분포수(N)는 합천화강암에서 모두 333개를 측정하였다. 각 면에 대하여 1번 면에서는 92개, 2번 면에서는 112개, 3번 면에서는 129개를 각각 측정하였다(Table 5). 한편 각 면에 대한 방향각 별 균열의 분포수를 도시하였으며(Fig. 9), 이는 미세균열의 길이 측정 수치와 동일하다. 3개 면에 대한 방향각 별 분포양상을 모식도(Fig. 2)와 관련하여 기재하였다. 1번 면에서는 $\pm 80^\circ \sim \pm 90^\circ$ 구간(그레인 1)에서 가장 높은 분포수를 보이고 있다. $+15^\circ \sim 20^\circ$ 구간에서 미약한 변곡점 형성하나, 전체적인 곡선의 형태는 Y축을 경계로 대칭형태로 나타난다. 2번 면에서는 $0^\circ \sim \pm 20^\circ$ 구간(리프트 1)에서 가장 높은 분포를 보이며, $\pm 80^\circ \sim 90^\circ$ 구간(하드웨이 1)에서 변곡점을 각각 형성하며, 대칭형태를 취하는 분포특성이 나타난다. 3번 면(리프트 2와 그레인 2가 교차하는 면)에서는 $0^\circ \sim \pm 10^\circ$ 구간(리프트 2)에서 가장 높은 길이분포를 보이며, $\pm 80^\circ \sim \pm 90^\circ$ 구간(그레인 2)

에서 다시 변곡점을 형성하여 2조의 미세균열이 상호 수직에 가까운 분포성을 나타내고 있다. 이 그림은 3개 면의 방향각 별 미세균열의 분포수에 대한 분포성을 나타내며, Fig. 5에서 제시한 총길이에 대한 분포형과 거의 유사하다(Fig. 9).

미세균열의 밀도 및 강도

조사선법에 의한 방향각 별 미세균열의 수(N) 및 길이(L)는 모두 333개가 측정되었다(Table 2 및 5). 미세균열의 밀도(ρ)는 시료의 단면적(A), 균열길이의 절반(half-length, C) 및 미세균열의 수(N)를 이용하여 다음 식 (Segall, 1984)으로 구할 수 있다(Table 6).

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

미세균열의 밀도는 균열의 빈도수와 길이의 함수이며, 각 면에 대한 분포각(θ)별 미세균열의 밀도를 도시하였다(Fig. 8). 1번 면에서는 분포각 $\pm 80^\circ \sim \pm 90^\circ$

Table 5. Orientation (θ) and microcrack number (N) distribution on three planes

Plane	$\theta(^{\circ})$													
	Negative							Positive						
	82.5 ~ 90	67.5 ~ 82.5	52.5 ~ 67.5	37.5 ~ 52.5	22.5 ~ 37.5	7.5 ~ 22.5	0 ~ 7.5	0 ~ 7.5	7.5 ~ 22.5	22.5 ~ 37.5	37.5 ~ 52.5	52.5 ~ 67.5	67.5 ~ 82.5	82.5 ~ 90
Rift	10	5	5	3	2	4	2	4	10	8	7	7	11	14
Grain	4	6	6	3	3	10	14	20	19	4	3	5	10	5
Hardway	7	5	3	2	3	12	21	26	15	5	2	8	13	7
Total	Rift : 92 Grain : 112 Hardway : 129 (333)													

Table 6. Orientation (θ) and microcrack density (ρ) distribution on three planes

Plane	$\theta(^{\circ})$	Negative							Positive							Total
		82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5	0	0	7.5	22.5	37.5	52.5	67.5	82.5	
		90	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5	7.5	22.5	37.5	52.5	67.5	82.5	90	
Rift		0.04	0.02	0.03	0.02	0.001	0.001	0.01	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	0.04	0.12	0.41
Grain		0.001	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.07	0.06	0.09	0.01	0.01	0.01	0.07	0.02	0.45
Hardway		0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04	0.06	0.14	0.05	0.01	0.01	0.03	0.05	0.02	0.48 (1.34)

Fig. 10. Distribution of microcrack density (ρ) relative to direction.

구간(그레인 1)에서 가장 높은 밀도분포를 보이며, $+15^{\circ}$ 및 -60° 구간에서 미약한 변곡점을 형성하고 있다. 이와 같은 양상은 빈도 수(Fig. 10)의 경우와 유사하다. 2번 면에서는 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 구간(리프트 1)에서 가장 높은 밀도분포를 보이며, $\pm 60^{\circ}$ 구간에서 변곡점을 각각 형성하여 미약한 증가추세를 보이고 있다. 3번 면에서는 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 구간(리프트 2)에서 가장 높은 밀도분포를 보이며, $\pm 80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 구간(그레인 2)에서

변곡점을 형성하여 2조의 미세균열이 상호 수직에 가까운 분포성을 보이고 있다. 이와 같은 양상은 2번 면의 분포형태와 유사하다. 이 그림은 3개 면의 방향 각 별 미세균열의 밀도 분포를 나타낸다(Fig. 8). 합천화강암의 균열밀도는 포천화강암의 4.14(박덕원 외, 2004)에 비하여 낮은 1.34이며, 3번 면 (0.48) > 2번 면 (0.45) > 1번 면 (0.41)의 순으로 나타난다.

한편 미세균열의 모식도(Fig. 2)에서 제시한 6개 방향에 따른 미세균열의 발생빈도(N), 총길이(L_t), 평균길이(L_m), 밀도(ρ) 및 압열 인장강도치를 종합해 보면 Table 7과 같다. 상기한 미세균열의 각종 물리량에 대하여 2방향의 결에 대한 평균치를 산출한 결과, (리프트 1 + 리프트 2) > (그레인 1 + 그레인 2) > (하드웨이 1 + 하드웨이 2)의 순으로 되어 결의 강도에 따른 경향성이 보다 뚜렷하다(Table 8).

화강암의 결과 관련된 역학적 이방성을 밝히기 위하여 균열의 분포성에 비교적 예민한 압열 인장시험을 수행하였다. Fig. 2에 제시한 6개 방향의 결과 평행한 방향으로 압열 인장응력을 가한 후 강도를 측정하였다. 6개 방향의 인장강도는 $83 \sim 121 \text{ kg/cm}^2$ (평균: 98.8 kg/cm^2), 각 면에 대한 2개 방향별 강도 이방성 계수의 범위는 $15.1 \sim 20.0\%$ (평균 17.5%)로 각각 나타난다. 6개 방향별 미세균열의 각종 물리량과 인장

Table 7. N, L_t , L_m , ρ and An of σ_t with respect to rock cleavage

Plane	Direction of rock cleavage	N	L_t (mm)	L_m (mm)	ρ	Tensile strength (kg/cm^2)	
						σ_t	An (%)
Rift	Hardway 2	6	15.1	1.98	0.02	121	20.0
	Grain 1	24	68.9	2.56	0.12	99	
Grain	Hardway 1	9	13.5	2.07	0.03	105	17.6
	Rift 1	34	74.5	2.37	0.14	88	
Hardway	Grain 2	14	26.7	2.07	0.04	97	15.1
	Rift 2	47	108.3	2.32	0.19	83	
Mean		22.3	51.1	2.22	0.09	98.8	17.5

*Six directions of rock cleavage are same as in Fig. 2. N: microcrack number, L_t : total length of microcrack, L_m : mean length of microcrack, ρ : microcrack density, σ_t : tensile strength, An (Anisotropy coefficient): Max-Min / Mean

Table 8. Mean values of N , L_t , L_m , ρ and σ_t with respect to rock cleavage

Direction of rock cleavage	N	L_t (mm)	L_m (mm)	ρ	Tensile strength (kg/cm ²)	
					σ_t	An (%)
Rift 1+Rift 2 / 2	40.5	91.4	2.34	0.17	85.5	
Grain 1+Grain 2 / 2	19.0	47.8	2.31	0.08	98	27.8
Hardway 1 +Hardway 2 / 2	7.5	14.3	2.02	0.03	113	

*Six directions of rock cleavage and symbols of microcrack parameters are same as in Fig. 2 and Table 7, respectively.

Fig. 11. Variation of microcrack density (○), mean length of microcrack (△), microcrack number (◇), total length of microcrack (▲) and tensile strength (□) with respect to six directions of rock cleavage shown in Fig. 2.

Fig. 12. Relation between microcrack parameters and tensile strength. Symbols of microcrack parameters are same as in Fig. 11.

강도와와의 상관도에서 인장강도는 미세균열의 밀도, 빈도수 및 총길이에 비교적 높은 상관성을 보이고 있다 (Fig. 11).

6개 방향별 인장강도 - 밀도, 평균길이, 빈도수 및

총길이간의 상관도에서 최적상관식은 모두 음의 지수 함수로 표현되며, 인장강도의 방향별 분포특성은 평균길이(상관계수: $R^2=0.40$)에 비하여 상대적으로 변화 폭이 큰 빈도수(상관계수: $R^2=0.88$), 밀도(상관계수: $R^2=0.77$) 및 총길이(상관계수: $R^2=0.70$)에 상대적으로 더 민감하다(Fig. 12).

토 론

국내 단위 석산 내에서의 결의 방향성은 채석방향을 결정하는 주요 요인으로 작용하며 또한 규격석을 위한 채석 실수율에도 많은 영향을 미친다. 따라서 이러한 수직의 결을 식별하는 능력은 화강암류 석산에서는 특히 중요하게 인식되고 있다. 기존의 석산에서는 일반적으로 수직 결의 방향과 평행한 수직상 채석면이 형성되어 있으나, 미개발지 내에서 발달하는 암체의 수평면 상에서 수직 결을 형성하는 1번 면 또는 2번 면의 방향을 결정하는 일은 신중하여야 하며 또한 중요한 사안에 속한다. 이러한 수직 결을 형성하는 미세균열의 방향성 파악과 아울러 미세균열의 유형별 가시화를 통하여 화강암체의 응력성에 관련된 지구조적인 측면에서도 그 의의를 모색할 수가 있다. Fig. 5에서 제시한 흑운모-석영 미세균열 및 장석-석영 미세균열의 방향성은 수직의 1번 면에 거의 평행하며, 모두 $0^\circ \sim \pm 10^\circ$ 구간(리프트 1)에서 높은 집중성을 보여주고 있다. 따라서 이러한 유형의 미세균열의 배열성은 화강암체 내부의 응력성을 반영하며, 특히 수직 결의 방향성 판별에 강력한 지시자로 나타난다.

한편 화강암에서 발달하는 석영 입자 내 미세균열은 다소 최대 압축 주응력(σ_1)의 방향과 평행한 반면, 장석의 경우에는 벽개면(cleavage plane)에 조정되어 때때로 응력 유도 미세균열과 벽개면과의 구별이 용이치 않다. 따라서 차응력(differential stress) 하에서 비탄성 변형(inelastic deformation)을 반영하는 석

영 입자 내에서 대표적인 측정치를 구할 수 있는 잇점이 있다(Takemura *et al.*, 2004). 그러나 이들 석영 입자 내 미세균열은 상호 미소한 차이의 주향각을 보여 육안상으로는 정확한 분포성의 확인이 어려우며, 박편의 확대사진의 분석을 통하여 보다 명확한 미세균열의 조 및 방향성을 확인할 수가 있다. 즉 다양한 시대에 걸쳐 형성된 미세균열의 계(system)를 보다 용이하게 관찰할 수가 있으며, 분포성이 뚜렷한 개개 미세균열 조의 방향성 판별 및 유형분류 등에 보다 유용할 것으로 생각된다. 특히 화강암체 내에서 발달하는 거시적인 절리(macroscopic joint)의 분포성은 미세균열의 분포성과 상관성이 있음을 보여 주고 있다(Vollbrecht *et al.*, 1991). 이러한 연구사례에 비추어 합천지역의 유라기 화강암체 내부에도 다양한 시대를 통하여 형성된 개개 미세균열 조와 평행하게 발달하는 수직상 절리의 잠재성을 유추할 수가 있다.

결 론

합천지역의 유라기 화강암을 대상으로 1번 면, 2번 면 및 3번 면에 평행하게 제작된 박편의 확대사진을 이용하여 미세균열의 방향성과 길이, 빈도수 및 밀도의 분포성 그리고 강도와의 상관성 등을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 조사선법에 의한 미세균열의 분포형은 1번 결 및 2번 결의 방향을 따라 상호 직교하는 형태를 보인다. 또한 미세균열의 밀도, 빈도수, 총길이 및 평균 길이는 결의 상대적인 강도를 제시하고 1번 결 > 2번 결 > 3번 결의 순으로 나타난다.
2. 결의 모식도에 따른 6개 방향별 압력 인장강도 - 미세균열의 빈도수, 밀도 및 총길이와의 관계도에서 결의 상대적인 발달 정도를 비교적 잘 반영하며, 평균길이에 비하여 빈도수와 상관성이 높게 나타난다.
3. 박편의 확대사진 상에서 전형적인 흑운모-석영 및 장석-석영 미세균열은 리프트 1의 방향성을 잘 반영한다. 석영 내부에 분포하는 미세균열의 분포특성은 잠재적인 채석면의 방향성을 판단할 수 있는 가능성을 제시한다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 지구환경연구부에서 수행하고 있는 '저온 지열 열병합 발전에 활용가능한

심부지열수 자원확보 기술 개발'과제에서 지원되었습니다. 또한 본 논문의 심사과정에서 유익한 조언과 지적을 해주신 충북대학교의 서용석 교수님과 익명의 심사위원님께 깊은 사의를 표합니다.

참고문헌

- 김동학, 황재하, 박기화, 송교영, 1998, 한국지질도(1:250,000), 부산도폭. 한국자원연구소, 62p
- 박덕원, 2007, 국내의 중생대 화강암류에서 발달하는 수직의 1번 및 2번 면의 방향성. 한국암석학회지, 16, 12-26.
- 박덕원, 김형찬, 이창범, 홍세선, 장세원, 이철우, 2004, 포천지역의 유라기 화강암에 발달된 결의 특성. 한국암석학회지, 13, 133-141.
- 서용석, 2000, 화강암의 응력완화현상에 관한 수침삼축시험. 대한지질공학회, 10, 217-223.
- 서용석, 정교철, 1999, 수침삼축압축하에서 관찰되는 화강암의 미세 파괴. 대한지질공학회, 9, 243-251.
- 이병대, 장보안, 윤현수, 이한영, 진명식, 1999, 문경지역에 분포하는 화강암의 미세균열 발달특성. 한국암석학회지, 8, 24-33.
- 장보안, 김영화, 김재동, 이찬구, 1998, 피로하중에 의한 포천화강암의 미세균열 발달특성. 대한지질공학회, 8, 275-284.
- 장보안, 오선환, 2001, 포천화강암내 발달한 결의 역학적 이방성과 미세균열의 상관성, 대한지질공학회, 11, 191-203.
- Akesson, U., Hanssen, J. and Stigh, J., 2003, Characterisation of microcracks in the Bohus granite, western Sweden, caused by uniaxial cyclic loading. Engineering Geology, 72, 131-141.
- Chae, B.G. and Seo, Y.S., 2011, Homogenization analysis for estimating the elastic modulus and representative elementary volume of Inada granite in Japan, Geosciences Journal, 15, 387-394.
- Douglass, P.M. and Voight, B., 1969, Anisotropy of granites: A reflection of microscopic fabric. Geotechnique, 19, 376-398.
- Hadley K., 1976, Comparison of calculated and observed crack densities and seismic velocities of Westerly granite. J. Geophys. Res., 81, 3484-3494.
- Kranz, R.L., 1979a, Crack growth and development during creep of Barre granite. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 16, 23-35.
- Kranz, R.L., 1980, The effect of confining pressure and stress difference on static fatigue of granite. J. Geophys., 85, 1854-1866.
- Kranz, R.L., 1983, Microcrack in rocks: a review. Tectonophysics, 100, 449-480.
- 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.S and Johnson, A.M., 1972, Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 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 Granites. *J. Geophys. Res.*, 89, 9350-9364.
- Segall, P., 1984, Formation and growth of extensional fracture sets. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95, 454-462.
- Segall, P. and Pollard D. D., 1983, Joint formation in granitic rock of the Sierra Nevada. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 94, 563-575.
- 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.
- Seo, Y.S. and Seico, Y., 1999, Crack generation and propagation during stress relaxation of crystalline rock under water saturated uniaxial condition. *J. Soc. Mat. Sci., Japan*, 48, 1255-1262.
- Simmon, G., Todd, T. and Baldrige, W.S., 1975, Toward a quantitative relationship between elastic properties and cracks in low porosity rocks. *Am. J. Sci.*, 275, 318-345.
- Sprunt, E. and Brace, W.F., 1974b, Some permanent structural changes in rock due to pressure and temperature. *Proc. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech.*, II-A, 524-529.
- Streckeisen, A.L., 1976, To each plutonic rocks and its proper name. *Earth Sci. Rev.*, 12, 1-33.
- Takemura, T., Golshani, A., Oda, M., Suzuki, K., 2003, Preferred orientation of microcracks in granite and their relation with anisotropic elasticity. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 40, 443-454.
- Takemura, T., Oda, M., 2004, Stereology-based fabric analysis of microcracks in damaged granite. *Tectonophysics*, 387, 131-150.
- Tapponier, P. and Brace, W.F., 1976, Development of stress-induced microcracks in Westerly granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 13, 103-112.
- 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. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 10, 535-557.
- Thill, R.E., Williard, R.J. and Bur, T.R., 1969, Correlation of longitudinal velocity variation with rock fabric. *J. Geophys. Res.*, 74, 4898-4909.
- 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. *J. Struct. Geol.*, 13, 787-799.
- Wawersik, W.R. and Brace, W.F., 1971, Post-failure behaviour of a granite and diabase. *Rock Mech.*, 3, 61-85.
- Wong, T.-F., 1982, Micromechanics of faulting in Westerly granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 19: 49-64.

2011년 12월 8일 접수

2011년 12월 12일 심사개시

2011년 12월 23일 채택