

## 주라기 화강암에 발달하는 결의 현미경학적 분석

### Microscopic Analysis of the Rock Cleavage for Jurassic Granite in Korea

박 덕 원 (Deok Won Park)  
서 용 식 (Yong Seok Seo)  
정 교 철 (Gyo Cheol Jeong)  
김 영 기 (Young Ki Kim)

한국지질자원연구원  
한국건설기술연구원  
안동대학교 지구환경과학과  
경북대학교 지질학과

#### 요약 / ABSTRACT

본 연구에서는 포천, 거창, 함천 지역에 분포하는 주라기 화강암의 결의 특성을 분석하기 위하여 결을 따라 제작된 박편의 편광현미경 관찰을 수행하였다. 또한 조사선법을 이용하여 미세균열의 방향성, 길이 및 간격을 측정하였다. 그 결과를 보면 석영과 장석 내에 분포하는 미세균열의 선택적 방향성이 결의 방향과 일치하고 있으며, 균열의 길이는 화강암을 구성하는 광물의 입자가 클수록 크게 나타났다. 또한 선택적 배향성을 보이는 미세균열은 rift, grain, hardway 면 순으로 발생빈도, 길이 및 밀도가 잘 발달되어 있다.

**주요어** : 화강암, 결, 균열길이, 균열밀도

Jurassic granites of three sites, Pocheon, Geochang and Habcheon, were analysed with respect to the characteristics of the rock cleavage. Microscopic analysis for the oriented thin sections of the specimens was conducted by using the scanline survey technique to measure microcrack direction, spacing and length. The results showed that the preferred orientations of microcrack developed in quartz and feldspar are coincident with the orientation of quarry planes. The length of microcrack is related to grain size. The length of microcrack in coarse-grained granite is longer than that in relatively fine-grained granite. In all granites, microcracks related to the preferred orientations are well developed in order of rift, grain and hardway planes in number, length and density.

**Key Words** : granite, rock cleavage, crack length, crack density

## 서론

암석중의 미세균열은 암석의 파괴, 시간의존성 거동 및 투수 등의 역학적 기구를 이해하는데 있어서 대단히 중요하다(Seo et al., 1999). 화강암 채석 작업에서는 채석방향, 즉 암석 “결” (rock cleavage)의 존재와 그 특성이 중요시되어 과거 많은 학자들에 의해 연구되어 왔다. Herrmann(1916), Dale(1923), Ljungner(1930), Jahns(1943)는 석영과 장석을 가로지르는 미세균열의 우세방향이 상호 수직을 이루어 일련 결(rift)과 이번 결(grain)을 형성한다고 하였다. Osborne(1935), Wise(1964)는 rift와 grain 외에 삼면 결(hardway)이 존재한다고 하였으며, hardway는 rift 및 grain에 각각 수직관계를 형성한다고 하였다. Rodrigues(1966), Douglass and Voight(1969), Tremmel and Widmann(1970)은 탄성계수를 검토한 결과 rift, grain 및 hardway가 상호 사방대칭임을 시험에 의해 밝혔다. Duvall(1965), Thill et al.(1969), Bur and Hjelmstad(1969), Thill et al.(1973)은 탄성과 속도를 이용하여 rift, grain 및 hardway간의 이방성을 밝혔고, 상호 사방대칭임을 규명하였다. Peng(1970), Peng and Johnson(1972), Simmons et al.(1975), Solberg(1975), Holzhausen(1989), 이상은 등(1999)은 현미경 관찰에 의하여 rift, grain 및 hardway를 제시하였다. Twidale(1982)은 rift, grain 및 hardway 상호간의 상대적인 분리성, 즉 rift > grain > hardway를 제시하였다. Plumb et al.(1984)은 rift, grain 및 hardway를 활용하여 현지응력의 방향성을 제시하였으며, 이병대 등(1999)은 국내 화강암을 대상으로 차분변형을 분석을 실시하여 화강암내에 발달하는 미세균열의 이방성을 밝혔다. 이상 여러 학자들에 의해 연구된 암석의 “결” (rock cleavage)은 암체에 충격을 가하였을 때 일정한 방향성을 갖고 분리하게 되는 성질을 말한다. Davis(1984)에 의하면 암석의 분리(rock cleavage)는 크게 연속분리(continuous cleavage)와 불연속분리(discontinuous cleavage)로 분류된다. 연속분리에는 슬레이트형 분리(slaty cleavage), 필라이트형 구조(phyllitic structure), 편리(schistosity)등이 있으며, 불연속 분리에는 파랑분리(crenulation cleavage), 간격 분리(spaced cleavage) 등이 있다. 본 연구에서 대상으로 하는

화강암의 결은 성인적인 연계성을 갖지 않는 간격분리(장태우, 1992)에 해당되며, Powell(1979)과 Borradaile et al.(1982)의 분류에 의하면 이접간격분리(disjunctive spaced cleavage)에 해당된다. 본 연구에서는 “결”을 상기한 분리(cleavage)에 대한 포괄적인 용어로서 사용한다.

암석의 분리 또는 파괴는 그 암체내의 잠재결함에 의하여 일어나게 된다. 즉 응력이 미세 결함(microscopic defect) 주위에 집중되어 분리 또는 파괴가 촉진된다 (Griffith, 1924). 암석의 결함은 온도, 습도, 동결, 용해, 반복되는 응력의 도수, 하중의 시간 및 충격의 속도 등 다양한 요인에 의해 발생되며, 이론적인 강성 및 소성이론이나 혹은 확률과정이론 등에 의해 분리성 및 파괴성을 규명할 수 있다.

본 연구에서는 화강암을 구성하는 주 구성광물내에 분포하는 미세균열의 방향성을 측정하여 평사투영망을 이용하여 분석하였으며, 불연속면 간격, 길이 및 분포밀도를 비교 분석하였다. 연구대상 암석은 채석작업시 국내에서 결의 발달이 양호한 것으로 알려져 있는 포천화강암, 결의 발달이 비교적 양호한 것으로 알려져 있는 거창화강암, 결의 발달이 다소 미약한 것으로 알려져 있는 함천지역에 분포하는 화강암으로 하였다.

## 시료제작 및 분석방법

### 암석시료

암석시료는 경기도 포천군 가양리에 분포하는 주라기 대보화강암(포천화강암), 경남 거창군 산청리에 분포하는 주라기 화강암(거창화강암)과 경남 함천군 우곡리에 분포하는 주라기 화강암(함천화강암)에서 채취하였다. Figure 1은 거창화강암의 채석장 사진이다.

포천화강암은 선캠브리아기의 편마암류 암체를 관입한 주라기 화강암체이며, 담홍색을 띠고, 특히 칼륨장석의 함량이 많은 암석이므로 비교적 강도가 낮은 암석에 속한다. 이 암석은 분류상 흑운모 화강암에 속한다.

거창화강암은 북북동측에 분포하는 선캠브리아기의 반상변정편마암과 동측에 분포하는 흑운모 호상편마암을 관입한 주라기 화강암이다(김남장과 김

주라기 화강암에 발달하는 결의 현미경학적 분석

정환, 1970). 본 화강암은 회백색을 띠고 중립질이며, 특히 사장석의 함량이 많아 포천화강암보다 강도가 좀 높은 편이다. 이 암석도 분류상 흑운모 화강암에 속한다.

합천화강암은 시대미상인 편마암상 화강암을 관

입하고 있으며(장기홍, 1968), 담회색을 띠고 조립질이며, 사장석 함량이 많은 편이다. 이 암석도 암석분류상 흑운모 화강암에 속한다. Table 1은 각 암석시료의 광물조성과 암석학적 특징을 나타낸 것이다.

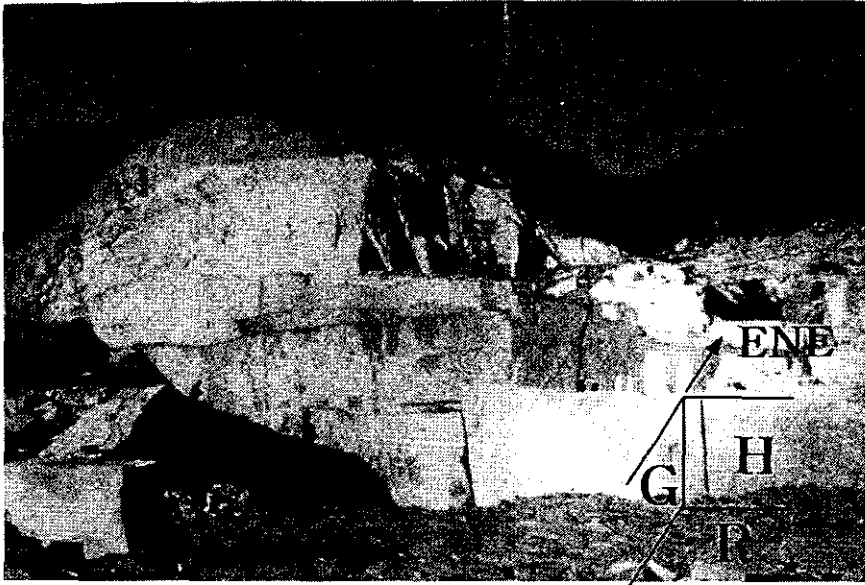


Fig. 1. Photograph of quarry in Geochang granite.

Table 1. Modal composition and physical properties of granites.

(Vol. %)

Granites	Pocheon granite	Geochang granite	Habcheon granite
Quartz	32.7	31.3	30.5
Plagioclase	29.3	39.5	40.4
Orthoclase	4.8	9.8	8.4
Microcline	15.3	9.6	12.1
Perthite	13.4	5.7	5.2
Biotite	3.1	2.9	2.6
Muscovite	tr	0.3	-
* Others	1.3	0.9	0.8
Color	Pale pink	Greyish white	Light grey
Texture	Equi-granular	Equi-granular	Equi-granular
Grain size (Quartz and feldspar)	3 - 9mm (Coarse grained)	2 - 6mm (Medium grained)	2 - 9mm (Coarse grained)
Sampling depth	25m	20m	17m

\* Others : Magnetite, zircon, apatite.

박편제작

본 연구는 박편 및 박편의 확대사진 관찰을 통하여 화강암에 분포하는 미세 결함, 즉 그 암석이 갖는 고유의 "결"(rock cleavage)을 규명하기 위한 것이다. 현미경관찰을 위하여 제작된 박편은 Figure 2와 같이 각 "결"의 면(rift plane, grain plane, hardway plane)에 평행하게 절단하여, 크기는 2cm × 3cm, 두께는 보통 박편의 4배 정도로 제작하였다.

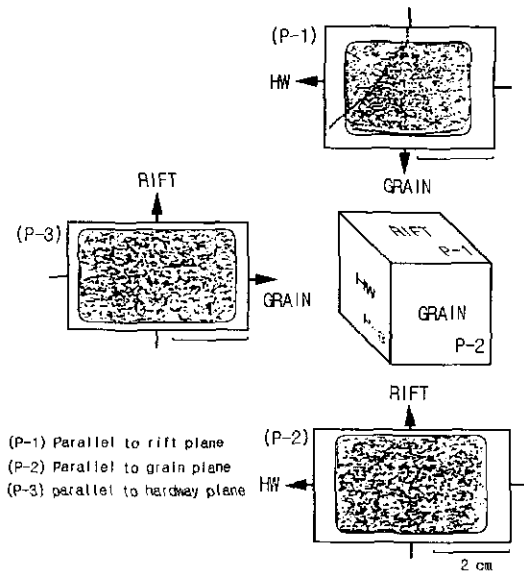


Fig. 2. Diagram of the orthogonal rift, grain, and hardway planes showing their approximate geographic orientation and oriented thin-section preparation for Pocheon granite.

분석방법

각 암체(포천화강암, 거창화강암, 합천화강암)에 대하여 한 암석당 3종류의 박편을 Figure 2와 같이 제작하였으며, 편의상 포천화강암을 P, 거창화강암을 K, 합천화강암을 H로 하고, 일변 면(rift plane), 이변 면(grain plane), 삼변 면(hardway plane)에 평행한 박편을 각각 1, 2, 3이라고 하였다. 즉, P-1 박편은 포천화강암의 rift plane에 평행하게 제작된 박편을 의미한다.

현미경 분석은 암석의 미세결구(microfabric) 별로 분리하여 해석하기 위하여 각 "결"의 면에서 석영의 미세균열, 석영내의 유체포유물, 장석의 미세

균열, 장석의 벽개면 및 흑운모의 벽개면의 방향성을 측정하고, 이를 슈미트네트를 이용하여 하반구 투영시켜, 일변 면을 중심으로 하여 세 종류의 박편 분석결과를 중첩시킴으로서 전 극점수에 대한 백분율(%)로 나타내었다. 미세균열의 길이는 전형적으로 100 μm이하인 것으로 정의되나(Simmon and Richter, 1976), 본 연구에서는 대체로 길이가 1mm이상인 미세균열을 대상으로 하였고, 이들의 관찰은 만능재료대(universal stage)가 장착된 암석 편광현미경을 사용하였다. 또 박편의 확대사진(× 6.7)으로 미세균열의 물리량(길이, 간격, 방향각)을 측정하였다.

시 험 결 과

암석의 결구분석

암석에는 여러 가지 결구성이 있을 수 있으나 본 연구에서는 미세 분할결구(김영기, 1986)를 중심으로 분석을 실시하였다. Figure 3은 박편상에서 측정된 미세결구를 평사투영법을 이용하여 분석한 결과이다. 그림에서 a) - c)는 미세균열의 방향성이고, d)와 e)는 벽개면의 방향성을 분석한 결과이다. 분석결과에 따르면 석영, 장석내에 발달된 미세균열은 일변 결(rift) 및 이변 결(grain)의 방향성과 비교적 일치하고 있으나, 석영내의 유체포유물에 해당하는 미세균열과 장석 및 운모에 발달하는 벽개면은 결의 방향성과 일치하지 않는 것으로 나타났다. 그리고 균열의 분포형태는 사방대칭의 형태를 보이고 있다. 따라서 결의 방향성은 석영 및 장석에 분포하는 미세균열의 방향성에 지배됨을 알 수 있다.

암석 결구의 물리량 계측

각 박편을 확대 촬영하여 미세균열에 대한 물리량 즉, 균열의 길이(L), 간격(S) 및 방향각을 측정하였다. 길이의 측정은 축선을 결 방향에 수직, 수평방향으로 설정하고 한 축선의 길이는 12cm/6.7배로 설정하였다. 제작된 9장의 박편 확대사진중에서 대표적인 3장과 그 스케치 결과를 제시하면 Figure 4, 5, 6과 같다. 물리량 측정시 균열의 길이는 1mm 이상인 것만 선택하였고, 축선과 교차하는 것만 측정되었다.

주라기 화강암에 발달하는 결의 현미경학적 분석

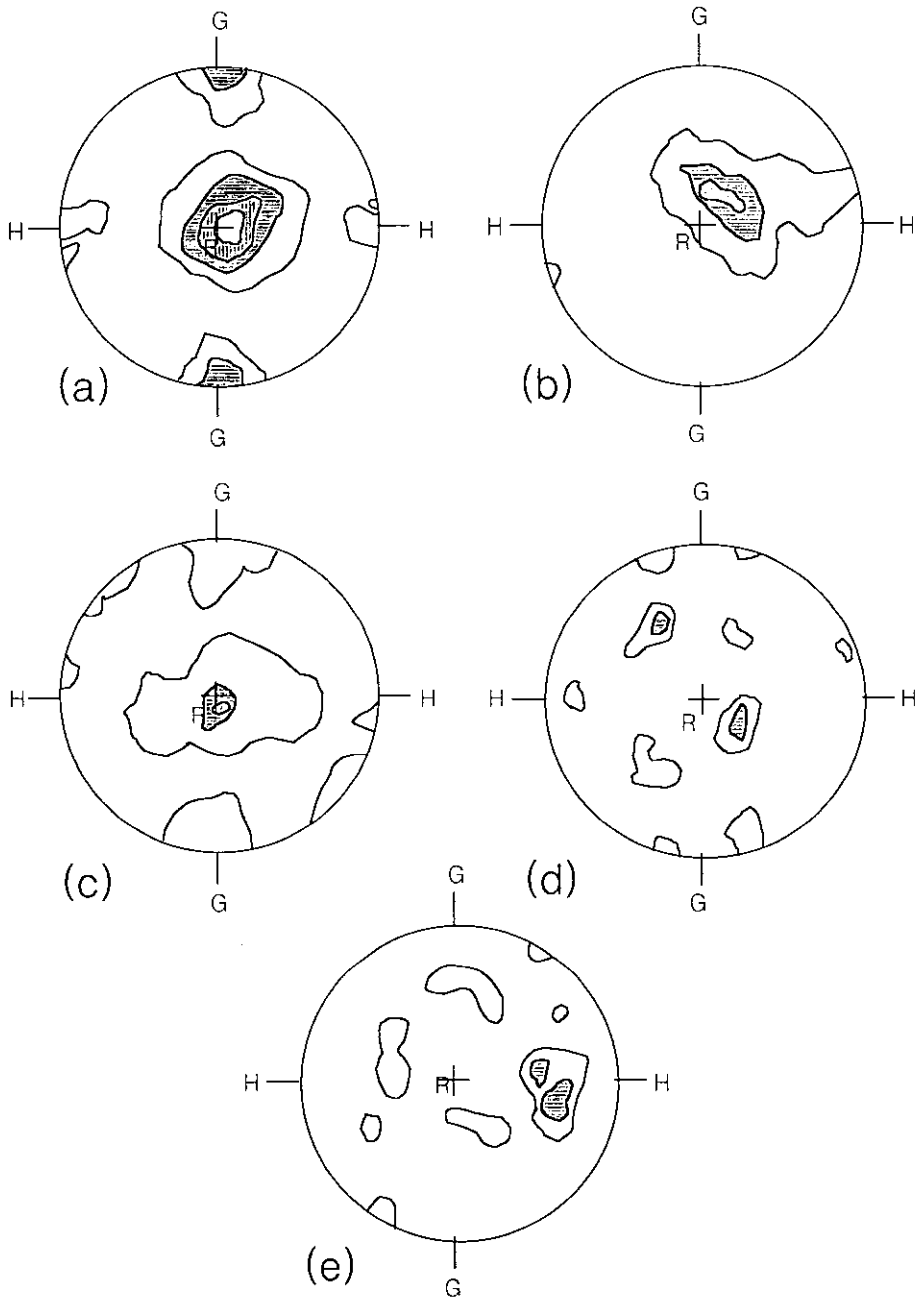


Fig. 3. Petrofabric diagrams for Pocheon granite. (a) Microcracks in Quartz, (b) fluid inclusions in quartz, (c) microcracks in feldspar, (d) feldspar cleavage and (e) biotite cleavage. Contours indicate 8%, 6%, 4% and 2% per 1% area.

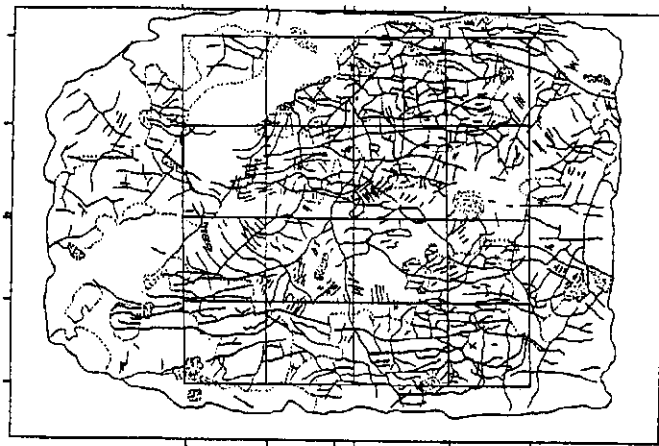
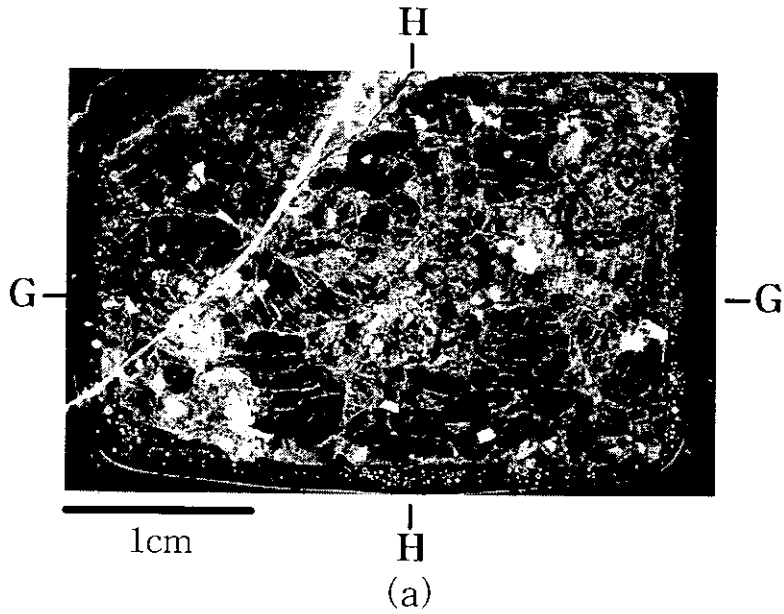
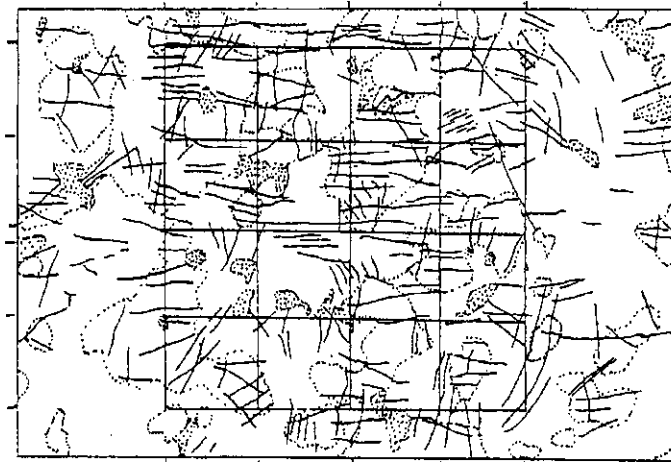
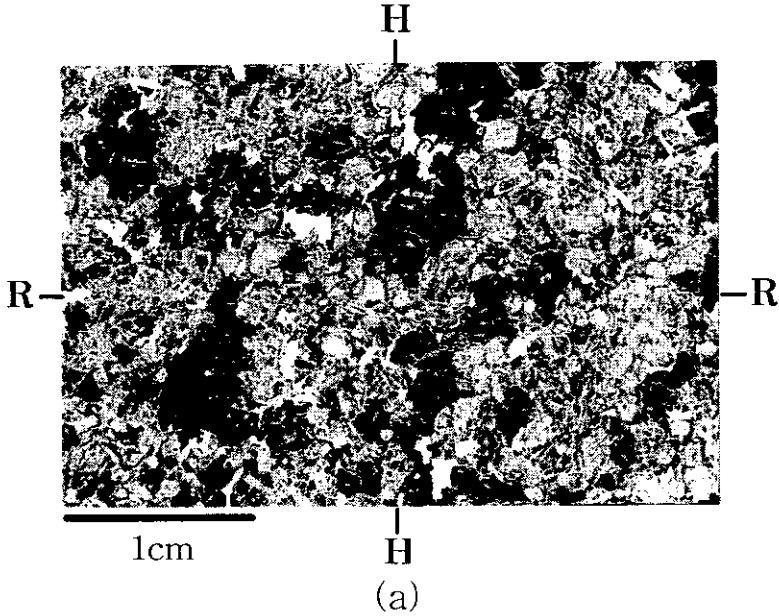


Fig. 4. (a) Photomicrograph of thin section of Pocheon granite cut parallel to rift plane. Black (opaque) areas are quartz, mottled areas are feldspar and white areas are biotite. (b) A microcracks map for (a). Most microcracks are in quartz and are approximately parallel to the grain plane.



(b)

Fig. 5. (a) Photomicrograph of thin section of Geochang granite cut parallel to grain plane. Black (opaque) areas are quartz, mottled areas are feldspar and white areas are biotite. (b) A microcracks map for (a). The preferred orientation of transgranular microcracks in the quartz is approximately parallel to the rift plane.

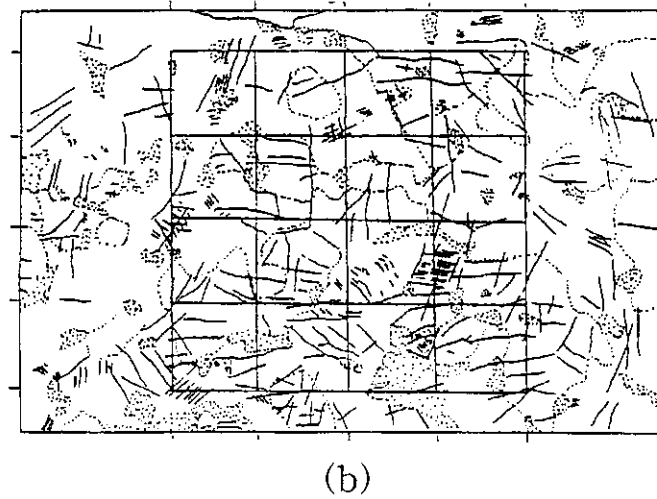
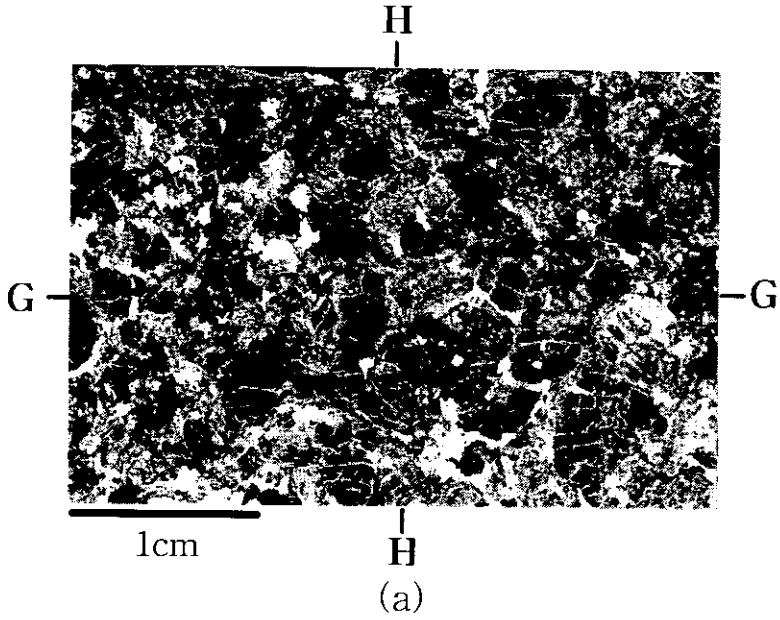


Fig. 6. (a) Photomicrograph of thin section of Habcheon granite cut parallel to rift plane. Black (opaque) areas are quartz, mottled areas are feldspar and white areas are biotite. (b) A microcracks map for (a). The preferred orientation of microcracks in the quartz is approximately parallel to the grain plane.



주라기 화강암에 발달하는 결의 현미경학적 분석

Figure 7은 각 박편에서의 길이의 측정결과이다. 포천화강암은 1-12mm, 거창화강암과 합천화강암은 1-6mm 등으로 발달하고 있으며, 포천화강암이 가장 분포범위가 크고, 거창 및 합천화강암은 거의 같게 나타나고 있다. 또 평균길이를 보면 포천화강암은 약 5.2mm이고, 거창화강암은 약 2.8mm, 합천화강암은 약 3.2mm정도이나, 이들 균열들은 주로 1-3mm사이에 집중되어 있다. 3개 지역 화강암 중에서 입도가 클수록 미세균열의 평균길이는 크게 나타나고, 각 면에서 측정된 미세균열의 길이(L)-

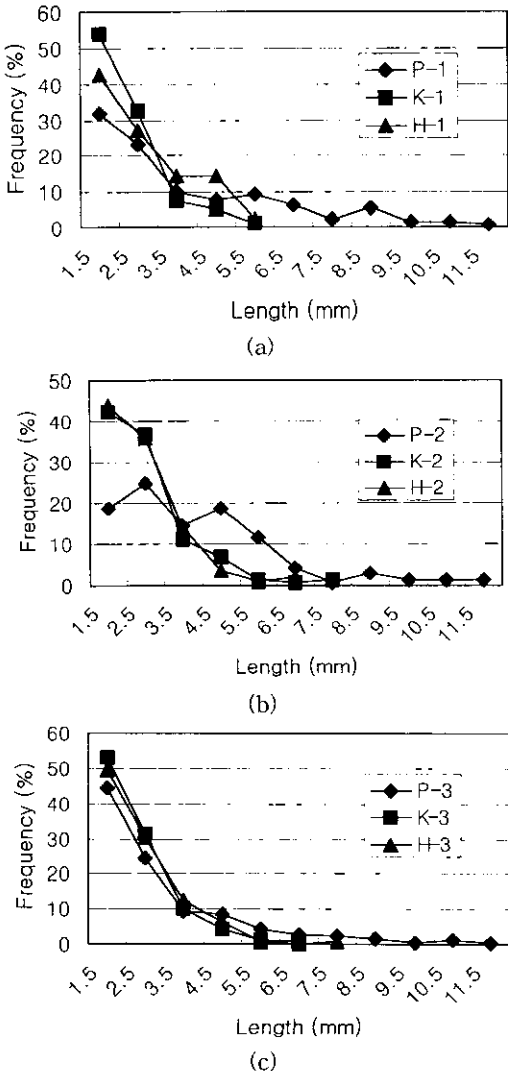


Fig. 7. Microcrack frequency with respect to their length at the three planes.

수(N) 분포양상은 음의 지수함수 곡선으로 나타난다. 이러한 결과는 각각 Krantz(1983), Segall and Pollard(1983), Seo et al.(1999), 서용석(2000) 등의 결론과 거의 일치한다.

균열간의 간격은 균열과 균열간의 최단거리(Priest and Hudson, 1981)를 말한다. 박편별 균열 측정결과를 figure 8에 나타내었다. 포천화강암의 균열의 간격은 0-3.0mm까지 분포하며, 거창화강암은 0-7mm, 합천화강암은 0-6.5mm까지 분포하고 있다. 또 포천화강암의 평균간격은 약 0.9mm 정도이며, 거창화강암은 1.7mm, 합천화강암의 평균간격은 2.0mm정도이며, 3개 지역 화강암에 공통적으로 1mm 이내에 집중되어 있다.

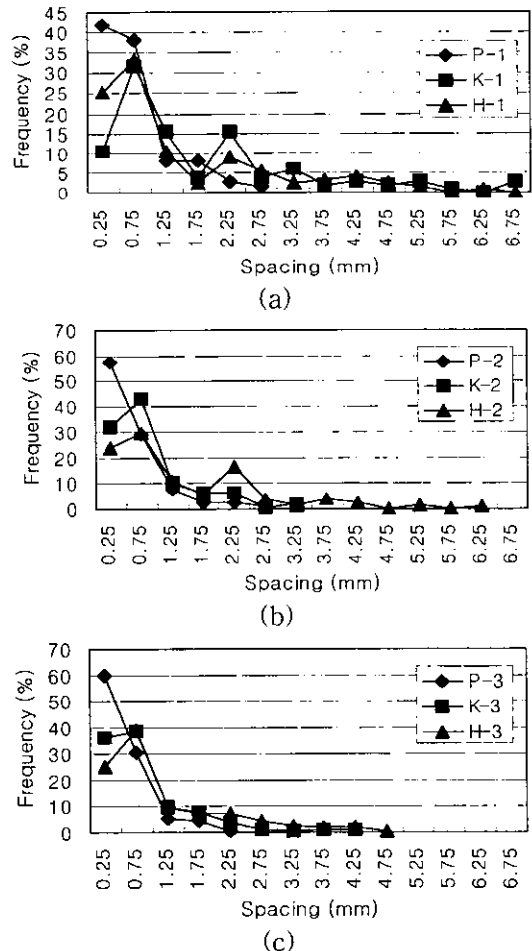


Fig. 8. Microcrack frequency with respect to their spacing at the three planes.

미세균열의 방향성은 박편의 세로축을 중심으로 하여 시계방향(positive)과 반시계방향(negative)으로 측정하였다. Figure 9는 방향별 미세균열의 발생빈도를 나타낸 것이다. 미세균열은  $0^{\circ} \sim \pm 20^{\circ}$ 와  $\pm 80^{\circ} \sim \pm 90^{\circ}$ 에 비교적 많이 분포하고 있음을 알 수 있다. 이는 결의 방향성과 미세균열의 선택적 배향성이 거의 일치하고 있음을 보여주고 있다.

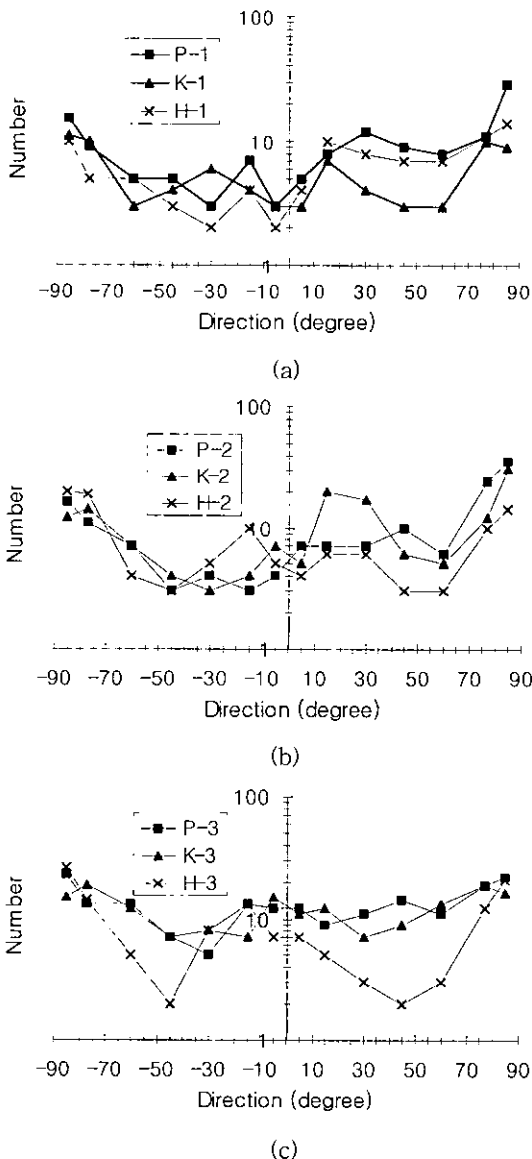


Fig. 9. Microcrack frequency with respect to their directions at the three planes.

위에서 언급된 물리량을 화강암별로 종합해 보면 figure 10과 같다. 각 화강암별로 세 종류의 박편 상에서 각각 서로 직교하는 두 종류의 결을 측정할 수 있다. 예를 들어 P-1 박편에서는 grain plane 1과 hardway plane 1이 측정된다. 이들을 모식적으로 나타낸 것이 Figure 10이다. 본 그림에서 알 수 있는 바와 같이 세 종류의 화강암에서 동일하게 rift > grain > hardway 순으로 발생빈도와 평균길이가 크다. 미세균열의 밀도는 시료의 단면적(A), 균열의 길이의 절반(C), 균열의 수(N)을 이용하여 다음 식으로 구할 수 있다(Segall, 1984).

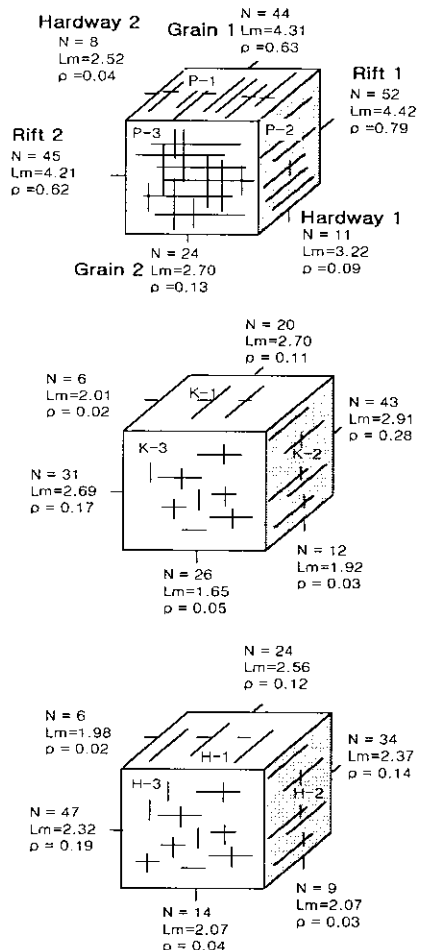


Fig. 10. Number (N), mean length ( $L_m$ ) and density ( $\rho$ ) of microcrack traced from photomicrograph. The unit of  $L_m$  is mm.

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

구해진 균열밀도를 살펴보면, rift > grain > hardway 순으로 포천화강암에서 0.71 > 0.38 > 0.07, 거창화강암에서 0.23 > 0.08 > 0.03, 그리고 합천화강암에서 0.17 > 0.08 > 0.03을 보이고 있다.

## 결 론

포천, 거창, 합천 화강암을 대상으로 현미경을 이용하여 미세균열의 방향성과 길이, 간격, 밀도 등을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 결은 석영과 장석 내에 발달된 미세균열의 방향성과 비교적 일치하고, 유체포유물이나 광물벽개와는 일치하지 않는다. 그리고 미세균열은 전체적으로 결의 방향을 따라 서로 직교하여 나타나는 경향을 보인다.

2. 균열의 발생빈도, 길이, 밀도는 모든 화강암에서 rift > grain > hardway 순으로 나타났다.

3. 화강암 별로는 비교적 조립에 속하는 포천화강암이 거창이나 합천화강암보다 평균길이 및 밀도가 크게 나타났으며, 거창이나 합천화강암은 큰 차이를 보이지 않았다.

## 참 고 문 헌

김남장, 김정환, 1970, 지질도폭설명서 (거창도폭, 1/50000), 국립지질조사소.  
 김영기, 1986, 지질공학, 대학교재 출판사, 서울, 52-56.  
 서용석, 2000, 화강암의 응력완화현상에 관한 수침 삼축시험, 지질공학, 10, 217-223.  
 이병대, 장보안, 윤현수, 이한영, 진명식, 1999, 문경 지역에 분포하는 화강암의 미세균열 발달특성, 암석학회지, 8, 1, 24-33.  
 이상은, 조상호, 양형식, 박홍민, 1999, 조사선을 이용한 화강암의 미세 불연속면 분포성상 평가, 터널과 지하공간, 9, 4, 364-372.  
 장기홍, 1968, 지질도폭설명서 (합천도폭, 1/50000), 국립지질조사소.

장태우, 1992, 옥천구조대 변성사질암의 벽개 발달에 관한 연구: 2. 간격벽개, 지질학회지, 28, 1-7.  
 Borradaile, G.J., M. Bayly, and C. Powell, 1982, Atlas of deformational and metamorphic rock fabrics, Springer-Verlag, 551.  
 Bur, T.R. and K. Hjelmstad, 1969, Elastic and attenuation symmetries of simulated lunar rocks, Icarus 13, 44.  
 Dale, T.N., 1923, The commercial granites of New England, U.S. Geol. Surv. Bull., 738, 488.  
 Davis, G.H., 1984, Structural geology of rocks and regions, John Willey & Sons, 429.  
 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., 232, 309-316.  
 Griffith, A.A., 1924, Theory of rupture, Proc. 1st Int. conf. for Appl. Mech., Delft.  
 Herrman, O., 1916, Steinbruch-Industrie und Steinbruch-Geologie, Borntraeger, Berlin, 2nd ed., 312.  
 Holzhausen, G.R., 1989, Origin of sheet structure, 1. Morphology and boundary conditions, Eng. Geo., 27, 225-275.  
 Jahns, R.H., 1943, Sheet structure in granites: its origin and use as a measure of glacial erosion in New England, J. Geol., 51, 71-98.  
 Krantz, R.L., 1983, Microcracks in rocks, Tectonophysics, 100, 449-471.  
 Ljungner, E., 1930, Spaltentektonik und morphologie der schwedischen Skagerrak-Kueste, Bull. Geol. Inst. Univ. Uppsala, 21, 478.  
 Osborne, F.F., 1935, Rift, grain and hardway in some pre-cambrian granite, Quebec. Econ. Geol., 30, 540-551.  
 Peng, S., 1970, Fracture and failure of Chemsford granite, Ph. D. dissertation, Dept. Mineral Engineering, Stanford University.

- Peng, S. and A. M. Johnson, 1972, Crack growth and faulting in cylindrical specimens of chernsford granite, *Int. J. Rock Mech. Sci.*, 9, 37-86.
- Plumb, R., T. Engelder and D. Yale, 1984, Near-surface in-situ stress, 3. Correlation with microcrack fabric within the New Hampshire, *J. Geophys. Res.*, 89, 9350-9364.
- Powell, C.M., 1979, A morphological classification of rock cleavage, *Tectonophysics*, 58, 21-34.
- Priest, S.K. and J.A. Hudson, 1981, Discontinuity spacings in rock, *Int. J. Rock Mech. Sci.*, 13, 136-140.
- Rodrigues, F.P., 1966, A anisotropy of granites. *Proc. 1st. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, 1, 721-731.
- 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., T. Seiki and Y. Ichikawa, 1999, Crack generation and propagation during stress relaxation of crystalline rock under water saturated uniaxial condition, *J. Soc. Mat. Sci.*, Japan, 48, 1255-1262.
- Simmons, G. and D. Richter, 1976, Microcrack in rock, in R.J.C. Sterns, ed., *The physics and chemistry of minerals and rocks*, Wiley-Interscience, New York, 105-137.
- Simmons, G., T. Todd and W.S. Baldrige, 1975, Toward a quantitative relationship between elastic properties and cracks in low porosity rock, *Am. J. Sci.*, 275, 318-345.
- Solberg, P.H., 1975, The influence of microcracks on sheet jointing in four New England granites, *Abstr. Trans. Am. Geophys. Union*, 56, 444.
- Thill, T.E., T.R. Bur, and R.C. Steckley, 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., R.J. Williard, and T.R. Bur, 1969, Correlation of longitudinal velocity variation with rock fabric, *J. Geophys. Res.*, 74, 4898-4909.
- Tremmel, E. and R. Widmann, 1970, Deformation properties of gneiss, *Proc. 2nd Cong. Int. Soc. Rock Mech.*, Belgrade, 1, 567-575.
- Twidale, C.R., 1982, Granite landforms, Elsevier scientific pub. comp., 46-86.
- Wise, D.U., 1964, Microjointing in basement, middle Rocky mountains of Montana and Wyoming, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 75, 287-292.
- 
- 박덕원  
한국지질자원연구원 지질연구부  
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30  
유성우체국 사서함 111호  
Tel : (042)868-3115
- 서용석  
한국건설기술연구원 토목연구부  
411-712 경기도 고양시 일산구 대화동 2311번지  
Tel : 031-910-0225  
Fax : 031-910-0211  
E-mail : ysseo@kict.re.kr
- 정교철  
안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과  
760-749 경북 안동시 송천동 388  
Tel : 0571-850-5753  
E-mail : jeong@andong.ac.kr
- 김영기  
경북대학교 명예교수  
대구광역시 수성구 상동 65-7번지  
Tel : 053-763-5907  
E-mail : dsgueng@hanmail.net