

변형된 청산 화강암의 압쇄암화작용시의 변형온도 - 변형된 청산 화강암의 구조 해석 -

김지훈

안동대학교 지구환경과학과

요 약: 거정 장석(주로 K-장석)반정을 다량 함유하는 변형된 청산 화강암에 대한 미구조 및 암석구조 연구를 통하여 연성전단변형 동안의 온도조건을 규명하고자 한다. K-장석에서 가장 중요한 미구조로는 미세킥크, 미세단열 그리고 코아 외부에 아입자 없는 코아-맨틀구조 등으로 인지된다. 밀메카이트와 플래임 퍼어사이트는 조각된 K-장석들의 입계에 고 변형량의 집중으로 이들 입계상에서 발달한다. 사장석에는 미세단열과 변형쌍정 그리고 킥크대가 우세하게 나타난다. 화성기원의 사장석 누대구조가 변형 쌍정에 의해 중첩되는 미세조작은 저 변형암에서 종종 관찰된다. 연성전단변형 동안에 재결정된 석영에 대한 c-축 배열 형태는 주로 $\text{prism}\langle a \rangle$ 가 탁월한 미끄럼계로 작용하여 형성된 single girdle과 type II crossed girdle을 보여준다. 연성전단운동 동안에 형성된 이상과 같은 특징적인 미구조로부터 청산 화강암에서 연성전단변형은 녹염석-각섬석상 변성도(400-500°C)에서 발생한 것으로 해석된다. 청산화강암에 발달된 연성전단대는 고 변형대가 혈관상으로 나타나는 불연속 전단대와 S-C 압쇄구조면을 갖는 연속 전단대 그리고 일정한 폭의 균질엽리 영역을 보이는 균질 전단대로 형태 분류된다. 이들 연성전단대는 동일 변형단계에서 형성되었으며 이들 연성전단대의 형태 변화는 400-500°C의 변형온도에서 변형량의 차이로부터 비롯된 것으로 해석된다.

핵심어: 청산 화강암, 연성전단변형, 미구조, 암석구조, 변형온도

서 론

화강암의 변형구조는 변형당시 마그마의 물리적 상태나 관입 당시의 지구조환경에 좌우되어 극히 다양한 형태로 나타난다(e.g. Bateman, 1984; Castro, 1986; Hibbard, 1987; Guineberteau *et al.*, 1987; Paterson, 1987; Hutton, 1988; Paterson *et al.*, 1989). 일반적으로 결정간 용융체의 양이 약 30% 이상인 마그마 상태에서 변형은 화성조직(eg. 누대구조, 성장쌍정)과 자형을 보이는 조기 정출 장석류들이 어떠한 소성변형 없이 형태적 정향배열에 의한 마그마 엽리를 형성(Hibbard, 1987; Paterson *et al.*, 1989)시키는 반면에 결정간 용융체의 양이 그 이하인 경우 화강암의 변형구조는 구성광물의 상대적인 양 그리고 온도, 압력, 변형률 등과 같은 변형조건에 의해 다양하게 나타나는 것으로 알려져 있는데, 이는 화강암의 암석구조 및 주 구성광물인 석영과 장석에 대한 미구조 연구로 해명되어 왔다(Tullis and Yund, 1977, 1980, 1985, 1987, 1991; Debat *et al.*, 1978; Hara *et al.*, 1980; Vital *et al.*, 1980; Passchier, 1982; Tullis, 1983; Simpson, 1985;

Gapais and Barbarin, 1986; Guineberteau *et al.*, 1987; Gapais, 1989; Paterson *et al.*, 1989; Tullis *et al.*, 1990; Pryer, 1993).

옥천대의 중앙부에 위치하는 청산 화강암(Fig. 1)은 주로 중립 내지 조립질의 석영, 장석, 흑운모 등을 기질로 하고 거정의 장석(주로 K-장석)을 반정으로 하는 반상 화강암으로서, 이 암체의 서쪽 경계부에는 연성 전단변형작용으로 압쇄암화된 변형구조가 잘 발달되어 있는 것으로 알려져 왔다(김옥준 외, 1977; 김동학과 이병주, 1986). 그리고 청산 화강암은 중부 옥천대에 대한 화성활동사와 변형작용사를 규명하기 위해 지질학적으로 아주 중요한 위치를 점하고 있으므로 최근 본 화강암에 대한 구조지질학적인 연구(권상훈 외, 1996), 지화학적인 연구(정창식과 장호완, 1996; Cheong and Chang, 1997; 사공희와 좌용주, 1997) 그리고 광물암석학적인 연구(사공희와 좌용주, 1997) 등이 활발히 수행되어 왔으며, 연성 전단변형 작용 동안에 발생된 미구조 및 광물학적인 변화와 전암의 화학성분 변화 사이의 관계는 Kwon *et al.* (1997)에 의해 수행된 바가 있다. 그러나, 변형된 청산 화강암의 암석구조 및 미구조에 대한 연구를 통하

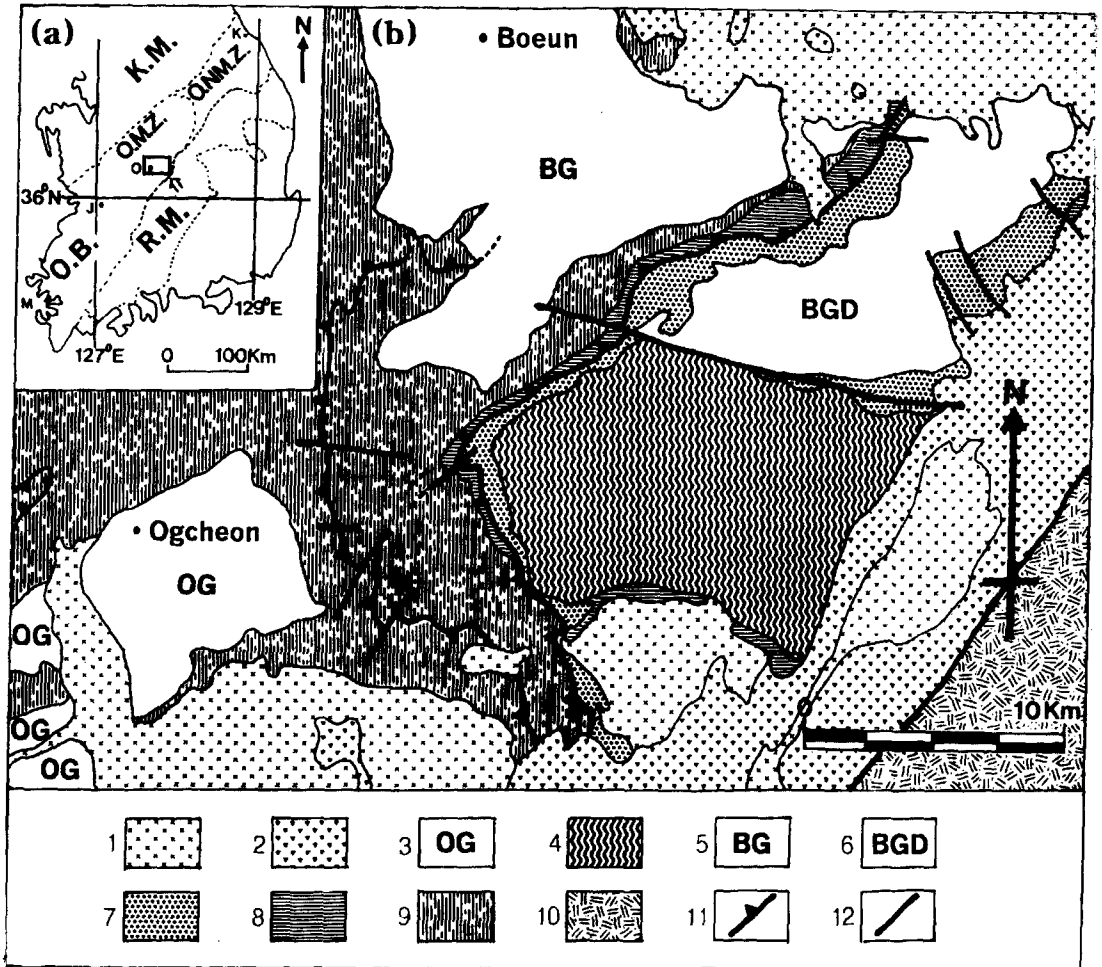


Fig. 1. (a) Index map of the study area. K.M.: Kyeonggi massif, R.M.: Ryeongnam massif, O.B.: Ogcheon belt, O.M.Z.: Ogcheon metamorphic zone, O.N.M.Z.: Ogcheon non-metamorphic zone, K: Kangneung, O: Ogcheon, J: Jeonju, M: Mogpo, thick arrow: Fig. 1b. (b) Geological map of the central part of the Ogcheon belt, Korea [modified from Kang *et al.*(1993)]. 1: Porphyry and granite of Cretaceous age, 2: Kyeongsang Supergroup, 3: Ogcheon granite, 4: Cheongsan granite, 5: Boeun granite, 6: Baekrook granodiorite, 7: Pyeongan Supergroup, 8: Joseon Supergroup, 9: Ogcheon Supergroup, 10: Ryeongnam gneiss complex, 11: nappe boundaries, 12: faults

여 암쇄암화작용 동안의 변형온도를 밝히고자 한 연구는 거의 수행된 바가 없다. 따라서 본 논문에서는 거정의 장석 반정을 다량으로 함유하고 있는 변형된 청산 화강암에서 암석구조 및 주 구성광물인 장석과 석영에 대한 미구조 연구를 통하여 연성전단변형 당시의 청산 화강암의 온도조건을 규명하고자 한다.

일반지질 및 암석기재

한반도 중남부 지역에서 북동-남서 방향으로 발달

하고 있는 옥천대의 중양부에 위치한 청산 화강암은 청산도폭(김동학과 이병주, 1986), 영동도폭(김규봉과 황재하, 1986), 옥천도폭(김동학 외, 1978) 그리고 보은도폭(김옥준 외, 1977)의 일부 영역에 걸쳐 분포하고 있으며 동-서 방향의 장축을 갖는 타원형 분포를 보이고 있다(Fig. 1).

청산 화강암의 경계부는 옥천대의 주요 구성암체들과 직접 접하고 있는데, 북쪽 경계부는 주로 고생대 후기의 백록 화강섬록암[256±16 Ma, Rb-Sr 전암법(Cheong and Chang, 1997)]과 단층으로 접촉

하고 있으며 동쪽 경계부는 주로 중생대 백악기의 영동층군(동정리층)에 의해 부정합으로 피복되어 있고 남쪽과 서쪽 경계부는 주로 고생대 초기의 조선누층군과 고생대 후기의 평안누층군과 각각 접하고 있다(Fig. 1b). 청산 화강암체 내부에는 평안누층군의 변성퇴적암류가 소량 산재되어 있으며 중생대 중기로 추정되는 복운모 화강암과 섬록암 그리고 중생대 말기로 추정되는 산성 및 염기성 암맥들은 청산 화강암을 관입하고 있다(Fig. 2).

청산 화강암에 대한 방사성 절대 연대 측정치[164 Ma, K-Ar 법(biotite)(Lee, 1971); 258 Ma, Rb-Sr 전암법(주승환과 김성재, 1985); 216±21 Ma, Rb-Sr 전암법(정창식과 장호완, 1996)]는 고생대 페르미안 중기에서 중생대 유라기 초기까지 다양하게 나타나고 평안누층군과 청산 화강암이 동시에 압쇄암화작용을 받아 그들 사이의 접촉관계가 명확히 판

찰되지 않는 관계로(사공희와 좌용주, 1997) 청산 화강암의 화성활동 시기에 대해서는 최근까지 논의되고 있다. 그러나 백운리의 남동쪽에 위치하는 하례곡 다리 부근에 소규모로 분포하는 평안누층군의 변성퇴적암(김동학과 이병주, 1986)(Fig. 2)에는 청산 화강암에 의한 접촉 변성광물로 추정되는 거정의 석류석 집합체가 노두규모에서 발견되고 경하에서는 석류석과 함께 방사상으로 성장된 섬유상 피블로라이트가 다량으로 산출됨이 본 연구결과와 확인된다(Fig. 3).

청산 화강암은 주로 K-장석과 부분적으로 사장석으로 구성된 거정의 장석을 반상으로 하고 주로 중립 내지 조립질의 석영, 장석, 흑운모 등을 기질로 하는 반상 화강암으로서, 기질부의 모드조성은 화강섬록암으로 나타나고(사공희와 좌용주, 1997) 기질부의 유색광물 함량은 장소에 따라 다소 차이점을

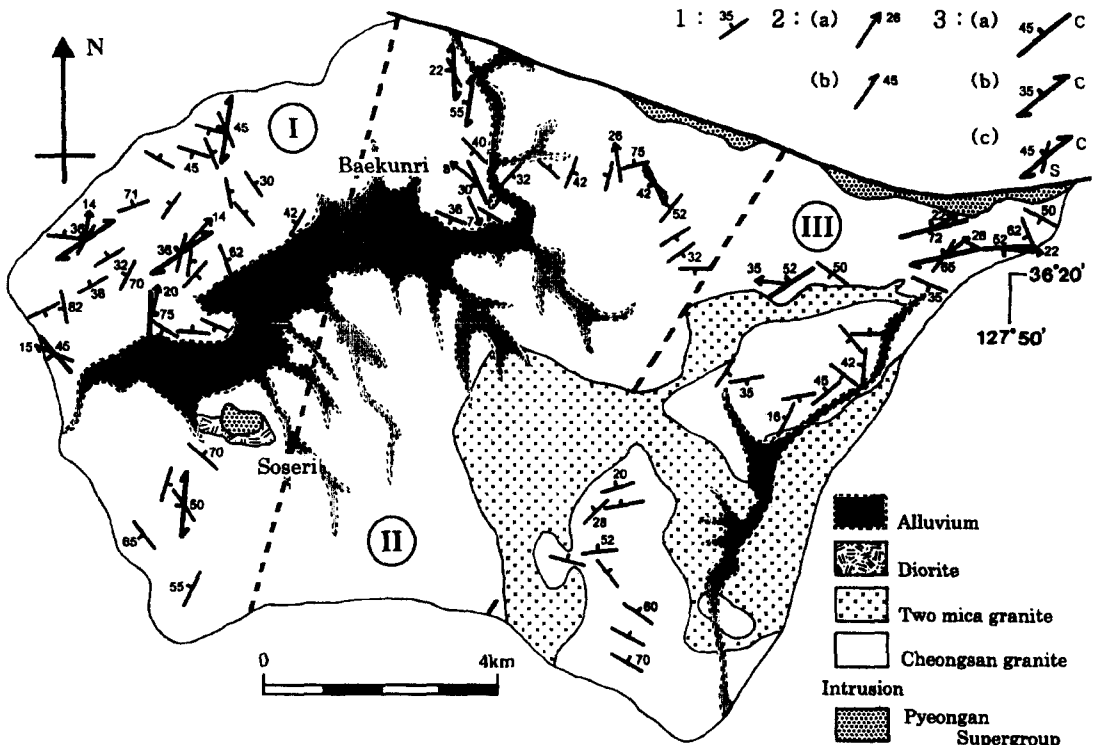


Fig. 2. Geological map within the Cheongsan granite body [modified from Kim *et al.*(1977), Kim *et al.*(1978), Kim and Hwang(1986), Kim and Lee(1986)] and orientation of foliations and stretching lineation in the Cheongsan granite. 1: magmatic foliation by preferred orientation of euhedral feldspar megacrysts, 2: stretching lineation[not showing shear sense(a) and showing shear sense(b) (arrow direction: the direction of relative motion of the upper block)], 3: solid-state foliation (C: shear foliation, S: mylonitic foliation, arrow direction: the direction of relative motion of the upper block) [(a-b): SZ-I, (c): SZ-II and SZ-III]. Division of domain(D.) (I: western D., II: central D., III: eastern D.).

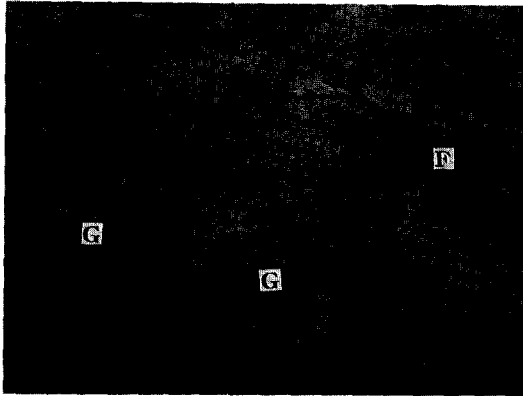


Fig. 3. Photomicrograph of metasedimentary rock of the Pyeongan Supergroup distributed within the Cheongsan granite body (near Haraegok bridge, 2 km SE of Baekunri). Open nicol, G: garnet, F: fibrolite. Scale bar is 0.3 mm.

보인다. 거정 장석 반상의 평균 장경은 2.1-3.5 cm의 범위에 최대 장경은 4-10 cm의 범위를 보이고 있으며 반상의 체적함량은 17-42%의 범위에 평균 함량은 약 28%에 달하고 있다(사공희와 좌용주, 1997). 정하에서의 주 구성광물은 석영, 정장석, 미사장석, 사장석, 흑운모 등으로 관찰되고 부수적인 광물로는 인회석, 저어콘, 스펀 등이 관찰되며 이차적인 광물로는 녹염석, 녹니석, 백운모, 방해석 등이 인지된다.

암석구조

청산 화강암에는 거정의 장석을 포유하는 다량의 포획물이 관찰된다. 이들 포획물의 크기[(장축의 길이×단축의 길이)^{1/2}]는 일반적으로 5-15 cm 범위(평균값: 약 13 cm)를 보이고 있으며 최대 크기는 약 55 cm에 달하고 있다(Fig. 4a). 이들 포획물의 신장 정도를 지시하는 종횡비(장축의 길이/단축의 길이)의 평균값은 5로 나타나고 최대 종횡비가 9를 넘는 신장된 포획물도 종종 관찰된다(Fig. 4b).

청산 화강암에는 자형 장석 반상들의 정향배열에 의해 정의되는 장석배열 엽리면(Figs. 5a and 5b)과 연성전단변형에 의해 형성된 압쇄구조 엽리면(Figs. 5b-5d)이 발달되어 있다. 장석배열 엽리면은 포획물의 유한변형 타원체 XY 면과 거의 평행하고 저 변형된 청산 화강암에서 보다 용이하게 인지된다(Figs. 5a and 5b).

고 변형된 청산 화강암에서는 연성전단대가 암석 규모로 종종 관찰된다(Figs. 5b-5e). Gapais(1989)의

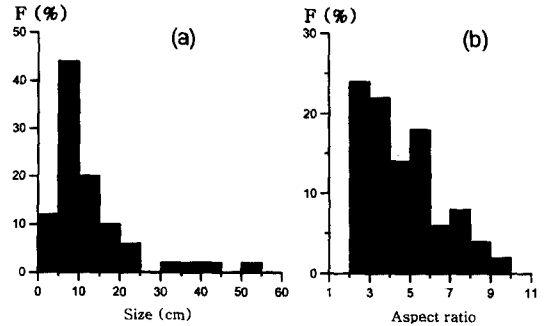


Fig. 4. Frequency distribution diagrams of the size (ave.: 13 cm) (a) and aspect ratio (ave.: 5) (b) of rocks included in the Cheongsan granite (date number: 50).

형태적 분류에 따르며 청산 화강암에서 인지되는 연성전단대는 균질엽리대(고 변형대)가 혈관상으로 나타나는 불연속 전단대(Fig. 5b) (이하 SZ-I)와 S-C 압쇄구조면(Berthe *et al.*, 1979; Lister and Snoke, 1984)을 갖는 연속 전단대(Fig. 5c) (이하 SZ-II) 그리고 일정한 폭의 균질엽리대를 갖는 균질 전단대(Fig. 5d) (이하 SZ-III) 등으로 구분된다. 청산 화강암의 압쇄구조면상에는 신장된 석영(집합체) 내지 장석(집합체) 등의 정향배열에 의해 정의되는 신장 선구조가 관찰된다(Fig. 5e).

SZ-I는 폭이 좁고 C면에 해당하는 고 변형대와 폭이 넓은 저 변형대로 구성되어 있다(Fig. 5b). 고 변형대는 저 변형대 주변에서 혈관상으로 나타나고 저 변형대와 고 변형대의 경계는 직선상으로 뚜렷이 관찰된다. 고 변형대에서 장석 잔쇄반정들의 입도는 세립이며 기질부의 구성광물은 거의 인지할 수 없을 정도로 압쇄화되어 있다. 저 변형대에서 장석 잔쇄반정들의 입도는 거정 내지 조립으로 나타나고 그들의 입형은 모서리가 각진 직사각형 내지 다각형을 보이고 있으며 기질부의 장석과 석영들은 원형 내지 아원형으로 나타난다. 저 변형대에서 장석 반상들의 배열은 다소 무질서하게 나타나나 자형 장석 반상들의 배열이 인지되는 경우 그들의 평균 우세 방향은 고 변형대의 방향과 고각으로 교차한다. 고 변형대 주변에서는 저 변형대의 자형 장석 반정들이 드래그 되어지는 암석구조가 종종 관찰되는데, 본 연구에서는 이러한 암석구조를 SZ-I 형성과 관련된 전단운동갑각을 결정하는데에 이용하였다.

SZ-II가 발달된 청산 화강암(Fig. 5c)에서는 자형 장석 반상들의 배열에 의해 정의되는 엽리면은 거의 인지할 수 없다. 장석 반상들은 둥근 입계를 갖고 S면을 따라 신장된 납작 타원체를 형성하고

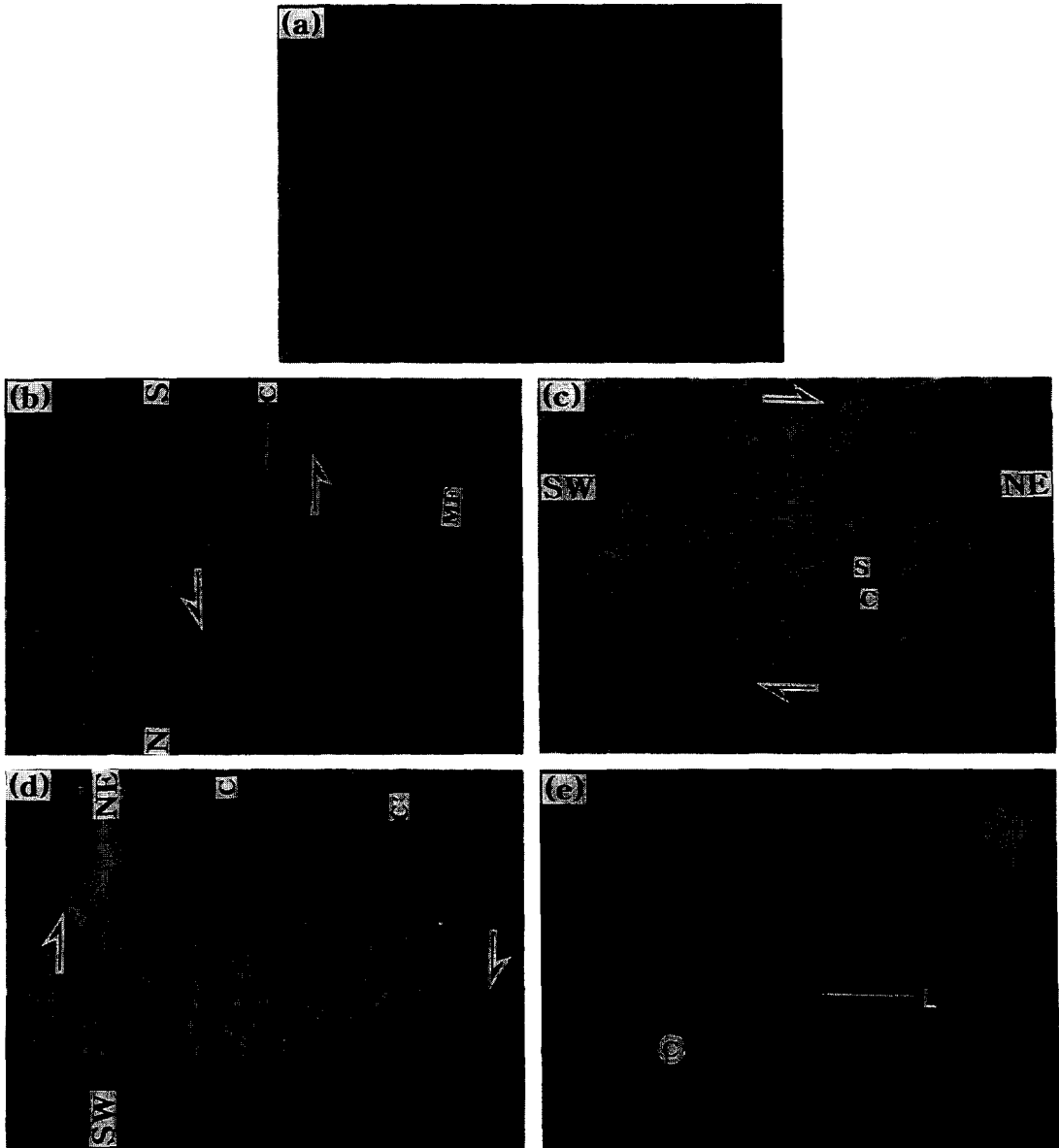


Fig. 5. Photographs of characteristic rock structures in the deformed Cheongsan granite. (a): Weakly deformed rock. (b): SZ-I(top-to-the-north shearing). Shear foliation(C) cuts magmatic foliation(MF). Feldspar megacrysts are dragged around the shear foliation(arrow). (c): SZ-II (top-to-the-northeast shearing) showing S-C structure. (d): SZ-III (top-to-the-northeast shearing) showing homogeneous foliation(C) and extensional crenulation cleavage(C'). (e): Stretching lineation(L) on the shear foliation(C).

있으며 기질부의 장석과 석영 역시 S면을 따라 신장된 납작 타원체로서 관찰된다. 본 연구에서는 이러한 S면과 S면의 불연속 전위면에 해당하는 C면 사이의 경사 관계를 이용하여 SZ-II 형성과 관련된 전단운동감각을 결정하였다.

SZ-III를 보이는 변형암(Fig. 5d)에서는 역시 자형 장석 반상에 의해 정의되는 장석 배열 엮리면은 인지할 수 없고 장석 반상들은 기질부의 석영, 장석들과 함께 C면을 따라 매우 신장된 납작 타원체로 관찰된다. SZ-III가 발달된 압쇄암에는 S-C 구조와 C

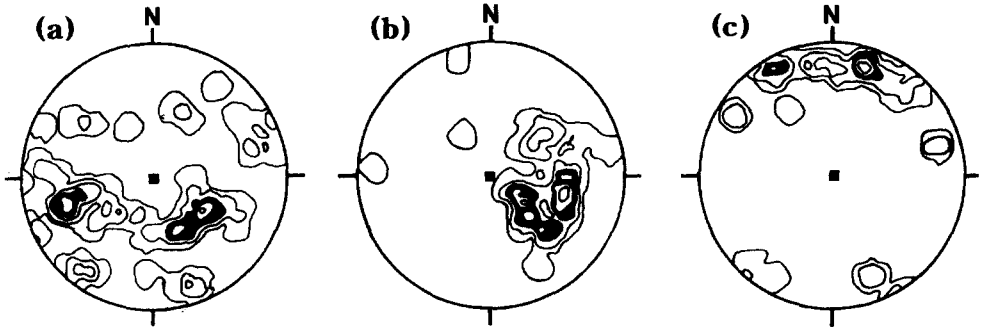


Fig. 6. Stereoplots (equal-area, lower-hemisphere projections) of foliations(a-b) and stretching lineation(c) in the western domain of the Cheongsan granite in Fig. 2. (a): Magmatic foliation [n=56 (number of data) and contours at 0.5-2-4-6-8% per 1% of area]. (b): Shear foliation (n=34 and 0.5-3-6-9-12%). (c): Stretching lineation (n=28 and 1-4-8-11-14%).

면에 대해 약 30° 이내의 저각을 이루는 C' 면이 관찰된다. 본 연구에서는 이러한 구조들을 SZ-III 형성과 관련된 전단운동감각의 지시자로 이용하였다.

Fig. 2에는 기재상의 편의를 위한 청산 화강암체의 영역 구분과 각각의 영역들에서 인지되는 자형 장석배열 엽리면과 SZ-I, SZ-II, SZ-III에서 인지되는 압쇄구조면과 신장선구조 등의 대표적인 방향성 그리고 암석구조와 미구조로부터 인지되는 전단운동감각을 도시하였다. Fig. 6에는 다른 영역들에 비해 이들 연성전단대의 발달이 탁월하게 인지되는 서부 영역에서 측정된 장석배열 엽리면, 전단엽리 C면 그리고 신장선구조 등의 모든 자료를 스테레오망에 도시하였다. 그 결과 전단엽리 C면상에서 신장선구조의 선주향과 전단엽리 C면의 주향 사이에 이루는 각도(pitch)는 모든 영역에서 약 40° 이내의 저각을 보이고 서부와 중부 영역들에서 신장선구조의 자세는 남북 선주향에 북쪽으로 저각 침강하는 선경사가 우세하게 나타나며 동부 영역에서는 동서 선주향에 동쪽으로 저각 침강하는 선경사가 우세하게 나타남을 알 수 있다. 장석배열 엽리면과 C면은 분산된 방향성을 보이고, 영역별 C면의 자세는 동부 영역에서 동서 주향-북쪽 경사, 중부 영역에서 남북 주향-서쪽 경사 그리고 서부 영역에서는 북동 주향에 북서쪽으로 경사하는 것이 각각 우세하게 나타나고, 모든 영역에서 전단운동감각은 동일하게 우수향으로 나타난다.

미구조

연성전단변형 동안에 형성된 청산 화강암의 주 구성광물(장석과 석영)에 대한 특징적인 미구조를

파악하기 위해 저 변형암에서는 자형 장석 배열 엽리면에 수직하고 거정 장석의 평균 장축방향에 평행한 박편을 제작하였으며 고 변형암에서는 압쇄구조면에 수직하고 신장선구조에 평행한 박편을 제작하였다.

장 석

청산 화강암에서 장석들의 특징적인 변형 미구조로는 미세단열(microfracture), 코어-맨틀(core and mantle) 구조, 미세킥크(microkink), 킥크대(kink band), 변형쌍정(deformation twin), 밀메카이트(myrmekite), 플레임 퍼어사이트(flame perthite) 그리고 파동소광 등이 인지된다.

미세단열은 주로 장석들의 벽개면을 따라 발생하고(Fig. 7a) 저 변형암에서 미세단열은 미세균열(microcrack)성 내지 불연속성으로 나타나는 반면에 고 변형암에서 미세단열은 연속성이 탁월하고 미세 단열된 K-장석 조각들의 입계상에는 재결정된 세립 장석립들이 일반적으로 관찰된다(Fig. 7). Fig. 8은 고 변형암에서 측정된 K-장석의 미세 단열방향에 대한 빈도 분포를 도시한 그림인데, 미세 단열방향은 거의 모든 방향에서 인지되나 전단엽리 C면에 준 평행한 것(이하 PFR)이 가장 우세하게 나타나고 전단운동 방향에 대해 synthetic 방향으로 10-50° (이하 SFR)와 antithetic 방향으로 30-70° (이하 AFR) 경사진 것들이 대체로 우세하게 나타남을 알 수 있다. 미세 단열된 K-장석 조각들 사이에는 주로 재결정된 세립 장석들로 구성된 미세단열대가 존재하는데, PFR 미세단열대 내에는 PFR에 대해 약 45° 방향으로 경사진 신장된 세립 재결정 장석립들이

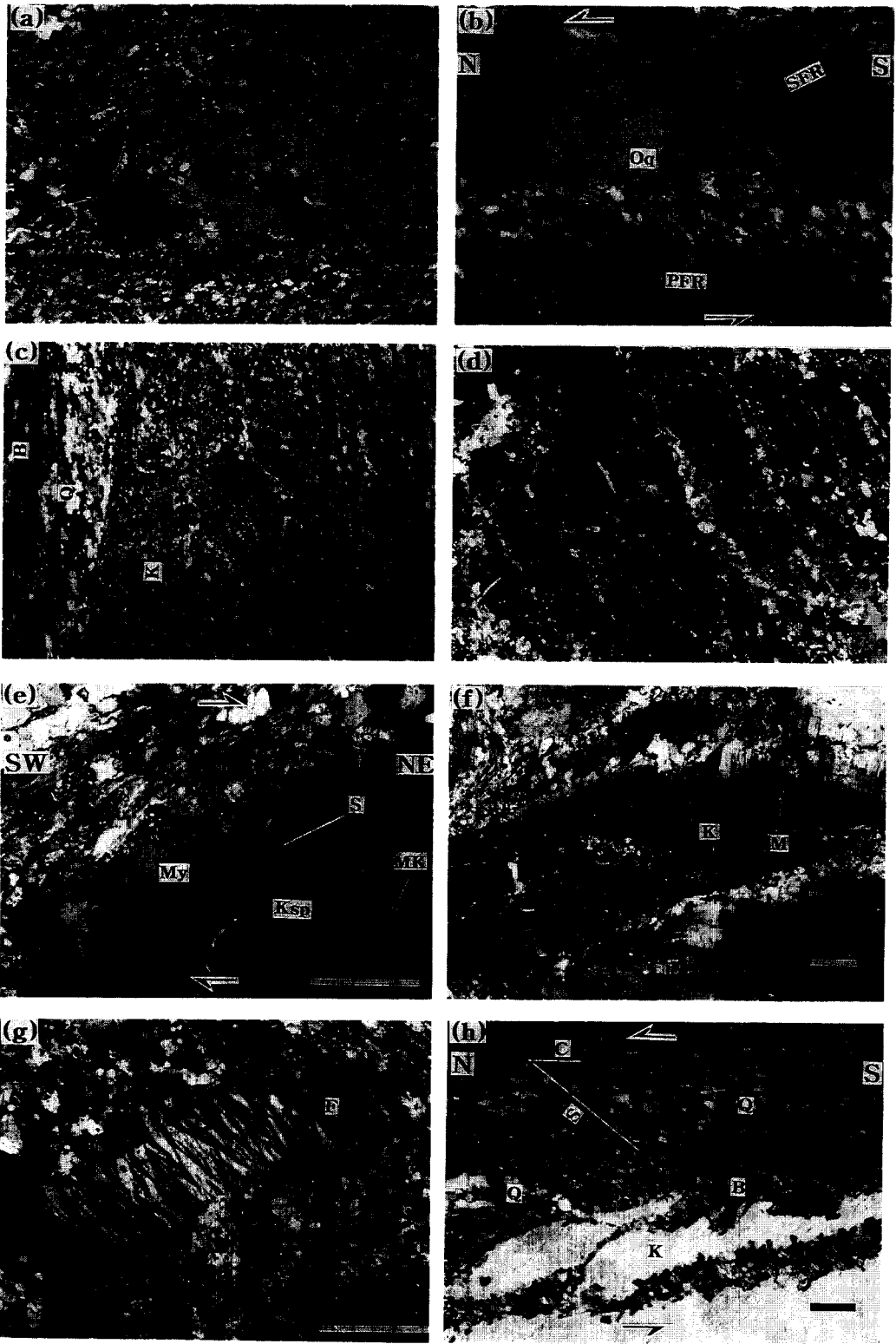


Fig. 7. Photomicrographs of characteristic microstructures of K-feldspar megacrysts in more deformed Cheongsan granite. All are cross nicols. Scale bars are 0.3 mm. (a): Core and mantle structures [microfractured K-feldspars(K) surrounded by dynamically recrystallized mantle feldspar grains and myrmekites (My: short arrows)] and conjugate microkinks(long arrows). Cl: cleavages of feldspars. (b) Oblique foliation(Oq) defined by elongation direction of dynamically recrystallized fine-grained feldspars within microfracture zone (top-to-the-north shearing). PFR: microfracture parallel to the shear plane, SFR: synthetic microfracture. (c): Homogeneous texture of K-feldspars(K), quartzs(Q) and biotites(B) in the most deformed rocks. (d) Conjugate microkinks(arrow) cut by microfractures. (e): Strain-related myrmekitic intergrowths (subround, bulbous, comma shape) (My: arrows) on the long side (S-surface) of fractured K-feldspars(Ksp) that faces the finite shorting direction (top-to-the northeast shearing). Note: no subgrain near boundary of the Ksp. MK: microkinks. (f): Microcline structure near microfractures of K-feldspars(K). M: microcline. (g): Flame perthite in microfractured K-feldspars. Flames(F) are widest at the grain boundary and taper to a point within K-feldspar. (h): Type II S-C microstructure within quartz aggregate (top-to-the-north shearing). Q: Quartzs, B: biotites, K: K-feldspars.

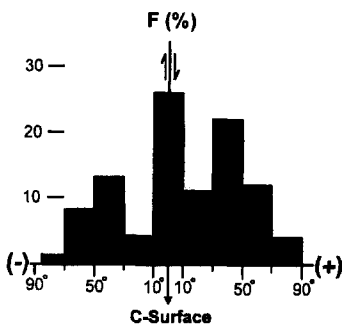


Fig. 8. Frequency distribution diagram of microfracturing orientation developed in K-feldspar megacrysts from more deformed Cheongsan granite (122 data measured from 4 thin sections). Microfractures were measured relative to the shear foliation (C-surface) showing dextral shear sense. Plus value: synthetic microfracture, minus value: antithetic microfracture.

종종 관찰된다(Fig. 7b).

PFR, SFR, AFR에 의해 미세 단열된 조립 K-장석들을 코아로 하고 주로 재결정된 세립 장석들로 구성된 미세단열대를 맨틀로하는 코아-맨틀구조(여기서 코아-맨틀구조라는 용어는 보다 저 변형된 K-장석 조각의 내부대 즉 코아와 보다 고 변형된 K-장석 조각의 외부대 즉 맨틀을 기재하기 위해 사용되었음)가 고 변형암에서 흔히 관찰된다(Fig. 7). 코아 K-장석의 입계는 재결정된 세립 맨틀 장석들의 침입으로 톱니상 형태를 취하고 있다(Figs. 7a, 7b, 7d and 7e). 코아 K-장석들에는 미세킹크와 같은 결정내부 변형구조가 주로 관찰되나 White(1976)의 전형적인 코아-맨틀구조와 달리 코아 K-장석에 아입자 구조는 관찰되지 않는다. 코아 K-장석들의 입도는 미세 단열대의 폭과 반비례적인 관계를 보이고 미세 단열대 폭이 좁은 경우 그들의 입형은 각진 사각형으로 나타나는(Fig. 7d) 반면에 폭이 넓은 경우 그들의 입형은 안구상 형태의 납작 타원형으로 나타난다(Fig.

7a). 재결정된 세립 맨틀장석들의 입형은 일반적으로 이원형 내지 다소 신장된 타원형으로 인지되고, 보다 고 변형된 고 변형암(균질엽리로만 구성된 변형암)에서 조각된 K-장석은 보다 세립의 형태로 소량 관찰되며 대부분의 K-장석 조각들은 세립으로 재결정된 다결정 장석집합체를 형성하고 있다(Fig. 7c).

저 변형암과 고 변형암의 K-장석에서 흔히 관찰되는 미세킹크는 공역(conjugate)성으로 나타난다. 미세 단열된 코아 K-장석 조각들에서 관찰되는 공역성 미세킹크의 둔각 이등분선은 일반적으로 미세 단열방향에 대해 평행 내지 수직으로 나타나고(Figs. 7a, 7d and 7e), 공역성 미세킹크의 축 방향은 미세단열대를 가로 질러 그 연장성이 종종 확인되는데 이러한 미세조직은 비교적 폭이 좁은 미세 단열대를 공유하는 K-장석 조각들 사이에서 일반적으로 관찰된다(Fig. 7d). 그리고 K-장석 조각들에는 알바이트(albite)식 쌍정과 퍼리클린(pericline)식 쌍정이 거의 직교하고 있는 격자상 구조가 관찰되는데, 이러한 미사장석 구조는 조각된 K-장석의 내부에서는 발달하지 않고 외부에서만 발달하는 경우가 종종 관찰된다(Fig. 7f).

사장석의 특징적인 변형 미구조로는 쌍정, 킹크대, 미세단열, 파동소광 등으로 인지된다. 사장석에 발달된 쌍정은 그 엽층들이 한 점을 향해 가늘어지거나 입자 내부에서 갑자기 사라지는 변형쌍정이 거의 대부분을 차지한다(Fig. 9a). 화성기원으로 추정되는 사장석의 누대구조가 변형쌍정에 의해 중첩되는 미세조직은 저 변형암에서 종종 관찰된다(Fig. 10a). 고 변형암에서의 변형쌍정은 휘어져 있거나 미세균열 내지 미세단층되어 있고 엽층들의 방향은 다소 무질서한 배열을 보인다(Figs. 9a and 9c). 킹크대는 확산 내지 직선 경계를 갖는 공역성(Fig. 9a) 내지 싱글(single)성 형태(Fig. 9b)로 관찰된다. 킹크대의 경계는 변형쌍정의 엽층이나 벽개면과 고각으로 교차하고(Figs. 9a and 9b), 공역성 킹크대의 둔각 이등

분선은 변형쌍정의 엷층 방향에 일반적으로 평행하게 나타난다(Fig. 9a) [(공역성 킥크대의 둔각)(변형쌍정의 엷층과 공역성 킥크대의 경계가 이루는 각도) : (120)(57, 63), (108)(49, 59), (140)(76, 64), (135)(55, 80), (139)(67, 72)]. 그리고 사장석에는 K-장석과 같이 미세단열에 의한 조각화 작용이 인지되나 고 변형암에서 조각된 사장석의 입형은 조각된 K-장석과 달리 대부분이 각진 다각형으로 나타나고 조각된 K-장석에서 흔히 관찰되는 미세킥크와 코아-맨틀구조는 거의 관찰되지 않는다(Fig. 9c).

밀메카이트는 고 변형암과 보다 고 변형된 저 변형암에서 일반적으로 관찰된다. 고 변형암에서의 밀메카이트는 코아 K-장석의 모든 방향의 입계상에서 코아 K-장석쪽으로 부푼 풍선형태로 흔히 관찰된다(Fig. 7a). S면에 평행한 코아 K-장석의 장축 입계상에서 관찰되는 밀메카이트는 Simpson(1985)의 관찰과 같이 콤마(comma)상으로 나타난다(Fig. 7e). 저 변형암에서의 밀메카이트는 사장석과 K-장석의 접촉부에서 주로 관찰된다(Fig. 10b). 그리고 K-장석내에 조각석이 불꽃상 형태로 나타나는 플래임 퍼어사이트는 보다 저 변형된 고 변형암의 조각된 K-장석에서 종종 관찰된다(Fig. 7g). 입계에서 비교적 넓은 폭을 가지고 입자 내부로 향하여 가늘어지는

불꽃상 조각석의 엷층 방향은 일반적으로 미세 단열면과 직교하고 있다.

석 영

저 변형된 청산 화강암에서 조립 장석들에 의해 둘러싸여 있는 변형 이전의 조립 석영은 아입자와 세립 신입자로 구성된 석영집합체로 관찰된다(Figs. 10c and 10d). 장석-장석과 석영-석영 사이의 경계는 요철되어 있으나(Figs. 10b and 10c) 석영-장석 사이의 경계는 거의 직선으로 관찰된다(Fig. 10d). 고 변형된 청산 화강암에서 석영집합체는 C면에 평행한 소량의 석영 리본과 C면에 약 45° 경사진 S면 방향으로 신장된 세립 재결정 석영립들로 구성되어 있다(Fig. 7h). 고 변형된 청산 화강암(Figs. 11a-11c)과 압쇄화된 평안누층군의 변형사암(Fig. 11d)에서 석영집합체의 석영 c-축 배열 형태는 prism<a>와 rhomb<a>가 탁월한 미끄럼계(slip system)로 작용하여 형성된 single girdle(Figs. 11a, 11b and 11d)과 basal<a>와 prism<a>가 탁월한 미끄럼계로 작용하여 형성된 type II crossed girdle(Fig. 11c)을 보여준다(Lister, 1977; Schmid and Casey, 1986). 이들 석영 c-축 배열 형태의 비대칭성(Lister and Williams, 1979; Behrmann and Platt, 1982)은 암석구조와 미구조에



Fig. 9. Photomicrographs of characteristic microstructures of plagioclase megacrysts in more deformed Cheongsan granite. All are cross nicols. Scale bars are 0.3 mm. (a): Deformation twins(D.T) and conjugate kink bands(K.B). An obtuse-angled bisector of conjugate kink bands is parallel to twin lamellae. Note: twin lamellae are microfractured or microfaulted(arrow). (b): Single kink bands with diffusion and sharp boundaries(K.B) which trend at a high angle to cleavages(Cl) of plagioclases(P). (c): Different microstructures between plagioclases(P) and K-feldspars(K) divided by biotite aggregate(B). Both plagioclase and K-feldspar are microfractured but core and mantle structure is not observed in the plagioclase. Lamellae of deformation twins in the plagioclase are bent, microfractured or microfaulted and are randomly oriented.

서 관찰되는 전단운동감각과 일치한다.

해석 및 논의

일반적으로 결정을 변형시키면 결정격자의 선결핍(line defect) 즉 전위(dislocation)가 결정내부에 발생하고 점진적인 변형작용은 결정내 전위밀도를 증가시키는 것으로 알려져 있다. Urai *et al.*(1983)과 Drury and Urai(1990)은 물질의 재결정작용에서 아입자회전(subgrain rotation: SR)과 입계이동(grain boundary migration: GBM) 재결정작용은 점진적인 변형작용 동안에 형성되는 결정내부 strain-free 에너지를 감소시키는 중요한 과정임을 지적하고 그들에 대한 형성기구와 경하에서 조직상의 특징을

다음과 같이 설명하고 있다. SR 재결정작용은 전위 클라임(climb)이 자유로운 변형조건에서 회복(recovery)과정에 의해 형성된 아입자 경계로 전위들이 연속적으로 부가됨에 따라 아입자 결정격자 사이의 각도(misorientation)가 점차적으로 커져 저각(5° 미만) 입계의 아입자들이 고각 입계의 신입자들로 형성되는 과정이며, GBM 재결정작용은 수용하는 변형량에 비해 전위 클라임이 자유롭지 못한 변형조건에서 고 전위밀도 장소에서 형성된 신입자 핵이 고 전위밀도를 갖는 입자쪽으로 돌출작용(bulging)과 서로 다른 전위밀도를 갖고 이웃하는 두 입자의 경계가 고 전위밀도를 갖는 입자쪽으로 이동하는 입계이동에 의해 신입자가 성장하는 과정이다. 그리고 경하에서 SR 재결정작용은 아입

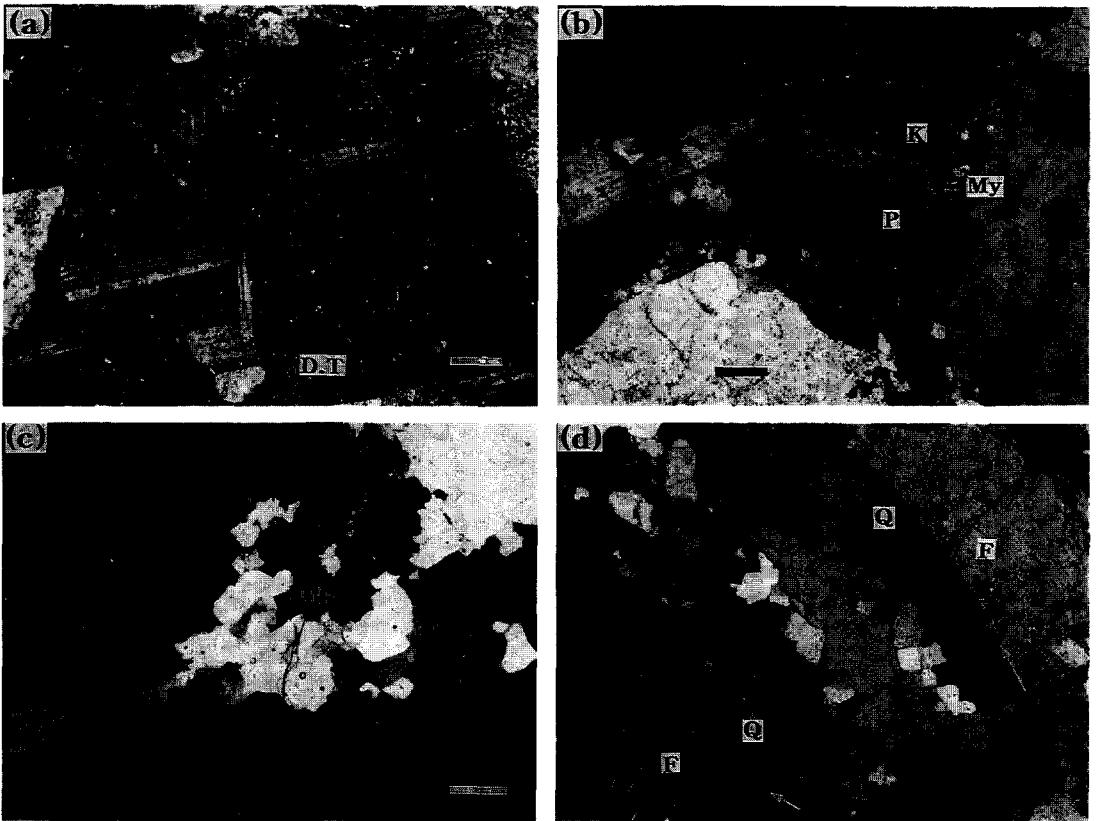


Fig. 10. Photomicrographs of characteristic microstructures of quartzs and feldspars in less deformed Cheongsan granite. All are cross nicols. Scale bars are 0.3 mm. (a): Deformation twins(D.T) overlap zoning structures of igneous origin in plagioclase. (b): Growth of myrmekite(my) on boundary of plagioclase(P) and K-feldspar(K). Note: subround boundaries between feldspars and feldspars. (c) New grains defined by sharp grain boundaries and subgrains defined by diffusion grain boundaries within quartz aggregate which is derived from original single coarse-grained quartz. (d): Sharp boundaries(arrows) between quartzs(Q) and feldspars(F).

자 경계보다 뚜렷한 직선 경계를 보이는 신입자의 입도가 주변의 아입자 입도와 유사함에 의해 인지되고 (cf. Fig. 10c), GBM 재결정작용은 신입자와 구입자 사이의 입도 차이와 신입자-구입자의 경계가 구입자 쪽으로 침입하는 불규칙상에 의해 인지된다.

청산 화강암의 고 변형암에서는 미세 단열된 조립 K-장석들을 코아로 하고 주로 재결정된 세립 장석립들로 구성된 미세단열대를 맨틀로 하는 코아-맨틀구조가 흔히 관찰된다(Fig. 7). 그러나, 청산 화강암의 조각된 K-장석의 코아-맨틀구조는, SR 재결정작용에 의해 형성되는 White(1976)의 전형적인 코아-맨틀구조 [코아의 중심부에서 주변부로 향해 아입자의 발달이 두드러지고 맨틀에서 아입자 집합체가 그와 동일 입도의 신입자 집합체로 점이적으로 변화함(White, 1976의 Fig. 2 참조)]와 달리, 코아

주변부에 아입자들의 발달이 관찰되지 않고 코아-맨틀의 경계는 주로 세립 장석들로 구성된 맨틀에 의해 확실히 구분되며 코아 K-장석들의 입계는 세립 맨틀 장석들의 침입에 의해 톱니상 형태를 취하고 있다(Figs. 7a, 7b, 7d and 7e). 이는 재결정된 세립 맨틀 장석들은 조각된 K-장석의 입도 감소와 함께 조각된 K-장석쪽으로 GBM에 의한 재결정작용으로 형성되었음을 지지하는 것으로(Urai, 1983; Drury and Urai, 1990), 장석에서 이러한 미구조는 전위 클라임이 용이하지 못한 변형온도(400-500°C)에서 고 변형량이 조각된 K-장석의 내부보다 조각된 K-장석의 입계에 집중될 때 형성되는 것으로 알려져 있다(Vidal *et al.*, 1980; Pryer, 1993, Passchier and Trouw, 1996의 p49-50).

고 변형암의 조각된 K-장석에서 흔히 관찰되는

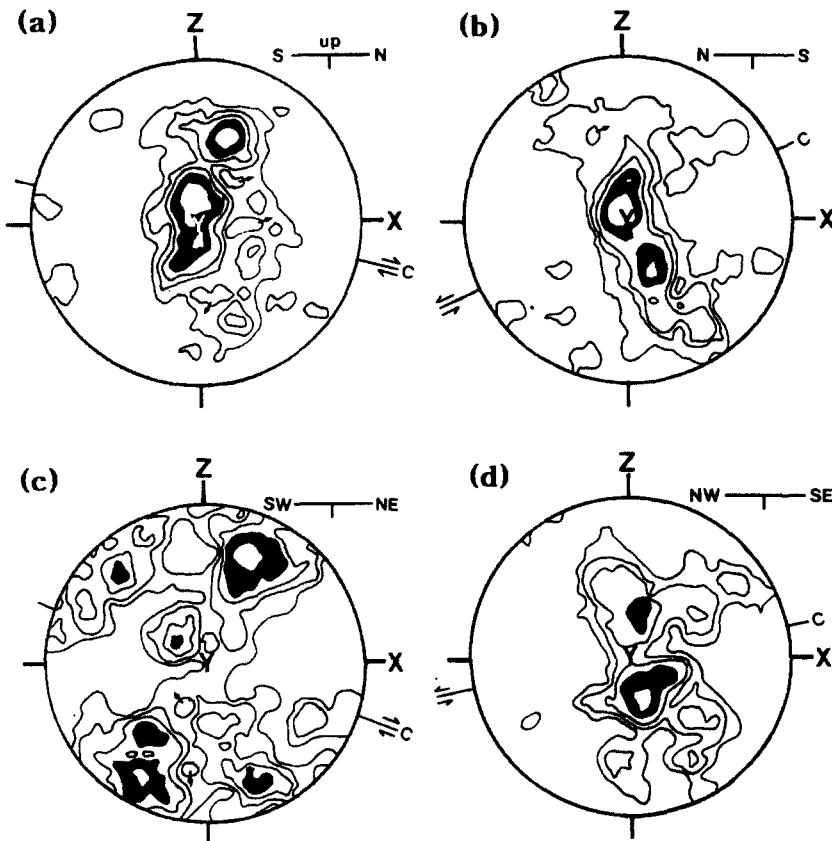


Fig. 11. Quartz c-axis fabrics (equal-area, lower-hemisphere projections) in the Cheongsan granite (a-c) and the metasedimentary rock of the Pyeongan Supergroup(d). X, Y, Z: principal axes of strain ellipsoid ($X > Y > Z$). (a): Single girdle (top-to-the north shearing) [n=200 (number of grain) and contours at 1-2-3-4-6% per 1% of area]. (b): Single girdle (top-to-the north shearing) (n=200 and 1-2-3-5-7%). (c): Type-II crossed girdle (top-to-the northeast shearing) (n=200 and 0.5-1-2-3-5%). (d): Single girdle (top-to-the northwest shearing) (n=200 and 1-2-3-5-7%).

미세킨크는 공역성으로 나타나고(Figs. 7a, 7d and 7e), 공역성 미세킨크 축의 방향은 비교적 폭이 좁은 미세단열대를 공유하는 조각된 K-장석들 사이에서 그 연장성이 종종 확인된다(Fig. 7d). 이는 K-장석 조각에 발달된 미세킨크는 미세 단열작용 이전에 형성되었음을 시사한다. Tullis and Yund(1987)의 실험 결과에 따르면 K-장석에서의 미세킨크는 전위 클라임이 용이하지 못한 약 450°C 전후의 변형온도(Tullis and Yund, 1980; Pryer, 1993)에서 서로 다른 미끄럼계를 갖고 이동하는 전위들 사이의 엉킴 현상에 의해 형성되는 것으로 알려져 있다. 고 변형압에서 K-장석의 미세 단열방향은 일반적으로 PFR, SFR, AFR의 순으로 우세하게 나타나는데(Fig. 8), Pryer(1993)은 변성온도가 잘 알려진 캐나다 Grenville 대에서 장석의 AFR은 300-400°C에서 그리고 장석의 SFR은 400-500°C에서 각각 우세하게 관찰된다고 보고한 바가 있다.

고 변형압에서 밀메카이트는 주로 코아 K-장석의 모든 입계상에서 코아 K-장석쪽으로 부푼 풍선 형태로 관찰된다(Fig. 7a). Simpson(1985)은 변형된 화강암에서 밀메카이트가 전단변형 작용시 발생하는 압축방향에 수직하게 놓인 K-장석 입계상에 형성됨을 발견하고(eg. Fig. 7e) 밀메카이트의 성장은 변형작용과 관련된 확산 및 용리작용에 의해 형성되었음을 제안한 바가 있다. 그러나 청산 화강암에서 발견되는 밀메카이트는 Simpson(1985)의 관찰과 달리 코아 K-장석의 모든 입계상에서 관찰된다(Fig. 7a). 이러한 기하학적인 산출양상은 이미 언급된 바와 같이 고 변형량이 주로 조각된 K-장석의 입계에 집중된 결과로 해석되며, 청산 화강암에서의 밀메카이트는 조각된 K-장석이 코아-멘틀구조로 형성되는 과정에서 Simpson(1985)의 주장과 같이 변형작용과 관련된 확산 및 용리작용에 의해 형성되었을 것으로 추정된다. 변형된 화강암에서 밀메카이트는 약 400°C 이상의 변형온도에서 우세하게 나타나는 것으로 알려져 있다(Simpson, 1985; Gapais, 1989; Pryer, 1993; Passchier and Trouw, 1996의 p49-50). 보다 저 변형된 고 변형암의 조각된 K-장석에서는 조장석 엽층이 입계에서 입자 내부로 향하여 가늘어지는 불꽃상 형태의 플레임 퍼어사이트가 종종 관찰되는데(Fig. 7g), 이러한 형태의 퍼어사이트는 K-장석이 결정화된 온도보다 낮은 온도(300-500°C)에서 변형될 때 K-장석에서 조장석의 용리에 의해 형성되는 것으로 알려져 있다(Passchier, 1982; Pryer, 1993; Passchier and Trouw, 1996의 p49-50).

쌍정의 엽층이 결정 내부의 한 점을 향해 가늘어

지거나 갑자기 사라지는 형태의 변형쌍정(Figs. 9a and 10a)과 확산 내지 직선 경계가 공역성 내지 싱글성 형태로 나타나는 키크대(Figs. 9a and 9b)는 사장석에서 일반적으로 관찰된다. 조각된 사장석에서 인지되는 변형쌍정은 미세단열 내지 미세단층되어 있고 변형쌍정의 엽층 방향은 다소 무질서한 배열을 보여주는데(Figs. 9a and 9c), 이는 사장석에서 변형쌍정은 미세 단열작용 이전에 형성되었음을 시사한다. Pryer(1993)은 변성온도가 잘 알려진 캐나다 Grenville 대에서 사장석의 변형쌍정과 키크대는 300-500°C의 변성온도에서 우세하게 나타남을 보고한 바가 있다.

고 변형된 청산 화강암(Figs. 11a-11c)과 압쇄화된 평안누층군 변성사암(Fig. 11d)의 석영 집합체에 대한 석영 c-축의 배열 형태는 주로 prism<a> (c. 500°C : Mainprice and Bouchez, 1987), 부수적으로 rhomb<a>와 basal<a> (300-500°C : Mainprice and Bouchez, 1987)가 탁월한 미끄럼계로 작용하여 형성된 single girdle(Figs. 11a, 11b and 11d)과 type II crossed girdle(Fig. 11c)을 보여준다. 이러한 single girdle 형태(Figs. 11a, 11b and 11d)는 각섬암상에서 형성된 Schmid and Casey(1986)의 P 248 형태와 유사하고 상부 녹색 편암상에서 각섬암상 사이의 변성도에서 변형된 암석에서는 일반적으로 type II crossed girdle(Fig. 11c)이 우세하게 나타나는 것으로 알려져 있다(Wilson, 1975; Miller and Christie, 1981).

Gapais(1989)는 변형온도와 연성적 행위요소의 양 그리고 변형량에 좌우되어 화강암에서 형성되는 연성전단대의 형태가 불연속 전단대(SZ-I), 연속 전단대(SZ-II), 균질 전단대(SZ-III)로 나타남을 제안하고 SZ-III과 SZ-II는 관입과 동시에 변형된 화강암-마그마가 고결되는 동안에 변형된 화강암에서 일반적으로 관찰되며 SZ-I은 정치된 이후에 변형된 화강암-마그마가 고결된 이후에 변형된 화강암-에서 우세하게 나타남을 지적한 바가 있다. 또한 그는 약 500°C 부근의 변형온도에서 변형량의 계속된 증가는 장석의 GBM 재결정작용에 의한 입도 세립화를 계속적으로 진행시켜 연성적 행위요소 양과 균질엽리대 폭의 증가를 초래하게 되어 SZ-I의 형태는 SZ-II 걸쳐 SZ-III로 전이한다고 하였다.

청산 화강암에 발달된 연성전단대는 Gapais(1989)의 SZ-I(Fig. 5b), SZ-II(Fig. 5c), SZ-III(Fig. 5d)로 형태 분류된다. 이들 연성전단대는 청산 화강암의 서부 영역에서만 관찰되는 것(김옥준 외, 1977; 김동학과 이병주, 1986; 권상훈 외, 1996; Kwon *et al.*,

1997)이 아니라 중부와 동부 영역들에서도 발견되고 전단엽리 C면의 방향성은 북동 주향-북서 경사가 일반적으로 우세하게 나타나나(김옥준 외, 1977; 김동학과 이병주, 1986; 권상훈 외, 1996; Kwon *et al.*, 1997) 남북 주향-북쪽 경사에서 동서 주향-북쪽 경사까지 다양하게 나타난다(Figs. 2 and 6b). 그러나 전단엽리 C면상에서 신장선구조의 선주향은 모든 영역에서 동일하게 C면의 주향과 저각을 이루고 동일 영역에서 함께 산출되는 이들 SZ-I, SZ-II, SZ-III에서 각각의 전단운동각각 (약간 경사성분을 포함한 우수향 주향이동)은 동일 영역에서 동일하게 나타난다(Fig. 2). 이는 이들 연성전단대가 동일 변형단계에서 형성되었음을 지시한다.

저 변형된 청산 화강암에서 조각된 K-장석들은 보다 조립으로서 그들의 입형은 아각진 다각형으로 나타나는(Fig. 10b) 반면에 고 변형암에서 조각된 K-장석은 톱니상 입계를 보이는 납작 타원형의 안구상 형태로 코아-맨틀구조를 이루고 있다(Fig. 7a). 코아 K-장석들의 입도는 주로 세립 재결정 장석립들로 구성된 미세단열대의 폭과 반비례적인 관계를 보인다(cf. Figs. 7a and 7d). 또한 균질엽리대로만 구성된 보다 고 변형된 고 변형암에서 조각된 K-장석은 보다 세립의 형태로 소량 관찰되며 조각된 K-장석의 대부분은 석영과 같이 세립 다결정 집합체를 이루고 있어 전체적인 미세조직은 균질하게 나타난다(Fig. 7c). 이와같이 저 변형암에서 고 변형암으로 갈수록 조각된 K-장석의 입형 변화 (아각진 다각형에서 톱니상 입계의 납작 타원형으로)와 함께 주로 세립 재결정 장석립으로 구성된 미세단열대의 폭이 증가함은 이미 언급된 바와 같이 장석에서 전위 클라임이 용이하지 못한 변형온도(400-500°C)에서 변형량이 주로 조각된 K-장석의 입계에 집중되어 조각된 K-장석이 GBM 재결정작용에 의해 그의 입도가 감소된 결과로 해석되며, 청산 화강암에서 연성전단대 SZ-I(Fig. 5b)에서 SZ-II(Fig. 5c) 그리고 SZ-III(Fig. 5d)로의 형태 변화(Figs. 5b-5d)는 역시 전위 클라임이 용이하지 못한 변형온도(400-500°C)에서 변형량의 증가와 함께 조각된 K-장석들이 GBM 재결정작용에 의한 입도 세립화와 균질엽리대의 폭이 증가된 결과로 고찰된다(Gapais, 1989).

결 론

연성 전단변형 동안의 온도조건을 이해하기 위해 이상과 같이 거정 장석(주로 K-장석) 반정을 다량으

로 함유하고 있는 청산 화강암의 압쇄구조와 미구조에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 미세킵크(400-500°C), 미세단열(300-500°C) 그리고 코아 외부에 아이자 없는 코아-맨틀구조(400-500°C)는 K-장석에서 가장 중요한 미구조로 인지된다. 거정 K-장석의 입도 세립화는 미세 단열작용과 미세 단열된 K-장석 조각들의 입계이동 재결정작용에 의해 진행되었다. 미세 단열된 K-장석 조각들의 입계상에는 변형작용과 관련되어 발달된 밀메카이트(400°C 이상)와 플래임 퍼어사이트(300-500°C)가 발견되고 변형쌍정과 킵크대(300-500°C)는 사장석에서 우세하게 나타난다. 거정 사장석의 입도 세립화는 역시 미세 단열작용에 의해 진행되나 K-장석과 달리 조각된 사장석에는 코아-맨틀구조가 거의 관찰되지 않는다. 석영집합체에 대한 석영 c-축 배열 형태는 주로 prism<a>가 부수적으로 basal<a>와 rhomb<a>가 탁월한 미끄럼계로 작용하여 형성된 single girdle 과 type II crossed girdle을 보여준다(400-500°C). 이상과 같은 장석-석영의 특징적인 변형 미구조로부터 청산 화강암은 녹색석-각섬암상 변성도(400-500°C)에서 연성전단변형을 받았음을 알 수 있었다.

2) 청산 화강암에 발달된 연성전단대는 혈관상 불연속 전단대, S-C 압쇄구조면을 갖는 연속 전단대 일정한 폭의 균질엽리 영역을 갖는 균질 전단대로 형태 분류된다. 이들 연성전단대는 동일 변형단계에서 형성되었으며 불연속 전단대에서 균질 전단대로 형태 변화는 400-500°C의 변형온도에서 변형량의 증가와 함께 조각된 K-장석들의 입계이동 재결정작용에 의한 조각된 K-장석들의 입도 세립화와 균질엽리대의 폭이 증가된 결과로 해석된다.

사 사

논문 초고에 대한 건설적인 비평을 해 주신 배재대학교 토목환경공학과 황상기 교수님과 고려대학교 지구환경과학과 박영도 박사님에게 깊은 감사를 드립니다. 또한 야외 및 실내작업에 도움을 준 안동대학교 지구환경과학과 대학원의 오세봉 군에게 감사하는 바이다. 본 연구는 1996년도 한국학술진흥재단의 신진교수과제(04-D-0040) 연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사하는 바이다.

참고문헌

김규봉, 황재하, 1986, 한국지질도(1:50,000) 영동지질

- 도폭 및 설명서. 한국동력자원연구소, 24p.
- 김동학, 이병주, 1986, 한국지질도(1:50,000) 청산지질도폭 및 설명서. 한국동력자원연구소, 20p.
- 김동학, 장태우, 김원영, 황재하, 1978, 한국지질도(1:50,000) 옥천지질도폭 및 설명서. 자원개발연구소, 21p.
- 김옥준, 이대성, 이하영, 1977, 한국지질도(1:50,000) 보은지질도폭 및 설명서. 자원개발연구소, 35p.
- 권상훈, 박영도, 김형식, 1996, 옥천대 중남부 청산 화강암체의 관입과 변형시기에 관한 연구: 예비고찰. 5차 정기총회 요약집, p10.
- 사공희, 좌용주, 1997, 청산 일대에 분포하는 화강암류의 광물조성과 구성분원소 지구화학. 암석학회지, 6, 185-209.
- 정창식, 장호완, 1996, 중부 옥천변성대의 화성, 변성 및 광화작용과 조구조적 연관성 연구(I): 보은지역 화강암류의 암석화학과 동위원소 지구화학. 지질학회지, 32, 91-116.
- 주승환, 김성재, 1985, Rb-Sr 법에 의한 영남육괴 연대 측정연구 I (평해-분천-김천화강편마암류 및 화강암류). 한국동력자원연구소, KR-85-24, 7-40.
- Bateman, R. 1984, On the role of diapirism in the segregation, ascent and final emplacement of granitoid magmas. *Tectonophysics*, 110, 211-231.
- Behrmann, J.H. and Platt, J.P., 1982, Sense of nappe emplacement from quartz c-axis fabrics. *Earth Planet Sci. Lett.*, 59, 208-215.
- Berthé, D., Choukroune, P. and Jegouzo, P., 1979, Orthogneiss, mylonite and non coaxial deformation of granites: the example of the South Armorican Shear Zone. *Jour. Struct. Geol.*, 1, 31-42.
- Castro, A., 1986, Structural pattern and ascent model in the Central Extramural batholith, Hercynian belt, Spain. *Jour. Struct. Geol.*, 8, 633-645.
- Cheng, C.S. and Chang, H.W., 1997, Sr, Nb, Pb isotope systematics of granitic rocks in the central Ogcheon Belt, Korea. *Geochem. Jour.*, 31, 17-36.
- Debat, P., Soula, J.C., Kubin, L. and Vidal, J.L., 1978, Optical studies of natural deformation microstructures in feldspars (gneiss and pegmatites from Occitania, Southern France). *Lithos*, 28, 133-145.
- Drury, M.R. and Urai, J.L., 1990, Deformation-related recrystallisation processes. *Tectonophysics*, 172, 235-253.
- Gapais, D., 1989, Shear structures within deformed granites: mechanical and thermal indicators. *Geology*, 17, 1144-1147.
- Gapais, D. and Barbarin, B., 1986, Quartz fabric transition in a cooling syntectonic granite (Hermitage Massif, France). *Tectonophysics*, 125, 357-370.
- Guineberteau, B., Bouchez, J.-L. and Vignerresse, J.-L., 1987, The Montagne granite pluton (France) emplaced by pull-apart along a shear zone: structural and gravimetric arguments and regional implication. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 99, 763-770.
- Hara, I., Sakurai, Y., Arita, S. and Paulitsch, P., 1980, Distribution pattern of quartz in granites: Evidence of their high-temperature deformation during cooling. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, 20-30.
- Hibbard, M.J., 1987, Deformation of incompletely crystallized magma systems: granitic gneisses and their tectonic implications. *Jour. Geol.*, 93, 543-561.
- Hutton, D.H.W., 1988, Granite emplacement mechanisms and tectonic controls: inferences from deformational studies. *Trans. Roy. Soc. Edinburgh. Earth Sci.*, 79, 245-255.
- Kang, J. H., Hara, I., Hayasaka, Y., Sakurai, Y., Shio-ta, T. and Umemura, H., 1993, Time-relationship between deformation and metamorphism of the Ogcheon Zone in the Ogcheon district, South Korea. *Mem. Geol. Soc. Japan*, 42, 63-90.
- Kwon, S.H., Park, Y.D., Park, C.S. and Kim, H.S., 1997, Microstructural, mineralogical and chemical changes during ductile deformation of the Cheongsan granite. In *Tectonic Evolution of Eastern Asian Continent* (eds. Lee, Y.I. and Kim, J.H.), *Geol. Soc. Korea 50th Anniv. Int'l Symp.*, 195-200.
- Lee, D.S., 1971, Study on the Igneous activity in the middle Ogcheon geosynclinal zone, Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 7, 153-216.
- Lister, G.S., 1977, Discussion: crossed-girdle c-axis fabrics in quartzites plastically deformed by plane strain and progressive simple shear. *Tectonophysics*, 39, 51-54.
- Lister, G.S. and Williams, P.F., 1979, Fabric development in shear zones: theoretical controls and observed phenomena. *Jour. Struct. Geol.*, 1, 283-297.
- Lister, G.S. and Snoke, A.W., 1984, S-C mylonite. *Jour. Struct. Geol.*, 6, 617-638.
- Mainprice, D.H. and Bouchez, J.L., 1987, Characterization of slip systems in naturally deformed quartz by microstructural, X-ray texture goniometry and transmission electron microscopy studies: application to simple fabric types as a function of temperature. In *Conference Report: Crystallographic fabrics and deformation histories* (reported by R.D. Law), *Jour. Geol. Soc. London*, 144, 677(Abstract).
- Miller, D.M. and Christie, J.M., 1981, Comparison of quartz microfabric with strain in recrystallized quartzite. *Jour. Struct. Geol.*, 3, 129-141.
- Passchier, C.W., 1982, Mylonitic deformation in the Saint-Bar-the'lemy Massif, French Pyrenees, with emphasis on the genetic relationship between ultramylonite and pseudotachylyte. *GUA. pap. Geol. Ser.*, 1, 16, 167-176.

- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J., 1996, *Microtectonics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 289p.
- Paterson, S.R., 1987, Canibal Creek granite: post-tectonic "balloning" pluton or pre-tectonic piercement diapir?. *Jour. Geol.*, 96, 730-736.
- Paterson, S.R., Vernon, R.H. and Tobisch, O.T., 1989, A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids. *Jour. Struct. Geol.*, 11, 349-363.
- Pryer, L.L., 1993, Microstructures in feldspars from a major crustal thrust zone: the Grenville Front, Ontario, Canada. *Jour. Struct. Geol.*, 15, 21-36.
- Schmid, S.M., Casey, M., 1986, Complete fabric analysis of some commonly observed quartz C-axis patterns. *Geophys. Monogr.*, 36, 263-286.
- Simpson, C., 1985, Deformation of granitic rocks across the brittle-ductile transition. *Jour. Struct. Geol.*, 7, 503-511.
- Tullis, J. and Yund, R.A., 1977, Experimental deformation of dry Westerly granite. *Jour. Geophys. Res.*, 82, 5705-5718.
- Tullis, J. and Yund, R.A., 1980, Hydrolytic weakening of experimentally deformed Westerly granite and Hale albite rock. *Jour. Struct. Geol.*, 2, 439-451.
- Tullis, J.A., 1983, Deformation of feldspars. In: *Feldspar Mineralogy* (ed. Ribbe, P.H.), *Miner. Soc. Amer.*, short course notes, 2(2nd Edn), 297-323.
- Tullis, J. and Yund, R.A., 1985, Dynamic recrystallisation of feldspar: a mechanism for ductile shear zone formation. *Geology*, 13, 238-241.
- Tullis, J. and Yund, R.A., 1987, Transition from cataclastic flow to dislocation creep of feldspar: mechanisms and microstructures. *Geology*, 15, 606-609.
- Tullis, J., Dell'Angelo, L. and Yund, R.A., 1990, Ductile shear zones from brittle precursors in feldspathic rocks: the role of dynamic recrystallization. In: Hobbs, B.E., Heard, H.C., (eds), *Mineral and rock deformation: laboratory studies*. AGU, *Geophys. Monogr.*, 56, 67-81.
- Tullis, J. and Yund, R.A., 1991, Diffusion creep in feldspar aggregates: experimental evidence. *Jour. Struct. Geol.*, 13, 987-1000.
- Urai, J.L., 1983, Water assisted dynamic recrystallization and weakening in polycrystalline biotite. *Tectonophysics*, 96, 125-157.
- Vidal, J.L., Kubin, L., Debat, P. and Soula, J.L., 1980, Deformation and dynamic recrystallisation of K-feldspar augen in orthogneiss from Montagne Noir, Occitania. *Lithos.*, 13, 247-257.
- White, S., 1976, The effects of strain on the microstructures, fabrics and deformation mechanisms in quartzites. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, 283, 69-86.
- Wilson, C.J.L., 1975, Preferred orientation in quartz ribbon mylonites. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 88, 968-974.

(책임편집 : 황상기)

(1997년 12월 28일 접수, 1998년 4월 26일 수리)

**The temperature condition for the mylonitization of the
Cheongsan granite, Korea
-Structural analysis of the deformed
Cheongsan granite, Korea -**

Ji Hoon Kang

*Department of Earth and Environmental Sciences, College of Natural Science,
Andong National University, Andong 760-749, Korea*

ABSTRACT : Microstructural and rock structural analyses on the deformed Cheongsan granite characterized by abundant K-feldspar megacrysts have been carried out to understand the temperature condition for the ductile shear deformation. In K-feldspar, microkinks, microfractures and core-and-mantle structures without the development of subgrains in outer core-zone are the most common microstructures observed. Myrmekites and flame perthites are developed at the strain-localized areas along the microfractured K-feldspar. In plagioclase, microfractures, deformation twins and kink bands are predominant. The deformation twins cut across the igneous zonation of the plagioclase. Patterns of c-axis fabrics of dynamically recrystallized new quartz grains display single girdle and type II crossed girdle where prism<a> slip system is predominant. These characteristic microstructures produced during the ductile shearing suggest that the ductile shear deformation in the Cheongsan granite occurred under epidote-amphibolite conditions(400-500°C). Three main shear zones are recognized at outcrop scale : discrete shear zone with anastomosing high-strain domain, shear zone with pervasive S-C structure and shear zone with homogeneously foliated domain. Geometric features of these shear zones produced during the ductile shear deformation are controlled by amount of strain under the 400-500°C deformation temperature.

Key words : Cheongsan granite, ductile shear deformation, microstructure, rock structure, deformation temperature