경상북도 북후면-평은면 지역에 발달된 예천전단대의 구조적 특성

강지훈*

안동대학교 지구환경과학과

Structural characteristics of the Yecheon Shear Zone in the Pukhmyeon-Pyeongunmyeon area, Gyeongsangbukdo, Korea

Ji-Hoon Kang*

Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong,
Gyeongsangbukdo 760-749, Korea

요약: 소백산육괴의 중앙부에 위치하는 경상북도 북후면-평은면 지역에서 주 구성암류인 선캄브리아기 변성퇴적암류와 중생대 화강암에 대한 변형된 암석 및 미구조 연구를 통하여 (동)북동-(서)남서 방향으로 발달하는 우수 주향 이동성 예천전단대의 상대적인 형성시기, 변형온도, 초압쇄암대의 분포 등을 파악하였다. 연성 변형된 주요 암석구조는 전단변형에 의해 형성된 압쇄구조면과 신장선구조 그리고 편마구조면 내지 압쇄구조면이 습곡되어 형성된 (동)남동-북서향의 완침강-중경사 밀착습곡 등이 있다. 연성전단변형 동안에 형성된 장식들의 특징적인 미구조는 플레임 퍼어사이트, 밀메카이트, 미세단열, 미세킹크, 킹크대, 파동소광 등이 인지된다. 재결정된 석영집합체의 c-축 배열은 rhomb<a>와 basal<a>가 탁월한 미끄럼계로 작용하여 형성된 single girdle과 Type I crossed girdle 형태를 보여준다. 전단운동감각 결정면상에서 인지되는 전단운동감각은 우세한 방향성인 북서-경사와 부수적인 방향성인 남동-경사 압쇄구조면상에서 상부-북동-이동과 상부-남서-이동을 각각 보여준다. 이러한 특징적인 암석 및 미구조로부터 예천전단운동은 밀착습곡이 형성된 이후 발생하였으며, 예천전단운동이 발생할 당시의 변형온도는 350~450°C이었음을 알 수 있다. 선캄브리아기 변성퇴적암류의 대상 분포와 변형된 선캄브리아기 변성퇴적암류의 장식과 중생대 화강암의 석영의 입도 분포로부터 불노봉과 박달산 북부를 통과하는 (동)북동 방향의 예천전단대의 초압쇄암대가 설정된다.

핵심어: 소백산육괴 북후면-평은면 지역, 예천전단대, 전단운동감각, 변형온도, 초압쇄암대

Abstract: The dextral strike-slip Yecheon Shear Zone of (E)NE-(W)SW trend is developed in the Pukhmyeon-Pyeongunmyeon area, Gyeongsangbukdo, in the central part of Sobaeksan Massif, Korea which mainly consists of Precambrian metasedimentary rocks and Mesozoic granite. This paper researched the relative formation time, the deformation temperature, and the distribution of ultramylonite zone of Yecheon Shear Zone from the analysis of their deformed rock structures and microstructures. There are the mylonite foliation and stretching lineation by shear deformation, and the (E)SE-vergence gentle plunging, moderately inclined tight fold defined by the gneissosity and mylonite foliation as ductilely deformed main rock structures. Flame perthites, myrmekites, microfractures, microkinks, kinkband, and undulatory extinction are recognized as characteristic microstructures in feldspars during ductile shear deformation. Patterns of c-axis fabrics of recrystallized quartz aggregate display single girdle and type I crossed girdle where the rhomb<a> and basal<a> slip systems are predominant. The shearing senses on sense-of-shear plane show top-to-the-NE and top-to-the-SW on the predominant NW-dipping and subordinate SE-dipping mylonite foliations, respectively. These characteristic rock structures and microstructures suggest that the Yecheon ductile shearing occurred under 350~450°C deformation temperature after the tight folding. The

*Corresponding author
Tel: 054-820-5474
E-mail: jhkang@andong.ac.kr

(E)NE trending ultramylonite zone of Yecheon Shear Zone, which passes through the Pulnobong and the north part of Pakdalsan, is established from the zonal distribution of Precambrian metasedimentary rocks and the grain-size distribution of feldspars in the Precambrian metasedimentary rocks and quartzs in the Mesozoic granite.

Keywords: Pukhmyeon-Pyeongunmyeon area of Sobaeksan Massif, Yecheon Shear Zone, shearing sense, deformation temperature, ultramylonite zone

서 론

한반도 호남지방을 중심으로 수 개의 우수 주향 이 동성 연성전단대(순창전단대, 광주전단대, 전주전단대, 영광전단대)가 발달되어 있다(Yanai *et al.*, 1985; Chang and Han, 1989; Lee *et al.*, 1990; Cluzel *et al.*, 1991; Kim and Kee, 1991)(Fig. 1a). 이들 중 북동-남서 방향으로 발달하고 있는 순창전단대는 연장성이 가장 우수하여 해남-순창-진안 연결선을 따라 단양 지역까지 연장되고, 점촌 부근에서 (동)북동-(서)남서향의 우수 주향 이동성 예천전단대(Chang, 1991)로 분리되며, 분리된 예천전단대는 소백산육괴의 북후면-평은면 지역을 지나 봉화군 상운면 지역에서 그 방향성을 동-서로 전환하여 장군봉 지역과 영양-울진 지역의 기성층 분포지로 연장된다(KIGAM, 1995; Kang *et al.*, 1997, 1998; Kang and Kim, 2000; Kang *et al.*, 2004). 그리고 Kang *et al.* (2006)은 이들 지역에 분포하는 소백산육괴 구성암류의 변형된 주요 암석 및 미구조에 대한 기하학적·운동학적 특성과 중첩 변형구조들의 선후관계로부터 소백산육괴의 광역적인 변형단계별 구조적 특성과 예천전단대를 포함한 각 변형단계의 상대적인 발생시기를 종합적으로 보고한 바가 있다. 또한 예천전단대와 그 주변부에 분포하는 중생대 화강암류에 대한 절대연령 측정과 이를 바탕으로 예천전단대의 발생시기에 대한 연구는 몇몇 연구자들에 의해 수행된 바가 있다(Choo, 1988; Kim *et al.*, 1988; Jin and Jang, 1999; Kim *et al.*, 2009).

본 논문은 경상북도 북후면-평은면 지역에서 주 구성암류인 선캄브리아기 변성퇴적암류와 중생대 화강암의 변형된 주요 암석 및 미구조 분석과 이들 구성암류의 주 구성광물인 석영과 장석의 입도 측정을 통하여 예천전단대의 상대적인 발생시기, 변형온도, 초압쇄암대의 분포 등을 파악하여 기존 연구결과와 비교·검토해 보았다.

지질개요

소백산육괴의 중앙부에 위치하고, 영주 지질도폭(Lee *et al.*, 1989)의 남동부와 예안 지질도폭(Lee and Lee, 1963)의 남서부 일부 영역을 점하고 있는 북후면-평은면 지역은 주로 선캄브리아기 변성퇴적암류와 이를 관입하는 중생대 화강암으로 구성되어 있다(Fig. 1). 지질도상에서 인지될 수 있는 주요 단층으로는 북북동-남남서향 단층과 북동-남서향 단층 등이 있으며, 이들 주요 단층은 본 역의 주요 구성암류를 절단한다(Fig. 1b).

원남통의 최하부층인 원남층(Yun and Shin, 1963)과 태백산 편마암복합체(Lee and Kim, 1984)에 대비되는 선캄브리아기 변성퇴적암류는 연구지역의 중앙부에서 북동-남서 방향으로 대상 분포한다(Fig. 1b). 주로 안구상 편마암, 호상 편마암, 화강암질 편마암 등으로 구성되어 있고, 석회규산질암, 운모편암, 각섬암, 대리암 등을 부분적으로 협재한다. 안구상 편마암은 주로 장석 잔쇄반정이 안구상으로 나타나고, 장석 안구의 입도 세립화와 함께 호상 편마암 내지 석영-장석 편암으로 변화한다(Fig. 2a-2d). 호상 편마암은 주로 사질 내지 이질 성분층과 장석질 성분층이 호층을 이룬다(Fig. 2e). 본 역의 편마암류는 주로 석영, 사장석, K-장석, 미사장석, 흑운모, 백운모 등으로 구성되어 있으며, 석류석, 규선석, 녹염석, 저어콘, 인회석, 전기석, 불투명 광물 등을 부성분 광물로 한다. 주 구성광물인 석영과 장석들의 신장배열에 의해 정의되는 신장선구조와 압쇄구조면은 암석규모에서 빈번히 관찰된다(Fig. 2d). 신장선구조에 평행하고 압쇄구조면에 수직한 암석 및 미소 규모의 단면에서는 예천전단대 형성과 관련된 전단운동감각 지시자가 많이 관찰된다.

중생대 화강암은 연구지역의 북서부와 남동부에 넓게 분포한다(Fig. 1b). 북서부 화강암은 예안도폭(Lee and Lee, 1963)과 춘양도폭(Son and Kim, 1963)에서 시대미상의 각섬석 화강암으로, 영주도폭(Lee *et*

Fig. 1. (a) Index map showing the locality (arrow mark) of the study area. B: Bonghwa, Bu: Busan, G: Gwangju, Ga: Gangnung, J: Jeumchon, Ja: Janggunbong, Je: Jeonju, Mo: Mokpo, S: Sunchang, Se: Seoul, W: Wando, Y: Yecheon, Ye: Yeonggwang, SSZ: Sunchang Shear Zone, YSZ: Yecheon Shear Zone [adapted from Kang *et al.* (2004)]. (b) Geological map of the study area [adapted from Lee *et al.* (1989)]. 1: Mesozoic granites, 2: Precambrian metasedimentary rocks (a: gneisses, b: limesilicate, black slate, marble, muscovite schist), 3: faults.

al., 1989)에서는 시대미상의 흑운모 화강암으로 분류된 바가 있다. 봉화 지역의 각섬석 화강암(영주화강암)과 춘양 지역의 각섬석 화강암(춘양화강암)이 동시대 화강암이라는 가정 하에서 측정된 Rb-Sr 전암 동위원소 자료는 이들 화강암의 정치연대가 224 ± 10 Ma (Choo, 1988)와 220 ± 27 Ma (Jin and Jang, 1999)로 나타난다. 그리고 남동부 화강암은 예안도폭에서 시대미상의 흑운모 화강암으로, 영주도폭에서는 유라기 편상 화강암으로 분류된 바가 있다, Kim *et al.* (1988)은 Rb-Sr 방법에 의한 전암(172.3 ± 0.9 Ma)과 흑운모(159.8 Ma) 절대연령으로부터 관입 시기를 전기 유라기로 보고한 바가 있다. 본 역의 중생대 화강암은 주로 석영, 사장석, K-장석, 미사장석, 흑운모, 각섬석 등으로 구성되어 있고, 백운모, 녹염석, 스펀, 저어콘, 녹염석, 인회석, 녹니석, 불투명광물 등을 부성분광물로 한다. 주 구성광물인 석영과 장석들의 신장배열에 의해 정의되는 압쇄구조면과 신장선구조는 역시 관찰되고, 신장선구조에 평행하고 압쇄구조면에 수직한 단면에서 전단운동감각 지시자는 암석규모보다는 미소규모에서 보다 뚜렷하게 인지된다.

예천전단대의 형성 시기는 지금까지 몇몇 연구자들에 의해 수행된 바가 있다. Kang *et al.* (1998)과 Kang and Kim (2000)은 예천 연성전단변형에 의해 재결정된 세립 석영립들이 장군봉 지역 춘양화강암으로 갈수록 열변성작용에 의해 조립화되는 반면에 봉화 지역 영주화강암에서는 예천 연성전단변형에 의한 압쇄구조면이 관찰됨을 보고하고, 이들 화강암은 추정과 달리 동시대 화강암(Choo, 1988; Jin and Jang, 1999)이 아니라 각각 예천전단변형 이후와 이전에 관입한 화강암임을 지적하고, 예천전단대의 상대적인 형성 시기를 봉화 지역 영주화강암의 관입 이후-장군봉 지역 춘양화강암 [$136 \pm 4.2 \sim 147 \pm 4.5$ Ma (K-Ar 백운모 연대)]의 관입 이전으로 제한한 바가 있다. 그리고 Kim *et al.* (2009)는 봉화 지역에 분포하는 압쇄암화된 선캠브리아기 석영-장석 정편마암(맨틀: ca. 179 Ma)과 영주화강암(코아: 187.2 ± 3.6 Ma, 맨틀: 178.4 ± 3.1 Ma)의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대로부터 영주화강암의 정치연대를 약 187 Ma 그리고 예천전단대의 형성 시기를 약 179~178 Ma(전기 유라기 말)로 설정한 바가 있다.

변형된 암석구조

변형된 주요 암석구조로는 연성전단변형에 의해 형성된 압쇄구조면과 신장선구조 그리고 선캠브리아기 변성퇴적암류의 편마구조면 내지 압쇄구조면이 습곡되어 형성된 (동)남동-북서로의 밀착습곡 등이 있다 (Fig. 2).

선캠브리아기 변성퇴적암류와 중생대 화강암류의 주 구성광물인 석영과 장석들의 최대신장 방향과 중간신장 방향에 의해 정의되는 압쇄구조면은 북서부 화강암보다 남동부 화강암에서 보다 용이하게 인지된다. 남동부 화강암과 변성퇴적암류에서 압쇄구조면의 발달은 이들 경계부로 갈수록 보다 현저하게 나타난다. 변성퇴적암류와 화강암에 발달하는 압쇄구조면의 주향은 (북)북동 방향에서 점이적으로 동북동 방향으로 변화한다. 압쇄구조면의 경사는 불노봉을 중심으로 북서부 영역에서는 북서-경사가 우세한 반면에 남동부

영역에서는 북서-경사와 남동-경사가 반복하여 나타난다 (Fig. 3a). 이들 압쇄구조면의 극점들을 등면적망의 하반구에 투영해 보면, N44°E 60°NW 부근의 우세 방향성과 분산된 극점배열로부터 21° N30°E 방향의 가장 적합한 π -축이 인지된다 (Fig. 3b). 선캠브리아기 변성퇴적암류와 중생대 화강암의 압쇄구조면상에서 주로 신장된 석영과 장석들의 정향배열에 의해 인지되는 신장선구조는 압쇄구조면이 발달할수록 보다 현저하게 나타나고, 압쇄구조면의 주향 방향에 해당하는 NE-SW 구간 선주향 영역에서 저각으로 침강하며 11° S57°W 부근의 우세 방향성이 인지된다 (Fig. 3c).

연구지역의 북동부 영역에 해당하고 북북동-남남서향 단층의 동부 영역에 분포하는 선캠브리아기 안구상 편마암에서는 압쇄구조면의 발달 정도와 방향성 사이의 상관관계로부터 소규모의 전단대가 인지된다 (Figs. 2a-2d, 3a). 저 변형된 안구상 편마암은 다수의 장석 안구 잔쇄반정으로 구성되어 있고, 압쇄구조면

Fig. 2. Photographs of characteristic rock structures in the Precambrian metasedimentary rocks. (a) Moderately deformed mylonitic rock. (b) Highly deformed mylonitic rock. (c) Very highly deformed ultramylonitic rock. (d) Stretching lineation (STL) on the mylonite foliation (MF) in very highly deformed ultramylonitic rock. (e) (E)SE-vergence gentle plunging, moderately inclined tight fold.

의 자세는 $N28^{\circ}E$ $82^{\circ}SE$ 로 측정된다(Figs. 2a, 3a). 한편 고 변형된 안구상 편마암은 장식 안구의 입도 세립화와 함께 신장된 소수의 장식 안구 잔쇄반정으로 구성되어 있으며, 압쇄구조면이 보다 우세하게 발달하여 안구상 편마암상은 호상 편마암상으로 변화한다(Fig. 2b). 압쇄구조면의 방향성은 $N38^{\circ}E$ $86^{\circ}SE$ 로 측정되고, 신장선구조는 압쇄구조면의 주향 방향에 근접한 $10^{\circ}N42^{\circ}E$ 로 나타난다(Fig. 3a). 그리고 초압쇄 압화된 안구상 편마암은 장식 안구 입도의 극세립화와 장식 안구의 기질화로 인하여 장식 안구 잔쇄반정은 거의 관찰되지 않고, 압쇄구조면의 발달이 보다 현저하여 안구상 편마암상은 석영-장식 편암상으로 변화하고(Fig. 2c, 2d), 압쇄구조면(신장선구조)의 자세는 $N46^{\circ}E$ $78^{\circ}NW$ ($20^{\circ}N32^{\circ}E$)와 $N58^{\circ}E$ $90^{\circ}NW$ ($28^{\circ}S70^{\circ}W$)로 측정된다(Fig. 3a). 이러한 신장선구조의 방향성과 저 변형대에서 고 변형대로 향해 북북동 내지 북동에서 북동 내지 동북동 방향으로 압쇄구조면 주향 성분의 방향성 변화로부터 예천전단대 형성과 관련된 우수 주향 이동성 전단운동감각이 인지된다(Fig.

3a).

밀착습곡은 압쇄구조면의 경사 방향이 북서-남동-북서로 반복하여 나타나는 불노봉의 남동부에서 관찰된다(Fig. 3a). 사질 내지 이질 성분층과 장식질 성분층이 호층을 이루는 선캠브리아기 호상 편마암에 발달된 밀착습곡은 $12^{\circ}N42^{\circ}E$ 방향의 습곡축과 $N38^{\circ}E$ $50^{\circ}NW$ 방향의 습곡축면을 갖는 (동)남동-버전스의 완침강-중경사 습곡으로 인지된다(Fig. 2e). 밀착습곡의 양 날개부에는 S자형 및 Z자형 비대칭 기생 소습곡들과 측부에서는 M자형 대칭 기생 소습곡들이 관찰되고, 기생 소습곡축은 밀착 습곡축과 동일한 방향성을 보여준다. 이러한 기생 소습곡의 기하로부터 밀착 습곡구조는 요굴 미끄럼 습곡작용(flexural slip folding)에 의해 형성되었음을 알 수 있다. 또한 밀착 습곡축의 방향성이 편마구조면 내지 압쇄구조면의 분산된 극점배열로부터 인지된 $21^{\circ}N30^{\circ}E$ 의 π -축 방향성(Fig. 3b)과 거의 일치함을 고려해 볼 때, 본 밀착 습곡은 연구지역의 지질구조를 지배하는 주 습곡구조로 해석된다.

Fig. 3. (a) Orientation and (b-c) stereoplots of mylonite foliation (MF) and stretching lineation (STL) developed in the Precambrian metasedimentary rocks (Gn) and Mesozoic granites (Gr) of the study area. Equal-area, lower-hemisphere projection. p: poles.

미구조

압쇄구조면에 수직하고 신장선구조에 평행한 전단 운동감각 결정면상에서는 연성전단변형 동안에 형성

된 선캠브리아기 변성퇴적암류와 중생대 화강암의 주 구성광물인 석영과 장석의 특징적인 미구조와 전단 운동감각을 지시하는 많은 증거들이 관찰된다(Figs. 4, 5).

Fig. 4. Photomicrographs of characteristic fabrics related to the Yecheon shear deformation in the Mesozoic granites. All are taken under crossed polars and all scale bars are 0.3 mm. The mylonite foliations dip northwest in (d)~(f). (a) Weakly deformed fabrics. (b) Moderately deformed mylonitic fabrics. (c) Flame perthite (Fp) in moderately deformed mylonitic rock. Flames taper to a point within K-feldspar. (d) Type II S-C fabrics defined by elongation direction (S) of dynamically recrystallized fine-grained quartzs and elongation direction (C) of ribbon quartzs in highly deformed mylonitic rock (top-to-the-NE shear sense). (e) Type I S-C fabrics in very highly deformed ultramylonitic rock (top-to-the-NE shear sense). Strain-related myrmekitic intergrowth (subround, bulbous, comma shape) (My) on the long sides (S) of K-feldspars that faces the finite shortening direction. (f) σ -type asymmetric tails of K-feldspar porphyroclast and type II S-C fabrics in quartz ribbons in very highly deformed ultramylonitic rock (top-to-the-NE shear sense). B: biotite, C: C-surface, H: hornblende, K: K-feldspar, S: S-surface, P: plagioclase, Q: quartz, Qr: quartz ribbon.

Fig. 5. Photomicrographs of characteristic fabrics related to the Yecheon shear deformation in the Precambrian metasedimentary rocks. All are taken under crossed polars and all scale bars are 0.3 mm. The mylonite foliations dip northwest in (a), (b), (f) and dip southeast in (d), (e), (g). (a) Type I S-C fabrics with strain-related myrmekitic intergrowth (My) in weakly deformed rock (top-to-the-NE shear sense). (b) Sigmoidal foliation patterns indicating top-to-the-NE shear sense in moderately deformed mylonitic rock. (c) Strain-related myrmekitic intergrowth (My) and conjugate microfractures (Mf) in moderately deformed mylonitic rock. (d) Myrmekites (My) and microfractures (Mf) and kink band boundary (Kb) in highly deformed mylonitic rock (top-to-the-SW shear sense). (e) S-C-C' fabrics in highly deformed mylonitic rock (top-to-the-SW shear sense). (f) Muscovite fish (MF) in very highly deformed ultramylonitic rock (top-to-the-NE shear sense). (g) Type II S-C fabrics defined by muscovite fish (MF) and oblique foliation in quartz ribbons in very highly deformed ultramylonitic rock (top-to-the-SW shear sense). C: C-surface, C': shear band, K: K-feldspar, Mk: microkink, S: S-surface, P: plagioclase, Q: quartz, Qr: quartz ribbon.

석영과 장석의 입도는 압쇄구조면과 신장선구조의 발달과 함께 저 변형암에서 고 변형암으로 갈수록 현저하게 감소하는 경향을 보인다. 장석들의 특징적인 미구조는 플레임 퍼어사이트(flame perthite), 밀메카이트(myrmekite), 미세단열(microfracture), 미세킹크(microkink), 킹크대(kink band), 파동소광 등으로 인지된다. 플레임 퍼어사이트는 입계에서 비교적 넓은 폭을 가지고 입자 내부로 향하여 가늘어지는 K-장석 내에 조장석이 불꽃상 형태로 나타나는 미구조로서 조장석의 불꽃상 엽층은 연성전단변형과 관련하여 일반적으로 입계 방향에 수직으로 발달한다(Fig. 4c). 연성전단운동의 압축유한변형에 의해 성장한 밀메카이트는 전단엽리 C면과 사교하고 압쇄엽리 S면에 평행한 K-장석 잔쇄반정의 장축 입계면상에서 K-장석 쪽으로 부푼 풍선 내지 콤마(comma)상으로 발달한다(Simpson, 1985)(Figs. 4e, 5a, 5c, 5d). 미세단열, 미세킹크, 킹크대 등은 주로 K-장석 잔쇄반정내에서 종종 공액성으로 나타나고, 전단운동의 압축유한변형에 의해 형성된 방향성을 보인다(Fig. 5a, 5c, 5d).

대표적인 전단운동감각 지시자(cf. Berthe *et al.*, 1979; Lister and Snoke, 1984; Simpson and Schmid, 1983)로서는 장석 잔쇄반정과 석영립들의 형태 신장배열에 의해 인지되는 압쇄엽리 S면과 압쇄엽리 S면의 불연속 전위면에 해당하는 전단엽리 C면에 의해 정의되는 Type I S-C 구조(Figs. 4e, 5a), 장석 잔쇄반정의 σ -형 꼬리구조(Figs. 4f, 5a), C면을 향한 점이적인 방향성 변화를 보이는 S면의 형태(Fig. 5b), 신장성 전단띠 C면과 함께 장석 잔쇄반정의 형태신장방향에 의해 정의되는 S면과 리본(ribbon) 석영립의 형태신장방향에 의해 정의되는 C면을 갖는 S-C-C' 구조(Fig. 5e), C면에 평행한 리본 석영립과 S면에 평행한 세립 재결정 석영립의 형태 신장배열 방향에 의해 정의되는 Type II S-C 구조(Figs. 4d, 4f, 5g), 물고기형 백운모의 꼬리방향 C면과 백운모 (001)벽배열면 S면에 의해 정의되는 Type II S-C 구조(Fig. 5f, 5g) 등이 있다. 그리고 이들 구조요소가 지시하는 전단운동감각은 본 역의 우세 방향성인 북서-경사 압쇄구조면상에서는 상부가 북동쪽으로 이동하는 전단운동(Figs. 4d-4f, 5a, 5b, 5f)을 보여주는 반면에 부수적인 방향성인 남동-경사 압쇄구조면상에서는 상부가 남서쪽으로 이동하는 전단운동(Fig. 5d, 5e, 5g)을 보여준다.

저 변형된 화강암에서 석영 집합체는 아입자 경계

Fig. 6. Quartz c-axis fabrics (equal-area, lower-hemisphere projections). The $X>Y>Z$ are the principal axes of finite strain. The reference frame is defined by mylonite foliation as XY plane and stretching lineation as X. (a) Single girdle (top-to-the-NE shear sense) [n=200 (number of grains) and contours at 1-2-3-4-5% per 1% area, Mesozoic granite]. (b) Type I crossed girdle (top-to-the-NE shear sense) (n=200 and 0.5-1.5-3-6-10%, Precambrian metasedimentary rock).

와 파동소광을 보이는 조립석영과 조립석영의 입계를 따라 성장한 세립 신입자로 구성되어 있다(Fig. 4a). 고 변형된 화강암에서 석영 집합체는 C면에 평행한 석영 리본과 S면 방향으로 신장된 세립 재결정 석영 립들로 구성되어 있다(Fig. 4c, 4d, 4e). 초압쇄암화된 화강암과 변성퇴적암류의 석영 집합체에 대한 석영 c-축 배열을 편광현미경 재물대 상에 설치된 자유회전대(universal stage)를 이용하여 측정해 보면 이들 배열은 rhomb<a>와 basal<a>를 탁월한 미끄럼계(slip system)로 하는 single girdle(Fig. 6a)과 Type I crossed girdle(Fig. 6b)의 형태를 보여준다(Lister, 1977; Schmid and Casey, 1986). 이들 석영 c-축의 배열 비대칭성(Lister and Williams, 1979; Behrmann and Platt, 1982)은 석영과 장석의 특징적인 미구조로부터 인지된 전단운동감각과 일치한다.

석영과 장석의 입도

변형작용에 의해 암석의 강도가 약해지는 변형약화현상(strain softening)은 구성광물의 입도 세립화작용에 의해 발생하며, 일반적으로 전단대내에서 이러한 변형약화현상은 전단대의 가장자리에 해당하는 저 변형대에서 전단대의 중심부에 해당하는 고 변형대로 갈수록 보다 현저하게 나타난다(cf. Davis and Reynolds, 1996의 p493-563). 따라서 본 연구는 북후면-평은면 지역에서 예전전단대의 영역별 상대적인 변형도를 파악하기 위하여 중생대 화강암을 중심으로 석영 입도를, 선캄브리아기 변성퇴적암류를 중심으로 장석 입

Fig. 7. Diagram showing frequency distribution of the average grain-size (Ave.) of feldspars in the Precambrian metasedimentary rocks [squares (Ave.): large (0.87-1.05 mm), medium (0.53-0.60 mm), small (0.25-0.37 mm)] and quartzs in the Mesozoic granites [circles (Ave.): large (0.32-0.52 mm), medium (0.23-0.24 mm), small (0.11 mm)]. Thick dot lines: ultramylonite zones.

도를 각각 측정해 보았다(Fig. 7). 대상 광물의 입도는 먼저 마이크로메타(micrometer) 접안렌즈로 대상 광물 입자의 장축과 단축을 측정하고, 마이크로메타 접안렌즈의 눈금에 대한 실제 길이를 대물 마이크로메타로써 결정한 다음에 (장축의 길이×단축의 길이)^{1/2}로 계산하여 정하였다. 그 결과, 석영의 최대입도와 평균입도는 저 변형대(Y20, Y36)에서 0.90~1.7 mm와 0.32~0.52 mm, 중 변형대(Y11, Y22)에서 0.45~0.60 mm와 0.23~0.24 mm, 고 변형대(Y26)에서 0.45 mm와 0.11 mm를 보인다. 그리고 장석의 최대

입도와 평균입도는 저 변형대(Y03, Y18, Y30)에서 4.0~4.5 mm와 0.87~1.05 mm, 중 변형대(Y14, Y37-1)에서 2.0~2.1 mm와 0.53~0.60 mm, 고 변형대(Y27, Y41)에서 0.8~2.1 mm와 0.25~0.37 mm 범위로 각각 나타난다(Fig. 7). 석영과 장석의 입도 대소 분포도로부터 주 구성광물의 입도는 남동부 화강암과 변성퇴적암류의 경계부를 향해 보다 세립화가 진행되었으며, 이와 함께 예천전단대의 상대적인 변형도는 역시 이들 경계면을 향해 증가함을 알 수 있다.

고 찰

지금까지 언급된 바와 같이 (동)북동-(서)남서향의 우수 주향 이동성 예천전단대는 경상북도 북후면-평은면 지역을 통과하고, 이 지역에 분포하는 선캄브리아기 변성퇴적암류와 중생대 화강암에서는 구성광물들의 세립화와 함께 예천전단대 형성과 관련된 압쇄구조면과 신장선구조가 발달하며, 이들 압쇄구조면에 수직하고 신장선구조에 평행한 전단운동감각 결정면상에서는 Type I S-C 구조, 운모형과 리본석영형의 Type II S-C 구조, σ -형 꼬리구조, 만곡형 S면의 형태, S-C-C' 구조 등 예천 전단운동감각을 지시하는 많은 증거들이 관찰된다(Figs. 1, 2, 4, 5). 그러나 이들이 지시하는 전단운동감각은 본 역의 우세 방향성인 북서-경사 압쇄구조면상에서는 상부-북동-이동 전단운동감각을 보여주는 반면에 부수적인 방향성인 남동-경사 압쇄구조면상에서는 상부-남서-이동 전단운동감각을 보여준다. 이와 같이 압쇄구조면 상부의 이동 방향이 압쇄구조면의 경사방향에 좌우되어 서로 반대로 나타남은 압쇄구조면의 경사 방향이 북서-남동-북서 방향으로 변화하는 불노봉 영역에서 노두 규모로 빈번히 출현하는 북동 방향의 완침강-중경사 밀착습곡과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 밀착습곡과 예천전단운동 사이의 기하학적·운동학적 관계로부터 이들 사이의 선후관계를 고려해 볼 때, 이는 편마구조를 습곡시키는 밀착습곡이 형성된 이후에 북서-경사와 남동-경사하는 양 날개부의 편마구조면을 전단면으로 하여 우수 주향 이동성 예천전단운동이 발생하였기 때문인 것으로 해석된다. 이러한 해석은 연구지역의 지질구조는 편마구조를 습곡시키는 밀착습곡이 형성된 이후에 예천전단대가 형성되었음을 의미한다.

Kang *et al.*(2006)은 경상북도 울진군 기성면 지역 선캄브리아기 변성암류에 대한 변형단계별 구조적 특성과 기존 연구결과(Kang *et al.*, 1997, 1998; Kang and Kim, 2000; Kang *et al.*, 2004)를 바탕으로 소백산육괴의 지질구조는 소백산육괴 구성암류에 편마구조 내지 편리가 형성된 이후 동북동-서남서 방향의 압축변형, 북북서-남남동 방향의 압축변형, 동북동 방향의 우수 주향 이동성 예천전단변형, 북북서 방향의 정이동 전단변형, 동북동 방향의 소백산육괴 원래의 지구조선을 북후면-평은면 지역의 북동 방향 지구조선과 장군봉 지역의 동서 방향 지구조선으로 변화시

킨 동북동-서남서 방향의 압축변형, 남-북 방향의 압축변형 등 적어도 여섯 번의 변형작용을 걸쳐 형성되었음을 보고한 바가 있다. 그리고 본 연구결과 연구지역의 밀착 습곡작용과 예천 전단운동은 그들의 두 번째와 세 번째 변형작용에 각각 해당될 것으로 판단되고, 기존 연구결과를 종합해 볼 때 밀착 습곡작용은 장군봉 지역의 평안층군 동수곡층이 퇴적된 패름기 이후에 발생하였으며, 예천 전단운동은 봉화 지역의 영주화강암이 관입된 이후-장군봉 지역의 춘양화강암이 관입되기 이전인 전기 주라기 말에 발생하였던 것으로 고찰된다(Kang *et al.*, 1998; Kang and Kim, 2000; Kim *et al.*, 2009).

연성전단 변형작용 동안에 형성된 석영과 장석의 특징적인 미구조로부터 연성변형 당시의 온도조건을 규명하고자 하는 연구는 지금까지 많은 연구자들에 의해 수행된 바가 있다(cf. Kang, 1998). K-장석내에 불꽃상의 조장석 엽층을 보이는 플레임 피어사이트(Fig. 4c)는 K-장석의 결정화 온도보다 낮은 300~500°C 변형온도에서 K-장석으로부터 조장석의 용리에 의해 형성되는 것으로 알려져 있다(Passchier, 1982; Pryer, 1993; Passchier and Trouw, 1996의 p49-50). 전단변형 작용시 압축방향에 수직하게 놓인 K-장석의 입계상에 형성된 밀메카이트는 변형작용과 관련된 확산 및 용리작용에 의해 형성되고, 이러한 밀메카이트(Figs. 4e, 5a, 5c, 5d)는 약 400°C 이상의 변형온도에서 우세하게 나타나는 것으로 알려져 있다(Simpson, 1985; Gapais, 1989; Pryer, 1993; Passchier and Trouw, 1996의 p49-50). K-장석 잔쇄반정 내에서 공액성 내지 싱글성 형태로 출현하는 미세단열과 킹크대는 변성온도가 잘 알려져 있는 캐나다 Grenville 조산대에서 Pryer(1993)에 의해 300~500°C의 변형온도에서 형성되는 것으로 알려져 있으며, 미세킹크는 전위 클라임(dislocation climb)이 용이하지 못한 약 450°C 전후의 변형온도에서 서로 다른 미끄럼계를 갖고 이동하는 전위들 사이에 엉킴 현상에 의해 형성되는 것으로 알려져 있다(Tullis and Yund, 1980, 1987; Pryer, 1993). 그리고 초압쇄암화된 화강암과 변성퇴적암류의 석영 집합체에서 측정된 석영 c-축 배열 형태는 300~500°C의 변형온도에서 rhomb<a>와 basal<a>가 우세한 미끄럼계로 작동하여 형성된 single girdle(Fig. 6a)과 Type I crossed girdle(Fig. 6b)을 보여준다(Lister, 1977; Schmid and Casey, 1986; Mainprice and Bouchez, 1987). 따라

서 예천 전단변형작용 동안에 형성된 이상과 같은 석영과 장석의 특징적인 미구조를 종합적으로 고려해 볼 때, 예천전단운동이 발생할 당시의 변형온도는 350~450°C로 고찰된다.

선캠브리아기 변성퇴적암류의 대상 분포방향과 연성 전단변형된 선캠브리아기 변성퇴적암류의 장석과 증생대 화강암의 석영의 입도 대소 분포도로부터 예천전단대의 영역별 상대적인 변형도와 초압쇄암대의 분포를 파악한 결과, 예천전단대의 변형도는 남동부 화강암과 변성퇴적암류의 경계부를 향해 증가함을 알 수 있고, 북북동-남남서 단층의 서부와 동부 영역에서 각각 불노봉과 박달산 북부를 통과하는 동북동 방향의 초압쇄암대가 작성된다(Fig. 7). 그리고 작성된 북북동-남남서 단층의 서부 영역에서의 초압쇄암대의 분포는 영주도폭에서 기재된 초압쇄암대 분포와 거의 일치하나, 동부 영역에서의 초압쇄암대 분포는 영주도폭에서 기재된 초압쇄암대 분포보다 남쪽으로 하향 설정된다.

연구지역에 발달하는 압쇄구조면은 주로 (북)북동~동북동 주향에 북서 내지 남동 방향으로 경사하고, 신장선구조는 압쇄구조면의 주향 방향으로 저각 침강하는 우세한 방향성을 보이고, 압쇄구조면의 주향 성분은 광역적으로 작성된 초압쇄암대의 연결선을 향해 북북동 내지 북동 방향에서 북동 내지 동북동 방향으로 점이적인 방향성 변화를 보인다(Fig. 3). 이는 신장선구조와 함께 초압쇄암대를 향한 압쇄구조면 주향 성분의 이러한 광역적인 방향성 변화는 (동)북동 방향의 우수 주향 이동성 예천전단대 형성 및 운동과 밀접한 관련이 있음을 의미하고, 선캠브리아기 변성퇴적암류의 대상 분포방향과 선캠브리아기 변성퇴적암류의 장석과 증생대 화강암의 석영의 입도 대소 분포도로부터 설정된 연구지역의 초압쇄암대의 분포를 역시 지지한다.

결론

소백산육괴의 중앙부에 위치하는 경상북도 북후면-평은면 지역에서 예천전단대의 형성시기, 변형온도, 초압쇄암대의 분포 등을 파악하기 위해 선캠브리아기 변성퇴적암류와 증생대 화강암의 변형된 암석 및 미구조를 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 연성 변형된 주요 지질구조는 (동)남동-버전스의 완침강-중경사 밀착습곡, (동)북동 방향의 우수 주향

이동성 예천전단대 순으로 형성되었다. 전자는 장군봉 지역 평안층군의 동수곡층이 퇴적된 패름기 이후에 형성되었으며, 후자는 봉화 지역 영주화강암이 관입된 이후-장군봉 지역 춘양화강암이 관입되기 이전인 전기 쥬라기 말에 형성되었다.

2. 예천전단운동은 밀착습곡이 형성된 이후에 북서-경사와 남동-경사하는 양 날개부의 편마구조면을 전단면으로 하여 발생하였다. 그 결과 우세한 방향성인 북서-경사와 부수적인 방향성인 남동-경사 압쇄구조면상에서 전단운동감각은 각각 상부-북동-이동과 상부-남서-이동을 보여준다.

3. 예천전단변형 동안에 형성된 장석들의 특징적인 미구조로는 플레임 퍼어사이트, 밀메카이트, 미세단열, 미세킹크, 킹크대, 파동소광 등이 있고, 재결정된 석영집합체의 c-축 배열 형태는 rhomb<a>와 basal<a>를 탁월한 미끄럼계로 하는 single girdle과 Type I crossed girdle을 보여준다. 이들 특징적인 미구조로부터 예천전단대는 350~450°C의 변형온도에서 형성되었음을 알 수 있다.

4. 예천전단대의 초압쇄암대는 불노봉과 박달산 북부를 통과한다. 압쇄구조면의 주향 성분은 (동)북동 방향의 우수 주향 이동성 예천전단대의 형성 및 운동과 관련하여 초압쇄암대를 향해 북북동 내지 북동 방향에서 북동 내지 동북동 방향으로 점이적인 방향성 변화를 보인다.

사사

이 연구는 2012년도 한국지질자원연구원의 “국내 희유금속자원 탐사 및 활용기술개발” 과제에서 일부 지원되었다. 그림 제작에 도움을 대학원생과 본 논문을 심사하여 유익한 조언을 해 주신 정해명 교수와 김성욱 박사께 감사드린다.

References

- Behrmann, J.H. and Platt, J.P., 1982, Sense of nappe emplacement from quartz c-axis fabrics. *Earth and Planetary Science Letters*, 59, 208-215.
- Berthe, D., Choukroune, P. and Jegouzo, P., 1979, Orthogneiss, mylonite and non coaxial deformation of granites: the example of the South Armorican Shear Zone. *Journal of Structural Geology*, 1, 31-42.
- Chang, T.W., 1991, On the microstructures of mylonitic rocks -with special reference to Yecheon Shear Zone,

- Korea-. Journal of the Geological Society of Korea, 27, 177-190.
- Chang, T.W. and Han, Y.M., 1989, On the ductile deformation of a granite in the vicinity of Chonju, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 25, 164-174 (in Korean with English abstract).
- Choo, S.H., 1988, Rb/Sr age determination, Yeongnam Massif, Korea (IV) (granitic gneiss in the Mokpo province, Ulri series and granitoids in the Taebaek province). Korea Institute of Energy and Resources, KR-87-27, 1-49 (in Korean).
- Cluzel, D., Lee, B.J. and Cadet, J.P., 1991, Indosinian ductile dextral fault system and synkinematic plutonism in the southwest of Ogcheon Belt (S. Korea). Tectonophysics, 194, 131-151.
- Davis, G.H. and Reynolds, S.J., 1996, Structural geology of rocks and regions. John Wiley and Sons, Incorporation, 776p.
- Gapais, D., 1989, Shear structures within deformed granites: mechanical and thermal indicators. Geology, 17, 1144-1147.
- Jin, M.S. and Jang, B.A., 1999, Thermal history of the Late Triassic to Early Jurassic Yeongju-Chunyang granitoid in the Sobaegsan Massif, South Korea, and its tectonic implication. Journal of the Geological Society of Korea, 35, 189-200 (in Korean with English abstract).
- Kang, J.-H., 1998, The temperature condition for the mylonitization of the Cheongsan granite, Korea -structural analysis of the deformed Cheongsan granite, Korea-. Journal of the Petrological Society of Korea, 7, 53-68 (in Korean with English abstract).
- Kang, J.-H. and Kim, H.S., 2000, Structural analysis of the North Sobaegsan Massif in the Sangun-myeon area, Bonghwa-gun, Korea. Journal of the Petrological Society of Korea, 9, 254-270 (in Korean with English abstract).
- Kang, J.-H., Kim, H.S. and Oh, S.B., 1997, Geological structure of Precambrian to Paleozoic metasedimentary rocks in the Janggunbong area, Korea -crustal evolution and environmental geology of the central part of the North Sobaegsan Massif, Korea-. Journal of the Petrological Society of Korea, 6, 244-259 (in Korean with English abstract).
- Kang, J.-H., Kim, N.H., Park, K.-H., Song, Y.S. and Ock, S.-S., 2004, Deformation history of Precambrian metamorphic rocks in the Yeongyang-Uljin area, Korea. Journal of the Petrological Society of Korea, 13, 179-190 (in Korean with English abstract).
- Kang, J.-H., Kim, N.H., Song, Y.S. and Park, K.-H., 2006, Deformation history of Precambrian metamorphic rocks of Sobaegsan Massif in Giseong-myeon area, Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do, Korea. Journal of the Petrological Society of Korea, 15, 49-59 (in Korean with English abstract).
- Kang, J.-H., Oh, S.B. and Kim, H.S., 1998, Time-relationship between deformation and metamorphism of the Paleozoic metasedimentary rocks of the North Sobaegsan Massif in the Janggunbong area, Korea. Journal of the Petrological Society of Korea, 7, 190-206 (in Korean with English abstract).
- KIGAM, 1995, Geological map of Korea (1: 1,000,000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials.
- Kim, B.K., Lee, H.Y., Kim, S.J. and Cheong, J.G., 1988, Geological report of the Andong sheet (1: 50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 7p.
- Kim, J.H. and Kee, W.S., 1991, Tectonic significances of Soonchang Shear Zone, the Hwasun coalfield, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 27, 642-655 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Kwon, S. and Ryu, I.-C., 2009, Geochronological constraints on multiple deformations of the Honam Shear Zone, South Korea and its tectonic implication. Gondwana Research, 16, 82-89.
- Lee, B.J., Kim, D.H. and Jeon, K.-S., 1990, The Characteristics of the ductile shear zone around Youngkwang-up in the SW part of Korean Peninsula. Journal of the Geological Society of Korea, 26, 304-312 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.S. and Lee, H.Y., 1963, Explanatory text of the geological map of Yeon sheet (1: 50,000). Geological Survey of Korea, 4p.
- Lee, M.S., Park, B.S. and Kim, J.H., 1989, Geological report of the Yeongju sheet (1: 50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 7p.
- Lee, S.M. and Kim, H.S., 1984, Metamorphic studies on the so-called Yulri and Weonnam Groups in the Mt. Taebaeg area. Journal of the Geological Society of Korea, 20, 195-214 (in Korean with English abstract).
- 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 Snoke, A.W., 1984, S-C mylonite. Journal of Structural Geology, 6, 617-638.
- Lister, G.S. and Williams, P.F., 1979, Fabric development in shear zones: theoretical controls and observed phenomena. Journal of Structural Geology, 1, 283-297.
- 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 sample fabric types as a function of temperature. In Conference Report: Crystallographic fabrics and deformation histories (reported by R.D. Law). Journal of Geological Society of London, 144, 677 (Abstract).
- Passchier, C.W., 1982, Mylonitic deformation in the Saint-Barthelemy Massif, French Pyrenees, with emphasis on the genetic relationship between ultramylonite and

- pseudotachylyte. GUA papers of geology. Series 1, 16, 167-176.
- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J., 1996, Microtectonics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 289p.
- Pryer, L.L., 1993, Microstructures in feldspars from a major crustal thrust zone: the Grenville Front, Ontario, Canada. Journal of Structural Geology, 15, 21-36.
- Schmid, S.M. and Casey, M., 1986, Complete fabric analysis of some commonly observed quartz c-axis patterns. Geophysical Monograph, Series 36, 263-286.
- Simpson, C., 1985, Deformation of granitic rocks across the brittle-ductile transition. Journal of Structural Geology, 7, 503-511.
- Simpson, C. and Schmid, S.M., 1983, An evaluation of criteria to deduce the sense of movement in sheared rocks. Geological Society of America Bulletin, 94, 1281-1288.
- Son, C.M. and Kim, S.J., 1991, Explanatory text of the geological map of Chunyang sheet (1: 50,000). Geological Survey of Korea, 7p.
- Tullis, J. and Yund, R.A., 1980, Hydrolytic weakening of experimentally deformed Westerly granite and Hale albite rock. Journal of Structural Geology, 2, 439-451.
- Tullis, J. and Yund, R.A., 1987, Transition from cataclastic flow to dislocation creep of feldspar: mechanisms and microstructures. Geology, 15, 606-609.
- Yanai, S., Park, B.S. and Otoh, S., 1985, The Honam shear zone (S. Korea): deformation and tectonic implication in the Far East. Scientific papers College Arts and Science University of Tokyo, 35, 181-210.
- Yun, S.K. and Shin, B.W., 1963, Explanatory text of the geological map of Ulchin sheet (1: 50,000). Geological Survey of Korea, 4p.

2014년 4월 21일 접수
 2014년 4월 22일 심사개시
 2014년 5월 7일 채택