

경상북도 울진군 기성면 지역에서 소백산육괴 선캠브리아기 변성암류의 변형작용사

강지훈^{1,*} · 김남훈² · 송용선² · 박계현²

¹안동대학교 지구환경과학과, ²부경대학교 환경지질과학과

Deformation history of Precambrian metamorphic rocks of Sobaegsan Massif in Giseong-myeon area, Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do, Korea

Ji-Hoon Kang^{1,*}, Nam Hoon Kim², Yong Sun Song² and Kye-Hun Park²

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong, Gyeongsangbuk-do, 760-749, Korea

²Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan, 608-737, Korea

요약: 변형된 주요 암석구조의 운동학적·기하학적 특성과 중첩된 변형구조들의 선후관계로부터 울진군 기성면지역에 분포하는 소백산육괴 선캠브리아기 변성암류(원남층, 평해 화강편마암, 하다 우백질화강편마암)에 대한 변형작용사를 연구하였고, 기존의 연구결과와 이번에 새롭게 밝혀진 연구결과를 바탕으로 예천전단대의 연장성과 각 변형단계의 상대적인 발생시기를 고찰하였다. 그 결과, 기성면지역의 지질구조는 편마면 내지 편리가 형성된 이후 적어도 다섯 번의 변형단계를 거쳐 형성되었음을 알게 되었다. (1) 첫 번째 변형은 동북동-서남서 방향의 압축 지구조 환경에서 발생하여 북북서 방향의 광역엽리와 매우 밀착된 등사습곡을 형성시켰다. 첫 번째 변형 이전의 편마면 내지 편리의 일반적인 방향성은 동북동이었으며 등사습곡작용에 의해 대부분이 북북서 방향으로 재배열되었다. (2) 두 번째 변형은 북북서-남남동 방향의 압축응력하에서 동북동 방향의 광역엽리와 밀착, 등사, 뿌리 없는 중간습곡을 형성시켰다(발생시기: 장군봉지역 평안층군의 동수곡층이 퇴적된 폐름기 이후). (3) 세 번째 변형은 우수향 주향이동 연성전단운동에 의해 발생하여 광역 엽리면상에 동북동 방향의 신장선구조와 S-C 압쇄구조를 형성시켰다(상운면지역 중생대 각섬석 화강암이 관입된 이후 - 장군봉지역 중생대 춘양화강암이 관입되기 이전). (4) 네 번째 변형은 (동)북동-(서)남서 방향의 압축 지구조 환경에서 발생하여 (북)북서 방향의 개방습곡을 형성시켰으며, (5) 다섯 번째 변형은 남-북 방향의 압축 지구조 환경에서 발생하여 북북동 방향과 북북서 방향의 공역성 주향이동 단층과 동-서 방향의 층상단층 그리고 이들 단층운동에 수반된 끝림습곡을 형성시켰다. 경상분지의 형성 및 발달과 관련된 네 번째와 다섯 번째 변형구조는 백악기 지구조운동의 결과로 형성되었으며, 이들 변형작용은 광역엽리의 일반적인 동북동 방향성을 부분적으로 재배열시켰다. 동-서 방향의 예천전단대는 연구지역으로 연장되나 연성전단 변형구조는 미약하게 발달한다.

주요어: 소백산육괴, 울진군 기성면지역, 선캠브리아기 변성암류, 변형작용사, 연성 전단변형

Abstract: This study clarifies the deformation history of Precambrian metamorphic rocks of Sobaegsan Massif (Wonnam Formation, Pyeonghae granite gneiss, Hada leucogranite gneiss) in Giseong-myeon area, Uljin-gun, Korea. It is based on the geometric and kinematic features and the developing sequence of multi-deformed rock structures. It also reviews the extension of Yecheon Shear Zone and the relative occurrence time of each deformation phase from previous researches. It suggests that the geological structure was formed at least through five phases of deformation after formation of their gneissosity or schistosity. (1) The first phase of deformation took place under compression of ENE-WSW direction, forming NNW trending regional foliation and very tight isoclinal fold. The general trend of gneissosity or schistosity is inferred to be ENE before the first phase of deformation, being rearranged into NNW by the isoclinal folding. (2) The second phase of deformation formed ENE trending regional foliation and tight, isoclinal, rootless intrafolial folds under compression of NNW-SSE direction [occurrence time: after

*Corresponding author: Tel. 82-54-820-5474, E-mail. jhkang@andong.ac.kr

deposition (Permian age) of Dongsugok Formation, Pyeongan Group, Janggunbong area]. (3) The third phase of deformation occurred by dextral ductile shearing on the regional foliation, forming stretching lineation of ENE trend and S-C mylonitic structure (after intrusion of Mesozoic hornblende granite, Sangunmyeon area - before intrusion of Mesozoic Chunyang granite, Janggunbong area). (4) The fourth phase occurred under (E)NE-(W)SW compression, forming (N)NW trending open fold. (5) The fifth phase took place under N-S compression, forming NNE and NNW trending conjugate strike-slip faults, E-W trending thrust-slip faults, and drag folds related to these fault movements. The deformed structures of fourth and fifth phases result from tectonic movement associated with the developing of the Gyeongsang Basin in Cretaceous age, and it partially rearranged the general ENE trend of the regional foliation in the study area. It also suggests that the Yecheon Shear Zone of E-W trending extends into this area but the ductile shear deformation is weakly developed.

Key words: Sobaegsan Massif, Uljin-gun Giseong-myeon area, Precambrian metamorphic rocks, deformation history, ductile shear deformation

서 론

해남-순창-진안 연결선을 따라 단양지역까지 연장되는 북동 방향의 순창진단대는 점촌 부근에서 동북동 방향의 우수향 주향이동성 예천진단대(Chang, 1991)로 분리되며, 분리된 예천진단대는 소백산육괴의 북후면-평은면지역을 지나 봉화군 상운면지역에서 그 방향성을 동-서로 전환하여 장군봉지역과 영양-울진지역의 기성층 분포지로 연장된다(강지훈 외, 1997, 1998; 강지훈, 2000; 강지훈과 김형식, 2000; 강지훈 외, 2004) (Fig. 1a).

소백산육괴의 동부에 해당하고 영양-울진지역의 동쪽 연장선상에 위치하는 울진군 기성면지역의 선캠브리아기 변성암류는 고기로부터 원남층, 평해 화강편마암, 하다 우백질 화강편마암 등으로 구분된다(Fig. 1). 평해 화강편마암은 주로 이질 내지 사질 기원의 변성 퇴적암류로 구성된 원남층을 관입하고 하다 우백질 화강편마암에 의해 관입되어 있으며, 상세한 야외지질조사 결과 이 지역 선캠브리아기 변성암류에는 여러 번의 변형작용에 의해 형성된 다양하고 중첩된 습곡구조와 연성진단운동에 의해 형성된 압쇄구조 등이 관찰된다.

따라서, 본 논문에서는 이들 주요 변형구조의 기하학적·운동학적 특성과 중첩된 변형구조들의 선후관계 등으로부터 울진군 기성면지역 선캠브리아기 변성암류에 대한 변형작용사를 밝히고, 본 연구결과와 기존 연구결과를 바탕으로 예천진단대의 연장성, 소백산육괴 변성암류에 대한 변형단계별 구조적 특성, 각 변형단계별 상대적인 발생시기 등을 고찰하고자 한다.

지질개요

평해 지질도폭(김옥준 외, 1963)의 북동 일부 영역을 점하고 있는 기성면지역의 선캠브리아기 변성암류는 원남층, 평해 화강편마암, 하다 우백질 화강편마암으로 구성되어 있다(Fig. 1). 원남층은 이질 기원의 안구상 편마암, 호상 편마암, 운모 편암, 운모-규석 편암과 사질 기원의 세립질 석영-장석-흑운모 편마암, 주입편마암, 규암 및 석영-견운모 편암 그리고 각섬암 및 각섬석 편암 등으로 주로 구성되어 있으며, 이 지역에 광범위하게 산출한다. 평해 화강편마암은 안구상 내지 호상 및 반상 변정질 구조를 갖는 흑운모 화강편마암으로 주로 구성되어 있고, 본 역의 북서부에서 원남층을 관입하며 동북동 방향으로 누운 V자형 분포를 보인다. 하다 우백질 화강편마암은 우백질 화강편마암, 우백질 거정 화강편마암, 반화강암질 편마암 등으로 주로 구성되어 있고, 본 역의 중앙부에서 원남층과 평해 화강편마암을 관입하며 동북동 방향의 대상 분포를 보인다.

야외에서 인지되는 선캠브리아기 변성암류의 주요 변형구조들은 준 수평적인 습곡축과 중각(30°-60° 범위) 경사하는 습곡축면을 갖는 등사습곡(isoclinal fold), 저각 침강하는 습곡축과 중각 내지 고각 경사하는 습곡축면을 갖는 밀착습곡(tight fold), 연성진단운동에 의해 형성된 신장선구조와 S-C 압쇄구조, 중각 침강하는 습곡축과 고각 경사하는 습곡축면을 갖는 개방습곡(open fold), 공역성 주향이동 단층 및 충상단층 그리고 이들에 수반된 끌림습곡(drag fold) 등으로 구분되며, 이들 변형구조들의 주요 특성은 이후 변형작용사에서

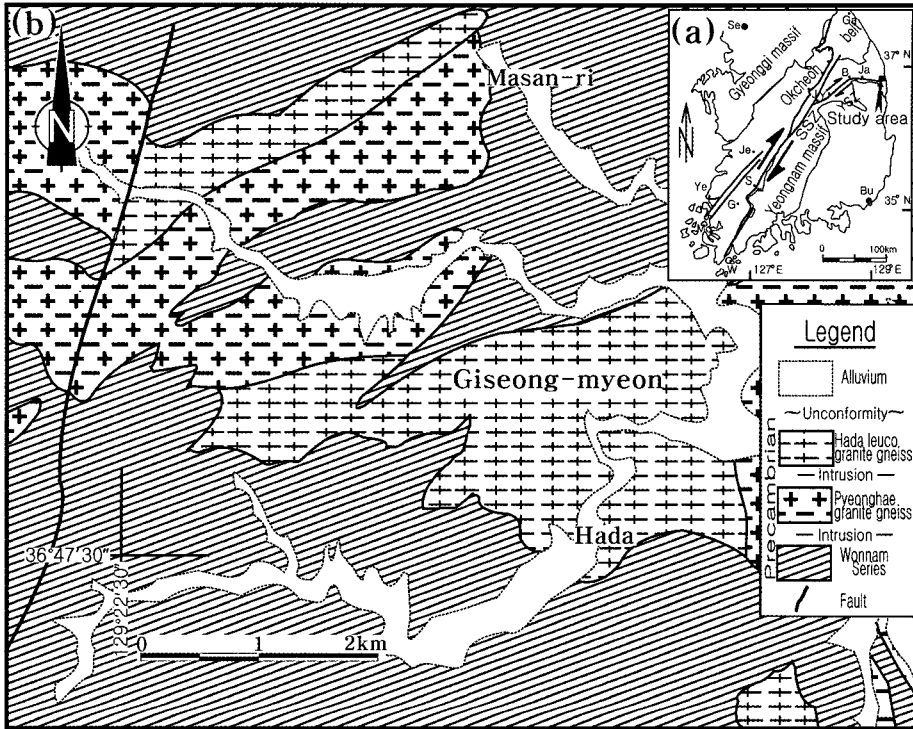


Fig. 1. (a) Index map showing the tectonic locality of study area (arrow mark). B: Bonghwa, Bu: Busan, G: Gwangju, Ga: Gangneung, J: Jeomchon, Ja: Janggunbong, Je: Jeonju, Mo: Mokpo, S: Sunchang, Se: Seoul, W: Wando, Y: Yecheon, Ye: Yeonkwang, SSZ: Sunchang Shear Zone, YSZ: Yecheon Shear Zone [adapted from KIGAM (1995) and Kang *et al.* (1997)]. (b) Geological map of study area [modified from Kim *et al.* (1963)].

상세히 기재한다. 지질도에서 인지되는 주요 단층으로는 북북동 방향의 서화산단층(김옥준 외, 1963)이 있다 (Fig. 1b). 서화산단층은 영양-울진지역에 발달하는 북북서 방향의 길곡단층(김옥준 외, 1963)과 같이 연구지역 구성암류의 동북동 대상 분포방향의 연장성을 절단한다.

변형작용사

중첩된 변형구조와 주요 변형구조들의 기하학적·운동학적 특성으로부터 기성면지역 선캄브리아기 변성암류에 대한 변형단계별 구조요소를 연구한 결과, 연구지역 구성암류의 지질구조는 선캄브리아기 변성암류의 편마면 내지 편리가 형성된 이후 적어도 다섯 번의 변형단계를 거쳐 형성되었음을 알게 되었다. 따라서, 본 논문에서는 편마면 내지 편리를 편이상 S_0 엽리라고 표현하고, 다섯 번의 변형단계를 그 상대적인 발생순서에 따라 D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 변형 등으로, 이들 각 변형단계 동안에 형성된 습곡구조들을 $F_1, F_2, F_3, F_4,$

F_5 습곡 등으로 구분하여 연구지역 선캄브리아기 변성암류의 변형작용사를 기재하고자 한다.

D_1 변형

D_1 변형에 의해 S_0 엽리가 습곡되어 형성된 F_1 습곡은 동북동-서남서 방향의 압축 지구조 환경하에서 형성된 북북서 방향의 매우 밀착된 등시습곡 형태로 나타난다 (Fig. 2a). F_1 등시습곡작용에 의해 습곡된 S_0 엽리는 동북동 방향의 축부를 제외하고 대부분이 북북서 방향의 F_1 측면엽리(S_1)로 완전히 전위되어 S_1 엽리와 평행한 복합엽리($S_{0,1}$)로 나타난다 (Fig. 2). 따라서, 야외에서 노두규모로 이러한 F_1 등시습곡을 인지하기 위해서는 매우 신중하고 자세한 관찰이 요구된다.

$S_{0,1}$ 복합엽리는 연구지역의 광역엽리로 인지되고, $S_{0,1}$ 광역엽리의 방향성은 이후의 변형작용에 의해 매우 분산되어 있다 (Fig. 3). $S_{0,1}$ 복합엽리의 극점 배열은 $150^\circ-170^\circ$ 방향에 $30^\circ-40^\circ$ 침강하는 집중된 방향성을 보이고, 분산된 극점들의 대부분은 $280^\circ-310^\circ$ 방향 범위와 $350^\circ-030^\circ$ 방향 범위로 침강하는 파이-축을 갖는 파

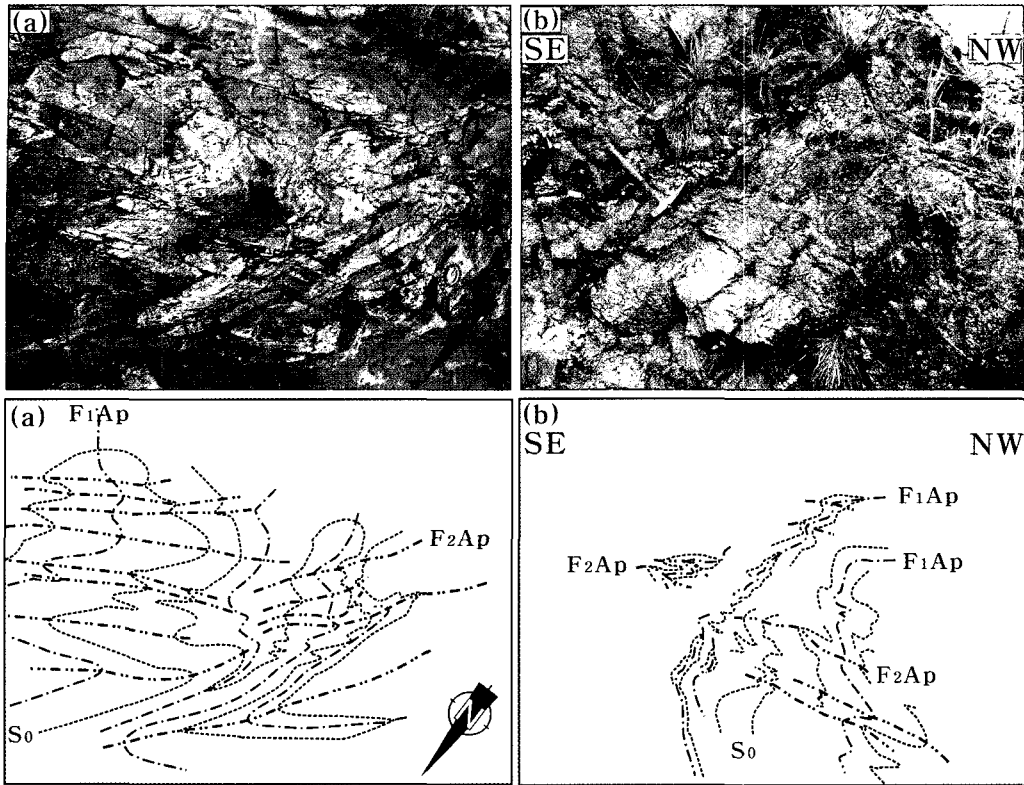


Fig. 2. Outcrop photographs and their sketches of F_1 isoclinal fold refolded by F_2 tight or isoclinal folds. (a) Wonnam Series. (b) Pyeonghae granite gneiss.

이-원상에 배열되고, 그 외 일부는 035°-075° 방향 범위로 침강하는 파이-축을 갖는 파이-원상에 배열된다 (Fig. 3).

D₂ 변형

D₂ 변형에 의해 S_{0,1} 복합엽리 및 F₁ 등사습곡이 (재) 습곡되어 형성된 F₂ 습곡은 주로 밀착습곡 형태로 나타나고, D₂ 변형 정도가 심한 노두에서는 등사습곡 내지 뿌리 없는 층간습곡 형태로 나타난다(Figs. 2 and 4). S_{0,1} 복합엽리 및 F₁ 등사습곡의 일반적인 북북서 방향성은 F₂ 습곡 축부를 제외하고 F₂ 밀착습곡작용에 의해 부분적으로 재배열되어 (북)북동 방향과 (서)북서 방향으로 나타나고, F₂ 등사습곡작용에 의해서는 F₂ 측면엽리와 거의 일치하는 동북동 방향으로 재배열되어 나타난다(Fig. 2). 또한, F₂ 층간습곡의 양 날개부를 구성하는 S_{0,1} 엽리는 F₂ 측면엽리(S₂)로 완전히 전위되어 동북동 방향의 S₂ 엽리와 거의 평행한 복합엽리(S_{0,1,2})로 나타나는(Fig. 4) 등 연구지역의 F₂ 습곡은 북북서-남남동 방향의 압축 지구조환경하에서 형성된 기하학

적 형태를 보이며 이전에 형성된 북북서 방향의 S_{0,1} 복합엽리를 동북동 방향으로 재배열시키고 있다.

F₂ 습곡측면은 S_{0,1} 복합엽리의 방향성과 유사한 동북동 주향에 북쪽으로 증각 내지 고각 경사하는 집중된 방향성과 동서 주향에 남쪽, 북동 주향에 북쪽으로 증각 내지 고각 경사하는 다소 분산된 방향성을 보이고, F₂ 습곡축은 285°-315° 방향 범위에서 15°-40° 침강과 030°-070° 방향 범위에서 10°-40° 침강하는 방향성을 보인다(Fig. 5). F₂ 습곡작용에 의해 분산된 노두 규모의 F₂ 습곡의 양 날개부와 축부에서 측정된 S_{0,1} 복합엽리 극점들은 285°-295° 방향 범위에서 15°-40° 침강하는 파이-축과 035°-075° 방향 범위에서 05°-45° 침강하는 파이-축을 갖는 파이-원상에 배열된다(Fig. 6). 이들 파이-축의 방향성은 각 노두에서 측정된 F₂ 습곡축의 방향성과 측정 오차 범위 내에서 일치하고(Fig. 6), 노두 규모의 F₂ 습곡의 양 날개부와 축부에서 측정된 S_{0,1} 엽리의 극점 배열(Fig. 6f)은 연구지역 전체 S_{0,1} 엽리의 극점 배열(Fig. 3b)과 유사하게 나타난다. 또한, 노두 규모에서 흔히 관찰되는 동북동 방향의 F₂ 밀착

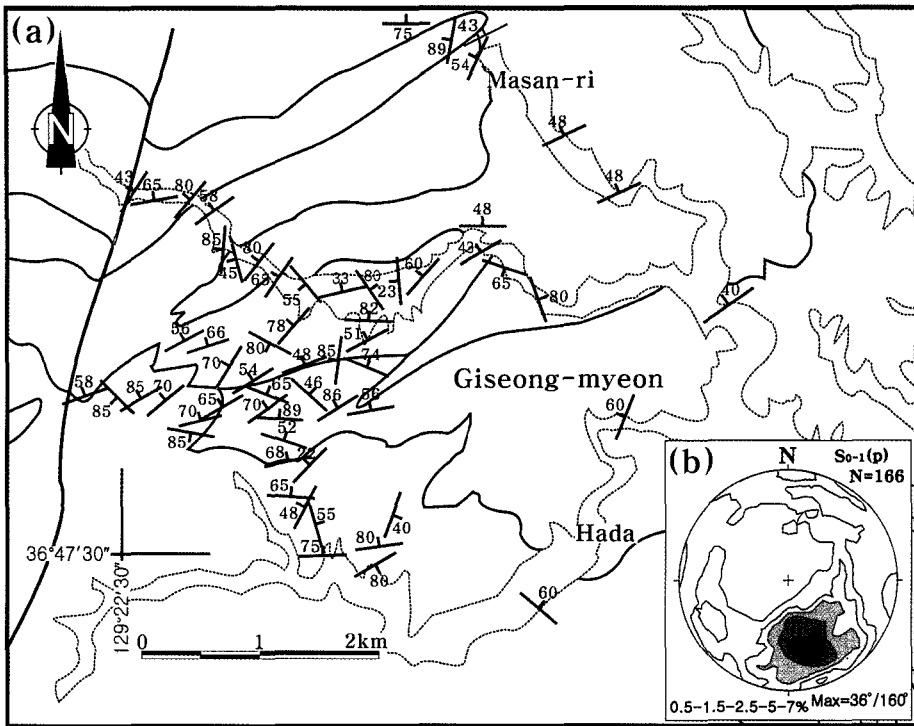


Fig. 3. (a) Orientation of $S_{0.1}$ composite foliation in study area. (b) Density map of poles(p) to $S_{0.1}$ foliation. Lower-hemisphere equal-area projection.

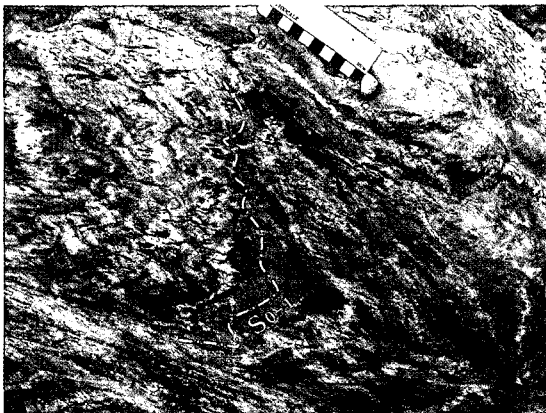


Fig. 4. Outcrop photograph of F_2 isoclinal or rootless folds (Pyeonghae granite gneiss) in study area. The $S_{0.1}$ foliation of its limb parts is completely transposed into the F_2 fold axial plane (F_2Ap) and forms $S_{0.1.2}$ composite foliation.

습곡 형태는 지질도 규모로 인지되는 평해 화강편마암의 동북동 방향 V자형 분포와 매우 유사하다(Figs. 1 and 2).

D₃ 변형

D₃ 변형구조로는 $S_{0.1(2)}$ 복합엽리를 전단면으로 하는 연성전단운동에 의해 형성된 신장선구조와 압쇄구조면으로 인지된다. 복합 엽리상에서 주로 신장된 석영(집합체)과 장석(집합체)들의 정향배열에 의해 정의되는 신장선구조는 복합엽리의 주향 방향으로 20°-40° 침강하는 방향성을 보인다(Fig. 7a). 신장선구조에 평행하고 이들 복합엽리에 수직인 전단운동감각 결정면에서는 우수향의 운동감각을 보이는 주향이동성 S-C 압쇄구조가 미약하게 종종 관찰된다(Fig. 7b).

D₄ 변형

D₄ 변형에 의해 형성된 F_4 습곡은 $S_{0.1(2)}$ 복합엽리와 압쇄구조면을 습곡시키는 (북)북서 방향의 개방습곡으로 인지된다(Fig. 8). F_4 개방습곡은 (북)북서 주향에 동쪽 또는 서쪽으로 고각 경사하는 습곡측면과 북쪽으로 중각-침강하는 습곡축을 갖고 (동)북동-(서)남서 방향의 압축 지구조 환경하에서 형성된 기하학적 형태를 보인다(Fig. 9). F_4 습곡작용에 의해 분산된 노두 규모의 F_4 습곡의 양 날개부와 측부에서 측정된 $S_{0.1(2)}$ 복합엽리

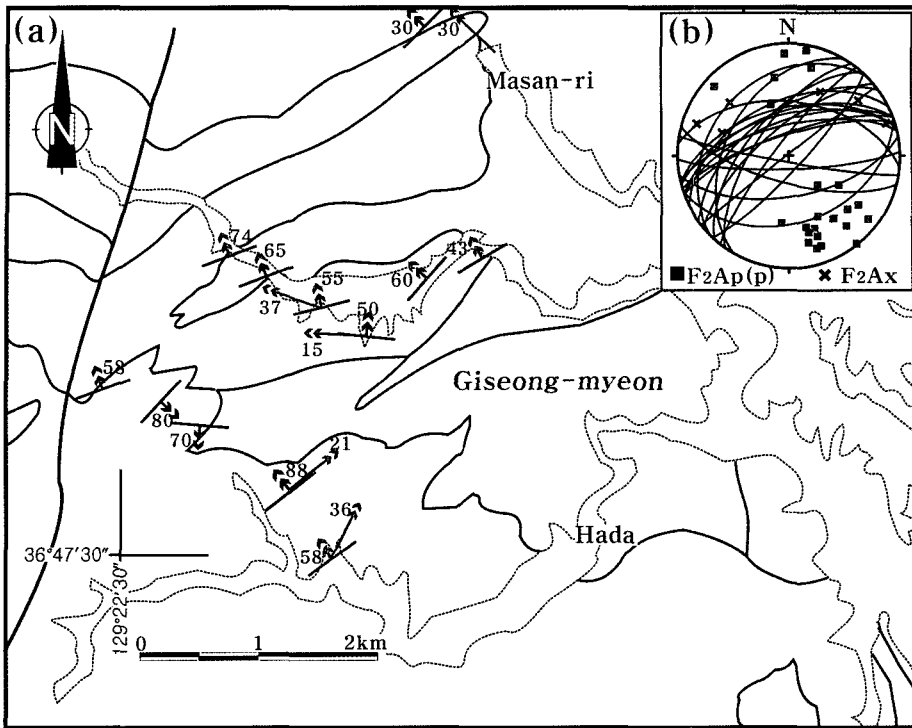


Fig. 5. (a) Orientation and (b) stereoplots of F_2 structural elements (F_2Ap and F_2Ax) in study area. p: poles. Lower-hemisphere equal-area projection.

극점들은 010° - 025° 방향 범위에서 40° - 65° 침강하는 파이-축을 갖는 파이-원상에 배열된다(Fig. 10).

D₅ 변형

D₅ 변형구조로는 남-북 방향의 압축 지구조 환경하에서 형성된 북북동 방향과 북북서 방향의 공역성 주향이동 단층과 동-서 방향의 충상단층 그리고 이들 단층운동에 수반된 끌림습곡 등으로 인지된다(Figs. 9 and 11). F₅ 끌림 습곡작용에 의해서는 $S_{0.1(2)}$ 복합엽리의 부분적인 방향성 변화가 인지된다. 이들 중에 본 역에서 가장 우세하게 발달하는 북북동 방향의 좌수향 주향이동 단층운동에 의해 형성된 끌림습곡작용은 $S_{0.1(2)}$ 복합엽리의 극점들을 351° 방향으로 69° 침강하는 가장 적합한 파이-축을 갖는 파이-원상에 배열시킨다(Fig. 12b). 북북서 방향의 우수향 주향이동 단층운동과 동-서 방향의 충상 단층운동에 의해 형성된 끌림습곡작용은 각각 053° 방향으로 72° 침강(Fig. 12a)과 273° 방향으로 14° 침강(Fig. 12c)하는 가장 적합한 파이-축을 갖는 파이-원상에 배열시킨다.

고찰

지금까지 기재된 주요 변형구조의 운동학적·기하학적 특성과 중첩된 변형구조들의 선후관계로부터 울진군 기성면지역 선캄브리아기 변성암류의 변형단계별 구조적 특성을 고찰해 보면 다음과 같다.

D₁ 변형은 동북동-서남서 방향의 압축 지구조 환경하에서 발생하여 북북서 방향의 매우 밀착된 등시습곡과 $S_{0.1}$ 복합 광역엽리를 형성시켰다. 습곡축부의 엽리 방향성이 일반적으로 습곡작용 이전의 엽리 방향성과 가장 근접한 방향성을 유지한다는 점을 고려해 볼 때, D₁ 변형 이전에 S_0 엽리의 일반적인 방향성은 F₁ 등사 습곡의 축부 방향성에 해당하는 동북동이었던 것으로 추정되며 동북동 방향의 S_0 엽리는 동북동-서남서 방향의 D₁ 압축응력과 관련된 F₁ 등사 습곡작용에 의해 F₁ 습곡축면과 거의 평행한 북북서 방향으로 재배열되어 $S_{0.1}$ 복합엽리를 형성한 것으로 고찰된다(Fig. 2). D₂ 변형은 북북서-남남동 방향의 압축 지구조 환경하에서 저각 침강하는 습곡축과 중각 내지 고각 경사하는 습

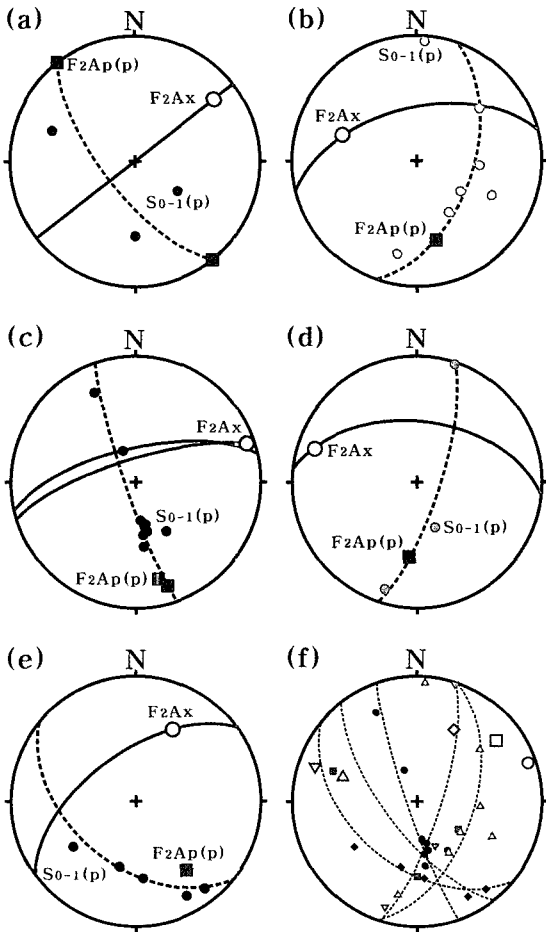


Fig. 6. Characteristic orientation of poles(p) to $S_{0.1}$ foliation dispersed by F_2 folding. (a-e) Each outcrops. (f) Total [solid marks: $S_{0.1}(p)$, open marks: F_2Ax]. Dotted lines: π -circles. Lower-hemisphere equal-area projection.

곡축면을 갖는 동북동 방향의 밀착, 등사, 뿌리 없는 층간습곡과 $S_{0.1,2}$ 복합 광역엽리를 형성시켰다. F_1 과 F_2 의 중첩된 습곡의 기하학적 형태(Fig. 2)로부터 D_2 변형 이전에 $S_{0.1}$ 복합엽리 및 F_1 등시습곡의 일반적인 방향성은 F_2 습곡의 축부 방향성에 해당하는 북북서 방향으로 추정된다. 이 방향은 북북서-남남동 방향의 D_2 압축응력과 관련된 F_2 밀착습곡작용에 의해 부분적으로 (북)북동 방향과 (서)북서 방향으로 그리고 F_2 등사 및 층간 습곡작용에 의해 F_2 습곡축면과 거의 평행한 동북동 방향으로 재배열된 것으로 고찰된다. D_3 변형은 우수향 주향이동성 연성전단운동과 관련하여 신장 선구조와 압쇄구조면을 형성시켰으며, D_4 변형은 (동)북동-(서)남서 방향의 압축 지구조 환경하에서 북쪽으

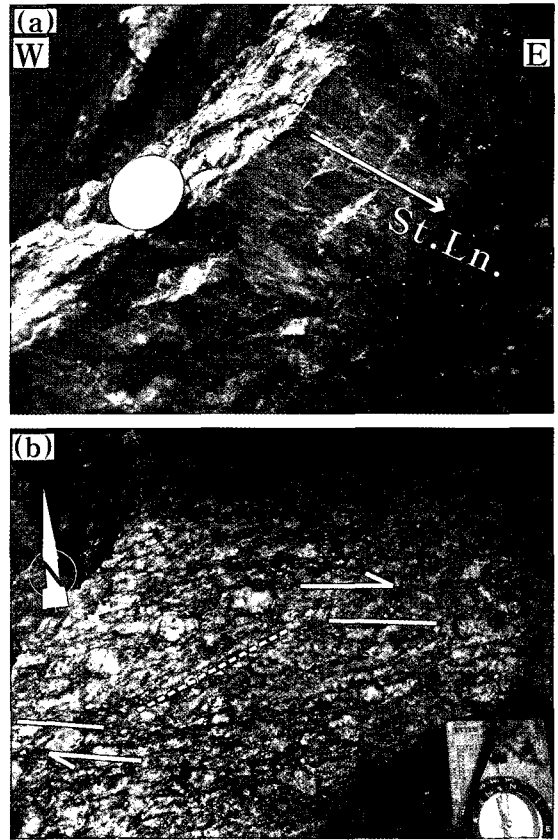


Fig. 7. Outcrop photographs of major D_3 structures in study area. (a) Stretching lineation (St.Ln.) (Hada leucogranite gneiss). (b) S-C structure (Pyeonghae granite gneiss).

로 중각 침강하는 습곡축과 (북)북서 주향에 동-서로 고각 경사하는 습곡축면을 갖는 개방습곡을 형성시켰다. D_5 변형은 남-북 방향의 압축 지구조 환경하에서 발생하여 북북동 방향과 북북서 방향의 공역성 주향이동 단층과 동-서 방향의 층상단층 그리고 이들 단층운동에 수반된 끌림습곡을 형성시켰다.

그리고 이러한 다섯 번의 변형작용은 분산된 $S_{0.1}$ 복합엽리의 방향성과 밀접한 관련성이 있다(Fig. 3). D_1 변형 이전에 동북동 방향의 S_0 편마면 내지 편리는 매우 밀착된 F_1 등사 습곡작용에 의해 S_1 엽리로 완전히 전위되어 북북서 방향의 복합엽리 $S_{0.1}$ 을 형성한다(Fig. 2). $S_{0.1}$ 복합엽리는 F_2 등사 및 층간 습곡작용과 F_2 밀착 습곡작용에 의해 각각 S_2 엽리의 방향성과 유사한 150° - 170° 방향으로 30° - 40° 침강하는 집중된 극점 배열과 280° - 310° 방향 범위로 침강하는 파이-축을 갖는 파이-원상에 분산되어 극점 배열됨을 보여준다(Fig. 3).



Fig. 8. Outcrop photograph of (N)NW trending F_4 open fold superposed on F_2 fold (Pyeonghae granite gneiss).

태가 지질도 규모로 인지되는 연구지역에서의 구성 지층들의 분포 양상 특히 평해 화강편마암의 동북동 방향 V자형 분포 양상과 매우 유사함을 고려해 볼 때 (Figs. 1 and 2), $S_{0,1}$ 복합엽리의 방향성은 주로 F_2 습곡작용에 의해 재배열 내지 분산되었으며 F_2 습곡작용은 F_1 습곡작용과 함께 연구지역의 지질구조를 지배하는 광역적인 지구구조운동이었던 것으로 고찰된다. 그 외, $350^\circ\text{--}030^\circ$ 방향 범위로 침강하는 파이-축의 파이-원상에 배열된 $S_{0,1}$ 복합엽리의 극점들이 F_4 개방 습곡작용(Figs. 8 and 10)과 북북동 방향의 좌수향 주향이동 단층운동과 관련된 F_5 끌림 습곡작용(Figs. 11 and 12b)에 의해 분산되었다. 또한, $035^\circ\text{--}075^\circ$ 방향 범위로 침강하는 파이-축의 파이-원상에 배열된 일부 $S_{0,1}$ 복합엽리의 극점들은 북북서 방향의 우수향 주향이동 단층운동과 관련된 F_5 끌림 습곡작용(Figs. 11 and 12a)에 의해 분산되었음은 이들 습곡에 의해 분산된 $S_{0,1}$ 복합엽리의 방향성과 이들 습곡의 기하학적 특성으로부터 추정된다. 그러나 F_4 와 F_5 습곡작용은 F_2 습곡작용에 의해 재배열된 동북동 방향의 $S_{0,1}$ 복합엽리를 부분적으로 재배열시키는 구부적인 구조요소로 추정된다.

또한, 노두 규모의 F_2 습곡의 양 날개부와 축부에서 측정된 $S_{0,1}$ 엽리의 극점 배열(Fig. 6f)이 전체 $S_{0,1}$ 엽리의 극점 배열(Fig. 3b)과 유사하게 나타나고, 노두 규모에서 흔히 관찰되는 동북동 방향의 F_2 밀착습곡구조 형

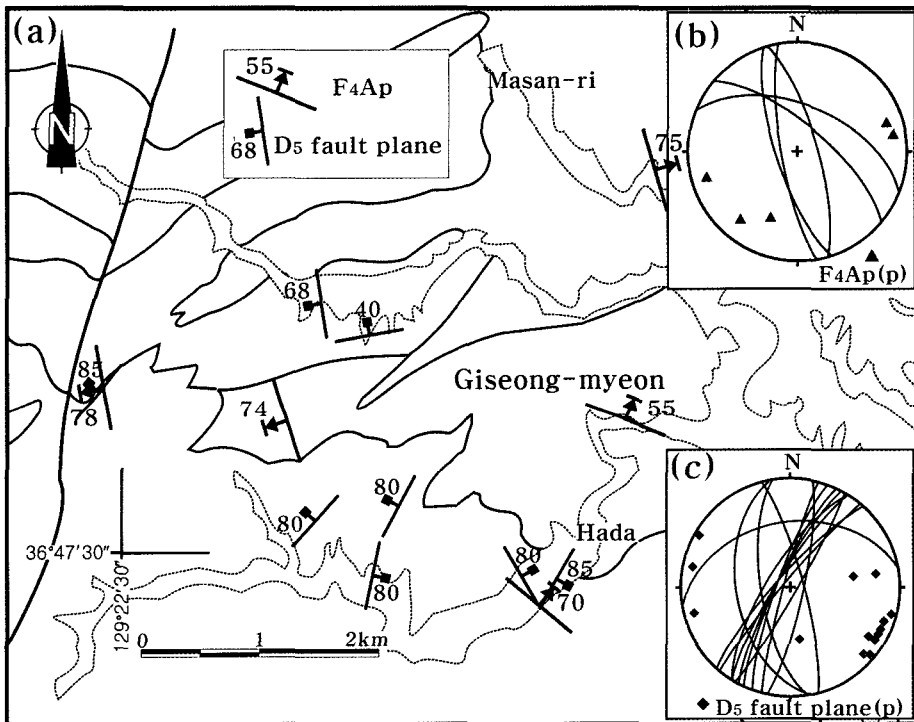


Fig. 9. (a) Orientations of F_4 axial plane and D_5 fault plane. (b) Stereoplots of F_4 axial plane and (c) D_5 fault plane. p: poles. Lower-hemisphere equal-area projection.

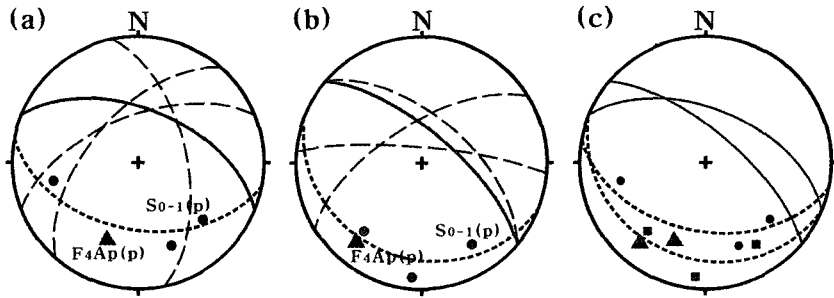


Fig. 10. Characteristic orientation of poles(p) to S_{0-1} foliation dispersed by F_4 folding. (a-b) Each outcrops. (c) Total. Dotted lines: π -circles. Lower-hemisphere equal-area projection.

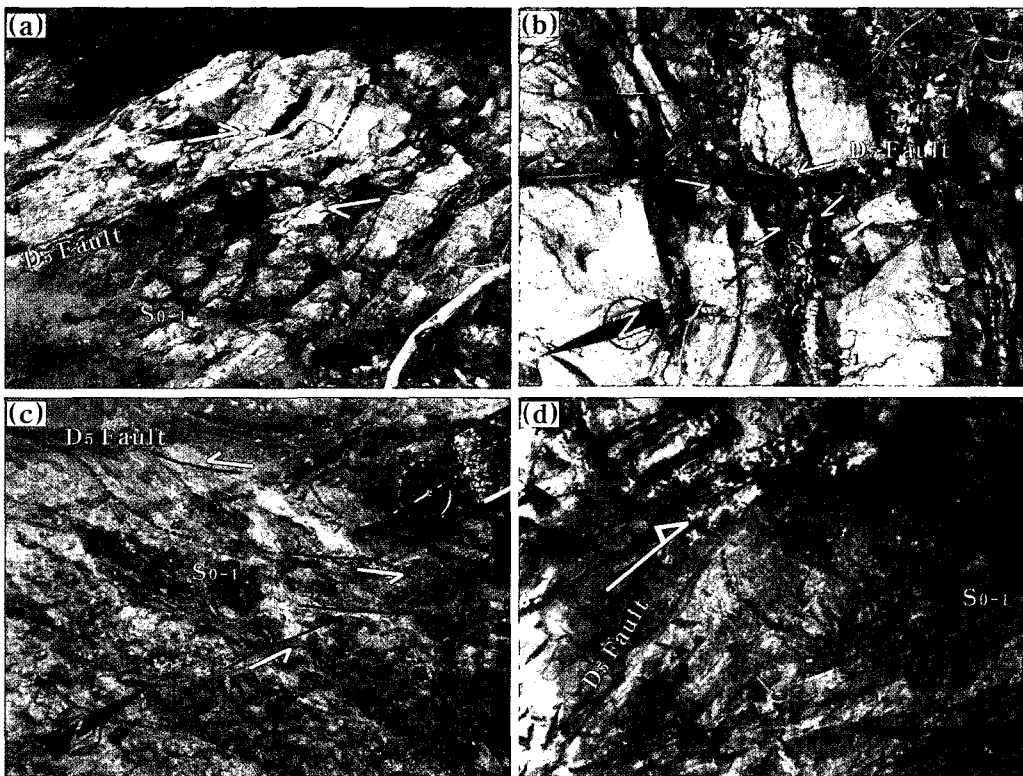


Fig. 11. Outcrop photographs of major D_5 structures in study area. (a-b) Conjugate strike-slip fault and its drag fold (Wonnam Series). (c) Sinistral strike-slip fault and its drag fold(Wonnam Series). (d) Drag fold accompanied with thrust faulting (Pyeonghae granite gneiss).

연구지역의 서쪽 연장부에 해당하고 동-서 방향의 예천전단대가 통과하는 영양-울진지역(강지훈 외, 2004)과 장군봉지역(강지훈 외, 1997; 강지훈 외, 1998), 그리고 동-서 방향의 예천전단대가 북동-남서 방향의 예천전단대로 전환되는 봉화군 상운면지역(강지훈과 김형식, 2000) 등에서의 기존 연구결과와 본 연구결과를 비교 분석하여 소백산육괴 구성암류에 대한 광역적인

변형단계별 구조적 특성과 각 변형의 상대적인 발생시기를 종합적으로 고찰해 보면 다음과 같다.

D_1 변형단계는 동북동-서남서 방향의 압축 지구조 환경하에서 발생하여 북북서 방향의 광역엽리와 매우 밀착된 등사습곡을 형성시켰다. D_2 변형단계는 북북서-남남동 방향의 압축 지구조 환경하에서 저각 침강하는 습곡축과 중각 내지 고각 경사하는 습곡측면을 갖

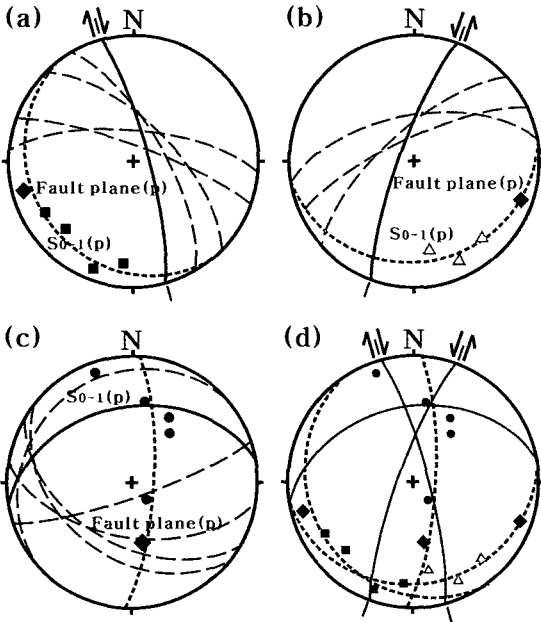


Fig. 12. Characteristic orientation of poles(p) to $S_{0,1}$ foliation dispersed by D_2 faulting. (a-c) Each outcrops. (d) Total. Dotted lines: π -circles. Lower-hemisphere equal-area projection.

는 동북동 방향의 밀착, 등사, 뿌리 없는 층간습곡 형성기로서, 이러한 변형작용은 장군봉지역 평안층군의 동수곡층이 퇴적된 폐름기 이후에 발생하여 소백산육괴를 구성하는 변성암류에 동북동 방향의 광역엽리를 형성시켰다. D_3 변형단계는 우수향 주향이동성 연성전단운동에 의해 동북동 방향의 신장선구조, 북동 방향의 Z자형 비대칭습곡, S-C 압쇄구조 등이 형성되는 시기로서, 예천전단대 형성과 관련된 D_3 변형작용은 상운면지역 중생대 각섬석 화강암이 관입된 이후 - 장군봉지역 중생대 춘양화강암[$136 \pm 4.2 - 147 \pm 4.5$ Ma(K-Ar 백운모 연대: 이현구 외, 1992)]이 관입되기 이전에 발생하여 소백산육괴 구성암류에 압쇄암질암을 형성시켰다. D_4 변형단계는 북북서 방향의 정이동 전단대와 준 수평적인 습곡축과 저각-경사하는 습곡축면을 갖는 동북동 방향의 개방 내지 키크형 횡습곡 형성기로서, 이러한 변형작용은 장군봉지역 중생대 춘양화강암의 관입 후기단계에 발생하였다. D_5 변형단계는 동북동-서남서 방향의 압축 지구조 환경하에서 발생하여 D_3 변형 이전의 동북동 방향의 지구조선을 완사 내지 개방형 경사 습곡작용에 의해 북동 방향의 지구조선과 동-서 방향의 지구조선으로 변화시켰다. 봉화군 상운면지역에서 북동 방향의 지구조선이 동-서 방향의 지

구조선으로 변화함은 D_5 변형과 밀접한 관련이 있다. D_6 변형단계는 남-북 방향의 압축 지구조 환경하에서 발생하여 동-서 방향의 공역성 층상단층, 북북동 방향과 북북서 방향의 공역성 주향이동 단층, 그리고 이들 단층운동에 수반된 끌림습곡을 형성시켰다. 콜라판과 태평양판의 상호작용과 관련된 동-서 방향과 남-북 방향의 압축 지구조환경하에서 백악기 경상분지의 형성 및 발달(Hilde et al., 1977; 황재하, 1994; Choi, 1998; Choi et al., 2002)을 고려해 볼 때, 소백산육괴 구성암류의 D_5 와 D_6 변형구조는 경상분지 형성 및 발달과 관련된 백악기 지구조운동의 결과로 해석되며 이들 변형은 연구지역의 D_4 와 D_5 변형에 각각 대비될 것으로 고찰된다. 그리고, 본 연구결과 소백산육괴의 D_4 변형구조는 울진군 기성면 지역에서는 관찰할 수가 없었으며, 예천전단대 형성과 관련된 소백산육괴의 D_3 신장선구조와 S-C 압쇄구조는 장군봉지역(강지훈 외, 1998), 상운면지역(강지훈과 김형식, 2000), 영양-울진지역(강지훈 외, 2004)과 비교하여 미약하게 발달하고 이들 지역에서 관찰되는 Z자형 비대칭 F_3 습곡구조는 본 연구 지역에서는 관찰할 수 없었으며, 소백산육괴의 D_1 변형구조는 이들 지역에서 기재된 바가 없다.

결론

소백산육괴의 동부에 해당하고 영양-울진지역의 동쪽 연장선상에 위치하는 울진군 기성면지역 선캠브리아기 변성암류에 대한 정밀한 야외지질조사를 실시하였다. 그 결과, 영양-울진지역에서의 동-서 방향의 예천전단대는 연구지역으로 연장됨이 확인되나, 연성전단운동과 관련된 변형구조는 미약하게 발달한다. 주요 변형구조의 기하학적·운동학적 특성과 중첩된 변형구조들의 선후관계로부터 밝혀진 울진군 기성면지역 선캠브리아기 변성암류에 대한 변형단계별 구조적 특성과 기존 연구결과(강지훈 외, 1997, 1998; 강지훈과 김형식, 2000, 강지훈 외, 2004)를 바탕으로 고찰된 이들 각 변형단계의 상대적인 발생시기를 요약해 보면 다음과 같다.

1. D_1 변형단계는 동북동-서남서 방향의 압축 지구조 환경하에서 발생하여 북북서 방향의 광역엽리와 매우 밀착된 등사습곡을 형성시켰다. D_1 변형 이전의 S_0 편마면 내지 편리의 일반적인 방향성은 동북동이었으나, F_1 등사습곡작용에 의해 대부분이 북북서 방향으로 재배열되었다.

2. D_2 변형단계는 북북서-남남동 방향의 압축응력에 의한 동북동 방향의 밀착, 등사, 뿌리 없는 층간습곡

형성기로서, D₂ 변형작용은 장군봉지역 평균층군의 동수곡층이 퇴적된 페름기 이후에 발생하여 소백산육괴를 구성하는 변성암류에 동북동 방향의 광역엽리를 형성시켰다. D₂ 변형 이전의 광역엽리 및 F₁ 등사습곡의 북북서 방향성은 F₂ 밀착습곡작용에 의해 부분적으로 (북)북동 방향과 (서)북서 방향으로 그리고 F₂ 등사 및 층간 습곡작용에 의해 동북동 방향으로 재배열되었다.

3. D₃ 변형단계는 우수향 주향이동 연성전단변형에 의해 동북동 방향의 신장선구조와 S-C 압쇄구조가 형성되는 시기로서, 예천전단대 형성과 관련된 D₃ 변형작용은 상운면지역 중생대 각섬석 화강암이 관입된 이후-장군봉지역 중생대 춘양화강암이 관입되기 이전에 발생하였다.

4. D₄ 변형단계는 (동)북동-(서)남서 방향의 압축 지구조 환경하에서 발생하여 (북)북서 방향의 개방습곡을 형성시켰다. D₅ 변형단계는 남-북 방향의 압축 지구조 환경하에서 발생하여 북북동 방향과 북북서 방향의 공역성 주향이동 단층과 동-서 방향의 층상단층 그리고 이들 단층운동에 수반된 끌림습곡을 형성시켰다. 연구지역의 D₄와 D₅ 변형구조는 경상분지의 형성 및 발달과 관련된 백악기 지구조운동의 결과로 형성되었으며, 이들 구조는 연구지역 광역엽리의 일반적인 동북동 방향성을 부분적으로 재배열시켰다.

사 사

이 연구는 한국과학재단의 틀정기초연구(과제번호: R01-2004-000-10825-0)의 지원을 받아 수행되었다. 본 논문을 심사하여 여러 가지 의미 있는 지적을 해 주신 김영석 박사와 김형수 박사께 심심한 감사를 드린다.

참고문헌

강지훈, 김형식, 오세봉, 1997, 장군봉지역 선클브리아대-고생대 변성퇴적암류의 지질구조 -북부 소백산육괴의 중앙

부 지역의 지각진화와 환경지질-. 암석학회지, 6, 244-259.

강지훈, 오세봉, 김형식, 1998, 장군봉지역 북부 소백산육괴의 고생대 변성퇴적암류에 대한 변형작용과 변성작용 사이의 상대적인 시간관계. 암석학회지, 7, 190-206.

강지훈, 2000, 안동저반 북서부에 발달하는 예천전단대의 구조적 특성. 한국암석학회/한국광물학회 2000년도 학술답사 안내서, 37-55.

강지훈, 김형식, 2000, 봉화군 상운면지역에서 북부 소백산육괴의 지질구조 해석. 암석학회지, 9, 254-270.

강지훈, 김남훈, 박계현, 송용선, 옥수석, 2004, 영양-울진지역 선클브리아기 변성암류의 변형작용사. 암석학회지, 13, 179-190.

김옥준, 홍만섭, 원종관, 박희인, 박양대, 김기태, 1963, 한국지질도(1:50,000) 평해도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 28p.

이현구, 박노영, 이마이나오야, 1992, 장군 광산 주변의 지질과 변성 작용. 이석 남기상선생 논문집, 21-44.

황재하, 1994, 백악기초 이후 한반도 남동부에 작용한 고응력 복원. 지질학회지, 30, 27-34.

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.

Choi, P.-Y., 1998, Tectonic evolution of SE Korea since the Early Cretaceous. In Tectonic Evolution of East Asia: the first joint meeting of Japanese and Korean structure and tectonic group (eds. Koh, H.J. and Lee, B.J.), 113-121.

Choi, P.-Y., Lee, S.R., Choi, H.I., Hwang, J.H., Kwon, S.K., Ko, I.S., and An, G.O., 2002, Movement history of Andong Fault System: Geometric and tectonic approaches. Geosciences Journal, 6, 91-102.

Hilde, T.W.C., Uyeda, S. and Kroenke, L., 1977, Evolution of western Pacific and its margin. Tectonophysics, 38, 145-165.

KIGAM, 1995, Geological map of Korea (1:1,000,000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials.

(2006년 4월 18일 접수; 2006년 5월 14일 채택)