

## 영양-울진지역 선캠프리아기 변성암류의 변형작용사

강지훈<sup>1,\*</sup> · 김남훈<sup>2</sup> · 박계현<sup>2</sup> · 송용선<sup>2</sup> · 옥수석<sup>3</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과, <sup>2</sup>부경대학교 환경지질과학과, <sup>3</sup>경성대학교 교양과정부

### Deformation History of Precambrian Metamorphic Rocks in the Yeongyang-Uljin Area, Korea

Ji-Hoon Kang<sup>1,\*</sup>, Nam Hoon Kim<sup>2</sup>, Kye-Hun Park<sup>2</sup>,  
Yong Sun Song<sup>2</sup>, and Soo-Seok Ock<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea

<sup>2</sup>Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

<sup>3</sup>Liberal Arts Course, Kyungseong University, Busan 608-739, Korea

**요약:** 소백산육괴의 동부에 위치하는 영양-울진지역의 선캠프리아기 변성암류는 평해층, 기성층, 원남층, 하다 우백질 화강편마암 등으로 구성되어 있다. 이들 변성암류는 서북서-동남동 방향의 대상 분포를 보이고 중생대 화성암류 및 퇴적암류에 의해 각각 관입 및 부정합으로 피복되어 있다. 본 논문은 변형 암석구조의 운동학적·기하학적 특성과 중첩된 변형구조들의 선후관계로부터 영양-울진지역 선캠프리아기 변성암류의 변형작용사를 연구하였다. 그 결과, 영양-울진지역의 지질구조는 선캠프리아기 변성암류의 편마면 내지 편리가 형성된 이후 적어도 네 번의 변형단계(연성 전단변형작용과 그 이전에 한 번의 습곡작용과 그 이후에 적어도 두 번의 습곡작용)를 거쳐 형성되었음을 알게 되었다. (1) 첫 번째 변형은 준 수평적인 습곡축과 북쪽으로 고각 경사하는 습곡측면을 갖는 서북서-동남동 방향의 등시습곡과 광역엽리를 형성시켰다. (2) 두 번째 변형은 광역엽리의 상부가 동쪽으로 밀리는 우수 주향이동성 연성전단운동에 의해 발생하여 동서 방향의 준 수평적인 신장선구조, S-C 압쇄구조면, Z자형 비대칭습곡 등을 형성시켰다. (3) 세 번째 변형은 준 수평적인 습곡축과 저각의 습곡측면을 갖는 동서 방향의 개방 내지 키크형 횡외습곡을 형성시켰다. (4) 네 번째 변형은 북북서-남남동 방향의 압축작용으로 발생하여 준 수평적인 습곡축을 갖는 동북동-서남서 방향의 대칭 개방 직립습곡, 비대칭 공역성 키크습곡, 북북서 방향과 남남동 방향으로 충상하는 공역성 충상단층과 이에 수반된 팔립형 습곡 등을 형성시켰다. 그리고 이러한 네 번의 변형작용은 영양-울진지역 광역엽리의 방향성과 밀접한 관련성이 있다. 첫 번째 변형은 서북서 주향에 북쪽으로 고각 경사하는 광역엽리를 형성하였고, 두 번째 변형은 남-북 방향으로 광역엽리의 주향을 부분적으로 변화시켰으며, 세 번째 변형과 네 번째 변형은 광역엽리의 경사각 및 경사 방향을 부분적으로 변화시켰다.

**핵심어:** 소백산육괴, 영양-울진지역, 선캠프리아기 변성암류, 변형작용사, 연성 전단변형작용

**Abstract:** Precambrian metamorphic rocks of Yeongyang-Uljin area, which is located in the eastern part of Sobaegsan Massif, Korea, are composed of Pyeonghae, Giseong, Wonnam Formations and Hada leucogranite gneisses. These show a zonal distribution of WNW-ESE trend, and are intruded by Mesozoic igneous rocks and are unconformably overlain by Mesozoic sedimentary rocks. This study clarifies the deformation history of Precambrian metamorphic rocks after the formation of gneissosity or schistosity on the basis of the geometric and kinematic features and the forming sequence of multi-deformed rock structures, and suggests that the geological structures of this area experienced at least four phases of deformation i.e. ductile shear deformation, one deformation before that, at least two deformations after that. (1) The first phase of deformation formed regional foliations and WNW-trending isoclinal folds with subhorizontal axes and steep axial planes dipping to the north. (2) The second phase of deformation occurred by dextral ductile shear deformation of top-to-the east movement, forming stretching lineations of

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

E-W trend, S-C mylonitic structure foliations, and Z-shaped asymmetric folds. (3) The third phase deformation formed E-W trending open- or kink-type recumbent folds with subhorizontal axes and gently dipping axial planes. (4) The fourth phase deformation took place under compression of NNW-SSE direction, forming ENE-WSW trending symmetric open upright folds and asymmetric conjugate kink folds with subhorizontal axes, and conjugate faults thrusting to the both NNW and SSE with drag folds related to it. These four phases of deformation are closely connected with the orientation of regional foliation in the Yeongyang-Uljin area. 1st deformation produced regional foliation striking NNW and steeply dipping to the north, 2nd deformation locally change the strike of regional foliation into N-S direction, and 3rd and 4th deformations locally change dip-angle and dip-direction of regional foliation.

**Key words:** Sobaegsan Massif, Yeongyang-Uljin area, Precambrian metamorphic rocks, deformation history, ductile shear deformation

### 서론

한반도 호남지방을 중심으로 수 개의 우수 주향 이동성 연성전단대(호남전단대: 순창전단대, 광주전단대, 전주전단대, 영광전단대, 청산전단대)가 발달되어 있다 (Yanai *et al.*, 1985; 장태우와 한영민, 1989; 이병주 외, 1990; Cluzel *et al.*, 1991; 김정환과 기원서, 1991; 이병주, 1992; 장태우, 1994). 이들 중 북동-남서 방향의 순창전단대는 연장성이 우수하여 해남-순창-진안 연결

선을 따라 단양지역까지 연장되고, 점촌 부근에서 동북동-서남서 방향의 우수 주향 이동성 예천전단대(Chang, 1991)로 분리되며, 분리된 예천전단대는 소백산육괴의 북후면-평은면지역을 지나 봉화 부근에서 그 방향성을 동-서 방향으로 전환하여 장군봉지역까지 연장된다 (KIGAM, 1995; 강지훈 외 1997, 1998; 강지훈과 김형식, 2000)(Fig. 1a).

소백산육괴의 동부에 해당하고 장군봉지역의 동쪽 연장선상에 위치하는 영양-울진지역의 선캠브리아기

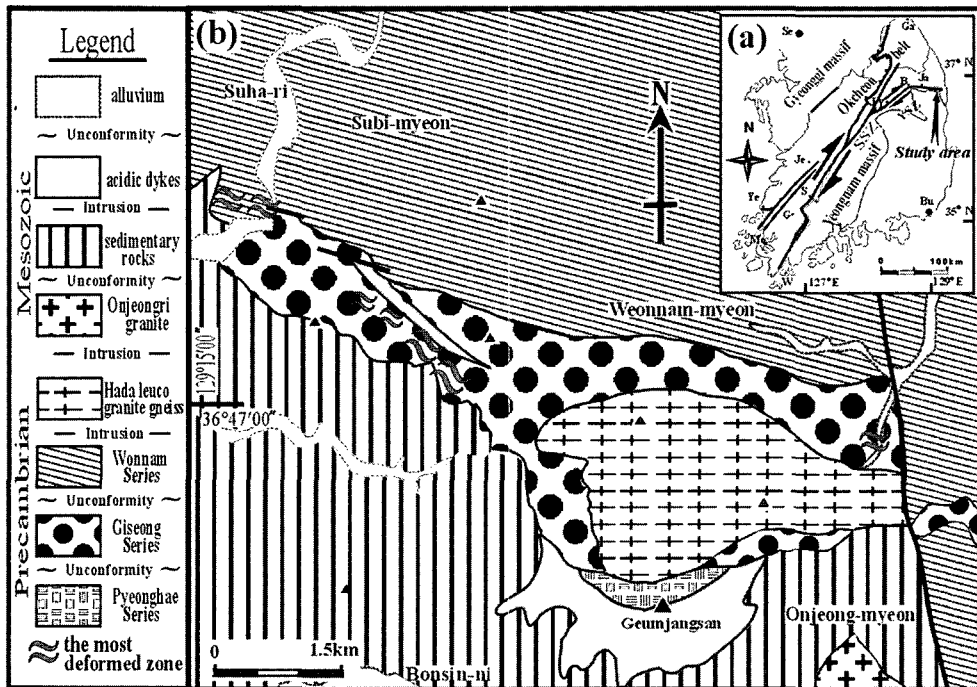


Fig. 1. (a) Index map showing the tectonic locality (arrow mark) of the study area. B:Bonghwa, Bu:Busan, G:Gwangju, Ga:Gangneung, J:Jeomchon, Ja:Janggunbong, Je:Jeonju, Mo:Mokpo, S:Sunchang, Se:Seoul, W:Wando, Y:Yecheon, Ye:Yeongkwang, SSZ:Sunchang shear zone, YSZ:Yecheon shear zone[adapted from KIGAM(1995)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

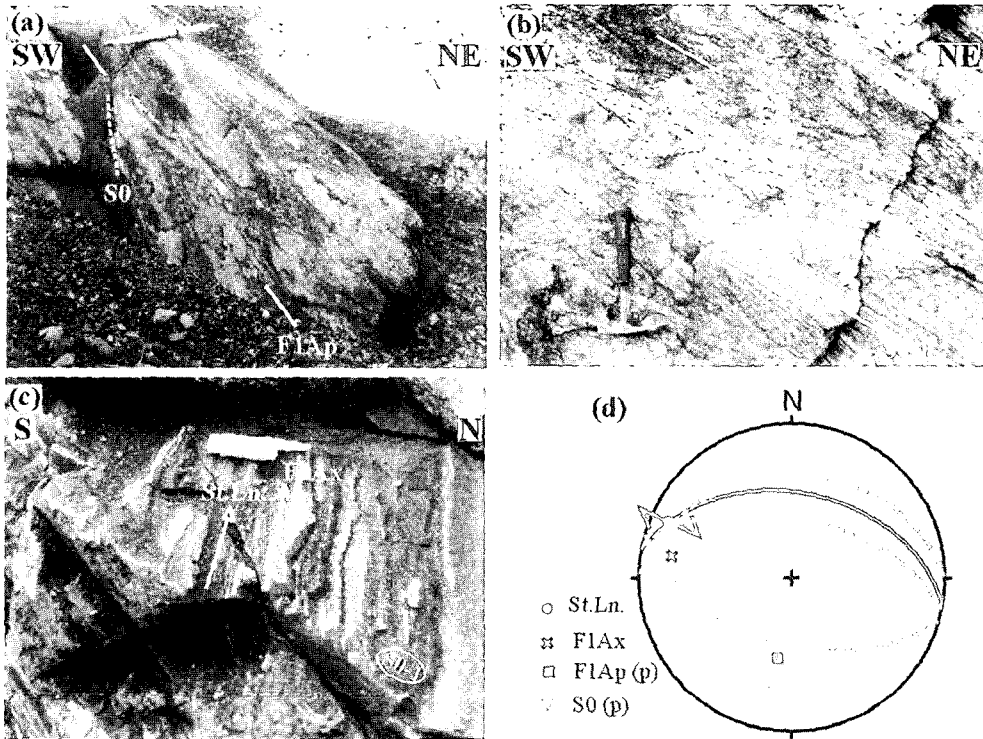


Fig. 2. (a-c) Outcrop photographs of major D1 structures in the study area. (a-b) Isoclinal F1 folds (a: less tight form, b: more tight form). The S0 foliation of limb parts in the more tight form is completely transposed into the axial plane of F1 fold (F1Ap) and forms the S0-1 composite foliation. (c) Orientation relation between F1 fold axis (F1Ax) and stretching lineation (St.Ln.) on the S0-1 composite foliation. (d) Stereoplot of major structural elements related to F1 folding (F1Ax, F1Ap, S0) and stretching lineation (St.Ln.) in the same outcrop, (a) and (c). p: poles. Lower-hemisphere equal-area projection.

변성암류는 고기로부터 평해층, 기성층, 원남층 등으로 구성되어 있고, 주로 변성화산암류로 구성된 기성층은 주로 이질 내지 사질 기원의 변성퇴적암류로 구성된 평해층과 원남층 사이에서 부정합적인 관계를 보이는 것으로 알려져 있다(김옥준 외, 1963)(Fig. 1). 최근 김남훈 외(2001, 2002)은 암석학적 및 지구화학적 연구를 통하여, 기성층의 구성암류는 변성화산암류가 아니라 평해층과 원남층에서 산출되는 화강암질편마암과 각섬암 기원의 변성암류가 심한 연성전단변형을 받아 형성된 압쇄암 내지 초압쇄암으로 구성되어 있고, 기존의 기성층은 변성화산암류와 같은 성분상으로 구분되는 별개의 층이 아닌 구조적으로 만들어진 연성전단대의 중심부의 산물일 가능성을 시사한 바가 있다.

본 연구는 소백산육괴의 지구조 발달과정을 파악하기 위해 소백산육괴의 동부에 위치하고 장군봉지역에 천전단대의 동쪽 연장선상에 놓여 있는 영양-울진지역에 분포하는 선캠브리아기 변성암류에 대한 상세한 야

외지질조사를 실시하였다. 그 결과, 이 지역 선캠브리아기 변성암류에는 여러 번의 변형작용에 의해 형성된 다양한 습곡 형태와 중첩된 습곡구조 그리고 연성전단대 형성과 관련된 압쇄구조 등이 관찰된다. 본 논문에서는 이들 주요 변형구조의 기하학적·운동학적 특성과 중첩된 변형구조들의 선후관계 등으로부터 영양-울진지역 선캠브리아기 변성암류의 변형작용사를 규명하고, 본 연구결과와 기존 연구결과를 바탕으로 각 변형단계의 발생시기를 고찰해 보고자 한다.

### 지질개요

평해 지질도폭의 북서 일부 영역을 점하고 있는 영양-울진지역은 선캠브리아기 변성암류와 이들을 관입 및 부정합으로 피복하는 중생대 화성암류(운정리 화강암과 산성 암맥) 및 퇴적암류(울련산층, 동화치층, 가송동층) 등으로 구성되어 있다(Fig. 1b). 선캠브리아기

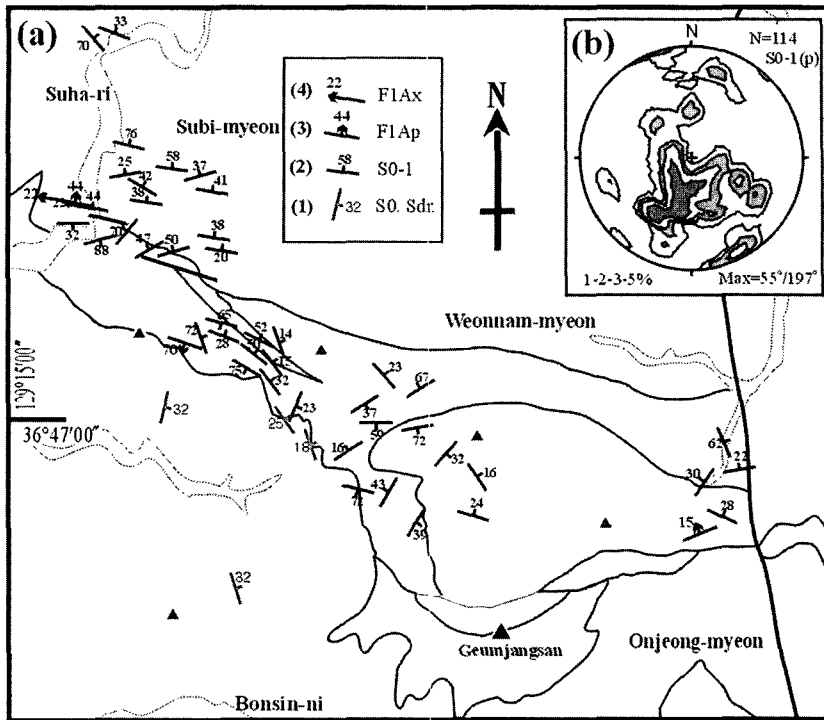


Fig. 3. (a) Orientations of (1) bedding plane in the Mesozoic sedimentary rocks, and of (2-4) D1 structural elements in the Precambrian metamorphic rocks. (b) Density map of poles(p) to S0-1 foliation in the Precambrian metamorphic rocks. Lower-hemisphere equal-area projection.

변성암류는 평해층, 기성층, 원남층, 그리고 이들을 관입하는 하대 우백질 화강편마암으로 구성되어 있고 이들은 서북서-동남동 방향으로 대상 분포한다.

금장산 일대에 소규모로 산출하는 평해층은 이질 기원의 안구상 편마암, 호상 편마암, 운모 편암 및 운모-규선석 편암과 사질 기원의 세립질 석영-장석-흑운모 편마암, 규암 및 석영-견운모 편암 등으로 주로 구성되어 있고, 박층의 결정질 석회암과 각섬암 등을 부분적으로 협재한다. 연구지역의 북부 영역에 다량 산출하는 원남층은 이질 기원의 안구상 편마암, 호상 편마암, 운모 편암, 운모-규선석 편암 및 흑연 편암(편마암)과 사질 기원의 세립질 석영-장석-흑운모 편마암, 규암 및 석영-견운모 편암과 주입편마암 그리고 박층의 결정질 석회암과 각섬암 및 각섬석 편암 등으로 구성되어 있다. 원남층의 구성암종은 평해층과 매우 유사하게 나타난다. 연구지역의 중앙부에서 서북서-동북동 방향으로 대상 분포하는 기성층은 응회질암, 화산각력암, 화산집괴암, 유문암류 기원의 변성화산암류로 주로 구성되어 있고 변성퇴적암류를 부분적으로 협재한다. 기성층은 평해층의 구조적 상부와 원남층의 구조적 하부

에 위치하고 하대 우백질 화강편마암과 중생대 산성암맥에 의하여 관입되어 있으며, 남부의 중생대 퇴적암류에 의하여 부정합으로 피복되어 있고 서부의 원남층과 단층으로 접촉한다.

연구지역 선캠브리아기 변성암류에 대한 층서, 암석학 및 지구화학적 연구결과, 평해 지질도폭(김옥준 외, 1963)의 연구자들은 선캠브리아기 변성화산암류로 구성된 기성층이 구조적으로 평해층과 원남층 사이에 놓이는 것을 보고, 평해층과 원남층의 관계를 부정합으로 해석한 바가 있다. 김남훈 외(2001, 2002)은 선캠브리아기 기반암의 건층인 기성층의 구성암석들을 변성화산암체가 아닌 평해층과 원남층의 화강암질편마암과 각섬암 기원의 변성암류가 심한 연성전단변형을 받아 구성광물의 입도가 세립화 내지 극세립화되어 형성된 암쇄암 내지 초암쇄암으로 보고하고, 기성층의 암쇄암 형성시기를 K-Ar 절대연대로부터  $122.8 \pm 1.8(1\sigma)$  Ma와  $89.9 \pm 1.8(1\sigma)$  Ma로 해석한 바가 있다. 또한, 그들은 평해층과 원남층에서 산출되는 각섬암은 모두 화성기원으로서 최소 2가지 이상의 기원 마그마로부터 형성되었음을 지적한 바가 있고, 이들 두 지층에 분포

하는 각섬암과 화강암질 편마암 시료로부터 평해층과 원남층의 변성 온도 및 압력 조건을 700-850°C, 4-9kbar와 550-700°C, 4-8kbar로 각각 설정한 바가 있다.

야외에서 인지되는 선캄브리아기 변성암류의 주요 변형구조들은 준 수평적인 습곡축과 고각-경사하는 습곡축면을 갖는 등사습곡, 연성전단운동에 의해 형성된 신장선구조, Z자형 비대칭습곡, S-C 압쇄구조면, 준 수평적인 습곡축과 저각-경사하는 습곡축면을 갖는 개방 내지 키크형 횡와습곡, 준 수평적인 습곡축을 보이는 대칭 개방 직립습곡, 비대칭 공역성 키크습곡, 그리고 공역성 층상단층과 이에 수반된 끌림형 습곡 등으로 구분된다. 이들 변형구조들의 주요 특성 및 관찰 위치 등은 이후 변형작용사에서 상세히 기재한다. 지질도상에서 인지되는 주요 단층으로는 북북서-남남동 방향의 길곡단층(김옥준 외, 1963)과 서북서-동남동 방향의 몇몇 단층들이 있고, 길곡단층은 연구지역 구성암류의 연장성을 절단한다(Fig. 1b).

### 변형작용사

주요 변형구조들의 기하학적·운동학적 특성과 증첩된 변형 암석구조들의 선후관계로부터 영양-울진지역 선캄브리아기 변성암류의 변형단계별 구조요소를 연구한 결과, 영양-울진지역 선캄브리아기 변성암류의 암석 및 지질구조는 편마면 내지 편리가 형성된 이후 적어도 네 번의 변형단계를 걸쳐 형성되었음을 알게 되었다. 따라서, 본 논문에서는 선캄브리아기 변성암류의 편마면 내지 편리를 편의상 S0 엽리라고 표현하고, 네 번의 변형단계를 그 상대적인 발생순서에 따라 D1 변형, D2 변형, D3 변형, D4 변형 등으로, 이들 각 변형단계 동안에 형성된 습곡구조들을 F1 습곡, F2 습곡, F3 습곡, F4 습곡 등으로 구분하여 영양-울진지역 선캄브리아기 변성암류의 변형작용사를 기재하고자 한다.

#### D1 변형

D1 변형에 의해 S0 엽리가 습곡되어 형성된 F1 습곡은 동-서 방향의 준 수평적인 습곡축을 갖는 등사습곡 내지 뿌리 없는 층간습곡 형태로 나타난다(Fig. 2). F1 습곡의 양 날개부를 구성하는 S0 엽리는 일반적으로 F1 습곡의 측면엽리(S1)로 완전히 전위되어 S1 엽리와 거의 평행한 복합엽리(S0-1)로 나타난다(Fig. 2a and 2b). S0-1 복합엽리는 이 지역의 광역엽리로 인지되고, S0-1 광역엽리는 구성암류의 대상 분포 방향과 유사한 서북서 주향에 북쪽으로 중각 경사하는 집중된 방향성[55°(경사각)/197°(경사방향)]을 보이며 분산되어 있다(Fig.

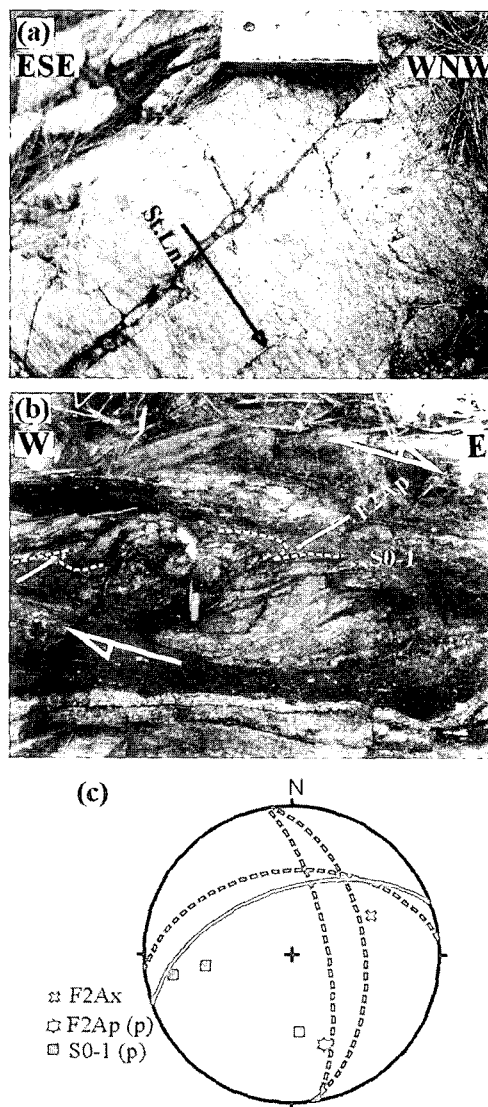


Fig. 4. (a-b) Outcrop photographs of major D2 structures in the study area (a: L2 stretching lineation, b: tight asymmetric F2 fold). The asymmetry of F2 fold, which can be described as Z-shaped, reflects dextral shear-sense (top-to-the east shearing of S0-1 foliation). (c) Stereoplot of major structural elements related to F2 folding in the (b) outcrop. Note: the outcrop of Fig. 4b is the same as that of Fig. 2a and 2c. p: poles. Lower-hemisphere equal-area projection.

3). 분산된 방향성은 서북서 주향에 남쪽으로 경사, 북서 내지 북동 주향에 남북으로 경사하는 경향을 보이고 후자의 방향성은 단층 주변 영역과 하단 우백질 화강편마암 분포 영역에서 주로 인지된다(Fig. 3a).

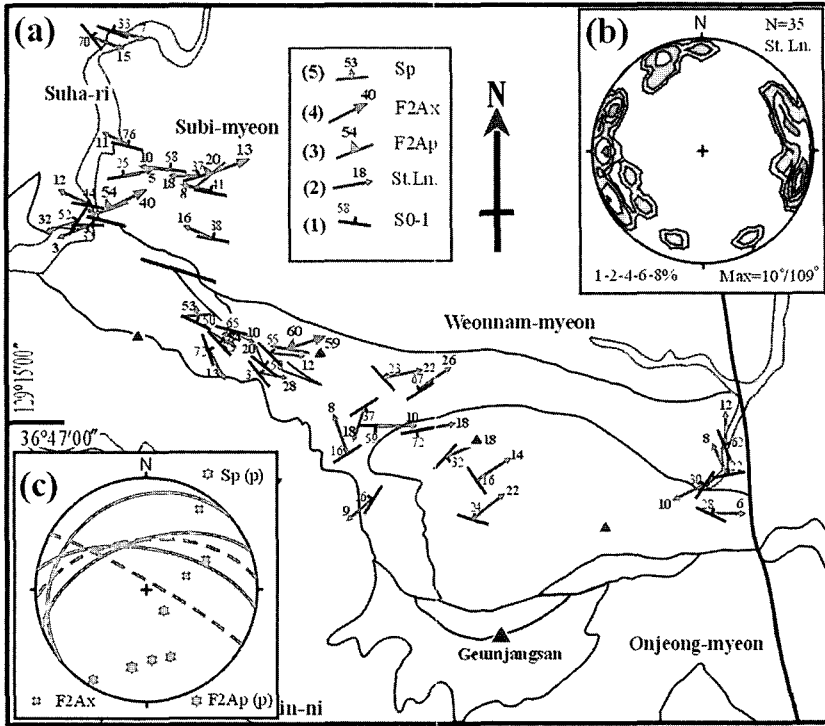


Fig. 5. (a) Orientations of (1) S0-1 composite foliation and (2-5) D2 structural elements in the Precambrian metamorphic rocks. (b) Density map of L2 stretching lineation (St.Ln.). (c) Stereoplots of F2 structural elements (F2Ap and F2Ax) and mylonitic foliation (Sp: S-surface). p: poles. Lower-hemisphere equal-area projection.

**D2 변형**

D2 변형구조로는 신장선구조, 비대칭습곡, 압쇄구조면 등으로 인지된다. 신장선구조는 S0-1 복합 엽리면 상에서 주로 신장된 석영(집합체)과 장석(집합체)들의 정향배열에 의해 정의된다(Fig. 4a). 신장선구조는 S0-1 복합엽리의 주향 방향으로 저각 침강하는 집중된 방향성[10°(선경사)/109°(선주향)]을 보이며 분산되어 있다(Fig. 5a and 5b). 신장선구조에 평행하고 S0-1 복합엽리에 수직한 전단운동감각 결정면에서는 S0-1 복합엽리면의 상부가 동쪽으로 이동하는 우수 주향 이동성 연성 전단운동감각을 지시하는 구조요소들이 다량 관찰된다(Fig. 6).

S0-1 복합엽리 및 F1 등사습곡을 (재)습곡시키는 F2 비대칭습곡은 S0-1 복합엽리를 전단면으로 하여 상부가 동쪽으로 이동하는 전단운동에 의해 형성된 Z자형 비대칭습곡 형태로 나타난다(Fig. 4b). F2 습곡측면은 동북동 주향에 북쪽으로 중각 경사하고(Fig. 5c), 서북서 주향에 북쪽으로 중각 경사하는 F1 습곡측면과는 20°-40° 범위의 사이각을 보인다(Figs. 2d and 4c). F2 습곡측은 북동 방향으로 중각 내지 저각 침강하고(Fig.

5c), 신장선구조와 거의 평행한 방향성을 보이는 F1 습곡측(Fig. 2c)과는 65°-75° 범위의 사이각을 이룬다(Figs. 2d and 4c).

연성전단변형에 의해 형성된 압쇄구조면은 전단엽리 C면과 압쇄엽리 S면으로 구분된다(Fig. 6b and 6c). 전단엽리 C면은 S0-1 광역엽리와 거의 일치하고, 압쇄엽리 S면은 F2 비대칭습곡의 측면엽리와 방향성이 거의 일치한다(Fig. 5a and 5c). 보다 개방된 F2 습곡에서 F1 습곡측면과 F2 습곡측면은 중각으로 사교하고, 이들 측면엽리 사이의 관계는 각각 전단엽리 C면과 압쇄엽리 S면 사이의 관계와 일치한다. 보다 밀착된 F2 습곡에서 이들 습곡측면은 저각으로 사교하거나 거의 평행하게 나타나고, F1 습곡측면과 F2 습곡측면이 거의 평행하게 발달하는 곳에서는 신장성 과방엽리 C가 발달한다. 압쇄구조면 S-C 기하로부터 인지되는 전단운동감각은 상기한 신장선구조와 F2 비대칭습곡 형성 과 관련된 전단운동감각과 일치한다.

**D3 변형**

S0-1 복합엽리와 압쇄구조면을 습곡시키는 F3 습곡

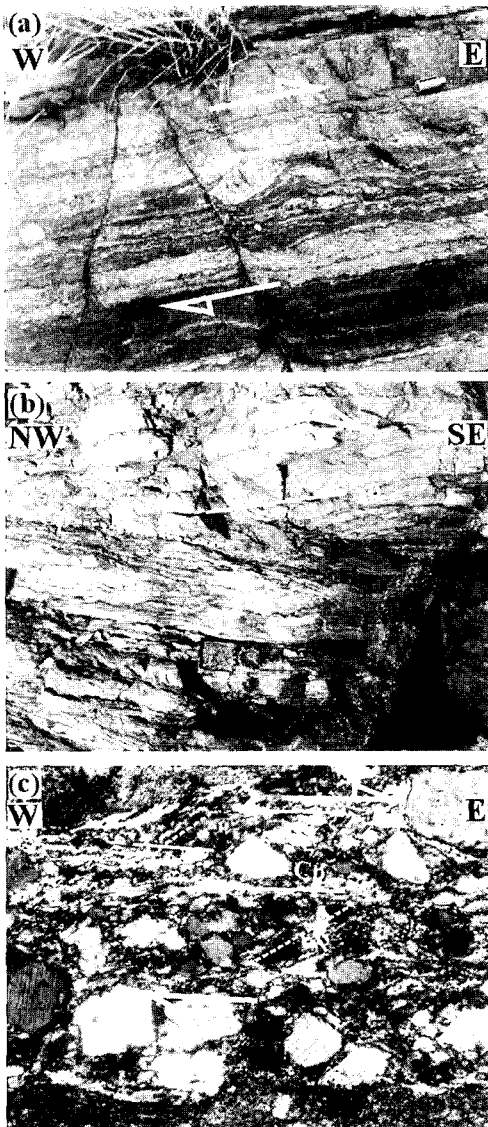


Fig. 6. Major D2 shear-sense indicators observed in the plane which is parallel to L2 stretching lineation and perpendicular to the S0-1 foliation. (a)  $\sigma$ -type asymmetric tails of feldspar porphyroclasts. (b) S-C structure in the outcrop. (c) S-C microstructure in the thin section. All indicators reflect dextral shear-sense (top-to-the east shearing of S0-1 foliation).

은 준 수평적인 습곡축과 저각의 습곡축면을 갖는 개방 내지 키크형 횡의습곡으로 인지된다(Fig. 7a). F3 습곡축 및 습곡축면은 대체로 집중된 방향성 없이 동서 방향으로 저각 침강 경사하고(Fig. 7b and 7c), F3 습곡작용에 의한 S0-1 광역엽리의 저각화 및 경사 방향의

변화 등은 노두규모에서 종종 관찰된다(Fig. 7a and 7d).

D4 변형

D4 변형에 의해 형성된 F4 습곡은 북북서-남남동 방향의 압축 지구조 환경하에서 형성된 대칭 개방 직립 습곡(Fig. 8a), 비대칭 공역성 키크습곡(Fig. 8b), 공역성 층상단층과 이에 수반된 끌림형 습곡(Fig. 8c and 8d) 등으로 인지된다. F4 습곡의 측면엽리는 일반적으로 동북동-서남서 주향에 남쪽과 북쪽으로 경사하는 다양한 경사각을 보인다(Fig. 9a and 9b). F4 습곡축은 동북동 내지 서남서 방향으로 저각 침강하는 집중된 방향성을 보인다(Fig. 9a and 9c). 대칭 개방 직립습곡은 압축 방향에 수직한 동북동-서남서 주향에 고각으로 경사하는 습곡축면을 갖는다. 비대칭 공역성 키크 습곡은 동북동-서남서 주향에 남쪽과 북쪽으로 경사하는 습곡축면을 갖는다. 이들 습곡축면이 이루는 평균 사이각은 111°와 69°로 나타난다(Fig. 9b). 비대칭 공역성 키크습곡의 긴 날개면은 S0-1 광역엽리의 일반적인 방향을 나타내고, 짧은 날개면은 긴 날개면의 주향에 90° 이상의 방향성을 보이고 경사는 보다 고각으로 변화한다. 공역성 층상단층은 동북동-서남서 주향에 남쪽과 북쪽으로 경사하는 단층면과 상부가 북북서 방향과 남남동 방향으로 층상하는 공역적인 운동상을 보인다(Fig. 10). 이들 층상단층면이 이루는 평균 사이각은 121°-122°와 59°-58°를 보인다. 공역성 층상단층운동은 공역성 키크습곡의 측면엽리를 따라 일반적으로 발생하고, 이러한 공역성 층상단층운동에 수반되어 발달하는 끌림형 습곡의 측면엽리는 층상단층 전단운동의 전단압축방향에 수직으로 발달한다. F4 습곡 측면엽리의 경사각은 비대칭 공역성 키크습곡(저각), 드래그습곡(중각), 대칭 개방 직립습곡(고각) 순으로 고각을 이룬다(Fig. 9b).

고 찰

본 연구결과, 영양-울진지역 소백산육괴의 변형된 주요 암석구조는 선캠브리아기 변성암류의 편마면 내지 편리가 형성된 이후 적어도 네 번의 변형단계를 걸쳐 형성되었음을 알게 되었다: (1) 광역엽리와 동서 방향의 준 수평적인 습곡축과 북쪽으로 고각-경사하는 습곡축면을 형성하는 등시습곡작용(D1 변형), (2) 동서 방향의 신장선구조, Z자형 비대칭습곡, S-C 압쇄구조면 형성과 관련된 광역엽리-상부-동쪽-이동 우수 주향 이동 연성전단운동(D2 변형), (3) 동서 방향의 준 수평적인 습곡축과 저각-경사하는 습곡축면을 갖는 개방

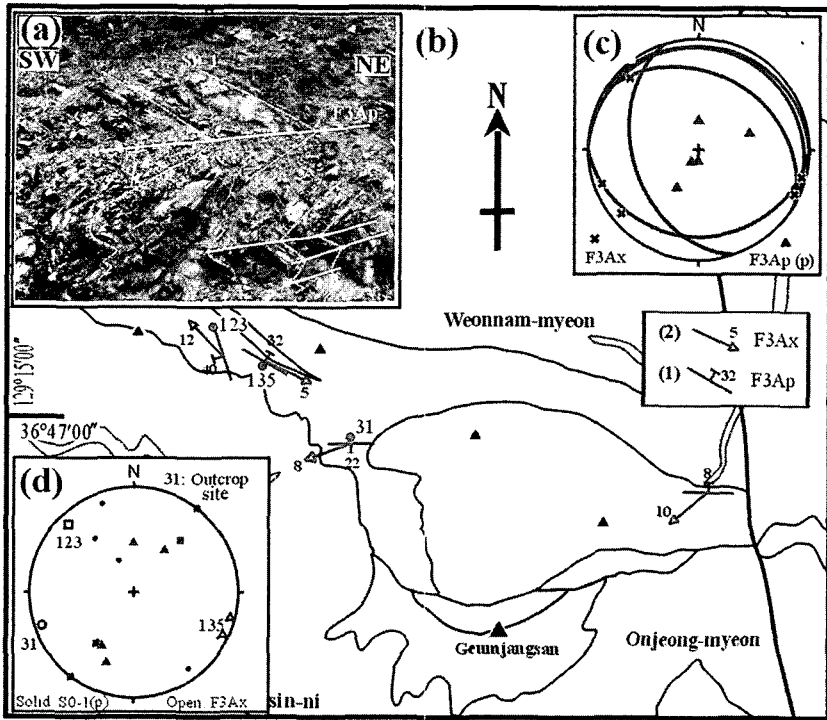


Fig. 7. (a) Outcrop photograph of recumbent open kink F3 fold. (b) Orientation and (c) stereonet of F3 structural elements. (d) Characteristic orientation of poles to S0-1 foliation dispersed by F3 folding. Lower-hemisphere equal-area projection.

내지 킹크형 횡외습곡작용(D3 변형), (4) 동북동-서남서 방향의 준 수평적인 습곡축을 보이는 대칭 개방 직립습곡작용, 비대칭 공역성 킹크 습곡작용, 그리고 공역성 충상단층운동과 이에 수반된 끌림형 습곡작용 (D4 변형). 이러한 연구결과는 본 연구지역의 서쪽 연장부에 해당하고 동-서 방향의 예천전단대가 통과하는 장군봉지역(Fig. 1a)에서의 기존 연구결과(강지훈 외, 1997)와 북동-남서 방향의 예천전단대가 동-서 방향의 예천전단대로 전환되는 봉화군 상운면지역(Fig. 1b)에서의 기존 연구결과(강지훈과 김형식, 2000)와 거의 일치한다.

강지훈 외(1997)은 선캠브리아기 원남층과 고생대 변성퇴적암류에 대한 변형된 암석 및 지질구조 연구를 통하여 장군봉지역 동-서 방향의 구조선은 고생대 퇴적암류가 형성된 이후 D1 등사 습곡작용, D2 연성전단변형, D3 개방형 횡외 습곡작용 등 세 번의 변형작용에 의해 형성되었으며, 이러한 동-서 방향의 구조 요소는 북서-침강 습곡축과 남서-경사 습곡축면을 갖는 D4 킹크 습곡작용에 의해 부분적으로 재배열되었음을 보고한 바가 있다. 또한, 강지훈과 김형식(2000)은 선캠브리아기 원남층과 중생대 각섬석 화강암에 대한 변

형된 암석구조 연구를 통하여 상운면 지역 소백산육괴의 암석 및 지질구조는 원남층의 편마면 내지 편리면이 형성된 이후 적어도 네 번의 변형단계[(1) D1 변형: 등사습곡과 부딩구조, (2) D2 변형: 우수 주향이동 전단운동에 의해 형성된 신장선구조와 압쇄구조면 그리고 Z자형 비대칭습곡, (3) D3 변형: 경사-정이동 전단대와 S자형 비대칭습곡, (4) D4 변형: 완사 내지 개방형 경사습곡 내지 킹크 습곡]를 걸쳐 형성되었으며, 동북동-서남서 방향의 압축 지구조환경하에서 발생한 D4 습곡작용은 상운면지역 북동-남서 방향의 지구조선과 동-서 방향의 지구조선 형성과 밀접한 관련성이 있음을 보고한 바가 있다. 그러나, 본 연구결과 D3 횡외습곡작용 이후 영양-울진지역에는 장군봉지역과 상운면 지역에서 인지되는 동북동-서남서 압축응력에 의한 구조요소들은 거의 관찰되지 않고 북북서-남남동 압축응력에 의한 구조요소들이 광역적으로 관찰된다. 이는, 소백산육괴의 동부에 위치한 영양-울진지역은 D3 횡외습곡작용 이후 북북서-남남동 압축응력에 의한 변형을 주로 수용한 반면에 장군봉지역과 상운면지역 소백산육괴에서는 동북동-서남서 방향의 압축응력을 주로



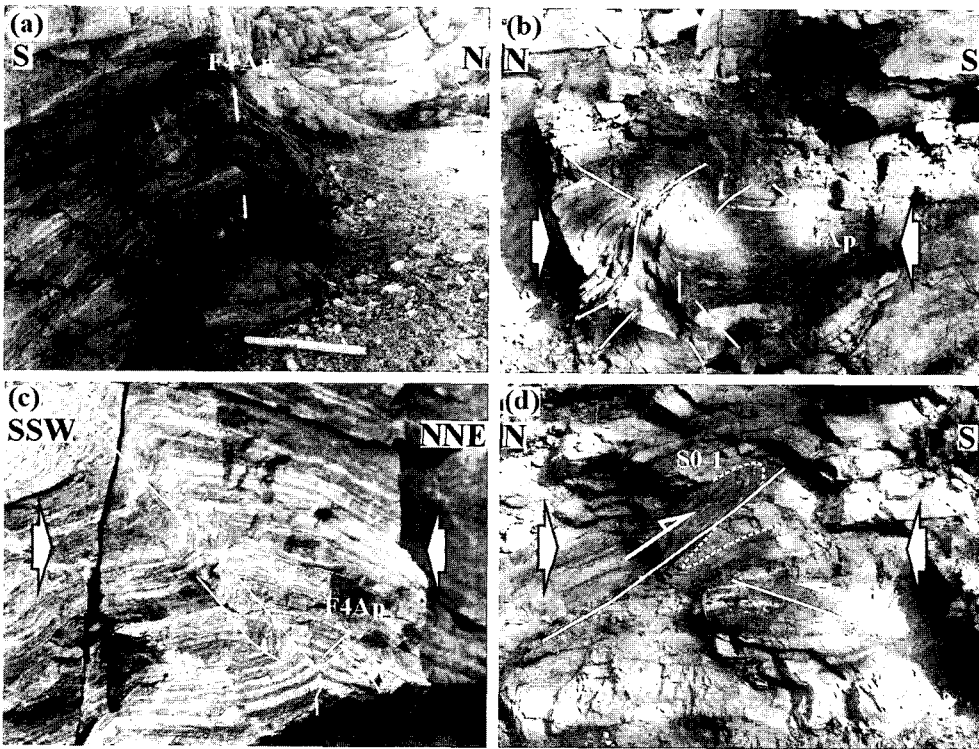


Fig. 8. Outcrop photographs of major D4 structures in the study area. (a) Upright open fold. (b) Asymmetric conjugate kink fold. (c) Thrust fault developing along the axial plane of conjugate kink fold. (d) Drag fold accompanied with conjugate thrust faulting.

수용한 결과로 해석되며, 그 원인과 이들 변형작용에 대한 선후관계 등은 추후 종합적인 연구가 요구된다.

최근, 김남훈 외(2002)는 평해-울진지역에 광범위하게 산출하는 암쇄암의 형성시기를 알아보기 위해 전단운동의 정도가 극심하여 거의 비정질화 되어 있는 시료에 대한 K-Ar 연대측정을 실시하였다. 그 결과,  $122.8 \pm 1.8(1\sigma)$ 와  $89.9 \pm 1.8(1\sigma)$ Ma의 절대연령 측정값을 구하고, 이 지역 암쇄암화작용의 시기를 백악기로 설정한 바가 있다. 그러나, 이러한 연구결과는 강지훈 외(1998), 강지훈과 김형식(2000) 등의 기존 연구결과와 다르다.

강지훈 외(1998)는 장군봉지역 고생대 변성퇴적암류와 중생대 춘양화강암에 대한 미구조 및 변형작용과 변성광물들 성장 사이의 상대적인 시간관계 연구를 통하여 고생대 변성퇴적암류는 저압형 매몰변성작용, 중압형 변형작용, 저압형 접촉변성작용 등의 발생순서로 적어도 세 번의 변성작용을 경험하였으며, 비변형/저변성 조건하에서 속성엽리 형성과 관련되어 출현하는 스택스상 저압형 변성광물(Craig *et al.*, 1982; Gregg, 1986; Passchier and Trouw, 1996의 p. 153-196)이 S1

엽리에 포획되어 산출되는 미구조로부터 장군봉지역 저압형 매몰변성작용은 평안충군 동수곡층이 퇴적된 페름기 이후-D1 등사습곡작용 이전의 비변형조건하에서 발생하였음을 지적한 바가 있다. 또한, 그들은 춘양화강암에 의한 접촉변성광물의 맨틀부가 전기 F3 미습곡 자취를 포획하고 후기 F3 미습곡 자취에 의해 포획되는 미구조로부터 장군봉지역 D3 개방형 횡와 습곡작용은 춘양화강암의 관입 후기단계에 발생하였음을 지적한 바가 있다. 강지훈 외(1998)과 강지훈과 김형식(2000)은 동서 방향의 예천전단대 형성과 관련된 D2 연성전단변형의 흔적이 중생대 춘양화강암에서 관찰할 수가 없고 D2 연성전단변형에 의해 재결정된 세립 석영립들이 춘양화강암의 접촉부로 갈수록 열변성작용에 의해 조립화되는 반면에 상운면지역 중생대 각섬석 화강암에서는 D2 연성전단변형에 의한 암쇄구조면이 관찰됨을 지적하고, D2 연성전단변형의 상대적인 발생시기를 상운면지역 각섬석 화강암의 관입 이후-장군봉지역 춘양화강암[ $136 \pm 4.2$ - $147 \pm 4.5$  Ma(K-Ar 백운모 연대: 이현구 외, 1992)]의 관입 이전으로 제한한 바가 있다.

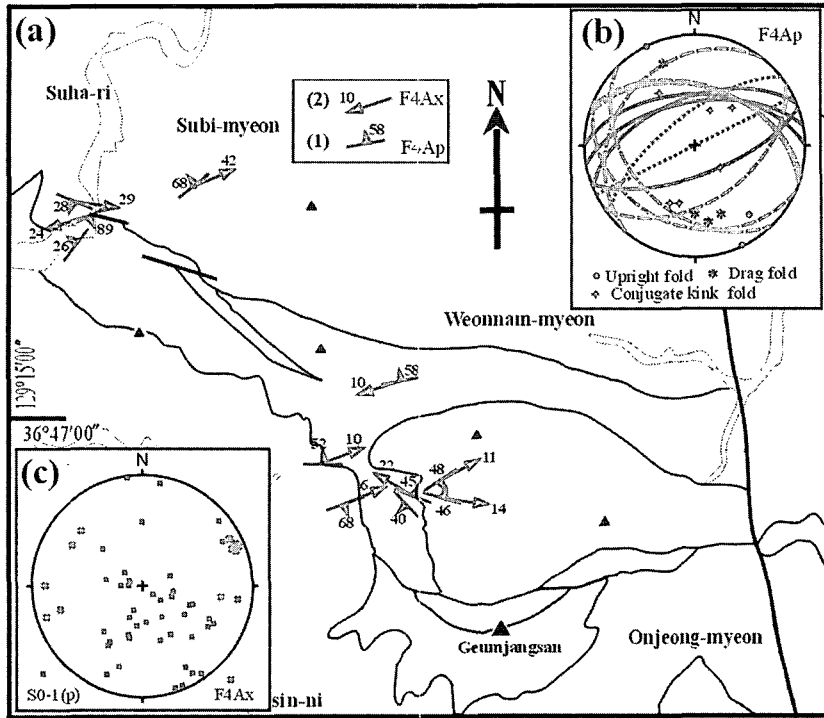


Fig. 9. (a) Orientation of F4 structural elements. (b) Stereoplote of poles to the axial plane of F4 fold. (c) Characteristic orientation of poles to S0-1 foliation dispersed by F4 folding. Lower-hemisphere equal-area projection.

따라서, 본 연구지역 동-서 방향의 연성전단대가 장군봉지역을 지나 상운면 지역으로 연장됨이 확실시되고(Fig. 1b), 본 연구지역의 변형단계별 암석구조 발달사 및 구조적 특성이 장군봉지역과 상운면지역의 변형단계별 암석구조 발달사 및 구조적 특성과 거의 일치함을 고려해 볼 때, 본 연구지역의 D1 변형은 장군봉지역 평안층군의 동수곡층이 퇴적된 페름기 이후, 압쇄암 형성과 관련된 D2 연성전단변형은 상운면지역 각섬석 화강암의 관입 이후-장군봉지역 춘양화강암의 관입 이전, D3 변형은 춘양화강암의 관입 후기단계에 각각 발생되었음을 유추할 수 있다. 그리고 쿨라판과 태평양판의 상호작용과 관련된 남북 방향과 동서 방향의 압축 지구조환경하에서 백악기 경상분지의 형성 및 발달(Hilde *et al.*, 1977; 황재하, 1994; Choi, 1998; Choi *et al.*, 2002) 등을 고려해 볼때, 연구지역의 북북서-남남동 압축에 의한 D4 변형구조와 장군봉지역과 상운면지역의 동북동-서남서 압축에 의한 D4 변형구조는 백악기 경상분지의 형성 및 발달과 관련된 지구조운동의 결과로 해석되며, 김남훈 외(2002)의 연대측정의 결과와 강지훈 외(1998), 강지훈과 김형식(2002)의 연구결과가 서로 다른 이유에 관해서는 추가적인 연구가 요구된다.

## 결론

경북 영양-울진지역에서 소백산속괴의 지구조 발달 과정을 규명하기 위해 선캠브리아기 변성암류에 대한 상세한 야외지질조사를 실시하였다. 그 결과, 장군봉지역 동서 방향의 예천전단대는 연구지역으로 연장됨이 확인되고, 이 지역에는 압쇄암화작용과 북북서-남남동 압축작용에 의해 형성된 변형 암석구조가 광범위하게 관찰되었다. 이들 주요 변형구조의 기하학적·운동학적 특성과 중첩된 변형구조들의 선후관계로부터 밝혀진 영양-울진지역 선캠브리아기 변성암류의 변형단계별 암석구조 발달사 및 구조적 특성과 기존 연구결과(강지훈 외, 1997, 1998; 강지훈과 김형식, 2000)로부터 유추된 이들 각 변형단계의 상대적인 발생시기를 요약해 보면 다음과 같다.

1. D1 변형단계는 동-서 방향의 준 수평적인 습곡축과 북쪽으로 고각 경사하는 습곡측면을 갖는 등사습곡형성기로서, 이러한 변형작용은 장군봉지역 평안층군의 동수곡층이 퇴적된 페름기 이후에 발생하여 연구지역에 서북서-동남동 방향의 광역엽리를 형성시켰다.
2. D2 변형단계는 광역엽리면의 상부가 동쪽으로 이

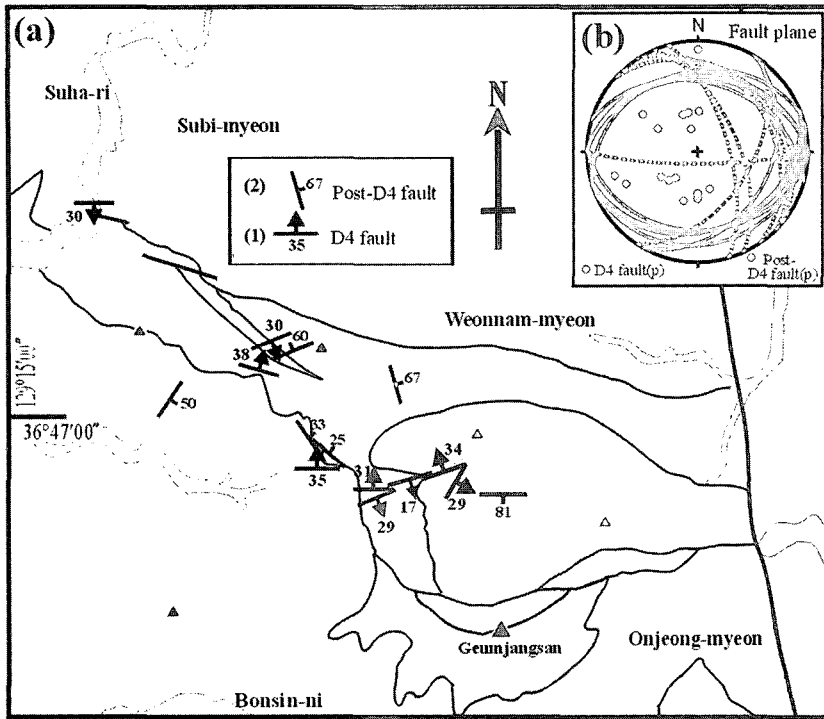


Fig. 10. (a) Orientation of D4 fault plane and post-D4 fault plane. (b) Stereoplote of their poles. Lower-hemisphere equal-area projection.

동하는 우수 주향이동 연성전단운동에 의해 동서 방향의 신장선구조, Z자형 비대칭습곡, S-C 압쇄구조면이 형성되는 시기로서, 예천전단대 형성과 관련된 D2 변형작용은 상운면지역 중생대 각섬석 화강암이 관입된 이후-장군봉지역 중생대 춘양화강암이 관입되기 이전에 발생하였다.

3. D3 변형단계는 동서 방향의 준 수평적인 습곡축과 저각-경사하는 습곡축면을 갖는 개방 내지 키크형 횡외습곡 형성기로서, 이러한 변형작용은 장군봉지역 중생대 춘양화강암의 관입 후기단계에 발생하였다.

4. D4 변형단계는 북북서-남남동 방향의 압축 지구조 환경하에서 동북동-서남서 방향의 준 수평적인 습곡축을 갖는 대칭 개방 직립습곡, 비대칭 공역성 키크 습곡, 공역성 층상단층과 이에 수반된 끝림형 습곡 형성기로서, 이러한 변형구조는 경상분자의 형성 및 발달과 관련된 백악기 지구조운동의 결과로 형성되었다.

사 사

이 논문은 2002학년도 안동대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었다. 본 논문을 읽고 세심한 지적과

유익한 검토 의견을 제시해 주신 오창환, 손문 심사위원님께 감사드립니다.

참고문헌

강지훈, 김형식, 오세봉, 1997, 장군봉지역 선캠브리아대-고생대 변성퇴적암류의 지질구조-북부 소백산육괴의 중앙부 지역의 지각진화 와 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, 김형식, 2000, 봉화군 상운면지역에서 북부 소백산육괴의 지질구조 해석. 암석학회지, 9, 254-270.  
 김남훈, 송용선, 박계현, 2001, 평해-울진 지역 선캠브리아기 평해층과 원남층의 관계: 암석학, 지구화학, 변성작용 비교연구. 한국광물학회·한국암석학회 2001년 공동학술발표회 논문집, 124-127.  
 김남훈, 박계현, 송용선, 강지훈, 2002, 평해-울진 지역 선캠브리아기 기성통의 부재 및 평해통과 원남통의 관계에 대한 소고. 암석학회지, 11, 271-277.  
 김옥준, 홍만섭, 원종관, 박희인, 박양대, 김기태, 1963, 한국지질도(1:50,000) 평해도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 28 p.

- 김정환, 기원서, 1991, 화순탄전에 발달된 순창전단대의 구조적 특성. 지질학회지, 27, 642-655.
- 이병주, 김동학, 전경석, 1990, 한반도 남서부 영광읍부근 연성전단대의 변형특성 연구. 지질학회지, 26, 304-312.
- 이병주, 1992, 화순탄전 북부지역에서 우수향 연성주향이동 운동에 관련된 변형작용. 지질학회지, 28, 40-51.
- 이현구, 박노영, 이마이나오야, 1992, 장군 광산 주변의 지질과 변성 작용. 이석 남기상선생 논문집, 21-44.
- 장태우, 한영민, 1989, 전주 부근 화강암의 연성변형작용에 관하여. 지질학회지, 25, 164-174.
- 장태우, 1994, 광주 전단대내 석영 분쇄암의 미구조에 관한 연구. 지질학회지, 30, 140-152.
- 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.
- 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.
- Craig, J., Fitches, W.R. and Maltman, A.J., 1982, Chlorite-mica stacks in low-strain rocks from Central Wales. Geological Magazine, 119, 243-256.
- Gregg, W.J., 1986, Deformation of chlorite-mica aggregates in cleaved psammitic and pelitic rocks from Islesboro, Maine, USA. Journal of Structural Geology, 8, 59-68.
- 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.
- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J., 1996, Microtectonics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 289p.
- 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 of the College of Arts and Sciences, University of Tokyo, 35, 181-210.

---

(2004년 10월 12일 접수; 2004년 11월 27일 채택)