

장군봉지역 선캄브리아대-고생대 변성퇴적암류의 지질구조 - 북부 소백산육괴의 중앙부지역의 지각진화와 환경지질 -

강지훈 · 김형식 · 오세봉

안동대학교 지구환경과학과, ¹고려대학교 지구환경과학과

요 약 : 북부 소백산육괴의 중앙부에 위치하는 장군봉지역(본 연구지역)은 선캄브리아대 변성퇴적암류(원남층과 울리층)와 고생대 변성퇴적암류[조선누층군(장산규암, 두음리층, 장군석회암)과 평안층군(동수곡층과 재산층)] 그리고 중생대 화강암류(춘양화강암) 등으로 구성되어 있다. 본 논문은 장군봉지역에서 북부 소백산육괴의 지질구조를 해석하기 위해 구성암류의 암석구조와 미세구조를 연구하였다. 그 결과 연구지역의 지질구조는 선캄브리아대 원남층의 편마면(S0)과 고생대 변성퇴적암류의 층리면(S0)이 형성된 이후 적어도 네 번의 변형단계(D2 연성전단변형 이전에 한 번의 습곡작용과 D2 연성전단변형 이후에 적어도 두 번의 습곡작용)를 거쳐 형성되었음을 알게 되었다. 첫 번째 변형(D1 변형)은 동-서 방향의 준 수평적인 습곡축(L1)과 동-서 주향에 북쪽으로 고각 경사하는 습곡축면(S1)을 갖는 밀착 등사습곡(tight isoclinal fold) (F1 습곡)을 형성시켰다. 두 번째 변형(D2 변형)은 전단엽리면(S2)의 상부가 동쪽으로 이동한 전단감각(top-to-the east shear sense)을 보이는 우수 주향 이동성 대규모 연성전단운동 발생기로서 이러한 D2 연성전단변형에 의해 신장선구조(L2)가 S2 전단엽리면에 형성된다. 세 번째 변형(D3 변형)은 동-서 방향의 준 수평적인 습곡축(L3)과 동-서 주향에 북쪽으로 저각 내지 중각 경사하는 습곡축면(S3)을 갖는 열린 경사습곡(open inclined fold) (F3 습곡)을 형성시켰다. 그 결과 원래 북쪽으로 경사하는 S1 엽리면은 F3 습곡의 한쪽 날개부에서 남쪽으로 경사하게 되고, 원래의 D2 전단감각은 재 배열된 남쪽 경사 S1 엽리면상에서 상부가 서쪽으로 이동한 전단감각을 보이게 된다. 네 번째 변형(D4 변형)은 북북서 내지 북서 방향으로 침강하는 습곡축(L4)과 남서 방향으로 경사하는 습곡축면(S4)을 갖는 북동 버전스의 비대칭형 열린 경사습곡(F4 습곡)을 형성시켰다. 그 결과 동-서 방향성을 보이는 D4 변형 이전의 구조요소들은 부분적으로 남-북 방향성으로 재배열된다. 이러한 변형의 효과는 고생대 변성퇴적암류에서 주로 인지된다.

핵심어 : 북부 소백산육괴, 밀착 등사습곡, 연성전단변형, 신장선구조, 열린 경사습곡

서 론

옥천대와 경상분지에 의해 각각 그의 북서부와 남동부가 경계져 있는 영남육괴는 점촌지역을 중심으로 그의 북동부에 해당하는 소백산지구(북부 소백산육괴)와 그의 남서부에 해당하는 지리산지구(남부 소백산육괴)로 구분된다(cf. Reedman and Um, 1975; Na, 1987). 북부 소백산육괴의 중앙부에 위치하는 경상북도 봉화군 장군봉지역(본 연구지역)(Fig. 1)은 북부 소백산육괴의 주요 구성암류에 해당하는 선캄브리아대 편암 및 편마암 복합체(원남층과 울리층)와 고생대 변성퇴적암류(조선누층군과 평안층군) 그리고 중생대 화강암(춘양화강암) 등이 분포한다(김옥준 외, 1963; Reedman and Um, 1975; 황덕환과 Reedman, 1975; 이현구, 1980; Imai *et al.*, 1982; 이상만과 김형식, 1984;

Na, 1987; 이현구 외, 1992; 안건상 외, 1993; 양판석과 조문섭, 1995). 이러한 구성암류의 분포는 연구지역의 지질 및 지체구조가 광역변성작용, 조구조운동 그리고 화성활동 등과 밀접한 연관성을 가지고 있음을 의미한다.

연구지역의 구성지층군에 대한 층서적 상하관계는 삼근리도폭(김옥준 외, 1963)에서 선캄브리아기의 원남통(원남층, 동수곡층, 장군석회암, 두음리층)-부정합-울리통-부정합-캠브리아기의 조선계(장산규암)-부정합-페름기의 평안계(재산층) 등으로 설정한 바가 있다. 그러나 황덕환과 Reedman (1975), 이현구(1980), Imai 외.(1982), 안건상 외(1993), 양판석과 조문섭(1995) 그리고 김기영 외(1996) 등 다수의 연구자들은 원남통의 동수곡층(평안계), 장군석회암 그리고 두음리층(조선계)을 고생대 지층으로 해석하여 연구지역의 주요 지질구

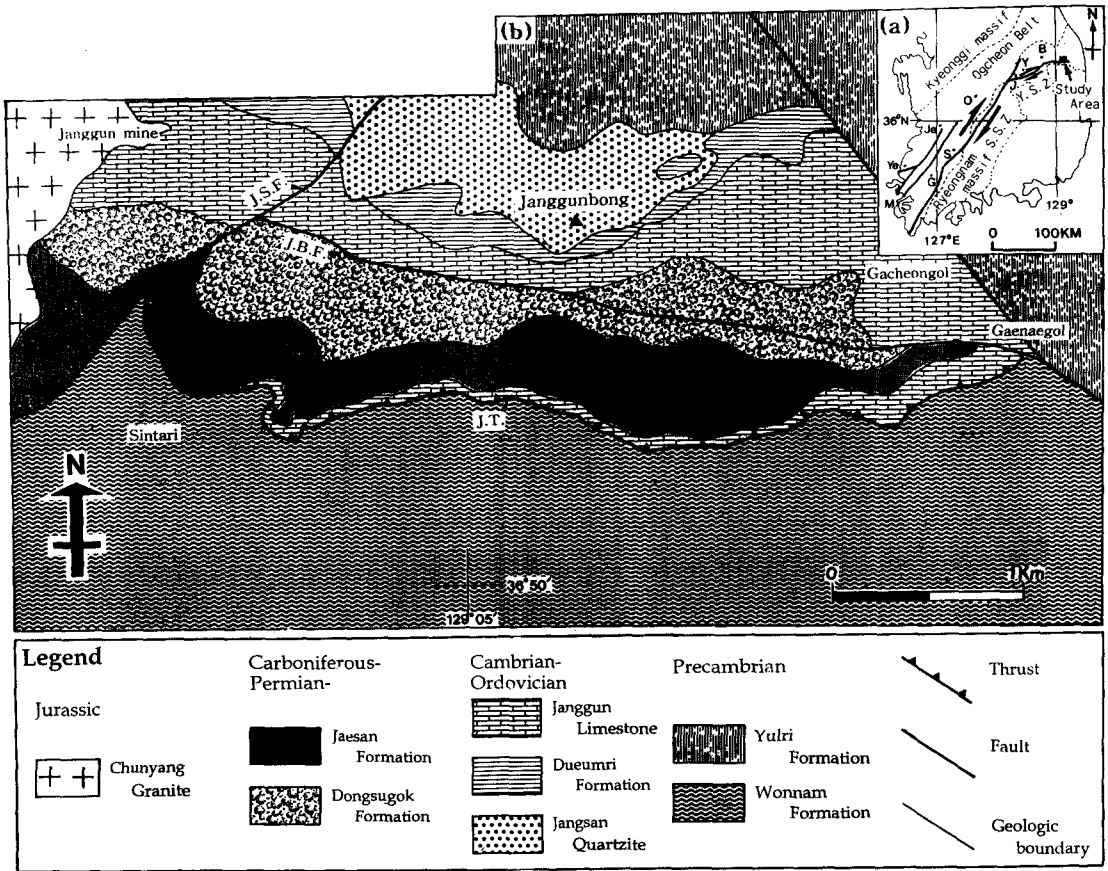


Fig. 1. (a) Index map showing the locality (arrow mark) of the study area. B : Bonghwa, G : Gwangju, J : Jeumchon, Je : Jeonju, M : Mokpo, O : Ogcheon, S : Sunchang, Y : Yecheon, Ye : Yeonggwang, S.S.Z. : Sunchang shear zone, Y.S.Z. : Yechon shear zone [adapted from KIGAM(1995)]. (b) Geological map of the study area [modified from Kim *et al.* (1963)]. J.S.F. : Jaesan fault, J.B.F. : Janggunbong fault, J.T. : Jaesan Thrust.

조를 중앙부에 분포하는 평안층군을 축부로 하는 동-서 방향의 역전된 직립등사 향사(upright isoclinal syncline) 구조로 해석한 바가 있다.

일반적으로 광역변성작용, 조구조운동 그리고 화성활동 등을 수반하는 조산대 지역에서 지체구조 형성과 관련된 지구조-변성 진화과정을 충분히 이해하기 위해서는 구성암류에 대한 지질 및 암석구조 발달사(변형작용사), 변성광물의 성장(변성작용)과 변형작용 사이의 상대적 시간관계(지구조-변성사), 각 변성단계와 각 변형단계의 온도-압력조건 그리고 지구조-변성사와 화성활동사 사이의 상대적 시간관계 등과 같은 종합적인 연구가 수행되어야만 한다고 생각된다. 그러나 연구지역에서 최근까지의 연구는 춘양화강암 관입과 관련된 접촉변성작용(이현구, 1980; Imai *et al.*, 1982; 이현구 외,

1992; 안건상 외, 1993), 고생대 변성퇴적암류의 다변성작용(양판석과 조문섭, 1995), 선캄브리아대-고생대 변성퇴적암류의 다변성작용(김기영 외, 1996) 등과 같이 연구지역에서 발생된 주요 변성작용의 특성과 각 변성단계의 온도-압력조건을 규명하려는 변성암석학적인 연구가 주로 수행되어 왔을 뿐 구성암류에 대한 지질 및 암석구조 발달사, 변성작용과 변형작용사이의 상대적 시간관계를 밝히기 위한 종합적이고 구체적인 연구는 미흡하였다고 판단된다.

따라서, 본 연구는 북부 소백산육괴의 주 구성암류가 분포하고 이들 구성암류 사이의 지질학적인 관계를 직접 조사할 수 있는 장군봉지역에서 북부 소백산육괴의 지구조-변성 진화과정을 파악하기 위한 기초연구로서 우선 장군봉지역의 구성암류에 대한 상세한 미세구조와 암석구조에 대한 연계 연구

를 통하여 장군봉지역 북부 소백산육괴의 지구조 발달과정을 밝히려고 한다. 그리고 연구지역에서의 변형작용과 변성작용 및 지구조-변성사와 화성활동사 사이의 상대적 시간관계에 대한 연구내용은 추후에 발표하고자 한다.

지질 및 암석기재

삼근리도곡(김옥준 외, 1963)의 남부 일부 영역을 접하고 있는 연구지역은 선캄브리아대의 변성퇴적암류(원남층과 울리층)와 고생대 변성퇴적암류(조선누층군과 평안층군) 그리고 중생대 화강암류(춘양화강암) 등으로 구성되어 있다(Fig. 1b). 이들 선캄브리아대-고생대 변성퇴적암류는 대체로 동-서 방향의 대상 분포를 보이고 있으며, 고생대의 변성퇴적암류는 연구지역의 중서부에 분포하는 춘양화강암[$136 \pm 4.2 - 147 \pm 4.5$ Ma(K-Ar 백운모 연대: 이현구 외, 1992)]에 의해 관입되어 있다(Fig. 1b). 지질도상에서 인지될 수 있는 주요 단층은 북동-남서 방향의 재산단층(김옥준 외, 1963), 북서-남동 방향의 단층(김기영 외, 1996)(개내골단층), 그리고 동-서 방향의 장군봉단층(김옥준 외, 1963)과 재산드러스트(양관석과 조문섭, 1995; 김기영 외, 1996) 등이 있다(Fig. 1b).

연구지역의 남부에 분포하고(Fig. 1b) 원남통의 최하부층(윤석규와 신병우, 1963)과 태백산 편마암 복합체(이상만과 김형식, 1984)에 대비되는 원남층은 주로 이질암 내지 사질암 기원의 편마암류로 구성되어 있고 각섬석 편(마)암을 부분적으로 협재한다. 편마암류는 서부 영역에서 주로 산출되는 화강암질 편마암과 동부 영역에서 우세하게 나타나는 호상 편마암과 안구상 편마암 등으로 야외에서 구분된다. 이들 편마암류는 주로 정장석, 사장석, 미사장석, 석영, 석류석, 흑운모, 백운모 등으로 구성되어 있고 소량의 규선석, 인회석, 저어콘, 녹니석, 불투명광물 등을 함유한다. 각섬석 편(마)암은 주로 앵페보올, 사장석, 정장석 등으로 구성되어 있으며 소량의 석영과 불투명광물을 포함한다. 야외에서 인지되는 원남층의 주요 암석구조는 동-서 방향의 밀착 직립등사 습곡과 주로 신장된 석영 및 장석의 정형배열에 의해 인지되는 동-서 방향의 신장선 구조가 있다.

연구지역의 북부와 동부에 분포하고(Fig. 1b) 울리층(김옥준 외, 1963)과 태백산 편암 복합체(이상만과 김형식, 1984)에 대비되는 울리층은 주로 사질암 내지 이질암 기원의 천매암과 편암으로 구성

되어 있다. 북부의 울리층은 조선누층군의 구조적 상위에 분포하고 동부의 울리층은 조선누층군과 단층으로 접촉하고 있다. 울리층을 구성하고 있는 암석들은 주로 백운모, 석영, 녹니석, 흑운모, 불투명광물 등으로 구성되어 있고 종종 홍주석, 석류석, 십자석 등이 반상변정으로 관찰되나 이들 광물은 가상 내지 잔류반정으로 인지되는 경우가 많다.

원남층의 구조적 상위에 소규모로 분포하고 북부 울리층의 구조적 하위에 다량으로 분포하는 조선누층군은 구조적 상부로부터 장산규암, 두음리층, 장군석회암으로 되어 있다(Fig. 1b). 이현구(1980)는 장산규암과 두음리층에서 나타나는 일차적 퇴적구조(역들의 분포와 분급층리)로부터 조선누층군의 구조적 상부층이 층서적 하부층에 해당함을 제안한 바가 있다. 장산규암은 주로 석영 사질암 기원의 우백색 내지 담황색의 규암과 석영 편암으로 구성되어 있고, 경하에서는 백운모, 견운모, 흑운모, 녹니석 등이 소량 관찰된다. 이들 암석은 풍화에 강해 지형적으로 돌출된 급사면을 형성하고 있다. 두음리층은 주로 이질암 기원의 암갈색 내지 담황색의 천매암과 편암으로 구성되어 있고 변성사질암과 결정질 석회암을 부분적으로 협재한다. 변성이질암의 주 구성광물은 흑운모, 백운모, 홍주석, 십자석, 석류석, 석영, 규선석, 녹렴석 등으로 되어 있고 소량의 녹니석, 전기석, 불투명광물 등이 관찰된다. 장군석회암은 탄산염질암 기원의 결정질 석회암으로 주로 구성되어 있고 변성이질암, 변성사질암 그리고 변성염기성질암을 협재한다. 변성탄산염질암은 주로 고회석과 방해석으로 구성된 암석으로서 회백색을 띠며 규질 염층과 종종 호층을 이룬다. 평안층군(동수곡층)의 구조적 상부에 분포하는 장군석회암은 기존 연구결과(cf. 김옥준 외, 1963)와 달리 가천골에서도 다량으로 산출됨이 본 연구를 통해 확인되었고, 평안층군(재산층)의 구조적 하부에 소규모로 산출되는 개내골 부근의 장군석회암은 본 연구결과 신타리까지 평안층군의 재산층과 원남층 사이에 연장성 있게 분포됨이 확인되었다(Fig. 1b)와 cf. 김옥준 외, 1963).

연구지역의 중앙부에 분포하고 있는 평안층군은 구조적 상부로부터 동수곡층, 재산층 순으로 되어 있다(Fig. 1b). 동수곡층은 주로 이질암 기원의 암갈색 내지 담갈색의 편암으로 구성되어 있으며 변성사질암과 변성염기성질암을 협재한다. 변성이질암의 주 구성광물은 흑운모, 홍주석, 십자석, 석류석, 섬유상 규선석, 클로이토이드, 석영, 백운모 등

으로 되어 있고 소량의 녹렴석, 녹니석, 전기석, 불투명광물 등이 관찰된다. 홍주석, 십자석, 석류석은 보통 거정의 반상변정으로 야외에서 발견된다. 함탄층을 협재하고 평안계의 사동통(김옥준 외, 1963; 이현구, 1980)에 대비되는 재산층은 주로 암회색 내지 담회색의 운모편암과 석영편암으로 구성되어 있으며 흑색 세일과 변성사질암을 부분적으로 협재한다. 운모편암은 동수곡층의 변성이질암과 유사한 광물조성을 보이고 구성광물들의 조직상의 특징 역시 유사하다. 석영편암은 석영, 백운모, 견운모 등으로 주로 구성된 암석으로서 주로 신장된 석영의 정향배열은 탁월한 신장선구조를 형성하고 있다. 야외에서 인지되는 고생대 변성퇴적암류의 주요 암석구조는 동-서 방향의 밀착 직립 등사습곡과 파랑습곡(crenulated fold)을 수반하는 동-서 방향의 열린 경사습곡(open inclined fold) 그리고 북동 버전스의 열린 경사습곡 등이 있다.

변형작용사

구성암류에 대한 암석구조와 미세구조 연구결과, 연구지역의 지질구조는 선캠브리아대 원남층의 편마면(S0)과 고생대 변성퇴적암류의 층리면(S0)이 형성된 이후 적어도 네 번의 변형단계를 거쳐 형성되었음을 알 수 있다. 따라서 본 연구는 이러한 네 번의 변형단계를 그 상대적인 발생순서에 따라 D1

변형, D2 변형, D3 변형, D4 변형 등으로 구분하였고, 이러한 네 번의 중첩된 변형구조의 특성은 선캠브리아대 원남층과 고생대 변성퇴적암류에서 뚜렷이 구분되므로 이들 구성암류를 중심으로 연구지역의 암석구조와 미세구조를 기재한다. 아래에 기재된 암석구조와 미세구조로부터 네 번의 변형단계를 구분한 근거와 네 번의 변형단계를 거쳐 형성된 지질구조에 대해서는 본 논문의 해석과 토의 부분에서 설명하고자 한다.

D1 변형

선캠브리아대 지층

S0 편마면이 습곡되어 형성된 F1 습곡은 일반적으로 동-서 방향의 준 수평적인 습곡축(L1)과 동-서 주향에 북쪽으로 경사하는 습곡축면(S1)을 갖는 밀착 등사습곡 형태로 연구지역의 원남층에서 종종 암석규모로 관찰된다(Fig. 2a, 2b). F1 습곡축면과 S0 편마면은 그의 축부에서 고각으로 사교하나 그의 양쪽 날개부에서는 거의 평행함을 보여준다. 보다 심하게 쪼인 원남층의 F1 습곡(Fig. 2b)에서는 그의 축부조차 인지하기 어렵고 그의 양쪽 날개부의 S0 편마면은 F1 습곡축면으로 완전히 전위(transposition)되어 하나의 편마면(S0-1)으로 인지된다. 원남층에서 이러한 F1 습곡의 기하학적인 양상(Fig. 2a, 2b)은 원남층의 F1 습곡축면과 편마면

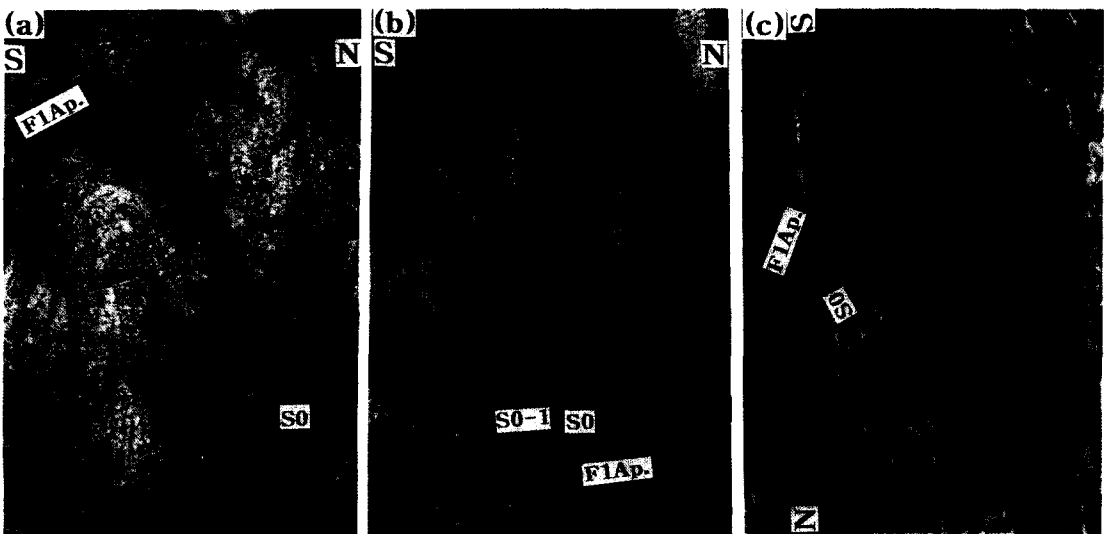


Fig. 2. Photographs of tight isoclinal fold related to D1 deformation in the Janggunbong area. (a-b) The Wonnam Formation. In more tight isoclinal fold (arrow mark in b) S0 foliation is completely transposed into S1 foliation(F1Ap.), forming a composite S0-1 foliation. (c) The Janggun Limestone of the Joseon Supergroup.

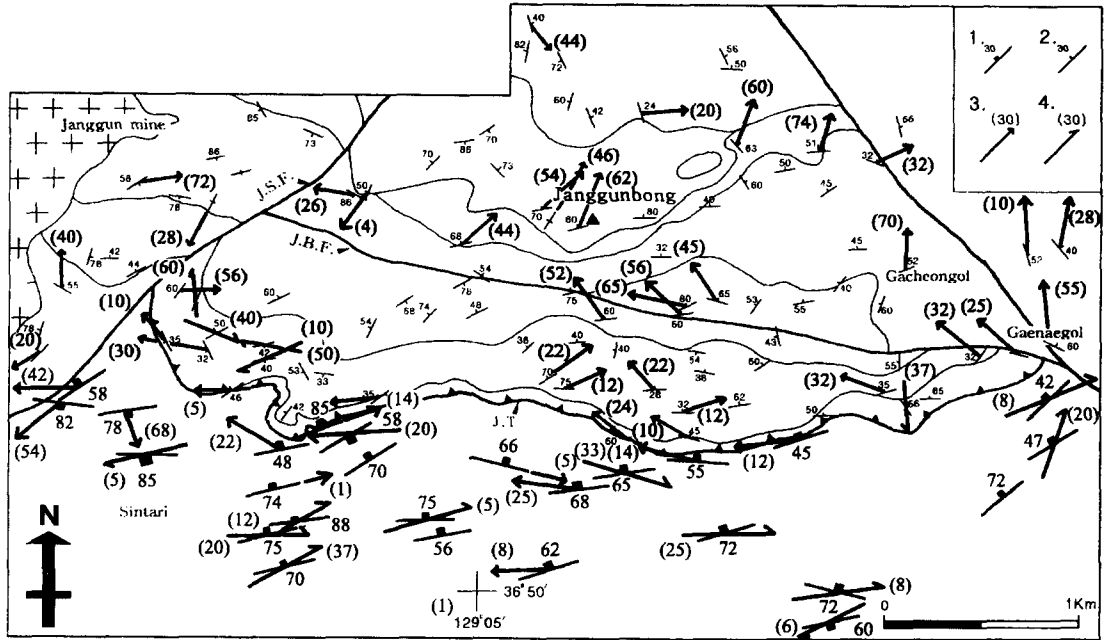


Fig. 3. Orientation of structural elements related to D1(1-2) and D2(3-4) deformations in the Janggungbong area. 1 : S0-1 foliation in the Wonnam Formation. 2 : S1 foliation. 3-4 : Bearing and plunge(number : the angle and the direction of plunge) of L2 stretching lineation[3 : stretching lineation not showing indicator of the shear sense, 4 : stretching lineation showing indicator of the shear sense (arrow direction: the direction of relative motion of the upper block)]. Note : top-to-the east shear sense on the north-dipping foliation and top-to-the west shear sense on the south-dipping foliation.

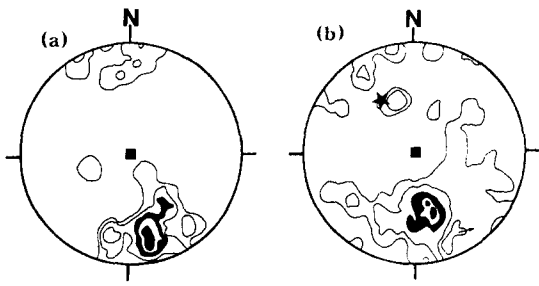


Fig. 4. Stereoplots(equal-area, lower-hemisphere projections) of foliation related to D1 deformation in the Janggungbong area. (a) S0-1 data in the Wonnam Formation[n=39(number of data) and contours at 1-3.5-7-10-15% per 1% of area]. (b) S1 data in the Paleozoic metasedimentary rocks(n=154 and 1-2.5-5-7-8.5%) (star mark : π -axis).

자세는 거의 일치함을 지시한다. Fig. 3의 원남층에서는 이러한 편마면의 방향성을 도시하였고 이들 편마면 극점들에 대한 등면적망 투영그림은 Fig. 4a와 같다. 그 결과 원남층에서의 F1 습곡축

면은 일반적으로 동-서 주향에 북쪽으로 고각 경사하는 것이 우세하게 나타나고 동-서 주향에 남쪽으로 고각 경사하는 것이 부수적으로 나타난다.

고생대 지층

S0 층리면이 습곡되어 형성된 F1 습곡은 선캠브리아대 원남층에서와 같이 밀착 등사습곡 형태로 연구지역의 고생대 변성퇴적암류에서 일반적으로 관찰된다(Fig. 2c). 고생대 변성퇴적암류에서는 이러한 F1 습곡작용으로 그의 측면자취(F1Ap)에 새로운 엽리면 S1이 형성되는데(Fig. 8b, 8c), Fig. 3의 고생대 변성퇴적암류에서는 이러한 S1 엽리면의 방향성을 도시하였고, 이들 S1 엽리면 극점들에 대한 등면적망 투영그림은 Fig. 4b와 같다. 그 결과 S1 엽리면은 원남층의 편마면의 방향성과 같이 동-서 주향에 북쪽으로 경사하는 것이 우세하게 나타나고 남쪽으로 경사하는 것이 부수적으로 나타난다. 그러나, 고생대 변성퇴적암류의 S1 엽리면은 원남층의 편마면의 고각 경사(Fig. 4a)와 달리 중각 경사가 우세하게 나타나고 그의 극점 배열은 다소

분산된 방향성을 보인다(Fig. 4b). 이러한 분산된 S1 극점 배열은 30°/315° 방향의 π -축을 갖는 다소 미약한 π -원을 형성한다(Fig. 4b).

D2 변형

선캠브리아대 지층

D2 변형은 원남층의 편마암류에서 신장된 석영(집합체), 장석(집합체) 그리고 각섬석 등의 정향배열에 의해 정의되는 신장선구조(L2) 형성과 관련된 변형으로 이러한 L2 신장선구조는 원남층의 편마면상에서 탁월하게 관찰된다(Fig. 5a). 신장선구조의 자세는 원남층의 편마면 주향과 약 20° 이내의 각도를 이루는 동-서 방향의 선주향(bearing)과 저각의 선경사(plunge)를 보인다(Fig. 3).

L2 신장선구조에 평행하고 편마면에 수직한 동-서 단면상에서는 이들 신장 선구조가 연성전단변형과 관련되어 형성된 증거들과 연성전단변형 동안의 전단운동감각을 지시하는 증거들이 암석규모와 박편규모에서 흔히 관찰된다. 대표적인 전단운동감각 지시자들로서는 암석규모에서 장석 잔쇄반정들의 σ 형 비대칭 압영구조(Simpson and Schmid, 1983)(Fig. 5b)와 신장성 파랑엽리(extensional crenulation cleavage)(Platt and Vissers, 1980)(Fig. 5c) 등이 인지되며, 박편규모에서는 신장성 파랑엽리와 함께 물고기형 운모(mica fish)의 꼬리방향에 의해 정의되는 전단엽리(shear foliation) C면과 (001) 벽개면의 배열이나 채결정석영립의 형태신장방향에 의해 정의되는 압쇄엽리(mylonitic foliation) S면을 갖는 Type II S-C 구조(Lister and Snoke, 1984)(Fig. 6a), 신장성 파랑엽리와 함께 장석 잔쇄반정들의 synthetic 미끄럼 구조(Malavieille, 1989)(Fig. 6b), 전단면 C 면과 약 20°를 이루는 정상석 잔쇄반정 장축면(S면)을 따라 전단운동의 유한변형(finite strain)에 의해 성장된 미르메카이트 조직(사장석과 석영 연정)(Simpson, 1985)(Fig. 6c) 그리고 리본석영립이나 세립 채결정석영립의 형태신장방향(S면)과 S면의 불연속 전위면(displacement discontinuities)(C 면)으로 정의되는 Type I S-C 구조(Berthé *et al.* 1979; Lister and Snoke, 1984)(Fig. 6d) 등이 관찰된다.

그러나, 암석규모와 박편규모에서 이러한 구조요소들이 지시하는 전단운동감각은 Fig. 3에 도시된 바와 같이 원남층의 편마면 경사 방향에 좌우되어 편마면 상부의 상대적인 이동방향이 서로 반대로 나타나는 특징을 보여준다. 즉, 원남층에서 우세하게 나타나는 동-서 주향에 북쪽으로 고각 경사하는

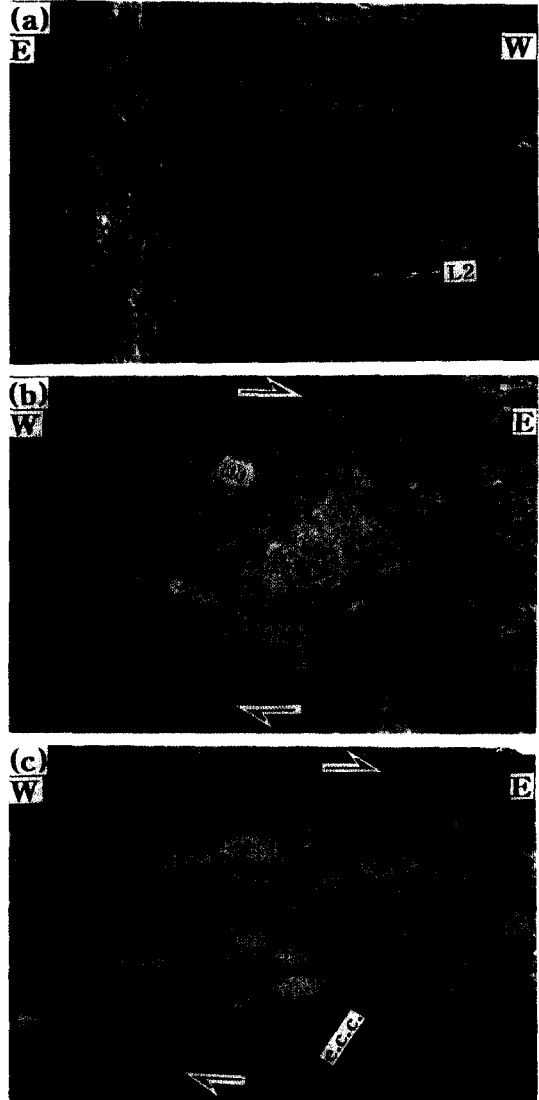


Fig. 5. Photographs of rock structures related to D2 deformation in the Wonnam Formation. (a) L2 stretching lineation(pencil direction) on the S0-1 foliation. (b) σ -type asymmetric pressure shadows indicating top-to-the-east shear sense. The S0-1 foliation dips north. (c) Extensional crenulation cleavage(e.c.c.) indicating top-to-the-east shear sense. The S0-1 foliation dips north.

편마면상에서는 일관성 있게 상부가 동쪽으로 이동하는 전단운동감각(Fig. 5b, 5c, 6a~6c)을 보여주는 반면에 동-서 주향에 남쪽으로 고각 경사하는 편마면상에서는 상부가 서쪽으로 이동하는 전단운동감각(Fig. 6d)을 보여준다.

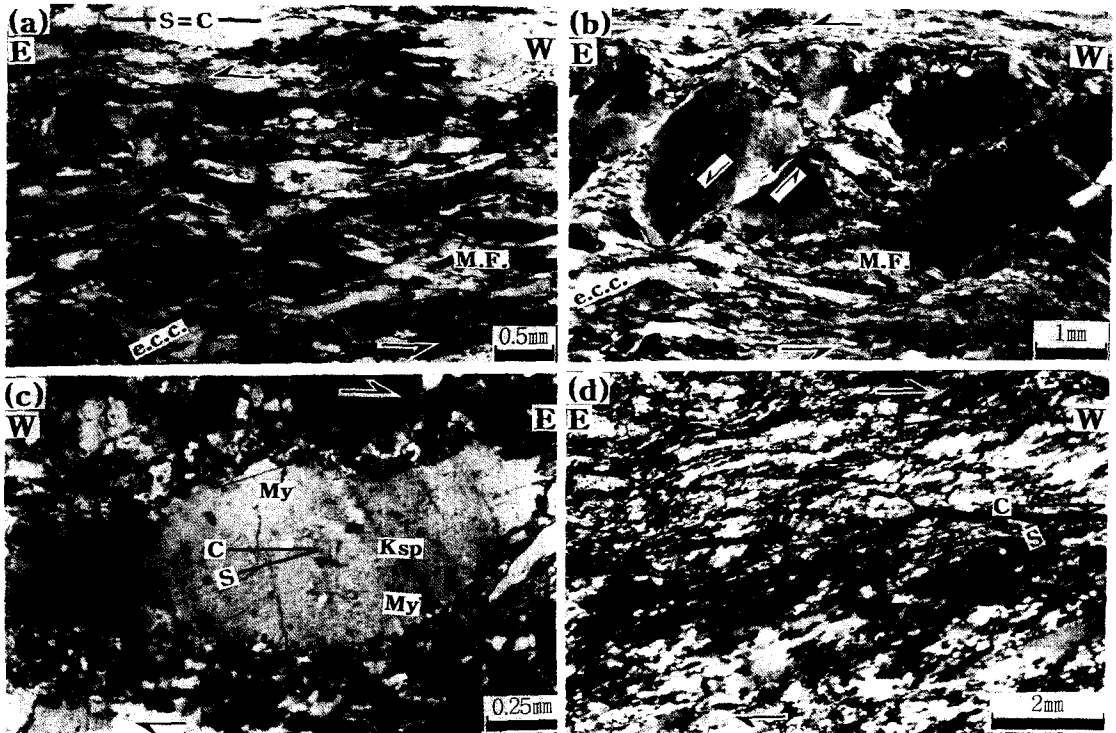


Fig. 6. Photomicrographs of microstructures related to D2 deformation in the Wonnam Formation. Thin-sections are cut perpendicular to the S0-1 foliation and parallel to the L2 stretching lineation. The foliation is parallel to the length of the photograph. The foliations of (a-c) dip north and the foliation of (d) dips south. All photographs are cross polars. (a) Muscovite fish(M.F.) of type II S-C microstructure with extensional crenulation cleavage(e.c.c.) indicating top-to-the-east shear sense. (b) Synthetic sliding of feldspar porphyroclasts with muscovite fish(M.F.) and extensional crenulation cleavage(e.c.c.) indicating top-to-the-east shear sense. (c) Type I S-C microstructure indicating top-to-the-east shear sense. Note: K-feldspar porphyroclast(Ksp) shows strain-related myrmekitic intergrowths (subround, bulbous, comma shape)(My) along the two sides (S-surfaces) of the porphyroclast that faces the finite shorting direction. (d) Type I S-C microstructure indicating top-to-the-west shearing. The S-surfaces are defined by elongate grain shape of ribbon quartz and recrystallized quartz and C-surfaces are by displacement discontinuities of the S-surfaces.

고생대 지층

D2 변형은 S1 엽리면상에서 주로 신장된 석영(집합체)의 정향배열에 의해 정의되는 신장선구조(L2)(Fig. 7a) 형성과 관련된 변형으로서 재산층내의 석영편암에서 탁월하게 인지된다. 고생대 변성 퇴적암류에서의 L2 신장선구조는 S1 엽리면의 방향성과 같이 다소 분산된 방향성을 보여주고 있으나, 그 신장선구조 L2의 선주향은 원남층의 L2 방향성과 같이 S1 엽리면의 주향과 약 30° 이내의 저각을 이루고 있다(Fig. 3).

S1 엽리면에 수직하고 L2 신장선구조에 평행한 단면상에서는 역시 이들 신장선구조가 연성전단변형과 관련되어 형성된 증거들과 연성전단변형 동안의 전단운동감각을 지시하는 증거들이 종종 관찰된

다. 대표적인 전단운동감각 지시자들로서는 클로이토이드의 물고기형 구조로 인지되는 Type II S-C 구조(Fig. 7b, 7c)와 십자석 반상변정 성장과 관련된 신장성 파랑엽리(Fig. 7d, 7e) 등이 인지된다. 이들 구조요소가 지시하는 전단운동감각은 원남층에서와 같이 북쪽으로 경사하는 S1 엽리면상에서는 상부가 동쪽으로 이동하는 전단운동(Fig. 7b, 7c)을 보여주는 반면에 남쪽으로 경사한 S1 엽리면상에서는 상부가 서쪽으로 이동하는 전단운동(Fig. 7d, 7e)을 보여준다(Fig. 3).

S1 엽리면에 수직하고 L2 신장선구조에 평행한 단면상에서는 고생대 변성퇴적암류의 십자석 반상변정의 Si(internal foliation: 내부 면구조 자취)와 Se(external foliation: 외부 면구조 자취) 사이에

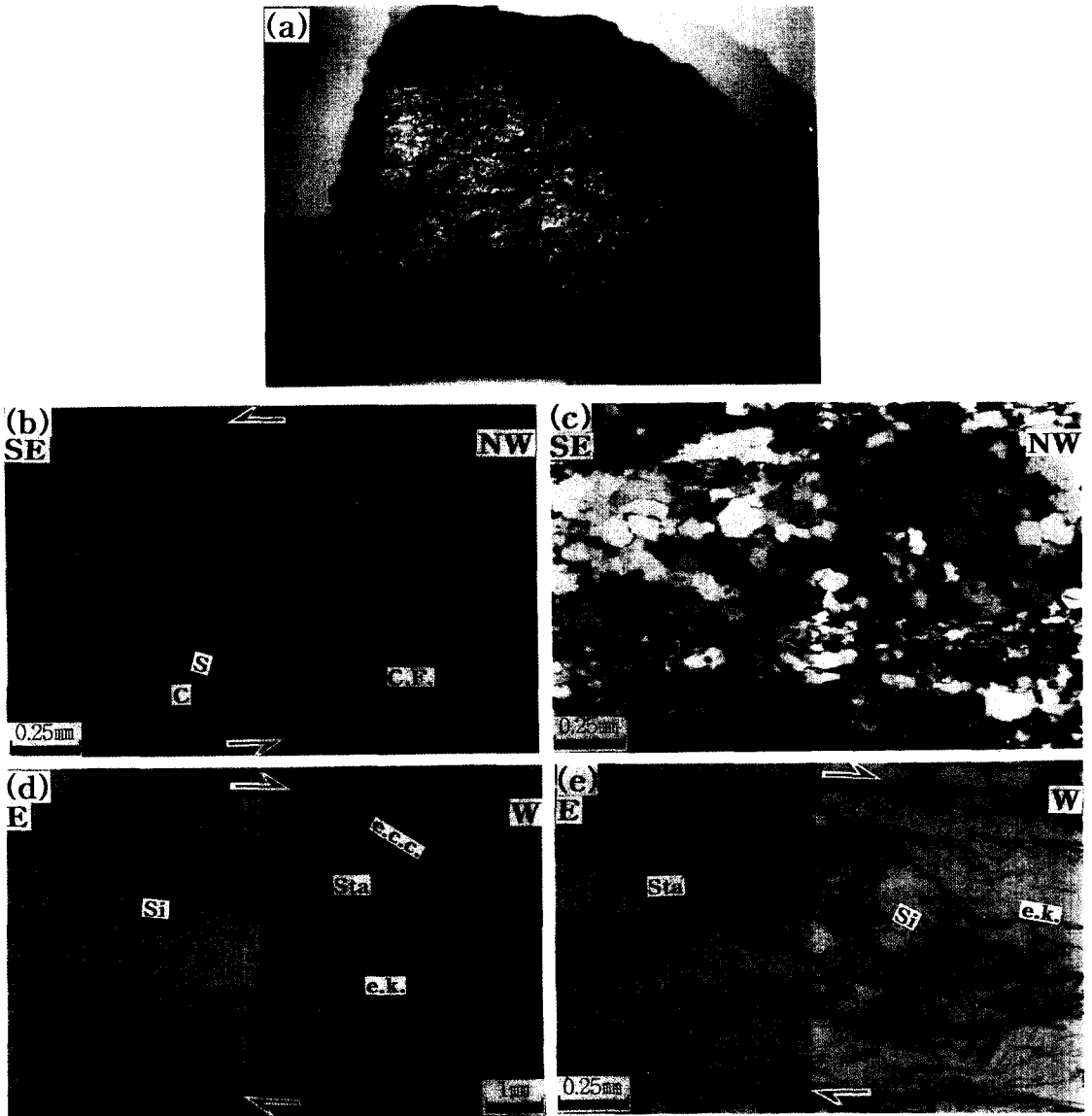


Fig. 7. Photograph of L2 stretching lineation on the S1 foliation (a) and photomicrographs of microstructures(b-e) related to D2 deformation in the Paleozoic metasedimentary rocks. Thin-sections are cut perpendicular to the S1 foliation and parallel to the L2 stretching lineation. (b) Chloritoid fish(C.F.) of type II S-C microstructure indicating top-to-the-southeast shear sense (the S1 foliation dips north). (c) Cross polar view of (b). (d-e) Synkinematic staurolite porphyroblast(Sta) with respect to D2 deformation(note : the continuity of Si and Se, the sigmoidal Z-shaped Si indicating top-to-the-west shear sense, extensional crenulation cleavage(e.c.c.) in Se indicating top-to-the-west shear sense, extension crack(e.k.) perpendicular to Se within the staurolite, the Se dips south).

특징적인 미세구조가 관찰된다(Fig. 7d, 7e). 주로 신장된 석영배열로 인지되는 십자석 반상변정의 Si는 Z자형 곡선 형태로 Se와 연결되어 있으며 십자석 반상변정에는 Se 방향에 거의 수직방향으로

신장단열이 발달하고 기질부의 Se에는 신장성 파랑엽리가 관찰된다(Fig. 7d, 7e). 그리고 Si의 Z자형 곡선 형태로부터 인지되는 전단운동감각은 신장성 파랑엽리 형성(D2 변형)과 관련된 전단운동감각과

일치한다(Fig. 7d, 7e).

D3 변형

선캠브리아대 지층

D3 변형에 의해 형성된 F3 습곡은 편마면 S0가

습곡되어 형성된 F1 밀착 등사습곡을 재습곡 시키고 일반적으로 동-서 주향에 북쪽으로 저각 경사하는 습곡축면(S3)과 동-서 방향의 준 수평적인 습곡축(L3)을 갖는 열린 경사습곡 형태로 연구지역의 원남층에서 암석규모로 종종 관찰된다(Fig. 8a). 이러한 F1 습곡과 F3 습곡의 중첩구조에서 F1 습곡

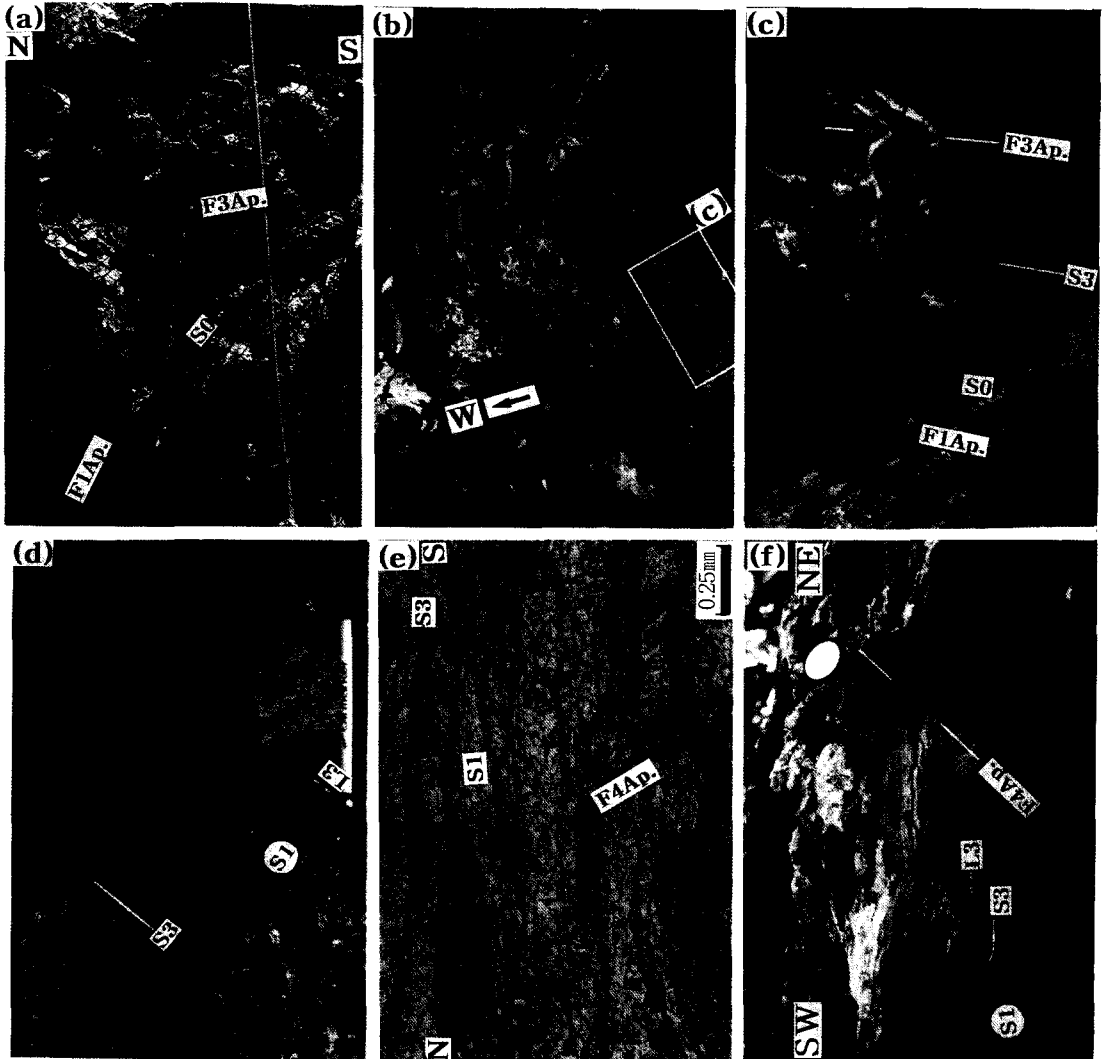


Fig. 8. Photographs of rock structures(a-d) related to the overlapping of D1 and D3 deformations. (a-c) : Overlapping of F1 tight isoclinal fold and F3 open inclined fold in the Wonnam Formation(a) and in the Jaesan Formation(b-c), (d) crenulation lineation(L3) and crenulation cleavage(S3) overlapped on S1 foliation in meta-pelitic rocks of the Dueumri Formation. Microstructure(e) and rock-structure(f) related to the overlapping of D1, D3 and D4 deformations. (e) Zonal crenulation cleavage(S3) in metapelitic rocks of the Dongsugok Formation. The S3 foliation is defined by cleavage domain(limbs of microfolds) and microlithons(hinge zone of microfolds). The microfolded foliation within microlithon is an older foliation(S1). Note that the S3 foliation is folded during D4 Deformation(F4Ap). (f) : F4 open inclined fold of NE-vergence in metapelitic rocks of the Dueumri Formation.

축과 F3 습곡축의 방향성은 동-서로 거의 동일한 방향성을 보여주고 있으며 F3 습곡에 의해 습곡된 F1 습곡축면은 동-서 주향에 남쪽과 북쪽으로 그 경사방향을 달리하며 경사한다.

고생대 지층

D3 변형에 의해 형성된 F3 습곡은 원남층에서와 같이 층리면 S0가 습곡되어 형성된 F1 밀착 등시습곡을 재습곡 시키는 열린 경사습곡 형태로 연구지역의 고생대 변성퇴적암류에서 흔히 관찰된다(Fig. 8b, 8c). F1 습곡의 축부에서는 층리면 S0와 고각으로 교차하는 F1 습곡축면(F1Ap.)에 해당하는 S1 엽리면이 인지되고 S1 엽리면은 F3 습곡에 의해 습곡되어 F3 습곡의 양쪽 날개부에서 동일 주향에 남쪽과 북쪽으로 그 경사 방향을 달리하며 중각으로 경사하며 F1 습곡축과 F3 습곡축은 역시 동일한 방향성을 보여준다. 고생대 변성퇴적암류에서의 이러한 F1 습곡과 F3 습곡의 중첩구조의 기하학적인 양상(Fig. 8b, 8c)은 선캄브리아대 원남층에서의 중첩구조(Fig. 8a)와 동일하다고 할 수 있다.

그러나 고생대의 변성퇴적암류에서의 F3 열린 경사습곡은 S1 엽리면이 주름져 형성되는 파랑습곡을

동반한다. 이러한 파랑습곡의 축면자취에는 S3 파랑벽개면이 형성되고 파랑습곡축에는 S1 엽리면과 S3 엽리면의 교차선구조에 해당하는 L3 파랑선구조가 형성된다(Fig. 8b~8d). 이러한 D3 구조요소는 비관통상으로 변성사질암보다 변성이질암에서 뚜렷이 관찰된다(Fig. 8c, 8d). Fig. 8e는 S3 파랑벽개면에 수직하고 L3 파랑선구조에 수직한 남-북 단면에서 D1 변형과 D3 변형이 중첩된 미세구조를 보여주고 있는 현미경 사진이다. Powell (1979)과 Borradaile 외. (1982)의 미세규모 엽리의 형태적 분류에 의하며 연구지역의 S3 엽리는 벽개영역과 마이크로리손(microlithon)으로 구성된 간격엽리(spaced foliation)에 해당한다(Fig. 8e). 세부적으로 S3 엽리는 이전에 형성된 S1 엽리가 습곡되어 형성된 F3 미소습곡을 포함하는 마이크로리손과 일정한 폭의 벽개영역을 가지는 대상파랑벽개(zonal crenulation cleavage)로 분류된다(Fig. 8e). 그리고 마이크로리손에 포함된 F3 미소습곡의 양쪽 날개부를 이루고 있는 S1 엽리는 동일 주향에 남쪽과 북쪽으로 그 경사 방향을 달리하며 중각으로 경사하는 기하학적인 양상을 보여준다(Fig. 8e). 이러한 미세구조는 선캄브리아대 원남층과 고생대 변성퇴적암류에서 중첩된 F3 습곡에 의해 S1

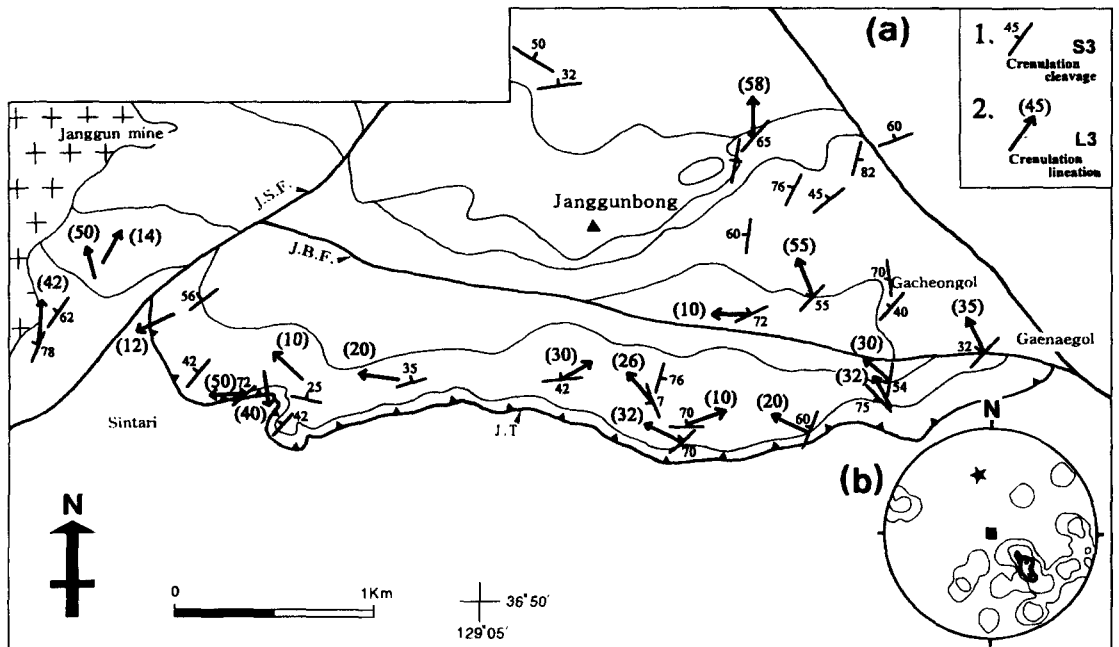


Fig. 9. (a) Orientation of S3 foliation and L3 lineation in the Paleozoic metasedimentary rocks. (b) Stereoplots (equal-area, lower-hemisphere projections) of S3 foliation in the Paleozoic metasedimentary rocks : n=26(number of data) and contours at 0.5-4.5-8-11-14% per 1% of area(star mark : π -axis).

엽리면이 재배열되는 암석구조(Fig. 8a~8c)와 동일하다고 할 수 있다.

Fig. 9a에는 야외에서 측정된 S3 파랑벽개면과 L3 파랑선구조의 방향성을 도시하였고, S3 파랑벽개면의 극점들에 대한 등면적망에 투영 결과는 Fig. 9b와 같다. 그 결과 L3 파랑선구조는 고생대 변성퇴적암류의 L2 신장선구조의 방향성과 같이 분산된 방향성을 보이나 영역별로 L2 신장선구조의 방향과 거의 일치성을 보이며 분산되어 있음을 알 수 있다(Fig. 3, 9a). 그리고 S3 파랑벽개면 역시 고생대 변성퇴적암류의 S1 엽리면의 방향성(Fig. 3, 4b)과 같이 다소 분산된 방향성을 보이나 이러한 분산된 S3 엽리면의 극점 배열은 40°/350° 방향의 π -축을 갖는 아주 미약한 π -원을 형성하고 있음을 알 수 있다(Fig. 9b).

D4 변형

D4 변형에 의해 형성된 F4 습곡은 일반적으로 남서 방향으로 경사하는 습곡측면(S4)과 북서 내지 북북서 방향(22N8W, 48N11W, 35N54W, 35N26W, 22N50W)으로 침강하는 습곡축(L4)을 갖는 북동 버전스의 열린 경사습곡 형태로 인지된다. Fig. 8f는 고생대 두음리층의 변성이질암에서 종종 관찰되는 F4 열린 경사습곡의 노두사진으로서, F4 습곡은 S1 엽리면 그리고 S1 엽리면이 주름져 형성된 S3 파랑벽개면과 L3 파랑선구조를 습곡시키고 있음을 보여준다. 이러한 F4 습곡의 영향으로 S1 엽리면과 S3 파랑벽개면 그리고 L3 파랑선구조의 방향성은 동-서에서 남-북 방향으로 분산됨을 알 수 있다(Fig. 8f). 또한 미소규모에서 F4 습곡이 S3 대상파랑벽개를 습곡시키는 미세구조는 고생대 변성이질암에서 종종 관찰된다(Fig. 8e).

해석 및 토의

본 연구결과 개내골 부근에서 평안층군(재산층)의 구조적 하부에 소규모로 산출되는 장군석회암(김옥준 외, 1963)은 신타리까지 재산층과 원남층 사이에 연장성 있게 분포됨이 확인되었다(Fig. 1b). 이는 연구지역의 선캠브리아대-고생대 변성퇴적암류가 재산단층과 개내골단층 사이에서 대칭적인 분포를 하고 있음을 지지하는 것으로 기존 연구자들(황덕환과 Reedman, 1975; 이현구, 1980; Imai *et al.*, 1982; 안건상 외, 1993; 김기영 외, 1996)에 의해 제안된 등사 향사구조에 대한 해석을 더욱 용이하게 한다: 등사 향사구조의 상위 날개부에 해당하

는 조선누층군(장산규암과 두음리층)은 시대미상의 장군드러스트 운동에 의해 절단되어 그 습곡의 하위 날개부에서는 노출되지 않지만, 연구지역의 구성지층군은 장군봉 단층운동에 의해 절단된 평안층군을 습곡의 축부로 하고 양측에 분포하는 조선누층군과 선캠브리아대 지층들을 습곡의 양 날개부로 하는 하나의 밀착등사 향사구조를 형성하고 있는 것으로 해석될 수 있다. 이러한 구성지층군의 밀착 등사습곡 형태는 원남층에서 편마면 S0와 고생대 변성퇴적암류에서 층리면 S0가 습곡되어 형성된 동-서 주향에 북쪽으로 고각 경사하는 습곡측면과 동-서 방향의 준수평적인 습곡축을 갖는 암석규모의 F1 밀착 등사습곡 형태와 일치한다고 할 수 있다(Fig. 2, 8a~8c).

연구지역의 구성암류에는 신장된 석영(집합체), 장석(집합체) 그리고 앵피보올 등의 정향배열에 의해 정의되는 신장선구조 L2가 S1 엽리면에 발달되어 있다. 이러한 신장선구조는 원남층의 편마암(Fig. 5a)과 재산층의 석영편암(Fig. 7a)에서 탁월하게 인지된다. 신장선구조에 평행하고 S1 엽리면에 수직인 단면에서는 이들 신장선구조가 대규모 연성전단운동에 의해 형성되었음을 지지하는 많은 증거들이 암석규모와 박편규모에서 관찰되는데(Fig. 5b, 5c, 6, 7b~7e), 이러한 신장선구조는 일반적으로 F1 습곡축의 방향성과 거의 일치하는 준수평적인 동-서 방향성을 보여준다(Fig. 2, 3, 8a~8c). 이는 연구지역의 F1 밀착 등사습곡이 대규모 연성전단운동과 관련되어 형성되는 신장선구조의 방향이 머리 부분(zone of conical closure)을 제외한 몸통 부분(zone of cylindrical closure)에서 습곡축과 거의 평행하게 나타나는 것으로 알려져 있는 단힌 납작타원형 칼집습곡(sheath fold)(Park, 1988; Skjernaa, 1989; Goscombe, 1991)의 하부 몸통부일 가능성을 제시한다. 이러한 해석은 연구지역의 신장선구조가 F1 밀착 등사습곡과 동시에 형성되었음을 의미한다. 그러나 야외에서 빈번히 발견되는 암석규모의 F1 밀착 등사습곡은 열린 납작타원 형태를 보이며(Fig. 2, 8a~8c) 칼집습곡이 형성된 지역에서 암석규모로 빈번히 관찰되는 단힌 납작타원형 습곡(Kang *et al.*, 1993; 강지훈과 류충렬, 1997)은 연구지역에서는 발견되지 않는다.

일반적으로 연성전단대에서 다량의 전단변형량을 동반하는 대규모 연성전단운동에 의해 형성된 압쇄암에는 전단면에 평행한 전단엽리 C면과 전단운동으로 발생하는 유한변형누적으로 인해 형성되는 압쇄엽리 S면 두 종류의 면구조가 발달된다. 그

리고 전단변형량의 증가와 함께 진행되는 점진적인 전단변형작용은 초기단계에서 약 45°를 이루는 S면과 C면의 각도를 S면의 회전과 함께 그 각도를 점진적으로 감소시켜 그 전단변형량이 극대량에 도달하였을 때 S면은 C면으로 완전히 전위됨과 동시에 그 후기에 신장성 파랑엽리 C'면이 형성되는 것으로 알려져 있다(Berthé *et al.*, 1979; Platt and Vissers, 1980; Simpson and Schmid, 1983; Platt, 1984).

연구지역에서 이러한 압쇄구조면들은 신장선구조에 평행하고 S1 엇리면에 수직한 동-서 단면상에서 흔히 관찰되는데, 이들 구조면 중 연구지역에서는 일반적으로 S면과 약 25° 이내의 저각을 이루는 C면(Fig. 6c, 6d, 7b, 7c) 그리고 C면과 약 35° 이내의 각도를 보이는 신장성 파랑엽리 C'면이 탁월하게 인지된다(Figs. 5c, 6a, 6b, 7d, 7e). 이는 이미 언급된 바와 같이 신장선구조가 다량의 전단변형량을 동반하는 대규모 연성전단변형에 의해 형성되었음을 지시한다. 또한 원남층에서 암석규모의 S면은 거의 인지하기 어렵고(Fig. 5b, 5c) 암석 및 미세규모에서 원남층의 S0-1 편마면은 전단엽리 C면에 평행하게 인지되는데(Figs. 5b, 5c and 6), 이는 신장선구조 형성과 관련된 대규모 연성전단운동은 S0-1 편마면을 전단면(S0-1-2)으로 하여 발생하였음을 추정하게 한다.

조산대에서 반상변정의 성장시기는 변형작용의 발생시기와 밀접한 관련성이 있다. 반상변정의 Si와 Se 사이의 기하학적인 양상은 변형작용과 반상변정 성장 사이의 상대적인 시간관계 뿐만 아니라 변형작용의 성질을 연구하는데 유용한 것으로 알려져 왔다(Zwart, 1962; Vernon and Ryde, 1978; Toteu and Macaudiere, 1984; Passchier and Trouw, 1996). 연구지역에서 고생대 변성퇴적암류의 십자석 반상변정의 Si와 Se 사이의 특징적인 미세구조(Fig. 7d, 7e)는 밀착 등사습곡작용과 대규모 연성전단운동 사이 상대적인 시간관계를 알 수 있게 한다. 이미 D2 변형에서 기재된 바와 같이 주로 신장된 석영들로 구성된 십자석 반상변정의 Si는 Z자형 비대칭 습곡 형태로 Se와 연결되어 있고 기질부의 Se에는 Se가 C면에 해당함을 지시하는 신장성 파랑엽리 C'면이 발달되어 있다. Z자형 비대칭 습곡의 장날개부의 Si 방향은 Se(C면) 방향과 평행하며 Si의 Z자형 비대칭 습곡 형태로부터 인지되는 전단운동감각은 신장성 파랑엽리 C'면 형성과 관련된 전단운동감각과 일치함을 보여준다(Fig. 7d, 7e). 이는 십자석 반상변정이 직선의 Si(S1 엇리면) 형성후 직선의 Si를 Z자형 곡선의 Si로 습곡시키는 전단변형작용과 동시기에 성장하였음을 지

시하고(Zwart, 1962; Vernon and Ryde, 1978; Toteu and Macaudiere, 1984; Passchier and Trouw, 1996), 전단변형운동은 직선의 Si(S1 엇리면)를 전단면(S1-2)으로 하여 발생하였음을 추정하게 한다. 즉 연구지역에서의 신장선구조 형성과 관련된 대규모 연성전단운동은 Se(C면)와 연결된 직선의 Si(S1 엇리면)를 전단면(S1-2)으로 하여 발생하여 Z자형 곡선의 Si를 형성시켰고, 십자석 반상변정은 직선의 Si(S1 엇리면)가 곡선의 Si로 되는 점진적인 전단변형작용 동안에 성장하였던 것으로 해석된다. 이러한 해석은 연구지역에서 S1 엇리면의 형성과 관련된 F1 밀착 등사습곡작용(D1 변형)이 십자석 반상변정 형성 이전에 발생하였으며 신장선구조(L2) 형성과 관련된 대규모 연성전단운동(D2 변형)은 십자석 반상변정과 동시기에 발생하였음을 의미한다. 그리고 고생대 변성퇴적암류에서 S1 엇리면과 전단엽리 C면(S2)은 하나의 엇리면(S1-2)으로 해석된다.

한반도 호남지방을 중심으로 수 개의 우수 주향 이동성 연성전단대(순창전단대, 광주전단대, 전주전단대, 영광전단대)가 발달하고 있다(Yanai *et al.*, 1985; 장태우와 한영민, 1989; 이병주 외, 1990; Cluzel *et al.*, 1991; 김정환과 기원서, 1991; 이병주, 1992; 장태우, 1994)(Fig. 1a). 이들 중 북동-남서 방향으로 발달하고 있는 순창전단대는 연장성이 가장 우수하여 해남-순창-진안 연결선을 따라 강원도 단양 부근까지 연장되고 점촌 부근에서 동북동-서남서 방향의 예천전단대로 분리되며 예천전단대는 봉화 부근에서 동-서 방향으로 그 방향을 전환하여 연구지역까지 연장되는 것으로 알려져 있다(KIGAM, 1995; Fig. 1a). 예천전단대에 발달된 전단엽리면의 자세는 일반적으로 N52E 70NW을 보이며 전단운동은 전단엽리면의 상부가 동북동 방향으로 이동하는 우수 주향이동성 전단운동감각을 보여준다(Chang, 1991).

연구지역의 선캄브리아대 원남층과 고생대 변성퇴적암류에는 상기된 바와 같이 D2 연성전단운동의 전단엽리에 해당하는 S0-1-2 편마면과 S1-2 엇리면이 발달하고 있다. 이러한 전단엽리면의 자세는 일반적으로 동-서 주향에 북쪽으로 중각 내지 고각 경사하는 것이 우수하게 나타나고 동-서 주향에 남쪽으로 중각 내지 고각 경사하는 것이 부수적으로 나타난다(Figs. 3 and 4). 그리고 전자와 같은 전단엽리면상에서의 전단운동은 상기한 예천전단대의 전단운동감각과 동일하게 전단엽리면의 상부가 동쪽으로 이동하는 우수 주향 이동성 전단운동

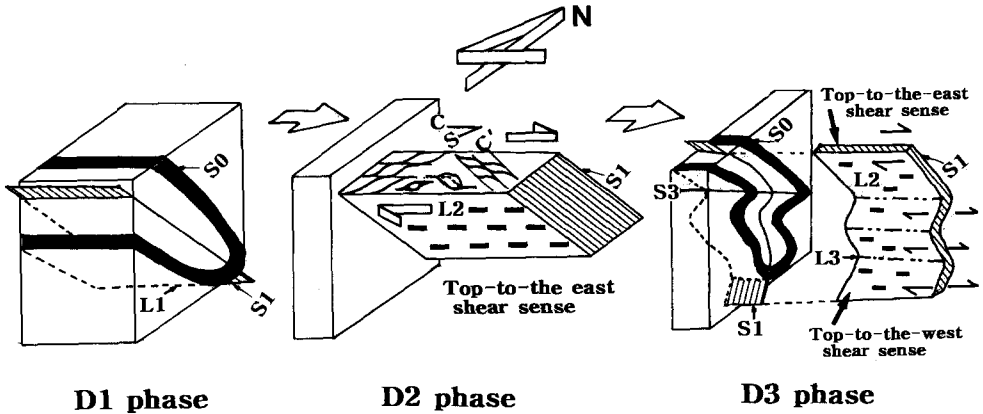


Fig. 10. Schematic diagram illustrating the rock structures and deformation history of the Precambrian-Paleozoic metasedimentary rocks in the Janggunbong area.

감각(Fig. 5b, 5c, 6a~6c, 7b, 7c)을 보여주는 반면에 후자와 같은 전단엽리면상에서의 전단운동은 일관성 있게 상부가 서쪽으로 이동하는 우수 주향 이동성 전단운동감각(Fig. 6d, 7d, 7e)을 보여준다(Fig. 3). 이와같이 전단엽리면 상부의 상대적인 이동방향이 전단엽리면의 경사방향에 좌우되어 서로 반대로 나타남은 D2 연성전단운동 이후 동-서 주향에 북쪽으로 저각 내지 중각 경사하는 습곡축면과 동-서 방향의 준 수평적인 습곡축을 갖는 F3 열린 경사습곡(Fig. 8)이 형성되었기 때문인 것으로 해석된다. 즉 원래 북쪽으로 고각 경사하는 F1 습곡축면(Fig. 2)은 D2 연성전단운동이 발생한 이후에 F3 열린 경사습곡(Fig. 8)에 의해 습곡되어 F3 습곡의 한쪽 날개부에서 남쪽 경사로 재배열 되었기 때문인 것으로 해석된다. 이러한 변형작용사를 모식도로 도시하면 Fig. 10과 같다.

연구지역의 F3 습곡은 S1 엽리면이 주름져 형성된 파랑습곡을 수반한다(Fig. 8b~8f). 이러한 파랑습곡은 선캄브리아대 원남층에서는 일반적으로 발달하지 않고 고생대 변성퇴적암류에서 탁월하게 발달된다. 이는 이들 구성암류 사이의 물성 차이에서 비롯된 것으로 해석되며 이러한 물성의 차이가 F3 습곡에 의해 재배열된 S1 엽리면의 경사를 원남층에서는 남-북 고각경사(Fig. 4a)로 고생대 변성퇴적암류에서는 남-북 중각경사(Fig. 4b)로 나타내게 한 것으로 해석된다.

고생대 변성퇴적암류에서 S1 엽리면과 L2 신장선 구조는 원남층에서의 이들 방향성(일반적으로 동-서 방향성)과 달리 다소 분산된 방향성을 보이고 있으며(Fig. 3), 분산된 S1 극점배열은 북서 방향으로 약

30° 침강하는 π -축을 형성하고 있다(Fig. 4b). S3 파랑벽개면과 L3 파랑선구조 역시 다소 분산된 방향성을 보이고(Fig. 9a), 분산된 S3 극점 배열은 S1 극점 배열과 유사하게 북서서 방향으로 약 40° 침강하는 π -축을 형성하고 있다(Fig. 9b). 이러한 π -축들의 방향은 S1 엽리면과 S3 파랑벽개면을 습곡시키는 북동 버전스의 열린 경사습곡(Fig. 8f)의 축의 방향(22N 8W, 48N11W, 35N54W, 35N26W, 22N50W)과 유사하다. 이는 연구지역에서의 비대칭형 열린 경사습곡(F4 습곡)은 D3 변형 이후에 형성되었으며 F4 습곡작용은 일반적으로 동-서 방향성을 보이는 D4 변형 이전의 구조요소들을 부분적으로 남-북 방향으로 재배열 시켰음을 알 수 있다. D4 변형을 받았음에도 불구하고 원남층에서는 고생대 변성퇴적암류와 달리 S1 엽리면과 L2 신장선구조가 일반적으로 동-서 방향성을 유지하는데(Fig. 3, 4a), 이는 이들 구성암류 사이의 물성의 차이에서 비롯된 것으로 연구지역에서 D4 변형은 원남층의 D4 변형 이전의 구조요소들을 재배열 시키지 못한 것으로 해석된다. 또한 고생대 변성퇴적암류에서 분산된 L2(Fig. 3)와 L3의 방향(Fig. 9a)이 영역별로 거의 유사하게 나타나고 있는데, 이는 D4 변형 이전에 이들 구조요소의 방향성이 동일하였던 것으로 해석되고 고생대 변성퇴적암류에서 D4 변형 이전의 이들 구조요소 방향성은 원남층에서의 L2 방향성과 동일한 동-서 방향성을 보였던 것으로 추정된다.

결론

장군봉지역에서 북부 소백산육괴의 지질구조를

해석하기 위해 구성암류의 암석구조와 미세구조를 연구하였다. 그 결과 연구지역의 지질구조는 선캄브리아대 원남층의 편마면(S0)과 고생대 변성퇴적암류의 층리면(S0)이 형성된 이후 적어도 네 번의 변형단계(D2 연성전단변형 이전에 한 번의 습곡작용과 D2 연성전단변형 이후에 적어도 두 번의 습곡작용)를 거쳐 형성되었음을 알게 되었다. 각 변형단계의 구조적 특성을 요약하면 다음과 같다.

(1) 첫 번째 변형(D1 변형)은 장군봉 단층운동에 의해 절단된 평안층군을 습곡의 축부로 하고 양측에 분포하는 조선누층군과 선캄브리아대 지층들을 습곡의 양 날개부로 하는 동-서 방향의 준 수평적인 습곡축(L1)과 동-서 주향에 북쪽으로 고각 경사하는 습곡측면(S1)을 갖는 하나의 밀착 등사습곡(F1 습곡)을 형성시켰다.

(2) 두 번째 변형(D2 변형)은 S1 옆리면을 전단면(S1-2)으로 하고 S2 전단옆리면의 상부가 동쪽으로 이동한 전단감각을 보이는 우수 주향 이동성 대규모 연성전단운동 발생기로서 이러한 연성전단변형에 의해 신장선구조(L2)가 전단옆리면에 형성된다. 이러한 D2 연성전단변형의 발생 시기는 예천전단대의 형성시기와 동일한 것으로 해석된다.

(3) 세 번째 변형(D3 변형)은 동-서 방향의 준 수평적인 습곡축(L3)과 동-서 주향에 북쪽으로 저각 내지 중각으로 경사하는 습곡측면(S3)을 갖는 열린 경사습곡(F3 습곡)을 형성시켰다. 이러한 F3 습곡의 영향으로 원래 북쪽으로 경사하는 S2 전단 옆리면은 F3 습곡의 한쪽 날개부에서 남쪽으로 경사하는 S2 전단 옆리면으로 재배열되고, 원래의 D2 연성전단감각(top-to-the east shear sense)은 재배열된 남쪽 경사 S2 전단 옆리면상에서 상부가 서쪽으로 이동한 전단감각을 보이게 된다.

(4) 네 번째 변형(D4 변형)은 북서 내지 북북서 방향으로 침강하는 습곡축(L4)과 남서 방향으로 경사하는 습곡측면(S4)을 갖는 북동 버전스의 열린 경사습곡(F4 습곡)을 형성시켰다. 그 결과 일반적으로 동-서 방향성을 보이는 D4 변형 이전의 구조 요소들은 부분적으로 남-북 방향성으로 재배열되고 이러한 재배열 효과는 고생대 변성퇴적암류에서 우세하게 나타난다.

감사의 글

논문 초고에 대한 건설적인 비평을 해주신 충북대

학교 지구환경과학과 나기창 교수님과 경북대학교 지질학과 장태우 교수님 그리고 본 연구 자료에 대한 유익한 조언을 해주신 한국자원연구소의 류충렬 박사님에게 깊은 감사를 드립니다. 본 연구는 교육부 1996년도 기초과학 학술연구 조성비(BSRI-96-5422)에 의해 수행되었다. 이에 감사하는 바이다.

참고문헌

강지훈, 류충렬, 1997, 충주 계명산지역 옥천변성대의 화성활동과 지질구조. 암석학회지, 6, (인쇄중).

김기영, 김형식, 오창환, 박찬수, 강지훈, 류영복, 1996, 장군봉 일대 선캄브리아대-고생대 변성퇴적암류의 다변성 작용 -북부 소백산육괴의 중앙부 지역의 지각진화와 환경지질-. 암석학회지, 5, 168-187.

김옥준, 홍만섭, 김기태, 박희인, 1963, 한국지질도 (1:50,000) 삼근리 도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 36p.

김정환, 기원서, 1991, 화순탄전에 발달된 순창전단대의 구조적특성. 지질학회지, 27, 642-655.

안건상, 정현희, 이현구, 1993, 장군광산 주변의 변성 이질암에서의 누진 변성반응 계열. 광산지질, 26, 473-478.

양판석, 조문섭, 1995, 춘양 화강암체 주변 두음리층에 산출하는 십자석-흑운모-홍주석-석류석 광물조합: 대수학적 분석. 암석학회지, 4, 49-60.

윤석규, 신병우, 1963, 한국지질도(1:50,000) 울진 도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 23p.

이병주, 김동학, 전경석, 1990, 한반도 남서부 영광읍부근 연성전단대의 변형특성 연구. 지질학회지, 26, 304-312.

이병주, 1992, 화순탄전 북부지역에서 우수향 연성주향 이동운동에 관련된 변형작용. 지질학회지, 28, 40-51.

이상만, 김형식, 1984, 소위 울리층군 및 원남층군의 변성 암석학적 연구-태백산 일대를 중심으로. 지질학회지, 20, 169-188.

이현구, 1980, 한국 장군 광산에 있어서 복합 유화물, 유염 광석의 광상학적 및 광물학적 연구. 일본 조도 전대학 박사 학위논문, 329p.

이현구, 박노영, 이마이나오야, 1992, 장군광산주변의 지질과 변성작용. 이석 남기상 선생 논문집, 21-44.

장태우, 한민영, 1989, 전주 부근 화강암의 연성변형작용에 관하여. 지질학회지, 25, 164-174.

장태우, 1994, 광주 전단대내 석영 분쇄암의 미구조에 관한 연구. 지질학회지, 30, 140-152.

황덕환, Reedman A.J., 1975, 삼한 장군 광산 조사 보고서. 한국 지질 광물 연구소. 지질 광물조사 보고서, 9-30.

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.

- Borradaile, G.J., Bayly, M.B., Powell, C.M.A., 1982, Atlas of deformational and metamorphic rock fabrics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 551p.
- Chang, T.W., 1991, On the microstructures of mylonitic rocks -with special reference to Yecheon shear zone, Korea-. Jour. Geol. Soc. Korea, 27, 177-190.
- 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.
- Goscombe, B., 1991, Intense non-coaxial shear and the development of mega-scale sheath folds in the Arunta Block, Central Australia. Jour. Struct. Geol., 13, 299-318.
- Imai, N., Park, N.Y., Lee, H.K., Machida, M. and Higashihara, Y., 1982, Geology and Metamorphic Rocks in the Environs of the Janggun Mine, Republic of Korea. With Some Comments Relating to the Unazuki Metamorphic Rocks in Japanese. Island Arc. In Geology of Japan Sea, 227-255, (in Japanese).
- Kang, J. H., Hara, I., Hayasaka, Y., Sakurai, Y., Shiota, 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.
- KIGAM, 1995, Geologic Map of Korea (1:1,000,000). KIGAM.
- Na, K.C., 1987, Metamorphic complexes of Sobaeksan Massif (or Ryeongnam Massif). In Geology of Korea(ed. Lee, D. S.), Geol. Soc. Korea, Kyohaksa, Seoul, 34-45.
- Lister, G.S. and Snoke, A.W., 1984, S-C mylonite. Jour. Struct. Geol., 6, 617-638.
- Malavieille, J., 1987, Kinematics of compressional and extensional ductile shearing deformation in a metamorphic core complex of the northeastern Basin Range. Jour. Struct. Geol., 9, 541-554.
- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J., 1996, Microtectonics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 289p.
- Park, A.F., 1988, Geometry of sheath folds and related fabrics at the Luikonlahtimine, Svecokareides, eastern Finland. Jour. Struct. Geol., 10, 487-498.
- Platt, J.P. and Vissers, R.L.M., 1980, Extensional structures in anisotropic rocks. Jour. Struct. Geol., 2, 397-410.
- Platt, J.P., 1984, Secondary cleavages in ductile shear zones. Jour. Struct. Geol., 6, 439-442.
- Powell, C.M.A., 1979, A morphological classification of rock cleavage. Tectonophysics, 58, 21-34.
- Reedman, A. J. and Um, S. H., 1975, Geology of Korea, Korea Insti. Ener. Resour., Seoul, 139p.
- Simpson, C. and Schmid, S., 1983, An evaluation of criteria to deduce the sense of movement in sheared rocks. Bull. Geol. Soc. Amer., 94, 1281-1288.
- Simpson, C., 1985, Deformation of granitic rocks across the brittle-ductile transition. Jour. Struct. Geol., 7, 503-511.
- Skjernaa, L., 1989, Tubular folds and sheath folds: definitions and conceptual models for their development, with examples from the Grapesvare area, northern Sweden. Jour. Struct. Geol., 11, 689-703.
- Toteu, S.F. and Macaudiere, J., 1984, Complex synkinematic and postkinematic garnet porphyroblast growth in polymetamorphic rocks. Jour. Struct. Geol., 6, 669-677.
- Vernon, R.H. and Ryde, N., 1978, Porphyroblast-matrix microstructural relationships in deformed metamorphic rocks. Geol. Rdsch., 67, 288-305.
- Yanai, S., Park, B. S. and Otoh, S., 1985, The Honam shear zone (S. Korea) : deformation and tectonic implication in the Far East. Sci. Pap. Coll. Arts Sci. Univ. Tokyo, 35, 181-210.
- Zwart, H.J., 1962, On the determination of polymetamorphic mineral associations and its application to the Bosost area(central Pyrenes). Geol. Rdsch., 52, 38-65.

(책임편집 : 나기창)

**Geological Structure of Precambrian to Paleozoic metasedimentary
rocks in the Janggungbong area, Korea
- Crustal evolution and environmental geology of the
central part of the North Sobaegsan Massif, Korea -**

Ji Hoon Kang, Hyung Shik Kim¹ and Seo Bong Oh

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

¹*Department of Earth and Environmental Science, College of Science,
Korea University, Seoul 136-701, Korea*

ABSTRACT : The Janggungbong area (this study area) at the central-south part in the North Sobaegsan Massif, Korea, consists mainly of Precambrian (Wonnam and Yulri Formations)-Paleozoic [Joseon Supergroup (Jangsan Quartzite, Dueumri Formation and Janggun Limestone) and Pyeongan Group (Jaesan and Dongsugok Formations)] metasedimentary rocks and Mesozoic granitoid (Chunyang granite). This study is to interpret geological structure of the North Sobaegsan Massif in the Janggungbong area by analysing rock-structure and microstructure of the constituent rocks. It indicates that its geological structure was formed at least by four phases of deformation after the formation of gneissosity (S0) in the Wonnam Formation and bedding plane (S0) in the Paleozoic metasedimentary rocks. The first phase deformation (D1) formed tight isoclinal fold (F1). Its axial plane (S1) strikes east-west and steeply dips north. Its axis (L1) subhorizontally plunges east-west. The second phase deformation (D2), which was related to ductile shear deformation, formed stretching lineation (L2) and shear foliation (S2). The sense of the shear movement indicates dextral strike-slip shearing (top-to-the east shearing). The third phase deformation (D3) formed open inclined fold (F3). Its axial plane (S3) strikes east-west and moderately or gently dips north. Its axis (L3) subhorizontally plunges east-west. The F3 fold reoriented the original north-dipping S1 foliation and D2 shear sense into south-dipping S1 foliation (top-to-the west shear sense on this foliation) at its a limb. The four phase of deformation (D4) formed asymmetric-type open inclined fold (F4) of NE-vergence with NW striking axial plane (S4) and NW-NNW plunging axis (L4). The F4 fold partly reoriented pre-D4 structural elements with east-west trend into those with north-south trend. Such reorientation is recognized mainly in the Paleozoic metasedimentary rocks.

Key words : north Sobaegsan Massif, ductile shear deformation, stretching lineation, open inclined fold