Jour. Korean Earth Science Society, v. 21, no. 3, p. 302−314, June 2000

옥천대 제천 남부의 지질구조: 당두산변성암복합체의 상승과정과 그 의미

김 유 홍[1] · 김 정 환[1] · 정 상 원[2]

[1]서울대학교 지구환경과학부, 151-742 서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

[2]충북대학교 자연과학대학 지구환경과학과, 361-763 충청북도 청주시 흥덕구 개신동 산 48

Geological Structures of the Southern Jecheon, Korea: Uplift Process of Dangdusan Metamorphic Complex and Its Implication

You-Hong Kihm[1] · Jeong-Hwan Kim[1] · Sang-Won Cheong[2]

[1]School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

[2]Department of Earth and Environmental Sciences, College of Natural Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

Abstract: Keumseong area in the southern part of the Jecheon city, the Ogcheon Belt, consists of Precambrian Dangdusan Metamorphic Complex, Dori Formation of the Choseon Supergroup, and Jurassic Jecheon Granite. The Dangdusan Metamorphic Complex consists of quartz schist, mica schist, quartzite and pegmatite. The Dori Formation is composed of mainly laminated limestone. The rocks in the study area have been undergone at least three phases of deformations since Paleozoic period. The Dangdusan Metamorphic Complex is outcrop at three areas in the study area, which are exposed along the faults and occurred as inlier within the Dori Formation. Previous authors interpreted the uplift of the Dangdusan Metamorphic Complex by the Dangdusan Fault, but we could not find any evidences related to the Dangdusan Fault. Thus, we interpret the uplift of the Dangdusan Metamorphic Complex due to the D_2 Weolgulri and Dangdusan thrusts and post-D_2 Jungbodeul, Kokyo and Jungjeonri faults. The uplift of the Busan Metamorphic Complex to the west of the study area was interpreted by ductile deformation. However, the Dangdusan Metamorphic Complex is formed by brittle thrusts and faults in this study. According to deformation sequence, the characters of deformations in the Choseon and Ogcheon suprergroups had been changed from ductile to brittle deformations through the time. Therefore, we interpret the Dangdusan Metamorphic Complex is exposed later than the Busan Metamorphic Complex.

Key words: Ogcheon Belt, Dangdusan Metamorphic Complex, Busan Metamorphic Complex, Dori Formation, Thrust, Normal fault

요 약: 옥천대 내의 옥천누층군과 조선누층군의 경계지역인 제천시 남부의 금성지역 내에는 선캠브리아 기반암인 당두산변성암복합체와 조선누층군인 도리층, 그리고 이들을 관입한 쥬라기 제천화강암이 분포한다. 당두산변성암복합체는 석영편암, 운모편암, 규암 및 페그마타이트 등으로 구성되어 있으며, 도리층은 주로 엽리상 석회암으로 구성된다. 연구지역 내의 지층들에서는 고생대 이후에 최소한 세 번의 변형작용의 영향이 인지된다. 당두산변성암복합체는 연구지역 내에서 세 곳에 분포하는데, 두 곳은 단층과 관련되어 분포하고, 한 곳은 도리층 내에 내암군으로 분포하고 있다. 당두산변성암복합체의 상승과 관련하여 이 연구에서는 두 번째 변형작용의 산물인 월굴리 및 당두산드러스트와 세 번째 변형작용 이후의 정단층인 중보들, 고교, 중전리단층들에 의해 당두산변성암복합체가 상승하여 현재와 같은 분포 상태를 보이는 것으로 해석되었다. 연구지역 서쪽의 부산변성암복합체는 연성변형작용에 의해서 상승하여 옥천누층군 내에 노출된 것으로 보고되어 있으나, 당두산변성암복합체는 취성 내지 반취성 변형작용에 의해서 상승하였다. 기존에 보고된 옥천누층군과 조선누층군이 고생대 이후 받은 변형작용 순서에 의하면, 변형작용은 시간에 따라서 연성에서 취성으로 바뀐 것으로 보고되어 있다. 따라서 아직 그 지질시대는 규명되지 못 하였지만, 당두산변성암복합체의 상승은 부산변성암복합체의 상승보다 후에 일어난 것으로 생각된다.

주요어: 옥천대, 당두산변성암복합체, 부산변성암복합체, 도리층, 드러스트, 정단층

서 론

경기육괴와 옥천대의 경계를 따라서 선캠브리아기의 기반암류가 옥천누층군이나 조선누층군 내로 돌출되었거나 고립되어 있는 예들이 여러 학자들에 의해 보고된 바 있다(김기완 외, 1967; 김옥준 외, 1986; 민경덕 · 박혜심, 1989; Cluzel *et al.*, 1991; 임명혁 · 장태우, 1993; 윤운상, 1994; 한래희 외, 1996; Ryoo, 1997). 이러한 기반암류들의 상승에 대한 해석은 경기육괴와 옥천대의 관계를 이해하는데 중요할 뿐 만 아니라 옥천대의 진화과정을 규명하는데 매우 중요하다. 충북 제천시 남서부 지역의 부산변성암복합체는 옥천누층군 내에 노출되어 있으며(김기완 외, 1967), 부산변성암복합체는 학자들에 따라서 각기 두 개의 습곡구조의 간섭상(Cluzel *et al.*, 1991), 칼집형 융기(임명혁 · 장태우, 1993) 그리고 변성핵복합체(한래희 외, 1996) 등으로 해석된 바 있다. 제천 남부 지역의 당두산변성암복합체(민경덕 · 박혜심, 1989)는 황강리 지역에 분포하는 조선누층군 내에 노출되어 있으며, 당두산단층에 의해 인접 지층과 접하고(김옥준 외, 1986), 주천 지역의 와촌클리페는 선캠브리아기의 방림층군 내에 노출되어 있으며, 북동쪽 버전스(vergence)의 연성 드러스트로 설명되었다(윤운상, 1994). 주천 및 평창 일원의 선캠브리아기 기반암은 조선누층군 상위로 북쪽 버전스의 연성 드러스트(Ryoo, 1997)에 의한 것으로 해석된 바 있다. 그러나 아직까지 이러한 기반암류의 노출과정에 대한 통합적인 연구나 상호비교는 이루어진 바가 없다.

당두산변성암복합체는 행정구역 상으로는 충청북도 제천시 금성면에 위치하며, 다른 변성암복합체에 비해 거의 연구가 이루어진 바 없다. 이 연구에서 당두산변성암복합체의 분포지역은 민경덕 · 박혜심(1989)의 정의(Fig. 2b)를 따랐으며, 이들이 정의한 당두산변성암복

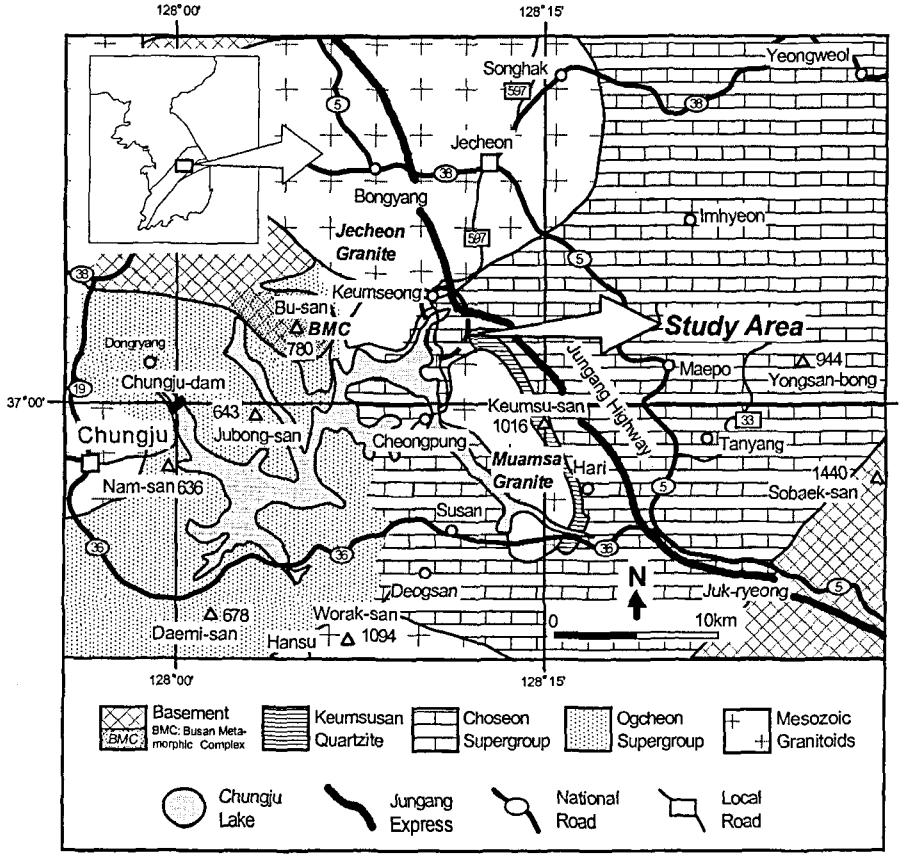


Fig. 1. *Regional geologic map of the study area showing the location of the study area and Busan Metamorphic Complex (BMC).*

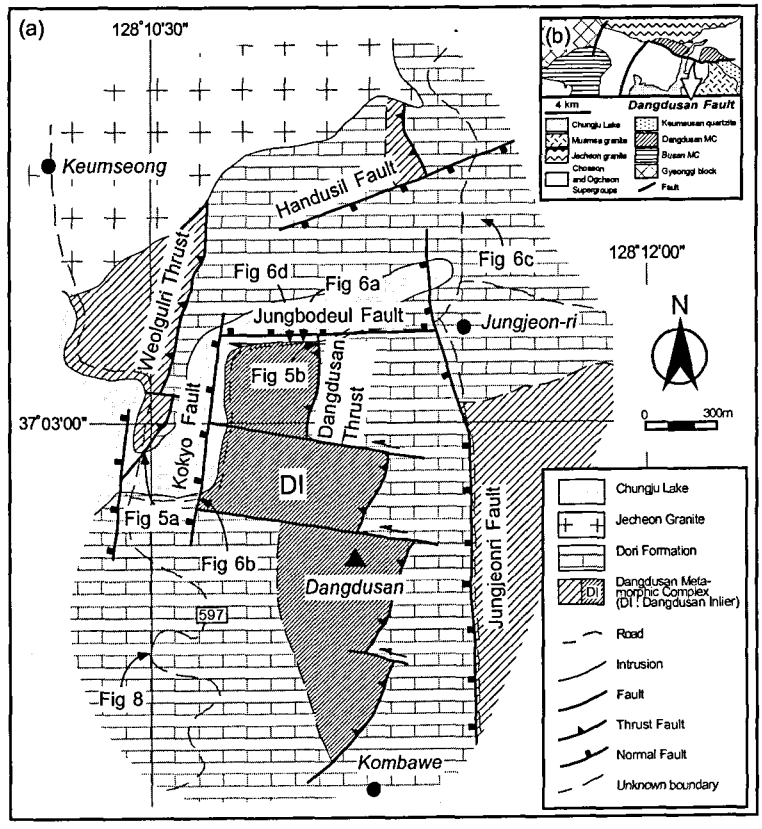


Fig. 2. (a) Geologic map of the study area. Locations of Figs. 5, 6 and 8 are shown. (b) Geological map from Min and Park (1989) shows the locations of the Dangdusan Metamorphic Complex and so-called Dangdusan Fault.

합체의 동쪽 부분이 이 연구의 연구대상지역이다. 이 지역은 옥천누층군과 조선누층군의 경계지역에 위치하여 경기육괴와 옥천대의 상호관계뿐만 아니라, 두 누층군의 상호관계와 진화과정을 밝히는데 중요하기 때문에 연구대상 지역으로 선정하였다. 당두산변성암복합체는 연구지역의 북서부, 중앙부와 남동부에 각각 분포하며, 제천도폭에서는 이를 서창리층의 변질물로 조선누층군에 의해 부정합으로 덮인다고 해석하였다(김기완 외, 1967). 그러나 Shibata *et al.* (1983)은 K-Ar 방법으로 페그마타이트의 백운모로부터 1,720±50 Ma를 얻어, 이들이 선캠브리아의 기반암임을 규명하였다. 김옥준 외 (1986)와 민경덕 · 박혜심(1989)은 당두산변성암복합체의 남쪽 경계는 동-서 주향방향의 당두산단층으로, 북쪽경계는 조선누층군의 석회암에 의해 부정합으로 피복되는 것으로 해석하였다. 당두산단층은 북측으로 70-80 경사하고, 북측이 상승한 고각의 드러스트로 해석된 바 있다(김옥준 외, 1986; 민경덕 · 박혜심, 1989). 그러나, 이 연구에서 정밀한 야외조사 결과 당두산단층은 확인할 수 없었다.

이 연구의 목적은 연구지역의 당두산변성암복합체가 어떤 과정을 거쳐 노출되었는지를 규명하고, 이를 부산변성암복합체의 노출과정과 비교하는데 있다. 이를 위해서 정밀한 야외조사를 바탕으로 지질도를 작성하였고, 야외에서 다양한 구조요소들을 측정하였다. 그리고 대한광업진흥공사에서 실시한 시추자료(대한광업진흥공사, 1977, 1979, 1982)를 단면해석에 이용하였고, 선형구조분석을 위하여 1 : 20,000 항공사진을 판독하였다.

지질개요

연구지역 내에는 주로 석영편암, 운모편암, 규암과 이를 관입한 페그마타이트로 이루어져 있는 선캠브리아 기반암류인 당두산변성암복합체, 이 지역 조선누층군의 가장 하부층인 도리층(김유홍 외, 1999)과 쥬라기의 화

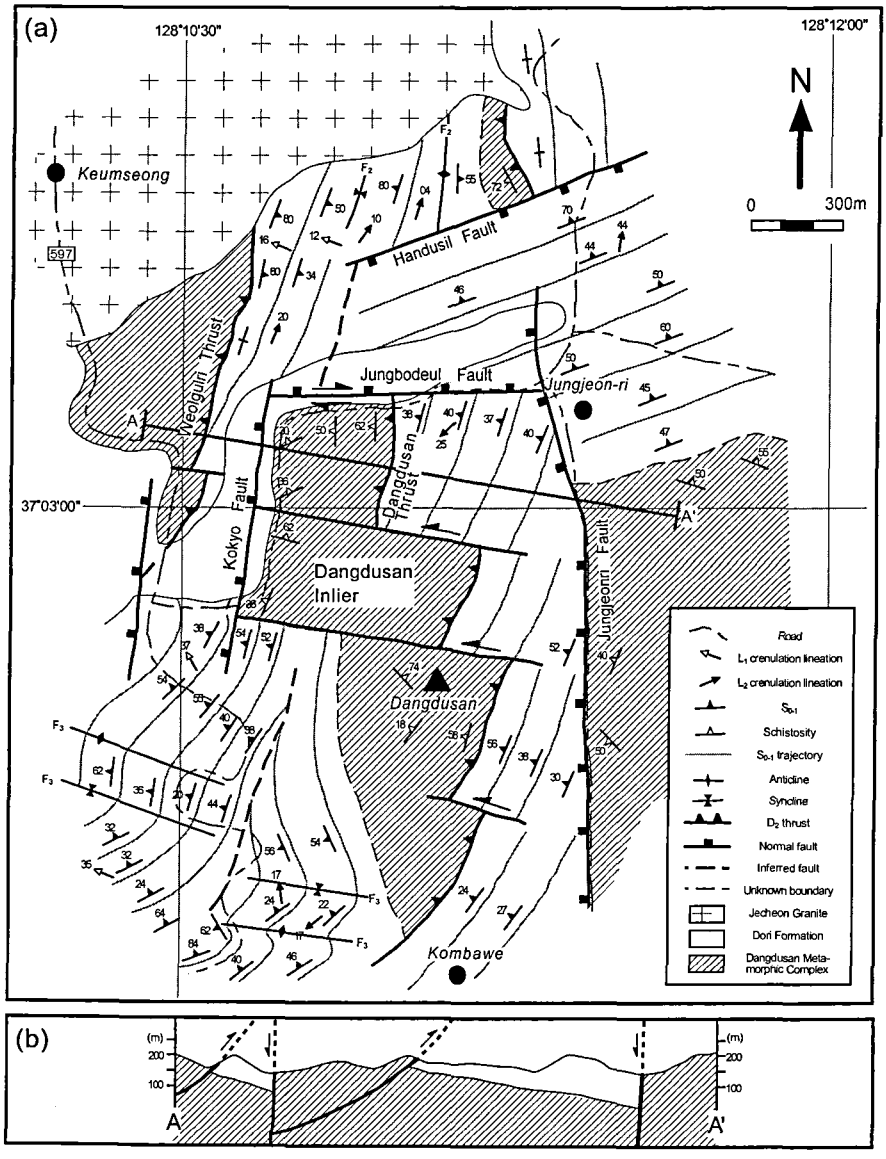


Fig. 3. Structural map (a) and A-A′ cross-section (b) of the study area showing the uplift of Dangdusan Metamorphic Complex due to the D_2 thrusts and post-D_2 faults.

강암인 제천화강암이 분포한다(Fig. 2a).

당두산변성암복합체는 석영편암과 운모편암이 반복적으로 나타나며, 운모편암이 더 우세하다. 특히 편암 내에는 흑운모의 발달이 현저하며, 흑운모는 편리를 따라서 강하게 배열되어 있다. 페그마타이트는 수 cm 크기의 석영, 장석, 백운모 등으로 구성된다. 연구지역 북서부에 분포하는 당두산변성암복합체는 월굴리드러스트에 의해 도리층을 위에 놓이며, 제천화강암에 의해 관입당하고 있다. 중앙부의 당두산변성암복합체는 고교단층, 중보들단층과 당두산드러스트에 의해서 도리층 내에 내암군(inlier) 형태로 분포하며, 이를 당두산내암군(Dangdusan Inlier)로 명명하였다. 이들은 동남부에서 중전리단층에 의해 다시 노출된다. 이처럼 당두산변성암복합체는 여러 드러스트와 단층에 의해 단절되어 있으나, 대한광업진흥공사 시추자료(1977, 1979, 1982)와 야외조사자료로 작성한 Fig. 3b처럼 석회암 분포지역에서도 약 140m 이하의 깊이에서는 기반암이 분포할 것으로 생각되며, 지표면에서 깊지 않은 곳에서 당두산변

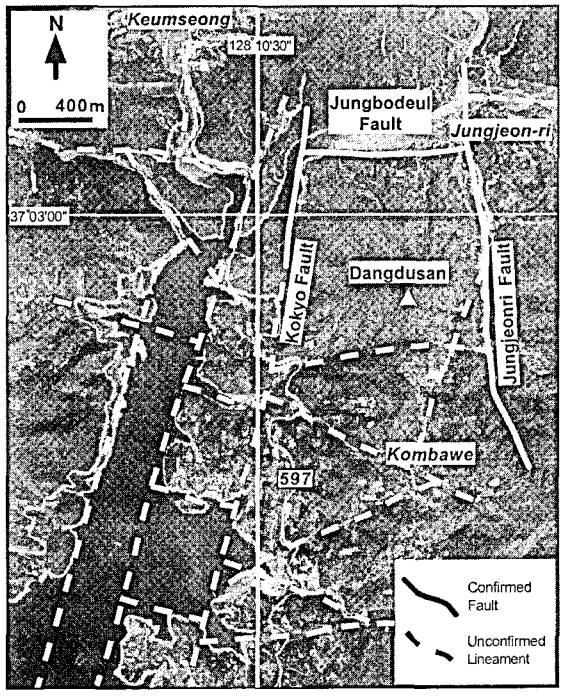


Fig. 4. Interpretation of air-photos (1:20,000). The study area is the upper right part. Among the several major lineaments, Kokyo, Jungbodeul and Jungjeonri

성암복합체는 모두 연결되어 있을 것으로 해석된다.

도리층은 연구지역 내에서 가장 넓게 분포하며, 남서부에서 북동부로 연장된다. 도리층은 연구지역 남쪽의 청풍지역에서 분포하기 시작하여(김유홍 외, 1999) 무암사화강암의 서측을 따라 북쪽으로 연장되어 연구지역인 금성지역에 이르고, 무암사 화강암의 북측을 돌아 남쪽으로 연장되어 무암사화강암의 동쪽, 금수산-매포 지역까지 연장된다(Fig. 1). 즉, 무암사화강암의 남측에서 도리층의 분포가 현재까지는 확인되지는 않았으나, 최소한 무암사화강암의 서측, 북측, 동측에는 도리층이 무암사화강암을 두르는 형태로 분포한다. 도리층은 엽리(lamination)가 잘 발달된 석회암으로 주로 구성되고 일부 돌로마이트와 리본암, 점판암이 협재된다. 엽리상 석회암은 두께가 수 mm에서 최대 1cm인 층이 반복되어 나타나며, 고교 부근에서부터 당두산내암군 서쪽 접촉부를 따라서 심하게 규화되어 있다. 엽리상 석회암내에 협재하는 괴상의 백색 내지 담회색 돌로마이트는 597번 지방도를 따라서 비교적 넓게 분포한다. 리본암과 점판암은 소량 협재한다. 기반암과 도리층과의 관계는 부정합으로 제시된 적이 있으나(김옥준 외, 1986; 민경덕 · 박혜심, 1989), 이 연구에서 확인되지 않았다.

연구지역의 북서부에 분포하는 제천화강암은 위의 지층들을 관입하고 있으며, 전기 쥬라기(~203 Ma) 때 약 7-9km의 깊이에서 관입한 것으로 보고된 바 있다(Jin, 1995). 제천화강암은 면적이 192.4km^{2}의 비교적 작은 화강암체로 주로 석영, 장석류, 흑운모 등으로 구성되어 있다(김규한 · 신윤수, 1990). 김용준(1979)은 제천화강암을 구성광물과 조직에 따라 북측과 동측의 조립질 흑운모화강섬록암, 동북부의 세립질 각섬석흑운모화강섬록암, 남측의 조립질 홍색장석흑운모화강섬록암, 송학산 부근의 우백질화강암, 중앙부의 반상흑운모화강암 등으로 세분한 바 있다. 이에 따르면 연구지역의 제천화강암은 조립질 홍색장석흑운모화강섬록암에 해당한다.

지질구조

항공사진 분석

항공사진으로부터 크게 두 방향의 선형구조(lineament)가 관찰된다(Fig. 4). 북-남 또는 북북동-남남서 방향의 선형구조들이 동-서 또는 서북서-동남동 방향의 선형구조들을 절단하는 형태로 관찰되며, 북-남 또는 북북동-남남서 방향의 선형구조들의 연장성이 더 좋다. 여러 선형구조들 중에서 고교, 중보들과 중전리단층들이 야외조사에서 확인되었다.

드러스트와 단층

연구지역 내의 주요 단층들과 드러스트들에 대하여 기술하면 아래와 같다.

월굴리드러스트 : 이 드러스트는 연구지역 중서부의 고교 다리 밑에서 잘 관찰된다(Fig. 5a). 북북동-남남서 주향방향에 서북서로 약 45° 경사하는 이 드러스트를 따라서 당두산변성암복합체가 도리층 위에 놓인다. 이 드러스트를 경계로 하여 당두산변성암복합체 내의 편리는 동쪽으로 경사하나(N18° W/80° NE), 석회암층 내의 엽리는 서쪽으로 경사한다. 이 드러스트는 북쪽으로 연장되다가 제천화강암에 의해, 남쪽으로는 남-북 주향방향의 정단층에 의해서 단절된다(Fig. 3a).

당두산드러스트 : 당두산드러스트(Fig. 3a)는 고교에서

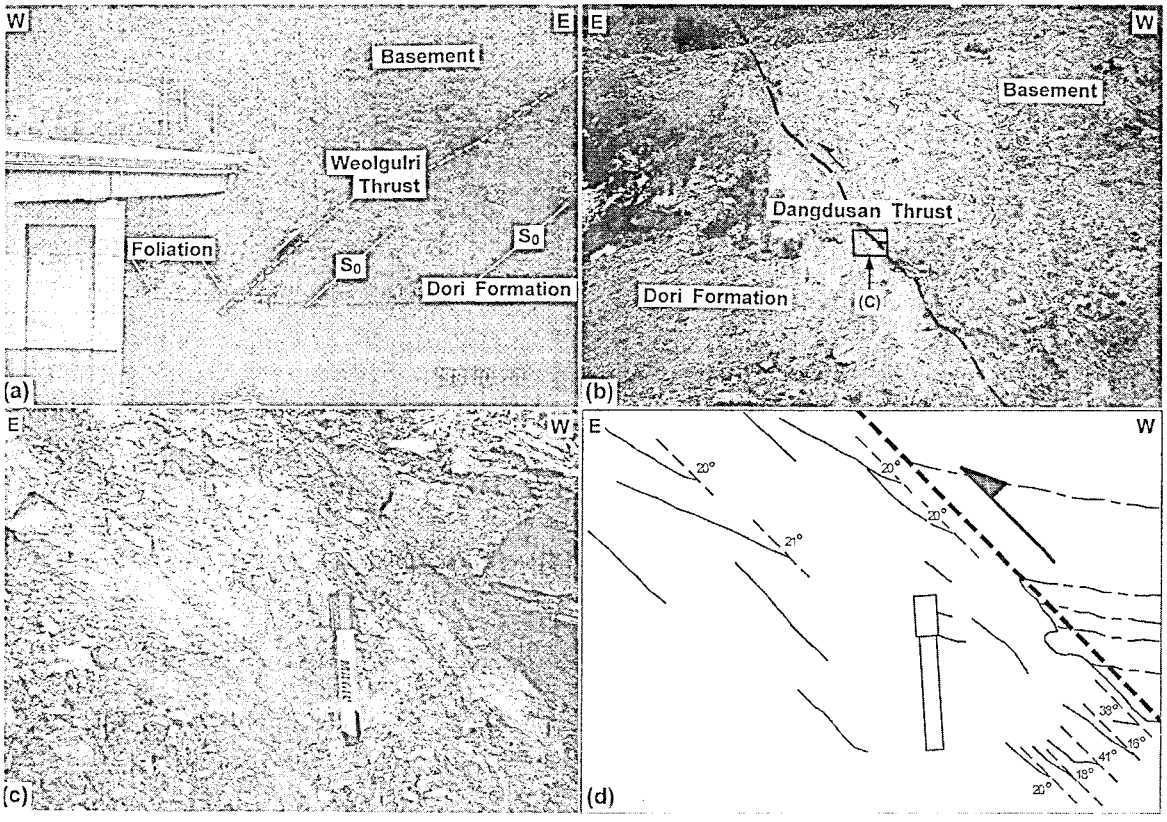


Fig. 5. Outcrop photographs and sketch. (a) Under the Kokyo bridge, basement rocks thrust over the Dori Formation by the Weolgulri Thrust. (b) Dangdusan Thrust shows the same features as the Weolgulri Thrust. (c) Fault zone of the Dangdusan Thrust. (d) Sketch of (c). Shear bands indicate the sense of thrust. See text for explanation. See Fig. 1 for locations.

중전리에 이르는 동-서 방향의 도로절개면에서 잘 관찰된다(Fig. 5b). 이 드러스트는 월굴리드러스트와 같이 북북동-남남서 주향방향에 서북서로 경사하며, 서쪽의 당두산변성암복합체가 동쪽의 도리층 위에 놓여 있으며, 당두산내암군의 동쪽 경계를 이룬다(Fig. 3a). 서쪽으로 약 45° 경사하는 단층대에서는 단층비지가 약 20-30cm의 두께로 발달하고, 단층비지 내에는 전단띠(shear band)가 단층면의 경사방향과 같은 서쪽 방향을 향해 약 20°의 저경사로 발달한다(Fig. 5c, d). Chester and Logan (1987)은 단층비지 내에 전단띠가 발달할 경우 단층의 전단방향은 전단띠가 단층면과 저각을 이루는 방향을 지시하는 것으로 해석하였는데, 이들에 의하면 이 단층은 드러스트로 해석된다. 이 전단띠는 리델 전단(Riedel Shear)의 R 전단으로 볼 수 있으며, 이 경우도 역시 드러스트로 해석된다. 당두산드러스트는 북쪽으로 동-서 주향방향의 우수향-정단층(dextral-normal fault)인 중보들단층에 의해서 단절되며, 남쪽으로는 3 조의 단층에 의해서 변위된다(Fig. 3a).

중보들단층 : 중보들단층(Fig. 3a)도 고교에서 중전리에 이르는 도로절개면에서 잘 관찰된다. 이 단층은 동-서 방향의 주향을 가지며 거의 수직단층으로 앞서 언급한 우수향-정단층의 성격을 가진다. 이 단층에 의해서 당두산내암군의 북쪽 경계가 도리층과 접한다. 절개면을 따라서 많은 미끄럼면(slickenside)이 관찰되며, 미끄럼면에서 관찰되는 미끄럼선(slickenline)들은 대부분 비스듬한 우수향-정이동(dextral-normal slip)을 지시한다(Fig. 6a). 중보들단층의 남쪽으로 서북서-동남동 주향방향의 단층이 3조가 발달하며, 중보들단층은 남-북 주향방향의 정단층인 고교단층과 중전리단층에 의해 단절된다(Fig. 3a). 구조도 상에서 이 단층들은 당두산내암군의 변위로 좌수향단층임이 인지되어 우수향의 중보들단층과는 다른 성격을 갖는다. 그러므로 이 3 조의

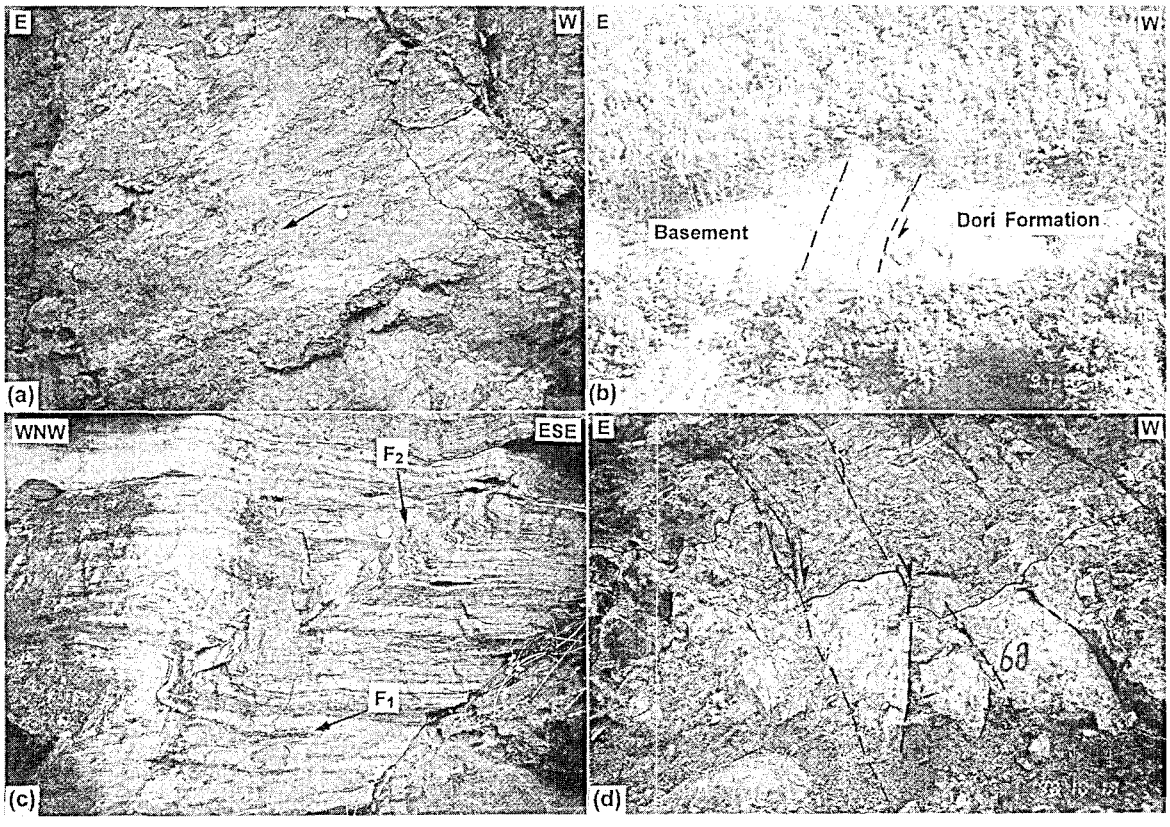


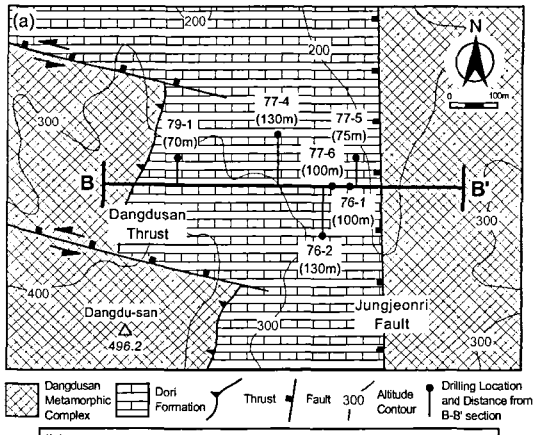
Fig. 6. Outcrop photographs. (a) Fault surface of Jungbodeul Fault. Fault striations show the dextral-normal sense. (b) the Kokyo Fault. (c) Type 3 interference pattern (Ramsay, 1967) of F_1 and F_2 folds. (d) A series of N-S trending normal-fault system in the Dangdusan Inlier. See Fig. 1 for locations.

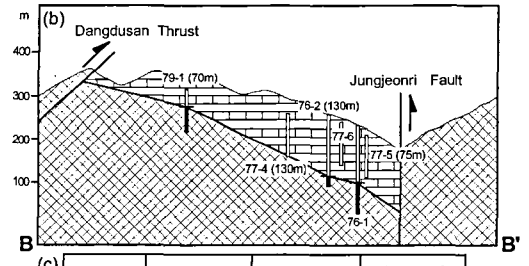
단층들은 당두산드러스트와 연관된 일종의 인열단층(tear fault)일 가능성이 높다.

한두실단층: 이 단층(Fig. 3a)은 동북동-서남서 방향의 주향을 보이며, 이 단층을 경계로 하여 북쪽과 남쪽 지역이 구조적으로 매우 다른 특징을 보인다. 즉, 북쪽 지역에서는 기반암이 노출되고 층리는 거의 남-북 방향의 주향방향을 보이지만, 남쪽에서 도리층의 층리면은 거의 동-서 주향방향을 가진다(Fig. 3a). 또한 한두실단층의 북쪽에는 연회색 내지 백색의 재결정화된 괴상의 석회암이 주를 이루는 반면에, 남쪽에서는 리본암이 잘 발달한다. 이러한 특징들은 지표상에서 단층면은 관찰하기 어렵지만 한두실단층의 존재를 암시한다. 단층의 주변 지역에서 비슷한 방향의 소규모 단층들이 정단층의 특성을 보이는 점으로 미루어 한두실단층은 남쪽 지괴가 하강한 정단층일 것으로 생각된다.

고교단층: 고교단층(Fig. 3a)은 고교에서 얼마 떨어지지 않은 동쪽 도로절개면에서 잘 관찰된다. 이 단층은 서쪽 지괴가 내려간 남-북 주향방향의 거의 수직인 정단층이며, 당두산내암군의 서쪽 경계를 이룬다. 단층대의 폭은 약 8m이다(Fig. 6b). 심한 풍화로 단층면과 미끄럼선은 확인할 수 없었으나, 도리층 내의 엽리가 단층대를 따라서 약하게 향사구조를 이루며 끌리는 점과 연구지역에서 관찰되는 남-북 주향방향의 단층들이 모두 서쪽 지괴가 하강한 정단층인 점 등으로부터 판단하였을 때, 서쪽 지괴가 하강한 정단층으로 생각된다.

중전리단층: 중전리단층(Fig. 3a)은 연구지역 동남부의 큰 계곡을 따라 발달하는 연구지역 내에서 가장 큰 단층으로, 남-북 주향방향과 거의 수직의 경사를 보이며, 서쪽 지괴가 하강한 정단층이다. 이 단층에 의해 연구지역 동남부에 당두산변성암복합체가 다시 지표에 노출된다. 대한광업진흥공사에서 여러 차례에 걸쳐 실시한 시추자료로부터 당두산에서 중전리단층을 가로지





(c)

core number	elevation (m)	depth of drilling (m)	depth of basement (m)
76-1	222	200	132
76-2	270	154	136
77-4	260	100	x
77-5	210	100	x
77-6	250	100	x
79-1	320	100	40

Fig. 7. Analysis of drilling core data (Korea Mining Promotion Corporation, 1977, 1979, and 1982). (a) Location of drill-holes and geologic cross-section. Parentheses below the core numbers show the distance from the B-B' cross section. (b) B-B' cross-section. The numbers in parentheses indicate the distance between core holes and the B-B' cross section (c) Drilling data from Korea Mining Promotion Corporation. B-B' cross-section shows at least 140 m displacement along the Jungjeonri Fault.

르는 B-B' 단면의 작성이 가능하다(Fig. 7). 이 단면은 중전리단층이 변위가 최소 140m인 서쪽 지괴가 하강한 정단층임을 지시한다(Fig. 7b).

구조요소들의 중첩관계

F_1과 F_2와의 관계 : Fig. 6c는 도리층 내에 발달한 중첩습곡구조로 등사습곡인 F_1과 개방습곡인 F_2와의 관계를 보여주고 있다. Fig.의 하부에서 F_1과 F_2가 간섭하여 지그재그 형태의 간섭 모양을 보여주며, 이는 Ramsay (1967)의 습곡간섭상의 타입 3에 해당한다. F_2 습곡축면은 N24° E/44° NW의 자세를 보여준다. F_1과 F_2의 이러한 관계는 연구지역의 여러 노두에서 관찰되며, F_2는 동남동 버전스를 갖는 비대칭성 개방습곡으로 F_1은 이러한 개방습곡의 양날개에 등사습곡의 형태로 발달하는 것이 일반적인 경향이다(Fig. 8).

F_3 습곡: F_3 습곡은 지질도상에서 층리면의 주향의 변화로부터 인지된다. 주로 연구지역의 남서부 지역에서 서북서-동남동 방향의 습곡축을 가진다(Fig. 3a). 연구지역 내 노두상에서 다른 습곡과의 관계를 보기는 어려우나, F_3 습곡에 따른 L_2 방향의 변화로부터 F_3임을 확인할 수 있다.

동-서 주향방향의 단층과 D_2 드러스트의 관계: 모든 동-서 주향방향의 단층들(한두실과 월굴리 단층)은 D_2 드러스트들(당두산과 월굴리 드러스트)을 절단하고 있다. 그러므로 동-서 주향방향의 단층들은 D_2 드러스트 운동 이후에 형성된 것으로 보인다.

동-서 주향방향의 단층과 남-북 주향방향의 단층의 관계: 당두산내암군의 북쪽 부분에는 남-북 주향방향의 도미노형태의 정단층계가 당두산변성암복합체 내에 발달한다(Fig. 6d). 도미노를 이루는 각 정단층의 주향은 정북방향에서 N40° W 사이이다. Fig. 6d의 노두 전면은 중보들단층의 단층면이고, 이 단층면은 남-북 주향방향의 정단층계에 의해서 잘린다. 따라서 남-북 주향방향의 정단층운동이 동-서 주향방향의 정단층운동 후에 일어났음을 지시한다. 이는 앞에서 언급한 대로 항공사진에서도 관찰된다. 동-서 주향방향의 정단층운동이 D_2 드러스트운동 후에 일어났으므로, 거의 직각을 이루는 두 정단층계는 모두 D_2 이후의 단층들이다.

구조구

연구지역은 암상과 층리, 엽리의 방향 등의 특징에 따라 단층 등을 경계로 Fig. 9처럼 다섯 개의 구조구로 나눌 수 있다. Fig. 9는 광역적 엽리(regional foliation, S_{0-1} or S_1)와 파랑선구조를 입체망에 투영한 것이다. 각 구조구의 특징들은 다음과 같다.

구조구 1: 이 구조구는 제천화강암, 월굴리드러스트, 한두실단층 등에 의해서 구획되는 지역이다. S_{0-1}은 비교적 일정한 N30° E-N40° E 사이의 주향방향을 보이지만 다양한 경사를 보이면서 대원상에 분포하여, 구조구

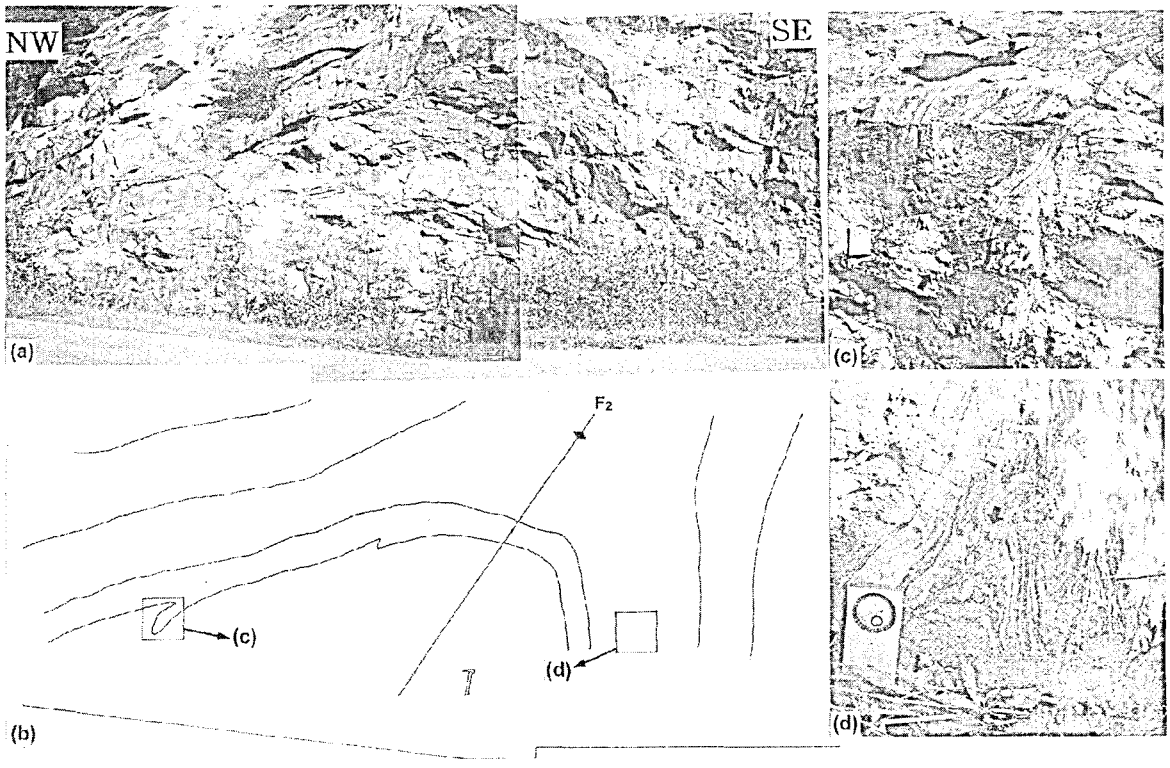


Fig. 8. Outcrop photographs of overprinting relationship of folds. (a) F_2 fold, develops in the Dori Formation, shows SE-vergence. (b) Sketch of (a) indicates the position of (c) and (d). (c) F_1 fold in the left limb of F_2 fold. (d) F_1 fold in the right limb of F_2 fold. Arrows in the (c) and (d) indicate the hinge of F_1 folds. See Fig. 1 for location.

1에 약 35° 방향의 습곡축을 갖는 직립습곡이 있음을 나타낸다(Fig. 9a). 이 사실은 35° 습곡축 방향의 Z 모양, 혹은 S 모양의 소습곡들이 잘 발달함을 보이는 야외조사의 결과와도 잘 일치한다(Fig. 3a). 이러한 습곡들은 노두에서 관찰되는 F_1 습곡의 재습곡으로부터 F_2 임을 확인할 수 있다. F_2 습곡축에 평행한 파랑선구조들이 Fig. 9b에 표시되어 있으며, Fig. 9a의 대원의 극점이 나타내는 F_2 습곡축의 방향과 잘 일치한다. 그 외에도 L_2 선구조와 거의 수직한 L_1 파랑선구조가 발달한다 (Fig. 3a, 9b).

구조구 2: 이 구조구는 한두실단층, 중보들단층, 동남부의 당두산변성암복합체 사이에 위치한 지역이다. 구조구 2에서 $S_{0\text{-}1}$의 주향방향은 다른 구조구와는 매우 다르다. 즉, 다른 구조구가 거의 남-북 또는 북북동-남남서의 주향방향을 보이는 반면에 구조구 2는 동북동-서남서 방향(N75° E/52° SE)의 주향을 보인다(Fig. 9c). Fig. 6c는 구조구 2에서 관찰되는 재습곡된 습곡으로부터 구조구 2 내에서 관찰되는 $S_{0\text{-}1}$의 급격한 변화가 언제 일어났는지에 대한 추측이 가능하다. Fig. 6c에서 F_1 습곡을 재습곡시키는 F_2 습곡의 습곡축면은 N24° E/44° NW이고, 습곡축의 방향은 약 30° NE이다. 이 방향은 구조구 1의 L_2 방향과 동일하며, 구조구 3의 L_2 방향과는 매우 유사하다(Fig. 9b, d, f). 따라서 구조구 1, 2, 3은 L_2 형성 이후에 이들의 방향을 크게 변화시키는 작용은 없었다고 해석된다. 다시 말하면, 구조구 2의 $S_{0\text{-}1}$이 현재와 같은 동북동-서남서 주향방향으로 바뀐 후에 L_2가 여러 구조구에서 공통적으로 생성되었다. 그러므로 현재 구조구 2의 $S_{0\text{-}1}$ 방향의 갑작스런 변화는 L_2 형성 이전, 즉 D_1 변형작용의 결과로 생각된다. 그 외에도 몇 개의 파랑선구조들이 측정되었으나, 위에서 제시한 경우를 제외하면, 이 선구조들이 F_1과 관련있는 L_1인지, 아니면 F_2와 관련 있는 L_2 인지 확실하지 않다 (Fig. 9d).

구조구 3: 이 구조구는 당두산내암군의 서쪽, 충주호

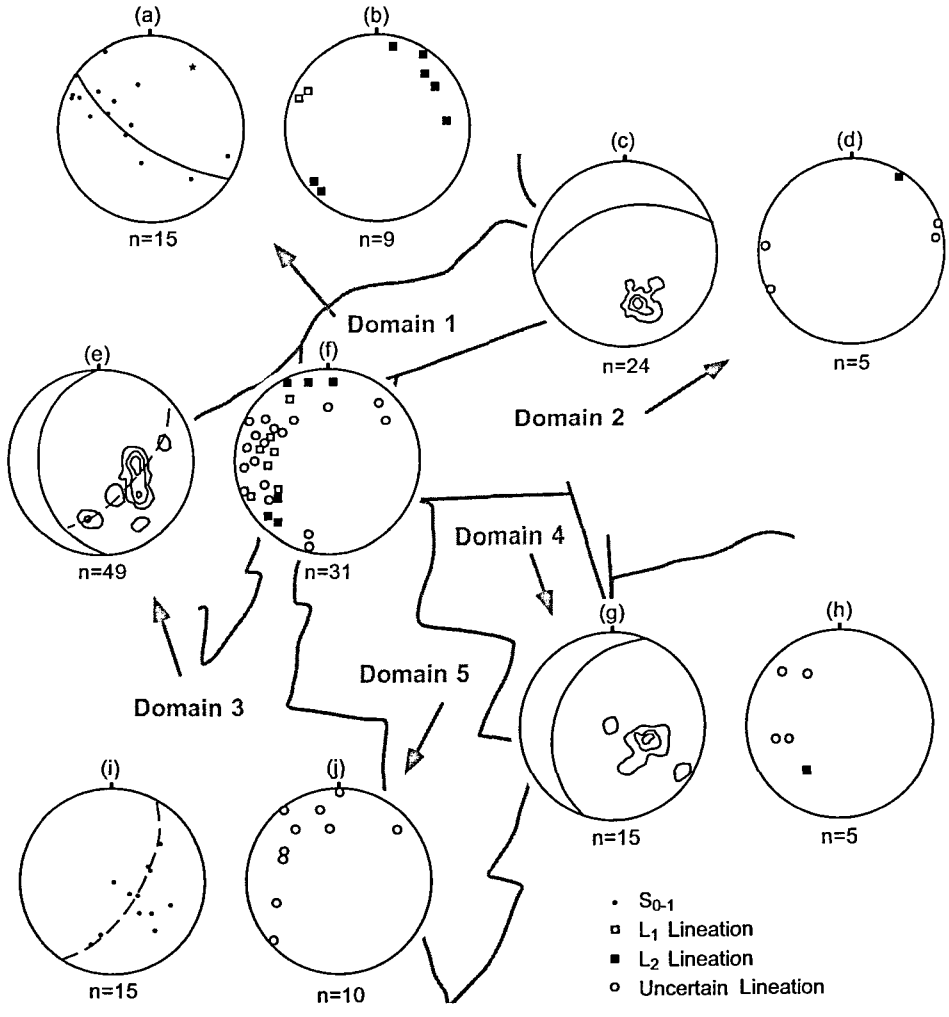


Fig. 9. Structural domains and equal-area lower hemisphere stereoplots of poles to S_{0-1} (a, c, e, g), schistosity (i) and crenulation lineations (b, d, f, h, j). (c) contours at 5.5, 16.5 and 27.5% per 1% unit area. (e) contours at 2.5, 7.5 and 12.5% per 1% unit area. (g) contours at 6, 18 and 30% per 1% unit area.

의 남쪽 지역이다. 구조구 3은 F_1, F_2 및 F_3가 간섭되어 연구지역에서 구조적으로 가장 복잡한 지역이다. S_{0-1}의 우세 방향은 NS/28° W으로, Fig. 9e에서 약한 대원이 나타난다. Fig. 9f를 참조해서 해석하면, 동북동-서남서 방향의 대원은 F_2 습곡을 반영하는 것으로 보인다. 이 구조구는 연구지역에서 관찰되는 F_1, F_2 및 F_3 세 습곡 구조들이 모두 잘 나타나는 구조구다. 즉, F_1 습곡은 서북서로 선경사하는(plunging) 횡와 등사습곡이고, F_2 습곡은 북동에서 북북동 방향의 습곡축을 갖는 동남동 버전스 드러스트와 관련된 직립 개방습곡이다. 마지막으로 F_3 습곡은 서북서 방향의 습곡축을 갖으나, 선구조를 수반하지 않는 직립 개방습곡으로 관찰된다.

구조구 4: 이 구조구는 당두산내암군과 연구지역 동남부의 당두산변성암복합체 사이에 위치하며, 중보들단층에 의해서 구조구 2와 구획되는 지역이다. 이 지역의 S_{0-1}의 방향은 N20° E/38° NW로 매우 일정한 방향성을 보여준다(Fig. 9g). 몇몇 선구조가 관찰되나 대부분 다른 구조와의 선후관계는 확실하지 않다(Fig. 9h).

구조구 5: 이 구조구는 당두산내암군 분포 지역이다. Fig. 9i에서 편리들은 약한 대원을 보인다. 이 대원은 Fig. 3a에서 볼 수 있듯이 동-서 주향방향과 남-북 주향방향의 편리들에 의해서 형성된 것으로 의미하는 바는

확실하지 않다. 선구조들은 구조구 4처럼 다른 구조와의 관계가 확실하지 않다(Fig. 9j).

변형사

연구지역에서는 앞서 언급한대로 최소한 3번의 변형작용이 인지된다. 첫 번째 변형작용(D_1)은 주로 습곡구조를 형성시킨 이벤트로 D_1 변형작용에 의한 단층을 관찰하기는 매우 어렵다. 이 변형작용은 현재 야외에서 관찰되는 광역적 엽리구조 S_1을 F_1 습곡의 습곡축면으로서 형성시켰다. 대부분의 F_1 습곡들은 모두 남남서 버전스를 보이는 횡와 등사습곡으로 관찰된다. F_1 습곡들의 남남서 버전스는 연구지역 남쪽인 덕산-청풍 지역에서 김유홍 외(1999)이 지적했듯이 D_1의 첫 번째 단계($D_{1\text{-}1}$)에 해당한다. 현재 D_1 변형작용의 흔적은 많이 지워졌으나, $S_{0\text{-}1}$의 궤적(trajectory)과 재습곡된 습곡으로부터 구조구 2가 다른 구조구에 비해서 D_1 변형작용에 의한 흔적($S_{0\text{-}1}$의 동-서 주향방향)이 많이 남아있는 지역으로 생각된다.

두 번째 변형작용(D_2)은 연구지역의 전반적인 구조적 방향(북북동-남남서 방향을 갖는 $S_{0\text{-}1}$와 드러스트의 주향방향, 대부분의 습곡의 습곡축 방향)을 결정한 변형작용이다. 현재 야외에서 관찰되는 대부분의 습곡, 드러스트, 파랑선구조 등이 이 이벤트의 산물로, 이 시기에 형성된 여러 드러스트들을 따라서 당두산변성암복합체가 도리층 상위로 충상하게 되었다. 당두산드러스트와 월굴리드러스트가 이 변형작용의 산물이다.

두 번째 변형작용 이후에 서남서-동남동 습곡축 방향의 습곡, 동-서 주향방향의 우수향-정단층, 남-북 주향방향의 서쪽 지괴가 하강한 정단층 등이 순차적으로 일어났다. 마지막 두 번의 단층운동은 연구지역의 지형적 특징인 남-북 방향과 동-서 방향의 계곡방향과 일치한다. 또 두 번째 드러스트에 의해서 노출된 당두산변성암복합체의 일부를 당두산내암군으로 변형시켰고, 현재와 같은 분포양상을 만들었다. 그러나 두 번째 변형작용 후의 세 가지 구조 운동이 하나의 변형작용의 결과인지는 확실하지 않다.

토 론

조선누층군과 옥천누층군의 경계지역에 부산혼성변성암, 부산안구상편마암, 부산혼성편마암류, 부산분쇄질편마암 등으로 불리운 부산변성암복합체와 당두산변성암복합체 등 선캠브리아기의 기반암이 노출된다는 것은 매우 중요한 사실이다. 특히 부산변성암복합체는 약 19억년의 연대측정결과(Sagong and Kwon, 1998)를 보이며 옥천누층군 내에 노출되어 있고, 당두산변성암복합체는 최소 약 17억년의 연대(Shibata *et al.*, 1983)를 보이며 조선누층군 내에 노출되어 있으므로 양자의 주변암과의 관계와 노출과정을 비교하는 것은 두 누층군의 상호관계와 변형사에 대한 유용한 정보를 줄 것이다.

먼저 주변암과의 관계에 대해 살펴보면, 제천도폭(김기완 등, 1967)에서는 부산변성암복합체를 서창리층의 상부로 보아 부산변성암복합체와 주변암인 서창리층과의 관계를 정합으로 생각했다. 김옥준 · 유강민(1977)은 부산변성암복합체에 접하는 층을 만지편암층이라 명명하였으나, 부산변성암복합체와 만지편암층과의 접촉부는 관찰하지 못 하였다. 대신에 만지층 서쪽으로 대향산규암층, 향산리돌로마이트층, 문주리층 등이 정합적으로 이어진다고 보고, 만지층을 대향산규암의 하부층인 계명산층에 대비시켰다. 김옥준 · 유강민(1977)은 부산변성암복합체를 화성기원으로 생각하고 만지편암층을 관입한다고 생각하여 양자의 관계를 관입으로 해석하였다. 임명혁 · 장태우(1993)는 부산변성암복합체를 둘러싸는 편암류가 부정합으로 부산변성암복합체 상위에 놓인 것으로 해석하였다. 같은 논문의 Fig. 9를 보면 서쪽 지역에서는 옥천누층군이, 동쪽 지역에서는 조선누층군이 부산변성암복합체로 대표되는 기반암 위에 부정합 관계로 쌓인 후, 옥천누층군이 조선누층군을 충상한다고 해석한 듯 하다. 이러한 연구 결과들에 의하면, 부산변성암복합체와 서창리층으로 대표되는 옥천누층군과의 관계는 부정합 내지 정합으로 보는 견해가 우세하다. 당두산변성암복합체에 대한 연구는 부산변성암복합체 만큼 심도있게 진행되지는 못 하였다. 서론에서 언급했듯이 제천도폭에서는 당두산변성암복합체를 서창리층으로 보았고, 조선누층군 위에 부정합으로 놓여있다고 생각하였다. 김옥준 외(1986), 민경덕 · 박혜심(1989) 등은 조선누층군이 당두산변성암복합체 위에 부정합으로 분포한다고 생각하였다. 결국 현재까지는 옥천누층군과 조선누층군이 모두 선캠브리아의 기반암 위에 부정합으로 놓여있다는 의견이 우세하며, 임명혁 · 장태우(1993)의 의견과 일치한다. 저자들은 김유홍

외(1996)에서 덕산 지역에서는 옥천누층군 중 서창리층이 조선누층군 상위에 단층 관계가 아닌 정합적 관계(현재는 부정합 관계로 생각)로 놓여있다고 주장한 바 있다. 위 의견들을 따른다면, 조선누층군이 금성, 덕산 지역에서 기반암 위에 퇴적된 후에 서창리층은 부산 지역에서는 기반암 위에, 덕산 지역에서는 조선누층군 위에 부정합 관계로 퇴적되었다는 결론에 이르게 된다. Cluzel (1992)의 옥천분지모델은 옥천분지가 열리기 전, 캠브리아 시기에 규암이나 석회암 등의 퇴적을 상정하고, 옥천분지가 열린 후 조선누층군과 옥천누층군이 동시에 퇴적되었다고 설명하고 있으므로, 여기서의 해석과는 매우 다르다 하겠다. 또 이 해석은 조선누층군 위에 옥천누층군이 부정합으로 퇴적되었다는 점에서 이민성 외(1998)의 의견과 일치한다. 그러나 동부에서 조선누층군이 퇴적되는 동안에 왜 서부에서는 아무런 퇴적작용이 없었는지에 대한 설명은 아직까지 제시된 바 없으며, 이에 대한 연구가 요구된다.

부산변성암복합체의 노출과정도 학자들마다 다양한 의견을 제시하고 있다. 노출과정과 직접적인 연관이 있을 것으로 생각되는 부산변성암복합체의 돔모양을 Cluzel *et al.* (1991)은 F_3와 F_4 습곡의 간섭형태로 생각했으며, 그들의 Fig. 18b의 단면을 보면 F_3 습곡은 약 60-90 의 익간각을 갖고 F_4는 거의 등사습곡의 형태를 보인다. 그러나 같은 논문의 Table 1을 보면 F_3는 개방(open)에서 밀착(tight) 습곡으로 기술하여 단면과 일치하나, F_4 습곡은 개방습곡으로 기술하여, 단면의 등사습곡과는 일치하지 않는다. 이러한 남-북 단면의 등사습곡의 형태를 임명혁 · 장태우(1993)는 D_2 단계의 칼집모양의 융기로 설명하였다. 이와 비슷하게 한래희 등(1996)은 부산변성암복합체를 북쪽과 남동쪽의 전단대를 따라 상승한 변성핵복합체로 보았다. 결국 현재까지의 연구결과들은 부산변성암복합체를 연성변형작용에 의한 융기 내지 상승으로 보는 의견이 우세하다 하겠다. 이 연구결과에 의하면, 당두산변성암복합체는 연성변형작용이 아닌 취성 또는 반취성 드러스트와 단층에 의해 노출된 것이다. 기존에 발표된 옥천누층군과 조선누층군이 받은 변형작용순서(Koh and Kim, 1995; Kim, 1996; 김유홍 외, 1999)에 따르면, 옥천대의 세 번 내지 네 번의 변형작용은 연성에서 점차 취성으로 바뀌어 왔다. 따라서 연성 변형작용에 의해 부산변성암복합체가 먼저 옥천누층군 위로 상승한 후에 취성 내지 반취성 변형작용에 의해 당두산변성암복합체가 조선누층군 상위로 상승한 것으로 해석된다. 대안으로서 부산변성암복합체와 당두산변성암복합체가 동시기에 상승했으나 깊이 차이에 의해서 부산변성암복합체는 연성 변형작용을, 당두산변성암복합체는 취성 내지 반취성 변형작용을 받았을 가능성도 있다. 그러나 현재의 연구결과들은 부산변성암복합체의 상승방향을 임명혁 · 장태우(1993)는 북쪽내지 북동쪽으로 생각했고, 한래희 외(1996)에도 예비 조사이기는 하나 부산변성암복합체가 상승한 전단대의 주향방향을 대체로 동-서로 생각하고 있다. 이러한 결과들은 당두산변성암복합체를 상승시킨 북북동-남남서 주향방향의 드러스트와는 매우 다른 방향으로 동시기에 형성되었다고 보기에는 어렵다. 물론 깊이에 다른 수직적 변형분할(vertical partitioning)이 노르웨이에서 보고된 바는 있으나(Northrup and Burchfiel, 1996), 이는 매우 예외적인 경우로서 이를 확인하기 위해서는 많은 증거가 필요하다.

결 론

1. 당두산변성암복합체는 D_2 드러스트인 북북동-남남서 주향방향의 당두산드러스트와 월굴리드러스트에 의해서 노출되었고, 그 일부가 D_2 이후에 동-서 주향방향의 우수향-정단층인 중보들단층, 서쪽 지괴가 하락한 남-북 주향방향의 고교단층에 의해서 당두산내암군으로 형성되었다.

2. 연구지역에서 당두산변성암복합체와 조선누층군과의 관계는 확인되지 않으나, 기존의 연구결과들에 의하면, 연구지역인 금성지역에서는 조선누층군이 기반암 위에 부정합으로, 연구지역 서쪽의 부산지역에서는 서창리층이 기반암 위에 부정합으로, 연구지역 남쪽의 덕산지역에서는 서창리층이 조선누층군 위에 부정합으로 분포할 가능성이 높다. 이러한 해석은 옥천분지의 형성과 발달과정에 대한 새로운 해석을 요구하며, 이에 대한 좀 더 자세한 연구가 요구된다.

3. 부산변성암복합체가 연성변형작용에 의해 옥천누층군 상위로 상승한 반면, 당두산변성암복합체는 취성 내지 반취성 변형작용에 의해 조선누층군 상위로 상승한 것으로 확인된다. 기존의 변형작용순서에 의하면, 고생대 이후 옥천대에 작용한 3-4번의 변형작용은 연성에서 점차 취성으로 바뀌어 왔으므로, 부산변성암복합체

가 먼저 상승한 후에 당두산변성암복합체가 상승한 것으로 해석된다.

사 사

이 논문을 읽어 주시고 유익한 비평과 지적을 하여주신 한국자원연구소 류충렬 박사, 공주대학교의 이동우 박사에게 감사를 드립니다. 이 연구는 교육부 기초과학 육성비(BSRI 97-98-5405)의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 대해 깊은 감사를 드립니다. 또한 2000년도 두뇌한국21사업에 의하여 부분 지원되었으며, 이에 대해서도 감사를 드립니다.

참고문헌

김규한 · 신윤수 · 1990, 충주-월악산-제천 화강암류의 암석화학적 연구. 광산지질, 23, 245-259.

김기완 · 이홍규 · 박봉순, 1967, 한국지질도 제천도폭(1:50,000) 지질도 및 설명서. 국립지질조사소, 46 p.

김옥준 · 유강민, 1977, 제천군 하천리-월굴리 지역의 지질구조와 암석학적 연구. 광산지질, 10, 19-36.

김옥준 · 민경덕 · 김규한, 1986, 옥천대의 지질 및 광물자원에 관한 연구-제천남부의 옥천계와 조선계의 경계 및 부근의 지질-광산지질, 19, 225-230.

김용준, 1979, 제천 화강암체에 대한 암석학적 연구. 광산지질, 12, 115-126.

김유홍 · 김정환 · 고희재, 1996, 충청북도 제천군 덕산면 일대의 지질 : 조선누층군과 옥천누층군의 접촉관계. 지질학회지, 32, 483-499.

김유홍 · 김정환 · 이재욱, 1999, 충북 제천군 덕산-청풍면 일대의 조선누층군과 옥천누층군의 지질구조. 지질학회지, 35, 233-252.

대한광업진흥공사, 1977, 광상시추조사보고 제 3 호. 1124 p.

대한광업진흥공사, 1979, 광상시추조사보고 제 4 호. 1145 p.

대한광업진흥공사, 1982, 광상시추조사보고 제 5 호. 955 p.

민경덕 · 박혜심, 1989, 제천 서남부 옥천대 지역에 대한 중력탐사 연구. 광산지질, 22, 91-102.

윤운상, 1994, 태백산지역, 주천-영월 일대의 지질구조 및 변형사. 서울대학교 이학석사 학위논문, 119 p.

이민성 · 여정필 · 이종익 · 좌용주, S. Yoshida, 이한영, 1998, 옥천계의 빙하기원 다이아믹타이트와 그 지질시대 및 고생대 말의 한반도의 고지리. 지질학회지, 34, 343-370.

임명혁 · 장태우, 1993, 북동부 옥천구조대 부산지역의 지질구조 및 변형작용사. 지질학회지, 29, 540-550.

한대희 · 이진한 · 박영도, 1996, 부산변성암복합체 : A metamorphic core complex?. 제 51차 대한지질학회 학술발표회 요약집, 부산대학교, 75.

Chester, F. M. and Logan, J. M., 1987, Composite planar fabric of gouge from the Punchbowl Fault, California. Jour. Struct. Geol., 9, 621-634.

Cluzel, D., 1992, Ordovician bimodal magmatism in the Ogcheon Belt (South Korea): intracontinental rift-related volcanic activity. Jour. Southeast Asian Earth Sci., 7, 195-209.

Cluzel, D., Jolivet, L., and Cadet, J. P., 1991, Early Middle Paleozoic intraplate Orogeny in the Ogcheon Belt (South Korea), A new insight on the Paleozoic buildup of East Asia. Tectonics, 10, 1130-1151.

Jin, M. S., 1995, Geochronology and cooling history of the Mesozoic Granite Plutons in the central part of the Ogcheon Fold Belt, South Korea. Jour. Petrol. Soc. Korea, 4, 153-167.

Kim, J. H., 1996, Mesozoic tectonics in Korea. Jour. Southeast Asian Earth Sci., 13, 251-265.

Koh, H. J. and Kim, J. H., 1995, Deformation sequence and characteristics of the Ogcheon Supergroup in the Goesan area, Central Ogcheon Belt, Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, 31, 271-298.

Northrup, C. J. and Burchfiel, B. C., 1996, Orogen-parallel transport and vertical partitioning of strain during oblique collision, Efjorden, north Norway. Jour. Struct. Geol., 18, 1231-1244.

Ramsay, J. G., 1967, Folding and fracturing of Rocks. McGraw-Hill, New York. 568 p.

Ryoo, C. R., 1997, Tectonics in the contact zone between the Precambrian basement (Gyeonggi Massif) and the Paleozoic sedimentary cover (Ogcheon Belt), Korea. 50th Anniversary of the Geological Society of Korea, Seoul, 59-64.

Sagong, H. and Kwon, S. T., 1998, Pb-Pb age and uplift history of the Busan gneiss complex in the Okchon Belt, Korea: a comparison with the Bagdalryeong gneiss complex in the Kyonggi Massif. Geoscience Journal, 2, 99-106.

Shibata, K., Park, N. Y., Uchiumi, S., and Ishihara, S., 1983, K-Ar Ages of the Jecheon Granitic Complex and related molybdenite deposits in South Korea. Mining Geology, 33, 193-197.

2000년 4월 10일 원고 접수
2000년 6월 10일 원고 채택