

## 단양 천동리 지역 옥천대/영남육괴의 접촉관계와 소위 화강암질 편마암의 Pb-Pb 연대

권성택 · 이진한<sup>1</sup> · 박계현<sup>2</sup> · 전은영

연세대학교 지질학과, <sup>1</sup>고려대학교 지구환경과학과, <sup>2</sup>대전 기초과학지원연구소

**요 약** : 단양에서 동남동으로 약 6 km 떨어진 천동리 지역에는 조선누층군의 최하부층인 장산규암과 영남육괴의 선캠브리아기로 추측되어온 엽리상 화강암(소위 화강암질 편마암)이 직접 접하고 있다. 이들의 관계는 전통적으로 장산규암이 엽리상 화강암을 부정합으로 피복한 것으로 생각되었다. 그러나, 장산 규암의 하부에 관찰되는 소위 기저역암은 주로 규암으로 엽리상 화강암의 역을 전혀 가지고 있지 않아 두 암석 단위의 경계를 부정합으로 보기는 힘들다. 반면, 이 지역의 최근 구조지질학적 연구는 이 경계가 연성전단운동에 의한 단층접촉임을 보이고 있다. 그러나, 이 전단대의 전단감각과 운동시기에 대해서는 아직 분명하지 않다. 우리는 옥동 단층의 일부인 천동리 지역 반취성전단대(semi-brittle shear zone)에서 나타나는 엽리상 파쇄암(foliated cataclastite)과 천매암쇄암(phyllonite)의 중구조 및 미구조를 관찰하였는데, 이들은 북서측의 장산규암층이 남동측의 엽리상 화강암에 대해서 북동측으로 이동한 전단감각(top-to-the-northeast shearing)을 나타낸다(즉, 우수 주향이동). 전단운동의 시기를 제한하는 한 방법으로, 전통적으로 선캠브리아기로 추정되나 그 관입시기가 확인되지 않은 엽리상 화강암에 대하여 Pb-Pb 연대측정을 시도하였다. 즉, 구조운동을 받은 화강암체의 관입시기는 구조운동 시기의 상한을 지시할 수 있기 때문이다. 엽리상 화강암의 전암 및 장석과 포획암의 전암에 대한 Pb 동위원소 자료는  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  그림에서  $2.16 \pm 0.15$  Ga ( $2\sigma$ ; MSWD=4.4)의 연대를 정의한다. 이 연대는 엽리상 화강암의 관입시기로 해석되는데, 보고된 영남육괴의 화성활동 시기와 잘 일치한다. 이 원생대 초기의 관입시기는 전통적인 생각이 옳음을 확인해 주며 전단운동의 시기를 알기 위해서는 다른 방법이 시도되어야 함을 지시한다.

**핵심어** : 옥동단층, 우수 반취성 주향이동, 지구조구 경계, 선캠브리아기 엽리상 화강암

### 서 론

전통적으로 우리나라의 옥천습곡대는 인접하는 경기육괴 및 영남육괴와 부정합적인 관계를 가지고 접촉하고 있다고 알려져 왔다. 그러나, 최근 연구에 의하면 이들 경계부가 적어도 부분적으로는 구조적인 접촉관계임이 밝혀지고 있다. 옥천대와 영남육괴의 일부 경계는 주향이동 전단대로 알려져 있으며(김정환 외, 1989; Cluzel *et al.*, 1991), 옥천대와 경기육괴의 일부 경계는 정연성전단대 관계로 알려졌다(이진한 외, 1995). 이러한 지구조구 사이의 경계특성을 잘 이해하는 것은 한반도의 지질역사를 바로 밝히는 데 매우 중요한 과제라고 할 수 있다.

김정환 외(1989)는 옥동-점촌 사이 북동-남서 방향의 약 100 km에 걸친 옥천대-영남육괴의 경계부가 단층접촉임을 처음으로 밝혔으며, 이를 옥동단층으로 정의하였다. 그러나, 이 단층의 구조지질학적 특징과 운

동시기에 대해서는 아직 분명하지 않다. 김정환 외(1989)는 이 단층이 좌수주향이동의 전단 감각을 보이는 것으로 해석하였으나, Cluzel *et al.* (1991)은 오히려 우수 주향이동으로 해석하였다. 옥동단층의 운동시기에 관해서도 위의 두 저자들은 견해를 달리하고 있다. 김정환 외(1989)는 Yun (1983)이 옥동지역 예밀리의 석영-전운모 편암류에 대하여 측정된 K-Ar 운모 연대인  $562 \pm 5$  Ma,  $266 \pm 5$  Ma,  $233 \pm 5$  Ma가 옥동단층의 운동과 관련되었을 것으로 간주하고 캠브리아기-트라이아스기 사이의 다단층운동을 추정하였다. 그러나, 김정환 외(1989)가 정의한 옥동단층은 엽리상 화강암이 조선누층군 뿐만아니라 백악기에 관입한 것으로 알려진 월악산 화강암과도 단층접촉하고 있음을 나타내고 있는데(김정환 외, 1989의 Fig. 2), 이 관찰이 맞을 경우 옥동단층의 운동시기는 백악기 이후임을 나타내기 때문에 옥동단층의 궁극적인 운동시기를 현재로서는 판단하기 힘들다. 한편, Cluzel *et al.* (1991)은 옥동단

층이 한반도 남서부에서 두드러지게 나타나는 우수 주향 이동 호남전단대의 북동측 연장으로서 해석하여 트리아스기 말의 운동으로 간주하고 있다.

이 연구는 옥동단층의 일부에 해당되는 단양 부근 천동리 지역에 나타나는 옥천대-영남육괴의 경계에 대해서 보다 자세한 구조지질학적 자료를 제시하고, 옥동단층에 의해 직접 옥천대와 접하고 있으나, 아직 관입시기가 알려지지 않은 영남육괴 엽리상 화강암(소위 화강암질 편마암)의 연대 측정 결과를 보고한다. 엽리상 화강암은 전구조(pre-tectonic) 혹은 동구조(syntectonic) 관입을 지지하기 때문에 변형운동의 시기를 제한하는데 유용하다. 예를들어, Cluzel *et al.* (1991)은 호남전단대의 운동시기를 전구조 혹은 동구조 암체(순창 엽리상 화강암과 대강 엽리상 화강암)와 후구조 관입암체(남원 화강암)의 관입시기를 이용하여 변형시기를 트리아스기로 제한하였다.

### 연구지역의 지질

연구지역은 단양에서 동남동 쪽으로 약 5 km 떨어진

천동리 지역으로 옥천대의 조선누층군과 영남육괴의 엽리상 화강암(소위 화강암질 편마암)이 직접 접하는 곳이며, 김정환 외(1989)가 정의한 옥동단층의 일부에 속한다(Fig. 1). 조선누층군의 층들은 대체로 북동-남서 방향의 주향과 북서 방향의 경사를 보이며, 일반적으로 북서쪽으로 좁어지는 정상적인 층서를 가지고 있다. 엽리상 화강암은 경계부근에서 경계와 평행하게 두드러진 엽리구조를 가지며, K-장석 거정을 가지는 반상 복운모 화강암이다. 석기는 중립-조립이며, 반정은 약 10 cm 크기에 달한다. 이 화강암내에는 편암, 규암, 석회규산염 등의 포획암이 흔히 관찰된다. 연구지역에서 조선누층군의 층리면, 엽리상화강암의 엽리면, 그리고 두 암체들의 접촉면은 대체로 평행한 조화적인(concordant) 관계를 보인다. 과거에는 두 구조구의 직접 경계는 부정합으로 생각되었다. 즉, 조선누층군의 최하부층인 장산규암층의 하부에 역이 존재하므로 기저역암으로 해석되어 선캠브리아기 암석으로 생각되고 있는 엽리상 화강암을 부정합으로 피복하는 것으로 간주되었다. 그러나, 장산규암 하부의 역들은 주로 규암역으로 구성되어 있고, 두 암석

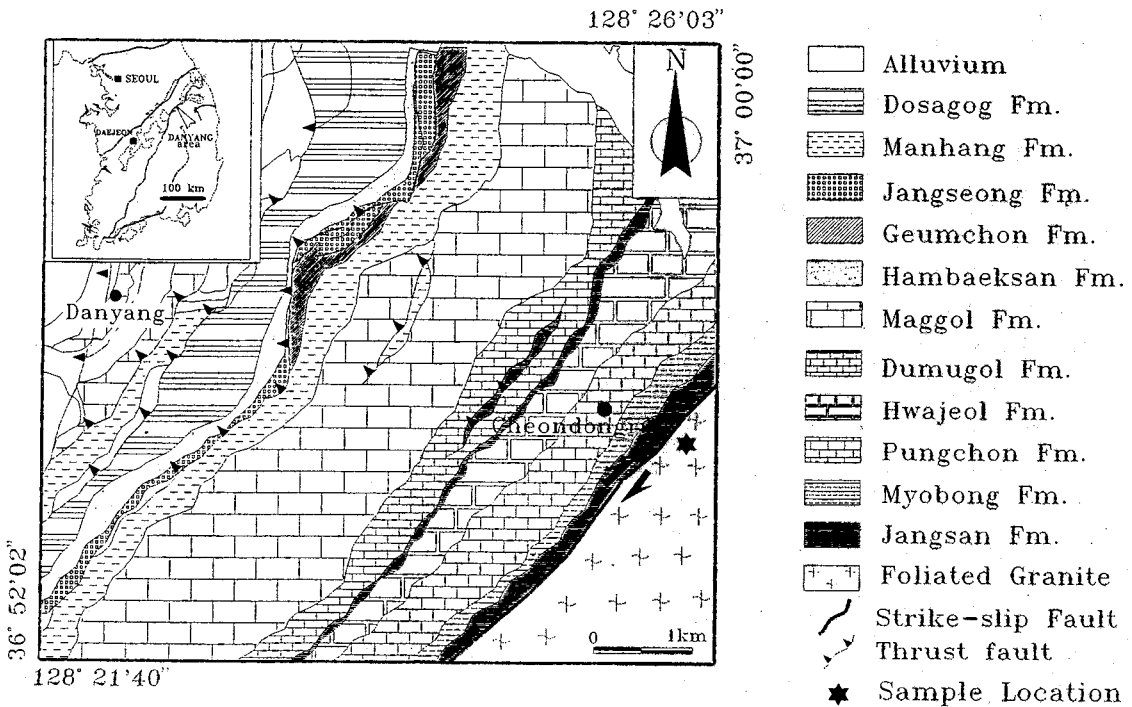


Fig. 1. Geologic map of the study area (from Kim, 1994). The inset shows the location of the study area.



Fig. 2. Outcrop photograph of phyllonite zone (Ph) between the Jangsan Quartzite (left) and the foliated cataclasite (right).

단위 사이가 부정합일 경우 고려될 수 있는 엽리상 화강암의 역들은 관찰되지 않아 이 지역의 경계에 관한 부정합 관계로 해석하는 것은 무리가 있다.

우리들의 야외관찰에 의하면, 두 암체의 접촉경계를 따라서 약 20~30 cm 두께의 천매암쇄암(phyllonite)이 존재하며(Fig. 2), 천매암쇄암과 엽리상 화강암 사이에는 아직 두께가 확인되지 않은 엽리상 파쇄암(foliated cataclasite; Chester *et al.*, 1985)이 나타난다(Fig. 3). 이 천매암쇄암과 엽리상 파쇄암이 이루는 반취성 전단대(semi-brittle shear zone) 내 엽리의 주향/경사는 N40°E/50°NW로 주위 장산규암층의 층리, 엽리상화강암의 엽리 그리고 천매암쇄암과 장산규암과의 접촉경계에 대체로 평행하다. 천매암쇄암의 엽리면상에 나타나는 운모의 정향배열(preferred orientation)과 신장된 석영과 석영집합체의 정향배열로 정의되는 광물/신장 선구조(mineral/elongation lineation)는 N20~30°E의 트렌드와 약 20°의 플러너지를 가진다.

엽리상 화강암이 반취성 전단작용을 받아 형성된 엽리상 암쇄암은 미세립의 기질, 잔쇄반정 및 소량의

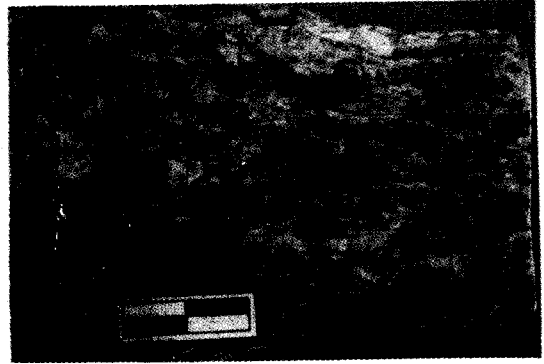
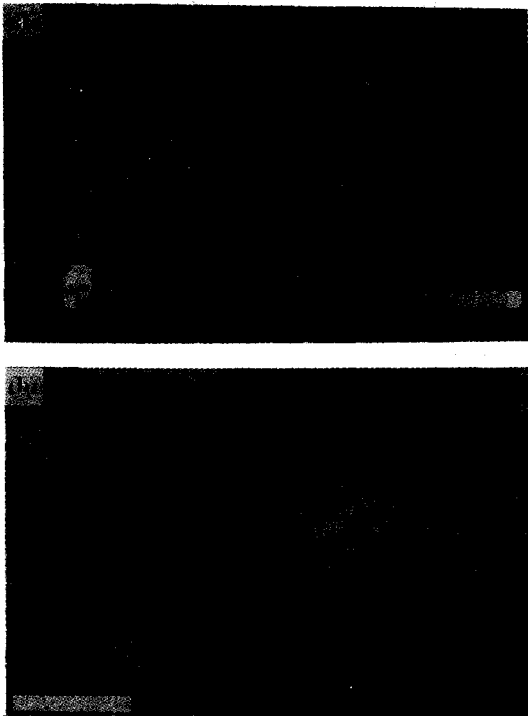


Fig. 3. Polished hand specimen of foliated cataclasite cut perpendicular to foliation and parallel to mineral lineation. Scale bar is 2 cm.



Fig. 4. Photomicrograph of foliated cataclasite. Thin-section is cut perpendicular to foliation and parallel to mineral lineation. The foliation is parallel to the length of the photograph. Cross polars. Scale bar is 5 mm.

전기석(0.05~0.6 mm)으로 구분된다(Fig. 4). 기질은 주로 백운모, 약간의 석영과 녹니석으로, 잔쇄반정은 주로 석영(0.2~7 mm, 대부분은 1~3 mm), 백운모(0.2~2 mm), 불투명광물(0.5~2 m) 등으로 이루어져 있다. 구성된 석영의 잔쇄반정들은 파동소광과 변형띠(deformation band)를 보이며 일부에는 조각형 파동소광(patchy undulatory extinction)이 나타나기도 한다. 이러한 미구조(microstructure)들은 결정내 단열(intragranular fracture)에 의해 잘려져 있다. 백운모의 잔쇄반정들은 키크(kink)되어 있거나 파동소광을 보인다. 엽리상 파쇄암에서의 엽리는 기질내 운모와 파쇄된 석영잔쇄반정 장축의 정향배열 그리고 전단대 경계에 대체로 평행한 단열과 미단층(microfaults)에 의해 정의된다(Fig. 3과 4; Hobbs *et al.* (1976)의 214쪽 Fig. 5.1c 참조).



**Fig. 5.** Photomicrographs of phyllonite. Thin-section is cut perpendicular to foliation and parallel to mineral lineation. The foliation is parallel to the length of the photograph. (a) Cross polars. Note that there are much less porphyroclasts than in foliated cataclasite. Scale bar is 5 mm. (b) Muscovite porphyroclasts with S/C microstructure indicating dextral (top-to-the-northeast) shear sense. Small grains of tourmaline overgrowing the foliation are shown in the lower right of the photograph. Plane light. Scale bar is 0.3 mm.

반취성 전단대 내의 고 변형대(high strain zone)에 발달한 천매암쇄암은 엽리상 파쇄암에 비해 잔쇄반정의 양이 현저히 적고(따라서 주로 백운모로 이루어진 기질의 양이 많음) 잔쇄반정의 크기(0.2~3 mm)도 작으며 엽리와 선구조가 강하게 나타난다. 석영과 운모 잔쇄반정의 결정내 미구조(intragranular microstructure)는 엽리상 파쇄암의 그것과 큰 차이가 없다. 엽리에 수직하고 선구조에 평행하게 제작된 박편에서 운모들은 Type I S/C 구조(Lister and Snoke, 1984), 전단띠(shear band) 등의 비대칭성을 보이며 석영 잔쇄반정은  $\delta$ 형 꼬리(Passchier and Simpson, 1986)를 일부 가진다(Fig. 5). 이러한 비대칭성은 북서측의 장산규암층이 남동측의 엽리상 화강암에 대하여 북동측으로 이동한 전단감각(top-to-



**Fig. 6.** Photograph of nearly horizontal outcrop displaying shear zone within the Jangsan Quartzite. Oblique extensional crenulation cleavage indicates dextral (top-to-the-northeast) shear sense.

the-northeast shearing)을 지시한다. 즉, 약간의 정전단 요소를 포함한 우수 주향이동을 나타낸다. 이 전단감각은 김정환 외(1989)가 기술한 옥동단층의 전반적인 전단감각인 좌수 주향이동과 정반대이며, Cluzel *et al.* (1991)이 기술한 전단감각과 일치한다.

한편 장산규암층은 장축이 0.4-10 mm 인 단결정 석영쇄설편 내지는 복결정 규암편으로 이루어져 있으며(대부분은 장축이 약 2 mm), 약간의 백운모가 기질로 나타난다. 쇄설편과 암편들은 타원체 모양으로 신장되어 있으며 타원체는 그 축비가 약 2:2:1인 부푼 팬케익 형태(pancake type)이다. 대부분의 석영들은 파동소광, 변형띠, 불합상 경계 등을 보이고 일부 석영 입자들은 동력재결정작용(dynamic recrystallization)의 한 종류인 회전재결정작용(rotational recrystallization; Urai *et al.*, 1986)의 증거를 보이기도 한다. 규암층내의 미구조요소들은 대칭적이어서 동축변형(coaxial deformation)이 우세하였던 것을 시사한다. 그러나 천매암쇄암으로 이루어진 연성전단대에서 북서측으로 약 1 m 떨어진 장산규암내에도 약 10 cm 두께의 연성전단대가 규암층의 층리면과 평행하게 발달하며 비대칭구조에 의한 전단감각 역시 우수 주향이동을 나타내(Fig. 6) 엽리상 화강암과 조선누층군 사이의 전단운동시 장산규암층도 특정층을 따라 전단작용을 받았음을 지시한다.

### 연대측정 시료와 분석방법

연구지역의 암석은 비교적 풍화가 심하다. 남 동위

원소 분석을 위하여 가능한한 신선한 시료를 채취하였으며, 필요에 따라 전석도 선택하였다. 분석된 시료는 노두에서 채취된 엽리상 화강암(CDA)과 약 10×20 cm 크기의 운모가 많은 외래암편(surmicaceous xenolith; CDB), 계곡에서 채취된 전석 2 시료(CDF1과 CDF2)이다. 외래암편을 제외한 시료는 흑운모 화강암의 광물조성을 갖고 흑운모의 배열 및 신장된 석영등에 의해 엽리구조를 보인다. 석영은 2-5 mm 내외의 타형으로 광물의 간극을 채우는 형태 혹은 재결정되어 집합체로 나타나며 변형작용 등에 의한 파동소광 및 톱니모양의 입자경계를 갖는다. 사장석은 3-7 mm 크기로 알바이트 쌍정을 보이는데 CDF2 이외의 시료에서는 쌍정면 혹은 결정 경계부를 따라 견운모가 관찰된다. CDF1 시료에서의 경우 신선한 사장석은 거의 보존되어 있지 않고 단지 쌍정 흔적만이 나타난다. 정장석으로는 미사장석과 피사이트질 미사장석이 주로 산출되는데 대체로 3-10 mm로 상대적으로 결정의 크기가 크다. CDF1 시료에서는 미사장석이 우세하게 나타나지만 심한 견운모화 작용을 받아 식별에 어려움이 있는 반면, CDF2 시료는 피사이트질 미사장석이 우세하게 나타나고 변질에 의한 영향은 관찰되지 않으며 70 mm 정도의 반경으로 산출되기도한다. 흑운모는 1-3 mm 내외의 입자크기로 분석된 시료에서 나타나는 유일한 유색광물로 적갈색의 다색성을 보인다. 벽개면을 따라 녹니석이나 산화철 등이 관찰되기도 하고 경우에 따라서 저콘을 포획하기도한다. 비교적 소량으로 관찰되는 백운모는 흑운모와 같이 변형작용에 의해 파쇄되었거나 벽개면을 따라 열극이 발달하기도 한다. 1-1.5 mm 내

외의 크기로 나타나는 백운모는 잘 발달된 벽개면을 가지면서 흑운모등에 의해 부분적으로 절단되는 것과 기질부나 장석을 치환하여 나타나는 이차적인 것으로 구분되어진다. 부구성광물로는 저어콘, 인회석, 티탄철석, 녹염석과 불투명광물이 관찰된다. 외래암편 시료는 흑운모, 석영, 방해석, 불투명광물, 단사조 이사이트(clinozoisite) 등으로 구성되어 있는데, 그중 흑운모가 가장 우세하다. 이들 구성광물의 크기는 2 mm 미만의 세립이며 흑운모는 진한 갈색의 다색성을 가진다.

이들 시료로부터 탕스텐 카바이드 불밀을 이용하여 전암 분말을 만들었으며, 엽리상 화강암 시료에서 장석을 분리하였다. 분말시료와 분리된 장석의 납 동위원소비는 대전 기초과학연구원연구소에 있는 열이온화 질량분석기를 이용하여 분석하였다. 납의 화학분리와 질량분석 절차에 대해서는 권성택과 박계현(1993)에 자세하게 기술되어있다. 장석은 녹이기 전에 결정에 붙어있을 수 있는 불순물을 제거하기 위하여 따뜻한 6N HCl에 약 1시간 동안 산처리하였다. 측정된 표준시료 NBS981의 동위원소비는 추천값에 대해 단위질량당  $0.100 \pm 0.025\%$ 의 분별을 보였다. 분석의 전과정에 대한 납의 배경값(blank)은 1 ng 이하이다. 비록 분석된 시료의 납 함량을 측정하지 않았지만, 일반적인 화강암질암의 전암과 장석의 납 함량이 약 20 ppm 정도이고 사용한 시료의 양이 약 30-50 mg이므로, 배경값은 측정된 납 동위원소비에 영향을 끼치지않는다고 판단된다. 등시선의 계산에는 Ludwig (1990)의 ISOPLOT 프로그램을 이용하였으며, 오차는  $2\sigma$ 로 표현하였다. 측정된 동위원소

Table 1. Pb isotopic data of the Cheondongri foliated porphyritic granite

sample	description	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
CDA-WR	outcrop	21.037	16.110	40.328
CDA-f	feldspar	20.110	16.001	38.693
CDB-WR	micaceous xenolith	20.291	16.033	38.451
CDF1-WR	float	19.700	15.848	39.008
CDF1-f	feldspar	18.962	15.888	38.164
CDF2-WR	float	19.220	15.888	39.287
CDF2-f(g)	grey K-f megacryst	17.201	15.613	36.578
CDF2-f(w)	feldspar	17.884	15.679	37.274

Abbreviation: WR, whole rock

비는 Table 1에 수록되어있다.

**해석 및 결과,**

측정된 납 동위원소 비에서 전암보다 장석이 낮은 값을 보이는데, 이는 장석의 U/Pb비가 작아 초기치에 가까운 것으로 알려진 바(Faure, 1986)와 같다. 같은 시료(CDF2)의 장석에서도 K-장석 거정이 석기의 장석보다 낮은 값을 보이는 것이 특징적이다.

납동위원소 자료를 Pb 상관도에 나타내었다(Fig. 7).  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  그림에서 전체적으로 선형 관계를 보이는데, 시료 CDF1의 전암과 장석 자료는 이 선형관계에서 벗어나 보인다. 이는 암석기재에서 관찰되는 변질작용의 영향으로 생각된다. 이들 2 자료를 제외하고 계산된 Pb-Pb 연대는  $2.16 \pm 0.15$  (2 $\sigma$ ) Ga (가중편차제공평균: MSWD=4.4)이며 일 단계(single stage) 모델  $\mu$  값은 8.37이다. 이러한 값 들은 CDF1의 장석 자료를 포함하여도 크게 변하지 않는다. 외래암편 시료 CDB도 이 등시선에 점시되는 점은 주목할 만하다. 이는 화강암질 마그마의 관입시 포획된 외래암편의 납 동위원소비가 마그마의 그것과 균질화된 것을 나타내는데, 이는 이런 상황에서 납의 분산(diffusion)이 활발한 것을 시사한다. 비록 원소의 종류는 다르지만, Sr의 경우에서도 유사한 현상이 보고된 바가 있다(Pin, 1991). 이러한 현상은 화강암질 암체의 Pb-Pb 혹은 Rb-Sr 연대를 구하기 위하여 외래암편도 이용될 수 있음을 지지한다.

화강암질암의 전암-장석 Pb-Pb 연대는 장석이 초기치를 나타낸다고 생각되기 때문에 전암 Pb-Pb 연대와 유사한 의미를 가진다고 해석할 수 있다. 화강암질 관입암체의 전암 Pb-Pb연대는 일반적으로 전암 Rb-Sr 혹은 U-Pb 저온 연대와 유사하기 때문에 관입시기를 나타낼 수 있다(Moorbath and Taylor, 1985). 영남육괴의 분천 편마암질 화강암의 경우 박계현 외(1993)가 보고한 전암 Pb-Pb 연대( $1920 \pm 56$  Ma)는 이덕원(1988)의 Rb-Sr 전암 연대 ( $1863 \pm 103$  Ma)와 오차한계내에서 일치한다. 비록 앞으로 다른 연대측정 방법으로 확인되어야 하겠지만, 잠정적으로 우리는 이 2.16 Ga 연대를 엽리상 화강암의 관입시기로 해석한다. 이 시기는 현재까지 알려진 영남육괴 북동부의 화강암질 편마암의 관입시기(주승

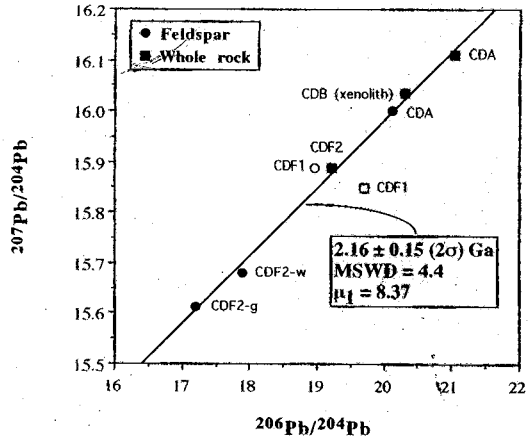


Fig. 7.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  isochron diagram. Note that the data for the open symbols were excluded during calculation of the isochron.

환과 김성재, 1986; 박계현 외, 1993; Lee *et al.*, 1994)와 일치하며, 이는 영남육괴 북동부에 원생대 초기의 활발한 심성활동이 있었음을 지지한다.

**토의 및 결론**

단양 천동리지역에서 직접 접하고 있는 조선누층군과 엽리상 화강암의 접촉관계는 i) 단층접촉, ii) 부정합, iii) 관입접촉의 가능성이 있었으나, 이 연구에서 밝혀진 엽리상 화강암의 관입시기가 2.16 Ga이고 두 암체 사이에 비교적 좁은 반취성 전단대가 관찰되므로 두 암체 사이의 접촉관계는 이전의 연구들(김정환 외, 1989; Cluzel *et al.*, 1991)이 제안한 대로 전단운동에 의한 단층접촉임이 확인되었다. 그러나 전단감각은 김정환 외(1989)가 제안한 바와는 달리 북서측의 조선누층군이 남동측의 엽리상 화강암에 대하여 북동측으로 이동한 전단감각(top-to-the-northeast shearing)을 지지한다. 즉, 약간의 정 전단요소를 포함한 우수 주향이동을 나타낸다. 또한 엽리상 화강암의 관입시기는 영남육괴 북동부의 화강암질 편마암의 관입시기와 유사하여(박계현 외, 1993; Lee *et al.*, 1994) 이 엽리상 화강암은 영남육괴 기반암의 일부일 가능성이 있다. 그러나 연구지역에서 영남육괴와 옥천대의 경계가 원래 부정합이었다가 후의 조산운동시 그 부정합면을 따라 전단운동이 일어났는지 혹은 원래 격리된 지대(terrane)이었으나 후

에 전단대를 따라 병렬된(juxtaposed) 것인지는 앞으로 더 연구가 되어야 한다. 예를 들면 Cluzel *et al.* (1991)은 후자의 가능성을 주장하여 북중국블럭에 속하는 영남육괴가 트라이아스기시 연성전단대(소위 "호남전단대")를 따라 수백 km 이동하여 남중국블럭에 속하는 옥천대와 접하게 되었다고 주장하였다. 그러나 이 모델의 문제점들은 이미 Ree and Hwang (1994)에 의해 지적된 바가 있다.

반취성 전단대에서는 일반적으로 파쇄유동(cataclastic flow)에 의해 변형이 일어나는데 이 변형기구(deformation mechanism)는 거시적으로(macroscopically) 그리고 의견상으로는 연성의 유동(ductile flow)이나 기계적으로(mechanically) 취성 변형과 같이 압력에 민감한 변형이다(Tullis and Yund, 1987; Chester, 1989).

화강암질암에서 파쇄유동이 일어나면 장석의 단열강도(fracture strength)가 석영의 강도보다 낮기 때문에 장석은 쉽게 파쇄되면서 변형의 대부분을 수용하게 된다(Tullis and Yund, 1977, 1987; Evans, 1988). 파쇄된 장석은 어렵지 않게 필로규산염 광물(phyllsilicates)로 변하게 되며 필로규산염 광물에는 슬립(slip)이 비교적 용이하기 때문에 변형이 집중되고, 이 광물들이 정향배열을 하게 되어 엽리상 파쇄암이 만들어지게 된다(Evans, 1988). 한편 석영은 변형 초기에는 비교적 적은 변형(취성 혹은 연성)을 받게 되고 변형작용이 계속됨에 따라 기질에 장석이 변한 필로규산염 광물이 많아지면서 단단한 물체(hard object)로 작용하여 잔쇄반정이 된다. 이렇게 만들어진 엽리상 파쇄암이 계속적으로 변형이 되면 잔쇄반정들은 점차적으로 파쇄되어 입자크기감소(grain size reduction)가 일어나 천매압쇄암으로 변하게 된다. 연구지역의 엽리상 파쇄암과 천매압쇄암에서 관찰되는 석영잔쇄반정내의 파동소광과 변형띠 등이 실제로 결정소성변형(crystalline plastic deformation)에 의한 것인지를 밝히기 위해서는 앞으로 투과전자현미경(transmission electron microscope)을 이용한 연구가 필요하다. 예를 들면 Tullis and Yund (1987)와 Goodwin and Wenk (1990)는 각각 장석과 흑운모에서 광학현미경(optical microscope)을 통해 관찰되는 결정소성변형의 특징들이, 전자현미경을 이용한 연구결과 실제로

는 결정내 파쇄작용(intracrystalline cataclasis)에 의한 것임을 밝힌 바 있다.

조선누층군과 영남육괴 사이의 전단운동 시기는 적어도 장산규암이 퇴적된 캄브리아기 이후임은 분명하기 때문에 이 연구에서 구한 엽리상 화강암의 원생대 초기의 관입시기는 단층운동의 시기를 제한하는데 직접적인 도움을 주지 못한다. 따라서 전단운동의 시기를 밝히기 위해서는 앞으로 다른 방법이 시도되어야 한다.

끝으로, 서론에서 언급한대로 김정환 외(1989)는 옥동단층의 운동시기를 추정하기 위해 Yun (1983)의 K-Ar 자료를 이용하였는데, 우리는 이 자료의 해석에 있어서 견해를 달리한다. Yun (1983)은 옥동지역 에밀리의 장산규암과 영남육괴 기반암 사이에 존재하는 약 10 m 폭의 견운모-석영 편암에 대한 K-Ar 광물연대를 보고하였다: 562±5 Ma (석영), 266±5 Ma (견운모+석영), 235±5 Ma (견운모). 김정환 외(1989)는 이 견운모-석영 편암이 옥동단층운동과 관련되어 생성된 것으로 생각하고 Yun (1983)의 K-Ar 연대가 캄브리아기-트라이아스기 사이의 단층운동을 나타내는 것으로 추정하였다. 그러나, Yun (1983)은 석영 분리물의 연대가 견운모를 포함하는 시료의 연대보다 높은 것은 과잉 아르곤(excess Ar)의 존재를 지시하는 것으로 해석하였으며, 견운모 분리물 역시 석영을 함유하고 있기 때문에 최대 연대로 해석되어야 한다고 주장하였다. 따라서, Yun (1983)의 해석이 맞을 경우, 이들 K-Ar 자료를 다변형운동을 지시하는 것으로 해석하는 것은 무리로 생각되며, 오히려 변형운동과 관련된 견운모의 생성시기는 235 Ma 이후일 것이다.

## 감사의 글

연구지역은 1994년 IGCP Project 321 Symposium의 Field excursion시 처음으로 방문하게 되었다. 연구지역을 안내한 김정환 교수께 감사드린다. 우리는 또한 나기창 교수와 두 익명 심사위원의 건설적인 비평에 감사드린다. 이 연구는 '94년도 교육부 기초과학 학술연구조성비에 의한 재정지원으로 이루어졌다. 두번째 저자(이진한)는 전략광물자원 연구센터의 연구비도 일부 지원 받았다.

참고문헌

권성택, 박계현, 1993, 한 정선 석회암의 U-Pb 연대. 지질학회지, 29, 535-539.

김정환, 고희재, 기원서, 1989, 옥동단층. 광산지질, 22, 285-291.

박계현, 정창식, 이광식, 장호완, 1993, 태백산 지역의 고기화강암 및 화강편마암류에 대한 납 동위원소 연구. 지질학회지, 29, 387-395.

이덕원, 1988, 상동-올진 지역의 주석광화작용과 관련된 화강암류의 암석지구화학적 특징과 탐사에의 응용에 관한 연구. 서울대학교 공학박사학위논문, 153 p.

이진한, 권성택, 박영도, 1995, 방대 연성전단대: 경기육괴와 옥천대의 경계. 95년도 대한지질학회 발표 초록.

주승환, 김승재, 1986, 영남육괴 Rb-Sr 연대측정 연구 (II) 지리산 남서부일대 화강암질편마암 및 편마상화강암류. 국토기본지질조사연구, 한국동력자원연구소 연구보고서 KR-86-7, 7-33.

Chester, F. M., 1989, Dynamic recrystallization in semi-brittle faults. *J. Struct. Geol.*, 11, 847-858.

Chester, F.M., Friedman, M. and Logan, J.M., 1985, Foliated Cataclases. *Tectonophys.*, 111, 139-146.

Cluzel, D., Lee, B.-J. and Cadet, J.-P., 1991, Indosinian dextral ductile fault system and synkinematic plutonism in the southwest of the Ogcheon belt (South Korea). *Tectonophys.*, 194, 131-151.

Evans, J. P., 1988, Deformation mechanisms in granitic rocks at shallow crustal levels. *J. Struct. Geol.*, 10, 437-443.

Faure, G., 1986, *Principles of Isotope Geology*. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York, 589 p.

Goodwin, L. B. and Wenk, H.-R., 1990, Intracrystalline folding and cataclasis in biotite of the Santa Rosa mylonite zone: HVEM & TEM observations. *Tectonophys.*, 172, 201-214.

Hobbs, B.E., Means, W.D. and Williams, P.F., 1976, *An Outline of Structural Geology*. John Wiley & Sons, New York, 571 p.

Kim, J.H., 1994, Structures in the Taebaegsan zone. in J.-H. Ree, M. Cho, S.-T. Kwon and J. H. Kim (eds.) "Structures and Metamorphism of the Ogcheon Belt," Field Trip Guidebook of 4th

IGCP321, Seoul, 23-57.

Lee, S.-G., Masuda, A. and Kim, H.-S., 1994, An early Proterozoic leuco-granitic gneiss with the REE tetrad phenomemon. *Chem. Geol.*, 114, 59-67.

Lister, G. S. and Snoke, A. W., 1984, S-C mylonites. *J. Struct. Geol.*, 6, 617-638.

Ludwig, K.R., 1990, ISOPLLOT - A plotting and regression program for radiogenic isotope data, for IBM-PC compatible computers. Version 2.12. U. S. Geol. Surv. Open-File Rep., 88-557, 31p.

Moorbath, S. and Taylor, P. N., 1985, Precambrian geochronology and the geologic record. in N.J. Snelling (ed.) "The Chronology of the Geological Record", Blackwell Scientific Publ., 10-28.

Passchier, C. W. and Simpson, C., 1986, Porphyroclast systems as kinematic indicators. *J. Struct. Geol.*, 8, 831-844.

Pin, C., 1991, Sr-Nd isotopic study of igneous and metasedimentary enclaves in some Hercynian granitoids from the Massif Central, France. in J. Didier and B. Barbarin (eds.) "Enclaves and Granite Petrology", 333-343.

Ree, J.-H. and Hwang, S.-G., 1994, Indosinian dextral fault system and synkinematic plutonism in the southwest of the Ogcheon belt (South Korea) - comment. *Tectonophys.*, 230, 135-137.

Tullis, J. and Yund, R. A., 1977, Experimental deformation of dry Westerly granite. *J. Geophys. Res.*, 82, 5705-5718.

Tullis, J. and Yund, R. A., 1987, Transition from cataclastic flow to dislocation creep of feldspars: mechanisms and microstructures. *Geology*, 15, 606-609.

Urai, J., Means, W. D. and Lister, G. S., 1986, Dynamic recrystallization of minerals. In: *Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies-The Paterson Volume* (edited by Heard, H. C. and Hobbs, B. E.). Am. Geophys. Un. Geophys. Monogr., 36, 161-199.

Yun, H. S., 1983, K-Ar ages of micas from Precambrian and Phanerozoic rocks in the northeastern part of Republic of Korea. *Schweiz. Mineral. Petrol. Mitt.*, 63, 295-300.

(책임편집 : 나기참)



## Nature of contact between the Ogcheon belt and Yeongnam massif and the Pb-Pb age of granitic gneiss in Cheondong-ri, Danyang

S.-T. Kwon, J.-H. Ree<sup>1</sup>, K.-H. Park<sup>2</sup> and E.-Y. Jeon

*Department of Geology, Yonsei University, Seoul, KOREA*

<sup>1</sup>*Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul, KOREA*

<sup>2</sup>*Korea Basic Science Institute, Daejeon, KOREA*

**ABSTRACT :** The Jangsan Quartzite of the Joseon Supergroup and the foliated granite (so-called granitic gneiss of presumed Precambrian age) of the Yeongnam massif are in direct contact at Cheondong-ri area, 6 km ESE of Danyang. Although it has been thought traditionally that the Jangsan Quartzite overlies unconformably the foliated granite, it is difficult to interpret the contact as an unconformity since the basal conglomerate in the lower part of the Jangsan Quartzite does not have any clast of the foliated granite. Rather, recent structural studies of this area indicate that the contact is a ductile shear zone. However, the sense and age of the shear movement are still problematic. Our mesoscopic and microscopic studies of the Cheondong-ri semi-brittle shear zone involving foliated cataclasite and phylloite, which is a part of the Ogdong fault, indicate a top-to-the northeast shearing, i.e., dextral strike slip. We also performed Pb-Pb dating for the age-unknown foliated granite, since the age of deformed granite can constrain the maximum age of deformation. The whole rock and feldspar Pb isotope data for the foliated granite and a micaceous xenolith define an isochron age of  $2.16 \pm 0.15$  Ga ( $2\sigma$ ; MSWD=4.4) which is interpreted as the emplacement age of the granite. This early Proterozoic age agrees with those of Precambrian igneous activity in the Yeongnam massif reported previously. The obtained age confirms the traditional idea about the age of the foliated granite and indicates that other method(s) should be employed to constrain the age of the shear movement.

**Key words :** Ogdong fault, dextral semi-brittle strike slip, tectonic boundary, Precambrian foliated granite.