

## 중부 옥천변성대의 변성진화: 최근의 연구결과 논평 및 문제점

조문섭\* · 김현철

서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부

### Metamorphic Evolution of the Ogcheon Metamorphic Belt: Review of Recent Studies and Remaining Problems

Moonsup Cho\* and Hyeoncheol Kim

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-747 Korea

**요약:** 옥천변성대의 변성진화사를 밝히기 위한 연구는 지난 수십여년간 많은 학자들에 의해 수행되어 왔다. 그 결과 옥천변성대의 변성조건이 약 490-630°C, 4.2-9.4 kbar에 해당되는 중온-중압형에 속함이 밝혀졌고, 또한 시계방향의 압력-온도-시간 경로를 경험했음이 알려졌다. 이러한 결과는 드리프트 나페에 의해 옥천변성대의 지각 두께가 증가했음을 지시한다. 그러나 변성작용에 관련된 조산운동을 규명하는데는 여러 가지 어려움이 남아 있다. 특히 변성시기에 대한 논란은 오랫동안 거듭되어 왔으며, 최근의 연구 결과는 옥천변성대의 최고변성작용 시기를 석탄기와 페름기의 경계 부근인 약 300-280 Ma로 규정짓는다. 따라서 옥천변성대와 태백산분지는 별개의 지구조구로서 서로 다른 진화 과정을 겪었으리라 추정되며, 이들은 약 250-220 Ma 사이에 불합되어 옥천대를 형성했을 가능성이 있다. 이와 같은 결과는 옥천대의 진화과정에 대한 기존의 생각과 일부 배치되며, 새로운 지체구조적 패러다임을 요구한다. 또한 옥천대가 일본의 히다연변대-히다변성대에 대비될 수 있음을 시사한다.

**핵심어:** 옥천대, 옥천변성대, 조산운동, 광역변성작용, 압력-온도-시간 경로

**Abstract:** Metamorphic evolution of the Ogcheon metamorphic belt has been studied by many investigators for the past few decades. P-T conditions of the Ogcheon metamorphic belt were estimated as 4.2-9.4 kbar and 490-630°C, corresponding to the medium-pressure type. In addition, the clockwise P-T-t path suggests a crustal-thickening event in association with the formation of thrust nappes. However, some details on deformation and orogeny of the Ogcheon metamorphic belt have been ambiguous yet. Although the metamorphic age has been also equivocal, recent isotopic studies strongly suggest that the peak metamorphism in the Ogcheon metamorphic belt has occurred at ca. 300-280 Ma between Late Carboniferous and Early Permian. It is thus inferred that the Ogcheon metamorphic belt and the Taebaegsan basin have evolved as separate terranes and that both were sutured at ca. 250-220 Ma. These results are partly in contrast with those of previous workers and require a revised framework for tectonic evolution of the Ogcheon belt. In addition, it is likely that the Ogcheon belt is correlative with the Hida marginal belt and the Hida metamorphic belt.

**Key words:** Ogcheon belt, Ogcheon metamorphic belt, orogeny, regional metamorphism, P-T-t path

### 서론

옥천대는 임진강대와 함께 우리나라의 대표적인 조산대로서, 그동안 많은 국내연구자들뿐만 아니라 외국 연구자들에 의해서 연구되어 왔다(e.g., Reedman

and Um, 1975; Cliff *et al.*, 1985; Cluzel *et al.*, 1990, 1991; 이종혁, 1995; Koh and Kim, 1995). 이들 조산대는 중국의 대륙충돌대인 친링-다비-수루(Qinling-Dabie-Sulu) 초고압대와의 대비 가능성이 제기된 바 있어, 최근 들어 진화사에 대한 논의가 더욱 활

\*Corresponding author: Tel. 82-2-880-6732, E-mail. moonsup@snu.ac.kr

발하게 진행되고 있다(조문섭 외, 1995; Ree *et al.*, 1996, 2001; Min and Cho, 1998; 전은영과 권성택, 1999; Chough *et al.*, 2000; Cheong *et al.*, 2003).

한반도의 남부를 북동-남서 방향으로 가로지르며 발달하는 옥천대는 두 개의 큰 지구조단위인 태백산분지와 옥천변성대로 나뉘어진다. 전자는 주로 퇴적암체 내지는 저온변성암체로 이루어지나 후자는 녹색편암 내지는 각섬암상의 변성퇴적암체로 구성된다. 옥천변성대의 초기 진화사는 신원생대(약 756 Ma; Lee *et al.*, 1998)에 있었던 대륙내 열곡 기원의 쌍모식(bimodal) 화산작용으로 대표된다. 옥천변성대 변성퇴적암들은 언제부터 퇴적되었는지 정확히 알 수 없으나 아마도 변성화산암류와 비슷한 시기인 신원생대 또는 화산작용 이후 고생대 초기(?)에 걸쳐 생성된 것으로 생각된다. 옥천대가 차지하는 지체구조적 중요성에도 불구하고, 옥천변성대의 변성지구조적 진화과정에 대한 연구는 아직까지 미흡한 형편이다.

60년대까지만 해도 잘 알려져 있지 않았던 옥천변성대에 대한 암석학적 연구는 김형식(1971)의 중압형 전진변성작용에 대한 보고로부터 시작되었다. 김형식(1971)은 녹니석, 흑운모, 석류석 및 남정석대로의 전진변성작용을 제안했으며, Reedman and Um(1975)는 변성분대가 옥천변성대의 주향 방향에 평행하게 발달하며 각 분대의 변성도는 북서쪽으로 갈수록 증가한다고 주장하였다. 이후 소수의 학자들에 의해 변성작용에 대한 연구가 수행되었으나(Hong, 1984; Cliff *et al.*, 1985; Kim, 1987), 본격적인 연구는 1990년대에 들어 전자현미분석기(EPMA)의 사용이 국내에서 수월하게 됨에 따라 시작되었다. 옥천변성대의 광역변성작용에 대한 연구는 크게 두 개 지역으로 나누어 생각할 수 있다: 즉 남부 지역에 대한 연구와(Oh *et al.*, 1995; 오창환 외, 1998, 2002), 중부-북부 지역에 대한 연구이다(Kang *et al.*, 1993; Cho *et al.*, 1994; 김현철 외, 1995; Min and Cho, 1998; Kim and Cho, 1999; 오창환 외, 1999). 중북부 지역은 남부에 비해 변성화산암류를 비롯해 다양한 암상을 포함할 뿐더러, 태백산분지와 직접 접촉하는 탓에 지구조적으로 매우 중요하므로 이 연구에서 주로 다룬다. 남부지역에 대한 연구결과(오창환 외, 1998, 2002)와 광역변성-변형사와는 비교적 관계가 적은 옥천변성대의 접촉변성작용(김현철 외, 1995; 노진환, 1995; 오창환 외, 1995, 1998, 1999, 2000; Min and Cho, 1998; Kim and Cho, 1999; Ahn and Nakamura, 2000)에 대한 토의는 다음 기회로 미룬다.

이 연구에서는 광역변성작용 및 변성진화사에 대해 그동안 거론된 내용들을 검토하였으며, 최근의 연구 결

과들을 정리하였다. 특히 압력-온도-시간 경로(P-T-t path; Spear, 1993) 즉 변성진화 경로를 밝히는데 중요한 변성시기를 요약하였고, 현재 확보된 자료에 근거해 옥천대의 진화사를 다시 조명해 보았다. “옥천분지”의 열림과 닫힘 그리고 옥천변성대와 태백산분지의 상호 관계 등에 대해 토의하였으며, 또한 앞으로 풀어야 할 숙제들에 대한 의견들을 제시하였다. 이 연구에서 사용된 옥천분지라는 용어는 단순히 옥천변성대의 원암들이 쌓였던 분지를 총괄적으로 지칭한다. 이 가상의 고분지(paleo-basin)는 넓게 분포하는 단일 분지에 의해 정의될 수도 있으나, 이와는 달리 시공간적으로 독립된 다수의 분지로부터 기원할 수도 있다.

## 광역 변성작용

옥천변성대의 지질, 구성암, 구조, 변성연대 등에 관한 연구결과들은 이전 연구자들에 의해 잘 정리되어 있는 편이다(e.g., 이종혁, 1995; 이민성 외, 1998). 지체구조에 관련된 내용은 Chough *et al.*(2000)에서 찾아볼 수 있으나, 이들은 옥천대의 변성작용에 대해서 거의 취급하지 않고 있다. 아래에 중-북부 옥천변성대의 변성작용과 관련되어 지난 10년 가까이 우리 연구팀에서 수행한 주요 연구내용과 새로운 생각들을 정리한다.

### 변성분대 및 암상

옥천변성대의 광역변성작용은 중압형으로, 변성도는 북동-남서 주향의 주엽리면에 수직한 방향인 북서쪽으로 갈수록 증가한다. 변성분대는 크게 흑운모대와 석류석대로 나뉘어진다(Min and Cho, 1998; 오창환 외, 1999). 그러나 이전에 보고된 것처럼(김형식, 1971; Cliff *et al.*, 1985; Kang *et al.*, 1993), 십자석대와 남정석대를 정의하기에는 십자석과 남정석이 너무 드물게 산출한다. 이들 광물은 이질-준이질(semi-pelitic) 편암 내에 특징적으로 산출하지만(김현철 외, 1995; Kim and Cho, 1999), 뚜렷한 변성분대를 광역적으로 정의하지는 못한다. 이처럼 십자석과 남정석이 드문 이유는 변성온도-압력 조건에 기인하기보다는, 아마도 대부분의 옥천변성대 편암들이 전형적인 이질암보다 Al 양이 적은 탓으로 생각된다. 한편 옥천변성대의 북서쪽으로 광역변성작용 이후 관입한 화강암류가 매우 넓게 분포하는 까닭에 남정석과 십자석이 후기 접촉변성작용에 의해 선택적으로 치환되었을 가능성도 배제할 수 없다(김현철 외, 1995; Kim and Cho, 1999; 오창환 외, 1999). 이들 Al이 풍부한 광물 외에 산출하는 주요 변성광물로 석류석, 흑운모, 백운모(+사장석, 석영, 철 산화물)

등이 있으며, 층상광물들은 북동-남서 방향의 주엽리면을 정의한다.

한편, 변성고철질암의 경우 Ca-각섬석, 녹렴석, 녹니석(+사장석, 석영, 철 산화물) 등이 주요광물로 산출하며, 변성이질암에서 관찰된 바와 같이 각섬암상의 변성광물조합이 특징적이다(Min and Cho, 1998). 충주-수안보 지역에 분포하는 소위 계명산층과 문주리층에서는 이들 변성고철질암이 변성산성화산암류와 함께 산출하며, 쌍모식 화산작용이 지배적이었음을 시사한다. 더 나아가 산성질암의 양이 고철질암에 비해 압도적으로 많이 분포하는 사실은 옥천변성대가 고화산작용 열개(high-volcanicity rift)로부터 기원했을 가능성을 지지한다(김태훈과 조문섭, 2000). 이들 쌍모식 변성화산암류와는 달리 괴산-미원 지역에 분포하는 석영 각섬암은 주로 Ca-각섬석과 석영(+ 소량의 녹니석, 녹렴석, 석류석, 사장석 등을 포함하기도 함)으로 구성되며, 변성사질암과 흔히 교호하며 얇은 층상으로 산출한다. 많은 경우 Ca-각섬석은 세립의 석영 기질 내에 자형의 층립-조립질 반상변정으로 관찰되며, 상대적으로 분리하기가 용이하여  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대 측정에 사용된 바 있다(Cho *et al.*, 1999; 아래 참조). 이러한 층상의 석영 각섬암은 드물게 탄산염 광물로 구성된 부분을 일부 간직하고 있거나 변성탄산염암과 석영 각섬암 사이에 접미적인 치환관계를 보여 주기 때문에, 충주-수안보 지역의 변성화산암류 기원암과는 달리 변성퇴적암 기원일 가능성이 크다고 여겨진다. 이들의 성인에 대해서는 앞으로 더 자세히 연구되어야 할 것이다.

**지구조단위와 변성조건**

옥천변성대에 대한 이전 연구들은 흔히 층서학적 개념에 근거한 퇴적층 내지는 층군을 전통적으로 사용하여 왔다. 하지만, 각섬암상의 변성 및 변형작용을 받은 경우, 주요한 일차 퇴적구조가 보존되어 있지 않을뿐더러 변형작용을 통한 전위(transposition)에 의해 새로운 층상구조들이 발달할 개연성이 높다. 따라서 변성도가 상당히 높은 중부지역의 옥천변성대에서는 층과 층군 개념보다는 변성암 단위(unit) 내지는 복합체(complex)로 부르는 게 타당하다. 이러한 개념에 근거해, 이 연구에서는 Cluzel *et al.*(1990)이 제시한 지구조단위(lithotectonic unit)를 사용해 기술한다.

Cluzel *et al.*(1990)은 옥천대가 열개 환경에서 퇴적된 이질암, 석회암 및 화산 쇄설암이 변성 및 변형작용에 의해 재구성된 나페(nappe)의 중합(stack)이라고 제안하였으며, 옥천변성대를 퇴적상의 변화에 따라 다섯 개의 지구조 단위로 세분하였다. 또한 이들을 현재

의 구조적 위치에 따라서 상부(피반령, 충주 및 두릉산)와 하부(보은 및 이화령) 지구조 단위로 구분하였으며, 양자 사이의 경계는 드러스트 단층에 의해 정의된다고 제안하였다(Fig. 1). 그러나 이들 단층이 단순히 서로 다른 암상 때문에 겉보기 변성도가 다르게 나타나는지, 아니면 상-하반에 해당되는 두 지구조 단위 사이에 변성도의 차이가 실제로 존재하는지 결론을 내리기 어렵다. 이에 대한 정보는 변형작용과 변성작용 사이의 선후관계를 밝히는데 중요한 정보를 제공한다. 특히 괴산-미원 지역의 중부 옥천변성대에서는 드러스트 단층을 경계로 변성퇴적암의 입자 크기 및 광물조합이 크게 다르므로 자세한 연구가 수행된 바 있다(김현철 외, 1995; Kim *et al.*, 2000). 즉, 구조적 상부에 해당되는 피반령 지구조 단위는 석류석±십자석±납정석 편암이 우세한 변성 사질암으로 주로 구성되어 있는 반면, 하부의 보은 지구조 단위는 흑색 점판암 및 함력 천매암이 우세하여 겉보기에는 변성도의 차이가 있는 것처럼 나타난다.

김현철 외(1995)는 괴산 남부의 덕평리 지역에 분포하는 보은 지구조 단위의 석류석 편암에서 4.2-8.2 kbar 와 490-540°C 범위의 변성 압력-온도 조건을 보고하였다. 그러나 Koh and Kim(1995)은 덕평리 지역에 분포하는 석류석 편암이 상부 지구조 단위에 속하며, 최고 변성작용 이후에 일어난 드러스트 단층에 의해 하부 지구조 단위에서 산출하는 것으로 해석하였다. 이 해석을 따를 경우, 위에 기술한 압력-온도 조건은 하부 지구조 단위의 변성조건을 대표한다고 생각하기 어렵다. 실제로 덕평리 석류석 편암의 변성조건은 상대적으로 낮은 압력-온도 범위를 보이긴 하지만, 상부 지구조 단위에서 구한 변성 압력-온도(5.4-9.4 kbar, 520-630°C)와 크게 다르지 않다. 그러나 하부 지구조 단위를 구성하는 대부분의 점판암 및 천매암에서는 지온-지압계로 이용할 변성광물이 산출하지 않기 때문에 정량적인 변성 조건을 구하기 어렵고, 따라서 두 지구조 단위 사이의 변성도가 상이한지를 밝히기가 쉽지 않다.

이 난제를 해결하기 위해, Kim *et al.*(2000)은 점판암과 천매암이 넓게 분포하는 덕평리-미원 지역에서 K-백운모를 분리하여 결정도 지수(CI)와  $b_0$ 값을 측정하였다. 이들은 각각 변성온도와 압력에 따라 변화하는 것으로 알려져 있다(e.g., Sassi and Scolari, 1974; Offler *et al.*, 1998). 따라서 Kim *et al.*(2000)은 녹색 편암상 변성이질암의 변성조건을 유추함은 물론이고, 변성조건이 두 지구조 단위 사이에서 차이가 나는지 밝히고자 시도하였다. 하부 지구조 단위를 구성하는 점판암 및 천매암의 CI와  $b_0$ 값은 각각  $0.12 \pm 0.01^\circ \Delta 2\theta$

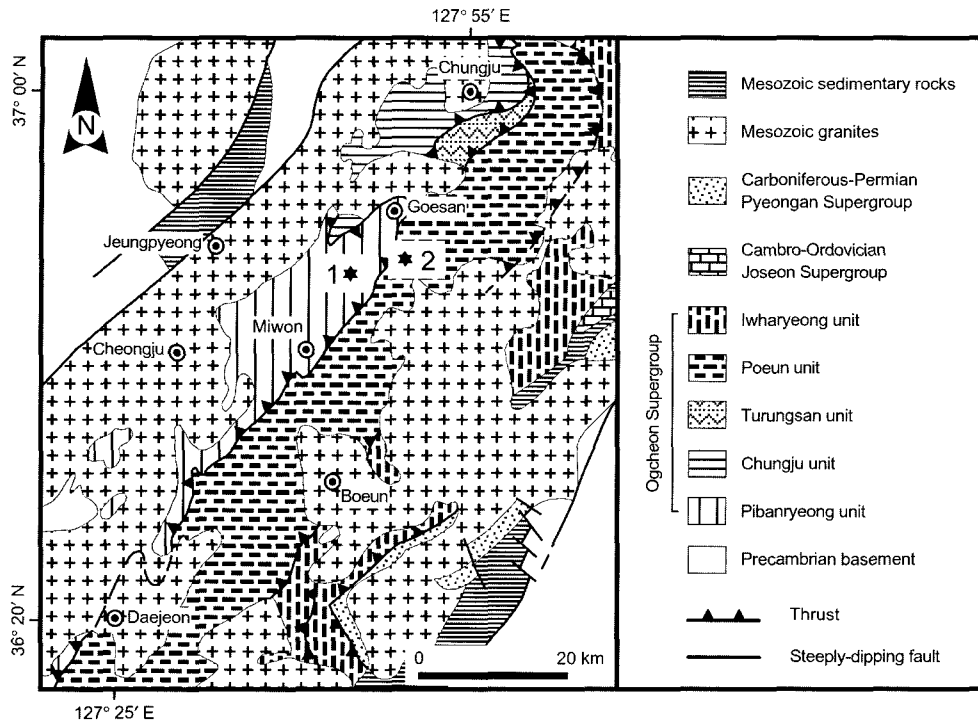


Fig. 1. Tectonic map of central Ogcheon metamorphic belt showing various lithotectonic units. Adapted from Cluzel *et al.* (1990). Stars designate the locations of samples analyzed for X-ray compositional map: 1, non-spiral garnet (Fig. 2); 2, spiral garnet (Fig. 3).

와  $9.010 \pm 0.007 \text{ \AA}$ 로, 이들 변성퇴적암이 상부 녹색편암상(혹은모대)에 해당하는 중압형의 변성작용을 받았음을 지시한다. 또한  $b_0$ 값은 상부와 하부 지구조 단위 사이에서 큰 변화를 보이지 않으며, 이는 최고변성작용 이후에 일어난 두 지구조 단위 사이의 수직변위가 크지 않음을 의미한다. 따라서 나페구조를 만든 드러스트 단층운동 시기가 변성작용보다 빠르거나 동시기일 가능성이 높다고 결론지을 수 있다. 더 나아가, 최고변성작용 이후의 드러스트 단층 때문에 하부 지구조 단위 내에, 이보다 고온에 해당되며 상부 지구조 단위에 속하는 석류석 편암이 산출한다는 Koh and Kim (1995)의 해석은 변성암석학적 증거에 의해 뒷받침되지 못한다.

#### 석류석의 누대구조

옥천변성대의 석류석은 주로 상부 지구조 단위에서 반상변정으로 흔히 산출하며, 이들이 보여주는 미세구조는 변성광물의 성장사 및 변형작용과의 상대적 시간 관계를 밝히는데 유용한 정보를 제공한다(e.g., Ikeda *et al.*, 2002; Stallard and Hickey, 2002). 특히 포유물 껍

적(inclusion trail)에 의해 정의되는 불연속적인 회전조직이나 누대구조는 전혀 다른 변형사건의 중첩을 의미할 수 있기 때문에 중요한 지구조적 의미를 지닌다(Karabinos, 1984; Stallard and Hickey, 2002).

석류석 반상변정은 흔히 석영과 티탄철석의 고체포유물을 가지며, 이들 포유물의 껍적은 회전조직을 보이는 것과 거의 보이지 않는 것으로 구분된다(김현철 외, 1995). 전자의 경우, 포유물이 외부 엽리와 불연속적이거나 사교하는 내부 엽리를 형성하기도 한다. 이러한 석류석은 주변형작용 이전에 성장한 전구조(pre-kinematic) 반상변정 또는 시기를 달리하는 두 변형운동 사이에 자란 조산운동간(inter-tectonic) 반상변정으로 생각된다. 한편, 회전조직을 보이며 외부 엽리와 연속적인 관계를 보이는 석류석은 동구조(syn-kinematic) 성장을 시사한다. 그러나 Cluzel *et al.*(1991)은 옥천변성대의 석류석 반상변정은 주 엽리면에 대하여 동구조 성장을 하였지만 후기의 변형작용이 중첩되어 외관상으로 전구조 성장을 한 것처럼 보인다고 해석하였다.

회전조직의 존재 유무에 관계없이, 즉 변성-변형작용 사이의 선후관계에 상관없이 석류석 반상변정의 스

페사틴(spessartine) 성분은 종모양의 누대조직을 잘 보여준다. 이러한 성분변화는 전진변성작용시 온도가 증가함에 따라 성장한 석류석에서 특징적으로 관찰된다. Fig. 2는 피반령 지구조 단위에서 관찰된, 회전조직을 보이지 않는 석류석의 4개 성분에 대한 대표적인 X-선 화학조성도(compositional map)이다. 누대조직은 모든 성분에서 관찰되며, 특히 Mn과 Ca 성분도에서는 석류석의 중간부와 주변부의 경계에 해당되는 영역에서 육각형의 자형 결정 모양이 명확히 판별된다. 따라서 석류석은 성장 초기에 자형을 유지하였으며, 이는 동력학적으로 정적인 환경을 지시하거나 또는 습곡의 힌지(hinge)부와 같은 저변형대(low-strain zone)에서 성장하였음을 시사한다. 또한, 이 석류석 내부에서 관찰되는 자형 결정의 경계 부분에서 화학조성은 급격히 변한다. 특히 그로술라(grossular) 성분은 8 mol%에서 16 mol%로 거의 불연속적인 증가를 보이는 반면, 스페사틴 성분은 약 7 mol%의 감소를 보인다. 후자의 변화 양상은 석류석이 성장하는 동안 온도가 불연속적으로 증가하였음을 시사하며, 이러한 온도 증가는 석류석 결정의 주변부로 갈수록 포유물의 크기가 커지는 경향과도 일치한다.

한편 회전조직을 보이는 석류석의 경우도 성분의 불연속면이 비교적 잘 관찰된다. Fig. 3은 보은 지구조 단위에서 관찰된 석류석의 X-선 화학조성도이다. 석류석 내에 발달하는 불연속면은 포유물의 양이 급격히 줄고, 포유물 제거에 의해 정의되는 내부 엽리 방향이 급격히 바뀌는 주변부에서 관찰된다. 석류석 반상변정 내부의 Mn 양이 풍부하고 Ca 양이 적은 부분은 비교적 자형의 각진 모습을 보존하고 있다. 그러나 Mn 양이 적은 주변부에서는 비대칭적으로 또는 선택적으로 자란 과성장띠가 특징적으로 나타난다. 이러한 사실은 포유물 제거의 회전조직과 함께, 비동축(non-coaxial) 변형작용이 석류석의 두 번째 성장 기간동안 주요했음을 시사한다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 급격한 화학조성의 변화 및 미세구조의 변화 양상은 옥천변성대의 석류석 반상변정이 불연속적으로 성장했음을 지시한다. 더 나아가 이러한 화학적, 미세구조적 특징은 석류석이 성장하는 기간동안 석류석을 만드는 반응이 달라졌거나, 변성조건 또는 변형작용의 양상이 급격히 변했을 가능성을 시사한다. 예를 들어, Lee(2000)에 의한 변형사에 따르면, 석류석이 압축력을 수반한 지각 두께의 증가에 따라 일차적으로 성장한 반면, 조산대의 중력붕괴에 따른 이차 과성장을 경험했을 것으로 유추할 수 있다. 하지만, 이들 가능성에 대한 검토는 보다 자세한

변성암석학적-구조지질학적 연구를 통해 이루어져야 할 것이다. 또한 포유물에 의한 회전조직의 유무만으로 석류석 반상변정들이 서로 다른 성장사를 경험했다고 단정지을 수 없음을 알 수 있다. 즉, 두 종류의 석류석 반상 변정은 각각 상부와 하부 지구조 단위에서 관찰되었음에도 불구하고, X-선 화학조성도에서 알 수 있듯이 비슷한 누대구조 양상을 보이며, 따라서 같은 성장사를 갖는 것으로 생각된다. 이러한 해석은 Cluzel *et al.*(1991)의 제안과도 일치한다.

## 변성진화

### 변성압력 및 온도

지온-지압계를 사용해서 구한 괴산-미원 지역의 광역변성작용의 압력과 온도는 위에서 언급한 바와 같이 각각 4.2-9.4 kbar, 490-630°C이다(Fig. 4; 김현철 외, 1995; Kim and Cho, 1999; 오창환 외 1999). 이러한 결과는 Min and Cho(1998)이 충주 지역에 분포하는 변성이질암 및 각섬암질 편암에서 얻은 5-8 kbar 및 520-590°C의 변성조건과 잘 일치한다. 계산된 압력 및 온도는 중압형 변성광물조합의 산출과도 잘 부합하며, 옥천변성대의 최고변성조건이 조산대 전역에 걸쳐 큰 차이가 없음을 시사한다. 하지만, 이들 압력-온도 값들이 비교적 넓은 범위를 보이는 이유는 아직 분명치 않다. 물론 지온-지압계를 구성하는 광물 사이의 비평형 관계 때문에 분산된 값을 보일 수도 있으나, 이들 값의 변화가 실제일 가능성도 배제하기 어렵다. 일례를 들어 김현철 외(1995)가 구한 상부와 하부 지구조 단위 사이에서의 변성온도는 최대로 약 100°C까지의 차이도 가능함을 시사한다. 압력 값 역시 양 지구조 단위 사이에 상당한 구배를 지닐 수 있다. 그러나 석류석에 기록된 변형사에 있어서는, X-선 화학조성도에서 보았듯이, 상부와 하부 지구조 단위 사이에 큰 차이가 없어 보인다.

한편 Min and Cho(1998)는 습곡되거나 부단화된 석영맥으로부터 유체포유물의 안정영역을 구하였다. 이러한 시도는 충주댐 부근에 발달하는 옥천변성대의 석류석-녹니석 편암의 변성-변형사를 밝히는데 중요한 정보를 제공한다. Min and Cho(1998)는 변형된 석영맥에서 3종류의 유체포유물을 기재하였다: (1) CO<sub>2</sub>로 주로 구성되며 분산되어 산출하는 포유물, (2) CO<sub>2</sub> 및 H<sub>2</sub>O의 혼합용액으로 구성된 것, 그리고 (3) H<sub>2</sub>O로 주로 구성된 것으로 정의된다. 성분이 서로 다른 이들 유체포유물의 등밀도선(isochore)들이 모두 안정한 영역으로부터 구한 압력 및 온도 범위는 약 1-3 kbar와 350-

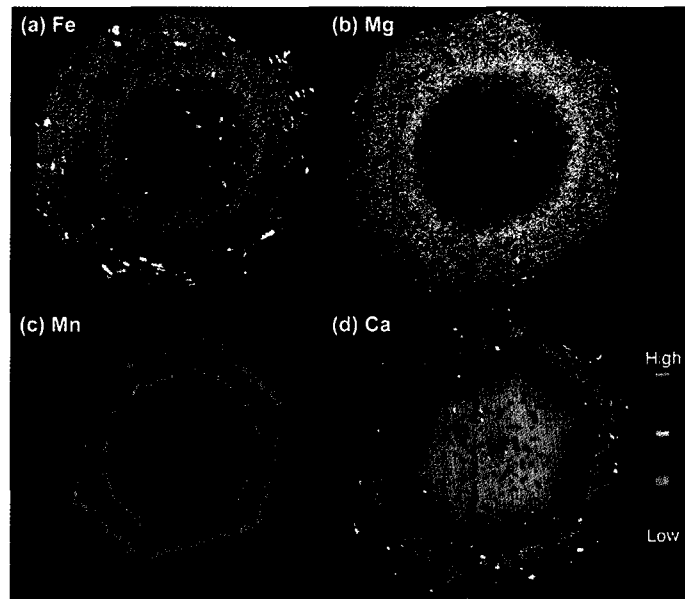


Fig. 2. Two-dimensional X-ray maps of pre-kinematic, non-spiral garnet from the upper lithotectonic unit. Note the euhedral shape of garnet at the margin of inclusion-free intermediate part. Maximum diameter of garnet porphyroblast is ca. 1.8 mm. X-ray maps were acquired with JEOL 8900 electron microprobe at Seoul National University. Analytical conditions were 15 kV accelerating voltage and 100 nA beam current. Beam size and analytical interval are 2  $\mu\text{m}$  and 4  $\mu\text{m}$ , respectively, and counting time is 0.08 second per pixel.

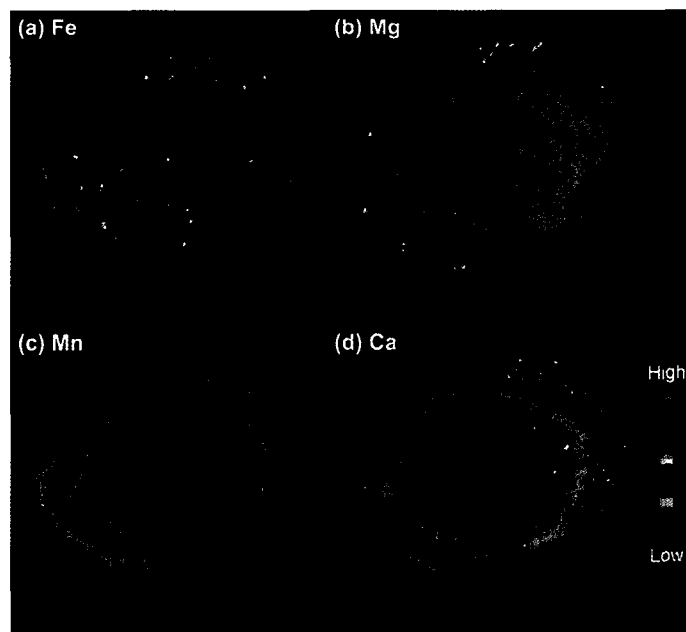


Fig. 3. X-ray maps of syn-kinematic, spiral garnet from the lower lithotectonic unit. Abrupt compositional change at the outer part is recognized where modal abundance of the inclusion phase decreases and internal orientation of inclusion trails changes. Maximum diameter of garnet porphyroblast is ca. 1.7 mm.

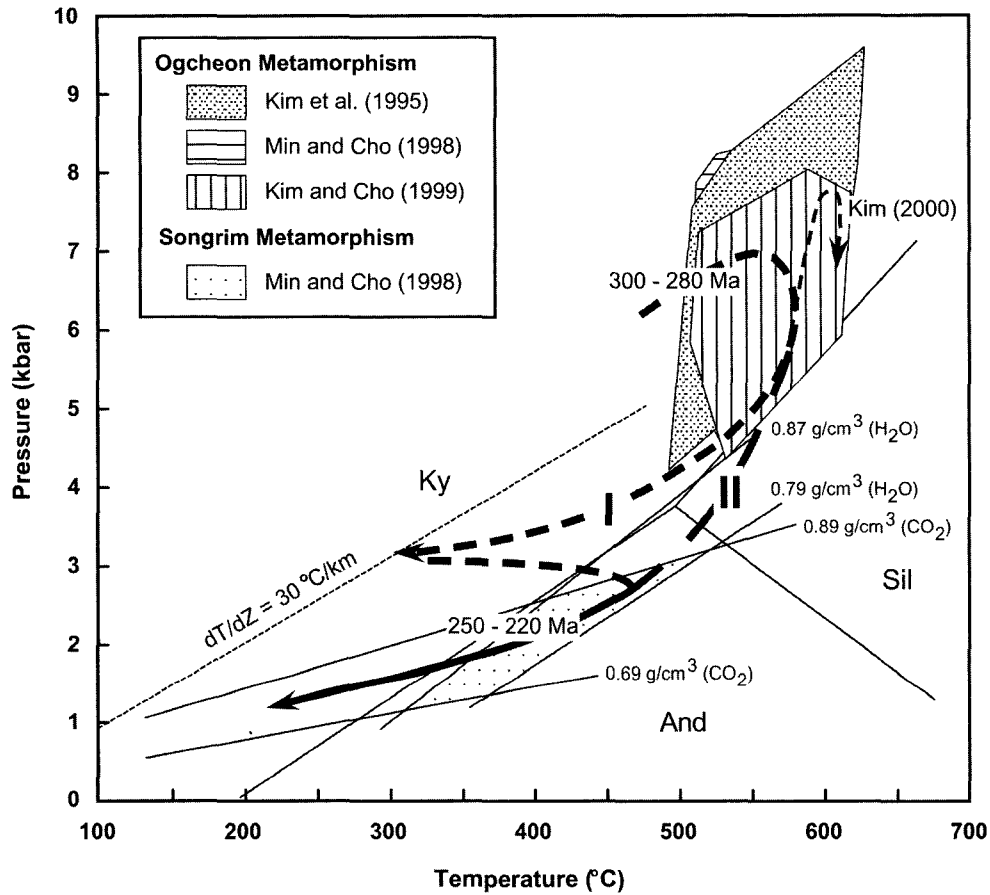


Fig. 4. Schematic P-T-t evolution of the Ogcheon metamorphic belt, characterized by two metamorphic events at 300-280 Ma (Ogcheon orogeny) and 250-220 Ma (Songrim orogeny), respectively. Each polygon represents peak metamorphic conditions estimated from various geothermobarometers by Kim et al. (1995), Min and Cho (1998) and Kim and Cho (1999). These P-T conditions are inconsistent with those given by Oh et al. (1999; not shown) who have apparently overestimated the temperature. P-T-t path estimated from a schist sample of the Pibanryeong unit using the Gibbs program (Kim, 2000) is shown in thin-dashed curve. After the Ogcheon peak metamorphism, the post-peak P-T array could be defined by either single or two distinct clockwise paths. These two possibilities of P-T-t evolutions are shown: I and II. In case I, the P-T-t evolution is assumed to have thermally relaxed to typical continental geotherm of ca. 30 °C/km. Then, the Ogcheon metamorphic belt was affected by another regional heating event during the Songrim orogeny. In case II, the retrogression from the peak metamorphic condition was too slow to reach the ca. 30 °C/km geotherm. Stippled polygon represents the P-T condition estimated from fluid inclusions of a deformed quartz vein (Min and Cho, 1998). Isochores of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>-rich fluid inclusions are also shown. Thermal metamorphism may produce a spike along the low-pressure, clockwise loop after the peak Songrim metamorphism, but this spike is not shown for clarity.

500°C이다(Fig. 4). 이러한 압력-온도 조건은 중압형 광역변성작용 이후 일어났을 감압 또는 용기과정을 대표할 수도 있으나, 또 다른 후기 변성작용에 기인할 가능성이 배제하지 못한다. 물론 이 후기 변성작용이 슈라기 화강암체의 관입에 따른 열변성작용의 효과를 지시할 수도 있으며, 이 경우 석영맥의 변형작용은 관입암체의 정치에 수반된 국부적인 현상으로 설명할 수

있다. 보다 자세한 변성-변형과정에 관한 이해를 위해서는 향후 연구가 요구되며, 특히 변성시기에 관한 정보는 옥천변성대의 진화과정을 푸는데 필수적으로 제공되어야 한다.

**변성시기**

옥천변성대를 구성하는 모암의 생성시기는 전기 고

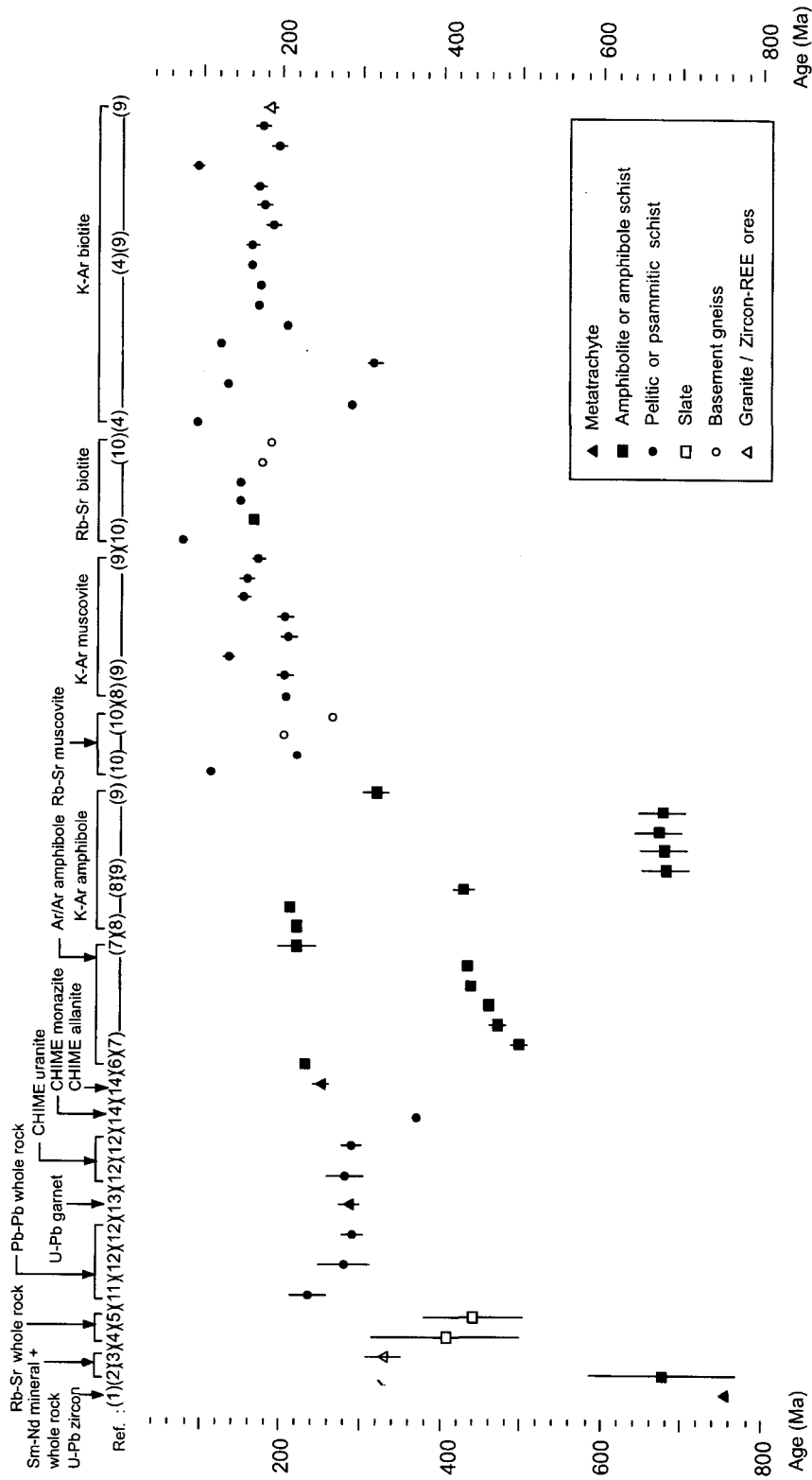


Fig. 5. Radiometric ages of metamorphic rocks from the Ogcheon metamorphic belt. Isotopic techniques used for the age determination are given at the top of figure, and numbers in parentheses refer to the sources of data: (1) Lee *et al.* (1998); (2) Kwon and Lan (1991); (3) Park and Kim (1995); (4) Kim (1990); (5) Park and Cheong (1998); (6) Lee and Cheong (1998); (7) Cho *et al.* (1999); (8) Oh *et al.* (1995); (9) Min *et al.* (1995); (10) Cliff *et al.* (1985); (11) Park (2001); (12) Cheong *et al.* (2003); (13) Kim *et al.* (2001); and Adachi *et al.* (1996).



생대로 태백산분지와 대비되는 것으로 생각되어 왔으나(e.g., Cluzel *et al.*, 1990), Lee *et al.*(1998)이 변성화산암으로부터 얻은 756 Ma의 저어른 연대는 이러한 생각이 틀렸음을 말해준다. 따라서 신원생대로부터 쥬라기 화강암이 관입하기까지 약 5.7 억년의 긴 시간동안 옥천대는 과연 언제, 어떤 조산운동을 경험하였는지 의문이 들 수밖에 없다. 옥천변성대에서 석류석, 십자석, 납정석 등의 특징적인 반상변정들을 만들어낸 광역변성작용의 시기를 밝히는 일은 무척 중요하다. 더구나 옥천대의 주 열리면을 발달시킨 변형작용이 광역변성작용과 거의 동시기에 일어났을 가능성이 크기 때문에 조산운동에 대한 이해를 위해서도 중요하다. 옥천대의 변성진화사를 밝히기 위한 변성연대를 얻기 위해, 그동안 많은 학자들이 다양한 연구방법을 적용하여 왔다. 그간 발표된 자료는 민경원 외(1995)와 Chough *et al.*(2000)에 의해 정리되어 있으며, 이들의 동위원소 연대-연대측정시스템 그림은 거의 같은 내용을 담고 있다. 그러나 최근 새로운 연대자료가 발표됨에 따라(Kim *et al.*, 2001; Cheong *et al.*, 2003) 기존의 변성연대를 재해석할 필요가 있게 되었다. 새로운 연대측정 결과에 대한 내용은 Fig. 5에 정리되어 있으며, 아래에 중요 사항들을 정리한다.

옥천변성대의 변성시기에 대해 동위원소 연대를 사용해 처음 제시한 논문은 Cliff *et al.*(1985)로 소위 황강리층의 함력천매암-편암에 대해 당시로서는 드물게 매우 자세한 Rb-Sr 연대를 구했다. 이들은 약 200 Ma 전에 광역변성작용이 있었고, 이후 약 190-150 Ma까지 느린 냉각사를 경험했다고 보고했다. 이후 Kim(1987)은 덕평리 흑색점판암에서 구한 Rb-Sr 전암연대에 근거해, 소위 “칼레도니아(Caledonia)” 조산운동이 옥천대에서 일어났음을 제안하였다. 이 제안은 Cluzel *et al.*(1990)에 의해 받아들여져 “옥천 조산운동”이란 개념으로까지 발전하게 된다. 이후 민경원 외(1995)는 4개의 각섬석으로부터 일치하는 K-Ar 연대( $675 \pm 30$  Ma)를 얻었고, 권성택과 藍晶瑩(1991)이 문경 지역에서 보고한 Sm-Nd 각섬암 연대( $677 \pm 91$  Ma)와 함께 변성시기를 지지하는 것으로 해석하였다. 하지만 이들 K-Ar 연대는 상호 일치하는 결과를 보임에도 불구하고, 과잉 Ar에 대한 문제점을 안고 있다. Cho *et al.*(1999)은 민경원 외(1995)가 사용한 각섬석 시료들을 대상으로  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  동위원소법을 적용하여 과잉 Ar의 존재를 확인하였고, 따라서 675 Ma 연대는 지질학적으로 의미가 없음을 밝혔다. 한편 미원-덕평리 지역에서 얻은  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  각섬석 연대는 상당히 분산되기는 하지만, 약 500-400 Ma에 해당되는 걸보기 연대를 보여 주었다. 이러

한 결과는 변성이질암의 Rb-Sr 전암 연대(440-400 Ma, Kim, 1990; 박계현과 정창식, 1998)와 함께 신원생대 변성작용 보다는 오히려 “칼레도니아” 조산운동의 가능성을 더 지지하는 듯 보여졌다. 그러나 이러한 해석은 박계현(2001), Kim *et al.*(2001)과 Cheong *et al.*(2003)의 연구 결과에 의해 오류임이 밝혀졌다.

옥천변성대의 흑색점판암에 대해 박계현(2001)은 단계적 용해(step-leaching)에 의한 연대측정방법을 성공적으로 적용하였고, 약  $237 \pm 24$  Ma의 Pb-Pb 변성연대를 얻었다. 이후 Cheong *et al.*(2003)은 덕평리 지역의 흑색점판암 시료들로부터 약 290 Ma의 전암 Pb-Pb 연대를 구하였고, 또한 약 280 Ma의 우라니나이트(uraninite) CHIME(Chemical Th-U-total Pb Isochron Method) 연대를 구하였다. 한편 Kim *et al.*(2001)은 덕평리 지역에 산출하는 석류석-각섬석 편암으로부터 단계적 용해법을 사용해 석류석의 U-Pb 연대(약 300-280 Ma)를 구하였다. 이러한 최근의 연구결과는 옥천변성대의 광역변성작용이 이전에 보고된 바와는 달리 석탄기 후기-페름기 초기에 일어났음을 지지한다.

한편 Adachi *et al.*(1996)은 소위 황강리층의 함력천매암내에 산출하는 화강편마암역으로부터 제노타임과 모나자이트를 분리해 CHIME 연대를 구하였다. 두 광물은 모두 선캠브리아(ca. 1.7 Ga) 연대를 보이는 중심부를 가지며, 주변부 연대는 약 370 Ma이다. 또한 소위 문주리층 내의 백운모-녹니석-석영 편암에서 분리한 알라나이트의 CHIME 연대로부터  $251 \pm 10$  Ma의 변성시기를 추정하였다. Adachi *et al.*(1996)은 함력천매암의 변성도가 낮기 때문에 이들 광물의 과성장띠는 퇴적 이전에 만들어졌다고 해석하였다. 따라서 함력천매암의 원암은 약 370 Ma 이후, 그리고 주 변성작용 시기(약 250 Ma) 이전인 석탄기-페름기에 퇴적되었다고 제안하였다. 이러한 주장은 지구조적 의미가 클 수 있는 만큼, 두 가지 면에서 신중히 검토되어야 할 것이다. 우선, 과성장띠의 생성 시기가 화강편마암역의 퇴적 이후일 가능성은 없는지 확인해야 한다. 제노타임은 Adachi *et al.*(1996)의 주장과는 달리 속성작용 시에도 생성될 수 있기 때문이다(McNaughton *et al.*, 1999). 두 번째로 검토해 보아야 할 사항은 폐쇄온도와는 관계없이 변성 반응에 의해서 각 부분광물이 새로 만들어질 가능성이다. 예를 들어, Smith and Barreiro(1990)는  $525 \pm 25^\circ\text{C}$ 에 해당되는 십자석대의 편암내에서, 모나자이트가 전진변성작용에 의해 생성되었다고 보고한 바 있다. 따라서 산상에 관한 좀더 자세한 정보 없이 약 370 Ma의 CHIME 연대가 변성시기일 가능성을 완전히 배제하기는 어렵다. 특히 Cliff *et*

al.(1985)이 지적했듯이, 함력천매암은 변성유체가 풍부한 환경에서 광역변성작용을 경험하였기 때문에 부정분광물이 변성작용에 의해 새로 탄생했을 가능성이 있다고 여겨진다. 이상 제기된 문제점들은 Adachi *et al.* (1996)에 실린 내용만으로 해결하기 어렵고, 앞으로 좀더 자세한 연구에 의해 검토되어야 할 것이다. 약 370 Ma의 데본기 말기 연대는 지질학적으로 화강편마암의 근원지에서 있었던 변성작용의 시기를 지시하든, 아니면 함력천매암 자체의 변성시기를 나타내든지 지체구조적으로 무척 흥미로운 연대임엔 틀림이 없다.

결론적으로, 옥천변성대의 주 열리면과 함께 자란 석류석을 만든 광역변성작용은 석탄기 후기(300-280 Ma)에 일어났을 것으로 생각되며, 이제까지 제안되어 왔던 오르도비스기-실루리아기 또는 트라이아스기와는 차이가 있다. 전자는 겉보기 연대로 해석할 수 있으나, 후자가 지니는 의미에 대해서는 좀더 연구해봐야 할 것이다. 370 Ma의 데본기 연대도 과연 지질학적으로 의미가 있는지 밝혀야 할 것이다. 왜 이처럼 다양한 겉보기 연대들이 얻어지는지 아직 불분명하지만, 적어도 그 이유의 일부는 옥천변성대가 경험한 다변성-다변형작용의 탓으로 돌릴 수 있을 것이다. 조문섭 외(1995)는 과산-덕평 지역에 산출하는 흑운모의 K-Ar 연대 분포가 트라이아스기 후기 내지 쥐라기 초기의 광역적인 열변성작용에 의해 설명될 수 있다고 제안한 바 있다. 이들은 또한 K-Ar 흑운모 연대가 옥천변성대의 주향에 수직인 방향으로 비대칭적인 분포를 보이는 점에 주목하고, 단순 냉각연대이기 보다는 쥐라기 및 백악기 화강암의 관입에 의해 점축부에서 부분적으로 또는 거의 완전히 열적으로 재평형되었음을 주장하였다. 그러나 광역변성작용의 시기가 300-280 Ma로 새롭게 제안된 이상, 트라이아스기 연대(약 250-210 Ma; Cliff *et al.*, 1985; 조문섭 외, 1995; Adachi *et al.*, 1996)가 또 다른 변성작용의 시기를 나타내는지, 아니면 광역변성작용 이후 천천히 식은 조산대의 냉각온도를 지시하는지 밝혀야 할 것이다.

### 압력-온도-시간 경로

이제까지 보고된 변성압력, 온도 및 시간에 관한 자료를 Fig. 4에 정리하였다. 최고변성조건은 앞에서 기술한 바와 같이 옥천변성대 전역에 걸쳐 비교적 일치하는 결과를 보여주며, 약 5-9 kbar와 500-600°C에 대부분 속한다. 한편 최고변성작용 이전의 압력-온도 경로를 구하는 것은 많은 경우 쉽지가 않다. 김현철 외(1995)는 누대조직을 갖는 석류석과 사장석 입자의 중심부와 주변부 조성을 이용하여 석류석 성장 초기와

후기에 해당되는 P-T 조건을 계산하였고, 석류석의 성장기간 동안 온도에 비하여 압력이 급격히 증가하였고 제안하였다. 이러한 제안은 석류석과 사장석 사이의 평형관계를 가정한 탓에 오류를 빚을 수 있다. 그러나 Kim(2000)이 석류석의 누대성분과 깁스(Gibbs) 프로그램(Spear and Menard, 1989)을 이용하여 계산한 압력-온도 경로는 김현철 외(1995)가 제안한 바처럼 매우 급한 압력구배를 보여준다(Fig. 4). 전진변성작용동안 온도뿐만 아니라 압력이 증가하는 P-T 경로는 옥천변성대의 남부지역에서도 보고되었다(오창환 외, 2002). 따라서 옥천변성대 전역에 걸쳐 광역변성작용 기간동안 압력과 온도가 동시에 증가했음을 알 수 있으며, 이러한 결과는 드러스트 운동에 의한 지각두께의 증가와 관련이 있을 것으로 생각된다.

최고변성작용 이후 연성-취성 영역에서 주열리면을 습곡시키며 발달하는 습곡축면 또는 파랑습곡면개면이 옥천변성대 전역에서 잘 관찰된다(Cluzel *et al.*, 1990, 1991; Koh and Kim, 1995). 최고변성작용 이후 석영맥들이 용기과정에서 생겼고, 이들은 연성-취성 변형운동 기간동안 변형되었을 것으로 생각된다. 따라서 그 압력-온도 조건은 Min and Cho(1998)이 제시한 약 1-3 kbar와 350-500°C의 범위에 속할 것으로 해석된다. 그러나 과연 이러한 압력-온도 조건이 별개의 광역변성작용을 뜻하는지 아니면 단지 용기과정의 일부에 해당되는지 앞으로 더 검토되어야 한다. 전자의 경우 P-T 경로는 두 개의 고리(loop)에 의해 정의되지만, 후자의 경우 시계방향의 단일 고리에 의해 정의된다(Fig. 4). 현재로서는 과연 어느 P-T 경로가 맞는지 판단하기 어렵다. 광역변성작용 이후 옥천변성대는 쥐라기의 대보화강암 지반의 관입에 의해 열변성작용을 받았으며, 그 결과 새로운 열 유입에 의한 P-T 스파이크(spike)가 예상된다. 이상의 논의에 근거해 보면, 옥천변성대의 P-T 경로는 한 개의 연속된 시계방향의 고리로 대표된다고 단정하기에는 어려움이 있다.

### 지체구조적 진화

옥천대의 지구조적 생성 및 진화과정에 대해서는 그동안 많은 연구가 발표되었으나(예, 김옥준과 김규한, 1976; Chough, 1981; Cluzel *et al.*, 1990, 1991; Koh and Kim, 1995; Min and Cho, 1998; Chough *et al.*, 2000; Ree *et al.*, 2001), 아직도 논란이 계속되고 있다. 그러나 최근 들어 좀더 믿을만한 연대자료들이 발표됨에 따라 진일보된 지체구조 모델을 제시할 수 있게 되었다. 물론 구체적인 증거나 자료의 확보 면에서는 아

직 미흡하지만, 이제까지 발표된 자료를 바탕으로 논의할 수 있는 주요 내용을 아래에 정리한다.

**옥천분지의 형성**

옥천분지는 반쪽 지구(half graben)의 형태로 벌어진 대륙내 열개(rift)에 해당될 것으로 생각되며(Cluzel *et al.*, 1990; Koh and Kim, 1995), 규암/사질암-탄산염암-이질암층과 함께 다이아미타이트(diamicctite)가 주된 구성암이다. 이들 퇴적암체는 규장질 화산암류와 그보다 적은 양의 고철질 화산암 또는 관입암체와 공존한다. 옥천변성대를 구성하는 변성퇴적암 및 변성화산암들의  $T_{DM}$  모델 연대는 각각 1.8-1.4 Ga와 1.3-0.8 Ga로, 경기 육괴나 영남육괴에서 흔히 보고된 2.0 Ga 이상의 연대와 큰 차이를 보인다(Lan *et al.*, 1995; Lee and Chang, 1997; Lee, K.S. *et al.*, 1998; Lee, S.R. *et al.*, 2003). 이는 선캄브리아 기반암이 형성된 뒤에, 맨틀기원의 새로운 마그마가 옥천변성대 지역에 유입되었음을 지시한다. 옥천변성대 내에 산출하는 변성화성암류들은 미량원소 및 희토류원소 지구화학 특성이 거의 비슷한 탓으로 아마도 같은 시기에 분출 또는 관입했을 것으로 생각된다(Lee and Chang, 1997). 그러나 이러한 해석은 태백산분지의 전기 고생대 석회암층을 관입하는-적어도 겉보기에-변성염기성암(각섬암)들이 산출하기 때문에 틀릴 수도 있다. 만약 시대를 달리하는 대륙내 열개환경 기원의 현무암질 마그마가 관입/분출했다면, 장기간에 걸친 열개 환경의 존속이 요구된다. 물론 양자 사이의 접촉이 지구조적 운동에 기인할 수 있기 때문에, 이들 사이의 상호관계는 앞으로 지질연대 측정을 통해 밝혀져야 할 부분이다.

옥천분지에서 일어난 퇴적작용 역시 언제까지 계속되었는지 알 수 없다. 소위 황강리층을 구성하는 변성 다이아미타이트의 성인은 물론이고(이민성 외, 1998; Chough *et al.*, 2000) 이를 포함하는 소위 옥천층군의 퇴적시기 역시 정확히 이해하기에는 자료가 부족하다. 한편 향산리 대리암 내에서 보고된 고배류(archaeocyatha) 화석의 산출(이대성 외, 1972)과 변성 다이아미타이트의 탄산염암역에서 보고된 코노돈트 화석 자료(Lee *et al.*, 1989)는 재현성에서 문제가 되고 있는 탓에 전폭적으로 신뢰하기에 어려움이 있다. 그렇지만, 남중국지괴의 난화(Nanhua) 열개는 신원생대인 약 900 Ma부터 오르도비스기까지 활동성이었던 것으로(Li, 1998) 비추어 보아, 옥천분지도 상당히 오랜 기간에 걸쳐 퇴적물이 쌓였을 가능성마저 배제하기는 어렵다. 장기간에 걸쳐 옥천분지가 형성되었다고 해도, 해양지각이 발달했다는 증거는 찾아 볼 수 없기 때문에 분지의

열개는 소규모로 또는 간헐적으로 진행되었으리라 짐작된다.

소위 문주리층을 구성하는 규장질 변성화산암의 분출 시기는 U-Pb 저어콘 연대로부터 756 Ma로 정확히 구해졌으며, 이 신원생대 화성활동은 최근 SHRIMP 이온현미분석을 통해 확인되었다(조문섭, 미발표 자료). 전지구적으로 보면 이 시기에 로디니아(Rodinia) 초대륙이 왕성하게 분열했으며(Li *et al.*, 1999), 옥천변성대에도 남중국지괴와 마찬가지로(Li *et al.*, 2003) 대륙분열에 따른 쌍모식 화성활동이 잘 보존되어 있다.

**옥천분지의 닫힘-주 변성/변형작용**

옥천분지가 어떤 힘에 의해 닫히게 되었는지는 아직 분명치 않지만, 아마도 최고변성작용 기간인 석탄기 후기부터 페름기 초기(약 300-280 Ma) 사이에 닫혔을 것으로 생각된다. 이 기간에 옥천분지의 퇴적암들은 지하 약 15-30 km 깊이(약 5-9 kbar)까지 매몰되었으며, 이러한 사실은 퇴적분지의 침강작용만으로 설명하기 어렵고 지구조적인 힘에 의해 두꺼워진 지각을 지시한다고 믿어진다. 퇴적분지의 최대 두께는 보통 10 km 정도인 것으로 알려져 있으므로, 본래의 폭에 비해 적어도 2-3 배에 해당되는 횡적 수축(shortening)이 있었을 것으로 생각된다. 지각두께를 증가시킨 변형운동은 옥천변성대에서 남동쪽으로 향하는 비대칭 습곡들에 의해 특징지워지며, 나뉘 형태의 대규모 드러스트 단층에 기인한 것으로 해석된다(Cluzel *et al.*, 1990, 1991; Koh and Kim, 1995). Cluzel *et al.*(1990)은 이를 바탕으로 옥천 조산운동을 제안하였으며, 그 시기를 실루리아기-데본기라고 유추하였다. 그러나, 앞에서 논의한 바와 같이 옥천변성대의 주 변성-변형시기는 300-280 Ma이므로, 옥천 조산운동은 석탄기-페름기 사이에 일어났음을 알 수 있다.

이 옥천조산운동의 동인이 무엇인지, 어떤 지구조적 환경에서 일어났는지 알아보는 것은 흥미롭다. 태백산 분지에는 석탄기 후기 내지 페름기 초기 사이에 탄층을 포함하는 평안누층군이 상당히 넓은 지역에 걸쳐 퇴적되었다. 평안누층군이 평남분지는 물론이고 옥천변성대의 서남부를 따라 대상으로 분포하는 잘 알려져 있다. 평안누층군은 비교적 얇은 바다에서 쌓인 해성 퇴적암으로부터 시작해 페름기에는 육성 퇴적물로 전이하는 점이 특징적이며, Yin and Nie(1993)에 의해 중국의 대륙충돌 사건과 관련된 것으로 해석된 바 있다. 이러한 전이는 분명히 지구조적 사건과 연관되어 있으나 아직 불확실한 점들이 남아 있어서 그 시기와 원인에 대해서 논하기는 어렵다. 예를 들어, 태백산분지에

서는 석탄기 후기에 비정합이 관찰되며(Chough *et al.*, 2000) 이들이 과연 약 300-280 Ma에 걸친 옥천변성대의 주변성/변형운동과 맞물려 있는지 추후 연구되어야 할 것이다. 그러나 전체적으로 보아, 평안누층군의 분포나 퇴적시기, 퇴적환경 등은 옥천변성대에서 얻은 동시기의 동위원소 연대 및 수십 km 지하에서 일어난 광역변성작용과 서로 잘 조화된다고 보기 어렵다. 따라서 이 두 지구조대 사이에는 큰 구조선이 존재할 수밖에 없으며, 그 통합 시기는 280 Ma 이후 그리고 적어도 대동누층군의 퇴적 시기(트라이아스기 후기-จู라기 전기) 이전으로 생각된다. 또한 옥천변성대와 평안누층군(변성)퇴적암체를 관입한 트라이아스기 화성암체의 연대(예를 들어, 약 220 Ma에 관입한 청산화강암체; Cho *et al.*, 2001; Ree *et al.*, 2001)보다도 이전일 것이다. 따라서, 옥천변성대 내에서 보고된 변성연대 결과들(Fig. 4)과 비교해 보면, 태백산분지와 옥천변성대의 통합 시기는 약 250-220 Ma가 가장 유력해 보인다. 이러한 연대 범위는 임진강대에서 보고된 바와도 일치하며(Ree *et al.*, 1996; Cho *et al.*, 2001), 결국 북-남중국 대륙의 충돌시 옥천대와 태백산분지의 통합이 이루어졌으리라 추정된다.

위에 기술한 지체구조적 해석에는 매우 중요한 의문이 남는다. 즉 옥천변성대와 태백산분지 사이의 통합, 그리고 옥천변성대의 남동 경계부를 따라 길게 분포하는 조선-평안누층군 퇴적암과의 통합 관계이다. 이들 두 암체 사이에 압력 즉 매몰깊이가 상당히 차이날 경우, 조산운동에 따른 압력의 증가가 요구된다. 그러나, 실제로는 평안누층군 역시 지역에 따라 편차는 있지만 상당한 매몰깊이를 경험했음을 기억해야 한다(e.g., 이종혁, 1992; 양관석과 조문섭, 1995). 예를 들어, 양관석과 조문섭(1995)은 평안누층군에 해당되는 변성이질암에서 약 3.5-5.0 kbar에 해당되는 변성압력을 제시한 바 있다. 평안누층군이 퇴적 후에 경험한 압력증가 역시 평안누층군의 변성/변형작용 이후에 관입한 청산-백록화강암체의 관입 이전에 일어났을 것이므로, 조산운동이 약 250-220 Ma에 있었음을 지지한다.

이상의 해석은 Ree *et al.*(2001)이 제안한, 옥천변성대(남중국지괴)와 영남육괴 및 태백산분지(북중국지괴)와의 경계가 약 220 Ma 이후에 일어난 우수향 연성전 단대에 의해 정의된다는 가설과 배치된다. Ree *et al.*(2001)의 지구조 모델에 의하면, (1) 청산-보은 지역에 산출하는 조선-평안누층군의 암체들은 북중국지괴보다 남중국지괴에 속하며, (2) 이 두 지괴사이의 충돌 시기도 약 220 Ma 이후로 정의된다. 전자는 주로 조선-평안누층군 퇴적암들로 구성된 태백산분지가 북중국

지괴에 속한다는 이들의 모델과 상충되며, 후자는 옥천변성대에서 보고된 변성시기를 설명하기 어렵기 때문에 받아들이기 힘들다. 따라서, Ree *et al.*(2001)의 제안과는 달리, 옥천변성대와 태백산분지(즉 조선누층군+평안누층군) 사이의 통합대가 북-남중국 대륙 사이의 경계에 해당될 것으로 생각된다.

Lee(2000)은 옥천대의 변형사를 크게 보아 (a) NE-SW 방향의 압축력으로 인해 NW 주향의 면구조가 발달한 이후 (b) NW-SE 방향의 압축력으로 인해 옥천변성대의 주엽리면에 해당되는 NE 방향의 면구조가 발달하였음을 주장하였다. 그는 또한 두 번째 조산운동의 경우 동축(coaxial) 변형작용에 따른 지각 두께의 증가가 있는 후, 중력효과로 인한 조산대의 붕괴에 수반되어 비동축(non-coaxial) 변형작용이 일어났음을 제안하였다. 즉 옥천변성대의 주엽리면은 용기에 관련된 연성변형작용에 의한 것으로 해석한 셈이다. 그러나 위에서 기술한 변성진화경로와 변성시기는 이러한 생각과 잘 일치하지 않는다. 더 나아가 Lee(2000)은 NE-SW 방향의 압축력이 남-북중국 지괴의 대륙충돌 사건에 관련된 것으로 유추하였으나, U-Pb 석류석 연대는 배치된다. 따라서 구조운동에 관한 자료만을 기초로 변형시기를 논의하는 데는 한계가 있음을 보여주는 예로 여겨진다.

한편 옥천변성대의 주변성/변형운동의 시기는 일본의 히다연변대(Hida Marginal Belt) 또는 령에대(Renge Belt)라고 불리우는 고압변성대에서 보고된 약 300 Ma의 변성작용(Kunugiza *et al.*, 2002)과 대비될 수 있다. 이 령에대에서는 최근 에클로자이트를 비롯해 청색편암과 같은 고압변성암들이 발견되어(Tsujimori *et al.*, 2000) 석탄기 후기에 섭입대가 존재했음을 지시한다. 또한 령에대는 약 250-240 Ma 전에 최고변성작용을 경험한(Suzuki and Adachi, 1994; Sano *et al.*, 2000; Kunugiza *et al.*, 2002) 히다변성대와 현재 접하고 있다. 이 두 지구조대 사이의 관계는 위에 기술한 옥천변성대의 변성진화과정과 조화적이며, 변성 또는 퇴적시기로 볼 때, 옥천변성대가 히다연변대와 그리고 평안누층군은 히다변성대의 우나즈키 편암류와 대비될 가능성을 시사한다. 이러한 생각은 구성암의 암상 및 변성상, CHIME 연대 등을 근거로 옥천변성대를 히다변성대에 대비한 Hiroi(1981)와 Suzuki and Adachi(1994)의 결과와 차이를 보인다.

#### 옥천변성대의 용기

옥천변성대의 용기과정에 대한 정보는 흔치 않지만, 용기 속도에 대한 규제 요소들에 대해 생각해 볼 수

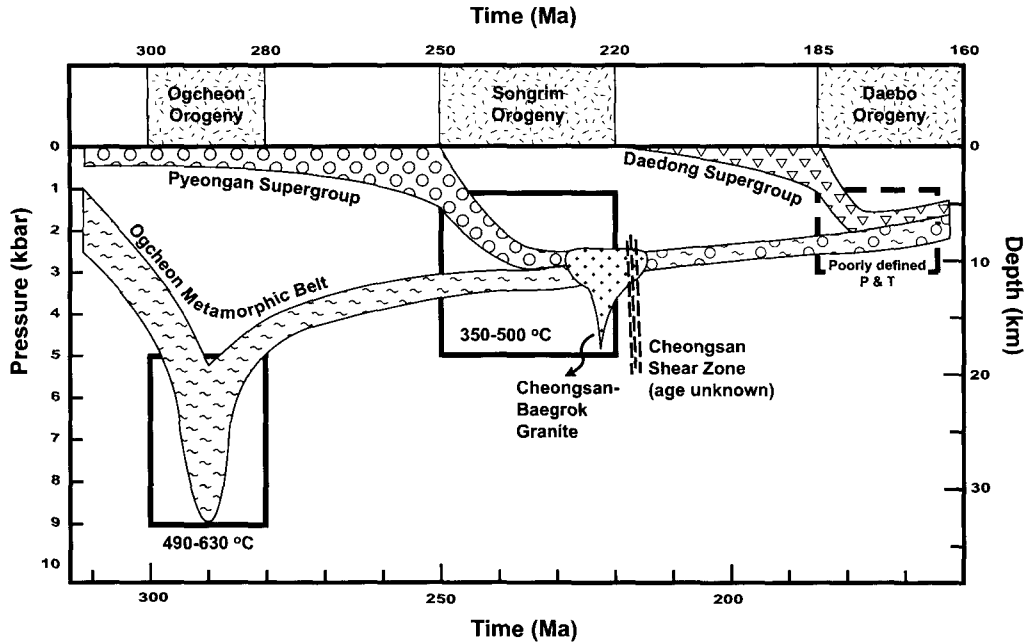


Fig. 6. A schematic diagram showing the pressure (or depth)-time evolution of the Ogcheon metamorphic belt. In this belt, the Ogcheon orogeny at ca. 300-280 Ma is responsible for the peak metamorphism at ca. 5-9 kbar and 490-630°C. Another regional metamorphic event at ca. 1-5 kbar and 350-500°C has occurred during the Songrim orogeny at 250-220 Ma. Then, the Ogcheon belt comprising both the Ogcheon metamorphic belt and the Taebaegsan basin was intruded by ca. 220 Ma granitoids, which were subsequently affected by dextral ductile shearing (e.g., Cheongsan shear zone, Ree *et al.*, 2001). Finally, non-marine sedimentary rocks of the Daedong Supergroup were deposited during late Triassic to early Jurassic, and affected by the Daebo orogeny (e.g., Cluzel, 1992). The Daebo metamorphism is likely to be limited in regional extent, and its P-T condition is poorly constrained.

있다. 옥천변성대의 구조적 하부인 보은 지구조 단위에는 우라늄을 많이 포함하는 흑색점판암이 상당히 넓은 지역에 걸쳐 분포하는 것으로 알려져 있다. 이들 점판암 역시 적어도 15 km 이상의 깊이까지 매몰되었다가 지표로 올라왔는데(Kim *et al.*, 2000), 이들이 지표열구에 미친 영향에 대해 주의를 기울여볼 필요가 있다.

지각두께를 증가시키는 드러스트 지구조운동에서는 두 개의 대조적인 P-T-t 경로가 나타날 수 있다(Thompson and England, 1984; Ernst and Liou, 1995). 만약 최고 압력을 경험한 후 장기간 지하 깊은 곳에 머물게 되면, 감압 즉 융기과정과 함께 온도 상승을 경험하게 되며 결국 최대 온도 즉 최고(peak) 변성조건에 다다르게 된다. 최고변성작용 이후에는 비교적 등온의 감압 경로를 보일 수 있는데, 이는 방사성동위원소의 붕괴열에 의한 열적 상승이 주효하기 때문이다. 반면 최고 압력을 경험한 이후 빠르게 융기되는 경우, P-T-t 경로는 매몰될 때의 전진변성작용경로와 비교적 비슷

한 dP/dT 기울기를 지니며 시계방향의 경로를 보인다. 따라서 최고변성조건은 압력이 최대로 달한 시점과 큰 차이가 없게 된다. 방사능 물질을 많이 포함하고 있는 옥천변성대의 P-T-t 경로는 아마도 후자에 가까울 것으로 추정된다(Fig. 4).

옥천변성대는 약 15-30 km 지하에서 일어난 최고변성작용 이후 비교적 빨리 감압되었을 것이나 지표로 노출되기보다는 상대적으로 얕은 깊이의 지하에 머물러 있었을 것이다. 이 기간동안 열적 이완(thermal relaxation)에 의해 대륙의 평균 지온구배를 되찾았을 것이다. 이후 약 250-220 Ma 기간에 다시 한번 조산운동을 경험하였으며 시계방향의 P-T 고리를 보여줄 것으로 추측된다(Fig. 4). 그러나 이 두 번째 P-T 경로는 옥천변성대에 기록된 자료만으로 정확히 규명하기 어렵고, 오히려 평안누층군의 변성이질암으로부터 (e.g., 양관석과 조문섭, 1995) 더 많은 정보를 얻을 수 있리라 짐작된다. 하여간 이 두 번째 조산운동은 북-남 중국 대륙의 충돌 사건과 관련되었을 것으로 생각된다.

이후 옥천변성대와 태백산분지는 지구조적으로 같은 진화경로를 밟았을 것이며, 이 과정은 Ree *et al.*(2001)에 의해 정리된 바와 같다.

이상에서 논의한 내용을 정리하면, Fig. 6과 같다. 즉 옥천변성대는 이제까지 알려진 바와는 달리 최고변성작용의 시기가 약 300-280 Ma이다. 이 광역변성작용은 Cluzel *et al.*(1990)이 옥천 조산운동으로 명명한 비동축 변형운동을 수반하였다. 옥천 조산운동 이후, 옥천 조산대는 두꺼워진 지각에 작용하는 중력효과로 인해 비교적 빠르게 붕괴되었으리라 생각된다. 트라이아스기에 들어서 옥천변성대는 서로 동떨어진 환경 및 압력 조건에서 진화를 해온 태백산분지와 통합되게 된다. 그 시기는 약 250-220 Ma로, 송림 조산운동에 해당된다. 두 지구조대는 합쳐진 이후, 또는 송림 조산운동의 최후기에 우수향 연성전단운동을 경험했을 것으로 추정된다. 이러한 해석은 Ree *et al.*(2001)이 제안한 지구조 모델과 다른데, 특히 통합시기와 연성전단운동의 시기를 달리 보는 점에서 큰 차이가 있다. 이를 해결하기 위해선, Ree *et al.*(2001)이 중부옥천드러스트(COT)로 명명한 옥천변성대와 태백산분지의 경계부가 청산지역의 연성전단대로 실제로 연장되는지 정량적으로 밝히는 노력이 필요하다.

## 결 론

옥천변성대를 구성하는 변성암류는 수차례의 변형-변형작용을 경험하였기 때문에, 이들의 원암이 퇴적 또는 분출된 옥천분지를 복원하기는 거의 불가능에 가깝다. 그럼에도 불구하고, 옥천변성대의 암석들은 여러 면에서 흥미로우며, 이들의 특성에 대해 자세히 연구해볼 가치가 충분히 있다. 일례로, 이들의  $T_{DM}$  모델 연대(1.8-0.8 Ga)는 경기육괴나 영남육괴에서 보고된 연대(>2.0 Ga)보다 젊으며, 아마도 원생대 후기에 새로운 지각물질이 옥천분지를 따라 맨틀로부터 상당량 유입되었음을 시사한다. 원생대 후기의 화성활동과 이에 수반된 화산퇴적암체의 분포가 얼마나 광범위한지 앞으로 연구해볼 가치가 있다. 한편, 소위 황강리층을 구성하는 변성 다이아믹타이트는 그 기원이 아직 확실하지는 않지만(Chough, 1981; 이민성 외, 1998; Chough *et al.*, 2000), 이민성 외(1998)이 제안한 빙하기원설은 상당한 매력을 지닌다. 즉 남중국 지괴에서 보고된 빙하 퇴적물과의 대비 가능성뿐만 아니라, 최근 집중적으로 논의되고 있는 눈덩이지구(Snowball Earth; Hoffman *et al.*, 1998, 참조) 이론과도 연관될 수 있기 때문이다. 따라서 보다 정량적인 지구연대학적, 지구화학적 자료들

을 바탕으로 빙하기원설을 증명하거나 반증할 필요가 있다.

옥천변성대의 광역변성작용은 두 번에 걸쳐 일어났을 것으로 해석되며(Min and Cho, 1998), 이들은 각각 옥천 및 송림 조산운동의 산물로 생각된다. 이제까지 발표된 연구들을 정리한 바에 의하면, Cluzel *et al.*(1990)의 추정과는 달리 옥천 조산운동의 시기는 약 300-280 Ma인 반면, 송림운동의 시기는 약 250-220 Ma로 추정된다. 전자는 최고 변성작용에 해당되는 광물 조합들을 낳았으나, 후자의 경우 특징적인 광물조합의 산출이 적어 변성조건을 자세히 규정하기는 어렵다. 그러나 대개 녹색편암상이 지배적이었을 것으로 생각된다(Ahn and Cho, 1996; Min and Cho, 1998). 이러한 결과들을 종합하면, 옥천변성대의 변성진화사는 아마도 두 개의 고리(loop)로 이루어진 시계방향의 압력-온도-시간 경로로 대표되는 광역변성작용과 P-T 스파이크를 지엽적으로 만들어낸 류라기-백악기의 열변성작용이 특징적이라고 여겨진다. 이와 같은 변성진화사는 히다연변대와 히다변성대에서 보고된 연구결과와(Kunugiza *et al.*, 2002) 잘 일치하며, 한반도에도 부가대 지체구조학(accretionary tectonics)과 관련된 지구조적 해석이 필요할 것으로 예상된다.

이상에서 기술한 옥천변성대의 변성 및 지구조적 진화경로는 아직 완전치 못한 부분이 많이 있으며, 앞으로 자세한 연구에 의해 보완되어야 한다. 특히 옥천변성대와 태백산분지의 통합시기에 관해 보다 자세한 자료가 필수적으로 요구된다. 만약 이 논문에서 제시한 지구조 모델이 맞다면, 평안누층군의 흑색 점판암의 변성연대(예를 들면 Pb-Pb 연대)는 옥천변성대와 달리 약 250-220 Ma의 범위에 속할 것이다. 또한 평안누층군이 퇴적을 끝마친 시기가 과연 트라이아스기 초기인지에 대한 생각도 검토되어야 한다. 만약 평안누층군을 포함하는 변형-변성작용이 약 250 Ma 시기에 있었다면, 평안누층군의 최상부층은 페름기 후기에 퇴적되었을 것이다.

결론적으로, 최근 발표된 변성암석학적-지구연대학적 자료들은 한반도 내의 조산운동에 대한 중요한 정보를 제공한다. 과연 이러한 연구 결과들을 모두 만족시키는 조산운동의 실체가 무엇인지 규명하기 위해서는 자세한 변성암석학적 연구는 물론이고, 좀더 활발한 학제간 연구가 필수적이다. 특히 동아시아의 트라이아스기 대륙충돌 사건과 관련하여, 한반도 내의 지체구조와 충돌대를 보다 구체적으로 설정하기 위한 연구는 한반도의 지각진화사를 밝히는데 뿐 아니라 중국 및 일본과의 대비관계를 밝히는데도 매우 중요하다.

후기 및 사사

옥천변성대의 변성작용에 대한 연구를 처음으로 시작하셨고, 우리나라의 암석학계 발전을 위해 늘 고심하셨던 고 김형식 교수님의 영전에 졸작이나마 이 논문을 바친다. 80년대 초 우리나라에서 전자현미분석을 할 수 없었던 시절, 제1저자와 함께 Stanford 대학의 EPMA 옆에서 꼬박 같이 밤을 지새웠던 기억은 지금도 새롭기만 하다. 교수님과 의 따사로운 기억들을 곱씹으며, 지난 세월 아낌없이 베풀어주신 각별한 정을 못 잊어 아쉬움의 옷깃을 여민다. 교수님의 따뜻한 목소리는 아직도 우리를 챙겨주시는 듯 한데, 아무쪼록 부단히 노력함으로써 조금이나마 교수님의 기대에 부응할 수 있는 우리이길 다짐해본다.

이 연구는 한국과학재단 특장기초연구비(R01-2001-00070)에 의해 지원되었다. 그림을 그리는데 도움을 준 김윤섭 석사와 문장을 다듬어준 김태훈 석사에게 감사한다. 초고를 읽고 용어 사용에서의 문제점들을 지적 해주신 최덕근 교수, 그리고 추모논문집 발간 때문에 바쁜 와중에도 건실적이고 유익한 비평들을 제공해 주신 오창환 편집위원장에게 감사한다. 급하게 준비된 원고이다 보니 미비한 점이 많을 것으로 생각되나-특히 참고문헌을 철저히 소개하지 못한 점이 못내 아쉽지만-독자제헌의 넓은 이해를 구한다.

참고문헌

권성택, 藍晶瑩, 1991, 옥천 각섬암의 Sm-Nd 동위원소 연구: 예비보고서. 광산지질, 24, 277-285.  
 김옥준, 김규환, 1976, 옥천지향사대내에 분포하는 염기성 암류의 암석학적 연구. 광산지질, 9, 13-26.  
 김태훈, 조문섭, 2000, 옥천대 "문주리층"에 산출하는 변성 화산암류의 분포와 화성조작: 고화산활동(high-volcanicity) 열곡의 존재 (요약문), 한국암석학회, 86.  
 김현철, 조문섭, 고희재, 1995, 증평-덕평 지역에 분포하는 중부 옥천 변성대의 변성 지구조적 진화. 지질학회지, 31, 299-314.  
 노진환, 1995, 수안보 지역 옥천누층군 변성 이질암류의 접촉변성 분대와 반점상 근청석의 생성. 지질학회지, 31, 328-342.  
 민경원, 조문섭, 권성택, 김인준, Nagao, K., Nakamura, E., 1995, 충주 지역에 분포하는 변성암류의 K-Ar 연대: 원생대 말기(675 Ma)의 옥천대 변성작용. 지질학회지, 31, 315-327.  
 박계현, 정창식, 1998, 옥천 변성대 변성퇴적암의 스트론튬 동위원소 조성 및 연대. 지질학회지, 34, 81-93.  
 박계현, 2001, 단계적 용해에 의한 연대측정법 연구. 암석학회지, 10, 133-147.

양판석, 조문섭, 1995, 춘양 화강암체 주변 두음리층에 산출하는 십자석-흑운모-홍주석-석류석 광물조합: 대수학적 분석. 암석학회지, 4, 49-60.  
 오창환, 김선태, 이정후, 1995, 옥천변성대 서남부 지역의 주변성작용 시기와 온도-압력에 관한 연구. 지질학회지, 31, 343-361.  
 오창환, 권용완, 김성원, 1999, 청주-미원지역 중부 옥천변성대의 변성진화과정. 암석학회지, 8, 106-124.  
 오창환, 김성원, 유인창, 이덕수, 2002, 옥천변성대 서남부 지역 변성퇴적암. 2002년도 한국암석학회 학술답사 안내서, 38p.  
 오창환, 김성원, 이정후, 1998, 옥천변성대 남서부지역의 광역변성작용과 접촉변성작용에 관한 연구. 지질학회지, 34, 311-332.  
 오창환, 이영엽, 2000, 문경 및 보은지역의 저압형 열변성 작용시 변성염기성암내 각섬석 성분의 변화. 지질학회지, 36, 383-410.  
 이대성, 장기홍, 이하영, 1972, 옥천계내 향산리돌로마이트 층에서의 Archaeocyatha의 발견과 그 의의. 지질학회지, 8, 191-197.  
 이민성, 여정필, 이종익, 좌우주, S. Yoshida, 이한영, 1998, 옥천계의 빙하기원 다이아미타이트와 그 지질시대 및 고생대 말의 한반도의 고지리. 지질학회지, 34, 343-370.  
 이종혁, 1992, 강릉-북평간에 발달하는 평안누층군의 변성 작용에 관한 연구. 지질학회지, 28, 553-570.  
 이종혁, 1995, 옥천누층군의 지질. 서남옥천대의 지질-이종혁 교수 정년퇴임 기념 논집, 17-130.  
 전은영, 권성택, 1999, 서부 임진강대 고남산 지역의 고압 변성작용: 반시계 방향의 P-T-t 경로. 지질학회지, 35, 49-72.  
 조문섭, 2001, 이온현미분석기를 사용한 남서부 경기육괴 변성암류의 U-Pb 저이온 연대: 남중국지괴와의 대비 가능성 (요약문), 한국광물학회-한국암석학회 공동학술발표회, 141-142.  
 조문섭, 권성택, 이진한, E. Nakamura, 1995, 연천-전곡 지역에 분포하는 임진강대의 고압 각섬암. 암석학회지, 4, 1-19.  
 Adachi, M., Suzuki, K., and Chwae, U.C., 1996, CHIME age determination of metamorphic rocks in the Okchon belt, Korea (abstract). Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, 80.  
 Ahn, J.H. and Cho, M., 1996, High-resolution transmission electron microscopy of structural defects in hornblendes of Ogcheon amphibolites. J. Geol. Soc. Korea, 32, 334-344.  
 Ahn, K. and Nakamura, Y., 2000, The natural reaction muscovite+chlorite+chloritoid=andalusite+biotite+quartz+H<sub>2</sub>O and a new petrogenetic grid. Geosci. J., 4, 25-39.  
 Cheong, C.-S., Jeong, G.Y., Kim, H., Lee, S.-H., Choi, M. S., and Cho, M., 2003, Early Permian peak metamorphism recorded in U-Pb system of black slates from the Ogcheon metamorphic belt, South Korea, and its tectonic implication. Chem. Geol., 193, 81-92.  
 Cho, D.-L., Kwon, S.-T., Sagong, H., Cheong, C.-S., and

- Armstrong, R., 2001, Precise cooling histories of three neighboring plutons in the central Ogcheon belt: Implications for magma movement rate and tectonics (abstract). Annu. Meet. Geol. Soc. Korea, 90.
- Cho, M., Kim, H., Lo, C.-H., Min, K., and Ahn, J.H., 1999, Ordovician (or "Caledonian") Okchon orogeny: Evidence from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  hornblende ages (abstract). Geol. Soc. Korea, 66.
- Cho, M., Min, K. and Kim, H., 1994, Metamorphism in the central Ogcheon belt. In Structure and Metamorphism of the Ogcheon Belt-Field Trip Guidebook (eds. J.-H. Ree, M. Cho, S.-T. Kwon and J.H. Kim), IGCP 321 4th Int. Symp. Field Excur., Harn Lim, Seoul, 97-120.
- Chough, S.K., 1981, Submarine debris flow deposits in the Ogcheon Basin, Korean Peninsula. U.N. ESCAP, CCOP Tech. Bull., 14, 17-29.
- Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H., and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view. *Eath-Sci. Rev.*, 52, 175-235.
- Cliff, R.A., Jones, G., Choi, W.C., and Lee, T.J., 1985, Strontium isotopic equilibration during metamorphism of tillites from the Ogcheon Belt, South Korea. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 90, 346-352.
- Cluzel, D., 1992, Formation and tectonic evolution of early Mesozoic intramontane basins in the Ogcheon belt (South Korea): a reappraisal of the Jurassic "Daebo orogeny". *J. Southeast Asian Earth Sci.*, 7, 223-235.
- Cluzel, D., Cadet, J.P., and Lapiere, H., 1990, Geodynamics of the Ogcheon belt (South Korea). *Tectonophysics*, 183, 41-56.
- 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.
- Ernst, W.G. and Liou, J.G., 1995, Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belts. *Geology*, 23, 353-356.
- Hiroi, Y., 1981, Subdivision of the Hida metamorphic complex, central Japan, and its bearing on the geology of the Far East in pre-Sea of Japan time. *Tectonophysics*, 76, 317-333.
- Hoffman, P.F., Kaufman, A.J., Halverson, G.P., and Daniel P. Schrag, D.P., 1998, A Neoproterozoic snowball Earth. *Science*, 281, 1342-1346.
- Hong, Y. K., 1984, Geochemistry of garnet-biotite mineral pairs in the Hwanggangni area, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 20, 115-126.
- Ikeda, T., Shimobayashi, N., Wallis, S.R., and Tsuchiyama, A., 2002, Crystallographic orientation, chemical composition and three-dimensional geometry of sigmoidal garnet: evidence for rotation. *J. Struct. Geol.*, 24, 1633-1646.
- 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.
- Karabinos, P., 1984, Polymetamorphic garnet zoning from southeastern Vermont. *Am. J. Sci.*, 284, 1008-1025.
- Kim, H., 2000, Metamorphic evolution of low- to medium-pressure rocks in central Ogcheon metamorphic belt, Korea and on Barton Peninsula, King George Island, Antarctica. Ph.D. dissertation, Seoul National Univ., 172p.
- Kim, H., Cheong, C.-S., Cho, M., Jeong, G.Y., and Choi, M.S., 2001, Geochronologic evidence for Late Paleozoic orogeny in the Ogcheon metamorphic belt, South Korea (abstract). Annu. Meet. Geol. Soc. Am., Abstr. with Programs, 33.
- Kim, H. and Cho, M., 1999, Polymetamorphism of Ogcheon Supergroup in the Miwon area, central Ogcheon metamorphic belt, South Korea. *Geosci. J.*, 3, 151-162.
- Kim, H., Cho, M., and Ahn, J.H., 2000, A study on the  $b_0$  parameter and crystallinity index of K-white micas from low-grade metapelites in Deokpyeong and Miwon areas, central Ogcheon metamorphic belt, Korea. *Geosci. J.*, 4, 201-209.
- Kim, H.S., 1971, Metamorphic facies and regional metamorphism of Ogcheon metamorphic belt. *J. Geol. Soc. Korea*, 7, 221-256.
- Kim, J.H., 1987, Caledonian Ogcheon orogeny of Korea with special reference to the Ogcheon uraniferous marine black slate. Ph.D. dissertation, Tokyo Univ., 208p.
- Kim, J.H., 1990, Middle Paleozoic isotopic ages of the Ogcheon Group in Korea and their significance, In *Tectonics of Circum-Pacific Continental Margins* (eds. Aubouin, J. and Bourgeois, J.), VSP, Utrecht, 181-191.
- Koh, H.J. and Kim, J.H., 1995, Deformation sequence and characteristics of the Ogcheon Supergroup in the Geosan area, central Ogcheon belt, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 31, 271-298.
- Kunugiza, K., Tsujimori, T., and Kano, T., 2001, Evolution of the Hida and Hida marginal belts. In *ISRGGA Field Workshop Guidebook for Major geologic units of southwest Japan* (ed. T. Kano), Field Science Publisher, Osaka, 75-131.
- Lan, C.-Y., Lee, T., Zhou, X.-H., and Kwon, S.-T., 1995, Nd isotopic study of Precambrian basement of South Korea: Evidence for Early Archean crust? *Geology*, 23, 249-252.
- Lee, H., 2000, Significance of systematic changes in crenulation asymmetries within metasediments across the Ogcheon Supergroup in the Goesan area, southern Korea. *Geosci. J.*, 4, 115-134.
- Lee, J.-H., Lee, H.Y., Yu, K.-M., and Lee, B.-S., 1989, Discovery of microfossils from limestone pebbles of the Hwanggangri formation and their stratigraphic signifi-



- cance. *J. Geol. Soc. Korea*, 25, 1-15.
- Lee, K.S. and Chang, H.W., 1997, Geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic systematics of the Ogcheon amphibolites from the central Ogcheon belt, Korea: implication for the source heterogeneity. *Geochem. J.*, 31, 223-243.
- Lee, K.S., Chang, H.W., and Park, K.-H., 1998, Neoproterozoic bimodal volcanism in the central Ogcheon belt, Korea: age and tectonic implication. *Precam. Res.*, 89, 47-57.
- Lee, S.R., Cho, M., Hwang, J.H., Lee, B., Kim, Y., and Kim, J.C., 2003, Crustal evolution of the Gyeonggi massif, South Korea: Nd isotopic evidence and implications for continental growths of East Asia. *Precam. Res.* (in press).
- Li, Z.X., 1998, Tectonic evolution of the major East Asian lithospheric blocks since mid-Proterozoic A synthesis. In *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia* (eds. F.J. Martin, S.-L. Chung, C.-H. Lo, and T.-Y. Lee), *Am. Geophys. Union, Washington, D.C.*, 221-243.
- Li, Z.X., Li, X.H., Kinny, P.D., and Wang, J., 1999, The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth Planet. Sci. Letters*, 173, 171-181.
- Li, Z.X., Li, X.-H., Kinny, P.D., Wang, J., Zhang, S., and Zhou, H., 2003, Geochronology of Neoproterozoic synrift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precam. Res.* (in press).
- McNaughton, N.J., Rasmussen, B., and Fletcher, I.R., 1999, SHRIMP uranium-lead dating of diagenetic xenotime in siliciclastic sedimentary rocks. *Science*, 285, 78-80.
- Min, K. and Cho, M., 1998, Metamorphic evolution of the northwestern Ogcheon metamorphic belt, South Korea. *Lithos*, 43, 31-51.
- Offler, R., Miller, J.McL., Gray, D.R., Foster, D.A., and Bale, R., 1998, Crystallinity and  $b_0$  spacing of K-white micas in a Paleozoic accretionary complex, Eastern Australia: metamorphism, paleogeotherms and structural style of an underplated sequence. *J. Geol.*, 106, 495-509.
- Oh, C.H., Kim, S.T., and Lee, J.H., 1995, The P-T condition and timing of the main metamorphism in the southwestern part of the Ogcheon metamorphic belt. *J. Geol. Soc. Korea*, 31, 343-361.
- Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-T., and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea: The Imjingang belt. *Geology*, 24, 1071-1074.
- Ree J.-H., Kwon, S.-H., Park, Y., Kwon, S.-T., and Park, S.-H., 2001, Petrotectonic and posttectonic emplacements of the granitoids in the south central Okchon belt, South Korea: Implications for the timing of strike-slip shearing and thrusting. *Tectonics*, 20, 850-867.
- Reedman, A.J. and Um, S.H., 1975, *Geology of Korea*. Geol. Miner. Inst. Korea, Seoul, 139pp.
- Sano, Y., Hidaka, H., Terada, K., Shimizu, H., and Suzuki, M., 2000, Ion microprobe U-Pb zircon geochronology of the Hida gneiss: Finding of the oldest minerals in Japan. *Geochem. J.*, 34, 135-153.
- Sassi, F.P. and Scolari, A., 1974, The  $b_0$  value of the potassic white micas as a barometric indicator in low-grade metamorphism of pelitic schists. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 45, 143-152.
- Smith, H.A. and Barreiro, B., 1990, Monazite U-Pb dating of staurolite grade metamorphism in pelitic schists. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 105, 602-615.
- Spear, F. S. and Menard, T., 1989, Program GIBBS: A generalized Gibbs method algorithm. *Am. Min.*, 74, 942-943.
- Spear, F.S., 1993, Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. *Mineral. Soc. Am. Monograph*, 1, 799p.
- Stallard, A. and Hickey, K., 2002, A comparison of microstructural and chemical patterns in garnet from the Fleur de Lys Supergroup, Newfoundland. *J. Struct. Geol.*, 24, 1109-1123.
- Suzuki, K. and Adachi, M., 1994, Middle Precambrian detrital monazite and zircon from the Hida gneiss on Oki-Dogo Island, Japan: their origin and implications for the correlation of basement gneiss of Southwest Japan and Korea. *Tectonophysics*, 235, 277-292.
- Thompson, A.B. and England, P.C., 1984, Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism II: Their influence and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks. *J. Petrol.*, 25, 929-955.
- Tsujimori, T., Ishiwatari, A., and Banno, S., 2000, Discovery of eclogitic glaucophane schist from the Omi area, Renge metamorphic belt, the Inner zone of southwestern Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, 106, I-II.
- Yin, A. and Nie, S., 1993, An indentation model for the north and south China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics*, 12, 801-813.

---

(2002년 10월 19일 접수, 2002년 12월 3일 채택)