

연천-전곡 지역에 분포하는 임진강대의 고압 각섬암

조문섭¹ · 권성택² · 이진한³ · Eizo Nakamura⁴

¹서울대학교 지질과학과, ²연세대학교 지질학과, ³고려대학교 지구환경과학과,

⁴오카야마대학교 고체지구 연구센터

요 약: 연천층군을 포함하며 동-서 방향으로 발달하는 임진강대의 실체를 밝히기 위해, 우리는 연천층군의 표식지인 연천-전곡 지역에 분포하는 변성암류에 대해 연구하였다. 연천층군의 삼꽃층은 흔히 조화적으로 산출하는 석회질 규산염암, 변성사질암, 각섬암, 각섬석 편마암 등으로 구성된다. 이들 변성암류는 동-서 주향 방향으로 15 km 폭 이상에 걸쳐 광역적으로 분포한다. 각섬암의 주된 광물 조합은 각섬석+사장석+석류석+투휘석+흑운모+석영이며, 부구성 광물로는 금홍석과 티탄철석이 티타나이트에 의해 치환됨이 특징적이다. 각섬암 내의 석류석-각섬석-사장석-석영 광물 조합으로부터 구한 변성온도와 압력은 각각 632~736°C와 7.9~11.1 kbar이다. 따라서 삼꽃층은 고압의 상부 각섬암상에 해당되는 광역 변성작용을 받았다. 한편 각섬암의 석류석-사장석-전암에 대한 Sm-Nd과 Rb-Sr 광물 등시선 연령은 각각 231±30 Ma와 222±24 Ma로서 트라이아스기의 광역 변성작용을 지지한다. 이상의 연구 결과는 산둥 반도에서 보고된 변성 조건 및 시기와 일치하며, 중국의 대륙충돌대가 임진강대로 연장될 가능성을 지지한다.

핵심어: 연천층군, 각섬암, 광역 변성작용, 임진강대, 대륙충돌대

서 론

한반도의 지체구조를 밝히기 위한 최근의 노력에 힘입어 그동안 잘 알려지지 않아 왔던 임진강대에 대한 관심이 국내외적으로 지대하다. 이는 중국에서 중한 지괴 (Sino-Korean craton)와 양쯔 지괴 (Yangtze craton) 사이에 발달하는 칭링-다비-산둥 (Qinling-Dabie-Shandong) 대륙충돌대가 임진강대로 연장될 가능성이 있다는데서 비롯된다 (Fig. 1; Cluzel, 1992; Yin and Nie, 1993; Liu, 1993; Ernst *et al.*, 1994; Ree *et al.*, 1994). 그러나 현재 국내에서는 임진강대의 정의조차도 불분명한 형편이고, 임진강대와 인접한 38선 이북의 남한 지역에 대해서는 1:50,000 지질 도폭마저도 발간되어 있지 않다. 우리는 임진강대의 변성 지구조직 (tectono-metamorphic) 진화사를 밝히기 위해 임진강대의 남부에 해당된다고 생각되는 연천-전곡 지역의 변성암류에 대해 연구하였다. 연구 지역의 지질 구조, 변성작용 및 지질 연대에 관한 예비 결과는 Ree *et al.* (1994)에 의해 발표된 바가 있다.

연천-전곡 지역은 연천층군의 표식지에 해당되지만, 이들 연천층군에 대한 연구는 Yamaguchi (1951)

와 Na (1978, 1979)의 변성암석학적 연구를 제외하고는 거의 없다. Yamaguchi (1951)는 동-서 방향으로 체계적인 분포를 보이는 연천층군을 암상과 변성 광물 조합에 따라 세분하였다: 북쪽에서 남쪽으로 감에 따라 상원누층군, 여척암대, 진곡암대, 계호암대, 흑석암대, 삼꽃암대의 순으로 변한다 (Fig. 2). 특히 Yamaguchi (1951)는 진곡암대 내에서 남쪽으로 감에 따라 변성도가 점진적으로 증가함을 밝히고, 중압형 변성상계에 속하는 흑운모, 석류석, 십자석, 남정석, 홍주석 분대를 설정하였다. 또한 이번 연구 지역에 해당되는 삼꽃암대 내에서 각섬석, 사방휘석, 사장석, 조이사이트, 석류석, 흑운모 등의 변성광물이 산출함을 보고하였다. Na (1979)는 연구 지역의 연천층군 내에서 남정석+홍주석+규선석, 흑운모+석류석, 흑운모+녹니석의 분대를 설정할 수 있다고 기술했으나, 정확한 변성분대의 분포나 반응 관계에 대해서는 언급하지 않았다. 따라서 연구 지역에 대한 기존 연구는 일반적인 변성 암석학적 이해에 도움을 줄 수 있지만 성인론적 해석에 필요한 정량적 자료는 거의 제공치 못하는 셈이다.

우리는 지난 1년여의 야외조사를 통해 Yamaguchi (1951)가 제시한 바와 같이 연구 지역의 변성암류가

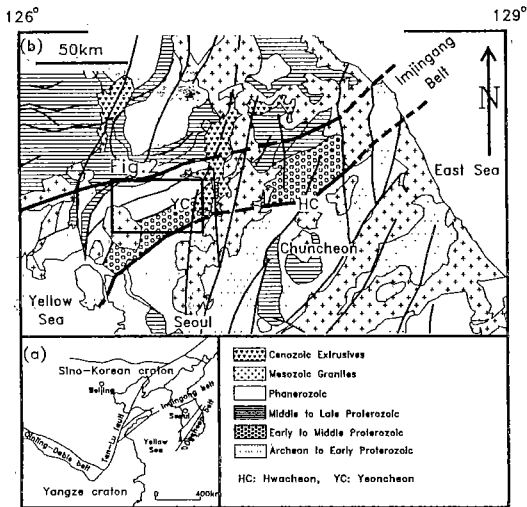


Fig. 1. (a) Tectonic map showing the Imjingang belt and various tectonic units of China. (b) Schematic geologic map showing the outline of the Imjingang belt. Compiled from tectonic map of Korea (Um and Chun, 1984; Russian Academy of Science, 1992), Yamaguchi (1951), Li (1993) and our unpublished data.

동서 방향으로 연장성이 좋게 발달함을 확인할 수 있었다. 휴전선 부근이라 지질도 작성은 불가능하였으나 Yamaguchi (1951)가 정의한 삼곶암대는 민통선 남쪽의 연천-전곡 지역에 분포하기 때문에 비교적 자세히 조사할 수 있었다. 삼곶암대에 분포하는 변성암류는 주로 석회질 규산염암, 변성 사질암, 각섬암 그리고 각섬석 편마암이다. 이번 연구에서는 이들 변성암류중 주로 각섬암에 대한 변성 암석학적, 지구화학적 연구 결과를 보고한다. 이 논문에서는 (1) 임진강대와 관련된 경기도 연천군 일대의 지질을 소개하고, (2) 연천-전곡 지역의 광역 변성작용을 지배한 온도 및 압력을 정량적으로 밝히고, (3) 연천충군의 변성암석학적 특성과 중국의 친링-다비산동 충돌대에서 보고된 변성진화 경로와 비교하고자 한다. 끝으로 이러한 연구 결과를 토대로 중국의 대륙충돌대가 임진강대로 연장될 수 있는 가능성에 대해 토의하고자 한다.

임진강대

임진강대는 1960년대에 북한 학자들에 의해 처음 보고되었으며, 우리나라의 지체구조도 (Um and Chun, 1984) 에서도 그 존재를 인정한 바가 있다.

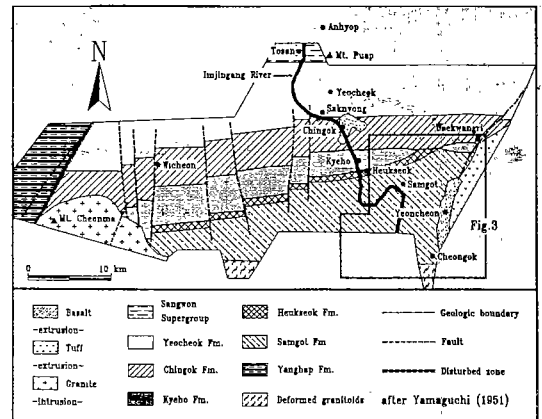


Fig. 2. Geologic map of the Yeoncheon Group adopted from Yamaguchi (1951). Type localities for the Anhyop, Puap, and Saknyong Series of the Imjin System are also shown. Note that the Sangwon Supergroup of Yamaguchi (1951) corresponds to the Puap Series, and other Formations except for the Sanggot Formation to the Saknyong Series of Li (1993).

그러나 임진강대의 정확한 정의에 대해서는 북한 자료의 절대 부족으로 인해 아직 국내에서 상세히 보고된 바가 없다. 예외적으로 최근에 Chang (1995) 과 이근착 (1995)이 북한의 "지질과학"에 실린 임진강대에 관한 논문들을 (예, 리죽남, 1993) 발췌해 보고한 바가 있다. 한편 북한에서 기재된 임진강대의 지질학적 특성들은 중국의 학자들에 의해 드물게 소개되어 왔다 (예, Xu and Tong, 1988; Yang, 1992; Liu, 1993). 따라서 이번 연구에서는 이들의 연구 결과를 빌어 임진강대를 개략적으로나마 정의하고자 한다.

임진강대는 동-서 방향의 주향을 갖는 습곡-단층대로서 한반도의 중앙부를 가로 지르며 발달한다. 임진강대의 남, 북 경계는 기존의 자료만으로 정확히 규정하기 힘들지만, 이미 발표된 한국의 지체구조도 (Um and Chun, 1984; Russian Academy of Science, 1992)와 1:1,000,000 지질도 (KIER, 1981)를 참조하여 임진강대의 대략적인 분포지역을 Fig. 1에 나타내었다. Um and Chun (1984)에 비해 임진강대를 넓게 정의하였는데 이는 이제까지 우리가 얻은 야외 조사의 결과에 근거한다. 즉 연천-전곡 지역에서 변성퇴적암류가 동-서 방향으로 넓게 발달하고, 대체로 NE의 주향을 보이는 경기육괴와 압쇄암 (mylonite)에 의해 뚜렷이 경계지어지는 때문이다. 또한 화천 지역에서는 특징적인 백립암상 (granulite

일반지질

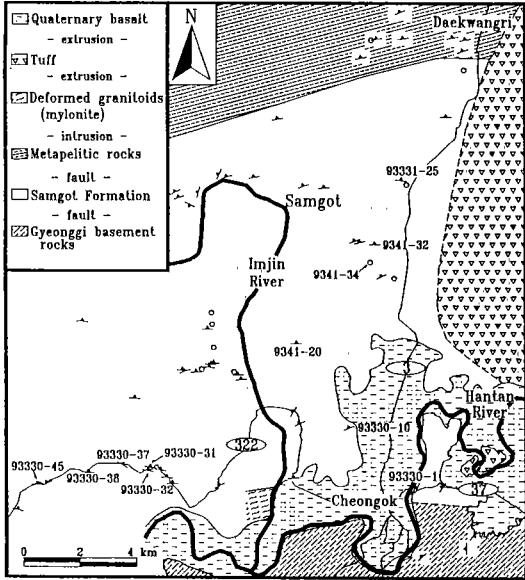


Fig. 3. Schematic geologic map of the Yeoncheon-Cheongok area. Geologic boundaries are only approximate. Numbers refer to the analyzed samples. Sample sites without strike and dip measurements are shown by open circles. Thin lines with numbers designate national roads.

facies)의 편마암류가 경기육괴의 기반암류와 동-서 방향의 경계를 보이며 단층-접촉한다 (이승렬과 조문섭, 1994). 따라서 임진강대와 경기육괴의 경계를 전곡-화천을 잇는 구조선으로 정의하였다 (Fig. 1). 임진강대에 속하는 위 두 지역의 변성암체는 중생대 화강암류에 의해 분리되어 있다.

Fig. 1에 정의된 임진강대는 태본기 중기-석탄기 초기의 (리죽남, 1993) 임진계 뿐만이 아니라 캄브리아-사일루리아기의 조선누층군, 원생대 중기-말기의 상원누층군 그리고 이들의 기저층에 해당되는 하부 연천층군을 포함한다. 또한 화천 지역에 분포하는 소위 마천령계로 알려진 (KIER, 1981) 백립암상의 편마암류들도 임진강대에 속한다. 이러한 임진강대의 분포는 최근 북한에서 발간된 한국 지체구조도 (Ri and Ri, 1994) 에서 제시된 것과 거의 유사하다. 그러나 임진강대의 남, 북 경계는 물론이고 동, 서 방향으로의 연장 관계 및 구성암들에 대한 지질학적 특성들은 앞으로 계속 연구되어야 할 과제로 남아 있다. 따라서 Fig. 1에 정의된 임진강대는 하나의 임시 모델 (working model)로서 받아들여져야 할 것이다.

경기도 연천군 지역에 분포하는 서부 임진강대의 연천층군은 크게 북쪽의 변성이질암류와 남쪽의 석회질 규산염암으로 구분된다 (Fig. 3). 전자는 Yamaguchi (1951)가 정의한 여척암대, 진곡암대, 계호암대, 후석암대에 후자는 삼꽃암대에 해당된다 (Fig. 2). Yamaguchi (1951)는 변성이질암류의 변성도가 각 암대별로 큰 차이를 보인다고 보고하였으나 현재까지의 야외조사만으로는 명확하지 않다. 그러나 이번 연구에서 변성이질암류가 바로비안 (Barrovian) 형의 석류석대 - 남정석대에 해당되는 광물 조합을 특징적으로 보유하고 있음을 확인하였다.

연천층군의 변성이질암류는 리죽남 (1993)이 석탄기 초기의 임진계 상부층으로 보고한 삭녕통의 동쪽 연장에 해당된다 (삭녕통의 표식지인 삭녕리는 Fig. 2에 나타나 있다). 임진계의 변성퇴적암류는 천매암, 규질 편암 및 염기성-중성 화산암 기원의 녹색 편암 등으로 구성되며, 대부분 흑운모대 즉 녹색 편암상에 속한다 (리죽남, 1993). 그러나 대광리 북쪽에 분포하는 연천층군의 변성이질암류는 삭녕통보다 높은 변성도를 보이기 때문에 양자의 대비 관계는 앞으로 더 검토되어야 한다.

변성이질암류는 편암, 천매암, 변성사질암, 규암 등으로 구성된다. 편암은 남정석, 십자석, 석류석 등의 반상 변정과 함께 동-서 주향과 북쪽으로는 경사 (30~60°N)를 가진 반복우세 엽리 (penetrative foliation)를 잘 보여준다. 반복우세 엽리면상에는 반상변정 주위의 압력그늘 (pressure shadow)이 정향 배열됨으로써 정의되는 신장 선구조 (elongation lineation)와 판상 운모의 정향 배열에 의해 정의되는 광물 선구조가 엽리면의 경사 방향에 평행하게 뚜렷이 나타난다. 때로는 반복우세 엽리와 동일한 주향을 갖는 약한 엽리면이 같이 관찰되며, 후자는 전자보다 약 5~20° 큰 북쪽으로는 경사를 보인다. 이 두 엽리의 교차 (intersection) 선구조는 노두나 시료상에서 관찰되지 않는다. 엽리에 수직하고 선구조에 평행하게 자른 박편에서 이 약한 엽리와 반복우세 엽리는 북측 암체가 남쪽으로 이동한 역 감각 (reverse sense)의 S/C 구조 형태를 보인다. 또한 변성이질암류에는 남쪽의 버전스 (vergence)를 보이는 밀착 (tight) 내지 등사의 (isoclinal) 노두 규모 습곡을 보여주기도 한다. 이러한 모든 구조 요소들은 임진강대의 수축 (contractional) 변형작용시 형성된

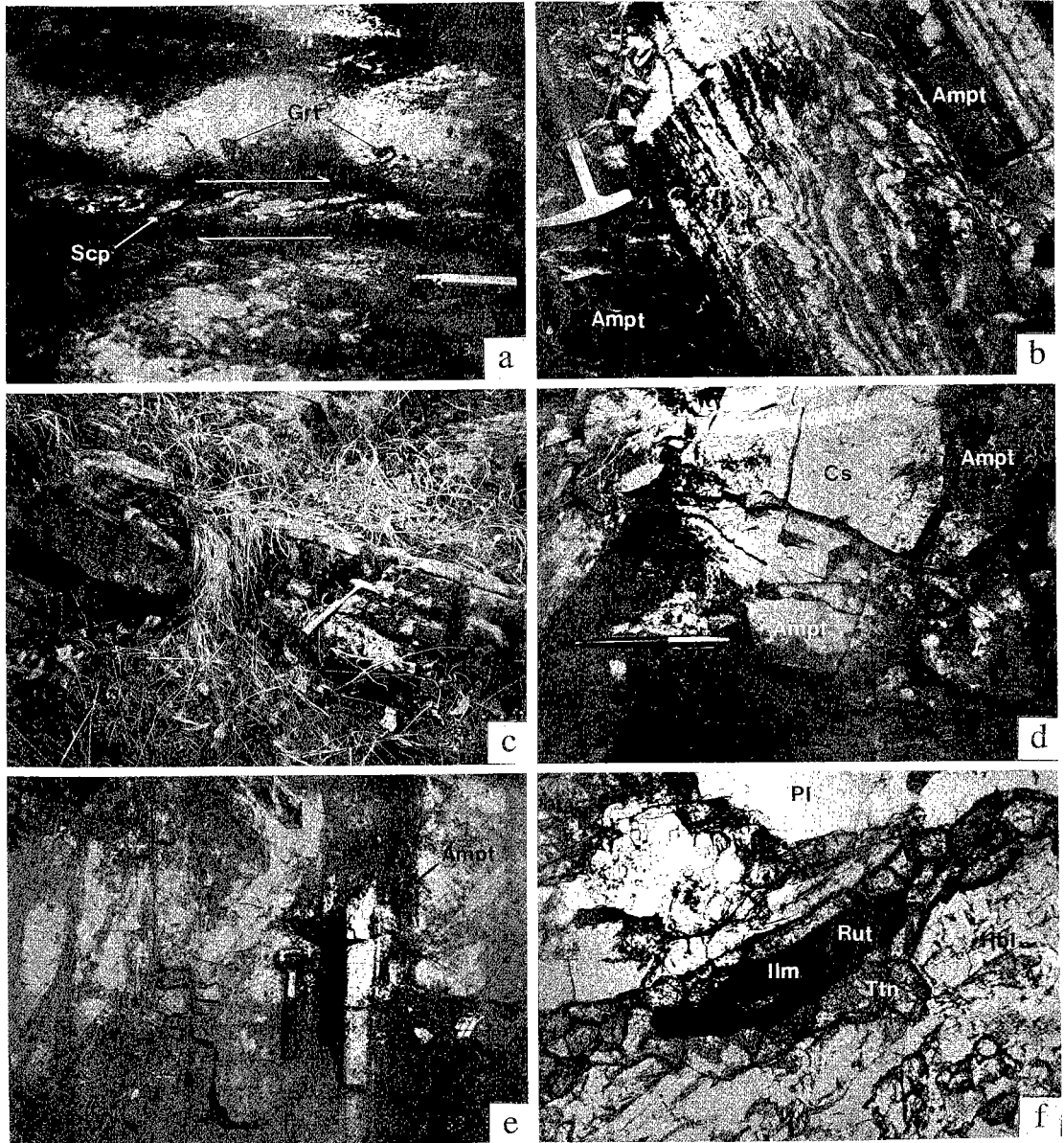


Fig. 4. (a) Scapolite (Scp)-bearing metapelite layers associated with garnet (Grt)-bearing calc-silicate rock in the Samgot Formation (sp. 93331-25). The length of this outcrop photograph is more or less parallel to the down-dip elongation lineation ($0^{\circ}/30^{\circ}$). The strike and dip of foliation are $N84^{\circ}W$ and $54^{\circ}N$, respectively. Elongate scapolite porphyroblasts oblique to penetrative foliation suggest a normal (top-down-to-the north) displacement; (b) Concordant amphibolite (Ampt) layers alternating with folded calc-silicate rock (sp. 93330-32); (c) Tight fold with an interlimb angle of 15° , occurring rarely in meta-sedimentary rocks of the Samgot Formation (sp. 9341-20). The attitude of the fold hinge line is $35^{\circ}/25^{\circ}$; (d) Massive amphibolite (Ampt) intruding the calc-silicate rock (Cs; sp. 93330-1); (e) Amphibolite (Ampt) sills and dykes associated with calc-silicate rocks in the Samgot Formation (sp. 93330-10); (f) Photomicrograph of rutile (Rut) and ilmenite (Ilm) grains enclosed in titanite (Ttn) of hornblende gneiss (sp. 93330-37). Matrix minerals include hornblende (Hbl) and plagioclase (Pl). Rutile grain is 0.65 mm in length. Plane polarized light.

것으로 해석된다. 그러나 연구 지역에서 남쪽으로 갈수록 북측 암체가 북쪽으로 이동한 정 (normal) 감각의 구조 요소가 강해진다 (아래 참조).

Yamaguchi (1951)의 삼곶암대는 (이 연구에서는 “삼곶층”으로 부르기로 한다) 주로 석회질 규산염암, 흑운모 변성사질암, 각섬암, 각섬석 편마암으로 구성되며, 북쪽의 변성이질암류와 암상이 크게 다르다. 특히 각섬암은 삼곶층에서 흔히 관찰되는 반면, 변성이질암류에서는 찾아 보기 어렵다. 삼곶층은 대체적으로 동-서 방향의 주향과 북쪽으로는 경사 (30~50°N)를 보이며, 구조적으로 변성이질암류의 하부에 놓인다 (Fig. 3). 상부 각섬암상의 삼곶층과 주로 녹색 편암상 내지 하부 각섬암상에 속하는 북쪽의 변성이질암류는 암상뿐만이 아니라 변성도에서 크게 차이가 난다. 이러한 관계는 대단층 규모의 구조적 불연속면을 시사하지만, 이를 뒷받침할 야외 증거는 아직 찾지 못했다. 한편 석회질 규산염암과 교호하며 상부 삼곶층 내에서 산출하는 변성 석회질-이질암의 경우, 조립의 (장경 1~3 cm) 신장된 스카포라이트 (scapolite) 반상변정이 정향 배열하여 반복우세 엽리면에 사교하는 것이 여러 층준에 걸쳐서 나타나며 이들은 북측 암체가 북쪽으로 이동한 정 전단 감각 (normal shear sense)을 보여 준다 (Fig. 4a). 이러한 구조 요소는 임진강대의 수축 변형작용 이후 용기 과정과 관련된 인장 (extensional) 변형 작용시 형성된 것으로 판단된다.

삼곶층을 구성하는 변성암류는 흔히 조화적으로 서로 협재하며 산출하고 (Fig. 4b), 동-서의 주향 방향으로 15 km 폭 이상에 걸쳐 광역적으로 분포한다 (Fig. 3). 석회질 규산염암은 연한 녹색이나 유백색을 띠며, 보라색-갈색을 띠는 흑운모 변성사질암과 호층을 이룬다. 이들 변성퇴적암류는 각섬암에 비해 복잡한 소규모의 습곡 구조들을 흔히 보이며 (Fig. 4b), 드물게는 노두 규모의 밀착-등사 습곡 구조를 보이기도 한다 (Fig. 4c). 석회질 규산염암은 주로 Mg-투휘석 (diopside), 그랜다이트 (grandite), 석류석, 각섬석, 흑운모, 크라이노조이사이트 (clinozoisite), 정장석 (Or₉₆₋₉₈), 사장석, 석영, Al-티타나이트, 방해석 등으로 구성되며, 스카포라이트가 연구 지역 전체에 걸쳐 산출함이 특징적이다.

삼곶층과 경기육괴의 경계부에 해당되는 전곡읍 남서부 지역에서는 심하게 변형된 화강암체가 넓게 분포한다 (Figs. 2, 3; Yamaguchi, 1951). 이 암체는 대부분 압쇄암화 작용 (mylonitization)을 받았으며,

부분적으로 슈도타키라이트 (pseudotachylite)가 발달한다. 이 경계부에서 관찰/측정된 모든 미세 구조 요소는 삼곶층이 북쪽으로 이동한 정 전단 감각을 보여, 경계부는 용기 작용시 발달한 인장 연성 전단대 (ductile shear zone)임을 지시한다. 연구 지역의 자세한 구조 지질학적인 해석은 이진한 외 (준비중)에서 다룰 예정이다. 이번 연구에서는 삼곶층에 발달하는 각섬암 (“삼곶 각섬암”으로 부르기로 한다)의 변성 암석학적 특징에 대해서 주로 보고한다.

삼 곶 각 섬 암

삼곶 각섬암은 주로 수 m - 수 cm 폭의 층상으로 산출하며, 주변의 변성 퇴적암류와 대부분 조화적인 관계를 보인다. 그러나 드물게는 각섬암이 석회질 규산염암을 관입한 증거가 관찰된다 (Fig. 4d, e). 예를 들어, 같은 노두에서 각섬암은 석회질 규산염암의 엽리면을 끊으며 암맥(dyke)으로, 또는 엽리면에 평행한 암상(sill)의 형태로 산출한다 (Fig. 4e). 각섬암은 대부분 치밀한 괴상 (massive) 구조를 보이며, 반려암질 화성 조직이 잘 보존되어 있는 경우도 있다 (예, sp. 9341-34).

각섬암의 주된 광물조합은 Ca-각섬석 + 사장석 ± 석류석 ± 투휘석 ± 흑운모 ± 석영 + 불투명 광물이다. 부구성 (accessory) 광물로는 금홍석 (rutile) ± 티탄철석 (ilmenite)이 티타나이트 (titanite)에 의해 치환됨이 특징적이다 (Fig. 4f). 삼곶 각섬암 시료들은 최고 (peak) 변성 광물들이 잘 보존되어 있으며, 후퇴 변성 광물들이 흔한 경기육괴 내의 각섬암들과 (예, Lee and Cho, 1995) 대조가 된다. 분석된 시료의 모드 (mode) 조성은 Table 1에 수록되어 있다.

각섬암을 구성하는 조암광물들의 화학 조성은 서울대학교의 전자현미분석기 (EPMA)를 사용하여 분석되었다. 분석 조건은 Lee and Cho (1995)에 기술된 바와 같다. 대표적인 광물 조성들은 Table 2에 수록되어 있다. 각섬석의 화학 조성은 Ca, Na와 K를 제외한 양이온의 합을 13이라고 가정해 계산하였다 (Robinson *et al.* (1982)의 13eCNK 방법). 이 계산법은 화학 조성이 잘 알려진 각섬석의 분석치와 비교할 때 가장 근접한 화학식을 제공한다고 보고된 바가 있다 (Cosca *et al.*, 1991). Kohn and Spear (1990)의 지압계를 쓰기 위해서 사용된 각섬석의 화학식은 이들의 제안대로 Spear and Kimball (1984)의 방법을 따랐다. 아래에 각 조암 광물들의

Table 1. Visually-estimated mineral modes of the analyzed amphibolites

Specimen no. (locality*)	Hornblende	Garnet	Diopside	Biotite	Plagioclase	Titanite	Opaque minerals
93330-1 (5032/2069)	67	1 (Alm ₄₉₋₅₈ ; n=18)	1	2	25 (An ₃₁₋₆₇ ; n=13)	2	2
93330-38 (5039/1951)	46	7 (Alm ₅₅₋₅₆ ; n=13)	-	tr	40 (An ₂₆₋₃₅ ; n=7)	4	3
93330-45 (5035/1933)	43	3 (Alm ₄₉₋₅₂ ; n=18)	10	-	40 (An ₂₅₋₄₀ ; n=22)	3**	1
9341-32 (5122/2054)	77	-	tr	5	20 (An ₃₉₋₆₇ ; n=3)	2**	1
9341-34 (5115/2053)	72	1 (Alm ₄₇₋₅₀ ; n=17)	-	5	20 (An ₄₂₋₇₂ ; n=13)	1	1

All samples contain minor quartz; n=number of analyses.

*National grid coordinates.

**Containing trace amounts of rutile rimmed by titanite.

Table 2. Representative analyses of amphibole, garnet, diopside, titanite and ilmenite

Sp. no. Pt. no.	amphibole										
	9341-34		93330-38		9341-32		93330-45			93330-1	
	45	52	59	83	97	101	111	126	133	200	202
SiO ₂	42.31	43.38	44.33	43.45	42.40	44.87	44.21	43.57	43.75	45.59	43.93
TiO ₂	1.12	0.92	1.09	1.07	0.87	0.75	0.99	0.76	0.81	1.10	1.07
Al ₂ O ₃	13.78	12.37	10.87	10.94	13.65	10.48	12.29	12.42	11.66	11.08	11.00
FeO*	15.50	15.15	18.07	18.38	15.26	14.31	15.36	15.64	15.48	17.79	18.12
MgO	9.11	9.70	8.71	8.36	9.41	10.68	9.84	9.89	9.91	8.93	8.71
MnO	0.33	0.38	0.21	0.18	0.27	0.20	0.33	0.34	0.28	0.06	0.18
CaO	11.64	12.03	11.43	11.10	11.57	11.83	11.26	11.28	11.52	11.46	11.73
Na ₂ O	1.33	1.31	1.47	1.52	1.55	1.14	1.27	1.63	1.38	1.41	1.30
K ₂ O	1.04	0.96	0.40	0.40	0.66	0.62	0.64	0.69	0.60	0.16	0.18
Total	96.17	96.21	96.57	95.40	95.63	94.87	96.18	96.21	95.39	97.56	96.21
	cations per 23 oxygens										
Si	6.38	6.55	6.68	6.63	6.40	6.80	6.59	6.52	6.61	6.76	6.64
Al(IV)	1.62	1.45	1.32	1.37	1.60	1.20	1.41	1.48	1.39	1.24	1.36
Ti	0.13	0.10	0.12	0.12	0.10	0.08	0.11	0.09	0.09	0.12	0.12
Al(VI)	0.83	0.75	0.62	0.60	0.83	0.67	0.75	0.71	0.69	0.69	0.60
Fe ^{3+***}	0.19	0.03	0.25	0.36	0.26	0.07	0.36	0.38	0.27	0.23	0.30
Fe ²⁺	1.77	1.88	2.02	1.99	1.66	1.74	1.55	1.58	1.68	1.97	1.99
Mg	2.05	2.18	1.96	1.90	2.11	2.41	2.19	2.20	2.23	1.97	1.96
Mn	0.04	0.05	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01	0.02
Ca	1.88	1.95	1.85	1.82	1.87	1.92	1.80	1.81	1.86	1.82	1.90
Na(M4)	0.12	0.05	0.15	0.18	0.13	0.08	0.20	0.19	0.14	0.18	0.10
Na(A)	0.27	0.33	0.28	0.26	0.32	0.26	0.16	0.28	0.27	0.22	0.28
K	0.20	0.18	0.08	0.08	0.13	0.12	0.12	0.13	0.12	0.03	0.04

*Total Fe as FeO.

**Fe³⁺ is calculated using 13cCNK of Robinson *et al.*(1981).

Table 2. continued.

Sp. no.	garnet										
	9341-34		93330-38		93330-45				93330-1		
Pt. no.	44	53	58	78	113	116	124	134	174	199	203
SiO ₂	38.87	38.97	37.98	37.96	38.75	38.39	39.00	38.51	37.96	39.08	38.52
TiO ₂	0.06	0.11	0.07	0.10	0.05	0.04	0.02	0.08	0.04	0.10	0.08
Al ₂ O ₃	20.76	21.50	20.62	20.14	21.12	20.50	21.20	21.12	21.80	21.88	21.69
FeO*	22.54	22.60	24.82	25.40	22.39	22.37	22.82	23.29	22.69	24.56	23.50
MgO	4.50	4.59	3.07	3.53	3.32	3.16	3.36	2.98	3.24	3.70	3.62
MnO	1.58	1.39	1.21	1.03	1.98	2.20	2.14	2.45	0.58	0.79	0.92
CaO	11.29	11.01	10.76	10.60	11.43	11.35	11.67	11.17	12.94	11.43	12.02
Total	99.59	100.18	98.54	98.76	99.03	98.01	100.21	99.61	99.24	101.54	100.35
	cations per 12 oxygens										
Si	3.04	3.02	3.03	3.03	3.05	3.06	3.04	3.03	2.98	3.01	3.00
Ti	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Al	1.91	1.97	1.94	1.90	1.96	1.93	1.95	1.96	2.02	1.99	1.99
Fe	1.47	1.46	1.66	1.69	1.47	1.49	1.49	1.53	1.49	1.58	1.53
Mg	0.52	0.53	0.37	0.42	0.39	0.38	0.39	0.35	0.38	0.42	0.42
Mn	0.10	0.09	0.08	0.07	0.13	0.15	0.14	0.16	0.04	0.05	0.06
Ca	0.94	0.91	0.92	0.91	0.96	0.97	0.97	0.94	1.09	0.94	1.00
XAlm**	0.48	0.49	0.55	0.55	0.50	0.50	0.50	0.51	0.50	0.53	0.51
XPrp**	0.17	0.18	0.12	0.14	0.13	0.13	0.13	0.12	0.13	0.14	0.14
XSps**	0.04	0.03	0.03	0.02	0.04	0.05	0.05	0.05	0.01	0.02	0.02
XGrs**	0.31	0.30	0.30	0.29	0.33	0.32	0.33	0.32	0.36	0.31	0.33
Fe/(Mg+Fe)	0.74	0.73	0.82	0.80	0.79	0.80	0.79	0.81	0.80	0.79	0.78

*Total Fe as FeO.

**XAlm=Fe/M; XPrp=Mg/M; XSps=Mn/M; XGrs=Ca/M, where M=Fe+Mg+Mn+Ca.

산상과 화학적 특성에 대해 기술한다.

각 섬 석

각섬석은 대부분 세립의 주상 결정으로 또는 반려암질 기원인 경우 (sp. 9341-34) 중립-조립의 결정으로 산출한다. 각섬석은 연한 녹색 내지 녹색의 다색성을 보이며, 드물게는 쌍정이 나타난다.

각섬석의 성분은 Leake (1978)의 분류에 의하면 Mg-각섬석 (magnesian-hornblende), Fe²⁺-각섬석 (ferro-hornblende), 처마카이트질 각섬석 (tschermakitic hornblende), Fe²⁺-처마카이트질 각섬석 (ferro-tschermakitic hornblende)에 속한다. 단위 화학식당 (p.f.u.) 23 개의 수소 산소를 기준으로 하였을 때, 각섬석의 Si 양은 6.28~6.80, Na(M4)는 0.05~0.25, 그리고 X_{Fe²⁺}(=Fe²⁺/Fe²⁺+Mg) 값은 0.35~0.54의 범위를 보인다 (Table 2). Si 또는

Al^{IV}의 성분 변화는 주로 각섬석 내의 파가사이트 (pargasite) 치환에 기인한다 (Fig. 5). 한편 Na(M4)의 변화는 춘천 각섬암에서와 마찬가지로 각섬석 내의 리베카이트 (riebeckite) 치환에 의해 설명된다. 삼곶 각섬암의 각섬석 성분은 춘천각섬암에서 보고된 성분 범위 내에 속하지만, 후자에 비해 제한된 변화를 보인다 (Fig. 5). 전자의 성분이 비교적 일정한 이유중의 하나는 대부분의 경기 육괴 변성암류와는 달리 연구 지역에서 후퇴 변성작용의 영향이 작기 때문이다.

사 장 석

사장석은 주로 세립-중립의 타형-반자형 결정으로 각섬석과 함께 각섬암의 주구성 광물로서 산출한다 (Table 1). 석류석과 각섬석의 접촉부에서는 사장석이 석류석 결정 주위에 얇은 띠를 이루며 발달하는

Table 2. continued.

Sp. no.	diopside				titanite			ilmenite			
	93330-45	9341-32	93330-1		93330-38	93330-45		93330-38	93330-45		
Pt. no.	109	94-1	176	195	89	103	206	102	105	172	173
SiO ₂	53.09	52.76	52.98	53.25	29.61	30.11	30.38	0.08	0.09	0.11	0.13
TiO ₂	0.03	0.04	0.04	0.03	35.78	37.12	37.09	49.62	50.45	50.48	48.75
Al ₂ O ₃	1.41	1.51	0.94	1.53	1.38	0.94	1.21	0.06	0.05	0.03	0.03
FeO*	8.84	8.14	9.71	8.92	0.42	0.26	0.25	43.23	43.21	39.84	39.04
MgO	11.97	12.18	11.67	12.21	0.02	0.01	0.02	1.05	0.24	0.02	0.01
MnO	0.21	0.25	0.09	0.10	0.01	0.04	0.00	1.50	2.58	5.48	6.99
CaO	22.71	23.73	23.47	23.60	28.38	28.07	27.99	0.49	0.04	0.14	0.08
Na ₂ O	0.56	0.50	0.32	0.42	0.04	0.01	0.00	0.07	0.01	0.08	0.10
K ₂ O	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.05	0.04	0.04	0.01
Cr ₂ O ₃	0.05	0.02	0.11	0.04	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Total	98.89	99.15	99.33	100.09	95.64	96.58	96.95	96.14	96.72	96.21	95.12
	cations per 6 oxygens				cations per 5 oxygens			cations per 3 oxygens			
Si	2.00	1.99	2.00	1.99	1.01	1.02	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.94	0.94	0.98	0.99	1.00	0.98
Al	0.06	0.07	0.04	0.07	0.06	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.28	0.26	0.31	0.28	0.01	0.01	0.01	0.95	0.94	0.87	0.87
Mg	0.67	0.68	0.66	0.68	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00
Mn	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.06	0.12	0.16
Ca	0.92	0.96	0.95	0.94	1.04	1.02	1.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Na	0.04	0.04	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe/(Mg+Fe)	0.29	0.27	0.32	0.29				0.93	0.93	0.88	0.85

*Total Fe as FeO. n.d.=not detected

조직이 혼치 않게 관찰된다. 이러한 조직은 아마도 각섬암의 용기 과정에 수반된 압력 하강에 의한 반응 산물인 것으로 생각된다.

사장석의 아노사이트 (An) 성분은 25~72 mol %의 변화를 보이지만 (Table 1) 대부분 안테신 - 라브라도라이트에 속한다. 동일한 입자 내에서의 성분 변화는 주변부로 갈수록 대개 An 양이 약간 (10 mol%) 증가한다. 그러나, 석회질 규산염과 밀접히 수반된 93330-1 시료에서는 An 양이 10 mol % 증가하거나 또는 16 mol% 감소한다. 이처럼 불규칙한 성분 변화는 비평형 관계를 지시한다.

석류석

석류석은 삼꽃 각섬암에서 소량으로 혼하게 관찰되며 (Table 1), 대부분 타형의 세립-중립 결정으로 산출한다. 석류석은 석영, 사장석, 각섬석 (\pm 미량의 티타나이트 또는 불투명 광물) 등의 작은 포

유물들로 인해 포획 변정 (poikiloblastic) 조직을 보인다.

석류석은 주로 알만딘 (almandine, Alm) - 그로술라 (grossular, Grs) - 파이로프 (pyrope, Prp)의 고용체로서, 각 단성분 (end-member component)은 47~58 Alm, 26~36 Grs, 그리고 11~18 Prp mol%의 변화를 보인다 (Fig. 6; Table 2). 스페사틴 (spessartine, Sps)의 양은 1~7 mol%의 범위에 속한다. 석류석의 성분은 동일 시료 내에서 비교적 일정하며 (Table 1), 한 개 입자 내에서의 누대구조는 크게 발달하지 않는다. 이러한 석류석의 성분은 Fig. 6에 보여진대로 춘천 각섬암의 것들과 비슷하지만, 파이로프 양이 큰 쪽에 속한다. Zhang *et al.* (in press)이 산동 반도의 위해서 부근에서 보고한 각섬암의 것들과 비교하면, 삼꽃 각섬암의 석류석은 거의 유사한 성분을 보인다. Fig. 6은 또한 산동 에크로자이트 (eclogite)의 석류석 성분이 (Zhang *et al.*, in press) 각섬암에서보다 Mg (+Mn) 양이 큼을 보여 준다.

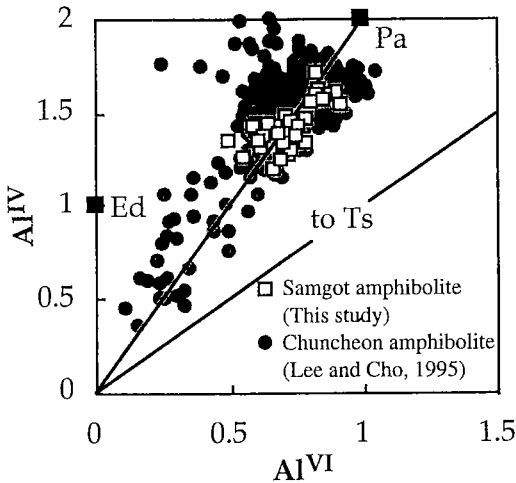


Fig. 5. Al^{VI} vs. Al^{IV} plot of the analyzed amphiboles. Two reference lines represent the pargasitic (Pa) and tschermakitic (Ts) substitutions, respectively. Note that the Pa substitution is identical to the sum of edenitic (Ed) and Ts substitutions. Compositions of amphiboles in the Samgot Formation vary less than those in the Chuncheon amphibolite (Lee and Cho, 1995).

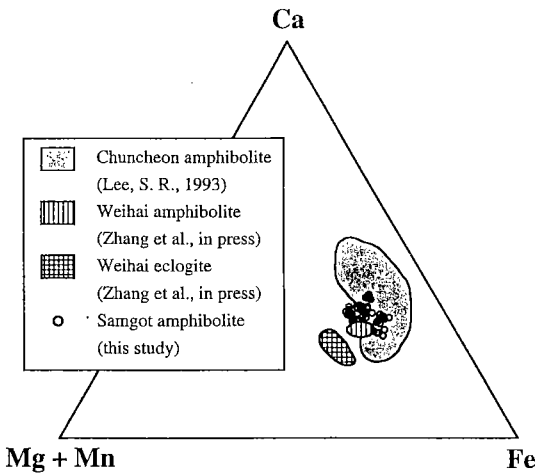


Fig. 6. Ca-(Mg+Mn)-Fe plot of the analyzed compositions of garnet. The compositional range of garnet in the Chuncheon amphibolite is from Lee (1993).

투회석

투회석(diopside)은 대부분 각섬석 결정 내에 패치(patch) 형태의 잔류 광물로 남아 있지만, 석류석이 없는 9431-32 시료에서는 독립된 반자형 결정으로

다른 광물들과 평형 관계를 보인다. 이들 단사회석의 X_{Fe^*} ($= Fe^*/Fe^* + Mg$) 값은 0.27~0.36의 변화를 보이며, Morimoto (1988)의 분류에 의하면 투회석에 속한다. 투회석은 0.69~2.19 wt%의 Al_2O_3 와 0.02~0.05 wt%의 Na_2O 를 포함하며 (Table 2), 계산된 재이다이트(jadeite) 단성분의 양은 2~5 mol%에 지나지 않는다.

흑운모

흑운모는 자형-반자형 세립 결정들의 집합체로서 산출하며, 연한 갈색-붉은 갈색의 다색성을 보인다. 흑운모는 22 개의 무수산소를 기준으로 한 단위 화학식당 5.53~5.64 Si, 2.86~3.03 Al 및 0.23~0.40 Ti을 포함하며, X_{Fe^*} 값은 0.46~0.49로 거의 일정하다 (Table 2).

부구성 광물

티타나이트, 티탄철석 및 금홍석은 부구성 (accessory) 광물로 거의 모든 각섬암에서 산출한다 (Table 1). 티타나이트는 다른 광물 내에서 세립의 포유물로 흔히 관찰되며, 기질에서는 타형-반자형 결정들의 집합체로 나타나기도 한다. 티타나이트는 금홍석이나 티탄철석을 흔히 치환하며 성장한다 (Fig. 4f). 이러한 조직은 다비 초고압 변성대는 물론이고 산동 반도의 석류석 각섬암과 에크로자이트에서 보고된 바가 있다 (Cong *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, in press).

티타나이트의 성분은 거의 일정하며, 소량의 Al (0.04~0.06 p.f.u.)과 Fe^{3+} (0.01~0.02 p.f.u.)를 포함한다 (Table 2). 티탄철석은 소량의 Mn (0.03~0.16 p.f.u.)과 함께 미량의 Ca과 Al을 포함한다 (Table 2). 티탄철석 내의 Mn/(Mn+Fe) 비는 공존하는 석류석에 비해 작은 것으로 알려져 있으나 (Pownceby *et al.*, 1987), 연구 지역에서는 반대의 경향이 관찰된다. 이는 주로 포유물로 산출하는 티탄철석이 석류석과 비평형 Mn-Fe 관계에 있음을 시사한다. 한편 금홍석은 갈색을 띠며 거의 순수한 TiO_2 성분을 보인다.

변성 조건

삼곶 각섬암은 상부 각섬암상에 속하는 각섬석+

Table 3. P-T estimates of the amphibolites, using Grt-Hb, Amp-Pl and GHPQ geothermobarometers

Sp. no.	9341-34			93330-38			93330-1			93330-45			9341-32							
XAn*	0.588	0.478	0.316	0.291	0.318	0.263	0.583	0.319	0.267	0.385	0.281	0.286	0.358	0.265	0.278	0.331	0.327	0.255	0.394	0.422
XAb*	0.410	0.521	0.681	0.706	0.680	0.680	0.417	0.681	0.728	0.612	0.707	0.708	0.638	0.729	0.715	0.661	0.670	0.739	0.559	0.573
Si**	6.560	6.404	6.718	6.772	6.640	6.675	6.663	6.797	6.633	6.718	6.560	6.647	6.585	6.626	6.699	6.569	6.475	6.639	6.425	6.814
Mg/(Fe+Mg)	0.535	0.524	0.476	0.498	0.474	0.467	0.478	0.486	0.557	0.593	0.555	0.538	0.570	0.591	0.549	0.544	0.551	0.524	0.571	
XAlm	0.488	0.483	0.548	0.545	0.561	0.540	0.506	0.527	0.498	0.500	0.497	0.503	0.518	0.496	0.502	0.503	0.496	0.513		
XPrp	0.177	0.172	0.121	0.115	0.115	0.138	0.140	0.142	0.132	0.126	0.130	0.126	0.126	0.131	0.120	0.131	0.124	0.117		
XSps	0.030	0.034	0.027	0.018	0.026	0.023	0.020	0.017	0.045	0.050	0.047	0.047	0.051	0.043	0.053	0.048	0.050	0.055		
XGrs	0.305	0.311	0.304	0.313	0.299	0.299	0.334	0.314	0.326	0.325	0.326	0.325	0.305	0.330	0.324	0.318	0.330	0.315		
T(GP) [#]	811	824	736	710	715	782	845	805	717	671	702	722	669	687	700	716	720	680		
T(P) [#]	683	690	616	586	601	662	671	656	583	542	583	587	554	553	569	587	582	557		
T(HB1) [#]	714	708	666	658	678	661	735	652	632	659	661	650	672	651	642	665	676	650	709	658
T(HB2) [#]	722	726	688	669	702	675	736	670	653	699	678	653	710	679	664	692	693	652	716	684
P(Mg) [§]	8.2	9.6	9.7	9.8	9.7	10.9	8.1	9.9	10.7	8.8	10.7	10.3	9.3	10.8	10.2	10.0	10.3	10.5		
P(Fe) [§]	7.9	9.1	9.7	9.9	9.9	10.3	7.9	9.4	10.6	9.6	10.8	10.2	10.0	11.1	10.4	10.2	10.5	10.7		

*XAn=Ca/(Ca+Na+K); XAb=Na/(Ca+Na+K).

**Si is calculated using the average Fe(3+) option of Spear and Kimball (1984).

#T(GP) and T(P) represent temperatures(°C) estimated from Grt-Hb geothermometers of Graham and Powell (1984) and Perchuk et al. (1985), respectively.

#T(HB1) and T(HB2) represent Amp-Pl geothermometers of Holland and Blundy(1994), based on reactions(1), respectively(2).

§P(Mg) and P(Fe) represent pressures in kbar estimated from Fe and Mg reactions of Kohn and Spear (1990) geobarometer, respectively, in conjunction with T(HB2).

사장석 ± 석류석 ± 투휘석 ± 흑운모 ± 석영의 광물 조합으로 구성된다. 이 각섬암은 Lee and Cho (1995)가 보고한 춘천 각섬암과 여러 면에서 유사하지만 투휘석과 금홍석이 산출하는 점과 석류석의 파이로프 성분이 대체적으로 크다는 점이 다르다. 이는 삼곶 각섬암의 변성 온도가 춘천 각섬암보다 약간 높았음을 시사한다. 삼곶 각섬암의 변성 조건을 정량적으로 밝히기 위해서 서로 접하고 있는 광물들의 주변부 성분에 대해 각종 지온-지압계(geothermo-barometry)를 적용하였다. 그 결과는 Tables 3과 4 그리고 Fig. 7에 정리되어 있다.

변성 온도

각섬암의 변성온도는 석류석-각섬석 (Grt-Hb; Graham and Powell, 1984; Perchuk *et al.*, 1985), 각섬석-사장석 (Amp-Pl; Holland and Blundy, 1994)과 석류석-단사휘석 (Grt-Cpx) 지온계를 사용하여 계산하였다.

Graham and Powell (1984)의 석류석-각섬석 지온계는 93330-45 시료에서 669~722°C의 비교적 일정한 온도를 보이지만 다른 두 개의 시료에서는 800°C 이상의 비정상적으로 높은 온도를 지시한다 (Table 3). 한편 Perchuk *et al.* (1985)의 지온계 식을

적용하였을 경우, Graham and Powell (1984)의 지온계보다 114~174°C만큼 낮은 온도를 보이며, 두 개의 시료에서는 600°C 이하의 온도가 계산된다. 석류석-각섬석 지온계를 사용해 구한 온도는 두 방법 모두 분석된 시료들간에 100°C 이상의 큰 온도 편차를 보이며, 비정상적으로 높거나 낮은 온도를 보인다. 이처럼 석류석-각섬석 지온계가 비조화적이고 불합리한 결과를 낳는 이유는 명확치 않다.

석류석-각섬석 지온계와는 달리 각섬석-사장석 지온계 (Holland and Blundy, 1994)는 분석된 시료간에 내부적으로 일치하는 결과를 보인다. 4 개의 석류석 각섬암과 석류석이 없는 1 개의 각섬암에 대해 각섬석-사장석 지온계를 적용하였다 (Table 3). 이 지온계는 Spear (1980)가 공존하는 각섬석과 사장석의 양이온 치환 관계를 사용한 지온계를 제안한 이래 Holland and Blundy (1994)에 의해 정량화되었다. 이들의 지온계는 온도에 민감한 두 반응식에 근거한다:

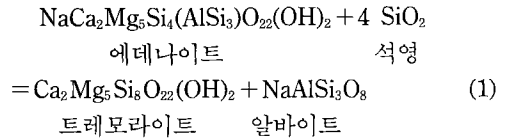


Table 4. P-T estimates using the GCPQ geothermobarometer and the GRIPS geobarometer

Sp. no.	93330-45		93330-1		93330-45		93330-38	
	garnet							
XAlm	0.500	0.513	0.495	0.493	0.510	0.501	0.503	0.545
XPrp	0.126	0.117	0.127	0.131	0.149	0.131	0.126	0.115
XSps	0.050	0.055	0.013	0.019	0.016	0.015	0.047	0.028
XGrs	0.325	0.315	0.365	0.356	0.326	0.353	0.325	0.313
	clinopyroxene							
Fe/(Fe + Mg)	0.293	0.293	0.318	0.285	0.296	0.291		
	ilmenite							
Fe/(Fe + Mg + Mn)							0.880	0.930
	plagioclase							
XAn	0.385	0.255	0.338	0.333	0.324	0.310	0.286	0.291
T(°C)*	686	644	737	721	721	711		
P(NP)**	6.1	5.6	7.0	7.7	6.8	7.2		
P(BL)**							12.3	12.1

*T at 10 kbar using the calibration of Ellis and Green (1979).

**P(NP) and P(BL) estimated at 700°C using the calibrations of Newton and Perkins (1982) and Bohlen and Liotta (1986), respectively.

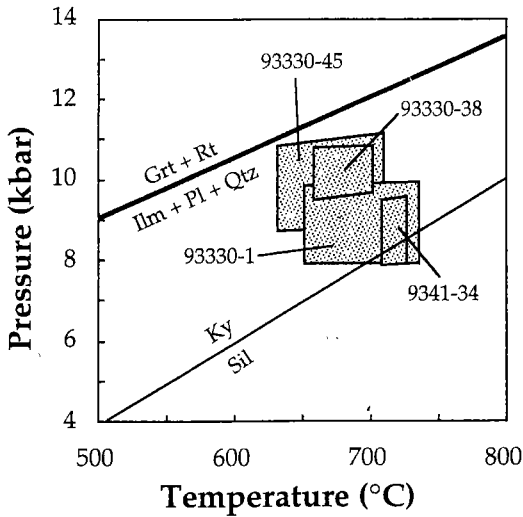
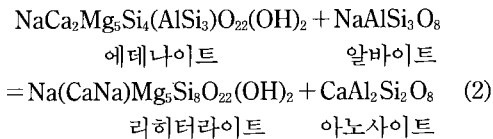


Fig. 7. P-T estimates of the Samgot amphibolite, using the amphibole-plagioclase geothermometer of Holland and Blundy (1994) and the garnet-hornblende-plagioclase-quartz geobarometer of Kohn and Spear (1990). Reaction curves for the GRIPS assemblage (heavy line) are calculated using the GIBBS program (Spear and Menard, 1989) together with the compositions of garnet, plagioclase and ilmenite analyzed from specimens 93330-38 and -45. The equilibrium curve for the reaction between sillimanite and kyanite is from Holdaway (1971).

그리고



(1) 식과 달리 (2) 식은 석영을 포함하지 않기 때문에 석영에 대해 불포화된 각섬암에 적용할 수 있다. 이 두 지온계 식을 사용해 얻은 결과는 Table 3에 나와 있듯이 주어진 성분 쌍에 대해 40°C 이하의 온도 차이를 보이며, 오차 범위 내에서 서로 일치한다. 또한 두 식 모두 동일 시료 내 및 서로 다른 시료 사이에서 조화적인 온도를 제공한다. 석류석의 존재에 관계 없이 단일 시료 내에서의 온도 변화 폭은 18°C 내지 84°C 이고, 분석된 5 개 시료의 온도 범위는 632~736°C에 속한다 (Table 3). 93330-45 시료에서 10 개의 각섬석-사장석 쌍으로부터 얻은 두 지온계의 온도는 $656 \pm 13^\circ\text{C}$ (1 식)과 $677 \pm 21^\circ\text{C}$ (2 식)로서 (1) 식이 (2) 식보다 평균 21°C 낮으나 덜 분산된

결과를 보인다. Fig. 7에는 계산된 모든 값들을 포함하는 온도 범위를 도시하였다.

각섬석-사장석 지온계로부터 얻은 결과를 석류석-단사회석 지온계 (Ellis and Green, 1979)를 사용해 구한 온도와 비교하여 보았다. 석류석 각섬암 내에서 투회석은 대부분 석류석과 접하고 있지 않기 때문에 두 광물 사이에서 계산된 온도는 비평형을 지시할 수 있다. 그럼에도 불구하고 Ellis and Green (1979)의 식을 사용해 두 개의 시료에서 계산된 온도는 (Table 4) 각섬석-사장석 지온계와 일치하는 결과를 보여 준다. 즉 93330-45 시료에서 얻은 644°C 와 686°C 는 (Table 4) 석류석-각섬석 지온계로부터 구한 온도 범위 (669~720°C, Table 3)의 낮은 영역에 속할 수 있을 뿐만 아니라 각섬석-사장석 지온계의 온도 (652~710°C)와 조화적이다. 또한 석류석과 투회석이 접하고 있는 93330-1 시료에서 구한 석류석-단사회석 지온계의 결과는 (711-737°C) 비이상적으로 높은 온도를 보이는 석류석-각섬석 지온계와는 대조적으로 각섬석-사장석 온도 (670°C와 736°C)와 잘 일치한다. 따라서 석류석-각섬석 지온계보다는 각섬석-사장석 지온계로부터 얻은 온도(632~736°C, Table 3)가 실제 삼중 각섬암의 변성 온도를 대표한다고 생각된다. 이러한 높은 변성 온도는 석회질 규산염암에서 흔히 관찰되는 그랜다이트 석류석-스카포라이트-방해석-크라이노조이사이트-석영 ± 사장석 광물조합의 산출과도 잘 일치한다 (cf., Harley *et al.*, 1994). 그러므로 연구 지역은 상부 각섬암상에 해당하는 광역 변성작용을 받았음을 알 수 있다. 또한 삼공층 내에서의 뚜렷한 온도 변화 경향은 찾아 보기 힘들며, 광역 변성작용의 온도가 비교적 일정하였음을 시사한다.

변성 압력

각섬암 내에 산출하는 각섬석-석류석-사장석-석영 (GHPQ; Kohn and Spear, 1990), 석류석-단사회석-사장석-석영 (GCPQ; Newton and Haselton, 1982), 석류석-금홍석-티탄철석-사장석-석영 (GRIPS; Bohlen and Liotta, 1986)의 광물 조합으로부터 압력을 추정하였다. 이들 지압계 광물 조합은 첫번째 것을 제외하고는 비평형 조직을 보이기 때문에 계산된 변성 압력을 서로 비교하는데만 사용하였다.

각섬석-사장석 지온계(Holland and Blundy, 1994)로부터 얻은 온도와 함께 Kohn and Spear (1990)

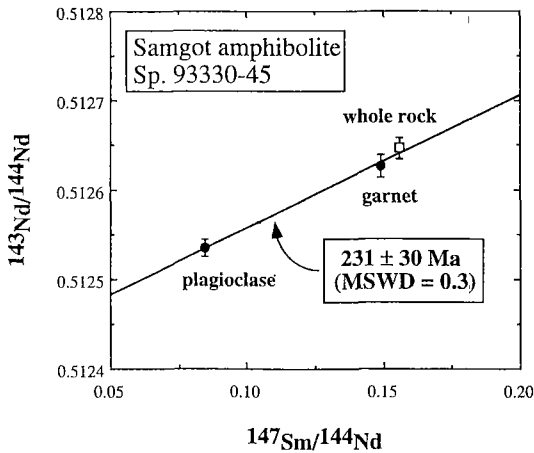


Fig. 8. Sm-Nd isochron diagram of the Samgot amphibolite (sp. 93330-45). Whole-rock data are shown by open square, garnet and plagioclase separates by closed circles.

의 지압계를 사용하여 얻은 압력 결과는 Table 3과 Fig. 7에 정리되어 있다. 계산된 압력은 7.9~11.1 kbar의 변화를 보이며, 단일 시료에서의 변화 폭은 2 kbar 이하이다. 이러한 압력의 변화는 주로 사장석의 An 양에 지배되며, 사장석의 성분이 비교적 일정한 93330-38 시료에서는 9.5~10.3 kbar의 좁은 압력 범위가 계산된다. 또한 GHPQ 지압계 광물 조합중 사장석 내에서 An 양이 주변부로 갈수록 증가하는 경향은 각섬암이 재결정 되는 동안 압력이 감소하였을 가능성을 시사한다.

Newton and Perkins (1982)의 GCPQ 지압계를 사용해 두 개 시료로부터 700°C의 온도를 가정하고 구한 압력은 GHPQ 지압계의 결과보다 낮은 5.6~7.7 kbar의 범위를 보인다 (Table 4). 이는 잔류 광물로 산출하는 투회석이 기질의 사장석과 평형을 이루지 못한 때문인 것으로 해석된다. 한편 Bohlen and Liotta (1986)의 GRIPS 지압계는 700°C에서 12.1~12.3 kbar의 높은 압력을 제공한다 (Table 4; Fig. 7). GRIPS 지압계의 광물 조합을 구성하는 금홍석은 항상 티타나이트 내에 잔류 광물로 산출하기 때문에 석류석+사장석과 평형을 이루지 않았을 확률이 크다. 한편 GRIPS 지압계로부터 구한 압력은 사장석의 누대조직과 함께 삼곳 각섬암을 구성하는 석류석-각섬석-사장석-석영이 7.9~11.1 kbar에서 평형을 이루기 전에 보다 높은 압력을 경험했음을 시사한다. 결론적으로 연구 지역은 비교적 높은 압력

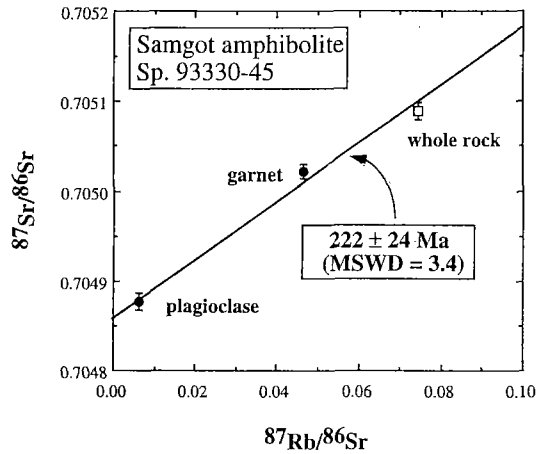


Fig. 9. Rb-Sr garnet - plagioclase - whole rock (open square) isochron for the Samgot amphibolite (sp. 93330-45).

(7.9~11.1 kbar) 하에서 상부 각섬암상에 해당되는 광역 변성작용을 받았음을 알 수 있다.

삼곳 각섬암의 변성 연대

삼곳 각섬암의 변성연대를 측정하기 위하여 93330-45 시료의 석류석-사장석-전암에 대하여 Sm-Nd과 Rb-Sr 광물 등시선 연령을 구하였다. 동위원소 자료는 일본 오카야마 대학교 부설 고체지구 연구센터의 Finnigan MAT261 열이온화 질량분석기 (TIMS)를 이용하여 분석하였다. 자세한 화학처리 및 질량분석 방법은 Makishima *et al.* (1991)과 Yoshikawa *et al.* (1993)을 참조하기 바란다. 측정된 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 은 표준시료 NBS987의 값인 0.710240 ± 0.000010 에 대한 상대적인 값으로, 그리고 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 은 표준시료 La Jolla 값 0.511841 ± 0.000010 에 대한 상대적인 값으로 보고한다. 그 결과는 Tables 5와 6 그리고 Figs. 8과 9에 정리되어 있다. 측정된 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 과 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 의 상대오차는 각각 1%와 0.5%로 추정된다. 등시선의 계산은 York (1969)의 방법을 따랐다.

사장석-석류석-전암에 대한 Sm-Nd 등시선 연령은 231 ± 30 (1 s) Ma 이다 (MSWD=0.3; Fig. 8). Fig. 8에서 석류석의 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 비가 전암의 비보다 낮기 때문에 전반적으로 이 등시선은 사장석의 동위원소 자료에 좌우되는 셈이다. 석류석은 흔히 비교적 높은 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 를 가지는 것으로 알려져

Table 5. Sm-Nd isotope data of the Samgot amphibolite (sp. 93330-45)

Sample	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	T_{DM} (Ga)
whole rock	7.350	28.51	0.1559	0.512647 ± 0.000012	1.08
garnet	2.681	10.88	0.1490	0.512627 ± 0.000013	
plagioclase	1.574	11.27	0.0845	0.512535 ± 0.000010	

Table 6. Rb-Sr isotope data of the Samgot amphibolite (sp. 93330-45)

Sample	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
whole rock	12.97	503.4	0.0745	0.705089 ± 0.000009
garnet	2.030	126.4	0.0464	0.705021 ± 0.000008
plagioclase	3.932	1844	0.0062	0.704877 ± 0.000009

있으나 (예, Humphries and Cliff, 1982), 분석된 시료에서 전암보다 오히려 낮은 값을 가지는 이유는 분명하지 않다. 분리된 석류석 내에 포유물로 존재하는 티타나이트와 같이 Nd 함량이 큰 불순물에 의하여 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 이 낮아졌을 가능성도 있으나, 약 11 ppm의 Nd 함량은 일반적으로 보고되는 석류석의 값과 유사 (예, Quadt, 1992)하기 때문에 단순히 불순물에 의한 것으로만 해석하기는 어렵다. 이러한 현상은 중국의 다비산 지역에서 산출하는 에크로자이트에서도 보고된 바가 있다 (Okay *et al.*, 1993).

사상석-석류석-전암에 대한 Rb-Sr 등시선 연령은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 222 ± 24 (1 s) Ma 이다 (MSWD=3.4). 이 연대는 위의 Sm-Nd 광물 연대와 오차 범위 내에서 서로 일치한다. 두 동위원소 계의 광물 연대에 대한 (특히, 사상석) 냉각 온도가 알려져 있지 않으나, 우리는 잠정적으로 이 변성 광물들의 등시선 연대가 트라이아스기의 변성작용을 지시한다고 해석한다. 이 연대가 최고 변성작용에 가까운 시기인지 또는 나중의 용기와 관련된 냉각 시기인지는 앞으로 냉각 온도가 잘 알려진 다른 동위원소 계 (예, U-Pb 저콘, K-Ar 각섬석 등) 자료에 의해 검증되어야 할 것이다.

한편, 이 논문에서 제시되지는 않았으나, 위의 광물 자료의 전암 (4개 시료)에 대해서도 예비적인 Sm-Nd 및 Rb-Sr 동위원소 자료를 얻었다. Rb-Sr 자료는 분산되어 등시선을 정의하지 않고, Sm-Nd 자료는 오시선 (errorchron) 연대로 950 ± 170 Ma와 $\epsilon\text{Nd}(T)=5.5 \pm 4.1$ 을 정의한다. 이 Sm-Nd 전암 자료는 삼섬 각섬암의 원암이 원생대 중기-후기에 정착한 맨틀 기원의 현무암질암임을 지시하는 것으로 생각된다 (권성택외, 준비중).

토 의

연 천 층 군

연천층군의 정의에 대해서는 그동안 많은 연구자들에 의해 다르게 사용되어 왔다. Kawasaki (1917)는 “연천계”를 선캠브리아 편마암에 의해 관입당하고, “상원계” 변성퇴적암류에 의해 피복된 규암과 결정질 석회암을 포함하는 편암 복합체라고 정의하였다. Kawasaki (1917) 이후 막연히 “연천계”로 불리워진 경기 육괴의 편마암류에 대해, 김옥준 (1973)은 부천 결정질 석회암과 대성리 규암을 건층으로 사용하여 부천층군, 시흥층군 및 양평층군으로 삼분하였다. 또한 그는 경기 변성암 복합체의 상위에 중기 원생대 내지 후기 원생대 초에 해당하는 장락층군과 춘성층군이 놓인다고 제안하였다.

Na (1978)는 변성상에 대한 연구를 토대로 연천층군은 경기 편마암 복합체와 춘천누층군의 상부에 놓이며, 중압-저온형의 녹니석 슬레이트, 천매암, 혹은 모-녹니석 편암으로 주로 구성된 변성퇴적암류라고 재정의하였다. Na (1978)는 또한 남정석, 십자석 등 고압 광물의 산출을 근거로 장락층군을 비롯해 부천층군과 시흥층군의 일부가 연천층군에 속하는 반면, 춘성층군과 소요산 부근의 장락층군은 경기 편마암 복합체에 속한다고 제안하였다. 그러나 저압 변성상으로 제안된 춘성층군과 용두리 편마암 복합체 내에서 중압형의 초기 변성작용이 인지되기 때문에 (이광진과 조문섭, 1992; 조문섭과 김종욱, 1993; Lee and Cho, 1995), Na (1978)의 변성 광물 또는 변성상의 차이에 따른 경기 육괴의 층서 구분은 의문시 된다. 또한 이 연구에서 밝혀진 바와 같이

연천군 지역의 변성암류에서 고온, 고압 변성작용이 광역적으로 관찰되기 때문에 Na (1978)의 연천층군에 대한 정의는 그 의미를 잃는다.

우리는 연천층군을 연천군 지역에 분포하는 일련의 변성퇴적암류를 지칭하는 것으로 국한시켜 사용할 것을 제안한다. 연천층군은 상부의 녹색편암-각섬암상에 해당되는 변성이질암류와 하부의 삼꽃층으로 정의된다. 이들의 암상 및 변성도는 크게 다르며, 양자 사이에는 구조적 불연속면이 발달할 것으로 생각된다.

연천층군의 변성이질암류는 앞에서 기술한대로 임진계의 삭녕통에 대비될 가능성이 있다. 그러나 Yamaguchi (1951)가 보고한 바와 같이 각 암대별 (Fig. 2) 변성도가 급격히 변화한다면 변성이질암류가 단순히 남쪽으로 갈수록 젊어지는 (리죽남, 1993) 퇴적층만으로 구성된다고 단정하기가 어렵다. 또한 삭녕통의 녹색 편암상보다 높은 변성도를 보이는 석류석+십자석+남정석 (+흑운모+백운모+석영) 광물 조합들이 흔히 관찰되기 때문에 정확한 대비와 층서의 확립을 위해서는 앞으로 변성이질암류에 대한 자세한 연구가 요구된다.

삼꽃층은 주로 석회질 규산염암 및 변성사질암, 그리고 이들을 관입한 각섬암으로 구성된다. 삼꽃층은 하부의 경기육괴 편마암 복합체와 인장 연성 전단대에 의해 경계지워진다. 삼꽃층은 각섬암의 Sm-Nd 전암 연대 (950 ± 170 Ma)를 고려할 때 원생대 초기-중기에 퇴적되었을 것으로 생각된다. 따라서 삼꽃층은 하부 상원누층군과 비슷한 시기 또는 이전의 퇴적층에 해당된다. 더 나아가 삼꽃층과 경기육괴 내에 산출하는 구봉산층군의 암상 및 변성 조건이 (Lee and Cho, 1995) 유사하기 때문에 서로 대비될 가능성이 있다. 그러나 정확한 층서 및 대비 관계의 설정을 위해서는 이들의 퇴적, 변형 및 변성 시기 그리고 지구조적 진화사를 밝히기 위한 연구가 선행되어야 할 것이다.

연천층군의 변성작용

Na (1978)는 연구 지역의 변성암류가 주로 낮은 변성도를 보인다고 보고했으나, 실제 관찰된 변성 광물조합은 석류석-단사회석-각섬석-흑운모 등을 포함하는 고온 광물 조합이 압도적으로 산출한다. 또한 각섬석-사장석 지온계와 GHPQ 지압계로부터 구한 변성 온도($632 \sim 736^\circ\text{C}$)와 압력($7.9 \sim 11.1$ kbar)

은 (Fig. 7) 삼꽃층이 상부 각섬암상에 해당되는 광역 변성작용을 경험했음을 지시한다. 한편 삼꽃층의 상부에 놓이는 변성이질암류는 바로비안 형의 석류석-남정석대에 해당되는 보다 낮은 온도 (\pm 압력) 조건을 보인다.

삼꽃 각섬암에서는 다비산과 산동 반도의 에크로자이트와 석류석 각섬암에서 보고된 (Cong *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, in press) 바와 같이, 금홍석이 티타나이트에 의해 치환되는 조직이 관찰된다. 이는 연구 지역의 변성암류가 상부 각섬암상의 변성작용 이전에 고압 변성작용을 경험했을 가능성을 시사한다. 한편 경기도 포천군 지역의 연천층군 내에서 산출하는 석류석 각섬암과 각섬석 편암의 온도-압력 조건은 $700 \sim 790^\circ\text{C}$ 와 $10 \sim 14$ kbar로서 (김종욱과 조문섭, 1994), 이 연구의 결과와 함께 연천층군이 거의 에크로자이트상에 해당되는 고압의 상부 각섬암상 변성작용을 받았음을 지시한다.

각섬암의 석류석-사장석-전암에 대한 Rb-Sr과 Sm-Nd 광물 등시선 연령은 각각 222 ± 24 Ma와 231 ± 30 Ma로서 트라이아스의 광역 변성작용을 지시한다. 이는 산동 반도에서 보고된 변성 시기와 일치하며 (예, Li *et al.*, 1994; Ames *et al.*, 1995), 중국의 대륙충돌대인 동-서 방향의 친링-다비-산동 고압 변성대가 임진강대로 연장될 가능성을 지시한다.

임진강대와 대륙충돌대

임진강대에 대한 국내 연구가 드문 것과는 대조적으로, 국외에서는 임진강대의 지구조적 성인에 대해 많은 논란이 진행되고 있다 (예, Cluzel, 1992; Yin and Nie, 1993; Liu, 1993; Ernst *et al.*, 1994). 남중국-북중국 충돌대는 동-서 방향으로 분포하는 친링-다비-산동 고압 변성대에 의해 잘 정의되어 있으나, 그 동쪽 연장이 한반도의 어느 부분에 해당되는지에 대해서는 아직 잘 알려져 있지 않다. 이는 한반도 내에서 오피오라이트 (ophiolite)나 섭입대의 존재를 지시하는 고압 변성암류가 아직 보고된 바가 없기 때문이기도 하다.

Cluzel (1992)은 옥천대가 고생대 초기의 대륙내 열개 (intracontinental rift)가 사일루리아 후기 - 데본기 초기에 닫힘에 따라 형성되었음을 제안하고, 따라서 중한-양쯔 지괴의 경계인 친링 충돌대의 동쪽 연장이 옥천대가 아니라 임진강대에 해당되리라고

추론하였다.

Yin and Nie (1993)는 임진강대와 호남 전단대 모두 남-북중국의 충돌에 관련된 봉합대 (suture zone)임을 제안하였다. 이들은 북중국 지괴의 남단이 오랜 기간동안 지속된 섭입작용에 의해 호상의 미끈한 경계를 가진 반면, 남중국 지괴의 북단은 열곡의 발달로 불규칙한 형태를 지닌 것으로 생각하였다. 특히 남중국 지괴는 현재의 탄루 (Tan-Lu) 단층대의 전이량에 해당하는 약 550 km 길이의 돌출된 부분이 동측에 발달한 육괴로서, 북중국 지괴와 충돌할 때 좌수 이동형의 (sinistral) 탄루 단층대와 우수 이동형의 (dextral) 호남 전단대를 형성했을 것이라고 제안하였다. 이들의 지구조 모델에 따르면, 임진강대는 260~270 Ma에 봉합된 충돌대에 해당되며, 또한 서에서 동쪽으로 갈수록 변성온도와 압력이 증가하는 추세로 보아 임진강대 내에 에크로자이트를 비롯한 고온+고압의 변성암이 산출하리라 예측할 수 있다.

Liu (1993)는 임진강대 내에서 데본기의 화석이 산출하기 때문에 산동 반도의 북단에 분포하는 친링대의 연장인 회양대에 임진강대가 대비되며, 경기 육괴는 산동 반도 남부의 수루 (Su-Lu) 육괴에 대비된다고 제안하였다. 따라서 경기 육괴에서 수루 육괴에서처럼 코어사이트 (coesite)를 함유하는 에크로자이트가 산출할 가능성을 예상하였다.

리죽남 (1993)은 임진강 습곡대가 중국의 산동-다바-친링 습곡대로 연결되며, 북동쪽으로는 석탄기 중기-페름기 초기에 형성된 함북 습곡대, 그리고 오호츠크 습곡대 남부로 연장될 수 있다고 제안하였다. 특히 그는 임진계에 대비될 수 있는 데본기의 퇴적암류가 산동 반도와 친링 습곡대에서 산출함을 지적하였다.

Ernst *et al.* (1994) 역시 임진강대가 중국의 대륙충돌대의 연장인 것은 물론이고, 경기 육괴도 대륙충돌대에 따른 고압 변성작용을 받은 것으로 제안하였다. 이들은 더 나아가 임진강대 ± 경기육괴로 이어지는 대륙충돌대가 일본의 히다 (Hida) 그리고 러시아의 시코테-알린 (Shikote-Alin) 변성대로 연장될 가능성이 있다고 추론하였다.

이상에서 기술한 바와 같이 최근의 연구들은 중국의 대륙충돌대가 임진강대+경기 육괴로 연장될 것이라고 추론하는 경향이 있다. 이번 연구는 연천층군 내에서 고압 각섬암의 존재와 트라이아스기의 변성 시기를 밝힘으로써 이러한 추론을 뒷받침하는

결과를 얻었다. 특히 삼곶 각섬암의 변성 조건은 Wang *et al.* (1993)과 Zhang *et al.* (in press)이 산동 반도의 코어사이트 백립암, 에크로자이트 및 석류석 각섬암으로부터 얻은 이차 변성작용의 P-T 조건과 매우 유사하다. 한편 경기 편마암 복합체 내에서 이 광진과 조문섭 (1992), 조문섭과 김종욱 (1993)은 고압 광물인 남정석이 산출함을 보고하였고, Lee and Cho (1995)는 경기 육괴의 구봉산층군이 매우 빠른 응기에 의해 특징지워지는 '거의 등온의 압력 하강을 경험했음을 밝혔다. 이러한 변성 진화 경로는 Hu *et al.* (1993)과 You *et al.* (1993)이 보고한 친링 변성대의 경로와 일치한다. 따라서 이제까지 밝혀진 임진강대와 경기 육괴의 변성 암석학적 특성은 중국의 대륙충돌대가 한반도로 연장된다는 가설에 배치되지 않는다. 그러나 현재까지 우리나라에서 초고압 광물인 코어사이트와 다이아몬드는 물론이고 에크로자이트 변성상의 특징 광물인 옴파사이트 (omphacite)나 파이로프 석류석이 보고된 바는 없다. 그러므로 임진강대가 중국의 대륙충돌대의 연장에 해당된다는 제안은 앞으로 더 많은 연구에 의해 검토되어야 할 것이다. 특히 앞으로의 연구는 중국의 대륙 충돌대에 수반된 지구조적 모델과 한반도의 육천대, 경기육괴, 그리고 임진강대의 형성 과정을 대비해 봄으로써 한반도의 지체구조를 밝히는 데 노력해야 할 것이다.

결 론

1. 임진강대 남부의 연천층군은 상부의 변성이질 암류와 하부의 삼곶층으로 구성되며, 경기 편마암 복합체와 인장 연성 전단대에 의해 접한다. 변성이질암류는 임진계의 삭녕통에 대비될 가능성이 있으나, 변성도는 삭녕통에서 보고된 것보다 높은 석류석-남정석대에 달한다. 삼곶층의 주된 암상은 주로 석회질 규산염암, 변성 사질암 및 이들을 관입한 각섬암으로 대표된다. 삼곶층을 구성하는 변성암류는 거의 동-서 방향의 주향과 북쪽으로의 경사를 보이며 주향 방향으로 15 km 폭 이상에 걸쳐 넓게 분포한다. 삼곶 각섬암의 주된 광물 조합은 각섬석+사장석±석류석±토휘석±흑운모±석영+불투명 광물이다.

2. 삼곶 각섬암의 석류석-각섬석-사장석-석영 광물 조합을 이용하여 구한 변성 온도와 압력은 각각 632~736°C와 7.9~11.1 kbar이다. 또한 사장석의

누대 조직과 금홍석 ± 티탄철석이 티타나이트에 의해 치환되는 조직은 삼각 각섬암이 상부 각섬암상의 변성작용 이전에 보다 높은 압력을 경험했을 가능성을 지지한다.

3. 삼각 각섬암의 Sm-Nd 및 Rb-Sr 광물 등시선 연령은 트라이아스기 (222~231 ± 30 Ma)의 광역 변성작용을 지지한다. 이는 P-T 조건과 함께, 중국의 친링-다비-산둥 대륙충돌대가 임진강대로 연장될 가능성을 지지한다.

사 사

야외조사와 시료 처리 및 분석을 도와 준 서울대학교의 김정민 석사, 김종욱 학사, 그리고 연세대학교의 전은영 석사에게 감사한다. 특히 전자현미분석 및 자료의 처리를 위해 성심껏 도와준 이승렬 석사에게 감사한다. 또한 논문 초고에 대한 건설적인 비평을 제공해 준 나기창, 오창환 교수께 감사한다. 이 연구는 서울대학교 대학 발전기금 대우학술연구비(94-07-2072)와 한국과학재단 목적기초연구 (94-1400-03-01-3)에 의해 지원받았다.

참 고 문 헌

- 김옥준, 1973, 경기육괴 서북부의 변성암복합체의 층서와 지질구조. 광산지질, 6, 201-218.
- 김종욱, 조문섭, 1994, 경기도 포천군에 분포하는 연천층군의 고온, 고압 변성작용. 대한지질학회 학술발표회 요약문집, 72.
- 리죽남, 1993, 한반도 중부 일대에 발달되어 있는 임진계 (D2-C1) 층에 대하여. 지질과학, 5, 2-9.
- 이광진, 조문섭, 1992, 가평-청평 지역 경기육괴의 변성작용. 암석학회지, 1, 1-24.
- 이근착, 1995, 연천 북서부의 인진속과 북한산의 연구 동향. 광업진흥, 53, 134-141.
- 이승렬, 조문섭, 1994, 화천-양구 지역에 분포하는 백립암에 대하여. 대한지질학회 학술발표회 요약문집, 73.
- 조문섭, 김종욱, 1993, 춘천-홍천지역 용두리편마암복합체내에 산출하는 남정석: 변성지구조적 의의. 암석학회지, 2, 1-8.
- Ames, L., Zhou, G., and Xiong, B., 1995, Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. Tectonics, 14.
- Bohlen, S. R. and Liotta, J. J., 1986, A barometer for garnet amphibolites and garnet granulites. Jour. Petrol., 27, 1025-1056.
- Chang, K.-H., 1995, Aspects of geologic history of Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, 31, 72-90.
- 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.
- Cong, B., Zhai, M., Carswell, D. A., Wilson, R. N., Wang, Q., Zhao, Z., and Windley, B. F., 1994, Petrogenesis of ultrahigh-pressure rocks and their country rocks at Shuanghe in Dabieshan, Central China. Eur. J. Mineral., 7, 119-138.
- Cosca, M. A., Essene, E. J., and Bowman, J. R., 1991, Complete chemical analyses of metamorphic hornblende: Implications for normalization, calculated H₂O activities and geothermobarometry. Contr. Mineral. Petrol., 108, 472-448.
- Ellis, D. J. and Green, D. H., 1979, An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. Contr. Mineral. Petrol., 71, 13-22.
- Ernst, W. G., Liou, J. G., and Hacker, B. R., 1994, Petrotectonic significance of high- and ultrahigh-pressure metamorphic belts: Inferences for subduction zone histories. Int. Geol. Rev., 36, 213-237.
- Graham, C. M. and Powell, R., 1984, A garnet-hornblende geothermometer and application to the Pelona schist, southern California. Jour. metamorphic Geol., 2, 13-32.
- Harley, S. L., Fitzsimons, and Buick, I. S., 1994, Reactions and textures in wolastonite-scapolite granulites and their significance for pressure-temperature-fluid histories of high-grade terranes. PreC. Res., 66, 309-323.
- Holdaway, M. J., 1971, Stability of andalusite and the aluminum silicate phase diagram. Am. Jour. Sci., 271, 97-131.
- Holland, T. J. B. and Blundy, J., 1994, Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. Contr. Mineral. Petrol., 116, 433-447.
- Humphries, F.J. and Cliff, R.A., 1982, Sm-Nd dating and cooling history of Scourian granulites, Sutherland. Nature, 295, 515-517.
- Hu, N., Yang, J., An, S., and Hu, J., 1993, Metamorphism and tectonic evolution of the Shangdan fault zone, Shaanxi, China. Jour. metamorphic Geol., 11, 537-548.
- Kawasaki, S., 1917, Eastern and southern parts of Gyeonggi-do. Min. Res. of Chosen, 6, no. 1-2(in Japanese).

- Korea Institute of Energy and Resources (KIER) 1981, Geologic map of Korea, 1:1,000,000.
- Kohn, M. J. and Spear, F. S., 1990, Two new geobarometers for garnet amphibolites, with applications to southern Vermont. *Am. Mineral.*, 74, 77-84.
- Leake, B. E., 1978, Nomenclature of amphiboles. *Mineral. Mag.*, 42, 533-563.
- Lee, S. R., 1993, Regional metamorphism of the Chuncheon amphibolite. Unpublished M.Sc. thesis, Seoul National University, 79 pp.
- Lee, S. R. and Cho, M., 1995, Tectonometamorphic evolution of the Chuncheon amphibolite, central Gyeonggi massif, South Korea. *Jour. metamorphic Geol.*, 13, 315-328.
- Li, S., Wang, S., Chen, Y., Liu, D., Qiu, J., Zhou, H., and Zhang, Z., 1994, Excess argon in phengite from eclogite: Evidence from dating of eclogite minerals by Sm-Nd, Rb-Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ methods. *Chem. Geol.*, 112, 343-350.
- Liu, X., 1993, High-P metamorphic belt in central China and its possible eastward extension to Korea. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 2, 9-18.
- Makishima, A., Nakamura, E., and Akimoto, S., 1991, Investigation of the bias in a secondary electron multiplier of Finnigan-MAT 261 mass spectrometer for the quantitative analysis of rare-earth elements in rock samples. Technical report of ISEI, Okayama Univ., B-10, 1-19.
- Morimoto, N., 1988, Nomenclature of pyroxenes. *Mineral. Mag.*, 52, 535-550.
- Na, K. C., 1978, Regional metamorphism in Gyeonggi Massif with comparative studies between Yeoncheon and Ogcheon metamorphic belts (I). *Jour. Geol. Soc. of Korea*, 14, 195-211.
- Na, K. C., 1979, Regional metamorphism in Gyeonggi massif with comparative studies between Yeoncheon and Ogcheon Metamorphic belts (II). *Jour. Geol. Soc. of Korea*, 15, 67-88.
- Newton, R. C. and Perkins, D. III, 1982, Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblage garnet - plagioclase - orthopyroxene - clinopyroxene - quartz. *Am. Mineral.*, 67, 203-222.
- Okay, A. I., Sengor, A. M. C., and Satir, M., 1993, Tectonics of an ultrahigh-pressure metamorphic terrane: The Dabie Shan/Tongbai Shan orogen, China. *Tectonics*, 12, 1320-1334.
- Perchuk, L. L., Aranovich, L. Ya., Podlesskii, K. K., Lavrent'eva, I. V., Gerasimov, V. Yu., Fed'kin, V. V., Kitsul, V. I., Karsakov, L. P., and Berdnikov, N. V., 1985, Precambrian granulites of the Aldan shield, Eastern Siberia, USSR. *Jour. metamorphic Geol.*, 3, 265-310.
- Pownceby, M. I., Wall, V. J., and O'Neill, H. St. C., 1987, Fe-Mn partitioning between garnet and ilmenite: Experiments and applications. *Contr. Mineral. Petrol.*, 97, 116-126.
- Quadt, A. V., 1992, U-Pb zircon and Sm-Nd geochronology of mafic and ultramafic rocks from the central part of the Tauern Window (eastern Alps). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 110, 57-67.
- Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-T., Chi, K.-H., and Nakamura, E., 1994, The Imjingang belt in South Korea: A preliminary result. In IGCP 321 Abstract vol. (eds. Cho, M. and Kim, J. H.), Harn Lim Printing Co., 103-104.
- Ri, J. N. and Ri, J. C., eds., 1994, Tectonic map of Korea (1:1,000,000 scale) and explanatory text. Central Geol. Survey, Pyongyang, 22 pp.
- Robinson, P., Spear, F. S., Schmacher, J. C., Laird, J., Klein, C., Evans, B. W., and Doolan, B. L., 1982, Phase relations of metamorphic amphiboles: natural occurrence and theory. In *Amphiboles: Petrology and experimental phase relations*, Rev. Mineral., 9B (eds. Veblen, D. R. and Ribbe, P. H.), Mineral. Soc. Am., 1-227.
- Russian Academy of Sciences, 1992, Geological Map of Korean Peninsula and Adjacent Areas, 1:1,500,000.
- Spear, F. S., 1980, NaSi-CaAl exchange equilibrium between plagioclase and amphibole: an empirical model. *Contr. Mineral. Petrol.*, 72, 33-41.
- Spear, F. S. and Kimball, C., 1984, RECAMP - a Fortran IV program for estimating Fe^{3+} contents of amphiboles. *Computer Geosci.*, 10, 317-325.
- Spear, F. S. and Menard, T., 1989, Program GIBBS: A generalized method algorithm. *Am. Mineral.*, 74, 943-943.
- Um, S. H. and Chun, H. Y., 1984, Tectonic map of Korea. Korean Institute of Energy and Resources.
- Wang, Q., Ishiwatari, A., Zhao, Z., Hirajima, T., Enami, M., Zhai, M., Li, J., and Cong, B., 1993, Coesite-bearing granulite retrograded from eclogite in Weihai, eastern China: a preliminary study. *European Jour. Mineral.*, 5, 141-152.
- Xu, J. and Tong, W., 1988, Some tectonic relationships between China continent and Korean peninsula in pre-Jurassic. IGCP 224 report, 3, 58-72.
- Yamaguchi, T., 1951, On the so-called Yeoncheon System and its regional metamorphism. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 57, 419-438. (in Japanese with English abstract)
- Yang, Z. J., 1992, New progress in the study of the Jiaodong. *Regional Geology of China*, 1, 43-50.
- Yin, A. and Nie, S., 1993, An indentation model for the North and South China collision and the de-

- velopment of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics*, 12, 801-813.
- York, D. (1969) Least squares fitting of a straight line with correlated errors. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 5, 320-324.
- Yoshikawa, M., Nakamura, E., and Takahashi, N. (1993) Rb-Sr isotope systematics in a phlogopite-bearing spinel lherzolite and its implications for age and origin of metasomatism in the Horoman peridotite complex, Hokkaido, Japan. *Jour. Min. Pet. Econ. Geol.*, 88, 121-130.
- You, Z., Han, Y., Suo, S., Chen, N., and Zhong, Z. (1993) Metamorphic history and tectonic evolution of the Qinling complex, eastern Qinling Mountains, China. *Jour. metamorphic Geol.*, 11, 549-560.
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., and Ernst, W. G. (in press) Ultrahigh-pressure metamorphism and decompressional P-T path of eclogites and country rocks from Weihei, eastern China. *Island Arc*.

(책임편집 : 오창환)

High-pressure amphibolite of the Imjingang belt in the Yeoncheon-Cheongok area

Moonsup Cho¹, Sung-Tack Kwon², Jin-Han Ree³ and Eizo Nakamura⁴

¹*Dept. of Geological Sciences, Seoul National University, Seoul, 151-742*

²*Dept. of Geology, Yonsei University, Seoul, 120-749*

³*Dept. of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul, 136-701*

⁴*Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University, Misasa, Tottori-ken 682-01, Japan*

ABSTRACT : In order to characterize the petrogenesis of the E-W trending Imjingang belt, we studied the metamorphic rocks of the Yeoncheon Group near its type locality, Yeoncheon - Cheongok area, belonging to the southern part of this fold-thrust belt. The Samgot Formation of the Yeoncheon Group consists of calc-silicate and metapsammitic rocks together with amphibolite and amphibole gneiss. Layers of these metamorphic rocks concordantly occur in a wide area with its length greater than 15 km along their strike direction. Major mineral assemblages of the amphibolite are hornblende + plagioclase ± garnet ± diopside ± biotite ± quartz. Accessory rutile and ilmenite are characteristically replaced by titanite. Metamorphic temperatures and pressures estimated from the garnet - hornblende - plagioclase - quartz geothermo-barometers are 632~736°C and 7.9~11.1 kbar, respectively. Thus, the regional metamorphism of the study area belongs to the upper amphibolite facies. Furthermore, Sm-Nd and Rb-Sr data of garnet, plagioclase, and whole rock of an amphibolite define mineral isochrons of 231 ± 30 Ma and 222 ± 24 Ma, respectively, suggesting the Triassic metamorphism. These results are consistent with P-T conditions and metamorphic ages reported in the Shandong Peninsula, and support the hypothesis that the Chinese collision belt may extend into the Imjingang belt in the Korean Peninsula.

Key words: Yeoncheon Group, amphibolite, regional metamorphism, Imjingang belt, collision belt.