

## 백동지역의 변성염기성암과 주변 편마암의 변성진화과정과 그 지구조적 의미

오창환\* · 최선규<sup>1</sup> · 송석환<sup>2</sup>

전북대학교 지구환경과학과, 561-756

<sup>1</sup>고려대학교 지구환경과학과, 136-701

<sup>2</sup>충부대학교 환경공학과, 312-940

### Metamorphic Evolution of Metabasites and Country Gneiss in Baekdong Area and Its Tectonic Implication

Chang Whan Oh\*, Seon Gyu Choi and Suk Hwan Song

Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Jeonju, 561-756, South Korea

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Korea university, 136-701, South Korea

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Jungbu University, 312-940, South Korea

**요약:** 경기육괴의 남서부에 위치한 백동-홍성 일원에는 선캠브리아기 편마암복합체내에 초염기성암체들이 소규모 렌즈상의 암체로 산출된다. 백동지역에 나타나는 초염기성암체내에 변성염기성암이 부딘 형태로 나타난다. 이들 변성염기성암으로부터 3차에 걸친 변성작용이 인지된다. 1차 변성작용은 석류석안에 나타나는 포획 광물들에 의해 정의되는 석류석+나트륨질 단사회석+감섬석+사장석+티타나이트 광물군에 의해 인지되며 2차 변성작용은 기질의 석류석+단사회석+감섬석+사장석 광물군에 의해 인지된다. 3차 변성작용은 후퇴변성작용시 석류석과 주변 회석 사이에 형성된 심플렉타이트내의 감섬석+사장석 광물군에 의해 인지된다. 1차와 3차 변성작용시의 온도-압력 조건은 각각 690-780°C, 11.8-15.9 kb 그리고 490-610°C, 4.0-6.3 kb이다. 이러한 자료들은 백동의 변성염기성암이 에클로자이트상-고압백립암상-감섬암상 점이대로부터 고압백립암상-감섬암상 점이대를 지나 감섬암상으로의 후퇴변성을 경험하였음을 지시한다. 초염기성암 주변의 석류석 화강편마암에서 석류석 중심부와 가장자리로부터 얻은 온도-압력 조건은 각각 615-815°C, 10.7-16.0 kb 그리고 575-680°C, 5.4-7.0 kb이며 이는 석류석 화강편마암도 변성염기성암과 유사한 변성진화과정을 경험하였음을 지시한다. 희유원소 분석치는 백동지역 변성염기성암의 지구조적 환경이 호상열도였음을 지시한다. 이러한 지질, 변성진화과정, 광물화학 그리고 지구조적 환경은 백동-홍성 지역이 산둥반도 수루 층돌대의 연장선일 가능성이 높음을 지시한다. 하지만 백동지역의 변성염기성암으로부터 얻어진 전암-석류석 Sm-Nd 연령인 268.7-297.9 Ma는 중국의 다비-수루 층돌대에서 인지되는 초고압변성작용 시기인 208-245 Ma보다 오래되었다. 이는 Sino-Korea 판과 Yangtz 판의 충돌이 중국보다 한반도에서 먼저 일어났을 가능성을 지시한다.

**핵심어:** 백동지역, 에클로자이트상, 고압백립암상, 다비-수루 층돌대, 산둥반도, 한반도

**Abstract:** In the Baekdong-Hongseong area, the southwestern part of the Gyeonggi Massif in Korea, ultramafic rocks occur as lenses within Precambrian granitic gneiss. At Baekdong area, ultramafic lens contains metabasite boudin which had undergone at least three stages of metamorphisms. The mineral assemblage on the first stage, Garnet+Sodic Augite+Hornblende+Plagioclase+Titanite, is recognized from the inclusions in garnet. The second stage is represented by the assemblage in matrix, Garnet+Augite+Hornblende+Plagioclase, while the third stage is identified by the Hornblende+Plagioclase ± Garnet assemblage in the symplectite formed around garnet. The P-T conditions of the first and the third stages are 690-780°C, 11.8-15.9 kb and 490-610°C, 4.0-6.3 kb, respectively. These data indicate that metabasite in Baekdong area had experienced a retrograde P-T path from the eclogite(EG) - high-pressure granulite (HG)-amphibolite (AM) transitional facies to the AM through HG-AM transitional facies. The core and rim of garnet in country granitic gneiss give 605-815°C, 10.7-16.0 kb and 575-680°C, 5.4-7.0 kb,

\*Corresponding author: Tel. 82-63-270-3397, E-mail. ocwhan@moak.chonbuk.ac.kr

respectively, indicating that the retrograde P-T path of granitic gneiss is similar to that of metabasite. Trace element data reveals that the tectonic setting of metabasite is island arc. The general geology, the metamorphic evolution, the mineral chemistry and the tectonic setting of Baekdong area indicate that the Baekdong-Hongseong area in Korea is a possible extension of the Sulu collision Belt in China. On the other hand, the Sm-Nd whole rock-garnet isochron ages of metabasites are 268.7-297.9 Ma which are older than the ages of UHP metamorphism (208-245 Ma) in the Dabie-Sulu Collision Belt. The older metamorphic ages suggest that collision between Sino-Korea and Yangtz plates may have occurred earlier in Korean Peninsula than China.

**Key words:** Baekdong area, Eclogite facies, High-pressure granulite facies, Dabi-Sulu Collision Belt, Sandong Peninsula, Korean Peninsula

## 서 론

1980년대 후반부터 중국에서는 Sino-Korea 판과 Yangtz 판과의 충돌대인 다비-수루(Dabie-Sulu)조산대에 대한 연구가 활발히 진행되었다(Wang *et al.*, 1989; Okay *et al.*, 1989; Wang and Liou, 1991; Okay and Sengor, 1992; Zhang *et al.*, 1994; Liou and Zhang, 1995; Zhai and Cong, 1996). 이러한 연구가 활성화 되는데 있어 다비-수루 조산대로부터 초고압 변성작용을 지시하는 코에사이트(coesite)를 포함하는 에콜로자이트(Eclogite)의 발견(Wang *et al.*, 1989; Okay *et al.*, 1989)이 매우 중요한 역할을 하였다. 1980년도 말에는 주로 다비 지역에 대한 연구가 진행되었으나 1990년도 초부터는 산둥반도에 위치한 수루 지역에 대한 연구가 활발히 수행되었다(Enami *et al.*, 1993; Zhang and Liou, 1994; Zhang *et al.*, 1994; Ishizaka *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, 1995; Li *et al.*, 1997; Zhai and Liu, 1998). 그 결과 대륙충돌을 지시하는 초고압 충돌대가 탄루 단층에 의해 산둥반도로 이동되었었다는 사실이 확인되었다. 또한 충돌대의 북쪽 경계인 Wulian-Muping 단층이 산둥반도에서 황해로 연장되어지며 산둥반도의 칭다오에서 100 km 떨어진 서해의 Qianliyan Island에서도 고압변성작용을 지시하는 에콜로자이트가 발견되었다(Zhai Mingguo와의 개인 통신). 그 결과 중국을 비롯한 세계의 여러 학자들이 과연 산둥반도의 수루 충돌대가 과연 서해를 지나 한반도로 연결될 것인가에 대한 지대한 관심을 갖게 되었다. 이러한 연장성의 확인 과제는 중국과 한국의 대비만이 아니라 동북아시아에서 중생대 초기에 일어나는 판구조 운동의 최종 마무리 단계를 이해하는데 꼭 필요한 정보이다.

한편 국내에서는 고지자기 연구에 의해 최초로 한반도가 고생대 말 적도로부터 현재의 위치로 이동되었었으며 태백산 일대 일부가 중국의 Yangtz 판과 대비될 수 있다는 주장(김광호와 정봉일, 1989; Kim *et al.*,

1992) 이후 한반도가 한 개의 판으로 구성되었는가 아니면 2개 이상의 판으로 구성되었는가에 대한 논란이 일어나고 있다. 이러한 논란은 국내에서도 중국을 포함한 외국에서와 마찬가지로 중국의 친링-다비-수루 조산대가 한반도로 연결될 것인가에 대한 관심을 고조시키고 있다. 국내외에서 야기되고 있는 이러한 관심을 바탕으로 최근 중국의 동부와 한반도의 조구조적 연관성에 대한 여러 의견이 제시되었다. Cluzel *et al.* (1990), Yin and Nie(1993), 조문섭외(1995)와 Ree *et al.*(1996)은 임진강대를 다비-수루 지역의 연장선으로 제시하였으며 Liu(1993)와 Oh *et al.*(1997)은 옥천변성대, 경기육괴, 그리고 임진강대 전체가 다비-수루 조산대의 연장선일 가능성을 제시하였다. 하지만 여전히 한반도가 하나의 판이었다는 주장도 계속되고 있다(Chang, 1997; Cheong *et al.*, 2000). 그리고 Chang (1996)은 다비-수루 조산대가 임진강대와 그리고 옥천변성대가 남중국판을 북쪽의 Yangtz판과 Cathaysia판으로 나누고 있는 Huanan Aulacogen과 연결되며 그 결과 임진강대 이북은 Sino-Korea판에, 경기육괴는 Yangtz판에 그리고 소백산육괴는 Cathaysian판에 대비된다고 주장하고 있다. 이러한 여러안이 주장됨에도 불구하고 현재까지 한반도에서는 충돌대의 특징인 오피오라이트, 에콜로자이트 그리고 초고압변성작용이 발견되지 않아 중국의 다비-수루 조산대가 한반도로 연결되는지를 쉽게 확인할 수 없었다.

현재 경기육괴의 서남부인 충청남도 백동-홍성 일원에서는 사문암화된 초염기성암, 변성염기성암 그리고 대리암이 화강암질 혹은 토날라이트질 화강편마암내에 렌즈형태로 산출되고 있으며(Song *et al.*, 1997) 백동지역의 초염기성암내에는 변성염기성암이 부딘형태로 협재되어 나타난다. 조문섭(2001)은 화강편마암의 관입연대가 812-822 Ma이며 이들이 223-235 Ma에 변성작용을 받았을 가능성이 있다고 발표하였다. 이러한 지질학적, 지질연대학적 상황은 중국 산둥반도의 수루 충

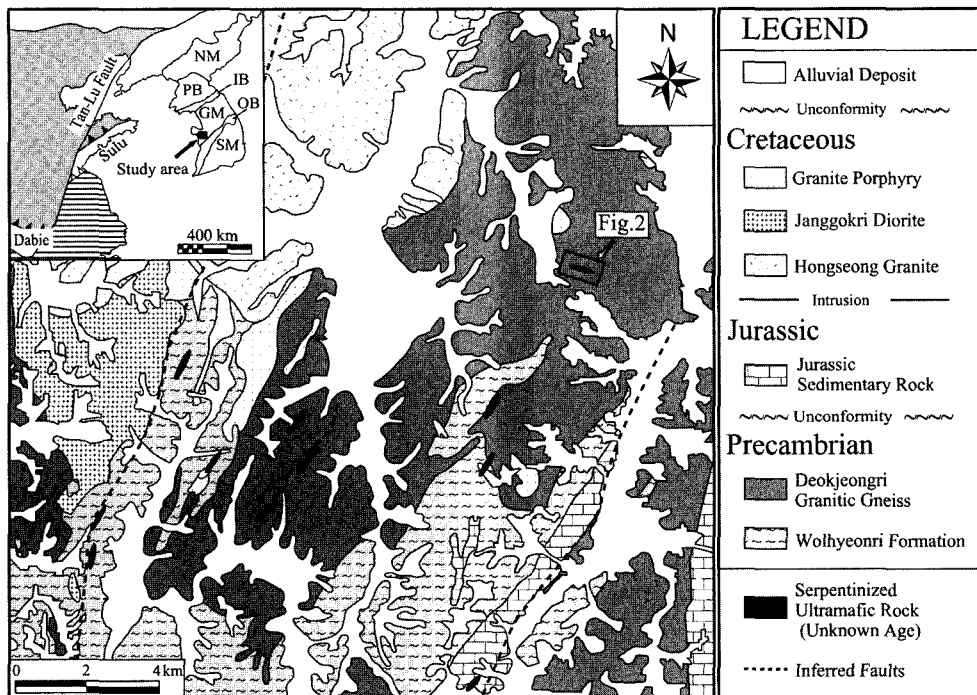


Fig. 1. Geologic map of the study area and tectonic map of the Korean Peninsula. NM, Nangnim Massif; PB, Pyeongnam Basin; IB, Imjingang Belt; GM, Gyeonggi Massif; OB, Okcheon Belt; SB, Sobaeksan Massif.

들대와 비슷하다. 수루 충돌대 지역에서는 700-800 Ma의 관입연령을 갖는 지오난 화강편마암내에 변성된 초염기성암, 변성염기성암, 그리고 대리암이 렌즈형태로 나타나며(Wang *et al.*, 1989; Zhang *et al.*, 1994; Kato *et al.*, 1997) 이들 암석들은 208-245 Ma 시기에 고압내지 초고압 변성작용을 받았다(Li *et al.*, 1993; Ye *et al.*, 2000).

수루지역의 많은 초염기성암이 부딘 형태의 변성염기성암을 포함하고 있으며 이들은 초고압변성작용중 코에사이트를 함유한 에클로자이트를 형성한 후 상승 시기 과정중에 백립암상의 후퇴변성작용을 먼저 받고 그 이후 각섬암상의 변성작용을 받았다(Zhang *et al.*, 1995; Banno *et al.*, 2000; Yao *et al.*, 2000). 이러한 후퇴변성작용시 석류석의 주변부와 주변광물사이에 심플렉타이트가 만들어지며 단사휘석의 성분은 옴파사이트질 휘석에서 나트륨질 오자이트를 거쳐 오자이트로 변화한다. 충청남도 백동지역의 초염기성암내에도 역시 수루지역과 마찬가지로 부딘 형태의 변성염기성암이 나타나며 이들 암석내 석류석 주변에는 심플렉타이트가 형성되어 있으며 석류석 내부에 나트륨질 오자이트와 금홍석이 포획물로 나타난다.

위에 언급한 백동-홍성지역과 산둥지역 수루 충돌대간의 유사성은 백동-홍성지역이 수루 충돌대의 연장성일 가능성을 제시하며 백동-홍성지역에 대한 연구가 필요함을 지시한다. 특히 부딘형태로 나타나는 변성염기성암을 함유한 초염기성암이 나타나는 백동지역에 대한 연구가 시급하다. 따라서 본 연구에서는 백동지역에서 초염기성암내에 산출되는 변성염기성암과 주변암인 화강편마암의 변성 온도-압력조건과 변성작용시기 및 변성진화과정을 연구하며 그 결과를 중국 산둥반도의 수루 충돌대의 변성환경 및 변성진화과정과 비교하고자 한다.

### 지질 및 암상개요

경기육괴의 남서부에 해당하며 옥천구조대의 북쪽에 위치한 백동-홍성일대의 충청남도 일원은 주로 선캄브리아기의 월현통과 덕정리 화강편마암으로 구성되어 있다(이종혁과 김성수, 1963; 염상호과 이민성, 1963; Fig. 1). 월현통은 주로 변성퇴적암류로 구성되어 있으며 주 변성퇴적암류는 흑운모-백운모 편암이고 규선석 편암, 녹니석 편암, 흑운모-각섬석 편암 그리고 대리암

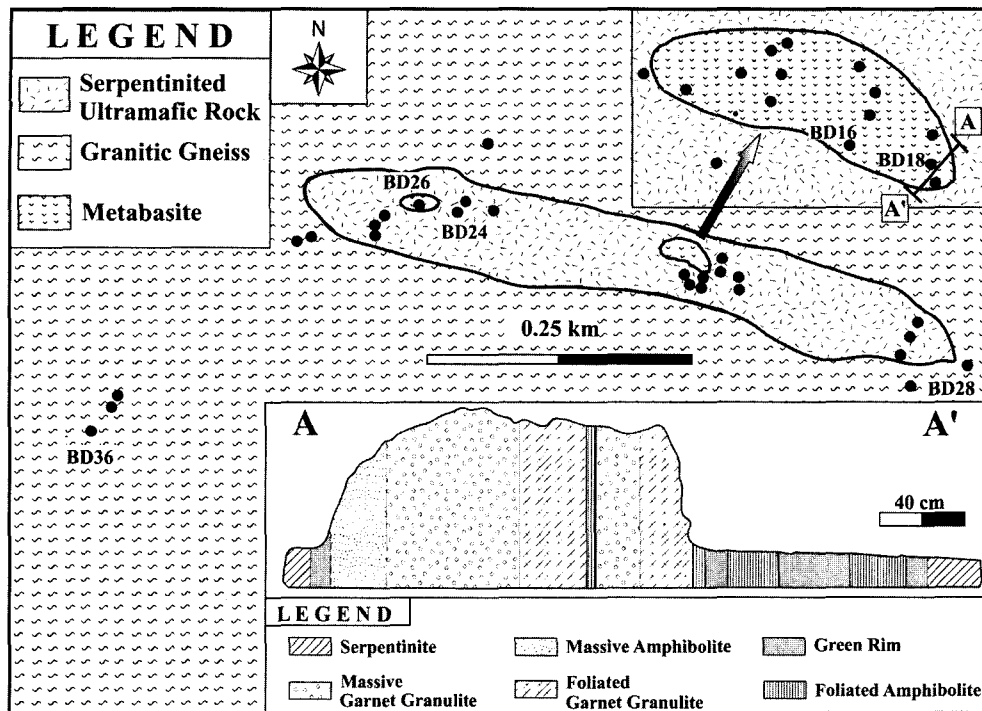


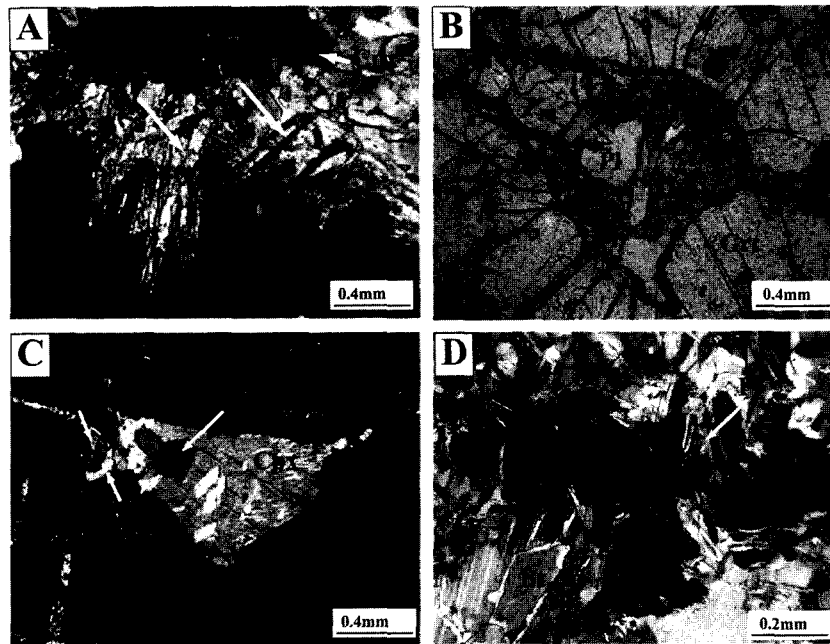
Fig. 2. Simplified geologic map of the study area and schematic cross section along A-A'. Black points are sampling locations and numbers represent sample numbers.

도 함께 나타난다. 변성염기성암도 이들 변성퇴적암류와 교호되며 나타난다. 월현통의 변성퇴적암류는 덕정리 화강편마암에 의해 관입되고 있다. 덕정리 편마암은 주로 각섬석 화강편마암으로 구성되어있다. 각섬석 편마암은 주로 흑운모, 사장석, K-장석, 석영, 각섬석으로 구성되어 있으며 가끔 석류석을 포함하기도 한다. Na (1992)는 월현통과 덕정리 화강편마암류를 각각 부천층군과 부천편마암층으로 규정하고 있으며 원생대 초기 암석으로 기재하고 있다. 하지만 최근 덕정리 화강편마암으로부터 Turek and Kim(1996)은 687 Ma의 U-Pb 저어콘 연령을 얻었으며 조문섭(2001)은 812-822 Ma의 SHRIMP 저어콘 연령을 얻었다. 이 연령은 기존의 해석과는 달리 덕정리 화강편마암은 원생대 말기의 화성작용에 의하여 생성되었음을 지시한다.

월현통과 덕정리 화강편마암내에는 초염기성암체들이 소규모 렌즈상의 암체로 이 지역에 우세한 구조선 방향인 북북동 방향으로 배열되어 산출된다(이종혁과 김성수, 1963; 김서운 외, 1976; 우영균 외, 1991; 윤상필 외, 1994, Song *et al.*, 1997). 이들 초염기성암체들은 조산대에 형성되는 알파인형이며 전형적인 상부 맨틀 기원의 암석이 부분용융된 맨틀 잔여물로서 지표로

의 이동과정에서 변성작용을 받아 시문석화 혹은 활석화되었다(Woo *et al.*, 1991; Yun *et al.*, 1994; Wee *et al.*, 1994; Song *et al.*, 1997). 덕정리 화강편마암내에는 초염기성암외에 대리암과 변성염기성암이 렌즈형태로 나타난다. 하지만 이들 암석이 원래 월현통과 대비되는지에 대해서는 연구된바가 없다. 덕정리 화강편마암과 월현통은 시대미상의 주라기 혹은 백악기로 예상되는 화강암에 의하여 관입되거나 하부 주라기에 해당하는 대동계 퇴적암류에 의하여 부정합관계로 피복되어있다.

본 연구의 대상지역인 백동지역에서도 다른 지역과 마찬가지로 덕정리 화강편마암과 단층으로 접하며 초염기성암 렌즈가 나타나고 있을 뿐 아니라 초염기성암체 내에 변성염기성암 부단들이 나타난다(Fig. 2). 부단 중심부에는 석류석을 포함하는 백립암이 나타나며 부단과 주변 초염기성암의 경계부에는 각섬석으로만 이루어진 테두리가 형성되어 있다. 석류석 백립암은 석류석, 휘석, 각섬석 그리고 사장석으로 이루어져 있다. 석류석은 휘석, 각섬석, 사장석, 티타나이트 그리고 금홍석을 포획하고 있으며(Figs. 3b, c) 각섬석과 사장석으로 이루어진 포획물 집합체 주변에 방사성 균열이



**Fig. 3.** Photomicrographs of garnet granulite (A, B and C) and garnet granitic gneiss (D). (A) Symplectite consisting with plagioclase and amphibole formed around garnet. (B) The radical crack occurs around inclusion aggregate of plagioclase and amphibole. (C) Clinopyroxene, amphibole, rutile and titanite occur as inclusions in garnet and rutile is rimmed by titanite. (D) Plagioclase rim formed between garnet and surrounding minerals.

관찰된다(Fig. 3b). 석류석 주변부와 주변 광물 사이에는 각섬석과 사장석으로 이루어진 심플렉타이트가 후퇴변성작용시기에 형성되었다(Fig. 3a). 이러한 후퇴변성작용의 정도가 부딘의 가장자리 부분으로 갈수록 증가하며 그 결과 부딘의 가장자리에서는 석류석과 휘석이 각섬석과 사장석으로 분해되어 석류석 백립암이 각섬암으로 전이된다.

초염기성암 주변의 화강편마암은 주로 흑운모 화강편마암이며 이 암석은 흑운모, 사장석, K-장석, 각섬석 그리고 석영으로 구성된다. 일부 흑운모 화강편마암내에서는 석류석이 함께 나타난다. 화강편마암내의 석류석은 흑운모, 사장석 그리고 석영을 포획물로 함유하고 있으며 일부 후퇴변성작용을 강하게 받은 화강편마암내에서는 석류석과 주변광물사이에 형성된 사장석 테두리가 나타나며 이는 석류석 백립암내의 심플렉타이트와 대비될 수 있다(Fig. 3d).

### 광물화학

백동지역에 나타나는 대표적인 석류석 백립암과 석류석 화강편마암내에 나타나는 광물들을 기초과학지원

연구원의 카메라 SX-51 전자현미분석기로 15 ekv와 20 nA의 분석조건하에서 분석하였다.

### 석류석

석류석 백립암 26 시료의 석류석 내부에서는 성분의 변화가 크게 없는데( $X_{Fe}$ , 0.557-0.598;  $X_{Alm}$ , 0.408-0.428;  $X_{Pyp}$ , 0.282-0.325;  $X_{Sps}$ , 0.090-0.016;  $X_{Grs}$ , 0.248-0.288) 반해 석류석의 최외곽부( $X_{Fe}$ , 0.654-0.692;  $X_{Alm}$ , 0.479-0.529;  $X_{Pyp}$ , 0.223-0.252;  $X_{Sps}$ , 0.021-0.028;  $X_{Grs}$ , 0.250-0.251)에서는  $X_{Fe}$ ,  $X_{Alm}$ ,  $X_{Sps}$ 는 증가하고  $X_{Pyp}$ 는 감소한다(Fig. 4a, b, Table 1). 심플렉타이트(symplectite) 구조가 잘 발달된 석류석 외각부의  $X_{Alm}$ 은 0.522-0.529이며  $X_{Pyp}$ 는 0.241-0.247이다. 이는 심플렉타이트가 잘 발달된 석류석 외각부의  $X_{Fe}$ 값이 심플렉타이트가 잘 발달되지 않은 석류석 외각부의  $X_{Fe}$ 값보다 높음을 지시한다. 석류석 내부 평균 성분에 비해서 휘석 포획물 주변 석류석( $X_{Fe}$ , 0.566-0.628;  $X_{Alm}$ , 0.408-0.445;  $X_{Pyp}$ , 0.257-0.321;  $X_{Sps}$ , 0.060-0.014;  $X_{Grs}$ , 0.248-0.313)의  $X_{Alm}$ ,  $X_{Fe}$ 값의 평균값이 약간 높고  $X_{Sps}$ 의 평균값이 약간 낮다. 이는 석류석 포획물 주변에 포획이후 포획물과 주변 석류석간에 성분의 교환이

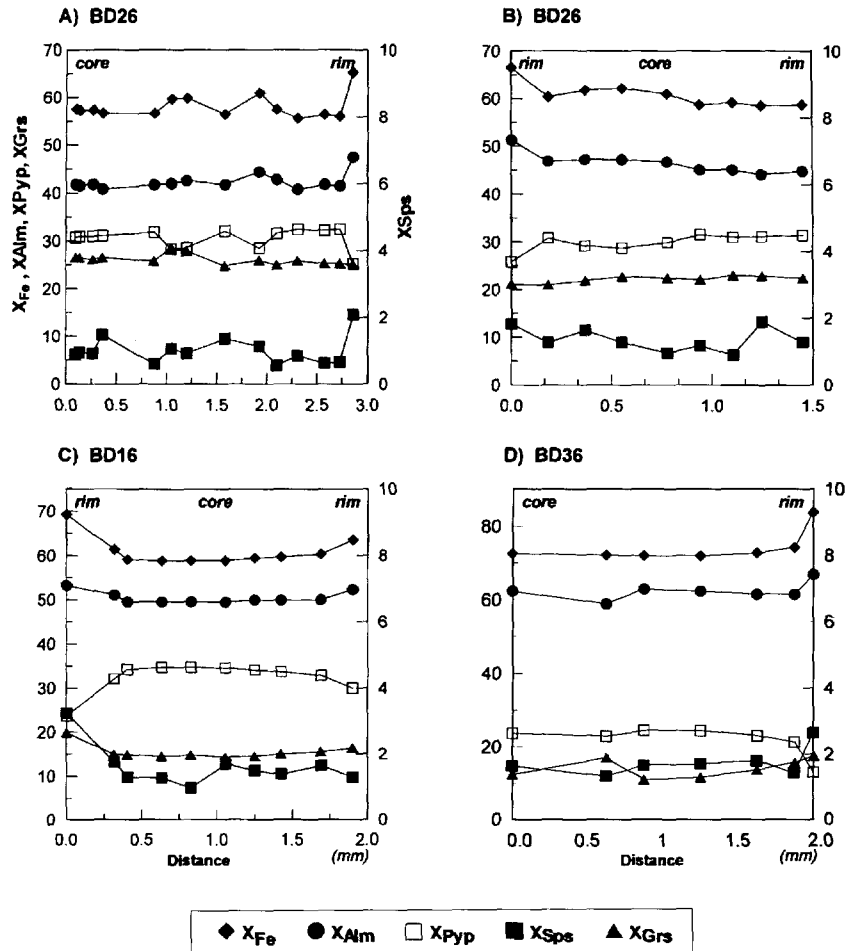


Fig. 4. The compositional profiles of garnet from sample BD26 (A and B), BD16 (C) and BD36 (D) in the study area.

일어났으나 그에 의한 성분변화가 적었음을 지시한다.

석류석 백립암 16번 시료내 석류석은 26번 시료내 석류석에 비해 전반적으로  $X_{Alm}$ 이 높고  $X_{Grs}$ 가 낮으나 26번 시료내 석류석과 같이 전반적으로 석류석 내부 ( $X_{Fe}$ , 0.565-0.629;  $X_{Alm}$ , 0.468-0.511;  $X_{Pyp}$ , 0.283-0.362;  $X_{Sps}$ , 0.06-0.018;  $X_{Grs}$ , 0.134-0.189)에 비하여 최외곽부 ( $X_{Fe}$ , 0.664-0.748;  $X_{Alm}$ , 0.482-0.566;  $X_{Pyp}$ , 0.181-0.300;  $X_{Sps}$ , 0.013-0.042;  $X_{Grs}$ , 0.142-0.300)에서  $X_{Fe}$ ,  $X_{Alm}$ ,  $X_{Sps}$ 가 증가하고  $X_{Pyp}$ 는 감소한다(Fig. 4c). 그리고 26번 시료에서와 같이 심플렉타이트의 발달 정도에 따라 석류석의 최외곽부의 성분이 변화한다. 하지만 26번 시료에서는  $X_{Grs}$ 가 최외곽부에서는 거의 변화가 없는데 비해 16번 시료에서는 증가한다.

석류석 백립암 18번 시료내 석류석은 16번 시료내 석류석과 유사한 성분을 보여주며 16번 시료내 석류석과 같

이 내부( $X_{Fe}$ , 0.518-0.534;  $X_{Alm}$ , 0.412-0.432;  $X_{Pyp}$ , 0.377-0.387;  $X_{Sps}$ , 0.010-0.012;  $X_{Grs}$ , 0.181-0.198)에서 최외곽부( $X_{Fe}$ , 0.660-0.727;  $X_{Alm}$ , 0.508-0.528;  $X_{Pyp}$ , 0.198-0.263;  $X_{Sps}$ , 0.034-0.046;  $X_{Grs}$ , 0.182-0.228)로  $X_{Fe}$ ,  $X_{Alm}$ ,  $X_{Sps}$ ,  $X_{Grs}$ 가 증가하며  $X_{Pyp}$ 는 감소한다(Fig. 4d). 18번 시료에서도 16번 시료에서와 같이 휘석과 각섬석 포획물 주변의 석류석( $X_{Fe}$ , 0.526-0.552)은 다른 석류석 중심부에 비해 상대적으로 약간 높은  $X_{Fe}$  평균값을 갖는다.

석류석 화강편마암인 시료 36내 석류석은 석류석 백립암내의 석류석에 비해  $X_{Fe}$ ,  $X_{Alm}$  성분이 높고  $X_{Pyp}$  성분이 낮지만 석류석 백립암과 같이 내부( $X_{Fe}$ , 0.719-0.742;  $X_{Alm}$ , 0.615-0.629;  $X_{Pyp}$ , 0.213-0.245;  $X_{Sps}$ , 0.144-0.180;  $X_{Grs}$ , 0.110-0.137)에 비해 최외곽부( $X_{Fe}$ , 0.837-0.853;  $X_{Alm}$ , 0.668-0.697;  $X_{Pyp}$ , 0.120-0.130;  $X_{Sps}$ , 0.026-0.043;  $X_{Grs}$ , 0.140-0.175)로  $X_{Fe}$ ,  $X_{Alm}$ ,

Table 1. Representative compositions of garnets in the study area.

	BD26				BD28		BD16			BD18		
	C	Cl	R	R	C	R	C	R	R	C	R	R
SiO <sub>2</sub>	39.06	38.97	38.08	38.12	37.93	37.82	39.90	38.69	38.14	39.01	37.82	38.84
TiO <sub>2</sub>	0.17	0.24	0.00	0.19	0.07	0.00	0.10	0.00	0.00	0.01	0.10	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.26	21.51	21.21	21.27	21.08	21.03	21.64	21.60	21.37	21.93	21.35	21.12
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10	0.16	0.03	0.00	0.00	0.00	0.20	0.24	0.13	0.02	0.04	0.00
FeO*	19.98	19.66	22.49	24.90	25.62	26.53	20.82	23.90	24.21	23.99	24.60	25.30
MnO	0.42	0.72	0.98	1.03	0.63	1.38	0.46	1.60	2.09	0.47	1.90	1.52
MgO	8.26	7.49	6.69	6.36	2.38	1.82	10.19	6.92	5.09	9.44	4.66	6.30
CaO	9.90	10.63	9.25	7.61	11.97	11.31	6.82	7.11	8.14	5.60	8.73	7.36
Na <sub>2</sub> O	0.26	0.26	0.29	0.19	0.23	0.27	0.25	0.22	0.31	0.21	0.21	0.25
Total	99.41	99.64	99.02	99.67	99.91	100.16	100.38	100.28	99.48	100.68	99.41	100.69
Si	2.98	2.98	2.95	2.96	2.99	2.99	3.00	2.98	2.98	2.95	2.97	2.99
Al(IV)	0.02	0.02	0.05	0.04	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.05	0.03	0.01
Al(VI)	1.89	1.91	1.89	1.91	1.94	1.94	1.92	1.93	1.95	1.90	1.94	1.91
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Cr	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>2+</sup>	1.28	1.26	1.46	1.62	1.69	1.75	1.31	1.54	1.58	1.52	1.61	1.63
Mg	0.94	0.85	0.77	0.74	0.28	0.21	1.14	0.79	0.59	1.06	0.55	0.72
Mn	0.03	0.05	0.06	0.07	0.04	0.09	0.03	0.10	0.14	0.03	0.13	0.10
Ca	0.81	0.87	0.77	0.63	1.01	0.96	0.55	0.59	0.68	0.45	0.73	0.61
Na	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.03	0.03	0.04
sum	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	7.99	8.00	8.01
X <sub>Fe</sub>	0.58	0.60	0.65	0.69	0.86	0.89	0.53	0.66	0.73	0.59	0.75	0.69
X <sub>Alm</sub>	0.42	0.42	0.48	0.53	0.56	0.58	0.43	0.51	0.53	0.49	0.53	0.53
X <sub>Pyp</sub>	0.31	0.28	0.25	0.24	0.09	0.07	0.38	0.26	0.20	0.35	0.18	0.24
X <sub>Sps</sub>	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03	0.05	0.01	0.04	0.03
X <sub>Grs</sub>	0.27	0.29	0.25	0.21	0.34	0.32	0.18	0.19	0.23	0.15	0.24	0.20

FeO\*=Total FeO, C=core, R=rim, Cl=core composition contacting with cpx inclusion, X<sub>Fe</sub> = Fe<sup>2+</sup>/(Fe<sup>2+</sup>+Mg), X<sub>Alm</sub>=X<sub>Fe</sub>/T, X<sub>Pyp</sub>=X<sub>Mg</sub>/T, X<sub>Sps</sub>=X<sub>Mn</sub>/T, X<sub>Grs</sub>=X<sub>Ca</sub>/T, T = Fe+Mg+Mn+Ca.

X<sub>Sps</sub>, X<sub>Grs</sub>가 증가하며 X<sub>Pyp</sub>는 감소한다. 이에 반해 또 다른 석류석 화강편마암인 시료 28내의 석류석의 경우 시료 36에 비해 X<sub>Grs</sub>가 높고 X<sub>Alm</sub>, X<sub>Pyp</sub>과 X<sub>Fe</sub>가 낮으며 (X<sub>Fe</sub>, 0.837-0.853; X<sub>Alm</sub>, 0.668-0.697; X<sub>Pyp</sub>, 0.120-0.130; X<sub>Sps</sub>, 0.026-0.043; X<sub>Grs</sub>, 0.140-0.175) 내부와 최외곽부의 성분의 차이가 크지 않으며 뚜렷한 성분의 경향이 없다. 이는 36번 시료내 석류석 주변에 사장석 테두리가 만들어진 것과 함께 36번 시료가 28번 시료에 비해 후퇴변성작용을 강하게 받았음을 지시한다.

**휘석**

26번 석류석 백립암 시료내에서 석류석내에 포획물로 나타나는 휘석(X<sub>Jd+Ac</sub>, 0.044-0.077; X<sub>Mg</sub>, 0.82-0.86)

은 기질에 나타나는 휘석(X<sub>Jd+Ac</sub>, 0.012-0.056; X<sub>Mg</sub>, 0.72-0.84)보다 높은 제이다이트와 에크마이트 성분의 합과 X<sub>Mg</sub>값을 갖는다(Fig. 5a, Table 2). 18번과 16번 시료들에서도 휘석포획물(X<sub>Jd+Ac</sub>, 0.079-0.106; X<sub>Mg</sub>, 0.85-0.86)이 기질의 휘석(X<sub>Jd+Ac</sub>, 0.034-0.058; X<sub>Mg</sub>, 0.74-0.83)보다 높은 제이다이트와 에크마이트 성분의 합을 갖는다. 그리고 휘석 포획물 중앙부가 외곽부보다 높은 제이다이트 성분을 보여준다. 26번과 16번 시료에서 포획물로 나타나는 휘석내의 Al<sub>total</sub>은 각각 0.186-0.299와 0.218로서 기질의 휘석에 나타나는 0.043-0.148과 0.119-0.162에 비해 높다(Fig. 5b). 16번 시료에서도 기질의 휘석의 Al<sub>total</sub>값은 휘석 포획물의 Al<sub>total</sub>값과 비슷하거나 낮다. 포획물로 나타나는 휘석내에는 각

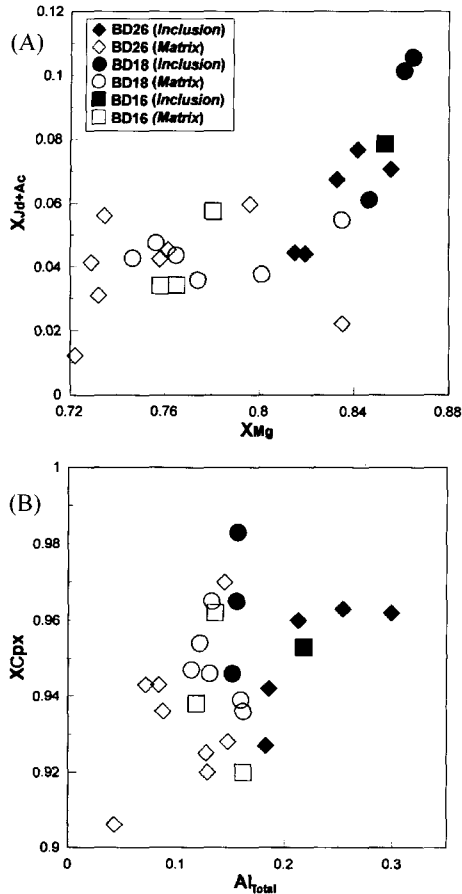


Fig. 5. The compositions of clinopyroxenes from garnet granulites. A)  $X_{Mg}$  vs.  $X_{Jd+Ac}$  diagram and B)  $X_{Cpx}$  vs.  $Al_{Total}$  diagram.

섬석이 항상 용출되어 나타나며 일부 기질 휘석내에서도 각섬석이 용출되어 나타난다.

**각섬석**

석류석 백립암내에 나타나는 각섬석 성분은 다음과 같다. 26번 시료에서는 포획물로 나타나는 각섬석의  $X_{Mg}$  값(0.732-0.834)이 기질의 각섬석의  $X_{Mg}$  값(0.636-0.969) 보다 높으며 이러한 현상이 16번 시료에서는 더욱 뚜렷하다(Fig. 6, Table 3). 하지만 18번 시료에서는 포획된 각섬석과 기질의 각섬석간의  $X_{Mg}$  값의 차이가 뚜렷하지 않다. 기질에서 심플렉타이트가 많이 진행된 부분의 각섬석과 그렇지 않은 부분의 각섬석간에는 큰 성분차이가 나타나지 않는다. 이들 시료내의 시료는 거의 모두 마그네슘질 혼블랜드 내지 첼마카이트 성분을 갖는다. 18과 24번에서는 석류석안의 각섬석 포획물과

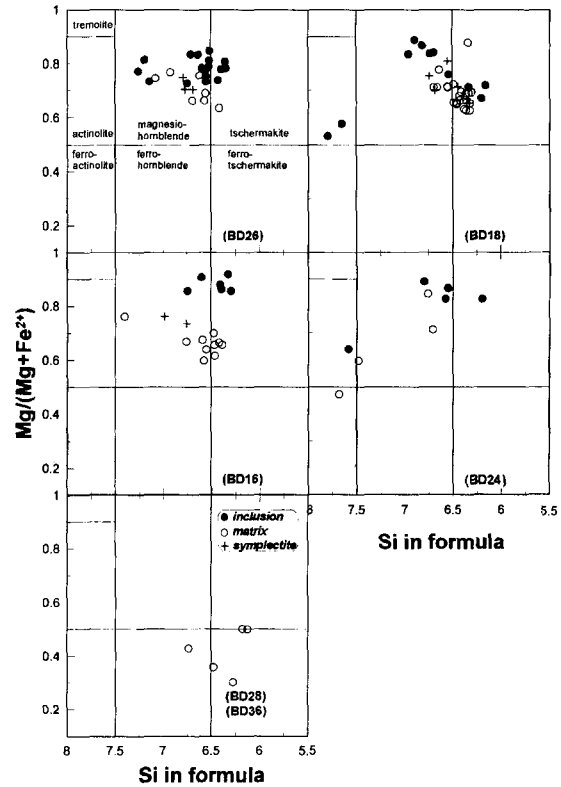


Fig. 6. The compositions of amphiboles in the study area are plotted in Si vs.  $X_{Mg}$ .

기질 각섬석의 일부가 양기적으로 나타난다. 이들 양기석은 후퇴변성작용의 최후기에 형성된 것으로 생각된다. 석류석-백립암과 사문암 사이에 나타나는 각섬석으로 이루어진 부분의 각섬석은  $X_{Mg}$  성분이 매우 높은 첼마카이트이며 석류석 화강편마암내에 나타나는 각섬석은 철질 첼마카이트이다.

**사장석**

석류석내에 각섬석과 함께 포획물로 나타나는 사장석은 두 종류의 성분을 보여준다. 26번 시료에서는  $X_{An}$ 이 0.01-0.04인 사장석과  $X_{An}$ 이 0.40-0.59인 사장석이 나타난다(Fig. 7, Table 4). 드물게  $X_{An}$ 이 0.26-0.27인 사장석이 나타나기도 한다. 16번 시료에서는  $X_{An}$ 이 0.02-0.08인 사장석과  $X_{An}$ 이 0.32-0.47인 사장석이 함께 나타난다. 하지만 이 두 성분 중 어느 성분이 안정된 성분인지 확인하기가 어렵다. 26시료에서 기질에 나타나는 사장석의  $X_{An}$ 은 대부분 0.65-0.76이다. 이에 반해 후퇴변성작용을 강하게 받은 부분에서는  $X_{An}$ 이 0.1-0.15인 사장석과 K-장석이 함께 나타나며 이들은 후퇴변



Table 2. Representative compositions of clinopyroxenes in the study area.

	BD26					BD16			BD18			
	I (C)	I (R)	I	M	M	I	M	M	I	I	M	M
SiO <sub>2</sub>	50.13	51.96	51.64	52.96	53.17	52.10	51.23	52.68	53.41	53.18	52.63	52.12
TiO <sub>2</sub>	0.63	0.39	0.65	0.17	0.32	0.38	0.51	0.14	0.00	0.34	0.33	0.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.86	4.27	5.90	0.98	3.36	5.01	3.69	2.72	3.64	3.66	2.63	3.09
FeO*	5.03	5.57	4.71	10.29	6.07	4.25	7.92	7.61	5.43	5.14	7.68	7.58
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.14	0.00	0.28	0.10	0.08	0.00	0.30	0.01	0.15	0.00	0.03
MnO	0.01	0.00	0.18	0.33	0.01	0.10	0.33	0.06	0.06	0.00	0.11	0.30
MgO	12.81	13.83	13.36	13.58	13.32	13.85	13.23	13.40	14.01	13.74	13.59	13.58
CaO	22.59	22.70	22.70	22.56	23.16	22.21	21.69	22.83	22.18	22.46	23.10	23.20
Na <sub>2</sub> O	0.90	0.58	1.04	0.16	0.82	1.05	0.73	0.44	1.38	1.47	0.48	0.74
Total	99.02	99.44	100.18	101.31	100.33	99.03	99.33	100.18	100.12	100.14	100.55	100.76
Si	1.86	1.92	1.89	1.96	1.96	1.92	1.91	1.95	1.95	1.94	1.94	1.91
Al(IV)	0.14	0.08	0.11	0.04	0.05	0.08	0.09	0.05	0.05	0.06	0.06	0.09
Al(VI)	0.16	0.11	0.14	0.00	0.10	0.14	0.07	0.07	0.11	0.10	0.06	0.05
Ti	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Cr	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.01	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.04	0.00	0.04	0.04	0.02	0.09
Fe <sup>2+</sup>	0.14	0.17	0.14	0.29	0.19	0.13	0.21	0.24	0.12	0.12	0.22	0.15
Mg	0.71	0.76	0.73	0.75	0.73	0.76	0.74	0.74	0.76	0.75	0.75	0.74
Mn	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Ca	0.90	0.90	0.89	0.90	0.91	0.88	0.87	0.91	0.87	0.88	0.91	0.91
Na	0.07	0.04	0.07	0.01	0.06	0.08	0.05	0.03	0.10	0.11	0.03	0.05
Sum	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
X <sub>Mg</sub>	0.83	0.82	0.84	0.72	0.80	0.85	0.78	0.76	0.86	0.86	0.77	0.83
X <sub>Jd+Ac</sub>	0.07	0.04	0.08	0.01	0.06	0.08	0.06	0.03	0.10	0.11	0.04	0.05

X<sub>Mg</sub>=Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>), X<sub>Jd+Ac</sub>=Na/(Na+Ca), Jd=Jadeite, Ac= Acmite, I=inclusion, M=matrix  
Same abbreviations in Table1 are used.

성작용 최후기에 양기석과 함께 만들어진 것으로 예상된다. 16번 시료에서 기질에 나타나는 사장석의 X<sub>An</sub>은 0.37-0.79로 매우 넓은 범위를 보여준다. 하지만 일부 사장석이 중심에서 가장자리로 X<sub>An</sub>이 증가하는 경향을 보여주는 사실과 X<sub>An</sub>이 높은 사장석이 주로 심플렉타이트와 함께 나타나는 것으로 보아 평형상태의 사장석의 X<sub>An</sub>의 범위는 0.50-0.65정도로 생각된다. 18번 시료와 24번 시료의 경우 사장석의 X<sub>An</sub>의 범위가 26번과 18번 시료에 비해 좁으며 포획물내의 사장석과 기질의 사장석이 큰 차이를 보이지 않는다. 그리고 많은 기질 부분에서 X<sub>An</sub>이 0.02-0.11인 사장석과 K-장석이 함께 나타난다. 이는 16번과 24번 시료가 26번과 18번 시료에 비해 후퇴변성작용을 많이 받았음을 지시한다. 석류석 화강편마암 28번과 36번 시료내의 사장석은 포획물과 기질의 성분간에 큰 차이가 없으며 각각 0.25

-0.45과 0.39-0.70의 X<sub>An</sub>성분을 갖는다. 그리고 알바이트 성분의 사장석이 가끔 K-장석이 함께 관찰되며 이들은 후퇴변성작용 최후기에 형성된 것으로 생각된다.

### 변성 진화 과정

백동 지역으로부터 41개의 시료를 채취하여 이들에 대한 자세한 변성암석학적 연구와 변성작용시의 온도-압력 조건을 추정하였다. 석류석 백립암에 대한 자세한 연구를 통하여 3 단계의 변성작용이 인지되었다. 첫 번째 변성단계는 석류석안에 포획된 광물들로부터 추정되는 석류석 + 나트륨질 휘석 + 각섬석 + 사장석 + 티타나이트 광물군에 의해 지시되며 이 광물군은 에클로자이트상-고압백립암상-각섬암상 점이대를 지시한다. 티타나이트 포획물 중심부에 나타나는 금홍석은 석류

Table 3. Representative compositions of amphiboles in the study area.

	BD26					BD16				BD18			
	ECI	I	ECM	M	S	ECI	I	M	S	ECI	I	M	S
SiO <sub>2</sub>	45.61	47.36	50.51	44.78	45.83	47.84	44.82	45.84	48.87	49.14	42.25	44.18	43.32
TiO <sub>2</sub>	1.12	0.77	0.63	1.17	0.96	0.67	1.19	0.98	0.66	0.87	1.15	1.05	1.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.89	10.88	5.55	10.88	10.32	11.08	14.10	10.02	7.95	8.88	14.01	11.97	13.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.16	0.16	0.01	0.30	0.04	0.29	0.00	0.09	0.67	0.00	0.08	0.07	0.13
FeO*	8.51	9.42	13.03	15.46	15.03	8.09	9.05	13.51	12.93	8.14	14.83	15.23	14.86
MnO	0.00	0.15	0.16	0.27	0.06	0.00	0.09	0.38	0.19	0.25	0.34	0.27	0.07
MgO	12.71	15.30	15.22	11.23	11.88	15.92	14.79	12.10	13.90	17.09	11.35	11.33	11.13
CaO	15.03	11.96	11.15	10.99	10.87	12.11	11.40	11.60	11.31	11.86	11.35	11.46	11.32
Na <sub>2</sub> O	1.78	1.56	1.12	2.02	1.66	1.55	1.69	1.61	1.40	1.86	2.20	2.17	2.07
K <sub>2</sub> O	0.06	0.19	0.05	0.07	0.11	0.00	0.15	0.13	0.02	0.00	0.19	0.17	0.11
Total	97.87	97.75	97.43	97.17	96.76	97.55	97.28	96.26	97.90	98.11	97.75	97.90	97.22
Si	6.75	6.72	7.20	6.57	6.69	6.75	6.33	6.76	6.99	6.89	6.15	6.46	6.35
Al(IV)	1.25	1.29	0.80	1.43	1.31	1.25	1.67	1.24	1.02	1.11	1.85	1.55	1.65
Al(VI)	1.00	0.53	0.13	0.45	0.46	0.59	0.68	0.51	0.32	0.35	0.55	0.51	0.60
Ti	0.13	0.08	0.07	0.13	0.11	0.07	0.13	0.11	0.07	0.09	0.13	0.12	0.13
Cr	0.02	0.02	0.00	0.04	0.01	0.03	0.00	0.01	0.08	0.00	0.01	0.01	0.02
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.48	0.82	0.65	0.74	0.40	0.80	0.35	0.62	0.51	0.84	0.56	0.62
Fe <sup>2+</sup>	1.05	0.64	0.73	1.25	1.09	0.56	0.27	1.32	0.93	0.45	0.97	1.30	1.20
Mg	2.81	3.23	3.23	2.46	2.59	3.35	3.12	2.66	2.96	3.57	2.46	2.47	2.43
Mn	0.00	0.02	0.02	0.03	0.01	0.00	0.01	0.05	0.02	0.03	0.04	0.03	0.01
Ca(M4)	2.00	1.82	1.70	1.73	1.70	1.83	1.73	1.83	1.73	1.78	1.77	1.79	1.78
Na(M4)	0.00	0.18	0.30	0.27	0.30	0.17	0.27	0.17	0.27	0.22	0.23	0.21	0.22
Na(A)	0.51	0.25	0.01	0.30	0.17	0.26	0.19	0.29	0.12	0.29	0.39	0.41	0.37
K	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.04	0.03	0.02
sum	15.52	15.28	15.02	15.32	15.19	15.25	15.22	15.32	15.13	15.29	15.43	15.44	15.39
X <sub>Mg</sub>	0.73	0.83	0.81	0.66	0.70	0.86	0.92	0.67	0.76	0.89	0.72	0.65	0.67

ECI=amphibole exsolution in cpx inclusion, ECM=amphibole exsolution in matrix cpx, S=symplectite. Same abbreviations in Tables 1 and 2 are used.

석 백립암이 에클로자이트상-고압백립암상-각섬암상 점 이대에 해당하는 변성작용을 받기 전에 에클로자이트 상의 변성작용을 받았을 가능성을 지시한다. 두 번째 변성단계는 기질에 나타나는 광물군인 석류석 + 휘석 + 각섬석 + 사장석에 의해 정의되며 이 광물군은 고압 백립암상-각섬암상의 점이대를 지시한다. 세 번째 변성단계는 석류석 주변에 형성된 심플렉타이트내의 광물군인 각섬석 + 사장석 ± 석류석으로 지시되면 이 광물군은 각섬암상을 지시한다.

첫 번째 변성시기의 온도-압력조건은 Ellis and Green (1979)과 Powell and Holland(1985)이 제시한 석류석-휘석 지온계와 Macarthy and Patino(1998)이 제시한 Ca-첼카마이트 휘석-사장석-석영의 지압계를 이용하여 계

산하였으며 계산된 온도-압력 조건은 690-780°C, 11.8-15.9 kb이다. 두 번째와 세 번째 변성단계의 변성 온도-압력 조건 추정을 위하여 Graham and Powell (1984)과 Perchuk *et al.*(1985)이 제안한 석류석-각섬석 지온계와 Kohn and Spear(1990)이 제안한 석류석-각섬석-사장석-석영 지압계를 사용하였다. 앞에서 언급되었듯이 각 석류석들은 물론 석류석 최외각부는 각기 다른 정도의 심플렉타이트화 작용을 받았으며 그 결과 석류석 최외각부로부터 서로 다른 성분이 인지된다. 두 번째 단계의 온도-압력 조건은 심플렉타이트를 거의 받지 않은 석류석 주변부로부터 계산되었으며 계산된 온도-압력 조건은 660-750°C, 8.2-8.8 kb이다(Table 5). 심플렉타이트 작용이 강하게 일어난 부분의 석류석으

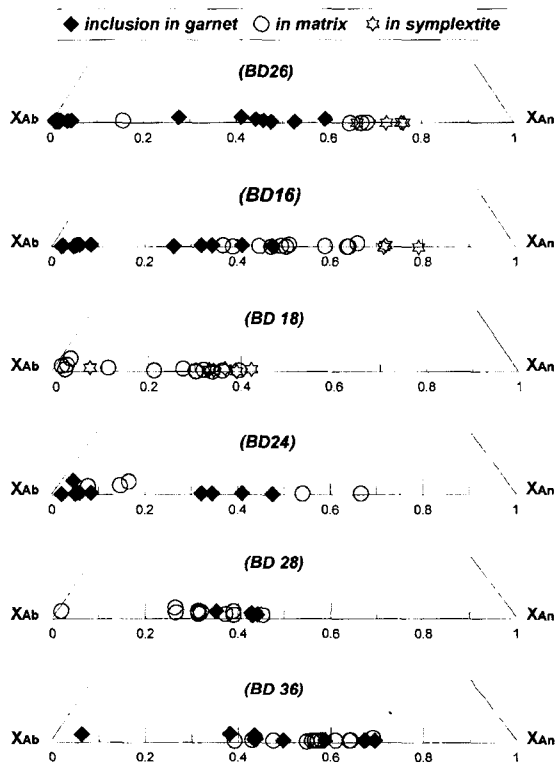


Fig. 7.  $X_{An} - X_{Ab} - X_{Or}$  diagram showing the compositions of plagioclase from garnet granulite and garnet granitic gneiss in the study area.

로부터 구해진 세 번째 변성작용의 온도-압력 조건은 490-610°C, 4.0-6.3 kb이다. 이들 계산된 세 변성단계의 온도-압력 조건은 광물군으로부터 예상되는 변성상과 잘 일치한다. 계산된 온도-압력 조건과 광물군은 석류석 백립암이 에클로자이트상-고압백립암상-각섬암상 점이대의 변성작용을 받은 후 고압백립암상-각섬암상 점이대를 거쳐 각섬암상으로 후퇴변성작용을 받았음을 지시한다(Fig. 8).

석류석 화강편마암의 변성조건은 Perchuk and Lavrent'eva(1981)과 Holdway *et al.*(1997)에 의해 제시된 석류석-흑운모 지온계와 Hoish(1990)가 제안한 석류석-흑운모-사장석-석영 지압계를 이용하여 계산하였다. 28번 시료내 석류석 중심부와 포획물로부터 605-805°C, 10.7-16.0 kb의 변성 온도-압력 조건을 얻었으며 후퇴변성작용을 강하게 받은 것으로 생각되는 36번 시료에서는 석류석 중심부와 포획물로부터는 640-815°C, 10.7-13.5 kb의 변성 온도-압력 조건이 그리고 석류석 가장자리로부터는 575-680°C, 5.4-7.0 kb의 변성 온도-

압력 조건이 계산되었다. 이는 사문암화된 초염기성암 주변 압석인 석류석 화강편마암이 초염기성암내의 변성열기성암인 석류석 백립암과 유사한 변성진화과정을 경험하였음을 지시한다.

### 변성연대와 판구조 환경

석류석-전암 Sm-Nd 연령측정을 위하여 텅스텐 카바이드 불필을 이용하여 전암 분말 시료가 제작되었으며, 실체 현미경을 통하여 순수한 석류석이 분리되었다. Sm-Nd 동위원소 분석을 위하여 시료 약 100 mg에  $^{149}\text{Sm}$ - $^{150}\text{Nd}$  스파이크를 넣은 후 혼합산(HF:HNO<sub>3</sub>:HClO<sub>4</sub>=4:1:1)으로 용해하였다. 양이온 교환수지(Dowex AG 50W-X8, H<sup>+</sup> form, 200-400#)를 이용하여 Rb, Sr 그리고 희토류원소를 단계분리한 후 HDEHP(Hexyl di-ethyl hydrogen phosphate)을 입힌 테플론 분말을 이용하여 Sm과 Nd를 분리하였다. 동위원소 분석은 대전 기초과학지원연구원의 열 이온화 질량분석기(VG54-30)를 이용하여 수행되었다. 분석된  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 은  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 로 동위원소 분별효과를 보정하면서 역동모드(dynamic mode)로 측정하였고 그 오차는 평균표준오차의 2σ값으로 보고하였다. 반복측정에 의한  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 과  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 의 실험오차는 각각 0.5%와 1% 미만이었으며, 분석시 Nd의 배경 값은 각각 1 ng 미만이었다. 함께 측정된 La Jolla 표준시료의 평균값은  $0.511844 \pm 0.000005(2\sigma, N = 17)$ 이다. 연대계산에 사용된  $^{147}\text{Sm}$ 의 붕괴상수는  $6.54 \times 10^{-12}/\text{yr}$ (Faure, 1986)이고, 계산은 Ludwig(1994)의 ISOPLLOT 프로그램을 사용하였다.

백동지역의 변성연대를 구하기 위해 두 석류석 백립암 시료에 대해 석류석-전암 Sm-Nd 동시선 연령을 구하였다. 동일 시료 내에서 석류석의  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 은 전암의 것에 비해 충분히 높은 값을 보이며 두 개의 석류석 백립암으로부터 계산된 전암-석류석 연령은  $297.9 \pm 5.7(2\sigma)$  Ma 그리고  $268.7 \pm 3.3(2\sigma)$  Ma이다(Table 6). 석류석 백립암에서 인지된 세 단계의 변성조건과 석류석의 Sm-Nd 폐쇄온도(700-750°C: Hensen and Zhou, 1995)를 함께 고려할 때 이들 변성연대는 에클로자이트상-고압백립암상-각섬암상 점이대에 해당하는 첫 번째 변성작용시기 혹은 고압백립암상-각섬암상 점이대에 해당하는 2번째 변성작용시기를 지시할 것이다. 한편, 전암의 두 동위원소 자료로부터 계산된 전암의 연령은 신빙도는 떨어지지만 약 408 Ma로 후기 사일루리아기 혹은 초기 데본기의 시기를 지시한다. 적어도 페름기 이전에 형성된 현무암질 암석이 페름기에

Table 4. Representative compositions of feldspars in the study area.

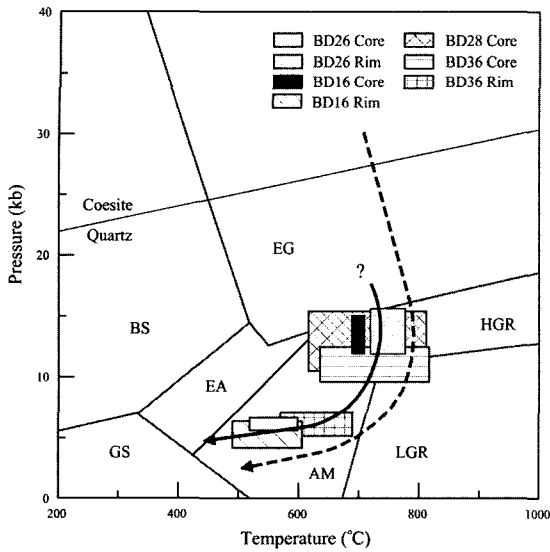
	BD26						BD28						BD16						BD18					
	I	I	M	S	I	M	I	M(C)	M(R)	M	I	M(C)	M(R)	S	I	I	I	M(C)	M(R)	S	M	M	M	S
SiO <sub>2</sub>	68.01	56.83	50.72	50.74	57.46	61.22	60.31	64.09	59.62	55.90	67.52	56.62	55.17	49.65	60.00	63.17	67.80	58.42						
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.04	0.00	0.05	0.01	0.06	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.13	0.00	0.00	0.08						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.62	27.24	31.20	30.40	26.44	23.95	24.48	18.13	24.90	27.51	19.51	27.80	27.27	32.30	24.81	17.81	19.54	26.25						
FeO*	0.16	0.22	0.00	0.11	0.27	0.14	0.09	0.17	0.10	0.23	0.07	0.02	0.04	0.04	0.18	0.22	0.00	0.31						
MnO	0.04	0.00	0.16	0.16	0.08	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02	0.07	0.22	0.01	0.00	0.11	0.00						
MgO	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
CaO	0.26	9.14	13.69	13.65	8.83	5.19	6.33	0.00	6.70	9.80	0.42	9.96	10.22	14.46	6.38	0.00	0.45	8.13						
Na <sub>2</sub> O	11.54	6.37	3.71	3.87	6.45	8.29	7.79	0.12	7.81	5.97	11.25	6.14	5.78	3.09	7.94	0.03	10.84	6.93						
K <sub>2</sub> O	0.08	0.15	0.00	0.00	0.12	0.47	0.35	17.15	0.07	0.03	0.02	0.00	0.03	0.08	0.01	17.25	0.31	0.00						
Total	99.71	100.00	99.48	98.98	99.66	99.32	99.37	99.72	99.20	99.45	98.78	100.56	98.58	99.90	99.46	98.48	99.05	100.12						
Si	11.93	10.21	2.32	2.33	2.59	2.74	2.70	2.99	10.71	10.11	11.94	2.53	2.52	2.27	2.69	2.99	2.99	2.61						
Al	4.05	5.76	1.68	1.65	1.40	1.26	1.29	1.00	5.27	5.86	4.06	1.46	1.47	1.74	1.31	0.99	1.02	1.38						
Ti	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
Fe <sup>2+</sup>	0.02	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01						
Mn	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00						
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
Ca	0.05	1.76	0.67	0.67	0.43	0.25	0.30	0.00	1.29	1.90	0.08	0.48	0.50	0.71	0.31	0.00	0.02	0.39						
Na	3.93	2.22	0.33	0.35	0.56	0.72	0.68	0.01	2.72	2.09	3.86	0.53	0.51	0.27	0.69	0.00	0.93	0.60						
K	0.02	0.04	0.00	0.00	0.01	0.03	0.02	1.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	1.04	0.02	0.00						
sum	20.01	20.02	5.00	5.01	5.00	5.00	5.00	5.03	20.02	20.00	19.95	5.00	5.00	5.00	5.01	5.03	4.98	4.99						
X <sub>An</sub>	0.01	0.44	0.67	0.66	0.43	0.25	0.30	0.00	0.32	0.47	0.02	0.47	0.49	0.72	0.31	0.00	0.02	0.39						
X <sub>Ab</sub>	0.98	0.55	0.33	0.34	0.57	0.72	0.68	0.01	0.68	0.52	0.98	0.53	0.50	0.28	0.69	0.00	0.96	0.61						
X <sub>Or</sub>	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.02	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	1.00	0.02	0.00						

Same abbreviations in Tables 1, 2 and 3 are used.

Table 5. P-T estimates in the study area.

Sample No.	Grt		Amp						Cpx					Bt	Pl	P(kbar)	T(°C)		
	X <sub>Fe</sub>	X <sub>Alin</sub>	X <sub>Pp</sub>	X <sub>Sps</sub>	X <sub>Grs</sub>	X <sub>TtSi</sub>	X <sub>TtAl</sub>	X <sub>Fe</sub>	X <sub>Nam4</sub>	X <sub>Nam</sub>	X <sub>Nam2</sub>	X <sub>Al(IV)</sub>	X <sub>Al(M1)</sub>	X <sub>Si</sub>	X <sub>Fe</sub>	X <sub>Fe</sub>	X <sub>An</sub>		
BD26	1*	0.628	0.445	0.264	0.011	0.280					0.900	0.108	0.039	0.961	0.185		0.404	11.8~12.1	755~780
	1*	0.575	0.417	0.308	0.011	0.264				0.889	0.142	0.056	0.944	0.149			0.300	15.5~15.9	705~730
	3***	0.687	0.529	0.241	0.022	0.207	0.698	0.302	0.252	0.274	0.196						0.661	5.5~6.3	520~550
	3***	0.687	0.529	0.241	0.022	0.207	0.693	0.307	0.297	0.221	0.256						0.661	5.7~6.2	560~600
BD16	1*	0.548	0.433	0.360	0.009	0.198					0.878	0.139	0.040	0.961	0.147		0.262	14.7~15.0	690~710
	1*	0.548	0.433	0.360	0.009	0.198				0.878	0.139	0.040	0.961	0.147			0.475	11.8~12.1	690~710
	2**	0.534	0.427	0.373	0.010	0.190	0.620	0.380	0.300	0.222	0.297						0.493	8.2~8.6	730~750
	2**	0.660	0.509	0.263	0.034	0.194	0.639	0.361	0.361	0.176	0.429						0.367	8.5~8.8	660~685
	3***	0.727	0.528	0.198	0.046	0.228	0.691	0.309	0.331	0.166	0.294						0.655	5.8~6.2	555~610
	3***	0.701	0.550	0.235	0.034	0.182	0.746	0.254	0.238	0.268	0.120						0.791	4.0~4.6	490~510
BD28	core	0.886	0.573	0.073	0.013	0.340											0.595	10.7~14	615~755
	core	0.873	0.575	0.084	0.015	0.326											0.623	12~15.4	675~805
	core	0.907	0.612	0.063	0.025	0.301											0.619	12.4~16	605~800
BD36	core	0.727	0.594	0.223	0.015	0.168											0.406	10.7~13.5	685~815
	core	0.727	0.594	0.223	0.015	0.168											0.363	10.7~13.5	640~760
	rim	0.822	0.716	0.155	0.055	0.074											0.445	5.5~6.2	580~680
	rim	0.822	0.716	0.155	0.055	0.074											0.431	5.4~7.0	575~660

1\*, 1st metamorphism; 2\*\*, 2nd metamorphism; 3\*\*\*, 3rd metamorphism



**Fig. 8. Metamorphic conditions and P-T paths estimated from garnet granulite and garnet granitic gneiss.** Solid and dotted lines, respectively, represent the P-T path of the metamorphic rocks in the study area and the P-T path of eclogites from Taohong in the Sulu Belt (Yao *et al.*, 2000). The petrogenetic grid made by Oh and Liou (1998) is used.

고압변성작용을 경험하였음을 지시한다. 하지만 주변 변성작용시기와 변성열기성암의 관입시기를 정확하게 이해하기 위해서는 폐쇄온도가 서로 다른 여러 연령측정 방법들을 이용하여 좀 더 정밀하게 조사하는 것이 필요하다.

석류석 백립암의 전암 및 희유원소를 캐나다의 ACT-LABS에서 ICP-AES(Termo Jarrel-Ash ENVIRO II) 그리고 ICP-MS(Perkin Elmer SCIEX ELAN 6000)를 이용하여 분석하였다(Table 7). Pearce and Cann (1996)이 제시한  $Ti/100-Zr-Y*3$  도표에 도시된 석류석

백립암의 희유원소 분석치는 석류석 백립암의 판구조적 환경이 호상열도임을 지시한다(Fig. 9). 다비-수루 충돌대내의 코에사이트를 함유한 많은 에클로자이트가 호상열도의 판구조적 환경에서 만들어짐(Zhai and Cong, 1996)을 고려할 때 두 지역의 판구조 환경이 유사함을 알 수 있다.

### 토 의

백동지역은 산둥반도의 수루 충돌대와 다음과 같은 유사성을 갖고 있다. 첫째 변성열기성암 부딘을 포함하는 초염기성암이 700-820 Ma의 관입연령을 갖는 화강편마암내에 나타난다. 둘째 후퇴변성작용의 온도-압력곡선이 에클로자이트상-고압백립암상-각섬암상 점이대와 고압백립암상-각섬암상 점이대를 지나 각섬암상대를 지나간다. 셋째, 백동지역 변성열기성암내의 광물의 화학성분 변화가 수루충돌대내의 웨이하이 (Weihai) 지역에 나타나는 후퇴변성작용을 강하게 받은 에클로자이트내 광물성분의 변화와 유사하다. 웨이하이 에클로자이트내 대부분의 휘석은 나트륨질 오자이트 ( $X_{Jd+Ac} = 0.02 - 0.25$ )이며 석류석내 휘석 포획물이 기질의 휘석에 비해 Na 함량이 높다(Banno, 2000). 그리고 웨이하이 에클로자이트내 석류석의 성분은 중심부에 비해 가장자리가 높은  $X_{Fe}$  값을 갖는다. 앞에서 언급되었듯이 백동지역의 석류석 백립암에서도  $X_{Jd+Ac}$ 가 0.04-0.11에 해당하는 휘석들이 나타나며 석류석 가장자리가 중심부에 비해 높은  $X_{Fe}$  값을 갖는다. 넷째로 백동지역의 변성열기성암과 수루충돌대의 많은 변성열기성암의 판구조적으로 호상열도에 해당한다. 위의 두 지역간의 유사성은 백동-홍성지역이 수루 충돌대의 연장선일 가능성을 지시한다. 하지만 본 연구와 조문섭 (2001)의 연구에서 나타난 백동-홍성지역의 변성시기 범위는 235-297 Ma로서 다비-수루 충돌대의 초고압 변

**Table 6. Sm-Nd data from garnet granulite in Baekdong area.**

sample	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}Sm/^{144}Nd^*$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	$2\sigma_m$	Age (Ma, $2\sigma$ )
Sample BD9805-16						
whole rock	1.966	4.600	0.2586	0.512799	0.000028	$297.9 \pm 5.7$
garnet	1.072	0.506	1.2816	0.514794	0.000026	
Sample BD9805-26						
whole rock	1.432	2.181	0.3973	0.513170	0.000038	$268.7 \pm 3.3$
garnet	0.739	0.164	2.7264	0.517266	0.000032	

\*Uncertainty is <0.5%  
Normalized to  $^{146}Nd/^{144}Nd=0.7219$   
The measured ratio for the La Jolla Nd standard was  $0.511844 \pm 0.000005$

Table 7. Bulk chemical compositions of garnet granulite in Baekdong area.

	BD2	BD3	BD4	BD24	BD18	BD17	BD16
SiO <sub>2</sub>	47.83	48.95	49.32	49.73	48.83	48.92	46.96
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.22	14.29	13.86	14.60	13.67	13.43	13.79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	12.26	11.97	11.91	12.00	11.68	10.97	14.69
MnO	0.19	0.20	0.18	0.21	0.20	0.22	0.23
MgO	9.82	9.45	9.92	8.71	9.94	8.52	9.72
CaO	10.80	10.85	10.29	8.00	10.64	12.24	9.85
Na <sub>2</sub> O	1.33	1.67	2.09	2.13	2.18	2.11	1.90
K <sub>2</sub> O	1.26	1.65	1.23	2.08	0.59	0.99	0.86
TiO <sub>2</sub>	0.86	0.95	0.78	0.61	0.80	1.02	1.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.04	0.06
LOI	1.60	0.90	1.25	1.17	1.58	0.87	0.90
Total	100.23	100.92	100.87	99.26	100.16	99.33	99.98
Ba ppm	37.00	193.00	49.00	94.00	72.00	41.00	83.00
Sr	290.00	151.00	293.00	197.00	201.00	355.00	233.00
Y	22.00	23.00	22.00	29.00	22.00	28.00	29.00
Sc	48.00	49.00	47.00	44.00	43.20	43.10	52.00
Zr	45.00	48.00	34.00	23.00	32.00	42.00	54.00
Be	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V	272.00	290.00	263.00	240.00	273.00	295.00	369.00
Cr	499.00	394.00	470.00	389.00	434.00	284.00	156.00
Co	63.00	47.00	53.00	65.00	63.00	77.00	80.00
Ni	162.00	128.00	164.00	171.00	174.00	77.00	128.00
Cu	11.00	23.00	92.00	147.00	81.00	138.00	92.00
Zn	64.00	47.00	94.00	94.00	82.00	55.00	108.00
As	18.00	5.00	16.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Rb	67.00	66.00	54.00	69.00	36.00	28.00	38.00
Mo	1.40	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
Ag	2.30	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
Sb	3.90	0.80	2.50	0.00	0.00	0.30	0.00
Cs	4.90	0.70	2.00	0.00	1.40	0.00	1.60
La	0.90	1.00	1.40	1.70	2.40	1.80	0.80
Ce	3.30	3.30	4.20	8.00	10.00	8.00	5.00
Nd	4.70	4.60	4.90	0.00	5.00	11.00	0.00
Sm	2.30	2.50	2.30	2.60	2.40	2.70	1.90
Eu	0.80	0.89	0.74	0.80	0.60	1.00	0.50
Yb	2.40	2.50	2.70	3.40	2.30	3.10	3.20
Lu	0.34	0.34	0.38	0.52	0.34	0.46	0.47
Hf	1.70	1.50	1.20	0.00	1.20	0.00	0.00
Ta	0.13	0.23	0.16	303.00	231.00	956.00	479.00
W	2.50	3.10	1.20	0.00	0.00	3.00	1.00
Pb	14.00	17.00	13.00	9.00	4.00	0.00	0.00
Bi	2.20	1.10	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00
Th	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
U	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
Tb				0.70	0.00	0.60	0.00
S				0.02	0.00	0.00	0.00

\*Total iron as Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

성시기인 208-245 Ma (Li *et al.*, 1993; Ye *et al.*, 2000)보다 오래되었다. 이는 남중국과 북중국의 충돌이 중국보다 한반도 쪽에서부터 일어났을 가능성을 지시한다. 이러한 제안은 Zhao and Coe(1987)이 고지자기 자료를 이용하여 남중국과 북중국 충돌이 동쪽에서부터 일어났음을 제시한 연구결과와 잘 일치한다.

## 결론

백동지역에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 백동지역은 석류석 백립암에 대한 자세한 연구를 통하여 3 단계의 변성작용이 인지되었다. 첫 번째 변

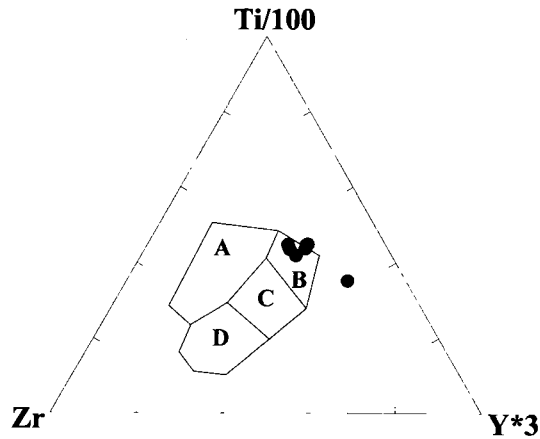


Fig. 9. Ti/100-Zr-3\*Y diagrams for garnet granulite in Baekdong area. A, Within-plate basalts; B, Island-arc tholeiites; C, Mid-Ocean Ridge Basalts; D, Calc-alkali basalts.

성단계는 석류석안에 포획된 광물들로부터 추정되는 석류석 + 나트륨질 휘석 + 각섬석 + 사장석 + 티타나이트 광물군에 의해 지시되며 이 광물군은 에클로자이트상-고압백립암상-각섬암상 점이대를 지시한다. 티타나이트 포획물 중심부에 나타나는 금홍석은 석류석 백립암이 에클로자이트상-고압백립암상-각섬암상 점이대에 해당하는 변성작용을 받기 전에 에클로자이트상의 고압변성작용을 받았을 가능성을 지시한다. 두 번째 변성단계는 기질에 나타나는 광물군인 석류석 + 휘석 + 각섬석 + 사장석에 의해 정의되며 이 광물군은 고압백립암상-각섬암상 점이대를 지시한다. 세 번째 변성단계는 석류석 주변에 형성된 심플렉타이트내의 광물군인 각섬석 + 사장석 ± 석류석으로 지시되며 이 광물군은 각섬암상을 지시한다.

2. 첫 번째 변성시기의 온도-압력 조건은 690-780°C, 11.8-15.9 kb이며 두 번째와 세 번째 변성단계의 변성 온도-압력 조건은 각각 660-750°C, 8.2-8.8 kb과 490-610°C, 4.0-6.3 kb이다. 이들 계산된 세 변성단계의 온도-압력 조건은 광물군으로부터 예상되는 변성상과 잘 일치한다. 계산된 온도-압력 조건과 광물군은 석류석 백립암이 에클로자이트상-고압백립암상-각섬암상 점이대의 변성작용을 받은 후 고압백립암상-각섬암상 점이대를 거쳐 각섬암상으로 후변성작용을 받았음을 지시한다. 두 개의 석류석 화강편마암의 석류석 중심부와 포획물로부터 각각 605-805°C, 10.7-16.0 kb 그리고 640-815°C, 10.7-13.5 kb의 변성조건이 계산되었다. 그리고 석류석 가장자리로부터 추정된 변성 온도-압력

조건은 575-680°C, 5.4-7.0 kb이다. 이는 사문암화된 초염기성암 주변 암석인 화강편마암이 초염기성암내의 변성염기성암인 석류석 백립암과 유사한 변성진화과정을 경험하였음을 지시한다.

3. 두 개의 석류석 각섬암으로부터 계산된 Sm-Nd 전암-석류석 연령은  $297.9 \pm 5.7(2\sigma)$  Ma 그리고  $268.7 \pm 3.3(2\sigma)$  Ma를 지시한다. 석류석 백립암에서 인지된 세 단계의 변성조건과 석류석의 Sm-Nd 폐쇄온도(700-750°C; Hensen and Zhou, 1995)를 함께 고려할 때 이들 변성연대는 에클로자이트상-고압백립암상-각섬암상 점이대에 해당하는 첫 번째 변성작용시기 혹은 고압백립암상-각섬암상 점이대에 해당하는 2번째 변성작용시기를 지시할 것이다.

4. 석류석 백립암의 희유원소 분석치는 석류석 백립암의 판구조적 환경이 호상열도임을 지시하며 수루-다비 충돌대내의 코에사이트를 함유한 많은 에클로자이트가 호상열도의 판구조적 환경에서 만들어짐(Zhai and Cong, 1996)을 고려할 때 두 지역의 판구조 환경이 유사함을 알 수 있다.

5. 백동지역과 중국 산둥반도의 수루 충돌대는 서로 유사한 지질, 변성진화과정, 광물화학 그리고 지구조환경을 가지며 이는 경기육괴 남서부인 백동-홍성지역이 산둥반도의 수루 충돌대의 연장선일 가능성을 높게 지시한다. 그리고 백동-홍성지역의 변성시기 범위는 235-297 Ma로서 다비-수루 충돌대의 초고압 변성시기인 208-245 Ma(Li *et al.*, 1993; Ye *et al.*, 2000)보다 오래되었다. 이는 남중국과 북중국의 충돌이 중국보다 한반도 쪽에서 먼저 일어났을 가능성을 지시한다.

## 사 사

본 연구는 1999년 한국학술진흥재단 기초과학연구지원(1999-015-DP0420)에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드린다. 본 연구를 위하여 연령측정과 전자현미 분석에 도움을 준 전은영 박사, 기초과학지원연구원의 정창식 박사와 이석훈 박사에게 감사한다. 또한 본 논문을 위한 시료채취와 광물분리에 도움을 준 김성원 박사와 진운영과 이덕수 학생들에게도 감사한다.

## 참고문헌

- 김광호, 정봉일, 1989, A study on the paleomagnetism of sothern Korea since Permian. *광산지질*, 19, 1, 67-83.  
 김서운, 유환수, 우영균, 1976, 한국지질도 (1:50,000), 공주도폭 및 설명서. 국립지질조사소.



- 우영균, 최석원, 박기화, 1991, 충남 예산지구 활석광산의 성인에 대한 연구. 광산지질, 24, 363-378.
- 윤상필, 문희수, 송윤구, 1994, 조염기성암 기원의 평안 및 대흥활석광산의 성인과 광물화학. 자원환경지질, 27, 131-145.
- 이종혁, 김성수, 1963, 한국지질도 (1:50,000), 홍성도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 33p.
- 조문섭, 2001, 이온현미분석기를 사용한 남서부 경기육괴 변성암류의 U-Pb 저어콘연대: 남중국지괴와의 대비 가능성. 한국광물학회 · 한국암석학회 공동학술발표회, 141.
- 조문섭, 권성택, 이진한, Eizo Nakamura, 1995, 연천-전곡 지역에 분포하는 임진강대의 고압 각섬암. 한국암석학회지, 4, 1, 1-19.
- 임상호, 이민성, 1963, 한국지질도 (1:50,000), 홍성도폭 및 한국지질도, 국립지질조사서, 18p.
- Banno, S., Enami, M., Hirajima, T., Ishiwatari, A. and Wang Q.C., 2000, Decompression P-T path of coesite eclogite to granulite from Weihai eastern China. Lithos, 52, 97-108.
- Chang, E.Z., 1996, Collisional orogene between north and south China and its eastern extension in the Korean Peninsula. J. SE. Asian Earth Sci., 13, 3-5, 267-277.
- Chang, K., 1997, Okchon nappe in light of isotope dates. Crustal Evolution in Northeast Asia. 4th Korea-China Joint Geology Symposium, 1-4.
- Cheong, C.S., Kwon, S.T. and Park, K.H., 2000, Pb and Nd isotopic constraints on Paleoproterozoic crustal evolution of the northeastern Yeongnam Massif, South Korea. Precambrian Research, 102, 207-220.
- Cluzel, D., Cadet, J.P. and Lapierre, H., 1990, Geodynamics of the Ogcheon Belt (South Korea). Tectonophysics, 183, 41-56.
- Ellis, D.J. and Green, E.H., 1979, An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. Contrib. Mineral. Petrol., 71, 13-22.
- Enami, M., Suzuki, K., Zhai, M.G. and Zheng, X.S., 1993, The chemical Th-U-total Pb isochron ages of Jiaodong and Jiaonan metamorphic rocks in the Shandong Peninsula, eastern China. The Island Arc, 2, 104-113.
- Faure, G., 1986, Principles of isotope geology. John Wiley and Sons, 589p.
- Graham, C.M. and Powell, R., 1984, A garnet-hornblende geothermometer: calibration, testing and application to the Pelona Schist, southern California. J. Metamorph. Geol., 2, 13-21.
- Hensen, B.J. and Zhou, B., 1995, Retention of isotopic memory in garnets partially broken down during an overprinting granulite facies metamorphism: Implications for the Sm-Nd closure temperature. Geology, 23, 225-228.
- Hoisch, T.D., 1990, Empirical calibration of six geobarometers for the mineral assemblage quartz+muscovite+biotite+plagioclase+garnet. Contrib. Mineral. Petrol., 104, 225-234.
- Holdway, M.J., Mukhopadhyay, B., Dyar, M.D., Guidotti, C.V. and Dutrow, B.L., 1997, Garnet-biotite geothermometry revised: New Margules parameters and a natural specimen data set from Maine. Am. Mineral., 82, 582-595.
- Ishizaka, K., Hirajima, T. and Zheng, X.S., 1994, Rb-Sr dating for the Jiaodong gneiss of the Su-Lu ultra-high pressure province, eastern China. The Island Arc, 3, 232-241.
- Kato, T., Enami, A., and Zhai, M., 1997, Ultrahigh-pressure marble and eclogite in the Su-Lu ultrahigh-pressure terrane, eastern China. J. Metamorph. Geol., 15, 169-182.
- Kim, K.H., Lee, J.D. and Choi, M.O., 1992, Carboniferous-Triassic paleomagnetism of South Korea. J. Geomag. Geoelectr., 44, 959-978.
- Kohn, M.J. and Spear, F.S., 1990, Two new geobarometers for garnet amphibolites, with applications to southern Vermont. Am. Mineral., 75, 89-96.
- Li, S., Chen, Y., Ge, N., Liou, D., Zhang, Z., Zhang, Q. and Zhou, D., 1993, Zircon U-Pb ages of eclogite and gneiss from Zingdao area-evidence for Jinning magma episode in Jiaonan Group: Chinese Sci. Bull., 38, 1773-1777 (in Chinese).
- Li, Y.G., Zhai, M.G., Liu, W.J. and Guo, J.H., 1997, Sm-Nd geochronology of the high-pressure basic granulite in Laixi, eastern Shandong: Scientia Geologica Sinica, 32, 1, 283-290.
- Liou, J.G. and Zhang, R.Y., 1995, Occurrence of ultrahigh-pressure talc-bearing assemblages and their tectonic significance. Mineralogical Magazine 59, 93-102.
- Liou J.G. and Zhang R.Y., 1996, Occurrences of intergranular coesite in ultrahigh-P rocks from the Sulu region, eastern China: Implications for lack of fluid during exhumation 81, 1217-1220.
- Liu X., 1993, High-P metamorphic belt in central China and its possible eastward extension to Korea. J. Petrol. Soc. Korea, 2, 1, 9-18.
- Ludwig, K.R., 1994, ISOPLOT a plotting and regression program for radiogenic isotope data. Version 2.71: USGS Open File Report 91, 445.
- Macarthy, T.C. and Patino D.A.E., 1998, Empirical calibration of the silica-Ca-tschermak's-anorthite (SCAn) geobarometer. J. Metamorph. Geol., 16, 675-686.
- Na, K.C., 1992, A study on the metamorphism in the southwestern part of Gyeonggi Massif. J. Petrol. Soc. Korea, 1, 1, 25-33.
- Oh, C.W., Kim, S.W. and Kwon, S.T., 1997, Tectonic interpretation based on  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  amphibole ages from the Ogcheon metamorphic belt, Korea, Eos, Transactions, AGU, 78, 46, pF785.
- Oh, C.W., Liou, J.G., 1998, A petrogenic grid for eclogite and related facies under high-pressure metamorphism. The Island Arc, 7, 36-51.
- Okay, A.I., Xu, S. and Sengor, A.M.C., 1989, Coesite from

- the Dabie Shan eclogites, central China. *European J. Mineral.*, 1, 595-598.
- Okay, A.I. and Sengor, A.M.C., 1992, Evidence for intrac-ontinental thrust-related exhumation of the ultrahigh-pressure rocks in China. *Geology*, 20, 411-414.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R., 1973, Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19, 290-330.
- Powell, R. and Holland, T.J.B., 1985, An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: 3. Applications to geobarometry, worked examples and a computer program. *J. Metamorph. Geol.*, 6, 173-204.
- Perchuk, L.L. and Lavrenteva, I.V., 1981, Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite-garnet-biotite: In: *Kinetics and Equilibrium in Mineral Reactions* (ed. Saxena, S.K.). Springer-Verlag, New York, 199-240.
- Perchuk, L.L., Aranovich, L.Y., Podlesskii, K.K., Lavranteva, I.V., Gerasimov, V.Y., FedKin, V.V., Kitsul, V.I., Karasakov, L.P. and Berdnikov, N.V., 1985, Precambrian granulites of the Aldan shield, eastern Siberia, USSR. *J. Metamorph. Geol.*, 3, 265-310.
- Ree, J.H., Cho, M., Kwon, S.T. and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision melt in South Korea: The Imjingang belt. *Geology*, 24, 12, 1071-1074.
- Song, S.H. Choi, S.G. and Woo, J.G., 1997, Genetic implications of ultramafic rocks from the Bibong area in the Kyeonggi gneiss complex. *Econ. Environ. Geol.*, 30, 477-491.
- Turek, A. and Kim, C.-B., 1996, U-Pb zircon ages for Precambrian rocks in southwestern Ryeongnam and southwestern Gyeonggi massifs, Korea. *Geochem. J.*, 30, 231-249.
- Wang, X., Liou, J.G. and Mao, H.K., 1989, Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China. *J. Geol.*, 17, 1085-1088.
- Wang, X. and Liou, J.G. 1991, Regional ultrahigh-pressure coesite-bearing eclogitic terrane in central China: evidence from country rocks, gneiss, marble, and metapelite. *J. Geol.*, 19, 933-936.
- Wee, S.M. Choi, S.G. and So, C.G., 1994, Preliminary study on ultramafic rocks from the Chungnam Province, Korea. *Econ. Environ. Geol.*, 27, 171-180.
- Woo, Y.K., Choi, S.W. and Park, K.H., 1991, Genesis of talc ore deposits in the Yesan area of Chungnam, Korea. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, 24, 363-378.
- Yao, Y., Ye, K., Liu, J., Cong, B. and Wang Q., 2000, A transitional eclogite- to high pressure granulite-facies overprint on coesite-eclogite at Taohang in the Sulu ultrahigh-pressure terrane, Eastern China. *Lithos*, 52, 109-120.
- Ye, K., Yao, Y., Katayama, I., Cong, B., Wang, Q. and Maruyama, S., 2000, Large areal extent of ultrahigh-pressure metamorphism in the Sulu ultrahigh-pressure terrane of East China: new implications from coesite and omphacite inclusions in zircon of granitic gneiss. *Lithos*, 52, 157-164.
- 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, 810-813.
- Yun, S.P., Moon, H.S. and Song, Y., 1994, Mineralogy and Genesis of the Pyoungan and Daeheung Talc Deposits in Ultramafic Rocks, the Yoogoo Area. *Econ. Environ. Geol.*, 27, 131-145.
- Zhai, M.G. and Cong, B.L., 1996, Prolotectonics of Sulu-Dabieshan metamorphic belt, central and east China: *Sciences in China (Series D)*, 39, 3, 319-320.
- Zhai M.G. and Liu W., 1998, The boundary between Sino-Korea Craton and Yangtze Craton and its extension to the Korean Peninsula, *J. Petrol. Soc. Korea*, 1, 15-26.
- Zhang R.Y., Liou J.G. and Cong, B.L., 1994, Petrogenesis of garnet-bearing ultramafic rocks and associated eclogites in the Su-Lu ultrahigh-P metamorphic terrane, eastern China. *J. Metamorph. Geol.*, 12, 169-186.
- Zhang, R.Y. and Liou, J.G., 1994, Coesite-bearing eclogite in Henan Province, central China: detailed petrography, glaucophane stability and P-T path. *European J. Mineral.*, 6, 217-233.
- Zhang R.Y., Hirajima T., Banno S., Cong B. and Liou J.G., 1995, Petrology of ultrahigh-pressure rocks from the southern Su-Lu region, eastern China. *J. Metamorph. Geol.*, 13, 659-675.
- Zhao, X. and Coe, R.S., 1987, Palaeomagnetic constraints on the collision and rotation of North and South China. *Nature*, 327, 141-144.

---

(2002년 10월 12일 접수, 2002년 11월 2일 채택)