

## 소백산육괴 서남부 지리산지역의 반상변정질 편마암에서 산출되는 백립암질 포획암

송 용 선

부경대학교 환경지질과학과

**요 약** : 소백산육괴 서남부의 지리산지역에 분포된 선캠브리아기 반상변정질 편마암에서 산출된 염기성 백립암질 포획암의 산상과 암석기재적 특징 및 변성진화 과정을 보고한다. 백립암질 포획암은 둥글고 긴 타원체형이며, 길이가 50-100 cm 정도이다. 조립질 입상변정질 조직과 신장된 석영과 흑운모에 의한 염상조직을 보인다. 주 구성 광물은 사방휘석, 석류석, 흑운모, 사장석, 석영, 티탄철석이며 사방각섬석이 후퇴변성 광물로 산출된다. 사방휘석은 대부분 후퇴변성되어 사방각섬석의 주변부로 둘러싸여 있다. 반상변정으로 산출되는 석류석들은 중심부에서 주변부로 감에 따라 파이로프 성분은 감소하고 알만딘 성분은 증가하는 후퇴변성 누대구조를 이루고 있다. 지질온도-압력계로부터 계산된 결과는 초기 변성의 조건은 약 800-850°C, 6 kb 정도이고 후퇴시의 조건은 500°C, 4 kb로 시계방향의 온도-압력 경로를 지시한다. 기 보고된 연대자료와 결부시켜 보면 백립암상의 변성작용이 화강암질 마그마의 정치시기인 21-19억년 보다 전에 일어났으며, 19-17억년 사이에 다시 600-700°C 이상의 고도의 변성작용이 중첩된 후 융기과정에서 냉각에 따라 후퇴된 것으로 추정된다.

**핵심어** : 백립암, 포획암, 소백산육괴, 사방휘석, 석류석, 사방각섬석, 지질온도압력계

### 서 언

백립암변성상의 암석들은 선캠브리아 순상지의 가장 대표적인 암종으로 보통 매우 높은 온도와 다양한 압력, 그리고 흔히 H<sub>2</sub>O 활동도가 낮은 조건하에서 생성되는 것으로 알려져 있다. 또한 하부 대륙지각이 백립암상 변성암들로 구성된 것으로 널리 인정되고 있기 때문에 하부 대륙지각의 조성과의 진화과정을 이해하는데 중요한 역할을 하고 있다.

한반도의 경우 남령육괴를 포함한 북한지역의 선캠브리아 암체들의 대부분이 백립암상 변성작용을 받은 것으로 보고되었다(Glebovitsky *et al.*, 1994). 남한의 경우, 소백산육괴의 서남부에 위치한 지리산 지역의 지질도폭(손치무 외, 1964; 최유구 외, 1966)에 백립암으로 분류된 암체가 기재되어 있지만 이는 암석의 조직에 의해 명명한 것으로, 소량의 석류석과 흑운모를 함유한 석영장석질 편마암이 주이며 백립암상의 특징적인 광물군은 산출되지 않는다(송용선, 1979). 김형식(1970)은 지리산 지역의 중심부에 백립암상 변성암이 넓게 분포하는 것으로 보고하였다. 그러나 이상만(1980)에 의해 소백산 변성대가 상부 앰피블라이트상에서 앰피블라이트상, 그리고 녹립석-앰피블라이트상이 차례로 중첩된 후퇴변성을 거듭해 온 것으로 알려지면서 이후

의 연구들(이상만 외, 1981; 이상만과 김형식, 1984; Lee, *et al.*, 1986; 송용선과 이상만, 1989 등)은 소백산육괴의 최고 변성도를 상부 앰피블라이트상 내지 앰피블라이트상으로 보았다.

한편, 송용선과 류호정(1993)은 지리산편마암체에서 휘석을 함유한 백립암변성상의 광물군을 보고하면서 이 지역의 변성암들이 초기에 백립암상의 변성작용을 받은 것으로 보고한 바 있으며, 최근에 김동연 외(1998)는 이 지역에서 차노카이트질 암석의 분포와 변성특성을 보고하였다. 조운호 외(1996), Lee *et al.*(1997), 권용완 외(1997) 등에 의해 경기육괴에서도 백립암상 변성작용이 널리 보고되면서 고기 한반도의 지체구조적 특징과 지각의 진화과정을 새롭게 해석할 필요성이 제기되고 있다.

이 연구는 소백산육괴의 서남부에 해당되는 지리산 일대에 광범위하게 분포된 반상변정질 편마암내에서 포획암으로 산출된 염기성 백립암의 산상과 암석기재, 광물화학적 특성과 변성조건 및 변성진화과정을 밝히는데 중점을 두었다.

### 광역지질

소백산 육괴의 서남부인 지리산 일대는 주로 선캠브리아 편마암류로 구성되어 있고, 동측에는 남

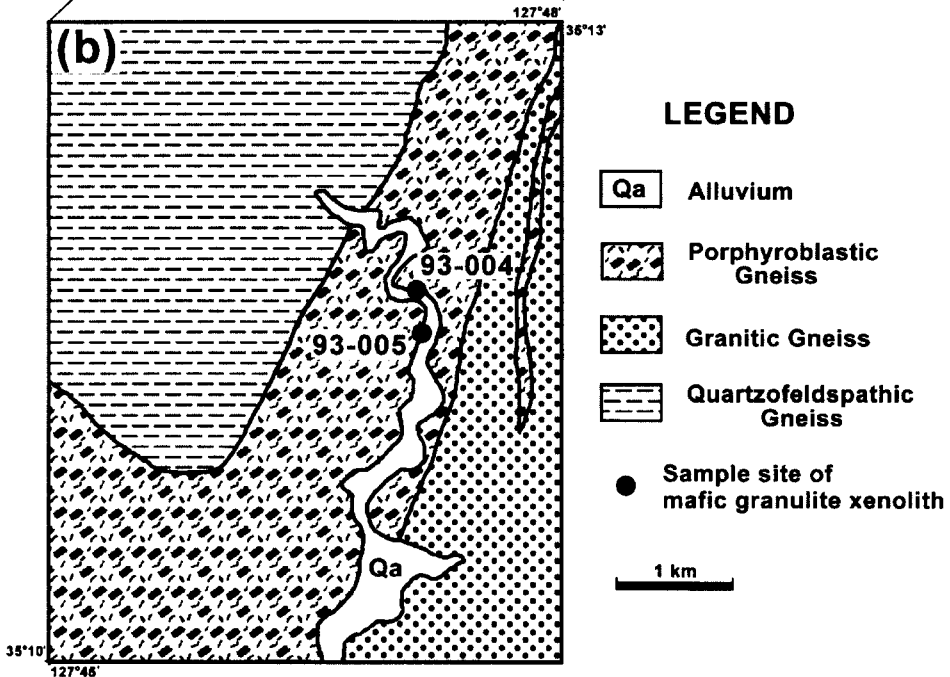
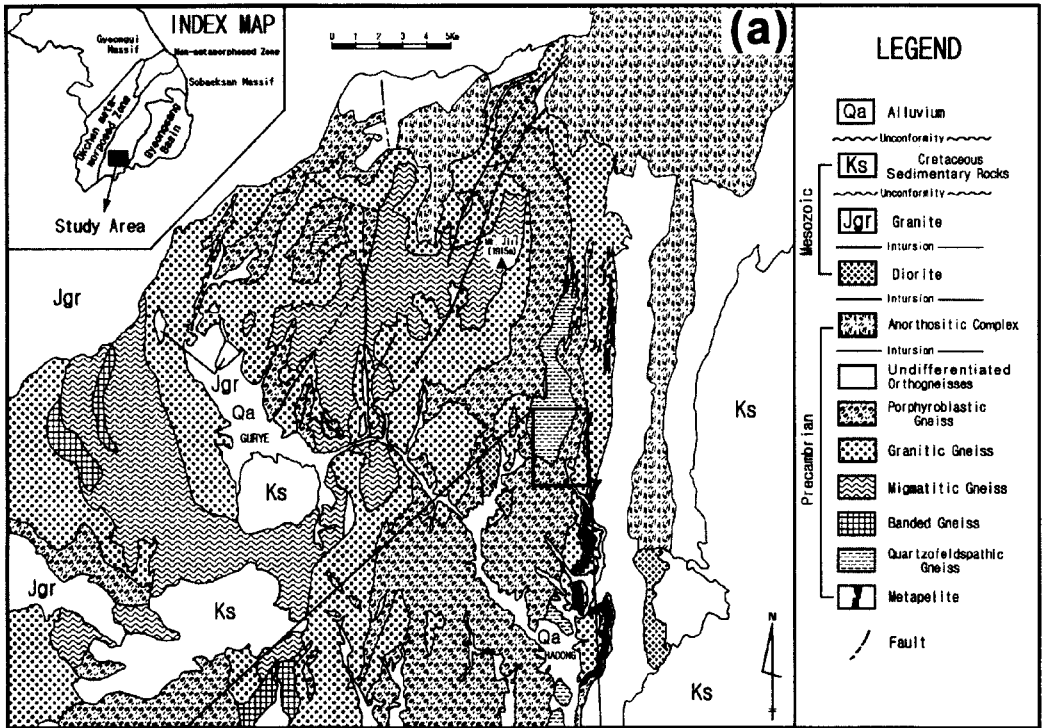


Fig. 1. (a) Geological map of the eastern Mt. Jiri area compiled from Kim & Kang (1965), Son et al. (1965), Choi et al. (1965) and Nam et al. (1989). (b) Enlarged geological map of the study area showing the sample sites.

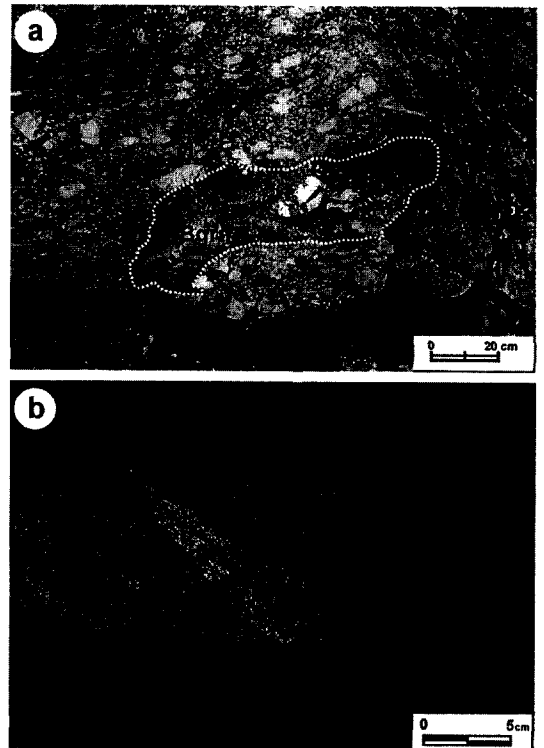
북방향으로 하동-산청 회장암 복합체가 편마암류를 관입하여 있다. 북서측은 중생대 주라기의 화강암류, 동측은 백악기 퇴적암층과 경계를 이루고 있으며, 서남부에는 소규모로 분포된 백악기 퇴적암과 화산암이 편마암류를 부분적으로 덮고 있다(그림 1a).

선캠브리아 편마암류는 기존 지질도폭들(김남장과 강필중, 1965; 남기상 외, 1989; 손치무 외, 1964; 최유구 외, 1965)에서 호상편마암, 미그마타이트질 편마암, 조립화강암질 편마암 및 반상변정질 편마암 등으로 구분된 암석들이 주를 이루고 있으며, 서쪽의 회장암체에 인접한 지역에는 유색광물의 함량과 주 구성 암종에 따라 우백질 화강편마암, 흑운모 편마암, 각섬석편마암, 흑운모-각섬석편마암으로 분류된 정편마암류가 비교적 좁은 대상으로 회장암과 함께 남북방향으로 분포하고 있다.

이 지역에 가장 광범위하게 분포된 암석은 화강암질 내지 화강섬록암질 조성의 소위 화강암질 편마암류와 반상변정질 편마암이다. 화강암질 편마암류는 조립질이고 편마구조의 발달이 미약하며 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모 및 석류석이 주성분 광물을 이루고 있다. 석류석은 흔히 흑운모와 녹니석으로 후퇴되어 녹색의 둥근 반점으로 산출되며, 흔히 소규모의 이질, 사질 또는 규질의 잔류물을 함유한 실리렌(schlieren) 내지 네블라이트질(nebulitic) 조직을 보인다. 중앙부를 중심으로 광범위하게 발달된 반상변정질 편마암은 자형 내지 반자형의 미사장석이 10 cm 내외 크기의 거정질 반상변정을 이루고 있으며, 흔히 변형되어 반상변정이 신장되었거나 국부적으로는 안구상 구조를 이루기도 한다. 미사장석 반상변정의 발달을 제외하면 화강암질 편마암과의 구별이 쉽지 않아 점이적인 관계로 설명되어 왔다. 이상만(1980)은 이들 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암을 준편마암류로 보고 반상변정의 발달을 심부 기원의 알칼리 변성교대작용으로 설명하였다. 그러나 Turek & Kim(1996)이 저어콘의 U-Pb 연대측정으로 이들의 관입연대를 약 2.1 Ga 내지 1.9 Ga로 규명함에 따라 최근에는 화성기원으로 보는 경향이다.

#### 백립암질 포획암의 산출상태와 암석기재

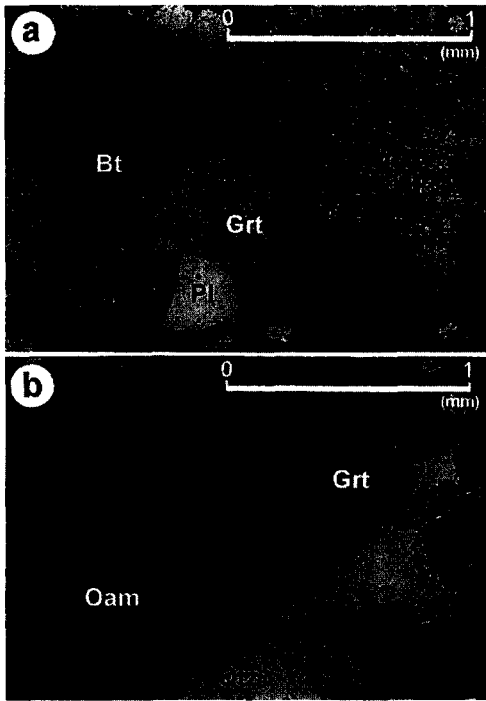
서론에서 기술한 석영장석질 편마암의 동남쪽에 분포된 반상변정질 편마암체내의 두 지점의 노두에서(그림 1b) 사방휘석과 석류석이 공생하는 엽기성 백립암질 포획암이 산출되었다. 백립암질 포획암은 50-100 cm 크기의 긴 타원체형으로 모암인 반상변



**Fig. 2.** Photographs of mafic granulite xenoliths. (a) Outcrop showing the granulite xenolith (Bgrn) within Porphyroblastic gneiss. (b) Handspecimen of mafic granulite with tonalitic granulite vein (Tgrn).

정질 편마암에 비해 더 어두운 색깔을 띤다(그림 2a). 반상변정질 편마암과 접촉된 표면부근에서는 동화작용으로 반상변정이 산점상으로 발달하기도 하지만 내부에선 미사장석이 함유되지 않으며, 한 노두에서 채취된 포획암(시료 93-005)의 내부에는 석류석을 거의 포함하지 않고 상대적으로 소량의 사방휘석과 흑운모를 수반하는 토날라이트질 백립암이, 엔델바이트(enderbite)에 해당, 맥상으로 발달되어 있기도 한다(그림 2b). 큰 포획암 주변에 심한 석류석과 사방휘석이 각각 흑운모와 각섬석으로 후퇴변성되어 암녹색을 띠는 직경 5 cm 정도의 작은 포획암이 함께 산출되기도 한다.

백립암질 포획암은 조립질의 입상조직을 보이며, 주 변성광물군은 석류석-사방휘석-흑운모-사장석-석영-티탄철석이고 소량의 흑연이 수반된다(그림 3a). 육안상에는 엽리구조가 뚜렷하지 않지만 현미경하에서는 사방휘석과 흑운모가 평행배열된 미약한 엽리가 발달되어 있고 석영들이 엽리방향으로 신장되었으며, 석류석들도 엽리를 따라 약간 신장



**Fig. 3.** Photomicrographs of (a) typical corona texture around orthopyroxenes (Opx) and (b) partly foliated texture defined by elongated quartz (Qtz) and biotite (Bt). Grt: garnet, Oam: orthoamphibole and Pl: plagioclase.

된 타원체를 이루기도 한다(그림 3b). 석류석은 균열이 많이 발달되어 있지만 후퇴변성에 의한 흑운모 등으로의 치환은 비교적 미약하다. 이에 비해 사방휘석은 대부분 주변부가 사방각섬석으로 치환된 반응주변부를 이루고 있다. 심하게 후퇴변성된 작은 포획암의 경우 석류석들이 가상치환을 이룬 흑운모 내에 미립의 파편상으로 잔류되어 있으며 사방휘석도 거의 대부분이 사방각섬석화 되어 있다. 토날라이트질 백립암은 석류석이 드물고 사방휘석과 흑운모의 함량이 낮은 사장석-석영-사방휘석-흑운모 광물군을 보인다.

백립암을 포획하고 있는 반상변정질 편마암은 주변성광물군이 석영-미사장석-사장석-석류석-흑운모이며, 석류석들은 조립질이고 흔히 많은 균열이 발달된 조직과 균열을 따라 부분적으로 미립의 갈색 내지 녹색색의 흑운모 또는 녹니석 등으로 후퇴되어 있지만, 석류석 주위에 접촉하고 있는 비교적 큰 결정의 적갈색 흑운모와는 상당히 안정된 공생 관계를 보이고 있다. 때때로 석류석 주위에 사장석 반응주변부가 발달되어 용기에 다른 압력감소의 과

정을 지시하고 있다.

**광물화학조성**

백립암질 포획암과 모암인 반상변정질 편마암의 주 구성 광물의 화학조성을 기초과학지원연구소 (Cameca 모델 SX51)의 전자현미분석기를 사용하여 분석하였다. 93-005의 경우 2개(a와 b)의 백립암질 포획암과 1개의 반상변정질 편마암의 박편시료를 제작하여 각각에 대해 분석하였다. 분석조건을 15 kV, 20 nA, 빔 크기 1 μm, 측정시간은 정점 (peak)에서 10초였다. 다음과 같은 천연광물과 합성 물질을 표준물질로 사용하였다. 알바이트(Na, Si), 페리클레이스(Mg), 강옥(Al), 인회석(P), 정장석(K), 규회석(Ca), MnTiO<sub>3</sub>(Ti, Mn) 그리고 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Cr).

흑운모의 분석결과는 표 1과 같다. 93-004는 한 박편내에서 서로 떨어져 있는 3개의 흑운모와 석류석내 포유물로 산출되는 1개의 결정을 선택하여 분석하였으며, 93-005a와 b는 석류석과 접촉하고 있는 비교적 큰 결정을 선택하여 분석하였다. 흑운모는 시료내의 분석위치나 입자간에 미약한 성분차를 보이지만 평균적으로 Mg/Mg+Fe 비가 0.44-0.45이다. 누대구조의 경향이 뚜렷하지는 않지만 심하게 후퇴된 사방휘석이나 석류석에 바로 인접한 부분은 0.47-0.49로 약간 높은 값을 보인다. 포유물로 산출되는 흑운모의 평균조성이나 주변부의 조성 역시 기질부의 것과 동일하여 이러한 성분경향이 후퇴시의 확산에 의한 것으로 해석된다. TiO<sub>2</sub>는 3.67-6.16 wt%로 주변의 다른 편마암류의 것들에 비해 상당히 높아 이 암석의 높은 변성도를 반영하는 것으로 보인다. 반상변정질 편마암의 흑운모도 Mg/Mg+Fe 비가 약간 높지만 거의 동일한 조성을 보인다.

표 2는 석류석의 분석치이다. 석류석들은 현저한 누대구조의 특성을 보이는 알만딘으로, 중심부는 X<sub>py</sub>=0.20-0.22로 파이로프 성분이 풍부한데 비해 주변부로 가면서 파이로프 성분(X<sub>py</sub>=0.13-0.16)이 급격히 감소하고 알만딘 성분이 풍부해지는 전형적인 후퇴변성의 누대구조를 이루고 있다(그림 4). 특히 흑운모와 직접 접촉하고 있는 석류석 주변부가 현저한 후퇴변성의 특성을 보인다. 또한 주변부로 가면서 칼슘성분이 미약하게 증가하는 경향이다. 흑운모에서와 같이 반상변정질 편마암중의 석류석도 백립암질 포획암의 것과 동일한 조성과 누대구조를 보여준다.

휘석은 칼슘성분이 거의 없는 순수한 Fe-Mg 고용체의 사방휘석(hypersthene)으로 X<sub>Mg</sub>가 0.44-

**Table 1.** Representative composition of biotite

Rock type	Mafic granulite xenolith						Porphyroblastic gneiss			
	93-004				93-005a		93-005b		93-005pob	
Specimen	93-004		93-005a		93-005b		93-005pob			
Grain	Ave.	Rim	Inc(Core)	Inc(Rim)	Ave.	Ave.	Rim	Ave.	Rim	Inc
SiO <sub>2</sub>	35.56	36.11	35.37	35.31	34.47	36.09	35.94	34.93	35.89	34.57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.60	14.64	14.33	14.46	14.87	14.85	14.98	14.89	16.16	18.10
TiO <sub>2</sub>	3.67	3.92	6.64	5.79	3.75	4.73	3.86	4.83	3.30	1.30
FeO*	21.68	20.18	20.62	20.85	21.49	22.12	21.49	21.30	20.56	22.44
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.03	0.02	0.00	0.03	0.01
MgO	9.72	10.75	9.46	10.38	9.39	9.98	10.75	8.81	9.57	9.36
CaO	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.08	0.01	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.17	0.15	0.23	0.22	0.22	0.16	0.14	0.08	0.04	0.09
K <sub>2</sub> O	8.97	9.45	9.39	9.09	8.97	9.12	9.06	9.57	9.65	9.73
Total	94.40	95.21	96.04	96.10	93.23	97.09	96.24	94.49	95.21	95.63
Formular basis on 22 O										
Si	5.55	5.55	5.42	5.40	5.46	5.48	5.49	5.46	5.52	5.35
Al(IV)	2.45	2.45	2.58	2.60	2.54	2.52	2.51	2.54	2.48	2.65
Al(VI)	0.23	0.21	0.00	0.01	0.23	0.13	0.18	0.21	0.45	0.65
Ti	0.43	0.45	0.77	0.67	0.45	0.54	0.44	0.57	0.38	0.15
Fe	2.83	2.59	2.64	2.67	2.84	2.81	2.74	2.79	2.64	2.90
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	2.26	2.46	2.16	2.37	2.22	2.26	2.45	2.05	2.19	2.16
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Na	0.05	0.04	0.07	0.07	0.07	0.05	0.04	0.02	0.01	0.03
K	1.79	1.85	1.84	1.77	1.81	1.77	1.76	1.91	1.89	1.92
Total	15.59	15.61	15.47	15.55	15.63	15.56	15.61	15.56	15.58	15.82
X <sub>Mg</sub>	0.444	0.487	0.450	0.470	0.439	0.446	0.472	0.424	0.453	0.426
X <sub>Ti(VI)</sub>	0.075	0.079	0.137	0.117	0.078	0.094	0.076	0.101	0.067	0.026
X <sub>Al(VI)</sub>	0.040	0.036	0.001	0.001	0.040	0.023	0.031	0.037	0.079	0.111

\*: All Fe as FeO. Ave.: average composition of the interiors of grains.

Core: average composition of the core of a grain. Inc: inclusion in garnet.

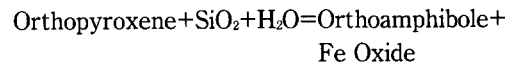
Rim: composition of the rim of a grain next to garnet or orthopyroxene.

X<sub>Mg</sub>=Mg/(Mg+Fe), X<sub>Ti</sub><sup>VI</sup>=Ti/(Al<sup>VI</sup>+Ti+Fe+Mn+Mg), X<sub>Al</sub><sup>VI</sup>=Al/(Al<sup>VI</sup>+Ti+Fe+Mn+Mg).

0.45로 성분범위가 매우 좁으며 Mg에 비해 Fe가 약간 풍부하다(표 3). 휘석의 결정내부에서는 성분 변화가 거의 없고(그림 5) 주변부는 각섬석화 되어 있어 각섬석화 이전에 후퇴변성에 따른 주변부의 성분변화가 있었는지를 확인할 수가 없다.

사방휘석의 반응주변부를 이룬 각섬석류 역시 칼슘이나 소다성분 및 알루미늄성분이 거의 없는 Fe-Mg 사방각섬석으로, 사방휘석에 비해 마그네슘 등의 다른 성분은 거의 유사하나 실리카성분은 높고 철성분은 상당히 낮다(표 3). 흑운모나 석류석의 후퇴변성에 따른 철성분의 변화가 미약하고 그 범위도 매우 좁은 주변부에 제한됨에 비해, 사방휘석의 각섬석화에 따른 철함량의 감소폭(5-7 wt%)과 각섬석화의 정도가 크며 주위에 티탄철석 등의 불투명광물이 자주 수반되고 있어(그림 3) 유리된 철이 다음과 같은 후퇴반응을 통해 철산화물을 형성한

것으로 해석된다.



사장석은 입자 내에서의 성분변화에 대한 체계적인 분석은 수행하지 못하였으나 같은 입자내에서 분석된 지점들의 성분변화가 크지 않은 것으로 볼 때 누대구조가 뚜렷하지 않은 것으로 판단되며, 대체로 X<sub>An</sub>=0.38-0.45 정도로 안데신에 해당된다. 반상변정질 편마암의 사장석의 조성도 역시 X<sub>An</sub>=0.40으로 동일한 범위에 놓인다. 티탄철석은 거의 순수한 Ti:Fe=1:1의 조성을 보인다(표 3).

### 변성조건

변성조건은 먼저 석류석-사방휘석-사장석-석영 광물군에 대해 석류석-사방휘석 지질온도계와 석류

**Table 2.** Representative composition of garnet

Specimen	93-004			93-005a		93-005b		93-005pob		
	Core	Rim	Inc	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Inc
SiO <sub>2</sub>	38.31	36.78	37.32	37.98	37.81	37.13	36.29	37.30	37.12	37.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.26	21.12	21.06	22.36	22.21	21.34	20.73	21.16	20.79	21.21
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.03	0.07	0.03	0.02	0.00	0.00	0.02	0.07	0.00
FeO	32.58	34.81	33.83	34.21	35.29	32.25	34.48	32.33	35.46	34.19
MnO	0.90	1.20	0.90	0.08	0.03	0.95	0.86	0.79	1.19	1.04
MgO	5.62	3.35	4.77	5.03	4.17	5.62	3.53	5.67	3.12	4.65
CaO	1.91	2.32	2.20	1.86	2.26	1.74	2.37	2.17	2.31	2.14
Na <sub>2</sub> O	0.05	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
K <sub>2</sub> O	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.68	99.63	100.15	101.56	101.81	99.03	98.26	99.47	100.10	100.43
Formular basis on 24 O										
Si	6.02	5.94	5.95	5.93	5.92	5.94	5.93	5.95	5.98	5.92
Al	3.94	4.02	3.96	4.12	4.10	4.02	4.00	3.98	3.95	3.99
Ti	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	4.28	4.70	4.51	4.47	4.63	4.31	4.73	4.31	4.78	4.56
Mn	0.12	0.16	0.12	0.01	0.00	0.13	0.12	0.11	0.16	0.14
Mg	1.32	0.81	1.13	1.17	0.97	1.34	0.86	1.35	0.75	1.11
Ca	0.32	0.40	0.38	0.31	0.38	0.30	0.42	0.37	0.40	0.37
Na	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
K	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	16.01	16.03	16.04	16.01	16.00	16.04	16.06	16.06	16.03	16.09
X <sub>alm</sub>	0.709	0.774	0.735	0.750	0.774	0.709	0.772	0.703	0.785	0.739
X <sub>py</sub>	0.218	0.133	0.184	0.196	0.162	0.220	0.140	0.220	0.123	0.179
X <sub>gr</sub>	0.053	0.066	0.061	0.052	0.064	0.049	0.069	0.060	0.066	0.059
X <sub>sp</sub>	0.020	0.027	0.020	0.002	0.000	0.021	0.020	0.017	0.027	0.023
X <sub>Mg</sub>	0.235	0.146	0.201	0.207	0.173	0.237	0.154	0.238	0.135	0.195

Inc: vicinity of a biotite inclusion. X<sub>Mg</sub>: Mg/(Mg+Fe). For explanation of other symbols, see Table 1.

석-사방회석-사장석-석영 지질압력계를 이용하여 구하였다. 사용된 석류석-사방회석 지질온도계는 Powell(1985), Sen & Bhattacharya(1984), Harley (1984), Lee & Ganguly(1988), 석류석-사방회석-사장석-석영 지질계는 Newton & Perkins(1982) 와 Perkins & Chipera(1985) 등의 것이다. 온도-압력 계산에서 석류석을 포함한 공생광물들이 주변 부를 제외한 내부에서는 성분변화가 거의 없기 때문에 이들의 중심부 성분을 변성 정점의 온도를 구하는데 이용하였다. 석류석의 주변부 성분은 후퇴 시의 변성조건을 구하는데 이용하였다. 사방회석과 사장석은 결정 내에서의 성분변화가 거의 없으며, 주변부에서의 성분변화가 뚜렷하지 않거나 알 수 없기 때문에 분석치의 평균을 정점과 후퇴시의 온도를 계산하는데 모두 이용하였다. 온도와 압력 계산시의 기준압력과 기준온도는 지질온도-압력계에서 계산된 결과에 의해 대략적으로 추정된 정점과 후퇴시의 대략적인 평균 압력과 온도(정점의 경우

6 kb, 800℃, 후퇴변성은 4 kb, 500℃)를 적용하였다. 표 4는 계산결과이다. 그림 6a는 석류석-사방회석 및 석류석-사방회석-사장석-석영 지질온도-압력 계들에 의해 구해진 정점과 후퇴시의 온도와 압력의 전체 범위를 온도-압력도상에 도시한 것이다. 중심부 성분에 의해 계산된 정점에서의 변성온도는 700-850℃ 정도이고 압력은 5-7 kb이다. 주변부는 계산된 온도-압력의 범위가 넓지만 평균하면 대략 450-600℃에 3.6-4.3 kb 정도이다.

또한 석류석-흑운모 지질온도계를 이용하여 변성 온도를 구하였다. 계산에 이용한 석류석의 성분은 앞의 경우와 동일하다. 흑운모의 경우는 석류석이나 사방회석(실제 주변부는 사방각섬석)에 바로 인접한 Mg 풍부한 주변부 성분은 후퇴변성조건을 계산에, 이를 제외한 내부의 평균조성은 정점의 조건을 구하는데 사용하였다. 지질온도계로는 Ferry & Spear(1978), Indares & Martignole(1985), Hodges & Spear(1982), Ganguly & Saxena(1984) 및 Per-

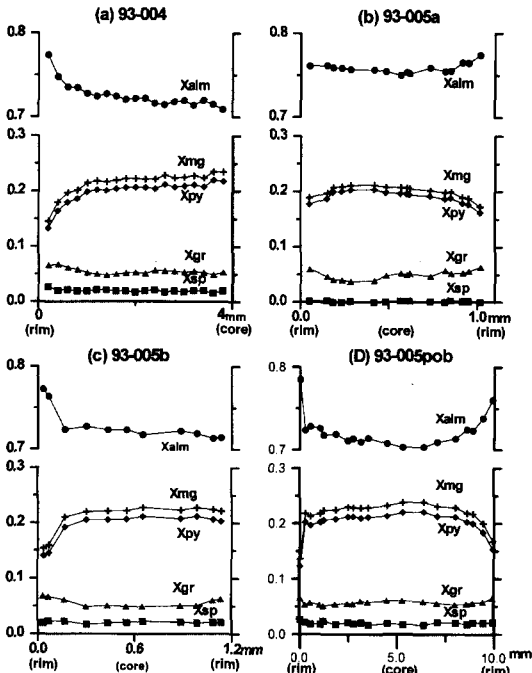


Fig. 4. Zoning profiles of garnets from granulite xenoliths and porphyroblastic gneiss.

chuk & Lavrent'eva(1983)의 것을 이용하였으며 그 결과는 표 5에 나타내었다. 온도계산시의 기준 압력으로는 역시 중심부의 경우 6 kb, 주변부는 4 kb를 적용하였다. Ferry & Spear(1978)의 실험적으로 결정된 지온계는 Mg-Fe간의 혼합만을 고려하였으나 Hodges & Spear(1982), Ganguly & Saxena(1984) 및 Perchuk & Lavrent'eva(1983) 등의 지온계는 석류석내의 다른 성분(Ca와 Mn)에 대한 보정을 포함한다. Indares & Martignole(1985)의 두 모델은 백립암상의 변성암에서 산출되는 흑운모들이 Ti와 Al의 함량이 높은 점을 고려하여 Ganguly & Saxena(1984)와 Hodges & Spear(1982)의 석류석의 Ca와 Mn에 대한 보정에 흑운모의 Ti와 Al 성분에 대한 보정을 추가한 것이다. 분석된 석류석의 경우 Ca와 Mn 성분의 함량이 매우 낮지만 흑운모는 Ti와 Al의 함량이 상당히 높아 Indares & Martignole(1985)의 것을 적용하는 것이 보다 타당하다고 보면, 백립암질 포획암의 경우 중심부의 온도는 750-850°C, 주변부의 경우는 500-650°C 정도로 사방회석-석류석 온도계의 것에 비해 약간(50°C 정도) 높지만 유사한 결과를 보인다. 모암인 반상변정질 편마암에 대해 구해진 온도조건도 거의 동일하여 상당히 높은 값을 보인다. 이것은 흑

운모의 산출상태나 기질부의 흑운모와 석류석내의 흑운모 포유물의 조성이 동일한 점으로 볼 때 흑운모의 조성이 후기에 석류석의 재흡수(resorption)에 의해 Fe가 풍부해진 결과보다는 석류석과 흑운모의 평형당시의 온도조건을 나타내는 것으로 해석되나 이에 대해서는 조사가 더 필요하다.

공생광물들의 평형 여부를 평가하고 온도-압력 계산의 오차범위를 줄이는데는 내부적으로 조화적인(consistent) 열역학 자료를 이용한 지질온도-압력계의 적용이 권장된다. 여기서는 THERMOCALC 프로그램 v2.7(cf. Powell & Holland, 1988; Powell & Holland, 1994; Holland & Powell, 1998; Powell *et al.*, 1998)을 이용하여 평균 온도-압력조건과 오차범위를 계산하여 그 결과를 그림 6b에 도시하였다. 계산에 사용한 광물조성은 앞의 경우와 동일하나 후퇴변성의 경우 사방각섬석을 함께 고려하여 계산하였으며, 광물내 단성분들의 활동도는 D. Waters의 WAX 프로그램을 이용하여 계산하였다. 계산결과는 정점의 경우 865-917( $\pm 200$ )°C, 6-6.5( $\pm 2.5$ )Kb이고 후퇴변성의 경우 744-753( $\pm 125$ )°C, 4.8-5.3( $\pm 2.1$ )Kb로 오차범위가 좀 크고 다른 지질온도-압력계의 결과에 비해 온도가 너무 높은 경향이 있지만 온도와 압력이 함께 떨어진 후퇴경로를 잘 나타내고 있다.

### 변성경로

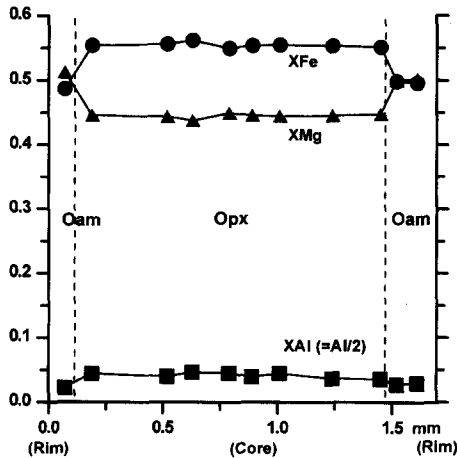
여러 가지 지질온도-압력계로부터 얻어진 시료별 온도-압력조건을 그림 6에 도시하였다. 석류석-사방회석 지질온도계와 석류석-사방회석-사장석-석영 지질온도계의 경우 얻어진 값들의 평균치를 도시하였고, 석류석-흑운모 지질온도계의 경우는 Indares & Martignole(1985)의 두 모델의 평균값을 취하였다. 또한 THERMOCALC 프로그램을 사용하여 얻은 평균 온도-압력을 함께 도시하였다.

석류석-사방회석 및 석류석-사방회석-사장석-석영 지질온도-압력계와 석류석-흑운모 지질온도계에 의해 얻어진 정점의 변성조건은 750-850°C 정도이다. 또한, 포획암중에 발달된 석류석이 결핍된 사방회석 토날라이트 맥의 발달은 부분용융 또는 이에 근접한 조건을 지시하고 있다. 따라서 계산된 변성조건은 그림 7에 함께 도시한 흑운모의 탈수 용융곡선(Johannes & Holtz, 1996의 Fig. 9.5)과 비교해 볼 때 어느 정도 신뢰성이 있다고 판단된다. 6 kb의 압력조건도 사방회석과 사장석을 포함하는 공생광물군과 어느 정도 합치된다. 후퇴변성의 경우

**Table 3.** Representative compositions of orthopyroxene, amphibole, ilmenite and plagioclase

Mineral	Orthopyroxene			Amphibole			Ilmenite	Plagioclase		
	93-004	93-005a	93-005b	93-004	93-005a	93-005b	93-004	93-004	93-005a	93-005pob
		Ave.	Ave.	Ave.	Ave.	Ave.		Ave.	Ave.	Ave.
SiO <sub>2</sub>	50.02	48.43	50.11	55.55	51.16	53.21	0.03	56.50	57.17	58.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.81	1.94	2.10	1.26	1.33	1.74	0.00	27.50	25.97	25.87
TiO <sub>2</sub>	0.09	0.10	0.15	0.04	0.05	0.12	52.63	0.00	0.00	0.01
FeO	32.64	33.06	32.42	25.22	28.60	26.74	47.18	0.00	0.04	0.03
MnO	0.27	0.33	0.29	0.15	0.28	0.23	0.31	0.00	0.00	0.04
MgO	14.63	14.62	14.98	14.28	13.80	15.16	0.12	0.00	0.02	0.00
CaO	0.23	0.26	0.28	0.55	0.44	0.62	0.00	9.30	7.82	8.34
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.00	0.09	0.12	0.07	0.01	6.03	6.76	6.67
K <sub>2</sub> O	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.15	0.01	0.43	0.37	0.24
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Total	99.72	98.77	100.34	97.15	95.81	98.04	100.29	99.76	98.15	99.22
Oxygen No.	6.00	6.00	6.00	23.00	23.00	23.00	3.00	32.00	32.00	32.00
Si	1.96	1.93	1.95	8.16	7.84	7.86	0.00	10.17	10.42	10.46
Al	0.08	0.09	0.10	0.00	0.24	0.30	0.00	5.84	5.58	5.50
Ti	0.00	0.00	0.00	0.22	0.01	0.02	1.00	0.00	0.00	0.00
Fe	1.07	1.10	1.06	3.10	3.66	3.30	0.99	0.00	0.01	0.00
Mn	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01
Mg	0.86	0.87	0.87	3.13	3.15	3.34	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.01	0.01	0.01	0.09	0.07	0.10	0.00	1.80	1.53	1.61
Na	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	0.02	0.00	2.10	2.39	2.33
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.09	0.05
Total	3.99	4.01	4.00	14.74	15.05	14.97	2.00	20.01	20.02	19.98
X <sub>Ca</sub>	0.005	0.005	0.005	0.014	0.010	0.015	X <sub>or</sub>	0.025	0.022	0.014
X <sub>Mg</sub>	0.444	0.442	0.451	0.502	0.463	0.503	X <sub>ab</sub>	0.526	0.596	0.583
X <sub>Fe</sub>	0.556	0.558	0.549	0.498	0.537	0.497	X <sub>an</sub>	0.449	0.382	0.403

X<sub>Ca</sub>: Ca/(Ca+Mg+Fe). X<sub>Mg</sub>: Mg/(Mg+Fe). X<sub>Fe</sub>: Fe/(Mg+Fe). For explanation of other symbols, see Table 1.



**Fig. 5.** Zoning profiles of orthopyroxene (Opx) rimmed by orthoamphibole (Oam) from granulite xenolith (specimen 93-004).

는 평형공생 광물군을 설정하는 것이 어렵고 석류석과 일부 흑운모를 제외하고는 후퇴변성에 의한

성분변화를 알지 못하기 때문에 변성조건을 결정하는 것이 불가능하다. 그러나 사방휘석과 사장석의 성분이 정점에서와 크게 다르지 않았다고 가정을 하고 계산한 결과는 냉각시의 성분확산의 폐쇄온도가 4 Kb의 압력조건에서 약 500℃임을 나타낸다.

이러한 결과는 백립암이 겪은 변성작용의 정점의 조건이 대략 800-850℃, 6 kb이고 후퇴변성은 500℃, 4 Kb 정도로, 그림 7의 화살표가 지시하는 바와 같이 온도와 압력이 함께 떨어진 후퇴경로를 나타낸다. THERMOCALC 프로그램에 의한 측정결과는, 온도가 지나치게 높지만, 정점에서부터 온도와 압력이 동시에 떨어진 시계방향의 변성진화 경로를 보다 잘 지시해 준다.

### 토의 및 결론

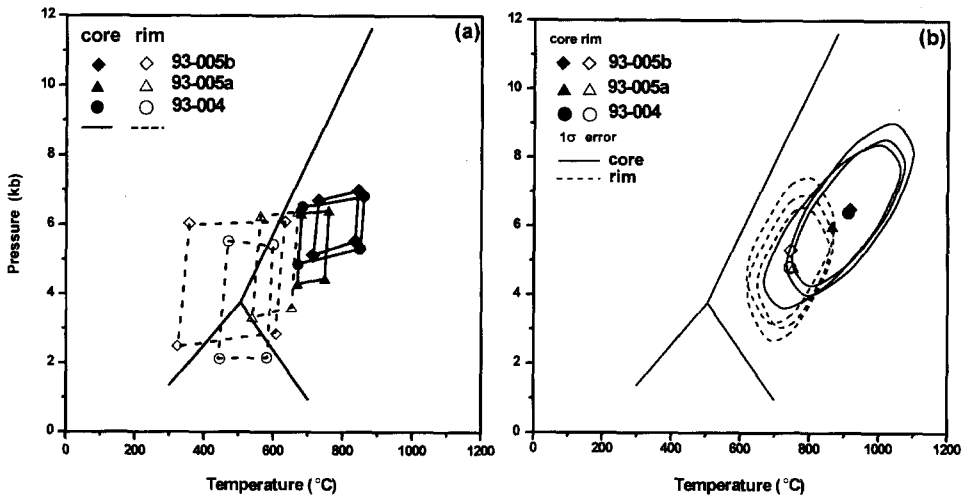
연구지역인 지리산일대에 넓게 분포된 반상변정질 편마암에서 포획암으로 산출된 염기성 백립암은 사방휘석-석류석-흑운모-사장석-석영-티탄철석의



**Table 4.** Temperatures and Pressures calculated from Garnet-Orthopyroxene thermometers and Garnet-Orthopyroxene-Plagioclase-Quartz barometers

Specimen	93-004		93-005a		93-005b	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim
$X_{Mg}(Opx)$	0.444	0.444	0.442	0.442	0.451	0.451
$X_{Mg}(Grt)$	0.218	0.133	0.196	0.162	0.220	0.140
$X_{Fe}(Grt)$	0.709	0.774	0.750	0.774	0.709	0.772
$X_{Ca}(Grt)$	0.053	0.066	0.052	0.064	0.049	0.069
$X_{Mn}(Grt)$	0.020	0.027	0.002	0.000	0.021	0.020
$X_{Al}(Pl)$	0.449	0.449	0.382	0.382	0.382	0.382
$P_{ref}(kb)$	6	4	6	4	6	4
$T_S$	854	524	750	620	835	448
$T_H$	758	516	680	583	747	453
$T_{L\&G}$	851	591	757	655	837	515
$T_{L\&G}$	815	458	692	548	798	339
$T_P$	681	589	686	624	722	616
$T_{ref}(^{\circ}C)$	800	500	800	500	800	500
$P_{N\&P}$	5.2	2.2	4.6	3.5	5.4	2.8
$P_{P\&C}$	6.7	5.5	6.5	5.3	6.9	6.0
$P_{P\&C}$	5.5	3.0	6.0	4.2	5.9	3.2

$P_{ref}$  and  $T_{ref}$ : reference pressure and temperature, respectively.  $T_{S\&B}$ : Sen & Bhattacharya (1984),  $T_P$ : Powell (1985),  $T_H$ : Harley (1984),  $P_{N\&P}$ : Newton & Perkins (1982),  $T_{L\&G}$ : Lee & Ganguly (1988),  $P_{P\&C}$ : Perkins & Chipera (1985).



**Fig. 6.** P-T diagrams of mafic granulite xenoliths showing the results of (a) P-T estimations according to geothermo-barometers and (b) Average P-T (symbols) and  $1\sigma$  error estimations (areas) using THERMOCALC (v2.7) program. Alumino-silicate stability curves are also calculated using THERMOCALC program.

전형적인 백립암상 변성광물군을 이루고 있다. 지질온도-압력계에 의해 계산된 변성조건도 초기변성의 경우 800-850°C, 6 kb 정도로 백립암상의 변성조건을 나타낸다. 현재로서는 이들 포획암이 지각 하부로부터 반상변정질 편마암의 관입시에 끌려온 것인지, 관입당한 주변암에서 유래한 것인지, 또는 백립암상의 고변성작용에 수반된 용융의 잔류물인

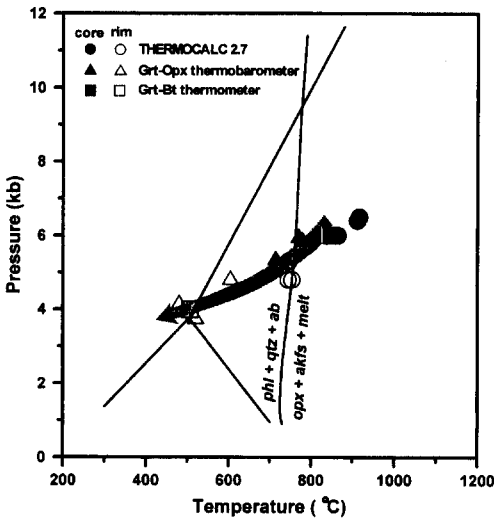
지 그 기원은 확실하지 않다. 그러나 추정된 압력조건(약 6 kb)과 사방휘석-사장석의 안정된 공생관계는 그렇게 높지 않았던 압력조건을 지시하고 있다.

최근까지는 소백산육괴에서 백립암상 변성작용이 명확하게 보고되지 않았었지만 이 지역 편마암류에 대한 근래의 연구에서 백립암상 변성작용이 보고되고(송용선, 1997), 차노카이트의 분포가 알려짐으로

**Table 5.** Temperatures (°C) calculated from Garnet-Biotite thermometers

Specimen	93-004				93-005a		93-005b		93-005pob		
	Core	Rim	Inc(Core)	Inc(Rim)	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Inc
X <sub>gr</sub> (Grt)	0.053	0.066	0.053	0.061	0.052	0.064	0.049	0.069	0.060	0.066	0.059
X <sub>py</sub> (Grt)	0.218	0.133	0.218	0.184	0.196	0.162	0.220	0.140	0.220	0.123	0.179
X <sub>alm</sub> (Grt)	0.709	0.774	0.709	0.735	0.750	0.774	0.709	0.772	0.703	0.785	0.739
X <sub>sp</sub> (Grt)	0.020	0.027	0.020	0.020	0.000	0.000	0.021	0.017	0.017	0.027	0.023
X <sub>Mg</sub> (Bt)	0.444	0.487	0.450	0.470	0.438	0.438	0.446	0.472	0.424	0.453	0.453
X <sub>al</sub> (VI)	0.040	0.036	0.001	0.001	0.040	0.040	0.023	0.031	0.037	0.079	0.111
X <sub>Ti</sub> (Bt)	0.075	0.079	0.137	0.117	0.078	0.078	0.094	0.076	0.101	0.067	0.026
P <sub>ref</sub> (kb)	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6
T <sub>F&amp;S</sub>	963	580	946	768	874	754	965	625	1036	596	855
T <sub>I&amp;Ma</sub>	848	503	719	612	762	652	811	550	864	530	834
T <sub>I&amp;Mb</sub>	851	509	716	613	750	641	818	555	863	525	823
T <sub>H&amp;S</sub>	984	607	968	794	896	771	985	653	1060	622	880
T <sub>G&amp;S</sub>	778	550	765	656	730	662	776	582	839	577	743
T <sub>P&amp;L</sub>	759	589	753	683	725	672	761	613	786	598	717

T<sub>F&S</sub>: Ferry & Spear (1978), T<sub>I&Ma</sub> & T<sub>I&Mb</sub>: Indares & Martignole (1985)'s model A and B, T<sub>H&S</sub>: Hodges & Spear (1982), T<sub>G&S</sub>: Ganguly & Saxena (1984), T<sub>P&L</sub>: Perchuk & Lavrent'eva (1983).



**Fig. 7.** P-T history for granulite xenoliths. The shaded arrow indicates P-T path during retrogression. Biotite dehydration melting curve is from Fig. 5 in Johannes and Holtz (1996).

씨(김동연 외, 1998) 지리산일대의 편마암 복합체들이 초기에 백립암상 변성작용을 겪었음이 확실해지고 있다. 따라서 반상변정질 편마암 중의 백립암질 포획암도 이 변성대내의 한 구성원으로 고변성의 광역변성작용동안이나 변성작용 이후에 관입한 반상변정질 편마암의 원암에 포획되었을 것으로 본다.

주승환과 김성재(1985)는 소백산육괴의 화강암질 편마암류에 대해 1.8 Ga의 Rb-Sr 연대를 보고

한 바 있고, Lee *et al.*(1992)는 김천지역의 화강암질 편마암류에서 약간 젊지만 유사한  $1.55 \pm 0.39$  Ga의 Sm-Nd 연대를 얻었다. 또한 Kwon & Jeong (1990)은 연구지역 동편의 화강암의 관입시기를  $1.678 \pm 0.09$  Ga로 보고하였다. 최근 필자에 의해 수행된 이 지역의 화강암질 편마암, 반상변정질 편마암 등의 각종 편마암류들에서 측정된 석류석의 Sm-Nd 광물연대(논문작성 중)도 약 1.7-1.8 Ga이다. 또한 Kim & Turek(1996)과 Turek & Kim (1996)은 이 지역 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암에 대한 저어른 U-Pb 연대측정 결과 각각 2.1과 1.9 Ga의 생성연대를 얻었다.

이러한 연대측정의 결과와 포획암중의 사마휘석 토날라이트 맥이 포획암내에만 발달되고 반상변정질 편마암에 의해 예리하게 절단되는 점 등은 지리산지역에서 2.1-1.9 Ga에 광범위한 칼크-알칼리질 화성활동이 있었고, 초기의 백립암상의 고변성작용은 그 이전(적어도 1.9 Ga 이전)에 일어났음을 시사한다. 1.9 Ga의 반상변정질 편마암의 관입 이후에 적어도 석류석의 Sm-Nd 동위원소 폐쇄온도인 600-700°C(Mezger *et al.*, 1992; Hensen & Zhou, 1995) 이상의 고변성이 중첩되었고, 이후 융기에 따른 냉각과정을 따라 후퇴변성되었을 것으로 추정된다. 송용선과 류호정(1993)은 이 지역의 변성작용에 대한 예비연구에서 압력의 변화는 별로 없고 온도만 떨어진 소위 등압냉각(IBC)형일 가능성을 제시한 바 있지만 이 연구의 결과는 오히려 시계방향의 변성경로를 지지하고 있다. 그러나 이 지역의

변성진화과정을 보다 잘 해석하기 위해서는 최근에 보고된 차노카이트를 포함하여 이 지역 편마암류의 변성작용과 화성기원 암체들의 정치과정 및 연대에 대한 연구들이 수행될 필요가 있다.

## 사 사

이 연구는 교육부 기초과학 연구소 연구비 지원(과제번호 BSRI-97-7406)에 의해 수행되었다. 연구비와 기기 이용을 지원해준 서울대학교 기초과학 교육연구 공동기기원과 조문섭 교수에게 감사드린다. 자료정리 및 도표작성에 많은 도움을 준 류호정, 김동연, 이호선, 김남훈 등 암석학 연구실 대학원생들에게도 감사를 드린다. 또한 이 논문의 심사과정 동안 많은 문제점을 지적하고 오류를 수정하여 주신 오창환 박사와 안건상 박사, 그리고 익명의 심사자들에게 깊은 감사를 드린다. 이 논문이 조금이라도 논문다워졌다면 그것은 전적으로 심사자들의 덕분일 것이다.

## 참고문헌

- 권용완, 김형식, 오창환, 1997, 경기육괴 북동부지역에 분포하는 오대산 편마암복합체의 다변성작용. 암석학회지, 6, 226-243.
- 김남장, 강필중, 1965, 진교도폭 및 설명서, 국립지질조사소, p. 33.
- 남기상, 류환수, 이종덕, 1989, 하동도폭 지질보고서, 한국동력자원연구소, p. 16.
- 김동연, 송용선, 박계현, 1998, 지리산 동부지역에 분포된 차노카이트의 암석학, 지구화학 및 지구연대학적 연구. 대한지질학회 제53차 학술발표회 초록집, 35-36.
- 김형식, 1970, 한국 서남부일대의 광역변성작용에 관하여. 지질학회지, 6, 97-118.
- 손치무, 이상만, 원종관, 장기홍, 김영주, 1964, 화개도폭 및 설명서, 국립지질조사소, p. 22.
- 송용선, 1979, 하동-산청지역에 분포하는 변성암류의 변성작용에 관한 연구. 서울대학교 석사 학위논문, p. 38.
- 송용선, 1997, 소백산육괴 남부 지리산 편마암 복합체의 변성진화에 관한 연구. 한국과학재단 연구보고서, p. 39.
- 송용선, 류호정, 1993, 지리산일대 소백산편마암체의 다변성작용. 한국암석학회 제2차 학술발표회 요약집, 20.
- 송용선, 이상만, 1989, 소백산육괴 중앙부 선캠브리아 변성암류의 암석학적 연구. 지질학회지, 25, 451-467.
- 이상만, 1980, 지리산(하동-산청) 지역의 변성이질암의 변성작용에 관한 연구. 지질학회지, 9, 1-15.
- 이상만, 김형식, 1984, 소위 울리층군 및 원남층군의 변성암석학적 연구-태백산일대를 중심으로. 지질학회지, 20, 195-214.
- 이상만, 나기창, 이상현, 박배영, 이상원, 1981, 소백산 육괴(동남부)의 변성암 복합체에 대한 변성작용에 관한 연구. 지질학회지, 17, 169-188.
- 조윤희, 조문섭, 이승렬, 1996, 청평-양평지역에 분포하는 근청석 편마암의 백립암상 변성작용과 P-T진화 경로. 암석학회지, 5, 52-65.
- 주승환, 김성재, 1986, 영남육괴 Rb-Sr 연대측정 연구(II): 지리산 남서부일대 화강암질암 및 편마상화강암류. 조사보고서, 7-33.
- 최유구, 정창희, 이대성, 김서운, 김수진, 1964, 단성도폭 및 설명서, 국립지질조사소, p. 28.
- Ferry, J.M. and Spear, F.S., 1978, Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. Contrib. Mineral. Petrol., 66, 113-117.
- Ganguly, J. and Saxena, S.K., 1984, Mixing properties of aluminosilicate garnets: constraints from natural and applications to geothermo-barometry. Am. Mineral., 69, 88-97.
- Glebovitsky, V.A., Sedova, I.S., Bushmin, S.A., Vapnik, Ye.A. and Buiko, A.K., 1994, Granulites of northern Korea. Jour. Petrol. Soc. Korea, 3, 196-219.
- Harley, 1984, An experimental study of the partitioning of Fe & Mg between garnet and orthopyroxene. Contrib. Min. Pet., 86, 359-373.
- 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 temperatures. Geology, 23, 225-228.
- Hodges, K.V. and Spear, F.S., 1982, Geothermometry, geobarometry and the Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. Am. Mineral., 67, 1118-1134.
- Holdaway, M.J. and Mukhopadhyay, 1993, Stability of andalusite and the aluminum silicate phase diagram. Am. Mineral., 78, 298-315.
- Holland, T.J.B. & Powell, R., 1998, An internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest. Jour. of Metamorphic Geology, 16, 309-344.
- Indares, A. and Martignole, J., 1985, Biotite-garnet geothermometry in the granulite facies: The influence of Ti and Al in biotite. Am. Mineral., 70, 272-278.
- Johannes, W. and Holtz, F., 1996, Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks. Springer-Verlag, Berlin, p. 335.
- Kim, C.B. and Turek, A., 1996, Advances in U-Pb zircon geochronology of Mesozoic plutonism in the southwestern part of Ryeongnam massif, Korea. Geochem. Jour., 30, 323-338.
- Kwon, S.T. and Jeong, J.G., 1990, Preliminary Sr-

- Nd isotope study of the Hadong-Sanchung Anorthositic rocks in Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 26, 341-349.
- Lee, H.Y. & Ganguly, J., 1988, Equilibrium compositions of coexisting garnet and orthopyroxene: reversed experimental determinations in the system FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> and applications. *Jour. Petrol.*, 29, 93-114.
- Lee, S.G., Shimizu, H., Masuda, A., Song, Y.S., 1992, Crustal evolution of the Precambrian basement in the Korean Peninsula. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 1, 124-131.
- Lee, S.M., Kim, H.S. and Oh, I.S., 1986, Metamorphic petrology of Precambrian gneisses in Samcheok-Jukbyeon area. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 22, 257-277.
- Lee, S.R., Cho, M., Cheng, C.S., Park, K.H., 1997, An early Proterozoic Sm-Nd age of mafic granulite from the Hwacheon area, South Korea. *Geoscience Jour.*, 1, 136-142.
- Mezger, K., Essen, E.J. and Halliday, A.N., 1992, Closure temperatures of the Sm-Nd system in metamorphic garnets. *Earth and Planetary Science Letters*, 113, 397-409.
- Newton & Perkins, 1982, Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages Gt-Pl-Opx-(Cpx)-Q. *Am. Mineral.*, 67, 203-222.
- Perchuk, L.L. and Lavrent'eva, I.V., 1983, Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite-garnet-biotite. In Saxena S.K. (Ed.), *Advances in Physical Geochemistry*, 3, Springer-Verlag, New York, 111-130.
- Perkins, D.III, and Chipera, S.J., 1985, Garnet-orthopyroxene-plagioclase-quartz barometry: refinement and application to the English River Valley. *Contrib. Miner. & Petrol.*, 89, 69-80.
- Powell, R., 1985, Geothermometry and geobarometry: a discussion. *Jour. Geol. Soc.*, London, 142, 29-38.
- Powell, R. & Holland, T.J.B., 1988, An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: 3. Application methods, worked examples and a computer program. *Jour. of Metamorphic Geology*, 6, 173-204.
- Powell, R. & Holland, T.J.B., 1994, Optimal geothermometry and geobarometry. *Am. Mineral.*, 79, 120-133.
- Powell, R. & Holland, T.J.B. & Worley, B., 1998, Calculating phase diagrams with THERMOCALC: methods and examples. *Jour. Metamorphic Geology*, 16.
- Sen & Bhattacharya, 1984, An Opx-Gt thermometer and its application to the Madras charnokites. *Conttib. Min Pet.*, 88, 64-71.
- Turek, A. and Kim, C.B., 1996, U-Pb zircon ages for Precambrian rocks in southwestern Ryeongnam and southwestern Gyeonggi massifs, Korea. *Geochem. Jour.*, 30, 231-249.

(책임편집 : 오창환)

(1999년 1월 15일 접수, 1999년 2월 18일 수리)

## Granulite xenoliths in porphyroblastic gneiss from Mt. Jiri area, SW Sobaegsan massif, Korea

Yong-Sun Song

*Department of Applied Geology, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea.*

**ABSTRACT:** Mafic granulite xenoliths are found in precambrian porphyroblastic gneiss of the Mt. Jiri area, SW Sobaegsan massif, Korea. The xenoliths are rounded to ellipsoidal in shape, 50-100 cm in length and coarse-grained with granoblastic and foliated texture. The xenoliths consist of orthopyroxene, garnet, biotite, plagioclase, quartz, ilmenite and secondary orthoamphibole. Orthopyroxene is mostly resorbed and rimmed by coronitic orthoamphiboles. Garnets occur as porphyroblasts and are zoned with higher pyrope content in cores than in rims. Geothermo-barometry results yield conditions of about 800-850°C, 6 kb and 500°C, 4 kb for early and retrograde stages of equilibration, respectively. According to available geochronological data, it is suggested that the granulite facies metamorphism occurred prior to 2.1-1.9Ga and that the area was superimposed by the high-grade (over 600-700°C) metamorphism between 1.9-1.7Ga, followed by cooling during uplift.