

소백산 육괴 서남부인 승주-순천 일대의 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암의 변성진화과정

오창환 · 전은영 · 박배영¹ · 안건상² · 이정후

전북대학교 지구환경과학과 · ¹전남대학교 지구환경과학부 · ²조선대학교 과학교육학부

요약: 소백산육괴의 서남부인 승주-순천 일대에는 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암이 광범위하게 분포되어있다. 화강암질 편마암으로부터 두 그룹의 변성 온도-압력 조건이 추정된다. 석류석 내부 그리고 후퇴변성작용을 약하게 받은 시료로부터 622-760°C/6.2~7.4 kbar의 Group I과 후퇴변성에 의하여 피로프가 감소하고 스페살틴이 증가한 석류석 주변부로부터 606~785°C/3.7~5.4 kbar의 Group II가 추정된다. 반상변정질 편마암으로부터 추정된 온도-압력 조건은 489~669°C/2.1~4.8 kbar로서 화강암질 편마암에서 얻어진 Group II의 온도-압력 조건과 유사하다. 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암의 전암-석류석 Sm/Nd 동위원소 연대는 각각 1417±52 Ma와 1421±14 Ma로 서로 일치한다. 이러한 자료는 화강암질 편마암이 경험한 Group I에 해당하는 중압형 변성작용이 화강암질 편마암 관입 이후 그리고 반상변정질 편마암의 관입 이전, 즉 1890 Ma와 2120 Ma 사이에 일어났을 가능성이 높으며, 두 편마암은 반상변정질 편마암 관입 이후 함께 1417~1421 Ma 시기에 저압형 변성작용을 받았음을 지시한다.

핵심어: 화강암질 편마암, 반상변정질 편마암, 소백산 육괴, Sm/Nd 동위원소 연대, 중압형 변성작용, 저압형 변성작용.

서 언

한반도의 기저는 북쪽에서 남쪽으로 선캠브리아기의 낭림육괴, 경기육괴 그리고 소백산육괴로 구성되어있으며, 낭림육괴와 경기육괴는 부분적으로 임진강대에 의해 그리고 경기육괴와 소백산육괴는 옥천대에 의하여 분리되어 있다(Fig. 1). 한반도에 인접한 산둥반도를 포함한 중국의 동부에는 중한지괴(Sino-Korean plate)와 양쯔지괴(Yangtze plate)가 충돌한 다비-수루 충돌대(Dabi-Sulu collision zone)가 형성되어 있다(Enami and Zhang, 1990; Enami *et al.*, 1993; Okay *et al.*, 1989; Wang and Liou, 1993; Wang *et al.*, 1989). 산둥반도를 포함한 중국의 동북부 지역과 한반도를 대비하는데 있어 여러 의견이 제시되었다. 첫째는 낭림육괴와 소백산육괴를 중한지괴에 그리고 경기육괴를 양쯔지괴에 비교하는 의견이며(Cluzel *et al.*, 1991; Yin and Nie, 1993, Ree *et al.*, 1996; Min and Cho, 1998), 둘째는 낭림육괴를 중한지괴에 그리고 소백산육괴를 양쯔지괴에 그리고 경기육괴를 충돌대에 비교하는 의견(Liu, 1993), 셋째는 낭림육괴, 경기육괴, 소백산육괴 모두를 중한지괴에 비교하는 의견이다(Chang, 1997). 그리고 네 번째로 낭림육괴를 중한지괴에 경

기육괴를 양쯔지괴에 그리고 소백산육괴를 양쯔지괴 하부에 위치한 커테시안지괴(Cathaysian plate)에 비교하는 의견(Chang, 1996)이 제시되어있다. 하지만 이들 대비 모델의 제시자들은 충분한 근거를 제시하지 못했기 때문에 아직도 이러한 대비 문제는

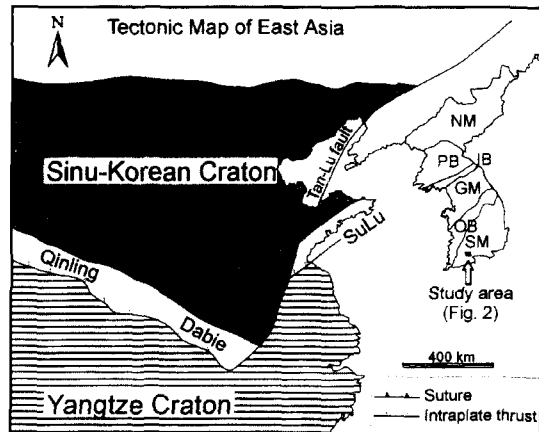


Fig. 1. Schematic tectonic map of East Asia (after Yin and Nie, 1993). NM = Nangrim Massif, PB = Pyeongnam Basin, GM = Gyeonggi Massif, OB = Ogcheon Belt, SM = Sobaksan Massif.

논란의 대상이 되고 있다. 이러한 대비에 큰 장애물중의 하나는 우리나라의 기저를 이루고 있는 경기육괴와 소백산육괴에 대한 연구 부족이다. 특히 소백산육괴에 대한 연구가 매우 부족한 형편이다. 따라서 한반도와 중국의 대비를 통한 동북아시아의 지질학적 해석을 위하여 소백산육괴에 대한 자세한 연구가 필요한 실정이다.

소백산육괴의 서남부 일대에는 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암이 광범위하게 분포되어 있어 (나기창, 1998) 이들 편마암에 대한 연구는 소백산육괴의 지체구조발달과 변성진화과정 연구에 중요하다. 하지만 이들 암석들간의 성인적인 관계와 이들 암석이 경험한 변성진화과정에 대한 연구는 매우 미진한 상태이다. 1990년대 이전의 연구에 의하면 소백산육괴는 수차례의 화성활동과 화강암화 작용을 포함하여 적어도 세차례 이상의 변성작용이 중첩되었으며 최고 변성작용이 각섬암상 내지 상부 각섬암상으로 알려져왔다(이상만, 1980; 이상만과 김형식, 1984; Lee *et al.*, 1986; 송용선과 이상만, 1989; 송용선, 1999). 하지만 1990년대 이후의 보다 자세한 연구들을 통해 소백산육괴의 하동-산청, 김천, 풍기 지역으로부터 백립암상의 변성작용, 고압형 변성조직과 함께 남침식이 보고되고 있다(송용선과 류호정, 1994; 김동연, 1999; 권용완 외, 1999; 류호정과 송용선, 1999; 송용선, 1999). 이러한 결과들은 소백산육괴의 지각 진화과정에 대한 새로운 해석을 위하여 보다 체계적이고 자세한 연구가 필요함을 제시하고 있다. 소백산육괴 서남부 지역중 백립암상의 변성작용을 받은 하동-산청 지역에 대한 변성암석학적 연구가 최근에 활발히 진행되고 있는 반면 승주-순천 지역과 같이 백립암상의 변성작용을 받지 않은 지역에 대해서는 변성암석학적 연구는 거의 수행되지 않은 형편이다.

이 연구의 목적은 소백산육괴 서남부 승주-순천 일대에 분포하는 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암에 대한 광물화학 자료 제시, 변성 온도-압력 조건 결정 그리고 Sm/Nd 전암-석류석 연대와 Rb/Sr 전암-흑운모 연대 연구를 통하여 이들 편마암들이 경험한 변성진화과정을 밝히는데 있다.

일반지질 및 암석기재

연구지역인 전라남도 승주-순천 지역은 괴목도폭(유환수 외, 1993) 남부지역과 순천도폭(이민성 외, 1989) 북부지역에 걸쳐있으며 주로 선캠브리아기의 변성암류로 이루어져 있다. 이들 변성암류의 일부

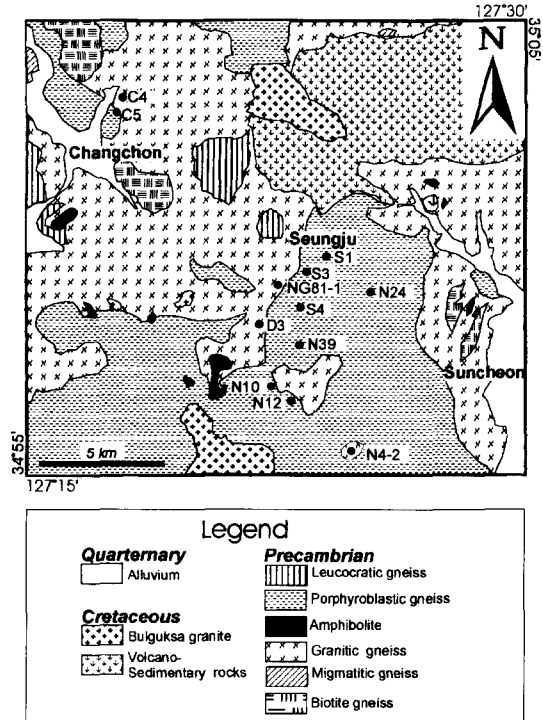


Fig. 2. Geologic map of the study area (after Lee *et al.*, 1989, You *et al.*, 1993).

는 백악기의 퇴적암류와 화산암류에 의해 부정합으로 덮이거나 관입되고 있으며 선캠브리아기의 변성암류와 백악기 퇴적암류와 화산암류는 다시 백악기의 불국사 화강암에 의해 관입당했다(Fig. 2). 변성암류는 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암이 주를 이루며, 이외에 우백질 편마암, 흑운모 편마암, 미그마타이트질 편마암, 그리고 각섬암이 함께 산출된다(Fig. 2). 연구지역에서 북동-남서 주향을 갖으며 남동으로 경사하는 엽리가 우세하나 곳에 따라 다양한 변화를 보인다. 그리고, 연구 지역의 일부에서는 단층 파쇄대 및 압쇄화작용의 흔적들이 관찰된다.

화강암질 편마암은 연구지역의 중서부와 동부에서 비교적 넓게 분포한다. 본암은 국부적으로 유색 광물의 함량의 차이를 보여 우백색이 우세한 곳도 관찰되며 유색광물(주로 흑운모)이 우세한 곳에서는 흑운모의 정향 배열에 의한 편마구조가 관찰된다. 주 구성광물은 중립 내지 조립의 석영, 미사장석, 퍼사이트, 사장석, 흑운모, 백운모, 석류석이며 규선석, 저어론, 인회석, 티탄철석 등이 부수적으로 산출한다. 석류석은 1-3 mm의 반상변정으로 산출하며

경우에 따라서는 석영과 흑운모를 포획하고 있다. 백운모는 0.5 mm 미만의 세립으로 산출하며 일부에서는 사장석의 변질에 의한 2차 광물로서 산출되기도 한다.

흑운모 편마암은 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암 내에 포획암 형태로 산출하며 흑운모로 이루어진 암갈색 대와 석영장석질의 우백색 대의 교호에 의한 뚜렷한 편마구조를 보여준다. 흑운모 편마암의 주 구성광물은 중립질의 석영, 미사장석, 사장석, 흑운모 및 백운모이다. 우백질 편마암은 큰 규모로는 중북부 화강암질 편마암 내에 관입의 형태로 나타나며 관입 접촉부에서 석류석이 관찰된다. 또한 우백질 편마암은 소규모로 반상변정질 편마암을 관입하며 주 구성광물은 중립 내지 조립질의 석영, 사장석 및 정장석이고 간혹 흑운모와 석류석이 주 구성광물과 수반되어 나타난다.

미그마타이트질 편마암은 연구지역 일부에서 소규모로 나타나며 암갈색 대와 우백색 대가 서로 교호하면서 호상구조를 보이거나 전체적으로 티그마틱 습곡등이 발달하면서 원래의 편마구조가 교란되어 나타난다. 미그마타이트질 편마암은 주로 석영, 퍼사이트, 미사장석, 사장석, 흑운모 석류석등으로 구성되어 있다. 각섬암은 여러지역에 소규모로 산출되며 주로 각섬석과 사장석으로 되어 있으며 약간의 흑운모와 석영을 포함한다. 미그마타이트질 편마암 및 각섬암과 주변암인 화강암질 편마암, 반상변정질 편마암 및 우백질 편마암의 관계는 분명치 않다.

반상변정질 편마암은 화강암질 편마암과 함께 연구지역을 대표하는 암석으로 연구지역의 중남부 및 북부에서 나타난다. 반상변정은 주로 미사장석이나 퍼사이트로 되어있고 보통 5 cm 내외의 크기이나 일부 지역에서는 10 cm 이상의 거정으로 산출된다. 이들은 대부분 엽리에 평행하게 장방형의 배열을 보이고 일부 지역에서는 안구상 편마암의 형태로 나타난다. 주구성광물은 석영, 사장석, 미사장석, 퍼사이트, 흑운모, 석류석이고 저어콘과 인회석이 부수적으로 산출한다. 일부 시료에서는 근청석, 홍주석 및 규선석이 관찰된다. 석류석은 보통 중립질이고 경우에 따라서는 흑운모와 사장석을 포획하고 있으며 매우 드물게는 석류석이 장석 반상변정내에 산출한다.

김용준(1988)은 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암에 대한 지화학적 연구에서 두 편마암을 일련의 화성활동의 산물로서 해석하였다. 주승환과 김성재(1986)는 보성-순창 지역의 화강암질 편마암과

반상변정질 편마암에 대해 각각 $2,230 \pm 50$ Ma와 $2,090 \pm 60$ Ma의 Rb/Sr 전암연령을 보고하였다. 한편, 연구지역의 인접지역에서 Turek and Kim(1996)은 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암으로 부터 $1934 \pm 14 \sim 2120 \pm 10$ Ma, $1890 \pm 6 \sim 1945 \pm 5$ Ma의 U/Pb 저어콘 연대를 보고한 바 있다. 비록 두 연구에서의 연대측정 결과가 약 100-200 Ma의 차이를 보이고 있으나, 두 연구 모두 화강암질 편마암보다 후기에 반상변정질 편마암이 관입하였음을 지시하며 이는 반상변정질 편마암이 화강암질 편마암을 관입하고 있는 야외관찰 결과와 잘 일치하고 있다. 김용준(1986)은 Ar/Ar 연령 측정 방법을 이용하여 연구 지역의 변성작용 연대로 예상되는 1998 ± 8 Ma의 각섬석 연대, 1330 ± 2 Ma의 백운모 연대 그리고 261 ± 2 Ma 흑운모 연대를 보고하였다. 하지만 이들 자료가 연속적인 냉각 시기를 지시하는지 혹은 서로 독립된 열 역사를 지시하는지 현재로서는 확실하지 않다. 한편, 김동연(1999)은 하동-산청 지역에 산출하는 백립암상의 변성작용을 받은 차노카이트로부터 1820 ± 11 Ma 전암-석류석 Sm/Nd 연대를 보고하였다.

분석 방법

광물의 화학조성을 알기 위하여 각 편마암의 대표 표품(화강암질 편마암 4개, 반상변정질 편마암 8개)에 대하여 연마편을 제작하여 전자현미분석(EPMA)을 실시하였고, 전자현미분석은 고려대학교 전략광물자원센터(CMR)의 JEOL JXA-8600을 사용하였다. 분석조건은 가속전압 15 kv, 빔(beam) 직경은 5 μ m, 그리고 빔 전류는 10 nA이다. 분석치 보정은 ZAF 방법을 사용하였다. 각 원소의 분석에 사용된 표준광물은 천연산 혹은 합성광물로서 알바이트(albite; Na, Al, Si), 규회석(wollastonite; Ca), 정장석(K-feldspar; K), 알만딘(almandine; Fe), 장미석(rhodonite; Mn), 파이로프(pyrope; Mg), 그리고 합성 TiO_2 (Ti)이다. 광물성분의 분석자료에서 Fe 값은 모두 Fe^{2+} 로 계산되었다.

동위원소 분석을 위하여 텅스텐 카바이드 불필을 이용하여 전암 분말 시료가 제작되었으며, 실제 현미경을 통하여 순수한 석류석과 흑운모가 분리되었다. Sm-Nd 및 Rb-Sr 동위원소 분석을 위하여 시료 약 100 mg에 ^{149}Sm - ^{150}Nd spike를 넣은 후 혼합산(HF : HNO₃ : HClO₄ = 4 : 1 : 1)으로 용해하였다. 양이온 교환수지(Dowex AG 50W-X8, H⁺ form, 200~400#)를 이용하여 Rb, Sr 그리고 희토류원소를

단체분리한 후 HDEHP(Hexyl di-ethyl hydrogen phosphate)을 입힌 테플론 분말을 이용하여 Sm과 Nd를 분리하였다. 동위원소 분석은 대전 기초과학연구원 연구소의 열이온화 질량분석기(VG54-30)를 이용하여 수행되었다. 분석된 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 은 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 로 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 은 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 로 동위원소 분별효과를 보정하면서 역동모드(dynamic mode)로 측정하였고 그 오차는 평균표준오차의 2 σ 값으로 보고된다. 반복측정에 의한 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 과 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 의 실험오차는 각각 0.5%와 1% 미만이었으며, 분석시 Nd 및 Sr의 배경 값은 각각 1ng과 0.3 ng 미만이었다. 함께 측정된 La Jolla 표준시료의 평균 값은 0.511844 ± 0.000005 (2 σ , N = 17)이고 NBS987 표준시료의 평균 값은 0.710237 ± 0.000007 (2 σ , N = 13)이다. 연대계산에 사용된 ^{147}Sm 과 ^{87}Rb 의 붕괴상수는 각각 $6.54 \times 10^{-12}/\text{yr}$ 와 $1.42 \times 10^{-11}/\text{yr}$ (Faure, 1986)이고, 계산은 Ludwig(1994)의 ISOPLOT 프로그램을 사용하였다.

광물 화학

석류석

석류석은 연구지역을 구성하는 암석에 나타나는 대표적인 변성광물로서 반자형 내지 타형의 반상변정으로 산출된다. 석류석 내 포획광물로는 주로 석영, 흑운모, 사장석이 주를 이루고 있으며 드물게 백운모, 저어콘 그리고 티탄철석이 관찰된다. 화강암질 편마암 및 반상변정질 편마암에 산출하는 석류석의 성분은 (Ca+Mn)-Mg-Fe 삼각도에 나타내었다(Fig. 3). 전반적으로 반상변정질 편마암내 석류석은 Mg가 높은 반면, 화강암질 편마암내 석류석은 Fe가 상대적으로 높은 경향을 보인다. 하지만 화강암질 편마암의 한 시료(NG 81-1)에서는 중심부 성분이 반상변정질 편마암의 성분 범위 내에 접시된다. 전체적으로 중심부가 주변부보다 Mg 성분이 높게 나타난다. 한편, 화강암질 편마암내 석류석에서는 Ca+Mn 함량의 변화가 상대적으로 심한 반면 반상변정질 편마암내 석류석에서는 Fe-Mg 변화가 크게 나타난다. 화강편마암과 반상변정질 편마암에서 산출하는 석류석의 화학조성의 다르기 때문에 각각의 암체에 대해 구분하여 기술하였다.

화강암질 편마암

화강암질 편마암에 산출하는 석류석은 75-88 mol%의 알만딘, 2-11 mol%의 파이로프, 1-15

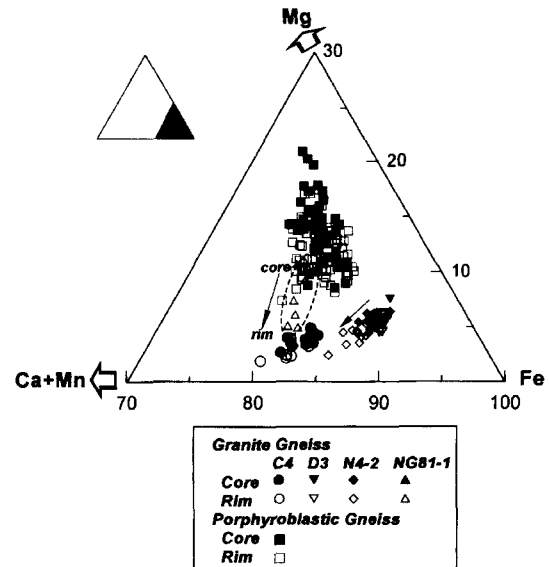


Fig. 3. The compositions of garnets from granitic and porphyroblastic gneisses in the Mg-Fe-(Ca+Mn) ternary diagram.

mol%의 스페살틴(spessartine) 그리고 3-9 mol%의 그로술라(grossular) 함량을 갖는다(Table 1). X_{Fe} 의 값은 0.88-0.98의 범위를 갖지만 대부분 0.93-0.96의 제한된 성분변화를 보인다. 시료 C4내 석류석의 경우 다른 화강암질 편마암 시료내 석류석에 비해 알만딘 함량이 낮은 반면, 그로술라는 8-9 mol%로 3-5 mol%정도 높다. 그리고 시료 NG81-1내 석류석은 알만딘이 75-81 mol%로 가장 낮지만 파이로프와 스페살틴은 각각 5-11 mol%와 5-15 mol%로 가장 높다. 각 시료간의 석류석의 성분 차이는 전암 성분과 상관이 있을 것으로 생각된다.

Fig. 4는 NG81-1의 석류석의 누대구조를 나타내는 그림으로 중심부에서는 파이로프와 스페살틴 성분이 대체적으로 일정한데 비해 최외곽부에서 파이로프는 급격히 감소하고 스페살틴은 급격히 증가하는 경향을 보인다. 이에 비해 알만딘은 크게 변화하지 않는다. 그 결과 중심부에서는 X_{Fe} 가 일정하다가 최외곽부에서 증가하는 현상이 나타난다. 그로술라의 경우 중심부에서 주변부쪽으로 점차적으로 감소하는 경향을 보여주나 그 변화 양이 파이로프와 스페살틴에 비해 적다. NG81-1내 일부 석류석의 최외곽부는 다른 최외각부보다 중심부와 유사한 스페살틴과 파이로프 성분을 보여준다(Table 6).

Fig. 5는 시료 N4-2 내에 산출하는 석류석의 누대 구조를 나타내는 그림이다. N4-2 내 석류석의 전

Table 1. Representative compositions of garnets from granitic gneiss.

Sample remarks	C4			D3			N4-2			NG81-1												
	core	rim	core	core	rim	core	core	rim	core	rim	core	rim										
SiO ₂	36.12	35.96	35.75	36.04	36.26	36.11	36.51	36.45	35.63	35.67	36.03	36.38	36.62	36.26	36.45	37.35	37.05	36.76	35.86	35.73		
TiO ₂	0.00	0.03	0.03	0.04	0.03	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.06	0.20	0.00	0.00		
Al ₂ O ₃	19.79	20.83	21.03	20.48	20.75	20.42	20.95	20.48	20.81	20.25	20.37	20.10	20.57	20.78	20.76	20.68	20.24	20.48	20.43	20.19		
FeO	36.77	37.25	37.19	36.21	36.50	36.16	38.45	38.72	39.04	38.38	38.68	38.54	38.42	37.44	38.20	38.14	36.43	35.47	36.24	35.76	34.04	
MnO	2.04	1.90	2.16	3.58	2.45	3.32	1.07	1.95	1.65	2.64	1.85	2.02	1.79	3.94	1.59	2.95	2.79	2.50	2.48	4.55	3.50	
MgO	1.10	1.06	0.89	0.53	0.79	0.58	1.87	1.17	1.38	0.99	1.28	1.38	1.29	0.60	1.21	1.13	2.50	2.73	2.61	1.50	1.89	
CaO	2.89	2.95	2.99	2.81	2.87	2.81	1.00	1.04	1.05	1.15	1.28	1.52	1.34	1.30	1.40	1.38	1.60	1.96	1.86	1.37	1.86	
Na ₂ O	0.38	0.02	0.00	0.03	0.00	0.04	0.02	0.00	0.30	0.34	0.54	0.21	0.37	0.26	0.29	0.24	0.19	0.32	0.46	0.39		
Total	99.09	100.00	100.04	99.72	99.65	99.48	99.89	99.80	100.49	100.44	99.27	99.69	99.78	99.97	100.01	100.90	100.82	100.93	100.73	100.94	100.11	100.16
	12(O)																					
Si	2.967	2.934	2.918	2.961	2.973	2.973	2.977	2.955	2.971	2.975	2.931	2.919	2.939	2.988	2.981	2.936	2.924	2.984	2.974	2.967	2.904	2.900
Al ^{IV}	0.033	0.066	0.082	0.039	0.027	0.027	0.023	0.045	0.029	0.025	0.069	0.081	0.061	0.012	0.019	0.064	0.076	0.016	0.026	0.033	0.096	0.100
Al ^{VI}	1.882	1.935	1.940	1.943	1.977	1.952	1.988	1.929	1.965	1.975	1.893	1.867	1.896	1.933	1.953	1.918	1.885	1.930	1.887	1.914	1.853	1.829
Ti	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.004	0.012	0.000	0.000
Fe	2.526	2.542	2.539	2.488	2.503	2.489	2.621	2.650	2.657	2.620	2.661	2.637	2.621	2.572	2.600	2.583	2.444	2.370	2.432	2.414	2.446	2.310
Mg	0.135	0.129	0.108	0.065	0.097	0.071	0.227	0.143	0.167	0.120	0.157	0.168	0.157	0.073	0.147	0.136	0.299	0.325	0.312	0.180	0.228	0.161
Mn	0.142	0.131	0.149	0.249	0.170	0.231	0.074	0.135	0.114	0.183	0.129	0.140	0.124	0.274	0.110	0.202	0.190	0.169	0.169	0.311	0.240	0.46
Ca	0.254	0.258	0.262	0.247	0.252	0.248	0.087	0.091	0.092	0.101	0.113	0.133	0.117	0.114	0.122	0.120	0.138	0.168	0.160	0.118	0.161	0.144
Na	0.061	0.003	0.000	0.005	0.000	0.006	0.003	0.052	0.003	0.000	0.048	0.054	0.085	0.033	0.058	0.041	0.045	0.037	0.030	0.050	0.072	0.691
X _{Fe}	0.95	0.95	0.96	0.97	0.96	0.97	0.92	0.95	0.94	0.96	0.94	0.94	0.94	0.97	0.95	0.95	0.89	0.88	0.89	0.93	0.91	0.93
X _{alm}	0.83	0.83	0.83	0.82	0.83	0.82	0.87	0.88	0.88	0.87	0.87	0.86	0.87	0.85	0.87	0.85	0.80	0.78	0.79	0.80	0.80	0.75
X _{pyr}	0.04	0.04	0.04	0.02	0.03	0.02	0.08	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.02	0.05	0.04	0.10	0.11	0.10	0.06	0.07	0.05
X _{sp}	0.05	0.04	0.05	0.08	0.06	0.08	0.02	0.04	0.04	0.06	0.04	0.05	0.04	0.09	0.04	0.07	0.06	0.06	0.05	0.10	0.08	0.15
X _{grs}	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05

X_{Fe} represents Fe/(Fe+Mg).
 X_{alm}=Fe/D, X_{pyr}=Mg/D, X_{sp}=Mn/D and X_{grs}=Ca/D, where D= Fe+Mg+Mn+Ca.

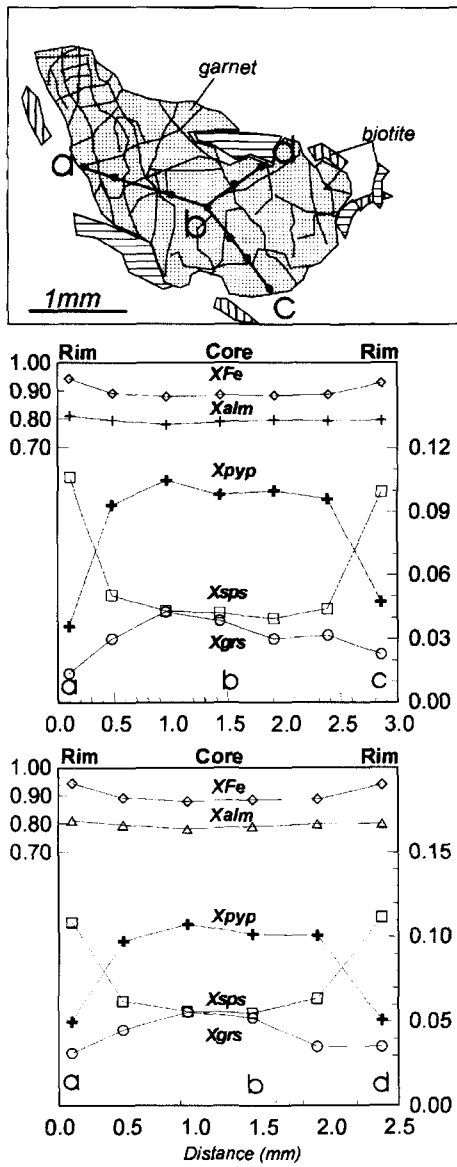


Fig. 4. The compositional profiles of garnet from granitic gneiss (sample NG81-1).

반적인 성분변화는 NG81-1의 석류석에서와 같이 중심부에서 주변부로 X_{Fe} , 스페살틴은 증가하는 반면, 파이로프는 감소하나 NG81-1에서와 달리 석류석의 알만딘 성분이 최외곽부에서 약간 감소하는 경향이 나타나며 그로슬라 성분은 크게 변화하지 않는다. Fig. 5의 a-b 축선에서는 중심부에서 파이로프와 스페살틴은 약간의 변화는 있으나 대체적으로 일정하며 최외곽부에서는 파이로프가 급격히 감

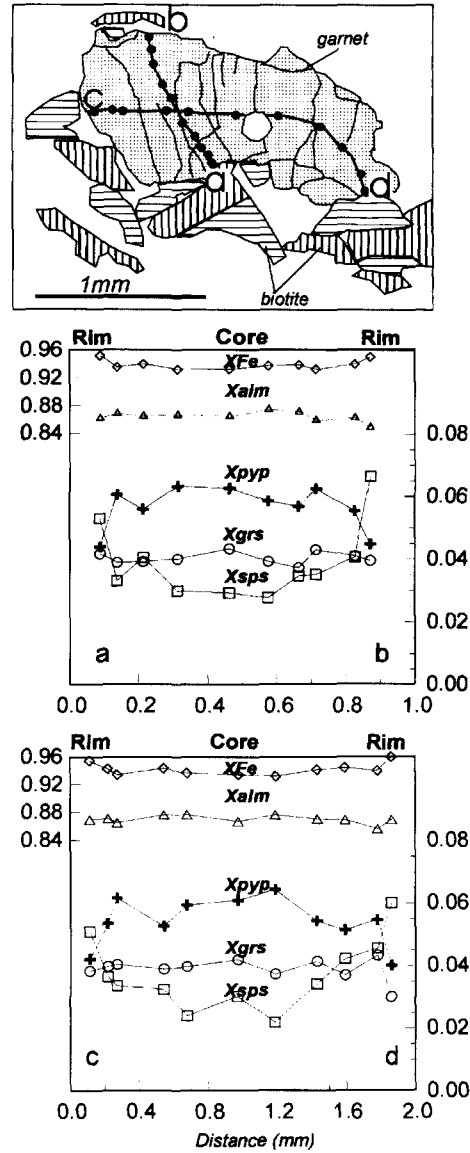


Fig. 5. The compositional profiles of garnet from granitic gneiss (sample N4-2).

소하고 스페살틴이 급격히 증가하는 대칭적인 성분 경향을 보인다. 이에 비해 c-d 축선에서 중심에서 d 방향으로 파이로프의 감소와 스페살틴의 증가가 상대적으로 완만하다. c-d와 같은 장축 방향으로 성분이 완만하게 변화하는 사실은 석류석내에 파이로프가 감소하고 스페살틴이 증가하는 시기에 단축 방향인 a-b 방향보다는 c-d 방향으로 주로 성장하였음을 지시한다.

Table 2. Representative compositions of garnets from porphyroblastic gneiss.

samples remarks	C5		N10		N12		N24		N39		S1		S3		S4									
	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim								
SiO ₂	36.88	37.78	36.54	36.67	37.00	36.51	37.35	37.59	37.59	36.37	36.41	37.04	37.57	37.35	36.72	37.06	36.99	36.73	36.95	36.97	36.44	36.66	36.33	
TiO ₂	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.12	0.02	0.08	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Al ₂ O ₃	21.14	21.65	20.61	21.14	20.45	20.36	20.97	20.89	20.41	20.65	21.31	21.09	21.00	20.43	20.67	20.66	20.69	21.11	20.40	21.21	20.99	20.53	20.44	20.83
FeO	33.93	33.17	35.31	35.54	36.32	36.50	36.21	35.56	36.14	36.68	34.81	36.07	34.73	36.01	35.11	34.79	35.23	34.89	35.62	34.11	35.61	35.11	34.89	35.03
MnO	1.10	0.49	1.16	0.77	1.83	1.58	1.26	1.04	1.43	1.44	1.32	1.83	1.36	1.82	2.08	1.63	2.01	1.40	2.01	0.98	1.97	2.01	2.40	
MgO	4.51	4.90	3.11	3.19	2.89	2.79	3.66	3.75	3.07	2.41	4.48	3.05	4.41	2.59	1.85	3.69	3.62	3.39	2.55	3.87	2.19	2.77	2.54	
CaO	1.61	1.45	1.47	1.64	1.90	1.76	1.11	1.29	1.22	1.14	1.42	1.58	1.31	1.33	1.33	1.68	1.63	2.04	2.33	2.25	2.19	1.69	1.65	
Na ₂ O	0.46	0.00	0.37	0.00	0.39	0.30	0.40	0.28	0.26	0.31	0.20	0.18	0.18	0.35	0.39	0.29	0.36	0.24	0.33	0.42	0.50	0.34	0.30	
Total	99.63	99.44	98.57	99.01	100.78	99.80	101.02	100.26	99.37	99.83	100.89	100.86	100.89	100.38	100.28	99.54	99.31	100.62	99.13	99.32	99.49	99.49	100.82	99.53
I2(O)																								
Si	2.938	3.014	2.975	2.978	2.957	2.951	2.959	2.986	2.980	2.974	2.939	3.000	2.973	2.930	2.946	2.953	2.979	2.982	2.977	2.965	2.959	2.972	2.996	2.976
Al ^{IV}	0.062	0.000	0.025	0.022	0.043	0.049	0.041	0.014	0.020	0.026	0.061	0.000	0.027	0.070	0.054	0.047	0.021	0.018	0.023	0.035	0.041	0.028	0.004	0.024
Al ^{VI}	1.921	2.034	1.951	2.060	1.881	1.889	1.916	1.951	1.924	1.942	1.921	1.982	1.929	1.868	1.916	1.893	1.911	1.966	1.925	1.963	1.936	1.928	1.947	1.950
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	
Fe	2.260	2.213	2.404	2.414	2.427	2.467	2.399	2.375	2.445	2.483	2.299	2.407	2.297	2.426	2.376	2.319	2.336	2.316	2.415	2.282	2.382	2.376	2.365	2.358
Mg	0.536	0.583	0.378	0.386	0.344	0.336	0.432	0.446	0.370	0.291	0.527	0.363	0.520	0.311	0.223	0.439	0.428	0.403	0.308	0.462	0.261	0.334	0.307	0.479
Mn	0.074	0.033	0.080	0.053	0.124	0.108	0.085	0.070	0.098	0.130	0.090	0.097	0.088	0.227	0.308	0.124	0.091	0.123	0.143	0.041	0.136	0.096	0.138	0.067
Ca	0.137	0.124	0.128	0.143	0.163	0.152	0.094	0.110	0.106	0.099	0.120	0.121	0.134	0.113	0.115	0.181	0.178	0.144	0.142	0.175	0.200	0.195	0.190	0.143
Na	0.071	0.000	0.058	0.000	0.060	0.047	0.061	0.043	0.041	0.049	0.031	0.028	0.028	0.055	0.061	0.045	0.055	0.037	0.052	0.065	0.078	0.053	0.047	0.000
X _{Fe}	0.81	0.79	0.86	0.86	0.88	0.88	0.85	0.84	0.87	0.90	0.81	0.87	0.82	0.89	0.91	0.84	0.85	0.85	0.89	0.83	0.90	0.88	0.89	0.83
X _{alm}	0.75	0.75	0.80	0.81	0.79	0.81	0.80	0.79	0.81	0.83	0.76	0.81	0.76	0.79	0.79	0.76	0.77	0.78	0.80	0.77	0.80	0.79	0.79	0.77
X _{pyr}	0.18	0.20	0.13	0.13	0.11	0.11	0.14	0.15	0.12	0.10	0.17	0.12	0.17	0.10	0.07	0.14	0.14	0.13	0.10	0.16	0.09	0.11	0.10	0.16
X _{sps}	0.02	0.01	0.03	0.02	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.07	0.10	0.04	0.03	0.04	0.05	0.01	0.05	0.03	0.05	0.02
X _{grs}	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05

Same abbreviations in Table 1 are used.

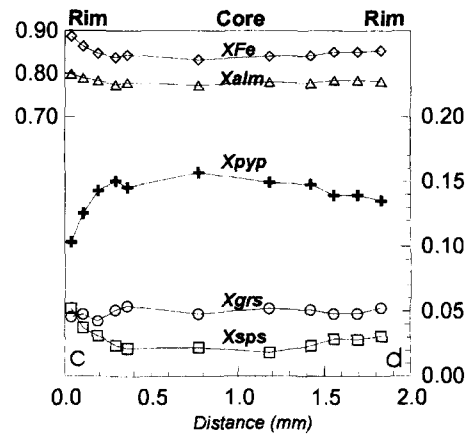
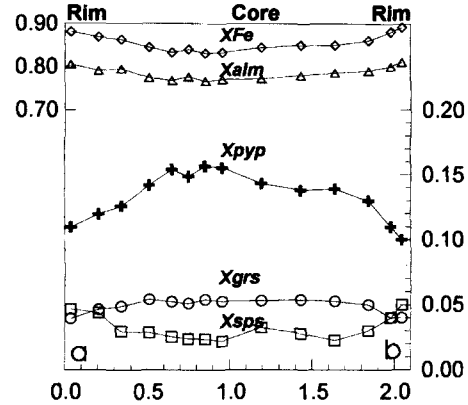
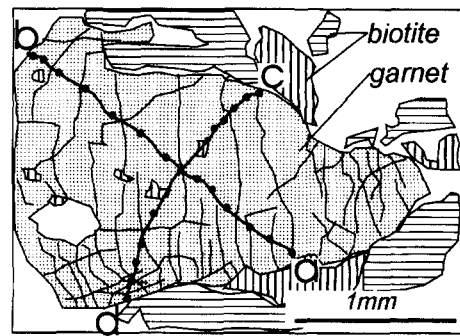
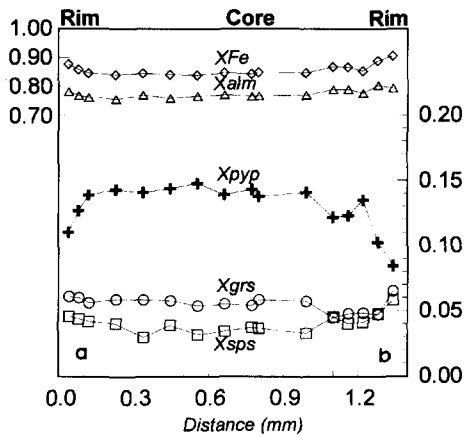
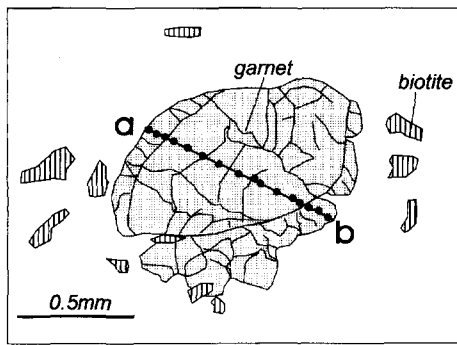


Fig. 6. The compositional profile of garnet from porphyroblastic gneiss (sample S1).

반상변정질 편마암

반상변정질 편마암내 석류석은 73-83 mol%의 알만딘, 8-17 mol%의 파이로프, 1-10 mol%의 스페살틴 그리고 2-7 mol%의 그로술라 함량을 갖는다. X_{Fe} 의 값은 0.78-0.91의 범위를 갖으며 대체적으로 주변부에서 약간 증가한다(Table 2). Fig. 6은 시료 S1내 석류석의 누대구조를 나타내는 그림으로 중심부에서는 X_{Fe} , 파이로프, 알만딘, 스페살틴이 대체적으로 일정하나 외곽부에서 파이로프는 급격히 감소하는 반면 X_{Fe} 와 스페살틴은 증가하는 경향을 보이며 화학성분의 변화가 대체적으로 대칭이다. 현미경 관찰시 성분의 변화를 보이는 석류석 외곽부는 석류석 내부와 균열에 의하여 뚜렷한 경계를 갖으며 이 균열은 외곽부가 새로이 형성되기 이전의 석류석 결정의 경계로 생각된다. 시료 S4 석류석내 장축 방향인 a-b 축선에서는 S1 석류석의 경우와 마찬가지로 중심부에서 주변부로 가면서 대칭적으로 파이로프가 감소하며 스페살틴과 X_{Fe} 가 증가하지만 성분의 변화율은 S1 석류석에 비해 완만하다(Fig.

Fig. 7. The compositional profiles of garnet from porphyroblastic gneiss (sample S4).

7). 이에 반해 S4 석류석내 단축 방향인 c-d 축선에서 c 방향으로 S1 석류석의 경우와 같이 최외곽부에서 파이로프가 급격히 감소하고 스페살틴과 X_{Fe} 가 증가하는 경향을 보이는 반면 d 방향에서는 주변부로는 성분 변화가 적어 최외곽부의 성분이 중앙부와 크게 다르지 않는 비대칭적인 화학성분의 변화가 관찰된다. 반상변정질 편마암 S4내에서 석

Table 3. Representative compositions of biotites from granitic and porphyroblastic gneisses.

samples remarks	Granitic Gneiss										Porphyroblastic Gneiss																		
	C4		D3		N4-2		NG81-1		C5		N10		N12		N12		N24		N39		S1		S3		S4				
	inclusion	matrix	inclusion	matrix	inclusion	matrix	inclusion	matrix	inclusion	matrix	inclusion	matrix	inclusion	matrix	inclusion	matrix	inclusion	matrix	inclusion	matrix	inclusion	matrix	inclusion	matrix	inclusion	matrix			
SiO ₂	33.04	32.04	33.08	32.51	32.03	32.61	33.58	34.06	33.73	32.46	33.16	34.87	34.92	35.24	34.50	34.65	34.76	33.26	34.40	35.43	34.75	34.94	35.11	34.33	35.80	34.41	34.84	34.87	34.17
TiO ₂	4.53	1.63	3.41	2.86	0.74	1.26	4.13	0.00	1.41	1.93	1.59	3.01	3.23	2.99	2.36	2.70	1.19	1.07	0.69	2.25	4.36	1.98	2.98	4.68	2.78	3.57	2.43	3.09	2.11
Al ₂ O ₃	16.81	18.82	16.78	17.80	19.84	18.48	18.37	20.08	19.19	17.95	18.45	18.89	19.19	17.00	17.38	18.55	19.67	20.15	20.47	18.33	17.44	18.77	18.33	17.58	17.56	18.02	18.02	18.54	19.03
FeO	25.36	29.02	28.42	29.05	30.60	29.90	26.19	27.36	27.73	26.59	25.87	18.12	20.07	20.83	21.32	21.31	20.88	21.23	21.61	18.49	19.98	20.45	19.98	21.39	16.88	20.98	20.82	20.76	21.46
MnO	0.00	0.10	0.00	0.11	0.23	0.16	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.08	0.12	0.00	0.12	0.00	0.00	0.10	0.23	0.00	0.08	0.05	0.00	0.00
MgO	4.71	3.57	3.65	2.93	3.33	2.94	3.49	2.90	3.01	5.04	5.19	10.50	8.60	8.82	9.25	7.25	8.03	7.70	7.86	10.58	8.65	8.77	9.34	7.35	11.55	7.57	8.75	8.28	8.21
CaO	0.00	0.08	0.00	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.04	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.04	0.00	0.05	0.00
Na ₂ O	0.25	0.04	0.30	0.05	0.04	0.02	0.39	0.31	0.40	0.40	0.33	0.45	0.29	0.50	0.29	0.36	0.32	0.40	0.44	0.43	0.34	0.37	0.35	0.48	0.64	0.28	0.12	0.11	0.28
K ₂ O	9.21	8.83	9.70	9.56	7.29	8.65	9.58	9.85	9.90	9.65	9.65	8.94	9.38	9.23	9.41	9.82	9.77	9.44	9.66	9.92	9.96	9.80	10.18	9.99	9.52	10.05	8.60	8.76	8.87
Total	93.91	94.13	95.34	94.88	94.13	94.04	95.92	94.56	95.65	94.02	94.24	94.78	95.78	94.61	94.51	94.99	94.80	93.71	95.33	95.71	95.63	95.08	96.63	96.17	94.97	95.00	93.63	94.46	94.13
H1(O)																													
Si	2.653	2.606	2.663	2.635	2.596	2.660	2.645	2.726	2.686	2.628	2.659	2.652	2.657	2.730	2.688	2.688	2.688	2.615	2.653	2.689	2.666	2.691	2.664	2.644	2.713	2.672	2.712	2.689	2.660
Al ^{IV}	1.347	1.394	1.337	1.365	1.404	1.340	1.355	1.274	1.314	1.372	1.341	1.348	1.343	1.270	1.312	1.312	1.312	1.385	1.347	1.311	1.334	1.309	1.336	1.356	1.287	1.328	1.288	1.311	1.340
Al ^{VI}	0.243	0.409	0.254	0.334	0.490	0.435	0.349	0.619	0.485	0.340	0.401	0.344	0.376	0.281	0.283	0.382	0.479	0.481	0.512	0.327	0.242	0.383	0.302	0.239	0.280	0.320	0.364	0.373	0.405
Ti	0.274	0.100	0.206	0.174	0.045	0.077	0.245	0.000	0.084	0.118	0.096	0.172	0.185	0.174	0.138	0.158	0.069	0.063	0.040	0.128	0.252	0.115	0.170	0.271	0.158	0.208	0.142	0.179	0.124
Fe	1.703	1.974	1.913	1.969	2.074	2.039	1.725	1.832	1.846	1.800	1.735	1.153	1.277	1.350	1.389	1.382	1.350	1.396	1.394	1.174	1.282	1.317	1.268	1.378	1.070	1.362	1.355	1.339	1.397
Mn	0.000	0.007	0.000	0.008	0.016	0.011	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.000	0.005	0.003	0.000	0.000
Mg	0.564	0.433	0.438	0.354	0.402	0.357	0.410	0.346	0.357	0.608	0.620	1.191	0.975	1.019	1.074	0.838	0.926	0.903	0.904	1.197	0.989	1.007	1.056	0.844	1.305	0.876	1.015	0.952	0.953
Ca	0.000	0.007	0.000	0.001	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.002	0.003	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.003	0.000	0.004	0.000
Na	0.039	0.006	0.047	0.008	0.006	0.003	0.060	0.048	0.062	0.063	0.051	0.066	0.043	0.075	0.044	0.054	0.048	0.061	0.066	0.063	0.051	0.055	0.051	0.072	0.094	0.042	0.018	0.016	0.042
K	0.944	0.916	0.996	0.989	0.754	0.900	0.963	1.006	1.006	0.997	0.987	0.868	0.910	0.912	0.935	0.972	0.964	0.947	0.950	0.961	0.975	0.963	0.985	0.982	0.920	0.995	0.854	0.862	0.881
X _{Fe}	0.75	0.82	0.81	0.85	0.84	0.85	0.81	0.84	0.84	0.75	0.74	0.49	0.57	0.57	0.56	0.62	0.59	0.61	0.61	0.50	0.56	0.57	0.55	0.62	0.45	0.61	0.57	0.58	0.59

X_{Fe} represents Fe/(Fe+Mg).

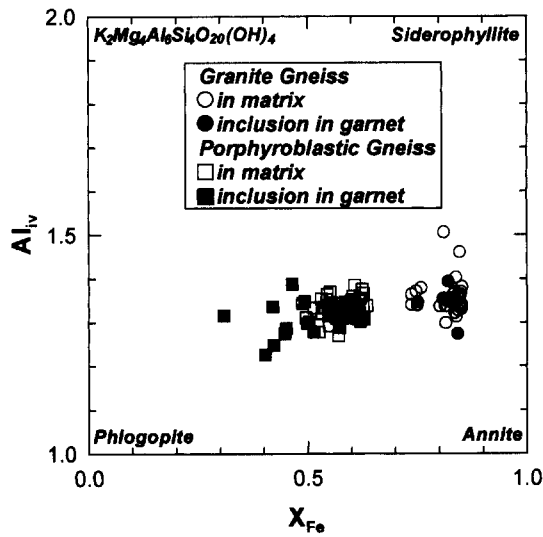


Fig. 8. The compositions of biotite from granitic and porphyroblastic gneisses in $Al^{IV}-X_{Fe}$ diagram.

류석의 장축 방향으로 성분의 변화가 완만한 사실은 화강암질 편마암인 N4-2 경우와 마찬가지로 석류석이 장축 방향으로 주로 성장하였음을 지시한다. d 방향에서 나타나는 화학성분의 비대칭성은 이 방향의 최외각부가 석류석 성장 마지막 시기에 성장을 하지 못하였거나 변성진화과정 후기에 석류석이 분해됨으로서 형성되었을 것으로 생각된다.

흑운모

흑운모는 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암의 주구성광물을 이루며, 호상 구조가 발달된 시료에서는 주 엽리를 이루고 있다. 흑운모의 화학조성은 Table 3에 나타내었다. 연구 지역의 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암에서 산출하는 흑운모 조성의 변화를 알아보기 위해 X_{Fe} 에 대한 Al^{IV} 의 변화를 Fig. 8에 도시하였다. 두 편마암의 흑운모는 매우 제한된 범위 내에서 유사한 Al^{IV} 값을 갖지만 X_{Fe} 값에 의해 확연히 구분되어진다. 화강암질 편마암의 경우 흑운모의 X_{Fe} 값은 0.75-0.85정도의 높은 값을 보인다. 반상변정질 편마암의 흑운모는 X_{Fe} 값은 0.3-0.65로서 화강암질 편마암내 흑운모의 X_{Fe} 값에 비해 낮지만 그 범위는 상대적으로 넓다. 그리고 반상변정질 편마암내에서 기질에 나타나는 흑운모의 경우 X_{Fe} 값은 0.5-0.65로서 포획물로 나타나는 흑운모의 X_{Fe} 값에 비해 제한된 범위를 갖는다. 반상변

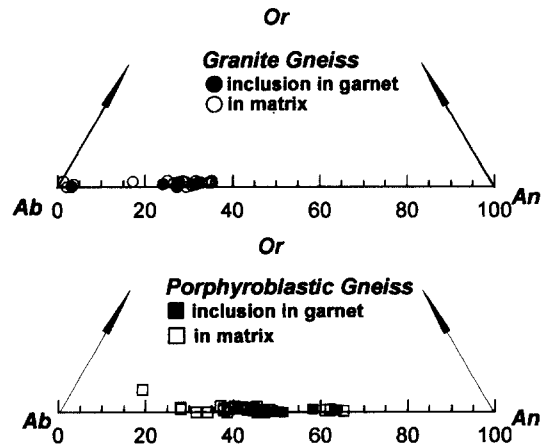


Fig. 9. The compositions of plagioclases from granitic and porphyroblastic gneisses in the Or-Ab-An ternary diagram.

정질 편마암내의 흑운모가 화강암질 편마암내의 흑운모에 비해 낮은 X_{Fe} 를 갖는 경향은 반상변정질 편마암내의 석류석이 화강암질 편마암내의 석류석에 비해 낮은 X_{Fe} 를 갖는 경향과 함께 반상변정질 편마암이 화강암질 편마암에 비해 전암성분의 X_{Fe} 가 낮음을 지시한다.

사장석

사장석은 연구지역의 편마암류에 보편적인 주구성광물로서 화학조성은 Table 4와 Fig. 9에 나타내었다. 화강암질 편마암 내에 산출하는 사장석은 An_{3-34} 의 범위를 보이지만 대부분 올리고클레이스-안데신에 속한다. 한편, 반상변정질 편마암 내의 사장석은 각 시료 내에서는 An 함량이 10 mol%의 제한된 성분변화를 보이지만, 전체적인 사장석의 성분은 올리고클레이스-라브라도라이트에 이르는 넓은 변화를 보인다. S-3 시료에서 석류석 내에 포획되어 산출하는 사장석은 주변부의 것보다 대체로 An성분이 2-17 mole% 정도 낮다(Table 4).

기타

화강암질 편마암 시료중 N4-2, D3, NG81-1의 기질에서 백운모가 관찰된다. C4의 경우는 장석의 변질에 의해 생성된 2차적 백운모만이 관찰된다. 이에 반해 반상변정질 편마암에서는 N12 시료를 제외하고는 백운모가 관찰되지 않는다. N12 시료에서는 백운모가 근청석 및 홍주석과 함께 관찰된다. 백

Table 4. Representative compositions of plagioclases from granitic porphyroblastic gneisses.

Sample remarks	Granitic Gneiss										Porphyroblastic Gneiss																
	C4		D3		N4-2		NG81-1		C5		N10		N12		N24		N39		S1		S3		S4				
	inclusion	matrix	matrix	core	matrix	inclusion	matrix	inclusion	matrix	inclusion	matrix	matrix	matrix	matrix	matrix	matrix	matrix	matrix	matrix	inclusion	matrix	inclusion	matrix				
SiO ₂	67.58	60.28	59.96	58.51	61.34	63.85	59.71	60.87	60.20	58.44	55.80	56.22	58.29	61.63	57.97	57.89	62.99	58.46	58.42	56.40	56.57	53.80	52.45	52.49	57.37	57.78	56.78
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.04	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.07	0.00	0.01	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	19.73	24.19	25.18	25.63	24.22	22.36	25.19	23.99	24.70	26.19	27.29	27.30	26.06	24.13	26.09	26.04	22.95	25.51	25.72	27.20	26.63	28.78	29.61	29.90	27.13	25.93	27.03
FeO	0.64	0.46	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.52	0.31	0.00	0.00	0.00	0.41	0.00	0.30	0.32	0.00	0.00	0.19	0.29	0.23	0.31	0.33	0.38	0.11	0.00	0.29
CaO	0.67	5.72	6.81	7.09	5.80	3.51	6.95	6.03	6.31	7.34	9.46	9.79	6.89	5.73	8.61	8.64	3.47	7.70	8.24	9.50	9.58	11.78	12.91	12.59	9.43	8.06	9.13
Na ₂ O	11.25	8.43	7.72	7.49	8.37	9.59	7.15	8.18	7.60	7.49	6.28	6.04	7.34	8.28	6.63	6.48	8.98	7.28	6.77	5.95	6.08	4.66	4.32	4.43	6.33	7.34	6.28
K ₂ O	0.02	0.00	0.18	0.19	0.11	0.23	0.24	0.21	0.10	0.19	0.00	0.00	0.00	0.19	0.16	0.17	0.89	0.25	0.22	0.08	0.02	0.12	0.11	0.07	0.12	0.16	0.14
Total	99.89	99.08	99.85	99.00	99.84	99.58	99.27	99.83	99.22	99.65	98.83	99.35	98.99	99.96	99.77	99.54	99.28	99.20	99.56	99.42	99.13	99.46	99.80	99.86	100.50	99.27	99.65
	8(O)																										
Si	2.967	2.709	2.675	2.638	2.728	2.826	2.675	2.718	2.695	2.620	2.535	2.540	2.627	2.736	2.603	2.605	2.807	2.635	2.625	2.547	2.562	2.443	2.388	2.386	2.562	2.608	2.557
Al	1.020	1.280	1.323	1.361	1.268	1.165	1.329	1.261	1.302	1.383	1.460	1.453	1.383	1.261	1.380	1.380	1.204	1.354	1.361	1.447	1.420	1.539	1.587	1.601	1.427	1.378	1.434
Ti	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	0.023	0.017	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.019	0.012	0.000	0.000	0.000	0.015	0.000	0.011	0.012	0.000	0.007	0.011	0.009	0.012	0.013	0.014	0.004	0.000	0.001	
Ca	0.032	0.275	0.325	0.343	0.276	0.166	0.334	0.288	0.303	0.353	0.461	0.474	0.333	0.273	0.414	0.416	0.166	0.372	0.397	0.460	0.465	0.573	0.630	0.613	0.451	0.390	0.441
Na	0.988	0.735	0.668	0.655	0.722	0.823	0.621	0.708	0.660	0.651	0.553	0.529	0.641	0.713	0.577	0.565	0.776	0.636	0.590	0.521	0.534	0.410	0.381	0.390	0.548	0.642	0.548
K	0.001	0.000	0.010	0.011	0.006	0.013	0.014	0.012	0.006	0.011	0.000	0.000	0.011	0.009	0.010	0.051	0.014	0.013	0.005	0.001	0.007	0.006	0.004	0.007	0.009	0.009	0.008
Xab	0.97	0.73	0.67	0.65	0.72	0.82	0.64	0.70	0.68	0.64	0.55	0.53	0.66	0.72	0.58	0.57	0.78	0.62	0.59	0.53	0.53	0.41	0.37	0.39	0.54	0.62	0.55
Xan	0.03	0.27	0.32	0.34	0.27	0.17	0.34	0.29	0.31	0.35	0.45	0.47	0.34	0.27	0.41	0.42	0.17	0.36	0.40	0.47	0.47	0.58	0.62	0.61	0.45	0.37	0.44
Xor	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01

Xab=Na/Q, Xan=Ca/Q and Xor=K/Q, where Q=Na+Ca+K.

Table 5. Chemical compositions of muscovites and cordierites from granitic and porphyroblastic gneisses.

samples	Muscovite			Cordierite		
	D3	N4-2	N12	N12		
SiO ₂	44.48	45.00	46.12	SiO ₂	48.84	47.81
TiO ₂	0.44	0.48	0.46	TiO ₂	0.14	0.00
Al ₂ O ₃	35.41	34.41	36.09	Al ₂ O ₃	32.14	32.45
FeO	1.44	1.75	1.22	FeO	8.58	7.30
MnO	-	-	0.04	MnO	0.00	0.28
MgO	0.00	0.31	0.40	MgO	8.05	8.41
CaO	-	-	0.01	CaO	0.00	0.00
Na ₂ O	0.35	0.46	0.46	Na ₂ O	0.47	0.46
K ₂ O	10.86	10.33	9.89	K ₂ O	0.05	0.08
Total	92.98	92.74	94.76	Total	98.27	96.79
	11(O)				11(O)	
Si	3.045	3.084	3.070	Si	5.07	5.01
Al ^{IV}	0.955	0.916	0.930	Al	3.93	4.01
Al ^{VI}	1.899	1.861	1.899	Ti	0.01	0.00
Ti	0.023	0.025	0.023	Fe	0.75	0.64
Fe	0.082	0.100	0.068	Mn	0.00	0.03
Mn	-	-	0.002	Mg	1.25	1.32
Mg	0.000	0.032	0.040	Ca	0.00	0.00
Ca	-	-	0.001	Na	0.10	0.09
Na	0.046	0.061	0.059	K	0.01	0.01
K	0.948	0.903	0.840			

-, not analyzed.

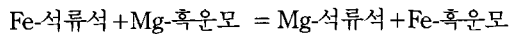
운모와 근청석의 화학조성은 Table 5에 나타내었다.

변성 온도-압력

4개의 화강암질 편마암과 8개의 반상변정질 편마암으로부터 석류석+흑운모+사장석+석영의 광물조합과 이들 광물 성분을 이용하여 변성 온도-압력 조건을 추정하였다. 석류석 주변부에서는 석류석과 인접한 광물 성분을 이용하여 변성 온도-압력을 추정하였고 석류석 내에 사장석과 흑운모가 포획물로 나타나는 경우 이들 포획물 성분과 그들 주변의 석류석 성분을 이용하여 온도-압력을 추정하였다.

지온계와 지압계

석류석-흑운모 쌍을 이용한 지온계는 변성암석학에서 가장 널리 사용되는 지온계로 이들 광물간에 온도에 따른 원소의 이동은 많은 학자들에 의해 연구되어 왔다. 석류석-흑운모 지온계는 온도에 민감한 아래의 반응식에 의한다.



석류석-흑운모 지온계의 이용시 석류석 내의 Ca, Mn 함량의 변화와 흑운모 내의 Fe³⁺, Ti, Al, F 함량의 변화는 지온계에 영향을 줄 수 있다. 즉, 석류

석 내의 Ca함량은 Fe/Mg의 분배를 이상화시키지 못하며, 흑운모 내의 Ti와 Al 함량의 증가도 석류석-흑운모 지온계를 비정상적인 고온으로 유도하게 한다. 이러한 오차의 범위를 줄이기 위해 많은 석류석-흑운모 지온계 모델이 제시되었으나 각 모델로부터 계산되는 온도가 일치하지 않는 경우가 많다. 예로서 석류석내의 Ca에 대해 보정을 하지 않은 Ferry and Spear(1978)이 제안한 석류석-흑운모 지온계 모델을 이용할 경우 중온의 각섬암상의 시료에 대해서는 다른 제안된 모델(i.e., Thompson, 1976)들을 이용한 경우와 계산되는 온도가 큰 차이가 없으나, 고온의 상부각섬암상 내지 백립암상의 시료와 Ca 함량이 높은 시료에 대해서는 적절한 온도가 계산되지 않는다(Indares and Martignole, 1985; Kleemann and Reinhardt, 1994; Holdaway *et al.*, 1997). Holdaway *et al.*(1997)은 석류석-흑운모 사이의 Fe-Mg 비이상적(non-ideal) 교환 반응을 일으키는 요인에 대한 기존의 연구결과를 총체적으로 수정 보완하고, 특히 Fe²⁺, Fe³⁺에 대한 정량적 자료를 이용하여 석류석-흑운모 지온계를 보정 제안하였다. 하지만 아직도 어떤 석류석-흑운모 지온계가 정확한지에 대해 뚜렷한 결론이 없다. 따라서 본 연구에서는 Thompson(1976), Holdaway and Lee(1977), Ferry and Spear(1978), Perchuck and Lavrent'eva(1983), Bhattachayra *et*

Table 6. P:T estimates for granite gneisses.

samples remarks	C4		NG81-1		N4-2		D3					
	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim				
Xalm	0.808	0.825	0.810	0.823	0.795	0.803	0.856	0.848	0.873	0.872	0.878	0.878
Xpyp	0.040	0.034	0.039	0.038	0.093	0.061	0.047	0.024	0.046	0.049	0.061	0.057
Xsps	0.069	0.062	0.077	0.056	0.074	0.099	0.062	0.090	0.060	0.037	0.038	0.039
Xgrs	0.084	0.079	0.076	0.083	0.052	0.037	0.036	0.038	0.034	0.041	0.028	0.026
X _{Fe} ^{Grt*}	0.953	0.960	0.962	0.956	0.915	0.929	0.948	0.972	0.949	0.946	0.935	0.939
X _{Fe} ^{Bi**}	0.817	0.849	0.814	0.845	0.736	0.758	0.737	0.838	0.833	0.843	0.826	0.843
X _{an} ^{Pl***}	0.272	0.324	0.324	0.324	0.294	0.294	0.286	0.286	0.318	0.272	0.279	0.279
T76	657	672	660	701	795	628	641	732	548	722	764	800
HL77	632	644	621	669	747	606	618	695	537	687	722	752
FS78	659	678	663	719	853	620	637	761	518	748	809	861
PL83	626	635	627	655	715	605	614	675	549	669	696	718
B92	597	606	591	588	634	565	565	656	491	649	692	721
H97	634	642	632	666	739	613	625	707	548	672	709	746
Avg.	634	646	635	622	760	606	617	704	532	691	732	766
STD(1s)	23	26	26	31	55	22	28	38	23	37	46	55
GBPQ-Mg ^{&}	7.4	6.8	6.4	6.2	6.2	4.2	4.1	5.3	1.7	4.0	6.3	5.4
GBPQ-Fe ^{&}	7.1	6.6	6.1	5.8	5.8	4.1	4.1	5.0	1.7	3.9	6.1	5.2

* and ** represent Fe/(Fe+Mg) of garnet and biotite, respectively. *** means Ca/(Ca+Na+K) of plagioclase. STD represents standard deviation. Same abbreviations in Table 6 are used. T76- Thompson (1976), HL77- Holdaway and Lee (1977), FS78- Ferry and Spear (1978), PL83- Perchuck and Laverenteva (1983), B92- Bhattacharya (1992), H97- Holdaway *et al.* (1997), & represents garnet-biotite-plagioclase-quartz geobarometer (Hoish, 1990) based on Mg and Fe end-member reactions.

Table 7. P-T estimates for porphyroblastic gneisses.

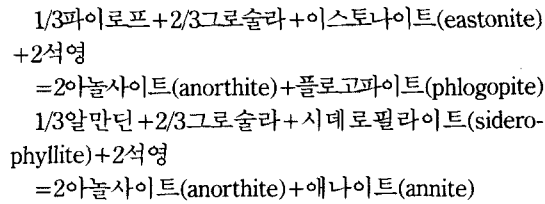
samples remarks	S-4		N39		C5		N10		N12															
	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core														
Xalm	0.804	0.810	0.811	0.791	0.783	0.788	0.786	0.752	0.820	0.802	0.807	0.818	0.792	0.804	0.794	0.798	0.805	0.816	0.815	0.827	0.818	0.826		
Xyp	0.102	0.101	0.095	0.102	0.101	0.101	0.074	0.178	0.109	0.130	0.138	0.116	0.146	0.126	0.112	0.112	0.110	0.105	0.115	0.097	0.088	0.097	0.097	
Xsps	0.049	0.045	0.046	0.054	0.075	0.083	0.074	0.102	0.025	0.025	0.019	0.026	0.017	0.027	0.041	0.047	0.035	0.044	0.035	0.043	0.062	0.045	0.045	
Xgrs	0.045	0.050	0.048	0.044	0.045	0.032	0.037	0.038	0.046	0.043	0.036	0.041	0.044	0.044	0.053	0.043	0.050	0.035	0.036	0.033	0.033	0.032	0.032	
X _{Fe} Grt*	0.888	0.889	0.895	0.888	0.900	0.886	0.886	0.914	0.808	0.883	0.860	0.876	0.884	0.864	0.876	0.876	0.880	0.886	0.877	0.895	0.903	0.895	0.895	
X _{Fe} Bit**	0.594	0.624	0.617	0.615	0.547	0.549	0.567	0.562	0.420	0.487	0.543	0.534	0.532	0.487	0.570	0.574	0.564	0.601	0.626	0.593	0.607	0.607	0.607	
X _{Fe} Plt***	0.375	0.375	0.375	0.446	0.167	0.167	0.167	0.455	0.455	0.455	0.456	0.456	0.473	0.456	0.342	0.387	0.387	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.277	
T76	608	639	613	634	596	563	564	581	504	587	518	560	632	573	643	552	611	614	594	619	678	586	578	602
HL77	589	616	593	612	579	550	551	566	498	571	510	547	610	559	619	541	592	594	577	599	649	570	564	584
FS78	594	634	600	628	579	537	538	559	465	567	481	533	625	549	640	523	598	601	576	609	686	565	556	586
PL83	592	613	595	609	583	560	561	573	517	577	527	557	608	567	616	552	594	596	582	600	639	576	571	587
B92	591	614	594	610	579	554	553	566	499	590	538	569	619	576	629	563	599	598	588	600	644	575	562	585
H97	609	629	610	626	598	583	585	593	542	599	555	581	624	586	631	577	612	611	602	615	651	593	589	604
Avg.	597	624	601	620	586	558	559	573	504	582	521	558	620	568	630	551	601	602	586	607	658	578	570	591
STD(Is)	9	11	8	11	9	16	16	12	25	12	25	17	9	13	11	18	9	8	10	9	19	10	12	9
GBPQ-M _{Fe} ^δ	3.5	4.2	3.6	3.7	2.9	4.5	4.6	5.1	3.9	3.3	2.1	2.4	2.5	2.2	3.7	2.3	4.4	3.3	3.4	3.6	4.7	2.6	2.4	2.5
GBPQ-Fe _δ	3.5	4.1	3.6	3.6	2.9	4.5	4.6	5.1	4.1	3.2	2.2	2.4	2.4	2.2	3.6	2.4	4.3	3.2	3.4	3.6	4.5	2.5	2.4	2.4

samples remarks	N24		S1		S3	
	rim	core	rim	core	rim	core
Xalm	0.764	0.775	0.772	0.779	0.792	0.792
Xyp	0.150	0.124	0.147	0.112	0.084	0.084
Xsps	0.036	0.052	0.042	0.054	0.058	0.058
Xgrs	0.051	0.048	0.039	0.055	0.065	0.065
X _{Fe} Grt*	0.836	0.862	0.840	0.874	0.904	0.887
X _{Fe} Bit**	0.495	0.552	0.565	0.546	0.503	0.598
X _{Fe} Plt***	0.414	0.426	0.420	0.467	0.415	0.437
T76	618	626	692	589	481	566
HL77	598	605	661	573	477	553
FS78	607	617	706	570	437	541
PL83	599	604	649	578	499	562
B92	610	608	656	582	502	558
H97	621	619	653	601	536	583
Avg.	609	613	669	582	489	561
STD(Is)	10	9	24	11	33	14
GBPQ-M _{Fe} ^δ	3.9	3.4	3.6	3.0	2.5	3.6
GBPQ-Fe _δ	3.8	3.3	3.3	2.8	2.8	3.5

Same abbreviations in Table 6 are used.

al.(1992) 그리고 Holdaway *et al.*(1997)에 의해 각기 서로 다른 비이상적 교환반응에 대해 수정 제안된 6개의 석류석-흑운모 지온계를 사용하여 변성온도를 추정한 후 그 평균치를 변성온도로 결정하였다.

Hoisch(1990)는 퇴적기원의 변성암에서 일반적으로 관찰되는 석류석-흑운모-백운모-사장석-석영의 광물조합에 대하여 가능한 6개의 평형반응식을 고려하여 각각에 대해 지압계를 제안하였다. 이 연구에서는 6개의 제안된 지압계 중 석류석-흑운모-사장석-석영(GBPQ)이 참여하는 두 개(각각 Fe와 Mg의 단성분 이용)의 지압계를 적용하였다. 압력계산에 사용된 두 개의 반응식은 다음과 같다.



본 연구에서 GBPQ의 Mg, Fe 단성분을 이용한 계산 결과는 1 kbar의 차이를 보이는 한 자료를 제외하면 모든 자료가 0.3 kbar 내로 거의 일치하는 결과를 지시한다(Table 6, 7). 본 논문에서는 GBPQ의 Mg 단성분으로부터 얻은 결과를 중심으로 변성 온도-압력 조건을 기술하였다.

화강암질 편마암

4개의 화강암질 편마암 시료로부터 계산된 변성 온도-압력을 Table 6과 Fig. 10에 나타내었다. 2개의 온도-압력 조건은 석류석 내의 흑운모와 사장석 포유물과 인접한 석류석 성분으로부터 계산되어진 결과이고 나머지는 석류석 주변부에서 석류석과 인접한 흑운모와 사장석 성분으로부터 얻어진 결과이다.

C4 시료에서 석류석 내부 흑운모와 사장석 성분을 이용하여 추정된 온도-압력 조건은 634°C, 7.4 kbar이며 석류석 주변부로부터 측정된 온도-압력 조건은 622~674°C, 6.2~7.4 kbar로서 넓은 온도 범위를 보인다. NG81-1의 경우 석류석 내부 흑운모 성분을 이용하여 추정된 온도-압력 조건은 760°C, 6.2 kbar이며 석류석 주변부로부터 측정된 온도-압력 조건은 606~702°C, 3.7~6.6 kbar로서 넓은 온도 범위를 보인다. NG81-1 시료의 경우 석류석 주변부로부터 추정된 넓은 범위의 온도-압력 조건은 석류석 주변부의 일부가 비평형 상태에 있음을 지시한다. NG81-1의 경우에서 가장 높은 온도-압력

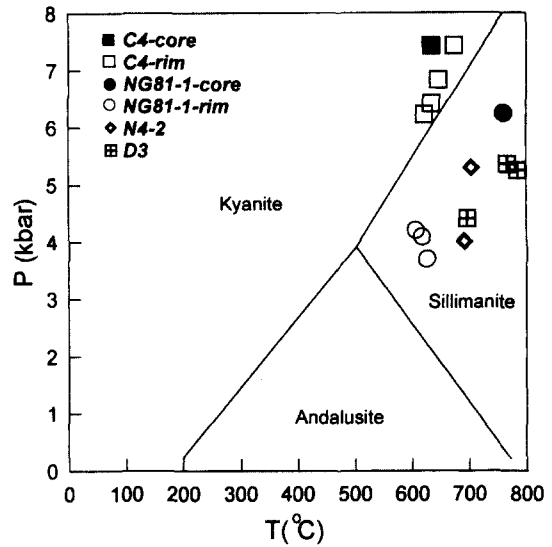


Fig. 10. The P-T conditions of granitic gneisses (phase boundary of Al₂SiO₅ from Holdaway, 1971).

조건을 보여주는 석류석 주변부의 피로프와 스페살틴 성분은 석류석 중심부와 유사하다. 광물화학의 석류석 부분에서 언급된 것과 같이 N81-1시료에서 석류석의 중심부에서는 피로프와 스페살틴이 거의 일정하며 최외각부에서 피로프와 스페살틴이 각각 급격히 감소하고 증가하는 사실과 연관지어 볼 때 NG81-1에서 온도-압력이 높게 추정된 석류석 주변부는 후퇴변성작용시에 성분이 충분히 변화하지 않은 것으로 생각된다. 즉 후퇴변성작용이 충분히 강하지 못해 석류석 주변부의 일부는 변화되어 후퇴변성시기의 온도-압력을 지시하나 다른 주변부는 변화되지 않거나 불완전하게 변화되어 최고 압력변성작용시 또는 최고압력변성작용과 후퇴변성작용의 중간 온도-압력 조건을 보여주는 것으로 생각된다. 따라서 비평형상태로부터 추정된 온도-압력 조건을 제외한 NG81-1의 석류석 주변부의 온도-압력 조건은 606~626°C, 3.7~4.2 kbar이다. C4는 NG81-1에 비해 석류석 주변부의 성분이 변화가 적었으며 석류석 중심부와 주변부간의 피로프와 스페살틴의 성분 차이도 훨씬 적었다. 그 결과 석류석 주변부로부터 추정된 온도-압력간에 차이가 크지 않았으며 중앙부와 주변부의 온도-압력의 차이 역시 적었다. 이는 C4가 NG81-1에 비해 전체적으로 후퇴변성작용을 약하게 받았음을 지시한다. 이는 C4내의 석류석이 NG81-1내의 석류석에 비해 자형 및 반자형의 석류석 경계를 잘 유지하고 있

으며 석류석 주변에 후퇴변성광물이 잘 발달되지 않는 사실과 잘 일치한다. 따라서 C4와 NG81-1의 석류석 내부로부터 추정된 온도-압력은 화강암질 편마암이 경험한 최고변성 조건을 지시하며 NG81-1 석류석 주변부중 파이로프가 낮고 스페살틴이 높은 부분으로부터 추정된 606~626°C, 3.7~4.2 kbar가 후퇴변성작용시기의 온도-압력 조건으로 판단된다. D3 시료의 석류석 주변부로부터 추정된 온도-압력은 697~785°C, 4.4~5.4 kbar이다. N4-2시료에서는 석류석 주변부중 스페살틴이 높은 부분(6.0-6.2 mole%)으로부터 691~704°C, 4.0~5.3 kbar의 변성 온도-압력 조건을 얻었으며 스페살틴이 낮은 부분(3.7 mole%)으로부터는 732°C, 6.3 kbar의 변성 온도-압력 조건을 얻었다. NG81-1의 경우와 같이 N4-2에서도 스페살틴이 높은 부분으로부터 얻어진 변성 온도-압력 조건이 후퇴변성작용시의 평형상태임을 알 수 있다. 그리고 N4-2 시료에서 제한된 석류석 주변에는 앞에서 언급된 변성 온도-압력변화가 추정된 석류석 주변부에 비해 훨씬 낮은 파이로프 성분과 높은 스페살틴 성분(2.4 mole%)을 보여주며 이 부분으로부터 추정된 온도-압력 조건은 532°C, 1.7 kbar이다. 이는 대부분의 석류석 주변부에서 추정된 1차 후퇴변성작용에 비해서는 미약하지만 2차 후퇴변성작용이 일어났음을 가능성을 지시할 수 있지만 현 자료만으로는 그 가능성을 확인할 수 없다. 압력 조건 계산치들은 화강암질 편마암이 최고 압력변성작용시기에 6.2~7.4 kbar의 압력을 경험한 후 온도 조건의 큰 변화 없이 압력이 3.7~5.4 kbar로 감소하였음을 지시한다.

반상변정질 편마암

8개의 반상변정질 편마암 시료에 대한 석류석-흑운모 지온계의 결과를 Table 7과 Fig. 11에 나타내었다. 화강암질 편마암에서와 같이 일부 변성 온도-압력 조건은 석류석 내의 흑운모와 사장석 포유물과 인접한 석류석 성분으로부터 그리고 대부분의 변성 온도-압력 조건은 석류석 주변부에서 석류석과 인접한 흑운모와 사장석 성분으로부터 계산되었다.

C5의 석류석 내부로부터 582°C, 3.3 kbar의 변성 온도-압력이 계산되었고 석류석 주변부로부터는 630°C, 3.7 kbar가 계산되는 한 지점을 제외하고는 521~620°C, 2.1~2.5 kbar의 변성조건이 계산되었다. 높은 온도-압력 조건이 계산된 석류석 주변부의 파이로프 성분은 다른 주변부보다 높으며 석류석 내부와 유사하다. 즉 이러한 석류석 주변부의 성분은 비평형상태를 지시하며 이 부분으로부터 계산된

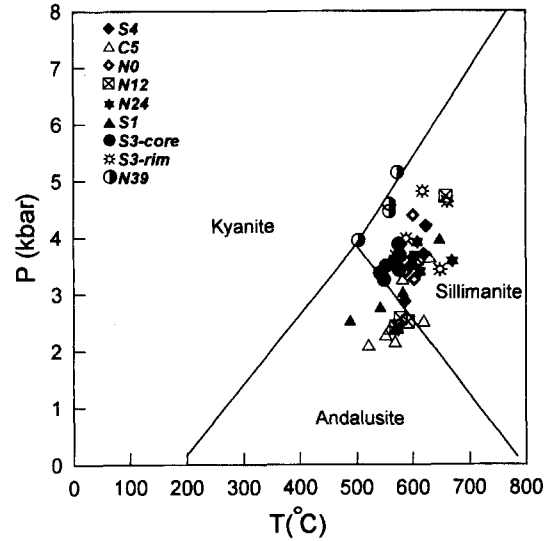


Fig. 11. The PT conditions of porphyroblastic gneisses.

온도-압력 조건은 평형상태의 온도-압력 조건이 아니다. N10의 석류석 내부로부터는 601°C, 4.4 kbar의 변성 온도-압력이 계산되었고 석류석 주변부로부터는 586~602°C, 3.3~3.4 kbar의 변성조건이 계산되었다. S1의 석류석 내부로부터 582°C, 3.0 kbar의 변성 온도-압력이 계산되었고 석류석 주변부로부터는 489~648°C, 2.5~3.9 kbar의 변성조건이 계산되었다. S3의 석류석 내부로부터는 541~589°C, 3.3~3.9 kbar의 변성 온도-압력이 계산되었고 석류석 주변부로부터는 570~661°C, 3.4~4.8 kbar의 변성조건이 계산되었다. C5와 N10에서는 석류석 중심부에서 주변부로 압력이 감소하는 경향을 보여준다. 이에 반해 S-3시료에서는 석류석 내부에서 석류석 주변부로 온도와 압력이 증가하는 경향을 보여준다. 하지만 중심부와 주변부의 압력 차이가 1 kbar 내로 일반적으로 잘 정의된 지압계(예, TWEEQU-Thermobarometry With Estimation of EQUilibrium state: Berman, 1991)에서 보고된 오차 범위 ± 1 kbar(Lieberman and Petrakakis, 1991) 내에서 변화하기 때문에 앞에서 기술된 상반된 경향이 서로 다른 변성진화과정에 기인한 것으로 판단하기에는 어려움이 있으며 이에 대해서는 앞으로 자세한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 석류석 내부와 주변부 간의 온도-압력 조건을 구분하지 않았다. S-4, N-39, N-12, N24 시료의 석류석 주변부로부터 추정된 변성 온도-압력 조건은 504~669°C, 2.4~4.7 kbar이며 이는 앞서 다른 시료에서 얻어진

Table 8. Whole rock-garnet Sm-Nd isotope data for granitic and porphyroblastic gneisses.

sample	Sm(ppm)	Nd(ppm)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd*	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ _m	Age (Ma)
Granitic gneiss (sample C4)						
whole rock	8.88	45.75	0.1174	0.511568	0.000014	1417±52
garnet	9.37	26.82	0.2114	0.512443	0.000029	
Porphyroblastic gneiss (sample S-3)						
whole rock	10.34	49.41	0.1266	0.511678	0.000018	1421±14
garnet	7.99	13.40	0.3607	0.513864	0.000011	

Errors of ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd* are less than 0.5%.

Table 9. Rb-Sr isotope data of whole rock and biotite for porphyroblastic gneiss (sample S3).

sample	Rb(ppm)	Sr(ppm)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr [§]	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ _m
whole rock	153.9	229.4	1.9513	0.760061	0.000010
biotite ¹	612.7	6.67	288.1	1.560392	0.000018
biotite ²	602.1	6.04	314.4	1.635371	0.000022

biotite^{1&2} means each fraction separated from same sample. Errors of ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr[§] are less than 1%.

온도-압력 조건과 함께 반상변정질 편마암의 변성 온도-압력 범위가 489~669°C, 2.1~4.8 kbar임을 지시한다.

변성연대

화강암질 편마암(시료 C4)과 반상변정질 편마암(시료 S3) 각 한 시료에 대해 대해 Sm/Nd 전암-석류석 연대를 측정하였고, 반상변정질 편마암의 경우 냉각 시기를 알기위해 Rb/Sr 전암-흑운모 연대를 측정하였다. Sm/Nd 및 Rb/Sr 동위원소 자료는 Table 8과 Table 9에 각각 나타내었고, Rb/Sr 전암-흑운모 자료는 Fig. 12에 제시하였다.

화강암질 편마암의 전암-석류석 Sm/Nd 동위원소 자료를 이용해 계산된 연대는 1417±52 Ma이고 반상변정질 편마암은 1421±14 Ma로 두 편마암으로부터 구한 연대는 서로 일치한다. 이 변성연대는 두 편마암의 변성조건과 석류석의 Sm-Nd 폐쇄온도(700-750°C: Hensen and Zhou, 1995; 600-700°C: Burton *et al.*, 1995)를 함께 고려할 때 두 편마암의 최고 변성작용의 시기를 지시할 가능성이 높다. 그리고 이 시기는 연구지역 주변에서 김용준(1986)에 의하여 제시된 1330±2 Ma의 Ar/Ar 백운모 연대와 유사하다.

반상변정질 편마암 S3의 전암-흑운모 Rb/Sr 연대는 196.9±0.4 Ma를 지시한다. 연구 주변지역에서 김용준(1986)이 제시한 261±2 Ma의 Ar/Ar 흑운모의 연대와 유사하며 Rb/Sr 폐쇄온도 300±50°C (Wagner *et al.*, 1977; Del Moro *et al.*, 1982)를 고려할 때 이 연대는 최고 변성작용 이후 냉각시기

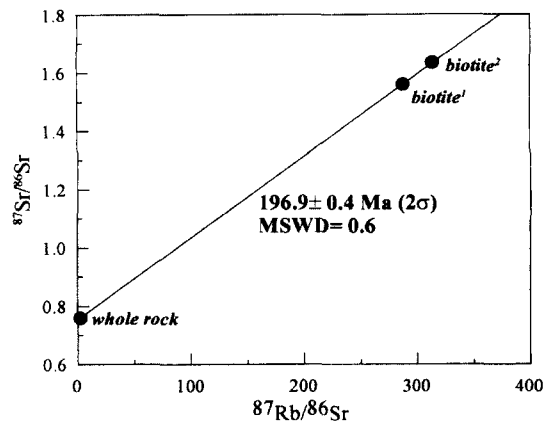


Fig. 12. Rb/Sr whole rock-biotite isochron diagram for porphyroblastic gneiss (sample S-3).

혹은 쥬라기의 열 사건(thermal event)을 지시한다. 연구지역의 변성암류를 관입하고 있는 화강암체가 백악기의 것임을 고려할 때 Ar/Ar 흑운모의 연대는 화강암류의 관입에 의한 열 사건이라기 보다는 최고변성작용이후 냉각시기로 해석된다.

변성진화

소백산 육괴의 승주-순천지역의 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암의 변성 온도-압력 조건과 이로부터 추정되는 변성진화 과정을 Fig. 13에 나타내었다. 화강암질 편마암으로부터 두 그룹의 변성 온도-압력 자료가 추정된다. Group I은 NG81-1에서 석류석내부 그리고 후퇴변성작용을 약하게 받은 C4

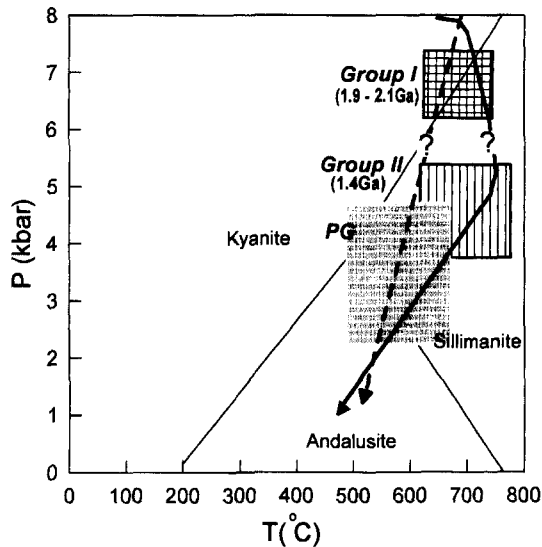


Fig. 13. P-T-t path of the study area deduced from the metamorphic conditions of granitic and porphyroblastic gneisses. Group I and II represent the P-T conditions of granitic gneiss and PG represents the P-T condition of porphyroblastic gneiss.

로부터 계산된 $622\text{--}760^\circ\text{C}/6.2\text{--}7.4$ kbar이며 Group II는 후퇴변성에 의하여 파이로프가 감소하고 스페살틴이 증가한 석류석 주변부로부터 계산된 $606\text{--}785^\circ\text{C}/3.7\text{--}5.4$ kbar이다. 화강암질 편마암과 달리 반상변정질 편마암으로부터 추정된 온도-압력 조건은 여러 그룹으로 나뉘지 않으며 $489\text{--}669^\circ\text{C}$, $2.1\text{--}4.8$ kbar의 온도-압력 조건하에 속한다. 반상변정질 편마암으로부터 얻어진 변성 온도-압력 범위는 화강암질 편마암에서 얻어진 Group II의 온도-압력 조건과 유사하다. 그리고 반상변정질 편마암에서는 화강암질 편마암에서 인지되는 Group I의 온도-압력 조건이 나타나지 않는다.

이러한 변성 온도-압력 조건의 변화는 연구지역에서 화강암질 편마암이 반상변정질 편마암에 의해 관입되는 현상 및 두 종류의 편마암이 화성기원입과 관련되어 다음과 같은 해석을 가능케 한다. 화강암질 편마암이 관입 후 Group I에 해당하는 $622\text{--}760^\circ\text{C}/6.2\text{--}7.4$ kbar의 중압형에 가까운 첫 번째 변성작용을 받았다. 이 변성작용이후 혹은 변성작용 시기에 반상변정질 편마암이 관입하였다. 그 후 반상변정질 편마암에서 관찰되는 저압형의 $489\text{--}669^\circ\text{C}$, $2.1\text{--}4.8$ kbar의 변성작용이 일어났으며 이때 화강암질 편마암은 후퇴변성작용을 받아 Group II에 해당하는 $606\text{--}785^\circ\text{C}/3.7\text{--}5.4$ kbar 변성 온도-압력 조건

을 우세하게 보여주게 되었다. 이는 화강암질 편마암이 시계방향의 변성진화과정을 경험하였음을 지시한다. 하지만 Group I과 II의 온도 조건이 지은계의 오차범위내에 들어갈 수 있기 때문에 화강암질 편마암이 Fig. 13에서 점선으로 나타낸 경로와 같이 온도가 증가하지 않고 약간씩 감소하며 압력이 하강하는 변성진화과정을 경험하였을 가능성도 있다.

변성작용에 대한 현재의 연구결과와 본 연구지역과 인접한 지역에 분포하는 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암의 관입연령이 각각 $1923\text{--}2120$ Ma와 $1890\text{--}1945$ Ma(Turek and Kim, 1996)인 연구결과를 동시에 고려할 때 화강암질 편마암이 경험한 Group I에 해당하는 중압형의 광역변성작용은 화강암질 편마암 관입 이후 그리고 반상변정질 편마암의 관입 이전, 즉 1890 Ma와 2120 Ma 사이에 일어났을 가능성이 높으며, 두 편마암에서 공히 관찰되는 저압형의 2차 광역변성작용의 시기는 반상변정질 편마암의 관입 후인 1.4 Ga로 추정할 수 있다. 그리고 연구지역은 2차 광역변성작용이후 냉각되어 197 Ma 시기에 $300\pm 50^\circ\text{C}$ 에 도달하였을 것으로 생각된다.

현재의 자료는 연구지역이 1.4 Ga에 주변성작용을 받았음을 지시하는데, 이 시기는 소백산육괴에서 일반적으로 보고되어지는 변성시기 약 $1.9\text{--}1.7$ Ga(이광식 외, 1997; 김동연, 1999; 이호선, 2000)보다 젊다. 예를 들면, 김동연(1999)은 연구지역과 비교적 가까운 하동-산청지역에 회강암과 인접하여 산출하는 차노카이트로부터 1.81 Ga의 Sm/Nd 전암-석류석 연대와 1.1 Ga의 Rb/Sr 전암-흑운모 예비연구 결과를 제시하였으며 이 연구결과는 본 연구에서 얻어진 최고 변성작용 시기로 고려되어지는 Sm/Nd 전암-석류석 연대 1.4 Ga와 197 Ma의 Rb/Sr 흑운모 연대와 매우 상이하다. 이는 두 지역이 서로 상이한 변성진화과정을 경험하였을 가능성을 지시한다. 한편, 이호선(2000)은 김천지역에 산출하는 흑운모 편마암시료로부터 분리된 등근 저어콘에 대한 CHIME(chemical Th-U-total Pb isochron dating) 예비보고에서 3.00 Ga, 2.44 Ga, 2.24 Ga, 1.81 Ga 그리고 1.45 Ga의 연대를 제시하였다. 이 절대연령자료는 소백산육괴가 적어도 다섯 번의 서로 다른 지구조적인 사건을 경험하였음을 시사하는데 저어콘의 최외곽부에서 얻어진 1.45 Ga의 사건은 이 연구결과에서 얻어진 자료와 일치한다. 이러한 사실들은 소백산 육괴가 이제까지 생각되었던 것보다 복잡한 변성진화과정을 경험하였음을 지시한다. 따라서 소백산육괴에서 일어난 복잡한 변성

진화과정을 정확하게 이해하기 위해서는 보다 많은 연구가 필요하다.

결 론

1. 화강암질 편마암류는 중압형의 변성작용(622-760°C/6.2-7.4 kbar)을 받은 후 저압형의 변성작용(606-785°C/3.7-5.4 kbar)에 의해 후퇴변성작용을 받았다.

2. 반상변정질 편마암류는 화강암질 편마암류에 중합형의 변성작용을 일으키면서 혹은 중압형의 변성작용을 받은 후 판입하였고 그 후 화강암질 편마암류와 함께 저압형의 변성작용(489~669°C, 2.1~4.8 kbar)을 받았다.

3. 화강암질 편마암류와 반상변정질 편마암류가 저압형의 변성작용을 받은 시기는 $1417 \pm 52 \sim 1421 \pm 14$ Ma이며 저압형 변성작용이후 냉각되어 197Ma 시기에 $300 \pm 50^\circ\text{C}$ 에 도달하였다.

사 사

본 논문은 98 과학기술기초 중점연구지원과제(기초과학연구소, 1998-015-D00269)의 지원과 전북대학교 박사후 연수 지원과제의 지원으로 수행되었다. 본 논문을 위한 전자현미경 분석에 도움을 준 고려대학교 권용환 박사과 최인식 석사 그리고 연령측정에 도움을 준 기초과학지원센터의 정창식 박사께 감사의 말씀을 드리며 야외조사 및 박편제작에 도움을 준 전남대 학생들에게도 감사한다.

참고문헌

권용환, 신의철, 오창환, 김형식, 강지훈. 1999, 풍기지역 소백산편마암체의 백립암상 변성작용-북부 소백산 육괴의 지각진화와 환경지질. 암석학회지, 6, 183-202.
 김동연, 1999, 지리산 동부지역에 분포하는 차노카이트의 암석학, 지구화학 및 지구연대학. 이학석사 학위논문, 부경대학교 대학원, 79p.
 김용준, 1986, 영남육괴에 분포하는 고기화강암질암의 지질연대와 성인에 대한 연구, 광산지질, 19, 151-162.
 김용준, 1988, 보성순천 지역에 분포하는 정편마암류의 지질시대와 성인에 대한 연구. 광산지질, 21, 69-83.
 나기창, 1998, 선캠브리아 이연층. 한국의 지질, 시그마프레스, 33-55.
 류호정, 송용선, 1999, 지리산 지역 이질 편마암에서 산출되는 석류석의 내포물과 방사상 쪼개짐 조직 및 납정석(?)의 산출. 한국 광물-암석학회 초록집, 31.

송용선, 이상만, 1989, 소백산육괴 중앙부 선캠브리아 변성암류의 암석학적 연구, 지질학회지, 25, 451-467.
 송용선, 류호정, 1994, 지리산 일대 소백산 편마암체의 다변성작용. 암석학회 제2차 학술발표회 요약집, 20.
 송용선, 1999, 소백산육괴 서남부 지리산지역의 반상변정질 편마암에서 산출되는 백립암질 포획암. 암석학회지, 8, 34-45.
 유환수, 김용준, 박배영, 1993, 괴목도폭 지질보고서. 한국자원연구소, 19p.
 이광식, 정창식, 박계현, 장호완, 1997, 무주지역 각섬암의 지구화학 및 Sm-Nd 동위원소 연구. 자원환경지질학회지, 30, 313-320.
 이민성, 박봉순, 백광호, 1989, 순천도폭 지질보고서. 한국동력자원연구소, 22p.
 이상만, 1980, 지리산 (하동-산청)지역의 변성이질암의 변성작용에 관한 연구, 지질학회지, 16, 1-15.
 이상만, 김형식, 1984, 소위 울리층군 및 원남층군의 변성암석학적 연구-태백산 일대를 중심으로. 지질학회지, 20, 195-214.
 이호선, 2000, 소백산 육괴 중부지역 김천일대에 분포하는 선캠브리아기 편마암류의 기원과 저어콘 CHIME연대. 이학석사학위논문, 부경대학교 대학원, 101p.
 주승환, 김성재, 1986, 영남육괴 Rb-Sr 연대측정 연구 (II): 지리산 남서부일대 화강암질암 및 편마상화강암류, 조사보고서, 7-33.
 Berman, R.G., 1991, Thermobarometry using multi-equilibrium calculations: a new technique, with petrological applications. Can. Mineral., 29, 833-855.
 Bhattachayra, A., Mohanty, L., Maji, A., Sen, S.K., and Raith, M., 1992, Non-ideal mixing in the phlogopite-annite boundary: Constraints from experimental data on Mg-Fe partitioning and a reformulation of the biotite-garnet geothermometer. Contrib. Mineral. Petrol., 111, 87-93.
 Burton, K.V., Kohn, M.J., Cohen, A.S. and O'Nions, R.K., 1995, The relative diffusion of Pb, Nd, Sr and O in garnet. Earth Planet. Sci. Letters, 133, 199-211.
 Chang, E.Z., 1996, Collisional orogene between north and south China and its eastern extension in the Korean Peninsula. J. Southeast Asian Earth Sciences, 13, 267-277.
 Chang, K.H., 1997, Okchon nappe in light of isotope dates. Crustal Evolution in Northeast Asia. 4th Korea-China Joint Geology Symposium, 1-4.
 Cluzel, D., Jolivet, L., and Cadet, J., 1991, Early middle Paleozoic intraplate orogeny in the Ogcheon Belt(south Korea): a new insight on the Paleozoic buildup of East Asia. Tectonophysics, 10, 1130-1151.
 Del Moro, A., Puxed, du M., Radicati di Brozolo, F. and Villa, I.M., 1982, Rb-Sr and K-Ar ages on minerals at temperatures of 300-400°C from deep wells of the Larderello geothermal field (Italy). Contrib.

- Mineral. Petrol., 81, 340-349.
- Enami, M. and Zang Q., 1990, Quartz pseudomorphs after coesite in eclogites from Shandong province, east China. *Am. Mineral.*, 75, 381-386.
- Enami, M., Zang, Q., and Yin Y., 1993, High-pressure eclogite in northern Jiangsu-southern Shandong province, eastern China. *J. Metamorphic Geol.*, 11, 589-603.
- Faure, G., 1986, *Principles of Isotope Geology*. John Wiley and Sons, Inc., 589p.
- 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.
- 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.
- Hoisch, T.D., 1990, Empirical calibration of six geobarometers for the mineral assemblage quartz + muscovite + biotite + plagioclase + garnet. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 104, 225-234.
- Holdaway, M.J. and Lee, S.M., 1977, Fe-Mg cordierite stability in high-grade rocks based on experimental, theoretical and natural observations. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 63, 175-198.
- Holdaway, M.J., 1971, Stability of andalusite and the aluminium silicate phase diagram. *Am. J. Sci.*, 271, 97-131.
- Holdaway, 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.
- 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.
- Kleemann, U. and Reinhardt, J., 1994, Garnet-biotite thermometry revisited: The effect of Alvi and Ti in biotite. *European J. Mineral.*, 6, 925-941.
- Lee, S.M., Kim, H.S. and Oh, I.S., 1986, Metamorphic petrology of Precambrian gneisses in Samcheok-Jukyeon area, *J. Geol. Soc. Korea*, 22, 257-277.
- Lieberman, J., and Petrakakis, K., 1991, TWEEQU thermobarometry: analysis of uncertainties and applications to granulites from western Alaska and Australia. *Can. Mineral.*, 29, 857-887.
- Liu, X., 1993, High-P metamorphic belt in central China and its possible eastward extension to Korea. *J. Petrol. Soc. Korea*, 2, 9-18.
- Ludwig, K.R., 1994, ISOPLOT: a plotting and regression program for radiogenic isotopic data, ver. 2.71. U.S. Geol. Surv. Open File Report, OF-91-445, 44p.
- Min, K. and Cho. M., 1998, Metamorphic evolution of the northwestern Ogcheon metamorphic belt, South Korea. *Lithos*, 43, 31-51.
- 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.
- Perchuck, L.L. and Lavrent'eva, I.V., 1983, Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite-garnet-biotite. In Saxena, S.K., ed. *Kinetics and Equilibrium in Mineral Reactions, Advances in Physical Geochemistry*. Springer New York, 199-239.
- Ree J.-H., Cho, M, Kwon, S.-T. and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea: The Imjingang belt. *Geology*, 24, 1071-1074.
- Thompson, A.B., 1976, Mineral reactions in pelitic rocks: I. Prediction of P-T-X (Fe-Mg) phase relations. *Am. J. Science*, 276, 401-424.
- Turek, A. and Kim C., 1996, U-Pb zircon for Precambrian rocks in southwestern Ryeongnam and southwestern Gyeonggi massif, Korea. 30, 231-249.
- Wagner, G.A., Reimer, G.M., Jager, E., 1977, Cooling ages derived by apatite fission track, mica Rb-Sr and K-Ar dating: the uplift and cooling history of the Central Alp. *Memori degli istituti di Geologia Mineralogia dell'Universita di Padova*, 30, 1-27.
- Wang, X. and Liou, J.G. 1993, Ultra-high-pressure metamorphism of carbonate rocks in the Dabie Mountains, central China. *J. Metamorphic Geol.*, 11, 575-588.
- Wang, X., Liou, J.G. and Mao H.K., 1989, Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China. *Geology* 17, 1084-1088.
- Yin, A. and Nie, S., 1993, An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics*, 12, 801-813.

(책임편집: 조문섭)

(2000년 5월 15일 접수, 2000년 6월 30일 수리)

Metamorphic evolution of granitic and porphyroblastic gneisses in the Seungju-Suncheon area, the southwestern part of the Sobacksan Massif

**Chang Whan Oh, Eun-Young Jeon, Bae Young Park¹,
Kun Sang Ahn² and Jung Hoo Lee**

Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Chonju 561-756

¹Division of Earth and Environmental Sciences, Chonnam National University, Kwangju 500-757

²Department of Sciences Education, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

Abstract: Granitic and porphyroblastic gneisses are widely distributed in the Seungju-Suncheon area, the southwestern part of the Sobacksan Massif. Two groups of metamorphic P-T conditions are recognized from granitic gneiss. 622-760°C/6.2~7.4 kbar(Group I) are estimated from garnet cores and samples with weak retrograde metamorphism. 606~785°C/3.7~5.4 kbar(Group II) are estimated from garnet rims which have lower pyrope and higher spessartine contents due to the effect of retrograde metamorphism. The metamorphic P-T conditions estimated from porphyroblastic gneiss are 489~669°C, 2.1~4.8 kbar which are similar to the P-T conditions of Group II in the granitic gneiss. The whole rock-garnet Sm/Nd isotopic ages determined from granitic and porphyroblastic gneisses are, respectively, 1417 ± 52 Ma and 1421 ± 14 Ma. These date indicate that intermediate-P/T type metamorphism represented by Group I may have occurred between the intrusion of granite gneiss and the intrusion of porphyroblastic gneiss(between 1890 Ma~2120 Ma) and two gneisses experienced low-P/T type metamorphism after the intrusion of porphyroblastic gneiss at 1417~1421 Ma.

Key words: Granitic gneiss, Porphyroblastic gneiss, Sobacksan Massif, Sm/Nd isotopic age, Intermediate-P/T type metamorphism, Low-P/T type metamorphism.