

분천과 홍제사 화강암질 편마암체의 변성작용

김형수 · 이종혁

*강원도 춘천시 효자동 강원대학교 지질학과

요 약 : 홍제사 화강암질 편마암체의 암상은 국부적으로 중앙부에서 주변부로 감에 따라 차례로 임상변정질 화강암질 편마암, 반상변정질 화강암질 편마암, 그리고 미그마타이트질 편마암으로 점이적인 변화를 보인다. 암상변화에 따른 광물군의 변화는 뚜렷하게 구분되지 않지만, 미그마타이트질 편마암 인접부에서는 부분적으로 광물군의 변화를 보여, 이를 Zone I과 II로 구분하였다. Zone I의 특징은 K-장석+백운모+규선석의 공생이고, Zone II의 특징은 (1) 백운모의 소멸, (2) 석류석+근청석의 공생, (3) 석류석+근청석+각섬석의 공생이다. 분천 화강암질 편마암체는 주로 안구상편마암으로 구성되어 있으며, 홍제사 화강암질 편마암체와 인접부에서는 흑운모+K-장석+규선석+(남정석) 광물군집을 보인다. 두 암체에서 산출되는 남정석은 타형 내지 반자형의 결정으로 잔류형태의 광물로 나타나며, 규선석과 공존하며 나타나기도 한다.

미그마타이트질 편마암의 Zone II에서 석류석은 중심부와 주변부에서 높은 F/FM (=Fe/Fe+Mg) 값과 X_{Fe} 함량을 보인다. 반면에, X_{Mg} 와 X_{Ca} 함량은 상대적으로 약간 감소하는 경향을 보인다. 반상변정질 화강암질 편마암의 Zone I에서 산출되는 석류석은 중심부에서는 성분변화를 보이지 않지만, 주변부에서는 누대구조를 보인다. 흑운모는 Zone I에서 Zone II로 이동됨에 따라 색은 녹색에서 갈색, 적갈색으로 변화하는 양상을 보이며, 그에 따라 Ti, Mg 함량이 증가하는 경향을 보인다. Zone I에서 사장석은 올리고크레스에 해당하는 $Ab_{84}An_{16}$ 내지 $Ab_{70}An_{30}$ 의 화학조성을 보이며, Zone II의 사장석은 안데신에 해당하는 $Ab_{70}An_{30}$ 내지 $Ab_{50}An_{50}$ 의 화학조성을 나타낸다. 이와같은 변화양상은 연구지역이 규선석+K-장석대 또는 상부 앰피블라이트상에 해당되는 높은 변성도를 경험하였음을 시사한다. 그리고 잔류상으로 남정석이 산출된다는 것은 규선석+K-장석대에 해당하는 고온-저압형 변성작용 이전에 고온-중압형의 변성작용을 경험했을 가능성을 제시해 주고 있다. 석류석-흑운모, 근청석-석류석, 사장석-K-장석 지온계, GASP 지압계 및 Zone I과 II의 광물군으로 측정된 연구지역의 암석에 대한 변성작용의 온도·압력 조건은 분천 화강암질 편마암의 경우, 698~729°C/6.3~11.3 kbar (Zone I의 중압대)이고, 미그마타이트질 편마암의 경우, 621~667°C/1.0~5.4 kbar (Zone II)이며, 반상변정질 화강암질 편마암의 경우는 602~624°C/1.9~3.4 kbar (Zone I의 저압대)이다. 이상의 증거로부터 추정된 연구지역의 전체적인 온도-압력 경로는 "등온성 압력감소 (isothermal-decompression; ITD)"를 보이며 시계방향 (clockwise path)으로 이동된 것으로 생각된다. 압력 감소비율(dP/dT)은 약 60 bar/°C를 보인다.

핵심어 : 남정석, 고온-중압형 변성작용, 상부 앰피블라이트상, 등온성 압력감소, 시계방향의 온도-압력 경로.

서 언

영남육괴 북동부에 위치하고 있는 분천 화강암질 편마암체와 홍제사 화강암질 편마암체에 대한 연구는 최근 20년 동안 여러 학자들에 의해 이루어져왔으나, 아직 두 암체의 형성과정에 대해서는 의견이 일치되지 않고 있다. 이 연구는 행정구역상 경상북도 울진군 북면, 죽변면, 울진읍에 걸친 (그림 1), 북위 37°00'~37°05', 동경 129°15'~129°25'에 해당하는 지역에 분포하는 분천과 홍제사 화강암질 편마

암의 변성작용에 관한 것이다. 연구지역의 일반지질에 대해서는 1:50,000 장성 도폭 설명서 (윤석규, 1967), 울진 도폭 설명서 (윤석규와 신병우, 1963), 평해 도폭 설명서 (김옥준 외, 1963) 등에 의해 비교적 자세히 설명된 바 있다. 영남육괴의 선캄브리아기 암석들은 적어도 3회 이상의 광역 변성작용; (1) 상부 앰피블라이트상 (upper-amphibolite facies), (2) 앰피블라이트상 (amphibolite facies) 그리고 (3) 녹염석-앰피블라이트상 (epidote-amphibolite facies) 내지 녹색편암상 (greenschist facies)이 거듭해온 것

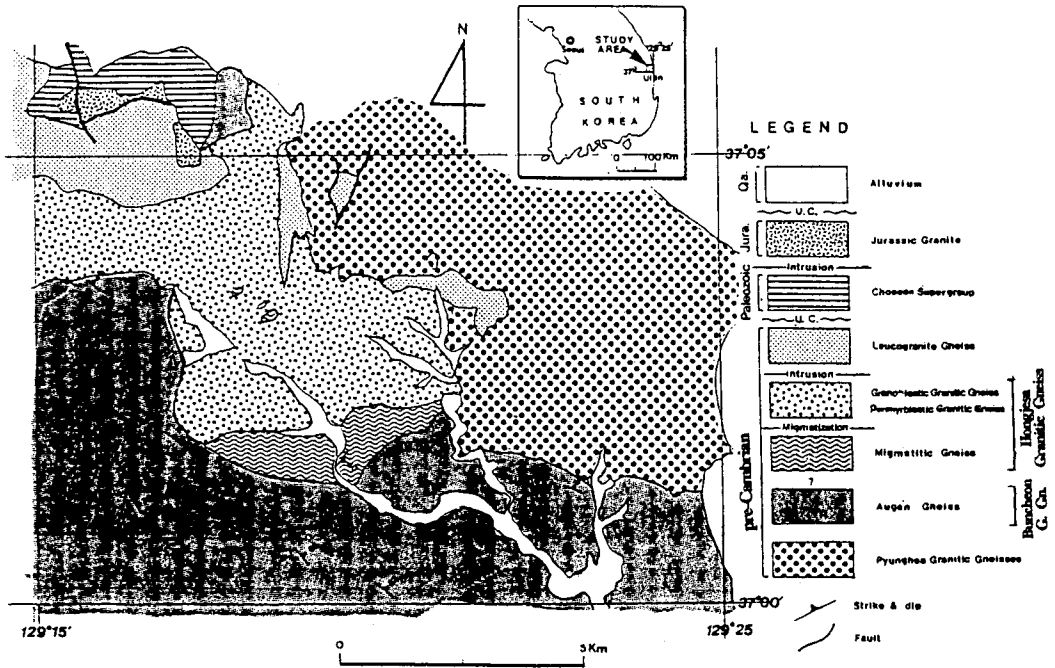


Fig. 1. Geologic map of the study area.

으로 최고 변성 온도·압력조건은 600~730°C, 4~6 kbar로 보고된 바 있다 (Lee et al., 1986 ; Kim et al., 1986). Hong (1992)은 석영-정장석-알바이트-H₂O계를 이용하여 분천과 홍제사 화강암질 편마암체가 1~3 kbar의 압력하에서 관입한 암체라 설명했지만, 이 압력은 F, B, CO₂와 같은 성분들의 효과 (Manning and Pichavant, 1983)를 고려하지 않았기 때문에 오차가 있을 것으로 생각된다. Kim and Cho (1994)는 석류석-흑운모 지온계와 석류석-사장석-흑운모-석영 지압계를 이용하여 홍제사 화강암질 편마암체가 650~700°C, 3±1 kbar의 온도·압력하에서 관입한 암체라 설명했다. 그러나 그들이 조사한 지역과 이번 조사지역은 암상과 광물광물에 있어서 차이를 보인다. 따라서 Kim and Cho (1994)가 제시한 홍제사 화강암의 정치 (emplacement) 온도와 압력은 다소 차이가 있을 것으로 생각된다.

이번 연구의 목적은 연구지역에 분포하는 선캠브리아기의 분천과 홍제사 화강암질 편마암체의 성인에 대한 언급보다는 두 암체의 암상에 따른 광물 조성상 차이점 및 암석화학적 차이점을 밝히고, 두 암체에서 공통적으로 산출되는 변성광물들의 화학조성상의 차이점을 바탕으로 연구지역의 변성 정

도 및 경로를 알아보는데 있다. 이러한 연구의 결과는 논란이 되고 있는 선캠브리아기의 분천과 홍제사 화강암질 편마암체의 형성과정을 밝히는데 도움을 주리라 생각된다.

지질개요

연구지역의 지질은 기저부위에 분천과 평해 화강암질 편마암체가 놓이며, 그 위에 홍제사 화강암질 편마암체가 분포하고 있다. 홍제사 화강암질 편마암체는 후에 우백질 화강편마암에 의해 관입당하였으며 (Kim et al., 1986), 고생대의 퇴적암류에 의해 부정합으로 피복되어 있으며, 중생대의 화성암류에 의하여 관입되어 있다 (그림 1).

분천 화강암질 편마암체의 지질시대는 기존의 절대연령치에 의하면 2,107±3 Ma (김동학 외, 1985), 2,097±4 Ma (Hong, 1985) 그리고 1,863±103 Ma (이덕원, 1988)으로 원생대 초기에 해당된다. 분천 화강암질 편마암체는 주로 안구상 편마암으로 구성되어 있으며 연구지역 남쪽에 넓게 발달하고 있다 (그림 1). 안구상 변정은 대부분 미사장석으로 되어 있고, 안구의 형태는 대부분 "아몬드 형태 (amond

shape type)"이며, 부분적으로 "마이로니틱 형태 (mylonitic type)"를 보이기도 한다.

홍제사 화강암질 편마암체에 대한 절대연령치는 1825 ± 20 Ma에서 1440 ± 140 Ma (Choo and Lee, 1980)으로 분천 화강암질 편마암보다는 후기의 암석으로 알려져 있다. 홍제사 화강암질 편마암체는 회색, 암회색 및 청회색의 암색을 보이며 연구지역의 중앙부에 넓게 분포하고 있다. 이 암체는 조직에 의해 크게 입상변정질 화강암질 편마암, 반상변정질 화강암질 편마암 그리고 미그마타이트질 편마암으로 나눌 수 있다. 미그마타이트질 편마암 (migmatitic gneiss)은 홍제사 화강암질 편마암체 남쪽 연변부에서 분천 화강암질 편마암체 인접하며 나타난다. 반상변정질 화강암질 편마암 (porphyroblastic granitic gneiss)은 미사장석이나 사장석을 반상변정으로 가지며, 규칙성 없이 홍제사 화강암질 편마암체 전역에서 입상변정질 화강암질 편마암과 함께 불규칙하게 산출되지만, 대체적으로 홍제사 화강암질 편마암체의 주변부에서 잘 관찰된다. 입상변정질 화강암질 편마암 (granoblastic granitic gneiss)은 대체로 홍제사 화강암질 편마암체의 중앙부에서 다소 우세하게 나타난다. 이 암석 내에는 특징적으로 편마암, 편암, 앰프블라이트의 잔류물 또는 내포물들이 수cm-수m 직경을 가지며 나타난다. 국부적으로 홍제사 화강암질 편마암체의 암상은 중앙에서 주변부로 감에 따라 차례로 입상변정질 화강암질 편마암, 반상변정질 화강암질 편마암 그리고 미그마타이트질 편마암으로 점이적인 변화를 보인다.

암석 기재

분천 화강암질 편마암체의 안구상 편마암과 홍제사 화강암질 편마암체의 구성암석들의 주구성 광물과 부구성광물 표 1에 정리하였다.

각 암석에서 석영은 여러번 재결정 작용을 받았으며, 부분적으로 엽리의 방향으로 신장되어 있고, 봉합상 조직과 모타르 조직을 보인다. 안구상 편마암과 반상변정질·입상변정질 화강암질 편마암에서 사장석은 대부분이 견운모화되어 나타난다. 사장석은 재결정된 석영에 의해 미르메카이트 조직 (myrmekite texture)을 보이며, 또한 큰 결정의 미사장석 결정 내에는 견운모화된 사장석이 내포되어 섬과 바다의 조직 (island and sea texture)을 보이기도 한다. 각 구성암석에서 사장석은 견운모화된 사장

석과 비교적 깨끗한 결정면을 보이는 사장석으로 구분할 수 있다. Michel Levy의 방법에 의해 측정된 사장석 성분은 다음과 같다: 안구상 편마암의 경우, 견운모화된 사장석은 약 An_{15-30} 으로 올리고크레스에 해당되고, 비교적 깨끗한 결정면을 보이는 사장석은 An_{1-5} 로 알바이트에 해당된다; 반상변정질·입상변정질 화강암질 편마암의 경우, 견운모화된 사장석은 각각 An_{13-28} , An_{10-23} 을 보이고 그렇지 않은 사장석은 An_{1-5} 를 보인다. 이와같은 사장석의 산출상태는 사장석의 결정시기가 견운모화된 사장석이 먼저 형성되었고, 신선한 결정면을 보여주는 사장석이 후기에 형성되었다는 것을 알 수 있다. 따라서 올리고크레스 (An_{10-30})가 먼저 생성된 광물이고 알바이트 (An_{1-5})는 후에 형성된 광물로 생각된다. 미그마타이트질 편마암에서 산출되는 사장석도 마찬가지로 견운모화되어 있는 사장석과 그렇지 않은 사장석으로 구분할 수 있으나, An%에서는 반대의 경향을 보이고 있다. 즉 견운모화되어 있는 사장석은 An_{10-20} 정도로 올리고크레스에 해당되고, 그렇지 않은 사장석은 An_{30-50} 정도로 안데신에 해당된다.

각 구성암석에서 흑운모의 산출상태를 살펴보면, 안구상 편마암에서 산출되는 흑운모는 녹색에서 적갈색까지 다양하게 나타난다. 반상변정질 화강암질 편마암에서 산출되는 흑운모는 적갈색보다는 녹색의 흑운모가 다소 우세하게 나타나고, 입상변정질 화강암질 편마암에서는 적갈색의 흑운모가 약간 우세하게 나타난다. 미그마타이트질 편마암에서 흑운모는 적갈색을 보이며 엽리를 이룬다. 모든 구성암석에서 흑운모는 녹니석 또는 백운모와 공존하며, 때로는 녹염석과 공생하면서 산출되기도 한다. 백운모는 부분적으로 흑운모의 벽개면과 사교하면서 중첩되어 나타나기도 하는데, 이는 후퇴변성작용을 지시하는 것으로 생각된다. 전체적으로 볼 때, 적갈색의 흑운모는 잔류 양상으로 산출되며 녹색의 흑운모는 녹염석, 녹니석, 백운모와 공생하며 나타난다.

규선석은 운모류 주변부에서 또는 사장석 내에 배태된 백운모 주변에서 섬유상으로 산출된다. 석류석은 잔류양상으로 파쇄되어 나타나고 깨진면 사이는 녹니석, 백운모, 흑운모로 채워져 있다. 근정석은 반상변정질 화강암질 편마암과 미그마타이트질 편마암에서 산출되며 흑운모와 함께 엽리 방향으로 신장되어 나타난다. 근정석은 심한 변질작용으로 많은 부분 견운모나 백운모로 치환되고 약간

Table 1. Summary of the petrological characteristics of the Buncheon and the Hongjesa Granitic Gneisses.

	Buncheon Granitic Gneiss	Hongjesa Granitic Gneisses		
	Augen Gneiss	Migmatitic Gneiss	Porphyroblastic Granitic Gneiss	Granoblastic Granitic Gneiss
Major Minerals	Quartz(34%), Plagioclase(28%) Microcline(12%) Biotite(10%), Chlorite(4%)	Quartz(34%), Plagioclase(21%) Biotite(17%)	Quartz(34%), Plagioclase(24%), Microcline(17%), Biotite(4%), Perthite(11%)	Quartz(32%), Plagioclase(29%), Microcline(18%), Muscovite(4%), Chlorite(3%)
Minor Minerals	Muscovite, Perthite, Garnet, Sillimanite, Kyanite, Epidote, Sericite, Hornblende, Calcite Ilmenite, Zircon, Apatite	Orthoclase, Chlorite Microcline, Muscovite, Garnet, Sillimanite, Cordierite, Kyanite Orthoam- phibole, Epidote, Sericite Rutile, Zircon, Apatite	Muscovite, Chlorite, Epidote, Garnet, Sillimanite, Cordierite, Kyanite, Sericite, Zircon, Ilmenite, Apatite	Biotite, Perthite, Garnet, Epidote Sillimanite, Sericite, Zircon, Ilmenite, Apatite
An% in * Plagioclase	15-30 (1-5)	10-30 (40-50)	13-28 (1-5)	10-23 (1-5)
Content of K-feldspar	15.36%	3.0%	27.1%	23.9%
Characteristic Minerals	Garnet, Sillimanite, Kyanite	Garnet, Sillimanite, Cordierite Kyanite Orthoamphibole	Garnet, Sillimanite, Cordierite, Kyanite	Garnet, Sillimanite
Q - K-F - PL Diagram	Granite, Granodiorite		Tonalite, Granodiorite, Granite	Granodiorite, Granite

* The numbers are An% of altered plagioclase by sericitization and the numbers parenthesis are An% of no altered plagioclase by sericitization.

만이 잔류되어 나타난다. 남정석은 안구상 편마암 (표품 B-20-1, E-34), 반상변정질 화강암질 편마암 (표품 D-18, D-126, D-119)과 미그마타이트질 편마암(표품 D-97)에서 나타난다. 남정석 결정들은 대부분 반자형 내지 타형이며 후기의 변성작용에 의해 불안정해져서 석영 또는 퍼사이트 내에 잔류물로 산출되거나, 백운모로 치환되어 나타난다. 드물게 남정석은 규선석과 공존하면서 산출되기도 한다. 각섬석은 미그마타이트질 편마암 (표품 KK)에서 산출된다. 현미경하에서 평행소광과 이축성 (+)의 특징을 보이며, 석류석+근청석과 공생하면서 나타난다.

분석방법

연구 지역에 대한 야외 조사시 600 여개의 표품을 채취하였고, 그 중 300 여개의 표품에 대해 박편을 제작하여 현미경을 통해 모드분석을 하였다. 모드 분석시 반상변정의 처리는 전체에서 반상변정의 함량을 계산한 후, 반상변정과 석기를 분리하여 계수하였다.

전암의 화학조성을 규명하기 위해 분천 화강암질 편마암체 8개, 홍제사 화강암질 편마암체 21개의 표품을 선정하여 기초과학 연구지원 센터 서울분소의 X-선 형광분석(XRF)기를 사용하여 화학분석 하

Table 2. Major oxides(wt%) and C.I.P.W. normative minerals for the Buncheon and Hongjesa Granitic Gneisses.

	Hongjesa Granitic Gneisses										Buncheon Granitic Gneisses				
	Migmatitic Gneiss										Augen Gneiss				
	D-23-1	D-23-4	D-99	D-100	E-20-1	D-81	Y-35	D-35	D-68	D-69	B-12	D-37	D-38-1	D-58	D-92
SiO ₂	69.88	63.57	73.70	61.22	62.32	71.26	66.08	69.13	74.34	67.01	77.07	64.18	75.40	75.27	68.29
Al ₂ O ₃	14.52	16.71	13.11	19.06	16.39	13.46	15.62	16.04	13.32	13.46	12.05	15.70	13.20	12.55	15.16
Fe ₂ O ₃	1.00	1.28	0.88	1.63	3.05	2.18	2.08	0.89	0.07	2.21	0.43	1.62	0.13	0.15	0.74
FeO ^a	3.62	4.41	2.42	3.08	4.96	2.41	2.82	1.74	2.54	4.68	0.94	4.15	1.47	2.28	2.41
TiO ₂	0.55	0.64	0.45	0.66	0.63	0.32	0.58	0.29	0.27	0.56	0.11	0.15	0.76	0.27	0.34
MnO	0.03	0.06	0.03	0.17	0.68	0.04	0.04	0.03	0.03	0.09	0.02	0.02	0.06	0.04	0.04
CaO	1.27	1.29	2.11	0.80	0.71	1.07	0.80	1.77	2.06	0.84	0.48	0.99	3.26	1.33	2.04
MgO	2.11	2.70	1.35	4.67	3.35	1.26	2.26	1.85	1.42	2.16	0.23	0.35	1.66	0.53	0.87
K ₂ O	1.97	3.79	1.49	2.67	3.96	1.89	4.04	2.76	1.33	1.33	4.42	5.39	2.65	4.08	4.76
Na ₂ O	2.50	2.31	3.23	1.37	1.05	2.87	1.74	4.03	3.27	3.31	2.98	2.54	3.58	2.45	2.99
A/K+N+C ^b	2.53	2.26	1.92	3.94	2.87	2.31	2.37	1.87	2.00	2.46	1.53	1.76	1.39	1.60	1.55
P ₂ O ₅	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08	0.06	0.09	0.07	0.05	0.06	0.03	0.04	0.17	0.06	0.08
L.O.I. ^c	1.67	1.98	0.66	2.96	1.57	1.69	2.63	0.58	0.89	1.97	0.54	1.04	0.41	0.82	1.83
Total	99.20	98.79	99.50	98.45	98.75	98.51	98.78	99.18	99.59	97.68	99.75	98.83	100.09	99.83	99.55
Q	39.89	26.26	41.49	32.81	31.66	42.34	34.49	27.84	41.92	35.08	40.97	21.89	36.38	40.25	25.72
Or	11.64	22.40	8.81	15.78	23.40	11.17	23.88	16.31	7.89	7.86	26.12	15.66	31.85	24.11	28.13
Ab	21.15	19.55	27.33	11.59	8.88	24.29	14.72	34.10	27.67	28.01	25.22	30.29	21.49	20.73	25.30
An	5.78	5.94	10.01	3.51	3.00	4.92	3.38	8.32	9.89	3.78	2.19	15.06	4.65	6.21	9.60
C	6.16	6.63	2.52	12.63	9.28	4.89	7.15	3.37	2.88	5.19	1.56	1.42	1.48	1.83	1.57
Hy	10.22	12.82	6.39	15.39	15.16	5.31	8.20	6.64	7.75	11.39	1.80	9.27	3.25	5.01	5.49
Mt	1.45	1.86	1.28	2.36	4.42	3.16	3.02	1.29	0.10	3.20	0.62	2.35	0.19	0.22	1.07
il	1.04	1.22	0.85	1.25	1.20	0.61	1.10	0.55	0.51	1.06	0.21	1.44	0.28	0.51	0.65
Ap	0.19	0.16	0.16	0.16	0.19	0.14	0.21	0.16	0.12	0.14	0.07	0.39	0.09	0.14	0.19
An%	21	23	27	23	25	17	19	20	26	12	8.0	33	18	23	28

^a; from wet analysis, ^b; Al₂O₃/K₂O+Na₂O+CaO, ^c; loss of ignition

(Location : National Grid 1:25,000 Duggu : D-23-1; 2291339245, D-23-4; 2291339247, D-99; 2291839218, D-100; 2291839216, D-81; 2274039530, Y-35; 2282839728, D-35; 2262539310, D-68; 2240839609, D-69; 2240039605, B-12; 2260839200, D-37; 2263539240, D-38-1; 2262039330, D-58; 2253839613, D-92; 2301839113 and National Grid 1: 25,000 Jukbyeon : E-20-1; 2374339350)

였다. 분석된 성분 중 Fe 은 산화·환원 적정법 (Harris, 1991)을 이용하여 제 2철과 제 3철을 구분 하였다.

두 화강암질 편마암체 광물의 화학조성의 변화 양상에 대한 차이점을 알기 위해서, 홍제사 화강암질 편마암체에서 20개 표본, 분천 화강암질 편마암체에서 10개 표본에 대해서 전자 현미 분석(EPMA)을 실시하였다. 전자 현미 분석은 서울대학교의 JEOL Superprobe 733 JXA를 사용하였다. 분석시 가속 전압은 15 kV, 빔(beam) 직경은 10 μm, 그리고 빔 전류는 10nA이다. 분석치 보정은 ZAF 방법을 사용하였다.

암석화학적 특징

주성분 원소의 변화

각 암체의 대표암석 화학성분과 CIPW 놈(norms)은 표 2에 정리하였다.

O'Connor (1965)가 제안한 An, Ab, Or norm 값을 이용한 화성암의 분류에 의하면, 분천과 홍제사 화강암질 편마암체는 대부분 화강암과 화강섬록암 영역에 해당되지만, 반상변정질 화강암질 편마암에서는 토날라이트 (Tonallite)의 조성을 보이기도 한다. 홍제사 화강암질 편마암체 중 미그마타이트질 편마

Table 2. continued.

	Hongjesa Granitic Gneisses												
	Porphyroblastic Granitic Gneiss								Granoblastic Granitic Gneiss				
	D-19	D-21	D-50	D-61	D-70	D-126	E-21	Y-51	Y-59	Y-64	Y-68	Y-76	Y-79
SiO ₂	73.60	73.47	74.38	72.48	68.46	72.20	72.20	73.08	74.72	74.04	72.50	74.56	73.02
Al ₂ O ₃	16.09	14.63	14.44	13.44	16.10	14.64	14.91	14.61	13.82	15.09	14.76	13.78	15.13
Fe ₂ O ₃	0.09	0.23	0.15	0.98	0.60	0.35	0.25	0.64	0.07	0.02	0.22	0.21	0.27
FeO	0.94	1.21	0.94	2.01	1.61	1.87	1.07	0.94	0.94	0.54	1.48	0.94	0.94
TiO ₂	0.03	0.09	0.11	0.25	0.24	0.27	0.14	0.22	0.08	0.03	0.22	0.17	0.09
MnO	0.06	0.02	0.02	0.05	0.01	0.05	0.05	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02
CaO	0.38	0.39	0.50	1.30	1.18	1.06	1.11	0.47	1.09	0.68	0.53	0.23	2.15
MgO	0.32	0.38	0.25	0.47	0.57	0.48	0.45	0.68	0.49	0.15	0.46	0.61	0.55
K ₂ O	4.72	5.45	5.36	4.22	7.27	5.08	6.25	5.22	3.70	5.21	5.77	7.16	2.26
Na ₂ O	2.32	2.92	3.15	2.72	2.65	2.71	2.57	2.92	3.12	3.38	3.15	1.83	4.42
Al/K+N+C	2.17	1.67	1.60	1.63	1.45	1.65	1.50	1.70	1.75	1.63	1.56	1.50	1.71
P ₂ O ₅	0.08	0.09	0.09	0.08	0.27	0.09	0.06	0.08	0.09	0.10	0.11	0.09	0.04
L.O.I.	1.45	0.79	0.65	0.91	0.79	0.69	0.82	0.99	1.69	0.52	0.71	0.71	0.65
TOTAL	100.10	99.67	100.10	98.91	99.75	99.49	99.88	99.87	99.83	99.77	99.93	100.3	99.54
Q	40.19	33.60	33.69	36.08	21.66	32.99	29.71	33.92	38.88	32.61	29.58	34.78	32.71
Or	27.89	32.21	31.68	24.94	42.96	30.02	36.94	30.85	21.87	30.79	34.10	42.31	13.36
Ab	19.63	24.71	26.65	23.02	22.42	22.93	21.75	24.71	26.40	28.60	26.65	15.49	37.40
An	1.36	1.35	1.89	5.93	4.09	4.67	5.11	1.81	4.82	2.72	1.91	0.55	10.41
C	6.67	3.43	2.76	2.23	2.37	2.97	2.04	3.49	2.92	2.89	2.63	2.82	1.60
Hy	2.51	2.87	2.08	3.73	3.50	3.99	2.74	2.56	2.79	1.32	3.36	2.81	2.76
Mt	0.13	0.33	0.22	1.42	0.87	0.51	0.36	0.93	0.10	0.03	0.32	0.30	0.39
Il	0.06	0.17	0.21	0.47	0.46	0.51	0.27	0.42	0.15	0.06	0.42	0.32	0.17
Ap	0.19	0.21	0.21	0.19	0.63	0.21	0.14	0.19	0.21	0.23	0.25	0.21	0.09
An%	6.0	5.0	7.0	20	15	17	19	7.0	15	9.0	7.0	3.0	22

(Location : National Grid 1:25,000 Duggu : D-19; 2281839418, D-21; 2270839450, D-50, 2270539530, D-61; 2250839608, D-70; 2240839607, D-126; 2291839738, Y-51; 2261839738, Y-59; 2260839738, Y-64; 2254039740, Y-68; 2242839843, Y-76; 2231339850, Y-79; 2254039800 and National Grid 1:25,000 Jukbyeon : E-21; 2373539248)

암의 기원암을 알아보기 위해서 ACF 와 A'KF 도표를 이용하였다. 이로부터 미그마타이트질 편마암은 대체로 셰일 (shale)이나 잡사암 (graywacke)의 조성범위에 해당됨을 알수있다. 분천과 홍제사 화강암질 편마암체에서 CIPW normative corundum (C) 값은 각각 1.42~1.83 wt%, 1.60~12.63 wt% 으로 peraluminous series에 해당되고, 홍제사 화강암질 편마암체에서는 비교적 큰 변화폭을 보인다. 그리고 Al₂O₃/(K₂O+Na₂O+CaO) 비가 각 구성암석에서 1.1 보다 크다. 이와같은 암석화학적 특성은 퇴적과정을 거친 암석이 초변성작용에 의해 형성된 S-type의 화강암체임을 지시하는 것이라 보고된 바 있다 (White and Chappel, 1983).

그림 2는 두 암체의 SiO₂ 함량이 증가함에 따라

주성분 원소들의 변화양상을 알아보기 위한 Harker의 도표이다. SiO₂ 함량에 따른 주성분 원소의 변화는 전체적으로 안구상 편마암과 미그마타이트질 편마암에서는 약간의 경향성을 보이지만, 입상·반상변정질 화강암질 편마암에서는 다소 집중되는 경향을 보인다. 분천과 홍제사 화강암질 편마암체에서 SiO₂ 함량의 증가에 따라 Al₂O₃, MgO, FeO는 감소하는 경향을 보인다. Kim and Cho (1994)은 이는 장석과 흑운모의 연속적인 결정화작용 (crystallization)에 의한 효과라 하였다. 그리고 분천 화강암질 편마암체에서는 SiO₂가 증가함에 따라 CaO와 Na₂O는 증가하지만 홍제사 화강암질 편마암체에서는 CaO는 감소하고, Na₂O는 거의 일정하게 나타난다. 그리고 Na₂O+K₂O, K₂O 함량이 분천 화

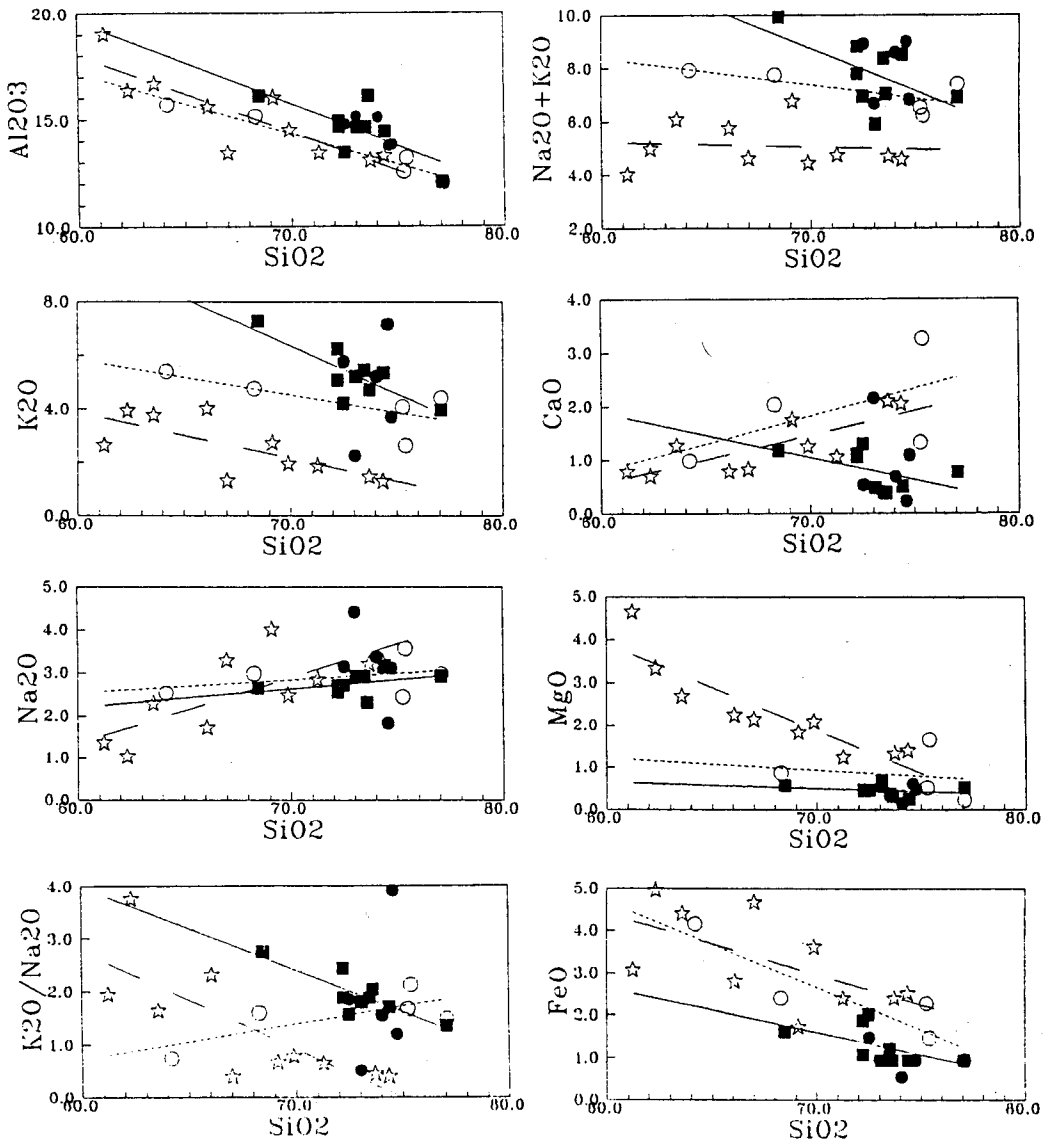


Fig. 2. Major oxides vs. SiO₂ content (in wt%) in Buncheon and Hongjesa Granitic Gneiss. Solid, dashed and dotted lines represent the linear regressional lines in porphyroblastic granitic gneiss, migmatitic gneiss and augen gneiss, respectively. ○, Augen gneiss; ■, Porphyroblastic granitic gneiss; ●, Granoblastic granitic gneiss; ☆, Migmatitic gneiss.

강암질 편마암체에서는 완만하게 감소되는데 비해서, 홍제사 화강암질 편마암체의 반상·입상변정질 화강암질 편마암에서는 급하게 감소한다. 이런 알카리 성분의 변화양상은 홍제사 화강암질 편마암체 전체가 K-변성교대작용에 의해 형성된 것으로 생각하기 어렵다. 두 암체에서의 K₂O/Na₂O비를 비교하여 보면 (표 2), 분천 화강암질 편마암체의 안구상 편마암에서는 0.74~2.12 (평균 1.52)를 보이고,

홍제사의 미그마타이트질 편마암에서는 0.40~3.77 (평균 1.31), 입상변정질 화강암질 편마암에서는 0.51~3.91 (평균 1.80), 그리고 반상변정질 화강암질 편마암에서는 1.12~3.91 (평균 1.99)로 홍제사 화강암질 편마암체 중앙부에서 주변부로 감에 따라 K₂O/Na₂O비가 증가하는 경향을 보인다. 이와같은 변화양상을 종합해 보면, 반상변정질 화강암질 편마암과 미그마타이트질 편마암이 접하는 곳에서는

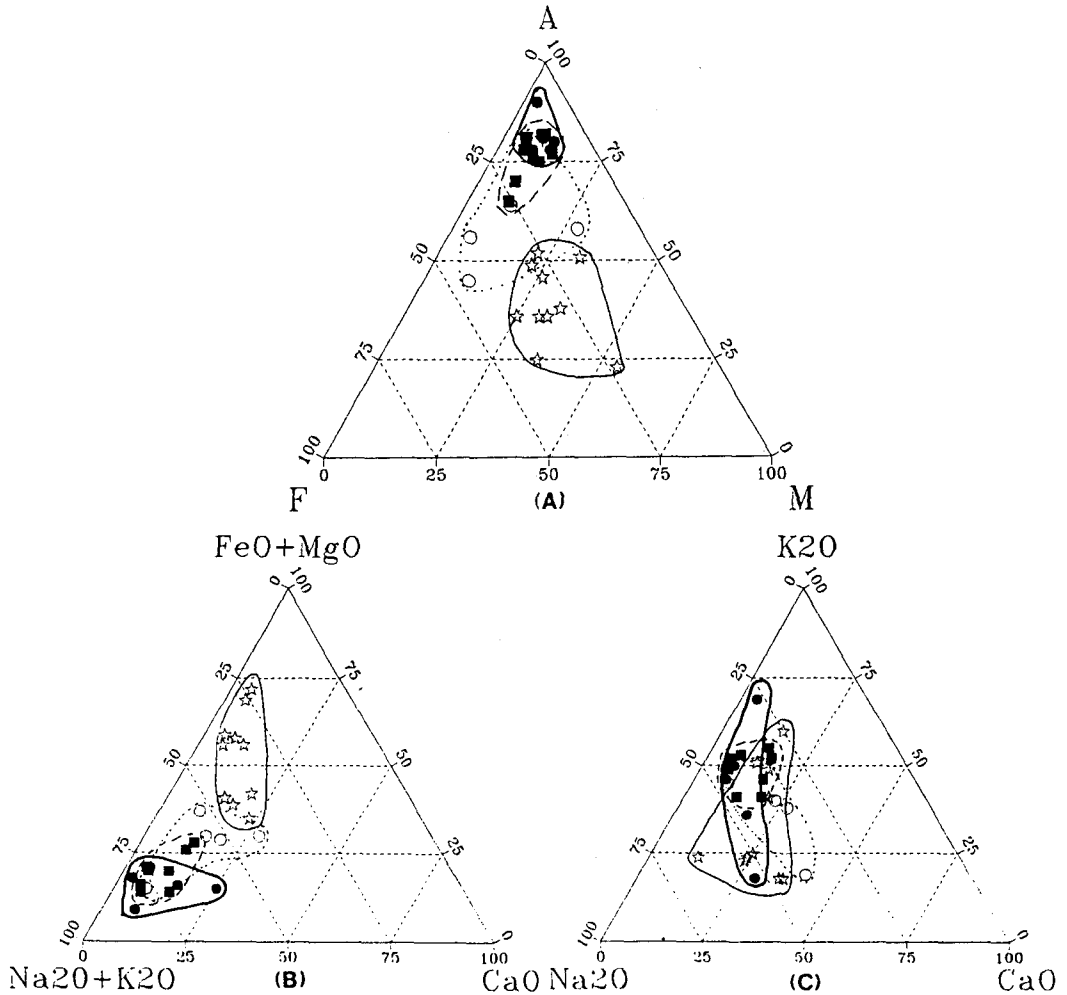


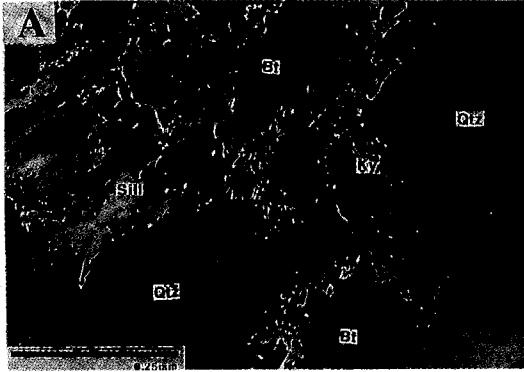
Fig. 3. Plots of the compositions of the Buncheon and Hongjesa Granitic Gneisses on AFM(A= K_2O+Na_2O , F= $FeO+Fe_2O_3$, M=MgO), $FeO+MgO-Na_2O+K_2O-CaO$, and Na_2O-K_2O-CaO ternary diagrams. Symbols are the same as in Fig. 2. -----, Porphyroblastic granitic gneiss; ———, Migmatitic gneiss; ———, Granoblastic granitic gneiss, ; Augen gneiss.

화강암체의 K/Na 비가 증가하는 경향을 볼 수 있는데, 이것은 synkinematic 화강암 주변부에서 보여주는 온도의 상승으로 설명할 수 있다 (Marmo, 1970). 그림 3A는 알카리성분과 고철질성분을 비교하기 위한 AFM 도표이다. 입상변정질 화강암질 편마암은 높은 알카리 함량을 보이며 집중되어 있고, 반상변정질 화강암질 편마암과 안구상 편마암은 F-M 변에 대해 다소 수직인 경향을 보인다. 이로부터 두 암체 모두가 total Fe, Mg 성분에 비해 알카리 성분의 변화가 크며, 반상·입상변정질 화강암질 편마암은 다른 암체에 비해 높은 K_2O+Na_2O 함량을

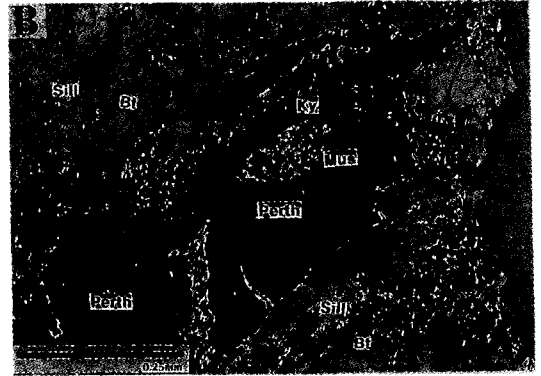
가짐을 알 수 있다. 그리고 $(FeO+MgO)-(Na_2O+K_2O)-CaO$ 도표 (그림 3B)에서 성분변화를 살펴보면, 미그마타이트질 편마암과 안구상 편마암은 CaO 보다는 $FeO+MgO$ 과 Na_2O+K_2O 성분의 변화폭이 크고, 입상·반상변정질 화강암질 편마암은 비교적 높은 Na_2O+K_2O 함량을 보이며 한정된 영역에 집중되는 경향을 보인다. 그리고 K_2O-Na_2O-CaO 도표 (그림 3C)에서 성분변화 양상을 보면, 미그마타이트질 편마암과 입상변정질 화강암질 편마암 그리고 안구상 편마암에서 K_2O-Na_2O 성분간 변화폭이 비교적 크게 나타난다. 그러나 홍제사 화강암질 편마

Mineral Assemblages in Zone I

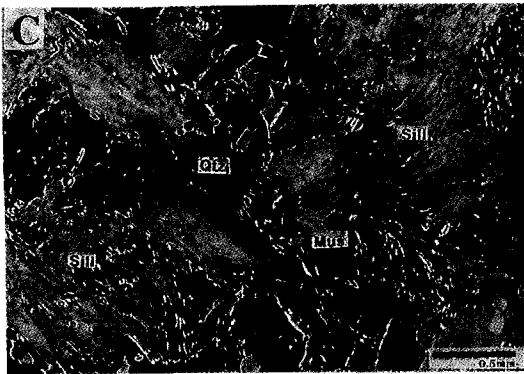
Biotite + Sillimanite + Kyanite



Biotite + Sillimanite + K-feldspar + Kyanite



Muscovite + Sillimanite



Biotite + Muscovite + Sillimanite + Cordierite

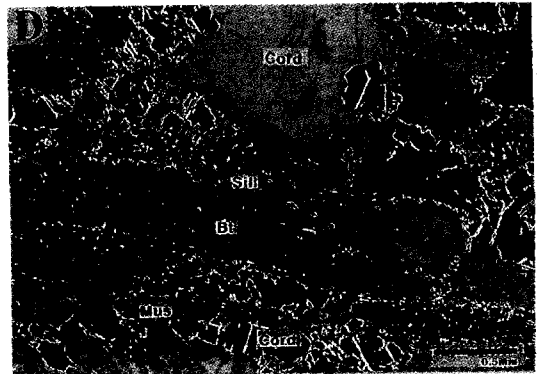


Fig. 5. Photomicrographs of the mineral assemblages in Zone I. (A) Kyanite occurring as a fine relict grain, together with sillimanite and biotite in specimen D-126 (Qtz; Quartz, Bt; Biotite, Sill; Sillimanite, Ky;Kyanite, cross-polarized light(XPL)); (B) A relict kyanite (Ky) grain replaced by muscovite (Mus) and occurring with biotite (Bt), perthite (Perth) and Sillimanite (Sill) in specimen B-20-1 (augen gneiss, XPL), (C) Muscovite embayed by quartz-sillimanite(Sill) intergrowth in specimen D-19 (porphyroblastic granitic gneiss, XPL), (D): Mineral assemblage of biotite+mucovite+sillimanite+cordierite (Cord) in specimen Y-11 (Migmatitic gneiss, XPL).

Zone II의 광물군

석영 + 사장석(An_{30-50}) + K-장석 + 흑운모 + 규선석 + 근청석 + 석류석 (5)

석영 + 사장석(An_{30-50}) + 석류석 + 근청석 + 각섬석 (6)

Zone I과 Zone II에서 규선석은 백운모 + 석영 = K-장석 + 규선석 + H_2O 과 백운모 + 사장석 + 석영 = 규선석 + K-장석 + Ca-rich 사장석 + H_2O 반응식에 의해 생성된다. Schumacher et al.(1990)는 이 반응식에서 온도가 증가함에 따라 K-장석의 K:Na 비와 사장석의 Ca:Na 비가 증가한다고 하였다. 그리고 백운모가 소멸되는 동안에 또는 그 다음에 흑운모의

탈수화작용(dehydration)에 의해 다음과 같은 반응이 일어난다.

규선석 + FeMg 흑운모 + 석영 = 석류석 + K-장석 + Mg-rich 흑운모 + H_2O (3)

Zone II의 광물군 (5)의 반응식은 다음과 같다. 규선석 + MgFe 흑운모 + 석영 = 근청석 + K-장석 + Fe-rich 흑운모 + H_2O (4)

규선석 + 흑운모 + 석영 = 석류석 + 근청석 + K-장석 + H_2O (5)

규선석 + K-장석군의 안정영역 아래에서 석류석과 근청석의 공생 (그림 6A)은 상부 앰피블라이트상이나 그라놀라이트상 같은 극히 제한된 온도-압력

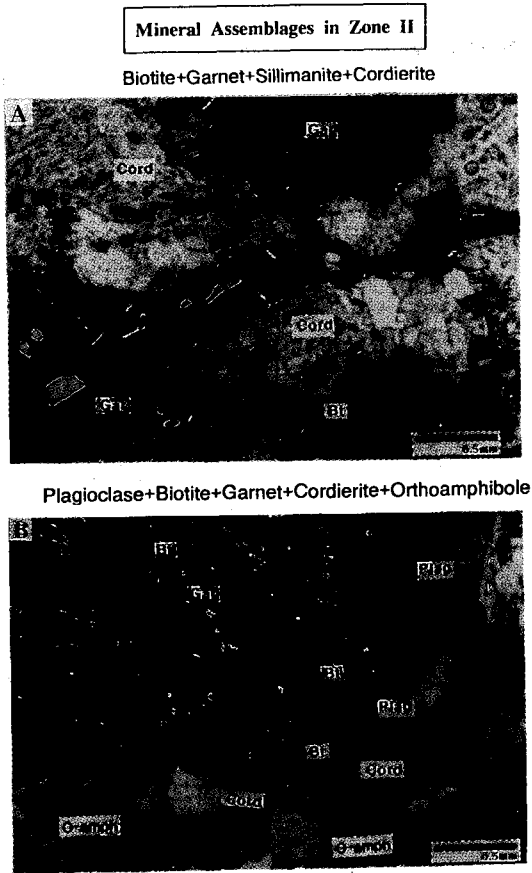


Fig. 6. Garnet coexisting with cordierite in Zone II. (A) Mineral assemblage of biotite + garnet + sillimanite + cordierite (Cord), showing elongated garnet and cordierite in specimen D-23-4 (Migmatitic gneiss, XPL), (B) Mineral assemblage of plagioclase + biotite + garnet + cordierite + orthoamphibole (O-amph) in specimen KK (migmatitic gneiss, XPL).

조건하에서만 가능하다. 이와같은 반응은 Lee and Holdaway (1977)에 의하면, 안정영역이 $P_{H_2O} < P_{TOT}$ 하에서 온도는 $700^{\circ}C$, 압력은 $4 \sim 5.7$ kbar ($P_{H_2O} = 0.2 \sim 0.4$)이다. 광물군 (6)에서 각섬석 (anthophyllite-gedrite) + 석류석 + 근청석의 공생 (그림 6B)은 8 kbar/ $680 \sim 720^{\circ}C$ 에서 $3 \sim 5$ kbar/ $600 \sim 650^{\circ}C$ 까지의 온도·압력 변화를 의미한다 (Harley and Hensen, 1990). 그리고 잔류 남정석은 후기 고온/저압의 변성작용에 의해 남정석 = 규선석 (Bohlen, 1987)반응과 석영 + gedrite + Al_2SiO_5 = 근청석 + anthophyllite (Harley & Hensen, 1990) 반응에 의해 전이된 것을 의미한다.

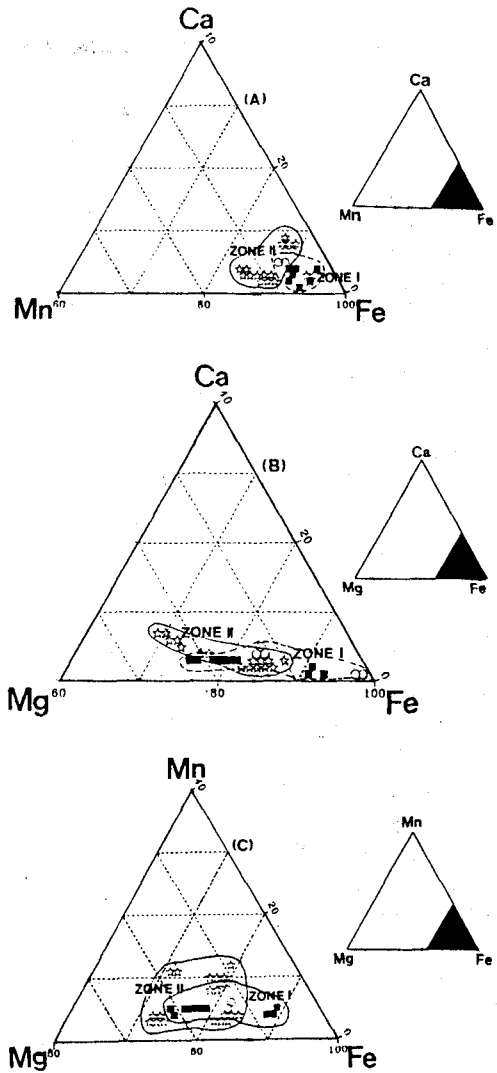


Fig. 7. Compositions of garnets in Buncheon and Hongjesa Granitic Gneisses, plotted in terms of; (A) Ca-Mn-Fe; (B) Ca-Mg-Fe; (C) Mn-Mg-Fe; Symbols are the same as in Fig. 2.

광물화학

석류석

Zone I과 Zone II에서 산출되는 석류석의 화학 조성은 표 3에 정리하였으며, Fe, Mg, Mn 및 Ca 함량변화는 그림 7에 도시하였다. 그림 7A에서 Zone I과 II의 석류석은 대체로 높은 Fe 함량을 보인다. 그림 7B에서 Zone I과 II의 석류석은 Mg와 Fe 간의

Table 5. Chemical compositions of muscovites from the Buncheon and Hongesa Granitic Gneisses.

	Hongesa Granitic Gneisses																			A ^a	B ^b
	Migmatitic Gneiss									Granoblastic Granitic Gneiss											
	D-35	D-69	D-97	D-106	E-20-1	Y-35	D-19	D-21	D-72	D-126	D-20-1	D-20-2	D-45	Y-19	Y-64	Y-76	Y-85	E-20			
SiO ₂	45.10	47.01	44.10	46.53	45.40	43.69	45.38	45.15	45.82	45.70	45.46	45.47	45.03	46.33	45.76	45.24	45.50	44.77			
TiO ₂	0.95	0.41	0.56	0.11	0.47	0.90	0.10	0.82	1.90	0.04	0.02	0.50	0.73	0.44	0.74	0.56	0.10				
Al ₂ O ₃	34.94	32.70	34.10	35.71	35.01	35.60	36.21	31.90	33.11	28.93	36.70	36.13	34.38	33.33	34.81	34.36	33.11	30.67			
FeO	1.03	2.66	2.95	1.14	1.16	0.84	0.92	3.60	2.14	3.70	0.67	1.10	1.37	2.14	1.54	1.61	1.93	6.82			
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.10			
MgO	0.83	1.40	1.03	0.88	1.02	0.60	0.18	0.80	0.73	1.34	0.11	0.21	0.70	0.96	0.60	0.60	0.90	0.22			
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00			
Na ₂ O	0.35	0.25	0.40	0.61	0.61	0.58	0.61	0.32	0.37	0.19	0.40	0.50	0.39	0.41	0.48	0.40	0.40	0.24			
K ₂ O	10.23	10.94	10.26	10.90	10.44	10.80	10.24	10.88	10.37	10.24	10.83	10.64	10.45	10.51	10.51	10.38	10.60	10.33			
Total	93.43	95.37	93.40	95.88	94.11	93.03	93.67	92.66	92.82	92.00	94.22	94.08	92.83	94.41	94.15	93.42	93.00	93.25			
Cation per 11 oxygens																					
Si	3.052	3.019	3.026	3.081	3.060	2.989	3.060	3.142	3.110	3.198	3.052	3.062	3.081	3.127	3.086	3.079	3.120	3.139			
Al(IV)	0.948	0.981	0.974	0.919	0.940	1.011	0.940	0.858	0.890	0.802	0.948	0.938	0.919	0.873	0.914	0.921	0.880	0.861			
Al(VI)	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000			
Ti	1.839	1.604	1.781	1.868	1.842	1.856	1.939	1.757	1.791	1.584	1.955	1.930	1.854	1.778	1.853	1.835	1.797	1.674			
Fe(2+)	0.048	0.020	0.029	0.005	0.024	0.046	0.005	0.000	0.042	0.099	0.002	0.001	0.025	0.037	0.027	0.038	0.028	0.005			
Mn	0.058	0.149	0.169	0.063	0.066	0.048	0.051	0.209	0.122	0.214	0.038	0.062	0.078	0.121	0.086	0.091	0.110	0.339			
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.006			
	0.083	0.139	0.105	0.087	0.102	0.060	0.018	0.081	0.074	0.139	0.010	0.021	0.067	0.096	0.059	0.059	0.088	0.023			
Ca	2.028	1.912	2.084	2.023	2.034	2.010	2.013	2.047	2.029	2.039	2.005	2.014	2.024	2.032	2.027	2.024	2.023	2.107			
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000			
K	0.045	0.032	0.053	0.077	0.079	0.076	0.079	0.042	0.049	0.025	0.052	0.064	0.052	0.053	0.062	0.060	0.052	0.032			
	0.884	0.936	0.898	0.921	0.940	0.940	0.881	0.996	0.909	0.915	0.928	0.914	0.913	0.905	0.905	0.901	0.926	0.924			
Mg/(Fe+Mg)	0.929	0.968	0.951	0.998	0.977	1.016	0.962	1.008	0.958	0.940	0.981	0.979	0.965	0.958	0.967	0.962	0.978	0.956			
Na/(Na+K)	0.411	0.517	0.617	0.420	0.393	0.444	0.739	0.721	0.622	0.602	0.792	0.747	0.538	0.558	0.593	0.607	0.556	0.945			
	0.048	0.033	0.056	0.077	0.081	0.075	0.082	0.042	0.051	0.027	0.053	0.065	0.054	0.055	0.068	0.062	0.053	0.033			

a. Buncheon Granitic Gneiss, b. augen gneiss

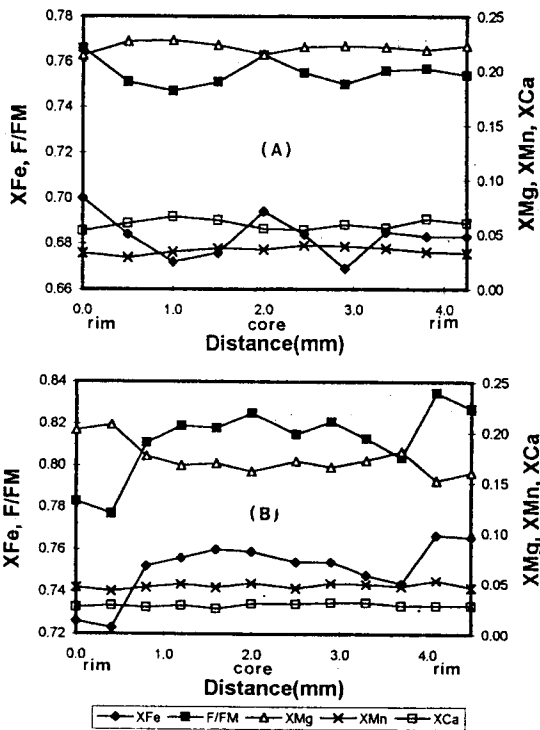


Fig. 8. Compositional zoning profiles of garnet (A) in the Zone II (specimen KK) and (B) in the Zone I (specimen E-21). Abbreviations; F/FM(=Fe/Fe+Mg), X_{Fe}(=Fe/Fe+Mg+Mn+Ca), X_{Mg}(=Mg/Fe+Mg+Mn+Ca), X_{Mn}(=Mn/Fe+Mg+Mn+Ca), X_{Ca}(=Ca/Fe+Mg+Mn+Ca).

성분변화로 특징지워지고, 그림 7C에서도 각 Zone의 석류석은 Mg와 Fe 간의 성분변화로 특징지워진다. 대체로 Zone II의 석류석은 Zone I 보다 Ca와 Mg 함량이 높게 나타난다.

Zone I과 Zone II의 석류석의 누대구조 즉, 석류석 결정 중심에서 주변으로 감에 따라 성분변화를 알아보기 위해서 석류석 결정 중 비교적 결정이 크고 (장경 4 mm), 변형을 심하게 받지 않은 입자를 선택했다. Zone II에서 산출되는 석류석 (표본 KK)은 중심부에서 주변부로 이동됨에 따라 F/FM (Fe/Fe+Mg) 값과 X_{Fe} 함량이 감소하다 증가하는 반면에, X_{Mg}와 X_{Ca} 함량은 뚜렷하지는 않지만 상대적으로 약간 감소하는 경향을 보인다 (그림 8A). 이와같은 성분변화는 석류석이 성장하면서 겪은 변성작용의 온도·압력 조건의 변화를 나타내는 것으로 해석할 수 있다 (Selverstone et al., 1983). Zone I에서 산출되는 석류석 (표본 E-21)은 중심부에서는 성분변화를 보이지 않지만, 주변부에서는 F/FM과 X_{Fe}는 급

격히 증가하는 반면 X_{Mg}는 상대적으로 감소한다 (그림 8B). 이는 석류석의 중심부가 화학성분의 확산이 활발한 높은 온도에서 재결정 되었다는 것을 의미하고, 후퇴변성작용의 영향으로 석류석의 주변부에서만 선택적으로 누대구조가 발달한 것으로 해석할 수 있다 (Yardley, 1977). 그리고 이런 후퇴변성양상은 규선석+K-장석대 내지 상부 앰피블라이트상에 해당하는 석류석에서 보여주는 양상 (Tracy, 1982)과 유사하다.

흑운모

각 암석에서 산출되는 흑운모의 화학조성은 표 4에 정리하였으며, 이 중 Mg/(Mg+Fe)와 Al(vi) 함량을 그림 9A에 도시하였다. 분천 화강암질 편마암체의 Mg/(Mg+Fe) 비는 0.25~0.45, 그리고 Al(vi) 함량은 0.20~0.57까지 변화한다. 그리고 홍제사 화강암질 편마암체의 반상변정질 화강암질 편마암에서 Mg/(Mg+Fe) 비는 0.2-0.51이고 Al(vi)은 0.25~0.58까지 변화한다. 그리고 미그마타이트질 편마암에서 Mg/(Mg+Fe) 비는 0.35~0.65이고, Al(vi)은 0.3~0.57까지 변화한다. Guidotti(1984)에 의하면, 앰피블라이트상에서 그라놀라이트상 사이의 암석에서 흑운모의 Mg/(Mg+Fe) 비가 0.5 이상에서 Mg/(Mg+Fe) 비가 증가하면 Al(vi)의 양은 감소하는 경향을 보이며 그 감소되는 정도는 변성도가 증가할수록 커지나 Mg/(Mg+Fe) 비가 0.5 이하인 경우에는 어떠한 경향성도 보이지 않는다고 설명했다. 연구지역의 미그마타이트질 편마암의 경우, Mg/(Mg+Fe) 비가 증가할수록 Al(vi) 함량은 감소하는 경향을 잘 보여준다 (그림 9A). 일반적으로 흑운모의 Ti 함량은 흑운모의 Mg/(Mg+Fe) 비에 영향을 받는다고 알려져 있고 변성도가 높아짐에 따라 Ti 함량은 증가한다 (Guidotti et al., 1977). 연구지역의 Zone I에서 Zone II로 이동됨에 따라서 흑운모의 Ti 함량은 증가하는 경향을 보인다 (그림 9B). 그리고 같은 Zone에 해당되는 흑운모들은 Mg 함량이 증가함에 따라 Ti 함량은 감소한다. 그림 9C는 흑운모 성분들 사이의 치환 관계를 알아보기 위한 것이다. 대부분의 흑운모들은 Al, Al=(Fe²⁺+Mg), Si 치환관계 (Guidotti, 1984)를 보이며, biotite-eastonite를 연결하는 흑운모선 근처에 위치한다. 따라서 흑운모들은 산출상태와 상관없이 비교적 높은 Al 성분을 보이는 eastonite에 가까운 성분을 가

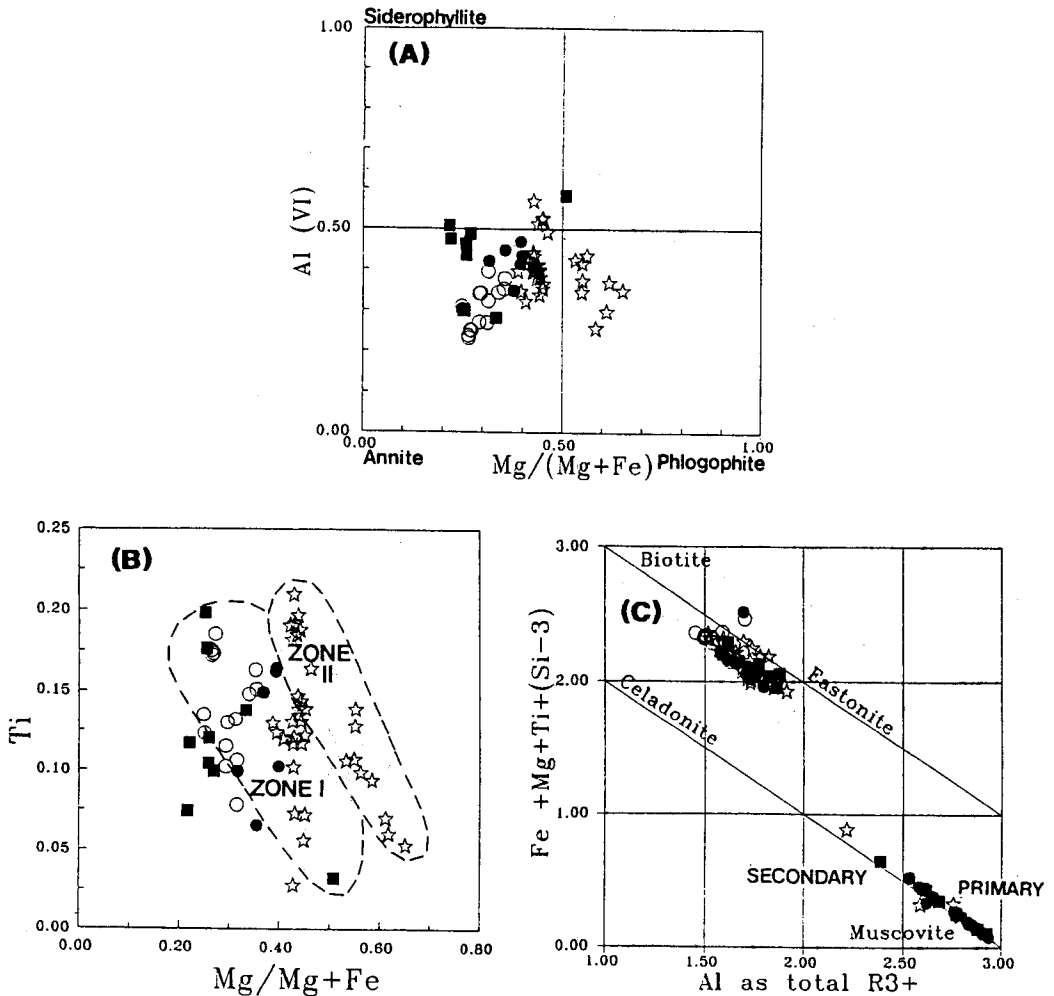


Fig. 9. The chemical compositions of the biotites in Buncheon and Hongjesa Granitic Gneisses, plotted in terms of (A) Mg/(Mg+Fe) vs. Al(vi); (B) Mg/Mg+Fe vs. Ti; (C) total Al as R³⁺ vs. Fe²⁺+Mg+Ti+(Si-3) to illustrate the ideal dioctahedral and trioctahedral substitution in biotites and muscovites. Symbols are the same as in Fig. 2.

지고 있음을 알 수 있다.

지금까지 설명된 흑운모의 성분 변화는 Zone I에 해당되는 흑운모 즉, 녹갈색에서 갈색을 보이는 흑운모에서 Zone II에 해당되는 흑운모 즉, 적갈색을 띠며 근청석+규선석+석류석과 공존하는 흑운모로 이동됨에 따라 Ti와 Mg 함량이 증가하는 경향을 보이고, Zone II의 경우는 Mg/Mg+Fe 비가 증가함에 따라 Al(vi) 값이 감소하는 특징을 보인다. 이와같은 흑운모의 성분 변화양상은 미그마타이트질 편마암에서 잘 관찰되며, 광물군과 비교해 볼 때, Zone II의 흑운모는 상부 앰피블라이트상에 해당

되고, Zone I의 흑운모는 앰피블라이트상에 해당된다고 볼 수 있다.

백운모

분석된 각 암석에서 백운모들은 이상적인 백운모 성분, KAl₂(AlSi₃)O₁₀(OH)₂에 가까운 조성을 보이며 K-Na 성분간 고용체를 이루고 있다 (표 5). 연구지역의 홍제사 화강암질 편마암체에서 대부분의 백운모들은 Al과 Si의 함량은 서로 반비례 관계 (그림 10A)를 보이는 반면, Fe+Mg와 Si 함량은 비례 관계

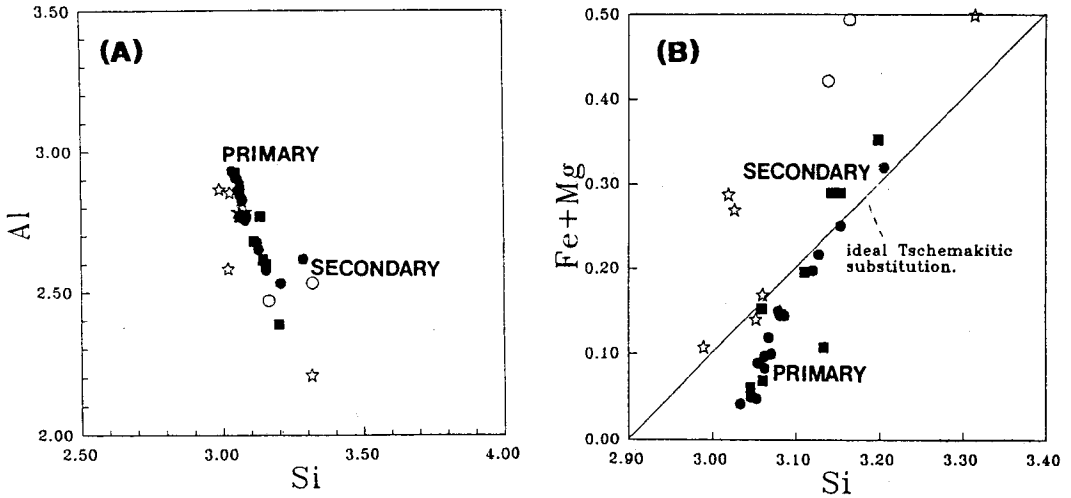


Fig. 10. Compositions of muscovites in Buncheon and Hongjesa Granitic Gneisses plotted in terms of (A) Si vs. Al; (B) Si vs. Mg+Fe. The reference line represents the ideal Tschemakitic substitution. Symbols are the same as in Fig. 2.

(그림 10B)를 보인다. 이와같은 백운모의 성분 변화는 처마카이트 (tschermakite)치환, (Mg, Fe²⁺), Si = Al(vi), Al(iv)에 의해 설명된다. 그리고 그림 10B에서 1차 백운모 (primary muscovite) 즉, 규선석 + K-장석과 공존하는 백운모는 비교적 낮은 Fe + Mg와 Si값을 보이지만, 2차 백운모 (secondary muscovite) 즉, 흑운모 + 녹니석과 공존하는 또는 석류석 주변부에서 나타나는 백운모들은 Si와 Fe + Mg 값이 1차 백운모에 비해 증가된 경향을 보이고 있다. 각 암석들에서 대부분의 백운모들은 세라도나이트-백운모(celadonite-muscovite) 연결선상을 따라서 위치하며, 1차 백운모는 대체로 이상적인 백운모 성분 쪽에 집중되어 있으며, 2차 백운모는 Fe + Mg + Ti + (Si-3) 성분이 1차 백운모에 비해 증가된 경향을 보여준다 (그림 9C). 이와같은 1차 백운모와 2차 백운모의 화학성분 차이는 홍제사 화강암질 편마암체 주변부에서 국부적으로 일어난 K-변성교대작용에 의한 효과로 생각된다. 즉, 1차 백운모는 고온에서 일어난 K-변성교대작용에 의해서 K 성분이 풍부하게 되었고, 2차 백운모는 후퇴변성작용에 의해 Si와 Fe + Mg 성분이 많은 백운모가 생성된 것이다.

사장석

분천 화강암질 편마암체의 안구상 편마암에서 사

장석의 성분은 An_{10.7-29.4} (평균 22.8%)를 보이며, An_{1.6}인 알바이트도 나타난다 (표 6). 그리고 견운모화되어있는 사장석과 그렇지 않은 사장석 사이의 An 성분 변화의 규칙성은 뚜렷하지 않다.

홍제사 화강암질 편마암체의 경우, 미그마타이트질 편마암에서 사장석의 성분은 An_{9.6-49.2} (평균 32.2%)를 보인다 (표 6). 사장석 결정은 견운모화 작용을 받은것과 비교적 신선한 결정면을 보이는 것으로 나눌 수 있다. 후자의 경우 규선석 + 근청석 + 흑운모와 공생하는 경우가 보통이며, 사장석의 성분은 An₃₀₋₅₀을 보이고, 전자의 경우는 An₁₀ 정도로 An 조성상의 차이를 보인다. 반상·입상변정질 화강암질 편마암에서의 사장석도 An 성분에 의해 An_{1.5}인 것과 An_{11.5-27.9}인 것 두가지로 구분된다. 전자는 비교적 신선한 결정면을 가지고 나타나거나 아주 심하게 견운모화되어 백운모와 공생하면서 나타나기도 한다. 그리고 후자는 부분적으로 견운모화되어 있는 사장석이거나, 미사장석이나 퍼사이트 내에 내포되어 있는 사장석이다. 이와같은 사장석의 성분상의 특징으로 볼때 (그림 11), 상부 앰피블라이트상에 해당되는 광물조합에서 사장석은 An₃₀₋₅₀을 보이며, 앰피블라이트상에서는 An₂₀₋₃₀, 그리고 녹염석-앰피블라이트상이나 녹색편암상에서는 An₁₅ 이하를 보인다. Zone I에 해당되는 사장석은 후에 녹염석-앰피블라이트상이나 녹색편암상이 중첩된 앰피블라이트상에 해당된다고 할 수 있다. 그리고 Zone II에

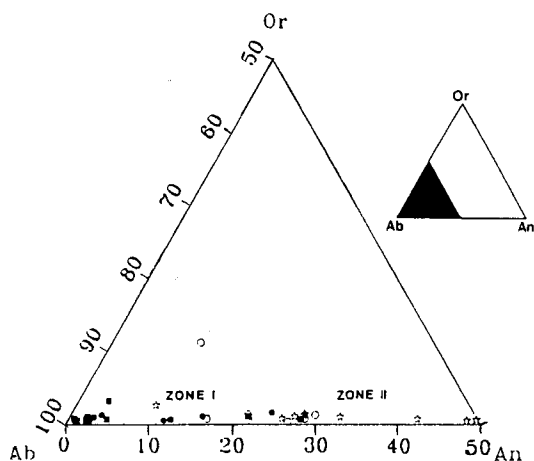


Fig. 11. Compositions of plagioclases in Buncheon and Hongjesa Granitic Gneisses, plotted on the Or-Ab-An ternary diagram. Symbols are the same as in Fig. 2.

해당되는 사장석은 후에 녹염석-앰피블라이트상 이나 녹색편암상이 중첩된 상부 앰피블라이트상에 해당될 것이다.

근청석·각섬석(orthoamphibole)

근청석은 석류석에 비해 드물게 Zone II에서만 국한적으로 산출된다. 석류석+규선석과 공생하는 근청석은 (표품 D-23-4) Mg/Mg+Fe 비가 0.59~0.57을 보이며, 석류석+각섬석과 공생하는 것들은 0.72 정도로 비교적 높은 값을 보여준다 (표 7). 이와같은 Mg/Mg+Fe 비의 차이는 모암의 성분차이로 기인된 것으로 생각된다.

각섬석은 미그마타이트질 편마암의 표품 KK에서만 산출된다. 각섬석의 Fe와 Mg 함량은 23개 무수산소를 기준으로한 단위화학적당 각각 2.97~3.16, 3.21~3.36 으로 상당히 높은 값을 보여주고, 반면에 Ca 함량은 0.04~0.07로 매우 낮은 값을 보여준다. 각섬석의 Al 함량은 1.06~1.49의 값을 갖는다 (표 8). 따라서 각섬석 그룹 중 anthophyllite-gedrite 즉, $(Mg, Fe^{2+})_7(Si_8O_{22})(OH, F)_2-(Mg, Fe^{2+})_5Al_2(Si_6Al_2O_{22})(OH, F)_2$ 계열에 해당된다.

변성작용

지온·지압계

연구지역에서 Zone I와 II의 변성온도를 측정하기

위해서 석류석-흑운모(Ferry and Spear, 1978; Ganguly and Saxena, 1984; Newton and Haselton, 1981; Kretz, 1990), 근청석-석류석 (Thompson, 1978; Bhattacharya et al., 1988) 그리고 사장석-K-장석 (Fuhrman & Lindsley, 1988) 지온계 등을 이용하였다. 석류석은 결정 주변부의 성분을 사용하였고, 이는 석류석과 접촉 또는 인접한 흑운모가 석류석 결정의 주변부와 평형을 이루었다는 가정에 의한 것이다. 흑운모와 사장석도 결정 주변부의 성분을 사용하였다. 석류석-흑운모 지온계를 이용하여 구한 Zone II의 변성온도는 Ferry and Spear (1978; T1)와 Ganguly and Saxena (1984; T2)에 의해 제시된 모델보다 Newton and Haselton (1981; T3)과 Kretz (1990; T4)가 제안한 열역학적 모델이 연구 지역의 변성온도를 잘 표현한다(표 9). 그 이유는 Kretz와 Newton and Haselton이 사용한 석류석과 흑운모의 성분범위에 연구지역의 석류석과 흑운모가 대부분 해당되기 때문이다. 온도 계산시 압력은 후술할 지압계에서 추정된 압력에 근거를 두고 5 kbar로 가정하였다. 전체적인 Zone II의 온도는 530~716°C를 보이고, 후퇴변성 온도는 530~540°C를 보인다 (그림 12A). 표품 D-23-1에서 석류석 내에 포획되어 있는 흑운모를 사용하여 얻은 온도는 621~667°C 이고, 인접한 흑운모를 이용하여 구한 온도는 보다 낮은 605-684°C를 보인다. 그러나 표품 KK에서는 석류석 내에 포획되어 있는 흑운모를 사용하여 얻은 온도는 587-604°C이고 인접한 흑운모를 이용하여 구한 온도는 623-714°C로 보다 높게 나타난다. 따라서 이 석류석은 점진 변성작용의 증거라 생각할 수 있다. 근청석-석류석 지온계는 Thompson (1978; T5)와 Bhattacharya et al. (1988; T6)의 모델을 사용하였다 (표 10). 측정된 온도 범위는 602~678°C를 보인다 (그림 12B). 이와같은 높은 온도 범위는 전술한 Zone II의 광물군과 석류석-흑운모 지온계와 잘 일치한다.

Zone I에 대한 온도는 석류석-흑운모 지온계 (표 9)와 사장석-K-장석 (two-feldspar) 지온계를 이용하여 구하였다. 석류석-흑운모 지온계를 사용하여 구한 Zone I의 온도 범위는 512~790°C를 보이며 (그림 12C), 이 중 602~624°C를 보이는 온도 범위는 Zone II의 온도와 유사하다. 그러나, 홍제사 화강암질 편마암체과 인접한 분천 화강암질 편마암체의 표품(E-34-1,2)에서 온도범위는 698~741°C로 거의 그라놀라이트에 해당되는 온도조건을 보인다. 이런

Table 6. Chemical compositions of plagioclases from the Buncheon and Hongjesa Granitic Gneisses.

	Hongjesa Granitic Gneisses													
	Migmatitic Gneiss							Porphyroblastic Granitic Gneiss						
	D-35-1	D-35-6	D-68	D-69	D-106-6	E-20-1	KK-47	KK-36	D-8	D-19	D-28	D-50	D-72	D-126
SiO ₂	65.12	60.69	60.56	59.80	54.90	59.33	56.99	56.35	65.47	67.96	62.05	66.67	66.34	60.32
TiO ₂	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
Al ₂ O ₃	21.61	24.18	24.60	23.77	28.18	25.50	26.23	26.26	20.62	19.92	24.15	20.11	19.20	24.54
FeO	0.04	0.00	0.04	0.05	0.00	0.11	0.05	0.08	0.03	0.00	0.00	0.03	0.08	0.01
MnO	0.01	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
MgO	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
CaO	2.02	5.30	5.86	5.37	10.10	6.83	8.08	8.48	0.76	0.13	4.82	0.66	0.21	5.92
Na ₂ O	10.28	8.59	8.43	8.73	5.69	7.68	6.99	6.53	10.83	12.06	9.16	11.52	11.43	8.37
K ₂ O	0.50	0.18	0.24	0.06	0.13	0.20	0.12	0.08	0.56	0.16	0.19	0.13	0.11	0.12
Total	99.60	98.94	99.75	97.78	99.00	99.65	98.46	97.78	98.27	100.23	100.37	99.13	97.37	99.28
Cation per 8 oxygens														
Si	2.878	2.723	2.701	2.720	2.495	2.655	2.592	2.581	2.924	2.970	2.742	2.948	2.981	2.702
Al	1.126	1.279	1.296	1.274	1.509	1.345	1.407	1.418	1.085	1.026	1.258	1.049	1.017	1.296
	4.004	4.002	3.997	3.994	4.004	4.000	3.999	3.999	4.009	3.996	4.000	3.997	3.998	3.998
Ca	0.096	0.255	0.280	0.262	0.425	0.327	0.394	0.416	0.036	0.006	0.228	0.031	0.018	0.284
Na	0.881	0.747	0.723	0.769	0.577	0.667	0.616	0.580	0.938	1.022	0.829	0.998	0.996	0.727
K	0.028	0.010	0.013	0.004	0.008	0.011	0.007	0.005	0.032	0.009	0.011	0.007	0.006	0.007
	1.006	1.002	1.016	1.035	1.010	1.005	1.017	1.001	1.006	1.037	1.068	1.036	1.020	1.018
An(%)	9.6	25.5	27.6	25.3	42.1	32.5	38.7	41.6	3.6	0.6	21.3	3.0	1.8	28.0
Ab(%)	87.7	74.6	71.2	74.3	57.1	66.4	60.6	57.9	93.2	98.6	77.6	96.3	97.6	71.4
Or(%)	2.7	0.9	1.2	0.4	0.8	1.1	0.7	0.5	3.2	0.8	1.1	0.7	0.6	0.6

	Hongjesa Granitic Gneisses								Buncheon Granitic Gneiss				
	Granoblastic Granitic Gneiss								Augen Gneiss				
	D-45-1	D-45-5	Y-49	Y-19	Y-64-4	Y-64-8	Y-76	Y-85	E-34	D-25-12	D-25-1	D-38	E-20
SiO ₂	66.31	60.43	63.05	66.45	62.45	66.66	65.72	62.31	59.79	61.37	60.18	62.26	67.71
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	20.04	23.70	21.48	19.98	21.22	19.83	19.77	22.08	24.41	23.16	24.57	23.51	20.15
FeO	0.03	0.02	0.02	0.04	0.24	0.00	0.00	0.01	0.02	0.17	0.03	0.02	0.00
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.03	0.00
MgO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
CaO	0.77	5.06	2.43	0.61	2.52	0.58	0.43	3.35	5.83	2.08	6.04	4.63	0.34
Na ₂ O	10.88	8.72	10.28	11.34	9.91	11.54	11.45	9.76	8.28	8.42	8.32	9.28	11.74
K ₂ O	0.22	0.28	0.11	0.20	0.12	0.10	0.16	0.18	0.13	1.84	0.14	0.19	0.04
Total	98.25	98.21	97.38	98.62	96.56	98.72	97.54	97.69	98.48	97.06	99.29	99.92	99.98
Cation per 8 oxygens													
Si	2.953	2.733	2.854	2.953	2.852	2.958	2.952	2.819	2.701	2.799	2.698	2.764	2.963
Al	1.053	1.264	1.146	1.047	1.143	1.037	1.047	1.177	1.299	1.245	1.298	1.230	1.039
	4.006	3.997	4.000	4.000	3.995	3.995	3.999	3.996	4.000	4.004	3.996	3.994	4.002
Ca	0.037	0.245	0.118	0.029	0.124	0.027	0.021	0.162	0.283	0.102	0.290	0.221	0.016
Na	0.940	0.764	0.902	0.977	0.877	0.993	0.998	0.856	0.724	0.744	0.723	0.799	0.994
K	0.012	0.016	0.006	0.011	0.007	0.005	0.009	0.011	0.007	0.107	0.008	0.011	0.002
	0.989	1.025	1.026	1.017	1.008	1.025	1.028	1.019	1.014	0.953	1.021	1.031	1.012
An(%)	3.7	23.9	11.5	2.9	12.3	2.6	2.0	15.9	27.9	10.7	28.4	21.4	1.6
Ab(%)	95.0	74.5	87.9	96.1	87.0	96.9	97.1	84.0	71.4	78.1	70.8	77.5	98.2
Or(%)	1.3	1.6	0.6	1.0	0.7	0.5	0.9	1.1	0.7	11.2	0.8	1.1	0.2

Table 7. Chemical compositions of cordierites from Hongjesa Granitic Gneisses.

	Hongjesa Granitic Gneisses					
	Migmatitic Gneiss					
	KK-2	KK-8	D-23 -4-24	D-23 -4-18	D-23 -4-12	D-23 -4-10
SiO ₂	46.91	47.54	46.16	46.43	46.71	46.31
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	32.07	32.49	31.29	31.60	32.12	31.76
FeO	6.40	6.67	8.97	8.81	9.12	8.88
MnO	0.04	0.02	0.21	0.15	0.17	0.21
MgO	8.58	8.88	7.23	7.07	6.70	7.13
CaO	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.79	0.36	0.15	0.16	0.31	0.19
K ₂ O	0.19	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	95.01	96.02	94.01	94.22	95.13	94.48
	Cation per 18 oxygens					
Si	4.976	4.981	4.998	5.007	4.981	4.986
Al(iv)	1.024	1.019	1.002	0.993	1.019	1.014
	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Al(vi)	2.986	2.994	2.991	3.024	3.019	3.016
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2.986	2.994	2.991	3.024	3.019	3.016
Fe(2+)	0.568	0.584	0.812	0.795	0.813	0.799
Mn	0.003	0.002	0.020	0.014	0.015	0.019
Mg	1.357	1.387	1.167	1.136	1.112	1.145
Ca	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.162	0.073	0.031	0.033	0.064	0.039
K	0.026	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000
	2.119	2.054	2.030	1.978	2.004	2.002
Mg/Fe+Mg	0.705	0.704	0.590	0.588	0.578	0.589
Mg/Fe	2.389	2.375	1.437	1.429	1.368	1.433

온도는 연구지역의 미그마타이트질 편마암의 형성과 연관된다고 생각된다. 즉, 미그타이트질 편마암의 우백질대 (leucosome)에서 타형의 석영과 퍼사이트질 K-장석의 존재는 용융 (melt) 환경에서 미그마타이트질 편마암이 형성된 것을 의미한다 (Pattison and Harle, 1988). 따라서 이 온도는 대륙지각 내에서 보여주는 부분용융 (melting) 효과를 반영하는 것으로 생각된다 (Thompson and England, 1984). 사장석-K-장석 지온계로부터 측정된 온도는 348~510°C를 보인다 (그림 12D). 이와같이 다른 지온계에 의해 구한 온도 보다 훨씬 낮은 온도를 보이는 것은 냉각시 알카리 장석 내에서 일어난 성분상의 재분포와 상변화에 기인한다. 따라서 이 온도는 변성작용시 온도라기 보다는 후퇴 변성작용의

Table 8. Chemical compositions of amphiboles from Hongjesa Granitic Gneisses.

	Hongjesa Granitic Gneisses				
	Migmatitic Gneiss				
	KK-68	KK-52	KK-60	KK-39	KK-21
SiO ₂	47.66	49.00	48.88	47.57	46.77
TiO ₂	0.20	0.33	0.21	0.45	0.36
Al ₂ O ₃	7.09	5.97	5.93	7.54	8.33
FeO	24.93	23.71	24.19	23.87	23.43
MnO	0.38	0.34	0.30	0.44	0.26
MgO	14.40	14.90	14.89	14.45	14.18
CaO	0.28	0.34	0.28	0.30	0.42
Na ₂ O	0.84	0.81	0.62	0.68	1.02
K ₂ O	0.02	0.10	0.01	0.02	0.37
Total	95.80	95.50	95.31	95.32	95.14
	Cation per 23 oxygens				
Si	7.214	7.385	7.389	7.198	7.101
Al(iv)	0.786	0.615	0.611	0.802	0.899
	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Al(vi)	0.419	0.446	0.445	0.542	0.591
Ti	0.023	0.038	0.024	0.051	0.042
Fe(2+)	3.156	2.988	3.058	3.020	2.975
Mn	0.049	0.044	0.038	0.056	0.033
Mg	3.249	3.347	3.356	3.259	3.209
Ca	0.045	0.055	0.045	0.049	0.068
Na	0.247	0.235	0.182	0.198	0.300
K	0.004	0.018	0.002	0.003	0.072
	7.252	7.171	7.150	7.178	7.290
Mg/Fe+Mg	0.507	0.528	0.523	0.519	0.519

온도를 나타내는 것으로 생각된다.

Zone I과 Zone II에 대한 압력은 GASP 지압계 (Hodges and Spear, 1982)를 이용하여 측정하였다. 그 결과, Zone II의 경우 1.0~5.4 kbar의 압력조건을 보여주고 반면, Zone I의 경우는 넓은 범위의 압력 분포 (2.0~11.3 kbar)를 보여준다 (표 11). 압력에 따라, Zone I은 중압대 (6.3~11.3kbar)와 저압대 (1.9~3.4 kbar)로 구분할 수 있다 (그림 13). Zone I의 중압대는 전술한 잔류 남정석의 산출을 잘 설명해 준다. 그리고 이런 중압대는 홍제사 화강암질 편마암체과 인접한 분천 화강암질 편마암체에서(표 품 E-34-1, E-34-2)에서 나타난다. 중압대에서 저압대로의 이동은 대륙충돌대에서 보여주는 등온성 압력감소(isothermal decompression, ITD) 효과로 생각된다 (Harley and Hensen, 1990). 즉, 초기에 남정석이 안정한 온도-압력조건 하에서 마그마 활동 (magmatism)과 비교적 빠른 융기 (uplift)로 인한

Table 9. Temperatures estimated from the garnet-biotite geothermometer.

Sample No.	Biotite		Garnet					Temperature(°C) (at 5 kbar)					
	F/FM ^a	W _{FeMg} ^g	F/FM	X _{Fe} ^b	X _{Mg} ^c	X _{Mn} ^d	X _{Ca} ^e	T1 ^f	T2 ^g	T3 ^h	T4 ⁱ		
ZONE I	E-21	0.492	10.10	0.826	0.766	0.161	0.046	0.027	628	673	639	624	
	D-21	0.678	10.36	0.950	0.880	0.059	0.047	0.014	506	540	512	529	
		0.552	10.18	0.876	0.766	0.118	0.092	0.024	601	672	610	602	
	D-69	0.550	10.16	0.857	0.755	0.126	0.092	0.027	628	703	639	624	
		0.573	10.20	0.876	0.781	0.110	0.086	0.023	600	670	610	604	
	E-34-1	0.648	10.20	0.877	0.787	0.110	0.062	0.041	726	797	743	698	
		0.646	10.20	0.875	0.788	0.113	0.057	0.042	733	802	750	701	
		0.646	10.18	0.866	0.783	0.121	0.053	0.043	772	842	790	729	
		0.648	10.20	0.875	0.788	0.113	0.057	0.042	736	806	754	704	
	E-34-2	0.661	10.19	0.870	0.781	0.117	0.057	0.045	753	827	773	741	
	ZONE II	D-23	0.574	10.20	0.876	0.828	0.117	0.035	0.020	601	635	610	605
			0.573	10.20	0.876	0.828	0.117	0.035	0.020	600	634	608	604
0.538			10.17	0.859	0.810	0.133	0.034	0.023	604	639	613	605	
0.562			10.18	0.864	0.813	0.128	0.036	0.023	621	658	631*	621*	
0.575			10.16	0.857	0.809	0.134	0.032	0.024	666	703	676*	654*	
-10.549			10.16	0.857	0.809	0.134	0.032	0.024	624	659	634*	623*	
0.549			10.15	0.851	0.804	0.141	0.030	0.024	645	680	655	637	
0.558			10.14	0.848	0.801	0.143	0.032	0.024	668	705	678	655	
0.575			10.15	0.852	0.803	0.139	0.036	0.022	684	722	693*	667*	
0.572			10.15	0.851	0.804	0.141	0.033	0.022	683	720	692	666	
KK		0.558	10.12	0.836	0.795	0.156	0.028	0.021	707	741	716	684	
		0.564	10.15	0.849	0.801	0.142	0.033	0.024	673	712	684	660	
		0.416	9.94	0.751	0.684	0.227	0.029	0.053	688	746	714	668	
		0.349	9.94	0.750	0.669	0.223	0.039	0.059	580	639	604*	587*	
D-97		0.383	9.95	0.753	0.688	0.225	0.027	0.061	626	681	651	623	
		0.389	9.95	0.753	0.668	0.225	0.027	0.061	636	692	662	631	
E-20-1		0.570	10.21	0.870	0.765	0.114	0.094	0.030	624	703	635	616	
		0.570	10.21	0.902	0.774	0.084	0.113	0.030	519	589	531	533	
		0.450	10.03	0.804	0.693	0.169	0.107	0.031	607	693	620	617	

^a: F/FM = Fe/Fe+Mg; ^{b-e}: X_i^{Gt} = i/(Fe+Mg+Ca+Mn); ^f: with Ferry-Spear (1978); ^g: with Ganguly-Saxena (1984); ^h: With Newton-Haselton (1981); ⁱ: with Kretz(1990); *: Temperatures calculated using the composition of included biotite in the garnet.

효과로 생각할 수 있다. 따라서 지금까지 연구지역의 최고 변성조건이 고온-저압형 변성상 (Lee et al., 1986; Kim et al., 1986)으로 설명되어 왔지만, 위에서 언급한 온도-압력조건으로 미루어 볼 때 최고 변성작용(peak metamorphism)은 고온-중압의 환경을 지시한다.

토 의

분천과 홍제사 화강암질 편마암체의 광물군에서 보여주는 남정석 잔류물의 산출과 Zone II에서 보

여주는 광물군, 석류석+근청석+규선석과 석류석+근청석+각섬석은 연구지역의 변성진화 과정을 해석하는데 매우 중요한 의미를 갖는다. 잔류상으로 남정석이 산출된다는 것은 지금까지 발표된 이 지역의 일반적인 특징인 규선석+K-장석대에 해당하는 고온-저압형 변성작용 이전에 고온-중압형의 변성작용을 경험했을 가능성을 제시해 주고 있다. 석류석-흑운모, 근청석-석류석 지은계, GASP 지압계와 Zone I과 II의 광물군 등으로부터 추정된 연구지역의 암석에 대한 변성작용의 온도·압력 조건은 분천 화강암질 편마암의 경우, 698~729°C/6.3~11.3 kbar

Table 10. Temperature estimated from the cordierite-garnet geothermometer.

Sample No.	Cordierite		Garnet				K_{D3}^b	Temperature(°C)		
	X_{Fe}^a	X_{Mg}	X_{Fe}	X_{Mg}	X_{Mn}	X_{Ca}		T5 ^c	T6 ^d	
Zone II	D-23-1	0.410	0.590	0.813	0.128	0.036	0.023	9.153	641	665
		0.412	0.588	0.804	0.141	0.033	0.022	8.166	645	688
		0.422	0.578	0.828	0.117	0.035	0.020	9.702	602	649
		0.422	0.578	0.801	0.143	0.033	0.024	7.642	663	700
		0.411	0.589	0.794	0.143	0.032	0.024	7.311	676	719
		0.410	0.590	0.809	0.141	0.030	0.024	8.657	630	673
	KK	0.295	0.705	0.688	0.225	0.027	0.061	7.306	676	743
		0.296	0.704	0.688	0.225	0.027	0.061	7.263	678	744

^a: $X_{Fe} = Fe/Fe + Mg$ in Cordierite; ^b: $K_{D3} = (Mg/Fe)^{Cd}/(Mg/Fe)^{Gt}$; ^c: Thompson(1978b) cordierite-garnet temperature $T5(K) = 6150 + 0.0303 P(\text{bar})/2.69 + R \ln K_{D3}$; ^d: Temperature(T6) calculated from the cordierite-garnet geothermometry of Bhattacharya *et al.*(1988) $T6(K) = 1814 + 0.0152 P(\text{bar}) + 1122(X_{Mg}^{Cd} - X_{Fe}^{Cd}) - 1258(X_{Mg}^{Gt} - X_{Fe}^{Gt}) + 1510(X_{Mg}^{Gt} + X_{Fe}^{Gt})/1.028 + \ln K_{D3}$

Table 11. Pressures estimated from the Garnet-Sillimanite-Quartz-Plagioclase(GASP) Geobarometer.

Sample No.	X_{Ca}^a	X_{An}^b	Temperature(°C) ^c		K_{D4}^d	Pressures(kbar) ^e		Mean pressure($\pm \delta$)	
			T3	T4		P1	P2		
ZONE I	D-69	0.024	0.253	610	602	2928	2.53	2.41	2.56 \pm 0.63
		0.027	0.253	639	624	2057	3.40	3.20	
		0.023	0.280	610	604	4510	1.95	1.88	
	E-34-1	0.041	0.166	743	698	166	11.34	7.94	7.20 \pm 1.83
		0.042	0.294	750	701	858	6.28	5.55	
		0.043	0.279	790	729	683	7.24	6.31	
E-34-2	0.042	0.265	754	704	733	6.82	6.06		
ZONE II	D-23-1	0.024	0.421	676	654	13494	1.19	0.94	1.03 \pm 0.16
		0.024	0.421	678	655	13494	1.20	0.95	
		0.022	0.421	692	666	17519	0.98	0.71	
		0.021	0.421	716	684	20143	1.00	-	
		0.024	0.421	684	660	13494	1.24	1.01	
	KK	0.053	0.401	714	668	1083	5.39	4.72	4.79 \pm 0.36
		0.059	0.394	604	587	745	4.23	4.90	
		0.061	0.416	651	623	793	4.91	4.50	
		0.061	0.416	662	631	793	5.08	4.60	
	E-20-1	0.031	0.325	620	617	2880	2.69	2.65	

^a. $X_{Ca} = Ca/(Fe + Mg + Mn + Ca)$ in Garnet.; ^b. $X_{An} = Ca/(Ca + Na + K)$ in Plagioclase; ^c. Temperature calculated from the garnet-biotite geothermometry of Newton and Haselton (1981; T3) and Kretz(1990; T4); ^d. $K_{D4} = (X_{An})^3 \cdot (Y_{An})^3 / (X_{Ca})_3 \cdot (Y_{Ca})_3$; ^e. Pressures(P1 and P2) from the GASP geobarometry of Hodges and Spear(1982); $11657 - 32.815 T(K) + 1.301[P(\text{bar}) - 1] + RT(K) \ln K_{D4} = 0$

(Zone I의 중압대) 이고, 미그마타이트질 편마암의 경우, 621~667°C/1.0~5.4 kbar (Zone II) 이며, 반상변정질 화강암질 편마암의 경우는 602~624°C/1.9~3.4 kbar (Zone I의 저압대) 이다 (그림 13). 각 Zone의 온도·압력 조건, 남정석 잔류물의 산출,

상부 앰피블라이트상에 해당되는 광물군의 산출, 석류석, 흑운모, 사장석 등의 성분변화 양상, 그리고 후퇴변성작용으로 특징지워지는 백운모, 녹니석, 녹염석, 알바이트의 산출 등의 증거를 토대로 하여 추정된 전체적인 온도·압력 경로는 시계방향 (clock-

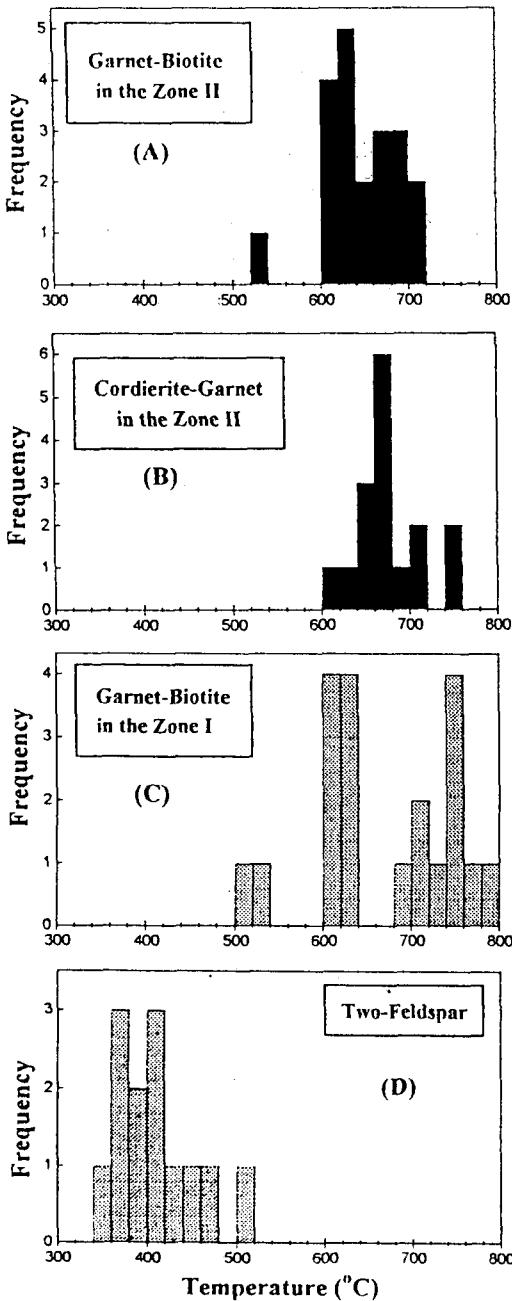


Fig. 12. Comparisons of the temperatures estimated with various geothermometers (see the text) in the Zone I and Zone II. The solid column boxes represent temperatures of the Zone II using garnet-biotite geothermometry (A), and cordierite-garnet geothermometry (B). The shaded columns denote the calculated temperatures of the Zone I using garnet-biotite geothermometry(C), represent recrystallization temperatures of the Zone I using two-feldspar geothermometry (D).

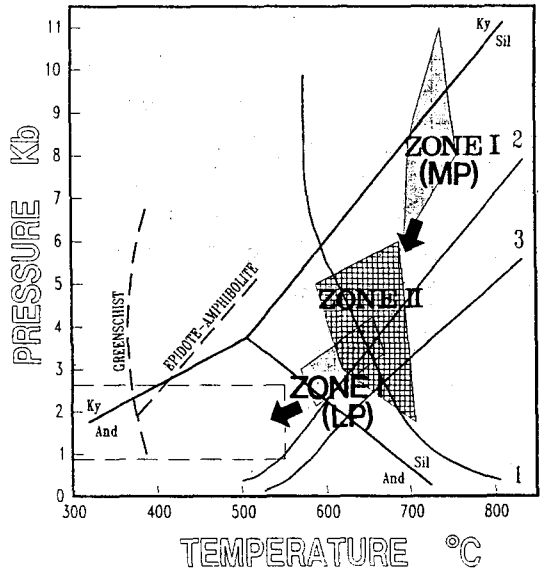


Fig. 13. P-T metamorphic conditions of the Zone I and Zone II in the Buncheon and Hongjesa Granitic Gneisses. The cross-hatched box represents the P-T conditions of the Zone II estimated from the GASP geobarometer and garnet-biotite and cordierite-garnet geothermometers. The shaded box denotes the P-T conditions of the Zone I estimated from GASP and garnet-biotite geothermobarometer. The dashed outline represents the P-T condition during the retrograde metamorphism of the Hongjesa Granitic Gneisses using the two feldspar geothermometer. The Zone I(MP) and Zone I(LP) indicates Medium Pressure and Low Pressure, respectively. Aluminum silicate triple point is from Holdaway (1971). Curve 1; Melting curve of granite (Yoder and Tilley, 1962), Curve 2; muscovite + quartz = sillimanite + K-feldspar + H₂O (Wyllie, 1971; Chatterjee & Johannes, 1974), Curve 3; biotite + sillimanite + quartz = garnet + cordierite + K-feldspar + H₂O (Holdaway and Lee, 1977).

wise)인 것으로 생각된다 (그림 13). 이와같은 온도-압력 경로는 대륙 충돌대나 대륙 연변부에서 멀리 떨어진 곳에서 보여주는 경로 (Thompson and England, 1984; Bohlen, 1987)와 유사하다. 즉, 대륙 충돌 결과 보다 하부의 대륙지각 slab에서 용융이 일어나고 그로 인해 규장질(felsic) 마그마를 형성한다. 이런 마그마활동은 고온/저압의 변성작용으로 특징지워질 수 있다 (Brown, 1984). 그림 13에서 Zone I 중압대에서 Zone I의 저압대와 Zone II로의 이동은 등온성 압력감소 경로 (ITD path; $dP/dT = 60 \text{ bar}/^{\circ}\text{C}$)의 특징을 보여준다. 이와같은 등온성 압

력감소 경로는 대륙충돌-확장 모델 (collisional-extension model; Harley and Hensen, 1990)에서 두꺼워진 지각의 노출과 비교적 빠른 융기 (uplift)를 통해 나타날 것이고, 대륙 충돌에 의한 마그마활동 (extensive magmatic activity)과 결합된다. 이것은 Kim and Cho (1994)가 주성분 원소를 이용한 분별그림으로 홍제사 화강암이 대륙 충돌 환경하에서 관입하였다는 것에도 일치한다. 이상에서 제시한 가능성들은 종합해 보면, 마그마활동에 의해 홍제사 화강암질 편마암체가 형성되고, 미그마타이트질 편마암은 홍제사 암체 형성 후 주변부에서 일어난 고온/저압의 변성작용에 의해 형성된 것으로 생각된다. 그러나 이번연구는 덕구지역의 분천과 홍제사 암체에 대해서만 언급된 것으로 두 암체의 성인 및 변성시기를 밝히기에는 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 앞으로 분천과 홍제사 암체의 변성·변형작용의 유형 및 시기를 밝힘은 더 많은 연구가 요구된다.

결 론

이상의 연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 분천 화강암질 편마암체는 안구상 편마암으로 구성되어 있으며, 홍제사 화강암질 편마암체는 입상변정질, 반상변정질 화강암질 편마암 그리고 미그마타이트질 편마암으로 구성되어있다. 그리고 홍제사 화강암질 편마암체 주변부에서는 K 함량이 부화되는 경향을 볼 수 있는데 이것은 K/Na 간의 교대작용 (replacement)에 의한 효과로 생각된다.

2. 분천과 홍제사 화강암질 편마암체를 광물군의 변화양상에 따라 국부적으로 Zone I과 Zone II로 구분할 수 있다. Zone I의 특징은 K-장석+백운모+규선석의 공생이고, Zone II의 특징은 (1) 백운모의 소멸, (2) 석류석+근청석의 공생, (3) 석류석+근청석+각섬석의 공생이다. 그리고 두 암체에서 부분적으로 남정석이 잔류결정으로 산출되는 것이 특징적이다.

3. Zone II에서 산출되는 석류석은 중심부에서 주변부로 이동됨에 따라 F/FM(=Fe/Fe+Mg) 값과 X_{Mg} 함량이 감소하다 증가하는 반면에, X_{Mg} 와 X_{Ca} 함량은 뚜렷하지는 않지만 상대적으로 약간 감소하는 경향을 보인다. Zone I에서 산출되는 석류석은 중심부에서는 성분변화를 변화를 보이지 않지만,

주변부에서는 F/FM과 X_{Fe} 는 급격히 증가하는 반면 X_{Mg} 는 상대적으로 감소한다. 그리고 흑운모의 Ti, Mg 함량도 증가한다. 또한 사장석도 올리고크레스(An₁₆₋₃₀)에서 안데신(An₃₀)으로 증가하는 경향을 보인다. 이와같은 변화양상은 연구지역이 상부 앵피블라이트상에 해당되는 높은 변성도를 경험하였음을 시사한다. 그리고 잔류상으로 남정석이 산출된다는 것은 규선석+K-장석대에 해당하는 고온-저압형 변성작용 이전에 고온-중압형의 변성작용을 경험했을 가능성을 제시해 주고 있다.

4. 지온·지압계로부터 추정된 연구지역의 암석에 대한 변성작용의 온도·압력 조건은 분천 화강암질 편마암의 경우, 698~729°C/7~11 kbar (Zone I의 중압대) 이고, 미그마타이트질 편마암의 경우, 621~667°C/1.0~5.4 kbar (Zone II)이며, 반상변정질 화강암질 편마암의 경우는 602~624°C/1.9~3.4 kbar (Zone I의 저압대) 이다. 이상의 증거로부터 추정된 전체적인 온도-압력 경로는 등온성 압력감소 (isothermal decompression; ITD, dP/dT=60 bar/°C)를 보이며 시계방향 (clockwise path)인 것으로 생각된다. 이런 등온성 압력감소 경로는 대륙 충돌-확장 모델 (collisional-extension model; Harley, 1989)에서 두꺼워진 지각의 노출과 비교적 빠른 융기 (uplift)를 통해 나타날 수 있고, 대륙 충돌에 의한 마그마 활동과 결합된다.

사 사

이 연구는 김형수의 강원대학교 지질학과 1995년 석사 학위논문은 바탕으로 쓰여졌다. 논문 작성과 정에서 조언과 유익한 비평을 하여준 이상현, 유재영, 조문섭 교수께 감사드리며, 또한 XRF 분석을 도와주신 기초과학 연구지원센터의 박찬수씨와 전자현미분석을 도와주신 서울대 EPMA실 담당자에게도 감사드린다. 야외조사와 실내작업시 도움을 준 암석학연구실 학생들에게도 사의를 표한다.

참고문헌

- 김동학, 주승환, 이동진, 1978, 홍제사 화강암의 Rb/Sr 년대, 조사연구보고 제4호, 자원개발연구소 간행.
 김옥준, 홍만섭, 원종관, 박희인, 김기태, 1963, 한국의 지질도(50,000:1), 평해도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 7024-II.

- 김형식 외, 1991, 한국 북동부 지역의 원생대의 화성활동과 변성작용 - 분천 화강암질편마암과 평해화강암질편마암의 비교연구, 지질학회지 27, 614-625.
- 윤석규, 신병우, 1963, 한국의 지질도(50,000:1), 울진도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 7024-I.
- 윤석규, 1967, 한국의 지질도(50,000:1), 장성도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 7025-III.
- 이덕원, 1988, 상동-울진 지역의 주석화작용과 연관된 화강암류의 암석지화학적 특징과 탐사에의 응용에 관한 연구, 서울대학교 대학원 자원공학과 박사논문, 1988.
- Bhattacharya, A., Mazumdar, A.C. and Sen, S.K., 1988, Fe-Mg mixing in cordierite; Constraints from the natural data and implications for cordierite-garnet geothermometry in granulites, *Am. Mineral.*, 73, 338-344.
- Bohlen, S.R., 1987, Pressure-Temperature-time Path and Tectonic model for the Evolution of Granulites, *Jour. of Geol.*, 95, 617-632.
- Choo, S.H., and Lee, D.J., 1980, A Rb/Sr age determination on a Precambrian granite in the Korean Peninsula, KIGAM, unpublished.
- 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.
- Fuhrman, M.L. and Lindsley, S.L., 1988, Ternary feldspar modelling and thermometry, *Am. Mineral.*, 73, 201-215.
- Ganguly, J. and Saxena, S.K., 1984, Mixing properties of aluminosilicate garnet; constraint from natural and experimental data, and applications to geothermobarometry, *Am. Mineral.*, 69, 88-97.
- Guidotti, C.V., 1984, Mica in Metamorphic rocks. In *Micas*, Rev. Mineral., 13 (ed. S. W. Bailey), Mineral Soc. Am., 357-468.
- Guidotti, C.V. and Cheney, J.T., and Guggenheim, S., 1977, Distribution of titanium between coexisting muscovite and biotite in pelitic schists from Northwestern Maine, *Am. Mineral.*, 62, 438-448.
- Harley, S.L. and Hensen, B.J., 1990, Archaean and Proterozoic high-grade terranes of East Antarctica (40-80°E): a case study of diversity in granulite facies metamorphism, In *High-temperature Metamorphism and Crustal Anatexis* (ed. J. R. Ashworth & M. Brown), Unwin Hyman Ltd., 320-370.
- Harris, D.C., 1991, Quantitative chemical analysis, 3rd. ed., Freeman.
- Hodges, K.V. and Spear, F.S., 1982, Geothermometry, geobarometry and the Al_2SiO_5 triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire., *Am. Mineral.*, 67, 1118-1134.
- Hong, Y.K., 1985, Petrogenesis of the Proterozoic granitic rocks in the Buncheon-Seogpo area, NE Korea, *Jour. Geol. Soc. Korea*, 21, 196-209.
- Hong, Y.K., 1992, Petrogenesis and Evolution of early Proterozoic granitic rocks in the Northeastern Ryeongnam Massif, Korea, *Jour. Geol. Soc. Korea*, 28, 6, 571-589.
- Kerr, P.F., 1977, *Optical mineralogy*, McGRAW-Hill, New York, 295.
- Kim, H.S., Lee, S.M. and Lee, B.N., 1986, Petrogenesis of the Hongjesa granitic gneiss in the Eastern part of Mt. Taebaeg area, Korea, *Memoris for Prof. Sang Man Lee's Sixtieth Birthday*, 107-133.
- Kim, J.M., and Cho, M.S. and Kim, H.S., 1994, Metamorphism of the Hongjesa granite and the adjacent metasedimentary rocks (Magmatism and metamorphism of the Proterozoic in the northeastern part of Korea), *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 3, 94-108.
- Kim, J.M., and Cho, M.S., 1994, Petrogenesis of the Precambrian Hongjesa granite (Magmatism and metamorphism of the Proterozoic in the northeastern part of Korea), *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 3, 76-93.
- Kretz, R., 1990, Biotite and garnet compositional variation and mineral equilibria in Grenville gneisses of the Otter Lake area, Quebec, *Jour. Metamorphic Geol.*, 8, 493-506.
- 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.M. and Holdaway, M.J., 1977, Significance of Fe-Mg Cordierite stability in relation to temperature, pressure and water pressure in cordierite granulites., In Heacock, J.C., ed., *The Earth's crust*. American Geophysical Union Geophysica Monograph, 20, 78-94.
- Manning, D.A.C., and Pichavant, M., 1983, The role of Fluorine and Boron in the generation of granitic melts, *Shiva Geology Series*, 94-109.
- Marmo, Y., 1970, *Granite Petrology and the Granite Problem*, Elsevier.
- Newton R.C. and Haselton, H.T., 1981, Thermodynamics of the garnet-plagioclase- Al_2SiO_5 -quartz geobarometer in Newton, R.C. and others, ed., *Thermodynamics of minerals and melt.*, Springer-Verlag, New York, 131-147.
- O'Connor, J.T., 1965, A classification for quartz-rich igneous rocks based on the feldspar ratio., *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 523B, 79-84.
- Orville, R.M., 1961, Alkalimetamorphism produced by alkali ion exchange within a thermal gradient, *Geol.*

- Soc. Am., Spec. Paper, 68, 243.
- Schumacher, J.C., Hollocher, K.T., Robinson, P and Tracy, R.J., 1990, Progressive reaction and melting in the Acadian metamorphic high of central Massachusetts and Southwestern New Hampshire, In High-temperature Metamorphism and Crustal Anatexis (ed. J.R. Ashworth & M. Brown), Uniwin Hyman Ltd., 198-234.
- Selverstone, J., Spear, F.S. Franz, G. and Morteani, G., 1983, High pressure metamorphism in SW Tauern Window, Austria; P-T path from hornblende-kyanite-staurolite schist., *Jour. Petrol.*, 25, 501-531.
- Thompson, A.B, and England, P.C., 1984, Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism : II. Their inference and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks., *Jour. Petrol.*, 25, 929-955.
- Thompson, A.B., 1978, Mineral reaction in pelitic rocks : II. Calculation of some P-T-X(Fe-Mg) phase relations, *Am. Jour. Sci.*, 276, 425-454.
- Tracy, R.J., 1982, Compositional zoning and inclusions in metamorphic minerals. In Ferry, J.M. ed., Characterization of metamorphism through mineral equilibria., *Am. Mineral*, 355-397.
- White, A.J.R., and Chappel, B.W., 1983, Granitoid types and their distribution in the Lachlan fold belt, southeastern Australia, *Geol. Soc. Am. Mem.*, 159, 21-34.
- Winkler, H.G.F., 1979, *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*, Springer-verlag. New York.
- Yardley, B.W.D., 1977, An empirical study of diffusion in garnet, *Am. Mineral.*, 62, 793-800.

(책임편집 : 권성택)

Metamorphism of the Buncheon and Hongjesa Granitic Gneisses

Hyeong Soo Kim* and Chong Hyock Lee*

Department of Geology, Kangwon National University

ABSTRACT : On the basis of lithology, the Precambrian Hongjesa Granitic Gneiss can be locally zoned into granoblastic granitic gneiss, porphyroblastic granitic gneiss, migmatitic gneiss from its center to the marginal part. There are no distinct differences in mineral assemblages by lithologic zoning, but it partly shows the change of mineral assemblage in the adjacent with migmatitic gneiss, thus mineral assemblage can be subdivided into Zone I and Zone II. In terms of mineral compositions, the characteristics of Zone I are coexisting K-feldspar + muscovite + sillimanite. The characteristics of Zone II are (1) breakdown of muscovite, (2) coexisting garnet + cordierite, (3) coexisting garnet + cordierite + orthoamphibole. The Buncheon Granitic Gneiss is mainly composed of augen gneiss. In the adjacent area with Hongjesa Granitic Gneisses, Buncheon Granitic Gneiss has the mineral assemblage of sillimanite + biotite + K-feldspar + (kyanite). Kyanite occurs as relict grains in the Buncheon and Hongjesa Granitic Gneisses. Kyanite shows anhedral to subhedral form and coexists with sillimanite in only one of these samples. Garnet from a migmatitic gneiss (Zone II) has relatively high X_{Fe} value in core and rim. Garnet from a porphyroblastic granitic gneiss (Zone I) has relatively homogeneous core but compositionally-zoned rim. Biotites show various colour from greenish-brown, brown to reddish brown at maximum adsorption. Also, the Ti, and Mg content in biotites increases from Zone I to Zone II. The plagioclases shows the chemical composition of $Ab_{84}An_{16} \sim Ab_{70}An_{30}$ (oligoclase) in Zone I and $Ab_{70}An_{30} \sim Ab_{50}An_{50}$ (andesine) in Zone II. These variations indicate that the gneisses in the study area experienced an upper amphibolite facies. The presence of kyanite as relict grains indicates that the metamorphic rocks in this area experienced a high-temperature/medium-pressure type metamorphism, followed by high-temperature/low-pressure metamorphism. Metamorphic P-T conditions for each gneiss estimated from various geothermobarometers and phase equilibria are 698~729°C/6.3~11.3 kbar in augen gneiss, 621~667°C/1.0~5.4 kbar in migmatitic gneiss, and 602~624°C/1.9~3.4 kbar in porphyroblastic granitic gneiss. These data suggest that the study area was subjected to a clockwise P-T path with isothermal decompression ($dP/dT = \text{about } 60 \text{ bar}/^{\circ}\text{C}$).

Key words : Kyanite, High-Temperature/Medium-Pressure Type Metamorphism, Upper-Amphibolite Facies, Isothermal Decompression