

의성분지 보현산 일대 화강암류와 포획암에 대한 암석학적 연구

좌용주 · 김건기

경상대학교 지구환경과학과

요약: 보현산 일대 화강암류는 화강섬록암과 화강암의 조성을 가지며, 화강암류 내에는 다양한 크기의 염기성 미립 포획암이 나타난다. 염기성 미립 포획암은 유색광물의 군집, 석영섬록암, 섬록암 등으로 구분할 수 있다. 이 염기성 미립 포획암의 산출 상태는 화강암류 외부에 독립된 암체로 존재하는 것이 아니라, 화강암류 내부에서만 발견된다는 특징을 가진다. 지구화학적 특징에서 화강암류와 염기성 미립 포획암은 칼크-알칼리계열에 속하며, 포획암이 메타알루미나질 내지 페알루미나질임에 반해 화강암류는 페알루미나질의 성질을 보인다. SiO_2 함량에 대한 주성분 산화물의 함량 변화는 포획암과 화강암류에서 매우 직선적인 변화 경향을 보인다. 이러한 경향은 마그마 과정 중에서 분별정출에 의한 결정분화작용 혹은 화강암질 마그마와 염기성 마그마 사이의 혼합작용으로 해석될 수 있다. 그러나 야외 산상을 비롯하여, 암석기재적 특징 그리고 광물 성장에 따른 화학 조성의 변화 등은 화강암류와 포획암 사이에 불균질 혼합이 주요 마그마 과정이었음을 지시한다. 화강암류와 포획암의 사장석은 그 주변부 조성에서 거의 유사하다. 그러나 일부 화강암류에서는 사장석의 중심부 조성이 매우 높게 나타난다. 한편, 화강암류의 각석은 중심부에서 주변부로 갈수록 $Mg/(Mg+Fe)$ 비가 높아진다. 이러한 결과는 화강암류의 조암광물의 화학조성이 보다 매찍한 마그마 조성에 의해 영향을 받았음을 지시한다. 화강암질 마그마와 보다 염기성인 섬록암질 마그마의 혼합과정을 2성분 혼합 테스트의 모델을 이용해 계산하였다. 이 결과 화강암류 중 가장 매찍한 화강섬록암의 경우 섬록암질 마그마 조성의 약 65% 정도 혼합되었고, 흑운모 화강암은 평균 19%, 화강섬록암은 평균 51% 정도의 섬록암질 조성이 혼합된 것으로 나타났다. 한편, 포획암의 평균 조성은 약 25% 정도의 화강암질 조성이 혼합된 결과이다.

핵심어: 보현산, 화강암류, 염기성 미립 포획암, 불균질 혼합, 2성분 혼합 테스트

서 론

화강암류에는 일반적으로 다소간의 포획암(enclave)이 포함되어 있다. 화강암류 내의 포획암에 대한 연구는 최근 화강암 연구에서 그 중요성이 부각되고 있다(예: Dodge and Kistler, 1990; Barbarin and Didier, 1991; Didier and Barbarin, 1991; Hibbard, 1991; Maas *et al.*, 1997; Silva *et al.*, 2000). 기존의 연구들에서 밝히고 있는 포획암의 성인은 대체로 (1) 화강암질 마그마가 관입할 때 주변의 기반암이 포획되거나, (2) 펠릭 마그마에 보다 매찍한 마그마가 나중에 주입된 것이거나, (3) 화강암질 마그마의 생성 장소에서 근원암이 포획된 경우, (4) 초기 정출 광물들의 집적 등으로 구분할 수 있다.

우리 나라의 경우 화강암류 내에 산출되는 염기성 포획암에 대한 연구는 주로 경상분지 화강암류를 대상으로 이루어지고 있다. 거제도(김중선 외, 1998; 김중선과 이준동, 2000), 양산(김춘식 외, 1999), 울산 방어진(김중선 외, 2000) 등에 나타나는

화강암류의 포획암이 지금까지 연구·보고되었다. 이 연구들은 염기성 포획암의 기원이 마그마의 불균질 혼합의 과정으로 생겨난 결과물이라는 같은 결론을 제시하고 있다. 즉, 포획암 성인에 대한 위의 세 가지 구분에서 (2)에 해당하는 것이다.

우리는 의성분지 보현산 일대의 화강암류에서 다량의 포획암을 확인하였다. 이 논문에서 포획암의 산출 상태를 비롯하여 화강암류와 포획암의 다양한 기재적 특징, 그리고 광물 조성과 전암 조성으로부터 화강암류와 포획암의 관계를 살펴보았다.

일반 지질

의성분지 보현산 일대는 1:5만 지질도폭으로 구산동, 신령, 기계 및 도평 도폭 지역에 걸쳐 분포한다(권영일과 이인기, 1973; 오인섭과 정국성, 1975; 장기홍 외, 1977; 원종관 외, 1980). 이 지역의 백악기 화성활동에 대한 연구로는 화산-심성 복합체에 대한 연구(원종관 외, 1978; 윤성효 외, 1997)와 화성암류의 암석화학적 및 연대학적 연구(김상중, 1997)

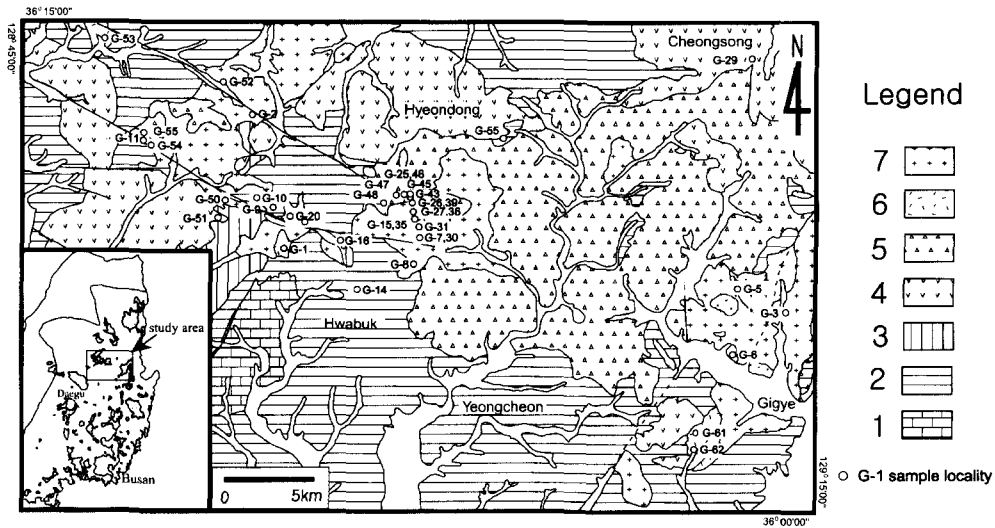


Fig. 1. Geologic map of the Bohyunsan area. 1, Haman formation; 2, Daegu (Banyawol, Chunsan) formation; 3, Hwasan (Sinyangdong) formation; 4, rhyolitic volcanic rocks; 5, andesitic volcanic rocks; 6, gabbroic rocks; 7, granitic rocks.

의 결과가 보고되었다.

연구 지역은 하부로부터 백악기 퇴적층인 함안층, 대구층, 화산층이 넓게 분포하고 있으며, 그 위에 산성~중성의 화산암류가 분출·피복하고 있다. 그리고 백악기의 심성암류가 이들을 관입하고 있다(Fig. 1).

퇴적암류는 주로 사암과 세일로 구성되며, 대부분 화강암류에 의한 접촉변성작용을 받아 혼펠스화되었다. 화산암류는 산성의 유문암질 화산암류와 중성의 안산암질 화산암류로 구분된다. 유문암질 화산암류는 연구지역의 서부와 북부에 주로 분포하고, 안산암질 화산암류는 주로 동부와 남부에 분포하고 있다.

심성암류는 반력암과 화강암류로 구분된다. 반력암은 분포가 매우 제한적인 소규모의 관입체로 나타난다. 그러나 화강암류는 연구 지역의 동서로 넓게 분포하고 있다. 화강암류에 대한 특징은 아래에서 구체적으로 언급하기로 한다.

보현산 일대의 화강암류와 포획암

보현산 일대의 화강암류는 연구지역의 남동에서 북서에 걸쳐 암주상으로 분포하고 있다(Fig. 1). 이 화강암류들은 지질 도폭에서 흑운모 화강암, 세립질 화강암, 중성 암맥 등으로 서로 다르게 기재되어 있지만, 전체적으로는 거의 유사한 화강암질 암석으로 이루어져 있다. 화강암류에 대한 모드 조성

은 Table 1에 나타내었다.

화강암류의 모드 조성으로부터 화강암류들이 대체로 화강섬록암과 화강암의 조성을 가짐을 알 수 있다(Fig. 2). 기재적인 특징으로부터 화강암류를 화강섬록암과 흑운모 화강암으로 구분할 수 있으나 두 화강암류는 뚜렷한 경계를 가지는 관입 관계를 보여주지는 않는다. 즉 암상이 점이적으로 변하기 때문에 분화 내지 혼합과 같은 마그마 과정의 차이를 지시할 뿐이다. 연구 지역 전반에 걸쳐 화강섬

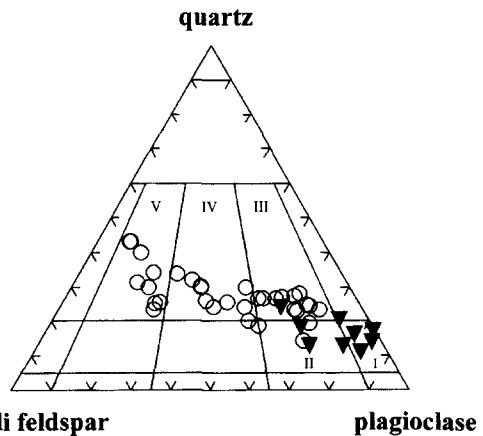


Fig. 2. Modal composition of the host granite and the enclave (after Streckeisen, 1976). ▼, enclave; ○, granite. I, quartz diorite; II, quartz monzodiorite; III, granodiorite; IV, monzogranite; V, syenogranite.

Table 1. Modal composition of the host granites and the enclaves from the Bohyunsan area.

sample no.	qtz	af	pl	bt	amp	cpx	chl	opq
G-3	23.97	31.10	38.80	1.53	0.13	-	3.20	1.27
G-4	24.87	18.60	49.40	4.53	0.27	-	1.00	1.33
G-7	42.67	47.33	8.33	1.07	-	-	-	0.60
G-8	30.07	41.60	16.40	0.20	9.33	-	0.73	1.67
G-13	23.50	21.80	43.30	3.30	2.30	-	4.60	1.20
G-15	24.90	36.60	34.20	1.90	1.20	-	-	1.20
G-16	26.67	33.00	28.81	9.93	-	-	-	1.59
G-17	24.40	47.87	23.67	0.20	-	-	2.79	1.07
G-18	20.40	14.80	53.10	1.00	-	0.60	9.40	0.70
G-19	24.30	21.20	45.60	1.20	-	1.00	4.50	2.20
G-20	37.73	44.93	11.80	4.60	-	-	-	0.94
G-21	26.10	22.80	38.70	2.50	-	-	6.90	1.40
G-22	11.40	15.33	52.53	18.10	-	-	-	2.61
G-23	16.10	24.70	45.70	1.00	0.50	-	8.80	2.60
G-26	29.40	49.73	15.13	0.80	-	-	3.87	1.07
G-30	27.53	34.38	29.79	7.05	-	-	-	1.25
G-31	22.73	35.00	36.73	1.07	-	0.60	2.87	1.60
G-35	22.40	50.67	23.27	3.00	-	-	-	0.66
G-36	31.93	38.93	23.53	0.20	-	1.60	4.40	1.01
G-45	22.18	26.72	42.60	2.87	-	-	3.96	1.67
G-46	18.50	28.10	45.70	1.50	1.70	-	2.50	2.00
G-48	30.05	35.83	27.39	5.77	-	-	0.15	0.81
G-49	23.20	47.33	21.67	5.33	0.13	-	-	2.34
G-50	25.60	12.50	53.20	3.00	-	1.1	2.80	1.80
G-53	22.00	11.40	56.00	3.00	0.84	0.76	4.70	1.30
G-54	25.60	14.00	53.60	1.70	0.50	-	3.20	1.40
G-55	43.03	47.99	8.20	0.16	-	-	0.23	0.39
G-56	23.60	12.60	58.40	2.30	1.80	-	1.20	0.10
G-57	17.00	13.20	56.53	11.40	-	-	-	1.87
G-58	25.82	17.68	52.43	2.67	-	-	-	1.40
G-59	20.93	15.47	53.67	5.13	1.33	-	1.20	2.27
G-60	20.60	9.60	57.47	2.33	2.27	-	5.67	2.06
E-3	18.70	6.63	65.98	6.88	-	-	1.81	-
E-15	14.27	0.40	68.67	-	5.87	-	7.80	2.99
E-35	11.20	16.40	59.53	2.33	8.13	-	-	2.41
E-36	21.80	18.39	50.48	0.72	5.41	-	-	3.18
E-39	11.27	8.73	66.87	-	8.40	-	-	4.73
E-43	9.07	5.53	67.87	0.73	12.20	-	-	4.60
E-45	11.91	2.19	71.64	-	2.51	2.84	-	8.91
E-46	14.55	14.45	50.80	2.80	12.10	-	1.40	3.90
E-62	13.20	4.80	64.47	8.00	1.87	-	4.73	2.93

Note : G ; granite, E ; enclave, qtz ; quartz, af ; alkali feldspar, pl ; plagioclase, bt ; biotite, amp ; amphibole, cpx ; clinopyroxene, chl ; chlorite, opq ; opaque.

록암과 흑운모 화강암은 함께 나타나며, 야외에서 두 암상의 분포를 구분짓기 어렵다.

보현산 일대 화강암류의 뚜렷한 특징 중의 하나는 매우 다양한 크기의 포획암이 발견되는 것이다. 포획암의 크기 분포로 볼 때, 화강섬록암 조성의 화강암류에서는 대체로 포획암의 크기가 작은 반면, 흑운모 화강암에서는 그 크기가 크다. 이 원인에 대해서는 후술할 것이다. 한편, 포획암의 모드 조성은 대체로 석영섬록암을 나타내지만(Table 1; Fig. 2), 부분적으로는 석영섬록암보다 더 매끈한 암상(섬록암)도 나타난다.

보현산 일대 화강암류의 정확한 관입시기는 잘

알려져 있지 않다. 구산동 지역 화강암류의 경우 K-Ar 흑운모와 알칼리장석의 연대가 64~66 Ma, 보현산 지역 화강암류의 K-Ar 알칼리장석의 연대가 52 Ma, 그리고 기계 지역 화강암류의 K-Ar 알칼리장석 연대가 62 Ma로 나타나 대체로 제3기초의 연대를 가리킨다 (Kim *et al.*, 1997). 하지만 K-Ar 광물 연대는 마그마의 관입연대가 아닌 냉각연대를 지시하며, 또한 계속된 마그마의 관입활동은 Ar 손실 등에 의한 젊은 연대 쪽으로의 연대 재설정 효과를 가져다 줄 수 있다. 따라서 화강암질 마그마의 관입시기를 파악하기 위해서는 Rb-Sr 전암법과 같은 연대측정이 필요하다.

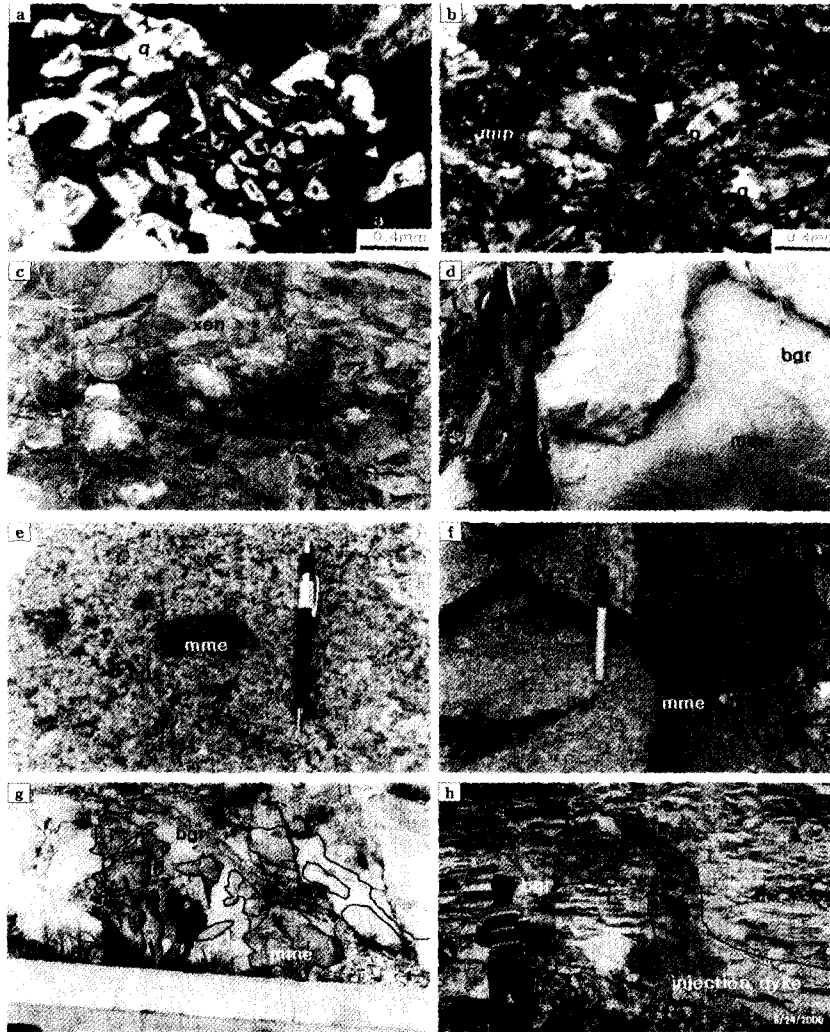


Fig. 3. Photographs of thin sections and outcrops. (a) micrographic intergrowth between alkali feldspar and quartz. (b) mafic minerals like amphibole and biotite surround plagioclase and quartz grains (mantling texture). (c) xenolith of country rock in the biotite granite. (d) mafic microgranular enclave (quartz diorite). (e) mafic microgranular enclave (mafic mineral clusters). (f) mafic microgranular enclave (diorite). (g) fracture filled and fragmented dyke. (h) injection dyke. Abbreviations: a, alkali feldspar; amp, amphibole; p, plagioclase; q, quartz; bgr, biotite granite; mme, mafic microgranular enclave; xen, xenolith.

아래에서는 모드 조성으로 구분된 흑운모 화강암과 화강섬록암, 그리고 포획암의 기재적 특징의 차이를 비교해 보았다.

흑운모 화강암

흑운모 화강암은 연구지역 전역에 나타나지만 특히 보현산 지역에 그 분포가 두드러지며, 입자크기는 1~5 mm로 중립질로서, 사장석 반정이 산출된

다. 암색은 알칼리장석의 함량이 많아 분홍색을 띠며, 육안으로도 라파키비 조직과 포이킬리틱 조직을 관찰할 수 있다. 그리고 화강암내에는 다양한 크기(0.3 cm~180 cm)의 포획암이 나타나며, 보현산 정상에는 안산암질 래필리 응회암이 현수체(roof pendant)형태로 나타난다.

흑운모 화강암의 주구성광물로는 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모, 각섬석, 녹니석, 불투명광물 등이 관찰된다. 문상 조직(Fig. 3a)과 포이킬리틱 조직

Table 2. Chemical compositions and structural formulae of amphiboles from the host granite and the enclave

Rock Type	Granite								Enclave	
Sample No.	G7 core	G7 rim	G9 rim	G15 core	G45 core(3)	G45 rim(3)	G46 core(2)	G46 rim(2)	E46 core	E46 rim
SiO ₂	48.83	50.45	50.48	47.24	48.44	48.55	47.83	49.35	47.44	47.90
TiO ₂	1.51	1.34	0.8	1.41	1.29	1.50	1.61	1.31	1.99	1.87
Al ₂ O ₃	5.72	4.77	4.13	5.55	5.11	5.22	5.41	4.86	6.12	5.96
FeO*	11.85	10.75	9.72	14.74	12.92	12.03	14.77	14.16	11.36	10.72
MnO	0.18	0.26	0.64	0.67	0.34	0.26	0.48	0.53	0.26	0.28
MgO	15.71	16.91	17.36	13.16	15.29	15.41	13.98	14.59	16.01	16.11
CaO	11.31	11.87	11.32	10.98	10.92	11.29	11.19	10.90	11.26	11.33
Na ₂ O	1.92	1.22	1.77	1.97	2.08	1.96	1.60	1.61	1.99	2.05
K ₂ O	0.68	0.53	0.58	0.77	0.64	0.70	0.68	0.48	0.52	0.58
Total	97.7	98.1	96.8	96.5	97.0	96.9	97.6	97.8	96.9	96.8
Cations per 23 oxygens										
Si	7.110	7.253	7.338	7.097	7.148	7.145	7.087	7.235	6.967	7.023
Al ^{IV}	0.890	0.747	0.622	0.903	0.852	0.855	0.913	0.765	1.033	0.977
Al ^{VI}	0.092	0.060	0.045	0.079	0.037	0.050	0.030	0.075	0.026	0.052
Ti	0.166	0.144	0.087	0.159	0.143	0.166	0.180	0.145	0.220	0.206
Mg	3.411	3.623	3.762	2.947	3.363	3.381	3.088	3.189	3.505	3.522
Fe	3.588	3.879	4.402	3.617	3.704	3.644	3.572	3.723	3.762	3.802
Mn	0.022	0.031	0.079	0.085	0.043	0.033	0.061	0.066	0.032	0.035
Ca	1.764	1.828	1.763	1.767	1.727	1.781	1.777	1.713	1.772	1.780
Na ^{M4}	0.102	0.021	0.083	0.110	0.094	0.110	0.034	0.075	0.050	0.091
Na ^A	0.440	0.319	0.416	0.464	0.501	0.449	0.426	0.382	0.517	0.491
K	0.126	0.098	0.108	0.148	0.120	0.131	0.128	0.090	0.097	0.109
Fe/(Fe+Mg)	0.513	0.517	0.539	0.551	0.524	0.519	0.536	0.539	0.518	0.519
A-site	0.566	0.417	0.524	0.612	0.621	0.580	0.554	0.472	0.614	0.600
Al ^T	0.982	0.807	0.667	0.982	0.889	0.905	0.943	0.840	1.059	1.029

*Total Fe as FeO

Number of parenthesis is the number of measurements.

이 특징적으로 나타난다. 석영은 반자형 내지 타형으로 나타나며, 알칼리장석은 주로 퍼사이트이다. 사장석은 알바이트, 칼스바드-알바이트 쌍정을 보여 주고, 부분적으로 견운모화 되어 있다. 그리고 다색성을 잘 보여주는 흑운모는 부분적으로 녹니석화 되어있다. 각섬석도 나타나지만 그 양은 비교적 적다. 각섬석과 흑운모와 같은 유색광물이 석영과 사장석 주위를 둘러싸고 있는 망토 조직(mantling texture)도 관찰된다(Fig. 3b).

화강섬록암

화강섬록암은 연구지역 전반에 걸쳐 분포하고 있다. 흑운모 화강암과의 경계가 매우 점이적이기 때문에 야외에서 관입의 선후관계를 설정하기 어렵다. 암석기재적인 특징으로는 중립질의 크기로 사장석이 반정이 나타나며, 암색은 회녹색을 띠지만, 부분적으로 알칼리장석의 함량이 많은 부분에서는 분홍색을 띠기도 한다. 유색광물의 함량은 각섬석이 흑운모 화강암에 비해 많다. 0.3 cm~50 cm 정도

크기의 포획암을 많이 포함한다.

화강섬록암의 주구성광물은 사장석, 석영, 알칼리장석, 각섬석, 소량의 단사회석, 흑운모, 녹니석, 불투명광물 등이다. 사장석은 자형 내지 반자형으로 반정의 형태로 나타나며, 알바이트 쌍정과 알바이트-칼스바드쌍정, 누대구조를 보여준다. 부분적으로 변질에 의해 견운모화 되어있다. 석영은 대부분이 반자형 내지 타형이며, 알칼리장석과 문상조직으로 산출된다. 알칼리장석은 대부분이 타형이며, 주로 퍼사이트이다. 각섬석은 주상의 자형 결정으로 나타난다. 구성광물의 종류와 함량을 제외한 나머지 기재적 특징은 흑운모 화강암과 화강섬록암 양쪽이 거의 유사하다.

포획암

연구지역의 화강암류 내에 포획된 포획암(enclave)은 크게 두 종류로 대별할 수 있다. 첫째는 화강암질 마그마가 관입하면서 포획한 주변암의 암편, 즉 이질 포획암(xenolith)(Fig. 3c)이다. 이질 포획암은

Table 3. Chemical compositions and structural formulae of plagioclases from the host granite and the enclave

Rock Type	Granite									
Sample	G7	G7	G9	G9	G35	G35	G45	G45	G46	G46
No.	core(3)	rim(2)	core(2)	rim(2)	core(3)	rim(2)	core(2)	rim(2)	core(3)	rim(2)
SiO ₂	59.62	62.98	54.36	62.68	63.14	64.66	58.84	64.10	54.59	65.08
TiO ₂	0.01	0.00	0.03	0.01	0.03	0.03	0.03	0.01	0.09	0.01
Al ₂ O ₃	25.89	23.53	27.71	22.89	22.65	21.70	25.12	21.45	27.73	21.39
FeO*	0.09	0.16	0.23	0.25	0.26	0.12	0.25	0.19	0.36	0.29
MnO	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.04	0.03	0.02
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	7.64	4.90	11.39	4.88	4.51	3.22	7.81	3.44	11.04	3.31
Na ₂ O	7.23	9.06	5.06	8.22	8.81	9.35	7.08	8.87	5.21	9.64
K ₂ O	0.39	0.32	0.22	0.97	0.49	0.57	0.36	1.18	0.22	0.43
Total	100.9	101.0	99.0	99.9	99.9	99.7	99.5	99.3	99.3	100.2
Cations per 8 oxygens										
Si	2.641	2.769	2.482	2.791	2.802	2.862	2.647	2.859	2.485	2.871
Al	1.351	1.218	1.490	1.201	1.184	1.131	1.331	1.127	1.487	1.111
Ti	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.003	0.000
Fe	0.003	0.006	0.009	0.009	0.010	0.004	0.009	0.007	0.013	0.011
Mn	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.001	0.001
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.363	0.231	0.557	0.233	0.214	0.153	0.376	0.164	0.539	0.156
Na	0.621	0.772	0.448	0.710	0.758	0.803	0.618	0.767	0.460	0.824
K	0.022	0.018	0.013	0.055	0.028	0.032	0.021	0.067	0.012	0.024
Ab	61.7	75.6	44.0	71.1	75.8	81.3	60.9	76.9	45.5	82.0
An	36.1	22.6	54.7	23.4	21.4	15.5	37.0	16.4	53.3	15.6
Or	2.2	1.8	1.3	5.5	2.8	3.2	2.1	6.7	1.2	2.4

*Total Fe as FeO

Number of parenthesis is the number of measurements.

Table 3. (continued)

Rock Type	Enclave				
Sample	G50	G50	E46	E46	E35
No.	core(2)	rim(2)	core	rim	rim
SiO ₂	61.31	60.51	58.30	64.17	64.3
TiO ₂	0.02	0.01	0.02	0.03	0.0
Al ₂ O ₃	23.44	24.14	25.18	21.39	21.8
FeO*	0.17	0.18	0.26	0.28	0.2
MnO	0.06	0.00	0.00	0.04	0.0
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
CaO	5.71	6.60	8.24	3.58	3.6
Na ₂ O	8.12	7.65	6.88	9.04	9.2
K ₂ O	0.34	0.32	0.33	0.73	0.5
Total	99.2	99.4	99.2	99.2	99.7
Cations per 8 oxygens					
Si	2.751	2.715	2.632	2.866	2.855
Al	1.239	1.276	1.338	1.125	1.142
Ti	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000
Fe	0.006	0.007	0.010	0.010	0.007
Mn	0.003	0.000	0.000	0.001	0.001
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Ca	0.275	0.317	0.399	0.171	0.172
Na	0.706	0.666	0.602	0.783	0.794
K	0.020	0.019	0.019	0.042	0.028
Ab	70.6	66.5	59.0	78.6	79.9
An	27.4	31.7	39.1	17.2	17.3
Or	2.0	1.9	1.9	4.2	2.8

Table 4. Chemical compositions and structural formulae of biotites from the host granite

Rock Type Sample No.	Granite				
	G7	G9	G15	G46 core(2)	G46 rim(2)
SiO ₂	38.59	37.36	39.68	37.25	37.20
Al ₂ O ₃	12.47	12.81	11.60	12.24	12.37
TiO ₂	4.50	5.29	3.62	5.13	5.49
FeO*	15.72	14.60	14.69	17.91	18.05
MnO	0.25	0.29	0.36	0.29	0.34
MgO	14.48	15.58	16.24	13.19	12.37
CaO	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.13	0.42	0.15	0.14	0.10
K ₂ O	9.73	9.66	9.68	9.42	9.73
Total	95.9	96.0	96.0	95.6	95.6
Cations per 22 oxygens					
Si	5.898	5.679	5.982	5.768	5.804
Al ^{IV}	2.102	2.293	2.018	2.232	2.196
Al ^{VI}	0.142	0.000	0.041	0.000	0.077
Ti	0.517	0.605	0.411	0.598	0.644
Fe	2.009	1.856	1.852	2.319	2.355
Mn	0.032	0.037	0.046	0.038	0.045
Mg	3.299	3.530	3.650	3.045	2.877
Ca	0.003	0.005	0.000	0.000	0.000
Na	0.039	0.124	0.044	0.042	0.030
K	1.950	1.873	1.896	1.861	1.937
Fe/(Fe+Mg)	0.378	0.345	0.337	0.432	0.450

*Total Fe as FeO

Number of parenthesis is the number of measurements.

퇴적암과 안산암으로 구성되며, 화강암류 주변의 기 반암에서 유래된 것임을 쉽게 알 수 있다. 이질 포획암은 대부분 각진 형태로 나타나고, 접촉변성에 의해 혼펠스화 되어 있으며, 관입 접촉부 부근에 집중적으로 분포하고 있다.

둘째는 염기성 미립 포획암(mafic microgranular enclave, MME)으로 그 형태와 조성에 따라 유색광물군집, 석영섬록암, 섬록암 등으로 구분할 수 있다 (Fig. 3d, e, f). 또한 포획암 조성의 암석은 흑운모 화강암 내부에서는 열극 총진(Fig. 3g)의 형태와 주입에 의한 암맥의 형태(Fig. 3h)로 나타나기도 한다. 포획암의 크기를 제외한 나머지 산출 양상은 흑운모 화강암과 화강섬록암에서 거의 유사하다. 이질 포획암과는 달리 염기성 미립 포획암을 이루는 암석들의 경우 그 분포가 화강암류의 내부에만 국한된다. 즉 이 암석들은 독립된 암체로 화강암류의 주변에 분포하는 것이 아니라 화강암류 내에 포획되어 나타날 뿐이다.

염기성 미립 포획암의 형태는 타원형이 우세하다. 입자 크기는 0.1 mm 이하의 세립질이고, 부분적으로 사장석 반정을 포함한다. 사장석 반정은 화강암류에서 나타나는 사장석 반정의 형태와 매우

유사하다. 염기성 미립 포획암의 주구성광물은 사장석, 각섬석, 단사휘석, 소량의 석영 등으로 구성되어 있다. 각섬석은 대부분 침상이며, 석영과 사장석 주위를 각섬석이 둘러싸고 있는 망토 조직도 종종 관찰된다. 사장석은 반정으로 나타나기도 하지만, 석기에서는 래스 형태로 나타난다.

염기성 미립 포획암은 기재적인 특징에서 이질 포획암과는 쉽게 구별된다. 이하에서 포획암이라 함은 염기성 미립 포획암을 가리키는 것으로 한다.

광물의 화학 조성

화강암류와 포획암에 산출되는 각섬석, 사장석, 흑운모의 화학조성은 기초과학연구원 연구소 대전본소의 CAMECA SX-51 전자현미분석기(EPMA)를 이용하여 측정하였다. 광물의 화학조성에 대한 분석치를 Table 2, 3, 4에 나타내었다.

먼저 각섬석을 화학조성에 따라 분류하면 화강암류와 포획암의 각섬석 모두 칼식 앰피볼(calcic amphibole) 그룹의 마그네시오 혼블렌드(magnesianhornblende)에 속한다(Fig. 4a). 치환 메커니즘을 알아보면 A-site와 Al^{IV}는 비교적 양의 관계를 갖는다 (Fig. 4b). 또한 Al^T이 증가할수록 Al^{IV}는 직선적으로 증가하는 경향성을 보이는 반면 Al^{VI}는 일정하게 나타난다(Fig. 4c). 이는 Si를 치환하는 Al^{IV} + (Na+K)가 증가할수록 Al^T이 증가하기 때문이다 (Fig. 4d). 하지만 각섬석의 가장자리에서는 A-site의 점유율이 작다. Fig. 4e에서는 체르마카이틱 치환을 보여주며 에테니틱 치환(Fig. 4d)과 더불어 각섬석의 조성 변화를 일으켰음을 알 수 있다. 한편 포획암의 각섬석의 경우 중심부와 주변부에서 Mg/(Mg+Fe) 비가 거의 일정하게 나타나지만, 화강암류의 각섬석은 중심부보다 주변부에서 Mg/(Mg+Fe) 비가 크게 나타나는 특징을 보인다(Fig. 4f).

화강암류 내의 사장석은 중심부의 조성이 라브라도라이트(An₅₀₋₇₀)에서 올리고클레스(An₁₀₋₃₀)까지 다양하게 나타나지만 포획암 내의 사장석은 중심부 조성이 안데신(An₃₀₋₅₀)을 가리킨다(Fig. 5). 화강암류와 포획암의 사장석들의 주변부 조성은 대체로 올리고클레스(An₁₀₋₃₀)에 해당한다.

흑운모의 경우, 화강암류에 산출되는 흑운모에 대해서만 그 화학조성이 측정되었다. 흑운모를 조성에 따라 분류하면, 대체로 금운모(phlogopite) 영역에 도시되며(Fig. 6a), Ti+2Al^{IV} = Mg+2Si의 치환이 일어났음을 알 수 있다 (Fig. 6b).

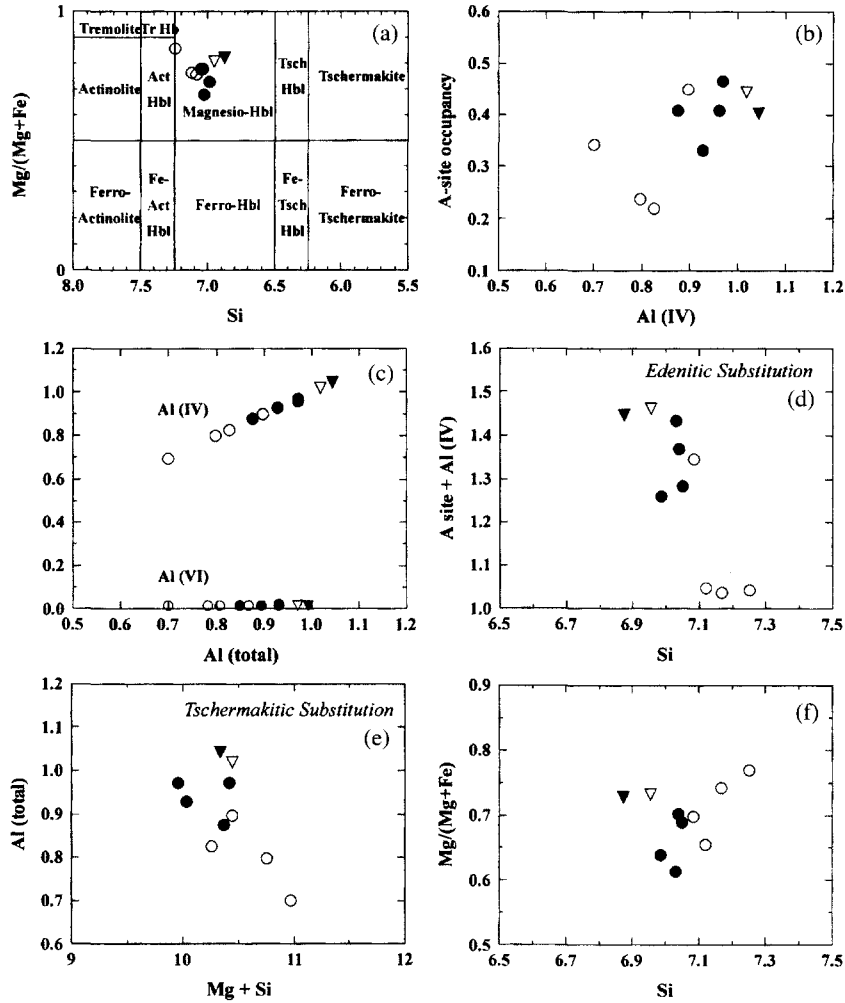


Fig. 4. Chemical composition of amphibole from the host granite and the enclave. ▼, core composition of amphibole from the enclave; ▽, rim from the enclave; ●, core from the host granite; ○, rim from the host granite.

주성분원소 지구화학

화강암류와 포획암에 대한 주성분원소 정량분석은 일본 이바라기대학 기기분석센터의 Rigaku-system 3270 X선형광분석장치(XRF)를 이용하였다. 화강암류와 포획암에 대한 주성분 원소의 분석치를 Table 5에 나타내었다.

각 시료에 대한 화학 분석치를 하커 도표에 도시하여 함량 변화의 경향을 살펴보았다(Fig. 7). SiO₂의 함량을 분화지수로 생각하면, SiO₂가 증가함에 따라, 즉 분화가 진행됨에 따라 화강암류와 포획암 양쪽에서 TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃T, CaO, MgO, MnO, P₂O₅ 함량은 점차 감소하는 경향을 보여주며, K₂O

와 Na₂O+K₂O 함량은 증가하는 경향을 나타낸다. Na₂O의 함량은 분산되어 나타나 어떠한 변화 경향도 알기 어렵다.

한편, Na₂O를 제외한 나머지 조성 변화에서 포획암의 조성이 화강암류 조성의 보다 매퓌한 쪽으로 연장되며, 이들의 변화 경향이 연속적이며 또한 직선적이라는 특징에 주목할 필요가 있다. 이 사실로부터 두 가지의 가능성을 생각해 볼 수 있다. 첫째는 화강암류가 포획암 조성의 모마그마로부터 분별 정출에 의한 결정분화로 형성되었을 가능성이고, 둘째는 포획암과 화강암류의 조성 변화는 포획암의 단성분과 화강암류의 단성분 사이의 기계적인 혼합(mechanical mixing)에 기인하였을 가능성이다

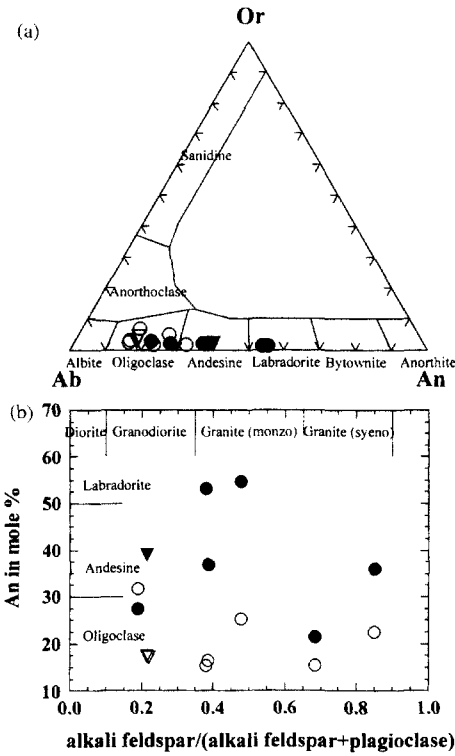


Fig. 5. Chemical composition of plagioclase from the host granite and the enclave. ▼, core composition of plagioclase from the enclave; ▽, rim from the enclave; ●, core from the host granite; ○, rim from the host granite.

(McBirney, 1993). 중성에서 펠식에 이르는 조성에서 주성분원소의 연속적인 변화 경향이 분별정출에 의한 것인지 혼합에 의한 것인지 판단하기는 매우 어렵다. 하지만, 이 두 가능성에 대한 검토는 포획암의 마그마와 화강암질 마그마 사이의 성인적 관계와 마그마과정을 해석하는데 매우 중요하다.

분별정출이나 혼합이나에 대한 해석은 우선적으로 야외 산상에서 검토되어야 한다. 즉 보다 매핑한 포획암 조성의 마그마가 관입하고, 다음에 분화된 화강암질 마그마가 관입했다면 분별정출의 가능성이 높다. 그러나 그러한 양상이 발견되지 않는다면 혼합의 가능성을 검토해 보아야 한다. 연구지역에 나타난 화강암류와 포획암의 산출 상태는 분별정출에 의한 마그마분화의 가능성에 부정적이다. 그 주된 이유로는 포획암 조성의 암상이 화강암류의 관입에 앞서 연구지역에 관입한 증거가 나타나지 않기 때문이다. 따라서 Fig. 7과 같은 주성분원소의 직선적인 변화 경향은 혼합에 의한 것일 가능성이 크고, 보다 구체적인 증거에 대해서는 다음 고찰 부

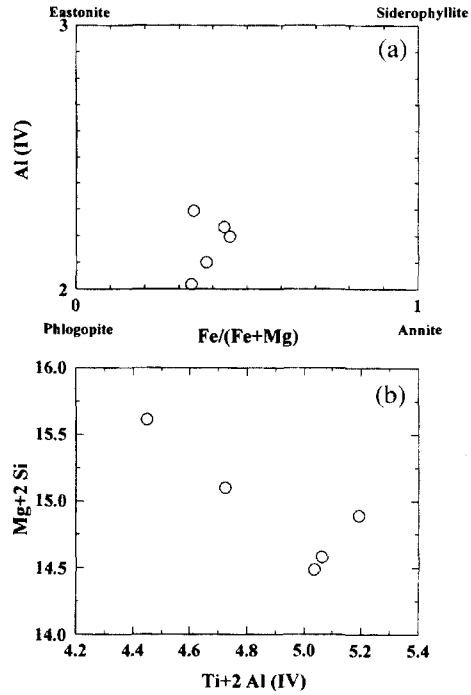


Fig. 6. Chemical composition of biotite from the host granite.

분에서 토의하였다.

화강암류와 포획암의 주성분원소에 의한 지구화학적 특징을 살펴보면, 이들은 비알칼리계열의 칼크알칼리계열의 화성암이다(Fig. 8a, b). 그리고 포획암은 메타알루미나질 내지는 퍼알루미나질의 특징을 보이거나 화강암류는 퍼알루미나질의 특징을 보인다(Fig. 8c).

고찰

화강암류와 그에 포함되어 나타나는 염기성 미립 포획암의 관계는 연구지역의 마그마활동을 이해하는데 매우 중요하다. 여기서 화강암류와 포획암의 관계를 두 가지로 나누어 생각해보기로 한다. 첫째로, 포획암으로 산출되는 암상, 즉 석영섬록암 내지 섬록암이 연구지역에 관입하였고 이후에 그로부터 분화된 화강암류가 관입한 경우이다. 마그마의 순차적인 관입에서 정상 누대구조의 관입체(normal zoned pluton)라면, 석영섬록암 내지 섬록암은 화강암류 주변에 분포하여야 한다. 역전 누대구조의 관입체(reverse zoned pluton)라면 화강암류 내부에 석영섬록암 내지 섬록암의 암체가 분포하여야 한다.

Table 5. Major element oxides (wt.%) and CIPW normative minerals of the host granite and the enclave from the Bohyun-san area

Sample No.	G-1	G-2	G-3	G-5	G-6	G-7	G-9	G-10	G-11	G-12	G-14
SiO ₂	77.19	67.74	70.01	65.33	79.36	77.04	72.61	69.56	71.10	74.20	67.93
TiO ₂	0.17	0.58	0.44	0.63	0.12	0.16	0.36	0.47	0.46	0.23	0.61
Al ₂ O ₃	12.81	15.48	16.06	16.37	11.74	13.04	14.20	14.66	14.48	14.54	15.47
Fe ₂ O ₃ T	1.59	4.06	2.69	4.83	0.85	1.13	2.81	3.21	2.90	1.62	3.96
MgO	0.18	1.55	0.82	1.55	0.06	0.11	0.54	0.96	0.82	0.37	1.30
MnO	0.03	0.09	0.10	0.12	0.03	0.02	0.06	0.07	0.07	0.04	0.08
CaO	0.43	2.95	1.83	2.99	0.27	0.42	1.14	1.88	1.62	0.59	2.82
Na ₂ O	2.99	3.62	4.40	3.98	2.57	3.00	3.15	3.68	2.44	2.96	3.58
K ₂ O	3.71	3.09	3.94	3.33	4.66	4.91	4.89	3.01	3.72	4.31	3.18
P ₂ O ₅	0.03	0.16	0.15	0.27	0.01	0.01	0.10	0.12	0.12	0.05	0.14
L.O.I	0.76	1.28	0.56	0.87	0.25	0.12	0.14	2.31	2.51	1.28	0.97
Total	99.89	100.60	101.00	100.27	99.92	99.96	100.00	99.93	100.24	100.19	100.04
Q	44.9	26.83	26.67	21.55	46.1	39.84	32.64	32.27	39.18	39.24	27.58
Or	22.14	18.4	23.29	19.82	27.65	29.09	28.96	18.24	22.51	25.77	18.99
Ab	25.49	30.8	34.12	33.84	21.79	25.4	26.66	31.86	21.1	25.29	30.54
An	1.98	13.8	8.2	13.34	1.29	2.03	5.08	8.84	7.51	2.66	13.3
C	3.17	1.15	2.13	1.35	1.99	2.04	1.85	2.23	3.82	1.31	4.07
Di wo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Di en	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mt	0.1	0.3	0.33	0.39	0.1	0.07	0.2	0.23	0.23	0.13	0.26
He	1.54	3.88	2.46	4.59	0.78	1.09	2.68	3.13	2.81	1.55	3.82
Ap	0.07	0.35	0.33	0.59	0.02	0.02	0.22	0.27	0.27	0.11	0.31

Note: G; granite, E; enclave, Fe₂O₃T; Total Fe, L.O.I; Loss on ignition.

Table 5. (Continued)

Sample No.	G-15	G-16	G-20	G-24	G-26	G-27	G-28	G-29	G-35	G-46	G-50
SiO ₂	71.77	75.94	78.35	76.97	71.10	70.59	70.36	76.55	73.84	67.42	64.12
TiO ₂	0.39	0.27	0.11	0.06	0.41	0.36	0.45	0.17	0.29	0.79	0.67
Al ₂ O ₃	15.20	13.15	12.51	13.70	15.18	15.90	15.37	13.31	14.33	15.48	15.75
Fe ₂ O ₃ T	2.33	1.92	0.86	1.63	2.70	2.20	2.66	1.16	1.79	4.84	5.68
MgO	0.47	0.35	0.06	0.01	0.55	0.57	0.61	0.21	0.34	1.46	2.22
MnO	0.05	0.05	0.03	0.03	0.05	0.04	0.07	0.02	0.03	0.08	0.10
CaO	1.39	0.66	0.42	0.03	1.45	0.77	1.67	0.28	0.80	3.34	3.23
Na ₂ O	3.55	3.06	3.02	3.77	3.57	4.02	3.61	2.91	3.40	3.65	3.10
K ₂ O	4.50	4.48	4.36	4.30	4.34	4.01	4.08	4.53	4.71	2.83	3.68
P ₂ O ₅	0.07	0.07	0.03	0.00	0.07	0.07	0.11	0.03	0.05	0.18	0.21
L.O.I	0.22	0.04	0.18	0.17	0.58	0.39	1.02	0.87	0.42	0.27	1.82
Total	99.94	99.99	99.93	100.67	100.00	98.92	100.01	100.04	100.00	100.34	100.58
Q	30.5	39.27	43.31	38.59	30.17	27.55	29.86	41.81	34.11	26.48	22.59
Or	26.69	26.51	25.85	25.47	25.82	23.83	24.38	27.02	27.98	16.73	22.04
Ab	30.09	25.87	25.59	31.9	30.35	34.14	30.82	24.8	28.86	30.83	26.53
An	6.51	2.87	1.91	0.14	6.83	8.42	7.72	1.22	3.69	15.51	14.99
C	2.1	2.2	2.12	2.15	2.12	1.87	2.22	3.19	2.29	0.71	1.24
Di wo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Di en	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mt	0.16	0.16	0.1	0.1	0.16	0.13	0.23	0.07	0.1	0.26	0.33
He	2.22	1.81	0.79	1.56	2.6	2.12	2.53	1.12	1.73	4.66	5.52
Ap	0.15	0.15	0.07	0	0.15	0.15	0.24	0.07	0.11	0.39	0.46

그러나 연구지역에서는 그러한 야외 증거가 전혀 발견되지 않는다. 포획암의 산출은 화강암류 내부에 국한될 뿐이며, 독립된 암체로 분포하지 않는다. 이 사실은 포획암의 암상이 화강암류보다 먼저 관입하였을 가능성이 높지 않음을 지시한다.

둘째로, 화강암류에 포획암 조성의 매픽 마그마가 나중에 관입한 경우이다. 이에 대한 야외 증거는 쉽게 찾을 수 있다. 포획암을 이루는 석영섬록암 내지 섬록암의 암상은 화강암류 내에 암맥, 열극 충전의 형태로 나타난다(Fig. 3g, h). 이러한 산

Table 5. (Continued)

Sample No	G-54	G-55	E-7	E-8	E-15	E-25	E-43	E-47	E-52
SiO ₂	68.10	67.42	65.84	68.10	61.78	61.40	64.76	60.20	56.26
TiO ₂	0.38	0.47	0.58	0.52	1.19	1.03	0.65	0.94	0.91
Al ₂ O ₃	15.62	16.25	15.38	15.15	16.57	16.35	16.19	16.08	16.86
Fe ₂ O ₃ T	3.62	3.80	4.19	3.65	6.21	7.30	4.69	7.40	8.17
MgO	1.41	1.35	1.65	1.32	2.04	2.62	1.54	3.18	3.82
MnO	0.06	0.09	0.07	0.07	0.12	0.12	0.10	0.15	0.13
CaO	1.82	3.03	3.13	2.69	4.11	5.49	3.22	5.91	5.89
Na ₂ O	3.09	3.65	3.51	3.32	4.17	3.49	3.74	3.18	2.92
K ₂ O	4.66	3.37	3.07	3.38	2.48	1.84	3.22	1.91	2.20
P ₂ O ₅	0.13	0.17	0.15	0.12	0.45	0.29	0.28	0.26	0.26
L.O.I	1.02	0.45	0.27	0.21	0.89	0.45	1.27	0.55	2.70
Total	99.91	100.05	97.84	98.53	100.01	100.38	99.66	99.76	100.12
Q	26.92	25.33	25.52	28.92	17.5	19.3	22.58	18.63	13.84
Or	27.87	20.01	18.61	20.33	14.8	10.93	19.36	11.39	13.36
Ab	26.41	30.97	30.4	28.54	35.56	29.62	32.13	27.09	25.33
An	8.36	14.1	15.02	12.87	17.92	23.57	14.58	24.11	27.05
C	2.47	1.44	0.92	1.4	0.51	0	1.3	0	0
Di wo	0	0	0	0	0	0.87	0	1.64	0.58
Di en	0	0	0	0	0	0.75	0	1.41	0.5
Mt	0.2	0.3	0.23	0.23	0.4	0.39	0.33	0.49	0.44
He	3.52	3.61	4.13	3.55	5.99	7.06	4.54	7.12	8.09
Ap	0.29	0.37	0.34	0.27	0.99	0.64	0.62	0.57	0.58

상은 보다 매퓌한 포획암 조성의 마그마가 화강암류보다 나중에 관입하였음을 지시한다. 그리고 포획암 조성의 마그마는 고결되기 이전의 화강암질 마그마에 관입하고 혼합되어 다양한 조직적 관계를 보이고 있다. 아래에서는 매퓌 마그마와 화강암질 마그마 사이의 혼합 과정을 살펴보고, 그 증거들을 살펴본다.

마그마 불균질 혼합의 기재적 증거

마그마 혼합은 마그마의 여러 분화과정에 있어서 액체-액체간의 상호작용을 의미한다(Didier and Barbarin, 1991). 섞이게 되는 두 개의 서로 다른 조성의 마그마를 가정할 때, 거의 균질하게 섞여 두 마그마의 원래 모습을 거시적으로 판단할 수 없을 때 이를 균질 혼합(mixing)이라 한다. 한편, 섞임이 불균질하여 두 마그마의 실체가 야외에서 뚜렷이 드러날 때 이를 불균질 혼합(mingling)이라 한다(Hibbard, 1991, 1995). 불균질 혼합의 경우 좀 더 매퓌한 조성의 마그마가 펠식한 조성의 마그마 내에서 포획암으로 존재하는 경우가 흔히 알려져 있다.

Fig. 9는 마그마의 혼합과 불균질 혼합이 일어나는 과정을 모식적으로 표현한 그림이다(Fernandez and Barbarin, 1991). 혼합의 과정은 펠식 마그마의 결정화 정도와 매퓌 마그마의 주입 시기에 따라 네 단계로 나누어진다. 제1단계는 펠식 마그마의 액 성분이 많을 때 매퓌 마그마가 주입되어 거의 균질

혼합되는 것이며 야외에서 혼합 여부를 판단하기 힘들다. 제4단계는 거의 결정화되어 가는 상태의 펠식 마그마에 매퓌 마그마가 주입되어 암맥의 형태로 나타난다. 제3단계에서는 기존의 열극을 충전하고 있는 형태이며, 제2단계는 불균질 혼합의 단계로서 액과 결정의 비율 차이에 의해 매우 다양한 양상을 보여준다.

연구지역의 화강암류 내에는 Fernandez and Barbarin(1991)의 네 가지 단계의 모식적인 혼합 양상이 나타난다. 우선 야외 산상으로부터 제4단계에 해당하는 암맥이나(Fig. 3h), 제3단계에 해당하는 열극 충전의 양상이 나타난다(Fig. 3g). 제2단계의 불균질 혼합에서는 다양한 크기와 형태의 포획암이 나타나며(Fig. 3c, d), 이 경우 포획된 포획암에서는 화강암질 마그마와의 온도 차이에 의한 과냉각대가 발견된다. 제1단계의 경우 야외에서 혼합의 증거를 찾기 어렵다. 이 경우 혼합의 증거를 현미경 하에서 관찰할 수도 있다. 결정화가 조금이라도 진행된 상태의 경우 혼합되는 두 마그마 내의 기정출 광물들은 서로 상대방에 혼입되어 들어가기도 하며, 일단 혼입되면 더 이상의 성장이 방해받거나, 결정의 주변부에 새로운 성장이 계속되기도 한다. 석영 내부의 각섬석-흑운모 영역, 석영 또는 장석 내의 포이킬리틱 조직, 침상의 각섬석, 각섬석이 석영과 장석 주위를 둘러싸는 망토 조직 등이 이러한 혼합의 기재적 증거이다(Fig. 3b). 따라서 이러한 증거들을 바탕으로 화강암질 마그마와 보다 매퓌한 마그마의

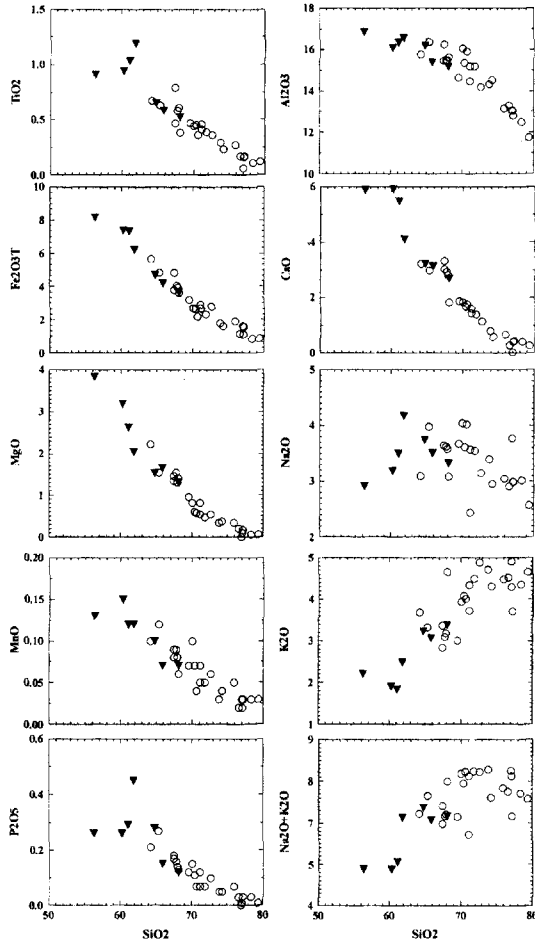


Fig. 7. Harker variation diagrams. ▼, enclave; ○, granite.

조성적인 혼합이 존재했을 것이라고 추정할 수 있었다.

마그마 불균질 혼합의 광물학적 증거

이미 정출된 반정을 포함하고 있는 두 마그마가 서로 불균질 혼합을 할 경우, 반정들은 서로 상대방의 마그마에 혼입되기도 한다. 또한 이미 정출된 반정이 성장을 계속할 경우 후기 성장부의 조성은 혼합의 결과로 변화된 마그마의 조성에 영향을 받는다. 즉, 혼합되기 이전의 반정의 조성(중심부 조성)과 성장된 주변부 조성 사이에 불균질 혼합으로 말미암은 조성적 차이가 발생하게 된다. 각섬석과 사장석의 경우를 예로 불균질 혼합에 따른 광물 조성의 변화를 알아보기로 하자.

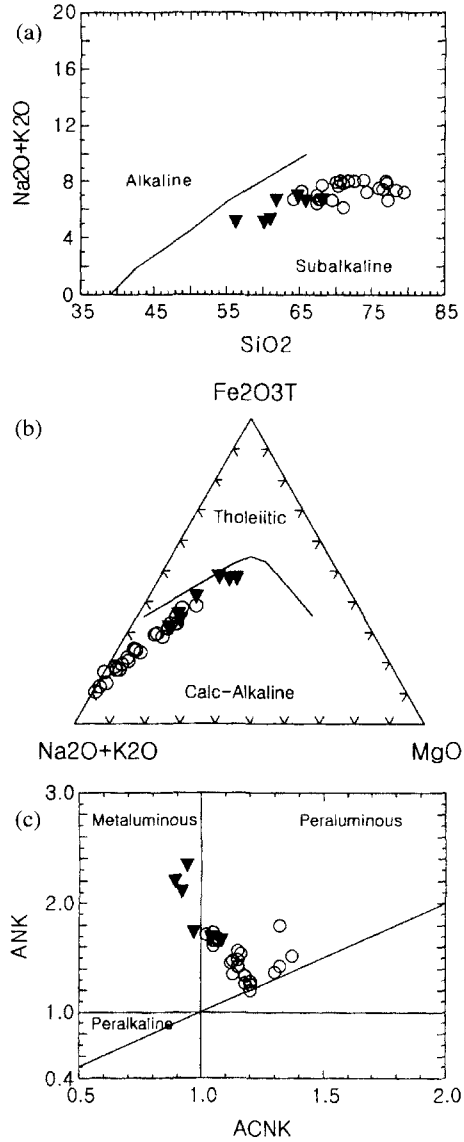


Fig. 8. Discrimination diagrams between alkaline and subalkaline (a), between tholeiitic and calcalkaline (b) (after Irvine and Baragar, 1971). Alumina saturation index of the host granite and the enclave (c).

각섬석의 경우 가장 뚜렷한 특징은 중심부와 주변부에서의 Mg/(Mg+Fe) 비에서 나타난다. Fig. 4f를 보면 포획암의 각섬석의 경우 중심부와 주변부에서 Mg/(Mg+Fe) 비에 거의 차이가 없다. 그러나 화강암류의 각섬석의 경우 중심부보다 주변부에서 이 비가 높아진다. 일반적으로 결정분화를 계속하는 마그마에서 정출되는 각섬석은 중심부에서 주변

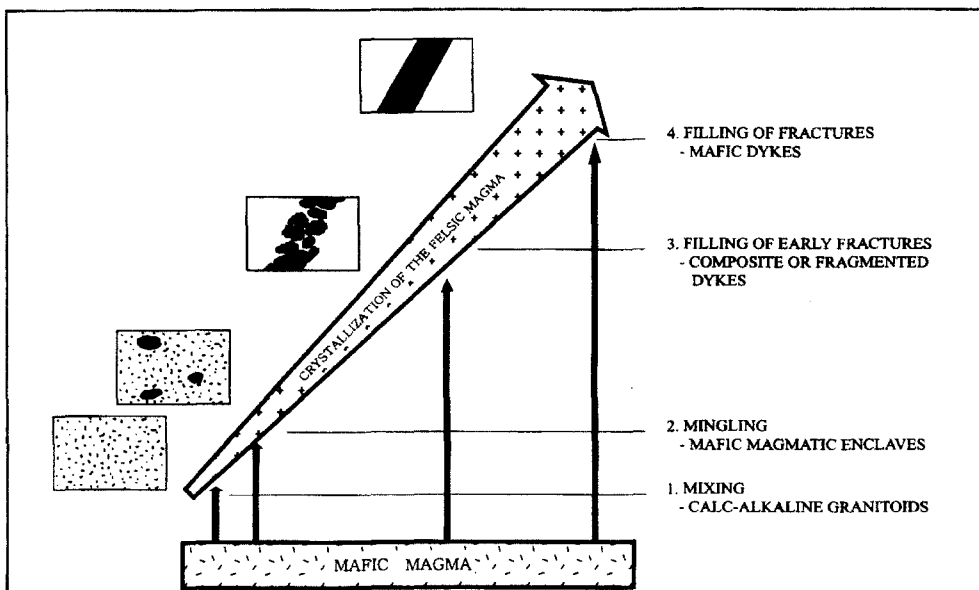


Fig. 9. Sketch showing the different types of hybridization obtained by injection of mafic magma into a granitic system at different stages of crystallization of the felsic magma (modified after Fernandez and Barbarin (1991)).

부로 갈수록 Mg/(Mg+Fe) 비가 감소하고, 경상분지의 화강암류에 포함된 각섬석에서 이 경향은 잘 알려져 있다(Lee, 1991; 조동룡, 1992). 연구지역 화강암류의 각섬석에서 Mg/(Mg+Fe) 비가 주변부에서 높게 나타나고 있는 것은 화강암류의 조성보다 매퓌한 조성의 마그마가 혼합되어 기정출 각섬석 반정 바깥으로 성장된 부분에서 Mg 함량이 높아진 결과로 해석할 수 있다.

한편, 사장석의 경우 포획암의 사장석은 중심부 조성이 안테신을 가리킨다. 화강암류에서 화강섬록암의 모드조성을 가진 암석의 사장석의 중심부 조성은 올리고클레스와 안테신의 경계부 정도의 조성을 가리킨다. 그런데 몬조화강암의 모드조성을 가진 암석에 포함된 사장석에서는 중심부 조성이 라브라도라이트에서 안테신의 높은 An 조성을 나타내어(Fig. 5b) 일반적인 몬조화강암의 사장석 조성과는 매우 차이가 난다(Deer *et al.*, 1963). 이런 높은 An 조성의 사장석은 화강암질 마그마에서 정출된 사장석이 아니라 보다 매퓌한 암상에서 기정출된 사장석이 혼합의 과정을 통해 화강암류에 혼입된 결과로 해석된다. 한편, 포획암과 화강암의 사장석의 주변부 조성이 비교적 일정한 것은 혼합이 일어난 후 화학적인 평형상태에 도달하였음을 지시하는 것으로 생각된다 (Fig. 5b).

불균질 혼합에 대한 모델 계산

위에서 살펴 본 여러 증거들을 근거로 보현산 일대에 관입한 심성암류의 형성 과정을 다음과 같이 정리할 수 있다. 첫째, 펠릭한 화강암질 마그마가 보현산 일대에 관입하여 배태되는 도중에 보다 매퓌한 섬록암질 마그마가 화강암질 마그마를 다시 관입하였다. 이 과정에서 섬록암질 마그마와 화강암질 마그마 사이에 균질 혼합(mixing)과 불균질 혼합(mingling)이 일어나고 다양한 형태의 포획암이 형성된다. 둘째, 균질 혼합이 잘 일어난 부분에서는 화강암질 마그마의 조성은 상당히 매퓌해져 화강섬록암의 암상을 나타낸다. 그리고 가장 매퓌한 화강섬록암은 섬록암질 마그마와의 혼합이 가장 많았던 결과이며, 포획암의 조성에 가까워진다. 셋째, 불균질 혼합이 일어나는 부분에서 포획암을 거의 포함하지 않는 화강암은 원래의 화강암질 마그마의 조성을 그대로 반영한다. 넷째, 포획암의 화학적 조성은 화강암질 마그마와 섬록암질 마그마의 불균질 혼합에 의해 변화된다.

그러면 균질 혼합 내지 불균질 혼합에서 화강암질 마그마와 섞이는 섬록암질 마그마의 양은 어느 정도일까? 그리고 과연 혼합의 과정이 보현산 일대 화강암류의 조성 변화에 관여하였는가? 이를 알아

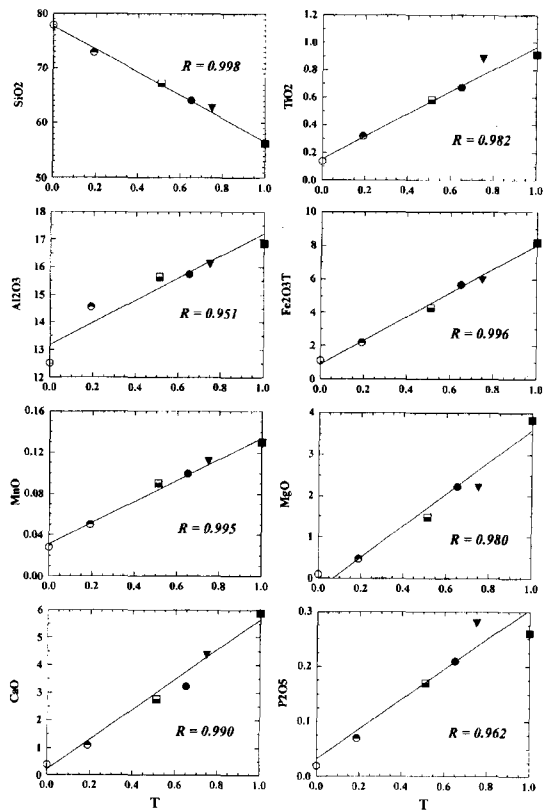


Fig. 10. Plot of major element contents vs. the weight fraction (T) of dioritic magma involved in the binary mixing process for the host granite and the enclave. ■, dioritic magma; ▼, average enclave; ●, the most mafic granodiorite; half-filled square, average granodiorite; half-filled circle, average granite; ○, granitic magma.

보기 위해 Fourcade and Allegre(1981)의 2성분 혼합 테스트(binary mixing test)의 모델을 이용하여 계산해 보았다. 이 모델 계산에 의한 마그마 혼합 가능성 테스트는 최근 포르투갈 벨라스 지역의 화강암체에 대해서도 성공적으로 응용되었다(Silva *et al.*, 2000).

우선 화강암질 마그마와 섬록암질 마그마의 두 개의 단성분이 필요한데, 섬록암질 마그마의 경우 포획암 중에서 가장 매퓌한 시료를 단성분으로 잡았다. 그 이유는 섬록암은 포획암 이외의 형태로 보현산 일대에 분포하지 않기 때문이다. 그리고 화강암질 마그마에 대한 단성분은 포획암을 거의 포함하지 않는 가장 펠식한 화강암 시료 가운데 4개 시료의 평균값이다.

모델 계산에서 혼합의 타당성을 살피기 위해, 포

획암, 흑운모 화강암, 화강섬록암의 평균 조성과 가장 매퓌한 화강섬록암의 조성에 대해서도 계산하였다. 모델 계산의 결과는 혼합되는 섬록암질 마그마의 중량비(T)에 대한 각 암상의 조성 변화로 나타낼 수 있다(Fig. 10). Fig. 10에서 보면 섬록암질 마그마의 중량비가 감소함에 따라 SiO_2 함량은 증가하지만, 나머지 산화물의 함량은 증가하며, 그 변화 경향은 직선적이다. 계산의 결과 가장 매퓌한 화강섬록암의 경우 섬록암질 조성이 평균 65% 정도 혼합되었으며, 흑운모 화강암은 평균 19%, 화강섬록암은 평균 51% 정도의 섬록암질 조성이 혼합된 것으로 나타났다. 한편, 포획암의 평균 조성은 약 25% 정도의 화강암질 조성이 혼합된 결과이다.

모델 계산의 타당성은 계산의 결과와 여러 조성 사이의 상관 관계(R)로부터 검증된다. R값이 1에 가까울수록 화강암질 마그마와 섬록암질 마그마의 두 단성분의 혼합의 결과로 해석된다. Fig. 10에서 SiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$, MnO , CaO 등은 혼합에 대한 관계가 매우 양호하여, 마그마 혼합 과정에서 일어난 화학적 교환(chemical exchange)에 따른 조성 변화로 해석할 수 있다. TiO_2 (0.982)와 P_2O_5 (0.962)의 경우 포획암의 평균 조성으로 말미암아 상관 관계가 약간 떨어지는데, 이는 포획암 조성에서 비정상적으로 높은 TiO_2 와 P_2O_5 함량을 가지는 한 시료(E-15) 때문으로, 만약 이 시료를 제외하면 R값은 각각 0.995와 0.985로 높아져 혼합의 가능성이 더욱 커진다.

MgO 의 경우 상관 관계가 약간 떨어지는데, 그 이유는 혼합 이전에 이미 정출되어 있던 각섬석과 같은 Mg -광물상의 거동에 관련될 수 있다. 즉 조성 변화가 단순한 화학적 교환만이 아닌 기정출 광물의 혼입 비율과도 관련되기 때문이다. 이것은 Al_2O_3 에서 매우 뚜렷하게 나타난다. Al_2O_3 의 R값이 낮은 것은 두 단성분의 혼합에 의한 화학적 원소 교환 이외에 다른 효과가 있었음을 지시한다. 화강암질 마그마와 섬록암질 마그마는 혼합 이전에 어느 정도의 결정작용이 진행되었고, 사장석과 같은 광물은 이미 정출되었을 것이다. 그리고 두 마그마에 포함된 기정출 사장석이 혼합에 의해 각기 상대방 쪽으로 혼입되었을 가능성이 크다. 이 경우 혼합 과정에서 Al_2O_3 의 함량은 화학적 교환과 더불어 혼입되어 들어오는 사장석의 비율에 의해 변화하게 된다. 기정출 사장석과 각섬석의 불균질 혼입이 MgO 와 Al_2O_3 에 대한 혼합 테스트의 상관 관계를 낮추는 원인이었을 것으로 생각된다.

결 론

이상의 연구로부터 아래와 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 보현산 일대 화강암류는 화강섬록암과 화강암의 조성을 가지며, 화강암류 내에는 다양한 크기의 포획암이 나타난다. 화강암류의 주변에서는 기반 퇴적암 기원의 이질 포획암이 부분적으로 나타나지만, 화강암류 내부에서는 대부분이 염기성 미립 포획암으로 나타난다.

(2) 염기성 미립 포획암은 유색광물의 군집, 석영 섬록암, 섬록암 등으로 구분할 수 있다. 이 염기성 미립 포획암의 산출 상태는 화강암류 외부에 독립된 암체로 존재하는 것이 아니라, 화강암류 내부에서만 발견된다는 특징을 가진다.

(3) 지구화학적 특징에서 화강암류와 염기성 미립 포획암은 칼크-알칼리계열에 속하며, 포획암이 메타알루미나질 내지 퍼알루미나질임에 반해 화강암류는 퍼알루미나질의 성질을 보인다.

(4) SiO₂ 함량에 대한 주성분 산화물의 함량 변화는 포획암과 화강암류에서 매우 직선적인 변화 경향을 보인다. 이러한 경향은 마그마 과정 중에서 분별정출에 의한 결정분화작용 혹은 화강암질 마그마와 염기성 마그마 사이의 혼합작용으로 해석될 수 있다. 그러나 야외 산상을 비롯하여, 암석기재적 특징 그리고 광물 성장에 따른 화학 조성의 변화 등은 화강암류와 포획암 사이에 불균질 혼합이 주요 마그마 과정이었음을 지시한다.

(5) 화강암질 마그마와 보다 염기성인 섬록암질 마그마의 혼합과정을 2성분 혼합 테스트의 모델을 이용해 계산하였다. 이 결과 화강암류 중 가장 매찍한 화강섬록암의 경우 섬록암질 마그마 조성의 약 65% 정도 혼합되었고, 흑운모 화강암은 평균 19%, 화강섬록암은 평균 51% 정도의 섬록암질 조성이 혼합된 것으로 나타났다. 한편, 포획암의 평균 조성은 약 25% 정도의 화강암질 조성이 혼합된 결과이다.

사 사

논문에 대한 건설적인 비평을 해 주신 부산대학교 윤성효 교수님과 한국해양연구소의 이종익 박사님께 감사드립니다. 이 연구는 한국과학재단의 97특정기초연구비(과제번호 97-07-03-02-01-3)에 의해 수행되었다.

참고문헌

권영일, 이인기, 1973, 한국지질도(1:50,000), 도평지질도폭 및 설명서, 국립 지질 광물 연구소, 9p.

김상중, 1997, 북부 경상분지의 화성활동과 다금속 광화작용에 관한 지화학 및 지질연대학적 연구. 충남대학교 박사 학위논문, 276p.

김종선, 이준동 2000, 거제도 화강암질암의 지화학적 특성에 의한 마그마 불균질혼합 증거. 지질학회지, 36, 19-38.

김종선, 이준동, 윤성효, 1998, 거제도 화강암질암의 마그마 불균질 혼합 증거: 1. 그 기재적 특성. 지질학회지, 34, 105-121.

김종선, 이준동, 김인수, 백인성, 최보심, 2000, 울산 방어진일대 화강암내에 산출되는 포획암의 암석학적 연구. 지질학회지, 36, 73-92.

김종식, 김성욱, 김근수, 김국락, 손 문, 김종선, 1999, 경남 양산 원동칼데라 중앙부의 각섬석-흑운모 화강암에 나타나는 포획암의 기원: 1, 암석기재학적 및 고자기학적 연구. 자원환경지질학회지, 32, 339-351.

오인섭, 정국성, 1975, 한국지질도(1:50,000), 기계지질도폭 및 설명서, 국립 지질 광물 연구소, 25p.

원종관, 윤선, 소철섭, 1980, 한국지질도(1:50,000), 신령지질도폭 및 설명서, 자원개발연구소, 19p.

원종관, 강필중, 이상현, 1978, 경상분지의 구조해석과 Igneous pluton에 관한 연구. 지질학회지, 14, 79-92.

윤성효, 고정선, 박기호, 1997, 한반도 동남부의 백악기 반려암질암에 대한 암석화학적 연구(1); 영천 방가산 지역을 중심으로. 한국지구과학회지, 18, 292-302.

장기홍, 고인석, 이재영, 김상욱, 한국지질도(1:50,000), 구산동지질도폭 및 설명서, 자원개발연구소, 25p.

조동룡, 1992, 남한에 분포하는 현생 화강암류의 기원에 대한 광물 및 암석학적 연구. 연세대학교 박사 학위논문. 189p.

Barbarin, B. and Didier, J., 1991, Macroscopic features of mafic microgranular enclaves. In Enclave and Granite Petrology (eds. J. Didier and B. Barbarin), Elsevier, Amsterdam, 253-262.

Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1963, Rock-forming minerals. Vol. 4 Framework silicates, Longmans, London, 435p.

Didier, J. and Barbarin, B., 1991, The different types of enclaves in granite-Nomenclature. In Enclave and Granite Petrology (eds. J. Didier and B. Barbarin), Elsevier, Amsterdam, 19-23

Dodge, F.C.W. and Kistler, R.W., 1990, Some additional observations on inclusions in the granitic rocks of the Sierra Nevada. Journal of Geophysical Research, 95, 17841-17848.

Fernandez, A.N. and Barbarin, B., 1991, Relative rheology of coval mafic and felsic magma; Nature of resulting interaction processes and shape and mineral fabrics of mafic microgranular enclaves. In

- Enclave and Granite Petrology (eds. J. Didier and B. Barbarin), Elsevier, Amsterdam, 263-275.
- Fourcade, S. and Allegre, C.J., 1981, Trace element behavior in granitic genesis: a case study, the calc-alkaline plutonic association from the Querigut Complex, Pyrenees, France. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 76, 177-195.
- Hibbard, M.J., 1991, Texture anatomy of twelve magma-mixed granotoid systems. In *Enclave and Granite Petrology* (eds. J. Didier and B. Barbarin), Elsevier, Amsterdam, 431-444.
- Hibbard, M.J., 1995, *Petrography and petrogenesis*. Prentis Hall, New Jersey, 587p.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8, 532-548.
- Kim, S.J., Lee, H.K. and Itaya, T., 1997, K-Ar ages and geochemistry for granitic and volcanic rocks in the Euseong and Shinryeong area, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 30, 603-612.
- Lee, J.I., 1991, Petrology, mineralogy and isotopic study of the shallow-depth emplaced granitic rocks, southern part of the Kyoungsang Basin, Korea - origin of micrographic granite -. Ph.D. dissertation, University of Tokyo, 197p.
- Maas, R., Nicholls, I.A. and Legg, C., 1997, Igneous and metamorphic enclaves in the S-type Deddick granodiorite, Lachlan Fold Belt, SE Australia: petrographic, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence for crust melting and magma mixing. *Journal of Petrology*, 38, 815-841.
- McBirney, A.R., 1993, *Igneous Petrology*. Jones & Bartlett, Boston, 508p.
- Silva, M.M.V.G., Neiva, A.M.R. and Whitehouse, M.J., 2000, Geochemistry of enclave and host granites from the Nelas area, central Portugal. *Lithos*, 50, 153-170.
- Streckeisen, A., 1976, To each plutonic rocks its proper name. *Earth Science Review*, 12, 1-33.

(책임편집: 윤성호)

(2000년 6월 23일 접수, 2000년 8월 30일 수리)

Petrology of host granites and enclaves from the Bohyeonsan area, Euseong Basin

Yong-Joo Jwa and Kun-Ki Kim

Department of Earth & Environmental Sciences, Gyeongsang National University,
Chinju, 660-701, Korea

Abstract: Mafic microgranular enclaves (MME) occur in the granites from the Bohyunsan area. The host granites are generally of granodioritic and granitic compositions. The MME can be divided into mafic mineral clusters, quartz diorite and diorite according to their occurrence. Harker variation diagrams show linear trends between the MME and the host granites. Though the rim compositions of plagioclase in the host granites and the MME are similar, the core compositions of plagioclase in some host granites show abnormally high An content. The Mg/(Mg+Fe) ratio of hornblende in the host granites gradually increase from the core to the rim. The chemical composition of minerals in the host granites had been affected by more mafic magma composition. The modelling of major elements of the MME and hybrid host granites also indicate that they result from simple mingling/mixing between a dioritic magma and the host granite magma. The MME are thus interpreted to be globules of a more mafic magma which intruded the granite magma. Partial equilibration has been achieved between the MME and the host granites after they were commingled with each other.

Key words: Bohyunsan, host granites, mafic microgranular enclave, mingling/mixing, binary mixing test