

경남 양산 원동칼데라 중앙부의 각섬석-흑운모 화강암에 나타나는 포획암의 기원: 1. 암석기재학적 및 고자기학적 연구

김춘식* · 김성욱* · 김근수* · 김국락* · 손 문* · 김종선*

The Origin of Enclave at Hornblende-biotite Granite in Central Wondong Caldera, Korea: 1. Petrography and Palaeomagnetic Study

Choon-Sik Kim*, Sung-Wook Kim*, Gun-Soo Kim*,
Guk-Lac Kim*, Son Moon* and Jong-Sun Kim*

ABSTRACT: Petrographic and palaeomagnetic studies have been conducted to understand the origin of dark-colored enclaves occurring in the hornblende biotite granite within the Wondong caldera. The enclaves are commonly elongated and rounded in shape. They are finer-grained and darker-colored than enclosing granite, but they have similar mineral assemblage to that of granite. Under the microscope the enclaves show microstructures reflecting an igneous origin. The microstructures of igneous origin include elongate grain shapes of plagioclase, hornblende, apatite, poikilitic anhedral quartz and zoning of plagioclase. All above features indicate that the enclaves belong to the 'microgranitoid enclaves' of Vernon (1984). A total of 91 oriented samples were drilled from 4 sites, and their AMS (anisotropy of magnetic susceptibility) axis directions and remanence components were analyzed. The result shows that both enclave and host granite have same AMS principle axis direction and same remanence magnetic direction in each site. The result of this study suggests that the enclaves were derived from the globules of magma, which were formed by pillowing of syn-plutonic dike of magma that is more mafic than the host granite magma.

서 언

화강암질암, 특히 천저 관입 칼크알칼리 화강암은 엔클레이브(enclave)라고 총칭하는 포획암들을 흔히 포함하고 있다. 화강암에 나타나는 포획암들은 그 기원에 따라서 크게 두 가지로 분류될 수 있는데, 하나는 화강암 주위의 외부 암석에서 유래된 외래암편(xenolith)이고, 다른 하나는 화강암질 마그마의 형성과 밀접한 관련이 있는 포획암들이다. 후자의 경우에 속하는 포획암을 미국에서는 통상 염기성 포획체(mafic inclusion)라고 부르며, 프랑스와 호주 등지에서는 미립상 엔클레이브(microgranular enclave; Didier, 1973)와 미화강암질 엔클레이브(microgranitoid enclave; Vernon, 1983,

1984), 또는 MME(Mafic Micro-granular(Microgranitoid) Enclave; Didier, 1973)라고 부른다.

화강암질 마그마의 형성과 밀접한 관련이 있는 포획암들, 즉, 염기성 포획체들은 다음의 세 가지 가설로 그 기원을 설명한다. 첫째, 화강암질 마그마를 형성시킨 원암의 용융-잔류물이 포획암으로 나타나는 것으로, restite라고 부르는 것들이다(Bateman, 1983; Bateman and Chappell, 1979; Noyes *et al.*, 1983; White and Chappell, 1977). 둘째, 성분이 서로 다른 마그마의 불균질혼합(magma mingling)의 산물로 나타나는 포획암으로서, 이 경우 포획암을 만든 마그마는 맨틀기원의 염기성 단성분(mafic end-member)을 나타낸다(Didier, 1973; Eichelberger, 1980; Reid *et al.*, 1983; Vogel *et al.*, 1984). 셋째, 화강암의 모마그마(parent magma)의 정출작용 초기에 형성된 결정들이 이후에 화강암질 마그마의 유동에 의해 떨어져 나와 분리된

*부산대학교 지질학과 (Department of Geology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea)

Table 1. Sample sites and sample designations.

Formation	Site	Granite		Enclave	
		No. of samples	Bulk susceptibility (min-max, SI unit)	No. of samples	Bulk susceptibility (min-max, SI unit)
Hornblendebiotite granite	A	17	282.5~7715.1	21	467.8~8099.1
	B	11	155.1~1554.9	9	609.6~9314.4
	C	7	461.3~3674.7	12	2938.1~39265.4
	D	14	1729.1~5413.2		

것들로서 집적암 (cumulate) 또는 marginal accretion의 형태 등으로 나타나는 포획암이다 (Didier, 1973; Fourcade and Allegre, 1981; Tindle and Pearce, 1983). 위의 해석에 의하면 염기성 포획체들은 화강암질 마그마의 기원과 진화를 연구하는데 중요한 단서를 제공할 수 있다. 예를 들면, restite 기원의 포획암을 포함하고 있는 화강암은 지각물질의 용융에 의해 형성된 것으로 추론할 수 있고, 집적암 기원의 포획암을 포함하는 화강암은 염기성 모암으로부터 분화작용에 의하여 형성되었을 가능성이 높다. 마그마혼합을 지지하는 포획암을 포함하고 있다면, 그 화강암은 맨틀기원의 염기성 마그마와 지각기원의 물질이 혼합하여 형성되었을 가능성이 높다. 또한 마그마혼합으로 대규모 화강암체에서 나타나는 국지적인 화학조성의 변이도 설명할 수 있을 것이다. 따라서 화강암체에 나타나는 염기성 포획체의 기원을 밝히는 연구는 이들을 포획하고 있는 화강암의 마그마의 생성과 진화를 이해하는데 매우 중요하다.

경상분지 남부에 분포하는 화강암들은 대부분 천저관입 메타알루미나질 (metaluminous) 화강암으로 알려져 있으며 (Lee, 1991) 암청색 내지 암흑색의 포획암을 흔히 포함하고 있다. 경상분지 동남부에 분포하는 화강암질암 중에 포획암을 다량 포함하는 화강암의 예로는 언양화강암 (김재영, 1991), 산내화강암 (황성규, 1996), 양산화강암 (차문성 등, 1972; 진미정, 1998), 거제도화강암 (김종선 등, 1998), 방어진화강암 (최보심, 1998) 등을 들 수 있다.

경남 양산시 원동면과 그 인근에 위치하는 소위 원동칼데라 (황상구, 1988; 황상구 등, 1997)의 중앙부에 암주상으로 나타나는 각섬석-흑운모 화강암에는 다양한 크기와 형태를 가진 암청색의 포획암들이 enclave swarm 형태로 무리 지어 나타난다. 본 연구는 각섬석-흑운모 화강암에 나타나는 암청색 포획암들을 대상으로 암석기재학적 연구와 고자기학적 연구를 수행하여 그것들의 기원을 밝히는 것이 목적이다. 후속 연구에서는 본 연구의 결과와 암석화학분석자료를 결합하여

그것으로부터 포획암과 각섬석-흑운모 화강암의 지화학적 관계를 밝히고자 한다.

연구방법

본 연구를 위해 야외에서 포획암의 산출상태를 기재하고, 직경 1인치의 다이아몬드 비트가 장착된 휴대용 착암기와 압축냉각수장치를 이용하여 4개 지점에서 화강암과 포획암으로부터 91개 (화강암: 49개, 포획암: 42개)의 정향시료를 채취하였다 (Table 1).

암석기재학적 연구를 위해서 50여 개의 박편을 제작하여 편광현미경 관찰을 하였다. 고자기학적 연구를 위해 채취된 시료들을 직경 2.54 cm, 높이 2.3 cm의 원주형 시편으로 제작하였다. 대자율 비등방성 측정작업은 철근건물로부터 격리된 목조건물에서 Molspin Minispin 대자율 측정기를 사용하여 자기세척실험 이전에 실시하였다. 화강암과 포획암 시편들의 잔류자기 안정성 검토와 성분분리를 위하여 Molspin AC demagnetiser를 사용하여 교류자기세척실험을 실시하였다. 각 시편의 잔류자기 측정에는 Molspin rock magnetometer를 사용하였다.

지질개요 및 각섬석-흑운모 화강암의 암석기재

연구지역은 경상분지 남부의 유천소분지 중앙부로부터 남서쪽으로 약간 치우친 곳으로, 이곳에는 백악기 유천층군의 화산암류와 이들을 관입하고 있는 관입암류가 분포한다 (Fig. 1). 화산암류는 하부로부터 안산암질 용암류 (밀양안산암)와 유문암질 응회암 (원동응회암)으로 구성되어 있으며, 유문암질 응회암은 응회질 퇴적암 및 화산암으로 구성된 소위 화체리층에 의해 정합적으로 피복된다 (황상구, 1998). 관입암류로는 석영반암, 세립질 화강섬록암, 각섬석-흑운모 화강암과 규장암이 있다. 황상구 (1998)에 의하면 포획암을 다량 함유하고있는 각섬석-흑운모 화강암은 원동칼데라 함

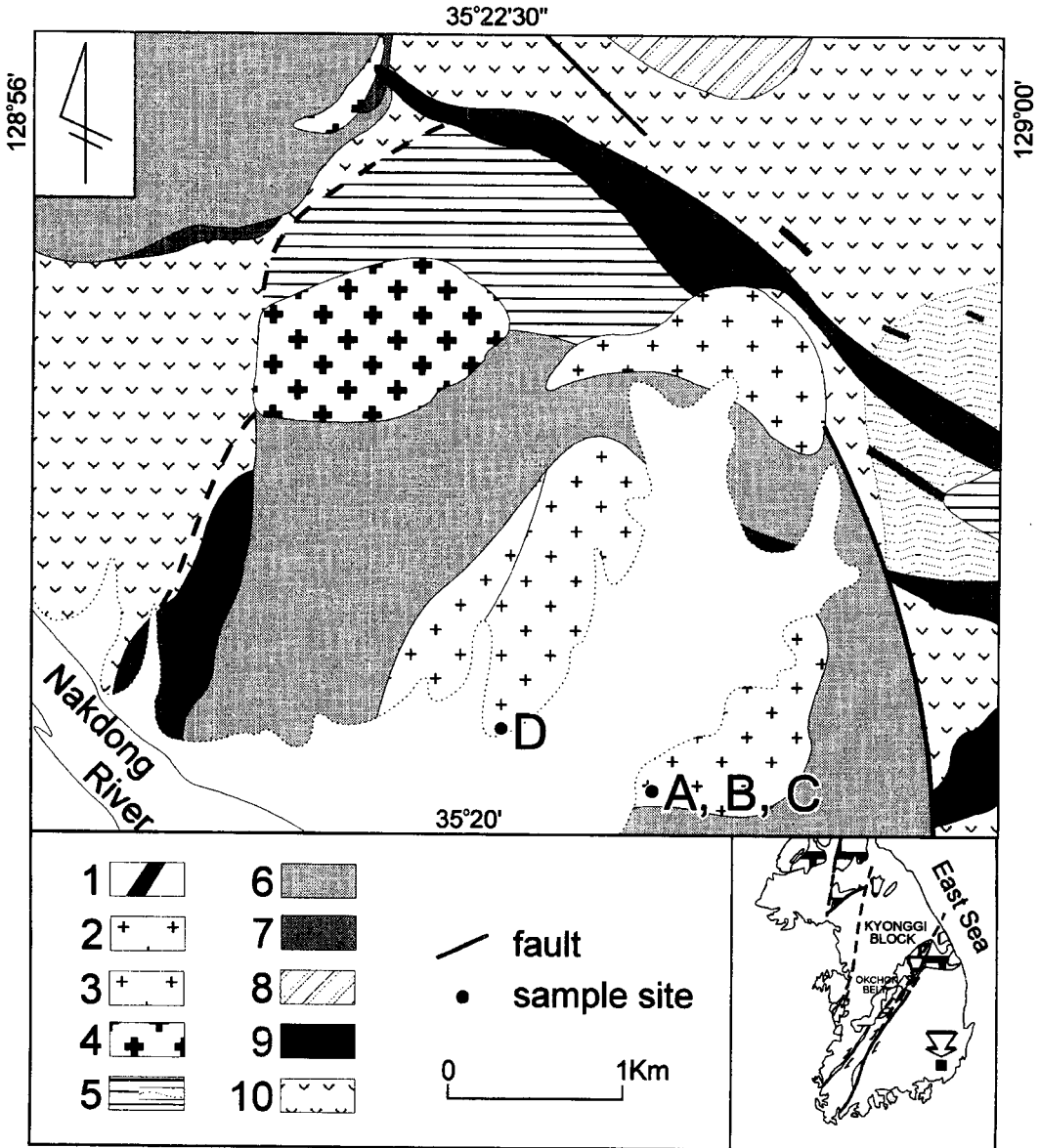


Fig. 1. Geologic map and sample sites of the Wondong area. 1. quartz porphyry, 2. hornblende biotite granite, 3. fine-grained granodiorite, 4. trachyte porphyry, 5. Hwajeri formation, 6. rhyolitic ash flow tuff, 7. rhyolitic fallout tuff, 8. Yangsan tuff, 9. Feldspar porphyry, 10. Chusasan andesitic rocks.

물 후에 마그마상승에 의해 형성된 소생 관입체 (resurgent intrusion)이며, 주변의 화산암류를 관입하였다.

각섬석-흑운모 화강암은 신선한 면에서 회백색을 띠며 대부분 등립질로서, 중립질이나 드물게 사장석반정을 가지며 반상조직을 보이기도 한다. 본 암은 주로 사장석, 석영, 정장석, 각섬석으로 구성되어 있고 미량

의 흑운모를 포함하고 있다 (Table 2). 사장석은 암석의 약 52%를 차지하며 크기는 대부분 1~2 mm이다. 이들은 자형 내지 반자형으로 나타나며, 누대구조를 보이는 경우가 많다. 사장석은 풍화 또는 변질을 받아 대부분 점토광물화 되었으며 일부 산점상으로 녹염석으로 교대되거나 견운모화 된 것도 있다. 석영과 정장석은 다른 결정들 사이를 채우며 타형으로 나타나고,

Table 2. Mode analyses (in vol. %) of host granite and enclaves.

Mineral	Host granite	Enclave
Plagioclase	52.1	64.9
Quartz	20.3	4.0
K-Feldspar	14.4	2.5
Amphibole	3.5	17.3
Opaques	2.1	5.7
Biotite	0.5	0
2nd. Mineral	7.0	5.4

종종 미문상 (micrographic) 조직을 보인다. 정장석의 결정은 대부분 변질작용을 받아 점토광물화 되었다. 각섬석은 암석의 3.5%를 차지하며 녹색색을 띤다. 대부분 자형의 결정으로 나타나고 쌍정을 보이기도 한다. 각섬석은 크기가 다양하며 침상으로 나타나는 것들은 길이가 보통 2~3 mm이며 최고 7 mm에 달하는 것도 있다. 변질이 심한 암석에서는 각섬석이 부분적 또는 전체적으로 녹니석 또는 녹염석으로 나타난다. 흑운모는 1% 미만이며, 대부분 녹니석으로 변질받았다. 부성분 광물로는 불투명광물, 저어콘, 인회석 등이 나타난다. 2차광물로는 녹니석이 주로 나타난다. 본암의 모드 분석치를 Q-A-P 삼각도에 도시하여 보면 화강섬록암에 해당한다.

포획암의 야외산상 및 암석기재

각섬석-흑운모 화강암에 나타나는 암청색 포획암들은 각섬석-흑운모 화강암의 동쪽 암체의 경계부근에 집중적으로 나타나며 서쪽 암체에서는 드물다. 이들 포획암은 화강암체 주위에 나타나는 안산암과 외관상 매우 유사하여 외래 암편 기원의 포획암으로 생각되어 왔으나 (황상구 등, 1997), 일반적으로 나타나는 외래 암편과는 달리 각이 지지 않고 둥글거나 매우 불규칙한 형태를 보이며, 길게 늘어나 있는 것이 많다.

포획암은 비반상 (aphyric), 세립질이고, 치밀하며, 노두에서 모암과는 뚜렷한 경계를 보인다. 포획암의 크기는 매우 다양하여 장축의 길이가 약 10 cm인 것에서 서부터 최고 1 m 이상인 것까지 나타나, 보통 수십 cm 정도이다 (Fig. 2A). 형태도 매우 불규칙하고 다양하나 배개 (pillow) 모양으로 길게 늘어진 것들이 많고 대부분 가장자리가 요철을 보인다. 길게 늘어진 것들은 길이/폭 비가 2에서 최고 10 정도까지 된다 (Fig. 2B). 대부분의 포획암은 담색 또는 흑색을 띠는 장경 2 내지 25 mm의 원형 또는 달갈형의 행인상 물질은

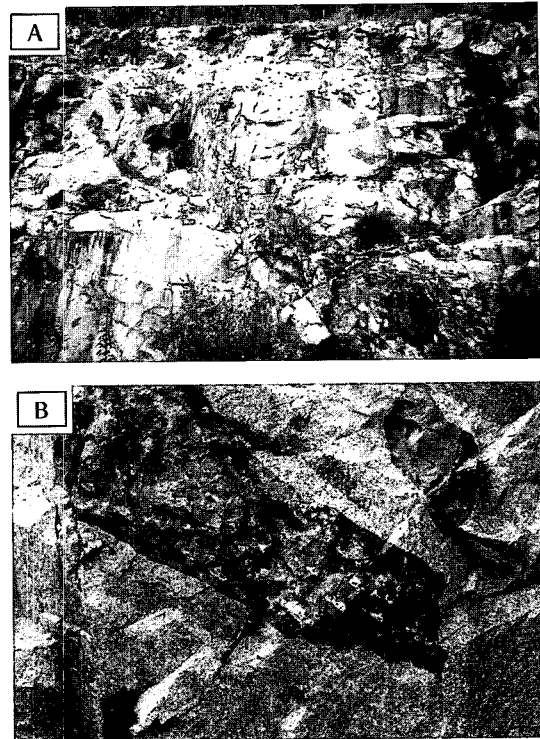


Fig. 2. A; Photograph of enclaves and host granite in outcrops. B; Photograph showing an elongated shape of enclave.

포획하고 있다. 이들 행인상 물질은 석영, 정장석, 녹니석 등으로 구성되어 있는데, 대부분은 가장자리가 1 mm 정도 두께의 K-장석 테로 둘러져 있으며, 그 안에 석영과 녹니석이 함께 들어 있거나 또는 한가지 광물만 들어있다. 염기성 포획암은 이들 행인상 물질의 분포밀도에 따라 동심원상의 대상 구조 (zonal structure)를 보이기도 한다. 즉, 행인상물질이 거의 없는 부분은 암청색을 띠고 치밀한 반면에, 행인상물질이 밀집되어 나타나는 부분은 황녹색을 띠는 경향이 있다. 황녹색을 띠는 이유는 대부분의 각섬석이 녹니석으로 바뀌었고 장석도 변질되어 점토화 되었기 때문이다. 포획암중에는 모암 (host rock)인 각섬석-흑운모 화강암의 페그마타이트 암편을 내부에 포획하고 있는 것도 있다. 화강암 암편의 크기는 최고 15 cm 정도이다.

경하관찰에 의하면, 포획암은 모암과 같은 종류의 광물로 구성되어 있으나, 모암보다 세립이며, 각섬석, 사장석, 불투명광물과 같은 염기성 광물의 양은 모암보다 훨씬 많고 석영과 정장석 같은 산성 광물의 양은 모암보다 적다 (Table 2). 그리고 포획암에 나타나는 초기정출 광물들 즉, 사장석과 각섬석은 길게 늘어나

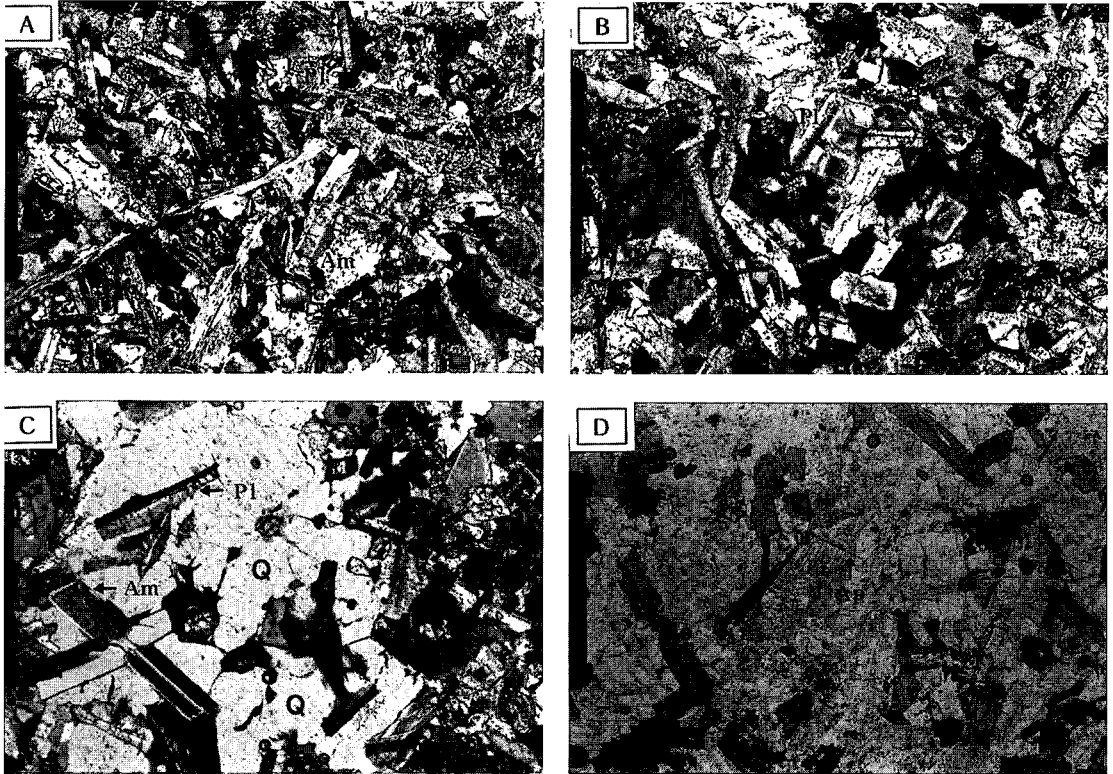


Fig. 3. Microtextures of an enclave. Scale bars indicate 1mm. A; Photomicrograph of an enclave showing lath-shaped plagioclase (Pl) crystals and acicular amphiboles (Am). B; Photomicrograph of an enclave including zoned plagioclase crystals. C; Photomicrograph of an enclave showing poikilitic texture of quartz (Q) phenocryst containing fine-grained plagioclase and amphibole. D; Photomicrograph of an enclave including acicular apatite (Ap).

있는 것이 특징이다. 포획암은 뚜렷한 화성암의 조직을 나타낸다. 사장석은 모암의 것과는 달리 대부분 길다란 래스 (lath) 형태로 나타나며, 길이와 너비의 비가 5 이상인 것이 많다 (Fig. 3A). 신장된 사장석 래스의 길이는 1mm 이하이며 대부분 0.7~0.9mm 범위에 속하고, 배열에 있어서 특별한 방향성을 보이지 않는다. 풍화가 된 암석에서는 특징적으로 사장석 래스의 가운데 부분만이 길다랗게 변질을 받아 있다. 드물게 나타나는 비교적 큰 정방형에 가까운 사장석들은 흔히 누대구조 (zoning)를 보여준다 (Fig. 3B). 각섬석은 녹갈색을 띠며, 반자형 내지 타형의 결정으로 나타나는데, 칼 모양으로 긴 것들이 많으며 (Fig. 3A), 일부는 쌍정을 보이기도 한다. 각섬석의 크기는 다양하며 대부분 0.1mm에서 0.8mm 사이에 해당하며, 칼 형태의 긴 것들은 1mm를 넘는 것도 있다. 석영과 정장석은 다른 광물들 사이를 채우며 타형으로 나타나는데, 석영은 초기정출 광물인 각섬석과 사장석의 미립을 포함하여 포이킬리틱 (poikilitic) 조직을 보이기도 한다

(Fig. 3C). 정장석의 양은 2.5% 정도로서 아주 적다. 부성분 광물로는 인회석, 저어콘, 불투명광물 등이 나타나며 인회석은 침상으로 나타난다 (Fig. 3D). 미립의 불투명광물들은 특징적으로 각섬석과 함께 또는 각섬석 주위에 나타난다. 포획암의 모드 분석치를 Q-A-P 삼각도에 도시하면 섬록암에 해당한다.

대자를 비등방성 연구

암석의 대자를 비등방성 (AMS: anisotropy of magnetic susceptibility) 연구는 자기적 선구조 (magnetic lineation)와 자기적 엽리구조 (magnetic foliation)를 인식해내고 이로부터 고수류 (palaeocurrent)와 고응력장 (palaeostress field)의 작용방향을 알아내며, 또한 그들 응력의 시대적인 선후 관계를 구분해 내는 간편하고 효과적인 방법 중의 하나이다 (Hrouda, 1982; 김인수, 1990; Tarling and Hrouda, 1993; 김성욱 등, 1997; 최은경 등, 1998).

대자율 비등방성 종류의 결정

암석에 외부자기장 **H**를 가하면 유도자기 **M**이 생성되는데 그 관계는 $M=kH$ 로 표시된다. 여기서 **k**를 그 암석의 대자율 (volume magnetic susceptibility)이라고 한다. 암석의 대자율이 방향에 따라 다를 경우 그 암석은 자기적으로 비등방성 (magnetic anisotropy)을 띤다고 하며 자기적으로 비등방성인 암석은 자기적 선구조나 자기적 엽리구조 혹은 이들 모두를 가지게 된다. 암석이 자기적으로 비등방성의 경우 대자율(**k**)은 대칭형 이차텐서 (tensor of second order)가 되어 구조지질학이나 지질공학에서의 응력텐서(stress tensor)처럼 3×3 대칭행렬로써 표현된다. 이 비등방 텐서로부터 고유벡터(Eigen vector)와 고유값(Eigen value)을 계산하면 각 시편에 대한 세 개의 주 대자율축(k_1, k_2, k_3)($k_1 > k_2 > k_3$)의 방향과 크기가 결정된다. 이 세 주축은 크기의 순서에 따라 k_1, k_2, k_3 로 표기한다. 서로 수직인 대자율 주축의 상대적 크기는 대자율 비등방타원체의 모양을 결정하며 이로부터 자기적 엽리구조와 선구조가 판별된다 (Woodcock, 1977; Boas, 1983; Davis, 1986; 김인수, 1990). 즉, $k_1 > k_2 \approx k_3$ 인 경우에는 자기적 선구조 (magnetic lineation)를, $k_3 < k_1 \approx k_2$ 인 경우에는 자기적 엽리구조 (magnetic foliation)를 가진 것으로 판별된다.

대자율 비등방성의 크기 및 자기적 구조의 발달 정도를 표현하는 데는 여러 공식들이 알려져 있다. 본 연구에서는 대자율 비등방성의 크기 정도를 판별하는 기준으로써 Jelinek (1981)의 $P_j = \exp\sqrt{2[(\mu_1 - \mu_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_3 - \eta_m)^2]}$ (여기서, $\eta_1 = \ln k_1; \eta_2 = \ln k_2; \eta_3 = \ln k_3; \eta_m = \sqrt[3]{\eta_1 \eta_2 \eta_3}$)식을, 선구조와 엽리구조를 구분하는 수단으로써는 Jelinek (1981)과 Hrouda (1982)의 대자율 타원체의 모양지수 (shape parameter)식 $T = [2(\{\eta_2\} - \{\eta_3\}) / (\{\eta_1\} - \{\eta_3\})] - 1$, ($-1 \leq T \leq 1$)을 이용하였다. 각 시료채취 지점별의 우세한 자기적 구조를 판단하기 위해서는 각기 시편들에 대한 P_j 와 T 를 계산한 후 이들 모두를 하나의 T-P_j 다이어그램상에 도시 (plotting)하였다.

시편별의 계산치의 대다수가 T-P_j 다이어그램의 편장 (prolate)영역에 도시되면 그 노두에서는 흐름에 의한 선구조 (flow lineation)가 우세한 것으로 해석할 수 있으며 그 흐름의 방향은 k_1 방향이 된다. 반면 계산치의 대다수가 편원 (oblate)영역에 도시되면 그 노두에서는 지층이 형성시기에 상위 층의 하중이나 지구조적 응력에 의해서 엽리구조 (foliation)가 초래된 것

으로 해석되는데, 이때 작용된 힘의 방향은 엽리구조에 수직인 k_3 축 방향이다.

대자율 비등방성 연구결과

T-P_j 다이어그램에서 편원 (oblate)영역에 우세하게 도시되는 2개 지점 (B, C지점)은 자기적 엽리구조가 발달하며, 1개 지점 (A지점)은 편원 (oblate)한 영역과 편장 (prolate)한 영역에 도시되는 시편들의 수가 같고, 이는 자기적 선구조와 엽리구조가 대등한 것을 의미한다 (Fig. 4). 다른 노두의 1개 지점 (D지점)의 시편들은 모두 편장 (prolate)영역에 도시되어, 자기적 선구조가 우세함을 알 수 있다. T-P_j 다이어그램에서 시편들의 대자율비등방성의 정도 (degree of anisotropy, P_j)는 1.04 미만의 영역에 집중되어 있는데, 이것은 암석의 형성시기와 형성이후에 외력이 거의 작용하지 않았음을 나타낸다 (Fig. 4).

한편 3개 지점 (A, B, C지점)에서 채취된 화강암 시편들과 포획암의 시편들은 대자율 비등방성의 주축 (k_1, k_2, k_3) 방향이 서로 일치하고 있다 (Fig. 5). 만약 화강암 내에 포획된 대소의 포획암들이 완전히 고

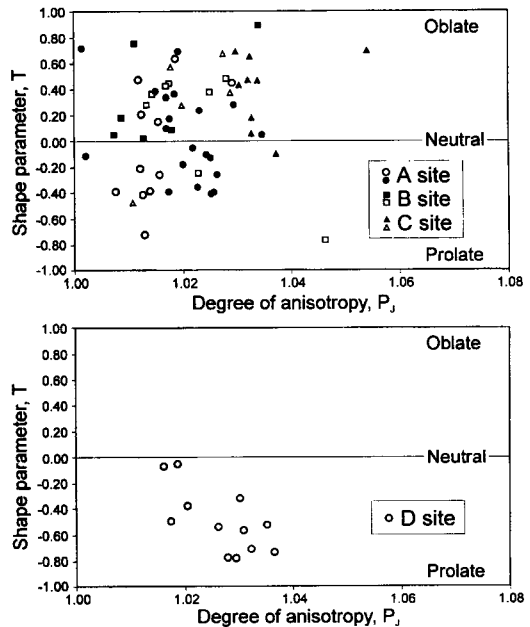


Fig. 4. Diagram of the magnitude of Shape parameter T (Jelinek, 1981; Hrouda, 1982) versus the degree of anisotropy P_j (Jelinek, 1982). White and black dots represent granite and mafic inclusion, respectively. D site shows the domination of prolate fabric samples.

Table 3. Summary of the study results (Site-mean Fisher statistics).

A) Site-mean axis direction of AMS

Site	Axis	Granite					Enclave				
		n	d(°)	i(°)	α_{95} (°)	k ₁	n	d(°)	i(°)	α_{95} (°)	k ₂
A	k ₁ -axis	11	19.9	-20.2	10.5	16.1	20	18.5	-23.5	7.8	16.2
	k ₂ -axis	11	353.2	62.3	14.4	8.6	20	316.1	48.8	10.2	9.4
	k ₃ -axis	11	105.1	11.1	14.4	8.7	20	94.3	39.7	6.9	20.4
B	k ₁ -axis	10	157.5	21.7	20.5	5.8	6	145.4	-3.2	19.1	9.0
	k ₂ -axis	10	277.8	61.2	26.2	3.6	6	227.5	44.5	20.6	7.7
	k ₃ -axis	10	55.1	25.1	23.4	4.5	6	51.9	44.2	20.4	6.5
C	k ₁ -axis	5	347.5	-13.7	34.0	3.4	9	4.4	-23.0	10.1	21.3
	k ₂ -axis	5	273.8	46.5	35.5	3.1	9	287.0	25.3	12.0	15.1
	k ₃ -axis	5	70.9	38.5	13.9	20.2	9	56.7	55.2	8.7	28.8

Note: n; number of data yielding site-mean axis direction, d(i); declination (inclination) of site-mean axis direction, α_{95} and k; statistical parameter (Fisher, 1953).

B) Site-mean ChRM direction

Site	Treat level	Granite					Enclave				
		n	d(°)	i(°)	α_{95} (°)	k ₁	n	d(°)	i(°)	α_{95} (°)	k ₂
A	20~90 mT	13	10.0	53.0	3.4	129.7	18	17.9	53.7	3.9	73.3
B	20~70 mT	8	20.3	56.0	6.7	53.9	5	14.0	54.5	5.9	111.6
C	25~60 mT	6	9.8	52.6	4.0	209.8	11	4.6	52.9	4.6	84.4
D	20~60 mT	11	7.4	51.0	4.2	103.4					

Note: n; number of data yielding site-mean ChRM direction, d(i); declination(inclination) of site-mean ChRM direction, α_{95} and k; statistical parameter (Fisher, 1953).

화된 후, 화강암에 포획된 외래암편 (xenolith)이라면, 포획암들에 포함된 자성광물의 배열방향은 분산되어 나타날 것이고, 대자울타원체의 주축방향도 분산될 것이다. 그러나 화강암과 포획암들에 대한 대자울 비등방성에 의한 자성광물의 배열은 동일하며, 세 개 지점 모두에서 포획암 시편들의 주축방향이 화강암 시편들보다 균집된 방향을 보여준다 (Table 3A, Fig. 5). 이와 같은 대자울 비등방성의 연구결과는 화강암을 형성한 화강암질 마그마와 포획암을 형성한 염기성 마그마가 거의 동시기에 결정화되었던 것으로 해석할 수 있다.

잔류자기 연구

연구방법

잔류자기 실험은 우선 각 지점별로 자화강도가 비교적 높은 1~2 개의 시편을 선택하여 최고 100 mT까지 10~15 단계의 교류자기 세척실험을 실시하였으며, 이를 바탕으로 안정 단일성분이 유리되는 외부자기장까지 10 단계 정도의 세척실험이 이루어지도록 하였다.

단계적 자기 세척실험에 의한 잔류자기의 크기와 방향의 변화는 벡터 다이어그램 (vector diagram,

Zijderveld diagram: Zijderveld, 1967)과 등각 투영도를 통해서 검토하였으며, 이로부터 이차성분의 분리와 세척실험의 최종단계까지 잔류한 안정된 단일 잔류자기성분을 결정하였다. 벡터다이어그램에서 원점을 향해 3단계 이상의 세척자료가 직선을 이루는 단일 잔류자기성분을 가진 시편들을 주성분 분석법 (PCA법: Kirschvink, 1980)에 적용하여 Fisher통계 (Fisher, 1953)처리함으로써 각 지점별 화강암과 포획암의 평균 특성잔류자기방향 (ChRM: characteristic remanent magnetization)을 계산하였다.

자기세척실험의 결과

화강암과 포획암들의 시편들은 각각 0.5~400 mA/m, 0.5~400 mA/m 범위의 자연잔류자기 (NRM)강도를 가지고 있었으며, 자기세척에서 불안정적인 반응을 보였던 일부의 시편들은 1 mA/m미만의 자기강도를 가진 것들로 대부분 풍화 또는 열수변질된 부분에서 채취된 것이었다.

대부분의 화강암 시편들에서 안정된 잔류자기성분을 추출할 수 있었다. 시편 A20A의 예는 자연잔류자기에서 북동방향의 편각과 50 내외의 북각을 정자화 성분

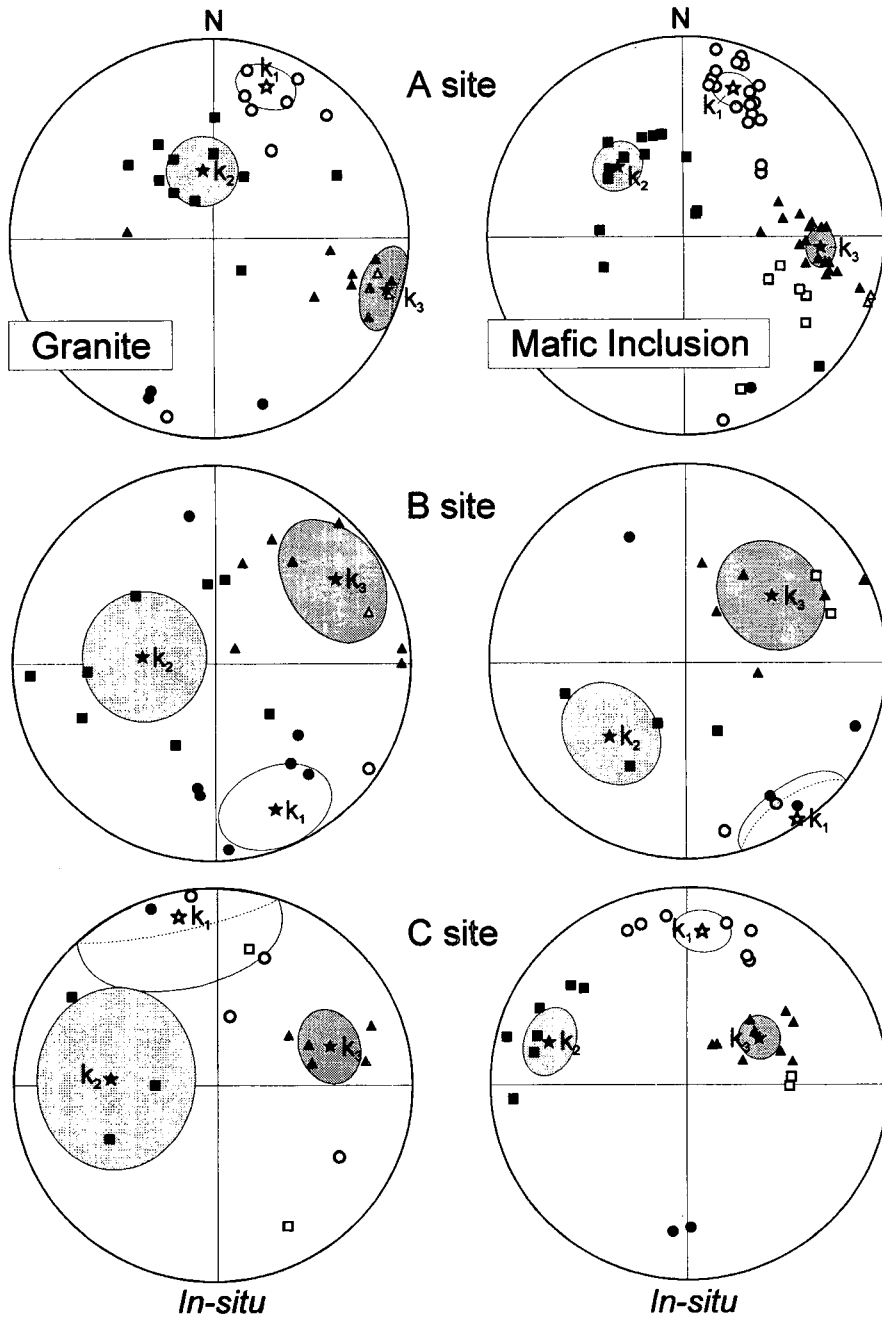


Fig. 5. The left (right) equal-area projection represent mean-direction of k_1 , k_2 , k_3 axis of granite (mafic inclusion). Black and White dots represent positive and negative inclination, respectively.

이 자기세척을 실시함에 따라 남북방향의 역자화 성분으로 방향의 변화가 나타나며 25 mT 이상에서 안정되고 있는 것을 보여준다. 시편 A22, B3A, D6A의 예는 서로 다른 방향으로 분산되어 있던 자연잔류자기

방향이 자기세척에 따라 한 방향으로 일치되는 결과를 보여주며, 그 방향은 시편 A22A에서 추출되었던 역자화 성분과 반평행한 방향이다 (Fig. 6).

원동지역 화강암의 특성잔류자기방향과 Fisher평균

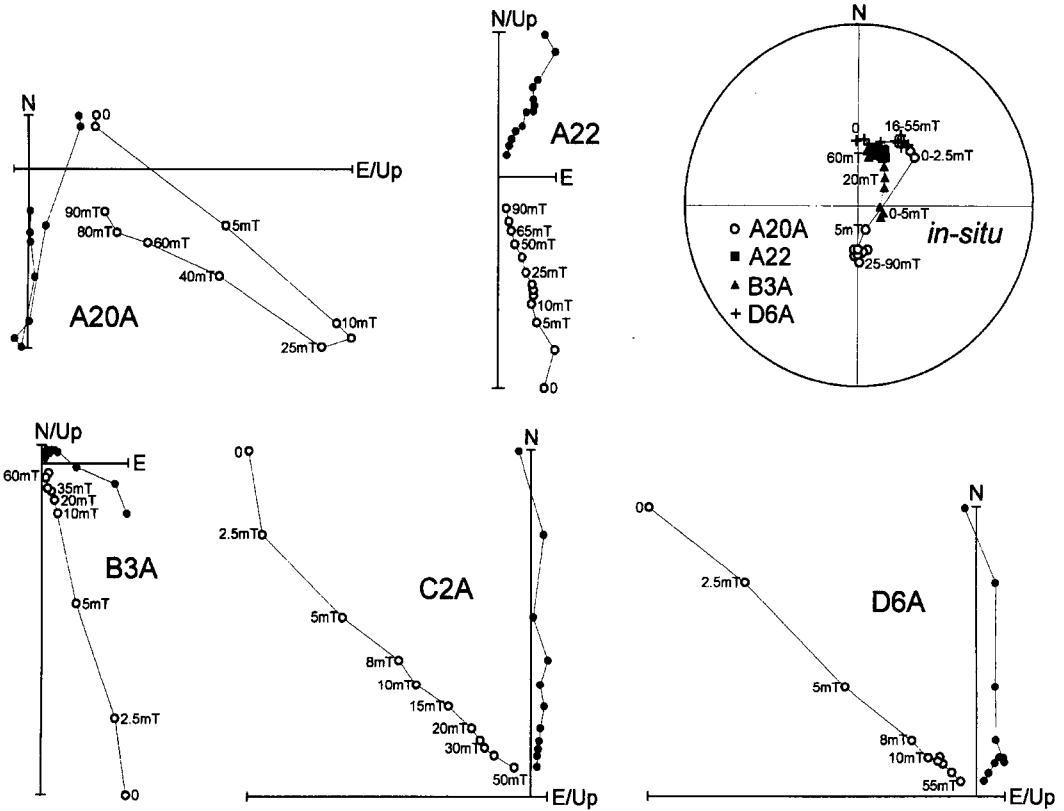


Fig. 6. Examples of AF demagnetization of the granite in the Wondong area. Vector (Zijderveld) diagrams are all depicted in in-situ coordinates with the solid (open) symbols projected onto the horizontal (vertical) plane. Equal-angle stereonet is drawn in geographic coordinates. Solid (open) symbols represent projections onto the lower (upper) hemisphere.

은 A site: $d=10.0^\circ$, $i=53.0^\circ$, $\alpha_{95}=3.4$, $k=129.7$, $n=13$, B site: $d=20.3^\circ$, $i=56.0^\circ$, $\alpha_{95}=6.7$, $k=53.9$, $n=8$, C site: $d=9.8^\circ$, $i=52.6^\circ$, $\alpha_{95}=4.0$, $k=209.8$, $n=6$, D site: $d=7.4^\circ$, $i=51.0^\circ$, $\alpha_{95}=4.2$, $k=103.4$, $n=11$ 이다 (Table 3B). 화강암 시편들의 잔류자기는 정자화와 역자화성분이 대등하게 분포한다. 이것은 암석의 형성이 정자화와 역자화의 균등혼합기 동안 이루어졌음을 지시한다 (Fig. 8a). 한편 A, B, C지점과 지역적인 거리를 두고 있는 D지점의 특성잔류자기 방향이 다른 세 지점의 것과 일치되고 있는 것으로 보아 두 화강암체 사이에 지층의 경동은 없었던 것으로 판단된다 (Fig. 8c).

포획암의 경우도 화강암과 유사한 세척반응을 보였다. 시편 A13A (■표시), B5B (▲표시)의 예는 90% 이상의 잔류자기가 세척되는 동안 현재 자장과 유사한 정자화 성분만이 유리되는 것을 보여주며, 시편 A5B, C4B의 예는 초기 분산된 방향이 세척에 따라 대원케

적의 방향변화를 나타내며, A13A, B5B시편에서 보여주는 정자화성분과 반평행한 역자화성분을 지시한다 (Fig. 7).

원동지역 화강암 내에 포획된 염기성 포획암의 특성 잔류자기방향과 Fisher평균은 A site: $d=17.9^\circ$, $i=53.7^\circ$, $\alpha_{95}=3.9$, $k=73.3$, $n=18$, B site: $d=14.0^\circ$, $i=54.5^\circ$, $\alpha_{95}=5.9$, $k=111.6$, $n=5$, C site: $d=4.6^\circ$, $i=52.9^\circ$, $\alpha_{95}=4.6$, $k=84.4$, $n=11$ 이다 (Table 3B). 포획암 시편들의 잔류자기도 화강암과 마찬가지로 정자화와 역자화가 같이 분포하며, A, B, C지점의 방향이 일치되고 있다 (Fig. 8b, d). 한편 화강암과 포획암의 잔류자기 방향을 비교하여도 서로 일치하고 있는 것을 볼 수 있는데 이것은 화강암 내에 분포하는 포획암이 화강암과 거의 동시기에 결정화 되었음을 지시하는 것이다.

화강암의 잔류자기 방향과 포획암의 잔류자기 방향이 같은 사실로써 포획암이 화강암의 주변에서 유래된

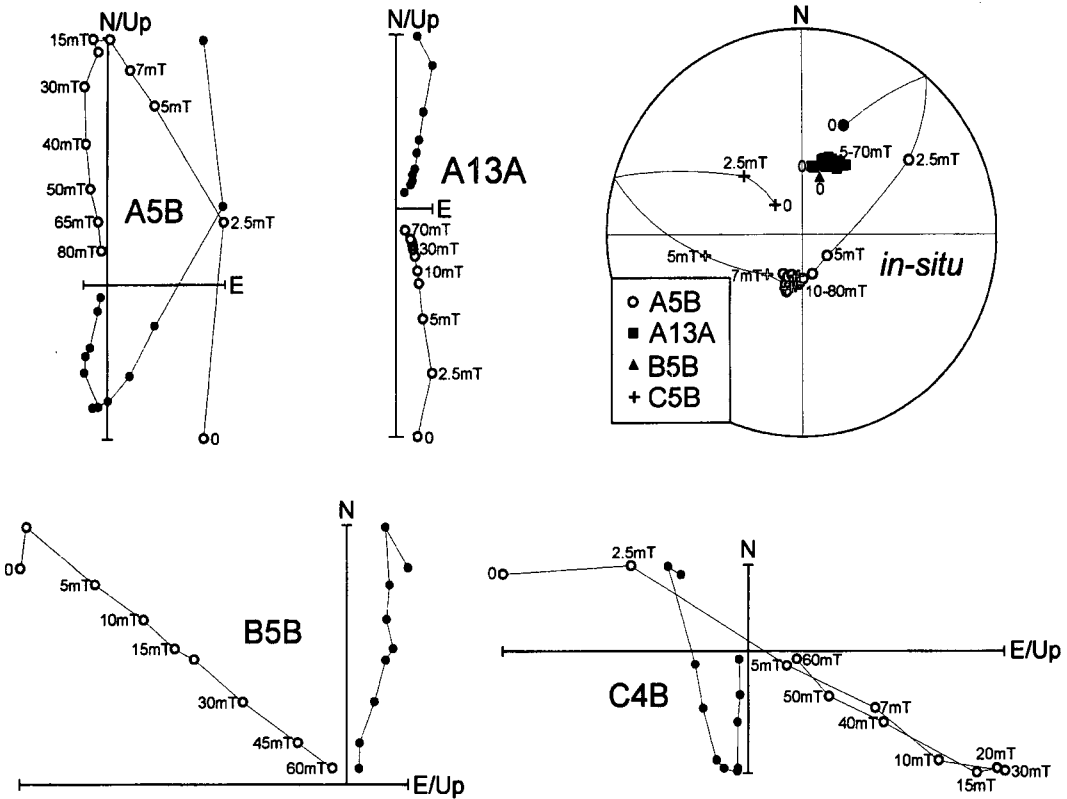


Fig. 7. Examples of AF demagnetization of the mafic inclusion in the Wondong area. Conventions are the same as in Fig. 6.

외래암편 (xenolith)으로 보기는 어려우나, 포획암이 화강암질 마그마에 의해 재자화 되었을 가능성을 배제할 수는 없다.

토의 및 결론

본 역에 나타나는 포획암은 외래암편 (xenolith)보다는 염기성 포획체 (mafic inclusion)의 특징들을 잘 보여준다. 외래암편은 흔히 각진 형태를 가지며, 강한 접촉변성작용에 기인하는 재결정작용의 조직을 보이는데 반해, 본 역의 포획암은 이러한 특징들을 보이지 않는다. 반면에 본 역의 포획암은 각이 지지않고 둥근 (rounded) 형태를 많이 보이며, 화성기원 (igneous origin)의 조직을 보여준다. 또한 이들은 모암보다 세립이며 어두운 색을 띠고, 모암과 비슷한 광물조합을 보이며, 침상의 인회석을 포함하고 있어서 microgranitoid enclave (Vernon, 1983)의 특징과 잘 일치하고 있다.

본 역의 포획암이 화성기원임을 지지하는 증거로 다음의 조직적 특징들을 들 수 있다. 첫째, 길게 늘어난 형태의 사장석 래스, 긴 칼 모양의 각섬석, 그리고 침

상의 인회석; 이들 초기정출 광물들이 길게 늘어난 형태를 보이는 것은 화강암보다 염기성을 띠는 마그마가 그보다 저온 상태에 있는 화강암질 마그마 내에 포획되면서 포획 초기에 급랭 (quenching)하였기 때문이다. 길게 늘어난 입자 형태는 마그마가 급랭되었을 때 나타나는 전형적인 급랭조직 (quenching texture)의 하나이다. 이들 광물이 세립으로 나타나는 것도 마그마가 급랭되었음을 나타낸다. 둘째, 초기정출 광물을 포함하고 있는 포이킬리틱 조직의 석영; 이것은 석영이 마그마로부터 초기 광물이 정출된 후에 후기까지 남은 잔류 멜트에서 형성되었음을 지시한다. 셋째, 정방형 사장석 입자에서 관찰되는 누대구조; 누대구조는 사장석이 멜트로부터 성장하였음을 반영한다. 이러한 조직적 특징 외에도, 본 역에서 흔히 보이는 포획암의 길게 늘어난 베개 또는 타원형 형태 역시 포획암이 마그마가 유동한 후에 고결되었음을 시사한다. 이외에도 포획암이 일차광물 (primary mineral)로만 구성되어 있다는 사실과 포획암 내에 모암의 암편이 들어 있다는 사실은 포획암이 마그마로부터 만들어졌음을 반영한다. 이상에서 설명된 포획암의 형태 및 조직적 특징과 모

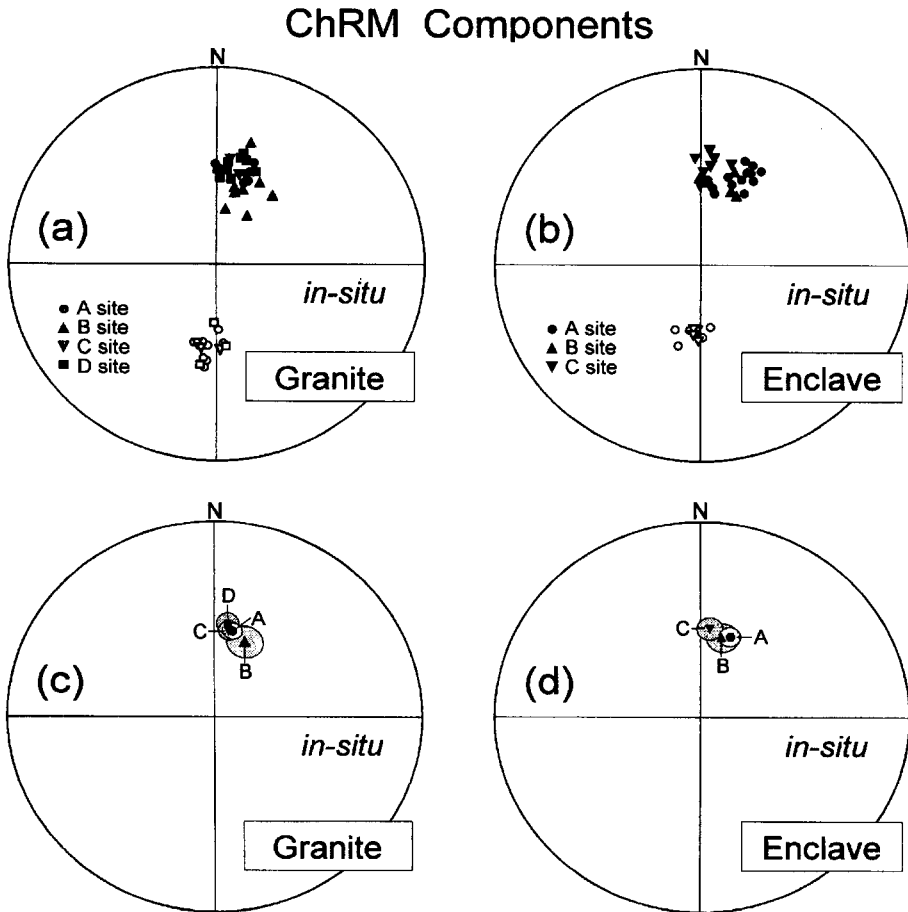


Fig. 8. Left (right) equal-area projection represent Characteristic remanent magnetizations (ChRM) of the host granite (mafic inclusion) in the Wondong area. Equal-area stereonet is drawn in geographic coordinates. Solid (open) symbols represent projections onto the lower (upper) hemisphere.

드분석결과는 본 역의 포획암이 화강암질 마그마 내에 포획된, 화강암보다 염기성을 띠는 마그마의 덩어리들 (globules)로부터 형성되었음을 나타낸다. 그러나 본 역의 포획암에는 마그마혼합 (magma mixing)에 의해 형성된 포획암에서 흔히 나타나는 K-장석 거정 (megacryst) 또는 quartz ocelli와 같은 xenocryst가 전혀 나타나지 않는 것으로 보아 화강암질 마그마와 포획암을 형성시킨 염기성 마그마 사이에 혼합 (mixing)은 없었고 단지 불균질혼합 (mingling)만 있었던 것으로 보인다.

Vernon (1983)은 microgranitoid enclave의 광물들과 화강암 모암 내에 있는 동일 광물들의 화학성분이 매우 유사한 것으로 보아 마그마가 천천히 냉각하는 냉각작용의 후기 단계에 enclave 마그마와 화강암질 마그마

사이에 어느 정도의 상호반응이 있었을 것으로 추정하였다. 그러나 고체상태로 포획된 외래암편과 화강암질 마그마가 반응하여 화성암의 조직을 갖는 염기성 포획체와 같은 포획암을 만들기는 어렵다고 주장하였다. 본 역의 포획암에서 얻어진 고자기 자료 역시 고체상태의 외래암편이 화강암질 마그마와 반응하여 현재의 포획암이 만들어졌을 가능성은 희박하다는 것을 보여준다. 즉, 화강암과 포획암의 대자율 비등방성에 의한 자성광물의 배열이 화강암과 포획암에서 동일한 것을 지시하며, 잔류자기방향이 서로 일치하는 것은 화강암과 포획암이 각각의 마그마로부터 거의 동시에 결정화 되었음을 지시한다. 이와 같이 암석기재학적 및 고자기학적 연구결과는 포획암의 기원이 미고결 상태에서 화강암질 마그마 내에 포획된 염기성의 마그마 덩어리들 (globules)이

고, 화강암질 마그마와 포획된 염기성의 마그마는 거의 동시에 결정화 되었음을 시사한다.

마지막으로 포획암을 형성시킨 마그마의 기원에 대하여 고찰해 본다. Vernon (1983)은 microgranitoid enclave 마그마의 기원으로 여러 가지를 제안한 바 있다. 본 역에 나타나는 포획암이 화강암의 절개지 일부에 집중되어 나타나나 절개지가 아닌 곳까지 추적하여 연결하면 거의 남북방향의 암맥상 분포를 보이고 있다. 이러한 분포양상과 덩어리 형태의 포획암이 밀집되어 나타남은 본 역에 나타나는 포획암의 기원이 Vernon (1983)이 enclave의 기원으로 제안한 것 중의 하나인 synplutonic dike와 매우 유사하다. 즉, 화강암질 마그마에 관입한 염기성 암맥 (synplutonic dike)의 마그마가 포획암의 기원으로 사료된다. Fernandez and Barbarin (1991)은 화강암질 마그마 내에 보다 염기성의 마그마가 주입될 때, 화강암질 마그마의 결정화 정도에 따라 주입된 마그마가 다양한 분산형태를 보인다고 하였다. 이에 의하면 본 역의 포획암은 화강암질 마그마의 결정화 단계중 세 번째 단계에 해당하는 시기에 주입되어 나타나는 초기 열극을 따른 층진 (김종선 등, 1998)의 양상으로 판단된다. 종합하면 본 역의 포획암은 결정화가 어느 정도 진행된 화강암질 마그마 내에 미고결상태에서 암맥형태로 관입한 보다 염기성의 마그마가 덩어리 형태로 분산되면서 고결되어 형성된 것이다.

참고문헌

- 김성욱, 최은경, 정연규, 김인수 (1997) 옥천대에 대한 고자기 연구: 태백지역에서의 대자율 비등방성과 지구조적 응력장. *자원환경지질*, 30, 613-624.
- 김인수 (1990) 포항이남 제3기 분지암석의 자기 비등방성과 지구조적 응력장. *광산지질*, 23, 59-71.
- 김재영 (1991) 경남 언양일대의 언양화강암체에 관한 암석학적 연구. 부산대학교, 석사학위논문, 38p.
- 김종선, 이준동, 윤성호 (1998) 거제도 화강암질암의 마그마 불균질 혼합 증거: 1. 그 기재적 특성. *지질학회지*, 34, 105-121.
- 진미정 (1998) 양산시 원호산 남부의 화강암질암체에 대한 암석학적 연구. 부산대학교, 석사학위논문, 61p.
- 차문성, 김정진, 윤선 (1972) 부산시 일원 (언양-동래지역)의 화성활동과 광화작용에 관한 연구. *광산지질*, 5, 151-162.
- 최보심 (1998) 울산 방어진일대 화강암의 암석학적 연구. 부산대학교, 석사학위논문, 74p.
- 최은경, 김성욱, 김인수 (1998) 옥천대에 대한 고자기 연구: 북동옥천대에서의 대자율 비등방성과 지구조적 응력장. *한국지구과학회지*, 19, 9-21.
- 황상구 (1998) 양산서부 원동칼데라의 진화와 유형, *지질학회지*, 34, 20-32.
- 황상구, 이기동, 김상욱, 이재영, 이윤종 (1997) 원동 칼데라의 화산작용과 화산과정, *암석학회지*, 6, 96-110.
- 황성규 (1996) 경남 밀양군 산내 중석광산 부근의 지질과 유체포유물 연구. 부산대학교, 석사학위논문, 87p.
- Bateman, P.C. (1983) A summary of critical relations in the central part of the Sierra Nevada Batholith, California, USA. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 159, 241-254.
- Bateman, P.C. and Chappell, B.W. (1979) Crystallization, fractionation, and solidification of the Tuolumne Intrusive Series, Yosemite National Park, California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 90, 465-482.
- Boas, M.L. (1983) *Mathematical Methods in the Physical Sciences*. 2nd ed., John Wiley & Sons, 793p.
- Davis, J.C. (1986) *Statistics and Data Analysis in Geology*. 2nd ed., John Wiley & Sons, 646p.
- Didier, J. (1973) Granites and Their enclave: The Bearing of Enclaves on the Origin of Granites. *Development in Petrology*, 3. Elsevier, Amsterdam, 393p.
- Didier, J. and Barbarin, B. (1991) *Enclaves and Granite Petrology*, Developments in Petrology, 13. Elsevier, Amsterdam, 625p.
- Eichelberger, J.C. (1980) Vesiculation of mafic magma during replenishment of silicic magma reservoirs. *Nature*, 288, 446-450.
- Fernandez, A.N. and Barbarin, B. (1991) Relative rheology of coeval mafic and felsic magmas: Nature of resulting interaction processes and shape and mineral fabrics of mafic microgranular enclaves. In: Didier, J. and Barbarin, B. (eds.), *Enclaves and Granite Petrology*. Elsevier, Amsterdam, 263-275.
- Fisher, R.A. (1953) Dispersion on a sphere. *Proc. R. Soc. London*, A217, 295-305.
- Fourcade, S. and All gre, C.J. (1981) Trace element behavior in granite genesis: a case study. The calc-alkaline plutonic association from the Qu rigut complex (Pyrenees, France). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 76, 177-195.
- Hrouda, F. (1982) Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophys. Surv.*, 5, 37-82.
- Jelinek, V. (1981) Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophys.*, 79, T63-T67.
- Kirschvink, J.L. (1980) The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 62, 699-718.
- 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. thesis, the University of Tokyo, Tokyo, Japan, 197p.
- Noyes, H.J., Wones, D.R. and Frey, F.A. (1983) A tale of two plutons: petrographic and mineralogic constraints on the petrogenesis of the Red Lake and Eagle Peak plutons, central Sierra Nevada California. *J. Geol.*, 91, 353-379.
- Reid, J.B., Evans, O.C. and Fates, D.G. (1983) Magma mixing in granitic rocks of the central Sierra Nevada, California. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 66, 243-261.
- Tindle, A.G. and Pearce, J.A. (1983) Assimilation and partial melting of continental crust: evidence from the mineralogy and geochemistry of autoliths and xenoliths. *Lithos*, 16, 185-202.

- Vernon, R.H. (1983) Restite, xenoliths and microgranitoid enclaves in granites. *J. Proc. R. Soc. N.S.W.*, 116, 77-103.
- Vernon, R.H. (1984) Microgranitoid enclave in granites-globules of hybrid magma quenched in plutonic environment, *Nature*, 309, 438-439.
- Vogel T.A., Younker, L.W., Wilband, J.T. and Kampmueller, E. (1984) Magma mixing: the Marsco suite, Isle of Skye, Scotland. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 87, 231-241
- White, A.J.R. and Chappell, B.W. (1977) Ultrametamorphism and granitoid genesis. *Tectonophysics*, 43, 7-22.
- Woodcock, N. H. (1977) Specification of fabric shapes using an eigenvalue method. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 88, 1231-1236.
- Zijderveld, J.D.A. (1967) A.C. demagnetization of rocks: Analysis of result. In: Collinson. D.W., Creer, K.M. and Runcorn, S.K. (Eds.), *Methods in Palaeomagnetism*. Elsevier, 254-286.

1999년 3월 2일 원고접수, 1999년 6월 5일 게재승인.