

경상분지 남서부 와룡산 일대에 분포하는 백악기 화강암류에 관한 암석학적 연구: 마그마 불균질 혼합에 의한 화강암류의 조성변화

김건기 · 김종선 · 좌용주*

경상대학교 지구환경과학과

Petrological Study of Cretaceous Granitic Rocks in the Waryongsan Area, Southwestern Gyeongsang Basin: Compositional Change of Granitic Rocks by Magma Mingling

Kun-Ki Kim, Jong-Sun Kim and Yong-Joo Jwa*

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

요약: 와룡산 일대에 암주상으로 분포하는 백악기 화강암류는 고도에 따른 수직적인 조성변화를 보인다. 이들 화강암류 내에는 다양한 크기와 형태의 염기성 미립 포유암들이 산출되며, 과냉각대, 망토조직, 그리고 백베닝 등과 같은 마그마 혼합의 뚜렷한 증거들이 나타난다. 화강암류는 암석기재적 특징과 모드분석결과로부터 반상화강암, 반상화강섬록암, 그리고 세립질화강암으로 세분되며, 염기성 미립 포유암은 석영섬록암, 석영몬조섬록암, 그리고 토날라이트 조성을 가진다. 화강암류 내에 염기성 미립 포유암의 분포 면적비는 반상화강암이 10~15%, 세립질화강암이 약 20%, 그리고 반상화강섬록암이 약 50% 정도로 반상화강섬록암에 집중되어 분포한다. 화강암류 주성분 원소 분석결과를 하거변화도에 도시해 보면 반상화강섬록암에서 세립질화강암으로 가면서 선적인 변화경향을 보이며, SiO₂ 함량은 61.2~72.0wt.%의 조성변화를 보이며, 반상화강섬록암은 평균 61.7wt.%, 반상화강암은 평균 68.6wt.%, 그리고 세립질화강암은 71.9wt.%의 조성을 가진다. 이와 같은 조성의 변화는 마그마 불균질 혼합에 의한 것으로 매픽 마그마의 양적인 비율에 따른 혼합 정도의 차이에 기인하는 것으로 생각된다. 매픽 마그마의 양이 많은 부분에서는 열적 평형에 빨리 도달하여 화학적 혼합에 의한 반상화강섬록암의 조성이 우세하고, 매픽 마그마의 양이 적은 부분은 기계적인 혼합에 의한 반상화강암과 세립질화강암의 조성이 우세한 것으로 고찰할 수 있다. 따라서 와룡산 일대 화강암류는 화강암질 마그마가 어느 정도 결정분화된 단계에서 보다 매픽한 마그마의 주입으로 인해 마그마 불균질 혼합이 발생하게 되었으며, 혼합된 두 마그마의 양적인 비율에 의해 화강암류의 조성이 변화된 것으로 판단된다.

주요어: 와룡산 화강암, 마그마 혼합과 불균질 혼합, 염기성 미립 포유암, 조성 변화

Abstract: Cretaceous granitic rocks in the Waryongsan area occur as a stock and show compositional changes with altitude. They include mafic microgranular enclaves (MME) with various sizes and types. The MMEs present clear evidence of magma mingling such as supercooling zone, mantling texture and back veining. The granitic rocks are divided into porphyritic granite, porphyritic granodiorite and fined-grained granite by their petrographic characteristics and modal compositions. The MMEs are discriminated to quartzdiorite, quartzmonzodiorite and tonalite. They have varying areal proportions in each granitic rock-type: 10~15% in the porphyritic granite, about 50% in the porphyritic granodiorite, and about 20% in the fined-grained granite. SiO₂ contents shows compositional change of 61.2~72.0wt.%. Mean SiO₂ contents have 61.7wt.% in the porphyritic granodiorite, 68.6wt.% in the porphyritic granite, and 71.9wt.% in the fined-grained granite, respectively. Major oxide contents of the granitic rocks linearly vary with SiO₂ contents from the porphyritic granodiorite to the fine-grained granite on Harker diagrams. Linear compositional variations seem to have been caused by differential degrees of mingling between mafic magma and host granite. Where larger amount of mafic magma was injected into the host granitic magma, the two magmas reached to thermal equilibrium more quickly and eventually chemical mixing occurred to

*Corresponding author: Tel. 82-51-751-6004, E-mail. jwayj@gsnu.ac.kr

produce the composition of the porphyritic granodiorite. On the other hand, less amount of injected mafic magma would have been responsible for mechanical mixing to produce the compositions of the porphyritic granite and the fined-grained granite. Therefore, it is considered that the granitic rocks in the Waryongsan area experienced magmas mingling resulting from the injection of more mafic magma into differentiating granitic magma, and that the compositional changes of the granitic rocks were ascribed to the degree of mingling between the two magmas.

Key words: granite, magma mixing and mingling, MME, compositional variation

서 론

경상분지에 분포하는 불국사 화강암류는 토날라이트부터 알칼리장석화강암까지 넓은 조성 범위를 가진다 (Jin *et al.*, 1982; 진명식, 1985, 1988). 이러한 불국사 화강암류의 넓은 조성 범위는 분별정출에 의한 마그마 분화작용으로 매픽 마그마에서 펠릭 마그마로 분화된 것으로 해석되어져 왔다. 하지만 최근 포유암(encalve)에 대한 연구에 있어서 엽기성 미립 포유암(mafic microgranular enclaves, MME)을 포함하는 화강암류는 성인적으로 마그마 혼합(magma mixing) 혹은 마그마 불균질 혼합(magma mingling) 산물로 보고하고 있다(김종선 외, 2000, 2004; 좌용주와 김진기, 2000; 진미정 외, 2000; Kim *et al.*, 2002; Choe and Jwa, 2004).

마그마 혼합 혹은 불균질 혼합은 일반적으로 펠릭 마그마 챔버 내에 보다 매찍한 마그마가 주입되어 일어나는 상호작용으로 마그마의 온도, 점성, 밀도 그리고 두 마그마의 상대적인 양적 차이 등에 의해 다양한 혼합의 양상이 나타나게 된다(Didier and Barbarin, 1991). 따라서 두 마그마의 물성 차이가 적을 경우 화학적인 혼합(chemical mixing)에 의해 혼성 마그마(hybrid magma)를 형성하게 되고, 그렇지 않을 경우 기계적 혼합(mechanical mixing)에 의해 불균질 혼합이 일어나 엽기성 미립 포유암이 산출된다(Hibbard, 1995; Poli *et al.*, 1996). 또한 두 마그마의 혼합 정도 차이에 의해 화강암류와 엽기성 미립 포유암의 조성이 다양하게 변화된다(Silva *et al.*, 2000).

와룡산 일대에 분포하는 화강암류에는 다양한 크기와 많은 양의 포유암들이 산출된다. 이들은 세립의 등립질로 화성기원의 조직을 가지며, 변성광물이 발견되지 않는다. 외형은 타원형으로 화강암류 전체에 분포한다. 포유암 암상은 독립된 암체로 발견되지 않으며, 포유암과 유사한 안산암질 용암은 반상조직으로 사장석 반정들이 일정한 배열성을 가지므로 포유암과는 조직적인 차이를 보인다. 포유암 내에는 사장석과 석영 반정들이 주로 함유되어 있는데, 이러한 반정들은 크기와 종류에 있어서 화강암류에서 관찰되는 광물과 비

슷할 뿐만 아니라 화강암류와의 경계부에 같이 접하면서 각섬석과 흑운모가 사장석 반정들을 둘러싼 망토조직(mantling texture)을 가진다. 화강암류와의 접촉부에서는 과냉각에 의한 세립질조직을 보이므로 화강암류보다 고온이었음을 지시한다. 따라서 화강암류 내에서 나타나는 포유암은 마그마 불균질 혼합에 의해 형성된 엽기성 미립 포유암이며, 화강암류의 조성에 따라 다양한 크기와 분포면적을 가진다.

본 연구에서는 화강암류의 암석기체특징과 엽기성 미립 포유암의 분포 면적비를 이용하여 화강암류에 대한 조성변화 원인을 고찰하고자 한다.

일반지질

연구지역은 경상남도 사천시 남동쪽의 사남면에 위치한 와룡산(臥龍山, 799 m)일대로 사천과 삼천포 1:50,000 지질도폭(최유구와 유병화, 1969; 지정만 외, 1983)에 해당하며, 암주상으로 분포한다. 하위로부터 경상누층군의 퇴적암류와 유천층군의 화산암류가 넓게 분포하며, 불국사 화강암류가 관입 분포한다(Fig. 1).

퇴적암류는 하양층군으로 하위로부터 칠곡층, 신라역암층, 함안층, 진동층이 분포한다. 칠곡층은 자색 세일 및 사질 세일로 구성되고, 상부로 갈수록 역의 양이 증가하여 신라역암층으로 전이된다. 신라역암층은 역암과 호층을 이루는 사암과 이암으로 구성되어 있다. 함안층은 신라역암층의 상부에 정합으로 퇴적된 층으로 회색, 자색, 녹색을 띠는 세일, 사질 세일, 사암으로 구성되어 있다. 진동층은 함안층 위에 정합으로 퇴적된 층으로 암상은 흑색 내지 회색의 세일 및 사질 세일로 구성되어 있다.

화산암류는 유천층군에 속하는 안산암류로 용암과 응회암으로 주변 퇴적암류를 피복하고 있으며, 와룡산 남쪽사면에서 화강암에 의해 관입되어져 있다. 극부적으로 암맥상으로 나타난다.

불국사 화강암류는 연구지역 중앙에 암주상으로 장경 5 km×단경 3 km로 노출되어 있으며, 주변 퇴적암류는 화강암체 주위에서 혼펠스화 되어있다. 그리고 화

강암류 내에는 다양한 크기와 양상으로 엽기성 미립 포유암이 산출된다.

암석기재

와룡산 일대 백악기 화강암류(Waryongsan granitic rocks)

와룡산 일대 백악기 화강암류는 연구지역 중앙에 암 주상으로 분포하며, 암석기재적 특징과 모드조성에 의하여 반상화강암, 반상화강섬록암, 세립질화강암으로 세분화 된다. 지형적으로 수직적인 조성변화를 보이는데 저지대에서는 반상화강암, 중간지대에서는 반상화강섬록암, 그리고 고지대에서는 세립질화강암이 소규모로 분포한다(Table 1, Fig. 1, 2). 그리고 이들 내에는 엽기성 미립 포유암이 다양한 크기와 면적비로 산출된다.

반상화강암은 와룡산 저지대에 주로 분포하며, 소규모로 고지대에서도 나타난다. 암색은 분홍색을 띠며, 입자크기는 중립질의 반상조적을 보인다. 현미경하에서 반정은 사장석, 석영, 그리고 각섬석으로 평균 41.4%의 함량비를 가지며, 석기는 석영, 정장석, 그리고 흑운모 등으로 평균 58.6%의 함량비를 가진다. 사장석은 자형 내지 반자형으로 크기는 1.0~5.5 mm 정도로 알바이트쌍정을 보이며, 부분적으로 흑운모와 각섬석에 의해 둘러싸여진 망토조적이 잘 나타난다(Fig. 3a). 석영은 타형으로 0.2~2.5 mm 정도의 크기로 직소광과 파동

소광을 하며, 정장석은 다형으로 0.2~0.7 mm 정도의 크기로 퍼사이트조적으로 석영과 함께 문상조적을 이루기도 한다. 각섬석은 1.5~4.0 mm 정도의 크기로 자형 혹은 침상으로 나타나며, 흑운모는 0.3~0.5 mm 정도의 크기로 반자형으로 부분적으로 녹니석화 되어있다. 모드 분석결과 문조화강암 조성을 가진다(Fig. 2).

반상화강섬록암은 와룡산 청룡사 계곡을 따라 중간지대에 주로 분포하며, 암색은 회백색을 띤다. 유색광물의 함량이 비교적 많으며, 입자크기는 중립질의 반상조적을 보인다. 현미경하에서 반정은 사장석, 석영, 그리고 각섬석으로 평균 47.9%의 함량비를 가지며, 석기는 석영, 정장석, 그리고 흑운모 등으로 평균 52.1%의 함량비를 가진다. 반정은 대부분 사장석, 석영, 그리고 각섬석이며, 석기는 석영, 흑운모, 정장석 등의 광물로 주를 이룬다. 사장석은 자형 내지 반자형으로 0.7~5.0 mm 정도의 크기로 알바이트쌍정과 누대구조가 잘 나타난다. 석영은 반자형 혹은 타형으로 0.2~2.0 mm 정도의 크기로 직소광과 파동소광을 보이며, 각섬석은 1.5~5.2 mm 정도의 크기로 자형 혹은 침상의 결정형태를 가진다. 흑운모는 0.3~1.5 mm 정도의 크기로 타형으로 나타나며, 부분적으로 녹니석화 되어있다. 모드 분석결과 화강섬록암 조성을 가진다(Fig. 2).

세립질화강암은 반상화강섬록암 내에 소규모로 분포하며, 암색은 분홍색으로 세립질의 반상조적을 나타낸다. 현미경하에서 반정은 사장석과 석영으로 평균 10.9%

Table 1. Modal compositions of granitic rocks and MMEs in the Waryongsan area.

Rock type	pg										
Sample	BC01	BC06	CY16	SD04	SD05	YJ02	YJ03	YJ05	YJ08	YJ09	pgd
Quartz	28.0	23.2	23.4	36.6	29.8	29.6	21.0	24.9	25.7	24.0	22.1
Plagioclase	34.0	40.1	37.1	32.1	22.7	40.7	43.9	40.7	39.7	43.2	47.5
K-feldspar	27.8	25.1	30.0	22.9	39.1	20.4	29.6	24.7	27.3	25.3	10.8
Biotite	6.9	5.4	5.4	3.2	0.3	0.6	0.4	1.5	3.4	1.5	13.9
Amphibole	0.3	0.2	2.6	0.8	0.1	0.9	0.3	3.3	1.9	1.0	2.6
Cholrite	1.7	3.9	0.8	3.5	6.0	5.6	3.3	3.7	1.2	4.0	2.7
Opaque	1.3	2.1	0.7	0.9	2.0	2.2	1.5	1.2	0.8	1.0	0.4

Rock type	pgd	fg	MME								
Sample No.	YJ07	CY05	CY07	BC08	BC11	BC12	CY03	CY07	CY17	YJ10	CY04
Quartz	24.2	37.6	36.1	15.5	11.1	24.3	29.3	25.2	10.8	24.7	11.3
Plagioclase	55.9	33.3	27.1	67.3	50.8	58.7	55.8	58.1	63.2	55.6	53.5
K-feldspar	9.2	24.5	31.7	1.1	7.7	5.0	2.9	1.5	2.3	3.4	12.4
Biotite	0.2	3.3	1.2	2.2	11.3	3.1	0.5	0.4	1.3	4.2	0.8
Amphibole	0.2	0.4	0.1	9.1	1.2	0.9	0.2	0.4	3.0	3.3	17.1
Cholrite	8.5	0.7	2.1	3.7	12.9	5.9	9.9	12.3	17.4	6.5	3.0
Opaque	1.8	0.2	1.7	1.1	5.0	2.1	1.4	2.1	2.0	2.3	1.9

Abbreviation: pg, porphyritic granite; pgd, porphyritic granodiorite; fg, fine-grained granite; MME, mafic microgranular enclave.

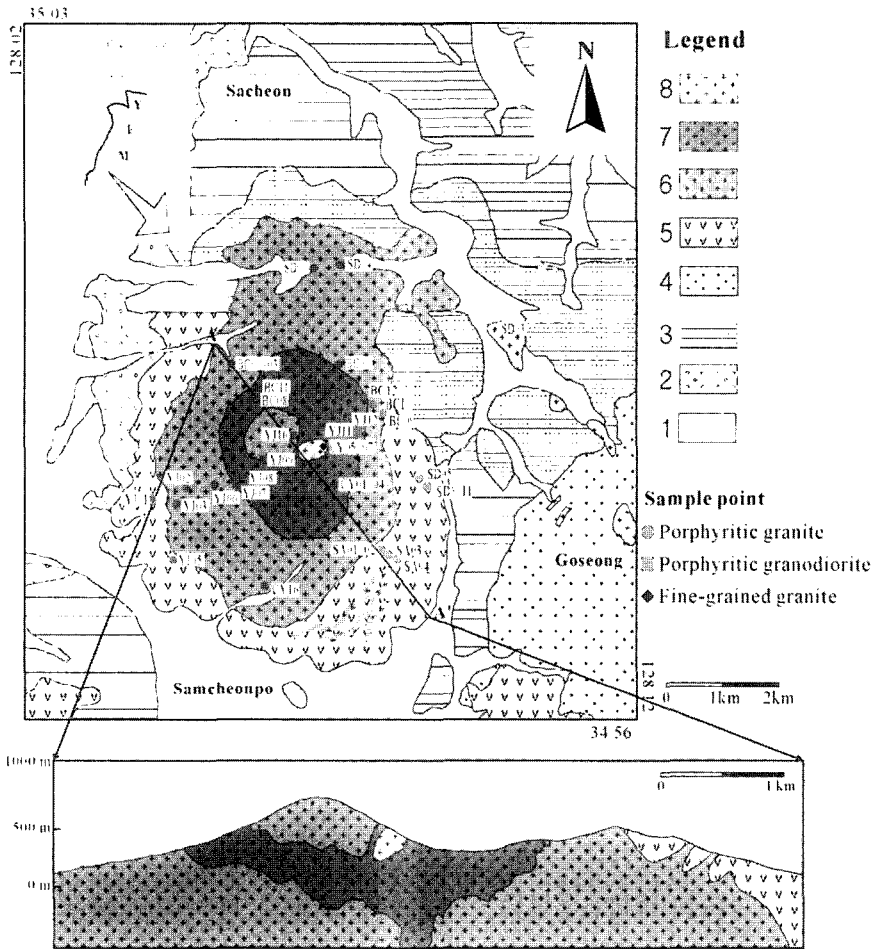


Fig. 1. Geological map of the Waryongsan area and a cross section. 1. Chilgok Formation; 2. Shilla Conglomerate; 3. Haman Formation; 4. Jindong Formation; 5. andesitic rocks; 6. porphyritic granite; 7. porphyritic granodiorite; 8. fine-grained granite.

의 함량비를 가지며, 석기는 석영과 정장석 그리고 흑운모 등으로 평균 89.1%의 함량비를 가진다. 반정은 사장석과 석영이며, 석기는 세립의 석영과 정장석 등으로 구성된다. 사장석은 0.7~4.0 mm 정도의 크기로 자형 혹은 반자형으로 알바이트쌍정과 누대구조가 잘 나타난다. 석영은 0.1~1.0 mm 정도이며, 직소광과 과동소광을 한다. 정장석은 타형으로 크기는 0.3~0.7 mm 정도로 석영과 함께 문상조직 보인다. 흑운모는 0.3~0.7 mm 정도의 크기로 벽개가 잘 발달해 있다. 모드 분석 결과 본조화강암 조성을 가진다(Fig. 2).

염기성 미립 포유암(mafic microgranular enclave, MME)

염기성 미립 포유암은 와룡산 일대의 백악기 화강암

류 전역에 걸쳐 매우 다양한 크기와 양상으로 산출되며, 화강암류의 조성에 따라 크기와 분포 면적비의 차이를 보이므로 화강암류에 따라 세분할 수 있다. 이러한 염기성 미립 포유암은 녹회색 내지 회녹색으로 사장석과 석영 반정들을 제외하면, 세립의 등립질로 화성조직을 가진다. 염기성 미립 포유암 내에 포함된 사장석과 석영 반정들은 주변 화강암류에서 나타나는 광물의 결정형태와 크기가 유사하며, 경계부에서 사장석과 석영이 유입되거나 각섬석과 흑운모에 의해 둘러싸여진 망토조직들을 관찰할 수 있다. 따라서 이러한 반정들은 화강암 호스트로부터 유래된 외래결정편(xenocryst)으로 화강암류에 따라 크기가 다양하다. 구성광물은 사장석, 석영, 정장석, 각섬석, 흑운모, 녹니석, 그리고 불투명광물 등으로 구성된다. 사장석은 자형내지 반

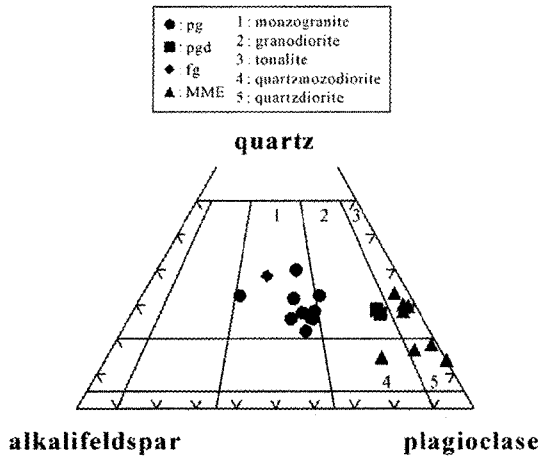


Fig. 2. Modal compositions (quartz-alkalifeldspar-plagioclase) of granitic rocks and MMEs in the Waryongsan area. Granitic rocks are monzogranite and granodiorite. MMEs are quartzdiorite, quartzmonzodiorite and tonalite (pg (●), porphyritic granite; pgd (■), porphyritic granodiorite; fg (◆), fine-grained granite; MME (▲), mafic microgranular enclave).

자형으로 0.3~0.4 mm 정도의 크기로 알바이트쌍정과 누대구조를 보이며, 석영은 반자형 내지 타형으로 0.2~0.5 mm 정도의 크기를 가지며, 직소광을 한다. 각섬석은 0.3~4.0 mm 정도의 크기로 반자형이 대부분이며, 반상화강섬록암 지역에서는 1.0 mm 정도의 크기로 침상으로 나타나기도 한다. 모드 분석결과 석영섬록암, 석영몬조섬록암, 그리고 토날라이트 조성을 가진다 (Fig. 2).

반상화강암 내에 산출되는 염기성 미립 포유암들은 반정을 포함하지 않는 세립의 등립질조직을 가지는 것과 사장석과 석영 반정들을 가지는 염기성 미립 포유암이 산출된다. 크기는 3~15 cm 정도로 약 10~15% 이하의 분포 면적비를 가지며, 타원형으로 경계가 불명확한 것들이 많다 (Fig. 3b). 암색은 녹회색으로 외래결정편을 제외하면 세립의 등립질조직을 가진다. 외래결정편인 사장석과 석영은 2.0~5.0 mm 정도의 크기로 반상화강암과 동일한 양상을 가진다.

반상화강섬록암 내에 산출되는 염기성 미립 포유암들은 반정을 포함하지 않는 세립의 등립질조직을 가지는 것, 사장석과 침상의 각섬석 반정들을 가지는 것, 그리고 침상의 각섬석이 포함된 염기성 미립 포유암으로 다양하게 산출된다. 크기는 10~500 cm 정도로 약 50% 이상의 분포 면적비로 집중되어 분포한다 (Fig. 3c). 전체적으로는 타원형으로 경계가 불명확한 것들이 많으며, 급랭에 의한 수축으로 균열이 발생하게 되고 균

열을 따라 반상화강섬록암이 재 거동되어 주입된 것과 같은 백베이닝(back veining) 구조를 보인다 (Fig. 3d, 3e). 암색은 녹회색 내지 회녹색으로 외래결정편을 제외하면 세립질의 등립질조직을 가진다. 외래결정편인 사장석과 석영은 1.0~4.0 mm 정도의 크기로 반상화강섬록암과 동일한 크기로 나타난다.

세립질화강암 내에 산출되는 염기성 미립 포유암들은 반정들을 포함하지 않는 세립의 등립질조직을 가지는 것과 사장석과 석영 반정들을 가지는 염기성 미립 포유암이 산출된다. 크기는 5~15 cm 정도로 약 20% 이하의 분포 면적비를 가지며, 타원형으로 경계가 뚜렷하게 구분된다 (Fig. 3f). 암색은 녹회색으로 외래결정편을 제외하면 세립의 등립질조직을 가진다. 외래결정편인 사장석과 석영은 1.0~3.0 mm 정도의 크기로 세립질화강암과 동일한 크기로 나타난다 (Fig. 3g).

안산암류 (andesitic rocks)

와룡산 일대에 분포하는 안산암류는 백악기 후기 유천층군에 해당하는 화산암류로 주변 퇴적암류를 피복하고 있으며, 함안층과의 접촉부에서는 소규모 암맥상으로 분포한다. 와룡산 동부 선암사 지역에서는 용암류와 응회암류가 분포한다. 용암류는 회색 또는 암회색으로 반상조직을 가지며, 사장석 반정들이 배열성을 보인다 (Fig. 4a). 반정은 사장석으로 2.0~2.5 mm 정도의 크기로 알바이트쌍정과 누대구조를 보이며, 기질은 0.5 mm 이하의 크기로 나타난다. 응회암류는 녹회색으로 5~10 cm 정도의 크기로 사암과 이암의 역을 함유하고 있으며, 기질과 유사한 안산암질의 역을 포함하고 있다 (Fig. 4b) 또한 반상화강암과의 경계부에서는 열변성을 받아 혼펠스화 되어있다 (Fig. 4c). 반상화강암 역시 급랭에 의한 사장석과 석영 반정들을 포함하는 반암의 조직을 보이며, 이들 내에도 1.0~2.0 mm 정도 크기의 염기성 미립 포유암들이 나타난다 (Fig. 4c, 4d, 4e, 4f).

따라서 와룡산 일대에 분포하는 화강암류를 형성한 마그마는 안산암류를 관입하기 이전에 사장석과 석영의 분별정출이 진행되어 반암 조직으로 급랭되었으며, 마그마 불균질 혼합이 있었던 것으로 판단된다.

암석지구화학

연구지역의 대표적인 암석 시료 12개를 한국해양연구원 XRF분석기기 (Philips PW1480)를 이용하여 주성분원소 분석을 실시하였다 (Table 2).

주성분원소 분석결과 SiO₂ 함량은 61.2~72.0wt.%의

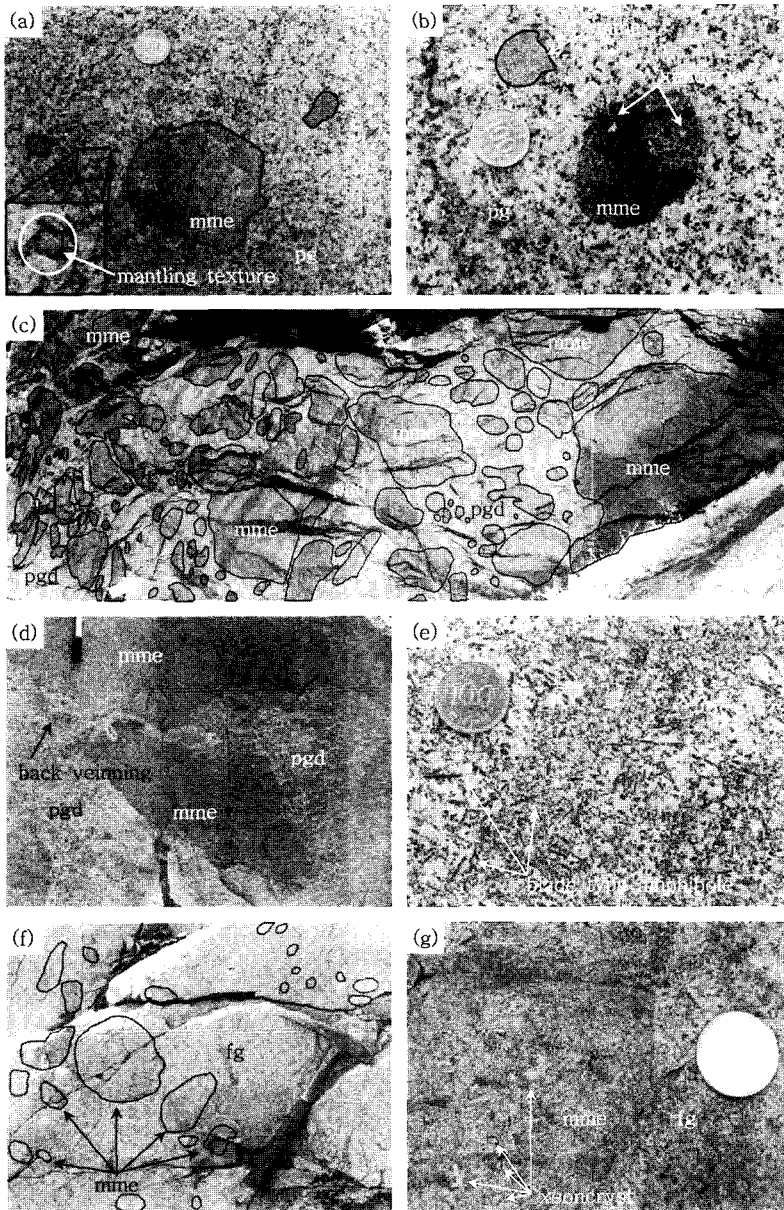


Fig. 3. Photographs of granitic rocks and MMEs in the Waryongsan area. (a) mantling texture in the porphyritic granite; (b) distribution of MMEs in the porphyritic granite; (c) distribution of MMEs in the porphyritic granodiorite; (d) back veinning structure in the porphyritic granodiorite; (e) blade type amphibole in MME; (f) MMEs in the fine-grained granite; (d) xenocryst in the MME (mme, mafic microgranular enclave; pg, porphyritic granite; pgd, porphyritic granodiorite; fg, fine-grained granite).

조성범위를 가지며, 반상화강섬록암에서 세립질화강암으로 갈수록 SiO_2 함량이 증가하는 경향을 보인다. 하커변화도에 도시해 보면 SiO_2 가 증가함에 따라 TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , 그리고 P_2O_5 는 감소하는 경향을 보이며, K_2O 는 증가하는 경향을 보인다

(Fig 5).

와룡산 일대에 분포하는 화강암류의 SiO_2 함량은 반상화강섬록암에서는 평균 61.7wt.%, 반상화강암에서는 평균 68.6wt.%, 그리고 세립질화강암에서는 71.9wt.%의 조성을 가진다. 또한 안산암류와의 경계에서 나타

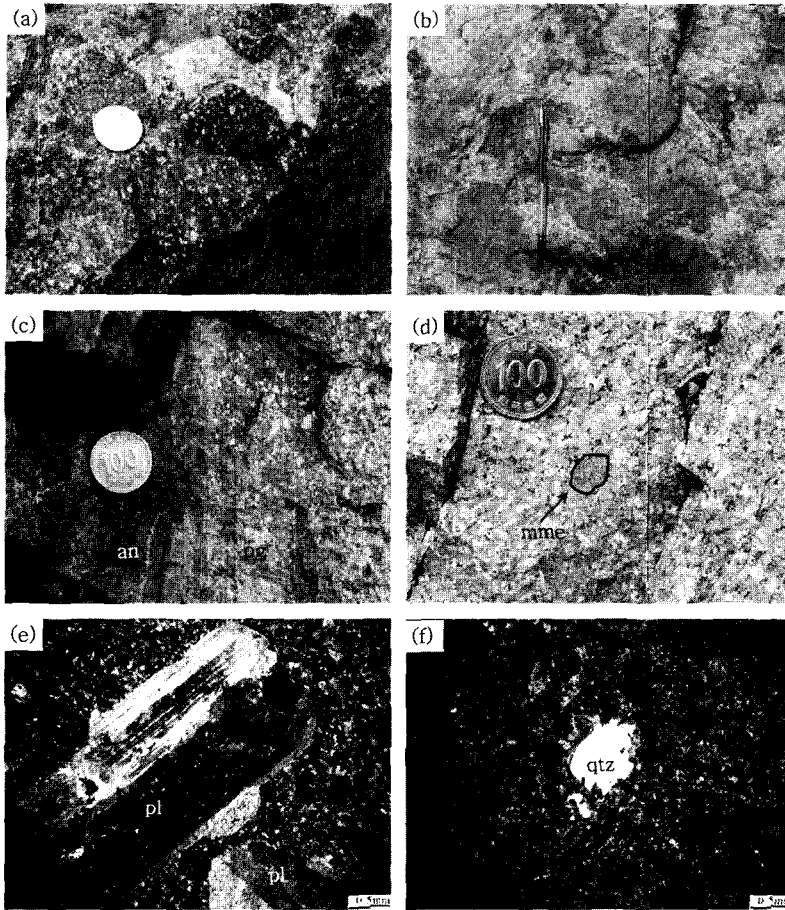


Fig. 4. Photographs of andesitic rocks and granitic rocks in the Waryongsan area. (a) andesitic lava in the Waryongsan area; (b) andesitic tuff in the Waryongsan area; (c) boundary between andesitic lava and porphyritic granite; (d) MME in the porphyritic granite margin; (e) porphyritic texture in the porphyritic granite margin; (f) porphyritic texture in the porphyritic granite margin (an, andesite; pg, porphyritic granite; mme, mafic microgranular enclave; pl, plagioclase; qtz, quartz).

나는 반암조직의 화강암류는 SiO_2 함량(SD06-SD09, SA04)이 66.8~72.0wt.%과 67.3wt.%의 조성을 가진다. 따라서 조성변화의 원인이 마그마 분화와 마그마 혼합 혹은 불균질 혼합이라고 한다면, 분화에 의한 조성변화도 존재하지만, 암석기재적 특징과 염기성 미립 포유암과의 관계를 통한 반상화강섬록암의 SiO_2 함량비를 고려하면, 결국 국부적인 지역에서의 넓은 화강암류의 SiO_2 조성변화는 마그마 불균질 혼합에 의한 것으로 판단된다.

마그마 혼합/ 불균질 혼합

마그마의 조성을 변화시키는 작용은 대표적으로 분화작용, 마그마 혼합, 그리고 동화작용에 의한 변화가

있다(Raymond, 1995). 와룡산 일대에 분포하는 백악기 화강암류는 사장석과 석영을 반정으로 하는 반상조직으로 모든 화강암류 내에 나타나며, 안산암과의 경계에서 반암과 반상화강암의 SiO_2 함량이 거의 유사하므로 초기 조성이 거의 유사했을 가능성이 높다. 또한 화강암류 내에는 외래기원 포획암(xenolith)이 발견되지 않는다는 점에서 동화작용의 가능성도 상당히 제한적이었을 것이다. 따라서 암석기재적 특징과 염기성 미립 포유암과의 관계 그리고 국부적인 지역에서의 넓은 SiO_2 함량비를 고려하면, 연구지역에서 나타나는 화강암류의 조성변화에 주도적 역할을 한 작용은 마그마 불균질 혼합에 의한 것으로 두 마그마의 물성차이에 기인한 것으로 판단된다.

마그마 혼합 혹은 불균질 혼합은 앞에서도 언급했듯

Table 2. Major oxide contents and normative mineral contents of granitic rocks and MMEs in the Waryongsan area.

Rock type Sample No.	pg								pgd		fg	
	BC01	BC02	SD01	SD-4	SD06	SD07	SD-08	SD-09	SA04	CY01	CY02	CY05
SiO ₂	68.87	68.94	68.05	67.54	71.95	66.75	70.58	67.80	67.26	62.10	61.21	71.88
TiO ₂	0.42	0.43	0.44	0.50	0.33	0.55	0.38	0.49	0.56	0.63	0.67	0.38
Al ₂ O ₃	15.53	15.31	15.40	15.74	14.44	15.94	14.41	15.31	15.36	17.92	17.38	13.75
FeOt*	3.41	3.40	3.20	3.76	2.08	3.18	2.24	3.19	3.20	4.37	4.66	2.45
MnO	0.09	0.09	0.09	0.10	0.05	0.08	0.05	0.11	0.10	0.18	0.14	0.08
MgO	0.99	1.01	1.13	1.18	0.63	1.11	0.76	1.05	1.02	1.56	1.65	0.84
CaO	2.36	2.36	2.58	2.54	1.62	2.97	1.72	1.98	2.55	4.64	4.75	1.57
Na ₂ O	4.22	4.15	4.08	4.16	4.10	4.75	3.96	4.31	4.33	4.50	4.33	3.33
K ₂ O	3.57	3.51	3.46	3.35	4.45	3.36	4.45	3.53	3.64	2.17	2.28	4.49
P ₂ O ₅	0.14	0.14	0.14	0.17	0.09	0.17	0.10	0.15	0.15	0.23	0.25	0.11
Total	99.60	99.34	98.56	99.03	99.72	98.84	98.65	97.91	98.16	98.31	97.30	98.87
Q	21.99	22.75	22.14	21.13	25.45	16.92	24.68	21.89	19.61	12.86	12.34	29.51
Or	21.20	20.90	20.76	20.01	26.39	20.10	26.68	21.32	21.93	13.06	13.86	26.86
Ab	35.81	35.31	34.98	35.50	34.74	40.61	33.93	37.20	37.28	38.69	37.6	28.46
An	10.94	10.97	12.16	11.72	7.53	12.35	8.06	9.14	11.90	22.06	21.79	7.23
C	0.72	0.68	0.54	1.01	0.11		0.15	1.13		0.21		0.79
Di						1.31			0.08		0.79	
Hy	8.23	8.27	8.25	9.29	4.95	7.27	5.55	8.04	7.78	11.40	11.75	6.18
Il(FT)	0.80	0.82	0.85	0.96	0.63	1.06	0.73	0.95	1.08	1.22	1.31	0.73
Ap(CP)	0.31	0.31	0.31	0.37	0.20	0.38	0.22	0.33	0.33	0.51	0.56	0.24

*FeOt: total iron oxide as FeO

Abbreviations: pg, porphyritic granite; pgd, porphyritic granodiorite; fg, fine-grained granite; Q, quartz; Or, orthoclase; Ab, albite; An, anorthite; C, corundum; Di, diopside; Hy, hypersthene; Il, ilmenite; Ap, apatite.

이 펠식 마그마 챔버 내에 보다 매퓌한 마그마가 주입되어 나타나는 것으로 액체와 액체간의 상호작용을 의미한다. 이때 마그마는 일반적으로 낮은 레이놀즈수를 가지는 점성유체이며, 흐름은 층류의 특징을 나타내고, 속도는 점성에 기인하는 저항력에 따라 감소한다. 만일 저점성의 마그마(매퓌 마그마)가 고점성의 마그마(펠식 마그마) 내에 주입되게 되면, 매퓌 마그마의 흐름 전단에 불안정성(flow-front instability)이 발생한다(Snyder and Tait, 1995). 이 불안정성은 두 마그마 사이의 점성 차이에 기인하기도 하고(Saffman-Taylor instability), 또 부력 차이에 기인하기도 한다(Rayleigh-Taylor instability). 이 두 가지 요인의 불안정성은 주입된 매퓌 마그마의 흐름을 여러 갈래로 분기시키는데, 이를 핑거링(fingering)이라 한다(Snyder and Tait, 1995; Snyder *et al.*, 1997). 분기된 각각의 핑거링은 펠식 마그마 내에서 계속 분열되고, 결국에는 염기성 미립 포유암으로 남게 되는 경우가 많다. 한편, 주입된 매퓌 마그마는 호스트인 펠식 마그마 보다 고밀도이기 때문에 챔버 내부로 가라앉으려는 경향이 강하고, 이로 말미암아 주입된 매퓌 마그마와 하부의 펠식 마그마 사

이에서 하중흔(load cast), 관상(pipe), 불꽃(flame), 그리고 열편상(lobate) 구조를 만든다(Chapman and Rhodes, 1992; Wiebe and Collins, 1998).

호스트인 펠식 마그마에 매퓌 마그마가 주입된 초기 단계에서는 두 마그마 사이의 온도, 밀도, 점성, 그리고 두 마그마의 상대적인 양 등의 차이가 크기 때문에 혼합이 쉽게 일어나지 않는다. 그러나 점차 두 마그마의 경계부에서는 열적 평형이 이루어져, 펠식 마그마에서는 가열되고(superheating), 매퓌 마그마에서는 냉각(freezing)되어 물성 차이가 줄어들게 되어 혼합이 빠르게 진행된다. 따라서 열적 평형이 이루어지기까지는 혼합의 과정은 거의 역학적인 혼합이 우세하게 나타난다. 그러나 일단 열적 평형에 도달하면 두 마그마 성분 사이에서 화학적인 혼합 과정이 강하게 나타난다. 결국 혼합과정에서 균질 혹은 불균질의 결정은 두 마그마가 어느 정도 빨리 열적인 평형에 도달하는가에 의존하는 것이다. 또한 두 마그마의 유동학적인 성질과 주입되는 매퓌 마그마의 비율 역시 균질 혹은 불균질 혼합을 결정하는 중요 요소가 된다. 두 마그마 사이의 균질 혼합은 두 마그마가 점성 유체의 성질을 가

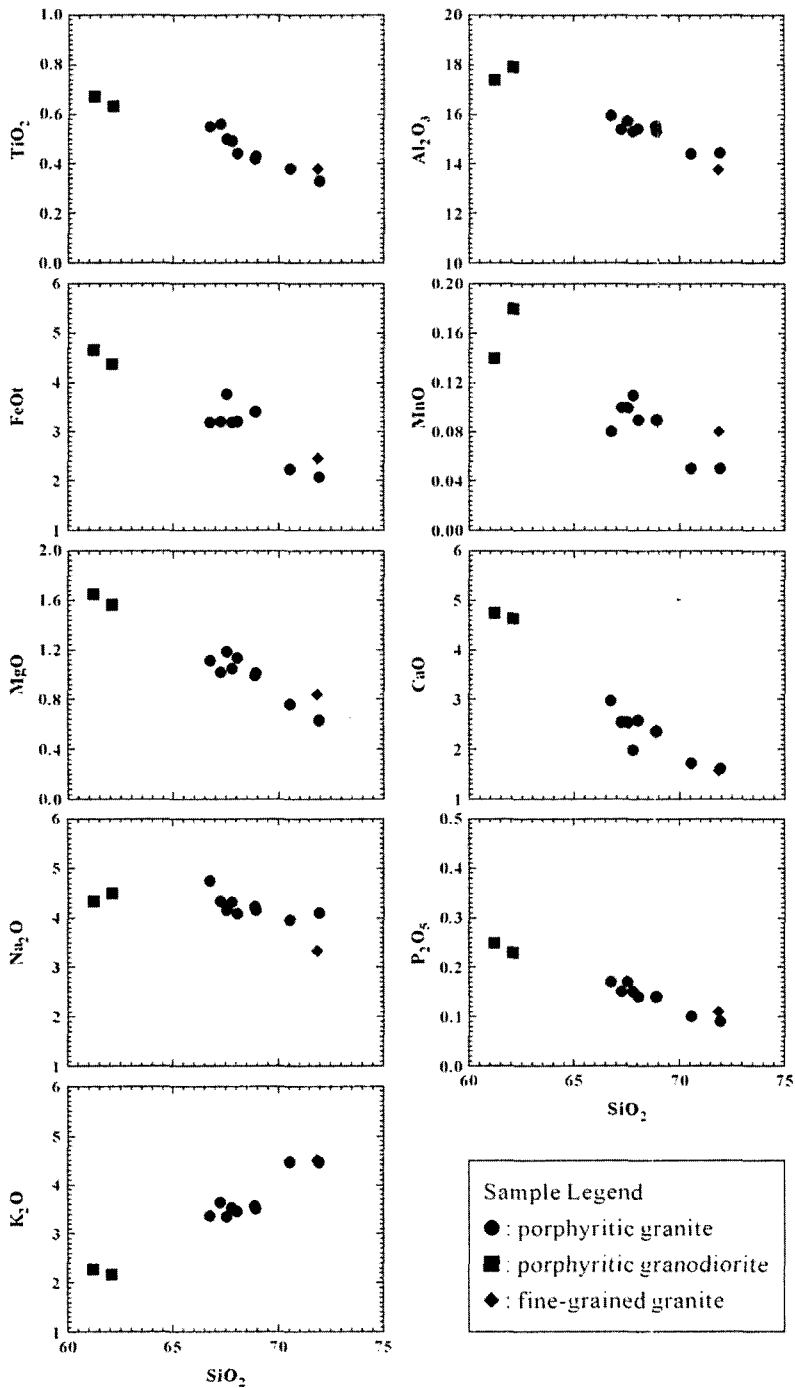


Fig. 5. Major oxide content vs. SiO₂ content in the Waryongsan granitic rocks.

지고, 주입되는 매픽 마그마의 비율이 높은 경우에 제한적으로 일어날 수 있다. 한편, 매픽 마그마의 비율이 낮은 경우에는 비록 균질 혼합이 잘 일어나지 않는다

고 할지라도, 보다 다양한 불균질 혼합의 양상을 나타낼 수 있다.

따라서 화강암류를 형성한 마그마는 고점성으로 보

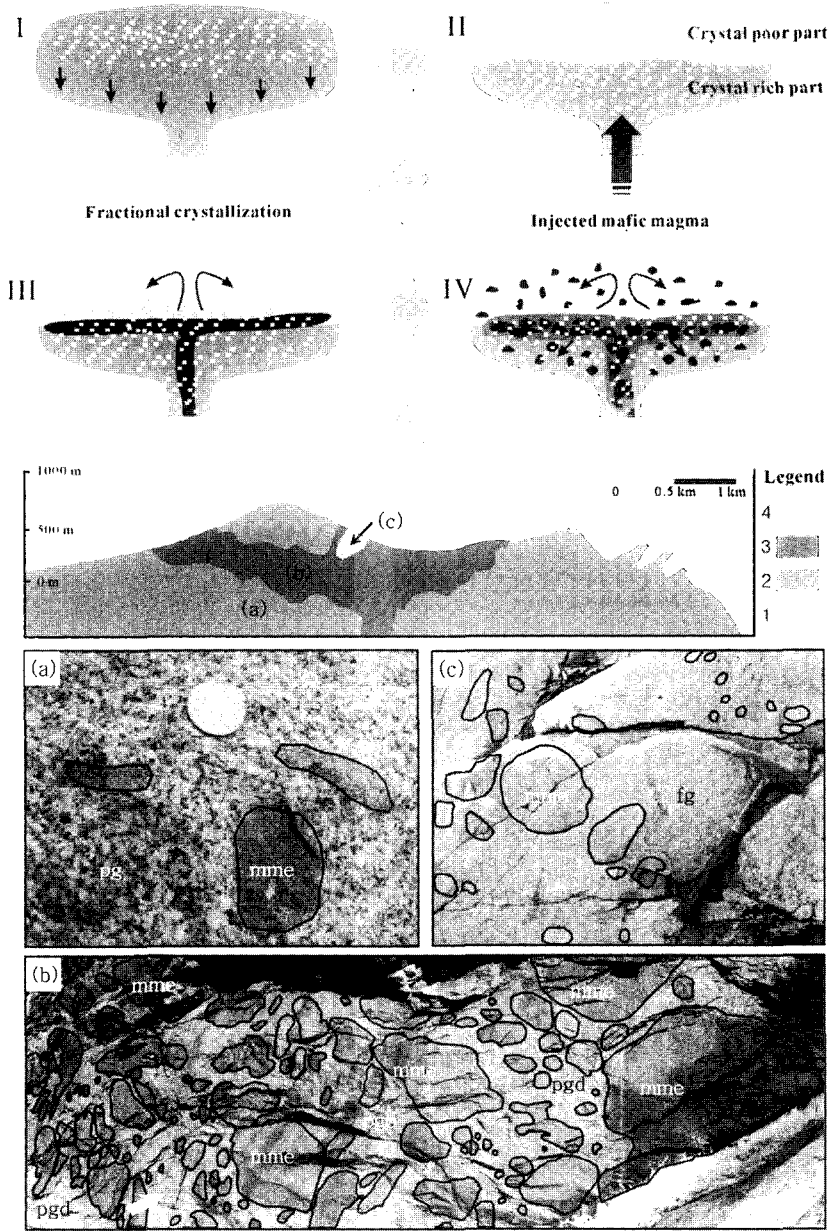


Fig. 6. (Above) Illustration showing development of sheet-like mafic bodies in granite by injection of mafic magma into felsic magma chamber (I→II→III→IV). (Below) A cross section of the Waryongsan granitic body and distribution of MMEs. 1, andesitic rocks; 2, porphyritic granite; 3, porphyritic granodiorite; 4, fine-grained granite; (a), 10~15% distribution of MMEs in porphyritic granite; (b), about 50% distribution of MMEs in porphyritic granodiorite; (c), about 20% distribution of MMEs in fine-grained granite (pg, porphyritic granite; pgd, porphyritic granodiorite; fg, fine-grained granite; mme, mafic microgranular enclave).

다 매핑한 마그마가 주입되어 마그마 불균질 혼합이 일어났으며, 두 마그마의 양적인 비율에 의한 혼합 정도 차에 의해 다양한 조성변화를 가진다. 매핑 마그마

의 양이 많은 부분에서는 열적 평형에 빨리 도달하여 화학적 혼합에 의해 반상화강섬록암의 조성이 평균 61.7wt.%를 가지며, 매핑 마그마의 양이 적은 부분은

기계적인 혼합에 의해 반상화강암과 세립질화강암의 조성이 각각 평균 68.6wt.%와 71.9wt.%를 가진다.

또한 외룡산 일대에 분포하는 백악기 화강암류는 지형적으로 수직적인 조성변화를 보이는데, 이러한 수직적인 조성변화는 Wiebe and Collins(1988)가 제시한 마그마 불균질 혼합 모델과 잘 일치된다. 펠릭 마그마가 용액(liquid) 상태에서 사장석들이 분별정출작용을 하여 결정과 용액의 혼합체(crystal mush)가 되고, 밀도차에 의해 분별정출된 사장석 결정은 아래로 떨어지게 된다. 이로 인해 마그마 챔버는 결정이 많은 부분(crystal rich part)과 액이 많은 부분(crystal poor part)으로 구분되어 물리적인 경계면이 발생하게 된다. 이때 보다 맵푼 마그마가 주입되면 상대적으로 약대인 경계면을 따라 이동하게 되고, 마그마 챔버의 상부인 액이 많은 부분을 재 가열시키게 되어 대류현상을 발생하게 되어 화강암류 전역에 다양한 양상의 염기성 미립 포유암이 나타난다.

외룡산 일대 백악기 화강암류에서 이러한 모델과 같이 세분화 된다. 반상화강암은 2.0~5.0 mm 정도의 큰 사장석과 석영 반정들로 반정의 함량이 많으며, 염기성 미립 포유암은 3~15 cm 정도의 크기로 10~15% 낮은 분포 면적비를 가진다. 반상화강섬록암은 1.0~4.0 mm 정도의 사장석과 석영 반정들을 가지며, 염기성 미립 포유암은 10~500 cm 정도의 크기로 약 50%의 높은 분포 면적비를 가진다. 세립질화강암은 1.0~3.0 mm 정도의 크기로 사장석과 석영 반정들로 기질의 함량이 많으며, 타원형의 염기성 미립 포유암은 5~15 cm 정도의 크기로 약 20%의 분포 면적비를 가진다(Fig. 6).

따라서 외룡산 일대 화강암류를 형성한 마그마는 분별정출작용으로 결정이 많은 부분과 액이 많은 부분으로 구분되어 물리적 경계면이 발생하게 되고, 이들 경계면에 보다 맵푼 마그마가 주입되어 마그마 불균질 혼합이 일어난 것으로 판단 할 수 있다. 그 결과 두 마그마의 양적인 비율에 의한 혼합 정도 차에 의해 맵푼 마그마의 양이 많은 부분에서는 화학적 혼합에 의한 반상화강섬록암이 나타나고, 맵푼 마그마의 양이 적은 부분에서는 기계적 혼합에 의한 반상화강암과 세립질화강암이 나타나는 것으로 판단된다.

결 론

외룡산 일대에 분포하는 백악기 화강암류는 염기성 미립 포유암, 망토조직, 백베인 등과 같은 마그마 불균질 혼합에 의한 증거들이 많이 나타난다. 암석기재적 특징과 모드분석결과에 의하여 화강암류는 반상화강섬

록암, 반상화강암, 그리고 세립질화강암으로 구분되며, 외룡산을 중심으로 수직적인 조성변화를 보여준다. 염기성 미립 포유암은 석영섬록암, 석영문조섬록암, 그리고 토날라이트 조성을 가지며, 화강암류 내에 분포 면적비는 반상화강암이 10~15%, 세립질화강암이 약 20%, 그리고 반상화강섬록암이 약 50% 정도로 반상화강섬록암에 집중되어 분포한다.

외룡산 일대에 분포하는 화강암류의 SiO₂ 함량은 반상화강섬록암에서는 평균 61.7wt.%, 반상화강암에서는 평균 68.6wt.%, 그리고 세립질화강암에서는 71.9wt.%의 조성을 가진다. 또한 안산암류와의 경계에서 나타나는 반암조직의 화강암류는 SiO₂ 함량(SD06~SD09, SA04)이 66.8~72.0wt.%과 67.3wt.%의 조성을 가진다. 따라서 조성변화의 원인이 마그마 분화와 마그마 혼합 혹은 불균질 혼합이라고 한다면, 분화에 의한 조성변화도 존재하지만, 암석기재적 특징과 염기성 미립 포유암과의 관계를 통한 반상화강섬록암의 SiO₂ 함량비를 고려하면, 결국 국부적인 지역에서의 넓은 화강암류의 SiO₂ 조성변화는 마그마 불균질 혼합에 의한 것으로 판단된다.

화강암류 주성분 원소 분석결과 SiO₂ 함량은 61.2~72.0wt.%의 조성범위를 가지며, 하커변화도에 도시해 보면 반상화강섬록암에서 세립질화강암으로 가면서 선적인 변화경향을 보인다. SiO₂ 함량은 반상화강섬록암에서는 평균 61.7wt.%, 반상화강암에서는 평균 68.6wt.%, 그리고 세립질화강암에서는 71.9wt.%의 조성을 가진다. 또한 안산암류와의 경계에서 나타나는 반암조직의 화강암류는 SiO₂ 함량(SD06~SD09, SA04)이 66.8~72.0wt.%과 67.3wt.%의 조성을 가진다. 따라서 분화에 의한 조성변화도 존재하지만, 암석기재적 특징과 염기성 미립 포유암과의 관계를 통한 반상화강섬록암의 SiO₂ 함량비를 고려하면, 결국 국부적인 지역에서의 넓은 화강암류의 SiO₂ 조성변화는 마그마 불균질 혼합에 의한 것으로 두 마그마의 물성차이에 기인한 것으로 판단된다.

따라서, 외룡산 일대 화강암류는 마그마가 분별정출 작용에 의한 마그마 분화 단계에서 보다 맵푼 마그마의 주입으로 인해 마그마 불균질 혼합이 발생하게 되었으며, 두 마그마의 양적인 비율에 의한 혼합 정도의 차에 의하여 화강암류의 조성이 변화된 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호:

2000-2-13100-003-5) 지원으로 수행되었다. 지구화학분석에 도움을 주신 한국해양연구원의 이종익 박사님께 감사드리며, 논문에 대한 유익한 지적을 해 주신 부경대학교 박계현 교수님과 의명의 심사자께 감사드린다.

참고문헌

- 김종선, 김건기, 좌용주, 이준동, 2004, 경상분지 화강암류에서 발견되는 엔클레이브(포유암)에 대한 암석기재적 연구, *암석학회지*, 13, 1-15
- 김종선, 이준동, 김인수, 백인성, 최보심, 2000, 울산 방어진 일대 화강암 내에 산출되는 포획암의 암석학적 연구, *지질학회지*, 36, 73-92.
- 좌용주, 김건기, 2000, 의성분지, 보현산 일대 화강암류와 포획암에 대한 암석학적 연구, *암석학회지*, 9, 187-203.
- 지정만, 김형식, 오인선, 김학천, 1983, 한국지질도(1:50,000) 삼천포도폭 및 설명서, 한국 동력자원연구소, 12p.
- 진명식, 1985, 남한의 백악기-제3기초 화강암류의 지화학적 연구, *지질학회지*, 21, 297-316.
- 진명식, 1988, 남한의 백악기-제3기 화강암류의 지화학적 연구, 제2편: 미량원소 지화학, *지질학회지*, 24, 168-188.
- 진미정, 김종선, 이준동, 김인수, 백인성, 2000, 양산시 원효산 화강암에 산출되는 포획암에 대한 암석학적 연구, *암석학회지*, 9, 142-168.
- 최유구와 유병화, 1969, 한국지질도(1:50,000), 사천도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 12p.
- Chapman, M. and Rhodes, J.M., 1992, Composite layering in the Isle au Haut Igneous Complex, Maine: Evidence for periodic invasion of a mafic magma into an evolving magma reservoir. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 51, 41-60.
- Choe, W. H and Jwa, Y. J., 2004, Petrological and geochemical evidences for magma mixing in the Palgongsan Pluton, *Geosciences Journal*, 8, 343-354.
- Didier J., Barbarin B., 1991, *Enclave and granite petrology*, Elsevier, Amsterdam, 625p.
- Hibbard M.J., 1995, *Petrography and petrogenesis*. Prentiss Hall, New Jersey, 587p.
- Jin, M. S., Lee, S. M., Kim, S. J., 1982, Litho-geochemistry of the cretaceous granitoids with relation to the metallic ore deposits in southern Korea., *Jour. Geol. Soc. Korea.*, 18, 119-131.
- Kim, J. S., Shin, K. C., Lee, J.D., 2002, Petrographical study on the Yuchon granite and its enclaves, *Geosciences Journal*, 6, 289-302.
- Poli, G., Tommasini, S. and Halliday, A.N., 1996, Trace element and isotopic exchange during acid°basic magma interaction processes. *Trans. R. Soc. Edinb.* 87, 225-232.
- Raymond, L.A., 1995, *Petrology: the study of igneous rocks*, WCB, USA, 262p.
- 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.
- Snyder, D. and Tait, S., 1995, Replenishment of magma chambers: Composition of fluid-mechanic experiments with field relations. *Contrib. Mineral. Petrol.* 122, 230-240.
- Snyder, D., Crambes, C., Tait, S. and Wibe, R. A., 1997, Magma mingling in dykes and sills, *J. Geology*, 105, 75-86.
- Wiebe R. A. and Collins W. J., 1998, Depositional features and stratigraphic sections in granitic plutons: implications for the emplacement and crystallization of granitic magma, *Journal of Structural Geology*, 120, 1273-1289.

(2005년 2월 9일 접수; 2005년 3월 1일 채택)