

양산 칼데라에 관련되는 화산암류에서 광물함량 변화의 해석

황상구* · 김세현 · 정성욱

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과

Interpretation for Variations in Mineral Contents in Volcanic Rocks Related to the Yangsan Caldera

Sang Koo Hwang*, Se Hyeon Kim and Seong Wook Jeong

Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 760-749, Korea

요약: 양산 칼데라에 관련된 화산암류의 반정광물 모드조성과 전암 노음조성은 마그마챔버 내에서 조성누대된 마그마로부터 유래되었음을 기록하고 있다. 이 화산암류는 SiO_2 에 대한 반정비율이 전체적으로 직선상의 연속적 조성구배를 나타낸다. 뿐만 아니라 총반정함량에 대한 반정비율이 양산응회암, 화제리층의 응회암과, 고규질 유문반암을 제외한 장석반암 등의 암석단위로 뚜렷하게 구분된다. 그리고 각 암석 단위 내에서 연속적인 직선상 조성구배를 나타내고, Q-Ab-Or 삼각도와 Q-An-(Ab-Or) 삼각도에서도 마찬가지로 경향을 보인다. 또한 상부로 가면서 사장석 반정함량과 그 비율이 점진적으로 풍부해지고 석영과 K-장석의 반정함량과 그 비율은 점점 감소하는 함량변화를 나타낸다. 그리고 양산응회암과 화제리층 응회암에서 반정함량과 그 비율이 상부로 가면서 지그재그형의 파동적인 변화를 나타낸다. 이 직선상 조성구배와 점진적인 함량변화는 각각 양산응회암 분출전 뿐만 아니라, 후기 양산 칼데라 함몰전과 함몰후의 마그마챔버에서 상부에서 하부로 가면서 성분이 누대되었음을 암시한다.

핵심어: 양산 마그마계, 반정광물, 노음광물, 조성구배, 조성누대 마그마

Abstract: The modal analyses on the phenocryst phases and the normative mineralogies from the bulk chemical analyses record that the volcanic rocks related to the Yangsan caldera might be derived from compositionally zoned magma. The volcanic rocks show linearly continuous mineralogical gradients, not only totally in the relations between SiO_2 and proportion of phenocryst content, but also within each rock unit in the relations between total phenocryst content and the proportion, Q-Ab-Or and Q-An(Ab-Or) diagrams. The roughly gradational modal variations of the phenocryst phases are shown upward within each rock unit. However, the contents and proportion of the phenocrysts in the Yangsan Tuff and the Hwajeri Formation represent the zigzaggedly undulatory variations. The continuous mineralogical gradients without large gaps define a large zoned magma system in the pre-eruptive, later precollapse and postcollapse magma chambers respectively. The zigzagged variations reflect the intermittent eruptive pulses representing any time gaps.

Key words: Yangsan magmatic system, Phenocryst phase, Normative mineral, Compositional gradient, Compositionally zoned magma

서 언

밀양-양산 지역은 산성 화산암류가 대규모로 분포하는데, 이들은 규질 마그마챔버로부터 칼데라를 동반하는 여러 개의 주요 화성사건을 기록하고 있다(황상구

와 김성욱, 1990). 그런데 이들은 백악기 말기 화산활동의 산물이기 때문에 침식이 비교적 심하면서도 칼데라 내외에 화성사건의 흔적으로서 분출암과 관입암을 보존하고 있다. 이 가운데 양산 칼데라지역은 보다 고기의 산물이기 때문에 침식정도가 보다 적은 편이어서

*Corresponding author: Tel. 82-54-820-5469, E-mail. hwangsk@andong.ac.kr

칼데라 내부뿐만 아니라 외곽에도 분출암이 나타나고 칼데라 내에는 환상암맥과 중앙도움을 이루는 관입체가 나타난다(황상구와 김상욱, 1992). 이와같이 깊게 침식된 백악기 칼데라에는 분출암과 관입암이 동시에 노출되어 이들과의 상호관계뿐만 아니라 이들이 마그마 챔버로부터 유래되는 주요 화성과정(igneous process)을 기록하고 있다.

양산 칼데라는 양산 칼데라-선기 양산 칼데라-화제리층-후기 양산 칼데라-장석반암 관입체로 복합되어 있음은 이미 알려진 바 있다(황상구와 김상욱, 1992). 기존 연구에 의하면 급속도로 분출하는 회류용회암 내에 보존된 조성변화는 이들을 분출한 마그마챔버 내의 일차적인 조성누대를 반영한다는 것이 증명되었다(Hildreth, 1979, 1981; Smith, 1979). 따라서 이들을 양산 칼데라의 화성과정에 적용하여 이에 관련된 화산암류에 대한 반정광물의 모드조성과 전암 화학조성으로부터의 노움조성에 대한 변화를 알아볼 필요성이 있다고 생각한다. 흔히 사장석 반정과 불투명광물 반정은 마그마챔버의 하부쪽에서 더 풍부하고 석영과 K-장석은 그 반대이다.

양산 칼데라와 관련되어 있는 화산암류에는 분출암과 이에 조합된 관입암이 있다. 이들은 양산 칼데라 아래의 마그마챔버에서 유래된 하나의 마그마계를 이루고 있으며 이를 양산 마그마계라 부른다(황상구, 1996). 이와같은 하나의 마그마계로부터 원래 마그마챔버 내에서의 조성누대를 연구할 기회는 그렇게 흔한 편은 아니다. 그러나 회류용회암, 환상암맥과 중앙도움 관입체로 노출되는 양산 마그마계는 이에 대한 좋은 연구과제를 제공해 준다. 왜냐하면 환상암맥과 중앙도움관입체는 이에 선행하는 회류용회암이 분출했던 마그마 챔버의 직접적인 잔류부분이기 때문이고 이들이 지하의 깊은 부위까지 침식되어 모드조성 변화를 보여주기 때문이다. 이러한 모든 화성사진은 동일한 하나의 칼데라순회(caldera cycle)에 포함되며 이와 관련된 산물은 하나의 마그마챔버에서 유래된 하나의 마그마계(magmatic system)를 형성한다. 그러므로 이러한 점을 고려한다면 양산 칼데라 지역에서 화성과정에 따라 생성되었던 양산용회암, 화제리층, 장석반암의 암체 내에서와 이들 간의 반정광물의 모드조성 변화는 한 마그마챔버 내에서 산성 마그마의 결정과정을 지배하는 물리적 조건의 변화를 연구할 수 있는 실마리를 제공해 줄 수 있다고 본다. 본 양산 마그마계에는 사장석, 석영, K-장석, 흑운모, 각섬석, 불투명광물의 반정이 공존하고 있기 때문에 이 연구에 적합하며, 이러한 반정군은 마그마챔버에서 결정낙하와 같은 물리적 상태를

이해하는데 편리한 것으로 생각된다. 이 반정군에서 함량이 많은 사장석, 석영, K-장석 등의 규장질 광물에 대해 논하고 함량이 거의 2% 이하로 적은 흑운모, 각섬석, 불투명광물 등의 고철질 광물은 오차를 고려하여 배제한다.

지질개요

경상분지에서 유천층군의 상부는 소량의 현무암질 안산암과 대부분 안산암질 내지 유문암질 용암과 화쇄암으로 구성되며 한반도 동남부에서 거의 활모양으로 분포되는 대륙연변호를 형성한다(황상구와 김상욱, 1994a). 이 대륙연변호는 경상분지에서도 백악기에 안산암질 화산작용으로 시작되고, 이후에 칼데라를 동반하는 대규모 규질 회류분출 극렬상의 화산과정으로 바뀌면서 여러 화산암층을 형성하였다(황상구, 1996).

유천소분지에서의 유천층군 화산암류는 하부에 주사산 안산암질암류와 상부에 운문산 유문암질암류로 구분된다(김상욱과 이영길, 1981). 주사산 안산암질암류는 하부로부터 팔용산 용회암, 비반상 안산암, 정각산층 및 범도리 안산암 등을 세분된 바 있다(김규봉과 황상구, 1988). 운문산 유문암질암류는 밀양에서 양산에 이르는 지역에서 대부분 회류용회암들로 구성되는데, 이들은 중간에 강하용회암이 협재되고, 구성성분의 차이가 다소 큰 3개의 암석단위로 구분되므로서 하부로부터 용회각력암, 데사이트질 회류용회암, 데사이트, 유산리층, 유문암질 강하용회암, 유문암질 회류용회암, 화제리층, 강하용회암, 유문데사이트질 회류용회암, 유문암 순으로 세분되었다(김규봉과 황상구, 1988; 황상구와 김상욱, 1990; Fig. 1). 또한 이 지역에서 양산 칼데라, 원동 칼데라, 삼랑진 칼데라 등의 3개 칼데라가 확인되면서 이 회류용회암과 강하용회암이 각기 칼데라 형성과 밀접하게 관련되어있음을 인식하고, 각 칼데라 형성과 관련된 분출암을 하나로 묶어 각각 양산용회암, 원동용회암과 삼랑진용회암으로 칭한 바 있다(황상구와 김상욱, 1990). 그리고 각 칼데라는 형성 후 속단계 산물로서 모두 환상암맥을 가지고, 칼데라에 따라 중앙도움 혹은 플러그, 소생관입체 등을 노출시킨다.

양산 칼데라는 양산시 바로 서쪽에 위치하며 칼데라 내부의 화산작용으로 인한 2.6×3.5 km의 작은 내칼데라(nested caldera)가 밝혀지므로서 선후기 칼데라로 나누어진다. 선기 양산 칼데라는 양산용회암의 분출에 의해 약 580~840 m의 심도로 함몰되었으며, 이에 뒤따른 관입암은 발견되지 않으나, 이후에 선기 양산 칼데라에 화산휴지기에 채워진 칼데라호 퇴적층으로서 유산

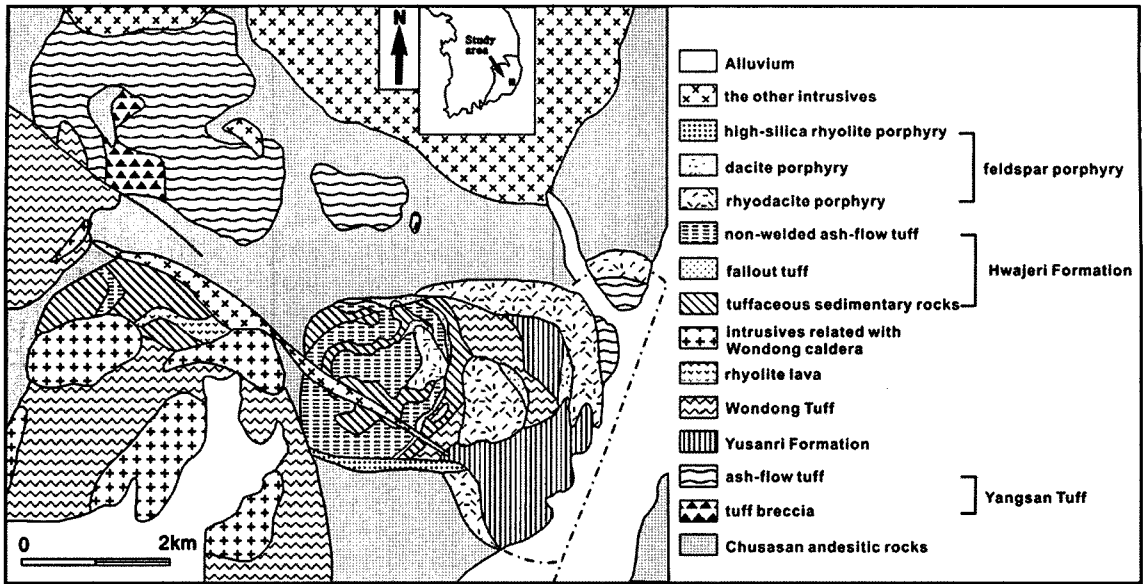


Fig. 1. Index map and generalized geological map around the Yangsan caldera.

리층과 다른 지역의 회류분출로부터 유입된 원동용회암이 노출된다. 반면에 후기 양산 칼데라는 화제리층 상부를 형성하는 용회암의 분출에 의해 다시 약 300 m의 함몰로 형성되었고, 이후의 잔류마그마에 의한 장석반암의 관입으로 환상암맥과 중앙도음을 나타내는 특징을 보인다(황상구와 김상욱, 1992). 따라서 이 양산 칼데라에서 유래된 분출암과 관입암을 양산 칼데라의 화산활동과 시공간적으로 관련시켜 (1) 양산 용회암의 하부와 상부, (2) 화제리층의 강하용회암과 비용결 회류용회암, (3) 장석반암의 유문데사이트반암, 데사이트반암과 고규질 유문반암 순으로 묶어 구별한다.

암석기재

양산용회암

양산용회암은 SiO₂ 함량이 64~76% 범위로서 데사이트에서 중규질 유문암에 속한다. 이 SiO₂ 함량은 본 용회암층 내에서 상부로 가면서 대체로 감소하는 경향을 보이는데 이에 따라 하부와 상부로 나눌 수 있다. 즉 하부는 76~70% 범위로서 중규질 유문암내지 저규질 유문암 성분이고 칼데라외부에서만 노출되며, 상부는 69~64% 범위로서 데사이트 내지 유문데사이트 성분이며 칼데라내부에서도 노출된다(황상구, 1996).

반정광물은 사장석, 석영, K-장석, 흑운모, 각섬석, 불투명광물 등으로 구성되며, 총함량이 21~38% 범위

로서 상당히 풍부하다(Table 1). 사장석 반정은 누대구조를 형성하고 파편상이거나 파열상이며, 그 함량은 12~34% 범위이다. 석영 반정은 거의 모든 곳에 함유되어 있고 그 함량이 1~7% 범위이며 대개 반곡상으로 용식되어 있다. K-장석 반정은 드물며(1~3%) Na-코발티니트레이트의 염색에 의하면 기질부에 K-장석이 풍부하게 함유되어있음을 보여준다. 흑운모는 드물고(0.2~1.2%) 대부분 산화철에 의한 오파사이트 림(opacite rim)을 형성한다. 각섬석도 드물고(<0.2%) 흑운모와 같이 외곽이 변질되어 오파사이트 림을 갖는다. 그리고 저어콘, 인회석 등이 미량으로 함유되어 있다.

양산용회암은 사장석, 각섬석, 불투명광물과 저어콘, 인회석 등이 다른 광물에 의해 둘러싸여 있어 초기에 정출되었음을 지시한다. 석영과 K-장석은 다른 광물로부터 둘러싸여 있지 않아 후기에 정출되었음을 지시한다.

반정광물의 모드조성을 상하부로 나누어 살펴볼 때, 하부 양산용회암에서 사장석은 12~26% 범위, 석영이 2~8% 범위, K-장석이 1~3% 범위이며, 이중 사장석은 하부일수록 적어지고 석영과 K-장석은 많아지는 경향이다(Table 1). 그리고 흑운모(1% 내외)는 대체로 하부일수록 많아지는 경향이고 각섬석(0.1% 내외)과 불투명광물(1~2%)은 상부일수록 많아지는 경향이다.

상부 양산용회암에서 사장석은 19~34% 범위이고 석영은 1~3% 범위이며 K-장석은 1~2% 범위이며(Table 1), 특히 칼데라내부에서 반정 함량이 많다. 여기서 이

Table 1. modal analyses(vol%) of selected samples from the volcanic rocks related to the Yangsan caldera.

rock unit	lower Yangsan Tuff				upper Yangsan Tuff			Hwajeri Formation			
								fallout tuffs			
sample No.	Hm660	HM490	HM644	HM291	HM546	HM588	HM90	HM715	HM714	HM727	HM704
glass	60.2	72.0	61.3	60.1	56.2	55.7	56.4	99.1	99.9	99.9	85.6
plagioclase	16.4	12.8	25.5	24.0	30	33.8	19.5	0.4			6.6
quartz	7.3	4.6	2.5	2.5	2.0	0.9	2.3	0.3			3.7
K-feldspars	2.7	1.7	1.5	1.4	2.1	0.8	0.8	0.1			1.7
biotite	1.2	0.7	0.6	0.5	0.7	0.3	0.2				0.1
hornblende		0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1				
opaques	1.6	1.3	2.0	2.2	2.8	1.8	2.8	0.1			0.2
zircon						0.2	0.1				
lithics	10.5	6.9	6.5	9.3	6.2	6.3	17.9				2.1
phenocrysts	29.2	21.2	32.2	30.7	37.7	38.0	25.8	0.9			12.3
pl/ph	56.2	60.4	79.2	78.2	79.6	88.9	75.6	44.4			53.7
q/ph	25.0	21.7	7.8	8.1	5.3	2.4	8.9	33.3			30.1
kf/ph	9.2	8.0	4.7	4.6	5.6	2.1	3.1	11.1			13.8
mf/ph	9.6	9.9	8.4	9.1	9.5	6.6	12.4	11.1			2.4
SiO ₂ (wt%)	75.65	-	70.92	70.23	69.02	68.77	64.50	78.01	73.46	77.16	74.32

rock unit	Hwajeri Formation				Feldspar porphyry						
	nonwelded ash-flow tuffs				rhyodacite porphyry			dacite porphyry		high-silica rhyolite	
	HM585	HM562	HM587	HM710	HM534	HM743	HM575	HM545	HM742	HM702	HM744
glass	65.4	59.1	69.2	70.9	87.3	86.5	85.8	75.2	76.3	69.5	67.5
plagioclase	10.3	22.3	9.1	11.7	11.9	12.5	12.9	23.7	22.5	13.9	15.7
quartz	7.2	3.7	5.2	2.8	0.1	0.3	0.4	0.2	0.1	7.1	7.4
K-feldspars	0.4	1.5	1.2	1.6	0.2	0.1				8.2	8.0
biotite	0.3	0.2	0.3	0.4		0.1		0.1	0.2	1.0	1.2
hornblende		0.1							0.2		
opaques	0.3	2.1	0.5	0.7	0.5	0.6	0.9	0.8	0.7	0.3	0.2
zircon											
lithics	16.2	11.0	14.5	11.9							
phenocrysts	18.5	29.9	16.3	17.2	12.7	13.6	14.2	24.8	23.7	30.5	32.5
pl/ph	55.7	74.6	55.8	68.0	93.7	91.9	90.8	95.6	94.9	45.6	48.3
q/ph	38.9	12.4	31.9	16.3	0.8	2.2	2.8	0.8	0.4	23.3	22.8
kf/ph	2.2	5.0	7.4	11.6	1.6	0.7				26.9	24.6
mf/ph	3.2	8.0	3.1	6.4	3.9	5.1	6.3	3.6	4.6	4.3	4.3
SiO ₂ (wt%)	-	68.84	71.05	72.88	69.87	71.12	71.68	66.86	65.19	77.14	77.11

들의 변화는 뚜렷하지 않으나 하부 양산응회암보다 사장석이 증가되고 석영과 K-장석이 감소되는 것은 뚜렷하다. 또한 불투명광물이 하부 양산응회암보다 많으나 뚜렷한 변화성은 보이지 않는다.

양산응회암 내의 조직은 화성쇄설성 특징을 잘 나타낸다. 편평화된 부석으로서의 피아메(fiamme)는 노두와 박편에서 인지되며, 이의 결정 함량이 기질보다 적은 편이다. 샤아드는 액시올리틱 결정작용에 의한 탈파리화로 그 윤곽이 뚜렷하게 인지되며, 이로 인해 전

체적으로 파리쇄설상 석리(vitroclastic fabric) 혹은 완배열상 석리(eutaxitic fabric)가 파괴되어 있지만 그 정도가 약할 때는 오히려 석리의 윤곽이 선명할 경우도 있다. 대부분 각상 구조를 갖는 암편(lithic fragment)의 함량은 6~10%로 적은 편이지만 지역에 따라 18%되는 곳도 있다(Table 1).

화제리층

양산 칼데라 내부에서 화제리층은 응회질 퇴적암 및

강하응회암층 3매와 비용결 회류응회암층 3매로 구성되고 서로 교호한다(황상구와 김상욱, 1992). 응회질 퇴적암 및 강하응회암층은 각층 상부에 강하응회암으로 구성되고 상위의 비용결 회류응회암으로 이어지는 화산연속성을 나타낸다.

이 응회암 중에 강하응회암은 SiO_2 함량이 73~78% 범위로서 저규질 유문암에서 고규질 유문암에 해당되며, 비용결 회류응회암은 SiO_2 함량이 68~73% 범위로서 유문데사이트와 저규질 유문암에 해당된다(황상구, 1996).

반정광물을 살펴보면 강하응회암에서는 대부분 미세하게 파편화되었기 때문에 간혹 석영과 장석편만이 12% 이내 범위로 존재하며 이는 원래의 함량을 그대로 나타나지 않는 것으로 생각된다. 그러나 비용결 회류응회암에서는 약간의 파편화를 무시한다면 그 총합량이 16~30% 범위로서 상당히 큰 변화폭을 나타내며 (Table 1), 사장석, 석영, K-장석, 흑운모, 불투명광물 등으로 구성된다. 사장석 반정은 파편상이거나 파열상이고 누대구조를 가지며, 큰 것은 녹색석으로 변질되어 있다. 그 함량은 9~23% 범위로서 변화폭이 매우 크다 (Table 1). 석영 반정은 대부분 작은 입자로서 각상이며 함량은 2~8% 범위이다. K-장석 반정은 퍼사이트 조직을 가지고 파동소광을 하는 것도 있으며 2% 이하의 함량을 가진다. 흑운모는 드물고(<0.4%), 불투명광물(<2.1%), 각섬석(<0.1%)이 수반된다. 상호 관계에 의하면 초기에 불투명광물과 사장석이 먼저 정출되었으며 후기에 석영과 K-장석 등이 정출되었다.

이 비용결 회류응회암은 화성쇄설성 석리가 현저하며 용결되어 있지 않다. 샤아드는 거의 변형되지 않고 반달형, 창촉형, Y자형의 원래모양을 거의 그대로 간직한 채로 남아 있는 파리쇄설상 석리를 보여준다. 압편은 11~17% 포함되어 있어 기타 응회암보다 그 함량이 많은 편이다. 그러나 강하응회암은 미세한 화산회가 동심원상으로 성장한 누적라필리(accretionary lapilli)가 적으나마 입도차이에 의해 흔히 인지되는 것이 특징적이다.

장석반암

양산 칼데라의 중심부와 경계부를 따라서 관입한 장석반암 관입체는 SiO_2 함량이 65~77% 범위로서 데사이트에서 고규질 유문암에 이르는 상당히 넓은 폭을 가진다. 그러나 이들은 주원소 조성에 의하여 3개 그룹으로 나누어진다. 즉 69~72% 범위의 유문데사이트 반암 내지 저규질 유문반암(이후 유문데사이트반암으로 칭함), 65~67% 범위의 데사이트반암과 77% 내외의

고규질 유문반암으로 구별된다(황상구, 1996). 이들은 양산 칼데라 아래의 마그마챔버 위로 뺀 환상암맥, 플러그인 것으로 해석되고 칼데라 함몰후의 잔류마그마 소생에 의한 관입체라고 생각된다.

장석반암은 대체로 완정질로서 미정질이다. 이 장석반암에서 동일 마그마계로 인지되지 않는 고규질 유문반암을 제외하면 반정광물은 12~25% 범위로서 대부분 사장석이고 불투명광물, 석영, K-장석, 흑운모 등이 각기 1% 이내로 수반된다. 즉 사장석 반정은 12~24% 범위로 함유되고 불투명광물은 0.5~0.9% 범위까지 함유되며 석영 반정은 0.4% 범위까지 포함되어 있다. K-장석과 흑운모 반정은 0.2% 이내 범위로 포함되어 있으나 인지되지 않는 곳도 있다(Table 1).

장석반암에서의 석기는 석영, K-장석, 사장석, 흑운모 등으로 구성된다. 사장석은 흔히 라쓰상의 미정을 이루며, 석영과 K-장석은 미문상으로 연정되어 있다. 이와 달리 고규질 유문반암은 반정이 30~33% 정도로 함유하며, 각 반정광물은 사장석이 13~16% 범위이고 특히 석영이 7% 내외와 K-장석이 8% 내외로 풍부하다(Table 1). 그러면서도 기타 반암에서 보다 변화폭은 훨씬 좁은 편이다.

반정광물의 함량변화

전체적인 조성구배

양산 마그마계에 속하는 화산암류의 반정광물의 모드조성은 강하응회암을 제외하면 대체로 사장석 반정이 9.1~33.8% 범위이고 석영 반정이 0.1~7.4% 범위이며 K-장석 반정이 0.1~8.2% 범위이다. 그러나 강하응회암은 이들의 함량이 이보다 훨씬 적은데 이는 먼저 정출된 반정광물이 심하게 파쇄되어 원래 함량보다 크게 감소되었기 때문인 것으로 생각된다. 왜냐하면 강하응회암은 강력한 폭발을 일으키는 수증기마그마성 분출에 의하여 이미 정출된 반정이 90% 이상 잘게 분쇄되었기 때문이다(황상구와 김상욱, 1992). 그리고 반정들의 총합량은 12.7~38.0% 범위이다. 이 총합량에 대한 각 반정비율은 사장석 반정비율이 26.9% 이하의 범위이다(Table 1). 그리고 노음광물 조성은 알칼리 성분 이동성이 큰 화제리층의 강하응회암을 제외하면 Q가 17.8~39.3 범위이고 Or이 9.2~29.2 범위이며, 또한 Ab가 14.3~42.6 범위이고 An이 1.1~17.9 범위이다 (Table 2).

반정비율과 SiO_2 에 대한 관계를 살펴본다면, 양산응회암, 화제리층, 장석반암 등의 암석단위에 크게 개의치 않고 SiO_2 함량이 많아질수록 전체적으로 사장석

Table 2. CIPW norms calculated from the major element compositions of selected samples from the volcanic rocks related to the Yangsan caldera(Hwang, 1996).

	Hm660	Hm644	Hm291	Hm546	Hm588	Hm90	Hm715	Hm714	Hm727	Hm704
Q	35.87	29.61	28.85	23.25	23.22	17.77	50.46	48.85	56.12	42.59
Or	19.65	17.84	19.33	20.03	14.68	15.63	7.85	2.03	16.62	19.94
Ab	34.27	34.76	34.43	39.35	41.97	39.65	25.55	10.93	7.49	24.17
An	5.19	11.32	9.37	11.92	13.78	16.8	7.31	17.81	7.41	4.81
C	0.85	2.32	2.38	0.79	0.48	0.23	3.64	5.33	5.99	4.39
Di										
Hp	1.04	2.59	3.75	2.5	3.77	5.77	1.91	1.86	3.48	1.43
En	0.75	0.76	1.59	1.18	1.54	4.06	1.48	1.64	3.29	1.21
Fs	0.28	1.83	2.16	1.32	2.23	1.71	0.43	0.22	0.19	0.22
Ilm	0.27	0.33	0.43	0.61	0.66	0.88	0.29	0.29	0.28	0.29
Mt	2.77	1.15	1.36	1.15	1.22	3.28	2.87	2.74	2.46	2.26
Hm										
Ap	0.11	0.09	0.13	0.42	0.21		0.13	0.17	0.15	0.13
	HM562	HM587	HM710	HM534	HM743	HM575	HM545	HM742	HM702	HM744
Q	21.76	39.37	39.29	25.51	24.72	31.86	21.99	19.61	38.89	34.79
Or	22.39	22.22	21.92	28.36	21.71	9.19	16.13	15.64	26.55	29.15
Ab	38.10	14.30	23.77	33.41	42.64	37.98	37.70	38.48	27.31	31.79
An	11.24	14.48	5.58	5.21	5.65	13.38	15.44	17.86	1.81	1.12
C		3.17	4.44	3.48	0.29		1.16		1.81	1.21
Di	0.12					0.42		0.71		
Hp	4.33	4.48	2.04	2.05	1.43	5.32	4.77	2.40	0.78	0.23
En	1.63	2.18	1.86	0.90	1.25	2.33	2.44	2.40	0.50	0.08
Fs	2.70	2.30	0.18	1.15	0.18	2.99	2.33		0.28	0.14
Ilm	0.67	0.51	0.35	0.49	0.38	0.43	0.85	0.87	0.17	0.11
Mt	1.18	1.27	2.44	1.19	3.00	1.23	1.20	4.01	2.55	1.56
Hm								0.05		
Ap	0.21	0.20	0.17	0.30	0.19	0.19	0.76	0.38	0.13	0.04

Rock units for the samples are the same as Table 1.

비율은 거의 직선적으로 감소하고 석영과 K-장석 비율은 대체로 직선적으로 증가하는 조성구배를 나타낸다(Fig. 2). 이러한 조성구배는 마그마챔버 내에서 냉각과 정출작용이 일어날 동안에 마그마가 조성누대되어 있었음을 나타낸다.

그러나 화학조성을 고려하지 않고 반정광물만으로 그 변화성을 살펴본다면, 반정 총함량이 많아질수록 모든 화산암류가 전체적인 변화성을 보이지 않고 각 암석단위 내에서만 직선적인 변화성을 보인다. 즉 (1) 양산응회암, (2) 화제리층의 비용결 회유응회암, (3) 장석반암 내에서의 유분데사이트반암-데사이트반암, (4) 고규질 유분반암 등의 암석단위로 뚜렷하게 나누어지고 각 암석단위 내에서 뚜렷한 변화성을 나타낸다(Fig. 3). 이와같이 전체적인 조성구배를 가지면서 암석단위 간에 뚜렷한 차별성을 보이는 것은 마그마챔버 내에서의

냉각과 정출작용이 일어날 때 큰 규모의 화산사건, 혹은/그리고 상당한 동안의 화산휴지기에 따르는 온도 압력의 재편을 의미하며, 각 암석단위 내에서 뚜렷한 변화성은 아마도 냉각 정출시의 마그마의 체계적인 조성누대를 의미하는 것으로 해석된다. 따라서 앞으로 모드조성 변화성을 해석할 때 위의 암석단위에 따르는 것이 효과적일 것으로 생각된다.

양산응회암의 모드조성 변화

양산응회암에서 사장석 반정비율은 상부로 갈수록 대체로 증가되는 변화성을 보이며, 반면에 석영과 K-장석 반정비율은 상부로 가면서 감소되는 조성구배를 보인다(Fig. 4). 그러나 사장석 반정함량은 상부로 갈수록 대체로 증가하면서도 함량이 다소 많아졌다 적어졌다하는 지그재그형의 파동상 변화성을 나타내며, 석

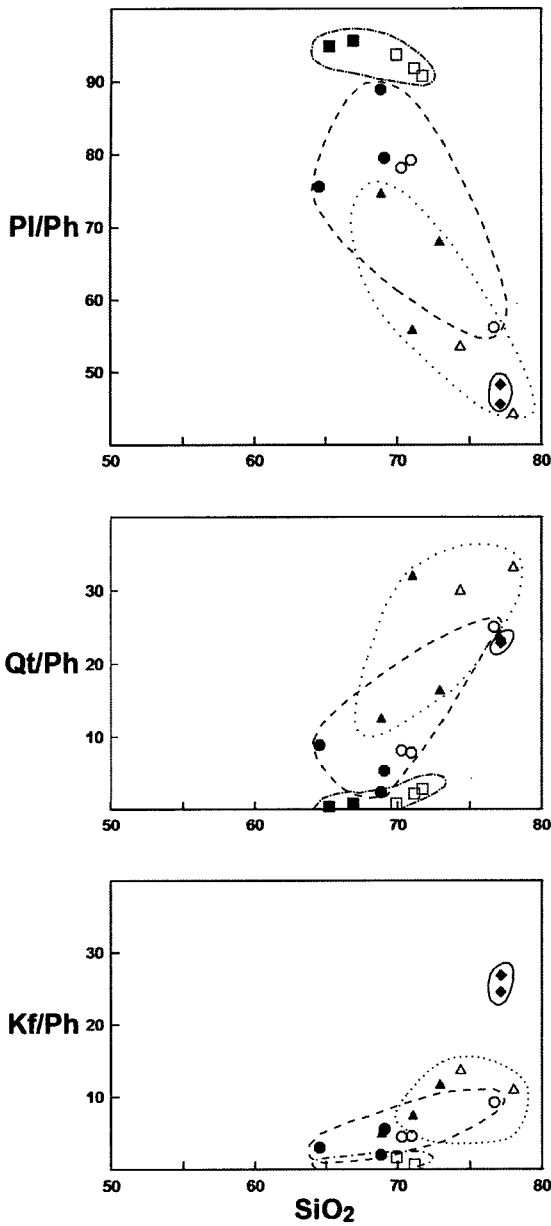


Fig. 2. Proportion of phenocrysts versus SiO₂ variation diagram for the volcanic rocks related to the Yangsan caldera. Ph, total phenocryst content; Pl, plagioclase content; Q, quartz content; Kf, K-feldspars content. Open circles, lower Yangsan Tuff; Solid circles, upper Yangsan Tuff; Open triangles, fallout tuff in the Hwajeri Formation; Solid triangles, nonwelded ash-flow tuff in the Hwajeri Formation; Open squares, rhyodacite porphyry; Solid squares; dacite porphyry; Diamonds, high-silica rhyolite porphyry.

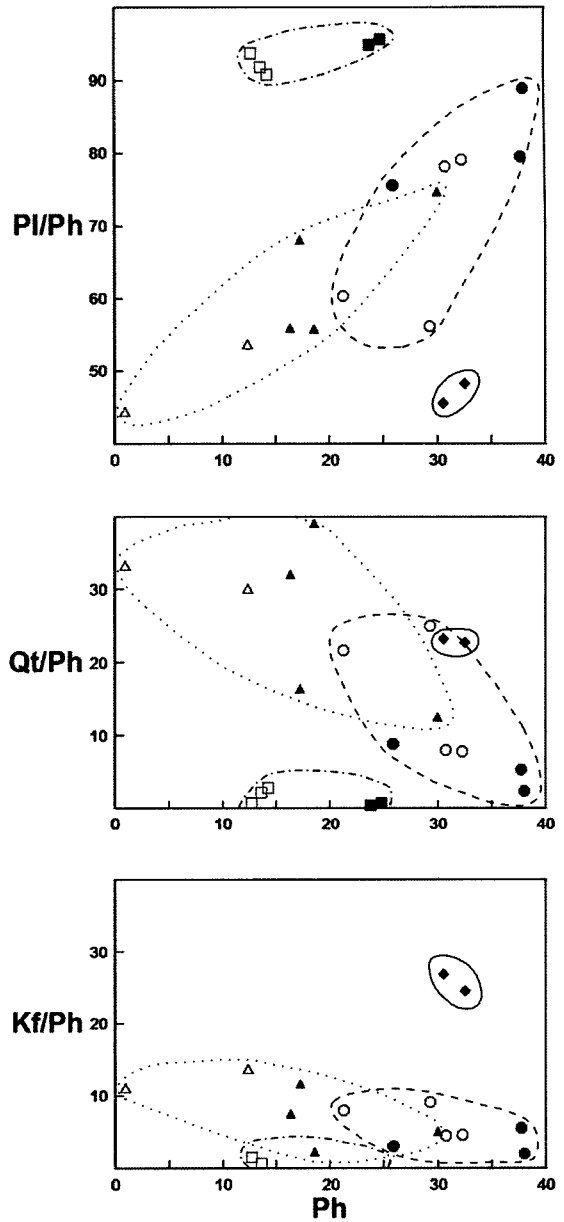


Fig. 3. Proportion of phenocrysts versus total phenocrysts variation diagram from modal compositions of the volcanic rocks related to the Yangsan caldera. Symbols are the same as in Fig. 2.

영과 K-장석 반영 함량은 상부로 가면서 큰 변동상 변화없이 감소하는 조성구배를 나타낸다(Fig. 5).

이와같이 상부로 갈수록 반영비율이 가지런하게 증

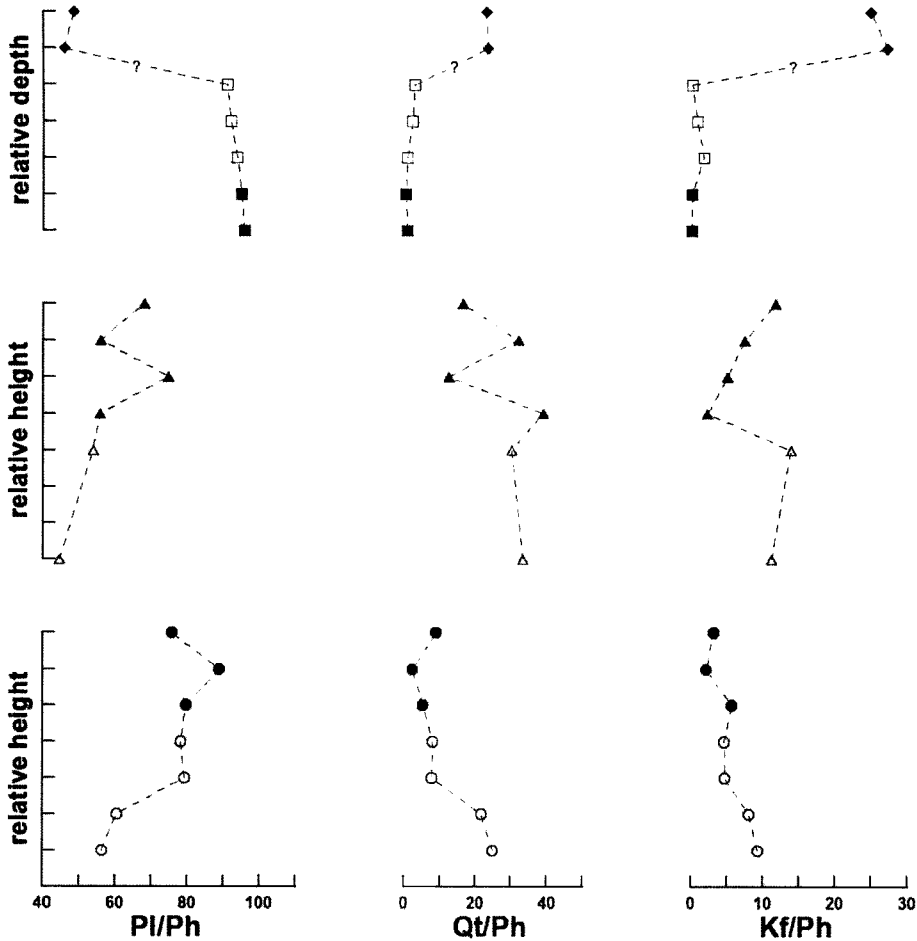


Fig. 4. Diagram showing relative height or depth versus proportion of phenocrysts. Symbols are the same as in Fig. 2.

가하거나 감소하는 직선상 조성구배는 전술한 바와 같이 냉각과 정출과정 동안에 마그마챔버 내에서 일어났던 마그마진화에 의한 조성누대에 일치되는 모드조성의 구배를 나타내는 것으로 해석된다. 그리고 이에 따르면서 상부로 가면서 반정함량이 파동상 변화성을 보이는 것은 조성누대된 마그마로부터 분출과정 속에 간헐적인 분출이 수반된데 그 원인이 있는 것으로 생각된다.

화제리층내 응회암의 모드조성 변화

화제리층 내의 응회암은 반정비율과 SiO₂의 관계에서 SiO₂가 증가할수록 직선상으로 사장석 반정비율이 감소되고 석영과 K-장석 반정비율이 거의 직선상으로 증가되는 경향을 나타낸다(Fig. 2). 반대로 반정비율과 총반정함량의 관계에서 총반정함량이 증가할수록 사장

석 반정비율은 체계적으로 증가되고 석영과 K-장석 반정비율은 체계적으로 감소되는 직선상 변화를 나타내는 조성구배를 보인다(Fig. 3). 그리고 화제리층 내에서 강하응회암을 제쳐두고 비용결 회류응회암 3매에 대해 반정광물의 함량과 비율을 알아보자. 사장석 반정은 그 비율이 상부로 갈수록 증가됐다 감소하고 다시 증가되는 현저한 파동상 변화를 보이며(Fig. 4), 마찬가지로 이의 함량도 비율의 변화와 같이 파동상 변화를 보이지만 그렇게 현저하지 않다(Fig. 5). K-장석 반정은 그 비율과 함량이 상부로 갈수록 큰 변화없이 약간의 증가를 나타낸다(Fig. 4, 5).

화제리층 내의 응회암이 사장석, 석영과 K-장석의 반정비율이 각각 대체로 체계적으로 직선상의 변화를 보이는 것은 전술한 바와 같이 마그마챔버 내에서 조성누대에 의한 광물의 조성구배를 의미한다. 그러나 비

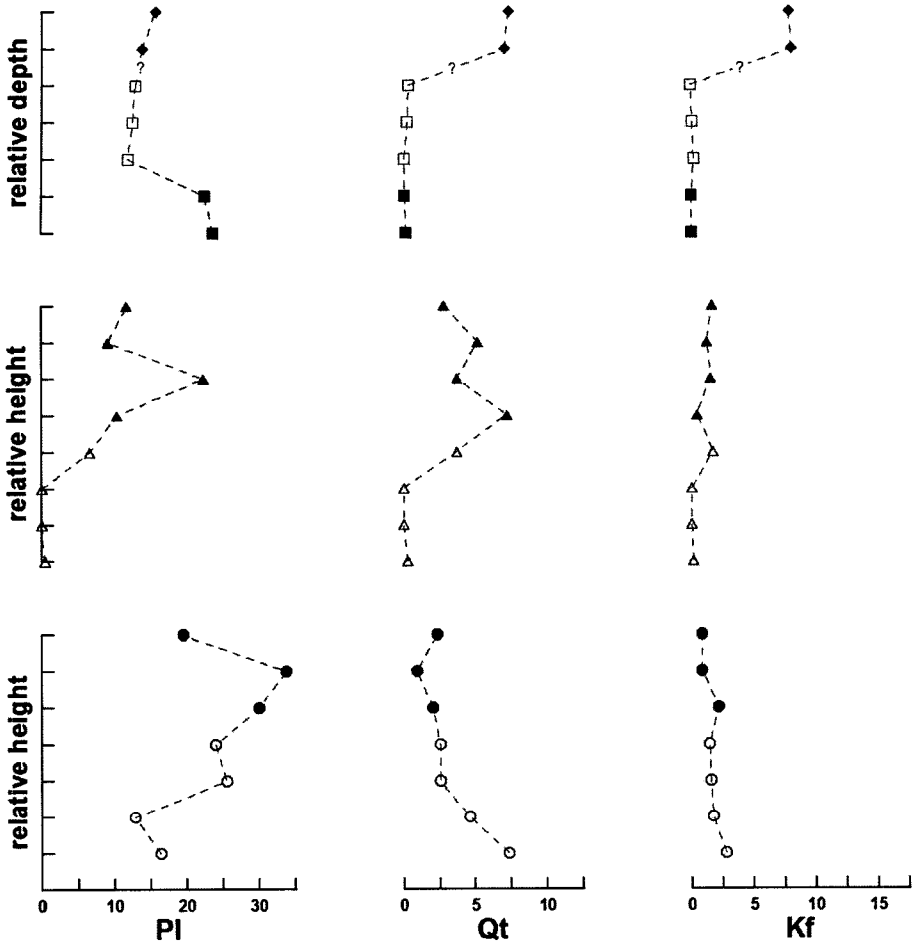


Fig. 5. Diagram showing relative height or depth versus total phenocryst content. Symbols are the same as in Fig. 2.

용결 회류용회암은 상부로 가면서 사장석과 석영의 안정비율과 함량이 현저한 파동상 변화를 나타내는데, 이는 이와같이 조성누대된 마그마챔버 내의 마그마가 냉각과 정출작용을 일으킬 때 연속적인 분출이 아니고 시간적 간격이 큰 간헐적인 분출에 의한 것임을 지시한다. 앞에서 설명한 바와 같이 비용결 회류용회암 내에 응회질 퇴적암층이 협재되어 있음이 이의 직접적인 증거가 되고 분출기 사이의 화산휴지기가 얼마간 유지되었음을 암시한다.

장석반암의 모드조성 변화

장석반암 관입체는 3개 그룹 가운데 고규질 유문반암을 제외하면 유문데사이트반암과 데사이트반암이 함께 조성적으로 역누대되어 있다(황상구, 1996). 즉 동부 환상암맥과 중앙관입체는 칼데라의 외측부에서 내

부로 또한 상부에서 하부로 저규질 유문반암 혹은 유문데사이트반암에서 데사이트반암으로 점이된다. 이들 간에는 관입에 의한 고체-액체관계를 보여주지 않고 점이적인 액체-액체관계를 보이는데, 이는 성분이 다른 두 암석이 정지전에 화학적으로 조성누대된 동일한 마그마챔버에서 유래되었다는 강한 증거를 제공한다. 즉 유문데사이트반암은 3개의 반상 관입체에서 모두 산출되지만 데사이트반암은 동부 환상암맥의 서측부와 중앙관입체의 동측부에서 칼데라 중심부에 해당되는 깊은 계곡 바닥에서만 노출된다. 그리고 고규질 유문반암은 후기 양산 칼데라의 남서 경계부를 따라 관입한 환상암맥으로만 독립적으로 산출된다. 이 고규질 유문반암맥은 그 내에서 점이적인 모드조성 변화가 발견되지 않고 이의 동측에서 유문데사이트반암과 관입접촉하고 있다.

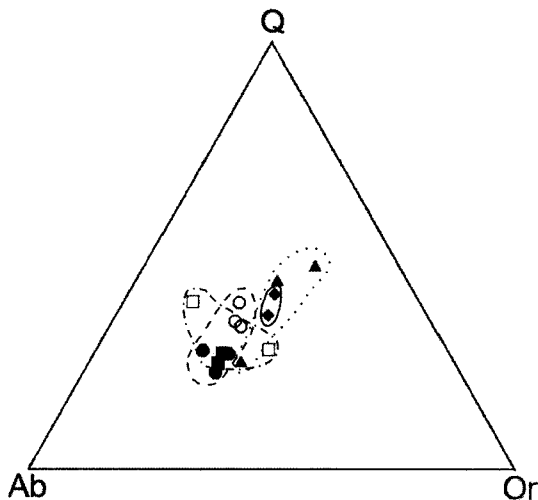


Fig. 6. Normative Q-Ab-Or diagram shows normative composition of the volcanic rocks related to the Yangsan caldera. The fallout tuffs are excluded from the Hwajeri Formation because of their mobility of alkali. Symbols are the same as in Fig. 2.

유문데사이트반암-데사이트반암과 나머지 고규질 유문반암과의 관계는 반정비율-SiO₂ 관계, 반정비율-총반정함량 관계, 반정비율-심도 관계, 각 반정함량-심도 관계 등에서 모두 서로 현저하게 격리되는 차이를 보인다(Fig. 2, 3, 4, 5). 여기서 심도는 상대적 고도차에 의해 계산되었다. 고규질 유문반암을 제외하고 유문데사이트반암과 데사이트반암을 함께 생각하면, 이 양자는 반정비율과 SiO₂의 관계에서 연속적인 직선상 변화를 뚜렷하게 나타낸다(Fig. 2). 그러나 이 양자는 반정비율과 총반정함량의 관계에서 동일한 직선상에 놓여 있지만 총반정함량에 있어 서로 격리되는 상당한 차이를 나타낸다(Fig. 3). 그리고 이 양자는 반정비율과 심도의 관계에서나 각 반정함량과 심도의 관계에서 고도가 높아질수록 사장석의 반정비율이나 함량이 대체로 감소되는 경향을 보이고 석영과 K-장석의 반정비율이나 함량이 증가되는 경향을 나타낸다(Fig. 4, 5).

모든 관계에서 고규질 유문반암이 유문데사이트반암-데사이트반암으로부터 멀리 격리되는 차별성을 나타내는 것은 큰 화산사건이나 조성누대에 의한 것이라기 보다 차라리 진화과정이 다르거나 마그마 성인이 다른 마그마계로부터 유래되었을 가능성(황상구, 1996)을 암시한다. 또한 이 양자가 반정비율과 총반정함량의 관계에서 연속성을 보이면서 총반정함량의 차이가 커서 이대분되는 것은 사장석 반정함량 차이에서 기인된다.

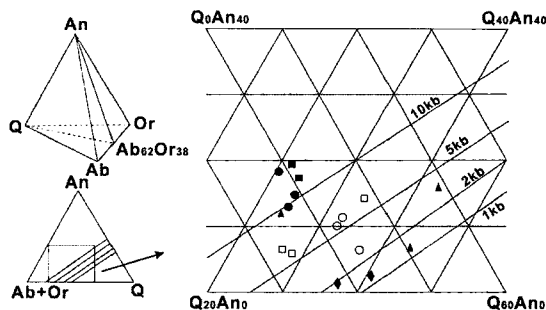


Fig. 7. Normative Q-An-(Ab-Or) relationship is projected on a plane Q-An-Ab62Or38. Estimated position of quartz-plagioclase cotectic surface at 1, 2, 5 and 10kb water vapor pressure are also shown in the figure. The fallout tuffs are excluded from the Hwajeri Formation.

이에 대한 가능성은 아마도 먼저 정출된 반정이 하부로 이동, 혹은 칼데라 함몰 직후에 틸바구니를 통해 누대된 마그마가 상승할 때 시간에 따라 출조심도(tapping depth)의 급변 등을 생각할 수 있으며 더 명확한 판단을 위해 더 많은 자료가 요구된다.

토 의

마그마챔버에서는 분화된 여러 부분과 단계에서 물리적 조건을 토의하기 위해서 규산염 용융물을 포함한 공존 반정광물의 함량변화를 알아보아야만 한다. 일반적으로 회류용회암층은 화구로부터 분출이 계속되는 동안 연속적으로 형성된 수많은 회류단위로 구성된다. 이때 화구로부터 초기에 나온 분출물은 층서단위의 하부 회류단위를 형성하고 나중에 나온 분출물은 상부 회류단위를 형성한다. 마그마가 화구로부터 체계적으로 분출한다면, 상하부 회류단위 간의 성분적인 대조는 마그마챔버 내에서 체계적인 마그마의 조성변화를 보여줄 것이다. 일반적으로 부석과 화산회는 분출후에 쉽게 변질되지만(Aramaki and Lipman, 1964), 조성과 변질도 사이에 대비할 수 있는 확실한 요인을 알 수는 없다. 그러므로 이러한 현상은 여기서 무시한다.

초기에 형성된 마그마는 상승하는 동안에 분별결정 작용과 지각물질의 혼염에 의해 화학조성이 다소 변화된 것으로 토의하였다(황상구, 1996). 그리고 기존 연구자들은 분출물에 대한 조성자료를 기초로 하여 분출 이전 한 마그마챔버 내에서의 조성변화에 관해 토의하였다(Lipman, 1966; Lipman et al., 1966). 본 화산암류에 대한 반정광물과 노음광물의 조성관계를 이용하여 고온-고압실험 자료와 관련시키므로써 마그마의 어

면 물리적 조건과 분출양상(eruptive mode)을 토의한다. 그러나 물리적 조건을 지배하는 것은 마그마챔버 전반에 걸쳐서 세워지지는 않는다. 그래서 유용한 물리적 조건은 마그마챔버에서 어떤 단계의 결정작용 전반에 걸친 평균치로서 생각해야만 하였다.

앞 장에서 설명한 모드조성의 차이를 설명하기 위해서는 다음과 같은 것들을 생각할 수 있다. 첫째로 가장 단순하게 생각한다면 이는 냉각과 정출과정 동안에 하나의 균질한 마그마로부터 간헐적으로 분출한 데서 비롯되었다고 할 수 있다. 그러나 이 설명은 여기서 불가능하다. 왜냐하면 본 양산 마그마계에서 화학적인 조성 차이가 상당히 있기(황상구, 1996) 때문이고 반정합량이 체계적으로 증가되지 않기 때문이다. 둘째로 냉각과 정출과정 동안에 마그마챔버 내에서의 누대된 마그마로부터 간헐적인 분출에 의한 것으로 생각할 수 있다. 마그마챔버 내에서의 누대는 비평형정출에 의한 분별결정작용(fractional crystallization)과 이와 동시에 결정침전(crystal settling)에 의한 결정분별작용(crystal fractionation)으로부터 형성될 수 있다. 셋째로 각 압체에 대한 마그마가 초기 단계에서부터 독립적으로 형성되었다는 것에 기인된다고 할 수도 있다. 이때의 조성 차이는 마그마 형성단계의 물리적 조건 차이, 모물질의 조성 차이, 마그마 상승시의 결정과정 차이 등에 의해 나타날 수 있다. 그러나 이 설명은 고규질 유문반암을 제외한 기타 화산암류는 동일한 마그마챔버에서 유래되는 화학적인 동일성을 내포하고 있기(황상구, 1996) 때문에 불가능하다. 넷째로 모든 압체의 마그마가 원래 연속적으로 형성되어 상승할 때 하나의 초기 마그마가 여러 개로 분리되어 인접지역에 multi-cupola를 형성하여 연속적으로 분출한 것으로부터 연유된다고 할 수도 있다. 이 가능성은 동일한 마그마챔버에서 유래되면서도 수평적으로 칼데라 외곽을 통과하거나 관입한 것이 이에 대한 논란의 대상이 되겠으나 현재로서 이를 설명해 줄 수 있는 압체의 존재가 보고된 바 없기 때문에 불필요하다.

반정비율과 SiO_2 에 대한 관계를 살펴본다면, 양산응회암, 화제리층과 장석반암 등의 암석단위에 크게 개의치 않고 SiO_2 함량이 많아질수록 전체적으로 사장석 비율은 하나의 단일 변화선상에서 거의 체계적으로 감소하고 석영과 K-장석 비율은 대체로 점진적으로 증가하는 직선상 조성구배를 나타내는데(Fig. 2), 이는 조성구배에 따르는 것으로도 볼 수 있다. 그러므로 이러한 조성구배는 양산 마그마계의 화성물질이 하나의 단일 마그마챔버에서 유래되었음을 시사하고 마그마의 정출트렌드를 나타내는 것으로 볼 수 있는데, 이는 하

나의 단일 마그마챔버 내에서 냉각과 정출작용이 일어날 동안에 마그마가 조성누대되어 있었다고 결론지을 수 있다.

반정광물의 조성구배로부터 냉각과 정출작용이 일어날 때 마그마챔버 내에서의 마그마가 조성누대되었다고 해석하는 것은 고규질 유문반암을 제외한 본 화산암류가 하나의 단일 마그마챔버에서 유래되었다는 것(황상구와 김상욱, 1992)에 근거를 두고 화학조성에 의해서 분출전후의 마그마챔버 내에서의 조성누대를 일으켰다고 해석한 바(황상구, 1996)에 일치되기 때문에 지지된다. 그러면 전체적인 광물의 조성구배로부터 마그마의 조성누대를 설명해줄 수 있는 것 중의 하나는 마그마챔버 내의 모양과 출조 과정에 의해 가능하다. 마그마챔버는 수직으로 조성구배되어 있고 화도가 이의 꼭대기에서 열리어 마그마가 출조되기 시작했을 것이며, 이 화도를 통하여 점진적으로 마그마가 이의 상부에서부터 하부쪽으로 분출되어 나갔을 것이다. 양산응회암의 하부와 상부는 분리된 마그마가 아니고 하나의 동일한 마그마에서 분출되었다. 왜냐하면 화학성분과 반정광물의 성질이 동원마그마성이기 때문이고 이들 간의 조성변화가 연속적인 직선상 변화를 보이기 때문이다. 여기서 양산응회암은 급속도로 분출하는 회유응회암 내에서 존재하는 조성변화가 이들을 분출한 마그마챔버 내에서의 일차적인 조성누대를 반영한다는 것(Lipman *et al.*, 1966; Smith and Bailey, 1966)에 의해 설명된다.

그러나 화학성분을 고려하지 않고 오로지 반정광물에만 의해 그 변화성을 살펴본다면, 반정 총합량이 많아질수록 모든 화산암류가 전체적인 조성구배를 보이지 않고 각 암석단위 내에서만 체계적인 조성구배를 나타낸다. 즉 (1) 양산응회암, (2) 화제리층의 비용결회유응회암, (3) 장석반암 내에서의 유문데사이트반암-데사이트반암, (4) 고규질 유문반암 등의 암석단위로 뚜렷하게 나누어지고(Fig. 3) 이 암석단위 내에서만 반정광물의 모드조성이 점진적으로 증가 혹은 감소하는 뚜렷한 조성구배를 나타낸다(Fig. 3). 또한 암석단위 내에서 후기 분화물일수록 사장석 반정의 함량과 그 비율이 점진적으로 풍부해지고, 석영과 K-장석 반정의 함량과 그 비율이 대체로 점점 감소되는 경향을 나타낸다(Fig. 4, 5). 그리고 노음광물 조성에 따르면 각 암층의 상부로 감에 따라 Q-An-Or 삼각도에서 노음 석영이 감소되고 노음 사장석이 풍부해지는 위치로 옮겨진다(Fig. 6). 마찬가지로 Q-An(Ab-Or) 비는 Q-AnAb₆₂-Or₃₈ 면상이나 가까이 투영되며, 따라서 이 Q-An(Ab-Or) 면상에 투영한 Q-An(Ab-Or) 사면체에서 후기 분

화물일수록 노음 사장석이 풍부해지고 노음 석영이 줄어드는 위치로 옮겨지는 조성변화를 나타낸다(Fig. 7). 이와같은 조성변화는 마그마챔버 내에서 상부로 반정함량의 차이가 있고 화학조성의 차이가 존재한다는 것을 나타낸다. 즉 이 차이는 사장석 반정이 마그마챔버 내의 하부에서 더 풍부하고 석영과 K-장석 반정은 상부에서 더 풍부하다는 것을 반영하며 화학성분도 이에 일치되어 있음을 의미한다. 예를들면 최초기 분출물과 최후기 분출물 사이의 SiO_2 함량 차이는 미국 네바다 남부의 한 화쇄류 내에서 8%에 달하는 조성차이(Lipman *et al.*, 1966)와도 비교될 수 있다. 따라서 전체적인 조성구배를 가지면서 암석단위 간에 뚜렷한 조성구배 차이를 보이는 것은 마그마챔버 내에서의 냉각과 정출작용이 일어날 때 칼데라 운회에 일치되는 큰 규모의 화산사건, 혹은/그리고 상당한 동안의 화산휴지에 따르는 온도 압력의 물리적 변화를 의미하며, 각 암석단위 내에서 뚜렷한 조성구배는 아마도 이미 형성된 마그마의 조성누대를 그대로 반영하는 것으로 생각해야만 한다. 그리고 마그마챔버 내의 단순 조성구배뿐만 아니라 각 암층을 형성시킨 화산사건별 간헐적 분출맥동과 이에 따른 영향도 같이 나타내는 것으로 볼 수 있다.

양산옹회암과 화제리층 옹회암에서 반정함량과 그 비율이 대체로 체계적인 변화를 따르면서 상부로 가면서 반정함량과 그 비율이 파동상 변화성을 보이는데(Fig. 4, 5), 이는 조성누대된 마그마챔버 내에서 마그마가 냉각과 정출작용을 일으킬 때 연속적인 분출이 아니고 간헐적으로 맥동적 분출에 의한 것으로 해석된다. 왜냐하면 이의 직접적인 증거로서는 앞장에서 설명한 바와 같이 비용결 회류옹회암 내에 옹회질 퇴적 암층이 협재되어 있기 때문이다. 반정비율과 총반정함량의 관계에서 유문데사이트반암-데사이트반암은 연속적인 변화를 보이지만 총반정함량의 차이가 커서 두 부분으로 나누어진다. 이는 사장석 반정함량 차이에서 기인된 것이며, 아마도 먼저 정출된 사장석 반정이 잔류용융체와의 비중차이에 의해 하부로 이동하는 결정 침전에 의해 분리되었거나 칼데라함몰 직후에 마그마 챔버의 불규칙한 지붕이나 찢어진 틈바구니로 누대된 마그마가 상승할 때 시간에 따라 관입심도의 차이가 컸던데 기인되는 것으로 생각된다.

그러면 본역에서 일어난 양산 마그마계의 활동과정을 요약하면 다음과 같다. 본문에서 반정광물과 노음 광물의 조성변화 뿐만 아니라 화학조성과 동위원소 자료에 의하면, 양산 칼데라운회에는 두개의 마그마계가

활동하였음이 인지되었다(황상구, 1996). 이중 양산 칼데라를 일으킨 마그마계가 가장 중요하고 양산 칼데라 운회의 전과정을 지배하였다. 이에 부수적으로 나타나는 마그마계는 양산 칼데라운회 말기에 약한 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 전기 양산 칼데라를 형성한 대규모 회류분출은 성분이 누대된 칼크알칼리 계열의 마그마(황상구와 김상옥, 1994b)로 채워진 마그마챔버로부터 유래되어 양산옹회암을 형성하였다. 칼데라함몰 후에도 마그마챔버는 조성구배가 유지되면서 모드 조성 범위가 더 산성쪽으로 확대되었으며, 이 누대된 마그마챔버로부터 수증기마그마성 분출이 일어나 화제리층의 강하옹회암과 비용결회류옹회암을 형성하였고 후기 칼데라가 형성되었다. 후기 칼데라 함몰후 마그마챔버도 다소 수정된 조성누대가 유지되어 이로부터 저규질 유문암에서 데사이트로 조성누대를 갖는 장석반암 관입체가 형성되었다. 마지막 함몰후 고규질 유문반암은 칼데라의 남서 경계부에서 마지막으로 관입한 것으로 해석된다.

결 론

양산 칼데라를 형성했던 마그마챔버로부터 유래된 화산암류들은 양산 마그마계에 속한다. 이 마그마계에 속하는 화산암류는 마그마챔버 내에서 조성적으로 누대된 마그마로부터 유래되었음을 기록하고 있다. 이 화산암류는 SiO_2 에 대한 반정비율이 전체적으로 직선상의 연속적 조성구배를 나타낸다. 뿐만 아니라 총반정함량에 대한 반정비율에서 양산옹회암, 화제리층의 옹회암과, 고규질 유문반암을 제외한 장석반암 등의 암석단위로 확실하게 구분된다.

각 암석단위 내에서 뚜렷한 연속적인 직선상 조성구배를 나타내고, Q-Ab-Or 삼각도와 Q-An-(Ab-Or) 삼각도에서도 마찬가지로 경향을 보인다. 상부로 가면서 사장석 반정함량과 그 비율이 점진적으로 풍부해지고 석영과 K-장석의 반정함량과 그 비율은 점점 감소하는 함량변화를 나타낸다. 그리고 경우에 따라 반정함량과 그 비율이 상부로 가면서 지그재그형의 파동상 변화성을 나타낸다.

이 직선상 조성구배와 점진적인 함량변화는 각각 양산옹회암 분출전 뿐만 아니라, 후기 양산 칼데라 함몰전과 함몰후의 마그마챔버에서 상부에서 하부로 가면서 모드조성이 누대되었음을 지시한다. 그리고 파동상 변화성은 대소에 따라 간헐적인 분출맥동을 지시하는 것으로 생각된다.

사 의

이 연구는 1996년 암석학전 진화에 관한 논문을 근간으로 하여 이루어졌다. 이 논문의 내용을 개선하기 위해 세심하게 지적하고 건설적인 비평을 해주신 두분의 심사위원과 편집위원께도 감사를 드린다. 실내작업을 도와준 안동대학교 화산학실험실 학생들에게도 감사한다.

참고문헌

- 김규봉, 황상구, 1988, 밀양도폭 지질보고서. 한국동력자원 연구소, 26p.
- 김상욱, 이영길, 1981, 유천분지 북동부 백악기 화산암류의 화산암석학 및 지질구조. 광산지질, 14, 35-49.
- 황상구, 1996, 양산 칼데라에 관련된 화산암류의 암석학적 진화. 지질학회지, 32, 208-222.
- 황상구, 김상욱, 1990, 밀양 양산 간의 칼데라를 동반한 화류용회암. 지질학회지, 26, 329-340.
- 황상구, 김상욱, 1992, 양산 칼데라의 규질 화산작용. 지질학회지, 28, 491-503.
- 황상구, 김상욱, 1994a, 밀양-양산지역 백악기 화산암류의 암석학적 연구(I): 암석조구조적 위치. 지질학회지, 30, 229-241.
- 황상구, 김상욱, 1994b, 밀양-양산지역 백악기 화산암류의 암석학적 연구(II): 암석성인. 지질학회지, 30, 563-567.
- Aramaki, S. and Lipman, P.W., 1964, Possible leaching of Na_2O during hydration of volcanic glasses. Proc. Japan Acad., 41, 467-470.
- Fridricd, C.J. and Mahood, G.A., 1984, Reverse zoning in the resurgent intrusions of the Grizzly Peak cauldron, Sawatch Range, Colorado. Geol. Soc. Am. Bull., 95, 779-789.
- Hildreth, W., 1979, The Bishop Tuff; Evidence for the origin of compositional zonation in silicic magma chamber. Geol. Soc. Am. Special Paper 180, 43-75.
- Hildreth, W., 1981, Gradients in silicic magma chamber; Implications for lithospheric magmatism. J. Geophys. Res., 86, 10153-10192.
- Lipman, P.W., 1966, Water pressures during differentiation and crystallization of some ash-flow magmas from southern Nevada. Am. J. Sci., 264-810-826.
- Lipman, P.W., 1967, Mineral and chemical variations within an ash-flow sheet from Aso caldera, southwestern Japan. Contr. Miner. Petrol., 16, 300-327.
- Lipman, P.W., Christiansen, R.L. and O'conner, J.T., 1966, A compositionally zoned ash-flow sheet in southern Nevada. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 524-F, 47p.
- Smith, R.L., and Bailey, R.A., 1966, The Bandelier tuff; A study of ash-flow eruption cycles from zoned magma chambers. Bull. Volcanol., 29, 83-104.

2008년 9월 8일 접수

2008년 9월 9일 심사개시

2008년 9월 26일 채택