

삼랑진 칼데라의 화산작용과 화성과정

황상구 · 김상욱* · 이윤종**

안동대학교 지구환경과학과, *경북대학교 지질학과, **경북대학교 지구과학교육과

요 약 : 삼랑진 칼데라에서는 삼랑진용회암의 강하용회암과 회류용회암, 칼데라후 관입체의 유문암 질암과 각섬석 흑운모 화강암, 광역구조 관입체의 세립질 화강섬록암과 흑운모 화강암 등이 관련된다. 화산작용은 먼저 화도에서 어떤 외부물과 상호작용되는 수증기플리니언 분출상으로 주로 강하회를 퇴적시켰으며 점차 물의 유입이 차단됨으로써 일시적으로 플리니언 분출상으로 전환되어 강하부석을 퇴적시켰다. 이는 다시 회류분출상으로 전환되어 고온의 화성쇄설 물질이 회류로 일시에 쏟아져 정치됨으로써 심하게 용결되었다. 분출초기에는 중앙화구로부터 회류가 발생되었지만 후기에는 환상열극화구로의 전이가 일어났다. 이 결과로 칼데라 내부에 최고 630m 이상 두께의 회류용회암을 축적하였다. 이 회류분출의 결과로 마그마 챔버의 지붕이 함몰되어 삼랑진 칼데라를 형성하게 되었다. 칼데라후 화산작용으로서 중앙화구와 환상단열대를 따라 유대상 유문암이 주입되어 중앙관입체와 환상암맥을 형성하고 다시 환상암맥 내측부에 유문대사이트 반암과 대사이트 반암이 정치되었다. 이후 남서측 환상단열대를 따라 각섬석 흑운모 화강암이 관입되어 환상관입체의 일원이 되었다. 그리고 칼데라의 북동쪽 어영단층대를 따라 세립질 화강섬록암과 흑운모 화강암이 관입되면서 환상암맥을 절단하였다.

핵심어 : 삼랑진용회암, 수증기플리니언 분출, 회류분출, 중앙화구, 칼데라후 화산작용

서 언

유천소분지 중앙부 밀양에서 양산 사이의 규질 화산지역은 회류용회암-칼데라-환상암맥 연속체로 조합된 세 개의 칼데라가 존재한다(황상구와 김상욱, 1990). 이 규질 화산지역의 남동부에 존재하는 양산칼데라와 원동칼데라는 이에 관련된 화산작용에 대해서 이미 자세하게 보고된 바 있다(황상구와 김상욱, 1992; 황상구 외, 1997). 그러나 삼랑진 칼데라는 아직 이에 관련된 화산작용에 대해 상세히 보고된 바 없다. 따라서 이 칼데라에 관련된 화성암류만을 선정하여, 이의 화산작용과 심성작용을 해석하고 이들의 화성과정을 이끌어 내는 것이 이 논문의 목적이다.

경상분지 내의 칼데라 지역은 흔히 침식정도가 매우 커서 일반적으로 칼데라 내에만 관련 화산암이 잔류된다(Park, 1990; 윤성호, 1993). 그러나 삼랑진 칼데라 지역은 이들에 비하여 보다 침식정도가 작으면서도 침식 계곡이 깊어서 이에 관련된 화산암층을 거의 전부 드러낼 뿐만 아니라 화산뿌리에 해당하는 관입체까지도 관찰할 수 있는 좋은 야외 실험장을 제공한다. 따라서 삼랑진 칼데라 지역은 칼데라 내외에 칼데라 형성의 원인으로써 삼랑진용회암이 분포되고, 칼데라 내부에 환상관입체,

중앙관입체와 광역구조 관입체 등의 다양한 암체가 잘 노출된다(Fig. 1). 이 분출암과 관입암들의 암상과 층서는 삼랑진 칼데라에 관련된 백악기 화산작용과 과정을 복원하기에 충분하다.

이번 연구를 통하여 칼데라형성 화산작용, 칼데라함몰, 칼데라후 화산작용과 심성작용 등이 토론될 것이다. 궁극적으로 이 결과는 후기 백악기 화산활동이 칼데라 화산작용과 연관되어 있음을 입증할 뿐만 아니라, 백악기 화성과정의 특성을 이해하는데 중대한 의미를 지닌다. 또한 이는 앞으로 다른 칼데라의 화산작용과 과정을 이해하는데 도움이 되고 비교하는데 이용될 것으로 기대된다.

지질개요

경상분지의 남동부에는 백악기 화산암류와 심성암류가 넓게 분포되며, 이들은 백악기 후기와 제삼기 초기에 유라시아판 대륙연변부의 섭입대를 따라 일어난 칼크알카리 화성활동의 산물에 해당된다(이상만 외, 1987; 황상구와 김상욱, 1994). 층서적으로 화산암류는 유천층군에 해당되며 심성암류는 불국사 관입암류에 해당된다. 이들은 주로 유천소분지에 집중적으로 분포된다. 이 지역은 유천소분지 중앙부에 위치함으로써 백악기 후기 유천층군으로

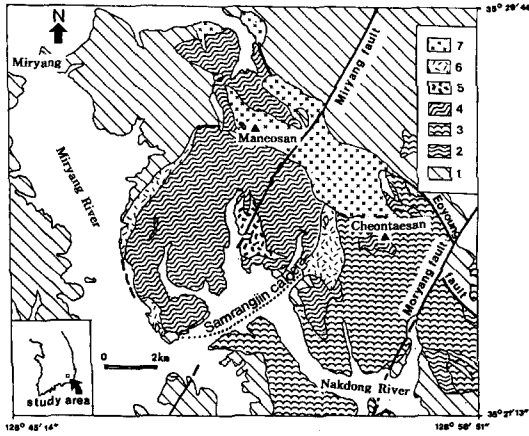


Fig. 1. Simplified geologic map, showing the distribution of Chusasan andesitic rocks(1), Yangsan Tuff(2), Wondong Tuff(3), the Samrangjin Tuff(4), central intrusion(5), ring intrusions related with the Samrangjin caldera(6) and regional tectonic intrusions(7), and the location of the Samrangjin caldera(modified from Hwang and Kim, 1990, 1994a, b).

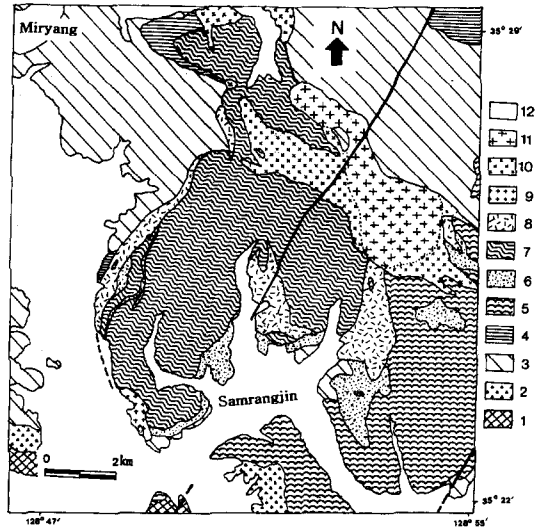


Fig. 2. Generalized geologic map of the Samrangjin caldera. 1, aphyric andesite; 2, andesitic lapilli tuff; 3, Miryang Andesite; 4, Cheonggaksan Formation; 5, Wondong Tuff; 6-7, Samrangjin Tuff(6, fallout tuff; 7, ash-flow tuff); 8-9, Central and ring intrusions(8, rhyolitic rocks; 9, hornblende biotite granite); 10-11, Regional tectonic intrusions(10, fine-grained granodiorite; 11, biotite granite); 12, Alluvium.

구성되고 부분적으로 불국사 관입암류가 나타나는 곳이다.

유천층군은 하부의 중성화산암류와 상부의 산성화산암류로 대별된다. 전자는 주사산 안산암질암류에 해당되고 후자는 운문사 유문암질암류에 해당된다(김상욱과 이영길, 1981). 유천소분지 중앙부에서 주사산 안산암질암류는 하부로부터 팔용산옹회암, 비반상안산암(중남산안산암), 안산암질 라필리옹회암(생철리옹회암), 밀양안산암, 정각산층 및 범도리안산암 등으로 세분된다(김규봉과 황상구, 1988). 운문사 유문암질암류는 밀양-양산 간의 규질 화산 지역에서 옹회각력암, 대사이트질 회류옹회암, 대사이트, 유문암질 강하옹회암, 유문암질 회류옹회암, 화제리층, 강하옹회암, 유문대사이트질 회류옹회암, 유문암질암 순으로 세분되었다(김규봉과 황상구, 1988). 그 후 이 지역에서 양산칼데라, 원동칼데라와 삼랑진 칼데라가 확인되면서 이 암석단위들은 각 칼데라와 관련시켜서 그룹화하여 각각 양산옹회암, 원동옹회암과 삼랑진옹회암으로 하였다(황상구와 김상욱, 1990).

관입암류는 화산암류로서 석영반암, 장석반암, 유문암질암, 규장암과 조면반암 등이 있고 심성암류로서 세립질 화강섬록암, 각섬석 흑운모 화강암과 흑운모 화강암 등이 있다. 여기서 비교적 소규모 암체인 유문암질암, 각섬석 흑운모 화강암은 환상관입체 혹은 중앙관입체로서 삼랑진 칼데라의 형성

과 직접적으로 연관되어 있다.

삼랑진 칼데라에 관련된 암석단위는 삼랑진옹회암, 유문암질암, 각섬석 흑운모 화강암, 세립질 화강섬록암과 흑운모 화강암이다(Fig. 2).

삼랑진옹회암과 칼데라

삼랑진옹회암은 그 공급지가 삼랑진 칼데라에서 유래된 강하옹회암과 회류옹회암을 묶어서 일컫는 암층명이다(황상구와 김상욱, 1990). 이 암층은 대부분 회류옹회암으로 구성되며 삼랑진 칼데라 내부와 외부에 분포된다(Fig. 1, 2). 이는 대부분 삼랑진 칼데라 내의 숨겨진 화구로부터 분출된 큰 용적의 회류가 방사상으로 퍼져나가 두껍게 쌓인 옹회암이지만 장기간의 침식 삭박으로 칼데라 내부와 외부의 북부에만 잔류한다. 이러한 침식 잔류체는 광역적으로 이 지역이 유천소분지 중앙부의 큰 구조적 분지의 서부에 위치함으로써 동쪽으로 기울어진 데 기인하고, 또한 지역적으로 어영단층의 남서 블록이 하락된 결과이다. 그리고 화학 조성은 강하옹회암이 안산암질과 유문암질이며, 회류옹회암이 유문암질에서 대사이트질 범위에 해당되고 대사이트질이 우세한 편이다(황상구와 정황식, 1998).

흔히 플리니언 분출에 의한 강하상은 수많은 규질 분출에서 보여주는 바와 같이 회류응회암 아래에 놓인다(Smith, 1960; Sparks *et al.*, 1973). 삼랑진응회암에서도 강하응회암은 회류응회암의 하부에 놓이고 국부적으로 회류응회암 하부에 협재된다. 따라서 전반적으로 강하응회암은 대규모 회류응회암 정규상(normal facies)에 선행하는 기저상(basal facies)으로써 나타난다. 이 강하응회암과 회류응회암 간의 변화를 살펴봄으로써 분출물의 복잡한 화산사건의 진화를 풀어나갈 수 있다.

강하응회암

강하응회암은 칼데라 경계부를 따라 동측부와 남동측의 외부, 남측부 내부와 서측부 내부에 분포된다(Fig. 2). 원동응회암, 밀양안산암 혹은 정각산층을 피복하며, 회류응회암에 덮이거나 그 하부에 협재된다. 층후는 지역에 따라 다르나 최고 약 80m 정도이며 서측부 회류응회암 하부에 약 20m 정도 협재된다. 본 암층은 화성쇄설암과 층회암(tuffite)으로 구성되며, 입도에 따르면 화성쇄설암은 응회각력암, 응회암, 라필리응회암 등으로 층회암은 응회질이암, 응회질사암, 응회질역암 등으로 구성된다. 본 암층은 남동측에서 고갯길 도로확장으로 수직 층서변화를 잘 드러낸다. 여기서 본 암층은 다양한 퇴적상을 나타내며 입도와 퇴적구조에 따라 암상을 분류하면 응회각력암(tuff breccia), 판상층리 응회암(planar-bedded tuff), 누적라필리 응회암(accretionary lapilli tuff), 점이층리 라필리응회암(gradedly bedded lapilli tuff), 피상 라필리응회암(massive lapilli tuff)으로 구성되고 상부에서 판상층리 응회질사암(planar-bedded tuffaceous sandstone)과 피상 응회질이암(massive tuffaceous mudstone)이 협재된다(Fig. 3). 반면에 서부에서 본 암층은 대부분 응회질 역암, 사암과 이암 등의 층회암으로 구성되고 라필리응회암이 소규모로 협재된다. 따라서 층회암은 남동부에서 북서부로 갈수록 우세해지는 경향을 나타낸다.

응회각력암은 밀양안산암 혹은 원동응회암 위에 3m 이하 두께로 놓이며(Fig. 3) 측방으로 연속성이 좋지 않다. 이 암상은 회백색과 암갈색의 각상 블록과 라필리로 구성되며 풍화면에서 거칠은 표면을 나타낸다. 이러한 암상은 아마도 삼랑진 지역에서 화산작용의 시작을 의미하는 것으로 생각된다.

판상층리 응회암은 담청록색 혹은 회색으로서 수 cm 내외 두께의 세립 내지 중립질 화산회로 구성되

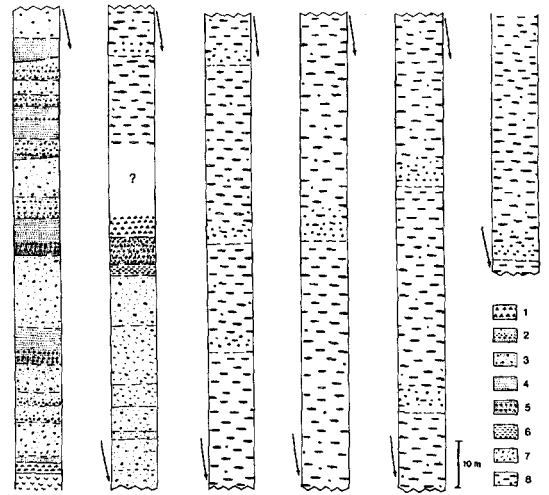


Fig. 3. Typical section of the Samrangjin Tuff showing variations in depositional units across from the southern margin to the northern. 1, tuff breccia; 2, gradedly bedded lapilli tuff; 3, massive lapilli tuff; 4, planar-bedded tuff; 5, accretionary lapilli tuff; 6, planar-bedded tuffaceous sandstone; 7, massive tuffaceous mudstone; 8, welded ash-flow tuff.

며 측방으로 층후변화 없는 평행층리를 발달시킨다(Fig. 4A). 이 암상은 분급이 중정도로 그렇게 양호하지 못한 편이며 보다 두꺼운 단일층 내에서 드물게 입도가 상향 세립화하는 점이현상도 보인다. 각 단일층 간의 경계는 확산되어 뚜렷하지 못한 편이다. 그리고 사층리나 침식흔적 등이 발견되지 않는다. 이 암상은 육안으로 결정 입자가 식별되지 않지만 경하에서는 결정편이 풍부하여 절반 이상을 차지한다(Fig. 4B). 결정편은 사장석이 대부분이고 석영과 각섬석이 드물게 포함된다. 이들의 입도는 1 mm 미만이고 그 모양이 각상을 이룬다. 이는 누적라필리 응회암 상위에서 가장 흔하게 나타난다(Fig. 3). 이 암상이 중세립질이고 평행층리를 형성하는 것은 화산회가 대류하는 플룸(plume)으로부터 낙하되어 형성되는 대기저 강하응회암(subaerial fallout tuff), 즉 분비응회암(air-fall tuff)임을 지시한다.

누적라필리 응회암은 담청록색을 띠고 누적라필리를 함유한다(Fig. 4C). 이 암상은 누적라필리를 제외하면 판상층리 응회암과 암질이 동일하며 반드시 이들과 호층을 이룬다. 누적라필리는 5-7 mm 내외의 직경을 가지며 이의 내부와 외부에서 화산회의 입도는 1 mm 미만의 세립질로서 거의 같지만 그 주변부가 보다 더 청백색에 가까워서 그 경계를

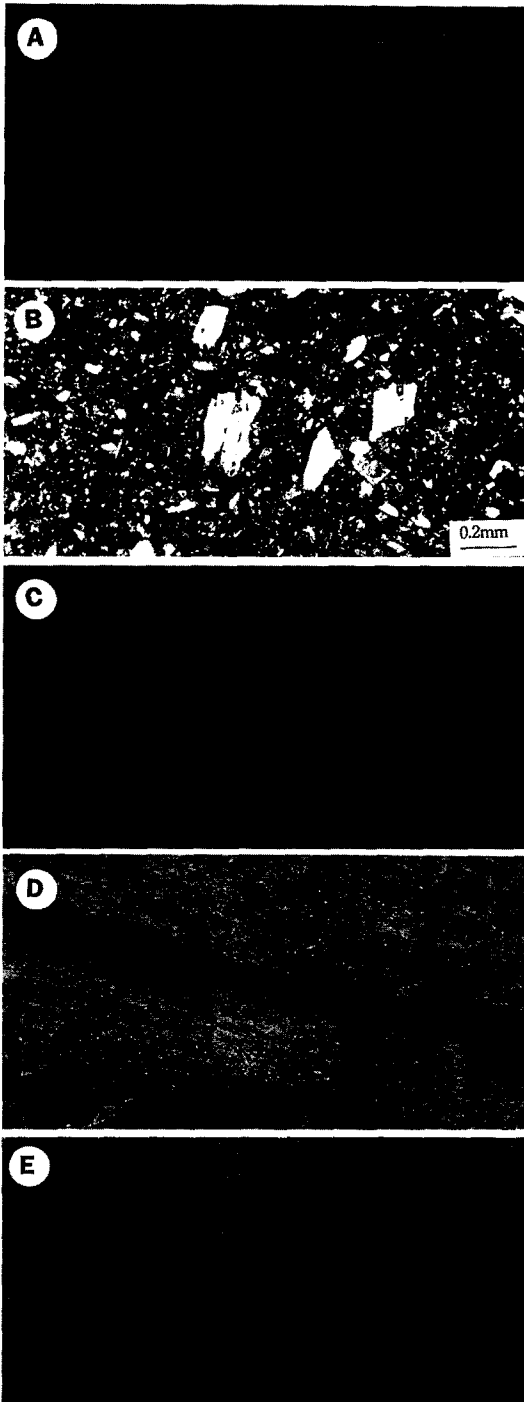


Fig. 4. Fallout tuff in the Samrangjin Tuff. A, planar-bedded tuff; B, photomicrograph of planar-bedded tuff abundant in plagioclase crystals; C, accretionary lapilli tuff; D, gradedly bedded lapilli tuff; E, massive lapilli tuff.

뚜렷하게 한다. 이 암상은 괴상 라필리응회암 상위에서 흔히 나타난다(Fig. 3). 따라서 이 암상은 습윤한 세립질 화산회가 공중에 높이 채공하면서 수분에 의한 점착성으로 작은 물방울과 같은 핵에 달라 붙어서 어느 정도 커진 후에 자체 무게에 의해 낙하되어 대기저에 퇴적된 분비응회암임을 지시한다. 그리고 1 mm 이하의 화산회를 대부분 차지하고 누적라필리를 함유하는 점에 의하면 이 암상은 판상층리 응회암과 함께 수증기마그마성 분출(phreatomagmatic eruption)에 의한 것임을 지시한다.

현재 남아 있는 노두를 기준하면 이 두 암상은 분포지가 최장 11 km이므로 분포면적이 아마도 95 km² 이상될 것으로 예상되기 때문에 수증기마그마성 분출 가운데 수증기플리니언 분출상(phreato-plinian eruption phase)에 해당된다(Cas and Wright, 1987). 따라서 이 두 암상은 이러한 강한 폭발적인 분출로부터 유래되는 강하회(ash-fall)에 의한 퇴적상임을 암시한다. 이 분출상은 마그마가 외부물과 접촉으로 폭발하는 거대한 분연주로부터 널리 퍼지는 강하회에 의해 형성하였고 매우 작은 입도와 매우 얇은 층후의 원인이 되었다.

점이층리 라필리응회암은 담청록색을 띠고 암편과 부석의 라필리로 구성되며 상부에서 부석 라필리를 매우 풍부하게 포함한다. 입도는 단일층 내에서 라필리응회암에서 조립질응회암으로 점점 작아지는 점이층을 형성한다(Fig. 4D). 기질은 조립질 화산회로 채워져 있으며 라필리가 풍부한 하부에서 상대적으로 적게 포함된다. 이 암상은 그 두께가 20~100 cm 범위이고 측방으로 잘 연속되며 대부분 괴상 라필리응회암 하위에 놓인다(Fig. 3). 이 암상이 점이현상을 나타내는 것은 큰 폭발에 의해 높은 분연주로부터 분출물이 낙하할 때 입도차이에 의해 최종낙하속도의 차이에 따라 점이적인 분급으로 정지된데 기인한다. 상부에서 풍부한 부석은 외부물의 차단에 의해 플리니언 분출상(plinian eruption phase)으로 전환되어 강하부석(pumice-fall) 퇴적이 일어났음을 지시한다.

괴상 라필리응회암은 다양한 암편과 부석의 라필리와 화산회의 기질로 구성된다(Fig. 4E). 기질은 대개 갈회색, 담록회색을 띠며 암편들이 암회색, 암갈색, 회백색을 띠고 부석이 주로 암록회색을 띤다. 기질이 매우 불량한 분급을 이루고 층리가 없는 괴상이며, 두께가 2~16 m 범위이고 그 경계가 다소 불규칙하다. 이 암상은 풍화면이 매우 거칠고 점이층리 라필리응회암 상위에서 흔히 나타난다(Fig. 3).

따라서 기질의 불량한 분급, 피상 층리와 두꺼운 두께 등에 의하면 이 암상은 분연주로부터 다소 습윤하고 밀집된 테프라가 암설류(debris flow)로 정치되었음을 시사한다.

판상층리 응회질사암은 강하응회암 상부에 소규모로 협재된다. 본암은 암갈색 내지 갈회색을 띠며 경하에서 장석과 석영 결정립과 유리질 사아드로 구성된다. 이 사아드는 원래 뾰족했던 끝이 마모되어 다소 둥글거나 불규칙한 모양을 이룬다. 이 암상은 층리가 잘 발달되며 상하위의 응회암과 관계가 접이적인 양상을 보이지 않는다. 그러므로 이러한 암상은 화산회가 국부적으로 존재하는 수중으로 낙하되어 유수에 의해 더 분급된 것으로 짧은 지표과정을 겪은 것으로 생각된다.

피상 응회질사암은 강하응회암 상부에 렌즈상으로 협재된다. 암색이 홍회색 내지 갈회색이고 층리가 없이 피상을 이루고 분급이 불량하며, 암회색 렌즈상 부석편을 가지거나 암갈색, 홍회색과 암갈회색 암편을 함유한다. 두께는 5-13m 범위이고 고결도가 불량한 편이다. 이 암상은 아마도 슬러리(slurry) 상태의 테프라가 수중에 암설류로 퇴적되었음을 시사한다.

회류응회암

회류응회암은 칼데라 내부의 남부를 제외한 대부분과 칼데라 외부의 북부에 분포하며, 반드시 강하응회암을 피복하거나 정각산층을 피복한다(Fig. 2). 이 암층은 삼랑진응회암 하부에 협재되는 20m 두께의 강하응회암을 사이에 두고 하부 암층이 약 80m이고 상부 암층이 최고 약 450m 이상이 된다. 이 두 회류응회암층은 담홍회색 내지 회색을 띠며 사장석을 다량 함유하고 육안으로 석영이 관찰되지 않는다. 화학성분상 SiO_2 가 65~72% 범위의 유문암 내지 대사이트에 해당된다(황상구와 정창식, 1998).

회류응회암은 전체적으로 분급되어 있지 않고 층리가 없으며 대부분 심히 용결되어 있으며 용암과 유사한 유상구조를 지시하는 내부특징과 함께 정치시에 높은 유체성(fluidity)을 가지는 특징을 나타낸다. 그리고 그 기저부에는 암편이 다소 풍부하며 상부로 가면서 감소되어 그 경계를 설정할 수 있게 한다. 하지만 기저 가까이에서 각상 암편이 다소 농집되는 것을 제외하고, 수직단면에서 각 회류단위의 경계는 거의 완전한 용결작용에 의해 가리워져 있다. 또한 그 하위에는 써지응회암(layer 1)이 존재

하고 그 상위에는 강하응회암(layer 3)이 존재해야만 이상적이지만 별다른 암상이 발견되지 않는다.

이 회류응회암은 평균 유리질 73%, 반정 21%와 암편 6%로 구성된다. 이 암편은 대부분 안산암으로 구성되며 라필리에서 블록 범위이고 5-10 cm 크기가 흔하다. 유리질(화산회와 부석)은 매우 심하게 용결되어 있고 거의 모든 화성쇄설조직이 파손될 정도로 용결열리화되어 있다. 부석은 두꺼운 상위의 누층에 의해 극히 심하게 편평화되어 있지만 그 경계가 희미하거나 모호하여 부석으로 인지하기가 매우 어렵다. 그러나 대부분 편평화된 피아메는 대개 암회색이며 풍화면에서 렌즈모양으로 튀어 나온 경우도 있다(Fig. 5A). 이들은 신선한 면에서 거의 용암과 같은 양상을 띠기 때문에 증명하기가 어렵다. 왜냐하면 피아메의 석기와 원래 응회암의 기질과는 쉽게 구별되지 않기 때문이다. 그리고 경하에서 관찰에 의하면, 반정은 대부분 사장석으로 구성되며 하위에 놓이는 양산응회암과 원동응회암의 회류응회암보다 반정의 상대적 비율과 크기(3-4 mm)가 더 작고 재용식 현상이 현저하지 못하다. 피아메는 실리카와 장석의 미정질 모자익상으로 결정화되어 탈파리화됨으로써 부석으로 인지하기가 매우 어렵다(Fig. 5B). 유리질 사아드도 대부분 심한 용결과 탈파리작용에 의해 그 모양 인지가 어렵다. 즉 대부분 축열상 결정작용(axiolitic crystallization)과 기체상 결정작용에 의한 실리카와 알칼리장석 결정으로 연정되어 있기 때문이다(Fig. 5C). 이러한 용결과 탈파리작용은 칼데라 내부의 본 암층에서 더욱 심한 것이 특징적이다. 그러나 칼데라 밖의 외류에서 본암은 유탉시틱 석리(eutaxitic fabric)가 인지되며, 경하에서 변형된 사아드가 인지되고 용결열리가 잘 인지될 정도로 탈파리작용은 아주 약한 편이다.

본암은 층리가 없고 분급되지 않은 것은 회류에 의해 정치되었음을 시사한다. 본 암층은 전반에 걸쳐 회운에 의한 강하응회암이 약간이라도 산출이 되지 않는 것은 분출중심지에 가깝다는 것과 연속적인 분출로 흐름단위(flow unit) 간의 시간이 짧았음을 반영하는 것 같다. 암편이 기저부에서 풍부한 것은 회류가 측방운동을 약간 겪으면서 치진 암편인 것으로 판단된다(Wright and Walker, 1977). 피아메와 기질의 경계가 희미하거나 모호할 정도로 용결된 것은 고온에 의해 거의 완전용결되어 액화되었음을 암시한다.

이와 같이 본 회류응회암이 다른 응회암보다 용결작용이 매우 심한 점, 반정의 함량이 적고 크기가

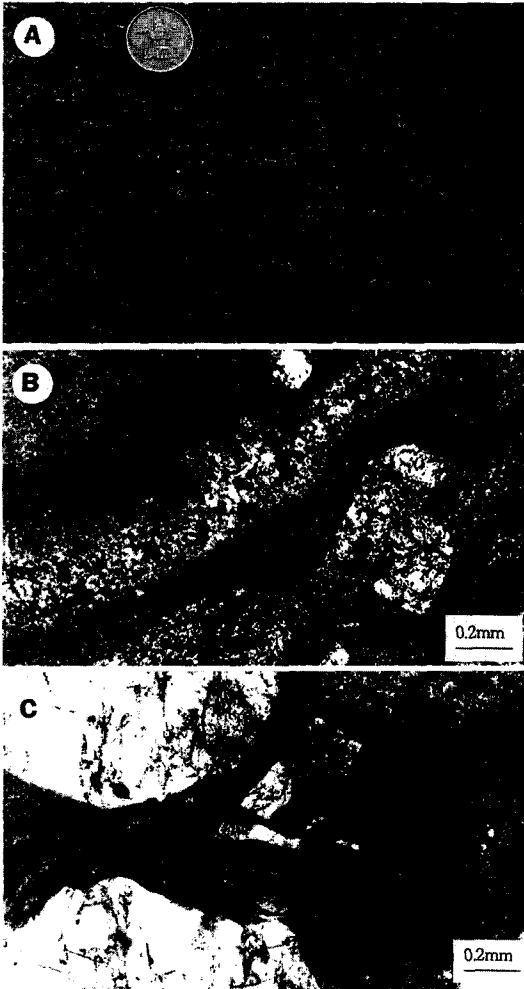


Fig. 5. Ash-flow tuff in the Samrangjin Tuff. A, flattened pumices represent a parataxitic fabric due to welding and flowage. B, photomicrograph of densely welded ash-flow tuff. Extremely flattened pumices have partially eliminated by coarse devitrification; C, photomicrograph of densely welded ash-flow tuff. It shows extreme welding, but with recognizable shard structure.

작은 점, 재음식 현상이 덜하다는 점 등에 의하면, 이 암상은 상대적으로 온도가 높은 회류에 의해 정지되었음을 지시한다. 탈파리작용이 매우 심한 점과 반정의 재음식 현상이 덜하다는 점에 의하면 본 암층은 낮은 분연주 붕괴에 의해 회류가 빠른 속도로 두껍게 집적되므로서 열 손실의 저하로 고온으로 보다 오래 지속되어 냉각기간이 길었음을 암시한다.

이상과 같이 조직적인 균질성, 큰 두께와 완전한

용결작용은 원래 높은 온도의 마그마에서 분출되어 속도가 느리고 유체화가 적으며 회운으로의 화산회손실이 적은 비확산적인 회류에 의해 일어난 퇴적상임을 반영한다(Wilson, 1980). 이러한 회류상은 맹렬하지 않은 대규모 분출에서 유래되었음을 암시하며, 이때의 분출은 폭발성이 약하게 연속적으로 일어나는 끓어넘침 분출상(boiling-over eruption phase)이었다고 생각된다. 이 분출상이 일어날 때는 회운이 거의 발생하지 않는 반복적인 회류의 범람에 의해 큰 용적의 회류응회암을 형성하였으며, 나중에 칼데라를 형성하면서 환상단열을 따라 일어나는 회류에 의해 암편이 많은 회류응회암을 형성하고 칼데라 내부가 두배 이상 두껍게 집적되었을 것으로 생각된다. 이러한 반복적인 회류가 두껍게 집적되므로서 고온의 열이 오래 유지됨으로서 강한 용결작용이 일어나고 심한 탈파리작용이 일어날 수밖에 없었을 것이다.

삼랑진 칼데라

삼랑진 칼데라의 경계는 환상단층과 환상관입체의 중간선을 따라 구획되는 환상단열대(19.7 km)와 남측부의 힌지대(5.5 km)이며 둘레 총연장 25.2 km에 달한다. 이 칼데라의 영역은 환상단열대와 힌지대로 구획되는 구조적 경계 내를 말한다. 여기서 삼랑진 칼데라에서 가장 직경은 7.9 km이고 최단 직경은 5.7 km이며 이 영역의 면적은 45.0 km²가 된다.

칼데라 내부의 삼랑진응회암은 북측부에서 환상관입체에 의해 둘러싸이거나 하위층에 속하는 주사산 안산암질암류와 단층경계되어 있어 이 하위 암층에 비하여 하락되었음을 나타낸다. 이는 칼데라 함몰에 대한 직접적인 증거가 된다. 환상단열대 사이에 두고 삼랑진응회암의 고도차는 함몰심도가 된다. 이 함몰심도는 북측부에서 550m 이상으로 나타나고 남측부에서 함몰없이 힌지대로 존재한다.

칼데라 형성에 직접 관여된 회류응회암의 용결 열리는 남측부를 제외하고 대체로 얇은 사발모양의 분상구조를 나타낸다. 이 구조도 칼데라 함몰에 수반되는 함몰구조로서 삼랑진 칼데라 함몰의 직접적인 증거가 된다. 그러므로 삼랑진 칼데라는 하향요곡운동(down sagging)과 환상단층운동(ring faulting)에 의해 형성되었으며 이로 인해 북측부에서 가장 깊게 비대칭적으로 함몰되는 뚜껑문형 칼데라를 형성하였다(Hwang and Kim, 1998).

칼데라후 관입체

삼랑진 칼데라 함몰후에 관입한 관입체는 유문암 질암, 세립질 화강섬록암, 각섬석 흑운모 화강암과 흑운모 화강암이 있다. 이 관입체들은 현재 여러 암상으로 고립되어 노출되며 아마도 모두 지하로 동일 마그마챔버에 연결될 것으로 생각된다. 그러나 북동부 심성암체는 칼데라 함몰보다 북서방향의 어영단층대에 더 관련되는 것 같다. 이런 경우에 본 칼데라 지역에서 침식레벨은 관입체의 원래지붕에 거의 접근될 것 같다. 그러므로 이 관입체들은 칼데라 형성에 관련되는 중앙관입체와 환상관입체, 그리고 어영단층에 관련되는 광역구조 관입체로 구분될 수 있다(Fig. 1). 중앙관입체는 유문암질암으로 구성되고 환상관입체는 유문암질암과 각섬석 흑운모 화강암으로 구성된다(Fig. 2). 이들이 삼랑진음회암의 높은 부위까지 관입한 것은 함몰후화산(postcollapse volcano)의 뿌리라는 단적인 증거가 된다. 왜냐하면 삼랑진음회암은 본역에서 최후 분출물이고 칼데라가 형성될 때 보다 높은 지면에 놓여 있었기 때문이다(Lipman, 1984).

중앙관입체

중앙관입체는 삼랑진 칼데라 중앙부에서 유문암질암으로 구성되며 삼랑진음회암의 강하응회암과 회류응회암을 관입하여 불규칙한 원형의 플러그를 형성하고 있다(Fig. 2). 이 유문암질암체는 그 암상이 대부분 유대상 유문암이다. 이 유문암은 대부분 암홍회색을 띠며 대부분 유리질이고 사장석 반정을 드물게 함유한다. 또한 전반적으로 유상엽리가 발달되고 강하응회암 가까이에서 구과상구조가 발달되어 있다. 유상엽리는 대체로 주향이 관입접촉부에 평행하고 경사가 25~75° 내외로서 거의 수직에 가깝다.

이 암체의 위치, 모양과 암상은 삼랑진 칼데라가 함몰된 후 휘발성물질이 소진된 잔류 마그마가 중심부로 상승하므로써 중앙분출이 일어났을 때 그 화도 부위인 것으로 생각된다. 구과상구조가 주로 강하응회암 가까이에서 발달하는 것은 아마도 유문암질암이 강하응회암 주위를 관입할 때 이로부터 유래된 수분의 영향하에서 기체상결정작용(vapor-phase crystallization)이 방사상으로 형성되므로써 이루어진 형체인 것으로 생각된다.

결론적으로 이 유대상 유문암의 정치는 중앙화구에 의해 지배되었음을 암시한다. 따라서 본암은 칼

데라 함몰후에 마그마챔버에 가해지는 압력에 의해 잔류마그마가 중앙화구의 빈 공간을 따라 올라와 메꾸어진 마그마활동 산물인 것으로 생각된다. 또한 이때 형성된 화산도움(volcanic dome)은 이미 침식삭박되어 없어졌지만, 이는 아마도 도움모양의 함몰후화산(postcollapse volcano)의 뿌리로서 마그마챔버에 연결될 것으로 판단된다.

환상관입체

유문암질암

환상관입체로서 유문암질암은 칼데라 동측부, 북서측과 북측부 등 여러 곳에 노출된다. 이들은 대개 이전 화산암류를 맥상 관입형태로 산출된다. 본암은 유상엽리, 암색, 반정과 화학조성 등의 차이가 크기 때문에 대체로 유대상 유문암(flow-banded rhyolite), 유문대사이트 반암(rhyodacite porphyry), 반상 대사이트(porphyrific dacite) 및 대사이트 반암(dacite porphyry) 등의 암상으로 세분할 수 있다. 이들은 야외에서 같은 한 암체라도 측방으로 수 100m 이내에서 암상 변화가 나타난다(Fig. 6). 그런데 이와같이 지역을 달리하거나 암상이 다른 유문암질암들 상호간에는 정치시기가 다소나마 다를 것으로 생각된다.

동측부 환상암맥: 이 환상 유문암질암체는 이의 동연부에 유대상 유문암과 서연부에 유문대사이트 반암으로 구분된다. 유대상 유문암은 환상암맥을 형성하며 대부분 절벽을 형성한다. 전반적으로 유상엽리가 발달되며 암홍회색 내지 홍회색을 띤다(Fig. 7A). 이의 남동 경계부에서는 구과상구조가 발달되어 있는데, 이들은 주위에 수저 강하응회암과 경계되어 있는 곳에서 절대적으로 우세하다. 그래서 유대상 유문암도 중앙관입체에서와 같이 강하

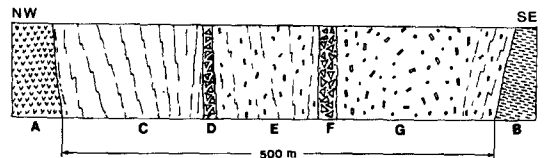


Fig. 6. Horizontally cross section showing lithofacies variations of the northwestern ring intrusion along a local road. A, porphyritic andesite; B, tuffites interbedded with some pyroclastics; C, flow-banded rhyolite with some porphyritic texture; D, breccia of flow-banded rhyolite; E, porphyritic dacite with some flow band and stony texture; F, breccia of stony dacite; G, dacite porphyry.

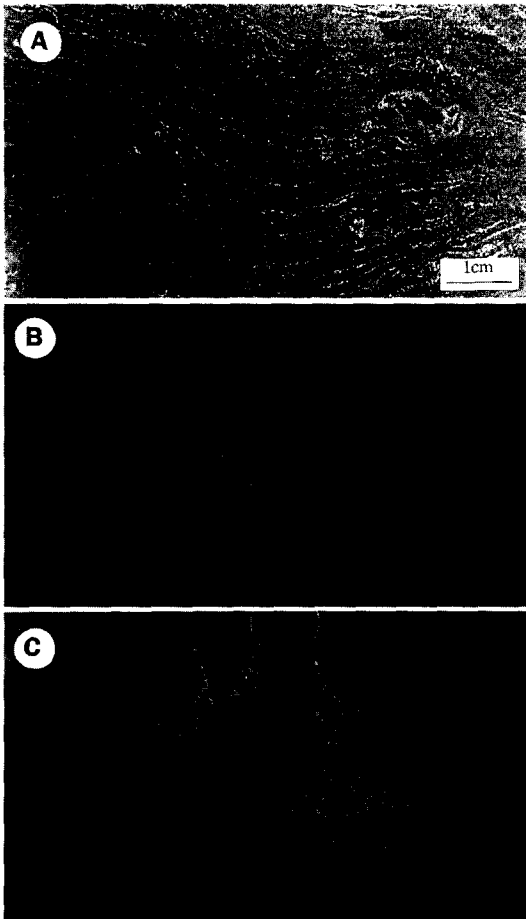


Fig. 7. Rhyolitic rocks in central and ring intrusions. A, Flow-banded rhyolite showing well developed flow foliation among the rhyolitic rocks; B, Contact breccia between flow-banded rhyolite and porphyritic dacite in the northwestern ring intrusion; C, Flow-banded rhyolite inclusions within rhyodacite porphyry in the eastern ring intrusion.

응회암 주위를 관입할 때 이로부터 유래된 수분의 영향하에서 기체상결정작용이 방사상으로 형성되므로서 이루어진 형상인 것으로 생각된다. 이 유문암은 1~8%의 사장석 반정을 함유하고 드물게 흑운모가 관찰되며 석기는 미정질 내지 유리질이다. 미정질 석기는 유문암이 화도벽에 의한 냉각보다도 차라리 상승시 휘발성물질 상실의 결과로 빨리 냉각되었음을 지시한다.

그리고 이 유대상 유문암은 암맥의 경계부에서 남쪽으로 약 500m 떨어져 강하응회암 상위에 소규모 용암으로 존재한다(Fig. 2). 이는 동측부 환상암맥에 연결시키면 용암도움(lava dome)의 일부일

것으로 생각된다. 따라서 중앙관입체 뿐만 아니라 환상관입체 상위에는 이미 침식되어 없어졌지만 근대근대 여러가지 모양의 화산도움이 존재했을 것으로 짐작된다.

유문대사이트 반암은 대체로 담홍회색 내지 회백색을 띠고 유상엽리가 희미하거나 거의 없으며 큰 사장석과 석영 반정을 함유한다. 이는 간혹 유상엽리가 발달한 유문암 포획체를 함유하는 경우도 있다(Fig. 7C). 경하에서 석기는 대부분 미정질로 결정화되어 모자익상 혹은 미구과상 구조를 형성한 점이 특징이다. 이러한 포획관계와 결정도 차이에 따르면 칼데라 함몰후 동연부가 먼저 정지한 후에 재차 관입한 산물인 것으로 해석된다. 유문대사이트 반암 내에 통합된 유대상 유문암의 존재는 보다 강력한 정지의 증거이다.

북서측 환상암맥: 이 환상 유문암질암체는 환상암맥으로 관입되어 있으며 밀양안산암과 삼랑진응회암과의 경계를 이루고 있다(Fig. 2). 이는 동측부 환상암맥보다 홍회색에 가까운 것이 많고 유상엽리가 희미하여, 구과상구조가 없고 석영 반정을 소량 함유한다. 본 암체는 도로변에서 이의 북서측으로부터 남서측으로 유대상 유문암, 반상 대사이트와 대사이트 반암 등의 암상으로 구성되는(Fig. 6) 역누대 관입체(reversely-zoned intrusion)를 이룬다(Ayuso, 1984). 이는 동측부 환상암맥과 함께 칼데라 함몰에 따르는 환상단층을 따라 관입되었으며, 북서측으로부터 남서측으로 혹은 안쪽으로 암상에 따라 순차적으로 정지된 것으로 생각된다. 본 관입체에서 유문암으로부터 대사이트로 변화되는 것은 마그마챔버의 보다 규질인 상단부의 마그마가 먼저 환상단열대를 따라 관입되고 다시 덜 규질인 중위부의 마그마로부터 관입에 의해 부분적으로 변위되었음을 암시한다. 유대상 유문암과 반상 대사이트 사이에는 접촉각력암대(contact breccia zone)가 수m 이내로 형성되어 있음이 이의 증거이다. 이 각력대 내의 유문암 블록들은 간혹 둥근 모양을 가지는데(Fig. 7B), 이는 유대상 유문암이 반상 대사이트에 의해 포획될 때 완전히 고화되지 않았음을 지시한다. 즉 유대상 유문암 환상암맥은 아직도 녹은 상태일 때 대사이트에 의해 관입되었음을 의미한다. 유대상 유문암은 침몰된 칼데라블록과 마그마 챔버 사이에서 보존된 보다 더 진화된 잔류용융물이었음이 분명하다. 환상관입체는 먼저 이 유문암대 마그마를 출조시켜서 급속히 가용성 용융물을 소진함으로써 다음에 그 아래의 대사이트 성분대 마그마를 출조시키게 되었다.

환상관입체에 대해 종합한다면 다음과 같다. 이 환상암맥에서 결정도가 전반적으로 뚜렷한 냉각대 없이 유리질 내지 미정질이고 응회암에서 뚜렷한 예인현상이 없음을 환상단열대의 빈 틈을 따라 관입되었음을 암시한다. 즉 이 환상암맥은 삼랑진 칼데라의 함몰과 직접 관련되어 있음을 지시한다. 그리고 환상암맥에서 암상 간에 접촉각력대가 존재하고 포유체의 포획관계에 의하면, 시공간적으로 외연부에서 내연부로 순차적으로 관입되었다는 것을 암시한다. 이 환상암맥은 외연부가 대부분 유리질인데 비하여 내연부가 반상이고 미정질로서 보다 조립질이며 회류응회암과의 경계부에서 냉각대가 없는데, 이는 마그마챔버가 외측부로부터 내측부로 냉각되어 보다 더 결정화된 내측부의 마그마로부터 관입되었음을 암시하거나 아니면 칼데라 내부에 두 겹씩 축적된 회류응회암이 충분히 냉각되기 전 고온하에 있을 때 암맥이 관입되었음을 암시한다. 그러나 필자는 암상 간의 관계가 점이적이지 않기 때문에 전자가 이 칼데라에서 더 유력한 가능성으로 생각한다.

그리고 이 암맥은 사장석 반정을 함유하며 극히 드물게 재음식된 석영 반정을 함유한다. 외연부에서 본 암맥은 기질에서 유리질이 우세하며, 내연부에서 반정이 더 크서 이의 용적이 더 크다. 화학조성은 외연부에서 유문암질이고 내연부에서 대사이트질에 속한다(황상구와 정창식, 1998). 이에 따르면 본 암맥은 광물조성과 화학조성상으로 회류응회암과 유사한 범위를 나타내는데, 이는 본 환상관입체가 칼데라형성 분출작용에 시공간적으로 밀접하게 관련되어 있음을 암시한다(Smith and Bailey, 1968).

이 환상암맥의 형태와 위치에 의하면 이의 정치는 칼데라블록의 주변에서 구조적 불연속 즉 환상단열대에 의해 지배되었음을 암시한다. 그리고 삼랑진응회암까지만 관입한 점, 칼데라 형성과 직접 관련된 점, 결정도가 유리질 내지 미정질인 점, 광물, 화학조성상 아주 유사한 점 등을 고려한다면, 본암은 마지막 회류분출이 일어난 최후단계에 환상단열대 빈 틈을 따라 올라와 메꾸어진 마그마활동 산물인 것으로 생각된다. 따라서 이는 함몰후화산의 뿌리로서 마그마챔버에 연결된 것으로 판단된다.

각석석 흑운모 화강암

환상관입체 일부로서 각석석 흑운모 화강암이 삼랑진 칼데라 남서측에서 소규모로 노출된다. 이는 강하응회암과 회류응회암을 작은 암주로 관입한다

(Fig. 2). 본암은 아주 신선한 곳에서 회백색이고 다소 풍화된 곳에서 담황갈색을 띤다. 드물게 사장석 반정을 가지고 각석석, 흑운모 등의 유색광물이 관찰되며 대부분 중립질에 해당된다. 본암은 드물지만 안산암 포획체를 가지며 주위의 회류응회암을 남석으로 변질시켰다. 이는 함몰 직후 칼데라블록 중앙부와 외측부로 마그마가 상승하여 정지한 후에 다시 잔류마그마가 남은 환상단열대로 상승하여 서서히 결정화된 것으로서 아마도 삼랑진 마그마계 화성작용의 종결 시기를 의미한다. 그러므로 이는 시공간적으로 볼 때 삼랑진 칼데라 함몰후 마그마가 마지막으로 상승할 때 칼데라의 남서측 틈을 따라 관입된 환상관입체의 화도 부위인 것으로 사료된다.

광역구조 관입체

광역구조 관입체는 칼데라 북동측에서 북서-남동 방향으로 직선상 암주로 관입되어 있다. 주 관입체의 북서 외곽부에 여러 개의 쿠폴라(cupola)로 고립되어 있고 주 관입체의 북서부와 남동부에서 여러 갈래의 암지상(apophysal)으로 갈라져 있다(Fig. 1). 이 관입체는 세립질 화강섬록암과 흑운모 화강암으로 구성된다(Fig. 2).

세립질 화강섬록암

세립질 화강섬록암은 삼랑진 칼데라 북동측 경계부 외곽에 소규모로 노출된다. 이는 밀양안산암, 정각산층과 삼랑진응회암을 불규칙하게 관입하지만 흑운모 화강암과 점이적인 관계를 갖는다(Fig. 2). 본암은 녹회색을 띠며 세립질로서 균질하여 무반정질로서 괴상을 이룬다. 기 존암체와의 경계부에서 극히 세립질로서 안산암으로 오인될 정도이며 세립질이므로 풍화저항력에 강해 비교적 높은 산릉을 형성한다. 따라서 여러 곳에서 큰 블록의 테일러스를 형성하며 특히 만어산 중턱에는 종석으로 유명하다. 광물과 화학조성상 본암은 화강섬록암질에서 석영몬조섬록암질에 속한다.

이는 본포 위치나 산출양상으로 볼 때 삼랑진 칼데라 함몰 후에 기원이 같거나 혹은 다른 마그마가 상승하여 칼데라의 북동측 틈과 이후에 발달하는 어영단층대를 따라 관입된 직선상 관입체인 것으로 사료된다. 그래서 북동측으로 연결되는 환상단층과 환상암맥이 잘려나갔을 것으로 판단된다. 그러므로 본암은 칼데라의 환상단열대의 제어도 받았겠으나

이보다도 어영단층대의 지배를 더 크게 받았음을 암시한다.

흑운모 화강암

흑운모 화강암은 삼랑진 칼데라 북동측 외곽부의 광역구조 관입체 내에 소규모로 노출된다. 이는 밀양안산암, 원동응회암과 유문암질암을 불규칙하게 관입하고 있지만 세립질 화강섬록암과 점이적인 관계이고 이의 중심상에 해당된다(Fig. 2). 본암은 대체로 회백색 내지 담홍색을 띠며, 대부분 중립질로서 야외에서 유백색 사장석 반정, 투명한 석영, 도홍색 K-장석과 흑색 흑운모 등의 주광물이 관찰된다. 경하에서는 간혹 미문상조직을 형성함이 특징적이다.

어영단층은 규질 화산암류가 집적됨으로써 지역적인 차별하중에 따라 형성되는 N50°W 방향의 변형대이며, 이 단층대의 남서 블록이 상대적으로 하락되었다(황상구, 1998). 세립질 화강섬록암과 흑운모 화강암은 어영단층 트렌드에 일치되어 관입되어 있음이 특색이다. 그러므로 이 어영단층은 본암체가 관입할 수 있는 통로 역할을 했을 가능성을 내포하고 있다. 이 단층대를 따른 구조적인 지배하에 마그마가 이동하여 정지됨으로써 이 관입체를 형성하였을 것으로 생각된다.

토 의

이미 해석한 바와 같이 삼랑진 칼데라 지역에서 많은 노두들은 삼랑진 칼데라 형성과 화산작용의 증거들을 기록하고 있다. 이 화산작용들을 칼데라 형성 순서에 따라 토의해 보기로 한다. 삼랑진 칼데라 지역은 (1) 초기에 수증기플리니언 분출 개시, (2) 회류분출에 선행하여 플리니언 분출, (3) 칼데라형성에 관련된 회류분출, (4) 칼데라 함몰, (5) 칼데라후 중앙플러그와 환상암맥 형성, (6) 칼데라후 환상단열대의 각섬석 흑운모 화강암 관입, (7) 어영단층대의 심성암 관입 등의 순으로 화성과정을 따른다.

수증기플리니언 분출

강하응회암층은 응회각력암, 판상층리 응회암, 누적라필리 응회암, 점이층리 라필리응회암, 괴상라필리응회암으로 구성되고 상부에서 응회질사암과 이암이 협재된다. 판상층리 응회암과 누적라필

리 응회암이 1 mm 이하의 화산회로 대부분 구성되고 누적라필리를 함유하는 점에 의하면 이는 수증기마그마성 분출에 의한 것임을 지시한다. 그런데 현존하는 노두를 기준하면 분포면적이 적어도 95 km² 이상될 것으로 예상되기 때문에 이는 수증기마그마성 분출 가운데 수증기플리니언 분출상에 해당된다(Cas and Wright, 1987). 따라서 본역에서 초기에는 화도로 상승하는 마그마에 외부물이 유입됨으로써 폭발적인 상호작용으로 수증기플리니언 분출을 유도하였다. 화구로 들어오는 외부물에 의해 최적의 열교환을 유도함으로써 매우 강렬한 분출을 야기시키며 높은 분연주를 형성하였다(Fig. 8A). 물의 기원으로서의 얇은 눈에서 유래되었을 가능성이 크다. 왜냐하면 강하응회암 내에 응회질퇴적암이 협재되어 있기 때문이다. 이 분연주로부터 다양한 입도의 화성쇄설 물질이 비중에 따라 분급되어 낙하되었고 보다 조립질로 밀집된 화성쇄설 물질이 화구 근처에 슬러리로 암설류와 같이 무더기로 퇴적되었으며, 세립질 화산회가 공중으로 높게 플룸으로 채워졌다가 낙하되었다. 이때 간혹 분급된 물

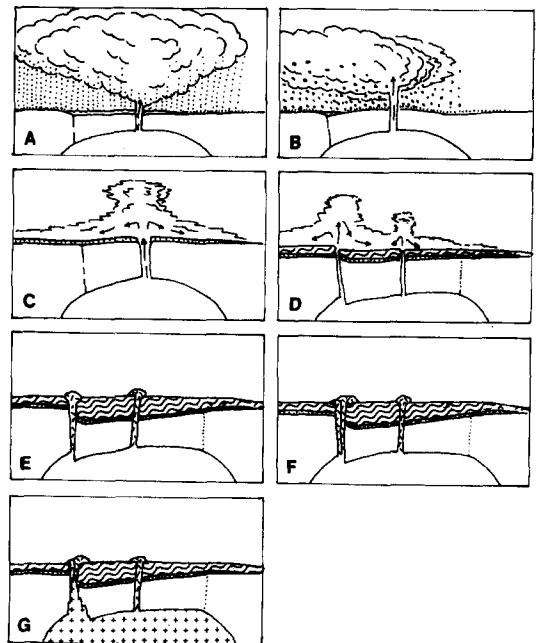


Fig. 8. Pictorial explanation of the volcanic processes in the Samrangjin caldera. A, phreatoplinian eruption; B, plinian eruption; C, ash-flow eruption through central vent; D, ash-flow eruption through ring fissure vents and caldera collapse; E, central and ring fracture volcanism; F, renewed volcanism along ring fracture; G, plutonism along ring fracture.

질로부터 간혹 점이층리 라필리옹회암을 형성하였고, 암설류가 정치되어 옹회각력암 혹은 괴상 라필리옹회암을 형성하였다. 또한 플룸으로부터 낙하되는 화산회가 판상층리 옹회암을 형성하였고, 이때 플룸 속에 제공하는 동안 습윤한 화산회가 어떤 핵을 중심으로 누적된 라필리로 낙하되어 누적라필리옹회암을 형성하였다. 이러한 분출활동은 반복적으로 일어났으며 폭발정도에 따라 암설류를 일으키지 않는 폭발활동도 있었을 것이다. 또한 암설류가 발생할지라도 국부적으로 정치된다면 판상층리 옹회암이 매우 두껍게 집적될 수도 있다.

그리고 중기로 접어들어 이 퇴적지도 국부적으로 침수되어 짧은 지표과정을 겪었다. 그래서 수중으로 낙하되는 화산 물질은 유수에 의해 더 분급되어 판상층리 옹회질사암을 퇴적시켰으며 슬러리 상태의 테프라가 수중에 사태류로 이동되어 괴상 옹회질사암을 퇴적시켰다.

플리니언 분출

이러한 분출상도 후기로 가면서 다른 분출상으로 전환되었는데, 이는 화도의 환경이 변화되었음을 의미한다. 화도가 완전히 건조됨으로써 수증기마그마성 분출은 마그마성 분출(magmatic eruption)로 전환되었다. 즉 외부물이 차단되는 환경변화로 인하여 주로 강하회를 퇴적시키던 수증기플리니언 분출은 점차 플리니언 분출(plinian eruption)로 전환되므로써 강하부석을 퇴적시켰다(Fig. 8B). 강하옹회암층의 상부에서 부석이 풍부한 점이층리 라필리옹회암이 이의 증거이다. 이러한 전환이 일어날려면 공급지는 물이 거의 완전히 제한되는 환경으로 바뀌어야만 한다. 즉 화구 부근에 강하회가 쌓이므로써 혹은 마그마가 점차 상승하므로써 지표수가 차단되든지, 아니면 마그마가 틈을 주입하므로써 지하수의 통로가 차단되는 등의 환경변화가 있어야만 한다.

이 두 분출상은 강하옹회암을 형성시켰지만, 중국적으로 저플리니언 분출상은 뒤이어 회류분출상으로 변경되었다.

칼데라 형성 회류분출

플리니언 분출상에서 회류분출상으로 흔히 전환된다는 것(Self and Rampino, 1981)은 앞에서 이미 언급한 바 있다. 강하부석에서 회류 화산활동으로 전환되는 것은 마그마 방출율이 급격히 증가되

었기 때문이다. 다시 말하면 계속되는 화산활동으로 화도가 넓어져 순간적으로 분연주가 붕괴되므로써 다량의 회류로 전환된데 그 원인이 있을 것이다(Fig. 8C, D). 이때의 마그마 방출율은 대류상 분연주(convective column)를 유지하는데 필요한 방출율보다 월등히 커졌을 것이다. 이는 회류분출 이전의 강하옹회암 내에 존재하는 암편들이 화도 확장을 단적으로 지시해 주고 있다. 또한 회류분출 초기에는 분연주 붕괴가 반복되었다고 본다. 왜냐하면 회류옹회암의 하부에 강하옹회암이 협재되어 있기 때문이다. 그러나 삼랑진옹회암의 회류옹회암은 각 흐름단위 간의 경계를 인지하기 매우 어려울 뿐만 아니라 대부분 파라텍시틱 석리를 형성할 정도로 심하게 용결되거나 거의 완전용결로 액화되어 있고 탈파리화되어 있다. 이러한 고도 용결옹회암을 형성하려면 고온 마그마로부터 낮은 분연주의 붕괴에 의해 회류의 속도가 느리고 유체화 정도가 적은 비확산적인 회류이어야만 하며 빠른 속도로 두껍게 집적되어야 한다. 왜냐하면 고온의 회류가 생성되어 범람할 때 열손실을 막아야만 하기 때문이다. 이렇게 분연주의 높이가 낮아지면 분출시에 개스함량이 적고 개스확산속도가 적으면서 마그마 방출율이 아주 커야만 가능하다. 이런 상태에서 회류는 덜 퍼져나가고 파리질 화산회(vitric ash)의 손실도 적었을 것이다. 이러한 회류상은 맹렬하지 않은 대규모 분출에서 유래되었음을 암시하며, 이때의 분출은 폭발성이 약하게 연속적으로 일어나는 끓어넘침 분출상(boiling-over eruption phase)이었다. 이 분출상이 일어날 때는 회운이 거의 발생하지 않는 반복적인 회류의 범람에 의해 큰 용적의 회류옹회암을 형성하였다.

강하옹회암과 초기의 회류옹회암은 중앙화도로부터 공급되었다(Fig. 8C). 점차 마그마 방출량이 방대해짐으로써 마그마챔버의 상위가 중앙화도를 중심으로 환상으로 북측부부터 함몰되기 시작하였다. 이와 같이 칼데라 형성이 처음 시작됨과 동시에 중앙화도는 그 역할이 급격히 축소되었다. 후기의 회류는 환상단열대를 따라 수많은 화도로부터 분출되었으며 칼데라 함몰은 계속 북측부가 더 깊게 함몰되어 최고 550m 이상이 되었다(Fig. 8D). 이러한 두 단계의 칼데라 형성 회류분출상은 이미 Druitt and Sparks(1985)에 의해 제안된 바 있다. 이와 같이 회류 분출과 관련하여 삼랑진 칼데라가 함몰되었다는 것은 본 회류옹회암의 측방변화가 이를 입증해 주고 있다. 본 회류옹회암은 삼랑진칼데라 북쪽 외류(outflow)에서보다 삼랑진칼데라 내에서 그

층후가 월등히 두껍기 때문이다. 본 삼랑진응회암의 층후를 수직 방향으로 계산하면, 상부가 침식되어 정확한 값을 얻기는 어려우나, 칼데라 내부 북측에서 약 630m 이상이고 칼데라 외부에서 약 230m 정도가 된다. 이와 같은 칼데라 내부에 축적된 응회암의 두께가 외류보다 3배 정도 더 두꺼운 것은 세계 각지의 다른 응회암들과도 유사하다(Lipman, 1984). 즉 이는 회류분출이 끝나면서 칼데라 함몰이 일어났던 것보다 차라리 분출 도중에 함몰이 시작되어 칼데라 내부에 회류응회암이 보다 빠른 속도로 축적되었음을 더 지지한다. 이외 증거로서 칼데라 내부에서 회류응회암은 비용결 부위가 거의 없고 파라텍시틱 석리가 우세한 용결현상을 보이는 점과 보다 조립의 결정으로 탈파리작용을 일으킨 점이다. 이는 칼데라 내부에 회류응회암이 급속히 집적되어 두꺼워짐으로써 높은 온도가 오랫동안 지속되었던데 가장 큰 원인이 있는 것으로 판단된다.

이러한 현상의 원인이 되는 환상열극분출은 분출량이 급격히 늘어나므로서 폭발력이 소진되고 칼데라 함몰은 계속되어 틈을 이용한 조용한 마그마 주입으로 전환되었다.

함몰후 증앙화구와 환상열극의 화산작용

환상열극을 따른 회류분출이 종식되고 삼랑진 칼데라가 형성된 후에 잔류마그마가 이 환상열극을 따라 주입되어 환상 유문암맥을 만들었다(Fig. 8E). 이들은 함몰후에 환상열극을 따라 생겨난 여러 화산들의 관입뿌리라고 생각된다. 이 화산은 유문암 도움을 이루었을 것으로 생각되며 여러 개가 환상으로 줄지어 있을 것으로 추측된다. 왜냐하면 환상암맥은 이의 유상열리를 살펴볼 때 대부분 칼데라 내측부에선 거의 수직에 가까우나 외측부에선 칼데라 중심쪽으로 경사를 이루기 때문이고, 한 곳이지만 용암도움으로 연결될 수 있는 용암 잔류체가 존재하기 때문이다.

또한 환상 유문암맥의 형성과 동시에 잔류마그마는 축적된 힘에 의하여 칼데라 중심부로 상승하기 시작하였다. 이때 마그마가 초기 회류응회암의 통로였던 증앙화도를 따라 주입되어 유문암 플러그를 형성하였다(Fig. 8E). 이도 함몰후화산의 하나로서 침식전 상부에는 유문암 도움으로 형성되었을 것이다. 왜냐하면 유상구조가 대체로 현재의 플러그의 중심부로 향하여 경사되어 있기 때문이다. 현재 플러그의 침식수준은 동측부 환상 유문암

맥 남측부와 마찬가지로 강하응회암과 접촉되는 부위에 속하므로 관입시 마그마의 열과 강하응회암의 수분과 상호작용하므로서 구과상구조를 형성케 하였다.

그리고 환상 유문암맥으로부터 내측부로 유문대 사이트 반암, 혹은 반상 대사이트와 대사이트 반암이 시공간적으로 순차적으로 관입되었다(Fig. 8F). 그 까닭은 이 암상 간에 접촉각력대가 존재하고 유문대사이트 반암 속에 유대상 유문암 포유체가 포획되어 있기 때문이다. 또한 이 반암들은 아마도 마그마침범이 외측부로부터 내측부로 냉각되어 보다 더 결정화된 내측부의 마그마로부터 관입되었다. 왜냐하면 이 환상암맥은 외연부가 대부분 유리질인데 비하여 내연부가 반상이고 미정질로서 보다 조립질을 나타내는 조직적인 차이를 가지며 회류응회암과의 경계부에서 냉각대가 없기 때문이다.

환상단열대의 심성작용

삼랑진 칼데라 남서측 환상단열대에는 함몰 종식 후 잔류마그마가 서서히 계속 상승하므로서 다소 높은 부위까지 각섬석 흑운모 화강암을 형성케 하였다(Fig. 8G). 이 각섬석 흑운모 화강암은 환상 유문암맥 관입뿌리의 더 깊은 연장부위라고 생각할 수도 있겠으나 인접 환상암맥과는 동일한 침식수준에 놓여 있으므로 지역적으로 일부만 잔류마그마의 상승이 더 후기까지 지속되었을 것으로 판단하는 것이 더 타당한 것 같다. 이는 칼데라 중앙부와 외측부로 마그마가 상승하여 정지한 후에 서서히 결정화된 것으로서 삼랑진 마그마계의 화성작용 종결 시기를 의미한다. 그러므로 이는 시공간적으로 볼 때 삼랑진 칼데라 함몰후 마그마가 마지막으로 상승할 때 칼데라의 남서측을 따라 관입된 환상관입체인 것으로 생각된다.

어영단층대의 심성작용

북동측에는 보다 큰 규모의 세립질 화강섬록암과 흑운모 화강암이 관입되었다. 이 관입체는 화산활동 마지막 단계의 일환으로 보기보다 이와 다른 구조운동 즉 어영단층운동에 동반된 산물인 것으로 생각된다. 왜냐하면 이 관입체는 화산활동 이후로 해석되는 어영단층의 N50°W 방향과 일치하여 연장되고 동측의 환상 유문암맥을 절단하고 있기 때문이다. 그러므로 본암은 칼데라의 환상단열대의

제어보다도 어영단층대의 지배를 더 크게 받았다. 즉 이 단층대의 구조적인 지배하에 마그마가 이동하여 정치되었다. 그리고 이 관입체는 서서히 냉각되면서 세립질 화강섬록암이 연변상으로 흑운모 화강암이 중심상으로 정치되었다.

결 론

삼랑진 칼데라에 관련된 암석단위는 하부로부터 삼랑진용회암의 강하회암과 회류용회암, 칼데라 후 관입체의 유문암질암과 각섬석 흑운모 화강암, 광역구조 관입체의 세립질 화강섬록암과 흑운모 화강암 등이다. 삼랑진 칼데라는 대체로 회류용회암-칼데라-환상암맥으로 연결되는 연속적인 화성사건을 일으켰다. 이에 따라 삼랑진 칼데라에서 일어난 화산작용과 화성과정을 다음과 같이 요약한다.

(1) 먼저 외부물의 접근에 의하여 수증기플리니언 분출상으로부터 주로 강하회를 퇴적시켰으며 점차 외부물의 접근이 차단됨으로서 일시적으로 플리니언 분출상으로 전환되어 강하부석을 퇴적시켰다. (2) 다시 넘쳐흐름 분출상으로 전환되어 고온의 화성쇄설 물질이 회류로 일시에 쏟아져 정치됨으로써 매우 심하게 용결되었다. 분출초기에는 중앙화구로부터 회류가 발생되었지만 후기에는 환상단열화구로의 전이가 일어났다. 이 결과로 칼데라 내부에 최고 630m 이상 두께로 회류용회암을 축적하였다. 이 회류분출의 결과로 마그마챔버 위의 지붕이 함몰되어 삼랑진 칼데라를 형성하게 되었다. (3) 칼데라 형성 직후에 중앙화구와 환상단열대를 따라 유대상 유문암이 주입되어 중앙관입체와 환상암맥을 형성하고 다시 환상암맥 내측부에 유문대사이트 반암과 대사이트 반암이 관입되었다. 이후 남서측의 단열대를 따라서 각섬석 흑운모 화강암이 관입되어 환상관입체의 일원이 되었다. (4) 그리고 칼데라 북동쪽에서 N50°W 방향의 어영단층대를 따라 길다란 화성암체가 관입되어 연변상의 세립질 화강섬록암과 중심상의 흑운모 화강암으로 정치되었다.

사 사

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(BSRI-97-5421)에 의하여 연구되었음을 밝혀둔다. 심사를 통하여 원고를 다듬어 주신 강원대학교 이문원 교수님, 부산대학교 윤성효교수님과 김진섭 교수님에게 감사드린다.

참고문헌

- 김규봉, 황상구, 1988, 밀양도폭 지질 보고서, 한국동력자원연구소, 1-26.
- 김상욱, 이영길, 1981, 유천분지 북동부 백악기 화산암류의 화산암석학 및 지질구조. 광산지질, 14, 35-49.
- 윤성효, 1993, 의성분지 중앙부 급성산화산암복합체의 화산활동과 폴드론구조. 지질학회지, 29, 309-323.
- 이상만, 김상욱, 민병식, 1987, 남한의 백악기 - 제삼기 화성활동과 지구구조적 의의. 지질학회지, 23, 338-359.
- 황상구, 1998, 양산서부 원동 칼데라의 진화와 유형. 지질학회지, 34, 20-32.
- 황상구, 김상욱, 1990, 밀양·양산 간의 칼데라를 동반한 회류용회암. 지질학회지, 26, 329-340.
- 황상구, 김상욱, 1992, 양산 칼데라의 규질 화산작용. 지질학회지, 28, 491-503.
- 황상구, 김상욱, 1994, 밀양-양산지역 백악기 화산암류의 암석학적 연구(I): 암석구조조적 위치. 지질학회지, 30, 229-241.
- 황상구, 정창식, 1998, 삼랑진 칼데라에 관련된 화성암류의 마그마 진화. 암석학회지, 7, 160-175.
- 황상구, 이기동, 김상욱, 이재영, 이윤종, 1997, 원동 칼데라의 화산작용과 화성과정. 암석학회지, 6, 96-110.
- Ayuso, R.A., 1984, Field relations, crystallization, and petrology of reversely zoned granitic plutons in the Bottle Lake complex, Maine. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 1320, 58p.
- Brown, G.M., Holland, J.G., Sigurdsson, H., Tomblin, J.F. and Arculus, R.J., 1977, Geochemistry of the Lesser Antilles volcanic island arc. Geochim. Cosmochim. Acta, 41, 785-801.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, Volcanic successions. Allen & Unwin, 59-91.
- Druitt, T.H. and Sparks, R.S.J., 1985, On the formation of calderas during ignimbrite eruptions. Nature, 310, 679-681.
- Hwang, S.K. and Kim, S.W., 1998, Volcanic evolution of the Samrangjin caldera. J. Petrol. Soc. Kor. Abst., 7, p. 15.
- Lipman, P.W., 1984, Roots of ash-flow calderas in western North America: windows into the tops of granitic batholiths. J. Geophys. Res., 89, 8801-8841.
- Park, K.H., 1990, A downsag caldera associated with the Chisulryoung volcanic Formation, near Kyeongju city, southern Korea. J. Geol. Soc. Korea, 26, 213-226.
- Self, S. and Rampino, M.R., 1981, The 1883 eruption of Krakatau. Nature, 294, 699-704.
- Smith, R.L., 1960, Ash flows. Geol. Soc. Am. Bull., 71, 795-842.
- Smith, R.L. and Bailey, R.A., 1968, Resurgent cal-

- drons. Geol. Soc. Am. Mem., 116, 613-662.
- Sparks, R.S.J., Self, S. and Walker, G.P.L., 1973, Products of ignimbrite eruptions. *Geology*, 1, 115-118.
- Wilson, C.J.N., 1980, The role of fluidisation in the emplacement of pyroclastic flows: An experimental approach. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 8, 231-249.
- Wright, J.V. and Walker, G.P.L., 1977, The ignimbrite source problem: significance of a co-ignimbrite lag-fall deposit. *Geology*, 5, 729-732.

(책임편집 : 윤성호)

(1998년 9월 15일 접수, 1998년 11월 5일 수리)

Volcanisms and igneous processes of the Samrangjin caldera, Korea

Sang Koo Hwang, Sang Wook Kim* and Yoon Jong Lee**

Dept. of Geology, Andong Nat'l University, Andong 760-749, Korea

**Dept. of Geology, Kyungpook Nat'l University, Taegu 702-701, Korea*

***Dept. of Earth Science Education, Kyungpook Nat'l University, Taegu 702-701, Korea*

ABSTRACT : The Samrangjin Caldera, a trapdoor-type, formed by the voluminous eruption of the silicic ash-flows of the Samrangjin Tuff which is above 630m thick at the northern inside of the caldera and thinnerly 80m at the southern inside. The caldera volcanism eviscerated the magma chamber by a series of explosive eruptions during which silicic magma was ejected to form the Samrangjin Tuff. The explosive eruptions began with phreatoplinian eruption, progressed through small plinian eruption and transmitted with ash-flow eruption. During the ash-flow eruption, contemporaneous collapse of the roof of the chamber resulted in the formation of the Samrangjin caldera, a subcircular depression subsiding above 550m deep. During postcaldera volcanism after the collapse, flow-banded rhyolite was emplaced as central plug along the central vent and ring dikes along the caldera margins. Subsequently rhyodacite porphyry and dacite porphyry were emplaced along the inner side of the ring dike. After their emplacement, residual magma was emplaced as a hornblende biotite granite stock into the southwestern caldera margin. In the northeastern part, the eastern dikes were cut final intrusions of granodioritic to granitic composition along the fault zone of N50°W trend.

Key words : Samrangjin Tuff, phreatoplinian eruption, ash-flow eruption, central vent, postcaldera volcanism.