

구암산 칼데라의 분출상과 화산과정

황상구^{1,*} · 손진담² · 이병주³ · A.J. Reedman⁴

¹안동대학교 지구환경과학과, ²한국지질자원연구원 석유해저연구부
³한국지질자원연구원 지질연구부, ⁴영국지질연구소 국제협력부

Eruptive Phases and Volcanic Processes of the Guamsan Caldera, Southeastern Cheongsong, Korea

Sang Koo Hwang^{1,*}, Jin Dam Son², Byung Joo Lee³ and Antony John Reedman⁴

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Andong Nat'l University, Andong 760-749, Korea

²Petroleum and Marine Research Division, KIGAM, Daejeon 305-350, Korea

³Geology Research Division, KIGAM, Daejeon 305-350, Korea

⁴International Division, British Geological Survey, United Kingdom

요약: 구암산 칼데라는 청송 남동부에 위치하며, 이에 관련된 층서단위는 구암산용회암과 유문암질 관입체가 있다. 구암산용회암은 대부분 회류용회암으로 구성되고 화산각력암과 얇은 강하용회암을 협재한다. 화산각력암은 분포위치와 층서에 따라 하부의 암괴회류 각력암과 상부의 칼데라함몰 각력암으로 구분된다. 하부에서 회류용회암은 화쇄류 형성 분출에 의한 팽창성 화쇄류상이고 강하용회암은 회운 강하상이며, 상부에서 회류용회암은 뿔어넘침 분출에 의한 비팽창성 회류상이다. 유문암질 관입체는 분포위치와 산출패턴에 따라 칼데라내부 관입체, 환상암맥으로 구분되고 환상암맥은 내측, 중간, 외측 환상암맥으로 나뉜다. 구암산 칼데라는 대체로 회류용회암-칼데라-환상암맥으로 연결되는 하나의 칼데라 유희를 나타낸다. 구암산 칼데라 지역에서 나타나는 분출상들로부터 칼데라 유희에 따라 화산과정을 다음과 같이 엮을 수 있다. 분출작용은 먼저 국부적인 펠리안 분출에 의한 암괴회류상으로 시작되었으며 연이어 화쇄류 형성 분출로부터 강한 유체화로 팽창성 화쇄류상으로 전환되고 회운 강하상도 수반되었다. 이때 분연주는 높이가 점차 낮아졌으며 화쇄류의 유체화도 줄어들었다. 다시 뿔어넘침 분출에 의한 비팽창성 회류상으로 전환되어 고온의 화성쇄설물이 일시에 방출되어 정지됨으로써 매우 심하게 용결되었다. 뿔어넘침 분출은 칼데라 함몰과 함께 환상단열로의 회구 이동에 의해 본격화되었다. 분출초기에는 중앙화구로부터 화쇄류가 발생되었지만 후기에는 환상단열회구로의 위치가 변경되어 회류가 다량으로 발생하였다. 회류 분출 후에는 칼데라내부 모우트의 갈라진 틈과 환상단열대를 따라 분류상이 연속적으로 뒤따랐으며 이들에 의한 함몰후 화산으로서 용암도움은 침식으로 사라졌지만 화산뿌리로서 칼데라내부 관입체와 3개의 환상암맥을 노출시킨다. 마지막으로 남서측 환상암맥의 관절부위에 유문테사이트가 순차적으로 연속 관입되어 환상암맥의 일원이 되었다.

핵심어: 구암산용회암, 유문암질 관입체, 화쇄류 형성 분출, 화쇄류상, 회운 강하상, 뿔어넘침 분출, 분류상

Abstract: Rock units, relating with the Guamsan caldera, are composed of Guamsan Tuff and rhyolitic intrusions. The Guamsan Tuff consists almost entirely of ash-flow tuffs with some volcanic breccias and fallout tuffs. The volcanic breccia comprises block and ash-flow breccias of near-vent facies and caldera-collapse breccia near the ring fracture. The lower ash-flow tuffs are of an expanded pyroclastic flow phase from the pyroclastic flow-forming eruption with an ash-cloud fall phase of the fallout tuffs on the flow units, but the upper ones are of a non-expanded ash-flow phase from the boiling-over eruption. The rhyolitic intrusions are divided into intracaldera intrusions and ring dikes that are subdivided into inner, intermediate and outer dikes. We compile the volcanic processes along a single cycle of caldera development from the eruptive phases in the Guamsan area. The explosive eruptions began with block and ash-flow phases from collapse of glowing lava dome caused by Pelean eruption, progressed through expanded pyroclastic flow phases and ash-cloud fallout phases during high column collapse of pyroclastic

*Corresponding author: Tel. 82-54-820-5469, Fax. 82-54-823-1627, E-mail. hwangsk@andong.ac.kr

flow-forming eruption from a single central vent. This was followed by non-expanded ash-flow phases due to boiling-over eruption from multiple ring fissure vents. The caldera collapse induced the translation into ring-fissure vents from a single central vent in the earlier eruption. After the boiling-over eruption, there followed an effusive phase in which rhyolitic magma was injected and erupted to be progressively emplaced as small plugs/dikes and ring dikes with many lava domes on the surface. Finally rhyodacitic magma was on emplaced as a series of dikes along the junction of both outer and intermediate dikes on the southwestern side of the caldera.

Key words: Guamsan Tuff, Rhyolitic intrusions, Pyroclastic flow-forming eruption, Pyroclastic flow phase, Ash-cloud fallout phase, Boiling-over eruption, Effusive phase

서 언

경상분지 북동부 태행산에서 보현산과 내연산 사이의 주왕산 화산지역은 회류옹회암-칼데라-환상암맥 연속체로 조합된 수 개의 칼데라가 존재한다. 이 화산지역의 중앙부에 존재하는 구암산 칼데라는 그 진화에 대해서 이미 자세하게 보고된 바 있지만(황상구, 2002a), 그러나 이에 연관된 분출상에 대한 연구가 이루어지지 않았다. 따라서 이 칼데라에 관련된 화산암류만을 선정하여 이의 분출상을 해석하고 이들의 화산과정을 엮어내는 것이 이 논문의 목적이다.

경상분지 내의 칼데라 지역은 흔히 침식정도가 매우 커서 일반적으로 칼데라 내에만 관련 화산암이 잔류되어 있다. 구암산 칼데라 지역도 마찬가지로 침식정도가 크고 침식 계곡이 깊어서 이에 관련된 화산암층을 거의 전부 드러낼 뿐만 아니라 화산뿌리에 해당하는 관입체까지도 관찰할 수 있는 좋은 야외실험장을 제공한다. 따라서 구암산 칼데라 지역도 칼데라 내부에 칼데라 형성의 원인으로써 구암산옹회암(Guamsan Tuff)이 분포되고, 또한 이에 조합된 칼데라내부 관입체(intracaldera intrusion)과 환상암맥(ring dike) 등의 유문암질 관입체(rhyolitic intrusion)가 노출된다(Fig. 1). 이 분출암과 관입체들의 암상과 층서는 구암산 칼데라에 관련된 분출상과 화산과정을 복원하기에 충분하다.

이번 연구를 통하여 합몰 전후의 여러 분출상, 칼데라함몰, 칼데라후 화산작용 등이 토론될 것이다. 궁극적으로 이 결과는 경상분지 화산활동이 칼데라 화산작용과 연관되어 있을 뿐만 아니라, 이 화산과정의 특성을 이해하는데 중대한 의미를 지닌다. 또한 이는 앞으로 다른 칼데라 화산작용과 과정을 이해하는데 기여할 것이고 서로 비교하는데 이용될 것이다.

지질개요

경상분지에는 화산암류가 넓게 분포되며, 이들은 백

악기 후기와 제삼기 초기에 유라시아판 대륙연변부의 섭입대를 따라 일어난 칼크알칼리 화성활동의 산물에 해당된다(이상만 외, 1987; 김규한·이진수, 1993; 김진섭·윤성효, 1993; 황상구·김상욱, 1994; 윤성효 외, 2000). 이 화산암류는 주로 유천소분지에 집중적으로 분포되지만 영양소분지 남동부에서 의성소분지 중동부에 이르는 지역에도 넓게 분포된다. 이 지역은 태행산

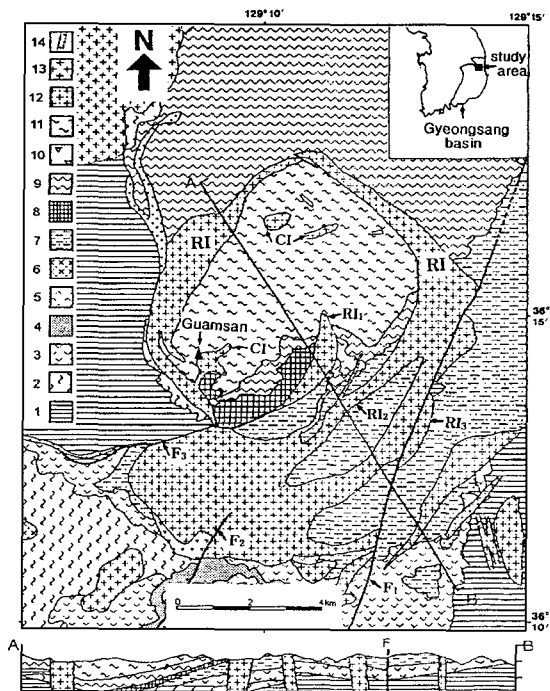


Fig. 1. Generalized geologic map of Guamsan caldera. 1, Sedimentary rocks; 2-6, Jukjang Volcanics (2, Rhyolitic to andesitic pyroclastics; 3, Andesite lavas; 4, Tuffites; 5, Basaltic andesite lavas; 6, Andesite intrusion); 7, Naeyo-nsan Tuff; 8, Neogudong Formation; 9, Muposan Tuff; 10, Volcanic breccia; 11, Guamsan Tuff; 12, Rhyolitic intrusions; 13, Plutonic rocks; 14, Acidic dikes. F1, Sampo fault; F2, Jayangcheon fault; F3, EW-trending fault.

에서 보현산과 내연산에 이르는 지역으로서 주왕산 화산지역에 해당된다.

이 화산지역에서의 화산암류는 대부분 분출암류로 구성되지만 소규모 관입암류도 포함된다. 분출암류는 하양층군 퇴적암류 위에 놓이면서 하부의 염기성·중성 화산암류와 상부의 산성 화산암류로 대별된다. 전자는 대전사현무암, 입봉안산암과 죽장화산층 등의 층서단위가 있으며 이들은 상부의 산성 화산암류에 피복되어 지역적으로 고립되어 있다. 후자는 하부로부터 지품화산암, 주왕산응회암, 내연산응회암, 너구동층, 무포산응회암, 구암산응회암 등의 층서단위로 구분되고 대체로 북쪽에서 남쪽으로 분포된다(황상구, 1998, 2002a).

관입암류는 칼데라와 관련된 유문암질 관입체와, 칼데라와 무관한 흑운모 화강암과 규장암맥이 있다. 유문암질 관입체는 칼데라 형성 후속단계 화산암류로서 칼데라 내부 관입체와 환상암맥으로 구분된다. 흑운모 화강암은 작은 암주 형태로 노출되고 규장암맥은 직선상으로 노출된다(Fig. 1).

본역에서 이 모든 지질은 북동-남서 방향의 주향이동 단층인 삼포단층과 자양천단층(오인섭·정국성, 1975)의 북동 연장부에 의해 잘리고 동서 방향 단층에 의해 함몰되어 있어 이들을 경계로 하여 암체가 변위되어 있다(Fig. 1).

구암산응회암과 칼데라

구암산응회암은 그 공급지가 구암산 칼데라에서 유래된 화산각력암(volcanic breccia), 회류응회암(ash-flow tuff), 강하응회암(fallout tuff)과 층회암(tuffite)을 묶어서 일컫는 하나의 층서단위이다(Fig. 2). 이 층서단위는 대부분 회류응회암으로 구성되며 구암산 칼데라 내부에만 분포된다(Fig. 1). 이는 대부분 구암산 칼데라 내의 숨겨진 화구로부터 분출된 큰 용적의 회류가 방사상으로 퍼져나가 두껍게 쌓인 응회암이지만 장기간의 침식 삭박으로 칼데라 내부에만 남아 있다. 이러한 잔류체는 침식으로 인한 깊은 계곡이 형성되어 있을 뿐만 아니라 광역적으로 본역 남쪽 외곽부의 큰 심성암체의 관입에 의하여 북쪽으로 기울어진 데 기인하여 이의 하부에서부터 상부까지의 그 단면을 대부분 노출시킨다. 그리고 이 응회암의 화학조성은 SiO_2 가 72~78% 범위로서 고규산 유문암질에서 저규산 유문암질 범위에 해당되고 저규산 유문암질이 우세하다(황상구, 2002b).

그러면 구암산응회암을 구성하는 암상을 상세히 기재하고 해석함으로써 분출물의 복잡한 화산사건의 진화를 풀어본다.

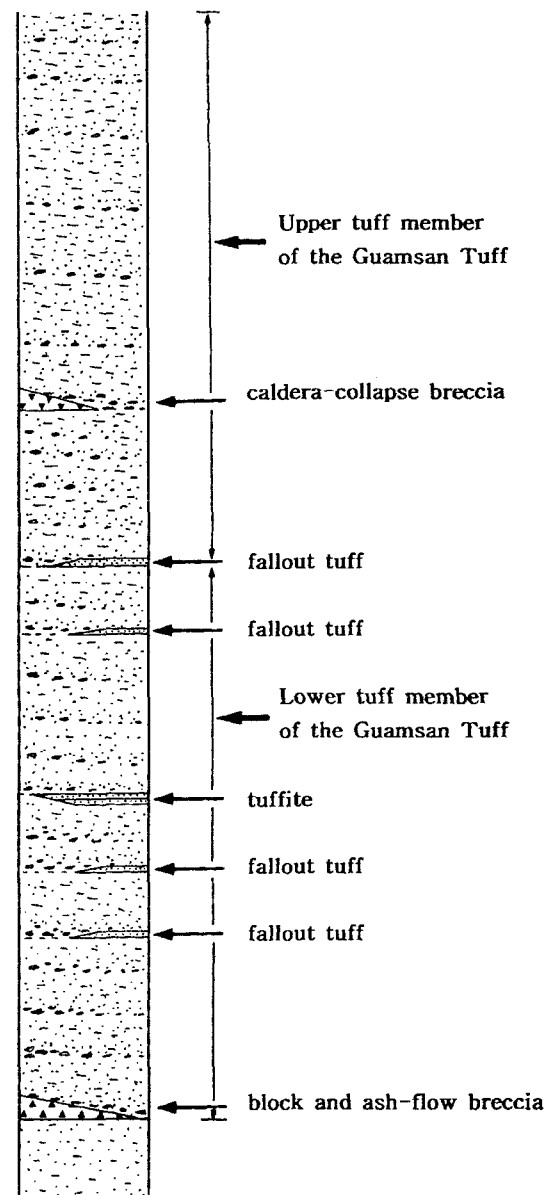


Fig. 2. Typical section of the Guamsan Tuff, showing variations in stratigraphic units that comprise volcanic breccias, fallout tuffs and tuffites in almost entire ash-flow tuffs.

화산각력암

화산각력암에는 무질서 괴상 각력암(disorganized massive breccia)과 혼돈 괴상 각력암(chaotic massive breccia) 등의 2개 암상이 있다.

혼돈 괴상 각력암은 대부분 유문암 암괴(stock)로 구

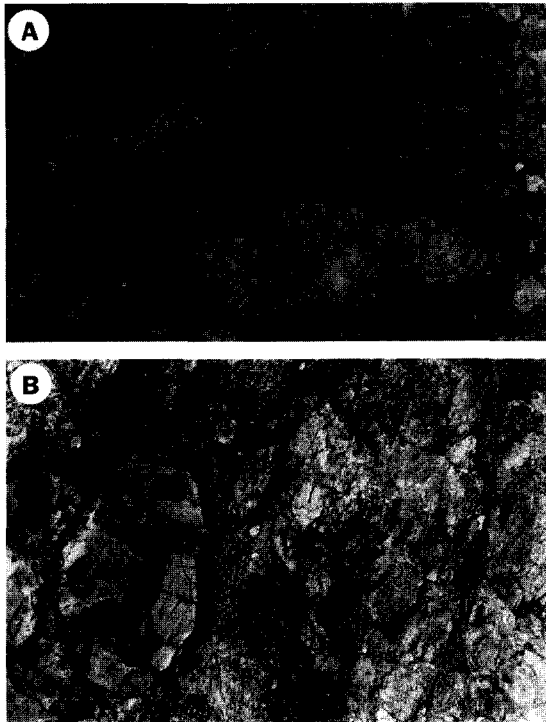


Fig. 3. Volcanic breccias. A, Disorganized massive breccia in the southwestern part of the caldera, interpreted as block and ash-flow breccia of a near-vent facies; B, Chaotic massive breccia near the northern caldera margin, interpreted as caldera-collapse breccia.

성되어 거의 단암질(monolithic)에 속하지만 안산암, 용결응회암 등의 암괴들을 포함한다. 이들은 직경이 보통 5~15 cm이고 간혹 최대 1 m 이상인 것도 포함되며 형태가 보통 아원상 내지 아각상이고(Fig. 3A) 입도 분류에 의하면 응회각력암(tuff breccia)에 속한다(Fig. 4). 기질은 회백색 내지 회색의 화산회로 구성되며 암괴들은 기질에 의해 지탱되어 있다. 이 암상은 측방으로 연속성이 좋지 않고 수직으로는 상당히 두꺼운 렌즈상이다. 이러한 암상은 원래 지형적 저지에서 상당히 두껍고 고지에서 얇다. 암괴를 제외하면 라필리응회암을 닮았고 내부층리와 점이현상을 거의 찾아볼 수 없다. 이 암상은 환상암맥의 남서측에서 가장 흔하고 최하부층에서 기저 암편질 각력암으로 산출되며(Fig. 5A) 이 곳으로부터 북동부로 갈수록 점이현상이 나타난다. 그래서 분포위치에 따라서 그 형성 기구가 상당한 차이를 나타낸다. 이는 입도 분류도에서 그 트렌드가 다른 암석단위와 상당히 다른 점에서도 지지된다(Fig. 4).

또한 남서측에서 이 각력암은 환상암맥을 감싸면서

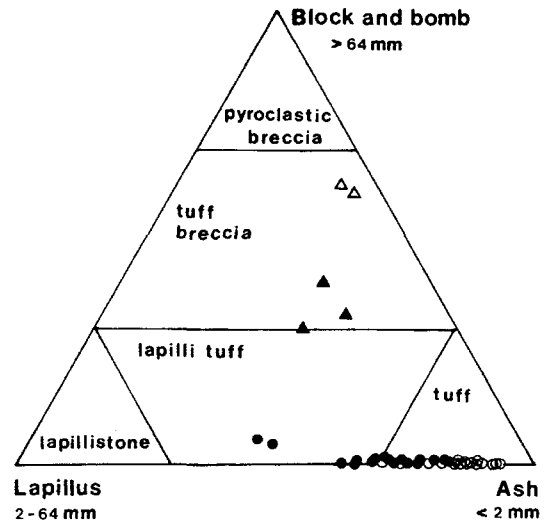


Fig. 4. Granulometric classification of the Guamsan Tuff showing different trends for lithofacies respectively. Solid triangle, block and ash-flow breccia; Open triangle, caldera-collapse breccia; Solid circle, lower tuff member; Open circle, upper tuff member.

소규모로 분포되며(Fig. 1), 죽장화산층을 자르면서 내연산응회암 위에 놓인다. 이 암상은 황화변질, 층서관계와 암상대비 등에 의하면 구암산응회암의 최하부와 대비된다(황상구, 2002a). 따라서 이 각력암은 화쇄류에 의한 화구 사면에 쌓인 화성쇄설암(pyroclastic rock)에 속하는 것으로 생각된다. 화쇄류 형성기구는 용암도움 붕괴, 분연주 붕괴에 의해 지배된다. 주로 유문암암괴로 구성된 점을 고려하면 활동하고 있던 용암도움 붕괴에 의해 그 조각들이 산사면으로 흘러서 형성된 암괴회류상(block and ash-flow phase)으로 분류된다. 이러한 암상은 아마도 근접화구상(near-vent facies)을 나타내며 구암산 지역에서 화산작용의 시작을 의미한다.

혼돈 괴상 각력암은 지질도에 표기할 수 없지만 상부 응회암 멤버의 하부에서 산출되며 회류응회암 사이에 켜기상으로 협재된다. 이 암상은 대부분 유문암과 용결응회암 암괴로 구성되고 직경이 보통 10~20 cm이고 간혹 1 m 이상인 것도 포함된다(Fig. 3B). 입도 분류에 의하면 응회각력암에 속하고 그 트렌드가 다른 암석단위와 매우 다르다(Fig. 4). 이의 경계면은 불규칙하지만 대체로 기저부에서 깊게 침식되어 있고 상단부에서 다소 평단하며 측방으로 불연속적이며 혼돈되지 않은 라필리응회암으로 연결된다. 이 암상은 내부 구조가 매우 불규칙하게 혼돈되어 있고 소규모 단층에 의해 잘려 있다(Fig. 3B). 이 암상은 북부 환상단열대

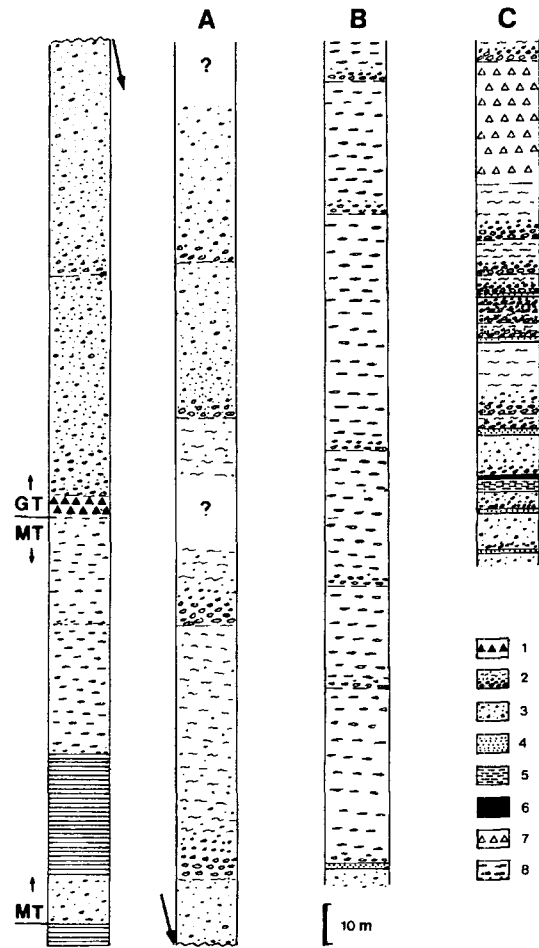


Fig. 5. Columnar sections showing variations in lithofacies of the Guamsan Tuff (GT), underlying by the Muposan Tuff (MT), across the caldera from the southern to the northern margin. 1, disorganized massive breccia; 2, graded-bedded tuff and lapilli tuff bed; 3, massive tuff bed; 4, planar-bedded tuff bed; 5, planar-bedded tuffaceous sandstone bed; 6, massive tuffaceous mudstone bed; 7, chaotic massive breccia; 8, welding-foliated tuff bed. A, lower tuff member of the Guamsan Tuff; B, upper tuff member of the Guamsan Tuff; C, intermediate part between lower and upper tuff members in the northern medial or distal zone of the Guamsan Tuff.

와 인접하여 경사진 부분의 계곡부에서 산발적으로 산출되며 층서적으로 구암산용회암의 중간 부분에 협제된다(Fig. 5C). 이러한 사실은 아마도 환상단열을 따라 일어나는 칼데라 함몰에 의해 형성된 급사면에 암설류 혹은 암괴류가 발생하고 다시 중력에 의해 슬라이딩됨으로서 형성된 것을 암시한다. 따라서 함몰 주위에 1 m

내외의 많은 암괴들이 형성될 수 있는 것으로 판단된다. 그러므로 이 각력암은 칼데라 함몰에 의한 암설류상(debris flow phase)으로 분류되는 칼데라함몰 각력암(caldera-collapse breccia)에 속한다. 또한 이 암상은 열극분출을 의미하는 화구 전이를 암시하는 것으로 생각된다. 분출이 열극을 따라 시작된다면 화도 침식에 의해 많은 암편을 포함할 것이다. 그러나 상부로 가면서 암편의 함량이 급격히 감소하는데 이는 단일대의 경사가 외측경사인데 기인하여 함몰에 따라 화도가 침식 없이 확장된 결과이다(황상구, 2002a).

회류용회암

회류용회암에 속하는 암상은 점이층리 용회암 및 라필리용회암층(graded tuff and lapilli tuff bed), 괴상 용회암층(massive tuff bed)과 용결엽리 용회암층(welding-foliated tuff bed)이 있다. 이들은 입도 분류도에서 용회암과 라필리용회암에 투시되면서 아랫변에 거의 평행되는 하나의 트렌드를 나타낸다(Fig. 4). 하부 용회암 멤버는 라필리용회암과 용회암 영역에 걸쳐있고 반면에 상부 용회암 멤버는 용회암 영역에만 존재하는데, 이는 하부 멤버가 상부 멤버보다 더 큰 암편이 많이 함유되기 때문이다.

점이층리 용회암 및 라필리용회암층은 회백색 내지 담회색을 띠고 화산회암 암편과 부석의 라필리로 구성되는 암편풍부 파리질용회암(lithic-rich vitric tuff)이다. 특히 전체적으로 하부에서 암편이 매우 풍부하고 상부에서 부석이 다소 풍부하게 포함한다. 그래서 입도는 단일층 내에서 암편에 의해서 라필리용회암에서 조립질용회암으로 점점 작아지는 정점이 현상을 보인다(Fig. 6A, B). 따라서 입도 분류도에서 용회암과 라필리용회암 영역에 투시되는 하부 용회암 멤버가 분암에 해당된다(Fig. 4). 기질은 조립질 화산회로 채워져 있으며 라필리가 풍부한 하부에서 상대적으로 적게 포함된다. 이 암상은 그 두께가 2~20 m 범위이고 노두에서 측방으로 연속된다. 두꺼운 단일층은 그 중간부가 다소 용결되어 완배열상 석리(eutaxitic fabric)를 나타내고(Fig. 6C) 그 하부가 암편이 밀집되어 있다(Fig. 6D). 이 암상은 하부 용회암 멤버에 주로 나타나고 상부 용회암 멤버의 하부에서도 산출된다(Fig. 5A, C). 이 암상이 점이현상을 나타내는 것은 큰 폭발에 의해 형성되는 높은 분연주의 붕괴로부터 발생하는 분연주 붕괴상(column collapse phase)일 것이다. 이때 붕괴된 테프라는 강한 유체화(fluidization) 화쇄류를 일으키면서 수증기 등의 상승하는 유체에 의해 지지되어 흐르다가

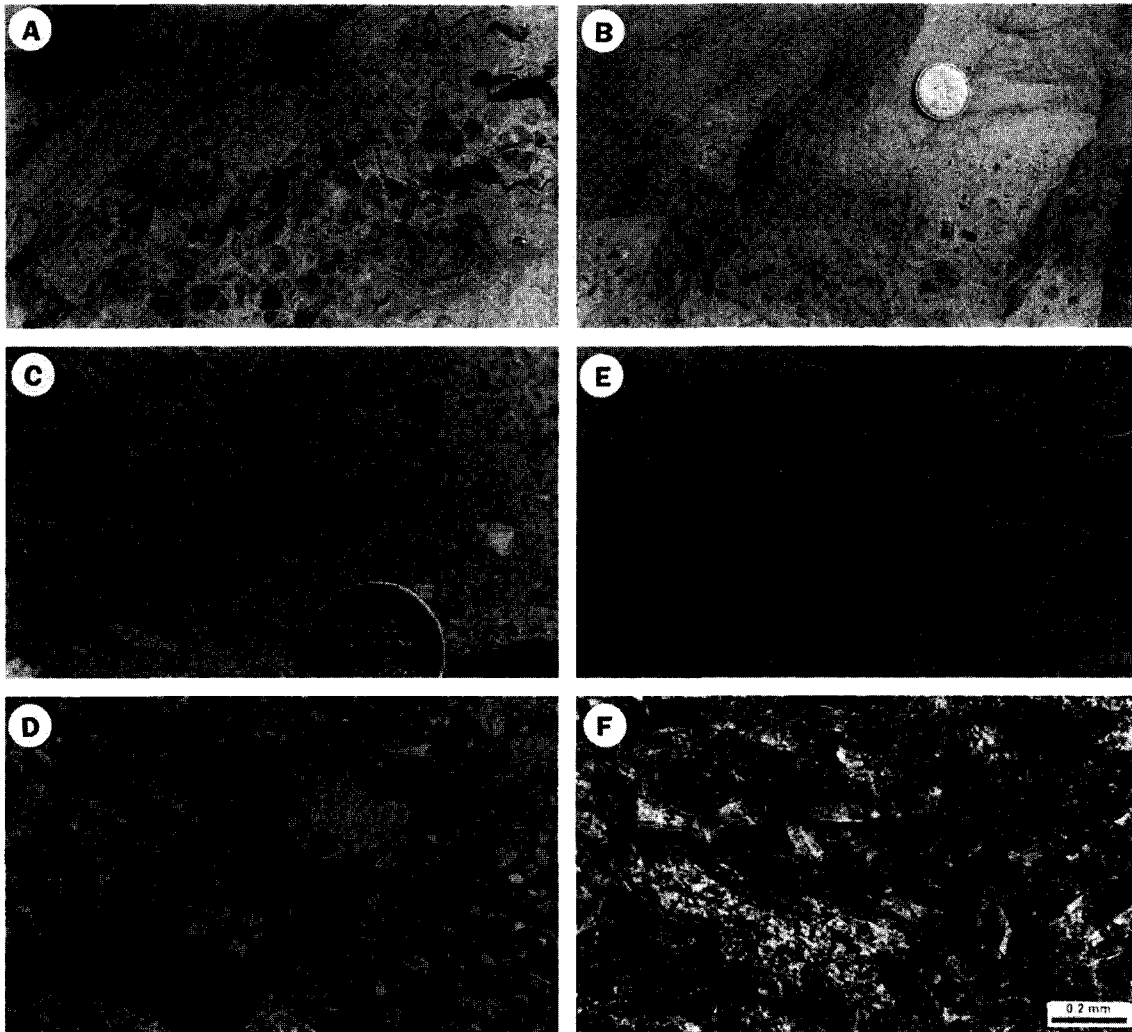


Fig. 6. Detail of graded tuff and lapilli tuff bed, and massive tuff bed derived from a expanded pyroclastic flow generated by eruption column collapse. A, Graded lapilli tuff bed; B, Graded tuff bed; C, Eutaxitic fabric in the middle part of a thick graded tuff and lapilli tuff bed; D, Lithic-rich zone in the lower part of the same thick graded tuff and lapilli tuff bed as C; E, Outcrop of massive tuff bed; F, Photomicrograph of massive tuff bed showing a vitroclastic fabric recognizable from axiolitied vitric shards and pumices.

비중이 큰 암편들이 입도에 따른 최종낙하속도의 차이에 의해 점이적인 분급을 일으킨다.

괴상 응회암층은 화산회의 기질 속에 다양한 색의 암편과 소량의 부석으로 구성되는 암편풍부 파리질응회암이다. 기질은 대개 회백색, 담회색, 담청록색을 띠며 암편들이 암회색, 담갈색, 암녹색을 띠고 부석이 주로 회백색을 띤다(Fig. 6E). 기질은 매우 풍부하고 매우 불량한 분급을 이루는 괴상을 나타낸다. 암편은 매우 약한 점이현상을 나타내고 하부에 다소 밀집된다.

두께는 4-25 m 범위이고 그 경계가 다소 불규칙하지만 단일층 내에서 암편의 하부 밀집에 의해 구분된다. 이 암상은 대부분 하부 응회암 뿔에서 산출되고(Fig. 5A) 입도 분류도에서 대부분 응회암 영역에 투시된다(Fig. 4). 경하에서 미반정으로 사장석과 정장석이 소량으로 나타나며 흑운모와 불투명광물이 극히 드물게 나타난다. 파리질 샤아드는 하부에서 뼈다귀, 초승달 혹은 Y자 모양으로 그대로 간직하고 있으며, 간혹 탈과리작용(devitrification)에 의해 그 윤곽이 선명하게 나타

난다(Fig. 6F). 따라서 최하부에서 거의 비용결로 파괴쇄설상 석리(vitroclastic fabric)를 나타낸다(Fig. 6F). 그러나 하부 응회암 멤버의 상부로 가면서 용결도가 높아지고 부석과 샤아드가 점차 편평화되어 약한 용결엽리(welding foliation)를 나타내는 것도 있다. 기질의 불량한 분급, 괴상 층리, 두꺼운 두께와 비용결 등에 의하면, 이 암상은 다소 큰 폭발에 의해 형성된 다소 높은 분연주 붕괴로부터 밀집된 테프라가 회류로 정치된 것을 지시한다. 암편이 약한 점이현상을 보이는 것은 약하게 유체화되었음을 의미한다. 기질이 매우 풍부한 것은 유체화가 강하지 않아 화산회의 이탈이 적었다는 것을 나타낸다. 그러므로 이 암상은 다소 큰 폭발에 의한 높은 분연주 붕괴로부터 발생하는 밀집된 테프라가 다소 유체화된 회류로부터 정치하는 분연주 붕괴상이라는 것을 지시한다. 그러나 상부로 가면서 용결도가 높아지는 것은 분연주의 높이가 점점 낮아지고 방출량이 점차 증가되었다는 것을 지시한다.

용결엽리 응회암층은 상부 응회암 멤버에서 산출되고(Fig. 5B) 입도 분류에 의하면 모두 응회암 영역에 투시된다(Fig. 4). 기질이 회색 내지 암회색을 띠며 육안으로 사장석이 약간 포함될 뿐 석영이 거의 관찰되지 않는 파리질응회암에 속한다. 이 암상은 전체적으로 분급되어 있지 않고 층리가 없다. 그러나 대부분 심히 용결되어 있어 마치 용암과 유사한 용결엽리를 나타내는 내부 특징을 보여주고 이와 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 흐름단위(flow unit)의 경계는 거의 완전한 용결작용에 의해 가리워져 있다. 또한 그 하위에는 써지응회암(layer 1)이 존재하고 그 상위에는 강하응회암(layer 3)이 존재해야만 이상적이지만 이들에 대한 별다른 암상이 발견되지 않는다(Fig. 5B).

이 암상은 암편이 드물고 그 크기가 5 cm 이하이다. 유리질 화산회와 부석은 매우 심하게 용결되어 있고 거의 모든 화성쇄설조직이 파손될 정도로 용결엽리화되어 있다. 부석은 암회색이고 두꺼운 상위의 누층에 의해 극히 심하게 편평화되어 있고 작아서 인지하기가 어렵다(Fig. 7A). 이들은 신선한 면에서 거의 용암과 같은 양상을 띠기 때문에 인지가 어렵다. 그러나 암편은 비교적 작고 흐름단위의 하부에 다소 밀집되며(Fig. 7B) 단일층의 구분에 이용된다. 경하에서 미반정으로 사장석, 정장석이 소량으로 나타나고(Fig. 7C) 석영, 흑운모, 불투명광물도 드물게 나타난다. 파리질 샤아드는

심하게 변형되고 용결되어 있으며, 하부에서 탈파리작용에 의해 경계부를 따라 축열상 결정작용(axiolitic crystallization)이 차별적으로 일어나 그 윤곽을 선명하게 한다(Fig. 7C). 부석도 심하게 편평화된 채로 피아메로 나타나며, 심하게 탈파리화되어 미문상으로 결정화되거나 혹은 그 내부가 기체상 결정작용(vapor-phase crystallization)에 의해 모자익상으로 결정화되어 있다(Fig. 7D). 그러므로 부석과 샤아드는 전체적으로 심하게 치밀용결(dense welding)되어 있어 용결엽리를 나타내지만, 그러나 하부에서는 완배열상 석리를 보여주고 상부로 갈수록 준배열상 석리(paratexitic fabric)를 보여주며 결국 원래 화성쇄설성 조직의 인지가 어려운 파리반상 석리(vitrophyric fabric)로 변화된다. 즉 본 응회암은 상부로 가면서 용결작용은 더 심해지면서 탈파리화 흔적이 없는 흑요암상을 나타낸다.

이 암상이 분급되지 않고 용결엽리를 형성하는 것은 회류에 의해 정치되었음을 지시한다. 본 암층은 전반에 걸쳐 회운에 의한 강하응회암이 약간이라도 산출이 되지 않는 것은 분출중심지에 가깝다는 것과 연속적인 분출로 흐름단위의 정치시간이 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 거의 액화되었음을 암시한다. 이와 같이 상부에서 회류응회암은 용결작용이 매우 심한 점, 반정의 함량이 적고 크기가 작은 점에 의하면, 이 암상은 상대적으로 온도가 높은 회류에 의해 정치되었음을 지시한다. 탈파리작용이 매우 심한 점에 의하면 본 암층은 낮은 분연주 붕괴에 의해 회류가 빠른 속도로 두껍게 집적되므로 열 손실의 저하로 고온으로 보다 오래 지속되어 냉각기간이 길었음을 암시한다.

이상과 같이 조직적인 균질성, 큰 두께와 심한 용결작용은 원래 높은 온도의 마그마에서 분출되어 속도가 느리고 유체화가 적으며 회운 속으로 화산회 손실이 적은 비팽창성 회류에 의해 일어난 것을 반영한다(Wilson, 1980). 이러한 회류상은 맹렬하지 않은 대규모 분출에서 유래되었음을 암시하며, 이때의 분출은 폭발성이 약하게 연속적으로 일어나는 끓어넘침 분출(boiling-over eruption)이었음을 반영한다. 이 분출이 일어난 때는 회운이 거의 발생하지 않는 반복적인 회류의 범람에 의해 큰 용적의 회류응회암을 형성하면서 이들이 칼데라 내부에 두껍게 집적되었을 것으로 생각된다. 그러나 이 분출은 초기에 칼데라를 형성하면서 환상단열을 따라 일어나는 회류에 의해 암편이 많은

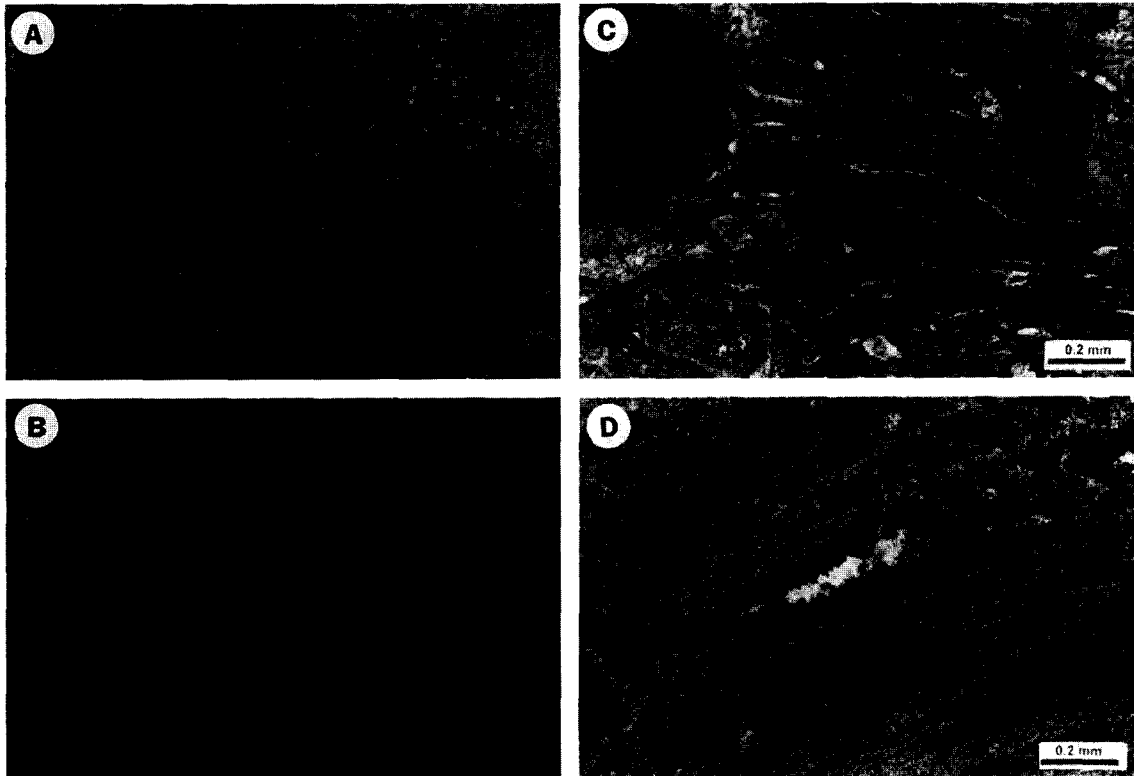


Fig. 7. Welding-foliated tuff bed in the upper member of the Guamsan Tuff, derived from a non-expanded ash flow by boiling-over eruption. A, Middle part of a welding-foliated tuff bed; B, Lower part of a welding-foliated tuff bed; C, Photomicrograph of a welding-foliated tuff bed. Extremely flattened shards and pumices, outlined and partially eliminated by axiolitic devitrification, define an eutaxitic welding fabric; D, Photomicrograph of a welding-foliated tuff bed. Extremely flattened pumices have partially eliminated by axiolitic devitrification and mosaic vapor-phase crystallization.

회류응회암을 형성하였다. 이러한 반복적인 회류가 두 겹께 집적되므로서 고온의 열이 오래 유지됨으로서 강한 용결작용이 일어나고 심한 탈파리작용이 일어날 수 있었을 것이다.

강하응회암

강하응회암은 화성쇄설암과 층회암으로 구성된다. 여기서 입도와 퇴적구조에 따라 암상을 분류하면 화성쇄설암은 판상층리 응회암(planar-bedded tuff)에 해당되고 층회암은 판상층리 응회질사암(planar-bedded tuffaceous sandstone)과 괴상 응회질사암(massive tuffaceous mudstone)이 있다.

판상층리 응회암은 담청록색 혹은 회색으로서 중·세립질 화산회로 구성되며 측방으로 거의 층후변화 없이 평행으로 연장된다(Fig. 8A). 이 암상은 두위부에서 산출되지 않고(Fig. 5A) 칼데라 북변부와 동변부의 중

위부 혹은 말단부에서 회류응회암 사이에 대부분 1 m 내외로 협재되며(Fig. 5C) 그 하부 경계가 뚜렷하지 못한 편이다. 이 암상은 분급이 양호하지 못한 편이며 단일층 내에서 드물게 입도가 상향 세립화하는 정점이 현상을 나타내고 간혹 5~10 mm 내외의 누적라필리(accretionary lapilli)를 함유하기 때문에(Fig. 8B) 강하응회암이라는 것을 알 수 있다. 그리고 사층리나 침식 흔적 등은 발견되지 않는다. 이 암상은 결정 입자가 드물게 포함되고 대부분 파리질 사아드로 구성되는 파리질응회암이다. 결정편은 사장석, 석영이 드물게 포함되며, 이들의 입도는 1 mm 미만이고 그 모양이 각상을 이룬다. 이 암상은 중·세립질이고 회류응회암 사이에 1 m 내외로 협재되고 그 하부 경계가 뚜렷하지 못한 것은 회류에 뒤따라 발생하는 회운으로부터 화산회가 공중에서 대류하다 낙하되어 형성되는 강하응회암임을 지시한다. 흔히 회운에 의한 강하상(fallout phase)은 회류응회암 상위에 놓인다(Sparks *et al.*, 1973). 따라서

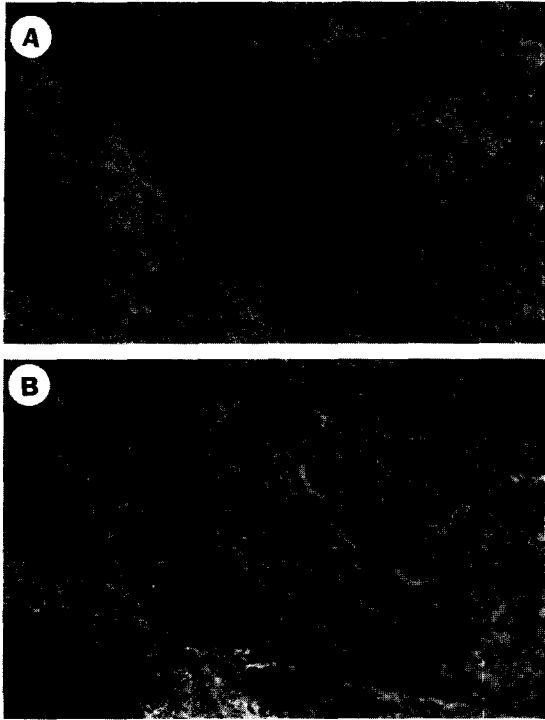


Fig. 8. A, Planar bedded tuff bed derived from ash-cloud fall and intercalated in the ash-flow tuffs of the lower member in the Guamsan Tuff; B, Accretionary lapilli within the planar bedded tuff bed of A.

이 강하응회암은 회류응회암의 정규상(normal facies)에 뒤따르는 상단상(top facies)으로써 나타난다. 또한 이 암상이 칼데라 북변부와 동변부의 중위 혹은 말단에서 만 산출되는 것은 이를 발생시킨 분화구가 남서쪽에 있다는 것을 시사한다. 왜냐하면 이 회운 강하상은 분화구로부터 멀어질수록 증가되어 말단부에서 가장 우세하며, 분화구 가까이에는 거의 나타나지 않기 때문이다.

판상층리 응회질사암은 하부 응회암 멤버에서 강하응회암 상위에 소규모로 얇게 협재된다(Fig. 5C). 본암은 회색 내지 담회색을 띠며 경하에서 장석과 석영 결정립과 파리질 샤아드를 함유한다. 이 샤아드는 마모되어 다소 둥글거나 불규칙한 모양을 이룬다. 이 암상은 두께가 10~40 cm이고 층리가 발달되며 상·하위의 응회암과 관계가 점이적인 양상을 보이지 않는다. 그러나 측방으로 괴상응회암으로 점이되는 것으로 보인다. 그러므로 이러한 암상은 화산회가 국부적으로 존재하는 수중으로 낙하되어 유수에 의해 더 분급된 것으로 생각된다.

괴상 응회질이암은 판상층리 응회질사암 상부에 국부적으로 존재한다(Fig. 5C). 암색이 홍회색 내지 갈회색이고 층리가 없이 괴상을 이루고 분급이 불량하다. 두께는 1 m 내외이고 고결도가 불량한 편이다. 이 암상은 아마도 슬러리(slurry) 상태의 테프라가 수중에 흘러들어 퇴적되었음을 시사한다.

구암산 칼데라

구암산 칼데라의 경계는 외측 환상암맥을 따라 구획되는 구조적 경계 내를 말한다. 여기서 구암산 칼데라에서 최장 직경은 9.2 km이고 최단 직경은 8.0 km이며 이 영역의 면적은 66.0 km²가 된다.

칼데라 내부의 구암산응회암은 북측부와 동측부에서 환상암맥을 사이에 두고 하위층에 속하는 무포산응회암과 경계되어 있어 이 하위 암층에 비하여 하락되었음을 나타낸다. 이는 칼데라 함몰에 대한 직접적인 증거가 된다. 칼데라내부 화산암류와 퇴적암류에서 용결엽리와 퇴적층리는 대체로 칼데라 주변부에서 안쪽으로 급경사되고 중앙부로 가면서 완경사되는 사발모양의 분상구조를 나타낸다. 이 구조도 칼데라 함몰에 수반되는 함몰구조로서 칼데라 함몰의 직접적인 증거가 된다. 칼데라 블록은 북변부에서 900 m 함몰되었고 남변부에서 300 m 내려앉은 비대칭 양상을 나타낸다.

그러므로 구암산 칼데라는 하향요곡운동(down sagging)과 환상단층운동(ring faulting)에 의해 형성되었다. 이 증거를 의하여 구암산 칼데라는 하나의 칼데라운회를 따르는 기하학적으로 비대칭 원통형 칼데라로 분류된다(황상구, 2002a).

함몰후 관입체

구암산 칼데라 함몰후에 형성된 관입체는 유문암질 관입체이다. 이 관입체들은 현재 여러 암상으로 노출되며 아마도 모두 지하로 동일 마그마챔버에 연결될 것으로 생각된다. 또한 이들의 암상은 화성구조와 화학조성 등의 차이 때문에 대체로 유대상 유문암(flow-banded rhyolite), 반상 유문암(porphyrific rhyolite), 반상 유문테사이트(porphyrific rhyodacite)와 석정상 유문암(stony rhyolite) 등으로 세분될 수 있다. 야외에서 같은 한 암체라도 측방으로 수 100 m 내지 수 km 이내에서 암상 변화가 나타난다. 이런 경우에 본 칼데라 지역에서 침식 수준은 관입체의 원래지붕에 거의 접근될 것 같다. 그러므로 이 관입체들은 칼데라 형성에 관여하여 그 위치에 따라 칼데라내부 관입체와 환상암맥으

로 구분된다(Fig. 1). 이들이 구암산용회암의 높은 부위까지 관입한 것은 함몰후 화산(postcollapse volcano)의 뿌리라는 증거이다. 왜냐하면 구암산용회암은 본역에서 최후 분출물이고 칼데라가 형성될 때 높은 위치에 놓여있었기 때문이다(Lipman, 1984).

칼데라내부 관입체

칼데라내부 관입체는 구암산 칼데라 중앙부와 주변부 사이의 모우트에 구암산용회암을 관입하며 불규칙한 원형 플러그와 직선상 암맥을 형성하고 있다(Fig. 1). 이들은 칼데라의 모우트를 따라 환상 고리를 형성하며 분포하는 것이 특징적이다. 이들의 노출 면적은 플러그가 암맥보다 훨씬 더 크다. 이 관입체는 그 압상이 대부분 유대상 유문암이고 구과상 유문암도 포함된다. 이들 유문암은 대부분 홍회색을 띠며 대부분 유리질이고 매우 드물게 사장석 반정을 함유한다. 또한 전반적으로 유상엽리가 발달되고(Fig. 9A) 북부의 플러그에서는 구과상구조가 발달되어 있다(Fig. 9B). 유상엽리는 대체로 주향이 관입접촉부에 거의 평행하고 경사가 40-75° 내외로서 가파르다.

이러한 암상과 산출패턴은 구암산 칼데라가 함몰된 후 휘발성물질이 소진된 잔류 마그마가 기존 화구나 혹은 함몰로 구겨져 생긴 틈을 따라 상승함으로써 용암분출이 일어났을 때 확대된 화도 부위인 것으로 생각된다. 특히 북부의 플러그에서 구과상 구조의 발달은 주위에 강하용회암과 경계되어 있는 곳에서 현저하다. 그래서 이 유문암이 강하용회암 주위를 관입할 때 이에 포함된 수분의 영향으로 기체상결정작용(vapor-phase crystallization)에 의해 방사상으로 결정화됨으로써 이루어진 것으로 생각된다.

환상암맥

환상암맥은 칼데라 경계부를 따라 산출되며 내측 환상암맥(inner ring dike), 중간 환상암맥(intermediate ring dike)과 외측 환상암맥(outer ring dike)으로 구분된다.

이 암맥들은 화학조성이 대부분 유문암질이며, 그러나 외측 환상암맥의 남서부는 유문데사이트질에 속한다(황상구, 2002b). 이에 따르면 본 암맥은 구암산용회암과 광물조성과 화학조성상으로 유사한 범위를 나타내는데, 이는 본 환상암맥이 칼데라형성 분출작용에 시공간적으로 밀접하게 관련되어 있음을 암시한다(Smith and Bailey, 1968).

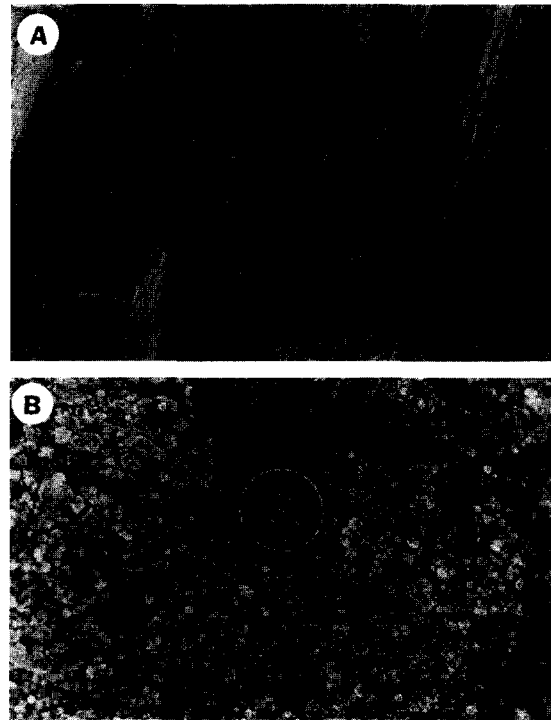


Fig. 9. Rhyolitic intrusions in the moat of the caldera. A, Flow-banded rhyolite showing well developed flow foliation; B, Spherulitic rhyolite rich in spherules.

내측 환상암맥: 이 암맥은 이의 내연부에 유대상 유문암과 외연부에 석정상 유문암으로 조합되어 있다. 유대상 유문암은 이 환상암맥의 내연부에서 가파른 사면을 형성한다. 전반적으로 유상엽리가 조밀하게 발달되며 홍회색 내지 담홍색을 띤다. 이 유대상 유문암은 반정이 없고, 아주 얇은 유리질대와 미정질대가 대상으로 교호된다. 반정이 없는 것은 챔버의 압축에 의해 마그마가 단열을 따라 주입될 때 결정보다 액체만 올라오는 여과압축작용(filter-pressing)의 결과인 것으로 생각된다. 미정질 조직은 유문암이 화도벽에 의한 냉각보다도 차라리 상승시 휘발성물질의 상실 결과로 빨리 냉각되었음을 지시한다.

석정상 유문암은 흔히 규장암으로 불리는 것이다. 이는 대체로 담홍색 내지 회백색을 띠고 유상엽리가 희미하거나 거의 없으며 매우 작은 석영과 장석 미반정을 드물게 함유한다. 경하에서 석영 반정은 육방복추모양이고 재용식(resorption)으로 만곡된 것도 있다. 석기는 미정질 내지 은정질로 결정화된 간립상 석리(intergranular texture)를 나타낸다. 그러므로 이는 결정도에 따르면 칼데라 함몰후 내연부가 먼저 정지한 후

에 순차적으로 관입한 것으로 해석된다.

외측 및 중간 환상암맥: 외측 환상암맥은 칼데라 경계부를 따라 관입되어 있고 퇴적암류, 죽장화산층, 내연산응회암과 무포산응회암 등과 경계를 이룬다. 중간 환상암맥은 외측 환상암맥의 남동부에서 갈라져 나와 다시 남부에서 합쳐지고 이의 내측부에서 두 개의 작은 가지가 뻗어 나온다. 암상은 회백색, 담회색, 담녹색과 담홍색을 띠고 폭이 좁은 것을 제외하면 유상엽리가 거의 나타나지 않으며, 구과상 구조가 없고 석정상 구조 혹은 장식과 석영에 의한 반상 구조를 나타낸다. 그래서 외측 환상암맥은 서부와 북부에서 대체로 석정상 유문암, 동부에서 반상 유문암, 남서부에서 반상 유문데사이트를 보이며 서로 접이적이다. 또한 북부에서는 관입 응회암도 존재한다. 중간 환상암맥은 대개 석정상 유문암으로 구성되며, 이의 내측부에서 돌아오는 작은 가지 부분이 유대상 유문암으로 구성된다.

석정상 유문암은 미반정으로 사장석과 정장석이 나타나고 석영과 불투명광물이 소량 수반된다. 이 반정들은 직경이 1 mm 이하로서 매우 작고 함량이 적을 뿐만 아니라 곳에 따라 상당히 다르다. 따라서 이 암상은 반상 유문암으로 접이적으로 변화된다. 석기는 미정질 내지 은정질로서 대부분 장식과 석영으로 되어 있고 간혹 흑운모와 불투명광물이 포함된다.

반상 유문암은 반정으로 석영, 정장석과 사장석 등이 나타나고 불투명광물이 극히 드물게 수반된다. 석영 반정은 최고 3 mm로서 심하게 재음식되어 만입상을 보이고 미정질 물질을 포유하고 있으며 육방복추모양을 이루는 것도 있다. 사장석 반정은 자기네끼리 취반정을 형성하기도 한다. 석기는 대체로 미정질 결정으로 간립상 석리를 나타낸다. 이 암상은 반상 유문데사이트와 석정상 유문암으로 매우 접이적이어서 그 경계를 설정하기가 어렵다.

반상 유문데사이트는 반정으로 사장석이 대부분이고 정장석, 각섬석, 흑운모와 불투명광물이 드물게 수반된다. 반정은 곳에 따라 함량 차이가 매우 큰 편이다. 사장석 반정은 자형이며 큰 것은 약한 누대구조를 가진다. 석기는 미정질 내지 은미정질의 장식, 석영, 흑운모 등으로 이루어져 있다.

이 환상암맥들은 전체적으로 암상이 칼데라내부에서 외측 환상암맥으로 또한 북측부에서 남서측으로 가면서 유대상에서 석정상, 반상으로 조직변화를 보이며, 한편으로 북측부에서 남서측으로 가면서 유문암에서 유문데사이트로 접이적인 조성변화를 나타낸다. 이들은 모두 환상암맥을 형성하기 때문에 칼데라 함몰에 의한 환상단층을 따라 관입되었다는 것을 의미한다.

그런데 이와같이 지역에 따라 암상이 다른 유문암들 간에는 정치시기가 다소나마 다를 것으로 생각된다. 칼데라내부에서 외측으로의 조직변화는 외측 환상단층보다 내측 환상단층에서 마그마의 주입속도가 더 컸다는 것과 외측 환상단층에서 더 넓은 통로의 관입으로 느린 냉각에 따라 다소 결정화된 것을 의미한다. 혹은 이 조직변화는 유대상 조직과 기타 조직간에는 외측 환상단층보다 내측 환상단층으로의 마그마 주입이 냉각 전에 고온상태의 마그마에서 일어났고 외측 환상단층으로의 관입이 다소 냉각된 상태의 마그마에서 일어나는 시차적인 단계 관입을 의미하고 석정상과 반상 조직간에는 순차적인 연속 관입을 의미한다. 그러나 칼데라 북부에서 남서부로의 조직변화는 북부보다 남서부가면서 침식 정도가 약간 더 컸다는 것을 시사한다.

북측부에서 남서측으로의 접이적인 조성변화는 마그마 챔버의 더 규질인 상단부가 먼저 환상단열대를 따라 관입되고 다시 보다 덜 규질인 마그마가 순차적으로 연속 관입되었음을 암시한다. 따라서 양자간의 관계는 액체와 액체 관계이었다. 즉 환상암맥 내의 유문암은 아직도 액체 상태일 때 유문데사이트질 마그마에 의해 관입되었음을 의미한다. 유문암질 마그마는 칼데라블록 아래의 마그마 챔버 상단부에 충분히 남아있었던 보다 더 진화된 잔류용융물이다. 마그마 챔버는 먼저 이 유문암질 마그마를 출조시켜서 급속히 가용성 용융물을 소진함으로써 다음에 그 아래의 유문데사이트질 성분대 마그마를 출조시키게 되었다(황상구, 2002b).

토 의

구암산 칼데라 지역에서 많은 노두들은 지금까지 해석한 결과와 같이 다양한 화산작용과 칼데라 함몰을 나타낸다. 이 화산작용들을 칼데라 형성 순서에 따라 토의해 보기로 한다. 구암산 칼데라 지역은 (1) 분연주 붕괴 화쇄류 형성 분출, (2) 칼데라 형성과 화구 이동, (3) 끊어넘침 분출과 회류상, (4) 함몰후 칼데라내부 유문암 관입, (5) 함몰후 환상 유문암맥 관입, (6) 유문데사이트의 연속 관입 등의 순으로 화산과정을 나타낸다.

분연주 붕괴 화쇄류 형성 분출

우리는 구암산응회암의 내부층서 관계로부터 이들의 분출작용을 해석하고 그 순서를 알아낼 수 있다. 칼데라 형성 분출에 있어서 이상적인 내부층서는 (1) 플리니언 강하상(Plinian fall phase), (2) 화쇄류상(pyroclastic flow phase), (3) 분류상(effusive phase)의 순서를

나타낸다. 초기의 플리니언 분출작용은 가스함량 감소 혹은 화구반경 확장 등에 의하여 분연주가 과적되어 붕괴됨으로서 화쇄류를 생성하게 되어 화쇄류 형성 분출로 전환된다. 따라서 강하상에서 화쇄류상으로의 전이는 방출률의 큰 증가를 일으키고(Bursik and Woods, 1996; 황상구 외, 1997, 1998), 흔히 굵은 처짐 각력암 (lag breccia)을 형성하는 다량의 암편 분출을 수반한다 (Wright and Walker, 1977; Aramaki, 1984; Druitt, 1985; Druitt and Bacon, 1986; Rosi *et al.*, 1996). 이 전이는 칼데라 함몰에 관련되는 새로운 화구의 개시에 일치한다는 것을 나타낸다(Druitt and Sparks, 1985). 그러나 모든 화쇄류 형성 분출작용은 반드시 초기 플리니언상을 가지지는 않는다(Francis *et al.*, 1983; 황상구 · 김상욱, 1992). 이는 아마도 화구지역의 붕괴로 인하여 화구 반경이 거의 동시에 넓어진다는 것을 시사한다.

구암산 지역에서도 플리니언상 없이 암괴회류상으로 시작한다. 이의 증거는 화산각력암 중에 암괴회류 각력암이 구암산응회암 본체와 떨어져 있지만 층서적으로 아마도 구암산응회암의 최하부에 해당되기 때문이다. 그리고 이 각력암은 화쇄류에 의한 화구 사면에 쌓인 화성쇄설성 각력암에 속한다. 화쇄류 형성기구는 용암도움 붕괴, 분연주 붕괴에 의해 지배된다. 이 암상은 주로 유문암 암괴로 구성되기 때문에 활동 중인 용암도움 (Fig. 10A)이 일시적인 붕괴로부터 펠리언 분출 (Pelean eruption)이 일어났음을 암시하며, 이때 용암 조각들이 암괴회류에 의해 산사면을 따라 흘러서 형성된 것이다 (Fig. 10B). 그리고 화구지역이 붕괴되어 화구가 확장되면서 유체화가 강한 화쇄류 형성 분출로 전환되었다 (Fig. 10C). 이때의 분출은 아마도 하나의 화구에서 분출되는 단일화구상(single vent phase)이었다.

이 상위에 놓이는 구암산응회암의 하부 멤버는 무질서 과상 각력암, 점이층리 응회암 및 라필리응회암, 과상 응회암, 판상층리 응회암 등의 암상으로 구성되며 이중에 앞의 세 암상은 화쇄류에 의한 화쇄류암에 해당되고 마지막 하나는 강하응회암에 해당된다. 이 강하응회암은 1 mm 이하의 화산회로 대부분 구성되며 1 m 내외의 두께이고 회류응회암의 각 단위의 상위에 놓이기 때문에 플리니언 강하상이 아니고 회운 강하상에 해당된다. 그러므로 회류응회암과 강하응회암의 한 쌍은 화쇄류에 의한 흐름단위와 회운 강하의 퇴적상을 나타낸다. Sparks *et al.* (1973)에 의하면 화쇄류의 본체에 해당되는 흐름단위는 layer 2에 해당되고 회운강하 퇴적상은 layer 3에 해당된다. 여기서 최하부의 layer 1에 해당하는 지면저지 퇴적상은 거의 인지가 어려운

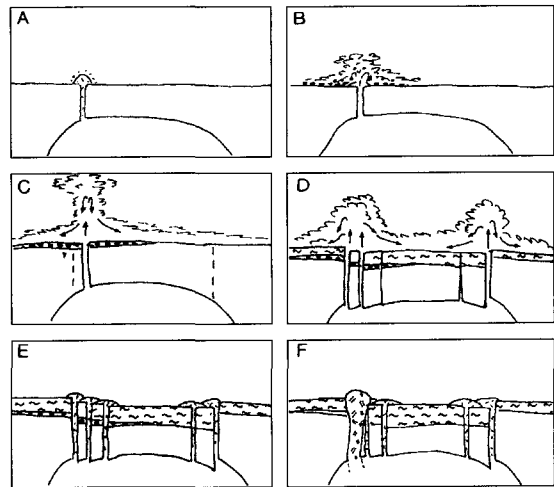


Fig. 10. Pictorial explanation of the volcanic processes in the Guamsan caldera. A, Glowing active rhyolite dome; B, Pelean eruption; C, Pyroclastic flow-forming eruption through a central vent; D, Caldera collapse along ring fractures, and ash-flow-forming eruption through ring fissure vents; E, Intracaldera fracture and ring fracture volcanism; F, Progressive renewed volcanism along the southwestern ring fracture.

상태이다. 그런데 강하응회암이 없는 회류응회암은 시간차 없이 화쇄류가 연속적으로 일어나 미처 회운으로부터 강하회가 퇴적될 여유가 없었거나 혹은 분화구와 가까이에서 속도가 빠른 강력한 화쇄류에 의해 깎였기 때문일 것이다. 그러나 일시적인 펠리언 분출이 일어난 후에 화쇄류 형성 분출작용이 연속적으로 일어났던 것이다. 이때 화쇄류의 형성기구는 분연주의 붕괴에 의해 일어났다 (Fig. 10C).

화쇄류의 흐름기구는 부분적으로 유체화성 흐름 (fluidized flow)을 나타내고 (Sparks, 1976) 운반 퇴적기구는 암설류와 유사하지만 약간 다르다. 즉 암설류는 큰 쇄설물이 세립질 기질과 물에 의해 운반되지만 반면에 화쇄류는 큰 암편들이 세립 화산회와 가스에 의해 운반된다. 대부분 화쇄류는 두위부에서 난류이더라도 주로 몸체부에서 층류이다. 화쇄류는 유체화 거동을 기초로 하면 비팽창류(non-expanded flow), 팽창류(expanded flow), 분리류(segregating flow) 등의 3 유형으로 분류된다 (Wilson, 1980). 구암산응회암에서 하부 회류응회암들은 대부분 팽창류에 의해서 정지된 것으로 생각된다. 하부 회류응회암에서 암편의 정점의 부석의 역점이 현상은 이들이 기질과의 밀도차이에 의한 낙하속도에 지배된다. 암편은 기질보다 고밀도이기 때문에 낙하속도가 커서 차례로 가라앉아 정점이 현상을

일으키고 부식은 저밀도이므로 낙하속도가 작아서 위로 뜨기 때문에 역점이 현상을 나타낸다. 이 점이 현상은 화쇄류의 팽창 정도가 클 때 기질과의 밀도차가 클수록 심하게 나타난다. 유체화작용 중에 포함된 가스흐름 과정은 세립질 화산회의 점이와 분급을 일으킨다. 팽창 정도에 따라 고펡창류는 세립질 화산회를 다량 상위의 회운으로 이탈시키고 저팽창류는 소량 이탈시킨다. 하부 회류용회암들은 대부분 고펡창류에 속하기 때문에 암편들이 정점이 현상을 나타내고 세립질 화산회가 회운 속으로 이탈되고 다시 낙하되어 상위에 판상층리 용회암층과 같은 얇은 강하용회암을 형성하였다.

그리고 화구와 먼 북쪽의 퇴적지는 국부적으로 침수되어 짧은 지표과정을 일으켰다. 그래서 수중으로 낙하되는 화산 물질은 유수에 의해 더 분급되어 판상층리 용회질사암층을 퇴적시켰고 슬러리 상태의 테프라가 수중에 흘러들어 판상층리 용회질사암을 퇴적되었다.

칼데라 형성과 화구 이동

하부 멤버의 회류용회암들과 강하용회암들은 중앙화구(central vent)로부터 공급되었다(Fig. 10C). 점차 마그마 방출량이 방대해짐으로서 마그마챔버의 지붕이 환상으로 함몰되기 시작하였다. 이때 함몰은 중앙화구로부터 북동쪽으로 치우쳐 일어났다. 마그마챔버는 마그마의 분출로 인해 점차 압력 감소가 일어나며, 마그마챔버 내의 부족압력(underpressure)이 상위 암석의 강도를 초과할 때 함몰이 일어난다고 생각된다. 지붕의 함몰은 챔버의 상단에서의 정압압(lithostatic pressure)을 복구시키게 된다. 이와 같이 칼데라 형성이 처음 시작됨과 동시에 중앙화도는 그 역할이 급격히 축소되었다. 후기의 회류는 환상단열대를 따라 수많은 화도로부터 분출되었으며 칼데라 함몰은 계속 더 깊게 함몰되었다(Fig. 10D). 두 단계의 칼데라 형성 회류분출상은 Druitt and Sparks(1985)에 의해 제안된 바 있다.

이와 같이 화쇄류 분출과 관련하여 구암산 칼데라가 함몰되었다는 것은 구암산용회암에서의 칼데라함몰 각력암의 협재와 측방변화가 이를 입증해 준다. 구암산용회암의 상부 멤버의 이에 쉐기상으로 협재하는 혼돈괴상 각력암이 하나의 직접적인 증거이다. 이 각력암은 칼데라 함몰에 따르는 급사면의 암설류 혹은 암괴류가 슬라이딩됨으로서 형성된 칼데라함몰 각력암이며, 열극분출을 의미하는 화구 전이를 암시한다. 따라서 이 각력암의 출현은 칼데라함몰의 시작을 지시할 뿐만 아니라 단일 중앙화구의 마감을 의미하고 복수의

환상열극화구(ring fissure vent)의 시작을 의미한다. 또한 이 구암산용회암은 칼데라 외곽에서는 전혀 남아있지 않은 반면에 칼데라 내에서 그 층후가, 상부의 침식으로 정확한 값을 얻기는 어려우나, 850m 이상으로 월등히 두껍기 때문이다. 이와 같은 칼데라 내부에 축적된 용회암의 두께가 외류보다 3배 정도 더 두꺼운 것은 세계 각지의 다른 용회암들과도 유사하다(Lipman, 1984). 즉 이는 회류분출이 끝나면서 칼데라 함몰이 일어났던 것보다 차라리 분출 도중에 함몰이 시작되어 칼데라 내부에 회류용회암이 보다 빠른 속도로 축적되었음을 지지한다. 이외 증거로서 북부 환상암맥 내에 관입 용회암이 일부 존재하는 것으로부터 알 수 있으며, 또한 칼데라 내부에서 구암산용회암의 하부 멤버는 용결 부위가 거의 없고 파리쇄설상 석리를 나타내는 반면에 상부 멤버는 완배열상 석리가 우세한 용결엽리를 보이는 점과 보다 조립질 결정으로 탈파리작용을 겪은 점이다. 이는 칼데라 내부에 회류용회암이 급속히 집적되어 두꺼워짐으로써 높은 온도가 오랫동안 지속되었던 데 가장 큰 원인이 있는 것으로 판단된다.

그러므로 중앙화구로부터의 화쇄류 분출이 일어나는 도중에 칼데라함몰에 의한 하나 이상의 환상단열이 발달됨으로서 단일화구(single vent)의 마감과 동시에 환상단열을 따라 복수화구(multiple vent)로의 위치변경이 자연스럽게 진행된 것으로 판단된다.

끓어넘침 분출과 회류상

칼데라와 관련하여 중앙화구에서 환상열극화구로 전환되면서 화쇄류 형성 분출의 두 단계 모델은 혼란 편이며(Druitt and Sparks, 1985; Druitt, 1985), 경우에 따라 환상열극을 따르는 분출이 제안되었다(Druitt and Bacon, 1986; Hildreth and Mahood, 1986). 환상단열로의 화구 이동은 분연주 붕괴에 의한 화쇄류 분출에서 끓어넘침 분출로 전환시키는 직접적인 원인이 되었던 것 같다. 끓어넘침 분출로의 전환은 마그마 방출률이 급격히 증가되었기 때문이며, 이 방출률 증가는 외측경사 환상단열을 따라 칼데라블록이 마그마챔버로 가라앉음으로서 가능하였다. 다시 말하면 화구가 다수로 많아졌고 환상단열의 외측경사로 말미암아 침하가 일어날수록 자연히 화도가 점점 넓어지게 되고 순간적으로 방출률이 급격히 증가하게 되었다. 따라서 이때 분출은 높은 분연주가 형성되지 않고 끓어넘침 분출로 전환되어 다량의 회류를 일으켰다(Fig. 10D). 이때의 마그마 방출률은 분연주를 유지하는데 필요한 방출률보다 월등히 컸을 것이다.

또한 침하에 따르는 자연스런 화도 확장은 화도벽의 침식을 동반할 필요도 없었다. 따라서 하부 회류용회암보다 상부 회류용회암에서는 암편들이 급격히 줄어들고 그 크기도 매우 작다. 암편들이 적기 때문에 상부 회류용회암들은 각 흐름단위 간의 경계를 인지하기 매우 어려울 뿐만 아니라 대부분 완배열상과 준배열상 석리를 형성할 정도로 심하게 용결되거나 거의 심한용결로 액화되어 있고 탈파리화되어 있다. 이러한 고도 용결용회암을 형성하려면 고온 마그마로부터 낮은 분연주의 붕괴에 의해 회류의 속도가 느리고 유체화 정도가 적은 비팽창성 회류이어야만 하며 단기간에 두껍게 집적되어야 한다. 왜냐하면 고온의 회류가 생성되어 범람할 때 열손실을 막아야만 하기 때문이다. 이렇게 분연주의 높이가 낮아지려면 분출시에 가스함량이 적고 가스확산속도가 적으면서 마그마 방출률이 아주 커야만 가능하다. 이런 상태에서 회류는 덜 퍼져 나가고 파리질 화산회(vitric ash)의 손실도 적었을 것이다. 이러한 회류상은 팽열하지 않은 대규모 분출에서 유래되었음을 암시하며, 이때의 분출은 폭발성이 약하고 연속적으로 일어나는 끓어넘침 분출이었음을 지지한다. 이 분출은 회운이 거의 발생하지 않는 반복적인 회류의 범람에 의해 큰 용적의 회류용회암만을 형성할 수 있었고 강하용회암은 퇴적될 여유가 없었다.

이러한 현상의 원인이 되는 환상열극분출은 분출량이 급격히 늘어남으로서 폭발력이 소진되고 칼데라 함몰은 계속되어 틈을 이용한 조용한 마그마 주입과 함께 분류상으로 전환되었다.

함몰후 칼데라내부 유문암 관입

환상열극을 통한 끓어넘침 분출도 대량의 회류를 분출시킴으로서 휘발성물질의 소진으로 폭발력이 소진되어 폭발성이 없는 마그마 활동으로 전환되었다. 이때 칼데라가 형성되면서 기존 화구 혹은 모우트 부분에 생긴 역쇄기상 틈이 잔류마그마를 주입시키는 통로 역할을 하면서 분류상의 화산활동이 연속적으로 일어났다(Fig. 10E). 왜냐하면 모우트에 유문암이 플러그상 혹은 맥상으로 관입되어 있기 때문이다. 북연부에서 유문암 플러그의 침식수준은 강하용회암과 접촉되는 부위에 속하므로 관입시 마그마의 열과 강하용회암의 수분과 상호작용하므로서 구과상구조를 형성케 하였다.

또한 이 유문암의 분포 패턴은 칼데라 함몰에 따라 모우트 부분에 벌어진 틈에 의해 지배되었음을 암시한다. 따라서 본암은 칼데라 함몰후에 마그마챔버에 가해지는 압력에 의해 잔류마그마가 모우트의 벌어진 틈

을 따라 올라와 메꾸어진 마그마활동 산물인 것으로 생각된다. 또한 이때 형성된 화산도움(volcanic dome)은 이미 침식삭박되어 없어졌지만, 이는 아마도 함몰 후 화산의 뿌리로서 마그마챔버로 연결된 것으로 판단된다.

다음 증거들은 칼데라 함몰후 화산의 관입 뿌리라는 것을 암시해 준다. 유문암 플러그는 이의 유상엽리를 살펴볼 때 대부분 칼데라 내측부에선 거의 수직에 가까우나 외측부에선 중심쪽으로 경사를 이루고 있다. 이 유문암이 칼데라의 모우트 틈을 따라 구암산용회암의 높은 곳까지 관입한 것은 보다 높은 위치에서 일어나는 칼데라 함몰후의 화산 뿌리라는 것을 지시해 주며, 이 유문암이 접촉부에서 냉각대 없이 구암산용회암과 경계를 이루고 광물과 화학조성이 구암산용회암과 매우 유사한 것도 회류분출 직후의 화산사건이라는 것을 지시한다. 즉 이는 칼데라 내부의 틈을 따라 일어나는 화산작용의 지하잔류체에 해당되는 것으로 생각할 수 있다. 이때 잔류마그마는 점성이 매우 커서 흘러가지 못하고 열극만을 채우거나 지표에 기껏해야 작은 도움을 형성했을 것이다.

환상 유문암맥 관입

환상열극을 따른 회류분출이 종식되고 구암산 칼데라가 형성된 후에 잔류마그마가 점차 이 환상단층을 따라 주입되어 환상 유문암맥을 만들었다(Fig. 10E). 환상단층 속으로 마그마 주입은 부력의 원인이 되는 마그마 초과압력(overpressure)으로 인하여 일어나는데, 이 주입은 벽암의 침식 없이도 암맥을 형성하게 된다(Gudmundsson *et al.*, 1999). 이 암맥들은 함몰후에 환상열극을 따라 생겨난 여러 화산들의 관입 뿌리라고 생각된다. 이 화산은 지표에 유문암 도움을 이루었을 것으로 생각되며 여러 개가 환상으로 줄지어 있을 것으로 추측된다. 왜냐하면 환상암맥은 이의 유상엽리를 살펴볼 때 대부분 칼데라 내측부에선 거의 수직에 가까우나 외측부에선 칼데라 중심쪽으로 경사를 이루기 때문이다.

칼데라내부의 유문암 관입에 뒤따라 혹은 거의 동시에 잔류마그마는 축적된 힘에 의하여 환상단열대로 상승하기 시작하였다. 이때 마그마는 주로 후기 회류용회암의 통로였던 환상열극화구를 따라 주입되어 유문암 환상암맥을 형성하였다(Fig. 10E). 이 암맥도 함몰 후 화산의 하나로서 침식전 상부에는 유문암 도움을 여러 개 형성했을 것이다.

이 환상암맥에서 결정도가 전반적으로 뚜렷한 냉각

대 없이 유리질 내지 미정질이고 인접 암체에서 뚜렷한 예인현상이 없는데 이는 환상단열대의 빈틈을 따라 관입되었음을 암시한다. 즉 환상암맥은 구암산 칼데라의 함몰과 직접 관련되어 있음을 지시한다. 그리고 이 환상암맥들은 내측 암맥이 유대상 내지 석정질이고 유리질이 우세한 것에 비하여 외측 암맥이 석정질 내지 반상이고 미정질로서 결정질이 우세하며 접촉부에서 냉각대가 없는데, 이는 마그마챔버가 외측부로부터 내측부로 냉각되는 점을 고려한다면 시차적인 단계 관입에 의한 것으로 설명되어야 한다. 그러나 외측 및 중간 환상암맥 내에서 암상간의 관계가 점이적이기 때문에 이는 순차적인 연속 관입으로 설명되어야 한다. 이러한 관계는 다음에 설명되는 바와 같이 점이적인 조성변화가 강하게 지지해준다.

유문데사이트 연속 관입

환상 유문암맥이 관입되고 뒤따라 칼데라 남서측 외측과 중간 환상암맥이 맞나는 관절 부위에 유문데사이트가 순차적인 연속 관입을 일으켰다(Fig. 10F). 그 까닭은 두 암상 사이에 접촉대가 점이적일 뿐만 아니라 외측과 중간 환상암맥이 합쳐져 관절 부위를 형성하고 두 환상암맥 사이의 내연산응회암이 유문데사이트에 의해 잘리기 때문이다. 또한 이 유문데사이트는 아마도 마그마챔버가 상부와 외측부로부터 내측부로 냉각되어 보다 더 결정화된 내측부의 마그마로부터 관입되었다. 그 까닭은 유문암맥이 대부분 유리질 내지 미정질인데 비하여 관절 부위의 유문데사이트가 반상이고 미정질 내지 세립질로서 보다 조립질을 나타내는 조직적인 차이를 가지며 벽암과의 접촉부에서 냉각대가 없기 때문이다.

외측 환상암맥에서 유문암에서 유문데사이트로의 점이적 변화는 마그마챔버의 더 규질인 상단부가 먼저 환상단열대를 따라 관입되고 다시 보다 더 고철질 마그마가 연속적으로 정치되었음을 암시한다. 이 환상암맥에서 유문데사이트 정치는 먼저 유문암질 조성대 마그마를 출조시켜서 유효한 용융물을 소진하고 다음에 유문데사이트질 조성대 마그마를 출조시킴으로서 가능해졌다(황상구, 2002b). 그러므로 이 환상암맥의 형태와 위치에 의하면 이 암맥들은 구암산 화산활동의 마지막단계에 두 환상단열대의 관절 부위를 따라 올라와 매꾸어진 마그마활동 산물이며, 따라서 마그마챔버에 연결되는 함몰후 화산의 뿌리인 것으로 판단된다.

이 유문데사이트 관입은 환상암맥의 관절 부위로 마

그마가 상승하여 정치한 후에 서서히 결정화된 것으로서 구암산 마그마계의 화산작용 종결 시기를 의미한다. 그러므로 이는 시공간적으로 볼 때 구암산 칼데라 함몰후 마그마가 마지막으로 상승할 때 칼데라의 남서측을 따라 관입된 환상관입체의 일부에 해당된다.

결론

구암산 칼데라에 관련된 층서단위는 구암산응회암과 유문암질 관입체가 있다. 구암산응회암은 대개 화산각력암, 회류응회암과 강하응회암으로 구성되며 회류응회암이 가장 우세하다.

화산각력암은 분포위치와 층서에 따라 하부의 암괴 회류 각력암과 상부의 칼데라함몰 각력암이 있다. 하부에서 회류응회암은 화쇄류 형성 분출에 의한 팽창성 화쇄류상이고 강하응회암은 회운 강하상이며, 상부에서 회류응회암은 끓어넘침 분출에 의한 비팽창성 회류상이다.

유문암질 관입체는 분포위치와 산출패턴에 따라 칼데라내부 관입체, 환상암맥으로 구분되고 환상암맥은 내측, 중간, 외측 환상암맥으로 나뉜다. 이들은 구암산 칼데라에서 회류응회암-칼데라 환상암맥으로 연결되는 하나의 칼데라 윤회의 마지막 산물을 나타낸다.

구암산 칼데라 지역에서 일어난 화산작용들로부터 칼데라 윤회에 따라 화산과정을 다음과 같이 엮을 수 있다. (1) 분출작용이 먼저 용암도움 붕괴를 일으키는 펠리언 분출의 암괴회류상으로 시작되었으며 (2) 연이어 높은 분연주 붕괴로부터 강하게 유체화된 화쇄류상으로 전환되었다. 이때 분연주는 높이가 점차 낮아졌으며 화쇄류의 유체화도 줄어들었다. (3) 다시 끓어넘침 분출에 의한 회류상으로 전환되어 고온의 화성쇄설 물질이 일시에 방출되어 정치됨으로써 매우 심하게 용결되었다. 끓어넘침 분출은 칼데라 함몰과 함께 환상단열로의 화구 이동에 의해 본격화되었다. 분출초기에는 중앙화구로부터 화쇄류가 발생되었지만 후기에는 환상단열화구로의 위치가 변경되어 회류가 다량으로 발생하였다. (4) 회류 분출 후에 칼데라 내부 모우트의 갈라진 틈으로 마그마가 주입되어 유문암 플러그와 암맥을 형성하였으며, (5) 뒤따라 혹은 거의 동시에 환상단열대를 따라 순차적으로 주입되어 유문암 환상암맥을 형성하였다. (6) 마지막으로 남서측 환상암맥의 관절부위에 유문데사이트가 순차적으로 연속 관입되어 환상암맥의 일원이 되었다.

사 사

본 연구는 2000년 한국과학재단 목적기초연구(과제 번호: 2000-1-13100-002-2)의 지원비에 의해 수행되었다. 심사과정을 통하여 초기 원고를 검토하고 비평과 조언을 해주신 부산대 김진섭 교수와 윤성호 교수, 편집을 통하여 투고규정에 맞게 원고를 다듬어주신 부경대 박계현 교수께 감사드립니다.

참고문헌

- 김규한, 이진수, 1993, 경상퇴적분지 내에 분포하는 백악기 화산암류의 암석지구화학적 연구. 지질학회지, 29, 84-96.
- 김진섭, 윤성호, 1993, 부산 일원에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 연구(I). 암석학회지, 156-166.
- 오인섭, 정국성, 1975, 한국지질도 기계도록. 국립지질광물연구소, 25p.
- 윤성호, 이문원, 고정선, 김영라, 한미경, 2000, 경상분지 동북부 보경사화산암체의 암석학적 연구. 지구과학회지, 21, 595-610.
- 이상만, 김상욱, 진명식, 1987, 남한의 백악기-제삼기 화성활동과 지구조적 의미. 지질학회지, 23, 338-359.
- 황상구, 1998, 청송 주왕산 일대의 화산지질. 대한지질학회 춘계학술답사 가이드북, 서울, 42p.
- 황상구, 2002a, 청송 남동부 구암산 칼데라의 함몰유형과 진화. 지질학회지, 38, 199-216.
- 황상구, 2002b, 구암산 칼데라에 관련된 화산암류의 마그마 진화. 지질학회지, 38, 341-359.
- 황상구, 김상욱, 1992, 양산칼데라의 규질 화산작용. 지질학회지, 28, 491-503.
- 황상구, 김상욱, 1994, 밀양-양산지역 백악기 화산암류의 암석학적 연구(I): 암석조구조적 위치. 지질학회지, 30, 229-241.
- 황상구, 김상욱, 이윤중, 1998, 삼랑진 칼데라의 화산작용과 화성과정. 암석학회지, 7, 147-160.
- 황상구, 이기동, 김상욱, 이재영, 이윤중, 1997, 원동 칼데라의 화산작용과 화산과정. 암석학회지, 6, 96-110.
- Aramaki, S., 1984, Formation of the Aira caldera, southern Kyushu, ~22,000 years ago. J. Geophys. Res., 89, 8485-8501.
- Bursik, M.I. and Woods, A.W., 1996, The dynamics and thermodynamics of large ash flows. Bull. Volcanol., 58, 175-193.
- Druitt, T.H., 1985, Vent evolution and lag breccia formation during the Cape Riva eruption of Santorini, Greece. J. Geol., 93, 439-454.
- Druitt, T.H. and Bacon, C.R., 1986, Lithic breccia and ignimbrite erupted during the collapse of Crater Lake caldera, Oregon. J. Volcanol. Geotherm. Res., 29, 1-32.
- Druitt, T.H. and Sparks, R.S.J., 1985, On the formation of calderas during ignimbrite eruptions. Nature, 310, 679-681.
- Francis, P.W., O'Callaghan, L., Kretzchmar, G.A., Thorpe, R.S., Sparks, R.S.J., Page, R.N., de Barrio, R.E., Gillou, G. and Gonzalez, O.E., 1983, The Cerro Galan ignimbrite. Nature, 301, 51-53.
- Gudmundsson, A., Marinoni, L.B. and Marti, J., 1999, Injection and arrest of dykes: implications for volcanic hazards. J. Volcanol. Geotherm. Res., 88, 1-13.
- Hildreth, W. and Mahood, G.A., 1986, Ring-fracture eruption of the Bishop Tuff. Geol. Soc. Am. Bull., 97, 396-403.
- 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.
- Rosi, M., Vezzoli, L., Aleotti, P. and De Censi, M., 1996, Interaction between caldera collapse and eruptive dynamics during Campanian Ignimbrite eruption, Phlegrean Fields, Italy. Bull. Volcanol., 57, 541-554.
- Smith, R.L. and Bailey, R.A., 1968, Resurgent cauldrons. Geological Society of America Memoir 116, 613-662.
- Sparks, R.S.J., 1976, Grain size variations in ignimbrites and implications for the transport of pyroclastic flows. Sedimentology, 23, 147-188.
- 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.A. and Walker, G.P.L., 1977, The ignimbrite source problem: significance of a co-ignimbrite lag-fall deposits. Geology, 5, 729-732.

(2002년 4월 25일 접수, 2002년 6월 29일 채택)