

원동 칼데라의 화산작용과 화산과정

황상구 · 이기동 · 김상욱* · 이재영* · 이윤종**

안동대학교 지질학과, *경북대학교 지질학과, **경북대학교 지구과학교육과

요 약 : 원동 칼데라의 화산작용은 화도에서 어떤 외부물과 상호작용되는 수증기마그마성 분출작용으로 시작하여 점차 물의 유입이 차단됨으로써 저플리니언 분출작용으로 전환되었으며 이는 다시 회류 분출로 전환되었다. 이 회류분출은 초기에는 중앙화구로부터 일어났으며 후기에는 환상 열극화구로 전환되었다. 이러한 환상 열극화구로부터 회류분출의 방출율이 급격히 커짐으로써 원동 칼데라가 형성되고 뒤이어 환상단열대를 따라 석영반암이 관입되어 환상암맥을 형성하였다. 그리고 이 칼데라 모우트에는 오랫동안 응회질 퇴적물이 채워지면서 반상유문암 용암이 초기 소생도움으로부터 분류되었으며, 환상단열대의 다른 틈을 따라 소량의 회류용회암이 분출되었다. 그리고 소생도움이 더 커지면서 세립질 화강섬록암이 관입되었으며, 마지막으로 지속적 소생작용으로 칼데라 중앙부에 각섬석 흑운모 화강암이 정치되어 완전한 소생도움을 형성하는 과정을 겪었다.

핵심어 : 원동용회암, 화제리층, 수증기마그마성 분출, 플리니언 분출, 회류분출, 용암분류

서 언

경상분지 남동부에는 백악기 후기 화산암류가 심성암류와 조합되어 호상으로 넓게 분포되어 있으며 경상분지 중에서도 유천소분지에 이들이 가장 밀집되어 분포된다. 이 유천소분지의 중앙부로부터 약간 남서쪽으로 치우친 밀양-양산 지역은 회류용회암-칼데라-환상암맥 연속체로 조합된 세 개의 칼데라가 존재함이 밝혀졌다(황상구와 김상욱, 1990). 여러 칼데라에 조합된 모든 연속체를 한꺼번에 논하기보다도 하나의 칼데라에만 조합된 연속체를 중심으로 화산층서와 암상을 논하는 것이 칼데라 화산작용(caldera volcanism)을 이해하기 쉽고 혼란을 피할 수 있다. 그러므로 세 개의 칼데라 가운데 원동 칼데라에 관련된 연속체만을 선정하여, 이의 화산작용과 화산과정을 현생 화산에서 관찰되는 화산과정에 입각해서 설명하고 신기 화산지역 연구로부터 얻어진 이론에 입각해서 토의하는 것이 본 논문의 한 전제이다.

원동 칼데라 주변은, 경상분지 내 다른 칼데라 지역이 침식정도가 매우 커서 일반적으로 칼데라 내에만 관련 화산암이 잔류되는데(Park, 1990; 윤성효, 1993)에 비하여, 보다 침식정도가 적으면서도 침식 계곡이 깊은 험준한 지역을 이룸으로써 크고 작은 화산암층을 연구케 할 뿐만 아니라 화산뿌리에 해당하는 심성암까지도 관찰할 수 있는 좋은 야

외실험장을 제공하고 있다. 따라서 원동 칼데라 지역은 칼데라 내외에 칼데라 형성의 원인으로써 원동용회암과 칼데라충진 퇴적층의 화제리층이 분포되고, 칼데라 내부에 환상관입체와 중앙관입체 등의 다양한 암체가 잘 노출된다(Fig. 1). 이 분출암과 관입암들의 층서와 암상은 원동 칼데라에 관련된 백악기 후기 화산작용과 과정을 복원하기에 충분하

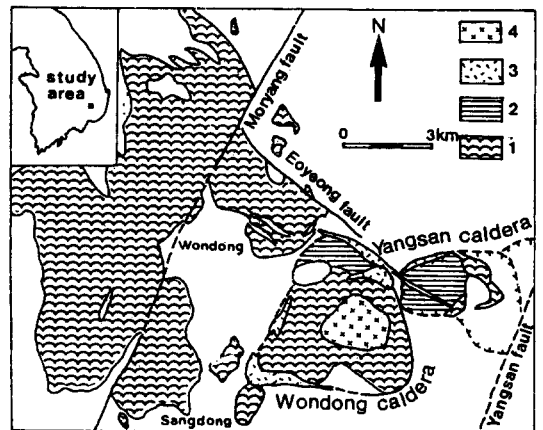


Fig. 1. Simplified geologic map, showing the distribution of the Wondong Tuff(1), Hwajeri Formation (2), ring intrusions related with the Wondong caldera (3) and central intrusion(4) and the location of the Wondong caldera (modified from Hwang and Kim, 1990, 1994a, b).

다. 이 원동 칼데라는 그 유형이 발레스형 칼데라 (Valles-type caldera)로서 소생칼데라(resurgent caldera)에 해당되는 것이 이미 알려진 바 있다(황상구, 1997a).

이번 연구를 통하여 칼데라형성 화산작용, 칼데라함몰, 칼데라후 화산작용, 모우트충진 퇴적작용, 칼데라 소생작용 등이 토론될 것이며, 역으로 이들은 지질학적으로 원동 칼데라에 밀접히 관련되어 있는 하나의 연속체라는 것이 밝혀질 것이다. 궁극적으로 이 연구 결과는 백악기 후기 화산활동이 칼데라 화산작용과 연관되어 있음을 입증할 뿐만 아니라, 백악기 후기 화산암류의 지질학적 위치를 이해하는데 중대한 의미를 지닌다. 또한 이는 앞으로 원동 칼데라 이외의 다른 칼데라의 화산과정을 이해하는데 도움이 되고 비교하는데 이용될 것으로 생각된다.

지질개요

경상분지의 남동부와 남부는 백악기 화산암류와 심성암류가 넓게 분포되며, 이들은 백악기 후기와 제삼기 초기에 유라시아판 대륙연변부의 섭입대를 따라 일어난 칼크알카리 화성활동의 산물에 해당된다(황상구와 김상욱, 1994a, b). 층서적으로 화산암류는 유천층군에 해당되며 심성암류는 불국사 관입암류에 해당된다. 이들은 주로 유천소분지에 가장 집중적으로 분포된다. 이 지역은 유천소분지 중앙부 남쪽에 위치함으로써 백악기 후기 유천층군으로 구성되고 부분적으로 불국사 관입암류가 나타나는 곳이다.

이 유천층군은 조성과 조직적으로 다양한 용암, 화산쇄설암, 회류응회암, 각력암과 관입암 등으로 구성되고 하부의 주사산 안산암질암류와 상부의 운문사 유문암질암류로 구분된다(김상욱과 이영길, 1981). 유천소분지 중앙부에서 주사산 안산암질암류는 하부로부터 팔용산응회암, 비반상 안산암 (중남산 안산암), 안산암질 라펠리응회암 (생철리 응회암), 밀양안산암, 정각산층 및 범도리안산암 등으로 세분된 바 있다(김규봉과 황상구, 1988). 운문사 유문암질암류는 주사산 안산암질암류 위에 부정합적으로 놓이고 밀양-양산 지역에서 대부분 회류응회암들로 구성되는데, 이들은 중간에 강하응회암(fallout tuff)이 협재되어 있고 암상과 조성 차이가 다소 큰 3개 단위로 구분되므로써 하부로부터 응회각력암, 대사이트질 회류응회암, 대사이트, 유문암질 강하응회암, 유문암질 회류응회암, 화제리층, 강

하응회암, 유문대사이트질 회류응회암, 유문암 순으로 세분되었다(김규봉과 황상구, 1988). 그 후 이 지역에서 3개의 양산, 원동, 삼랑진 칼데라가 확인되면서 각 칼데라에 각기 다른 회류응회암과 강하응회암이 조합되어 있음을 인식하여, 각 칼데라 형성과 관계된 분출암을 각기 묶어 각각 양산응회암, 원동응회암 및 삼랑진응회암으로 하였다(황상구와 김상욱, 1990). 그리고 각 칼데라는 형성 후속단계 산물로서 환상암맥, 소생관입체 등과 조합됨으로써 반드시 회류응회암-칼데라-환상암맥 (-소생관입체)로 이어지는 연속체를 형성한다.

불국사 관입암류는 심성암류와 반심성암류로 구성되는데 대부분 규모가 큰 화강암체를 이룬다. 그러나 규모가 작은 암맥과 암주에 해당하는 석영반암, 장석반암, 세립질 화강섬록암, 각섬석 흑운모 화강암들은 칼데라의 환상단열대로 혹은 중앙관입체로 칼데라에 직접적으로 연관되어 화산연속체의 일원으로서 화산의 지하뿌리 부위를 나타낸다.

이상의 층서관계를 모식화시키면 모식층서단면도와 같다(Fig. 2). 이 지역에서 화산과정에 따라 분류하면 하부로부터 양산응회암, 유산리층, 원동응회암, 석영반암, 화제리층, 장석반암, 삼랑진응회암, 유문암, 세립질 화강섬록암, 각섬석 흑운모 화강암, 규장암과 조면반암 등의 순으로 세분된다(Fig. 3). 이 가운데 원동응회암, 석영반암, 화제리층, 세립질 화강섬록암, 각섬석 흑운모 화강암과 규장암 등은 원동 칼데라에 성인적으로 관련되고 조면반암이 이 내부에 존재한다(황상구 외, 1997).

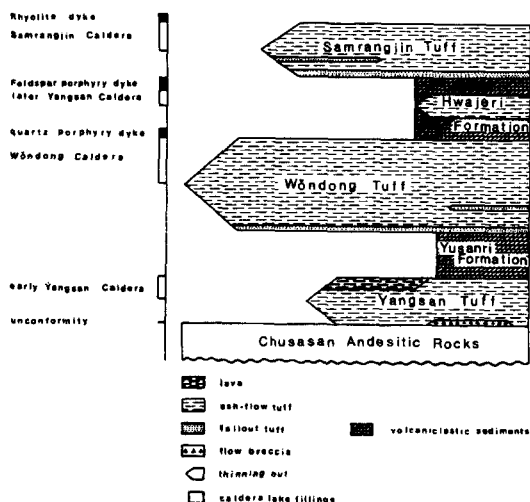


Fig. 2. Schematic stratigraphic section illustrating the volcanic sequence around the Wodong caldera.

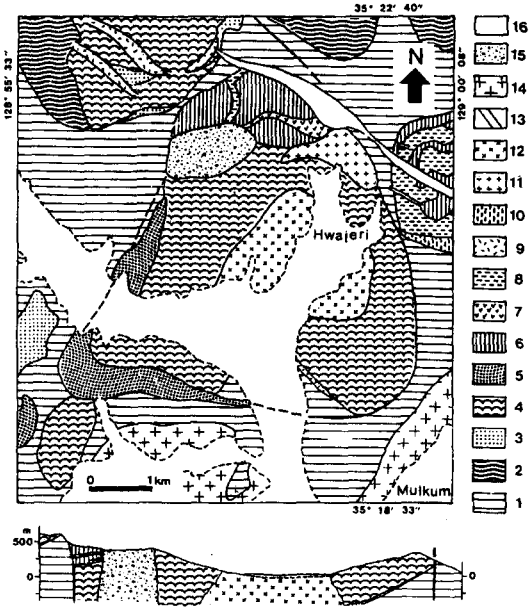


Fig. 3. Generalized geologic map of the Wondong caldera; 1, Chusasan andesitic rocks; 2, Yangsan Tuff; 3-4, Wondong Tuff (3, rhyolitic fallout tuff; 4, rhyolitic ash-flow tuff); 5, quartz porphyry; 6-8, Hwajeri Formaton (6, tuffaceous sedimentary rocks; 7, porphyritic rhyolite lava; 8, tuff); 9, rhyolite; 10, feldspar porphyry; 11, fine-grained granodiorite; 12, hornblende biotite granite; 13, felsite; 14, biotite granite; 15, trachyte porphyry; 16, Alluvium.

원동응회암과 원동칼데라

원동응회암(Wondong Tuff)은 그 공급지가 원동 칼데라에서 유래된 강하응회암과 회류응회암을 묶어서 일컫는 암층명이다(황상구와 김상욱, 1990). 이 암층은 원동 칼데라 내부와 외부에 넓게 분포되며, 칼데라 경계부에서 외부로 현재 24 km 이상 뻗어 있는 두꺼운 외류암판(outflow sheet)을 이루고 있다(Fig. 1). 이는 원동 칼데라 내의 숨겨진 화구로부터 분출된 큰 용적의 회류가 방사상으로 퍼져나가 두껍게 쌓인 응회암이지만 장기간의 침식 삭박으로 칼데라 외부의 서부와 북부에만 잔류한다. 이러한 침식 잔류체는 광역적으로 이 지역이 유천소 분지 중앙부의 큰 구조적 분지의 남부에 위치함으로써 북쪽으로 기울어진 데 기인하고, 또한 지역적으로 어영단층의 남서 블록이 하락된 결과이다. 그리고 이 암층은 광물조성과 화학조성이 유문암질에서 유문대사이트질 범위에 해당되고 대부분 유문암질에 속한다. 그러므로 본 원동응회암은 조성과 조

직에 의해 유문암질 강하응회암과 유문암질 회류응회암으로 기재된 바(김규봉과 황상구, 1988)와 일치한다.

흔히 플리니언 분출에 의한 강하상은 수많은 규질 분출에서 보여주는 바와 같이 회류응회암 아래에 놓인다(Smith, 1960; Spark *et al.*, 1973). 원동응회암에서도 수증기플리니언 강하상과 플리니언 강하상은 회류상에 앞서 나타난다. 즉 강하응회암은 회류응회암의 하위에 놓이고, 국부적으로 응회질사암이 하부와 상부 회류응회암 사이에 협재된다. 따라서 전체적으로 강하응회암은 정규상(normal facies)으로서의 대규모 회류응회암에 종속되는 기저상(basal facies)으로서 이에 선행하는 분출물이다. 그러면 강하응회암과 회류응회암 간의 변화를 살펴봄으로써 분출물의 열기고 설진 화산사건의 진화를 풀어 나갈 수 있을 것이다.

강하응회암

강하응회암(fallout tuff)은 칼데라 내부의 남측과 칼데라 외부의 북부와 서남부에 퍼뜨림 얇게 분포된다(Fig. 3). 반드시 밀알안산암 혹은 양산응회암을 피복하며 회류응회암에 덮이거나 그 하부에 협재된다. 층후는 지역에 따라 다르나 약 20 m 정도이다. 회류응회암 하위의 본 암층은 세립응회암과 조립응회암이 교호되며 이의 상부에서는 라필리응회암이 교호되어 있다. 칼데라 서남부의 것은 대부분 부석으로 이루어진 라필리응회암으로 구성된다. 그리고 상부와 하부 회류응회암 사이에 협재되는 것은 응회질사암에 해당된다(Fig. 4).

세립응회암과 조립응회암은 담갈색 내지 담녹갈색을 띠고 희미한 평행층리를 보여주며 이는 얇지만 측방으로 고지형 위로 연결된다. 이 암층은 보다 큰 석영과 장석 결정 외에는 육안으로 식별되지 않지만 경하에서는 샤아드와 각상의 석영과 사장석 결정편이 관찰된다. 이들의 입도는 1 mm 이하이고 그 모양이 아각상 내지 각상을 이룬다. 이들은 분급이 다소 불량하거나 중간 정도이며 보다 두꺼운 단일층 내에서 드물지만 입도가 상부로 가면서 조립에서 세립화하는 점이층리 양상을 보인다. 세립응회암에서는 5 mm 내외 크기의 누적라필리(accretionary lapilli)도 관찰된다(Fig. 5A). 누적라필리의 내부와 외부에서 화산회암의 입도분포는 세립질로서 거의 같지만 누적라필리의 주변부는 보다 더 세립으로서 그 경계를 뚜렷하게 한다. 그리고 사층리나 침식흔적 등이 발견되지 않는다. 이들의 주향과

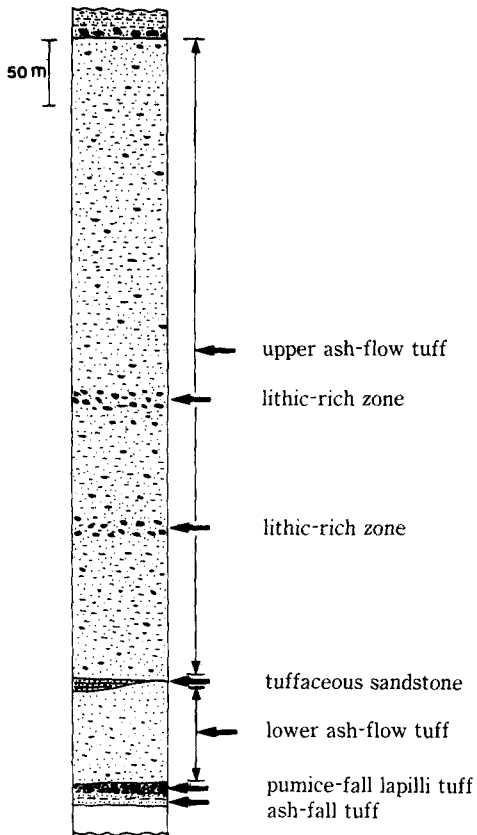


Fig. 4. Typical section of the Wondong Tuff showing variations in depositional units.

경사는 지역적으로 다양하다. 이러한 암상은 대기저 강하응회암(subaerial fallout tuff), 즉 분비응회암(air-fall tuff)임을 지시한다. 또한 1 mm 이하의 화산회를 대부분 차지하고 누적라필리를 함유하는 점은 이 강하응회암이 수증기마그마성 분출(phreatomagmatic eruption)에 의한 것임을 지시한다. 현재 칼데라 중심에서 가장 멀리 떨어진 노두를 기준으로 할 때 분포면적이 대략 130 km² 이상이 되기 때문에 이는 수증기마그마성 분출에 해당되는 수증기플리니언 분출상(phreatoplilian eruption phase)으로부터 강하회(ash-fall)에 의한 퇴적상임을 시사한다(Cas and Wright, 1987). 이 분출상은 마그마가 지하수와 초기접촉으로 폭발분출하는 거대한 분연주로부터 널리 퍼지는 강하회에 의해 형성하였고 매우 작은 입도와 매우 얇은 층후의 원인이 되었다.

라필리응회암은 세립응회암과 조립응회암의 상부에 교호되며 칼데라 남서부에서는 이 응회암층이

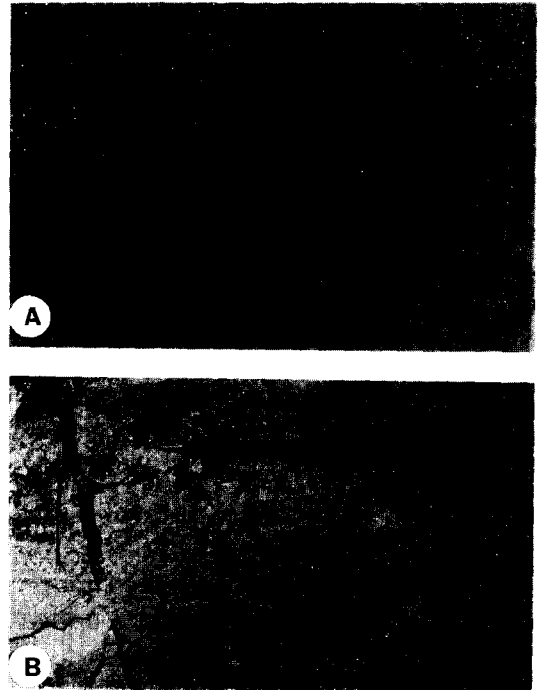


Fig. 5. Fallout tuff in the Wondong Tuff. A) Photomicrograph of ash-fall part showing accretionary lapilli. Plane light. B) Fallout tuff showing pumice-rich part representing a reverse grading.

결층된 채로 안산암의 상위에 소규모로 산출된다. 이들은 평행층리를 발달시키며 측방으로 연결되며, 라필리는 대부분 부석들로 구성된다(Fig. 5B). 부석편은 그 경계부가 매우 불규칙하고 흔히 끝부분이 뾰족하다. 칼데라 남서부에 집중적으로 두껍게 퇴적된 것은 회백색 내지 담록색을 띠며 대부분 부석들로 구성되어 가볍고 연하다. 원동응회암 중 강하응회암에서 나타나는 가장 큰 부석편은 이곳에서 산출되며 입경이 최고 약 5 cm에 달한다. 이와 같은 암상은 대기저에서 플리니언 분출상(plinian eruption phase)에 의한 강하부석(pumice-fall)의 퇴적상임을 지시한다. 또한 이는 분포면적이 칼데라 면적 보다 넓고 강하회 퇴적상 보다 작은 대략 20-130 km²에 해당하기 때문에 저플리니언 분출상일 것으로 생각된다(Cas and Wright, 1987).

응회질사암은 원동응회암 하부에 회류응회암 사이에 렌즈상으로 협재되며 양측 경계부가 유문암맥에 의해 관입된다(Fig. 3). 본암은 회색 내지 녹색을 띠며 경하에서 결정편이 거의 관찰되지 않고 대부분 식별이 어려운 세립질의 파리지질 화산회 즉

샤아드들로 구성되어 있다. 이 샤아드는 원래 뽀족했던 끝이 마모되어 다소 둥글거나 불규칙한 모양을 이룬다. 본암은 층리가 잘 발달되며 상하위의 회류응회암과 관계가 점이적인 양상을 보이지 않는다. 그러므로 이러한 암상은 상부 회류응회암 상위에 회운강하회(ash cloud ash-fall)로 잠시 퇴적되었다가 국부적으로 존재하는 수증기로 재이동되어 다시 퇴적된 짧은 지표과정에 의한 것으로 생각된다. 결과적으로 이 응회질 사암은 회류가 이동할 때의 상부로 피어 오르는 수증기와 이를 따라 올라온 세립질 화산회로 구성된 회운에서 낙화된 화산회로부터 유래된 것으로 간주된다.

회류응회암

회류응회암(ash-flow tuff)은 험준한 산악을 형성하면서 칼데라 내부와 외부에 대규모로 분포한다(Fig. 1, 3). 본암은 강하응회암 상위에 놓이거나 안산암 상위에 직접 놓이며 삼랑진응회암 하위에 놓인다. 두께는 현재 칼데라 외부에서 최고 약 550 m 이상이고 칼데라 내부에서 계산하면 1,550 m가 된다(황상구, 1997a). 이 회류응회암은 응회질사암에 의해 하부와 상부로 분리되고 상부 회류응회암은 중간에 암편풍부대(암편풍부 회류응회암)에 의해 3구간으로 구분된다(Fig. 4).

하부 회류응회암은 담록회색을 띠며 암편이 거의 없고 석영과 장석립을 비교적 많이 함유한다. 부석은 적은 편이어서 유택시틱 석리(eutaxitic fabric)를 거의 나타내지 않는다.

상부 회류응회암은 회색 내지 회갈색을 띠며 석영과 사장석 반정, 부석과 암편을 함유한다. 암편 함량은 7% 내외로서 적은 편이고 반정 함량은 20% 내외로서 풍부하지 못한 편이며 나머지가 부석과 샤아드 등이다. 전암층을 통하여 분급되어 있지 않고 층리가 없으며 대부분 심히 용결되어 있다. 부석은 편평화되어 피아메를 이루며 이로 인한 유택시틱 석리를 흔히 발달시킨다(Fig. 6A). 유택시틱 석리가 현저한 곳의 엽리면에서는 드물지만 신장된 부석에 의한 선구조도 나타난다. 대부분 피아메는 대개 암회색이며 풍화면에서 튀어 나온 경우도 있다. 이 피아메는 두께가 2-5 mm에서 길이가 10-25 mm가 흔하며 길이가 4 cm 이상되는 것도 있다. 피아메가 현저하고 반정이 양산응회암 보다 풍부하지 않으나 다소 많은 것이 본암의 두드러진 특징이다. 육안으로 인식되는 반정은 2 mm 내외의 자형 사장석, 1 mm 내외의 다소 둥근 석영과, 드물지만

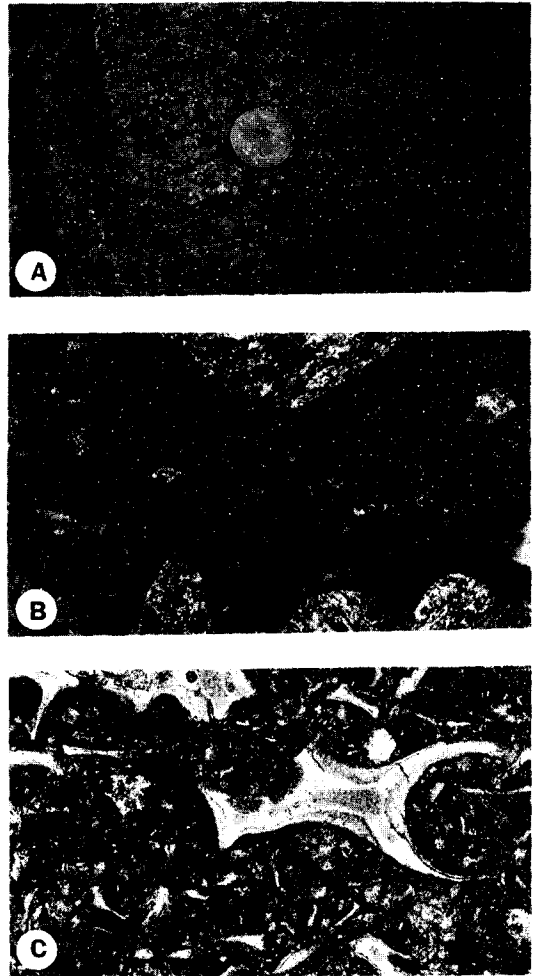


Fig. 6. Ash-flow tuff in the Wondong Tuff. A) Flattened pumices represent an eutaxitic fabric due to welding. B) Photomicrograph of densely welded ash-flow tuff from the outflow. It shows extreme welding, but with recognizable shard structure. Extremely flattened pumices have partially eliminated by coarse devitrification. C) Photomicrograph of non-welded ash-flow tuff from the outflow. It shows a vitroclastic texture with shards of a wide range in size. There is a broken nearly circular glass-bubble wall.

엽편상 혹은 모 등이다. 본 암석단위의 전반에 걸쳐 회운에 의한 강하응회암이 작은 규모라도 산출이 빈약한 것은 분출중심지에 가깝다는 것과 연속적인 분출로 흐름단위(flow unit)의 정착시간이 짧았음을 반영한다. 그리고 본 암석단위 기저 가까이에서 각상 화산암편의 농집을 제외하고, 수직단면에서 각 흐름단위의 경계는 거의 완전한 용결작용에 의해 가리워져 있다.

그러나 암편이 풍부한 회류응회암이 상부 회류응회암의 두 층준에서 발견된다. 이는 칼데라 북부와 서부에서 멀리 떨어진 곳까지 산출된다. 이 암편은 대부분 안산암으로 구성되며 라필리에서 블록 범위이고 5-10 cm 크기가 흔하다. 이는 암편이 풍부한 회류가 측방운동을 약간 겪으면서 처진 암편인 것으로 판단된다(Wright and Walker, 1977). 이러한 증거는 화구의 위치가 중앙에서 환상단열대로 이동되었음을 지시하는 것 같다. 왜냐하면 상부 회류응회암의 중간에서 원동응회암의 기반암에 해당하는 안산암의 암편 풍부도가 두꺼운 회류응회암 상부 속에 협재되고 이것이 중심화구로부터 측방으로 먼 곳에서 발견되기 때문이다.

경화에서 대체로 피아메는 초생의 장석과 규산광물의 미정들을 함유하고 있으며 기질은 그렇지 않다. 필자는 이를 정치후에 휘발성 물질을 갖고 있던 부석을 녹일 만큼 충분한 열을 보유하고 있었다고 생각한다. 또한 결정편도 풍부한데 이는 고열의 회류가 이동될 때 결정의 파편화 작업이 지속되었음을 암시한다. 기질의 샤아드는 부분적으로 결정작용이 일어나므로써 샤아드 경계부분에 직각으로 깃털 모양의 미정이 성장되어 축열상 결정작용(axiolic crystallization)으로 탈파리작용이 일어나 있다(Fig. 6B). 이외 대부분 샤아드는 심한 용결과 탈파리작용에 의해 그 모양 인지가 어렵다. 이러한 용결과 탈파리작용은 칼데라 내부의 분암에서 더욱 심한 것이 특징적이다. 즉 축열상 결정작용과 피아메 내의 기체상 결정작용(vapor-phase crystallization)에 의한 규산광물과 알카리장석 결정이 여러 양상으로 형성된 집합체가 흔히 관찰되기 때문이다.

이상과 같이 조직적인 균질성, 큰 두께와 완전한 용결작용은 속도가 낮고 유체화가 적으며 회운으로의 화산회 손실이 적은 비평창적 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)이었다. 이 분출상이 일어나는 초기에는 보다 폭발성이 강해서 회운이 보다 크게 발생하는 소규모 회류에 의해 보다 세립질의 회류응회암을 형성하였다. 중기부터는 회운이 거의 발생하지 않는 반복적인 회류의 범람에 의해 큰 용적의 회류응회암을 형성하였으며, 후기에 접어들어 칼데라를 형성하면서 환상단열을 따라 일어나는 회류에 의해 암편이 많은 회류응회암을 형성하고 칼데라 내부가 두배 이상 더 두껍게 집적된 것으로 판단된

다. 이러한 반복적인 회류가 두껍게 집적되므로써 고온의 열이 오래 유지됨으로써 용결 작용이 일어나고 선택적으로 탈파리작용이 일어날 수 밖에 없었을 것이다.

원동 칼데라

원동 칼데라의 경계는 환상단층과 환상관입체의 중간선을 따라 구획되는 환상단열대이며 둘레 총연장 17.6 km에 달한다. 따라서 원동 칼데라는 환상단열대로 구획되는 구조적 경계 내의 영역을 말한다. 여기서 원동 칼데라에서 최단 직경은 4.0 km이고 최장 직경은 5.1 km이며 이 영역의 면적은 20.4 km²이다(황상구, 1997a).

칼데라 내부의 원동응회암층은 환상관입체에 의해 둘러싸이거나 하위층에 속하는 주사산 안산암질암류와 단층경계되어 있어 이 하위 암층에 비하여 하락되었음을 나타낸다. 이는 원동 칼데라 함몰에 대한 직접적인 증거가 된다. 환상단열대를 사이에 두고 원동응회암의 고도차는 함몰심도가 된다. 이 함몰심도는 칼데라 내외부에 회류응회암의 하한으로부터 계산하면 1.93 km로 산출된다(황상구, 1997a).

칼데라 형성에 직접 관여된 회류응회암의 용결력은 광역적인 틸팅이전으로 복귀할 때 얇은 사발 모양의 분상구조를 나타낸다(황상구, 1997a). 이 구조도 칼데라 함몰에 수반되는 함몰구조로서 원동 칼데라 함몰의 직접적인 증거가 된다. 그러므로 원동 칼데라는 환상단층운동(ring faulting)과 하향요곡운동(down sagging)에 의해 형성되었으며 이로 인해 단층경계를 이루는 얇은 사발모양의 원동상 칼데라블록을 형성하였다(Walker, 1984).

석영반암

석영반암(quartz porphyry)은 원동 칼데라의 서측과 남서측에만 분포된다. 이들이 관입한 최후의 암석은 원동응회암이다. 본암은 원동응회암 외측에서 환상암맥으로 관입되어 있다(Fig. 3). 이 환상암맥과 유문암질 회류응회암과의 경계부는 냉각대(chilled zone)없이 점이적이기 때문에 그 경계가 뚜렷치 않다. 이는 칼데라 내부에 두껍게 축적된 회류응회암이 충분히 냉각되기 전 고온하에 있을 때 암맥이 관입된 것을 암시하는 것으로 생각된다. 이로부터 석영반암에서의 냉각대가 없고 응회암에서 뚜렷한 예인현상이 없음은 이의 설명을 가능하게 한다. 즉 본 암맥은 원동 칼데라의 함몰과 직접 관

련되어 있음을 지지한다.

그리고 본암은 석영, 사장석을 반정으로 함유하며 석영은 재용용되어 있다. 서측부에서 본암은 기질이 입상화되어 있어 화강반암에 속하며, 남서측에서 본암은 석영반정이 그 크기가 최고 3 mm 까지로서 보다 입도가 큰 편이다. 화학성분상 본암은 유문대사이트질에 속한다(황상구, 1997b). 이에 따르면 본암은 회류용회암과 광물조성과 화학조성상으로 매우 유사하다는 것을 나타내며, 이는 본 환상관입체가 칼데라형성 분출작용에 시공간적으로 밀접하게 관련되어 있음을 암시한다(Smith and Bailey, 1968).

이 석영반암맥의 형태와 위치에 의하면 이의 정치는 칼데라블록의 주변에서 구조적 불연속 즉 환상단열대에 의해 지배되었음을 암시한다. 그리고 원동용회암까지만 관입한 점, 이와 경계가 뚜렷하지 않고 점이적인 점, 칼데라 형성과 직접 관련된 점, 광물, 화학조성상 아주 유사한 점 등을 고려한다면, 본암은 마지막 회류분출이 일어난 최후단계에 환상단열대 틈을 따라 올라와 메꾸어진 마그마 활동 산물인 것으로 생각된다. 따라서 이는 함몰후 화산(postcollapse volcano)의 뿌리로서 마그마 챔버에 연결된 것으로 판단된다.

칼데라 충전물

큰 용적의 회류분출로 형성된 원동 칼데라 내부에 채워진 칼데라 충전물은 원동 칼데라 형성 화산 작용과 칼데라 후 소생 관입작용 사이에 원동 칼데라 내부의 칼데라호에 채워진 화산쇄설성 퇴적층, 반상유문암 용암과 응회암층으로 구성되는 화제리층(Hwajeri Formation)이다. 이는 세립질 화강섬록암, 규장암과 조면반암에 의해 관입되어 있다(Fig. 3).

화제리층

원동 칼데라에서 화제리층은 원동용회암 위에 정합적으로 놓이며 전체 두께가 약 380 m이고 중심부쪽으로 다소 얇아지는 경향이다(황상구, 1997a). 화산쇄설성 퇴적층은 중부에 존재하는 응회암층에 의해 하부의 저색대와 상부의 녹색색대로 나뉘어진다. 저색대는 원동 칼데라에서 두께가 최고 약 230 m이며, 주로 응회질의 역암, 이암과 사암으로 구성되고 기저로부터 80 m 위치에 반상유문암 용암이 협재된다. 이 용암에 의해 저색대는 하부 저색대와 상부 저색대로 나뉜다. 따라서 화제리층은 하부 저

색대, 반상유문암, 용암, 상부 저색대, 응회암과 녹색색대로 구분된다.

하부 저색대

하부 저색대는 대부분 응회질 역암으로 구성되고 응회질 이암과 사암이 소량 포함된다. 특히 역암은 원동용회암의 직상위와 안산암의 인접부에서 흔하다. 역의 종류는 유문암, 회류용회암, 안산암, 사암 등의 암편이 있고 그 크기는 다양하며 대부분 기질지지 배열상태를 보여 역들이 서로 떨어져 기질에 무질서하게 떠있는 것처럼 나타난다. 특히 칼데라저 가까이에서는 3 m의 안산암의 거대한 암괴가 관찰된다. 이는 북쪽의 칼데라벽의 붕괴로부터 유래된 산사태(landslide)에 의한 거대암괴에 해당된다. 그리고 이의 기질은 저색 이암이며 보다 작은 역이 25% 이하 포함되어 있다. 이와 같이 역의 성인은 화산원과 퇴적원의 두 가지가 존재한다. 기질은 대체로 내부에 층리를 나타내지 않는 괴상층리를 이루고 부분적으로 회미한 점이층리가 나타나기도 한다. 이러한 증거들로부터 필자는 이것이 아마 수중에서 일어난 화산암설류에 의한 산물이라고 생각한다. 왜냐하면 본대가 대부분 기질의 높은 함유비를 보이고, 역의 기질지지 배열상태, 기질의 괴상층리와 회미한 점이층리 등을 나타내며, 대기저 화산암설류의 상단에 흔히 기질이 없이 역들로만 지지되는 역암과는 매우 대조적이기 때문이다.

반상유문암

용암은 화제리층 기저로부터 80 m 위치에 약 30~60 m 두께로 협재되며 서쪽으로 점점 얇아진다. 이 용암은 조면반암과 세립질 화강섬록암의 관입에 의해 양단이 잘렸지만 약 1.3 km의 길이를 가진다. 따라서 이의 종횡비(aspect ratio)는 1/29로서 높은 편이다. 이의 암질은 회색 내지 회백색을 띠고 은미정질의 규장질 석기에 사장석 반정을 약 5% 내외로 함유하는 반상유문암이다(황상구, 1997b). 유상구조가 거의 나타나지 않고 대부분 괴상 양상을 보인다. 이는 폭발성 분출과 달리 분류성 분출(effusive eruption)에 의해 정치되었다. 따라서 이의 공급 화구는 적어도 칼데라호의 물이 접근할 수 없는 초기 소생도용 상에 있었을 것으로 판단된다. 왜냐하면 만약에 환상단열대의 어떤 화구이라면 칼데라호 물이 접근할 수 밖에 없어 폭발성 분출을 쉽게 일으키기 때문이다. 그리고 원동 칼데라에서 소생작용은 칼데라호 퇴

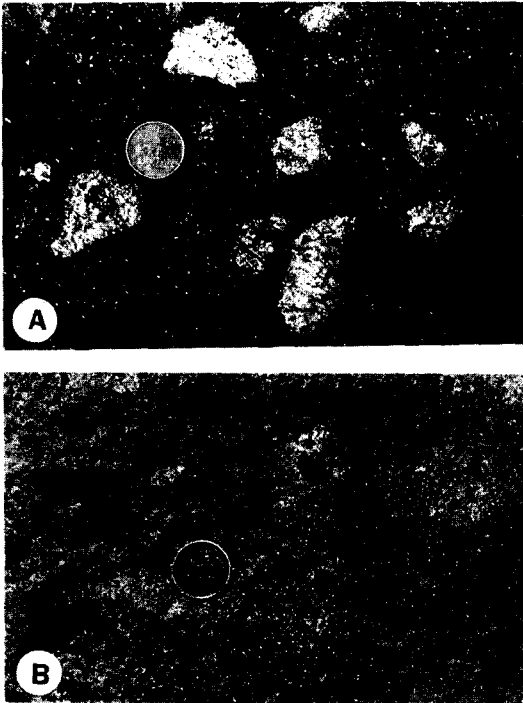


Fig. 7. Volcanological aspects in the Hwajeri Formation. A) Rhyodacitic blocks included in the upper purple zone. B) Nonwelded ash-flow tuff typically outcropped in the tuff zone.

적작용이 일어나는 도중에 시작되었기 때문에 (황상구, 1997a), 칼데라 중앙부는 호수면 위로 드러나고 소생도움 상단에 장력에 의한 열극이 발생하므로서 용암 분류의 원인이 되었을 것으로 판단된다.

이 반상유문암의 암편들이 상부 저색대 퇴적암 속에 포함되어 있다. 특히 이 암편은 반상유문암 용암 직상위의 저색 이암 속에 다양한 크기로 불규칙하게 분포된다. 이 암편은 회백색 내지 회색으로서 규장암상을 보이거나 회색의 흑요암상을 나타내고 표면이 매우 불규칙하다(Fig. 7A). 이러한 유문암편의 분포와 암상은 아마도 함몰 후 소생 도움의 약한 틈을 따라 분출한 반상유문암 용암이 호수로 흘러 들면서 급냉과편화(quench fragmentation)된 것을 지시한다.

상부 저색대

상부 저색대는 대부분 응회질 이암과 사암으로 구성된다. 이 저색대는 분급이 양호하고 호층을 이루는 곳에서는 층리가 발달되고 이암만 있는 곳에

는 층리가 없고 고결도가 불량하다. 이암은 흔히 두께가 두껍고 분급이 아주 불량하며, 괴상층리를 이루고 점이층리가 불량하게 나타난다. 그리고 부석이 함유되어 있기도 하며 이들은 아마도 하중에 의해 편평화되어 있다. 그리고 사암은 최고 2 cm 두께이나, 보통 50 cm 이하가 흔하다. 이는 점이층리가 발달되어 있다. 평행층리가 가장 우세한 퇴적구조이다. 층의 하부에서는 흔히 이편(mud clast)을 함유하며 곳에 따라 층의 하위에 침식구조, 짐흔적(load cast) 등이 나타나기도 한다. 이들은 유수에 의해 빠른 속도로 퇴적되었음을 지시한다.

응회암층

응회암층은 저색대와 녹회색대 사이에 약 50 m 두께로 놓인다. 이 암층은 회백색, 회색 내지 암회색으로서 다양한 색깔을 띠고 칼데라 경계부로 가면서 암회색으로 점이된다. 대부분 층내에 내부구조가 나타나지 않는 괴상층리를 이루며, 석영과 장석 반정을 포함하고, 부석, 저색 이암편, 회색 유문암편과 용결응회암편 등을 함유한다(Fig. 7B). 그러나 이러한 반정과 암편은 칼데라 경계부로 가면서 줄어들고 화산회 기질이 풍부해진다. 경하에서 본암은 원래의 샤아드 모양이 거의 변형되지 않고 용결되지 않은 채로 나타나며 흔히 파리쇄설조직(vitroclastic texture)을 보여주지만 칼데라 경계부에서 본암은 강한 용결조직을 나타낸다. 이러한 차이는 본암이 아마도 북측 환상단열대에서 분출되어 호수 속으로 흘러들었다는 것을 암시한다.

녹회색대

녹회색대는 반드시 응회암 상위에 놓이며 총후는 100 m이다. 이는 사암, 세일, 각력암으로 구성되며 보통 평행층리가 발달되고 점이층리가 흔하다. 사암은 중립 내지 세립인 것이 흔하며 최고 100 cm 두께이나 일반적으로 30 cm 이하가 흔하다. 이 사암은 그 기저가 선명하고 상향 세립화되어 평행층리가 발달된 세일로 점이된다. 또한 곳에 따라 화산암편, 이편 등을 가진다. 본대의 상부로 가면서 사암층의 빈도는 감소되나 최상부에서는 각력암이 산출된다. 각력암 내의 각력들은 이의 하위 혹은 상위와 같은 층리가 발달되어 있는 세립사암이며 그 모양은 각상이면서 층리 방향으로 장방형을 이루는 것이 특징이다. 또한 각력들의 장축방향은 본 녹회색대의 층리방향과 거의 일치된다. 이는 약간 굳은 상태의 퇴적층이 각력화되어 원위치로부터 거의 이동없이 제자리에 동시에 퇴적되었음을 의미하는 등

시쇄설성 각력암(intraclastic breccia)에 해당된다. 그리고 칼데라 북측 경계부의 안산암과 인접부에서는 세립질 세립사암이 10-20 cm 정도 크기의 부딘 모양으로 늘어나면서 잘린 양상의 인리구조가 발달되어 있다. 이는 퇴적물이 완전히 굳기전에 칼데라 중심부의 소생관입체가 관입할 때 칼데라 주변부를 따라 수반되는 인장성 장력에 기인된다(황상구, 1997a).

칼데라후 관입체와 소생도움

원동 칼데라 함몰후에 관입한 관입체는 석영반암, 세립질 화강섬록암, 각섬석 흑운모 화강암과 규장암이 있고 최후에 조면반암이 있다. 이 관입체들은 현재 여러 암상으로 고립되어 노출되지만 아마도 조면반암을 제외하고 모두 지하로 동일 마그마 챔버에 연결된다. 왜냐하면 조면반암은 성인적으로 원동 마그마계에 속하지 않기 때문이다(황상구, 1997b). 이런 경우에 본 칼데라 지역에서 침식레벨은 관입체의 원래지붕에 거의 협론될 것이다. 이 관입체 중에 석영반암은 함몰직후 화제리층 퇴적전에 관입되었고 원동응회암과 밀접히 관련되기 때문에 앞에서 설명되었다. 나머지 관입체 중에서 세립질 화강섬록암과 규장암은 화제리층을 관입하는 환상관입체이며, 각섬석 흑운모 화강암은 원동응회암을 관입하여 소생도움을 형성하는 중앙관입체이다(Fig. 1). 이들이 원동응회암과 화제리층을 높은 부위까지 관입한 것은 함몰후 화산의 뿌리라는 단적인 증거가 된다. 왜냐하면 칼데라 충전물인 화제리층은 넓게 볼 때 칼데라가 형성될 때에 보다 높은 지면에 놓여 있었기 때문이다(Lipman, 1984).

환상관입체

세립질 화강섬록암

세립질 화강섬록암(fine-grained granodiorite)은 원동 칼데라 동쪽 경계부 내측에 소규모로 노출된다. 이는 밀양안산암, 원동응회암과 화제리층을 반달모양의 작은 암주로 관입하였다(Fig. 3). 본암은 녹회색을 띠며 세립질로서 균질하여 무반정질로서 괴상을 이룬다. 기존암체와의 경계부에서 극히 세립질로서 안산암으로 오인될 정도이다. 세립질이므로 풍화 저항력에 강해 비교적 높은 작은 산릉을 형성한다. 광물과 화학조성상 본암은 화강섬록암질에서 석영문조섬록암질에 속한다(황상구, 1997b). 이는 분포 위치나 산출양상으로 봐서 원동 칼데라

함몰 후 칼데라호 퇴적 말기에 다시 마그마가 상승할 때 칼데라립의 북동측 틈을 따라 관입된 환상관입체의 화도 부위인 것으로 사료된다.

규장암

규장암(felsite)은 원동 칼데라 북동측 환상단열대를 따라 노출된다. 이는 밀양안산암과 화제리층을 관입하여 맥상으로 산출된다(Fig. 3). 이는 대부분 북동측 환상암맥을 형성하지만 이의 남동부 일부가 어영단층 트렌드와 일치되어 있다. 따라서 본 암맥은 칼데라의 환상단층과 어영단층의 규제를 받은 것으로 생각된다. 그러나 이는 마그마가 상승하여 소생도움을 형성할 때 다시 벌어진 환상단열대보다도 이후에 어영단층의 남서블록이 상대적인 하락으로 인해 형성되기 시작한 단층에 더 크게 지배되는 틈을 따라 관입된 것으로 판단된다.

중앙관입체

중앙관입체는 원동 칼데라 중심부에 노출되는 각섬석 흑운모 화강암(hornblende biotite granite)이다. 이 화강암은 주사산 안산암질암류와 원동응회암을 관입하여 원형모양의 암주를 형성하고 있다(Fig. 3). 본암은 아주 신선한 곳에서 회백색이고 다소 풍화된 곳에서 담황갈색을 띤다. 드물게 사장석 반정을 가지고 각섬석, 흑운모 등의 유색광물이 관찰되며 대부분 중립질에 해당된다. 그리고 본 암체에는 안산암 포획체가 자주 관찰된다. 특히 본 암체의 주변부에는 행인상 안산암이 길다랗게 포획되어 있는데 이들은 관입 접촉부에서 대체로 평행하게 배열되어 거의 40-50°로 경사진다(황상구, 1997a). 이는 세립질 화강섬록암과 마찬가지로 원동 칼데라 함몰후에 마그마가 소생하여 상승할 때 이루어진 소생관입체라는 것을 지시한다. 이는 칼데라블록 중앙부에 마그마가 상승하여 정착한 후에 결정화된 것으로서 원동 마그마계 화성작용의 거의 종결을 의미한다.

소생도움

칼데라 경계부를 벗어나 칼데라 중앙부 근처에서의 여러 증거들에 의하면 원동 칼데라는 함몰 후에 소생작용으로 중앙부가 볼록한 소생도움(Smith and Bailey, 1968)을 형성했음을 알 수 있다. 소생도움은 이미 침식되어 없어졌지만 도움모양 성격이 사발모양 함몰구조에 중첩되는 부위까지 깊게 침식

삭박되지 않았기 때문에 소생염기의 도움형성 요소가 아직도 남아 있다.

북측부 칼데라충진의 화재리층에서 지층 경사는 위에서 언급했듯이 중앙부로 오면서 점점 급해지며 여기서 광역 틸팅을 원상태로 복귀시키더라도 외측으로 경사진다는 점이다.

또한 칼데라 내부의 회류용회암의 용결염리가 칼데라의 기하학적 중심부인 각섬석 흑운모 화강암 암주의 중앙관입체로부터 밖으로 방사상 경사를 한다는 점이다. 이와같이 관입체 주변 암층에서 방사상 경사는 강압식관입(forcible intrusion)에 의한 틸팅을 의미하며 합몰 후 잔류마그마의 상승에 의한 칼데라 중앙부가 불룩하게 융기한 소생도움의 증거이다.

그리고 본 칼데라 중심부에는 각섬석 흑운모 화강암이 암주상으로 관입되어 있으며, 이 속에 원래 하부에 위치하던 안산암의 포획체가 포함되어 있고 길다란 포획체의 배열이 밖으로 급경사되어 있다(황상구, 1997a; Hwang, 1997b). 이 사실들은 본 칼데라가 큰 합몰에 비하면 합몰 후에 적어도 이보다 더 마그마가 다소 굴착식관입(stoping intrusion)을 하면서 상승되어 정지되었음을 지시한다. 이러한 사실은 합몰 후에 마그마 상승에 의해 칼데라 중앙부가 위로 불룩한 소생도움을 생각할 수 밖에 없다(황상구, 1997a).

토 의

앞에서 해석한 바와 같이 원동 칼데라 지역에서 수많은 노두들은 원동 칼데라 형성과 주요 화산작용의 증거들을 기록하고 있다. 원동 칼데라 형성에 따르는 화산작용을 그 순서에 따라 토의해 보기로 한다. 원동 칼데라는 1) 초기에 수증기마그마성 분출로 유문암질 화산작용 개시, 2) 회류분출에 선행하여 작용하는 플리니언 분출, 3) 칼데라형성에 직접 관련된 회류분출, 4) 칼데라 합몰과 환상단열화구로의 전이, 5) 칼데라형성 직후 석영반암맥 관입, 6) 칼데라 내부의 모우트충진 퇴적작용과 화산활동, 7) 환상단열대를 따라 세립질 화강섬록암 관입, 8) 잔류마그마 상승에 따른 심성암의 관입과 소생도움 형성 등의 화산사건 순서를 따른다(Hwang, 1997a).

수증기마그마성 분출

강하용회암은 하부의 용회암과 상부의 라필리용회암으로 이루어진다. 용회암은 세립과 조립 화산

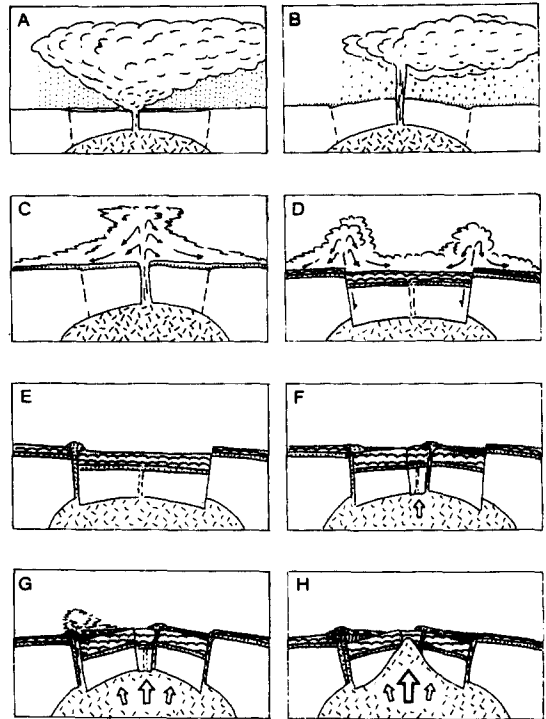


Fig. 8. Schematic sections showing the volcanic processes in the Wondong caldera.

회가 공중으로 분비되어 대기저에 쌓인 산물이다. 왜냐하면 이는 평행층리를 가지며, 침식구조, 사층리 등이 존재하지 않고 누적라필리를 가지고 있기 때문이다. 그리고 이들은 수증기마그마성 분출로부터 유래된 강하회 용회암 들이다. 그 이유는 이들이 대부분 세립이라는 점과 다른 강하용회암에 비해 분급이 불량하고 점이층리가 거의 없는 등 층리 발달이 불량하다는 점 때문이다. 즉 본 기원지에서의 초기 분출상은 수증기플리니언 분출상이었음을 말해 준다. 이 분출상은 폭발력이 매우 강해서 분연주(eruptive column)가 매우 높게 형성되었을 것이다(Fig. 8A). 이 때의 강력한 폭발력은 마그마가 어떤 기원의 물과 상호작용함으로써 가능하며 세립질 화산회를 분비시킬 수 있었을 것이다. 물의 기원은 지하수 아니면 얕은 눈에서 유래되었을 것이다. 왜냐하면 이 때의 주변환경 즉 고지면은 대부분 대기저에 있었기 때문이다.

플리니언 분출

이러한 환경과 분출상도 후기로 가면서 다른 환

경과 분출상으로 전환되었다. 본 강하응회암 상부는 주로 부석으로 이루어진 라펠리응회암으로 구성되어 있다. 이는 플리니언 분출상에 의한 강하부석 퇴적상들이다. 그런데 이 퇴적상은 분포면적이나 분출용적이 작은 규모이므로 플리니언 분출상으로 보기보다는 저플리니언 분출상(subplinian eruption phase)으로 봄이 더 타당성이 있는 것 같다(Fig. 8B). 이러한 강하부석 퇴적상은 칼데라 남서 외측부에 집중되며 층후가 두껍다. 이는 당시의 풍향, 지형 혹은 분출중심지의 위치에 관계되는 것 같다. 이들은 그 분출상이 저플리니언 강하부석(subplinian pumice-fall) 분출상으로 전환했음을 의미한다. 즉 물과 상호작용하는 수증기플리니언 분출상으로부터 외부의 물과 작용이 전혀 없는 저플리니언 분출상으로 탈바꿈했다는 것이다. 이러한 탈바꿈이 일어나려면 분출장은 물이 차단되는 환경으로 바뀌어야만 한다. 즉 화구 부근에 강하회가 쌓이므로서 혹은 마그마가 점차 상승하므로서 지표수가 차단되던지, 아니면 마그마가 틈을 주입하므로서 지하수의 통로가 차단되는 등의 환경변화가 있었을 것으로 판단된다.

이 두 분출상은 회류분출에 앞서 강하응회암을 형성시켰으며, 중국적으로 저플리니언 분출상은 뒤이어 회류분출상으로 변경되었다.

중앙화구 회류분출

저플리니언 (혹은 플리니언) 분출상이 회류분출상으로 전환되는 것은 일반적인 사전이다(Self and Rampino, 1981). 이 때 선행 저플리니언 분출작용이 계속되어 화도가 확장됨으로서 마그마 방출율(magma discharge rate)이 급격히 증대되고 이로 인해 순간적으로 분연주가 붕괴되어 회류로 전환된다(Fig. 8C). 원동응회암의 회류응회암은 각 흐름단위 간의 경계를 인지할 수 없고 대부분 유택시틱 석리(eutaxitic fabric)를 형성할 정도로 심하게 용결되어 있어 고도 용결응회암(high-grade welded tuff)이라고 할 수 있다. 이러한 고도 용결응회암을 형성하려면 분연주의 붕괴 높이가 낮으며 회류의 속도가 낮고 유체화 정도가 적은 비확산적 회류이어야만 한다. 왜냐하면 회류가 생성되어 범람할 때 열손실을 막아야만 하기 때문이다. 이렇게 분연주의 높이가 낮을려면 분출시에 개스함량이 적고 개스확산속도가 적으면서 마그마 방출율이 아주 커야만 가능하다. 이런 상태에서 회류는 덜 퍼져나가고 파리질 화산회(vitric ash)의 손실도 적었을 것이다.

원동응회암의 회류응회암은 외류의 규모가 큼에도 불구하고 회운강하회(ash cloud ash-fall) 퇴적상이 풍부하지 못하다. 이는 현잔류 응회암이 회운강하회가 풍부한 말단부(distal part)가 아니고 풍부하지 않는 두위부(proximal part)인데 큰 원인이 있겠으나, 이외에 분포면적에 대한 두께가 상당히 큰 중형비에 근거하면 확산속도와 유동성이 상당히 적었음을 지시하기 때문에 이들이 풍부치 못한 하나의 큰 원인이 되겠다. 마그마 방출율, 중형비, 용결도 등은 상호 불가분의 관계를 가지며 본 회류응회암의 분출과 이동 양상을 단적으로 반영해 주고 있다.

칼데라형성과 환상단열화구의 전이

강하응회암과 초기 회류응회암은 중앙화도(central vent)에서 기원되었다고 본다. 마그마 방출량이 증가됨에 따라 마그마챔버의 압력이 소진되고, 결국 이 압력은 마그마챔버 상위의 지붕에 의한 하중보다 떨어짐에 따라 마그마챔버 크기 만한 환상단열대가 형성되면서 함몰이 일어나기 시작하였다. 칼데라함몰은 마그마챔버 내의 압력지배를 회복하여 환상단열대의 새로운 화구로 회류분출이 이동되고 기존 중앙화도는 그 역할이 줄어들게 되었다(Druitt and Sparks, 1985). 이때 계속적인 함몰로 점차 완전한 칼데라를 형성하였다. 이와같은 칼데라형성 회류분출(caldera-forming ash-flow eruption)은 분출중심이 중앙화도에서 환상열극으로 화구 위치를 옮겼다(Fig. 8D). 원동응회암에서 후기의 회류분출상이 환상열극분출이라는 것은 칼데라 구조 외에도 본 회류응회암의 측방변화가 이를 잘 반영해 준다. 즉 원동 칼데라 내외부에서 층후, 냉각불연속의 존재와 탈파리작용의 차이가 현저하기 때문이다. 본 회류응회암의 층후는 유택시틱 염리에 수직된 방향에서 계산에 의하면 칼데라 외부 외류에서 약 550 m 이상인데 비해 칼데라 내부에서 약 1,550 m이다(황상구, 1997a). 이 층후는 원래 두께를 반영한다고 볼 수 없지만 칼데라 내부에 축적된 회류응회암은 외류에서 보다 약 3배에 가깝게 두껍다는 것을 무시할 수는 없다. 이는 세계 각지의 칼데라를 동반한 다른 회류응회암들과도 일치된다(Lipman, 1984). 이는 회류분출활동이 끝나면서 칼데라 함몰이 발생된 것이 아니고 적어도 분출도중에 함몰이 일어나 칼데라 내부에 회류응회암이 빠른 속도로 축적되었다는 것을 반영한다. 또한 칼데라 내부에서는 냉각불연속이 인식되지는 않으나 칼데라 외부 외류에서는 냉각불연속이 인정된다.

이는 칼데라 내부에서는 회류용회암이 축적될 때 냉각불연속이 생길 틈이 없이 축적되나 외류에서는 회류분출의 맥동에 따라 냉각불연속이 있어 부분냉각이 있었음을 보여주는 한 단면이다. 그리고 칼데라 내부에서 본 회류용회암은 외류에서 보다 탈파리작용과 기체상 결정작용이 보다 심한 점이다. 이는 칼데라 내부에 회류용회암이 빠른 속도로 두껍게 집적되므로 냉각되는 시간이 보다 오랫동안 유지되었기 때문인 것으로 해석된다. 또한 상부 회류용회암 중간에서 암편이 풍부한 회류용회암은 새로운 화구의 기원을 의미하며 화도에서 기반암의 단열과 파편화를 일으키는 파국적인 사건을 의미한다. 이 암편풍부대가 중앙화구로부터 환상단열화구로의 전이를 나타내는 직접적인 증거인 것으로 생각된다.

환상암맥 관입

환상열극을 통한 회류분출상도 대량의 회류를 분출시킴으로서 폭발력이 소진되어 폭발성이 없는 마그마 활동으로 전환되었다. 즉 원동 칼데라 형성 직후에 잔류마그마에 의한 화산활동이 환상단열대를 따라 연속적으로 일어났다(Fig. 8E). 왜냐하면 석영반암이 원동 칼데라 남서측에 환상맥상으로 관입되어 있기 때문이다. 그리고 다음 증거들은 칼데라 함몰후화산(postcollapse volcano)의 관입 뿌리라는 것을 암시해 준다. 본암이 원동 칼데라의 환상단열대를 따라 원동용회암과 주사산 안산암질암류 사이의 높은 곳까지 관입한 것은 보다 높은 위치에서 일어나는 칼데라 함몰 후의 화산의 뿌리라는 것을 지시해 주며, 본암이 경계부에서 냉각대 없이 회류용회암과 점이적 경계를 이루고 회류용회암과 광물과 화학조성이 매우 유사한 것도 회류분출 직후의 화산사건이라는 것을 지시한다. 즉 이는 원동 칼데라의 환상단열대를 따라 일어나는 화산작용의 지하 잔류체에 해당되는 것으로 생각할 수 있다. 이때 잔류마그마는 점성이 매우 커서 흘러가지 못하고 열극만을 채우거나 기껏해야 도움을 형성했을 것이다. 왜냐하면 사장석과 석영 반정을 다량 함유하고 유상구조가 나타나지 않으며 용암에 해당되는 부분이 발견되지 않기 때문이다.

칼데라호 퇴적작용과 화산작용

화재리층 기저에서 원동용회암의 상부 경계부는 지표에 분출된 화산암이라는 것을 증명하는데 좋은 곳이다. 이 곳에서 심히 용결된 원동용회암도 상부

로 가면서 용결도가 약해지며 결국 화재리층으로 된다. 이 퇴적층 내에는 원동용회암 파편들이 함유되며 이는 원동용회암의 상부 표면이 대기저 호성퇴적과정에 노출되었음을 지시한다. 이 양자의 접촉부는 일차적인 용회암에서 재이동된 외력쇄설성 용회질퇴적층(epiclastic tuffaceous sediments)으로 변하는 점이대를 형성한다. 원동용회암과 화재리층과의 시간적 성인관계는 저색 퇴적층에 나타나 있다.

저색대의 역암층에 견고한 용결용회암편이 존재한다는 것은 이 퇴적층이 재이동된 화성쇄설성이라기보다 외력쇄설성이라는 것을 지시한다(Fisher, 1961; Fisher and Schminke, 1984).

원동 칼데라의 모우트에는 용회질 퇴적층, 용암층과 용회암층이 층진되었다(Fig. 8F). 이 퇴적층 중에서 초기에는 암설류에 의한 역암이 가장 대표적이다. 이 역암의 기질은 보다 높은 지역에 쌓여 있던 화산회가 낮은 원동 칼데라 내로 유입되었던 것으로 생각된다. 큰 암편들은 대부분 안산암이며 이들은 밀양 안산암으로 노출된 칼데라벽에서 유래되었다고 본다. 대부분 암편은 용결용회암, 안산암, 사암, 유문암 등으로 다양하며, 이는 화재리층 퇴적시에 다양한 암질이 지표에 노출되었다는 것을 지시한다. 지형적으로 큰 수직적 기복을 이루는 칼데라벽은 아마 이러한 노출의 큰 원인이 될 것이다. 화재리층의 저색대에는 산사태에 의한 최고 3m의 안산암괴가 포함돼 있는 바와 같이 이는 칼데라벽에서 중력에 의한 산사태가 대함몰 이후에 가끔 일어났음을 지시한다.

저색 퇴적층이 쌓이는 도중에 반상유문암 용암이 분출되었다. 이 용암의 공급 화구는 적어도 칼데라호의 물이 접근할 수 없는 초기 소생도움 상에 있었다. 칼데라 중앙부는 호수면 위로 소생도움을 형성하고 이 상단에 장력에 의한 열극이 발생하므로 용암이 분류될 수 있었다. 그리고 이 용암은 보다 낮은 모우트로 흘러들므로서 차가운 호수물에 의해 급냉각되어 파편화되었을 것이다. 왜냐하면 이 반상유문암 암편들이 용암층 상위의 저색 이암 속에 다양한 크기로 불규칙하게 포함되어 있기 때문이다.

용암이 분류한 이후에는 주로 저색의 이암과 사암을 형성하는 퇴적작용이 일어났다. 이 퇴적작용이 끝날 무렵에 칼데라 북측으로부터 회류분출 사건이 소규모로 일어났다. 왜냐하면 저색대 상위의 회류용회암은 같은 암층임에도 불구하고 짧은 거리에서 암상과 용결도의 변화가 상당히 크기 때문이다. 그러므로 이는 칼데라에서 발생한 고온 회류가 점차 칼데라호로 들어가 용결도와 암상 차이를 일

어킨 것으로 간주된다.

화산작용이 종식되었어도 칼데라호에는 쇄설물이 계속 쌓여 응회암층 상위에 녹회색 퇴적층을 형성하였다. 퇴적층이 빠른 속도로 계속 쌓임으로서 칼데라의 심도는 알아져 퇴적동시성 각력암을 형성하기도 하였다. 그리고 화제리층이 쌓이는 동안도 칼데라의 환상단열대를 따라 약하나마 정단층운동이 계속되어 칼데라벽 인접부에서는 인리구조를 형성하게 되었다. 이의 배후에는 화산작용 대신에 화산휴지기를 틈타 원동 칼데라 중심부 지하에서의 마그마 소생작용에 의해 칼데라 주변부에서 신장형 단층운동을 수반케 하였다(황상구, 1997a).

세립질 화강섬록암 관입

세립질 화강섬록암도 분포 위치나 산출양상으로 봐서 원동 칼데라 함몰 후 칼데라호 퇴적 말기, 즉 소생도움이 완성되는 단계에 소생작용에 의해 다시 벌어진 칼데라림의 동측 틈을 따라 보다 깊은 곳으로부터 마그마가 주입된 것으로 사료된다. 왜냐하면 이는 원동 칼데라 동측 경계부에서 원동응회암과 화제리층을 작은 암주상으로 관입하였고 입도가 세립질이지만 완정질이기 때문이다. 이 암주는 아마도 안산암 도움의 원통상 뿌리부분에 해당되는 것으로서 칼데라 함몰의 환상단열대 일부를 따라 일어나 도움형성 화산작용(dome-buliding volcanism)의 화도일 수도 있다(Fig. 8G). 고기화산으로서 이와 유사한 예는 미서부 콜로라도주 산주안산맥의 플라토라칼데라 연변부에 화산뿌리에 해당되는 작은 암주가 관입되어 있다(Lipman, 1975).

소생도움 형성과 규장암맥 관입

칼데라충진 퇴적작용과 거의 동시에 칼데라 바다 중앙부가 솟아오르기 시작하였다(황상구, 1997a). 왜냐하면 칼데라충진 퇴적층과 이에 협재된 반상유문암 용암이 다같이 틸팅되어 있기 때문이고, 원동 칼데라의 중앙도움 형성 후에 모우트충진 퇴적작용이 일어났다면 원동응회암과 화제리층의 관계가 경사부정합이어야 하지만 그렇지 않기 때문이다. 그러나 화제리층의 충후가 중심부로 올수록 다소 얇아지는 경향이 있기 때문에 소생작용은 퇴적작용이 진행되면서 시작되어 계속적으로 서서히 일어난 것으로 생각된다. 소생작용에 직접적으로 관련된 관입체는 각섬석 흑운모 화강암이다. 왜냐하면 본 암체가 기하학적으로 칼데라 중앙부에 관입되어 있고

암체 주위에서 용결엽리와 층리가 밖으로 방사상 경사를 보이는 구조적 도움을 나타내기 때문이다(황상구, 1997a). 따라서 화강암 관입활동은 강한 마그마 소생작용에 따른 상향 도움형성을 의미하는 것으로 생각된다. 그러므로 소생작용이 계속되면서 세립질 화강섬록암이 서측 환상단열대에 따라 정치되어 환상관입체의 구성원이 되었으며(Fig. 8G), 중앙부가 서서히 계속 솟아오르면서 마지막으로 각섬석 흑운모 화강암이 중앙부에 정치하고 현재와 같이 노출된 것으로 생각된다(Hwang, 1997b). 이 결과로 현재와 같이 높은 부위에 각섬석 흑운모 화강암 암주를 형성했을 것으로 판단된다(Fig. 8H). 이러한 관입체들은 지표에서 여러개로 고립되어 노출되지만 아마도 지하에서 하나의 마그마챔버로 연결되는 화성암체 가지에 해당될 것이다. 그리고 마지막으로 북동측 환상단열대의 틈을 따라 규장암맥이 관입하여 화성활동이 종결되었다. 이때 규장암맥은 칼데라의 환상단층 이외에 남서블록이 상대적으로 하락되는 어영단층의 규제를 동시에 받았다.

결론

원동 칼데라에 관련된 화산층서는 하부로부터 원동응회암, 석영반암, 화제리층, 세립질 화강섬록암, 각섬석 흑운모 화강암, 규장암맥 순으로 놓인다. 즉 원동 칼데라는 회류응회암-함몰칼데라-환상암맥-칼데라 충진물-환상관입체-소생관입체로 연결되는 화산연속체를 이룬다. 이에 따라 원동 칼데라에서 일어난 화산작용과 화산과정을 요약한다.

(1) 원동 칼데라 지역에서 마그마에 외부물의 접근에 의하여 수증기마그마성 분출작용으로부터 시작되어 강화회를 퇴적시켰다. 이 분출작용은 점차 외부물의 접근이 차단되므로서 저플리니언 분출작용으로 전환되어 강화부석을 퇴적시켰다.

(2) 이 분출작용은 넘쳐흐름 분출활동으로 전환되어 화쇄물질이 대규모 회류형태로 쏟아져 나와 낮은 곳으로 흘러서 사방으로 퍼져 나갔다. 이 결과로 칼데라 외부 외류는 두꺼운 판상체를 형성하였다. 분출초기에는 중앙화구로부터 회류가 발생되었지만 후기에는 마그마챔버 위의 지붕이 함락되는 수많은 환상단열화구로의 전이가 일어났다. 이로 인해 칼데라 내부에는 회류응회암의 충후가 칼데라 외부 550 m 보다 더 두꺼운 1,550 m를 축적할 수 있었다. 이때 대규모 분출작용의 결과로 마그마챔버 상위의 지붕이 함몰되어 원동 칼데라를 형성하게 되었다.

(3) 원동 칼데라 형성된 직후에 남서측 환상단열대를 따라 석영반암이 주입되어 환상암맥을 형성하였다. 따라서 이 석영반암은 광물과 화학조성이 원동응회암과 매우 유사한 암질을 형성하게 되었다.

(4) 이후 원동 칼데라에는 장기간에 걸쳐 칼데라 충전 퇴적물이 쌓이기 시작하고 초기 소생작용으로 인하여 호수물이 미치지 않는 칼데라 중앙부로부터 반상유문암 용암이 분류되었고 북측부 환상단열대에서 화류응회암이 소규모로 분출되었다.

(5) 칼데라충진 퇴적작용이 일어난 얼마 뒤에 칼데라 바닥 중앙부가 솟아오르기 시작하였다. 그리고 소생작용으로 인한 장력에 의해 세립질 화강섬록암이 동측부 환상단열대에 따라 정치되어 환상관입체의 일원이 되었다.

(6) 중앙부가 계속 솟아오르면서 마지막으로 각 침식 혹은 화강암이 중앙부에 정치하였으며 단층작용을 받는 환상단열대에 규장암맥이 정치되었다. 이 관입체들은 아마도 지하에서 하나의 마그마챔버로 연결되는 화성암체 가지에 해당될 것이다.

사 사

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(BSRI-96-5421)에 의하여 연구되었음을 밝혀둔다. 실내외 실험에서 안동대학교 화산학실의 이상근, 김성규 대학원생의 도움이 있었다.

본 논문의 심사를 통하여 조언을 주신 자원 연구소 진명식 박사님, 부산대학교 윤성효 교수님, 강원대학교 이문원 교수님에게 사의를 표한다.

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 금성산 화산암 복합체의 화산활동과 콜드론구조. 지질학회지, 29, 309-323.
 황상구, 1997a, 양산 서부 원동칼데라의 진화과 유형. 지질학회지, 33.
 황상구, 1997b, 원동마그마계: 암석화학적 진화. 암석학회지, 6.
 황상구, 김상욱, 1990, 밀양, 양산간의 칼데라를 동반한 화류응회암. 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): 암석구조조직 위치. 지질학회

지 30, 229-241.
 황상구, 김상욱, 1994b, 밀양-양산지역 백악기 화산암류의 암석학적 연구(II): 암석성인. 지질학회지 30, 563-577.
 황상구, 김상욱, 여운중, 1997, 원동 칼데라 주변의 지질. 암석학회 '97 야외 학술탐사 가이드북, p36.
 Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, Volcanic successions. Allen & Unwin, 59-91.
 Druitt, T.H. and Sparks, R.S.J, 1984, On the formation of calderas during ignimbrite eruptions. Nature, 310, 679-681.
 Fisher, R.V., 1961, Proposed classification of volcanoclastic sediments and rocks. Geol. Soc. Am. Bull., 72, 1409-1414.
 Fisher, R.V. and Schminke, H.-U., 1984, Pyroclastic rocks. Springer-Verlag, 128-230.
 Hwang, S.K., 1997a, Volcanic evolution of the Wondong caldera. J. Petrol. Soc. Kor. Abst., 6, 39-40.
 Hwang, S.K., 1997b, Resurgence of the Wondong caldera. Internat'l Symposium Proceeding Kangwon Univ.
 Lipman, P.W., 1975, Evolution of the Platora Caldera Complex and related volcanic rocks, southeastern San Juan Mountains, Colorado. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 852, 128P.
 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. Jour. 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 cauldrons. 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.
 Walker, G.P.L., 1984, Downsag calderas, ring faults, caldera sizes, and incremental caldera growth. J. Geophys. Res., 89, 8407-8416.
 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 : 윤성효)

Volcanisms and Volcanic Processes of the Wondong Caldera, Korea

**Sang Koo Hwang, Gi Dong Lee, Sang Wook Kim*,
Jae Young Lee* 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 Wondong Caldera, formed by the voluminous eruption of the rhyolitic ash-flows of the Wondong Tuff which is about 1,550 m thick at the intracaldera and 550 m at the outflow, is a resurgent caldera which shows a dome structure on the central exposure of the caldera. The Wondong caldera volcanism eviscerated the magma chamber by a series of explosive eruptions during which rhyolitic magma was ejected, as small fallouts and voluminous ash-flows, to form the Wondong Tuff. The explosive eruptions began with ash-falls, progressed through pumice-falls and transmitted with ash-flows. During the ash-flow phase the initial central vent eruption transmitted into late ring-fissure eruption which accompanied with caldera collapse. Contemporaneous collapse of the roof of the chamber resulted in the formation of the Wondong Caldera, a subcircular depression subsiding about 1,930 deep. Following the collapse, quartz porphyry was intruded as ring dykes along the ring fracture near the southwestern caldera rim. Subsequently the central part of the caldera floor began to be uplifted into a circular resurgent dome by the rising of residual magma. Concurrent with the resurgent doming, the volcanoclastic sediments of Hwajeri Formation were accumulated in the caldera moat and then rhyodacite lava erupted from the initial central resurgent dome and another ash-flow tuff from the northern ring fracture. After the sedimentation, the fine-grained granodiorite was intruded as an arc along the eastern ring fracture of the caldera. Finally in the central part, the resurgent magma was emplaced as a hornblende biotite granite stock that formed the central dome.

Key Words : Wondong Tuff, Hwajeri Formation, phreatomagmatic eruption, plinian eruption, ash-flow eruption, lava effusion