

구암산 마그마챔버의 조성구배

황상구

안동대학교 지구환경과학과 (hwangsk@andong.ac.kr)

1. 서언

구암산 칼데라는 청송 남동부에 위치하며 하양층군 퇴적암류, 죽장화산층, 내연산용회암과 무포산용회암 속에 매몰되어 있는 8.0 x 9.2km 크기의 칼데라이다. 이 칼데라는 백악기 이후 오랜 침식으로 심하게 절개되어 깊은 계곡들을 형성하여 구암산 마그마계의 여러 부위가 보존되고 내장부에서 뺀 나온 뿌리 부위까지도 노출시키고 있다. 이 칼데라는 화산 과정에 따라 형성된 분출암과 관입암으로부터 조성변화를 검토함으로써 이 칼데라 아래의 마그마챔버에서의 조성구배를 연구케 해준다.

조성변화를 알아보기 위해서 각 암석단위를 대표할 수 있고 조성을 가장 잘 나타낼 수 있는 것을 선택하여 체계적으로 신선한 시료를 채취하였다. 분출암에서는 대표적인 단면에서 상하로 횡단하면서 여러 층준에서 가능한 한 암편이 없는 곳을 골라 채취하고, 관입암에서는 관입체마다 적당한 간격을 두고 변질되지 않은 부분에서 시료를 채취하였다. 그리고 비교를 위해서 내연산용회암 3개와 무포산용회암 2개도 추가하였다.

2. 지질개요

주왕산 화산지역의 화산암류는 분출암류와 관입암류로 구성된다. 분출암류는 하양층군 퇴적암류 위에 놓이면서 염기성에서 중성과 산성의 여러 화성쇄설암과 용암들로 구성된다. 이 중에서 산성 화성쇄설암이 가장 우세하며 이들은 중간에 안산암 용암 혹은/그리고 퇴적암이 협재되어 있어 여러 층으로 구분되고 공급지와 조성이 다르기 때문에 지품화산층, 내연산용회암, 주왕산용회암, 너구동층, 무포산용회암 등의 여러 층서단위로 구분되었다(황상구, 1998).

그리고 청송 남동부 구암산 지역에서 구암산 칼데라를 발견하고 이에 관련된 회류용회암을 하나의 층서단위로 구암산용회암이라 하였다(황상구, 2001). 구암산용회암은 최고 850m 이상의 두께를 이루며, 중부에 2m 내외의 얇은 강하용회암이 협재되어 있어 상·하부 회류용회암으로 구분된다. 이 칼데라 형성 후속단계의 관입암류는 관입암은 기하학적 위치와 모양에 따라서 칼데라내부 관입체(intracaldera intrusion)와 환상암맥으로 구분되고 환상암맥은 내측 환상암맥(inner ring dike)과 외측 환상암맥(outer ring dike)으로 나누어진다. 이들은 대체로 세립질로서 유문암질에서 유문대사이트질 조성을 나타낸다.

3. 화학조성 변화

(1) 주원소

구암산 칼데라에 관련된 화산암류의 주원소 조성은 SiO_2 조성이 67.08-78.16% 범위이다. 이 주원소 조성은 SiO_2 를 분화지시자로 사용하여 그린 하크도에서 Na_2O 를 제외한 모든 원소의 조성 변화경향은 SiO_2 조성에 대해 대체로 선형의 점진적 변화를 나타낸다. MgO 를 분화지시자로 이용한 그림에서도 대체로 선형의 점진적 변화를 나타낸다. 그러나 내연산용회암과 무포산용회암은 이 선형 변화트렌드로부터 약간 이탈되는 경향을 보인다. 이는 이 두 암석단위가 구암산 마그마계와 다르다는 것을 암시한다. 그러므로 이 두 층서단위는 호

름지시자와 최대입경분석으로부터 본역 동쪽에서 공급되었다고 보고한 것(안용산, 1999; 조남식, 2001)에 무관하지 않다.

이 변화트렌드 내에서 외측 환상암맥이 유문대사이트에서 고규산 유문암(67.08-78.16%)까지 변화트렌드를 이루며, 구암산용회암이 이 트렌드와 72.93-77.57% 사이에서 겹치고, 내부 관입체가 75.76-78.08% 사이에서, 내측 환상암맥이 76.02-78.79% 사이에서 이 트렌드와 겹친다. 따라서 외측 환상암맥은 다소 분산되지만 대체로 선형 변화경향을 형성하고 구암산용회암과 기타 관입암과 겹치며 동시에 같은 선형의 점진적 변화트렌드를 나타낸다.

(2) 희토류원소

희토류원소의 총합량은 105-213 ppm 범위이다. 이들 원소를 콘드라이트 값으로 표준화한 REE 패턴에서 본역 화산암류는 전체적으로 큰 차이가 없다. 즉 모든 암석단위는 $(La/Lu)_n = 5.1-9.7$, $(Eu/Eu^*)_n = 0.52-0.85$ 로서 LREE가 부화되고 HREE가 결핍되어 LREE/HREE 비가 강하게 분별된 양상을 보이며 모두 Eu의 부이상을 나타낸다.

그러나 구암산 칼데라에 관련된 화산암류에서 REE는 고규산 유문암에서 유문대사이트까지 함량이 다소 뚜렷한 변화를 관찰할 수 있다. REE의 총합량은 분화에 따라 감소하는데, 이러한 경향은 HREE에서보다 LREE에서 더 현저하다. 구암산용회암과 내부 관입체는 강하게 분별된 양상($(La/Lu)_n = 6.9-9.7$)은 나타내지만 환상암맥에서는 다소 평탄하다($(La/Lu)_n = 5.1-9.0$). 현저한 Eu 이상치는 아마도 분화에 따라 사장석의 강한 분별작용으로 인하여 줄어든다. REE의 총합량은 상부 희류용회암과 내부 관입체에서 환상암맥에서보다 더 높다.

그리고 내연산용회암과 무포산용회암은 REE 총합량이 위의 구암산 마그마계의 범위에 속하고 REE 패턴이 이들과 유사한데 이는 성인이 거의 같다는 것을 암시한다. 그러나 구암산용회암에서 REE 총합량이 평균 176인데 비하여 내연산용회암에서 평균 145이고 무포산용회암에서 166으로서 서로 차이가 상당히 있다. $(La/Lu)_n$ 은 내연산용회암에서 평균 7.7이고 무포산용회암에서 7.6인데 비하여 구암산용회암에서 평균 8.3으로서 전자가 후자 두 용회암보다 더 급하다. 이러한 차이는 아마도 공급지가 다른 것에 비추면 공급지에서 마그마의 성인이나 그 진화과정이 지역적으로 달랐음을 의미한다.

(3) Sr 동위원소비

구암산용회암은 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 비가 0.7073-0.7101 범위와 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 비가 2.33-5.92 범위이다. 이 두 자료를 점시할 경우 정비례 관계를 보이는 등시선을 나타낸다. 구암산용회암의 Rb-Sr 동위원소 자료는 비교적 좁은 범위에서 변해 $56 \pm 11(2\sigma)$ Ma의 연대와 $0.7054 \pm 0.0006(2\sigma)$ 의 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 초기치가 계산된다. 따라서 구암산용회암의 정치시기는 대체로 56 Ma 내외인 것으로 판단된다. 따라서 이는 마그마의 분출시기를 나타낼 뿐만 아니라 동시에 구암산 칼데라의 형성시기로 생각할 수 있다.

4. 토 의

주요 화성사건에 따라 나타났던 화성계(igneous system)를 중심으로 구암산 마그마계의 마그마챔버 내에서 존재했던 마그마의 조성구배에 대해 알아본다.

구암산용회암의 SiO_2 조성이 연속적인 스펙트럼을 이루는 것에 의하면 마그마챔버 내에서 조성구배는 이의 지붕에서 아래로 향하여 유문암과 유문대사이트 성분으로 마그마조성

이 점이적으로 성층화되었음을 생각할 수 있다. 그러나 이러한 조성구배는 구암산 마그마계의 전부를 나타내지는 않고 그 아랫부분에 대사이트 성분이 존재할 것으로 생각된다. 왜냐하면 조성구배된 마그마기둥(magma column) 중에서 분출되지 않은 아랫부분이 크게 남아 있기 때문이다. 그러므로 함몰된 후의 마그마챔버로부터 출조된 여러 암상들의 화학조성, 분포위치와 정치순서에 의하면 이때도 마그마챔버에서의 조성이 체계적으로 누대되어 있었다는 정보를 제공한다. 마그마챔버로부터의 분출퇴각은 흔히 안정된 방출에 의한 하향출조(downward tapping)로부터 일어나는 경우가 많지만 방출율의 급격한 증가로 전암층에서의 조성단절(compositional gap)을 초래하면서 일어날 경우도 있다(Spera et al., 1986). 그러나 구암산용회암을 형성시켰던 대부분의 마그마는 함몰된 후에도 칼데라 아래 마그마 챔버 내에 남아 있을 수 있었다.

구암산 칼데라 내의 관입체는 칼데라 함몰 후에 부위에 따라 시공간적으로 다르게 연속적으로 정치되었고, 칼데라유희에 있어서 함몰 후에, 구암산용회암을 분출시킨 챔버 내에서의 마그마 정보에 대한 시료가 된다. 함몰후 관입체로서 고규산 내지 중규산 유문암에서 나온 화학적 자료는 이 관입체를 정출시킨 마그마가 챔버의 상층부에서 출조되었다는 것을 나타낸다. 이곳에서 고규산 유문암이 출조된 조성대는 이미 구암산용회암이 초기에 출조된 조성대(compositional zone)와 거의 같은 조성대에서 출조된 것도 동시에 나타낸다. 이 조성대의 출조는 마그마챔버의 상층부에서 쉽게 이루어질 것으로 생각된다. 왜냐하면 이 조성대는 챔버의 상층부에 상당히 넓게 존재하고 있어서 이 부분이 칼데라함몰로 형성된 칼데라내부 열극과 환상단층으로 쉽게 연결되어 압력에 의해 쉽게 밀려 올라갈 수 있기 때문이다. 그리고 이 조성대는 다음 정치된 구암산용회암 내의 저규산 유문암질 회류용회암에 의하면 그 아래로 연속된다는 것을 암시한다. 또한 외측 환상암맥에서 반상 유문대사이트에 의한다면 저규산 유문암이 출조되었던 조성대보다 더 아래에 유문대사이트질 조성대가 존재했다는 것도 암시한다. 이 조성대는 구암산용회암이 출조되었던 조성대보다 더 깊은 부위이다. 이 부위의 마그마는 환상열극이 유문암질 마그마로 정치된 후에 남서쪽 환상암맥의 관절부위를 확대되면서 그 통로를 이용하여 서서히 올라왔을 것이다. 왜냐하면 이때는 마그마챔버의 연변부가 이미 냉각되어 초기 고화선(solidification line)까지 점이적으로 고결되어 있어서 그 아랫부분 조성대에서 출조될 수밖에 없었기 때문이다.

이 외측 환상암맥은 남쪽으로 향하여 반상 유문암으로 정치되어 있고 맥폭이 넓을수록 반정이 더 크고 풍부하며 석기가 상대적으로 더 결정질이고 조립질이다. 이는 남쪽 환상암맥에서 저규산 유문암이 북쪽 환상암맥에서 고규산 유문암보다 더 후에 정치되었음을 암시한다. 그러나 암상들 간에는 관입관계를 보이지 않고 점이적이다. 이러한 관계는 고규산 유문암이 먼저 정치되면서 뒤따라 저규산 유문암이 연속적으로 정치되었음을 암시한다. 그러므로 이 해석은 마그마챔버에서 고규산 유문암과 저규산 유문암 조성대가 상부로부터 차례로 존재하고 그 아래에 유문대사이트 조성대가 존재한다는 것으로 생각할 수 있다.

이는 조성과 결정도가 서로 다른 암상이 정치 전에 화학적으로 조성구배를 이룬 하나의 마그마챔버에서의 다른 조성대에서 유래되었음을 의미할 뿐만 아니라 시간의 경과에 따라 출조심도가 더 깊어졌다는 것과 출조부위가 더 안쪽으로 치우쳐 있다는 것을 의미한다. 이때 보다 심부에 존재하는 유문대사이트질 조성대로부터 출조될려면 환상열극의 아랫 입구가 구암산용회암이나 기타 관입체가 출조될 때의 입구보다 더 깊었을 것이고 같은 유문대사이트 조성대라도 더 바깥쪽의 후기 고화선 근처이었을 것으로 생각된다.

구암산용회암, 칼데라내부 관입체와 외측 환상암맥을 종합한다면 이들은 마그마챔버 내에서 조성이 수직으로 다르게 놓였음을 암시한다. 즉 마그마챔버의 지붕에서 아래로 조성

구배는 총상으로 고규산 유문암, 중규산 내지 저규산 유문암, 유문대사이트와 대사이트 조성대를 형성했을 것으로 생각된다. 여기서 이 조성대는 아마도 함몰전의 조성대가 유지되었지만 윗부분에서는 화산사건에 따라 조정되었을 것으로 생각된다. 즉 함몰 후의 잔류마그마 조성 범위는 구암산응회암 분출에도 불구하고 윗부분의 유문암 조성대가 상당히 남아있었고 그 아랫부분이 완전히 소모되지 않고 남아 있었다. 따라서 다시 출조가 일어날 때 유문암 조성대로부터 출조가 시작되었으며 연속적으로 더 깊은 조성대로까지 출조될 수 있었다. 또한 본역에서 대사이트가 비록 산출되지 않지만 대사이트 조성을 갖는 마그마는 구암산 마그마계의 여러 암석단위를 출조시켰던 마그마챔버 아랫부분에 보다 크게 존재했을 것으로 생각된다.

5. 결론

구암산 칼데라에는 구암산응회암이 보존되어 있고 함몰후 칼데라내부 관입체와 환상암맥으로서 정치된 유문암질 관입체가 노출된다. 구암산응회암은 상부로 가면서 대체로 고규산 유문암에서 저규산 유문암으로 조성변화를 나타낸다. 외측 환상암맥은 암상이 다양한 유문암, 반상 유문대사이트와 관입용결응회암으로 구성된다. 그러나 이들은 상호 점이적 관계를 나타내며 부위에 따라 시공간적으로 다르게 연속적으로 정치되었음을 지시한다.

구암산 화산암류에 속하는 구암산응회암과 유문암질 관입체는 이들의 Rb-Sr 동위원소 자료로부터 $56 \pm 11(2\sigma)$ Ma의 연대와 $0.7054 \pm 0.0006(2\sigma)$ 의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기치를 얻었으며 화학조성으로부터 유문암으로부터 유문대사이트 성분으로의 연속적 조성변화를 읽을 수 있다. 이 연속적 조성변화는 함몰 전후에 마그마챔버에서 지붕에서 아래로 고규산 유문암, 중규산 내지 저규산 유문암, 유문대사이트, 대사이트 성분 순으로 성층상 조성구배를 형성했음을 지시하며, 고규산 유문암 성분은 마그마챔버에서 지붕 근처의 조성대를 지시하고 유문대사이트 성분은 가장 깊은 출조 심도를 지시한다.

6. 참고문헌

- 안용산, 1999, 청송 남동부 무포산응회암의 화산학 연구. 안동대학교 대학원 이학석사 학위논문, 58p.
- 조남식, 2001, 영덕 남부 내연산응회암의 화산학 연구. 안동대학교 대학원 이학석사 학위논문, 57p.
- 황상구, 1998, 청송 주왕산 일대의 화산지질. 춘계학술답사 가이드북, 대한지질학회, 서울, 42p.
- 황상구, 2001, 청송 남동부 구암산 일대의 화산지질과 칼데라. 2001년도 춘계공동학술발표회 논문집, 대한자원환경지질학회, 219~222.
- Spera, F.J., Yuen, D.A., Greer, J.C. and Sewell, G., 1986, Dynamics of magma withdrawal from stratified magma chambers. *Geology*, 14, 723-726.