

## 제주도 송악산 단성화산의 조성변화와 그 원인

황상구<sup>1\*</sup>, 원종관<sup>2</sup>, 이문원<sup>3</sup>, 윤성효<sup>4</sup>

<sup>1</sup>안동대 지구환경과학과,

<sup>2</sup>강원대 지질학과,

<sup>3</sup>강원대 지학교육과,

<sup>4</sup>부산대 지학교육과

### 1. 서 언

송악산 화산은 제주도 남서단 해안에 위치하는 소형화산으로서 화도의 환경변화로 인한 3가지 분출양식에 의하여 형성되었다. 즉 이 화산은 외곽에 응회환이, 이의 분화구 내에 분석구, 이 양자 사이에 용암연을 형성하고 그 위에 국부적으로 지표쇄설층으로 덮혀 있다(황상구 외, 1992). 이들은 복잡하지만 1윤회의 분출과정에 의해 형성된 단성화산이다(황상구, 2000).

제주도는 여러 암석학자들에 의해 전체적으로 혹은 지역적으로 마그마의 성인과 진화에 대하여 논의해 왔다(원종관, 1976; Lee, 1982; 박준범과 권성택, 1993; 이문원 외, 1994). 그러나 아직도 하나의 단성화산을 대상으로 한 마그마진화는 수행된 바 없다. 마그마진화는 단성화산에서 인식되기가 어렵지만 적어도 모체와의 파생관계라도 알아낼 필요성이 있다고 본다. 그래서 필자들은 송악산 화산을 대상으로 층서에 따라 암석기재와 조성변화를 해석하고 그 원인을 논하고자 한다.

### 2. 지질개요

제주도는 전체적으로 순상화산을 이루며 대부분 현무암질 용암, 소량의 화성쇄설암과 지표쇄설층으로 구성된다. 이들은 화학적으로 알칼리현무암에서 조면현무암, 조면안산암과 조면암에 이르는 알칼리 계열의 화산암으로 구성되는 섬이다. 이 섬은 약 360여 개의 기생화산을 가지며, 이들은 대부분 분석구들이고 나머지 약 10여 개가 응회구 혹은 응회환이고 이 중앙에 분석구를 가진다. 이들 응회구와 응회환은 제주도 서부에서 현무암대를 기준으로 선후기 2개 군으로 나누어지며 대부분 응회구가 선기 화산군에 속하고 나머지 송악산과 수월봉 응회환이 후기 화산군에 속한다(김동학 외, 1989; Hwang et al., 1991).

송악산 화산은 알려진 바와 같이 화도의 환경변화에 따라 여러 화산단위로 구성된다(김동학 외, 1989). 외곽에 응회환이 형성되어 있고 이의 분화구 내에 분석구가 형성되어 있으며, 이 양자 사이에 용암연으로 구성되고 그 위에 소규모의 소분석구 복합체가 조합

되어 있다. 그리고 이들 위에는 부정합으로 지표쇄설층이 덮고 있다.

### 3. 구성원과 암석기재

응회환은 여러 암상으로 구성되며, 각 암상은 화산회와 라필리와 소량의 블록으로 구성되고 각층마다 이들의 구성비율이 다양한 응회암과 라필리응회암을 형성한다. 이중에 화산회는 입도가 2mm 이하 크기로서 대부분 유리편, 결정편과 암편으로 구성된다. 유리편은 작은 기공을 가지고 대부분 깨진면과 기공벽에 의해 둘러싸임으로써 오목하고 불룩한 면을 갖는 블록상 모양을 이룬다. 이들은 흔히 작은 사장석 라쓰를 가지고 가끔 감람석과 휘석을 가지며, 유리질 부분이 대부분 담갈색의 황갈유리(palagonite)로 변질된 것이고 얼마가 불투명한 현무유리(tachylite)인 것도 있다. 결정립은 대부분 석영이고 가끔 정장석, 미사장석, 사장석, 감람석과 휘석이 소량 포함된다. 석영 중에 큰 것이 파동소광을 나타내는데 이들은 정장석, 미사장석과 함께 기반물질에서 유래된 외래결정편인 것으로 생각된다. 암편은 드물게 사암편과 규암편이 외래암편으로 포함되어 있다. 기질은 투명한 담갈색 유리가 풍부하지만, 티탄자철석 미정으로 인해서 불투명한 부분도 있다. 한편 외래결정과 외래암편은 제주도 순상화산 아래의 기반물질에서 유래된 것으로 생각된다. 왜냐하면 제주도 서부지역에서 해수면 아래 약 85m부터 사질과 이질의 미고결 퇴적층이 200m 이상 두껍게 화산암류의 기반물질로 존재하기 때문이다.

분석구는 암갈색의 라필리, 화산탄, 스패터 등의 스코리아와 블록으로 구성되며 대부분 산화도 증가에 따라 적갈색을 나타낸다. 이들은 미약한 층리를 보여주며, 스패터들은 서로 약간 유착되어 있다. 보다 큰 블록과 화산탄은 분석구의 표면과 기저를 무질서하게 둘러싼다.

용암연은 수매의 용암류로 구성되며, 각 용암류는 대체로 괴상이지만 상단부가 직경 1cm 내외의 기공들로 다공상 조직을 나타낸다. 이 용암은 휘석, 감람석과 사장석 등의 미반정을 소량 함유한다. 석기는 사장석, 감람석, 휘석을 함유한다. 사장석은 반자형 라쓰모양이며 흔히 양모배열상 석리를 나타낸다. 감람석은 사장석 사이에 간립상(intergranular) 혹은 간전상(intersertal)으로 존재한다. 휘석은 담홍갈색이고 약한 다색성을 나타내며 역시 간립상으로 존재한다. 간혹 이들은 가끔 깃털상 급냉성장(feathery quench-growth) 형태를 나타낸다. 그러므로 이 용암은 휘석, 감람석, 사장석 광물군으로 조성된 조면현무암이다.

### 4. 화학적 변화

송악산 화산에서  $\text{SiO}_2$ 의 조성은 47.0~66.8 wt%이며 현무암에서 안산암과 대사이트 조성에 이른다.  $\text{SiO}_2$ 의 조성이 감소할 때  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ 와  $\text{P}_2\text{O}_5$  등의 조성이 대체로 응회환에서 분석구와 용암연으로 점차 증가하는 선형 배열을 보인다. 여기서  $\text{Na}_2\text{O}$ 는  $\text{SiO}_2$ 의 조성이 감소할 때 감소하지 않고, 응회환에서 2.42-2.76 wt%로서 일정하고 분석구와 용암연에서 3.36-3.95 wt%로 일정하여 양자간의 함량차이를 나타낸다.  $\text{K}_2\text{O}$ 는  $\text{SiO}_2$ 의 조성이 감소할 때 약간 감소를 보이지만 다소 산재된다. 이는 아마도 응회환이

형성될 때 알칼리가 적고 실리카가 많은 이질 물질의 유입이 있었음을 반영한다. Nb-주 원소 하커도에서 Nb 조성이 증가할 때  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ 와  $\text{P}_2\text{O}_5$  등의 조성이 응회환에서 분석구와 용암연으로 연속적으로 증가한다. 그러나 Nb가 증가할 때  $\text{Na}_2\text{O}$ 와  $\text{K}_2\text{O}$ 는 별로 변화를 보이지 않는다. 이는 아마도 응회환 분출시에 외부로부터 알칼리가 적은 물질이 상당히 유입되었음을 시사한다. 이 두 변화도는 응회환에서의 외래 물질의 유입을 제외하면 송악산 화산 내에서 선형 변화를 보여준다. 이 선형 변화에서 단절없이 연속적인 것은 세 암상 모두가 현위치에 분출되기 전에 동일 마그마의 분화로부터 유래되는 양상임을 지시한다.

층서에 따른 화학조성의 변화는 완만한 파상곡선을 나타낸다. 주원소 변화에서  $\text{SiO}_2$ 는 대체로 응회환 하부에서 증가하다가 중부에서부터 분석구와 용암연으로 감소하는 파상곡선을 보여주고, 반면에  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ 와  $\text{MnO}$  등은 이와 반대되는 파상곡선을 보여준다. 그러나  $\text{Na}_2\text{O}$ 와  $\text{K}_2\text{O}$ 는 특히 응회환에서 불규칙적인 변화를 보인다. 이는 전체적으로 고철질 광물형성 원소들이 응회환 하부에서 중부까지 감소하다가 분석구와 용암연으로 갈수록 증가되는 양상 때문이다. 반면에 규장질 광물을 주로 지배하는 원소들은 이와 반대 양상을 보이며 혹은 불규칙적 변화를 보이거나 변화폭이 작아서 그 규칙성이 인지되지 않는다.

이 주원소 변화는 대체로 응회환에서 분석구와 용암연으로의 상부층으로 가면서 일어나며, 이들의 화학적 구배는 매우 미약하다. 현저한 주원소 변화는 고철질 광물의 형성으로 제거된 원소들이 상부층으로 가면서 증가되는 것이다. 그러나 단위층 내에서는 이들의 화학성이 뚜렷한 변화를 나타내지 않지만 응회환 내에서는 이의 하부에서 중부까지 고철질 광물형성 원소들이 감소하다가, 반대로 중부부터 상부까지 증가하는 변화를 보이거나 혹은 산만하게 흩어진 불규칙한 변화를 보여준다. 층간의 전체적인 변화는 분별결정작용에 의한 마그마분화에 의한 것이고, 응회환 내의 변화는 아마도 폭발 분출시의 외래물질의 유입량 차이에 의한 것으로 생각된다.

REE 패턴은 전체적으로 평행한 배치를 보이면서 응회환에서 분석구와 용암연으로 갈수록 높아진다. 즉 응회환에서의 REE 패턴이 분석구와 용암연에서의 것과 겹치면서 전체적으로 보다 아래에 놓인다. REE 패턴이 거의 평행한 것은 동원마그마에서 유래되었다는 것을 지시하고 분포 차이는 약한 조성구배를 의미한다. 그러나 응회환에서는 기타 암층보다 아래에 놓이는 것은 알칼리 계열 분출물에 총희토류원소의 함량이 보다 적은 다른 계열(Henderson, 1984)의 외래물질이 개입된 것으로 생각된다. 이는 위의 분별작용에 폭발시의 국부적으로 추가되는 지각물질의 혼합을 지시하는 것으로 판단할 수 있다.

## 5. 토의 및 결론

송악산 화산에서 각 암층의 조성은 이들이 분출될 때 마그마의 조성과의 관계를 결정지어준다. 그래서 이러한 관계를 설명하기 위해서는 앞에서 제기되었던 분별결정작용과 외래물질의 혼입이 매우 중요하다. 분별결정작용 동안에 일어나는 결정의 하방낙하는 이

암층들의 조성변화를 해석하는데 있어 매우 중요한 기구라 할 수 있다. 적지만 분출전 마그마에서 결정의 하방낙하와 용융물의 상방이동이 일어난 것으로 보인다. 결정의 낙하가 결정분별작용의 유일한 기구라면 각 암층은 이들이 분출될 때 마그마와 같은 조성을 가질 것이다. 그래서 분석구와 용암연의 조면현무암 조성은 이 화산이 분출되기 전에 마그마 조성을 대표하게 될 것이며, 연속적으로 하부의 응회환 조성은 이 암층이 분출될 때 분별결정작용과 외래물질 혼입 등으로 원래보다 수정된 조성을 나타낼 것이다. 그래서 선택적인 외래물질의 혼입이 일어났다면, 동시에 결정의 낙하가 있건 없던 간에 어느 암상도 분출시 마그마의 진짜 조성을 보존하지는 못할 것이다. 그러나 많은 화산분출물에 추가적인 혼입물은 응회환에서  $\text{SiO}_2$ 를 제외한 주원소 조성을 크게 변화시키지 못한 것 같다. 그래서 전체적으로 이들은 분출전에 조성이 조면안산암에서 조면현무암으로 누대된 마그마저장소에서 유래된 것으로 생각된다. 결론적으로 송악산 화산은 조성누대된 마그마저장소의 상단으로부터 출조되고 계속적으로 아래의 더 고철질 마그마를 분출하였다.

## 6. 참고문헌

- 김동학, 황재하, 황상구, 최성자, 1989, 제주도 화산활동 연구(II): 제주도 서부 지역의 화산층서와 분출사. 과학기술처 KR-88-(B)-4, 49p.
- 박준범, 권성택, 1993, 제주도 화산암의 지화학적 진화: 제주 북부지역의 화산층서에 따른 암석기재 및 암석화학적 특징. 지질학회지, 29, 39~60.
- 원종관, 1976, 제주도의 화산암류에 대한 암석화학적 연구. 지질학회지, 12, 207~226.
- 이문원, 원종관, 이동영, 박계현, 김문섭, 1994, 제주도 남사면 화산암류의 화산층서 및 암석학적 연구. 지질학회지, 30, 521~541.
- 황상구, 2000, 제주도 송악산 응회환 분석구 복합체의 화산형태. 지질학회지, 36, 473~486.
- 황상구, 황재하, 김동학, Howells, M.F., 1992, 제주도 송악산 응회환 분석구의 화산과정. 지질학회지, 28, 110~120.
- Henderson, P., 1984, Rare earth element geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 510p.
- Hwang, S.K., Hwang, J.H., Kim, D.H. and Howells, M.F., 1991, Tuff cones and tuff rings, and their stratigraphic relationship on the western side of Cheju Island, Korea. Korean Inst. Mining Geol. 24, 399~408.
- Lee, M.W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju Volcanic Island, Korea. Sci. Rpt. Tohoku Univ., 3, 15, 177~256.