

남극 킹조지섬 바톤-위버 반도의 반정을 함유한 화산암과 큐물레이트 조직의 심성암으로부터 추정되는 본원 마그마

여정필¹, 이종익², 허순도², 최변각¹

¹ 서울대학교 지구과학교육과 (jpyeo@hanmir.com)

² 한국해양연구원 극지연구본부

1. 서론

남극반도와 약 200km 떨어져 평행하게 배열하는 남쉐틀랜드 군도는 중생대 쥐라기부터 신생대 제4기까지 피닉스판의 섭입과 브랜스필드 해협 확장으로 수반된 화성활동에 의해 형성된 호상열도로 알려져 있다. 바톤-위버 반도는 남쉐틀랜드 군도 중 가장 큰 섬인 킹조지섬의 남서부에 있는 맥스웰 만의 동쪽 해안에 위치한다. 두 반도는 마리아 소만을 사이에 두고 약 1.4km 떨어져 있으며 북쪽에는 위버 반도, 남쪽에는 바톤 반도가 자리 잡고 있다.

바톤-위버 반도의 최하부층은 화산쇄설암으로 이루어진 세종층이다. 세종층의 퇴적시기는 세종층에 협재되는 적색의 실트스톤 층 내에 발견되는 식물화석으로부터 신생대 제3기의 팔레오세 후기 내지 에오세로 알려져 있다.

연구지역의 화산암과 심성암은 킹조지섬 북서쪽의 피닉스판이 섭입하면서 발생시킨 마그마로부터 유래된 것으로 알려져 있다. 화산암은 세종층을 암맥상으로 관입하거나 용암류의 형태로 피복하고 있으며 현무암에서 안산암에 해당하는 조성범위를 보인다. 심성암은 반려암, 섬록암, 석영몬조섬록암, 화강섬록암으로 산출되며 세종층과 화산암을 관입하고 있다.

이 연구에서는 바톤-위버 반도의 심성암과 화산암의 지구화학적 특징들로부터 본원 마그마의 조성 및 분화 과정에 대해 논의하고자 한다.

2. 암석학적 특징

화산암은 위버 반도의 경우 세종층을 암맥의 형태로 관입하고 있으며, 바톤 반도의 경우는 세종층을 용암류의 형태로 피복하고 있다. 화산암은 대부분 반정들을 함유하고 있는데, 사장석 반정만 가지는 것과 사장석과 휘석 반정을 동시에 포함하는 것이 있다. 화산암은 기질에 대한 반정의 함량이 1~40% 정도로 매우 다양하다.

심성암은 위버 반도에서는 반려암-섬록암-석영몬조섬록암으로, 바톤 반도에서는 주로 화강섬록암으로 산출된다. 위버 반도의 반려암은 자형 내지 반자형의 사장석 반정들 사이에 휘석이 타형으로 성장하는 큐물레이트 조직을 보인다. 섬록암, 석영몬조섬록암, 화강섬록암은 사장석, 휘석, 각섬석, 흑운모, 알칼리 장석, 석영을 주구성광물로 포함한다.

3. 지구화학적 특징

화산암은 희토류 및 미량원소의 지구화학적 특징으로부터 주로 염기성암에 해당하는 V1(volcanic unit 1, SiO₂ = 47~56 wt%)과 중성암에 해당하는 V2(volcanic unit 2, SiO₂ = 54~60 wt%)의 두 종류로 크게 분류될 수 있다. V1과 V2는 Eu의 거동에서 뚜렷한 차이를 보인다. V1은 Eu이 양의 이상값을 V2는 음의 이상값을 보인다. 동일한 MgO, SiO₂ 함량을 지니는 V1, V2 두 암석의 Eu 거동을 비교해 볼 때, V2는 사장석을 일정정도 정출하고 남은 잔류 마그마 액 성분으로부터 기원했을 것으로 생각된다.

V1은 위버 반도에서는 세종층을 암맥상으로 관입하고, 바톤 반도 서북부 지역에서는 세종

층을 피복한 용암류의 형태로 산출된다. V2는 바톤 반도 대부분 지역에서 세중층을 피복하는 용암류의 형태로 나타난다. 위버 반도에 V2가 분포하지 않고 V1이 암맥상으로만 나타난다는 사실은 위버 반도가 바톤 반도에 비해 상대적으로 용기했을 가능성을 보여주는 것으로 생각된다.

연구지역의 화산암과 심성암은 염기성 내지 중성의 비알칼리암에 해당한다. 이 시료들 중 SiO₂ 함량이 57% 이하의 시료들은 Low-K부터 Medium-K 마그마 계열까지 연속적으로 분포한다. Miyashiro(1974)의 다이어그램을 이용하면 V1은 대부분 쏘리아이트 영역에 해당하며, V2는 칼크-알칼리 및 쏘리아이트에 걸쳐 전이적인 양상을 보이고, 심성암은 칼크-알칼리 계열의 특징을 뚜렷이 보이고 있다.

Low-K 내지 Medium-K 계열에 속하는 섭입대의 본원 마그마는 온도가 내려감에 따라, 일반적으로 감람석-사장석-휘석-자철석의 순서로 정출이 일어난다고 알려져 있다. 연구지역의 화산암은 대부분 Low-K 내지 Medium-K 계열에 속하므로, 이러한 정출순서는 큐물레이트 조직의 반려암에서 사장석이 먼저 정출해서 집적된 후에 잔류 액으로부터 휘석이 결정화되는 양상과 잘 부합된다. 만약 정출된 사장석과 휘석 반정이 챔버 내에서 서로 분리되지 않고 임의로 섞여 있다고 가정한다면, 연구지역에서 사장석 반정만 포함하는 화산암은 휘석이 정출되기 이전의 마그마로부터, 사장석과 휘석을 동시에 반정으로 가지는 화산암은 휘석이 정출된 이후의 마그마로부터 비롯되었을 것이다. 그러므로 동일한 본원 마그마의 챔버를 가정한다면, 휘석에 비해 사장석 반정의 함량이 높은 화산암일수록 마그마의 온도가 더 높았을 것으로 추정된다.

바톤-위버 반도의 화산암과 심성암의 Mg#는 모두 60 이하이고, FeO*/MgO 비는 1.2 이상이다. 이는 연구지역 화산암이 모두 Fe가 Mg에 비해 농집된 마그마로부터 분화되었음을 보여주는 것이다. 일반적으로 섭입대의 본원 마그마는 Mg#가 70 이상, FeO*/MgO 비가 1 보다 작은 것으로 알려져 있으므로, 바톤-위버 반도의 화산암들은 본원 마그마 챔버에서 Mg 성분이 풍부한 감람석을 큐물레이트로 정출시킨 후에 잔류된 마그마 액으로부터 기원한 것으로 판단된다.

화산암의 경우 기질에 대한 반정의 함량이 매우 다양하며, 심성암은 큐물레이트의 양상을 보이고 있다. 화산암의 반정들은 마그마 챔버에서 먼저 정출된 광물에 해당하므로 심성암의 큐물레이트로 집적된 광물과 비슷한 역할을 한다. 즉 마그마 챔버에서 초기에 정출한 반정을 많이 포함한 화산암 시료는 큐물레이트의 성격을 지니게 된다고 볼 수 있다. 반정을 포함한 화산암과 큐물레이트 조직을 보이는 심성암은 둘 다 정출된 광물과 잔류된 마그마 액의 혼합물인 것이다.

연구지역의 화산암과 심성암에서 Eu를 제외한 대부분의 희토류원소는 함께 거동하고 있다. 이는 연구지역의 모든 화산암 시료들이 유사한 조성의 본원 마그마로부터 유래했음을 보여주는 것으로 생각된다.

4. 본원 마그마에 대한 고찰

하나의 마그마 챔버에서 분리된 큐물레이트와 잔류 마그마 액의 조성을 각각의 함량 비만큼 혼합한다면 본래 마그마의 조성파 일치할 것이다.

바톤-위버 반도의 경우, 큐물레이트 조직을 보이는 심성암 시료들의 조성이 일정하지 않고 잔류 마그마도 지속적으로 분화해 다양한 조성을 지니고 있다. 위버 반도 심성암 챔버의 초기 마그마 조성을 유추하기 위해 반려암 시료의 평균 조성을 큐물레이트 조성으로, 섬록암과 석영몬조섬록암을 합한 평균조성을 잔류 마그마 액의 조성으로 가정하였다. 편의상 위

비 반도 심성암 시료 중 SiO_2 가 52% 이하인 것을 반려암(GB)으로, 53%~58%인 것을 섬록암-석영문조섬록암(DQMD)으로 정하였다.

화산암은 사장석과 휘석을 반정으로 포함하는데, 시료에 따라 사장석만 함유하는 것이 있고, 사장석과 휘석을 동시에 포함하는 것도 있으며, 반정이 거의 없이 괴상으로 산출되는 것도 있다. 반정은 마그마 챔버에서 먼저 정출된 광물이므로, 반정을 잔류된 마그마 액과 각각의 함량비만큼 혼합시키면 초기 마그마 조성이 될 것이다. 반정을 함유한 화산암은 심성암에서 큐물레이트 광물과 잔류 마그마를 여러 가지 함량비로 섞은 것과도 유사하다. 화산암과 심성암은 희토류원소의 거동으로부터 유사한 마그마에서 비롯된 것으로 판단되기 때문에 이 둘을 서로 비교해보는 것은 본원 마그마의 특성을 파악하는데 있어 중요할 것으로 생각된다.

화산암 중 V1은 현무암 및 현무암질 안산암에 해당하며, V2 보다 더 매끈한 조성을 지닌다. 주성분원소, 희토류 및 미량 원소 전체에 있어 V1의 평균조성은 위버 반도 심성암에서 GB 35%에 DQMD 65%를 혼합한 것($\text{GB}_{35}\text{DQMD}_{65}$)과 거의 일치하고 있다. V1과 위버반도 심성암은 Eu이 양의 이상값을 보이는 반면 V2는 Eu이 음의 이상값을 나타낸다. 이러한 특징으로부터 V1은 $\text{GB}_{35}\text{DQMD}_{65}$ 조성과 유사한 마그마의 분화 산물이라고 가정할 수 있다. V2는 Eu이 음의 이상값을 보이는 것을 제외하면 대부분 희토류 원소의 거동이 V1 및 위버 반도 심성암과 유사하다. 이는 V2가 V1에 비해 사장석을 일정 정도 큐물레이트로 정출시킨 후 잔류된 마그마 액으로부터 기원했음을 암시하는 것으로 생각된다.

지구화학적 증거들은 바톤-위버 반도의 화산암과 심성암이 모두 유사한 본원 마그마 조성으로부터 비롯되었다는 것을 보여주고 있다. 본원 마그마의 조성을 추정해보기 위해 Onuma et al.(1983)이 제시한 Sr-Ba systematics를 이용했다. 연구지역 화산암과 심성암에 대해 Sr/Ca, Ba/Ca 비를 Sr-Ba 다이어그램에 도시하면 대략 Sr/Ca=0.009, Ba/Ca=0.003에서 부분용융선(partial melting line)과 만나고 있다. 부분용융선은 맨틀의 감람암이 부분용융되는 정도에 따라 변해가는 본원 마그마의 조성을 추정한 선이다. 부분용융선과의 교점의 조성은 $\text{GB}_{35}\text{DQMD}_{65}$ 의 조성과 거의 일치한다. $\text{GB}_{35}\text{DQMD}_{65}$ 의 경우 Mg#가 50, FeO^*/MgO 비는 1.7로 섭입대에서 일반적으로 알려져 있는 본원 마그마 조성(Mg# \geq 70, $\text{FeO}^*/\text{MgO} < 1$)과는 상당한 차이를 보인다. Mg#가 낮은 이유는 Mg 성분이 Fe 보다 풍부한 감람석을 큐물레이트로 정출시켰기 때문으로 생각된다. 그렇다면 바톤-위버 반도 화산암과 심성암의 본원 마그마는 마그마 챔버에 집적된 감람석 큐물레이트 암석과 $\text{GB}_{35}\text{DQMD}_{65}$ 조성의 잔류 마그마 액의 혼합물이 될 것이다. 본원 마그마의 조성을 좀더 정확하게 알기 위해서는 감람석 큐물레이트 암석의 조성을 알아야 하지만, 바톤-위버 반도의 화산암에서는 감람석 큐물레이트 포획암이나 감람석 반정이 발견된 바가 없기 때문에 앞으로 이에 대한 좀더 면밀한 조사가 이루어질 필요가 있을 것으로 생각된다.

5. 참고문헌

- Miyashiro, A., 1974, Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*, 274, 321-355.
- Onuma, N., Hirano, M. and Isshiki, N., 1983, Genesis of basalt magmas and their derivatives under the Izu Islands, Japan, inferred from Sr/Ca-Ba/Ca Systematics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 18, 511-529.