

## 파푸아 뉴기니 마누스 분지 내 남동 균열대 화산암의 암석학적 연구

박승현<sup>1\*</sup>, 이상목<sup>1</sup>, 이경용<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 서울대학교 지구환경과학부 (shpark21@snu.ac.kr)

<sup>2</sup> 한국해양연구원 해저자원연구본부

### 1. 서론

파푸아 뉴기니 마누스 분지(Manus Basin) 동쪽에 분포하는 남동 균열대(South East Rift, SER)는 용암(lava)의 분출과 열수 작용이 활발한 지역이다(Binns and Scott, 1993). 특히 SER은 열수작용의 메커니즘 해명, 열수 생태계의 규명 등을 위한 다양한 탐구의 대상이 되어왔다 (eg. Yang and Scott, 1996). 이 지역의 지구조적 환경은 호상열도와 다르나 이 지역에서 분출하는 화산암의 지화학적 특성은 호상열도에서 분출하는 암석과 유사한 것으로 알려져 있다(Binns and Scott, 1993; Sinton *et al.*, 2003).

마누스 분지는 올리고세 시기에 태평양 판 위의 온통 자바 해저대지(Ontong java plateau)가 섭입 지역의 상부지판인 호주 인도 판에 충돌하면서 태평양판의 섭입이 중단되고, 남쪽에서 새로운 섭입대가 성립되면서 형성된, 독특한 지구조 진화 역사(tectonic history)를 갖고 있다(Marlow *et al.*, 1991). 현재 마누스 분지 북쪽에는 태평양판의 섭입이 중단된 마누스 해구가 분포하고 있으며, 남쪽에서는 솔로몬 지판이 뉴브리튼 해구로 섭입하고 있다. 현재 뉴브리튼 해구와 마누스 해구 사이의 거리는 위치에 따라 다르지만, SER이 놓여진 곳을 기준으로 했을 경우 약 450 Km 정도로서 과거에는 이보다 더 가까운 거리에서 마주보고 있었을 것으로 추측되고 있다(Martinez and Taylor, 1995). 즉 마누스 분지는 2개의 섭입 지판 사이에 놓인 독특한 환경이다.

마누스 분지와 그 주변에는 SER 외에도 다양한 화산 활동이 분포한다. 솔로몬 지판의 섭입작용에 의한 것으로 보이는 뉴브리튼 호상열도(New Britain Island Arc)에서는 화산활동이 활발하다(eg. Woodhead *et al.* 1998). 그리고 마누스 분지의 중앙에는 썩기 형태로 확장하는 중앙 확장대(Mid Spreading Center, MSC)가 분포하며 MSC 서쪽에는 확장 변환대(Extensional Transform Zone, ETZ) 남쪽에는 남 균열대 (South Rift, SR) 그리고 남동쪽에는 연구지역인 SER이 분포하고 있는데, SER은 디자울 변환단층(Djaul transform fault)에 의해 MSC와 분리되어 있다(Martinez and Taylor, 1995). 기존의 연구(Sinton *et al.*, 2003)에 의하면, SER은 MSC와 ETZ 등 다른 지역과는 미량원소와 방사선 동위원소 등 지화학적 특성이 다른 것으로 알려져 있다. Sinton 등(2003)은 SER의 경우 태평양 지판의 섭입 당시 만들어졌던 호상열도 지각에 대한 동화작용 (Assimilation and Crystal Fractionation, AFC)이 활발하게 일어났기 때문에 이러한 차이가 나타난 것으로 해석하고 있다. 그러나 이러한 해석은 마누스 분지 남북에 분포하는 두 지판 중, 섭입을 멈춘 태평양 지판의 영향은 배제하고 솔로몬 지판만의

영향을 고려했기 때문에 얻어진 것으로 문제점을 갖고 있는 것으로 보인다. 따라서 이번 발표에서는 SER 화산암에 대한 주원소, 미량원소, 방사선 동위원소 대한 새로운 분석 자료를 제시하고, SER 화산암에 영향을 미친 호상열도 성분의 기원을 밝히고 더 나아가 마누스 분지 내 맨틀 순환(mantle convection)에 대해 논의 하고자 한다.

## 2. 시료채취 및 분석 방법

SER에 대한 탐사는 1999년 열수광상 탐사의 일환으로 한국해양연구원 (KORDI)에서 R/V Onnuri 호를 통해 수행되었다. 시료 채취는 균열대 내 동, 중, 서 대부분의 지역에서 드래지를 이용, 총 10회 실시했다. 대부분의 시료는 유리질이었으며 동쪽에서 채취된 시료에서는 매우 소량의 사장석 반정도 관찰되었다. 신선한 시료를 엄선하여 실험실에서 분말화 한 후 화학분석을 실시하였다. 주원소는 XRF(Phillips Co)를 이용해 분석했다. V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Cd, Ba 등의 원소는 ICP-AES(Optima 3300DV, Perkin Elmer Co.)로, Pb, Cs, Nb, U, Th, Hf와 REEs(Rare Earth Elements)는 ICP-MS(PQII, VG element Co.)를 이용하여 분석했다. Sr-Nd-Pb 방사선 동위원소는 중국 지질조사소에 의뢰해 TIMS로 분석했다.

## 3. SER 화산암의 기본적인 특성

SER 화산암들은 현무암질 안산암(Basaltic Andesite)에서 석영 안산암(Dacite)까지의 변화를 나타내며, 분별결정작용이 상당히 진행된 것으로 판단된다. 감람석(Olivine), 사장석(Plagioclase), 휘석(Pyroxene)은 물론 자철석(Magnetite), 인회석(Apatite), 각섬석(Hornblende)의 정출도 일어난 것으로 보인다. 미량원소는 N-MORB로 표준화했을 때, Nb 이상치 등 고전하 양이온(High field strength elements, HFSE)에 비해 친석원소(Large ion lithophile elements, LILE)가 부화되어 있는 호상열도 암석의 전형적인 특성을 나타낸다. SER 화산암의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 은 N-MORB에 비해 높은 반면  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 의 N-MORB에 비해 약간 낮은 편이다. Pb 동위원소들은 N-MORB와 유사하거나 약간 높은 값을 나타낸다. DePaolo (1981) 등에 따르면 AFC가 활발한 경우, 분별결정이 진행되면서  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  비가 높아져야 되나 SER 화산암에서는 이러한 현상이 관찰되지 않으며 따라서 Sinton 등(2003)의 해석과는 달리 AFC는 두드러지지 않은 것으로 보인다. 즉 SER 암석의 동위원소 비를 통해 SER 화산암의 기원 맨틀 특성을 파악할 수 있을 것으로 보인다.

## 4. 기원 맨틀의 특성과 호상열도 성분의 기원

기존의 연구에 따르면 MSC와 ETZ 등 마누스 분지의 다른 지역은 N-MORB 기원 맨틀에 비해 상대적으로 고전하 원소 (High Field Strength Elements, HFSE)가 결핍된 특성을 나타낸다. Sinton 등(2003)은 이러한 특성이 일반적인 N-MORB 기원 맨틀의 용융에 의해 설명될 수 없으며 이 지역 맨틀에서 사전 결핍(prior depletion)이 일어났기 때문으로 해석했다. 그러나 SER 화산암의 경우는 HFSE 조성이 N-MORB와 유사한 것으로 보이며 따라서 사전 결핍 현상이 관찰되지 않는다.

한편 맨틀은 동위원소 조성에 따라 태평양 형과 인도양 형으로 나누어질 수 있음이 알려져 있다(eg. Hart, 1984). 이러한 맨틀 타입은  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  도표에 의해

가장 잘 구분되는데, 이 도표에 의하면 인도양 형의 특성을 갖는 MSC, 뉴브리튼 호상열도와는 달리 SER 화산암은 태평양 형 맨틀의 특성을 갖는다. 일반적으로 호상열도 환경에서 Pb 동위원소는 섭입된 퇴적물과, 섭입된 지판 위의 변질된 해양지각의 탈수화 작용(dehydration)에 의해 배경 맨틀에 공급된 유체(fluid)와의 혼합으로 설명된다(Miller *et al.*, 1993). 즉 호상열도의 Pb 동위원소 조성은 배경 맨틀 보다는 호상열도 성분의 특성을 반영한다. 솔로몬 지판에서 호상열도 성분을 주로 공급받은 뉴브리튼 호상열도가 인도양 형의 동위원소 특성을 나타내는 것을 볼 때, SER 화산암이 태평양 타입의 특성을 갖고 있다는 것은 SER 화산암의 배경 맨틀에 공급된 호상열도 성분이 태평양 지판에서 기원했음을 의미한다.

$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  도표에서 SER 화산암들은 해양지각이 일반적으로 나타내는 배열에 비해 상대적으로 높은 기울기(steepest slope)를 나타내는데 이는 퇴적물 성분이 SER 화산암에 많은 영향을 미쳤다는 것을 의미한다. 그리고 SER 화산암의 Sr-Nd 방사선 동위원소의 변이는 인도양 형 맨틀 특성을 갖는 MSC 화산암과 퇴적물 성분의 혼합에 의해 가장 잘 설명되는 것으로 보인다. SER 화산암이 MSC에 비해 상대적으로  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 의 비가 낮은 것은 퇴적물 성분이 용융물의 형태로 SER 화산암 기원 맨틀에 공급되었음을 암시한다. 한편 SER 화산암과는 달리 뉴브리튼 호상열도의 Sr-Nd 동위원소 조성은 MSC와 매우 유사한 것으로 보이고 (Woodhead *et al.* 1998), 따라서 퇴적물 성분의 영향이 매우 작았음을 의미한다. 뉴브리튼보다 SER이 솔로몬 지판에서 멀리 떨어져 있음을 고려할 때, SER에서 확인되는 퇴적물 성분 역시 태평양판에서 기원한 것으로 해석된다.

SER 화산암의 동위원소 조성은 배경 맨틀과 퇴적물의 용융물의 단순한 혼합으로는 잘 설명되지 않는 것으로 보인다. 이러한 현상을 설명하기 위해서는 Nd/Pb 비는 낮으면서  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 퇴적물과 유사한 단종이 요청되는 데, 이에 가장 가까운 것은 퇴적물에서 기원한 유체이다. 이상의 결과들로 볼 때 SER 화산암의 기원 맨틀에 분포하는 퇴적물 성분은 용융물과 유체 모두의 형태로 전달된 것으로 보인다.

## 5. 결론

SER 화산암에 공급된 호상열도 성분은 남쪽에서 섭입하고 있는 솔로몬 지판 보다는 섭입이 중단되어 있는 북쪽의 태평양 지판에서 기원한 것으로 보인다. 그리고 SER 화산암에서 기원 맨틀의 사전 용융 현상이 관찰되지 않는다는 것은 SER 하부에 분포하는 맨틀이 인근의 활발한 순환에서 벗어나 있었다는 것을 암시한다. 변환단층이 맨틀 순환의 경계가 될 수 있다는 기존의 연구결과(Langmuir *et al.*, 1984)를 참고할 때 디자울 변환단층을 경계로 맨틀 순환이 달라질 가능성도 있는 것으로 추정된다.

## 6. 참고문헌

- Binns, R.A. and S.D. Scott, (1993) Actively Forming Polymetallic Sulfide Deposits Associated with Felsic Volcanic Rocks in the Eastern Manus Back-Arc Basin, Papua New Guinea. *Eco. Geol.* 88: 2226-2236.
- DePaolo, D. J. (1981) Trace element and isotopic effects of combined wall rock

- assimilation and fractional crystallization, *Earth Planet. Sci. Let.*, 53, 189-202.
- Hart, S.R., (1984) A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle, *Nature*, 309, 753-757,
- Langmuir, C. and J. Bender, (1984) Geochemical variations around transform faults: observations and implications, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 69, 107-127.
- Martinez, F. and B. Taylor, (1995) Backarc Spreading, Rifting, and Microplate Rotation, Between Transform Faults in the Manus Basin. *Mar. Geophy. Res.* 18: 203-224.
- Marlow, M.S., N.F. Exxon and S.V. Dadisman, (1991) Hydrocarbon Potential and Gold Mineralization in the New Ireland Basin, Papua New Guinea. In *Geology and Geophysics of continental margins* (ed. by Watkins, J.S *et al*) American Association of Petroleum Geologists Memoir. No. 53, 119-137.
- Miller, D. M., S. L. Goldstein and C. H. Langmuir (1993) Ce/Pb and Pb isotope ratios in arc magmas and the enrichment of Pb in the continents, *Nature*, 368, 514-519.
- Sinton, J. M., L.L Ford, B. Chappell, and M. T. McCulloch (2003) Magma genesis and mantle heterogeneity in the Manus back-arc basin, Papua New Guinea, *J. Petrol.*, 44, 159-195.
- Yang K. and S.D. Scott (1996) Possible contribution of a metal-rich magmatic fluid to a sea-floor hydrothermal system. *Nature*, v. 383, no. 6659, p. 420-423.
- Woodhead, J.D., S.M. Eggins and R.W. Johnson (1998) Magma genesis in the New Britain Island arc: further insights into melting and mass transfer processes. *J. Petrol.*, 39, 1641-1668.