

Article

남극 드레이크 해협 피닉스 해령 P3구역 축부 해저현무암: K-Ar 연대측정과 지구화학

이종익*¹ · 허순도¹ · 이미정¹ · 김규중¹ · Keisuke Nagao²

¹한국해양연구원 극지연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

²일본 동경대학 지각화학연구소
Hongo, Bunkyo-gu, Tokyo 113-0033, Japan

Axial Seamount Basalts in P3 Segment of Phoenix Ridge, Drake Passage, Antarctica: K-Ar Age Determination and Geochemistry

Jong Ik Lee*¹, Soon Do Hur¹, Mi Jung Lee¹, Kyu Jung Kim¹, and Keisuke Nagao²

¹Polar Sciences Laboratory, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Laboratory for Earthquake Chemistry, University of Tokyo
Hongo, Bunkyo-gu, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract : The axial seamount basalts in the P3 segment of the Phoenix Ridge were obtained from dredging and the K-Ar age determination and whole-rock geochemical analyses have been done for understanding their origin. The K-Ar ages for PR2 basalts sampled from 1,000 m below sea level are 2.6 - 2.2 Ma and those for PR3 basalts from 800 m are 1.6- 1.5 Ma. The younger ages towards the crest of the seamount indicate that this submarine volcano has been grown by central eruptions. The youngest age of about 1.5 Ma for PR3 basalts corresponds to the final eruption period of this volcano. The seamount basalts contain small amounts of normative quartz and olivine. They have transitional geochemical nature between alkaline- and subalkaline-series basalts. Trace and rare earth elements compositions of the seamount basalts are very similar to those of ocean island basalts (OIB), and indicate that this seamount has been formed by a hotspot activity, not in association with a seafloor spreading. The melting degree from the source has decreased with time, and finally the volcanic activity has stopped when the basaltic magma reached mild alkaline composition.

Key words : 축부해저화산(axial seamount), K-Ar연대(K-Ar age), 열점형 화산활동(hotspot-type volcanism), 피닉스 해령(Phoenix Ridge).

1. 서 론

남미대륙과 남극반도 사이의 드레이크 해협에 존재하는 피닉스판은 중생대 후기 이후 남극-피닉스 해령(이하 피닉스

스 해령)이 남동 방향으로 이동함에 따라 점차 그 크기가 작아져 현재는 소규모 해양판의 형태로 남아 있다(Fig. 1). 피닉스 해령은 계속해서 남극반도의 해구와 충돌하면서 소멸을 거듭했고 현재는 확장작용도 정지한 것으로 보인다(Barker 1982). 현재의 피닉스 해령은 남서쪽의 히어로 파쇄대와 북동부의 웨클톤 파쇄대 사이에서 세 개의 분할

*Corresponding author. E-mail : jilee@kordi.re.kr

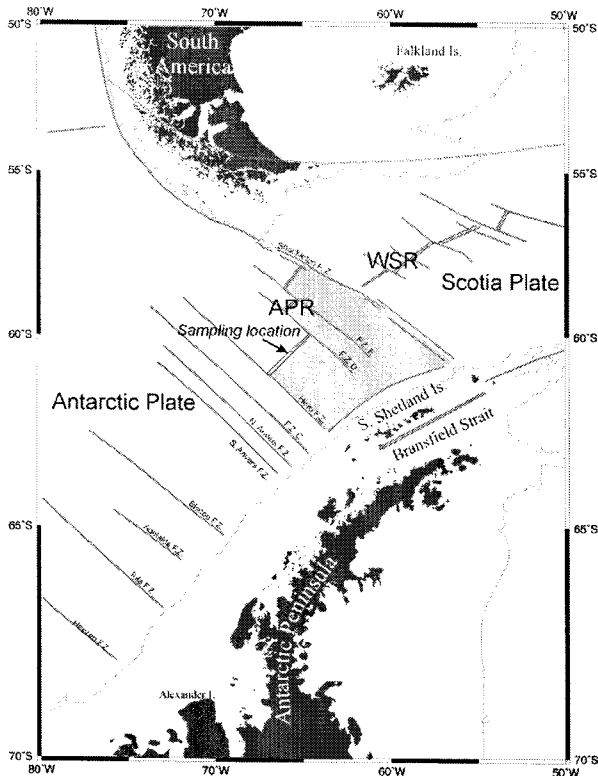


Fig. 1. Tectonic map around the Drake Passage. The gray area is the Phoenix Plate and the double lines are the ridge axes which are inactive or active. Solid lines represent the fracture zones. APR, Antarctic Phoenix Ridge; WSR, West Scotia Ridge.

된 구역으로 남아있는데 북동쪽 구역부터 차례로 P1, P2, P3로 불린다(Livermore *et al.* 2000).

피닉스 해령은 50 Ma부터 알렉산더 섬 남부지역에 충돌하기 시작하였으며, 4 Ma에는 히어로 파쇄대 서편에 충돌한 것으로 해석된다(Barker 1982). 알렉산더 섬에서부터 해령이 해구와 충돌하면서 각각의 충돌 지역에서는 대양저 확장과 해양지각의 섭입이 함께 범추었다. 충돌 후 해구 지형은 없어졌으며(Tucholke and Houtz 1976), 그 주변부는 비활동성 연변부(passive margin)로 변하였다. 이와 같은 해령과 해구의 충돌은 남아메리카 대륙에도 나타나는데, 남극-나즈카 해령(Antarctic-Nazca Ridge)은 칠레 해구와 충돌하면서 북쪽으로 이동하여 현재에는 46°S에 삼중점이 형성되어 있다. 그러나 이 지역에서는 섭입속도가 이전보다 상당히 느려지긴 했지만 섭입활동은 계속되고 있다(Forsthe and Nelson 1985; Forsthe *et al.* 1986; Cande and Leslie 1986; Cande *et al.* 1987). 칠레 해구 지역과 남극반도 지역의 차이점은 남극판의 경우 해구가 소

멸된 지역과 잔여 해령이 동시에 공존한다는 것이다. 이것은 충돌 이전부터 이들 사이에 상대적인 움직임이 전혀 없었다는 것을 의미한다(Larter and Barker 1991). 즉, 약 13 Ma에 남극-나즈카-피닉스 삼중점(ANT-NAZ-PHO triple junction)이 칠레 해구에 다다르게 되고 남극판의 일부가 섭입을 시작하지만, 이 지역의 판의 이동에 영향을 주지는 않았다(Cande and Leslie 1986)는 것을 의미한다. 히어로 파쇄대의 남서쪽에 위치하던 해령들은 계속해서 해구와 충돌하게 되고, 이후에 히어로 파쇄대의 북동쪽에 있는 세 개의 피닉스 해령은 해구에 다다르기 전에 확장을 멈추었다.

Barker(1982)는 약 4 Ma에 정상적인 해저 확장이 멈추었다고 하였으나 Larter and Barker(1991)는 이후에도 매우 느린 속도의 확장이 있었을 것으로 생각하고 그 이유로 해구 자체의 무게로 인한 섭입이 계속되었다고 추측하였다. 아마도 해구의 밀도가 증가하여 섭입하고 이에 의한 rollback 현상에 의해 브랜스필드 해협(Bransfield Strait)의 후배호 분지가 형성되기 시작한 것으로 보인다(Barker 1982; Maldonado *et al.* 1994).

피닉스 해령의 활동이 멈춘 원인은 히어로 파쇄대 남서쪽에서 일어난 해령과 해구의 충돌로 인하여 rollback에 의한 해양판 섭입의 직접적인 힘이 되었던 해양판의 크기가 감소함으로 인한 것으로 해석된다(Barker and Austin 1998; Livermore *et al.* 2000). 7.8 Ma에는 서스코시아 해령이 활동을 멈추고 피닉스 해령의 확장 속도가 급격히 감소하다가 3.3 Ma(C2A)에 피닉스 해령은 활동을 멈춘다. 이러한 확장 속도의 변화는 급격한 화산 활동을 유발시키고, 그 결과 양쪽에 경사가 급한 해령을 형성한 것으로 추측된다(Livermore *et al.* 2000). 피닉스판의 잔여 해령들에 대한 각각의 이동속도는 자력이상에서 나타나는 역전현상을 이용하여 구한다. 여러 학자들에 의해 구해진 평균속도는 21-29 mm/yr 정도로 이 속도는 저속도 또는 중간속도 확장 해령에 해당한다. 특히 4-5 Ma에 확장속도의 급격한 감소가 관찰되었는데, 이는 피닉스 해령과 해구의 충돌이 남극반도를 따라 동쪽으로 이동하여 히어로 파쇄대 서편에 도달한 시기와 거의 일치한다. 따라서 해령과 해구의 충돌 메커니즘이 피닉스 해령의 소멸과 직접적인 관련이 있는 것으로 해석된다(Larter and Barker 1991; Livermore *et al.* 2000).

1999-2000년도 한국해양연구원 종합조사선 온누리호를 이용한 남극 하계조사 기간 동안 피닉스 해령과 히어로 파쇄대 교차지점에서 새로운 정밀 해저지형과 중력 자료를 획득하였다(Fig. 2). 해저지형 관측 결과 피닉스해령의 가장 남서쪽 구역(P3 segment) 중앙에 거대한 해저화산이 발달함이 밝혀졌는데, 이 해저화산의 높이는 수심 3500 m를 기준으로 할 때 대략 2600 m 정도이다. 해저화산의 단

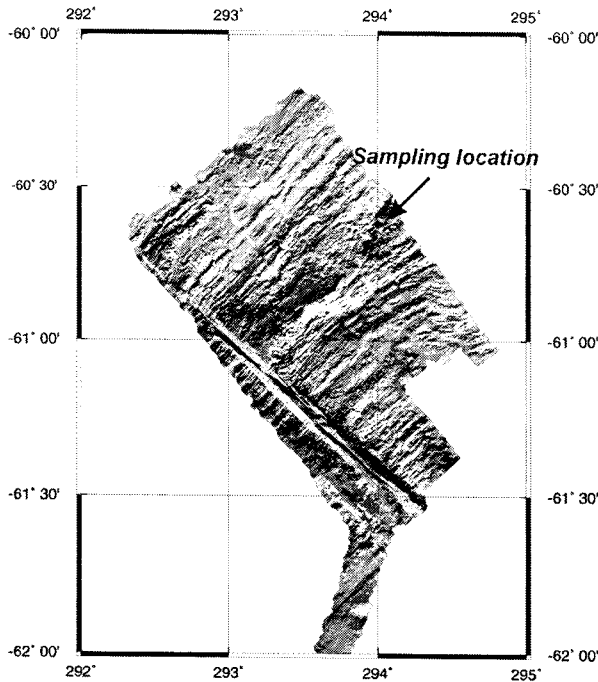


Fig. 2. Bathymetry of P3 segment of the Phoenix Ridge (named by Livermore *et al.* 2000) obtained using Simrad Seabeam 2000.

축은 약 20 km에 달하고 장축은 30 km 이상이 될 것으로 추정된다. 이 해저화산 시료 채취를 위해 2000-2001 하계 조사 기간 중 조사선 유즈모호에서 드레지를 수행하여 수심 1000 m와 800 m 두 지점에서 신선한 현무암 시료를 획득하였다.

이 연구에서는 채취한 현무암 시료의 K-Ar 연대측정과 전암화학분석을 통해 해저화산체를 형성한 현무암질 모암의 성인을 규명하고자 하였다. 또 피닉스판의 진화 및 관련된 지체구조 상의 특징에 대해 토의하였다.

2. 시료채취 및 연구방법

해저 화산암 시료 채취를 위한 드레지는 조사선 유즈모호에서 3차례 실시되어 2차와 3차 드레지에서 다량의 신선한 현무암 시료가 얻어졌다(Fig. 2). 2차 드레지의 심도는 수심 약 1000 m 정도로 이 해저화산의 중상부에 해당하고, 3차 드레지의 심도는 약 800 m 정도로 최정상부에 해당한다. 채취된 현무암 시료들은 기공질 암편이 과상 압편보다 우세하다.

현미경 관찰에 의하면 기공질 현무암편은 반결정질 석기와 감람석과 사장석의 반정(또는 미반정)으로 구성된다. 원형 또는 약한 타원형의 형태를 갖는 기공(vesicle)은 어떤 이차광물도 함유하지 않는 것이 보통이다. 감람석 반

정은 자형 또는 반자형으로 주로 단독으로 산출된다. 사장석 반정은 자형이 대부분으로 알바이트-칼스바드 쌍정을 보인다. 석기는 래스상의 사장석과 감람석, 휘석 그리고 유리질로 구성되며, 이차광물은 거의 관찰되지 않는다. 과상 현무암편의 구성광물은 기공질 현무암편과 차이가 없으나 기공의 함량 및 크기가 대폭 감소한다. 구성광물과 조직특성 면에서 2차 드레지 시료(PR2)와 3차 드레지 시료(PR3)는 별다른 차이가 없다.

채취된 시료의 박편 관찰을 통해 기본적인 광학적 특성을 검토하고, K-Ar 연대측정과 전암화학분석을 위한 대표적인 시료를 선정하였다. 선정된 시료는 먼저 1 cm 내외 두께의 chip으로 절단한 후 암석분쇄기(Jaw Crusher, Retsch, BB51)를 이용하여 파쇄하였다. 1차 파쇄된 부분을 체로 걸러 2 mm 내외의 입자를 선택한 후 초음파세척기를 이용해 입자 표면을 수차례 세척하였다. 실제현미경 상에서 암편의 표면 및 기공내에 퇴적물등의 불순물이 함유되어 있는 부분을 hand picking으로 제거하고 신선한 부분만을 선택하여 연대측정에 사용하였다.

K-Ar 연대 측정을 위한 전암의 K 정량은 한국해양연구원의 X선 형광분석기(XRF Philips PW1480)를 이용하였고, Ar 동위원소의 정량 분석은 일본 동경대학 지각화학연구소의 질량분석기(modified VG5400)를 이용하였다. 자세한 분석 방법은 Nagao *et al.* (1996)을 참조하였다. 연대계산에 사용한 K의 동위원소비와 붕괴상수는 $\lambda_{\beta} = 4.962 \times 10^{-10} \text{y}^{-1}$, $\lambda_{\alpha} = 0.581 \times 10^{-10} \text{y}^{-1}$, $^{40}\text{K}/\text{K} = 0.01167$ (atomic %)이다(Steiger and Jäger 1977).

전암화학분석을 위해 최종 선택된 입자 100 g 정도를 아게이트볼밀(agate ball mill, Retsch, PM400)을 이용하여 분말로 만들었다. 주성분원소는 이종익(1994)의 방법에 따라 한국해양연구원의 X선 형광분석기(XRF, Philips, PW1480)를 이용하여 분석하였다. JB-1a, JA-2를 이용해 계산된 주성분원소의 분석 오차는 3% 내외이다. 미량원소 및 희토류원소는 한국해양연구원의 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Perkin-Elmer, Elan 6100)를 이용하여 분석하였다.

3. 화산체의 형성시기

연대측정 결과 수심 1000 m에서 채취한 PR2 현무암은 2.6-2.2 Ma, 수심 800 m에서 채취한 PR3 현무암은 1.6-1.5 Ma의 연대를 보인다(Table 1). 해저 화산체의 상부로 갈수록 연대가 젊어지는 것은 중심분화를 통해 화산체가 성장했음을 지지하는 것으로 해석되며, 이 화산체의 최정상부에서 채취한 PR3 현무암의 연령(1.6-1.5 Ma)은 화산활동의 종결시기를 나타내는 것으로 보인다.

많은 경우 해저현무암들은 수심이 해저에 미치는 압력

Table 1. Analytical result of K-Ar ages for Phoenix Ridge (P3) seamount basalts.

	PR2-1	PR2-2	PR2-4	PR3-1	PR3-3	PR3-6
sample wt(g)	0.2140	0.2309	0.2139	0.1997	0.2179	0.1994
K conc(wt.%)	0.95	0.85	0.79	1.21	1.29	1.32
^{36}Ar (E $^{-10}$ cc/g)	3.34	4.00	3.20	2.17	2.95	3.29
$^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$ (E $^{-8}$ cc/g)	9.34	7.23	7.91	6.89	7.97	7.41
Error	0.52	0.43	0.49	0.48	0.50	0.48
Atm. ^{40}Ar (%)	51.5	62.1	54.5	48.3	52.4	56.7
Age (Ma)	2.53	2.19	2.58	1.47	1.55	1.45
Error	0.16	0.15	0.18	0.11	0.11	0.10

의 영향으로 Ar 동위원소가 불균질하게 분포해 연대측정이 어려운 것으로 알려져 있다. 한 예로 남극 브랜스필드 해협 측부에 발달하는 해저현무암의 경우 단일 화산체에서 8.6-0.16 Ma의 매우 넓은 범위를 갖는 K-Ar 연대 측정 결과가 얻어졌다(좌용주·이종익 2001). 일반적으로 브랜스필드 해협이 약 4 Ma부터 형성되기 시작했다는 점을 고려하면 4 Ma보다 오래된 연대를 보이는 현무암 시료들은 과잉의 ^{40}Ar (excess Ar effect)을 갖고 있기 때문에 외관상 훨씬 오래된 연대를 보인다. 따라서 이 경우는 정확한 해저화산의 형성시기를 알 수 없고 단지 최소연대만을 유추할 수 있다.

반면 피닉스 해령 P3 구역의 현무암들은 연대 폭이 비교적 좁은 결과를 보여준다. 특히 화산체의 최정상부에서 채취한 PR3 현무암의 세 개의 시료는 모두 오차 범위 내에서 일치하는 연대를 갖는다. 이는 드래지에 의해 채취된 시료의 대표성 문제를 고려하더라도 이 결과가 현무암의 분출시기를 잘 지시하는 것으로 보인다. 따라서 2500 m 이상의 높이를 갖는 이 해저 화산체의 중상부부터 최상부에 걸쳐 채취된 현무암들은 2.6-1.5 Ma 사이에 분출한 것으로 해석된다. 또 PR3 시료들이 화산체의 최정상부에서 채취되었고, 이 시료들의 지구화학 조성이 부분융해 정도가 매우 낮은 성분을 보여주고 있다는 점을 고려하면(뒤에서 자세히 설명), 이 화산체는 약 1.5 Ma에 분출활동을 멈춘 것으로 여겨진다.

4. 지구화학 특성

주성분원소

피닉스 해령 P3 구역 해저화산암의 SiO_2 함량은 49.9-51.9 wt%로 매우 좁은 변화폭을 갖는 보통 현무암의 조성이며, 깊이가 낮은 PR3 현무암의 SiO_2 함량이 PR2 현무암에 비해 약간 높은 경향을 보인다(Table 2, Fig. 3). 다른 주성분원소 조성도 전체적으로 상당히 좁은 변화폭을 갖는다. PR2, PR3에서 채취한 현무암들의 균질한 화학조성은 각각의 시료채취 지점에서 현무암들이 상당히

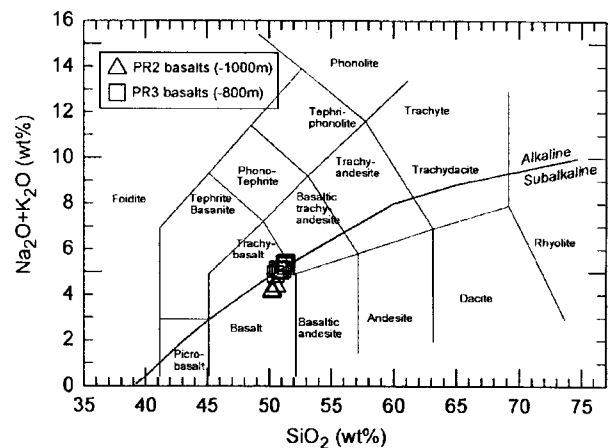


Fig. 3. Chemical classification and nomenclature of volcanic rocks using TAS diagram of Le Maitre *et al.* (1989). The boundary between alkaline and subalkaline series is taken from Irvine and Baragar (1971).

균질했음을 지시한다. 이들의 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (total alkali)함량은 현무암 조성에서 그리 높지 않아 모두 비알칼리계열 또는 알칼리-비알칼리계열 중간의 전이계열에 해당한다(Fig. 3). K_2O 함량은 PR3 현무암(1.4-1.6 wt%)이 PR2 현무암(1.0-1.2 wt%)에 비해 약간 높다. K_2O - SiO_2 관계에서 이 현무암들은 모두 middle-K 계열 현무암에 해당한다. 이 현무암들은 노움 네펠린을 함유하지 않고 약간의 노움 감람석이나 노움 석영을 갖기 때문에 노움 광물 조성에서도 알칼리계열과 비알칼리계열의 중간 조성에 해당하는 화학조성을 보인다(Table 2, Fig. 4). 전형적인 중앙해령 현무암들은 상부맨틀의 저압 부분에서 다량의 부분융융과정을 거쳐 형성되기 때문에 K_2O 함량이 낮은 (low K-series) 솔레아이트 계열의 현무암이 대부분인 것으로 알려져 있으며(Klein and Langmuir 1987), 이들은 노움 광물 조성에서 노움 석영을 상당량 함유하는 것이 보통이다. 결과적으로 피닉스해령 P3 구역 측부에서 채취

Table 2. Major elements and CIPW normative mineral compositions of the Phoenix Ridge (P3) basalts (in wt%).

	PR2-1	PR2-2	PR2-3	PR2-4	PR3-1	PR3-2	PR3-3	PR3-4	PR3-5	PR3-6	PR3-7	PR3-8
SiO ₂	50.80	49.89	50.50	49.97	50.98	50.38	51.49	51.85	51.73	51.38	50.29	50.82
TiO ₂	2.47	2.48	2.35	2.39	2.22	2.43	2.43	2.42	2.39	2.54	2.50	2.36
Al ₂ O ₃	16.45	16.73	16.72	16.98	17.55	17.41	17.80	17.85	17.68	17.68	17.40	17.25
FeO*	9.82	9.68	9.40	9.45	8.44	8.90	8.63	8.58	8.54	8.99	8.97	8.48
MnO	0.20	0.26	0.19	0.21	0.15	0.20	0.17	0.15	0.15	0.16	0.18	0.16
MgO	5.95	5.69	6.01	6.06	6.00	5.53	4.50	4.92	4.89	4.37	4.52	5.54
CaO	9.92	9.94	9.77	10.03	9.32	9.49	9.57	9.52	9.43	9.68	9.66	9.34
Na ₂ O	3.24	3.15	3.20	3.16	3.59	3.52	3.83	3.73	3.89	3.82	3.60	3.68
K ₂ O	1.15	1.02	1.10	0.95	1.45	1.38	1.55	1.59	1.56	1.60	1.47	1.42
P ₂ O ₅	0.42	0.45	0.41	0.33	0.43	0.50	0.47	0.33	0.36	0.57	0.51	0.45
Total	100.42	99.30	99.64	99.52	100.14	99.72	100.43	100.92	100.61	100.78	99.11	99.49
normative minerals												
Q	0.8	1.1	0.9	0.4			0.1	0.1		0.1	0.2	
or	6.7	6.1	6.5	5.7	8.5	8.1	9.1	9.2	9.1	9.3	8.8	8.4
ab	27.2	26.7	27.1	26.7	30.3	29.8	32.1	31.1	32.6	31.9	30.6	31.1
an	26.7	28.6	28.0	29.4	27.3	27.6	26.6	27.0	25.9	26.1	27.1	26.4
di	15.5	14.3	14.2	14.6	12.6	12.8	13.9	13.9	14.3	14.1	14.1	13.5
hy	11.7	11.7	12.4	12.3	8.1	9.3	6.9	7.8	5.9	6.6	7.4	8.4
ol					2.6	1.0			1.2			1.0
mt	5.7	5.8	5.6	5.6	5.4	5.7	5.7	5.6	5.6	5.8	5.8	5.6
il	4.7	4.7	4.5	4.5	4.2	4.6	4.6	4.5	4.5	4.8	4.8	4.5
ap	1.0	1.1	0.9	0.8	1.0	1.2	1.1	0.7	0.8	1.3	1.2	1.0

*Total Fe as FeO.

Abbreviations: Q, quartz; or, orthoclase; ab, albite; an, anorthite; di, diopside; hy, hypersthene; ol, olivine; mt, magnetite; il, ilmenite; ap, apatite.

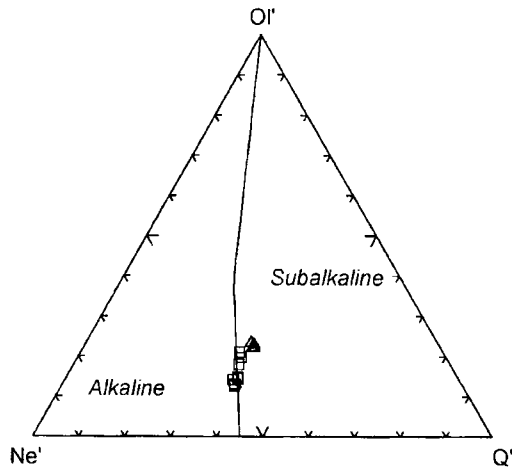


Fig. 4. Normative Ne-OI-Q triangular diagram showing the boundary between alkaline and subalkaline fields after Irvine and Baragar (1971). The symbols are the same as those in Fig. 3.

된 현무암들은 total alkali 함량(또는 K₂O 함량)이나 노움 광물 조성에서 전형적인 중앙해령형 현무암들과는 차이가 있음을 알 수 있다.

미량원소

연구지역 현무암들의 호정성 원소 함량은 시료채취 깊이 에 따라 다소 차이가 있다(Table 3). 수심 1000 m 깊이 에서 채취한 PR2 현무암의 호정성원소(Cr; 184-196 ppm, Ni; 86-99 ppm, V; 320-334 ppm) 함량이 수심 800 m 깊이 의 PR3 현무암의 호정성원소(Cr; 89-100 ppm, Ni; 40-67 ppm, V; 236-292 ppm) 함량보다 높다. Cr, Ni 그리고 V은 현무암질 마그마에서 고상선 온도가 높은(즉 고온에서 정출하는) 감람석이나 산화광물과 친화력이 큰 원소이다. 따라서 호정성원소의 함량 차이는 PR2 현무암질 마그마와 PR3 현무암질 마그마의 진화 과정 차이(결정분화 정도의 차이 또는 부분용해도의 차이)에 의한 것으로 해석될 수 있는데, 이에 대해서는 뒷 부분에서 살펴보기로 한다.

P3 구역 측부 현무암들은 고상과 액상간의 상대적인 친화력을 나타내는 분배계수(partition coefficient)가 유사한 Th과 Ta 함량이 비슷하다(Table 3). 이들은 Th/Yb-Ta/Yb 도면상에서 Th/Ta = 1 선 근처에 비교적 잘 접재되고, Th/Yb 비와 Ta/Yb 비는 PR2 현무암보다 PR3 현무암이 다소 크다(Fig. 5). 또 이들은 중앙해령 현무암(MORB) 보다는 Th/Yb, Ta/Yb 비가 크다. 현무암질 모마그마에서 Ta에 비

Table 3. Trace element compositions of the Phoenix Ridge (P3) basalts (in ppm).

	PR2-1	PR2-2	PR2-3	PR2-4	PR3-1	PR3-2	PR3-3	PR3-4	PR3-5	PR3-6	PR3-7	PR3-8
Be	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.1	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1
Li	6.3	6.9	6.1	6.1	6.8	6.4	6.5	5.8	6.7	6.7	6.7	6.5
Sc	28.1	28.8	27.5	27.5	22.3	23.4	24.4	23.2	23.5	22.6	23.4	23.3
Co	37.7	60.9	39.9	48.4	28.9	41.9	34.6	24.0	23.5	25.4	34.3	29.3
Cr	186.8	183.5	189.7	196.2	99.6	89.3	88.5	96.1	96.0	89.7	91.3	95.7
Cu	50.2	47.5	43.6	38.9	49.4	44.0	36.7	37.9	38.1	54.8	45.0	44.1
Zn	119.6	133.1	116.6	119.8	99.7	111.7	106.3	92.4	97.0	104.1	105.6	101.2
Mo	2.8	2.9	2.9	2.7	2.9	3.2	1.7	2.5	2.1	2.8	2.7	3.2
Ni	86.4	90.7	91.4	98.7	67.0	59.8	45.7	45.7	46.3	39.8	47.0	53.9
Cs	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2
V	323.1	333.8	320.0	326.6	235.7	262.4	290.5	274.1	271.3	291.6	282.1	274.2
Ga	20.7	21.0	20.7	20.4	17.8	18.6	18.9	18.8	18.5	18.9	18.2	18.3
Rb	16.8	14.1	15.7	12.8	23.9	20.9	22.8	22.3	23.3	10.9	18.9	21.0
Sr	258.6	273.0	265.1	271.1	394.4	395.6	387.4	383.2	387.8	382.3	385.8	391.2
Y	30.3	32.5	29.8	25.8	21.2	26.4	22.2	18.9	18.1	24.2	24.7	24.4
Zr	214.0	220.1	213.8	198.7	204.5	224.3	212.0	217.4	224.4	231.5	221.5	227.5
Nb	40.1	41.9	40.2	39.3	51.0	54.1	54.5	53.4	54.2	56.3	54.2	54.4
Ta	4.2	3.9	3.5	3.3	4.3	4.5	4.4	4.4	4.5	4.7	4.6	4.6
Hf	5.3	5.6	5.4	5.2	5.0	5.7	5.7	5.6	5.8	6.0	5.9	6.0
Ba	191.9	192.3	187.8	176.4	311.8	312.7	333.6	322.1	332.2	334.3	329.9	323.1
U	0.8	0.9	0.8	0.7	1.0	1.6	0.9	0.9	1.0	1.4	1.2	1.1
Th	2.6	3.4	2.7	2.8	4.0	4.7	4.4	3.5	3.9	4.3	4.7	4.4
La	18.6	20.7	18.1	14.5	21.4	25.8	18.3	14.4	13.9	20.5	22.4	22.9
Ce	39.5	48.4	38.4	33.9	41.4	51.6	41.5	29.7	28.6	43.5	46.4	45.0
Pr	4.7	5.2	4.6	3.8	4.7	5.9	4.6	3.6	3.6	5.1	5.3	5.2
Nd	19.8	21.8	19.3	16.3	18.5	23.1	18.8	14.8	14.9	21.2	21.8	20.8
Sm	4.9	5.3	4.8	4.2	4.0	5.2	4.4	3.5	3.5	4.9	5.0	4.7
Eu	1.8	1.9	1.7	1.6	1.5	1.8	1.7	1.5	1.5	1.8	1.8	1.7
Gd	6.1	6.6	6.1	5.3	4.8	6.2	5.3	4.3	4.3	5.9	6.0	5.7
Tb	1.0	1.1	1.0	0.9	0.7	0.9	0.8	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9
Dy	6.0	6.5	6.0	5.2	4.3	5.5	4.8	4.0	4.0	5.4	5.4	5.2
Ho	1.2	1.3	1.2	1.1	0.9	1.1	0.9	0.8	0.8	1.1	1.1	1.0
Er	3.5	3.8	3.5	3.1	2.5	3.2	2.7	2.4	2.3	3.1	3.1	3.0
Tm	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
Yb	3.4	3.6	3.3	3.0	2.5	3.1	2.7	2.4	2.4	3.0	2.9	3.0
Lu	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

해 Th이 이상적으로 부화되는 것은 흔히 섭입 환경하에서 퇴적물을 함유하고 있는 슬랩 성분의 영향으로 생각된다 (Pearce 1982; McCulloch and Gamble 1991). 중앙해령 현무암이 갖는 낮은 Th/Yb, Ta/Yb 비는 이들이 주로 결핍된 기원맨틀로부터 매우 큰 부분용융 작용을 통해 유래되기 때문이다. 따라서 피닉스해령 해저현무암의 모마그마는 오래된 해양판의 섭입 성분의 영향이 없는 환경하에서 생성되었고, 중앙해령형 기원맨틀보다는 다소 부화된 기원맨틀 성분으로부터 유래되었을 것으로 해석된다.

미량원소의 조성을 시원맨틀 값과 비교하면 피닉스해령 해저현무암은 일반적인 해양도 화산암(OIB)이 갖는 패턴과 매우 유사하다(Fig. 6). 즉 불호정성의 이온 반경이 큰

친석원소(LILE)들이 호정성인 고전하 양이온(HFSE)들보다 전체적으로 부화되어 있고 전반적으로 불룩한 패턴을 보인다. 이런 경향성은 불호정성원소들이 호정성원소들보다 결핍된 특성을 보이는 중앙해령 현무암(N-type MORB)과는 성인이 다르다는 것을 지시한다. 피닉스해령 해저현무암의 형성과 관련된 지체구조 특성을 살펴보기 위해 대표적인 주성분원소와 미량원소를 이용한 지체구조 판별도에 첨가하면 이들은 판내부 현무암 또는 해양도 현무암 중의 알칼리 현무암에 해당함을 알 수 있다(Fig. 7).

희토류원소

시원적인 운석 값에 표준화한 희토류원소 도면에서 P3

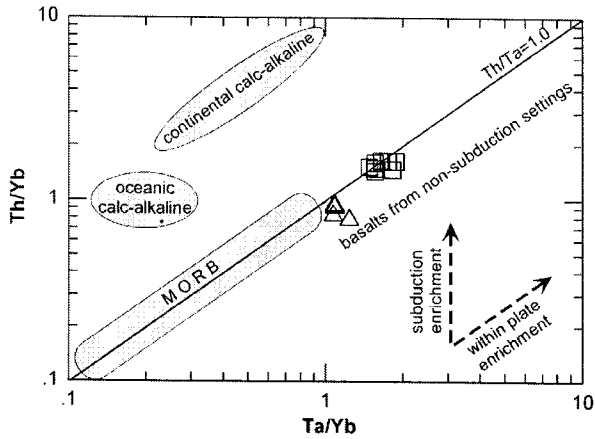


Fig. 5. Th/Yb versus Ta/Yb diagram showing the “within plate” character of the Phoenix Ridge (P3) basalts. Vector for within plate and subduction enrichment, and fields for oceanic and continental calc-alkaline rocks are from Pearce (1982). The symbols are the same as those in Fig. 3.

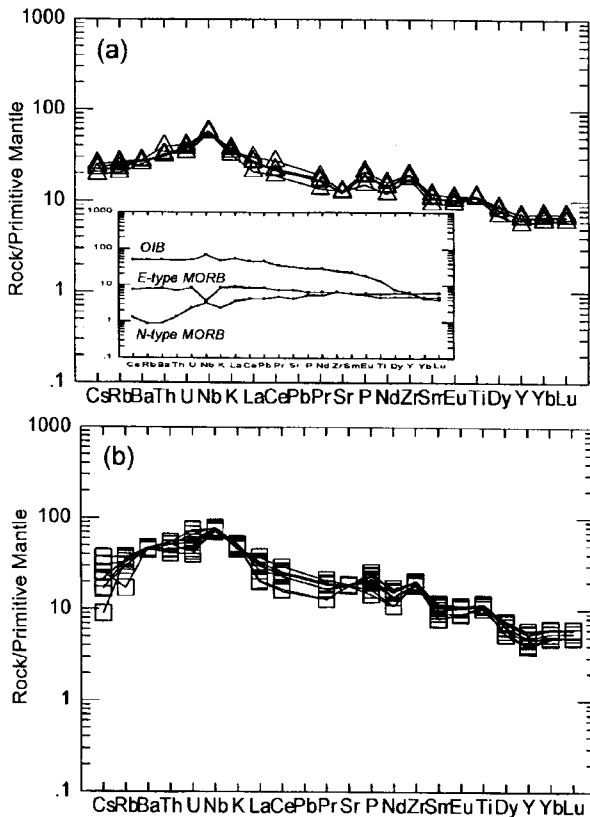


Fig. 6. Primitive mantle-normalized diagrams of the Phoenix Ridge (P3) basalts. The data of primitive mantle, N-type MORB, E-type MORB, and ocean island basalt (OIB) are taken from Sun and McDonough (1989). (a) PR2 basalts (~1000 m) and (b) PR3 basalts (~800 m).

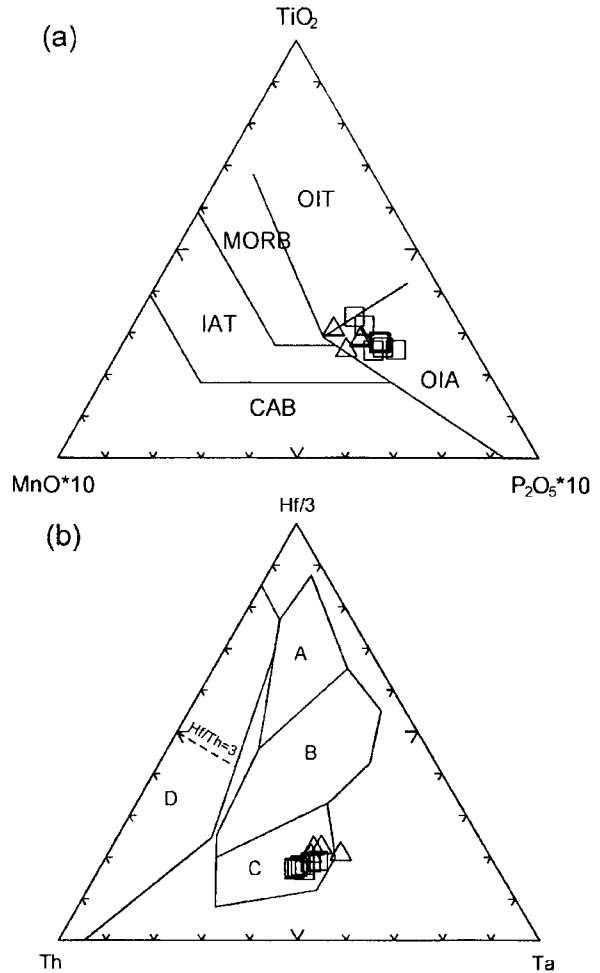


Fig. 7. (a) The MnO-TiO₂-P₂O₅ discrimination diagram for basalts (after Mullen 1983). OTB, ocean island tholeiite; OIA, ocean island alkali basalt; CAB, island arc calc-alkali basalt; IAT, island arc tholeiite. (b) The Th-Hf-Ta discrimination diagram for basalts (after Wood 1980). The fields are : A, N-type MORB; B, E-type MORB and within-plate tholeiites; C, within-plate alkaline basalts; D, volcanic arc basalts. Island arc tholeiites plot in field D where Hf/Th > 3.0 and calc-alkaline basalts where Hf/Th < 3.0. The symbols are the same as those in Fig. 3.

구역 해저 현무암은 경희토류원소(LREE)가 중희토류원소(HREE)에 비해 부화된 특징을 보이고, 해저화산 깊이에 따른 큰 차이점은 인정되지 않는다(Fig. 8). 또 분화된 화산암에서 잘 나타나는 Eu의 부의 이상 현상은 보이지 않는다. 일반적으로 경희토류원소는 중희토류원소에 비해 액상으로 농집되려는 성질이 강하다. 따라서 상부맨틀의 상당부분을 구성하는 석류석 감람암과 같은 조성을 현무암질 모마그마의 기원물질로 가정할 경우 경희토류원소가

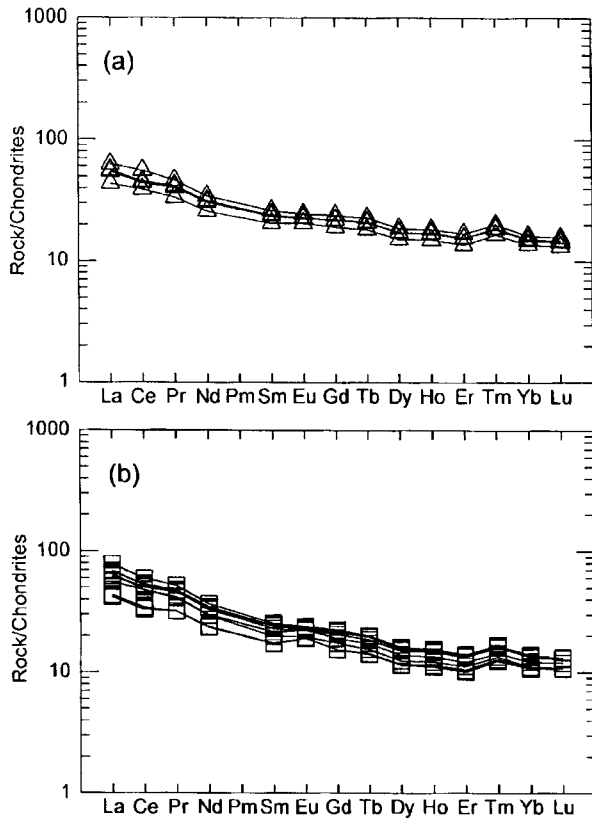


Fig. 8. Chondrite-normalized rare earth element patterns of the Phoenix Ridge (P3) basalts. (a) PR2 basalts (~1000 m) and (b) PR3 basalts (~800 m). The chondrite values used in normalizing REE are from Nakamura (1974).

중희토류원소보다 부화되기 위해서는 부분용해 정도가 5% 이내로 매우 작아야 한다.

석류석을 함유한 감람암을 기원물질로 가정하고 피닉스해령 해저현무암질 마그마의 부분용해 정도를 계산하였다 (Fig. 9). 기원물질은 감람석(60%), 사방휘석(25%), 단사휘석(10%) 그리고 석류석(5%)을 함유한 석류석 감람암으로, 기원물질내의 각 희토류원소의 함량은 시원운석의 2 배로 가정하고, Shaw(1970)의 non-modal 부분용해 방정식을 이용하였다. 또한 각 광물상의 용융비(P^i)는 감람석(0%), 사방휘석(10%), 단사휘석(40%), 석류석(40%)으로 가정하고, 충분배계수(D^i)는 Nakamura *et al.*(1989)이 제시한 것을 이용하였다. 이 결과 Th는 기원물질을 구성하는 모든 광물에 대해서 불호정성이 매우 크고(D^i 는 0으로 가정함), 희토류원소 중 La는 Sm에 비해 불호정성이 크기 때문에 부분용해의 정도가 작을수록 $(La/Sm)_n$ 비와 Th 함량은 증가한다. 그림에서와 같이 피닉스해령 해저현무암은 부분용해 곡선상에 비교적 잘 점재되기 때문에 계산상

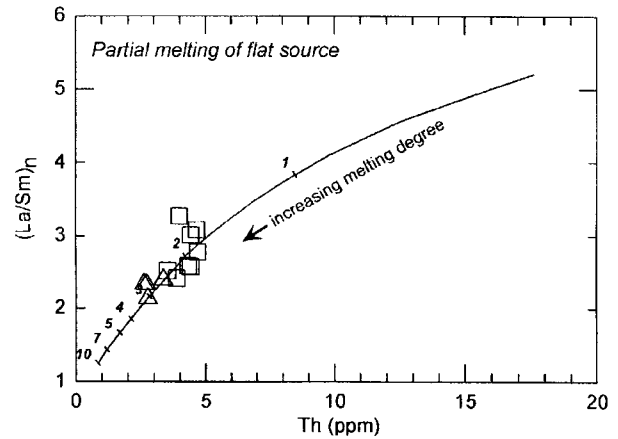


Fig. 9. $(La/Sm)_n$ versus Th concentration diagram of the Phoenix Ridge (P3) basalts, showing melting percentages (numbers at ticks above solid curve) from model melting for alkali basalts from Nakamura *et al.* (1989). Th concentration in the source is assumed to be 0.088 ppm (Sun 1980). The REE pattern for "primitive" mantle is assumed to be 2 times the chondritic flat pattern. Non-modal batch partial melting equation, $C_1 = C_0/(D^1 + F(1-P^1))$ is performed (Shaw 1970). Modal composition of source is assumed to be olivine (60%), orthopyroxene (25%), clinopyroxene (10%), and garnet (5%), and liquid proportion (P^1) of 0%, 10%, 40%, and 40%, respectively. The symbols are the same as those in Fig. 3. See details in the text.

의 여러 가정들이 상당히 타당함을 지지한다.

$(La/Sm)_n$ 비와 Th 함량과의 관계는 피닉스해령 해저현무암이 상당히 작은 부분용해 작용을 거쳐 생성되었음을 나타낸다. 먼저 분출한 수심 1000 m 심도의 현무암들은 약 3% 내외, 그리고 최후기 분출물로 생각되는 수심 800 m 심도의 현무암들은 약 2% 내외의 감람암 모암의 용해에 의해 형성되었음을 보여준다. 따라서 피닉스해령 해저현무암은 전체적으로 매우 낮은 부분용해작용을 통해 형성되었다는 것과 해저화산은 분출 말기를 향해 부분용해 정도가 줄어들면서 화산활동을 종결했다는 것을 알 수 있다.

5. 토 의

해저화산의 성인(중양해령형? 또는 열점형?)

피닉스해령 P3 구역 측부에 발달하는 해저 현무암의 지구화학 자료는 예상과 달리 해령 확장에 동반되는 중양해령형 현무암과는 화학적으로 차이가 많다는 점을 보여준다. 일반적으로 해령의 확장과 동반되어 다량 분출하는 중양해령형 현무암은 스피넬 감람암과 같이 최상부 맨틀에

존재하는 기원물질의 부분융해에 의해 형성되고 그 용융 정도도 10% 이상으로 매우 높은 것으로 알려져 있다 (Klein and Langmuir 1987). 따라서 이런 현무암들은 low-K 쏘라이트 계열의 화학조성을 보이며, 전반적으로 불호정성원소가 결핍된 성질을 갖는다. 또 해령 축으로 분출하지 못한 많은 현무암질 마그마는 그 챔버에서 고결되어 반려암이 되고, 이 암석은 해양저 확장이 진행됨에 따라 해양지각의 하부 구성 물질이 된다. 결과적으로 해령에서 형성된 해양지각은 최상부에 베개모양의 현무암질 용암에서부터 하부로 갈수록 판상 암맥복합체(sheeted dike complex) 그리고 최하부에 반려암과 집적암(cumulate) 등으로 구성된다.

반면 연구가 수행된 해저 현무암은 피닉스해령 P3 구역 중앙 축부에 분포하지만 일반적인 중앙해령형 현무암(N-type 또는 E-type MORB)의 조성이 아니라 전형적인 열점기원 해양도 현무암(OIB)의 화학조성과 유사하다. 지구물리 탐사 결과에 의하면 피닉스 해령 P3 구역은 전형적인 저속도 확장해령의 특성을 갖지만, 해령 확장 축에서의 맨틀 부우게 이상값의 변화량은 일반적인 해령에서 나타나는 값보다 크고 기울기도 매우 가파르다(김규중 외 2000). 이런 이상값이 나타나는 원인으로 Livermore *et al.*(2000)은 피닉스 해령 활동 말기에 있었다고 생각되는 격렬한 화산활동과 관련되어 맨틀 구조에 이상이 생겨 열적인 이상을 초래한 것으로 해석했다. 결과적으로 이 해저화산은 해령의 확장 활동이 거의 끝났거나 종결된 후 맨틀 깊은 곳으로부터 새로 발생한 플룸에 의해 형성된 것으로 생각된다. 해령 중앙부에서 맨틀 플룸이 만나 열점기원 화산체를 만드는 것은 우연적인 것으로 생각되지만 이런 예는 대서양, 인도양 중앙해령과 Juan de Fuca Ridge(JDF)등 여러 곳에서 찾을 수 있다(예를들면, Delaney *et al.* 1981; Desonie and Duncan 1990; Rhodes *et al.* 1990; Kurz *et al.* 1998; Douglass *et al.* 1999).

피닉스 해령 해저현무암의 화학조성은 알칼리도(alkalinity)가 그리 강하지 않지만 미량원소와 희토류원소 조성 특징 면에서 전형적인 열점기원 현무암류와 매우 유사하다. 태평양권에 발달하는 대표적인 열점인 화와이섬 화산암류는 쏘라이트질 현무암이 우세하고, 화산분출 말기에 일부 알칼리 현무암이 분출하는 특징을 나타낸다. 반면 서태평양 케롤라인 군도에 발달하는 신생대 후기 열점은 모두 강한 알칼리 현무암이 주를 이루고 분출 말기에는 네펠리나이트 등을 동반한다(이종익 외 2001). 이처럼 열점기원 화산암류의 화학조성이 다양한 것은 맨틀 플룸의 크기 및 지속성과 관련된 부분융해 정도가 열점마다 다르기 때문인 것으로 생각된다. 즉 부분융해가 크면 불호정성원소/호정성원소(또는 경희토류원소/중희토류원소) 비가 작아지고, 실리카 포화도는 증가하게 되어 쏘라이트계

열 현무암이 되고, 부분융해 정도가 작으면 이 반대가 되어 알칼리계열 현무암이 된다.

피닉스 해령 해저현무암의 경우는 분출말기를 향해(화산체의 상부를 향하여) 알칼리도가 약간 증가하고 부분융해 정도가 약간 줄어든 특징을 보인다. 수심 800 m에서 채취한 PR3 현무암은 이 해저화산의 최상부에서 채취된 것이기 때문에 화산분화의 최말기 산물로 여겨진다. 따라서 이 해저화산은 분출 활동이 진행됨에 따라 점진적으로 부분융해 정도가 줄어들어 최종적으로 약한 알칼리성 현무암을 분출하고 그 화산활동을 종결한 것으로 해석된다.

이 해저화산은 수심 기준으로 최소 3000 m 이상에 그 기저가 존재한다. 따라서 이번에 채취된 수심 1000 m 깊이(PR2)와 수심 800 m 깊이(PR3)의 시료는 이 화산의 중상부를 대표하기 때문에, 화산체의 기저부를 구성하는 현무암의 분출 양식 및 화학조성에 대해서는 현재 알 수가 없다. 그러나 Fig. 5에서 보여지는 것과 같이 PR2 현무암의 화학조성은 PR3 현무암에 비해 중앙해령형 현무암과 유사하다. 따라서 화산 활동의 초기에는 열점기원 성분과 중앙해령기원 성분의 현무암질 마그마가 상호작용을 했을 가능성을 배제할 수 없지만 시료의 제한으로 인해 이 문제는 다음에 검토하기로 한다.

열점의 활동기간과 열점기원 해저화산의 자취(hotspot chain)

앞의 연대측정 결과로부터 피닉스 해령 P3 구역 축부에 발달한 해저화산은 산체의 중상부를 이루는 용암이 분출하는데 적어도 100만년은 소요되었으며, 약 1.5 Ma에 화산활동을 종결한 것으로 보인다. 일반적으로 태평양에 발달하는 열점기원 단일 화산의 활동기간은 300만년 이내로 알려져있다(McDougall and Duncan 1980). 현재까지의 연대 측정 결과는 이 해저화산의 중상부의 연령만을 지시하기 때문에 산체의 하부 2/3 정도를 구성하는 현무암의 연대를 유추하기 어렵지만, 해저화산의 규모를 보면 적어도 300만년 가량 활동했을 가능성을 배제하기 어렵다. 이 해저화산의 정확한 활동시기를 결정하기 위해서는 산체의 하부를 구성하는 현무암을 채취하여 연대측정을 실시해 볼 필요가 있다.

또 이 해저화산이 공교롭게도 해령의 축부에서 발달한다는 점과 주변에 같은 열점기원이 해산들이 존재하는지의 여부도 검토해 보아야 한다. 오랜 시간동안 거의 고정점에서 활동하는 열점에서 분출한 화산들이 해양지각 위에서 선상 배열하고 활동시기가 가장 젊은 화산이 해령에 존재하는 예는 쉽게 찾아볼 수 있다(예를 들면, Cobb-Eickelberg Chain, Delaney *et al.* 1981; Desonie and Duncan 1990). 북미 알래스카만의 태평양판 위에 발달하는 Cobb-Eickelberg Chain은 북서-남동 방향으로 약 900만년

동안 해저화산군들의 chain 구조를 보이는데, 현재의 열점 위치는 JDF 해령의 축부에 발달하는 Axial 해저화산의 하부에 존재한다. 이 해저화산군은 형성한 열점활동은 적어도 900만년 동안 거의 고정점에서 활동했으나, JDF 해령 북서측의 태평양판의 확장속도가 남동측의 JDF 판보다 빠르기 때문에(상대 속도로 약 43 ± 3 km/Ma) 해령이 점진적으로 북서진해 약 2 Ma에 현재의 위치에서 열점과 만난 것으로 해석된다(Desonie and Duncan 1990). 현재 JDF 해령 축부에 발달하는 Axial 해저화산의 화학성분은 N-type과 E-type 중앙해령 현무암의 중간조성으로 많은 화학적 지표들이 JDF 해령을 구성하는 현무암들과 유사하다(Rhodes et al. 1990). 또한 최근에 분출한 용암류와 열수작용 그리고 칼데라 활동을 동반하는 등 현재도 활동 중인 것으로 보인다(Johnson and Embley 1990). 즉 이 해저화산군들은 해령과 만나기 전에는 E-type MORB의 조성을 보이다가 해령과 만나면서 해령을 형성한 N-type MORB 성분과 혼합되었다는 것을 알 수 있다.

피닉스 해령 P3 구역 해저화산은 지구화학적으로 중앙해령형 현무암과의 강한 혼합이 인지되지 않고, 약 1.5 Ma에 분출 활동을 멈추었다는 점에서 현재에도 활동 중인 JDF 해령의 Axial 해저화산과는 성질이 다르다. 또 이 해저화산과 성인을 같이하는 화산군들이 피닉스 해령 좌우에 선상배열하고 있다는 것도 현재까지 밝혀진 바 없다. 그러나 피닉스 해령 주변의 해저지형도를 살펴보면, P3 구역 해저화산을 중심으로 남동부 약 100 km 지점에 비교적 큰 해저화산이 위치하고 있고, 북서부 약 200 km 지점에는 매우 큰 몇 개의 해저화산들이 주변지형과 1500 m 이상 차이를 보이는 큰 기복으로 북서-남동 방향(피닉스 해령 방향과 거의 수직 방향)으로 발달한다. 따라서 P3 구역 해저화산을 형성한 열점의 활동기간과 특성을 규명하기 위해서는 해령의 북서-남동 방향에 발달하는 해저화산들에 대한 시료를 채취하고 체계적인 지구화학 연구를 통해 이들의 성인적인 연관성을 추적해 볼 필요가 있다.

해령확장과 열점활동의 시공간적 관계

앞서 논의한 것과 같이 해령 부근에 열점이 발달하는 예는 북미 알래스카 만 지역 이외에도 남미판, 아프리카판 그리고 남극판이 만나는 남대서양 지역을 들 수 있다(Kurz et al. 1998; Douglass et al. 1999). 이 지역에는 북으로부터 대표적인 세 개의 열점들(Discovery, Shona, Bouvet)이 해령 축부에 발달하는데, Discovery와 Shona 열점은 남미판과 아프리카판의 경계를 이루는 남대서양 중앙해령 상에 그리고 Bouvet 열점은 남미판, 아프리카판 그리고 남극판이 만나는 삼중점(Bouvet triple junction) 상에 위치한다. 이들은 모두 매우 오랜 기간(적어도 1억년 이상) 거의 고정점에서 활동한 지구상의 대표적 열점들이다.

현재까지 스코티아판과 피닉스판에서는 열점이 발견된 예가 없기 때문에 비교할 만한 자료가 없지만 피닉스 해령 P3 축부의 해저화산은 이 지역에서 처음 발견된 열점기원 화산이 될 것이다. 피닉스 해령의 활동과 관련하여 현재도 매우 느린 속도로 확장이 계속되고 있다는 주장(Larter and Barker 1991)이 있지만, 약 4 Ma 또는 3.2 Ma에 확장이 정지되었다는 주장(Barker 1982; Livermore et al. 2000)이 설득력을 얻고 있다. 피닉스 해령이 약 4 Ma 또는 3.3 Ma에 확장을 멈추었다면, P3 축부에 발달하는 해저화산은 확장이 정지된 이후까지 맨틀 플룸 활동에 의해 분출했고, 이 활동은 약 1.5 Ma까지 계속되었을 것으로 생각된다. 이런 가설은 이 해저화산체 중상부 현무암의 화학조성에서 중앙해령형 현무암과의 혼합 흔적이 발견되지 않는다는 점과도 조화적이다. 화산체의 하부 규모까지를 고려하여 이 화산이 적어도 300만년 정도 활동하였다면(약 4.5 Ma부터 1.5 Ma까지), 현무암질 마그마는 피닉스 해령이 확장을 멈추기 전부터 분출했을 것이고, 이 시기에는 해령에서 분출한 MORB형 마그마와 열점형 마그마가 충분히 혼합했을 가능성이 있다.

반면 피닉스 해령이 현재까지도 저속도로 확장 활동을 계속하고 있을 경우에는 해령을 구성하는 MORB형 마그마의 분출이 동반되기 때문에 해령 하부에는 마그마 챔버가 존재할 가능성이 크다. 이 경우 JDF 해령의 Axial 해저화산과 같이 활동성 해령을 구성하는 MORB형 마그마와 열점형 마그마가 혼합할 가능성이 훨씬 증가하기 때문에 이 화산체의 지구화학 조성에 이런 혼합의 특징이 잘 나타날 것으로 기대된다. 그러나 현재까지 이런 혼합의 흔적은 거의 나타나지 않기 때문에 이 가능성은 희박해 보인다.

6. 결 론

피닉스 해령 P3 구역 축부에 발달하는 해저화산의 중상부 부분(수심 1000-800 m)은 기공질 또는 괴상의 현무암으로 구성되는데, 기공질의 현무암이 우세하다. 기공질 현무암은 반결정질 석기와 감람석과 사장석의 반정(또는 미반정)으로 구성된다. 원형 또는 약한 타원형의 형태를 갖는 기공은 보통 이차광물을 함유하지 않는다. 감람석 반정은 자형 또는 반자형으로 주로 단독으로 산출된다. 사장석 반정은 자형이 대부분으로 알바이트-칼스바드 쌍정을 보인다. 석기는 래스상의 사장석과 감람석, 휘석 그리고 유리질로 구성된다. 괴상 현무암의 구성광물은 기공질 현무암과 별다른 차이가 없다. 현무암의 구성광물과 조직특성도 화산체의 높이(시료 채취 심도)에 관계없이 전반적으로 매우 유사하다.

K-Ar 전암 연대측정 결과 수심 1000 m의 PR2 현무암

은 2.6-2.2 Ma 그리고 수심 800 m의 PR3 현무암은 1.6-1.5 Ma의 형성시기를 나타낸다. 해저 화산체의 상부로 갈수록 연대가 젊어지는 것은 중심분화를 통해 화산체가 성장했음을 지시하는 것으로 생각된다. 또 이 화산체의 최정상부에서 채취한 PR3 현무암의 연령(1.6-1.5 Ma)은 화산활동의 종결시기를 나타내는 것으로 보인다.

이 현무암들은 노움 네펠린을 함유하지 않고 약간의 노움 감람석이나 노움 석영을 갖는 알칼리계열과 비알칼리계열의 중간 조성에 해당하는 화학조성을 보인다. 미량원소와 희토류원소 조성 특성은 이 해저화산이 해령 확장과 관련된 중앙해령형 현무암이 아니라 맨틀 플룸에 기인한 열점활동의 산물임을 지시한다. 이 해저화산은 전체적으로 상부맨틀 감람암의 낮은 부분융해에 의해 형성되었는데, 분출활동이 진행됨에 따라 점진적으로 부분융해 정도가 줄어들어 약 1.5 Ma에 약한 알칼리성 현무암을 분출하고 화산활동을 종결하였다.

현재까지 스코티아관과 피닉스관에서는 오랜기간 거의 고정점에서 활동한 열점이 발견된 예가 없기 때문에 비교할 만한 자료가 없지만 피닉스 해령 P3구역 측부에서 발견된 이 해저화산은 이 지역에서 처음 발견된 열점 기원 화산체일 것으로 생각된다. 따라서 이 해저화산의 현무암 시료들은 피닉스 해령의 진화 과정, 해령 확장과 열점활동의 시공간적 관련성등 많은 지체구조 상의 문제점을 해결할 수 있는 귀중한 자료로 여겨지기 때문에 향후 방사성 동위원소 조성 분석 등 다양한 연구가 계속 이루어져야 할 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원 일반 사업 “남극 광물자원 확보를 위한 환경 특성 연구(PP02103)”과 국가지정연구실 사업 “북극 대기환경 및 광물자원 연구(PN47500)”의 연구비를 통해 이루어졌다. 이 논문을 심사해 주시고 건설적인 비평을 해주신 한국해양연구원 유찬민 박사과 연세대학교 최성희 박사께 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

김규중, 이상복, 진영근, 남상현, 김예동, 유인성, 윤종렬. 2000. 남극-피닉스 해령과 히어로 파쇄대 교차지역에 대한 중력 및 해저지형 연구. *극지환경 특성 및 보존에 관한 연구*, BSPP 00001-05-1329-7, 한국해양연구원, 611-649.

이종익. 1994. X-선 형광분석기를 이용한 화강암류의 정량분석 프로그램 개발에 관한 연구. *한국해양연구소 기본과제 보고서*, BSPE 00431-671-7, 43 p.

이종익, 허순도, 박병권, 한상준. 2001. 서태평양 캐롤라인군도 웨노섬 알칼리 현무암류의 지구화학 및 K-Ar 연대. *Ocean Polar Res.*, 23, 23-34.

최용주, 이종익. 2001. 브랜스필드 해협 해저화산의 지구화학. *남극광물자원 확보를 위한 환경특성 연구*, BSPP 001-B3-1406-7, 한국해양연구원, 157-184.

Barker, P.F. 1982. The Cenozoic subduction history of the Pacific margin of the Antarctic Peninsula: ridge crest-trench interactions. *J. Geol. Soc. London*, 139, 787-801.

Barker, D.H.N. and J.A. Austin. 1998. Rift propagation, detachment faulting, and associated magmatism in Bransfield Strait, Antarctic Peninsula. *J. Geophys. Res.*, 103, 24017-24043.

Cande, S.C. and R.B. Leslie. 1986. Late Cenozoic tectonics of the Southern Chile Trench. *J. Geophys. Res.*, 91, 471-496.

Cande, S.C., R.B. Leslie, J.C. Parra, and M. Hobart. 1987. Interaction between the Chile Ridge and Chile Trench: Geophysical and geothermal evidence. *J. Geophys. Res.*, 92, 495-520.

Delaney, J.R., H.P. Johnson, and J.L. Karsten. 1981. The Juan de Fuca ridge-hotspot-propagating rift system: New tectonic, geochemical, and magnetic data. *J. Geophys. Res.*, 86, 11747-11750.

Desonie, D.L. and R.A. Duncan. 1990. The Cobb-Eickelberg seamount chain: Hotspot volcanism with mid-ocean ridge basalt affinity. *J. Geophys. Res.*, 95, 12697-12711.

Douglass, J., J.-G. Schilling, and D. Fontignie. 1999. Plume-ridge interactions of the Discovery and Shona mantle plumes with the southern mid-Atlantic Ridge (40-55°S). *J. Geophys. Res.*, 104, 2941-2962.

Forsthe, R.D. and E.P. Nelson. 1985. Geological manifestations of ridge collision: Evidence from the Golfo de Penas-Taitao Basin, southern Chile. *Tectonics*, 4, 477-495.

Forsthe, R.D., E.P. Nelson, M.J. Carr, M.E. Kaeding, F. Herve, C. Mpodozis, J.M. Soffia, and S. Harambour. 1986. Pliocene near trench magmatism in southern Chile: A possible manifestation of ridge collision. *Geology*, 14, 23-27.

Irvine, T.N. and W.R.A. Baragar. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8, 523-548.

Johnson, H.P. and R.W. Embley. 1990. Axial seamount: An active ridge axis volcano on the central Juan de Fuca ridge. *J. Geophys. Res.*, 95, 12689-12695.

Klein, E.M. and C.H. Langmuir. 1987. Global correlations of ocean ridge basalt chemistry with axial depth and crustal thickness. *J. Geophys. Res.*, 92, 8089-8115.

- Kruz, M.D., A. Le Roex, and H.J.B. Dick. 1998. Isotope geochemistry of the oceanic mantle near the Bouvet triple junction. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62, 841-852.
- Larter, R.D. and P.F. Barker. 1991. Effects of ridge-trench interaction on Antarctic-Phoenix spreading: Forces on a young subducting plate. *J. Geophys. Res.*, 96, 19583-19607.
- Le Maitre, R.W., P. Bateman, A. Dudek, J. Keller, M.J. Lameyre Le Bas, P.A. Sabine, R. Schmid, H. Sorensen, A. Streckeisen, A.R. Woolley, and B. Zanettin. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Blackwell Science, Inc., London, 193 p.
- Livermore, R., J.C. Balanya, A. Maldonado, J.M. Martinez, J. Rodriguez-Fernandez, C.S. Galdeano, J.G. Zaldivar, A. Jabaloy, A. Barnolas, L. Somoza, J. Hernandez-Molina, E. Surinach, and C. Viseras. 2000. Autopsy on a dead spreading center: The Phoenix Ridge, Drake Passage, Antarctica. *Geology*, 28, 607-610.
- Maldonado, A., R.D. Larter, and F. Aldaya. 1994. Fore-arc tectonic evolutions of the South Shetland margin, Antarctic Peninsula. *Tectonics*, 13, 1345-1370.
- McCulloch, M.T. and J.A. Gamble. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 102, 358-374.
- McDougall, I. and R.A. Duncan. 1980. Linear volcanic chains - recording plate motions? *Tectonophysics*, 63, 275-295.
- Mullen, E.D. 1983. MnO/TiO₂/P₂O₅: A minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implication for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 62, 53-62.
- Nagao, K., A. Ogata, Y.N. Miura, and K. Yamaguchi. 1996. Ar isotope analysis for K-Ar dating using two modified-VG5400 mass spectrometers - I: Isotopic dilution method. *J. Mass Spectrom. Soc. Japan*, 44, 39-61.
- Nakamura, E., I.H. Campbell, M.T. McCulloch, and S.-S. Sun. 1989. Chemical geodynamics in a back arc region around the Sea of Japan: Implications for the genesis of alkaline basalts in Japan, Korea, and China. *J. Geophys. Res.*, 94, 4634-4654.
- Nakamura, N. 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38, 757-775.
- Pearce, J.A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. p. 525-547. In: *Andesites*, ed. by R.S. Thorpe. John Wiley, New York.
- Rhodes, J.M., C. Morgan, and R.A. Lias. 1990. Geochemistry of axial seamount lavas: Magmatic relationship between the Cobb hotspot and the Juan de Fuca Ridge. *J. Geophys. Res.*, 95, 12713-12733.
- Shaw, D.M. 1970. Trace element fractionation during anatexis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 34, 237-243.
- Steiger, R.H. and E. Jäger. 1977. Subcommittee on geochronology conversion on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36, 359-362.
- Sun, S.-S. 1980. Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs. *Phil. Trans. Royal Soc. London*, A297, 409-445.
- Sun, S.-S. and W.F. McDonough. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. p. 315-345. In: *Magmatism in the Ocean Basins*, eds. by A.D. Saunders and M.J. Norry. Geol. Soc. London Spec. Pub., 42.
- Tucholke, B.E. and R.E. Houtz. 1976. Sedimentary framework of the Bellingshausen Basin from seismic profiler data. p. 197-227. In: *Initial Report of Deep Sea Drilling Project*, 35.
- Wood, D.A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 50, 11-30.

Received Feb. 15, 2003

Accepted Mar. 17, 2003