Jour. Petrol. Soc. Korea Vol. 14, No. 1, p. 73~81, 2005

남극 피닉스 해령 확장작용 소멸시기에 대한 새로운 고찰

최원희* · 이종익 · 이미정 · 허순도 · 진영근

한국해양연구원 부설 극지연구소, 426-744, 경기도 안산시 상록구 사2동 1270

New Approach on the Extinction of Spreading at the Phoenix Ridge, Antarctica

Won Hie Choe*, Jong Ik Lee, Mi Jung Lee, Soon Do Hur and Young Keun Jin

Korea Polar Research Institute, KORDI, 1270, Sa-2-dong, Sangrokgu, Ansan 426-744, Korea

요 약: 남극 드레이크 해협에서 작은 해양판으로 존재하는 피닉스판의 확장 작용 소멸 시기를 보다 명확하게 이해하고자 해령의 각 구역에서 체계적으로 채취된 현무암편을 대상으로 K-Ar 연대 측정을 실시하였다. 남서쪽 P3 구역 열극 사면 현무암의 K-Ar 연령은 3.5-6.4 Ma이고 해령 축부 거대 화산체의 연령은 1.5-3.1 Ma이다. 중앙의 P2 구역 열극 사면 현무암의 연령은 2.1 Ma이고, 축부 중앙고지대 현무암의 연령은 1.4-1.9 Ma이다. 해령 축으로부터의 거리와 지체구조 특성에 기초한 확장작용 소멸시기는 P3 구역이 3.3 Ma, P2 구역이 2.0 Ma로 해석된다. 이 결과는 기존의 여러 지구물리 자료가 제시하는 '3.3 Ma 동시 소멸설'과는 배치되며 해령의 P3 구역에서 P2 구역을 향해 확장작용이 단계적으로 소멸되었다는 것을 지지한다.

핵심어: 피닉스 해령, 소멸 시기, K-Ar 연대, 해저 현무암

Abstract: K-Ar ages have been determined for the submarine basalts dredged from the P2 and P3 segments of the Phoenix Ridge, Drake Passage, Antarctica, for better understanding on the extinction of seafloor spreading. At the P3 segment, the K-Ar ages of the rifted ridge basalts are 3.5-6.4 Ma, and those for the axial seamount basalts are 1.5-3.1 Ma. The K-Ar ages for the basalts at the rifted ridge and axial central high in the P2 segment are 2.1 and 1.4-1.9 Ma, respectively. We suggest that the extinction of seafloor spreading at the P3 and P2 segments occurred at 3.3 and 2.0 Ma, respectively, on the basis of ridge structure and formation time of basalts. This result favors a stepwise extinction model rather than a simultaneous one on the extinction of the Phoenix Ridge.

Key words: Phoenix ridge, extinction of spreading, K-Ar age, submarine basalt

서 론

지구상에서 해양판의 섭입작용은 판의 크기, 섭입속도와 각도 등에 따라 대륙주변부에서 다양한 특성을 보인다. 남미대륙과 남극반도 사이의 드레이크 해협에 존재하는 피닉스판은 중생대 후기 이후 남극-피닉스 해령(이하 피닉스 해령)이 남동 방향으로 이동함에 따라 점차 그 크기가 작아져 현재는 소규모 해양판의 형태로 남아 있다(Figs. 1 and 2). 피닉스 해령은 계속해서 남극반도의 해구와 충돌하면서 소멸을 거듭했고 현재는 확장작용도 정지한 것으로 보인다(Barker, 1982). 현재의 피닉스 해령은 남서쪽의 히어로 파쇄대와 북동부의 쉐클톤 파쇄대 사이에서 세 개의 분할된 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 멈추었

*Corresponding author: Tel. 82-31-400-6413, E-mail. wonychoe@snu.ac.kr

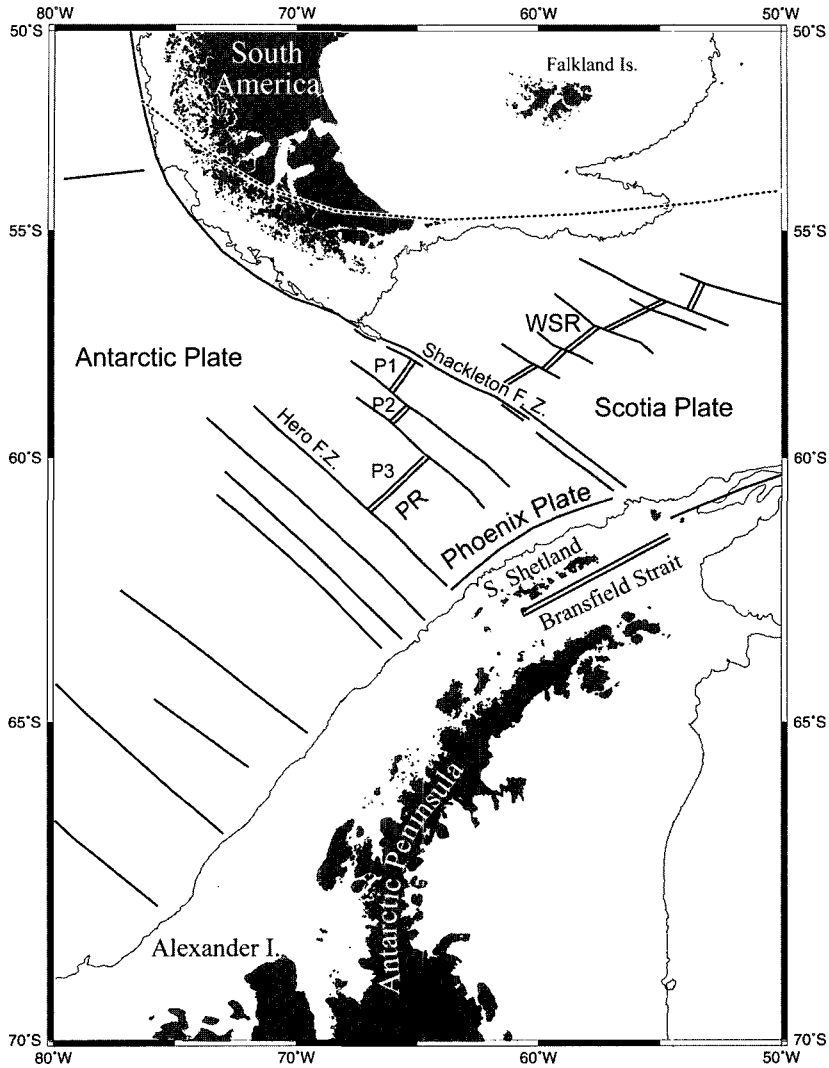

Fig. 1. Tectonic map around the Drake Passage. The gray area is the Phoenix Plate and the double lines are the ridge axises which are inactive or active. Solid lines represent the fracture zones. PR, Phoenix Ridge; WSR, West Scotia Ridge.

다. 충돌 후 해구 지형은 없어졌으며(Tucholke and Houtz, 1976), 그 주변부는 남극판의 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 소멸된 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 현재 확장작용이 정지된 것으로 보인다.

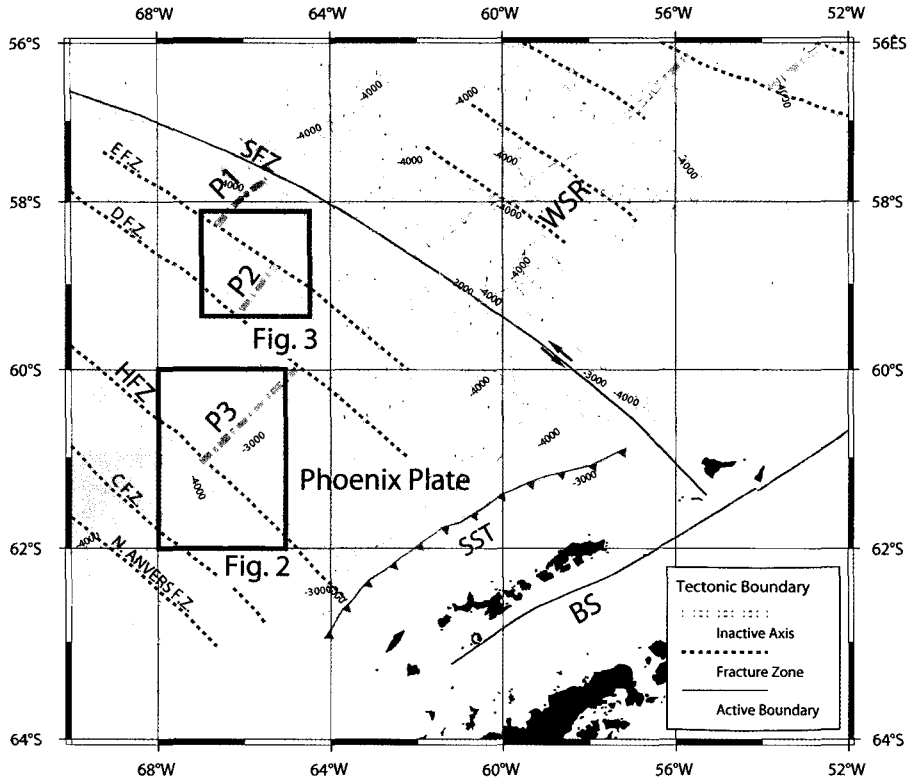

Fig. 2. Tectonic boundary map over the bathymetry predicted using satellite altimetry in Drake Passage (Smith and Sandwell, 1994). Green area shows below 4000 m depth and yellow above 3000 m. Solid lines are active boundaries, dotted lines represent the fracture zones and the thick dotted lines represent inactive spreading axis. BS, Bransfield Strait; HFZ, Hero Fracture Zone; P1, P2, P3, Phoenix Ridges; SFZ, Shackleton Fracture Zone; SST, South Shetland Trench; WSR, West Scotia Ridge.

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

피닉스 해령의 활동이 멈춘 원인은 히어로 파쇄대 남서쪽에서 일어난 해령과 해구의 충돌로 인하여 해양판 섭입의 직접적인 힘이 되었던 해양판의 크기가 감소함에 따른 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 멈춘 것으로 보인다. 이러한 확장 속도의 변화는 급격한 화산 활동을 유발시키고, 그 결과 저속도 확장해령에서 흔히 보이는 해령축 양쪽에 경사가 급한 해령을 형성한 것으로 추측된다(Livermore *et al.*, 2000). 피닉스판의 잔여 해령들에 대한 각각의 이동속도는 자력이상에서 나타나는 역전현상을 이용하여 구해졌다. 여러 학자들에 의해 구해진 평균속도는 21-29 mm/y 정도로 이 속도는 저속도 확장해령에 해당한다. 특히 4-5 Ma에 확장속도의 급격한 감소가 확인되었는데, 이는 피닉스 해령과 해구의 충돌이 남극반도를 따라 동쪽으로 이동하여 히어로 파쇄대 서편에 도달한 시기와 거의 일치한다. 따라서 해령과 해구의 충돌 메카니즘은 피닉스 해령의 소멸과 직접적인 영향이 있는 것으로 해석된다(Larter and Barker, 1991; Livermore *et al.*, 2000).

그러나 저속도(또는 초저속도) 확장 해령 축부 근처에서는 자력이상이 흔히 중첩될 수 있기 때문에 자력이상만으로는 확장작용 소멸시기를 정확하게 밝혀내기가 어렵다. 또 히어로 파쇄대 서측에서 남서쪽 구역으로부터 점진적으로 해구와 충돌하여 소멸되어 오던 피

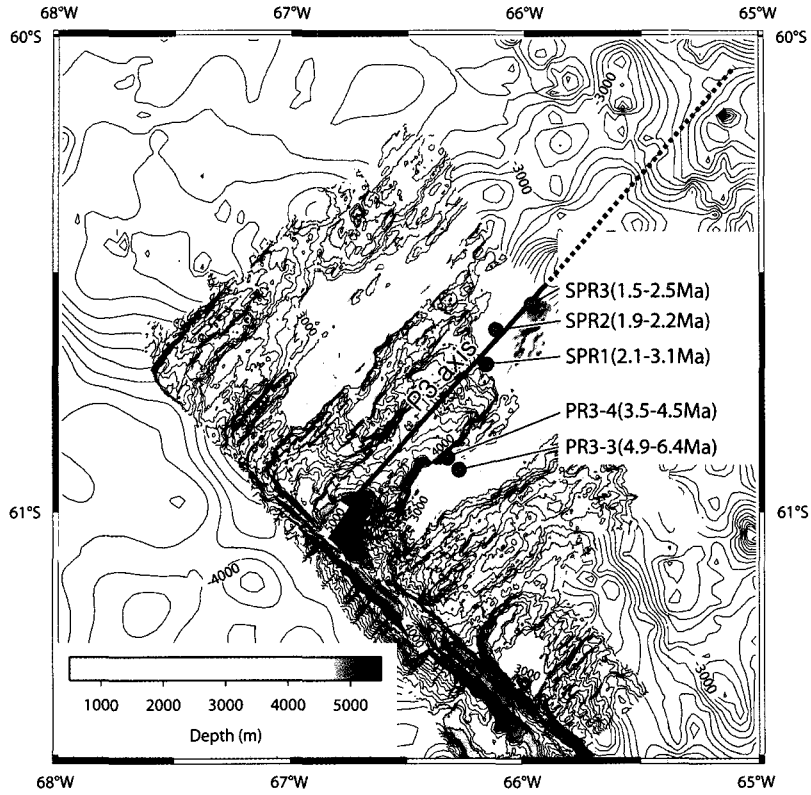

Fig. 3. Bathymetry of P3 segment of the Phoenix Ridge, obtained using SEABEAM 2000 mutibeam sonar. Shaded relief representation illuminate from northeast. Solid sircles represent sampling locations together with K-Ar age ranges. SPR3 is the sampling site of the 2000/2001 cruise (Lee *et al.*, 2003).

닉스 해령의 남은 구역들(P1, P2, P3)이 3.3 Ma에 동시적으로 확장 작용을 멈추었다는 점에도 의문이 제기된다. 피닉스 해령의 확장 작용이 일시에 멈추었는지 또는 시간적 차이를 두고 멈추었는지 아니면 현재도 매우 느린 속도로 확장을 하고 있는지의 여부는 남쉐틀랜드 해구의 섭입작용 지속성 여부와 불가분의 관계를 갖고 있다. 또 남쉐틀랜드 군도와 남극반도 사이에서 형성되고 있는 브랜스필드 배호분지의 구조적 진화과정을 밝히기 위해서도 선결되어야 하는 문제이다.

이 연구에서는 피닉스 해령의 확장작용 특성을 시간적으로 보다 명확하게 이해하고자 확장축 주변에서 체계적으로 채취된 해저 현무암들을 대상으로 K-Ar 연대측정을 실시하였다. 또 확장축 주변의 지형적 특성과 연결하여 피닉스 해령 P2, P3 구역의 최후기 진화과정에 대해 논의 하였다.

피닉스 해령의 구조

1999-2000년도 한국해양연구원 종합조사선 온누리호를 이용한 남극 하계조사 기간동안 히어로 파쇄대 부근 P3 구역에서 새로운 정밀 해저지형 자료가 얻어졌다(Fig. 3). 이 구역의 해령축의 길이는 약 200 km이고 해령의 양쪽 산맥간의 거리는 약 39 km이며 중심분출 화산체가 존재하는 곳에서는 약 47 km로 증가한다. 깊은 열곡의 폭은 대략 10-20 km이며 수심은 해령축을 따라서 1,000-5,000 m로서 히어로 파쇄대를 향해 깊어진다. 해령의 경사면은 북서방향으로 비교적 완만하고 남동방향으로 급경사를 이루는 비대칭의 해저지형을 이룬다.

이처럼 해령 축 부근이 깊고 좌우로 급한 경사를 갖는 해령이 발달하는 것은 전형적인 저속도 확장 해령의 특징이다(Macdonald, 1982). 그러나 확장축 중앙부근에 이상적으로 높은 거대한 화산체가 존재하는데 이러한 화산체는 보통의 고속도나 저속도 확장해령에서는 관찰되지 않는다. 이 화산체의 정상부는 수심이 약 750 m로서, 기저부까지의 깊이를 고려하면 높이 약 2,600 m의 화산체이다. 이 해저 화산체의 단축은 약 20

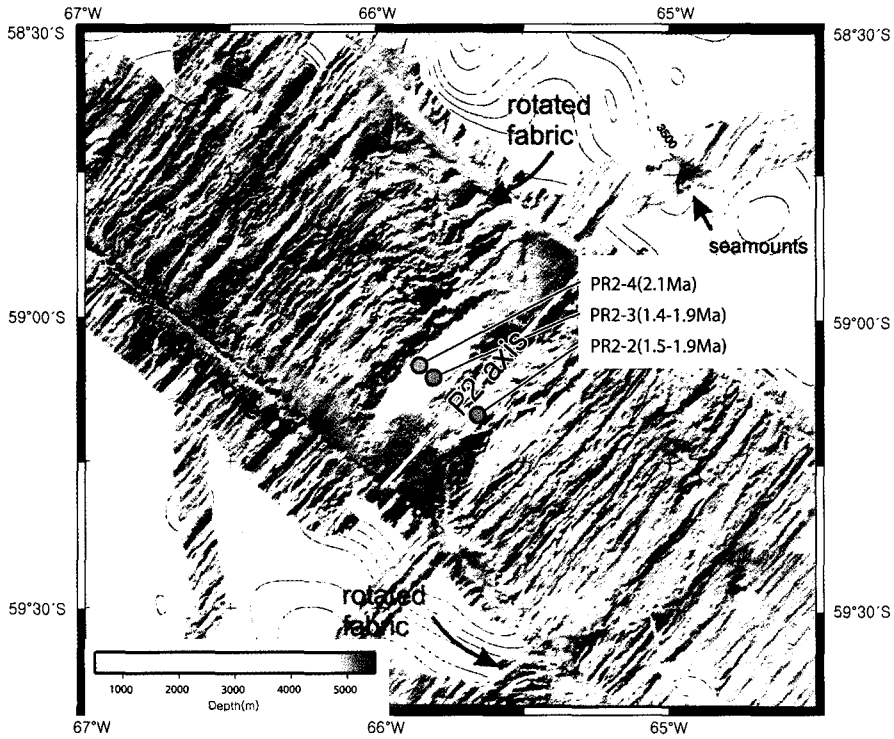

Fig. 4. Bathymetry of P2 segment of the Phoenix Ridge, obtained using Simrad EM12 multibeam sonar (Livermore *et al.*, 2000). Shaded relief represents illumination from south. Contours indicate depths predicted from satellite altimetry (modified from Smith and Sandwell, 1994). Solid circles represent sampling locations together with K-Ar age ranges.

km에 달하고 장축은 30 km 이상이 될 것으로 추정된다. 화산체 정상부(수심 1,000-800 m 지점)에서 채취된 현무암 시료의 K-Ar 전암연대는 1.5-2.5 Ma로서 확장활동이 정지된 후에도 거듭된 중심분출에 의해 화산체가 성장했다는 것을 지시한다(이종익 외, 2003). 이처럼 해령 축부에 거대한 화산체가 발달하는 경우는 해령과 열점이 만나는 독특한 환경에서 찾아볼 수 있다(예를 들면, Hébert *et al.*, 1999). 그러나 현재까지 이 화산체가 열점기원 화산체라는 지구화학적 또는 지구물리학적 증거가 빈약하기 때문에 화산체 성인 자체에 대한 논의는 추후에 하기로 한다.

피닉스 해령 중에서 축의 길이가 가장 짧은 P2 구역은 축으로부터 먼 곳에서는 해령축과 평행한 많은 기복 구조를 갖는 고속도 확장 해령의 특징을 보인다(Fig. 4; Livermore *et al.*, 2000). 그러나 해령축 부근에서는 보다 심한 지형적 기복이 나타난다. 축의 양쪽 파쇄대 근처에서는 4,000-4,500 m 깊이의 분지가 발달하고, 축 중앙부는 수심 2,000 m 정도의 고지대를 보여 전체적으로 축 방향으로 말안장 형태를 보인다. 축의 양측면에는 거대한 해령이 발달하는데 북서쪽 해령은 깊이가 약 570 m, 남동쪽 해령은 약 1,500 m로서 북서쪽 해령이 급한 경사를 보인다. 이런 특징은 원래 고지대를 이루던 축 부분이 확장속도 감소(저속도 확장)와 열극작용(rifting)에 의해서 양쪽으로 분리되면서 생긴 것으로 해석된다(Livermore *et al.*, 2000).

시료채취 및 연구방법

해저 화산암 시료는 2002-2003 하계조사 기간 중 조사선 유즈모호에서 드레지 작업을 통해 채취되었다. P3 구역에서는 기복이 심한 남동쪽 해령 사면의 수심 2,500 m 지점(PR3-3)과 3,000 m 지점(PR3-4)에서 다량의 현무암편을 채취하였다. P3 구역 축부 해저 화산체에서는 수심 2,900 m 지점(SPR1)과 2,000 m 지점(SPR2)에서 현무암편을 채취하였다. 화산체 정상부에 해당하는 지점은 이종익 외(2003)의 시료 채취 지점이다.

P2 구역에서는 축 중앙부 고지대의 두 지점(수심 2,400 m(PR2-2)와 2,000 m(PR2-3))과 경사가 급한 북서쪽 해령의 수심 1,200 m 지점(PR2-4) 등 총 세 지점에서 현무암편 시료가 채취되었다. 채취된 현무암편은 모

Table 1. Analytical result of K-Ar ages of Phoenix Ridge basalts.

Sample	K (wt%)	^{40}Ar radiogenic (10^{-8} cc/g)	^{36}Ar (10^{-10} cc/g)	Age (Ma) (2σ)	Air (%)
PR2-2-1	1.179	6.820±0.218	28.841	1.490±0.065	92.59
PR2-2-2	1.378	8.413±0.237	17.455	1.572±0.065	85.98
PR2-2-3	1.046	7.917±0.226	20.314	1.949±0.081	88.35
PR2-2-4	0.838	7.028±0.208	21.025	2.158±0.091	89.84
PR2-3-1	1.312	10.294±0.248	32.485	2.021±0.063	90.31
PR2-3-2	1.162	8.592±0.472	25.560	1.903±0.119	89.79
PR2-3-2g*	1.079	15.998±0.261	22.487	3.815±0.098	80.60
PR2-3-3	1.295	8.779±0.372	50.002	1.745±0.091	94.39
PR2-3-3g	1.171	6.344±0.218	20.775	1.396±0.064	90.63
PR2-3-5	1.187	6.631±0.223	13.191	1.438±0.065	85.46
PR2-4-1	0.772	6.355±0.226	17.595	2.119±0.098	89.11
PR2-4-3	0.797	6.771±0.227	21.918	2.187±0.098	90.54
PR3-3-1	0.241	5.979±0.217	20.311	6.387±0.300	90.94
PR3-3-2	0.291	5.524±0.225	11.618	4.891±0.247	86.14
PR3-3-3g*	0.116	41.588±0.217	23.997	89.905±2.671	63.03
PR3-3-4	0.216	4.347±0.241	14.050	5.181±0.326	90.52
PR3-4-1*	2.507	740.554±0.680	42.628	74.534±1.462	14.54
PR3-4-2	0.141	1.915±0.225	1.614	3.492±0.416	71.36
PR3-4-3g*	0.108	49.963±0.267	9.361	115.489±3.409	35.64
PR3-4-4	0.216	3.751±0.224	19.774	4.471±0.298	93.97
SPR1-1	0.564	6.933±0.249	17.683	3.161±0.148	88.29
SPR1-2	0.523	4.347±0.246	20.348	2.140±0.137	93.26
SPR1-2g	0.564	6.931±0.213	17.164	3.160±0.136	87.98
SPR1-3	0.589	5.175±0.244	13.711	2.260±0.126	88.67
SPR2-1g*	0.963	20.590±0.324	45.560	5.500±0.186	86.74
SPR2-2	1.087	8.460±0.304	25.946	2.003±0.094	90.06
SPR2-3	1.021	8.645±0.376	37.197	2.180±0.115	92.71
SPR2-4	1.021	7.526±0.233	34.193	1.898±0.082	93.07

*Samples possibly containing excess radiogenic Ar.
g: glass of pillow lava surface

두 육안상으로 매우 신선하며, 대체적으로 잘 발달된 베개 모양의 용암구조를 갖는다. 즉 표면에 약 1 cm 두께의 유리질 표면이 발달하고 중심구조를 향하여 방사상의 절리가 발달한다. 기공의 발달정도, 반정의 유무와 종류는 채취지점에 따라 다양한 특성을 보인다.

채취된 시료들은 지역별로 서로 다른 화학조성을 보인다. P3 구역 남동쪽 사면의 현무암편들(PR3-3, PR3-4)은 불호정성 원소들이 결핍되고, 미량원소와 희토류 원소의 함량은 낮은 전형적인 N-type 중앙해령 현무암(MORB)의 조성을 갖는다. 반면 P3 구역 축부 해저화산체(SPR1, SPR2)와 P2 구역(PR2-2, PR2-3, PR2-4)의 현무암편들은 불호정성 원소들이 부화되고, 호정성이 강한 원소를 향하여 단조적으로 감소하는 E-type 중앙해령 현무암의 화학조성을 갖는다(이종익, 미발표).

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

K-Ar 연대 측정을 위한 전암의 K 정량은 극지연구소의 X-선 형광분석기(XRF Philips PW1480)를 이용하였고, Ar 동위원소의 정량 분석은 한국기초과학지원연구원 연대측정팀에 의뢰하여 불활성기체 질량분석기

(SVMS, VG5400)를 이용하였다. 자세한 분석 방법은 김정민(2001)을 참조하였다. 연대계산에 사용한 K의 동위원소비와 붕괴상수는 $\lambda_\beta = 4.962 \times 10^{-10} y^{-1}$, $\lambda_e = 0.581 \times 10^{-10} y^{-1}$, $^{40}K/K = 0.01167$(atomic %)이다(Steiger and Jäger, 1977). 분석 과정 중 측정된 표준시료 SORI93 흑운모(92.6±0.6 Ma; Sudo *et al.*, 1998)의 연령은 91.6±0.5 Ma(2σ 표준오차)로서 1% 범위 내외의 오차 범위 내에서 표준값과 잘 일치하였다. 현무암편의 연대측정 결과는 Table 1에 제시하였다.

결 과

일반적으로 해저에 분출한 베개용암의 표면 유리질 부분은 급랭되면서 정상적인 마그마의 탈가스 작용을 방해하기 때문에 흔히 이상적으로 많은 양의 불활성 기체를 함유한다(Kaneoka, 1993). 따라서 이 부분은 마그마의 성인을 규명하기 위한 불활성 기체(He, Ne, Ar 등) 동위원소 분석에 많이 이용되며, K-Ar 연대측정을 실시하면 이상적으로 높은 연령을 보이기도 한다. Table 1에서와 같이 대부분의 베개 용암 표면 유리질 시료의 연대측정 결과는 동일한 위치의 다른 시료들에 비해 최대 30배 가량의 신뢰할 수 없는 연대를 보인다(예를 들면, PR3-4-3g의 115 Ma 등). 따라서 이런 시료들은 해저 현무암편의 형성시기에 관한 이후 논의에서 제외하기로 한다.

피닉스 해령의 현무암 연령은 전체적으로 1.4-6.4 Ma의 범위를 갖지만 구역별로 큰 차이를 보인다. P2 구역에서는 1.4-2.1 Ma의 작은 범위를 갖지만, P3 구역에서는 1.5-6.4 Ma의 넓은 연령 분포를 보인다. 이렇게 인접한 해령에서 나타나는 연령의 큰 편차는 해령의 확장속도 변화 또는 확장 소멸 시기의 차이에 기인했을 가능성을 제기한다.

P3 구역 남동쪽의 경사가 급한 해령사면 현무암의 경우 해령축에서 멀어짐에 따라 수심 3,000 m에서 3.5-4.5 Ma(PR3-4), 2,500 m에서 4.9-6.4 Ma(PR3-3)의 연령을 보인다(Fig. 3). 최근 이 부분에서 자기 이상도 해석에 의한 연령은 5 Ma(C3) 전후로 밝혀졌다(Kim, 2005). 따라서 이 시기는 해령 확장이 소멸기에 근접하면서 급격한 속도 감소가 일어났던 시기로 해석되며, 자력 이상 자료는 이 기간의 확장속도를 2 mm/y 전후로 제시한다.

P3 구역 중심부에서는 수심 3,500 m를 기준으로 높이 2,600 m 정도의 해저화산체가 존재하고, 이 화산체를 이루는 현무암의 K-Ar 연령은 기저부로부터 수심 2,900 m에서 2.1-3.1 Ma(SPR1), 2,000 m에서 1.9-2.2 Ma (SPR2)의 연령을 나타내어 화산체의 상부로 갈수록 연령이 감소한다. 또 이 화산체의 최정상부(수심 1,000-800 m)에 해당하는 현무암의 연령은 1.5-2.5 Ma로 보고되었다(이종익 외, 2003). 이 화산체 형태와 높이에 따른 연령의 조화적 감소 특성은 이 화산체가 중심분출에 의해 형성되었다는 것과 3.1-1.5 Ma 기간 동안 마그마 분출에 의해 화산체가 성장하고 있을 시기에는 해령 확장이 완전히 정지되었었다는 것을 지시한다. P3 구역에서 자력이상 자료를 해석한 해령의 확장정지 시기는 대략 3.6 Ma로 제시한다(Kim, 2005). 따라서 P3 구역 축부 중앙에서는 해령의 확장이 정지된 이후에도 용암의 분출이 200만년 가량 지속되어 화산체가 큰 규모로 성장한 것으로 생각된다.

P2 구역의 해령은 열곡에 중앙고지대(central high)가 존재하는 전형적인 저속도 확장해령(< 2 mm/y)이다. 현무암의 연령은 해령축 좌우의 중앙고지대 남동쪽의 수심 2,400 m 지점에서 1.5-1.9 Ma(PR2-2)이며, 북동쪽의 수심 1,800 m 지점에서 1.4-1.9 Ma(PR2-3)으로 중앙고지대는 거의 같은 시기의 마그마가 분출물로 이루어진 것을 알 수 있다. 또 축 북서부에서 열극작용에 의해 형성된 급한 경사면의 상부에 해당하는 수심 1,200 m 지점의 현무암의 연령은 대략 2.1 Ma(PR2-4)이다. 기복이 완만한 P2 구역 중앙고지대에서 채취된 현무암의 연령(1.4-1.9 Ma)은 드레지 작업에서의 시료 채취 지점의 오차를 고려하면 거의 해령축에서의 마그마 분출시기로 보는 편이 타당하다. 따라서 열극작용과 관련된 북서쪽 해령 고지대의 현무암의 연령(PR2-4; 2.1 Ma 전후)이 확장의 소멸시기와 거의 일치하는 것으로 해석된다. 결과적으로 P2 구역의 해령 확장 소멸시기는 P3 구역보다 100만년 이상 젊은 것으로 해석되며, 비록 확장이 다소 진행되었다고 하더라도 그 속도는 1 mm/y 전후로 매우 느렸을 것으로 생각된다.

토의 및 결론

일반적으로 해령확장 속도가 점차 감소하다가(< 2 mm/y) 확장작용이 멈출 경우 그 해령 축부 주변에서 고지자기 이상 판별에 의해 해령의 연령을 구하는 방법은 매우 어렵다. 현재까지의 대부분의 고지자기 연구결과는 피닉스 해령이 5-3.3 Ma를 전후하여 멈춘 것으로 해석하고 있다(Livermore *et al.*, 2000; Kim, 2005).

그러나 P2, P3 구역에서 체계적으로 채취된 현무암의 연대측정 결과는 두 해령의 확장작용 소멸시기에 있어서 100만년 이상의 큰 차이가 있음을 지시한다.

P3 구역에서와 같이 축상에 위치하는 큰 화산체는 일반적으로 해령과 열점이 만날 때 잘 형성된다고 알려져 있다. 그러한 예는 대서양, 인도양의 중앙해령과 북동 태평양의 Juan de Fuca 해령 등 여러 곳에서 발견된다(예를 들면, Delaney *et al.*, 1981 Desonie and Duncan, 1990; Rhodes *et al.*, 1990; Kurz *et al.*, 1998; Douglass *et al.*, 1999). 그러나 이러한 경우 열점은 맨틀 대류와 관계없이 깊은 맨틀에 고정되기 때문에 해령에 수직방향으로 해저화산군의 배열이 나타난다. 연구지역의 P3 구역 주변에서는 이러한 선상의 해저화산군의 배열이 발견되지 않는 것으로 보아 이 거대 화산체가 열점에 의해 형성되었을 가능성은 적어 보인다.

그러나 이 큰 화산체는 기원 물질의 성인과 관계없이 중심 분출에 의해 100만년 이상 성장하였고, 화산체 주변에 열극 작용과 같은 큰 구조적 기복이 전혀 없다. 따라서 이 화산체는 해령의 확장 작용이 완전히 소멸한 후에 형성된 것으로 해석된다. 따라서 열극 구조를 뚜렷하게 보이는 P3 구역 남동부 사면의 현무암의 형성시기(3.5-6.4 Ma)까지를 해령 확장기로 본다면 P3 구역의 확장 소멸 시기는 기존의 고지자기 연구 결과와 잘 일치한다(3.3 Ma, Livermore *et al.*, 2000; 3.6 Ma, Kim, 2005).

P2 구역은 축 중앙의 고지대와 축 좌우로 열극 작용을 받은 두개의 해령이 잘 발달한다는 점에서 전형적인 저속도 확장해령의 구조적 특성을 잘 보여준다. 또 P2 구역에서 채취된 현무암의 형성 시기는 1.4-2.1 Ma 범위로 매우 좁기 때문에 대체적으로 이 기간에 해령 확장이 멈춘 것으로 해석해도 무방하다. 그러나 우리는 해령축에서 가장 멀리 위치하며 열극 구조를 잘 보이는 북서쪽 해령 사면에서 채취한 현무암의 연령이 가장 오래된 2.1 Ma인 것에 주목하여 P2 구역의 확장 소멸시기를 2.0 Ma로 제안한다.

결론적으로 피닉스 해령 해저 현무암의 연대 측정 결과는 P2 해령이 P3 해령보다 적어도 100만년 이상 확장 작용을 유지했다는 것을 지시한다. 또 이 결과는 과거 큰 해양판이었던 피닉스판의 각 해령 구역들의 충돌이 신생대 이후 남극 반도 남서부에서 북동부로 점진적으로 진행되어 현재 모습을 보이고 있다는 기존의 학설과 잘 부합된다. 이런 해석은 피닉스판의 가장 북동부에 위치하며 남쉐틀랜드 해구까지의 거리가 가장 큰(즉, 해구측에서 볼 때 가장 오래된) P1 해령(Fig. 1)이 2.0 Ma 보다도 늦은 시기에 확장 활동을 정지했거나 현재까지도 확장 활동을 계속하고 있을 가능성을 암시한다.

그러나 P1 해령은 칠레의 배타적 경제수역(EEZ) 내에 위치하여 접근이 용이하지 않고 정밀한 해저 지형 자료도 없기 때문에 이 문제에 대한 종합적인 해석까지는 시간을 필요로 한다. 다행히 2004년 말 한국과 칠레간의 국제공동 연구 협약이 체결되어 조만간 이 지역에 대한 종합 지질-지구물리 탐사가 재개될 것으로 기대되기 때문에 향후 보다 진지한 토의를 기대해 본다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원 부설 극지연구소의 기관고유사업 '남극 지구조 진화 및 지질 환경특성 연구(PE05001)'와 정책연구사업 '남극 브랜스필드 배호분지 열수시스템에 대한 선도적 연구(PG05001)'의 지원을 받아 수행되었다. 이 논문을 심사해 주시고 건설적인 비평을 해주신 부경대학교 박계헌 교수와 익명의 심사자께 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

김정민, 2001, 한국기초과학지원연구원에 도입된 K-Ar 연대 측정 시스템: 개요 및 성능. 암석학회지, 10, 172-178.

이종익, 허순도, 이미정, 김규중, Keisuke Nagao, 2003, 남극 드레이크 해협 피닉스 해령 P3 구역 축부 해저현무암: K-Ar 연대측정과 지구화학. Ocean and Polar Research, 25, 107-118.

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

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.

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

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

Delaney, J.R., Johnson, H.P. and Karsten, J.L., 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 Duncan, R.A., 1990, The Cobb-Eickelberg seamount chain: Hotspot volcanism with mid-ocean ridge basalt affinity. J. Geophys. Res., 95, 12697-12711.

Douglass, J., Schilling, J.-G. and Fontignie, D., 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 Nelson, E.P., 1985, Geological manifestations of ridge collision: Evidence from the Golfo de Penas-Taitao Basin, southern Chile. Tectonics, 4, 477-495.

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

Hébert, H., Villemant, B., Deplus, C. and Diament, M., 1999, Contrasting geophysical and geochemical signatures of a volcano at the axis of the Wharton fossil ridge (N-E Indian Ocean). Geophys. Res. Lett., 26, 1053-1056.

Kaneoka, I., 1993, Noble gas signatures of magmatic sources and processes. Geochem. J., 27, 201-211.

Kim, K.J., 2005, Geophysical investigations of the Phoenix Ridge, a fossil spreading center in Drake Passage, Antarctica. Ph.D. dissertation, Seoul National University, 156p.

Kruz, M.D., Le Roex, A. and Dick, H.J.B., 1998, Isotope geochemistry of the oceanic mantle near the Bouvet triple junction. Geochim. Cosmochim. Acta, 62, 841-852.

Larter, R.D. and Barker, P.F., 1991, Effects of ridge-trench interaction on Antarctic-Phoenix spreading: Forces on a young subducting plate. J. Geophys. Res., 96, 19583-19607.

Livermore, R., Balanya, J.C., Maldonado, A., Martinez, J.M., Rodriguez-Fernandez, J., Galdeano, C.S., Zaldivar, J.G., Jabaloy, A., Barnolas, A., Somoza, L., Hernandez-Molina, J., Surinach, E. and Viseras, C., 2000, Autopsy on a dead spreading center: The Phoenix Ridge, Drake Passage, Antarctica. Geology, 28, 607-610.

Macdonald, K.C., 1982, Mid-ocean ridges: Fine scale tectonic volcanic and hydrothermal processes within the plate boundary zone. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 10, 155-190.

Maldonado, A., Larter, R.D. and Aldaya, F., 1994, Fore-arc tectonic evolutions of the South Shetland margin, Antarctic Peninsula. Tectonics, 13, 1345-1370.

Rhodes, J.M., Morgan, C. and Liias, R.A., 1990, Geochemistry of axial seamount lavas: Magmatic relationship between the Cobb hotspot and the Juan de Fuca Ridge. J. Geophys. Res., 95, 12713-12733.

Smith, W. H. F. and Sandwell, D. T., 1994, Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry, J. Geophys. Res., 99, 21803-21824.

Steiger, R.H. and Jäger, E., 1977, Subcommission on geochronology convension on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology. Earth Planet. Sci. Lett., 36, 359-362.

Sudo, M., Uto, K., Anno, K., Ishizuka, O. and Uchiumi, S., 1998, SORI93 biotite: A New Mineral Standard for K-Ar Dating. Geochem. J., 32, 49-58.

Tucholke, B.E. and Houtz, R.E., 1976, Sedimentary framework of the Bellingshausen Basin from seismic profiler data. Initial Report of Deep Sea Drilling Project, 35, 197-227.

(2005년 2월 18일 접수; 2005년 3월 13일 채택)