

남극 드레이크해협 히어로 파쇄대 사문암의 기원

길영우¹ · 이석훈^{2,*} · 이종익³ · 진영근³

¹한국석유공사 해외개발본부

²한국기초과학지원연구원 나노환경연구부

³한국해양연구원 부설 극지연구소

요 약

남극 히어로 파쇄대에서 암석준설기에 의해 채취한 사문암은 사문석, 각섬석, 녹니석, 활석, 자철석과 잔류 광물로서 감람석, 휘석, 스피넬을 포함하고 있다. 감람석은 높은 포스터라이트 (Fo₈₉₋₉₀) 값을 가진다. 스피넬의 Cr-number와 Mg-number는 상부맨틀 기원 심해 페리도타이트 영역에 속한다. 히어로 파쇄대 사문암은 두 번에 걸쳐 사문석화 작용을 받았다. 첫 번째 사문석화는 깊은 심도(150 - 450°C)에서 일어났다. 첫 번째 사문석화 영역 내의 사문석은 대부분 리자르다이트이나, 비교적 사문석화 작용 진행이 낮은 중심부는 리자르다이트와 안티고라이트가 공존한다. 두 번째 사문석화는 낮은 심도 (150°C 이하)에서 진행되었다. 두 번째 사문석화 영역 내의 사문석은 모두 리자르다이트이다. 사문석화가 진행 되면서, 감람석의 MgO, FeO의 함량은 감소하나, 사방휘석과, 단사휘석의 MgO, FeO 함량은 증가한다. 경하에서 잔류광물이 방향성을 보이고, 잔류 감람석이 높은 Fo₈₉₋₉₀ 값을 나타내며, 스피넬이 상부맨틀 심해 페리도타이트 내 스피넬과 유사한 색깔과 화학조성을 가지는 것은 기원암이 맨틀기원암임을 지시한다. 또한 히어로 파쇄대 사문암의 (HREE)_n 값(0.3 - 1.6)과 Eu 결핍 현상이 보이지 않는 것은 히어로 파쇄대 사문암이 스피넬 페리도타이트를 기원으로 하고 있음을 지시한다.

주요어: 남극, 히어로 파쇄대, 페리도타이트

Young-Woo Kil, Seok-Hoon Lee, Jong-Ik Lee and Young-Keun Jin, 2005, The origin of serpentinite from Hero Fracture zone in Drake passage, Antarctic. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 41, no. 2, p. 157-173

ABSTRACT: Serpentinities from Hero Fracture zone in Antarctic contain serpentinite, amphibole, talc, chlorite, and magnetite as well as olivine, pyroxene, and spinel as relict minerals. Fosterite compositions of olivines in serpentinites are 89 - 90. Cr-numbers and Mg-numbers of spinels in serpentinites are similar to those of spinels in abyssal peridotite. Serpentinities from Hero Fracture zone in Drake Passage have undergone two serpentinization events by oceanic water; first serpentinization event and second serpentinization event. First serpentinization part includes lizardite and antigorite, but second serpentinization part includes only lizardite. First serpentinization event occurred at deeper part (150 - 450°C) than second serpentinization event. During serpentinization, MgO and FeO in olivine are decreased, and those in orthopyroxene and clinopyroxene are increased. The protholith of serpentinites is upper mantle spinel peridotite because of mineral assemblage, Fo₈₉₋₉₀ composition in olivines, and Cr-number and Mg-number in spinels. Moreover, the values of (HREE)_n (0.3 - 1.6) and no Eu anomaly in serpentinites from Hero Fracture zone indicate that the protholith of serpentinites is upper mantle spinel peridotite.

Key words: Antarctic, Hero Fracture zone, Peridotite

(Young-Woo Kil, Korea National Oil Corporation, 1588-14, Gwanyang-dong Dongan-gu, Anyang 431-711, Korea; Seok-Hoon Lee, Korea Basic Science Institute, 52 Yeoeun-dong Yuseung-gu, Daejeon 305-333, Korea; Jong-Ik Lee and Young-Keun Jin, Korea Polar Research Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

1. 서론

사문암은 보통 초염기성암이 지하심부에서 주위의 물을 취입하여 감람석, 휘석 등이 사문석으로 변질되어지는 사문석화작용을 받아 생성된다(Deer *et al.*, 1992) 이러한 사문암은 오래전부터 해양바다에 널리 존재한다고 보고 되고 있다. Hess(1962)는 해양암권에 맨틀암석 근원 사문암이 널리 존재하고, 해령 주위의 500°C 등온선을 따라 사문암이 존재한다고 언급했다.

심해에서 발견되어지는 심해 페리도타이트는 파쇄대를 따라 산출되기도 하고, 저속도로 확장되는 해령에서 발견되기도 한다(Bonatti, 1968, 1976; Miyashiro *et al.*, 1969; Bonatti, 1976; Bonatti and Honnorez, 1976; Prinz *et al.*, 1976). 파쇄대에서는 대규모의 절리를 따라 주위의 물(대부분이 해수)이 취입되고, 초염기성암이 사문암으로 변질되게 된다. 이런 과정을 통해 사문암 밀도가 해양지각의 평균 밀도(2.8 g/cm³)와 맨틀암석의 밀도(3.3 g/cm³) 보다 낮은 2.5 g/cm³가 된다.

연구 지역은 British Antarctic Survey와 Polish Academy of Science에 의해 지진파, 중력, 자력을 이용한 해양 지각 구조 해석에 관한 연구가 있었고(Ashcroft, 1972; Barker and Dalziel, 1983; Guterch *et al.*, 1985, 1991; Renner *et al.*, 1985; Garrett and Storey, 1987; Parra *et al.*, 1988; Gonzalez-Ferran, 1991), 한국해양연구원 부설 극지연구소에 의해 지구물리학적 연구가 있었다(Jin and Kim, 1996; Jin *et al.*, 1997, 2002). 그 외도 최근에 들어서 남극 지역에 관한 많은 논문들이 있었으나 대부분이 지질 구조 및 지구물리학적 연구에 국한 되어져 있어, 이 지역 사문암에 관한 연구는 없었다(Henriet *et al.*, 1992; Livermore *et al.*, 2000; Jin *et al.*, 2002).

이 연구는 히어로 파쇄대에 산출되는 사문암의 기원암을 찾아보고, 사문석화 과정을 유추하여, 기원암이 형성 되어진 후에 있었던 일련의 과정들을 살펴보고, 지구조적인 환경을 고찰하는데 있다. 또한 이 연구는 피닉스판의 활동성 여부를 판단할 수 있는 하나의 실마리를 제공할 것이다.

2. 연구지역

그림 1에서와 같이 남극 반도와 태평양 지각에는

여러 개의 파쇄대가 존재한다. 그들 중에서 남세틀랜드 북서쪽에 큰 규모의 히어로 파쇄대와 웨클턴 파쇄대가 있다. 웨클턴 파쇄대는 지금은 남극판에 속하여 있는 피닉스판과 스코시아판의 경계에 놓여져 있고, 히어로 파쇄대는 피닉스판과 남극판의 경계에 놓여져 있다.

남극반도와 태평양쪽 대륙주연부에는 판게아 초대륙의 분리가 시작된 이후에 복잡한 섭입작용과 이와 관련되어 화산활동이 있었다(Barker, 1982; Pankhurst, 1982; Storey and Garrett, 1985). 약 50 Ma에 이 지역은 해양해령과 해구가 충돌하기 시작하였다(Barker, 1982). 이때 남극-피닉스 해령이 점진적으로 남동 방향으로 이동함에 따라 피닉스판만 남기고 해구로 섭입 되었다. 현재 히어로 파쇄대를 경계로 남동쪽은 해양해령이 모두 사라진 지역이 되었고, 북동쪽은 해양해령이 남아있는 지역이 되었다. 이러한 피닉스 해령의 섭입은 현재는 정지한 것으로 생각된다(Barker, 1982; Henriet *et al.*, 1992; Livermore *et al.*, 2000; Pearce *et al.*, 2001).

3. 시료채취 및 연구방법

히어로 파쇄대 지역의 정확한 해저지형과 시료채취 지점을 파악하기 위하여 한국해양연구원 종합조사선 온누리호를 이용하여 획득한 탄성파 자료(김예동 외, 1998)와 Henriet *et al.* (1992)의 자료를 비교하여 보았다. 그림 1A에서와 같이 시료 채취 지점에서 가까운 다채널 탄성파 라인은 Henriet *et al.* (1992)에 의해 실시된 남극반도일대의 탄성파 라인 4b이다. 히어로 파쇄대는 세 개의 산봉우리가 산맥 모양을 이루고 있다. 히어로 파쇄대의 사문암은 2002년 12월에 조사선 유즈모호를 이용하여 S61°44'20", W65°17'40" 지점(심도 -2200 m)에서 암석 준설기를 이용하여 얻었다. 정확한 시료 채취 지점은 히어로 파쇄대 왼쪽 봉우리의 오른쪽 사면이 된다(그림 1B).

변질작용을 심하게 받은 시료들은 절단 시 쉽게 부서지기 때문에 진공 하에서 점도가 낮은 에폭시로 충전시켜 2일에 걸쳐 건조시켰다. 에폭시로 충전된 시료를 절단하여 연마박편을 제작하였다. 편광현미경을 이용하여 광물의 기본적인 감정 및 조직을 조사하였고, 각각의 광물에 대한 화학조성을 분석하고자 전자현미분석기(Cameca SX-50)를 이용하였다. 분

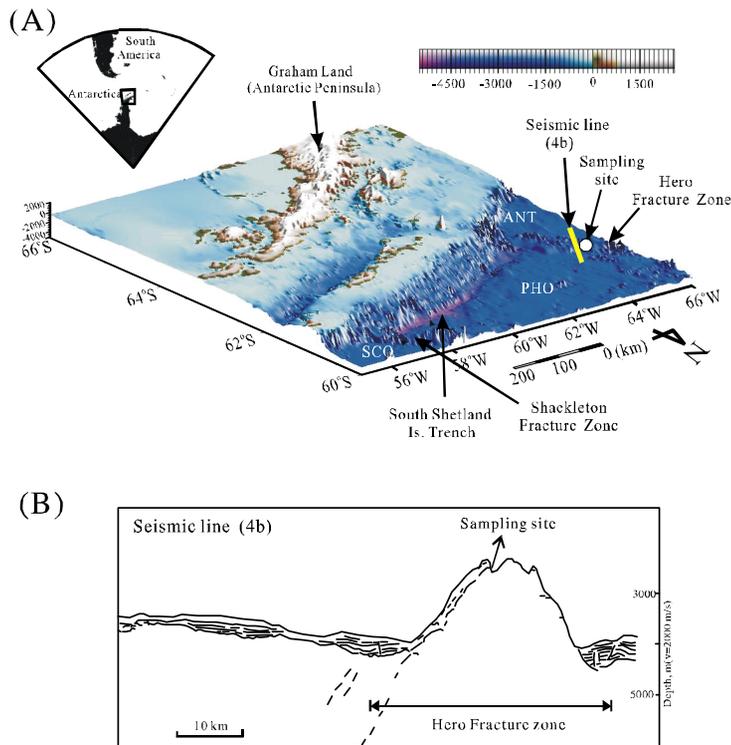


Fig. 1. (A) Three dimensional geographical map with the sampling locality (Canals *et al.*, 2000). ANT = Antarctica Plate, PHO = Former Phoenix Plate, and SCO = Scotia Plate. (B) Mutichannel seismic line of 4b (Henriet, 1992).

석대상 광물이 대부분 전자빔에 약하여 분석과정에서 손상을 입기 때문에 손상을 최소화 하고 보다 정확한 자료를 얻기 위해 가속전압 및 전류를 15 kV, 10 nA로 설정하고 위치에 따라 전자빔의 크기를 1~5 μm 로 조정하며 분석을 실시하였고, Fe^{3+} 과 Fe^{2+} 는 Droop(1987)의 방법을 사용하여 계산하였다. 또한 시료 전체의 광물조성을 규명하고자 시료를 자연 건조시킨 후 15 μm 이하로 분쇄하여 X-선 회절분석을 실시하였다. 분석조건은 40 kV, 40 mA에서 입사슬릿을 0.5 mm로 설정하고, 2°/min의 속도로 5~70°/2 θ 범위에서 분석을 실시하였다. 전압 주성분원소분석과 미량원소분석은 XRF(X-ray Fluorescence spectrometer), ICP-AES(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer), ICP-MS(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)을 이용하였다. 미량원소 중에서 Sr, Ba, Cr, Li, P, S, Sc, Zn, V, Zr은 ICP-AES을 이용하여 분석하였고, 그 외의 미량원소에 대하여서는 ICP-MS을 이용하였다. 모든

분석은 한국기초과학지원연구원에 있는 장비를 사용하여 실시하였다.

4. 암석기재

사문암은 전형적 색깔인 회흑색을 띠고 있으며, 크기가 3 cm 이상이다(그림 2A), 육안 상으로 사문암은 첫 번째 사문석화가 진행된 FS(First Serpentinization Part)와 두 번째 사문석화가 진행된 SS(Second Serpentinization Part)로 구분된다(그림 2A). FS 중심부는 기원암의 잔류 광물인 감람석, 스피넬을 가장 많이 포함하고 있다. 잔류광물은 타형의 둥근 모양을 보이고, 잔류광물 사이는 사문석화 작용을 받아 사문석으로 채워져 있다(그림 3A). 가장 적게 사문석화를 경험한 FS 중심부는 FS 주변부와 구성광물의 종류와 크기가 비슷하나 상대적으로 사문석 함량이 적다. FS의 주변부는 부분적으로 변질을 받아 황토색을 띠고 있다. 잔류광물들은 층상으로 방

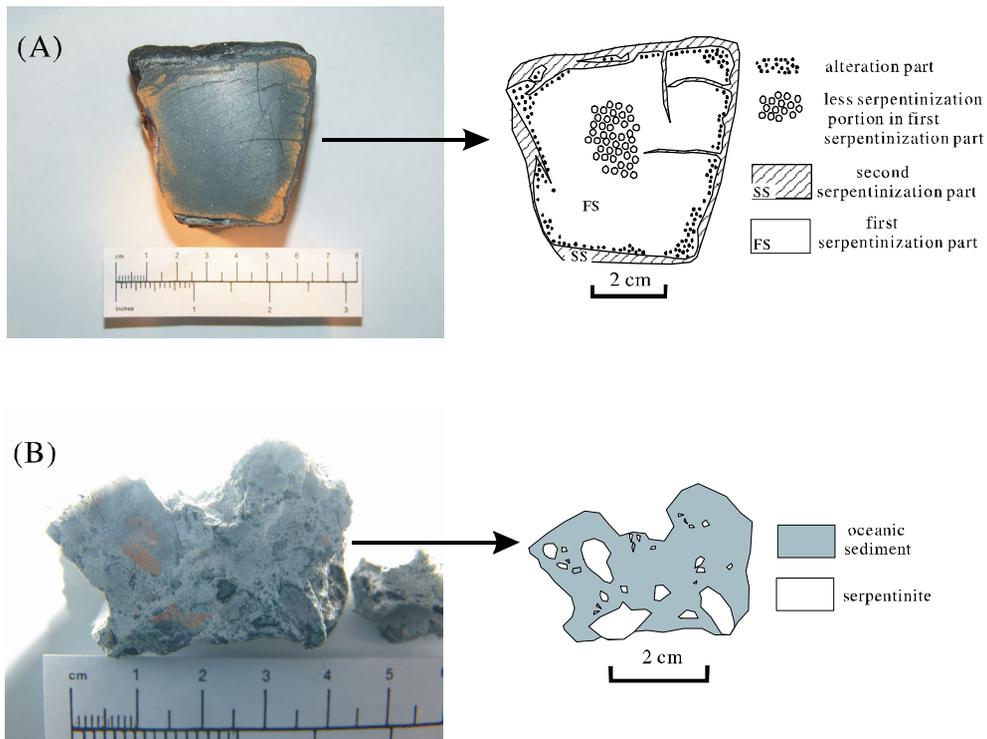


Fig. 2. Photographs of (A) 2-1a and (B) 2b from Hero Fracture zone.

향성을 가지고 배열되어져 있다(그림 3A). 잔류광물 스피넬 중심부는 맨틀 암석의 스피넬과 유사한 적갈색을 보이며, 스피넬 주변부는 녹니석으로 둘러싸여져 있다(그림 3D).

SS(Second Serpentinization Part)는 두 번째 사문석화가 진행된 부분이다. SS는 FS 보다는 어두운 색을 띠고 있어, 다른 환경에서 사문석화 작용을 받았다. 주구성 광물은 대부분 사문석이며 잔류광물인 감람석을 포함하기도 한다. SS는 부분적으로 FS를 맥 상으로 관입 한다(그림 2A). 사문암의 표면은 전형적으로 파쇄대에서 발견되는 특징인 단층 활면(slickenside)을 보인다.

그림 2B와 그림 3E는 유백색의 해양퇴적물에 수 mm~1 cm 정도의 사문석 각력파편이 들어 있는 시료의 그림과 현미경사진이다. 파쇄대에서 부서진 사문암 파편들은 각을 이루고 있는 것이 특징이다. 이들 작은 크기의 사문암 파편들은 해양퇴적층이 퇴적되면서 그 속에 쌓여 형성된 것이다. XRD를 이용해 해양퇴적물의 구성광물을 알아본 결과 주로 아라고나

이트와 방해석으로 되어 있다(그림 5B).

5. 암석화학 조성

사문암의 주성분 및 미량원소 전암분석 결과는 표 1, 표 2와 같다. 히어로 파쇄대 사문암은 주로 SiO_2 (39.18 - 40.60 wt%), MgO (37.59 - 40.60 wt%), Fe_2O_3^* (7.18 - 13.53 wt%)과 소량의 Al_2O_3 (1.48 - 1.98 wt%), CaO (1.00 - 1.92 wt%)로 구성되어 있으며, 나머지 성분은 미량으로 존재한다(표 1). 일반적으로 사문석화가 진행되는 동안 H_2O 와 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 은 증가하고, CaO , 알칼리 성분들은 감소한다(Miyashiro *et al.*, 1969). 표 1에서와 같이 FS의 L.O.I (Loss of Ignition)는 3.34 - 4.74 wt%로서 SS의 L.O.I 11.93 - 12.32 wt% 보다 적다. FS의 CaO 성분은 1.38 - 1.92 wt%로서 SS의 CaO 성분 1.00 - 1.15 wt% 보다는 많다. 그러므로 전암 분석 결과는 FS 보다는 SS가 더 많은 사문석화를 경험하였다는 것을 지시한다.

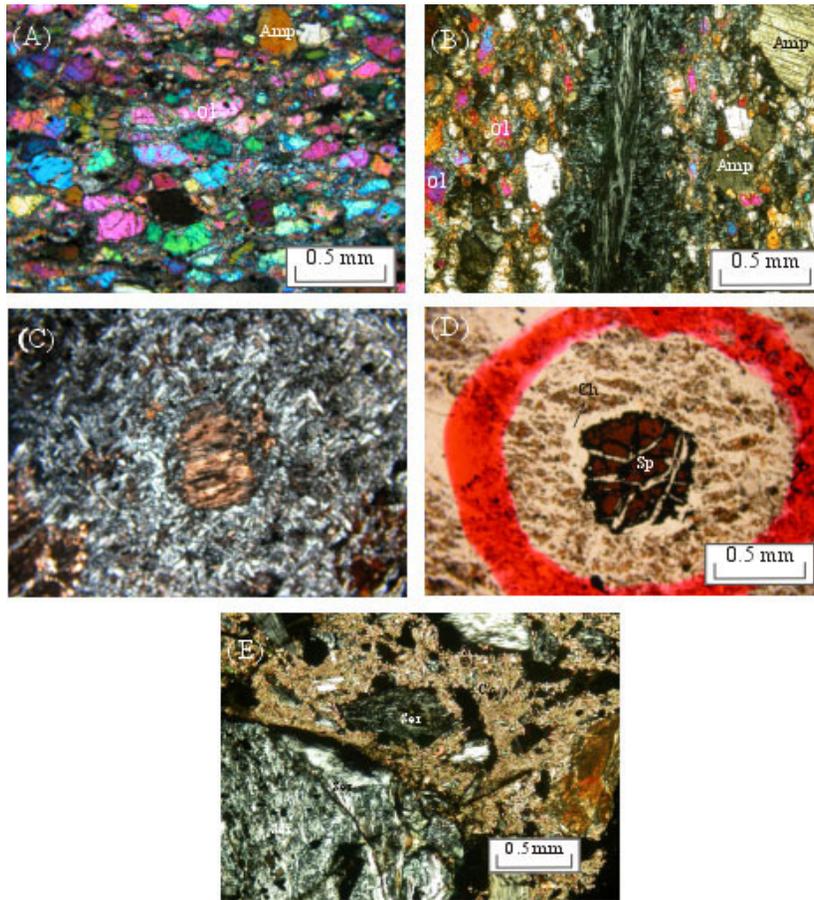


Fig. 3. Photomicrographs of (A) mineral banding, (B) serpentine vein, (C) replacement of pyroxene by serpentine, (D) spinel mantled by chlorite, and (E) small grain serpentinites embedded in oceanic sediment. Ol = olivine, Amp = Amphibole, Sp = spinel, Ch = chlorite, and Ser = serpentinite.

Table 1. Major element compositions (wt %) of serpentinites from Hero Fracture Zone. Fe_2O_3^* is total iron composition. FS = first serpentinization part and SS = second serpentinization part. FS[~] is less serpentinized part in FS. L.O.I is loss of ignition.

Sample	2-1a	2-1a	2-1c	2-1c	2-2b	2-2b
Part	FS [*]	FS	FS	SS	FS	SS
SiO ₂	40.60	40.48	40.48	39.18	39.96	39.37
TiO ₂	0.05	0.04	0.06	0.06	0.05	0.04
Al ₂ O ₃	1.93	1.88	1.48	1.83	1.62	1.98
Fe ₂ O ₃ [*]	11.65	12.11	13.53	10.16	12.90	7.18
MnO	0.18	0.19	0.24	0.14	0.20	0.09
MgO	39.45	39.72	39.98	35.33	40.60	37.59
CaO	1.92	1.81	1.53	1.15	1.38	1.00
Na ₂ O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
K ₂ O	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
P ₂ O ₅	n.d.	n.d.	0.02	0.02	n.d.	0.01
L.O.I	4.74	4.44	3.43	11.93	3.34	12.32
Total	100.52	100.67	100.75	99.80	100.04	99.58

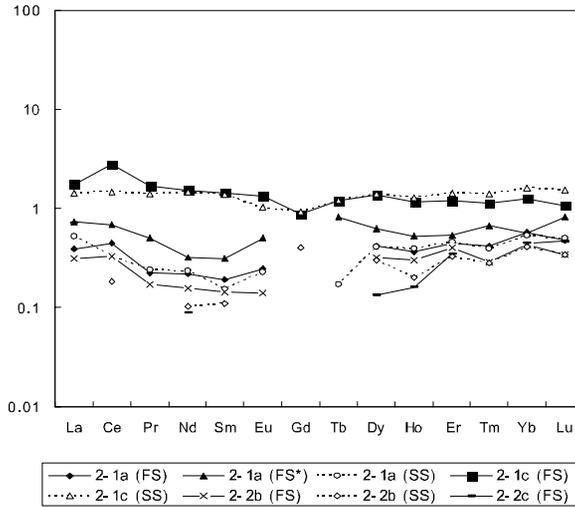


Fig. 4. Chondrite normalized REE of serpentinites from Hero Fracture zone. Solid lines indicate FS (first serpentinization part) and dotted lines indicate SS(second serpentinization Part). Chondrite values are from Taylor and McLennan (1985). FS* is less serpentinization portion in FS.

표 2의 미량원소 분석치를 보면, 히어로 파쇄대 사문암의 Cr, Co, Ni, Mn은 대부분 100 ppm 이상으로 높고, Li, Sc, V, Cu, Zn, Sr은 1 - 100 ppm 사이 이고, 나머지 미량원소와 희토류 원소의 양은 1 ppm 이하이다. Taylor and McLennan(1985)의 Chondrite 값으로 표준화한 (La/Yb)_n 비는 첫 번째 사문석화 부분은 0.68 - 1.63이고, 두 번째 사문석화 작용을 많이 받은 부분은 0.89 - 0.96이다. Chondrite 값으로 표준화한 REE 패턴은 두 부분들이 뚜렷한 차이를 보이지 않으며, 0.1 - 3 범위 안에서 일정하게 평행한 패턴을 보인다(그림 4). 이들 값들은 감람암(0.01 - 0.2) 이 가지는 값들 보다는 높다(Henderson, 1984). Eu 결핍 현상은 해양 지각 반려암에서 주로 나타나는데 히어로 파쇄대 사문암에서는 이런 현상이 보이지 않는다(Melcher *et al.* 2002). 불호정성 정도가 상대적으로 적은 (HREE)_n 값은 히어로 파쇄대 사문암은 0.3 - 1.6 이다. 이 값은 감람암(0.01 - 0.2) 보다는 높고, 휘석암(3 - 10) 보다는 작다(Henderson, 1984; Downes, 2001).

6. 광물화학 조성

6.1 사문석

사문석은 리자르다이트, 크리소타일, 안티고라이

트로 세분된다. XRD를 이용하여 세 종류의 사문석을 구별하기가 어렵지만, 대부분의 사문석 피크는 리자르다이트 피크와 잘 일치한다. 안티고라이트는 (330)면 1.559 Å에서 피크가 나타나서, XRD 패턴으로 안티고라이트와 다른 두 사문석 광물이 구분된다(Wick and O'Hanley, 1988). 이 지역의 사문암 중에서는 FS 중심부에서 1.559 Å에 해당하는 피크가 나타난다(그림 5A).

해양저 초염기성암의 감람석, 사방휘석 기원의 사문석은 주성분 원소들의 함량 차이로 구분될 수 있다(Bonatti and Hamlyn, 1981). 감람석 기원의 사문석은 MgO(평균 39.59 wt%), SiO₂(평균 42.38 wt%) 함량은 높으나, Al₂O₃(평균 1.28 wt%), Cr₂O₃(평균 0.03 wt%) 함량은 낮다(표 3). 사방휘석 기원의 사문석은 감람석 기원의 사문석에 비하여 MgO(평균 33.55 wt%), SiO₂(평균 38.79 wt%) 함량은 낮으나, Al₂O₃(평균 3.70 wt%), Cr₂O₃(평균 1.32 wt%) 함량은 높다(표 3). 사문석 주성분 원소의 평균 총 함량은 감람석, 사방휘석을 기원으로 하는 사문석들이 각각 87.20 wt%와 85.56 wt%이다. 만약 총 함량을 100 wt%로 가정하고, L.O.I가 물로만 되어졌다고 가정하면 사문석 속의 물의 함량은 대략 14 wt%가 된다.

휘석, 각섬석, 운모가 사문석 구조를 가지로 가상으로 변화 된 것을 바스타이트(bastite)라는 용어로

Table 2. Rare Earth and trace element compositions (ppm) of serpentinites from Hero Fracture Zone. FS = first serpentinization part and SS = second serpentinization part. FS* is less serpentinization part in FS.

Sample Part	2-1a FS*	2-1a FS	2-1a SS	2-1c FS	2-1c SS	2-2b FS	2-2b SS	2-2c FS	2-2c SS
V	36.4	36.8	54.7	41.9	26.3	28.1	30.9	-	-
Cr	1857.7	2183.9	1881.5	1846.6	1724.8	1904.0	1901.7	-	-
Co	100.4	103.3	92.0	86.1	108.2	103.5	68.4	136.4	-
Ni	1952.6	1865.2	1584.4	1787.9	1709.8	1886.8	1430.5	-	-
Cu	22.8	36.1	13.0	9.2	4.5	25.1	15.2	18.2	-
Zn	70.0	66.7	76.8	66.6	54.2	83.7	99.1	148.3	73.6
Li	1.7	2.2	2.6	6.6	10.6	2.4	2.3	5.5	5.5
Sc	11.3	11.7	12.7	10.2	10.0	10.5	9.6	2.6	1.6
Rb	0.8	n.d.	0.0	0.3	n.d.	n.d.	n.d.	11.6	0.0
Sr	3.5	3.3	3.5	5.9	3.7	2.3	2.5	45.0	0.5
Y	0.9	0.9	0.8	2.3	2.8	0.7	0.6	1.8	0.0
Zr	3.7	1.6	3.1	5.7	6.6	2.4	3.5	5.4	1.2
Nb	0.2	0.2	0.1	0.4	0.3	0.2	0.1	n.d.	n.d.
Cs	<0.1	n.d.	n.d.	n.d.	0.1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ba	2.7	2.8	1.5	1.9	1.8	1.8	0.9	6.2	1.2
La	0.3	0.1	0.2	0.6	0.5	0.1	n.d.	0.3	n.d.
Ce	0.6	0.4	0.3	2.7	1.4	0.3	0.2	n.d.	n.d.
Pr	0.07	0.03	0.03	0.23	0.19	0.02	n.d.	n.d.	n.d.
Nd	0.23	0.16	0.17	1.09	1.04	0.11	0.07	0.06	n.d.
Sm	0.07	0.04	0.04	0.33	0.32	0.03	0.03	n.d.	n.d.
Eu	0.04	0.02	0.02	0.12	0.09	0.01	n.d.	n.d.	n.d.
Gd	n.d.	n.d.	n.d.	0.27	0.28	n.d.	0.12	n.d.	n.d.
Tb	0.05	n.d.	0.01	0.07	0.07	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Dy	0.24	0.16	0.16	0.52	0.54	0.12	0.11	0.05	n.d.
Ho	0.04	0.03	0.03	0.10	0.11	0.03	0.02	0.01	n.d.
Er	0.13	0.11	0.11	0.30	0.36	0.10	0.08	0.09	n.d.
Tm	0.02	0.01	0.01	0.04	0.05	0.01	0.01	n.d.	n.d.
Yb	0.14	0.14	0.13	0.31	0.40	0.11	0.10	0.11	n.d.
Lu	0.03	0.02	0.02	0.04	0.06	0.01	0.01	0.02	0.00
Hf	0.04	0.02	0.03	0.17	0.15	0.04	0.06	n.d.	n.d.
Ta	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	n.d.	n.d.	0.01	n.d.
Pb	1.2	1.2	1.7	1.3	2.3	3.1	n.d.	11.0	2.3
Th	0.09	0.02	n.d.	0.11	0.02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
U	0.02	0.01	0.65	1.14	0.02	0.01	0.53	3.06	0.13

정의 한다(O'Hanley, 1996). 바스타이트로 나타나는 단사회석은 사문석으로 완전히 변하지는 않았지만, 많은 양의 물을 포함하는 변질과정에 있다. 그러므로 이 논문에서 단사회석 기원 바스타이트를 다른 광물 기원의 바스타이트와 구별하기 위해 수화단사회석으로 정의 한다. 수화단사회석의 주성분 원소 총 함량은 평균 92.18 wt%이다. CaO 성분은 11.50 - 21.24 wt% 범위에 있다. 이는 단사회석이 함유되는 과정

에서 CaO 성분이 빠져나갔음을 의미한다.

그림 6은 감람석, 사방회석, 단사회석의 FeO, MgO, SiO₂ 성분이 사문석화 과정에서 어떠한 변화를 보이는지에 관한 그림이다. FeO-MgO-SiO₂ 그림에서 감람석 보다 감람석 기원의 사문석은 Mg, Fe가 결핍되어 있고, 사방회석 보다 사방회석 기원의 사문석이 Mg, Fe가 부화되었다. 단사회석은 함유 되어지면서 Mg, Fe가 부화되었다.

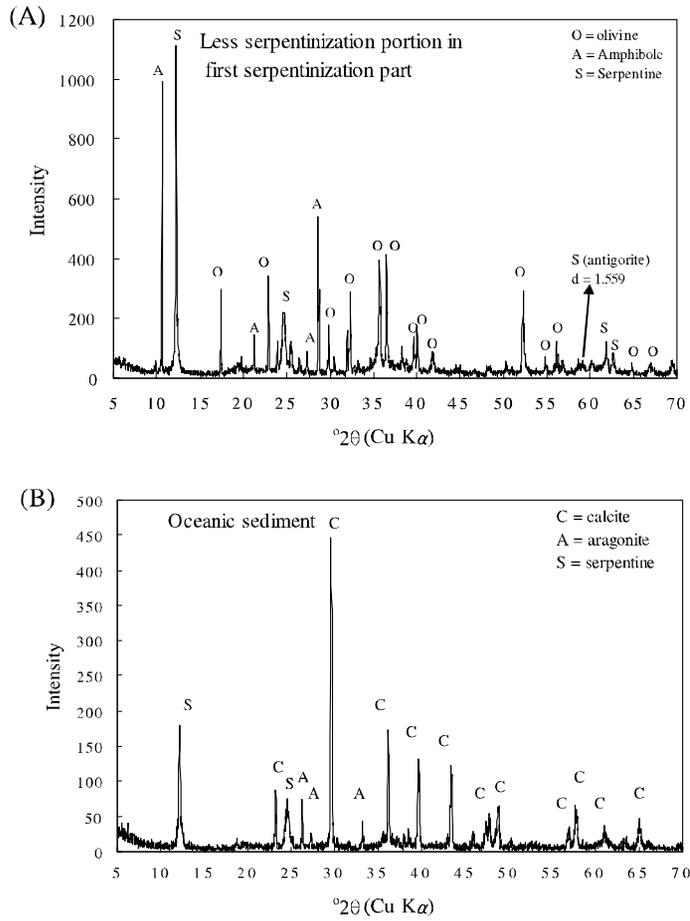


Fig. 5. (A) XRD patterns of less serpentinization portion in FS (first serpentinization part) in sample 2-1a and (B) oceanic sediment in sample 2b.

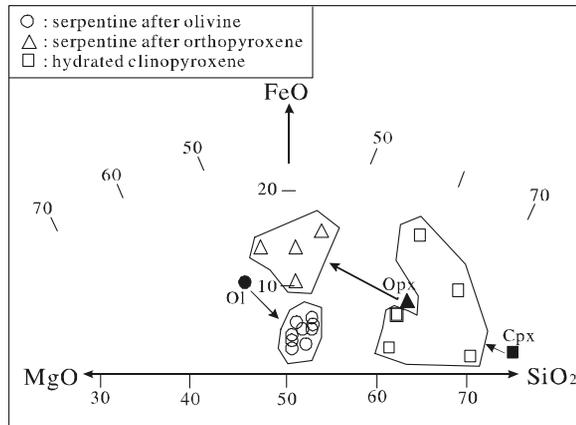


Fig. 6. Ratio Si/Mg/Fe in serpentine phases derived from olivines, orthopyroxenes, and hydrated clinopyroxenes. Solid symbols are average values of olivines (this research data), orthopyroxenes (Prinz *et al.*, 1976), and hydrated clinopyroxenes (이석훈 외, 2004). Ol = olivine, Opx = orthopyroxene, and Cpx = clinopyroxene.

Table 3. *Continued.*

Sample #	2-3	2B	2B	2B	2B	2B	2-1a	2-1a	2-1a	2-1a	2-1a	2-1a	2-1b	2-1b	2-1b	2-1b
Min Name	S(OI)	S(OI)	S(OI)	S(OI)	S(OI)	S(OI)	S(OpX)	S(OpX)	S(OpX)	S(OpX)	S(OpX)	Hy Cpx	Hy Cpx	Hy Cpx	Hy Cpx	Hy Cpx
SiO ₂	42.23	42.43	41.65	42.07	44.02	43.81	41.46	39.90	39.74	37.46	35.40	43.21	43.85	40.46	50.56	45.62
TiO ₂	0.04	0.02	0.03	0.04	0.03	0.00	0.10	0.06	0.02	0.06	0.07	0.04	0.13	0.17	0.02	0.05
Al ₂ O ₃	1.77	1.66	1.23	1.43	0.18	0.37	4.89	6.07	1.47	1.93	4.16	1.68	5.19	2.81	1.35	3.20
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	1.43	1.22	0.67	1.97	-	0.14	1.47	1.29	-	-
FeO	3.10	3.79	2.81	2.83	2.77	2.98	4.09	5.40	8.64	11.24	11.87	6.06	4.77	10.51	1.32	2.06
NiO	-	-	-	-	-	-	0.14	0.20	0.00	0.04	-	0.20	0.12	0.06	-	-
MnO	0.09	0.00	0.04	0.01	0.06	0.06	0.04	0.14	0.04	0.12	0.09	0.18	0.39	0.22	0.03	0.06
MgO	39.53	39.01	40.18	40.46	40.19	39.74	33.62	32.34	37.23	35.21	29.37	17.73	25.41	19.76	20.84	27.98
CaO	0.01	0.03	0.01	0.04	0.02	0.03	4.43	3.66	0.06	0.09	4.72	17.92	11.50	18.06	21.24	12.69
Na ₂ O	0.02	0.01	0.03	0.02	0.01	0.00	0.07	0.05	0.02	0.02	0.02	0.20	0.12	0.04	0.03	0.09
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02
Cl	-	-	-	-	-	-	0.05	0.02	0.02	0.02	-	0.00	0.01	0.03	-	-
Total	86.77	86.97	86.01	86.92	87.28	87.01	90.35	89.09	87.92	88.15	85.70	87.40	92.95	93.39	95.40	91.78
	cations per 7 oxygens											cations per 6 oxygens				
Si	2.001	2.010	1.986	1.987	2.047	2.047	1.977	1.953	1.931	1.873	1.857	1.861	1.776	1.706	1.928	1.809
Ti	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.004	0.002	0.001	0.002	0.003	0.001	0.004	0.005	0.001	0.001
Al	0.049	0.046	0.035	0.040	0.005	0.010	0.138	0.175	0.042	0.057	0.129	0.043	0.124	0.070	0.030	0.075
Cr	-	-	-	-	-	-	0.027	0.024	0.013	0.039	0.000	0.002	0.024	0.021	0.000	0.000
Fe	0.123	0.150	0.112	0.112	0.108	0.117	0.163	0.221	0.351	0.470	0.521	0.218	0.162	0.371	0.042	0.068
Ni	-	-	-	-	-	-	0.006	0.008	0.000	0.002	0.000	0.007	0.004	0.002	0.000	0.000
Mn	0.003	0.000	0.002	0.000	0.002	0.002	0.002	0.006	0.002	0.005	0.004	0.007	0.013	0.008	0.001	0.002
Mg	2.794	2.756	2.857	2.849	2.786	2.770	2.391	2.361	2.697	2.625	2.297	1.139	1.535	1.243	1.185	1.654
Ca	0.000	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.226	0.192	0.003	0.005	0.265	0.827	0.499	0.816	0.868	0.539
Na	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.000	0.006	0.005	0.002	0.002	0.002	0.017	0.009	0.004	0.002	0.007
K	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001

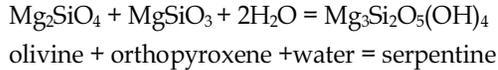
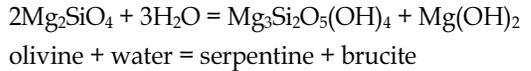
6.2 잔류광물

사문석화 과정 이전의 잔류 광물인 감람석 스피넬의 화학 조성의 특징들은 표 4와 같다. 감람석은 Fo₈₉-Fo₉₀의 좁은 범위를 보인다. Fo 값은 마그마 분화에 의해서 형성된 누적암(cumulate) 속의 감람석 Fo₈₇₋₈₁ 보다 높고(Jackson and Thayer, 1972), 맨틀 기원 스피넬 페리도타이트 감람석의 Fo 값과 유사하다. 스피넬의 Mg-number[(Mg/Mg+Fe²⁺)]와 Cr-number [(Cr)/(Cr+Fe³⁺+Al)]는 각각 0.87 - 0.91과 0.17 - 0.23의 범위를 보인다. 자연에서 관찰되는 스피넬 Mg-number와 Cr-number는 기원에 따라 다양한 값을 보인다. 히어로 파쇄대 사문석 내 스피넬은 상부맨틀 심해 페리도타이트 내의 스피넬과 유사한 Mg-number, Cr-number 값을 가진다(그림 7). 특히 마그마 누적암 내의 스피넬과 비교하여 본 결과, 연구 지역의 스피넬은 누적암 보다는 상부맨틀 암석인 스피넬 리어조라이트 내의 스피넬과 유사한 Mg-number와 Cr-number를 가진다(그림 7).

7. 토 의

사문석은 여러 가지 반응에 의하여 형성될 수 있

다. 순수하게 마그네슘만을 고려한다면 아래의 반응에 의하여 형성될 수 있다.



Mg₃Si₂O₅(OH)₄ 조성을 가지는 사문석은 리자르다이트, 크리소타일, 안티고라이트로 세분된다. 리자르다이트는 가장 흔하게 볼 수 있고, 크리소타일은 광택의 섬유상형태로 나타나며, 맥에서 주로 나타난다(Deer *et al.*, 1992). 크리소타일은 자연 상태에서 그 양이 상당히 적고, 일반적으로 리자르다이트나 크리소타일의 재결정으로 만들어진다. 안티고라이트는 리자르다이트와 크리소타일에 비하여 높은 온도와 압력 하에서 사문석화 작용이나, 점진적인 변성작용에 의해 만들어진다(Moody, 1976). 이들 세 종류의 사문석은 기본적으로 실리카 사면체와 마그네슘 팔면체가 1:1 층으로 구성된 기본 구조를 가지고 있다. 리자르다이트는 평평한 모양으로 사면체와 팔면체가 층상으로 구성되어져 있고, 크리소타일은 실린더 형태로 사면체와 팔면체가 층상으로 구성되어져 있다. 안티고라이트는 중간에 팔면체가 유실되면서, 사

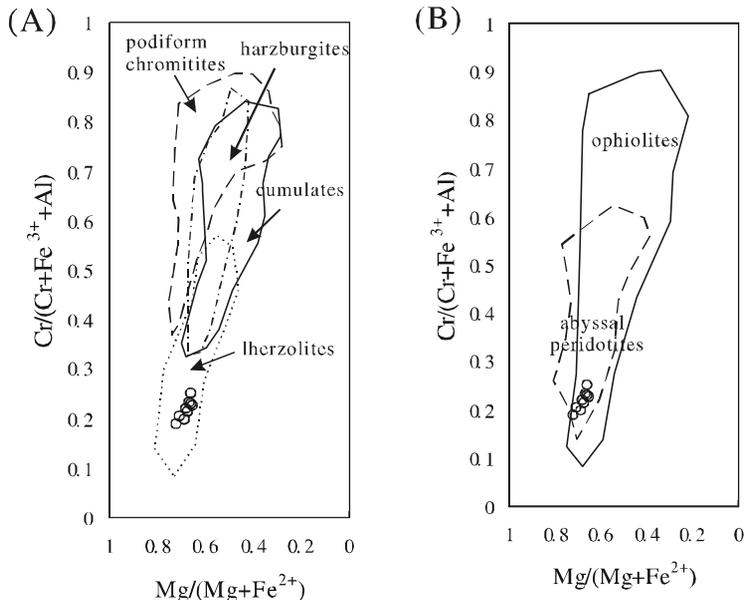


Fig. 7. Comparisons Mg-number [(Mg/Mg+Fe²⁺)] vs. Cr-number [(Cr)/(Cr+Fe³⁺+Al)] of spinels from Hero Fracture Serpentinities with those of spinel from (A) lherzolite and (B) abyssal peridotites. Compositional fields of spinel data from Pober and Faupl (1988).

면체 팔면체가 주기적으로 뒤집혀 있는 형태를 보인다.

히어로 파쇄대 사문암은 대부분이 리자르다이트로 구성된 것은 심해에서 산출되는 사문암의 사문석이 대부분 리자르다이트인 것과도 일치한다. 그러나 FS 중심부에 리자르다이트가 안티고라이트와 공존한다. 이러한 공존은 청색편암상에 상응하는 온도 압력 하에서 일어난다(O'Hanley, 1996). 그러므로 히어로 파쇄대의 리자르다이트와 안티고라이트가 공존하는 FS는 청색편암상의 150 - 450°C, 7 - 14 kbar에서 사문석화가 진행된 것이다.

해양지각의 층서는 상부로부터 해양 퇴적물, 현무암, 암맥, 반려암, 누적암 순이고, Moho 면을 경계로 하부에 상부맨틀 암석인 스피넬 페리도타이트가 놓인다(Ehlers and Blatt, 1982). 해양지각과 상부맨틀을 구성하는 암석들 중에서 기원암으로 추정되어지는 암석은 엽기성의 반려암, 마그마에서 중력에 의해 분리된 누적암, 상부맨틀 스피넬 페리도타이트이다(Ehlers and Blatt, 1982). 반려암 내에는 다량의 사장석이 존재한다. 그러나 히어로 파쇄대 사문암 내에는 사장석의 흔적을 찾아 볼 수 없다. 그러므로 반려암은 기원암이 아니다. 누적암은 일반적으로 누적구조가 나타나고, 회장암, 감람암, 트록도라이트, 휘석암으로 구성되어져 있다. 또한 누적암 내 감람석은 Fo₈₇₋₈₁의 조성을 가지고 있다. 그러나 히어로 파쇄대 사문암은 누적구조를 보이지 않고, 사문암의 광물조합이 누적암과 관련된 암석들의 광물조합과 일치하지 않고, 사문암 속의 감람석의 Fo 조성이 누적암의 것과는 다르다. 그러므로 누적암은 사문암의 기원암이 아니다.

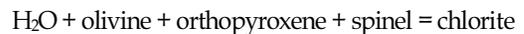
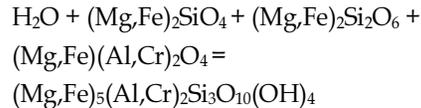
히어로 파쇄대 기원암이 상부맨틀 스피넬 페리도타이트라는 이유는 다음과 같다.

첫째, 상부맨틀 최상부의 층상 페리도타이트는 상부맨틀 암석 중에서 부분용융을 많이 경험한 것으로서, 스피넬 페리도타이트 중에서도 하즈버자이트에 속하는 암석이 주를 이루고 있으며, 광물이 층상으로 배열되어 있는 특징을 가지고 있다. 현미경 관찰에서 히어로 파쇄대 사문암은 층상의 배열을 잘 가지고 있다(그림 3A).

둘째, 스피넬 페리도타이트는 감람석, 단사휘석, 사방휘석, 스피넬로 구성되어져 있다. 히어로 파쇄대 사문암에는 잔류광물로서 감람석과 스피넬이 관찰되며(그림 3A, 3D), 사방휘석은 사문석으로 변질되었으며(표 4), 흡수된 단사휘석은 사문석으로 변질되

는 과정에 있다(표 4, 그림 3C). 그러므로 상부맨틀 스피넬 페리도타이트를 구성하는 광물들이 히어로 파쇄대 사문암에서는 모두 관찰된다.

셋째, 스피넬 주연부의 녹리석은 사장석의 열수 변질에 의하여 형성되기 보다는 감람석, 휘석, 스피넬이 공존하는 곳에서 형성되었기 때문이다. 이러한 현상은 사장석이 존재하지 않는 각섬석상의 메타페리도타이트에서 다음의 반응에 의해 일어난다(ODP, 2003).



넷째, 히어로 파쇄대 사문암 내 감람석은 Fo₈₉₋₉₀의 값을 갖는다. 이 값들은 매우 일정하고 높아서 맨틀 암석 내의 감람석 Fo 조성과 매우 유사하다.

다섯째, 잔류광물인 스피넬의 변질 되지 않은 중심부 색깔이 전형적인 상부맨틀 스피넬 페리도타이트 내 스피넬에서 나타나는 적갈색과 같다(그림 3D). 또한 스피넬 Cr-number와 Mg-number는 상부맨틀 심해 페리도타이트의 그것들과 매우 유사하다(그림 7).

여섯째, 지질학적 시간을 통해 상부 맨틀 암석은 부분용융을 경험하여 불호정성인 원소들의 함량이 적어지기도하고, 맨틀교대작용을 경험하여 유체에 유동적인 원소들의 함량이 증가한다(Zindler and Jagoutz, 1988). 그러므로 기원암을 유추하기 위해서는 상대적으로 불호정성 정도가 적은 원소들을 비교하는 것이 적당하다. 히어로 파쇄대 사문암의 (HREE)_n은 0.3 - 1.6 이다. 이것은 상부 맨틀 암석인 스피넬 페리도타이트의 (HREE)_n 값 (0.1 - 3) 범위에 놓인다(Downes, 2001). 이 값은 누적암인 감람암(0.01 - 0.2)과 휘석암(3 - 10)이 가지는 값들과는 차이가 있다(Henderson, 1984; Downes, 2001). 이상의 이유들은 히어로 파쇄대 사문암의 기원암이 최소 5 km 깊이에 있었던 상부맨틀 스피넬 페리도타이트임을 지시한다(Ehlers and Blatt, 1982).

상부 맨틀 기원암의 평형 온도를 계산하기 위하여 변질을 가장 적게 받은 잔류광물 감람석과 스피넬 중심부를 분석하여, Fabries(1979), Roeder *et al.*(1979), Ballhaus *et al.*(1991)의 지온계에 적용하였다. 이들 지온계는 압력의 변화에 영향을 많이 받지 않지만, 압력이 5 kbar로 가정하여 온도를 구하였다(표 5). 이들의 온도는 시료 2-1a가 784 - 912°C의 범위이고, 시

Table 4. Electron Probe Microanalysis for the major elements compositions (wt.%) of olivines and spinels in serpentinites from Hero Fracture Zone.

Sample #	2-1a	2-2b	2-2b	2B							
Min Name	Olivine										
SiO ₂	40.63	41.16	40.55	41.47	41.05	40.70	40.32	39.84	41.10	40.67	39.84
TiO ₂	0.01	0.02	0.01	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.04	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.04	0.04	0.01	0.00	0.01	-	-	-	0.02	-	-
FeO	10.12	10.89	9.90	10.09	9.75	11.07	10.23	9.89	9.52	9.51	10.06
NiO	0.43	0.32	0.39	0.37	0.34	-	-	-	0.42	-	-
MnO	0.19	0.27	0.17	0.18	0.11	0.20	0.12	0.15	0.08	0.17	0.13
MgO	48.64	48.65	49.60	48.71	49.35	48.84	49.92	49.81	49.79	50.30	49.47
CaO	0.03	0.00	0.02	0.06	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
K ₂ O	0.01	0.00	0.01	0.05	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
Cl	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	-	-	-	0.00	-	-
Total	100.12	101.40	100.67	100.96	100.67	100.92	100.64	99.71	100.95	100.68	99.54
cations per 4 oxygens											
Si	0.998	1.000	0.990	1.008	0.999	0.994	0.985	0.981	0.997	0.989	0.984
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-	-	0.000	-	-
Fe	0.208	0.222	0.202	0.205	0.199	0.226	0.209	0.204	0.193	0.194	0.208
Ni	0.008	0.006	0.008	0.007	0.007	-	-	-	0.008	-	-
Mn	0.004	0.005	0.003	0.004	0.002	0.004	0.002	0.003	0.002	0.003	0.003
Mg	1.782	1.764	1.805	1.766	1.792	1.779	1.818	1.830	1.802	1.824	1.821
Ca	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001
K	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg#	89.5	88.8	89.9	89.6	90.0	88.7	89.7	90.0	90.3	90.4	89.8

Table 4. *Continued.*

Sample #	2-1a	2-1a	2-1a	2-1a	2-2a	2-2a	2-2b	2-2b	2-2b	2-2b
Min Name	Spinel									
SiO ₂	1.82	0.02	0.05	0.64	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02
TiO ₂	0.09	0.05	0.05	0.03	0.05	0.04	0.06	0.06	0.02	0.05
Al ₂ O ₃	22.44	31.07	33.07	30.46	29.28	31.00	35.21	35.29	33.11	37.04
Cr ₂ O ₃	33.99	34.40	32.99	33.03	37.05	34.72	32.62	30.90	34.11	30.39
FeO	30.17	20.21	20.31	21.63	21.35	21.90	19.29	19.46	20.17	18.70
NiO	0.07	0.03	0.10	0.04	0.11	0.05	0.09	0.10	0.09	0.11
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	9.27	11.45	11.99	11.67	11.59	12.02	13.33	12.26	12.23	13.71
CaO	0.04	0.04	0.06	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
Na ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02	0.03	0.05	0.03
K ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.03
Cl	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
Total	97.88	97.28	98.63	97.52	99.49	99.81	100.64	98.13	99.83	100.08
cations per 4 oxygens										
Si	0.088	0.001	0.002	0.031	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
Ti	0.003	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002
Al	0.638	0.893	0.928	0.861	0.829	0.866	0.958	0.987	0.920	1.002
Cr	0.648	0.663	0.621	0.626	0.704	0.650	0.595	0.580	0.636	0.552
Fe ³⁺	0.652	0.547	0.551	0.559	0.575	0.599	0.553	0.536	0.554	0.553
Fe ²⁺	0.566	0.278	0.259	0.309	0.283	0.270	0.192	0.236	0.242	0.166
Ni	0.003	0.001	0.004	0.002	0.004	0.002	0.003	0.004	0.003	0.004
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.666	0.833	0.851	0.834	0.831	0.850	0.917	0.867	0.860	0.939
Ca	0.002	0.002	0.003	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000
Na	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.004	0.002	0.003	0.004	0.003
K	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.002

료 2-2b가 801 - 899°C의 범위이다. 해양지각의 지열 구배를 이용하여 보면, 이러한 온도 범위는 해양 60 - 100 km 깊이 범위에 해당하는 것이다(Philpotts, 1990). 이는 최상부 맨틀 페리도타이트의 온도 범위와는 큰 차이가 있다. 이렇게 높은 온도는 마지막 재평형 상태의 온도로서, 사문석화 이전에 히어로 파쇄대 하부에는 온도를 높여줄 수 있는 열원이 있었을 가능성을 암시한다.

그림 8의 두 모델은 맨틀 암석이 해양지각 상부에 어떻게 노출 되어 있는지에 관해 설명할 수 있는 모델들이다(Henriet, 1992; O'Hanley, 1996). 첫 번째 모델은 단순히 히어로 파쇄대를 경계로 두 개의 해양 암권 중에서 한쪽 암권이 다른 쪽의 암권 보다 융기한 경우이다(그림 8A). 그러나 이 모델은 다음과 같은 문제점들이 있다. 첫째, 히어로 파쇄대가 지형학적으로 산맥형태를 이루고 있어서, 한쪽 암권이 융기한 지형과는 일치하지 않는다. 둘째, 지진파 속도가 한쪽면 맨틀이 지표로 노출하였다는 가설을 뒷받침하지 못하고 있다(김예동 외, 1998).

다른 메커니즘으로의 설명은 Henriet (1992)의 부력 사문암 산맥 모델(buoyant serpentinite ridge model)이다. 초염기성 맨틀암석의 평균 밀도는 3.3

g/cm³ 이나, 사문석화 작용에 의해 구성광물들이 함유되어 사문암의 평균 밀도가 2.5 g/cm³가 된다. 이 밀도는 평균 해양 지각의 밀도인 2.8 g/cm³ 보다 낮게 되므로 부력을 얻어 상승하게 된다는 것이다. 이 모델이 사문암의 노출 메커니즘과 잘 일치하는 것은 산맥 모양의 히어로 파쇄대의 지형학적 특징을 잘 설명할 수 있기 때문이다. 그러므로 부력 사문암 산맥 모델에 의해 히어로 파쇄대 사문암이 노출 된 것으로 고려된다.

이상의 설명들을 근거로 기원이 되는 상부맨틀 스피넬 페리도타이트가 해양지각 상부에 노출된 것을 시간에 따라 설명할 수 있다: 첫째, 히어로 파쇄대 사문암의 근원지는 상부 맨틀 최상부, 즉, 최하 5 km 범위에 있는 스피넬 페리도타이트 지역이었다. 둘째, 파쇄대가 형성되면서 해수가 침투하고, 스피넬 페리도타이트는 하부의 열원에 의하여 온도가 상승하는 경험을 하면서, 구성광물들의 원소들은 재평형 상태에 놓이게 된다. 셋째, 침투한 해수에 의하여 층상 페리도타이트는 첫 번째 사문석화를 청색 편암상에 해당하는 150 - 450°C에서 경험하게 되고, 사문암의 밀도가 평균해양 지각 밀도 보다 낮아져 사문암이 상승하게 된다. 넷째, 상승한 사문암은 두 번째 사문석화를 150°C 이하의 낮은 심도에서 경험하게 된다, 다섯째, 해양 퇴적물이 퇴적되면서, 퇴적물이 해양지각 상부에 노출된 사문암 파편들 사이에 쌓이게 된다.

Table 5. Temperature (°C) data, obtained by olivine-spinel geothermometers, for sample 2-1a and 2-2b serpentinites at given 5kbar pressure.

Sample Number	2-1a	2-2b
Fabries (1979)	912	899
Roeder <i>et al.</i> (1979)	784	850
Balhaus <i>et al.</i> (1991)	802	801

8. 결 론

남극 히어로 파쇄대에서 암석준설기에 의해 얻은 사문암의 성인을 해석하기 위해 현미경 관찰, XRF,

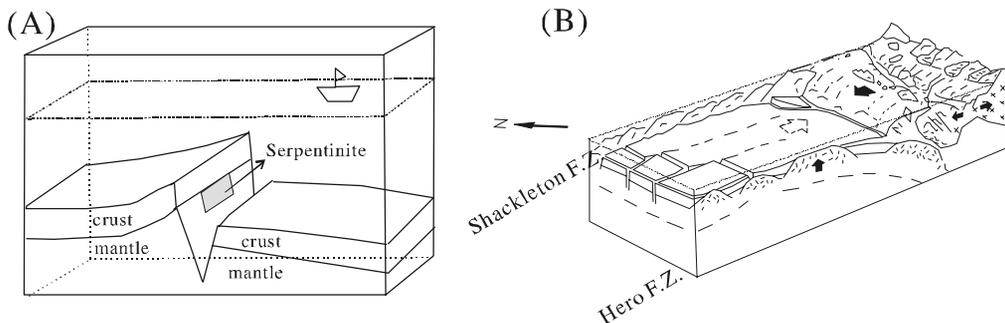


Fig. 8. (A) uplift model and (B) buoyant serpentinite ridge model (Henriet, 1992) for ascending mechanism of serpentinites.

ICP-AES, ICP-MS로 암석분석, XRD, EPMA로 광물감정 및 광물 분석을 하여 암석학적 연구를 실시하였다. 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 사문암은 주로 사문석으로 구성되어 있고, 잔류광물로서 감람석, 휘석 및 스피넬을 포함하고 있고, 각섬석, 녹니석, 활석, 자철석 등도 포함한다. 첫 번째 사문석화 부분은 리자르다이트와 안티고라이트가 공존하나, 두 번째 사문석화 부분은 단지 리자르다이트만이 존재한다.

둘째, 히어로 파쇄대 사문암은 해수에 의해 두 번의 사문석화 과정을 걸쳐 형성 되었다. 첫 번째 사문석화 부분은 기원암의 특징을 많이 가지고 있으면서, 상대적으로 깊은 곳에서(150 - 450°C) 사문석화 작용을 받았다. 두 번째 사문석화 부분은 상대적으로 낮은 심도에서 사문석화를 경험했다.

세째, 사문석은 감람석과 사방휘석을 기원으로 하고 있다. 사문석화 작용에 의해 함수되면서, 감람석은 MgO와 FeO가 감소하나, 사방휘석, 단사휘석은 MgO와 FeO가 증가한다.

넷째, 사문암 잔류광물 중에서 감람석은 $F_{0.89-0.90}$ 의 범위로 높다. 스피넬은 상부맨틀 심해 페리도타이트 내 스피넬과 같은 적갈색을 띠우며, Mg-number와 Cr-number도 그것들과 일치한다. 또한 사문암의 0.3 - 1.6 범위의 (HREE)_n 값은 스피넬 페리도타이트가 가지는 범위에 속한다.

다섯째, 사문암 기원암인 스피넬 페리도타이트의 평형 압력을 5 kbar로 가정할 때 이 암석의 평형 온도는 784 - 912°C 범위 이다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 부설 극지연구부의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. 이 논문을 심사하신 송석환 교수님과, 익명의 심사위원께 깊은 감사드립니다.

참고문헌

이석훈, 길영우, 이종익, 진영근, 2004, 남극 드레이크해협 히어로 파쇄대 사문암의 사문석화작용 및 기원암의 성인. 한국해양연구원 부설 극지연구소 보고서, KBSI-2004-1220-0111-0599, 46 p.
김예동 외 18명, 1998, 98남극 해저지질 조사사업 보고서.

한국해양연구소, BSPM98008-01-1120-7, 349 p.
Ashcroft, W.A., 1972, Crustal structure of the South Shetland Island and the Bransfield Strait. Br. Antact. Surv. Sci. Rep., 66, 1-43.
Ballhaus, C., Berry, R.F. and Green, D. H., 1991, High pressure experimental calibration of the olivine orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle. Contrib. Mineral. Petrol., 107, 27-40.
Barker, P.F., 1982, The Cenozoic subduction history of the Pacific margin of the Antarctic Peninsula: ridge crest-trench interactions. J. Geo. Soc. London, 139, 787-801.
Barker, P.F. and Dalziel, I.W.D., 1983, Progress in geodynamics in the Scotia arc region. In: Cabre, R. (eds.), Geodynamics of the Eastern Pacific Region, Caribbean and Scotia Arcs. Am. Geophys. Union, Geodyn. Ser., 9, 137-170.
Bonatti, E., 1968, Ultramafic rocks from the Mid-Atlantic Ridge. Nature, 219, 363-364.
Bonatti, E., 1976, Serpentinite protrusions from the Mid-Atlantic Ridge. Earth Plant. Sci. Lett., 32, 107-113.
Bonatti, E. and Honnorez, J., 1976, Sections of the earth's crust in the Equatorial Atlantic. J. Geophys. Res., 81, 4104-4116.
Bonatti, E. and Hamlyn, P.R., 1981, Oceanic ultramafic rocks. The sea, 7, 241-284.
Canal, M., Urgeles, R. and Calafat, A.M., 2000, Deep sea-floor evidence of past ice streams off the Antarctic peninsula. Geology, 28, 31-34.
Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1992, An introduction to the rock-forming minerals. Longman, England, 696 p.
Downes, H., 2001, Formation and Modification of the shallow sub-continental lithospheric mantle: a review of geochemical evidence from ultramafic xenolith suites and tectonically emplaced ultramafic massifs of western and central Europe. Journal of Petrology, 42, 233-250.
Droop, G.T.R., 1987, A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. Mineralogical Magazine, 51, 431-435.
Ehlers, E.G. and Blatt, H., 1982, Petrology: igneous, sedimentary, and metamorphic. Freeman, San Francisco, 732 p.
Fabries, J., 1979, Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes. Contrib. Mineral. Petrol., 69, 329-336.
Garrett, S.W. and Storey, B.C., 1987, Lithospheric extension on the Antarctic Peninsula during Cenozoic subduction. In: Coward, M.P., Dewey, F.F. and Hancock,

- P.L. (eds.), *Continental Extension Tectonics*. Geol. Soc. Spec. Publ., 28, 419-431.
- Gonzalez-Ferran, O., 1991, The Bransfield rift and its active volcanism. In: Thomson, M.R.A., Crame, J.A. and Thomson, J.W. (eds.), *Geological Evolution of Antarctica*, Cambridge University Press, Cambridge, 505-509.
- Guterch, A., Grade, M., Janik, T., Pechuc, E. and Pajchel, J., 1985, Seismic studies in the crustal structure in West Antarctica 1979-1980. Preliminary results. *Tectonophysics*, 114, 411-429.
- Guterch, A., Grade, M., Janik, T. and Pechuc, E., 1991, Tectonophysical models of the crust between the Antarctic Peninsula and the South Shetland trench. In: Thomson, M.R.A., Crame, J.A. and Thomson, J.W. (eds.), *Geological Evolution of Antarctica*, Cambridge University Press, Cambridge, 499-504.
- Henderson, P., 1984, *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, New York, 510 p.
- Henriet, J.P., Meissner, R., Miller, H. and GREAPE Team, 1992, Active margin processes along the Antarctic Peninsula. *Tectonophysics*, 201, 229-253.
- Hess, H.H., 1962, History of the ocean basins, In: *Petrologic Studies*. Buddington Volume, Geological Society of America, Boulder, CO, 599-620.
- Jackson, E.D. and Thayer, T.P., 1972, Some criteria for distinguishing between stratiform, concentric and alpine peridotite-gabbro complexes. In *Int. Geol. Congr. 24th Proc.*, Sect. 2, 289-398.
- Jin, Y. and Kim, Y., 1996, Tectonic Deformation in the Shackleton Fracture Zone, Antarctica. *Korean Journal of Polar Research*, 7, 23-28.
- Jin, Y., Kim, Y., Nam, S., Lee, D. and Lee, K., 1997, Gravity models for the South Shetland Trench and the Shackleton Fracture Zone, Antarctica. *Geoscience Journal*, 1, 89-98.
- Jin, Y., Larter, R.D., Kim, Y., Nam, S. and Kim, K., 2002, Post-subduction margin structures along Boyd Strait, Antarctic Peninsula. *Tectonophysics*, 346, 187-200.
- Livermore, R., Balanya, J.C., Maldonado, A., Martinez, J.M., Fernandez, J.R., Galdeano, C.J., Zaldivar, J.G., Jabaloy, A., Barnolas, A., Somoza, L., Molina, J.H., Surinach, and E., Viseras, C., 2000, Autopsy on a dead spreading center: The Phoenix Ridge, Drake Passage, Antarctica. *Geology*, 28, 607-610.
- Melcher, F., Meisel, T., Puhl, J. and Koller, F., 2002, Petrogenesis and geotectonic setting of ultramafic rocks in the Eastern Alps: constraints from geochemistry. *Lithos*, 65, 69-112.
- Miyashiro, A., Shido, F. and Ewing, M., 1969, Composition and origin of serpentinites from the Mid-Atlantic Ridge near 24 and 30°N. *Contrib. Mineral. Petro.*, 23, 117-127.
- Moody, J.B., 1976, Serpentinization: a review. *Lithos*, 9, 125-138.
- ODP, 2003, Leg 209 Preliminary Report. Ocean Drilling Program, Texas A&M university, 160 p.
- O'Hanley, D. S., 1996, *Serpentinites*, Oxford Univ. Press, 296 p.
- Pankhurst, R.J., 1982, K-Sr geochronology of Graham Land, Antarctica, *J. Soc. Geol. London*, 139, 701-711.
- Parra, J.C., Yanez, G. and USAC-Group, 1988, Aeromagnetic survey on the Antarctic Peninsula and surrounding sea: integration of the data obtained at different altitudes. *Ser. Cient. INACH*, 38, 118-131.
- Pearce, J.A., Leat, P.T., Barker, P.F. and Miller, I.L., 2001, Geochemical tracing of Pacific-to-Atlantic upper-mantle flow through the Drake passage. *Nature*, 410, 457-461.
- Philpotts, A.R., 1990, *Principles of igneous and metamorphic petrology*. Prentice Hall, New Jersey, 498 p.
- Pober, E. and Faupl, P., 1988, The chemistry of detrital chromian spinels and its implications for the geodynamic evolution of the Eastern Alps. *Geologische Rundschau*, 77, 641-670.
- Prinz, M., Keil, K., Green, J.A., Reid, A.M., Bonatti, E., and Honnorez, J., 1976, Ultramafic and mafic dredge samples from the equatorial Mid-Atlantic ridge and fracture zone. *J. Geophys. Res.*, 81, 4087-4103.
- Renner, R.G.B., Sturgeon, L.J.S. and Garrett, S.W., 1985, Reconnaissance Gravity and Aeromagnetic Surveys of the Antarctic Peninsula. *British Antarctic Survey Scientific Reports*, No. 110, Cambridge, 95 p.
- Roeder, P. L., Campbell, J. H. and Jamieson, H. E., 1979, A re-evaluation of the olivine-spinel geothermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 68, 325-334.
- Storey, B.C. and Garrett, S.W., 1985, Crustal growth of the Antarctic peninsula by accretion, magmatism and extension. *Geological magazine*, 122, 5-14.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, *The continental crust: its composition and evolution.*, Blackwell, Oxford, 312 p.
- Wick, F.J. and O'Hanley, D.S., 1988, Serpentine minerals: Structure and petrology. In: Bailey, S.W. (eds.), *Hydrous Phyllosilicates*. *Reviews in Mineralogy*, Vol. 19, Mineralogy Society of America, 91-167.
- Zindler, A. and Jagoutz, E., 1988, Mantle cryptology. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 319-333.

투 고 일 : 2004년 12월 8일

심 사 일 : 2004년 12월 13일

심사완료일 : 2005년 6월 16일