

## 남극반도 북부 남극-스코시아 판경계부에서의 세클턴 파쇄대의 지형지체구조

진영근 · 김예동 · 남상헌 · 김규중

한국해양연구원

### 요 약

남극반도 엘리펀트섬 북부의 남극-스코시아판 경계부에서 획득한 지구물리 자료(탄성파, 중력자료)는 세클턴 파쇄대를 따라 지각구조의 급격한 변화를 보여준다. 이들 자료에 의하면 세클턴 파쇄대의 해저산맥은 남극반도 대륙주변부 앞에서 중단되지만, 파쇄대의 변환단층대는 엘리펀트섬 부근의 주변부까지 계속 연장되며 그 넓이도 확장되고 있음을 보여준다. 즉 세클턴 파쇄대의 변환단층은 남동쪽으로 내려오면서 (1) 드레이크 해협에서는 지구(graben) 구조의 합몰대, (2) 파쇄대 산맥의 남쪽 끝, 삼중점 바로 남동쪽에서는 해양지각에 대규모 반지구(half-graben) 구조, (3) 남극반도 엘리펀트섬 북쪽 대륙사면을 심하게 변형시키는 단층군으로 그 형태를 변화한다. 세클턴 파쇄대의 단층대를 따라 두 단계의 판구조 환경 변화가 진행되었다. 첫 번째 단계는 대규모 정단층운동에 의해 반지구구조와 같은 확장구조를 형성시킨 확장력 환경이다. 이 시기는 드레이크 해협의 확장이 진행되었던 중기 마이오신세(약 10 Ma ~ 20 Ma 사이)에 해당된 것으로 추정된다. 두 번째 단계는 세클턴 단층을 역단층운동으로 재활성화 시킨 최근의 압축력 환경으로, 이는 최근 약 6 Ma 이후 진행된 스코시아판의 서향운동으로 인한 남극판과의 수렴작용에 의한 것이다.

**주요어:** 세클턴 파쇄대, 남극반도, 지형지체구조, 변환단층, 지구물리 자료

**Young Keun Jin, Yea Dong Kim, Sang Heon Nam and Kyu Joong Kim, 2000, Morphotectonics of the Shackleton Fracture Zone around the Antarctic-Scotia plate boundary off the northern Antarctic Peninsula. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 3, n. 3, p. 141-152**

**ABSTRACT:** In the vicinity of the Antarctic-Scotia plate boundary off Elephant Island(EI), geophysical data(multichannel seismic and gravity data) reveal rapid structural variation of the Shackleton Fracture Zone(SFZ) along its strike. The SFZ ridge terminates in front of the Antarctic Peninsula margin, whereas the transform fault of the SFZ continues farther southeast near EI and the width of the SFZ broadens toward the southeast. Accordingly, the SFZ transform fault changes its morphology along its strike as (1) a graben structure along the high Shackleton ridge in Drake Passage, (2) a half-graben structure in oceanic crust just southeast of the Antarctic-Scotia plate boundary, and (3) splay faults deforming the margin of EI. Two phases of tectonic deformation are clearly observed along the transform fault. Major extensional deformation had formed a large-scale half-graben during roughly about 10~20 Ma when Drake Passage had opened. And then, the Shackleton fault has been reactivated with reverse sense, which has been caused by recent convergence between Antarctic and Scotia plates due to westward movement of the Scotia plate since 6 Ma.

**Key words:** Shackleton Fracture Zone, Antarctic Peninsula, morphotectonics, transform fault, geophysical data

(Young Keun Jin and Yea Dong Kim, Sang Heon Nam and Kyu Joong Kim, Polar Sciences Lab, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea email: ykjin@kordi.re.kr)

## 1. 서 론

세클턴 파쇄대는 드레이크 해협을 가로질러 남미대륙의 남쪽 끝에서 남극반도 북쪽 끝까지 약 800 km 구간에 걸쳐 발달한 대규모 해저지질 구조로, 남극판과 스코시아판의 경계를 이루고 있다 (Fig. 1). 남극반도 북부에서 세클턴 파쇄대는 남쉐틀랜드 해구와 남스코시아 해저산맥과 만나 삼중점(triple junction)을 형성한다.

세클턴 파쇄대는 후기 제3기 동안 진행된 드레이크 해협의 확장에서 중요한 역할을 수행하였다. 드레이크 해협이 본격적인 확장을 시작한 30 Ma 이전에는 원시-세클턴 파쇄대는 남미남단지역과 남극반도사이에 일어났던 상대적인 운동, 즉 안데스산맥 남단에서 일어났던 대륙간의 변형과 이동단층운동, 그리고 스코시아판의 경계를 따라 분리된 대륙블록들 사이의 운동들에 의한 응력을 대부분 수용했던 좌향이동 단층시스템이었다 (Barker *et al.*, 1991). 30 Ma 이후에는 남미대륙과 남극반도의 이동속도 차이에 의해 스코시아해와 드레이크 해협이 열리면서, 서로 다른 확장시

스템을 가진 두 판(스코시아판과 피닉스판)의 경계로서 두 판의 상대적인 운동에 수용하는 역할을 하고 있다. 한편 드레이크 해협에서는 파쇄대의 동쪽에 위치한 스코시아해에서의 해저확장작용이 약 9 Ma경에 멈추었지만, 서쪽에 위치한 남극-피닉스 확장해령에서는 약 4 Ma까지 해저확장이 계속되었다(Barker and Burrell, 1977; Larter and Barker, 1991). 현재 진행되고 있는 남극판과 스코시아판의 수렴작용은 세클턴 파쇄대의 좌향이동단층운동에 의해 수용되고 있다(Pelayo and Wiens, 1989). 따라서 세클턴 파쇄대는 드레이크 해협 확장작용의 방향을 지시해주는 지시자이다(Cunningham *et al.*, 1995).

세클턴 파쇄대는 드레이크 해협에서는 높은 해저 횡단산맥(transverse ridge)과 변환단층대(transform fault zone)로 이루어져 있다(Fig. 2 and Fig. 3). 이 변환단층대는 남극판과 스코시아판의 상대적 움직임을 실제적으로 수용하는 두 판의 경계부이다. 대규모 해양파쇄대를 따라 나타나는 높은 해저산맥은 대서양 등 다른 지역에서도 자주 관찰되는 구조이다. 아직 그 성인과 구조

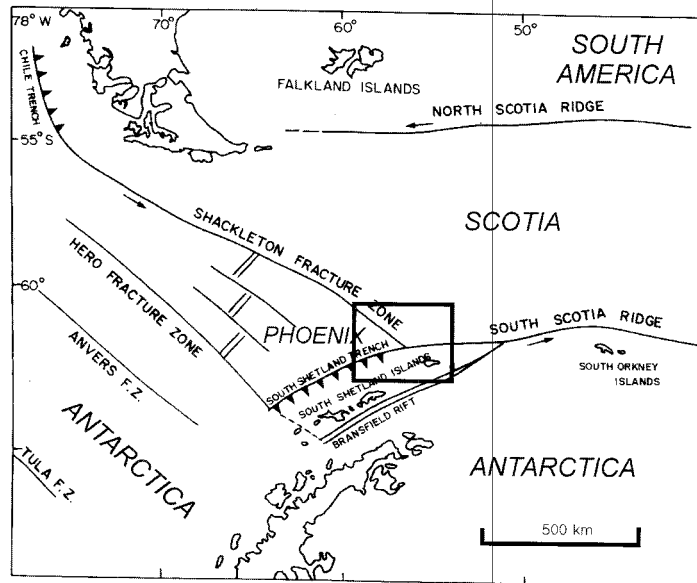


Fig. 1. Simplified tectonic map around the Antarctic Peninsula(modified from Jeffers and Anderson, 1990). Thick box indicates the study area.

는 잘 밝혀지지 않고 있다(Jin *et al.*, 1997). 해저 지형도에서는 세클턴 파쇄대의 횡단산맥은 남극반도 북쪽 끝 지역인 남극코시아 해저산맥과 남쉐틀랜드 해구가 만나는 삼중점에서 갑자기 끝나는 모습을 볼 수 있다(Fig. 2). 하지만 파쇄대를 이루는 또 하나의 구조인 변환단층대는 이 삼중점을 지나 남동쪽으로 남극반도 북부 대륙주변부까지 연장된다(Klepeis and Lawver, 1996).

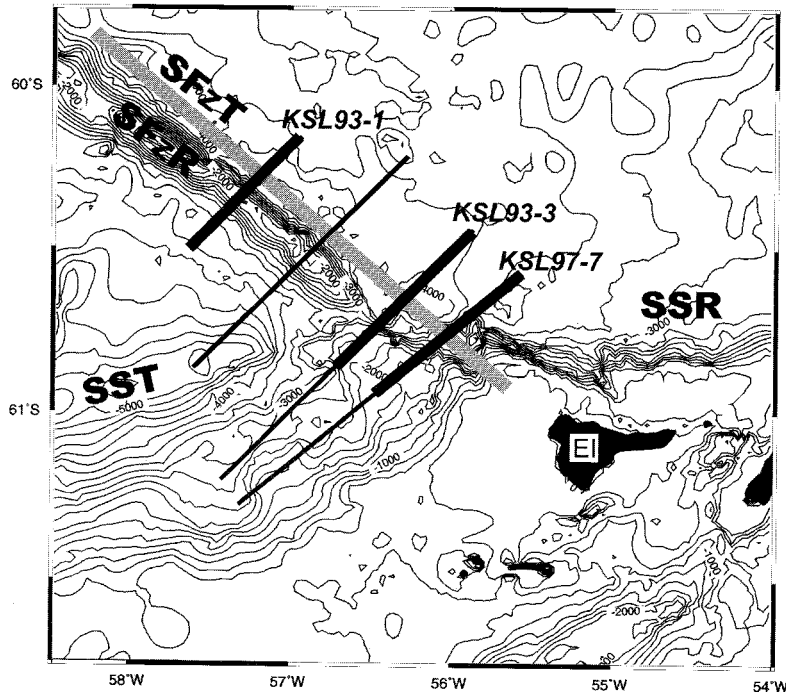
이 연구에서는 이 지역에서 얻은 다중채널 탄성파 단면도와 중력모형을 통해 세클턴 파쇄대가 남극반도쪽에서 어떤 형태로 연장되는지와 남극반도 대륙주변부를 어떻게 변형시키고 있는지를 규명하고자 한다. 이는 남극판과 스코시아판이 경계하고 있는 남극반도 북부에서 진행되고 있는

두 판의 상대적인 판구조운동과 판경계부에서 나타나는 지체구조 변화에 대한 보다 깊은 이해를 줄 것이다.

## 2. 자료 획득 및 처리

1993년 1월 한국해양연구소의 연구선 온누리호를 이용하여, 남극반도 북부 해역을 대상으로 다중채널 탄성파, 중력, 해저지형자료 등 종합적인 지구물리자료를 획득하였다(Fig. 2).

다중채널 탄성파탐사의 발파원으로는 총용량 22.6 l의 16개 슬리브건 배열을 사용하였으며 발파간격은 50 m이다. 신호수신에는 채널 간격은 25 m인 96 채널 아날로그 스트리머를 이용하였으



**Fig. 2.** Bathymetric map of the seafloor around the Antarctic-Scotia plate boundary off Elephant Island. Based on Onnuri 93 swath bathymetry data and Smith and Sandwell(1997). Isobath interval is 250 m. Solid lines show locations of geophysical profiles presented in this study. Bold solid lines on the solid lines indicate locations of MCS profiles shown in Fig. 3, Fig. 5, Fig. 7. Shade thick line indicates location of the Shackleton Fracture Zone Transform Fault System. EI-Elephant Island, SFzR-Shackleton Fracture Zone Ridge, SFzT-Shackleton Fracture Zone Transform Fault System, SSR-South Scotia Ridge, SST-South Shetland Trench.

며, 스트리머의 총길이는 2400 m이다. 각 채널은 24 개의 해상수진기(hydrophone)로 구성되었다. 최종적으로 24 fold 공심점(common depth point: CDP) 자료를 획득하였다. 기록길이는 10 s로 하였으며, 샘플링 간격은 4 ms로 설정하였다. 이 기록들은 현장에서 SEG-D 8015 포맷으로 기록되었다. 획득된 현장자료는 일반적인 해상탄성과 자료처리 과정에 따라 자료처리되었다. 즉 트레이스편집(trace edit), 구형발산 보정(spherical divergence correction), 공심점 취합(CDP gather), 예측 디컨벌루션(predictive deconvolution), NMO 보정(normal-moveout correction), 속도분석, 공심점 중합(CDP stack), 시변 필터링(time-variant filtering), 자동이득조절(auto-gain control) 등이 실시되었다. 자료처리에는 프랑스 CGG사의 Geovecteur<sup>®</sup> 자료처리 시스템을 이용하였다.

중력자료를 획득하기 위해 온누리호에 탑재된 Lacoste-Romberg(model S)<sup>®</sup> 선상중력계를 사용하였다. 이 중력계는 실시간으로 자료를 기록하며, 오차범위는 0.1 mgal이다. 중력자료에는 시간, 위치, 수심, 항속 및 선수 방향이 함께 기록되었다. GPS에 의해 위치정보가 제공되었다. 해상에서 얻어진 자료에 조석보정, 계기보정, 위도보정과 Eötvös 보정 등을 실시하여 최종적으로 Free-air 중력이상자료를 산출하였다.

해저지형자료는 온누리호에 탑재된 Sea Beam 2000 을 사용하여 획득하였다. 연구선에 장착된

micro-VAX 4000-200 시스템에 의해 일차적인 자료처리가 실시되었다. 자료를 획득하지 못한 지역은 Smith and Sandwell(1997)의 자료를 사용하였다.

### 3. 해저지형

남극반도 엘리펀트섬의 북부 해역에는 남극판과 스코시아판의 경계를 이루는 셰클턴 파쇄대, 남스코시아 해저산맥과 남쉐틀랜드 해구가 만나는 삼중점이 존재한다(Figs. 1 and 2). 셰클턴 파쇄대의 해저산맥은 삼중점에서 깊은 협곡을 사이로 남극반도 대륙주변부와 마주하고 있다(Fig. 2). 이 협곡은 웨넬해로부터 남쉐틀랜드 해구로 흐르는 강한 저층류의 이동 통로로 알려져 있다(Nowlin and Zenk, 1988).

드레이크 해협에서 연장된 높은 파쇄대 해저산맥과 마주하고 있는 남극반도의 대륙주변부에서는 심한 지형변화가 관찰된다(Fig. 2). 이에 반해 파쇄대의 변환단층대가 위치한 동쪽지역에는 삼중점에서 남쪽으로 약 20 km까지 지형의 변화가 상대적으로 적은 스코시아판의 해양지각이 계속되며, 단층대의 연장선과 만나는 엘리펀트섬 북쪽의 대륙사면은 연장선과 평행하게 발달한 협곡들에 의해 몇 개의 봉우리로 분할되어 심한 지형변화를 보인다(Fig. 2). Klepeis and Lawver(1996)은 해저지형자료로부터 엘리펀트섬 주변부에 파

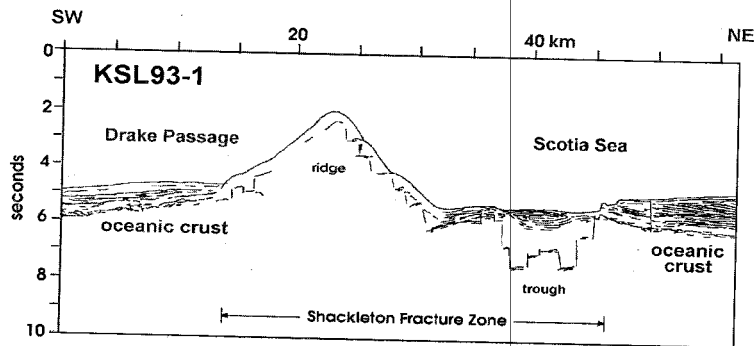


Fig. 3. Interpreted line drawing of KSL93-1 showing the SFZ with a high ridge and deep trough in Drake Passage(after Jin *et al.*, 1997). See Fig. 2 for location.

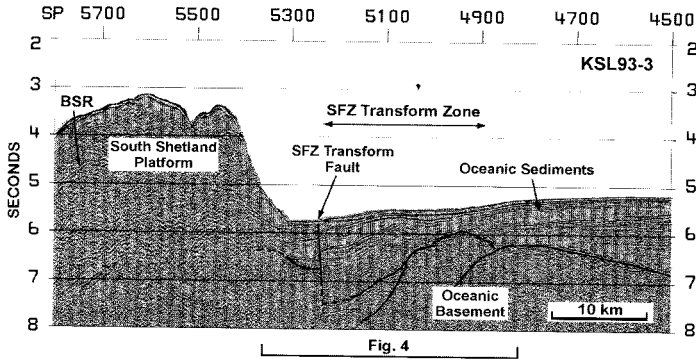


Fig. 4. MCS profile of KSL93-3 with interpretive lines, showing large-scale half-graben structure along the SFZ transform fault.

쇄대와 같은 주향으로 발달한 단층들이 다수 분포함을 제시하였다. 단층대의 연장선상을 따라 같은 주향으로 나타나는 대륙주변부의 심한 지형변형은 셰클턴 파쇄대의 단층대가 남동쪽으로 계속 연장되어 남극반도 지역까지 변형하고 있음을 시사한다.

### 3. 탄성과 구조

#### 3.1. 삼중점의 남동쪽

탄성과 단면도 KSL93-3은 삼중점의 바로 남동쪽 지역을 지나는 축선이다(Fig. 2). 단면도의 북동쪽에 나타나는 심해지역은 스코시아판에 속하는 해양지역이며, 남서쪽 천해지역은 남극반도의 대륙주변부이다(Fig. 4). 대륙사면은 28°에 달하는 급경사를 보인다. 대륙사면 하단, 심해지역과 만나는 경계지점에는 작은 언덕이 형성되어 있다. 남쉐틀랜드 해구의 부가대 하단에도 이 언덕과 유사한 구조들이 관찰되는데, 최근 해구지역의 압축응력 지체구조환경에 의해 형성된 것이다(Kim et al., 1997).

대륙사면 바로 아래인 SP5300 부근에는, 약 5 km 구간에 걸쳐 단면도에서 가장 깊은 지대가 나타나는데, 이 구간은 매우 평탄한 해저면을 보인다. 동쪽으로 가면서 수심이 완만하게 얕아진다. 해저면 지형이 완만하게 변하는 것과는 달리, 하부지층은 매우 심한 지각구조변화를 보인다(Figs. 4 and 5). 평탄한 지대가 끝나는 지점(SP5240)에서

대규모 단층이 관찰된다. 이 단층을 경계로 동쪽의 해양기반암이 서쪽에 비해 1200 m 이상 하강하였다. 이 단층은 고각단층(high-angle fault)으로 해저면까지 변형시키고 있다. 이 연구에서는 이 단층을 “셰클턴 단층(Shackleton Transform Fault)”으로 명명한다. 동쪽으로 가면서 해양기반암이 차츰 상승하는 모습을 보인다. 해양기반암의 평균 경사는 약 4°이다. 계속해서 해양기반암이 상승하여 SP4900 부근에서는 해양기반암이 약 500 m 이상 상승한 지형적인 언덕을 형성하고 있다. 이 구조는 역단층면을 따라 해양기반암이 상승한 형태이다. 이 역단층은 셰클턴 단층에서 대규모 정단층운동이 일어났을 때 함께 형성된 역단층운동(antithetic reverse fault)으로, 공간의 확장이 없이 해양지각블록이 회전하강함에 따라 다른 한쪽이 상승하면서 형성된 것으로 해석된다. 셰클턴 단층으로부터 이 역단층까지 약 18 km 구간을 “셰클턴 단층대(Shackleton Transform Zone)”로 정의한다. 이 역단층과 같은 경사를 갖는 평행한 또 다른 역단층이 셰클턴 단층과의 사이에서 관찰된다. 이 역단층면은 심도가 깊어짐에도 불구하고 왕복주시 8 초까지 뚜렷한 반사면을 유지한다. 셰클턴 단층대는 반지구구조(half-graben structure) 형태를 이루며 두꺼운 퇴적분지가 형성되어 있다.

셰클턴 단층대의 동쪽으로는 변형을 받지 않은 전형적인 해양기반암이 나타나며, 동쪽으로 가면서 점차 심도가 깊어진다(Fig. 4). 셰클턴 단층대 양쪽

의 해양기반암, 즉 대륙사면 아래(SP5300 - 5200)에 조금 남아 있는 해양기반암과 단층대의 동쪽 지역(SP5000)에 나타나는 해양기반암의 심도는 거의 비슷하다. 이는 셰클턴 단층대가 두 지역의 중간부분을 변형시키고 형성되었음을 지시한다.

셰클턴 단층대의 바깥쪽으로, 동쪽 지역에는 변형작용을 받지 않은 두꺼운 퇴적층들이 쌓여있다(Fig. 4). 가장 하부에 놓인 S3층은 내부반사특성이 희미한 반사특성을 보인다. 이층은 경사진 해양기반암의 기복을 채우며 평탄한 상부경계면을 형성하고 있다. S3/S2층 경계는 진폭이 큰 반사층으로 나타난다. S2층의 두께는 약 400 m이다. 전체적으로 반사특성이 희미하지만, 서쪽과 상부로 가면서 연장성이 좋은 반사층들이 나타난다. S2/S1층의 경계면은 셰클턴 단층대의 동쪽 끝, 상승한 기반암 블록 부근에서 침식단절면

(truncational surface)으로 구별되는데, 단층대쪽으로 가면서 심도가 깊어지면서 역단층에 의해 상승한 해양기반암 언덕의 최상부로 연결된다. S1층은 단층대 동쪽에서는 약 200 m 두께로 얇지만, 단층대에서는 서쪽으로 두께가 급속히 증가되면서 BS1층과 연결된다(Fig. 4).

셰클턴 단층대내, SP5050 - 5100 구간에서는 상부가 매우 교란된 해양기반암 위(왕복주시 6.2 초 - 6.8 초)에 내부반사층리가 잘 보이지 않은(transparent) 퇴적층(BS4)이 나타난다(Fig. 5). BS4층위를 덮고 있는 BS3층은 변형을 심하게 받은 층으로, 상부에서는 진폭이 큰 수평반사층이 단속적으로 나타나지만 전체적으로 내부반사층의 연장성이 나쁘고, 매우 혼잡한 형태를 보인다. 상부경계는 위로 볼록한 반사면으로 나타난다. BS3층은 왕복주시 7.2 초 아래에 500 m이상 두껍게 쌓여있고, 그 위

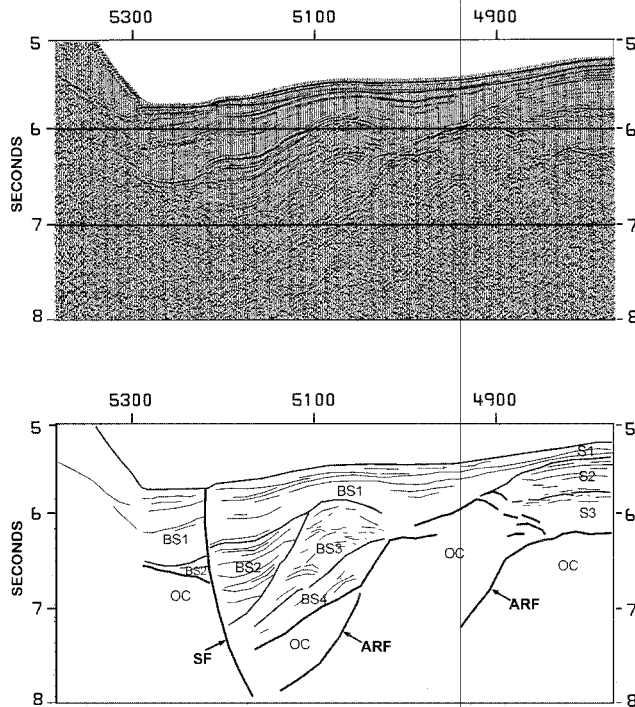


Fig. 5. MCS section and interpreted line drawing of KSL93-3 showing detailed structure of the SFZ transform fault zone. See Fig. 4 for the location. OC-oceanic crust. SF-SFZ transform fault. ARF-SFZ antithetic reverse fault.

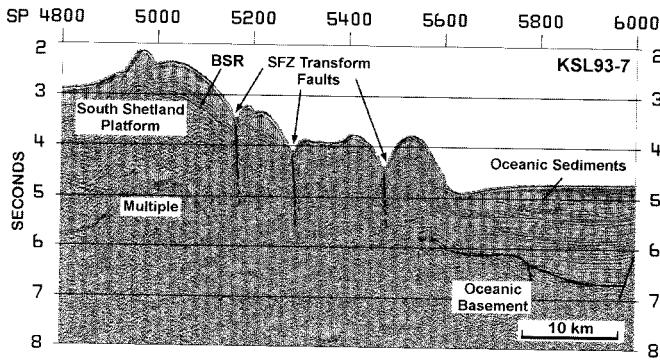


Fig. 6. MCS profile of KSL93-7 with interpretive lines, showing the continental margin off Elephant Island highly deformed by a series of SFZ transform faults.

로 연장성이 좋고 반사계수가 높은 BS2층이 BS3층의 경사를 따라 형성된 분지를 채우고 있다. BS2층은 왕복주사 6.8 초에 나타나는 강한 반사층을 경계로 상부층과 하부층으로 나눌 수 있다. 하부층의 최대 두께는 약 400 m이며, 상부층은 500 m이다.

대륙사면과 세클턴 단층사이의 좁은 구간에는 경사진 해양지각 바로 위에는 단층쪽으로 가면서 두꺼워지는 쉼기 형태의 BS2층을 볼 수 있다(Fig. 5). 이 퇴적층위로 해저면까지 약 700 m의 두꺼운 BS1층이 쌓여있다. 세클턴 단층을 경계로, 서쪽의 BS2/BS1층의 경계면과 BS1층이 동쪽에 비해 상승해 있다. 단층의 변위는 상부로 가면서 감소하는 양상이다. 단층을 경계로 BS2/BS1층 경계면의 변위는 약 150 m이다.

### 3.2. 엘리펀트섬 북부 대륙주변부

가장 높은 지형을 보이는 대륙봉단은 위로 볼록한 둥근 지형을 형성한다(Fig. 6). 대륙사면의 하부에는 연장성이 나쁜 반사특성 때문에 하부 지층구조를 명확하게 구별하기 어렵지만, 대략 세 개의 층으로 대별된다. 해저면에서 약 600 m 깊이까지는 희미한 내부 반사특성을 보이는 상부층, 그 하부에 연장성은 좋지 않지만 상대적으로 큰 진폭을 가진 반사특성을 보이는 하부층, 왕복주사 4 초 부근에 나타내는 심부 반사층은 음향기저(acoustic basement)로 해석된다. 대륙사면에서 가장 주목할 만한 반사층은 해저면 하부 왕복주사 0.6 초 아래에 해저지형과 거의 평행하게 나타나

는 연장성이 매우 좋은 강한 반사층이다. 이 반사층은 같은 깊이에서 나타나는 연장성이 나쁘고, 기복이 심한 다른 반사층들을 교차하면서 나타난다. 이 강한 반사층은 반사특성과 출현심도가 남극반도 북부 대륙주변부에서 자주 발견되는 가스수화물의 기저 반사층(Bottom simulating reflector)과 잘 일치한다(Jin and Kim., 1996; Tinivella et al., 1998).

대륙사면을 따라 내려오면 가파른 사면을 가진 협곡에 의해 분리된 세 개의 봉우리가 해양지각과 접하고 있다(Fig. 6). 가장 높은 서쪽에 위치한 봉우리(R1)에는 봉우리의 정상에 조그만 봉우리가 발달해 있다. 이는 SP4950 지점 대륙봉단 정점 부근의 봉우리와 유사한 형태이다. R1은 서쪽사면은 짧고, 동쪽사면은 볼록한 긴 사면을 보이는 비대칭형이다. 가운데 위치한 봉우리(R2)는 양쪽의 봉우리와는 매우 다른 형태를 가진다. R2의 정상부 약 2 km는 비교적 평탄한 대지를 형성한다. 동쪽의 봉우리(R3)는 대칭형태의 봉우리로서 동쪽의 스코시아해 지역에 비해 약 800 m 솟아있다. 봉우리 사이를 단절하는 약 200 ~ 500 m 깊이의 계곡들은 가파른 사면을 보여, 단층에 의해 형성된 사면일 가능성이 높다.

단면도의 동쪽에는 스코시아판의 해양지각이 나타난다(Fig. 6). 대륙사면 아래에서 가장 깊고, 단면도의 동쪽 끝으로 가면서 평탄해지는 해저면 지형을 보이며, 평균 3500 m의 수심을 보인다. 평탄한 해저면과는 달리, 해양기반암은 동쪽으로 가면서 급속히 깊어지는데, 대륙사면 아래에서 왕복

주시 약 6 초이며 동쪽으로 가면서 최대 6.6 초까지 깊어진다. 한편 R3아래 왕복주시 1 ~ 1.5 초 근방에 부분적으로 단절된 강한 반사층들이 관찰된다. 이 반사층들은 R3의 지형을 따라 위로 볼록한 형태로 배열하는데, R3의 지형효과를 보정해 준다면 이 반사층들 모두 해양기반암과 거의 같은 심도에 위치할 가능성이 높다. 따라서 이 반사층은 해양기반암 상부반사층의 연장으로, 스코시아 해양기반암이 대륙쪽으로 어느 정도 연장될 가능성, 즉 섭입의 가능성을 시사하지만, 섭입과 관련된 다른 구조가 뚜렷하게 관찰되지 않아 그 가능성은 높지 않다.

단면도의 동쪽 끝 SP5970에서는 해양기반암이 갑자기 6.7 초에서 6.0 초까지 상승함에 따라 지형적인 함몰대가 형성되어 있다. 함몰대 하부에는 뚜렷한 해양지각의 변형구조가 관찰되지 않는다. 남극반도의 태평양 연안에는 이런 함몰대 형태를 형성하며 나타나는 파쇄대가 자주 관찰된다(Larter and Barker, 1991). 이 함몰대가 또 다른 파쇄대의 존재를 나타내는지는, 파쇄대 양쪽지역의 해양지각이 서로 다른 시기의 것인지를 결정할 수 있는 해저자기이상 연구가 필요하다. 해양퇴적층의 두께는 아래에 놓인 해양기반암의 심도차이 때문에 대륙사면 아래에서 1000 m, 단면도의 동쪽 끝 함몰대 부근에서 최대 2000 m로 증가한다.

#### 4. 중력 모델링

KSL97-3의 탄성과 축선을 따라 중력자료를 획득하였다. 자료처리후 얻어진 Free-air 중력이상에 의하면 가장 높은 지형을 형성하는 대륙붕단에서 높은 중력이상값(Fig. 7a에서 'A')이 나타나며, 세클턴 단층대에서는 국부적으로 가장 낮은 중력이상값('B')이 관찰되었다(Fig. 7a). B지점을 지나서 해양쪽으로는 중력이상값이 계속해서 증가한다. A와 B지점은 약 20 km 떨어져 있고, 중력이상값 차이는 30 mgal에 달한다.

관찰된 Free-air 중력이상값을 이용하여 중력모델링을 실시하였다. 해저면, 퇴적층과 해양지각의 상부 등 천부구조의 깊이는 탄성과 단면도에서 획득하였다. 해수의 속도는 1500 m/s, 퇴적층의

속도는 1800~2500 m/s를 사용하여 깊이로 환산하였다. 각 층에 대한 밀도는 일반적으로 널리 인용되는 범위내의 값을 사용하였으며 Fig. 7b에 제시하였다.

중력모델에 의하면 이는 B지점에 나타나는 낮은 중력이상값은 주로 세클턴 단층대에 나타나는 두꺼운 퇴적분지 때문이다(Fig. 7b). 단층대 하부에서 해양지각이 약 2 km 정도 얇아지는 양상을 볼 수 있다. 이는 단층대의 심한 파쇄현상이 지각 심부까지 이어지며, 이런 약대를 따라 맨틀이 상승해 있음을 시사한다. 하지만 모델에 사용한 분지 퇴적층의 밀도를 증가하거나 두께를 감소시킨다면, 해양지각의 두께가 증가하여 맨틀의 상승효과가 나타나지 않을 수 있다. 해양지각과 대륙지각은 비교적 뚜렷한 경계를 보이는 것으로 해석된다. 중력 모델에 의한 계산값은 실제 관측값과 잘 일치한다(Fig. 7a).

### 5. 토 론

#### 5.1. 삼중점 남쪽에서의 세클턴 파쇄대 형태변화

기존 연구(Jin and Kim, 1996; Klepeis and Lawver, 1996; Kim *et al.*, 1997)에 의하면 드레이크 해협에서 세클턴 파쇄대는 주변 해저면에 비해 2000 m가 넘는 거대한 해저산맥과 두께 1000 m 이상되는 두꺼운 퇴적층으로 채워진 깊은 함몰대로 구성된 거대한 해저구조이다(Fig. 3). 최근의 지진연구에 의하면 세클턴 파쇄대를 따라 현재 압축변환단층운동(transpressional movement)이 계속되고 있다(Pelayo and Wiens, 1989). 세클턴 파쇄대의 해저산맥은 삼중점 앞에서 갑자기 중단되며, 그 남쪽으로는 지형변화가 심한 남극반도의 대륙주변부가 마주하고 있다(Fig. 2). 비록 세클턴 파쇄대의 해저산맥은 삼중점에서 중단되었지만, 파쇄대의 변환단층운동은 남쪽의 남극반도의 대륙사면으로 계속 연장된다(Klepeis and Lawver, 1996).

삼중점 바로 남쪽을 지나서 축선 KSL93-3에서는 세클턴 파쇄대의 연장선을 따라 단층작용에 의한 지각변형이 잘 관찰된다. 대륙사면 아래에서는 대규모 고각단층인 세클턴 단층을 따라 동쪽



해양지각 블록이 약 1200 m 하강한 대규모 반지구구조가 나타난다(Fig. 4). 이 단층은 삼중점 북쪽 드레이크 해협에서 나타나는 세클턴 파쇄대 변환단층대의 연장선과 일치하여 변환단층대가 계속되고 있음을 나타낸다.

KSL93-7에서 보는 것처럼 세클턴 파쇄대가 남극반도 대륙주변부를 통과하는 엘리펀트섬 북부의 대륙사면에는 해저지형변화가 심하다(Fig. 6). 사면을 따라 협곡들에 의해 나누어진 세 개의 봉우리가 연이어 지면서 동쪽으로 스코시아 해양지각과 만난다. 골곡이 심한 지형변화 때문에 하부의 탄성파구조를 구별하기 어렵지만, 봉우리 사이의 깊은 협곡들은 단층들에 의해 형성된 것으로

판단된다.

세클턴 파쇄대의 단층대는 남동쪽 남극반도 대륙주변부에 이르면서 점차 넓어진다. 삼중점의 북서쪽, 드레이크 해협에서는 KSL93-1에서 나타난 것처럼 단층대의 폭이 약 10 km이다(Fig. 3). 삼중점 남동쪽에서는 KSL93-3에서 반지구구조가 나타나는 구간의 너비가 약 18 km이며(Fig. 4), 남극반도 대륙사면과 만나서 심한 지형변화를 보이는 구간은 약 20 km에 이른다(Fig. 6). 즉 드레이크 해협에서 깊고 좁은 지구구조의 함몰대를 형성한 세클턴 단층대가 삼중점의 바로 남동쪽에서는 반지구구조의 단층대로 형태가 변화하다가, 남극반도 대륙사면과 만나는 지역에서는 여러 개

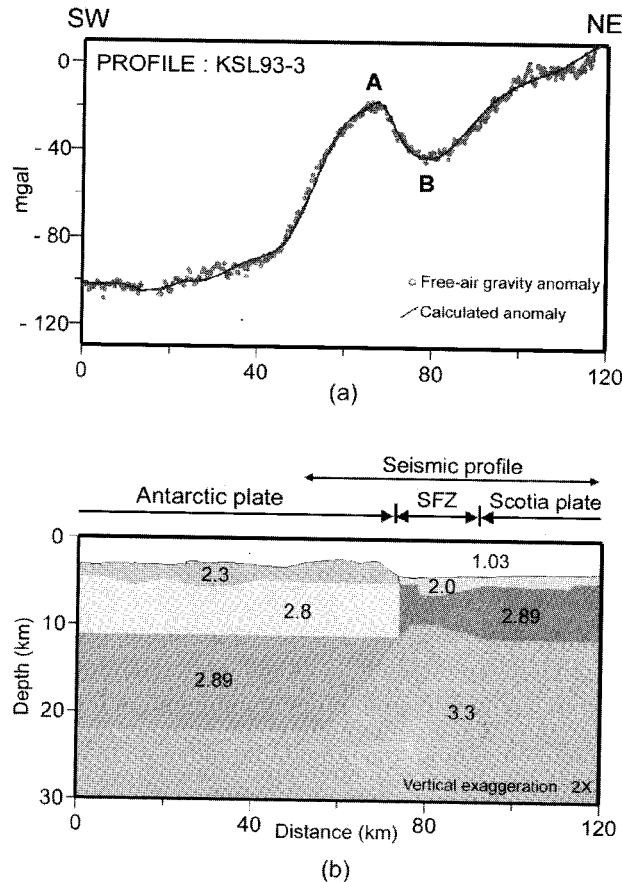


Fig. 7. (a) Gravity profile of KSL93-3, and (b) Gravity model of KSL93-3. The model shows thick sedimentary basin and thin oceanic crust in the SFZ associated with the gravity low 'B' on the profile.

의 소규모 단층들로 분사되는 형태로 나타난다. 이는 아마도 단층대가 점차 공간적으로 발달되면서 단층대의 깊이는 감소하고 폭은 증가함을 나타낸다.

이런 세클턴 파쇄대의 단층운동은 엘리펀트섬의 남쪽, 브랜스필드 동부부지까지 영향을 주고 있는 것으로 생각된다. 이 지역의 주응력방향은 브랜스필드 분지의 주향과 같은 북동-남서방향으로 알려져 있고, 대부분의 단층방향도 같은 주향으로 발달되어있다(Klepeis and Lawver, 1996). 하지만 동부부지에서 북동-남서 방향의 분지축을 따라 얻어진 탄성과 단면도 KSL96-1에는 이런 주응력방향과 거의 수직으로 발달한, 세클턴 파쇄대와 같은 북서-남동방향의 주향을 가진 단층들이 분지의 두꺼운 퇴적층을 심하게 교란하고 있는 모습을 볼 수 있다(한국해양연구소, 1996). 이 단층들은 세클턴 파쇄대의 대륙쪽 연장선을 따라 집중적으로 나타난다.

## 5.2. 세클턴 파쇄대의 형성시기와 남극반도 북부지역의 판구조 역학 변화

탄성과 단면도 KSL93-3에서는 대규모단층인 세클턴 단층을 따라 동쪽의 해양지각 블록이 약 1200 m 하강한 모습을 볼 수 있다(Figs. 4 and 5). 이는 세클턴 파쇄대를 따라서 대규모 정단층 운동이 일어났음을 지시한다. 여기서 가장 중요한 점은 이런 확장응력 환경에서의 대규모 정단층 운동이 언제 진행되었느냐는 것이다. 다른 축선들과는 달리 KSL93-3의 경우 단층대를 따라 지각변형작용에 의해 반지구구조가 형성되어 있고, 반지구구조를 채우는 두꺼운 퇴적층이 집적되어 있다. 이 퇴적층의 상부는 지각변형을 받지 않은 동쪽의 퇴적층과 연결되어 있어, 변형을 받은 구간과 그렇지 않은 구간의 퇴적층간의 대비가 가능하기 때문에 대규모 지각변형을 유발한 단층운동의 시기를 대략적으로 추정할 수 있다.

단층대 동쪽의 해양퇴적층은 하부에서부터 S3, S2, S1층으로 크게 구별할 수 있다(Fig. 3). 최상부층 S1층은 100~200 m의 얇은 층을 형성하고 있다. S2/S1 경계면은 침식절단면으로 서쪽으로 경사져서 세클턴 단층대의 동쪽경계를 이루고 있

는 상승한 해양기반암 정상부까지 연결된다. S3층과 S2층은 이 해양기반암에 막혀 단층대쪽으로 연장되지 않는다. S1층은 단층대 구간에서는 BS1층으로 연장되며 평균 500 m로 두꺼워진다. 따라서 S1층은 BS1층과 같은 층으로, 단층대를 포함한 전 구간을 걸쳐 연결되는 유일한 퇴적층이다. 단층대의 동쪽 경계에서 해양기반암이 역단층면을 따라 상승한 지각변형작용이 S1층에는 전혀 영향을 주지 않는다. 이는 S1층(BS1층)의 형성이 적어도 세클턴 단층의 대규모 확장단층운동에 수반된 역단층운동이 일어난 이후, 즉 반지구구조가 모두 형성된 이후임을 지시한다.

한편 세클턴 단층대에는 퇴적층의 두께가 2000 m가 넘는 깊은 퇴적분지가 형성되어 있다(Fig. 4). 상부 약 1500 m에는 층 간격이 일정하고 연장성이 좋으며, 변형을 받지 않은 퇴적층 BS1층과 BS2층이 나타난다. 이런 두 퇴적층의 반사특성은 세클턴 단층에서의 대규모 정단층운동이 완전히 끝난 후에 이 퇴적층들이 집적되었음을 지시한다. BS2층은 분지 안에 쌓인 층으로, S2층과는 직접적으로는 연결되지 않는다. S2/S1층 경계의 침식 단절면은, 주변 퇴적층들이 침식되어 깊은 세클턴 분지쪽으로 대량 이동하였을 가능성을 시사한다.

이 지역에는 세클턴 파쇄대와 남스코시아 해저 산맥의 높은 지형 때문에 대륙사면 아래로 흐르는 강한 해저류(sea-bottom flow)가 존재한다(Nowlin and Zenk, 1988). 이 해저류는 단면도에 대해 수직방향으로 흐르며, 많은 퇴적물을 운반했을 것으로 생각된다. 따라서 같은 기간동안에는 분지안에 훨씬 많은 퇴적물이 집적하였을 것으로 생각된다. 이런 퇴적을 차이 때문에 분지퇴적층 BS2층과 동쪽의 S2층간의 직접적인 대비는 어렵다. 다만 BS1층과 S1층이 동일한 퇴적층이라면 BS2층은 비슷한 반사특성을 보이는 S2층의 상부층과 대비될 가능성이 높다.

BS3층은 내부 반사특성이 매우 교란된 모습을 보이며 세클턴 단층쪽으로 경사져 있다. 이 층은 내부 반사특성이 매우 혼잡한 양상을 보인다. 이 층은 정단층운동에 의해 깊은 분지가 형성된 시기에 급격하게 퇴적된 층으로 해석된다. BS4층은 단층쪽으로 해양기반암의 경사와 평행한 층리들

보이는 퇴적층이다. 균질한 반사특성을 보이며, 직선의 반사면으로 나타나는 상부경계면에 의해 BS3층과 뚜렷하게 구별된다. BS3층의 일부 상부층들은 이 상부경계면에 대해 onlap을 형성한다. 또한 해양기반암 위를 직접적으로 덮고 있으며, 뚜렷한 상부경계면이 발달해 있다. 이 층은 단층운동 전에 이미 형성된 퇴적층으로, 단층운동으로 해양기반암과 함께 기울어진 것으로 해석된다. 이에 따라 해양기반암에 나타나는 동쪽의 S3층과 대비된다. BS4층의 상부경계면이 S3층의 상부경계면과 같은 시기인지는 알 수 없지만, BS4층이 해양기반암 위에 놓여 있다는 사실은 적어도 BS4층의 대부분은 S3층의 중·하부층과는 같은 시기임을 시사한다.

이런 퇴적층 분석을 통해 KSL93-3의 세클턴 단층에서 대규모 정단층운동이 일어난 시기를 대략적으로 추정할 수 있다. 이 단층운동은 이분지 퇴적층 BS4층 형성 후와 BS2층 형성 전 사이, 즉 BS3층이 형성된 시기에 진행되었다. 만일 BS2층이 S2층의 상부층과 같은 시기이고 BS4층의 상부경계가 S3층의 상부층 일부와 같다면, 정단층운동의 시기는 S2층의 중부층에서 S3층의 상부층에 해당한다. 탄성과 자료만으로는 이 층들의 정확한 연령을 결정하는 데는 한계가 있다. 최근의 해저자력이상자료에 의하면 이 지역의 해양지각의 연령은 자기이상 C10의 바로 전인 약 29 Ma로 추정되고 있다(Lodolo *et al.*, 1997). 퇴적물이 일정했다는 아주 단순한 가정아래에서 계산한 정단층운동의 시기는 대략적으로 10~20 Ma사이이다. 이 시기는 현재의 남스코시아 해저산맥을 따라 남오크니 소대륙(South Orkney Micro-continent)이 남극반도의 북쪽 끝 지역으로부터 분리되어 이동하면서 파워웰 분지(Powell Basin)와 제인 분지(Jane Basin)와 같은 확장분지들이 생긴 중기 마이오신세와 대체적으로 일치한다(Maldonado *et al.*, 1998). 이 시기에는 연구지역인 남극반도 북부 끝지역을 포함한 인근의 남극-스코시아 경계부지역 전체가 확장응력 환경에 놓여 있었으며, 단면도에서 관찰되는 세클턴 단층의 대규모 정단층운동은 이 시기에 전체적인 지체구조운동에 일부로서 진행된 것으로 해석된다.

단면도에서는 세클턴 단층을 따라 진행된 중요한 판구조환경의 변화를 관찰할 수 있다. 세클턴 단층에서는 하부의 해양기반암인 경우 동쪽지역이 크게 하강한 반면에, 상부의 퇴적층, 즉 BS2층의 상부층과 BS1층은 서쪽에 비해 약 150 m 상승한 모습을 보인다. 해저면에서도 단층을 경계로 동쪽지역이 약 50 m 상승한 계단식 지형을 보인다. 이는 과거의 정단층이었던 세클턴 단층이 최근에 역단층으로 재활성화되었음을 나타낸다. 대체적으로 하부에서 해저면으로 가면서 역단층의 변위량이 감소하는 양상을 보인다. 이는 역단층의 활동성이 점차 감소하거나, 고화가 덜 진행된 최상부층의 압축효과일 수 있다. 최근 이 지역의 판구조 복원 연구에 의하면 약 6 Ma 이후 스코시아 판이 서쪽방향으로 전진하기 시작함에 따라 남극 판과 스코시아판이 서로 수렴하고 있다(Pelayo and Wiens, 1989). 현재 드레이크 해협 지역은 압축력 환경에 놓여 있다. 따라서 세클턴 단층을 따라 재활성화된 역단층운동의 시기는 6 Ma 이후로 생각된다.

## 6. 결 론

남극반도 북부에 위치한, 세클턴 파쇄대와 남쉐틀랜드 해구, 남스코시아 해저산맥이 만나는 삼중점부근에서 탄성과, 중력, 해저지형자료 등 종합적인 지구물리 자료를 획득하였다. 탄성과 자료에 의하면 세클턴 파쇄대의 해저산맥은 남극반도 대륙주변부 앞에서 중단되지만, 파쇄대의 변환단층대는 파쇄대의 연장선을 따라 남동쪽으로 계속 연장되면서 그 형태에 변화를 보인다. 즉, 드레이크 해협에서는 지구 구조의 깊은 함몰대를 형성하였고, 삼중점 남쪽에서는 해양지각내에 대규모 반지구 구조의 단층대, 남극반도 엘리펀트섬 북쪽 대륙사면을 심하게 변형시키고 있는 단층군의 형태를 보인다. 중력 모델링 결과는 단층대에는 파쇄작용에 의해 형성된 깊은 퇴적분지와 약 4 km의 얇은 해양지각이 나타난다.

삼중점 지역 남동쪽에서는 세클턴 파쇄대의 단층대를 따라 두 단계의 판구조 환경 변화가 관찰된다. 첫 번째는 확장력 환경으로, 세클턴 단층을

따라 대규모 정단층 운동이 일어나 대규모 반지구 구조를 형성하였다. 이 시기는 S2층의 중부에서 S3층의 상부 퇴적층이 형성된 시기에 해당되며, 대략적인 추산에 의하면 중기 마이오신세(10 Ma에서 20 Ma사이)에 해당한다. 두 번째는 최근의 압축력 환경이다. 세클턴 단층은 약 6 Ma 이후 현재까지 진행되고 있는 남극판과 스코시아 판 수렴작용에 의해 재활성화되어, 해저면까지 변형시키는 역단층운동을 보인다.

## 사 사

이 연구는 대한민국 남극연구 프로그램의 일환으로 해양수산부에 의해 지원되는 “남극해저지질 조사사업”의 결과이다. 출고 거친 남극의 바다에서 좋은 자료를 획득해주신 참여 연구원들께 감사드린다. 더욱 알찬 논문이 되도록 힘써주신 두분의 심사위원께도 감사를 드린다.

## 참고문헌

- 한국해양연구소, 1996, '96 남극 해저지질 조사사업 보고서, BSPG00252-935-7.
- Barker, P.F. and Burrell, J., 1977, The opening of Drake Passage, *Marine Geology*, 25, 15-34.
- Barker, P.F., Dalziel, I.W.D., and Storey, B.C., 1991, Tectonic development of the Scotia Arc region: *in* Tingey, R.J. Ed., *Antarctic Geology*, Oxford University Press, 215-248.
- Cunningham, W. D., Dalziel, I. W. D., Lee, T. Y., and Lawver, L. A., 1995, Southernmost South America-Antarctic Peninsula relative plate motions since 84 Ma: Implications for the tectonic evolution of the Scotia Arc region, *Journal of Geophysical Research*, 100, 8257-8266.
- Jeffers, J.D. and Anderson, J.B., 1990, Sequence stratigraphy of the Bransfield Basin, Antarctica: Implications for tectonic history and hydrocarbon potential: *in* John, B.St. Ed., *AAPG Studies in Geology*. No. 31. Antarctica as an Exploration Frontier- ydrocarbon Potential, *Geology, and Hazards*. The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, 13-39.
- Jin, Y.K. and Kim, Y., 1996, Tectonic implication of the Crustal Structure in the South Shetland Trench, Antarctic Peninsula, *Journal of Geological Society of Korea*, 32, 146-161.
- Jin, Y.K., and Kim, Y., Nam, S.H., Lee, D.K. and Lee, K., 1997, Gravity models for the South Shetland Trench and the Shackleton Fracture Zone, *Geoscience Journal of Korea*, 1, 32-40.
- Kim, Y., Jin, Y.K., and Nam, S.H., 1997, Crustal Structure of the Shackleton Fracture Zone in the Southwestern Scotia Sea: *in* Ricci, C.A., Ed., *The Antarctic Region: Geological Evolution and Process*, Proceedings of VII Int'l Symposium on Antarctic Earth Sciences, Siena 1995, 661-667.
- Klepeis, K.A. and Lawver, L.A., 1996, Tectonics of the Antarctic-Scotia plate boundary near Elephant and Clarence Islands, West Antarctica, *Journal of Geophysical Research*, 101, 20211-20231.
- Larter, R.D. and Barker, F., 1991, Neogene interaction of tectonic and glacial processes at the Pacific margin of the Antarctic Peninsula: *in* MacDonald, D.I.M., Ed., *Sedimentation, Tectonics and Eustasy*. International Association of Sedimentology Special Publications, 12, 165-186.
- Lodolo E., Coren, F., Schreider, A.A., and Ceccone, G., 1997, Geophysical evidence of a relict oceanic crust in the southwestern Scotia Sea, *Marine Geophysical Researchs*, 19, 439-450.
- Maldonado, A., Zitellini, Z., Leitchenkov, G., Balanyá, J.C., Coren, F., Galindo-Zaldívar, J., Lodolo, E., Jabaloy, A., Zanolla, C., Rodriguez-Fernández, J., and Vinnikovskaya, O., 1998, Small ocean basin development along the Scotia-Antarctica plate boundary and in the northern Weddell Sea, *Tectonophysics*, 296, 371-402.
- Nowlin, Jr., W.D. and Zenk, W., 1988, Westward bottom currents along the margin of the South Shetland Island arc, *Deep-Sea Research*, 35, 269-301.
- Pelayo, A.M. and Wiens, D.A., 1989, Seismotectonics and relative plate motion in the Scotia Sea region, *Journal of Geophysical Research*, 94, 7293-7320.
- Smith, W.H.F. and Sandwell, D.T., 1997, Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science* 277, 1956-1962.
- Tinivella, U., Lodolo, E. Camerlenghi, A., and Boehm, 1998, Seismic tomography study of a bottom simulating reflector off the South Shetland Islands (Antarctica): *in* Henriot, J.P. and Mienert, J., Eds., *Gas Hydrates: Relevance to world margin stability and climate change*. Geological Society of London Special Publication, 137, 133-140.

2000년 4월 30일 원고접수

2000년 9월 21일 원고채택