지구물리 제 2권 제 4호, p. 241-250, (1999년 12월)

남극 브랜스필드 해협의 해저면 반사계수 특성

진 영 근*, 홍 종 국**, 이 덕 기*
*한국해양연구소 극지연구센터, **한국해양연구소 해양지질연구단

요 약

남극 브랜스필드 해협에서 획득한 탄성파 자료로부터 다중반사파와 해저면 반사파의 진폭비를 이용하여 해저면 반사계수를 구하였다. 시험 자료처리 결과에 의하면 측점에 따른 심한 변동오차를 감소시키기 위하여 이동평균이 효과적임을 보여준다. 계산된 해저면 반사계수와 해저면 물성에 반영된 지질환경과의 관련성을 분석하였다. 중부 브랜스필드분지 지역에서는 퇴적물의 공급원으로부터의 거리가 멀수록 반사계수가 감소하는 변화양상이 우세하여, 사면 근처에서는 0.12~0.2 사이, 분지의 중심에서는 0.1~0.12 사이의 반사계수를 나타낸다. 서부 브랜스필드분지에서 지역적으로 나타나는 빙하침식 지형에서는 반사계수가 0.2~0.3의 범위 내에서 변하였으며, 확장중심의 화산분출물이 노출된 지역은 0.2 이상의 큰 반사계수를 나타냈다. 또한 지체구조운동에 의해 상승작용을 받은 고지층들이 후기의 빙하침식작용에 의해 해저면에 드러난 지역에서는 해저면 반사계수가 비교적 크게 나타났다.

주요어: 반사계수, 해저면 물성, 탄성파 자료, 브랜스필드 해협, 지질환경

Jin, Young Keun, Hong, Jong Kuk, and Lee, Duk Kee, 1999, Characteristics of Water-bottom Reflection Coefficients in Bransfield Strait, Antarctic Peninsula. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 2, n. 4, p. 241-250.

ABSTRACT: Reflection coefficients of the seafloor have been calculated from the amplitude ratio of secondary to primary water bottom reflection in seismic data obtained from Bransfield Strait, Antarctic Peninsula. Test processing for the coefficients shows that moving average is effective to reduce severe fluctuation of the coefficient measured at each point. Relationship between the coefficients and the properties of water bottom is analyzed to illuminate geological environment. In the central Bransfield Basin, the magnitude of reflection coefficients decreases as it is distant from the sedimentary sources. Reflection coefficients range from 0.12 to 0.2 near the continental slope of the basin, and from 0.1 to 0.12 in the basin floor. In the western Bransfield basin, reflection coefficients between 0.2 to 0.3 are obtained from the area eroded by glacial movement. On the volcanic structures near Deception Island, the coefficients show relatively high values more than 0.2. Paleo-geological structures uplifted by tectonic movement and outcropped by glacial erosion have relatively high coefficients.

Key words: reflection coefficients, water-bottom properties, seismic data, Bransfield Strait, geological environment

(Jin, Young Keun and Lee, Duk Kee, Polar Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea; Hong Jong Kuk, Marine Geology and Geophysics Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea. e-mail: ykjin@kordi.re.kr)

1. 서 론

남극반도 북부에 위치한 브랜스필드분지는 4백만년 전 이후에 진행된 최근의 확장작용에 의해 남극반도와 남쉐틀랜드군도사이에 형성된 대륙주변부 분지(Barker, 1982; Lawver *et al.*, 1996)로, 남

극의 다른 지역에 비해 고온 다습한 환경에 놓여있다(Fig. 1). 이 분지는 후기 플라이오신세와 플라이스토세 동안에 빠른 침강작용을 겪어 남극의 어느 지역보다 이 기간동안의 연속된 층서가 완전하게 보존된 지역이다(Banfield · Anderson, 1995). 특히 고위도 지방에서 특징적으로 나타나는 간빙기와 빙하기 동안에 일어났던 빙하의 전진후퇴 작용이 뚜렷하여 많은 빙하계곡과 빙하퇴적층이 잘 발달해 있어, 이에 수반된 퇴적작용을 밝힘으로써 고지구환경 변화를 자세히 연구할 수 있는 지역으로 최근 많은 관심이 집중되고 있다(Griffth · Anderson, 1989; Jeffers · Anderson, 1990; Domack · Ishman, 1993; Banfield · Anderson, 1995).

Jeffers · Anderson (1990)은 스파키(sparker)와 워터건(watergun) 자료에 의한 탄성파 층서 연구를 토대로 빙하 최대기(glacial maximum period) 동안의 브랜스필드분지의 퇴적상 모델을 제시하였다. Griffith · Anderson (1989)과 Domack · Ishman (1993) 등은 분지내 여러 지역에서 획득한 많은 퇴적물 시추코아 자료들을 이용하여 빙하기 퇴적물과 간빙기 퇴적물을 구별하고, 최근의 고해양환경변화를 해석하였다. Banfield · Anderson (1995)은 2600 km의 탄성파 자료를 해석하여 제4기 이후의 빙하역사를 규명하고, 100 여점의 시추코아 및 그랩(grab) 자료 분석을 통해 탄성파 상(seismic facies) 연구를 수행하여 현생 간빙기 환경 특성을 파악하는 연구를 수행하였다.

최근 수 십만년 전 이후에 진행되었던 빙하기-간빙기의 기록들은 거의 해저면 지층에 국한되어 있기 때문에, 이제까지의 고해양환경 연구는 시추코아시료를 통해서만 이루어져 왔다. 하지만 시추코아 경우 해저면이 비정상적으로 딱딱한 남극 지역에서는 시료의 획득이 다른 지역에 비해 상대적으로 어렵고, 넓은 지역을 연결시키기 위해서는 많은 정점이 필요하다는 단점이 있다. 현재까지 이 지역의 고해양환경 연구를 진행함에 있어 탄성파 자료와 코아 자료는 직접적으로 서로 연결되지 못하고 있다. 실제로 브랜스필드분지 내에서 얻어진 대부분 시추코아의 길이가 10 m를 넘지 못하는 반면에, 탄성파 단면도를 이용할 경우 버블 잡음과 같은 인위적인 신호에 의해 해저면 하부 약 15~20 m 이내의 표층에 대한 분석은 거의 불가능하기 때문이다(Banfield · Anderson, 1995).

남극반도 지역에서는 최근 대륙붕 퇴적층조차도 2000 m/sec 이상의 높은 속도를 갖는 것으로 알려져 있다(Larter · Barker, 1989). 이는 빙하기 최대기 동안에 해저면까지 확장된 빙상(ice sheet)의 전진후퇴작용으로 인해 해저면 지층이 심한 침식작용 및 과압축(overcompaction)을 받았기 때문이다(Maldonado *et al.*, 1994). 이런 높은 해저면 속도는 높은 반사계수를 유발하여 음원의 투과에너지 크게 감소시켜 하부 지층을 판별하기 어렵게 만들뿐만 아니라, 수심이 얕은 지역에서는 강한 해저면 버블잡음과 다중반사파를 형성시키기 때문에 탄성파 단면도에서 천부 해저 퇴적층의 해석을 더욱 어렵게 한다.

이 연구에서는 브랜스필드 지역에서 획득한 탄성파 자료에서 강하게 나타나는 다중반사파의 진폭을 이용하여 해저면 반사계수를 구하고자 한다. 해저면 반사계수는 해저면의 물성을 직접적으로 반영하기 때문에, 퇴적장소와 퇴적물 공급원 사이의 거리, 빙하 작용, 화산작용 및 지체구조 운동과 같은 이 지역의 퇴적작용에 영향을 주는 요인들에 대한 유용한 정보를 포함한다. 따라서 각각의 요인이 우세하게 나타나는 지역에서 반사계수의 양상이 어떻게 변화하는지를 살펴봄으로써 서로의 상관관계를 도출하고, 이를 토대로 해저면 물성, 퇴적작용, 그리고 지층분포에 대한 일차적인 판단자료로 반사계수를 이용할 수 있는지를 검증할 것이다. 이런 분석이 가능하다면, 시추코아 자료와의 보완을 통해 보다 쉽게 신빙성 있는 해저면의 물성을 밝히는 데 활용될 수 있을 것이다. 나아가 이 지역에서 특징적으로 진행되었던 고위도 지역의 퇴적작용, 최근 빙하기 동안 일어났던 빙하전진후퇴운동의 진행과정, 화산활동 및 지체구조운동 등에 대한 광역적인 복원이 이루어질 수 있을 것이다.

2. 연구 지역

신생대이후 남극반도 북부 지역은 상대적으로 좁은 지역 안에 여러 종류의 지체구조운동이 복합적으로 진행된 지역이다. 연구 지역인 브랜스필드해협은 최근 4백만년 전 이후에 진행된 확장지구조운동에 의해 형성된 분지이며, 현재 남극판과 스코시아판의 상호작용에 의한 응력이 전달된 지역에 해당하고 있다. 브랜스필드해협은 북동쪽으로는 쉐클턴파쇄대, 남서쪽으로는 히어로파쇄대의 대륙쪽 연장선에 사이에 위치하고 있으며, 이는 대양쪽에 나타나는 남쉐틀랜드 해구의 범위와 일

치한다(Fig. 1). 히어로파쇄대는 남서쪽의 비활동성 대륙주변부와 북동쪽의 활동성 대륙주변부의 경계를 이루며 서부 브랜스필드해협의 지체구조 형성에 큰 영향을 미치고 있다. 이는 히어로파쇄대의 대륙쪽 연장선의 남서쪽으로는 더 이상 섬들이 대륙주변부에 나타나지 않는 지형적인 특징으로 나타난다.

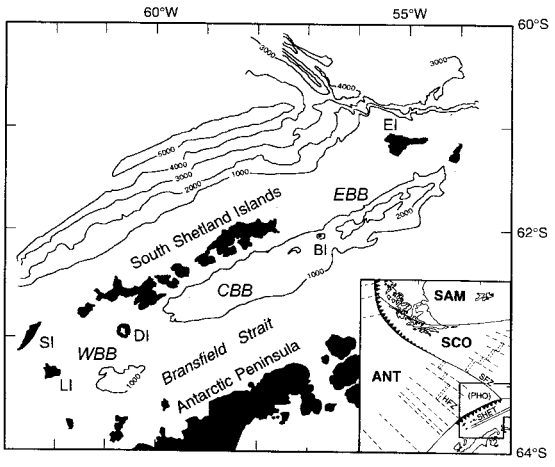

Fig. 1. Location map for Bransfield Strait in the northern Antarctic Peninsula. Simplified bathymetric contours in thousands of meters. BI-Bridgeman Island, DI-Deception Island, EI-Elephant Island, LI-Low Island, and SI-Smith Island, CBB-Central Bransfield Basin, EBB-Eastern Bransfield Basin, WBB-Western Bransfield Basin. Inset shows present-day tectonic setting in the region. Standard single lines indicate plate boundaries and sawtooth lines are trenches. Double dashed lines represent no longer active ridge-crest segments and single dashed lines show fracture zone trends. ANT-Antarctic Plate, SAM-South American Plate, SCO-Scotia Plate, PHO-former Phoenix Plate, SHET-South Shetland Microplate, HFZ-Hero Fracture Zone, and SFZ-Shackleton Fracture Zone.

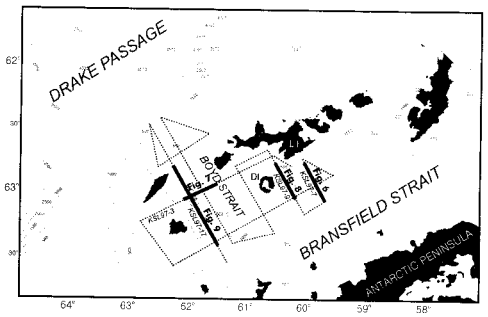

Fig. 2. Distribution of seismic lines available for this study. Sections displayed in figures are highlighted and numbered. Bathymetric map with 500 m interval contours are drawn using estimated topographic data file drived from satellite altimetry data by Sandwell *et al.* (1994). DI-Deception Island, KGI-King George Island, LI-Livingston Island.

브랜스필드해협은 남극반도와 남쉐틀랜드군도 사이에 약 100 km의 너비에 450 km의 길이로 발달한 확장분지이다. 분지의 확장축이 남쉐틀랜드군도쪽으로 치우쳐 있어, 남극반도쪽의 사면이 완만한 반면 남쉐틀랜드군도쪽의 사면은 가파른 비대칭형의 해저지형을 보인다(Fig. 1). 분지의 확장축을 따라 관찰되는 확장해령, 높은 지열류량, 최근의 정단층과 지진활동 등은 이 분지가 현재까지 확장작용을 계속하고 있음을 강하게 시사하고 있다(Lawver *et al.*, 1995).

브랜스필드분지는 분지축에 배열하는 화산섬인 디셉션섬과 브리지먼섬을 경계로 하여 지형적으로 3개의 소분지로 나누어진다(Jeffers • Anderson, 1990). 남서쪽의 디셉션섬과 북동쪽의 브리지먼섬 사이에 발달한 중부 소분지는 중심부의 최대수심이 1950 m이고 분지폭이 60 km에 달하는 가장 넓은 분지이다(Fig. 1). 해협의 확장축을 따라 뚜렷한 형태의 확장해령들이 배열한다. 브리지먼섬의 북동쪽에서 클레런스섬까지는 최대 수심이 2700 m, 분지폭 42 km의 좁고 깊은 동부 소분지가 전개된다. 디셉션섬의 남서쪽에는 상대적으로 지형이 복잡하고 1500 m 미만의 수심을 보이는 서부 소분지가 위치한다. 서부 소분지에는 브랜스필드해협과 직교하는 보이드해협이 북서쪽의 태평양까지 연결되고 있다(Fig. 2). 이런 서부 소분지의 불규칙한 천해 지형과 대양으로 연결된 지정학적 특징은 이 지역이 빙하 이동의 통로로서 상대적으로 강한 빙하 퇴적작용과 빙상 이동운동의 영향을 받았을 가능성이 매우 크다.

3. 연구 자료

이 연구에서는 96년 12월 수행된 남극하계 조사기간 동안 브랜스필드분지 서부 지역에서 획득한 17개 측선, 총 1093 km에 달하는 탄성파 자료 중 일부를 이용하였다(Fig. 2). 연구조사선은 러시아의 R/V Yuzhmorgeologiya호를 이용하였고, 음원으로는 조사선에 장착된 2개의 에어건으로 이루어진 건배열 시스템, 수진기는 한국해양연구소 보유의 총길이 75 m인 12채널 스트리머를 이용하였다.

수진된 자료는 DFS-V를 이용하여 6초의 기록시간, 2 ms의 샘플링 간격으로 기록하였다.

4. 해저면 반사계수

4.1. 해저면 반사파와 다중반사파

해양에서 탄성파 탐사를 수행할 경우, 해저면과 해수면 사이를 왕복하면서 연속적으로 반사하는 다중반사파의 에너지가 크게 나타난다. 해저면의 반사계수를 R, 해수면에서의 반사계수가 R_w라 할 때, 탄성파 진행시 나타나는 진폭감쇄 현상을 고려하지 않을 경우 해저면 반사파와 다중반사파들의 진폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R,\ R^2R_w,\ R^3R_w^2,\ R^4R_w^3,\ \ldots$$

해황이 잔잔한 이상적인 경우를 가정하면 해수면에서의 반사계수 R_w는 -1 이므로, 이때 반사파와 다중반사파들의 진폭은 다음과 같다.

$$R,\ -R^2,\ R^3,\ -R^4,\ \ldots$$

위 식에서 해저면 반사계수는 1차 다중반사파 진폭과 해저면 반사파 진폭의 비로 나타남을 알 수 있다(Warner, 1990).

4.2. 해저면 반사계수 산출방법

해저면 반사파와 다중반사파의 진폭을 사용하여 반사계수를 계산하기 위한 가장 적합한 자료는 음원과 수진기의 거리가 일치하는 영거리(zero-offset) 자료이다. 그러나 일반적으로 수행되는 해양 탄성파 탐사시에는 영거리 자료를 획득하고 있지 않으므로 음원에서 최근접 트레이스를 이용하여 반사계수를 구한다(Hyndman · Spence, 1992). 이번 연구에서 사용한 스트리머 수진구간의 총길이가 75 m이며 트레이스 사이의 거리가 6.25 m에 불과하다. 그러므로 반사계수 측정시 트레이스 사이에 나타나는 해저면 반사파 및 다중반사파의 AVO 효과는 작을 것이다. 이에 신호대 잡음비를 향상시키기 위한 방안으로 하나의 발파점 기록을 모두 합하는 중합을 수행하였다. 중합시 적용한 중합속도는 해저면 반사파와 다중반사파의 신호의 중합에 적합한 해수층의 속도인 1500 m/s를 적용하였다. 탄성파의 진폭은 기하학적인 분산에 의하여 거리에 따라 반비례하는데 이를 보상하기 위하여 중합 후의 자료에 도달시간에 따라 단조증가하는 보상함수를 적용하였다. 진폭 보정후 트레이스의 envelope을 구한 후, 해저면 반사파와 1차 다중반사파에 해당하는 진폭을 측정하였다. 이 때 측정된 해저면 반사파와 1차 다중반사파의 진폭을 각각 A_P, A_M이라 하면, 반사계수는 A_M/A_P의 값을 갖는다.

Fig. 3은 측선 KSL96-13의 탄성파 중합단면도 일부로 해저면이 최대경사가 1.6° 이내이다. SP 5700에서 해저면 반사파와 1차, 2차 다중반사파들은 각각 0.23초, 0.47초, 0.7초이며 선명하게 나타난다. 다중반사파가 나타나는 왕복주시 근처에서는 심부지층의 반사신호가 거의 나타나지 않으므로, 반사파에 크게 간섭되지 않은 실제 다중반사파 진폭만을 구할 수 있었다.

Fig. 4에 점선으로 도시한 중합 자료의 반사계수 A_M/A_P 값은 0.1과 0.5 사이에서 크게 변하였다. 이와 같이 측점에 따라 반사계수의 변화가 심하게 나타나는 것은 자료 획득시 해황, 주변 잡음 및 측

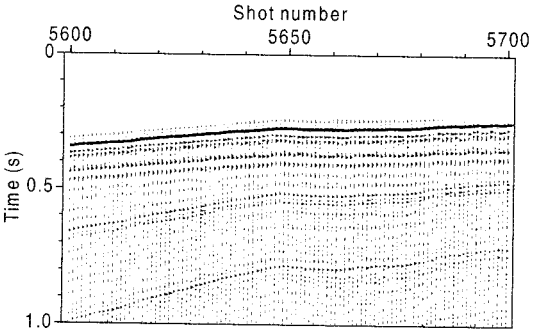

Fig. 3. A stacked section showing water bottom reflections and its multiples.

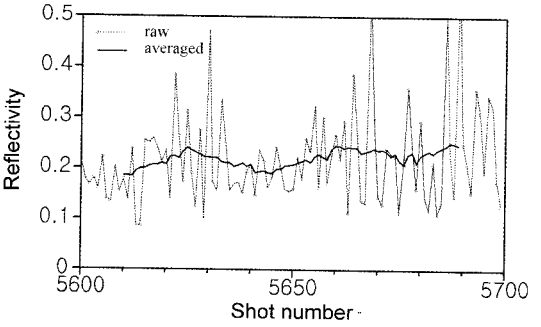

Fig. 4. Calculated reflection coefficicents from stacked section and its moving averaged values.

정오차 등에 의하여 측정값이 불안정하게 나타나는 것으로 생각된다. 특히 해황, 즉 해수면의 굴곡은 해수면 반사계수에 가장 큰 영향을 주는 요인이다. Verma (1986)에 의하면 수중해수면 반사계수는 잔잔한 바다의 경우 약 -0.95이지만, 거친 바다의 경우 -0.6 이하로 감소한다. 실제 남극 근해는 심한 바람과 나쁜 해황으로 유명한 지역이며, 날씨 변화가 매우 심한 곳이다. 따라서 나쁜 해황과 심한 날씨 변화는 반사계수의 심한 변화를 일으킨 곳으로 해석된다. 또 다른 요인으로는 다중반사파와 같은 왕복주시에 나타나는 해저 지층반사신호들의 간섭도 상정할 수 있다. 이런 간섭은 다중반사파의 크기를 증가 또는 감소시킬 수 있다.

측점에 따른 반사계수의 변화양상이 불규칙적으로 변하기 때문에 이런 무작위 변화요인들에 의한 측정오차를 감소시켜 반사계수의 변화양상을 알아보기 위하여, 측점 주변 20개 샘플씩 이동평균(moving average)을 구한 후 이를 Fig. 4에 실선으로 도시하였다. 평균화된 반사계수는 약 0.19에서 0.25 사이의 값을 가지면서 완만하게 변하므로 주변 잡음 및 측정오차가 상당부분 감소된 탐사 지역의 해저면 반사계수로 간주된다. 이상과 같은 시험 자료처리를 통하여 반사계수 계산을 위한 자료처리 순서를 Fig. 5와 같이 결정하였다.

이번 연구에 이용된 음원의 주된 에너지는 100 Hz 이내에 분포한다. 만일 해저면 하부의 퇴적물 속도(v)의 범위가 1500 m/s에서 1800 m/s 이내이고 신호의 주파수(f)를 30 Hz로 가정한다면, 해저면 하부에서의 탄성파 파장(λ)은 $\lambda = v/f$의 관계식에 의해 50~60 m의 파장을 가진다. 이와 같이 큰 파장을 가지는 음원신호가 해저면에서 반사되어 올 경우, 일차적으로 생각할 수 있는 문제는 해저면에서 반사되어온 신호로부터 산출된 반사계수가 어느 깊이까지의 해저면 물성을 반영하는가 하는 문제이다. 즉 해저면 경계의 물성만을 반영하는지 아니면 해저면 하부 일정 깊이까지 지층의 영향을 모두 반영하느냐하는 문제인데, 이에 대한 해석은 명확하지 한다. 이는 실제 해저면 지층의 물성변화, 고화 상태 등 많은 변수를 감안해야 하고, 탄성파의 여러 성질을 고려해야하는 복잡한 문제이다. 이 연구에서는 반사파를 이용하여 구한 반사계수가 해저면 하부 일정범위 내의 물성을 평균적으로 반영하는 것이 일차적인 가정이다. 이런 가정은 해저면 표층시추코아 자료에서 산출할 수 있는 반사계수와의 비교에 의해 타당성을 검증할 수 있을 것으로 생각되며, 앞으로 이 방면에 대한 연구를 수행할 예정이다.

5. 반사계수와 퇴적물 특성

Hamilton (1970)은 태평양의 퇴적물의 물성과 반사계수와의 관계를 연구하여, 퇴적물의 성분에 따른 반사계수 및 임피던스값을 제시하였다. 그에 의하면 반사계수는 퇴적물의 성분의 변화에 민감하게 변한다. 반사계수의 범위가 0.3 이상이면, 주로 조립, 세립의 모래와 모래질 실트로 구성되어 있으며, 때로는 노출된 암반 또는 해저면 퇴적층의 과압축 등에 의한 높은 임피던스를 보이는 해저면 지층으로 이루어진 것으로 분석된다. 반사계수의 범위가 0.2에서 0.3 사이에서는 주된 성분이 사질 실트, 실트로 되어 있다. 0.1에서 0.2 이내의

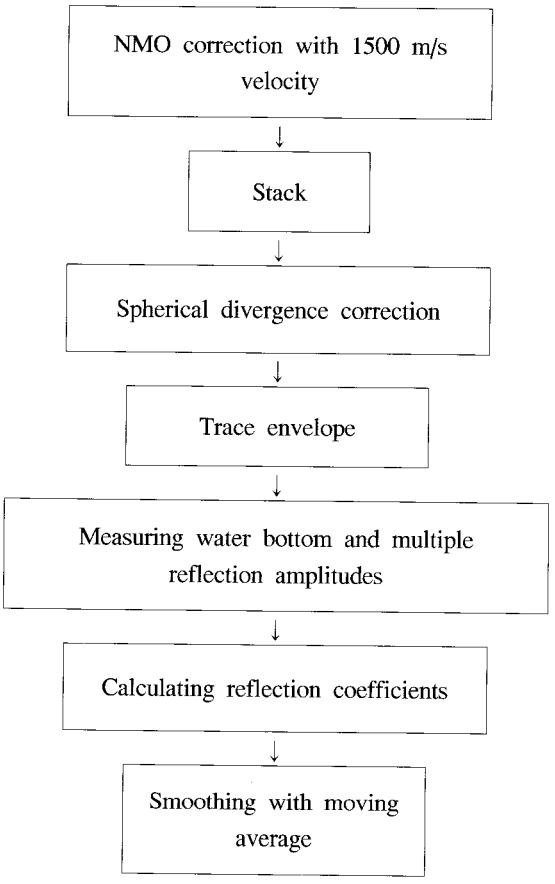

Fig. 5. Processing sequences for calculating water bottom reflection coefficients in this study.

Table. 1. Sediment impedance (ρV_p) and reflection coefficient (R) at normal incidence (after Hamilton, 1970).

Environment sediment type	ρV_p	R
Continental Terrace (shelf and slope)		
Sand		
Coarse	3.7347	0.4098
Fine	3.4433	0.3740
Very fine	3.2645	0.3517
Silty sand	3.0633	0.3228
Sandy silt	2.2401	0.2136
Sand-silt-clay	2.4939	0.2504
Clayey silt	2.1989	0.1767
Silty clay	2.1571	0.1586
Abyssal Plain (Turbidite)		
Sandy silt	2.6795	0.2627
Silt	2.6111	0.2208
Clayey silt	2.1154	0.1506
Silty clay	1.8919	0.0944
Clay	1.8911	0.0941
Abyssal Hill (Pelagic)		
Clayey silt	2.2165	0.1596
Silty clay	2.0674	0.1412
Clay	2.1118	0.1477

작은 반사계수는 주로 점토로 이루어져 있으며 점토질 실트도 포함한다.

또한 대륙붕, 대륙사면 또는 심해 등 공급지로부터의 퇴적물 위치에 따라 크게 영향을 받는다(Table. 1). 즉 퇴적물의 성분이 사질에서 니질로 입자의 크기가 작아질수록 반사계수가 0.4098에서 0.1477까지 감소한다. 대략 대륙쪽 영역에 속하는 대륙붕과 대륙사면에서는 0.16~0.4, 터비다이트가 주로 나타나는 대양저 평원에서는 0.09~0.26, 원양성 퇴적물로 구성된 대양저 언덕에서는 0.14~0.16 정도의 반사계수를 보이는 것으로 제시되었다.

6. 지질환경에 따른 해저면 반사계수의 변화

일반적으로 해저면 반사계수는 퇴적물 공급지로부터의 거리, 해당 지역의 수심 및 퇴적환경 등에 의해 조절되는 퇴적물 성분 및 암상에 의해 크게 영향을 받는다. 브랜스필드해협의 경우 최근에 확장된 대륙주변부 분지이기 때문에 확장작용에 수반된 퇴적작용이 진행되었을 것이다. 한편 남극반도 지역과 같은 고위도 지방에서는 빙하기 동안의 빙하작용이 매우 중요한 요인으로 작용한다. 또한 이 지역에서 신생대이후에 진행되었던 활발한 지체구조운동도 해저면 지층형성에 영향을 주었을 것으로 생각된다. 이런 각각의 요인들이 복합적으로 영향을 주기 때문에 단순히 한가지 요인으로 해저면의 반사계수를 설명하기는 힘들지만, 획득된 자료를 이용하여 이런 요인들이 우세한 지역에서 해저면 반사계수에 어떻게 영향을 주었는지를 분석하고자 한다.

6.1. 퇴적작용

Fig. 6은 남쉐틀랜드군도에서 남극반도까지 브랜스필드 중부분지를 가로지르는 측선을 보여준다. 중부 브랜스필드분지를 지나는 이 측선은 전체적으로 평균수심 900 m 정도로 일정한 수심을 보이는 분지면(basin floor) 중앙에 주변 분지면보다 500 m 이상 상승한 확장해령이 발달해 있다(Fig. 6a). 최근의 해저지형도에는 이 측선의 확장해령이 북동-남서 주향의 분지축을 따라 20 km 이상 연장되어 있음을 보여준다(Lawver *et al.*, 1996). 이 해령은 브랜스필드분지의 확장작용에 의해 최근에 분출한 화산암류로 조성되어 있으며(Barker · Austin, 1998), 이 해령을 중심으로하여 브랜스필드분지는

최근 200만년 이후 수 십 km를 확장하였다(González-Ferrán, 1991). 연속된 확장해령은 해령 양쪽 지역 간의 퇴적물 이동을 차단하여 해령의 북서쪽과 남동쪽 지역에 분포하는 퇴적층은 서로 다른 지역에서 공급된 퇴적물로 이루어져 있다. 즉, 북서쪽 분지는 남쉐틀랜드군도로부터 퇴적물이 공급되어 이동거리가 짧고(<30 km), 남동쪽 분지는 남극반도 쪽에서 공급된 퇴적물이 길고 완만한 사면(~100 km)을 따라 멀리 이동된 퇴적물로 이루어져있으며 Banfield · Anderson (1995)에 의하면 주로 화산재층을 포함하는 니질 퇴적물이 해저면을 덮고 있다.

Fig. 6b에 제시된 이 지역의 해저면 반사계수는 SP 5580~5980 사이의 확장해령에서 가장 큰 반사계수 0.32를 보인다. 해령의 양쪽 분지에서는 전체적으로 0.1~0.2 사이의 반사계수를 보이나 분지에 따른 반사계수의 변화 양상은 다소 차이를 보인다. 즉, 해령의 북서쪽 분지는 상대적으로 반사계수의 변화가 크고 남쉐틀랜드군도의 사면 아래에서 반사계수가 증가하는 양상을 보인다. 반면에 해령의 남동쪽의 경우 해령에서 약 5 km 이내의 구간(SP 6000~6300)에서는 기반암 상승부가 연장되어 반사계수가 0.1~0.25 사이에서 불규칙하게 변하였다. SP 6300~6600 구간은 매우 균질하고 낮은 반사계수(0.1~0.13)를 보이므로 이 분지의 퇴적환경이 안정되었음을 나타낸다. SP 6600~6900 구간은 반사계수가 0.12~0.2 사이의 값에서 변화하는데, 이 구역은 남극반도 사면에 근접하여 보다 조립질의 퇴적물이 퇴적되었음을 시사한다.

6.2. 빙하작용

브랜스필드해협 지역은 빙하기 동안 두꺼운 빙상(ice sheet)이 전진했던 지역으로 수심이 낮은 지

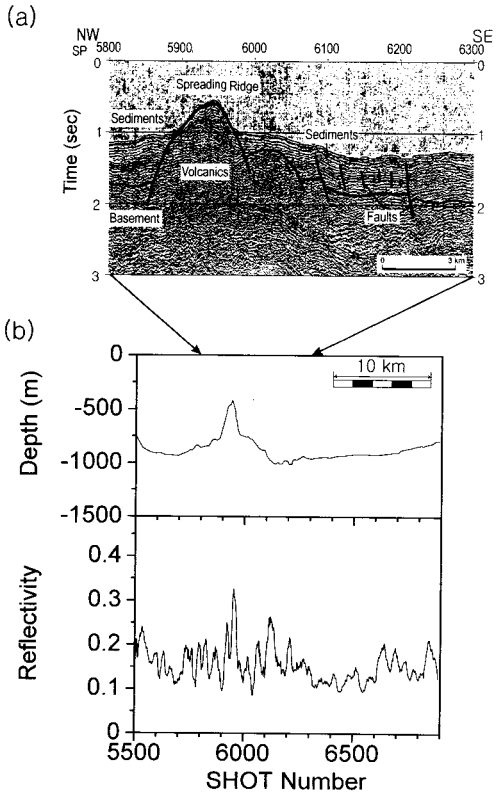

Fig. 6. (a) Seismic sections of KSL96-7 showing an spreading ridge and basin floor along the axis of Bransfield Strait, (b) water depth and calculated reflectivity of KSL96-7. See Fig. 2 for location.

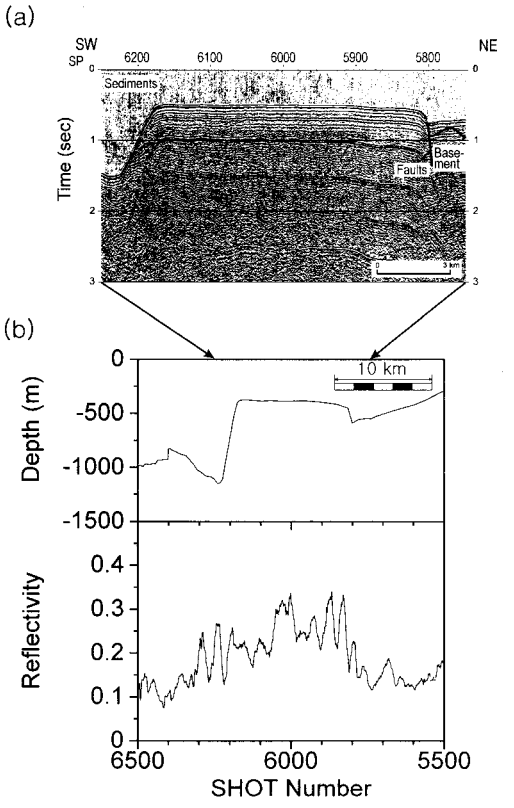

Fig. 7. (a) Seismic sections of KSL96-3 showing very flat Livingston Island platform formed by movement of grounded ice sheet, (b) water depth and calculated reflectivity of KSL96-3. See Fig. 2 for location.

역에는 빙상이 해저면까지 닿을 것으로 추정된다(Prieto *et al.*, 1999). 현재 사면에 남아 있는 많은 계곡들은 빙류(ice stream)가 있었던 위치이고, 계곡이나 만의 출구 사이에 있던 고지대는 빙상이 그 위를 누르고 있었을 것으로 추정된다. 따라서 이 지역은 빙하의 전진후퇴작용에 수반된 퇴적·침식·다짐작용을 강하게 받았을 것으로 예상된다. 특히 빙하에 의한 침식 및 다짐작용은 해당 지역의 해저면 반사계수를 크게 증가시켰을 것이다.

Fig. 7은 보이드해협을 가로지르는 측선 중 일부분이다. 측선의 북동쪽 끝부분은 리빙스턴섬 연안이며, 남서쪽으로 보이드해협이 지난다. 리빙스턴섬에서 남서쪽으로 서서히 수심이 깊어지다가, 단층을 경계로 지형이 상승하여 수심 350 m로 일정한 매우 평탄한 탁상형 대지가 약 12 km에 걸쳐 전개된다. 이 대지의 하부구조는 높은 해저면의 반사계수에 의하여 하부의 구조가 거의 보이지 않는다(Fig. 7a). 대지의 평탄한 지형은 빙하의 전진후퇴작용에 수반된 침식작용에 의해 형성되었을 가능성이 매우 높으며, 상부의 퇴적층이 침식 또는 다짐작용을 받았거나 입자가 큰 빙하퇴적물이 퇴적되었을 것으로 해석된다.

Fig. 7b에 제시된 이 구간의 반사계수는 빙하활동에 영향을 받은 SP 5750~6250 사이 약 15 km 구간에서 주변보다 0.1 이상 높은 0.2에서 0.3 값을 갖는다. 또한 이 구간의 서쪽사면이 보이드해협으로 내려가는 사면임을 고려할 때 빙하기 동안 리빙스턴섬의 빙상이 보이드해협까지 진출하였음을 지시한다.

6.3. 화산 활동

Fig. 8은 현재 활동중인 화산섬과 디셉션섬의 북동쪽 해저사면을 지나는 측선의 지하구조와 반사계수를 보여준다. SP 9000~9400 구간에 비교적 평탄하고 퇴적층이 발달되어 있으며, 탄성파 단면도는 브랜스필드 확장축의 연장선에 해당하는 SP 9000에서 남동쪽으로 약 18 km 구간은 내부에 반사면이 거의 보이지 않고 울퉁불퉁한 표면을 갖는 화산분출암으로 이루어진 많은 소규모 분출구조들이 나타난다. 이 지역의 해저지형 자료에서도 이 측선이 지나가는 분지중심에는 확장축을 따라 선구조를 이루는 확장해령들이 나타나며, 작은 해령이 평행하게 분포하는 것을 보여준다(Lawver *et al.*, 1996).

Fig. 8b에 나타난 반사계수 변화는 퇴적활동과 화산활동에 의한 해저면 반사계수의 특징을 각각 나타내고 있다. 즉, 퇴적활동이 활발한 북서쪽에서는 반사계수가 0.2 이하의 값을 지니며 구역에 따른 반사계수의 변화폭이 비교적 작게 나타났다. 소규모 분출해령이 분포하는 중심부 지역은 반사계수가 0.2 이상의 비교적 큰 값을 갖는 구간이 많이 존재하며 구간별 변화의 폭이 크게 나타났다.

6.4. 지체구조운동

보이드해협의 가장 깊은 분지축을 따라 달리는 남동-북서 주향의 측선은 서부 브랜스필드분지로부터 대륙붕 내부 기반암지대(inner-shelf basement high), 고전호분지(former forearc basin), 중부 기반암지대(mid-shelf high)와 외부 대륙붕 및 대륙붕단 지역(outer-shelf and shelf edge), 대륙사면으로 이

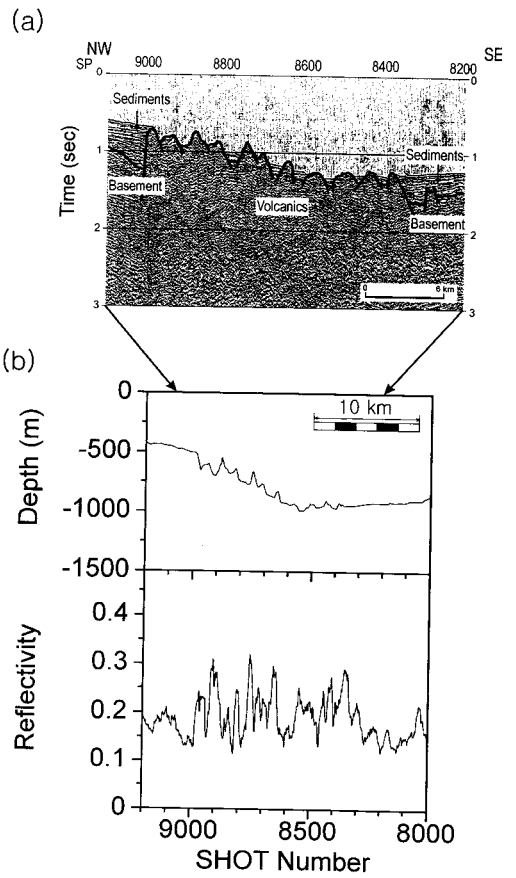

Fig. 8. (a) Seismic sections of KSL96-9 showing many small volcanic structures near Deception Island, (b) water depth and calculated reflectivity of KSL96-9. See Fig. 2 for location.

어지는 지질구조 배열을 보인다(Jin *et al.*, 1999). 이런 지질구조 배열은 히어로파쇄대의 남서쪽에 분포하는 비활성 주변부(passive margin)의 전형적인 지질구조로, 신생대 약 5천만년 전 이후 남극반도를 따라 남서쪽에서 북동쪽으로 진행되었던 남극-피닉스 확장해령의 충돌에 의해 형성된 것이다(Larter · Barker, 1989; Larter *et al.*, 1997). Fig. 9a는 이 측선 중 일부분으로서 내부 기반암 지대에 속하는 SP 5000 부근은 해저면 하부에 나타나는 대부분의 지층이 내부반사신호가 거의 없는 균질한 반사특성을 보인다. 이러한 반사특성은 결정질암류나 오래된 퇴적변성암 성분의 기반암임을 시사한다(Larter *et al.*, 1997). 지하 심부에 위치했던 이 기반암들은 남극반도 하부로 섭입한 남극-피닉스판의 확장해령의 영향으로 상승하였고, 이후 진행된 심한 빙하작용에 의해 상부가 침식당하여 지표에 노출되었다. 상승에 이어지는 침강에 의해 지금의 수심에 위치하게 된 것이다(Larter · Barker, 1991).

Fig. 9b에 나타난 반사계수의 변화는 SP 4500~6000 구간에서 특징적인 양상을 보여준다. 즉 수심이 1000 m 이상임에도 불구하고 반사계수가 평균 약 0.3, 최대 0.5에 달하는 큰 값을 보이며 심한 변동을 보인다. 이 지역의 높은 반사계수는 국부적으로 해저면 표층을 얇게 덮여 있는 현생퇴적층보다는, 하부 기반암의 효과가 반영된 것이다.

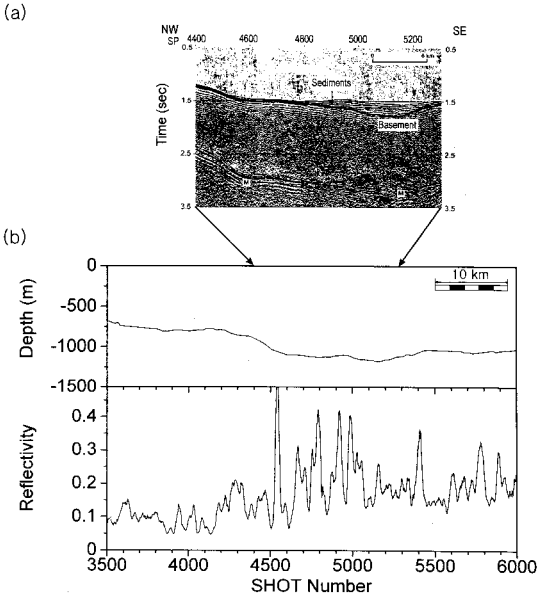

Fig. 9. (a) Seismic sections of KSL96-17 showing the inner shelf basement high along Boyd Strait. (b) water depth and calculated reflectivity of KSL96-17. M indicates water bottom multiple. See Fig. 2 for location.

7. 결론 및 토의

시험 자료에 대하여 진폭보정을 수행한 후 해저면 반사파와 다중반사파의 진폭을 이용하여 계산한 해저면 반사계수는 측점에 따라 반사계수가 심하게 변동하는 양상을 보이지만, 이동평균을 한 후 얻어진 반사계수는 오차범위가 줄어들고 완만하게 변화하여 해저면의 반사계수 변화를 연구하는데 적절하였다.

연구 지역의 반사계수 변화는 대체로 퇴적물의 공급원과 퇴적장소와의 거리가 증가할수록 반사계수가 작아지는 양상을 보인다. 즉 중부 브랜스필드분지에서는 남극반도와 남쉐틀랜드군도 양쪽사면에서 반사계수가 약 0.2이며, 분지의 중심쪽으로 갈수록 작아져 0.1~0.12의 값을 갖는다.

보이드해협 사면에서 나타나는 0.2 이상의 높은 반사계수를 보이는 구간들은 주변의 섬들에 분포하였던 빙하들이 태평양으로 연결된 보이드해협 쪽으로 진출했던 지역이다. 디셉션섬 부근에서는 분출된 화산구조물에 의해 0.2 이상의 비교적 큰 반사계수를 보이며 그 변화폭이 크다. 보이드해협 축을 따라서는 수심이 깊어짐에도 불구하고 반사계수가 평균 0.3 가량의 큰 값이 관찰되는 데, 이 지역은 신생대이후 남극반도의 대륙주변부에서 일어났던 확장해령-해구 충돌의 결과로 상승한 기반암 상승지대 및 과거의 전호분지 등이 후기의 빙하침식작용에 의해 해저면에 노출되었기 때문이다.

이 연구 방법은 넓은 지역에 대해 일차적인 해저면 지층 분포를 분석하는데 쉽게 적용할 수 있어, 시추코아시료 등과 같은 실제 해저면 물성을 확인할 수 있는 자료와 연결한다면 보다 신뢰성 높은 결과를 작성할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 고위도 지방인 남극반도 지역에는 최근 빙하운동의 효과가 강하게 해저면에 남아 있기 때문에, 빙하의 침식작용과 이동 경로 등에 대한 분석을 가능하게 할 것이다.

사 사

이 연구는 대한민국 남극연구 프로그램의 일환으로 해양수산부에 의해 지원되는 '남극 해저지질

조사사업'의 일부 결과이다. 열악한 탐사환경에서 좋은 자료를 획득해주신 남극현장 참여 연구원들께 감사드린다, 이 논문이 더욱 알찬 내용이 되도록 심사해주신 심사위원들께도 감사드린다

참고문헌

Banfield, L.A. and Anderson, J.B., 1995, Seismic facies investigation of the late quaternary glacial history of Bransfield Basin, Antarctica: *in* Cooper, A.K., Barker, P.F., and Brancolini, G., Eds., Geology and Seismic Stratigraphy of the Antarctic Margin. American Geophysical Union, Antarctic Research Series, 68, 123-140.

Barker, P.F., 1982, The Cenozic subduction history of the Pacific margin of the Antarctic Peninsula: Ridge crest-trench interactions, Journal of Geological Society of London, 139, 787-801.

Barker, D.H.N, and Austin Jr, J.A., 1998, Rift propagation, detachment faulting, and associated magmatism in Bransfield Strait, Antarctic Peninsula, Journal of Geophysical Research, 103, 24017-24043.

Domack, E.W. and Ishman, S., 1993, Oceanographic and physiographic controls on modern sedimentation within Antarctic fjords, Geological Society of America Bulletin, 105, 1175-1189.

González-Ferrán, 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. UK, Cambridge University Press, 505-509.

Griffth, T.W. and Anderson, J.B., 1989, Climatic control of sedimentation in bays and fjords of the northern Antarctic Peninsula, Marine Geology, 85, 181-204.

Hamilton, E.L., 1970, Reflection coefficients and bottom losses at normal incidence computed from pacific sediment properties, Geophysics, 35, 995-1004.

Hyndman, R.D. and Spence G.D., 1992, A seismic study of methane hydrate marine bottom simulating reflectors, Journal of Geophysical Research, 97, 6683-6698.

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.S, Ed., Antarctica as an Exploration Frontier - Hydrocarbon Potential, Geology, and Hazards. American Association of Petroleum Geologists, AAPG studies in Geology, 31, 13-29.

Jin, Y.K., Kim, Y., Nam, S.H., and Lee, D.K., 1999, Variation of extensional phase in the Western Bransfield Strait, Antarctic Peninsula: 8th International Symposium on Antarctic Earth Sciences, Abstract, 159.

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

Larter, R.D. and Barker, P.F., 1989, Seismic Stratigraphy of the Antarctic Peninsula Pacific margin: A record of Pliocene-Pleistocene ice volume and paleoclimate, Geology, 17, 731-734.

Larter, R.D., Rebesco, M., Vanneste, L.E., Gamboa, L.A.P., and Barker, P.F., 1997, Cenozoic tectonic, sedimentary and glacial history of the continental shelf west of Graham Land, Antarctic Peninsula: *in* Barker, P.F. and Cooper, A.K., Eds., Geology and Seismic Stratigraphy of the Antarctic Margin, Part 2. American Geophysical Union, Antarctic Research Series, 71, 1-27.

Lawver, L.A., Keller, R.A., Fisk, M.R., and Strelin, J.A., Bransfield Strait, 1995, Antarctic Peninsula: Active extension behind a dead arc: *in* Tayler, 'B., Ed., Backarc Basins: Tectonics and Magmatism. Plenum, New York, 315-344.

Lawver, L.A., Sloan, B.J., Barker, D.H.N., Ghidella, M., Herzen, R.P.V., Keller, R.A., Klinkhammer, and Chin, C.S., 1996, Structure of the Bransfield Strait marginal basin, Antarctic Peninsula, based on multi-beam bathymetry: Evidence for active extension, GSA Today, 6, 1-6.

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

Prieto, M. J., Ercilla, G., Canals, M. de Batist, M., 1999, Seismic stratigraphy of the Central Bransfield Basin (NW Antarctic Peninsula): interpretation of deposits and sedimentary process in a glacio-marine environment, Marine Geology, 157, 47-68.

Sandwell, D.T., Yale, M.M., and Smith, W.H.F., 1994, ERS-1 geodetic mission reveals detailed tectonic structures, EOS, Transaction, AGU, 75, No. 44 supplement, 155.

Verma, R.K., 1986, Offshore seismic exploration, Gulf Publishing Company, Houston.

Warner, M., 1990, Absolute reflection coefficients from deep seismic reflections, Tectonophysics, 173, 15-23.

1999년 8월 27일 원고접수
1999년 12월 23일 원고채택