

Article

가스수화물 BSR을 이용한 남극반도 남쉐틀랜드 대륙주변부의 지열류량 변화

진영근* · 남상헌 · 김예동 · 김규중 · 이주한

한국해양연구원 극지연구소
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Gas Hydrate BSR-derived Heat Flow Variations on the South Shetland Continental Margin, Antarctic Peninsula

Young Keun Jin*, Sang Heon Nam, Yeadong Kim, Kyu Jung Kim, and Joo-Han Lee

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

Abstract : Bottom simulating reflectors (BSR), representing the base of the gas hydrate stability field, are widespread on the South Shetland continental margin (SSM), Antarctic Peninsula. With the phase diagram for the gas hydrate stability field, heat flow can be derived from the BSR depth beneath the seafloor determined on multichannel seismic profiles. The heat flow values in the study area range from 50 mW/m² to 85 mW/m², averaging to 65 mW/m². Small deviation from the average heat flow values suggests that heat flow regime of the study area is relatively stable. The landward decrease of heat flow from the South Shetland Trench to the continental shelf would be attributed to the landward thickening of the accretionary prism and the upward advection of heat associated with fluid expulsion. The continental slope 1500 m to 3000 m deep, where BSRs are most distinguished in the SSM, shows relatively large variation of heat flow possibly due to complex tectonic activities in the study area. The local high heat flow anomalies observed along the slope may be caused by heat transport mechanisms along a NW-SE trending large-scale fault.

Key words : 가스수화물(gas hydrate), BSR, 지열류량(heat flow), 남쉐틀랜드 대륙주변부(South Shetland margin).

1. 서 론

가스수화물(gas hydrate)은 물분자와 가스(주로 메탄)로 구성된 얼음과 비슷한 고체로 된 물질이다. 물과 가스가 같이 존재하는 곳에서 저온과 고압 환경조건에서 형성되는데(Sloan 1998), 주로 극지지역의 영구동토층 지역과 수심 300-500 m이 넘는 전세계 해양지역에 광범위하게 분포한다(Kvenvolden 1993). 최근 가스수화물에 포함되어 있는 막대한 양의 메탄 때문에 미래의 에너지 자원으로

비상한 관심을 모으고 있다. 또한 지구기후변화와 해저사면의 안정성에도 중요한 영향을 주는 요인으로 부각되면서 많은 연구가 집중되고 있다(Kvenvolden 2000).

가스수화물을 확인할 수 있는 가장 뚜렷한 증거는 탄성파 단면도에서 해저면과 거의 평행하게 나타나는 가스수화물 기저반사층(bottom simulating reflector: BSR)이다(Tucholke *et al.* 1977; Shipley *et al.* 1979). BSR은 가스수화물 안정구역(gas hydrate stability zone)의 기저로 생각되고 있으며, 가스수화물을 함유하는 상부퇴적층과 가스 또는 물로 충전된 하부퇴적층 사이의 상변화 경계(phase boundary)를 나타낸다. 가스수화물의 온도-압력 안

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

정조건은 잘 알려져 있기 때문에, 상변화 경계인 BSR 출현심도에서의 온도 산출이 가능하며, 이를 이용하여 BSR이 나타나는 지역의 지열류를 산출해 낼 수 있다.

남극대륙 주변부에서는 지금까지 4개의 지역에서 BSR이 확인되었다(Lodolo and Camerlenghi 2000). 이들 지역 중 남셰틀랜드 대륙주변부(South Shetland continental margin)(Lodolo *et al.* 1993; Tinivella *et al.* 1998)와 윌크스랜드 주변부(Wilkes Land margin)(Kvenvolden *et al.* 1987; Tanahashi *et al.* 1994)의 BSR이 가스수화물과 관련된 BSR로 판명되었다. 최근 연구결과에 의하면 남셰틀랜드 대륙주변부에는 가스수화물이 광범위하게 분포되어 있으며, 그 매장량은 적어도 표준상태의 메탄가스 체적으로 10^{12} m³가 넘는 것으로 추정된다(Lodolo *et al.* 2002; Jin *et al.* 2003).

이 연구에서는 남극해역에서 유일하게 해구와 섭입 시스템이 남아있는 활동성 대륙주변부(active margin)인 남셰틀랜드 대륙주변부에서 나타나는 가스수화물 BSR을 이

용하여 이 지역의 지열류를 산출하고자 한다. 대부분의 남극지역과 마찬가지로 가혹한 탐사환경 때문에 이번 연구지역에도 지열류량 탐사자료가 거의 없다. 따라서 이 연구결과로 규명된 지열류량 분포는 가스수화물의 산출상과 안정조건에 대한 이해와 남셰틀랜드 대륙주변부 섭입-해구시스템의 지열구조, 판구조 운동 해석에 유용한 정보를 제공할 것이다.

2. 지체구조

남셰틀랜드 대륙주변부는 남극반도(Antarctic Peninsula)의 태평양 주변부의 북동쪽 끝에 위치한다(Fig. 1). 이 지역은 곤드와나 거대륙(Gondwana supercontinent)이 분리되기 시작한 이후로 계속해서 섭입작용(subduction)이 진행된 활동성(active) 대륙주변부였다(Pankhurst 1982). 신생대동안 남극-피닉스 판(Antarctic-Phoenix plates)에 속하는 확장구역들(segments)의 확장중심(spreading center)

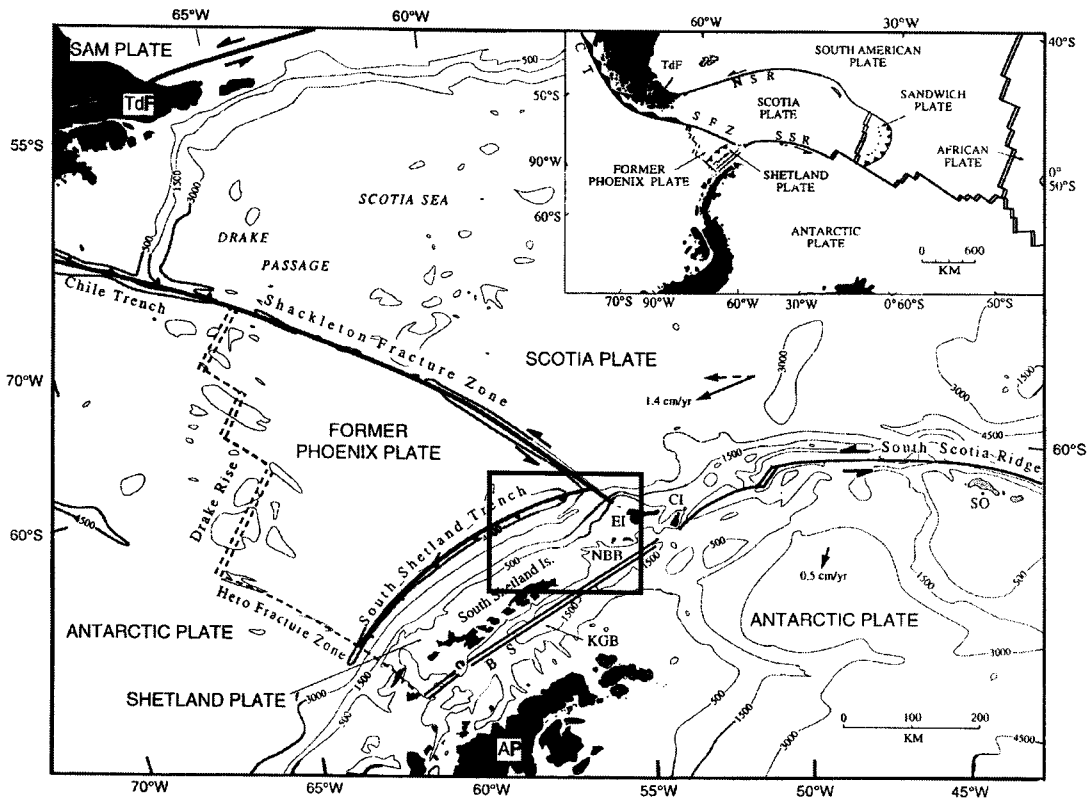


Fig. 1. Tectonic setting of the region adjacent to the northern Antarctic Peninsula (AP). Inset shows regional setting of the Scotia plate between southernmost South America and the AP. BS is Bransfield Strait, CI is Clarence Island, EI is Elephant Island, KGB is King George Island, NBB is North Bransfield Basin, NSR is the North Scotia Ridge transform system, SAM plate is the South American plate, SFZ is the Shackleton Fracture Zone, SO is the South Orkney Islands, SSR is the South Scotia Ridge transform system, TdF is Tierra del Fuego. Box shows study area.

들이 남극반도 남서쪽 지역에서부터 남극반도 대륙주변부에 도달하기 시작하였고, 이런 확장중심의 도달은 남극반도를 따라 계속해서 북동쪽으로 진행되었다. 약 3.3-6.4 Ma경 히어로 파쇄대(Hero Fracture Zone) 바로 남서쪽 지역에서 마지막으로 남극-피닉스판의 확장 중심이 남극반도 대륙주변부에 도달하였다(Larter *et al.* 1997). 확장중심이 대륙주변부에 도달한 지역에서는 섭입작용이 중단됨에 따라 비활동성(passive) 주변부로 바뀌게 되었다. 한편, 히어로 파쇄대의 북동쪽, 드레이크 해협(Drake Passage)에는 현재까지도 세 개의 남극-피닉스 확장중심들이 존재한다(Fig. 1). 이 확장중심에서 연장되는 해양판과 남극반도 대륙주변부가 만나는 곳에는 여전히 해구지형을 간직하고 있는 남셴틀랜드 해구가 위치한다. 이 확장중심들에서 남셴틀랜드 해구 사이에 존재하는 조그만 해양판은 전피닉스판(former Phoenix plate)의 마지막 남은 부분이다. 최근 연구결과에 의하면 이 확장중심들에서의 확장활동은 약 3.3 Ma에 멈추었다(Livermore *et al.* 2000). 확장중심에서의 확장활동이 중단되었지만, 현재 해구에서는 남셴틀랜드 소대륙(micro-continent)과 전피닉스판 사이에 압축 작용(shortening)이 진행되고 있는 것으로 알려져 있다(Kim *et al.* 1995). 이 압축작용이 해구에서의 섭입활동이 계속되고 있다는 증거인지에 대해서는 많은 논란이 있다(Larter and Barker 1991; Lawver *et al.* 1996; González-Casado *et al.* 2000).

연구지역인 남셴틀랜드 대륙주변부의 북동쪽 지역은 좁은 지역 내에 매우 복잡한 판구조운동이 진행되고 있는 곳이다. 이 지역의 북동쪽에는 남극판(Antarctic plate), 스코시아판(Scotia plate), 전피닉스판의 경계를 이루는 세 개의 대규모 지질구조(셴클턴 파쇄대, 남스코시아 해령, 남셴틀랜드 해구)가 만나는 삼중점(triple junction)이 존재한다(Fig. 1). 남스코시아 해령(South Scotia Ridge)과 셴클턴 파쇄대(Shackleton Fracture Zone)는 남극판과 스코시아판의 경계를 이루는 변환단층시스템이다(Pelayo and Wiens 1989; Klepeis and Lawver 1996). 최근 들어 스코시아판의 서향이동에 의해 발생하는 응력이 삼중점 부근 지역에 강한 지각변형작용을 야기하고 있으며, 최근 브랜스필드 해협의 확장을 유발시켰을 가능성이 높다는 연구 결과들이 속속히 발표되었다(Klepeis and Lawver 1996; Kim *et al.* 1997; Jin *et al.* 2000; González-Casado *et al.* 2000).

3. BSR을 이용한 지열류량 산출에 대한 기존 연구

지난 20년 동안 BSR을 이용하여 지열류량(이하 BSR 지열류량)을 산출하여 대륙주변부의 지열구조를 규명하는 여러 연구 결과들이 발표되었다. Yamano *et al.*(1982)

는 Nankai Trough에서의 연구를 통해, 대륙쪽으로 가면서 퇴적층의 두께가 증가하는 만큼 BSR 지열류량이 감소하는 현상을 발견하였다. 또한 지온전도도와 지층 구간속도 등과 같은 몇 가지 불확실한 요인 때문에, BSR 지열류량값이 실제로 해저면에서 측정된 지열류량값과 비교할 때, 정확도는 높지 않았지만 대체적으로 일치된 경향을 나타낸다고 보고하였다. Minsull and White(1989)은 Gulf of Oman 경우, Nankai Trough와는 달리, 대륙쪽으로 가면서 BSR 지열류량이 감소하는 현상이 관찰되지 않으며, 이는 섭입부가대안에서의 열이류현상(advective heat flow)에 기인한다고 해석하였다. Davis *et al.*(1990)은 Northern Cascadia 섭입부가대에서 정밀한 현장 지열류량 탐사와 BSR 지열류량 산출을 통해, 실제 측정값이 BSR 지열류량값에 비해 약 30% 높은 값을 나타내며, 이런 차이는 부가대 퇴적물의 탈수작용(dewatering)에 의한 열이류작용(advection)에 기인한다고 해석하였다. 하지만 Wang *et al.*(1993)은 Blake Ridge와 Vancouver섬 주변부에서 명확한 나타나는 것처럼, 실제로 몇 개의 ODP (Ocean Drilling Project) 시추공에서는 BSR에서의 실제 온도가 가스수화물의 안정 영역으로부터 추정된 온도보다 낮은 현상이 보인다고 반론을 제기하였다. 현재 이 차이에 대한 명확한 해석은 나오지 않고 있다. 최근에 Ganguly *et al.*(2000)은 Cascadia 대륙주변부에서, Kaul *et al.*(2000)은 Makran 섭입부가대에 대한 BSR 지열류량 연구를 수행하였다.

4. 탄성과 자료 획득 및 처리

1992/1993년 남반구 여름 기간동안 한국해양연구원 남극연구팀은 연구선 온누리호를 이용하여 남셴틀랜드 대륙주변부에서 다중채널 탄성과 자료를 획득하였다. Fig. 2는 연구지역의 탄성과 축선 위치를 보여준다. 자료획득에는 2400 m 길이의 96 채널 다중채널 스트리머와 16개의 에어건으로 구성된 음원군(총체적 22.1 리터)이 사용되었다. 50 m 간격으로 음원이 발파되어 24 중첩(fold coverage) 탄성과 자료를 획득하였다. 자료의 샘플링 간격은 4 ms 이다.

이 연구에 이용된 자료의 전산자료처리에서는, BSR과 같은 가스수화물에 의해 나타나는 특징적인 탄성과 신호를 보다 뚜렷하게 나타내고 정량적인 분석을 실시하기 위해, 상대적 실진폭(relative true amplitude) 기법과 파형 디컨볼루션(wavelet deconvolution) 등의 전문자료처리 기법들이 사용되었다. 파형 디컨볼루션 기법으로는 variable norm 디컨볼루션 방법(Gray 1979)이 사용되었다. 뚜렷한 영상과 정확한 구간속도를 도출하기 위해 경사 무브아웃(dip move out: DMO) 기법을 함께 사용하였다.

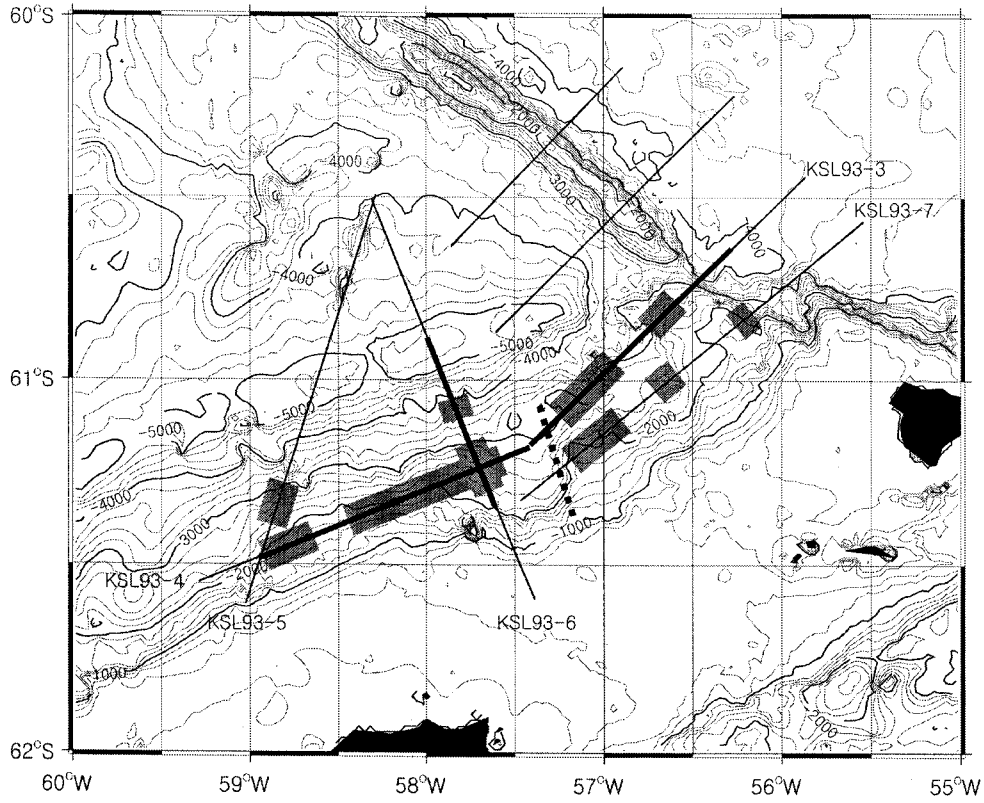


Fig. 2. Location of multichannel seismic lines overlaid on bathymetric contour map. Thick solid lines indicate the location of seismic profiles shown in Figs. 3 and 8., and the dashed line indicates the location of the South Shetland Fault shown in Fig. 3. The BSR zones observed on the lines are marked with gray rectangles. Bathymetry is derived from Smith and Sandwell (1997). Contour interval is 200 m.

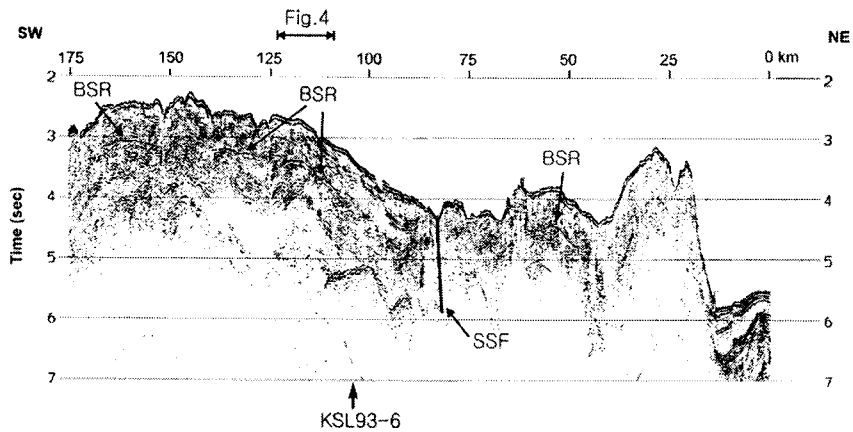


Fig. 3. Multichannel seismic profile of KSL93-3 and KSL93-4. See Fig. 2 for the location. Bottom simulating reflectors (BSRs) at the depth of about 600 ms in two way travel time beneath the seafloor are widespread along the profile. See Fig. 2 for the location of the South Shetland Fault (SSF).

5. BSR 특성 및 분포

남셰틀랜드 대륙주변부 북동부 지역에서 얻은 탄성과

자료에는 해저면 아래 왕복주시(two way travel time) 약 600-800 ms 부근에 해저면과 거의 평행한 강한 반사신호를 형성하는 BSR들이 광범위하게 분포한다(Fig. 3). 단면

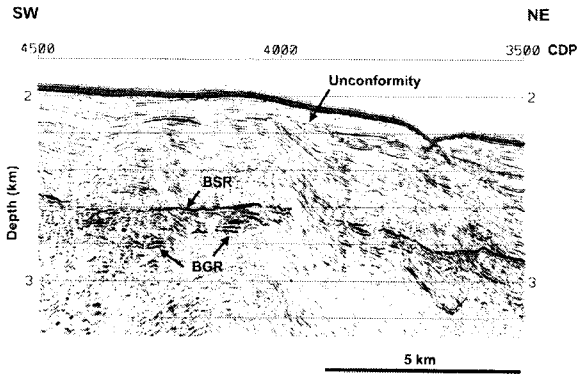


Fig. 4. A depth-converted seismic section of profile KSL93-4 showing well-developed BSR, the base of gas reflector (BGR), and unconformity just beneath the seafloor. See Fig. 3 for the location of the section.

도에서 BSR은 부분적으로 단절된 모습을 보이는데, 이는 지구조적인 불연속성이나 가스수화물 안정대의 국부적인 교란에 의한 것으로 생각된다. 상세 단면도인 Fig. 4는 연구지역에 나타나는 BSR의 전형적인 모습을 보여준다. 해저면과 평행한 BSR이 습곡구조의 경사 퇴적층을 가로지르고 있는 모습을 뚜렷하게 볼 수 있다. 그러나 북동쪽으로 심하게 경사진 반사층들이 분포하고 있는 단면도 중앙부에서는 BSR이 단절되면서 보이지 않는다. 이 구간에서는 경사층을 따라 심부의 가스가 상부로 이동함에 따라, BSR 형성에 필요한 하부가스층이 존재하지 않기 때문에 BSR이 나타나지 않은 것으로 해석된다. CDP4050과 CDP4400 구간에서는 BSR 아래 120 m-200 m 깊이에 매우 강한 반사면을 볼 수 있는데, 이 반사면은 BSR 하부에 나타나는 가스층의 기저반사면(base of gas reflector: BGR)으로 분석된다.

이번 연구지역을 지나는 KSL93-3, KSL93-4, KSL93-5, KSL93-6, KSL93-7 등 총 5개의 축선에 나타나는 BSR의 위치를 Fig. 2의 축선도 위에 회색 음영으로 나타내었다. 이런 BSR의 분포는 이 지역에 가스수화물이 광범위하게 분포함을 지시한다. 전체적으로 대륙주변부를 따라 평행하게 달리는 축선들(평행축선: KSL93-3, KSL93-4, KSL93-7)이 대륙주변부를 가로질러 달리는 축선들(횡단축선: KSL93-5와 KSL93-6)에 비해 BSR의 연장성이 좋다. 평행축선이 주로 위치한 약 2000 m 수심 부근의 대륙사면 지역에 BSR이 잘 발달되어 있음을 알 수 있다.

6. 지열류량 계산

BSR을 이용하여 지열류량을 계산하기 위해서는, BSR

의 심도를 결정하고 이 심도에서의 압력을 구한다. 이로부터 가스수화물의 압력-온도 안정조건으로부터 BSR의 온도를 구한 다음, 해저면의 온도와 BSR의 온도를 이용하여 지열증가율과 열전도율을 계산한다. 이렇게 얻어진 값들을 가지고 최종적으로 지열류량을 산출한다.

BSR 심도

탄성과 단면도에서 해저면 반사면과 BSR을 구별하고 그 탄성과 주시(travel time)를 읽는다. 탄성과 파형에서 해저면은 positive peak를, BSR은 negative peak를 선정한다. 탄성과 주시는 탄성과 자료의 속도분석에서 결정된 속도함수를 사용하여 심도로 환산하였다. BSR이 가장 뚜렷하게 나타나는 CDP4000-CDP4300 구역의 경우(Fig. 4), BSR위에 해당하는 가스수화물 안정구역의 평균 구간속도는 1850 m/s이며, BSR 심도는 해저면 아래 약 650 m이다.

심도-압력 관계

BSR에서의 압력은 정암압(lithostatic pressure)을 가정하여 다음과 같은 식을 사용하여 산출하였다.

$$P = P_w + P_s = (\rho_w \cdot W + \rho_s \cdot z_{bsr}) \cdot g$$

여기서 ρ_w 는 해수의 밀도, ρ_s 는 BSR 위의 퇴적물 밀도, W 는 수심, 그리고 z_{bsr} 는 해저면에서 BSR까지의 깊이, g 는 중력가속도를 나타낸다.

연구지역의 경우 심해시추자료가 없기 때문에 해저면과 BSR 사이의 퇴적물의 밀도를 정확히 알 수 없다. 이 연구에서는 일반적으로 사용되는 밀도값, 즉 해수의 밀도를 1.05 g/cm³으로, 해저면과 BSR 사이의 퇴적물의 밀도를 약 1.9 g/cm³으로 각각 가정하여 사용하였다. 이 퇴적물의 밀도는 육성기원 퇴적물의 경우 널리 인정받고 있는 Hamilton(1978)의 퇴적물의 깊이-밀도 관계식으로부터 산출하였다. 가스수화물의 유망지역인 Nankai Trough나 Cascadia margin에서 얻은 ODP 시추자료의 밀도값의 경우 이 관계식과 일치하는 결과를 보인다(Taira *et al.* 1991; Carson *et al.* 1993).

압력-온도 안정 조건

BSR 심도에서의 온도는 가스수화물의 압력-온도 안정 조건으로부터 결정할 수 있다. 가스수화물의 압력-온도 곡선은 다음과 같은 실험식을 이용하여 구할 수 있다(Dickens and Quinby-Hunt 1994).

$$\frac{1}{T_{bsr}} = 3.79 \times 10^{-3} - 2.83 \times 10^{-4} \log(P)$$

여기서 T_{bsr} 는 BSR 심도에서의 절대온도이며, P 는 압력(Mpa)이다.

열전도율(thermal conductivity)

해저면에서 BSR까지의 평균 열전도율은 Davis *et al.* (1990)에 의해 제안된 다음과 같은 경험식을 사용하여 구하였다.

$$k = 1.07 + 5.86 \times 10^{-4} \times z - 3.24 \times 10^{-7} \times z^2$$

여기서 k 는 열전도율(W/m°C), z 는 해저면에서의 깊이(m)이다. 이 경험식은 비록 약 10%의 편차를 인정하고 있지만, ODP sites 889/890에서 측정된 평균값은 이 경험식에 의해 계산된 값과 잘 일치한다(Ganguly *et al.* 2000).

지열류량

전형적인 온도상승과 간단한 대류 열이동 모델(conductive heat transport)을 적용하여 만들어진 다음과 같은 식을 통해 지열류량(H)을 계산할 수 있다.

$$H = k \frac{T_{bsr} - T_{sea}}{z_{bsr}}$$

연구지역의 해저면 온도(T_{sea})는 기존의 해수온도 측정 자료로부터 결정되었다(Nowlin and Zenk 1988). 이 측정 자료에 의하면 수심 약 1000 m까지는 국지적인 온도변화가 크지만 1000 m 이하에서는 비교적 안정된 온도분포를 보인다(Nowlin and Zenk 1988). 수심 2000 m에서는 약 0°C를 나타내며, 2000 m 이상에서는 수온이 아주 천천히 낮아져서 3000 m에서는 -0.3°C를 나타낸다. 최종적으로 연구지역의 총 5개 탄성과 축선에서 관찰된 BSR로부터 지열류량을 산출하였다.

7. 결과와 토론

광역적인 분포

연구지역의 탄성과 단면에 나타난 BSR에 대해 일정한 간격마다 수심과 BSR 출현 심도를 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. KSL93-5와 KSL93-6은 수심 5000 m가 넘는 해구에서 수백 m의 대륙붕 지역까지 대륙주변부를 횡단하는 축선이며, KSL93-3, KSL93-4, KSL93-7은 수심 1500 m에서 3000 m의 대륙사면을 따라가는 평행축선이다(Fig. 2). 따라서, Fig. 5에서 수심 3000 m를 넘는 지점의 자료들은 대부분 횡단축선에 속하는 자료들이다.

만일 지열류량이 일정하다면, BSR의 출현심도는 수심이 깊어짐에 따라 증가한다. 하지만 지열류량이 수심에 따라 증가한다면, 출현심도가 감소하거나 심도증가율이 작아지게 된다. 연구지역의 경우, 전반적으로 BSR은 해저면 아래 400 m에서 800 m에 분포한다. Fig. 5a에 보는 것처럼 심도에 따른 지열류량 변화가 심해 전체적으로 뚜렷한 경향성을 보기는 힘들지만, 그림에서 직선으로 나타낸 것

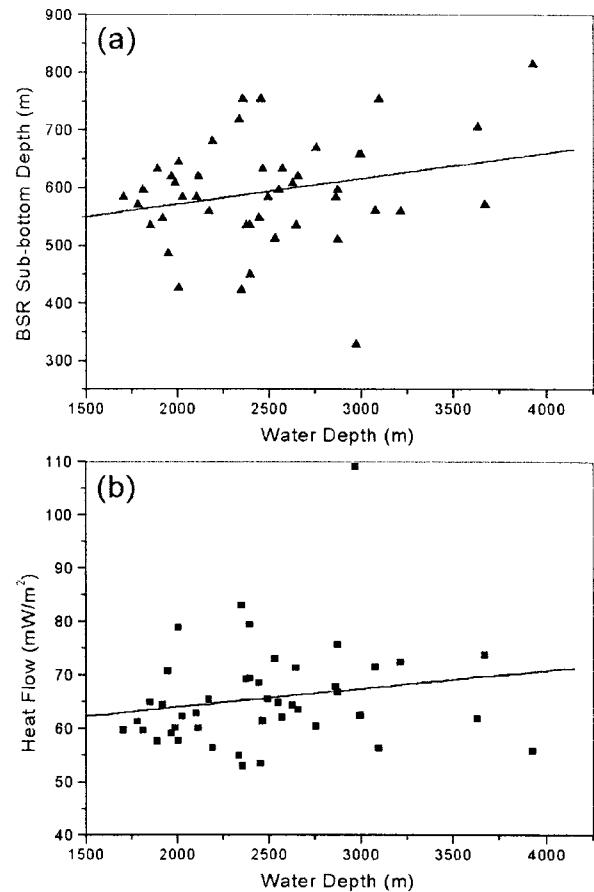


Fig. 5. Graphs showing the regional distributions of (a) BSR sub-bottom depths and (b) heat flow values with respect to water depth on all seismic profiles. Solid straight lines in the graphs indicate general trends of the distribution.

처럼 수심이 깊어짐에 따라 전반적으로 BSR의 심도가 완만하게 증가하는 경향을 나타낸다. 하지만 이런 완만한 BSR 심도 증가는, 지열류량이 일정한 경우에 예상되는 심도증가율보다 작은 것이다. 따라서 BSR의 심도를 이용하여 지열류량으로 계산한 경우, 수심이 깊어짐에 따라 지열류량이 다소 증가하는 양상을 보인다(Fig. 5b).

수심 3000 m 이하의 대륙사면의 상부에서는, BSR이 잘 발달되어 있음에도 불구하고 심한 BSR의 심도변화를 보인다. 이런 심한 변화는, 주로 국부적인 열원이나, 단층과 습곡 같은 국지적인 지체구조 변화 등에 기인한 것으로 생각된다. 이번 연구지역 부근에서 얻은 다른 나라 연구팀의 탄성과 자료에서도 수심 3000 m 이하의 지역에서는 BSR 심도 분포가 불규칙하게 나타난다(Camerlenghi and Lodolo 1994).

BSR로부터 산출된 연구지역의 지열류량은 대략 50

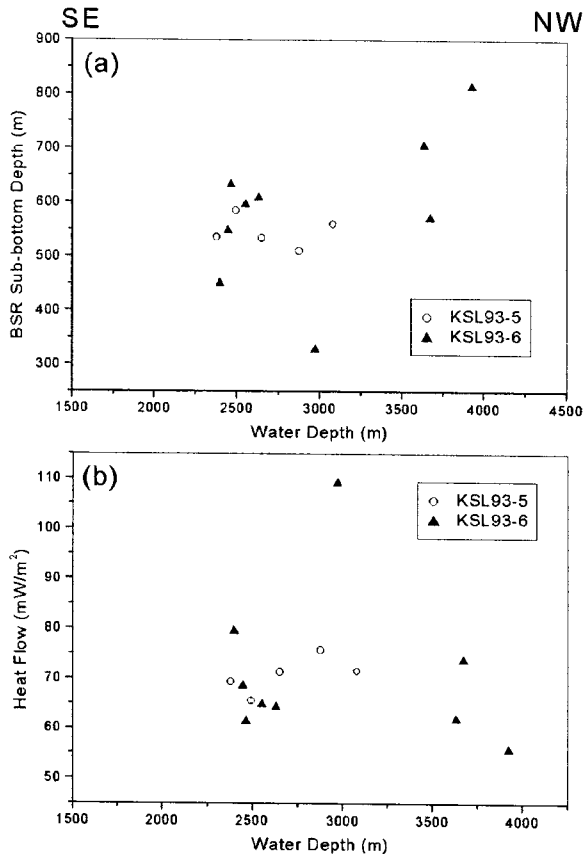


Fig. 6. Graphs showing the distributions of (a) BSR sub-bottom depths and (b) heat flow values with respect to water depth along profiles KSL93-5 and KSL93-6.

mW/m^2 에서 85 mW/m^2 사이의 범위를 보이며, 평균값은 65 mW/m^2 이다(Fig. 5b). 대체적으로 자료분포가 평균값에서 크게 벗어나지 않는 양상을 보여, 광역적으로 지열 구조가 비교적 안정되어 있음을 나타낸다.

국지적 분포

횡단측선(KSL93-5, KSL93-6)

횡단측선들은 해구에서의 해양관 섭입방향과 비슷한 방향이기 때문에, 해구-섭입시스템에서 나타나는 지열류량 분포를 살펴볼 수 있는 측선들이다. 두 횡단측선의 경우 대체적으로 55 mW/m^2 에서 80 mW/m^2 사이의 지열류량을 보이며 평균값은 약 70 mW/m^2 이다. 광역적인 평균 지열류량에 비해 조금 큰 값이다(Fig 6b).

KSL93-6 측선에서는 수심 2500 m와 4000 m 부근에 BSR이 주로 분포한다(Fig. 6a). 같은 수심에서도 BSR 심도 변화가 심한 것을 알 수 있다. 이 측선의 탄성과 단면도에서 BSR의 분포, 해저면 형태와 지층구조를 자세히

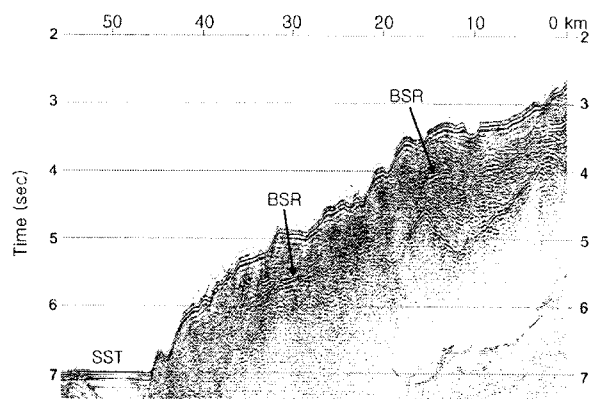


Fig. 7. Seismic section of profile KSL93-6 showing BSRs occurring along the continental slope with highly deformed topography.

볼 수 있다(Fig. 7). 단면도의 5 km-20 km 구간과 28 km-36 km 구간에 BSR이 분포한다. 두 BSR구간 사이, BSR이 단절된 구간은, 해저지형 변화가 매우 심하다. 이 구간에서는 지형변화에 의해 가스수화물의 안정조건에 변화가 일어나 상부 가스수화물층 또는 하부 가스층이 불안정해지면서 BSR이 형성되지 못한 것으로 해석된다. 두 BSR구간의 해양쪽 끝단인 20 km와 36 km 지점은 지형변화가 심한 곳에 해당하며, BSR 심도가 크게 얕아진 모습을 볼 수 있다. Fig. 6에서 극단적으로 얕은 BSR 깊이와 높은 지열류량 값을 보이는 수심 3000 m의 자료값은 20 km 지점에서 얻은 것이다.

Minshull and White(1989)는 Makran 부가대에서 단층 근처에서 BSR의 심도가 얕아지는 현상을 관찰하고, 이는 단층을 따라 따뜻한 지층수들이 상부로 이동함에 의해 지온이 상승하여 일어난 현상이라고 설명한 바 있다. 한편 Dillon *et al.*(2001)은 미국 동해안 Blake Ridge에서 BSR의 하부 가스의 갑작스런 방출에 의해 해저면에 깊은 붕괴지형이 형성되어 있음을 관찰하였다. KSL93-6 경우에도, BSR이 나타나지 않는 구간(20 km-28 km)에서는, 이 측선에 나타나는 대륙사면의 평균 경사구배에 비해 함몰된 분지지형을 형성하고 있다(Fig. 7). 따라서 이 구간에 대해서도 Blake Ridge의 경우처럼, BSR 하부의 가스층이 대규모 방출됨에 따라 해저지형의 붕괴가 일어나 깊은 지형이 형성되었고, 하부 가스층의 방출로 BSR이 소멸되었을 가능성을 상정해 볼 수 있다.

KSL93-5의 경우에는 수심 2300 m에서 3000 m 사이에서 약 10 km 이상 연장된 BSR이 관찰된다. 이 BSR의 경우 비록 짧은 구간에 한정되지만, 단절이 되지 않고 연장되기 때문에 수심-BSR 심도 관계를 보다 정확히 알 수 있다. 이 측선에서 나타나는 BSR 심도는 500 m에서 600 m

이며, 전체적으로 수심이 깊어지면서 BSR 심도는 감소하는 경향을 보인다(Fig. 6a). 이는 수심이 증가하는 해구쪽으로 가면서 지열류량이 증가함을 의미한다(Fig. 6b).

전 세계적으로 활동성 대륙주변부중 해구에서 대륙쪽으로 가면서 지열류량이 감소하는 현상은 여러 연구자들에 의해 밝혀졌다. 일본의 Nankai Trough(Yamano *et al.* 1982; Ashi and Taira 1993), Barbados Ridge(Lengseth *et al.* 1990), Cascadia margin(Davis *et al.* 1990) 등 가스수화물 BSR이 잘 발달된 지역에서 이와 같은 현상을 찾아볼 수 있다. 이와 같은 섭입부가대에서 관찰되는 대륙쪽으로의 지열류량 감소 현상은 수치모델의 결과와도 잘 일치한다. 이는 대륙쪽으로 가면서 퇴적층의 두께가 증가하고, 부가대안의 지층수가 빠져 나오기 때문인 것으로 해석된다(Hyndman *et al.* 1993).

평행측선(KSL93-3, KSL93-4)

이 두 평행측선들은 서로 연결된 측선으로 남서-북동 방향의 주향을 가지며, 수심 1500-3000 m의 남쉐틀랜드 대륙사면을 따라 200 km에 달하는 긴 구간에 걸쳐 BSR의 분포와 변화를 볼 수 있는 측선이다(Fig. 2). 이 평행측선들이 지나가는 대륙사면 구간은 연구지역에서 가장 BSR이 잘 나타나는 구간으로, 지구조적으로 같은 환경에 속하는 지역에서 지열류량이 어떻게 변화하는지를 관찰할 수 있다. 특히 KSL93-3의 북동쪽 끝에는 셰클턴 파쇄대, 남쉐틀랜드 해구, 남스코시아 해저산맥이 만나는 삼중점이 존재하며, 남극판과 스코시아판의 경계지역이다(Fig. 1). 따라서 복잡한 지체구조환경에 관련된 지열류량의 변화를 관찰할 수 있을 것으로 예상되는 지역이다.

평행측선에 나타나는 수심과 BSR의 심도, 그리고 지열류량을 Fig. 8에 나타내었다. KSL93-4에서는 남서쪽에서 북동쪽으로 수심이 깊어짐에 따라 BSR의 심도가 증가하는 경향을 뚜렷하게 보여준다(Fig. 8a). 계속해서 북동쪽으로 연결되는 KSL93-3에서는 수심이 가장 깊은 지점(CDP 8500)에서 BSR 심도가 급격히 감소하며, 북동쪽으로 가면서 수심이 얕아지면서 BSR 심도가 증가하는 반대 경향을 보인다.

수심과 지열류량 분포에서도 KSL93-4의 경우 55-65 mW/m^2 범위내에서 일정한 값을 보인다(Fig. 8b). 반면에, KSL93-3의 경우 수심이 가장 깊은 CDP 8500 지점에서 가장 높은 지열류량인 70 mW/m^2 를 나타내며, 북동쪽으로 가면서 수심이 빠르게 얕아지면서 지열류량이 55 mW/m^2 까지 차차 감소하는 모습을 보인다. 즉 CDP 8500 지점에서 KSL93-4의 같은 수심에 비해 15 mW/m^2 이상 급격하게 높아진 지열류량 이상값을 보이다가 북동쪽으로 가면서 차츰 낮아져서 전체적인 평균값으로 수렴된다.

이는 CDP 8500 지점 부근에서 전체적인 경향보다 비

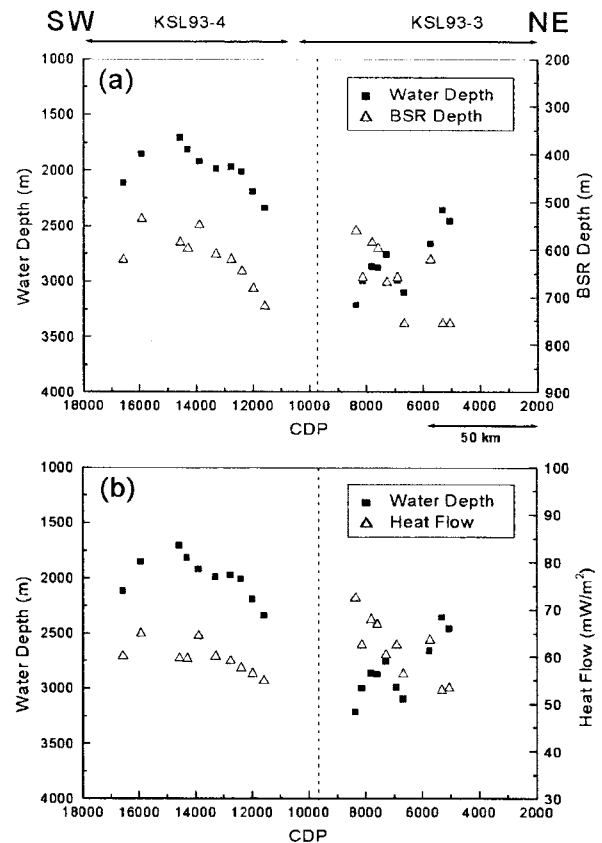


Fig. 8. Graphs showing the distributions of (a) water depths and BSR depths and (b) water depths and heat flow values along profiles KSL93-3 and KSL93-4. The dashed line indicates the location of the South Shetland Fault shown in Fig. 3.

정상적으로 높은 지열류량 상승현상이 있음을 지시한다. 이런 상승은 이 지점부근에 존재하는 국부적인 열원에 의한 것으로 추정된다. CDP 8500 지점은 북동쪽끝 판경계부에서 약 50 km 떨어진 대륙주변부 내부에 속하며, KSL93-4와 연결되는 경계지점 부근이다. 최근 Lodolo *et al.*(2002)은, 이 지점 부근에 북서-남동 방향의 주향이동단층(transfer fault)이 존재함을 발표하였다. 이 단층은 KSL93-3과 KSL93-7에도 잘 나타난다(Fig. 3). 따라서 이 단층은 적어도 수십 km이상 연장되는 대규모 단층이다. 이 연구에서는 이 단층을 남쉐틀랜드단층(South Shetland Fault: SSF)이라고 명명하고, Fig. 2에 그 위치를 표시하고, Fig. 3의 탄성과 단면도와 Fig. 8의 그래프에 각각 도시하였다. 단층은 더운 지층수들이 상부로 이동하는 통로역할을 하기 때문에, 국지적인 지열류량 상승을 유발할 수 있다. Trehu *et al.*(1995)은 미국 서부연안의 Cascadia 섭입대에서 단층과 BSR의 교차점에서 국지적인 높은 지열류량 이상대를 관찰하였다. 따라서 이번 연구지역 CDP8500

지점부근에서 관찰되는 높은 지열류량 상승 역시 대규모 단층인 SSF를 따라 일어나는 심부로부터의 열수이동에 의한 현상으로 해석된다.

한편 Klepeis and Lawver(1996)는 남극반도 북동부 지역에 낮은 중력값을 보이는 대규모 구조선(gravity low line)이 존재한다고 보고하였다. 이 낮은 중력이상 구조선은 브랜스필드 확장분지의 세 개의 소분지 중, 동부와 중부 분지의 경계를 지나며 남쉐틀랜드 대륙주변부까지 수백 km에 걸쳐 연장되는데, SSF 부근까지 이어진다. 최근 여러 개의 지진들이 이 구조선을 따라 발생하고 있어(Lee *et al.* 2000; González-Casado *et al.* 2000), 현재 활동중인 하나의 대규모 지체구조선으로 생각되며, SSF가 이 지체구조선의 일부일 가능성이 높다.

8. 결 론

남쉐틀랜드 대륙주변부의 다중채널 탄성과 단면도에는 가스수화물의 BSR이 광범위하게 관찰된다. 이 연구에서는 가스수화물의 BSR을 이용하여 이 지역의 지열류량을 산출하고, 그 분포특성을 규명하였다. 앞으로 실제 해저면에서의 지열류량 자료를 획득하여 이번 연구에서 얻은 BSR 지열류량 자료와의 비교연구를 통해 연구지역의 지열류량 특성에 대한 깊이 있는 연구를 수행할 예정이다. 이 연구에 의해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 연구지역에서 관찰되는 지열류량은 50 mW/m²에서 85 mW/m² 사이에 분포한다. 평균값은 약 65 mW/m²이다. 전체적으로 평균값에서 큰 편차를 보이지 않아 광역적으로 지열류량이 비교적 안정되게 분포한다.

2. 횡단측선에 분석한 결과는 남쉐틀랜드 대륙주변부의 섭입부가대와 대륙사면에서는 BSR의 깊이 변화가 심한 모습을 보인다. BSR이 나타나지 않는 구간은 상대적으로 깊은 지형을 형성하며 그 하부에는 지각변형이 심하다. 해구에서 대륙쪽으로 가면서 지열류량이 완만하게 감소하는 경향을 보이는데, 이는 퇴적층의 두께 증가와 지층 수 배퇴에 기인한 것으로 해석된다.

3. KSL93-3과 KSL93-4의 경계 지점 부근에서 평균값에 비해 15 mW/m² 높은 지열류량 이상이 관찰된다. 이 국부적인 지열류량 상승지점은 이 지역을 지나는 북서-남동 주향의 대규모 단층인 남쉐틀랜드단층(SSF)의 인근 지점이다. 따라서 이 지점에서의 지열류량 상승은 SSF를 따라 일어나는 심부로부터의 열이동 현상에 의한 것으로 해석된다.

사 사

이 연구는 대한민국 남극연구 프로그램의 일환으로 수

행된 '남극광물자원 확보를 위한 환경특성 연구(PP02103)'와 '남극해저지질조사사업(PM15800)'의 지원을 받았다. 이 논문을 심사해 주신 김한준 박사님과 박민규 박사님께 감사드립니다. 출고 힘든 남극 현장탐사에 참여하여 주신 모든 연구원들께 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

- Ashi, H. and A. Taira. 1993. Thermal structure of the Nankai accretionary prism as inferred from the distribution of gas hydrate BSRs. p. 137-149. In: *Thermal Evolution of the Tertiary Shimanto Belt, Southwest Japan: An Example of Ridge-Trench Interaction*. ed. by M.B. Underwood. Geological Society of America Special Paper 272.
- Camerlenghi, A. and E. Lodolo. 1994. Bottom simulating reflector on the South Shetland margin (Antarctic Peninsula) and implications for the presence of gas hydrates. *Terra Antarctica*, 1, 154-157.
- Carson, B., G.K. Westbrook, and R.J. Musgrave *et al.* 1993. ODP Leg 146 examines fluid flow in Cascadia margin. *EOS*, 74, 345-347.
- Davis, E.E., R.D. Hyndman, and H. Villinger. 1990. Rates of fluid expulsion across the northern Cascadia accretionary prism: constraints from new heat flow and multichannel seismic reflection data. *J. Geophys. Res.*, 95, 8869-8889.
- Dickens, G.R. and M.S. Quinby-Hunt. 1994. Methane hydrate stability in seawater. *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2115-2118.
- Dillon, W.P., J.W. Nealon, M.H. Taylor, M.W. Lee, R.M. Drury, and C.H. Anton. 2001. Seafloor collapse and methane venting associated with gas hydrate on the Blake Ridge-causes and implications to seafloor stability and methane release. p. 211-233. In: *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution and Detection*. eds. by C.K. Paull and W.P. Dillon. Geophysical Monograph 124.
- Ganguly, N., G.D. Spence, N.R. Chapman, and R.D. Hyndman. 2000. Heat flow variations from bottom simulating reflectors on the Cascadia margin. *Mar. Geol.*, 164, 53-68.
- Gray, W.C. 1979. Variable norm deconvolution. Ph.D. thesis. Stanford Univ. 101 p.
- González-Casado, J.M., J.L. Giner-Robies, and J. López-Martinez. 2000. Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: Not a normal backarc basin. *Geol.*, 28, 1043-1046.
- Hamilton, E.L. 1978. Sound velocity-density relations in seafloor sediments and rocks. *J. Acoust. Soc. Am.*, 63, 366-377.

- Hyndman, R.D., K. Wang, T. Yuan, and G.D. Spence. 1993. Tectonic sediment thickening, fluid expulsion and the thermal regime of subduction zone accretionary prism: the Cascadia margin off Vancouver Island. *J. Geophys. Res.*, 98, 21865-21876.
- Jin, Y.K., Y. Kim, S.H. Nam, and K.J. Kim. 2000. Morpho-tectonic variation of the Shackleton Fracture Zone around the Antarctic-Scotia plate boundary off the northern Antarctic Peninsula. *Korean J. Geophys.*, 3, 210-218.
- Jin, Y.K., M.W. Lee, Y. Kim, S.H. Nam, and K.J. Kim. 2003. Gas hydrate volume estimations on the South Shetland continental margin, Antarctic Peninsula. *Antarc. Sci.* (in press)
- Kaul, N., A. Rosenberger, and H. Villinger. 2000. Comparison of measured and BSR-derived heat flow values, Markan accretionary prism, Pakistan. *Mar. Geol.*, 164, 37-51.
- Kim, Y., H.-S. Kim, R.D., Larter, A. Camerlenghi, L.A.P. Gambôa, and S. Rudowski. 1995. Tectonic deformation in the upper crust and sediments at the South Shetland Trench. p. 157-166. In: *Geology and Seismic Stratigraphy of the Antarctic Margin*. eds. by A.K. Cooper, P.F. Barker, and G. Brancolini. AGU, Antarc. Res. Ser. 68.
- Kim, Y., Y.K. Jin, and S.H. Nam. 1997. Crustal Structure of the Shackleton Fracture Zone in the Southwestern Scotia Sea. p. 661-667. In: *The Antarctic Region: Geological Evolution and Process*. ed. by C.A. Ricci. Terra Antarctic Publication, Siena.
- Klepeis, K.A. and L.A. Lawver. 1996. Tectonics of the Antarctic-Scotia plate boundary near Elephant and Clarence Islands, West Antarctica. *J. Geophys. Res.*, 89, 20211-20231.
- Kvenvolden, K.A. 1993. A primer on gas hydrate. p. 279-291. In: *The Future of Energy Gases*. ed. by D.G. Howell. et al. US Geological Survey professional paper 1570.
- Kvenvolden, K.A. 2000. Natural gas hydrate: Introduction and history of discovery. p. 9-16. In: *Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments*. ed. by M.D. Max. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Kvenvolden, K.A., M. Golan-Bac, and J.B. Rapp. 1987. Hydrocarbon geochemistry of sediments offshore from Antarctica: Wilkes Land continental margin. p. 205-213. In: *The Antarctic continental margin: Geology and Geophysics of offshore Wilkes Land*. eds. by S.L. Eittreim and M.A. Hampton. Circum Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series, Houston.
- Larter, R.D. and P.F. Barker. 1991. Effects of ridge crest-trench interaction on Antarctic-Phoenix spreading: Forces on a young subducting plate. *J. Geophys. Res.*, 96, 19583-19607.
- Larter, R.D., M. Rebesco, L.E. Vanneste, L.A.P. Gamboa, and P.F. Barker. 1997. Cenozoic tectonic, sedimentary and glacial history of the continental shelf west of Graham Land, Antarctic Peninsula. p. 1-27. In: *Geology and Seismic Stratigraphy of the Antarctic Margin, Part 2*. eds. by P.F. Barker and A.K. Cooper, AGU, *Antarc. Res. Ser.*, 71.
- Lawver, L.A., B.J. Sloan, D.H.N. Barker, M. Chidella, R.P. Von Herzen, R.A. Keller, G.P. Klinkhammer, and C.S. Chin. 1996. Distributed, active extension in Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: Evidence from multibeam bathymetry. *GSA Today*, 6(11), 1-6.
- Lee, D.K., Y.K. Jin, Y. Kim, and S.H. Nam. 2000. Seismicity and tectonics around the northern Antarctic Peninsula from King Sejong station data. *Antarctic Science*, 12, 196-204.
- Lengseth, M.G., G.K. Westbrook, and M. Hobart. 1990. Contrasting geothermal regimes of the Barbados ridge accretionary complex. *J. Geophys. Res.*, 95, 8829-8844.
- Livermore, R., J.C. Balanya, A. Maldonado, J.R. Martinez, J.R. Fernandez, C.S. Baldeano, J.G. Zaldivar, A. Jabaloy, A. Barnolas, L. Somoza, J.H. Molina, E. Surinach, and C. Viseras. 2000. Autopsy on a dead spreading center: The Phoenix Ridge, Drake Passage, Antarctica. *Geol.*, 28, 607-610.
- Lodolo, E. and A. Camerlenghi. 2000. The occurrence of BSRs on the Antarctic Margin. p. 199-212. In: *Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments*. ed. by M.D. Max. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Lodolo, E., A. Camerlenghi, and G. Brancolini. 1993. A bottom simulating reflection on the South Shetland Margin, Antarctic Peninsula. *Antarctic Sciences*, 5, 207-210.
- Lodolo, E., A. Camerlenghi, G. Madrussani, U. Tinivella, and G. Rossi. 2002. Assessment of gas hydrate and free gas distribution on the South Shetland margin (Antarctica) based on multichannel seismic reflection data. *Geophys. J. Inter.*, 148, 103-119.
- Minsull, T. and R. White. 1989. Sediment compaction and fluid migration in Makran accretionary prism. *J. Geophys. Res.*, 94, 7387-7402.
- Nowlin, Jr. W.D., and W. Zenk. 1988. Westward bottom currents along the margin of the South Shetland Island arc. *Deep-Sea Res.*, 35, 269-301.
- Pankhurst, R.J. 1982. Rb-Sr geochronology of Graham Land, Antarctica. *J. Geol. Soc. London*, 139, 701-711.
- Pelayo, A.M. and D.A. Wiens. 1989. Seismotectonics and relative plate motion in the Scotia Sea region. *J. Geophys. Res.*, 94, 7293-7320.

- Shibley, T.H., M.H. Houston, R.T. Buffler, F.J. Shaub, K.J. McMillen, J.W. Ladd, and J.L. Worzel. 1979. Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises. *AAPG Bull.*, 63, 2204-2213.
- Sloan, E.D. 1998. *Clathrate Hydrate of Natural Gases*. Marcel Dekker, New York. 705 p.
- Smith, W.H.F. and D.T. Sandwell. 1997. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth sounding. *Science*, 277, 1956-1962.
- Taira, A., I. Hill, J. Firth, and the Leg131 Shipboard Scientific Party. 1991. Proceedings of the ODP, Initial Reports 131, Ocean Drilling Program, College Station, TX.
- Tanahashi, M., S. Eittrheim, and J. Wannesson. 1994. Seismic stratigraphic sequences of the Wilkes Land margin. *Terra Antarc.*, 1, 391-393.
- Tinivella, U., E. Lodolo, A. Camerlenghi, and G. Boehm. 1998. Seismic tomography study of a bottom simulating reflector off the South Shetland Margin (Antarctica). p. 141-151. In: *Gas hydrates: Relevance to world margin stability and climate change*. eds. by J.-P. Henriot and J. Mienert. Geological Society London Special Publication 137.
- Trehu, A.M., G. Lin, E. Maxwell, and C. Goldfinger. 1995. A seismic reflection profile across the Cascadia subduction zone offshore central Oregon: new constraints on methane distribution and crystal structure. *J. Geophys. Res.*, 100, 15101-15116.
- Tucholke, B.E., G.M. Bryan, and J.I. Ewing. 1977. Gas-hydrate horizons detected in seismic-profile data from the Western North Atlantic. *AAPG*, 61, 698-707.
- Wang, K., R.D. Hyndman, and E.E. Davis. 1993. Thermal effects of sediment thickening and fluid expulsion in accretionary prisms: model and parameter analysis. *J. Geophys. Res.*, 98, 9975-9984.
- Yamano, M., S. Uyeda, Y. Aoki, and T.H. Shibley. 1982. Estimates of heat flow derived from gas hydrates. *Geol.*, 10, 339-343.

Received May 7, 2003

Accepted May 30, 2003