

Article

남극 남셰틀랜드 북부 대륙주변부 및 남스코시아해 지역의 고해상(3.5 kHz) 음향 특성

이상훈* · 진영근 · 김규중 · 남상헌 · 김예동

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

High-Resolution (3.5 kHz) Echo Characters of the Northern South Shetland Continental Margin and the South Scotia Sea, Antarctica

Sang Hoon Lee*, Young Keun Jin, Kyu Jung Kim, Sang Heon Nam, and Yeadong Kim

*Korea Polar Research Institute, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

Abstract : High-resolution (3.5 kHz) subbottom profiles were analyzed in order to reveal sedimentation pattern of late Quaternary in the northern South Shetland continental margin and the South Scotia Sea, Antarctica. On the basis of clarity, continuity and geometry of surface and subbottom echoes together with seafloor topography, high-resolution echo characters are classified into eight echo types which represent rock basements (echo type III-1), coarse-grained subglacial till or moraine (echo type I-1), slides/slumps (echo type IV), debris-flow deposits (echo types II-3 and III-2), and bottom-current deposits (echo types I-2, II-1 and II-2). Subglacial till or moraine (echo type I-1) is mostly present in the lower continental shelf and upper continental slope of the northern South Shetland continental margin, which changes downslope to slides/slumps (echo type IV) and debris-flow deposits (echo types II-3 and III-2) in the middle to lower continental slope. This distribution suggests that the continental slopes of the northern South Shetland continental margin were mostly affected by downslope gravitational processes. Further downslope, bottom-current sediments (echo type I-2) deposited by the southwestward flowing Antarctic Deep Water (ADW) occur at the South Shetland Trench, reflecting an interaction between mass flows and bottom currents in the area. In contrast to the northern South Shetland continental margin, the South Scotia Sea is dominated by bottom-current deposits (echo types II-1 and II-2), indicating that the sedimentation was mostly controlled by the westward flowing ADW. Flow intensity of the ADW has increased in the relative topographic highs, forming thin covers of coarse-grained contourites (echo type II-1), whereas it has decreased in the relative topographic lows, depositing thick, fine-grained contourites (echo type II-2). The poor development of wave geometry in the fine-grained bottom-current deposits (echo type II-2) is suggestive of the unsteady nature of the ADW flow.

Key words : 고해상 음향 특성(high-resolution acoustic characters), 제4기 후기 퇴적작용(late Quaternary sedimentation), 질량류 및 저층류 퇴적물(mass-flow and bottom-current deposits), 남셰틀랜드 북부 대륙주변부(northern South Shetland continental margin), 남스코시아해(South Scotia Sea)

*Corresponding author. E-mail : shlee@soc.soton.ac.uk

1. 서 론

고주파(3.5-12 kHz) 음원을 이용한 천부 지층 탐사는 저위도에서 고위도까지, 천해에서 심해까지 매우 다양한 퇴적 환경에서 퇴적 작용을 연구하는데 아주 유용하다(Damuth 1975, 1980; Chough *et al.* 1985a, 1985b, 1997; Pratson and Laine 1989; Pudsey and Howe 1998; Zaragosi *et al.* 2000; Lee *et al.* 2002; Pudsey *et al.* 2002). 고주파 천부 지층 탐사는 보통 수 십 m정도의 퇴적층을 투과함으로써, 퇴적물에 따라 수 만년에서 수 십 만년에 걸친 퇴적층의 퇴적 작용과 퇴적 환경을 용이하게 밝힐 수 있다. 반사되어 오는 음향신호는 퇴적층의 퇴적 조직(sedimentary texture) 및 해저표면(surface)과 지층내(subsurface) 퇴적층의 형태(geometry)를 반영하고 있다(Damuth 1975, 1980; Damuth and Hayes 1977). 따라서 고주파 음향 특성과 그 지역적인 분포 양상은 퇴적 및 침식작용을 해석하는데 중요한 단서를 제공한다(Damuth 1978, 1980; Chough *et al.* 1985a, 1997; Pratson and Laine 1989; Pudsey and Howe 1998; Zaragosi *et al.* 2000; Lee *et al.* 2002).

제 4기 후기, 마지막 빙하기가 끝나면서 시작된 기후 변화로 인해 해양환경은 다양하게 변화하였다. 특히, 남극 반도(Antarctic Peninsula)와 남셰틀랜드 군도(South Shetland Islands) 주변부는 극지역의 특성상 저위도 해역과는 다른 해양환경 변화가 일어났는데, 빙하기에서 간빙기로의 기후 변화 과정에서 해수면의 상승, 온난화에 따른 점진적 극빙하의 쇠퇴 및 빙하 말단부의 후퇴와 해빙에 따른 남극순환류의 강도 변화가 현격하게 나타났다(Pope and Anderson 1992; Shevenell *et al.* 1996; Howe *et al.* 1998; Pudsey and Howe 1998; Pudsey 2000; 윤 등 2002). 이러한 해양환경의 변화는 다시, 남극 대륙 주변부로 공급되는 육성기원 퇴적물의 성분 및 공급량, 퇴적물 운반 기작 및 퇴적작용에 변화를 유발시킴으로써 해저 퇴적층의 형성작용에도 상당한 영향을 미친 것을 알려져 있다(Domack and Ishman 1993; Pudsey and Howe 1998; Pudsey 2000; Yoon *et al.* 2000; Pudsey *et al.* 2002). 따라서 고주파 천부 지층 탐사를 이용한 남극 반도 및 남셰틀랜드 군도 주변부의 해양 퇴적작용에 관한 연구는 지난 플라이스토세와 홀로세 동안 남극권 해양환경 변화양상을 이해하는데 매우 기초적인 정보를 제공하게 된다.

본 연구에서는 한국해양연구원이 2002년 겨울에 남셰틀랜드 북부 대륙주변부(northern South Shetland continental margin)와 남스코시아해(South Scotia Sea)에서 획득한 고주파(3.5 kHz) 천부지층 탐사자료의 음향 특성을 자세하게 분석하여 제 4기 후기 퇴적작용을 분석하고, 이 퇴적작용의 광역적인 분포 양상을 밝히고자 한다.

2. 연구지역 개관

연구지역인 남셰틀랜드 북부 대륙 주변부 및 남스코시아해 주변은 좁은 지역내에 매우 복잡한 판구조운동이 진행되고 있는 곳이다. 이 지역에는 남극판(Antarctic plate), 스코시아판(Scotia plate) 및 전 피닉스판(Former Phoenix plate)의 경계를 이루는 세 개의 대규모 지질구조인 셰클턴 파쇄대(Shackleton Fracture Zone), 남스코시아 해령(South Scotia Ridge)과 남셰틀랜드 해구(South Shetland Trench)가 만나는 삼중점(triple junction)이 존재한다(Fig. 1A). 남스코시아 해령과 셰클턴 파쇄대는 남극판과 스코시아판의 경계를 이루는 변환단층 시스템이다(Palayo and Wiens 1989; Klepief and Lawver 1996). 최근들어 스코시아판의 서향이동에 의해 발생하는 응력이 삼중점 부근지역에 강한 지각변형작용을 야기하고 있다고 알려져 있다(Klepief and Lawver 1996; Kim *et al.* 1997; Gonzalez-Casado *et al.* 2000; Jin *et al.* 2000).

남셰틀랜드 북부 대륙주변부의 대륙붕은 수심 약 500-600 m로 깊고 폭이 넓으며, 대륙사면의 경사는 약 2.3-2.7°로 수심이 약 5,000-5,500 m의 남셰틀랜드 해구(South Shetland Trench)까지 깊어진다(Fig. 1A). 남셰틀랜드 해구를 지나면서 수심은 태평양쪽으로 다시 약 4,000 m 정도로 얕아진다(Fig. 1A). 남셰틀랜드 북부 대륙주변부의 대륙사면은 북동쪽으로 북서-남동방향의 셰클턴 파쇄대와 접하고 있으며, 파쇄대를 지나면서 대륙사면은 좁아지고 경사가 매우 급해진다(Fig. 1A). 연구지역의 북동부는 동서방향의 남스코시아 해령이 분포하는데, 이 해령은 스코시아판의 남쪽 경계를 형성하면서, 웨델해(Weddell Sea)와 스코시아해(Scotia Sea)사이의 장벽(barrier) 역할을 하고 있다. 남스코시아 해령은 주변 해저면보다 약 1,000-1,500 m정도 높은 남쪽과 북쪽의 두 지맥(branch)으로 구성되어 있으며, 두 지맥사이에는 수심이 약 3,000-4,000 m로 깊어지는 중앙함몰대(central deep)가 존재한다(Fig. 1A). 남스코시아 해령의 북부해역, 즉 남스코시아해는 수심 약 3,000-4,000 m정도의 매우 평탄한 해저분지 평원으로 이루어져 있다(Fig. 1A).

남극순환류(Antarctic Circumpolar Current: ACC)는 극전선(Polar Front)을 따라 남태평양에서 드레이크 해협(Drake Paassage)과 스코시아해를 거쳐 대서양으로 이동한다(Fig. 1B; Grose *et al.* 1995; Orsi *et al.* 1995). ACC의 심층부 수괴(water mass)인 남극순환류 심층수(Circumpolar Deep Water: CDW)는 남쪽에서 수온이 더 낮고 많은 양의 산소를 포함하고 있는 남극심층수(Antarctic Deep Water: ADW)와 접하고 있다(Sievers and Nowlin 1984; Orsi *et al.* 1995). 남극심층수는 Weddell Sea에서

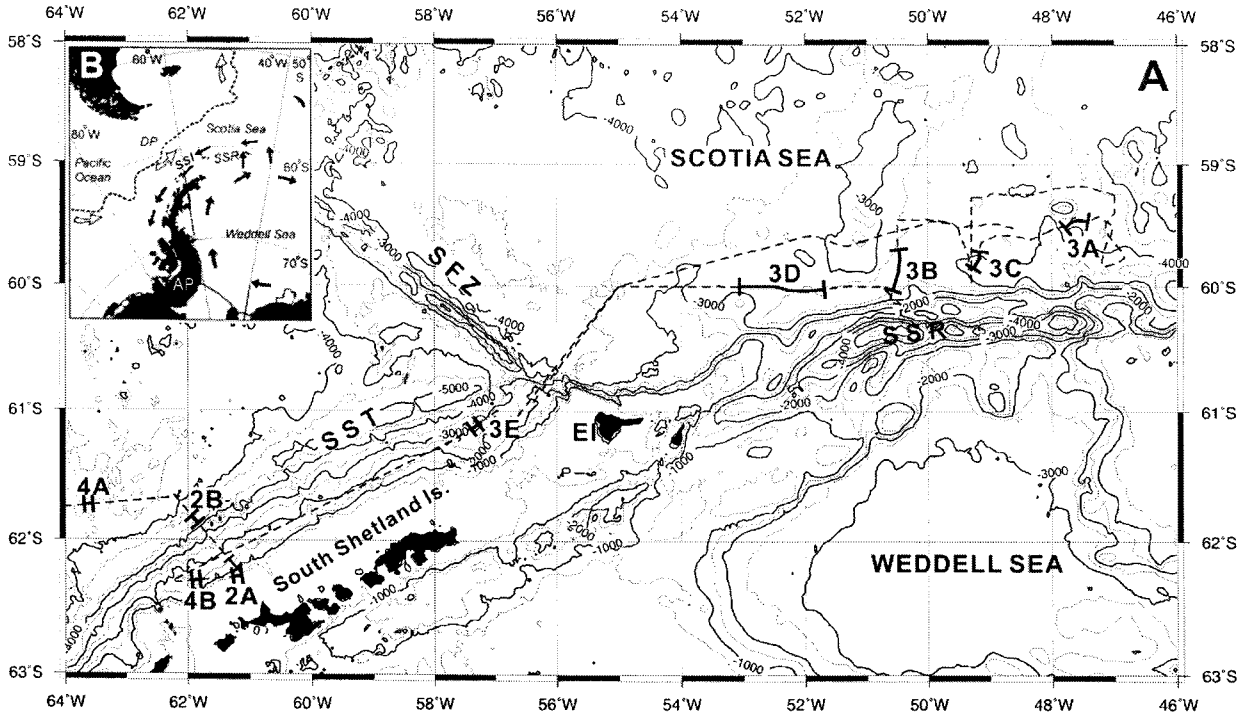


Fig. 1. (A) Bathymetry and tracklines (dotted lines) around the South Shetland Islands and the South Scotia Ridge. EI = Elephant Island; SFZ = Shakleton Fracture Zone; SSR = South Scotia Ridge; SST = South Shetland Trench. Bathymetry in meters. Contour interval is 500 m. Numbered thick bars indicate locations of 3-5 kHz subbottom profiles shown in Figs. 2-5. (B) Map showing the ocean-circulation systems around the Antarctic Peninsula, South Shetland Islands and South Scotia Ridge. Note the Antarctic Circumpolar Current (open arrows) axis along the Polar Front (dashed lines). Black arrows represent the Antarctic Deep Water and Weddell Gyre. AP = Antarctic Peninsula; DP = Drake Passage; SSI = South Shetland Is.; SSR = South Scotia Ridge. Modified from Pudsey (2000).

시계 방향으로 순환하는 Weddell Gyre가 서경 40°와 48° 근처의 심해통로를 따라 북쪽으로 이동하여 남스코시아해와 남셰틀랜드 북부 대륙주변부를 따라 서쪽 또는 남서쪽으로 움직이면서 시계반대 방향의 순환을 하고 있는 것으로 알려져 있다(Fig. 1B; Nowlin and Zenk 1988; Camerlenghi *et al.* 1997). 따라서 연구지역인 남셰틀랜드 북부 대륙주변부와 남스코시아해는 남극심층수의 직접적인 영향을 받고 있다.

3. 자료 및 분석 방법

2002년 12월에 시행된 남극 해양조사에서 약 1,845 km의 고해상(3.5 kHz) 천부 탄성파탐사 자료를 남셰틀랜드 북부 대륙주변부 및 남스코시아해에서 획득하였다(Fig. 1A). 남셰틀랜드 북부 대륙주변부에서는 주로 상-중부 대륙사면을 따라 북동-남서방향으로 자료를 얻었으며, 남스코시아해에서는 심해평원(수심 3000 m 이상) 지역에서 주로 동-서 방향으로 자료를 획득하였다. 자료 획득시 조

사선의 속도는 시간당 3.5-11.5 knots를 유지하였으며, 조사선 위치자료는 GPS를 이용하여 획득하였다.

고해상 탄성파 음향상 분류는 기본적으로 Damuth (1978, 1980)와 Chough *et al.* (1985b)의 분류기준을 따랐다. 표층 반사파의 반사강도(명확성), 횡적 연속성 및 해저 지형 특성을 기준으로 4개의 음향특성 그룹으로 분류하였다: 1) 뚜렷한 표층반사파(I), 2) 불명확하거나 확산된 표층반사파(II), 3) 쌍곡선형태의 표층반사파(III) 및 4) 여러 가지 형태가 복합적으로 구성된 표층반사파(IV). 각각의 음향특성 그룹은 지층내 반사파의 유무, 명확성, 횡적 연속성 및 형태의 특성에 따라 아라비아 숫자를 추가하여 세분하였다. 이렇게 분류된 각각의 음향상은 고해상 음향특성에 관한 기존 연구결과와 비교하여 퇴적 작용을 해석하였다.

4. 음향상 특성 및 분포

음향상 I-1

음향상 I-1은 분명한 표층 반사파를 보이며 지층내 반

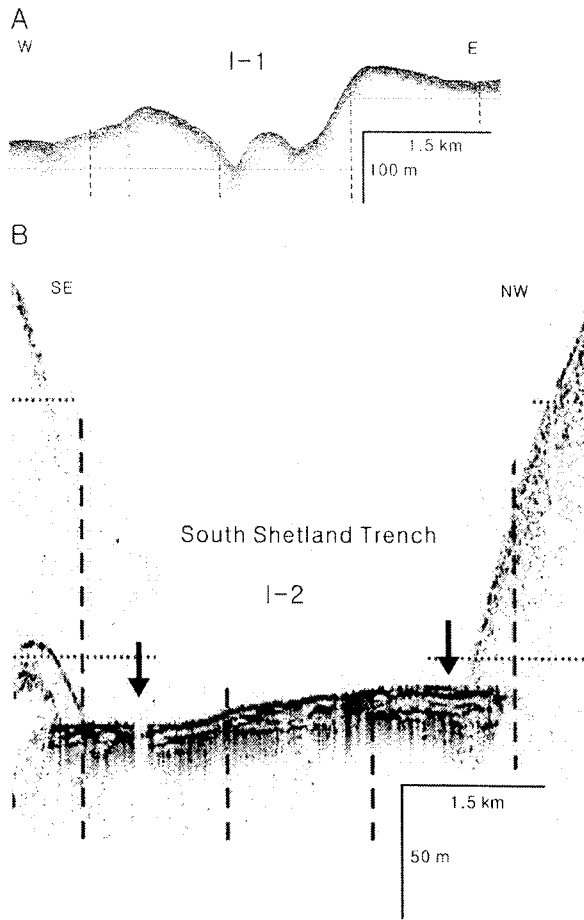


Fig. 2. High-resolution (3.5 kHz) subbottom profiles of Distinct echoes (I). For location of each profile, see Fig. 1A. (A) Distinct bottom echoes with no internal reflectors (Echo type I-1). (B) Distinct surface echoes with a few subbottom echoes (Echo type I-2). Internal reflectors are not exactly conformable to the surface echoes. Note channel/moat (arrow) and channel-filling geometry near the base of slope.

사파가 없는 특징을 보인다(Fig. 2A). 표층반사파 바로 아래는 확산된 음향특성이 나타나기도 한다(Fig. 2A). 해저면은 대체적으로 평탄하지만 부분적으로 불규칙한 기복을 보이기도 한다. 음향상 I-1은 남셰틀랜드 북부 대륙주변부에서 수심이 300-500 m인 하부 대륙붕과 최상부 대륙사면지역에 분포한다.

지층내 반사파를 동반하지 않는 뚜렷한 표층 반사파는 고화된 기반암이 해저면에 노출되어 있거나 해저면이 고주파(3.5 kHz)음향의 투과가 어려운 조립질 퇴적물로 덮여 있을 경우에 주로 나타난다(Damuth and Hayes 1977; Damuth 1980; Pratson and Laine 1989). 음향상 I-1이 분

포하는 남셰틀랜드 북부 대륙주변부의 대륙붕 및 최상부 대륙사면 지역은 대부분 빙하에 의해 공급된 퇴적물로 덮여 있어서 기반암 노출지역이 제한적으로 분포한다(Banfield and Anderson 1995; Jin *et al.* 1996; 윤 등 2002). 따라서 음향상 I-1은 주로 빙하로부터 공급된 조립질 퇴적물이 분포하는 지역을 나타내는 것으로 해석된다.

음향상 I-2

음향상 I-2는 명확한 표층반사파와 측방연속성이 좋지 않은 여러 개의 지층내 반사파로 구성되어 있으며, 음파투과 깊이는 약 15-25 m 정도이다(Fig. 2B). 지층내 반사파는 표층 반사파와 정확하게 평행하지 않게 나타난다(Fig. 2B). 음향상 I-2는 북동-남서방향의 남셰틀랜드 해구(South Shetland Trench)에서 관찰되는데, 표층반사파는 경사가 급한 지역과 경계되는 부근에서 규모가 작은 수로(channel) 또는 호(moat) 형태를 보이고 있으며, 지층내 반사파를 침식하기도 한다(arrow in Fig. 2B). 또한 이 부근에서의 지층내 반사파는 수로-채움(channel-filling geometry) 형태를 보이기도 한다(Fig. 2B).

분명한 표층 반사파와 여러 개의 지층내 반사파는 음향상 I-2가 니(clay)와 같이 비교적 세립질 퇴적물로 구성되어 있음을 지시한다(Damuth 1978; Chough *et al.* 1997). 남셰틀랜드 해구와 같이 경사가 급하고 높은 지형에 의해 제한된(confined) 지역에 분포하는 양상과 경사가 급한 지역과 경계되는 부근에서 호(moat) 및 수로-채움 형태를 보이는 특징은 음향상 I-2가 해구를 따라서 흐르는 저층류(bottom current)에 의해 형성된 제한된 세립질 표적물(confined fine-grained drift)임을 지시한다(Reed *et al.* 1987; Carter and McCave 1994; Faugères *et al.* 1999). 특히, 남셰틀랜드 북부 대륙주변부를 따라 남서쪽으로 흐르는 남극침층수의 존재(Nowlin and Zenk 1988)는 음향상 I-2가 저층류에 의해 형성되었음을 뒷받침한다.

음향상 II-1

음향상 II-1은 다소 확산(semi-prolonged)되어 두껍게 나타나고 측방 연속성이 양호한 표층반사파와 지층내 반사파가 나타나지 않는 것이 특징적이다(Fig. 3A, B). 부분적으로 희미하고 측방연속성이 좋지 않은 한-두개의 지층내 반사파가 관찰되기도 한다(Fig. 3A, B). 해저지형은 비교적 평탄하거나 매우 완만한 경사를 보이는데, 부분적으로 불규칙한 기복이 나타나기도 한다(Fig. 3A, B). 음향상 II-1은 주로 남스코시아해 심해평원에서 지형이 약간 높은 지역에 분포하며, 음향상 II-2와 횡적으로 점이적인 변화를 보여주고 있다.

지층내 반사파를 동반하지 않는 다소 확산된 표층반사파의 특성은 실트와 같이 상대적으로 조립질 퇴적물로 구

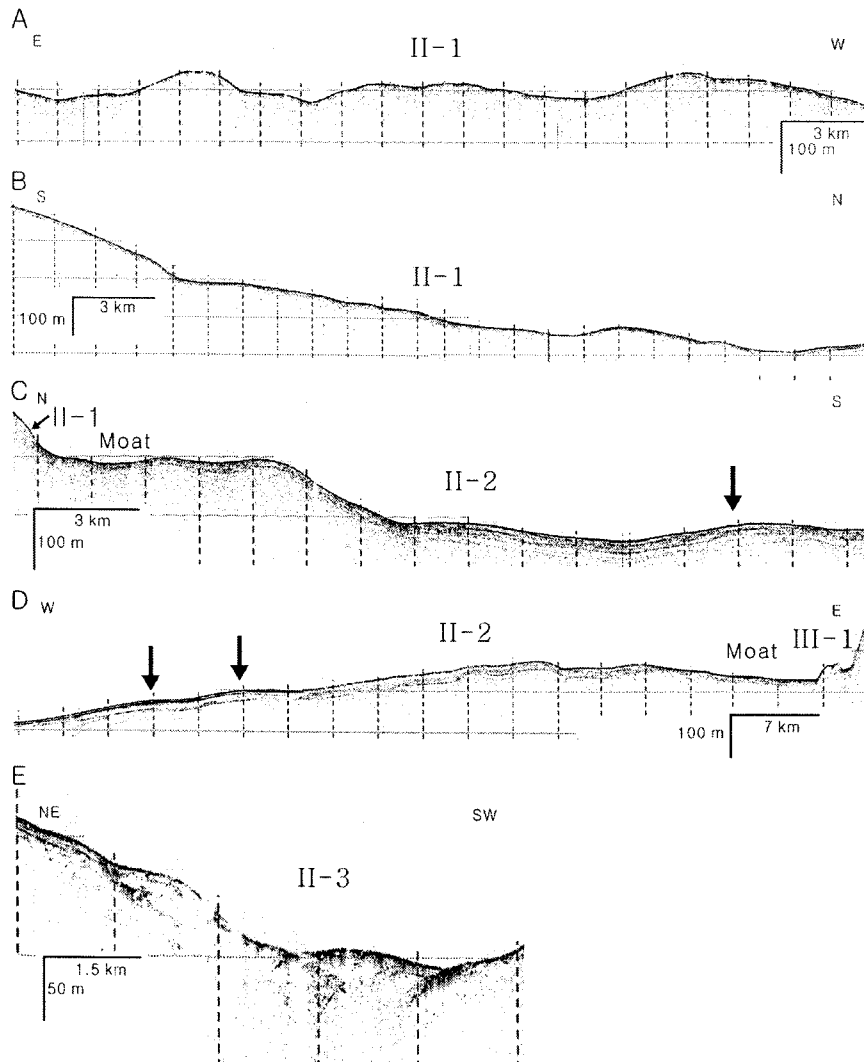


Fig. 3. 3.5-kHz subbottom profiles of Indistinct echoes (II). For location of each profiles, see Fig. 1A. (A) and (B) Indistinct to prolonged bottom echoes with either no or rare diffuse internal reflectors (Echo type II-1). (C) and (D) Prolonged bottom echoes with a few internal reflectors (Echo type II-2). Subbottom echoes are not exactly parallel to the surface reflector. Note local occurrence of slightly undulating (6-8 km in wavelength) geometry (arrows) and moat (less than 15 m deep) near the area where the slope gradient is abruptly reduced. (E) Laterally wedged, acoustically transparent masses (Echo type II-3).

성되어 있거나 해저표면에 고주파(3.5 kHz) 음향으로 분해하기 힘든 작은 규모의 퇴적구조가 분포할 때 나타나는 데, 이러한 음향 특성은 주로 대륙대에 가까운 심해 평원 지역의 저탁암(turbidite)이나 저층류 퇴적물(bottom-current deposit)에서 관찰된다(Damuth and Hayes 1977; Damuth 1980; Chough *et al.* 1997). 음향상 II-1이 분포하는 남스 코시아해 심해평원 지역은 남쉐틀랜드 북부 대륙주변부와 달리 주변으로부터 중력에 의해 재동되어 공급되는 퇴적물양이 매우 적은 편이고 서쪽으로 흐르는 남극심층수가 분포하고 있다(Howe *et al.* 1998; Pudsey and Howe

1998; Howe and Pudsey 1999). 따라서 음향상 II-1은 저층류에 의해 형성되었을 가능성이 크다.

음향상 II-2

음향상 II-2는 다소 불분명하거나 확산(semi-prolonged)된 형태의 측방연속성이 양호한 표층반사파와 그 하부 30-50 m에 걸쳐 나타나는 다수의 지층내 반사파로 구성되어 있다(Fig. 3C, 3D). 지층내 반사파는 표층반사파와 정확하게 평행하지 않으며 분명하거나 다소 확산된 특성을 보인다(Fig. 3C, 3D). 해저지형은 대체로 평탄하거나 매우

완만한 경사를 보이지만, 부분적으로 6-8 km 정도의 파형 길이를 갖는 완만한 굴곡(undulating) 형태가 관찰된다(Fig. 3C, 3D). 완만한 굴곡 형태의 골(trough)지역에서는 지층내 반사파 사이의 두께가 두껍고 음파투과 깊이가 깊은 반면, 마루(crest)지역에서는 지층 두께가 얇고 음파투과 깊어도 얕다(Fig. 3C). 음향상 II-2는 경사가 급해지면서 지형이 높은 지역(음향상 II-1 및 III-1)과 횡적으로 경계를 가지며, 이 경계지역에서 깊이가 5-15 m 내외인 호(moat)가 나타난다(Fig. 3C, 3D). 지층내 반사파들은 호(moat)에 의해 침식당한 특징을 보이며, 호(moat)에서 멀어질수록 지층내 퇴적층 두께가 두꺼워지고 음파투과 깊이도 증가한다(Fig. 3D). 음향상 II-2는 주로 남스코시아해 심해평원에서 지형이 상대적으로 낮은 지역에 분포한다.

다소 확산된 표층 반사파와 그 하부 30-50 m에 걸쳐 나타나는 여러 개의 지층내 반사파는 니(clay)와 같은 세립질 퇴적물로 구성되어 있음을 지시하는데, 이런 음향 특성은 대륙사면의 말단이나 해저분지 평원에서 반원양성 퇴적물(hemipelagic sediments), 저탁암(turbidites) 및 저층류 퇴적물(bottom-current deposits)로 구성되어 있음이 보고되고 있다(Damuth and Hayes 1977; Damuth 1978, 1980; Pratson and Laine 1989). 비록 코어퇴적물 자료를 획득하지 않아 퇴적물 종류를 정확하게 파악할 수 없지만, 음향상 II-2의 경계지역에 나타나는 호(moat), 부분적인 파형(undulating) 형태 및 지층내 퇴적층 두께 변화 양상은 저층류(bottom current)에 의해 형성되었음을 반영한다(Faugères and Stow 1993; Pudsey and Howe 1998; Faugères et al. 1999). 또한, 음향상 II-2가 남스코시아해 심해평원에 분포하는데, 이 지역은 남셴틀랜드 북부 대륙 주변부와 달리 주변으로부터 중력에 의해 재동되어 공급된 퇴적물량이 매우 적고 서쪽으로 흐르는 남극심층수가 분포하는 특징(Nowlin and Zenk 1988; Pudsey and Howe

1998)으로 미루어 보아 음향상 II-2는 저층류에 의해 형성되었을 가능성이 매우 크다.

음향상 II-3

음향상 II-3은 지층내 반사파가 없이 음향학적으로 투명하고 횡적으로 췌기형태인 퇴적체를 반영한다(Fig. 3E). 표층반사파는 비교적 다양한 특성을 보이는데, 높이가 수 m 이내의 비교적 규칙적으로 중첩하는 쌍곡선 형태의 반사파나 다소 확산된 특징을 보이며, 위로 불룩하거나 평탄한 형태를 보인다(Fig. 3E). 이 음향상은 주로 남셴틀랜드 북부 대륙주변부의 대륙사면에서 협곡이나 계곡과 같이 지형이 상대적으로 낮은 지역에서 채움 형태(filling geometry)로 관찰되며(Fig. 3E), 상부경사방향으로 음향상 III-2나 IV와 접하여 나타난다.

음향학적으로 내부가 투명하고 췌기형태 구조는 암설류(debris flow)에 의해 집적된 퇴적체의 전형적인 특징이다(Embley 1976; Damuth and Embley 1981; Chough et al. 1985a). 음향학적 투명성은 내부에 층리가 발달됨이 없이 균질하게 퇴적물이 분포하고 있음을 반영하며, 이는 암설류가 움직이는 동안 전단 변형(shear deformation)과 주변 해수와의 혼합으로 인한 것으로 해석된다(Middleton and Hampton 1973; Embley and Jacobi 1977; Nardin et al. 1979). 소규모의 쌍곡선 및 다소 확산된 표층반사파는 암설류가 집적되는 동안 퇴적체의 표면에 발달한 다양한 퇴적구조임을 반영한다(Damuth 1980; Masson et al. 1993; Lee et al. 1999).

음향상 III-1

음향상 III-1은 규모와 높이(수 십 m에서 수 백 m)가 매우 다양한 여러 개의 쌍곡선 표면 반사파가 불규칙하게 중첩되어 있거나 큰 규모의 하나의 쌍곡선 표면반사파가

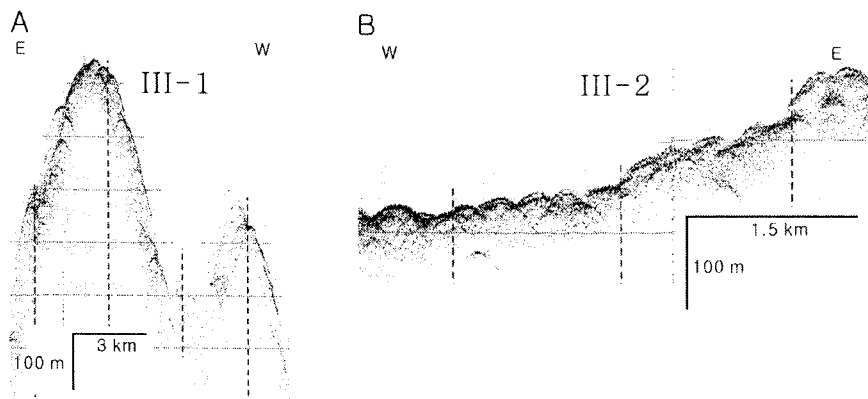


Fig. 4. High-frequency (3.5 kHz) subbottom profiles of Hyperbolic echoes (III). For location of profiles, see Fig. 1A. (A) Large-scale, single or irregular-overlapping hyperbolic surface echoes with highly varying vertex elevation (Echo type III-1). (B) Regular overlapping hyperbolae with slightly varying vertex elevation (Echo type III-2).

나타나는 특징을 보인다(Fig. 4A). 이 음향상은 매우 기복이 심한 지형을 보이는데, 표면 반사파는 매우 강하며 지층내 반사파는 나타나지 않는다. 큰 규모의 쌍곡선 반사파 사이 지역, 즉 지형이 낮은 지역에서는 작은 규모의 음향상 IV가 관찰된다. 음향상 III-1은 주로 남셰틀랜드 북부 대륙주변부의 상-중부 대륙사면과 남스코시아해에서 지형이 매우 높은 지역에 분포한다.

불규칙하게 중첩된 다양한 규모의 쌍곡선 표층반사파는 경사가 매우 급하고 기복이 매우 심한 해저지형에서 관찰된다(Damuth and Hayes 1977; Damuth 1978; Chough *et al.* 1997). 매우 강한 표면 반사파와 지형이 높은 지역에 분포하는 특징은 음향상 III-1이 해저표면에 드러나 있는 암반 기반암(rock basement)임을 암시한다(Pratson and Laine 1989; Lee *et al.* 2002; 윤 등 2002)

음향상 III-2

음향상 III-2는 규모가 작고 약간의 높이 차이(10-15 m 이내)를 보이는 여러 개의 쌍곡선 표면반사파가 비교적 규칙적으로 중첩되어 나타난다(Fig. 4B). 일반적으로 이 음향상은 횡적으로 음향상 II-3 및 IV와 접하여 나타난다. 음향상 III-2는 주로 남셰틀랜드 북부 대륙주변부의 중부 대륙사면에서 협곡이나 계곡과 같이 상대적으로 지형이 낮은 지역에 분포한다.

규모가 작고 약간의 높이 차이를 보이며 규칙적으로 중첩된 쌍곡선 표면반사파는 다수의 침식 또는 퇴적 기원의 해저표면 구조가 일정한 간격을 두고 인접하여 발달되어 있는 해저에서 특징적으로 기록된다(Damuth, 1978, 1980). 이와 같은 구조는 일반적으로 대륙사면, 대륙대 및 심해저 전상지에 발달하는 해저 사태(slump) 및 암설류(debris flow) 퇴적체로 해석된다(Embley and Jacobi 1977; Pratson and Laine 1989; Lee *et al.* 2002).

음향상 IV

음향상 IV는 규모가 다양한 블록, 쌍곡선 및 투명한 음향 형태의 퇴적체로 구성되어 있으며 상부 경사방향으로 함몰대(scar)나 함몰단에(scarp)와 접해있는 특징을 보인다(Fig. 5). 함몰단애의 높이는 약 30-130 m 정도이다. 함몰단애로부터 하부 경사방향으로 이동된 퇴적체들은 다양한 변형정도를 보이고 있다(Fig. 5). 이 음향상은 일반적으로 하부 경사방향에서 음향상 III-2나 II-3과 접하여 나타난다. 음향상 IV는 주로 남셰틀랜드 북부 대륙주변부의 상-중부 대륙사면에 분포한다.

상부 경사지역의 함몰대 및 함몰단애와 하부 경사방향으로 이동된 다양한 규모의 블록, 쌍곡선 및 투명한 음향 형태의 퇴적체의 특징은 음향상 IV가 해저 슬라이드 및 슬럼프에 의해 형성되었음을 지시한다(Embley and Jacobi

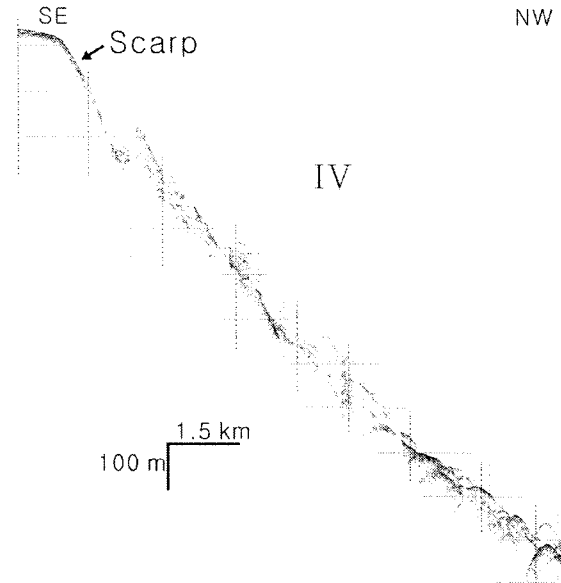


Fig. 5. 3.5-kHz subbottom profile of combined echoes (IV). For location of profile, see Fig. 1A. Irregular blocky, lumpy or hyperbolic masses bounded upslope by scarps or scars (Echo type IV).

1977; Chough *et al.* 1985b, 1997; Lee *et al.* 2002).

5. 토 의

남셰틀랜드 북부 대륙주변부 지역에서는 음향상 I-1, I-2, II-3, III-1, III-2 및 IV이 분포하고 있다. 획득된 자료가 주로 중부 대륙사면에서 얻어져서 대륙붕에서 해저분지 평원까지의 체계적인 음향상 분포를 파악하지 못하지만, 하부 대륙붕 및 상부 대륙사면(수심 300-800 m 구간)에서는 음향상 I-1(빙하 말단부 조립질 퇴적물)과 III-1(암반기 반암)이 나타난다. 남극반도 주변에서 얻어진 심부탄성파 단면의 층서분석 결과에 따르면 과거 빙하 최대 발달기 (Last Glacial Maximum: LGM) 동안 남극대륙의 빙상은 현재 해수면보다 700-1000 m 정도 낮은 곳까지 전진해 있었다(Banfield and Anderson 1995). 여러 가지 의견이 있지만 이 빙상은 약 15,000-11,000년 전에 후퇴하기 시작하여 현재는 남극대륙과 남셰틀랜드 군도의 육상과 연안역에 대부분 분포하고 있다(Pope and Anderson 1992; Pudsey *et al.* 1994; Yoon 1995). 따라서 음향상 I-1은 빙하기저부나 빙하 말단부에서 형성되었음을 짐작할 수 있다(e.g., 윤 등 2002). 중부 대륙사면에는 주로 음향상 IV (슬라이드/슬럼프), III-2(암설류 퇴적물) 및 II-3(암설류 퇴적물)이 분포하는데, 이는 빙하 퇴적작용에 의해 하부 대륙붕 및 상-중부 대륙사면에 집적된 퇴적물이 사면 불안정으로 인해 활발히 재동 되어 하부 대륙사면, 대륙대 및

심해 분지평원으로 퇴적물을 공급하였음을 지시한다(e.g., Chough *et al.* 1997; Lee *et al.* 2002; 윤 등 2002). 하지만 하부 대륙사면, 대륙대와 심해 분지평원지역에 자료가 거의 없기 때문에 중력작용에 의해 재동되어 형성된 퇴적물의 분포 범위를 정확하게 확인할 수는 없다. 남셰틀랜드 해구지역에는 음향상 I-2(저층류 퇴적물)가 분포하는데 이는 퇴적물 질량류(mass flows)와 저층류(bottom currents)의 상호작용이 대륙대 및 분지평원 지역에서 있었음을 암시한다. 이러한 특징은 대륙대와 심해 분지평원에서 퇴적물 질량류와 저층류가 상호 작용하여 형성된 큰 규모(수십-수백 km 길이, 수십 km 너비)의 언덕 형태 퇴적체가 넓게 분포하고 있는 본 연구지역 바로 남쪽에 해당되는 남극반도 서쪽 대륙주변부 연구결과(Rebesco *et al.* 1996; Pudsey 2000; Pudsey *et al.* 2002)와 연결시켜 볼 수 있다.

남셰틀랜드 북부 대륙주변부 지역과 달리, 남스코시아해 심해평원지역은 주로 저층류(bottom currents)에 의해 형성된 음향상 II-1과 II-2가 분포한다. 비록 남스코시아해령 지역에 자료가 없긴 하지만, 이 지역은 남셰틀랜드 북부 대륙주변부 지역에 비해 빙하 작용에 의한 퇴적물 집적과 중력에 의한 퇴적물 재동이 상대적으로 매우 적은 편이다(Pudsey and Howe 1998; Howe and Pudsey 1999). 따라서 남스코시아해 심해평원지역에는 적어도 마지막 빙하기부터 현재까지 저층류와 퇴적물 질량류와의 상호 작용보다는 서쪽으로 이동하는 남극심층수에 의해 주로 영향을 받았음을 알 수 있다.

남극심층수 흐름에 의해 형성된 저층류 퇴적물(bottom-current deposits)인 음향상 II-1과 II-2는 상호연관 되어 분포한다. 음향상 II-1은 주변보다 지형적으로 약 40-150 m 정도 높은 지역에 나타나는 반면, 음향상 II-2는 지형이 낮은 음향상 II-1의 주변에 분포한다(Fig. 3C). 또한 음향상 II-1과 II-2의 사이는 지형의 경사가 급하게 변하며, 이 경사면의 하부에는 5-15 m의 깊이의 호(moat)가 존재한다(Fig. 3C). 이러한 퇴적 특징은 지형에 따른 저층류의 유동력학적(hydrodynamic) 특성 변화로 설명될 수 있다. 일반적으로 저층류는 지형이 상대적으로 높은 지역에서는 유속이 커져 퇴적이 일어나지 않거나 비교적 조립질인 퇴적물이 퇴적되는데(Faugères *et al.* 1999; Howe and Pudsey 1999; Masson 2001), 이는 지층내 반사파를 동반하지 않는 다소 확산된 표면반사파를 갖는 음향상 II-1의 음향 특성 및 분포와 잘 일치한다. 또한 높은 지형에서 낮은 지형으로 변하는 급한 경사면에서는 저층류의 유속 세기가 집중되어 침식이 일어나 호(moat)가 형성된다(Faugères and Stow 1993; Faugères *et al.* 1999). 반면 지형이 상대적으로 낮은 지역에서는 저층류의 유속이 비교적 작기 때문에 퇴적이 되는데(Howe *et al.* 1998; Faugères *et al.* 1999), 이는 지층내 반사파를 동반하는 다소 확산된 표면반사파

를 갖는 음향상 II-2의 음향 특성과 분포를 잘 설명할 수 있다. 음향상 II-2에서 호(moat)로부터 멀어질수록 퇴적층의 두께와 음파투과 깊이가 커지는데(Fig. 3D), 이는 호(moat)로부터 유속이 작아지는 저층류의 유동학적 특성과 잘 일치한다(Faugères and Stow, 1993; Faugères *et al.* 1999).

일반적으로 세립질 퇴적물로 구성된 저층류 표적퇴적체(fine-grained bottom-current drift)에는 큰 규모의 파형형태(sediment waves) 퇴적구조가 잘 발달되어 있지만(Flood and Shor 1988; Howe *et al.* 1994; Howe 1996; Faugères *et al.* 1999; Wynn and Stow 2002), 음향상 II-2에는 파형형태가 부분적으로 나타날 뿐 광범위하게 발달되어 있지 않다. 남서대서양 아르헨티나 분지에는 저층류에 형성된 전형적인 파형 형태 퇴적체가 광범위하게 분포하고 있다(Flood and Shor 1988; Flood *et al.* 1993). Flood and Shor(1988)는 저층류의 속도가 가장 일정하고 소용돌이(eddy)가 약한 분지의 중앙부에서 파형형태 퇴적구조가 가장 발달되어 있고, 저층류의 속도가 일정하지 않고 소용돌이가 강한 분지의 서쪽 주변부로 갈수록 파형형태 퇴적구조가 발달이 미비해진다고 보고하였다. 비록 연구지역에서 직접적인 관측을 통해 남극심층수의 물리학적 특성을 파악하지 못했지만, 음향상 II-2에서 파형형태 퇴적구조가 잘 나타나지 않은 이유로 이 지역에서 남극심층수의 흐름이 일정하지 않는 특성과 관련시켜 생각해 볼 수 있다.

6. 결 론

남극 남셰틀랜드 북부 대륙주변부와 남스코시아해 지역에서 분류된 8개의 음향상은 암반기반암(음향상 III-1), 빙하 발달부 조립질 퇴적물(음향상 I-1), 해저 슬라이드 및 슬럼프(음향상 IV), 암설류 퇴적물(음향상 II-3 및 III-2), 저층류 퇴적물(음향상 I-2, II-1 및 II-2)을 반영한다. 남셰틀랜드 북부 대륙주변부의 하부 대륙붕 및 상부 대륙사면에는 빙하 발달부 조립질 퇴적물(음향상 I-1)과 중, 하부 대륙사면에는 슬라이드/슬럼프(음향상 IV), 암설류 퇴적물(음향상 II-3 및 III-2)이 주로 분포하는데, 이는 이 지역에서 빙하기에 집적된 많은 양의 퇴적물이 사면 불안정성으로 인해 하부 경사방향으로 활발하게 재동 되었음을 지시한다. 남셰틀랜드 북부 대륙주변부를 따라 남서쪽으로 흐르는 남극심층수에 의해 남셰틀랜드 해구지역에 저층류 퇴적물(음향상 I-2)이 형성되었는데 이는 남셰틀랜드 북부 대륙주변부의 하부 대륙사면과 대륙대에서 중력류와 저층류가 상호작용하고 있음을 암시한다. 이와 다르게 남스코시아해 심해평원지역은 주로 저층류 퇴적물(음향상 II-1 및 II-2)이 분포하며, 중력류에 의해 재동된 퇴적물의 영향

이 미비하고 남스코시아해를 따라 서쪽으로 흐르는 남극 심층수에 의한 퇴적 작용이 우세하였다. 남극심층수의 흐름은 지형과 상호작용하여 상대적으로 지형이 높은 지역에서는 비교적 흐름 세기가 강해져 두께가 얇은 조립질 저층류 퇴적물(음향상 II-1)을 형성시켰으며, 반면 지형이 낮은 지역에서는 흐름 세기가 상대적으로 약하기 때문에 두께가 두꺼운 세립질 저층류 퇴적물(음향상 II-2)을 형성시켰다. 높은 지형에서 낮은 지형으로 경사가 급격하게 변하는 지역에서는 흐름 세기가 집중되어 작은 규모의 호(moat)가 형성되었다. 세립질 저층류 퇴적물(음향상 II-2)에서는 과형형태가 잘 발달되어 있지 않고 부분적으로 나타나는데 이는 이 지역에서 남극심층수의 흐름이 일정하지 않았음을 시사한다.

사 사

이 연구는 대한민국 남극연구 프로그램의 일환으로 수행된 '남극 지구조진화 및 지질 환경특성 연구(PP03103)' 과 '남극해저지질조사사업(PM21600)'의 지원을 받아 수행되었으며, 부분적으로 첫 번째 저자는 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원을 받아 이 연구를 수행하였습니다. 쉽고 험한 남극현장탐사에 참여하신 모든 연구원들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 윤석훈, 윤희일, J. Howe. 2002. 남극 브랜스필드 해협 해저 퇴적층의 고해상 탄성파상 분석. *지질학회지*, 38, 537-550.
- Banfield, L.A. and J.B. Anderson. 1995. Seismic facies investigation of the late Quaternary glacial history of Bransfield Basin, Antarctica. *Antarctic Res. Series*, 68, 123-140.
- Camerlenghi, A., A. Crise, C.J. Pudsey, E. Accerboni, R. Laterza, and M. Rebesco. 1997. Ten-month observation of the bottom current regime across a sediment drift of the Pacific margin of the Antarctic Peninsula. *Antarct. Sci.*, 9, 426-433.
- Carter, L. and I.N. McCave. 1994. Development of sediment drifts approaching an active plate margin under the SW Pacific Deep Western Boundary Undercurrent. *Paleoceanography*, 9, 1061-1085.
- Chough, S.K., K.S. Jeong, and E. Honza. 1985a. Zoned facies of mass-flow deposits in the Ulleung (Tsushima) basin, East Sea (Sea of Japan). *Mar. Geol.*, 65, 113-125.
- Chough, S.K., D.C. Mosher, and S.P. Srivastava. 1985b. Ocean Drilling Program (ODP) site survey (Hudson 84-30) in the Labrador Sea: 3.5 kHz profiles. Geological Survey of Canada, Paper, 85-1B, 33-41.
- Chough, S.K., S.H. Lee, J.W. Kim, S.C. Park, D.G. Yoo, H.S. Han, S.H. Yoon, S.B. Oh, Y.B. Kim, and G.G. Back. 1997. Chirp (2-7 kHz) echo characters in the Ulleung Basin. *Geosciences J.*, 1, 143-153.
- Damuth, J.E. 1975. Echo character of the western Equatorial Atlantic floor and its relationship to dispersal and distribution of terrigenous sediments. *Mar. Geol.*, 18, 17-45.
- Damuth, J.E. 1978. Echo character of the Norwegian-Greenland Sea: relationship to Quaternary sedimentation. *Mar. Geol.*, 28, 1-36.
- Damuth, J.E. 1980. Use of high-frequency (3.5-12 kHz) echograms in the study of near-bottom sedimentation processes in the deep-sea: a review. *Mar. Geol.*, 38, 51-75.
- Damuth, J.E. and R.W. Embley. 1981. Mass-transport processes on Amazon Cone: western equatorial Atlantic. *AAPG Bull.*, 65, 629-643.
- Damuth, J.E. and D.E. Hayes. 1977. Echo character of the east Brazilian continental margin and its relationship to sedimentary processes. *Mar. Geol.*, 24, 73-95.
- Domack, E.W. and S. Ishman. 1993. Oceanographic and physiographic controls on modern sedimentation within Antarctic fjords. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 105, 1175-1189.
- Embley, R.W. 1976. New evidence for occurrence of debris flow deposits in the deep sea. *Geology*, 4, 371-374.
- Embley, R.W. and R.D. Jacobi. 1977. Distribution and morphology of large submarine sediment slides and slumps on Atlantic continental margins. *Mar. Geotechnol.*, 2, 205-228.
- Faugères, J.C. and D.A.W. Stow. 1993. Bottom-current-controlled sedimentation: a synthesis of the contourite problem. *Sed. Geol.*, 82, 287-297.
- Faugères, J.C., D.A.W. Stow, P. Imbert, and A. Viana. 1999. Seismic features diagnostic of contourite drifts. *Mar. Geol.*, 162, 1-38.
- Flood, R.D. and A.N. Shor. 1988. Mud waves in the Argentine Basin and their relationship to regional bottom circulation patterns. *Deep-Sea Res.*, 35, 943-971.
- Flood, R.D., A.N. Shor, and P.L. Manley. 1993. Morphology of abyssal mudwaves at Project MUDWAVES sites in the Argentine Basin. *Deep-Sea Res.*, 40, 859-888.
- Gonzalez-Casado, J.M., J.L. Giner-Robies, and J. Lopez-Martinez. 2000. Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: Not a normal backarc basin. *Geology*, 28, 1043-1046.
- Grose, T.J., J.A. Johnson, and G.R. Bigg. 1995. A comparison between the FRAM (Fine Resolution Antarctic Model) results and observations in the Drake Passage. *Deep-Sea Res.*, 42, 365-388.

- Howe, J.A. 1996. Turbidite and contourite sediment waves in the northern Rockall Trough, North Atlantic Ocean. *Sedimentology*, 43, 219-234.
- Howe, J.A. and C.J. Pudsey. 1999. Antarctic circumpolar deep water: a Quaternary paleoflow record from the northern Scotia Sea, south Atlantic Ocean. *J. Sediment. Res.*, 69, 847-861.
- Howe, J.A., R.A. Livermore, and A. Maldonado. 1998. Mudwave activity and current-controlled sedimentation in Powell Basin, northern Weddell Sea, *Antarctica. Mar. Geol.*, 149, 229-241.
- Howe, J.A., M.S. Stoker, and D.A.V. Stow. 1994. A Late Cenozoic sediment drift complex, northeast Rockall Trough, North Atlantic. *Paleoceanography*, 9, 989-999.
- Jin, Y.K., Y. Kim, H.S. Kim, and S.H. Nam. 1996. Preliminary results of seismic survey in the central Bransfield Strait, Antarctic Peninsula. *Proc. NIPR Symp. Antract. Geosci.*, 9, 141-149.
- Jin, Y.K., Y. Kim, S.H. Nam, and K.J. Kim. 2000. Morpho tectonic variation of the Shackleton Fracture Zone around the Antarctic-Scotica plate boundary off the northern Antarctic Peninsula. *Korean J. Geophys.*, 3, 210-218.
- 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.
- Klepics, 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.
- Lee, S.H., S.K. Chough, G.G. Back, Y.B. Kim, and B.S. Sung. 1999. Gradual downslope change in high-resolution acoustic characters and geometry of large-scale submarine debris lobes in Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan), *Korea. Geo-Mar. Lett.*, 19, 254-261.
- Lee, S.H., S.K. Chough, G.G. Back, and Y.B. Kim. 2002. Chirp (2-7 kHz) echo characters of the South Korea Plateau: styles of mass movement and sediment gravity flow. *Mar. Geol.*, 184, 227-247.
- Masson, D.G. 2001. Sedimentary processes shaping the eastern slope of the Faeroe-Shetland Channel. *Cont. Shelf Res.*, 21, 825-857.
- Masson, D.G., Q.J. Huggett, and D. Brunnsden. 1993. The surface texture of the Saharan Debris flow deposit and some speculations on submarine debris flow processes. *Sedimentology*, 40, 583-598.
- Middleton, G.V. and M.A. Hampton. 1973. Mechanics of flow and deposition. p. 1-38. In: *Turbidites and Deep Water Sedimentation*. ed. by A.H. Bouma. SEPM, Pacific Section. Short Course.
- Nardin, T.R., F.J. Hein, D.S. Gorsline, and B.D. Edwards. 1979. A review of mass movement processes, sediment and acoustic characteristics in slope and base-of-slope systems versus canyon-fan-basinfloor systems. p. 61-73. In: *Geology of Continental Slopes*. ed. by L.J. Doyle and O.H. Pilkey. SEPM Spec. Publ., 27.
- Nowlin, W.D. and W. Zenk. 1988. Westward bottom currents along the margin of the South Shetland Island Arc. *Deep-Sea Res.*, 35, 269-301.
- Orsi, A.H., T. Whitworth III, and W.D. Nowlin. 1995. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-Sea Res.*, 42, 641-673.
- Palayo, A.M. and D.A. Wiens. 1989. Seismotectonics and relative plate motion in the Scotia Sea region. *J. Geophys. Res.*, 94, 7293-7320.
- Pope, P.G. and J.B. Anderson. 1992. Late Quaternary glacial history of the northern Antarctic Peninsula's western continental shelf: evidence from the marine record. *Antarctic Research Series*, 57, 63-91.
- Pratson, L.F. and E.P. Laine. 1989. The relative importance of gravity-induced versus current-controlled sedimentation during the Quaternary along the mid-east United-States outer continental-margin revealed by 3.5 KHz echo character. *Mar. Geol.*, 89, 87-126.
- Pudsey, C.J. 2000. Sedimentation on the continental rise west of the Antarctic Peninsula over the last three glacial cycles. *Mar. Geol.*, 167, 313-338.
- Pudsey, C.J. and J.A. Howe. 1998. Quaternary history of the Antarctic Circumpolar Current: evidence from the Scotia Sea. *Mar. Geol.*, 148, 83-112.
- Pudsey, C.J., P.F. Barker, and R.D. Larter. 1994. Ice sheet retreat from the Antarctic Peninsula shelf. *Cont. Shelf Res.*, 14, 1647-1675.
- Pudsey, C.J., J.A. Howe, P. Morris, and D.E. Gunn. 2002. Processes on sediment drifts from 3.5 kHz data, Antarctic Peninsula continental rise. *Royal Soc. New Zealand Bull.*, 35, 345-350.
- Rebesco, M., R.D. Larter, A. Camelenghi, and P.F. Barker. 1996. Giant sediment drifts on the continental rise west of the Antarctic Peninsula. *Geo-Mar. Lett.*, 16, 65-75.
- Reed, D.L., A.W. Meyer, E.A. Silver, and H. Prasetyo. 1987. Contourite sedimentation in an intraoceanic forearc system: eastern Sunda Arc, Indonesia. *Mar. Geol.*, 76, 223-242.
- Shevenell, A.E., E.W. Domack, and G.M. Kernan. 1996. Record of Holocene palaeoclimate changes along the

- Antarctic Peninsula: evidence from glacial marine sediments, Lallemand Fjord. p. 55-64. In: *Climate Succession and Glacial History over the Past Five Million Years*. ed. by M.R. Banks and M.J. Brown. Roy. Soc. Tasmania, 130.
- Sievers, H.A. and W.D. Nowlin. 1984. The stratification and water masses in Drake Passage. *J. Geophys. Res.*, 83, 3010-3022.
- Wynn, R.B. and D.A.W. Stow. 2002. Classification and characterisation of deep-water sediment waves. *Mar. Geol.*, 192, 7-22.
- Yoon, H.I. 1995. Glaciomarine Sedimentation Patterns of Bransfield Strait and Adjoining Fjords in South Shetland Islands, Antarctica: Implications for Late Quaternary Glacial History. Ph.D. thesis, Inha University, Incheon, Korea, 273 p.
- Yoon, H.I., B.K. Park, Y. Kim, and D. Kim. 2000. Glaciomarine sedimentation and its paleoceanographic implications along the fjord margins in the South Shetland Islands, Antarctic during the last 6000 years. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoceanogr.*, 157, 189- 211.
- Zaragosi, S., G.A. Auffret, J.C. Faugères, T. Garlan, C. Pujol, and E. Cortijo. 2000. Physiography and recent sediment distribution of the Celtic Deep-sea Fan, Bay of Biscay. *Mar. Geol.*, 169, 207-237.

Received Nov. 6, 2003

Accepted Dec. 5, 2003