

남극 킹조지섬 마리안 소만의 하계 수층 특성과 부유물질 분산

유규철 · 윤호일¹ · 오재경 · 김예동¹ · 강천윤¹
인하대학교 해양학과, ¹한국해양연구소 극지연구센터

Water Column Properties and Dispersal Pattern of Suspended Particulate Matter (SPM) of Marian Cove during Austral Summer, King George Island, West Antarctica

KYU-CHEUL YOO, HO IL YOON¹, JAE-KYUNG OH, YEADONG KIM¹
AND CHEON YUN KANG¹

Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea
¹Polar Research Center, Korea Ocean Research & Development Institute,
Ansan PO Box 29, Seoul 425-600, Korea

아남극권 피오르드의 하계 수층 특성과 부유물질 분산 형태를 이해하기 위해 남극 킹조지 섬 마리안 소만의 조수빙하 앞에서 1998년 1월 21일에서 22일까지 약 24시간동안 CTD(Conductivity/Temperature/Depth/Transmissivity) 연속관측을 실시하였다. 관측된 연직 수온, 염분 및 투광도 분포 특성을 보면, 마리안 소만에서 특징적인 세 개의 수층이 보인다. 1) 수심 2 m 이내에 존재하는 저온, 저염의 혼탁한 표층 플룸, 2) 수심 15~35 m 사이에 존재하는 고온, 저탁도의 맥스웰 만 표층수, 그리고 3) 저온, 저염, 고탁도의 중층 플룸(수심 40~65 m)으로 구분된다. 주변수에 비해 저온, 고탁도의 표층과 중층 플룸은 육성기원 쇄설성 입자로 구성되어 부유입자의 기원은 각각 용설수류와 빙하기저부 유출수이다. 기온 상승과 강우량 증가에 따라 발달하는 용설수류는 연안 해변으로부터 소만으로 유입되어 혼탁한 표층 플룸을 형성하며 조수빙하 기저에서 나오는 빙하기저부 유출수는 중층 플룸을 만든다. 마리안 소만 수층구조의 시간적인 변화는 주로 조석주기 및 풍향·풍속과 밀접한 관련을 보인다. 즉 관측기간 후반부에 맥스웰 만 해수의 유입과 마리안 소만 부유물질의 분산은 조석 순환과 관련을 보이나, 관측 전반부에 표층에서 나타나는 탁도 감소와 염분 증가 그리고 맥스웰 만 유입수 및 중층 플룸의 약화는 관측 전날 지속된 바람의 영향이 크다. 관측 전날에 지속된 강한 동풍(평균 풍속 8 m sec^{-1} 이상)이 마리안 소만 표층수를 만 밖(서쪽)으로 내보내고 이로 인해 조수빙하 앞에서 중층수의 용승이 관측 초기의 표층과 중층 플룸의 발달을 저해하는 것으로 생각된다. 결과적으로 아남극권 피오르드 환경의 빙하 용설수 및 부유입자를 포함한 혼탁한 플룸의 분산은 조석에 의해 조절되는 것이 일반적인 현상이지만, 바람과 같은 외부력이 클 경우 수직적인 수층 교환에 의해 플룸의 분산 기작이 달라질 수 있음을 고려해야 한다.

Vertical CTD measurement at one point near tidewater glacier of fjord-head in Marian Cove, a tributary embayment of Maxwell Bay, South Shetland Islands was performed for 24 hours during the austral summer (January 21–22, 1998) to present water-column properties and SPM (suspended particulate matter) dispersal pattern in subpolar glaciomarine setting. Marian Cove shows three distinct water layers: 1) cold, freshened, and highly turbid surface plume in the upper 2 m, 2) warm, saline, and relatively clean Maxwell Bay water between 15–35 m in water depth, and 3) cold and turbid mid plume between 40–65 m in water depth. The surface plume is composed of silt-sized clastic particles mixed with flocculated biogenic detritus, and appears to originate from either supraglacial discharge by meltwater streams along the coast or water fall of ice cliff. Freshened and turbid mid plume consists exclusively of silt-sized clastic particles, resulting from subglacial discharge beneath the tidewater glacier. The disappearance of the two turbid plumes during the earlier period of measurement seems to be largely due to the breakup of the plumes by upwelling caused by strong easterly wind ($> 8 \text{ m s}^{-1}$). Thus, wind coupling over tidal effects regionally plays a major role in dispersal pattern of SPM as well as water exchange in Marian Cove.

서 론

하계(12월-2월)동안 남극 조수빙하환경(tidewater glacier setting)에서 연안을 따라 발달하는 용설수류(meltwater stream)는 다량의 쇄설성 입자 운반에 중요한 역할을 할 뿐만 아니라, 그 규모나 형태는 기온 변화에 따라 크게 변한다(Griffith and Anderson, 1989; Domack and Williams, 1990; Domack and Ishman, 1993). 용설수류에 의해 운반되는 퇴적물과 해양의 표층수에서 생성된 유기물질과 같은 부유물질의 분산은 빙해양(glaciomarine) 퇴적환경의 특성을 결정할 뿐만 아니라 해양 오염물질의 잠재적인 영향을 평가하는데 도움을 줄 수 있다(Domack and Williams, 1990; Syvitski *et al.*, 1996). 결국 남극 피오르드(fjord) 환경에서 용설수의 이동과 분산 과정에 대한 이해는 지구환경 변화는 물론 상수기지 주변의 오염물질 유출을 모니터링 하는데 매우 중요하다. 그러나 부유물질의 분산은 해저지형, 빙하형태, 조석, 파랑, 기상조건 등과 같은 수리적인 요소와 생화학적 영향에 따라 변할 수 있을 뿐만 아니라 시공간에 따라서 그 형태를 달리하기 때문에 정확히 이해하기 어렵다.

서부 남극반도에 발달한 피오르드의 수층 관찰로부터 Domack and Williams(1990)는 저온, 고탁도의 표층 플룸(surface plume)과 중층의 저온층(cold tongue)의 존재를 확인하였고 이 저온층에 대한 확산 기작을 설명하였다. 마리안 소만(Marian Cove)이 위치하고 있는 남셰틀랜드 군도는 남극반도로부터 북쪽으로 약 100 km 정도 떨어진 위치에 있으며, 남서쪽의 벨링스하우젠 해(Bellingshausen Sea)에서 불어오는 온난, 습윤한 저기압의 영향을 주기적으로 받으며, 아남극(subpolar) 기후의 영향권에 속한다(Reynold, 1981). 소만 지역의 하계 평균 기온은 2°C 이상이며, 평균 습도는 89% 이상을 보여 고위도에 위치한 남극 반도 지역에 비해 온화한 기후 특성을 보인다. 이러한 기후조건은 소만 주변 육상에 발달한 설선(snow line)을 더욱 높은 곳으로 이동시키며, 이로 인해 여름철에 부유물질을 함유한 다량의 용설수가 소만으로 유입된다(Yoon *et al.*, 1997). 특히 평균 대기온도가 최고가 되는 1월에는 다량의 유빙(drifting iceberg)과 용설수가 만안쪽에 발달한 조수빙하를 통해 바다로 유입되며 연안에는 소규모 빙하성 산상지(outwash fan)를 형성하는 용설수류가 광범위하게 발달한다(Yoon *et al.*, 1997). 이러한 사실은 마리안 소만이 특징적인 수층 구조를 보여주는 충분 조건을 지니고 있으며 고위도에 위치한 남극반도의 피오르드와는 상이한 부유물질의 분산 형태를 보여줄 것으로 생각된다. 이 연구의 목적은 아남극권에 발달한 조수빙하 지역인 마리안 소만에서 시간에 따른 수층의 변화와 부유물질의 연직 분포를 기술하고, 부유물질의 분산기작을 이해하는데 있다.

연구 지역 개관

마리안 소만은 서남극 남셰틀랜드 군도(South Shetland Islands)에서 가장 큰 킹조지 섬(King George Island)의 북서쪽에 위치하는 길이 3.5 km, 폭 1.2 km의 소규모 만으로서 북서쪽은 웨버 반도(Weaver Peninsula)에 의해, 남동쪽으로 바톤 반도(Barton Peninsula)에 의해 둘러 쌓여있다(62°13'15"S,

58°45'10"W; Fig. 1). 최대수심은 약 130 m로 조수빙하 앞이며, 중앙분지는 약 100 m이다. 소만의 북부연안은 완만한 수심 경사를 가지는 반면 남부는 급격한 경사를 갖는다. 소만 입구의 해저 실(submarine sill)은 지형적으로 소만과 맥스웰 만을 분리하지만, 실의 수심이 매우 깊어(약 40 m) 맥스웰 만 표층수가 마리안 소만으로 자유롭게 유입된다(Mullins and Priddle, 1987). 만 안쪽은 해수면에서 약 20 m 높이의 조수빙하가 발달해 있으며, 북부 및 남부 연안은 자갈 해변이 넓게 발달하고 연안을 따라 육상 빙하에서 기원하는 용설수류가 하계동안 발달한다.

맥스웰 만 및 주변 소만들의 표층수는 겨울(보통 7월말에서 9월 중순까지)에 결빙되며 마리안 소만에서 최대 얼음 두께는 8월말에 60 cm를 보인다. 일반적으로 여름은 12월초에 시작되며 이때 빙하의 녹는 현상이 활발하고 다량의 유빙이 소만으로 유입되며, 맥스웰 만으로 담수 공급이 크게 증가한다. 유빙 확산으로 인한 부유물질 공급은 남극의 빙하가 매우 깨끗하기 때문에 그 영향이 크지 않은 것으로 알려져 있다(Syvitski *et al.*, 1996). 맥스웰 만 표층의 염분 분포를 보면 맥스웰 만 북동부에서 염분 최소값이 관찰되는데, 이것은 담수유입이 주로 콜린스 만(Collins Bay)과 마리안 소만에서 발생한다는 것을 의미한다(Yoon *et al.*, 1998). 반면에 마리안 소만 입구의 해저 실을 넘어 교환되는 맥스웰 만 해수는 소만 내 조석의 높이와 조석 주기를 결정하며, 소만의 연직 수층특성에 커다란 영향을 미친다. 조석은 독특한 부등성을 지닌 혼합된 형태의 반일주조이며, 최대 대조차는 2.8 m(평균 대조차: 1.5 m)이다(Yoon *et al.*, 1998). 조사기간동안 평균조차는 약 70 cm로 평상시에 비해 낮았다. 연중 총 강우량의 대부분이 여름에 집중하지만 겨울에도 강우가 간헐적으로 발생한다.

CTDT 관측과 SPM 측정

1998년 1월 21일에서 22일 사이에 마리안 소만 조수빙하 빙벽 앞(수심 100 m) 약 50 m 떨어진 지점에서 1시간 간격으로 24시간 동안 CTDT 연속관측을 수행하였다(Fig. 1). 염분, 수온, 수심을 측정하기 위해 SEABIRD 모델 SBE 911(24 Hz sampling rate)를 이용하였고 상대적인 부유물질농도를 측정하기 위해 SEATECH 투광측정계(660 nm 파장과 25 cm beam path length)와 로젯채수기(Rosette water sampling system)가 사용되었다. 660 nm에서 투광측정계의 출력값은 0~5 V의 전압값이며 이것은 0~100% 투과도에 해당하기 때문에(Bishop, 1986), 전압값이 작을수록 고탁도를 의미한다. 0.3 m sec⁻¹로 CTDT를 투하하여 얻어진 자료는 염분, 수온, 수심 및 투광도의 결과 곡선을 매끄럽게 하기 위해 수심 1 m 간격으로 자료를 평균하였다. 자료는 수온에서 ±0.0001°C, 염분에서 ±0.0001‰로 보정되어 얻어졌다.

소만의 부유물질농도를 알기 위해 관측 후반부인 22일 13시경 관측지점에서 CTDT를 위로 올리면서 채수(수심 0, 10, 45, 55, 60, 80 m)하였다. 기온, 풍속 및 풍향은 세종기지의 기상 관측소에서 측정되며, 이에 관한 관측값들은 10분 간격의 평균값이다.

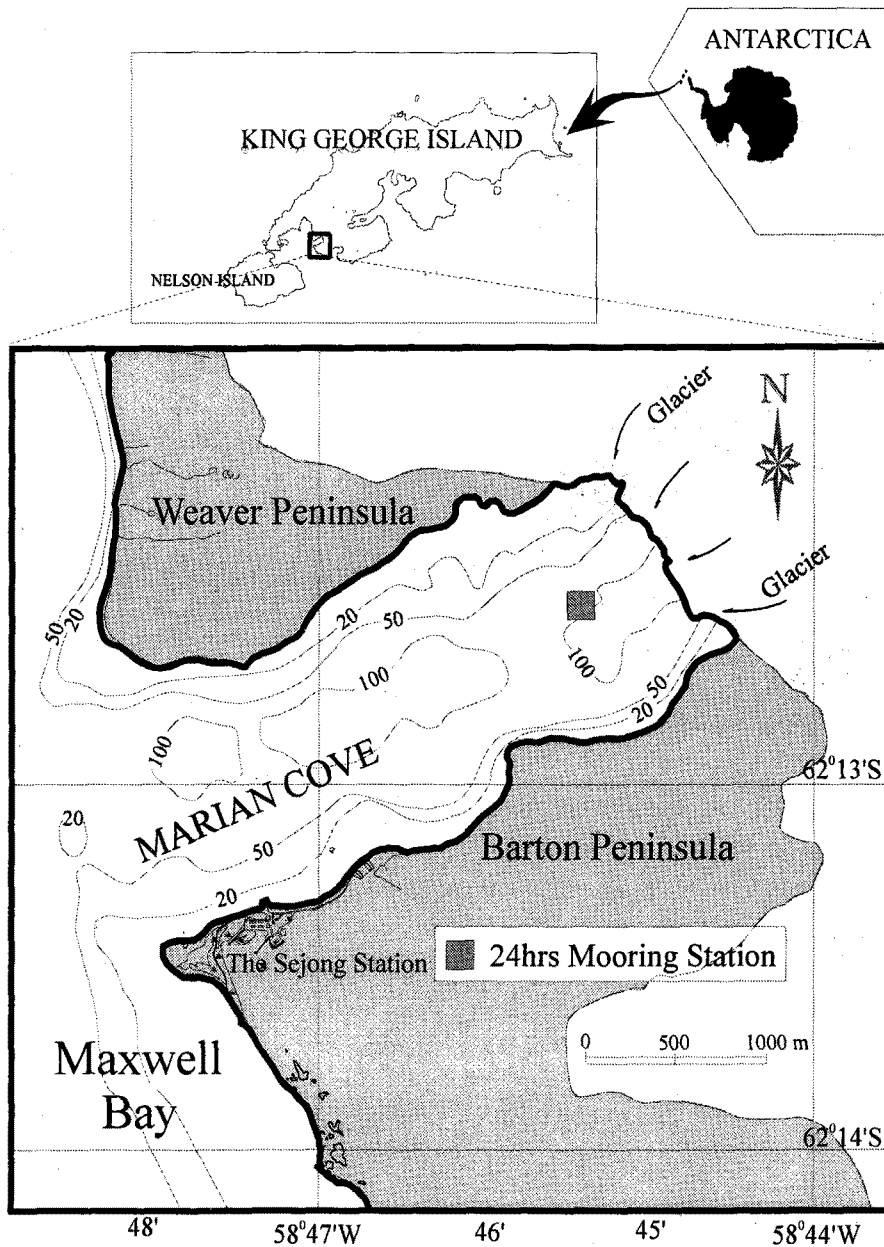


Fig. 1. Study area and position of CTDT casts (rectangle shape) occupied during January 21-22, 1998 near the front of tidewater glacier in Marian Cove.

결 과

CTDT 관측 결과와 부유물질농도

수온, 염분 및 투광도에 대한 연직 단면도의 연속관측 결과, 대체로 수온과 염분의 변화는 작지만(0.60~0.85 °C; 33.60~34.11‰), 투광도의 변화는 큰 편이다(1.5~4.3 V). 그 결과로부터 크게 세 개의 수층으로 나눌 수 있었다(Fig. 2). 첫째는 표층 2 m 이내에 존재하는 저온, 저염, 고탁도의 수층(<0.6 °C; <33.55‰; <1.6 V)이고 둘째는 수심 15~35 m 사이에 존재하는 고온, 고염, 저탁도의 수층(>0.8 °C; 33.95~34.06 ‰; 3.8~4.2 V)이며 셋째는 수심 37~67 m 사이에 존재하는 저온, 저염, 고탁도의 수층(0.6~0.7 °C; 34.03~34.04 ‰; 3.7~4.1 V)이다.

표층 2 m 이내에 존재하는 수층의 저온 현상(<0.6 °C)은 조사

기간동안 마리안 소만 지역의 평균 기온이 약 1 °C 이상이었기 때문에 대기의 대류에 의한 냉각으로 설명되지 않으며, 저염, 고탁도의 수층 특성으로부터 이 수층이 담수성 플룸으로 생각된다. 실제로는 수심 1 m 간격으로 평균하여 계산된 관측값과 표층 수온과 염분의 작은 연직 변화 때문에 표층 플룸을 뚜렷하게 볼 수는 없다. 그렇지만 관측 후반부(1월 22일 10:00) 표층 5 m 내에서 보여주는 저염의 등염분선(isohaline)과 낮은 전압값(투광도)의 밀집현상(packing)은 뚜렷한 표층 플룸을 잘 보여준다(Fig. 2c; Fig. 2d). 이러한 표층 플룸의 부유입자는 밀도 성층에 의해 입자의 침전이 지연되기 때문에 멀리 운반되는 것으로 알려져 있다(Yu and Lee, 1993; Yu et al., 1994). 관측 초기에 나타나지 않다가 후기(1월 21일 18시 이후)부터 보이기 시작한 수심 15~35 m 사이의 수층은 특이하게 연직 수온 분포에서 수온 최

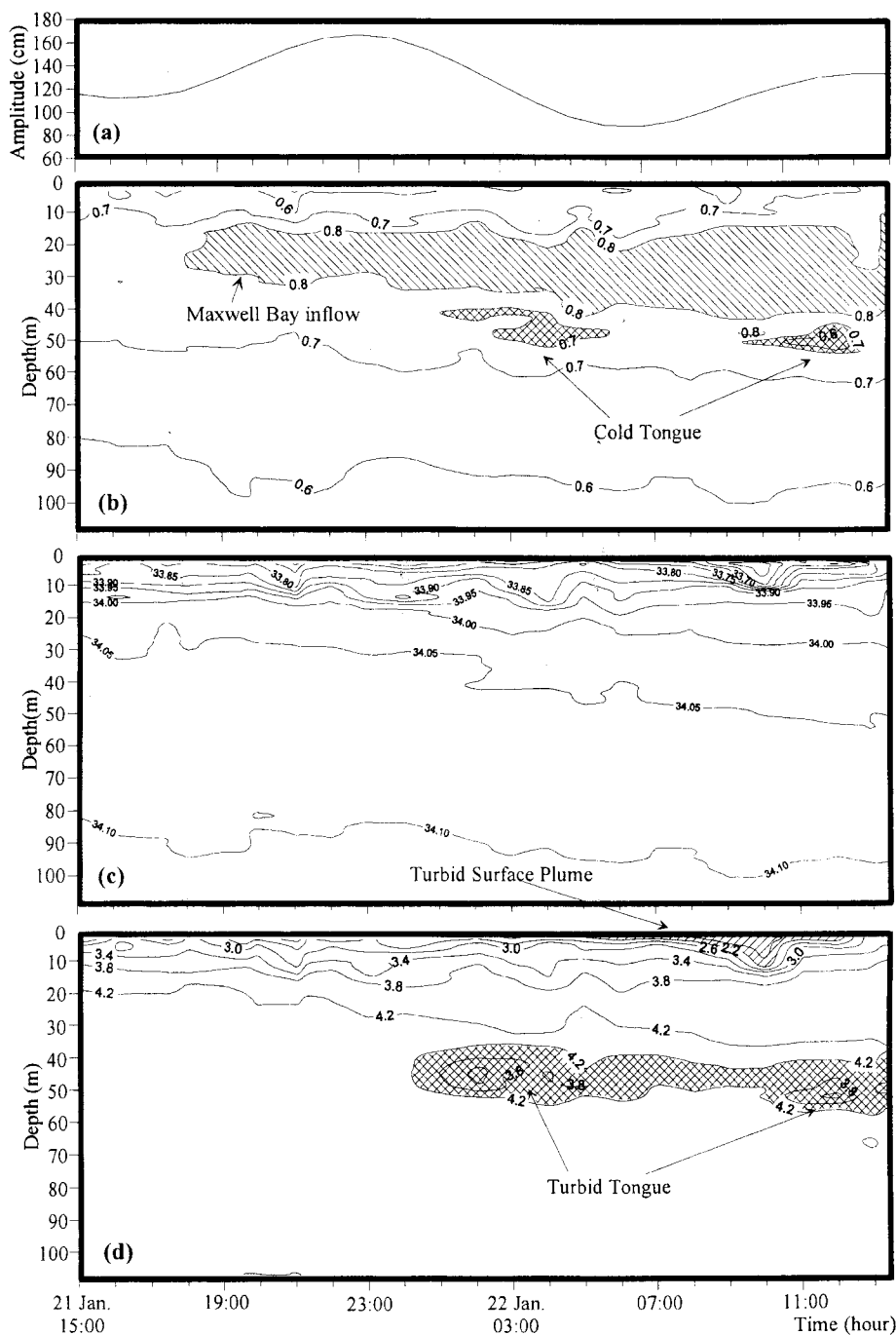


Fig. 2. Hydrographical profiles of CTD measurements; (a) tidal amplitude (cm), (b) temperature ($^{\circ}\text{C}$), (c) salinity (‰), and (d) transmissivity (V).

대값(0.8°C 이상)을 보인다. 이 수온 최대층(temperature maximum layer)은 위에서 지적된 두 수층에 비해 고온, 저탁도($3.8 \sim 4.2$ V)의 특성을 갖는다. 결국 이 수층은 마리안 소만의 내부 기원이 아닌 외부 기원의 맥스웰 만 유입수입을 알 수 있다(Fig. 2b). 그리고 연행(entrainment)과 바람에 의한 난류성 확산(turbulent diffusion)으로 발생하는 표층 플룸과 맥스웰 만 유입수의 혼합은 표층의 염분 변화에 영향을 줄 것으로 생각된다. 측정 시작 후 약 9시간만에 중층에 나타나는 저온, 고탁도의 수층은 1월 22일 01시경에 수심 45 m 부근에서 갑자기 출현한 뒤 점차로 약해지지만, 측정 후반부(1월 22일 약 10:00)에서는 수심 50 m 부근에서 다시 뚜렷한 플룸을 형성한다(Fig. 2d). 이 수층

은 연직 단면도에서 주변수보다 $0.02 \sim 0.27^{\circ}\text{C}$ 정도 차고 $0.001 \sim 0.01 \text{‰}$ 정도 저염인 두께 7~20 m의 혀모양(tongue)을 띠는 것이 특징이며, 이러한 형태는 주로 수심 37~67 m 사이에서 발견된다.

22일 13시경에 만 안쪽(조수병하 부근)에서 획득한 해수시료의 부유물질농도는 $2.66 \sim 5.06 \text{ mg l}^{-1}$ 의 범위로, 표층에서 최대 농도를 보인다(Fig. 3). 중층 50~57 m 사이에 나타나는 주변수에 비해 저온·고탁도의 수층은 혼탁한 중층 플룸의 존재를 확실하게 보여준다. 단지 중층 탁도의 연직 기울기와 이 수층 주변에서 채수되어 측정된 농도값의 경향이 잘 일치되지 않는데, 이는 저층에서 CTD를 올리면서 채수할 때 그 전에 내려가면서 일

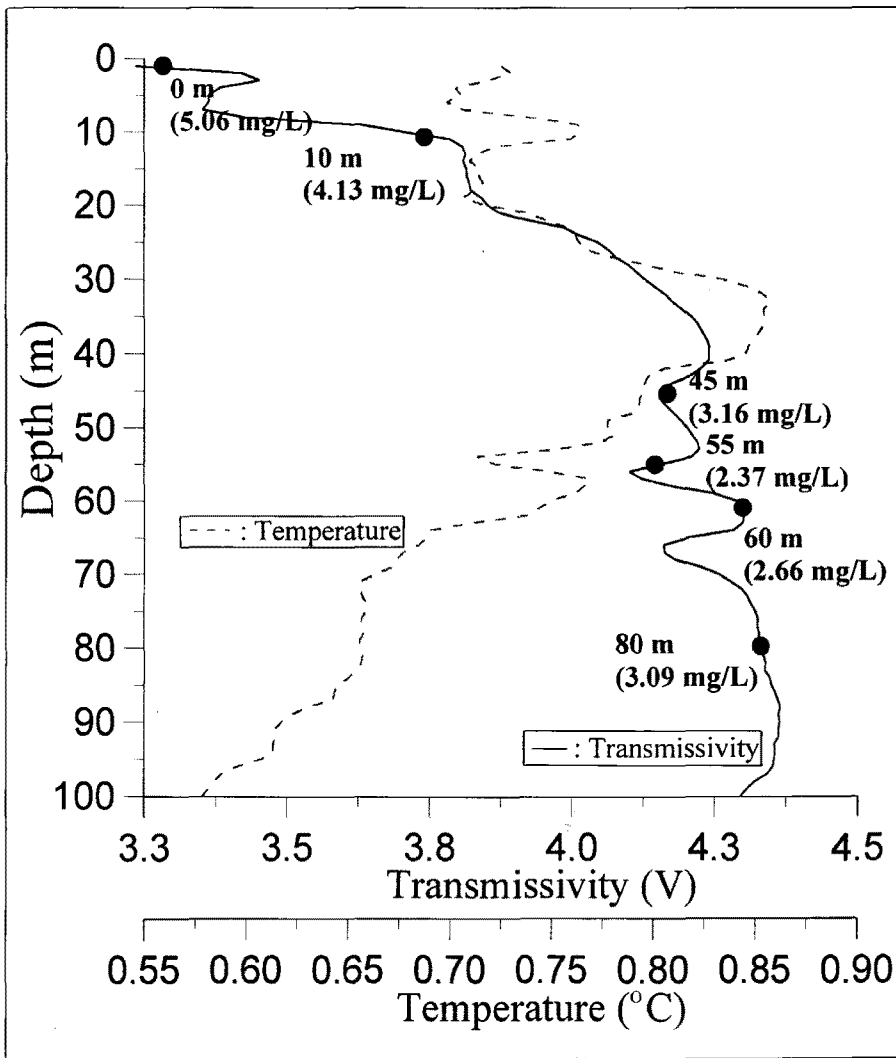


Fig. 3. The vertical profiles of transmissivity and temperature and SPM concentrations according to the depth points (0, 10, 45, 55, 60, and 80 m) at 13:00, 22 Jan. Note that the dashed line is temperature curve and the solid line transmissivity curve.

오킨 외동영향과 물리적인 요소(입자의 침강속도에 의한 분급 효과와 수온에 의해 영향받는 점성도)가 포함되어 나타난 것으로 생각된다(Sleath, 1984; Dyer, 1986).

기온 및 바람

지난 5년간(1994년~1998년) 세종기지에서 관측된 월평균 기상 자료(1월)에 의하면 1997년 이전에 비해 기온이 점차 상승하는 경향을 볼 수 있고 연구지역의 주 풍향이 북북서(NNW)임을 알 수 있다(KORDI, 1998). 그러나 조사기간과 부합되는 단기간 변화 요인을 알기 위해서는 보다 상세한 기상자료가 요구된다. 1월 19일에서 23일까지의 10분 간격의 평균 기상자료(Fig. 4)을 보면, 풍속, 풍향 및 기온의 변화가 단기간임에도 불구하고 크다는 것을 알 수 있다. 관측 시작 후 남풍계열의 바람이 4 m sec⁻¹ 이하로 약하게 불었으나, 21일 23시 이후부터 동풍계열의 바람이 점차 강해져 22일 03시에 7 m sec⁻¹ 이상의 강한 바람이 발생하였다. 그 이후부터 점차 약해지다가 06시경부터 남서풍계열의 바람으로 바뀌면서 2 m sec⁻¹ 미만의 약한 풍속이 지속된다. 관측당시 최대 평균풍속은 약 7 m sec⁻¹이었고, 평균기온은 0.6~2.7°C 까지 변화하며 관측 전날들에 비해 변화가 작은 편이었다.

토의 및 고찰

하계(12월에서 2월 사이)동안 아남극권의 피오르드 수(fjord water)에는 부유상태의 수많은 소립자가 포함되어 있으며 그 크기는 작은 알갱이에서 가시적 관찰이 가능한 거대분자(macromolecule)까지 다양하다. 부유물질(suspended particulate matter)은 피오르드의 물리·지질·화학·생물학 및 수리적 성질과 매우 밀접한 관련이 있으며, 이 영향에 따라서 부유물질의 시공간적인 분산이 달라진다. 부유물질의 형태는 일반적으로 1) 육성기원 입자, 2) 생물작용과 관련된 유기입자, 3) 점토광물, 용존유기물, 박테리아 및 50 μm보다 큰 미소플랑크톤(nanoplankton)에서 형성된 응집물(aggregate), 그리고 4) 살아있는 유기물에서 생성된 무기 입자에 이르기까지 광범위하다(Harris, 1972). 이러한 부유물질의 탁도를 기준으로 피오르드는 크게 세 가지 환경으로 나눌 수 있다(Syvitski, 1994). 남극빙하환경은 이 중 하나로서 조석과 파랑의 상호작용에 의한 용설수를 담수와 부유물질의 기원으로 간주한다. 또한 퇴적율이 높은 북반구의 피오르드(Alaska와 Greenland 피오르드)와는 달리 남극 피오르드는 표층수의 부유물질농도가 10 mg l⁻¹ 이하인 저탁도 환경으로 퇴적물 함량이 적

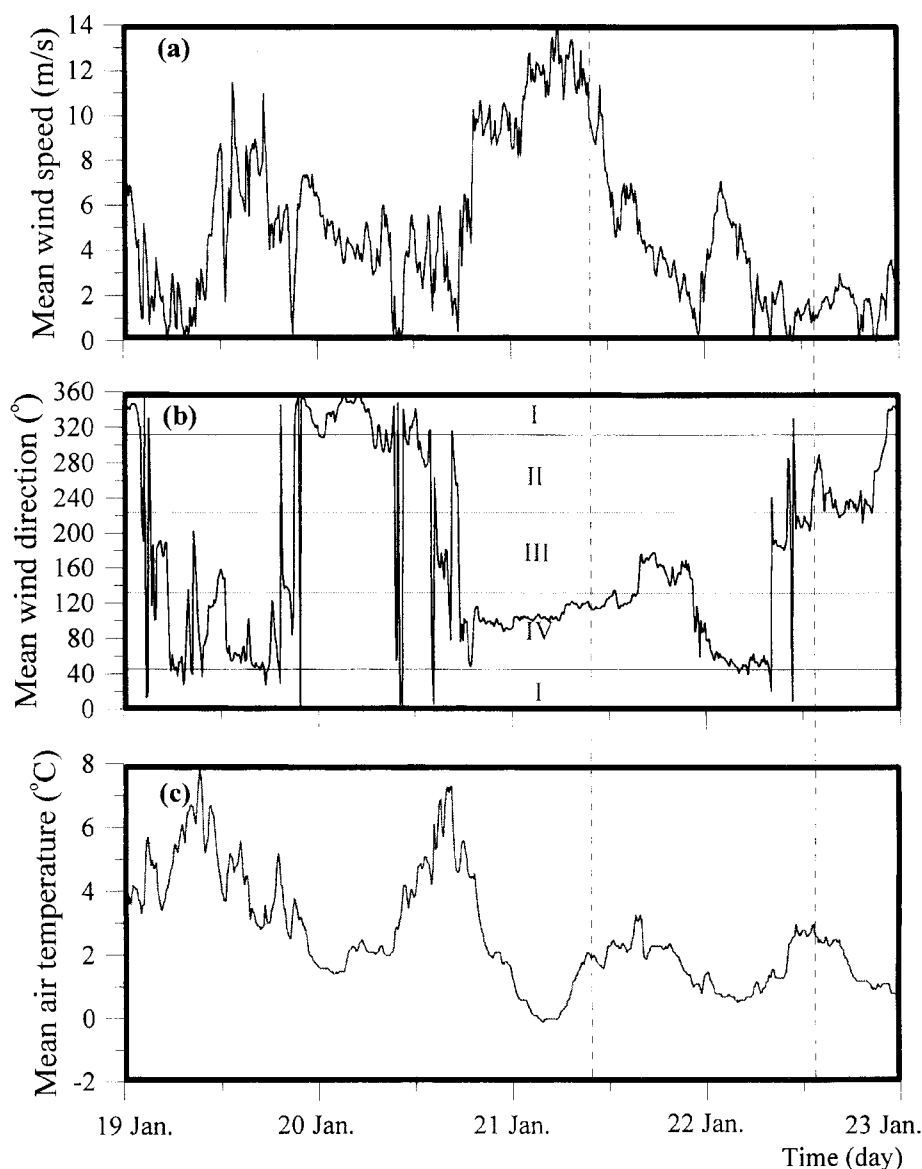


Fig. 4. Meteorological data from the Sejong station; (a) mean wind speed (m/s) at 10 minutes intervals, (b) mean wind direction (°)(I: northern sector, II: western sector, III: southern sector, and IV: eastern sector), and (c) mean air temperature (°C). The interval between the dashed lines indicates the period of field survey obtaining CTDT data.

은 부빙(iceberg)의 발달이 현저하며 빙하기저부 유출수(subglacial discharge)가 매우 적은 편이다(Domack *et al.*, 1994). 하지만 1992년 12월 중순에 측정된 마리아나 소만 표층 부유농도 결과에 의하면(Yoon *et al.*, 1997), 크레바스(crevasse)가 많이 발달한 조수빙하가 있는 소만 북동부에서 28 mg l⁻¹ 이상의 농도를 보여 피오르드 내 위치에 따라라도 부유물질농도가 크게 달라질 수 있음을 보여준다. 또한 시간에 따른 농도 변화도 소만에서 볼 수 있다. 1월보다 2월로 가면서 내만의 수층에서 수직 안정도(stability)가 보다 강해지는데, 이것은 많은 용설수의 유입으로 표층의 염분이 감소하기 때문이다(Chang *et al.*, 1990). 그럼에도 불구하고 연구지역은 북반구 피오르드에 비해 부유물질 농도가 낮은 저탁도 환경이다.

일반적으로 저염, 고탁도의 표층과 중층 플룸은 빙하기저부 터널에서 소만으로 유출되는 용설수로 알려져 있다(Cowan and Powell, 1990). 또한 남극 반도 피오르드 관찰 결과로부터 Domack and Williams(1990)는 저염, 고탁도의 표층과 중층 플

룸의 기원이 1) 조석 순환, 냉각, 그리고 빙하기저부 터널(subglacial marine tunnel) 내 용빙, 2) 빙벽 크레바스 분출(flushing), 그리고 3) 소규모 용설수류로부터 발생한다고 보고하였다. 두 플룸의 기원에 대한 첫번째 설명은 조석 작용에 의한 빙하기저부 터널의 거동과 관련이 있다. 만조시 빙하를 들어올리면서 빙하기저부 터널이 열리고 이때 주변 해수가 유입되면 이 해수는 냉각되고 염분이 낮아진다. 그리고 저조가 되어 빙하가 내려앉으면서 터널이 닫히고 빙하기저부 쇄설물과 더불어 차가워진 용빙수가 방출된다는 것이다. 두번째로 고조시 크레바스 안으로 유입된 해수가 표층 플룸의 추가적인 발생원이 될 수 있음을 제시하였다. 세번째로 피오르드의 기반암 벽을 따라 발견되는 작은 용설수류이다. 이 외에 남극 반도보다 따뜻한 아남극의 기후 조건과 많은 강우량으로 인해 생성된 용설수가 빙하 표면의 연직 관수로(vertical conduit)를 따라 빙하기저부로부터 나오는 유출수일 가능성도 배제할 수 없다(Paterson, 1981). 또한 소만 내로 유입되는 따뜻한 맥스웰 만 해수가 빙벽과 접촉하면서 만들어지

는 용설수가 표층 플룸을 형성할 수도 있다. 그러나 이러한 설명을 검증할 만한 조사는 빙벽 가까이 접근이 어렵기 때문에 이루어지지 않았다. 조수빙하의 파열(calving)로 유빙이 소만 내에 존재할 경우 표층의 해수 특성 변화에 커다란 영향을 줄 수가 있지만, 관측 당시 소만 내에는 유빙의 발달이 없었기 때문에 유빙에 의한 부유물질의 유입은 고려하지 않았다.

마리안 소만 표층 플룸에는 실트 크기의 쇄설성 입자와 생물 활동에 의해 생성된 생물기원 입자가 공존하고 있으며, 대조차 피오르드인 알라스카 Muir Inlet(평균 조차: 4.2 m, 최대 대조차: 7.3 m)처럼 빙하기저부 기원의 표층 플룸이 크게 발달하거나 고탁도(>100 mg l⁻¹)도 아니다(Cowan and Powell, 1990; Yoon *et al.*, 1998). 이것은 소만 내 저온, 저염, 고탁도의 표층 플룸이 빙하기저부 유출수에 의해 표층으로 부유하여 만들어지는 플룸이 아님을 말해준다. 주변 육상의 넓은 해변에서 발달하는 용설수류, 빙벽 위에 발달한 낙수(water fall), 조수빙하가 고온수와 접촉시 발생하는 용설수, 강우와 기온에 의한 빙벽 크레바스 유출수 등이 담수성 표층 플룸의 기원이지만, 마리안 소만 내 조수빙하가 비교적 깨끗한 빙하임을 감안하면, 표층 플룸의 쇄설성 입자는 연안에 발달한 용설수류를 통해 소만으로 유입되는 부유 입자로 볼 수 있다.

중층 플룸이 주변수에 비해 저온, 고탁도의 수층 특성을 보인다는 사실은 이 수층이 빙하기저부로부터 기원하는 유출수임을 말해준다. 일반적으로 빙하기저부 해저 터널에서 방출되는 용설수는 난류 제트(turbulent jet)의 형태를 갖는다. 초기 유출 이후 그 운동은 체적 유입(volume flux), 유출 운동량(discharge momentum)과 부유 유입(buoyancy flux)에 의해 좌우된다(Fischer *et al.*, 1979; Syvitski, 1989). 유출된 제트의 운동량이 감소하여 중력이 우점하기 시작하면서 결국 수직부유플룸(vertical buoyant plume)으로 변하며, 수층 내 중성 부력을 얻는 위치(수심 37-67 m 근처)에 도달해 수평부유플룸(horizontal buoyant plume)으로 전환하는 것으로 생각한다. 이러한 플룸은 빙하기저부에서 쇄설성 입자를 포함하는데, SEM(Scanning Electron Microscope) 분석에 의하면 유기물 함량이 거의 없는 쇄설성 입자로만 구성된다(KORDI, 1997). 마리안 소만의 중층 플룸의 거동은 조석, 기상 및 빙하의 전진과 후퇴에 따라 그 변화양상이 달라질 수 있지만(Pfirman and Solheim, 1989), 관측기간이 단 기간임을 감안하면 중층 플룸의 거동은 조석과 바람에 의해 크게 영향을 받는다(Pruszk, 1980).

피오르드에서 표층 플룸 거동에 영향을 주는 요인은 크게 조석, 바람, 하천 유출수(fluvial discharge) 및 전향력(Coriolis force)이다(Domack and Ishman, 1993). 마리안 소만은 주변에 하천이 존재하지 않기 때문에 하천수의 유출에 의한 영향은 전혀 없다. 피오르드의 폭이 내부 로스비 변형반경(internal Rossby radius of deformation)보다 크면 지구자전영향이 중요해지고 결국 편향력은 중요한 요인이 될 수 있다(Huppert, 1980). 내부 로스비 변형반경을 계산해 본 결과(Gill, 1982), 마리안 소만의 폭을 모두 초과하였다. 이러한 사실은 마리안 소만의 표층 순환에 편향력이 커다란 역할을 하지 않음을 의미한다.

일반적으로 피오르드에서 시간에 따른 표층 플룸의 발달은 바람의 영향이 극히 작은 경우에 물의 유입량을 좌우하는 조석에

의해 크게 영향을 받는다. 그러나 바람이 강할 때, 조석 영향이 가세된 표층 플룸은 복잡한 발달 양상을 보인다(Pickard and Rodgers, 1959; Buckley and Pond, 1976). 1996년 12월 관측 결과(KORDI, 1997)에서 조차가 약 2 m이고 바람의 영향이 거의 없었던 표층 플룸의 발달을 보면, 대조차일 때에 그리고 저조시에 비해 상대적으로 고조시에 그 발달이 커진다. 또한 조석 진폭(tide amplitude)이 클수록 따뜻한 맥스웰 만 표층수의 유입이 증가되고 그에 따른 빙하면 접촉으로 인한 용빙 증가는 표층 플룸의 생성을 크게 한다. 그러나 본 연구 결과에 의하면, 전체적인 표층 플룸의 발달 정도가 그 당시에 비해 미약하고 조석 순환에 따른 표층 플룸의 발달 관계도 현저히 약하다(Fig. 2a; Fig. 2d). 이러한 표층 플룸의 생성과 발달은 관측기간동안 약 70 cm 이하의 작은 조차(평균 조차: 1.5 m, 최대 대조차: 2.8 m)와 관련이 있는 것으로 생각된다. 또한 1996년 12월 조사 결과(KORDI, 1997)에서 저온, 고탁도의 중층 플룸은 조석에 의한 맥스웰 만 해수의 유입과 밀접한 관계를 보여주었다. 즉 고조시에 맥스웰 만 해수 유입이 상대적으로 커지고 맥스웰 만 유입수와 중층 플룸과의 성층이 강화되면서 중층 플룸의 발달이 더욱 뚜렷한 형태를 갖는다. 본 연구에서 중층 플룸이 전반적으로 조석순환에 따른 발달 경향이 미약하게 나타나며 이 플룸의 전반적인 발달 정도는 표층 플룸과 마찬가지로 미약하였다.

연직 수온과 탁도의 시간에 따른 변화를 보면, 관측 시작 후 3시간동안에 맥스웰 만 유입수가 나타나지 않았고 11시간동안 중층 플룸이 관찰되지 않았다(Fig. 2b; Fig. 2d). 조석 순환에 의해 지속적으로 관측되는 표층과 중층 플룸이 관측 전반부에 나타나지 않았다는 사실은 외부적인 바람에 의한 영향일 가능성을 높여준다. 이미 이전에 마리안 소만과 인접한 포터 소만(Potter Cove)에 대한 연구에서 바람이 만 밖으로 배출되는 표층수의 유속을 증가시켜 맥스웰 만 표층 유입수의 유속을 늦추거나 만류시킬 수 있다는 사실이 제시되었다(Klöser *et al.*, 1994). Pruszk (1980)은 인접한 애드미랄티 만(Admiralty Bay)에서 유빙 이동 관찰을 통해 풍속이 4 m sec⁻¹ 이상이면 표층 해수순환이 바람에 의해 조절될 수 있는 것으로 밝혔으며 만 바깥으로 세기가 큰 바람이 지속적으로 불 경우 저층수의 용승을 초래하고 이로 인해 수층 구조의 변화가 일어날 수 있음을 보고하였다. 조사기간 동안의 기상조건(Fig. 4)을 보면, 관측 이틀 전(20일부터 21일까지)부터 3°C 이상의 고온(최대 7°C 이상)이 지속되었으며, 관측 하루 전인 20일 18시경부터 소만 바깥으로 부는 강한 동풍(평균풍속 8 m sec⁻¹ 이상)이 우세해 용승이 일어날 수 있는 가능성을 제시한다. 관측 이틀 전의 따뜻한 기온으로 보아 연구지역 주위의 빙하를 녹였을 뿐만 아니라 다량의 용설수를 소만 내로 유입시켜 표층 플룸의 발달이 예상된다. 이러한 표층 플룸이 8 m sec⁻¹ 이상의 강한 동풍으로 인해 소만 밖으로 빠져나가고 맥스웰 만의 표층 해수의 유입도 어렵게 하였을 것이다. 결국 강한 동풍으로 인한 표층수의 이류(advection)는 중층수를 조수빙하 앞에서 용승시키는 결과를 초래하고, 이것이 관측 초기에 표층과 중층 플룸을 파괴·분산시켜 두 플룸을 사라지게 한 것으로 생각된다. 관측 초기에 표층에 나타나는 탁도 감소와 염분 증가 현상은 표층수에 비해 저탁도, 고염의 중층수의 용승이 일어났음을 극명하게 보여주는 증거가 된다. 용승 발생 이후 바람의

영향이 점차 약해짐에 따라 상대적으로 조석 순환의 역할이 증대되어 맥스웰 만 해수가 유입되면서 소만에서 전형적으로 나타나는 표층과 중층 플룸의 발달이 재연되는 것으로 보인다. 그러나 이웃하는 애드미랄티 내만(20 m 이하의 낮은 수심)에서 남풍에 의한 용승으로 저층 퇴적물과 저층 구조각을 재부유시켜 표층의 탁도와 영양염 농도를 증가시킨 사실(Brandini and Rebello, 1994)은 마리안 소만에서 용승에 의한 저탁도 결과와는 다른 차이를 보인다. 이것은 지형적인 원인으로 아마도 마리안 소만의 내만 수심(130 m 이상)이 깊어 바람에 의한 중층수의 용승이 해저면 퇴적물의 재부유에 영향을 주지 못했기 때문으로 보인다.

결론

(1) 남극 세종기지 앞 마리안 소만에서 얻은 하절기 CTD 관측 결과에 의하면, 마리안 소만은 저탁도 환경으로 세 개의 뚜렷한 수층을 형성한다. 1) 표층 2 m 이내에 존재하는 저온, 저염, 고탁도의 표층 플룸, 2) 수심 15-35 m의 고온, 저탁도의 맥스웰 만 유입수, 그리고 3) 수심 40-65 m의 저온, 저염, 고탁도의 중층 플룸으로 나눌 수 있다. 표층 플룸의 부유물질 기원은 넓은 해빈에서 발달하는 용설수류 및 빙벽의 낙수로부터 기원하는 쇄설성 입자와 표층 해수에서 생성된 생물기원 입자의 혼합물이고, 중층 플룸은 빙하기저부로부터 나오는 유출수에 의해 공급된 쇄설성 입자로 구성된다.

(2) 마리안 소만은 주변으로부터 하천 유입수의 영향이 없으며, 소만의 폭이 좁기 때문에 해수순환에서 편향력의 영향을 무시할 수 있다. 따라서 소만의 표층과 중층에 존재하는 플룸의 발달 정도나 맥스웰 만 유입수의 이동에 영향을 미치는 것은 주로 조석이다. 그러나 관측 당시 저조차로 인해 표층과 중층 플룸의 전반적인 발달이 미약하였다.

(3) 관측 전반기에 나타난 표층해수의 탁도 감소 및 염분 증가는 관측 전날에 불었던 강한 동풍($>8 \text{ m sec}^{-1}$)에 의한 것으로 보인다. 또한 강한 동풍은 마리안 소만의 중층수를 용승시키는 결과를 초래하여 결과적으로 표층과 중층 플룸의 발달을 저해한 것으로 보인다. 이러한 사실은 아남극 소조차 피오르드 환경에서는 강한 바람이 수층특성은 물론 부유물질의 이동을 조절하는 주요인이 될 수 있음을 보여준다.

감사의 글

본 연구를 수행하는데 많은 조언과 배려를 해주신 극지연구센터 장순근 박사님과 연구원들, 그리고 측정을 도와주신 러시아 Yuzhmoregeologiya 승조원 여러분들께 감사를 드립니다. 또한 논문 심사를 맡아주신 두 분의 심사위원께도 감사드립니다. 본 연구는 '남극 고해양 및 고기후 변화 연구' 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

Bishop, J.K.B., 1986. Instrument and methods: the correction and suspended particulate matter calibration of Sea Tech transmis-

- someter data. *Deep-Sea Res.*, **33**: 121-134.
- Brandini, F.P. and J. Rebello, 1994. Wind field effect on hydrography and chlorophyll dynamics in the coastal pelagial of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Antarctic Sci.*, **6**: 433-442.
- Buckley, J.R. and S. Pond, 1976. Wind and the surface circulation of a fjord. *J. Fisheries Res. Bd. Canada*, **33**: 2265-2271.
- Chang, K.I., H.K. Jun, G.T. Park and Y.S. Eo, 1990. Oceanographic Conditions of Maxwell Bay, King George Island, Antarctica (Austral Summer 1989). *Korean J. Polar Res.*, **1**: 27-46.
- Cowan, E.A. and R.D. Powell, 1990. Suspended sediment transport and deposition of cyclically interlaminated sediment in a temperate glacial fjord, Alaska, U.S.A. In: *Glacimarine Environments: Processes and Sediment*, edited by Dowdeswell, J. A. and J. D. Scourse, Geol. Soc. London Special Publications, **53**: 75-89.
- Domack, E.W. and C.R. Williams, 1990. Fine structure and suspended sediment transport in three Antarctic fjord. *Am. Geophys. Union, Antarct. Res. Ser.* **50**: 71-89.
- Domack, E.W. and S. Ishman, 1993. Oceanographic and physiographic controls on modern sedimentation within Antarctic fjords. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **105**: 1175-1189.
- Domack, E.W., D.J.P. Foss, J.P.M. Syvitski and C.E. Mclennen, 1994. Transport of suspended particulate matter in an Antarctic Fjord. *Mar. Geol.*, **121**: 161-170.
- Dyer, K.R., 1986. *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*. John-Wiley & Sons, New York, 342 pp.
- Fischer, H.B., E.J. List, R.C.Y. Koh, J. Imberger and N.H. Brooks, 1979. *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, New York, 483 pp.
- Gill, A.E., 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, New York, 662 pp.
- Griffith, T.W. and J.B. Anderson, 1989. Climatic control of sedimentation in bays and fjords of the northern Antarctic Peninsula. *Mar. Geol.*, **85**: 181-204.
- Harris, J.E., 1972. Characterization of suspended matter in the Gulf of Mexico-I. Spatial distribution of suspended matter. *Deep-Sea Res.*, **19**: 719-726.
- Huppert, H.E., 1980. Topographic effects in stratified fluids. In: *Freeland*, edited by H.J., D.M. Farmer and C.D. Levings, Fjord Oceanography, Plenum, New York, pp. 117-140.
- Klöser, H., G. Ferreyra, I. Schloss, G. Mercuri, F. Laternus and A. Curtosi, 1994. Hydrography of Potter Cove, a Small Fjord-like Inlet on King George Island (South Shetlands). *Estuar., coast. Shelf Sci.*, **38**: 523-537.
- KORDI, 1997. The studies on Natural Environment and Conservation of Polar Region. BSPE 97604-00-1020-7, pp. 297-327.
- KORDI, 1998. Annual weather report at Antarctic King Sejong Station (1994-1996). Korea Oce. Res. Dev. Ins. Open File Report, Open File Report, EC PP97-006, 213 pp.
- Mullins, B.W. and J. Priddle, 1987. Relationships between bacteria and phytoplankton in the Bransfield Strait and southern Drake Passage. *Br. Antarct. Surv. Bull.*, **76**: 51-64.
- Paterson, W.S.B., 1981. *The Physics of Glaciers*. Pergamon, New York, 380 pp.
- Pickard, G.L. and K. Rodgers, 1959. Current measurements in Knight Inlet, British Columbia. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **16**:

- 635-678.
- Pfirman, S.L. and A. Solheim, 1989. Subglacial meltwater discharge in the open-marine tidewater glacier environment: Observations from Nordaustlandet, Svalbard Archipelago. *Mar. Geol.*, **86**: 265-281.
- Pruszek, Z., 1980. Current circulation in the water of Admiralty Bay (region of Arctowski Station on King George Island). *Pol. Polar Res.*, **1**: 55-74.
- Reynolds, J.M., 1981. Distribution of mean annual air temperatures in the Antarctic Peninsula. *Br. Antarct. Surv. Bull.*, **54**: 123-133.
- Sleath, J.F.A., 1984. *Sea Bed Mechanics*. John-Wiley & Sons, New York, 335 pp.
- Syvitski, J.P.M., 1989. On the deposition of sediment within glacier-influenced fjords: oceanographic controls. *Mar. Geol.*, **85**: 301-329.
- Syvitski, J.P.M., 1994. Glacial sedimentation processes. *Terra Ant-arct.*, **1**: 251-253.
- Syvitski, J.P.M., J.T. Andrews and J. A. Dowdeswell, 1996. Sediment deposition in an iceberg-dominated glaciomarine environment, East Greenland: basin fill implications. *Global and Planetary Change*, **12**: 251-270.
- Yoon, H.I., M.W. Han, B.K. Park, J.K. Oh and S.K. Chang, 1997. Glaciomarine sedimentation and paleo-glacial setting of Maxwell Bay and its tributary embayment, Marian Cove, in the South Shetland Islands, West Antarctica. *Mar. Geol.*, **140**: 265-282.
- Yoon, H.I., B.K. Park, E. W. Domack and Y. Kim, 1998. Distribution and dispersal pattern of suspended particulate matter in Maxwell Bay and its tributary, Marian Cove, in the South Shetland Islands, West Antarctica. *Mar. Geol.* **152**: 261-275.
- Yu, H.S. and J. Lee, 1993. A hydrodynamic solution for the lateral spreading of a river plume. *J. Kor. Soc. Coast. Ocean Eng.*, **5**: 302-306.
- Yu, H.S., J. Lee, H.J. Kang, S.Y. Kang, K.S. Choi and J.S. Kim, 1993. Lateral spreading of a river plume and transport of suspended sediments in the Nakdong estuary. *J. Kor. Soc. Coast. Ocean Eng.*, **5**: 296-301.

1999년 3월 24일 원고 접수

1999년 7월 10일 수정본 채택