

서남극 남 셰틀랜드 군도 마리안 소만에서 바람 및 강수에 의한 여름철 수층 구조의 변화와 부유물질 분산

유규철* · 윤호일 · 오재경¹ · 강천윤 · 김예동 · 배성호
한국해양연구원 극지연구소, ¹인하대 해양학과

Wind- and Rain-induced Variations of Water Column Structures and Dispersal Pattern of Suspended Particulate Matter (SPM) in Marian Cove, the South Shetland Islands, West Antarctica during the Austral Summer 2000

KYU-CHEUL YOO*, HO IL YOON, JAE-KYUNG OH¹, CHEON YUN KANG, YEADONG KIM AND SUNG-HO BAE

Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

¹*Korea Polar Research Institute, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan PO Box 29, Seoul 425-600, Korea*

남극 세종기지 앞에 위치한 마리안 소만의 여름 수층 구조와 부유물질 분산기작을 이해하기 위해 빙벽 앞에서 CTDT 연속측정을 하였으며, 측정기간 동안의 조석, 부유물질농도, 유속, 그리고 기상요인도 함께 분석되었다. 45 시간동안 1시간 간격으로 측정된 연속 수층 특성 분포에 의하면, 수심 0~20 m에는 저온·저염·고탁도의 혼합 표층수가 존재하였고, 수심 20~40 m에 고온·고염·저탁도의 최대수층인 맥스웰 만 유입수가 나타난다. 그 아래의 수심 40~70 m에는 주변 해수에 비해 저온·고탁도의 아빙하성 유출수인 중층 플룸(빙하기저부)이 위치한다. 마지막으로 수심 70 m 이하에 나타나는 저층수는 저온·고염·저탁도의 특성을 보였다. 늦여름(2월초)에 연안의 높아진 설선에서 녹아 소만으로 유입하는 담수의 특성은 유입지역의 특성(지형, 빙하조건, 퇴적물의 구성 등)에 따라 수온과 부유물질농도에서 차이를 보였으며, 바람이 거의 불지 않는 측정시기 동안에는 저염·고탁도의 표층 플룸이 유입지역에 제한적으로 나타났다. 지속적으로 강한 바람이 불 경우, 빙벽 앞에서 육성기원의 혼탁한 담수성 플룸, 저온의 중빙하성 용승수/조수빙하 용빙수 그리고 맥스웰 만 유입수가 혼합되면서 표층에 혼합층(저온·저염·고탁도)이 발달하였다. 소만의 강수는 단기간 빙하성 유출 증가의 가장 큰 요인이며, 중빙하성 용승수의 발생은 조수빙하의 상태와 강수량이 크게 좌우하였다. 특히 많은 양의 강수로 인해 아빙하성 중층 플룸의 유출량이 커지면서 중층 이하의 수심에 저염화를 초래하였다. 그러나 입자가 거의 없을 정도로 깨끗한 중앙 빙벽에서 나오는 중빙하성 용승수와 중층 플룸의 유입량이 클지라도, 낮은 부유물질농도로 인해 육성기원 입자의 소만 퇴적율은 작을 것이다.

Time-series CTDT (Conductivity/Temperature/Depth/Transmissivity) were obtained at one point near tide-water glacier of Marian Cove (King George Islands, Antarctica) to present water column properties and SPM (suspended particulate matter) dispersal pattern in relation with tide, current, meteorological data, and SPM concentration. Four layers were divided from the water column characteristics measured in the interval of an hour for about 2 days: 1) cold, fresh, and turbid surface mixed layer between 0–20 m in water depth, 2) warm, saline, and relatively clean Maxwell Bay inflow between 20–40 m in water depth, 3) turbid/cold tongue of subglacial discharges compared with the ambient waters between 40–70 m in water depth, and 4) cold, saline, and clean bottom water beneath 70 m in water depth. Surface plume, turbid freshwater at coastal/cliff area in late summer (early February), had the characteristic temperature and SPM concentration according to morphology, glacial condition, and composition of sediments. The restrict dispersion only over the input source of meltwater discharges was due to calm wether condition. Due to strong wind-induced surface turbulence, fresh and turbid surface plume, englacial upwelling cold water, glacier-contact meltwater, and Maxwell Bay inflow was mixing at ice-proximal zone and the consequent mixed layer deepened at the surface. Large amount of precipitation, the major controlling factor for increasing short-term glacial discharges, was accompanied by the apparent development

*Corresponding author: kcyoo@kordi.re.kr

of subglacial discharge that resulted in the rapid drop of salinity below the mid depth. Although amount of subglacial discharge and englacial upwelling may be large, however, their low SPM concentration would have small influence on bottom deposition of terrigenous sediments.

Key words: Antarctica, CTD, Water Column Properties, SPM

서론

서남극 북단에 위치한 남 쉘랜드 군도(South Shetland Islands)의 킹조지 섬(King George Island)에는 대한민국의 세종과학기지를 비롯해 여러 나라의 기지가 상주하고 있어 인위적인 환경오염이 발생하기 쉽다. 1998년 초에 남극조약환경보호의정서(Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty)가 발효되어, 남극에 기지를 소유한 나라는 자국의 기지 주변의 육상과 대기 및 해양에 대한 모니터링 연구를 의무적으로 수행해야 한다. 이러한

차원에서 세종기지 주변을 대상으로 다양한 모니터링 연구가 이루어지고 있으며, 이 중에는 세종기지 앞 마리안 소만(Marian Cove)에서 수리 및 기상 요인(조석, 바람, 파랑 등)에 따른 수층 구조 변화와 부유물질 분산 연구가 포함되어 있다(유 등, 1999; 유 등, 2000).

마리안 소만은 길이 3.5 km, 폭 1.2 km의 작은 피오르드이며 북쪽으로는 바튼 반도(Barton Peninsula)와 남쪽으로는 위버 반도(Weaver Peninsula)에 의해 둘러싸여있다(Fig. 1). 소만 안쪽에 남쪽 연안은 해저 지형이 급경사인 반면에 북쪽 연안은 완경사이다. 소만 입구의 양쪽 연안은 자갈 해변이 발달하였다. 여름의 대기복사

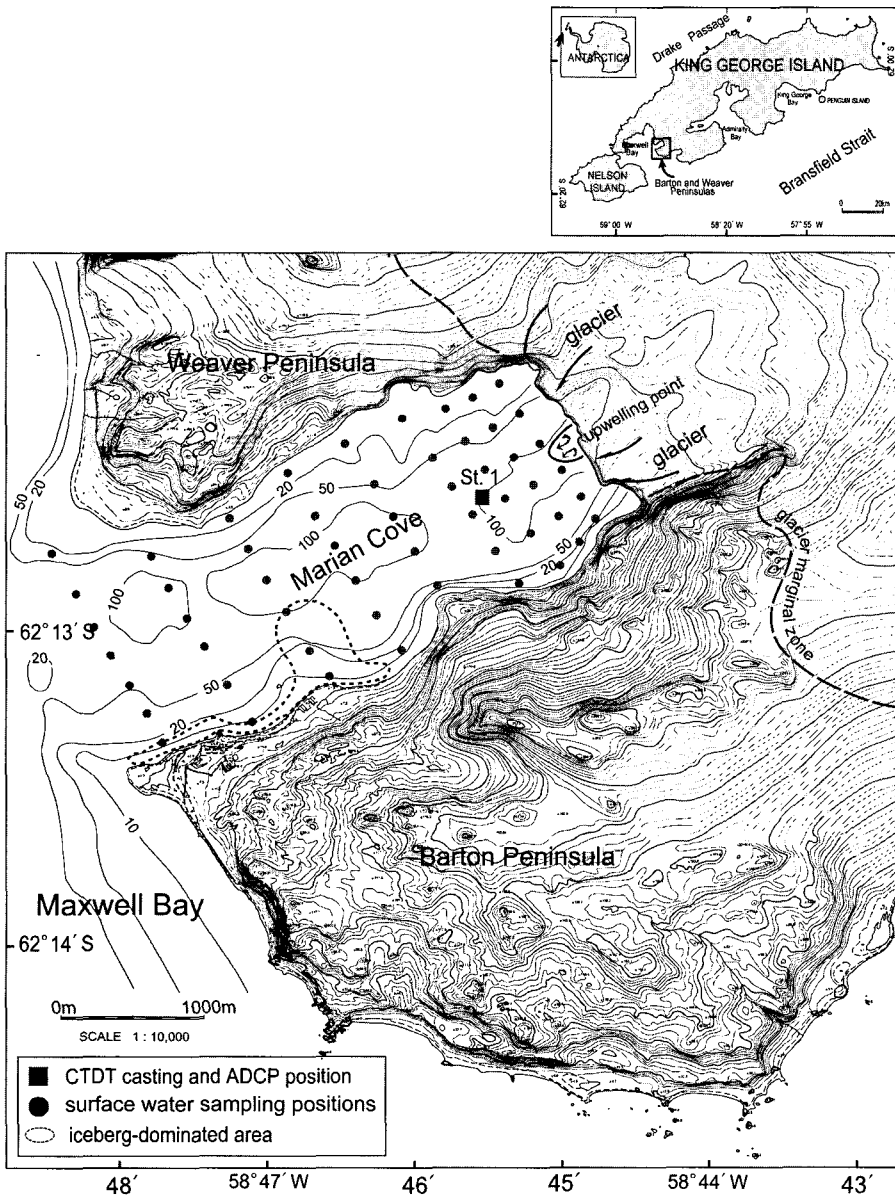


Fig. 1. Study area. St. 1 indicates CTD casting site and the circles do the points measuring surface temperature, salinity and SPM.

열에 의한 용빙(melting)은 연안지역의 설선(snow line)을 높이고 저지대로 흐르는 용설수류(meltwater stream)를 발달시키며, 빙벽 폭포수(waterfall)가 발생하기도 한다. 소만의 조석은 부등성을 지닌 혼합된 형태의 반일주조이며 맥스웰 만 표층수가 소만 입구의 해저 실(submarine sill)을 넘어 유입되면서 소만과 맥스웰 만 사이에 해수교환이 이루어진다(유 등, 1999).

남셰틀랜드 군도를 포함한 남극반도는 지역적인 온난화로 급속한 환경 변화를 겪는 지역이며, 최근 마리안 소만의 계속되는 빙하 후퇴는 이러한 사실을 잘 반영하고 있다(Park *et al.*, 1998). 결국 빙하 용빙수의 계절적인 발생과 그에 따른 부유물질의 분산은 아남극권의 기후와 해양의 관계를 연결하는 중요한 현상이다. 용빙수의 생성은 시공간적으로 달라져 해양물리와 지질 및 생물환경의 변화에 영향을 준다(Kirkwood and Burton, 1988; Court, 1996; Yoon *et al.*, 1998). Yoon *et al.* (1997)은 탄성과 단면도와 코아 퇴적물에 나타난 기록에서 소만의 퇴적작용이 과거의 기후변화를 밝히는데 중요한 연구가 될 수 있음을 보여주었다. 지금까지 유 등(1999, 2000)은 마리안 소만의 빙벽 앞에서 특징적인 수층을 구분하며 부유물질 분산 기작을 규명하려고 노력하였으며, 환경요인의 상호작용(빙하상태, 기상조건, 수리특성 등)에 따른 현상이 복잡해져 다양한 환경에서의 자료획득이 요구된다. 2000년 1월에 수층 특성과 공간적인 부유물질이 측정된 시기는 바람이 강하고 강수량이 많아서(Fig. 2), 기존의 결과와 비교/검토할 수 있었다. 바람과 강수는 소만 내의 수층 특성과 구조 및 표층 순환을 좌우하는 중요한 요인이 될 수 있다(Svendsen and Thompson, 1978; Syvitski, 1989; Dowdeswell and Cromack, 1991; Kloser *et al.*, 1994; Kloser *et al.*, 1994; Bintanja, 1995). 이 연구의 목적은 이러한 요인에 따른 여름 소만의 수층 구조와 부유물질의 분산 기작을 설명하고 남극 피오르드의 빙해양 퇴적작용을 이해하고 이전의 연구를 보완·검토하고자 한다.

연구방법

2000년 1월 1월 25일 오전 11시부터 27일 오전 8시까지 약 3일 동안 마리안 소만의 빙벽 앞에서 1시간 간격으로 CTD(Conductivity/Temperature/Depth/Transmissivity) 연속 측정을 하였으며, 마리안 소만의 표층수 특성을 알기 위해 2월 4일에 고무보트를 이용하여 약 3시간동안 표층수의 수온과 염분 그리고 부유물질농도 측정이 이루어졌다(Fig. 1). CTD 측정을 위해 SEATECH 투광측정계(660 nm 파장과 20 cm beam path length)를 장착한 SEABIRD 모델 SBE 911(24 Hz sampling rate)을 이용하였으며, 부유물질농도를 측정하기 위해서는 로젯채수기(Rosette water sampling system)를 이용하였다. 660 nm에서 투광측정계의 출력은 0~5 V의 전압값이며 이것은 0~100% 투과도에 해당하기 때문에(Bishop, 1986), 전압값이 작을수록 고탁도를 의미한다. 수온에서 $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$, 염분에서 ± 0.001 psu로 보정된 CTD 기기는 윈치 시스템(winch system)으로 0.3 m sec^{-1} 로 투하시켜 자료를 얻었고 획득된 자료는 수심 0.5 m 간격으로 평균하였다.

수층의 실제 부유물질농도를 알기 위해 25일 16시, 26일 13시와 22시, 27일 05시경 CTD 측정시간에 채수를 하여 여과지를 통과시켰다. 미리 무게를 측정된 뉴클리오어(nucleopore) 막 여과지($0.45 \mu\text{m}$)

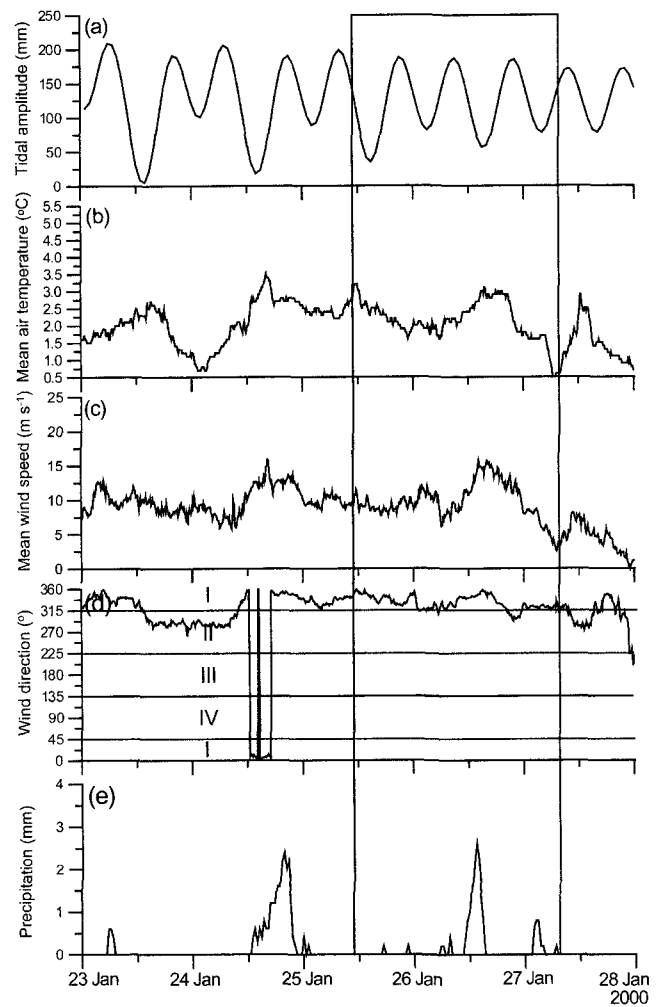


Fig. 2. (a) Tidal amplitude (mm), (b) mean air temperature ($^{\circ}\text{C}$); (c) mean wind speed (m s^{-1}), (d) mean wind direction ($^{\circ}$) (I: northern sector; II: western sector; III: southern sector; IV: eastern sector), and (e) precipitation (mm). Meteorological data were averaged at 10 minutes from the King Sejong Station. The box area indicates the period of field survey obtaining CTD data (23–27 January, 2000).

에 해수 1 L를 여과시킨 후 오븐에서 건조시켰으며, 부유물질농도는 건조된 여과지의 무게를 측정하여 여과하기 전의 무게를 뺀 값으로 계산하였다. 그리고 2월 4일에 소만 내의 10개 측선(각 측선당 약 6개 정점)에서 표층 해수의 특성과 부유물질의 분포를 알기 위해 염분과 수온은 YSI 30 염분/전도도/수온 측정기기(각각 염분 및 수온의 정밀도: ± 0.1 ppt, $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)를 이용하였으며 각 지점에서 직접 채수한 해수를 여과하여 부유물질농도를 구하였다(Fig. 1).

조사기간의 기온, 풍속 및 풍향은 세종기지에서 10분 간격으로 관측된 자료이며, 조석은 조화분석을 통해 얻어진 값을 이용하였다. 수층의 유속을 알기 위한 해류자료는 온누리호 배 밑에 장착된 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 통해 얻어졌으며, 얻어진 자료는 초기 수심인 17 m에서 자료상태가 양호한 33 m까지의 자료(수심 17 m, 25 m 그리고 33 m)를 분석하였다. ADCP 유속자료는 저역필터링(low-pass filtering)을 한 후 재샘플링(decimation)을 하였다.

결 과

연구지역의 환경 특성

Fig. 2는 CTDT 연속측정 시기(1월 25일부터 27일까지)의 마리안 소만에서의 조석, 강수량, 기온과 바람자료이다. 이 시기는 조차가 약 1.1~1.5 m로써 평균대조차(약 1.5 m)에 비해 낮았으며 고조와 저조가 약 6~7시간 간격으로 반복되는 반일주조의 주기 형태가 나타났다. 측정 하루전날인 1월 24일에는 약 12시간동안 많은 양의 강수(총강수량: 22.7 mm)가 있었으며, 측정 중반인 26일 11시부터 15시 사이에도 14.0 mm의 높은 강수량이 있었다(Fig. 2e). 측정 시기의 기온은 1.7~3.0°C를 유지하였으나, 후반에 약 2시간 동안은 기온이 약 0.5°C 정도로 낮아졌다. 풍향은 주로 북풍 및 북서풍 계열이었으며, 풍속은 8~16 m s⁻¹의 범위였다. 풍속은 측정 후반으로 갈수록 약해져서 약 5 m s⁻¹ 이하를 보이기도 하였다.

2월 4일에 이루어진 표층수 특성 조사 시기에 소만의 남쪽과 북

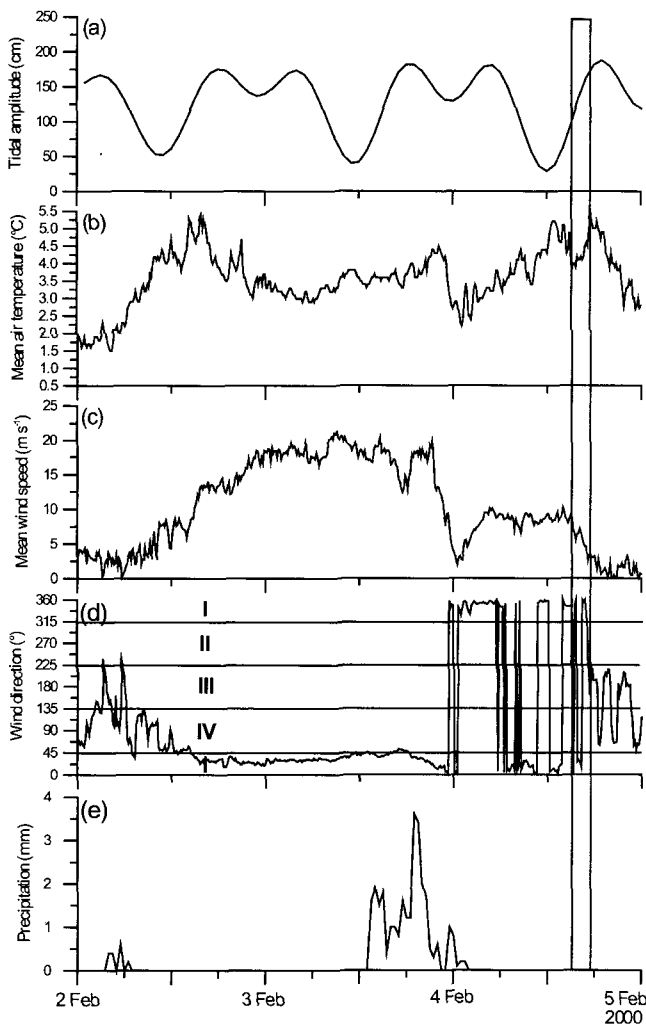


Fig. 3. (a) Tidal amplitude (mm), (b) mean air temperature (°C), (c) mean wind speed (m s⁻¹), (d) mean wind direction (°) (I: northern sector; II: western sector; III: southern sector; IV: eastern sector), and (e) precipitation (mm). Meteorological data were averaged at 10 minutes from the King Sejong Station. The box area indicates the period of field survey obtaining CTD data (5 February, 2000).

쪽 연안에는 주변 육상에서 폭포수와 혼탁한 용설수류가 소만으로 유입되는 것이 관찰되었다. 이 시기의 조차 약 1.6 m와 기온 3.0~5.5°C로 1월 측정 시기에 비해 높은 편이었다(Fig. 3a and 3b). 측정시작 12시간 전에는 약 10 m s⁻¹의 강한 북풍이 우세하였으나, 측정이 시작되면서 풍속이 약해졌고 풍향은 남풍으로 바뀌었다(Fig. 3c and 3d). CTD 측정 시작 24시간 전인 2월 3일에 12시간동안 내린 강수량은 28.4 mm이었지만, 측정 당일에는 강수가 없었다(Fig. 3e). 중앙 빙벽 앞에서는 용승(upwelling)이 관찰되었고, 북쪽 빙벽에는 빙하동굴(glacier cave)이 관찰되었다(Fig. 1). 유빙은 소만의 남쪽 연안을 따라 세종곶까지 띠형태로 존재하였다(Fig. 1).

수층 구조와 표층수 특성

1월 25일 측정 초기인 11시부터 15시까지 표층에 1.3°C 이상의 고온수가 나타났으며, 15시부터 23시까지 수심 10~30 m 사이에는 0.8°C 이하의 저온수가 나타났다(Fig. 4a). 이 측정 초기의 수층 구조를 제외하면, 마리안 소만의 수층은 4개의 수층 구조로 구분된다(Fig. 4). 저온·저염·고탁도의 혼합층이 표층 0~20 m에 나타나고, 수심 20~40 m에는 상부 혼합층에 비해 고염·저탁도인 최대수온층(1.1~1.4°C)이 나타나며, 수심 40~70 m에는 저온·고탁도인 수층이 발달한다. 그리고 수심 70 m 아래를 차지하는 저층수는 저온·고염·저탁도의 특성을 보였다. 특히 수심 40~70 m에 발달하는 수층은 최대수온층과 저층수에 비해 0.2~0.5°C 정도 낮아 이들과는 뚜렷하게 구별된다(Fig. 4a).

마리안 소만 수층의 염분 변화는 밀도의 변화와 유사해 저온의 해수에서 염분 변화가 밀도 변화를 대변한다(Fig. 4b; Fig. 4c). 표층 혼합층의 등염분선이 다른 수층에 비해 매우 조밀하게 나타나며, 중층의 34.10 psu의 등염분선은 측정시작부터 시간이 지날수록 뚜렷하게 깊어졌다(Fig. 4b). 수층별 부유물질농도 범위는 1.5~8.3 mg l⁻¹이었으며(Fig. 5; Fig. 6; Fig. 7), 표층수의 농도는 중층 아래의 수층에 비해 높게 나타났다. 중층 및 저층수의 부유물질농도와 투과도의 분포는 수심에 따라 서로 일치하지 않았다(Fig. 4e; Fig. 5; Fig. 6; Fig. 7). 이는 중층 아래의 부유물질농도가 2.8 mg l⁻¹ 이하로 매우 낮아서 부유물질농도 측정의 에러(기기 및 실험 등)가 포함되어 나타난 결과로 보인다. 현장조사 시기에는 마리안 소만에 유빙이 거의 없었다.

2월 4일에 측정된 표층수의 부유물질농도 분포를 보면, 빙벽 가장자리와 용설수류가 유입되는 연안에서 높은 값을 보이는 반면에, 맥스웰 만 유입수가 들어오는 소만의 입구는 상대적으로 낮았다(Fig. 8b). 특히 위버 반도의 연안에 발달하는 표빙하성 유출지(P1과 P2)의 부유물질농도는 남쪽 연안(P4와 P5)에 비해 약 3~6 배 정도 높았다. 유빙이 분포하는 장소는 소만의 중앙에 비해 낮은 부유물질농도를 보였다. 표층수의 수온 분포에서 빙벽 근처에서 1.3°C 이하의 수온이 나타나는 반면에 소만의 중앙과 입구는 유빙이 분포하는 장소를 제외하면 1.4~1.8°C의 수온을 보여, 전체적으로 소만의 안쪽에서 입구 쪽으로 갈수록 표층 수온이 증가하였다(Fig. 9a). 특히 용승지역은 0.0~1.0°C의 수온값이 나타나 빙벽 근처 정점 중에서 가장 낮았다. 유빙이 밀집된 장소는 -0.2°C의 최저 수온을 보였으며, 소만 입구의 위버 반도 연안에서는 다른 지역에 비해 높은 수온값(약 2°C 정도)이 나타났다. 특이한 사

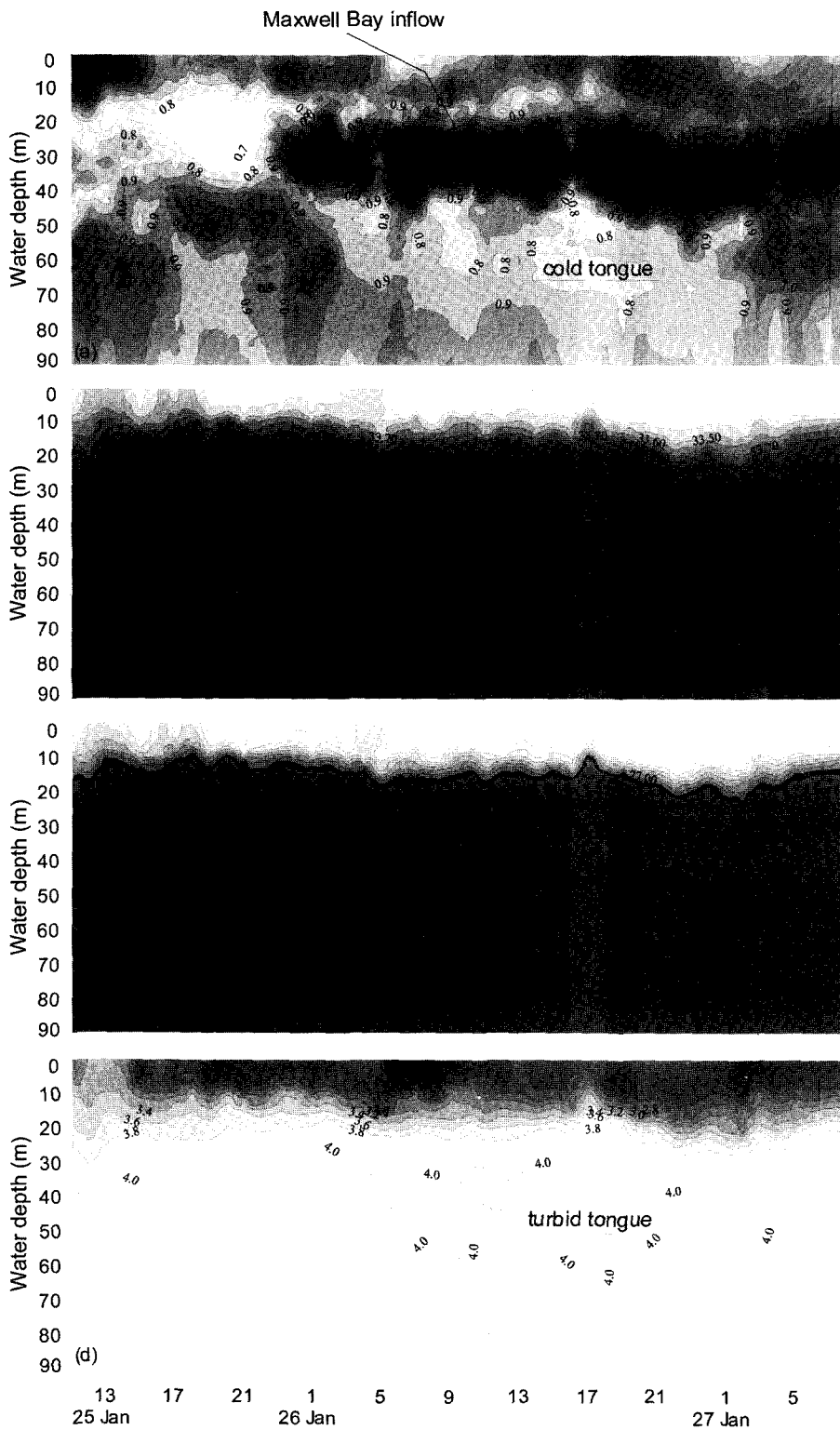


Fig. 4. Time series water column characteristics at St. 1. (a) temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) salinity (psu), (c) sigma-t (kg m^{-3}), and (d) transmissivity (V).

실은 빙벽 북부로부터 녹수가 유입되는 장소는 저온(약 1°C 정도)이지만, 소만 중앙의 남쪽 및 북쪽 연안에서 녹수가 유입되는 장소에서는 그 주변수보다 약 0.3°C 정도 수온이 높았다(Fig. 9a). 염분 분포는 유빙 지역과 용빙수 유입지 근처를 제외하면 $33.1\sim 33.5$ psu 사이였다(Fig. 9b). 유빙 지역과 녹수가 유입되는 연안(P1~P5)의

염분은 33.0 psu 이하를 보였으며, 용승지역은 $33.6\sim 33.8$ psu를 보여 주변에 비해 높은 값을 보였다(Fig. 8a and 9b). 소만 입구의 위버 반도 연안에서는 염분이 소만 입구에 비해 $0.2\sim 1.0$ psu 정도 낮았다.

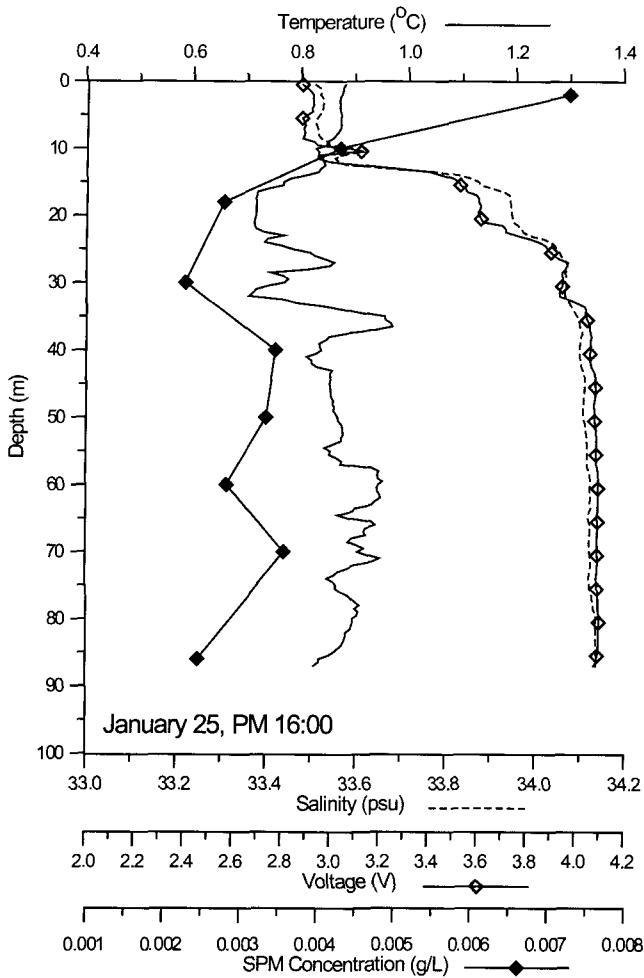


Fig. 5. Water column characteristics (temperature, salinity, transmissivity, and SPM concentration) at 25 January (16:00).

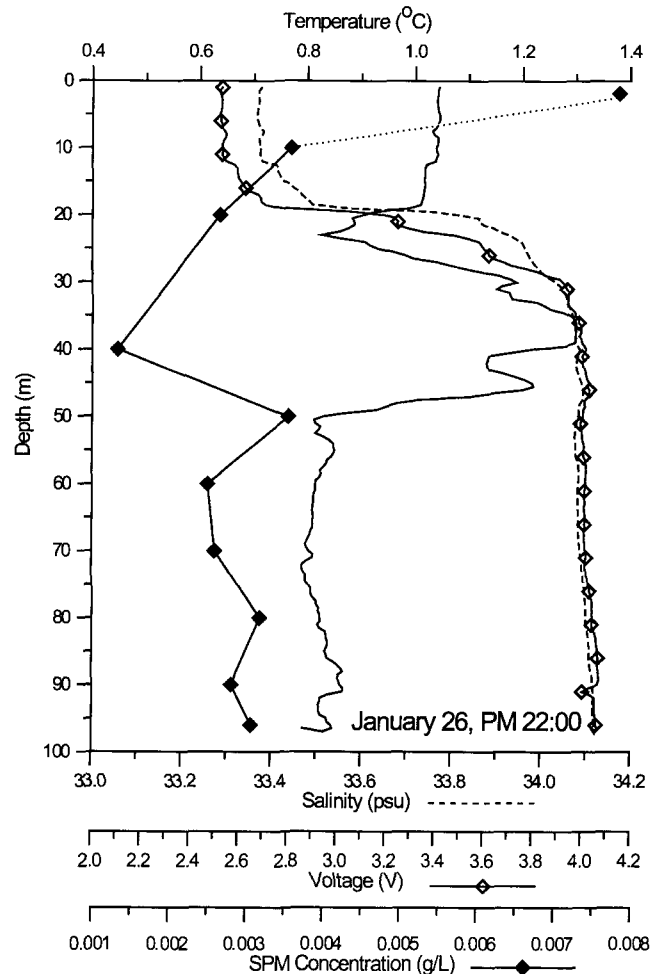


Fig. 6. Water column characteristics (temperature, salinity, transmissivity, and SPM concentration) at 26 January (22:00).

ADCP 유속자료

CTDT 연속측정 시작 4시간 이후부터 ADCP를 이용하여 유속이 측정되었다. 유속은 8 m 간격으로 얻어졌으며, 자료의 질이 양호한 수심 17 m, 25 m와 33 m에서 얻은 유속은 10분 평균된 자료로 얻어졌다(Fig. 10). 수심 25 m와 33 m의 유속은 서로 유사한 변동을 보이는 반면에 수심 17 m의 유속은 상이한 경향을 보여준다. 특히 수심 17 m에서 20.0 cm s⁻¹ 이상의 높은 유속이 측정되었으며, 유속의 방향은 조석에 따라 흐름이 반복되는 조류의 특성을 볼 수 없었다. 전체 자료를 평균하여 계산한 해류(비조석성분)의 유속은 수심 17 m에서 8.62 cm s⁻¹로 수심 25 m와 33 m에 비해 높았으며, 방향은 수심 17 m에서 북쪽으로 향하고 수심 25 m와 33 m에서는 동북쪽으로 향하였다(Table 1). 전체 자료를 저주파 필터링을 하고 1시간 간격으로 나누어 계산한 해

Table 1. Speed and direction of mean current at 17 m, 25 m and 33 m of water depth

Depth	Speed (cm/s)	Direction (deg)
17 m	8.62	335.55
25 m	3.36	52.24
33 m	1.89	59.09

류 결과에 의하면, 수심 17 m에서는 관측초기부터 북쪽으로 향하는 흐름이 지속되었지만, 수심 25 m와 33 m에서는 측정 초기에 흐름이 북쪽으로 향하다가 2월 26일 07부터 14시까지 남서쪽으로 향하고 이후 북쪽으로 다시 향하다가 측정 후반에는 서쪽으로 향하였다(Fig. 11).

토 의

마리안 소만의 빙벽 앞에서 얻어진 CTDT 연속 측정 결과는 소만의 수층 구조를 뚜렷하게 보여준다(Fig. 4). 수심 20~40 m 사이에서 수온 1.1°C 이상을 보이는 최대수온층이 발달한다(Fig. 4a). 이 최대수온층은 여름에 소만 바깥의 맥스웰 만에서 소만으로 유입되는 해수로 알려져 있으며, 기존 결과의 범위는 0.8~1.8°C이었다(유 등, 1999, 2000, 2002). 그리고 측정 초기를 제외하고 수심 20 m 이내의 수층은 조밀한 등염분선과 높은 탁도를 보였고, 그 아래 수층인 최대수온층에 비해 수온이 낮았다(Fig. 4). 이러한 수온 역전 현상은 여름의 높은 대기복사열이 소만 해수에 직접적인 영향과 무관하며, 담수성 플룸의 유입에 따른 결과임을 말해준다. 여름에 큰 강수량과 기온의 상승은 하천이 없는 소만에서 표

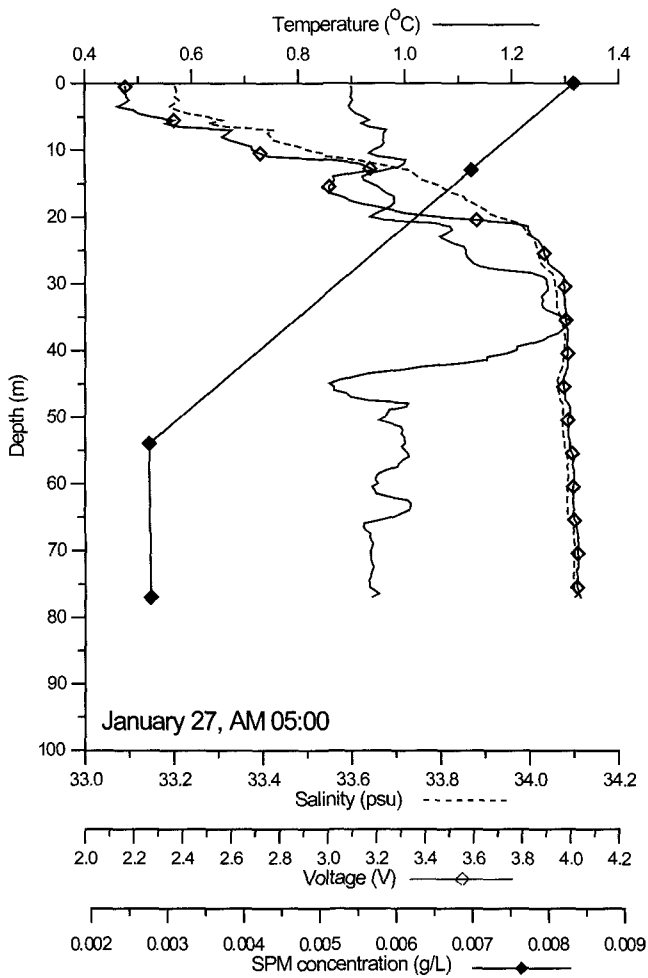


Fig. 7. Water column characteristics (temperature, salinity, transmissivity, and SPM concentration) at 27 January (05:00).

빙하성(supraglacial) 유출을 발생시켜(Mullins and Priddle, 1987), 유출 근원지를 중심으로 수심 1 m 이내에 저염·고탁도의 플룸이 발생한다. 결국 수심 약 20 m 이내의 수층은 표빙하성 유출수와 맥스웰 만 유입수가 혼합되어 나타나는 것으로 보인다. 수심 40~70 m에 나타나는 저온·고탁도(<0.8°C; 3.8~4.0 V)의 수층은 빙하기저부를 따라 공급되는 고탁도의 유출수가 증층을 따라 발달하는 전형적인 아빙하성 유출 기원의 특성을 보였다(Figs. 4a and 4d; 유 등, 1999; Domack *et al.*, 1994).

표층 2 m 이내에서 저온·저염·고탁도의 특성이 25일 19시, 26일 7시 그리고 27일 2시에 나타났었다(Figs. 4a and 4d). 이것은 빙벽 앞에서 표빙하성 유출에 따른 표층 플룸의 발달을 말해준다. 시간에 따른 표빙하성 유출량이 일정하고 바람이 미약할 경우, 조수 빙하로부터 열적인 용빙이 저조시보다 고조시에 증가하면서, 빙벽 앞에서의 표층 플룸은 고조시에 보다 뚜렷하게 발달하는 것으로 알려져 있다(유 등, 1999). 표층 플룸이 뚜렷하게 발달하는 시간과 최고조시(25일 21시, 26일 9시와 22시)를 비교하면, 표층 플룸이 두 번째까지는 최고조시보다 약 2시간 전에 발달하였다(Figs. 2 and 4). 그러나 세 번째에 발달하는 표층 플룸은 최고조시보다 4시간 후에 발달한다. 이러한 차이는 바람의 영향과 연관되어 있는

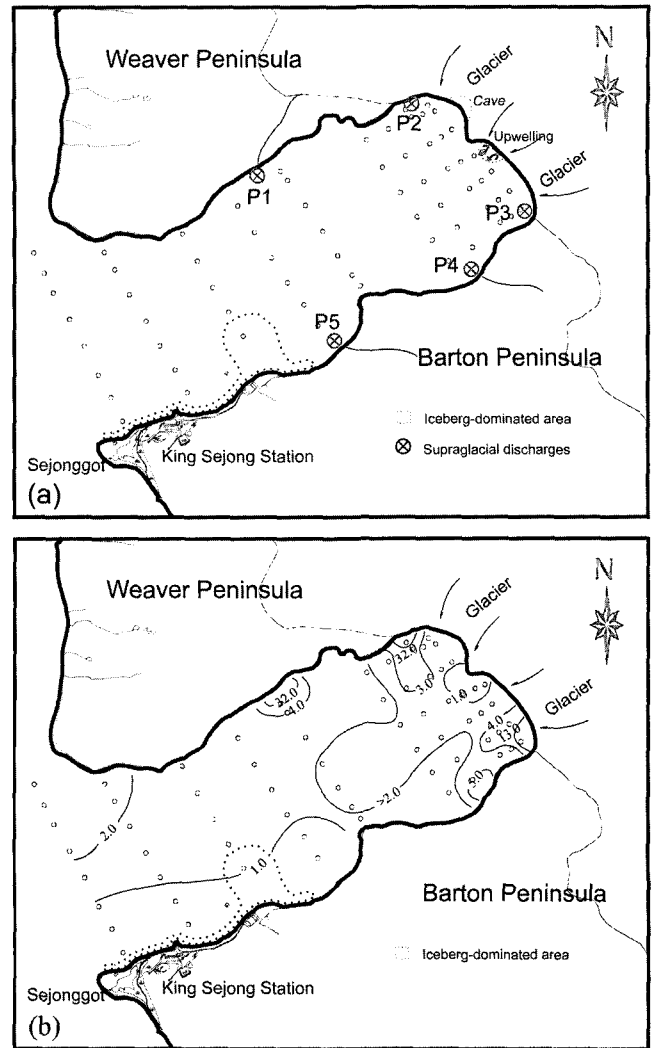


Fig. 8. (a) Surface water sampling sites at Marian Cove, and (b) horizontal distribution of SPM concentration.

것으로 사료된다. CTD 측정 초기에 풍속 약 10 m s^{-1} 정도를 유지하던 북서풍이 측정 중반 이후(26일 18시부터 27일 00시) 약 6 시간동안 15 m s^{-1} 이상으로 강해졌다(Fig. 2). 이 바람이 맥스웰 만 표층수를 소만으로 크게 이류(advection)시키면서 소만 표층과 맥스웰 만 유입수 사이에 활발한 혼합을 일으켜 표층 플룸의 특성이 약화되었고, 세 번째 최고조시(26일 22시) 전에 나타나야 할 고탁도 특성이 저탁도의 맥스웰 만 유입수에 의해 희석된 것으로 해석된다. 결국 세 번째 최고조시 전에 표층에 나타나는 고온·고염·저탁도의 특성은 소만의 표층수와 맥스웰 만 유입수 사이에 일어난 혼합의 결과를 보여준다(Fig. 4). 그리고 표층 플룸이 저조시인 27일 2시에 발달한 것은 27일 00시 이후의 약한 풍속과 26일 11시부터 18시까지 내린 강수로 인해 소만으로 표빙하성 유출의 유입이 증가되어 나타난 결과로 해석된다(Figs. 2 and 4).

ADCP 자료 결과에 의하면, 조류의 특성이 잘 보이지 않았다(Fig. 10). 이는 측정시기 이전부터 풍속 10 m s^{-1} 이상이었던 북풍과 북서풍의 영향인 것으로 보인다(Fig. 2). 특히 수심 17 m에서 측정기간 동안 북향 흐름이 지속적으로 나타났는데(Fig. 11),

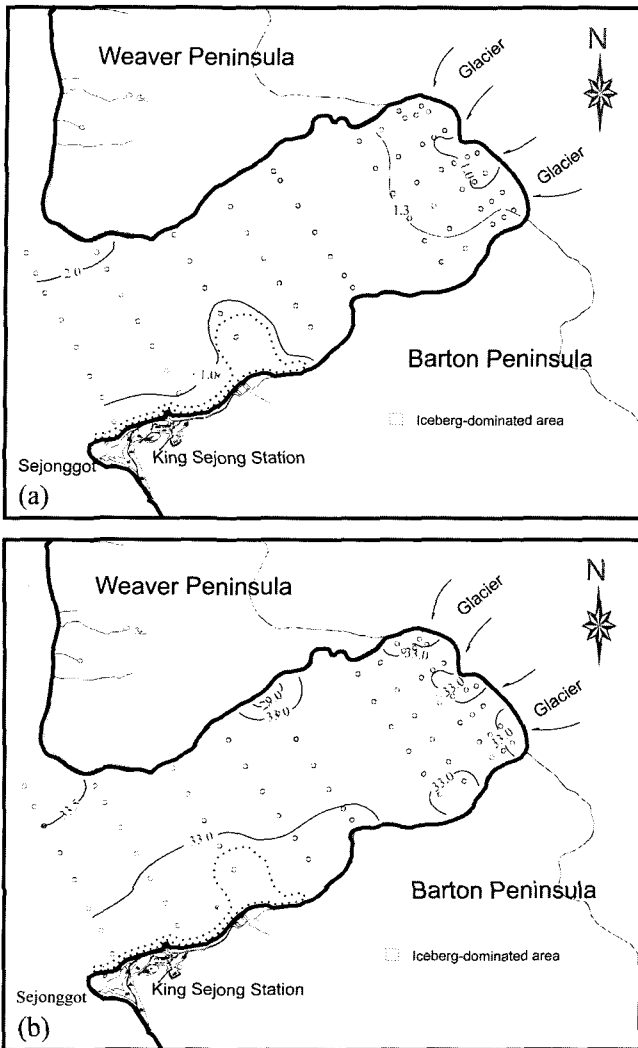


Fig. 9. (a) Horizontal distribution of surface temperature (°C), and (b) horizontal distribution of surface salinity (psu).

이는 강한 북풍과 북서풍이 소만 안쪽으로 지속적으로 불면서 마리안 소만 표층수가 소만의 남쪽 연안에 축적되었고 이 해수가 하강하여 나타난 결과로 해석된다. 측정 중반인 26일 12시부터 24시까지 약 6시간동안 15 m s⁻¹ 이상의 강한 북서풍이 불었던 시기에는 마리안 소만의 수심 33 m에서도 북향 흐름이 나타났다 (Fig. 10). 결국 지속적으로 강하게 부는 바람으로 인한 표층 응력이 빙벽 앞의 상당한 수심까지 영향을 주는 것으로 생각된다.

CTDT 측정 전반부를 제외한 나머지 기간동안 수심 40 m 아래에 나타나는 저온·고탁도의 중층 플룸은 아빙하성 유출수로서 맥스웰 만 유입수 밑의 수층에 위치하는 것으로 알려져 있다 (Fig. 4; 유 등, 1999). 일반적으로 아빙하성 유출은 빙하기저부 터널로 해수가 출입되면서 발생하는 용빙수의 유출이거나 조수빙하 표면에서 녹은 물이 연직 관수로 (vertical conduit)를 따라 내려가서 빙하기저부에서 나온다 (Domack and Williams, 1990; Domack *et al.*, 1994; Paterson, 1981). 그리고 이 물이 수직으로 부유하여 소만 해수와 유출수사이의 중성 부력 위치 (neutral buoyancy position)에서 수평적인 중층 플룸으로 발전한다 (Cowan and Powell, 1986).

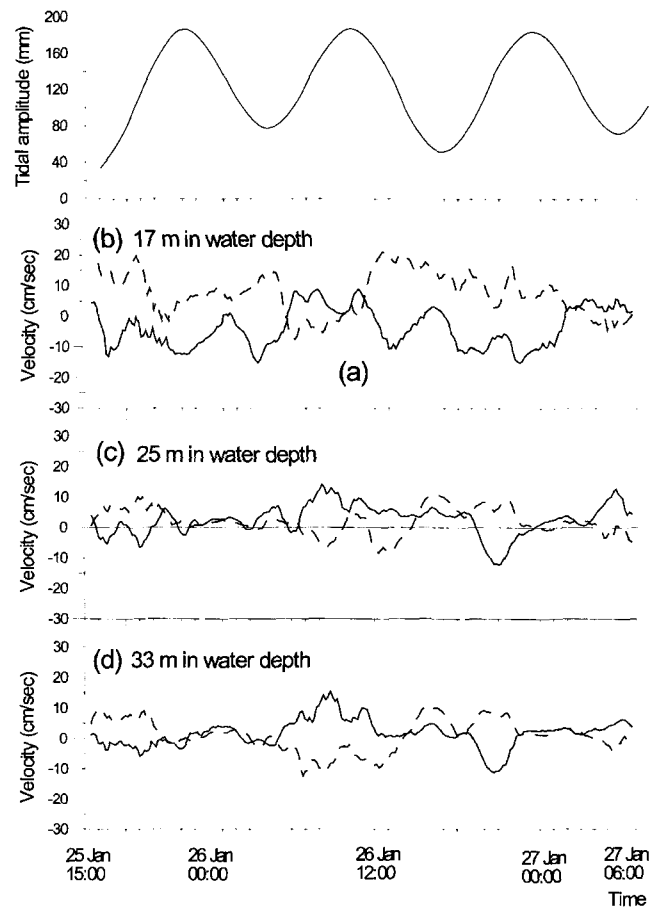


Fig. 10. (a) Tidal amplitude (mm), and (b)-(d) time series of velocity for U (solid line) and V (dotted line) components at 17 m, 25 m, 33 m of water depth, respectively.

유 등 (1999)은 마리안 소만에서 중층 플룸이 저조시에 비해 고조시에 발달하며 맥스웰 만 유입수 아래의 수심에 나타나는 사실을 보여주었다. 그러나 Fig. 4a의 결과에서 측정 초기에 나타나는 중층 플룸이 맥스웰 만 유입수 위치까지 발달하는 사실은 기존의 결과와 다르게 나타났다. 이러한 결과는 빙하 표면부터 이어지는 연직 관수로의 유출력 (discharge forcing) 및 기상조건과 밀접한 관련이 있는 것으로 해석된다. 여름철 중순인 1월말은 빙하 표면에 크레바스가 많이 존재해 연직 관수로가 발달한다. 그리고 CTDT 측정 시기 이전에 2.5°C 이상의 높은 기온이 유지되었고, 1월 24일 12시부터 25일 03시까지 지속적인 강수 (총강수량: 22.7 mm)가 있었다. 이렇게 높은 기온과 많은 강수량은 빙하 표면을 녹여 많은 양의 용빙수를 생성시키며, 이 용빙수는 연직 관수를 따라 빙하기저부에 도달한다. 빙하기저부에서 아빙하성 유출수는 연직 관수로의 상태 (유출 잠재력, 입구 크기와 위치 등)에 따른 용빙수의 활발한 유입으로 인해 그 운동량과 부유력이 커질 것이다. 결국 아빙하성 유출수가 맥스웰 만 유입수의 수심 위치까지 상승하여, CTDT 측정 초기에 맥스웰 만 표층수의 유입을 저해할 정도로 중층 플룸이 크게 발달한 것으로 해석된다. 그러나 측정 중반인 26일 2시 이후부터는 중층 플룸이 맥스웰 만 유입수 아래에 나타났다 (Fig. 4a). 이는 강수가 중단되어 연직 관수로로 용빙수의

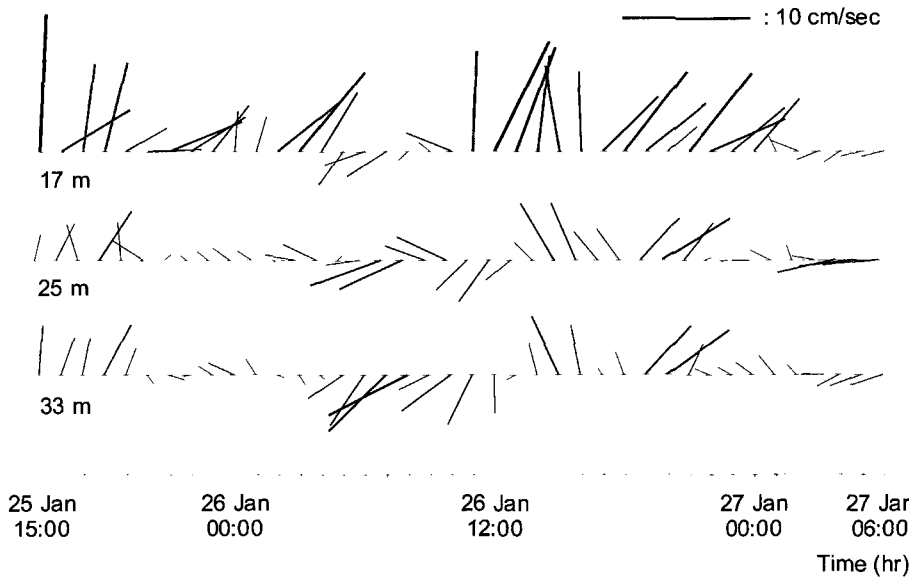


Fig. 11. (a) Tidal amplitude (mm), and (b)-(d) time series of low-pass filtered vector velocity at 17 m, 25 m, 33 m of water depth, respectively.

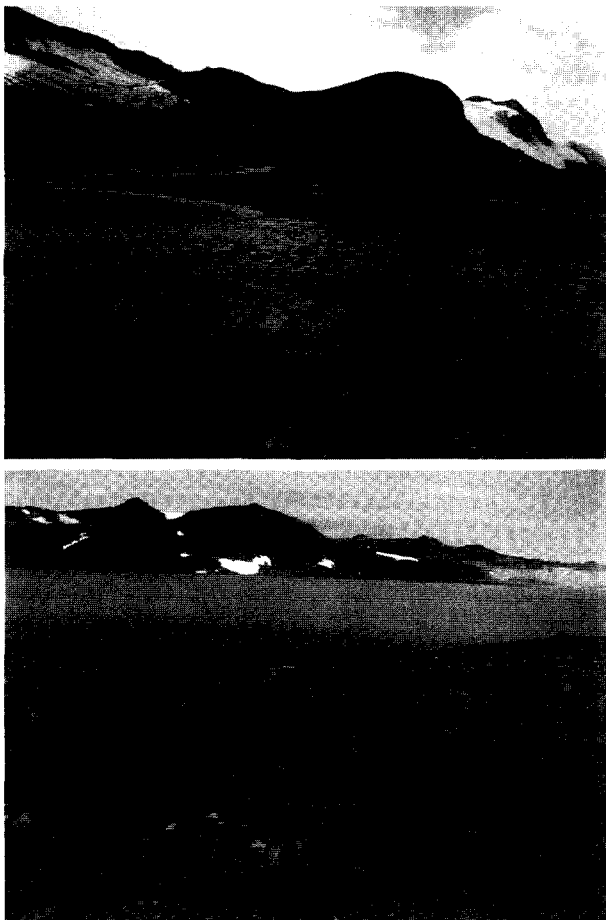


Fig. 12. Typical meltwater stream inflowing into the cove at St. P1. The dashed line indicates the boundary between turbid surface plume and seawater.

입이 약화되면서, 아빙하성 유출수의 운동량 저하에 따른 부유력의 약화로 인해 나타난 결과로 보인다. 26일에 15~21시까지 저

조시에도 불구하고 중층 플룸이 발달하였는데(Figs. 2a and 4a), 이는 26일 09~18시 사이에 내린 강수(총강수량: 12.8 mm) 시기 이후에 일어나 강수가 아빙하성 유출수의 일시적인 증가를 입증한다(Fig. 2e). 측정 기간동안 담수성 중층 플룸이 활발하게 유입되면서 34.10 psu의 등염분선이 시간이 갈수록 저층으로 내려가는 것을 알 수 있다(Fig. 4b).

2월 4일 표층수 특성 조사 시기에 용승이 중앙 빙벽 앞에서 일어나 빙하성 유출에 의한 기원임을 말해준다(Cowan and Powell, 1990). 용승수의 부유물질농도가 1.0 mg l⁻¹ 이하로 나타났다(Fig. 8b). 저탁도 수층인 맥스웰 만 유입수의 부유물질농도는 2.0 mg l⁻¹이었고, 아빙하성 유출 기원인 중층 플룸과 저층수의 부유물질 농도는 2.0~3.5 mg l⁻¹이었다(Fig. 5; Fig. 6; Fig. 7). 용승수가 맥스웰 만 유입수와 중층 플룸 그리고 저층수보다도 저탁도인 사실은 용승수를 중앙 빙벽의 기저부에서부터 기원하는 아빙하성 유출수로 볼 수 없다. 다른 간접적인 증거로서 유 등(2002)은 북쪽 빙벽의 기저부가 주된 아빙하성 유출지임을 밝혔다. 즉 북쪽 빙하 표면이 다른 곳에 비해 크레바스(crevasse)가 많고 빙하 수심(<60 m)도 낮아 연직 관수로(일반적인 한계 수심: 약 100 m)가 잘 발달되어 아빙하성 유출이 나타나는 것으로 해석하였다. 그러나 중앙 빙하는 빙하 수심이 100 m 이상으로 깊고 크레바스가 많지 않아 아빙하성 유출이 나타나지 않았다. 결국 2월 4일에 나타난 용승수는 부유물질 특성과 빙하 조건에 의해 아빙하성 유출수가 아닌 빙벽 해수면 바로 아래에서 연직 관수로를 따라 나오는 중빙하성 유출수임을 말해준다. 측정시기 이전의 높은 기온(>2.4~5.6°C)과 많은 양의 강수(3일 15시경부터 4일 02시경까지 28.4 mm)는 중빙하성 유출을 유도하는 잠재력으로 작용하였던 것으로 해석되며(Fig. 3b; Fig. 8a), 쇄설성 입자가 거의 없을 정도로 깨끗한 소만 중앙의 빙하로 인해 주변의 수층보다 부유물질농도가 낮았던 것으로 보인다.

P1~P6는 표빙하성 유출 장소로서 조수빙하를 포함해 담수성 녹수가 소만으로 유입되는 곳이었다(Fig. 8). 완만한 경사지인 P1은 소만 안쪽으로 높은 설선이 위치하고 있으며, P2와 P4는 육상

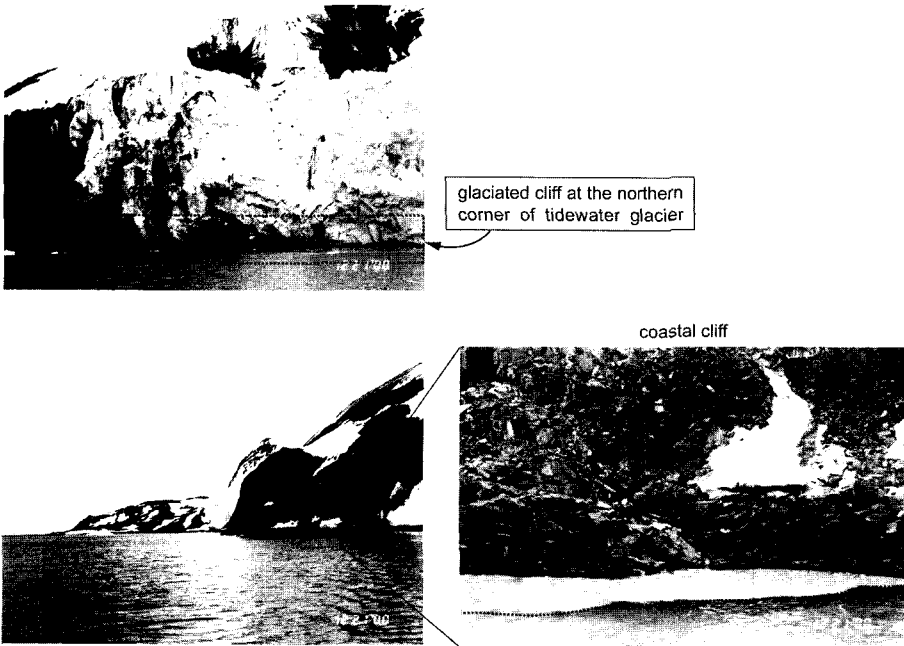


Fig. 13. Turbid meltwater incoming through coastal and glaciated cliffs of the inner cove at St. P2. The dashed boxes indicate the source of meltwater and the dashed line does the apparent boundary between turbid meltwater and seawater in the cove.

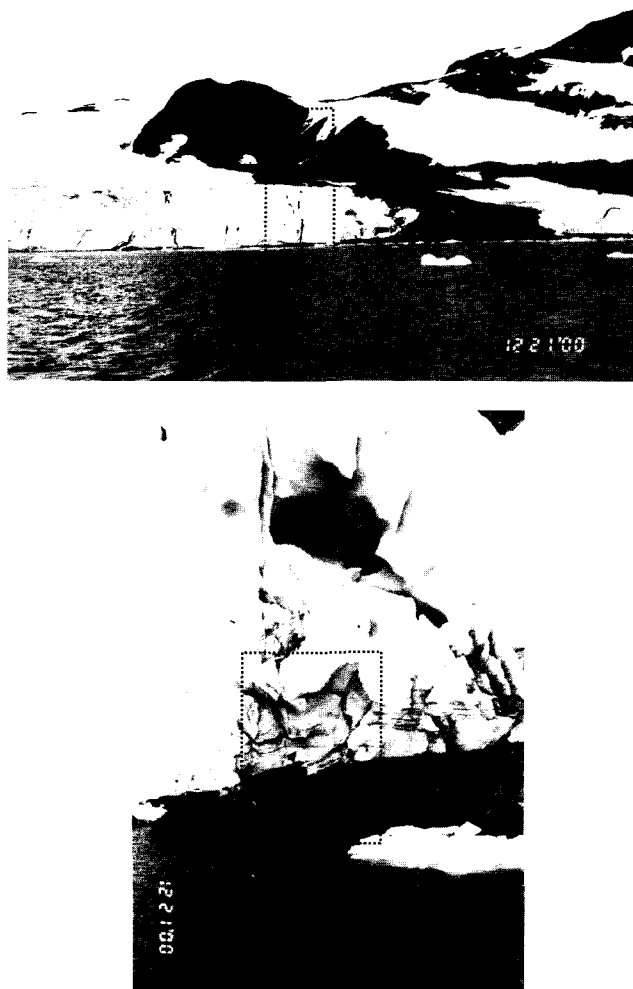


Fig. 14. Small waterfall located in the southern corner of tidewater glacier at St. P4.

빙하가 덮힌 암벽(glaciated cliff)이고, P3는 중앙의 조수빙하이며, P5 그리고 P6는 육상에 빙퇴석(moraine)이 발달되어있다(한국해양연구원, 1988, 1989; Fig. 1; Fig. 12; Fig. 13; Fig. 14; Fig. 15). P1의 육상지질은 자갈과 세립질 퇴적물(특히 화산기원의 풍성 퇴적물)로 구성되어있어(Griffith and Anderson, 1989) 혼탁한 담수가 용설수류를 통해 소만으로 많이 유입된다(Fig. 12). 그리고 P2의 육상지질은 퇴적물이 많이 노출된 암벽으로 혼탁한 담수가 암벽이나 육상빙하 기저부에서 흘러나오며(Fig. 13), P4는 P2에 비해 세립질 퇴적물이 적은 암벽으로 혼탁한 폭포수가 육상빙하의 기저부로 나와 소만으로 유입된다(Fig. 14). P5와 P6는 세립질 퇴적물이 거의 없는 빙퇴석으로 구성되어있으며, 용빙수가 빙퇴석 퇴적물의 투수층(effluent zone)을 따라 소만으로 유입된다(Fig. 15).

표빙하성 유출수가 유입되는 연안지역(P1~P6)의 표층수는 유입의 특성에 따라 서로 상이한 수층 특성을 보였다(Figs. 8 and 9). 유출 근원지 근처에만 저염·고탁도의 제한적인 특성이 나타난 것은 늦여름에 높은 대기복사열로 인해 용빙수가 소만으로 지속적으로 유입되었고, 당시의 약한 풍속($< 5 \text{ m s}^{-1}$)으로 혼합 에너지가 작아 나타난 결과로 해석된다(Fig. 3). 깨끗한 중앙 조수빙하기원의 저탁도 용빙수(P3)를 제외한 표층수의 부유물질농도는 북쪽 연안이 남쪽 연안보다 높게 나타났으며, P5와 P6의 부유물질농도는 P1, P2 그리고 P4보다 2~10배 이상 낮게 나타났다(Fig. 8b). 이는 높은 설선 위에서 녹은 용빙수가 P5와 P6의 투수층을 통과하면서 퇴적물이 여과되어 다른 유출지보다 저탁도의 특성을 보이는 것으로 사료된다. 현장 관찰에서 보았던 유출량도 P5와 P6 보다는 P1, P2 그리고 P4에서 크게 나타나 P1, P2 그리고 P4의 표빙하성 유출이 소만의 혼탁한 담수 유입을 주도하는 것으로 보인다. 결국 유출 근원지 담수의 특성은 연안 특성, 빙하조건 그리고 쇄설성 부유물질량의 차이에서 나타난 결과로 보인다.

표층수의 다른 특징으로 P1, P4, P5와 P6에서 나오는 유출수의 수온이 소만 안쪽의 주변 표층수와 빙벽 앞의 용빙수의 수온보다 약간 높다는 것이다(Figs. 8a and 9a). 그리고 소만 입구의 남쪽

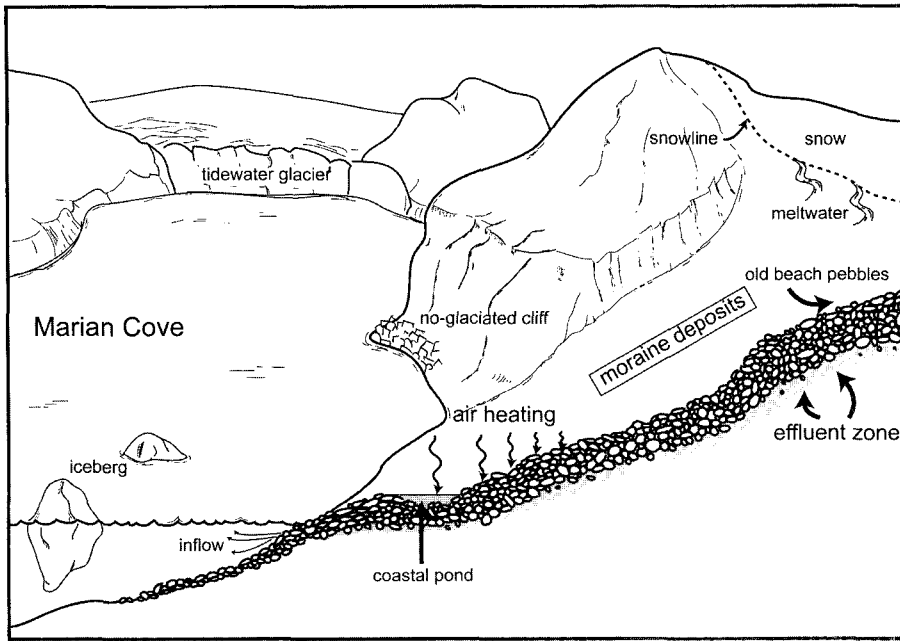


Fig. 15. Schematic model showing the meltwater input incoming into the cove through the effluent zone within moraine deposits at the coast of P5 and P6.

위버 반도의 표층수는 마리안 소만 중앙으로 들어오는 맥스웰 만 유입수보다 상대적으로 높은 수온과 낮은 염분을 보여주었다(Fig. 9). 소만의 여름에는 밤이 짧고 낮이 상당히 길어 대기복사열이 크다. 연안을 따라 내려오는 폭포수나 용설수류 그리고 투수층이 발달한 자갈해빈이나 빙퇴석(P5와 P6)의 담수는 대기복사를 많이 받고, 용승수와 빙벽 바로 앞 표층수는 조수병하의 잠열속(latent heat flux)의 영향을 받으면서 각기 다른 수온 특성을 보이는 것으로 해석된다. 바톤 반도 서쪽 조간대에 투수층이 발달한 자갈해빈에 나타난 사실은 빙퇴석 지형과는 비슷한 유형을 보여준다(한국해양연구원, 1990). 이 자갈해빈에서도 용설수류가 맥스웰 만으로 유입하는데, 이 물과 혼합한 주변 해수의 염분은 조석주기에 따라 변화했지만, 수온은 고온(>7°C)의 일정한 값을 유지하였다. 각각 다른 경로와 특성을 지닌 표빙하성 유출수의 결과로부터 수층 구조의 표층에 나타나는 저온·고탁도·저염의 소만 안쪽 특성이 고탁도 특성의 유출수와 저온 특성의 빙하기원 용빙수의 혼합 정도에 따라 반영된 결과로 사료된다. 다른 표층수는 소만의 남쪽 연안을 따라 입구까지 유빙이 점유하였던 장소로 저온·저염·저탁도의 특성을 보여주는데, 유빙의 양과 지연기간(residence time)이 지역적으로 소만의 표층 특성을 좌우하였음을 보여준다(유 등, 2000; Weeks and Campbell, 1973).

결론

2000년도 하계 동안의 마리안 소만의 수층은 연안에서 형성된 용설수류와 조수병하의 연직 관수로를 따라 용빙수가 소만으로 유입되면서 특징적인 수층 특성과 구조를 보였으며 이를 좌우하는 주된 요인은 바람과 강수이었다. 표층 플룸은 소만 안쪽의 표빙하성 유출로 인해 나타나며, 연안의 혼탁한 담수와 소만 안쪽의 조수병하의 용빙수가 만나 표층 플룸의 고탁도·저온 특성이 결정된다. 특히 강한 바람의 영향으로 수온최대층인 맥스웰 만 유입

수와 표빙하성 유출수가 혼합되면서 소만에 혼합층이 크게 발달하였다. 그리고 지속하여 강하게 부는 북서풍의 영향으로 소만 남쪽 연안에 표층수가 쌓이면서 결국 이 연안에서 하강류가 발생하였다. 많은 양의 강수로 인해 아빙하성 유출의 중층 플룸이 기존에 비해 맥스웰 만 유입수 위치까지 차지할 정도로 발달이 커졌으며, 소만 중층의 저염화가 일어났다. 그리고 해수면 아래의 중앙 빙벽에서 나오는 저온·저탁도의 용승수도 강수와 밀접한 관련이 있었으며, 중빙하성 기원으로 지금까지 관찰되지 않았던 현상이었다.

마리안 소만 빙벽 앞 부유물질 분산은 수층구조와 마찬가지로 바람과 강수에 의해 크게 영향을 받았다. 소만 안쪽 연안의 용설수류, 낙수 등을 통해 소만으로 퇴적물이 유입하며, 낙수 및 용설수류를 통해 유입된 담수는 연안 퇴적물 입자를 많이 포함한다. 대기온도가 높고 강수가 많았던 2000년 2월은 연안의 퇴적물이 소만으로 가장 많이 유입한 시기였다. 육성기원 퇴적물을 포함하는 표층의 혼합층과 아빙하성 중층 플룸이 발달하면서 소만 저층에 퇴적이 활발하였을 것이다. 부유물질 중 육성기원의 주된 근원지는 소만 북부 연안의 용설수류가 발달된 장소(P1), 빙하 북쪽 가장자리(P2), 그리고 빙하 남쪽 가장자리의 폭포(P3)이었다. 그리고 바람이 약할 경우 소만으로 유입되기 때문에, 육성기원 입자는 낙수나 용설수류가 발달한 유입 근원지 연안에 국한되어 유입되었다. 그러나 중빙하성 유출의 용승수는 상대적으로 녹수가 많이 유입되었음에도 불구하고 육성기원 쇄설성 입자가 거의 없어 소만 내 부유물질 입자의 퇴적작용에 미치는 영향은 작았다.

감사의 글

이 연구를 수행하는데 많은 조언과 배려를 해주신 한국해양연구원 극지연구본부의 장순근·이방용 박사님과 극지연구본부 연

구원, 그리고 축정을 도와주신 은누리호 승조원 여러분들에게 감사드립니다. 그리고 심사를 도와주신 군산대 최진용 교수님과 다른 심사위원님께서도 깊은 감사를 드립니다. 이 연구는 한국해양연구원 극지연구본부에서 수행하는 “남극권 고해양 및 고기후 연구(PP03106)” 연구사업과 국제공동연구사업(PN50600, PN50800)의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- 유규철, 윤호일, 오재경, 김예동, 강천윤. 1999. 남극 킹조지 섬 마리안 소만의 여름 수층 특성과 부유물질 분산. 한국해양학회지 바다, **4**: 266-274.
- 유규철, 윤호일, 오재경, 강천윤, 김부근. 2000. 유빙이 점유한 남극 마리안 소만의 여름기간 수층 구조와 부유물질 분산, 한국해양학회지 바다, **5**: 295-304.
- 유규철, 강천윤, 윤호일, 석동우, 오재경. 2002. 남 웨틀랜드 군도 마리안 소만의 계절적인 수층 특성과 부유물질 분산. 대한지질학회지, **38**(4): 573-593.
- 한국해양연구원. 1988. 남극 과학기지 주변 환경조사(예비조사). BSPG 00069-190-7.
- 한국해양연구원. 1989. 남극 과학기지 주변 환경조사(제2차년도). BSPG 00081-246-7.
- 한국해양연구원. 1990. 남극 과학기지 주변 환경조사(제3차년도). BSPG 00111-317-7, p. 307.
- Bintanja, R. 1995. The local surface energy balance of the Ecology Glacier, King George Island, Antarctica: measurements and modelling. *Antarct. Sci.*, **7**: 315-325.
- Bishop, J.K.B. 1986. Instrument and methods: the correction and suspended particulate matter calibration of Sea Tech transmissometer data. *Deep-Sea Res.*, **33**(1): 121-134.
- Court, G.S. 1996. The seal's own skin game. *Nat. Hist.* **105**: 36-48.
- Cowan, E.A. and R.D. Powell. 1986. Deposition of cyclically interlaminated sand-and-mud in an ice-proximal glacial marine environment. In: Biennial Am. Quat. Assoc; 9th (Champaign-Urbana, III.). Program Abstr., pp. 74.
- Cowan, E.A., R.D. Powell, and N.D. Smith. 1988. Rainstorm-induced event sedimentation at the tidewater front of a temperate glacier. *Geol.*, **16**: 409-412.
- 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 *Glacial Marine Environments: Processes and Sediment* (Dowdeswell, J. A. & Scourse, J. D. eds). Geological Society of 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., 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.
- Dowdeswell, J.A. and M. Cromack. 1991. Behavior of a glacier-derived suspended sediment plume in a small arctic inlet. *J. Geol.*, **99**: 111-123.
- 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.
- Kirkwood, J.M. and H.R. Burton. 1988. Macrobenthic species assemblages in Ellis Fjord, Vestfold Hills, Antarctica. *Mar. Biol.*, **97**(3): 445-457.
- Klöser, H., G. Ferreyra, I. Schloss, G. Mercuri, F. Laturnus and A. Curtosi. 1994. Hydrography of Potter Cove, a small fjord-like inlet on King George Island (South Shetlands). *Est., Coastal, Shelf Sci.*, **38**: 523-537.
- Marple, S.L. 1987. Digital spectral analysis with applications. Prentice-hall Inc., 1-171.
- Mullins, B.W. and J. Priddle. 1987. Relationships between bacteria and phytoplankton in the Bransfield Strait and southern Drake Passage. *British. Antarct. Surv. Bull.*, **76**: 51-64.
- Park, B.K., S. K. Chang and H. Chung. 1998. Recent retreat of ice cliffs, King George Island, South Shetland Islands, Antarctic Peninsula. *Ann. Glaciol.* **27**: 633-636.
- Paterson, W.S.B. 1981. The Physics of Glaciers. Pergamon, New York, p. 380.
- Svensen, H. and R.O.R.Y. Thompson. 1978. Wind-driven circulation in a fjord. *J. Phys. Ocean.*, **8**: 703-712.
- Syvitski, J.P.M., K.W. Asprey, D.A. Clattenburg, and G.D. Hodge. 1985. The prodelta environment of a fjord: suspended particle dynamics. *Sedimentology*, **32**: 83-107.
- 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., J.T. Andrews and J. A. Dowdeswell. 1996. Sediment deposition in an iceberg-dominated glacial marine environment, East Greenland: basin fill implications. *Global Planet. Change*, **12**: 251-270.
- Weeks, W.F. and W.J. Campbell. 1973. Icebergs as a freshwater source: an appraisal. *J. Glaciol.*, **12**: 207-223.
- Yoon, H.I., M.W. Han, B.K. Park, J.K. Oh and S.K. Chang. 1997. Glacial marine 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.

2003년 3월 28일 원고접수

2003년 9월 9일 수정본 채택

담당편집위원: 최진용