「The Sea」 Journal of the Korean Society of Oceanography
Vol. 5, No. 4, pp. 295 — 304, November 2000

유빙이 점유한 남극 마리안 소만의 하계기간 수층 구조와 부유물질 분산

유규철 · 윤호일[1] · 오재경* · 강천윤[1] · 김부근[1]
인하대학교 생물 · 해양학부, [1]한국해양연구소 극지연구본부

Water Column Structure and Dispersal Pattern of Suspended Particulate Matter (SPM) in a floating ice-dominated fjord, Marian Cove, Antarctica during Austral Summer

KYU-CHEUL YOO, HO IL YOON[1], JAE-KYUNG OH*, CHEON YUN KANG[1] AND BOO-KEUN KHIM[1]
Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea
[1]Polar Sciences Lab., KORDI, Ansan 425-600, Korea

수리적인 환경 요인(조석, 바람 등)에 따른 하계 서남극 킹조지섬 마리안 소만의 수층 특성과 부유물질 분산을 이해하기 위해 내만에 유빙이 점유했던 시기에 30분 간격으로 CTDT 연속 관측을 수행하였고 공간적인 표층 해수의 특성(수온과 염분)과 부유물질농도가 측정되었다. 소만 중앙의 수층은 탁도의 관점에서 크게 1) 저온 · 저염 · 고탁도의 표층 플름과 2) 고온 · 고염 · 저탁도의 맥스웰 만 유입수로 나누어진다. 소만 안쪽의 빙벽 앞과는 달리 빙하 기저부 유출에 의한 담수성 수층이 나타나지 않았다. 고온의 맥스웰 만 표층수와 조수빙하/유빙의 열적 융빙은 표층 혼합층을 발달시키며 특히 소만 내 유빙의 점유와 거동으로 인해 맥스웰 만 유입수의 수층 특성이 불안정해진다. 이러한 수층의 불안정으로 인해 조석주기에 따른 맥스웰 만 유입수와 표층 플름의 거동은 나타나지 않았다. 소만 북부 연안에 나타나는 표층 플름에 비해 고온 · 고염 · 고탁도 표층 플름은 강한 북서풍 계열의 바람으로 위버 반도 서부 연안을 따라 중앙 분지로 유입되는 연안류이다. 표층 플름의 육성기원 쇄설물은 주로 급경사 연안의 빙벽 가장자리와 일부 해안가의 융설수류로부터 유입되며 조석과 바람에 의해 분산되고 조절된다. 특히 대조차 시기의 북서풍은 고탁도의 표층 플름을 내만에 체류시키며 소만 분지에 육성기원 쇄설성입자의 퇴적을 증가시킨다.

Vertical measurement of CTDT at about 30 min intervals and spatial surface temperature, salinity, and concentration of suspended particulate matters were conducted to elucidate the character of water column and the dispersal pattern in a floating ice-dominated fjord, Marian Cove, West Antarctica. Marian Cove showed two distinct water layers in terms of turbidity; 1) cold, fresh, and turbid surface plume in the upper 2 m, 2) warm, saline, and relatively clean Maxwell Bay inflow between 15–45 m in water depth. Thermal melting of Maxwell Bay inflow and tidewater glacier/floating ices developed the surface mixed layer and the activity of floating ices cause Maxwell Bay inflow to be unstable. Due to the unstable water column, the development of Maxwell Bay inflow and subsequent surface plume are not influenced by tidal frequency. Coastal current generated by strong northwesterly wind may extend warm, saline, and turbid surface plume into the central part of the cove along the northern coast via the western coast of Weaver Peninsula. Terrigenous sediments of meltwaters from the glaciated ice cliffs near the corner of tidewater glacier and some coasts enter into the cove and their dispersion depends upon the hydrographic regimes (tide, wind, wave etc.). At the period of spring tide, the strong wind stress with the northwesterly wind direction reserve suspended sediment-fed surface plume and so allow the possibility of deposition of terrigenous sediments within the basin of cove.

서 론

서남극 킹조지 섬 바톤 반도와 위버 반도 사이에 위치한 마리안 소만은 길이 3.5 km, 폭 1.5 km를 갖는 맥스웰 만의 소규모 만 중의 하나이다(Fig. 1). 중앙 분지의 수심은 약 100 m이고, 최대 수심은 130 m로 빙벽 앞에 나타난다. 만 안쪽에는 약 30 m 높이의 조수빙하(tidewater glacier)가 존재하며 북쪽 빙벽이 남쪽 빙벽에 비해 크레바스(crevasse)가 잘 발달되어 빙하파열현상(calving)이 활발한 편이다. 빙벽 양쪽의 가장자리는 중앙 빙벽에 비해 쇄설성 입자를 많이 함유하며 빙벽 가장자리 급경사 연안에서는 깨

*Corresponding author: jkoh@inha.ac.kr

꿋하지 않은 눈이 쌓여 만으로 흘러내리거나 골을 따라 융설수류(meltwater stream)가 만 내로 흐른다.

아남극(subpolar)의 전형적인 피오르드(fjord)인 마리안 소만은 현재 점차적인 기온 상승으로 인해 빙하가 후퇴하면서 생성되는 해양분지의 진화과정 단계를 거치고 있다(Park *et al.*, 1998). 이러한 진화과정에서 부유물질을 함유한 담수성 플름(plume)의 동적인 거동을 포함하여 부유물질 분산과 수리적인 영향의 상호관계에 대한 연구가 KARP(Korea Antarctic Research Program)를 통해 이루어졌다(KORDI, 1997, 1998). 일반적으로 부유물질 농도와 분산은 표층의 기초생산력, 수송형태, 해류 순환 및 기상 변화에 영향을 받으며 피오르드의 생태계는 물론 생지화학적 순환에 크게 영향을 준다(Syvitski, 1989; Yoon *et al.*, 1998). 또한 재동작용으로 인해 부유된 쇄설성 입자의 퇴적과정은 저층 퇴적상의 변화를 가져오며(Yoon *et al.*, 1997), 부유물질의 수송 역학을 이해하는 것은 상주기지 주변의 오염물질 배출을 간접적으로 모니터링하는 역할을 하기 때문에 해양 오염물질의 잠재적인 영향을 평가하는데 도움을 줄 수 있다(Domack and Williams, 1990; Syvitski *et al.*, 1996).

현재까지 남극 피오르드에서는 유빙(drifting icebergs)이 없고 강우의 영향이 없었던 조건에서 조석이나 바람에 의해 좌우되는 부유물질의 수송과 분산에 대하여 연구가 이루어졌다(Domack and Williams, 1990; Dowdeswell and Cromack, 1991; Domack *et al.*, 1994; Klöser *et al.*, 1994). 유 등(1999)은 탁도를 기준으로 마리안 소만 빙벽 근처의 특징적인 수층을 구별하고 수리적인 영향에 따른 수송 기작을 규명하였지만, 다양한 환경요인에 따라 달라지는 부유물질의 분산 기작을 이해하기에는 부족하였다. 화산재나 육성기원 입자를 매우 적게 함유한 남극 빙하의 특성과 더불어 현재 빙하의 후퇴 속도가 매우 빨라지고 있는 현재의 마리안 소만에서 유빙이 존재할 경우에는 조석 및 바람에 의한 유빙의 거동과 그에 따른 수층 특성, 그리고 부유입자의 분산 및 퇴적 현상이 상이하게 발생할 것이다(Syvitski *et al.*, 1996). 결국 현재의 빙해양 퇴적작용에 대한 이해는 과거 시추 퇴적물에 나타나는 다양한 퇴적암상과 비교하여 그 당시의 여러 환경 요인(기후 및 퇴적학적 변동, 퇴적물의 기원 등)을 유추할 수 있는 기초가 된다.

소만 내 유빙이 많았던 조사기간동안 CTDT(Conductivity/Temperature/Depth/Transmissivity) 수직 측정과 공간적인 표층 부유물질농도 측정은 부유물질 분산의 기존 고찰과 비교할 수 있는 귀중한 자료이다. 이 논문의 목적은 소만 내 유빙이 많이 분포하는 환경에서 수리적인 영향(조석, 바람 및 강우량)에 따른 유빙의 거동과 부유물질의 분산을 밝히는데 있다.

연구 방법

1998년 12월 15일에서 17일 사이에 마리안 소만의 중앙(St. 1, 수심 100 m)과 외곽(St. 2, 수심 100 m)에서 CTDT 연속관측을 수행하였다(Fig. 1). 유빙이 소만 내에 점유하는 환경에서 12월 15일 12시부터 16일 16시까지 30분 간격으로 마리안 소만 중앙(St. 1)에서 CTDT 관측이 이루어졌으며, 소만 내 유빙이 외곽 근처까지 산재되어 조사선이 소만 외곽으로 이동한 후 St. 2에서 CTDT 연속 관측이 다시 수행되었다. 17일 02시부터 시작된 관측은 당일 07시에 완료되었고 5시간동안의 관측 결과는 St. 1의 CTDT 연속 관측과 연장선상에 있지 않아도 마리안 소만 중앙에서의 관측 결과와 비교·검토할 수 있다. 염분, 수온 및 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 출력은 0~5 V의 전압값이며 이것은 0~100% 투과도에 해당하기 때문에(Bishop, 1986), 전압값이 작을수록 고탁도를 의미한다. 수온에서 ±0.0001°C, 염분에서 ±0.0001 psu로 보정된 CTDT 기기를 0.3 m sec^{-1}로 투하하여 자료를 얻었고 이것을 수심 1 m 간격으로 평균하였다.

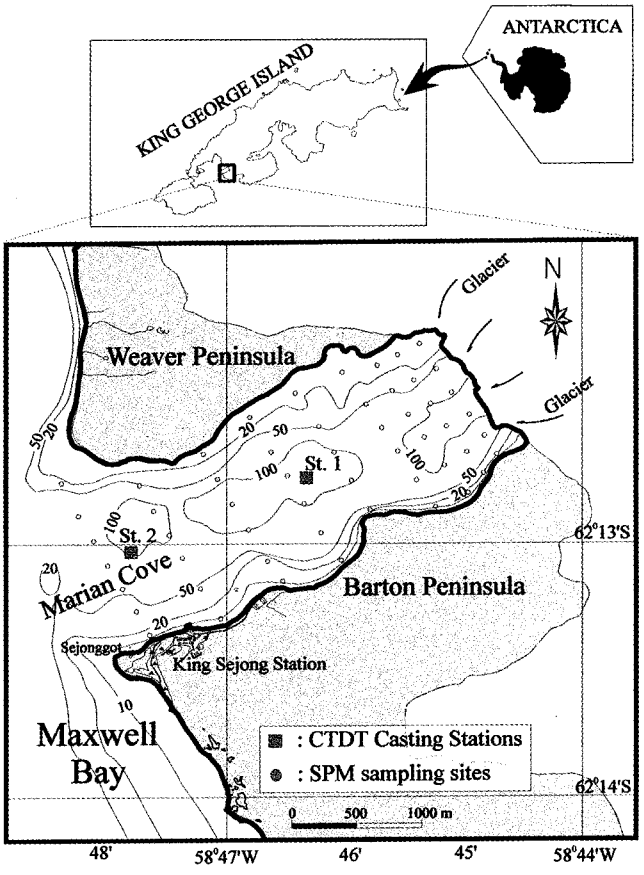

Fig. 1. Study area and position of CTDT casting sites (rectangles) occupied during 15–17 December, 1998 at the central (St. 1) and the outer (St. 2) basin of Marian Cove and SPM (suspended particulate matter) sampling sites (circles).

연속 관측 후반에 수층별 부유물질농도를 알기 위해 16일 12시경 관측지점에서 CTDT를 위로 올리면서 채수(수심 0, 10, 20, 30, 35, 70, 95, 105 m)하였다. 미리 무게를 측정한 Nucleopore 막 여과지(0.45 μm)에 해수 1 L를 여과시킨 후 그 여과지를 실험실 내 오븐에서 건조시켰다. 부유물질농도는 건조된 여과지의 무게를 측정하여 여과하기 전의 무게를 뺀 값으로 계산하였다. 전반적인 수층의 부유물질농도 범위는 5.1~6.6 mg l^{-1}로 차이가 크지 않다(Fig. 2). Syvitski *et al.*(1996)은 탁도를 관점으로 피오르드 환경

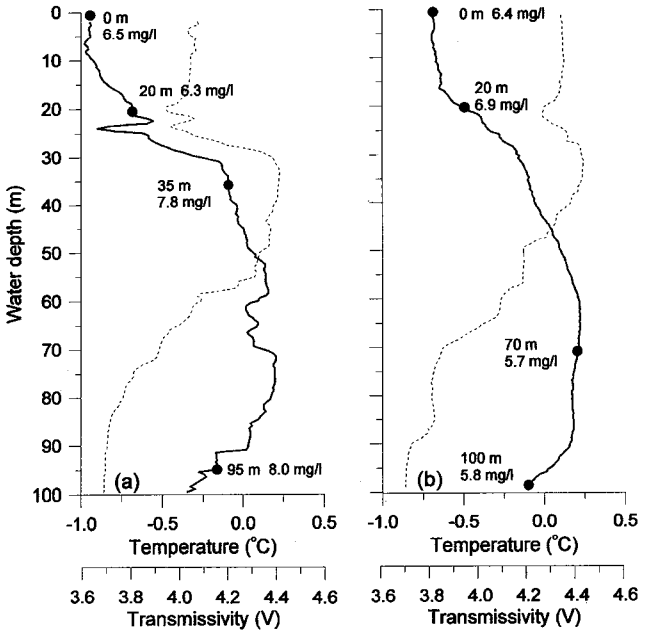

Fig. 2. Temperature and SPM concentration (a) at the central basin (a.m. 12:00, 16 Dec. at st. 1) and (b) at the outer basin (a.m. 08:00, 17 Dec. at st. 2). Note that the dashed line indicates temperature and the solid SPM concentration.

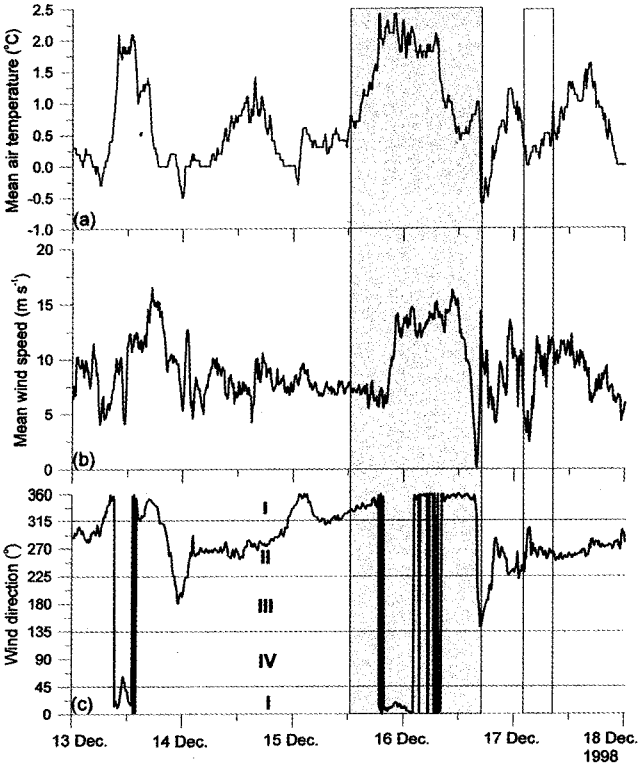

Fig. 3. Meteorological data at King Sejong station: (a) mean air temperature (°C), (b) mean wind speed (m s^{-1}), and (c) mean wind direction (°) (I: northern sector, II: western sector, III: southern sector, and IV: eastern sector). Shading boxes indicates the period of two casting surveys.

들 중에 남극 피오르드를 저탁도 환경으로 분류하였는데, 마리안 소만은 이와 일치한다. 투과도의 수직 분포도는 표층에서 최대를 보이고 중층까지 감소하다가 수심 90 m 이하에서 다시 증가하는 양상을 보여준다(Fig. 2). 또한 12월 21일과 29일에 소만에서 9개 측선을 설정하고 각 측선당 6개 정점에서 고무 보트를 이용하여 마리안 소만 표층에서 YSI 30 염분/전도도/수온 측정기기(각각 염분 및 수온의 정밀도: ±0.1 ppt, ±0.1°C)를 이용한 염분과 수온 그리고 부유물질농도를 측정하였다(Fig. 1).

기온, 풍속 및 풍향은 세종기지의 기상관측소에서 측정되었으며, 이에 관한 관측값은 10분 간격의 평균값이며 조석은 조화분석을 통해 얻어진 값을 이용하였다.

결과 및 고찰

마리안 소만 중앙분지에서 CTDT 연속 관측

CTDT 관측 초기에 유빙 띠가 소만 남동쪽 빙벽 앞에 형성되었으나, 점차 유빙이 남부 연안쪽으로 움직여 16일 10시경에는 유빙이 남부 연안을 따라서 약 4 m의 폭으로 유빙 띠를 형성하였다. 남극 소만에서 이러한 유빙의 이동은 강한 바람의 영향을 받는다(Madejski and Rakusa-suszezewski, 1990). 관측이 끝나기 2시간 전까지 관측기간 내내 약 7.5 m sec^{-1} 이상의 지속적인 북풍 계열의 강풍이 내만으로 불었다(Fig. 3). 관측 초기 남부 빙벽 앞에 형성된 유빙 띠가 나중에 남부 연안을 따라 띠를 형성한 것은 관측 전 우세했던 강한 북서풍이 북풍으로 바뀌면서 나타난 결과로 해석된다. 전반적으로 만 안쪽에 유빙이 많이 분포하고 있어 CTDT 연속 관측은 소만 중앙에서 이루어졌다.

수온, 염분 및 투과도의 수직 단면도에 의하면(Fig. 4), 전반적으로 수온과 투과도는 깊이에 따라 크게 변하는 반면(−0.8~0.1°C; 3.55~4.35 V), 염분의 변화는 표층(약 15 m 이내)을 제외하고는 크지 않다(33.55~34.15 psu). 마리안 소만은 5개의 특징적인 수층으로 구분된다. 첫째는 표층 0~2 m 이내에 나타나는 저온·저염·고탁도의 플름(<−0.4°C; <33.50 psu; <3.40 V)이고, 둘째는 수심 2~20 m 사이의 혼합층(−0.4~0.1°C; 33.50~34.00 psu; 3.4~4.1 V), 셋째는 상층 수층에 비해 고온·고염·저탁도인 수심 20~45 m 사이의 수층(>−0.1°C; 34.00~34.05 psu; 4.1~4.3 V), 넷째는 수심 45~80 m 사이의 중층수(−0.1~−0.8°C; 34.05~34.15 psu; >4.3 V)이며, 마지막으로 수심 80 m 이상의 저층수(<−0.8°C; >34.15 psu; <4.3 V)이다.

대기 가열로 인한 녹수(meltwater) 생성은 강우량이 전혀 없다는 가정에서 소만 배수분지(drainage basin) 내 빙하 표면적과 비례하며 또한 대기 온도가 높을수록 증가한다. 관측기간동안 평균 대기온도가 1.0~2.5°C까지 높아 대기의 표면 가열은 녹수 생성을 촉진시킨다(Fig. 3; Mullins and Priddle, 1987). 이러한 녹수는 조수빙하나 주변 해안 빙하, 그리고 빙벽 가장자리 골을 따라 소만 내로 들어오는데, 그 녹수는 저온·저염이며 혼탁해 소만 내에서 저온·저염·고탁도의 표층 플름을 형성한다(Syvitski, 1989).

마리안 소만은 조석주기에 의해 만 어귀 바깥의 해저 실(submarine sill)을 넘어오는 맥스웰 만 표층수와 해수 교환이 이루어진다(Bintanja, 1995). Figure 3a의 따뜻한 수층(20~45 m 사이)은 맥

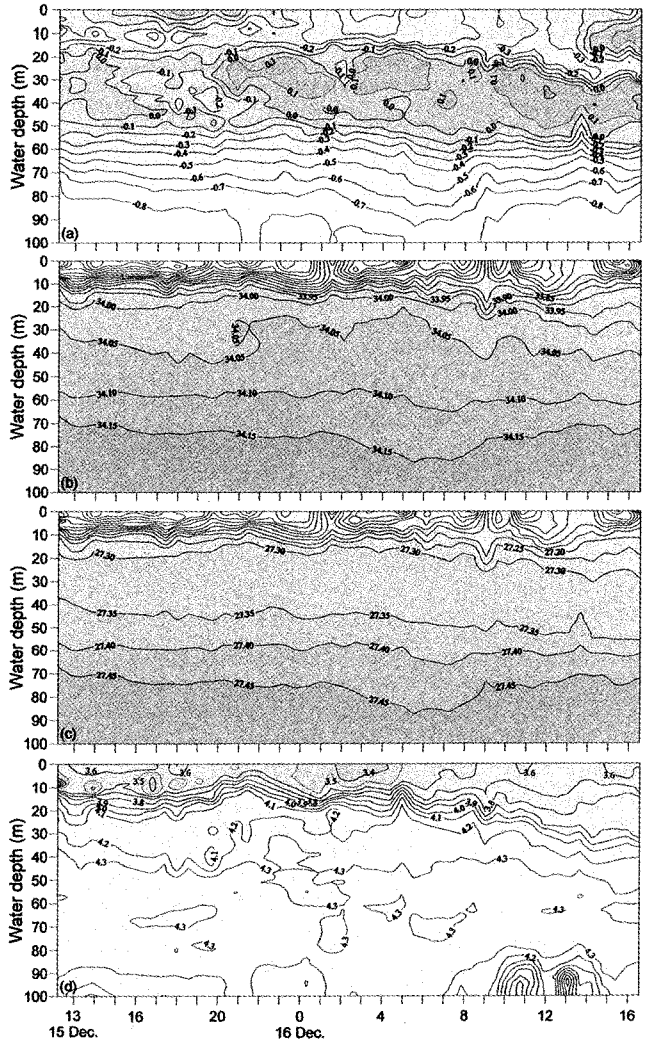

Fig. 4. Hydrographical profiles of CTDT mesurements at st. 1 during the period of 15–16 December, 1998: (a) temperature (°C), (b) salinity (psu), (c) density (sigma-t), and (d) transmissivity (V).

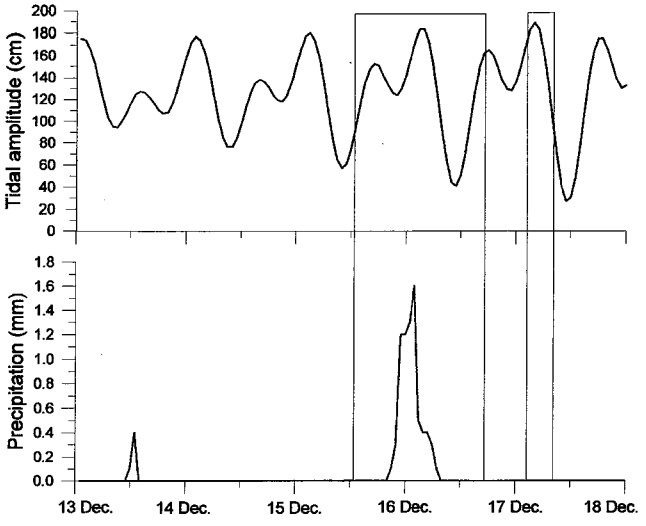

Fig. 5. Tidal amplitude (cm) and precipitation (mm) at King Sejong Station (13–18 Dec.).

스웰 만 유입수(Maxwell Bay inflow)이다. 조차가 크면 고온의 맥스웰 만 해수와의 교환이 활발해지고, 이로 인해 맥스웰 만 해수는 소만 내의 조수빙하와 접촉가능성을 높여 녹수량을 증가시킬 수 있다(Weeks and Campbell, 1973). 관측 당시 최대 조차는 약 1.4 m로서(Fig. 5), 평균 대조차(약 1.5 m)와 거의 일치해 고온인 맥스웰 만 표층수의 유입은 유빙과 조수빙하를 녹이는 작용을 할 수 있다. 상층에서 수심 20 m까지의 수층 구간은 밀도 기울기가 커서 혼합이 활발한 수층임을 말해주며, 저온 · 저염인 표층 플름 및 유빙에서 녹수 유입이 증가해 혼합층이 발달한 것으로 해석된다.

유 등(1999)에 의하면, 바람의 영향이 없고 유빙이 거의 없는 환경에서 마리안 소만의 수온최대층(temperature maximum layer)을 이루고 있는 맥스웰 만 유입수는 조석주기에 따른 발달을 보인다. 조석주기에 따른 마리안 소만 수층 특성 결과에 의하면 간조시보다 만조시에 그 발달이 크다(KORDI, 1997). 그러나 측정 당시에 평균 대조차에 가까운 조차를 보였음에도 조석에 따른 맥스웰 만 유입수의 변화가 없었으며 0.1°C 이상의 수온 최대값의 시간적 변화도 불규칙하였다(Fig. 4a). Figure 4a의 수온의 수직 단면도에서 −0.1°C 이하의 차가운 물이 맥스웰 만 유입수 내에 간헐적으로 나타나는 것은 소만 내에 존재하는 유빙과 유입수와의 열적 융빙(thermal melting)으로 인해 생성된 차가운 녹수때문일 것이다(Cowan and Powell, 1986). 결국 맥스웰 만 유입수는 소만 내의 유빙의 열적 융빙과 거동으로 인해 조석과는 무관하게 불규칙한 발달을 보이고 불안정한 교란 상태가 되었음을 말해준다.

하절기 마리안 소만의 빙벽 앞 표층수 특성은 내만의 주변 급경사 연안지역과 조수빙하의 표빙하성 유출수(supraglacial discharge)의 유입으로 인해 저온의 특성을 보인다(유 등, 1999). 그러나 관측 전반부(15일 15시부터 22시까지)와 후반부(16일 14시부터 관측종료)에 혼합층(수심 20 m 이내) 상부에 나타나는 플름은 고온(>−0.1°C)의 특성을 지닌다(Fig. 4). 하절기 복사열에 의한 해수 표면의 가열현상은 수심 1 m 이내로 제한되며 관측 지점 앞에 유빙으로부터 차가운 융빙수와 주변 연안에서 저온의 녹수가 계속 유입되는 사실로 미루어 고온의 표층 플름은 소만 외부로부터 유입된 것으로 보아야 한다. 이 플름의 발생 시기와 조석 주기를 비교해보면, 만조가 우세할 때 나타났다가 간조때 사라지고 다시 만조가 시작되면서 나타난다(Fig. 4; Fig. 5). 이것은 마치 조석 주기에 따라 소만 어귀의 실을 넘어 들어오는 맥스웰 만 유입수의 거동 경향과 유사하지만 표층 플름의 저염 · 고탁도 특성은 맥스웰 만 유입수와는 다르다.

관측 전반과 후반에 보이는 고온 · 저염 · 고탁도의 표층 플름과는 달리 중반인 16일 3시에서 5시 사이에서 최소 수온(<−0.5°C)과 염분(<33.50 psu), 고탁도(>3.35 V)의 표층 플름이 보인다(Fig. 4). 이 플름은 16일 01시에 1.5 mm의 최대 강우량을 보인 뒤 1시간 후에 나타나며(Fig. 5), 그 시기는 만조가 최대일 때이다. 최대 만조 시기와 더불어 소만에 내린 강우는 주변 연안이나 유빙 또는 조수빙하로부터 다량의 녹수를 형성하였고 이러한 녹수가 소만 중앙으로 유입되면서 저온의 표층 플름이 관측된 것으로 해석된다. 관측 내내 지속적으로 부는 강한 북풍의 바람응력은 표층수를 내만으로 유도해 고온의 표층 해류가 소만 내로 유입될 수 있

다(Madejski and Rakusa-Suszczewski, 1990). 그럼에도 불구하고 강우로 인해 표층 해수 특성이 크게 달라진다는 사실은 소규모 피오르드에서 강우량이 단기간의 부유물질 생성과 분산에 커다란 영향으로 작용할 수 있음을 말해준다(Cowan and Smith, 1988).

수심 80 m 이상의 저층수에서 중층수에 비해 높은 탁도(<4.3 V)가 간헐적으로 나타나는데, 이는 모든 피오르드의 주된 특성이다(Fig. 4d; Syvitski *et al.*, 1996). 이러한 현상이 관측되는 주된 원인은 1) 저탁류, 2) 해저 실 근처에서 조류에 의한 재부유와 체질작용(winnowing)이다(Pickard and Giovando, 1960). 저탁류는 조수빙하 기저부(tidewater glacial terminus)에서 기원하는 혼탁한 아빙하성 유출수(subglacial discharge)의 지류가 해저 바닥을 따라 흐를 때 발생한다. 이는 대조차 환경에서 조수빙하 기저부로부터 나오는 플름의 밀도가 클 경우 발생하지만(Powell and Molnia, 1989), 마리안 소만은 대조차일 때에도 아빙하성 유출이 매우 약해 저층에 고탁도 특성이 전혀 발견되지 않았다(KORDI, 1997). 또한 배수분지의 크기가 작고 소규모 연안 융설수류만이 존재해 하천에서 발생하는 고밀도 저탁류도 나타나지 않는다. 결국 해저 실 근처에서 조류에 의한 재부유와 체질작용이거나 수리적인 영향으로 소만 내의 유빙이 움직일 때 북부 연안(수심 20~30 m 이내)과의 바닥 충돌로 인한 재부유로 해석된다.

마리안 소만 외곽분지에서 CTDT 연속 관측

St. 2에서 관측시 조위는 만조에서 간조로 진행하는 중이었고(Fig. 5), 기상조건은 평균 대기온도 0.25°C, 5~12 m s^{-1}의 서풍이었다(Fig. 3). 이러한 조건에서 관측된 수층 결과는 전반적으로 수심 35 m 내의 수온 변화가 특히 심하게 나타난다(Fig. 6). 관측 전반부에 수심 20 m를 중심으로 0.3°C 이상의 고온수가 존재하는데 이 수층은 St. 1에서 CTDT 관측시에 동일 수심에 나타나는 맥스웰 만 유입수로 보인다(Fig. 6). 그러나 간조가 시작되면서 맥스웰 만 유입수가 존재하는 수심 20 m 근처에서 저온 수층(<0.1°C)이 나타난다. 이것은 소만 중앙과 외곽 일부까지 분포하던 유빙으로부터 기원하는 저온의 융빙수가 간조가 되면서 만 외곽으로 이동되어 나타난 것으로 해석된다. 또한 전반적으로 수심 10 m 이내에서 고온의 수온(>0.1°C)이 나타난다. 수심 10 m 이내의 수층은 다른 수층에 비해 저염 · 고탁도이지만 St. 1에서 보인 표층 혼합층의 염분과 투과도에 비해 고염·저탁도이다. 이는 외곽 관측 위치가 저온 · 저염 · 고탁도의 표층 플름의 근원지인 소만 안쪽과는 멀리 떨어져있고 또한 관측 6시간 전부터 강한 서풍에 의해 유도된 고염 · 저탁도의 맥스웰 만 해수가 유입되어 나타난 것으로 해석된다.

소만 외곽의 St. 2에서 관측된 수층 특성 결과는 전반적으로 St. 1의 중앙보다 수심에 따른 변화가 작다(Fig. 6). 외곽분지에서 관측된 저층수의 밀도는 중앙분지의 관측값보다 약 0.03 정도 낮은 값을 보인다. 이는 관측 시기의 차이로 인해 저층수보다 저염인 맥스웰 만 유입수의 영향을 받아 나타난 결과일 수도 있으나, 관측기간 내내 존재했던 유빙의 융빙수 영향일 수도 있다. 유빙이 차가운 물에서 녹는 위치는 주로 수면선이지만 온난한 물에서는 주로 떨어져 깨어지거나 하부에서 녹을 수 있다. 평균 수심 100 m인 마리안 소만에 유빙이 점유하면서 따뜻한 맥스웰 만 유입수와의 접촉은 유빙 하부에 저염인 융빙수의 생성해 결과적으로 저층 해수의 밀도에 변화를 줄 수도 있다. 이는 소규모 피오르드에서 유빙의 지연 시간(residence time)이 수층 특성 변화의 한 요인을 될 수 있음을 말해준다(Syvitski *et al.*, 1996). 또한 수심 80 m 이하 저층수의 고탁도 특성은 St. 1에 나타난 해석과 일치한다.

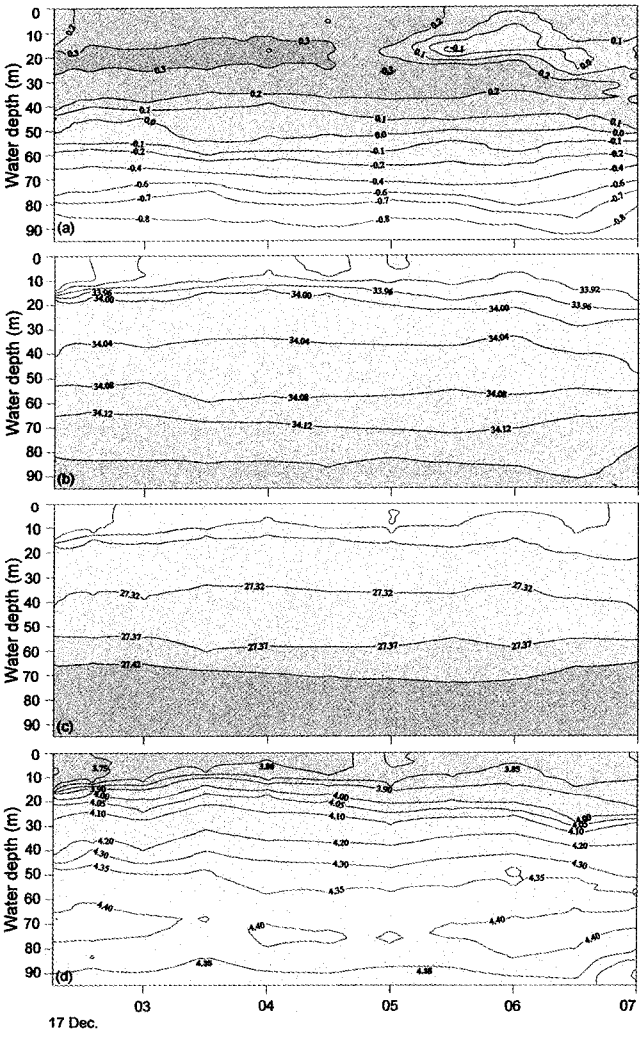

Fig. 6. Hydrographical profiles of CTDT measurements at st. 2 during the period of 17 December, 1998; (a) temperature (°C), (b) salinity (psu), (c) density (sigma-t), and (d) transmissivity (V).

마리안 소만 표층 염분 및 수온의 공간 분포

21일 오후 15시부터 시작된 조사는 약 3시간동안 이루어졌으며 그 시기에 유빙이 빙벽 약 20 m 앞까지 나란하게 띠를 이루고 있었다. 당시의 기상조건을 보면, 평균 대기온도는 1.5~2.7°C로 따뜻하였고, 북서풍 계열의 바람이 평균 6~8 m s^{-1}로 불었다(Fig. 7). 표층 수온의 범위는 남부 해빈 근처의 2.8°C를 제외하고 최저값 −0.3°C(빙벽 앞)에서부터 1.7°C(북부 연안)까지를 보인다(Fig. 8a). 조차는 약 1.8 m(평균대조차: 약 1.5 m)이었고 당시는 간조에서 만조로 전환하는 시기였다(Fig. 7). 또한 표층 염분의 범위는 최저 31.10 psu(내만 안쪽 남부 연안)에서부터 최대 33.48 psu(세종곶 앞)이다(Fig. 8b).

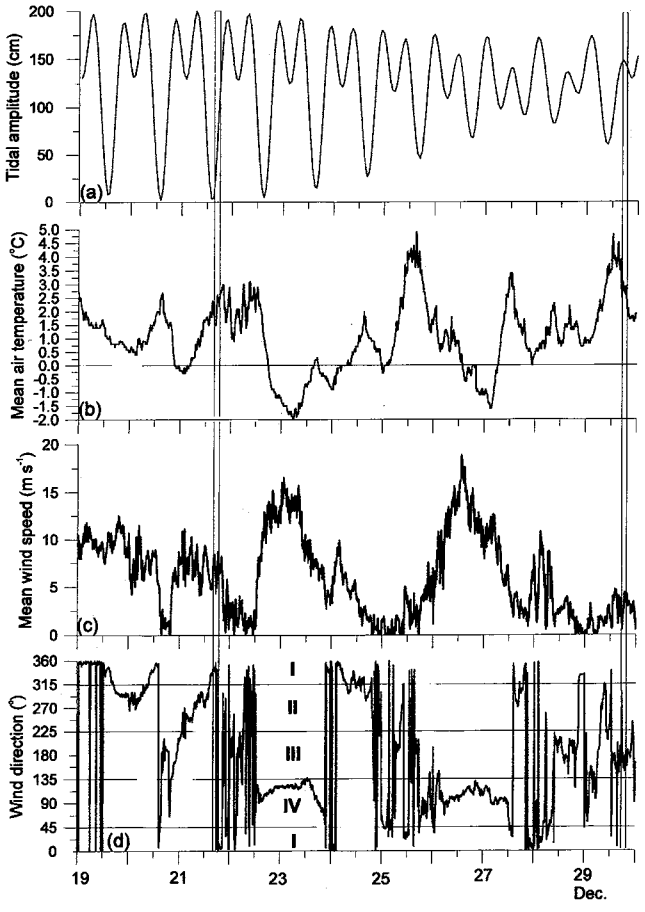

Fig. 7. Tidal amplitude (Dec 19 –29) and meteorological data from King Sejong station: (a) tidal amplitude (cm), (b) mean air temperature (°C), (c) mean wind speed (m s^{-1}) at 10 minutes intervals, and (d) mean wind direction (°) (I: northern sector, II: western sector, III: southern sector, and IV: eastern sector). Shading boxes indicates the period of field survey obtaining temperature, salinity, and SPM concentration data.

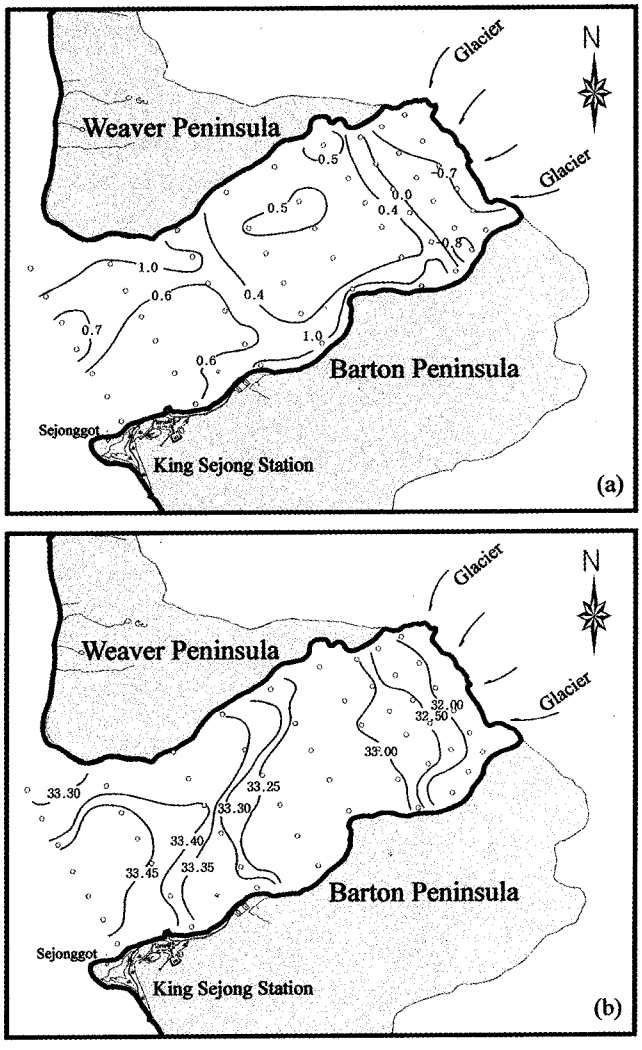

Fig. 8. Spatial distribution of (a) surface temperature (°C) and (b) surface salinity (psu) measured on 21 December, 1998.

표층 수온과 염분 분포를 보면, 저온 · 저염의 특성이 빙벽 앞과 소만 남부에서 강하게 나타나고 소만 어귀로 갈수록 점차 고온·고염화된다(Fig. 8). 빙벽 앞에서 저온·저염의 표층수(<0.0°C; <32.50 psu)는 빙벽과 나란히 분포하는데, 즉 빙벽 앞의 유빙 지역이나 남부 및 북부 급경사 연안에 형성된다. 당시의 조차(1.8 m; 평균대조차 약 1.5 m)로 인한 고온의 맥스웰 만 표층수의 유입 크기는 조수빙하와의 열적 융빙을 증가시키고 관측 전날의 높은 대기 온도는 연안으로부터 차가운 융설수류의 유입을 증가시킬 것이다. 당시 간조가 끝날 시기임에도 이 플름이 빙벽 앞에 제한적으로 분포하였는데, 이것은 관측일 이전에 지속적으로 불었던 강한 북서풍(6~8 m sec^{-1})이 간조시 외만으로 나가는 저온·저염의 표층 플름을 저지하고 고온·고염의 맥스웰 만 표층 유입수(>0.6°C; >33.50 psu)가 유입된 결과로 해석된다.

마리안 소만 어귀 중앙에 나타나는 맥스웰 만 표층 유입수(>0.6°C; <33.40 psu)와 비교되는 다른 표층수가 소만 외곽의 북부 연안(수심 20 m 정도)을 따라 나타난다(Fig. 8). 이 표층수는 소만 어귀 중앙의 표층수보다 고온이고 저염의 특성을 보인다. 마리안 소만 북부 위버 반도 연안에 나타나는 표층수는 소만 내부의 빙하 기원의 표층수와도 상반되기 때문에 당시 북서풍 계열의 강풍에 인해 위버 반도 서부 연안을 따라 소만 중앙으로 유입되는 연안류로 해석된다. 이는 St. 1의 CTDT 연속 관측 결과에서 보여준 고온 · 저염의 표층 플름과도 일치한다. 또한 해수의 유동이 작고 수심이 낮은 내만의 남부 연안(수심 1 m 정도)을 따라 고온(>1.0°C)의 해수 특성이 나타나지만 염분은 낮다. 이러한 특성은 맥스웰 만 표층수의 유입의 결과가 아닌 대기로부터 복사 가열(radiation heating)로 인한 결과로 해석된다.

29일과 동일한 정점에서 대한 2차 관측이 시도되었다. 8일 동안 빙하파열현상으로 빙벽이 약간 후퇴되어 1번 측선 앞에 새롭게 0번 측선을 설정하였다. 유빙이 전반적으로 만 안쪽에서 중앙 분지까지 드물게 나타나거나 남부 해안를 따라 존재하였지만, 대부분 4번 측선에 걸쳐 존재하였다. 29일 오후 17시부터 시작된 조사는 약 20시까지 21일과 동일한 정점에서 조사되었다. 이 시기는 조차가 0.9 m로 평균대조차에 비해 작았으며 고조이었다(Fig. 7). 평균 대기온도는 2.5~4.0°C로 매우 따뜻한 반면에 남풍 계열

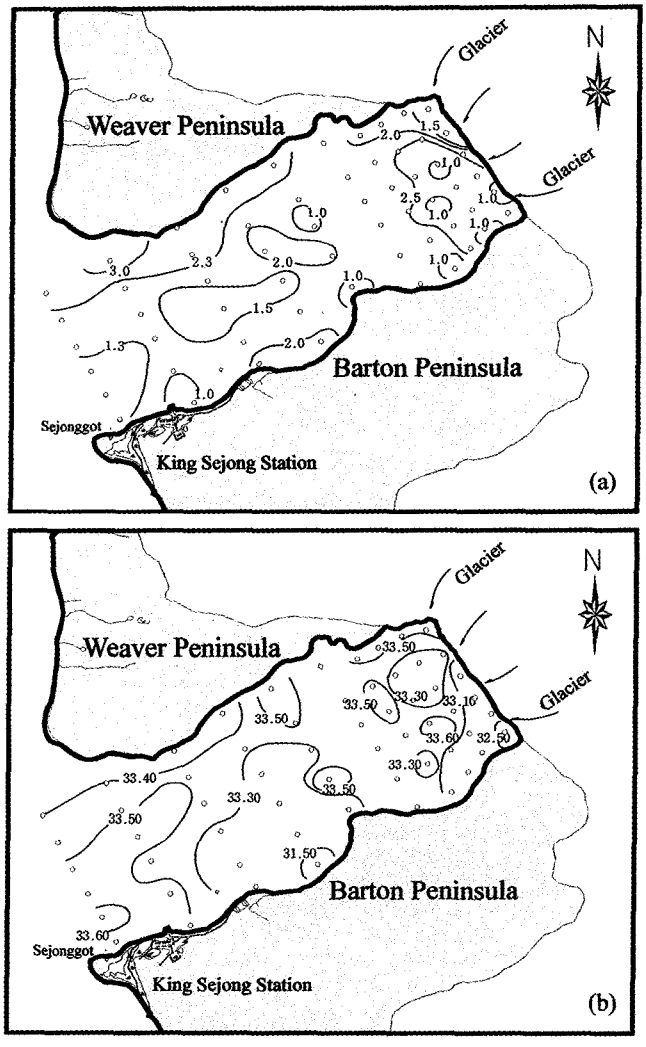

Fig. 9. Spatial distribution of (a) surface temperature (°C) and (b) surface salinity (psu) measured on 29 December, 1998.

의 바람이 우세하였지만 평균 풍속은 1~4 m sec^{-1}로 표층 해수의 유동이 거의 없었다(Fig. 7). 당시 전반적인 표층 수온의 범위는 1.1~2.5°C이었고 북부 연안과 만 안쪽(남부 연안)에서 표층 수온이 높았다(Fig. 9a). 표층 염분의 범위는 31.14~33.61 psu까지 변한다(Fig. 9b).

29일 표층 수온 분포를 보면, 유빙이 많이 존재하였던 빙벽 앞, 빙벽 남부 가장자리 연안 그리고 4번 측선을 제외하고 수온이 평균 1.0°C 이상으로 매우 높은 값을 보여준다(Fig. 9). 또한 2°C 이상의 물이 소만 북부 연안을 따라 중앙 분지까지 넓게 분포하는 반면에 소만 어귀 중심과 중앙에는 1.5°C 이하의 등온선이 자리잡고 있다. 표층 염분 분포는 빙벽 남부와 가장자리의 저염분(33.10 psu 이하) 지역을 제외하고 33.30 psu 이상으로 높다. 남부 빙벽 가장자리에 32.90 psu 이하의 저염 현상은 당시 육안 관찰로 미루어 남부 빙벽 가장자리에 육상빙하 기저부로부터 고탁도의 낙수가 소만으로 유입되어 나타난 결과로 해석된다. 소조차 기간이지만 관측 당시 약 5시간 지속된 만조에도 불구하고, 이 저염수는 빙벽 남부 가장자리에 제한적으로 존재한다. 즉 유빙이 존재하는 곳(4번 측선과 일부 남부 연안), 빙벽 앞 그리고 빙벽 가장자리를 제외하고 전체 소만의 표층 해수의 특성은 고온·고염인 물이 나타난다. 결국 당시 표층 해수의 특성 분포를 해석하는 것은 피오르드 표층 순환에 커다란 영향을 주는 조석 이외의 다른 요소인 바람을 고려하는 것이 필요하다. Figure. 7의 기상조건을 보면, 10 m sec^{-1} 이상의 강한 동풍이 관측 사흘 전(25일 12시)부터 27일 12시까지 이틀동안 발생하였다. 또한 관측 사흘 전부터 계속되는 소조차 환경은 조차에 의한 외부 유입수와의 표층 해수 교환을 매우 적게 만들었을 것이다. 또한 강한 동풍에 의한 소만 표층수의 이류(advection)는 빙벽 앞에서 중층수를 용승시켜 수온과 염분이 증가한 것으로 해석된다(유 등, 1999). 그 결과들로 인해 북서풍에 의한 연안수 유입(>1.5°C; >33.40 psu)이 소만 북부 연안에 나타나고 용승 흐름의 잔재(2.5°C; 33.60 psu)도 빙벽 앞에 존재하는 것으로 해석된다.

소만 중앙에 저온·저염수(1.5°C; 33.30 psu)가 존재한다. 조수빙하 앞 내만의 고온수는 4번 측선에 있는 유빙과의 열적 융빙을 촉진시키고 이로부터 생성된 융빙수는 관측 이전 간조시에 소만 중앙으로 흐를 것이다. 이 때 소만 중앙에서 혼합이 이루어지고 이로 인해 소만 중앙의 수온과 염분이 감소한 것으로 해석된다. 결과적으로 21일과 29일의 표층 해수 특성 분포는 조석이나 바람과 같은 수리학적 영향, 기상 조건 및 빙하 작용이 마리안 소만에 영향을 준 결과이다.

마리안 소만 표층의 부유물질농도와 퇴적작용

소만의 빙벽 앞에서 얻은 기존 자료에 의하면, 탁도의 관점에서 마리안 소만은 3개의 특징적인 수층인 표층 플름, 맥스웰 만 유입수, 그리고 조수빙하 기저부 기원의 중층 플름으로 나눌 수 있었다(유 등, 1999). 그러나 소만 중앙분지에서 관측된 이번의 연속관측 결과에 의하면 빙하 기저부 기원의 중층 플름이 나타나지 않았다. 아남극의 하계는 보통 12월에 시작되는데, 이 시기에 빙하 파열현상이 가장 심하다. 이로 인한 조수빙하의 후퇴는 대조차 환경일지라도 빙하 기저부 기원의 아빙하성 유출수 생성을 약화시키며 그 유출수에 의해 중층 플름이 형성된다고 할지라도 유출수의 작은 운동량(momentum)으로 인해 중앙분지까지 그 형태를 유지시키기 힘들다(Powell, 1990). 또한 관측 당시 빙벽 앞에 형성된 유빙이 조석이나 바람에 의한 원활한 해수 순환을 방해하고 유빙의 거동으로 인해 수층 교란이 발생하면서 이 플름의 발달을 저해한 것으로 해석된다.

21일 표층의 부유물질농도의 범위는 5.5~10.5 mg l^{-1}이다(Fig. 10a). 빙벽 앞의 부유물질농도는 내만 분지나 소만 중앙에 비해 작은 농도를 보여준다(Fig. 10a). 이는 대조차 환경에서 빙벽 앞에 밀집한 유빙/조수빙하와 따뜻한 맥스웰 만 표층 유입수의 열적인 접촉에 의해 저온·저염의 융빙수가 증가할지라도 빙벽 가장자리 및 연안에서 나오는 부유물질량에 비해 조수 빙하와 빙벽 앞 유빙이 상대적으로 매우 적은 부유물질을 포함한 결과로 해석된다. 또한 소만 중앙에 나타나는 높은 농도(>9.5 mg l^{-1})는 관측 이전의 간조시에 부유물질이 소만 바깥으로 이동되어야 하지만 지속적으로 부는 강한 북서풍으로 인해 소만 중앙으로 부유물질이 집적된 결과이며 소만 어귀의 북부 연안에서 고농도의 부유물질(>8.0 mg l^{-1})의 근원은 표층 해수 특성과 마찬가지로 위버 반도 서부 연안을

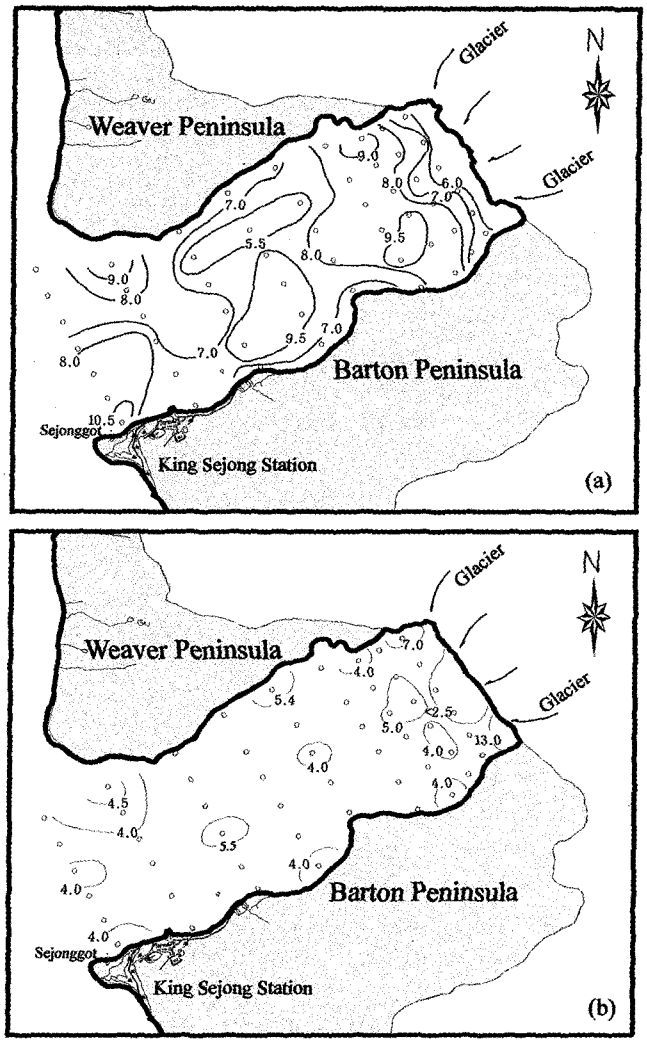

Fig. 10. Spatial distribution of SPM concentration (mg l^{-1}) measured on (a) 21 and (b) 29 December, 1998.

따라 유입되는 표층 플름으로 해석된다.

29일 표층의 부유물질농도 분포는 남부 빙벽 가장자리의 13.2 mg l^{-1}를 제외하고 1.6~5.9 mg l^{-1}이다(Fig. 10b). 남부 빙벽 가장자리의 높은 부유물질농도(>13.0 mg l^{-1})는 당시 현장 관찰로 미루어 육상 빙하 기저부에서 기원하는 혼탁한 낙수가 존재해 이로부터 부유물질이 유입되어 나타난 결과이다. 그 다음으로 북부 빙벽 가장자리에서 높은 값을 보여주고 다른 연안 부근에서 4.0~6.0 mg l^{-1} 사이의 값을 보여주는데, 이는 당시 연안에서 높은 대기온도로 인해 형성된 소규모 융설수류의 육성 퇴적물이 유입되어 나타난 것으로 해석된다. 또한 소만 어귀 북부 연안의 높은 부유물질농도(>4.0 mg l^{-1})는 21일 관측 결과와 마찬가지로 외만의 위버 반도 연안을 따라 유입되는 표층 플름과 관련이 있다. 21일과 마찬가지로 다른 정점들보다 빙벽 앞에 부유물질농도(<2.6 mg l^{-1})가 낮다. 이는 깨끗한 조수빙하의 부유물질 유입량이 연안 융설수류의 것과 비교하여 낮다는 사실을 재차 입증한다.

21일 평균 부유물질농도값이 7.6 mg l^{-1}이고 29일에는 4.1 mg l^{-1}로 21일에 비해 29일의 농도가 상대적으로 작다. 21일과 29일의 평균 조차와 풍속을 비교하면 21일에는 각각 1.8 m와 6~8 m s^{-1}인 반면에 29일에는 0.9 m와 1~4 m s^{-1}이고 풍향은 양쪽 모두 만 안쪽으로 불었다. 21일에 대조차로 인한 조수빙하와의 열적 융빙이 커져 표빙하성 유출수의 유입이 커지고 강한 북서풍으로 인한 바람응력은 소만 바깥으로의 표층 순환을 제한시켜서 결국 소만 내 표층 부유물질농도를 증가시키는 역할을 하였다. 그와 반면에 26일 이후의 강한 동풍은 빙벽 앞에서 고온 · 고염 · 저탁도의 중층수의 용승을 일으키고 29일까지 계속되는 소조차 환경과 약한 바람응력으로 인해 맥스웰 만으로부터의 표층 해수 교환이 작아져 전반적으로 29일 소만 내 부유물질농도가 21일에 비해 낮은 것으로 해석된다.

29일의 부유물질 분포 특성은 만조가 되면서 저탁도의 맥스웰 만 표층수가 유입하는 것을 잘 반영하지만, 21일의 분포는 저탁도의 맥스웰 만 유입수의 영향을 직접 받는 세종곶 연안에서 고농도값(10.5 mg l^{-1})이 나타난다(Fig. 10a). 이는 대조차 환경인 21일 관측 당시에 수심이 낮은 세종곶 연안으로 나오는 썰물이 강한 북서풍으로 생성된 파랑과 더불어 맥스웰 만에서 다시 들어가려는 밀물과 만나면서 생성되는 와동(turbulence)이 세종곶 연안 바닥의 퇴적물을 재부유시켜 내만으로 분산시키는 효과에 의한 것으로 해석된다. 이러한 지형적인 영향과 수리역학적인 관계에 의해 발생되어 분산하는 부유물질량이 적을지라도 전체 마리안 소만의 부유물질농도 범위를 고려할 때 그 양은 무시할 수 없는 크기이다. 29일의 현장조사 시기는 소조차인 동시에 바람이 약해 그런 유사한 현상이 나타나지 않은 것으로 생각된다.

표층 부유물질농도 분포 결과로부터 마리안 소만의 조수빙하가 육성 기원 입자가 적게 함유하고 있는 점과 연안에 발달한 혼탁한 융설수류를 감안하면 육성 기원 퇴적물의 유입은 융설수류에 의해 좌우된다. 결국 조석주기에 따른 맥스웰 만과의 해수 교환으로 발생하는 표층 플름의 발달 정도와 부유입자의 유입량은 절대적인 관계일 수 없다. 즉, 대기 가열과 강우량에 의해 조절되는 연안 융설수류의 크기가 소만 내 육성 쇄설물의 유입 정도를 결정한다. 또한 소만 내 표층 플름의 순환에 커다란 영향을 주는 바람은 조석과 더불어 부유입자의 분산과 퇴적에 영향을 주는 다른 요인이다. 맥스웰 만 표층 부유물질농도 분포는 마리안 소만과 포터 소만(Potter Cove)의 어귀에서 가장 높은 농도를 보여준다(Chang *et al.*, 1990). 이는 소만의 부유물질을 함유한 표층수가 맥스웰 만으로 유출된다는 것을 말해준다. 주로 조석주기에 따라 표층수가 맥스웰 만으로 유출되지만 바람은 맥스웰 만 표층수 유입과 마리안 소만 내 혼탁한 표층 플름의 유출에 영향을 줄 수 있다. 즉, 지속적으로 부는 강한 북서풍이나 서풍은 혼탁한 표층 플름의 유출을 지연하는 반면에 동풍은 그 유출을 크게 할 것이다(Klöser *et al.*, 1994). 연안으로부터 표빙하성 유출수의 유입량이 일정할지라도 지속적으로 부는 강한 북서풍의 조건에서 부유물질이 실린 표층 플름의 소만 바깥 유출이 저지되면서 부유퇴적물의 퇴적은 증가할 것이다. 이러한 상황이 대조차 환경과 만나면 소만에서 부유퇴적물의 퇴적은 더욱 상승될 것이다.

빙하파열로 인해 마리안 소만에 유입된 유빙은 피오르드 순환에 따라 소만 내 위치와 지연 시간이 달라진다. 마리안 소만에서 조수빙하의 파열과 유빙의 수층 교란은 결국 조수빙하 기저부 기원의 중층 플름 발달을 저해하기 때문에 그 플름 내의 쇄설성 입

자의 퇴적과정은 조석과 바람에 의한 것보다 더욱 불규칙해진다. 이러한 유빙의 밀도와 크기는 수층을 교란시킬 뿐만 아니라 수심이 낮은 연안지역에서 해저 바닥과의 충돌로 바닥 퇴적물을 재부유시킨다. 결국 소만 내 유빙은 조석 및 바람과 더불어 부유물질 분산을 조절하는 중요한 요인으로 작용할 수 있다.

결 론

빙하파열로 유빙이 마리안 소만을 점유하는 환경에서 바람에 의해 형성된 해류와 조류는 유빙의 거동과 위치뿐만 아니라 소만 내에 유빙을 지연시키며 소만의 부유물질 유입량과 분산에 큰 영향을 준다. 소만 중앙까지 유빙이 점유하는 시기에 소만 중앙의 CTDT 연속 관측 결과에서 빙하기저부 기원의 수평 플름은 보이지 않았고 저온·저염·고탁도의 표층 플름이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 또한 조석주기에 따라 소만 내로 유입되는 고온·고염의 맥스웰 만 유입수가 관찰되었고, 관측 기간 내내 유빙의 거동으로 인해 유입수 특성의 시간적 변화가 심하였다. 그 결과 조석주기에 따른 표층 플름과 맥스웰 만 유입수의 발달 형태가 뚜렷하지 않은 반면에 표층 플름과 맥스웰 만 유입수와의 혼합층이 발달하였다. 또한 소만의 빙하 기저부 유출수의 농도가 작아 중앙분지까지 미치는 중력류가 없다는 사실을 감안하면, 저층수의 고탁도 특성은 조수빙하 기저부에서 기원한 밀도류에 의해 수송된 부유퇴적물의 농도에서 나타나는 결과가 아닌 소만 내 순환으로 인한 부유퇴적물의 수송 결과이거나 유빙의 이동으로 인한 해저와의 충돌로 재부유되는 퇴적물의 수송 결과일 수 있다. 특히 소만 안쪽의 표층 최상에서 저온·저염·고탁도의 표층 플름과 비교되는 고온·저염·고탁도의 표층 플름은 소만 내부 근원이 아닌 맥스웰 만으로부터 위버 반도 서부 연안을 따라 들어오는 연안 표층수로 해석된다. 이러한 연안수의 유입 정도는 수리학적 환경(조류, 바람 등)에 의해 좌우되며 만조가 우세하거나 북서풍 계열의 강한 지속성 바람이 부는 시기에 그 유입은 커질 것이다.

마리안 소만 표층 수괴를 대표하는 저온·저염인 표층 플름의 근원은 하천이 아닌 조석 유동에 의한 소만 내 조수빙하와의 열적 융빙수로 만들어지거나 주변 연안에 발달한 융설수류이다. 조석주기에 따라 깊은 해저 실을 넘는 고염의 맥스웰 만 표층수는 저염의 마리안 소만 표층 플름과 만나면서 미약한 하구 형태의 순환이 이루어진다. 마리안 소만에 유입되는 부유입자의 양은 조수빙하에서 매우 작은 반면에 빙하와 육지가 접한 빙벽 가장자리나 급경사 연안에서 육성 기원 쇄설물을 함유한 융설수류로부터 많이 공급받는다. 바람과 강우의 영향이 거의 없고 대기 온도가 일정하다고 가정하면, 만조시에 표층 플름이 더욱 발달되고 그 탁도 또한 증가하는 반면에 간조시에는 그 발달 정도가 작아지고 탁도도 감소한다. 이 표층 플름 내의 부유입자는 조석주기에 따라 어귀쪽으로 수송되거나 내만에 퇴적된다. 그러나 바람 방향과 소만 내 유빙의 활동은 부유입자의 분산과 퇴적 과정을 더욱 복잡하게 만든다. 전반적으로 대조차 환경과 더불어 북서풍 계열의 바람이 지속적으로 크게 부는 경우 소만 어귀 바깥으로 부유물질 유출이 저지되면서 소만 내 집중적인 퇴적이 발생할 것이다. 그럼에도 불구하고 아남극 피오르드는 탁도의 관점에서 북극권의 피오르드와 비교해 저탁도 환경(<10 mg l^{-1})으로 실질적인 퇴적율은 크지 않을 것이다.

표층에 작용하는 강한 바람응력에 의해 발생한 파랑은 연안지역의 퇴적물을 재부유시키거나 지형적인 돌출부에서 역학적으로 발생시킨 쇄설물을 수송시킬 수 있다. 전반적으로 소만 내 부유물질농도가 매우 낮은 편이기 때문에 재부유에 의한 입자들의 소만 내 유입은 표층 플름 농도 분포에 커다란 영향을 줄 수 있다. 특히 위버 반도 북부 연안에 나타나는 고염·고탁도의 표층 플름이 위버 반도 연안류에 의해 유입되는데 이는 맥스웰 만 위버 반도 저수심의 서부 연안에서 재부유된 입자가 연안류에 의해 위버 반도 남부 연안을 거쳐 유입되는 것으로 해석된다.

마리안 소만으로 국한되어 부유물질 분산과정을 다루었던 기존 연구와는 달리 유빙의 이동과 지형적인 조건, 수리적인 환경과 관련된 분산 현상을 좀더 이해할 수 있었으며 차후에 분산기작을 정량적으로 평가할 수 있는 역학적인 분석과 모델링을 함으로써 오늘날의 피오르드 퇴적과정이 과거 고기 퇴적상과 비교되어 과거의 고환경을 유추하는데 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구를 수행하는데 많은 조언과 배려를 해주신 장순근 박사님과 극지연구센터 연구원들, 그리고 측정을 도와주신 러시아 *Yuzhmorgeologiya* 승조원 여러분들께 감사를 드립니다.

참고문헌

유규철, 윤호일, 오재경, 김예동, 강천윤, 1999. 남극 킹조지섬 마리안 소만의 하계 수층 특성과 부유물질 분산, 한국해양학회지 바다, **4**: 266－274.

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**: 121－134.

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, 1986. Deposition of cyclically interlaminated sand-and-mud in an ice-proximal glacimarine environment. In: Biennial Am. Quat. Assoc.; 9th (Champaign-Urbana, III.). Program Abstr., pp. 74.

Cowan, E.A. and N.D. Smith, 1988. Rainstorm-induced event sedimentation at the tidewater front of a temperate glacier. *Geol.*, **16**: 409－412.

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.

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.

KORDI, 1997. The studies on natural environment and conservation of polar region. BSPE 97604-00-1020-7, 297−327.

KORDI, 1998. The studies on natural environment and conservation of polar region. BSPE 98001-04-1149-7, 132−145.

Madejski, P. and Rakusa-suszczewski, S., 1990. Icebergs as tracers of water movement in the Bransfield Strait. *Antarct. Sci.*, **2**: 259−263.

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, H.I. Yoon, and H. Chung, 1998. Recent retreat of ice cliffs, King George Island, South Shetland Islands, Antarctic Peninsula. *Annals Glaciol.*, **27**: 633−635.

Pickard. G.L. and L.F. Giovando. 1960. Some observations of turbidity in British Columbia inlets. *Limnol. Oceanogr.*, **5**: 162−170.

Powell, R.D., 1990. Glaciomarine processes at grounding-line fans and their growth to ice-contact deltas. In: Dowdeswell, J.A. & Scourse, J.D. (eds) Glacimarine Environments: Processes and Sediments, Geological Society, London, Special Publication, **53**: 53−73.

Powell, R.D. and B.F. Molnia, 1989. Glacimarine sedimentary processes, facies and morphology of the south-southeast Alaska shelf and fjords. *Mar. Geol.*, **85**: 359−390.

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 glacimarine 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. 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.

2000년 5월 15일 원고접수
2000년 8월 16일 수정본 채택
담당편집위원: 김대철