

1998/1999 남극 킹조지섬 마리안소만 표층수에 서식하는 미세조류의 계절적 변동

강재신 · 강성호 · 이진환¹ · 최돈원² · 이상훈

(한국해양연구소 극지연구센터, ¹상명대학교 자연과학대학 생물학과, ²강원대학교 지질학과)

적 요 - 남극 킹조지섬 맥스웰만 내 마리안소만의 한 정점에서 1998년 1월부터 1999년 10월까지 약 2년 동안 미세조류 생물량의 계절적 변동 및 해수의 수온, 염분, 부유물질 등을 모니터링하였다. 그 결과 2년 동안 거의 매일 채수된 연구 정점 표층수의 수온은 평균 -0.30°C 로 조사되었으며, 최고 4.53°C (1999년 1월 22일), 최저 -2.07°C (1998년 8월 23일)가 관찰되었다. 염분은 평균 33.38 psu이었으며, 최고 42.80 psu (1999년 1월 6일), 최저 19.50 psu (1999년 6월 6일)로 관찰되었다. 부유물질의 2년 평균 무게는 $34.14 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 이었으며, 1998년 3월 7일에 $60.62 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 로 가장 높게, 1998년 12월 26일에 $12.90 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 로 가장 낮게 관측되었다. 미세조류 생물량을 측정하기 위한 Chlorophyll *a* (Chl *a*) 값은 2년 평균 전체 Chl *a* 농도는 평균 $0.55 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 이었으며, 최고 Chl *a* 농도는 1998년 10월 4일 ($12.16 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 나타났으며, 최저 Chl *a* 농도는 $0.19 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 였다. 월 평균 전체 Chl *a* 농도는 1998년 10월 ($1.32 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 가장 높게 관찰되었으며 최저 전체 Chl *a* 농도는 1998년 7월 ($0.28 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 관찰되었다. 미소플랑크톤에 의한 nano-sized Chl *a*의 농도는 평균 $0.40 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 이었으며, 월 평균 nano-sized Chl *a* 농도는 1998년 11월 ($0.90 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 가장 높게 관찰되었으며, 1999년 7월 ($0.22 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 가장 낮게 관찰되었다. Micro-sized Chl *a* 농도는 평균 $0.15 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 이었으며, 월 평균 micro-sized Chl *a* 농도는 1998년 10월 ($0.81 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 가장 높게, 1998년 7월, 1999년 1, 2, 9월 ($0.05 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 가장 낮게 관찰되었다. 봄철에서 여름철 사이인 1998년 10월에서 1999년 3월 사이에 나타난 Chl *a* 농도는 전체 Chl *a*의 65%를 차지하였다. 1998년부터 1999년까지 남극 연안은 그 해 해수의 물리적 변화에 따라 독특한 미세조류의 변화 패턴이 나타난다고 생각된다. 특히 수온의 감소는 겨울철에만 열을 잃게하고 이에 따라 micro-sized Chl *a*가 하계 때 증가하지 못하는 원인으로 작용한다고 생각된다. 이에 따라 년 중 미세조류의 생물량의 감소가 나타나며, 동계 때의 수온분포에 따라 하계때의 생물량이 결정된다고 생각된다.

서 론

지금까지 남극 식물플랑크톤에 관한 연구는 남극의 춘계와 하계에 외양에서 주로 수행되어왔다 (Kozlova 1964; Hasle 1968, 1969; Estrada & Delgado 1990; Kang *et al.* 1993). 최근 들어 남극 연안생태계의 중요성이 강조되면서 많은 연구가 연안에서도 시작되었다. 그러나 이러한 연구는 비교적 연구활동이 용이한 하계동안 이루어져 왔고 (Villafañe *et al.* 1995; Knox 1996; Ahn *et al.* 1997; JS Kang *et al.* 1997), 일년 주기 변화 양상에 대한 연구 (Krebs 1983; Dayton *et al.* 1986; Everitt & Thomas 1986; Clarke *et al.* 1988; Clark & Leakey 1996; SH Kang *et al.* 1997; Kim *et al.* 1998; JS Kang *et al.* 1999)는 아직까지 빈약하다.

Krebs (1983)의 연구 결과에 의하면 미국의 파머기지 근처 해역에서 일년동안 관찰한 식물플랑크톤이 계절에 따라 변화양상이 매우 다양하였다. 그는 이러한 계절적 변화가 바람의 세기와 같은 물리적 요인에 의해 영향을 받는다고 하였다. 한편, 한국 해양연구소 세종기지 앞에서 1994년 한해동안 연구한 결과에 의하면 표층 식물플랑크톤 군집의 크기가 계절에 따라 변하는데 일사량이 중요한 제한 요인으로 작용한다고 하였다 (Kim *et al.* 1998). 또한 1996년 한해동안 Kim *et al.* (1998)의 연구장소와 유사한 장소에서 채수한 SH Kang *et al.* (1997) 연구결과에 의하면, 미세조류의 생물량 및 종조성은 바람의 방향과 세기에 큰 영향을 받는다고 하였으며, 겨울동안에는 일조량의 부족으로 아주 낮은 생물량을 보이며 봄이 시작되면서 일조량의 증가와 함께 급속한 미세조류의 생물량 증가가 나타났다고 하였다.

남극 연안의 미세조류의 생물량은 주로 하계에 집중되어 있어 (SH Kang *et al.* 1997), 동계동안의 생물량이나 생산력은 거의 무시되어 왔고 이에 대한 정보도 부족하다. 또한 지금까지의 계절변동에 관한 연구는 Kang *et al.* (1997)을 제외하고는 거의 매주 또는 매월 조사가 진행되어왔다. JS Kang *et al.* (1999)에 의하면, 남극 연안에서 호냉성 규조인 *Navicula glaciei*와 *N. perminuta* 생물량의 계절적 변동은 같은 날에 채수할지라도 만조와 간조 때에 따라서 큰 변화가 나타날 수도 관찰되었다. 따라서 본 연구는 2년 동안 가능한 매일 조사를 실시하여 꾸준한 미세조류 생물량의 계절적 변동 및 해수의 물리 화학적 요인을 모니터링하여 미세한 규모의 변화 양상을 감지하고, 장기적인 환경변화를 감지하기 위한 표준데이터를 제시하는 것이 그 목적이다.

재료 및 방법

1. 연구 지역

본 연구는 남극 킹조지섬 맥스웰만에 위치한 마리안 소만의 한 정점 (Fig. 1)에서 조사되었다. 이곳에는 한국 해양연구소 연구기지인 세종기지 (62° 13' 남위, 58° 47' 서경)가 위치한다. 킹조지섬과 넬슨섬 사이에 위치한 맥스웰만은 수심 200 m까지는 서서히 깊어지다가 중앙부의 수심이 갑자기 500 m가 넘는 지형을 하고 있으며 만의 입구는 브랜스필드 해협과 연결되어 있다. 콜린스만과 마리안 소만의 안쪽 벽과 같이 만의 곳곳에는 빙벽이 발달해 있으며, 그 해의 특성에 따라 동계에 맥스웰만 표층수가 얼거나 frazil ice 등이 형성되기도 한다. 하계 동안 맥스웰만 곳곳에서 담수의 유입이 있으며 외만으로 부터 유입된 유빙의 조각들이 만의 표층수를 덮고 있기도 한다.

2. 미세조류의 채집 및 분석

본 연구는 1998년 1월부터 1999년 10월까지 세종기지 앞의 한 정점에서 이루어졌다. 연안에서 실시한 작업이기 때문에 조석에 의한 영향을 무시할 수 없으므로 1998년 1월 한달 동안은 만조와 간조 때 시료를 채수하여 그 결과를 비교하였다. 또한 1998년 11월 30일부터 31일까지, 그리고 같은 해 12월 3일부터 4일까지 두 시간 간격으로 같은 정점에서 24시간 정점관측을 실시하였다. 이 지역은 수심이 약 10 m 정도이며 수층은 바람과 조류에 의해 비교적 고르게 혼합되어 있다. 표층수 시료는 수심 약 0.5 m에서 PVC병으로 채수되었으며, 채수한 즉시 YSI 610D Conductivity meter를 이용하여 수온과 염분도를 측정하였다. 채수된 해수는 미세조류의 정

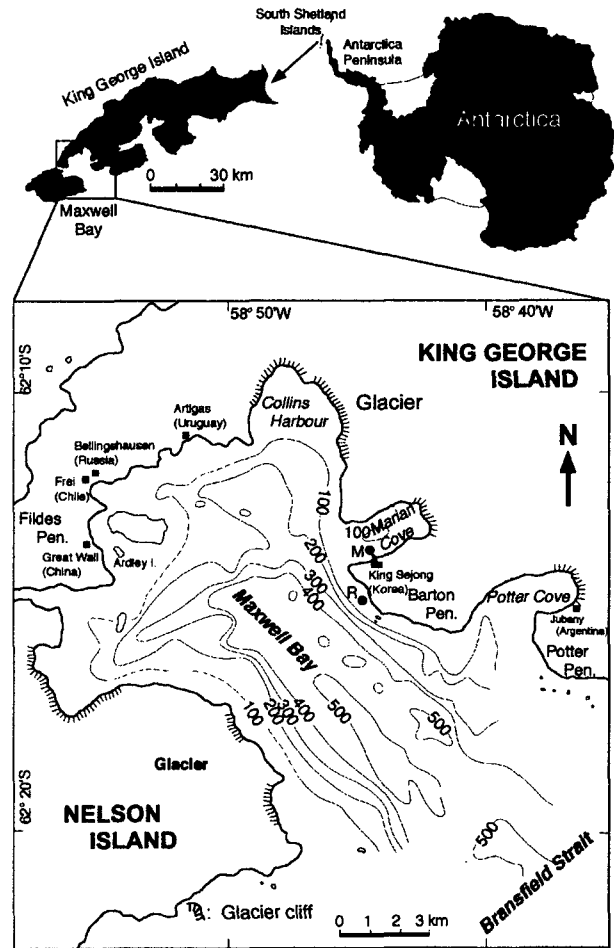


Fig. 1. Location of the sampling area in Marian Cove, King George Island, Antarctica.

량분석을 위하여 현장에서 Glutaraldehyde로 희석농도 1%가 되도록 고정하였으며, 일부의 시료는 Chlorophyll *a* 농도 분석을 위하여 dark bottle에 담아 세종기지의 실험실로 운반하였고 부유물질의 무게 분석을 위해 고정하지 않은 시료를 1 l 채수하였다.

1) Chlorophyll *a*

Chlorophyll *a* (Chl *a*)의 분석을 위하여 시료는 실험실로 운반한 뒤 Turner Design Fluorometer (model 10-005R)로 *in vivo* 형광을 측정하였으며, spectrophotometer를 이용하여 Chl *a* 절대값을 측정하였다. *in vivo* 값과 절대값의 linear relation ($y = 0.44x \times 0.058$, $n = 55$)은 Chl *a* 농도를 계산하는데 이용하였다. Chl *a*는 망목 20 μ m net를 이용하여 크기를 구분하여 그 농도를 측정하였다. 대체적으로 net를 통과한 시료는 극미소 (pico-)와 미소 (nano-) 조류에 의한 chlorophyll로 간주되었으며, net에 걸려진 나머지 시료는 미세조류 (micro-) 특히 규조류에

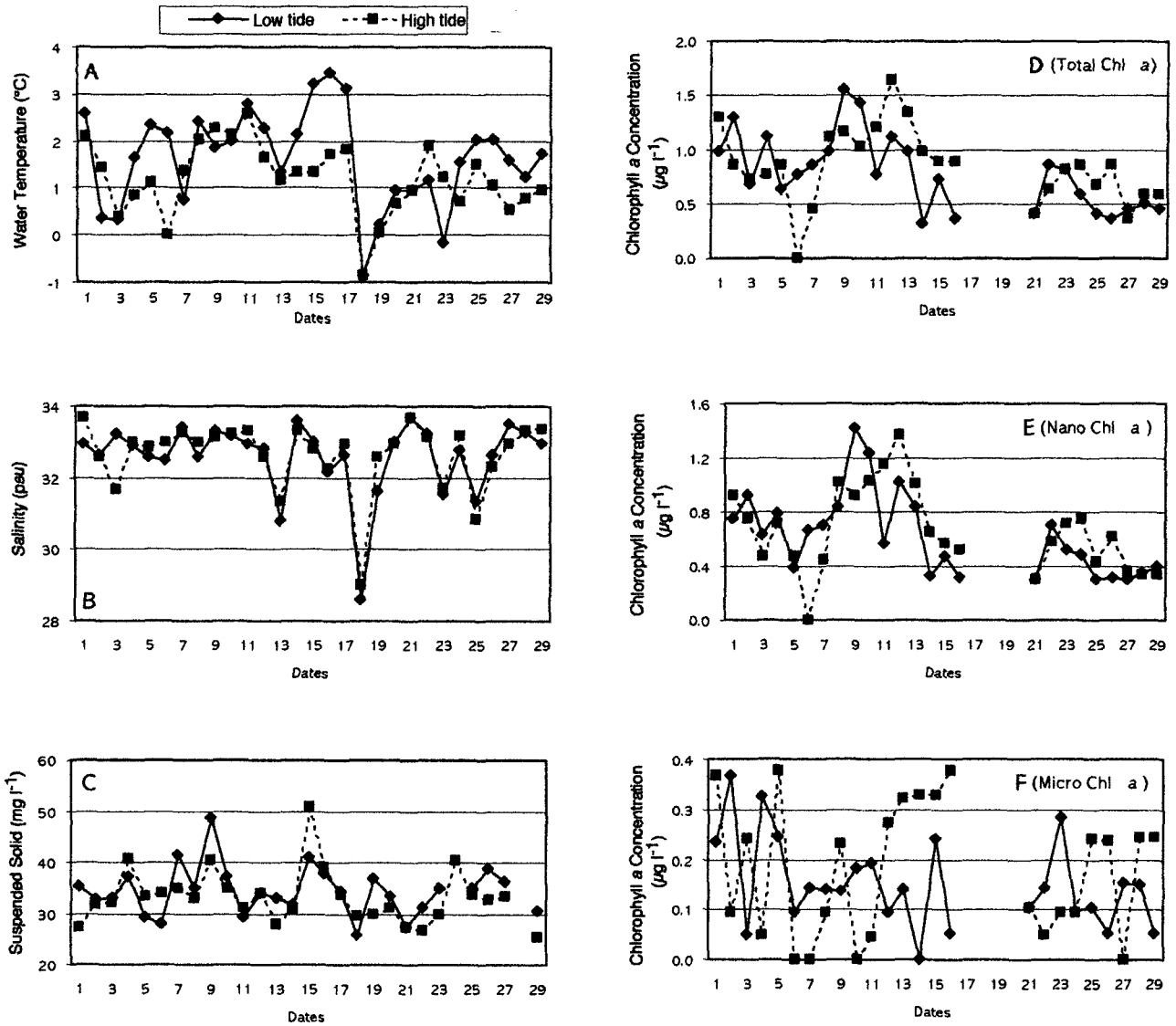


Fig. 2. Daily variation of water temperature, salinity, suspended solid and Chl *a* concentration measured at the nearshore station at low and high tide in December 1998.

의한 chlorophyll로 간주되었다.

2) 부유 물질

채수한 1l의 표층수는 고르게 섞은 뒤 24시간 전에 60°C dry oven에서 미리 건조시켜 무게를 재어 놓은 GF/F 여과지를 이용하여 여과하였다. 여과된 여과지는 다시 60°C dry oven에서 24시간 동안 건조시킨 후 그 무게를 측정하였다. 전체 부유물질의 무게는 여과한 여과지의 무게에서 미리 건조시킨 빈 여과지의 무게를 빼 값으로 이용하였다.

결 과

1. 조석의 영향

1월 한달간 만조와 간조 때 시료를 채수한 결과는 Fig. 2와 같다. 수온은 조석에 의한 영향은 거의 없고 채수 시간에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 염분과 부유물질의 무게도 조석에 의한 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다. 전체 Chl *a*의 양과 nano-sized Chl *a*의 양도 조석에 따라 큰 폭으로 변하지 않는 것으로 나타났으나, micro-sized Chl *a*의 양은 조석에 따라 큰 폭으로 변하는 날도 관찰이 되었다. 하지만 만조와 간조의 특정

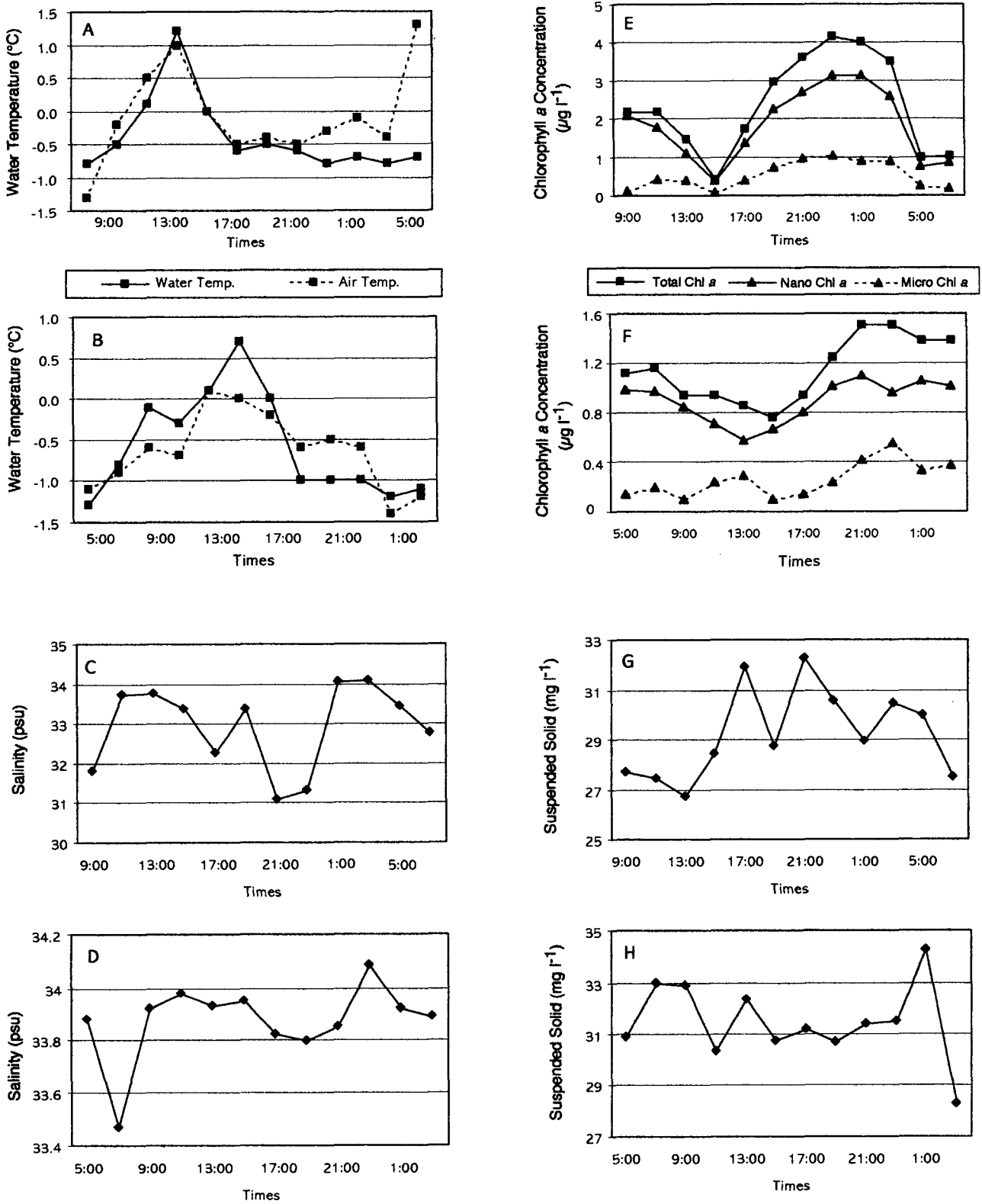


Fig. 3. Diurnal variation of water and air temperature, salinity, suspended solid and Chl a concentration measured at the nearshore station on 30 November and 3 December 1998. A, C, E and G: water and air temperature, salinity, Chl a concentration and suspended solid on 30 November 1998. B, D, F and H: water and air temperature, salinity, Chl a concentration and suspended solid on 3 December 1998.

기간에 측정값이 편중되어 증가하는 현상은 관찰되지 않았기 때문에 2년간 실시한 계절변동에 관한 조사는 조석표에 따라 채수를 하지않고 채수하는 시간을 고정하여 실시하였다.

2. 24시간 연속 관측

1) 수온, 염분, 부유 물질

24시간 연속 관측한 결과를 살펴보면 관측 첫째 날의 평균 수온은 -0.39°C ($-0.80 \sim 1.20^{\circ}\text{C}$), 둘째 날은 -0.58°C ($-1.20 \sim 0.7^{\circ}\text{C}$)로 관측되었으며, 최저 수온은 관측 둘째 날인 1998년 12월 4일, 새벽 1시에 -1.20°C 로 가장 낮게 관측되었고 최고 수온은 관측 첫째날인 1998년 11월 30일, 오후 3시에 1.20°C 로 가장 높게 관측되었다(Fig. 3A, B).

염분의 24시간 변화 패턴은 관측 첫째 날의 평균 염분이 32.92 psu (31.09~34.09 psu), 둘째 날이 33.97 psu (33.47~34.08 psu)로 관측되었으며, 최저 염분은 관측 첫째날인 1998년 11월 30일, 저녁 11시에 31.09 psu로 가장 낮게 관측되었고 최고 염분은 관측 첫째날인 1998년 11월 30일, 오후 3시에 34.08 psu로 가장 높게 관측되었다(Fig. 3C, D).

관측 첫째 날의 평균 부유물질의 무게는 $29.22 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 였으며, 둘째 날은 $31.44 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 로 나타나 첫째 날에 비해 둘째 날의 부유물질이 더 많았던 것으로 나타났다. 관측 첫째 날, 하루 중 가장 부유물질이 많았던 시간은 오후 11시 ($32.25 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)였으며, 가장 적었던 시간은 오후 1시 ($26.72 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)였다. 관측 두 번째 날에 부유물질이 가장 많았던 시간은 새벽 1시 ($34.25 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)였으며, 가장 낮았던 시간은 두 시간 뒤인 새벽 3시 ($28.28 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)로 관측되었다(Fig. 3G, H).

2) Chl *a* 농도

Chl *a* 농도는 관측 첫째 날의 평균 전체 Chl *a* 농도는 $2.35 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ($0.41 \sim 4.15 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)이었으며, 둘째 날은 $1.14 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ($0.76 \sim 1.51 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)로 관측되어 첫째 날의 전체 Chl *a*의 농도가 둘째 날에 비해 두배 가량 높았다. 관측 첫째 날의 전체 Chl *a*는 오후 5시부터 서서히 증가하여 오후 11시까지 증가한 뒤 다시 감소하였으며 둘째 날에는 오전 7시부터 오후 3시까지 서서히 감소하다가 오후 5시부터 오후 9시까지 다시 증가하였다(Fig. 3E, F). Nano-sized Chl *a* 농도는 관측 첫째 날의 평균 Chl *a* 농도는 $1.84 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ($0.36 \sim 3.13 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)이었으며, 둘째 날은 $0.89 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ($0.57 \sim 1.10 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)로 관측되어 전체 Chl *a* 농도와 함께 첫째 날의 nano-sized Chl *a*의 농도가 둘째 날에 비해 두배 가량 높았다. 또한 nano-

sized Chl *a* 농도의 증감 패턴도 전체 Chl *a*와 유사하였다. Micro-sized Chl *a*의 경우, 관측 첫째 날의 평균 Chl *a* 농도는 $0.51 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ($0.09 \sim 1.03 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)이었으며, 둘째 날은 $0.25 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ ($0.09 \sim 0.55 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)로 관측되어, 첫째 날의 micro-sized Chl *a*의 농도가 둘째 날에 비해 두 배 가량 높았다. 또한 micro-sized Chl *a* 농도의 증감 패턴도 전체 Chl *a*, nano-sized Chl *a*와 유사하였다.

3. 계절적 변동

1) 수온, 염분, 부유 물질

2년 동안 거의 매일 채수된 연구 정점 표층수의 수온은 평균 -0.30°C 로 조사되었으며, 최고 수온은 1999년 1월 22일 (4.53°C)에 나타났으며, 최저수온은 1998년 8월 23일 (-2.07°C)에 관찰되었다(Fig. 4A). 월 평균 수온은 1998년 2월 (1.71°C)에 가장 높게 관찰되었으며 월 평균 최저수온은 1998년 8월 (-1.73°C)에 관찰되었다(Fig. 5A).

염분은 평균 33.38 psu이었으며, 최고 염분은 1999년 1월 6일 (42.80 psu)에 나타났으며, 최저 염분은 1999년 6월 6일 (19.50 psu)에 관찰되었다(Fig. 4B). 월 평균 염분은 1999년 9월 (34.34 psu)에 가장 높게 관찰되었으며 월 평균 최저 염분은 1998년 1월 (32.59 psu)에 관찰되었다(Fig. 5B).

부유물질의 2년 평균 무게는 $34.14 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 이었으며, 1998년 3월 7일에 $60.62 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 로 가장 높게 관측되었고, 1998년 12월 26일에 $12.90 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 로 가장 낮게 관측되었다(Fig. 4C). 월 평균 부유물질의 무게는 1998년 2월 ($29.20 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)에 가장 낮게 관측되었으며, 1999년 2월 ($37.65 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)에 가장 높았다(Fig. 5C).

2) Chl *a* 농도

2년 동안 전체 Chl *a* 농도는 평균 $0.55 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 였으며, 최고 Chl *a* 농도는 1998년 10월 4일 ($12.16 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 나타났으며, 최저 Chl *a* 농도는 $0.19 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 였다(Fig. 4D). 월 평균 전체 Chl *a* 농도는 1998년 10월 ($1.32 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 가장 높게 관찰되었으며 최저 전체 Chl *a* 농도는 1998년 7월 ($0.28 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 관찰되었다(Fig. 5D).

미소플랑크톤에 의한 nano-sized Chl *a*의 농도는 평균 $0.40 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 였으며, 최고 Chl *a* 농도는 1998년 11월 24일 ($2.61 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 나타났으며, 최저 Chl *a* 농도는 $0.19 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 였다(Fig. 4D). 월 평균 nano-sized Chl *a* 농도는 1998년 11월 ($0.90 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 가장 높게 관찰되었으며 최저 전체 Chl *a* 농도는 1999년 7월 ($0.22 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 관찰되었다(Fig. 5D).

규조류와 같은 미세조류에 의한 micro-sized Chl *a* 농

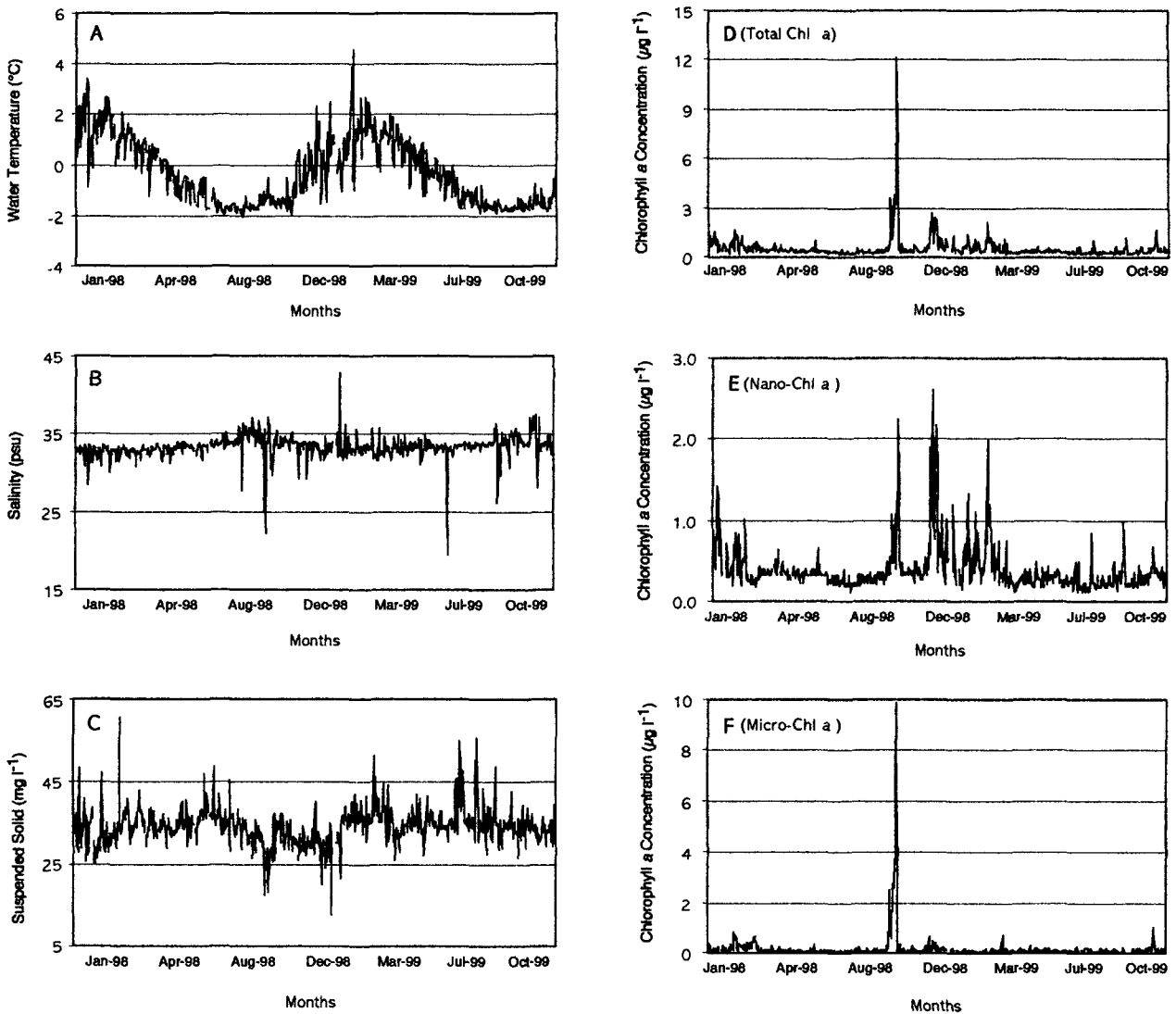


Fig. 4. Seasonal variation of water temperature, salinity, suspended solid, total Chl *a* concentration, nano-sized Chl *a* concentration and micro-sized Chl *a* concentration measured at the nearshore station from January 1998 to October 1999.

도는 평균 $0.15 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 였으며, 최고 Chl *a* 농도는 1998년 10월 4일 ($9.90 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 나타났으며, micro-sized Chl *a*가 전혀 검출되지 않았던 시기도 관찰되었다(Fig. 4D). 월 평균 micro-sized Chl *a* 농도는 1998년 10월 ($0.81 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 가장 높게 관찰되었으며 최저 micro-sized Chl *a* 농도는 1998년 7월, 1999년 1, 2, 9월 ($0.05 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 관찰되었다(Fig. 5D).

고찰

1. 조석의 영향 및 24시간 연속 관측

본 연구는 남극 세종기지 부두 앞에서 약 5m 정도 떨

어진 정점의 표층수를 대상으로 2년 동안 미세조류의 계절적 변동과 해양 환경과의 관계에 대하여 조사하였다. 조사 정점의 위치가 연안에 있기 때문에 조석 및 바람의 영향 등 조사시간에 따른 관측값의 차이를 무시할 수가 없었다. 따라서 하루에 한번 조사하는 값이 대표값으로 이용될 수 있는지를 밝히기 위하여 1998년 1월 한 달 동안은 만조와 간조시 하루에 두 번 조사를 실시하여 조석과의 관계를 조사하였고, 1998년 11월 30일에서 12월 1일, 12월 3일에서 4일까지 24시간 동안 연속적으로 꾸준히 모니터링 해 보았다.

그 결과 만조에 비해 간조 때 또는 간조에 비해 만조 때 특정 값이 크게 변동하는 것을 관찰할 수 없었다

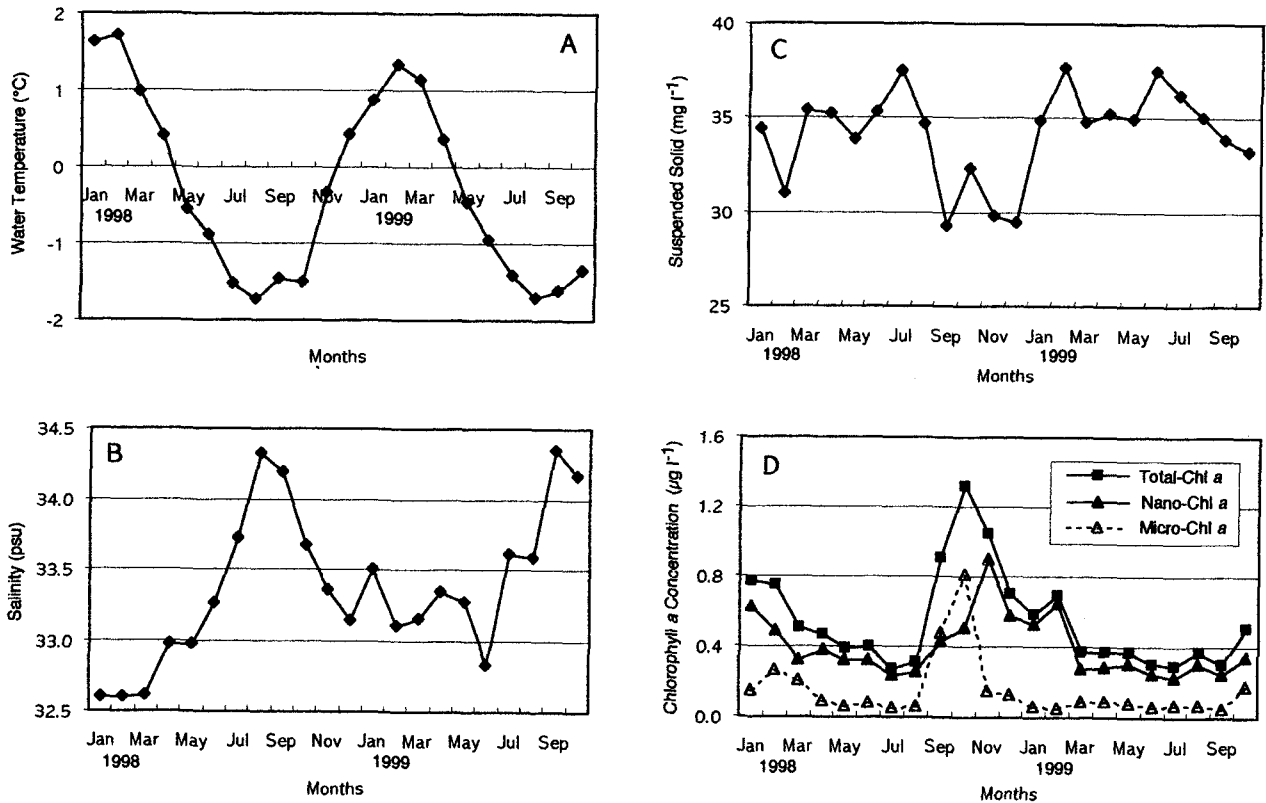


Fig. 5. Seasonal changes in monthly mean values of water temperature, salinity, suspended solid and Chl *a* concentration.

(Fig. 2). 수온의 경우 1월 15일~1월 17일 사이의 만조와 간조의 수온이 간조 때 약 1.5°C 정도 만조에 비해 높은 것으로 관측되었다(Fig. 2A). 이는 간조의 시료를 채수한 시간이 모두 오후 2시에서 4시 사이인 반면 만조의 시료를 채수한 시간은 오전 8시에서 10시이기 때문인 것으로 생각된다. 즉 간조 때 관측값이 높은 이유는 정오를 지나 표층 수온이 가장 높아질 때가 간조 때였기 때문이다.

만조와 간조의 측정치가 가장 크게 차이가 나는 결과는 micro-sized Chl *a*의 양이었다(Fig. 2F). 하계 동안 남극의 연안의 규조류의 생물량은 시간에 따라 매우 변화가 심하다(Ahn *et al.* 1997). 또한 규조류 중에서도 육지와 인근한 연안의 경우, 하계에 부착성 규조의 생물량이 매우 증가하기 때문에 바람이나 조석에 따라 생물량의 큰 변동이 온다(Ahn *et al.* 1997; JS Kang *et al.* 1997). 따라서 micro-sized Chl *a*의 양을 결정하는 원인종은 규조류이므로 이와같이 조석이나 바람 등이 원인이 되어 만조와 간조의 Chl *a*가 큰 차이가 난 것으로 생각된다. 하지만 만조 때 혹은 간조 때 일정하게 micro-sized Chl *a*의 양이 증가하는 패턴은 찾아볼 수 없었다.

Micro-sized Chl *a*의 양은 채수하는 시간의 연안 환경 조건에 따라 영향을 받으므로 결과를 분석할 때 채수할 당시의 환경조건이 늘 고려되어야 한다고 생각된다. 이러한 결과로 미루어보면 하루에 한번 채수한 결과를 그 날의 대표값으로 선택하는데는 어려움이 있다고 생각된다. 하지만 채수시간을 고정된 뒤 지속적으로 관측을 하여 한달 동안 관측된 값의 평균을 계절에 따른 변동으로 비교할 때는 큰 무리가 없다고 생각되었다.

24시간 연속 관측된 수온의 변화는 만조와 간조의 실험에서와 같이 채수시간에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 최대값이 나타난 시간이 관측 첫째 날과 둘째 날 모두 오후 세시였으며, 최소값이 나타난 시간은 새벽 한 시에서 5시 사이에 나타났다(Fig. 3A, B). 염분의 경우는 관측 첫째 날의 변화의 폭(31.09~34.09 psu)이 관측 둘째 날(33.47~34.08 psu)에 비해 크게 나타났다. 관측 둘째 날의 자료로 평가하자면 하루에 한번 채수한 값을 대표값으로 이용하는데 큰 어려움이 없을 것이라 생각된다. JS Kang *et al.* (1999)에 의하면 마리안 소만의 표층수 염분은 얼음과 밀접한 관계가 있다. 수온이 점점 낮아지며 frazil ice가 형성될 때는 10 psu 이상 염분이

증가하며 하계동안에는 용설수의 유입으로 전반적으로 염분이 감소하나 특히 만 밖에서 밀려들어오는 유빙이 있을 때 갑자기 염분이 감소하는 경향을 보였다. 관측 첫째 날의 경우도 마리안 소만 내에 일시적으로 잔잔한 유빙의 띠가 만들어졌다. 관측 첫째 날의 급격한 염분 감소는 유빙에 의한 원인으로 생각되어진다.

Chl *a* 농도는 관측 첫째 날 전체 Chl *a*의 최대, 최소값의 차이가 $3.74 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 인 반면 관측 둘째날은 $0.75 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 이었다. 관측 둘째 날의 경우는 하루 한번의 채수로 그날을 대표하는데 큰 무리가 없다고 생각되어지나 관측 첫째 날의 결과는 시간에 따라 매우 큰 폭으로 변화하였기 때문에 어려움이 있다고 생각된다. 하지만 Chl *a* 농도 역시 지속적으로 관측을 하여 한달 동안 관측된 값의 평균을 계절에 따른 변동으로 비교할 때는 큰 무리가 없다고 생각되어진다.

전반적인 결과들로 미루어볼 때 하루에 한번 측정한 값을 그 날의 대표값으로 이용을 하기에 큰 무리가 없는 것으로 나타났으며, 또한 하루에도 시간에 따라 변이가 매우 큰 영양염이나 Chl *a*의 양도 가능한 일정한 시간에 지속적으로 관측을 한 뒤 모여진 값들의 평균을 계절에 따라 또는 한 달씩 비교하기에 적합하다고 생각된다.

2. 계절적 변동

2년 동안 지속적으로 모니터링 해온 본 연구 정점의 수온 변화는 5월부터 11월까지 영하의 수온을 유지하다가 하계인 12월부터 4월까지 영상의 수온이 나타나는 전형적인 남극 패턴을 보여주었다(SH Kang *et al.* 1997). 두 해 모두 8월에 표층수의 평균 수온이 가장 낮게 관측되었으며, 2월에 가장 높았던 것으로 나타났다(Fig. 5B). 남극의 Arthur항에서 수온 변화를 1년간 모니터링 한 Krebs(1983)의 결과에서도 5월에서 11월 사이에 수온은 영하로 관측되었으며 표층 수온의 일시적인 상승은 그날의 기온이 높고 바람이 적은 날씨를 시사한다고 설명하였다. 표층수 염분의 경우도 1998년 4월부터 꾸준히 증가하여 8월에 가장 높은 염분(34.32 psu)이 관측되었고, 9월부터 염분은 감소하여 11월부터 1999년 6월까지 33.5 psu 이하로 관측되었다(Fig. 5B). 이렇게 여름과 봄철에 염분이 낮게 나타나는 이유는 하계에 기온이 올라가면서 용설수의 유입이 많은 결과이다(SH Kang *et al.* 1997; JS Kang *et al.* 1999).

부유물질은 1998년 9월에서 12월 사이에 감소하다가 1999년 1월부터 증가하여 6월부터 지금까지 서서히 감소하였다(Fig. 5C). SH Kang *et al.* (1997)에 의하면 1996년 한해동안에는 부유물질이 크게 변동이 없다가 7월부

터 서서히 증가하여 12월에는 급격한 증가를 보였다. 이러한 증가는 당시 11월이 되면서 micro-sized Chl *a*가 급격히 증가한 결과라고 분석하였다. 남극에서 하계에 부유물질의 양을 결정하는 공급원은 크게 용설수가 유입되면서 발생하는 무생물학적 육상 기원 물질, 생물학적 해양 기원의 재부유되는 부착성 물질, 무생물학적 해양 기원의 빙벽이 녹으면서 발생하는 물질을 생각할 수 있다. 마리안소만에서는 80% 이상이 무기물질(주로 퇴적물)로 구성되어 있다(Ahn *et al.* 1997). 1998년 7월에 부유물질이 가장 많다가 8월에서 9월 사이에 낮은 값이 관찰되는 것은 이 시기에 맥스웰만이 결빙되었기 때문으로 생각된다. 그리고 1999년 1월부터 부유물질이 다시 증가하는 원인은 이 시기에 수온이 가장 높게 상승하면서 용빙수 및 용설수의 유입이 늘어나 염분도 감소하며 부유물질이 크게 늘어난 것으로 생각된다. Kim *et al.* (1998)에 의하면 1994년에는 일년동안 큰 변화가 없던 부유물질이 12월에 현저히 증가하였다. 이 당시의 수온과 염분의 변화도 수온이 11월이 되면서 차츰 상승하여 12월에는 최고 수온을 기록하였고 이때 염분은 최저 값을 나타내어 용설수나 용빙수에 의한 효과로 생각된다. 또한 Kim *et al.* (1998)에 의하면, 이때 투명도가 가장 낮았다고 밝혀 용설수 유입의 가능성을 밝혔다.

두 해에 걸쳐 관측된 전체 Chl *a* 농도는 평균 $0.55 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 였으며, 1998년 3월에서 8월 사이에 평균 이하로 낮게 나타나다가 9월부터 증가하여 10월($1.32 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)에 가장 높게 관측되었으며 다시 1999년 3월이 되면서 전체 Chl *a* 농도는 $0.4 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 이하로 낮아지다가 10월이 되면서 약간 증가하는 것이 관찰되고 있다(Fig. 5D). 1998년 9월이 되면서 얼었던 맥스웰만이 녹기 시작하고 nano-sized Chl *a*와 micro-sized Chl *a*가 모두 증가하여 전체 Chl *a*가 증가하였다. micro-sized Chl *a*는 1998년 10월에 가장 높게 나타나다가 11월부터 다시 급격히 감소하였다. 반면에 nano-sized Chl *a*는 맥스웰만이 녹은 뒤 11월까지 꾸준히 증가하였고 12월부터 1999년 2월 사이에는 평균($0.40 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$) 이상으로 유지되다가 3월부터 평균 이하로 감소하여 10월까지 유지되고 있다.

SH Kang *et al.* (1997)에 의하면, 1996년에는 3월부터 Chl *a*가 감소하여 겨울동안 매우 낮게 나타나다가 10월부터 Chl *a*가 증가하기 시작하여 11월과 12월에 피크가 나타났다. 이 시기에 나타난 Chl *a* 증가는 연안의 바위나 대형 해조에 부착하여 서식하는 부착규조가 증가함에 따른 결과로 부착규조가 조석에 의한 해류나 바람 등에 의해 부착기질로부터 떨어져 나와 일시적으로 수층 내에 Chl *a*를 증가시켰기 때문이다. SH Kang *et al.* (1997)은 1996년을 'warm year'라고 부르며 연평균 기

온이 1998년부터 1995년에 비해 무려 1.3°C 높았다고 밝혔다. 1998년 동계와 1996년의 동계와 가장 큰 차이가 있다면 1996년에는 동계에 간간히 frazil ice나 pancake ice 등이 형성되었을 뿐 맥스웰만이 얼지 않았다는 것이다.

남극에서 여름철에 용설수의 유입으로 인한 수층의 안정은 대변성의 초기 조건을 형성한다(Jacobs & Amos 1967; El-Sayed 1971; Smith & Nelson 1985). 그럼에도 불구하고 1998년 12월부터 1999년 2월 사이에 하계에 오히려 Chl *a*가 감소한 것으로 나타난 이유는 1998년 7월부터 9월 초 사이에 맥스웰만이 언 사실과 관련이 있는 것으로 생각된다. 즉 하계에 전체 Chl *a*의 증가를 가져오는 가장 큰 원인 생물은 부착규조인데 이 시기에 micro-sized Chl *a*가 감소하였다는 결과는 부착규조의 생물량이 매우 낮았음을 시사한다.

1996년의 연구결과에 의하면 10월에서 3월 사이에 마리안소만에 나타나는 Chl *a*는 1년 전체 Chl *a*의 82%를 차지한다(SH Kang *et al.* 1997). 1998년의 경우는 65%를 차지하며 1996년에 비해 봄과 여름철의 식물플랑크톤의 생물량이 감소한 것을 보여주었다. 이러한 현상이 나타난 이유를 어떤 환경요인과 관련지어 결론을 맺기에는 아직까지 자료가 부족하다. 지금까지의 연구결과로 추측해 본다면 1996년에 비해 1998년 Chl *a*가 한 달 이른 9월에 최대값이 나타난 것은 맥스웰만이 얼었다 해빙이 되면서 호저온성 또는 호냉성 미세조류의 생물량이 늘어난 원인으로 생각된다. 또한 하계에 오히려 Chl *a*가 감소하는 현상은 동계 때 맥스웰만이 얼어있던 기간 동안 하계에 bloom할 부착성 규조의 seed들이 수온 및 일조량 감소 등의 원인으로 영향을 받아 여름에 증가하지 못한 것이 아닐까 생각된다.

1998년부터 1999년까지 꾸준히 미세조류와 환경요인의 계절적 변동을 모니터링한 결과 남극의 연안 생태계는 그 해에 형성되는 기상조건과 해수의 물리적 환경 변화에 따라 독특한 미세조류의 변화 패턴이 결정된다고 생각한다. 동계동안 남쪽으로부터 유입된 찬 고기압이 강하게 나타나는 해 즉, 'cold year' 동안에는 표층수의 결빙이 이루어지고 수온이 감소하여 저서성 규조류의 대량 증식 조건이 형성되지 못한다. 이에 따라 년 중 전체 미세조류 생물량의 감소가 나타나며, 동계 때의 수온분포에 따라 하계 때의 생물량이 결정된다고 생각된다. 또한 아직까지 분석이 끝나지 않은 종조성의 변화양상을 추후에 비교한다면 이러한 차이가 우점종의 변화를 유도할 것으로 예측된다. 따라서 지속적인 연안 해양 환경 모니터링을 통해 미세조류의 생물량 및 우점종의 변화 패턴을 이해하고 환경변화 지표종을 찾음으로써

앞으로 일어날 남극 연안 생태계의 변화를 예측하는데 도움이 될 것이라고 생각된다.

사 사

본 시료의 채수에 도움을 주신 13차 월동대 다이버 한성수씨에게 감사하는 마음을 전합니다. 또한 본 연구는 과제 PP9900104와 PN99385의 도움으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Ahn IY, H Chung, JS Kang & SH Kang (1997) Diatom composition and biomass variability in nearshore waters of Maxwell Bay, Antarctica, during the 1992/1993 austral summer. *Polar Biol.* **17** : 123-130.
- Clarke A, LJ Holmes & MG White (1988) The annual cycle of temperature, chlorophyll and major nutrients at Signy Island, south Orkney Island, 1969-82. *Br. Antarc. Surv. Bull.* **80** : 65-85.
- Clark A & RJG Leakey (1996) The seasonal cycle of phytoplankton, macronutrients, and the microbial community in a nearshore Antarctic marine ecosystem. *Limnol. Oceanogr.* **41** : 1281-1294.
- Dayton PK, D Watson, A Palmisano, JP Barry, JS Oliver & D Rivera (1986) Distribution patterns of benthic microalgal standing stock at McMurdo Sound, Antarctica. *Polar Biol.* **6** : 207-213.
- El-Sayed SZ (1971) Observations of phytoplankton bloom in the Weddell Sea. *In: Biology of the Antarctic seas IV* (Liano GA & IE Wallen eds), Academic Press, London, 301-312 pp.
- Estrada M & M Delgado (1990) Summer phytoplankton distribution in the Weddell Sea. *Polar Biol.* **10** : 441-449.
- Everitt DA & DP Thomas (1986) Observations of seasonal changes in diatoms at inshore localities near Davis Station, East Antarctica. *Hydrobiologia* **139** : 3-12.
- Hasle GR (1968) Distribution of marine diatoms in the Southern Ocean. *In: Primary productivity and benthic marine algae of the Antarctic and Subantarctic* (Bushnell VC ed). American geographic Society, New York (Antarctic Map Folio Series folio 10). 6-8 pp.
- Hasle GR (1969) An analysis of the phytoplankton of the Pacific southern Ocean: abundance, composition, and distribution during the Bratigg Exp. 1947-48. *Hvalradets Skr.* **52** : 1-168.
- Jacobs SS & A Amos (1967) Physical and chemical oceanographic observations in the Southern Ocean. Lamont-

- Doherty Geological Observatory, Technical Report 1-cu-1-67 New York.
- Kang JS, SH Kang & JH Lee (1999) Cryophilic diatoms *Navicula glaciei/perminuta* in an Antarctic coastal environment: morphology and ecology. *Korean J. Phycol. (Algae)* **14** : 1-10.
- Kang JS, SH Kang, JH Lee, KH Chung & MY Lee (1997) Antarctic micro- and nano-sized phytoplankton assemblages in the surface water of Maxwell Bay during the 1997 austral summer. *Korean J. Polar Res.* **8** : 35-45.
- Kang SH, JS Kang, KH Chung, MY Lee, BY Lee, H Chung, Y Kim & DY Kim (1997) Seasonal variation of near-shore Antarctic microalgae and environmental factors in Marian Cove, King George Island, 1996. *Korean J. Polar Res.* **8** : 9-27.
- Kang SH, MS Suk, CS Chung, SY Nam & CY Kang (1993) Phytoplankton populations in the western Bransfield Strait and southern Drake Passage, Antarctica. *Korean J. Polar Res.* **42** : 29-43.
- Kim HC, SR Yang, SJ Pae & JH Shim (1998) The seasonal variation of primary productivity in the Antarctic coastal ecosystems. *J. Korean Soc. Oceanogr.* **3** : 80-89.
- Knox GA, EJ Waghorn & PH Ensor (1996) Summer plankton beneath the McMurdo ice shelf at white island, McMurdo Sound, Antarctica. *Polar Biol.* **16** : 87-94.
- Kozlova OG (1964) Diatom algae of the Indian and Pacific sectors of the Antarctic Ocean. Nauka. Moscow.
- Krebs WN (1983) Ecology of neritic marine diatoms, Athur Harbor, Antarctica. *Micropaleontology* **29** : 267-297.
- Smith WO & DM Nelson (1985) Phytoplankton bloom produced by a receding ice edge in the Ross Sea: Spatial coherence with the density field. *Science* **227** : 163-166.
- Villafañe VE, EW Helbling & O. Holm-Hansen (1995) Spatial and temporal variability of phytoplankton biomass and taxonomic composition around Elephant Island, Antarctica, during the summers of 1990~1993. *Mar. Biol.* **23** : 677-686.

Seasonal Variation of Microalgae in the Surface Water of Marian Cove, King George Island, the Antarctic 1998/1999

Jae Shin Kang, Sung Ho Kang, Jin Hwan Lee,¹
Don Won Choi² and Sang Hoon Lee

(Polar Research Center, Korea Ocean Research & Development Institute, 425-600 Ansan P.O. Box 29, ¹Department of Biology, Sangmyung University, Seoul 110-743, Korea, and ²Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

Abstract - We investigated seasonal variation of microalgal assemblages, sea water temperature, salinity and suspended solid and the parameters measured daily from January 1998 to October 1999 at a nearshore shallow-water in Marian Cove, Maxwell Bay, King George Island, the Antarctic. Annual mean surface water temperature was -0.30°C and the highest water temperature was 4.53°C (22 January 1999) and the lowest water temperature was -2.07°C (23 August 1998). Annual mean salinity was 33.38 psu, ranging from 42.80 psu (6 January 1999) to 19.50 psu (6 June 1999). Annual mean suspended solid (SS) during two years was $34.14 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, ranging from $60.62 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (7 March 1998) to $12.90 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (26 December 1998). Chlorophyll *a* (Chl *a*) concentrations were measured in order to know seasonal variations of microalgae in the surface seawater. Annual mean of total Chl *a* concentration was $0.55 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$, the highest Chl *a* concentration ($12.16 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$) appeared in 4 October 1998, the lowest Chl *a* concentration appeared $0.19 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$. Monthly mean total Chl *a* concentration was high in October 1998 ($1.32 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$) and low in July on 1998 ($0.28 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$). Annual mean nano-sized Chl *a* concentration was $0.40 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$, monthly mean nano-sized Chl *a* concentration was high in November 1998 ($0.90 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$), and low in July 1999 ($0.22 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$). Annual mean micro-sized Chl *a* concentration was $0.15 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$, monthly mean micro-sized Chl *a* concentration was high in October 1998 ($0.81 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$), and low July 1998, January, February and September 1999 ($0.05 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$). More than 65% of total Chl *a* was concentrated during spring and summer time between October and March. Microalgal variation appeared to be due to physical factors of seawater in the Antarctic nearshore from 1998 to 1999. The reason why micro-sized Chl *a* did not increase during austral summer was the bay had been frozen by decrease of water temperature. We think that total microalgal abundance was decreased because the summer microalgal abundance was determined by variation of water temperature during winter season. [Chl *a* concentration, Microalgal assemblages, Seasonal variation, the Antarctic nearshore].