

## 남극 연안생태계에서 일차생산력의 계절변화

김해철 · 양성렬<sup>1</sup> · 배세진<sup>2</sup> · 심재형

서울대학교 해양학과·해양연구소, <sup>1</sup>광주대학교 환경공학과, <sup>2</sup>한국해양연구소 생물연구부

### The Seasonal Variation of Primary Productivity in the Antarctic Coastal Ecosystems

HAE CHEOL KIM, SUNG RYULL YANG<sup>1</sup>, SE JIN PAE<sup>2</sup> AND JAE HYUNG SHIM

Department of Oceanography and Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Kwangju University, Kwangju 503-703, Korea

<sup>2</sup>Biological Oceanography Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

남극 내만 생태계에 서식하는 식물플랑크톤의 계절에 따른 분포 및 생리상태, 그리고 상호관계를 알아보기 위하여 아남극에 위치한 Maxwell 만과 Marian 소만에서 1994년 2월부터 1994년 12월까지 물리, 화학적 환경요인과 식물플랑크톤의 색소량, 일차생산력을 조사하였다. 조사시기 동안 관측한 chlorophyll *a*의 농도는 미검출 수준(not detected)~3.03 µg/l (평균 0.63 µg/l)의 비교적 큰 변화를 보였고, 일차생산력은 0.53~18.95 mg C/m<sup>3</sup>·day를 기록하였으며, 수층적분한 식물플랑크톤의 일차생산력은 41.28~560.20 mg C/m<sup>2</sup>·day의 범위를 보였다. 식물플랑크톤의 생물량은 일사량과 양의 상관관계를 보였고( $r^2=0.29$ ,  $p < 0.01$ ), 일차생산력은 일사량과 매우 밀접한 관련이 있었으나( $r^2=0.85$ ,  $p < 0.001$ ), 온도와 영양염은 식물플랑크톤 군집을 조절하는데 기여하지 않았다.

To understand the temporal variation of phytoplankton community in the Antarctic coastal ecosystem, physicochemical parameters, chlorophyll *a*, and primary productivity were measured as a component of the 7th KARP (Korea Antarctic Research Program) in 1994. Data were collected every month between February and December except four months (June—September) when the study area was frozen. Chlorophyll *a* concentrations ranged from negligible to 3.03 µg/l, averaging 0.63 µg/l. The primary productivity ranged 0.53—18.95 mg C/m<sup>3</sup>·day, and the depth-integrated primary productivity ranged 41.28—560.20 mg C/m<sup>2</sup>·day. A positive relationship was observed between the phytoplankton biomass and irradiance ( $r^2=0.29$ ,  $p < 0.01$ ). The degree of correlation between the primary productivity and irradiance ( $r^2=0.85$ ,  $p < 0.001$ ) was significantly higher than that between the phytoplankton biomass and irradiance. However, neither temperature nor inorganic nutrients seem to affect the temporal variation of primary productivity.

### 서 론

남극해는 남위 50~60°에 위치한 고리모양의 남극수렴대(Antarctic Convergence) 남쪽에 위치하는 수괴로 정의되며, 이 수렴대를 중심으로 태평양, 인도양, 대서양과 해수의 교환이 이루어진다(Deacon, 1982; 김 등, 1991). 남극해는 고위도에 속하기 때문에 태양광의 계절적 변화와 얼음 등에 의한 지역적 변이가 매우 크며, 강한 바람에 의한 수직혼합이 활발하게 일어나는 극한환경이다. 이러한 환경변수들은 일일, 주간, 계절 등 다양한 시간주기로 변화하며, 수괴 내에 존재하는 생물의 성장과 분포 양상에 영향을 미친다. 그러나 수온과 영양염 농도는 온대해역과는 달리 비교적 일정한 편이다. 수온은 -1.8(남극대륙 부근)~4.5°C(남극 극전선 부근)의 좁은 범위에서 변화한다(Sakshaug and Holm-Hansen, 1986). 남극해역에 서식하는 식물플랑크톤의 수온에 대한 반응(Neori and Holm-Hansen, 1982)은 온대

해역의 식물플랑크톤이 온도에 대해 보이는 반응(Eppley, 1972; Goldman and Carpenter, 1974)과 유사하나, 수온의 변화 폭이 좁기 때문에 성장속도의 온도 의존성은 낮다. 영양염은 항상 식물플랑크톤의 최대 성장을 유지에 충분한 수준을 보이며(Hart, 1942; Holm-Hansen *et al.*, 1977; El-Sayed, 1984; Hayes and Whittaker, 1984), 식물플랑크톤이 성장하는 시기에도 한계농도 이상을 보이고(El-Sayed, 1971), 대번성 이후에도 높은 영양염 농도가 유지된다(Jennings *et al.*, 1984).

남극에서의 일사량, 영양염 농도, 일차생산력 및 일차생산자의 생물량 등의 증감은 single pulse를 가지는 것이 특징이다(Smith and Sakshaug, 1990). 일사량은 계절변화가 매우 크고, 입사광 각도(angle of incidence light), 표면반사(surface reflectance) 뿐만 아니라 부유물질, 유빙(thick fast ice), 해빙(海氷; pack ice)의 유무에 따라 변화양상이 다르기 때문에 식물플랑크톤의 성장을 결정하는 중요한 환경변수가 된다. 유광대에서 광도와 일차생

산력 사이에는 높은 상관관계가 있으며(Holm-Hansen *et al.*, 1977), 낮의 길이는 식물플랑크톤의 성장에 커다란 영향을 미친다(Gilstad, 1987). 수층안정은 빛의 가용도를 결정하는 다른 요인으로 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력에 영향을 미친다(Braud and Klem, 1931; Gran, 1931; Sverdrup, 1953). 남극해에서의 해수의 밀도는 온도보다 염분에 의하여 결정되는데, 융설수(ice-melting water)에 의한 수층안정은 여름철(austral summer) 대변성의 초기 조건을 형성한다(Jacobs and Amos, 1967; El-Sayed, 1971; Smith and Nelson, 1985; Nelson *et al.*, 1987). Weddell 해에서 1968년 발생한 대변성(식물플랑크톤 생물량이  $190 \mu\text{g Chl.}a/l$ )도 Filchner 빙봉 부근의 marginal ice zone에서 해빙이 녹으면서 형성된 낮은 밀도의 해수에 의하여 조성된 강한 밀도약층에 기인하였다(El-Sayed, 1971).

지금까지 남극에 대한 연구는 주로 남반구의 여름에 한정되고 접근이 용이한 해역에 국한되어 이루어져 왔으며, 하절기를 제외하고는 가혹한 환경조건으로 인하여 최근까지 연구활동이 빈약하였으나, 최근들어 연구지원기술이 발전하면서 동절기를 포함하는 남극 해양생태계의 연중 변화양상의 관측이 가능하게 되었다. 그러나 아직도 남극 동절기의 현장관측자료는 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 남극 내만 생태계에 서식하는 식물플랑크톤의 시간에 따른 분포 및 생물량에 있어서의 상관관계를 파악하기 위하여, 해역의 결빙이 이루어져 채수가 불가능한 극한기를 제외한 시기에 온도, 염분, 영양염, 광량 등 환경변수와 식물플랑크톤의 생물량 지수인 chlorophyll *a*와 일차생산력을 측정하여, 각 요인간의 계절에 따른 변화양상 및 상호관계를 고찰하였다.

### 재료 및 방법

본 연구는 대한민국 남극과학기지 제 7차 월동연구대의 연구활동(Korea Antarctic Research Program; KARP)의 일환으로, 1994년 2월부터 12월까지 South Shetland 군도의 King George 섬 남서쪽에 위치한 Barton 반도의 서쪽 끝 세종기지(남위  $62^{\circ} 13'$ , 서경  $58^{\circ} 45'$ ) 주변 해역에서 이루어졌다(Fig. 1). 조사 정점은 북서-남동 방향으로 약 18 km 장축과 북동-남서 방향의 약 10 km 횡단폭을 갖는 Maxwell 만에서 두 정점, Maxwell 만의 북동쪽에 위치한 폭 1.5 km, 길이 3.5 km인 Marian 소만에서 두 정점을 선정하였다. Maxwell 만은 평균수심이 470 m이며, King George 섬과 Nelson 섬으로 둘러싸이고 남동쪽으로 Bransfield 해협을 향해 열려 있는, 빙하침식 작용에 의해 형성된 전형적인 피요르드이다. Marian 소만은 평균 수심이 100 m 내외이며, 세종기지가 위치한 Barton 반도와 그 북쪽의 Weaver 반도로 둘러싸여있다.

본 연구 해역은 반일주조(semi-diurnal)이고, 겨울철에는 얼음으로 덮여 있으며, 봄철이 되면서 얼음이 깨지고 담수유입이 일어나면서 하구순환(estuarine circulation)이 시작된다. 담수는 주로 피요르드의 북동쪽에 잘 발달되어 있는 빙하가 녹으면서 유입된다. 담수유입으로 인하여 형성되는 염분약층은 피요르드 상부에서는 비교적 뚜렷이 나타나며, 마리아 소만 입구의 빙벽 근처로 갈수록 수직혼합 강하여 염분약층의 수심이 깊어지고

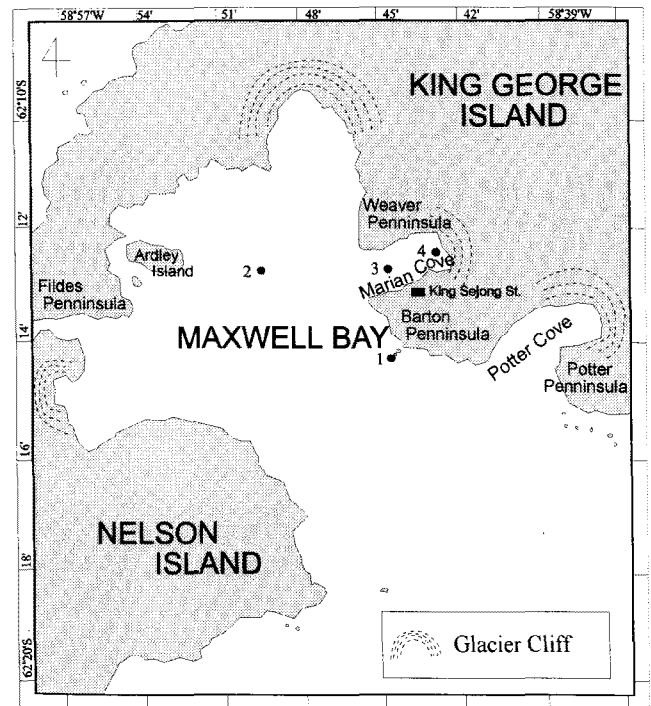


Fig. 1. Sampling stations in Maxwell Bay and Marian Cove during 1994.

그 강도는 약해진다. 여름철로 진행하면서 융설수의 양이 증가함에 따라 표층에 염분차이로 인한 밀도차이로 저온 저염의 수층이 형성되는 것이 특징이다.

해수 시료는 고무보트(Zodiac)를 이용하여 5 l Niskin sampler로 채수하여 바로 냉암소에 보관, 실험실로 운반하여 분석하였다. 겨울철인 6~9월에는 연구해역이 결빙되어 채수가 불가능하였다. 현장의 수온 및 pH는 pH-meter(Delta HD8602)로 측정하였고, 염분은 Autosal을 이용하여 분석하였다. 총알칼리도(total alkalinity)는 100 ml의 해수에 0.01N HCl 25~30 ml를 첨가하고 상온에 방치하여, pH를 측정한 후, 환산식으로 계산하였다(Parsons *et al.*, 1984). 부유물질은 건조시켜 미리 무게를 잰 47 mm GF/C 여과지에 2 l의 시료를 여과하고, 중류수로 세척하여 염기를 제거한 후에, 110°C에서 2~3 시간 말린 후 desiccator에서 방망시켜 Mettler저울(AE240)로 무게를 측정하였다.

광량은 총광량(total irradiance)을 측정할 수 있는 pyranometer(Eppley 사)를 사용하였으며, 그 중 PAR(photosynthetically available radiation)는 총광량의 50%로 환산하였다(Eppley사에서 제공한 보정계수). 유광대 수심의 계산에는 Beer의 법칙을 사용하였고, 소광계수 *k*는 Poole and Atkins(1929)에 의해 제시된 경험식인  $k=1.7/D_s$ 을 사용하였다.

영양염 분석을 위한 시료는 부유물질을 측정하기 위해 GF/C 여과지로 거른 여과수(filtrate)를 사용하였으며 암모니아를 제외한 영양염 분석은 Parsons *et al.*(1984)의 방법에 준하였고, 암모니아는 Grasshoff(1983)의 방법에 의하여 실험하였다. Chlorophyll *a*는 아세톤으로 추출한 후, 분광광도계를 이용하여 흡광도를 측정하고 SCOR & UNESCO식으로 농도를 환산하였다(Parsons *et al.*, 1984).

식물플랑크톤에 의한 일차생산력의 측정은 기지 앞 정점인 3번과 대조구인 2번 정점의 표층에서 실시하였다. Steeman-Nielsen(1952)에 의해 제안된  $^{14}\text{C}$  방사성 동위원소법에 기초하여, Parsons *et al.*(1984)에 준하여 실시하였다. 250 ml의 polycarbonate 병을 각각 100, 49, 30, 15, 3.5, 1%의 광이 투과하도록 laser 천공된 nickel screen으로 포장한 후, 해수시료 250 ml을 넣고,  $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ (Amersham) stock을 최종 농도  $10 \mu\text{Ci}$ 가 되게 첨가하였다.  $^{14}\text{C}$ 를 첨가한 시료는 자연광과 온도조건하에서 4~6 시간 배양한 후, GF/F 여과지로 여과하고, 건조기에서 12N 강염산으로 혼중시켜 용존무기탄소를 제거하였다. 여과지는 섬광계수병(scintillation vial)에 옮겨 담고, 10 ml의 섬광액(scintillation cocktail)을 넣고, 액체섬광계수기(liquid scintillation counter)로 방사능량(dpm; decay per minute)을 측정하였다. 일차생산력은 dpm값과 총이산화탄소량 및 배양시간을 계산식에 대입하여  $\text{mg C/m}^3 \cdot \text{hr}$ 값으로 전환시킨 후, 이를 다시 하루중 총광량에 대하여 적분하여,  $\text{mg C/m}^3 \cdot \text{day}$ 로 환산하였고, 유광대의 깊이를 알 수 있는 정점 2와 3에서는 유광층까지 수심에 따른 적분을 하여  $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 계산하였다. 총이산화탄소량은 이미 구한 총알칼리도 값으로부터 붕산에 대한 meq(milliequivalent) 보정값인 A를 빼서 탄산염 알칼리도(carbonate alkalinity; CA)를 구한 후, 이 CA값에 전환상수인 FT를 곱하여 구하였다(Parsons *et al.*, 1984).

식물플랑크톤의 탄소량은 chlorophyll *a*에 의한 추정법을 이용하였으며, 일반적으로 사용하는 C/Chl. *a*( $\theta$ )값 50(Eppley *et al.*, 1977; Cho and Azam, 1990)을 사용하였다. 식물플랑크톤 군집의 배가시간(doubling time)은 Eppley(1972) 방법으로 구했다. 획득한 자료의 상관관계는 선형회귀법을 이용하여 분석하였다.

## 결 과

### 물리적 특성

**수온:** 연구 기간중 수온의 변화는  $-1.5 \sim 2.2^\circ\text{C}$ 의 범위를 보였으며(Fig. 2a), 시기별로는 겨울철로 갈수록 감소하여 10월에 최저치( $-1.5^\circ\text{C}$ )를 기록하고(6~9월 측정치 없음), 그 이후에는 남극의 여름철로 진행하면서 수온이 증가하는 양상을 보였다(Fig. 2a). 이와 같은 양상은 이 해역의 뚜렷한 계절성에 기인하는 것으로, 여름철에는 광조건이 호전되면서 수온이 상승하며, 반대로 겨울철에는 일조량이 감소하고, 대륙에서 불어오는 차가운 눈보라를 동반한 폭풍설(blizzard)이 발생하는 빈도가 높아져, 전반적으로 수온을 하강시키기 때문이다. 여름철인 12월과 1월의 일조시간은 20~21 시간 정도이며, 겨울철인 6월과 7월의 일조시간은 6~7 시간 정도로서, 일조시간의 차이에 의한 일조량의 차이가 매우 크다. 아울러, 겨울철의 빈번한 폭풍설은 기온을 최저  $-25.6^\circ\text{C}$ (7월)까지 하강시켜, 해수의 결빙에 주요한 역할을 한다.

수온의 변화폭은 대부분의 정점에서  $0 \sim 0.6^\circ\text{C}$ 의 매우 작은 수층간 차이를 보여 조사해역의 수위가 수직적으로 균일하였다. 예외적으로, 광조건이 호전되고 수온이 상승하는 11월과 12월에 정점 2와 3에서 각각  $1.8^\circ\text{C}$ ,  $1.6^\circ\text{C}$ 의 수층간 차이를 보였는데, 이는 표층수의 수온상승과 함께 용설수의 영향에 의한 염

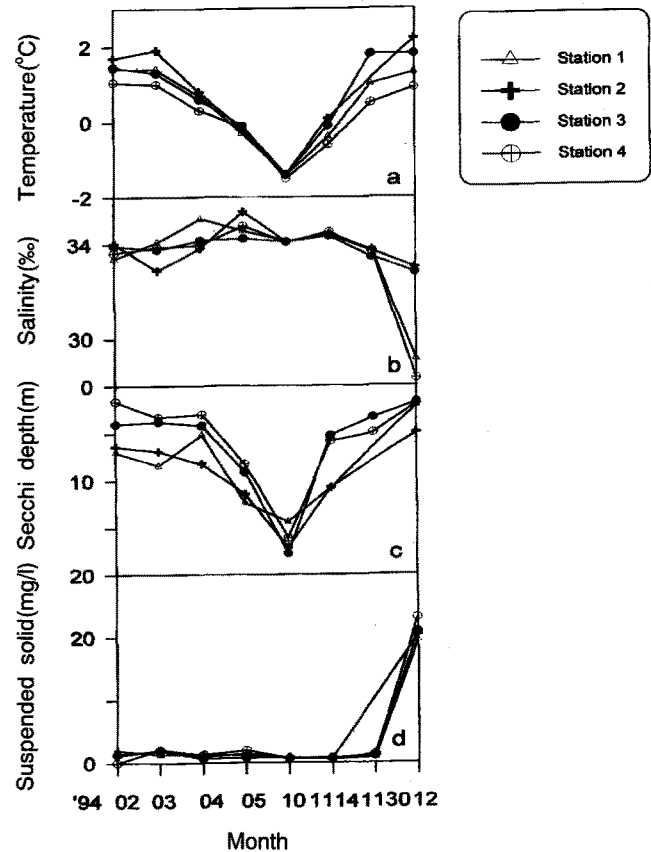


Fig. 2. Temporal variations of environmental parameters at each surface layer in Maxwell Bay and Marian Cove during 1994: (a) temperature, (b) salinity, (c) Secchi depth, (d) concentration of suspended solid.

분의 감소에 따른 수층안정에 기인한 것으로 보인다.

**염분:** 염분의 경우, 내만 정점에서의 연중변화는 28.30~35.39‰의 범위를 보였고(Fig. 2b), 얼음이 녹아 용설수의 유입이 많아지는 여름철로 갈수록 염분이 낮아지는 남극해역의 전형적인 양상을 보였다. 만년빙 부근에 위치한 정점 4의 경우, 여름철에는 용설수의 유입량이 많아, 표층수의 염분이 현저히 낮았고(12월, 28.30‰), 용설수가 바다로 유입되는 하천이 위치한 정점 1의 경우도 표층, 저층에서 각각 29.10‰, 30.80‰(12월)의 낮은 염분을 보였다. 염분의 변화는 주로 용설수에 기인하였다. 염분의 수층간 차이는 온도와 비슷한 양상을 보이는데, 겨울철에는 수층간 차이가 미미한 반면에 수온과 광조건이 호전되어지는 여름철에는 수층별 차이가 컸다( $0 \sim 1.8\%$ 의 변화폭). 12월 정점 4에서는 다량의 용설수가 표층으로 유입되어 표층과 저층(20 m)의 염분차가 4.4‰까지 기록되었다.

**투명도와 부유물질:** 투명도는 10월을 제외하고 Maxwell 만이 Marian 소만에 비하여 다소 높았는데, 이는 육상으로부터 유입되는 부유물질의 영향이 용적이 적은 Marian 소만에서 더 크기 때문인 것으로 추측된다. 아울러, 영구빙에 의한 영향을 받는 정점 4는 다른 세 정점에 비해 항상 낮았고, 특히 용설수가 유입되는 여름철에 투명도가 가장 낮았다(2월, 1.6 m; 12월, 1.85 m). 투명도의 계절별 변화는 겨울로 갈수록 커지다 여름으로 갈수

록 다시 작아지는 양상을 보였다(Fig. 2c). 부유물질은 전 정점에 걸쳐, 2월부터 11월까지 0.56~3.5 mg/l로 비교적 소폭의 변화를 보이다가, 12월로 접어들면서 19.39~23.11 mg/l로 현저히 증가하였다(Fig. 2d).

**화학적 특성**

질산염(+아질산염)은 연중 높은 28.9~36.09 $\mu$ M의 농도범위(평균 33.49 $\mu$ M)를 보였다. 표층과 저층은 농도의 차이가 크지 않아, 수층이 비교적 잘 혼합되어 있음을 알 수 있다. 계절별로는 겨울철이 여름철보다 다소 높았다(Fig. 3a). 인산염은 0.33~2.62 $\mu$ M의 분포(평균 2.0 $\mu$ M)를 보였고(Fig. 3b), 12월(평균 1.27 $\mu$ M)을 제외한 나머지 시기에는 평균 1.94~2.30 $\mu$ M의 비교적 높은 농도로 분포하였다. 규산염의 분포는 15.61~91.54 $\mu$ M의 범위를 보였는데(Fig. 3c), 12월을 제외하면 평균 70 $\mu$ M 이상의 높은 농도분포를 기록하였다. 12월에는 농도가 54.86 $\mu$ M까지 떨어졌는데, 이는 광조건이 호전되고, 온도가 상승함에 따라 규조류의 성장에 의한 규산염의 소비와 함께, 유입되는 용설수에 의한 희석효과가 동시에 작용한 것으로 보인다. 암모니아의 경우, 0.42~2.98 $\mu$ M(평균 1.44 $\mu$ M)의 범위를 보였으며(Fig. 3d), 수층별 차이는 0~0.5 $\mu$ M을 나타내었다. 계절변화는 뚜렷한 양상을 보이지는 않았지만, 5월이 평균 2.44 $\mu$ M로 가장 높았다.

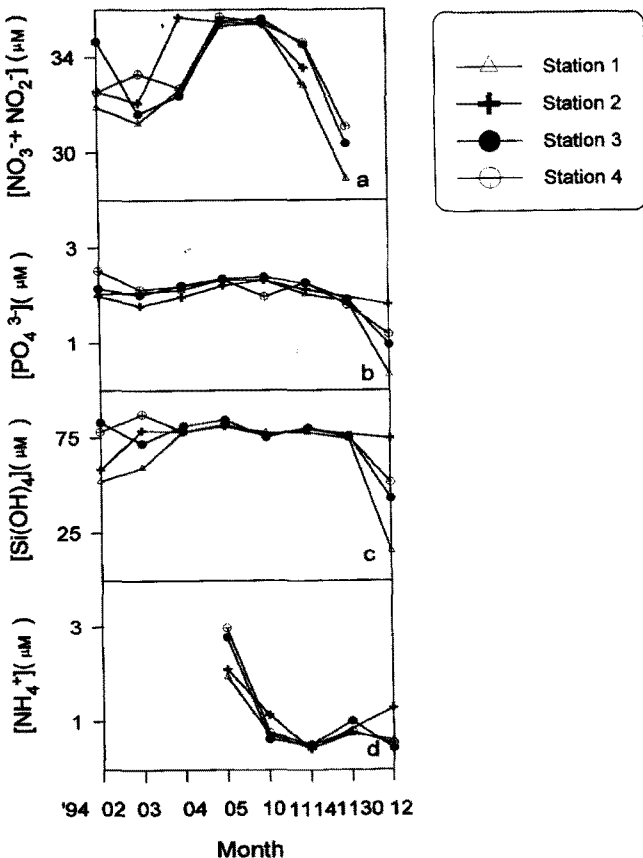


Fig. 3. Temporal variations of nutrient concentrations at surface layers in Maxwell Bay and Marian Cove during 1994: (a) [nitrate+nitrite], (b) [phosphate], (c) [silicate], (d) [ammonium ion].

**Chlorophyll a 및 식물플랑크톤 생물량**

조사시기 동안 관측한 chlorophyll a의 농도는 전 정점에 걸쳐 미검출 수준에서 3.03  $\mu$ g/l의 분포(평균 0.63  $\mu$ g/l)를 보였고(Fig. 4), 하계기간 중의 chlorophyll a 농도(11월 30일 자료와 12월 자료)는 0.2~3.0  $\mu$ g/l(평균 0.9  $\mu$ g/l)로 이는 같은 해역에서 Hong(1989)이 보고한 값인 1~2  $\mu$ g/l과 비슷한 범위에 속한다. 최 등(1992)은 같은 해역에서 0.6~0.9  $\mu$ g/l의 chlorophyll a 농도를 보고한 바 있는데, 이 값은 본 연구에서의 조사치 보다 다소 낮은 값이다.

계절별로는 내만에서 평균적으로 4월(0.06  $\mu$ g/l), 5월(0.05  $\mu$ g/l)에 낮게 나타났고, 늦여름인 3월(1.31  $\mu$ g/l)과 12월(1.22  $\mu$ g/l)에 높은 chlorophyll a값을 기록하였다. 수직혼합이 강한 5월과 10월에는 표층과 저층(20 m) 사이의 chlorophyll a의 농도차가 거의 없었고(0~0.06  $\mu$ g/l), 나머지 조사시기에는 불규칙한 양상을 보이며 변화하였으나(0.01~1.7  $\mu$ g/l), 대부분 표층이 저층보다 낮은 값을 보였다. 12월의 경우 모든 정점에서 표층이 저층보다 높은 값을 기록하였는데, 이는 이 시기의 유광대 깊이가 10 m 이하인 반면에 저층의 채수 수심이 20 m이기 때문이다.

Fukuchi *et al.*(1985)이 Lützow-Holm 만에서 1982년 1월부터 1983년 1월까지 연중 관측한 chlorophyll a값의 경우, 1월에서 3월까지 < 0.5  $\mu$ g/l로 분포하였고, 4월부터 11월까지 < 0.1  $\mu$ g/l로 감소하였으며, 12월에는 다시 < 0.5  $\mu$ g/l로 약간 증가하였

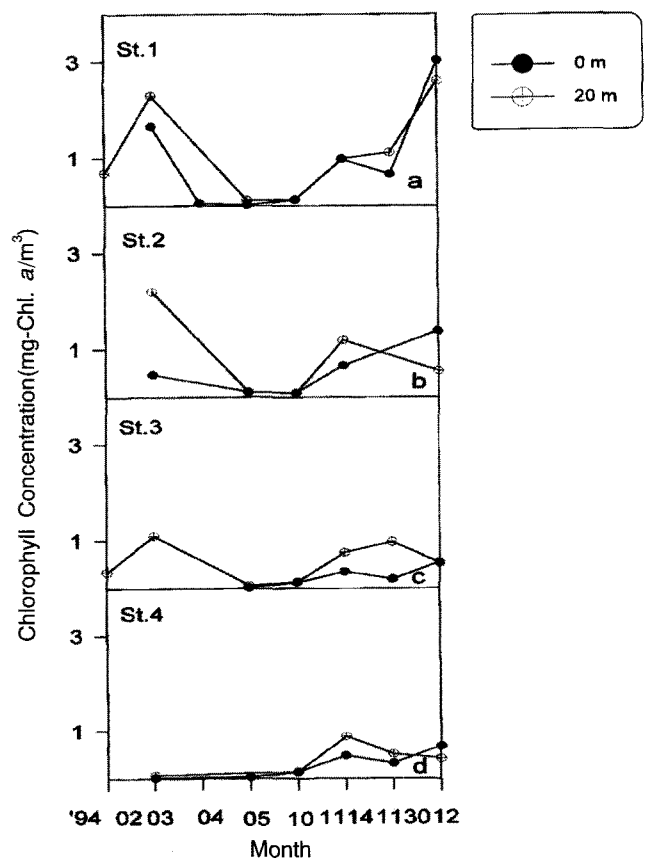


Fig. 4. Temporal variations of chlorophyll a concentration in Maxwell Bay and Marian Cove during 1994: (a) St. 1, (b) St. 2, (c) St. 3, (d) St. 4.

다가 1월에 7.0~11.3  $\mu\text{g/l}$ 까지 크게 증가한다고 보고한 바 있다. 본 자료와 절대치에 있어 차이가 있긴 하지만 계절별 변화양상은 비슷하다고 볼 수 있다.

식물플랑크톤 생물량은 전 정점에서 미검출 수준에서 151.6  $\text{mg C/m}^3$ (평균 32  $\text{mg C/m}^3$ )까지 분포하였다. 평균적으로는 최 등(1992)이 같은 해역에서 보고한 31.2  $\text{mg C/m}^3$ 과 유사하다.

### 식물플랑크톤의 일차생산력

조사 기간동안 정점 2, 3의 표층에서의 일차생산력은 최저 0.53  $\text{mg C/m}^3 \cdot \text{day}$ (10월)에서 최고 18.95  $\text{mg C/m}^3 \cdot \text{day}$ (12월)의 범위(평균 7.38  $\text{mg C/m}^3 \cdot \text{day}$ )를 기록하였다(Table 1). 유광대 깊이로 수층적분한 하루중 일차생산력은 최저 41.28  $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ (10월)에서 최고 560.20  $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ (11월 14일)를 기록하였으며, 평균 219.26  $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ 이었다(Table 1). 최 등(1992)은 Maxwell 만과 Marian 소만에서 18.34  $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ 를 보고한 바 있고, Yang(1989)은 같은 해역에서 140~300  $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ (ca. 220  $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ )를 보고한 바 있다. 전자의 경우, 본 조사결과에 비하여 1/10 수준의 낮은 값을 보였는데 이는 본 연구보다 긴 24 시간 배양에 따른 microflagellate 등에 의한 섭식작용의 영향이 매우 큰 것으로 판단된다. 후자의 경우, 하계기간 동안의 평균값보다는 약간 작은 값이고 조사기간 전체의 평균값과는 거의 유사하다. 본 연구 결과 중, 12월 실험 결과치가 이례적으로 낮은 이유는 증가한 부유물질로 인하여 빛의 이용효율이 감소하고 유광대 깊이가 얕아져서, 유광대에 걸쳐 적분한 식물플랑크톤 색소량이 줄어들었기 때문인 것으로 사료된다.

식물플랑크톤의 비성장률(specific growth rate)는 정점 2, 3번의 경우, 0.16~1.06/day이었고, 관측된 값들 중 10월이 0.16/day로 가장 낮았고, 2월이 1.06/day로 가장 높았으며(Table 1), 평균 0.56/day이었다. Eppley(1972)가 제안한 온도와 specific growth rate 간의 관계식( $\log_{10} \mu = 0.0275T - 0.07$ )에 근거하여 남극해의 연중 온도범위 중 일반적인 하한 값이라 할 수 있는  $-2^\circ\text{C}$ 에서의 최대 성장속도를 계산하면 0.75/day가 된다. 본 조사결과는 이 값보다 낮는데, 이는 조사해역에서 조류의 성장에 온도이외에 다른 제한요인이 있음을 시사한다.

**Table 1.** Primary productivity of phytoplankton (integrated value to euphotic depths,  $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ ; surface value,  $\text{mg C/m}^3 \cdot \text{day}$ ), and Specific growth rate (doublings per day) at two stations in Maxwell Bay and Marian Cove in 1994

| Month | St. no. | Primary productivity ( $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ ) | Primary productivity ( $\text{mg C/m}^3 \cdot \text{day}$ ) | Specific growth rate ( $\text{day}^{-1}$ ) |
|-------|---------|---|---|--|
| Feb.  | 2       | -   | -   | -  |
|       | 3       | 61.03   | 1.09  | 1.06                                       |
| Mar.  | 2       | 276.83  | 5.53  | 0.30                                       |
|       | 3       | -   | -   | -  |
| Oct.  | 2       | 41.28   | 0.53  | 0.16                                       |
|       | 3       | 291.09  | 2.53  | 0.47                                       |
| Nov.  | 2       | 560.20  | 12.22   | 0.45                                       |
|       | 3       | 214.82  | 10.83   | 0.69                                       |
| Dec.  | 2       | -   | -   | -  |
|       | 3       | 89.57   | 18.95   | 0.76                                       |

## 고 찰

### 생물량 및 생산력과 환경요인과의 관계

**영양염:** 남극은 식물플랑크톤이 성장하기에 충분한 양의 영양염이 존재하며(Hart, 1942; Holm-Hansen *et al.*, 1977; El-Sayed, 1984; Hayes and Whittaker, 1984), 식물플랑크톤이 대번성하고 있는 시기에도 영양염 농도는 식물플랑크톤에게 제한요인으로 작용할 수 있는 한계농도 이상으로 존재한다(El-Sayed, 1971). 지금까지 보고된 가장 낮은 농도값(인산염, 0.5  $\mu\text{M}$ (Weddell Sea); 질산염, 6.7  $\mu\text{M}$ (Ross Sea), 7.5  $\mu\text{M}$ (Bransfield Strait))에서도 식물플랑크톤의 대번성이 유지되기에 충분하였다(Jacques, 1989). 아울러, 영양염 첨가한 후, 식물플랑크톤의 성장률이 증가했다는 실험결과는 없다(Hayes and Whittaker, 1984). 따라서 철 등 미량원소를 제외한 영양염은 남극식물플랑크톤의 성장에 제한요소로 작용할 가능성이 적은 것으로 판단된다.

본 조사해역은 전 조사기간에 걸쳐 높은 농도의 영양염이 분포하였으며, Fig. 5a는 식물플랑크톤 생물량과 영양염 사이에 유의성 있는 음의 상관관계가 있음을 보여준다. 이는 생물에 의한 소모작용과 여름철로 갈수록 육상으로부터 유입되어지는 용설수에 의한 희석의 영향일 것으로 사료된다. 실제로 용설수의 영양염 농도는 극히 낮은 것(질산염, 1.6  $\mu\text{M}$ ; 인산염, 0.1  $\mu\text{M}$ ; 규산염, 12  $\mu\text{M}$ )으로 보고되었다(정 등, 1990). 아울러 영양염(인산염, 규산염) 농도와 염분은 양의 상관관계를 가지고 그 분포양상도 비슷했으며(Fig. 6a), 영양염(인산염, 규산염)과 온도와 관계(Fig. 6c)는 염분과 온도가 가지는 관계(Fig. 6b)와 비슷했는데, 이는 영양염(인산염, 규산염)이 염분과 같이 희석에 의한 영향을 받았음을 보여준다. 또한 chlorophyll *a*와 영양염의 상관관계(Fig. 5a)는 chlorophyll *a*와 염분과의 상호관계(Fig. 5b)와 비슷하다. 특히 여름철인 12월 정점 1, 4의 표층의 인산염, 규산염, 염분 자료는 비슷한 동태를 보인다.

일반적으로 생물량과 영양염 사이의 음의 상관관계는 생물작용 증가로 인한 결과인데, Priddle *et al.*(1986)은 남극식물플랑크톤의 성장이 영양염 농도의 감소를 초래한다고 보고하였다. 본 연구에서는 영양염의 생물에 의한 이용효과를 알아보기 위해 용설수에 의한 영향을 받지 않는 계절을 분류하여 전 수층에서 생물량과 영양염간의 관계를 구해 보았는데 그 결과, 암모니아, 질산염+아질산염 및 총무기질소는 chlorophyll *a*와 매우 높은 음의 상관관계를 보였으나(Fig. 5c), 인산염이나 규산염은 chlorophyll *a*와 뚜렷하다 할 상관성을 보이지 않았다(규산염,  $r^2=0$ ; 인산염,  $r^2=0.02$ ). 이는 영양염의 공급이 일정할 경우 질소태 영양염이 다른 무기 영양염보다 생물에 의한 이용빈도가 높음을 시사해 준다. 특히, 식물플랑크톤 생물량의 증가에 따른 암모니아의 지수적인 감소는 흥미로운데, 식물플랑크톤 생물량이 아주 낮을 때([Chl. *a*] < 0.2  $\mu\text{g-chl. a/l}$ )는 암모니아를 왕성하게 소모하고 chlorophyll *a* 농도가 어느 수준을 넘게 되면 평형상태에 이르게 됨을 알 수 있다. El-Sayed *et al.*(1983)은 Ross Sea에서 chlorophyll *a*와 암모니아 농도 사이에 강한 음의 상관관계가 있음을 보고하고, 식물플랑크톤이 유광대 내에서 암모니아 농도를 조절하는 역할을 하고 있음을 주장한 바 있다. Fig. 5d를 보면, 박테리아 수도와 TIN(total inorganic nitrogen) 사이에 음의

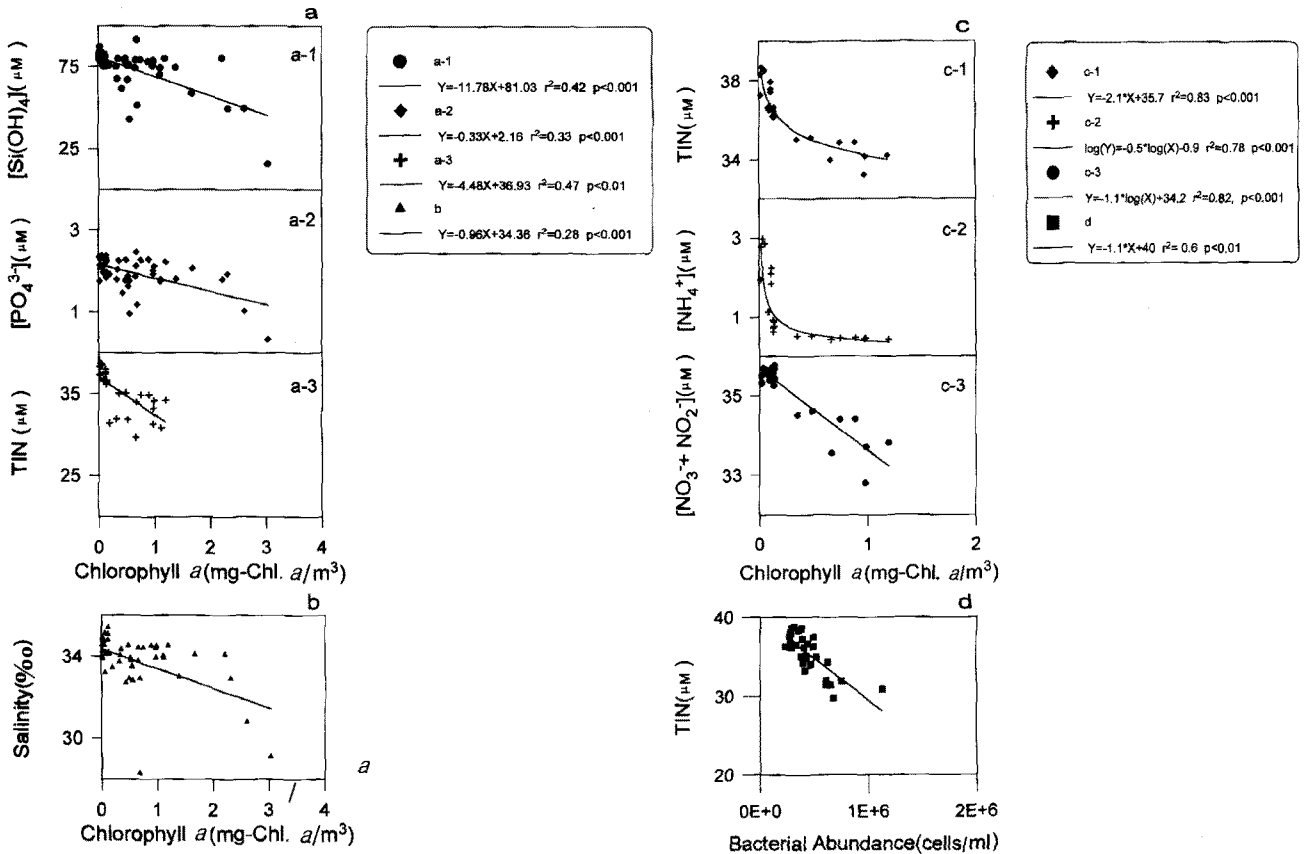


Fig. 5. The relationship between nutrients, salinity and biological parameters in Maxwell Bay and Marian Cove during 1994: (a) nutrients vs. chlorophyll *a* concentration, (b) salinity vs. chlorophyll *a* concentration, (c) nitrogenous nutrients vs. chlorophyll *a* concentration during the season when there was no influence of ice-melt waters, (d) total inorganic nitrogen vs. bacterial number.

상관관계가 있음을 알 수 있는데, 이는 식물플랑크톤에 의한 섭취가 영양염의 농도를 낮추는 반면, 상대적으로 박테리아와 식물플랑크톤의 생물량은 증가하기 때문으로 사료된다. Fuhrman *et al.*(1980)은 질산염 농도와 박테리아 생물량 및 생산력 사이에 음의 상관관계가 있음을 보고하였는데, 이들은 식물플랑크톤이 영양염을 많이 섭취함으로써 상대적으로 무기영양염의 농도는 낮아지고, 식물플랑크톤의 생산력, 생물량, 박테리아의 생산력, 생물량 등이 높아지게 됨에 따라 나타나는 결과인 것으로 주장하였다.

결론적으로 본 연구에서 영양염과 생물량 사이에 나타나는 음의 상관관계는 용설수에 의한 희석과 생물학적인 이용에 기인하는 것으로 사료되며 영양염은 연중 높은 농도로 존재하여 식물플랑크톤 생물량이 증가할 수 있도록 조건을 제공하고 있지만, 식물플랑크톤 생물량이나 일차생산력의 증가를 직접적으로 촉발시키지 않는다.

**온도:** 온도와 식물플랑크톤 생물량과의 관계는, 미약하지만 양의 상관관계를 가지는 것으로 나타났고(Figs. 7a, 7b), 온도와 일차생산력과의 관계는 뚜렷한 상관성이 없는 것으로 드러났다( $r^2=0.18$ ,  $p=0.345$ ). 식물플랑크톤 생물량과 온도와의 미약한 양의 상관관계는 식물플랑크톤 군집의 장기적 적응의 결과라 할 수 있지만, 온도와 생산력간의 이와 같은 결과는 남극에서 다른 학자들에 의해 보고되어진 사실과 다른 결과이다.

Laubscher *et al.*(1993)은 남극해 대서양 권역(Antarctic sector)의 극전선 부근에서 온도가 식물플랑크톤의 생산력, 생물량과 밀접한 관련을 가지고 있다고 보고했고, Tilzer *et al.*(1986)은 극히 낮은 온도환경에서 빛이 제한되어진 광합성물은 점점 온도에 의존적이 된다고 했는데, 그 이유는 식물플랑크톤의 최대광수율(maximum quantum yield)이 온도에 의존하면서 변하기 때문이라고 주장했다. 세포 내의 광화학적 기구가 포화상태에 이르렀을 때에는 온도가 광합성물을 조절하는 주요 요인이 될 수 있다. Scotia 해와 북웨델 해에서의 자료를 보면(Neiri and Holm-Hansen, 1982), 식물플랑크톤의 광합성은 표층광도의 10~15% 정도에서 포화되기 때문에 수층의 상층부(10~20 m 내)에서는 온도가 주요한 광합성 조절기작이 된다. Fiala and Oriol(1990)은 남극에 서식하는 자연상태의 호한성(psychrophilic) 식물플랑크톤 군집이 최대 성장률을 보일 수 있는 온도 범위는 3~5°C 정도이며, 6~9°C에서는 생존이 힘들다고 보고하였고, Neiri and Holm-Hansen(1982)은 7°C에서 최대 광합성률을 보인다고 보고하였다. Li(1985)는 북극의 식물플랑크톤이 그들이 서식하는 현장온도보다 10°C 이상 높은 온도에서 최적의 성장률을 보인다고 보고하였다. 온도와 식물플랑크톤의 성장율과의 관계는 본 연구처럼 현장 자료만으로 규명하기에는 많은 한계가 노정되기 때문에 종차원의 배양실험을 통해 세포의 생리상태와 온도와의 관계를 고찰함이 바람직하다고

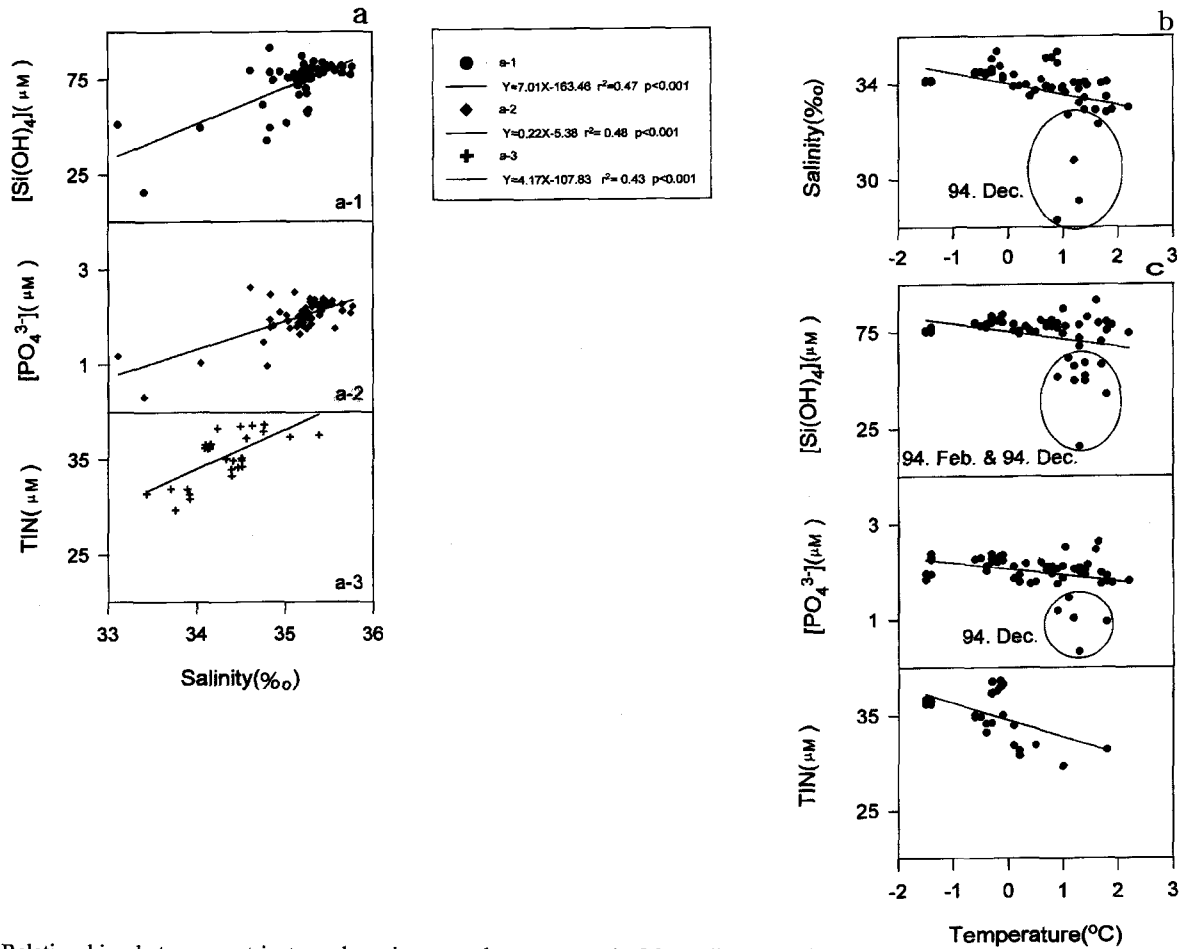


Fig. 6. Relationships between nutrients and environmental parameters in Maxwell Bay and Marian Cove during 1994: (a) nutrients vs. salinity, (b) salinity vs. temperature, (c) nutrients vs. temperature.

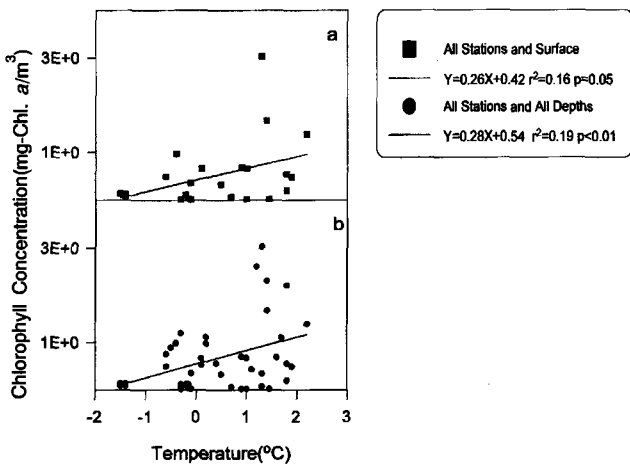


Fig. 7. The correlation of chlorophyll a concentration with temperature in Maxwell Bay and Marian Cove during 1994: (a) at surface, (b) at all depths.

본다.

**일사량:** 일사량은 계절에 따라 변이가 매우 크므로 식물플랑크톤의 성장을 결정짓는 중요한 환경변수로 인식되어져 왔다 (Smith and Sakshaug, 1990). 보통 위도 60° 부근에선 한겨울

일조시간이 6 시간에서 한여름 일조시간이 19 시간까지 변화한다(Smith and Sakshaug, 1990). 따라서 일조량(일조시간)의 변이가 식물플랑크톤의 성장에 큰 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다.

본 연구에서는 광량의 연중 변화에 따른 식물플랑크톤의 생물량 및 생산력의 변화를 비교하기 위해 시료 채집이 있었던 날의 광량 평균과 표층에서의 식물플랑크톤 생물량, 생산력과의 상관관계를 도출하였다(Fig. 8). 비록 생산력 및 생물량의 자료 중 결빙된 시기의(6, 7, 8, 9월) 자료는 누락되었지만, 시간에 따른 광량의 현저한 변화에 대한 식물플랑크톤의 동태를 어느 정도 파악할 수 있는 결과를 보였는데, 아울러, Fig. 8a는 식물플랑크톤의 일차생산력과 광량사이에 꽤 유의성이 높은 양의 상관관계가 있음을 보여준다( $r^2=0.85$ ,  $p=0.003$ ).

일반적으로 일사량과 일차생산력 및 식물플랑크톤의 생물량 사이의 상관관계를 조사하기 위해서는 수괴의 혼합을 고려해야 하나 본 연구에서는 혼합수심(mixing depth)에 대한 자료 부족으로 유광대와 수괴의 부등면 사이의 관계에 대한 구체적인 정보를 얻을 수는 없었다. 그러나 위의 결과로 파악할 수 있는 것은, 표층에서의 생산력과 생물량이 그때의 시, 공간을 대표할 수 있는 값이라는 가정하에, 시간에 따라 표층에 조사되는 광량의 변화가 표층의 일차생산과 생물량에 미치는 영향이다. 여

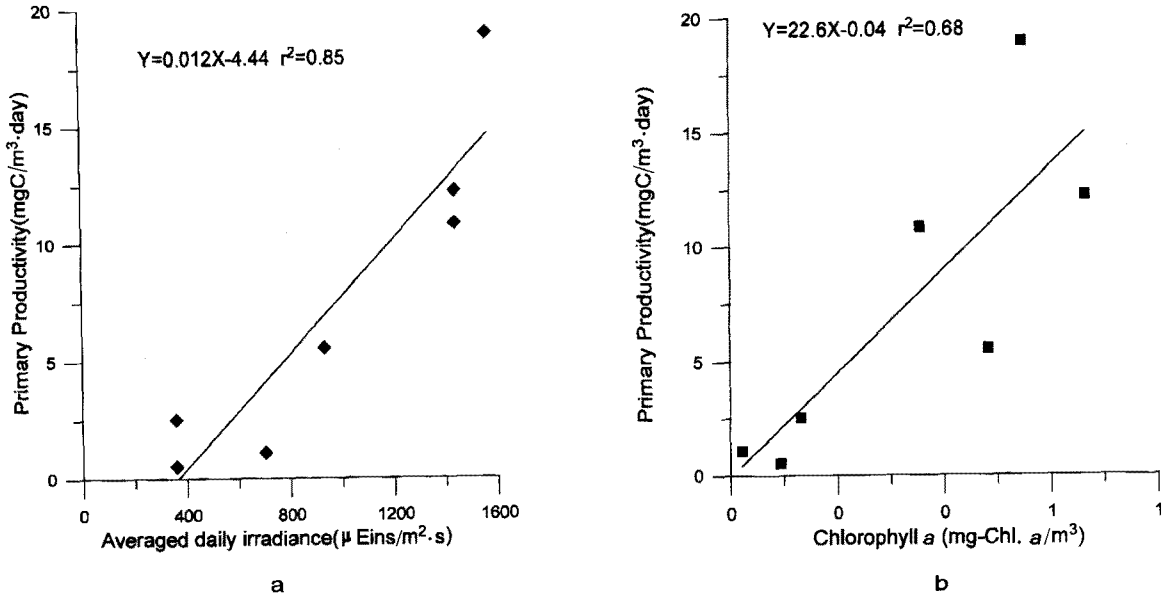


Fig. 8. The correlations of primary productivity with daily averaged irradiance and chlorophyll a concentration at the surface of Stations 2 and 3: (a) primary productivity vs. daily averaged irradiance, (b) primary productivity vs. chlorophyll a concentration.

름으로 갈수록 광조건이 호전되어짐에 따라 표층에 서식하는 식물플랑크톤의 광합성률이 증가함을 알 수 있었고, 생물량도 광량과 미약한 양의 상관관계( $r^2=0.29$ ,  $p < 0.01$ )를 보였다. 광량과 생물량과의 상관성이 광량과 생산력과의 관계에 비해 낮은 이유는 생물량이 다른 요인들(초식, 혼합 등에 의한 변화 등)에 의한 영향을 받기 때문으로 보인다. 그러나 Fig. 8b에서 보여진 생산력과 생물량의 높은 상관관계( $r^2=0.68$ ,  $p < 0.05$ )로 보아 생물량 역시 일사량과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

결론

표층 식물플랑크톤 군집의 크기가 계절에 따라 변하는데는 일사량이 중요한 제한요인으로 작용하였는데, 식물플랑크톤 생물량과 일사량의 상관관계는 각 정점에서 모두 양의 상관관계를 보였으며( $r^2=0.29$ ,  $p < 0.01$ ), 일차생산력과 일사량 사이에는 매우 높은 양의 상관관계( $r^2=0.85$ ,  $p < 0.001$ )가 있었다(Fig. 8a). 온도는 식물플랑크톤 생물량과 결정계수( $r^2$ ) 20% 미만의 미약한 상관관계를 보였으며(Figs. 7a, 7b), 일차생산력은 온도와 유의성 있는 상관관계를 보이지 않았다( $r^2=0.18$ ,  $p=0.345$ ). 이는 온도가 식물플랑크톤의 생물량 및 일차생산력에 미치는 영향이 크지 않음을 시사한다. 영양염과 식물플랑크톤 생물량이 보이는 음의 상관관계는 생물에 의한 소모를 시사하는 동시에 여름철 육상과 피요르드 상부로부터 눈과 얼음이 녹아 유입되는 담수에 의한 희석을 반영하고 있다. 담수에 의한 희석이 없는 계절의 질소태 영양염과 생물량 간의 관계는 매우 높은 음의 상관관계를 보여 주는데, 이는 질소태 영양염이 다른 영양염에 비해 상대적으로 이용빈도가 높음을 시사한다. 영양염은 조사기간동안 항상 높은 농도로 분포하며 식물플랑크톤 생물

량을 증가시킬 수 있는 조건을 제공하고 있지만, 식물플랑크톤 생물량의 증가를 촉발하는 결정적인 요인으로는 작용하지 않았다.

참고문헌

김수암, 김해철, 신형철, 1991. 남극어류 *Nototherioidei* 亞目的 생물학적 특징에 대한 기초 조사. 남극환경 및 자원탐사 기술(한국해양연구소편). 과학기술처, BSPG 00140-400-7, pp. 739-766.

정호성, 전득산, 정창수, 김종근, 1990. 바톤반도 조간대의 해수특성과 해조류 성장. 남극환경 및 자원탐사 기술(한국해양연구소편). 과학기술처, BSPG 00111-317-7, pp. 307-356.

최중기, 박경철, 노재훈, 심문보, 1992. 브랜스필드 해협외의 식물플랑크톤 분포에 관한 연구. 남극환경 및 자원탐사 기술(한국해양연구소편). 과학기술처, BSPG00169-5-485-7, pp. 281-369.

Braud, T. and A. Klem, 1931. Hydrographical and chemical investigations in the coastal waters off More and in the Romsdals fjord. *Hvalradets Skrifter*, 1: 1-88.

Cho, B.C. and F. Azam, 1990. Biogeochemical significance of bacterial biomass in the ocean's euphotic zone. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 63: 253-259.

Deacon, G.E.R., 1982. Physical and biological zonation in the Southern Ocean. *Deep-Sea Res.*, 29: 1-15.

El-Sayed, S.Z., 1971. Observations on phytoplankton bloom in the Weddell Sea. In: *Biology of the Antarctic Seas IV*, edited by Llano, G.A. and I.E. Wallen, Academic Press, London,



- pp. 301—312.
- El-Sayed, S.Z., 1984. Productivity of Antarctic waters—a reappraisal. In: *Marine Phytoplankton and Productivity*, edited by Holm-hansen, O., L. Bolis and R. Gilles, Springer-Verlag, Berlin, pp. 19—34.
- El-Sayed, S.Z., D.C. Biggs and O. Holm-Hansen, 1983. Phytoplankton standing crop, primary productivity, and near-surface nitrogenous nutrient fields in the Ross Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res.*, **30**: 871-886.
- Eppley, R.W., 1972. Temperature and the regulation of phytoplankton growth in the sea. *Fish. Bull.*, **70**: 1063—1085.
- Eppley, R.W., Harrisoh, W.G., Chisholm, W.W. and Stewart, E., 1977. Particulate organic matter in surface waters off Southern California and its relationship to phytoplankton. *J. Plank. Res.*, **35**: 671—696.
- Fiala, M. and L. Oriol, 1990. Light-temperature interactions on the growth of Antarctic diatoms. *Polar Biol.*, **10**: 629—636.
- Fuhrman, J.A., J.W. Ammerman and F. Azam, 1980. Bacterioplankton in the coastal euphotic zone: distribution, activity and possible relationships with phytoplankton. *Mar. Biol.*, **60**: 201—207.
- Fukuchi, M., A. Tanimura and H. Ohtsuka, 1985. Marine biological and oceanographical investigations in Lützow-Holm Bay, Antarctica. In: *Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs*, edited by Siegfried, W.R., P.R. Condy and R.M. Laws, Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 52—59.
- Gilstad, M., 1987. Effect of Photoperiod and Irradiance on Diatom Growth. M.S. Thesis, University of Trondheim, Trondheim (Norway).
- Goldman, J.C. and E.J. Carpenter, 1974. A kinetic approach to the effect of temperature on algal growth. *Limnol. Oceanogr.*, **19**: 756—766.
- Gran, H.H., 1931. On the conditions for the production of plankton in the sea. *Rapports et Proces-Verbeaux des Reunions Conseil International pour' Exploration de la Mer*, **15**: 37—46.
- Grasshoff, K., M. Ehrhardt and K. Kremling (eds.), 1983. *Methods of Seawater Analysis*. Springer-Verlag, Weinheim, 419 pp.
- Hart, T.J., 1942. Phytoplankton periodicity in Antarctic Surface water. *Discov. Rep.*, **21**: 261—356.
- Hayes, P.K. and T.M. Whittaker, 1984. The distribution and nutrient status of phytoplankton in the Southern Ocean between 20° and 70° W. *Polar Bio.*, **3**: 153—165.
- Holm-Hansen, O., S.Z. El-Sayed, G.A. Franceschini and R. Cubel, 1977. Primary production and the factors controlling phytoplankton growth in the Southern Ocean. In: *Adaptations within Antarctic Ecosystems—Proceedings of the Third SCAR Symposium on Antarctic Biology*, edited by Llano, G. A., Houston, pp. 11—50.
- Hong, G.H. 1989. Oceanography of Maxwell Bay, the King George Island. Short-term variation of chemical property of water and the sedimentation of particulate matter in the glacially fed antarctic coastal waters. In: *Antarctic Science: Geology and Biology*, edited by Huh, H.T., B.K. Park and S.-H. Lee, Korea Ocean Research and Development Institute, pp. 171-185.
- Jacobs, S.S. and A. Amos, 1967. *Physical and Chemical Oceanographic Observations in the Southern Ocean*. Lamont-Doherty Geological Observervatory, Technical Report 1-cu-1-67, New York.
- Jacques, G., 1989. Primary production in the open Antarctic Ocean during the austral summer: a review. *Vie Milieu*, **39**: 1—17.
- Jennings, J.C. Jr., L.I. Gordon and D.M. Nelson, 1984. Nutrient depletion indicates high primary productivity in the Weddell Sea. *Nature*, **308**: 51—54.
- Laubscher, R.K., R. Perissinotto and C.D. McQuaid, 1993. Phytoplankton production and biomass at frontal zones in the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Polar Biol.*, **13**: 471—481.
- Li, W.K.W., 1985. Photosynthetic response to temperature of marine phytoplankton along a latitudinal gradient (16° N to 74° N). *Deep-Sea Res.*, **32**: 1381—1391.
- Nelson, D.M., W.O. Smith, Jr., L.I. Gordon and B.A. Hubert, 1987. Early spring distributions of density, nutrient, and phytoplankton biomass in the ice-edge zone of the Weddell-Scotia Sea. *J. Geophys. Res.*, **92**: 7181—7190.
- Neori, A. and O. Holm-Hansen, 1982. Effect of temperature on rate of photosynthesis in Antarctic phytoplankton. *Polar Bio.*, **1**: 33—38.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press, Ottawa, 309 pp.
- Poole, H.H. and W.R.G. Atkins, 1929. Photoelectric measurements of submarine illumination throughout the year. *J. Mar. Biol. Asso. UK*, **16**: 297—324.
- Priddle, J., R.B. Heywood and E. Threiot, 1986. Some environmental factors influencing phytoplankton in the Southern Ocean around South Georgia. *Polar Bio.*, **5**: 65—79.
- Sakshaug, E. and O. Holm-Hansen, 1986. Photoadaptation in Antarctic phytoplankton: Variations in growth rate, chemical composition and P-I curves. *J. Plank. Res.*, **8**: 459—473.
- Smith, W.O. and D.M. Nelson, 1985. Phytoplankton bloom produced by a receding ice edge in the Ross Sea: Spatial coherence with the density field. *Science*, **227**: 163—166.
- Smith, W.O., Jr. and E. Sakshaug, 1990. *Polar phytoplankton*. In: *Polar Oceanography. Part B. Chemistry, Biology, and Geology*, edited by Smith, W.O., Jr., Academic Press, San Diego, pp. 477—525.
- Steeman-Nielsen, E., 1952. The use of radioactive carbon (C-14) for measuring organic production in the sea. *J. Cons. Perma. Int. Explor. Mer.*, **18**: 117.
- Sverdrup, H.U., 1953. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. *J. du Conseil International pour' Exploration de la Mer.*, **18**: 287—295.

Tilzer, M.M., M. Elbächter, W.W. Gieskes and B. Beese, 1986.  
Light-temperature interactions in the control of photosynthesis  
in Antarctic phytoplankton. *Polar Biol.*, **5**: 105—111.

Yang, J.S., 1989. Nutrient distribution in the Scotia Sea. In:  
Antarctic Science: Geology and Biology, edited by Huh, H.T.,

B.K. Park and S.-H. Lee, Korea Ocean Research and  
Development Institute, pp. 199—214.

---

1997년 9월 4일 원고 접수

1998년 1월 20일 수정본 채택