

<총 설>

# 전 지구 환경변화에 대한 극지 식물플랑크톤의 중요성

강성호 · 강재신 · 이상훈 · 김동선 · 김동엽

(한국해양연구소 극지연구센터)

**적 요** - 최근 극지 해양 생태계는 화석연료 사용의 증가로 인한 지구 온난화, 오존층 파괴에 의한 자외선 증가 등과 같은 전 지구 환경변화에 영향을 받고 있다. 지구 온난화와 오존층 파괴에 의한 수온 상승, 빙하 후퇴, 해수면 상승, 해빙 분포 변화, 자외선 증가 등으로 인해 극지 해양 생물들의 성장 환경이 변화하는 등 여러 가지 증후들이 극지 해양 생태계에 나타나고 있다. 특히 빛을 에너지원으로 하고, 온도에 민감하며, 빠르게 성장하는 일차생산자들인 식물플랑크톤들이 극지 해양의 물리적, 생지화학적 환경 변화에 가장 민감하게 영향을 받고 있다. 전체 극지 해양 생태계를 유지하기 위한 주요 탄소 공급원인 식물플랑크톤의 변화는 전체 극지 해양 생태계의 변화를 의미한다. 식물플랑크톤들은 오랜 기간 극한 환경에 적응하여 왔기 때문에 미세한 환경변화를 쉽게 감지하고 감시하기 위한 생물학적 환경 변화 지표종으로 이용될 수 있다. 전 지구 환경변화에 따른 극지 해양 생태계의 변화 양상을 이해하기 위해서는 환경 변화에 민감하게 반응하는 극지 식물플랑크톤에 대한 연구가 선행되어야 하며 표준화되고 대표적인 식물플랑크톤 지표종의 선정이 필요하다. 이 총설에서는 극지 식물플랑크톤의 일반적인 특징, 서식 환경, 극지 해양의 환경 변화, 환경 변화에 따른 식물플랑크톤의 영향, 전 지구 환경변화를 이해하기 위한 극지 식물플랑크톤의 중요성에 대한 최근 연구 동향이 정리되어 있다.

## 서 론

극지 해양생태계는 일반적으로 극한 환경 조건하에서 형성되는 것으로 인식되고 있지만 오랜 기간을 통해 물리적, 화학적으로 안정된 환경을 유지하고 있다. 극지 해양의 환경 요인들은 이 지역 해양생태계의 주요 일차생산자인 식물플랑크톤의 종 조성, 성장, 생산력, 분포, 계절적 변이 등에 직접적인 영향을 미친다. 이들 환경 요인 중에 일사량은 하계와 동계 동안에 극한 차이를 보이는 반면에 (Fig. 1), 수온은 낮지만 (-2°C~4°C) 열대 해역이나 온대 해역의 계절적 변화에 비해 상대적으로 일정한 상태를 유지하고 있다 (Fig. 2). 이와 같은 특수한 극지 해양 환경으로 인해 극지에만 존재하는 해양생태계가 형성된 것이다.

남극해 또는 남빙양을 해양학적, 지리학적으로 정의하면 남극 수렴대 (Antarctic Convergence)의 남쪽에 존재하는 해양이며, 범위는 시간적, 공간적으로 변화한다 (Deacon 1982). 북극해는 일반적으로 북극 심층 외양수를 의미하나 일반적으로 북극해 주변 연근해 (베링해, 그린랜드해, 카라해, 바렌츠해, 동시베리아해, 척치해, 북포

트해)를 모두 포함하기도 한다. 남극해와 북극해는 극단적으로 변화하는 일사량의 차이로 인해 해빙 (sea ice) 분포의 계절적인 변화가 커서 (Fig. 3) 식물플랑크톤의 생물량과 성장률이 시간적, 공간적으로 해빙의 분포에 많은 영향을 받는다.

극지 해양의 일차생산력은 급격한 일사량의 증가가 일어나는 하계 동안에 집중적으로 증가한다. 영양염의 감소도 이 기간에 일어난다 (Fig. 4A). 일반적으로 동물플랑크톤은 식물플랑크톤이 증가한 후에 기간을 달리하여 생물량의 증가가 일어난다. 일차생산력은 수심, 해빙의 분포, 해빙 주변 표층수에 형성되는 용빙수의 형성, 위도 등에 따라 다른 양상을 보인다. 이와 같은 요인들은 식물플랑크톤의 대량증식 시기 및 강도, 종조성, 생산력 등을 결정하는 주요 요인들이다. 인공위성 센서의 발달로 인해 극지 전 해양에 서식하는 식물플랑크톤의 생물량 및 분포 양상을 이해할 수 있게 되었다 (Fig. 5). 비록 인공위성의 관찰 횟수 부족, 극지방에 형성되는 구름층 등으로 인해 다른 지역에 비해 시간적, 공간적 관찰의 정확성은 떨어지지만, 극지 해양 현장에서 관찰되는 식물플랑크톤 분포 양상을 확인하고 이해하는데 상당한 기여를 하고 있다. 즉 현장에서 관찰된 남극해 및 북극

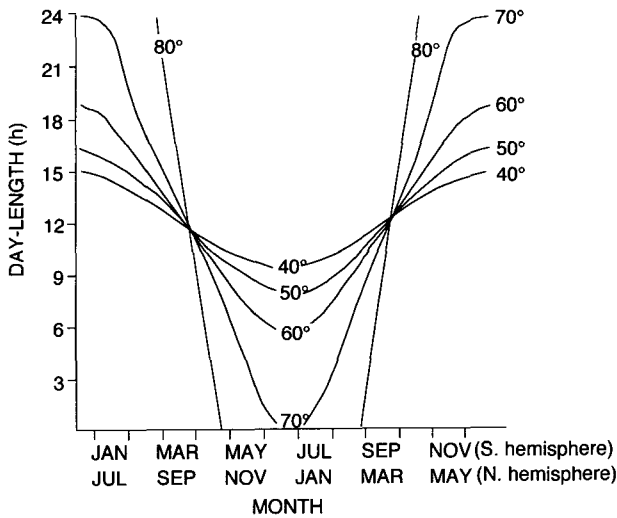


Fig. 1. Seasonal variation in daylength at various latitudes (Sakshaug & Holm-Hansen 1984).

해 해빙 주변지역, 연근해, 극전선 (polar front)에 형성되는 식물플랑크톤의 대량증식과 외양에 형성되는 낮은 생물량을 동시에 지역적으로 관찰이 가능하게 되었다.

극지 해양에서 해빙에 서식하는 미세조류에 의한 일차생산력이 중요한 부분을 차지하고 있다. 해빙 미세조류는 식물플랑크톤이 형성되기 전에 해빙 내에 존재하는 종들로서 해빙의 계절적, 지역적인 분포와 함께 변화한다 (Fig. 4B). 초창기 극지에서 수행되었던 연구 결과에 의하면 일차생산력의 대부분이 크기가  $20\ \mu\text{m}$  이상인 돌말류 (diatoms)에 의해 일어나고 있는 것으로 생각하였다 (Hart 1934). 그러나 최근 필터를 이용한 정량적인 엽록소 분석 및 형광 및 전자 현미경 관찰에 의한 분석에 의하면 크기가 큰 돌말류에 의한 일차생산력은 해빙주변, 연근해, 극전선 지역과 같이 해수의 수피가 안정된 곳에 일어나지만 대부분의 극지 해양에서는  $20\ \mu\text{m}$  이하의 식물플랑크톤에 의해서 일산 생산력이 이루어진다는 사실을 알게 되었다 (Hews *et al.* 1985; Koike *et al.* 1986; WO Smith *et al.* 1987; Kang & Fryxell 1991, 1992; Kang & Lee 1995) (Fig. 6).

다른 해양에서와 마찬가지로 주어진 어떤 시간과 공간에 존재하는 극지 식물플랑크톤의 생물량은 성장률과 사망률 (제거율) 사이의 차이에 의한 결과이다. 극지 식물플랑크톤의 성장률은 수온, 해빙분포 및 표층수의 수직적 운동에 의해 결정되는 빛 조건, 영양염 공급 (심층에서 공급되는 새로운 영양염과 미생물의 분해에 의해 표층수에서 다시 순환되어 공급되는 영양염), 유기물, 중금속, 미량원소 등과 같은 물리적, 화학적 요인들에 의해 결정된다. 사망률 (제거율)은 동물플랑크톤의 섭식, 침전

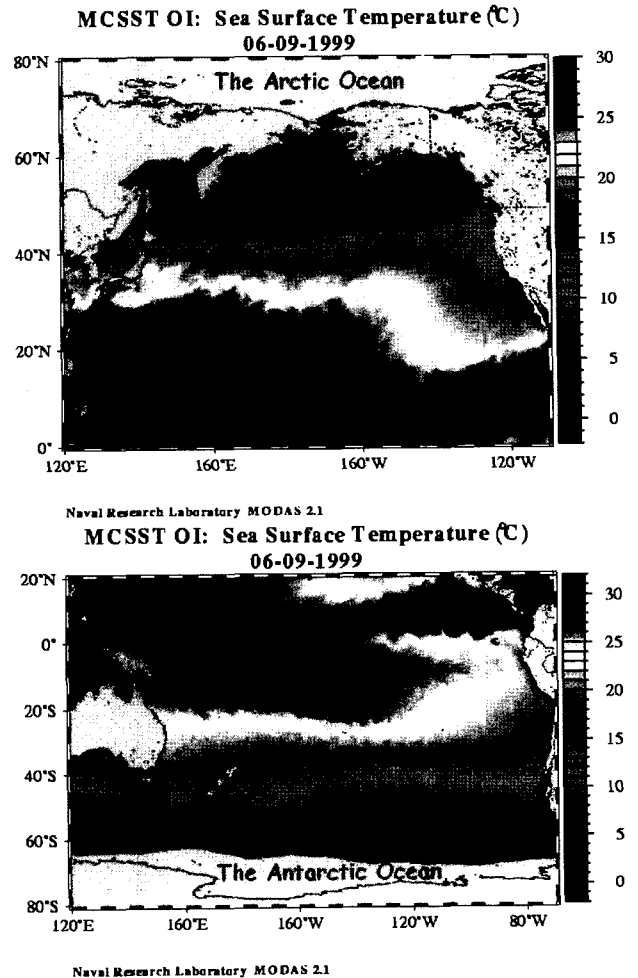
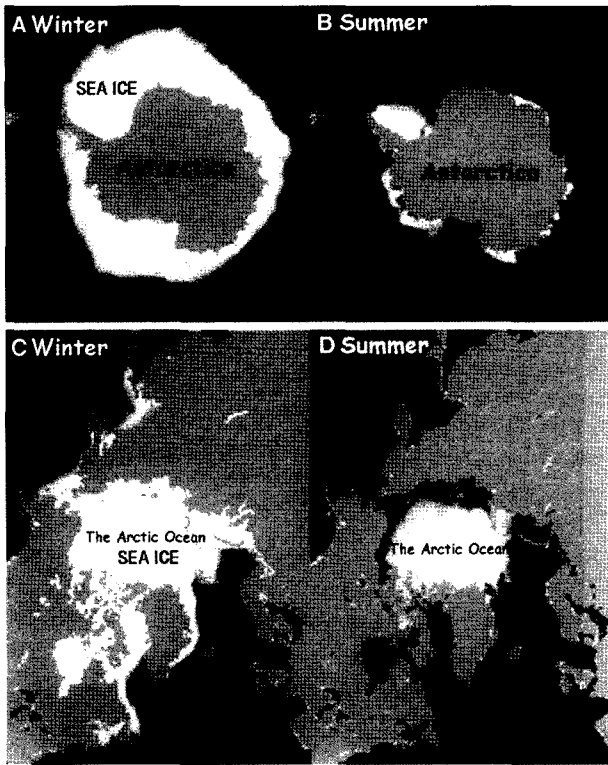


Fig. 2. Spatial distribution of sea surface temperature (SST) around the Arctic and the Antarctic determined from an US Naval Research Laboratory satellite ([http://www7300.nrlssc.navy.mil/altimetry/regions/reg\\_sat.html](http://www7300.nrlssc.navy.mil/altimetry/regions/reg_sat.html)).

등과 같은 생물학적, 물리적 기작에 의해 결정된다. 낮은 수온, 계절적으로 변화하는 해빙의 분포, 해빙 용빙수 형성, 일사량의 급격한 계절적 변화 등이 함께 공존하는 극지 해양 환경에 적응하여 성장하는 식물플랑크톤들이 이 지역 전체 해양생태계를 유지하기 위해 없어서는 안 될 중요한 일차 생산자인 것이다.

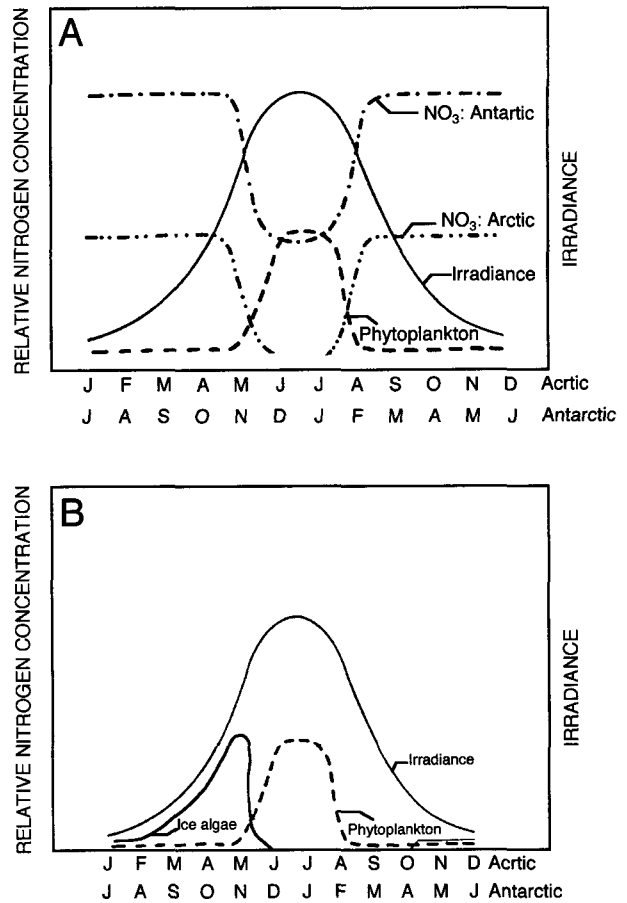
## 2. 극지 식물플랑크톤의 구조적 변화 양상

극지 해양생태계의 외해에 형성되는 식물플랑크톤의 대량증식은 년중 하계에 집중적으로 일어나는 양상을 보인다. 하계 동안의 대량증식이 일어나기 전까지 극지의 외양 생태계는 강한 바람에 의한 표층수의 수직적 순환이 활발하게 이루어 지고, 이로 인해 심층으로부터 많은 영양염이 공급되지만, 일사량의 부족과 수직적 순



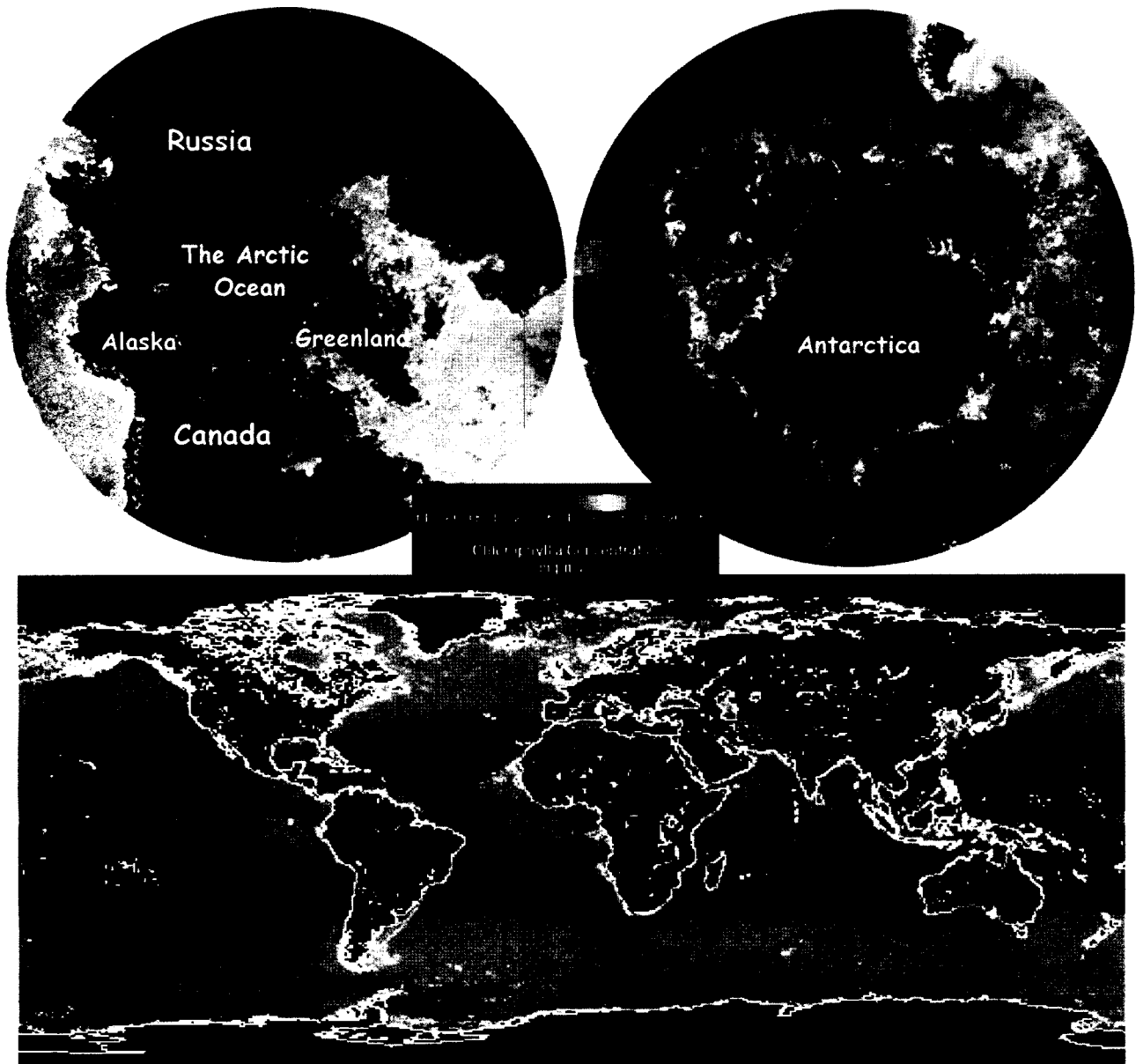
**Fig. 3.** Seasonal variation of sea ice distribution in the Arctic and the Antarctic. A, B: The average extent of sea ice for winter and summer in the Antarctic typically varies between  $21 \times 10^6 \text{ km}^2$  in the austral winter and  $4 \times 10^6 \text{ km}^2$  in the austral summer (Zwally *et al.* 1983). C, D: The average extent of sea ice for winter and summer in the Arctic typically varies from  $14 \times 10^6 \text{ km}^2$  in the boreal winter to about  $7 \times 10^6 \text{ km}^2$  in the boreal summer (Walsh & Johnson 1979).

환으로 인해 식물플랑크톤 성장이 일어나지 못하여 해수 중 식물플랑크톤 생물량이 낮은 상태로 존재한다. 여름이 되어 일사량이 증가하면 수온이 상승하고 저층의 해빙이 녹아 형성된 저밀도의 안정된 표층수가 형성된다. 겨울동안에 충분히 공급되어 있던 영양염, 일사량 증가, 수괴의 안정, 아직 출현하지 않은 낮은 포식자 수 등으로 인해 식물플랑크톤 성장이 일어날 수 있는 조건이 형성되어 하계 동안에 급격한 식물플랑크톤 성장이 이루어진다. 식물플랑크톤 대량증식은 해수 중에 녹아있는 영양염 농도와 일사량에 따라 그 강도와 지속성이 결정된다. 예를 들면, 북극의 바렌츠해와 베핀만의 해빙 주변 해역에서는 매년 하계 동안 25 m 이하의 낮은 밀도 약층이 표층수에 형성되어 식물플랑크톤의 대량증식이 일어나지만 2주만에 영양염의 고갈로 인해 대량증식이 멈추는 결과를 초래하였다(Rey & Loeng 1985). 그러나 남



**Fig. 4.** A: Annual cycle of solar irradiance, nitrate, and phytoplankton biomass in polar regions, B: Temporal development of ice algae relative to phytoplankton in the water column (Smith & Sakshaug 1990).

극해는 북극해와는 달리 영양염의 농도가 높은 북대서양 심층수가 지속적으로 공급되고 비교적 해수순환이 잘 이루어지기 때문에 식물플랑크톤 대량증식에 의한 영양염 고갈 현상이 거의 일어나지 않는다. 해수 중에 존재하는 식물플랑크톤의 성장은 일년 내내 지속적으로 일어나지만 일사량의 계절적 변화에 따라 성장률이 변하게 된다. 북극해에서 식물플랑크톤 대량증식 기간 동안의 생물량은 바렌츠해에서  $10 \sim 15 \text{ mg Chl } a \text{ m}^{-3}$ , 베링해의 해빙 주변에서  $40 \text{ mg Chl } a \text{ m}^{-3}$  이상이 관찰되었다(Iverson *et al.* 1979; Rey & Loeng 1985). 남극 웨델해의 해빙 주변에서 chlorophyll 농도는 최고  $30 \text{ mg Chl } a \text{ m}^{-3}$  이상으로 높았으나(W.O. Smith & Nelson 1986), 일반적으로  $10 \text{ mg Chl } a \text{ m}^{-3}$  정도였다(El-Sayed 1984). El-Sayed(1971)에 의해  $180 \text{ mg Chl } a \text{ m}^{-3}$ 의 chlorophyll 농도가 관찰된 적도 있지만 이는 해빙이 형성되면서 일어

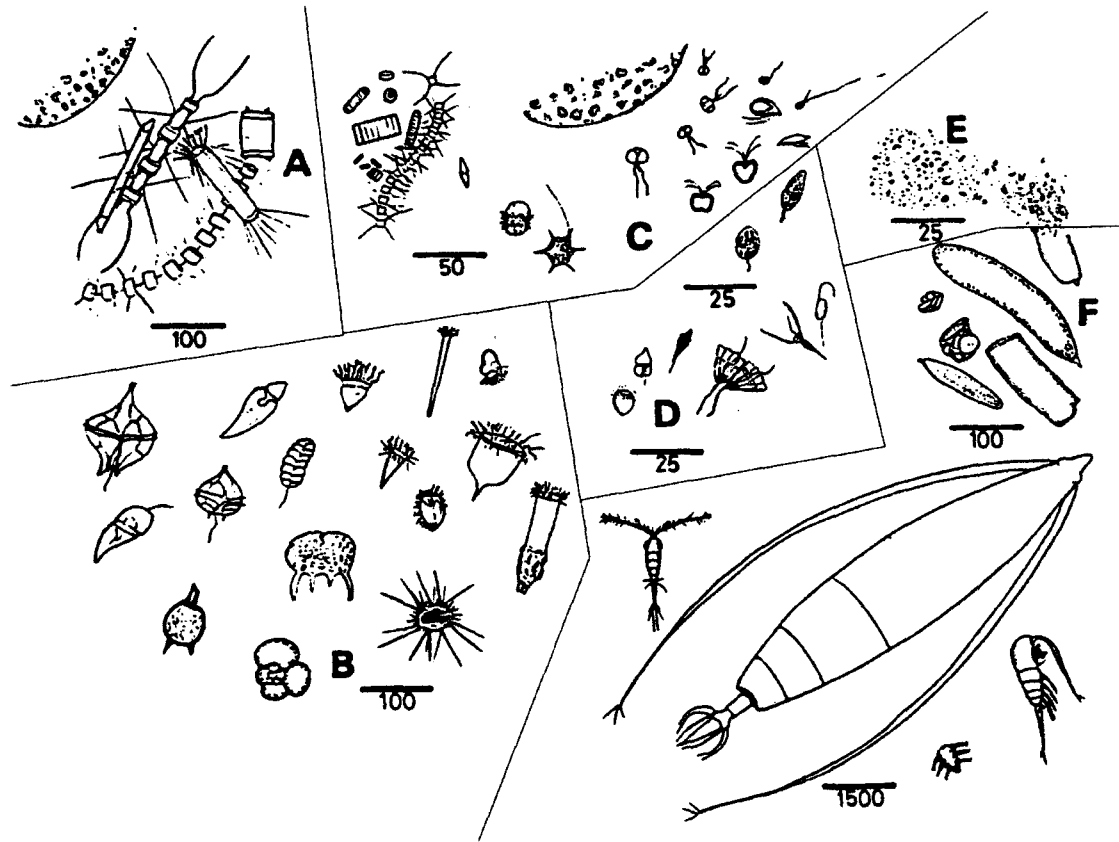


**Fig. 5.** Spatial distribution of phytoplankton biomass around the Arctic and the Antarctic as determined from ocean color using the Coastal Zone Color Scanner on the Nimbus-7 satellite and SeaWiFS satellite (<http://seawifs.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS.html>), Goddard Space Center/NASA.

난 주변 식물플랑크톤의 농축 기작에 의한 것으로 판명되었다(Garrison *et al.* 1983). 일반적으로 이와 같은 식물플랑크톤의 대량증식은 크기가  $20\ \mu\text{m}$  이상인 돌말류나 군체를 형성하는 *Thalassiosira*, *Chaetoceros*, *Fragilariopsis*, *Pseudo-nitzschia*, *Phaeocystis* 등에 의해 이루어진다(Kang & Fryxell 1991, 1992; Kang & Fryxell 1993; Kang *et al.* 1993; Kang *et al.* 1995; Bidigare *et al.* 1996). 반면 대량증식이 끝난 후 외해나 겨울 동안에 존재하는 극지 식물플랑크톤의 생물량은  $1\ \text{mg Chl } a\ \text{m}^{-3}$

이하이며  $0.1\ \text{mg Chl } a\ \text{m}^{-3}$  이하인 경우도 많이 있다. 이때에는 주로 크기가  $20\ \mu\text{m}$  이하인 편모를 가지고 있는 *Cryptomonas*, *Pyramimonas*, *Phaeocystis* motile stage, picophytoplankton, naked dinoflagellages 등으로 구성되어 있다(Kang *et al.* 1993; Kang & Lee 1995; Lee *et al.* 1995) (Fig. 7).

극지의 해양생태계는 계절적으로 얼었다 녹았다 하면서 변화하는 해빙에 의해 많은 영향을 받는다(Fig. 3). 계절별로 변화하는 해빙에 영향을 받는 지역을 해빙 주



**Fig. 6.** The microbial network together with metazoans comprises the polar pelagic food web. A: Typical bloom diatoms and *Phaeocystis*, B: Micro-sized herbivorous protozoans, C: Small diatoms and flagellates, D: Nano-sized phagotrophic protozoans, E: Bacteria, F: Fecal pellets of copepods, Scale bar unit =  $\mu\text{m}$ . (Smetacek *et al.* 1990).

변 지역 (Marginal Ice Zone; MIZ)이라 부른다. MIZ는 극지 해양생태계 중에서 대부분의 생물들의 생산력이 높은 지역으로 알려져 있다 (Hart 1934; Bradstreet & Cross 1982; Ainley *et al.* 1986; WO Smith 1987; Kang & Fryxell 1993) (Fig. 8). MIZ에서의 높은 일차생산력은 해빙 주변에 형성된 낮은 밀도의 안정된 표층수에서 식물플랑크톤의 지속적인 성장이 이루어지기 때문이다 (Gran 1931; Marshall 1957; McRoy & Goering 1976; El-Sayed & Taguchi 1981). 인공위성의 발달, 해빙을 따라 계절별로 실시된 중규모의 현장 조사 등을 통해 MIZ에서 일어나는 일차생산력이 정량적으로도 높은 지역이라는 사실을 알게 되었다 (Alexander & Niebauer 1981; WO Smith & Nelson 1985, 1986; Rey & Loeng 1985; SL Smith *et al.* 1985; Nelson *et al.* 1987; WO Smith *et al.* 1987). 일사량의 증가와 함께 해빙이 녹으면서 형성된 저밀도의 안정된 표층수와 높은 영양염의 공급으로 인해 식물플랑크톤이 성장하기에 최적의 조건이 MIZ에 형성된다 (Fig. 9). 해빙 주변에 형성되는 식물플랑크톤의

대량증식은 해빙이 녹기 시작하는 봄에 시작하여 해빙을 따라 일정한 거리를 유지하면서 이루어진다. 대량증식의 기간과 규모는 지역적으로 다르게 형성되는 해류의 흐름, 기상 조건, 해빙 용빙수 형성 지역의 규모 등과 같은 물리적 기작에 따라 다르게 나타난다 (Rey & Loeng 1985; Nelson *et al.* 1987; Sullivan *et al.* 1988; Comiso *et al.* 1990). 일반적으로 북극해 주변 해역인 베링해, 바렌츠해, 프렘해협은 해빙 주변 식물플랑크톤 대량증식은 MIZ를 따라 50 km 정도 확장되어 있는 반면에, 남극의 웨델해, 로스해 등에서는 보통 250 km 정도 확장된다 (Alexander & Niebauer 1981; Rey & Loeng 1985; SL Smith *et al.* 1985; WO Smith & Nelson 1985; Nelson *et al.* 1987).

### 3. 극지 식물플랑크톤의 일차생산력

극지에서의 식물플랑크톤 연구는 기상 조건이 가장 좋은 하계와 선박의 접근이 쉬운 연근해 지역에서 집중적으로 이루어 졌다. 이로 인해 타 계절 동안 수심이 깊

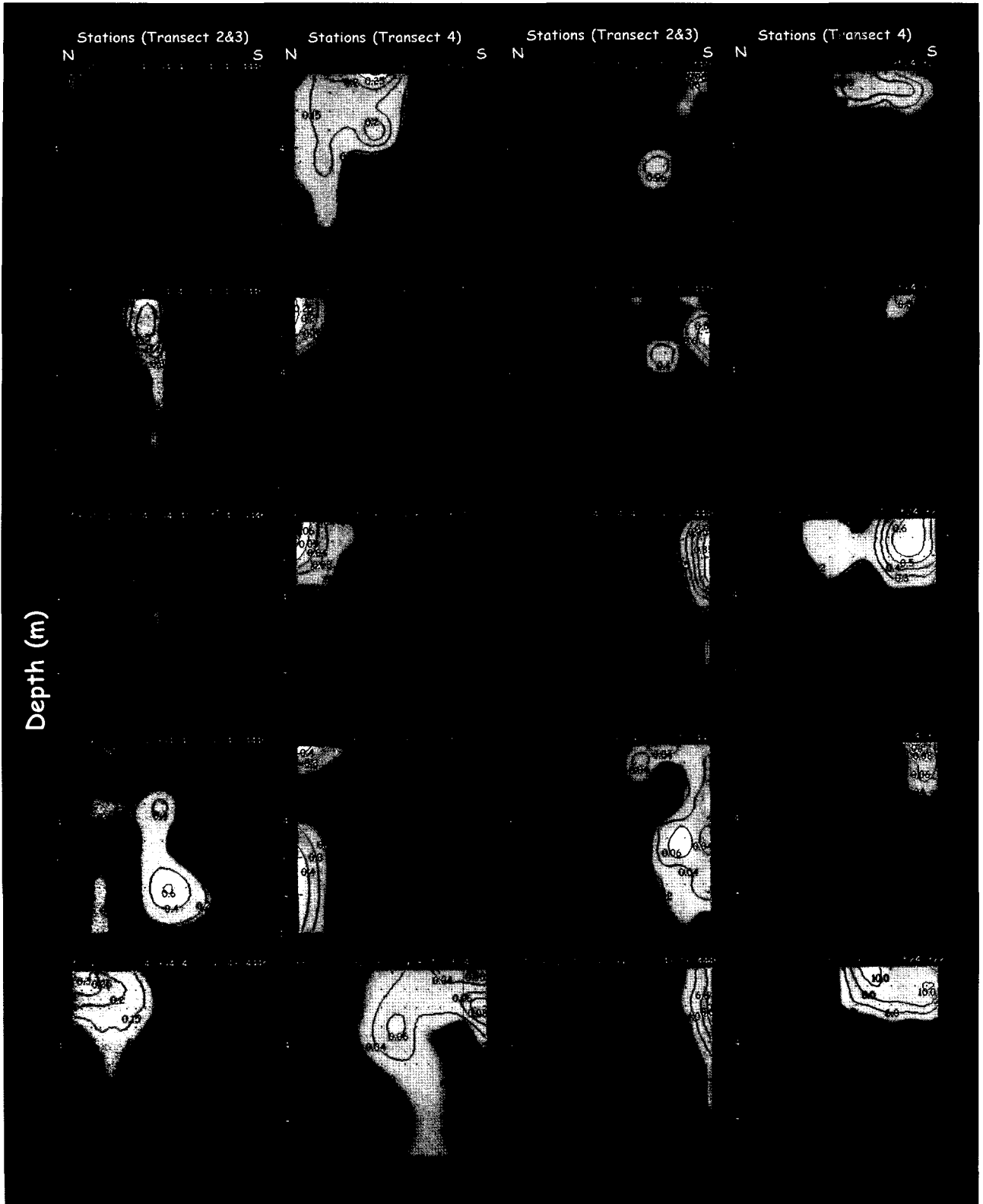


Fig. 7. Distributional patterns of dominant phytoplankton species in the marginal ice zone of the northwestern Weddell Sea (Kang & Lee 1995; Kang *et al.* 1995).

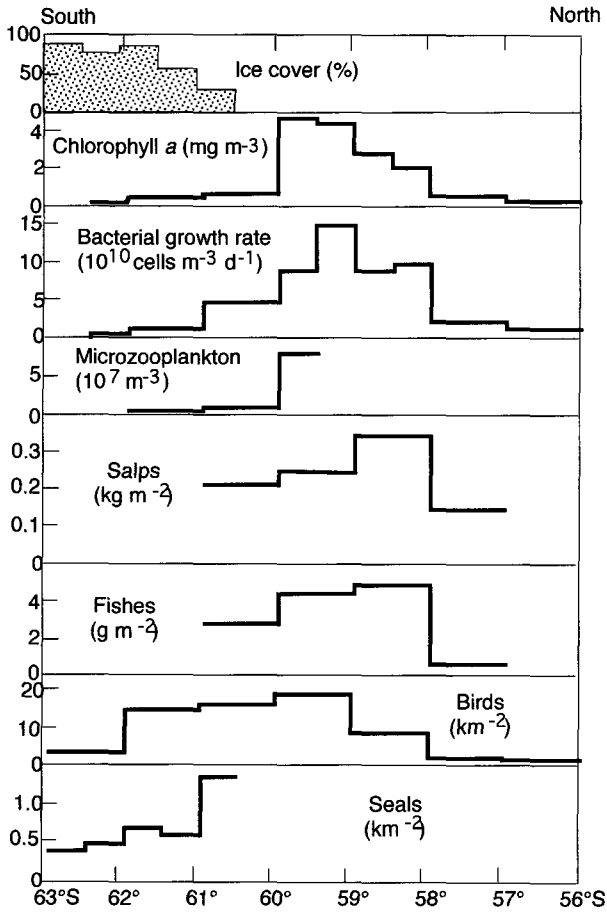
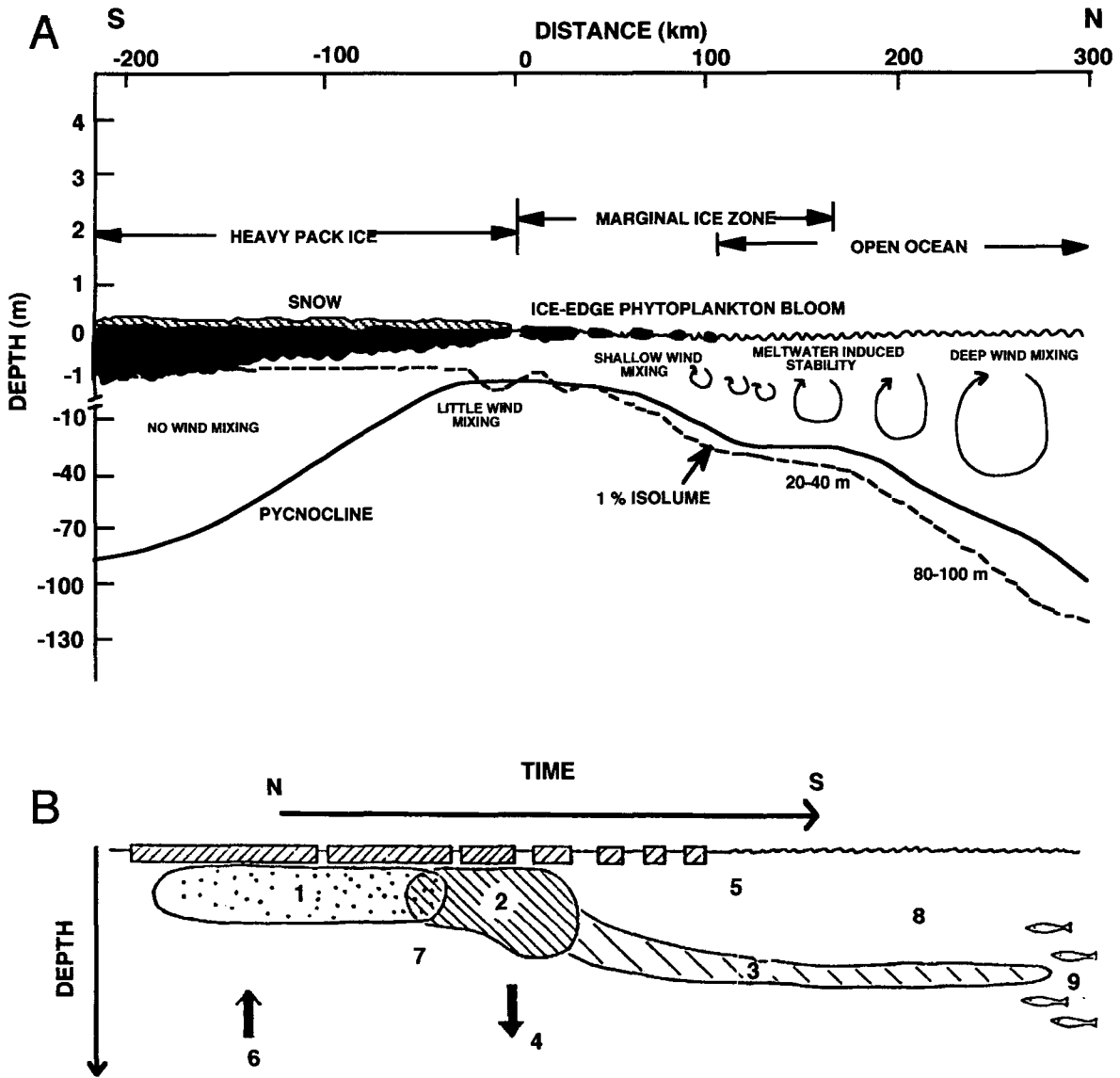


Fig. 8. The coupling between algal production and higher trophic levels in the marginal ice zone (Vincent 1988).

은 외해에서의 연구가 미미한 상태였다. 과거 식물플랑크톤의 정량적인 연구는 망의 크기가 큰 플랑크톤 넷으로 이루어 졌기 때문에 식물플랑크톤의 정확한 정량화가 이루어지지 못하였다. 그 결과 극지에서의 생물량과 일차생산력이 계절과 지역에 관계없이 높은 것으로 생각되어 왔다(El-Sayed 1984). 더 나아가 극지 생태계에 존재하는 많은 생물들(크릴, 펭귄, 물개, 고래)이 일차생산력이 높기 때문에 가능할 것이라고 생각하였다. 그러나 계절별로 광범위한 연구 지역에서 일차생산력을 측정해 본 결과 과거의 관측 값들이 시간적, 공간적으로 제한된 상태에서 도출된 것이라는 사실을 알게 되었다. 실제로 남극해는 하계 동안 해빙 주변, 연근해, 극전선의 제한된 지역에서 집중적인 식물플랑크톤 대량증식이 일어날 뿐이고 대부분의 외해 지역과 다른 계절동안에는 열대지방과 같이 낮은 생물량과 생산력을 보여 주고 있었다(Hasle 1969; Holm-Hansen *et al.* 1977; Sakshaug

& Holm-Hansen 1984). 일반적으로 남극해 전체 외해에서의 일차생산력은  $134 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  또는  $16 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  정도인 것으로 관찰되었다(Holm-Hansen *et al.* 1977). 북극해는 남극해와 달리 연근해를 제외한 대부분의 외해 지역이 일년 내내 해빙으로 덮여 있기 때문에 식물플랑크톤에 의한 일차생산력이 낮은 지역으로 간주되어 왔다(Platt & Subba Rao 1975). Subba Rao & Platt (1984)는 북극해의 일차생산력이 연근해 지역에서는 대략  $225 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  또는  $27 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  정도이며 외해에서는  $75 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  또는  $9 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  정도인 것 추정하였다. 수치만 가지고 볼 때 전체 북극해와 남극해의 연평균 일차생산력은 크게 차이가 나지 않는다.

그러나 하계의 짧은 기간 동안 연근해, 해빙 주변, 극전선 주변에서 일어나는 급격한 일차생산력의 증가 때문에 극지 생태계에 많은 생물들이 존재하는 것이다(Fig. 10). 북극해의 해빙 주변 해역에서 측정된 일차생산력은  $1.1 \sim 6.6 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 외해 지역에 비해 높은 값이 관측되었다(Rey & Loeng 1985; WO Smith 1987). 남극해의 경우도 외해나 해빙 아래 지역에 비해 연근해와 해빙 주변에서 높은 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력이 측정되었다(Ainley *et al.* 1986; Nelson *et al.* 1987, 1989; El-Sayed 1988; Sullivan *et al.* 1988, 1990; Cota *et al.* 1990; Smith & Nelson 1990; Holm-Hansen & Mitchell 1991; Yang *et al.* 1998; Park *et al.* 1999). Smith & Nelson (1986)과 Sakshaug (1994)에 의하면 남극해 전체 일차생산력의 40~50%가 MIZ(Marginal Ice Zone, 해빙 주변 지역)에서 일어나는 것으로 추정하였다. Holm-Hansen & Mitchell (1991)은 서 블랜스필드 해협 주변의 연근해 지역에서 해빙 지역 정도의 높은 생물량(최대  $25 \text{ mg Chl a m}^{-3}$ )과 일차생산력( $3 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )을 관찰하였다. Turner & Owens (1995), Boyed *et al.* (1995), Smetacek *et al.* (1997)은 극전선 지역에서 일어나는 일차생산력이 전체 남극에서 일어나는 일차생산력의 가장 중요한 부분을 차지하는 결과를 보여주었다. 최근 Arrigo *et al.* (1998)의 인공위성 관찰로 이루어진 남극해 일차생산력 추정 결과에서도 남극해 일차생산력의 88.6%가 극전선 주변 외양에서 이루어지고 있다고 보고하였다(Fig. 5). Arrigo *et al.* (1998)의 결과는 기존의 현장 측정에 비해 남극해가 4배 가량 높은 일차생산력을 보이는 지역이기 때문에 현재와 같이 엄청난 수의 크릴, 펭귄, 물개, 고래 등이 존재할 수 있다는 것을 의미한다. 이는 기존에 생각되어 오던 “남극 파라독스” 즉, 남극의 낮은 일차생산력이 어떻게 높은 일차 소비자 개체군들의 탄소 공급원이 될 수 있을까하는 의구심을 해결할 수 있는 중요한 연구 결과라고 할 수 있다.



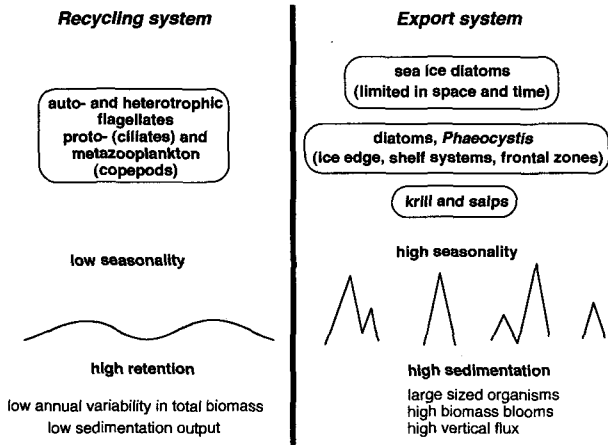
**Fig. 9.** Conceptual model of the development of phytoplankton blooms in the marginal ice zone of (A) the Antarctic and (B) the Barants Sea, the Arctic. The numbers in (B) correspond to the following stages: 1, prebloom conditions; 2, ice-edge phytoplankton bloom; 3, postbloom deep chlorophyll maximum; 4, sedimentation of phytoplankton; 5, nutrient-depleted postbloom surface layer; 6, upward migration of zooplankton; 7, spawning of zooplankton; 8, growth and development of zooplankton; 9, capelin feeding and migration (Smith & Sakshaug 1990).

**4. 극지 식물플랑크톤을 이용한 전 지구 이산화탄소 순환 연구**

최근 수 십년 사이에 전 지구 탄소 순환에 관련된 지구과학 분야에서 가장 흥미 있는 발견은 빙하기 때 대기중의 이산화탄소 농도(200 ppm)가 산업혁명 전 간빙기 때의 농도(300 ppm)에 비해 삼분의 일 정도 낮았다는 사실이다. 이 같은 사실은 극지방에서 활발히 진행되고 있는 빙하 시추 자료에 의해 밝혀졌다(Berner 1980; Barnola *et al.* 1988). 현재 많은 과학자들이 왜 빙하기

때 대기중 이산화탄소 농도가 간빙기 때보다 낮은 이유를 밝히기 위해 상당한 노력을 기울이고 있다(Kumar *et al.* 1995). 지금까지 많은 가능성들이 제시되어왔었는데, 그 중에서 많은 사람들이 받아들이는 것은 해양 식물플랑크톤의 생산력이 대기중의 이산화탄소 농도를 조절한다는 것이다. 그 증거로 제시된 것은 빙하 시추 자료로부터 얻은 시대에 따른 대기중 이산화탄소 농도 변화가 해양 퇴적물로부터 얻은 고생산력 변화와 잘 일치한다는 것이다.





**Fig. 10.** Conceptual models of two extreme organizational structures of pelagic ecosystems. Left hand side: recycling system with low annual variability in total biomass and low sedimentation output. Right hand side: export system with large sized organisms creating high biomass blooms which results in high vertical flux (Bathmann 1996).

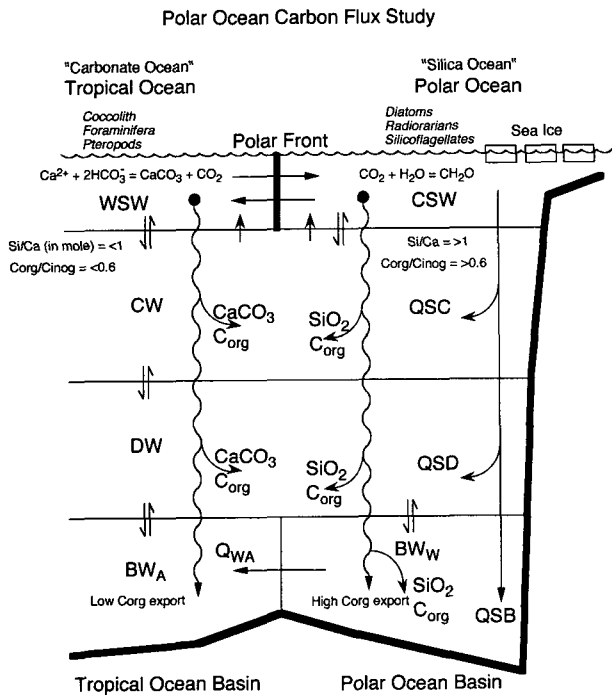
해양의 일차생산력이 클 때에는 대기중 이산화탄소 농도가 낮고 일차생산력이 작을 때에는 이산화탄소 농도가 높다(Berger *et al.* 1989). 해양의 일차생산력과 대기중 이산화탄소와의 상관 관계는 Broecker(1982)가 제시한 생물학적 펌핑 시스템으로 설명될 수 있다. 해양의 일차생산력이 클 때에는 식물플랑크톤이 해수 중에 있는 용존 탄소를 많이 섭취하여 표층 해수의 용존 탄소 농도가 감소하게 된다. 그러므로 감소된 용존 탄소를 보충하기 위해 대기중 이산화탄소가 표층 해수로 유입됨으로서 대기중 이산화탄소 농도가 감소하게 된다. 이와 같은 가정이 옳다면 빙하기 때 대기중 이산화탄소 농도가 간빙기 때보다 낮은 이유는 해양 식물플랑크톤의 생산력이 간빙기 때보다 빙하기 때에 높았기 때문일 것이다. 현재까지의 연구 결과를 보면 해양의 고생산력 변화가 지역에 따라 큰 차이를 보여 아직도 해양의 생산력이 간빙기 때보다 빙하기 때 큰 것인지가 불분명하다.

극지 식물플랑크톤의 광합성은 탄소의 단기 순환 과정에서 중요한 역할을 한다. 광합성을 통해 대기중의 이산화탄소가 식물플랑크톤의 유기물로 전환되어지며, 이산화탄소에 포함되어 있던 탄소가 식물플랑크톤에 저장된다. 식물플랑크톤은 연간 대기중의 이산화탄소에 포함되어 있는 무기 탄소를 광합성을 통해 유기 탄소로 전환하여 저장한다. 이렇게 고정된 탄소들은 호흡과 분해 작용을 통해 다시 대기로 돌아가거나, 심층으로 침전되어 해양의 퇴적물로 저층에 쌓이게 된다. 일부는 해양

미생물들의 분해에 의해 이산화탄소로 전환되어 식물플랑크톤의 광합성에 다시 이용된다.

남극해는 영양염류가 표층 해수에 풍부하게 존재함에도 불구하고 일차생산력이 낮은 지역으로 알려져 일부 사람들은 현재 이 지역 생산력이 낮기 때문에 간빙기 때에 대기중 이산화탄소 농도가 높은 것으로 추측하기도 한다(El-Sayed 1984). 그러나 대기에서 바다로 유입되는 이산화탄소의 총량의 69% 정도가 이 지역에서 일어난다(Takahashi *et al.* 1986)는 연구결과를 뒷받침하는 최근 CZCS 자료를 이용한 남극해의 일차생산력을 측정해 본 결과 연간 남극해에서 생성되는 탄소의 양은 4414 Tg C으로 과거 현장에서 측정된 결과에 비해 4-5 배 정도 높은 값을 보였다(Arrigo *et al.* 1998, Fig. 5). 이 결과는 남극해가 이산화탄소를 흡수하는 지역으로서 중요하다라는 것을 의미하며 앞으로 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다. 이런 까닭에 남극해는 전세계 탄소 순환에 있어서 가장 중요한 지역으로 인식되어지고 있지만 해양의 일차생산력 변화에 대해서는 아직도 불분명하여 보다 체계적인 연구가 필요하다. 그동안 남극해에서의 연구는 시간적, 공간적으로 너무나 제한적으로 이루어졌기 때문에 이 지역이 전지구 이산화탄소의 발생(source) 지역인지 흡수(sink) 지역인지에 대해서 잘 모르는 상태에 있다(Southern Ocean JGOFS 1993). 남극해의 일차생산력과 그 결과 형성된 탄소와 영양염이 심해로 이동하는 기작은 시간적, 공간적으로 많은 차이를 보이고 있다. 특히 이 지역에서는 1) 영양염이 풍부한(고영양염) 지역임에도 불구하고 일차생산력이 낮은 지역으로 일차생산력을 저해하는 요인에 대한 이해가 부족하고, 2) 포식자와 일차생산자간의 관계에 대한 이해가 부족하고, 3) 일차생산자에 의해 대기의 이산화탄소가 탄소 상태로 고정되어 심해로 침강될 것인지 아니면 상층부에서 재 순환될 것인지를 결정하는 미생물 고리(microbial loop)의 효율에 대한 이해가 부족하기 때문에 물질이 순환되는 속도라든지 유입 정도를 정량적으로 정확하게 추정하기가 어려운 상태에 있다.

남극해의 극전선 북쪽 해양에는 외부 규각의 주성분이 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)으로 되어 있는 유공충(foraminifera), 석회비늘편모류(coccolithophorids) 등이 우점종으로 존재한다. 광합성을 통해 고형 유기탄소가 만들어지고 규각 형성을 위해 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)이 생성될 때 마다 1몰의 CO<sub>2</sub>가 해수 중으로 방출된다(Ca<sup>2+</sup> + 2HCO<sup>3-</sup> = CaCO<sub>3</sub> + CO<sub>2</sub>). 따라서 이 지역에서 서식하는 유공충(foraminifera), 석회비늘편모류(coccolithophorids)의 규각인 CaCO<sub>3</sub> 생성은 대기중 이산화탄소를 제거하는 것이 아니라 오히려 이산화탄소를 생성시키는 결과를 낳



**Fig. 11.** Hypothetical model of polar ocean carbon flux. WSW; Warm Surface Water, CSW; Cold Surface Water, CW; Central Water, DW; Deep Water, BW; Bottom Water, ●; Removal of nutrients/ organic carbon to the sink as particles,  $CaCO_3$ ; calcium carbonate flux,  $C_{org}$ ; organic carbon flux, QSC; Formation rate of Central Water, QSD; Formation rate of Deep Water, QSB; Formation rate of Bottom Water,  $Q_{WA}$ ; Flow rate from polar ocean basin to tropical ocean basin (Honjo with permission).

는다. 따라서 광합성작용이나 유기물 생성으로 이루어진 이산화탄소의 소모는  $CaCO_3$  생성 과정에서 발생한 이산화탄소와 상충되는 효과를 야기시켜 대기중 이산화탄소를 제거하는 기작으로는 중요하지 않다(Fig. 11). 그러나 돌말류, 규질편모류(silicoflagellates)와 같이 규소를 외부 규각으로 생성하는 식물플랑크톤이 우점하는 남극해에서는 이들이 용존 이산화탄소를 고품 유기탄소로 전환시켜주기 때문에  $(CO_2 + H_2O = CH_2O)$  대기중 이산화탄소를 제거하는데 중요하다(Honjo 1996). Honjo (in prep.)는 전세계 해양을 크게 탄소 해양(carbonate ocean)과 규소 해양(silica ocean)으로 나누어 각 해양에서 일어나는 탄소의 생지화학적 순환을 설명하였다. Carbonate ocean은  $CaCO_3$  생성이 biogenic opal 생성보다 우세한 지역으로 표층 해수에서 저층으로 운반되는 입자의 Si/Ca 몰 비율이 1보다 작은 지역으로  $CaCO_3$  생성으로 인해 대기중 이산화탄소의 흡수가 적은 곳이다

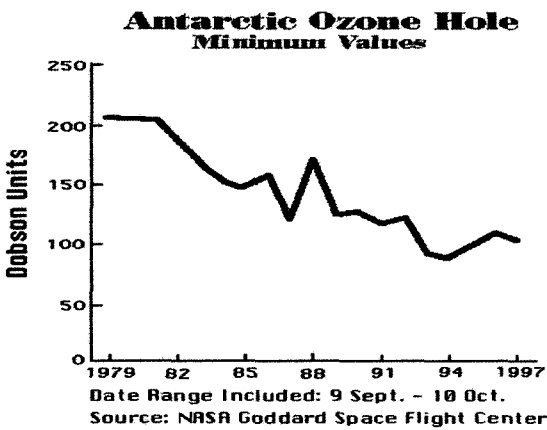
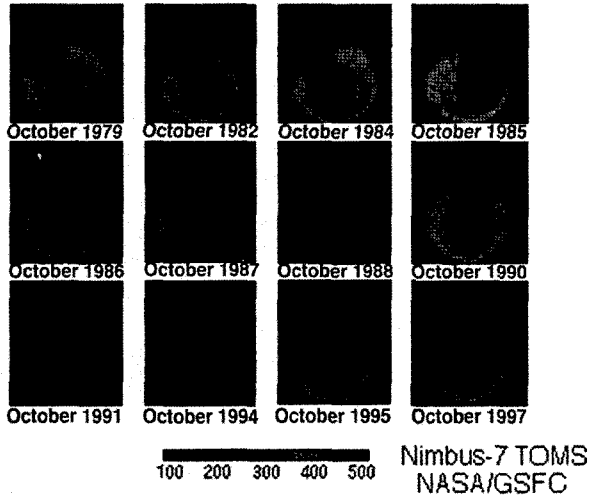
(Fig. 11). 이에 반해 silica ocean은 biogenic opal 생성이  $CaCO_3$  생성보다 큰 지역으로 Si/Ca 몰 비율이 1보다 큰 지역으로 정의되며 대기중 이산화탄소가 바다로 유입이 큰 곳으로 생각되는 지역이다. 전세계 대부분의 해양이 carbonate ocean에 속하며 silica ocean은 남극해와 북극해 주변의 단지 20% 이하에 불과하다(Honjo 1996). 그러나 지금까지 위에서 설명한 것들은 모든 사람들이 받아들이는 정설이 아니라 Honjo (pers. comm.)가 최근에 제시한 가설이다. 그래서 최근 전 지구적 이산화탄소 문제를 해결하기 위해 Honjo의 가설을 증명하기 위해 많은 연구가 수행되어지고 있다. 이 가설이 입증이 되어서면 남극해 및 북극해에서의 탄소 순환 및 물질 플럭스를 이해하는데 도움을 줄 뿐만 아니라 전 지구의 대기중 이산화탄소 농도를 조절하는데 극지 해양에 서식하는 식물플랑크톤의 역할을 보다 구체적으로 알 수 있을 것이다.

**5. 지구 환경변화에 따른 극지 식물플랑크톤의 영향**

최근 극지의 해양생태계는 전 지구적 환경 변화(오존층 파괴로 인한 자외선 증가, 지구 온난화)에 의해 위협 받고 있다. 극지 식물플랑크톤들은 오랜 세월 동안 낮은 광 조건과 온도 등 열악한 환경 하에서 각각의 생태적 지위를 유지하면서 적응하여 왔기 때문에 미세한 환경 변화에도 그 생태적 지위가 영향을 받아 전체 생태계가 변화될 수 있다(Clarke et al. 1988; Barnes & Clarke 1994; Clarke & Leaky 1996).

극지 해양생태계를 구성하고 있는 생지화학적 시스템이 지속적으로 유지되기 위해서는 광합성을 통한 일차 생산자가 절대적으로 중요한 역할을 한다(Clarke & Leaky 1996). 태양 광선은 광합성의 추진력일 뿐만 아니라 형태 형성을 조절하는 요인으로서 모든 일차 생산자에 절대적으로 필요한 에너지원이지만 광도가 너무 높으면 식물에게 오히려 유해한 경우가 있다. 태양에서 방출되는 전자기파 중에는 자외선이 있는데, 이 가운데 특히 UV-B (280~320 nm)와 UV-C (200~280 nm)는 높은 에너지를 지니고 있어, 단백질이나 DNA와 같이 생물학적으로 매우 중요한 분자들에 의해 흡수되어 그것들을 파괴시키는 성격을 지니고 있다. 특히 연안 해역에 서식하는 미세조류 및 해조류는 비교적 쉽게, 빨리 이들 변화에 노출되기 때문에 환경 변화를 감지하고 감시하기 위한 주요 생물학적 파라미터로 이용될 수 있다. 낮은 빛 조건과 온도에 적응되어 온 극지 식물플랑크톤은 오존층 파괴에 의한 자외선(UV-B)의 침투 및 지구 온난화에 의한 미세한 해수 온도의 변화에도 민감하게 반응하게 된다(Karentz et al. 1991a, b; Marchant et al.

# The Ozone Hole



**Fig. 12.** Total column ozone concentration (in Dobson units) over Antarctica as determined by the TOMS (Total Ozone Monitoring Satellite) during October (above) and monthly means of total ozone (below) from 1979 to 1997. NASA Goddard Space Flight Center (<http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/today.html>).

1991). 식물플랑크톤은 극지 해양생태계를 유지하는데 중요한 역할을 하며, 이들의 변화는 전체 남극 해양생태계의 변화를 의미한다.

특히 남극의 성층권 오존층 파괴에 의한 자외선 증가가 1970년대 중반 이후 9월부터 11월 사이에 관찰되어 왔다(Stolarski *et al.* 1986). 특히 10월에 오존 농도가 가장 많이 감소하는 것으로 나타나고 있다(Fig. 12). 그 결과 남극 춘계 동안에 침투되는 자외선은 남극의 한 여름 동안의 자외선 량과 비슷한 양상을 보이고 있다(Frederick & Snell 1988; Lubin *et al.* 1989). 특히 남극

생물에 유해한 B 파장(280~320 nm) 자외선(UV-B)의 증가는 남극 해양생태계의 식물플랑크톤에 미치는 영향에 대한 연구에 많은 관심을 이끌어 냈다. 남극은 이미 오래 전부터 매년 자외선이 서서히 증가하여 왔고, 자외선 강도는 일정한 주기로 계절적 변이를 보이고 있다. 이러한 결과 이미 남극에서의 일차 생산자들의 계절적인 천이 과정에 자외선의 영향이 작용했을 가능성을 배제할 수 없다. 그러므로 남극 해양생태계를 구성하는 일차 생산자들(해산 및 담수 미세조류, 대형 해조류)의 일련의 생태적인 변화를 규명하고 앞으로의 변화를 예측하기 위해서는 실제 남극에서 서식하고 있는 종을 대상으로 한 연구가 필수적이다.

남극 해양생태계에서 하계 동안의 연근해의 식물플랑크톤 군집 구조에 대한 연구는 많이 되어 왔다(Everitt & Thomas 1986; Dayton *et al.* 1986; Perrin *et al.* 1987; Gilbert 1991; Kloser *et al.* 1993; Brandini & Rebello 1994; Ahn *et al.* 1997; SH Kang *et al.* 1997; JS Kang *et al.* 1997). 그러나 이들에 대한 계절별 종구성, 생물량 및 천이 과정에 대한 연구는 거의 전무한 상태이다. 특히 이들의 구조를 결정하는 환경 요인을 체계적으로 관찰한 연구가 없었다. 남극 연안 지역은 일조량의 변화, 자외선, 바람, 조석간만의 차, 주변 빙산이 녹아 형성된 담수의 유입 등에 의한 여러 가지 물리적 요인들에 의해 표층에 서식하는 식물플랑크톤의 환경이 변한다. 남극은 지구 환경 변화의 감시를 위한 자연의 실험장으로서 이용되고 보존되어야 하는데 인식을 같이하고, 그 기초 작업으로 장기 감시를 위한 생물학적 파라미터 개발에 많은 연구 투자가 전세계적으로 이루어지고 있다. 자외선의 증가는 식물플랑크톤의 생리 변화, 크기 분포, 종 조성, 종 다양도 및 일차생산력을 변화시킨다(Maske 1984). 남극해에서도 오존층 파괴에 의한 자외선 증가에 의해 수심 10~20 m에서 일차생산력이 25% 정도가 감소하는 것으로 보고된 바 있다(Helbling *et al.* 1994; Bidigare *et al.* 1996). 또한 자외선의 증가가 먹이사슬을 통한 생태계 구조를 바꿀 것인가에 대하여 여러 각도에서의 연구가 진행 중이다(Smith *et al.* 1992).

남극 식물플랑크톤은 종과 각 종의 생활사 단계에 따라 UV-B에 대한 성장률이나 생존 전략 등이 서로 다르게 나타나며(Calkins & Thordardottir 1980; Karents *et al.* 1991a, b; Marchant *et al.* 1991), UV-B 증가로 인해 종 수준에서 야기될 수 있는 여러 가지 가설들이 제안되고 있다. 그중 UV-B 증가로 인해 기존에 우점하던 종들이 UV-B 증가에 잘 적응하는 새로운 우점종이 출현하면서 생태계의 구조적 양상이 변할 것이라는 예측이 가장 널리 받아들여지고 있다(Hader & Worrest

1991; Karentz 1991; Marchant & Davidson 1991). UV-B 증가에 의한 미세조류 종조성의 변화 양상을 예측하고, 남극 해양생태계에 이들이 미치는 영향을 이해하기 위해서는 주요 우점종에 대한 UV 광생물학적 연구와 생물 반응, 적응 전략, 생산력에 영향을 미치는 기작에 관한 연구가 필수적으로 이루어져야만 한다(Karentz *et al.* 1991a). 지금까지 자외선 증가에 따른 남극 미세조류의 영향에 대한 연구가 많이 이루어지고 있지만(El-Sayed 1988; Smith 1989; Smith & Baker 1989; Voytek 1989, 1990; Hader & Worrest 1991; Karentz 1991; Smith 1992), 종 수준에서 자외선이 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 못하고 있다(Karentz *et al.* 1991a; Davidson & Marchant 1994a, b; Karentz & Spero 1995; Helbling *et al.* 1996). 자외선 증가에 따른 중간 적응기작과 적응 능력이 다르게 나타나기 때문에 자외선 증가에 따른 남극 해양생태계의 영향을 장기적으로 모니터링하기 위해서는 남극 해양생태계를 유지하는데 중요한 역할을 하고 있는 주요 우점종에 대한 연구가 필수적으로 이루어져야만 한다(Kang & Kang 1998). 최근 Helbling 등(1996)에 의해 수행된 *Thalassiosira sp.*, *Corethron criophilum*, *Pseudo-nitzschia sp.*, *Fragilariopsis cylindrus* 등과 같은 주요 돌말류를 이용한 자외선 증가에 따른 영향에 대한 연구 결과에 의하면, 종에 따라 자외선에 대해 서로 다른 반응과 민감도를 보이는 것으로 나타났다. 특히 돌말류는 남극의 다른 미세조류에 비해 자외선 증가에 잘 적응하는 것으로 알려져 있다(Karentz *et al.* 1991b; Davidson & Marchant 1994; Helbling *et al.* 1994; Karentz 1994). 돌말류의 자외선에 대한 적응능력은 자외선을 흡수하는 물질을 분비함으로써 이루어졌을 것이라 가설이 제시되었다(Karentz *et al.* 1991a; Karentz 1994; Villafañe *et al.* 1995). Mycosporine-like amino acid compounds(MAAs)와 같은 자외선 흡수물질을 만들어 내어 자외선을 차단하는 기작은 돌말류 뿐만 아니라 flagellates(Marchant *et al.* 1991), dinoflagellates(Vernet *et al.* 1994), *Phaeocystis*(Smith *et al.* 1992; Davidson & Marchant 1994a; Karentz 1994; Karentz & Spero 1995; Bidigare *et al.* 1996) 등과 같은 다른 미세조류에서도 이루어지고 있는 것으로 알려져 있다. 현장 조사 결과에 의하면 종에 따라 다르게 나타나지만, 일반적으로 MAAs 합성이 잘 이루어지는 종이 자외선에 잘 적응하는 것으로 알려져 있다(Villafañe *et al.* 1995).

Karentz 등(1991b)이 남극 연안에 서식하고 있는 57종의 어류, 무척추동물 및 미세조류에 대한 조사 결과, 이들 중 90% 이상이 체내에 MAAs를 포함하고 있었다.

또한 자연상태의 남극 플랑크톤 군집 내에서도 상당한 양의 MAAs가 포함되어 있었다(Mitchell *et al.* 1989; Gieskes & Kraay 1990). 그러나 실제로 남극 미세조류 중 어떤 종이 얼마나 효율적으로 자외선 흡수물질을 형성하는지에 대한 연구는 미흡한 상태에 있다. Marchant & Davidson(1991)은 남극의 돌말류에 비해 상대적으로 많은 MAAs를 포함하고 있는 *Phaeocystis*가 자외선 증가에도 불구하고 남극 해양생태계에서 가장 우점하는 종이 될 수 있을 것으로 생각하였다. 이로 인해 기존에 크릴의 먹이로 이용되던 돌말류 대신에 *Phaeocystis*가 우점종으로 출현함으로써 전체 해양생태계가 변화될 가능성이 제기되고 있다.

남극에 서식하는 미세조류는 서식 환경, 크기, 분류군에 따라 나눌 수 있다. 특히 해빙 주변에서 우점하는 prymnesiophyte인 *Phaeocystis antarctica*는 남극 환경 변화와 함께 관심 있는 연구 대상 종으로 이용되고 있다(Kang & Kang 1998). 이 종의 생활사는 크게 두 단계로 나눌 수 있는데, 직경이 5~8 $\mu\text{m}$ 이고 두 개의 편모를 지니고 있는 단계와 세포들이 점액 물질에 둘러싸여 구형의 군체를 이루고 있는 단계로 구성되어 있다(Fig. 13). 특히 구형의 군체 형성 단계는 남극 해양생태계의 해빙과 해빙 주변에서 대량 번식이 일어난다(Garrison *et al.* 1987; Fryxell & Kendrick 1988; Davidson & Marchant 1992; Kang & Fryxell 1993). *Phaeocystis*와 함께 이 지역에서 우점하는 미세조류인 돌말류(*Fragilariopsis* spp.) 또한 미세조류 군집 구조를 결정하는 중요한 역할을 한다(Garrison *et al.* 1987; Fryxell & Kendrick 1988; Garrison & Buck 1989; Davidson & Marchant 1992). 만약에 이들 우점종들이 자외선 증가로 인한 적응 양상(생산력)의 차이로 인해 생물량이나 구성비의 변화가 일어난다면 해양생태계의 주요 탄소 공급원인 이들에 대한 초식동물들의 먹이 이용에 영향을 미치는 입자 크기, 형태, 탄소 이용 및 수직적인 탄소플럭스 등의 변화가 일어날 것으로 예상된다(Marchant & Davidson 1991). 또한 *Phaeocystis*는 대기에 존재하는 생물 기원 dimethyl sulfide(DMS)의 약 10%를 생산하는 것으로 알려져 있다(Gibson *et al.* 1990). *Phaeocystis*가 만들어진 DMS가 해양에서 대기중으로 배출된 후 DMS는 산화 반응을 통해 황산염이 되어 에어로졸 상태로 응축된다. 대기중의 황산염 에어로졸은 빙방울을 형성하는 핵으로 작용하며 구름과 비를 만드는 역할을 한다. 그래서 자외선 증가로 인해 DMS를 생성하는 *Phaeocystis*의 생산력과 현존량의 변화는 전 지구 DMS 생산에 영향을 미쳐 해양과 대기 사이 복사 에너지의 균형에 영향을 주고, 지구로 유입하는 태양 복사 에너지 반사에 영향을

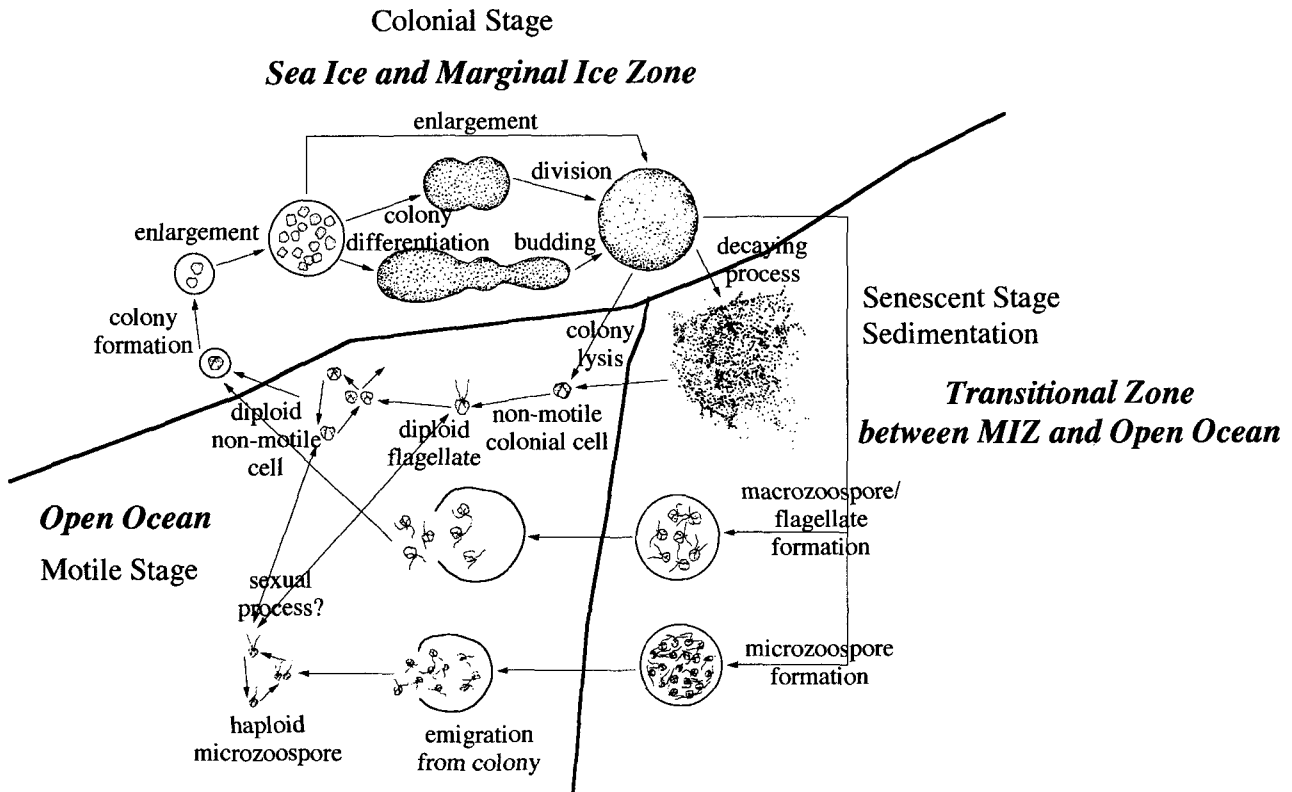


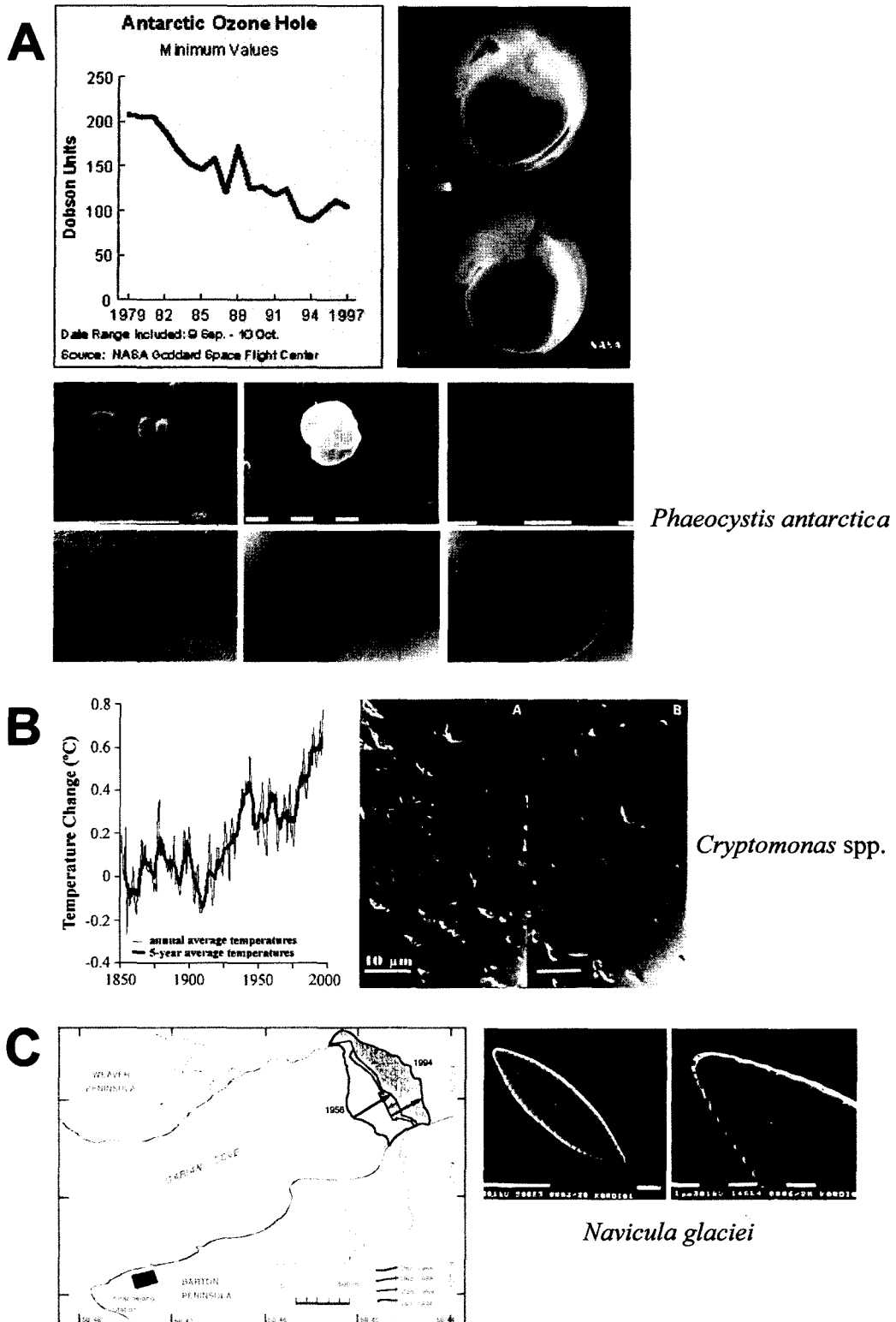
Fig. 13. Hypothetical life cycle of *Phaeocystis antarctica* as compiled from culture and field observation (Kang & Kang 1998).

주게 된다(Bates *et al.* 1987; Charlson *et al.* 1987).

지난 20년간 남극 해양 환경 변화의 주요 파라미터였던 자외선의 증가로 인해 얼마나 해양생태계가 변화하였는지는 아무도 알 수 없다. 왜냐하면 현재의 생태계가 변화하였는지를 비교할 수 있는 과거의 데이터가 부족하기 때문이다. 자외선이 증가된 현재의 환경에 존재하고 있는 미세조류들의 생존율, 자외선 흡수 물질 농도, 광합성률, 성장 양상 등의 변화는 분명히 지난 20년 동안 우점종의 생물학적 지위의 변화를 야기시켜 전체 해양생태계의 구조적 양상에 영향을 주는 주요 원인이 되었을 것이라 생각한다. 남극 성층권 오존이 원래 상태로 회복되기까지는 앞으로 몇십 년이 더 걸릴 것으로 예상되고 있다. 앞으로의 변화 양상이라도 더 체계적으로 조사하기 위해서는 현재 존재하고 있는 미세조류의 구조적 양상 및 생리적, 생화학적 반응 기작에 대한 기본 연구가 지속적으로 이루어져야만 할 것이다. 지금까지의 연구 결과에 의하면, 자외선에 대한 미세조류의 광생물학적 기작, 반응, 상호작용 등이 종에 따라 많은 차이가 난다는 점이다. 그리고 실제로 자연 상태에 존재하는 우점종을 찾아내기 위한 작업이 쉽지만은 않다는 점이다.

그리고 지금까지의 대부분의 연구가 식물플랑크톤에 국한되어 있으며, 실제로 연안역의 조간대에 서식하면서 자외선에 가장 직접적으로 노출되어 있는 저서성 미세조류에 대한 연구는 이루어지지 못하고 있다. 비록 자외선의 증가에 따른 미세조류의 우점종 변화 양상이 공간적으로 혹은 시간적(계절별 또는 연간) 변화하는 양상을 찾아내기는 힘들겠지만 지속적인 연구가 수행된다면 환경 변화에 대한 장기적인 모니터링을 위해 이들 미세조류들이 이용될 것으로 생각한다.

이와 같은 연구가 성공적으로 수행된다면, 우리는 남극 환경 변화(자외선 증가, CO<sub>2</sub> 증가, 지구온난화)에 따른 해양 환경의 기상학적, 물리-화학적, 생물학적 파라미터의 특징과 생태계의 변화 양상을 이해하고 생물의 생리, 생화학적 반응 기작 연구를 이용, 남극 환경 변화 감시 시스템 구축 및 예측 기술 개발이 가능할 것이다. 또한 단위 세포나 종 수준에서 생리, 생화학적으로 규명된 사실을 이용, 현장 생태계 생물 군집의 종조성, 생물량, 생산력 등의 변화와 환경 요소 변화 사이의 원인 기작과 경로를 이해함으로써 남극의 특징적 환경(해빙 해역, 극전선 해역)이나 연근해 환경에 서식하는 해양 미



**Fig. 14.** Selected antarctic phytoplankton as biological indicators for detecting and monitoring the global environmental changes (UV-B increases by ozone depletion, seawater temperature increase by global warming, new environmental formation by glacier recession). (A) *Phaeocystis antarctica* increase by UV-B radiation increase, (B) *Cryptomonas* sp. increase by seawater temperature increase, (C) *Navicula galciei* increase from cold water inflow from melted glacier waters (Kang & Lee 1995; Kang & Kang 1998).

세조류를 지표종으로 이용해 환경 및 생태계 모니터링에 이용할 수 있을 것이다. 현재 환경변화에 따른 지표종으로 이용될 수 있는 주요종에 대한 연구가 진행중이며 정성적인 분석에 의하면 수온 상승과 함께 *Cryptomonas* spp.가 빈번하게 출현하며, 빙벽주변, Frazil ice 형성시 수온 감소와 관련하여 *Navicula* spp.가 많이 출현했으며, 해빙, 자외선 증가와 관련하여서 *Phaeocystis antarctica*가 증가하는 것으로 보아 이들 종들이 남극해 환경변화에 따른 주요 지표종으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다(Fig. 14).

사 사

이 논문은 한국해양연구소 기관고유특수사업(PP 9900104)과 과학기술부 용역사업(PN99385)의 일환으로 수행된 것입니다.

참 고 문 헌

Ahn IY, H Chung, JS Kang & SH Kang (1997) Diatom composition and biomass variability in near-shore waters of Maxwell Bay, Antarctica, during the 1992/ 1993 austral summer. *Polar Biol.* **17** : 123-130.

Ainley DG, WR Fraser, CW Sullivan, JJ Torres, TL Hopkins & WO Smith, Jr. (1986) Antarctic mesopelagic micronekton: Evidence from seabirds that pack ice affects community structure. *Science* **232** : 847-849.

Alexander V & HJ Neibauer (1981) Oceanography of the eastern Bering Sea ice-edge in spring. *Limnol. Oceanogr.* **26** : 1111-1125.

Arrigo KR, D Worthen, A Schnell, & MP Lizotte (1998) Primary production in southern ocean waters. *J. of Geophy. Res.* **103** : 15,587-15,600.

Barnes DK & AA Clarke (1994) Seasonal variation in the feeding activity of four species of Antarctic bryozoan in relation to environmental factors. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **181** : 117-133.

Barnola JM, D Raynaud, YS Korotkevich & C Lorius (1987) Vostok ice core provides 160,000 year record of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature* **329** : 408-414.

Bates TS, RJ Charlson & RH Gammon (1987) Evidence for the climatic role of marine biogenic sulphur. *Nature* **329** : 319-321.

Bathmann UV (1996) Abiotic and Biotic Forcing on Vertical Particle Flux in the Southern Ocean. *In Particle Flux in the Ocean* (Ittekkot V, P Schafer, S Honjo & PJ Depetris eds.). John Wiley & Sons, New York, pp. 243-250.

Berger WH, VS Smetacek & G Wefer (1989) Ocean productivity and paleoproductivity—an overview. *In Productivity of the Ocean: Present and Past* (Berger WH, VS Smetacek & G Wefer eds.) John Wiley & Sons, New York, pp. 1-34.

Berner W, H Oeschger & B Stauffer (1980) Information on the CO<sub>2</sub> cycle from ice core studies. *Radiocarbon* **22** : 227-235.

Bidigare RR, JL Iriarte, SH Kang, D Karentz, ME Ondrusek & GA Fryxell (1996) Phytoplankton: Quantitative and qualitative assesments, Foundation for ecological research of the Antartic Peninsula, *Antarc. Res. Ser.* **70** : 173-198.

Boyd PW, C Robinson, G Savidge & PJ le Williams (1995) Water column and sea-ice primary production during austral spring in the Bellingshausen Sea. *Deep-Sea Res.* **42** : 1177-1200.

Bradstreet MSW & WE Cross (1982) Optical efficiency factors of some phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* **28** : 816-832.

Brandini FP & J Rebello (1994) Wind field effect on hydrography and chlorophyll dynamics in the coastal pelagial of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Antarc. Sci.* **6** : 433-442.

Broecker WS (1982) Ocean chemistry during glacial time. *Geochem. Cosmochem. Acta*, **46** : 1689-1705.

Calkins J & T Thordardottir (1980) The ecological significance of solar UV radiation on aquatic organisms. *Nature* **283** : 563-566.

Charlson RJ, IE Lovelock, MO Andreae & SG Warren (1987). Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature* **326** : 655-661.

Clarke A, LJ Holmes & MG White (1988) The annual cycle of temperature, chlorophyll, and major nutrients at Signy Island, South Orkney Islands, 1969~82. *Br. Antarct. Surv. Bull.* **80** : 65-86.

Clarke A & RJG Leaky (1996) The seasonal cycle of phytoplankton, macronutrients, and the microbial community in a nearshore Antarctic marine ecosystem. *Limnol. Oceanogr.* **41** : 1281-1294.

Comiso JC, NG Maynard, WO Smith Jr. & CW Sullivan (1990) Satellite ocean color studies of Antarctic ice edges in summer/autumn. *J. Geophys. Res.* **95** : 9481-9496.

Cota GF, ST Kottmeier, DH Robinson, WO Smith Jr. & CW Sullivan (1990) Bacterioplankton in the marginal ice zone of the Weddell Sea: biomass, production and metabolic activities during austral autumn. *Deep-Sea Res.* **37** : 1145-1167.

Davidson AT & HJ Marchant (1992) Protist interactions

- and carbon dynamics of a *Phaeocystis*-dominated bloom at an Antarctic coastal site. *Polar Biol.* **12** : 387-395.
- Davidson AT & HJ Marchant (1994a) The impact of ultraviolet radiation on *Phaeocystis* and selected species of Antarctic marine diatoms. In *Ultraviolet Radiation and Biological Research in Antarctica* Antarctic Research Series 62 (Weiler CS & Penhale PA eds.). American Geophysical Union, Washington, DC. pp. 187-205.
- Davidson AT & HJ Marchant (1994b) The *in situ* photobiology of Antarctic *Phaeocystis* and selected diatom species. *Polar Biol.* **7** : 53-69.
- 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.
- Deacon GER (1982) Physical and biological zonation in the Southern Ocean. *Deep-Sea Res.* **29** : 1-16.
- El-Sayed SZ (1971) Observations on phytoplankton bloom in the Weddell Sea. In *Antarctic Research Series 17, Biology of the Antarctic Seas IV* (Llano GA & IE Wallen eds). pp. 301-312.
- El-Sayed SZ (1984) Productivity of the Antarctic waters - a reappraisal. In *Marine phytoplankton and productivity* (Holm-Hansen O, L Boris & R Gilles eds.). Springer-Verlag, Berlin, pp. 19-34.
- El-Sayed SZ (1988) Fragile life under the ozone hole. *Natur. Hist.* **10** : 73-80.
- El-Sayed SZ & S Taguchi (1981) Primary production and standing crop of phytoplankton along the ice-edge in the Weddell Sea. *Deep-Sea Res.* **28** : 1017-1032.
- Everitt DA & DP Thomas (1986) Observations of seasonal changes in diatoms at inshore localities near Davis Station, East Antarctica. *Hydrobiologia* **139** : 3-12.
- Frederick JE & HE Snell (1988) Ultraviolet radiation levels during the Antarctic spring. *Science* **241** : 438-410.
- Fryxell GA & GA Kendrick (1988) Austral spring microalgae across the Weddell Sea ice edge: spatial relationships found along a northward transect during AMERIEZ 83. *Deep-Sea Res.* **35** : 1-20.
- Garrison DL & KR Buck (1989) The biota of Antarctic pack ice in the Weddell Sea and Antarctic Peninsular regions. *Polar Biol.* **10** : 211-219.
- Garrison DL, SF Ackley & KR Buck (1983) A physical mechanism for establishing algal populations in frazil ice. *Nature* **306** : 363-365.
- Garrison DL, KR Buck & GA Fryxell (1987) Algal assemblages in the Antarctic pack ice and in ice-edge plankton. *J. Phycol.* **23** : 564-572.
- Gibson JAE, RC Garrick, HR Burton & AR McTaggart (1990). Dimethylsulflde and the alga *Phaeocystis pouchetii* in Antarctic coastal waters. *Mar. Biol.* **104** : 339-346.
- Gieskes WWC & GW Kraay (1990) Transmission of ultraviolet light in the Weddell Sea: report of the first measurements made in the Antarctic. *BIOMASS Newsl.* **12** : 12-14.
- Gilbert NS (1991) Microphytobenthic seasonality in near-shore marine sediments at Signey Island, South Orkney Islands, Antarctica. *Estua., Coast. and Shelf Sci.* **33**: 89-104.
- Gran HH (1931) On the conditions for the production of plankton in the sea. *J. Cons., Cons. Int. Explor. Mer.* **75** : 37-46.
- Hader DP & RC Worrest (1991) Effects of enhanced solar ultraviolet radiation on aquatic ecosystems. *Photochem. Photobiol.* **53** : 717-725.
- Hart TJ (1934) On the phytoplankton of the south-west Atlantic and Bellingshausen Sea. *Discovery Rep.* **8** : 1-268.
- Hasle GR (1969) An analysis of the phytoplankton of the Pacific Southern Ocean: Abundance, composition, and distribution during the Brategg Expedition, 1947-1948. *Hvalradets Skrifter.*, **52** : 1-168.
- Helbling EW, BE Chalker, WC Dunlap, O Holm-Hansen & VE Villafañe (1996) Photoacclimation of antarctic marine diatoms to solar ultraviolet radiation. *J. Exper. Mar. Biol. Ecol.* **204** : 85-101.
- Helbling EW, V Villafañe & O Holm-Hansen (1994) Effects of ultraviolet radiation on Antarctic marine phytoplankton photosynthesis with particular attention to the influences of mixing. In *Ultraviolet Radiation and Biological Research in Antarctica*. Antarctic Research Series 62 (Weiler CS & PA Penhale eds.). American Geophysical Union, Washington, DC. pp. 207-227.
- Hewes CD, O Holm-Hansen & E Sakshaug (1985) Alternate carbon pathways at lower trophic levels in the Antarctic food web. In *Antarctic nutrient cycles and food webs* (Siegfried WR, PR Condy & RM Laws eds.). Springer-Verlag, Berlin & Heidelberg, pp. 277-283.
- Holm-Hansen O & BG Mitchell (1991) Spatial and temporal distribution of phytoplankton and primary production in the western Bransfield Strait region. *Deep-Sea Res.* **38** : 961-980.
- Holm-Hansen O, SZ El-Sayed, GA Franceschini & RL Cuhel (1977) Primary production and the factors controlling phytoplankton growth in the Southern Ocean. In *Adaptations within Antarctic Ecosystems* (Llano GA ed.). Smithsonian Institution, Washington, pp. 11-50.
- Honjo S (1996) Fluxes of particles to the interior of the



- open oceans. In Particle Flux in the Ocean (Ittekkot V, P Schafer, S Honjo & PJ Depetris eds.). John Wiley & Sons, New York, pp. 92-154.
- Iverson RL, TE Whitledge & JJ Goering (1979) Chlorophyll and nitrate fine structure in the southeastern Bering Sea shelf break front. *Nature* **281** : 664-666.
- Kang JS, SH Kang, JH Lee, KH Chung & MY Lee (1997) Antarctic micro- and nano-phytoplankton assemblages in the surface water of Maxwell Bay during the 1997 austral summer. *Korean J. Polar Res.* **8** : 35-45.
- Kang SH & GA Fryxell (1991) Most abundant diatom species in water column assemblages from five ODP Leg 119 drill sites in Prydz Bay, Antarctica: Distributional patterns. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 119: College Station, Texas (Ocean Drilling Program), pp. 645-666.
- Kang SH & GA Fryxell (1992) *Fragilariopsis cylindrus* (Grunow) Krieger: The most abundant diatom in water column assemblages of Antarctic marginal ice edge zones. *Polar Biol.* **12** : 609-627.
- Kang SH & GA Fryxell (1993) Phytoplankton in the Weddell Sea, Antarctica: Composition, abundance and the distribution in water column assemblages of the marginal ice-edge zone during austral autumn. *Mar. Biol.* **116** : 335-352.
- Kang SH & JS Kang (1998) *Phaeocystis antarctica* Karsten as an indicator species of environmental changes in the Antarctic. *Korean J. Polar Res.* **9** : 17-35.
- Kang SH & SH Lee (1995) Antarctic phytoplankton assemblage in the western Bransfield Strait region, February, 1993: composition, biomass, and mesoscale distributions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **129** : 253-267.
- Kang SH, GA Fryxell & DL Roelke (1993a) *Fragilariopsis cylindrus* compared with other species of the diatom family Bacillariaceae in Antarctic marginal ice edge zones. *Nova Hedwigia* **106** : 335-352.
- Kang SH, MS Suk, CS Chung, SY Nam & CY Kang (1993b) Phytoplankton populations in the western Bransfield Strait and the southern Drake Passage, Antarctica. *Korea J. Polar Res.* **4** : 29-43.
- Kang SH, DY Kim, JS Kang, MY Lee & SH Lee (1995) Antarctic phytoplankton in the eastern Bransfield Strait region and in the northwestern Weddell Sea marginal ice zone during austral summer. *Korea J. Polar Res.* **6** : 1-30.
- Kang SH, JS Kang, KH Chung, MY Lee, BY Lee, H Chung, YD Kim & DY Kim (1997) Seasonal variation of environmental factors and nearshore microalgae in Marian Cove, King George Island, Antarctica, 1996. *Korea J. Polar Res.* **8** : 9-27.
- Karentz D (1991) Ecological considerations of Antarctic ozone depletion. *Antarc. Sci.* **3** : 3-11.
- Karentz D (1994) Ultraviolet tolerance mechanisms in Antarctic marine organisms. In Ultraviolet Radiation and Biological Research in Antarctica Antarctic Research Series 62 (Weiler CS & PA Penhale eds.). American Geophysical Union, Washington, DC. pp. 93-110.
- Karentz D & HJ Spero (1995) Response of a natural *Phaeocystis* population to ambient fluctuations of UVB radiation caused by Antarctic ozone depletion. *J. Plan. Res.* **17** : 1771-1789.
- Karentz D, JE Cleaver & DL Mitchell (1991a) Cell survival characteristics and molecular responses of Antarctic phytoplankton to ultraviolet-B radiation. *J. Phycol.* **27** : 326-341.
- Karentz D, FS McEuen, MC Land & WC Dunlap (1991b) Survey of mycosporine-like amino acid compounds in Antarctic marine organisms: Potential protection from ultraviolet exposure. *Mar. Biol.* **108** : 157-166.
- Klöser H, G Ferreyra, I Schloss, G Mercuri, F Laturnus & A Curtosi (1993) Seasonal variation of algal growth conditions in sheltered Antarctic bays: the example of Potter Cove (King George Island, South Shetlands). *J. Marine Systems* **4** : 289-301.
- Koike I, O Holm-Hansen & DC Biggs (1986) Inorganic nitrogen metabolism by Antarctic phytoplankton with special reference to ammonium cycling. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **30** : 105-116.
- Kumar N, RF Anderson, RA Mortlock, PN Froelich, P Kubik, B Dittrich-Hannen & M Suter (1995) Increased biological productivity and export production in the glacial southern ocean. *Nature* **378** : 675-680
- Lee MY, SH Kang, S Lee, KH Chung & JK Choi (1995) Distribution and biomass of phytoplankton and bacterioplankton: relationships to environmental parameters during an Antarctic austral summer in the Bransfield Strait. *Korea J. Polar Res.* **6** : 31-47.
- Lubin D, JE Frederick, CR Booth, T Luck & D Neuschula (1989) Measurements of enhanced springtime ultraviolet radiation at Palmer Station, Antarctica. *Geophys. Res. Lett.* **16** : 783-785.
- Marchant HJ & AT Davidson (1991) Possible impacts of ozone depletion on trophic interactions and biogenic vertical carbon flux in the Southern Ocean, In: Proceedings of the International Conference on the Role of Polar Regions in Global Change (Wdla G, CL Wilson & BAB Severin eds.) Geophysical Institute, Fairbanks, Alaska. pp. 397-400.
- Marchant HJ, AT Davidson & GJ Kelly (1991) UV-B protecting pigments in the marine alga *Phaeocystis* pou-

- chetii from Antarctica. *Mar. Biol.* **109** : 391-395.
- Marshall PT (1957) Primary production in the Arctic. *J. Cons., Cons. Int. Explor. Mer.* **23** : 173-177.
- Maske H (1984) Daylight ultraviolet radiation and the photoinhibition of phytoplankton carbon uptake. *J. Plankton Res.* **6** : 351-357.
- McRoy CP & JJ Goering (1976) Annual budget of primary production in the Bering Sea. *Mar. Sci. Commun.* **2** : 255-267.
- Mitchell BG, M Vernet & O Holm-Hansen (1989) Ultraviolet light attenuation in Antarctic waters in relation to particulate absorption and photosynthesis. *Antarctic. J. US.* **24** : 179-181.
- Nelson DM, WO Smith Jr, LI Gordon & LI Huber (1987) Spring distributions of density, nutrients, and phytoplankton biomass in the ice edge zone of the Weddell-Scotia Sea. *J. Geophys. Res.* **92** : 7181-7190.
- Nelson DM, WO Smith Jr, RD Muench, LI Gordon, CW Sullivan & DM Husby (1989) Particulate matter and nutrient distributions in the ice-edge zone of the Weddell Sea: Relationship to hydrography during late summer. *Deep-Sea Res.* **36** : 191-209.
- Park MK, SR Yang, SH Kang, KH Chung & JH Shim (1999) Phytoplankton biomass and primary production in the marginal ice zone of the northwestern Weddell Sea during austral summer. *Polar Biol.* **21** : 251-261.
- Perrin RA, P Lu & HJ Marchant (1987) Seasonal variation in marine phytoplankton and ice algae at a shallow antarctic coastal site. *Hydrobiologia* **146** : 33-46.
- Platt T & DV Subba Rao (1975) Primary production of marine microphytes. In: *Photosynthesis and productivity in different environment* (Cooper JP ed.). Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 249-280.
- Rey F & H Loeng (1985) The influence of ice and hydrographic conditions on the development of phytoplankton in the Barents Sea. In: *Marine Biology of Polar Regions and Effects of Stress on Marine Organisms* (Gray JS, & ME Christiansen eds.). Wiley, Chichester, pp. 49-64.
- Sakshaug E & O Holm-Hansen (1984) Factors governing pelagic production in polar oceans. In: *Marine Phytoplankton and Productivity* (Holm-Hansen O, L Bolis & Gilles R eds.). Springer-Verlag, Berlin. pp. 1-18.
- Sakshaug E (1994) Discussant, s report: primary production in the Antarctic pelagial a view from the north. In: *Southern Ocean ecology, the BIOMASS perspective* (El-Sayed SZ ed.). Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 125-126.
- Smetacek V, R Scharek & EM Nothig (1990) Seasonal and Regional Variability in the Pelagial and its Relationship to the Life History of Krill. In: *Antarctic Ecosystems: Ecological Change and Conservation* (Kerry KR & G Hempel eds.). Springer-Verlag Berlin, New York, pp. 103-114.
- Smetacek V, HJW Baar, UV Bathmann, K Lochte & MM Rutgers van der Loeff (1997) Ecology and biogeochemistry of the Antarctic Circumpolar Current during austral spring: a summary of Southern Ocean JGOFS cruise ANT X/6 of R. V. Polarstern. *Deep-Sea Res.* **44** : 1-21.
- Smith RC (1989) Ozone, middle ultraviolet radiation and the aquatic environment. *Photochem. Photobiol.* **50** : 459-469.
- Smith RC & KS Baker (1989) Stratospheric ozone, middle ultraviolet radiation and phytoplankton productivity. *Oceanography* **2** : 4-10.
- Smith SL, WO Smith Jr, LA Codispoti & DL Wilson (1985) Biological observations in the marginal ice zone of the East Greenland Sea. *J. Mar. Res.* **43** : 693-717.
- Smith WO Jr (1987) Phytoplankton dynamics in marginal ice zones. *Annual Review of Oceanography and Marine Biology* **25** : 11-38.
- Smith WO Jr & 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.
- Smith WO Jr & DM Nelson (1986) Importance of ice-edge phytoplankton production in the Southern Ocean. *BioScience* **36** : 251-257.
- Smith WO Jr & DM Nelson (1990) Phytoplankton growth and new production in the Weddell Sea marginal ice zone in the austral spring and autumn. *Limnol. Oceanogr.* **35** : 809-821.
- Smith WO Jr & E Sakshaug (1990) Polar Phytoplankton. In: *Polar Oceanography Part B Chemistry, Biology, and Geology* (Smith WO Jr. ed.). Academic Press, Inc., New York, pp. 477-535.
- Smith WO Jr, MEM Baumann, DL Wilson & L Aletsee (1987) Phytoplankton biomass and productivity in the marginal ice zone of the Fram Strait during summer 1984. *J. Geophys. Res.* **92** : 6777-6786.
- Smith RC, BB Prezelin, KS Baker, RR Bidigare, NP Boucher, T Coley, D Karentz, S Macintyre, HA Matlick, D Menzies, M Ondrusek, Z Wan & KJ Waters (1992) Ozone depletion: Ultraviolet radiation and phytoplankton biology in Antarctic waters. *Science* **255** : 952-959.
- Southern Ocean JGOFS (1993). JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study) Southern Ocean Planning Group. Report for 1992~93. The reports of JGOFS meetings held in Carqueiranne, France, September 1993; Joint Global

- Ocean Flux Study; Kiel, Germany, pp. 38-51.
- Stolarski RS, AJ Krueger, MR Schoeberl, RD McPeters, PA Newman & JC Alpert (1986) Nimbus 7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease. *Nature* **322** : 808-811.
- Subba Rao DV & T Platt (1984) Primary production of Arctic waters, *Polar Biol.* **3** : 191-201.
- Sullivan CW, CR McClain, JC Comiso & WO Smith Jr (1988) Phytoplankton standing crops within an Antarctic ice edge assessed by satellite remote sensing. *J. Geophys. Res.* **93** : 12,487-12,498.
- Sullivan CW, GF Cota, DW Krempin & WO Smith Jr (1990) Distribution and activity of bacterioplankton in the marginal ice zone of the Weddell-Scotia Sea during austral spring. *Mar. Eco. Prog. Ser.* **63** : 239-252.
- Takahashi T, J Goddard, S Sutherland, DW Chipman & CC Breeze (1986) Seasonal and geographic variability of carbon dioxide sink/source in the oceanic areas: observations in the North and Equatorial Pacific Ocean, 1984~1986 and global summary. DOEE Technical Report MRETTA 19X-89675C, pp. 1-52.
- Turner DR & NJP Owens (1995) A biogeochemical study in the Bellingshausen Sea: overview of the STERNA 1992 expedition. *Deep-Sea Res.* **42** : 907-932.
- Vernet M, EA Brody, O Holm-Hansen & BG Mitchell (1994) The response of Antarctic phytoplankton to ultraviolet radiation: absorption, photosynthesis, and taxonomic composition. *In: Ultraviolet radiation in Antarctica: Measurements and biological effects* (Weiler CS & PA Penhale eds.). American Geophysical Union. Washington, DC. pp. 143-158.
- Villafañe V, EW Helbling, O Holm-Hansen & BG Mitchell (1995) Acclimatization of Antarctic natural phytoplankton assemblages when exposed to solar ultraviolet radiation. *J. Plankton Res.* **17** : 2295-2306.
- Voytek MA (1989) Ominous future under the ozone hole: Assessing biological impacts in Antarctica, report, Environ. Def. Fund, Washington, D.C.
- Voytek MA (1990) Addressing the biological effects of decreased ozone on the Antarctic environment. *Ambio* **19**: 52-61.
- Yang SR, SH Kang & S Lee (1998) Carbon and nitrogen productivities in the Weddell Sea and the Bransfield Strait, Antarctica, The 5th International symposium on Antarctic Science. *Korean J. Polar Res.* **9** : 55-62.
- Walsh JE & CM Johnson (1979) Interannual atmospheric variability and associated fluctuation in the Arctic Sea ice extent. *J. Geophys. Res.* **84** : 6915-6928.
- Zwally HJ, JC Comiso, CL Parkinson, WJ Campbell, FD Carsey & P Gloersen (1983) Antarctic sea ice, 1973~1976: Satellite passive-microwave observations. Natl. Aeronaut. and Space Admin., Washington, D.C. NASA SP-459 : 1-206.

## Importance of Polar Phytoplankton for the Global Environmental Change

Sung-Ho Kang, Jae-Shin Kang, Sang Hoon Lee, Dongseon Kim and Dong Yup Kim

*(Polar Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, 425-600  
Ansan, P.O. Box 29, Seoul, Korea)*

**Abstract** – There are increasing evidences of climate change in the Antarctic and Arctic Oceans, especially elevated temperature due to the continuous burning of the fossil fuels and ultraviolet B (UV-B) flux within the ozone hole. Light-dependent, temperature-sensitive, and fast-growing organisms respond to these physical and biogeochemical changes. Polar marine phytoplankton, which are pioneer endemic species and important carbon contributors in the polar waters, are therefore highly suitable biological indicators of such changes. By virtue of light requirement, the primary producers are exposed to extreme seasonal fluctuations in temperature, photosynthetically active radiation, and UV radiation. Local environmental warming and increased UV-B radiation during ozone depletion may have profound effects on the primary producers that are primary carbon producers in the polar waters. Small changes in climate temperature and solar radiation may have profound effects on the activity threshold of the polar phytoplankton. To demonstrate biological response to the environmental changes, standardized representative natural and biological parameters are needed so that replicate samples (including controls) can be taken over extended periods of time. In this paper, we review general characteristics of polar phytoplankton, their environment, environmental changes in the polar waters, the effects on the environmental changes to the polar phytoplankton, and the importance of the polar phytoplankton to understand the global environmental changes. [Biological indicators, Global environmental change, Polar phytoplankton, UV].