

## Article

제 1차 한-러 북극해 탐사(2000년 8월) 동안의 바렌츠해와 카라해의  
식물플랑크톤 현존량 및 영양염 분포

강성호\* · 정경호 · 강재신 · 김예동

한국해양연구원, 극지연구소, 극지환경특성연구본부  
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29Distribution of Phytoplankton Biomass and Nutrient Concentrations  
in the Barents and Kara Seas during the 1st Korea-Russia  
Arctic Expedition in August, 2000

Sung-Ho Kang\*, Kyung Ho Chung, Jae-Shin Kang, and Yeadong Kim

Korea Polar Research Institute (KOPRI), KORDI  
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

**Abstract :** During the 1st Korea-Russia Arctic Expedition from 3 to 26 August, 2000 phytoplankton biomass and nutrient concentration were measured in the Barents and Kara Seas. Total of 57 surface samples were collected for the phytoplankton related measurements. Chlorophyll *a* (chl *a*) concentrations were measured to investigate the relations between physico-chemical factors and phytoplankton biomass distribution. Chl *a* values ranged from 0.14 to 2.34 mg m<sup>-3</sup> (mean of 0.65 ± 0.42 mg m<sup>-3</sup>) over the surface stations. The elevated values of the chl *a* concentrations (1.49~2.34 mg m<sup>-3</sup>) were found in the southeastern Barents Sea near the Pechora River. Nanoplanktonic (< 20 μm) phytoflagellates were the important contributors for the increase of the chl *a*. The nano-sized phytoflagellates accounted for more than 80% of the total chl *a* biomass in the study area. Mean chl *a* concentration in the Barents Sea (0.72 ± 0.57 mg m<sup>-3</sup>) was higher than in the Kara Sea (0.52 ± 0.45 mg m<sup>-3</sup>), but there was no big difference between two areas. Surface temperatures and salinities ranged from 4.1 to 11.7°C (mean of 8.8 ± 1.9°C) and from 23.8 to 32.5psu (mean of 30.3 ± 1.9 psu), respectively. The physical factors were not highly correlated with phytoplankton distribution. It is speculated that the insignificant correlation between phytoplankton biomass and physical factor was due to the same current which introduced similar water mass with higher water temperature and lower salinity into the study area. The mean values of major nutrients such as ammonia, nitrite, nitrate, phosphate, and silicate were 0.42 ± 0.31 μM, 0.10 ± 0.03 μM, 1.44 ± 1.03 μM, 0.35 ± 0.12 μM, 10.99 ± 3.45 μM, respectively. The relations between phytoplankton biomass and nutrient concentration were not close, indicating that the surface nutrient concentrations during the study seem to be controlled by other physical factors such as input of fresh water (i.e. dilution effects).

**Key words :** 북극(Arctic), 바렌츠해(Barents Sea), 카라해(Kara Sea), 식물플랑크톤(phytoplankton), 영양염(nutrient)

\*Corresponding author. E-mail : shkang@kordi.re.kr

## 1. 서 론

북극해 해양생태계의 외해에 형성되는 식물플랑크톤의 대량증식은 년중 하계에 집중적으로 일어나는 양상을 보인다. 하계 동안의 대량증식이 일어나기 전까지 북극해의 외양 생태계는 강한 바람에 의한 표층수의 수직적 순환이 활발하게 이루어지고, 이로 인해 심층으로부터 많은 영양염이 공급되지만, 일사량의 부족과 수직적 순환으로 인해 식물플랑크톤 성장이 일어나지 못하여 해수 중 식물플랑크톤 생물량이 낮은 상태로 존재한다(Smith and Sakshaug 1990). 여름이 되어 일사량이 증가하면 수온이 상승하고 저염의 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 and Loeng 1985). 그러나 남극해는 북극해와는 달리 영양염의 농도가 높은 북대서양 심층수

가 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(Fig. 1).

북극해의 해양생태계는 계절적으로 얼었다 녹았다 하면서 변화하는 해빙에 의해 많은 영향을 받는다(Fig. 2). 계

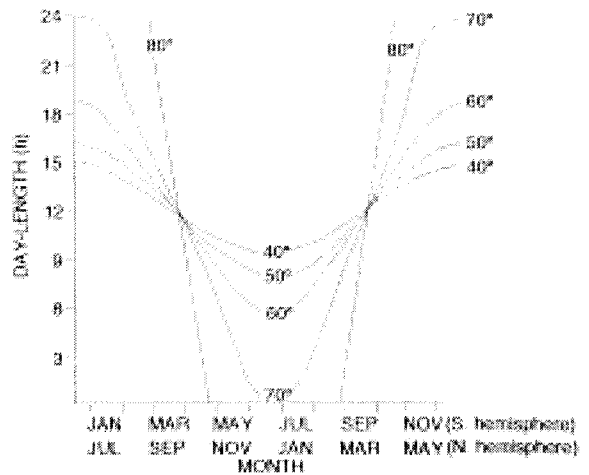


Fig. 1. Seasonal variation in daylength at various latitudes (Sakshaug & Holm-Hansen 1984).

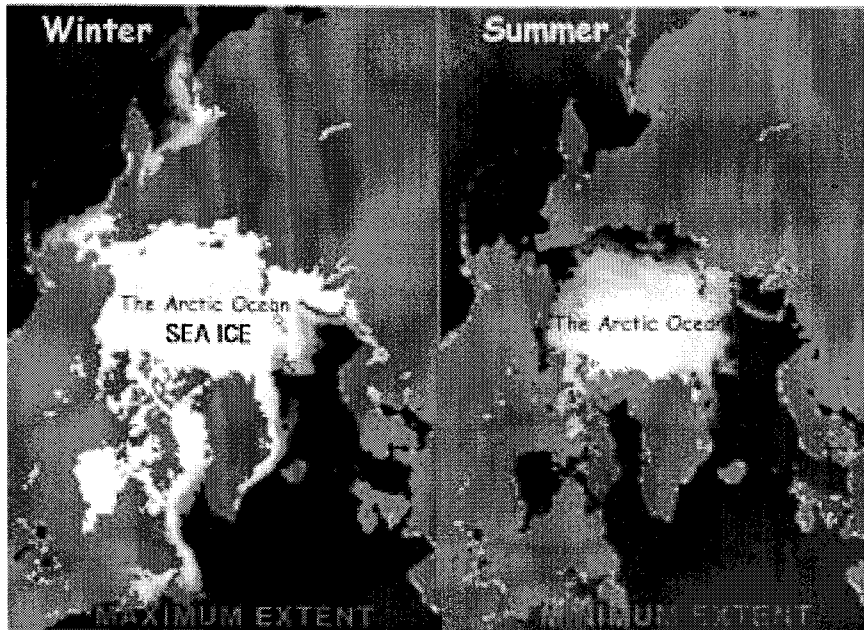


Fig. 2. Seasonal variation of sea ice distribution in the Arctic. The average extent of sea ice for winter and summer in the Arctic typically varies from  $14 \times 10^6$  km<sup>2</sup> in the boreal winter to about  $7 \times 10^6$  km<sup>2</sup> in the boreal summer (Walsh & Johnson 1979).

절별로 변화하는 해빙에 영향을 받는 지역을 해빙 주변 지역(Marginal Ice Zone; MIZ)이라 부른다. MIZ는 북극해 해양생태계 중에서 대부분의 생물들의 생산력이 높은 지역으로 알려져 있다(Hart 1934; Bradstreet and Cross 1982; Ainley *et al.* 1986; W.O. Smith 1987; Kang and Fryxell 1993). MIZ에서의 높은 일차생산력은 해빙 주변에 형성된 낮은 밀도의 안정된 표층수에서 식물플랑크톤의 지속적인 성장이 이루어지기 때문이다(Marshall 1957; McRoy and Goering 1976; El-Sayed and Taguchi 1981). 인공위성의 발달, 해빙을 따라 계절별로 실시된 중규모의 현장 조사 등을 통해 MIZ에서 일어나는 일차생산력이 정량적으로도 높은 지역이라는 사실을 알게 되었다(Alexander and Niebauer 1981; W.O. Smith and Nelson 1985, 1986; Rey and Loeng 1985; S.L. Smith *et al.* 1985; Nelson *et al.* 1987; W. O. Smith *et al.* 1987). 일사량의 증가

와 함께 해빙이 녹으면서 형성된 저밀도의 안정된 표층수와 높은 영양염의 공급으로 인해 식물플랑크톤이 성장하기에 최적의 조건이 MIZ에 형성되었다(Fig. 3). 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 and Loeng 1985; Nelson *et al.* 1987; Comiso *et al.* 1990). 일반적으로 북극해 주변 해역인 베링해, 바렌츠해, 프랭크해의 해빙 주변 식물플랑크톤 대량증식은 MIZ를 따라 50 km 정도 확장되어 있는 반면에, 남극의 웨델해, 로스해 등에서는 보통 250 km 정도 확장된다(Alexander and Niebauer 1981; Rey and Loeng 1985; S.L. Smith *et al.* 1985; W.O. Smith and Nelson 1985;

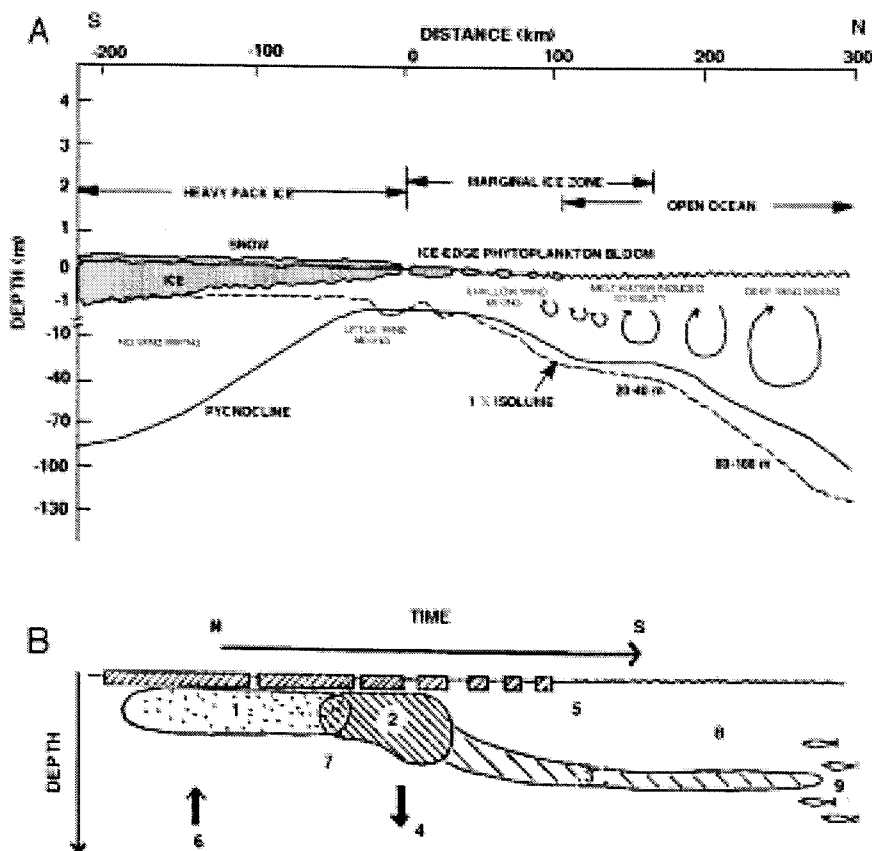


Fig. 3. Conceptual model of the development of phytoplankton blooms in the marginal ice zone of (A) the Antarctic and (B) the Barants Sea, the Arctic. The numbers in (B) correspond to the following stages: 1, prebloom conditions; 2, ice-edge phytoplankton bloom; 3, postbloom deep chlorophyll maximum; 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).

Nelson *et al.* 1987).

북극해의 연근해 지역은 북극해를 둘러싸고 있는 주변 대륙(러시아, 미국, 캐나다)에 잘 발달되어 있는 강들로부터 유입되는 막대한 양의 담수로 인해 마치 강과 바다가 만나는 기수지역과 같다고 말할 수 있다(Matthiessen *et al.* 1999). 이 중에서도 러시아의 북쪽 시베리아에 위치하고 있는 페초라강, 오브강, 예니세이강, 레나강에서 흘러 들어 오는 담수의 양이 큰 부분을 차지한다. 전세계 기후에 큰 영향을 미치는 북대서양 심층수의 형성은 최근 지구 온난화로 인해 시베리아 연안에 형성되어 있는 강으로부터 엄청난 양의 담수 유입, 빙하와 해빙이 녹아 형성되는 담수의 유입이 증가하여 이 지역 해수의 저 염분화로 인해 영향을 받고 있다. 즉 담수의 유입으로 인한 표층 해수 염분의 감소가 북대서양 심층수 형성을 억제하는 역할을 함으로서 전세계 기후에 영향을 주고 있는 것이다. 또한 북극해 주변에 형성되어 있는 시베리아 강과 주변 연근해 지역은 대륙과 해양사이에 형성되어 있는 생지화학적 시스템을 유지하는 중요한 역할을 한다(Lukashin *et al.* 1999; Mattiessen *et al.* 1999).

한편 북극해 해양생태계는 일반적으로 극한 환경 조건 하에서 형성되는 것으로 인식되고 있지만 오랜 기간을 통해 물리적, 화학적으로 안정된 환경을 유지하고 있다. 북극 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. 이와 같은 특수한 북극 해양 환경으로 인해 북극에만 존재하는 해양생태계가 형성된 것이다. 북극해는 일반적으로 북극 심층 외양수를 의미하나 일반적으로 북극해 주변 연근해(베링해, 그린란드해, 카라해, 바렌츠해, 동시베리아해, 척치해, 뉴포트해)를 모두 포함하기도 한다. 북극해는 극단적으로 변화하는 일사량의 차이로 인해 해빙(sea ice) 분포의 계절적인 변화가 커서(Fig. 2) 식물플랑크톤의 생물량과 분포가 시간적, 공간적으로 해빙의 분포에 많은 영향을 받는다(Smith and Sakshaug 1990).

북극해의 일차생산력은 남극해와 마찬가지로 급격한 일사량의 증가가 일어나는 하계 동안에 집중적으로 증가하며 영양염의 감소도 이 기간에 일어난다(Fig. 4). 일차생산력은 수심, 해빙의 분포, 해빙 주변 표층수에 형성되는 용빙수의 형성, 위도 등에 따라 다른 양상을 보이며 이들 요인들은 식물플랑크톤의 대량증식 시기 및 강도, 종조성, 생산력 등에 영향을 미치게 된다. 인공위성 센서의 발달로 인해 극지의 전 해양에 서식하는 식물플랑크톤의 생물량

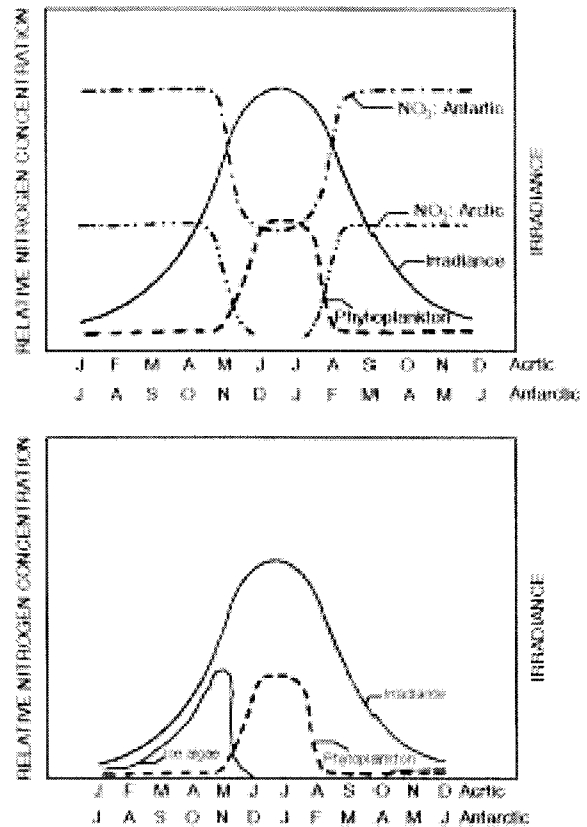


Fig. 4. A: Annual cycle of solar irradiance, nitrate, and phytoplankton biomass in polar regions, B: Temporal development of ice algae relative to phytoplankton in the water column (Smith & Sakshaug 1990).

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

북극해의 일차생산력은 해빙에 서식하는 미세조류가 중요한 부분을 차지하는데 해빙 미세조류는 식물플랑크톤이 형성되기 전에 해빙 내에서 먼저 형성되는 종들로서 해빙의 계절적, 지역적인 분포와 함께 변화한다(Fig. 4). 초기 북극해에서 수행되었던 연구 결과에 의하면 일차생산력의 대부분이 크기가 20  $\mu\text{m}$  이상인 규조류(diatoms)에 의해 일어나고 있는 것으로 생각하였다(Ehrenberg 1843; Cleve 1898, 1899; Grunow 1884; Gran 1904; Usachev 1946,

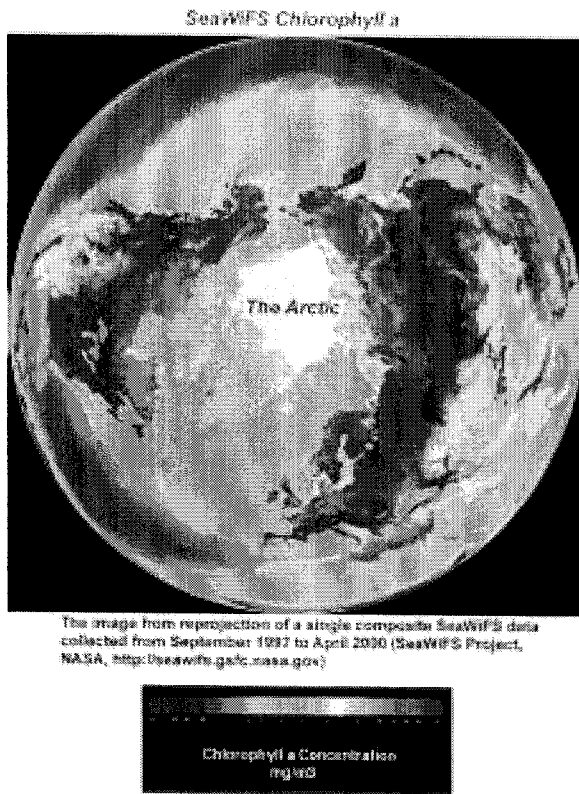


Fig. 5. Spatial distribution of phytoplankton biomass around the Arctic as determined from SeaWiFS satellite (<http://seawifs.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS.html>), Goddard Space Center/NASA.

1968). 그러나 최근 필터를 이용한 정량적인 엽록소 분석 및 형광 및 전자 현미경 관찰에 의한 분석에 의하면 크기가 큰 규조류에 의한 일차생산력은 해빙주변, 연근해, 극전선 지역과 같이 해수의 수괴가 안정된 곳에 일어나지만 대부분의 극지 해양에서는  $20 \mu\text{m}$  이하의 식물플랑크톤에 의해서 일산 생산력이 이루어진다는 사실이 밝혀졌다 (Hews *et al.* 1985; Koike *et al.* 1986).

다른 해역에서와 마찬가지로 주어진 어떤 시간과 공간에 존재하는 북극해 식물플랑크톤의 생물량은 성장률과 사망률(제거율) 사이의 차이에 의한 결과이다. 북극해 식물플랑크톤의 성장률은 수온, 해빙분포 및 표층수의 수직적 운동에 의해 결정되는 빛 조건, 영양염 공급(심층에서 공급되는 새로운 영양염 공급, 미생물의 분해에 의해 표층수에서 다시 순환되어 공급되는 영양염), 유기물, 중금속, 미량원소 등과 같은 물리적, 화학적 요인들에 의해 결정된다. 사망률(제거율)은 동물플랑크톤의 섭식, 침전 등과 같은 생물학적, 물리적 기작에 의해 결정된다. 낮은 수온, 계절적으로 변화하는 해빙의 분포, 해빙 융빙수 형성, 일사량의 급격한 계절적 변화 등이 함께 공존하는 극지 해양

환경에 적응하여 성장하는 식물플랑크톤들은 이 지역 전체 해양생태계를 유지하기 위해 없어서는 안될 중요한 일차생산자인 것이다. 이번 연구의 목적은 러시아 북극해인 바렌츠해와 카라해의 연근해에서 하계 동안의 식물플랑크톤 현존량과 분포 양상과 함께 식물플랑크톤의 현존량과 분포에 미치는 환경요인인 영양염과 표층의 물리 요인에 대한 조사를 병행함으로써 이들의 구조적 변화 양상을 이해하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 연구해역 특성

바렌츠해와 카라해는 대부분 200미터 이하의 대륙붕으로 이루어져 있다. 이 지역의 해수는 서쪽 대서양에서 유입되는 걸프 해류 기원의 비교적 고온, 고염의 해수, 북쪽의 저온, 저염의 해빙 융빙수와 주변 강에서 유입되는 담수가 만나 계절과 지역에 따라 다양한 수괴의 특징을 보인다(Erienkeuser *et al.* 1999). 카라해는 보통 10월에 해빙이 형성되기 시작해서 5월까지 지속된다(Pavlov and Pfirman, 1995). 6월부터 일사량이 증가하면서 해빙이 녹고, 북극 툰드라 지역에 쌓였던 눈이 녹아 내리면서 엄청난 양의 담수가 유입되기 시작한다. 해빙의 융빙과 강으로부터의 담수 유입으로 인해 하계동안 카라해 표층 염분이 15 psu 이하로 내려가고 수온도  $4\text{--}9^\circ\text{C}$  정도로 상승하게 된다. 이러한 고온, 저염분의 표층해수는 바람의 영향으로 바렌츠해와 카라해 내에 반 시계 방향으로 흐르고 있는 무르만스크 해류와 야말 해류에 의해 빌키스키 해협을 통해 북쪽과 북동쪽에 위치하고 있는 랍네펬로 흘러간다. 또한 남서쪽에 위치한 노바야젬라 섬과 바이가쉬 섬 사이의 카라 해협을 통해 바렌츠해의 고온, 저염의 해수가 유입되어 남서 카라해에 영향을 준다. 카라해의 남쪽 연안은 7월 말까지 육상부착해빙(Fast Ice)이 형성되어 있다. 카라해의 연근해에 형성되는 해빙은 수심이 얇은 곳에 형성되기 때문에 저층 퇴적물이 해빙 속에 많이 포함되게 된다. 많은 양의 퇴적물을 포함한 해빙은 하계에 해류의 이동과 함께 북극해의 북극점 근처를 통과하면서 흐르는 해류의 이동(Transpolar Drift)으로 인해 서쪽에서 동쪽에 위치한 프랭 해협까지 이동하여 북극해 퇴적물 이동에 중요한 역할을 한다(Pfirman *et al.* 1997).

### 현장관측 및 데이터 측정 방법

이 연구는 러시아 기상청 소속 쇄빙연구선인 R/V 'Ivan Petrov'에 승선하여 2000년 8월 3일부터 26일까지 약 23 일동안 바렌츠해와 카라해에 분포하는 식물플랑크톤 생물량(chl *a*), 식물플랑크톤 크기에 따른 생물량( $<20 \mu\text{m}$ , pico- and nanophytoplankton vs.  $>20 \mu\text{m}$ , microphy-

toplankton), 식물플랑크톤 종조성, 정량분석(종에 따른 우점종 분석), 수온, 염분, 밀도, 무기 영양염류(암모니아, 아질산염, 질산염, 인산염, 규산염) 등과 같은 파라미터들의 측정을 위해 총 57개 연구정점의 표층수에서 시료를 채집하였다(Fig. 6). 조사해역의 물리적 요인인 표층 수온, 염분은 현장에서 YSI model 30을 이용하여 측정하였다. 식물플랑크톤의 정성조사를 위한 시료 채취는 식물플랑크톤 채집망(20  $\mu\text{m}$  mesh size)을 이용하였다. 식물플랑크톤의 현존량은 Turner Design Model Field Fluorometer를 사용해서 현장에서 chl *a* 값을 측정하였으며 in vivo 값을 이용해 크기별(<20  $\mu\text{m}$  vs. >20  $\mu\text{m}$ ) 식물플랑크톤 비율을 측정하였다. Chl *a* 절대 값은 해수 1-1.5리터를 Whatman GF/F 필터로 여과하여 90% 아세톤에 하루 정도 추출한 후 spectrophotometer를 이용하여 측정하였다.

식물플랑크톤 우점종 및 탄소량의 측정은 현장에서 측정된 chl *a* 양에 따라 20 m에서 100 m까지 해수시료를 0.45  $\mu\text{m}$ 의 Gelman membrane filter에 여과시켜 추후 실험실에서 현미경을 이용한 정량조사를 위해 Kang and Fryxell(1991, 1992)의 방법에 따라 슬라이드를 현장에서 제작하였다.

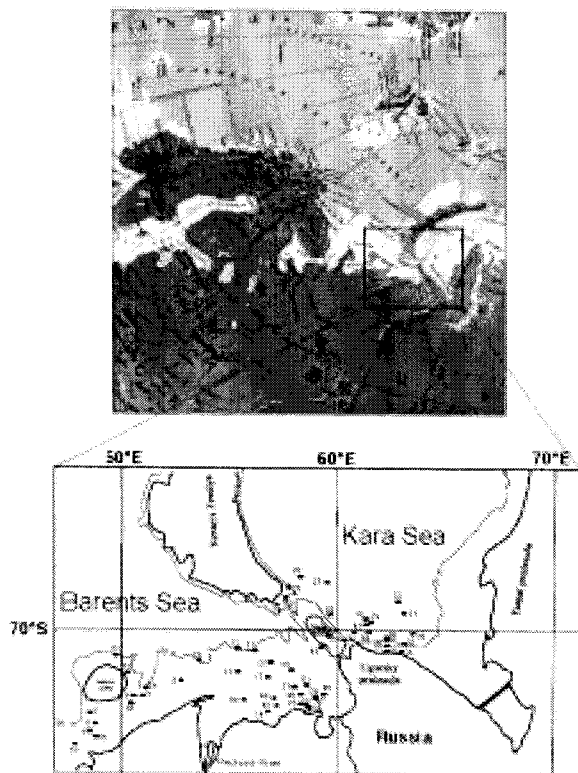


Fig. 6. Study area of the R.V. Ivan Petrov expedition and sampling locations during this study (3-26 August 2000).

무기 영양염류의 측정은 현장에서 해수 채수 후 곧바로 GF/F glass fiber filter로 여과하였고 여과액을 30 ml HDPE bottle에 넣은 후 냉동(-70°C) 보관하였다. 이후 실험실에서 Parson *et al.*(1984)의 방법에 의해 영양염 자동 분석(Lachat QuickChem AE)를 이용하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 식물플랑크톤의 물리적 서식 환경

조사 기간동안 연구 지역의 표층수온과 염분은 각각 4.1~11.7°C의 범위(평균  $8.8 \pm 1.9^\circ\text{C}$ )와 23.8~32.5 psu의 범위(평균  $30.3 \pm 1.9$  psu)를 보였으며, 수온과 염분으로 결정되는 밀도의 범위는 18.1~25.7  $\text{kg m}^{-3}$ (평균  $23.5 \pm 1.6$   $\text{kg m}^{-3}$ )로 전 해역의 표층수는 고온, 저염의 영향으로 인해 낮은 밀도를 보였다(Figs. 7-9). 바렌츠의 평균 표층수온은  $8.8 \pm 1.5^\circ\text{C}$ 로 동쪽 카라해 해역의 표층수온(평균  $8.8 \pm 2.5^\circ\text{C}$ )과 같은 값을 보였다. 표층염분은 바렌츠해와 카라해가 각각  $30.2 \pm 2.3$  psu와  $30.5 \pm 1.1$  psu로 수온과 유사하게 큰 차이를 나타내지 않았다.

하계동안 바렌츠해와 카라해에 서식하고 있는 식물플랑크톤은 바렌츠해의 페초라강과 카라해의 오브강과 예니세이강에서의 담수 유입, 해빙의 용빙으로 인해 형성되는 저염과 고온의 걸프 해류 유입, 지역적인 해류의 수온 상승으로 인해 형성된 고온, 저염의 환경에 적응하면서 서식하여야 한다(Nothig and Kattner 1999). 카라해의 크기는 약 883,000  $\text{km}^2$ 이다. 전체 북극해 담수의 3분의 1이 카라해 남동 연안에 위치하고 있는 오브강과 예니세이강으로부터 유입된다. 이는 러시아 시베리아 북극해 전체 담수 유입량

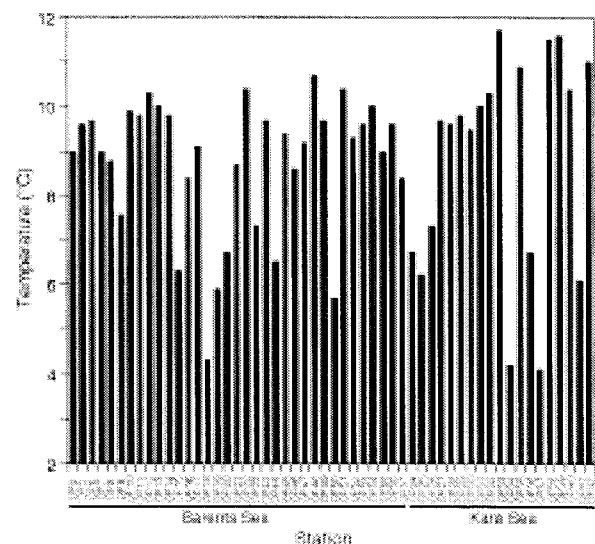


Fig. 7. Surface temperature distribution.

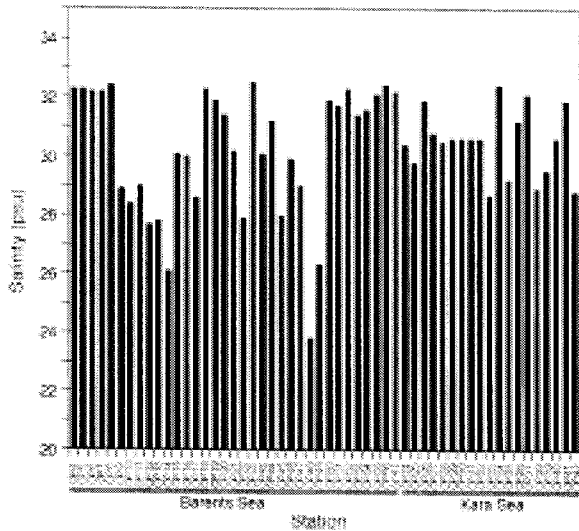


Fig. 8. Surface salinity distribution.

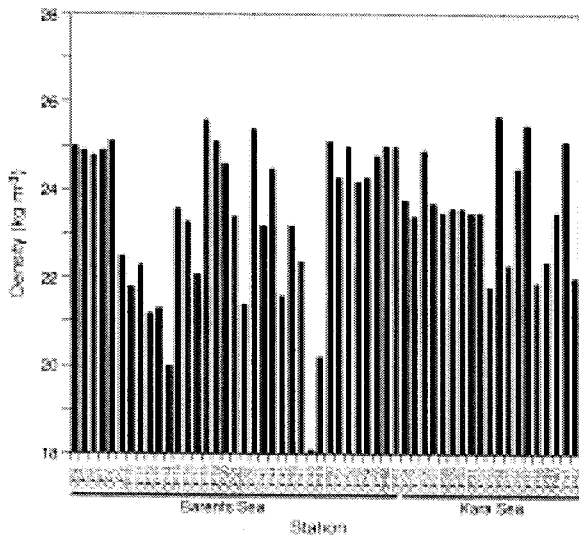


Fig. 9. Surface density distribution.

(연간  $1290 \text{ km}^3$ )의 55%에 해당되는 엄청난 담수 유입이다(e.g. Pavlov and Pfirman 1995). 또한 북극해로 유입되는 총 유기물과 입자성 부유물질의 약 35%가 이곳을 통해 유입되는 것으로 조사되었다(Gordeev *et al.* 1996; Lukashin *et al.* 1999).

매년 조금씩 차이가 나는 해빙의 형성시기와 분포양상에 따라 식물플랑크톤의 성장 시기, 우점종 구성, 현존량, 분포양상이 결정된다. 저염의 해빙이 녹아서 형성된 저밀도의 안정된 수괴가 해빙근처(Sea-Ice edge)의 표층수(>40 m)에 형성되며, 이로 인한 식물플랑크톤의 현존량 증가는 전체 생태계의 주요 탄소공급원으로 역할을 하게 된다. 해

빙이 다 녹은 초여름에는 일조량의 증가로 인해 표층 수온이 더욱 상승하며, 이미 형성되어 있었던 저염의 표층수가 더욱 더 안정된 수괴가 되어 식물플랑크톤의 생산력이 최대가 된다. 연구기간 동안의 수괴의 수평적인 분포를 보면 연구지역의 카라해에 위치한 정점에서는 북동쪽으로부터 유입된 것으로 추정되는 저염, 저온의 수괴가 잘 발달되어 있지 않았다(Figs. 10, 11).

연근해에서 일어나는 생태계 구조를 이해하기 위한 많은 연구가 이 지역에서 이루어 졌는데, 특히 독일의 극지연구소와 러시아 극지연구소의 공동 연구로 진행된 카라해 연구프로그램(The Kara Sea Expedition of RV "Akademik Boris Petrov" 1997)을 통해 집중적으로 조사되었다(Matthiessen *et al.* 1999). 이 연구를 통해 카라해 연근해 지역이 담수의 유입, 해빙의 용빙 등 여러 가지 물리적 요인으로 인해 해수의 염분과 수온이 변한다는 사실을 알았다. 또한 이 지역의 물리적 구조가 크게 다른 네가지 해수(i, Meteoric water(MW)-river water plus precipitation,  $>8.0^\circ\text{C}$ ,  $<3.1 \text{ psu}$ ; ii, Transformed meteoric water(TMW),  $4-7^\circ\text{C}$ ,  $6-13 \text{ psu}$ ; iii, Polar water of the Kara Sea(PWKS),  $-1.5--0.1^\circ\text{C}$ ,  $30.7-32.3 \text{ psu}$ ; iv, Transformed polar water of the Kara Sea(TPWKS),  $0.8-5.6^\circ\text{C}$ ,  $9.9-25 \text{ psu}$ )로 구분되고, 이에 따라 각 지역에 서식하는 식물플랑크톤의 구조 및 기능 또한 다르게 나타남을 알았다(Matthiessen *et al.* 1999).

#### 영양염류(암모니아, 아질산염, 질산염, 인산염, 규산염)

조사해역에서 측정된 암모니아의 농도는 바렌츠해가  $0.01-1.00 \mu\text{M}$ (평균  $0.31 \pm 0.23 \mu\text{M}$ ), 카라해가  $0.07-1.43 \mu\text{M}$ (평균  $0.61 \pm 0.35 \mu\text{M}$ )의 범위로 두 해역 모두 전반적으로 낮게 나타나고 있으나 평균 농도에 있어서 카라해가 바렌츠해에 비해 약 2배 정도 높은 경향을 보였다. 암모니아의 분포는 바렌츠해의 경우 페초라강 하구역(Ops. 19-20), 카라해의 경우 노바야젬라섬과 바이가쉬섬 사이의 협협(Ops. 25-28)과 바이가쉬섬 동북쪽 해역(Ops. 29-32)에서 비교적 높게 나타나고 있다(Fig. 12-a). 아질산염은 바렌츠해가  $0.08-0.19 \mu\text{M}$ (평균  $0.11 \pm 0.03 \mu\text{M}$ ), 카라해가  $0.07-0.13 \mu\text{M}$ (평균  $0.09 \pm 0.02 \mu\text{M}$ )의 범위로 두 해역간에 농도가 유사한 결과를 보였다. 해역별 아질산염의 분포는 바렌츠해에서 페초라강 하구역(Ops. 19-21)이 높게 나타나고 있으나 카라해의 경우는 지역적으로 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 12-b). 질산염은 바렌츠해와 카라해가 각각  $0.07-3.44 \mu\text{M}$ (평균  $1.21 \pm 0.99 \mu\text{M}$ ),  $0.25-4.06 \mu\text{M}$ ( $1.85 \pm 0.00 \mu\text{M}$ )의 범위로 카라해가 다소 높은 양상을 나타냈으나 두 해역 모두 일반적인 연안환경의 질산염 농도에 비해 매우 낮은 결과를 보였다. 해역별 질산염의 분포는 바렌츠해의 경우 지역적으로 심한 농도 차이를 보이고 있으

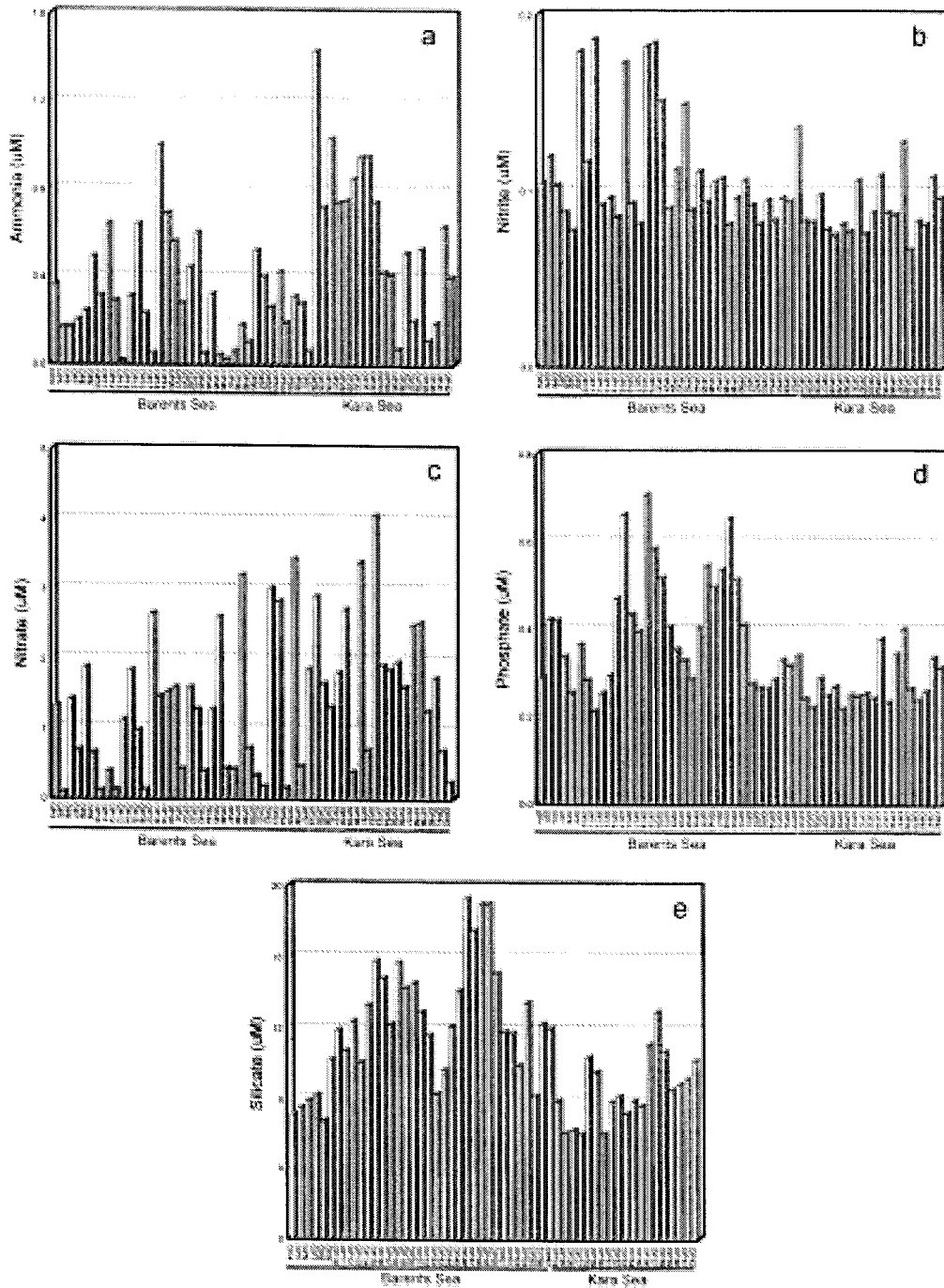


Fig. 10. Spatial distributions of each inorganic nutrient (a: ammonia, b: nitrite, c: nitrate, d: phosphate, e: silicate).

나 대체로 암모니아나 아질산염과 유사하게 페초라강 하구역(Op. 18)에서 높은 경향을 보였으며 폴크네브섬 동쪽 연안(Op. 48)에서도 높은 농도가 발견되었다(Fig. 12-c). 카라해에서는 노바야젬라섬과 바이가쉬섬 사이의 해협과 바이가쉬섬 동북쪽 해역에서 높은 경향을 보였다. 인산염

은 바렌츠해가  $0.21\text{--}0.71\ \mu\text{M}$ (평균  $0.40 \pm 0.13\ \mu\text{M}$ ), 카라해가  $0.22\text{--}0.40\ \mu\text{M}$ (평균  $0.27 \pm 0.05\ \mu\text{M}$ )의 범위로 전반적으로 낮은 분포를 보이고 있다. 바렌츠해에서의 인산염 분포 또한 무기질소계 영양염과 마찬가지로 페초라강 하구역에서는 평균  $0.5\ \mu\text{M}$  이상의 높은 농도를 보이고 있으며



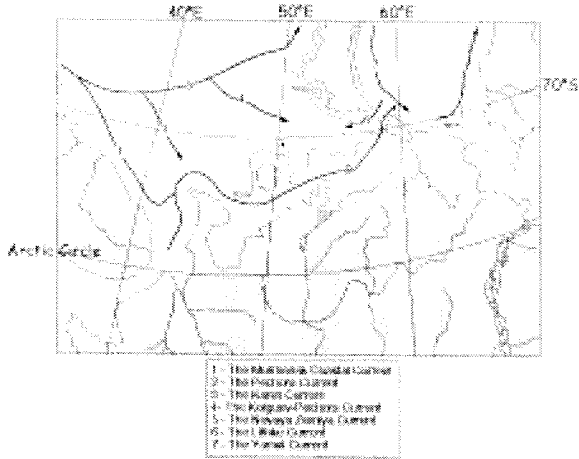


Fig. 11. Scheme of surface currents in the Barents Sea and Kara Sea (Tantsyura, 1973).

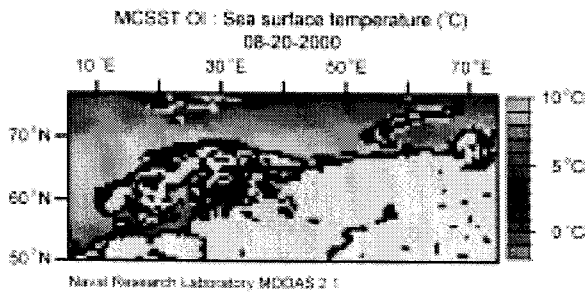


Fig. 12. Sea surface temperature (SST) observed by US naval research lab MODAS 2.1 ([http://www7300.nrlssc.navy.mil/altimetry/regions/reg\\_gbl.html](http://www7300.nrlssc.navy.mil/altimetry/regions/reg_gbl.html)).

카라해의 경우 대체로 지역별로 큰 차이를 나타내지 않았다(Fig. 12-e). 규산염은 바렌즈가  $6.75-19.29 \mu\text{M}$ (평균  $12.31 \pm 3.40 \mu\text{M}$ ), 카라해가  $6.05-12.93 \mu\text{M}$ (평균  $8.57 \pm 1.90 \mu\text{M}$ )의 범위로 바렌즈해가 다소 높은 경향을 보였다. 해역별 규산염의 분포를 살펴보면 바렌즈해의 경우 다른 영양염류와 유사하게 페초라강 하구역에서 집중적으로 높은 농도를 보이고 있으며 카라해에서는 다소 분산된 분포 양상을 나타냈다(Fig. 12-f).

**Chl a와 식물플랑크톤 종 분포 양상**

조사 기간동안 식물플랑크톤의 분포는 수평적인 수온과 염분 분포가 유사한 무르만스크 해류의 흐름을 함께 받는 바렌즈해와 카라해에서 큰 차이를 보이지 않았다(Figs. 10, 11).

전 연구 정점의 표층수에서 측정된 식물플랑크톤의 현존량(chl a 농도)은  $0.14-2.34 \text{ mg m}^{-3}$  범위(평균  $0.65 \pm$

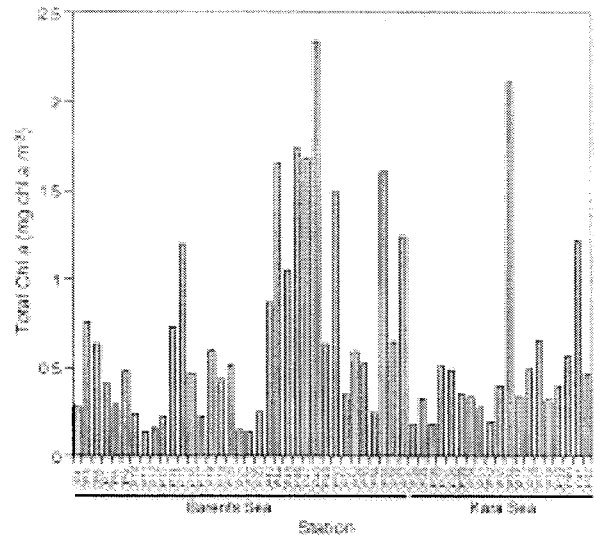


Fig. 13. Distribution of surface total chlorophyll a concentrations.

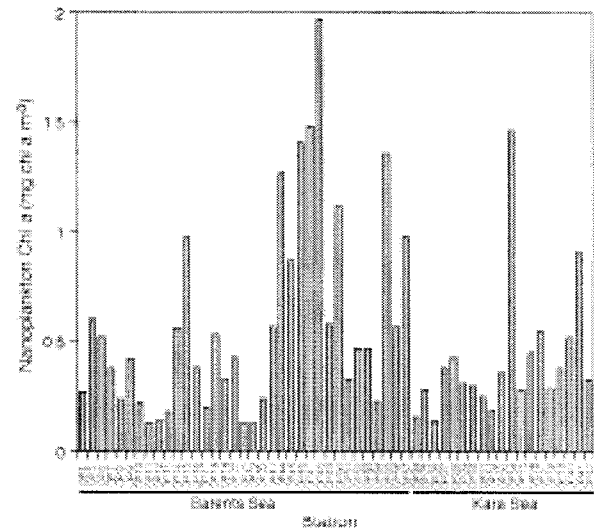


Fig. 14. Distribution of surface nanoplanktonic chlorophyll a concentrations.

$0.53 \text{ mg m}^{-3}$ )를 보였다(Fig. 13). 이중  $20 \mu\text{m}$  이하의 nanophytoplanktonic chl a 농도(평균  $0.53 \pm 0.42 \text{ mg m}^{-3}$ )가 전체 현존량의 82.1%를 차지하였다(Fig. 14). 연구 해역에 우점하였던 식물플랑크톤은 크기가 작은 편모식물플랑크톤에 의한 것으로 판단된다. 일반적으로 극지방의 해빙 주변에 형성되는 규조류와 같은  $20 \mu\text{m}$  이상의 microplanktonic chl a 농도(평균  $0.12 \pm 0.13 \text{ mg m}^{-3}$ )는 전체 현존량의 약 18%에 불과하였다(Figs. 15, 16). 이는 연구 해역이 규조류의 대량 증식을 야기시키는 물리적, 화

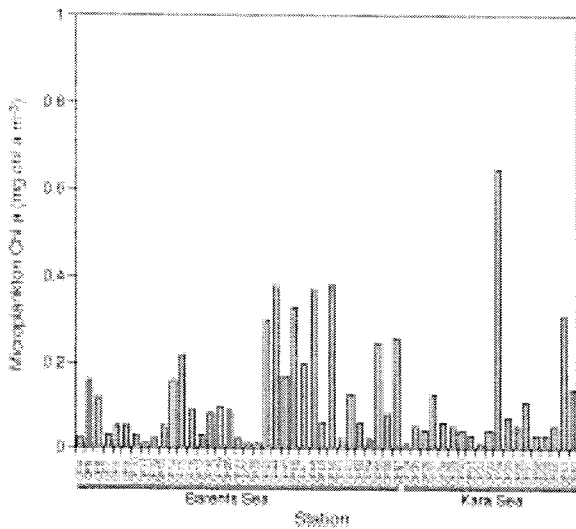


Fig. 15. Distribution of surface microplanktonic chlorophyll *a* concentrations.

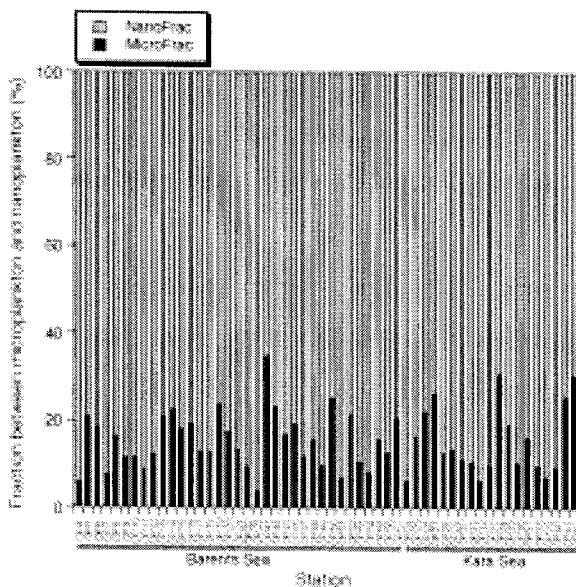


Fig. 16. Nanoplanktonic and microplanktonic chlorophyll *a* fractions given as percentage of total chlorophyll *a* in the surface waters of the study area.

학적, 생물학적 요인이 형성되지 않았기 때문으로 생각된다. 일차적인 요인인 해빙에 의한 수괴의 안정이 이미 6월에 녹기 시작한 해빙의 분포의 영향권에 벗어나 있었기 때문으로 생각된다. 식물플랑크톤 현존량 분포는 바렌즈해(평균  $0.72 \pm 0.57 \text{ mg m}^{-3}$ )가 카라해(평균  $0.52 \pm 0.45 \text{ mg m}^{-3}$ )에 비해  $0.2 \text{ mg m}^{-3}$  정도 높은 값을 보여주었으나 큰 차이는 나지 않았다. 가장 높은 식물플랑크톤 생물

량을 보인 지역은 우골스키반도 서쪽 해안의 바렌즈해 남동 지역 정점 44-50 지역으로  $1.49\text{-}2.34 \text{ mg m}^{-3}$ 의 높은 양이 존재하고 있었다(Fig. 13). 가장 높은 chl *a* 값은 바렌즈해 정점 48에서  $2.34 \text{ mg m}^{-3}$ 가 측정되었다.

북극해에서 식물플랑크톤 대량증식 기간 동안의 생물량(chl *a*)은 바렌즈해에서  $10\text{-}15 \text{ mg m}^{-3}$ , 베링해의 해빙 주변에서  $40 \text{ mg m}^{-3}$  이상이 관찰되었다(Rey and Loeng 1985; Iverson et al. 1979). 남극해의 경우 웨델해의 해빙 주변에서  $30 \text{ mg m}^{-3}$  이상의 chl *a* 농도가 관찰되었고(W.O. Smith and Nelson 1986), 일반적으로  $10 \text{ mg m}^{-3}$  정도의 농도를 보인다(El-Sayed 1984). El-Sayed(1971)에 의해  $180 \text{ mg m}^{-3}$ 의 chl *a* 농도가 관찰된 적도 있지만 이는 해빙이 형성되면서 일어난 주변 식물플랑크톤의 농축 기작에 의한 것으로 판명되었다(Garrison et al. 1983).

카라해와 바렌즈해에서 수행된 규조류 연구는 1900년 초기부터 플랑크톤 넷을 이용한 종조성, 정성분석 등이 이루어 졌다(Cleve 1899; Meunier 1910; Kisselev 1935; Shirshov 1937; Khmyznikova and Zabelina 1946; Usachev 1946, 1968; Il'yash and Koltsova 1981; Koltsova Il'yash 1982; Bondarchuk et al. 1985). 이들 연구는 주로 해빙과 해수 내에 존재하는  $20 \mu\text{m}$ 이상의 규조류에 대한 분류학적 연구, 종조성, 계절별 종의 천이 등을 중심으로 이루어 졌다. 특히 규조류의 종조성에 대한 연구를 통해 해빙종, 식물플랑크톤, 담수종, 저서규조류, 기수종 등 서식환경에 따른 규조류의 분포양상을 이해하여 해양학적 연구를 위한 생물학적 파라미터로 이들을 이용하려는 시도를 하였다. 그러나 정성적인 연구에 치중하여 연구를 수행하다 보니 크기가 작고 생태적으로 중요한 탄소공급원인 우점종에 대한 연구가 미흡하였다.

Polyakova(1988, 1997)는 카라해에서 약 80 taxa의 부유성 규조류를 기재하였다. 이중 41%가 북극-북방종(Arctic-boreal species), 7%가 양극종(bipolar species), 26%가 전세계종(cosmopolitan species), 12%가 북반구종(Arctic-boreal-tropic species), 나머지 분류하지 못한 14% 등으로 이들 규조류를 서식환경에 따라 분류하였다. 북극-북방종과 양극종을 합한 48%가 이곳에 존재하는 것으로 보아 북극해의 영향을 많이 받는 지역으로 간주하였다. 반면에 전 세계종과 북방종이 총 38% 정도를 차지하고 있다는 것은 이지역 담수의 유입으로 인한 담수종과 서쪽에서 유입되는 고온의 북대서양 종과 바렌즈해에 서식하는 종들이 유입되어 영향을 준 것으로 생각하였다.

Polyakova(1999)는 카라해의 오브강과 예니세이강 주변 해역의 표층 퇴적물에서 총 169종의 규조류를 동정하였다. 이중 58종은 해양-기수종이었으며 111종이 담수종이었다. 분류학적으로 가장 다양하게 나타난 속은 *Navicula*(25 taxa), *Thalassiosira*(12 taxa), *Nitzschia*(11

taxa), *Gomphonema*(9 taxa), *Pinnularia*(9 taxa), *Eunotia* (8 taxa), *Aulacoseira*(6 taxa) 등이었다. 서식 환경에 따라 해양 및 기수 지역 부유종(25 taxa), 저층 서식 부착성 및 일시 부유성 종(33 taxa), 해빙 서식종(7 taxa). 이 중 담수 서식 부유성 규조류가 14 taxa, 저서성 부착 규조류가 111 taxa였다.

일반적으로 이와 같은 식물플랑크톤의 대량증식은 크기가 20  $\mu\text{m}$  이상인 규조류나 군체를 형성하는 속들(*Thalassiosira*, *Chaetoceros*, *Fragilariopsis*, *Pseudo-nitzschia*, *Phaeocystis*)에 의해 이루어진다(Kang and Fryxell 1991, 1992, 1993; Kang et al. 1993, 1995; Bidigare et al. 1996). 반면 대량증식이 끝난 후 외해나 겨울 동안에 존재하는 극지 식물플랑크톤의 생물량(chl *a*)은 1  $\text{mg m}^{-3}$  이하이며 0.1  $\text{mg m}^{-3}$  이하인 경우도 많이 있다. 이 때에는

주로 크기가 20  $\mu\text{m}$  이하인 편모를 가지고 있는 식물플랑크톤(*Cryptomonas*, *Pyramimonas*, *Phaeocystis* motile stage, picophytoplankton, naked dinoflagellates)으로 구성되어 있다(Kang et al. 1993; Kang and Lee 1995; Kang et al. 2001).

*Nitzschia grunowii*, *Fragilariopsis cylindrus*, *Fossula arctica*는 해빙에 서식하는 해빙 서식 우점종으로 해빙의 영향을 받는 카라해 북쪽에 많이 분포하였다( $13.8 \pm 10^6$  valves  $\text{g}^{-1}$ ). 이 종들은 해빙과 관련된 환경을 추정되는데 이용될 수 있다. *Thalassiosira antarctica*, *T. gravinga*, *T. nordenskioldii* 등은 외양의 식물플랑크톤 우점종으로 외양환경을 대표하는 종이다. 해양 기수 우점 종인 *Thalassiosira baltica*, *Melosira moniliformis*와 담수 부유성 우점 종인 *Aulacoseira*, *Stephanodiscus* 등은 담수에 영향을 받

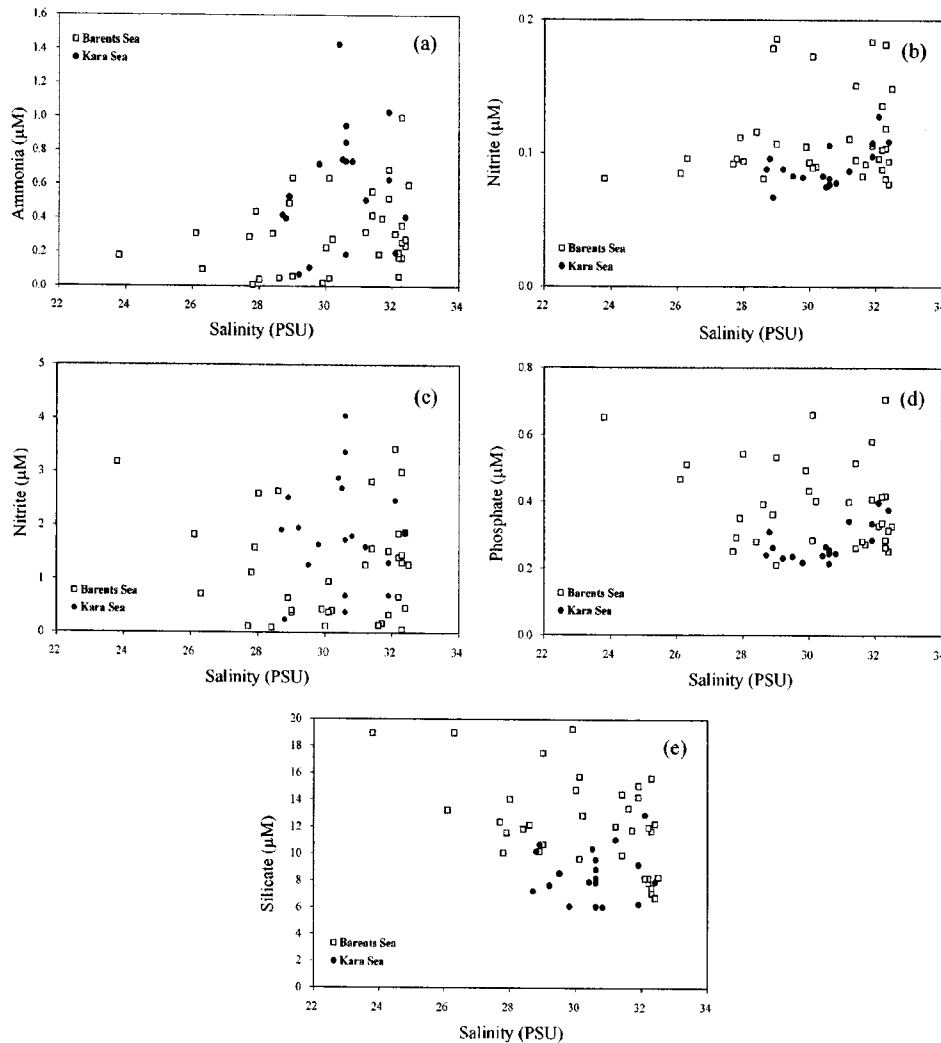


Fig. 17. Relationship between salinity and each inorganic nutrient (a: ammonia, b: nitrite, c: nitrate; d: phosphate, e: silicate).

은 환경을 추정하는 생물학적 지표종으로 이용될 수 있다. 이들 구조의 분포양상을 이해함으로써 1) 퇴적물에 유입된 유기물의 기원을 이해하고, 2) 담수와 해수가 만나는 전선에 형성되는 높은 생산력의 원인을 규명하고, 3) 강으로부터 유입되는 담수의 확정 범위, 생물학적 및 물리학적 영향 등을 이해하는 데 이용될 수 있다(Polyakova 1999).

#### 식물플랑크톤과 환경요인과의 상관관계

조사 기간동안 바렌츠해와 카라해에 측정된 무기 영양염류의 농도는 전반적으로 매우 낮게 나타나고 있는데 이는 비교적 높은 영양염 농도를 보이는 남극의 연안환경과는 확연히 다른 결과이다. 남극해의 경우 북대서양 심층수로부터 높은 농도의 영양염이 지속적으로 공급되기 때문

에 식물플랑크톤의 생장에 제한 요인으로 작용하지 않은 것으로 알려져 있다. 조사해역인 바렌츠해와 카라해의 연안역의 경우 주변에 각각 페초라강, 오브강 그리고 예니세이강이 위치하고 있어 주변 연안역 및 이들 강으로부터 하계에 막대한 양의 담수가 유입됨에 따라 고농도의 영양염의 농도를 나타낼 것이라고 예상하였지만 이와는 상반된 결과를 보였다. 바렌츠해의 경우 페초라강 하구역에서 대부분의 영양염이 비교적 높은 농도를 보여 이 해역의 영양염 분포를 조절하는 원인중의 하나가 담수 유입이라는 것을 추정할 수 있으나 염분과 같은 물리적 환경 요인과의 상관관계가 낮은 것으로 보아 그 영향의 정도는 정확히 판단하기 어렵다(Fig. 17). 한편 식물플랑크톤의 현존량(chl *a*)과 각 영양염류와의 상관관계에 있어서도 뚜렷

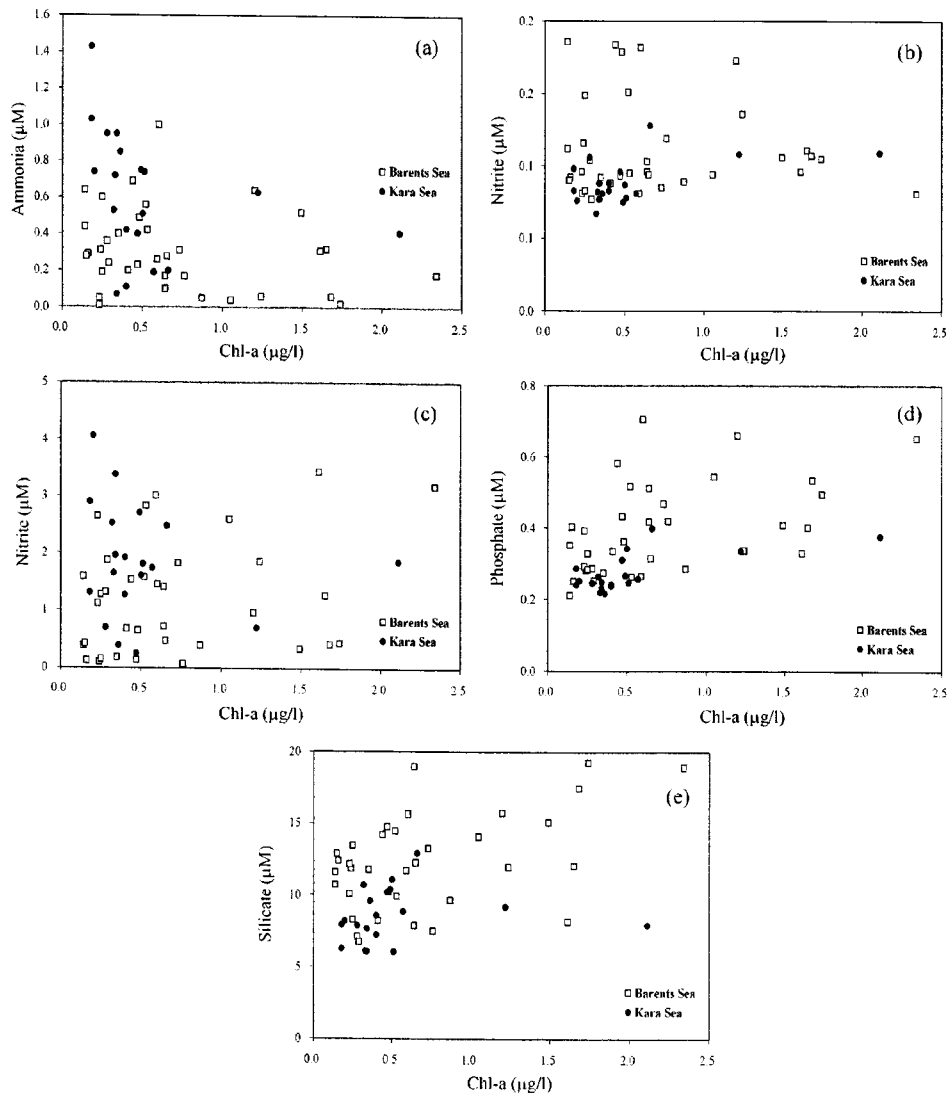


Fig. 18. Relationship between chlorophyll *a* and each inorganic nutrient (a: ammonia, b: nitrite, c: nitrate; d: phosphate, e: silicate).

한 경향을 보이지 않는 것으로 미루어 보아 영양염 농도가 식물플랑크톤의 생장에 미치는 영향 또한 정확하게 판단하기 어렵다(Fig. 18). 한편 바렌즈해와 카라해역의 질소대 인의 비(Redfield ratio)를 살펴보면 바렌즈해가 평균  $4.4 \pm 3.1$ 로서 일반 해양환경에서의 질소대 인의 비(약 7대 1)에 비해 상당히 낮게 나타나고 있어 이 해역의 식물플랑크톤의 생장은 영양염에 의해 제한을 심하게 받고 있음을 추측하게 한다. 반면 카라해는 평균  $9.7 \pm 4.7$ 로서 영양염 농도가 제한요소로 작용하지 않음에도 불구하고 바렌즈해에 비해 식물플랑크톤의 현존량(chl *a*)은 더 낮게 나타나고 있는 양상을 보였다. 종합적으로 두 해역의 무기 영양염류는 전반적으로 낮은 농도에도 불구하고 식물플랑크톤 현존량과는 낮은 상관관계를 보여 식물플랑크톤에 의한 흡수와 같은 생물학적 요인보다는 하계에 주변 육상으로부터의 강수 유입, 빙하, 해빙의 용빙 등에 의한 해수의 희석과 같은 물리적 요인이 더 큰 조절 요인으로 작용하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

1) 전 연구정점의 표층수에서 측정된 chl *a* 농도는  $0.14\text{--}2.34 \text{ mg m}^{-3}$  범위(평균  $0.65 \text{ mg m}^{-3}$ )를 보였다. 가장 높은 식물플랑크톤 생물량을 보인 지역( $1.49\text{--}2.34 \text{ mg m}^{-3}$ )은 바렌즈해 남동쪽 페초라 강 하구 주변 해역으로 높은 양이 존재하고 있었다. 이는 이 지역에 nanoplanktonic (<20  $\mu\text{m}$ ) 편모식물플랑크톤이 우점하고 있었기 때문이다.

2) 연구기간 동안 연구 해역에서 20  $\mu\text{m}$  이하의 편모식물플랑크톤이 전체 식물플랑크톤 현존량의 80% 이상을 차지하였다. 바렌즈해 평균 chl *a* 값( $0.72 \text{ mg m}^{-3}$ )은 카라해의 평균 chl *a* 값( $0.52 \text{ mg m}^{-3}$ )과 비교할 때  $0.2 \text{ mg m}^{-3}$  정도 높은 값을 보였으나 큰 차이를 보이지 않았다.

3) 연구 지역의 표층수온과 염분은 각각  $4.1\text{--}11.7^\circ\text{C}$ 의 범위(평균  $8.8^\circ\text{C}$ )와 23.8–32.5 psu의 범위(평균 30.3 psu)를 보였으며, 식물플랑크톤 현존량의 분포에 미약한 영향을 주었다. 이와 같이 바렌즈해와 카라해 연안 주변 해역에서 chl *a* 값이 큰 차이를 나타내지 않은 주요원인으로는 연안을 따라 서쪽에서 유입된 고온, 저염의 무르만스크 해류에 의해 두 해역에서 유사한 식물플랑크톤 현존량 분포가 이루어진 때문으로 보인다.

4) 무기 영양염은 카라해와 바렌즈해 전반에 걸쳐 암모니아, 아질산염, 질산염, 인산염 및 규산염이 각각 평균  $0.42 \pm 0.31 \mu\text{M}$ ,  $0.10 \pm 0.03 \mu\text{M}$ ,  $1.44 \pm 1.03 \mu\text{M}$ ,  $0.35 \pm 0.12 \mu\text{M}$ ,  $10.99 \pm 3.45 \mu\text{M}$ 의 낮은 농도 분포를 보였다. 무기 영양염은 전반적으로 낮은 농도에도 불구하고 식물플랑크톤 현존량과는 상관관계가 낮은 것으로 보아 식물플랑크톤에 의한 흡수와 같은 생물학적 요인보다는 하계에

주변 육상으로부터의 강수 유입, 빙하, 해빙의 용빙 등에 의한 해수의 희석과 같은 물리적 요인이 분포를 결정짓는 주요 조절요인으로 작용하는 것으로 보인다.

5) 북극해 해양생태계가 전지구 환경변화에 미치는 역할을 이해하기 위해 식물플랑크톤의 종조성, 생물량, 생산력과 관련된 주요 요인 즉, 생물학적 요인(동물플랑크톤 포식, 박테리아 분해, 원생동물 분포), 화학적 요인(영양염, 철 이온 농도), 물리적 요인(수온, 염분 및 수괴안정), 해빙의 분포 등과의 관계를 규명하는 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

#### 사 사

이 연구는 해양수산부의 해양개발과 사업인 '북극해 해양조사 연구(PM21700)와 한국해양연구원 '북극다산기지 주변 자연환경 및 생물자원 연구(PP03107)'의 일환으로 이루어졌다. 시료 채집에 도움을 주신 양영선 씨, 러시아 연구 관계자에게 감사드린다. 자료 분석 및 정리에 도움을 준 조성록, 김은정, 최정은 씨께도 고마움을 표합니다. 아울러 이 논문을 심사하면서 좋은 의견을 주신 전남대학교의 이학영 교수와 박명길 교수께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Ainley, D.G., W.R. Fraser, C.W. Sullivan, J.J. Torres, T.L. Hopkins, and W.O. Smith, Jr. 1986. Antarctic mesopelagic micronekton: Evidence from seabirds that pack ice affects community structure. *Science*, 232, 847-849.
- Alexander, V. and H.J. Neibauer. 1981. Oceanography of the eastern Bering Sea ice-edge in spring. *Limnol. Oceanogr.*, 26, 1111-1125.
- Bidigare, R.R., J.L. Iriarte, S.-H. Kang, D. Karentz, M.E. Ondrusek, and G.A. Fryxell. 1996. *Phytoplankton: Quantitative and qualitative assessments, Foundation for ecological research of the Antarctic Peninsula. Antarctic Research Series*, 70, 173-198.
- Bondarchuk, L.L., V.V. Zernova, and T.I. Kol'tsova. 1985. Diatoms of some regions of the Arctic shelf, Ecology of the flora and fauna of the ocean near coastal zone: 74-93. (in Russian)
- Bradstreet, M.S.W. and W.E. Cross. 1982. Optical efficiency factors of some phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 28, 816-832.
- Cleve, P.T. 1898. Diatoms from Franz-Joseph-Land collected by the Jackson-Harmsworth Expedition. *Bihang Kongelige svenska Vetenskaplige Akademie Handlingar* 22, Afd., III, 3-26.
- Cleve, P.T. 1899. Mikroskopisk undersökning af stoft, funnet

- pa drifis I Ishafvet. Ofversigt af Kongliga Vetenskaps-Akademiens Forhandlingar, 1899, 122-130.
- Comiso, J.C., N.G. Maynard, W.O. Smith, and C.W. Sullivan. 1990. Satellite ocean color studies of Antarctic ice edges in summer/autumn. *J. Geophys. Res.*, 95, 9481-9496.
- Ehrenberg, C.G. 1843. Ubere neue Anschauungen des kleinsten nordlichen Polarebens. Beutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin Monatsberichte. 522-529.
- El-Sayed, S.Z. 1971. Observations on phytoplankton bloom in the Weddell Sea. p. 301-312. In: *Antarctic Research Series 17, Biology of the Antarctic Seas IV*, eds. by G.A. Llano and I.E. Wallen.
- El-Sayed, S.Z. 1984. Productivity of the Antarctic waters a reappraisal. p. 19-34. In: *Marine phytoplankton and productivity*, eds. by O. Holm-Hansen, L. Boris and R. Gilles. Springer-Verlag, Berlin.
- El-Sayed, S.Z. and S. Taguchi. 1981. Primary production and standing crop of phytoplankton along the ice-edge in the Weddell Sea. *Deep-Sea Res.*, 28, 1017-1032.
- Erikenkuser, H., R. Spielhagen, and E. Taldenkova. 1999. Stable isotopes in modern water and bivalve samples from the southern Kara Sea. *Ber. Polarforsch.*, 300, 80-90.
- Garrison, D.L., S.F. Ackley, and K.R. Buck. 1983. A physical mechanism for establishing algal populations in frazil ice. *Nature*, 306, 363-365.
- Gordeev, V.V., J.-M. Martin, I.S. Sidorov, and M.N. Sidorova. 1996. A reassessment of Eurasian river input of water, sediment, major elements and nutrients to the Arctic Ocean. *Amer. J. Sci.*, 296, 655-695.
- Gran, H.H. 1904. Diatomaceae from the ice-floes and plankton of the Arctic Ocean. *Scientific Results of the Norwegian North Polar Expedition*, 4, 3-74.
- Grunow, A. 1884. Die Diatomeen von Franz Josephs Land. Denkschriften der Akademie der Wissenschaften, Wien, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse I, 48, 53-112.
- Hart, T.J. 1934. On the phytoplankton of the south-west Atlantic and Bellingshausen Sea. *Discovery Rep.*, 8, 1-268.
- Hewes, C.D., O. Holm-Hansen, and E. Sakshaug. 1985. Alternate carbon pathways at lower trophic levels in the Antarctic food web. p. 277-283. In: *Antarctic nutrient cycles and food webs*. eds. by W.R. Siegfried, P.R. Condy, and R.M. Laws. Springer-Verlag, Berlin & Heidelberg.
- Il'yash, L.B. and T.I. Kol'tsova. 1981. Phytoplankton of the Yenisei Gulf. *Hydrobiol. J.*, 17(3), 3-8. (in Russian)
- Iverson, R.L., T.E. Whitledge, and J.J. Goering. 1979. Chlorophyll and nitrate fine structure in the southeastern Bering Sea shelf break front. *Nature*, 281, 664-666.
- Kang, S.-H. and G.A. 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*), 645-666.
- Kang, S.-H. and G.A. 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, S.-H. and G.A. 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, S.-H. and S.H. Lee. 1995. Antarctic phytoplankton assemblage in the western ransfield Strait region, February, 1993: composition, biomass, and mesoscale distributions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 129, 253-267.
- Kang, S.-H., G.A. Fryxell, and D.L. Roelke. 1993. *Fragilariopsis cylindrus* compared with other species of the diatom family Bacillariaceae in Antarctic marginal ice edge zones. *Nova Hedwigia*, 106, 335-352.
- Kang, S.-H., D.-Y. Kim, J.-S. Kang, M.-Y. Lee, and S.H. Lee. 1995. Antarctic phytoplankton in the eastern Bransfield Strait region and in the northwestern Weddell Sea marginal ice zone during austral summer. *Korea J. of Pol. Res.*, 6, 1-30.
- Kang, S.-H., J.-S. Kang, S. Lee, K.H. Chung, M.G. Park, and D.S. Kim. 2001. Antarctic phytoplankton assemblage in the marginal ice zone of the northwestern Weddell Sea. *J. Plankton Res.*, 23(4), 333-352.
- Khmyznikova, V.L. and M.M. Zabelina. 1946. Plankton of the south-western part of the Kara Sea. *Proc. Arctic Scient.-Res. Inst. "Glav. Upr. Sevmorput"*, 193, 45-73. (in Russian)
- Kiselev, I.A. 1935. Some data on phytoplankton of the north-eastern part of the Kara Sea. *Proc. Taimyr hydrograph. expedition, part II. Leningrad*, 191-202. (in Russian)
- Koike, I., O. Holm-Hansen, and D.C. Biggs. 1986. Inorganic nitrogen metabolism by Antarctic phytoplankton with special reference to ammonium cycling. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 30, 105-116.
- Kol'tsova, T.I. and L.V. Il'yash. 1982. Distribution of phytoplankton in the near coastal zone of the Taimyr Peninsula in connection to hydrological conditions. *Water*

- Resources*, 4, 158-165. (in Russian)
- Lukashin, V.N., S.V. Ljutsarev, A.D. Krasnyuk, V.P. Shevchenko, and V. Yu. Rusakov. 1999. Suspended particulate matter in the Ob and Yenisei estuaries. *Ber. Polarforsch.*, 300, 155-178.
- Marshall, P.T. 1957. Primary production in the Arctic. *J. Cons., Cons. Int. Explor. Mer.*, 23, 173-177.
- Mattiessen, J., O.V. Stepanets, and The Shipboard Scientific Party. 1999. The expedition to the Kara Sea in summer 1997: Summary of the shipboard scientific results. *Ber. Polarforsch.*, 300, 5-16.
- McRoy, C.P. and J.J. Goering. 1976. Annual budget of primary production in the Bering Sea. *Mar. Sci. Commun.*, 2, 255-267.
- Meunier, A. 1910. Microplankton des mers Barents et de Kara. Due d'Orleans, Compagne arctique de 1907. Bruxelles, 355 p.
- Nelson, D.M., W.O. Smith, L.I. Gordon, and L.I. 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.
- Nothig, E.-A. and G. Kattner. 1999. Distribution of phytoplankton biomass and nutrient concentrations. *Ber. Polarforsch.*, 300, 37-44.
- Parson, T.R., Y. Maita, and C.M. Lalli. 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press. 177 p.
- Pavlov, V.K. and S.L. Pfirman. 1995. Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution. *Deep-Sea Res.*, 42(6), 1369-1390.
- Pfirman, S.L., R. Colony, D. Nurnberg, H. Eicken, and I. Rigor. 1997. Reconstructing the origin and trajectory of drifting Arctic sea ice. *J. Geophys. Res.*, 102(C6), 1369-1390.
- Polyakova, Ye.I. 1988. Diatoms of the USSR Arctic seas and their significance for the investigations of the bottom sediments. *Okeanologiya*, 28(2), 286-291. (in Russian)
- Polyakova, Ye.I. 1997. *The Eurasian Arctic Seas during the Late Cenozoic*. Nauchnyi Mir, Moscow. 145 p. (in Russian)
- Polyakova, Ye.I. 1999. New data on diatom distribution in surface sediments of the Kara Sea. *Ber. Polarforsch.*, 300, 209-218.
- Rey, F. and H. Loeng. 1985. The influence of ice and hydrographic conditions on the development of phytoplankton in the Barents Sea. p. 49-64. In: *Marine Biology of Polar Regions and Effects of Stress on Marine Organisms*, eds. by J.S. Gray and M.E. Christiansen. Wiley, Chichester.
- Shirshov, T.P. Sezonnie javlenia v zhizni fitoplanktona poljarnikh morey v svjazi s ledovim regimom. Trudi Arktich. In-ta, t. 82, 1937. (Seasonal patterns in the life of phytoplankton of polar seas in relation to regime of ice. Works of Arctic Institute, 82, 1937.
- Smith, S.L., W.O. Smith, L.A. Codispoti, and D.L. Wilson. 1985. Biological observations in the marginal ice zone of the East Greenland Sea. *J. Mar. Res.*, 43, 693-717.
- Smith, W.O. 1987. Phytoplankton dynamics in marginal ice zones. *Annual Review of Oceanog. Mar. Biol.*, 25, 11-38.
- 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. and D.M. Nelson. 1986. Importance of ice-edge phytoplankton production in the Southern Ocean. *BioScience*, 36, 251-257.
- Smith, W.O. and E. Sakshaug. 1990. Polar Phytoplankton. p. 477-535. In: *Polar Oceanography Part B Chemistry, Biology, and Geology*, ed. by Smith, W.O. Academic Press, Inc., New York.
- Smith, W.O., M.E.M. Baumann, D.L. Wilson, and 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.
- Usachev, P.I. 1946. Biological indices of the ice origin in the Kara Sea, Laptev Sea and in the Straits of the Franz Josef Land. (On the Base of materials of the expedition of the Arctic Scientific-Research Institute on the "Sadko" during 1936 and 1937 years). *Proc. Inst. Oceanol. Acad. Sci. USSR*, 1, 113-150. (in Russian)
- Usachev, P.I. 1968. Phytoplankton of the Kara Sea. p. 6-28. In: *Plankton of the Pacific Ocean*. Nauka, Moscow. (in Russian)

---

Received Aug. 4, 2003

Accepted Sep. 17, 2003