

Article

북극해 하계 남동 바렌츠 해역에서 식물플랑크톤 크기별 분포와 환경요인에 관한 연구

주형민¹ · 이진환² · 정경호¹ · 강재신¹ · 강성호^{1*}

¹한국해양연구원 부설 극지연구소
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호
²상명대학교 생명·화학시스템학부 생명과학전공
(110-743) 서울시 종로구 홍지동 7

Phytoplankton and Environmental Factors in the Southeastern Barents Sea during August 2003

Hyoung Min Joo¹, Jin Hwan Lee², Kyung Ho Chung¹,
Jae Shin Kang¹, and Sung-Ho Kang^{1*}

¹Korea Polar Research Institute, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Department of Lifescience, Division of Life and Chemical System
Sangmyung University, Seoul 110-743, Korea

Abstracts : In order to grasp the structure and dynamics of phytoplankton communities, chlorophyll-*a* (Chl-*a*) and cell abundance were measured at 20 stations during the period from August 9 to August 21, 2003 in the southeastern Barents Sea on surface and subsurface chlorophyll maximum depth (SCM). Surface temperatures were varied from minimum -0.7°C (st. 18) to maximum 10.4°C (st. 1). Salinities were varied from minimum 29.9 psu(st. 18) to maximum 35.8 psu(st. 2). The maximum nutrient(phosphate, nitrate, silicate) concentrations were $0.12\ \mu\text{M}$, $0.11\ \mu\text{M}$, $7.53\ \mu\text{M}$ and minimum concentrations were $0.01\ \mu\text{M}$, $0.03\ \mu\text{M}$, $1.43\ \mu\text{M}$, respectively. On SCM physical environmental factor were almost similar. Chl-*a* concentrations ranged from 0.23 to $2.13\ \mu\text{g chl-}a\ l^{-1}$ at SCM. Nano- and pico phytoplankton were the important contributors for increase of the Chl-*a*. It was about seven times difference between highest concentration to lowest. Phytoplankton communities were composed of diatoms, dinoflagellates, cryptophyceae, silicoflagellate, and prymnesiophyceae showing 37 taxa at surface and 38 taxa at SCM. Picophytoplankton was the most dominant in all stations and all layers, but the second groups were 2 and/or 3 taxa. Phytoplankton abundance ranged from minimum $4.3 \times 10^5\ \text{cells}\ l^{-1}$ (st. 20) to maximum $2.4 \times 10^6\ \text{cells}\ l^{-1}$ (st. 17) at surface water. As a result, phytoplankton might be controlled by physical factors such as North Atlantic ocean currents and northern melt water among environmental factors in Barents Sea. In addition the dominant species were nano- and pico phytoplankton such as *Phaeocystis*, *Cryptomonas* and *Dinobryon* in the study area.

Key words : 북극해(Arctic Ocean), 바렌츠 해(Barents Sea), 식물플랑크톤(Phytoplankton), 엽록소 *a* (Chlorophyll-*a*), 미소-극미소 식물플랑크톤(nano-pico sized phytoplankton)

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

1. 서 론

북극의 해양환경은 폐쇄적인 남극의 해양환경과 달리 다른 대양들과 상호관계를 유지하고 있다(Loeng *et al.* 1997). 북극해는 근처의 연관된 다른 해양들과 물리 이화학적 다양한 요소에 의해서 서로 영향을 미치는 관계에 놓여 있다. 또한 지속적으로 유입되는 연안 해수들과 유럽, 아시아, 북미 북쪽에 잘 발달되어 있는 강에서 흘러 들어오는 엄청난 양의 담수의 유입으로 마치 강과 바다가 만나는 기수역과 같다고 말할 수 있다(Mattiessen *et al.* 1999). 그리고 북극해에서 유입되는 빙하와 해빙이 녹아 형성되는 담수 및 시베리아 연안의 강으로부터 유입되는 엄청난 담수의 유입으로 나타나는 표층해수 염분의 감소가 전 세계 기후에 영향을 주고 있다(Mattiessen *et al.* 1999).

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 수온은 낮지만(-2°C~4°C) 열대 해역이나 온대 해역의 계절적 변화에 비해 상대적으로 일정한 상태를 유지하고 있다(Sakshaug and Holm-Hansen 1984). 이와 같은 특수한 북극 해양 환경으로 인해 북극에만 존재하는 해양생태계가 형성된 것이다.

일반적으로 해양에서 일차생산은 식물플랑크톤군집 중 크기가 비교적 큰 규조류와 와편모조류가 우세하게 출현하나 남극해나 북극해에서는 크기가 작은 종류가 우세하게 나타난다. 이러한 이유는 수온이나 광조건이 열악한 곳에서 적응하는 것으로 이해되고 있다. 북극해의 생태계는 계절적으로 해빙과 결빙에 의한 영향이 크며(Sakshaug and Holm-Hansen 1984), 영양염류는 심층수로부터 충분히 공급되지만 일사량의 부족과 낮은 수온으로 식물플랑크톤의 생물량은 낮은 편이다. 그러나 일사량의 증가와 해빙으로 안정된 밀도를 유지하는 하계에는 생산력이 비교적 높다고 할 수 있겠다(Smith 1987; Nelson *et al.* 1987).

북극해를 구성하는 여러 바다들 중 본 연구지역인 바렌츠 해는 북극점을 중심으로 알래스카의 반대편에 위치한 스발바르섬, 프라즈조셉섬, 야말반도, 콜라반도로 에워싸여져 있다. 특히 하계의 경우 바렌츠 해 동부인 러시아 북부 연안은 인근의 페초라 강, 오브 강, 예나강, 예나세이 강, 레나 강에서 유입되는 많은 양의 담수에 의한 영향이 나타나는 지역으로 북극해의 특성 중 하나인 강과 바다가 만나는 기수역의 특성을 보여주는 지역이다(Loeng *et al.*

1997; Mattiessen *et al.* 1999).

이러한 바렌츠 해역은 대부분 수심 200 m 이하의 대륙붕으로서 서쪽에서는 대서양에서 유입되는 걸프 해류 기원의 고온·고염의 해수가, 북쪽에서는 저온·저염의 해빙 용빙수가 유입되는 곳으로 생태학적으로 매우 특이한 곳이다(Erlenkeuser *et al.* 1999).

계절에 따라 이 해역은 해빙의 진퇴가 일어나는 곳으로 겨울에서 여름으로 진행되어 해빙이 물러나면 해빙에서 녹아나온 해수가 수층의 상층부를 차지하면서 수층이 안정화 되고, 식물플랑크톤의 대발생으로 이어진다.

이러한 지리적 특성으로 바렌츠 해의 식물플랑크톤의 현존량과 분포 및 물리 이화학적 요인의 분석은 이 해역의 특성을 이해하는데 도움이 될 것이다. 그러나 식물플랑크톤의 대발생이 일어나는 봄철의 생태계 변동은 집중적인 조사대상이 되어왔으나(Paul *et al.* 1999) 하계에 바렌츠 해의 식물플랑크톤의 조사는 활발히 이루어지지 않았다(Arashkevich *et al.* 2002; Falk-Petersen *et al.* 2001; Rat'kova and Waddmann 2002; Verity *et al.* 2002). 극지역 중 Ice edge zone에서의 대량발생은 매년 주기적으로 일어나는데 북극에서는 Bering Sea(McRoy and Goering 1974; Alexander 1980; Alexander and Niebauer 1981), Beaufort Sea(Horner and Schrader 1982) 그리고 Fram Strait(Gradinger and Baumann 1991) 등의 지역에서 조사되었다. 그러나 바렌츠 해역에서의 조사는 이 기간 동안 조사가 이루어지지 않았다.

본 연구는 북극해 해양 생물자원 조사의 일환으로 러시아 북극해인 바렌츠 해에서 대발생이 끝난 이후 하계의 식물플랑크톤 현존량의 분포 양상과 우점종을 관찰하고 환경요인인 영양염과 물리적인 요인과의 관계에 대하여 조사하였다.

2. 재료 및 방법

조사 지역 및 조사 기간

본 연구는 북극의 하절기인 2003년 8월 9일부터 2003년 8월 21일까지 러시아 기상청 소속 쇄빙 연구선인 R/V 'Ivan Petrov'를 이용하여 조사를 실시하였고, 조사정점은 동부 러시아 연안지역에서 북쪽 방향으로 전체 20개의 정점에서 표층 및 Subsurface Chlorophyll Maximum Depth(SCM)에서 조사를 실시하였다(Fig. 1). 조사지역의 위도는 73° 01', 21'N~78° 16', 57'N이며 경도는 25° 36', 88'E~53° 07', 25'E이었다. 조사지역의 평균 수심은 256.6 m 이었다. 조사지역 중 북쪽의 정점(정점 11~20)은 해빙 용빙수의 영향을 받는 지역이며, 러시아 연안에 있는 정점(정점 1~10)은 북대서양의 해류의 영향을 받는 지역이다(Fig. 2).

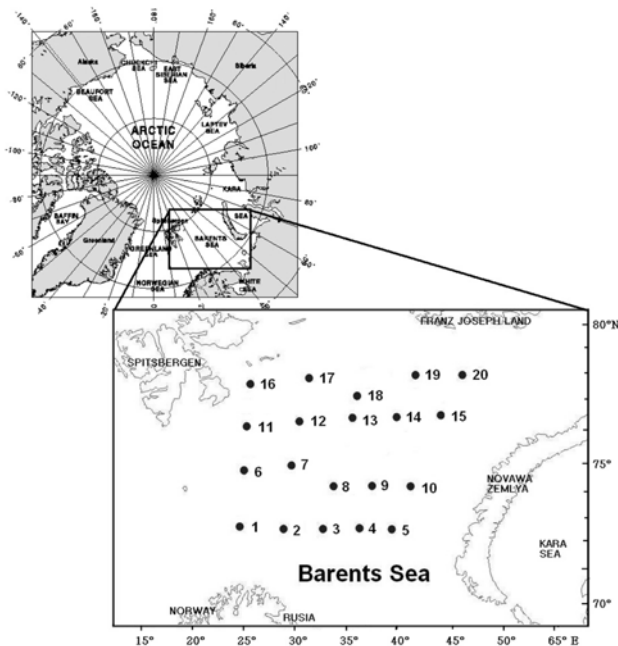


Fig. 1. Study area of the R/V *Ivan Petrov* expedition and the sampling locations in the Barents Sea.

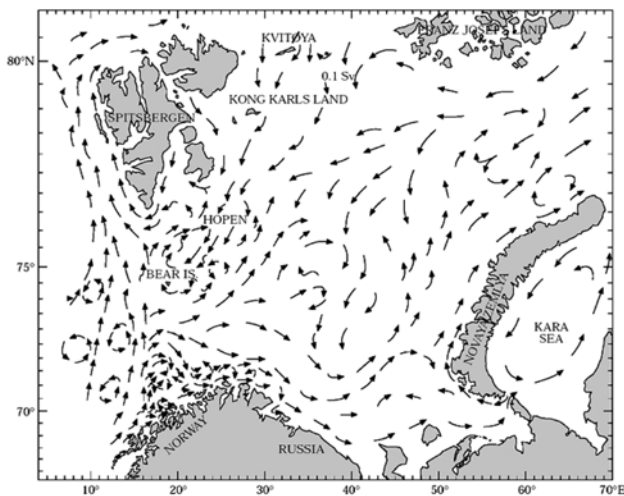


Fig. 2. Surface currents in the Barents Sea (from Loeng *et al.* 1997).

환경요인

수온 및 염분은 현장에서 TS-meter(YSI model 30)로 소수점 첫째자리까지 측정하였고, 무기 영양염(아질산염+질산염, 인산염, 규산염)은 현장에서 해수를 채수한 후 곧바로 GF/F filter(Whatman)로 여과하여 미리 산세척한 30 ml HDPE bottle에 넣은 후 냉동 보관하였다. 이후 Parsons *et al.*(1984)의 방법에 의해 영양염 자동분석기(Lachat QuickChem AE)를 이용하여 분석하였다.

Chlorophyll-*a* (biomass)

Chlorophyll-*a*(Chl-*a*)의 농도를 분석하기 위하여 선상에서 채수한 시료 500 ml를 GF/F filter(Whatman, d = 25 mm)로 여과 후, 90% acetone을 넣어 암냉 보관하여 24시간동안 추출하였다. 추출액을 MFS filter(pore size = 0.5 μm , d = 25 mm)로 여과를 시킨 후 형광분석기 TD-700(Turner Designs)을 사용하여 측정된 뒤 아래의 계산식으로 정량하였다. 미소-극미소 식물플랑크톤 Chl-*a*의 농도를 알기 위하여 mesh size 20 μm 필터로 여과한 후 같은 방법으로 분석을 실시하였다.

$$\text{mg Chl-}a \cdot \text{m}^{-3} = \text{Ca} \cdot \text{EV/SV} \quad (\text{Note: } \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1} \equiv \text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$$

Ca = Fluorometer로 측정된 형광값

EV = 아세톤 부피(ml)

SV = 여과한 시료의 부피(l)

식물플랑크톤의 동정 및 계수(cell abundance)

식물플랑크톤의 생물다양성, 현존량, 우점종, 출현종을 파악하기 위하여 현장에서 측정된 Chl-*a* 양에 따라 HPMa 슬라이드를 제작하였다(Kang and Fryxell 1991; 1992). 채수된 100 ml의 해수를 glutaraldehyde(최종농도 1%, v/v)로 고정하여 GN-6 Metrical membrane filter (0.45 μm pore-size, 25mm diam; Gelman Sciences)에 여과한 후, 2~3방울 정도의 HPMa(2-hydroxypropyl methacrylate) 시약을 흡수시켰다. 약 24시간동안 건조기에서 건조시켜 HPMa슬라이드를 제작하였다. 정성분석은 제작된 HPMa슬라이드 글라스 위에 놓고 100~1000배 하에서 검경·동정하였다. 극미소식물플랑크톤은 형광현미경(OLYMPUS, BX-51; 한국해양연구원 부설 극지연구소)의 1000배 하에서 계수하였다. 시료의 분류 및 동정에는 Cupp(1943), Brunel(1962), Hendey(1964), Simonsen (1974), Dodge(1982), Round *et al.*(1990), Hasle and Syvertsen(1996) 등의 참고문헌을 이용하였다. 한편 크기가 작아 광학현미경에서 동정하기 어려운 규조류는 전자현미경으로 동정하기 위하여 세포 내 유기물을 제거하였다(Hasle and Fryxell 1970). 유기물을 제거한 시료는 aluminum stub에 고정하고 건조시켜 gold-palladium으로 코팅(JEOL, MSC-101) 후 주사전자현미경(SEM, JEOL 5600LV; 상명대학교 전자현미경실)으로 동정하였으며, 필요한 경우 사진을 촬영하였다. 또한 외부골격이 규산질이 아닌 외편모조류는 2% glutaraldehyde로 고정시킨 후 osmic acid(OsO₄)의 최종농도가 1~2%가 되도록 부가하여 실내에서 1~2시간 동안 고정하였다(Reimann *et al.* 1980). 이후 Et-OH series로 탈수하여 isoamylacetate로 치환시켜 Critical Point Dryer(SPI, Dry-CPD)로 건조시킨 후 주사전자현미경에서 검경 및 동정하였다.

3. 결 과

환경요인

조사기간 중 표층의 수온은 유빙의 영향을 받은 정점 18에서 -0.7°C 로 최저를 나타냈으며 정점 1에서 최고 10.4°C 를 나타내어 11.1°C 의 차이를 나타내었다(Table 1, Fig. 3). 북극 해류의 영향을 받는 지역인 정점 16, 17, 18, 19, 20의 평균 수온은 1.6°C 이었고 러시아 연안지역인 정점 1, 2, 3, 4, 5의 평균 수온은 8.1°C 로 비교적 큰 폭의 차이를 나타내었다. 본 조사해역을 러시아 연안을 기준으로 동-서로 구분하였을 때 북대서양 해류의 영향을 받는 지역(정점 1, 6, 11, 16)의 평균 수온은 5.7°C 이었고, 노바야젬야섬 부근(정점 5, 10, 15, 20)은 4.7°C 를 나타내서 변화 폭이 크지 않았다.

반면 SCM에서는 평균 2.26°C 를 나타내었으며 정점 16에서 -1.58°C 로 최저를, 정점 2에서 8.21°C 로 최고를 나타내었다(Table 2).

염분은 표층에서 최저 29.9 psu(정점 18)에서 최고 35.8 psu(정점 2)를 나타내었다(Fig. 3). 해빙 용빙수의 영향을 받는 북쪽 정점(정점 17, 18, 19)이 평균 31.6 psu로 낮았던 반면, 고염의 해수가 유입되는 서쪽의 정점 1, 6의 평균이 34.2 psu를 나타내어 북대서양의 영향에 의해 염분

Table 1. Spatial distribution of physicochemical factor on surface in the study area.

| Station | Temp. ($^{\circ}\text{C}$) | Sal. (psu) | Density (kg m^{-3}) | Phosphate (μM) | Nitrate (μM) | Silicate (μM) |
|---------|------------------------------|------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1 | 10.4 | 35.7 | 27.4 | 0.08 | 0.09 | 3.40 |
| 2 | 9.6 | 35.8 | 27.6 | 0.08 | 0.06 | 1.94 |
| 3 | 7.4 | 34.8 | 27.2 | 0.09 | 0.12 | 1.69 |
| 4 | 6.3 | 34.5 | 27.1 | 0.08 | 0.06 | 2.33 |
| 5 | 6.9 | 34.9 | 27.4 | 0.13 | 0.15 | 2.15 |
| 6 | 4.7 | 32.6 | 25.8 | 0.07 | 0.14 | 5.17 |
| 7 | 5.6 | 33.7 | 26.6 | 0.08 | 0.05 | 4.08 |
| 8 | 5.6 | 33.6 | 26.5 | 0.09 | 0.04 | 1.82 |
| 9 | 4.8 | 33.5 | 26.5 | 0.09 | 0.06 | 2.49 |
| 10 | 5.6 | 33.6 | 26.5 | 0.11 | 0.07 | 3.57 |
| 11 | 3.2 | 33.2 | 26.4 | 0.05 | 0.03 | 7.53 |
| 12 | 1.6 | 32.2 | 25.8 | 0.08 | 0.06 | 3.16 |
| 13 | 1.0 | 30.8 | 24.7 | 0.12 | 0.11 | 2.66 |
| 14 | 3.9 | 33.0 | 26.2 | 0.11 | 0.10 | 1.43 |
| 15 | 3.4 | 34.3 | 27.3 | 0.13 | 0.05 | 2.36 |
| 16 | 4.3 | 33.1 | 26.2 | 0.06 | 0.09 | 2.40 |
| 17 | 0.2 | 31.7 | 25.4 | 0.07 | 0.05 | 2.03 |
| 18 | -0.7 | 29.9 | 24.0 | 0.14 | 0.15 | 1.73 |
| 19 | 0.9 | 31.7 | 25.4 | 0.14 | 0.07 | 2.85 |
| 20 | 2.7 | 34.2 | 27.3 | 0.15 | 0.05 | 1.56 |

이 증가하는 양상을 나타내었다. SCM에서는 최저 33.38 psu(정점 9)에서 최고 35.05 psu(정점 2)로 큰 차이를 나타내지 않았다.

표층에서 밀도는 최저 24.0 kg m^{-3} (정점 18)에서 최고 27.6 kg m^{-3} (정점 2)로 3.6 kg m^{-3} 의 차이를 나타내었다(Fig. 3). 정점 4, 9, 14, 19를 기준으로 용빙수와 북대서양수의 영향을 받는 지역은 밀도가 낮은 반면에 노바야젬야섬 부근의 밀도는 높게 나타내어 서로 다른 수괴가 만나고 있음을 나타내었다. SCM에서는 최저 26.5 kg m^{-3} (정점 9)에서 최고 27.7 kg m^{-3} 로 평균 27.28 kg m^{-3} 을 나타내었다.

표층에서 영양염의 농도를 보았을 때 $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 최저 $0.05 \mu\text{M}$ (정점 11)에서 최고 $0.12 \mu\text{M}$ (정점 13)로 $0.07 \mu\text{M}$ 의 차이를 나타내었다(Table 1, Fig. 4). 북극해에서 유입된 용빙수의 영향으로 정점 13을 중심으로 비교적 높은 농도를 보였으며, 서쪽의 지역에 비해 노바야젬야섬 부근

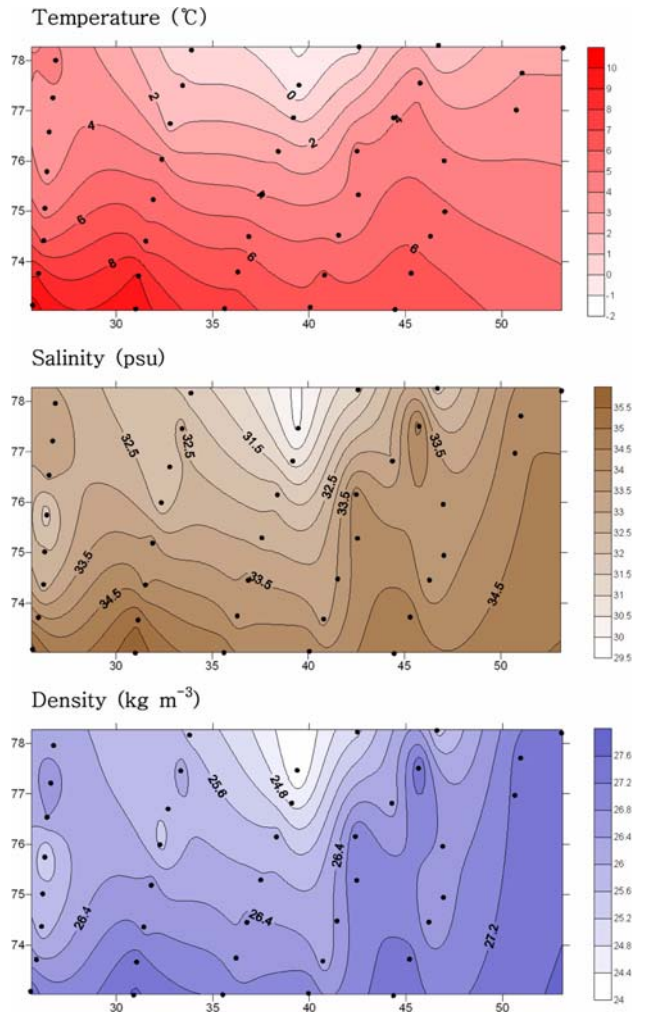


Fig. 3. Contour of surface temperature, salinity and density on surface.

Table 2. Spatial distribution of physical factor at SCM in the study area.

| Station | Temp. (°C) | Sal. (psu) | Density (kg m ⁻³) | Depth (m) |
|---------|------------|------------|-------------------------------|-----------|
| 1 | 5.34 | 35.03 | 27.7 | 86.44 |
| 2 | 8.21 | 35.05 | 27.3 | 25.26 |
| 3 | 2.77 | 34.77 | 27.7 | 30.37 |
| 4 | 6.29 | 34.43 | 27.1 | 17.73 |
| 5 | 3.51 | 34.56 | 27.5 | 30.28 |
| 6 | -1.22 | 34.19 | 27.5 | 40.26 |
| 7 | 5.07 | 35.02 | 27.7 | 26.11 |
| 8 | 0.44 | 34.30 | 27.5 | 26.31 |
| 9 | 3.98 | 33.38 | 26.5 | 20.71 |
| 10 | 5.87 | 33.86 | 26.7 | 15.69 |
| 11 | -0.42 | 33.92 | 27.3 | 38.06 |
| 12 | -1.39 | 34.13 | 27.5 | 26.43 |
| 13 | 1.35 | 33.87 | 27.1 | 14.84 |
| 14 | 2.49 | 34.07 | 27.2 | 25.00 |
| 15 | 3.18 | 33.83 | 26.9 | 15.98 |
| 16 | -1.58 | 34.02 | 27.4 | 52.07 |
| 17 | -1.12 | 33.94 | 27.3 | 27.65 |
| 18 | 1.09 | 34.21 | 27.4 | 17.09 |
| 19 | 2.23 | 33.51 | 26.8 | 15.14 |
| 20 | -0.71 | 34.39 | 27.6 | 30.66 |

이 비교적 높은 농도를 보였다.

NO₃-N은 최저 0.03 μM(정점 11)에서 최고 0.11 μM(정점 13)을 보여 0.08 μM의 차이를 나타내었다(Fig. 4). PO₄-P와 같이 정점 13을 중심으로 주변해역으로 갈수록 낮아지는 양상을 보였고, 북대서양 해류의 영향을 받는 지역은 비교적 높은 농도의 NO₃-N을 나타내었고 용빙수의 영향을 받은 지역 이외에서는 낮은 농도를 나타내었다.

SiO₂-Si는 조사기간 중 최저 1.43 μM(정점 14)에서 최고 7.53 μM(정점 12)으로 6.10 μM의 농도차를 보였다(Fig. 4). 북대서양 해류의 영향을 받는 지역에서 비교적 높은 농도를 나타내었다.

Chlorophyll-*a* (biomass)

총 Chl-*a*

본 조사에서 표층 총 Chl-*a*의 농도는 최저 0.186 μg chl-*a* l⁻¹(정점 18)에서 최고 1.046 μg chl-*a* l⁻¹(정점 2)까지 평균 0.412 μg chl-*a* l⁻¹로 수평적 변화폭은 7배 이상이었다(Table 3, Fig. 5).

조사지역을 정점 3, 8, 13, 18을 기준으로 동-서로 구분하여 비교해 보았을 때 서쪽 지역(정점 1, 2, 6, 7, 11, 12, 16, 17)이 평균 0.548 μg chl-*a* l⁻¹인 반면 동쪽지역은 평

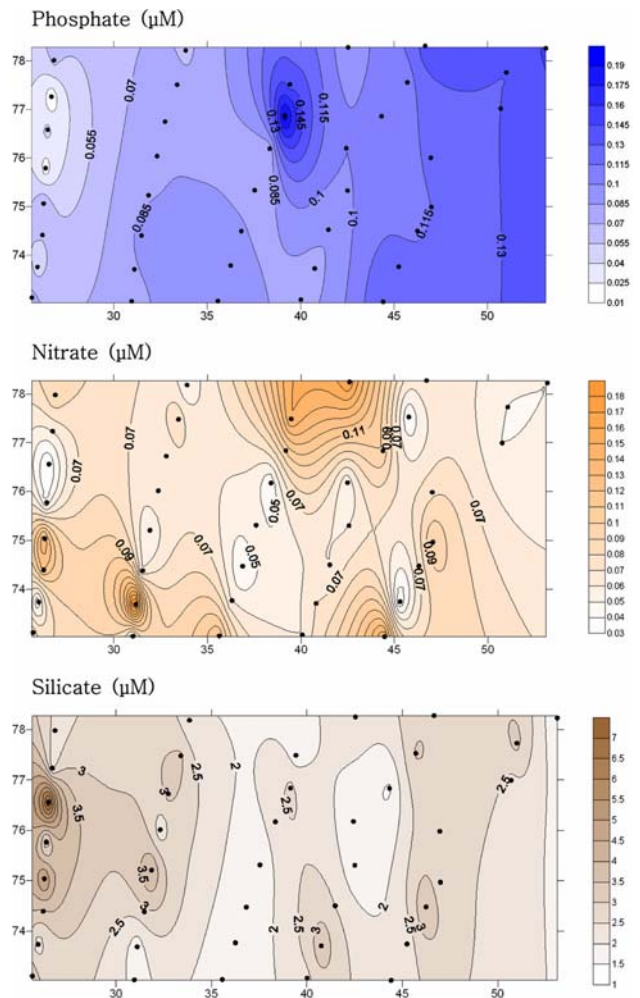


Fig. 4. Contour of surface nitrate, phosphate and silicate concentrations.

균 0.326 μg chl-*a* l⁻¹로 약 1.5배의 이상 차이를 나타내었다(Fig. 6).

SCM에서는 최저 0.232 μg chl-*a* l⁻¹(정점 10)에서 최고 2.134 μg chl-*a* l⁻¹(정점 11)을 나타내었고 평균 0.800 μg chl-*a* l⁻¹을 나타내어 표층보다 약 2배의 차이를 나타내었다.

미세 식물플랑크톤의 Chl-*a*

미세 식물플랑크톤(>20 μm)의 Chl-*a* 농도는 표층에서 최저 Not Detected(ND, 정점 12, 17)에서 최고 0.162 μg chl-*a* l⁻¹(정점 2)까지 평균 0.045 μg chl-*a* l⁻¹로 변화폭이 크지 않았으나, SCM에서는 최저 ND(정점 5, 14)에서 최고 0.598 μg chl-*a* l⁻¹(정점 16)을 나타내어 상대적으로 큰 변화폭을 나타내었다(Fig. 6). 또한 수직적으로도 표층에 비하여 SCM에서 2배 이상의 농도를 나타내었다.

미소-극미소 식물플랑크톤의 Chl-a

크기가 20 μm 미만인 미소-극미소 식물플랑크톤(극미소 식물플랑크톤 ; $<2\ \mu\text{m}$)의 Chl-a 농도는 표층에서 최저 0.120 $\mu\text{g chl-a l}^{-1}$ (정점 18)부터 최고 0.884 $\mu\text{g chl-a l}^{-1}$ (정점 2)까지 평균 0.367 $\mu\text{g chl-a l}^{-1}$ 로 수평적 변화폭이 7배 이상이었다(Fig. 6). 총 Chl-a와 같이 동-서로 비교해

Table 3. Spatial distribution of Chl-a in the study area.

| St. | Total Chl-a ($\mu\text{g chl-a l}^{-1}$) | | Micro Chl-a ($\mu\text{g chl-a l}^{-1}$) | | Nano+Pico Chl-a ($\mu\text{g chl-a l}^{-1}$) | |
|------|--|-------|--|-------|--|-------|
| | Surface | SCM | Surface | SCM | Surface | SCM |
| 1 | 0.558 | 0.472 | 0.062 | 0.076 | 0.496 | 0.396 |
| 2 | 1.046 | 0.740 | 0.162 | 0.064 | 0.884 | 0.676 |
| 3 | 0.436 | 0.876 | 0.014 | 0.112 | 0.422 | 0.764 |
| 4 | 0.302 | 0.458 | 0.022 | 0.046 | 0.280 | 0.412 |
| 5 | 0.536 | 0.542 | 0.022 | ND | 0.514 | 0.542 |
| 6 | 0.202 | 1.034 | 0.026 | 0.046 | 0.176 | 0.988 |
| 7 | 0.316 | 0.748 | 0.004 | 0.072 | 0.312 | 0.676 |
| 8 | 0.376 | 0.536 | 0.092 | 0.096 | 0.284 | 0.440 |
| 9 | 0.270 | 0.512 | 0.008 | 0.034 | 0.262 | 0.478 |
| 10 | 0.206 | 0.232 | 0.046 | 0.010 | 0.160 | 0.222 |
| 11 | 0.520 | 2.134 | 0.064 | 0.254 | 0.456 | 1.880 |
| 12 | 0.748 | 0.748 | ND | 0.034 | 0.748 | 0.714 |
| 13 | 0.392 | 0.380 | 0.048 | 0.030 | 0.344 | 0.350 |
| 14 | - | 0.434 | - | ND | - | 0.434 |
| 15 | 0.264 | 0.300 | 0.060 | 0.036 | 0.204 | 0.264 |
| 16 | 0.456 | 1.558 | 0.052 | 0.598 | 0.404 | 0.960 |
| 17 | 0.534 | 1.678 | ND | 0.142 | 0.534 | 1.536 |
| 18 | 0.186 | 0.270 | 0.066 | 0.006 | 0.120 | 0.264 |
| 19 | 0.242 | 0.296 | 0.034 | 0.054 | 0.208 | 0.242 |
| 20 | 0.238 | 2.050 | 0.072 | 0.472 | 0.166 | 1.578 |
| Mean | 0.412 | 0.800 | 0.045 | 0.109 | 0.367 | 0.691 |

ND : Not Detected, - : No Data.
Cell size : Micro Chl-a ($>20\ \mu\text{m}$), Nano+Pico Chl-a ($<20\ \mu\text{m}$).

볼 때 서쪽 지역은 평균 0.447 $\mu\text{g chl-a l}^{-1}$ 인 반면에 동쪽 지역은 0.223 $\mu\text{g chl-a l}^{-1}$ 의 농도를 보여 총 Chl-a와 비슷

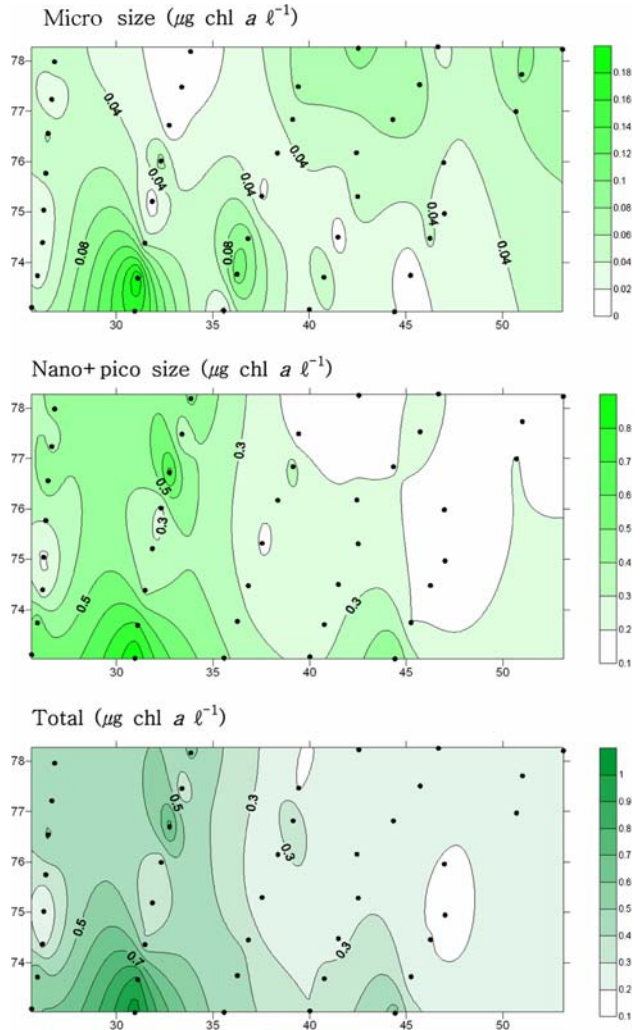


Fig. 6. Contour of surface chlorophyll-a(biomass) concentrations.

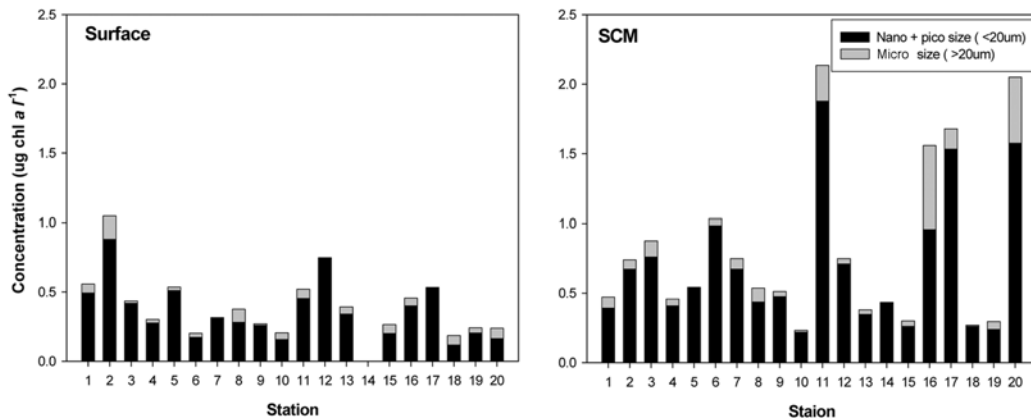


Fig. 5. Distribution of chlorophyll-a concentrations on the study area.

한 양상을 보였다. SCM에서는 정점 10에서 0.222로 최저를, 정점 11에서 1.880 $\mu\text{g chl-}a\text{ l}^{-1}$ 으로 가장 높은 농도를 보였으며 평균 0.691 $\mu\text{g chl-}a\text{ l}^{-1}$ 로서 표층에 약 2배 이상의 값을 나타내어 총 Chl-*a*의 양상과 비슷하게 나타났다.

Size fraction 별 Chl-*a*의 비율

본 해역에서 총 Chl-*a*의 농도를 미세 식물플랑크톤과 미소-극미소 식물플랑크톤이 차지하는 비율로 구분하면 표층과 SCM 모두 미소-극미소 식물플랑크톤의 비율이 월등히 높았다. 정점별 미소-극미소 식물플랑크톤의 비율은 표층에서 최저 65%(정점 18)에서 최고 100%(정점 12, 17)로 평균 87%였다. 미소-극미소 식물플랑크톤은 7개 정점(정점 3, 4, 5, 7, 9, 12, 17)에서 90% 이상을, 7개 정점(정점 1, 2, 6, 11, 13, 16, 19)에서 80~89%를 차지하였다. 미세 식물플랑크톤이 차지하는 비율과 정점은 위의 결과와 상대적인 것이다.

한편 SCM에서는 11개의 정점(정점 2, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 17, 18)에서 90% 이상의 비율을 차지하였고 평균 89%로 표층에 비해 약간 높은 비율을 차지하였다.

식물플랑크톤의 종 조성

출현종

바렌츠해역의 표층에서 출현하는 식물플랑크톤군집의 다양성은 외편모조류 14종류, 규조류 14종류, 규질편모조류 2종류, 은편모조류 2종류, 프림네지오조류 1종류, 프라지노조류 1종류, 미동정 3분류군 등 총 37종이었다(Table 4). 정점별 출현종은 최저 6종류(정점 6)에서 최고 16종류(정점 18)까지 변화폭이 컸으며, 평균 10종류였다. SCM에서도 표층에 비하여 규조류 1종이 많은 총 38종의 식물플랑크톤이 관찰되었다. 대부분의 정점에서 출현하는 종은 은편모조류의 *Cryptomonas* spp., 프림네지오조류의

Table 4. The appearance species in the study area.

| Bacillariophyceae | Dictyochophyceae |
|---------------------------------|--|
| <i>Achnanthes</i> sp. | <i>Dictyocha speculum</i> |
| <i>Actinocyclus</i> spp. | <i>Dictyocha speculum</i> var. <i>speculum</i> |
| <i>Bacteriastrium</i> spp. | |
| <i>Chaetoceros</i> sp. | Cryptophyceae |
| <i>Flagilariopsis cylindrus</i> | <i>Cryptomonas</i> spp. |
| <i>Minidiscuss</i> sp. | <i>Lucocryptos</i> sp. |
| <i>Paralia sulcata</i> | |
| <i>Pseudonitschia</i> sp. | Prymnesiophyceae |
| <i>Rhizosolenia hebetata</i> | <i>Phaeocystis</i> spp. |
| * <i>Skeletonema</i> spp. | |
| <i>Synedropsis hyperborea</i> | Prasinophyceae |
| <i>Thalassiosira</i> spp. | <i>Pyramimonas</i> spp. |
| <i>Navicula</i> spp. | |
| <i>Nitzschia</i> spp. | Unidentified Micro size plankton |
| <i>Rhizosolenia</i> spp. | Unidentified Nano size plankton |
| | Unidentified Pico size plankton |

*: Only SCM.

Phaeocystis spp., 미동정종의 미소 식물플랑크톤과 극미소 식물플랑크톤이 각각 1종류로 이들의 출현빈도로 보았을 때 이 해역의 대표종으로 판단되었다.

우점종

조사해역의 표층에서 식물플랑크톤군집의 우점종은 전체 20개 정점 중 17개 정점에서 극미소 식물플랑크톤이 제 1 우점이었으며 평균 65%로 우점율이 매우 높았다. 정점 11, 12, 13에서는 미소 식물플랑크톤이 우점을 하였다. SCM에서도 동일한 정점에서 극미소 식물플랑크톤이 제 1 우점을 나타냈으며 정점 12, 13에서는 미소 식물플랑크톤이, 정점 11에서는 *Dinobryon belgica*가 제 1 우점

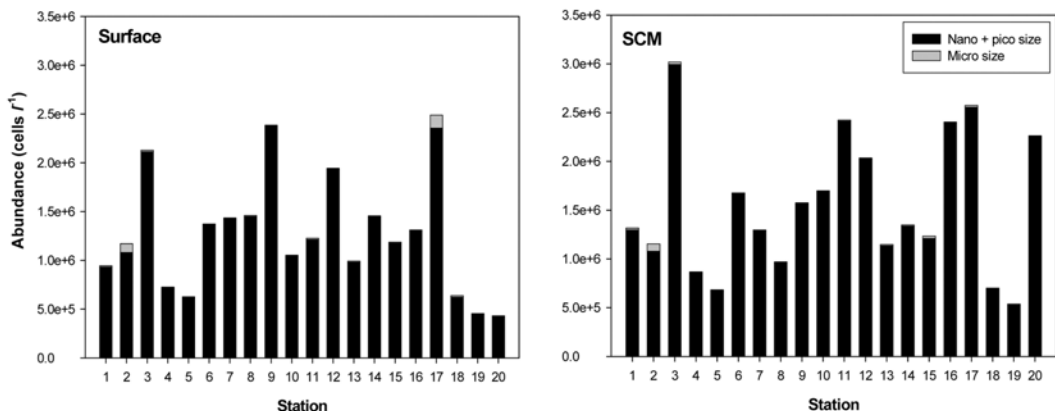


Fig. 7. Variation of phytoplankton cell abundance in the Barents Sea.

을 나타내었다. 제 2 우점종은 모든 층에서 정점별 차이가 있었다.

현존량(cell abundance)의 변화

바렌츠해역의 표층에서 식물플랑크톤 현존량의 변화는 최저 4.3×10^5 cells l^{-1} (정점 20)에서 최고 2.4×10^6 cells l^{-1} (정점 17)까지 평균 1.2×10^6 cells l^{-1} 이었으며, 정점 간 현존량의 차이가 약 7배에 달하여 그 변화폭이 매우 컸다 (Fig. 7). 정점 간 변화는 연안에 인접한 정점에서 높은 현존량을 보이고 있어 특징적이었다. SCM에서의 현존량은 최저 5.4×10^5 cells l^{-1} (정점 19)에서 최고 3.0×10^5 cells l^{-1} (정점 3)까지 평균 1.5×10^6 cells l^{-1} 이었으며, 정점 간 현존량의 차이가 약 6배에 달하여 표층과 같은 양상을 나타내었다. 수직적으로 보았을 때 표층에 비하여 SCM에서 약간 높은 현존량을 나타내었다.

4. 고 찰

물리적 서식 환경

조사해역인 바렌츠 해 수온은 북쪽에서 유입되는 용빙수의 영향을 받는 지역에는 낮은 수온을 나타내다가 러시아 연안 및 북대서양 해류를 받는 지역으로 갈수록 수온이 상승하였다. 조사 결과 수온은 러시아 연안에서 북쪽으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. 바렌츠 해는 보통 10월에 해빙이 형성되어 5월까지 지속된다(Pavlov and Pfirman 1995; Loeng et al. 1997). 6월부터 일사량이 증가하여 해빙이 녹기 시작하기 때문에 조사가 이루어진 8월 중순에는 최남단까지 내려온 해빙의 남방한계선이 북쪽으로 이동하는 시기이다(Pfirman et al. 1995). 용빙수가 다량으로 유입되고 하절기에 늘어나는 담수 유입의 영향으로 보통 고온 저염의 상태를 나타내는 데 채집기간 표층의 평균온도는 4.5°C 로 고온의 상태를 나타내었으나, 평균 염분은 33.4 psu로 낮게 나타나지 않았다. 조사 지역 중 정점 18에서 가장 낮은 온도를 보였는데 유빙의 영향으로 저온, 저염을 나타내었다. 수온과 염분에 의해 결정되는 밀도는 $24.0\sim 27.6 \text{ kg m}^{-3}$ 으로 조금 낮은 값을 나타내었다. 염분의 경우 29.9 psu에서 35.8 psu를 나타내어 동 지역의 지난 연구(Dahle et al. 1998)와 다소 차이를 나타내었다. 염분이 저염의 상태를 나타내지 않는 것은 고염인 북대서양 해류의 유입에 비해 해빙 유입량의 감소와 러시아 연안에서 유입되는 담수의 양의 감소가 그 이유로 사료된다.

무기영양염

인산염의 경우 $0.05\sim 0.12 \mu\text{M}$ 로 낮은 분포를 보이고 있었다. 이는 빈영양화 수역에서 인산염의 흡수량인 $0.14\sim$

$0.18 \mu\text{M}$ (Perry and Eppley 1981)에 근접하였다. 이는 하계 식물플랑크톤의 대량발생의 결과로 생각되어진다. 이는 이 지역의 지난 연구(강 등 2003)와 비교하였을 때 보다 낮은 농도를 나타내고 있었다. 페초라 강 하구역에서 높은 농도의 인산염이 나온 것과는 동쪽의 농도가 서쪽에 비해 비교적 높은 농도가 나온 것은 북대서양 해류의 영향을 받는 서쪽지역에서 동쪽지역에 비하여 식물플랑크톤의 대량발생이 이루어졌음을 짐작할 수 있다. 질산염도 인산염과 같이 북쪽의 유빙지역(정점 18)에서 가장 높은 농도가 조사되었다. 규산염은 북대서양 해류의 영향을 받아 조사 해역의 서쪽지역에서 높게 나타났다. 규조류 성장에 최적 $\text{Si}(\text{OH}_4)\text{-Si}$ 의 양은 $2.00\sim 5.00 \mu\text{M}$ 으로(Bezeinski and Nelson 1996; Brezeinski et al. 1997), 조사 해역과 비교 시 성장제한요인으로는 작용하지 않았을 것으로 사료된다. 식물플랑크톤 중 큰 비중을 차지하는 규조류의 대량증식을 조절하는 중요인자로 작용하는 규산염은(Lewin 1962; Véronique et al. 2000) 조사해역의 서쪽 지역에서 높게 나타났다. 이는 서쪽지역에서 크기가 비교적 큰 규조류의 현존량이 많았던 것과 일치한다.

Chlorophyll-a 농도의 분포양상

북극해 주변해역의 생태적 특징은 년 중 낮은 기온과 그 변화폭이 좁고, 계절적으로는 여름이 겨울보다 불안정한 기후를 나타내는 것으로 알려져 있다. 특히 여름에는 해빙이 확장되어 해빙수와 해수의 물리적 작용 및 담수의 유입으로 복잡한 생태적 특징을 나타내고 있다. 일반적으로 연안에서는 크기가 비교적 큰 미세 식물플랑크톤에 의하여 일차생산이 이루어지고 있는데 반하여 북극해에서는 오히려 미세한 크기의 식물플랑크톤이 활발한 생산 활동을 하고 있었다. 이와 같은 현상은 대양에서도 잘 알려져 있다.

북극해에서 식물플랑크톤 대량증식 기간 동안의 생물량(Chl-a)은 바렌츠 해에서 $10\sim 15 \mu\text{g chl-a } l^{-1}$ 의 농도로 관찰되었다(Rey and Loeng 1985). 반면 대량증식이 끝난 후의 극미소 식물플랑크톤의 Chl-a는 $1.00 \mu\text{g chl-a } l^{-1}$ 이거나 그 이하인 경우도 많이 있다. 조사기간 동안 바렌츠 해에서의 Chl-a의 농도는 표층에서 평균 $0.40 \mu\text{g chl-a } l^{-1}$, SCM에서 평균 $0.80 \mu\text{g chl-a } l^{-1}$ 로 하계 대량발생이 끝났음을 보여주었다. 또한 이 지역의 특징은 두 층 모두 크기가 상대적으로 작은 미소 식물플랑크톤과 극미소 식물플랑크톤에 의해 주도되고 있었다. 전 정점에서 크기가 $20 \mu\text{m}$ 이상의 미세 식물플랑크톤의 Chl-a의 양은 전체 Chl-a의 양의 15% 미만으로 나타났고, $20 \mu\text{m}$ 이하의 편모 식물플랑크톤이 우점 하는 것으로 나타났다. 이는 조사해역의 물리 이화학적 환경이 규조류가 대량증식을 하는데 적합하지 않았던 것으로 생각되어진다.

식물플랑크톤의 현존량의 분포

식물플랑크톤의 현존량은 표층에서 총 37종류, SCM에서 38종류가 출현 하였다. 표층에서 출현종의 종 조성도 외편모조류가 14종류를, 규조류가 14종류 차지하였는데 현존량과 비교하였을 때 규조류 보다는 외편모조류가 상대적으로 많았다. 다양하게 출현한 외편모조류와 규조류는 크기가 큰 분류군으로서 광합성을 위하여 많은 양의 햇빛 에너지가 필요하겠으나, 수심이 깊어질수록 빈약한 광에너지 때문에 크기가 미세한 미소 및 극미소 정도의 식물플랑크톤이 서식할 수 있어 수직적으로 군집의 조성이 바뀔 것으로 판단되었으나 SCM에서도 표층과 거의 같은 양상을 나타내었다.

과거 현미경이나 화학분석 기기가 부족하던 시기에는 크기가 상대적으로 큰 식물플랑크톤에 대한 연구와 표층의 연구에 국한하였지만 최근 필터를 이용한 정량적인 엽록소 분석, 형광 및 전자 현미경 관찰에 의하면 크기가 큰 규조류에 의한 일차생산력은 해빙 주변, 연근해, 극전선 지역과 같이 해수의 수위가 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; Smith *et al.* 1987).

일반적으로 극지방에서 대량발생이 끝난 이후에는 크기가 $20\ \mu\text{m}$ 미만인 편모를 가지고 있는 *Cryptomonas*, *Pyramimonas*, *Phaeocystis* motile stage, Picophytoplankton, naked dinoflagellates 등으로 구성되어 있는데(Kang *et al.* 1993; Kang and Lee 1995; Lee *et al.* 1995) 본 조사 해역의 주요 우점종으로 *Cryptomonas* spp., *Phaeocystis* spp., 미동정종의 미소 식물플랑크톤과 극미소 식물플랑크톤 및 *Dinobryon belgica* 등이 관찰되어 기존의 결과와 일치하

였다(Fig. 8). 바렌츠 해에서 수행된 규조류의 연구는 1900년 초기부터 이루어졌으나(Cleve 1899; Shirshov 1937; Khmyznikova and Zabelina 1946; Usachev 1946, 1968; Il'yash and Koltsova 1981; Bondarchuk *et al.* 1985) 크기가 작은 편모 식물플랑크톤에 대한 연구는 많이 수행되지 못하였다.

Phaeocystis 종은 직경이 $3\sim 9\ \mu\text{m}$ 로서, 세계적으로 넓게 분포하는 해양종이다. 그 중 *Phaeocystis pouchetii*는 북극해에 널리 서식하는 종으로서 군집을 형성하며 극한 환경에서 일차생산자로서 많은 부분을 차지하고 있다. *Phaeocystis*의 생활사는 두개의 편모를 지니고 있는 단계와 세포들이 점액 물질에 둘러싸여 구형의 군체를 이루고 있는 단계로 구분되어있다. 이 종은 남극에서도 주요 우점종으로 나타나고, 많은 연구가 되어왔는데 이는 이 종이 자외선에 잘 적응한 종이기 때문이다(Marchant and Davidson 1991). 식물플랑크톤이 자외선에 대한 방어 기작으로 자외선을 흡수하는 화학물질인 플라보노이드(Flavonoid), 엔소시아닌(Anthocyanin), 마이코스포린 같은 아미노산(Mycosporin-like amino acid, MAAs)과 같은 물질을 생성하여 자외선에 대한 영향을 벗어나면서 진화하고 있는데(강 등 2001) *Phaeocystis*가 대표적인 속이다. 이러한 *Phaeocystis*가 북극에서 우점을 하는 것으로 볼 때 본 조사해역에서도 자외선에 의한 영향이 있었음을 생각할 수 있다.

*Dinobryon belgica*와 *Cryptomonas* spp.는 바렌츠 해 서쪽 지역에서 서식하는 대표적인 종으로서 본 조사에서는 *Dinobryon belgica*는 *Phaeocystis* 종과 함께 군집을 형성하여 미소 식물플랑크톤 일차생산량의 많은 부분을 담당하고 있다. 기존의 연구에서 *Dinobryon belgica*는 바렌츠

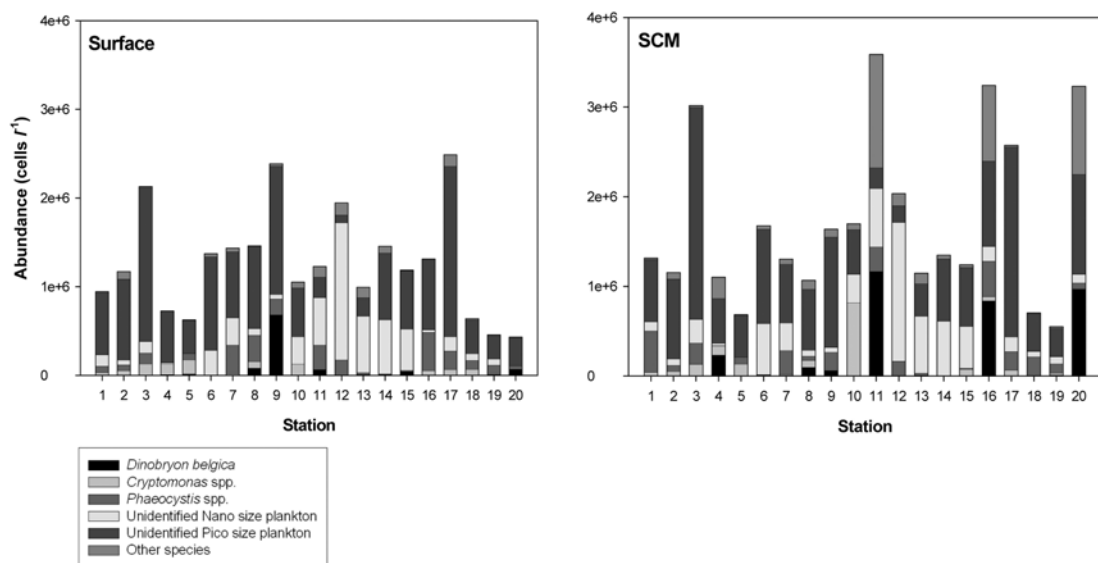


Fig. 8. Distribution of major dominant species phytoplankton on the study area.

해역 중 서쪽에서 관찰되는 것으로 나와 있으나 본 조사 기간 동안에는 전 지역에 걸쳐서 많은 양이 관찰되어진 것이 특징이다.

식물플랑크톤 현존량의 변화는 연안에 위치한 정점에서 높은 값을 보이고 있는데 비하여 외해에서는 낮았다. 식물플랑크톤의 현존량이 연안 쪽에서 높은 것은 대서양에서 유입되는 고염의 북대서양 해류의 영향으로 판단된다. 한편 외편모조류의 종류가 다양하였으나 종별 개체수는 높지 않았다. 본 해역에서는 종별 개체수가 차지하는 비율이 0.05% 미만으로 매우 낮은 수였으며 이것은 고염 및 고온에 의한 영향으로 풀이된다.

5. 결 론

북극 남동 바렌츠 해 물리적 요인은 고온, 고염의 북대서양 해류와 북쪽의 해빙 용빙수에 의하여 영향을 받고 있었다. 이러한 영향으로 고온 저염의 상태를 나타내게 되는데 본 조사에서는 고온 고염의 특성이 나타났다. 이는 북대서양 해류의 유입량이 많아져서 상대적으로 해빙 유입량과 러시아 연안에서 담수의 유입량의 감소에 기인된 것으로 사료된다.

무기영양염에서 인산염과 질산염은 비교적 낮은 농도를 나타내었고 규산염은 높은 농도가 조사되었다. 일반적으로 하계에는 러시아 연안에서 유입되는 담수의 양이 증가하여 높은 농도의 영양염을 추정할 수 있으나 조사 결과를 보았을 때 식물플랑크톤의 대량 발생에 의한 결과로 생각되어진다.

Chl-*a*의 분포양상도 표층과 SCM 모두 전체 Chl-*a*에서 미소-극미소 식물플랑크톤의 Chl-*a*의 농도가 85% 이상이 었다. 일반적으로 식물플랑크톤의 대량 증식은 안정된 수괴가 형성되는 늦봄 때 크기가 20 μm 이상인 규조류나 군체를 형성하는 속들에 의해 이루어진다. 이후 늦여름이 되면 대량발생에 의한 영양염의 고갈과 동물플랑크톤의 섭식 등에 의하여 생물량은 낮아지고 작은 편모식물플랑크톤이 생산력을 주도한다(Else 1997). 높은 비율의 미소-극미소 식물플랑크톤의 농도는 본 조사 시기가 대량증식이 끝난 이후임을 나타낸다고 할 수 있다.

전 정점에서 미소 식물플랑크톤인 *Phaeocystis* 종과 미동정 미소 식물플랑크톤이 개체 내에서 우점을 나타내는 것과 Chl-*a*의 크기별 비율을 보았을 때 지난 연구 결과와 일치하고 있음을 나타내었다.

바렌츠 해의 늦여름 기간 동안 수괴의 분포 양상은 복잡하다. 북대서양 해류의 유입이 뚜렷하지만 혼합층 이하에는 냉수괴가 바렌츠 해 상당히 남쪽까지 자리 잡고 있다. 북상하는 난수괴와 냉수괴의 충돌은 식물플랑크톤 생산력과 생물량을 결정하는 데 중요한 역할을 하는 것으로

생각된다.

결론적으로 식물플랑크톤의 대량증식이 끝난 하계의 바렌츠해역은 여러 환경 요인이 독특한 생태적 환경을 형성하여 식물플랑크톤 군집이 영향을 많이 받는다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이 지역은 *Phaeocystis* sp. 및 *Dinobryon belgica*와 같은 미소-극미소 식물플랑크톤이 우점을 하는 것을 확인하였다.

북극해 해양생태계가 지구환경변화에 미치는 역할을 알아보기 위해 일차 생산자인 식물플랑크톤과 환경요인과의 관계에 관한 조사가 지속적으로 이루어져야 하겠다.

사 사

본 연구는 해양수산부 해양개발 사업인 “북극해 해양조사 연구(PM21700)”와 “극지생물활용연구(PM05090)”의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- 강성호, 강재신, 이상훈, 이윤호. 2001. 남극 오존층 파괴가 식물플랑크톤에 미치는 영향. *Algae*, 16(3), 303-314.
- 강성호, 정경호, 강재신, 김예동. 2003. 제 1차 한-러 북극해 탐사(2000년 8월) 동안의 바렌츠해와 카라해의 식물플랑크톤 현존량 및 영양염 분포. *한국해양학회지*, 25, 202-215.
- Alexander, V. 1980. Interrelationship between the seasonal sea ice and biological regimes. *Cold Regions Sci. Technol.*, 2, 157-178.
- Alexander, V. and H.J. Niebauer. 1981. Oceanography of the eastern Bering Sea ice-edge zone in spring. *Limnol Oceanogr.*, 26, 1111-1125.
- Arashkevich, E., P. Wassmann, A. Pasternak, and C. Wexles Riser. 2002. Seasonal and spatial changes in biomass, structure, development progress of the zooplankton community in the Barents Sea. *J. Mar. Syst.*, 38, 125-145.
- Bondarchuk, L.L., V.V. Zernova, and T.I. Kol'tsova. 1985. Diatoms of some region of the Arctic shelf, ecology of the flora and fauna of the ocean near coastal zone. 74-93. (in Russian)
- Brzezinski, M.A. and D.M. Nelson. 1996. Chronic substrate limitation of silicic acid uptake rates in the western Sargasso Sea. *Deep-Sea Res.*, 43(2), 437-453.
- Brzezinski, M.A., D.R. Phillips, F.P. Chavez, G.E. Friederich, and R.C. Dugdale. 1997. Silica production in the Monterey, California, upwelling system. *Limnol. Oceanogr.*, 42, 1694-1705.
- Brunel, J. 1962. Le phytoplankton de la Baie des Chaleurs.

- Les Presses de L'Universite de Montreal. 365 p.
- Cleve, P.T. 1899. Mikroskopisk undersokning af stoft, funnet pa drifis i Ishafvet. p. 122-130. In: *Ofversogt af Kongliga Vetenskaps -Akademiens Forhandlingar*.
- Cupp, E.E. 1943. Marine plankton diatoms of the west coast of north America. *Bull. Scripps Inst. Oceanogr., Univ. Calif.*, 5, 1-237.
- Dahle, S., S.G. Denisenko, N.V. Denisenko, and S.J. Cochrane. 1998. Benthic fauna in the Pechora Sea. *Sarsia*, 83, 183-210.
- Dodge, J.D. 1982. Marine dinoflagellates of the British Isles. Her Majesty's Office. London. 214 p.
- Else, N.H. 1997. Phytoplankton of the Barents Sea - the end of a growth season. *Polar Biol.*, 17, 235-241.
- Erlenkeuser, 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.
- Falk-Petersen, S., H. Hop, W.P. Budgell, E.N. Hegseth, R. Korsnes, T.B. Loeyning, J.B. Oerbaek, T. Kawamura, and K. Shirasawa. 2001. Physical and ecological processes in the marginal ice zone of the northern Barents Sea during the summer melt period. *J. Mar. Syst.*, 27, 131-159.
- Gradinger, R.R. and M.E.M. Baumann. 1991. Distribution of phytoplankton communities in relation to the large-scale hydrographical regime in the Fram Strait. *Mar. Biol.*, 111, 311-321.
- Hasle, G.R. and E.E. Syvertsen. 1996. Marine diatoms. p. 387-584. In: *Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates*. ed. by C.R. Tomas. Academic Press, San Diego, California.
- Hasle, G.R. and G.A. Fryxell. 1970. Diatoms: cleaning and mounting for light and electron microscopy. *Trans. Am. Microsc. Soc.*, 89, 469-474.
- Hendey, N.J. 1964. An introductory account of the smaller algae of British coastal waters. V. Bacillariophyceae (Diatoms). p. 317.
- 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*. ed. by W.R. Siegfried, P.R. Condy, and R.M. Laws. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg.
- Horner, R. and G.C. Schrader. 1982. Relative contributions of ice algae, phytoplankton, and benthic microalgae to primary production in nearshore region of the Beaufort Sea. *Arctic*, 35, 485-503.
- Il'yash, L.B. and T.I. Kol'tsova. 1981. Phytoplankton of the Yenisei Gulf. *Hydrobiol. J.*, 17(3), 3-8. (in Russian)
- 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. p. 645-666. In: *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 119*. College Station, Texas (Ocean Drilling Program).
- 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 S.H. 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 S.-H., M.S. Suk, C.S. Jung, S.Y. Nam, and C.Y. Kang. 1993. Phytoplankton populations in the western Bransfield Strait and the southern Drake Passage, Antarctica. *Kor. J. Polar Res.*, 4, 29-43.
- Khmyznikoba, V.L. and M.M. Zabelina. 1946. Plankton of the south-western part of the Kara Sea. p. 47-73. In: *Proc. Arctic Scient.-Res. Inst. "Glav. Upr. Sevmorputi". 193*. (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.
- Lee, M.Y., S.H. Kang, S. Lee, K.H. Chung, and J.K. Choi. 1995. Distribution and biomass of phytoplankton and bacterioplankton: relationships to environmental parameters during an Antarctic austral summer in the Bransfield Strait. *Kor. J. Polar Res.*, 6, 31-47.
- Lewin, J.C. 1962. Silicification. p. 445-455. In: *Physiology and Biochemistry of Algae*. ed. by R.A. Lewin. Academic Press.
- Loeng, H., V. Ozhigin, and B. Ádlandsvik., 1997. Water fluxes through the Barents Sea. *J. Mar. Sci.*, 54, 310-317.
- McRoy, C.P. and J.J. Goering. 1974. The influence of ice on the primary productivity of the Bering Sea. p. 403-421. In: *Oceanography of the Bering Sea*. ed. by D.W. Hood and E.J. Kelly. Univ. Alaska, Occasional Pub. 2.
- Marchant, H.J. and A.T. Davidson. 1991. Possible impacts of ozone depletion on trophic interactions and biogenic vertical carbon flux in the Southern Ocean. p. 397-400. In: *Proceedings of the International Conference on the Role of Polar Regions in Global Change*. ed. by G. Wdla, C.L. Wilson, and B.A. Severin. Geophysical Institute Fairbanks, Alaska.
- Mattiseen, J. 1999. OV Stepanets and the shipboard scientific party. The expedition to the Kara Sea in

- summer 1997: Summary of the shipboard scientific result. *Berichte zur Polarforschung*, 300, 5-16.
- Nelson, D.M., W.O. Smith, Jr., L.I. Gordon, and L.I. Hurber. 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.
- Parsons, T.R., Y. Maita, and G.M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. 173 p.
- Paul, W., R. Tatjana, A. Inger, V. Maria, P. Gunar, and R. Francisco. 1999. Spring bloom development in the marginal ice zone and the central Barents Sea. *Mar. Ecol.*, 20(3-4), 321-346.
- Pavlov, V.K. and S.L. Pfirman. 1995. Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution. *Deep-Sea Res.*, 42, 1369-1390.
- Perry, M.J. and R.W. Eppley. 1981. Phosphate uptake by phytoplankton in the central North Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.*, 28A, 39-49.
- Pfirman, S.L., J. Kögeler, and B. Anselme. 1995. Costal environments of the western Kara and eastern Barents Seas. *Deep-Sea Res.*, 42, 1369-1390.
- Rat'kova, T. and P. Wassmann. 2002. Seasonal variation and spatial distribution of phyto- and protozooplankton in the central Barents Sea. *J. Mar. Syst.*, 38, 47-75.
- Reimann, B.E.F., E.L. Duke, and G.L. Floyd. 1980. Fixation, embedding, sectioning and staining of algae for electron microscopy. p. 285-303, In: *Handbook of Phycological Methods*. ed. by G. Elisabeth. Cambridge Univ. Press, London.
- Rey, F. and H. Loeng, 1985, The influence of ice and hydrographic conditions on the development of phytoplankton in the Barents Sea. p. 49-54. In: *Marine Biology of Polar Region and Effects of Stress on Marine Organisms*. ed. by J.S. Gray and M.E. Christiansen. Wiley, Chichester.
- Round, F.E., R.M. Crawford, and D.G. Mann. 1990. The Diatoms, Biology and Morphology of the Genera. Cambridge Univ. Press.
- Sakshaug, E. and O. Holm-Hansen. 1984. Factors governing pelagic production in polar oceans. p. 1-18. In: *Marine Phytoplankton and Productivity*. ed. by O. Holm Hansen, L. Bolis, and R. Gilles. Springer-Verlag, Berlin.
- Shirshov, T.P. 1937. Sezonnii javlenia v zhizni fitoplanktona poljarnikh morey v svjazi s ledovim regimom. Trudi Arktich. In-ta, t. 82, (Seasonal patterns in the life of phytoplankton of polar seas in relation to regime of ice) Works of Arctic Institute, p. 82.
- Simonsen, R. 1974. The diatom plankton of the Indian Ocean expedition, R/V "Meteor", 1964-1965. *Meteor Forsch.-Ergebnisse*, 19, 1-107.
- Smith, W.O., Jr. 1987. Phytoplankton dynamics in marginal ice zones. *Ann. Rev. Oceanogr. Mar. Biol.*, 25, 11-38.
- UNESCO/SCOR. 1966. Determination of photosynthetic pigments. p. 10-18. In: *Determination of Photosynthetic Pigments in Seawater*. UNESCO. Paris.
- 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 Sadkoduring 1936 and 1937 years). p. 113-150. In: *Proc. Inst. Oceanol. Acad. Sci. USSR*. 1. (in Russian)
- Verity, P., P. Wassmann, E. Frischer, M.H. Howard-Jones, and A.E. Allen. 2002. Grazing of phytoplankton by microzooplankton in the Barents Sea during early summer. *J. Mar. Syst.*, 38, 109-123.
- Vronique, M.J., M. Hildebrand, and M.A. Brzezinski. 2000. Silicon metabolism in diatoms: Implications for growth. *J. Phycol.*, 36, 821-840.

Received May 25, 2005

Accepted Jul. 6, 2005