

## Article

## 북극 스발바드섬 Kongsfjorden의 해양 환경 및 식물플랑크톤 모니터링 연구

강성호\*<sup>1</sup> · 김예동<sup>1</sup> · 강재신<sup>1</sup> · 유규철<sup>1</sup> · 윤호일<sup>1</sup> · 이원철<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국해양연구원 극지연구본부  
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

<sup>2</sup>한양대학교 자연과학대학 생명과학과  
(133-791) 서울특별시 성동구 행당동 17

### Monitoring on the Marine Environment and Phytoplankton of Kongsfjorden, Svalbard, Arctic

Sung-Ho Kang\*<sup>1</sup>, Yeadong Kim<sup>1</sup>, Jae-Shin Kang<sup>1</sup>, Kyu-Cheul Yoo<sup>1</sup>,  
Ho Il Yoon<sup>1</sup>, and Wonchoel Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Polar Sciences Laboratory, KORDI*

*Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

<sup>2</sup>*Department of Life Science, Hanyang University*

*17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea*

**Abstract :** Kongsfjorden near Korean Arctic Station, Dasan, is a glacial fjord in the Svalbard archipelago, Arctic that is influenced by both Atlantic and Arctic water masses. During the Arctic field season, August 2002, surface temperature, salinity, density, and phytoplankton biomass (chl *a*) was measured in Kongsfjorden. A total of 15 surface samples were collected for the phytoplankton related measurements. Chl *a* values ranged from 0.08 to 1.4 mg chl *a* m<sup>-3</sup> (mean of 0.53 mg chl *a* m<sup>-3</sup>) in the overall surface stations. The highest values of the chl *a* concentrations (> 1.0 mg chl *a* m<sup>-3</sup>) were found near glacier in the northeastern part of Kongsfjorden. Nanoplanktonic (< 20 μm) phytoflagellates were important contributors for the increase of the chl *a*. The nano-sized phytoflagellates accounted for more than 90% of the total chl *a* biomass in the study area. Surface temperatures and salinities ranged from 2.5 to 7.18°C (mean of 4.65°C) and from 22.55 to 32.97 psu (mean of 30.16 psu), respectively. The physical factors were not highly correlated with phytoplankton distribution. The character of surface water due to down-fjord wind was highly similar to phytoplankton distribution. Drifting ice, freshwater, and sediment inputs from large tidal glaciers located in the inner part of Kongsfjorden create steep physico- and biogeochemical environmental gradients along the length of this fjord. The glacial inputs cause reduced biodiversity, biomass, and productivity in the pelagic community in the inner fjord. Primary production of benthic and pelagic microalgae is reduced due to the limited light levels in the turbid and mixed inner waters. The magnitude of glacial effects diminishes towards the outer fjord. Kongsfjorden is an important feeding ground for marine mammals and seabirds. Especially, seabirds play the largest energy intake and also export nutrients for primary production of the marine microalgae. Kongsfjorden has received a lot of research attention as a site for exploring the impacts of climate changes. Dasan Station in Kongsfjorden will be an important Arctic site for monitoring and detecting future environmental changes.

**Key words :** 북극(Arctic), 스발바드 섬(Svalbard), Kongsfjorden, 해양 환경(marine environment), 식물플랑크톤(phytoplankton), 모니터링(monitring).

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

## 1. 서 론

Kongsfjorden은 스발바드 군도(Svalbard Islands)의 스피츠베르겐 섬(Spitsbergen Island)의 서쪽 해안 북위 79도에 위치한 북극 빙하 피오르드 지역으로 고온의 대서양 걸프 해류의 영향으로 인해 아북극 환경(subarctic environment)의 특성을 보인다(Fig. 1). Kongsfjorden 입구에는 해류의 흐름을 방해하는 해저 실(submarine sill)이 존재하지 않아 만 외해수의 유입이 원활하며, 주로 빙하성 유출수의 유입이 큰 피오르드 해수와 만 외해수(서 스발바드 연안수와 서대륙붕 연안수) 사이의 물리적인 변화는 생물학적 변화를 동반한다(Svendsen *et al.* 2002). 특히 서 스발바드 연안수는 고온·고염성 북대서양 해류의 북쪽 끝에 걸쳐있는 해류와 서 스피츠베르겐 해류(West Spitsbergen Current)가 결합되어 형성되는 것으로 알려져 있다(Loeng 1991; Svendsen *et al.* 2002). 서 스피츠베르겐 해류는 기후 변화와 관계있는 북대서양 진동지수(North Atlantic Oscillation index)에 상응하여 달라지기 때문에(Hurrell 1995; Vinje 2001) 기후 변화에 의해 형성되는 만

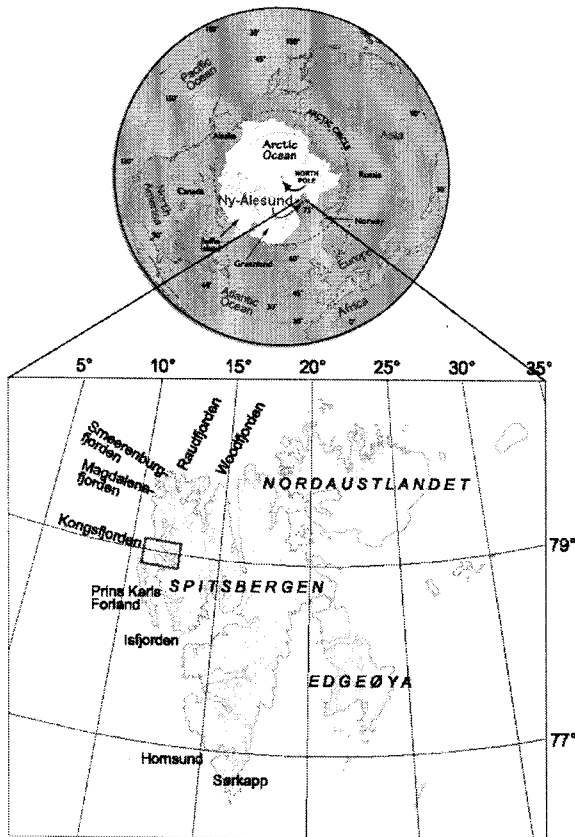


Fig. 1. Location of Kongsfjorden in the Svalbard Archipelago, the Arctic(from Hop *et al.* 2002).

의 “cold year”와 “warm year”는 스발바드 연안에서 기후 변화의 지시자인 해양생태계 변화를 동반한다(Weslawski and Adamski 1987).

Kongsfjorden은 대서양과 북극해 생물상이 모두 관찰되는 지역이다. 대서양에서 올라온 해류와 만 안쪽의 빙하로부터 유입되는 유입수가 만나서 변화하는 물리화학적 환경변화에 따라 생물상이 달라진다. 만약에 대서양 해류의 영향이 증가하면 만 안쪽의 생물상이 북방종(boreal species)으로 변화하게 되는 반면, 빙하쪽에서 유입되는 유입수가 증가하면 만 안쪽의 생물상은 북극종으로 변화하게 된다(Hop *et al.* 2002). 빙하에서 유입되는 담수와 퇴적물이 증가하면 만 내부의 환경이 급격하게 변화하게 된다. 빙하로부터 유입되는 유빙 및 유입의 영향이 만 내부에서 외부로 나감에 따라 점점 줄어들어 종조성, 생물량, 생산력 등의 변화가 일어나게 된다. 따라서 만 안쪽 해양생태계의 구조적, 기능적 특성은 만 내부에 유입되는 대서양 해류와 빙하 유입수의 증감 여부에 따라 변하게 되는 것이다(Holte *et al.* 1996; Holte and Gulliksen 1998). Kongsfjorden의 표층수는 조석, 해류, 바람, 강수, 빙하와 연안에서 녹은 물의 유입, 해빙 및 빙하의 유빙 등의 복합적인 요인에 의해 달라지며, 이러한 요인은 일 또는 계절에 따라서도 상이하게 작용해 표층수의 특성은 일일 또는 계절 변화를 보여준다. Kongsfjorden의 조석은 반일주조를 보인다.

Kongsfjorden 내부의 일차생산력은 일차적으로 물리적 요인인 빛 조건과 수괴의 안정화 정도에 따라 변하게 된다. 일차생산력을 결정하는 가장 중요한 요인인 유광대의 깊이는 대서양 해류가 유입되고, 빙하 유입수의 영향이 적은 만 외부에서는 약 30 m까지 나타나지만, 만 내부의 빙하 주변 해역은 유빙과 빙하에서 유입되는 퇴적물의 영향으로 유광대가 0.3 m 밖에 안 되는 아주 혼탁한 해양 환경이 형성된다. 빙하 유입 퇴적물뿐만 아니라 해빙(sea ice)의 형성도 빛의 침투를 차단하는 다른 중요한 물리적 요인이 된다. Kongsfjorden의 해빙은 만 안쪽의 빙하 주변에서는 일년에 5-7개월 동안 덮혀 있지만, 만 바깥은 해빙이 형성되지 않는다(Svendsen *et al.* 2002). 해빙이 덮혀 있는 만 안쪽은 빛의 침투가 차단되어 일차생산력이 감소하게 되지만, 만 바깥은 북극해의 다른 해역에 비해 비교적 높은 일차생산력을 보인다(Sakshaug *et al.* 1994; Hegseth 1998).

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(Hop *et al.* 2002). 사망률(제거율)은 동

물플랑크톤의 섭식, 침전 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 식물플랑크톤들은 이 지역의 전체 해양생태계를 유지하기 위해 없어서는 안될 중요한 일차생산자인 것이다. 이번 연구의 목적은 1) 지난 2002년 4월에 개소한 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden에서 수행되었던 해양 환경 및 식물플랑크톤 연구 결과를 분석하고, 2) 현재 진행되고 있는 물리적 환경변화와 식물플랑크톤의 모니터링을 위한 기초 조사로 하계 중 8월의 식물플랑크톤의 현존량과 분포에 미치는 환경요인인 표층의 물리 요인에 대한 조사를 병행함으로써 이들의 구조적 변화 양상을 이해하려는 것이다.

## 2. 재료 및 방법

노르웨이 극지연구소 소속 연구보트에 승선하여 2002년 8월 Kongsfjorden 만에 분포하는 식물플랑크톤 생물량

(chl *a*), 식물플랑크톤 크기에 따른 생물량(20  $\mu\text{m}$  이하, pico- and nanophytoplankton), 수온, 염분 등의 환경요인에 대한 측정을 위해 총 15개의 연구정점에서 시료를 채집하였다(Fig. 2). 식물플랑크톤 시료는 모든 정점의 표층수에서 채집되었고, 물리적 환경특성과의 관계에 따른 식물플랑크톤 생물량 및 분포양상 조사를 위해 정량화가 이루어졌다. 물리적 요인인 표층수온, 염분은 표층수 채집기를 이용해 채집된 해수를 YSI CTD를 이용하여 측정하였다. 식물플랑크톤 현존량은 chl *a* 값이 이용되었다. 식물플랑크톤의 정성조사를 위해 식물플랑크톤 채집망(20  $\mu\text{m}$  mesh size)을 이용해 대부분의 식물플랑크톤이 분포하고 있는 표층에서 망을 끌어 시료를 채집하였으며, chl *a*, 식물플랑크톤 채집을 위해 표층채수기를 이용해서 시료를 채집하였다.

식물플랑크톤 우점종 및 탄소량의 측정을 위해, 현장에서 측정된 chl *a* 양에 따라 20 m에서 100 m까지 0.45  $\mu\text{m}$ 의 Gelman membrane filter에 여과시켜 추후 실험실에서 현미경을 이용한 정량조사를 위해 슬라이드를 현장에서 만들었다. 영양염 시료는 채집 후 곧바로 급냉실에 보

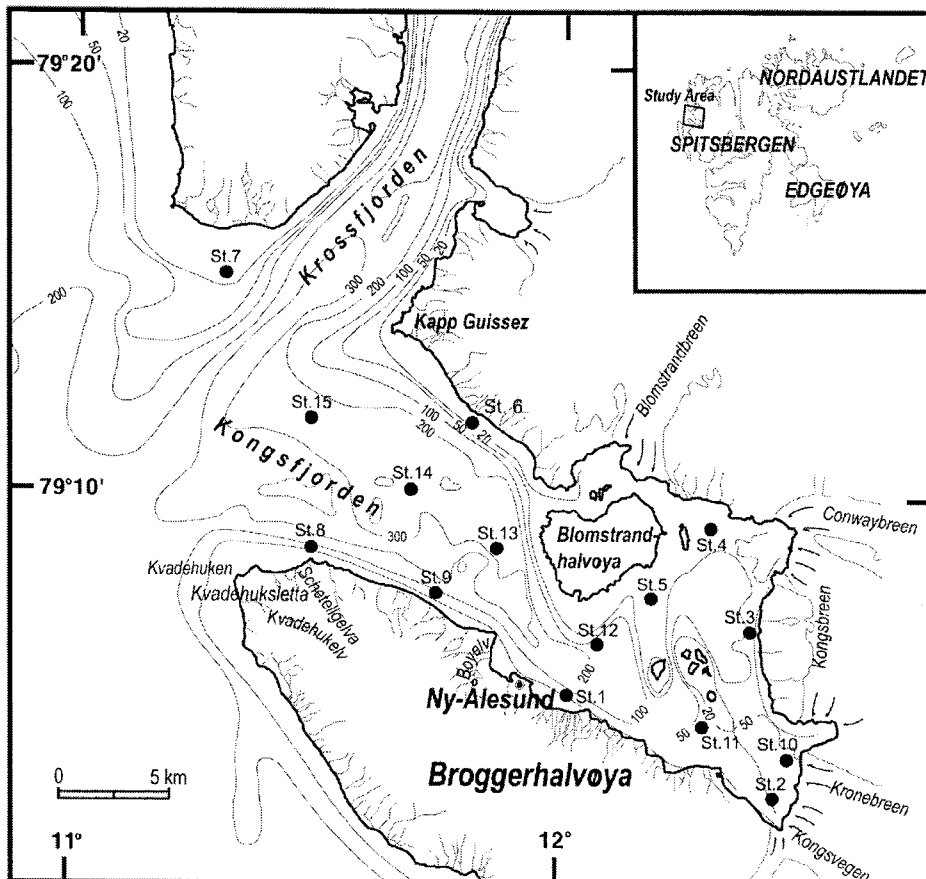


Fig. 2. Sampling stations in Kongsfjorden during August, 2002.

관되었으며, 추후 실험실에서 영양염 자동 분석기를 이용하여 분석하였다. 전 연구 정점의 표층수에서 Field Fluorometer Turner Design를 사용해서 chl *a* 농도를 측정하였다. In vivo값을 이용해 크기별(20  $\mu\text{m}$  이하; pico- and nanophytoplankton과 20  $\mu\text{m}$  이상; microphytoplankton) 식물플랑크톤 비율을 측정하였다. Chl *a* 농도를 구하기 위해 해수 1-1.5리터를 Whatman GF/F 필터로 필터하여 90% 아세톤에 하루 정도 추출된 후 절대값을 측정하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### Kongsfjorden 내 식물플랑크톤의 물리적 환경

연구 지역의 표층 수온과 염분은 각각 2.50-7.18°C의 범위(평균  $4.65 \pm 1.43^\circ\text{C}$ )와 22.55-32.97 psu의 범위(평균  $30.16 \pm 2.7$  psu)를 보였으며, 수온과 염분으로 결정되는 밀도의 범위는  $17.99-25.96 \text{ kg m}^{-3}$ (평균  $23.86 \pm 2.1 \text{ kg m}^{-3}$ )이었다(Figs. 3-5). 표층 수온의 분포는 Blomstrandhalvøya 섬을 기점으로 섬 안쪽은  $4.50^\circ\text{C}$  이하의 수온을, 섬 바깥은  $4.50^\circ\text{C}$  이상의 수온을 보여주며, Kongsfjorden의 남쪽

연안이 북쪽 연안보다 상대적으로 높은 수온을 보여준다(Fig. 3). 그리고 이 섬 바깥에서 남쪽 연안에서 가장 높은 수온( $>7.00^\circ\text{C}$ )이 나타났다. 표층 염분의 분포에서도 남쪽 연안이 북쪽 연안보다 상대적으로 높은 염분을 보여준다(Fig. 4). 특히 만 안쪽 Kronebreen 빙하 앞의 만에서 가장 낮은 수온과 염분을 보여준다(Figs. 3 and 4). 표층 밀도 분포에서 이러한 표층 수온과 염분 분포의 특성이 잘 반영되어 만 남쪽 연안이 북쪽 연안보다 높은 밀도를 보인다(Fig. 5). 그리고 밀도 분포는 염분 분포의 경향과 잘 일치해 극 환경에서 염분 분포가 밀도의 경향을 대변한다는 사실을 말해준다.

#### 스발바드 군도 주변의 해양학적 특성

스발바드 군도의 서쪽에 위치한 스피츠베르겐 섬의 서쪽에 위치한 Kongsfjorden의 해양학적 특성은 스발바드 군도 주변을 흐르고 있는 해류와 밀접한 관계가 있다(Fig. 6). 수심 600 m까지 형성된 고온과 고염의 노르웨이 대서양 해류(Norwegian Atlantic Current)의 북쪽 해류인 서스피츠베르겐 해류(West Spitsbergen Current, WSC)가 스

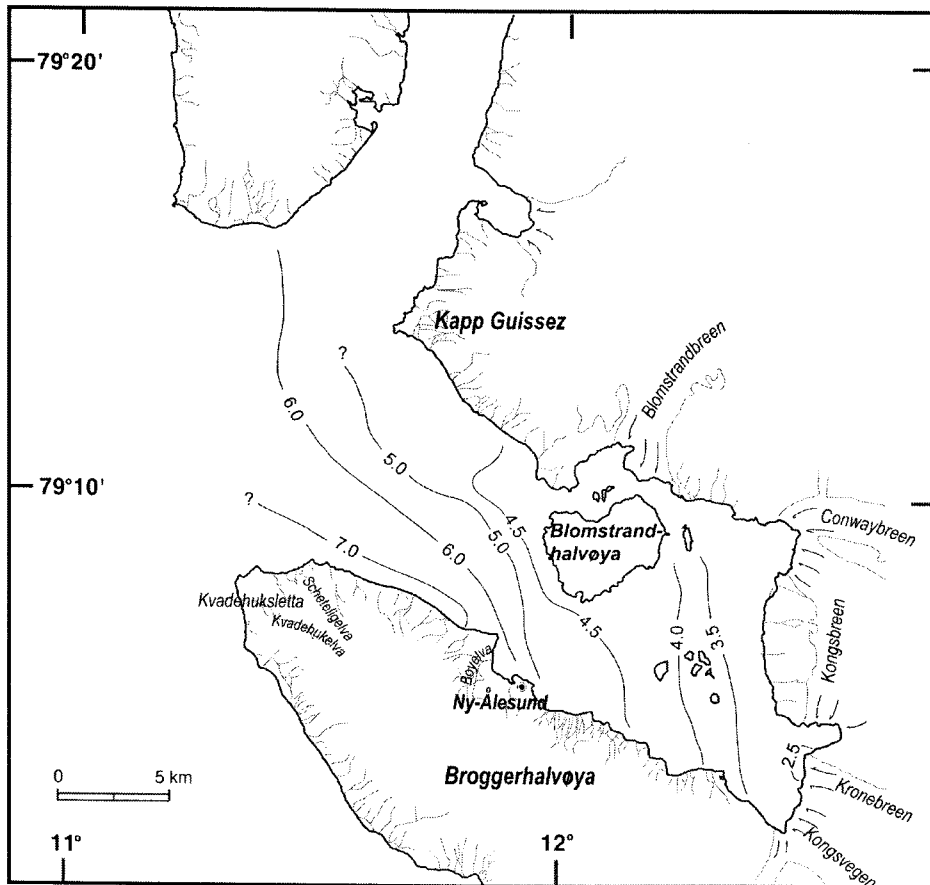


Fig. 3. Spatial distribution of surface water temperature ( $^\circ\text{C}$ ) during August, 2002 in Kongsfjorden.

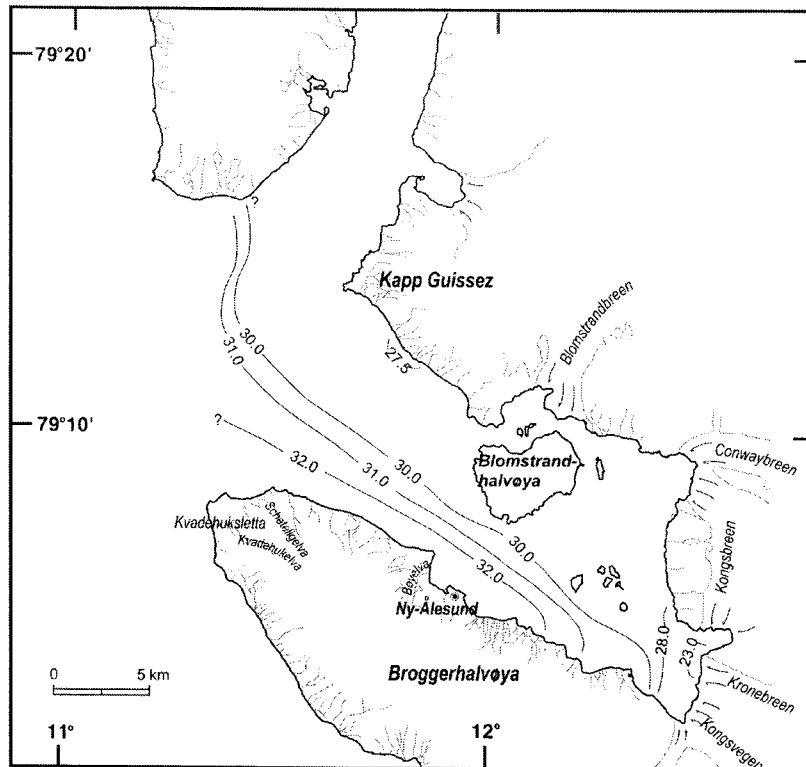


Fig. 4. Spatial distribution of surface water salinity(psu) during August, 2002 in Kongsfjorden.

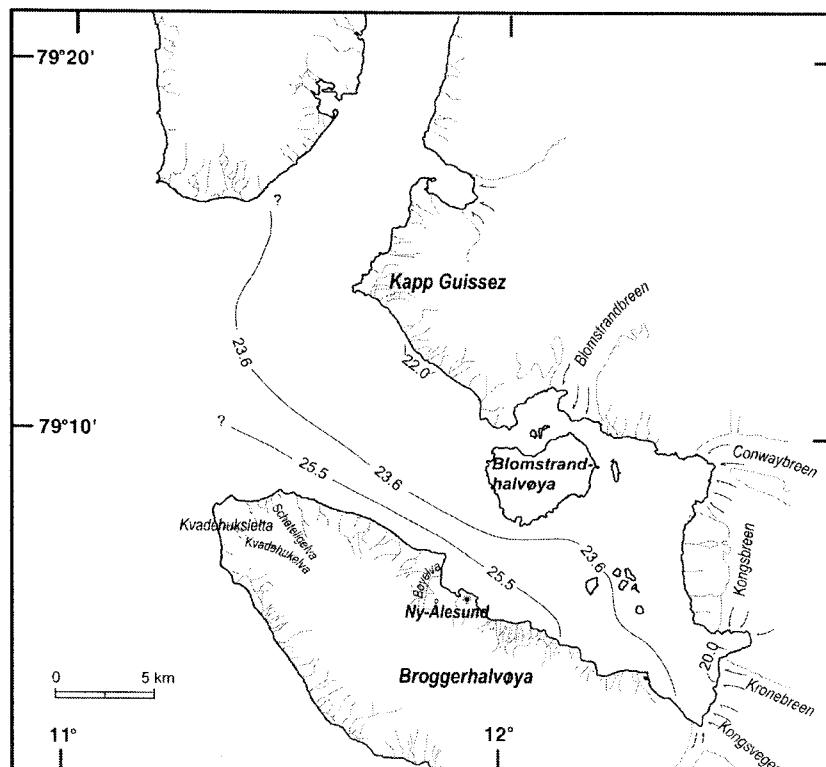


Fig. 5. Spatial distribution of surface water density( $\text{kg m}^{-3}$ ) during August, 2002 in Kongsfjorden.

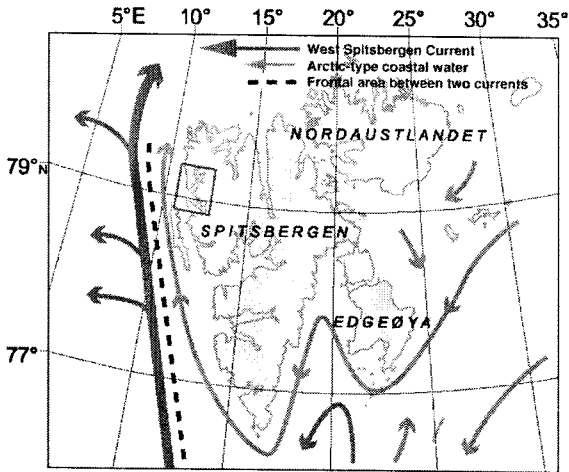


Fig. 6. Map of Svalbard showing the major currents. Off the coast of western Spitsbergen is the West Spitsbergen Current(thick red) and the Arctic-type coastal water(blue). The dashed line indicates the frontal area between the two currents(from Svendsen et al. 2002).

발바드 군도가 위치한 북극해 쪽으로 유입되며, 특히 스피츠베르겐 섬의 서쪽을 따라 이 고온, 고염의 해류가 북극해 쪽으로 유입되게 된다(Svendensen et al. 2002). 따라서 북위 75도 이상의 고위도에 위치한 서쪽 해역은 겨울 동안에도 해빙이 형성되지 않는 특이한 해양학적 환경이 형성된다(Aagaard et al. 1987; Gascard et al. 1995). 최근 지구온난화로 인한 북서 유럽의 대기 순환의 변화가 야기되어 대서양 수온이 상승하고 있다. 이로 인해 고온의 대서양 해류가 북극해 쪽으로 유입됨으로서 북극해 해빙이 점점 줄어들고 있다(Vinje 2001). 스발바드 군도의 북동쪽의 연근해를 따라 남쪽으로 저온, 저염의 북극해 해류가 유입되어 고온, 고염의 대서양 해류와 만나면서 전선이 형성된다.

**스발바드 군도 주변 기후 및 기상**

스발바드 군도의 기후는 대기순환, 광조건, 북극해 해빙 분포, 해류의 변동 등에 영향을 받는다. 고온 다습한 북 대서양 해의 해류는 그린란드와 북극해 위에 형성되는 아이스랜드의 대규모 저기압 및 고기압 순환에 의해 노르웨이 해와 바렌츠 해로 이동하여 북극해 쪽으로 유입된다(Svendensen et al. 2002). 대기 순환의 영향이 북극해 기온 또는 대서양 기온에 따라 변하며, 이러한 기상 상태에 따라 스발바드 군도의 기상, 특히 겨울철 기상 상태의 변화가 심하게 일어난다(Fig. 7)(Hansen-Bauer et al. 1990; Førland et al. 1997). 남쪽에서 유입되는 고온의 대서양 해류의 끝자락인 서 스피츠베르겐 해류로 인해 스발바드

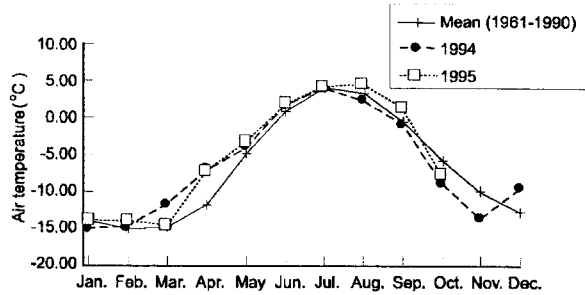


Fig. 7. Monthly mean values of air temperature in Ny-Ålesund(from Svendsen et al. 2002).

군도의 서쪽 해안 전체와 북쪽 해안의 일부가 겨울 동안에도 해빙이 형성되지 않는다(Vinje 1982).

스발바드 군도의 다른 지역과 마찬가지로 Kongsfjorden의 연안 지역은 북극해의 찬공기와 대서양의 온화한 공기가 만날 때 형성되는 안개가 여름 기간에 주로 만들어진다(Svendensen et al. 2002). Ny-Ålesund 지역에서는 청명한 날이 겨울(11-2월) 동안에는 한달에 5-8일 정도, 여름(6-9월) 동안에는 하루도 채 되지 않으며, 봄과 가을에는 중간 정도의 상태를 보인다(Førland et al. 1997). Ny-Ålesund 지역은 Kongsfjorden이 어는 겨울 동안에는 북극의 대륙성 기후를 보이는 반면에 고온의 대서양 해류에 영향을 받는 여름 동안에는 연안 해양성 기후를 보인다(Svendensen et al. 2002).

**바람**

Kongsfjorden에 형성되는 바람의 대부분은 육지쪽 빙하 위에서 형성된 고밀도의 찬 공기로서 고온·다습의 만 내 해역으로 불어오는 하강풍(katabatic wind or down-fjord wind)이다(Hansen-Bauer et al. 1990; Førland et al. 1997). Ny-Ålesund 지역에 주로 나타나는 바람 방향은 여름 동안에는 만 안쪽에서 외양쪽으로 부는 고온의 남동풍이며, 겨울에는 반대로 저온의 북서풍이 만 안쪽으로 불어온다. 바람 방향을 결정하는 주요 요인은 스발바드 군도 위에 형성되어 있는 대류의 순환(저기압과 고기압의 변화)에 따라 결정된다(Fig. 8). 여름에 만 안쪽에 유입된 담수는 표층수와 섞이면서 만 바깥쪽으로 수송되는 기수 흐름(brackish flow)이 나타난다. 그리고 하강풍이 주로 부는 여름에 기수의 하강 이류(advection)는 전 조석주기 동안 유지되며, 단지 조석은 그 흐름의 세기를 변화시킨다(Svendensen et al. 2002). 담수와 바람의 상호 영향에 대한 모델 결과에 의하면, 하강풍이 지속되면 기수 흐름이 만의 북쪽면에 치우쳐 흘러 나가는 것으로 알려져 있다. Fig. 4의 표층 염분 분포에 나타난 결과는 Svendsen et al.(2002)의 표층 염분 분포와 유사하며, 이는 2002년 8월 결과에도 하강풍에

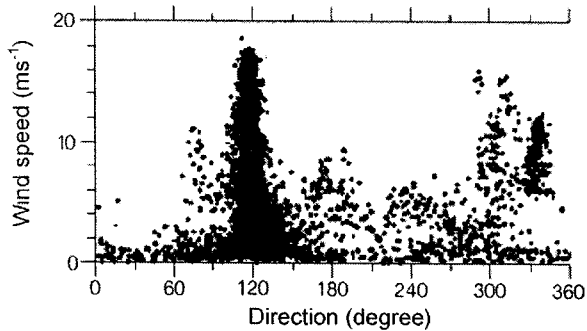


Fig. 8. Scatter plot of the wind speed versus wind direction (Svendsen *et al.* 2002).

의한 표층 해류가 흘렀음을 말해준다. 그리고 표층에 나타나는 생물량의 변화도 이러한 표층 해류의 흐름에 따라 분포하고 있어 (Figs. 10-14) 바람에 의한 표층 해류의 흐름이 만 내 생물량을 조절할 수 있음을 보여준다.

#### 광조건 변화

Ny-Ålesund의 여름과 가을 동안의 광조건은 북쪽의 찬공기와 남쪽의 따뜻한 공기가 만나서 생기는 안개와 구름에 의해 조절되는 해양성 기후의 영향을 받는다 (Ørbæk *et al.* 1999). 반대로 겨울과 봄 동안에는 만 내부에 형성된 해빙과 유빙의 영향으로 북극 대륙에 형성되는 광조건과 비슷한 양상을 보인다. Kongsfjorden의 겨울 동안에는 빛이 전혀 없는 상태가 10월 25일 경부터 시작해서 2월 17일까지 지속되며, 2월 말부터 서서히 광량이 증가하기 시작하며 4월 18일 경부터 8월 23일까지 백야의 상태가 지속된다 (Fig. 9). 여름 동안의 광조건은 구름, 안개, 대기 중 수증기 농도 등에 따라 변하게 되며, 자외선의 경우는 성층권 오존층의 변화에 따라 변하게 된다 (Svendsen *et al.* 2002). 일년 평균 가시광선(340-695 nm)의 주사량은  $1043 \text{ MJ m}^{-2}$  정도였다. Hanelt *et al.* (2001)이 1998년 3월 1일부터 10월 31일까지 측정 한 하루 평균 가시광선 일사량은  $54.3 \text{ W m}^{-2}$ 였으며, 최대 일사량은 6월과 7월에 관측되었다. 한 여름 동안 청명한 날 관찰한 PAR(Photosynthetically Active Radiation, 400-700 nm)의 광량은  $1300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 까지 증가했다 (Bischof *et al.* 1998). 이 기간 동안 측정 한 하루 평균 최대 가시광선(370-695 nm)이  $170 \text{ W m}^{-2}$ 까지 관찰되었으며, 자외선(300-370 nm)의 일사량도  $16.8 \text{ W m}^{-2}$ 까지 측정되었다 (Hanelt *et al.* 2001). 장 자외선 파장인 자외선 A(UV-A, 320-400 nm)의 하루 조사량은  $1600 \text{ KJ m}^{-2}$ 까지 나타나며, 최대  $19 \text{ W m}^{-2}$ 까지 올라간다 (Bischof *et al.* 1999; Groß *et al.* 2001). 자외선 중에서 특히 생물에 유해한 자외선 B 파장(UV-B, 280-320)의 경우 Ny-Ålesund 지역에서 1998년 6월 24일 관찰

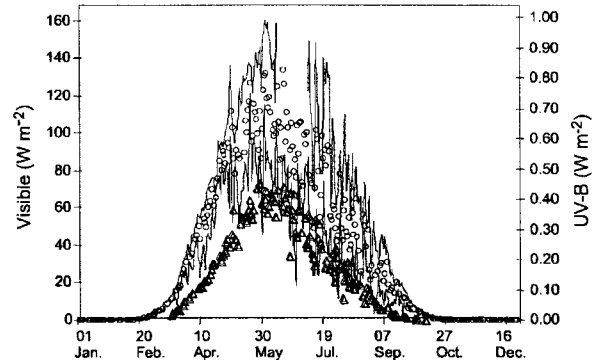


Fig. 9. Daily averaged solar irradiance in Ny-Ålesund: circles represent mean values of visible radiation(370-695 nm); lines show minimal and maximal values of visible radiation; triangles are mean values of UV-B radiation(280-320 nm) (from Svendsen *et al.* 2002).

된 값으로 하루 평균 일조량이  $0.61 \text{ W m}^{-2}$ 와 맞먹는 수치인 최대  $52.6 \text{ KJ m}^{-2}$ 까지 노출된 적이 있다 (Bischof *et al.* 1999). 성층권 오존층의 오존 농도가 10 DU(Dobson units) 감소되면 300 nm의 자외선이 12% 증가하는 결과를 초래한다 (Groß *et al.* 2001). 오존층 파괴에 의한 자외선 증가로 야기될 수 있는 해양생태계에 미치는 영향에 대한 조사가 Kongsfjorden 지역에서 집중적으로 이루어지고 있다 (Hop *et al.* 2002).

#### 식물플랑크톤 분포

전 연구 정점의 표층수에서 측정된 식물플랑크톤의 현존량(chl *a* 농도)은  $0.08-1.4 \text{ mg chl a m}^{-3}$  범위(평균  $0.53 \pm 0.39 \text{ mg chl a m}^{-3}$ )를 보였다 (Fig. 10). 이중  $20 \mu\text{m}$  이하의 nanophytoplankton의 chl *a* 농도(평균  $0.48 \pm 0.38 \text{ mg chl a m}^{-3}$ )가 전체 현존량의 90.6%를 차지하였다 (Figs. 11, 12). 연구 해역에 우점하였던 식물플랑크톤은 크기가 작은 편모식물플랑크톤일 것으로 생각되어 진다. 추후 현미경 관찰에 의한 정량분석이 이루어 질 예정이다. 일반적으로 극지방의 해빙 주변에 형성되는 규조류와 같은  $20 \mu\text{m}$  이상인 microplankton의 chl *a* 농도(평균  $0.05 \pm 0.05 \text{ mg chl a m}^{-3}$ )는 전체 현존량의 9.4%에 불과하였다 (Figs. 13, 14). 이 결과는 연구 해역이 규조류의 대량 증식을 야기하는 물리적, 화학적, 생물학적 요인이 형성되지 않았기 때문으로 생각된다. 일차적인 요인인 해빙에 의한 수괴의 안정이 이미 5월에 녹기 시작한 해빙의 분포의 영향권에 벗어나 있었기 때문으로 생각된다.

Kongsfjorden의 식물플랑크톤 연구는 주로 하계 동안에 이루어졌으며, 종조성, 생물량, 약간의 생산력 측정 등을 중심으로 수행되어 왔다. 지금까지 148종의 식물플랑크톤

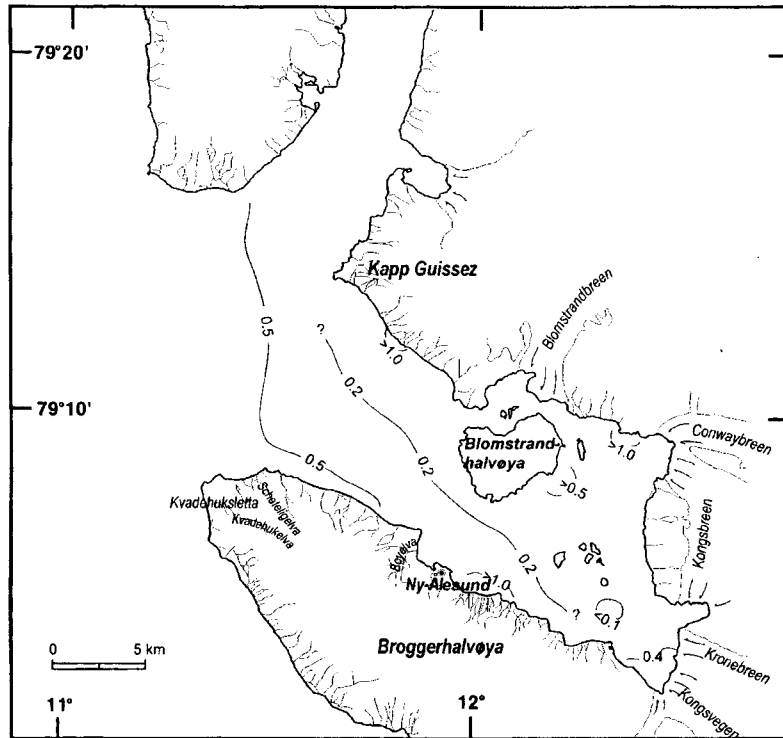


Fig. 10. Spatial distribution of surface total chlorophyll *a* concentration ( $\text{mg chl } a \text{ m}^{-3}$ ) during August, 2002 in Kongsfjorden.

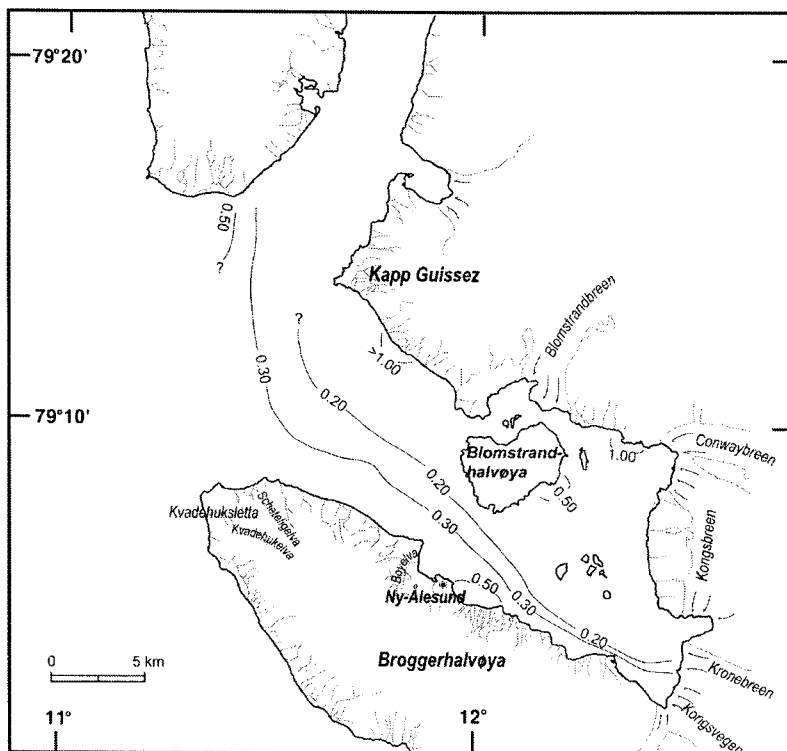


Fig. 11. Spatial distribution of surface nanoplanktonic chlorophyll *a* concentration ( $\text{mg chl } a \text{ m}^{-3}$ ) during August, 2002 in Kongsfjorden.



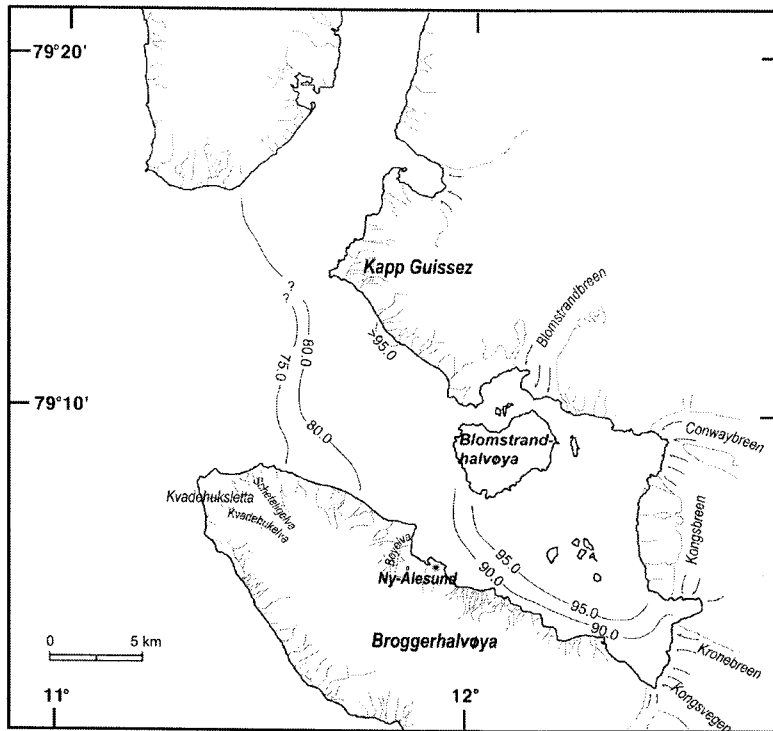


Fig. 12. Spatial distribution of relative portion of surface nanoplankton(%) to the total chlorophyll *a* concentration during August, 2002 in Kongsfjorden.

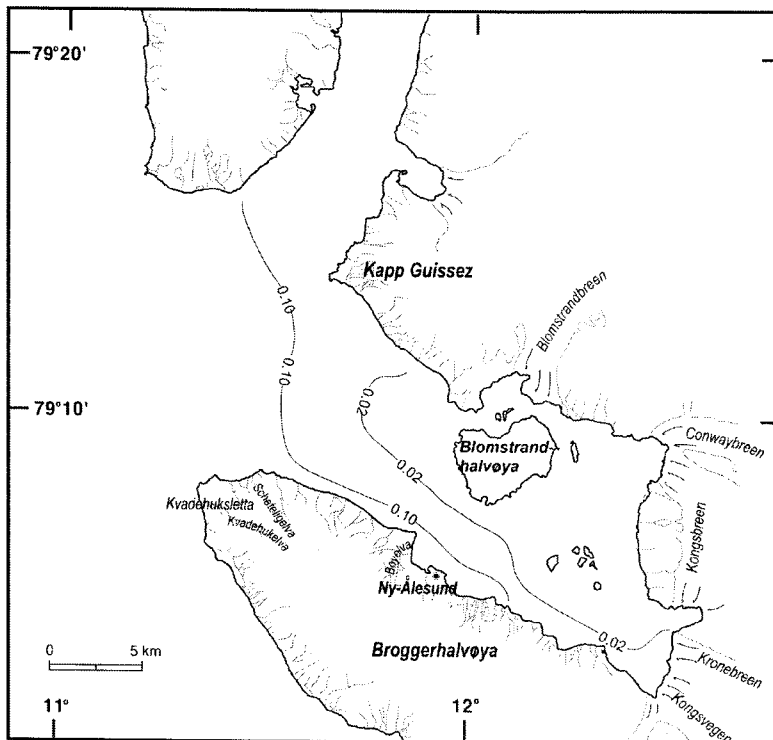


Fig. 13. Spatial distribution of surface microplanktonic chlorophyll *a* concentration( $\text{mg chl } a \text{ m}^{-3}$ ) during August, 2002 in Kongsfjorden.

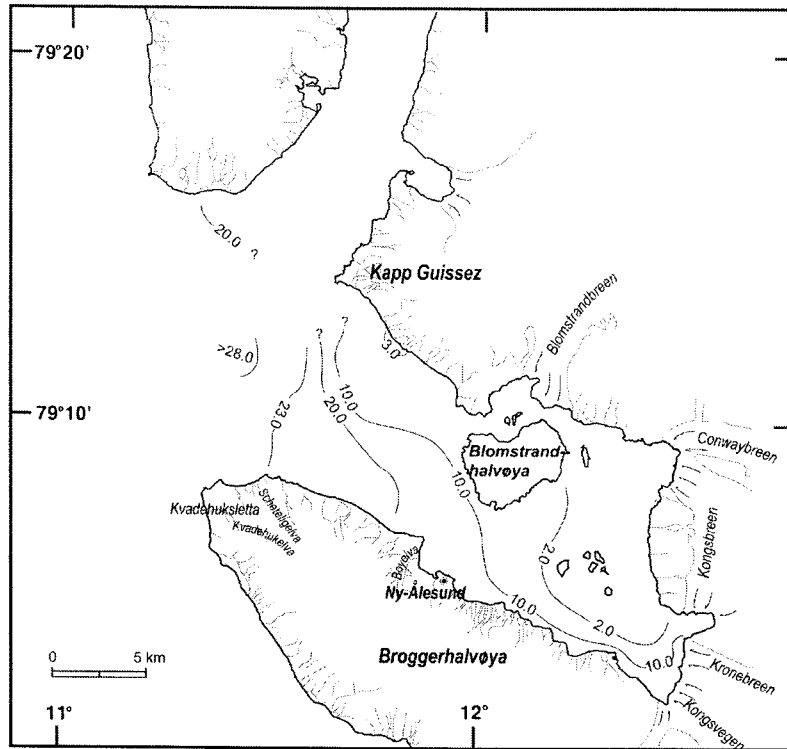


Fig. 14. Spatial distribution of relative portion of surface microplankton(%) to the total chlorophyll a concentration during August, 2002 in Kongsfjorden.

종이 기재되었으며, 이중 67종이 규조류이며 46종이 와편모조류로 구성되어 있다(Eilerstsen *et al.* 1989; Hasle and Heimdal 1998; Keck *et al.* 1999; Wiktor 1999). 대부분의 종이 대서양에서 유입된 종이거나 범세계(cosmopolitan) 종이다. Hasle and von Quillfeldt(1996)에 의하면 이중 단지 31종(21%)만이 북극해와 관련된 저온 적응 종이다. 계절에 따라 식물플랑크톤의 성장과 분포 양상이 변한다. 북위 79도에 위치한 Kongsfjorden 지역은 일년 중 116일이 완전한 무광 상태로 이때는 식물플랑크톤의 생산력이 거의 이루어지지 않게 된다. 겨울 동안에 이루어진 한 연구에 의하면 해수 중 미소 플랑크톤의 구성이 편모 원생동물로만 이루어져 있는 것으로 조사되었다(Wiktor 1999). 한 겨울동안에는 살아 남아있는 대부분의 식물플랑크톤은 해빙 속에서 결빙방지 물질을 만들어 내서 존재하거나(Raymond 2000), 휴면포자를 만들어 살아남는 것으로 알려졌다(Hasle and Heimdal 1998).

해빙이 녹기 시작하는 봄(5월) 기간에 약 60여종의 식물플랑크톤이 동정되었으며, 대부분 규조류였다(Wiktor 1999). 봄철 우점 식물플랑크톤은 착편모류(haptophyte)에 속하는 *Phaeocystis pouchetii*(최대  $12 \times 10^6$  cells/liter)와 규조류인 *Chaetoceros socialis*(최대  $4.7 \times 10^6$  cells/liter)와 *Thalassiosira nordenskiöldii*였으나, 일반적으로 해빙 주

변에 많은 수가 존재하는 *Fragilariopsis* 종은 적게 나타났다. 와편모조류 중에서는 *Protoperdinium*과 *Gymnodinium* 종들이 우점종으로 나타났다(Eilerstsen *et al.* 1989; Wiktor 1999). 해빙으로 덮여있는 Kongsfjorden 만 내부와 중심부 지역은 크기가 작은 규조류나 편모류 등이 우점하고 있었으며, 해빙 아래 해역에는 주로 편모류의 작은 식물플랑크톤이 우점종으로 나타났다(Wiktor 1999).

해수 중 부유물질이 적은 초 봄(3월)에는 식물플랑크톤에 이용될 수 있는 PAR가 1%까지 도달하는 깊이인 유광대가 30 m 이상까지 형성된다. 해수 중에 규조류가 나타나면서 이 지역에 식물플랑크톤 성장이 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다(Wiktor 1999). Kongsfjorden 만 내에서 유일하게 예측할 수 있는 식물플랑크톤의 대량증식이 봄철에 일어난다. 4월이 되면서 식물플랑크톤 생물량이 증가하기 시작하며, 해빙 주변에서는  $250 \text{ mg chl } a \text{ m}^{-2}$ 까지 생물량이 증가하게 된다. 이렇게 증가된 봄철 식물플랑크톤 대량증식은 동물플랑크톤의 포식압으로 인해 조절되어 그 수가 급격하게 줄어들게 된다. 이로 인해 식물플랑크톤에 의한 저서생물로의 유기탄소의 공급이 줄어들게 된다. 따라서 Kongsfjorden의 식물플랑크톤의 봄철 대량증식을 조절하는 초기의 물리적 요인은 광조건이며, 그 이후 형성된 대량증식은 동물플랑크톤의 포식압에 의해 조

절된다고 말할 수 있다(Hop *et al.* 2002).

하계 동안 Kongsfjorden의 식물플랑크톤 종 다양성이 증가하게 된다(130 종 이상 기록됨). 만의 안쪽 빙하 주변에는 외편모조류인 *Protoperidinium* spp., *Gymnodinium* spp., *Gyrodinium* spp.(최대  $0.6 \times 10^6$  cells/liter)와 크기가  $20 \mu\text{m}$  이하인 편모성 식물플랑크톤이 우점종으로 나타난다. 만의 중심부에서는 외편모조류뿐만 아니라 Chrysophyte인 *Dinobryon balticum*(최대  $3.5 \times 10^6$  cells/liter)가 우점종으로 관찰되었다. 만의 바깥쪽 해역은 규조류인 *Thalassiosira antarctica* var. *borealis*, *Cylindrotheca closterium*, *Chaetoceros* spp.가 최대  $0.2 \times 10^6$  cells/liter까지 나타나며, 또한 *Phaeocystis pouchetii*, *Dinobryon balticum*, 외편모조류 등이 우점종으로 나타난다(Halldal and Halldal 1973; Eilerstsen *et al.* 1989; Hasle and Heimdal 1998; Keck *et al.* 1999; Okolodkov *et al.* 2000). 때때로 대서양 해류의 유입이 증가할 때는 coccolithophorids인 *Coccolithus pelagicus* f. *hyalinus* and f. *pelagicus*가 최대  $0.13 \times 10^6$  cells/liter까지 관찰되었다(Halldal and Halldal 1973; Hasle and Heimdal 1998). 그러나 대서양 해류의 유입이 만 내 전체 식물플랑크톤 종조성과 생산력에 어떤 영향을 미치는지에 대해서는 알려져 있지 않다.

빛 조건에 따라 일차생산력이 크게 변한다. 보통 Kongsfjorden에서 광의 강도가 가장 높을 때가 보통  $1300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이며, 비록 이 수치는 저위도 지역에 비해 낮은 값이지만 하계동안 형성되는 백야 현상으로 인해 하루 동안 해양생태계에 노출되는 일차생산을 위해 이용되는 PAR의 절대량은 높다(Svendsen *et al.* 2002). 여름이 시작하는 6월초에는 기온의 상승으로 인해 주변의 용설수, 용빙수를 통해 유입되는 퇴적물의 유입이 증가하여 해수의 투명도가 급격히 낮아지게 된다. 특히 만의 안쪽 빙하 주변에서 이런 현상이 두드러지게 나타나며, 이는 유광대 깊이를  $0.3 \text{ m}$ 까지 만들어 식물플랑크톤이 거의 성장할 수 없는 빛 조건이 형성되어 식물플랑크톤의 감소를 가져오는 주요한 요인으로 작용한다(Eilerstsen *et al.* 1989; Keck *et al.* 1999). 만의 중심지역의 해수의 투명도는 해류와 조석간만의 차에 따라 달라진다. 해류의 세기, 방향과 간조, 만조시 발생하는 조석간만의 차이에 의해 발생하는 퇴적물의 유입량에 따라 만 중심부의 유광대 깊이는  $6 \text{ m}$ 에서  $25 \text{ m}$ 까지 변하는 것으로 조사되었다(Hop *et al.* 2002).

영양염의 농도는 계절에 따라 크게 변한다. 수괴의 수직적 혼합이 잘 이루어지는 겨울 동안에는 영양염의 농도가 비교적 높게 나타난다(Nitrate,  $10\text{-}12 \mu\text{M}$ ; Phosphate,  $0.7\text{-}0.8 \mu\text{M}$ ; Silicate,  $4\text{-}6 \mu\text{M}$ )(Hop *et al.* 2002). 그러나 수층 수괴가 안정화되어 저층의 영양염 공급이 줄어들고, 식물플랑크톤의 성장이 증가하는 여름철 동안에는 영양염의 농도가 급격하게 줄어들게 된다(Nitrate,  $1.6\text{-}3.3 \mu\text{M}$ ;

Phosphate,  $0.5 \mu\text{M}$ ; Silicate  $1.4\text{-}1.5 \mu\text{M}$ ). 하계 동안에 Kongsfjorden의 수직 혼합층의 깊이는  $30\text{-}40 \text{ m}$  정도로 이 혼합층 내에서 간헐적으로 이루어지는 식물플랑크톤의 대량증식은 불규칙적으로 영양염이 공급될 때 발생한다(Hop *et al.* 2002).

Kongsfjorden의 바깥쪽 해역의 식물플랑크톤 성장은 퇴적물의 유입이 많은 만 안쪽에 비해 동물플랑크톤에 의한 포식압에 의해 조절된다. 만의 바깥쪽 해역은 요각류와 같은 동물플랑크톤의 농도가 높아서, 동물플랑크톤에 의한 fecal pellet의 농도가 증가하여 이들이 주요한 생물 기원 퇴적물을 구성하게 된다(Hop *et al.* 2002). 그러나 만 안쪽 해역은 육상기원 부유퇴적물의 증가로 인한 투명도의 감소로 인해 식물플랑크톤의 성장이 감소하고, 담수 유입의 증가로 인해 동물플랑크톤의 삼투압의 차이로 인해 대량으로 삼투압사 당하기 때문에 부유성 유기물질의 대부분이 생물체에 의한 것보다 생물의 사체인 degraded detritus로 이루어져 있다(Weslawski and Legezynska 1998; Keck 1999).

#### 해빙서식 미세조류

Kongsfjorden의 식물플랑크톤은 계절적으로 변하는 광조건, 수온, 그리고 겨울에 형성되는 해빙의 영향을 받게 된다. 빙하에서 떨어져 나온 유빙과는 달리 해빙의 아래 부분은 비교적 편평하다(Gerland *et al.* 1999). Kongsfjorden 해빙의 최대 두께는  $0.7 \text{ m}$  정도로 다른 북극해 지역의 해빙 평균 두께(약  $2 \text{ m}$ )에 비해 두께가 얇은 편이다(Brown and Cote 1992). 겨울철에 형성되는 해빙 속에는 겨울에 살아남아 있는 호냉성 미세조류가 존재한다. 해빙 위에 쌓이는 눈은 광의 투입을 차단하여 해빙 서식 미세조류의 광합성에 장애가 되기 때문에 눈이 쌓이는 양에 따라 해빙 미세조류의 생산력은 영향을 받는다(Grossi *et al.* 1987; Welch and Bergman 1989). 봄이 되어 광량이 증가하면서 해빙 미세조류는 해빙과 해수가 만나는 해빙의 아래면에서 서서히 성장하기 시작하여 해빙의 아래쪽에서 약  $20 \text{ cm}$  정도까지 위쪽으로 침투하여 서식하게 된다. 해빙의 위쪽으로 갈수록 미세조류의 수는 줄어든다(Hop *et al.* 2002).

해빙 코어 시료를 분석해 본 결과, 해빙 미세조류는 해빙 전체에 분포하는 것이 아니라 해빙 아래쪽에 편중되어 분포되어 있으며, 해빙 미세조류가 가장 많이 존재하는 시기는 5월 말경이었다(Hop *et al.* 2002). 우점 해빙 미세조류는 규조류인 *Nitzschia frigida*, *Pleurosigma stuxbergii*, *Cylindrotheca closterium*, *Navicula pelagica*, *Entomoneis* spp., *Cocconosis* spp., *Thalassiosira* spp.로 나타났다. 그러나 외편모조류인 *Dinophysis acuta*, *Gyrodinium* spp., *Protoperidium* spp. 등과 외편모조류의 포자도 관찰되었

다. 해빙의 내부로 들어갈수록 종수가 감소했으며, 특히 해빙 안쪽에서는 *Navicula* spp.가 우점종이었다(Hop et al. 2002).

#### 인간 활동 및 환경변화에 대한 영향

지구상 최북단에 형성된 마을인 Ny-Ålesund 지역은 Kongsfjorden의 남쪽 연안에 위치하고 있다. 이 지역은 1917년부터 1962년까지 광산지역으로 석탄생산을 위한 중요한 지역이었다. 광산 사고로 인해 폐광된 이후 여러 가지 활용방안이 강구되어 오다가 1990년 이후부터 이 지역을 북극 연구를 위한 국제 연구 전진기지로 개발되고 있다. 환경 보호를 위한 환경법이 엄격하게 적용되고 있으나, 광산 개발 시기에 이루어졌던 인위적 오염의 잔재가 아직 약간 남아있다(Steichen et al. 1996).

계절적 혹은 연간 변화하는 환경 변동에 따라 변화하는 북극해 수괴의 분포 양상에 따라 Kongsfjorden의 해양생태계가 영향을 받는다. 환경 변화에 따라 기온이 따뜻한 해에는 대서양 해류의 유입이 증가된 것으로 생각할 수 있다. 스발바드 주변 해수의 기온 상승이 1920년대부터 관찰되어 왔으며(Blacker 1957), 여전히 기온이 지속적으로 상승하고 있다는 사실이 최근의 Kongsfjorden 기상관측에서 알려졌다(Hop et al. 2002). 대부분의 해양생물들은 각각이 적응할 수 있는 최적의 환경조건(해수 수괴)에 서식하고 있다. 만약에 환경 변화에 따라 스발바드 지역 수괴 양상이 변화한다면 이 지역의 전체 해양생태계의 변화가 일어나게 될 것이다(Galkin 1998; Hop et al. 2002). 특히 외양 서식 생물인 플랑크톤은 그 해가 따뜻한 해(warm year)인지 아니면 예년보다 추웠던 해(cold year)이었느냐에 따라 상당한 영향을 받는다. 또한 환경변화에 따라 Kongsfjorden 내에 형성되는 해빙의 분포는 매년 변한다(Svendsen et al. 2002).

해빙의 확장이 미약했던 해에는 봄철에 외양 및 저서생물의 생산력이 증가하는 반면에, 해빙의 확장이 증가했던 해에는 Kongsfjorden 서식 생물의 생산력이 감소하고 플랑크톤의 대량증식이 지연되는 것이 관찰되었다. 환경 변화에 따른 만 내의 표빙하성(supraglacial) 유입물(연안에 쌓인 눈과 빙하에서 녹은 물의 유입, 유빙 등)의 증감 변화에 따라 빙하 주변 해역의 수온, 염분 및 투명도는 변한다(Svendsen et al. 2002). 지구온난화로 인해 빙하가 후퇴하며 육상으로부터 기인한 담수의 유입이 증가하고 있다. 이미 Kongsfjorden의 빙하가 연간 150 m 후퇴하고 있다는 것이 관찰되고 있다(Svendsen et al. 2002).

앞으로 예상되는 인위적, 자연적 환경변화를 감시하기 위한 생물학적 요인으로 일차생산자인 식물플랑크톤과 환경요인의 계절적 변동이 지속적으로 모니터링된다면 북극의 연안해양 환경 변화를 이해할 수 있을 것이다. 특히 자

외선 변화, 수온변화, 해빙분포변화에 따른 식물플랑크톤 종조성 변화의 지속적인 모니터링이 필요하다. 종조성의 변화양상을 비교한다면 이러한 차이가 어떤 환경조건에 의해 우점종의 변화가 유도되었는지를 예측할 수 있을 것이다. 따라서 지속적인 모니터링 연구를 통해 미세조류의 생물량 및 우점종의 변화 패턴을 이해하고 지표종을 찾는 일은 미래 북극 연안 생태계에 일어날 환경변화를 예측하는데 도움이 될 것이라고 생각된다.

#### 4. 결 론

1) 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden은 대서양과 북극해 해수가 혼합된 특성을 보이는 빙하 피오르드 지역인 것으로 보인다.

2) 전 연구정점의 표층수에서 측정된 chl *a* 농도는 0.08-1.4 mg chl *a* m<sup>-3</sup> 범위(평균 0.53 mg chl *a* m<sup>-3</sup>)를 보였다.

3) 가장 높은 식물플랑크톤 생물량을 보인 지역(>1.0 mg chl *a* m<sup>-3</sup>)은 만의 북동쪽 지역의 빙벽 주변이었다. 이는 이 지역에 nanoplanktonic(< 20 μm) 편모식물플랑크톤이 우점하고 있었기 때문이다.

4) 연구기간 동안 연구 해역에서 20 μm 이하의 편모식물플랑크톤이 전체 식물플랑크톤 현존량의 90% 이상을 차지하였다. 연구 지역의 표층 수온과 염분은 각각 2.50-7.18°C의 범위(평균 4.65°C)와 22.55-32.97 psu의 범위(평균 30.16 psu)를 보였다. 그리고 하강풍의 영향이 뚜렷한 표층 특성 분포는 식물플랑크톤 현존량의 분포와 유사하였다. 결국 생물량의 표층 분포가 바람에 의해 좌우될 수 있음을 보여주었다.

5) Kongsfjorden 안 빙하를 통해 유입되는 많은 양의 유빙, 담수, 퇴적물들은 이 지역 해양의 생지화학적 특성의 급격한 변화를 야기시키며, 빙하를 통해 유입된 유빙 및 퇴적물들은 빙하주변 해역 생물들의 종 다양성을 저하시키는 역할을 하는 것으로 보인다.

6) 식물플랑크톤들은 빙하 주변에 유입된 많은 양의 퇴적물때문에 빛 조건이 악화되어 일차생산력이 감소하게 된다. Kongsfjorden의 빙벽 근처에서 외양 쪽으로 멀어지면서 빙하에 의한 영향이 점점 줄어들게 된다. Kongsfjorden은 해양 포유동물과 조류의 중요한 서식환경이다. 특히 이곳에 서식하고 있는 조류들은 해양 미세조류들의 일차생산을 위해 필요한 영양염의 주요 공급원으로서의 역할을 하는 것으로 보인다.

7) 대한민국 다산기지 주변의 Kongsfjorden은 지구온난화와 같은 전지구적 환경변화를 감시하고 감지하기 위한 중요한 모니터링 지역으로 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 생각한다.

## 사 사

이 연구는 한국해양연구원 ‘북극다산기지 주변 자연환경 및 생물자원 연구(PP03107)’와 과학기술부의 국가지정연구실 사업인 ‘북극대기 환경 및 광물자원 연구(PN47500)’의 일환으로 이루어졌다. 시료 채집에 도움을 주신 이희승 박사, 김효원 씨, 최종원 PD, 노르웨이 극지연구소 관계자와 자료 정리에 도움을 준 최정은 씨께 고마움을 표합니다. 아울러 이 논문을 심사하면서 좋은 의견을 주신 한국해양연구원의 장만 박사와 군산대학교의 이원호 교수께 감사드립니다.

## 참고문헌

- Aagaard, K., A. Foldvik, and S.R. Hillman. 1987. The West Spitsbergen Current: disposition and water mass transformation. *J. Geophys. Res.*, 92, 3778-3784.
- Bischof, K., D. Hanelt, H. Tug, U. Karsten, P.E.M. Brouwer, and C. Wiencke. 1998. Acclimation of brown algal photosynthesis to ultraviolet radiation in Arctic coastal waters, Spitsbergen(Norway). *Polar Biol.*, 20, 388-395.
- Bischof, K., D. Hanelt, and C. Wiencke. 1999. Acclimation of maximal quantum yield of photosynthesis in the brown alga *Alaria esculenta* under high light and UV radiation. *Plant Biol.*, 1, 435-444.
- Blacker, R.V. 1957. Benthic animals as indicators of hydrographic conditions and climate change in Svalbard waters. *Fish. Invest.*, 20, 1-49.
- Brown, R.D. and P. Cote. 1992. Interannual variability of landfast ice thickness in the Canadian high Arctic, 1950-89. *Arctic*, 45, 273-284.
- Eilertsen, H.C., J.P. Taasen, and J.M. Weslawski. 1989. Phytoplankton studies in the fjords of West Spitsbergen: physical environment and production in spring and summer. *J. Plankton Res.*, 11, 1245-1260.
- Førland, E.J., I. Hansen-Bauer, and P.Ø. Nordli. 1997. Orographic precipitation at the glacier Austre Brøgger-breen. DNMI Rep. 2/97 Klima. Norwegian Meteorological Inst., Oslo.
- Galkin, Y.I. 1998. Long-term changes in the distribution of molluscs in the Barents Sea related to the climate. *Ber. Polarforsch.*, 287, 100-143.
- Gascard, J.C., C. Richez, and C. Rouault. 1995. New insights on large-scale oceanography in Fram Strait: the Spitsbergen Current. *Coast. Estuar. Stud.*, 49, 131-182.
- Gerland, S., J.-G. Winther, J.B. Ørbæk, and B.V. Ivanov. 1999. Physical properties, spectral reflectance and thickness development of first year fast ice in Kongsfjorden, Svalbard. *Polar Res.*, 18, 275-282.
- Grossi, S.M., S.T. Kottmeier, R.L. Moe, G.T. Taylor, and C.W. Sullivan. 1987. Sea ice communities. VI. Growth and primary production in bottom ice under graded snow cover. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 35, 153-164.
- Groß, C., H. Tug, and O. Schrems. 2001. Three years of spectral resolved UV-measurements at Koldevey Station(1997-1999). *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Iss.*, 54, 113-123.
- Halldal, P. and K. Halldal. 1973. Phytoplankton, chlorophyll, and submarine light conditions in Kings Bay, Spitsbergen, July 1971. *Norw. J. Bot.*, 20, 99-108.
- Hanelt, D., H. Tüg, K. Bischof, C. Groß, H. Lippert, T. Sawall, and C. Wiencke. 2001. Light regime in an Arctic fjord: a study related to stratospheric ozone depletion as a basis for determination of UV effects on algal growth. *Mar. Biol.*, 138, 649-658.
- Hansen-Bauer, I., M. Kristensen Solas, and E.L. Steffensen. 1990. The climate of Spitsbergen. *DNMI Rep. 39/90 Klima*. Norwegian Meteorological Inst., Oslo.
- Hasle, G.R. and B.R. Heimdal. 1998. The net phytoplankton in Kongsfjorden, Svalbard, July 1988, with general remarks on species composition of Arctic phytoplankton. *Polar Res.*, 17, 31-52.
- Hasle, G.R. and C.H. von Quillfeldt. 1996. Part 8. Marine microalgae. p. 375-382. In: *A catalogue of Svalbard plants, fungi, algae and cyanobacteria*. eds. by A. Elvebakk and P. Prestrud. Nor. Polarinst. Skr., 198. Norwegian Polar Inst., Oslo.
- Hegseth, E.N. 1998. Primary production in the northern Barents Sea. *Polar Res.*, 17, 113-123.
- Holte, B. and B. Gulliksen. 1998. Common macrofaunal dominant species in the sediments of some north Norwegian and Svalbard glacial fjords. *Polar Biol.*, 19, 375-382.
- Holte, B., S. Dahle, B. Gulliksen, and K. Naes. 1996. Some macrofaunal effects of local pollution and glacier-induced sedimentation, with indicative chemical analyses, in the sediments of two Arctic fjords. *Polar Biol.*, 16, 549-557.
- Hop, H., T. Pearson, E.N. Hegseth, K.M. Kovacs, J.M. Weslawski, C. Wiencke, S. Kwasiński, K. Eiane, R. Leakey, S. Cochrane, M. Zajaczkowski, O.J. Lønne, F. Mehlum, C. Lydersen, B. Gulliksen, S. Falk-Petersen, M. Poltermann, S.-A. Wangberg, M. Kendall, K.Y. Bischof, A. Voronkov, N.A. Kovaltchouk, G.W. Gabrielsen, M. Włodarska-Kowalczyk, J. Wiktor, G. di Prisco, A. Estoppey, C. Papucci, and S. Gerland. 2002. The marine ecosystem of Kongsfjorden, Svalbard. *Polar Res.*, 21, 167-208.
- Hurrell, J.W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic

- Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676-679.
- Keck, A. 1999. West Spitsbergen fjords(Svalbard, Norwegian Arctic): physical settling and sedimentation. p. 58-68. In: *Sedimentation and recycling in aquatic ecosystems.the impact of pelagic processes and planktonic food web structure*. eds. by A.S. Heriskanen et al. Finn. Environ., 263.
- Keck, A., J. Wiktor, R. Hapter, and R. Nilsen. 1999. Phytoplankton assemblages related to physical gradients in an Arctic, glacier-fed fjord in summer. *ICES J. Mar. Sci.*, 56 Suppl. 203-214.
- Loeng, H. 1991. Features of the physical oceanographic conditions of the Barents Sea. p. 5-18. In: *Proceedings of the Pro Mare Symposium on Polar Marine Ecology (Polar Res., 10.)*. eds. by E. Sakshaug et al. Trondheim, Norway, 12-16 May 1990.
- Okolodkov, Y.B., R. Hapter, and S.V. Semovski. 2000. Phytoplankton in Kongsfjorden, Spitsbergen, July 1996. *Sarsia*, 85, 1-8.
- Ørbæk, J.B., V. Hisdal, and L.E. Svaasand. 1999. Radiation climate variability in Svalbard: surface and satellite observations. *Polar Res.*, 18, 127-134.
- Raymond, J.A. 2000. Distribution and partial characterization of ice-active molecules associated with sea-ice diatoms. *Polar Biol.*, 23, 721-729
- Sakshaug, E., A. Bjørge, B. Gulliksen, H. Loeng, and F. Mehlum. 1994. Structure, biomass distribution, and energetics of the pelagic ecosystem in the Barents Sea: a synopsis. *Polar Biol.*, 14, 405-411.
- Steichen, D.J.J., S.J. Holbrook, and C.W. Osenberg. 1996. Distribution and abundance of benthic and demersal macrofauna within a natural hydrocarbon seep. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 138, 71-82.
- Svendsen, H., A. Beszczynska-Møller, J.O. Hagen, B. Lefaconnier, V. Tverberg, S. Gerland, J.B. Ørbæk, K. Bischof, C. Papucci, M. Zajaczkowski, R. Azzolini, O. Bruland, C. Wiencke, J.-G. Winther, and W. Dallmann. 2002. The physical environment of Kongsfjorden-Krossfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard. *Polar Res.*, 21, 133-166.
- Vinje, T. 1982. Frequency distribution of sea ice in the Greenland and Barents seas, 1971-80. *Nor. Polarinst. Arb.* 1980, 57-61. Norwegian Polar Inst., Oslo.
- Vinje, T. 2001. Anomalies and trends of sea-ice extent and atmospheric circulation in the Nordic seas during the period 1864-1998. *J. Clim.*, 14, 255-267.
- Welch, H.E. and M.A. Bergmann. 1989. Seasonal development of ice algae and its prediction from environmental factors near Resolute, N.W.T., Canada. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 46, 1793-1804.
- Weslawski, J.M. and P. Adamski. 1987. Cold and warm years in south Spitsbergen coastal marine ecosystem. *Pol. Polar Res.*, 8, 96-106.
- Weslawski, J.M. and J. Legezynska. 1998. Glaciers caused zooplankton mortality? *J. Plankton Res.*, 20, 1233-1240.
- Wiktor, J. 1999. Early spring microplankton development under fast ice covered fjords of Svalbard, Arctic. *Oceanologia*, 41, 51-72.

---

Received Apr. 23, 2003

Accepted Jun. 4, 2003