

## 울릉도 주변 해역의 극미소플랑크톤 분포 특성

심정민 · 윤석현 · 황재동 · 진현국 · 이용화 · 김영숙 · 윤상철

국립수산과학원 동해수산연구소

(2007년 11월 28일 접수; 2008년 10월 8일 수정; 2008년 10월 24일 채택)

### Seasonal Variability of Picoplankton Around Ulneung Island

Jeong-Min Shim, Suk-Hyun Yun, Jae-Dong Hwang, Hyun-Gook Jin,  
Yong-Hwa Lee, Young-Suk Kim and Sang-Chul Yun

Marine Environment Division, East Sea Fisheries Research and Development Institute, 30-6  
Dongduck-ri, Yeongok-myeon, Gangneung, Gangwon-Do 210-860, Korea

(Manuscript received 28 November, 2007; revised 8 October, 2008; accepted 24 October, 2008)

#### Abstract

The seasonal variations of picoplankton including *Prochlorococcus*, *Synechococcus* and Picoeukaryotes around Ulneung Island were investigated by flow cytometry in spring, summer and autumn in 2006. All groups of picoplankton showed clear seasonal patterns in population abundance. Among the group, *Synechococcus* showed the most prominent seasonal variation during the study period. The maximal abundance of *Synechococcus* occurred in summer and the lowest in autumn. The seasonal distribution of *Prochlorococcus* displayed the reverse tendency with that of *Synechococcus*. The abundance of *Prochlorococcus* ranged from  $2.9 \times 10^3$  cells/ml in summer to  $311 \times 10^3$  cells/ml in autumn. However, the seasonal distribution of Picoeukaryotes was shown to be relatively constant, and the maximal abundance was  $81.5 \times 10^3$  cells/ml in summer. The highest abundance of Picoeukaryotes occurred in summer and the lowest in autumn and the seasonal distribution in abundance of Picoeukaryotes showed a similar trend with that of *Synechococcus*. The estimated total carbon biomass of picoplankton were ranged from 74.7 mg C/m<sup>2</sup> to 1,055.9 mg C/m<sup>2</sup>. The highest total carbon biomass occurred in summer, but lowest occurred in autumn. The pattern of the contribution of three picoplankton to total autotrophic picoplankton carbon is different. The contribution of *Synechococcus* to total autotrophic picoplankton carbon is increased to 75%, but the contribution of *Prochlorococcus* dropped to 12% in summer. The contribution of Picoeukaryotes is ranged from 24% in summer to 72.5% in spring.

**Key Words :** Picoplankton, Flow cytometry, Carbon biomass, Size-fractioned chlorophyll-*a*

#### 1. 서 론

해양생태계의 먹이망에 있어서 식물플랑크톤은

일차생산자와 동물플랑크톤의 먹이로서 기여하는 바가 크다<sup>1~3)</sup>. 특히 해양에 분포하는 식물플랑크톤 중 극미소플랑크톤(Picoplankton, 0.2~2.0 μm)은 중속영양 박테리아나 바이러스와 같은 중속영양생물체 뿐만 아니라 광합성을 하는 원핵성 및 진핵성 세포들을 포함하며 다양한 환경에서 높은 풍도를 보임으로서 해양생태계에 있어서 식물플랑크톤의 생체

Corresponding Author : Jeong-Min Shim, Marine Environment Team, East Sea Fisheries Research and Development Institute, 30-6 Dongduck-ri, Yeongok-myeon, Gangneung, Gangwon-Do 210-860, Korea  
Phone: +82-33-660-8532  
E-mail: jmshim@nfrdi.go.kr

량과 일차생산력에 미치는 영향이 크다<sup>4~7)</sup>. 그러나 연안에서는 Nanoplankton(2~20  $\mu\text{m}$ )과 Microplankton(20~200  $\mu\text{m}$ )에 의한 영향이 크다<sup>8)</sup>. 또한 극미소플랑크톤은 해양에서 탄소량을 결정짓기도 하며, 영양염 재생산과 순환에 있어서도 중요한 역할을 하며 극미소플랑크톤의 식물플랑크톤 생체량 기여 정도에 따라 부유생물 먹이망의 구조와 식물플랑크톤의 생산율도 결정된다<sup>9~11)</sup>.

극미소플랑크톤에는 원핵성 남세균에 속하는 *Prochlorococcus*와 *Synechococcus*속 그리고 picoeukaryotes 등 3개 분류군이 있다. 1988년부터 flow cytometer를 이용한 분석 기법은 특히 *Prochlorococcus*와 *Synechococcus*속의 남세균의 분포 특성을 밝히는데 매우 유용한 수단이 되었고 Eukaryotes를 포함한 3개 분류군의 분포에 대해 과거 20년간 다양한 연구가 이루어졌다<sup>10,12~14)</sup>. 태평양, 대서양, 지중해 및 아라비아 해 등 전 세계적으로 극미소플랑크톤에 대한 연구가 다방면으로 수행되는데 비해 우리나라 주변 해역에 대한 극미소플랑크톤의 연구는 그다지 활발하게 수행되지 않고 있다. 동해의 경우 울릉분지를 중심으로 한 동해 서남부 해역의 춘계 및 추계 극미소플랑크톤의 풍도변화에 대한 연구가 일부 이루어져 있을 뿐<sup>15)</sup> 극미소플랑크톤에 대한 연구는 매우 빈약한 상황이다. 반면에 동중국해에 대해서는 flow cytometer를 이용한 극미소플랑크톤 연구가 최근 들어 매우 활발히 이루어지고 있다<sup>16~19)</sup>. 본 연구는 대마난류와 북한한류가 만나 극전선이 형성되고 이와 관련된 물리적 작용에 의한 영양염의 유입이 풍부하고, 식물플랑크톤의 생산력 또한 높은 해역

인 울릉도를 포함한 인근 해역에 있어서의 독립영양 극미소플랑크톤 현존량과 크기별 클로로필-*a*의 계절변동 특성을 밝히고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

극미소플랑크톤 분포 조사는 2006년 6월, 8월 및 10월에 울릉도와 독도를 포함한 인근해역 10개 정점에 대해서 이루어졌다(Fig. 1). 조사정점의 물리적인 특성은 국립수산과학원 시험조사선 탐구 5호에 장착된 CTD(SBE 9 plus)를 이용하여 측정하였다. 시료 채취는 Rosette에 부착된 채수기(Niskin sampler)를 이용하여 표층에서 수심 100 m까지 사이의 4개 수층(0, 20, 50, 100 m)에서 이루어졌다.

클로로필-*a* 농도 분석은 층별 해수 2 l를 membrane filter(47 mm)를 이용하여 거른 후 여과지를 5 ml의 90% 아세톤 용액에 넣어 4°C의 암소에서 24시간 색소를 추출하였으며<sup>20)</sup> 형광측정법을 이용하여 구하였다. 또한 크기별 클로로필-*a*의 분석을 위하여 1 l 해수를 20  $\mu\text{m}$  mesh size filter와 3  $\mu\text{m}$  polycarbonate filter를 이용하여 1차 여과 후 GF/F(47 mm)로 2차 여과된 필터를 액화질소에 냉동보관 후 실험실로 옮겨 Turner Design Fluorometer(Turner Design, 10AU)로 분석하였다.

무기영양염류 분석은 수심별로 채수된 시료를 염산(10% HCl) 처리된 플라스틱병에 담아 냉동상태에서 실험실로 옮긴 후 Parsons 등<sup>20)</sup>의 방법을 따라 용존무기질소, 용존무기인 및 규산규소를 분석하였다.

극미소플랑크톤 분석을 위한 시료는 층별 해수 3 ml에 0.5% glutaraldehyde와 10% paraformaldehyde의

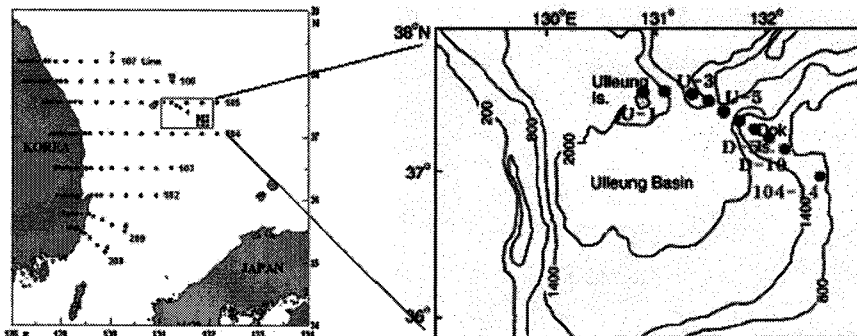


Fig. 1. Map showing the sampling stations in study area.

혼합액을 0.3 ml 첨가한 후 액화질소에 넣어 냉동 보관하였다. 극미소플랑크톤 분석을 위하여 15 mW Argon-ion laser(488 nm)가 장착된 Flow cytometer (FACS Calibur, Becton Dickinson)을 이용하였고, 분석시 산란(scattering)과 형광(fluorescence)을 표준화하기 위하여 시료마다 내부표준물질(internal reference)로 직경 1  $\mu\text{m}$ 의 형광 bead를 혼합하여 분석하였다(Fig. 2). 이때 데이터의 분석은 Cell Quest Pro 프로그램을 사용하여 분석하였다.

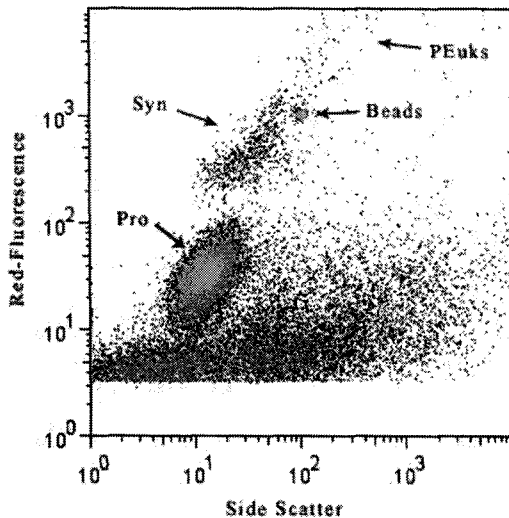


Fig. 2. Example of a flow cytogram dot plot of each group of picoplankton.

Flow cytometer를 이용하여 구한 개체수로 극미소플랑크톤의 탄소생체량을 구했다. *Prochlorococcus*와 *Synechococcus*는 Charphy와 Blanchot<sup>21)</sup>가 측정된 탄소변환계수 53 fg C/cell와 191 fg C/cell을 각각 적용하였다. Picoeukaryotes는 Blanchot 등<sup>22)</sup>이 사용한 1,361 fg C/cell을 적용하여 탄소량을 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 수온 연직 분포

수온 연직 분포는 수심에 따라 표면 혼합층과 수온약층이 형성되어 있으며 표면 혼합층은 계절에 따라 그 깊이가 달라졌다(Fig. 3). 표면 혼합층의 깊이는 춘계에는 수심 40 m, 하계에는 수심 20 m 내외, 그리고 추계에는 수심 40~50 m에 형성되어 추계에 가장 깊었으며 하계에 가장 낮게 형성되었다. 계절별 표면 혼합층 수심에서부터 100 m까지의 수온 차이를 보면 춘계에는 104-14점을 제외하고 수온 차이가 약 5 $^{\circ}\text{C}$ , 하계에는 약 20 $^{\circ}\text{C}$ , 추계에는 약 14 $^{\circ}\text{C}$  정도로 하계에 가장 강하게 나타났다. 따라서 본 연구해역에서 수온약층의 강도는 하계에 가장 큰 것으로 나타났다.

#### 3.2. 영양염 분포

질산염(Nitrate+Nitrite)의 농도는 표층에서는 춘계 정점 평균 0.31  $\mu\text{g-at/l}$ 으로 하계와 춘계에 비해 매우 낮은 농도 분포를 보였으며 수심이 깊어짐에

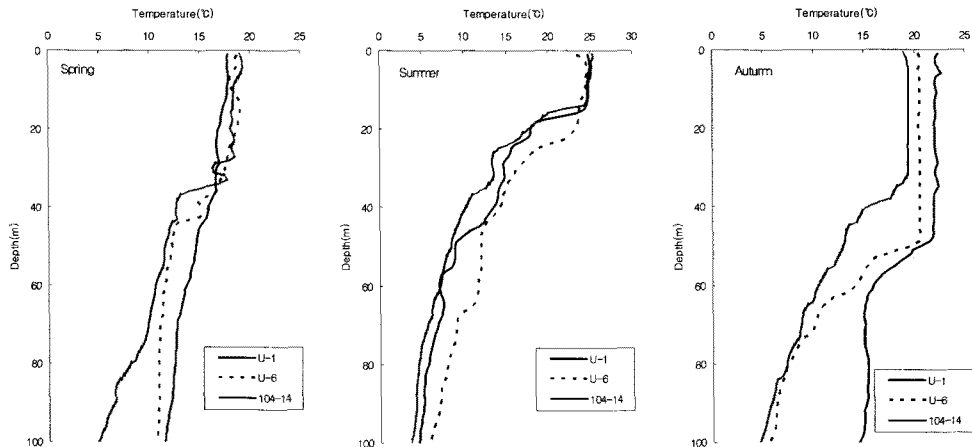


Fig. 3. Vertical profiles of water temperature for each sampling stations.

따라 질산염의 농도가 높아지는 전형적인 패턴을 보였다(Table 1). 하계와 추계에는 표층의 질산염의 농도가 정점 평균 각각 1.29, 2.46  $\mu\text{g-at/l}$  으로 다소 높았으며 그 외의 수층에서도 춘계에 비해 다소 높은 농도 분포를 보였다. 인산염은 질산염의 농도 분포와 같은 분포 패턴을 보여 춘계에 낮고 하계와 추계에 높았다.

**3.3. 클로로필-a 분포**

계절별 클로로필-a 수직분포는 다른 형태를 보였다(Fig. 4). 춘계 클로로필-a 평균 농도 범위는 0.20~0.50  $\mu\text{g/l}$  로 대체로 낮은 분포를 보였고 조사정점별로 비슷한 수직 분포를 보였다. 수심별로는 표층보다는 20~50 m층에서 다소 높은 농도를 보였으나 100 m층에서 다시 낮아졌다. 하계 클로로필-a 평균 농도는 0.14~1.86  $\mu\text{g/l}$  로 조사정점별 클로로필의 큰 농도 차이를 보였고 정점 U-1과 U-3에서는 표

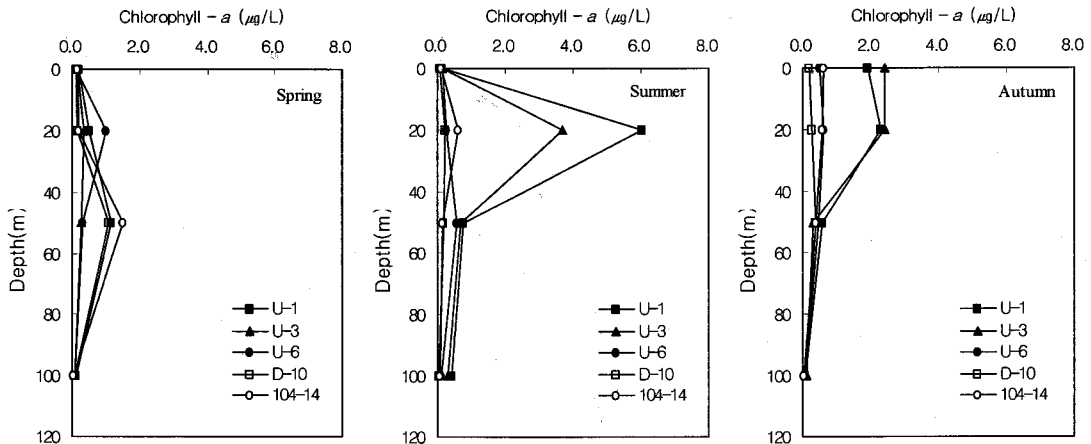
면혼합층 깊이에서 클로로필-a 최대층이 잘 발달된 형태를 보였다. 추계에는 클로로필-a 평균 농도는 0.21~1.32  $\mu\text{g/l}$  로 조사정점별로 차이를 보여 하계의 클로로필 분포와 비슷한 경향이었고 정점 U-1과 U-3의 수심 20 m층에서 2  $\mu\text{g/l}$  이상의 농도를 보였다.

**3.4. 크기별 클로로필-a 분포**

크기별 클로로필-a 농도는 계절별 뚜렷한 차이를 보였다(Fig. 5). 춘계에는 20  $\mu\text{m}$  이상의 net-sized 클로로필-a의 점유율은 18%, pico-sized 클로로필-a의 점유율은 56%로서 춘계의 식물플랑크톤 군집은 주로 pico-sized 식물플랑크톤에 의해 구성되어 있으며, 전 정점에서 비교적 낮은 농도 분포를 보였다. 하계에는 net-sized 클로로필-a와 pico-sized 클로로필-a가 모두 42%의 점유율을 보이면서 상대적으로 nano-sized 클로로필-a의 비율이 매우 낮았다. 추계의 식물플랑크톤 군집은 net-sized 식물플랑크톤 비

**Table 1.** Seasonal variations of nutrient concentrations around Ulneung Island

Depth (m)	Nutrient ( $\mu\text{g-at/l}$ )	Spring	Summer	Autumn
0 m	Nitrite+Nitrate	0.083 - 1.537 (0.313)	1.164 - 1.360 (1.291)	0.284 - 6.567 (2.461)
	Phosphate	0.004 - 0.215 (0.053)	0.053 - 0.803 (0.273)	0.001 - 0.108 (0.052)
20 m	Nitrite+Nitrate	0.076 - 4.672 (0.743)	1.121 - 1.391 (1.281)	0.100 - 6.080 (2.154)
	Phosphate	0.016 - 0.584 (0.109)	0.014 - 0.980 (0.371)	0.002 - 0.118 (0.052)
50 m	Nitrite+Nitrate	0.503 - 9.556 (5.980)	1.243 - 8.293 (4.940)	9.497 - 20.979 (10.766)
	Phosphate	0.070 - 0.562 (0.295)	0.281 - 1.168 (0.720)	0.064 - 1.010 (0.489)
100 m	Nitrite+Nitrate	7.361 - 15.006 (10.865)	1.375 - 11.381 (7.103)	9.285 - 19.976 (15.553)
	Phosphate	0.326 - 0.981 (0.517)	0.052 - 1.489 (0.676)	0.361 - 0.961 (0.765)



**Fig. 4.** Vertical profiles of chlorophyll-a concentrations for each sampling stations.

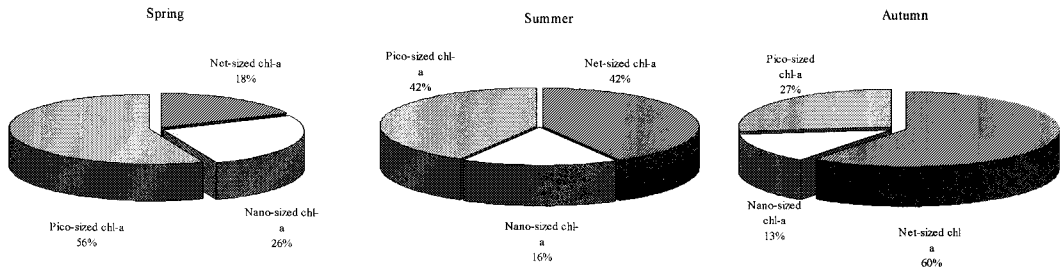


Fig. 5. The relative frequency of size-fractionated chlorophyll-a at different season.

율이 60%로 가장 높았고 pico-sized 클로로필-a의 농도가 가장 낮은 비율을 보였다. 본 연구에서는 춘계와 하계에 nano+pico-sized 클로로필-a의 비율이 각각 82%, 40%이었으며 이는 Park<sup>23)</sup>이 2000년 동해남부 연안에 춘계와 추계 조사한 53%, 60% 보다 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

### 3.5. 극미소플랑크톤의 계절 분포

극미소플랑크톤 분류군별 개체수 풍도는 Table 2에 나타난 바와 같이 계절변동은 다른 형태를 나타내었다. *Prochlorococcus*는 춘계와 추계에 비교적 높은 개체수 분포를 보인 반면 하계에는 낮은 개체수 분포를 나타내었다. 춘계 조사시  $0.9 \times 10^3$  cells/ml ~  $124.0 \times 10^3$  cells/ml의 개체수 분포를 보였다. 하계 조사 시는 춘계 조사 시에 비해 정점 U-1의 20 m층 ( $175.1 \times 10^3$  cells/ml)을 제외하고는 낮은 개체수 분포를 보여 평균  $15.9 \times 10^3$  cells/ml로 나타났다. 추계 조사시  $0.2 \times 10^3$  cells/ml ~  $311.5 \times 10^3$  cells/ml로 비교적 높은 개체수 분포를 보여 춘계 보다 2배, 하계에 비해 4배 정도 높은 개체수 분포를 보였다.

*Synechococcus*는 계절별 분포 변화가 뚜렷하게 나타나 하계에는 가장 풍부한 개체수를 보였고 추계에 낮은 분포를 보였다. 춘계 조사시 전체 수층에서  $0.3 \times 10^3$  cells/ml ~  $486.2 \times 10^3$  cells/ml 분포로 평균  $37.2 \times 10^3$  cells/ml의 개체수를 보였다. 정점별로는 U-라인보다는 D-라인에서 평균 개체수가 높게 나타났

으며 특히 정점 D-5에서 개체수 최대를 보였다. 하계 조사 시는  $2.6 \times 10^3$  cells/ml ~  $1.2 \times 10^6$  cells/ml로 대부분의 정점에서 평균  $10^5$  cells/ml 이상의 높은 개체수 분포를 보였고 정점별 고른 개체수 분포를 보였다. 특히 독도 주변 정점 D-5에서 최대현존량인  $1.19 \times 10^6$  cells/ml을 보였다. 추계에는 매우 낮은 개체수 분포를 보였으며 정점별 평균  $15 \times 10^3$  cells/ml 이하의 개체수를 보였다.

Picoeukaryotes는 *Synechococcus*와 비슷한 계절 분포를 보였으나 개체수 분포는 매우 낮게 나타났다. 춘계에는 U-라인에는  $10^4$  cells/ml 이하의  $5.06 \times 10^3$  cells/ml로 매우 낮은 개체수를 나타내었다. Picoeukaryotes는 다른 분류군에 비해 비교적 낮은 현존량을 나타내었으며 정점별로 큰 현존량 차이를 보이지 않았다.

조사수역에서의 극미소플랑크톤 분류군별 계절변동 특성은 비교적 뚜렷하게 나타났다. *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*는 계절별 현존량 분포가 반대로 나타나 *Synechococcus*는 하계에 최대 풍도를 보인 반면에 *Prochlorococcus*는 하계에 최소 풍도를 나타내었다. 현존량의 계절 변동이 가장 작은 분류군은 Picoeukaryotes이었으나 계절변동이 가장 큰 분류군은 *Synechococcus*로 나타났다. 본 조사에서 하계 *Prochlorococcus*의 풍도는  $2.9 \times 10^3$  cells/ml ~  $175.1 \times 10^3$  cells/ml로서 매우 낮았다. 이러한 하계 *Prochlorococcus*의 풍도는 Noh 등<sup>24)</sup>에서 나타난 하계 울릉분지를 비롯한 동해 표층에서 *Prochlorococcus*의 풍도

Table 2. The cell abundance of *Prochlorococcus*, *Synechococcus* and Picoeukaryotes

Season	Spring	Summer	Autumn
<i>Prochlorococcus</i> ( $\times 10^3$ cells/ml)	39.8(0.9 ~ 124.0)	15.9(2.9 ~ 175.1)	67.8(0.2 ~ 311.5)
<i>Synechococcus</i> ( $\times 10^3$ cells/ml)	37.2(0.3 ~ 486.2)	250.9(2.6 ~ 1,187.5)	9.2(0.03 ~ 54.3)
Picoeukaryotes ( $\times 10^3$ cells/ml)	8.7(0.27 ~ 46.87)	9.9(0.4 ~ 81.5)	3.0(0.20 ~ 8.8)

는  $41.7 \times 10^3 \text{ cells/ml} \sim 97.5 \times 10^5 \text{ cells/ml}$ 의 분포를 보였던 것과 비교할 때 매우 낮은 분포였다. 반면에 하계 *Synechococcus*의 표층 풍도는 Noh 등<sup>24)</sup>에서 보고된  $7.6 \times 10^3 \text{ cells/ml} \sim 68.9 \times 10^3 \text{ cells/ml}$  범위와는 상반되게 본 연구에서는  $2.6 \times 10^3 \text{ cells/ml} \sim 1.2 \times 10^6 \text{ cells/ml}$ 로 최대개체수가 매우 높게 나타났다. 일반적으로 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*의 풍도 변화는 조사 시기별 환경변화와 이에 반응하는 분류군의 생태, 생리적인 차이에 의하여 나타난다고 보고되었다<sup>25,26)</sup>. 또한 *Prochlorococcus*는 열대 대양의 극한 빈영양 상태에서 풍도가 증가하여 *Synechococcus* 개체수의 100배 이상, 생체량으로는 20배 이상을 나타내는 것으로 잘 알려져 있다<sup>26~28)</sup>. 따라서 본 연구에서 계절별 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*의 풍도 차이는 조사 해역의 환경 차이에 기인한 것이라 여겨진다.

3.6. 극미소플랑크톤의 수직분포

분류군별 수직 분포는 계절별로 다른 형태를 보였다. *Prochlorococcus*는 표층과 20 m층에서 춘계와 추계에 비교적 높은 개체수 분포를 보인 반면 하계에는 낮은 개체수 분포를 나타내었다(Fig. 6). 춘계 조사시 표층과 20 m층에서 최대  $95.09 \times 10^3 \text{ cells/ml}$ ,  $123.97 \times 10^3 \text{ cells/ml}$ 으로 수층별 평균이 각각  $10^5 \text{ cells/ml}$  이상으로 비교적 높은 개체수 분포층이었으나 50~100 m층에서는 급격히 감소하여  $10^3 \text{ cells/ml}$  이하의 분포를 보였다. 하계 조사 시는 표층에서 50 m층 사이에  $10 \times 10^3 \text{ cells/ml} \sim 30 \times 10^3 \text{ cells/ml}$  범위의 보였으며 100 m층에서는  $10^3 \text{ cells/ml}$  이하로 춘계 조사 시에 비해 정점 U-1의 20 m층( $175.12 \times 10^3 \text{ cells/}$

ml)을 제외하고는 낮은 개체수 분포를 보여 정점별 평균  $2 \times 10^4 \text{ cells/ml}$  이하로 나타났다. 추계 조사시는 표층과 20 m층에서 각각 평균  $118 \times 10^3 \text{ cells/ml}$ ,  $133 \times 10^3 \text{ cells/ml}$ 로 높은 개체수 분포로 50 m와 100 m층에 비해서 8~33배 정도 높은 개체수 분포를 보였다.

일반적으로 알려진 *Prochlorococcus*의 수직분포는 표층에서 유광대 깊이까지  $1.0 \times 10^5 \text{ cells/ml} \sim 3.0 \times 10^5 \text{ cells/ml}$  범위의 균질한 개체수를 나타낸다고 보고되었다<sup>29)</sup>. 그러나 본 연구에서는 *Prochlorococcus*는 모든 계절에 대부분의 조사정점에 있어서 표층과 20 m층에서 높은 개체수를 보였으나 그 이하의 수심에서는 개체수가 급격히 감소하는 형태를 보였다. *Prochlorococcus*는 열대 동태평양 해역에서는 100 m 수층에서도  $1.0 \times 10^4 \text{ cells/ml}$  이상을 보이는 것으로 알려져 있으나<sup>28)</sup> 본 연구 해역에서는 100 m층에서  $1.0 \times 10^3 \text{ cells/ml}$  정도의 개체수 분포를 보여 표층과 20 m층에 비해 1/10 수준의 개체수 분포를 보였다. 본 조사 수역의 100 m층에서 *Prochlorococcus* 개체수 감소는 질산염의 농도와 *Prochlorococcus* 풍도가 역상관 관계임을 잘 보여주고 있다. *Prochlorococcus*는 실내 배양시 질소계 영양염 중  $\text{NO}_3^-$ 를 성장에 이용하지 않으나<sup>30,31)</sup> 유기질소 화합물은 흡수하는 것으로 알려져 있다<sup>32)</sup>. 따라서 표층에 영양염이 공급되는 용승환경에서는 생체량은 낮은 것으로 알려져 있다. 또한 *Prochlorococcus*의 풍도와 성장률은 질산염과 인산염과는 역상관 관계를 보이는 것으로 알려져 있다<sup>27,28,33,34)</sup>. 일부 보고에 따르면 *Prochlorococcus*는 동중국해의 연안역에서는  $3 \mu\text{g}$

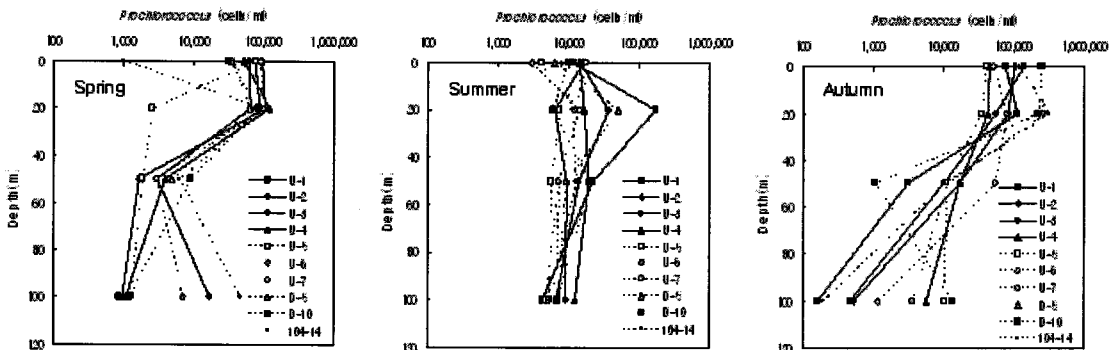


Fig. 6. Vertical profiles of *Prochlorococcus* cell abundance at each station.

-at/L 이상에서는 분포하지 않는 것으로 보고되었지만 황해로 유입되는 쿠로시오 지류의 영향을 받는 동중국해 북동부 해역에서는 6  $\mu\text{g-at/L}$  이상의 농도에서도 분포하는 것으로 알려져 있으며 이러한 농도 분포는 *Prochlorococcus*가 분포하는 영양염 한계 농도에 해당한다고 보고되었다<sup>17)</sup>. 그러나 본 연구에서는 *Prochlorococcus*의 춘계 U-1 정점의 20 m층에서 질산염의 농도가 6.080  $\mu\text{g-at/L}$ 이었으나  $112 \times 10^3$  cells/ml의 개체수를 보여 영양염 한계 농도와 일치하지 않는 결과를 보였다. Noh 등<sup>24)</sup>에 의하면 하계 동해에서 *Prochlorococcus*는 표층~30 m 수층까지 유사한 풍도를 보이다 이하의 수심에서 감소한다고 보고하였으나 본 연구에서는 춘계와 추계에 50 m 수층에서 풍도가 급격히 감소하는 형태를 보였고 하계에는 낮은 풍도로서 수층별 풍도 변화가 적었다.

*Synechococcus*는 계절별로 최대 개체수 분포 수층이 다르게 나타났다. 춘계 조사시 표층은  $0.33 \times 10^3$  cells/ml ~  $5.95 \times 10^3$  cells/ml의 개체수를 보였으나 수심 50 m층에서는  $11.31 \times 10^3$  cells/ml ~  $486 \times 10^3$  cells/ml로 증가하여 비교적 높은 개체수가 나타났다(Fig. 7). 50 m층의 평균 개체수는 표층과 20 m층의 평균 개체수에 비해 각각 70배와 7배 이상 높은 개체수 분포를 보였다. 하계 조사 시는 춘계 조사 시와는 다르게 20 m층에서 개체수 최대층이 나타났다. 표층은  $179 \times 10^3$  cells/ml ~  $393 \times 10^3$  cells/ml, 20 m층은  $383 \times 10^3$  cells/ml ~  $1.19 \times 10^6$  cells/ml로 거의 대부분의 정점에서 고른 분포를 보였으며 수층별로는 20 m층에서  $10^6$  cells/ml 이상의 매우 높은 개체수 분포를 보였다. 추계에는 표층과 20 m층의 개체수 분포

가 각각 최대  $54.26 \times 10^3$  cells/ml,  $29.79 \times 10^3$  cells/ml로 나타났으며 50 m층에서는  $10^3$  cells/ml 이하의 매우 낮은 개체수를 나타내었다. 춘계와 하계 조사 시에 비해 추계에는 개체수 최대층이 뚜렷하지 않았다. 본 연구에서는 *Synechococcus*의 풍도가 높은 수층에서는 *Prochlorococcus*의 풍도가 상대적으로 낮은 형태를 나타내었다. *Synechococcus*는 표층에서는 개체수 풍도가 낮고 20~50 m층의 밀도약층 부근에 개체수 최대층이 뚜렷하게 형성되었다. 일반적으로 *Synechococcus*는 열대와 아열대의 빈영양 수역에서는 개체수 최대층이 밀도약층 바로 상부에 나타난다고 보고된 바 있다<sup>14,35)</sup>. *Synechococcus*는 풍부한 광하에서 밀도약층 하부로부터 공급되는 질산염을 효율적으로 이용함으로써 개체수가 발달하는 것으로 알려져 있으며<sup>25)</sup> 질산염의 유입에 빠른 반응을 보이며 증식이 일어나는 것으로 알려져 있다<sup>36)</sup>. 본 연구에서도 *Synechococcus*는 영양염의 농도가 비교적 높은 수층인 20~50 m 수층에서 개체수 최대층을 보였으며 또한 표면하층보다는 표면혼합층에서 개체수 최대층을 보이다가 밀도약층 하부에서 감소하는 형태의 수직분포를 보이기도 한다. 이러한 수직분포 형태는 본 연구에서 하계에 수온약층이 발달한 수심 20 m에서 *Synechococcus*의 개체수 최대층이 나타난 것과 잘 일치한다. Noh 등<sup>24)</sup>에 의하면 하계 동해에서 *Synechococcus*는 표층~30 m 수층까지 높은 풍도를 보이다 이하의 수심부터 풍도 감소가 증가한다고 보고하였으며 이는 본 연구에서 하계 *Synechococcus*의 풍도 변화와 같은 형태를 보였다.

Picoeukaryotes는 *Synechococcus*와 매우 비슷한 수

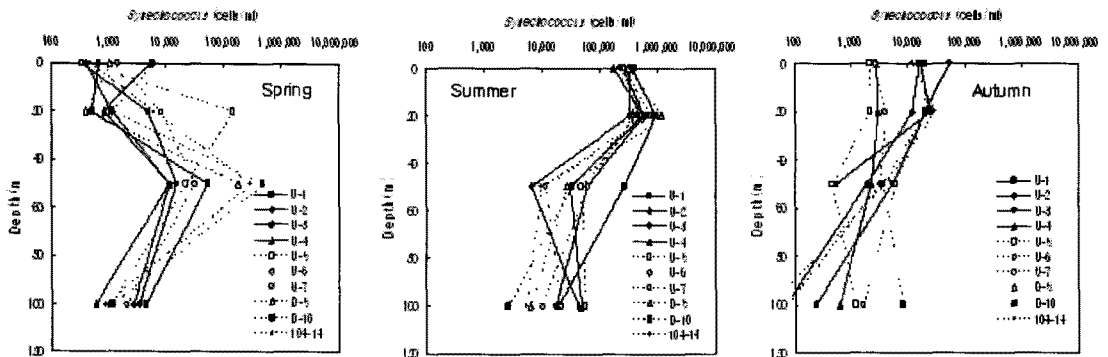


Fig. 7. Vertical profiles of *Synechococcus* cell abundance at each station.

직분포를 보였다. 춘계 조사 시는 개체수 최대층이 50 m층에서 나타났으나 하계 조사 시에는 20 m층에서 가장 높은 분포를 보였다(Fig. 8). 추계에는 표층에서 50 m층 사이에  $2.13 \times 10^3$  cells/ml ~  $5.06 \times 10^3$  cells/ml로 매우 낮은 개체수를 나타내어 뚜렷한 개체수 최대층이 나타나지 않았다. Campbell 등<sup>35)</sup>에 의하면 태평양 아열대 수역에서 Picoeukaryotes의 개체수 최대층이 *Synechococcus* 보다 약간 깊은 수심에 형성된다고 보고하였으나 본 연구에서는 계절별로 *Synechococcus*와 같은 수심에서 개체수 최대층이 발달한 형태를 보였다. Noh 등<sup>24)</sup>에 따르면 동해에서 하계 20 m와 30 m에서 풍도 최대층이 나타난 후 이하의 수심에서 감소한다고 알려졌으며 이러한 결과는 본 연구에서 하계에 20 m층에서 최대 풍도를 보인 것과 일치하였다. 일반적으로 Picoeukaryotes의 수직분포는 수심 20~50 m층에서 개체수 최대층을 보이다 그 이하의 수심에서 감소하는 수직분포 형태를 보여 *Synechococcus*와 비슷한 수직분포 형태를 보이는 것으로 알려져 있으며 이는 환경에 반응하는 생태·생리적 특성이 *Synechococcus*와 매우 유사함을 보여준다.

### 3.7. 개체군별 탄소추정량

초미소플랑크톤 개체군별 탄소변환 상수를 이용하여 생체량 비율을 비교하였다(Table 3). 춘계의 정점별 생체량은 66.9~671.8으로 Picoeukaryotes가 42.2~72.5%로 가장 높은 점유율을 보였으며, 정점 D-5와 104-14에 비해 U라인에서 비교적 낮은 20 mg C/m<sup>2</sup> 이하의 생체량을 보여 정점간 변화가 크게 나타났다. 개체군별 점유율은 정점에 따라 차이를 보

였으며 U라인에서는 Picoeukaryotes가 60% 전후로 높은 점유율을 보였고, D라인에서는 *Prochlorococcus*가 5% 이하의 낮은 점유율을 보였으며 Picoeukaryotes와 *Synechococcus*의 비율은 비슷하게 나타났다. 하계에는 319.7~1,055.9 mg C/m<sup>2</sup>으로 정점 U-1에서 1,000 mg C/m<sup>2</sup> 이상의 높은 생체량을 보였으며 그 외 다른 정점에서 비교적 정점 간 변화가 적으면서 높은 생체량 분포를 보였다. 개체군별로는 *Synechococcus*가 55.3~79.2%의 점유율을 나타내어 하계의 생체량을 결정짓는 분류군이었다. 추계에는 74.7~108.2 mg C/m<sup>2</sup>으로 104-14점을 제외하고는 100 mg C/m<sup>2</sup> 이하의 생체량 분포를 보였다.

전체 생체량은 하계에 가장 높았고, 추계에 낮았으며 개체군별 생체량은 계절에 따라 비교적 뚜렷한 분포 변화를 보였다. 특히 *Synechococcus*는 하계에 생체량 점유율이 70% 전후인 반면에 *Prochlorococcus*는 생체량이 0.8~2.8%로 상반되는 생체량 분포를 보여 개체군별 생체량 변화가 뚜렷하였다. Picoeukaryotes는 하계에는 비교적 낮았으나 춘계와 추계에는 비교적 높은 생체량 분포를 나타내었다. Noh 등<sup>28)</sup>에 의하면 동중국해의 극미소플랑크톤의 생체량 중 Picoeukaryotes가 매우 높게 나타났다고 보고되었으며 본 연구 해역에서도 Picoeukaryotes가 다른 분류군에 비해 높은 생체량을 나타내었다. 이러한 극미소플랑크톤 생체량의 계절변화는 클로로필-*a*의 계절 변화와 잘 일치하였다. 클로로필-*a*의 농도가 특히 높았던 하계 U-1과 U-3 정점의 클로로필-*a* 농도는 각각 6.05, 3.68  $\mu\text{g/l}$ 였으며 이때의 추정된 물기중내의 탄소량은 각각 1,055, 581 mg C/m<sup>2</sup>

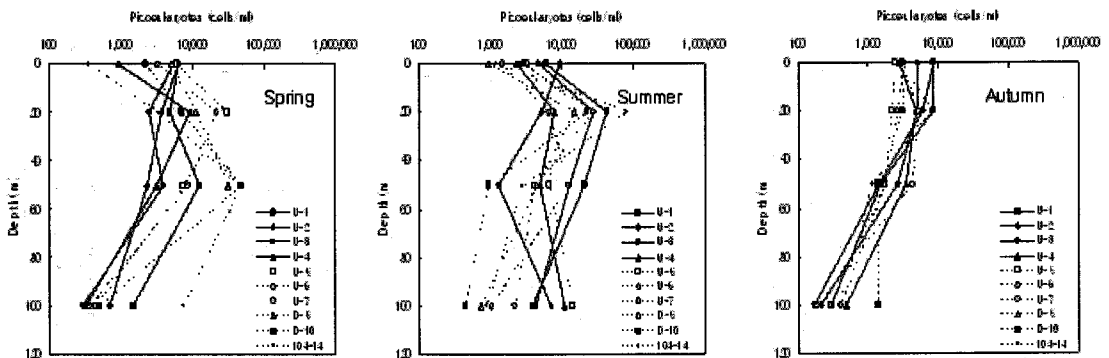


Fig. 8. Vertical profiles of Picoeukaryotes cell abundance at each station.



**Table 3.** Comparison of estimated carbon biomass of *Prochlorococcus*, *Synechococcus* and Picoeukaryotes

Season	St.	Carbon biomass(mgC/m <sup>2</sup> )			Total
		<i>Prochlorococcus</i>	<i>Synechococcus</i>	Picoeukaryotes	
Spring	U-1	15.9 (10.0)	43.9 (27.8)	98.3 (62.2)	158.0
	U-3	14.9 (21.7)	15.5 (22.5)	38.4 (55.8)	68.7
	U-6	19.1 (11.6)	28.7 (16.5)	126.0 (72.5)	173.7
	D-10	14.8 (2.2)	373.7 (55.6)	283.4 (42.2)	671.8
	104-14	20.1 (3.7)	228.1 (42.2)	292.7 (54.1)	540.9
Summer	U-1	29.0 (2.8)	742.5 (70.3)	284.4 (26.9)	1,055.9
	U-3	9.5 (1.6)	389.3 (66.7)	185.2 (31.7)	581.4
	U-6	4.4 (1.2)	287.1 (74.7)	92.7 (24.1)	384.3
	D-10	6.5 (1.6)	316.1 (77.0)	88.1 (21.5)	410.6
	104-14	5.3 (0.8)	374.5 (55.3)	297.2 (43.9)	677.0
Autumn	U-1	19.7 (23.2)	15.5 (18.2)	49.8 (58.6)	84.9
	U-3	17.0 (20.6)	24.4 (29.5)	41.3 (49.9)	82.7
	U-6	24.9 (33.3)	5.0 (6.6)	44.9 (60.1)	74.7
	D-10	44.3 (47.7)	19.8 (21.8)	26.9 (29.5)	91.0
	104-14	49.8 (46.0)	19.5 (18.0)	38.9 (36.0)	108.2

\* numbers in the parenthesis indicate percentage

으로 조사기간 중 가장 높은 탄소량을 나타내었다. 이는 Noh 등<sup>28)</sup>의 열대 동태평양 해역의 극미소플랑크톤 생체량과 클로로필-*a*의 농도와 일치하지 않았던 결과와는 상반되는 것이었다. 일반적으로 생체량은 전 지구적 범위와 지역적 범위의 차이를 보이는 것으로 알려져 있으며 분류군 중 *Prochlorococcus*는 40°N~40°S의 위도 사이에 제한적으로 분포하며 열대와 아열대의 빈영양 환경에서 높은 개체수를 보인다고 알려져 있다<sup>26)</sup>. 또한 Noh 등<sup>28)</sup>에 의하면 적조대 용승환경과 연계된 수렴환경에서는 *Synechococcus*와 Picoeukaryotes는 생체량이 높고 반면에 *Prochlorococcus*는 낮은 생체량을 보인다고 알려졌다. 본 연구에서는 *Synechococcus*의 생체량이 가장 높았던 하계의 질산염의 농도는 최대 농도가 1.5 μg-at/l 이하로 다른 계절에 비해 낮았으며 이는 *Synechococcus*의 개체군 증식에 소모된 것으로 추정된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 울릉도 주변 해역에서 독립영양 극미소플랑크톤의 분류군별 계절 변동 특성을 밝히기 위해 2006년 6월, 8월, 10월 조사를 수행하였다. 극미소플랑크톤은 flow cytometry 방법을 이용하여 *Synechococcus*, *Prochlorococcus* 및 Picoeukaryotes로

구분하여 분석하였다. 분석 결과 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*는 계절에 따른 개체수 풍도가 상반되게 나타났다. *Synechococcus*는 분류군 중 가장 뚜렷한 계절변동 특성을 나타내어 하계에 정점 평균 250.89×10<sup>3</sup> cells/ml의 풍도를 보였으며 춘계와 추계보다 평균 7~27배 이상 높은 현존량 분포를 보였다. 반면에 *Prochlorococcus*는 하계에 2.9×10<sup>3</sup> cells/ml로 매우 낮은 현존량을 보여 *Synechococcus*와 상반되는 계절 변동 특성을 보였다. Picoeukaryotes는 다른 분류군에 비해 비교적 낮은 현존량을 나타내었으며 *Synechococcus*와 비슷한 계절 분포를 보였다. 현존량의 계절 변동이 가장 작은 분류군은 Picoeukaryotes이었으나 계절변동이 가장 큰 분류군은 *Synechococcus*로 나타났다.

#### 감사의 글

이 논문은 국립수산과학원 동해수산연구소에서 수행 중인 동해 해양환경 연구(RP-2008-ME-052)의 일환으로 수행되었습니다. 본 논문을 심사해주신 심사위원님들과 현장조사와 분석에 도움을 주신 동해수산연구소 환경연구과 연구원들께 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고 문헌

- 1) Joint I. R., Wollast R., Chou L., Batten S., Elskens M., Edwards E., Hirst A., Burkill P. H., Groom S., Gibb S. W., Miller A., Hydes D., Dehairs F., Antia A., Barlow R. G., Rees A. P., Pomroy A. J., Brockmann U., Cummings D. G., Lampitt R., Loijens M., Mantoura R. F. C., Miller P., Raabe T., Alvarez-Salgado X., Stelfox C. E., Woolfenden J., 2001, Pelagic production at the Celtic Sea shelf break, *Deep-Sea Res.*, 48, 3049-3081.
- 2) Karl D. M., Bidigare R. R., Letelier R. M., 2001, Long-term changes in plankton community structure and productivity in the North Pacific Subtropical Gyre: the domain shift hypothesis, *Deep-Sea Res.*, 48, 1449-1470.
- 3) Sanders R. W., Berninger U. G., Lim E. L., Kemp P. F., Caron D. A., 2000, Heterotrophic and mixotrophic nanoplankton predation on picoplankton in the Sargasso Sea and on Georges Bank, *Mar. Eco. Pro. Ser.*, 192, 103-118.
- 4) Li W. K. W., Subba Rao D. V. W., Harrison G., Smith J. C., Cullen J. J., Irwin B., Platt T., 1983, Autotrophic picoplankton in the tropical ocean, *Science*, 219, 292-295.
- 5) Liu H., Suzuki K., Saito H., 2004, Community structure and dynamics of phytoplankton in the western subarctic Pacific Ocean synthesis, *J. Oceanogr.*, 60, 119-137.
- 6) Campbell L., Nolla H. A., Vault D., 1994, The importance of *Prochlorococcus* to community structure in the central North Pacific Ocean, *Limnol. Oceanogr.*, 39, 954-961.
- 7) Shimada A., Kawaguchi S., Maruyama T., Naganibu M., 1999, Flow cytometric analysis of picophytoplankton in the South Pacific and Antarctic Oceans, In: Charpy and A.W.D. Karkum, *Marine Cyanobacteris*, Institut. Oceanographique, Monaco, 256.
- 8) Li W. K. W., Harrison W. G., 2001, Chlorophyll, bacteria and picophytoplankton in ecological provinces of the North Atlantic, *Deep-Sea Res.*, 48, 2271-2293.
- 9) Legendre L., Rassoulzadegan F., 1996, Food-web mediated export of biogenic carbon in oceans hydrodynamics control, *Mar. Eco. Pro. Ser.*, 145, 179-193.
- 10) Tarran G. A., Zubkov M. V., Sleight M. A., Burkill P. H., Yallop M., 2001, Microbial community structure and standing stocks in the NE Atlantic in June and July of 1996, *Deep-Sea Res.*, 48, 963-985.
- 11) Vanucci S., Mangoni O., 1999, Pico and nanophytoplankton assemblages in a subantarctic ecosystem in the Strait of Magellan, *Bota. Mari.*, 42, 563-572.
- 12) Partensky F., Hess W. R., Vault D., 1999, *Prochlorococcus*, a marine photosynthetic prokaryote of global significance, *Micro. Mol. Bio. Rev.*, 63, 106-127.
- 13) Chisholm S. W., Olson R. J., Zetter E. R., Goerike R., Waterbury J. B., Welschmeyer N. A., 1988, A novel free-living prochlorophyte abundant in the oceanic euphotic zone, *Nature*, 334, 340-343.
- 14) Olson R. J., Chisholm S. W., Zettler E. R., Altabet M. A., Armbrust E. V., 1988, Analysis of *Synechococcus* pigment types in the sea during single and dual beam flow cytometry, *Deep-Sea Res.*, 35, 425-440.
- 15) Kang J. H., Kim W. S., Chang K. I., Noh J. H., 2004, Distribution of plankton related to the mesoscale physical structure with in the surface mixed layer in the southwestern East Sea, Korea, *J. Plankton Res.*, 26, 1515-1528.
- 16) Jiao N. Z., Yang Y. H., Koshikawa H., Watanabe M., 2002, Influence of hydrographic conditions on picoplankton distribution in the East China Sea, *Aqua. Micro. Ecol.*, 30, 37-48.
- 17) Jiao N. Z., Yang Y. H., Hong N., Ma Y., Harada S., Koshikawa H., Watanabe M., 2005, Dynamics of autotrophic picoplankton and heterotrophic bacteria in the East China Sea, *Conti. Shelf Res.*, 25, 1265-1279.
- 18) Pan L. A., Zhang L. H., Zhang J., Josep M. G., Chao M., 2005, On-board flow cytometric observation of picoplankton community structure in the East China Sea during the fall of different years, *FEMS. Microb. Ecol.*, 52, 243-253.
- 19) Noh J. H., Yoo S. J., Lee J. A., Kim H. C., Lee J. H., 2005, Phytoplankton in the waters of the Ieodo Ocean Research Station determined by microscopy, flow cytometry, HPLC pigment data and remote sensing, *Ocean Polar Res.*, 27, 397-417.
- 20) Parson T. R., Maita Y., Lalli C. M., 1984, A manual of chemical and biological methods for seawater analysis, Pergamon Press, New York, 173.
- 21) Charry L., Blanchot J., 1998, Photosynthetic picoplankton in French Polynesian atoll lagoons: estimation of taxa contribution to biomass and production by flow cytometry, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 162, 57-70.
- 22) Blanchot J. J., Andre M., Navarette C., Neveux J., Radenac M. H., 2001, Picophytoplankton in the equatorial Pacific: vertical distributions in the warm pool and in the high nutrient low chlorophyll condition, *Deep-Sea Res.*, 48, 297-314.
- 23) Park M. O., 2006, Composition and distributions of phytoplankton with size fraction results at southwestern East/Japan Sea, *J. Ocean Sci.*, 41(4), 301-313.
- 24) Noh J. H., Yoo S. J., Kang S. H., 2006, The summer distribution of picophytoplankton in the Western

- Pacific, Korean J. Environ. Biol., 24, 67-80.
- 25) Moore L. R., Post A. F., Rocap G., Chisholm S. W., 2002, Utilization of different nitrogen sources by the marine cyanobacteria *Prochlorococcus* and *Synechococcus*, Limnol. Oceanogr., 47, 989-996.
- 26) Partensky F., Blanchot J., Vault D., 1999, Differential distribution of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in oceanic waters, Marine cyanobacteria, ed. Oceanogr. Monaco, 19, 457-475.
- 27) Landry M., Kirshtein R. J., Constantinou J., 1996, Abundance and distribution of picoplankton in the central equatorial Pacific from 12°N to 12°S, 140°W, Deep-Sea Res., 43, 871-890.
- 28) Noh J. H., Yoo S. J., Lee M. J., Son S. K., Kim W. S., 2004, A Flow cytometric study of autotrophic picoplankton in the Tropical Eastern Pacific, Ocean polar Res., 26, 273-286.
- 29) Partensky F., Blanchot J., Lantoine F., Neveux J., Marie D., 1996, Vertical structure of picophytoplankton at different trophic sites of trophic northeastern Atlantic Ocean, Deep-Sea Res., 43, 1191-1213.
- 30) Moore L. R., Post A. F., Rocap G., Chisholm S. W., 2002, Utilization of different nitrogen sources by the marine cyanobacteria, *Prochlorococcus* and *Synechococcus*, Limnol. Oceanogr., 47, 989-996.
- 31) Rippka R., Coursin T., Hess W., Lichtle C., Scanlan D. J., Palinska K. A., Itean I., Partensky F., Houmar J., Herdman M., *Prochlorococcus marinus* Chisholm et al. 1992 subsp. *pastoris* subsp. nov. strain PCC9511, the first axenic chlorophyll a(2)/b(2)-containing cyanobacterium(Oxyphotobacteria), J. Sys. Evol. Microb., 50, 1833-1847.
- 32) Zubkov M. V., Fuchs B. M., Tarran G. A., Burkill P. H., Amann R., 2003, High rate of uptake of organic nitrogen compounds by *Prochlorococcus* cyanobacteria as key to their dominance in oligotrophic oceanic waters, Appl. Environ. Microb., 69(2), 1299-1304.
- 33) Liu H., Campbell L., Landry M. R., Nolla H. A., Brown S. L., Constantinou J., 1998, *Prochlorococcus* and *Synechococcus* growth rates and contribution to production in the Arabian Sea during the 1995 Southwest and Northeast Monsoons, Deep-Sea Res., 45, 2327-2352.
- 34) Partensky F., Blanchot J., Vault D., 1999, Differential distribution and ecology of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in oceanic waters: a review. In: L. Charpy and A. W. D. Larkum, Editors, Marine Cyanobacteria, Musee Oceanographique, Monaco, 457-475.
- 35) Campbell L., Nolla H. A., Vault D., 1993, Photosynthetic picoplankton community structure in the subtropical north Pacific Ocean Hawaii (station ALOHA), Deep Sea Res., 40, 2043-2060.
- 36) Glover H. E., Prezelin B. B., Campbell L., Garside C., 1988, A nitrate-dependent *Synechococcus* bloom in surface Sargasso Sea water, Nature, 331, 161-163.