Article

Flow cytometer를 이용한 열대 동태평양의 독립영양 극미소 플랑크톤 연구

노재훈^{1*} · 유신재¹ · 이미진² · 손승규³ · 김웅서³¹한국해양연구원 해양생물자원연구본부²한국해양연구원 정책조정실³한국해양연구원 해저환경 · 자원연구본부

(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

A Flow Cytometric Study of Autotrophic Picoplankton in the Tropical Eastern Pacific

Jae-Hoon Noh^{1*}, Sin-Jae Yoo¹, Mi-Jin Lee², Seung-Kyu Son³, and Woong-Seo Kim³¹Marine Living Resources Research Division, KORDI²Policy Coordination Department, KORDI³Marine Geoenvironment and Resources Research Division, KORDI

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

Abstract : The effects of environmental forcing on autotrophic picoplankton distributional patterns were investigated for convergence (5°N), divergence (9°N-10°30'N) and oligotrophic (17°N) sites in the tropical eastern Pacific during 2001 and 2003 KODOS (Korea Deep Ocean Study) cruises. The distributions of picoplankton populations - *Prochlorococcus*, *Synechococcus* and picoeukaryotes algae - were determined by flow cytometric analyses. Latitudinal variations in abundance maxima, vertical profiles, integrated abundance (0-150 m), and estimated carbon biomass were contrasted for each site according to three hydrological conditions. *Prochlorococcus* showed consistently high abundance in the surface mixed layers of all sites at $1 \times 10^5 \sim 3 \times 10^5$ cells mL^{-1} and showed declining abundance below these layers. However, these decreasing rates were not particularly sharp showing considerably high abundance at 1×10^4 cells mL^{-1} or higher even at 100 m depth. Vertical profiles of *Synechococcus* and picoeukaryotes were generally parallel to each other in all sites. A clear abundance maximum was observed at divergence site at or slightly above the pycnocline depth. Higher abundance was observed at the surface mixed layer for convergence site but a sharp decrease was observed below the pycnocline. However, there was no significant abundance fluctuation with depth at more oligotrophic site (17°N). Integrated cell abundance of *Prochlorococcus* was high in the oligotrophic site at 2.17×10^{13} cells m^{-2} , and low in the convergence site at 0.88×10^{13} cells m^{-2} . However, opposite pattern was observed for *Synechococcus* and picoeukaryotes where relatively high integrated cell abundance was shown in the convergence site. Estimated carbon biomass of *Prochlorococcus* contributed 30.4-80.3% of total autotrophic picoplankton carbon showing the highest contribution in the oligotrophic site and the lowest contribution in the convergence site. *Synechococcus* contribution of total autotrophic picoplankton carbon biomass was lower than 5.8% for most of sites except the convergence site where *Synechococcus* contributed 23.2% of picoplankton carbon biomass. Carbon biomass of picoeukaryotes was 18.8-46.4% showing the highest carbon biomass at the convergence site. Overall, *Prochlorococcus* showed higher cell abundance and carbon biomass and exhibited different reaction to hydrological conditions when compare with the other two major autotrophic picoplankton groups.

Key words : 극미소 플랑크톤(picoplankton), 유세포 분석기(flow cytometer), 세포 개체수(cell abundance), 수렴(convergence), 발산(divergence), 빈영양(oligotrophic)

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

1. 서 론

해양에 분포하는 세포직경이 2~3 μm 이하의 극미소 플랑크톤(picoplankton)에는 종속영양 박테리아나 바이러스와 같은 종속 영양생물체 뿐 아니라 광합성 능력이 있는 원핵성 및 진핵성 세포들이 포함된다. 원핵성 남세균에 속하는 극미소 플랑크톤은 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*가 대표적이며(Palenik and Haselkorn 1992; Urbach et al. 1992), 진핵성은 Pelagophyceae, Bolidophyceae, Chlorophyceae 등의 다양한 분류군에 속해있다(Andersen et al. 1993; Guillou et al. 1999; Moon-van der Staay 2001). 이들 독립 영양 극미소 플랑크톤은 전세계 넓은 해역에서 생체량과 일차생산력에 높은 기여를 하고 있다(Partensky et al. 1999a).

열대 태평양은 위도에 따른 동서방향의 해류의 변화를 환경을 결정짓는 중요한 요인으로 작용한다(Wyrtki and Kilonsky 1984). 태평양 적도대의 용승 현상은 남아메리카 연안으로부터 날짜 변경선까지 넓은 지역에서 일어나며, 표층수로 다량의 영양염과 CO_2 가 공급된다(Chavez et al. 1996). 이 지역은 연안의 용승 지역과 달리 식물플랑크톤 생체량이 낮게 나타나는 HNLC(high-nutrient low-chlorophyll) 환경이 형성되며(Chisholm and Morel 1991), 이는 biological pump의 역량 약화로 연결되어 궁극적으로 1년에 1gigaton의 CO_2 를 대기로 방출하게 된다(Tans et al. 1990). 또한 전세계 기상변화를 초래하는 엘니뇨 및 라니냐 현상에 의한 해양 및 기상변화가 나타나는 중심지역이기도 하다. 이러한 지역적 중요성으로 인해 JGOFS 프로그램은 태평양 적도대의 생지화학적 순환이 전체 해양에서 발생하는 현상들에 미치는 영향이나, 태평양 적도대의 biological pump의 역량, 엘니뇨 남방진동에 대한 반응 등을 연구하고 있다(Le Borgne et al. 2002).

열대 태평양 빈영양 수역은 물론 적도 용승대까지 독립 영양 극미소 플랑크톤이 높은 생체량을 나타내 3 μm 이하로 분급된 엽록소-a는 전체 엽록소의 70% 이상을 점유한다(Le Bouteiller and Blanchot 1991; Bidigare and Ondrusek 1996). 1988년 flow cytometer를 이용한 분석이 도입되며 극미소 플랑크톤의 분류군별 분포에 새로운 사실이 밝혀졌다(Chisholm et al. 1988). 이전의 관점과 달리 *Synechococcus*에 비해 *Prochlorococcus*의 개체수가 적도 용승대에서 최소한 10배 이상, 빈 영양 수역에서 100배 정도 풍부하였다(Landry et al. 1996; Partensky et al. 1999a). 각 분류군의 극미소 플랑크톤이 갖는 생태·생리적 다양성은 이들이 열대 태평양의 다양한 환경에서 우점적 지위를 유지하는 데 중요한 역할을 하고 있다(Moore et al. 2002). Flow cytometer를 이용한 극미소 플랑크톤의

분포연구는 각 분류군별 생태·생리적 특성은 물론 열대 태평양해역의 일차생산력이나 물질순환 등 환경 조절자로서 극미소 플랑크톤의 중요성과 역할에 대해 많은 정보를 제공하고 있다(Landry and Kirchman 2002; Le Borgne et al. 2002).

본 연구는 열대 동태평양의 3가지 다른 환경에서 flow cytometer를 이용 분류군별 독립영양 극미소 플랑크톤의 수평·수직적 분포특성을 밝히기 위해 수행되었다. 적도 용승과 연계된 수렴대, 적도반류와 북적도해류 경계 해역의 발산대 그리고 극한 빈 영양 환경을 보이는 17°N 수역의 수문학적 특징과 이에 반응하여 나타난 극미소 플랑크톤의 분포를 통해 각 분류군의 생태·생리학적 차이점과 생체량 관점에서의 상대적 중요성을 알아보고자 하였다. 또한 열대 태평양의 환경과 생태계에 대한 이해의 폭을 넓혀 향후 심해저자원 개발시 나타날 환경변화의 예측 및 대응방안을 위한 기반을 확립하고자 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

조사수역 개관

극미소 플랑크톤 조사는 2001년 7월과 2003년 8월 동태평양 열대수역에서 수행되었다(Fig. 1). 2001년 조사(KODOS '01)는 북위 10°30'을 잇는 동서방향 관측선상에 위치한 4개 정점(정점 H3, H5, H7, H10)에서 이루어졌다. 2003년 조사(KODOS '03)는 서경 131°30' 상의 남북방향 관측선에 위치한 3개 정점(정점 N5, N9, N17)에서 이루어졌다.

열대 태평양해역은 중위도와 달리 해류의 주된 방향이 동서방향이다. 30°S~5°N 사이 해역의 상층에서는 서향의 남적도해류가, 5°~10°N는 동향의 북적도반류가 나타나며, 10°~30°N 사이의 해역에서는 다시 서향의 북적도해류가 나타난다(Wyrtki and Kilonsky 1984). 남적도해류가 흐르는 5°S~5°N 사이를 중심으로 적도대 용승이 나타나는데, 용승해역은 남아메리카 연안으로부터 날짜 변경선에 이르는 광활한 해역에서 동서방향으로 발달하여 있다(Wyrtki 1981). 용승해역은 영양염 농도는 높으나 엽록소 농도는 낮은 HNLC(High Nutrient Low Chlorophyll) 해역특성을 나타낸다(Chisholm and Morel 1991). HNLC해역은 영양염 공급에 비해 엽록소-a 농도의 큰 증가를 보이지는 않으나 주변해역보다는 상대적으로 높은 엽록소 농도를 나타낸다. 열대 동태평양의 수역별 엽록소-a 분포는 위성에서 관측된 이미지에 뚜렷이 나타난다(Fig. 1).

2001년 조사시의 동일 위도상에 위치한 4개 정점은 수문학적 특성이 유사한 해역에 위치한 반면 2003년 조사 정점은 환경특성이 서로 다른 해역에 위치하였다.

Fig. 1. Sampling stations during KODOS-'01 and KODOS-'03, and the distribution map of chlorophyll in the eastern Pacific derived from a monthly (July, 2003) composite data taken from SeaWiFS.

시료채취 및 분석방법

조사정점의 물리특성은 조사선 온누리호에 장착된 SBE 911 plus CTD를 이용 측정하였다. 엽록소-a, 극미소 플랑크톤, 영양염 분석을 위한 시료채취는 Rosette에 부착된 채수기(Niskin sampler)를 이용하여 표층에서 수심 200 m 사이의 7~9개 수층에서 이루어졌다.

엽록소-a

엽록소-a 농도 분석을 위해 층별 해수 2 l를 GF/F 여과지를 이용 거른 후, 여과지를 5 m/l의 90% 아세톤 용액에 넣어 4°C의 암소에서 24시간 색소를 추출하였다. 분석은 표준 엽록소-a(Sigma co.)로 보정된 형광측정기기(Turner Designs-10AU)를 이용하였다. 엽록소-a 농도는 Parsons *et al.*(1984)의 형광측정법을 이용 구하였다.

Flow cytometer를 이용한 극미소 플랑크톤 계수

극미소 플랑크톤 분석을 위한 시료는 층별 해수 3 m에 10% paraformaldehyde와 0.5% glutaraldehyde의 혼합액 0.3 ml 첨가한 후 액화질소에 넣어 냉동 보관하였다. 시료는 실험실로 옮겨 암소에서 녹인 후 산란과 형광을 표준화하기 위해 시료마다 내부표준물질을 첨가하였다. 내부

표준물질은 0.5 μm 직경의 yellow-green beads, 0.5 μm 직경의 UV beads 그리고 1 μm 직경의 yellow-green beads를 혼합하여 사용하였다. Flow cytometer는 UV(225 mW)와 488 nm(1 W)의 아르곤 이온 레이저가 장착된 Beckman-Coulter Altra를 이용하였다. *Synechococcus*와 *Prochlorococcus* 그리고 picoeukaryotes와 같이 광합성을 하는 극미소 플랑크톤은 각분류군의 forward light scattering(FLS), 엽록소에 의한 적색형광, phycoerythrin에 의한 오렌지색형광 특성 등 flow cytometer 상에서 이용되는 특징들(Olson *et al.* 1990a, b)을 이용 분리 계수하였다. Flow cytometer에서 산출된 자료는 FlowJo(Star, Inc., www.flowjo.com) 프로그램을 이용하여 분석하였다.

극미소 플랑크톤의 추정된 탄소량

Flow cytometer를 이용하여 구한 개체수를 이용 극미소 플랑크톤의 탄소 생체량을 구하기 위해 분류군별로 신뢰성 있다고 판단되는 변환계수를 이용하였다. *Prochlorococcus*와 *Synechococcus*는 Charpy and Blanchot(1998)이 측정한 탄소변환계수 53fgCcell⁻¹과 191fgCcell⁻¹을 적용하여 탄소량을 구하였다. Picoeukaryotes는 Blanchot *et al.*(2001)이 사용한 1,361fgCcell⁻¹을 적용 탄소량을 구하였다.

영양염

무기영양염류 분석을 위한 해수시료는 CTD Rosette에 부착된 채수기(Niskin sampler)를 이용하여 수심별로 채수하였다. 2001년 조사시는 정점 H10를 제외한 3개 정점에서 영양염 분석이 이루어지지 않았다. 채수된 시료는 염산(10% HCl) 처리된 플라스틱병(60 ml, HDPE)에 담아 냉동상태에서 실험실로 옮긴 후 Parsons *et al.*(1984)의 방법에 따라 영양염 자동분석기(Alliance)를 사용하여 질산염(nitrate + nitrite)과 인산염을 분석하였다.

3. 결 과

물리특성

열대 태평양 해역에 나타나는 해류의 주된 방향은 동서 방향으로 표층 순환체계는 10°N을 경계로 북쪽에서는 서향의 북적도해류가, 4°N~10°N 사이는 동향의 적도반류가

Fig. 2. North-south cross section showing vertical and meridional circulation in equatorial latitudes, the shape of the sea-surface and thermocline. Regions of eastward and westward flows are indicated by the letters E and W.

나타나며, 4°N 남쪽에서는 다시 서향의 남적도해류가 흐르는 특징을 보인다(Bearman 1989). 표층해류에 의해 10°N 부근에서 발산(divergence)에 의한 용승이 나타나 수온약층이 낮은 수심에 형성되고 4°N 부근에는 수렴(convergence)에 의해 수온약층이 깊어진다(Fig. 2). 그러나 적도반류는 계절 및 기후변동에 따라 남·북 방향으로 수백 km씩 이동되고, 경도에 따라서도 해류의 위치 및 폭이 차이를 나타내(Bitterman and Hansen 1989), 수렴 및 발산이 나타나는 위도는 시기적으로 큰 변화를 보일 수 있다. 2003년 조사시는 북적도 해류가 9°N의 부근에서 시작되며 발산에 의해 수온약층이 표층에 가장 근접하여 나타났다(해양수산부 2004).

열대 태평양의 해류 순환체계의 영향을 받은 물리특성은 2001년과 2003년 조사정점들에서 잘 나타나 있다. 2001년 조사정점은 동일한 위도상에 위치 정점들의 물리적 특성이 매우 유사하였으며 표면혼합층이 깊지 않았다(Fig. 3A). 표면혼합층의 수온은 약 28°C로 균질하며 깊이는 정점에 따라 27~42 m의 변화를 보였다. 표면혼합층 하부에는 급격한 수온경사를 보이는 수온약층이 발달하였다. 수온약층의 깊이나 수온경사 그리고 수온약층 하부에서의 수온 변화 등이 정점들간에 매우 유사한 구조를 나타냈다. 염분은 수심 약 30 m까지 표층 저염수가 분포하고 30~50 m 수층에 염분약층이 발달하여 급격히 염분이 증가하는 수직구조를 나타냈다(Fig. 3B). 염분약층이 시작되는 깊이는 약 30 m로서 수온약층보다 10 m 정도 표층에 접근된 구조를 보였다. 밀도약층은 염분약층과 같은 수심에서 나타났다(Fig. 3C).

2003년 조사정점들은 남북방향으로 위치하여 정점간에 매우 다른 물리특성을 나타냈다. 정점N5는 적도반류와 남적도해류의 수렴대에 위치 표면혼합층이 63 m로 깊고 수온약층의 경사는 정점N9보다 완만하며 수심 150 m의 수온도 정점N9보다 높았다(Fig. 4A). 염분은 표층에서 34.7 psu의 고염환경을 나타냈고 깊이에 따른 변화가 크지 않았다(Fig. 4B). 발산대에 위치 용승의 영향을 받은 정점N9

Fig. 3. Vertical profiles of temperature (A), salinity (B), Sigma-T (C) for sampling stations during KODOS-'01.

Fig. 4. Vertical profiles of temperature (A), salinity (B), Sigma-T (C) for sampling stations during KODOS-'03.

의 표면혼합층 깊이는 42 m이고 수온약층에서는 급격한 수온경사를 보였다. 표층의 염분은 33.4 psu의 저염이며 20~60 m 수층에서 염분약층이 나타났다. 정점N17의 수온 및 염분의 수직구조는 남쪽정점들과 매우 다른 양상을 나타냈다. 수온은 수심 증가에 따라 완만한 경사를 보여 뚜렷한 수온약층이 나타나지 않고 염분도 뚜렷한 염분약층이 없이 120 m 이하 수심에서 염분 최소층이 나타났다. 밀도약층은 정점N5에서 급격한 경사를 보이며 잘 발달하고, 정점N9는 상대적으로 깊은 수심에서 완만한 경사를 보였으며 정점N17에선 나타나지 않았다(Fig. 4C).

영양염 분포

정점H10의 질산염(nitrate+nitrite)농도의 수직구조는 밀도 구조와 유사한 경향을 나타냈다(Fig. 5A). 표면혼합층에서 0.48~0.77 μM 의 농도를 보이다 밀도약층에서 급격한 농도증가가 나타났으며 75 m 수심 아래서는 25 μM 이상의 농도를 보였다. 2003년 조사정점들은 서로 다른 수직분포 보였(Fig. 5B). 용승이 나타난 정점N9의 표면혼

합층에서 0.07~0.10 μM 의 낮은 농도를 보였으나 50 m에서 18.98 μM 로 급격한 농도 증가가 나타났다. 반면 수렴대에 위치한 정점N5는 50 m 수심에서 0.89 μM 로 농도 증가가 나타나기 시작하였다. 정점 N17에서는 100 m 수심까지 검출 이하의 농도를 보였으며 150 m 수심에서 3.87 μM 의 농도를 나타냈다.

인산염의 분포도 질산염과 유사하게 밀도약층과 밀접한 구조를 나타냈다(Fig. 6A,B). 정점H10, N5, N9의 수직구조는 표층수의 수렴 및 발산의 영향을 받은 구조를 나타냈다. 정점N17의 인산염은 수심 120 m까지 0.18~0.24 μM 의 농도를 보이다 150 m에서 0.55 μM 로 증가 하였다.

엽록소-a 분포

2001년 조사 정점들의 엽록소-a 수직분포는 밀도약층 깊이에서 수면하 엽록소 최대(subsurface chlorophyll maximum: SCM)가 잘 발달된 형태를 나타냈다(Fig. 7A). SCM은 표층의 엽록소 농도보다 약 2~3배 증가된 0.20~0.30 $\mu\text{g l}^{-1}$ 을 나타냈다. 2001년 조사 정점들은 정점간에

Fig. 5. Vertical profiles of nitrate + nitrite concentrations during KODOS-'01 (A) and KODOS-'03 (B) for selected sampling stations.

Fig. 6. Vertical profiles of phosphate concentrations during KODOS-'01 (A) and KODOS-'03 (B) for selected sampling stations.

Fig. 7. Vertical profiles of chlorophyll-a concentrations during KODOS-'01 (A) and KODOS-'03 (B) for each sampling station.

유사한 수직분포를 보인 반면 2003년 조사 정점들은 각기 다른 형태를 나타냈다. 수렴대의 정점 N5는 0~50 m 깊이의 넓은 층에서 높은 엽록소 농도를 나타냈으며 밀도약층 하부에서 급격히 낮아졌다(Fig. 7B). 반면 발산대의 정점 N9는 밀도약층인 50 m 수심에서 SCM이 뚜렷이 발달하였다. 엽록소 최대층은 $0.34 \mu\text{g l}^{-1}$ 로서 표층보다 약 3배 높은 농도를 나타냈다. 정점 N17은 표층에서 75 m 수심까지 낮은 농도를 보이다가 수심 120 m에서 SCM이 형성됐다.

2001년 조사정점들의 수심 150 m까지 적분된 엽록소-a 농도는 $13.73\sim 21.48 \text{ mg m}^{-2}$ 의 범위로 정점간에 56.4%의 변화를 보였다(Fig. 8). 2003년은 정점 N5에 25.51 mg m^{-2} 으로 가장 높고, 정점 N17에서 14.59 mg m^{-2} 으로 가장 낮아 정점간 74.9%의 변화율을 보였다. $2 \mu\text{m}$ 이하로 분급된 엽록소-a는 물기중내 전체 엽록소-a의 80.3~90.5%를

Fig. 8. 150 m depth integrated chlorophyll-a concentrations during both KODOS-'01(A) and KODOS-'03 (B) surveys (bar), and contribution of less than $2 \mu\text{m}$ pico-fraction in the total integrated chlorophyll-a concentration for KODOS-'03 (closed circle).

Fig. 9. Vertical distribution of picoplankton cell abundance during KODOS-'01 for *Prochlorococcus* (A), *Synechococcus* (B) and picoeukaryotes (C).

Fig. 10. Vertical distribution of picoplankton cell abundance during KODOS-'03 for *Prochlorococcus* (A), *Synechococcus* (B) and picoeukaryotes (C).

차지하여 이들 극미소 플랑크톤이 연구해역의 식물 플랑크톤 생체량의 대부분을 차지하는 주된 일차생산자임을 나타냈다.

극미소 플랑크톤의 수직 분포

2001년 조사 정점들의 분류군별 수직분포는 유사한 구조를 나타낸 반면 2003년 조사 정점들은 서로 다른 형태를 나타냈다(Figs. 9, 10). 2001년 조사시는 *Prochlorococcus*가 가장 풍부한 개체수를 보였으며 *Synechococcus*나 picoeukaryotes와는 다른 수직분포 형태를 나타냈다. *Synechococcus*와 picoeukaryotes는 수심 30~50 m에서 개체수 최대층이 잘 발달된 형태의 수직분포를 보인 반면 *Prochlorococcus*는 뚜렷한 개체수 최대층이 발달하지 않고 수심 0~30 m에서 높은 개체수를 보이다 밀도약층 아래서 감소하는 형태를 나타냈다(Fig. 9). *Prochlorococcus*의 수직분포의 또 다른 특징은 밀도약층 하부에서 개체수 감소가 완만히 나타나 100 m 수심에서도 10^4 cells mL^{-1} 이상의 높은 개체수를 보인 점이다.

*Synechococcus*의 수직 분포는 30 m 수심에서 개체수 최대층이 잘 발달된 형태를 보였다. 표층은 0.79×10^3 ~

2.04×10^3 cells mL^{-1} 의 개체수를 보였으나 30 m 수심에서는 4.34×10^3 ~ 9.41×10^3 cells mL^{-1} 로 증가하였다. 개체수 최대층은 표층에 비해 약 3~9배 높은 개체수를 보였으며, 밀도약층 아래서는 0.27×10^3 cells mL^{-1} 이하의 낮은 개체수가 나타났다. Picoeukaryotes의 수직분포는 *Synechococcus*와 유사한 형태이나 개체수 최대층은 40~50 m로서 *Synechococcus*보다 깊은 수심에 형성됐다. 개체수 최대층은 4.05×10^3 ~ 6.35×10^3 cells mL^{-1} 로서 표층에 비해 4~9배 높은 개체수가 나타났다. 2001년 조사시는 정점들의 환경이 유사한 관계로 각 정점에서의 극미소 플랑크톤의 수직분포도 유사하게 나타났다. 그러나 환경에 대한 분류군별 반응의 차이로 인해 *Synechococcus*와 picoeukaryotes는 유사한 수직분포를 보였으나 *Prochlorococcus*는 다른 형태를 나타냈다.

2003년 조사시는 각 분류군이 다른 형태의 수직분포를 보임과 동시에 정점별 차이도 나타났다. 정점N5에서 *Prochlorococcus*는 표층에서 최대개체수가 나타나고 수심 증가에 따라 점차적으로 감소하였다(Fig. 10A). 수심 0~60 m 사이의 표면혼합층은 0.63×10^5 cells mL^{-1} 이상의 개체수를 보였으며 75 m 수층도 10^4 cells mL^{-1} 이상의 개

체수가 나타났다. *Prochlorococcus*는 정점N5보다 정점N9와 정점N17에서 개체수가 풍부하게 나타났다. 정점N9의 표면혼합층에선 $2.18 \times 10^5 \sim 2.76 \times 10^5$ cells m^{-1} 로 높은 개체수를 보이다 밀도약층에서 급격히 감소하는 수직구조가 나타났다. 반면 정점N17은 표층보다 30~75 m사이의 넓은 수층에서 개체수 최대층이 나타났으며 수심 100 m에서도 1.01×10^5 cells m^{-1} 의 높은 개체수가 유지되었다. *Synechococcus*는 정점별 개체수의 수직 변화가 크게 나타났다(Fig. 10B). 정점N5의 표면혼합층에서 $12.38 \times 10^3 \sim 36.25 \times 10^3$ cells m^{-1} 범위의 높은 개체수가 나타나고 밀도약층에서 급격히 감소하였다. 표면혼합층의 상부(0~30 m)에서는 $32.74 \times 10^3 \sim 36.25 \times 10^3$ cells m^{-1} 로 균질한 개체수를 보였으나 하부(50 m)에서는 급격한 감소가 나타났다. 정점N9에선 밀도약층 상부인 수심 50 m에서 표층에 비해 약 4배 증가한 11.67×10^3 cells m^{-1} 의 개체수를 보이는 개체수 최대층이 나타났다. 표면혼합층에선 $2.61 \times 10^3 \sim 3.28 \times 10^3$ cells m^{-1} 의 유사한 수준을 보였다. 정점N17은 수심에 따른 개체수 변화가 적었으며 75 m에서 1.05×10^3 cells m^{-1} 로 약간 증가한 분포를 보였다. Picoeukaryotes 개체수의 수직분포도 *Synechococcus*와 유사한 형태를 나타냈다(Fig. 10C). 정점N5는 표면혼합층 상부(0~30 m)에서 유사한 수준의 높은 개체수가 나타났으며 밀도약층 아래에서 급격한 감소를 보였다. 정점N9는 표면혼합층에서 유사한 수준의 개체수를 보이다 밀도약층 깊이인 수심 60 m에서 약 4배 증가한(7.15×10^3 cells m^{-1}) 개체수 최대층이 나타났다. 정점N17은 수심에 따른 변화가 적었으며, 최대개체수는 2.12×10^3 cells m^{-1} 로 120 m 수심에서 나타났다.

물기둥내에서 적분된 극미소 플랑크톤 개체수

표층에서 수심 150 m까지의 물기둥내에 분포하는 *Prochlorococcus*의 개체수는 Fig. 11A와 같은 정점별 변화가 나타났다. 2001년 조사 정점들은 $0.87 \times 10^{13} \sim 1.11 \times 10^{13}$ cells m^{-2} 의 적분된 개체수를 보여 정점간 변화가 작았다. 2003년은 정점별로 $0.88 \times 10^{13} \sim 2.17 \times 10^{13}$ cells m^{-2} 의 개체수를 보여 정점간 변화폭이 컸으며, 극한 빈영양 환경을 보인 정점N17에서 가장 높았고 수렴대에서 가장 낮은 값을 보였다. *Synechococcus*의 적분된 개체수는 *Prochlorococcus*에 비해 낮은 수준을 보였다(Fig. 11B). 2001년 조사 정점들은 $1.30 \times 10^{11} \sim 2.88 \times 10^{11}$ cells m^{-2} 의 분포를 보인 반면 2003년은 정점간 개체수의 변화 폭이 크게 나타났다. 수렴대의 정점N5는 18.63×10^{11} cells m^{-2} 로 매우 풍부한 개체수를 보였으며, 발산대의 정점N9는 이 보다 낮은 수준인 3.26×10^{11} cells m^{-2} 의 개체수를 나타냈다. 극한 빈영양환경의 정점N17은 정점N5에 비해 약 30배 낮은 0.66×10^{11} cells m^{-2} 의 개체수가 나타났다.

Fig. 11. 150 m depth integrated abundance during both KODOS-'01 and KODOS-'03 for *Prochlorococcus* (A), *Synechococcus* (B) and picoeukaryotes (C).

Picoeukaryotes의 개체수는 *Synechococcus*와 유사한 정점별 변화 양상을 보였다(Fig. 11C). 2001년 조사정점은 변화가 크지 않은 반면 2003년은 상대적으로 큰 변화를 보였으며 정점N5에 5.22×10^{11} cells m^{-2} 로 가장 많은 개체수가 분포하였다. 따라서 극미소 플랑크톤은 2가지의 특징적인 분포를 나타내는데 첫 째는 2001년 조사 정점들에서 나타났듯이 유사한 환경 하에서는 각 분류군의 개체수가 공간적 차이를 보이지 않는 것이다. 두 번째 특징은 환경변화에 따른 개체수 변동양상이 *Synechococcus*

Table 1. Comparison of estimated carbon biomass of *Prochlorococcus*, *Synechococcus*, and picoeukaryotes. And, 150 m depth integrated chlorophyll-a concentration for less than 2 μm picoplankton fraction (n.d. - no data).

Year	St.	Carbon biomass (mgC m^{-2})				Chl-a (<2 μm) (mg m^{-2})
		<i>Prochlorococcus</i>	<i>Synechococcus</i>	Picoeukaryotes	Total	
2001	H3	586.4 (64.0)	25.6 (2.8)	304.9 (33.3)	916.9	N.D.
	H5	461.1 (70.7)	24.8 (3.8)	166.0 (25.5)	651.9	N.D.
	H7	413.4 (59.2)	37.8 (5.4)	247.7 (35.4)	698.9	N.D.
	H10	588.3 (61.9)	55.0 (5.8)	307.6 (32.3)	950.9	N.D.
2003	N5	466.7 (30.4)	355.4 (23.2)	712.4 (46.4)	1534.5	21.20
	N9	910.9 (64.1)	61.4 (4.3)	449.3 (31.6)	1421.6	16.69
	N17	1149.1 (80.3)	12.4 (0.9)	269.5 (18.8)	1431.0	13.21

*numbers in the parenthesis indicate percentage

와 picoeukaryotes는 유사한 반면 *Prochlorococcus*는 반대 양상을 보인 점이다.

2001년 조사시는 *Prochlorococcus*의 적분된 개체수가 *Synechococcus*나 picoeukaryotes에 비해 약 50배 높게 나타났다. 2003년은 정점N17에서 *Synechococcus*에 비해 약 300배, picoeukaryotes에 비해 약 100배 높은 개체수가 나타났다. 반면 수렴대의 정점N5에서는 *Synechococcus*에 비해 약 5배 picoeukaryotes에 비해 약 15배 높은 개체수가 나타났다.

추정된 극미소 플랑크톤 탄소량의 정점별 분포

탄소 변환상수를 이용하여 구한 물기둥내의 극미소 플랑크톤의 생체량은 Table 1과 같다. 2001년의 정점별 생체량은 $651.9\sim 950.9 \text{ mgC m}^{-2}$ 이며 이중 *Prochlorococcus*의 생체량이 59.2~70.7%로 가장 높은 점유율을 보였다. *Synechococcus*는 점유율이 2.8~5.8%로 낮았으며, picoeukaryotes는 25.5~35.4%를 나타냈다. 2003년 조사 정점들의 극미소 플랑크톤의 탄소량은 $1421.6\sim 1534.5 \text{ mgC m}^{-2}$ 으로 2001년 조사 정점들보다 높고 정점간 변화가 작게 나타났다. 그러나 분류군별 생체량은 정점에 따라 큰 변화를 보였다. 전체 극미소 플랑크톤의 생체량중 *Prochlorococcus*의 점유율은 정점N5에서 30.4%로 가장 낮고 정점N17에서 80.3%로 가장 높았다. *Synechococcus*의 점유율은 정점에 따라 0.9~23.2%로 정점 N5에서 높고 정점N17에서 낮았다. Picoeukaryotes는 18.8~46.4%의 점유율을 보였으며 정점별 변화양상은 *Synechococcus*와 같았다. 2001년의 정점별 생체량의 변화는 *Prochlorococcus*와 picoeukaryotes의 개체수 분포에 따라 결정되었으며 *Prochlorococcus*의 영향을 가장 크게 받았다. 2003년의 경우는 정점에 따라 생체량에 기여하는 분류군이 다르게 나타났다. 정점N5에서는 picoeukaryotes의 생체량이 가장 높았으나 3분류군이 비교적 고르게 분포하는 양상을 보였다. 정점N9에선 *Synechococcus*의 생체량이 매우 낮았으며 *Prochlorococcus*

와 picoeukaryotes가 생체량의 대부분을 차지하였다. 정점 N17은 *Prochlorococcus*의 생체량이 80.3%로서 전체 생체량의 대부분을 차지하였다.

2 μm 이하로 분류된 엽록소-a의 정점별 분포와 탄소변환상수를 이용하여 구한 탄소량의 정점별 분포는 서로 다르게 나타났다(Table 1). 탄소량은 $1,421.6\sim 1534.5 \text{ mgC m}^{-2}$ 로 정점별 변화가 미세한 반면 엽록소-a는 정점 별로 $13.21\sim 21.20 \text{ mgC m}^{-2}$ 의 변화 폭을 보였다.

4. 토 의

*Prochlorococcus*의 중요성

해양에서 *Prochlorococcus*의 발견(Chisholm *et al.* 1988, 1992)으로 인해 식물플랑크톤 생태계를 보는 시각에 큰 변화가 나타났다. *Synechococcus*가 열대 및 아열대 해역의 식물플랑크톤 생체량과 생산력에 중요한 기여를 한다는 기존의 결과와 다르게 *Prochlorococcus*가 전세계의 열대와 아열대 대양에서 가장 풍부하게 분포하는 식물플랑크톤임이 밝혀지기 시작했다(Chisholm *et al.* 1988; Vault *et al.* 1990; Olson *et al.* 1990a; Campbell *et al.* 1993; Goerike and Welschmeyer 1993; Shimada *et al.* 1993). 세포크기가 $0.6\sim 0.8 \mu\text{m}$ 로 매우 소형이며 divinyl-chlorophyll a(chl a_2)와 divinyl-chlorophyll b(chl b_2) 그리고 α -카로틴을 갖는(Goerike and Repeta 1993) 이 극미소 플랑크톤은 독특한 색소 조성 and 함께 생태·생리적 다양성으로 인해 표층에서 유광대의 심부까지의 넓은 수층에서 효율적인 적응하는 것으로 밝혀졌다(Moore *et al.* 1995, 1998, 2002; Moore and Chisholm 1999). 태평양의 열대와 아열대에서 *Prochlorococcus*와 picoeukaryotes가 풍부한 생체량을 보이는 반면 *Synechococcus*는 일반적으로 10% 이내의 생체량을 나타낸다(Campbell *et al.* 1994, 1997; Blanchot *et al.* 2001). 또한 개체수를 비교하면 *Prochlorococcus*는 *Synechococcus*에 비해 적도 용승대에서 최소한 10배 이상

빈영양 수역에서 100배 정도 풍부하게 나타난다(Landry et al. 1996; Partensky et al. 1999a). 위와 같은 생체량은 이들이 태평양 해역의 가장 중요한 일차생산자임을 의미하고 있다.

*Prochlorococcus*가 빈영양 수역에서 높은 생체량을 보이는 현상은 비교적 잘 알려져 있으며(Partensky et al. 1999a) 이러한 현상은 17°N의 극미소 플랑크톤 군집구조를 통해 잘 재현되고 있다. 정점N17의 2 µm 이하 엽록소-a량은 전체의 90.5%이며(Fig. 8) *Prochlorococcus*의 탄소량은 극미소 플랑크톤량의 80.3%를 점유하는 것으로 추정된다. 이를 통해 *Prochlorococcus*의 생체량이 전체 식물플랑크톤 생체량의 약 70% 정도를 차지할 것으로 추정할 수 있다. 빈영양 수역에서 보이는 *Prochlorococcus*의 이러한 극단적인 우점 현상을 밝히기 위해 1990년대 이후 많은 연구가 진행되었다. 이점에 대해 Moore et al.(2002)의 실험은 진보적이며 매우 신선한 관점을 제공하고 있다. 배양되고 있는 몇 strain의 *Prochlorococcus*를 이용 실험한 결과 이들은 질소계 영양염중 NH_4^+ 와 urea를 이용하여 성장하나 NO_3^- 를 이용한 성장은 나타나지 않았다. *Prochlorococcus*에서 나타나는 두가지 생태형 중 높은 광에 적응된(Chl b_2/a_2 가 낮음) 생태형의 유전자분석 결과 이들은 NO_3^- 의 흡수와 환원에 관계되는 유전자를 갖고 있지 않았다. 이와 같은 유전적 특징은 *Prochlorococcus*의 2가지 수순계끼 같은 분포 유형을 이해하는데 도움을 준다. 하나는 빈영양해역에서의 변성으로 정점N17과 같이 수심 75 m까지 질산염이 검출이하의 농도를 보이는 환경에서 증가된 생체량을 나타내는 것이다. Moore et al.(2002)이 제시한 결과를 참고하면 *Prochlorococcus*는 질산염 농도에 관계없이 표층 환경에서 재순환 되는 NH_4^+ 와 urea를 이용함으로써 높은 생체량을 유지하는 것으로 판단된다. 이와 같은 영양 특성이 빈영양 해역의 분포를 전부 밝히는 것은 아니나 생태특성 이해에 중요한 단초를 제공하는 것으로 판단된다. 또한 *Prochlorococcus*는 질산염을 이용하지 않으므로 표층에 영양염이 공급되는 용승 환경에서 생체량 증가가 나타나지 않는다. 적도대 용승 환경과 연계된 수렴환경인 정점N5에서 *Synechococcus*와 picoeukaryotes는 생체량이 크게 증가한데 반해 *Prochlorococcus*의 생체량은 낮게 나타났다. 이는 각 분류군의 독립영양 극미소 플랑크톤이 질산염 이용에 차이를 보이고 있음을 간접적으로 나타내고 있다. 이와 같이 생태·생리적 다양성으로 인해 극미소 플랑크톤이 다양한 환경의 해양에서 중요한 일차생산자로서 자리 매김할 수 있는 것이다. 특히 *Prochlorococcus*의 생태·생리적 다양성은 열대수역은 물론 빈영양 환경인 아열대 환류대의 생물 생산력을 유지시키는 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

수직분포

극미소 플랑크톤의 수직분포 형태는 물리·화학적 요인들(수온, 수주의 안정도, 빛, 영양염, 미량원소)과 생물학적 요인들(성장률, 포식압, 사망률, 유전적 다양성)의 영향에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다. 따라서 극미소 플랑크톤의 수직분포형태는 서식지의 환경특성을 나타내는 물론 분류군별 생태·생리 특성을 파악하기 위한 중요한 수단이 되기 때문에 20년 이상 지속적인 연구가 수행되었다. 초기의 연구들은 *Prochlorococcus*가 심부 유광대에 제한적으로 나타나는 듯한 결과를 제시하였으나, 이는 표층에 분포하는 형광이 약한 세포를 flow cytometer에서 감지 못해 나타난 결과로 밝혀졌다. 지속적인 연구를 통해 밝혀진 가장 일반적인 *Prochlorococcus*의 수직분포는 표층에서 유광대 깊이까지 $1.0 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5 \text{ cells ml}^{-1}$ 범위의 균질한 개체수를 나타내는 형태다(Partensky et al. 1999b). 이는 *Prochlorococcus*가 수주내에 형성되는 다양한 환경에 적응할 수 있는 생태·생리적 다양성이 있음을 의미한다. 다양한 해역과 환경에서 분리 배양한 *Prochlorococcus*들을 이용한 실험에서 이들은 2가지 다른 생태형으로 구분되고 있다. 강한 광에 적응된(낮은 Chl b_2/a_2) 생태형과 약한 광(높은 Chl b_2/a_2)으로 분리되며(Partensky et al. 1993; Moore et al. 1995, 1998; Moore and Chisholm 1999), 실제 아열대와 열대해양 조사에서 Chl b_2/a_2 가 높은 낮은 광에 적응한 *Prochlorococcus*가 심부 유광대에 우점하며 분포하고 있음이 밝혀졌다(Goerike and Repeta 1993; Moore et al. 1998; West et al. 2001). 이러한 생태·생리적 다양성은 이들이 표층부터 심부유광대까지 높은 개체수를 유지시키는 중요한 요인이 되며 동시에 해양에서 가장 풍부한 식물플랑크톤으로 변성할 수 있는 원동력이 되고 있다.

본 조사시 나타난 *Prochlorococcus*의 수직분포는 가장 일반적으로 알려져 있는 형태를 나타냈다. *Prochlorococcus*는 대부분 정점에서 *Synechococcus*나 picoeukaryotes와 달리 밀도 약층 부근에 형성되는 개체수 최대층이 없이 표면혼합층에서 높은 개체수를 보였다. 예외적으로 빈영양 수역의 정점 N17에서 표층에 비해 수심 30~75 m에서 개체수가 증가한 형태를 보였으나 표층 개체수보다 약 50% 정도 증가한 것으로 뚜렷한 개체수 최대층이 발달한 형태로 볼 수는 없다. 따라서 전 정점에서 표면혼합층에서 높은 개체수를 보이고 뚜렷한 표면하 개체수 최대층이 나타나지 않은 유사한 분포 특성을 나타낸 것으로 볼 수 있다. 또한 밀도 약층 아래의 깊은 수심까지 풍부한 개체수를 나타내 100 m 수층에서도 $1.0 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$ 이상이 유지되었다. 이러한 수직 분포형태는 저층의 낮은 광과 표층의 낮은 영양염 및 강한 광 조건하에서 효율적인 성장을 보이는 *Prochlorococcus*의 생태·생리적 특성이 잘 반

영된 결과로서 Moore *et al.*(2002)의 실험에서 제시한 결과를 통해 이해할 수 있다.

Synechococcus 개체수의 수직분포는 3가지 형태를 나타냈다. 첫 번째는 밀도약층 상부에 잘 발달된 개체수 최대층이 나타나는 형태로 2001년 조사 정점들과 정점 N9에서 나타났다. 이와 같이 개체수 최대층이 밀도약층 바로 상부에서 나타나는 형태는 열대와 아열대의 빈영양 수역에서 빈번히 관찰되고 있다(Olson *et al.* 1990b; Campbell *et al.* 1993). 본 조사 수역과 인접한 동부태평양 140°W의 9°N와 12°N 수역에서도 동일한 수직분포 형태가 보고되었다(Landry *et al.* 1996). 이러한 수직분포를 나타내는 정점들은 표면혼합층에서 빈영양 환경을 보이고 밀도약층이 깊지 않고 유광대 내에 위치할 때 주로 나타나고 있다. *Synechococcus*들이 풍부한 광을 받으며 밀도약층 하부로부터 공급되는 풍부한 질산염을 이용할 수 있을 때 개체수 최대층이 잘 발달하는 것으로 사료된다. Moore *et al.* (2002)의 실험결과에서 나타나듯 *Synechococcus*는 NO₃⁻와, NO₂⁻를 포함 다양한 종류의 질소계 영양염을 이용할 수 있는 생리적 특성을 보이고 있다. 이러한 특징은 개체수 최대층을 형성하는 중요한 요인으로 작용할 것으로 판단된다. 두 번째 형태는 표면하 개체수 최대층이 나타나지 않고 표면혼합층에서 풍부한 개체수를 보이다 밀도약층 하부에서 감소하는 형태로 수렴대에 위치한 정점N5에서 나타났다. 정점N5 표층의 개체수는 타 정점들보다 10배 이상의 높은 수준이다(Fig. 10). 이와같이 높은 개체수의 출현은 적도 용승대에서 표면 혼합층으로 유입된 영양염의 영향을 받은 표층수가 수렴대로 이동됨에 따라 나타나는 현상으로 판단되나 조사시 나타난 질산염 농도로는 확실한 판단을 내리기 어려운 점이 있다. Landry *et al.* (1996)이 적도대인 1°N에서 분석한 결과도 표면 혼합층의 개체수가 높고 균질한 수직 분포를 나타냈다. 이러한 결과들을 참고할 때 질산염의 유입이 표면혼합층의 개체수를 증가시키는 것으로 판단된다. 세 번째 형태는 밀도약층이 발달하지 않은 빈영양 수역인 17°N에서 나타난 형태로 수심에 따른 개체수의 변화가 크지 않고 개체수 최대층이 깊은 수심에서 매우 약하게 발달된 형태이다. 이러한 구조는 표면 혼합층이 깊게 발달한 빈영양 수역에서 빈번히 관찰되는 수직 구조이다(Campbell *et al.* 1993; Partensky *et al.* 1999a).

Picoeukaryotes의 수직 분포는 모든 조사 정점에서 *Synechococcus*와 유사한 형태를 나타냈다(Figs. 9, 10). 이는 환경에 반응하는 생태·생리적 특성이 *Synechococcus*와 매우 유사함을 의미한다. 그러나 picoeukaryotes의 개체수 최대층은 항상 *Synechococcus* 보다 약간 깊은 수심에서 형성되고 있다. 이러한 분포는 태평양 아열대 수역 조사에서도 동일하게 나타나고 있다(Campbell *et al.*

1993). 이러한 분포가 두 분류군 사이의 어떠한 특성의 차이로 인해 나타나는가에 대한 연구는 아직 이루어지지 않고 있다.

생체량

지난 20여 년간의 많은 조사들은 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*의 생체량이 전지구적 범위와 지역적 범위의 차이를 보이고 있음을 밝히고 있다. *Synechococcus*는 극지방으로부터 열대 해역까지 전세계 모든 바다에서 분포하나 일반적으로 영양염이 풍부한 유광대 상부에서 높은 생체량을 나타낸다. 반면 *Prochlorococcus*는 대체적으로 40°N~40°S의 위도사이에 제한적으로 분포한다. 반면 열대나 아열대의 빈영양 환경에서 높은 생체량을 보이며 유광대 하부까지 높은 개체수가 나타난다(Partensky *et al.* 1999a). 영양염 환경과 관계된 극미소 플랑크톤의 분포 양상은 열대 동부태평양의 적도용승대에 위치한 HNLC (high-nutrient low-chlorophyll)환경과 빈 영양환경이 형성되는 서태평양 warm pool의 분포비교에서 잘 나타난다(Blanchot *et al.* 2001). *Prochlorococcus*는 두 환경 모두에서 가장 우점하나 warm pool에서 약간 높은 생체량을 보인다. 반면 *Synechococcus*와 picoeukaryotes는 HNLC에서 warm pool 보다 몇 배 증가된 생체량을 나타낸다.

기존의 조사에서 보인 극미소 플랑크톤 생체량의 수역별 분포 양상은 본 조사에서도 잘 나타났다. *Prochlorococcus*는 수렴대 정점을 제외하면 전 정점에서 독립영양 극미소 플랑크톤 생체량의 약 60% 이상을 점유하였다. 즉 열대 빈영양해역의 독립영양 극미소 플랑크톤 생체량의 변화는 대체적으로 *Prochlorococcus*의 분포 특성에 의해 결정되는 군집구조를 보이는 것이다. Picoeukaryotes는 가장 빈 영양환경을 나타낸 정점 N17을 제외하면 대부분 정점에서 약 30% 내외의 생체량을 나타냈다. *Synechococcus*는 수렴대에서 생체량의 급격한 증가를 보였으나 다른 환경에서는 6% 미만의 생체량을 나타냈다.

극미소 플랑크톤의 생체량의 두가지 지표인 엽록소-a와 탄소량이 서로 일치하지 않는 결과가 나타났다(Table 1). 2003년 조사시 엽록소-a는 정점별로 13.2~21.2 mg m⁻²의 변화를 보인 반면 추정된 탄소량은 1,421.6~1,534.5 mg m⁻²의 유사한 범위를 나타냈다. 이는 수역별 환경과 군집 구조의 차이에서 기인한 결과로 판단된다. Flow cytometer를 이용하여 측정된 하나의 세포가 나타내는 엽록소 형광은 빈 영양수역인 정점N17에서 가장 낮고 수렴대인 정점 N5에서 가장 높았다(Fig. 12). 이는 동일한 개체수가 두 해역에서 나타날 때 빈 영양수역에서 낮은 엽록소-a 농도를 나타낼 수 있음과 수역별 환경차이와 함께 군집 조성의 차이로 인해 엽록소-a와 탄소량의 불일치가 나타날 수 있음을 보이고 있다. 빈 영양환경의 정점N17은 *Prochloro-*

Fig. 12. Vertical profiles of mean chlorophyll fluorescence per cell during KODOS-'03 survey for *Prochlorococcus* (A), *Synechococcus* (B) and picoeukaryotes (C). All fluorescence measurements were normalized against three types of fluorescence beads.

coccus가 우점한 반면 수렴대의 정점N5는 *Synechococcus*와 picoeukaryotes가 높은 점유율을 보이는데 엽록소-a/탄소량이 분류군에 따라 다를 경우 군집조성의 변화는 엽록소-a와 탄소량의 변화로 이어질 수 있다. 생체량 분포에서 한가지 주목해야 할 점은 빈영양 수역에서 탄소량/chl-a 비가 높은 현상이다. 이는 엽록소-a 농도가 낮은 특징을 보이는 열대와 아열대의 넓은 해역이 현재 평가되는 생체량보다 실제로는 더 높은 수준의 독립영양 극미소 플랑크톤 생체량이 나타날 수 있는 가능성을 보인 결과이다.

5. 결 론

Flow cytometer를 이용하여 분석한 열대 동태평양의 극미소 플랑크톤 분포 특성은 몇 가지 주목 할만한 결과를 나타냈다. *Prochlorococcus*의 개체수와 생체량은 다른 분류군의 극미소 플랑크톤에 비해 높은 수준을 보였으며 빈영양 해역에서 증가하는 독특한 특징을 보였다. 이에 반해 *Synechococcus*와 picoeukaryotes의 개체수 및 생체량은 적도 용승대와 연계된 수렴환경에서 증가하여 *Prochlorococcus*와 상반대는 분포를 보였다. 이와 같은 분포는 각 분류군의 극미소 플랑크톤이 서로 다른 생태·생리적 특성을 갖고 있음을 의미하며, 이러한 생물학적 다양성으로 인해 극미소 플랑크톤이 연구해역에서 우점적 분포를 하는 것으로 판단된다. 또한 각 분류군별 수직분포는 서식지의 환경특성과 분류군별 생태·생리 특성이 잘 반영된 결과를 보였다. 특히 *Prochlorococcus*의 수직분포는 두가지 생태형이 존재하는 생리적 다양성에 근거하여 이들이 동태평양에서 우점하는 현상에 대한 이해의 폭을 넓힐 수 있었으며, *Synechococcus*와 picoeukaryotes의 수직분포는 용승되는 엽록소-a와의 관련성을 고려해야 함을 알 수 있었다.

극미소 플랑크톤의 생체량의 두가지 지표인 엽록소-a와 탄소량이 서로 일치하지 않는 결과를 나타냈다. 빈 영양

수역에서 탄소량/chl-a 비가 높은 현상을 보였다. 이는 엽록소-a 농도가 낮은 특징을 보이는 극한 빈영양 수역이 현재까지의 예상보다 더 높은 수준의 극미소 플랑크톤 생체량이 나타날 수 있음을 의미하였다.

사 사

본 연구는 해양수산부 R&D 연구과제인 '심해저광물자원탐사사업'의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 시료 분석에 필요한 Flow cytometer의 이용에 도움을 주신 Hawaii 대학의 Karen Selph 박사님과 본 논문을 심사하여 주신 배세진 박사님과 현정호 박사님께 감사드립니다. 또한 현장 연구수행에 도움을 주신 온누리호 선장님 이하 전 승조원 분들과 함께 탐사에 참여한 연구원 모두에게도 감사드립니다.

참고문헌

- 해양수산부. 2004. 심해저 자원탐사 및 환경연구 보고서(I). 해양수산부 보고서 CRPM197-00-1582-5. 770 p.
- Andersen, R.A., G.W. Saunders, M.P. Paskind, and J. Sexton. 1993. Ultrastructure and 18S rRNA gene sequence for *Pelagomonas calceolata* gen. and sp. nov. and the description of a new algal class, the Pelagophyceae class nov. *J. Phycol.*, 29, 701-715.
- Bearman, G. 1989. Ocean circulation. The open university. Pergamon Press. Toronto. 238 p.
- Bidigare, R.R. and M.E. Ondrusek. 1996. Spatial and temporal variability of phytoplankton pigment distributions in the central equatorial Pacific Ocean. *Deep-Sea Res. II*, 43, 809-833.
- Bitterman, D.S. and D.V. Hansen. 1989. Direct measurements of current shear in the tropical Pacific Ocean and

- its effect on drift buoy performance. *J. Atmos. Ocean Tech.*, 6, 274-279.
- Blanchot, J., J.M. Andre, C. Navarette, J. Neveux, and M.H. Radenac. 2001. Picophytoplankton in the equatorial Pacific: vertical distributions in the warm pool and in the high nutrient low chlorophyll condition. *Deep-Sea Res. I*, 48, 297-314.
- Campbell, L., H.A. Nolla, and D. Vault. 1993. Photosynthetic picoplankton community structure in the subtropical north Pacific Ocean near Hawaii(station ALOHA). *Deep-Sea Res. I*, 40, 2043-2060.
- Campbell, L., H.A. Nolla, and D. Vault. 1994. The importance of *Prochlorococcus* to community structure in the central north Pacific Ocean. *Limnol. Oceanogr.*, 39, 954-961.
- Campbell, L., H. Liu, H. Nolla, and D. Vault. 1997. Annual variability of phytoplankton and bacteria in the subtropical north Pacific Ocean at station ALOHA during the 1991-1994 ENSO event. *Deep-Sea Res. I*, 44, 167-192.
- Charpy, L. and J. Blanchot. 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.
- Chavez, F.P., K.R. Buck, S.K. Service, J. Newton, and T. Barber. 1996. Phytoplankton variability in the central and eastern Pacific. *Deep-Sea Res. II*, 43, 835-870.
- Chisholm, S.W., R.J. Olson, E.R. Zetter, R. Goerike, J.B. Waterbury, and N.A. Welschmeyer. 1988. A novel free-living prochlorophyte abundant in the oceanic euphotic zone. *Nature*, 334, 340-343.
- Chisholm, S.W., S.L. Frankel, R. Goerike, R.J. Olson, B. Palenik, J.B. Waterbury, L. West-Johnsrud, and E.R. Zetter. 1992. *Prochlorococcus marinus* Nov. Gen. sp.: an oxyphototrophic marine prokaryote containing divinyl chlorophyll-a and b. *Arch. Microbiol.*, 157, 297-300.
- Chisholm, S.W. and F.M.M. Morel. eds. 1991. What controls phytoplankton production in nutrient-rich areas of the open ocean? *Limnol. Oceanogr.*, 36, 1507-1970.
- Goerike, R. and D.J. Repeta. 1993. Chlorophylls a and b and divinyl chlorophylls a and b in the open subtropical north Atlantic Ocean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 101, 307-313.
- Goerike, R. and N.A. Welschmeyer. 1993. The marine prochlorophyte *Prochlorococcus* contributes significantly to phytoplankton biomass and primary production in the Sargasso Sea. *Deep-Sea Res. I*, 40, 2283-2294.
- Guillou, L., M.J. Chréiennot-Dinet, L.K. Medlin, H. Claustre, S. Loiseauxde Goér, and D. Vault. 1999. *Bolidomonas*: a new genus with two species belonging to a new algal class, the Bolidophyceae (Heterokonta). *J. Phycol.*, 35, 368-381.
- Landry, M.R., J. Kirshtein, and J. Constantinou. 1996. Abundance and distribution of picoplankton in the central equatorial Pacific from 12°N to 12°S, 140°W. *Deep-Sea Res. II*, 43, 871-890.
- Landry, M.R. and D.L. Kirchman. 2002. Microbial community structure and variability in the tropical Pacific. *Deep-Sea Res. II*, 49, 2669-2693.
- Le Borgne, R., R.A. Feely, and D.J. Mackey. 2002. Carbon fluxes in the equatorial Pacific: a synthesis of the JGOFS programme. *Deep-Sea Res. II*, 49, 2425-2442.
- Le Bouteiller, A. and J. Blanchot. 1991. Size distribution and abundance of phytoplankton in the Pacific equatorial upwelling. *La Mer*, 29, 175-179.
- Moon-van der Staay, S.Y., R. De Wachter, and D. Vault. 2001. Oceanic 18S rDNA sequences from picoplankton reveal unsuspected eukaryotic diversity. *Nature*, 409, 607-610.
- Moore, L.R., R. Goerike, and S.W. Chisholm. 1995. Comparative physiology of *Synechococcus* and *Prochlorococcus*: influence of light and temperature on growth, pigments, fluorescence and absorptive properties. *Mar. Eco. Prog. Ser.*, 116, 259-275.
- Moore, L.R., G. Rocap, and S.W. Chisholm. 1998. Physiology and molecular physiology of coexisting *Prochlorococcus* ecotypes. *Nature*, 393, 464-467.
- Moore, L.R. and S.W. Chisholm. 1999. Photophysiology of the marine cyanobacterium *Prochlorococcus*: ecotype differences among cultured isolates. *Limnol. Oceanogr.*, 44, 628-638.
- Moore, L.R., A.F. Post, G. Rocap, and S.W. Chisholm. 2002. Utilization of different nitrogen sources by the marine cyanobacteria *Prochlorococcus* and *Synechococcus*. *Limnol. Oceanogr.*, 47, 989-996.
- Olson, R.J., S.W. Chisholm, E.R. Zettler, M.A. Altabet, and J.A. Dusenberry. 1990a. Spatial and temporal distributions of prochlorophyte picoplankton in the north Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res. I*, 37, 1033-1051.
- Olson, R.J., S.W. Chisholm, E.R. Zettler, and E.V. Amburst. 1990b. Pigment, size, and distribution of *Synechococcus* in the north Atlantic and Pacific Ocean. *Limnol. Oceanogr.*, 35, 45-58.
- Palenik, B. and R. Haselkorn. 1992. Multiple evolutionary origins of prochlorophytes, the chlorophyll b-containing prokaryotes. *Nature*, 355, 265-267.
- Parsons, T.R., Y. Maita, and C.M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis.

- Pergamon Press, New York. 173 p.
- Partensky, F., N. Hoepffener, W.K.W. Li, O. Ulloa, and D. Vaulot. 1993. Photoacclimation of *Prochlorococcus* sp. (Prochlorophyta) strains isolated from the north Atlantic and Mediterranean Sea. *Plant Physiol.*, 101, 285-296.
- Partensky, F., J. Blanchot, and D. Vaulot. 1999a. Differential distribution of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in oceanic waters: a review. In: *Marine cyanobacteria*. Charpy L., Larkum A.W.D. eds., *Bull. L'Institut. Oceanogr. Monaco No. sp.*, 19, 457-475.
- Partensky, F., W.R. Hess, and D. Vaulot. 1999b. *Prochlorococcus*, a marine photosynthetic prokaryote of global significance. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, 63, 106-127.
- Shimada, A., T. Hasrgawa, I. Umeda, N. Kadoya, and T. Maruyama. 1993. Spatial mesoscale patterns of west Pacific picophytoplankton as analyzed by flow cytometry: their contribution to subsurface chlorophyll maxima. *Mar. Biol.*, 115, 209-215.
- Tans, P., I.Y. Fung, and T. Takahashi. 1990. Observational constraints on the global atmospheric carbon dioxide budget. *Science*, 247, 1431-1438.
- Urbach, E., D.L. Robertson, and S.W. Chisholm. 1992. Multiple evolutionary origins of prochlorophytes within the cyanobacterial radiation. *Nature*, 355, 267-270.
- Vaulot, D., F. Partensky, J. Neveux, R.F.C. Mantoura, and C.A. Llewellyn. 1990. Winter presence of prochlorophytes in surface waters of the northwestern Mediterranean Sea. *Limnol. Oceanogr.*, 35, 1156-1164.
- West, N.J., A.S. Wilhelm, N.J. Fuller, R.I. Amann, R. Rippka, A.F. Post, and D.J. Scanlan. 2001. Closely related *Prochlorococcus* genotypes show remarkably different depth distributions in two oceanic regions as revealed by in situ hybridization using 16S rRNA-targeted oligonucleotides. *Microbiology*, 147, 1731-1744.
- Wyrki, K. 1981. An estimate of equatorial upwelling in the Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 11, 1205-1214.
- Wyrki, K. and B. Kilonsky. 1984. Mean water and current structure during the Hawaii-to-Tahiti shuttle experiment. *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 242-254.

Received Apr. 29, 2004

Accepted May 28, 2004