

## 남태평양 측 라군의 초미소 식물플랑크톤 분포 특성

노재훈\* · 이미진<sup>1</sup>

한국해양연구원 해양환경연구본부

Picophytoplankton Distribution in the Chuuk Lagoon  
South PacificJae Hoon Noh\* and Mijin Lee<sup>1</sup>

\*Marine Environmental Research Division, KORDI

<sup>1</sup>Ocean Policy Center, KORDI Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

**Abstract** - The cell abundance and marker pigment distribution patterns of picophytoplankton in the Chuuk Lagoon, tropical South Pacific, were analyzed flow cytometry and HPLC. Also, respective contribution of *Synechococcus*, *Prochlorococcus* and picoeukaryotes on estimated carbon biomass was evaluated. *Synechococcus* and *Prochlorococcus* showed contrasting distributional patterns in the waters of Chuuk Lagoon. Relatively high concentration of *Synechococcus* was observed near Weno Island but the concentration decreased toward the Northeast Passage. However, *Prochlorococcus* showed an opposite distributional pattern. Picoeukaryotes did not show any significant variable difference. The range of divinyl chlorophyll *a* (Chl. *a*2) concentration, marker pigment of *Prochlorococcus*, was 1.2~180.3 ng L<sup>-1</sup> and higher concentrations were observed at the stations near the Northeast Passage than stations near Weno Island. This pigment pattern was similar to cell abundance pattern indicating that chl. *a*2 may be a useful biomass indicator. On the other hand, the range of zeaxanthin concentrations was 61.4~135.8 ng L<sup>-1</sup> showing comparatively less significant variation indicating zeaxanthin influence derived from *Prochlorococcus*. Estimated carbon biomass of *Synechococcus* contributed 68% of total picophytoplankton biomass. *Prochlorococcus* and picoeukaryotes respectively contributed 17.1% and 14.9% of total picophytoplankton biomass.

**Key words** : Chuuk Lagoon, flow cytometry, pico-phytoplankton, abundance, pigment, carbon biomass

## 서론

1979년 해양에서 세포직경이 2~3 μm 이하인 초미소 식물플랑크톤의 분포가 발견된 이후(Johnson and Sieburth 1979; Waterbury *et al.* 1979), 많은 연구들은 열대 해양에

서 이들 초미소 식물플랑크톤이 높은 풍도를 보이며 식물플랑크톤 생체량 중 50% 이상을 차지하는 우점 그룹임을 밝히고 있다(Partensky *et al.* 1999a and references there in). 한편 초미소 식물플랑크톤 연구에 flow cytometer를 이용한 방법이 이용되며(Chisholm *et al.* 1988), 열대 대양환경에선 *Prochlorococcus*가 풍도와 생체량 면에서 가장 중요한 초미소 식물플랑크톤임이 밝혀졌다(Partensky *et al.* 1999b). 그러나 대양과 다르게 열대 산

\*Corresponding author: Jaehoon Noh, Tel. 031-400-6218, Fax. 031-408-5934, E-mail. jhnoh@kordi.re.kr

호초 생태계에서는 대체적으로 *Synechococcus*가 풍도 및 생체량에서 우점하는 경향이 나타난다(Charpy and Blanchot 1998, 1999).

산호초 라군 생태계는 빈 영양환경의 열대 대양 한 가운데 위치하여 있으나, 사막속의 오아시스와 같이 생물생산성과 다양성이 매우 높은 특징을 보인다. 이러한 환경적 특징 때문에 라군 생태계의 주요 일차생산자인 초미소 식물플랑크톤에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔으나, 주로 중앙과 동부 태평양의 라군을 대상으로 진행되었다(Charpy and Blanchot 1998). 이 연구는 한국 해양연구원 남태평양 연구센터가 위치한 열대 서태평양의 마이크로네시아 연방 측 라군에서 수행되었다. Flow cytometer를 이용하여 각 분류군의 초미소 식물플랑크톤 풍도를 분석하였고, 탄소 생체량을 추정 측 라군의 일차생산자로서 분류군별 상대적 중요성을 파악하고자 하였다. 또한 분포 특성을 통해 라군 환경에 반응하는 생태적 특징을 파악하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사수역과 조사시기

측 라군은 직경 50~60 km의 보초(barrier reef)로 둘러 쌓여있으며, 19개의 화산섬과 많은 수의 산호섬이 산재해 있다(Fig. 1). 라군 내의 대부분 수역은 수심 70 m 이하의 천해환경을 보이나, 보초 밖은 수심이 급격히 깊어져 태평양 심해저와 연결된다. 보초사이에는 9개의 수로가 있어 이곳을 통해 외양수와 라군 안쪽의 해수의 교환이 이루어진다.

초미소 식물플랑크톤 및 생태 환경 조사를 위한 시료

채취는 2002년 8월 남태평양에 위치한 마이크로네시아 연방 측 라군의 웨노(Weno)섬 주변의 4개 정점과, 웨노섬과 북동수로상의 A 관측선에 위치한 5개 정점에서 수행되었다(Fig. 1).

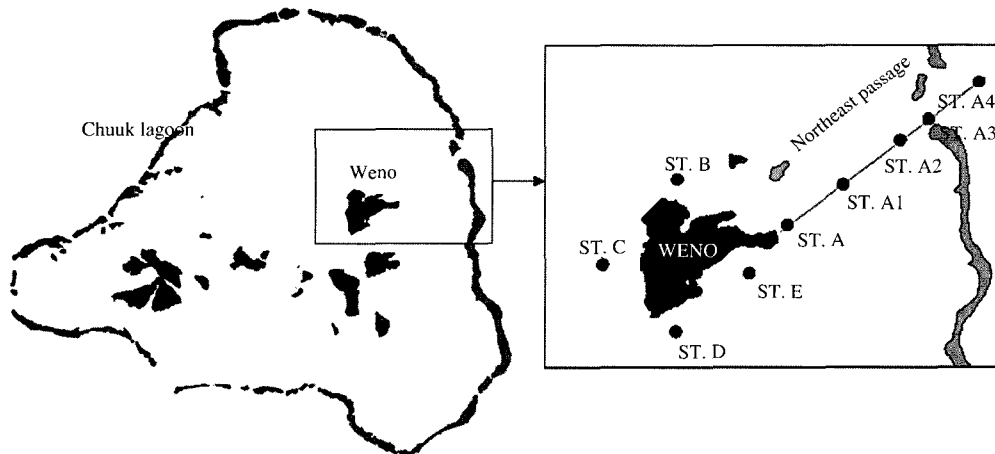
### 2. 시료채집

표층과 저층에서 5L 용량의 niskin 채수기를 이용하여 해수를 채취 후 분석 항목에 따라 처리를 달리 했다. 저층의 시료채취 수심은 정점에 따라 18~75 m 수심에서 이루어졌다(Table 1). Flow cytometer를 이용한 초미소 플랑크톤 분석을 위해 층별 해수 3 mL을 cryogenic 튜브에 넣고 10% paraformaldehyde와 0.5% glutaraldehyde의 혼합액 0.3 mL 첨가한 후 냉동 보관하였다(Marie *et al.* 2000). 무기영양염류 분석을 위한 해수시료는 염산(10% HCl) 처리된 플라스틱병(60 mL, HDPE)에 담아 냉동 보관하였다. 색소 분석용 시료는 해수 2 liter를 GF/F 여과지로 거른 후 냉동 보관하였다.

조사정점의 수온 및 염분은 Idronaut CTD에 부착된 센서를 이용하여 측정하였다.

**Table 1.** Water depths and bottom water sampling depths for each station

Station	Depth (m)	Bottom sampling depth (m)
B	26	20
C	35	30
D	20	18
E	42	30
A	45	30
A1	40	35
A2	45	40
A3	52	40
A4	310	75



**Fig. 1.** Sampling stations in the Chuuk Lagoon.

### 3. 분석방법

초미소 식물플랑크톤의 계수는 UV (225 mW)와 488 nm (1 W)의 아르곤 이온 레이저가 장착된 flow cytometer (Beckman-Coulter Altra)를 이용하였다. 현장에서 냉동 보관된 시료는 실험실로 옮겨 암소에서 녹인 후 산란과 형광을 표준화하기 위해 시료마다 내부표준물질을 첨가하였다. 내부표준물질은 0.5  $\mu\text{m}$ 와 1  $\mu\text{m}$  직경의 yellow-green beads를 혼합하여 사용하였다. *Synechococcus*와 *Prochlorococcus* 그리고 picoeukaryotes와 같이 광합성을 하는 초미소 플랑크톤은 각 분류군의 forward light scattering (FLS), 엽록소에 의한 적색형광, phycoerythrin에 의한 오렌지색 형광 특성 등 flow cytometer 상에서 이용되는 특징들을 이용 분리 계수하였다 (Fig. 2). Flow cytometer에서 산출된 자료는 FlowJo 프로그램을 이용하여 분석하였다.

초미소 플랑크톤의 탄소 생체량을 구하기 위해 분류군별로 신뢰성 있다고 판단되는 변환계수를 이용하였다. *Prochlorococcus*와 *Synechococcus*는 Charpy and Blanchot (1998)이 측정된 탄소변환계수 53  $\text{fgC cell}^{-1}$ 과 191  $\text{fgC cell}^{-1}$ 을 적용하여 탄소량을 구하였다. Picoeukaryotes는 Blanchot *et al.* (2001)이 사용한 1,361  $\text{fgC cell}^{-1}$ 을 적용 탄소량을 구하였다.

HPLC를 이용한 식물플랑크톤 색소분석은 Zapata *et al.* (2000)의 방법을 기초로 이루어 졌다. 식물플랑크톤은 Whatman GF/F 여과지로 거른 후 액체 질소에 냉동 보

관하였다. 실험실에서 여과지를 녹인 후 3 mL의 95% methanol과 함께 유리튜브에 넣고 0°C 얼음물에 튜브를 담근 후 분쇄기로 세포를 분쇄하였다. -20°C 냉장고에서 2시간 동안 색소를 추출 후, 직경 25 mm의 teflon (PTFE) syringe filter (MFS, 0.2  $\mu\text{m}$  pore size)를 이용하여 추출물에 포함된 식물플랑크톤이나 여과지 조각들을 제거하였다. 색소 peak의 변형을 막기 위해 여과된 추출물 1 mL에 증류수 (millie-Q water) 400  $\mu\text{L}$ 를 넣은 후, 혼합 시료 200  $\mu\text{L}$ 를 HPLC system (Shimadzu LC-10A system (dual LC-10AD pumps, SIL-10AD autoinjector, SCL-10A system controller, SPD-M10A photodiode array detector, RF-10A spectrofluorometric detector)에 주입하였으며 색소 분리는 Waters C8 column (150  $\times$  4.6 mm, 3.5  $\mu\text{m}$  particle size, 100 Å pore size)을 이용하였다. Column 온도는 항온순환기를 이용 25°C를 유지하였다. Chromatogram의 봉우리 (peak)에 대한 동정은 표준색소 (DHI water & Environment, Hørsholm, Denmark.)의 머무름 시간 (retention time)과 비교하여 결정하였으며, 농도는 표준색소의 봉우리 면적을 이용하여 구하였다.

질산염 (nitrate+nitrite) 농도는 Parsons *et al.* (1984)의 방법에 따라 영양염 자동분석기 (Alliance)를 사용하여 분석하였다.

## 결 과

### 1. 물리 환경

조사정점들의 표층과 저층의 수온은 Fig. 3에 나타났다. 표층 수온은 28.41~28.86°C의 범위로 점점별 변화가 작게 나타났다. 저층의 수온은 26.38~28.63°C 범위를 보였다. 북동 수로에 접하여 위치한 정점 A3와 A4에

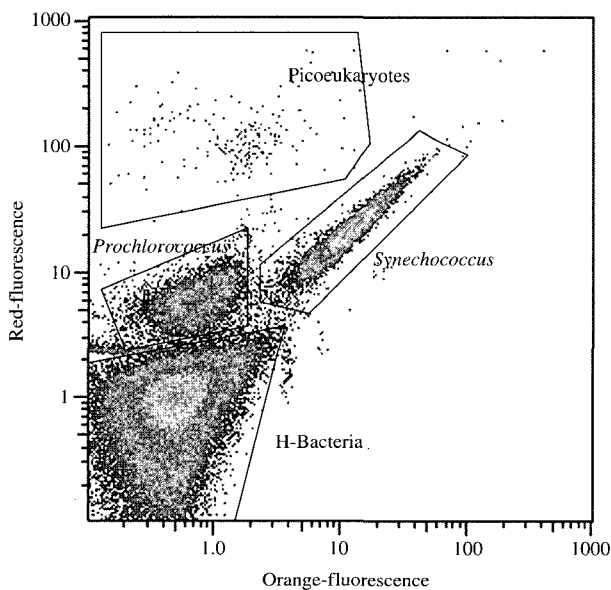


Fig. 2. Flow cytometric analysis of a pico-phytoplankton sample. Each group of picoplankton signatures was discriminated using orange and red fluorescence settings.

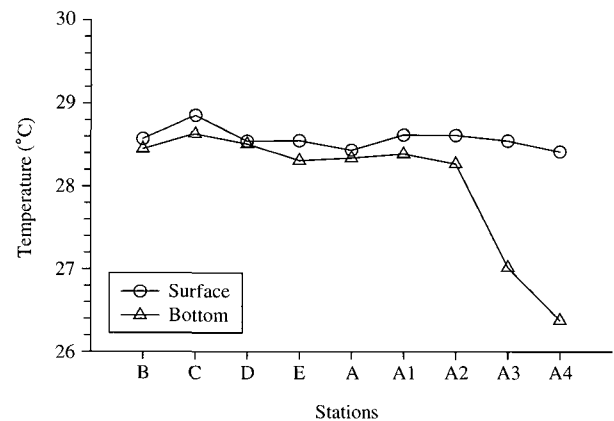


Fig. 3. Variation of surface and bottom water temperature.

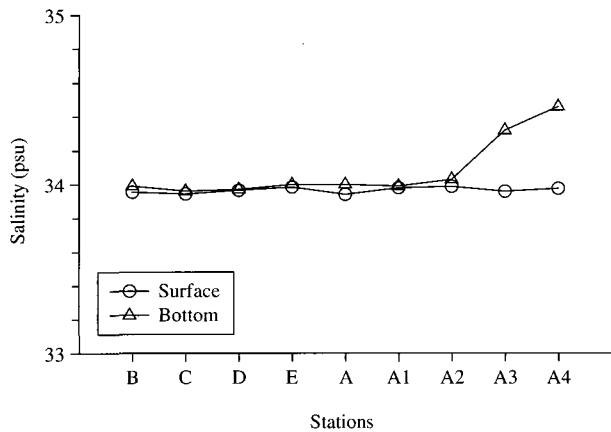


Fig. 4. Variation of surface and bottom water salinity.

Table 2. Inorganic nutrients concentrations for each station

Stations	Depth (m)	Inorganic nutrient concentration ( $\mu\text{M}$ )		
		$\text{NO}_2 + \text{NO}_3$	$\text{HPO}_4$	$\text{Si}(\text{OH})_4$
B	0	0.07	0.04	18.49
	20	0.08	0.06	17.33
C	0	0.05	0.03	18.56
	30	0.14	0.10	19.65
D	0	0.07	0.03	19.16
	18	0.12	0.04	18.15
E	0	0.07	0.04	19.18
	30	0.14	0.04	18.23
A	0	0.09	0.03	20.58
	30	0.12	0.09	17.09
A1	0	0.03	0.02	25.82
	35	0.16	0.04	21.88
A2	0	0.05	0.06	21.61
	40	0.19	0.13	22.48
A3	0	0.09	0.02	22.39
	40	0.30	0.10	21.02
A4	0	0.14	0.02	19.11
	75	2.05	0.14	21.97

서 표층수온과 차이를 보였으나, 타 정점들은 표층과 유사한 수온을 나타냈다. 표층의 염분은 33.94~33.99 psu의 범위로 정점별 변화가 매우 작았다 (Fig. 4). 저층의 염분은 33.97~34.46 psu로서 라군내의 정점들은 표층과 유사한 값을 보였으나 북동수로에 접한 정점 A3와 A4에선 표층에 비해 고염을 나타냈다.

## 2. 영양염 환경

질산염 ( $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ )의 표층 농도는 0.03~0.14  $\mu\text{M}$ 의 범위로 정점평균 0.07  $\mu\text{M}$ 을 나타냈다 (Table 2). 저층에서는 0.08~2.05  $\mu\text{M}$ 의 범위 및 0.37  $\mu\text{M}$ 의 평균 농도로서 표층에 비해 농도가 높았다. 대부분 정점의 표층과

저층에서 한계 검출치 정도의 낮은 농도를 보인 반면, 북동수로의 바깥에 위치한 정점 A4의 저층(75 m)에서 증가된 농도를 보였다. 정점 A3의 저층에서도 0.3  $\mu\text{M}$ 로 라군 안쪽에 위치한 정점들에 비해 높은 농도를 나타냈다.

인산염도 질산염과 유사한 정점별 변화를 보였다. 표층은 0.02~0.06  $\mu\text{M}$ 의 범위와 0.03  $\mu\text{M}$ 의 평균 농도를 보였다. 저층은 0.04~0.14  $\mu\text{M}$ 의 범위를 보였는데 정점 A4의 75 m 층에서 가장 높은 농도가 나타났다. 저층의 평균농도는 0.08  $\mu\text{M}$ 로서 표층보다 높은 값을 보였다.

질산염과 인산염이 낮은 농도를 보이는데 반해 규산염의 농도는 높은 농도를 보이고 정점 및 수층에 따른 변화가 크지 않았다. 표층과 저층에서 각각 20.54  $\mu\text{M}$ 과 19.76  $\mu\text{M}$ 의 평균농도를 보였다.

## 3. 식물플랑크톤 색소

해양의 식물플랑크톤이 광합성 색소로서 monovinyl chlorophyll *a* (chl. *a1*)를 갖는데 반해 *Prochlorococcus*는 divinyl chlorophyll *a* (chl. *a2*)를 갖는다 (Moore *et al.* 1995). *Prochlorococcus*의 풍도가 높게 나타나는 측 라군의 생체량을 파악하기 위해 chl. *a*는 chl. *a1*과 chl. *a2*의 농도를 합한 값으로 나타냈다. 표층의 chl. *a* 농도는 정점별로 109.5~271.0  $\text{ng L}^{-1}$ 의 변화를 보였다 (Table 3). 웨노섬 주변의 정점에 비해 A관측선 상의 정점들인 A1~A4 정점에서 상대적으로 낮았으며 북동수로 외측에 위치한 정점 A4의 표층에서 109.5  $\text{ng L}^{-1}$ 로 가장 낮은 농도를 보였다. *Prochlorococcus*가 갖는 chl. *a2*의 농도는 5.4~60.0  $\text{ng L}^{-1}$ 의 정점별 변화를 보였다. A관측선 상의 정점들에서 웨노섬 주변의 정점들에 비해 상대적으로 높은 농도가 나타났다. 열대해양의 초미소 식물플랑크톤 연구에서 *Synechococcus*의 지시색소로 이용되는 zeaxanthin의 농도는 표층에서 61.4~135.8  $\text{ng L}^{-1}$ 의 정

Table 3. Concentration distribution of pico-phytoplankton marker pigments

Stations	Concentration $\text{ng L}^{-1}$			
	Chl. <i>a1</i>	Chl. <i>a2</i>	Chl. <i>a</i> (Chl. <i>a1</i> + <i>a2</i> )	Zeaxanthin
B	255.3	15.7	271.0	101.0
C	153.6	5.4	158.9	91.5
D	189.9	9.1	199.0	106.9
E	130.8	9.7	140.5	94.5
A	203.1	40.7	243.9	135.8
A1	135.4	27.2	162.6	103.9
A2	91.6	36.7	128.4	96.1
A3	116.8	60.0	176.9	88.9
A4	63.2	46.2	109.5	61.4
Mean	148.9	27.9	176.7	97.8

Chl. *a1*: monovinyl chlorophyll *a*  
Chl. *a2*: divinyl chlorophyll *a*

점별 변화를 보였다. 공간적으로는 웨노섬 주변의 정점들이 A 관측선 상의 정점들보다 약간 높은 농도를 나타냈다.

4. 초미소 식물플랑크톤의 풍도 및 추정된 탄소량 분포

*Synechococcus*의 표층 풍도는  $13.2 \times 10^3 \sim 40.0 \times 10^3$  cells mL<sup>-1</sup>의 범위를 보였다. 웨노섬 주변 정점들에서 높

고 북동수로로 멀어지며 감소하는 수역별 풍도의 변화가 비교적 뚜렷이 나타났다(Fig. 5) 저층의 풍도도 유사한 수준을 보였으며, 정점별 변화는 표층과 유사하게 나타났다. *Prochlorococcus*의 풍도는 표층수에서  $1.2 \times 10^3 \sim 52.5 \times 10^3$  cells mL<sup>-1</sup>의 범위를 보였다(Fig. 5). 정점별 분포는 *Synechococcus*와 반대 양상을 나타내 웨노섬 주변 정점들에서 풍도가 낮고 북동수로로 멀어지며 증가하였다. 정점별 저층에서의 풍도도 표층과 유사한 변화를 나타냈다. Picoeukaryotes의 표층 풍도는 *Synechococcus*나 *Prochlorococcus*에 비해 낮은 수준인  $0.3 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^3$  cells mL<sup>-1</sup>의 범위를 보였다. 저층에서의 풍도도 표층과 유사한 수준을 보이는 정점별 변화를 나타냈다. 수역별 변화는 *Synechococcus*나 *Prochlorococcus*와 같이 뚜렷한 특징은 보이지 않고 정점 C와 A4에서 상대적으로 낮은 개체수를 나타냈다.

물기둥 내에서 적분된 초미소 식물플랑크톤의 풍도에 탄소변환계수를 적용 각 분류군별 탄소량을 구하였다(Table 4). 수심이 깊은 정점 A4는 표층에서 75 m까지 적분하였으며 다른 모든 정점은 바닥 깊이까지 적분하였다. *Synechococcus*의 탄소생체량은 정점에 따라 139.5 ~ 349.7 mgC m<sup>-2</sup>의 범위와 228.5 mgC m<sup>-2</sup>의 평균값을 보였다. 전체 초미소 식물플랑크톤의 생체량 중 *Synechococcus*가 차지하는 비율은 정점에 따라 30.5~90.4%의 변화를 보였으며 평균 68.0%를 나타냈다. *Prochlorococcus*의 탄소생체량은 정점별로 1.2~180.3 mgC m<sup>-2</sup>의 범위와 57.3 mgC m<sup>-2</sup>의 평균값을 보였다. 전체 초미소 식물플랑크톤의 생체량 중 *Prochlorococcus*가 차지하는 비율은 정점에 따라 0.6~47.4%의 변화를 보였으며 평균 17.1%를 나타냈다. Picoeukaryotes의 탄소생체

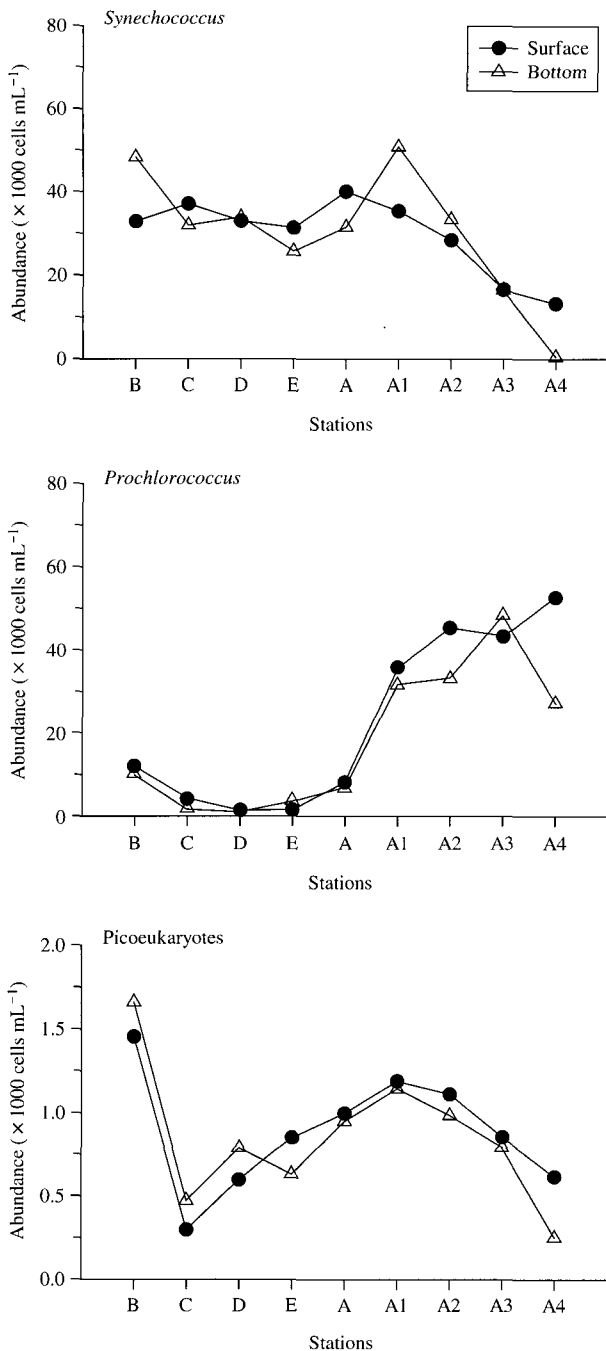


Fig. 5. *Synechococcus*, *Prochlorococcus* and picoeukaryote cell abundance distributions in the surface and bottom water.

Table 4. Comparison of estimated carbon biomass of *Synechococcus*, *Prochlorococcus*, and picoeukaryotes based on depth integrated cell abundance, and surface to 75 m depth integrated chlorophyll-a concentrations for less than 3 μm picoplankton fraction (- : no data)

Stations	Carbon biomass (mgC m <sup>-2</sup> )			Chl-a (< 3 μm) (mg m <sup>-2</sup> )
	<i>Synecho-coccus</i>	<i>Prochloro-coccus</i>	Picoeu-karyotes	
B	154.9(67.4)	15.6(6.8)	59.5(25.9)	53.5
C	257.1(90.4)	5.3(1.9)	22.2(7.8)	-
D	163.4(86.5)	1.2(0.6)	24.4(12.9)	60.4
E	204.8(82.5)	4.1(1.7)	39.3(15.8)	64.4
A	292.0(81.2)	13.8(3.8)	54.0(15.0)	-
A1	349.7(73.5)	66.2(13.9)	60.2(12.6)	82.4
A2	302.2(61.6)	117.9(24.0)	70.6(14.4)	-
A3	193.0(30.5)	111.6(30.5)	61.4(30.5)	65.9
A4	139.5(36.7)	180.3(47.4)	60.7(16.0)	-
Mean	228.5(68.0)	57.3(17.1)	50.3(14.9)	65.3

\* numbers in the parenthesis indicate percentage.

량은 22.2~70.6 mgC m<sup>-2</sup>의 정점별 분포를 보였다. 전체 초미소 식물플랑크톤 탄소생체량에 대한 정점별 기여율은 7.8~30.5% 범위를 보였으며 평균 14.9%를 나타냈다.

## 토 의

### 1. 초미소 식물플랑크톤의 분포 특성

초미소 식물플랑크톤의 정점별 풍도 변화에서 나타나는 가장 뚜렷한 특징은 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*가 서로 상반되는 분포를 보인다. *Synechococcus*는 웨노섬 주변의 정점에서 높은 풍도를 보이고 외양수의 영향이 커지는 북동수로 쪽으로 나가며 풍도가 감소했다. *Prochlorococcus*의 경우는 이와 반대의 분포특징을 나타냈다. 즉 이들 두 남세균은 조사수역에서 나타나는 환경변화에 대해 서로 다른 반응을 보이는 것으로 판단된다. 해양에서 *Prochlorococcus*의 발견 (Chisholm *et al.* 1988) 이후 진행된 많은 연구들은 이들 두 남세균이 전 지구적 규모 그리고 지역적 규모의 분포에서 차이가 있음을 밝히고 있다 (Partensky *et al.* 1999a and references there in; Agawin *et al.* 2000). *Synechococcus*는 빈 영양수역에 비해 영양염 공급이 원활한 환경에서 높은 풍도를 보이는 반면, *Prochlorococcus*는 열대와 아열대의 빈 영양 환경에서 높은 풍도를 나타낸다. *Synechococcus*는 전세계 대부분의 해양에 분포하나, *Prochlorococcus*는 대체적으로 40°N~40°S의 위도사이에 제한적인 분포를 나타낸다. 또한 *Prochlorococcus*는 연안환경에서는 출현이 제한되는 분포를 보이고 있다 (Jiao *et al.* 2002, 2005). 서태평양 열대수역과 동중국해 및 동해가 포함된 초미소 식물플랑크톤 분포조사에 의하면 동중국해 대마난류 수역에는 *Prochlorococcus*가 분포하나 양자강수의 영향을 받는 정점에선 출현하지 않는다 (Noh *et al.* 2005). 이와 같은 분포의 제한이 염분환경 변화에 의한 것인지 담수의 유입 시 동반되는 미량원소의 영향인지는 아직 밝혀지지 않았다. 그러나 축 라군의 *Prochlorococcus* 분포는 이에 대한 중요한 정보를 나타내고 있다. 웨노섬 주변정점들과 북동 수로쪽에 접근해있는 정점들 사이에는 무기영양염이나 염분의 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 *Prochlorococcus*가 연안환경에서 출현하지 않거나 풍도가 감소하는 것은 염분이나 무기영양염이 아닌 다른 요인이 있을 수 있음을 보이는 것이다. 따라서 향후 축 라군에서의 초미소 식물플랑크톤 연구는 *Prochlorococcus*가 보이는 전 지구적 분포경향을 이해할 수 있는 단초를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. *Syne-*

*chococcus*가 웨노섬 주변에서 높은 풍도를 보인 것은 이들이 빈 영양 수역보다는 영양염이 호조건인 환경에서 높은 풍도를 보이는 생태적 특징이 잘 나타난 현상이다. 무기영양염류의 농도는 큰 차이를 보이지는 않았으나 chl. *a1*의 농도는 웨노섬 주변에서 높은 농도를 보여, 이곳은 무기영양염류 소모율이 북동 수로쪽 정점보다 높게 나타날 수 있다. 이는 같은 농도 환경 하에서는 웨노섬 주변 정점의 영양염 공급이 상대적으로 높을 수 있음을 의미하며, *Synechococcus* 풍도가 높게 나타나는 원인이 될 수 있을 것으로 추정된다. 따라서 풍도의 변화 정도는 영양염 농도의 변화가 큰 환경에서와 같이 (Li and Wood 1998; Noh *et al.* 2005; Pan *et al.* 2005) 높은 수준의 풍도 변화가 나타나지 않았다. Picoeukaryotes의 풍도는 남세균에 비해 낮은 수준으로 (Fig. 5), 특징적인 정점별 변화는 보이지 않았다.

초미소 식물플랑크톤은 조사 정점의 표층과 저층에서 풍도 변화가 없이 유사한 수준을 나타냈다. 단지 북동수로 외측에 위치 수심 75m에서 저층 시료를 채취한 정점 A4에서 약간의 변화를 보였다. 75m 층은 표층 수온 및 염분과 차이를 보여 수온 약층에 위치하고 있음을 나타냈다 (Figs. 3, 4). 대부분 정점들에서 수층별 풍도차이를 보이지 않은 것은 낮은 수심에 영향을 받은 것으로 추측된다. 표층과 저층의 수온은 정점 A3와 A4를 제외하면 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 수주내에서 성층이 형성되지 않고 혼합이 잘 나타나고 있음을 보이는 것으로, 이러한 폴리환경이 수층별 풍도 분포에 영향을 준 것으로 판단된다.

### 2. 지시색소의 분포

*Prochlorococcus* 세포는 chl. *a1* (monovinyl chlorophyll *a*)을 대신하여 chl. *a2* (divinyl chlorophyll *a*)를 내포함으로써 다른 식물플랑크톤과 뚜렷한 차이를 나타낸다 (Goericke and Repeta 1992). 따라서 chl. *a2*은 *Prochlorococcus*의 지시색소로서 이들의 생체량 연구에 많이 이용되고 있다 (Jeffrey and Vesk 1997; Higgins and Mackey 2000; Wright and van den Enden 2000; Veldhuis and Kraay 2004). 조사 정점들의 표층에선 5.4~60.0 ng L<sup>-1</sup>의 chl. *a2* 농도가 검출되었다 (Table 3). 정점별 분포는 웨노섬 주변정점들에서 낮고 A 관측선상의 정점들에서 높았다. 이러한 분포는 *Prochlorococcus*의 풍도와 유사한 분포로서 chl. *a2*가 *Prochlorococcus*의 분포를 잘 나타낼 수 있는 지시색소임을 보이고 있다. Zeaxanthin은 *Synechococcus*에서 나타나는 지시색소이나 *Prochlorococcus*와 일부 녹조류에서도 나타난다 (Jeffrey and Vesk 1997).

Zeaxanthin은 *Synechococcus*의 carotenoids 중 75% 이상을 차지하는 주요색소로서 (Kana *et al.* 1988), 배양된 세포에서 측정된 zeaxanthin의 농도는 strain에 따라 1.1~3.3 fg cell<sup>-1</sup>의 범위를 보이며 광도에 따른 변화는 작게 나타난다 (Kana *et al.* 1988; Six *et al.* 2004). *Prochlorococcus*의 세포당 zeaxanthin 함유량은 1.0 fg cell<sup>-1</sup>으로 *Synechococcus*와 비슷하거나 조금 낮은 수준이다 (Moore *et al.* 1995). 따라서 본 조사수역과 같이 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*가 혼재되어 나타나는 환경에서는 *Synechococcus*의 지시색소로 이용할 때 *Prochlorococcus*의 출현 양상을 고려해 판단해야 한다. 조사정점들의 zeaxanthin 농도는 북동수로에 접해있는 정점 A4에서 약간 낮은 농도를 보인 것을 제외하면 정점별 변화가 크지 않았다. 이는 웨노섬 주변정점에서 *Synechococcus*로부터 분리된 zeaxanthin 농도가 높음에 비해, A관측선상의 정점들에서 *Prochlorococcus*로부터 분리된 zeaxanthin 농도가 더해져 나타난 농도 분포로 판단된다.

### 3. 초미소 플랑크톤의 추정된 탄소량 분포

초미소 식물플랑크톤의 분류군별 추정된 탄소 생체량은 각 분류군의 일차생산자로서의 상대적 중요성을 추측할 수 있는 중요한 자료이다. 3 μm 이하 초미소 식물플랑크톤의 chl. *a*는 조사 수역 표층에서 전체 chl. *a*의 65.3%를 점유하는 것으로 나타났다 (Table 4). 이는 측 라군 수층의 일차생산자로서 초미소 식물플랑크톤의 역할이 매우 높을 수 있음을 의미한다. 초미소 플랑크톤 중 *Synechococcus*의 생체량은 정점평균 228.5 mgC m<sup>-2</sup>로서 전체 초미소 식물플랑크톤 생체량의 68.0%를 나타냈다. 정점별 분포는 북동수로에 접한 정점에서 초미소 식물플랑크톤 생체량 중 30.5%와 36.7%를 나타내 점유율이 낮았으나, 타 정점들에서는 60% 이상의 높은 값을 보였다. *Prochlorococcus*의 정점 평균 추정 탄소량은 57.3 mgC m<sup>-2</sup>로서 전체 초미소 식물플랑크톤 생체량의 17.1%를 나타냈다. 정점별 점유율은 0.6~47.4%로서 북동수로 방향으로 나가면서 높게 나타났다. Picoeukaryotes의 탄소 생체량은 정점 평균 50.3 mgC m<sup>-2</sup>로서 전체 초미소 식물플랑크톤 생체량의 14.9%를 나타냈다. 측 라군에서 보인 분류군별 생체량은 동부 열대수역 Tuamotu 라군과 유사한 결과를 보이고 있다 (Charpy and Blanchot 1998). 이는 라군내의 환경이 외양과 차이를 보이며 우점 분류군이 *Prochlorococcus*에서 *Synechococcus*로 변환을 나타내고 있다.

## 적 요

열대 남태평양에 위치한 측 라군에서 flow cytometry와 HPLC를 이용 초미소 식물플랑크톤 조사를 하였다. *Synechococcus*, *Prochlorococcus* 그리고 picoeukaryotes의 풍도와 지시색소 분포 양상을 분석하였고 추정된 탄소 생체량에서의 기여율을 조사하였다. 남세군인 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*는 측 라군에서 대비되는 분포 특성을 보였다. *Synechococcus*는 웨노섬 주변 정점에서 높은 풍도를 보인 반면, 북동수로 쪽으로 멀어지며 풍도가 감소하였다. *Prochlorococcus*는 이와 반대의 분포 특성을 나타냈으며, picoeukaryotes는 특징적인 수역별 변화를 보이지 않았다. *Prochlorococcus*의 지시색소인 divinyl chlorophyll *a* (Chl. *a*2)는 1.2~180.3 ng L<sup>-1</sup>의 농도 범위를 보였으며, 웨노섬 주변 정점들보다 북동수로에 접한 정점들에서 높게 나타났다. 이는 *Prochlorococcus*의 풍도와 유사한 분포로서, chl. *a*2가 생체량의 좋은 지표임을 나타냈다. 반면 zeaxanthin은 61.4~135.8 ng L<sup>-1</sup>의 농도 범위로 정점별 변화가 풍도변화에 비해 작은 특징을 보였는데 이는 *Prochlorococcus*로부터 유래된 zeaxanthin의 영향으로 판단된다. *Synechococcus*의 추정된 탄소 생체량은 전체 초미소 식물플랑크톤 생체량의 68%를 차지하였다. *Prochlorococcus*와 picoeukaryotes는 각각 17.1%와 14.9%의 생체량을 나타냈다.

## 사 사

본 연구는 한국해양연구원 기본과제인 '남태평양 열대해양 생물소재 실용화 기술개발 연구'의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 논문의 문제점 수정에 도움을 주신 심사위원님께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Agawin NSRA, CM Duarte and S Agusti. 2000. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production. *Limnol. Oceanogr.* 45:591-600.
- Blanchot J, JM Andre, C Navarette, J Neveux and MH 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.

- 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. Eco. Prog. Ser.* 162:57-70.
- Charpy L and J Blanchot. 1999. Picophytoplankton biomass, community structure and productivity in the Great Astrolabe Lagoon, Fiji. *Coral Reefs* 18:255-262.
- Chisholm SW, RJ Olson, ER Zetter, R Goerike, JB Waterbury and NA Welschmeyer. 1988. A novel free-living prochlorophyte abundant in the oceanic euphotic zone. *Nature* 334:340-343.
- Goerike R and DJ 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.
- Higgins HW and DJ Mackey. 2000. Algal class abundances, estimated from chlorophyll and carotenoid pigments, in the western Equatorial Pacific under El Nino and non-El Nino conditions. *Deep-Sea Res. I.* 47:1461-1483.
- Jeffrey SW and M Vesik. 1997. Introduction to marine phytoplankton and their pigment signatures. In: *Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods.* ed. by Jeffrey, S.W., R.F.C. Mantoura, and S.W. Wright. UNESCO, Paris. pp. 37-84.
- Jiao N, Y Yang, H Koshikawa and M Watanabe. 2002. Influence of hydrographic conditions on picoplankton distribution in the East China Sea. *Aq. Microb. Ecol.* 30:37-48.
- Jiao N, Y Yang, N Hong, Y Ma, S Harada, H Koshikawa and M Watanabe. 2005. Dynamics of autotrophic picoplankton and heterotrophic bacteria in the East China Sea. *Cont. Shelf Res.* 25:1265-1279.
- Johnson PW and J McN Sieburth. 1979. Chroococcoid cyanobacteria in the sea: A ubiquitous and diverse phototrophic biomass. *Limnol. Oceanogr.* 24:928-935.
- Kana TM, PM Glibert, R Goerike and NA Welschmeyer. 1988. Zeaxanthin and  $\beta$ -carotene in *Synechococcus* WH7803 respond differently to irradiance. *Limnol Oceanogr.* 33:1623-1627.
- Li WKW and AM Wood. 1988. Vertical distribution of North Atlantic ultraphytoplankton: analysis by flow cytometry and epifluorescence microscopy. *Deep-Sea Res. I.* 35: 1615-1638.
- Marie D, N Simon, L Guillou, F Partensky and D Vaultot. 2000. Flow cytometry analysis of marine picoplankton. In: *Living Colors: Protocols in Flow Cytometry and Cell sorting.* ed. by Diamond, R.A. and S. DeMaggio. Springer Verlag. pp. 421-454.
- Moore LR, R Goerike and SW 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.
- Noh JH, SJ Yoo and SH Kang. 2006. The summer distribution of pico-phytoplankton in the western Pacific. *Korean J. Environ. Biol.* 24:67-80
- Pan LA, LH Zhang, J Zhang, MG Josep and M Chao. 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.
- Parsons TR, Y Maita and CM Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. New York. pp. 173.
- Partensky F, J Blanchot and D Vaultot. 1999a. Differential distribution of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in oceanic waters: a review. In: *Marine cyanobacteria.* ed. by Charpy, L, and A.W.D. Larkum. Bull. L'Institut. Oceanogr. Monaco. 19:457-475.
- Partensky F, WR Hess and D Vaultot. 1999b. *Prochlorococcus*, a marine photosynthetic prokaryote of global significance. *Microbiol. Mol. Bio. Rev.* 63:106-127.
- Six C, JC Thomas, B Btrahamsha, Y Lemoine and F Partensky. 2004. Photophysiology of the marine cyanobacterium *Synechococcus* sp. WH8102, a new model organism. *Aq. Microb. Biol.* 35:17-29.
- Veldhuis MJW and GW Kraay. 2004. Phytoplankton in the subtropical Atlantic Ocean: towards a better assessment biomass and composition. *Deep-Sea Res. I.* 51:507-530.
- Waterbury JB, SW Watson, RRL Guillard and LE Bland. 1979. Widespread occurrence of a unicellular, marine, planktonic, cyanobacterium. *Nature* 277:293-294.
- Wright SW and RL van den Enden. 2000. Phytoplankton community structure and stocks in the East Antarctic marginal ice zone (BROKE survey. January-March 1996) determined by CHEMTAX analysis of HPLC pigments signatures. *Deep-Sea Res. II.* 47:2363-2400.
- Zapata M, F Rodriguez and JL Garrido. 2000. Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C8 column and pyridine containing mobile phases. *Mar. Eco. Progr. Ser.* 195:29-45.

Manuscript Received: August 24, 2005

Revision Accepted: October 10, 2005

Responsible Editorial Member: Sung-Ho Kang  
(KORDI)