

하계 서태평양의 초미소 식물플랑크톤 분포 특성 연구

노재훈* · 유신재 · 강성호¹

한국해양연구원 해양환경연구본부,

¹한국해양연구원 부설 극지연구소The Summer Distribution of Picophytoplankton
in the Western PacificJae Hoon Noh*, Sinjae Yoo and Sung-Ho Kang¹

Marine Environmental Research Department, KORDI

¹Korea Polar Research Institute, KORDI

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

Abstract – The effect of environmental forcing on picophytoplankton distribution pattern was investigated in the tropical and subtropical western Pacific (TSWP) and the East Sea in September, 2002, and the continental shelf of the East China Sea (C-ECS) in August, 2003. The abundance of picophytoplankton populations, *Synechococcus*, *Prochlorococcus* and picoeukaryotes were determined by flow cytometry analyses. Picophytoplankton vertical profiles and integrated abundance (0~100 m) were compared with these three physiochemically different regions. Variation patterns of integrated cell abundance of *Synechococcus* and *Prochlorococcus* in these three regions showed contrasting results. *Synechococcus* showed average abundance of 84.5×10^{10} cells m^{-2} , in the TSWP, 305.6×10^{10} cells m^{-2} in the C-ECS, and 125.4×10^{10} cells m^{-2} in the East Sea where increasing cell concentrations were observed in the region with abundant nutrient. On the other hand, *Prochlorococcus* showed average abundance of 504.5×10^{10} cells m^{-2} in the TSWP, 33.2×10^{10} cells m^{-2} in the C-ECS, and 130.2×10^{10} cells m^{-2} in the East Sea exhibiting a distinctive pattern of increasing cell abundance in oligotrophic warm water. Although picoeukaryotes showed a similar pattern to *Synechococcus*, the abundance was 1/10 of *Synechococcus*. *Synechococcus* and picoeukaryotes showed ubiquitous distribution whereas *Prochlorococcus* generally did not appear in the C-ECS and the East Sea with low salinity environment. The average depth profiles for *Synechococcus* and *Prochlorococcus* displayed uniform abundance in the surface mixed layer with a rapid decrease below the surface mixed layer. For *Prochlorococcus*, a similar rapid decreasing trend was not observed below the surface mixed layer of the TSWP, but *Prochlorococcus* continued to show high cell abundance even down to 100 m depth. Picoeukaryotes showed uniform abundance along 0~100 m depth in the C-ECS, and abundance maximum layer appeared in the East Sea at 20~30 m depth.

Key words : Pico-phytoplankton, flow cytometry, abundance, vertical profiles, western Pacific

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

서 론

세포직경이 2~3 μm 이하인 해양 초미소 식물플랑크톤은 남세균에 속하는 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus* 속 그리고 다양한 분류군이 속한 picoeukaryotes의 3그룹으로 이루어져 있다. 이들 초미소 식물플랑크톤은 다양한 환경의 해양에서 높은 풍도를 보이며, 특히 열대와 아열대 해양에서 일차생산과 식물플랑크톤 생체량에 높은 기여를 하는 특징을 나타낸다 (Partensky *et al.* 1999a; Agawin *et al.* 2000).

해양에서 초미소 식물플랑크톤이 발견된 이후 (Johnson and Sieburth 1979; Waterbury *et al.* 1979) 이들의 분포특성을 밝히기 위한 많은 연구가 진행되며 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*가 전 지구적 범위와 지역적 범위에서 서로 분포의 차이를 나타냄이 밝혀졌다 (Partensky *et al.* 1999a, b and references there in). *Synechococcus*는 극지방으로부터 열대 해역까지 전 세계 모든 해양에 분포하나 일반적으로 영양염이 풍부한 해역의 유희대 상부에서 높은 생체량을 나타낸다. 반면 *Prochlorococcus*는 대체적으로 40°N~40°S의 위도사이에 제한적으로 분포하며, 열대나 아열대의 빈 영양 환경에서 높은 생체량을 보이며 유희대 하부까지 높은 풍도가 나타난다. 이들 남세균은 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*의 두 분류군으로 이루어져 있으며 크기와 색소 조성이 서로 다른 특징을 보여 flow cytometer를 이용한 분류군별 연구가 매우 용이하게 이루어지고 있다. 반면 picoeukaryotes는 다양한 분류군으로 조성되어 있으며 형태나 색소를 이용한 분류가 용이하지 않아 분류군별 분포 연구는 최근 들어 분자생물학적 방법이 도입되며 활발히 진행되고 있으나 (Moon-van der Staay *et al.* 2000; Not *et al.* 2002; Romari and Vaultot 2004), 전지구적 규모의 분류군별 분포형태를 파악하기에는 자료가 부족한 상태이다.

북서태평양에 위치한 본 연구해역은 다양한 환경이 나타난다. 남쪽에는 북적도해류가 흐르고 여기서 기원한 서안경계류인 쿠로시오는 대만동부에서 대륙사면을 따라 흐르다 토카라 해협을 통해 일본 남쪽연안으로 빠져 나간다 (Nitani 1972). 동중국해 대륙사면에서 쿠로시오로부터 분지된 대마난류의 분류는 대한해협을 거쳐 동해로 유입되고, 일부지류는 제주도 서쪽해역으로 유입된다. 따라서 쿠로시오와 대마난류는 동중국해 및 동해에 열과 염을 공급하며 해황을 결정하는 중요한 해류이며 (Lie and cho 1994), 열대해역과 우리나라 주변해의 환경을 연결시키는 역할을 하고 있다. 동중국해 대륙봉과 동해는 하계에 서로 다른 환경특성을 나타낸다. 동중국해

대륙봉의 하계 해황을 지배하는 주요 요인 중 하나는 장강으로부터의 담수유입이다. 장강으로부터 유입되는 담수는 1년에 $930 \times 10^9 \text{ m}^3$ 으로 이중 70~80%는 7~10월 사이에 집중된다 (Zhang 1996). 따라서 하계에는 저염수가 동중국해에 넓게 분포하고 있다. 반면 동해는 담수의 유입이 적으며 대마난류의 영향으로 동중국해에 비해 상대적으로 고염환경을 나타낸다 (Kim *et al.* 1999). 이와 같이 열대에서 온대로 이어지며 나타나는 다양한 환경 스펙트럼에 반응하여 초미소 플랑크톤 각 분류군은 독특한 분포 특성을 나타낼수 있어 초미소 식물플랑크톤의 생태특성을 연구하기에 매우 이상적인 장소로 판단된다.

이와 같은 환경적 장점에도 불구하고 서태평양 열대수역이나 동해의 초미소 식물플랑크톤 연구는 매우 빈약한 상황이다. 반면 동중국해는 flow cytometer를 이용한 초미소 식물플랑크톤 연구가 최근 들어 활발히 이루어지고 있다 (Jiao *et al.* 2002, 2005; Noh *et al.* 2005; Pan *et al.* 2005). 동해의 경우 울릉분지를 중심으로 동해 서남부 수역의 춘계 및 추계 초미소 플랑크톤의 풍도변화 정도가 밝혀져 있다 (Kang *et al.* 2004).

이 연구는 극한 빈 영양 환경의 열대수역으로부터 담수의 영향이 크게 나타나는 동중국해 대륙봉 수역 그리고 대마난류에 의해 열대해양과 연결되는 동해 등 다양한 환경에서 하계 초미소 식물플랑크톤의 분포특성을 밝히고자 하였다. 저 수온에 의한 성장제한이 없는 하계에 영양염이나 염분환경의 변화가 초미소 식물플랑크톤 각 분류군의 분포에 미치는 영향을 밝히고, 이를 통해 각 분류군의 생태·생리적 특성을 파악하고자 하였으며 향후 진행될 우리나라 주변해의 초미소 식물플랑크톤 연구에 기초가 되는 자료를 산출하고자 하였다.

재료와 방법

1. 조사수역과 조사시기

초미소 식물플랑크톤 분포특성 연구를 위한 현장 조사는 2002년 9월에 서태평양의 열대 및 아열대 수역 (TSWP: Tropical and Subtropical Western Pacific)과 동해 수역 (ES: East Sea)에서 수행되었다. 2003년 8월에는 동중국해 대륙봉 수역 (C-ECS: Continental shelf of East China Sea)에서 한국해양연구원의 조사선인 이어도를 이용 시료채취와 현장관측이 이루어졌다 (Fig. 1). TSWP 조사는 동중국해의 쿠로시오 영향 수역에 위치한 2개 정점 (P4, P5)과 열대 대양환경의 3개 정점 (P1, P2, P3)에서 이루어졌다. 동해 조사는 울릉분지를 포함한 동해 남서

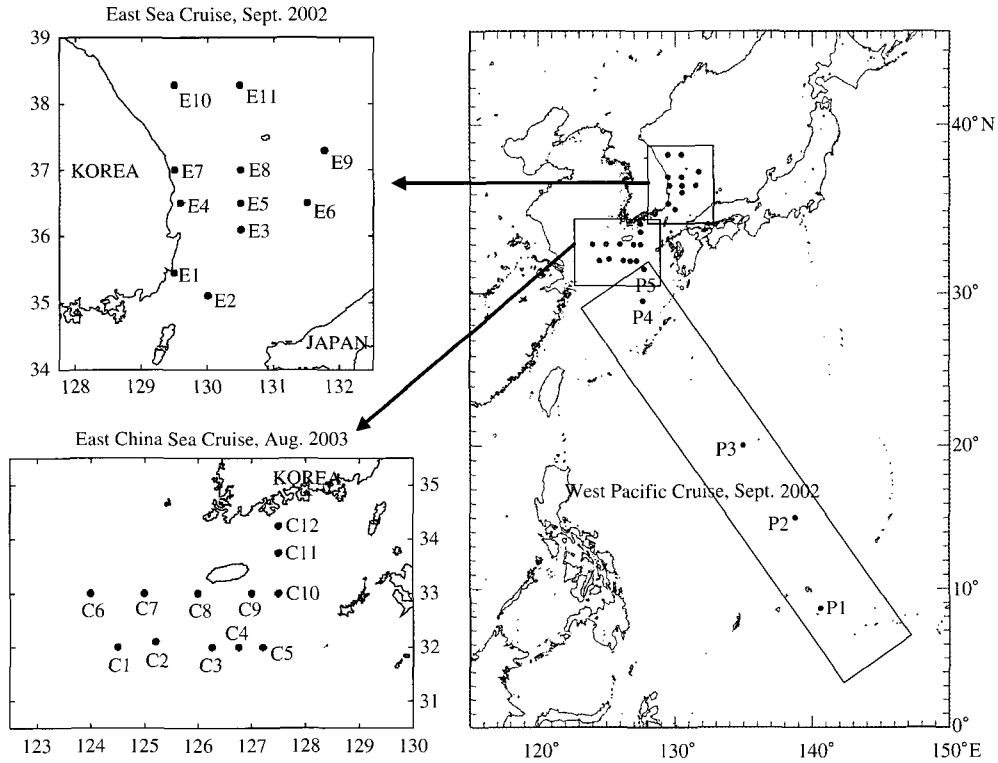


Fig. 1. Study area and sampling stations.

Table 1. Water depths of sampling stations

TSWP		East China Sea		East Sea	
Stations	Depth (m)	Stations	Depth (m)	Stations	Depth (m)
P1	2670	C1	41	E1	84
P2	4327	C2	52	E2	135
P3	5432	C3	91	E3	1663
P4	187	C4	107	E4	120
P5	145	C5	121	E5	2021
		C6	47	E6	1949
		C7	81	E7	134
		C8	105	E8	2206
		C9	104	E9	1636
		C10	136	E10	1613
		C11	89	E11	2499
		C12	30		

부 수역의 11개 정점에서 수행 하였다. 동중국해 대륙붕 수역 조사는 양자강 회석수의 영향을 받는 연안쪽 수역과 대마난류수의 영향을 받는 외양 수역이 포함된 총 12개 정점에서 수행되었다.

정점별 수심은 Table 1과 같다. TSWP 조사 정점들은 2,670~5,432 m의 수심의 대양에 위치하고 정점 P5만 수심 145 m의 동중국해 대륙붕 단에 위치하였다. 동중국해 정점들은 수심 41~136 m 사이의 대륙붕 수역에 위치하고 있으며 제주도 남서쪽 대마난류 영향수역에 위

치한 일부정점들은 100 m 이상의 수심을 나타냈다. 동해 정점들 중 E1, E2, E4, E7은 수심 100 m 내외의 천해환경에 위치하고, 나머지 정점들은 1,613~2,499 m 수심의 심해환경에 위치하였다.

2. 시료채집

초미소 식물플랑크톤 분석을 위한 시료 채취는 SBE 911 CTD가 장착된 Rosette sampling system에 10 L 용량의 niskin bottle들을 부착하여 이루어졌다. 채수는 8개 층의 표준 수심 (1, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150 m)에서 하였다. 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 액화질소에 넣어 냉동 보관하였다 (Marie et al. 2000). 무기영양염류 분석을 위한 해수시료는 염산 (10% HCl) 처리된 플라스틱병 (60 ml, HDPE)에 담아 냉동 보관하였다.

3. 분석방법

초미소플랑크톤의 계수는 UV (225 mW)와 488 nm (1 W)의 아르곤 이온 레이저가 장착된 flow cytometer

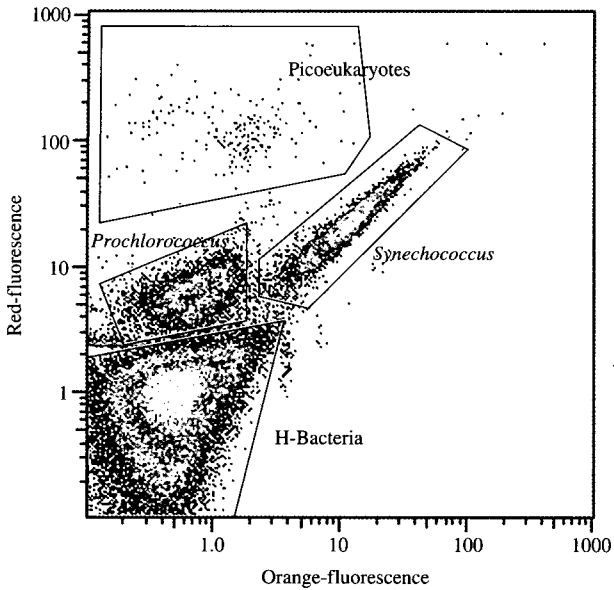


Fig. 2. Flow cytometric analysis of a picophytoplankton sample. Each group of picoplankton signatures was discriminated using orange and red fluorescence settings.

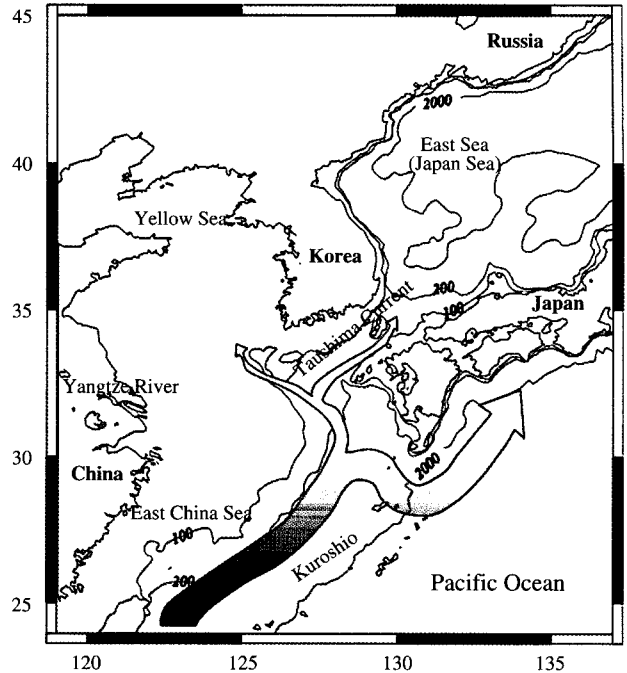


Fig. 3. Schematic of the current system in the East China Sea from Nitani (1972).

(Beckman-Coulter Altra)를 이용하였다. 현장에서 냉동 보관된 시료는 실험실로 옮겨 암소에서 녹인 후 산란과 형광을 표준화하기 위해 시료마다 내부표준물질을 첨가하였다. 내부표준물질은 0.5 μm 와 1 μm 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 (Star, Inc., www.flowjo.com) 프로그램을 이용하여 분석하였다.

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

결 과

1. 물리 환경

조사 정점들이 위치한 동중국해 및 동해의 물리환경은 쿠로시오와 이로부터 분지된 대마난류수의 영향을 크게 받는다. 북적도해류에서 기원한 서안경계류인 쿠로시오는 대만동부에서 대륙사면을 따라 흐르다 토까라해협을 통해 일본 남쪽연안으로 빠져나간다(Fig. 3). 동

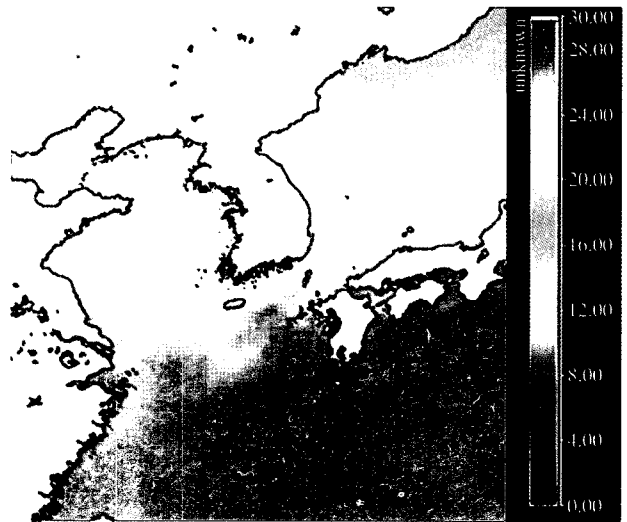


Fig. 4. Sea surface temperature image in the East China Sea and the East Sea derived from a monthly (September 2002) composite data taken from MODIS.

중국해 대륙사면에서 쿠로시오로부터 분지된 대마난류의 분류는 대한해협을 거쳐 동해로 유입되고, 일부지류는 제주도 서쪽해역으로 유입된다. 쿠로시오와 대마난류는 동중국해 및 동해에 열과 염을 공급하며 해황을 결정하는 중요한 해류이다. 2002년 9월의 북서태평양의 표층 수온의 위성자료는 동해해황에 미치는 대마난류의

영향이 잘 나타나 있다(Fig. 4). 쿠로시오 본류수역의 고수온 환경은 대마난류에 의해 동해의 일본 쪽 수역까지 확장되어 있다. 우리나라 쪽 수역은 대마난류와 연결된 동한난류의 영향을 받고 있으며 동해북부수역은 상대적으로 저수온 환경이 발달해있다. 현장 관측 자료도 위성사진에 나타난 수온분포와 잘 일치하였다. 2002년 9월에 조사된 표층 수온은 서태평양의 열대 및 아열대해역(TSWP)이 동해에 비해 상대적으로 높게 나타나고 있다(Fig. 5). 동해의 조사 정점 중 동한난류 중심축에 위치한 E3와 E5 정점이 상대적으로 높은 수온환경을 보이고 E10이 위치한 울릉도 북서쪽 수역은 저온 환경을 나타낸다. 2003년 8월에 조사된 동중국해의 표층수온은 정점에 따라 25.8~29.4°C의 범위로서 대마난류의 영향을 받는 외양의 정점들(정점 C4, C5, C9, C10)에서 상대적으로 높은 수온 분포를 나타냈다.

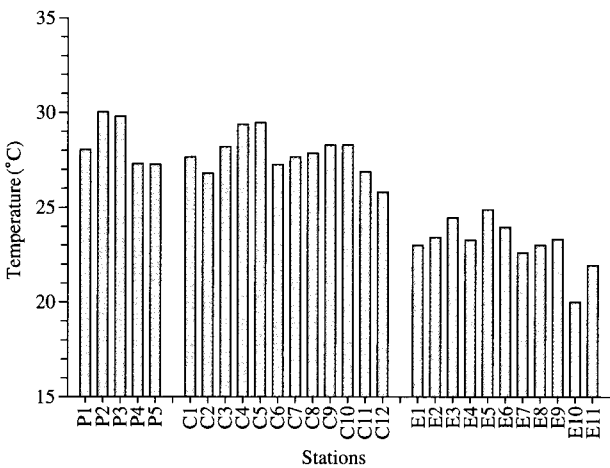


Fig. 5. Sea surface temperature distribution of each station.

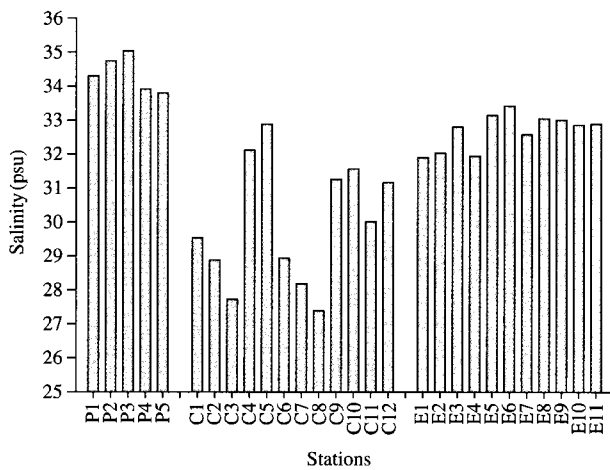


Fig. 6. Sea surface salinity distribution of each station.

표층의 염분은 조사 해역별 특징을 잘 나타내고 있다(Fig. 6). TSWP 수역은 33.8~35.0 psu 범위의 고염 환경을, C-ECS수역은 27.4~32.9 psu 범위의 저염 환경을 나타냈다. 동중국해의 정점들 중 중국 연안쪽 정점들은 장강으로부터 유출되는 담수의 영향으로 저염 환경을 보이고, 제주도 남동쪽 수역에 위치한 정점들은 대마난류의 영향에 의해 상대적으로 높은 염분 환경을 보였다. 동해의 조사정점들은 31.9~33.4 psu의 염분 범위로서 C-ECS 정점들보다 높으나 TSWP 정점에 비하면 낮게 나타났다. 동해 조사수역의 남서부에 위치한 E1, E2, E4 정점은 상대적으로 낮은 염분을 나타내 남해연안수나 동중국해의 장강 희석수의 영향을 받은 것으로 판단된다. 이상과 같이 장강으로부터의 담수유입과 대마난류수

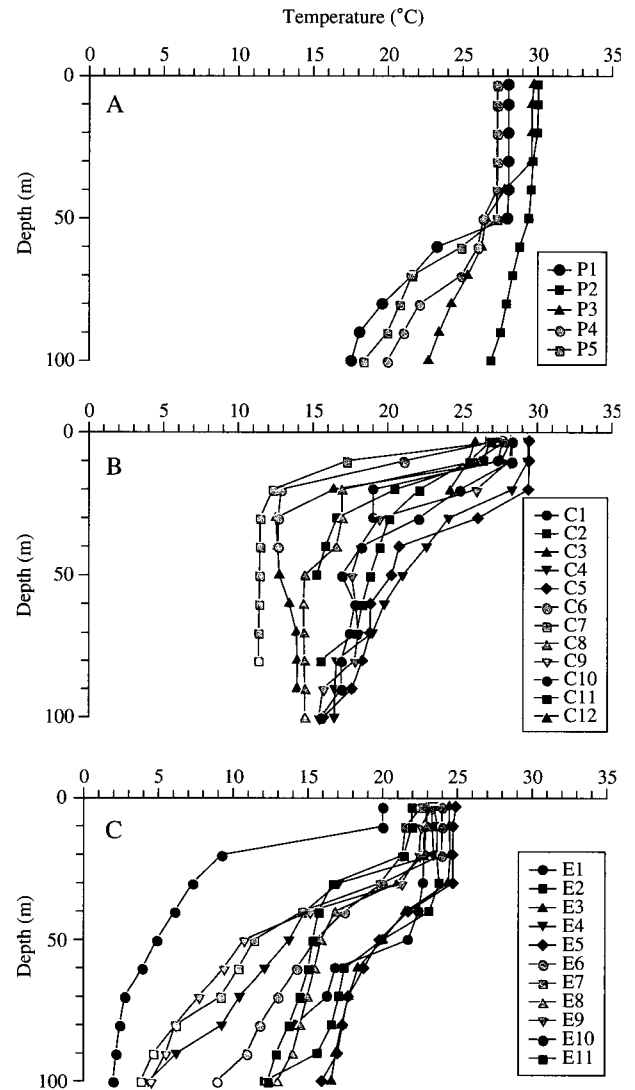


Fig. 7. Vertical profiles of temperature in each station of TSWP (A), C-ECS (B) and the East Sea.

의 흐름은 동중국해와 동해의 물리특성을 결정짓는 중요한 요인임을 보이고 있다.

조사수역 및 정점별 수온의 수직구조는 Fig. 7에 나타났다. TSWP 수역의 정점들은 30~50 m 깊이까지 수온변화가 적은 표면 혼합층이 나타났다. 반면 동중국해 조사 정점들은 20 m 깊이 이내의 표면 혼합층이 나타나며 이하 수심에서 급격한 수온감소가 나타나 수온약층이 강하게 발달하는 특징을 보였다. 동해의 정점들은 10~40 m 깊이의 표면 혼합층을 나타났다. 가장 낮은 표면 혼합층 깊이를 나타낸 정점 E10을 제외하면 20~40 m 깊이의 표면 혼합층이 나타나 TSWP 수역과 C-ECS의 중간적 특징을 나타냈다. 조사 정점 중 남쪽에 위치한 정점 E1과 E2에서 40 m 깊이의 표면 혼합층이 나타났고 E4와 E5는 30 m 이하에서 수온약층이 나타났다. 타 점들은 20 m까지 균일한 수온을 보이다 이하 수심에서 잘 발달된 수온약층이 나타났다.

2. 영양염 환경

C-ECS와 동해 표층수의 질산염 (nitrate+nitrite) 농도는 조사수역의 환경특성을 잘 나타내고 있다(Fig. 8). C-ECS 정점들의 표층 질산염 (nitrate+nitrite) 농도는 0.28~1.21 μM의 범위를 보였다. 정점평균 농도는 0.73 μM로서 양자강으로 부터의 공급으로 인해 양호한 질산염 환경을 나타냈다. 동해는 0.11~0.41 μM의 범위와 정점 평균 0.19 μM의 농도를 보여 동중국해보다 빈 영양 상태임을 보였다. TSWP 수역은 영양염 분석 자료가 없으나, 열대 및 아열대 외양수의 표층은 극한 빈 영양 상태를 보임은 잘 알려져 있다 (Carpenter and Capone 1983). 따라서 본 조사는 열대 대양의 극한 빈 영양 환

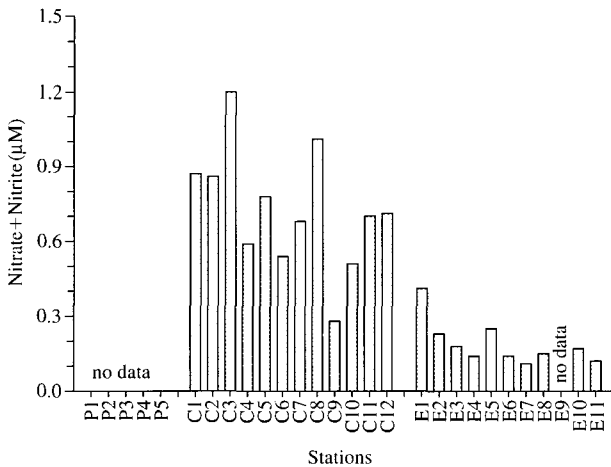


Fig. 8. Surface nitrate+nitrite concentrations of each station.

경, 동해의 빈 영양 환경 그리고 동중국해 대륙붕의 중 영양환경 (meso trophic)을 보이는 서로 다른 환경에서 수행되었다.

3. 초미소 식물플랑크톤의 수역별 풍도 변화

Flow cytometer를 이용 *Synechococcus*, *Prochlorococcus*, picoeukaryotes의 3개 그룹으로 분리 계수된 초미소 식물플랑크톤의 층별 풍도를 100 m 수심까지 적분한 값을 Table 2에 나타냈다. *Synechococcus* 풍도의 조사 수역별 평균값은 동중국해가 $305.6 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 으로 가장 높았고 TSWP 수역이 $84.5 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 로 가장 낮았다. TSWP 수역의 정점들 중 외양에 위치한 P1, P2, P3 정점들은 $3.5 \times 10^{10} \sim 5.4 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 의 낮은 풍도를 나타냈으나 동중국해의 대륙붕에 위치한 정점 P4와 P5에서는 $189.4 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 와 $219.0 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 로

Table 2. Depth (0~100 m) integrated cell abundance for each group of pico-phytoplankton for each sampling station

Area	Station	Integrated cell abundance ($\times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$)		
		<i>Synechococcus</i>	<i>Prochlorococcus</i>	Picoeukaryotes
TSWP	P1	5.4	666.8	2.9
	P2	5.3	611.5	0.7
	P3	3.5	418.5	1.0
	P4	189.4	314.0	8.7
	P5	219.0	511.5	24.9
	Mean	84.5	504.5	7.6
East China Sea	C1	350.1	n.d.	9.7
	C2	240.0	n.d.	16.0
	C3	809.3	n.d.	23.1
	C4	231.2	165.0	53.0
	C5	204.7	70.5	27.8
	C6	156.0	n.d.	13.0
	C7	161.3	n.d.	22.4
	C8	447.5	9.3	30.8
	C9	268.0	26.0	61.5
	C10	268.3	113.2	56.7
	C11	152.7	14.7	18.2
	C12	180.3	n.d.	30.2
Mean	305.6	33.2	27.8	
East Sea	E1	48.3	n.d.	5.5
	E2	39.7	n.d.	8.9
	E3	139.5	306.1	6.8
	E4	43.7	n.d.	5.4
	E5	143.1	331.6	9.5
	E6	164.0	494.5	11.1
	E7	154.4	107.9	10.2
	E8	100.9	121.4	16.7
	E9	91.1	n.d.	35.1
	E10	344.8	n.d.	25.6
	E11	109.3	71.0	14.8
Mean	125.4	130.2	13.6	

증가하였다. C-ECS에 위치한 12개 조사 정점들은 $152.7 \times 10^{10} \sim 809.3 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 범위의 높은 풍도를 보여, TSWP의 외양 정점에서 낮은 풍도를 보이다 동중국해 대륙붕 수역에서 높게 증가하는 분포특성이 뚜렷이 나타났다. 동해의 정점들은 $39.7 \times 10^{10} \sim 344.8 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 범위의 풍도로서 TSWP 보단 높으나 C-ECS에 비해서는 낮은 수준을 보였다. *Prochlorococcus*의 수역별 풍도 분포는 *Synechococcus*와 반대양상으로, TSWP 수역이 $504.5 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 의 높은 정점 평균 값을 보인 반면 C-ECS에선 $33.2 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 의 낮은 값을 나타냈다. TSWP의 P1, P2, P3 정점들은 $418.5 \times 10^{10} \sim 666.84 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 범위의 높은 *Prochlorococcus* 풍도를 나타냈으며 이는 *Synechococcus*의 풍도에 비해 100배 이상 높은 값이다. C-ECS는 12개 조사 정점 중 대마난류수의 영향을 강하게 받을 수 있는 수역에 위치한 6개 정점만 *Prochlorococcus*가 출현하였다. 이들 정점에서의 풍도는 $9.3 \times 10^{10} \sim 165.0 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 의 범위이며 외양에 위치한 C4, C5, C10 정점에서 상대적으로 높은 값을 보였다. 동해의 정점평균 풍도는 $130.2 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 로서 TSWP 수역보단 낮으나 C-ECS에 비해 높게 나타났다. 동해의 11개 조사 정점 중 6개 조사 정점만 *Prochlorococcus*가 출현하였다. 남서쪽 수역에 위치한 정점 E1, E2, E4와 저수온 환경이 나타난 E10 정점에서 *Prochlorococcus*가 출현하지 않았다. 울릉분지에 위치한 대부분 정점에서 출현하였다. *Prochlorococcus*가 출현한 정점은 $71.0 \times 10^{10} \sim 494.5 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 의 풍도 범위를 보였으며 정점 E3, E5, E6에서 상대적으로 높은 풍도를 나타냈다.

Picoeukaryotes 수역별 정점평균 풍도는 C-ECS가 $27.8 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 로 가장 높고 TSWP이 $7.6 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 로 가장 낮았다. 수역별 분포유형은 *Synechococcus*와 같았으나 풍도는 1/10 수준을 나타냈다. TSWP 수역의 P1, P2, P3 정점은 $0.7 \times 10^{10} \sim 2.9 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 의 낮은 풍도를 보였고 동중국해에 위치한 P4와 P5 정점에선 증가된 풍도를 나타냈다. 동중국해 대륙붕 수역의 정점들은 $9.7 \times 10^{10} \sim 61.5 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 범위의 풍도를 보였다. 정점평균 풍도는 $27.8 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 로 동해에 비해 약 2배 TSWP 수역에 비해 약 4배 높은 수준을 보였다. 동해의 정점들은 $5.5 \times 10^{10} \sim 35.1 \times 10^{10} \text{ cells m}^{-2}$ 의 풍도 범위를 보였으며 남쪽 수역에 위치한 정점들이 상대적으로 낮은 풍도를 보였다.

4. 초미소 식물플랑크톤의 수역별 수직분포 특성

Synechococcus 풍도의 수직분포는 조사수역에 따라 다

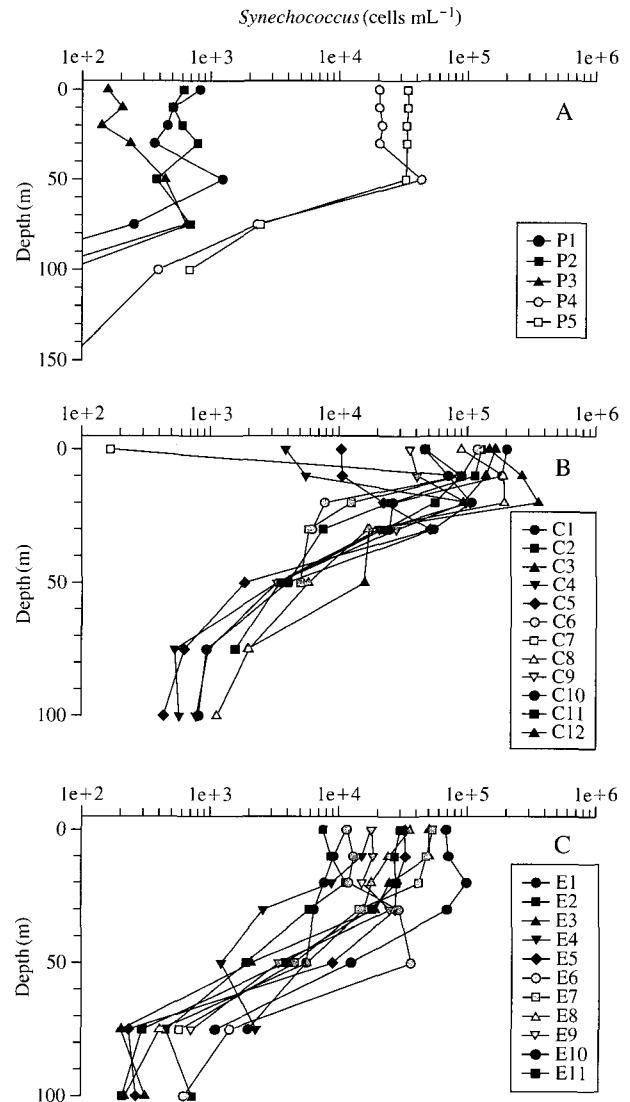


Fig. 9. Vertical profiles of *Synechococcus* cell abundance in each station of TSWP (A), C-ECS (B) and the East Sea.

른 유형을 나타냈다(Fig. 9A-C). TSWP의 정점에선 50~75 m 이하 수심에서 급격한 풍도감소가 나타났다. 이와 같은 수직구조는 형태는 표면 혼합층과 수온 약층의 발달 깊이에 의해 결정된다(Fig. 7A). TSWP에 위치한 정점중 동중국해에 위치한 정점들이 남쪽의 정점들보다 높은 풍도를 나타냈다(Fig. 9A). 정점 P5의 표면 혼합층은 $34.3 \times 10^3 \sim 33.5 \times 10^5 \text{ cells ml}^{-1}$ 의 유사한 풍도를 보였으며 이하수심에서 감소하였다. 정점 P4는 표층에서 30 m 수심까지 약 $21.0 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 의 풍도를 보이다 50 m 수심에서 $43.9 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 로 증가한 후 감소하였다. 남쪽의 대양에 위치한 P1, P2, P3 정점들은 표층에서 $1.6 \times 10^2 \sim 8.2 \times 10^2 \text{ cells ml}^{-1}$ 의 낮은 풍도를 나타냈

다. 정점 P1의 50 m 수심과 P3의 75 m 수심에서 풍도 최대층이 나타나나 1.2×10^2 cells ml⁻¹ 이하의 낮은 수준이다. TSWP 정점들의 *Synechococcus* 수직분포는 대체적으로 표면 혼합층까지 유사한 수준을 보이고 표면 혼합층 바로 아래 수심에서 풍도증가가 나타난 후 이심에서 감소하는 구조를 나타냈다. C-ECS의 정점들은 수역 특성별로 크게 2가지 유형의 수직분포를 나타냈다(Fig. 9B). 대마난류수에 근접한 정점 C4, C5, C9, C10는 표층에 비해 20~30 m 수심에서 풍도가 증가하는 구조를 나타냈다. 반면 연안수역의 정점들은 표층에서 10~20 m 수심까지 유사한 풍도를 보이다 이심에서 감소하는 구조를 나타냈다. 이와 같은 수직분포는 수온의 수직분포와 밀접한 관계를 보이고 있으며 대체적으로 표면 혼합층 혹은 표면 혼합층의 아래 아래 수층까지 높은 풍도를 나타냈다. 정점 C7을 제외한 정점들의 표층 풍도는 $3.8 \times 10^3 \sim 203.1 \times 10^3$ cells ml⁻¹의 수준으로 TSWP에 비해 높게 나타났다. 동해 정점들의 표층 풍도는 $7.6 \times 10^3 \sim 68.9 \times 10^3$ cells ml⁻¹의 범위로서 C-ECS에 비해 낮으나 TSWP의 정점들 보다 높은 수준을 나타냈다. 수직분포는 E6 정점의 50 m에서 풍도 최대층을 나타낸 것과 E1 정점에서 표층부터 50 m 수심까지 유사한 수준을 보이다 75 m 수심에서 약간 감소하는 한 것을 제외하면, 대부분 정점이 20~30 m 수심까지 유사한 풍도를 보이다 이하 수심에서 감소하는 구조를 보였다(Fig. 9C). *Synechococcus* 풍도의 수직분포는 대체적으로 수온약층의 형성과 밀접한 관계를 나타냈다.

Prochlorococcus 풍도의 수직분포 역시 표면 혼합층의 깊이 및 수온약층 발달과 밀접한 관계를 보였다(Fig. 10A-C). TSWP의 정점 중 50 m 이심에서 뚜렷한 수온약층이 형성되지 않은 정점 P2와 P3는 *Prochlorococcus*의 풍도가 100 m 수심까지 유사한 수준을 보이고 150 m 수심에서 약간의 감소가 나타났다(Fig. 10A). 반면 50~100 m 수심에서 수온약층이 나타난 P1, P4, P5 정점에선 50 m 수심까지 유사한 수준의 풍도를 보이다 이심에서 감소하는 형태를 보였다. 표층풍도는 $32.7 \times 10^3 \sim 76.8 \times 10^5$ cells ml⁻¹의 범위로서 정점별 변화는 크지 않았다. C-ECS의 정점 중 연안수역에 위치한 6개 정점에선 *Prochlorococcus*가 출현하지 않았으며 대마난류의 영향권에 있는 외양 쪽 정점들에서 분포를 나타냈다(Fig. 10B). *Prochlorococcus*가 출현한 정점들도 서로 다른 수직분포를 나타냈다. 정점 C4와 C5는 각각 20 m와 30 m 이심에서 풍도 감소가 나타났으며 C10과 C11 정점은 표층에 비해 20~30 m 수심이 높은 풍도를 보이고 이심에서 감소하는 구조를 나타냈다. C9 정점은 50 m 이심에서 약간의 풍도감소가 나타났으며, 정점 C8은 30 m

수층만 *Prochlorococcus*가 출현 하였다. 표층의 풍도는 $1.3 \times 10^3 \sim 97.9 \times 10^5$ cells ml⁻¹의 범위로서 TSWP에 비해 낮은 수준을 나타냈다. 동해의 정점들 중 6개 정점에서 *Prochlorococcus*가 출현하였고, 수직분포는 대체적으로 표면 혼합층에서 높은 풍도를 보이다 이심에서 감소하는 형태를 나타냈다(Fig. 10C). 표면 혼합층의 깊이는 정점별로 10~50 m를 나타냈고 정점 E3과 E6에선 풍도 최대층이 약하게 발달하였다. 표층의 풍도는 $41.7 \times 10^3 \sim 97.9 \times 10^5$ cells ml⁻¹의 수준으로 출현한 정점만을 비교하면 TSWP 수역과 유사한 수준을 보였다.

TSWP 수역의 picoeukaryotes의 수직분포는 *Synechococcus*와 유사한 유형을 나타냈다(Figs. 11A-C). 정점 P5는 50 m 수심까지 유사한 수준의 풍도를 보이다 이심에

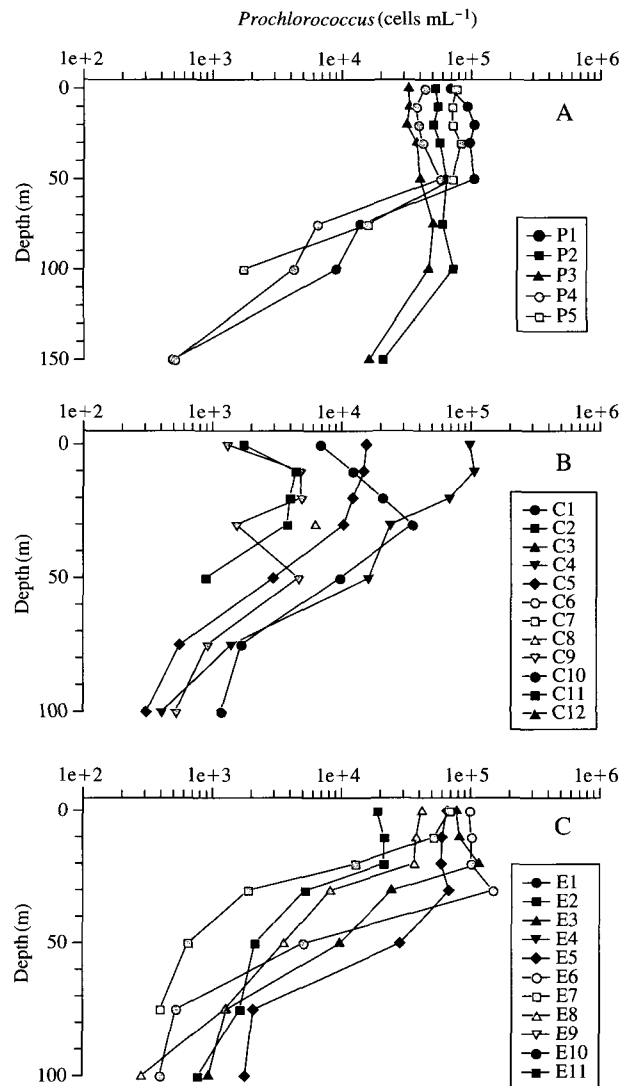


Fig. 10. Vertical profiles of *Prochlorococcus* cell abundance in each station of TSWP (A), C-ECS (B) and the East Sea.

서 감소했고 정점 P4에선 50 m 수심에서 풍도 최대층이 나타난 후 이심에서 감소하였다 (Fig. 11A). 남쪽 대양수에 위치한 P1, P2, P3 정점의 표층 풍도는 매우 낮은 수준을 보였으며 수심증가에 따라 점차 증가하는 양상을 나타냈다. 정점 P1은 100 m 수심까지 풍도가 약간 증가한 후 이심에서 감소하였다. 그러나 풍도 최대층은 0.4×10^5 cells ml⁻¹의 낮은 수준을 나타냈다. 정점 P2와 P3는 100~150 m 수심까지 풍도가 점차 증가하였으나 0.3×10^5 cells ml⁻¹ 이하의 낮은 수준에서 변화를 나타냈다. C-ECS의 정점들은 수심에 따른 풍도변화가 크지 않았다 (Fig. 11B). 표층의 풍도는 $1.2 \times 10^3 \sim 5.6 \times 10^5$ cells ml⁻¹의 범위로서 TSWP와 동해에 비해 높은 수준을 나타냈다. 동해에선 정점에 따라 복잡한 유형의 수직분포

가 나타났다 (Fig. 11C). 표면 혼합층이 깊게 나타난 정점 E1, E2, E4에선 수심별 풍도변화가 매우 적었다. 타 정점들은 30~50 m 수심까지 높은 풍도를 보이다 이심에서 감소를 보였는데, E6, E7, E8, E9 정점들은 20~50 m 수심에서 풍도 최대층이 나타났다. 표층의 풍도는 $0.6 \times 10^3 \sim 4.3 \times 10^5$ cells ml⁻¹의 범위로 C-ECS보다 낮고 TSWP 수역에 비해 높은 수준을 보였다.

토 의

1. 수역별 풍도 분포

조사수역에서 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*의 풍도 분포는 서로 상반되는 특징을 나타냈다. 100 m 수심까지 적분된 *Synechococcus*의 풍도는 C-ECS에서 높고 TSWP에서 낮은 반면, *Prochlorococcus*의 풍도는 TSWP에서 높고 C-ECS에서 낮게 나타났다. 이런 분포는 조사수역별 환경 변화와 이에 반응하는 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*의 생태·생리적 차이에 의해 나타나는 것으로 판단된다. TSWP에서 보인 것과 같이 열대와 아 열대의 대양환경에서 *Prochlorococcus*가 높은 생체량을 보이는 것은 잘 알려진 현상이다 (Partensky et al. 1999a). 1980년대 후반 flow cytometer를 이용한 *Prochlorococcus*의 계수가 가능해짐에 따라 (Chisholm et al. 1988; Li and Wood 1988), 초미소 플랑크톤의 분포 연구가 활발히 진행되었다. 그 결과 남세균인 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*의 전 지구 규모적과 지역적 분포특성이 많이 밝혀졌다. 이들 두 분류군의 분포 연구에서 밝혀진 가장 특이한 점은, 열대 대양의 극한 빈 영양 환경에서 *Prochlorococcus*의 풍도가 증가하는 점이다. *Prochlorococcus*는 빈 영양환경에서 풍도가 증가하여 *Synechococcus* 풍도의 100배 이상, 생체량으로는 20배 이상을 나타낸다 (Landry et al. 1996; Partensky et al. 1999a; Noh et al. 2004). 반면 *Synechococcus*는 일반적으로 영양염이 풍부한 환경에서 높은 풍도와 생체량이 증가를 보인다. 이러한 생태적 특징은 이번 조사에서도 잘 나타나고 있다. *Synechococcus*의 풍도는 TSWP 수역 중 극한 빈 영양 상태를 보일 것으로 예측되는 정점 P1~P3 수역에서 $3.5 \times 10^{10} \sim 5.4 \times 10^{10}$ cells m⁻²의 낮은 풍도를 보이다, 동중국해에 위치한 정점 P4와 P5에서 약 200.0×10^{10} cells m⁻² 수준으로 급격한 풍도 증가를 나타냈다. 중 영양환경 (meso trophic)을 보인 동중국해 대륙붕 수역에서는 좀 더 증가하여 305.6×10^{10} cells m⁻²의 정점 평균 풍도를 나타냈다. 이와 같은 *Synechococcus*의 풍도 분포는 열대의 극한 빈 영양환경으로부터 중 영양 환경의 동중

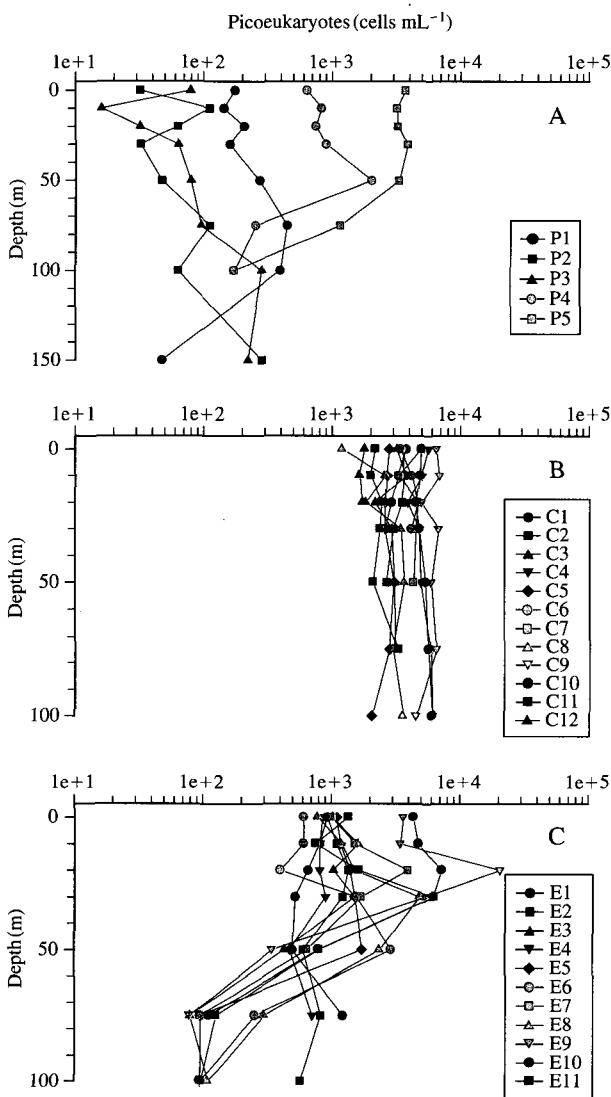


Fig. 11. Vertical profiles of picoeukaryotes cell abundance in each stations of TSWP (A), C-ECS (B) and East Sea.

국해로 이어지는 상이한 영양염 환경에 반응하는 생태적 특징을 나타내는 결과로 판단된다. 동해는 수심이 깊고 연안환경으로부터 영양염 유입이 적어 동중국해 대륙붕 수역에 비해 빈 영양 환경을 나타냈다 (Fig. 8). 동해의 *Synechococcus* 정점 평균 풍도는 125.4×10^{10} cells로서 TSWP 수역보다 높고 C-ECS에 비해 낮은 수준을 보이는데 이러한 풍도 수준은 영양염 환경의 영향을 받은 것으로 판단된다.

*Prochlorococcus*는 극한 빈 영양 환경이 예상되는 TSWP 수역에서 높은 풍도를 보이고 비교적 질산염의 농도가 높은 C-ECS에선 낮은 풍도를 보였다. 또한 C-ECS의 연안쪽 일부 정점에서는 출현하지 않았다. 동해의 일부 정점도 *Prochlorococcus*가 출현하지 않았으나, 전체적으로 C-ECS보다 높은 풍도를 나타냈다. 전체적인 분포특징은 빈 영양 환경이 예상되는 정점 P1~P3 수역에서 가장 높은 풍도를 보이고 동중국해의 P4와 P5 정점에서도 높은 풍도를 유지했다. 그러나 영양염 환경이 양호한 C-ECS에서는 출현하지 않거나 풍도가 낮게 나타난다. 반면 빈 영양 환경의 동해에선 동중국해보다 높은 풍도를 나타낸다. 이러한 분포 형태에는 2가지 흥미로운 면이 있다. 하나는 영양염 환경에 반응하는 특이성이고, 다른 하나는 동중국해와 동해 같은 온대의 주변해에서 나타나는 출현 양상이다. 영양염 환경과 관계된 *Prochlorococcus*의 특이한 분포 양상은 *Prochlorococcus*의 발견 (Chisholm *et al.* 1988, 1992) 이후 초미소 플랑크톤 연구에서 알게 된 가장 흥미로운 현상중의 하나였다. *Prochlorococcus*의 발견 후 진행된 일련의 연구들을 통해 세포크기가 0.6~0.8 μm 에 불과한 이 초미소 식물플랑크톤이 극한 빈 영양 환경을 보이는 전 세계 열대와 아열대 해양에서 풍도가 증가하는 특이한 환경 적응 능력을 통해 전 세계 열대와 아열대 해양을 지배하고 있음이 밝혀졌다 (Chisholm *et al.* 1988; Vaultot *et al.* 1990; Olson *et al.* 1990a; Campbell *et al.* 1993; Goericke and Welschmeyer 1993; Shimada *et al.* 1993). 이와 같은 영양염 환경과 관계된 *Prochlorococcus*의 분포 특성을 이해하는데 Moore *et al.* (2002)의 실험은 진보적이며 매우 신선한 관점을 제공하고 있다. 배양되고 있는 몇 strain의 *Prochlorococcus*를 이용하여 실험한 결과 이들은 질소계 영양염중 NH_4^+ 와 urea를 이용하여 성장하나 NO_3^- 를 이용한 성장은 보이지 않았다. Moore *et al.* (2002)이 제시한 결과를 참고하면 *Prochlorococcus*는 질산염 농도에 관계없이 표층 환경에서 재순환 되는 NH_4^+ 와 urea를 이용함으로써 높은 생체량을 유지할 수 있는 것으로 판단된다. 이와 같은 생리적 특징을 이용 TSWP 수역과 같은 빈 영양 수역에서 다른 식물플랑크톤과 어려운 경

쟁 없이 우점적인 분포를 나타낼 수 있을 것이다. *Prochlorococcus*의 동중국해 분포 특징은 최근 flow cytometer를 이용한 초미소 플랑크톤 연구가 시작되며 부분적으로 밝혀지고 있다 (Jiao *et al.* 2002, 2005; Noh *et al.* 2005; Pan *et al.* 2005). 대륙붕수역에선 *Prochlorococcus* 분포의 양상의 계절 변화가 크게 나타나는데, 저 수온기엔 동중국해 대륙붕에서 출현하지 않고 수온이 높은 쿠로시오 수역을 중심으로 출현수역이 제한된다. 수온의 제한을 받지 않는 하계에는 장강 희석수의 영향이 큰 대륙붕 수역에서 *Prochlorococcus*는 출현이 제한되는 현상을 보이고 있다. 이번 조사시도 염분환경이 낮은 정점들에서는 *Prochlorococcus*가 출현하지 않았다. 전체 조사 정점의 표층에서 100 m 수심 사이에서 보이는 최대 염분값과 풍도를 나타낸 그림은 *Prochlorococcus* 분포가 염분 환경과 밀접한 관계가 있음을 보이고 있다 (Fig. 12). C-ECS의 정점 중 *Prochlorococcus*가 출현하지 않은 6개 정점은 최대염분층의 33.4 psu 이하를 보였고, 출현한 6개 정점은 34.3 psu 이상을 나타냈다. 염분환경에 따른 *Prochlorococcus*의 분포는 염분 자체의 영향일 수 있으며, Jiao *et al.* (2005)의 추정과 같이 양자강 희석수에 포함된 중금속이나 미량원소 등에 의한 영향일 수도 있다. 비교적 빈 영양 환경을 보인 동해에선 C-ECS보다 높은 풍도를 보였다. 그러나 동해 정점들에서도 *Prochlorococcus* 출현 제한 현상이 나타났다. 대체적으로 남해 연안 환경의 영향을 받을 수 있는 E1, E2, E4와 같은 정점들에서 *Prochlorococcus*가 출현하지 않았다. 그러나 정점 E2와 E4의 염분최대층은 약 34.5 psu의 고염환경을 보여 대마난류의 영향을 받았을 것으로 판단되는데 이들 정점에서의 출현 제한 현상은 염분이 아닌 다른

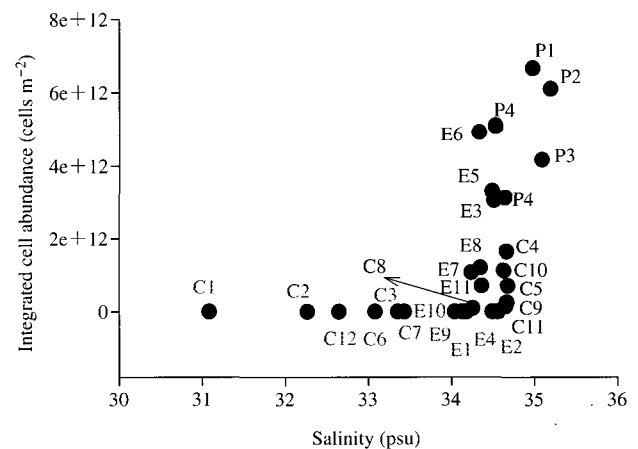


Fig. 12. Diagram representing relationship between salinity maximum of 0~100 m depth and 0~100 m depth integrated cell abundance.

요인이 있을 것으로 판단된다. 정점 E10은 염분 최대층의 염분이 상대적으로 낮았고 한류대에 위치하여 출현하지 않은 것으로 판단된다. 독도 인근에 위치한 정점 E9이 보이는 34.1 psu의 최대 염분값과 *Prochlorococcus*의 출현하지 않은 현상이 매우 특이하나 원인은 파악되지 않고 있다. 동중국해 대륙붕 수역과 동해의 *Prochlorococcus* 분포는 저염환경이 이들의 분포확장을 막는 제한요인임을 잘 나타냈다. 그러나 염분자체와 함께 다른 제한요인이 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 이해는 우리나라 주변해 뿐만 아니라 전 지구적 규모의 *Prochlorococcus* 분포양상 파악에 도움이 될 것으로 판단된다.

Picoeukaryotes의 수역별 풍도변화는 *Synechococcus*와 유사한 양상을 보였다 (Table 2). Picoeukaryotes의 수역별 평균 풍도는 *Synechococcus*의 1/10 수준이었으나 C-ECS > 동해 > TSWP 순의 풍도변화는 *Synechococcus*와 같았다. 이러한 분포는 picoeukaryotes도 영양염 환경에 따라 풍도가 변할 수 있음을 의미한다. Noh *et al.* (2005)의 이어도 관측기지 수역조사에서 picoeukaryotes가 식물플랑크톤 대증식기에 맞춰 풍도가 증가하는 현상을 나타냈다. 이는 picoeukaryotes 풍도변화가 영양환경과 밀접할 수 있음을 의미한다.

2. 수직분포특성

초미소 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 초미소 식물플랑크톤의 수직분포형태는 서식지의 환경특성을 나타내는 물론 분류군별 생태·생리 특성을 파악하기 위한 중요한 자료로 이용될 수 있다. 조사수역에서 나타난 초미소 식물플랑크톤의 수직분포 특징은 각 분류군의 수심별 평균풍도의 수역별 그림에 잘 나타나 있다 (Fig. 13).

TSWP 수역에서 *Synechococcus*는 표층에서 50 m 수심까지 높은 풍도를 보이고 이심에서 급격한 감소를 보였다. 50 m 수심에서 최대 풍도 층이 나타났는데 이와 같이 수온약층 부근에서 풍도 최대층이 나타나는 형태는 열대와 아열대의 빈 영양 수역에서 빈번히 관찰되고 있다 (Olson *et al.* 1990b; Campbell *et al.* 1993). 이와 같은 구조는 빈 영양환경의 표면 혼합층에서 성장이 제한되고, 저층수로부터 영양염이 공급되는 수온약층 부근에서 성장이 증가되면 나타나는 구조이다. C-ECS 대륙붕 수역은 표층~20 m 수심까지 높은 풍도를 나타내고 30 m 수심부터 급격한 감소가 나타났다. 이곳은 수심이 낮고 하계에 양자강희석수의 영향으로 표층수의 밀도가 낮아

지며 수온 약층이 표층에 가까운 수심에서 형성된다. 따라서 표층에선 양자강으로부터 공급되는 영양염의 영향으로 높은 풍도를 보이고 20 m 아래서는 급격히 풍도가 감소한다. 그러나 동중국해 대륙붕 수역 중 대마난류의 영향을 받는 수역은 수온약층이 깊어짐에 따라 풍도 감소도 30 m보다 깊은 수심에서 나타난다 (Fig. 9B). 동해에선 수온약층의 깊이가 깊어짐에 따라 표층~30 m 수심까지 높은 풍도를 보이다 이심부터 풍도 감소가 증가하였다. 동해와 동중국해에 나타난 수직분포 구조는 TSWP와 같이 표면 혼합층의 영양염 환경이 *Synechococcus*의 성장을 강하게 제한하는 수준은 아닌 것으로

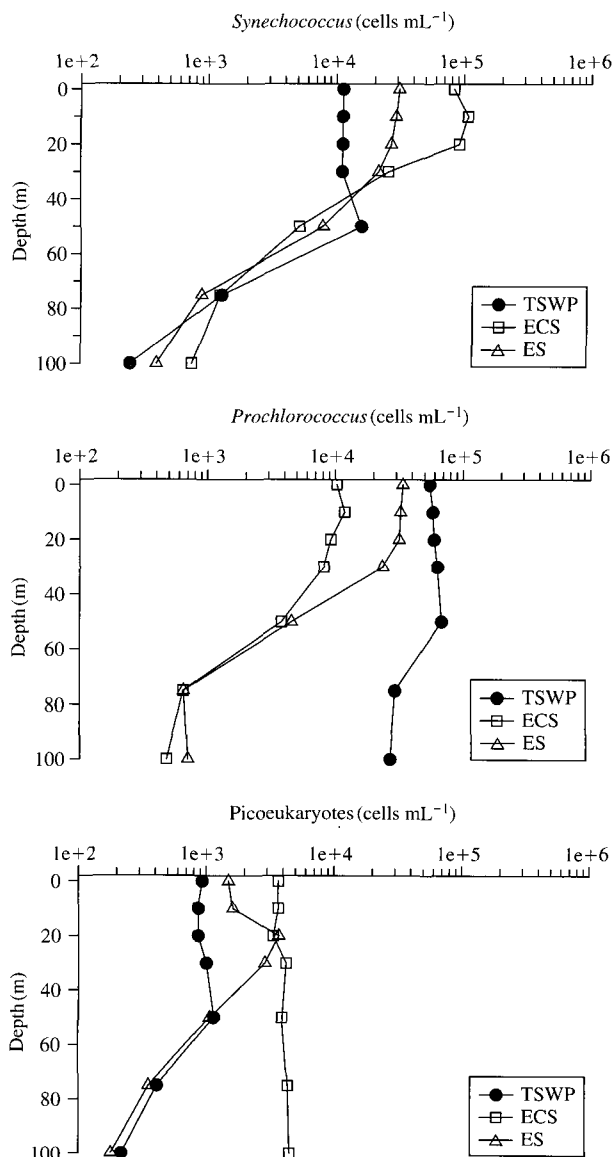


Fig. 13. Average depth profiles of *Synechococcus*, *Prochlorococcus* and picoeukaryotes cell abundance in the three different regions.

판단된다.

TSWP 수역의 *Prochlorococcus* 수층 평균 풍도는 표층 ~ 50 m까지 점차 증가하는 구조를 보이다 75 m 수심에서 약간 감소하였다. 그러나 풍도 감소는 크지 않아 100 m 수심에서도 26.9×10^3 cells ml⁻¹를 나타냈다. 이는 정점 P2와 P3에서 100 m 수심까지 유사한 풍도를 보여 나타난 구조이다. 이러한 수직구조는 열대나 아열대의 빈 영양 환경에서 흔히 볼 수 있는 구조로서 표층에서 유광대 깊이까지 $1.0 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5$ cells ml⁻¹ 범위의 균질한 풍도를 나타내고 이심에서의 감소도 급격히 나타나지 않는다 (Partensky *et al.* 1999a, b). 이는 *Prochlorococcus*가 수주내에 형성되는 다양한 환경에 적응할 수 있는 생태·생리적 특징이 있음을 의미한다. 다양한 해역과 환경에서 분리 배양한 *Prochlorococcus*들을 조사한 결과 divinyl chl. *b* (chl. *b*₂)와 divinyl chl. *a* (chl. *a*₂)의 조성이 다른 2가지 생태형이 나타났다. 이들은 강한 광에 적응된(낮은 chl. *b*₂/*a*₂) 생태형과 약한 광에 적응된(높은 chl. *b*₂/*a*₂) 생태형으로 분리되며 (Partensky *et al.* 1993; Moore *et al.* 1995, 1998; Moore and Chisholm 1999), 실제 아열대와 열대해양 조사에서 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 심부 유광대까지 높은 개체수를 유지시키는 중요한 요인이 되며 동시에 해양에서 가장 풍부한 식물플랑크톤으로 번성할 수 있는 원동력이 되고 있다. 또한 *Prochlorococcus*는 표층 환경에서 재순환 되는 NH₄⁺와 urea를 이용함으로써 빈 영양 환경 하에서도 높은 생체량을 유지할 수 있는 생리적 특징을 갖고 있다 (Moore *et al.* 2002). 이러한 *Prochlorococcus*의 생태·생리적 특징은 TSWP 수역의 풍도와 수직분포를 결정한 것으로 판단된다. C-ECS의 수직분포는 표층 ~ 30 m 수층까지 유사한 농도를 보이다 이심에서 감소하였다. 이는 *Synechococcus*가 30 m 수심에서 급격히 감소한 것과 차이를 보이는 구조이다. 이러한 구조는 *Prochlorococcus*가 깊은 수심에 적응할 수 있는 생태적 특징보다는 동중국해에서의 출현 양상 때문에 보이는 구조로 판단된다. 동중국해에서 *Prochlorococcus*는 표면 혼합층이 깊은 외양 쪽 정점에서 출현하고 표면 혼합층이 얇은 연안수역에선 출현하지 않아 위와 같은 수직분포를 보인 것으로 판단된다. Jiao *et al.* (2002)의 하계 동중국해 조사에서도 *Prochlorococcus*는 표층하 풍도최대층을 보이지 않았다. 동해수역은 표층 ~ 30 m 수층까지 유사한 농도를 보이다 이심에서 감소하여 *Synechococcus*와 유사한 수직구조를 보였다. TSWP 수역과 달리 동중국해와 동해에는 표면

혼합층이 깊지않고 영양염 환경도 상대적으로 높은 수준을 보인다. 따라서 열대의 심부유광대 같이 저층환경에 적응된 생태형의 *Prochlorococcus*가 우점할 수 있는 환경이 형성되지 않아 표층하 풍도최대층의 발달하지 않은 것으로 판단된다.

TSWP 수역의 picoeukaryotes는 표층 ~ 50 m까지 유사한 풍도를 보이다 이심에서 감소하였다. 반면 동중국해 대륙붕 수역은 표층 ~ 100 m까지 풍도의 변화가 없었다. 동해에선 20 m와 30 m에서 풍도 최대층이 나타난 후 이심에서 감소하였다. 이러한 수역별 분포 특성을 이해하기는 현재로서는 어려운 점이 많다. *Picoeukaryotes*에는 다양한 분류군이 포함되나, 이들은 세포크기가 작고 형태적 특징이 뚜렷치 않아 분류에 어려움이 있다. 따라서 최근 분자 생물학적 방법에 의한 분류군별 연구가 수행되기 전까지 3 μm 크기 이하의 모든 원핵조류는 picoeukaryotes 그룹에 포함되어 연구가 이루어져 왔다. 이번 연구 수역인 서태평양의 TSWP 수역 (Shimada *et al.* 1993)과 동중국해 대륙붕 (Jiao *et al.* 2002, 2005; Noh *et al.* 2005; Pan *et al.* 2005) 그리고 동해 (Kang *et al.* 2004)에서 수행된 기존의 연구도 분류군의 구분없이 picoeukaryotes에 포함시켰다. 그러나 picoeukaryotes는 출현 수역 및 시기에 따라 다른 분류군이 우점할 수 있으며, 이들은 생태·생리적으로 서로 다른 특성을 보일 수 있다. 즉 각기 다른 생태·생리적 특성을 갖는 picoeukaryotes들이 나타난 분포특성의 이해가 없이는 환경이나 생물의 특성에 대해 정확한 정보를 얻을 수 없는 것이다. Noh *et al.* (2005)의 조사에 의하면 picoeukaryotes가 동중국해 초미소 식물플랑크톤 생체량 중 매우 높은 점유율을 보이고 있다. 이는 picoeukaryotes가 동중국해에서 중요한 일차생산자 역할을 하고 있음을 의미한다. 향후 picoeukaryotes의 생태계에서의 역할이나 생태적 특징을 밝히기 위해서는 분류군별 연구가 필요하며, 이를 위해 분자생물학적 방법이 병행되는 연구가 도입되어야 할 것으로 판단된다.

적 요

환경특성이 초미소 식물플랑크톤의 분포에 미치는 영향을 파악하기 위해 서태평양의 열대와 아열대 수역 (TSWP)과 동해에서 2002년 9월 조사를 하였고, 동중국해 대륙붕수역 (C-ECS)은 2003년 8월에 조사를 수행하였다. 초미소 식물플랑크톤은 flow cytometry 방법을 이용 *Synechococcus*, *Prochlorococcus* 그리고 picoeukaryotes의 3개체군으로 구분 계수하였다. 물리화학적 환경이 상

이한 3곳의 조사수역 별로 초미소 식물플랑크톤의 수직 분포, 100 m 수심까지 적분된 풍도를 비교하였다. 분석 결과 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*의 적분된 개체 수는 3곳의 조사수역에서 서로 상반되는 결과를 보였다. *Synechococcus*는 TSWP에서 정점평균 84.5×10^{10} cells m^{-2} 의 풍도를, C-ECS에서 305.6×10^{10} cells m^{-2} 를 동해에선 125.4×10^{10} cells m^{-2} 의 풍도를 보여 영양염이 풍부한 지역에서 풍도가 증가하는 경향을 보였다. 이에 반해 *Prochlorococcus*는 빈 영양 환경의 TSWP에서 504.5×10^{10} cells m^{-2} 의 가장 높은 풍도를 보였으며, 영양염 환경이 양호한 C-ECS에서 낮은 풍도를 보이는 독특한 분포양상을 나타냈다. Picoeukaryotes는 *Synechococcus*와 유사한 지역적 변화를 보였으나 풍도는 약 1/10 정도를 나타냈다. *Synechococcus*와 picoeukaryotes는 모든 정점에서 출현한 반면 *Prochlorococcus*는 일반적으로 C-ECS와 동해의 저염 환경에서 출현하지 않았다. *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*의 수층별 평균 풍도의 수직분포는 표면 혼합층에서 유사한 수준을 보이다 이심에서 급격한 감소를 나타냈다. 그러나 TSWP에선 풍도의 급격한 감소가 나타나지 않고 100 m 수심까지 높은 풍도를 나타냈다. Picoeukaryotes는 C-ECS에서 100 m까지 유사한 수준의 풍도를 보였으며, 동해의 20~30 m 수심에선 최대 풍도층이 나타났다.

사 사

본 연구는 해양수산부 R&D 연구과제인 ‘이어도 과학기지 활용연구 사업’과 ‘중장기 기후변화에 따른 동중국해 해양생태계 변동 예측 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.
- Campbell L, HA 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.
- Carpenter EJ and DG Capone. 1983. Nitrogen in the Marine Environments. John Wiley and Sons. New York, pp.900.
- 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.
- Chisholm SW, SL Frankel, R Goerike, RJ Olson, B Palenik, JB Waterbury, L West-Johnsrud and ER Zetter. 1992. *Prochlorococcus marinus* Nov. Gen. sp.: an oxyphototrophic marine prokaryote containing divinyl chlorophyll-*a* and *b*. *Arch. Microbiol.* 157:297-300.
- 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.
- 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.
- Kang JH, WS Kim, KI Chang and JH Noh. 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.
- Kim K, YG Kim, YK Cho, M Takematsu and Y Volkov. 1999. Basin-to-basin and year-to-year variation of temperature and salinity characteristics in the East Sea. *J. Oceanogr.* 55:103-109.
- Landry MR, 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.
- 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.
- LIE HJ and CH Cho. 1994. On the origin of the Tsushima Warm Current. *J. Geophys. Res.* 99:25081-25091.
- 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.
- Moon-van der Staay SY, GWM van der Staay, L Guillou, D Vaultot, H Caustre and LK Medlin. 2000. Abundance and diversity of prymnesiophytes in the picoplankton community from the equatorial Pacific Ocean inferred from 18S

- rDNA sequences. *Limnol. Oceanogr.* 45:98-109.
- Moore LR, R Goericke 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.
- Moore LR, G Rocop and SW Chisholm. 1998. Physiology and molecular physiology of coexisting *Prochlorococcus* ecotypes. *Nature* 393:464-467.
- Moore LR and SW Chisholm. 1999. Photophysiology of the marine cyanobacterium *Prochlorococcus*: ecotype differences among cultured isolates. *Limnol. Oceanogr.* 44:628-638.
- Moore LR, AF Post, G. Rocop and SW Chisholm. 2002. Utilization of different nitrogen sources by the marine cyanobacteria *Prochlorococcus* and *Synechococcus*. *Limnol. Oceanogr.* 47:989-996.
- Nitani H. 1972. Beginning of the Kuroshio. in *Kuroshio, Its Physical Aspects*, ed. by H. Stommel and K. Yoshida, Univ. of Tokyo Press. Tokyo. pp. 129-163.
- Noh JH, SJ Yoo, MJ Lee, SK Son and WS Kim. 2004. A flow cytometric study of autotrophic picoplankton in the tropical eastern Pacific. *Ocean Polar Res.* 26:273-286.
- Noh JH, SJ Yoo, JA Lee, HC Kim and JH Lee. 2005. Phytoplankton in the waters of the Jeodo Ocean Research Station determined by microscopy, flow cytometry, HPLC pigment data and remote sensing. *Ocean Polar Res.* 27:397-417.
- Not F, N Simon, IC Biegala and D Vaultot. 2002. Application of fluorescent in situ hybridization coupled with tyramide signal amplification (FISH-TSA) to assess eukaryotic picoplankton composition. *Aquat. Microb. Ecol.* 28:157-166.
- Parsons TR, Y Maita and CM Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. New York. pp. 173.
- Olson RJ, SW Chisholm, ER Zettler, MA Altabet and JA Dusenberry. 1990a. Spatial and temporal distributions of prochlorophyte picoplankton in the north Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res. I.* 37:1033-1051.
- Olson RJ, SW Chisholm, ER Zettler and EV Amburst. 1990b. Pigment, size, and distribution of *Synechococcus* in the north Atlantic and Pacific Ocean. *Limnol. Oceanogr.* 35:45-58.
- 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, N Hoepffener, WKW Li, O Ulloa and D Vaultot. 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 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.
- Romari K and D Vaultot. 2004. Composition and temporal variability of picoeukaryote communities at a coastal site of the English Channel from 18S rDNA sequences. *Limnol. Oceanogr.* 49:784-798.
- 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. Bio.* 115:209-215.
- Vaultot D, F Partensky, J Neveux, RFC Mantoura and CA Llewellyn. 1990. Winter presence of prochlorophytes in surface waters of the northwestern Mediterranean Sea. *Limnol. Oceanogr.* 35:1156-1164.
- Waterbury JB, SW Watson, RRL Guillard and LE Bland. 1979. Widespread occurrence of a unicellular, marine, planktonic, cyanobacterium. *Nature* 277:293-294.
- West NJ, AS Wilhelm, NJ Fuller, RI Amann, R Rippka, AF Post and DJ 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.
- Zhang J. 1996. Nutrient elements in large Chinese estuaries. *Cont. Shelf Res.* 16:1023-1045.

Manuscript Received: September 1, 2005

Revision Accepted: September 28, 2005

Responsible Editorial Member: Wonchoel Lee
(Hanyang Univ)