

Article

**현미경, Flow Cytometer, HPLC 색소자료 및 원격탐사를 이용한 이어도
관측기지 주변수의 식물플랑크톤 연구**

노재훈* · 유신재 · 이정아 · 김현철 · 이재학

한국해양연구원 해양환경연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호**Phytoplankton in the Waters of the Ieodo Ocean Research Station
Determined by Microscopy, Flow Cytometry, HPLC Pigment
Data and Remote Sensing**

Jae Hoon Noh*, Sinjae Yoo, Jung Ah Lee, Hyun Chul Kim, and Jae Hak Lee

*Marine Environment Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

Abstract : Phytoplankton community structure and distribution pattern in the surface water around the Ieodo Ocean Research Station were investigated during seven cruises carried out from July, 2003 to October, 2004. Samples were analyzed using various tools including a microscope, flow cytometer, and HPLC. Satellite images were used to analyze spatio-temporal phytoplankton biomass distribution. SeaWiFS chlorophyll *a* (chl *a*) images showed that spring blooms occurred in April-May near the Ieodo Station, and these waters were under the influence of Changjiang Dilute Water during July-October. Also, during the July-October period, HPLC pigments data showed increasing zeaxanthin concentrations, a marker pigment of cyanobacteria whereas increasing concentrations of various other pigments such as fucoxanthin, peridinin, prasinoxanthin, alloxanthin, 19'-hexanoyloxyfucoxanthin and chlorophyll *b* were noted during spring blooms. Such pigment marker data were consistent with picoplankton data analyzed by flow cytometer and nano-microplankton analyzed by microscope. The pigment-CHEMTAX method was used to drive the phytoplankton group apportioned chl *a*. Diatoms, chlorophytes, dinoflagellates, and cryptophytes comprised 25.8, 20.7, 15.9, and 14.1%, respectively, of the total chl *a* in May. Average cyanobacteria concentrations in July-October contributed 25.4% of the total concentration. This was the highest percent contribution and was followed by chlorophytes, diatoms, and prymnesiophytes. This study discusses results from various methods, similarities and differences in the results among those methods, and the application range of the results from different analytical methods. Also, the study reveals a detailed phytoplankton community structure in the waters around the Ieodo Station, and suggests future monitoring considerations in relation to cell morphology, ecology and diversity factors according to taxonomic groups.

Key words : 식물플랑크톤 군집구조(phytoplankton community structure), 이어도 해양관측기지(Ieodo Ocean Research Station), 유세포 분석기(flow cytometer), 고성능 액상크로마토그래피(HPLC), 색소(pigment)

1. 서 론

식물플랑크톤의 크기 및 분류군별 조성은 생태계내의 먹이망 구조, 물질 순환, 생물생산력 등을 결정짓는 중요한 요인이다(Longhurst 1991; Legendre and Le Fevre 1995; Legendre and Michaud 1998). 따라서 생태계 구조, 기능 및 변화 연구에 있어 군집구조 파악은 필수적 분야라 할 수 있다. 그러나 해양 식물플랑크톤은 10개의 식물문(phylum)에 속하는 다양한 종들로 이루어져 있고(Hoek et al. 1995), 크기도 0.6~4,000 μm 의 넓은 범위를 보여(Jeffrey and Vesk 1997) 군집구조 연구는 분류학적 지식과 함께 다양한 분석방법이 요구되는 문제점을 갖고 있었다.

최근 25년은 식물플랑크톤 연구 분야에 큰 변화가 나타난 시기로서, 형광현미경을 이용한 초미소 플랑크톤의 발견(Johnson and Sieburth 1979; Waterbury et al. 1979)은 변화의 중요한 전환점이 되었다. 이전까지 진행되던 구조류와 와편모조류 같은 미소~소형 크기 위주의 식물플랑크톤 연구가 초미소 플랑크톤의 발견으로 박테리아 크기까지 범위가 확대되었고, 이들이 식물플랑크톤 생체량과 생산력 및 먹이망을 통한 물질 전달과정에서 중요한 역할을 하고 있음이 밝혀졌다(Paltr et al. 1983; Murphy and Hagen 1985; Ituriaga and Michell 1986). 이러한 결과는 해양 식물플랑크톤 군집구조를 보는 시각에 변화를 준 중요한 계기가 되었으며, 1980년대 후반 이후 간편하고 효율적인 분석 장비인 flow cytometer의 이용으로 초미소 크기를 포함한 식물플랑크톤 군집구조 연구가 더욱 활발히 이루어지게 되었다(Chisholm et al. 1988; Vault et al. 1996; Reckermann and Veldhuis 1997; Collier 2000). 형광현미경과 flow cytometer의 이용으로 초미소 플랑크톤을 포함한 식물플랑크톤 군집 구조가 밝혀지기 시작했으나, 미소형 편모류와, picoeukaryotes와 같이 세포가 작고 단순한 형태의 그룹들은 분류의 어려움으로 인해 군집연구에 포함되지 않는 경우가 많았다. 그러나 Mackey et al.(1996)이 현미경을 이용한 형태적 구분 없이 지시색소들(marker pigments)을 이용 분류군별 생체량 측정을 가능케 하는 CHEMTAX 분석 방법을 개발함으로써 식물플랑크톤 전체 분류군의 군집 연구가 가능하게 되었다. 최근에는 CHEMTAX 방법을 이용하여 열대에서 극지방까지 다양한 해양환경에서 식물플랑크톤 군집연구가 진행되고 있다(Higgins and Mackey 2000; Wright and van den Enden 2000; Veldhuis and Kraay 2004). 또한 CHEMTAX 방법과 현미경, flow cytometer 등 2~3가지 분석 방법을 병행하는 군집 연구와(Andersen et al. 1996; Breton et al. 2000; Havskum et al. 2004; Veldhuis and Kraay 2004), 연구선을 이용한 조사의 시공간적 제한을 극복하기 위해

인공위성자료를 결합한 연구들이 증가 추세에 있다.

동중국해는 넓은 대륙붕이 발달하여 있고 생물생산력이 높은 곳으로 주변국들에게 주요한 단백질 공급원의 역할을 하고 있으며 많은 어족자원의 산란장이기도 하다. 동중국해의 높은 생물생산성은 장강 등 강으로부터의 영양염 유입과 환경적 다양성에 기인한 식물플랑크톤의 높은 일차생산력과 연결되어 나타나는 것으로 알려져 있다(Guo 1994). 그러나 근래 들어 동중국해의 식물플랑크톤 생태계에 큰 변화가 나타나고 있으며, 향후에도 지속적인 변화를 보일 것으로 예측되고 있다. 상해 및 인근 도시들의 산업화, 내수면 양식면적의 증가 등에 의해 장강을 통한 영양염 유입이 급격한 증가를 보이고, 이로 인해 동중국해 내측 대륙붕 수역은 빈번한 적조현상이 나타나고 있다(Chen et al. 2003; Gao and Song 2005). 또한 삼협댐의 건설은 장강 담수 유입량 및 유입 패턴, 부유사 농도 등 다양한 환경변화와 연계되어 동중국해 식물플랑크톤 생태계에 심각한 영향을 미칠 것으로 예측되고 있다(Chen et al. 2003). 이러한 인위적 환경변화와 더불어 지구 기후변화에 따른 생태계 변화도 동중국해의 생태계에 변화를 야기할 잠재적 요인으로 평가 받고 있다. 따라서 식물플랑크톤 연구를 통한 환경변화가 하위영양준위 생태계에 미치는 영향의 파악 및 생태계 변화 예측 능력을 높이기 위한 기반 연구가 필요한 실정이다.

동중국해의 초미소 플랑크톤 연구는 Vault and Ning (1988)의 형광현미경을 이용한 *Synechococcus* 분포 연구로부터 시작되었으며, 최근 flow cytometer를 이용한 그룹별(*Synechococcus*, *Prochlorococcus*, picoeukaryotes) 연구가 이루어져 분포 특성은 개략적으로 밝혀졌다(Jiao et al. 2002, 2005; Pan et al. 2005). 초미소 플랑크톤의 연구를 제외하면 동중국해의 식물플랑크톤 연구는 구조류와 와편모조류를 주 대상으로 이루어졌으며(Kawarada et al. 1968; Guo 1991, 1994), 전체 분류군의 분포특성은 CHEMTAX 분석 기법을 이용한 Fruya et al.(2003)의 연구가 유일한 실정이다. 따라서 동중국해의 수역별 식물플랑크톤의 분포와 시기별 변화 및 환경변화와 연동되는 특성을 파악하기 위한 자료는 매우 부족한 상태이다.

2003년 완공된 이어도 과학기지는 한국의 최남단 도서인 마라도에서 서남방으로 149 km 떨어진 동중국해 대륙붕상에 위치하고 있으며, 이곳은 대만난류수, 대만난류수, 장강 희석수 등 다양한 물리환경이 교차하며 나타나는 곳이다. 따라서 해류 및 장강 희석수의 이동을 포함한 동중국해의 환경변화 및 이와 관련된 식물플랑크톤 생태계의 연동관계 연구를 위한 생태계 모니터링에 적합한 조건을 갖추고 있는 곳이다. 그러나 효율적 모니터링을 위해서는 식물플랑크톤 각 분류군의 시기별 분포 특징 파악과 이에 따른 분석기법의 선택적 적용을 통한 신뢰성있는 자

료의 확보 방안이 먼저 모색되어야 할 것으로 판단된다. 이를 위해 현미경, flow cytometer, HPLC 및 원격탐사 등 다양한 분석방법을 이용 이어도 기지수역의 식물플랑크톤 군집구조를 파악하고자 하였으며, 각 분석 방법의 특성을 파악 한후 이어도 관측기지에서 이용할 모니터링 방법개발을 위한 기초 자료로 이용하고자 하였다.

2. 조사 방법

식물플랑크톤 생태계 연구를 위한 현장 조사는 2003년 7월, 8월, 10월과 2004년 3월, 5월, 7월, 10월 총 7회에 걸쳐 이어도 해양과학기지 부근 수역에서 조사선 이어도를 이용 수행하였다(Fig. 1). 실험을 위한 해수 채취는 SBE 911이 장착된 Rosette sampling system에 10l 용량의 niskin 채수기를 부착하여 이루어졌다. 채수는 7개 층의 표준 수심(1 m, 10 m, 20 m, 30 m, 50 m, 75 m, 100 m)과 SCM 층에서 하였으며 분석항목에 따라 시약 및 보존방법을 달리하여 처리하였다. 이어도 관측기지에서의 수온은 수심 10 m에 설치된 염분 수온 측정기를 이용하여 10분 간격으로 자료를 획득하였다.

엽록소 a 분석

식물플랑크톤의 chlorophyll *a* (chl *a*) 측정을 위해 현장에서 채수한 해수 1~2리터를 직경 47 mm의 GF/F 여과지로 거른 후 여과지를 분석 때까지 액체 질소에 보관하였다. Chl *a* 농도는 여과지를 90% 아세톤 10 ml가 담긴 유리병에 넣어 4°C 냉장상태에서 24시간 추출 후 형광측정기(Turner designs model, TD-700)를 이용하여 구하였다. 초미소 플랑크톤의 chl *a* 농도는 3 μ m 직경의 polycarbonate 여과지를 통과시킨 해수 1000 ml를 GF/F로 걸러 추출 후 분석하였다.

식물플랑크톤 색소분석

HPLC를 이용한 식물플랑크톤 색소분석은 Zapata *et al.* (2000)의 방법을 기초로 이루어졌다. 식물플랑크톤은 Whatman GF/F 여과지로 거른 후 액체 질소에 냉동 보관하였으며, 실험실에서 여과지를 녹인 후 3 ml의 95% methanol에 넣고 4°C 냉장고에서 24시간 동안 색소를 추출하였다. 추출물에 포함된 식물플랑크톤이나 여과지 조각들을 제거하기 위해 직경 25 mm의 teflon(PTFE) syringe filter(MFS, 0.2 μ m pore size)를 이용하였다. 색소 peak의 변형을 막기 위해 여과된 추출물 1 ml에 증류수(milie-Q water) 400 μ l를 넣은 후, 혼합 시료 200 μ l를 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 μ m particle size, 100 \AA 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(Fig. 2), 농도는 Mantoura and Repeta(1997)에 따라 표준색소의 봉우리 면적을 이용하여 구하였다.

CHEMTAX 분석

식물플랑크톤의 분류군별 chl *a* 농도는 지시색소 농도로부터 분류군별 chl *a* 농도를 계산하는 요인 분석 프로그램인 CHEMTAX(CHEMical TAXonomy) 프로그램(Mackey *et al.* 1996)을 계산하였다. 계산에 이용한 그룹별 초기 색소 조성비는 Furuya *et al.*(2003)이 동중국해 식물플랑크톤 색소 연구에서 이용한 값을 사용 하였

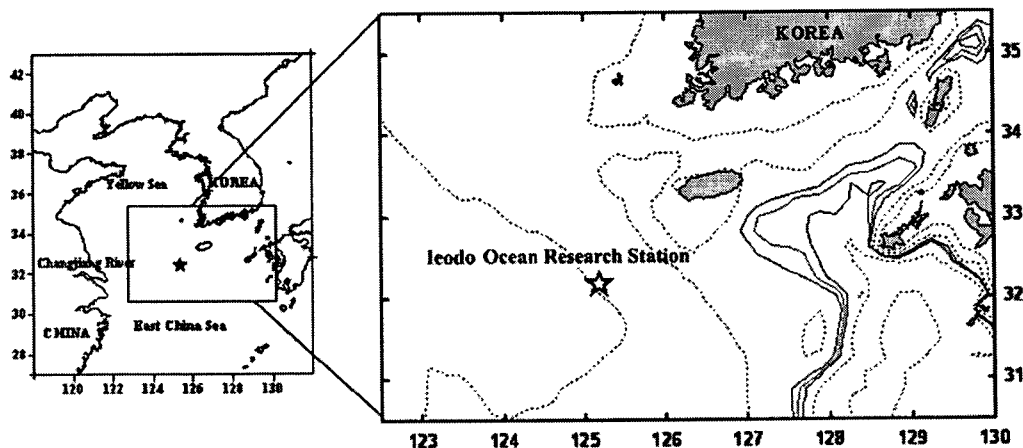


Fig. 1. Location map of the Ieodo Ocean Research Station.

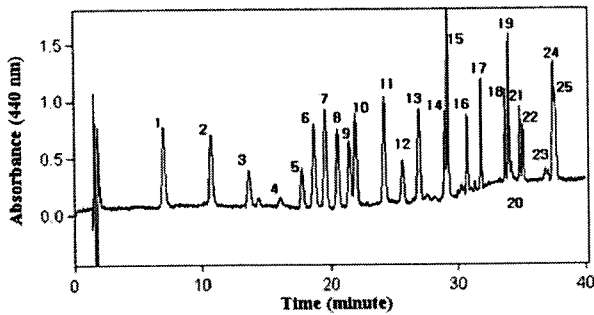


Fig. 2. HPLC Chromatogram of a aqueous mixture of pigment standards. Codes to pigment identities are: 1=chl. c3, 2=chl. c2, 3=peridinin, 4=Pheophobidea, 5=19'-but., 6=Fucoxanthin, 7=Neoxanthin, 8=Prasinanthin, 9=Violaxanthin, 10=19'-hex., 11=Diadinoxanthin, 12=Antheraxanthin, 13=Alloxanthin, 14=Zeaxanthin, 15=Lutein, 16=Cantaxanthin, 17=Gyroxanthin-diester, 18=B-cryptoxanthin, 19=Chlorophyll-b, 20=Echinenone, 21=Divinyl chlorophyll a, 22=Chlorophyll a, 23=Pheophytin a, 24= α -carotene, 25= β -carotene.

다(Table 1). CHEMTAX 프로그램을 이용 전체 엽록소 a 농도 중 규조류(diatoms), 와편모조류(dinoflagellates), 후각편모조류(prymnesiophytes), 녹조류(chlorophytes), 황색편모조류(chrysophytes), 은편모조류(cryptophytes), *Synechococcus* (cyanobacteria), *Prochlorococcus*, 이상 8 그룹 식물플랑크톤의 그룹별 chl a 농도 및 분율을 구하였다. CHEMTAX 분석에 이용된 "규조류"와 "녹조류" 등의 용어는 일반적으로 식물플랑크톤 분류군 연구에 이용되는 명칭을 이용하였고, 남세균에 속하는 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*는 독립시켰다. 두 속(genus)을 분리시킨 것은 divinyl chlorophyll a에 의해 속(genus)의 뚜렷한 구분이 가능하며 분리 분석된 자료가 연구의 효율성이 높기 때문이다.

Flow cytometry를 이용한 초미소플랑크톤 분석

Flow cytometer를 이용한 초미소플랑크톤 분석을 위해 증별 해수 3 ml을 cryogenic 튜브에 넣고 10% paraformaldehyde와 0.5% glutaraldehyde의 혼합액 0.3 ml 첨가한 후 액체 질소에 넣어 냉동 보관하였다(Marie et al. 2000). 시료는 실험실로 옮겨 암소에서 녹인 후 산란과 형광을 표준화하기 위해 시료마다 내부표준물질을 첨가하였다. 내부표준물질은 0.5 μ m와 1 μ m 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 초미소플랑크톤은 각 분류군의 forward light

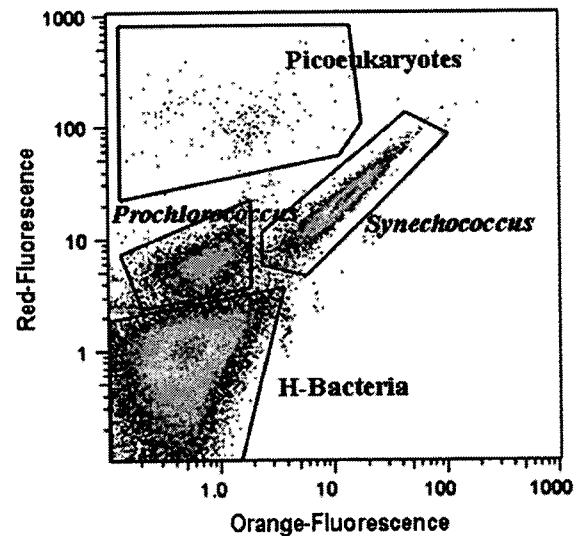


Fig. 3. Flow cytometric analysis of a picoplankton sample. Each group of picoplankton and heterotrophic bacteria signatures were discriminated using orange and red fluorescence settings.

Table 1. Input matrix for CHEMTAX. Pigment to chlorophyll a ratios were used in phytoplankton chlorophyll biomass estimation.

Taxa	Per	But-Fuco	Fuco	Hex-Fuco	Neo	Viol	Allo	Zea	Chl b	DV Chl a	Total Chl a
Dinoflagellates	1.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Diatoms	0	0	0.47	0	0	0	0	0	0	0	1
Chrysophytes	0	0.37	0.11	0	0	0	0	0	0	0	1
Prymnesiophytes	0	0	0	1.71	0	0	0	0	0	0	1
Chlorophytes	0	0	0	0	0.08	0.06	0	0.01	0.46	0	1
Cryptophytes	0	0	0	0	0	0	0.23	0	0	0	1
Prochlorophytes	0	0	0	0	0	0	0	0.27	0.68	1	0
Cyanobacteria	0	0	0	0	0	0	0	0.35	0	0	1

scattering(FLS), 엽록소에 의한 적색형광, phycoerythrin에 의한 오렌지색 형광 특성 등 flow cytometer 상에서 이용되는 특징들을 이용 분리 계수하였다(Fig. 3). Flow cytometer에서 산출된 자료는 FlowJo(Star, Inc.) 프로그램을 이용하여 분석하였다.

현미경을 이용한 식물플랑크톤 분석

식물성 편모조류는 해수 30 m에 10% paraformaldehyde와 0.5% glutaraldehyde의 혼합액 3 ml을 넣은 후 냉동보관하였다. 시료는 실험실에서 0.2 μ m pore size black polycarbonate filter에 거른 후 Porter and Feig(1980)의 방법으로 DAPI 염색을 하여 형광현미경을 이용 계수하였다. 식물성 편모류 중 엽록소 *a*에 의한 적색형광을 내는 종류는 독립영양 편모류로 계수하였고, phycoerythrin 색소에 의해 주황색을 나타내는 세포는 cryptomonads로 계수하였다.

규조류와 와편모조류는 냉동시료를 DAPI 염색 후 형광현미경하에서 계수하는 방법과 루골과 중성포르말린으로 고정 후 침전 농축시켜 Sedgwick-Rafter Counting Chamber를 사용하여 동정 계수하는 방법을 병행하여 사용하였다. Coccolithophorids는 중성포르말린으로 고정된 시료를 250 ml을 직경 25 mm의 cellulose nitrate membrane으로 여과한 후 여과지를 immersion oil로 투명하게 하여 차등간섭 위상차현미경을 이용 계수하였다.

위성자료 처리

해색 위성센서인 SeaWiFS의 자료를 이용하여 동중국해의 식물플랑크톤의 광역분포 및 시계열을 분석하였다. 사용된 자료는 8-day 합성자료와 monthly 합성 SMI(Standard Mapped Image) 자료로 공간해상력이 9 km이다. 2003년 7월부터 2004년 10월까지의 자료를 NASA의 DAAC(Distributed Active Archive Center)로부터 제공받아, SeaWiFS 전용처리 프로그램인 SeaDAS(SeaWiFS Data Analysis System)를 이용하여 분석하였다. 해색은

NASA의 SeaWiFS 표준 색상표(식물플랑크톤 농도에 대한 로그 단위의 색상표)를 이용하여 표현하였다.

3. 결 과

물리환경

2003년 7월에서 2004년 10월 사이 이어도 해양관측기 지 10 m 수심에서 측정된 수온의 일변화를 Fig. 4에 나타냈다. 2003년 9월초에 28.8°C로 가장 높았던 수온은 10월 말에 21.2°C로 낮아졌다. 11월~1월 사이의 자료가 없으나 동계의 수온 하강을 예상할 수 있으며 2월초엔 8.5°C의 저 수온을 보였다. 10°C 이하의 낮은 수온은 4월초까지 이어졌으며 4월 중순 이후 뚜렷한 수온 증가가 나타나 8월 중순에는 30.0°C에 접근하는 높은 수온이 측정되었다. 2003년 7월, 11월 12월, 2004년 1월, 9월의 수온은 측정되지 않았으나, 측정된 자료는 이어도 수역 수온의 연변화를 잘 나타내고 있다.

조사선 이어도호를 이용한 관측기지 주변수의 물리특성

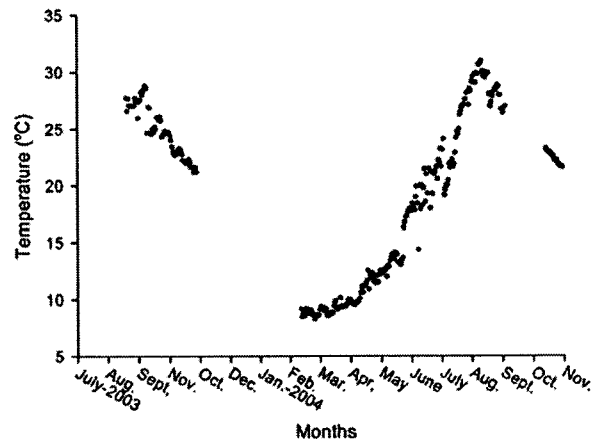


Fig. 4. Surface water temperature at the Ieodo Ocean Research Station during July, 2003-October, 2004.

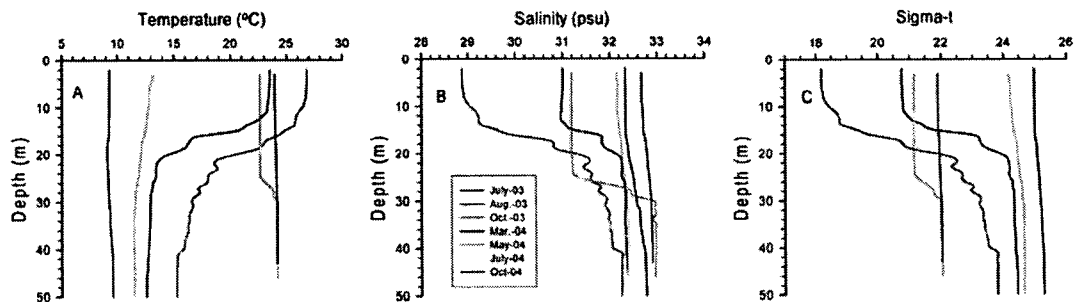


Fig. 5. Vertical profiles of seasonal water temperatures and salinity at the Ieodo Ocean Research Station during the survey cruises.

조사는 2003년 7월에서 2004년 10월 사이 7회에 걸쳐 수행되었다. 표층 수온은 이어도 관측기지에서 측정된 값과 유사하며 계절 변화가 잘 나타났다(Fig. 5A). 염분은 장강수의 영향으로 인해 저염환경이 우세하였다(Fig. 5B). 2003년은 2004년보다 낮은 염분을 나타냈으며 특히 8월 조사 시 28.9 psu로 가장 낮았다. 2004년 3월 32.3 psu인 염분은 7월 31.5 psu로 낮아진 후 10월에 32.7 psu로 증가하는 변화를 보였다.

수온의 수직분포 그림은 계절에 따른 수온약층의 발달과 소멸을 잘 나타낸다(Fig. 5A). 2003년 7월과 8월은 하계 수온약층이 10~20 m 수심에서 잘 발달된 구조를 나타

냈다. 10월에는 표층 수온이 낮아지며 표층과 저층의 수온이 역전된 구조를 보였다. 2004년 3월은 수심에 따른 변화가 없이 균일한 수직분포를 보였으며 5월은 표층수온이 조금 증가한 형태를 보였다. 2004년 7월은 2003년과 다르게 10~40 m 수층에서 완만한 수온 변화를 보이는 수온약층이 나타났다. 10월에는 수직적인 수온변화가 나타나지 않았다.

염분의 수직 분포는 Fig. 5B에 나타났다. 2003년 7월과 8월엔 저염의 표면혼합층이 수심 약 10 m까지 발달하고 10~20 m 수층에서 염분의 급격한 증가가 나타났다. 10월은 수온 분포와 유사하게 약 25 m 수심까지 염분이 균일

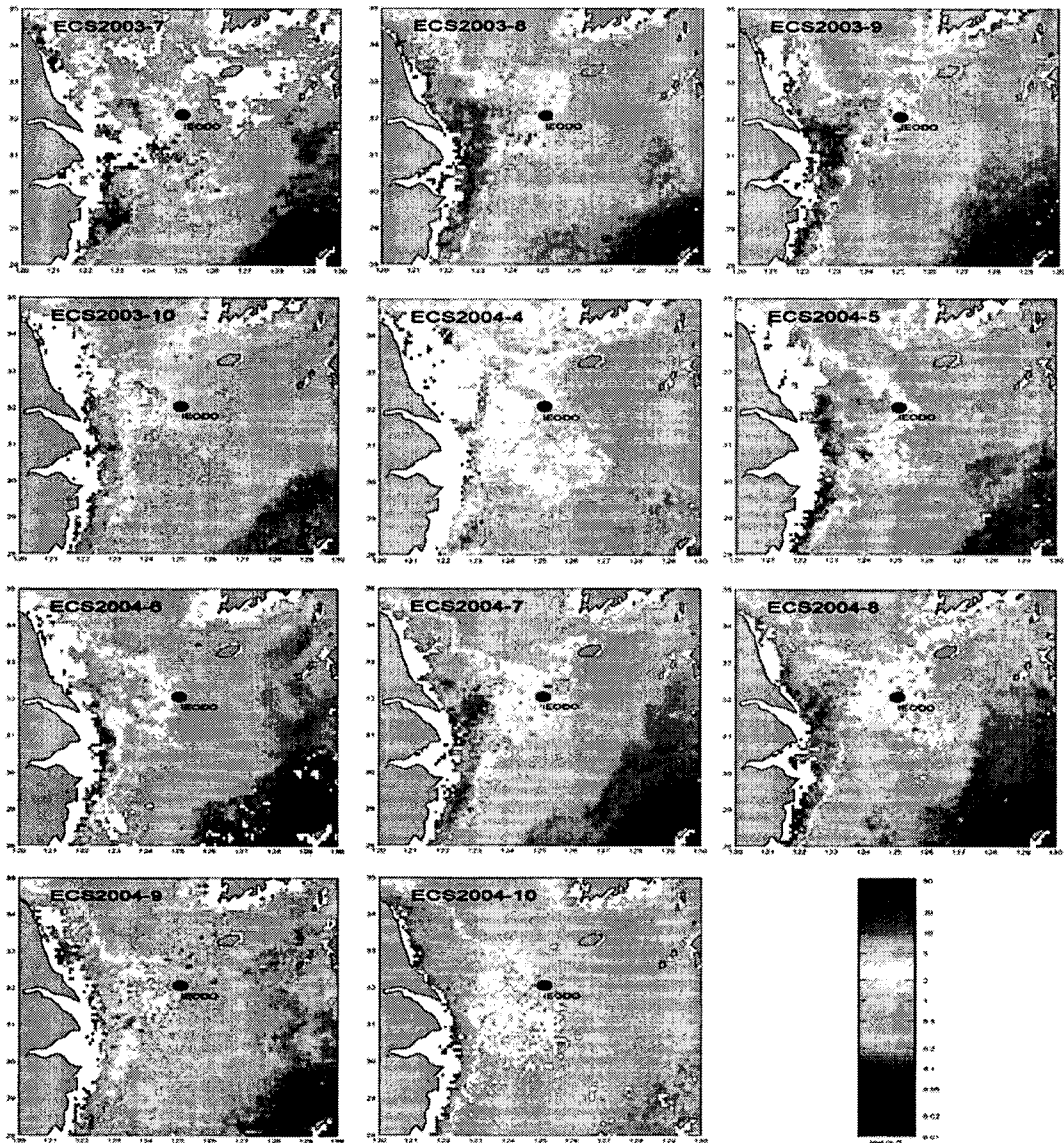


Fig. 6. Chlorophyll *a* distribution in the East China Sea derived from a monthly composite data taken from SeaWiFS.

하고 이하 약 5 m 사이에서 급격한 변화가 나타났다. 2004년 3월과 5월은 염분약층 없이 균질한 수직 분포를 나타냈다. 7월엔 수심 25 m 이하에서 염분약층이 나타났으며, 10월에는 염분약층이 소멸됐다.

밀도는 염분과 유사한 구조를 나타냈다(Fig. 5C). 2003년 7월과 8월은 수심 약 10 m 이하에서 밀도약층이 발달하였고, 10월에는 약 25 m 이하에서 나타났다. 2004년 3월은 수직적으로 밀도의 변화가 크지 않았고, 5월에는 약하게 밀도변화가 나타나기 시작했다. 7월에는 25 m 이하에서 밀도 약층이 나타났으며 10월에는 밀도약층이 사라졌다.

이상과 같이 이어도 기지수역은 온대지방에서 나타나는 계절별 기후요소의 변화에 의한 수온의 변화(Chen *et al.* 1993)와 7월~10월에 집중되는 장강수의 유출(Zhang *et al.* 1994)에 의한 하계 저염 현상이 뚜렷이 나타났다. 수온과 염분의 수직분포도 동중국해의 시기별 환경특성을 잘 나타내고 있다. 3월에는 북서계절풍에 의한 수층 혼합이 잘 나타나고 있으며 하계에는 표층수의 수온 상승과 장강 희석수의 확장에 의해 잘 발달된 성층이 나타났다. 10월에는 표층수온의 하강에 따라 성층이 소멸되었다.

SeaWiFS 해색자료 분석

2003년 7월부터 2004년 10월 사이 이어도 관측기지 수역을 포함한 동중국해의 chl *a* 농도 분포를 SeaWiFS 해색 영상으로 나타냈다(Fig. 6). 이 기간중 2003년 11월 이후 2004년 3월까지의 연안수역의 탁도 증가에 의해 위성자료로부터 chl *a* 농도를 구할 수 없었다. 위성영상에서는 chl *a* 농도가 낮은 쿠로시오 혹은 대마난류 수역과 chl *a* 농도가 높은 중국 연안쪽 대륙붕 수역이 뚜렷이 구분된다. 또한 장강 유출수의 영향에 의해 높은 chl *a* 농도를 보이는 수괴가 제주도 방향이나 동쪽 방향으로 확장되는 것을 볼 수 있다. 이어도 관측기지수역은 장강 유출수의 이류 경로나 영향권에 위치하고 있다. 2003년 7월의 chl *a* 분포를 보면 연안의 높은 chl *a* 농도를 보이는 수괴가 제

주도 방향으로 확장되어 있으며, 이어도 관측기지 수역은 확장되는 수괴의 주변부에 위치하고 있다. 2003년 8월과 9월도 chl *a* 농도가 높은 장강 유출수가 제주도 방향으로 확장되어 있으며 이어도관측기지 수역은 chl *a* 농도가 높지 않으나 장강 유출수의 영향권에 위치하고 있다. 2003년 10월엔 장강쪽 대륙붕수역의 chl *a* 농도는 낮아지고 유출수의 제주도 방향으로의 확장도 약화되었으나, 이어도 관측기지 수역은 여전히 장강 유출수의 영향 하에 남아 있다. 2004년 4월은 이어도 관측기지 수역 뿐 아니라 황해 남부수역과 이어도 관측기지의 남부수역을 포함한 넓은 해역에서 높은 chl *a* 농도가 나타났다. 이러한 chl *a* 분포는 식물플랑크톤 춘계 대증식의 영향으로 판단된다. 5월에는 제주도 서부해역과 동중국해 남부해역에서 chl *a* 농도가 감소하였으나 장강 연안수역의 높은 chl *a* 농도가 이어도 수역까지 확장되어 있다. 6월은 5월과 유사한 chl *a* 분포를 보이거나 높은 chl *a*를 나타내는 수역은 감소하였다. 7월과 8월에는 장강 유출수의 영향이 동중국해 대륙붕 동쪽수역과 제주도 수역까지 확장되어 있다. 9월과 10월에는 연안수역의 chl *a* 농도가 낮아지고 제주도 방향으로 확장되는 장강수의 세력이 약하게 나타났다.

이상과 같이 월별 위성자료는 이어도 관측기지 수역의 chl *a* 농도가 4~5월의 경우 식물플랑크톤 춘계 대증식을 유도하는 환경요인에 의해 결정되며, 하계에는 장강 유출수에 크게 영향 받을 수 있음을 나타낸다. 특히 성층이 강화되는 하계에 표층을 통한 장강유출수의 이동이 이어도 기지수역의 chl *a* 농도에 영향을 줄 수 있음을 보이고 있다.

이어도 기지 수역의 엽록소-*a* 분포

이어도 관측기지 수역의 현장관측에서 측정된 표층 chl *a* 농도는 0.33~3.24 $\mu\text{g l}^{-1}$ 의 범위를 보였다(Fig. 7A). 2004년 5월은 위성자료에서 나타나듯 이어도 관측기지 수역을 포함한 동중국해 대륙붕수역의 춘계 식물플랑크톤 대증식 시기로서 가장 높은 chl *a* 농도를 보였다. 2003년

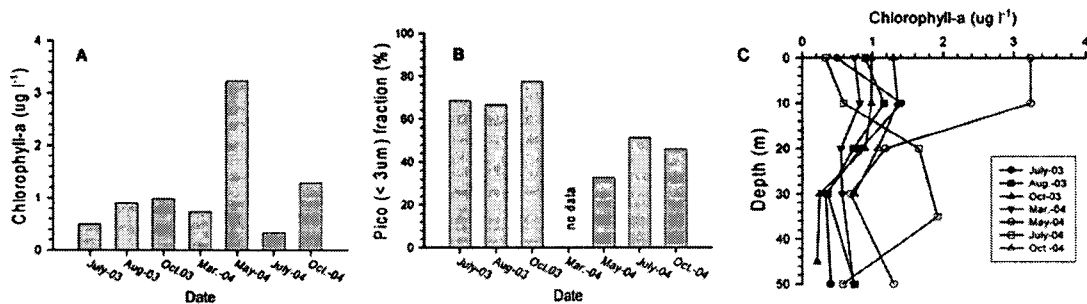


Fig. 7. Chlorophyll *a* concentration (A), percent contribution of $<3 \mu\text{m}$ -fraction to total chlorophyll *a* (B), and vertical profile of chlorophyll *a* (C) for each survey cruise.

8월의 표층 chl *a* 농도는 $0.89 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 성층이 발달한 환경 하에서 비교적 높은 농도를 보였다. 이는 위성사진에 나타나듯 장강 희석수의 이류가 이어도 수역의 chl *a* 농도에 영향을 미친 것으로 판단된다. 그러나 위성자료상에서 장강 유출수 이류에 의해 비교적 높은 엽록소 *a* 농도를 보인 2004년 7월의 현장관측 결과는 $0.33 \mu\text{g l}^{-1}$ 의 낮은 엽록소 *a* 농도를 보였다. 이러한 차이는 무엇보다 장강유출수가 광학적으로 복잡한 case 2 해수의 특성을 가져서 엽록소가 과대추정 되는 오차가 생기기 때문이다. 또한 위성자료가 월간 평균 chl *a* 농도를 나타내는 반면 현장관측은 조사시점에 나타날 수 있는 식물플랑크톤의 불균질한 분포, 폭풍으로 혼합층이 깊어짐에 따라 나타나는 희석 효과 등의 영향을 받았을 것으로 추정된다. 10월의 엽록소 *a* 농도는 2003년과 2004년에 $0.99 \mu\text{g l}^{-1}$ 와 $1.29 \mu\text{g l}^{-1}$ 로서 하계보다 약간 증가된 값을 나타냈다.

chl *a*의 수심별 분포는 2004년 5월 춘계 증식기를 제외하면 물리특성에 따라 영향을 받는 구조를 나타냈다(Fig. 7C). 밀도약층이 10~20 m 수심에서 발달한 2003년 7월과 8월에는 밀도약층 상부인 10 m 수심에서 SCM층이 나타났다. 2003년과 2004년 10월은 밀도약층이 깊어짐에 따라 20 m 수심까지 유사한 chl *a* 농도를 나타내고 그 이하 수심에서 낮아졌다. 2004년 3월은 전 수층에서 유사한 농도를 나타냈으나 5월에는 표층과 10 m 수심에서 높은 농도를 보이고 이하수심에서 급격한 감소가 나타났다.

전체 chl *a* 농도에서 $3 \mu\text{m}$ 이하의 초미소 플랑크톤이 차지하는 비율은 시기별로 차이를 보이거나 전체적으로 높은 값을 나타냈다(Fig. 7B). 2003년 7월~10월 조사시는 66.7~77.5%의 높은 비율을 보였고, 2004년 5월 춘계 식물플랑크톤 대증식기에는 32.8%로 낮아졌다. 2004년 7월과 10월의 비율은 51.4%와 46.0%로서 5월에 비해 높으나 2003년에 비해 낮게 나타났다. 춘계 대증식기를 제외하면 초미소 플랑크톤의 생체량이 평균적으로 전체 식물플랑크톤의 50%를 상회하고 있음을 보였다. 이와 같은 결과는 초미소 플랑크톤이 이어도 수역의 중요한 일차생산자임을 나타내고 있다.

식물플랑크톤 분포

초미소 플랑크톤

Flow cytometer를 이용하여 이어도 기지수역의 초미소 플랑크톤을 *Synechococcus*, *Prochlorococcus*, picoeukaryotes의 3분류군으로 구분하여 계수하였다. 표층수의 *Synechococcus* 개체수는 조사 시기에 따라 $2.1 \times 10^3 \sim 354.4 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 의 범위를 나타냈다(Fig. 8A). 2003년 7월, 8월, 10월의 3회 조사에선 $128.8 \times 10^3 \sim 300.4 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 범위의 높은 개체수가 나타났다. 2004년 3월에는 $2.1 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 로 풍도가 크게 감소했다. 5월과 7월에는 $14.6 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 와 $33.7 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 가 나타나 3월에 비해 점차 증가하는 양상을 보였다. 그러나 2004년 7월은 2003년 7월에 비해 약 10배 낮은 수준을 보였다. 10월에는 $354.4 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 로 2003년 10월과 유사한 개체수가 나타났다. *Synechococcus*의 풍도는 저수온기에 낮고 고수온기에 높은 기존의 조사결과들과(Vaulot and Ning 1988; Jiao et al. 2005) 동일한 계절 변화를 나타냈다. Picoeukaryotes는 조사 시기별로 $1.3 \times 10^3 \sim 34.6 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 범위의 개체수를 보였다. 2004년 5월이 풍도가 가장 높았고, 다음은 2004년 10월로서 $10.9 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 의 개체수가 나타났다(Fig. 8B). 다른 시기에는 $6.8 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 이하의 개체수가 나타났다. *Prochlorococcus*는 2004년 10월에 $2.2 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 의 개체수가 나타났으며 다른 시기에는 출현하지 않았다(Fig. 8C). 동중국해 대륙붕수역에서 *Prochlorococcus*는 동계의 저수온이나 하계의 장강 유출수에 의한 저염 및 다른 환경요인에 의해 분포가 제한 받는 것으로 추정되고 있다(Jiao et al. 2005). 이어도 수역은 동계에 10°C 이하의 저수온을 나타내고 하계에는 장강 유출수의 영향을 받고 있음을 기지에서 수온측정과 위성사진을 통해 파악되고 있다. 이러한 환경 특성이 *Prochlorococcus*의 분포를 결정하였을 것으로 판단된다.

*Synechococcus*의 수직분포는 2004년 10월을 제외하면 물리특성과 유사한 수직구조를 보였다(Fig. 9A). 2003년 7월과 8월은 표면혼합층인 10 m 수심까지 높은 개체수를

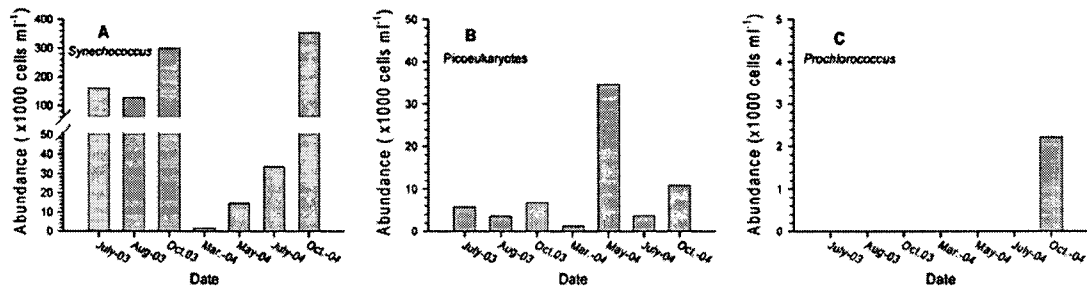


Fig. 8. Cell abundances of *Synechococcus* (A), picoeukaryotes (B), *Prochlorococcus* (C) in the waters off the Ieodo Ocean Research Station for each survey cruise.

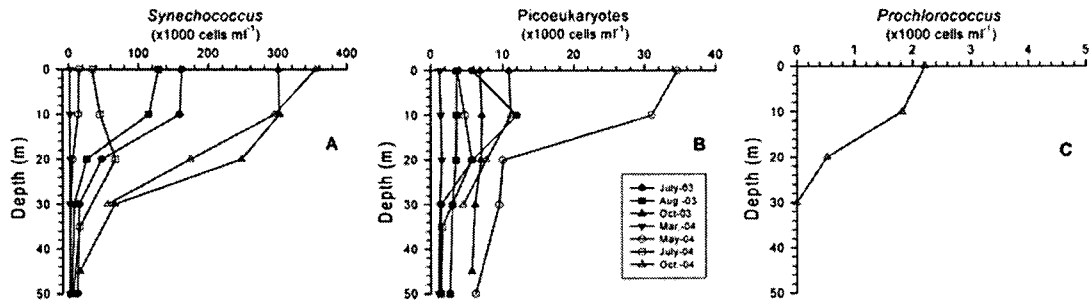


Fig. 9. Vertical profiles of cell abundance for each *Synechococcus* (A), picoeukaryotes (B), *Prochlorococcus* (C) for each survey cruise.

보이고 성층 이하의 수심에서는 급격한 개체수 감소를 보였다. 10월에는 표면혼합층이 깊어지며 20 m 수심까지 높은 개체수를 보였다. 성층이 발달하지 않은 2004년 3월과 5월은 *Synechococcus*의 개체수도 수직적으로 변화가 없이 낮은 개체수를 나타냈다. 2004년 7월은 성층이 20 m 이하 수심에서 형성되었으며 *Synechococcus*도 20 m 수심에서 다소 증가된 개체수를 보였다. 2004년 10월을 제외하면 *Synechococcus* 풍도의 수직분포는 물리환경에 영향을 받는 구조를 나타내고 있다. Picoeukaryotes의 경우 2004년 5월엔 수심별 풍도변화가 크게 나타났고 다른 시기에는 표층의 개체수가 낮아 수심에 따른 변화가 뚜렷치 않았다 (Fig. 9B). 따라서 개체수의 수직분포에 물리특성의 영향이 뚜렷이 나타나지 않았다. *Prochlorococcus*는 2004년 10월 조사 시 출현 하였으며 표층에서 풍도가 가장 높고 수심증가에 따라 감소하였다(Fig. 9C).

식물성 편모조류 및 coccolithophorids

형광현미경을 이용 3 μm 이상의 독립영양 편모조류를 계수하였다. Biliprotein을 색소단백질로 내포하여 주황색 형광을 나타내는 은편모조식물(cryptophytes)에 속하는 편모조류는 cryptomonads로 계수하였고, biliprotein을 갖지 않고 chl a 농도에 의한 적색형광을 나타내면 미소편모조류로 계수하였다. 미소편모조류의 풍도는 Fig. 10A에 나타났다. 시기별로 150.2~973.9 cells ml^{-1} 범위의 풍도를

나타냈으며, 2004년 5월에 최대 풍도를 보였다. Biliprotein을 갖는 cryptomonads의 풍도는 32.8~209.4 cells ml^{-1} 의 범위를 보였다(Fig. 10B). 식물플랑크톤 대증식기인 2004년 5월에 가장 높은 풍도를 보였으며 2004년 10월과 2003년 10월 조사 시 각각 182.0 cells ml^{-1} 과 120.2 cells ml^{-1} 로 높은 풍도를 보였다.

Coccolithophorids의 풍도는 시기별 변화가 크게 나타났다(Fig. 10C). 2003년 10월에 38.0 cells ml^{-1} 로 풍도가 가장 높았고, 춘계 식물플랑크톤 대증식기인 2004년 5월에도 29.6 cells ml^{-1} 의 높은 풍도를 보였다. 그러나 다른 조사시기에는 0.03~0.47 cells ml^{-1} 사이의 낮은 풍도를 나타냈다.

규조류 및 와편모조류

규조류와 와편모조류는 광학현미경과 형광현미경을 이용 계수하였다. 규조류의 풍도는 시기별로 17.2~9,671.8 cells ml^{-1} 의 변화를 나타냈으며(Table 2), 2004년 3월에 가장 낮고 2004년 5월에 가장 높았다. 2003년 7월은 *Cylindrotheca closterium*과 *Dactyliosolen fragilissimus*가 우점종으로 나타났다. 8월에는 *Cylindrotheca closterium*이 가장 높은 풍도를 보였고 *Haslea warikae*가 다음으로 높은 풍도를 보였다. 10월에는 세포 직경이 2~4 μm 인 *Minidiscus comunis*가 우점종으로 나타나 광학현미경으로 는 계수가 어려웠으며 형광현미경과 전자현미경을 이용

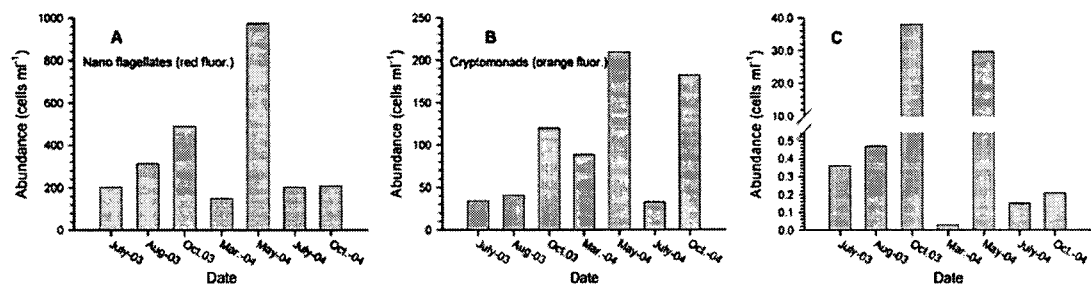


Fig. 10. Cell abundance distribution of Autotrophic nanoflagellates (A), Cryptomonads (B) and coccolithophorids (C).

Table 2. Cell abundance and dominant species for diatom and dinoflagellates during the survey period.

Taxa/Date	Abundance (cells m^{-1})						
	July-03'	Aug.-03'	Oct.-03'	March-04'	May-04'	July-04'	Oct.-04'
Diatom							
<i>Chaetoceros</i> sp.					68.3		
<i>Cylindrotheca closterium</i>	140.2	109.5			9596.3	20.5	34.1
<i>Cerataulina</i> sp.	59.3						
<i>Haslea warikae</i>		10.7					
<i>Minidiscus comunis</i>			882.5				
<i>Paralia sulcata</i>				7, 1			
<i>Pseudonitzschia</i> sp.			6.8			61.4	13.7
<i>Thalassiosira</i> sp.				6.8			
Total	218.5	136.7	898.8	17.2	9671.8	84.3	47.8
Dinoflagellates							
<i>Gymnodinium</i> type.	4.8	21, 6	5.7	2.8	68.3	9.1	26, 1
<i>Oxytosum variable</i>							77.8
<i>Prorocentrum minimum</i>		3.5					
<i>Prorocentrum balticum</i>					32.3		
<i>Prorocentrum donghaiense</i>	1.2						
Total	13.8	114.1	61.4	5.25	309.1	63.8	121

동정과 계수 하였다. 2004년 3월에는 일시부유성 규조류인 *Paralia sulcata*가 우점종으로 나타났다. 이는 동계 북서계절풍에 발달에 의한 수층혼합의 결과로서 기존의 동중국해 동계 식물플랑크톤 조사에서도 *Paralia sulcata*가 높은 우점율을 보였다(Furuya et al. 1996). 2004년 5월엔 *Cylindrotheca closterium*이 9,596.3 cells m^{-1} 로 매우 높은 풍도를 보였으며 *Chaetoceros* 속의 규조류도 68.3 cells m^{-1} 의 높은 풍도를 보였다. 2004년 7월과 10월에는 *Pseudonitzschia* sp.와 *Cylindrotheca closterium*이 우점종으로 나타났다.

와편모조류는 주로 10 μm 크기 내외의 미세플랑크톤들이 우점 하였으며 다양한 속(*Peridinium*, *Oxytoxum*, *Prorocentrum*, *Scrippsiella* 등)의 종들이 출현하였다. 이들 미소 와편모조류의 광학현미경상에서 동정은 정확치 않기 때문에 적조생물인 *Prorocentrum* 속만 종별로 계수하고 나머지 종들은 와편모조류로 합쳐서 풍도를 구하였다. 2004년 5월이 309.1 cells m^{-1} 로 가장 풍도가 높았고, 2003년 8월과 2004년 10월도 114.1 cells m^{-1} 와 121.0 cells m^{-1} 로 비교적 높은 풍도가 나타났다. 2003년 7월과 2004년 3월에는 11.38 cells m^{-1} 과 5.25 cells m^{-1} 로 다른 시기에 비해 낮은 풍도가 나타났다.

식물플랑크톤 지시색소와 풍도의 비교

HPLC를 이용 분석한 색소 중 식물플랑크톤 분류군의

지시색소(marker pigment)로 이용되는 색소의 농도를 Fig. 11에 나타냈다. Flow cytometer와 현미경에서 얻은 분류군별 풍도와 각 분류군을 대표하는 지시색소 농도의 비교를 통해 지시색소와 분류군별 생체량과의 관계를 파악하고자 하였다. Peridinin은 와편모조류의 지시색소로서(Jeffrey and Vesik 1997), 2004년 5월에 다른 시기에 비해 약 10배 이상 높은 농도인 431.5 ng l^{-1} 을 보였다. 이 시기에 현미경으로 계수한 와편모조류의 풍도 역시 309.1 cells m^{-1} 로 높은 값을 나타냈다(Table 2). 와편모조류 풍도와 지시색소인 peridinin의 농도가 유사한 시기별 변화 형태를 나타냈다. Alloxanthin은 은편모조류(Cryptophytes)에서 나타나는 지시색소이다(Jeffrey and Vesik 1997). Alloxanthin 농도와 cryptomonads의 풍도는 5월과 10월에 높아지는 유사한 변화를 보였다. 남세균인 *Prochlorococcus*는 지시색소로 divinyl chlorophyll a 를 함유한다(Goericke and Repeta 1992; Veldhuis and Kraay 2004). Divinyl chlorophyll a 는 2004년 10월에 4.8 ng l^{-1} 의 매우 낮은 농도가 검출되었으며 다른 시기에는 검출되지 않았다. Flow cytometer를 이용한 분석도 *Prochlorococcus*가 2004년 10월에만 2.2×10^3 cells m^{-1} 의 풍도를 보였으며 다른 시기에는 출현하지 않았다(Fig. 8C). Prasinoxanthin은 녹조류의 담록조강(Prasinophyceae)에서 나타나는 지시색소이나(Latasa et al. 2004), 현미경이나 일반적인 flow cytometer로는 Prasinophyceae속하는 식물플랑크톤은 구별이 불가

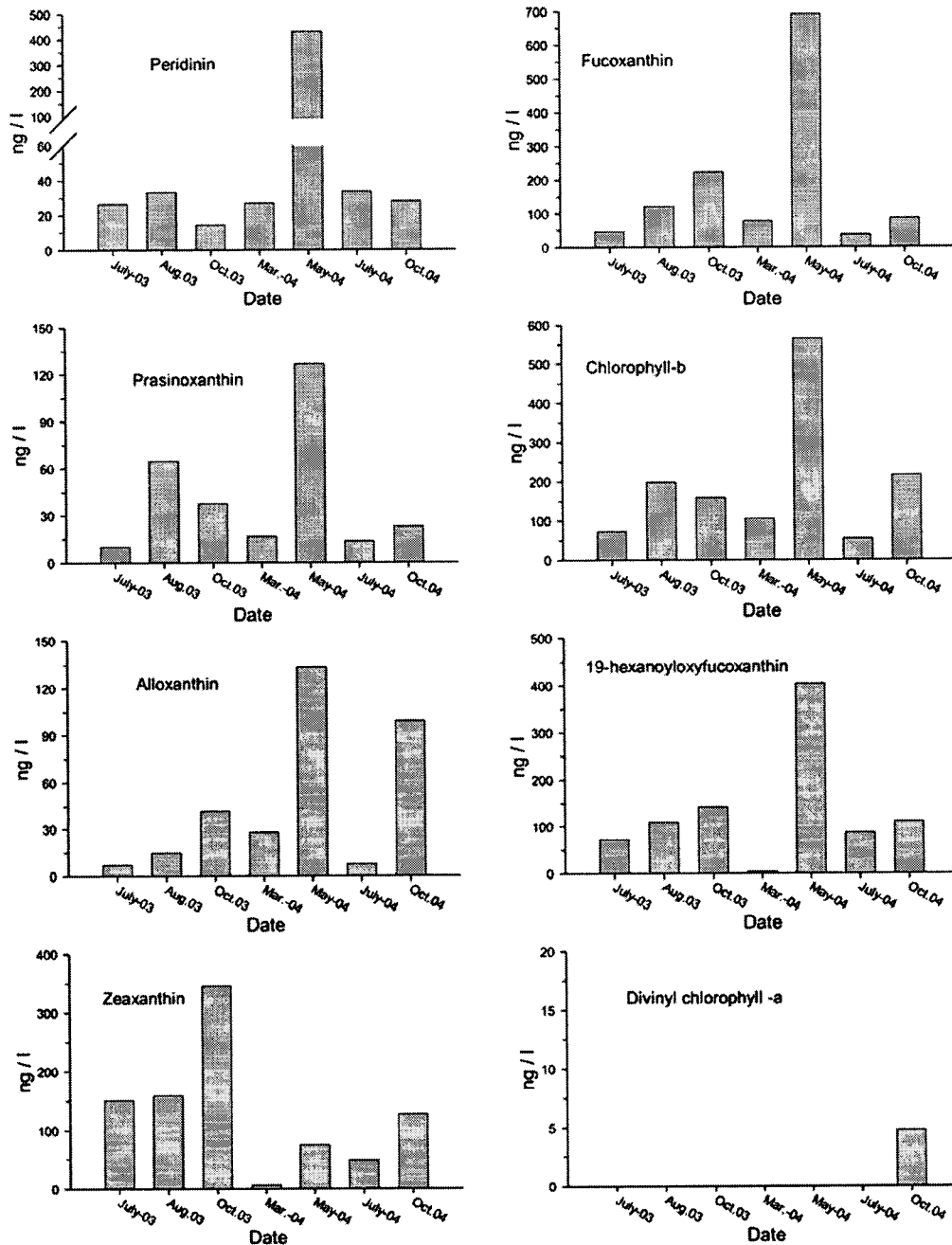


Fig. 11. Phytoplankton pigment distribution during the survey period.

능하여 풍도와의 관계를 비교할 수 없었다. 위와 같은 색소들은 단일 분류군에서 주로 나타나나, 일부색소들은 2개의 분류군 이상에서 나타나기도 한다. Fucoxanthin은 규조류(diatoms), 후각편모조류(prymnesiophytes), 황색편모조류(chrysophytes)에서 공통적으로 나타나며, 19'-Hex. (19'-Hexanoyloxyfucoxanthin)는 후각편모조류의 지시색소이나 일부 와편모조류에서도 나타나고, zeaxanthin은 남

세균인 *Synechococcus*, *Prochlorococcus*와 일부 녹조류 및 홍조류에서 나타난다(Jeffrey and Vesk 1997). Fucoxanthin은 2004년 5월에 691.5 ng l^{-1} 의 높은 농도가 나타났으며, 규조류의 시기별 풍도와 유사한 변화양상을 보였다. 후각편모조류와 황색편모조류는 풍도 자료가 없어 fucoxanthin 농도와의 관계를 파악하지 못했으나 규조류에 의해 농도 변화가 나타나는 경향을 보였다. Zeaxanthin 농도는 2003

Table 3. Concentrations of chl *a* ($\mu\text{g l}^{-1}$) in each phytoplankton group calculated by CHEMTAX, and numbers in parenthesis indicate contribution percentage to total chl *a* concentrations.

Taxa/Date	2003			2004			
	July	August	October	March	May	July	October
Dinoflagellates	0.029 (5.7)	0.046 (5.2)	0.009 (1.0)	0.066 (9.0)	0.512 (15.9)	0.039 (11.8)	0.042 (3.3)
Diatoms	0.082 (16.5)	0.188 (20.9)	0.207 (20.9)	0.211 (28.5)	0.836 (25.8)	0.041 (12.3)	0.184 (14.2)
Chrysophytes	0.026 (5.2)	0.047 (5.3)	0.123 (12.4)	0.019 (2.6)	0.247 (7.5)	0.028 (8.4)	0.061 (4.7)
Prymnesiophytes	0.071 (14.2)	0.134 (14.9)	0.098 (9.9)	0.003 (0.5)	0.383 (11.8)	0.084 (25.1)	0.130 (10.0)
Chlorophytes	0.097 (19.3)	0.231 (25.7)	0.091 (9.2)	0.237 (32.1)	0.672 (20.7)	0.064 (19.1)	0.240 (18.6)
Cryptophytes	0.026 (5.2)	0.045 (5.0)	0.103 (10.4)	0.185 (25.1)	0.457 (14.1)	0.029 (8.7)	0.371 (28.7)
<i>Prochlorococcus</i>	0.000 (0.0)	0.000 (0.0)	0.000 (0.0)	0.000 (0.0)	0.000 (0.0)	0.000 (0.0)	0.014 (1.1)
Cyanobacteria	0.169 (33.9)	0.204 (22.7)	0.358 (36.2)	0.016 (2.2)	0.123 (3.7)	0.049 (14.5)	0.251 (19.4)

년 7월~10월에는 상대적으로 높고 2004년 3월에 낮은 농도를 보인 후 5월에 증가하였다. 7월은 5월보다 낮은 농도를 보였으며 10월에는 다시 증가하였다. 2003년 10월의 zeaxanthin 농도는 345.4 ng l^{-1} 였으며, 2004년 3월은 6.1 ng l^{-1} 로 가장 낮았다. Zeaxanthin 농도는 저수온기에 비해 고수온기에 높은 분포를 보였으며, *Synechococcus*의 개체 수도 유사한 변화를 나타냈다. 이와같이 분류군별 식물플랑크톤 개체수는 지시색소의 농도와 유사한 분포를 나타냈다.

CHEMTAX에 의한 식물플랑크톤 군집연구

식물플랑크톤 색소자료를 CHEMTAX 프로그램으로 처리하여 추산된 각 분류군별 chl *a* 농도와 전체 chl *a*에서 차지하는 비율을 Table 3에 나타냈다. 와편모조류, 규조류, 황색편모조류, 후각편모조류, 녹조류, 은편모조류의 chl *a* 농도는 식물플랑크톤 춘계대증식기인 2004년 5월에 가장 높은 농도를 나타냈다. 와편모조류의 경우 2004년 5월에 $0.512 \mu\text{g l}^{-1}$ 의 chl *a* 농도를 보여 다른 시기보다 약 10배 이상 높은 값을 나타냈다. 규조류는 2004년 5월에 $0.836 \mu\text{g l}^{-1}$ 의 chl *a* 농도를 나타내 다른 시기에 비해 약 4~20배 높은 농도를 보였다. 녹조류도 다른 시기에 비해 3~20배 높은 농도인 $0.672 \mu\text{g l}^{-1}$ 를 보였다. 은편모조류와 후각편모조류도 $0.457 \mu\text{g l}^{-1}$ 과 $0.383 \mu\text{g l}^{-1}$ 의 chl *a* 농도를 보였다. *Synechococcus*의 chl *a* 농도는 2004년 7월을 제외하면 고수온기인 7~10월 사이에 $0.169\text{--}0.358 \mu\text{g l}^{-1}$ 의 높은 농도 범위를 보였다. 2004년 3월은 $0.016 \mu\text{g l}^{-1}$ 으로 낮았으며 5월에는 $0.123 \mu\text{g l}^{-1}$ 으로 증가하였다. *Prochlorococcus*는 2004년 10월에 $0.014 \mu\text{g l}^{-1}$ 의 chl *a* 농도를 보였으며 다른 시기에는 검출되지 않았다. 각 분류군의 chl *a* 농도가 전체 식물플랑크톤에서 차지하는 비율은 괄호 안에 나타냈다. 2003년 7월에는 *Synechococcus*의 chl *a*는 전체의 33.9%를 차지하였다. 다음으로 녹조류, 규조류, 후각편모조류가 각각 19.3%, 16.5%, 14.2%

를 나타냈다. 2003년 8월에는 녹조류로부터 유래한 chl *a*가 25.7%로 가장 높았으며, *Synechococcus*는 22.7%의 기여율을 나타냈다. 규조류와 후각편모조류는 각각 20.9%와 14.9%의 기여율을 나타냈다. 2003년 10월에는 *Synechococcus*가 36.2%, 규조류가 20.9%를 기여하는 chl *a* 분포를 보였다. 황색편모조류, 후각편모조류, 녹조류, 은편모조류는 10% 정도의 기여율을 나타냈다. 2004년 3월에는 녹조류, 규조류, 은편모조류가 각각 32.1%, 28.5%, 25.1%로 높은 기여율을 나타냈으며 *Synechococcus*와 후각편모조류는 2.2%와 0.5%로 낮게 나타났다. 2004년 5월에는 규조류와 녹조류가 25.8%와 20.7%의 높은 기여율을 보였다. 와편모조류 또한 15.9%의 높은 기여율을 나타냈다. 반면 *Synechococcus*는 3.7%로 낮은 기여율을 보였다. 2004년 7월에는 후각편모조류가 25.1%로 가장 높았으며 녹조류도 19.1%의 높은 기여율을 보였다. *Synechococcus*는 14.5%를 보여 2003년 7월에 비해 낮은 비율을 나타냈다. 2004년 10월에는 은편모조류가 29.2%로 가장 높았으며, *Synechococcus*는 다음으로 높은 19.4%를 나타냈다. 녹조류, 규조류, 후각편모조류도 10% 이상의 기여율을 나타냈다. *Prochlorococcus*는 2004년 10월에 출현하였으나 chl *a* 기여율은 0.6%의 낮은 값을 보였다.

4. 고찰

초미소 플랑크톤의 분포 특성

*Synechococcus*는 열대에서 극지방까지 전 해양에 분포하며, 빈 영양 환경보다 영양염이 풍부한 환경에서 높은 풍도를 나타낸다(Partensky et al. 1999). 대양의 빈 영양 환경에선 약 $1\text{--}4 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 수준의 풍도를 나타내나 (Olson et al. 1990; Campbell and Vaulot 1993), 영양염이 풍부한 용승환경이나 연안환경에선 약 $4 \times 10^5 \text{ cells ml}^{-1}$ 의 높은 풍도를 보이기도 한다(Burkill et al. 1993; Partensky et al. 1996). 동중국해 대륙붕수역에선 고 수온

기에 10^5 cells m^{-1} 이상의 풍도가 보고된 바가 있고 (Vaulot and Ning 1988), 2004년 10월 이어도 수역 조사 시도 3.5×10^5 cells m^{-1} 의 높은 풍도가 나타났다. 이와 같은 결과는 동중국해의 대륙붕수역이 *Synechococcus*의 성장에 적합한 환경임을 나타내고 있다. 현재까지 동중국해의 *Synechococcus* 분포조사에서 밝혀진 가장 뚜렷한 특징은 저 수온기에 풍도가 낮고 고 수온기에 증가하는 시기별 변화 양상이다. 장강 희석수의 영향을 받는 동중국해 대륙붕 수역에서 1월에 $10^2 \sim 10^3$ cells m^{-1} 수준이던 *Synechococcus*의 풍도는 7월에 $10^2 \sim 10^5$ cells m^{-1} 로 증가한 풍도를 보였다(Vaulot and Ning 1988). 대만 북부수역으로 부터 장강 하구를 포함하는 동중국해의 대륙붕수역에서 *Synechococcus*의 풍도는 저수온 환경인 5월에 비해 10월에 10배 정도 높게 나타났으며(Chiang et al. 2002), 유사한 수역에서 1월과 7월에 수행된 Jiao et al. (2005)의 조사 결과 역시 여름에 높은 풍도를 나타냈다. 본 조사 결과도 저 수온기인 3월과 5월엔 풍도가 낮고 고 수온기인 7월~10월엔 높아져 기존의 결과들과 동일한 분포양상을 나타냈다. 이러한 계절별 풍도 변화는 수온 변화와 밀접한 관련이 있는 것으로 추정되고 있다. Chang et al. (2003)이 동중국해에서 3월과 7월 *Synechococcus*의 성장률을 측정 한 결과 고수온기인 7월이 저수온기인 3월에 비해 약 3.5 배 높은 결과를 보여, 계절별 풍도변화가 수온과 연동될 수 있음을 보이고 있다. 대륙붕 수역에서 시기별 풍도 변화가 크게 나타나는데 반해 쿠로시오 수역은 풍도변화가 크지 않은 특징을 보인다(Chiang et al. 2002; Jiao et al. 2005). 동계~춘계에 대륙붕 수역은 저 수온에 의해 *Synechococcus*의 성장 제한이 나타날 수 있으나, 쿠로시오 수역은 높은 수온으로 인해 성장제한을 받지 않아 대륙붕 수에 비해 높은 풍도를 나타낸다. 하계~추계 대륙붕 수역은 고 수온과 장강으로 부터의 영양염 공급증가에 의해 높은 풍도 증가가 나타나나, 쿠로시오 수역은 빈 영양환경으로 인해 풍도 증가를 보이지 않는다. 이와 같은 *Synechococcus*의 분포특성을 고려할 때 이어도 수역에서 나타난 3월과 5월의 낮은 풍도는 저 수온에 의한 성장제한, 하계와 추계의 높은 풍도는 수온증가에 의한 성장률 증가와 영양염 공급이 결합되어 나타난 현상으로 추정된다. 또한 이어도 관측기지 수역에서의 *Synechococcus*의 시기별 풍도변화가 동중국해 대륙붕 수에서 조사된 결과들과 유사한 특징을 보인 것은 이어도 관측기지가 동중국해 대륙붕의 중앙에 위치하여 *Synechococcus*의 성장을 제어하는 환경 요인이 동중국해 대륙붕수역과 유사한 이유로 판단된다.

*Prochlorococcus*는 이어도 수역의 7회의 조사 중 2004년 10월에만 출현하였다. 이러한 제한적 분포 특성은 *Prochlorococcus*의 전 지구적 규모의 분포 양상을 살펴보

면 일면 이해되는 부분이 있다. *Synechococcus*는 열대에서 극지방에 걸쳐 넓은 분포를 보이는 반면 *Prochlorococcus*는 남 북위 40도 이내의 외양역에 주로 분포한다(Partensky et al. 1999). *Synechococcus*는 빈 영양수역보다 중 영양 혹은 부 영양 수역에서 높은 생체량을 보이는 반면, *Prochlorococcus*는 빈 영양 수역에서 높은 생체량을 보이고, 연안환경이나 부 영양 수역에서는 출현이 제한된다. 이와 같은 분포특성을 통해 *Prochlorococcus*는 혐성성이며 연안환경에 적응이 힘든 외양종의 생태적 특징을 갖고 있음을 파악할 수 있다. *Prochlorococcus*의 동중국해 분포 특징은 최근 flow cytometer를 이용한 초미소 플랑크톤 연구가 시작되며 부분적으로 밝혀지고 있다(Jiao et al. 2002, 2005; Pan et al. 2005). 현재까지 조사된 결과에 의하면 대륙붕수역에서의 분포는 계절 및 수역별 변화가 크게 나타난다. 이들은 고 수온 환경에 서식하는 생태적 특징으로 인해 저 수온기엔 동중국해 대륙붕에서 출현하지 않고 수온이 높은 쿠로시오 수역을 중심으로 출현한다. 장강 희석수의 영향이 큰 대륙붕 수역은 하계 고 수온 환경 하에서도 *Prochlorococcus*는 출현이 제한된다. 이는 장강 희석수의 세력 확장에 의한 저염 환경의 형성과 중금속 미량원소 등의 영향에 의한 성장 제한으로 추측되고 있다(Jiao et al. 2005). 이어도 수역에서 나타난 제한적 분포는 3월과 5월에 형성되는 저 수온 환경과 7월 이후 장강 담수의 영향을 받는 해양환경적 특성에 따른 현상으로 판단된다. 2004년 10월에 *Prochlorococcus*의 출현은 장강 희석수의 세력이 약화되고 대만류수의 영향이 강화되며 나타난 현상으로 판단된다.

동중국해 대륙붕 수역의 picoeukaryotes의 시기별 분포 특징은 최근 flow cytometer를 이용한 연구들을 통해 부분적으로 밝혀지고 있다(Jiao et al. 2005; Pan et al. 2005). 대륙붕 및 쿠로시오 수역이 포함된 동중국해 조사에서 picoeukaryotes의 풍도는 10월~11월에 14.4×10^3 cells m^{-1} 로 가장 높았다. 1월에 7.1×10^3 cells m^{-1} 의 정점 평균 풍도를 보였으며, 7월이 0.6×10^3 cells m^{-1} 로 가장 낮았다. 이어도 수역에서는 식물플랑크톤 대증식기인 5월에 34.6×10^3 cells m^{-1} 의 최대 풍도가 나타났다. 수온이 높으며 장강 유출수의 영향이 증가하는 7월과 8월에는 $3.6 \sim 5.8 \times 10^3$ cells m^{-1} 의 풍도를 보였고, 10월에는 하계에 비해 높은 풍도를 나타냈다. 3월에는 1.3×10^3 cells m^{-1} 로 풍도가 최소값을 보였다. 기존의 동중국해 조사 결과와 이어도 기지수역의 자료로부터 picoeukaryotes 풍도는 춘계와 추계 식물플랑크톤 대증식기에 높아지는 현상을 보이는 반면 다른 초미소 플랑크톤과 달리 수온과 염분의 영향은 뚜렷이 나타나지 않았다. 식물플랑크톤의 대증식기에 높은 풍도를 보인 것은 이들이 다양한 분류군으로 구성되어 있어, 이들 중 대증식 환경 하에서 높은 성장을 일으킬 수

있는 일부분류군의 증식에 따른 것으로 추정된다.

초미소 플랑크톤의 색소와 생체량

초미소 플랑크톤의 분류군별 출현 및 생체량 연구에 있어 지시색소를 이용하는 방법은 형광현미경을 이용하는 방법에 비해 정밀성과 재현성이 높은 것으로 알려져 있다. 또한 빠른 시간에 자료를 얻을 수 있는 장점으로 인해 최근에는 초미소 플랑크톤연구에 있어 flow cytometer와 색소분석을 이용한 방법이 병행되기도 한다(Velduis and Kraay 2004). 남해군에 속하는 초미소 플랑크톤인 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus*는 색소조성이 간단하며, zeaxanthin과 divinyl chl *a*와 같은 지시색소가 존재하여 색소를 이용한 출현 양상의 파악이 용이하다. 반면 picoeukaryotes는 다양한 분류군으로 구성되어 있어 1~2 종류의 지시색소로는 분류군별 출현양상과 생체량을 파악하기 어려운 점이 있다. Divinyl chl *a*는 *Prochlorococcus*에 특이적으로 나타나는 지시색소로서(Goericke and Repeta 1992), 생체량을 나타내는 지표로 이용된다. 반면 zeaxanthin은 *Synechococcus*의 지시색소로 이용되나 *Prochlorococcus*와 일부 녹조류 및 홍조류에서 나타난다(Jeffrey and Veski 1997). 따라서 zeaxanthin을 *Synechococcus*의 출현 동태와 관계된 지표로 사용하기 위해서는 조사수역에서 zeaxanthin을 갖는 다른 분류군들의 출현 양상을 고려해야 할 필요가 있다. 본 조사 시 zeaxanthin농도는 3 μm 로 분급된 농도와 유사한 값을 보여 대부분이 초미소 식물플랑크톤으로 추측되었음을 나타냈다. 따라서 홍조류에 의한 영향은 없을 것으로 판단되어 *Prochlorococcus*와 일부 녹조류의 영향을 분석하였다.

Zeaxanthin은 *Synechococcus*의 carotenoids 중 75% 이상을 차지하는 주요색소이다(Kana et al. 1988). 배양한 세포에서 측정된 zeaxanthin의 농도는 strain에 따라 1.1~3.3 fg cell⁻¹의 범위를 보이며 광도에 따른 변화는 작게 나타난다(Kana et al. 1988; Six et al. 2004). *Synechococcus* (WH8102) 배양실험에서 측정된 zeaxanthin: chl *a*의 비는 15~650 $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{sec}^{-1}$ 의 광 구간에서 0.17~2.24의 범위를 보이는데, 이는 zeaxanthin의 양적변화보다 약한 광에서 배양된 세포의 chl *a* 농도가 높아짐에 따라 나타나는 변화이다(Six et al. 2004). *Prochlorococcus*의 세포당 zeaxanthin 함유량은 1.0 fg cell⁻¹으로 *Synechococcus*와 비슷하거나 조금 낮은 수준이다(Moore et al. 1995). 그러나 이어도 수역에서 *Prochlorococcus*의 분포는 매우 제한적이기 때문에 zeaxanthin을 *Synechococcus*의 생체량 지표색소로 이용하는 것이 가능하다 판단된다. 반면 picoeukaryotes의 풍도가 증가하는 시기에 *Synechococcus*의 지표색소로 zeaxanthin의 이용은 큰 오차를 발생시킬 수 있을 것으로 예측된다. 녹조류의 Prasinophyceae 강에

속하는 picoeukaryotes들의 zeaxanthin: chl *a*의 비는 종에 따라 차이가 있으나 0.008~0.065의 범위를 보인다(Latasa et al. 2004). 이는 *Synechococcus*에 비해 낮은 값이나 picoeukaryotes는 세포용적과 세포당 chl *a* 농도가 상대적으로 높아, 풍도가 높을 시는 많은 양의 zeaxanthin을 함유할 수 있다. 이어도 수역에서 flow cytometer를 이용 세포당 chl *a*의 상대적 양을 추정할 수 있는 적색 형광세기를 측정된 결과 picoeukaryotes가 *Synechococcus*에 비해 5.4~46.5배 높게 나타나고 있다(Fig. 12). 이런 결과는 picoeukaryotes가 zeaxanthin 색소 농도에 영향을 미칠 수 있는 분류군임을 보이고 있다. 즉 이어도 해역에서 2004년 3월과 5월과 같이 *Synechococcus*의 풍도가 낮거나

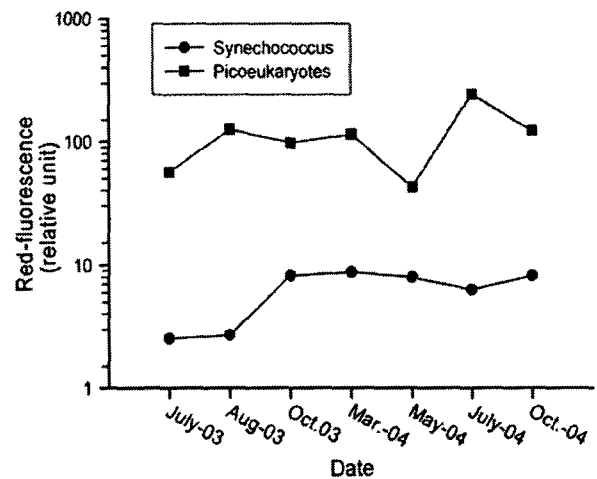


Fig. 12. Red fluorescence of *Synechococcus* and picoeukaryotes using flow cytometric analyses during the survey period.

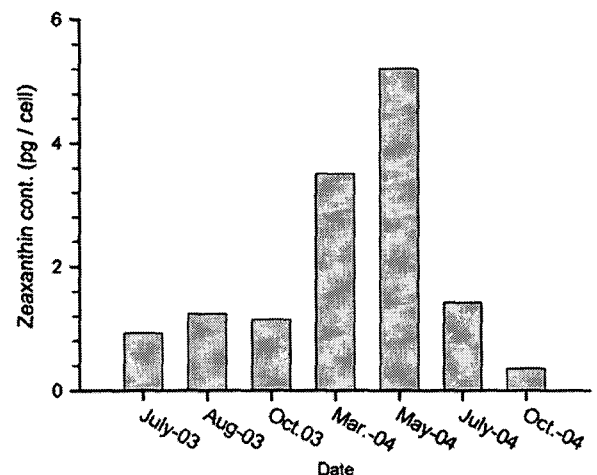


Fig. 13. Average concentrations of zeaxanthin per *Synechococcus* cell.

picoeukaryotes의 풍도가 높은 시기에는 zeaxanthin의 농도 중 많은 부분이 picoeukaryotes에서 추출될 수 있을 것이다. 그러나 7월~10월 사이의 zeaxanthin 농도는 대부분이 *Synechococcus*로부터 추출 되었을 것이며, zeaxanthin 농도를 통한 *Synechococcus* 생체량 추정에 있어 다른 분류군의 영향은 작을 것으로 판단된다.

이어도 수역의 시기별 zeaxanthin 농도를 *Synechococcus* 개체수를 나눈 결과는 Fig. 13과 같다. *Synechococcus*의 풍도가 높고 picoeukaryotes의 풍도가 상대적으로 낮은 2003년 7월~10월 사이에는 $0.75\sim 1.17 \text{ fg cell}^{-1}$ 의 범위를 나타내 배양된 *Synechococcus*(WH8102)에서 보인 $0.92\sim 1.33 \text{ fg cell}^{-1}$ 와 유사한 수준을 나타냈다. 2004년 3월에는 $2.38 \text{ fg cell}^{-1}$ 으로 조사기간 중 가장 높은 세포당 zeaxanthin 농도를 나타냈다. 이는 *Synechococcus*의 풍도가 $2.1 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 로서 매우 낮아 다른 분류군으로부터 추출된 zeaxanthin이 영향을 미쳤을 가능성이 높다. *Synechococcus*에 비해 picoeukaryotes가 높은 풍도를 나타낸 5월에도 $2.05 \text{ fg cell}^{-1}$ 의 비교적 높은 값을 나타냈다. *Synechococcus*의 풍도가 picoeukaryotes보다 상대적으로 높은 2003년 7월, 8월, 10월 및 2004년 7월에는 $0.75\sim 1.59 \text{ fg cell}^{-1}$ 범위의 값을 보였다. 반면 2004년 10월에는 $0.30 \text{ fg cell}^{-1}$ 로 다른 시기에 비해 낮은 zeaxanthin 농도를 보였다. 이러한 변화의 원인을 현재로서는 밝히기 어려우나 이 시기에는 세포당 zeaxanthin 함유량이 다른 *Synechococcus* stain의 출현이 원인이었을 것으로 추정된다. 이어도 해역에서 *Synechococcus*는 시기에 따라 약 100배의 변화를 나타내므로 세포내 zeaxanthin 함유량의 시기적 변화에 관계없이 *Synechococcus*의 생체량 변동 경향을 나타내는 지표로 zeaxanthin을 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 정확한 생체량의 추정에는 앞에서 언급된 계절별 변화요인을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

*Prochlorococcus*의 경우 지시색소인 divinyl chl *a*를 이용한 출현여부의 추정이 매우 효율적인 것으로 나타났다. 이어도 수역의 경우 일정한 시기를 제외하면 *Prochlorococcus*가 출현하지 않고, 출현 시도 매우 낮은 풍도를 나타낸다. 풍도가 낮을 경우 작은 부유입자들과 섞여 flow cytometer 상에서 뚜렷한 구분이 힘들어지는 경우가 있다. 따라서 flow cytometer와 함께 색소분석을 이용한 *Prochlorococcus*의 확인이 요구된다. *Prochlorococcus*가 $2.2 \times 10^3 \text{ cells ml}^{-1}$ 의 비교적 낮은 풍도를 나타낸 2004년 10월 시료에서 4.8 ng l^{-1} 의 divinyl chl *a*가 검출되어 HPLC를 이용한 색소분석의 높은 해상력을 나타냈다. 따라서 시기별로 부유물질 농도가 높게 나타나는 이어도 수역에서 divinyl chl *a* 분석은 flow cytometer의 단점을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

Picoeukaryotes에는 다양한 분류군이 포함되나, 이들은

Table 4. Percent contribution to total chl *a* concentrations in each picophytoplankton groups calculated by CHEMTAX.

Taxa	2003		2004		
	July	October	May	July	October
Dinoflagellates	1.8	0.2	2.4	1.2	0.1
Diatoms	13.1	17.6	42.3	18.7	10.6
Chrysophytes	5.7	8.3	4.0	5.1	5.3
Prymnesiophytes	12.9	9.6	9.9	21.7	7.7
Chlorophytes	18.5	11.8	20.8	18.4	16.0
Cryptophytes	6.6	12.4	12.1	0.1	19.1
<i>Prochlorococcus</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2
Cyanobacteria	41.4	40.2	8.5	34.9	40.0

세포크기가 작고 형태적 특징이 뚜렷치 않아 분류에 어려움이 있다. 따라서 분자생물학적 방법에 의한 분류군별 연구가 수행되기 전까지 $3 \mu\text{m}$ 크기 이하의 모든 원핵조류는 picoeukaryotes 그룹으로 구분되어 연구가 이루어져 왔다. 동중국해의 경우도 분류군의 구분 없이 picoeukaryotes 그룹으로 연구가 이루어져(Jiao *et al.* 2002, 2005; Pan *et al.* 2005), 분류군별 조성이나 풍도에 대한 자료는 없는 상태이다. 본 연구에서는 색소를 이용 분류군의 조성과 이들의 상대적 생체량을 파악하기 위해 $3 \mu\text{m}$ 크기로 분급된 식물플랑크톤의 색소를 분석하였다(Table 4). $3 \mu\text{m}$ 로 분급된 색소 자료에서 보인 특징적인 점은 규조류, 후각편모조류, 황색편모조류에서 나타나는 색소인 fucoxanthin이 2003년 10월과 2004년 5월에 높은 농도를 보인점이다. 이 시기에는 초미소 크기를 나타내는 규조류인 *Minidiscus communis*와 세포의 길이는 $10 \mu\text{m}$ 이상이나 폭이 좁아 구경 $3 \mu\text{m}$ 크기의 여과지를 통과하는 *Cylindrotheca closterium* 등의 풍도가 높게 나타나고 있어, fucoxanthin의 농도는 규조류의 출현 양상에 의해 영향 받고 있음을 보인다. 이는 초미소 크기를 갖는 규조류가 picoeukaryotes의 주요 구성원이 될 수 있음을 보이는 동시에 *Cylindrotheca closterium*과 같이 미소플랑크톤으로 구분될 수 있는 종들이 분급되는 과정에서 초미소 플랑크톤 생체량의 과대 추정에 영향을 줄 수 있음을 나타내고 있다. *Cylindrotheca closterium*은 $3 \mu\text{m}$ 로 분급된 엽록소 *a*와 색소 농도에는 영향을 미치나 flow cytometer를 이용한 계수에선 picoeukaryotes에 포함되지 않으므로 자료의 비교 시 이런 점을 유의해야 할 것이다. Chlorophyll *b*, neoxanthin, prasinoxanthin, violaxanthin은 녹조류에서 공통적으로 나타나는 색소로서, 이들 색소를 통해 이어도 수역의 초미소 플랑크톤에 속하는 녹조류의 분포양상을 파악할 수 있다. 2004년 5월에 높은 농도를 보인 prasinoxanthin은 녹조류중 Prasinophyceae에 속하는 분류군에서 나타나는 지

시색소이다. Prasinoxanthin의 농도를 통해 2004년 5월에 Prasinophyceae가 높은 생체량이 나타났음을 알 수 있다. 19'-Hex와 alloxanthin의 검출은 초미소 식물플랑크톤 크기의 후각편모조류와 은편모조류가 이어도 수역에서 출현함을 의미한다. 이외에도 peridinin 색소가 출현 초미소플랑크톤 크기의 와편모조류가 출현함을 나타냈다.

3 μm 로 분급된 색소자료를 이용한 CHEMTAX 분석은 이어도수역에서 출현하는 초미소 플랑크톤의 분류군별 생체량 분포에 대한 정보를 제공한다(Table 4). 분석 결과 규조류, 녹조류, 후각편모조류, 은편모조류 등 다양한 분류군의 picoeukaryotes가 높은 chl *a* 기여율을 나타냈다. 녹조류의 chl *a*는 11.8~20.8%의 비교적 높은 기여율을 보였다. 규조류는 2004년 5월에 42.3%의 높은 기여율을 보였으나 초미소 플랑크톤이 아닌 미소형 규조류인 *Cylindrotheca closterium*에 의한 영향에 의해 과대평가된 결과로 판단된다. 후각편모조류의 chl *a*는 7.7~21.7%의 기여율을 보였으며, 은편모조류도 2004년 7월을 제외하면 높은 chl *a* 기여율을 보였다. 초미소 플랑크톤 중 picoeukaryotes의 chl *a* 기여율은 원핵조류인 *Synechococcus*의 기여율을 제외한 값으로서 2004년 5월을 제외하면 약 60% 나타났다. 그러나 2004년 5월과 같이 소형 규조류 등의 영향으로 인해 과대평가가 나타날 수 있음을 고려해야 한다.

동중국해의 초미소 플랑크톤 연구에 필요한 분류군별 풍도와 형광 특성 DNA 함유량 등의 생태·생리학적 자료는 flow cytometer를 이용 얻을 수 있다. 반면 초미소 플랑크톤의 분류군별 생체량은 색소 분석을 통해 많은 정보를 얻을 수 있으며 flow cytometer에서 얻은 자료와 상호 보완적인 역할을 하게 된다. 특히 picoeukaryotes의 분류군별 조성을 파악하는데 있어 색소분석은 flow cytometer에서 얻을 수 없는 분류군별 정보를 제공할 수 있을 것이다. 특히 이어도 수역 및 동중국해의 연안 대륙붕수의 탁도가 높아지는 동계에는 색소를 이용한 분류군별 생체량 자료가 flow cytometer의 자료를 보정하는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다. 따라서 이어도 기지를 이용한 초미소 플랑크톤 모니터링에 있어 flow cytometer와 HPLC를 이용한 색소분석의 병행이 필요한 것으로 판단된다.

미소 및 소형식물플랑크톤의 분포

이어도 관측기지 수역의 규조류 출현은 계절적 물리환경 변화 및 장강수의 영향을 받고 있음이 나타났다. 저수온기인 3월에는 북서계절풍의 발달에 의한 수주의 수직혼합의 영향으로 일시부유성 규조류인 *Paralia sulcata*가 우점하였다. 이와 같이 동계에 *Paralia sulcata*가 우점종으로 나타나는 현상은 Fruya(1996)의 동중국해 대륙붕수역 조사에서도 나타났다. 위성자료에 의하면 이어도 관측 기

지 수역을 포함한 동중국해 대륙붕 수역은 4월과 5월 사이 춘계식물플랑크톤 대증식 현상이 나타난다(Fig. 6). 2004년 5월의 이어도 수역 조사에서는 소형 규조류인 *Cylindrotheca closterium*이 $9,596.3 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 높은 풍도를 보였으며, 대표적인 대증식 종인 *Chaetoceros* spp도 높은 풍도를 나타냈다. 춘계대증식기 이후 하계에는 이어도수역이 장강희석수의 이동경로 상이나 영향권에 위치함이 위성자료 상에서 나타난다(Fig. 6). 이는 이어도 수역의 식물플랑크톤이 하계 성층의 발달에 따른 표층수로의 영양염 공급제한과 같은 전형적인 환경특성보다는 장강수의 이동에 의한 환경변화에 영향을 받을 수 있음을 의미한다. 2003년 7월과 8월에 $0.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 와 $0.90 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 비교적 높은 chl *a* 농도를 나타낸 것은 장강 유출 수 영향에 의한 것으로 판단된다. 이 시기에는 *Cylindrotheca closterium*과 *Pseudonitzschia* sp. 등이 우점종으로 나타났다. 10월은 표층 수온이 낮아지며 하계에 발달한 성층이 소멸되고 장강 희석수의 영향이 점차 감소하는 시기로서 2003년에는 2~4 μm 크기의 *Minidiscus comunis*가 높은 풍도를 나타내는 특이한 현상을 보였다.

이어도 수역에서 정량적으로 높은 풍도를 나타낸 와편모조류는 주로 10~20 μm 크기의 *Gymnodinium*, *Katodinium*, *Prorocentrum*, *Oxytoxum*속과 미분류속의 종들이었다. 풍도는 춘계 대증식기 5월에 $309.1 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 최대를 보였으며 2003년 8월과 2004년 10월도 $114.1 \text{ cells mL}^{-1}$ 과 $121.0 \text{ cells mL}^{-1}$ 으로 다른 시기에 비해 높게 나타났다. 동중국해의 와편모조류 연구는 장강하구의 적조발생지역을 중심으로 연구가 이루어지고 있어 대륙붕의 시기별 풍도 변화와 이에 영향을 미치는 환경요인에 대한 자료는 부족한 실정이다. 따라서 이어도 수역에서 나타나는 와편모조류의 시기별 풍도 변화 유형이 동중국해 대륙붕의 넓은 수역에 걸쳐 유사하게 나타날지는 현재로서는 판단하기 어려운 상태이다. 이어도 수역의 와편모조류 분포 연구는 동중국해 환경변화와 연결되어 몇 가지 중요성을 내포하고 있다. 지난 20년간 상하이와 인접한 연안도시들의 산업발달에 의해 장강을 통해 동중국해로 유입되는 영양염은 급속도로 증가하였다(Chen et al. 2003). 영양염 유입 증가에 의해 유해조류대증식(HABs; Harmful algal blooms)이 장강 하구에 인접한 동중국해 내측 대륙붕 수역에서 5~8월 사이에 집중적으로 발생하고 있다. 장강하구에서 발생하는 유해조류대증식(HABs)은 29° - 32.5°N 과 122° - $123^{\circ}20'\text{E}$ 수역에서 나타나고 이중 70%는 $30^{\circ}30'$ - 32°N 과 $122^{\circ}15'$ - $123^{\circ}15'\text{E}$ 수역에서 나타난다. 영양염 증가와 함께 삼협댐 건설에 의한 부유사 감소는 장강하구의 탁도를 감소시켜 빈번한 HABs의 발생 원인이 되고 있다. 최근에는 HABs를 일으키는 원인 식물플랑크톤이 규조류인 *Skeletonema costatum*에서 와편모조류인 *Prorocentrum*

dentatum, *Noctiluca scintillans*, *Alexandrium* spp.로 옮겨가고 있다(Chen *et al.* 2003).

위성자료에 의하면 장강하구의 적조 다발수역의 높은 엽록소 농도가 이어도 수역을 향하여 확장되고 있어 적조다발 수역에서 발생한 적조생물의 이어도 수역 출현이 예상된다. 장강하구에서 빈번히 적조를 일으키는 *Prorocentrum* 속의 종들이 이어도 수역에서 출현하고 있어 두 지역 생태계가 연동할 가능성이 보이고 있다. 향후 이어도 관측기 지에서의 모니터링은 와편모조류의 시기별 변동양상과 환경요인과의 관계에 대해 많은 정보를 줄 것으로 판단되며 적조다발 지역에서 발생한 적조생물의 확산에 대해 이해를 높이는 데 많은 기여를 할 것으로 판단된다.

미소형 편모조류 중 은편모조식물(Cryptophytes)에 속하는 편모조류는 biliprotein을 갖고 있어 현광 현미경하에서 오렌지색 형광을 나타낸다. 또한 이들은 지시색소로서 alloxanthin 갖고 있어 색소분석을 통해 생체량 파악이 용이한 것으로 알려져 있다(Jeffrey and Vesik 1997). 이어도 수역에서 은편모조류에 속하는 cryptomonads의 풍도는 식물플랑크톤 대증식기인 2004년 5월에 가장 높은 풍도를 보였으며 2004년 10월과 2003년 10월 조사 시 각각 182.0 cells ml⁻¹과 120.2 cells ml⁻¹로 높은 풍도를 보였다. 이러한 풍도는 식물플랑크톤 대증식기와 일치하여 증가하는 유형으로 춘계 및 추계 증식을 유도하는 환경 특성이 cryptomonads의 증식에 영향을 주는 것으로 추정할 수 있다. biliprotein을 갖지 않는 미소형 편모조류의 시기별 풍도도 cryptomonads와 유사하게 나타나 이들도 식물플랑크톤의 춘계 및 추계 대증식을 유도하는 환경특성의 영향을 크게 받는 풍도 분포를 나타냈다. 이는 이들 편모조류가 다양한 분류군으로 이루어져 대증식기 환경에 성장이 적합한 분류군이 높은 성장을 나타낸 것으로 추정된다.

Coccolithophorids의 풍도는 시기별 변화가 크게 나타났다(Fig. 10C). 2003년 10월에 38.0 cells ml⁻¹로 풍도가 가장 높았고, 춘계 식물플랑크톤 대증식기인 2004년 5월에도 29.6 cells ml⁻¹의 높은 풍도를 보였다. 그러나 다른 조사 시기에는 0.03~0.47 cells ml⁻¹ 사이의 낮은 풍도를 나타냈다. Coccolithophorids는 지시색소로 19'-Hex를 내포하나, 풍도를 고려할 때 이어도 수역에서 보인 19'-Hex. 농도는 다른 분류군으로부터 유래되었을 것으로 판단된다.

분류군별 생체량

지시색소를 이용한 미세조류 분류군 연구는 현미경이나 flow cytometer를 이용한 확인이 필요한데, 이유는 일부 지시색소가 서로 다른 분류군의 미세조류에 공통적으로 나타나기 때문이다(Jeffrey *et al.* 1997). *Prochlorococcus*에서 나타나는 divinyl chl *a*와 cryptophytes의 alloxanthin처럼 특정 분류군을 지시하는 명확한 색소가 있는 반면,

fucoxanthin이나 19'-Hex처럼 2종류 이상의 분류군에서 나타나는 지시색소도 있다. 또한 색소조성이나 색소들의 비율은 환경요인에 의해 변할 수 있다(Geider *et al.* 1993; Schlüter *et al.* 2000). 이러한 문제로 인해 최근에는 CHEMTAX를 이용하여 분류군별 생체량분석을 하고 있다. CHEMTAX는 다양한 환경의 해양에서 적용가능하며 몇몇 식물플랑크톤과 같이 동일한 강(class)에서 다른 pigment type을 나타내는 경우에도 효율적으로 분리가 되고 있다(Wright *et al.* 1996).

CHEMTAX 분석결과 이어도 수역의 식물플랑크톤은 다양한 분류군들로 조성되는 특징을 보였다. 규조류의 chl *a*는 전체의 12.3~28.5%를, 와편모조류는 1.0~15.9% 차지하였다. 규조류와 와편모조류를 합한 chl *a* 농도는 전체 식물플랑크톤 chl *a* 농도의 17.5~41.7% 수준으로 평균 27.3%의 기여율을 보였다. 이는 규조류와 와편모조류를 제외한 다른 분류군의 식물플랑크톤이 70% 이상의 생체량을 나타냄을 의미한다. 3 μm로 분급된 엽록소 *a* 농도에서 나타났듯 5월~10월 사이 초미소 플랑크톤의 생체량이 전체식물플랑크톤 생체량의 32.8~77.5%를 나타냈다. 이와 같은 엽록소 분급구조는 이어도 수역에서 출현이 제한되는 *Prochlorococcus*를 제외한 *Synechococcus*와 picoeukaryotes의 chl *a*량이 전체 식물플랑크톤 엽록소 중 높은 비율을 차지함을 의미한다. *Synechococcus*로부터 추출된 chl *a*는 5월에 3.7%의 낮은 기여율을 나타낸 반면 7월~10월 사이에는 14.5%~33.9%의 기여율을 나타냈다. 따라서 전체 초미소 플랑크톤의 chl *a* 기여율에서 *Synechococcus*의 기여율을 제외한 26.6~44.0%의 chl *a*가 picoeukaryotes로 부터 유래되어야 할 것이다. 이와 같은 값은 *Synechococcus*의 chl *a* 기여도를 약간 상회하는 값으로 이어도 수역에서 picoeukaryotes의 중요성을 나타낸다. 그러나 3 μm 이하의 식물플랑크톤 색소자료를 이용한 CHEMTAX 결과에서 보듯 소형의 규조류들이 여과하는 과정에서 초미소 플랑크톤에 포함될 수 있다. 따라서 picoeukaryotes의 chl *a* 기여율은 산술적 계산 보단 낮을 것으로 예상된다. Picoeukaryotes는 녹조류, 후각편모조류, 황색편모조류 및 일부 규조류, 와편모조류, 은편모조류에 속하는 다양한 분류군으로 이루어져 있으나 시기별 우점군 및 이들의 색소특성의 자료가 없어 생체량을 정량화할 수 없었다. 규조류와 와편모조류, *Synechococcus*의 chl *a* 합은 전체 chl *a*의 36.9~58.0% 수준이며 평균 46.2%를 나타냈다. 여기에 은편모조류의 chl *a* 농도를 합하면 시기별로 전체엽록소의 47.4~68.4%의 범위와 평균 60.1% 수준을 나타낸다. 따라서 녹조류, 후각편모조류, 황색편모조류에 속하는 picoeukaryotes와 편모조류 및 후각편모조류에 속하는 coccolithophorids 등의 엽록소가 전체의 40% 정도를 차지하는 것으로 나타났다.

5. 요약 및 결론

이 연구는 이어도 해양관측기지 주변수역의 식물플랑크톤 군집구조를 밝히는 목적으로 수행하였다. 기존에 수행되던 규조류와 와편모조류 위주의 연구방식에서 벗어나 전체 식물플랑크톤 분류군을 포함한 군집구조를 밝히려 하였다. 이를 위해 현미경외에 flow cytometer와 HPLC를 이용한 색소 분석 방법을 이용하였으며, CHEMTAX 프로그램을 이용 분류군별 생체량을 정량화 하였다. 또한 이어도 해양과학기지에 영향을 줄 수 있는 주변 환경을 파악하고자 동중국해의 시기별 chl *a* 분포를 위성자료를 통해 살펴보았다. 획득된 자료는 이어도 해양과학기지에서의 식물플랑크톤 생태계의 모니터링 방식과 분석방법의 선택을 위한 기초 자료로 이용하고자 하였다.

동중국해의 시기별 chl *a* 분포를 위성자료로 분석한 결과, 이어도 관측기지 수역의 춘계 식물플랑크톤 대증식이 2004년 4월과 5월 사이에 발생하였음이 나타났다. 춘계 대증식 후 하계~추계에는 장강 유출수의 영향이 확대되는 현상이 나타났으며, 이어도 관측기지는 장강 유출수 이동 경로상이나 영향권에 위치하고 있음이 파악되었다. 이어도 수역의 현관관측 결과도 위성자료에서 파악된 chl *a* 분포와 유사한 경향을 보였으며, 성층이 발달한 시기에도 장강 유출수의 영향으로 비교적 높은 chl *a* 농도를 나타냈다.

Chlorophyll *a* 분급 조사결과 3 μm 크기 이하의 초미소 플랑크톤의 생체량은 전체 식물플랑크톤 생체량 중 높은 비율을 나타내 이들이 식물플랑크톤 생태계에서 중요한 그룹임을 나타냈다. Flow cytometer를 이용하여 분석된 초미소 플랑크톤 3그룹은 각기 다른 풍도 및 분포특성을 나타냈다. *Synechococcus*는 초미소 플랑크톤중 가장 높은 풍도를 보이고 고 수온기인 하계~추계에 풍도가 증가하는 양상을 나타냈다. 반면 *Prochlorococcus*는 동계의 저 수온 환경과 하계~추계의 장강 유출수의 영향으로 이어도 기지 수역에서 분포가 제한됨을 보였으며, 이들의 출현은 고 수온기에 대마난류의 영향이 강화되는 환경 하에서 가능한 것으로 파악된다. Picoeukaryotes는 춘계 및 추계 식물플랑크톤 대증식기에 풍도가 증가하는 양상을 나타냈다. *Synechococcus*의 시기별 풍도변화는 기존의 동중국해 대륙붕 수역 조사 결과와 유사한 경향을 보여, 이어도 기지에서의 모니터링을 통해 동중국해의 현황 파악이 가능한 것으로 예상된다. 반면 *Prochlorococcus*는 출현이 매우 제한적이어서 생산력이나 먹이망에서의 중요성 보다는 고 수온기에 대마난류수의 세력정도를 파악하는 지표 생물로 연구하는 것이 적합하다 판단된다. 초미소 플랑크톤의 각 그룹의 생태적 특이성은 동중국해의 환경 특성 및 이에 연동되는 생태계 특성을 파악하는데 많은 정보를 제공할 수 있음이 기존의 조사들을 통해 밝혀졌다(Jiao et al.

2005). 또한 초미소 플랑크톤은 flow cytometer를 이용 편리하고 정밀하며 신뢰성이 높은 자료를 취할 수 있으며, 동일한 그룹에 대한 전 세계 다양한 환경에서 분석된 자료와 비교가 가능하여 동중국해의 생태계 특성을 이해하는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

동중국해 대륙붕에서 환경특성에 따른 규조류, 와편모조류, 독립영양 편모조류와 coccolithophorids 등의 분포 양상에 대해 밝혀진 내용은 극히 적은 실정이다. 따라서 이어도 수역을 포함하여 동중국해의 미소 및 소형 플랑크톤의 분포와 이를 결정하는 환경과의 관계에 대한 이해를 넓혀가는 과정이 필요하다. 규조류와 와편모조류를 포함하는 이들 미소-소형 그룹들은 종 다양성이 높아 수역 특성에 따라 다른 풍도와 우점종을 보일 것으로 예측된다. 특히 다양한 환경이 공존하며, 시기별로 변하는 동중국해의 특성상 미소-소형 식물플랑크톤의 분포는 복잡하게 나타날 것이다. 이러한 식물플랑크톤의 분포특성을 현미경으로 파악하는 일은 매우 오랜 시간과 노력이 필요하다. 따라서 동중국해의 연구는 지시색소를 이용 식물플랑크톤의 분류군별 생체량을 추정하는 방법이 효율적이라고 판단된다. 지시색소 방법의 검증에 위해 이어도 관측기지에서 zeaxanthin, divinyl chl *a*, fucoxanthin, peridinin, alloxanthin 등의 지시색소와 *Synechococcus*, *Prochlorococcus*, 규조류, 와편모조류, 은편모조류등의 풍도와의 관계를 조사한 결과 서로 연동되는 경향이 잘 나타났으며 비교 시 고려해야할 점도 파악하였다. 이 실험에서 얻어진 정보는 향후 진행될 동중국해의 식물플랑크톤 생태계 연구에 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

CHEMTAX 분석을 통해 이어도 수역에서 나타나는 식물플랑크톤의 분류군별 생체량과 전체적인 군집구조를 파악할 수 있었다. 7회 조사를 평균할 때 규조류와 와편모조류의 생체량은 전체식물플랑크톤 생체량의 30% 정도를 나타냈다. 따라서 70%는 남세균인 *Synechococcus*, 녹조류, 황색편모조류, 은편모조류등 6개 분류군이 차지하였다. 춘계 대증시기에는 규조류, 와편모조류, 녹조류, 은편모조류가 높은 생체량을 보이는 군집구조가 나타났고, 하계~추계에는 *Synechococcus*, 녹조류, 규조류, 후각편모조류가 높은 생체량을 보였다. 하계~추계에 3 μm 이하 크기의 식물플랑크톤의 chl *a*가 전체 chl *a*의 약 70%를 차지하는 것은 *Synechococcus*와 함께 picoeukaryotes의 생체량이 높게 나타날 수 있음을 보인다. 반면 3 μm 이하로 분급된 식물플랑크톤의 색소분석을 통한 CHEMTAX 분석 결과 미소형의 규조류들이 초미소 플랑크톤의 생체량에 포함될 수 있음을 보였고, 이로 인해 초미소 플랑크톤의 생체량이 과대평가 될 수 있음이 나타났다.

이번 연구를 통해 식물플랑크톤 군집구조의 파악에 있어 현미경, flow cytometer, HPLC를 이용한 색소분석 및

위성자료의 이용은 상호 보완적이며 필수적임을 파악할 수 있었다. 또한 조사 과정에서 파악된 이어도 수역의 생태환경, 식물플랑크톤 분포특성, 분석방법의 적절성 및 문제점은 향후 이어도 해양관측기지에서의 생태계 모니터링의 계획 및 실행단계에서 필요한 많은 정보를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

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 노일 교수님과 강성호 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- Andersen, R.A., R.R. Bidigare, M.D. Keller, and M.D. Latasa. 1996. A comparison of HPLC pigment signatures and electron microscopy observations for oligotrophic waters of the North Atlantic and Pacific Oceans. *Deep-Sea Res. II*, 43, 517-537.
- Breton, E., C. Brunet, B. Sautour, and J.M. Brylinski. 2000. Annual variations of phytoplankton biomass in the eastern English Channel: comparison by pigment signatures and microscopic counts. *J. Plankton Res.*, 22, 1423-1440.
- Burkill, P.H., R.J.G. Leakey, N.J.P. Owens, and R.F.C. Mantoura. 1993. *Synechococcus* and its importance to the microbial food web of the northwestern Indian Ocean. *Deep-Sea Res. II*, 40, 773-782.
- Campbell, L. and D. Vaulot. 1993. Photosynthetic picoplankton community structure in the subtropical North Pacific Ocean near Hawaii (station ALOHA). *Deep-Sea Res. I*, 40, 2043-2060.
- Chang, J., K.H. Lin, K.M. Chen, G.C. Gong, and K.P. Chiang. 2003. *Synechococcus* growth and mortality rates in the East China Sea: range of variations and correlation with environmental factors. *Deep-Sea Res. II*, 50, 1265-1278.
- Chen, S., W. He, S. Yao, and S. Zang. 1993. A classification of hydrological climatic seasons in the China seas. *Acta Oceanol. Sin.*, 12, 63-78.
- Chen, C., J. Chu, R.C. Beardsley, and P.S.J. Franks. 2003. Physical-biological sources for dense algal blooms near the Changjiang. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1515-1518.
- Chiang, K.P., M.C. Kuo, J. Chang, R.H. Wang, and G.C. Gong. 2002. Spatial and temporal variation of the *Synechococcus* population in the East China Sea and its contribution to phytoplankton biomass. *Cont. Shelf Res.*, 22, 3-13.
- 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.
- Collier, J.L. 2000. Flow cytometry and the single cell in phycology. *J. Phycol.*, 36, 628-644.
- Furuya, K., K. Kurita, and T. Odate. 1996. Distribution of phytoplankton in the East China Sea in the winter of 1933. *J. Oceanogr.*, 52, 323-333.
- Furuya, K., M. Hayashi, Y. Yabushita, and A. Ishikawa. 2003. Phytoplankton dynamics in the East China Sea in spring and summer as revealed by HPLC-derived pigment signatures. *Deep-Sea Res. II*, 50, 367-387.
- Gao, X. and J. Song. 2005. Phytoplankton distributions and their relationship with the environment in the Changjiang Estuary, China. *Mar. Pollut. Bull.*, 50, 327-335.
- Geider, R.J., J. LaRoche, R.M. Green, and M. Olaizola. 1993. Response of the photosynthetic apparatus of *Phaeodactylum tricornutum* (Bacillariophyceae) to nitrate, phosphate, or iron starvation. *J. Phycol.*, 29, 755-766.
- Guo, Y.J. 1991. The Kuroshio. part 2. Primary productivity and phytoplankton. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 29, 155-189.
- Guo, Y.J. 1994. Primary productivity and phytoplankton in China Seas. p. 227-242. In: *Oceanology of China Seas. Vol. 1*. ed. by Zhou, D., Y.B. Liang, and C.K. Zeng. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Goerike, R. and D.J. Repeta. 1992. The pigments of *Prochlorococcus marinus*: the presence of divinyl chlorophyll a and b in a marine prochlorophyte. *Limnol. Oceanogr.*, 37, 425-433.
- Havskum, H., L. Schlüter, R. Scharek, E. Berdalet, and S. Jacquet. 2004. Routine quantification of phytoplankton groups microscopy or pigment analyses? *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 273, 31-42.
- Higgins, H.W. and D.J. 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.
- Hoek, C. van den., D. Mann, and H.M. Jahns. 1995. *Algae: an introduction to phycology*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 627 p.
- Iturriaga, R. and B.G. Michell. 1986. Chroococoid cyanobacteria: a significant component in the food web dynamics of the open ocean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 28, 291-297.
- Jeffrey, S.W. and M. Vesik. 1997. *Introduction to marine*

- phytoplankton and their pigment signatures. p. 37-84. In: *Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods*. ed. by S.W. Jeffrey, R.F.C. Mantoura, and S.W. Wright. UNESCO, Paris.
- Jiao, N., Y. Yang, H. Koshikawa, and M. Watanabe. 2002. Influence of hydrographic conditions on picoplankton distribution in the East China Sea. *Aquat. 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, P.W. and J. McN. Sieburth. 1979. Chroococcoid cyanobacteria in the sea: A ubiquitous and diverse phototrophic biomass. *Limnol. Oceanogr.*, 24, 928-935.
- Joint, I.R. and A.J. Pomroy. 1986. Photosynthetic characteristics in the sea: a ubiquitous and diverse phototrophic biomass. *Mar. Biol.*, 92, 465-474.
- Kana, T.M., P.M. Glibert, R. Goericke, and N.A. Welschmeyer. 1988. Zeaxanthin and β -carotene in *Synechococcus* WH7803 respond differently to irradiance. *Limnol. Oceanogr.*, 33, 1623-1627.
- Karawada, Y., M. Kito, K. Furuhashi, and A. Sano. 1968. Distribution in the waters neighboring Japan in 1966 (CSK). *Oceano. fr. Mar.*, 20, 187-212.
- Latasa, M., R. Scharek, F. Le Gall, and L. Guillou. 2004. Pigments suites and taxonomic groups in Prasinophyceae. *J. Phycol.*, 40, 1149-1155.
- Legendre, L. and J. Le Fevre. 1995. Microbial food webs and the export of biogenic carbon in oceans. *Aquat. Microb. Ecol.*, 9, 69-77.
- Legendre, L. and J. Michaud. 1998. Flux of biogenic carbon in oceans: size dependant regulation by pelagic food webs. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 164, 1-11.
- Longhurst, A.R. 1991. Role of the marine biosphere in the global carbon cycle. *Limnol. Oceanogr.*, 36, 1507-1526.
- Mackey, M.D., D.J. Mackey, H.W. Higgins, and S.W. Wright. 1997. CHEMTAX User's Manual; a program for estimating class abundance from chemical markers-application to HPLC measurements of phytoplankton pigments CSIRO Marine Laboratories Report 229, Hobart. 41 p.
- Mantoura, R.F.C. and D.J. Repeta. 1997. Calibration methods for HPLC. p. 407-428. In: *Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods*. ed. by S.W. Jeffrey, R.F.C. Mantoura, and S.W. Wright. UNESCO, Paris.
- Marie, D., N. Simon, L. Guillou, F. Partensky, and D. Vault. 2000. Flow cytometry analysis of marine picoplankton. p. 421-454. In: *Living Colors: Protocols in Flow Cytometry and Cell Sorting*. ed. by R.A. Diamond and S. DeMaggio. Springer Verlag.
- Moore, L.R., R. Goericke, and S.W. Chisholm. 1995. Comparative physiology of *Synechococcus* and *Prochlorococcus*: influence of light and temperature on growth, pigments, fluorescence and absorptive properties. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 116, 259-275.
- Murphy, L.S. and E.M. Hagen. 1985. The distribution and abundance of phototrophic picoplankton in the North Atlantic. *Limnol. Oceanogr.*, 30, 47-58.
- Olson, R.J., S.W. Chisholm, E.R. Zettler, and E.V. Amburst. 1990. Pigment, size, and distribution of *Synechococcus* in the north Atlantic and Pacific Ocean. *Limnol. Oceanogr.*, 35, 45-58.
- Pan, L.A., L.H. Zhang, J. Zhang, M.G. 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.
- Partensky, F., J. Blanchot, and D. Vault. 1999. Differential distribution of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in oceanic waters: a review. p. 457-475. In: *Marine cyanobacteria*. ed. by L. Charpy and A.W.D. Larkum. Bull. L'Institut. Oceanogr. Monaco, Special No. 19.
- Platt, T., V. Subba-Rao, and B. Irwin. 1983. Photosynthesis of picoplankton in the oligotrophic ocean. *Nature*, 301, 702-704.
- Porter, K.G. and Y.S. Feig. 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnol. Oceanogr.*, 25, 943-948.
- Reckermann, M. and M.J.W. Veldhuis. 1997. Trophic interactions between picophytoplankton and micro- and nanozooplankton in the western Arabian Sea during the NE monsoon. *Aquat. Microb. Ecol.*, 12, 263-273.
- Schlüter, L., F. Mølenberg, H. Havskum, and S. Larsen. 2000. The use of phytoplankton pigments for identifying and quantifying phytoplankton groups in coastal areas: testing the influence of light and nutrients on pigment/ chlorophyll *a* ratios. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 192, 49-63.
- Six, C., J.C. Thomas, B. Btambahsha, Y. Lemoine, and F. Partensky. 2004. Photophysiology of the marine cyanobacterium *Synechococcus* sp. WH8102, a new model organism. *Aquat. Microb. Biol.*, 35, 17-29.
- Vault, D., N. LeBot, D. Marie, and E. Fukai. 1996. Effect of phosphorus on the *Synechococcus* cell cycle in surface Mediterranean waters during summer. *Appl. Environ. Microbiol.*, 62, 2527-2533.
- Vault, D. and X. Ning. 1988. Abundance and cellular characteristics of marine *Synechococcus* spp. in the

- dilution zone of the Changjiang (Yangtze River, China). *Cont. Shelf Res.*, 8, 1171-1186.
- Veldhuis, M.J.W. and G.W. Kraay. 2004. Phytoplankton in the subtropical Atlantic Ocean: towards a better assessment biomass and composition. *Deep-Sea Res. I*, 51, 507-530.
- Waterbury, J.B., S.W. Watson, R.R.L. Guillard, and L.E. Bland. 1979. Widespread occurrence of a unicellular, marine, planktonic, cyanobacterium. *Nature*, 277, 293-294.
- Wright, S.W., D.P. Thomas, H.J. Marchant, H.W. Higgins, M.D. Mackey, and D.J. Mackey. 1996. Analysis of phytoplankton of the Australian sector of the Southern Ocean: comparisons of microscopy and size frequency data with interpretations of pigment HPLC data using the 'CHEMTAX' matrix factorisation program. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 144, 285-298.
- Wright, S.W. and R.L. 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 pigment signatures. *Deep-Sea Res. II*, 47, 2363-2400.
- Zapata, M., F. Rodriguez, and J.L. 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. Ecol. Prog. Ser.*, 195, 29-45.
- Zhang, J., W.W. Huang, and M.G. Liu. 1994. Geochemistry of major Chinese river-estuary systems. p. 179-188. In: *Oceanology of China Seas*. ed. by D. Zhou, Y.B. Liang, and C.K. Zeng. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Received Jun. 30, 2005

Accepted Oct. 4, 2005