

2006년 여름 남해 동부 연안 식물플랑크톤 군집 변동

임월에* · 이영식 · 이삼근 · 이재영¹
국립수산과학원 남해수산연구소 양식환경연구센터
¹부산대학교 생명과학부

Distribution and Community Structure of Phytoplankton in the Southeast Coastal Waters During Summer 2006

WEOL-AE LIM*, YOUNG-SIK LEE, SAM-GEUN LEE AND JAE-YOUNG LEE¹

Aquaculture Environment Institute, NFRDI Tongyeong, Kyeongsangnamdo 650-943, Korea

¹Division of Biological Sciences, School of Natural Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

여름철 남해 동부해역 해양환경 변동에 따른 식물플랑크톤 군집의 단기변동을 연구하기 위하여 5차례에 걸쳐 11개 정점에서 현장관측을 실시하였다. 식물플랑크톤 군집의 변화에 영향을 미치는 환경요인인 수온, 염분, 영양염과 엽록소 *a*를 수심별로 조사하였으며 투명도와 강수량 자료도 이용하여 분석하였다. 조사기간 동안 총 63속 151종의 식물플랑크톤을 동정하였다. 이 중 규조류가 37속 92종으로 가장 우점하였으며, 와편모류가 22속 52종으로 그 다음을 차지하였다. 또한, 라피도조류 3속 6종, 유글레나류 1속 1종이 출현하였다. 7월 중순은 장마로 많은 영양염이 유입되어 규조류인 *Chaetoceros* 속이 대량 증식하였다. 8월 초는 가뭄으로 영양염이 감소하고 강한 수온약층이 형성되면서 *Chaetoceros* 속의 현존량이 급격히 감소하였다. 8월 하순에는 남해 외양수의 유입으로 표·저층의 수괴가 균질해지고 투명도 수심이 증가하였으며 식물플랑크톤 군집은 와편모류가 우점으로 나타났다. 9월 초는 다시 규조류 우점군집으로 천이하였으며, 외양수 유입현상도 소멸하였다. 2006년 우리나라 하계 남동해역은 1) 여름 갈수기가 이례적으로 극심하여 빈영양 상태가 지속되고, 2) 남해외양수 유입이 약하여 *C. polykrikoides* 적조가 비발생 하였으며 3) 외양수 영향으로 와편모류가 출현하였으나 곧 *Chaetoceros* 속이 재우점 하였다.

Short-term variations of phytoplankton community structure in the southeast coastal waters of Korea from July to September in 2006 were investigated with data set of phytoplankton, chemical and physical water properties, and meteorological data. A total of 11 sampling sites of 4 different depths (surface, 5 m, 10 m, and bottom) were visited on July 11-14, July 24-26, August 7-10, August 21-24 and September 5-8. We identified 151 species in 63 genera of phytoplankton in which diatoms were the most diverse group composed of 92 species in 37 genera. Dinoflagellates were the second diverse group of 52 species in 22 genera. The other groups include 7 species in 4 genera including Raphidophytes, and Euglenophyta. After rainy season, excessive nutrients from adjacent streams to the stratified water column proliferates *Chaetoceros* group in July. But biomass of phytoplankton and nutrient concentrations were decreased during the period of a drought in August. However, *Chaetoceros* was the most dominant genera in all depths of the first, second, third and fifth cruises, except the 4th cruise on August 21-24 when dominant group were dinoflagellates including *Gymnodinium* spp. and *Cochlodinium polykrikoides*. The characteristic of phytoplankton community and environment condition during summer 2006 can be summarized as: 1) low concentration of nutrients caused by a long lasting drought in August 2) no summer outbreak of *C. polykrikoides* because the strength of offshore waters was weak than other years, and 3) *Chaetoceros* spp. was the dominant species despite short period appearance of dinoflagellates.

Keywords: Phytoplankton, *Cochlodinium polykrikoides*, Diatom, Dinoflagellate

서 론

남해 동부해역은 남해연안수, 대마난류수, 황해난류수, 양자강수 등 특성이 서로 다른 수괴들이 접하는 해역으로 알려져 있다

*Corresponding author: limwa@nfrdi.re.kr

(나 등, 1990; 추와 김, 1998; 김, 2000). 특히, 여름철의 경우 대마난류를 포함한 남해외양수가 가장 연안 가까이 확장됨으로써 (박 등, 1998) 남해동부해역은 진해만 등의 내만해역에 비해 식물플랑크톤의 종수가 많아지고 편모조류의 비율이 낮아져 양식생물에게 좋은 먹이환경이 조성된다(박, 1980). 연구 해역은 삼면이 육

지로 둘러 쌓여 있고 남쪽해역만 외해와 연결되어 있는 지형학적 특성에 의해 안정된 수괴가 유지됨으로써 양식 활동의 적지로 인정되어 1970년대부터 어·패류 양식 산업이 매우 발달하였다(이 등, 1991; 최 등, 1997). 그러나 최근 양식장 이용의 장기화와 과밀화에 따라 양식생물의 폐사가 급증하고 있으나 그 원인은 정확히 규명되지 않고 있다(임 등, 1975; 조와 김, 1978; 조와 박, 1983; 권 등, 2005). 또한 여름철 대규모 적조발생에 따른 수산피해가 지속되어 매년 경제적 손실이 발생하고 있다(조, 1979; 최 등, 1997; 김 등, 2001).

1995년 대발생 이후 매년 여름철 남해 동부해역에 빈번히 발생하는 적조 중으로 알려진 *Cochlodinium polykrikoides*는 아열대성 외편모류로 쿠로시오 난류를 따라 우리나라 및 일본 해역으로 유입되며 연안해역에서 대규모 적조를 일으킨다(임, 2004). 지금까지의 연구 결과들을 종합하여 보면 *C. polykrikoides* 적조 발생은 외양수가 그 유입원(seed)으로 작용하고, 연안수와 외양수가 만나는 전선역에서 집적되어 성장·증식하여 적조가 형성된다(Lee & Kang, 2003; 임, 2004). 여름철 남해 동부해역에서 갑작스러운 투명도 증가와 수온약층 소멸현상이 나타나며, 이와 동시에 *C. polykrikoides* 적조가 발생하고 있다(정 등, 1999; 김 등, 1999). 또한, 이와 같은 수괴의 물리적인 변화는 식물플랑크톤 군집구조 변동과도 크게 연관이 있는 것으로 나타났다(정 등, 1999; 임 등, 2003). 해양환경 변동이 그 해의 적조 규모와 관계성이 있으며(서 등, 2003), 발생된 적조의 이동·확산은 바람, 강우와 태풍 등의 기상현상과 밀접한 관련이 있다(서 등, 2002; 임 등, 2002).

2000년 이후 우리나라의 여름철은 7월 장마 이후 8월에도 집중호우, 잦은 태풍의 내습 등 기상이변이 관측되고 있다(Chung et al, 2004). 이에 따라 여름철 발생하는 식물플랑크톤 대증식이 대규모화되며 고밀도로 나타나고 있다(국립수산과학원, 2002; 2005a; 2005b). 그러나 본 연구 기간인 2006년 여름은 평년에 비해 태풍이 발생하지 않았으며, 7월 중순 장마 이후 8월 동안 극심한 가뭄 현상이 있었다. 또한, 1995년 이후 매년 대규모 발생하던 *C. polykrikoides* 적조가 거의 발생하지 않은 예외적인 해로 기록되고 있다(국립수산과학원, 2007).

본 연구에서는 2006년 여름 예외적인 기상현상과 관련하여 1) 여름 장마와 가뭄이 해양환경과 식물플랑크톤 군집 변동에 어떠한 영향을 주었으며 2) *C. polykrikoides* 적조 비발생 원인은 무엇이며 3) 남해외양수 유입과 식물플랑크톤 군집 변동 사이에 어떤 관련이 있는지를 밝히기 위해 해당 해역 해양환경 요인의 수직 및 수평분포와 식물플랑크톤 군집에 관한 조사를 실시하였다.

재료 및 방법

통영을 중심으로 한 남해 동부 연안의 11개 정점에서 본 연구를 실시하였다(Fig. 1). 2006년 7~9월 동안 보름간격으로 7월 중순(7월 11~14일), 7월 말(7월 24~26일), 8월 초(8월 7~10일), 8월 말(8월 21~24일)과 9월 초(9월 5~8일) 총 5회 현장조사를 하였다. 각 조사 정점마다 표층, 5 m, 10 m와 저층(바닥에서 1 m 층)의 4개 수심에서 채수 하였다.

조사 정점의 수온, 염분의 수직분포 측정을 위해 CTD meter (IDRONAUT Srl 316 Plus)를 사용하였다. 영양염 분석은 Niskin

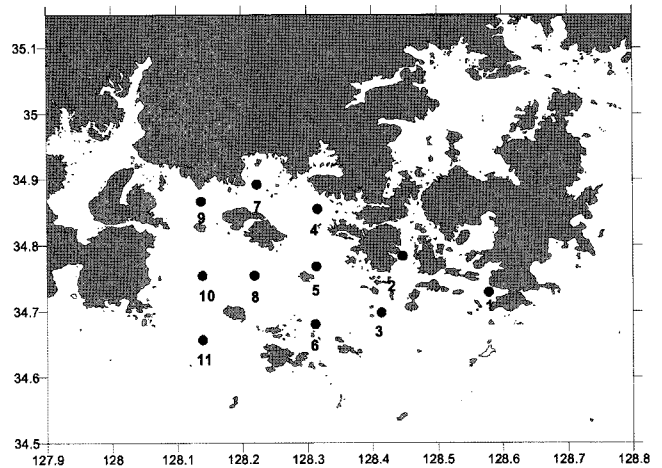


Fig. 1. Map showing the study area.

채수기를 이용하여 채수한 해수를 450 °C에서 태운 GF/F필터(Whatman)로 여과한 후 분석 전까지 -70 °C에서 냉동 보관하였다. 용존 무기영양염류의 측정은 Parsons et al.(1984)에 의해 기술된 분광광도법을 이용하여 용존무기질소(질산염, 아질산염과 암모니아), 인산염과 규산염을 측정하였다. Chlorophyll *a*(엽록소 *a*) 농도는 해수 500 m를 0.45 μm membrane filter로 여과 후, 90% acetone으로 엽록소를 24시간 추출하고 이를 분광광도계(UV-visible Spectrophotometer Varian Tech. Cary 300 Conc.)로 분석하였다. 투명도(transparency)는 직경 30 cm의 투명도판(secchi disk)을 이용하여 선상에서 육안으로 측정하였다.

식물플랑크톤 중 조성과 정량분석은 해수 1 l를 현장 채수하여 산성 Lugol 용액으로 고정한 후, 실험실로 옮겨 침전법에 의하여 농축하였다. 종동정은 Yamaji(1984)와 Tomas(1997)를 참고하여 동정하였다. 식물플랑크톤 군집분석을 위해 종다양성(diversity)은 Shannon-Wiener 지수(H'), 균등도(evenness)는 Pielou index를 사용하였다(Zar, 1984). 조사 시기에 따른 환경요인의 변동을 조사하기 위하여 일요인 분산분석(one-way ANOVA)법으로 각 조사시기의 환경요인들의 평균값 사이의 차이를 검정하고, Duncan의 사후분석(Post Hoc Multiple comparisons)을 수행하여 조사 시기에 따른 차이를 검정하였다(SPSS Inc., 2003). 식물플랑크톤 우점종은 총 출현 개체수의 순위를 정하고, 총 개체수 중 1% 이상 출현한 종을 우점으로 하였다.

결 과

환경요인 변동

2006년 8월 상순(1~15일)은 강수량이 총 0.1 mm로써, 1987년~2005년의 평균 강수량 113.9 mm과 비교해 볼 때 극한 가뭄 현상이 일어났다. 또한, 8월 중 태풍 통과도 없었으며, 8월 하반기(16~31일) 평균 강수량은 63 mm로 8월 하반기 평균 강수량 150.3 mm에 비교하여 매우 적은 강수량을 보였다(Fig. 2). 이와 같이 2006년 8월은 예년과 달리 매우 안정된 기상이 장기간 유지되었다.

조사 기간 동안 표층과 저층의 수온차가 가장 크게 나타난 시

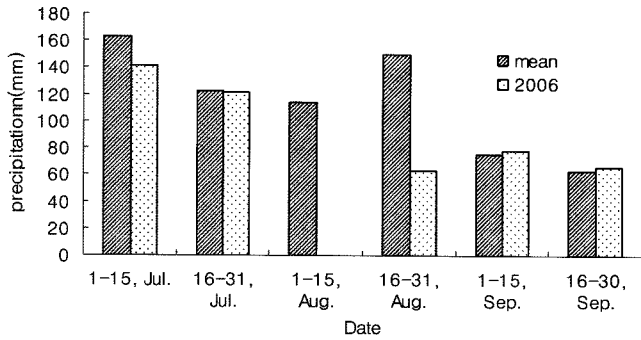


Fig. 2. The amount of precipitation of a half month in summer, 2006 compared with mean precipitation from 1987 to 2005.

기는 갈수기였던 8월 초였으며 이때 표층과 저층의 수온은 각각 $26.24 \pm 1.94^\circ\text{C}$ 와 $17.05 \pm 0.65^\circ\text{C}$ 의 분포를 보였다. 8월 말부터 표층과 저층의 수온차가 급격히 감소하여 9월 초는 표층과 저층의 수온이 각각 $25.68 \pm 0.90^\circ\text{C}$ 와 $24.29 \pm 1.36^\circ\text{C}$ 로 그 차이가 거의 없었다(Fig. 3A). 조사 시기에 따른 표층수온은 8월 말에 가장 높았으며, 7월 중·하순에 낮게 나타났다. 염분의 경우, 장마기였던 7월 중순에 표·저층 염분이 각각 29.20 ± 2.60 , 32.90 ± 0.37 psu로 크게 차이가 나타났으나, 갈수기인 8월 초에 표·저층 염분이 각각 31.3 ± 0.50 와 33.98 ± 0.19 psu였다. 그러나 9월 초는 표층 31.46 ± 0.26 psu와 저층 31.89 ± 0.46 psu로 염분 차가 거의 나타나지 않았다(Fig. 3B). 조사 시기에 따른 표층 염분은 7월 중순과 말에 가장 낮게 나타났으나, 8월과 9월 초는 비슷하게 나타났다. 투명도는 8월 말에 6.6 ± 1.7 m로 가장 깊었으며, 7월 중순에 3.2 ± 0.9 m로 가장 얇게 나타났다(Fig. 3C).

Fig. 4는 용존 무기영양염 중 용존 무기질소(DIN), 인산염(DIP)과 규산염의 농도 변화를 보여준다. 용존 무기질소의 경우, 8월 말과 9월 초에 2.94 ± 0.44 , $3.55 \pm 0.77 \mu\text{M}$ 로 가장 낮게 나타났다. 저층의 용존 무기질소는 7월 말과 8월 초 가장 높았으며, 8월 말 가장 낮은 농도를 보였다. 인산염은 7월 중순에 전 수층에서 가장 높은 농도를 보였으며, 8월 초와 9월 초 가장 낮은 농도를 보였다(Fig. 4B). 규산염의 경우 용존 무기질소와 같이 전 조사 기간 중 장마시기인 7월 중순 표층에서 가장 높은 농도($21.4 \pm 6.51 \mu\text{M}$)를 보였으며, 7월 말과 8월 초 가장 낮은 농도를 보였다. 반면, 저층 규산염은 8월 초 $21.55 \pm 2.77 \mu\text{M}$ 로 가장 높은 농도를 보였다(Fig. 4C).

식물플랑크톤 군집 변동

조사 기간 동안 총 63속 151종의 식물플랑크톤을 동정하였으며, 이 중 규조류는 37속 92종, 외편모류는 22속 52종, 라피도조류는 3속 6종, 유글레나류는 1속 1종을 동정하였다. 동정한 식물플랑크톤 중 규조류가 약 48.2%를 차지하여 가장 우점 하였으며, 외편모류는 26.2%를 차지하여 두 번째로 높은 점유율을 보였다. 조사 시기별 식물플랑크톤의 군집 조성은 7월 중순 100종(규조류 31속 62종, 외편모류 16속 35종, 라피도조류 3속 3종), 7월 말 91종(규조류 27속 63종, 외편모류 13속 27종, 유글레나류 1속 1종), 8월 초 106종(규조류 26속 64종, 외편모류 17속 38종, 라피도조류 1속 3종, 유글레나류 1속 1종), 8월 말 66종(규조류 20속 24종, 외편모류 18속 36종, 라피도조류 2속 5종, 유글레나류 1속 1종), 그

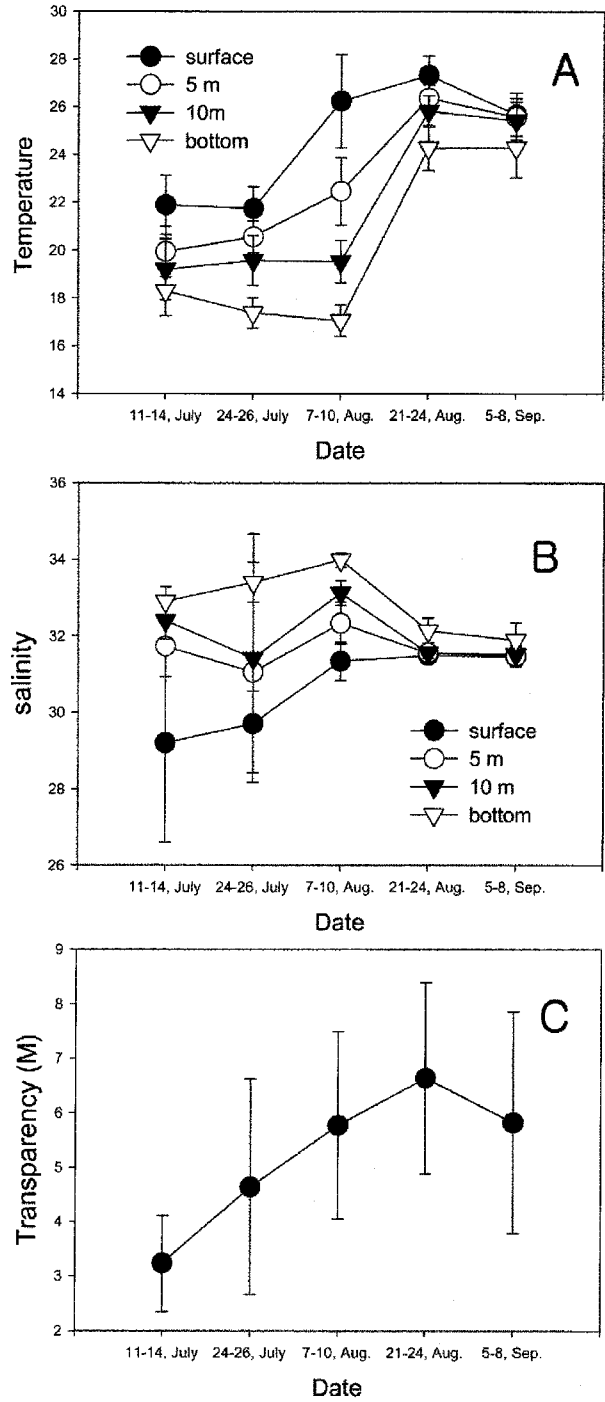


Fig. 3. The vertical distributions of mean water temperature, salinity (A, B) and mean transparency depth (C) in each survey.

리고 9월 초는 92종(규조류 29속 64종, 외편모류 17속 27종, 유글레나류 1속 1종)으로 나타났다(Fig. 5).

조사 시기에 따른 식물플랑크톤의 종다양성지수(species diversity index, H')를 살펴보면 8월 말은 3.0으로 다른 조사 1.8~1.9에 비하여 높게 나타났으며, 균등도지수도 8월 말이 0.47로 0.16~0.19의 범위를 가지는 나머지 조사와는 달리 높았다(Fig. 6).

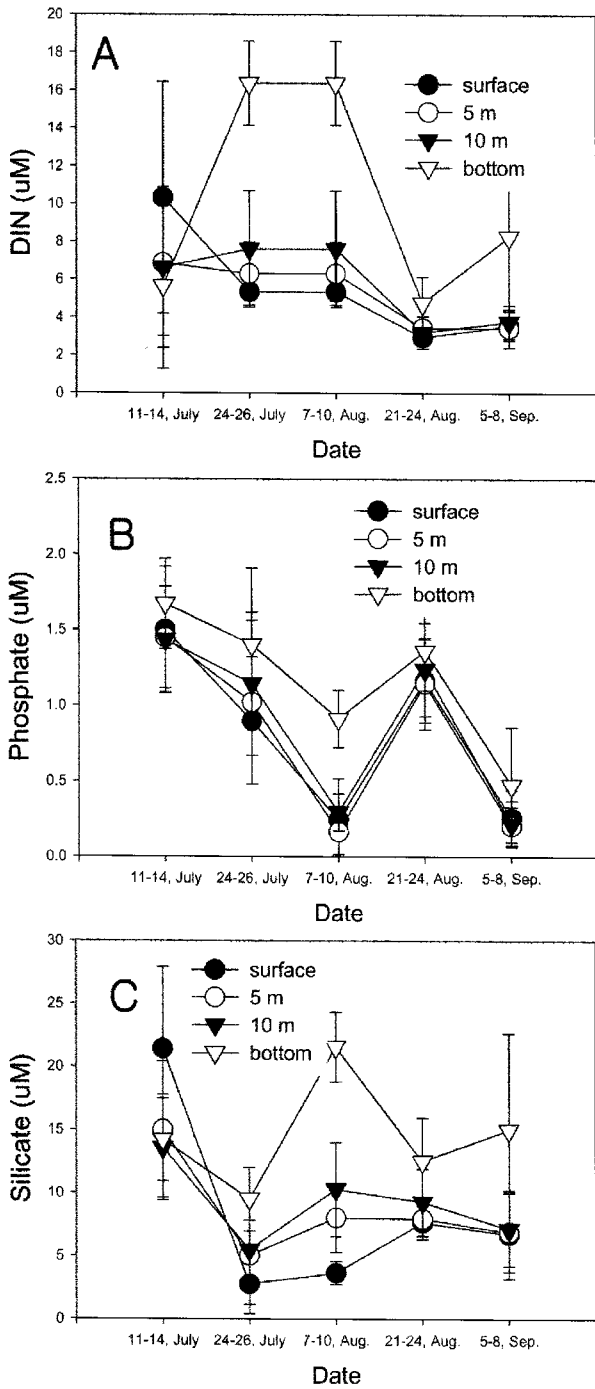


Fig. 4. The vertical distributions of mean concentration of DIN, DIP and silicate in each survey.

수층별 식물플랑크톤 우점종은 7월 중순에 표층은 미 동정된 소형 편모류가 35.1%로 우점을 나타내었으나, 5 m 이하의 수심에서는 *Chaetoceros* spp.가 17.5~24.5%로 우점을 차지하였다. 7월 말과 8월 초 모두 *Chaetoceros* spp.가 31.6%~65.2%로 조사 수층에서 극우점으로 나타났다. 8월 말은 규조류가 아닌 외편모류인 *Gymnodinium* spp.가 표층과 10 m에서 38.6와 21.5%로 우점이었으며, 5 m 수심에서는 *Cochlodinium polykrioides*가 39.2%로 우

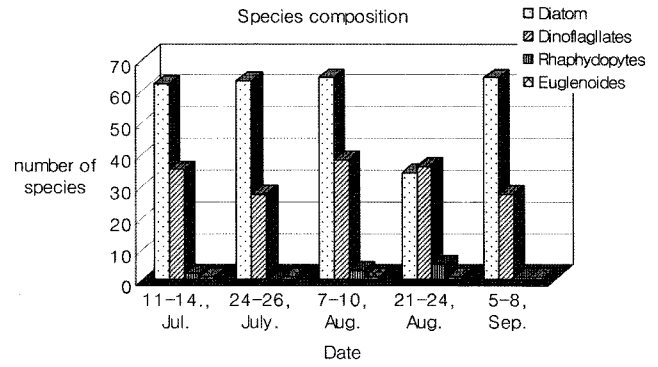


Fig. 5. The compositions of phytoplankton species in each survey.

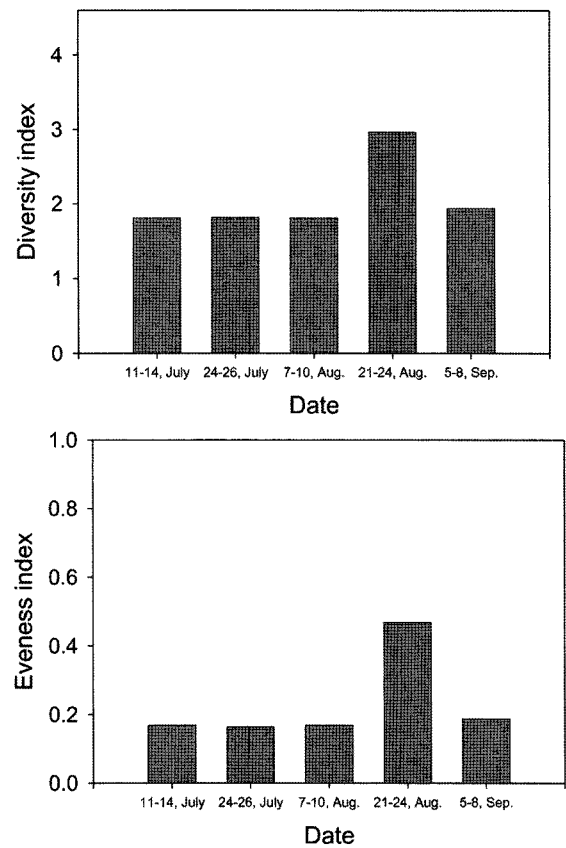


Fig. 6. The species diversity and evenness of phytoplankton in each survey.

점하였으나 저층에서는 *Nitzschia* spp.가 우점종(19.5%)이었다. 9월 초는 *Chaetoceros* spp.가 표층에서 33.1%로 우점 하였고, 5 m 이심에서는 *Ch. curvisetum*이 29.3~37.8%로 우점으로 출현하였다 (Fig. 7).

표층 엽록소 *a*의 농도변화를 살펴보면(Fig. 8A) 7월 말 $6.34 \pm 4.72 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 가장 높았으며 나머지 조사시간에서는 차이를 나타내지 않았다. 영양염 농도분포와는 달리 저층 엽록소 *a*의 양은 9월 초에 $2.05 \pm 0.96 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며, 7월 중순과 8월 말에 0.83 ± 0.12 , $1.37 \pm 0.83 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 낮게 나타났다. 식물플랑크톤의 조사시기별 표층 평균 세포수는 7월 말 표

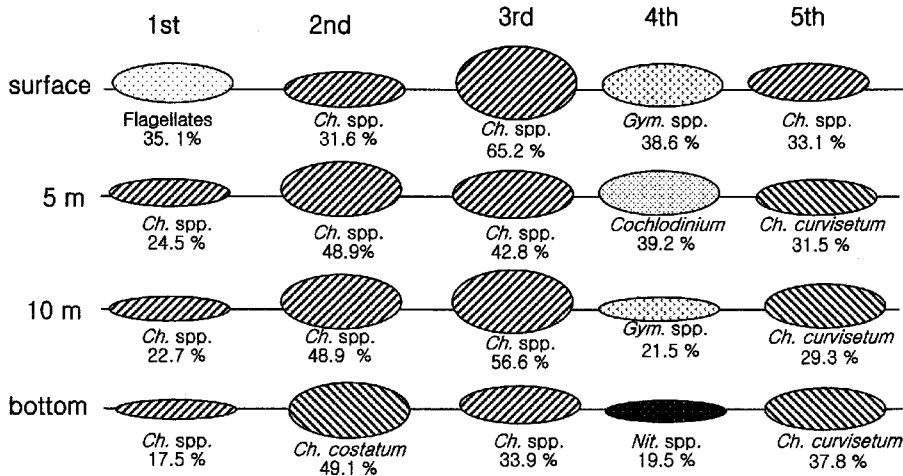


Fig. 7. Dominant species of phytoplankton in surface, 5 m, 10 m and bottom in study period.

층이 2628 ± 1215 cells ml^{-1} 로 가장 높았고 4차 조사에서 가장 낮은 17 ± 4 cells ml^{-1} 로 나타났다. 그러나 저층은 영양염 분포와 달리 8월 초와 9월 초에 298 ± 170 cells ml^{-1} , 380 ± 161 cells ml^{-1} 로 높게 나타났다.

엽록소 a의 수평분포를 보면(Fig. 9) 대체적으로 연안을 중심으로 높은 농도를 보이고 있다. 조사시기별 수평분포의 변동을 살펴보면 7월 중순과 8월 초에 표층 엽록소 a는 $5 \sim 8 \mu g l^{-1}$ 를 나타내었으나, 8월 21-24일 조사에서는 $1 \mu g l^{-1}$ 이하의 매우 낮은 농도를 보였다.

C. polykrikoides 유영세포의 수평분포를 보면, 7월 말부터 외측(육지도) 해역을 중심으로 사량도 연안으로 유입되는 분포를 보였다. 그러나 3차 조사에서 다소 외측으로 물러난 듯이 보이며 개체수 밀도도 100 cells l^{-1} 로 감소하였다. 표·저층 수괴가 혼합된 8월 말은 남해도 동측해역을 중심으로 $1,000$ cells l^{-1} 이상의 분포를 보였다.

조사 시기에 따른 투명도의 수평분포를 보면(Fig. 11) 장마시기인 7월 중순 가장 낮았으며, 표·저층 수괴가 균질화된 시기인 8월 말에 7~8 m 이상의 높은 투명도 수심을 나타내었다.

토 의

여름철 강우로 인한 담수의 유입은 수괴 내에 성층을 형성하며, 식물플랑크톤에 의해 영양염이 완전히 소비될 때까지 사용된다(Smayda, 1997). 우리나라는 몬순 기후의 영향으로 7월 장마 동안 많은 영양물질이 유입되어 식물플랑크톤의 대량 증식이 발생한다고 알려져 있다(김, 1989; Lee et al., 1994; Kang et al., 1999). 본 연구에서도 7월 전·중반기 장마로 인해 영양염이 다량 유입되어(Fig. 4), 7월 하반기에 식물플랑크톤이 높은 현존량을 보였으며(Fig. 8), 규조류인 *Chaetoceros* 속이 극우점으로 출현하였다(Fig. 7). 우리나라 여름철 남해 동부해역에서는 *Chaetoceros* 속이 극우점으로 출현하며, 최고 중수가 나타나며(최, 1967), 식물플랑크톤 중수가 내만해역에 비해 풍부하다(박, 1980). 박과 이(1990)는 우리나라 여름철 남해 외해역에서 식물플랑크톤 군집 조사 결과 67종 이상의 종이 출현하였으며 우점종은 *Chaetoceros* 속으로 나타난다고 보고하였다. 이러한 결과들은 여름철 장마 후 남해 동부 연안은 *Chaetoceros* 속이 우점하며 높은 현존량을 보이는 본 조사 결과와도 일치하였다.

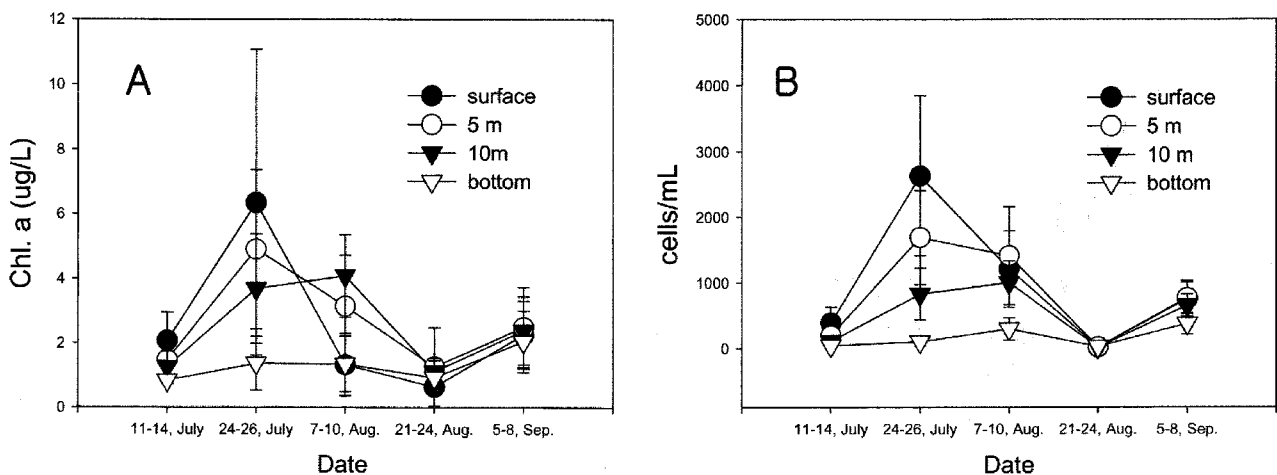


Fig. 8. The mean concentration of chlorophyll a and the mean amount of phytoplankton cells in surface, 5 m, 10 m and bottom during study period.?

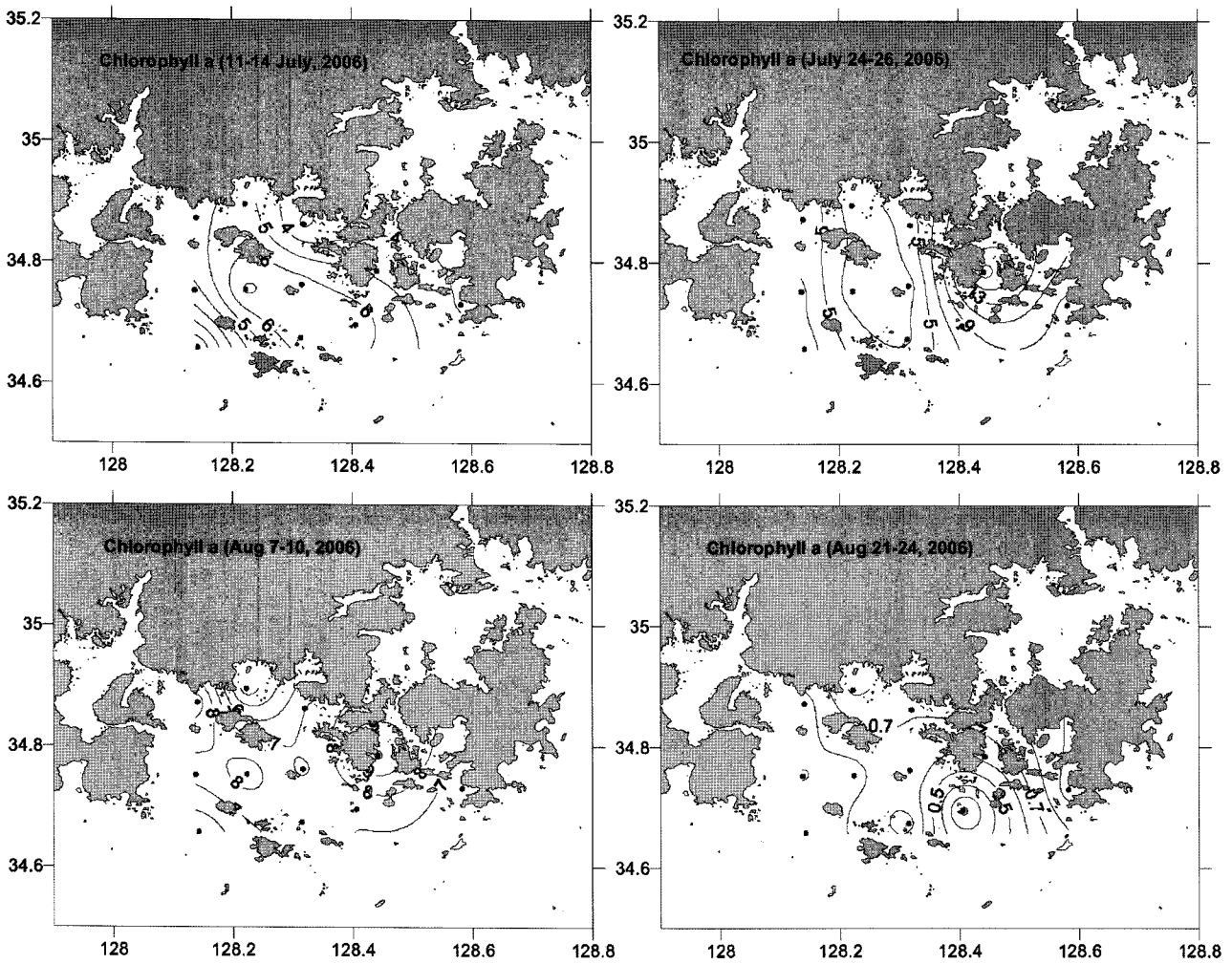


Fig. 9. The horizontal distribution of cells of *Cochlodinium polykrikoides* in study period.

8월 초 일사량 증가와 보름이상의 극심한 여름가뭄(Fig. 2)은 표·저층 수온이 10 °C 이상 나는 강한 수온성층을 형성하여 안정된 수괴를 유지하였다(Fig. 3A). 수온약층 상부의 제한된 공간에서 영양염의 급격한 감소는 7월 말 조사에서 관찰된 높은 규조류 현존량으로 설명되어 진다. 영양염 종류에 따라 감소 경향은 다소 차이가 있으나 Fig. 4와 Fig. 8에는 제한된 영양염이 식물플랑크톤의 증식에 따라 감소하는 양상이 잘 나타나 있다. 식물플랑크톤의 성장에 사용되는 용존 무기영양염의 감소에 따른 식물플랑크톤 현존량의 급속한 감소에도 불구하고 식물플랑크톤 군집은 규조류인 *Chaetoceros* 속이 지속적으로 우점 하였다. 7월 말과 8월 초 저층에서 관측한 높은 영양염은 저층 퇴적물에서 용출된 영양염이 강한 수온약층 때문에 상부수괴와 혼합되지 못하여 높은 농도를 보인 것으로 생각된다. 8월 말은 수온, 염분 뿐 아니라 표·저층 영양염도 균질화 되는 경향을 보였으며, 외편조류가 우점한 수괴 상부와 달리 하부에는 높은 규산염 농도와 더불어 규조류인 *Nitzschia* spp가 우점으로 출현하였다(Fig. 4, Fig. 7).

2000년 이후 여름철은 지구온난화의 영향으로 집중호우와 태풍이 자주 내습하는 기상이변을 보여 왔다(Chung *et al.*, 2004; Dore,

2005). 이에 따라 연안해역은 육상기원 부영양화 물질들이 다량 유입되어 적조가 장기간 발생하고 있다(임 등, 2002). 본 연구에서는 최근 기상 경향과는 달리 극한 가뭄으로 인한 수온약층 상부의 빈영양화와 식물플랑크톤 현존량의 감소가 두드러지게 나타났다.

남해~옥지~사량~거제해역인 남해 동부 연안에서는 여름철 특히 8월에 맑고 투명한 수괴가 출현하고 있어 어민들은 이를 종종 청수로 부르고 있다. 그러나 이 수괴는 내만의 청수와는 달리 정상적인 용존산소를 가지고 있어 수산피해를 일으키지 않는 것으로 알려져 있으며 이러한 급작스러운 수괴의 변화는 대마난류가 연안으로 강하게 유입되기 때문으로 추정하고 있다(국립수산과학원, 2000). 대마난류수를 포함하는 남해 외양수의 유입은 우리나라 연안해역에서 투명도 수심의 변화를 발생시키고 있으며, 4, 5월에 가장 낮고 8, 9, 10월에 가장 깊은 것으로 알려져 있다(박 등, 1998). 특히 *C. polykrikoides* 적조 발생 직전에 가장 깊은 투명도 수심이 나타나며, 동시에 수괴의 표·저층이 균질해지고 식물플랑크톤 양이 급격히 감소하는 현상이 나타난다(김 등, 1999; 정 등, 1999; 이 등, 2001; 임 등, 2003). 본 연구에서도 8월 하순에 위에서 언급한 물리적 현상들이 발생하였으며(Fig. 3; Fig. 11), 각 조

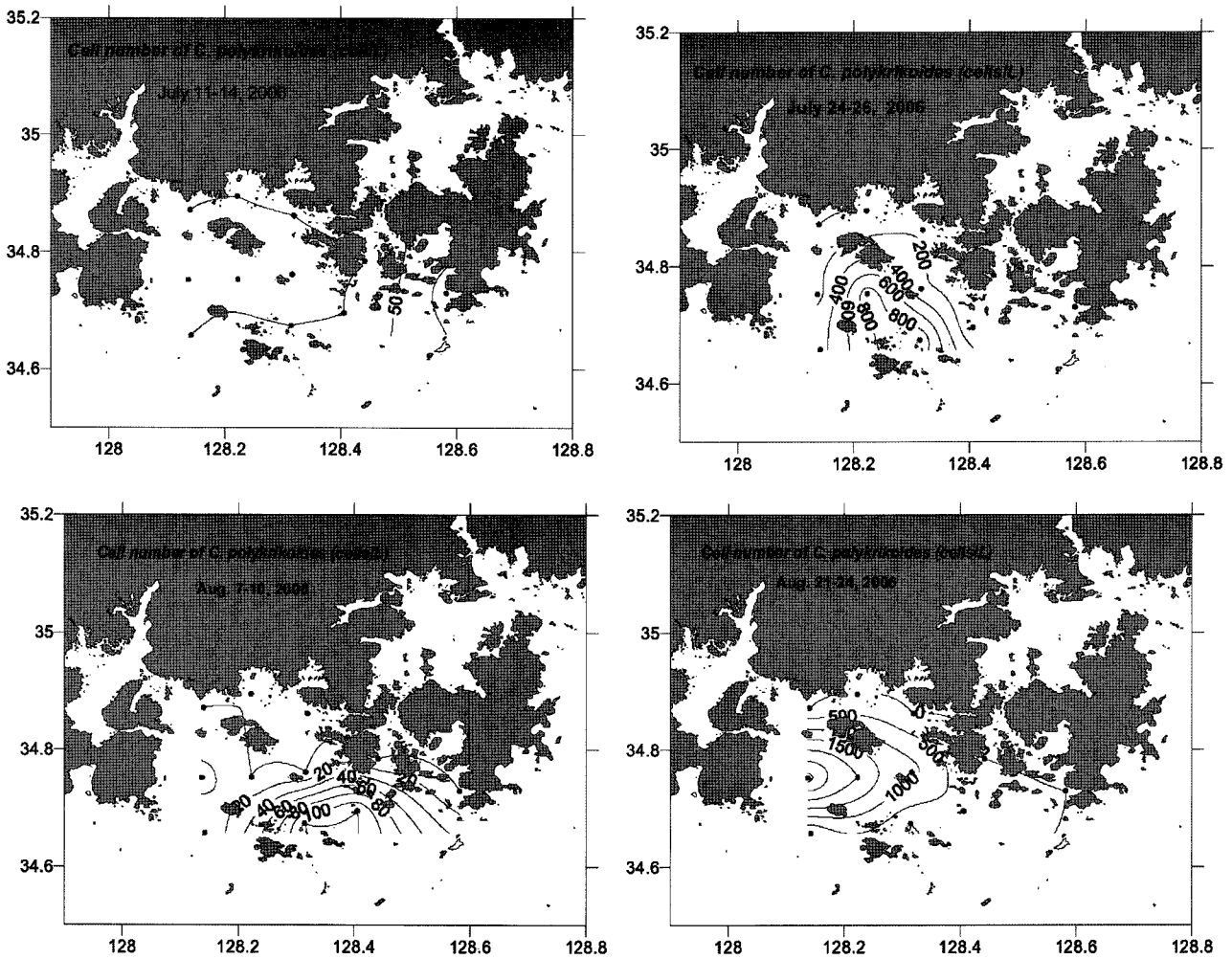


Fig. 10. The Horizontal distribution of *Cochlodinium polykrikoides* during the period of July 12-14, July 24-26, August 7-10 and August 21-24, 2006.

사 시기별 투명도의 수평분포는 바깥해역에서 연안으로 갈수록 투명도가 낮아지는 현상이 뚜렷하였고, 수괴의 균질화가 일어난 8월 말에 외측부터 연안까지 전체해역이 깊은 투명도 수심을 보였다.

C. polykrikoides 적조는 지금까지 연구 결과를 볼 때 부영양화에 의해 발생하는 적조와 다른 발생 기작을 가진다(정 등, 2000; 양 등, 2000; 최, 2001; 이 등, 2001; Lee & Kang, 2003; 임 2004). 여름철 강한 남해외양수의 유입은 연안가까이에 연안수와 남해외양수의 경계가 되는 수온전선대가 형성되며, 남해외양수와 함께 유입된 *C. polykrikoides* 유영세포들이 전선대에 집적된다. 이 전선역에서 *C. polykrikoides*는 생태적 적응전략으로 다른 식물플랑크톤에 비해 난류(turbulence) 등의 물리적 충격을 극복하면서 긴 체인을 형성하여 성장, 적조로 나타난다고 알려져 있다. 8월 초의 *C. polykrikoides*의 유영세포의 출현량은 본 조사 기간에서는 1 cells ml^{-1} 이하로 2000년 18-54 cells ml^{-1} (임, 2004), 2007년 200 cells ml^{-1} 이상(미발표)으로 비교하여 매우 낮은 것으로 나타났다. 최대 투명도 수심이 $6.6 \pm 1.7 \text{ m}$ 로, *C. polykrikoides* 적조가 대규모로 발생한 2007년의 최대 투명도(본 연구와 동일한 11개 정점 평균, $7.7 \pm 2.8 \text{ m}$) 보다 낮았다(미발표). 이는 남해연안수와 대마난류

수 사이에 형성되는 수온전선대가 평년보다 수십 마일 외해 쪽에 형성되어 외해수가 연안 가까이 접근하지 못하여 적조 발생이 미약했던 것으로 추정한다(국립수산과학원, 2007) 결과와도 일치한다. 또한 한 등(2006)도 2006년은 강한 수온성층, 태풍이 없는 안정된 기상유지 및 평년보다 외해쪽에 형성된 수온전선대의 영향으로 *C. polykrikoides* 적조가 발생하지 않았던 것으로 설명하였다. Fig. 10 과 Fig. 11에서 보듯이 투명도 수심이 깊은 곳에서 *C. polykrikoides*의 유영세포의 출현이 높게 나타나는 경향을 보였다. 7월 말 육지~사량도 해역에서 *C. polykrikoides* 밀도가 높았으며 이때 투명도가 7 m 이상인 것으로 나타났다. 8월 말 남해도 동측해역을 중심으로 *C. polykrikoides*가 높은 농도를 보인 해역과 투명도 수심이 깊은 해역이 일치하였다. 이와 같은 결과는 *C. polykrikoides*의 출현과 외해수 유입이 높은 상관성을 보인다는 앞선 언급들과 일치한다. 염록소 a의 수평분포는 연안해역을 중심으로 높은 농도를 보이거나(Fig. 9), 이 값들은 *C. polykrikoides* 유영세포의 수평분포와는 어떠한 경향성도 보이지 않았다. 이는 *C. polykrikoides*가 전체 식물플랑크톤 양에 비해 그 양이 많지 않았음을 의미한다. 2006년 남해동부 연안해역에서 *C. polykrikoides* 적조가 8월 26일 사

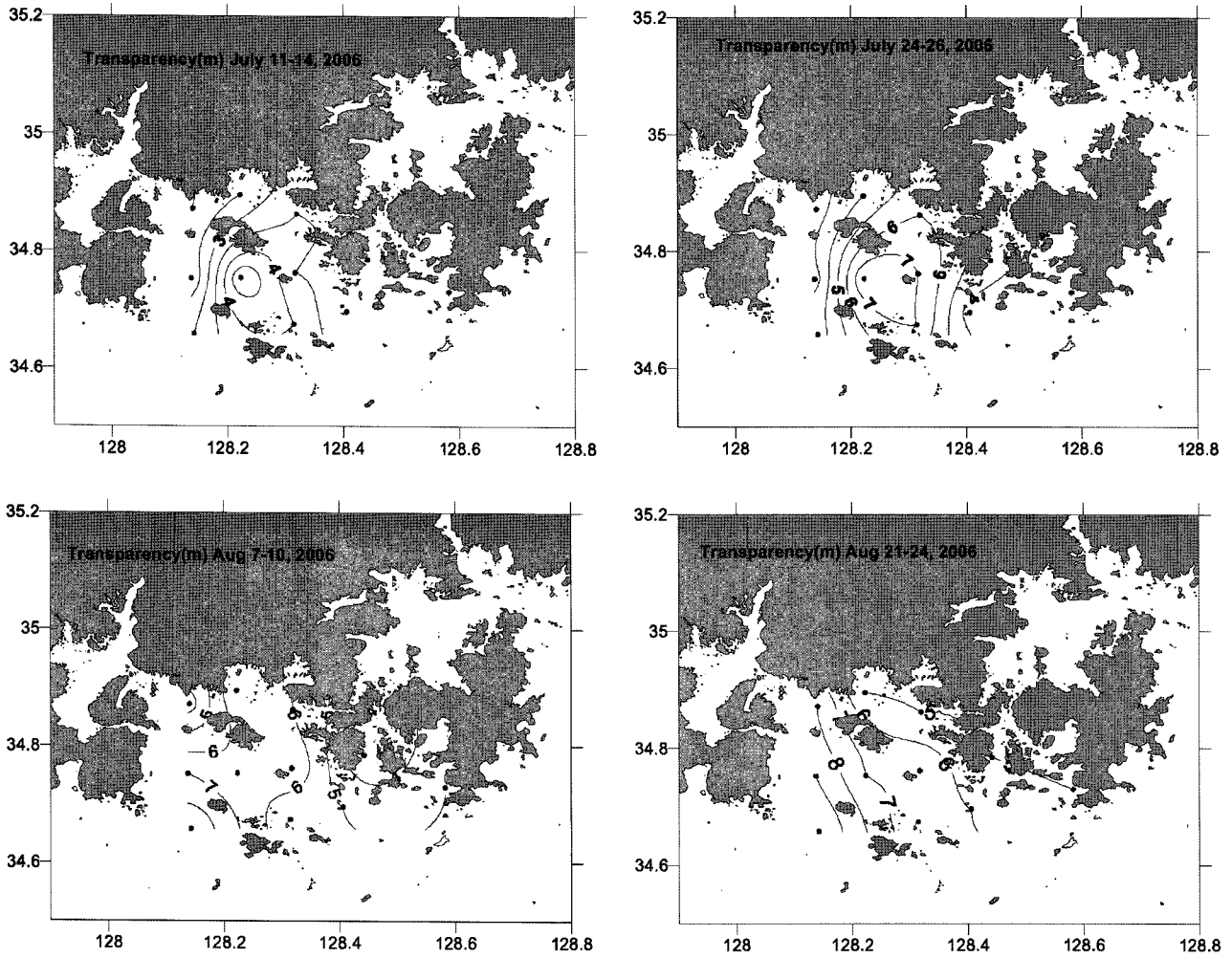


Fig. 11. The Horizontal distribution of transparency during the period of July 12-14, July 24-26, August 7-10 and August 21-24, 2006.

량도 부근해역에서 소규모($60\sim 1,450\text{ cells ml}^{-1}$)로 발생하였다가, 2~3일 만에 소멸하였다(국립수산과학원, 2007).

8월의 빈영양화 된 해역에 남해 외양수의 유입은 해양환경의 물리·화학·생물학적 변화를 초래하였다. 육상으로부터 질소성분의 유입이 없어 영양염 농도가 지속적으로 감소하고 외양수의 유입 후에 더욱 감소되는 양상을 보였다. 인산염의 경우 외양수 유입시기에 갑작스런 증가 현상이 나타났으나, 다시 급격한 감소를 보였다. 규산염의 수직분포는 표·저층 수괴의 혼합이 저층의 규소성분을 표층수와 혼합시키는 역할을 했음을 나타내나 정확한 해석을 위해서는 좀 더 조류성장잠재력 등의 추가적인 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 보인다. 남해외양수는 계절과 연도에 따라 역동적으로 변화하며, 특히, 영양염은 비보존적 성질을 지녀 생물에 의한 변화가 쉽게 발생하므로 그 변화양상을 한마디로 정의하기가 매우 어렵다(이, 1999). 그러나 낮은 영양염 농도는 규조류에 비해 상대적으로 낮은 성장률을 가지는 와편모류의 성장에 유리하였던 것으로 보이며, 규소성분은 와편모류의 성장에는 사용되지 않는다는 것을 8월 말과 9월 초 표층에서 증가된 규소농도를 통해서 알 수 있었다(Fig. 4).

C. polykrioides 적조발생 전후의 남해 동부해역은 식물플랑크톤 군집이 단순화되며 현존량이 낮아지고 와편모류의 증가가 두드러진다(임 등, 1999; 김 등, 1999; 정 등, 1999; 강 등, 2003). 그러나 *C. polykrioides* 적조 발생기를 제외하고는 대부분 규조류가 우점한 결과를 나타내었다. 본 연구에서는 151종의 식물플랑크톤이 출현하였으며, 앞선 결과들보다 다양한 종 출현을 보였다. 그러나, *C. polykrioides* 적조가 발생한 8월 말은 종다양성지수, 군등도지수가 다른 시기에 비해 높았고, 종풍부도는 낮았다(Fig. 6). 8월 말은 앞선 물리자료들을 볼때 외양수인 다른 수괴가 유입되어 일시적으로 외양수에 포함된 와편모류가 우점 하였으나, 외양수의 세력이 약화된 9월 초에는 다시 연안의 식물플랑크톤 군집으로 천이한 결과를 보였다. 8월 하순 조사결과 표층에서는 *Gymnodinium* spp. (상대적 출현양 38.6%), *Prorocentrum micans*(11.7%), *C. polykrioides* (6.4%), 5 m층에서는 *C. polykrioides*(39.2%), *Gymnodinium* spp. (21.3%), *Chattonella antiqua*(4.2%)이 출현하였으며(본 논문에서는 미세시), 이때의 출현농도는 $0.4\sim 8.4\text{ cells ml}^{-1}$ 로 매우 낮았다(Fig. 8). 9월 초순 식물플랑크톤 군집이 다시 와편모류에서 규조류의 우점으로 다시 천이되었다(Fig. 6).

본 연구결과, 2006년은 이례적으로 여름 갈수기가 극심하여 성층의 발달이 두드러졌으며, 수온약층 상부의 빈영양 상태가 지속되어 식물플랑크톤의 현존량이 급격히 감소하였다. 또한 8월 말 남해외양수의 유입으로 식물플랑크톤의 군집이 규조류에서 외편모류로 천이되었다. 이 남해외양수는 예년에 비해 그 세력이 약하여 *C. polykrikoides*의 연안으로의 집적이 원활하지 못하였으며 이로 인한 적조발생이 일어나지 않았다. 또한 약한 외해수의 유입은 단기간에 원래의 우점식물플랑크톤 군집인 *Chaetoceros* 속으로 천이 할 수 있었다.

감사의 글

본 논문의 심사를 통해 귀중한 조언을 해주신 박종규 교수님과 한분의 심사위원님께 감사드립니다. 본 논문은 국립수산과학원(RP-2007-ME-012) 남해 해양환경 연구사업으로 운영되었으며, 현장조사에 적극 협조해주신 탐구 10호 승무원과 연구원 설영화님과 김정동님께 감사드립니다.

참고문헌

- 강양순, 권정노, 손재경, 정창수, 홍석진, 공재열, 2003. 2002년 통영연안의 적조발생전후의 식물플랑크톤 군집구조의 특성. 한수지, **36**: 515-521.
- 국립수산과학원, 2000. 해양환경 정보 총람. pp. 346.
- 국립수산과학원, 2002. 2000~2001년도 한국연안의 적조발생 상황. pp. 158.
- 국립수산과학원, 2005a. 2004년도 한국연안의 적조발생 상황. pp. 95.
- 국립수산과학원, 2005b. 2005년도 한국연안의 적조발생 상황. pp. 149.
- 국립수산과학원, 2007. 2006년도 한국연안의 적조발생 상황. pp. 97.
- 권정노, 정래홍, 강양순, 안경호, 이원찬, 2005. 수치모델을 이용한 해상어류가두리양식장의 환경관리 방안. 한국해양학회지 "바다", **10**: 181-195.
- 김동수, 2000. 한국 남해 중부연안 어장에서 수괴의 계절 변화. 한국어업기술학회지, **36**: 105-116.
- 김학균, 1989. 마산만의 편모조적조발생과 환경특성. 수진연구보고, **43**: 1-40.
- 김학균, 최우정, 정영균, 정창수, 박종수, 안경호, 백철인, 1999. 나로도 인근해역에서 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초발생과 환경특성. 수진연구보고 **57**: 119-129.
- 김학균, 정창수, 임월에, 이창규, 김숙양, 윤성화, 조용철, 이삼근, 2001. 한국연안의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생과 변천. 한수지, **34**: 691-696.
- 나정렬, 한상규, 조규대, 1990. 한반도 근해의 해류와 해수 특성, 남해연안수 확장파 수온변화. 한수지, **23**: 267-279.
- 박종규, 심재형, 이준백, 1998. 한국 동해남해역 식물플랑크톤 생물량의 장기간 변동과 의미. *Algae* **13**: 123-133.
- 박주석, 1980. 한국 남해안의 식물성 plankton의 출현량 및 조성 과 이들이 먹이와 적조로서 양식생물에 미치는 영향. 수진연구보고, **23**: 7-92.
- 박주석, 이삼근, 1990. 한국남해의 식물플랑크톤의 분포와 수괴특성. 한수지, **23**: 208-214.
- 서영상, 김동순, 김복기, 이동인, 김영섭, 김일근, 2002. 태풍통과에 따른 한국 연근해 수온변동. 환경과학회지, **11**: 627-636.
- 서영상, 장이현, 김학균, 2003. *C. polykrikoides* 적조의 시공간분포와 대규모 해양환경 변동간의 관계성. 한국지리정보학회지, **6**: 139-150.
- 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규, 2000. 전남 고흥해역의 유해성 적조의 발생연구: 1. 물리화학적 특성. 한국해양학회지 "바다", **5**: 16-26.
- 이동섭, 1999. 여름과 겨울철 남해의 영양염 분포 특성. 한국해양학회지 "바다", **4**: 371-382.
- 이병돈, 강형구, 강용주, 1991. 굴 양식장 수역의 기초생산 연구. 한수지, **24**: 39-51.
- 이영식, 박영태, 김영숙, 김귀영, 박종수, 고우진, 조영조, 박승윤, 2001. *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생기작과 대책 1. *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 소멸의 환경특성. 한국해양학회지 "바다", **6**: 259-264.
- 임두병, 조창환, 권우섭, 1975. 충무부근 굴 양식어장의 환경에 관하여. 한수지, **8**: 61-67.
- 임월에, 최우정, 박영철, 엄기혁, 1999. 통영주변해역의 *Cochlodinium* 적조발생시의 식물플랑크톤과 해양세균의 종 조성 변화. 수진연구보고, **57**: 145-151.
- 임월에, 정창수, 이창규, 조용철, 이삼근, 김학균, 정익교, 2002. 2000년 여름 남해안에 나타난 *Cochlodinium polykrikoides* 우점적조의 발생 특성. 한국해양학회지 "바다", **7**: 68-77.
- 임월에, 강창근, 김숙양, 이삼근, 김학균, 정익교, 2003. 여름철 남해도 연안 식물플랑크톤 군집구조의 단기변화. *Algae*, **18**: 49-58.
- 임월에, 2004. 한국 남해안의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생과정에 관한 연구. 부산대학교 대학원 박사학위 논문, pp. 119.
- 조창환, 김용술, 1978. 굴양식장의 환경에 관한 연구. 한수지, **11**: 243-247.
- 조창환, 박경양, 1983. 고성자란만 패류양식장 저니의 부영양화. 한수지, **16**: 260-264.
- 조창환, 1979. 1978년 진해만 적조와 양식굴의 대량폐사. 한수지, **12**: 27-33.
- 정해진, 박종규, 최현용, 양재삼, 심재형, 신윤근, 이원호, 김형섭, 조경재, 2000. 전남고흥해역의 유해성 적조의 발생연구 2. 1997년도 식물플랑크톤의 시공간적 변화. 한국해양학회지 "바다", **5**: 27-36.
- 정창수, 최우정, 김학균, 정영균, 김정배, 임월에, 1999. 1998년도 남해도 인근수역의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 동물성플랑크톤의 분포특성. 수진연구보고, **57**: 153-161.
- 추효상, 김동수, 1998. 한국 남해의 대마난류 변동이 멀치 난자어의 연안역 수송에 미치는 영향. 한수지, **31**: 226-244.
- 최상, 1967. 한국해역의 식물플랑크톤에 관한 연구II. 한국연안수역의 식물플랑크톤. 한국해양학회지, **2**: 1-12.
- 최우정, 전영열, 박정흠, 박영철, 1997. 한산거제만의 환경특성이 양식 굴의 비만에 미치는 영향. 한수지, **30**: 794-803.
- 최현용, 2001. 한국 남해 나로도도 소리도 사이 해역의 1998년 하계 해황 및 적조소멸과의 관계. 한국해양학회지 "바다", **6**: 49-62.
- 한인성, 권기영, 성기탁, 서영상, 이윤, 이지연, 2006. Oceanic condition change around the Korean peninsula related with HAB in summer, 2006. 한국해양학회 2006년도 추계학술발

- 표대회 요약집, pp. 220.
- Chung, Y.S., M.B. Yoon and H.S. Kim. 2004. On climate variations and changes observed in South Korea. *Climatic Change*, **66**: 151-161.
- Dore, M.H.I. 2005. Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know?. *Environment International*, **31**: 1167-1181.
- Kang, C.K., P.J. Kim, W.C. Lee and P.Y. Lee, 1999. Nutrients and phytoplankton blooms in the southern coastal waters of Korea: I. The elemental composition of C, N and P in particulate matter in the coastal bay system. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **34**: 86-94.
- Lee, D.K. and Y.H. Kang, 2003. The physical environments and *Cochlodinium polykrikoides* bloom in the sea near Naro-Do. *Ocean and Polar Research*, **25**: 303-314.
- Lee, P.Y., C.K. Kang, J.S. Park and J.S. Park, 1994. Annual change and C:N:P ratio in particulate organic matter in Chinhae Bay, Korea. *J. Oceanol. Soc. Kor*, **29**: 107-118.
- Parsons, R.R., M. Takahashi and B. Hargrave, 1984. *Biological Oceanographic Process*. 3rd ed., Pergamon Press, pp. 143-157.
- Smayda, T.J., 1997. Harmful phytoplankton blooms: their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea. *Limnol. Oceanogr.*, **42**: 1137-1153.
- SPSS Inc, 2003. SPSS base 12.0 User's Guide. Chicago, IL, USA.
- Tomas, C.R., 1997. Identifying marine phytoplankton. Academic press. pp. 853.
- Yamaji, I., 1984. Illustration of marine plankton of Japan. 3re ed. Hoikushm Pub. Co., pp. 158.
- Zar, J.H., 1984. Biostatistical analysis, Seond ed. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ. pp. 696.

2007년 10월 8일 원고접수

2007년 11월 21일 수정본 채택

담당편집위원: 강성호