

## Article

## 인천 연안의 초가을 식물플랑크톤 대증식기에 식물플랑크톤과 종속영양 원생동물 군집의 단주기 변동

양은진<sup>1\*</sup> · 최중기<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국해양연구원 해양환경연구본부  
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29  
<sup>2</sup>인하대학교 자연과학대학 해양학과  
(402-751) 인천시 남구 용현동 253

### Short-term Variations in Community Structure of Phytoplankton and Heterotrophic Protozoa during the Early Fall Phytoplankton Blooms in the Coastal Water off Incheon, Korea

Eun Jin Yang<sup>1\*</sup> and Joong Ki Choi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Marine Environment Research Department, KORDI  
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

<sup>2</sup>Department of Oceanography, College of Natural Science  
Inha University, Incheon 402-751, Korea

**Abstract :** In order to examine the short-term variations of phytoplankton and heterotrophic protozoa community structures with bloom events, water samples were collected every other day at one site in the coastal water off Incheon, Korea, from August 15-September 30, 2001. Chlorophyll-*a* concentrations varied widely from 1.8 to 19.3  $\mu\text{g l}^{-1}$  with the appearances of two major peaks of chlorophyll-*a* concentration during the study period. Size-fractionated chlorophyll-*a* concentration showed that net-size fraction ( $>20 \mu\text{m}$ ) comprised over 80% of total chlorophyll-*a* during the first and second bloom periods, nano-size fraction (3~20  $\mu\text{m}$ ) comprised average 42% during the pre- (before the first bloom) and post-bloom periods (after the second bloom), and pico- size fraction ( $<3 \mu\text{m}$ ) comprised over 50% during inter-bloom periods (i.e. between the first and second bloom periods). Dominant phytoplankton community was shifted from autotrophic nanoflagellates to diatom, diatom to picophytoplankton, picophytoplankton to diatom, and then diatom to autotrophic nanoflagellates, during the pre-, the first, the inter, the second, and the post-bloom periods, respectively. During the blooms, *Chaetoceros pseudocrinitus* and *Eucampia zodiacus* were dominant diatom species composed with more than 50% of total diatom. Carbon biomass of heterotrophic protozoa ranged from 8.2 to 117.8  $\mu\text{gC l}^{-1}$  and showed the highest biomass soon after the peak of the first and second blooms. The relative contribution of each group of the heterotrophic protozoa showed differences between the bloom period and other periods. Ciliates and HDF were dominant during the first and second bloom periods, with a contribution of more than 80% of the heterotrophic protozoan carbon biomass. Especially, different species of HDF, thecate and athecate HDF, were dominant during the first and the second bloom periods, respectively. Interestingly, *Noctiluca scintillans* appeared to be one of the key organisms to extinguish the first bloom. Therefore, our study suggests that heterotrophic protozoa could be a key player to control the phytoplankton community structure and biomass during the study period.

**Key words :** phytoplankton bloom, short-term variation, diatom, heterotrophic protozoa

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

## 1. 서 론

온대 연안수역에서 식물플랑크톤의 대증식은 큰 크기의 규조류에 의해 봄과 가을에 주로 발생하며(Durban *et al.* 1975; Claereboudt *et al.* 1994), 대증식 기작은 생물 및 무생물학적 요인들 간의 다양한 상호관계에 의하여 영향을 받는다(Kjørboe 1993; Wassmann 1998). 전통적으로 식물플랑크톤 대증식의 가장 중요한 포식자는 중형 동물플랑크톤으로 알려져 왔다(Smith and Lane 1988; Irigoien *et al.* 1998). 그러나 최근 들어 규조류에 의해 발생하는 식물플랑크톤의 대증식을 감소시키는 요인으로 종속영양 원생동물에 대하여도 중요하게 연구되어 지면서, 기존에 생각해 왔던 것보다 연안역의 플랑크톤 군집에서 종속영양 원생동물의 역할이 큰 것으로 보고되었다(Hansen 1991; McManus and Ederington-Cantrell 1992; Nielsen and Kjørboe 1994; Strom *et al.* 2001). 특히 원생동물은 식물플랑크톤 처럼 빠르게 성장하며, 식물플랑크톤 생물량의 변화에 빠르게 반응하기 때문에 대증식을 조절 하거나 식물플랑크톤 군집구조를 조절하는데 있어 포식자로서의 큰 잠재성을 갖고 있다(Banse 1992; Frost 1993). 그러나 종속영양 원생동물이 영양염이 풍부한 연안역에서 식물플랑크톤의 중요한 소비자로서 인식되어 왔음에도 불구하고 규조류에 의하여 높은 생산성을 갖는 연안역에서 규조류의 섭식자로서 종속영양 원생동물의 역할은 아직까지 분명하지 않다. 특히 식물플랑크톤과 종속영양 원생동물 군집의 계절 변화에 대한 많은 연구들이 수행되었으나, 현장에서 식물플랑크톤 대증식과 관련하여 두 군집의 영양학적 관계(예, 피식-포식자)에 대한 단주기 연구는 아직까지도 많이 보고되어 있지 않다(Archer *et al.* 2000). 또한 이제까지는 중형 폐쇄 생태계를 이용하여 식물플랑크톤과 원생동물 군집의 변화 및 식물플랑크톤의 조절자로서 종속영양 원생동물의 섭식에 관한 연구들만이 수행되어 왔다(Schlüter 1998; Suzuki *et al.* 2002). 특히 우리나라 연안환경에서 식물플랑크톤 군집의 단주기 변화에 대한 연구는 물리, 화학적 환경요인의 변화와 관련하여 연구되었으며(이 등 2005; Lee *et al.* 2005), 식물플랑크톤 대증식과 관련된 종속영양 원생동물 군집에 대한 연구는 전무한 실정이다.

인천연안 수역에서 식물플랑크톤과 종속영양 원생동물 군집의 계절적 특성에 대한 연구들이 많이 수행되었다(Choi and Shim 1986b; 송 1998; Lee and Choi 2000; 양 2001; 양과 최 2003). 특히 인천연안 수역의 미세생물 먹이망에서 종속영양 원생동물과 식물플랑크톤의 관계에 대한 양(2001)의 연구는 3년 동안 10일 간격으로 조사되었다. 이 결과에 의하면 조사수역에서 식물플랑크톤의 분포는 일차적으로 종속영양 원생동물의 생물량과 높은 상관

관계를 갖으며, 종속영양 원생동물은 식물플랑크톤 대증식의 소멸과 깊은 관계가 있음을 암시하였다. 그러나 종속영양 원생동물과 식물플랑크톤의 짧은 세대시간을 감안한다면 10일간의 시간 간격은 너무 길기 때문에 종속영양 원생동물이 식물플랑크톤의 조절자로서 대증식의 소멸에 영향을 미치는지에 대하여는 명확하게 설명되지 않았다.

따라서 본 연구는 인천연안 수역에서 규조류에 의해 발생하는 초가을 대증식기에 식물플랑크톤과 종속영양 원생동물 군집의 단주기 변동에 대하여 조사하였으며, 식물플랑크톤의 조절자로서 종속영양 원생동물의 군집 및 생물량 변화에 초점을 두었다. 특히 온대 연안 수역에서 대증식의 소멸과 관련하여 식물플랑크톤과 종속영양 원생동물 군집 사이의 영양학적 관계에 대하여 논의하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 조사 수역 및 조사 시기

인천연안 수역은 한강으로부터 유입되는 담수의 영향을 받는 혼염성 기수역으로, 주기적인 조석의 영향으로 외해수와 교환되는 반폐쇄성 연안수역이다(Choi and Shim 1986a). 조사정점은 경기만의 내만에 위치하고 있으며, 수심은 약 7-13 m로 수직 혼합이 활발한 수역이다(Fig. 1). 본 조사정점에서 1993년 10월에 1시간 간격으로 실시한 24시간의 연속관측 결과에 의하면 수온은 하루 동안에 약 1°C의 차이를 보였고, 염분은 약 2.5 psu의 차이를 보여 한강수의 영향을 직접받는 세어도 수역에 비해 담수의 영향을 적게 받는 수역으로 나타났다(양 2001). 또한 엽록소-a 농도의 24시간 연속 관측 결과 3.02-4.38  $\mu\text{g l}^{-1}$ 의 변화를 보였다. 본 조사는 인천 항만 부두에서 2001년 8월

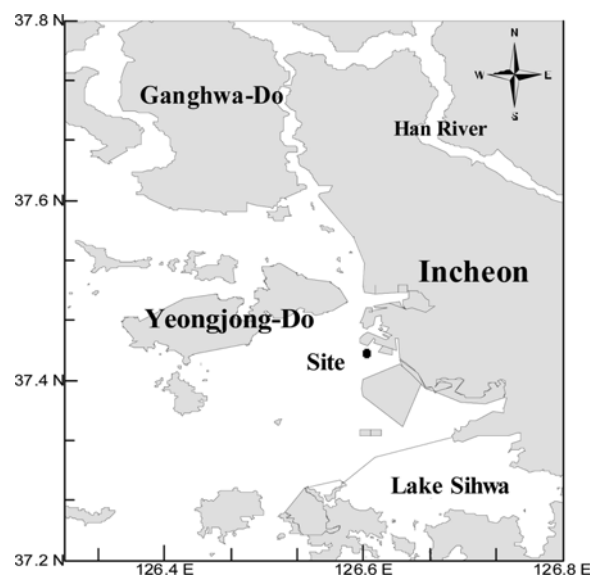


Fig. 1. A map of a sampling site in the study area.

Table 1. Short-term variations of environmental factors

Sampling date	Julian day	Periods	Temperature (°C)	Salinity (PSU)	Irradiance (MJ m <sup>-2</sup> )	Windspeed (m sec <sup>-1</sup> )	TN (μM)	HPO <sup>4=</sup> (M)	N/P	Chl- <i>a</i> (μg l <sup>-1</sup> )
Aug. 15	227	Pre-bloom	25.1	27.2	21.2	3.0	36.1	1.5	24.2	2.7
Aug. 17	229		25.5	27.3	19.6	3.0	32.0	1.5	21.3	3.1
Aug. 19	231		26.0	27.1	17.8	4.4	30.7	1.4	21.9	2.3
Aug. 21	233		26.8	27.0	19.8	3.4	40.2	1.4	27.8	5.5
Aug. 23	235	First-bloom	26.6	27.2	20.9	3.6	14.7	0.7	21.3	7.4
Aug. 25	237		26.4	27.3	18.2	1.8	37.8	1.4	27.3	11.3
Aug. 27	239		26.1	28.2	18.0	1.4	18.0	0.6	30.5	19.3
Aug. 29	241		26.2	28.2	14.7	4.0	24.1	1.1	21.9	8.2
Aug. 31	243	Inter-bloom	26.1	28.0	19.0	4.2	35.3	1.5	23.8	3.0
Sep. 2	245		26.0	28.1	19.8	3.0	35.6	1.7	20.9	2.6
Sep. 4	247		26.1	28.4	14.3	3.6	14.8	0.7	20.8	2.7
Sep. 6	249		25.8	28.5	15.4	2.6	34.9	1.8	19.9	2.6
Sep. 8	251		25.6	26.0	17.3	3.0	-	7.2	-	2.7
Sep. 10	253		25.2	28.8	16.1	3.6	39.7	2.3	17.4	2.5
Sep. 12	255		25.0	29.5	19.6	6.0	28.7	1.7	16.5	2.2
Sep. 14	257		24.6	29.2	15.4	3.2	29.4	1.7	17.4	2.4
Sep. 16	259		24.2	28.6	19.3	3.6	29.3	1.6	18.2	9.2
Sep. 18	261		Second-bloom	23.5	29.8	17.4	3.0	21.8	0.9	23.3
Sep. 20	263	23.0		29.9	17.2	4.6	19.9	0.7	29.7	10.8
Sep. 22	265	22.5		30.0	19.2	1.8	-	0.8	-	8.1
Sep. 24	267	Post-bloom	22.7	29.9	18.6	5.0	-	1.2	-	2.4
Sep. 26	269		21.9	28.7	17.3	3.0	92.2	4.0	22.8	2.4
Sep. 28	271		21.6	30.1	15.9	2.4	94.2	3.0	30.7	2.0
Sep. 30	273		21.5	30.0	9.8	5.4	14.3	0.8	18.6	1.8

15일부터 2001년 9월 30일까지 이를 간격으로 만조시에 표층 해수를 채수하여 조사하였다. 조사 시기는 엽록소-*a* 농도와 크기별 엽록소-*a* 농도의 우점률에 근거하여 대증식기 전(Pre-bloom period), 첫 번째 대증식기(First-bloom period), 대증식기 사이(Inter-bloom period), 두 번째 대증식기(Second-bloom period), 대증식기 후(Post-bloom period)로 구분하였다(Table 1).

#### 환경 요인

수온 및 염분은 Salinometer(YSI 30)를 사용하여 측정하였으며, 질산염과 인산염 분석을 위하여 현장에서 채수한 해수를 10% 염산과 증류수로 세척된 60 ml 병에 담아 드라이 아이스에서 보관하여 실험실로 옮긴 후 영양염 자동 분석기(NNA; Nutrients Auto Analyzer, Alliance, Evolution II)와 분광흡광기(Milton Roy diode array, Spectronic 3000 array)를 이용하여 분석하였다(Parsons *et al.* 1984).

#### 크기별 엽록소-*a* 농도

총 엽록소-*a* 농도를 측정하기 위하여 표층 해수를 채수

하여 0.3-0.5 l를 GF/F 여과지로 여과하였고, 크기별 엽록소-*a* 농도를 측정하기 위하여 0.5 l의 해수를 각각 20 μm 망과 PC membrane 여과지(<3 μm)에 걸러준 후 다시 GF/F 여과지에 여과하여 냉동 보관하였다. 실험실에서 UV-Spectrophotometer를 사용하여 엽록소-*a* 농도를 측정하였다(Parson *et al.* 1984).

#### 독립영양 극미소 및 미소플랑크톤과 종속영양 미소플랑크톤의 형광 현미경 분석

극미소 및 미소플랑크톤의 생물량을 파악하기 위하여 표층 해수를 채수하여 글루타르알데하이드로 최종농도 1%가 되게 고정된 후 실험실로 운반하였다. 2시간 이내에 8-30 m의 시료를 0.45 μm nuclepore polycarbonate black filter로 여과하여 DAPI(Porter and Feig 1980)와 Primulin (Caron 1983)으로 염색한 후 형광 현미경(Nikon type 104)을 사용하여 독립영양 플랑크톤과 종속영양 플랑크톤을 구분하여 측정하였다. UV filter 아래에서 미소편모류를 인식하였으며, 독립영양 미소편모류와 종속영양 미소편모류의 구분은 B filter 또는 G filter 하에서 붉은 빛을 발하는 엽록소 autofluorescence)의 유무로 결정하였다. 미

소편모류의 탄소량은 체적을 구한 후 Børsheim and Bratbak(1987)의 전환값인  $220 \text{ fgC } \mu\text{m}^{-3}$ 을 이용하여 구하였다.

### 식물플랑크톤과 종속영양 원생동물 군집의 광학 현미경 분석

표층 해수 1000 m를 채수하여 루골용액으로 최종농도 5% 되게 고정하였다. 고정된 시료는 실험실로 운반해 그 중 1000 m/는 50 m/까지 가라앉게 한 후 Sedgewick-Rafter chamber와 Uteröohl chamber를 사용하여 광학 현미경(Nikon Type 104)과 전도 현미경(Olympus IX 70)으로 관찰하였다. 식물플랑크톤은 구조류와 독립영양 외편모류로 나누어서 계수하였으며, 종속영양 원생동물은 섬모충류와 종속영양 외편모류로 나누어 계수하였다. 원생동물의 탄소량을 구하기 위하여 현미경하에서 각 세포 크기를 측정 한 후 세포 용적을 Edler(1979)의 방법에 따라 구하였다. 유중섬모충류는  $\text{carbon}(\text{pg})=44.5+0.053 \text{ lorica volum}(\mu\text{m}^3)$ (Verity and Langdon 1984)의 식에 따라 구하였으며, 피각이 없는 빈섬모충류는  $0.19 \text{ pgC } \mu\text{m}^{-3}$ (Putt and Stoecker 1989)의 전환값을 사용하여 환산하였다. 외편모류의 탄소량은 Edler(1979)의 방법에 따라 용적을 구한 후 Menden-Deuer and Lessard(2000)의 실험식인  $\text{Carbon}(\text{pg})=0.216[\text{volume, m}^3]^{0.939}$ 을 이용하여 각 세포의 탄소량을 구하였다.

### 시료 분석 및 자료 처리

식물플랑크톤 군집은 구조류, 독립영양 외편모류, 독립영양 미소편모류 및 독립영양 극미소플랑크톤(남세균과 극미소 진핵편모류를 대상으로 계수하였음)으로 구분하여 분석하였다. 종속영양 원생동물 군집은 부유섬모충류, 종속영양 외편모류 및 종속영양 미소편모류로 구분하였다. 부유섬모충류는 피각이 없는 빈섬모충류(aloricate ciliates)와 피각을 갖고 있는 유중섬모충류(loricate ciliates)로 구분하여 분석하였다. 종속영양 외편모류는 *Protoperidinium* 속과 같이 피각을 갖고 있는 종속영양 유각외편모류(thecate dinoflagellate)와 *Gyrodinium* 속과 *Gymnodinium* 속과 같은 피각을 갖고 있지 않은 종속영양 무각외편모류(athecate dinoflagellate)로 구분하였다. 교차상관분석(cross correlation)을 위한 통계처리는 SAS package(ver. 8.2)를 이용하여 분석하였다.

## 3. 결 과

### 환경요인 변화

조사기간 동안 바람은  $1.4 \text{ m sec}^{-1}$ 에서  $6.0 \text{ m sec}^{-1}$ 로 나타났으며, 8월 19일에서 23일 사이에 가장 세게 불었

나, 큰 변화는 관찰되지 않았다. 광량은 273일제를 제외하고는  $14.3 \text{ MJ m}^{-2}$ 에서  $22.1 \text{ MJ m}^{-2}$ 로 조사기간 동안 큰 변화폭을 보이지 않았다. 수온은  $26^\circ\text{C}$ 에서  $21^\circ\text{C}$ 까지 점차 감소하는 경향을 보였으며, 염분은 26 psu에서 30 psu로 점차적으로 증가하는 양상을 보였다(Table 1). 총 용존 무기질소는  $14.3 \mu\text{M}$ 에서  $94.2 \mu\text{M}$ 로 크게 변하였으며, 용존 무기질인은  $0.6 \mu\text{M}$ 에서  $7.2 \mu\text{M}$ 로 큰 변화폭을 보였다. 그러나 시간에 따른 영양염 농도의 뚜렷한 변화 양상은 나타나지 않았으며 질소:인(N/P)의 비율은 조사기간 동안 16.5 이상으로 유지되었다.

### 크기별 엽록소-a 변화

엽록소-a 농도는  $1.8\text{--}19.3 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 변화하였으며, 첫 번째 대증식은 8월 27일에  $19.3 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 최대의 농도를 보였고, 두 번째 대증식은 9월 18일에  $13.3 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 나타났으며, 대증식이 발생하지 않은 시기에는 평균  $2.5 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 나타났다(Fig. 2). 총 엽록소-a에 대한 소형 엽록소-a ( $>20 \mu\text{m}$ ) 농도는 대증식기에 평균 80.7%의 우점률을 보였으며, 대증식이 발생하지 않은 시기에는 평균 20%를 기여하는 것으로 나타났다. 미소형 엽록소-a 농도( $3\text{--}20 \mu\text{m}$ )의 기여도는 첫 번째 대증식의 발생 전과 두 번째 대증식이 발생한 후에 전체 엽록소-a의 평균 42%를 차지하였으며, 대증식기 사이에도 평균 30%를 기여하였다. 극미소 엽록소-a( $<3 \mu\text{m}$ )의 기여도는 대증식기 사이에 평균 50% 이상의 우점률을 보였으며, 첫 번째 대증식기 전과 두 번째 대증식기 후에도 평균 30%를 차지하였다.

### 식물플랑크톤 군집의 단주기 변동

식물플랑크톤 군집중 남세균(cyanobacteria)의 개체수는  $150\text{--}10,830 \times 10^3 \text{ cells l}^{-1}$ 로 분포하였으며, 첫 번째 대증

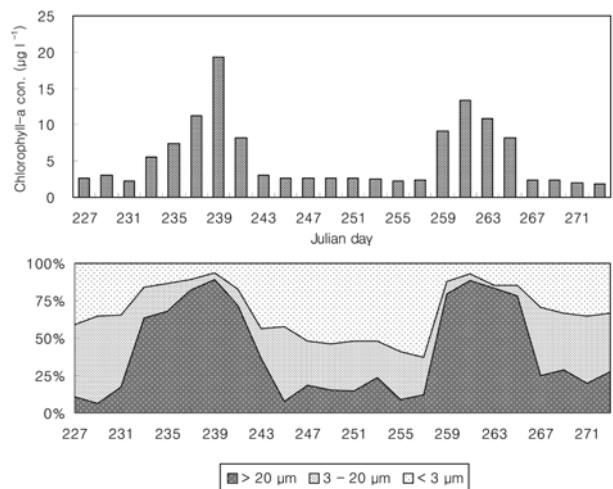


Fig. 2. Short-term variations of chlorophyll-a concentration and the relative percentage of the size-fractionated chlorophyll-a concentration.

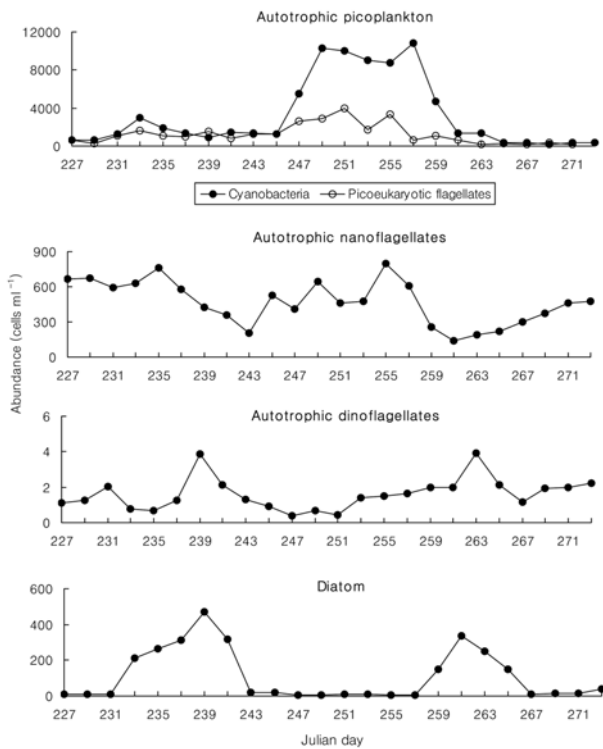


Fig. 3. Short-term variations of abundance of autotrophic picoplankton, autotrophic nanoflagellates, autotrophic dinoflagellates and diatom.

식이 소멸된 후 5일째부터 증가하기 시작하여 대증식기 사이에 가장 높은 개체수를 보였다(Fig. 3). 그 외 극미소 진핵편모류(picoeukaryotic flagellates)는  $163\text{--}3,960 \times 10^3$  cells  $l^{-1}$ 로 나타났으며, 남세균과 유사한 분포 양상을 보였다. 남세균과 극미소 진핵편모류를 포함한 독립영양 극미소플랑크톤의 개체수는 다른 시기에 비하여 대증식기 사이에 평균 3배 이상 높은 밀도를 보였으며, 특히 이 시기에 남세균의 개체수는 독립영양 극미소플랑크톤 개체수의 평균 79%를 차지하였다. 독립영양 미소편모류의 개체수는  $120\text{--}760 \times 10^3$  cells  $l^{-1}$ 로 분포하였으며, 대증식기를 제외한 시기에 비교적 높게 나타났다. 독립영양 외편모류의 개체수는  $0.4\text{--}5.6 \times 10^3$  cells  $l^{-1}$ 로 나타났으며, 대증식 기간 동안 비교적 높았다. 독립영양 외편모류는 *Alexandrium*, *Ceratium*, *Dinophysis*, *Akashiwo*과 *Prorocentrum* 속들이 출현 하였으며, 규조류에 비하여 약 100배 정도 낮은 개체수 분포를 보였다. *Dinophysis* sp.는 가장 우점하는 종으로 나타났으며, 첫 번째 대증식기에는 *Prorocentrum minimum*에 의해 높은 개체수를 보였고, 두 번째 대증식기에는 *Akashiwo sanguinea*에 의해 높게 나타났으나, 조사 기간 동안 두드러진 우점종의 천이 현상은 관찰되지 않았다(Fig. 4). 규조류의 개체수는  $5\text{--}468 \times 10^3$  cells  $l^{-1}$ 로 분포하였으며, 대증식기에 가장 높은 밀도를 보였다. 첫 번째

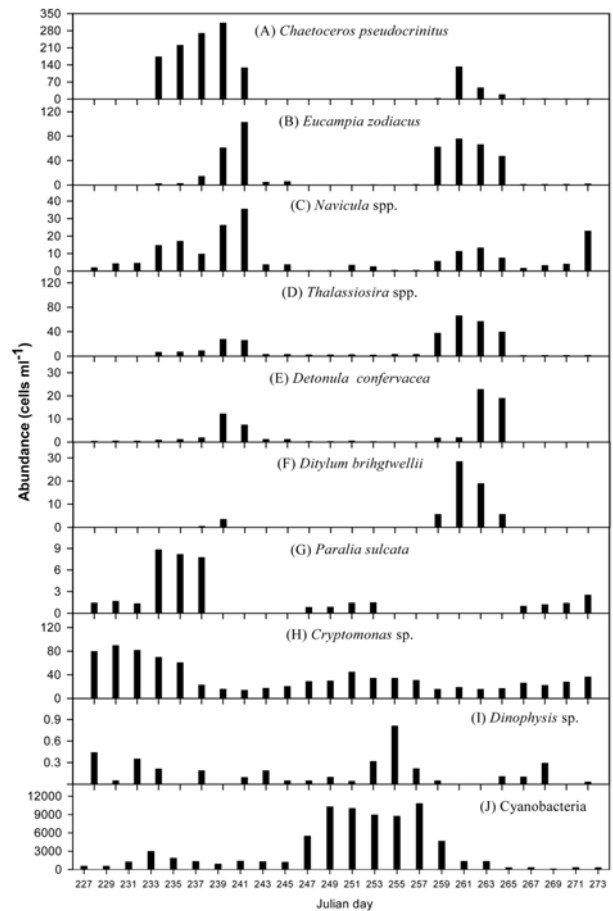
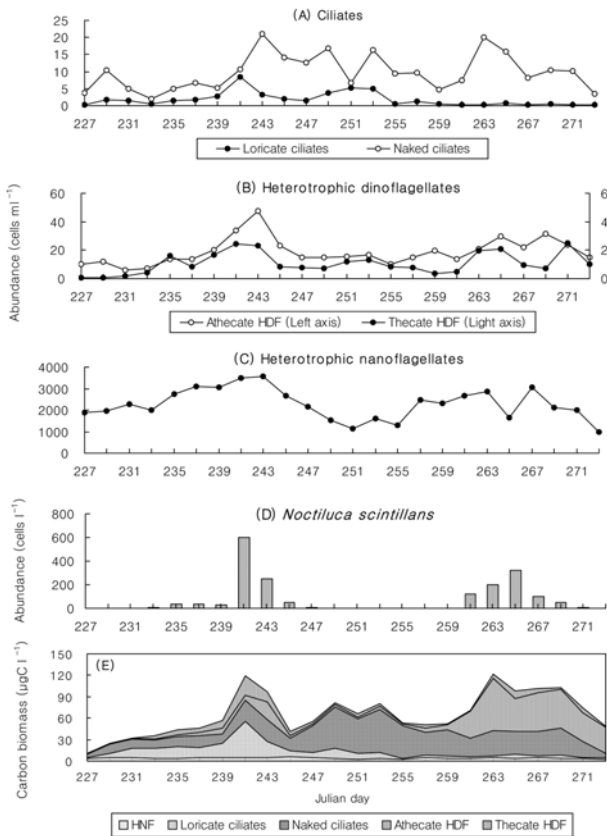


Fig. 4. Short-term variations of major species and groups of phytoplankton.

대증식기에는 *Chaetoceros pseudocrinitus*에 의해 68%, *Eucampia zodiacus*에 의해 13%의 우점률을 보였으며, 그 외 *Navicula* spp., *Thalassiosira* spp., *Detonula confervacea*와 *Paralia sulcata* 등이 분포하였다. 두 번째 대증식기에는 첫 번째 대증식기때와 유사한 우점종 분포 양상을 보였으나, *Chaetoceros pseudocrinitus*, *Eucampia zodiacus*와 *Thalassiosira* spp.에 의해 76%의 우점률을 보였으며, 그 외 *Detonula confervacea*와 *Ditylum brightwellii* 등이 첫 번째 대증식기에 비하여 높게 나타났다. 규조류의 분포는 대증식기를 제외하고는  $20 \times 10^3$  cells  $l^{-1}$  미만으로 나타났다.

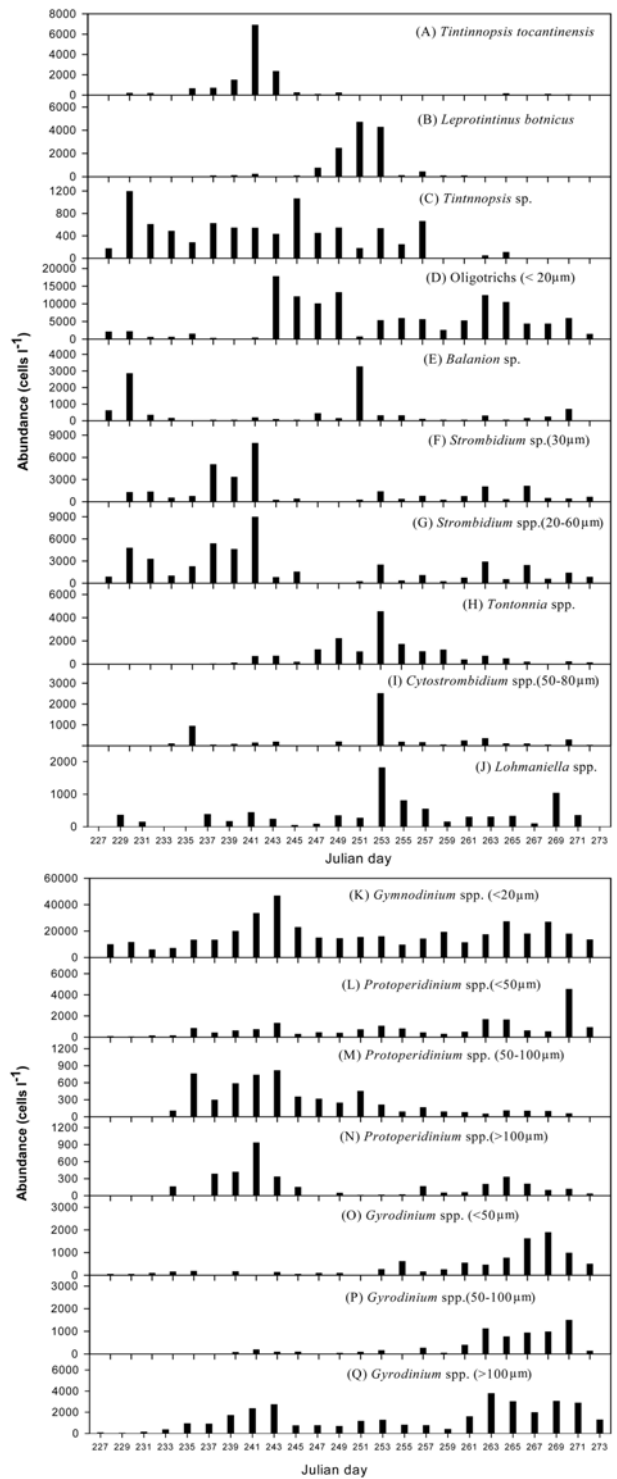
#### 종속영양 원생동물 군집의 단주기 변동

종속영양 원생동물 군집은 섬모충류, 종속영양 외편모류, 종속영양 미소편모류로 구분하였다. 빈섬모충류의 개체수는  $2\text{--}21 \times 10^3$  cells  $l^{-1}$ 로 분포하였으며, 첫 번째와 두 번째 대증식기에 식물플랑크톤 생물량이 가장 높게 나타난 이틀 후에 가장 높은 밀도를 보였다(Fig. 5). 빈섬모충류의 대부분은 *Strombidium*과 *Strobilidium*속으로 구성되



**Fig. 5.** Short-term variations of abundance of ciliates (A), heterotrophic dinoflagellates (B), heterotrophic nanoflagellates (C), *Noctiluca scintillans* (D) and carbon biomass of heterotrophic protozoa except for *Noctiluca scintillans* (E).

었다. 첫번째 대증식기에는 *Strombidium* spp.(20-60 µm)에 의해 우점하였으며, 대증식기 사이에는 크기가 20 µm 이하인 빈섬모충류에 의해 높은 밀도를 보였다. 그 외 *Balanion* sp.(15 µm)가 특정 시기에 높게 나타났으며, 특히 전형적인 혼합영양 섬모충류인 *Tontonia* spp.가 다른 시기에 비하여 비교적 높게 분포하였다(Fig. 6). 피각을 갖고 있는 유충섬모충류의 개체수는  $0.2-8.4 \times 10^3$  cells l<sup>-1</sup>로 분포하였으며, 빈섬모충류의 개체수와 다소 다른 분포 양상을 보였다(Fig. 5). 유충섬모충류는 식물플랑크톤의 생물량이 가장 높게 나타난 첫 번째 대증식기에 가장 높은 밀도를 보였고, 점차 감소하면서 첫 번째 대증식이 완전히 소멸된 후 다시 증가하는 양상을 보였으며, 두 번째 대증식이 시작하면서 1000 cells l<sup>-1</sup> 이하로 감소하였다. 유충섬모충류의 종조성은 첫 번째 대증식기까지는 *Tintinnopsis tocaninensis*와 *Tintinnopsis* sp.에 의해 우점하였으며, 첫 번째 대증식이 완전히 소멸되면서 *Leptotintinnus botnicus*와 *Tintinnopsis* sp.에 의해 우점 하였다(Fig. 6). 종속영양 와편모류중 유각와편모류의 개체수는  $0.05-4.7 \times 10^3$  cells



**Fig. 6.** Short-term variations of major species and groups of heterotrophic protozoa. (A-J: Ciliates, K-Q: Heterotrophic dinoflagellates).

l<sup>-1</sup>로 분포하였으며, 첫 번째와 두 번째 대증식기의 식물 플랑크톤 생물량이 가장 높게 나타난 직후에 높은 밀도를 보였다(Fig. 5; Fig. 6). 특히 첫 번째 대증식기에는 크기가

50  $\mu\text{m}$  이상의 *Protoperidinium* spp.에 의해 높은 우점률을 보였다. 무각와편모류의 개체수는 6-47 cells  $\text{mL}^{-1}$ 로 분포하였으며, 첫 번째 식물플랑크톤의 생물량이 가장 높았을 때 가장 높은 밀도를 보였으며, 두 번째 대증식기의 끝에서 비교적 높은 밀도를 보였다. 무각와편모류의 대부분은 *Gymnodinium*과 *Gyrodinium*속으로 구성되어 있으며, 특히 대증식기에는 세포 크기가 100  $\mu\text{m}$  이상 되는 *Gyrodinium* spp.에 의해 높은 우점률을 보였다. 종속영양 와편모류 군집은 첫 번째 대증식기에는 *Gymnodinium* spp.와 *Protoperidinium* spp.에 의해 우점하였으며, 두 번째 대증식기에는 *Gyrodinium* spp.에 의해 우점하였다. 대부분이 10  $\mu\text{m}$  이하로 구성된 종속영양 미소편모류의 현존량은  $960\text{-}3,570 \times 10^3$  cells  $\text{L}^{-1}$ 로 분포하였으며, 첫 번째와 두 번째 대증식기에 비교적 높은 밀도를 보였다. 종속영양 와편모류에 속하는 *Noctiluca scintillans*의 개체수는 2-600 cells  $\text{L}^{-1}$ 로 분포하였으며, 대증식이 소멸되기 시작하면서 200 cells  $\text{L}^{-1}$  이상의 높은 밀도를 보였고, 첫 번째 식물플랑크톤의 생물량이 최고로 높았던 직후에 가장 높은 밀도를 보였다.

*Noctiluca scintillans*를 제외한 종속영양 원생동물 군집의 탄소량은 8.2-117.8  $\mu\text{gC L}^{-1}$ 로 분포하였으며, 첫 번째와 두 번째 대증식기의 식물플랑크톤 생물량이 가장 높게 나타난 직후에 가장 높았다(Fig. 5). 종속영양 원생동물 군집은 첫 번째 대증식이 시작되기 전에는 유중섬모충류가 55%, 빈섬모충류가 33% 우점하여 주로 섬모충류에 의하여 높은 분포를 보였다. 첫 번째 대증식기에는 유중섬모충류가 38%, 빈섬모충류가 30%로 우점하였으며, 종속영양 유각와편모류가 20% 이상 우점하였다. 대증식기 사이에는 빈섬모충류가 65% 이상 우점하여 나타났다. 두 번째 대증식기에는 무각와편모류가 46%, 빈섬모충류가 44%

우점 하였으며, 두 번째 대증식이 소멸된 이후에는 무각와편모류가 58%, 빈섬모충류가 28% 우점하는 양상을 보였다.

#### 식물플랑크톤과 종속영양 원생동물 군집의 관계

종속영양 원생동물 군집의 생물량은 식물플랑크톤 군집의 생물량과 유사한 분포 양상을 보였으며, 첫 번째와 두 번째 대증식기의 식물플랑크톤 생물량이 가장 높게 나타난 직후에 가장 높은 생물량을 보였다(Fig. 7). 두 군집사이의 교차상관분석(Cross correlation) 결과 종속영양 원생동물의 생물량은 바로 이전 단계 식물플랑크톤의 생물량에 영향을 받으면서 변화하였으며, 두 군집은 이들의 시간간격을 갖고 상호 밀접한 영양 관계를 갖으면서 변화하였다(Fig. 7).

#### 4. 고 찰

경기만 수역에서 식물플랑크톤 대증식은 전형적으로 봄과 초가을에 발생하며, 겨울철 대증식 발생도 일반화 되어 있는 현상이다(Choi and Shim 1986b; 양 2001). 특히 식물플랑크톤의 초가을 대증식은 다양한 구조류 군집에 의하여 우점하며(Choi and Shim 1986a), 2001년 8월에 경기만 수역에서 *Chaetoceros pseudocrinitus*와 *Eucampia zodiacus*에 의한 대증식을 보고 하였다(인하대학교 서해연안환경연구소 2002). 조사기간 동안 식물플랑크톤 대증식은 *Chaetoceros pseudocrinitus*와 *Eucampia zodiacus*에 의해서 늦여름과 초가을 사이에 2회에 걸쳐서 발생하였으며, 대증식 기간도 약 6-8일 정도 짧게 지속 되었다(Fig. 4). 짧은 조사기간 동안 식물플랑크톤 군집은 구조류에 의해 우점한 첫 번째 대증식이 발생하였으며, 구조류가 소멸된 후 극미소플랑크톤에 의해 유지되었고, 그 후 구조류에 의한 두 번째 대증식이 발생하였으며, 두 번째 대증식의 소멸 후에는 은편모류를 포함한 독립영양 미소편모류에 의해 우점하는 양상을 보여, 단기간 동안에 뚜렷한 식물플랑크톤 군집의 천이가 발생하였다. 이와 같은 식물플랑크톤의 생물량 및 군집구조의 변화는 종속영양 원생동물의 생물량 및 군집구조와 유사한 분포 양상을 보였다(Fig. 4; Fig. 6). 조사수역과 동일한 정점에서 1997년부터 1999년까지 조사된 양(2001)의 연구에 의하면 식물플랑크톤과 미소형 및 소형동물플랑크톤 군집 사이에는 밀접한 관계가 있으며, 미소형 및 소형동물플랑크톤의 생물량은 식물플랑크톤 생물량이 가장 높았거나 바로 직후에 가장 높게 나타났다. 본 조사에서도 이전의 연구 결과와 유사하게 종속영양 원생동물 군집은 첫 번째와 두 번째 대증식기에 가장 높은 생물량을 보였다(Fig. 5). 특히 종속영양 원생동물의 생물량은 식물플랑크톤 생물량이 최대 밀도로 나타

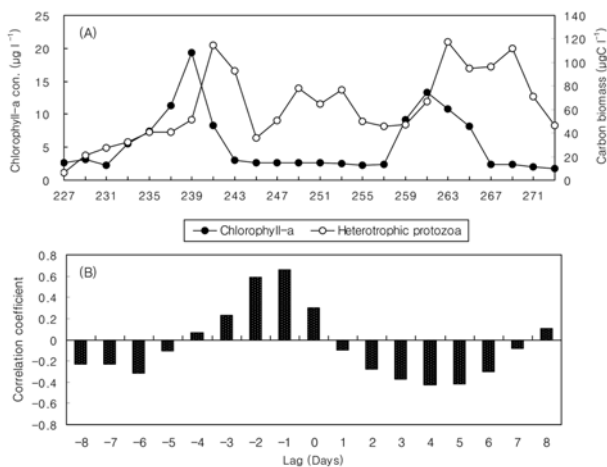


Fig. 7. Short-term variations (A) and cross correlation (B) of chlorophyll-a concentration and heterotrophic protozoan biomass.

Heterotrophic protozoa	Other group		<i>Noctiluca scintillans</i>		<i>Noctiluca scintillans</i>	
	Athecate HDF		<i>Gymnodinium</i> spp.		<i>Gyrodinium</i> spp.	<i>Gyrodinium</i> spp. <i>Gymnodinium</i> spp.
	Thecate HDF		<i>Protoperidinium</i> spp.			
	Naked Ciliates	<i>Strombidium</i> spp.	<i>Strombidium</i> spp.	Oligotrichs (<20 μm) <i>Tontonia</i> spp.	<i>Strombidium</i> spp.	
	Loricated Ciliates	<i>Tintinnopsis</i> sp.	<i>Tintinnopsis tocaninensis</i>	<i>Leptotintinus botnicus</i>		
Phytoplankton	>20μm		Chain-forming diatom		Chain-forming diatom	
	3-20μm	<i>Cryptomonas</i> sp. ANF (<20 μm)				ANF (<20 μm)
	< 3μm			Picoplankton		
		Pre-bloom	First-bloom	Inter-bloom	Second-bloom	Post-bloom

Fig. 8. Short-term successions of phytoplankton and heterotrophic protozoan communities.

났던 이틀후에 가장 높게 분포하였으며, 종속영양 원생동물 군집도 식물플랑크톤 대증식과 관련하여 서로 다른 분포 양상을 보였다(Fig. 6; Fig. 8). 첫 번째 대증식이 시작되기 전에는 미소형 식물플랑크톤을 주로 섭식하는 섬모충류에 의해 주로 우점하였다. 첫 번째 대증식기에는 빈섬모충류, *Tintinnopsis tocaninensis*로 구성되어 있는 유충섬모충류, *Protoperidinium* spp.으로 구성되어 있는 종속영양 유각외편모류에 의해 우점하였으며, 아주 짧은 시기였으나 대증식이 소멸하기 시작한 시점부터 약 4일 동안 *Noctiluca scintillans*의 개체수가 200 cells l<sup>-1</sup> 이상으로 최대치를 보였다. 또한 두 번째 대증식기에는 빈섬모충류와 종속영양 무각외편모류에 의해 높은 우점률을 보였으며, 역시 두 번째 대증식이 소멸하기 시작한 시점으로부터 약 4일 동안 *N. scintillans*의 개체수는 높게 나타났다. 식물플랑크톤의 첫 번째 대증식이 소멸하기 시작하면서 출현한 큰 크기의 섬모충류는 식물플랑크톤의 중요한 섭식자로서, 특히 연안역에서 큰 크기의 섬모충류는 체인형 규조류를 효과적으로 섭식하는 것으로 알려져 있다(Sime- Ngando *et al.* 1995; Tamigneaux *et al.* 1997; 양 2001). 따라서 첫 번째 대증식기에 출현한 100 μm 이상의 빈섬모충류는 규조류의 섭식자로서 중요한 역할을 했을 것으로 판단된다. 그러나 이시기에 출현한 유충섬모충류는 주로 미소형 식물플랑크톤을 섭식하며, 그들은 자신의 입 크기의 평균 40-45% 되는 크기의 먹이를 섭식할 수 있다(Heinbokel 1978; Rassoulzadegan and Étienne 1981). 조사기간 동안 우점하여 출현한 *Tintinnopsis tocaninensis*의 입 크기는 평균 30-40 μm로 이들은 주로 미소플랑크톤을

섭식하기 때문에 대증식기에 출현한 유충섬모충류는 체인형 규조류의 섭식에 효과적으로 영향을 미치지 못했을 것으로 판단된다. 또한 첫 번째 및 두 번째 대증식의 소멸시기에 높은 우점률을 보인 종속영양 외편모류는 전형적으로 대증식이 발생한 시기 또는 대증식이 끝난 직후에 가장 높게 나타나기 때문에 연안환경에서 규조류의 섭식자로서 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다(Smetacek 1981; Tiselius and Kuylenstierna 1996; Levinsen *et al.* 1999; Strom *et al.* 2001). 본 조사에서도 종속영양 외편모류는 두 번의 대증식기에 모두 출현하였으나 출현하는 그룹들의 상대적인 중요성은 서로 다르게 나타났다. 첫 번째 대증식기에 출현한 *Protoperidinium* 속은 세포 외부로 유기물을 내어 먹이를 둘러싼 뒤 소화효소를 분비하여 먹이를 녹인후 먹이 내용물을 세포내로 흡수하는 pallium feeding을 하기 때문에 다양한 크기와 다양한 종류의 먹이를 섭식할 수 있다(Jacobson 1987; Jeong and Latz 1994; Jeong 1999). 두 번째 대증식에 우점한 *Gyrodinium*속은 생산성이 높은 연안역에서 체인형 규조류의 대증식기에 주요 우점종으로 나타나며, 이들 역시 자신의 몸체 보다 더 큰 먹이를 섭식하는 것으로 알려져 있다(Strom and Strom 1996; Strom *et al.* 2001). 본 조사에서도 대증식의 감소와 함께 출현한 *Gyrodinium* spp.가 *Eucampia zodiacus*와 같은 큰 크기의 체인형 규조류를 섭식하는 것이 현미경을 통해 관찰 되었으며, 인천연안 조사에서도 겨울과 봄철의 대증식기에 *Gyrodinium* spp.의 높은 밀도가 관찰되었다(양 2001). 따라서 종속영양 외편모류의 강한 섭식기작 또는 큰 세포 크기는 빈섬모충류 보다 체인형 규조류를 섭식하



기에 더 용이할 수 있기 때문에 조사기간 동안 종속영양 외편모류는 빈섬모충류에 비하여 식물플랑크톤의 소멸에 더욱 중요한 역할을 했을 것으로 사료된다. 그러나 대증식기 동안에 큰 크기의 빈섬모충류, *Protoperdinium* spp. 및 *Gyrodinium* spp. 이외에도 종속영양 외편모류인 *N. scintillans*는 규조류의 대증식이 소멸하기 시작하면서 짧은 기간 동안 높은 개체수가 관찰되었다(Fig. 5). *N. scintillans*는 물리적인 환경 요인 보다는 먹이 농도에 의하여 가장 크게 영향을 받으며, 특히 규조류 대증식은 *N. scintillans* 개체군의 초기 증가에 크게 기여하는 것으로 보고되었다(Miyaguchi *et al.* 2006). 경기만 수역에서 연간 우점하여 나타나는 *N. scintillans*는 식물플랑크톤 대증식이 발생하는 시기에 동물플랑크톤중에서 매우 높은 우점률을 보이며, 특히 소형 엽록소-*a*와 상관 관계가 있는 것으로 보고되었다(Youn and Choi 2003; Yoo *et al.* 2006). 경기만 수역에서 이들은 주로 내만역에 분포하며, 식물플랑크톤의 대증식이 발생하는 시기에 적당한 환경이 조성되면 높은 성장률로 인하여 단시일 내에 개체수 증가가 빠르게 발생할 수 있음을 보고하였다(윤과 최 2003). 조사기간 동안 *N. scintillans*의 현장 성장률은 첫 번째 대증식기에  $1.4 \text{ day}^{-1}$ , 두 번째 대증식기에는 평균  $0.24 \text{ day}^{-1}$ 로 나타나 첫 번째 대증식기에 더 높은 성장률을 보였다(미발표 자료). 이와 같은 결과는 다음과 같이 설명 될 수 있다. 첫 번째 대증식기의 엽록소-*a* 농도는 두 번째에 비하여 약 1.5배 높게 나타났으며, *N. scintillans*의 개체수는 첫 번째 대증식기에 2배 정도 높았다. 그러나 종속영양 원생동물 군집은 두 번째 대증식기에 섬모충류 보다는 상대적으로 포식성이 강한 *Gyrodinium* spp.에 의해 50% 이상의 우점률을 보였다. 결과적으로 식물플랑크톤 생물량이 가장 높았던 첫 번째 대증식이 감소하면서 고밀도로 나타난 *N. scintillans*는 다른 어떤 종속영양 그룹보다도 대증식의 직접적인 소멸에 가장 중요한 역할을 하였을 것으로 판단된다. 따라서 조사기간 동안 두 차례에 걸친 대증식의 감소 시점에서 높게 관찰된 *N. scintillans*는 규조류의 밀도가 가장 높았을 때 이들을 빠른 속도로 섭식하면서 세포의 증식에 상당한 에너지를 이용하였을 것이고, 규조류의 밀도가 감소되면서 이용할 수 있는 먹이의 부족으로 *N. scintillans*의 개체수도 빠른 속도로 감소했을 것으로 판단된다. 결과적으로 종속영양 원생동물 군집 및 생물량은 짧은 기간 동안 발생한 식물플랑크톤 대증식의 소멸에 섭식자로서 중요한 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

또한 첫 번째 대증식이 완전히 소멸된 후 두 번째 대증식이 발생하기 전인 대증식기 사이에는 독립영양 극미소플랑크톤에 의해 상대적으로 높은 분포를 보였다. 이 시기에는 주로 미소형 빈섬모충류에 의해 우점 하였으며, 혼합영양 섬모충류인 *Tontonia* spp.의 개체수가 다른 시기에

비하여 높게 나타났다. 이와 같은 독립영양 극미소플랑크톤의 상대적으로 높은 분포는 이 시기에 높은 우점률을 나타낸 미소형 빈섬모충류( $<20 \mu\text{m}$ )의 출현과 관련이 있으며, 특히 체내에 엽록체를 갖고 있어 혼합영양을 하는 *Tontonia* spp.의 높은 개체수와도 관련이 있는 것으로 판단된다. 혼합영양 섬모충류는 해양의 표층에 주로 분포하며, 빛과 남세균의 분포와 높은 상관관계가 있는 것으로 보고되었다(Bernad and Rassoulzadegan 1994). 대증식기 사이에 남세균의 높은 밀도와 함께 관찰된 *Tontonia* spp.는 세포 체내에 cryptophyta 엽록체를 갖고 있어 빛이 좋은 시기에 광합성 결과 생긴 유기물을 보충 받으면서 한편으로는 먹이를 섭식한다. 그러나 대증식기 사이에는 독립영양 극미소플랑크톤 뿐 아니라 cryptophyta 엽록체를 갖는 *Cryptomonas* sp.가 대증식기에 비하여 높게 분포한 것으로 판단해 볼 때, 혼합영양 섬모충류의 높은 개체수는 남세균 뿐만 아니라 *Cryptomonas* sp.의 분포와도 관련이 있었을 것으로 사료된다.

본 연구 결과, 인천연안 수역에서 초가을에 발생한 식물플랑크톤 대증식은 규조류에 의해 우점하는 전형적인 연안역의 특성을 보였으며, 대증식은 약 6-8일 정도 짧게 지속 되었다. 이렇게 연안역에서 발생하는 식물플랑크톤 군집의 단기간 대증식은 물리적인 요인(온도, 빛, 조석주기, 수괴혼합), 화학적 요인(영양염 농도) 및 상위 단계의 섭식자에 의해 조절된다(Mackas *et al.* 1985; Legendre 1990). 본 조사는 표층에서만 수행 되었으며, Table 1에서 제시된 물리·화학적 요인들만으로는 식물플랑크톤의 단기간 대증식의 생성과 소멸 기작에 대하여 설명할 수는 없었다. 그러나 조사기간 동안에 식물플랑크톤과 종속영양 원생동물 군집의 천이 현상은 식물플랑크톤 대증식과 관련하여 분명하게 관찰되었다. 특히, 종속영양 원생동물의 생물량은 식물플랑크톤 대증식의 소멸 시기에 가장 높게 나타났으며, 그 시기에는 규조류에 대하여 섭식능력이 강한 종속영양 외편모류 군집에 의하여 우점 하였다. 따라서, 조사기간 동안 출현한 종속영양 원생동물 군집은 빠르게 변화하는 식물플랑크톤 군집의 조절자로서, 특히 식물플랑크톤의 소멸 시기에 중요한 역할을 하였을 것으로 사료되며, 이 두 그룹은 이들간의 시간 간격을 갖고 잠재적인 피식-포식자의 관계를 형성하였을 것으로 판단된다.

이제까지 연안수역에서 보고된 식물플랑크톤과 관련된 종속영양 원생동물 군집의 연구에 의하면 종속영양 원생동물의 생물량은 식물플랑크톤 생물량과 높은 상관관계를 갖으며, 특히 대증식기에 식물플랑크톤에 대한 섭식률이 가장 높은 것으로 나타났다(Tamigneaux *et al.* 1997; Strom *et al.* 2001; Stelfox-Widdicombe *et al.* 2004). 그러나 본 조사와 같은 단주기 조사 결과, 종속영양 원생동물의 생물량은 식물플랑크톤의 밀도가 가장 높았던 이들 후에 가장

높게 나타났으며, 이와 같이 이들간의 시간 간격을 갖는 두 군집간의 변화는 종속영양 원생동물이 식물플랑크톤의 조절자로서 잠재적으로 중요한 역할을 하였음을 암시한다. 특히 식물플랑크톤에 대한 종속영양 원생동물의 섭식률이 식물플랑크톤의 밀도가 가장 높았던 이들 후에 높게 나타났다는 사실은 이와 같은 결과를 잘 뒷받침 해주고 있다(미발표 자료). 그러나 식물플랑크톤과 종속영양 원생동물의 빠른 성장률을 고려한다면, 이들간의 시료 채집 기간도 두 군집의 영향학적인 관계를 설명하기에는 긴 시간이기 때문에, 두 군집사이의 정확한 피식-포식자의 관계를 설명하기 위해서는 향후 좀 더 조밀한 시간 간격의 시료 채집이 요구된다.

## 5. 요약

2001년 8월부터 9월 사이에 인천연안 수역에서 발생된 초가을 식물플랑크톤 대증식기에 식물플랑크톤과 종속영양 원생동물 군집의 단주기 변동에 대하여 조사하였다. 조사기간 동안 엽록소-*a* 농도의 분포는 1.8-19.3  $\mu\text{g l}^{-1}$ 로 분포 하였으며, 첫 번째 대증식기에 가장 높은 농도를 보였다. 소형 엽록소-*a*(>20  $\mu\text{m}$ )는 대증식기 동안에 엽록소-*a* 농도의 80% 이상을 차지하였고, 미소형 엽록소-*a*(3-20  $\mu\text{m}$ )는 대증식기 전과 대증식기 후에 전체의 42%를 차지하였으며, 대증식기 사이에는 극미소 엽록소-*a*(<3  $\mu\text{m}$ )에 의해 50% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 식물플랑크톤 군집은 대증식기 사이에는 독립영양 극미소플랑크톤에 의해 우점 하였으며, 대증식기 전과 대증식기 후에는 독립영양 미소편모류에 의해 우점 하였고, 두 번의 대증식기에는 규조류에 의해 높은 우점률을 보였다. 특히 대증식기에 관찰된 규조류의 개체수는 *Chaetoceros pseudocrinitus*와 *Eucampia zodiacus*에 의해 50% 이상 우점하였다. 종속영양 원생동물의 탄소량은 8.2-117.8  $\mu\text{gC l}^{-1}$ 로 분포하였으며, 식물플랑크톤의 생물량이 가장 높았던 직후에 가장 높게 나타났다. 조사기간 동안 종속영양 원생동물의 상대적인 기여도는 식물플랑크톤의 생물량 및 군집구조에 따라 차이를 보였다. 빈섬모충류와 종속영양 외편모류는 첫 번째와 두 번째 대증식기에 우점 하였으며, 종속영양 원생동물 생물량의 80% 이상을 차지하였다. *Protoperdinium* spp.에 의해 우점하는 종속영양 유각외편모류는 첫 번째 대증식기에 가장 우점하였으며, *Gyrodinium* spp.로 구성된 종속영양 무각외편모류는 두 번째 대증식기에 가장 우점 하였다. 그의 *Noctiluca scintillans*는 첫 번째 대증식기에 식물플랑크톤 소멸에 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 결과적으로 식물플랑크톤의 대증식기 동안에 종속영양 원생동물 군집은 식물플랑크톤의 생물량 및 군집구조의 변화에 빠르게 반응하였으며, 이와 같은 결과는 두

군집 사이에 잠재적인 피식-포식자의 관계가 있음을 암시한다. 따라서 조사기간 동안 종속영양 원생동물은 식물플랑크톤 대증식의 소멸과 관련된 중요한 섭식자로서, 식물플랑크톤 군집을 조절하는데 중요한 역할을 하였을 것으로 사료된다.

## 사 사

본 논문을 세밀하게 심사해주신 두 분의 심사위원과 주세종 박사님께 진심으로 감사드립니다. 이 연구는 2006년 정부의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-2006-532-C00012)의 지원 및 한국해양연구원의 기본사업인 “갯벌 경계면에서의 물질 플럭스 및 갯벌의 생태적 기능 평가(PE97703)”와 산업자원부가 지원하는 인하대학교 서해연안환경연구센터의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 송태윤. 1998. 경기만에서 식물플랑크톤 군집구조와 색소의 월간 변동. 이학석사 학위논문, 인하대학교. 106 p.
- 양은진. 2001. 인천연안 미소형 및 소형 동물플랑크톤의 생태학적 연구. 이학박사 학위논문, 인하대학교. 286 p.
- 양은진, 최중기. 2003. 경기만 수역에서 미세생물 군집의 계절적 변동 연구. II. 미소형 및 소형 동물플랑크톤. *한국해양학회지 「바다」*, 8, 78-93.
- 윤석현, 최중기. 2003. 경기만 동물플랑크톤 군집의 시공간적 분포. *한국해양학회지 「바다」*, 8, 243-250.
- 이원호, 명금옥, 유영두, 김경길, 정해진. 2005. 금강하구연담수방류와 춘계 식물플랑크톤 군집의 단주기 변동. *한국해양학회지 「바다」*, 10, 154-163.
- 인하대학교 서해연안환경연구센터. 2002. 서해연안환경연구센터 연구 보고서. 426 p.
- Archer, S.D., P.G. Verity, and J. Stefels. 2000. Impact of microzooplankton on the progression and fate of the spring bloom in fjords of northern Norway. *Aquat. Microb. Ecol.*, 22, 27-41.
- Banase, K. 1992. Grazing, temporal changes of phytoplankton concentrations, and the microbial loop in the open sea. p.409-440. In: *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea*. eds. by P.G. Falkowski and A.D. Woodhead. Plenum, New York.
- Bernard, C. and F. Rassoulzadegan. 1994. Seasonal variations of mixotrophic ciliates in the northwest Mediterranean Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 108, 295-301.
- Børsheim, K.Y. and G. Bratbak. 1987. Cell volume to cell carbon conversion factors for a bacterivorous *Monas* sp. enriched from sea waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 36, 171-175.

- Caron, D.A. 1983. Technique for enumeration of heterotrophic and phototrophic nanoplankton, use epifluorescence microscopy an comparison with other procedures. *Appl. Environ. Microbiol.*, 4, 491-498.
- Choi, J.K. and J.H. Shim. 1986a. The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. I. Environmental characteristics. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 23, 1-12.
- Choi, J.K. and J.H. Shim. 1986b. The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. III. Phytoplankton composition, standing crops, tychopelagic plankton. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 23, 1-12.
- Claereboudt, M., J. Côté, J. Bonardelli, and J.H. Himmelman. 1994. Seasonal variation in abundance and size structure of phytoplankton in Baie des Chaleurs, southwestern gulf of St. Lawrence, in relation to physical oceanographic conditions. *Hydrobiologia*, 306, 147-157.
- Durban, E.G., R.W. Krawiec, and T.J. Smayda. 1975. Seasonal studies on the relative importance of different size fractions of phytoplankton in Narragansett Bay (USA). *Mar. Biol.*, 32, 271-287.
- Edler, L. 1979. Phytoplankton and chlorophyll recommendations for biological studies in the Baltic Sea. *Baltic Marine Biologists*, p. 13-25.
- Frost, B.W. 1993. A modelling study of processes regulating plankton standing stock and production in the open subarctic Pacific Ocean. *Prog. Oceanogr.*, 32, 17-56.
- Hansen, P.J. 1991. Quantitative importance and trophic role of heterotrophic dinoflagellates in a coastal pelagic food web. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 73, 253-261.
- Heinbokel, J.F. 1978. Studies on the functional role of tintinnids in the Southern California Bight. II. Grazing rates of field populations. *Mar. Biol.*, 47, 191-197.
- Irigoin, X., R. Head, U. Klenke, B. Meyer-Harms, D. Harbour, B. Niehoff, H.J. Hirche, and R. Harris. 1998. A high frequency time series at Weathership M, Norwegian Sea, during the 1997 spring bloom; feeding of adult female *Calanus finmarchicus*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 172, 127-137.
- Jacobson, D.M. 1987. The ecology and feeding biology of thecate heterotrophic dinoflagellates. Ph.D. Thesis Woods Hole Oceanographic Institution/Massachusetts Institute of Technology Joint Program, Woods Hole. 210 p.
- Jeong, H.J. 1999. The ecological roles of heterotrophic dinoflagellates in marine planktonic community. *J. Eukaryot. Microbiol.*, 46, 390-396.
- Jeong, H.J. and M.I. Latz. 1994. Growth and grazing rates of the heterotrophic dinoflagellates *Protoperdinium* spp. on red tide dinoflagellates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 106, 173-185.
- Kjørboe, T. 1993. Turbulence, phytoplankton cell-size, and the structure of pelagic food webs. *Adv. Mar. Biol.*, 29, 1-72.
- Lee, W.J. and J.K. Choi. 2000. The roles of heterotrophic protists in the planktonic community of Kyeonggi Bay, Korea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 35, 46-55.
- Lee, W.J., K. Shin, P.G. Jang, M-C. Jang, and N.J. Park. 2005. Summer pattern of phytoplankton distribution at a station in Jangmok Bay. *Ocean Sci. J.*, 40, 109-118.
- Legendre, L. 1990. The significance of microbial algal blooms for fisheries and for the export of particulate organic carbon in the oceans. *J. Plankton Res.*, 12, 681-699.
- Levinsen, H., T.G. Nielsen, and B.W. Hansen. 1999. Plankton community structure and carbon cycling on the western coast of Greenland during the stratified summer situation. II. Heterotrophic dinoflagellates and ciliates. *Aquat. Microb. Ecol.*, 16, 217-232.
- Mackas, D.L., K.L. Denman, and M.R. Abbott. 1985. Plankton patchiness: Biology in the physical vernacular. *Bull. Mar. Sci.*, 37, 652-674.
- McManus, G.B. and M.C. Ederington-Cantrell. 1992. Phytoplankton pigments and growth rates, and microzooplankton grazing in a large temperate estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 87, 77-85.
- Menden-Deuer, S. and E.J. Lessard. 2000. Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms and other protist plankton. *Limnol. Oceanogr.*, 45, 569-579.
- Miyaguchi, H., T. Fujiki, T. Kikuchi, V.S. Kuwahara, and T. Toda. 2006. Relationship between the bloom of *Noctiluca scintillans* and environmental factors in the coastal waters of Sagami Bay, Japan. *J. Plankton Res.*, 28, 313-324.
- Nielsen, T.G. and T. Kjørboe. 1994. Regulation of zooplankton biomass and production in a temperate, coastal ecosystem. 2. ciliates. *Limnol. Oceanogr.*, 39, 508-519.
- Parson, T.R., Y. Maita, and C.M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Oxford. 173 p.
- Porter, K.G. and Y.S. Feig. 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnol. Oceanogr.*, 25, 943-948.
- Putt, M. and D.K. Stoecker. 1989. An experimentally determined carbon: volume ratio for marine oligotrichous ciliates from estuarine and coastal waters. *Limnol. Oceanogr.*, 34, 1097-1103.
- Rassoulzadegan, F. and M. Étienne. 1981. Grazing rate of

- the tintinnid *Stenosella ventricosa* (Clap. & Lachm.) Jörg. on the spectrum of the naturally occurring particulate matter from a Mediterranean neritic area. *Limnol. Oceanogr.*, 26, 258-270.
- Schlüter, L. 1998. The influence of nutrient addition on growth rates of phytoplankton groups, and microzooplankton grazing rates in a mesocosm experiment. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 228, 53-71.
- Sime-Ngando, T., M. Gosselin, S. Roy, and J.P. Chanut. 1995. Significance of planktonic ciliated protozoa in the lower St. Lawrence Estuary: Comparison with bacterial, phytoplankton, and particulate organic carbon. *Aquat. Microb. Ecol.*, 9, 243-258.
- Smetacek, V. 1981. The annual cycle of protozooplankton in the Kiel Bight. *Mar. Biol.*, 63, 1-11.
- Smith, S.L. and P.V.Z. Lane. 1988. Grazing of the spring diatom bloom in the New York Bight by the calanoid copepods *Calanus finmarchicus*, *Metridia lucens* and *Centropages typicus*. *Cont. Shelf. Res.*, 8, 485-509.
- Stelfox-Widdicombe, C.E., S.D. Archer, P.H. Burkill, and J. Stefels. 2004. Microzooplankton grazing in *Phaeocystis* and diatom-dominated waters in the southern North Sea in spring. *J. Sea. Res.*, 51, 37-51.
- Strom, S.L. and M.W. Strom. 1996. Microplankton growth, grazing, and community composition in the northern Gulf of Mexico. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 130, 229-240.
- Strom, S.L., M.A. Brainard, J.L. Holmes, and M.B. Olson. 2001. Phytoplankton blooms are strongly impacted by microzooplankton grazing in coastal North Pacific waters. *Mar. Biol.*, 138, 355-368.
- Suzuki, K., A. Tsuda, H. Kiyosawa, S. Takeda, J. Nishioka, T. Saino, M. Takahashi, and C.S. Wong. 2002. Grazing impact of microzooplankton on a diatom bloom in a mesocosm as estimated by pigment-specific dilution technique. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 271, 99-120.
- Tamigneaux, E., M. Mingelbier, B. Klein, and L. Legendre. 1997. Grazing by protists and seasonal changes in the size structure of protozooplankton and phytoplankton in a temperate nearshore environment (western Gulf of St. Lawrence, Canada). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 146, 231-247.
- Tiselius, P. and M. Kuylenstierna. 1996. Growth and decline of a diatom spring bloom: phytoplankton species composition, formation of marine snow and the role of heterotrophic dinoflagellates. *J. Plankton Res.*, 18, 133-155.
- Verity, P.G. and C. Langdon. 1984. Relationships between lorica volume, carbon, nitrogen and ATP content of tintinnids in Narragansett Bay. *J. Plankton Res.*, 6, 859-868.
- Wassmann, P. 1998. Retention versus export food chains; processes controlling sinking loss from marine pelagic systems. *Hydrobiologia*, 363, 29-57.
- Yoo, J.K., S.H. Youn, and J.K. Choi. 2006. Temporal fluctuation and ecological characteristics of *Noctiluca scintillans* (Dinophyceae) in the coastal waters of Incheon, Korea. *Kor. J. Environ. Biol.*, 24, 372-379.
- Youn, S.H. and J.K. Choi. 2003. Seasonal changes in zooplankton community in the coastal waters off Incheon. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 38, 111-121.

---

Received Mar. 5, 2007

Accepted Jun. 5, 2007