

## 청계만 식물플랑크톤 크기구조의 계절적 변동

지 성 · 신용식\* · 서호영<sup>1</sup>

목포해양대학교 해양시스템공학부  
<sup>1</sup>전남대학교 해양기술학부

### Seasonal Variations of Size-structured Phytoplankton in the Chunggye Bay

SUNG JI, YONGSIK SIN\* AND HOYOUNG SOH<sup>1</sup>

*Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University*  
*<sup>1</sup>Division of Marine Technology, Chonnam National University*

청계만에는 3개의 방조제(창포, 복길, 구일)가 위치하고 있고 이로부터 유입되는 담수로 인한 환경의 변화가 예상된다. 이를 조사하기 위해 2006년 11월(가을), 2007년 2월(겨울), 5월(봄), 8월(여름)에 각 방조제 앞에서 3개 정점을 선정하였다. 각 방조제 정점에서 대발생은 갈수기인 2007년 2월에 대형식물플랑크톤에 의해 발생하였고 풍수기에는 중형식물플랑크톤이 우점하는 분포를 나타냈다. 각 방조제 정점에서 풍수기에는 담수의 유입으로 인하여 염분과 투명도는 낮고 암모늄과 인산염은 갈수기인 2007년 2월보다 높게 나타났지만 식물플랑크톤 생체량은 낮게 나타났는데 이는 담수의 유입으로 인한 높은 탁도나 염분의 급격한 감소가 영양염류보다 더 영향을 미치는 것으로 사료된다. 즉 본 조사해역에서 갈수기인 2007년 2월에는 식물플랑크톤의 성장에 영양염류가 영향을 미치지만 풍수기에는 높은 탁도나 급격한 염분변화가 영양염류보다 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Three embankments are located in the Chunggye Bay, each named as Changpo, Bokkil and Kuil and environmental changes are expected due to freshwater input. To investigate this phenomenon, three sample sites in front of each embankment gate were selected in Nov. 2006 (autumn), Feb. 2007 (winter), May. 2007 (spring) and Aug. 2007 (summer). At every point of embankment spot, large cells (micro-size,  $>20 \mu\text{m}$ ) of phytoplankton were turned out to be a major cause of algal bloom in Feb. 2007 and nano-size ( $2\text{-}20 \mu\text{m}$ ) phytoplankton became dominant during rainy season. In rainy season, each point of embankment showed low salinity and transparency with higher ammonium and phosphorus concentrations than dry season. However, the number of phytoplankton has decreased and it is expected that freshwater influx has more influence on high turbidity and radical decrease of salinity than nutrient. According to the results of this study, therefore, nutrient could have more influence on growth of phytoplankton in dry season, but high turbidity and radical changes of salinity have more influence in rainy season.

**Keywords:** Phytoplankton, Size-structure, Changpo embankment, Bokkil embankment, Kuil embankment, Chunggye Bay

### 서 론

식물플랑크톤은 연안 수(水) 생태계 먹이망(food web)에서 일차 생산자로서 상위 영양단계를 구성하는 동물플랑크톤 및 어업 생산량에 영향을 미치고, 또한 탄소와 영양염류의 순환에도 중요한 역할을 담당한다(Kemp and Boynton, 1981; Boynton *et al.*, 1982; Coffin *et al.*, 1987; Sundbaeck *et al.*, 1990). 연안 하구(estuary)에서는 일차생산량이 갑자기 증가하는 경우가 발생하는데, 이는 포식자에 의한 섭식(top-down control)(Carpenter *et al.*, 1987; Kivi *et al.*, 1993; Armstrong, 1994; Caraco *et al.*, 1997)이 늦어지거나 과도한 영양염류의 유입(bottom-up control)에 기인한다. 대발생

(bloom)이 일어나면 식물플랑크톤은 스스로 광(light)흡수인자로 작용하여 빛의 투과를 막아 자신들의 성장을 제한하고(self-shading, Kirk, 1994), 포식되지 않고 바닥에 가라앉은 식물플랑크톤은 미생물 대사로 인하여 저층의 빈산소층을 형성하여 수질을 악화시키는가 하면(Sunback *et al.*, 1990), *Alexandrium tamarense* 등의 독성을 가지는 조류 등은 적조를 일으켜 수(水)생태계 및 수산업에 치명적인 피해를 입히기도 한다(Harper, 1992). 식물플랑크톤의 동역학(dynamics)을 보다 자세히 이해하기 위해서는 크기 구조에 따라 연구할 필요가 있는데, 이를 위해 screen and filter를 사용(Stemann Nielsen and Jensen, 1957; Yentsch and Ryther, 1959; Anderson, 1965; Malone, 1971; McCarthy *et al.*, 1974; Durbin *et al.*, 1975; Lamont-Doherty Geological Observatory, 1979)하여 분류하였다. 세포(cell)의 크기는 환경 변화에 따른 식

\*Corresponding author: yongsik@mmu.ac.kr

물플랑크톤 군집의 반응 민감도(Malone and Chervin, 1979; Hein *et al.*, 1995; Sin and Kim, 2003)와 연안 생태계 먹이사슬을 통한 에너지의 흐름(Ryther, 1969; Parsons and LeBrasseur, 1970; Walsh, 1976)을 결정하기 때문이다. 또한 식물플랑크톤은 수계의 물성변화에 대하여 민감하게 반응하여 환경변화 및 오염의 지표로 중요하게 활용되고 있다(Watanabe, 1962; Brook, 1965; Chapman 1968; Dodge, 1975; Bold and Wynne, 1985, Hellawell, 1986).

조사 해역은 무안반도와 압해도로 싸여 있는 작은 내만으로 영산강 유역 농업 종합개발계획의 제 4단계 사업(2006-2020)이 시행되고 있는 지역이다. 청계만에는 길이가 1.21 km로 1976년에 완공된 복길방조제, 북으로는 길이 0.93 km로 1976년에 완공된 창포방조제와 무안반도에 위치하고 있는 길이 1.25 km인 구일방조제로부터 유입되는 담수로 인한 연안 환경의 변화가 예상된다. 이러한 환경에서 수중의 일차 생산자이며 환경에 민감하게 반응하는 식물플랑크톤에 대한 연구는 중요하다. 지금까지 청계만 환경에 대한 조사로는 복길간척지 주변의 식물플랑크톤 군집에 관한 연구(박, 1994), 저서무척추동물 및 담수어류상(송, 1997)에 관한 연구가 이루어 졌지만 크기 구조에 따른 식물플랑크톤의 분포 특성에 관한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구는 청계만내 크기 구조에 따른 식물플랑크톤의 시공간적 분포 특성 및 식물플랑크톤 생체량과 여러 환경인자들과의 관계를 파악하고자 한다.

## 재료 및 방법

현장조사는 계절별 특성을 나타낼 수 있는 2006년 11월(가을), 2007년 2월(겨울), 5월(봄), 8월(여름)에 창포방조제, 복길방조제 구일방조제의 전방 해역에서 각각 3개 정점을 선정하였다(Fig. 1). 채수는 Vandon water sampler를 이용하여 표층(해수 표면에서 1 m

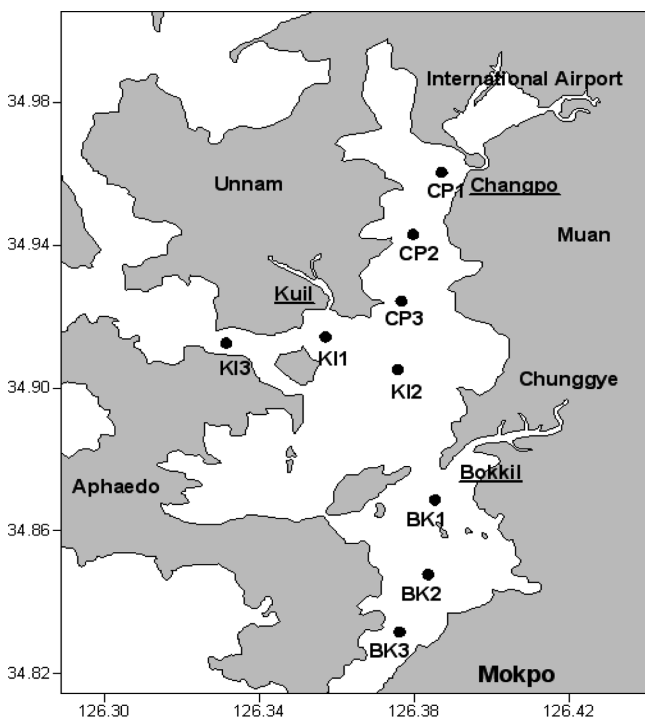


Fig. 1. Sampling stations in the study area.

아래)과 저층(퇴적층에서 1 m 위)에서 하였다. 조사기간 동안 강수량 및 일조시간은 인접 지역인 전남 목포시 기상청 자료를 이용하였다.

### 물리·화학적 환경인자

조사기간 동안 수온, 염분(salinity)은 수온, 염분 수심 센서형광광도계가 부착되어 있는 CTD(Alec Co., ACL1150-DK)를 이용하여 측정하였고, 투명도는 secchi disk를 이용하여 측정하였다.

무기영양염류는 일정량을 Acrodis<sup>®</sup> 25 mm Syringe Filter를 통과시켜 여액을 20 ml Plastic scintillation vial에 넣어 dry ice에 냉동 운반하여 -20 °C 냉동보관 후 Parsons *et al.*(1984)에 준하여 Auto Analyzer(Bran Luebbe<sup>®</sup>)를 이용하여 암모늄(NH<sub>4</sub>), 질산염(NO<sub>3</sub>) 아질산염(NO<sub>2</sub>), 인산염(PO<sub>4</sub>)을 분석하였다.

### 식물플랑크톤 생체량(chlorophyll *a*) 측정

본 연구에서는 식물플랑크톤을 3개의 크기로 분류하여 분석하였다(Micro-size(>20 μm), Nano-size(2-20 μm), Pico-size(<2 μm)). 이 분류를 위해 20 μm Nytex<sup>®</sup> mesh와 Polycarbonate membrane filter(직경 47 mm. Whatman<sup>®</sup>, pore size 2 μm)를 이용하여 시료 적당량(20 μm; 200 ml, 2 μm; 100 ml)을 펌프(<120 mmHg)를 사용해서 여과하였으며, 여과한 후, 여액을 GF/F filter(직경 25 mm, Whatman<sup>®</sup>, pore size 0.7 μm)를 이용하여 여과하였다. 전체 chlorophyll *a*는 시료 적당량 200 ml를 GF/F filter를 이용하여 여과하였고, 농도차이를 이용하여 크기별 chlorophyll *a*를 계산하였다. 사용된 필터들을 chlorophyll *a* 추출 용액인 90% Acetone 8 ml가 담긴 차광 시험관에 넣고 12시간이 지난 후 24시간 이내에 Turner Designs<sup>®</sup> 10-AU Fluorometer를 사용하여 측정하였다.

### 통계분석

전체 및 크기별 식물플랑크톤 변화와 물리·화학적 요인과의 상관성은 Person's correlation analysis를 통해 수행하였다. 통계적 분석에 있어서 유의수준은 P<sup>a</sup><0.1, P<sup>b</sup><0.05를 기준으로 하였고, 프로그램은 SPSS 11.0을 이용하였다.

## 결 과

### 기후인자 조사

2006년 11월부터 2007년 8월까지 조사지역의 월합 일조시간을 보면, 2007년 4, 5월에 각각 213.9 hr, 236.1 hr로 길게 나타났고, 6, 7월에 각각 140.5 hr, 132.6 hr로 짧게 나타났다(Fig. 2). 강수량은 갈수기인 봄과 겨울에 적고 여름에 많게 나타나는 우리나라의 계절에 따른 분포와 비슷하게 나타났다(Fig. 2).

### 물리적 환경인자

수온(Temperature)은 창포, 복길, 구일방조제의 모든 정점에서 우리나라의 계절에 따른 패턴과 유사한 분포를 나타냈다(Fig. 3A-D). 2007년 8월(여름)에 구일방조제의 모든 정점에서 저층이 표층보다 약 1 °C 정도 높은 분포를 나타낸 것을 제외하곤 조사기간별로 각 방조제 정점의 표-저층의 수온 분포는 거의 흡사하게 나타났다(Fig. 3A-D).

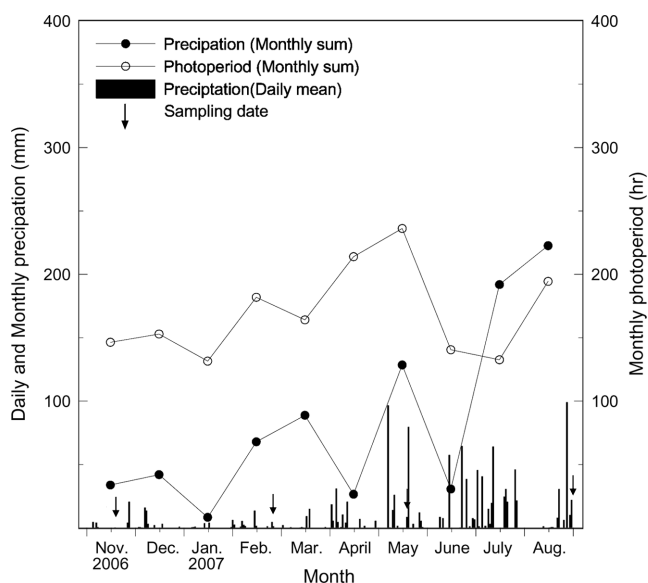


Fig. 2. Photoperiod (monthly sum), precipitation (daily mean and monthly sum) in the study area.

염분(Salinity)은 각 방조제 정점의 표·저층에서 강수량이 집중되었던 2007년 8월에 낮은 시간적 분포를 나타냈다(Fig. 3E-H). 창포, 북길방조제 정점의 표층에서는 조사기간별로 유사한 분포를 나타냈다(Fig. 3E-H). 구일방조제 정점의 표층에서는 2007년 8월에 다른 방조제에 비하여 상대적으로 낮은 분포를 나타냈고, KI1, KI2, KI3정점이 27.2 psu, 27.3 psu, 24.5 psu

로 KI1, KI2정점에 비해 KI3정점이 현저히 낮게 나타난 것을 제외하고 조사기간별로 모든 정점이 유사한 분포를 나타냈다(Fig. 3E-H). 각 방조제 정점의 표·저층에서 염분의 분포를 보면, 창포방조제에서는 2007년 8월에는 저층이 표층보다 약간 높게 나타난 것을 제외하곤 조사기간별로 거의 흡사한 분포를 나타냈고 구일방조제에서는 2007년 8월에 모든 정점에서 저층이 표층보다 약 2~5 psu정도 높게 나타났다(Fig. 3E-H).

투명도(secchi depth)는 각 방조제의 모든 정점에서 강수량이 집중되었던 2007년 8월에 가장 낮은 시간적 분포를 나타냈다(Fig. 2, Fig. 3I-L).

무기영양염류

조사기간 동안 대부분의 각 방조제 정점에서 무기영양염류 농도는 표·저층이 조사기간별로 유사한 분포를 나타냈다(Fig. 4A-P).

조사기간 동안 암모늄은 각 방조제의 모든 정점에서 염분이 가장 낮게 나타났던 2007년 8월(여름)에 현저히 높은 시간적 분포를 나타냈고, 2007년 8월을 제외하고 창포, 북길방조제 정점에서는 유사한 공간적 분포를 구일방조제 정점에서는 유사한 분포를 나타냈다(Fig. 4A-D). 2007년 8월을 보면, 창포방조제 정점에서는 방조제 바로 앞인 CP1정점이 28.4  $\mu\text{M}$ 로 가장 높게 나타났고 내측에서 외측해역으로 갈수록 감소하는 공간적 분포를 나타냈다(Fig. 4D). 북길방조제 정점에서는 BK1, BK2, BK3정점이 각각 18.7  $\mu\text{M}$ , 16.4  $\mu\text{M}$ , 19.2  $\mu\text{M}$ 로 BK2정점으로 갈수록 낮아지다가 BK3정점에서 높아지는 공간적 분포를 나타냈다(Fig 4D). 구일방조제 정점에서는 KI1정점이 19.2  $\mu\text{M}$ 로 가장 높고 KI3정점이 17.0  $\mu\text{M}$

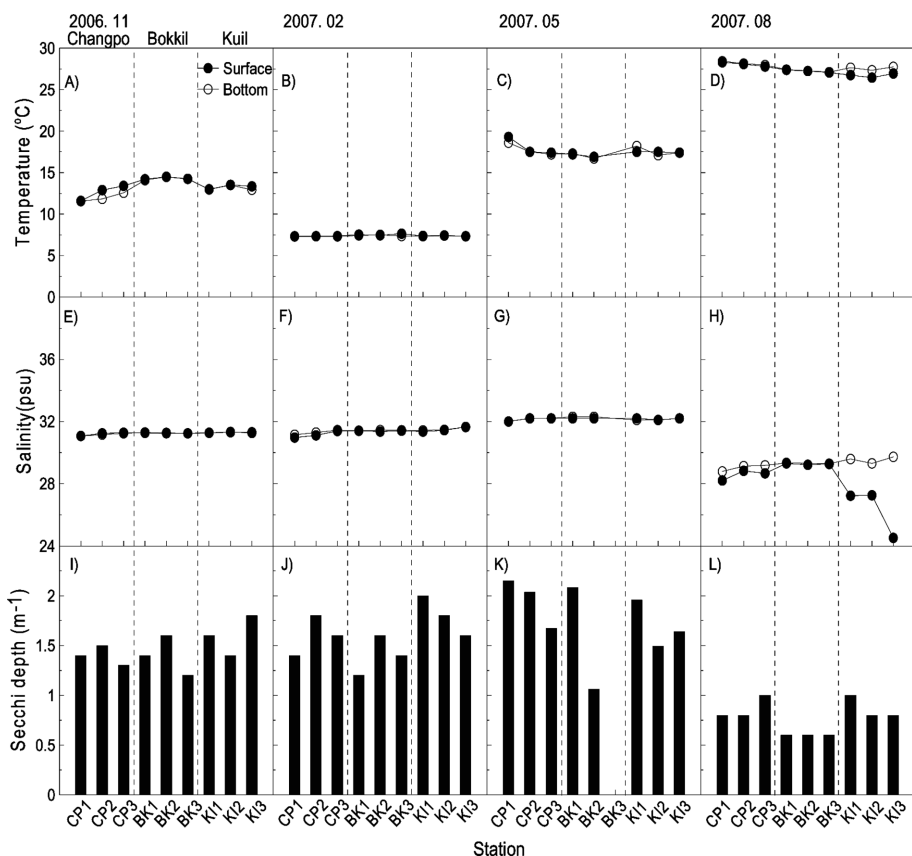


Fig. 3. Temporal and spatial variations of water temperature, salinity, and secchi depth in the Chunggye Bay.

로 가장 낮게 나타났다(Fig. 4D).

조사기간 동안 아질산+질산은 구일방조제의 K12정점이 2007년 5월(봄)에 가장 높게 나타난 것을 제외하고는 각 방조제 정점에서 2006년 11월(가을)에 가장 높고 2007년 8월(여름)로 갈수록 낮아지는 시간적 분포를 나타냈다(Fig. 4E-H). 2007년 8월에는 각 방조제의 모든 정점에서 1.1  $\mu\text{M}$  이하로 현저히 낮게 나타났다(Fig. 4H).

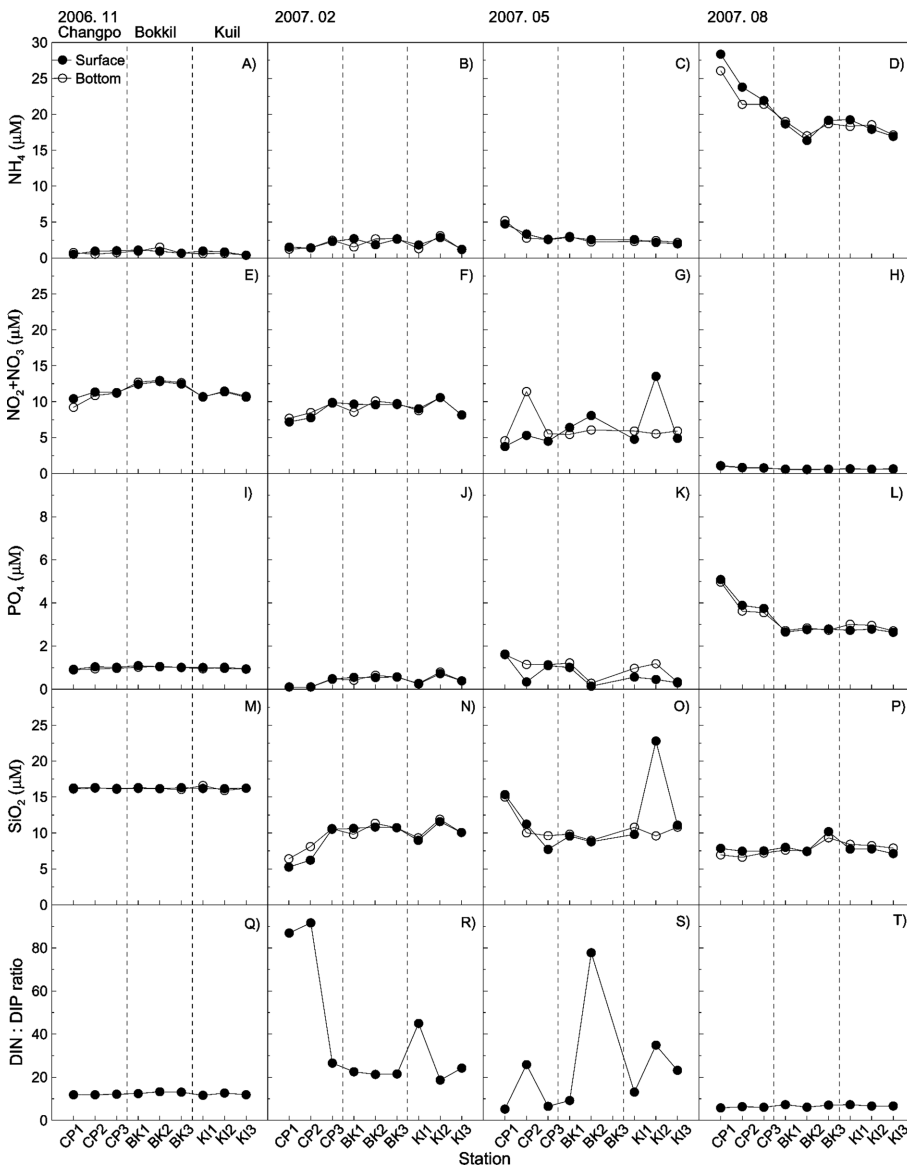
인산염은 조사기간별로 암모늄과 유사한 시·공간적 분포를 나타냈다(Fig. 4A-D, 4I-L). 인산염과 암모늄은 2007년 8월에 창포방조제 정점이 북길, 구일방조제 정점에 비하여 상대적으로 높게 나타났다(Fig. 4D, 4L). 규산염은 2007년 5월에 구일방조제의 K12 정점에서 높게 나타난 것을 제외하곤 각 방조제의 모든 정점에서 2006년 11월에 높은 시간적 분포를 나타냈다(Fig. 4M-P).

DIN:DIP ratio를 보면, 2006년 11월과 2007년 8월에는 각 방조제의 모든 정점에서 16이하로 나타냈다(Fig. 4Q, 4T). 2007년 2월(겨울)에 각 방조제의 모든 정점에서 16이상으로 나타냈다(Fig. 4R). 2007년 5월에 창포, 북길방조제의 CP1, CP3, BK1정점은 16 이하로 나타났고 CP2, BK2정점은 16이상으로 나타냈다(Fig. 4S).

**크기별 식물플랑크톤 및 기여율**

조사기간별로 각 방조제의 표·저층에서 전체 식물플랑크톤 및 크기별 식물플랑크톤 생체량(biomass)은 유사한 분포를 나타냈고 생체량은 10  $\mu\text{gL}^{-1}$  이하로 나타냈다(Fig. 5A-D).

전체 식물플랑크톤의 생체량을 보면, 창포방조제 정점에서는 2007년 11월에 가장 낮고 2007년 2월에 가장 높은 분포를 나타냈다(Fig. 5A-D). 조사기간별로 공간적 분포를 보면, 2006년 11월에는 모든 정점이 약 1.5  $\mu\text{gL}^{-1}$ 로 유사하게 나타났고 2007년 5월에는 외측해역으로 갈수록 증가하는 분포를 나타냈다(Fig. 5A, 5C). 2007년 2월에는 CP1, CP2, CP3정점이 각각 8.4  $\mu\text{gL}^{-1}$ , 8.3  $\mu\text{gL}^{-1}$ , 5.2  $\mu\text{gL}^{-1}$ 이고 2007년 8월에는 CP1, CP2, CP3정점이 각각 2.4  $\mu\text{gL}^{-1}$ , 2.8  $\mu\text{gL}^{-1}$ , 1.7  $\mu\text{gL}^{-1}$ 로 CP1, CP2정점은 유사하게 나타났으며, CP3 정점으로 갈수록 낮아지는 공간적 분포를 나타냈다(Fig. 5B, 5D). 북길방조제 정점에서는 BK2정점에서 2007년 5월에 가장 높게 나타난 것을 제외하고 그 외 정점에서는 2007년 2월에 높고 2007년 8월에 낮은 분포를 나타냈다(Fig. 5A-D). 공간적 분포를 보면 2007년 2월에는 외측해역으로 갈수록 증가하고 2006년 11월과 2007



**Fig. 4.** Temporal and spatial variations of inorganic nutrient, DIN:DIP ratio in the Chunggye Bay.

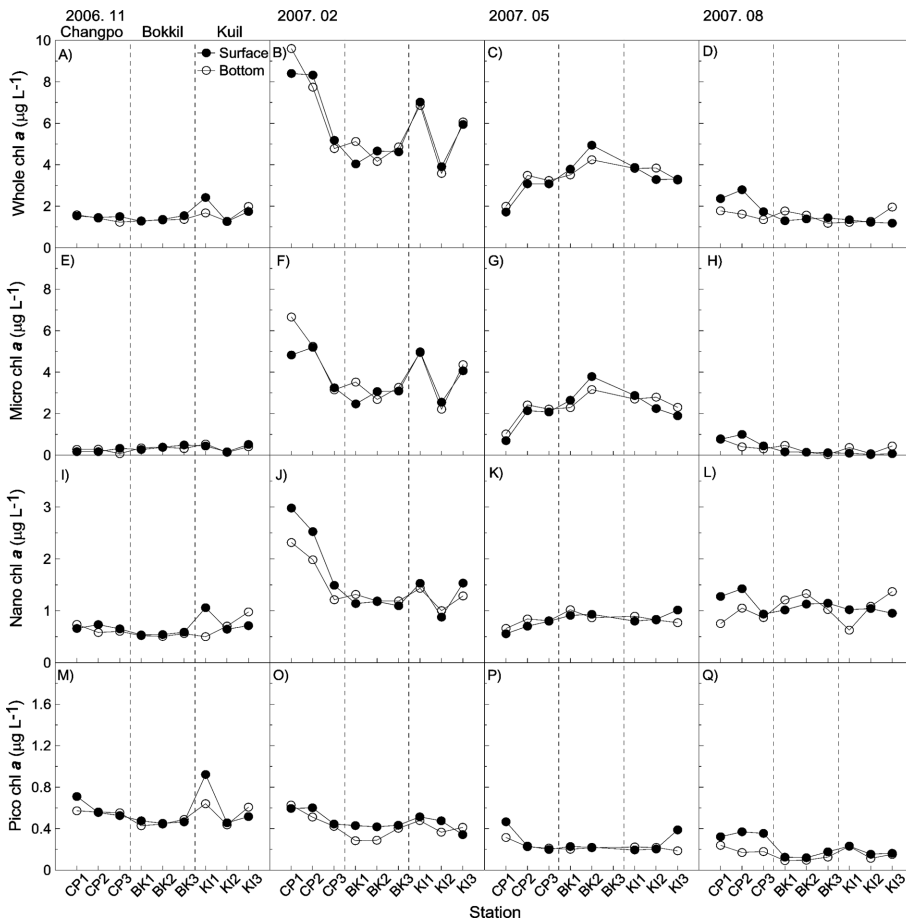


Fig. 5. Temporal and spatial variations of phytoplankton biomass of size classes in Chunggye Bay.

년 8월에는 내·외측해역이 유사한 공간적 분포를 나타냈다(Fig. 5A, 5B, 5D). 구일방조제의 모든 정점에서는 2007년 2월에 높고 2007년 8월로 갈수록 낮아지는 시간적 분포를 나타냈다(Fig. 5A-D). 구일방조제 정점에서는 2007년 2월에 K11, K12, K13정점이 각각  $7.0 \mu\text{g L}^{-1}$ ,  $3.9 \mu\text{g L}^{-1}$ ,  $6.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 K12정점이 상대적으로 다른 정점에 비하여 낮은 분포를 나타냈고, 2007년 8월에는 유사한 분포를 나타냈다(Fig. 5B, 5D).

대형식물플랑크톤의 생체량은 조사기간 동안 각 방조제에서 전체 식물플랑크톤의 생체량과 시·공간적으로 유사하게 나타났다(Fig. 5A-H). 중형식물플랑크톤의 생체량을 보면, 창포방조제 정점에서는 전체 식물플랑크톤과 유사한 시·공간적 분포를 나타냈다(Fig. 5A-D, 5I-L). 북길방조제 정점에서는 2006년 11월에 상대적으로 가장 낮고 그 외 조사기간에는 유사한 시간적 분포를 나타냈으며 조사기간별로 내·외측해역이 유사한 공간적 분포를 나타냈다(Fig. 5I-L). 구일방조제 정점에서 조사기간별로 2007년 2월에 상대적으로 높고 그 외 기간에는 유사한 시간적 분포를 나타냈다(Fig. 5I-L)

조사기간동안 창포, 북길, 구일방조제의 모든 정점에서 소형식물플랑크톤의 생체량은  $1 \mu\text{g L}^{-1}$  이하로 나타났다(Fig. 5M-Q). 창포방조제 정점에서는 2006년 11월에서 2007년 8월로 갈수록 감소하는 시간적 분포를 나타냈고, 2007년 8월에 내·외측정점이 유사한 공간적 분포를 나타낸 것을 제외하고 다른 조사기간에는 외측해역으로 갈수록 감소하는 공간적 분포를 나타냈다(Fig. 5M-Q). 북길방조제 정점에서는 창포방조제 정점과 유사한 시간적 분포를

나타냈고 조사기간별로 내·외측정점이 유사한 공간적 분포를 나타냈다(Fig. 5M-Q). 구일방조제의 모든 정점에서는 창포, 북길방조제와 유사한 시간적 분포를 나타냈고, 2007년 5월에 K13정점이 K11, K12정점보다 높게 나타난 것을 제외하고 그 외 조사기간에는 K11정점이 K12, K13정점에 비해 높은 분포를 나타냈다(Fig. 5M-Q).

기여율 변화를 보면, 2007년 2월과 5월에는 각 방조제의 모든 정점에서 micro-size가 우점하였고, 2007년 8월과 2006년 11월에는 nano-size가 우점하였다(Fig. 6A-D). Micro-size는 2007년 8월로 갈수록 감소하고, nano-size는 2007년 8월로 갈수록 증가하는 시간적 분포를 나타냈다(Fig. 6A-D). Pico-size는 2006년 11월에서 2007년 5월로 갈수록 감소하다가 2007년 8월에는 증가하는 시간적 분포를 나타냈는데 특히 2006년 11월에 각 방조제의 모든 정점에서 30%이상으로 다른 조사기간에 비하여 매우 높은 분포를 나타냈다(Fig. 6A-D). 저층은 표층과 거의 흡사하여 결과를 제시하지 않았다.

#### 전체 및 크기별 식물플랑크톤과 환경인자와의 상관성

창포방조제 해역에서 수온은 전체, 대형, 소형식물플랑크톤과 유의한 음의 상관성을 나타냈다(Table 1). 전체, 대형, 중형식물플랑크톤은  $\text{SiO}_2$ 와 유의한 음의 상관성을 나타냈고, 소형식물플랑크톤은  $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ 와 유의한 양의 상관성을 나타냈다(Table 1).

북길방조제 해역에서 수온과 염분은 전체, 대형, 소형식물플랑크톤과 유의한 음의 상관성을 나타냈다(Table 1). 전체식물플랑크

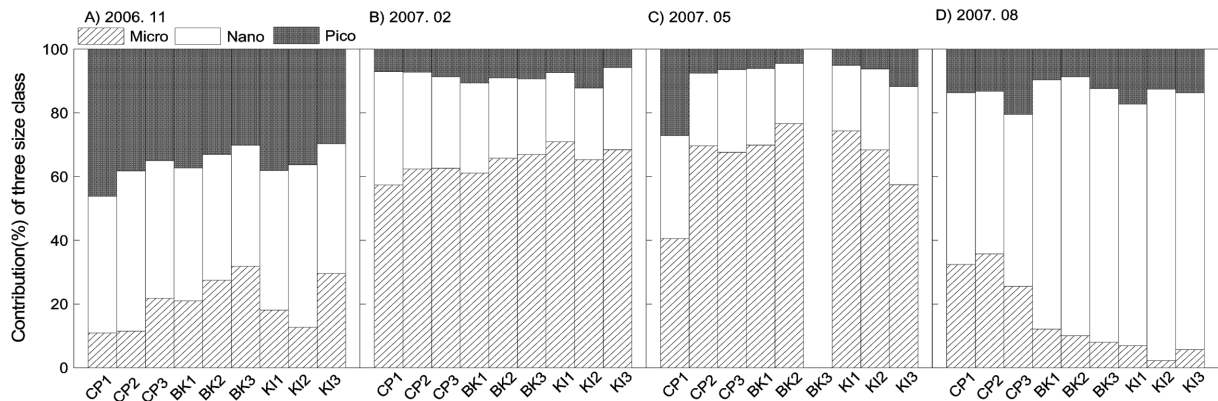


Fig. 6. Size structure of phytoplankton (% contributions of size classes to total chlorophyll *a*) in the Chunggye Bay.

Table 1. Correlation matrix of size-structured phytoplankton and environmental factors at Changpo, Bokkil, Kuil embankment and Chunggye Bay including all stations.

	Size class	Temp.	Salinity	Secchi-depth	NH <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>
Changpo	Whole	-0.577 <sup>b</sup>	0.149	0.189	-0.274	0.126	-0.205	-0.655 <sup>b</sup>
	Micro	-0.589 <sup>a</sup>	0.265	0.312	-0.335	0.121	-0.351	-0.644 <sup>b</sup>
	Nano	-0.394	-0.150	-0.113	-0.029	-0.002	0.490	-0.718 <sup>b</sup>
	Pico	-0.608 <sup>b</sup>	0.125	0.049	-0.450	0.656 <sup>b</sup>	-0.261	0.368
Bokkil	Whole	-0.635 <sup>b</sup>	0.663 <sup>b</sup>	0.450	-0.477	0.240	-0.734 <sup>b</sup>	-0.349
	Micro	-0.626 <sup>b</sup>	0.722 <sup>b</sup>	0.495	-0.523 <sup>a</sup>	0.279	-0.769 <sup>b</sup>	-0.314
	Nano	0.112	-0.335	-0.346	0.492	-0.634 <sup>b</sup>	0.225	-0.844 <sup>b</sup>
	Pico	-0.856 <sup>b</sup>	0.583 <sup>a</sup>	0.569 <sup>a</sup>	-0.823 <sup>b</sup>	0.934 <sup>b</sup>	-0.686 <sup>b</sup>	0.810 <sup>b</sup>
Kuil	Whole	-0.724 <sup>b</sup>	0.556 <sup>a</sup>	0.688 <sup>b</sup>	-0.525 <sup>a</sup>	0.337	-0.711 <sup>b</sup>	-0.091
	Micro	-0.686 <sup>b</sup>	0.567 <sup>a</sup>	0.698 <sup>b</sup>	-0.520 <sup>a</sup>	0.327	-0.723 <sup>b</sup>	-0.074
	Nano	-0.390	0.067	0.225	-0.100	-0.019	-0.192	-0.324
	Pico	-0.495 <sup>a</sup>	0.347	0.303	-0.409	0.402	-0.339	0.167
Chunggye	Whole	-0.621 <sup>b</sup>	0.386 <sup>b</sup>	0.411 <sup>b</sup>	-0.370 <sup>b</sup>	0.119	-0.542 <sup>b</sup>	-0.386 <sup>b</sup>
	Micro	-0.629 <sup>b</sup>	0.470 <sup>b</sup>	0.487 <sup>b</sup>	-0.428 <sup>b</sup>	0.231	-0.604 <sup>b</sup>	-0.340 <sup>b</sup>
	Nano	-0.258	-0.077	-0.028	0.053	-0.140	-0.108	-0.563 <sup>b</sup>
	Pico	-0.573 <sup>b</sup>	0.318	0.307 <sup>a</sup>	-0.440 <sup>b</sup>	0.530 <sup>b</sup>	-0.332 <sup>a</sup>	0.297 <sup>a</sup>

P<sup>a</sup><0.1, P<sup>b</sup><0.05

톤은 PO<sub>4</sub>와 유의한 음의 상관성을 나타냈고, 대형식물플랑크톤은 NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>와 유의한 음의 상관성을 나타냈다(Table 1). 중형식물플랑크톤은 NO<sub>2</sub>+NO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>와는 유의한 음의 상관성을 나타냈고, 소형식물플랑크톤은 NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>는 유의한 음의 상관성을 나타냈고, NO<sub>2</sub>+NO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>와는 유의한 양의 상관성을 나타냈다(Table 1).

구일방조제 해역에서 수온은 전체, 대형, 소형식물플랑크톤과 유의한 음의 상관성을 나타냈고, 염분과 투명도는 전체, 대형식물플랑크톤은 유의한 양의 상관성을 나타냈다(Table 1). 전체, 대형식물플랑크톤은 NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>와 유의한 음의 상관성을 나타냈다(Table 1). 청계만 전체 정점에 대한 회귀분석과 각 방조제별로 회귀분석은 유사한 것으로 나타났다.

## 고 찰

연안 하구에 서식하는 식물플랑크톤의 생산력 및 생체량은 다양한 환경 요인에 의해 영향을 받고 서로 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있다(Wafer *et al.*, 1983). 또한 연안 하구 환경에

입되는 담수로 인하여 식물플랑크톤의 성장과 사멸에 영향을 미치는 여러 가지 환경인자들을 일시적으로 변화시킨다(Malone and Chervin, 1979; Pennock, 1985; Gallegos *et al.*, 1992; Cloren *et al.*, 1983; Malone *et al.*, 1988; Boyer *et al.*, 1993). 신 등(2005)에 의하면, 방조제에서 담수 방류는 해역의 염분(salinity), 투명도(secchi depth) 및 영양염(nutrient) 증가 등 많은 환경적 변화를 일으킨다고 보고하였다. 또한 Fisher(1988)는 하구역의 환경요인 중 가장 큰 변동을 보이는 것은 염분이고, 이러한 염분 변화에 영향을 주는 것은 하구 내로 유입되는 담수량이며, 식물플랑크톤 생체량의 최대는 염분 변화에 영향을 받는다고 하였다. 본 연구에서도 창포, 복길, 구일방조제의 정점에서 염분의 변화, 투명도의 감소, 영양염의 증가와 같은 환경인자들의 변화를 보였다(Fig. 3E-L, 4A-D, 4I-L). 각 방조제로부터 유입되는 담수유입량을 직접적으로 확인할 수 없었지만 염분의 변화를 통해 2007년 8월에 담수유출량이 가장 많다는 것을 간접적으로 파악할 수 있었고 또한 담수 유출량은 구일방조제가 제일 많음을 알 수 있다(Fig. 3E-H).

일반적으로 수(水) 생태계에서 식물플랑크톤의 생체량은 빛, 영

양염과 같은 환경적 요인에 의해 조절되며, 영양염류중에 질소와 인은 식물플랑크톤의 성장에 필요한 필수요소이다(최 등, 2003). 수체 내 N:P ratio는 일반적으로 식물플랑크톤 세포내 물질 함량 비로 알려진 Redfield ratio(16N:1P)가 사용되고 조류의 생물량과 종의 친이를 예측하거나 조류성장에 대한 잠재적인 영양염 제한을 나타내는 간접적인 지표로 활용되고 있다(Smith, 1983; Fugimoto and Sudo, 1997). 본 조사해역의 각 방조제에서는 갈수기인 2007년 2월에 DIN:DIP ratio는 16이상으로 나타났다(Fig. 4R). 또한 Fisher(1988)가 미국 동부에 위치하고 있는 Chesapeake Bay에서 제시하였던 saturation level(DIN≈4 μM, DIP≈0.4 μM)과 비교하여 보면, 본 조사해역의 DIN은 4 μM보다 높게 나타났고 DIP는 0.4 μM보다 낮거나 유사하게 나타났다(Fig. 4B, 4F, 4J). 각 방조제 해역에서 전체식물플랑크톤과 인산염의 유의한 음의 상관성, 갈수기인 2007년 2월에 나타난 식물플랑크톤 대발생, 2006년 11월에 인산염 농도가 대발생기인 2007년 2월에 비해 2배정도 높은 것을 고려할 때 식물플랑크톤 성장에 인이 사용되어 고갈된 것으로 사료된다(Fig. 4I, 4J, 5B). 풍수기에는 DIN:DIP ratio는 16이하로 나타났으나 DIN과 DIP는 saturation level보다 현저히 높게 나타나 질소 제한이 아닐 가능성이 있다(Fig. 4D, 4H, 4L, 4T). Fisher(1988)는 담수가 유입될 때 대부분의 하구역(estuarine)에서 영양염류는 식물플랑크톤의 성장에 제한 요인으로 작용하지 않으며 불안정한 수괴나 높은 탁도 그리고 급격한 염분 변화가 영향을 미친다고 하였다. 양 등(2001)은 낙동강 하구역에서 풍수기에는 담수의 유입으로 염분의 급격한 감소와 탁도의 증가로 식물플랑크톤의 생체량과 생산력이 감소한다고 보고한바 있다. 본 조사해역에서도 각 방조제의 정점에서는 풍수기에 암모늄과 인산염은 높게 나타났으나 전체식물플랑크톤의 생체량은 2007년 8월에 낮고 갈수기인 2007년 2월에 높게 나타났고 상관분석에서 염분과 투명도와 양의 상관성을 고려하면(Table 1), 본 조사해역에서도 풍수기에 담수가 유입될 때 화학적 인자보다는 물리적 인자의 변동이 식물플랑크톤의 성장에 영향을 미칠것이라 사료된다(Fig. 2, 3E-H, 4D, 4L, 5A-D).

Goldman and Ryther(1976)는 대형식물플랑크톤은 다른 크기의 식물플랑크톤에 비해 상대적으로 낮은 수온을 선호한다고 보고하였다. 또한 양 등(2003), 현 등(2005)은 경기만, 아산만에서는 겨울에 대형식물플랑크톤에 의해 대발생(bloom)이 일어나고 여름으로 갈수록 대형식물플랑크톤에서 중형식물플랑크톤으로 크기 구조의 변동이 발생하는 것으로 보고하였고, 조사해역과 인접한 목포항 역시 겨울에 대형식물플랑크톤에 의하여 대발생이 일어나고 수문 개방시 대형식물플랑크톤에서 중형식물플랑크톤으로 크기 구조의 변동이 발생하였다고 신 등(2005)은 보고하였다. 본 조사해역인 청계만의 창포, 복길, 구일방조제에서는 2007년 2월에 대형식물플랑크톤에 의해 대발생이 일어난 것으로 나타났으며 풍수기로 갈수록 중형식물플랑크톤이 우점하는 크기 구조의 변동이 나타났다(Fig. 2, 6A-D). 소형식물플랑크톤은 일반적으로 연안 하구에서 따뜻한 수온과 충분한 빛이 존재하는 계절에 높은 성장률을 보인다(Loftus et al. 1972). 그러나 본 연구에서는 소형식물플랑크톤이 오히려 가을이 여름보다 높게 나타났는데 이는 여름철에 특징인 장마로 인한 탁도의 증가와 가을에 비해 짧은 일조시간으로 인한 광량의 감소가 영향을 미친 것으로 사료된다(Fig. 2, 3I-

L, 6A, 6D).

박(1994)은 복길방조제 해역에서는 *Thalassiosira*속은 2월부터 7월까지, *Skeletonema costatum*은 4월에, *Paralia sulcata*는 2월과 5월에, 그리고 *Eucampia zoodiacus*는 10월에 각각 우점종으로 출현하였다고 보고하였다. 본 조사기간동안에 각 방조제의 동정 결과(미발표 자료)를 보면, 2007년 2월과 5월에 각 방조제의 모든 정점에서는 각각 Bacillariophyceae의 *Cyclotella* sp., *Eucampia* sp.가 우점하였다. 2006년 11월에 창포방조제의 모든 정점과 구일방조제의 K11, K13정점에서는 Cryptophyceae의 *Cryptomonas* sp.가 우점하였고, 구일방조제의 K12정점에서는 Cyanophyceae의 *Microcystis* sp.가 우점하였다. 복길방조제의 BK1정점에서는 Bacillariophyceae의 *Coscinodiscus* sp.와 *Nitzschia* sp.가 우점하였는데 *Nitzschia* sp.가 chain을 형성한 것으로 나타났다. BK2, BK3정점에서는 Bacillariophyceae의 *Coscinodiscus* sp.가 우점하였다. 따라서 조사기간 중 2006년 11월에 BK1정점에서 발생한 chain형성은 식물플랑크톤 크기구조에 영향을 미쳐 크기구조만으로 동해역의 식물플랑크톤 동태 파악에는 한계가 있을 것으로 판단된다.

결론적으로 본 조사해역에서는 전체식물플랑크톤의 대발생은 갈수기인 2007년 2월에 대형식물플랑크톤에 의해 발생하였으며, 여름으로 갈수록 대형식물플랑크톤에서 중형식물플랑크톤으로 크기구조의 변동이 나타났다. 대발생이 일어났던 2007년 2월에 인이 고갈되었는데 이는 대발생에 인이 사용되었기 때문인 것으로 판단되고, 전체적으로 담수의 유입과 수온의 변화가 크기구조의 변동을 일으킨 것이라 사료된다. 풍수기에는 3개의 방조제에서 유출되는 담수량은 구일방조제가 제일 많았고 담수의 유입으로 인한 염분의 급격한 저하, 탁도의 감소, 영양염류의 증가가 나타났지만 전체식물플랑크톤 생체량은 낮게 나타났다. 즉 갈수기인 2007년 2월에는 식물플랑크톤의 성장에 영양염류가 영향을 미치지만 풍수기에는 담수의 유입으로 인한 높은 탁도 및 급격한 염분변화가 영양염류보다 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 본 연구해역과 같은 복잡한 생태환경을 완벽하게 이해하기 위해서는 시공간적으로 더욱 세분화된 현장조사와 중형폐쇄실험(mesocosm)과 같은 추가적인 연구가 필요할 것이라고 사료된다.

## 사 사

본 논문을 심사해주신 심사위원님들과 현장조사와 실험을 같이 하며 동고동락을 같이하는 목포해양대학교 해양 환경 미생물실험실원들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 박경양, 1994. 복길 간척지 주변 해역의 식물플랑크톤의 군집에 관한 연구. *Bulletin of Institute of Littoral Environment* **11**: 81-90.
- 송태곤, 1997. 전남 무안군의 4개 소하천의 저서무척추동물 및 담수어류상. *Bulletin of Institute of Littoral Environment*. **14**: 27-34.
- 신용식, 서호영, 현봉길, 2005. 해수층의 염분 변화가 일차생산자와 상위소비자의 크기구조에 미치는 영향. *한국해양학지*. **10**(2): 113-123.

- 심재형, 1994. 한국동식물도감 제34편 식물편 해양식물플랑크톤 양성렬, 송환석, 문창호, 권기영, 양한섭, 2001. 낙동강 하구역의 담수유입에 따른 해양환경 및 일차생산력 변화. *한국조류학회지*. **16**(2): 165-177.
- 양은진, 최중기, 2003. 경기만 수역에서 미세생물 군집의 계절적 변동 연구 II. 미소형 및 소형 동물플랑크톤. *한국해양학회지*. **8**: 78-93.
- 이상현, 신용식, 양성렬, 박 철, 2005. 아산만 식물플랑크톤의 계절별 군집분포 특성. *한국해양학회지*. **27**: 149-159.
- 최광현, 황순진, 김호섭, 한명수, 2003. 팔당호 식물플랑크톤의 제한영양염과 성장률의 경시적 변화. *한국유수학회지*. **26**(2): 139-149.
- 현봉길, 신용식, 박 철, 양성렬, 이영준, 2006. 아산만 식물플랑크톤 크기구조의 시공간적 변동. *한국환경생물지*. **24**(1): 7-18.
- Amstrong R.A. 1994. Grazing limitation and nutrient limitation in marine ecosystems: steady state solution of an ecosystem model with multiple food chains. *Limnol. Oceanogr.* **39**(3): 597-608.
- Anderson G.C. 1965. Fractionation of phytoplankton communities off the Washington and Oregon coasts. *Limnol. Oceanogr.* **10**: 477-480.
- Boyer, J.P., R.R. Christian and D.W. Stanley, 1993. Patterns phytoplankton primary productivity in the Neuse River estuary, North Carolina, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **97**: 287-297.
- Bold H.C. and M.J. Wynne, 1985. Introduction to the algae. 2nd Ed. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 720.
- Boynton W.R., W.M. Kemp and C.W. Keefe, 1982. A comparative analysis of nutrients and other factors influencing estuarine phytoplankton production, in: Estuarine Comparisons, edited by V. Kennedy, Academic Press, New York, pp. 69-90.
- Brook A.J. 1965. Planktonic Algae as indicators of lake types, with special reference to the desmidaceae. *Limnol. Oceanogr.* **10**: 403-411.
- Caraco N.F., J.J. Cole, P.A. Raymond, D.L. Strayer, M.L. Pace, S.E.G. Findlay, D.T. Fisher, 1997. Zebra mussel invasion in a large, turbid river: Phytoplankton response to increased grazing. *Ecol.* **78**(2): 599-602.
- Carpenter S.R., J.F. Kitchell, J.R. Hodgson, P.A. Cochran, J.J. Elser, M.M. Elser, D.M. Lodge, X. Kretchmer, X. He, C.N. von Ende, 1987. Regulation of lake primary productivity by food web structure. *Ecol.* **68**: 1863-1876.
- Chapman V.J. 1968. The algae. Macmillan London, Melbourne, Toronto St Martis Press, New York, pp. 472.
- Cloren J.E., A.E. Alpine, B.E. Cole, R.L.J. Wong, J.F. Arthur and M.D. Ball, 1983. River discharge controls phytoplankton dynamics in the northern San Francisco Bay Estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **16**: 415-429.
- Coffin B. Richard, Sharp and H. Jonathan, 1987. Microbial trophodynamics in the Delaware Estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **41**: 253-266.
- Dodge J.D. 1975. The fine structure of algal cells. Academic Press, Inc. London, pp. 261.
- Durbin 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.
- Fisher T.R., L.W. Harding, D.W. Jr., Stanley and L.G. Ward, 1988. Phytoplankton, nutrient and turbidity in the Chesapeake, Delaware and Hudson estuaries. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **27**: 61-93.
- Fugimoto, N. and R. Sudo, 1997. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under various N:P supply ratios and temperatures. *Limnol. Oceanogr.* **42**: 250-256.
- Smith, V.H, 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Sci.* **221**: 669-671.
- Gallegos, C.L., T.E. Jordan and D.L. Correl, 1992. Eventscale response of phytoplankton to watershed inputs in a subestuary: Timing, magnitude, and location of blooms. *Limnol. Oceanogr.* **37**(4): 813-825.
- Goldman, J.C. and J.H. Ryther, 1976. Temperature-influenced species competition in mass cultures of marine phytoplankton. *Biotechnol. Bioeng.* **18**: 1125-1144.
- Harper, D. 1992. Eutrophication of freshwater. Principles, problems and restoration. Chapman and Hall, London, pp. 329.
- Hein, M., M.F. Pedersons and K. Sand-Jensen, 1995. Size-dependent nitrogen uptake in micro-and macroalgae. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **118**: 247-253.
- Hellawell J.M. 1986. Biological indicators of freshwater pollution and environmental management. Elsevier Applied Science Publishers, pp. 546.
- Kemp W.M. and W.R. Boynton, 1981. External and internal factors regulating metabolic roles of an estuarine benthic community. *Oecol.* **51**: 19-27.
- Kirk J.T.O. 1994. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. p.75-77. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Kivi K., S. Kaitala, H. Kuosa, J. Kuparinen, E. Leskinen, R. Lignell, B. Marcussen and T. Tamminen, 1993. Nutrient limitation and grazing control of the Baltic plankton community during annual succession. *Limnol. Oceanogr.* **38**(5): 893-905.
- Lamont-Doherty Geological Observatory, 1979. Effects of 22- $\mu$ m screens on size-frequency distributions of suspended particles and biomass estimates of phytoplankton size fractions. *Limnol. Oceanogr.* **24**(5): 956-960.
- Loftus M.E., D.V. Subba Rao and H.H. Seliger, 1972. Growth and dissipation of phytoplankton in Chesapeake Bay. I. Response to a large pulse of rainfall. *Chesapeake Science* **13**: 282-99.
- Malone T.C. 1971. The relative importance of nanoplankton and netplankton as primary producers in the California Current System. *Fish. Bull.* **69**: 799-820.
- Malone T.C., L.H. Crocker, S.E. Pike and B.W. Wendler, 1988. Influences of river flow on the dynamics of phytoplankton production in a partially stratified estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **48**: 235-249.
- Malone T.C. and M.B. Chervin, 1979. The production and fate of phytoplankton size fraction in the plume of Hudson river, New York Bight. *Limnol. Oceanogr.* **24**: 683-696.
- Marshcall, H.G. and W.A. Raymond, 1988. Spatial and temporal diatom assemblages and other phytoplankton within the lower Chesapeake Bay, USA. Diatom symposium.
- McCarthy, J.J., W.R. Taylor and M.E. Loftus, 1974. Significance of nanoplankton in the Chesapeake Bay Estuary and problems associated with the measurement of nanoplankton productivity. *Mar.*



- Biol.* **24**: 7–16.
- Pennock, J.R. 1985. Chlorophyll distributions in the Delaware Estuary: Regulation by light-limitations. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **21**: 711–725.
- Parsons T.T., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Peramon Press, New York, pp. 22–25.
- Parsons T.R. and R.J. LeBrasseur, 1970. The availability of food to different trophic levels in the marine food chain, pp. 325–343.
- Ryther J.H. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. *Sci.* **166**: 72–76.
- Sin Y.S. and J.M. Kim, 2003. Relative importance of Bottom-up vs. Top-down controls on Size-structured Phytoplankton Dynamics in a Freshwater Ecosystem; I. Temporal and Spatial variations of size structure *Korean J. Limnol.* **36**: 403–412.
- Stemann Nielsen E. and E.A. Jensen, 1957. Primary oceanic production the autotrophic production of organic matter in the ocean. *Galathea Rep.* **1**: 49–136.
- Sundbaeck K., B. Joensen, P. Nilsson and I. Lindstroem, 1990. Impact of accumulating drifting macroalgae on a shallow-water sediment system: An experimental study, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **58**(3): 261–274.
- Watanabe T., 1962. On the Biotic. Index of Water Pollution based upon the species Number of Bacillariophyceae in the Tokoro River in Hokkaido(in Japanese). *Japan J. Ecol.* **12**: 216–222.
- Wafer M.V.M., P.I. Le Corre and J.L. Birrien, 1983. Nutrients and primary production in permanently well-mixed temperate coastal water. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **17**: 431–446.
- Walsh J.J. 1976. Herbivory as a factor in patterns of nutrient utilization in the sea. *Limnol. Oceanogr.* **21**: 1–13.
- Welschmeyer and Lorenzen, 1985. Role of herbivory in controlling phytoplankton abundance: annual pigment budget for a temperate marine fjord. *Mar. Biol.* **90**(1): 75–86.
- Yentsch C.S. and J.H. Ryther, 1959. Relative significance of the net phytoplankton and nanoplankton in the waters of Vineyard Sound. *J. Cons. Cons. Int. Explor. Mer.* **24**: 231–238.
- Yentch C.S. and D.W. Menzel, 1963. A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep-Sea Res.* **10**: 221–231.

---

2008년 8월 26일 원고접수

2008년 10월 31일 수정본 채택

담당편집위원: 이준백