

## 가을철 광양만 식물플랑크톤의 수평 분포와 추가 영양염 공급이 식물플랑크톤 성장에 미치는 영향

배시우<sup>1,3</sup> · 김동선<sup>2</sup> · 김영옥<sup>1</sup> · 문창호<sup>3</sup> · 백승호<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>한국해양과학기술원 남해특성연구부, <sup>2</sup>한국해양과학기술원 해양순환 기후연구부,  
<sup>3</sup>국립 부경대학교 해양학과

### The Influences of Additional Nutrients on Phytoplankton Growth and Horizontal Phytoplankton Community Distribution during the Autumn Season in Gwangyang Bay, Korea

Si Woo Bae<sup>1,3</sup>, Dongseon Kim<sup>2</sup>, Young Ok Kim<sup>1</sup>, Chang Ho Moon<sup>3</sup> and Seung Ho Baek<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Ocean Science and Technology/South Sea Institute, Geoje 656-830, Korea

<sup>2</sup>Ocean Circulation and Climate Research, KIOST Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

<sup>3</sup>Department of Oceanography, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

**Abstract** - In order to estimate the effect of additional nutrients on phytoplankton growth and horizontal phytoplankton community distribution during the autumn season in 2010 and 2011, we investigated the abiotic and biotic factors of surface and bottom waters at 20 stations of inner and offshore areas in Gwangyang Bay, Korea. Also, nutrient additional experiments were conducted to assess additional nutrient effects on phytoplankton assemblage using the surface water. In both years, the total nutrients were high at the enclosed inner bay and the mouth of Seomjin River, whereas it was low at the St.15~20 where in influenced by the surface warm water current from offshore of the bay. On the other hand, nano- and pico-sized Chl. *a* were gradually increased towards the outer bay and their trends were significant in 2011 than in 2010. The cryptophyta species occupied more than 85% of total phytoplankton assemblages in 2010, whereas their abundance in 2011 remains to be 1/10 levels of 2010. Following the cryptophyta species, the diatom *Chaetoceros* spp. and *Skeletonema* -like spp. were found to be dominant species. Further the bioassay experimental results shows that the phytoplankton biomass in the +N and +NP treatments was higher compared to control and +P treatments and its trend was significant at St.8 and St.20 where nutrient concentration were low. Based on the bioassay and field survey, providing the high nutrients may have stimulated to phytoplankton growth such as *S. costatum*-like spp.. In particular, opportunistic micro-algae such as *Cryptomonas* spp. were able to achieve the high biomass under the relatively mid nutrient condition from bottom after break down of seasonal stratification in the Gwangyang Bay.

**Key words** : *Cryptomonas* spp., size fraction, phytoplankton community, nutrient addition experiments, Gwangyang Bay

\* Corresponding author: Seung Ho Baek, Tel. 055-639-8513,  
Fax. 055-639-8509, E-mail. baeksh@kiost.ac

## 서 론

식물플랑크톤은 먹이 영양단계에서 상위 포식자에게 에너지를 공급하는 1차 생산자로서 중요한 역할을 한다. 그들은 광량, 수온, 염분, 영양염류와 같은 비생물학적인 요인과 더불어 상위 포식자의 포식압과 같은 생물학적 요인에 의해 크게 영향을 받으며, 해역의 환경특성에 따라서 시·공간적으로 시시각각 변동한다(Mukai 1987; Frost 1991; Sommer 1994). 우리나라와 같은 4계절이 뚜렷한 온대 해역에서는 식물플랑크톤이 춘계와 추계의 대증식이 잘 알려져 있고, 춘계의 대증식(Spring bloom)은 동계 수층혼합으로 공급된 영양염이 일사량 증가와 함께 작용하여 일어나며, 추계의 대증식은 하계 고갈된 영양염이 표층주변의 온도하강과 더불어 점차적인 성층의 파괴로 인하여 저층으로부터 재차 공급되는 영양염에 기인한다. 특히 영양염류는 식물플랑크톤 증식과 밀접한 관계를 가지며, 생화학적 과정으로 퇴적물로 제거되거나, 일부는 환원 과정을 거쳐 해수 중으로 재용출되기 때문에 보존성이 약하며 순환경로 및 거동이 매우 복잡하여 생물학적 요인과 더불어 비생물학적 요인과 결부시켜 그 특성을 파악할 필요성이 있다(Lee 1999).

식물플랑크톤 성장에 영향을 미치는 제한영양염을 분석하는 방법으로는 절대 영양염 농도의 하한치 값을 측정하는 법( $N < 1 \mu M$ ,  $P < 0.2 \mu M$ ,  $Si < 2 \mu M$ )과 화학량론적 영양염( $N:P:Si=16:1:16$ )의 상대적인 비로 평가하는 방법 등이 있으나, 용존 무기질소 및 용존 무기인의 농도가 아주 낮을 경우 측정오차로 인해 잘못된 해석을 내릴 수 있고(Lee *et al.* 2001), 같은 성분 구성비라도 절대 농도가 높은 경우 제한 영양염을 판단하기 어렵다. 이에 반해, 현장수에 영양염을 첨가하고 식물플랑크톤을 현장 또는 실험실에서 배양하는 생물검정실험(algal bioassay)은 단일 배양된 분리배양주와 현장 식물플랑크톤을 이용하는 두 방법이 일반적으로 알려져 있으며(Claesson and Forsberg 1987), 특히 현장 개체군을 이용한 배양 실험은 해양생태계에서 식물플랑크톤의 영양염 흡수능을 보다 잘 반영할 수 있어 다른 방법에 비해 널리 활용되고 있다(Munawar *et al.* 1983).

광양만은 남해안 중앙부에 위치하고 있으며, 북쪽의 광양지역, 서쪽의 여수반도, 그리고 동쪽의 남해도로 둘러싸여 있고, 남해를 향해 열려있다. 만의 동서간의 길이는 27 km, 남북의 폭은 15 km인 타원형의 반폐쇄형 내만으로 중앙에는 묘도가 위치하고, 북쪽에는 섬진강, 북서쪽에는 광양의 서천 및 동천으로 담수가 유입되고 있다.

만 북부지역에는 광양제철소와 남부지역에는 여천국가산업단지가 위치해 있고, 인구가 밀집한 지역에서 생활하수 및 산업공단지역으로부터 폐수가 유입될 수 있다. 호우시 많은 양의 담수가 유입되면 식물플랑크톤의 증식에 현저한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 특히 광양만은 계절에 따른 강우 유입량이 현저한 차이를 나타내고 있으며, 이와 같은 강우량의 차이는 식물플랑크톤의 성장에 필요한 영양염 거동이 역동적으로 변동할 가능성이 높다. 또한 광양만은 반폐쇄성만이면서 해수의 순환이 비교적 빠르면서 원활하여, 다른 해역과 비교하여 영양염의 변화특성이 다를 가능성이 높다(Lee *et al.* 2001).

광양만 해역에서 식물플랑크톤에 관한 연구는 와편모조류의 시스트분포(Kim *et al.* 2003), 식물플랑크톤 군집분포 특성(Cho *et al.* 2006, 2007; Baek *et al.* 2010, 2011), 식물플랑크톤의 성장에 필요한 영양염 제한(Lee *et al.* 2001; Kwon *et al.* 2002; Baek *et al.* 2011), 무기영양염의 시공간적 분포를 조절하는 요인(Jang *et al.* 2005), 섬진강 하구역에서 영양염의 거동(Kwon *et al.* 2001; Lim *et al.* 2003) 등이 있다. 이러한 연구의 대부분은 섬진강 하구역에서 담수의 유입이 식물플랑크톤의 성장에 미치는 영향과 연중 출현하는 식물플랑크톤의 분포특성에 초점을 두고 있다. 결과적으로 어떤 특정기간에 광양만에서 식물플랑크톤 군집구조와 제한영양염 특성을 파악하기 위해서 생물검정실험과 병행하여 식물플랑크톤의 증식 특성을 규명한 연구는 동계에 수행한 Baek *et al.* (2011)의 연구로 제한되어 있다. 따라서 본 연구는 Baek *et al.* (2011)의 후속 연구로 2010년과 2011년 추계에 성층이 파괴되어 저층으로부터 공급되는 영양염이 식물플랑크톤의 성장에 미치는 영향을 유추하기 위해서 인위적으로 영양염을 첨가하여 식물플랑크톤의 증식 및 반응 특성을 파악하고 현장에서 절대영양염의 제한과 화학량론적 영양염 제한이 식물플랑크톤의 종조성에 미치는 영향을 조사하였다. 아울러 어떠한 해양환경요인이 식물플랑크톤의 성장에 영향을 미치는지 검토하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 현장조사

현장조사는 광양만에서 2010년 20개 정점에서, 2011년에는 가장 외측 정점을 제외한 19개 정점에서 2010년 11월 21~22일과 2011년 11월 17~18일에 표층수는 버킷으로 저층수는 니스킨 채수기를 이용하여 각각 채수하였다(Fig. 1). 수온, 염분, pH는 CTD를 이용하여 현장

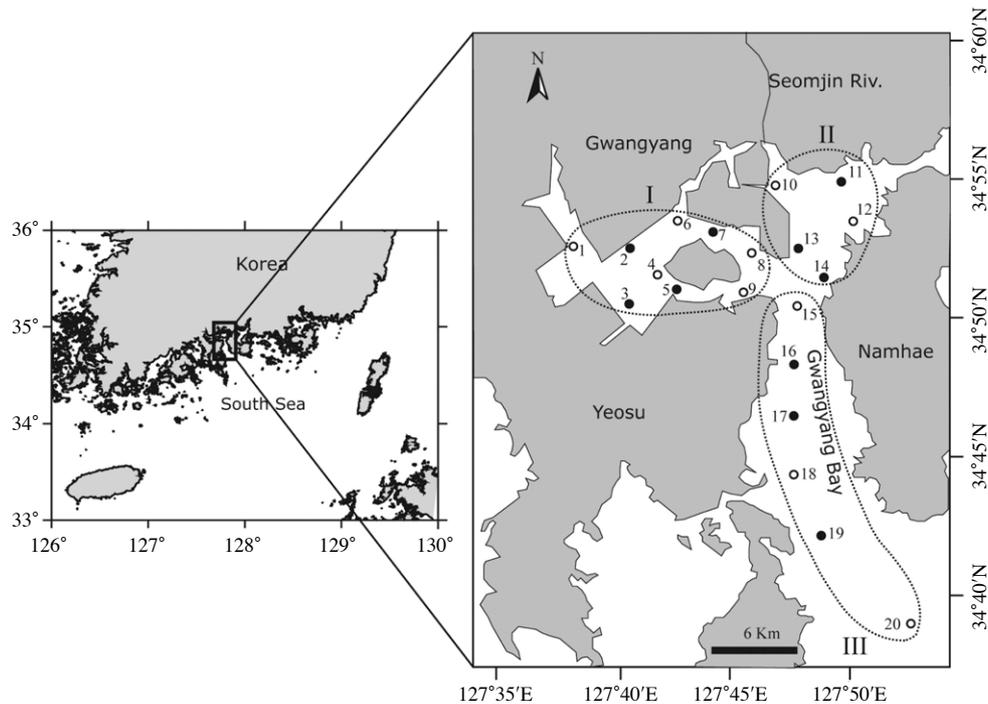


Fig. 1. Location of sampling sites in Gwangyang Bay, Korea. White open circles indicates autumn bioassay stations in 2010.

에서 측정하였다. 투명도는 선상에서 Secchi disc를 이용하여 측정하였다. Chlorophyll *a* (Chl. *a*) 농도 측정을 위해서 표층과 저층수 300 mL를 선상에서 GF/F여과지 (47 mm Whatman glass fiber filters)로 여과하였고, 그 여과지는 15 mL 튜브에 넣어 냉동보관하였다. 용존산소 (DO)는 표층과 저층수를 용존산소병에 채수하여 잉클러법으로 측정하였다. 영양염 분석용 시료는 GF/F여과지로 여과한 해수 20 mL를 30 mL PC병에 넣고 냉동보관하였다. 식물플랑크톤 종조성과 정량분석을 위해 500 mL용 채수병에 표층수와 저층수를 각각 500 mL를 넣고 곧바로 Lugol 용액으로 최종농도 1%로 고정했다. 특히 식물플랑크톤의 크기별 Chl. *a* 농도를 조사하기 위해 표층수를 3  $\mu\text{m}$  ~ 20  $\mu\text{m}$ 의 나노 (Nano) 크기와 < 3  $\mu\text{m}$ 의 피코 (Pico) 크기로 나누었다. Chl. *a* 농도는 냉동 보관한 여과지를 90% acetone에 넣고 24시간 냉암소에서 엽록소를 추출한 후 형광측정기 (Turner Designs 10-AU Fluorometer)로 분석하였다 (Parsons *et al.* 1984).

영양염류는 냉동 보관한 시료를 분석전 해동하여 규산염 (SiO<sub>2</sub>), 암모니아성 질소 (NH<sub>4</sub>-N), 아질산과 질산성 질소 (NO<sub>2</sub>+NO<sub>3</sub>-N), 인산염 (PO<sub>4</sub>-P)을 Parsons *et al.* (1984)의 분석법에 따라서 Auto Analyzer (Bran Luebbe)로 분석하였다.

식물플랑크톤의 종조성과 현존량을 파악하기 위해서

500 mL의 샘플을 50 mL로 농축시킨 후 100 ~ 300  $\mu\text{L}$  분주하여 200배 또는 400배 배율로 동정 및 계수하였다. 특히 광학현미경에서 동정이 극히 어려운 종은 속 수준에서 동정하였다.

## 2. 영양염 첨가 실험

생물검정실험은 2010년 10개 정점에서, 표층해수를 mesh (200  $\mu\text{m}$  pore size)로 자연여과하여 동물플랑크톤을 제거한 후 실험실로 운반하여, 시험관 ( $\phi 22 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ , PYREX)에 식물플랑크톤 개체수 밀도를 동일하게 맞춘 후 광량 60  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 광주기 12L:12D, 온도 15°C의 조건으로 수행되었다. 생물검정실험은 현장수에 영양염을 첨가하지 않은 대조군 (control), 질산염 첨가군 (+N), 인산염 첨가군 (+P), 질산염과 인산염 첨가군 (+NP)으로 설정하였고, 질산염은 KNO<sub>3</sub>, 인산염은 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 분말을 이용하여, +N의 최종농도는 +20  $\mu\text{M}$ 로, +P는 2  $\mu\text{M}$ 로, +NP는 N을 20  $\mu\text{M}$ 와 함께 P를 2  $\mu\text{M}$ 로 각각 조절하였다. 현장수에 영양염과 식물플랑크톤을 일정량 주입한 시험관 ( $\phi 22 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ , PYREX)을 광량 60  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 광주기 12L:12D, 온도 15°C 조건의 배양기에서 실험을 수행하였다. 모든 실험에서 생물량의 변동은 2일 간격으로 *in vivo* 상태의 형광값을 Fluorometer (Turner

design 10-AU, USA)로 12일 측정하였고, 식물플랑크톤 군집조성을 조사하기 위해 1mL씩 sub-sample하여 Lugol 용액으로 최종농도 1%로 고정하여 보관하였다.

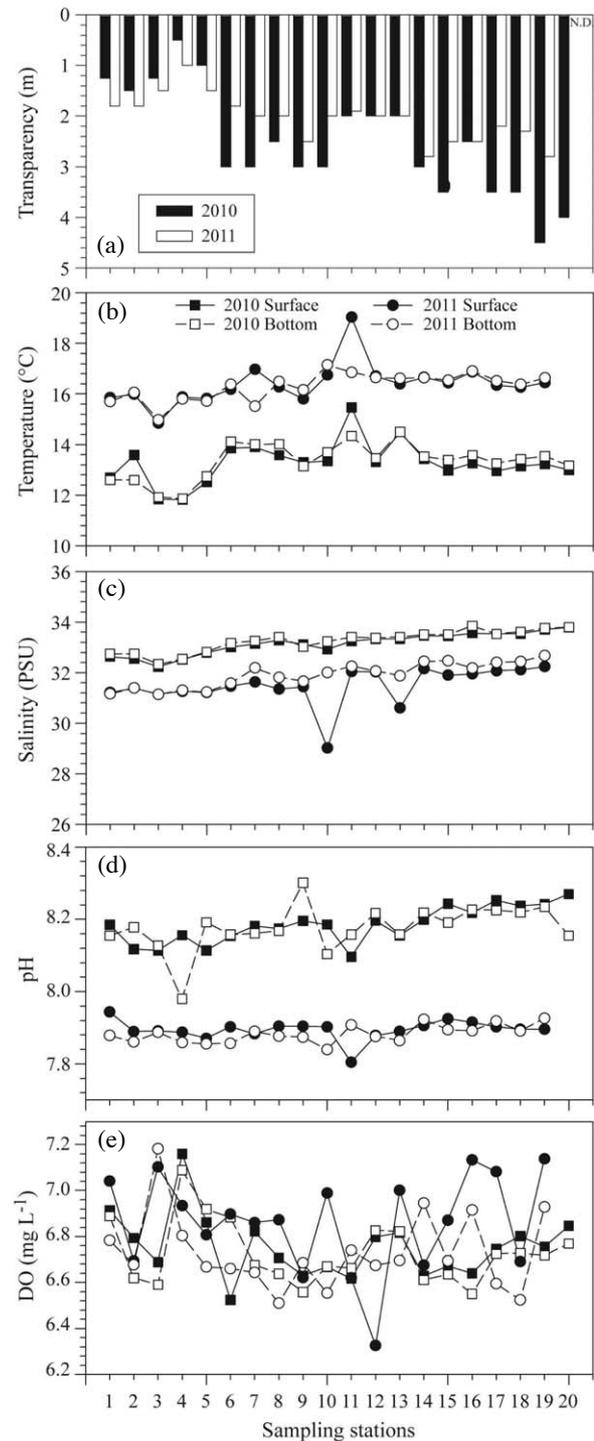
각각의 영양염첨가군의 성장효율은 각 정점별 8일간 배양한 형광값의 성장율을 산출한 후  $(Tf/Cf-1) \times 100$  식에 대입하여 구할 수 있었다. 여기서  $Tf$ 는 첨가군의 성장율의 값이며,  $Cf$ 는 대조군 성장율의 값이다.

## 결 과

### 1. 환경요인

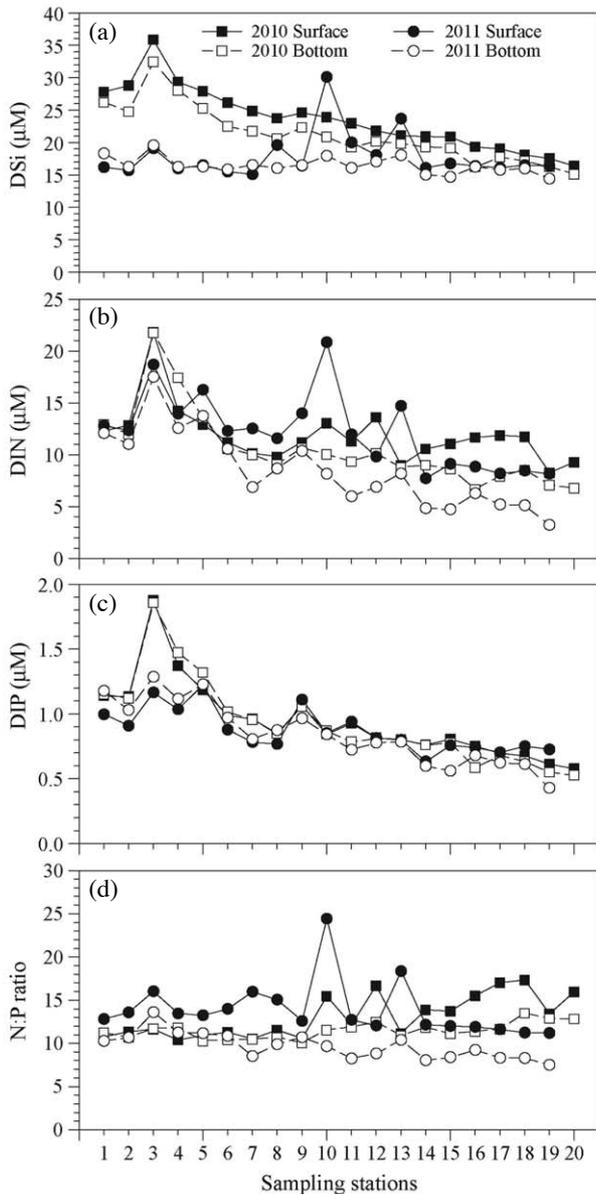
2010년과 2011년 각 정점에서 환경요인의 변화는 Fig. 2와 3에서 나타내었다. 2010년 투명도는 만 내측에서 2 m 이하로 낮게 나타났으며, 정점6~10에서 3 m 내외로 상대적으로 높게 나타났다. 섬진강 인근해역인 정점11~13에서는 2 m 내외로 나타났으며, 외해로 갈수록 높게 나타나 정점19에서 4.5m로 가장 높게 관찰되었다. 특히 2011년의 투명도는 2010년보다 내만에서 다소 높게 나타났으며, 그외 정점에서는 상대적으로 낮은 값을 유지하였다(Fig. 2a). 표층 수온은 2010년 평균  $13.30 \pm 0.81$ 로, 2011년  $16.40 \pm 0.80$ 보다 낮게 나타났으며, 정점11에서 2010년과 2011년에 각각  $15.5^\circ\text{C}$ 와  $19.04^\circ\text{C}$ 로 상대적으로 높게 나타났다. 2010년과 2011년의 연도별 표층과 저층의 수온차이는 크지 않았다(Fig. 2b). 염분은 표층에서 2010년 평균  $33.15 \pm 0.43$  psu로, 2011년의  $31.48 \pm 0.74$  psu보다 상대적으로 높게 나타났으며, 저층 염분 또한 2010년 평균  $33.25 \pm 0.42$  psu로, 2011년 평균  $31.90 \pm 0.49$  psu보다 높게 나타났다(Fig. 2c). pH는 표층에서 2010년 평균  $8.18 \pm 0.05$ 로 정점간 큰 차이는 보이지 않았으며, 외해로 갈수록 약간 증가하는 경향을 보였고, 2011년의 표층에서  $7.89 \pm 0.02$ 로 2010년보다 조금 낮게 나타났다(Fig. 2d). 용존산소는 2010년 표층에서  $6.52 \text{ mg L}^{-1} \sim 7.19 \text{ mg L}^{-1}$ 로 변동하였고, 정점간 변동이 크게 나타났으며, 2011년에도 최소  $6.63 \text{ mg L}^{-1}$ 에서 최대  $7.13 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 정점간 변동이 크게 나타났다(Fig. 2e).

각 정점간 영양염농도의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 규산염은 2010년 내만 정점3의 표층에서  $35.87 \mu\text{M}$ 로 가장 높게 나타났고, 외해역으로 갈수록 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 특히 저층에서는 표층보다 약간 낮은 농도를 보였으며, 각 정점별 농도변화의 경향은 표층과 유사하였다. 반면 2011년 규산염은 정점10, 13을 제외하면 정점간의 차이는 크지 않았고,  $16.00 \mu\text{M}$  전후의 값으로 일정하게 나타났다. 섬진강 담수의 영향을 직접



**Fig. 2.** Horizontal distribution changes of transparency (a), temperature (b), salinity (c), pH (d) and dissolved oxygen (DO) (e) in 2010 and 2011 in Gwangyang Bay. White and black indicate surface and bottom layers, respectively.

적으로 받는 정점10에서  $30.12 \mu\text{M}$ 로 높게 나타났다. DIN(질산염+아질산염+암모니움)은 2010년 표층 평균



**Fig. 3.** Horizontal distribution changes of DSi (a), DIN (nitrate, nitrite, ammonia) (b), DIP (c), N:P ratios and Chl. *a* concentration (d) in 2010 and 2011 in Gwangyang Bay. White and black indicate surface and bottom layers, respectively.

이  $11.88 \pm 2.81 \mu\text{M}$ 로, 저층  $10.54 \pm 3.66 \mu\text{M}$ 보다 약간 높게 나타났고, 특히 내만 정점3에서  $21.80 \mu\text{M}$ 로 가장 높았고, 외해 정점19에서  $8.24 \mu\text{M}$ 로 가장 낮게 나타났다. 동일하게 2011년에도 표층 평균이  $12.20 \pm 3.64 \mu\text{M}$ 로, 저층평균  $8.50 \pm 3.70 \mu\text{M}$ 보다 다소 높게 나타났다. DIN 농도에서도 DSi농도와 유사하게 섬진강 하구역 담수의 영향을 받는 정점10 표층에서  $20.81 \mu\text{M}$ 로 가장 높았다. DIP는 2010년 내만 정점3 표층에서  $1.88 \mu\text{M}$ 로 가장 높

게 나타났으며, 규산염의 증감경향과 유사하게 표층과 저층 모두 외해로 갈수록 감소하였다.

아울러 해역별 환경요인과 영양염 농도의 변화를 구체적으로 파악하기 위해서 광양만 해역을 3개로 나누어 평가하였다(Fig. 4). 해역I은 내만 해역의 특성을 가지는 정점1~9, 해역II은 섬진강 하구 담수의 영향을 받는 정점10~14, 해역III은 외해역의 특성을 가지는 정점15~20으로 나누었다. 수온은 각 해역간 큰 차이가 없었으며, 2010년에 비해 2011년이 약간 높았고, 염분 또한 해역별 차이는 크지 않았다. 투명도는 2010년 해역I에서 낮았고, 해역III에서 높았으며, 2011년에도 2010년과 유사한 경향을 보였으나, 해역별 값의 차이는 2010년보다 낮았다. 규산염은 2010년 해역I에서 평균  $27.67 \pm 3.64 \mu\text{M}$ 로 가장 높게 나타났으며, 해역III에서 가장 낮았다. 반면 2011년에는 해역II에서  $21.59 \pm 5.52 \mu\text{M}$ 로 가장 높게 나타났으며 해역I과 해역III는  $16.00 \mu\text{M}$  전후로 큰 차이를 보이지 않았다. DIN은 내만해역인 해역I과 해역II에서 높았고, 상대적으로 외해역으로 가는 해역III에서는 낮았다. DIP는 해역I에서 높은 반면, 해역II와 해역III에서 상대적으로 낮게 관찰되었다.

Chl. *a*농도는 전체, 나노(Nano,  $3 \sim 20 \mu\text{m}$ ), 피코(Pico,  $< 3 \mu\text{m}$ ) 크기로 분획하여 구분하였고, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 2010년 정점20에서 전체 Chl. *a*농도가  $3.32 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높은 값을 나타내었다. 외해로 갈수록  $20 \mu\text{m}$  이상의 Chl. *a*농도가 높게 나타났고, 나노 크기는 낮았다. 2011년에는 총 Chl. *a*가 내만 정점3에서  $3.17 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높은 값을 나타내었다. 특히 내만정점2, 3을 제외하면  $3 \mu\text{m}$  미만의 피코 크기의 Chl. *a*농도가 전 해역에서 상대적으로 높게 나타났다.

## 2. 식물플랑크톤의 수평적 분포

2010년과 2011년 표층 식물플랑크톤의 총 개체수와 식물플랑크톤의 그룹별 점유율 및 구조류에 대한 주요 우점종의 정점별 출현 양상을 Fig. 6에 나타내었다. 2010년 표층에서 총 58종이 관찰되었다. 은편모조류가 대부분의 정점에서 85% 이상으로 우점하였고, 다음으로 구조류순으로 나타났다. 식물플랑크톤의 총 개체수는 해역별로 해역I(평균  $2.5 \times 10^5 \text{ cells L}^{-1}$ )에서 높았으며, 정점별로는 정점2에서  $3.4 \times 10^5 \text{ cells L}^{-1}$ 로 가장 높았다. 해역II와 해역III에서는 평균  $1.5 \times 10^5 \text{ cells L}^{-1}$  전후로 유사하였고, 특히 정점11에서 가장 낮은  $9.8 \times 10^4 \text{ cells L}^{-1}$ 로 관찰되었다. 정점18에서 은편모조류 다음으로 황색편모조류인 *Dictyocha speculum*가  $1.5 \times 10^4 \text{ cells L}^{-1}$ 로 높게

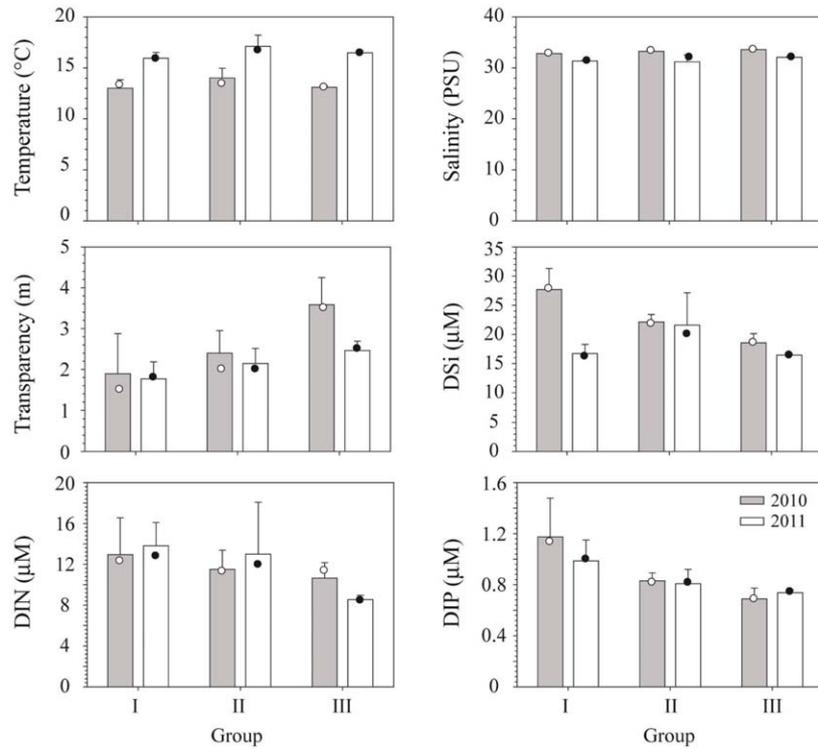


Fig. 4. Variation of environmental factors in three different zones in Gwangyang Bay.

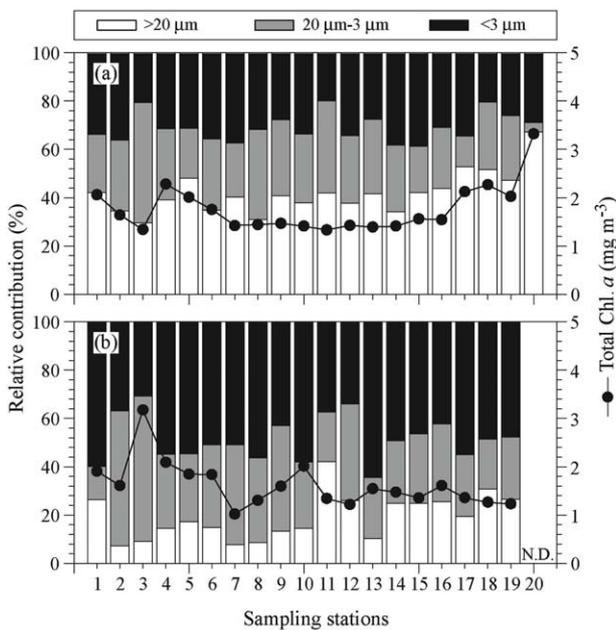


Fig. 5. Percentage of Chl. a concentration in each size fraction at the surface in 2010 (a) and 2011 (b).

나타났으며, 규조류중 *Skeletonema costatum*-like species 가  $1.0 \times 10^4$  cells  $L^{-1}$ 로 나타났다.

2011년의 식물플랑크톤은 총 61종이었고, 그 중 규조류가 34종으로 가장 높게 나타났고, 다음으로 와편모조류 23종과 더불어 은편모류, 규질편모류, 유글레나류순으로 나타났다. 총 식물플랑크톤 개체수는 해역I에서  $4.5 \times 10^4$  cells  $L^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며 해역II와 III으로 갈수록 낮게 나타났다. 해역II에서는 섬진강 하구 담수의 유입을 직접적으로 받는 해역(10, 13, 14)과 동부해역(11, 12)의 식물플랑크톤 종조성이 다르게 나타났으며, 담수의 직접적인 영향을 받는 해역에서는 은편모조류가 우점하였고, 동부해역에서는 규조류가 평균  $8.8 \times 10^3$  cells  $L^{-1}$ 로 높게 나타났고, 특히 *Skeletonema costatum*-like species와 *Thalassiosira pacifica*가 우점하였다. 2010년과 2011년 추계 광양만에서 물리화학적 환경인자가 식물플랑크톤 군집구조에 미치는 영향을 파악하기 위해서 식물플랑크톤군집과 환경인자와의 상관성 분석을 하였다(Table 2). 2010년 수온과 DO는 식물플랑크톤 군집과의 상관성이 보이지 않았고, 전체 식물플랑크톤 현존량과 은편모조류는 염분과 투명도에 유의한 음(-)의 상관성을 보였다. 반면, 영양염류( $PO_4$ ,  $Si(OH)_4$ ,  $NO_3$ ,  $NH_4$ )와 식물플랑크톤의 현존량과는 유의한 양(+의 상관성을 보였다. 2011년에는 pH와 DO는 식물플랑크톤 군집과 상관성이 나타나지 않았으며, 수온과 염분은 Chl. a와

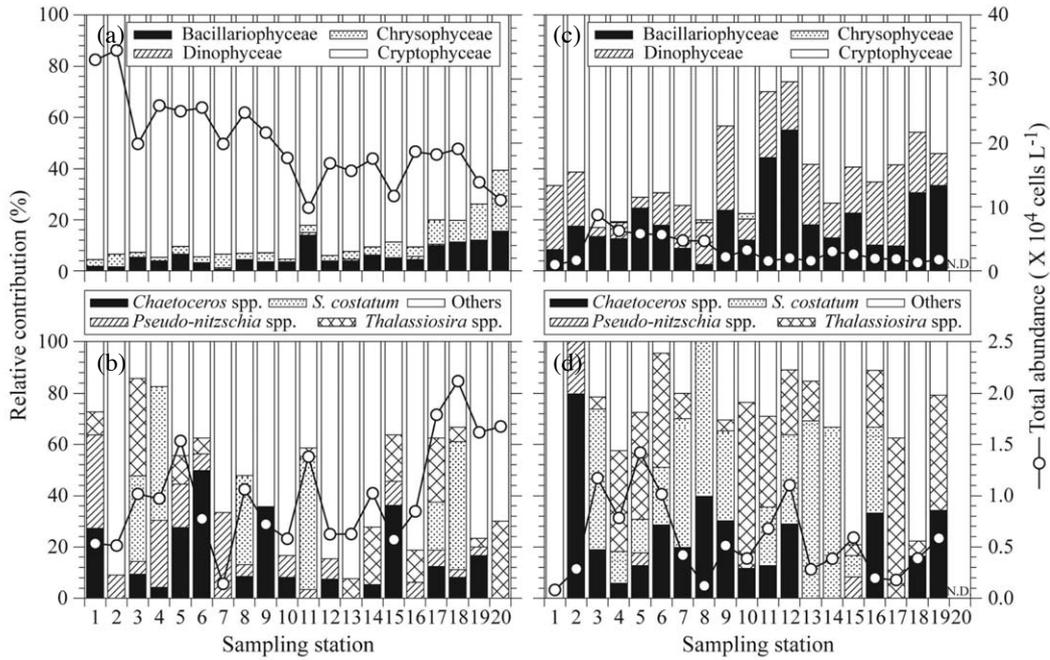


Fig. 6. Relative contribution of phytoplankton classes (upper) and dominant diatom species (lower) in 2010 (a, b) and 2011 (c, d).

Table 1. Nutrient limitation assessment in Gwangyang Bay based on two different criteria (nutrient concentration and ratios). Bold words indicates the nutrient limitation

Station	Si limitation		N limitation				P limitation		Nutrient concentration limitation									
	DSi/DIP < 10		DSi/DIN < 1		DIN/DIP < 10		DSi/DIN > 1		DSi/DIP > 22		DIN/DIP > 22		DIN < 1.0 μM		DIP < 0.2 μM		DSi < 2.0 μM	
	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011
1	24	16	2.0	1.3	12.3	12.8	<b>2.0</b>	<b>1.3</b>	<b>24</b>	16	12.3	12.8	14.0	12.8	1.14	1.00	27.8	16.2
2	25	17	2.0	1.3	12.8	13.5	<b>2.0</b>	<b>1.3</b>	<b>25</b>	17	12.8	13.5	14.5	12.3	1.13	0.91	28.8	15.7
3	19	16	1.5	1.0	13.1	16.0	<b>1.5</b>	<b>1.0</b>	19	16	13.1	16.0	24.7	18.7	1.88	1.17	35.9	19.1
4	21	15	1.9	1.1	11.4	13.4	<b>1.9</b>	<b>1.1</b>	21	15	11.4	13.4	15.7	13.9	1.37	1.04	29.4	16.0
5	24	13	1.9	1.0	12.1	13.2	<b>1.9</b>	<b>1.0</b>	<b>24</b>	13	12.1	13.2	14.4	16.2	1.18	1.23	27.9	16.5
6	26	18	2.0	1.3	13.4	14.0	<b>2.0</b>	<b>1.3</b>	<b>26</b>	18	13.4	14.0	13.3	12.3	0.99	0.88	26.1	15.5
7	26	19	2.3	1.2	11.4	16.0	<b>2.3</b>	<b>1.2</b>	<b>26</b>	19	11.4	16.0	10.9	12.5	0.96	0.78	24.9	15.1
8	28	26	2.4	1.7	11.6	15.0	<b>2.4</b>	<b>1.7</b>	<b>28</b>	<b>26</b>	11.6	15.0	9.8	11.5	0.85	0.77	23.7	19.6
9	23	15	2.2	1.2	10.3	12.6	<b>2.2</b>	<b>1.2</b>	<b>23</b>	15	10.3	12.6	11.0	14.0	1.06	1.11	24.6	16.4
10	28	35	2.2	1.4	13.1	24.4	<b>2.2</b>	<b>1.4</b>	<b>28</b>	<b>35</b>	13.1	<b>24.4</b>	11.1	20.8	0.84	0.85	23.9	30.1
11	25	21	2.5	1.7	<b>9.8</b>	12.7	<b>2.5</b>	<b>1.7</b>	<b>25</b>	21	9.8	12.7	9.1	11.9	0.93	0.94	22.9	20.0
12	27	22	2.3	1.8	11.4	12.0	<b>2.3</b>	<b>1.8</b>	<b>27</b>	<b>22</b>	11.4	12.0	9.3	9.8	0.82	0.81	21.8	18.1
13	26	30	2.4	1.6	11.1	18.3	<b>2.4</b>	<b>1.6</b>	<b>26</b>	<b>30</b>	11.1	18.3	9.0	14.7	0.80	0.80	21.1	23.7
14	27	25	2.5	2.1	11.2	12.1	<b>2.5</b>	<b>2.1</b>	<b>27</b>	<b>25</b>	11.2	12.1	8.5	7.7	0.76	0.63	20.9	16.1
15	26	22	2.3	1.8	11.1	12.0	<b>2.3</b>	<b>1.8</b>	<b>26</b>	<b>22</b>	11.1	12.0	8.9	9.1	0.81	0.76	20.9	16.8
16	26	22	2.3	1.9	11.2	11.9	<b>2.3</b>	<b>1.9</b>	<b>26</b>	<b>22</b>	11.2	11.9	8.5	8.8	0.75	0.74	19.3	16.4
17	27	23	2.4	2.0	11.4	11.6	<b>2.4</b>	<b>2.0</b>	<b>27</b>	<b>23</b>	11.4	11.6	7.9	8.2	0.70	0.70	19.0	16.1
18	27	22	2.4	2.0	11.3	11.2	<b>2.4</b>	<b>2.0</b>	<b>27</b>	<b>22</b>	11.3	11.2	7.7	8.4	0.68	0.75	18.1	16.5
19	29	23	2.5	2.0	11.4	11.2	<b>2.5</b>	<b>2.0</b>	<b>29</b>	<b>23</b>	11.4	11.2	7.0	8.1	0.61	0.73	17.6	16.4
20	28	N.D.	2.5	N.D.	11.4	N.D.	<b>2.5</b>	N.D.	<b>28</b>	N.D.	11.4	N.D.	6.6	N.D.	0.58	N.D.	16.4	N.D.

상관성이 나타났다. 총 식물플랑크톤 현존량은 수온과 투명도에 유의한 음(-)의 상관성을 보였고, 영양염류(PO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>)와 유의한 양(+의 상관성을 보였다.

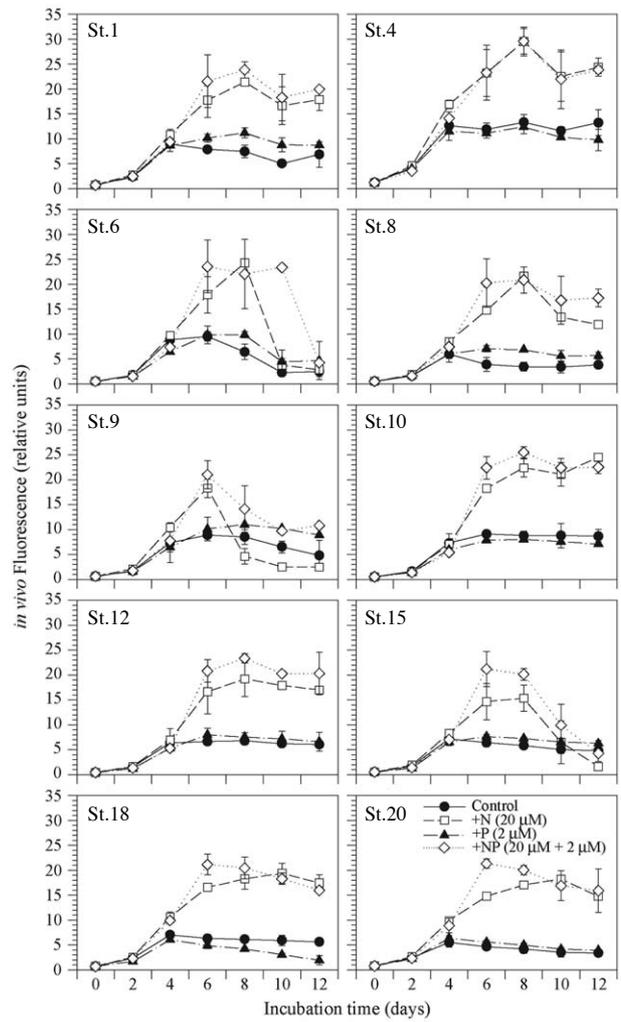
### 3. 영양염 첨가 실험

해역별 영양염 첨가실험은 식물플랑크톤의 증식을 간

**Table 2.** Pearson correlation coefficients (*r*) indicating the relationships between abiotic and biotic factors at 19~20 stations in 2010 (left lower part) and 2011 (right upper part) in Gwangyang Bay

	Temp.	Salinity	SD	pH	DO	PO <sub>4</sub>	Si(OH) <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub>	DIN	DIN/DIP	DSI/DIP	Chl. <i>a</i>	PT	BACIL.	DINO.	CRYPT.	CHRYSO.
Temperature		0.21	0.26	-0.61**	-0.30	-0.40	0.19	-0.27	-0.22	-0.29	-0.03	0.44	0.37	-0.46*	-0.19	0.10	-0.49*	0.02
Salinity	0.39		0.40	-0.12	-0.26	-0.32	-0.80**	-0.93**	-0.27	-0.87**	-0.93**	0.49*	-0.40	-0.24	-0.24	0.29	-0.28	-0.71**
Secchi depth (SD)	0.24	0.81**		0.28	-0.04	-0.67**	-0.08	-0.53*	-0.65**	-0.61**	0.74**	0.39	0.39	-0.59**	0.43	0.17	-0.59**	-0.19
pH	-0.19	0.75**	0.77**		0.42	-0.22	-0.14	-0.06	-0.34	-0.13	0.00	0.06	0.11	-0.08	-0.41	0.09	-0.02	0.09
DO	-0.48*	-0.28	-0.45**	-0.01		-0.04	0.12	0.20	-0.01	0.17	0.24	-0.07	0.38	0.21	-0.27	-0.09	0.30	0.15
PO <sub>4</sub>	-0.46*	-0.97**	-0.75**	-0.70**	0.21		-0.01	0.59**	0.79**	0.69**	0.11	-0.86**	0.66**	0.50*	0.58**	-0.24	0.47*	-0.05
Si(OH) <sub>4</sub>	-0.37	-0.97**	-0.78**	-0.77**	0.18	0.96**		0.71**	0.03	0.62**	0.86**	0.00	0.21	-0.03	-0.10	-0.30	0.00	0.70**
NO <sub>3</sub>	-0.55*	-0.97**	-0.70**	-0.63**	0.22	0.98**	0.95**		0.52*	0.98**	0.85**	0.67**	0.45	0.45	0.24	-0.31	0.47*	0.58**
NH <sub>4</sub>	-0.25	-0.89**	-0.62**	-0.74**	-0.09	0.92**	0.95**	0.91**		0.67**	0.25	-0.82**	0.65**	0.58*	0.51*	-0.17	0.56*	-0.09
DIN	-0.50*	-0.93**	-0.70**	-0.67**	0.16	0.98**	0.96**	0.99**	0.94**		0.79**	0.03	0.69**	0.52*	0.33	-0.30	0.54*	0.48*
DIN/DIP	-0.39	-0.57**	-0.23	-0.26	-0.03	0.42	0.53*	0.59**	0.59**	0.60**	-0.35	0.58*	0.34	0.26	0.06	-0.19	0.30	0.71**
DSI/DIN	0.59**	0.91**	0.68**	-0.57**	-0.22	-0.92**	-0.91**	0.88**	-0.74**	-0.96**	-0.69**	0.56*	-0.61**	-0.60**	-0.41	0.07	-0.59**	-0.07
DSI/DIP	0.44	0.76**	0.73**	0.59**	-0.27	-0.91**	-0.81**	-0.84**	-0.74**	-0.83**	-0.11	0.79**	-0.25	-0.33	-0.44	-0.09	-0.28	0.57*
Chl. <i>a</i>	-0.39	0.25	0.23	0.48*	0.50*	-0.25	-0.32	0.16	0.43	0.22	0.01	0.09	0.17	0.66**	0.40	-0.32	0.69**	0.14
Phytoplankton (PT)	-0.32	-0.68**	-0.57**	-0.40	0.31	0.48*	0.62**	0.52*	0.49*	0.54*	-0.59**	-0.32	-0.02	0.31	0.61**	0.10	0.99**	0.19
BACILARIOPHYCEAE	-0.13	0.40	0.32	0.30	0.06	0.28	-0.41	-0.24	-0.42	-0.28	0.27	0.17	0.58**	-0.16	0.14	-0.26	0.07	0.03
DINOPHYCEAE	0.17	0.27	-0.05	0.00	-0.12	-0.18	-0.24	-0.21	-0.21	-0.21	0.15	-0.01	-0.07	0.16	0.14	-0.26	0.07	0.03
CRYPTOPHYCEAE	-0.29	-0.73**	-0.62**	-0.46*	0.27	0.52*	0.67**	0.54*	0.55*	0.55*	-0.62**	-0.36	-0.14	0.99**	-0.43	-0.17	0.07	0.24
CHRYSOPHYCEAE	-0.11	0.43	0.54*	0.57**	0.18	-0.43	-0.47*	-0.33	-0.50*	-0.37	-0.04	0.31	0.40	-0.06	0.49*	-0.02	-0.19	0.03

Significant correlation: \*\**p* < 0.01, \**p* < 0.05



**Fig. 7.** Growth response of phytoplankton assemblage by algal bioassay. These experiments are used the surface water of each station in the autumn of 2010 in Gwangyang Bay.

접적으로 확인할 수 있는 형광값을 이용하여 영양염 첨가에 따른 각 정점별 샘플의 반응을 살펴보았다(Fig. 7). 대부분의 정점에서 인 첨가군 형광값이 영양염을 첨가하지 않은 대조군의 값과 비슷하거나 그 이하로 나타났으며, 질소 첨가군에서는 배양시간의 경과와 더불어 형광값이 높게 나타났다. 대조군에서도 대부분의 정점에서 시간의 경과와 더불어 형광값이 다소 증가하는 것을 확인하였다. 대조군 대비 N첨가군, P첨가군, NP첨가군에 대한 영양염 첨가의 효율을 Fig. 8에 나타내었다. 대조군 대비 N첨가군에서는 정점9에서 부(-)의 효율을 보였고, 나머지 정점에서 평균 1.48배의 영양염 첨가효율을 보였다. 대조군 대비 P첨가군에서도 정점1, 6, 8, 15, 20에서 대조군보다 약간 높게 나타났고, 나머지 정점에서는 대조

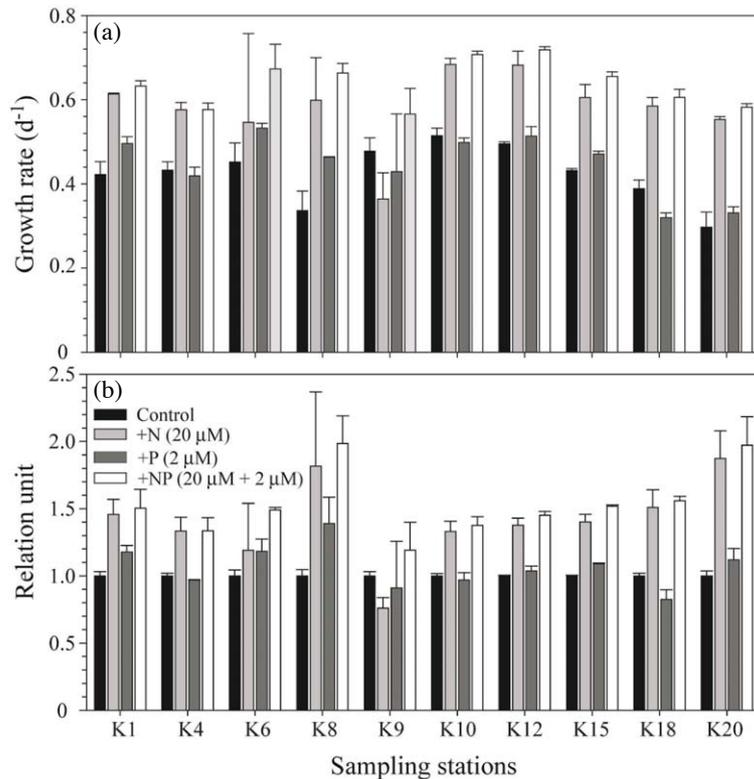


Fig. 8. Comparison of N, P and NP nutrient additional efficiency vs. control based on Fig. 7.

군과 유사하거나 낮게 나타났다. 대조군 대비 NP첨가군에서는 모든 정점에서 대조군 대비 N첨가군과 비슷하거나 약간 높게 증가하였으며, 특히 정점8과 20에서 1.97배와 1.96배의 높은 첨가효율을 보였다.

## 고찰

### 1. 식물플랑크톤과 환경인자

추계 광양만 식물플랑크톤의 군집구조를 살펴보면, 2010년에는 *Cryptomonas* spp.가 대부분의 정점에서 85% 이상 우점하였다. *Cryptomonas* spp.는 내만 해역I( $2.38 \times 10^5$  cells L<sup>-1</sup>)에서 가장 높게 나타났으며, 해역II와 해역III에서는 내만 해역I보다 1/2수준의 밀도로 각각  $1.42 \times 10^5$  cells L<sup>-1</sup>와  $1.23 \times 10^5$  cells L<sup>-1</sup>로 관찰되었다. 2011년에는 2010년에 비해 총 식물플랑크톤 개체수가 낮았으며, *Cryptomonas* spp.의 개체수 또한 1/10수준으로 관찰되었다. 하지만 해역I과 해역III에서 은편모그룹의 종이 각각 70.0%, 56.5% 이상 점유하였고, 해역II에 해당하는 정점11과 12에서는 30%와 26%로 상대적으로 낮았다.

은편모조류에 속하는 *Cryptomonas* spp.는 넓은 범위의 환경요인에 적응이 가능하다. Marshall and Locourt (1986)에 따르면 체사피크만에서 하계와 추계에 은편모조류의 높은 개체군 밀도를 보였고, 동계에는 감소하는 경향을 보고하였다. 또한 우리나라에서도 은편모조류는 광양만(Baek *et al.* 2011), 진해만(Yoo *et al.* 2007), 아산만(Yi *et al.* 2005)에서 연중 출현하는 분포 특성을 나타냈으며, 그 중 춘계와 추계에 높은 생물량을 보고하였다. Clay *et al.* (1999)은 크기가 작은 은편모조류는 1차 생산자로서 생태학적으로 중요한 분류군에 속하며, 담수, 기수 및 해수에 폭넓게 분포하는 것으로 보고하였다. 특히 이들 그룹의 생물은 적절한 난류(turbulence)가 형성될 때 유리하게 증식하여 때때로 대발생한다(Reynold 1984). 본 연구에서도 광양만에서 4계절을 통하여 은편모조류는 관찰되었으나(Baek *et al.* 2011; Bae *et al.* 2014), 독특하게 추계에 높은 개체수 밀도를 나타낸 것은 추계 성층 파괴로 인한 수계의 혼합으로 은편모조류의 성장에 유리하게 작용하였기 때문인 것으로 사료된다. Barone and Naselli-Flores (2003)에 의하면, 은편모그룹은 탁도가 높고 낮은 광조건에서도 잘 적응하는 것을 보고하였다.

본 연구 해역인 광양만에서도 지리적으로 수심이 얇고 추계 성층파괴로 인한 수층 혼합으로 퇴적층의 미세입자가 재부유되어 입자성유기물질의 형태로 수주내 대량으로 공급되면, 수계내 투명도를 극히 나쁘게 하여 다른 미세조류가 증식하지 못한다. 이때 은편모조류가 기회적으로 출현하여 빠르게 증식하여 높은 개체수 밀도를 유지한 것으로 사료된다. 결과적으로 광양만에서 은편모그룹의 생물체는 추계 성층파괴로 인한 수계의 혼합으로 적절한 난류가 형성되고, 수계내 투명도가 현저하게 떨어지는 환경에 적응하여 극우점 출현하는 종특이적인 생존 전략을 지니는 것으로 판단되었다.

식물플랑크톤의 군집구조 및 우점종의 천이는 해양환경 변화에 따라 나타나며, 이들 상호 관계를 파악하는 것은 생태학적으로 중요한 의미가 있다. 2010년 광양만에서 수온은 Chl. *a*와 식물플랑크톤의 각 군집에 유의한 상관성이 나타나지 않았다. 염분과 투명도는 각각 총 식물플랑크톤 개체수와 은편모조류에 유의한 음(-)의 상관성을 보였고, 이는 앞서 언급한 것과 같이 은편모그룹은 투명도가 낮은 환경에서도 적응이 가능하며 때때로 높은 개체수 밀도를 유지할 수 있다는 것을 시사한다. 영양염류는 총 식물플랑크톤 개체수와 은편모조류에 양(+)의 상관성을 보였으나 규조류와 와편모조류에 유의한 상관성은 나타나지 않았다. 해역II의 정점11에서 총 식물플랑크톤 개체수가  $9.84 \times 10^4$  cells L<sup>-1</sup>로 가장 낮게 나타났으며, 규조류의 점유율이 다른 해역에 비해 상대적으로 높은 14.0%로 나타났다. 그 중 *Skeletonema costatum*-like species가  $7.1 \times 10^3$  cells L<sup>-1</sup>로 우점하였다. *S. costatum*-like species는 광온, 광염성종으로 계절에 관계 없이 내만 뿐만 아니라 기수역에도 활발한 증식을 하며 (Han et al. 1992; Baek and Kim 2010; Baek et al. 2011), Bae et al. (2014)의 선행된 광양만조사에서도 하계에 극우점하며 나타났다. 이는 섬진강 담수 유입에 따른 낮은 염분과 풍부한 영양염이 그들의 증식에 영향을 미친 것으로 판단된다. 2011년 해역I의 정점1에서 규조류 중 80% 이상이 *Chaetoceros*속으로 나타났다. *Chaetoceros* spp.는 *Skeletonema* spp.와 *Thalassiosira* spp.보다 규산염을 흡수하는 능력이 뛰어나며 (Coway and Harrison 1977), 본 연구에서도 규산염의 농도가 2010년보다 상대적으로 낮은 2011년에 *Chaetoceros* spp.가 우점하였고, 이와 같은 중심목의 규조류는 규산염을 빠르게 흡수하였을 가능성을 시사하였다. 해역II는 섬진강 하구역과 인접한 해역으로서, 반폐쇄성 연안 및 하구역에서는 강으로부터 유입되는 담수로 인해 쉽게 영향을 받는다. 하구역의 식물플랑크톤 군집 또한 조석에 따른 해양환경 특성에 민감하게 반

응할 수 있고, 이와 같은 해역에서는 담수종, 기수종, 해양종이 공존할 수 있으며, 결과적으로 담수 유입과 같은 급격히 변화하는 환경조건에 따라서 우점종이 결정된다 (Townsend et al. 1992; Kawamiya et al. 1996; Huisman et al. 1999). 특히 염분 변화는 식물플랑크톤 종조성의 변화를 가져올 수 있다 (Kwon 2002). 본 연구에서도 2011년 추계 강우량은 조사 12일전 41.5mm인 것을 제외하면 조사 이전 강우는 관측되지 않았고, 조사 당일 강우(11/17: 1.5 mm, 11/18: 36.0 mm)를 확인하였다. 이와 같은 담수 유입의 영향을 직접적으로 받는 정점은 10과 13으로 염분이 각각 29.2 psu와 30.61 psu로 나타나, 다른 정점에 비하여 상대적으로 낮게 기록되었다. 식물플랑크톤의 종조성 및 개체수의 밀도 또한 담수의 영향을 직접적으로 받은 정점10, 13, 14와 상대적으로 적게 받은 정점11과 12에서 명확한 차이를 보였다. 즉 정점10과 13에서 은편모조류가 77.4%와 58.3%로 높게 우점했으며, 규조류가 각각 11.9%와 18.0%로 나타났다. 그 중 정점10에서는 *Thalassiosira* spp.가  $2.5 \times 10^3$  cells L<sup>-1</sup> 우점하였고, 정점12에서는 *S. costatum*-like species가  $1.9 \times 10^3$  cells L<sup>-1</sup>로 관찰되었다. 반면 정점11과 12에서 규조류가 44.2%와 55.0%의 높은 우점율을 보였고, 정점11에서는 *Thalassiosira pacifica*가  $2.4 \times 10^3$  cells L<sup>-1</sup> 높게 관찰되었으며, 정점12에서는 *S. costatum*-like species가  $3.8 \times 10^3$  cells L<sup>-1</sup>로 우점하였다. 결과적으로 해역II의 섬진강 하구 담수의 영향을 직접적으로 받는 해역에서 조차, 해양환경의 변화에 따라서 식물플랑크톤의 군집조성이 명확하게 다르게 나타날 수 있다는 것을 파악하였다. 이와 같은 식물플랑크톤의 군집구조의 차이는 염분변화뿐만 아니라 영양염의 조성에서 기인된 것으로 판단된다.

## 2. 크기분획에 따른 Chl. *a*농도의 변화

식물플랑크톤의 Nano와 Pico 크기의 Chl. *a* 분획에서 2010년 외측해역인 해역III으로 갈수록 전체 Chl. *a*와 >20 μm 크기의 Chl. *a*가 점차적으로 증가하는 경향을 나타내었고, 최외곽 정점20에서 총 Chl. *a*가 3.32 μg L<sup>-1</sup>로 가장 높고, >20 μm의 크기로 분획된 Chl. *a* 비율이 67.12%로 가장 높았다. 이는 크기가 큰 규조류와 황색편모조류의 증가로, 상대적으로 다른해역에 비해 식물플랑크톤의 총 개체수 낮지만 Chl. *a*는 높게 나타나는 차이를 보인 것으로 추측할 수 있었다. Joo et al. (2011)에 의하면, 단세포의 식물플랑크톤이라 할지라도 세포의 크기에 따라서 Chl. *a*함량의 차이를 보일 수 있다. 일반적으로 세포체적이 크고 광합성 활성이 높은 미세조류가

보다 많은 Chl. *a* 함량을 갖는다. 본 연구 결과에서도 정점20에서 총 개체수는 감소하였지만 크기가 큰 식물플랑크톤의 증가로 인하여 총 Chl. *a*량이 주변정점보다 상대적으로 높게 나타났다. Thurman and Trujillo (1999)의 보고에 의하면 pico 크기의 식물플랑크톤은 단위부피당 표면적이 커서 더 오랜시간 부유할 수 있고 효율적으로 영양염과 빛을 이용할 수 있기 때문에 영양염 농도가 낮은 외측해역에서 높은 생물량이 나타난다. 본 연구에서도 내만 해역인 해역I과 내만과 외해역이 교차하는 해역II를 지나 외해역인 해역III으로 갈수록 영양염류의 농도가 점차 감소하는 경향을 나타내었고, nano와 pico 크기로 분획된 Chl. *a*량이 증가하는 경향을 관찰하였다. 2011년에는 2010년보다 총 개체수는 줄었지만 총 Chl. *a*함량은 큰 차이가 없었으며, 특히 nano와 pico 크기로 분획된 식물플랑크톤의 Chl. *a*가 전체 식물플랑크톤 Chl. *a*의 80.82%를 차지하였다. Iriarte and Purdie (1994)의 보고에 따르면, 세포의 크기가 큰 소형 (microplankton) 식물플랑크톤은 영양염이 풍부한 상태에서 높은 분포를 나타내었고, 피코(pico)식물플랑크톤은 세포가 작기 때문에 극히 낮은 농도의 영양염에서도 성장이 가능할 수 있다. 결과적으로 피코 크기로 분획된 Chl. *a*함량의 비율은 영양염 농도가 점차적으로 낮아지는 외해로 갈수록 높았고, 상대적으로 영양염이 풍부한 내만에서는 연쇄군을 형성하는 규조류가 우점하여, 해역별 영양염의 분포 특성에 따라서 식물플랑크톤의 군집구조의 명확한 차이를 확인할 수 있었다.

### 3. 영양염 제한특성

식물플랑크톤의 성장에 중요한 질소, 인, 규소는 각 영양염의 비에 따라 제한영양염이 결정된다 (Dufour *et al.* 1999). Dortch and Whitledge (1992)의 보고에 의하면, DIN이  $1.0 \mu\text{M}$ , DIP가  $0.2 \mu\text{M}$ , DSi가  $2.0 \mu\text{M}$  이하로 관찰되는 해역에서 식물플랑크톤의 증식에 필요한 절대 영양염의 제한을 받는다. Justic *et al.* (1995)이 제시한 상호복합적으로 연관되는 화학량론적 제한 (stoichiometric limitation)에서, P제한은  $\text{DSi}:\text{DIP} > 22$  또는  $\text{DIN}:\text{DIP} > 22$ 이며, N제한은  $\text{DIN}:\text{DIP} < 10$  또는  $\text{DSi}:\text{DIN} > 1$ 이며, Si제한은  $\text{DSi}:\text{DIP} < 10$  또는  $\text{DSi}:\text{DIN} < 1$ 으로 평가하고 있다. 이 기준치를 추계 광양만에 적용하여 Table 1에 나타내었다. 2010년에는 영양염 구성 성분비에 따라 질산염 제한이 해역II의 정점11에서 나타났으며, 이는 Lee *et al.* (2001)이 보고한 추계 섬진강 하구역에서 영양염 비에 따른 질산염 제한이 나타난 것과 부분적으로 일치하

였다. 반면 규산염과 인산염의 구성 성분비에 따른 제한은 전 해역에서 나타나지 않았으며 절대 농도에 따른 제한 또한 명확하게 구분되지 않았다. 이는 추계의 성층붕괴로 인하여 수층 혼합으로 저층으로 부터 일정한 규산염과 인산염이 표층주변으로 공급되어 영양염 제한이 나타나지 않았기 때문인 것으로 사료되었다. 2011년에는 2010년보다 상대적으로 높은 강우로 인하여 섬진강 담수의 유입이 많았으나, 인산염의 제한비율이 높았다. Lee *et al.* (2001)와 Jang *et al.* (2005)에 따르면 담수의 유입으로 인해 질산염이 높은 농도로 유입되면 인산염이 상대적으로 제한 요인으로 작용할 수 있고, Fisher *et al.* (1992)는 미국 체사피크만의 하구역에서 담수의 유입이 많을 경우 인이 제한요인으로 작용할 것이라는 결과와 유사하였다. 반면 선행연구인 Baek *et al.* (2011)과 Bae *et al.* (2014)의 보고에서도 광양만해역(같은 조사 정점)에서 동계, 춘계, 하계에 규산염에 대한 영양염 제한은 나타나지 않았고, 본 연구기간의 추계에도 규산염의 절대 농도 및 구성성분비에 의한 제한은 나타나지 않았다. 규산염을 이용하는 규조류가 현장에서 우점했던 선행 연구결과와는 달리 추계에는 은편모조류가 대부분의 해역에서 극우점하였기 때문인 것으로 사료된다. Klaveness (1989)에 따르면 대부분의 은편모조류는 절대농도에 대한 영양염의 제한은 나타나지 않았고, 영양염의 경쟁자가 상대적으로 적은 환경하에서 기하급수적으로 증식하여 높은 생산력을 나타내는 기회적인 특성을 보였다. 광양만은 규산염이 연중 풍부하여 규산염을 이용하는 규조류의 성장에 유리한 환경조건이지만, 추계와 같이 성층이 붕괴되어 수층혼합으로 투명도가 낮아 수주내 투과되는 광량의 제한은 규조류의 성장을 둔화시킬 가능성이 높다. 결과적으로 추계의 수주내 광량 제한은 은편모조류와 같은 기회성종이 우점출현할 수 있는 환경이라는 것을 시사할 수 있었다.

### 4. 영양염 첨가실험을 통한 식물플랑크톤의 반응

2010년 해역별 영양염 첨가 실험에서는 전 해역에서 N첨가군과 NP첨가군에서 높은 성장율을 보였으며, P첨가군의 성장율은 대조군과 비슷하거나 약간 높게 나타났다. 선행 연구에서도 담수 유입이 적은 시기에 질소기원의 영양염 제한이 일어났고, 인산염기원의 영양염 제한은 명확하지 않았다 (Lee *et al.* 2001; Baek *et al.* 2011; Bae *et al.* 2014). 섬진강 담수로부터 공급된 높은 영양염으로 인해 해역II의 정점10과 12에서는 대조군에서도 다른 해역에 비해 상대적으로 높은  $0.51 \text{ d}^{-1}$ 과  $0.49 \text{ d}^{-1}$ 의

성장을 보여, 대조군 대비 영양염 첨가 효율은 N첨가군이 1.33배와 1.37배, NP첨가군이 1.37배와 1.45배로 상대적으로 높지 않았다. Bae *et al.* (2014)의 선행 연구에 의하면, 낮은 영양염 농도가 관찰된 외해역의 정점에서 일정한 영양염 첨가는 식물플랑크톤의 증식을 자극하여 내만해역보다 빠른 성장을 보였으며, 성장을 또한 내만 정점의 영양염 첨가실험보다 영양염 첨가효율이 높았다. 본 연구에서도 해역III에서 N첨가군 및 NP첨가군에 동일한 영양염을 첨가하여 성장을 알아본 결과 외해로 갈수록 성장은 낮아졌지만, 대조군 대비 첨가 효율은 점차적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 내만해역과 동일한 농도의 영양염을 첨가 했을 때 외해로 갈수록 영양염 첨가 효율이 높다는 것을 시사할 수 있으며, 높은 농도의 영양염에서 성장한 내만의 식물플랑크톤보다 낮은 농도의 영양염이 관찰된 해역에서 일정한 영양염류를 첨가하면, 미세조류가 곧바로 반응하여 1차 생산력과 직결될 수 있다는 것을 의미한다. 특히 영양염 첨가 실험에서 *Thalassiosira* spp.가 모든 정점의 대조군과 영양염 첨가군에서 관찰되었으며, 산업시설과 생활주거공간이 밀집한 해역I는 산업폐수 및 생활하수 등의 유입으로 인해 현장에서 높은 농도의 영양염이 나타난 해역으로 대조군에서 *Dictyocha* spp.와 *Guinardia* spp.가 우점하였으나, N첨가군에서 *Dictyocha* spp.와 더불어 *Pseudo-nitzschia* spp., *Skeletonema* spp.가 각각 추가로 우점하였고, P첨가군에서 *Dictyocha* spp.와 함께 *Guinardia* spp., *Pseudo-nitzschia* spp., *Skeletonema* spp.가 우점하였다. 특히 N과 P를 동시에 첨가한 실험군에서는 *Pseudo-nitzschia* spp.와 *Skeletonema* spp.가 극히 높은 밀도로 출현하였다. 섬진강 담수의 영향을 직접적으로 받는 해역II에서는 대조군에서 *Guinardia* spp.와 *Pseudo-nitzschia* spp.가 우점하였고, N, P첨가군과 더불어 N+P첨가군에서 *Thalassiosira* spp.와 함께 *Skeletonema* spp.가 극우점하였다. 영양염류의 농도가 점점 낮아지는 경향을 나타낸 해역III에서는 대조군에서 *Chaetoceros* spp.와 *Dictyocha* spp., *Skeletonema* spp.이 관찰되었고, N첨가군에서는 *Skeletonema* spp.가 극우점하였고, 아울러 P첨가군과 N+P첨가군에서 *Skeletonema* spp.가 극우점하는 양상을 보였다. 결과적으로 해역I에서는 영양염이 풍부하여 종간경쟁에서 우위를 차지한 종들이 영양염 첨가에 따라 서로 다른 종이 우점하였으며, 해역II에서 *Thalassiosira* spp.와 더불어 *Skeletonema* spp.가 극우점하였다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 담수의 유입으로 인한 낮아진 염분에 적응한 종들이 성장에 우위를 차지한 것으로 판단되었다. 한편 해역III에서는 전해역에서 영양염 첨가군에 *Skeletonema* spp.가

우점하였다.

요약하면 광양만에서 추계 생물검정실험을 수행한 것과 같이 일정한 높은(N: 20  $\mu$ M, P: 2  $\mu$ M, N+P: 20+2  $\mu$ M) 농도의 영양염이 공급될 경우, 현장에서 일정한 낮은 개체수 밀도를 유지하였지만, 잠재적인 성장동력이 우수한 *Skeletonema* spp.가 극우점할 수 있다는 것을 파악할 수 있었다. 아울러 성층의 붕괴와 같은 저층으로부터 점차적으로 공급되는 낮은 농도의 영양염류는 현장에서 추계에 우점한 은편모그룹과 같이 기회성 특성을 가진 종이 우점 출현할 가능성이 높다는 것을 시사하였다.

## 적 요

2010년과 2011년 추계 광양만에서 식물플랑크톤 군집구조와 그들의 성장에 미치는 환경요인을 파악하기 위해 만내외측의 19~20개 정점에서 생물학적 요인과 무생물학적 요인을 조사하였다. 또한 식물플랑크톤에 대한 영양염 첨가 효과를 알아보기 위해 2010년 현장 10개 정점의 표층수를 이용하여 생물검정실험을 수행하였다. 2010과 2011년의 영양염 수평적 분포특성은 내만해역I(정점1~9)과 섬진강의 영향을 직간접적으로 받을 수 있는 해역II(정점10~14)에서 상대적으로 높게 나타났고, 해역III(정점15~20)으로 갈수록 점차적으로 감소하여 해역별 차이가 명확하였다. 반면, 크기별로 분류된 Chl. *a*함량은 영양염농도가 낮은 해역으로 갈수록 극미소(Nano와 Pico)크기의 생물량이 상대적으로 증가하였다. 이와 같은 양상은 2010년보다 2011년이 두드러졌다. 2010년 은편모조류가 대부분의 정점에서 85% 이상으로 우점하였고, 2011년에도 은편모그룹이 전체 식물플랑크톤 군집중 대부분의 정점에서 50% 이상의 높은 비율을 차지하였으나, 2010년의 출현개체수의 1/10 수준에 머물렀다. 은편모그룹 다음으로 높은 비율을 차지한 생물군이 규조류 *Chaetoceros* spp.와 *Skeletonema* spp.로 나타났다. 생물검정실험에서는 전 해역에서 N첨가군과 NP첨가군의 효율이 대조군과 P첨가군에 비하여 높았고, 특히 현장 영양염농도가 낮게 기록된 정점8과 20의 NP영양염첨가군에서 약 2배의 높은 효율을 보였다. 결과적으로 광양만에서 추계 갑작스럽게 높은 영양염이 공급될 경우 *Skeletonema* spp.와 같은 영양염 흡수능이 뛰어난 생물이 우점할 수 있을 것이며, 성층붕괴와 같은 일정량의 지속적인 영양염공급은 세포크기가 작은 기회성 특징을 가진 은편모그룹의 성장에 유리한 조건이라는 것을 알 수 있었다.

## 사 사

본 연구는 한국해양과학기술원 연구과제 “남해특별 관리해역의 관리를 위한 해양 생태계 건강지수 개발 (PE99151)”지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Bae SW, DS Kim, YO Kim, CH Moon and SH Baek. 2014. The influence of nutrients addition on phytoplankton communities between spring and summer season in Gwangyang Bay, Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr. (The Sea)* 19:53-65.
- Baek SH and YO Kim. 2010. The study of summer season in Jinhae Bay - short term changes of community structure and horizontal distribution characteristic of phytoplankton. *Korean J. Environ. Biol.* 28:115-124.
- Baek SH, DS Kim, BG Hyun, HW Choi and YO Kim. 2011. Characteristics of horizontal community distribution and nutrient limitation on growth rate of phytoplankton during a winter in Gwangyang Bay, Korea. *Ocean Polar Res.* 33: 99-111.
- Baek SH, KS Shin, BG Hyun, PG Jang, HS Kim and OM Hwang. 2010. Distribution characteristics and community structure of phytoplankton in the different water masses during early summer of southern sea of Korea. *Ocean Polar Res.* 32:1-13.
- Barone R and L Naselli-Flores. 2003. Distribution and seasonal dynamics of Cryptomonads in sicilian water bodies. *Hydrobiologia* 502:325-329.
- Cho ES, JB Kim, KH An, J Yu, JN Kwon and CS Jeong. 2006. The clarification of spatial-temporal patterns of phytoplankton from southern Korean coastal waters in 2004. *J. Environ. Sci.* 15:539-562.
- Cho ES, SY Lee, SS Kim and YS Choi. 2007. Marine Environments and ecological characteristics of phytoplankton in southern coastal waters during June to October in 2004-2006. *J. Environ. Sci.* 16:941-957.
- Claesson A. and A. Forsberg 1978. Algal assay procedure with one or five species. *Minitest. Mitt. Verein. Limnol.* 21:21-30.
- Clay BL, P Kugrens and RE Lee. 1999. A revised classification of Cryptophyta. *Bot. J. Linn. Soc.* 131:131-151.
- Conway HL and PJ Harrison. 1997. Marine diatoms grown in chemostats under silicate or ammonium limitation. IV. Transient response of *Chaetoceros debilis*, *Skeletonema costatum*, and *Thalassiosira gravida* to a single addition of the limiting nutrient. *Mar. Biol.* 43:33-43.
- Dortch Q and TE Whitley. 1992. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions? *Cont. Shelf. Res.* 12:1293-1309.
- Dufour P, L Charpy, S Bonnet and N Gracia. 1999. Phytoplankton nutrient control in the oligotrophic south Pacific subtropical gyre(Tuamotu Archipelago). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 179:285-290.
- Fisher TR, ER Peele, JW Ammerman and LW Harding. 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 82:51-63.
- Frost BW. 1991. The role of grazing in nutrient-rich areas of the open sea. *Limnol. Oceanogr.* 36:1616-1630.
- Han MS, K Furuya and T Nemoto. 1992. Species-specific productivity of *Skeletonema costatum* in the inner part of Tokyo Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 79:267-273.
- Huisman J, P van Oostveen and FJ Weissing. 1999. Critical depth and critical turbulence: two different mechanisms for the development of phytoplankton blooms. *Limnol. Oceanogr.* 44:1781-1787.
- Iriarte A and DA Purdie. 1994. Size distribution of chlorophyll a biomass and primary production in a temperate estuary (Southampton water): the contribution of photosynthetic picoplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 115:283-297.
- Jang PG, WJ Lee, MC Jang, JD Lee, WJ Lee, M Chang, KC Hwang and KS Shin. 2005. Spatial and temporal distribution of inorganic nutrients and factors controlling their distributions in Gwangyang Bay. *Ocean Polar Res.* 27:359-379.
- Joo HM, JH Lee and SW Jung. 2011. Correlations between cell abundance, bio-volume and chlorophyll a concentration of phytoplankton communities in coastal waters Incheon, Tongyeong and Ulsan of Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 29:312-320.
- Justic D, NN Rabalais, RE Turner and Q Dortch. 1995. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 40:339-356.
- Kawamiya M, MJ Kishi, MDK Ahmed and T Sugimoto. 1996. Causes and consequences of spring phytoplankton blooms in Otsuchi Bay, Japan. *Cont. Shelf. Res.* 16:1683-1698.
- Kim SY, CH Moon and HJ Cho. 2003. Relationship between dinoflagellate cyst distribution in surface sediments and phytoplankton assemblages from Gwangyang Bay, a southern coastal area of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr. (The Sea)* 8:111-120.
- Klaveness D. 1989. Biology and ecology of the Cryptophyceae: state and challenges. *Biol. Oceanogr.* 6:257-270.
- Kwon KY, CH Kim, CG Kang, CH Moon, MO Park and SR

- Yang. 2002. Limiting nutrients for phytoplankton growth in the Seomjin River estuary as determined by algal bioassay experiment. *J. Korean Fish. Soc.* 35:455-462.
- Kwon KY, CH Moon and HS Yang. 2001. Behavior of nutrients along the salinity gradients in the Seomjin River estuary. *J. Korean Fish. Soc.* 34:199-206.
- Lee DS. 1999. Characteristics of nutrients distribution in summer and winter in the South Sea. *J. Korean Soc. Oceanogr. (The Sea)* 4:371-382.
- Lee YS, JS Lee, RH Jung, SS Kim, WJ Go, KY Kim and JS Park. 2001. Limiting nutrient on phytoplankton growth in Gwangyang Bay. *J. Korean Soc. Oceanogr. (The Sea)* 6:201-210.
- Lim DI, IK Um, SK Jeon, JM Yoo and HS Jung. 2003. Physiochemical characteristics of coastal pseudo-estuarine environment formed during the summer flood season in the south coast of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr. (The Sea)* 8:151-163.
- Marshall HG and R Lacouture. 1986. Seasonal patterns of growth and composition of phytoplankton in the lower Chesapeake Bay and vicinity. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 23:115-130.
- Mukai T. 1987. Effects of micro-scale in situ environmental gradients concerning water qualities on the structure of the phytoplankton community in a coastal embayment. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 25:447-458.
- Mulaert K and K Sabbe. 1996. The diatom genus *Thalassiosira* (Bacillariophyta) in the estuaries of the schelde (Belgium/The Netherlands) and the Elbe (Germany). *Bot. Mar.* 39:103-105.
- Munawar M, A Mudroch, IF Munawar and RL Thomas. 1983. The impact of sediment-associated contaminants from the Niagara River mouth on various size assemblages of phytoplankton. *J. Great Lakes Res.* (2):303-313.
- Parsons TR, Y Maita and CM Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, New York. 173pp.
- Reynold CS. 1984. *The Ecology of Freshwater Phytoplankton.* Cambridge Univ. Press, Cambridge. 384pp.
- Sommer U. 1994. The impact of light intensity and daylength on silicate and nitrate competition among marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* 39:1680-1688.
- Thurman HV and AP Trujillo. 1999. *Essentials of Oceanography.* Prentice-Hall, Inc. pp.374-375.
- Townsend DW, MD Keller, ME Sieracki and SG Ackleson. 1992. Spring phytoplankton blooms in the absence of vertical water column stratification. *Nature* 360:59-62.
- Yi SH, YS Sin, SR Yang and C Park. 2005. Seasonal characteristics of phytoplankton distribution in Asan Bay. *Ocean Polar Res.* 27:149-159.
- Yoo MH, TY Song, ES Kim and JK Choi. 2007. The characteristics on the spatial and temporal distribution of phytoplankton in western Jinhae Bay, Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr. (The Sea)* 12:305-314.

Received: 22 January 2014

Revised: 14 February 2014

Revision accepted: 17 February 2014