

생물검정실험을 통한 동계 진해만 식물플랑크톤의 군집 변동 특성 파악

현봉길^{1,3} · 신경순¹ · 김동선² · 김영옥¹ · 주혜미¹ · 백승호^{1,*}

¹한국해양연구원 남해연구소

²한국해양연구원 본원

³국립 부경대학교

Understanding of Phytoplankton Community Dynamics Through Algae Bioassay Experiment During Winter Season of Jinhae bay, Korea

BONG-GIL HYUN^{1,3}, KYOUNGSOON SHIN¹, DONG SUN KIM², YOUNG OK KIM¹,
HAE MI JOO¹ AND SEUNG HO BAEK^{1,*}

¹Korea Ocean Research and Development Institute/ South Sea Institute, Geoje 656-830, Korea

²Marine Environment Research Department, KORDI Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

³Department of Oceanography, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

동계 진해만 광역해역의 식물플랑크톤의 군집구조와 영양염 제한 특성을 파악하고자 식물플랑크톤 군집의 정점 간 비교와 환경인자간의 관계를 조사하였다. 아울러 식물플랑크톤의 성장에 영향을 미치는 제한영양염을 평가하기 위해서 현장수를 이용하여 생물검정실험을 수행하였다. 조사기간동안 규조류와 은편모조류는 대부분의 정점에서 전체 식물플랑크톤의 90% 이상을 점유하였고, 식물플랑크톤의 현존량은 마산만이 진해만 보다 현저히 높게 관찰되었다. DIN:DIP 비, pH, 투명도는 식물플랑크톤의 생물량과 유의한 양(+)의 관계를 보였다. 식물플랑크톤 군집구조를 바탕으로 Cluster 분석과 MSD 분석을 한 결과 크게 3개의 그룹으로 구분되었다. 제 1그룹은 고성과 통영을 중심으로 한 진해만 서부해역으로 은편모조류가 전체 식물플랑크톤 현존량에 50% 이상으로 우점하였다. 제 2그룹은 마산만 가장 내측해역으로 높은 생물량, 낮은 투명도, 높은 DIN:DIP 비가 관찰된 것이 특이적이었다. 제 3그룹은 진해만 동부수역에 해당되는 마산만 외측과 진해만 중앙해역으로 구분이 되었고, 이들 정점의 특성은 DSI:DIP 비가 높았고, 규조류가 우점출현하였다. 영양염 절대농도와 구성성분비에 의한 제한영양염과 생물검정실험을 통한 영양염 제한은 마산만 대부분의 정점은 P 영양염의 제한이 관찰되었고, 진해만은 N기원의 영양염제한이 식물플랑크톤의 증식에 중요한 역할을 하는 것으로 파악되었다. 동계 진해만은 규산염이 상대적으로 풍부하게 존재하였고, 이는 규조류가 우점하기 좋은 환경이라 사료된다.

The distributions of phytoplankton assemblages and environmental factors in Jinhae Bay and their relationships were investigated to estimate the potential limiting nutrient for phytoplankton growth and community structure. In situ algal bioassay experiments were also conducted to assess the species-specific characteristics in phytoplankton responses under different nutrient conditions (control, N(+) and P(+) treatment). During the study periods, bacillariophyceae and cryptophyceae occupied more than 90% of total phytoplankton assemblages. Phytoplankton standing crops in the inner part of Masan Bay were higher than that of Jinhae Bay. The DIN:DIP ratio, pH and transparency showed the significant positive correlation with phytoplankton biomass. According to cluster and multidimensional scaling (MDS) analysis based on phytoplankton community data from each station, the bay was divided into three groups. The first group included stations from the south-western part of Jinhae bay where cryptophyta species were dominated. The second group was distinguished from inner stations in Masan Bay. These stations showed low transparency and high DIN:DIP ratio. The other cluster included the stations from the eastern part and central part of Jinhae Bay, which was characterized by the high DSI:DIP ratio and dominant of diatom species. Phosphorous (P) was limited in Masan Bay due to significantly increases in the phytoplankton abundances. Based on stoichiometric limitation and algal bio-assay in Jinhae Bay, nitrogen (N) was a major limiting factor for phytoplankton production. However, silicate (Si) was not considered as limiting factor, since Si/DIN and Si/P ratio and absolute concentration of nutrient did not create any

*Corresponding author: baeksh@kordi.re.kr

potential stoichiometric limitation in the bay. This implies that high Si availability in winter season contributes favorably to the maintenances of diatom species.

Key words: phytoplankton community structure, algal bioassay experiments, potential limiting nutrient, multidimensional scaling (MDS), Jinhae Bay

서론

해양 생태계내에서 영양염류의 제한과 증가는 식물플랑크톤의 현존량과 종조성에도 중요한 영향을 미친다. 연안해역의 유무기물에 의한 영양염 공급원은 외부로부터 직접 기인하는 것과 수계내에 있는 생물의 증식과 소멸과정에서 기인하는 것으로 구분 할 수 있다(Ryther and Dunstan, 1971). 일반적으로 온난해역에서 식물플랑크톤의 대증식은 춘계와 추계에 현저하고, 하계는 계절적 온도 약충으로 인하여 저층수의 풍부한 영양염이 유광층에 충분히 공급되지 않아 영양염 제한이 지속적으로 이루어져 식물플랑크톤 성장이 둔화되고, 동계에는 수층혼합으로 인하여 수주내 영양염이 풍부하게 존재하지만, 저수온과 광량 부족은 식물플랑크톤 성장의 제한인자 중 하나가 된다(Riley, 1942; Cushing, 1989). 특히 수계내 필수 영양염 농도(N, P, Si)와 그 구성 성분비는 식물플랑크톤의 증식과 종조성에 큰 영향을 미치게 됨으로 어떤 종이 어떠한 영양제한을 받는지를 명확하게 파악하는 것은 식물플랑크톤의 동태와 대증식 발생기작을 이해하는데 중요하다(Redfield *et al.*, 1963; Fisher *et al.*, 1992). 최근 전세계적으로 동계 적조 발생빈도가 높게 보고되고 있으며(Goffart *et al.*, 2002), 진해만에서도 동계에 식물플랑크톤 대발생이 빈번하게 일어나고 있다(이와한, 2007). 이러한 현상은 수층 혼합으로 인한 풍부한 영양염류의 공급이 동계 식물플랑크톤 성장에 크게 영향을 미쳤을 것이다.

식물플랑크톤의 증식기작을 이해하기 위해서 제한 영양염을 평가하는 것은 중요하며, 그 방법으로는 N: P: Si비, Mesocosm 실험, 생물검정실험(Algal bio-assay) 등이 있다(Fisher *et al.*, 1992; Taylor *et al.*, 1995; Fujiki *et al.*, 2004; 이 등, 2001; 정 등, 2008). 이들 방법중 N: P: Si비에 의한 평가가 가장 보편적으로 활용되고 있으나 용존 영양염류의 농도가 낮을 경우 측정 오차로 인해 잘못된 해석을 할 수 있으며(이 등, 2001), 같은 성분 구성비라도 절대 농도가 높은 경우에는 제한 영양염으로 판단하기 어렵다. Mesocosm 실험 또한 현장에서 인위적으로 식물플랑크톤을 증식시켜 필수 영양염의 고갈양상으로 평가할 수 있으나, 비용과 인력이 많이 소진되는 단점이 있다. 생물검정실험은 단일 배양된 식물플랑크톤의 영양염 제한을 검토하기 위해서 널리 사용되고 있지만, 현장의 식물플랑크톤 군집을 충분히 반영하지 못하는 단점이 있다. 하지만 현장수를 이용하여 계절별로 출현하는 식물플랑크톤을 대상으로 생물검정실험을 수행하면 현장 조건을 잘 반영할 수 있으며 어떤 영양염이 언제 어느 지역에서 제한되는지 간접적으로 평가할 수 있다.

반폐쇄성 해역인 진해만은 외양과 내만의 혼합 정도가 커서 난류의 형성이 보고되고 있으며, 기상 조건에 따라서 해황의 변동이 심한 곳이다(조 등, 1998; Han *et al.*, 1991). 반면 진해만에 귀속되어 있는 마산만은 대도시가 인접하고 있고, 이로 인한 오폐수의 유입 등 담수의 영향을 현저하게 받는 반폐쇄성만으로 외해수와 교환이 원활하지 않아 수질이 나쁘고, 식물플랑크톤 성장에 필요한 영양염류와 각종 미량원소가 풍부하여 적조가 자주 발생하는

해역이다. 이러한 특성으로 인하여 진해만에서는 다양한 연구가 수행되었으며, 특히 수질 환경의 계절적 변동 특성(조 등, 1998; 임 등, 2007)과 식물플랑크톤 군집 분포(이 등, 1981; 김 등, 1993) 및 적조의 발생(곽 등, 2001; Lee and Lim, 2006; 임 등, 2008) 등의 생태학적 연구가 압도적으로 많이 수행되었다. 하지만 이들 대부분의 조사는 마산만과 진해만의 일부 국부적인 정점에서 물리화학적 환경요인과 식물플랑크톤의 상호관련성을 규명하는데 초점을 두고 있어서 영양염 제한과 식물플랑크톤 동태에 관한 연구는 미흡하다고 하겠다.

따라서 본 연구는 동계 진해만 해역에서 식물플랑크톤의 성장에 영향을 미치는 제한 영양염을 생물검정실험법을 이용하여 확인하고 해역특성을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

현장조사

조사는 2010년 2월 8~9일에 걸쳐 진해만 23개 정점에 대해서 해양연구원 조사선 장목호를 이용하여 실시하였다. 표층수는 버킷으로 저층수는 니스킨 채수기를 이용하여 각각 채수하였다(Fig. 1).

조사지역의 이전 10일 동안의 일일 평균 온도, 강수량 및 일조시간은 진해만에 인접한 마산 기상청 데이터를 이용하였다(Fig. 2). 수온과 염분은 수질측정기(YSI)로 현장에서 측정하였다. 투명도는

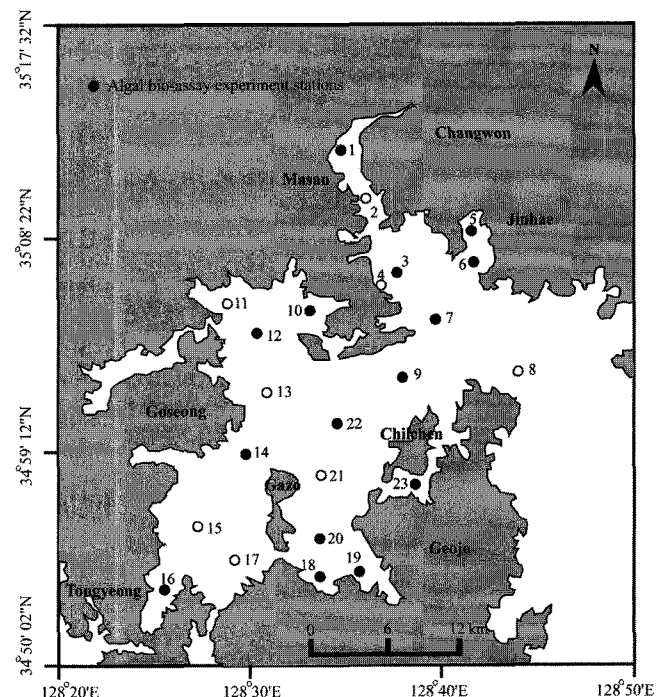


Fig. 1. Location of study sites in Jinhae Bay, Korea. Black circles indicate the stations conducted the algal bio-assay experiments.

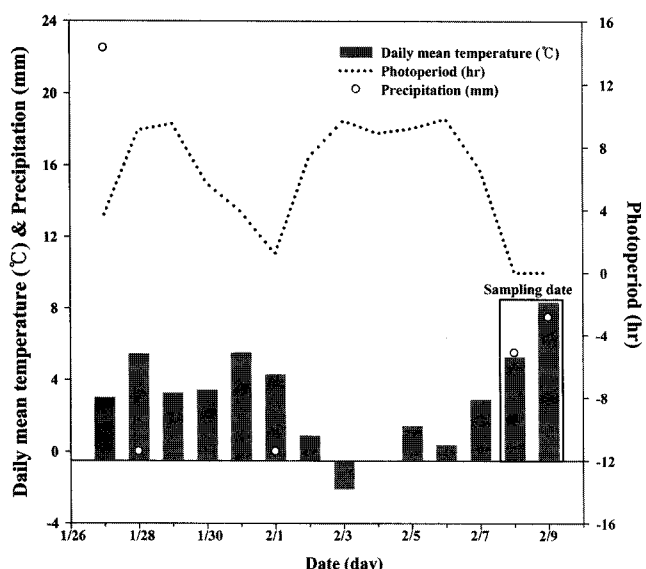


Fig. 2. Changes in daily mean air temperature (C), photoperiod (hrs) and precipitation (mm) before survey 10 days in Jinhae Bay.

선상에서 Secchi disc를 투하하여 산출하였다. Chlorophyll *a*(Chl. *a*)농도 측정을 위해서 표층과 저층수 1000 mL를 선상에서 GF/F 여과지(47 mm Whatman glass fiber filters)로 여과한 후 15 mL 튜브에 넣어 냉동보관하였다. 영양염 분석용 시료는 GF/F여과지를 통과한 여과 해수 20 mL를 30 mL PC병에 넣고 냉동보관하였다. 식물플랑크톤 종조성과 정량분석을 위해 500 mL용 채수병에 표층수와 저층수를 각각 500 mL를 넣고 곧바로 Lugol로 최종농도 1%로 고정했다.

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).

영양염 냉동 보관한 시료를 분석전 해동하여 규산염(SiO₂-Si), 암모니아성 질소(NH₄-N), 아질산과 질산성 질소(NO₂-N, NO₃-N), 인산염(PO₄-P)를 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 μL분주하여 X20또는 X40 배율에서 동정 및 계수하였다. 광학현미경하에서 동정이 어려운 종은 속 수준에서 동정하였다(Cupp, 1943; Tomas, 1977; Yamaji, 1979; Dodge, 1982).

생물검정실험

생물검정실험을 하기 위해 진해만 현장 조사시 내측과 외측해역의 15개 정점을 선정하여 표층해수를 채수하였다(Fig. 1). 각 정점별 표층해수는 200 μm의 mesh로 자연여과하여 동물플랑크톤을 제거한 후 1L 멸균 채수병에 담아 암조건에 보관하여 실험실로 운반하였다. 영양염 조절은 현장수에 영양염을 첨가하지 않은 대조군(control), 질산염을 첨가한 질소첨가군(+N), 인산염을 첨가한 인산첨가군(+P)으로 설정하였다. 질산첨가군은 KNO₃ 분말을 이용하여 첨가후 최종농도가 현장수 DIN 농도 + 20 μM로, 인산첨가군은 KH₂PO₄분말을 이용하여 첨가후 최종농도가 현장수 DIP + 2 μM로 각각 조절하였다. 실험은 현장표층수 50 mL을 두경이 달린 70 mL

의 시험관(ø22 mm × 200 mm; PYREX®)에 넣고 정점 당 2개씩으로(duplicate) 수행하였다. 배양조건은 광량은 60 μmol m⁻² s⁻¹, 광주기는 12L: 12D, 수온은 현장수온 범위의 7°C로 12일 동안 정지 배양하였다. 영양염 제한이 일어나는 시기를 파악하기 위해서 2일 간격으로 형광값을 측정하였고(Turner Designs 10-AU Fluorometer), 실험 종료시 식물플랑크톤의 군집조성을 살펴보았다.

결 과

물리 화학적 인자

식물플랑크톤의 군집동태를 파악하는데 있어 조사 10일전의 일평균 온도, 강수량 및 일조시간은 매우 중요한 인자이다. 일평균 온도는 조사 4-6일전에 -1.8~-1.6°C로 급격히 낮았으나 조사 3일전부터 조금씩 증가하는 경향을 보였다. 일조시간은 조사전 2-6일 사이는 길었고(7.4~9.7 hr), 그후 점차적으로 감소하였다(Fig. 2). 강수량은 조사전 12일에 22.5 mm의 강우를 보인 것을 제외하면 조사 이전 강우는 관측되지 않았으나, 조사 당일 약간의 강우(2월 8일: 5.5 mm, 2월 9일: 7.5 mm)를 확인하였다.

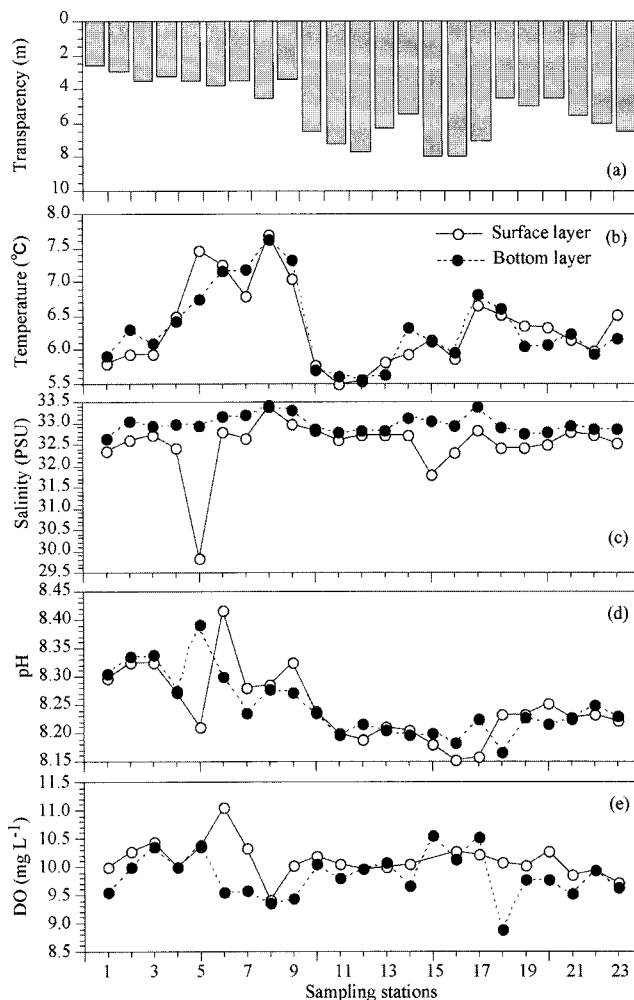


Fig. 3. Changes of transparency (a), temperature (b), salinity (c), pH (d) and dissolved oxygen (DO) (e) at 23 stations in Jinhae Bay, from February 8 to February 9. White and black circles indicate surface and bottom layers, respectively.

본 연구의 물리·화학적 결과를 고려하였을 때 마산만 해역은 정점 1에서 8까지로 구분되었고, 나머지 정점은 진해만 해역으로 구분하여 서술하였다. 수온은 마산만 외측 정점 8 표층과 저층에서 가장 높았으며(표층 7.71 °C, 저층 7.62 °C), 정점 11(진동만 내측)에서 가장 낮았다(표층 5.51 °C, 저층 5.62 °C). 조사기간중 진해만 광역해역에서 표층과 저층의 수온 차이는 뚜렷하게 관찰되지 않았다(Fig. 3b). 염분은 표층과 저층에서 각각 29.85~33.40 psu와 32.77~33.38 psu를 보였으며, 행암만 정점5 표층에서 가장 낮은 농도를 보였다(Fig. 3c). 투명도는 2.6~8.0 m의 분포를 보였으며, 전반적으로 마산만해역(정점 1~8)에서 낮게, 진해만 중앙수역을 포함하여 진동(정점 10~13), 고성-통영(정점 14~17) 및 거제(정점 9, 18~23) 인근 해역에서는 상대적으로 높게 나타났다(Fig. 3a). pH는 표층과 저층에서 높은 염분 차이를 보였던 정점5에서 가장 큰폭의 차이를 보였으며 (표층 8.21, 저층 8.39), 마산만 내측해역이 전반적으로 높은 값을 나타내었다(Fig. 3d). 용존산소는 표층이 저층보다 높았고, 정점18 저층(8.88 mg L⁻¹)을 제외하면 모든 정점에서 9 mg L⁻¹ 이상의 값을 보여 빈산소 수괴는 관측되지 않았다(Fig. 3e).

표층 규산염(SiO₂-Si)은 마산만 내측 해역인 정점 5에서 16.69 μM로, 저층에서는 정점18에서 12.34 μM로 최대값을 보였다(Fig. 4a). 마산만 및 거제 인근 해역에서는 전반적으로 표층에서 높은 농도를 보인 반면, 진해만 서쪽 해역에 위치한 정점(11~16)에서는 저층에서 높게 나타났다. 암모니아은 마산만 내측 정점인 1과 2에서 각각 22.1 μM과 32.6 μM로 높게 나타났으며, 진해만 중앙수역과

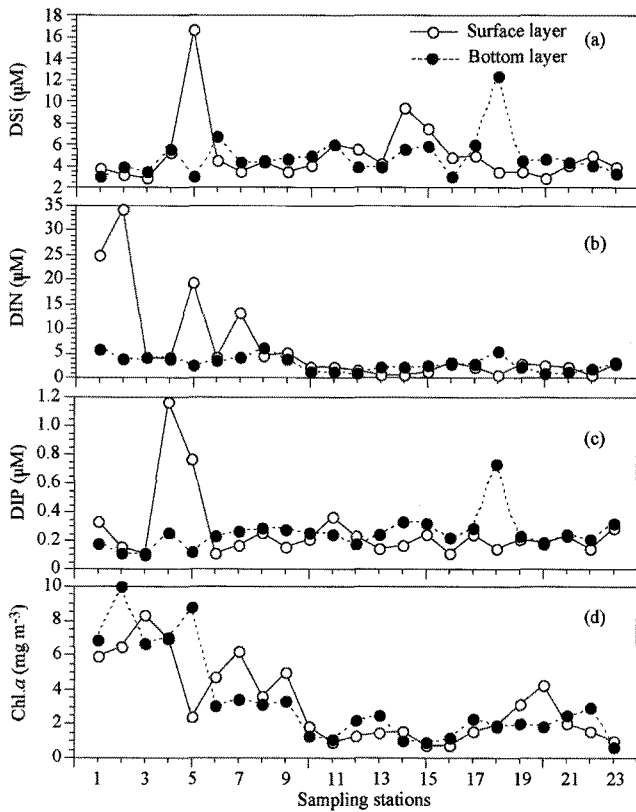


Fig. 4. Changes of DSi (a), DIN (nitrate, nitrite, ammonia) (b), DIP (c), and Chl.a concentration (d) from February 8 to February 9 at 23 stations in Jinhae Bay. White and black circles indicate surface and bottom layers.

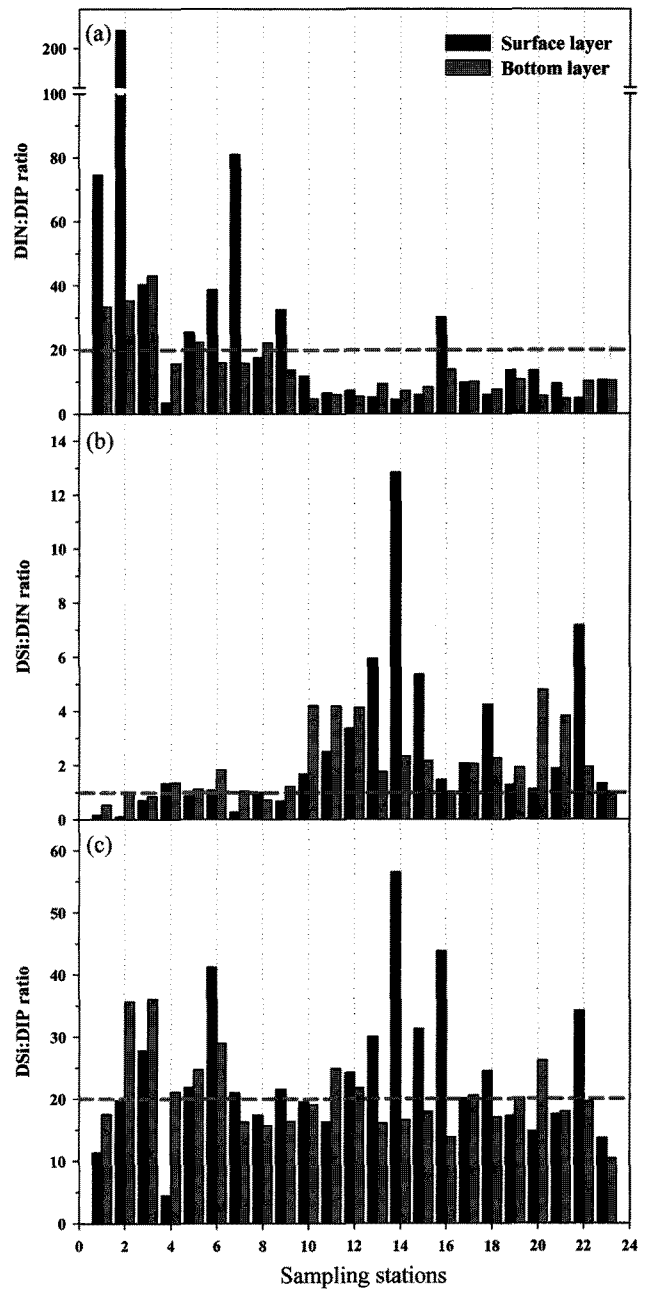


Fig. 5. Changes of DIN:DIP ratios (a), DSi:DIN ratios (b) and DSi:DIP ratios (c) from February 8 to February 9 at 23 stations in Jinhae Bay. White and black circles indicate surface and bottom layers, respectively. The dotted lines indicates the limitation factor by nutrients ratio; DSi limitation: DSi/DIP <10, DSi/DIN <1; DIN limitation: DSi/DIN >1, DIN/DIP <10; DIP limitation: DSi/DIP >20, DIN/DIP >20.

서부해역에서 상대적으로 낮게 관찰되었다. 질산염+아질산염은 정점 5 표층에서 17.6 μM로 최고치를 보였고, 마산만 내·외측해역을 중심으로 높게 나타났다. 인산염은 정점 4와 5 표층에서 각각 1.17 μM과 0.77 μM로 최고치를 기록하였고, 저층에서는 정점 18에서 0.73 μM로 가장 높았다(Fig. 4c). 인산염은 전반적으로 저층이 표층보다 약간 높게 나타났다.

DIN:DIP 비는 정점 4의 표층을 제외하면 마산만 내외측 정점에

서 Redfield 비 16보다 높게 나타났다(Fig. 5a). 반면 DSi:DIN 비는 마산만 내외측 정점에서 낮게 나타났으나, 진해만 중앙수역과 서부해역에서 Redfield 비 1보다 높게 나타났다(Fig. 5b). DSi:DIP 비는 규산염 농도가 높게 관찰된 고성·통영 인근 해역의 표층에서 높게 나타났으며, 대부분의 정점에서 Redfield 비 16 보다 높게 나타났다(Fig. 5c).

식물플랑크톤 분포

각 정점별 Chl.a 농도는 질소기원의 영양염이 풍부한 마산만 내측해역에서 높게 나타났으며(Fig. 4d), 진해만 중앙수역과 남서부해역으로 갈수록 상대적으로 낮게 관찰되었다. Chl.a 농도의 최고치는 정점 2저층(9.98 mg m⁻³)에서 관찰되었고, 최저치는 정점 23 저층에서 나타났다. 특히 정점 5에서는 표층과 저층의 Chl.a 농도차가 현저하게 나타났다.

조사 기간동안 총 67종의 식물플랑크톤의 동정되었으며, 규조강(Bacillariophyceae)이 43종으로 가장 높게 나타났고, 다음으로 와편모조강(Dinophyceae) 20종, 은편모조강(Cryptophyceae) 2종, 규질편모조강(Chrysophyceae)와 유글레나강(Euglenophyceae) 각 1종 순으로 관찰되었다. 조사 정점별 출현한 식물플랑크톤의 주요 그룹

을 살펴보면, 규조강과 더불어 은편모조강(5-10 μm 크기의 동정이 불가능한 종)이 대부분의 정점에서 90% 이상 극우점 하였다(Fig. 6c, d). 규질편모조류, 유글레나조류, 라피도조류의 그룹은 출현 빈도도 낮고 개체수 밀도도 극히 낮게 관찰되었다. 조사기간동안 출현한 식물플랑크톤 개체수를 보면, Chl. a 농도가 높았던 마산만 내측해역 표층과 저층에서 각각 평균 2,710 cells mL⁻¹과 1,426 cells mL⁻¹로 가장 높았고, 거제인근해역, 마산만 외측해역, 진동, 고성·통영 순으로 관찰되었다(Fig. 6a, b). 정점별 출현 종수와 Shannon-Wiener의 다양도지수를 보면, 출현종수는 현존량이 높게 관찰된 정점에서 비교적 높게 나타났으나, 다양도와 균등도 지수는 정점간 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다(Fig. 7). 특히 정점 1의 표층에서는 출현한 종수가 가장 많음에도 불구하고 종 다양도와 균등도는 오히려 다른 정점에 비해 낮게 나타났는데, 이는 출현 종수가 많음에도 불구하고 어느 특정종이 극우점 출현한 결과라고 판단된다(Fig. 7). 조사 기간중 우점규조류는 *Chaetoceros compressus*, *Chaetoceros didymus*, *Pseudo-nitzschia multistriata*, *Skeletonema* spp.로 마산만 내측해역에서 높은 밀도로 관측되었고, *Thalassiosira nordenskioldii*와 *Thalassiosira minima*는 진동 인근해역인 정점 11 표층에서 약 42%의 점유율을 보였다. 미소편모조류(5-10 μm 크기)는

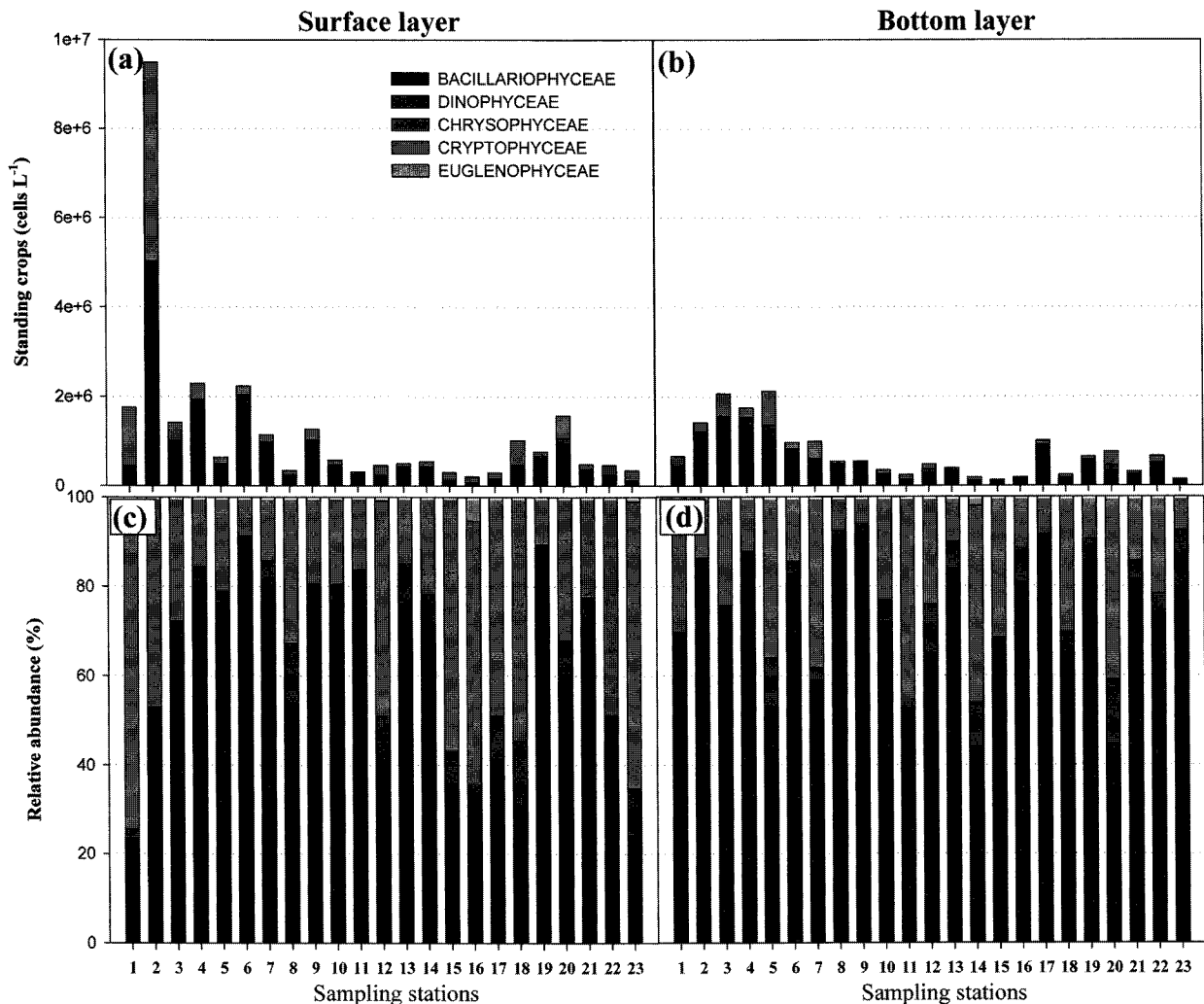


Fig. 6. Phytoplankton standing crops and relative contribution(%) in Jinhae Bay.

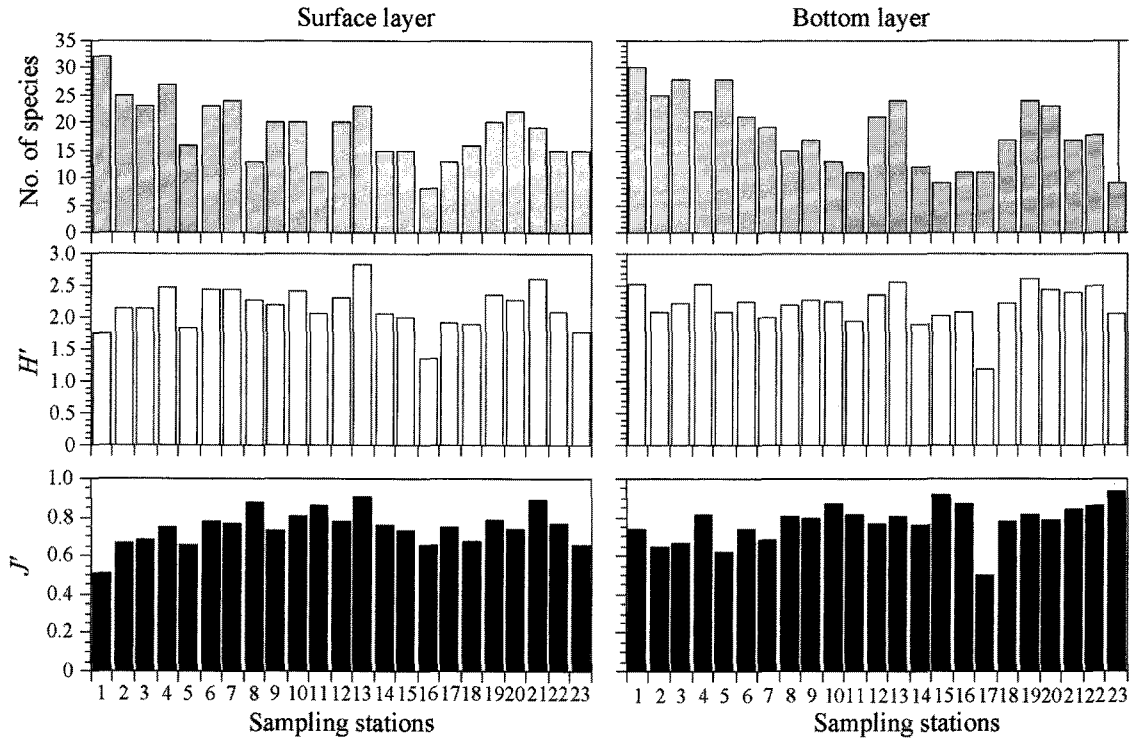


Fig. 7. Changes in number of observed species (upper), Shannon-Wiener diversity indices (H') (middle) and evenness (J) (below) at surface (left) and bottom (right) layers from February 8 to February 9 in Jinhae Bay.

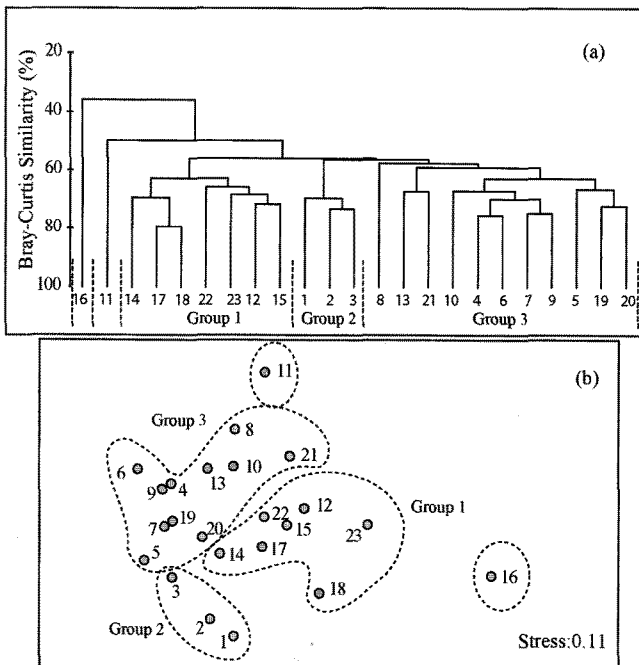


Fig. 8. Joint plots of sites association analyses obtained by cluster (a) and non-metric multidimensional scaling (MDS) (b) ordination analyses, using a data set of the surface species abundances at 23 stations of surface layer during winter season in Jinhae Bay.

정점1 표층에서 74%로 극우점 하였고, 대부분의 조사 정점에서도 가장 높은 기여율을 보였다(Fig. 6c, d). 정점별 출현한 식물플랑크톤의 군집구조를 바탕으로 Cluster 분석과 MSD 분석한 결과를 Fig.

8에 나타내었다. 식물플랑크톤의 군집구조와 출현양상에 따라서 형성되는 정점별 그룹의 차이는 명확하게 나누어지지 않았지만, 크게 3개의 그룹으로 구분할 수 있었다. 제1그룹은 진동, 고성-통영 부근을 포함하는 진해만 서부 해역으로 나누어 졌으며, 제2그룹은 마산만 최내측해역으로 육상으로부터 유입되는 담수의 영향을 많이 받는 정점1, 2, 3으로 나누어 졌다. 제3그룹은 마산만내 덕동하수종말처리장 부근인 정점4과 행암만내 정점5, 6을 포함한 마산만내외측(정점7, 8) 해역과 가조도 우측 해역(정점9, 10, 13, 19, 20, 21)으로 나누어 졌다.

식물플랑크톤군집과 환경인자와의 상관성 분석

동계 진해만에서 물리화학적 환경인자가 식물플랑크톤 군집구조에 미치는 영향을 파악하기 위해서, 식물플랑크톤 군집과 환경인자와의 상관성 분석을 하였다(Table 1). 수온과 염분은 표층에서 식물플랑크톤 군집과 뚜렷한 상관성이 나타나지 않았으며, Chl. a와도 유의한 상관성이 관찰되지 않았다. 투명도와 pH는 표층에서 은편모조류 그룹과 상관성을 보이지 않았고, 전체 식물플랑크톤, 규조류, Chl. a 농도와 유의한 상관성을 보였다. DIN:DIP 비는 전체 식물플랑크톤 현존량 및 그룹 그리고 Chl. a 농도와 유의한 양(+)의 상관성을 나타냈으며, 그룹별로는 우점규조류, 은편모조류와는 양(+)의 상관성을 보인 반면, 외편모조류는 상관성을 보이지 않았다. 표층에서 DSi:DIP 비는 Chl. a 농도와 음의 상관성을 보였고, DSi:DIP 비는 식물플랑크톤 군집과 상관성을 보이지 않았다.

생물검정실험

영양염 첨가에 따른 각 정점별 출현하는 식물플랑크톤 군집의

Table 1. Pearson correlation coefficients (r) indicating the relationships between abiotic and biotic factors at 23 stations of surface layer in Jinhae Bay.

	DIP	NH ₄	SiO ₂	DIN	DIN/DIP	DSi/DIN	DSi/DIP	SD	Temp.	pH	Salinity	DO	BACIL. CRYPT.	Chl.a	PT	
DIP	1.00															
NH ₄	-0.05	1.00														
SiO ₂	0.46*	-0.22	1.00													
DIN	0.14	0.92**	0.13	1.00												
DIN/DIP	-0.15	0.94**	-0.19	0.88**	1.00											
DSi/DIN	-0.18	-0.38	0.28	-0.43*	-0.39	1.00										
DSi/DIP	-0.49*	-0.26	0.25	-0.26	-0.10	0.68**	1.00									
Secchi depth (SD)	-0.26	-0.53**	0.06	-0.59**	-0.50*	0.39	0.30	1.00								
Temperature	0.21	-0.12	0.25	0.07	-0.04	-0.32	-0.11	-0.44*	1.00							
pH	-0.07	0.43*	-0.33	0.37	0.47*	-0.40	-0.10	-0.78**	0.38	1.00						
Salinity	-0.47*	0.02	-0.81**	-0.33	0.01	0.07	0.02	0.09	-0.18	0.26	1.00					
DO	-0.13	0.12	0.10	0.17	0.27	-0.18	0.35	-0.23	0.07	0.41	-0.25	1.00				
BACILLARIOPHYCEAE	0.08	0.72**	-0.19	0.65**	0.83**	-0.31	-0.12	-0.55**	0.04	0.60**	0.05	0.39	1.00			
CRYPTOPHYCEAE	-0.07	0.89**	-0.20	0.8**	0.91**	-0.24	-0.16	-0.40	-0.18	0.35	0.02	0.11	0.85**	1.00		
Chl.a	0.19	0.55**	-0.32	0.50*	0.55**	-0.50*	-0.32	-0.85**	0.21	0.77**	0.13	0.31	0.61**	0.42*	1.00	
Phytoplankton (PT)	0.01	0.83**	-0.21	0.75**	0.9**	-0.28	-0.15	-0.50*	-0.06	0.50*	0.04	0.27	0.97**	0.96**	0.55**	1.00

Significant correlation: ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

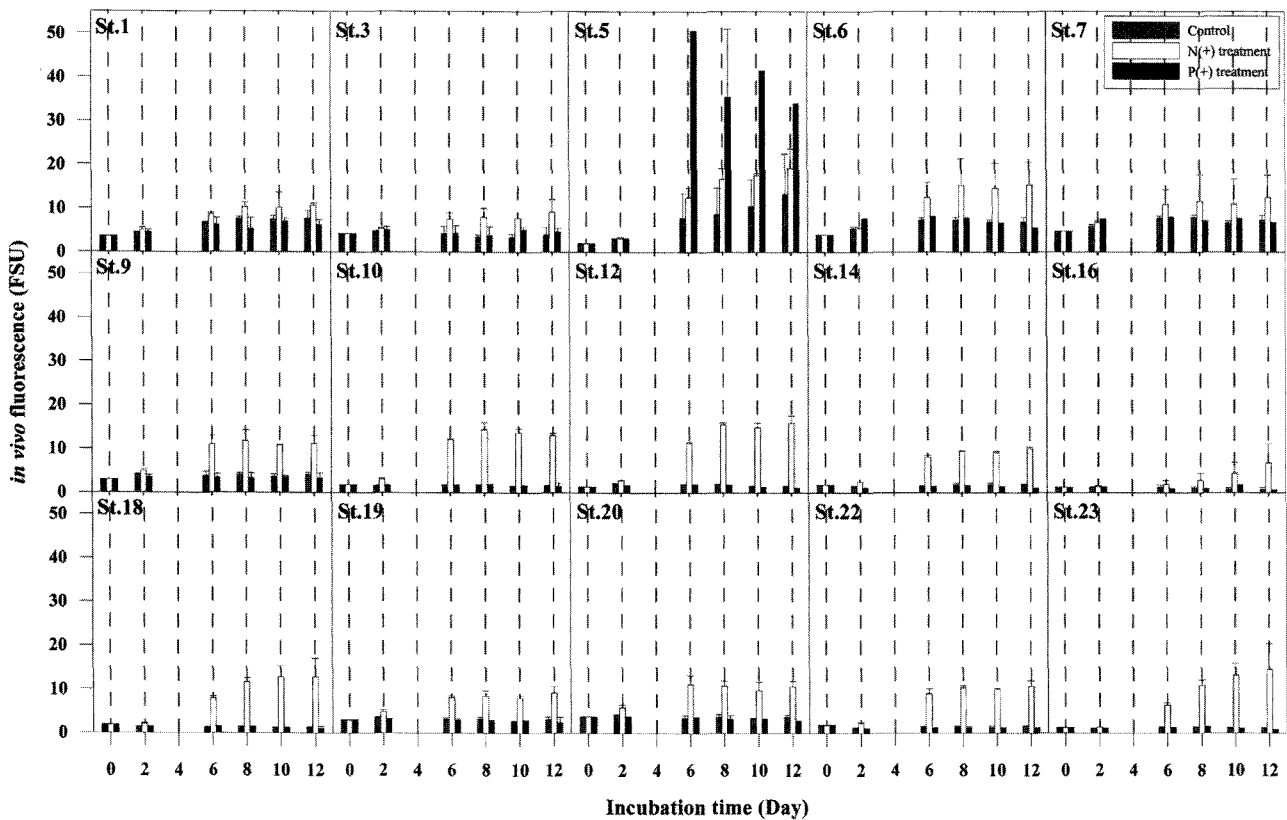


Fig. 9. Growth response of phytoplankton assemblages by algal bio-assay.

반응을 평가하는 생물검정실험 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 대부분의 정점에서 질산염 첨가구가 대조구와 인산염 첨가구보다 높은 성장률을 보였다. 인산염 첨가구에서는 대량 증식이 발생했던 정점 5를 제외하면 대조구와 비슷한 형광값을 보였다.

영양염 첨가 효율을 파악하기 위해서 대조구 대비 질산염과 인산염 첨가구의 영양염 첨가 효율을 Fig. 10에 나타내었다. 각각의

영양염 첨가구의 효율은 각 정점별 12일간 배양한 형광값의 평균을 산출한 후 $(T/C) \times 100$ 식에 대입하여 구하였다. 여기서 T 는 영양염 첨가구의 형광값이며, C 는 대조구의 형광값이다. 질산염 첨가구는 인산염 첨가구에 비해 높은 효율을 보였으며, 마산만 인근해역 보다는 그 이외 정점에서 효과적으로 반응 하는 것으로 나타났다(Fig. 10a). 인산염 첨가구는 마산만 인근해역에서는 대조구

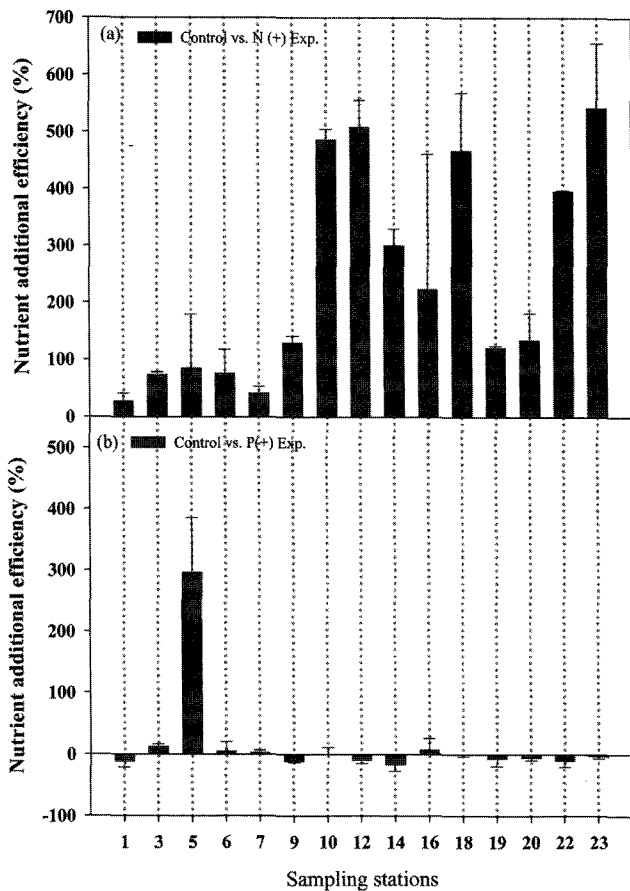


Fig. 10. Comparison of N and P nutrient additional efficiency vs. control based on Figure 9.

보다 높은 효율을 보였으나, 그 이외 정점에서는 오히려 대조구가 인산염 첨가구 보다 높은 성장을 보였다(Fig. 10b).

생물검정실험에서 우점한 식물플랑크톤의 종조성을 Table 2에 나타내었다. 인산염 첨가에 의해서 대발생이 일어난 정점5에서는 크기가 작은 은편모그룹과 *Skeletonema* spp., *Thalassiosira minima* 가 우점을 하였으며, 질산염 첨가구에서도 정점5에서 *Skeletonema* spp.이 97.8%로 극우점하였다. 생물검정실험을 수행한 대부분의 정점에서 *Skeletonema* spp., *Pseudo-nitzschia multistriata*, *Chaetoceros* spp., *Chaetoceros compressus*, *Thalassiosira minima*, *Thalassiosira anguste-lineata*, *Thalassiosira nordenskioldii*, 미동정 은편모그룹 등이 우점 출현하였다.

토 의

식물플랑크톤 군집의 공간 분포

동계 마산만 식물플랑크톤의 군집구조와 현존량 분포를 살펴보면, 마산만 최내측해역에서 현존량이 극히 높았고, 외측정점으로 향할수록 점차적으로 감소하는 경향이 관찰되었다. 아울러 미동정 은편모그룹은 최내측정점에서 극히 높았으나, 외측정점으로 갈수록 규조류로 우점종이 바뀌는 양상이 관찰되었다. 진해만에서는 대부분의 정점에서 규조류와 은편모조류가 우점하였고, 서북부해역인 고성과 통영의 원문만주변해역의 표층에서 은편모조류가 40~60%

의 높은 점유율을 보였다. 저층에서는 규조류가 압도적으로 우점하였고, 다음으로 은편모조류와 외편모조류로 나타났고, 규질편모조류, 유글레나조류, 라피도조류의 그룹은 출현 빈도도 낮고 개체수 밀도도 극히 낮게 관찰되었다.

표층 식물플랑크톤 군집 구조에 따른 Cluster와 MDS 분석을 수행한 결과, 제1그룹은 *Thalassiosira nordenskioldii*와 *Thalassiosira minima* 가 각각 우점출현한 정점 11과 원문만 정점 16을 제외한 나머지 진해만 서북부해역의 정점으로 구분되었다. 그룹 1에 묶인 대부분의 정점은 질산염 농도가 낮게 관찰되어 DIN:DIP 비가 Redfield 비16보다 낮게 관찰된 것이 특징적이었다. 또한 정점 14를 제외하면 은편모조류가 전체 식물플랑크톤 현존량에 50% 이상의 점유율을 보였다. 제 2그룹에 묶인 마산만 내측정점 1, 2, 3은 정점간 유사도가 70% 이상으로 높게 나타났고, 이들 정점에서 식물플랑크톤의 현존량이 극히 높았다. 제 2그룹은 낮은 투명도와 더불어 높은 DIN:DIP 비를 보였고, 은편모조류와 규조류 *Chaetoceros* spp., *Pseudo-nitzschia multistriata* 가 각각 우점하였다. 제3그룹은 마산만내 덕동하수종말처리장의 정점4와 행암만내 정점5, 6을 포함하여 마산만의 외측정점과 진해만 중앙수역, 칠천도 인근해역 등으로 구분되었다. 3그룹은 전반적으로 DSi:DIP 비가 Redfield 비 16보다 높은 값을 보인 정점으로 구분된 것이 특이적이었고, 규조류의 우점율이 높게 나타났다. 본 연구에서 투명도가 낮고 질소기원의 영양염이 풍부한 해역에서 은편모조류가 우점출현하였고, 이는 낮은 광조건하에서 영양염을 잘 흡수한다는 Blanco *et al.*(2008)의 보고와 비교적 잘 일치하였다. 그룹2에서는 규조류가 높은 밀도로 출현하였고, 그 중 *Chaetoceros* spp.가 극우점을 하였으며, 다음으로는 *Pseudo-nitzschia multistriata*와 *Skeletonema* spp.로 나타났다. 일부 선행연구에 의하면(Conway and Harrison, 1977; Harrison and Davis, 1979; 장 등, 2010), *Chaetoceros* 속은 *Skeletonema* 속보다 규산염을 흡수하는 능력이 뛰어나며, 본 연구에서도 규산염이 상대적으로 제한되는 정점에서 *Chaetoceros* 속이 높은 현존량 분포를 보였으며, 이는 *Chaetoceros* 속이 규산염을 보다 빨리 흡수하여 규산염 제한을 일으켰을 가능성이 크다. 제1그룹의 정점 2에서는 *Pseudo-nitzschia* 속이 *Skeletonema* 속보다 높게 우점하였다. *Pseudo-nitzschia* 속은 인산염에 대한 반포화 계수가 낮고 인산염이 제한되는 해역에서 다른 그룹과의 경쟁에서 우위를 점할 수 있고(Sommer, 1985; Grover, 1989a, 1989b), *Skeletonema* spp.는 인산염(Sakshaug and Andersen, 1986)과 규산염농도(Lagus *et al.*, 2004; 장 등, 2010)가 높을 때 경쟁력이 탁월하다. 특히 정점 2에서는 본 조사 해역중 가장 높은 DIN:DIP 비(209.04)를 갖는 정점으로 질산염의 과잉 공급으로 인산염과 규산염이 제한되었다. 결과적으로 *Pseudo-nitzschia multistriata*는 인산염이 낮은 해역에서도 성장이 가능했고, 아울러 낮은 인산염 환경하에서 *Skeletonema* 속과의 영양염 경쟁에서 우위를 차지할 가능성이 크다.

식물플랑크톤 군집과 환경인자와의 상관성

식물플랑크톤 군집구조 및 현존량은 주변 환경에 민감하게 반응하기 때문에, 그들간의 상호 관계를 파악하는 것은 생태학적으로 매우 중요한 의미를 가진다. 진해만에서 수온과 염분은 표층과 저층에서 식물플랑크톤 각 군집 및 Chl. *a* 농도와 유의한 상관성이 나타나지 않았다. 투명도는 표층에서 은편모조류 그룹과 상관성을 보이지 않은 것을 제외하면, 표층과 저층에서 전체 식물플랑크톤,

Table 2. Relative contribution (%) of dominant phytoplankton species through the algal bio-assay experiments.

Site	Control	N (+) Exp.	P (+) Exp.
St. 1 No data		<i>Chaetoceros</i> spp. (13.3) Unidentified Cryptophyceae (61.9)	<i>Chaetoceros</i> spp. (10.8) Unidentified Cryptophyceae (67.9)
St. 3 No data		<i>Chaetoceros</i> spp. (54.8) Unidentified Cryptophyceae (25.8)	<i>Chaetoceros</i> spp. (49.2) Unidentified Cryptophyceae (27.5)
St. 5 No data		<i>Skeletonema costatum</i> (97.8)	<i>Skeletonema costatum</i> (27.2) Unidentified Cryptophyceae (42.2)
St. 6 Unidentified Cryptophyceae (27.8)	<i>Skeletonema costatum</i> (37.0)	<i>Chaetoceros</i> spp. (35.6) Unidentified Cryptophyceae (28.8)	<i>Chaetoceros</i> spp. (37.2) Unidentified Cryptophyceae (33.0)
St. 7 <i>Chaetoceros</i> spp. (46.8)	<i>Skeletonema costatum</i> (34.0)	<i>Chaetoceros</i> spp. (23.6) Unidentified Cryptophyceae (42.7)	<i>Chaetoceros</i> spp. (52.8) Unidentified Cryptophyceae (37.5)
St. 9 <i>Chaetoceros</i> spp. (36.5)	Unidentified Cryptophyceae (41.3)	<i>Chaetoceros</i> spp. (22.5) Unidentified Cryptophyceae (23.9)	<i>Chaetoceros</i> spp. (28.4) Unidentified Cryptophyceae (61.2)
St. 10 Unidentified Cryptophyceae (29.2)	<i>Skeletonema costatum</i> (16.7)	<i>Chaetoceros</i> spp. (44.4)	<i>Chaetoceros</i> spp. (33.3) <i>Skeletonema costatum</i> (22.2)
St. 12 Unidentified Cryptophyceae (48.3)	<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i> (10.3)	<i>Skeletonema costatum</i> (67.7)	<i>Skeletonema costatum</i> (40.0) Unidentified Cryptophyceae (45.7)
St. 14 <i>Chaetoceros</i> spp. (30.3)	Unidentified Cryptophyceae (60.6)	<i>Chaetoceros</i> spp. (29.9) Unidentified Cryptophyceae (26.9)	<i>Chaetoceros</i> spp. (31.6) Unidentified Cryptophyceae (42.1)
St. 16 Unidentified Cryptophyceae (93.2)		<i>Skeletonema costatum</i> (28.1)	<i>Skeletonema costatum</i> (27.3) Unidentified Cryptophyceae (68.2)
St. 18 Unidentified Cryptophyceae (13.3)	<i>Pseudo-nitzschia multistriata</i> (16.7)	<i>Chaetoceros</i> spp. (55.8) Unidentified Cryptophyceae (13.3)	<i>Chaetoceros</i> spp. (60.7) Unidentified Cryptophyceae (10.7)
St. 19 <i>Chaetoceros</i> spp. (53.3) <i>Skeletonema costatum</i> (22.2)	<i>Pseudo-nitzschia multistriata</i> (13.3)	<i>Chaetoceros</i> spp. (33.8) Unidentified Cryptophyceae (47.5)	<i>Chaetoceros</i> spp. (25.4) Unidentified Cryptophyceae (50.7)
St. 20 <i>Chaetoceros</i> spp. (25.4)	Unidentified Cryptophyceae (55.2)	<i>Skeletonema costatum</i> (21.5)	<i>Chaetoceros</i> spp. (29.4) Unidentified Cryptophyceae (56.5)
St. 22 <i>Thalassiosira anguste-lineata</i> (42.9) <i>Thalassiosira nordenskiöldii</i> (14.3)	<i>Pseudo-nitzschia multistriata</i> (14.3) Unidentified Cryptophyceae (12.1)	<i>Chaetoceros</i> spp. (19.7)	<i>Chaetoceros</i> spp. (11.1) Unidentified Cryptophyceae (70.4)
St. 23 <i>Chaetoceros</i> spp. (36.8) <i>Skeletonema costatum</i> (15.8) Unidentified species (10.5)	<i>Pseudo-nitzschia multistriata</i> (10.5) Unidentified Cryptophyceae (26.9)	<i>Chaetoceros</i> spp. (16.2)	<i>Chaetoceros</i> spp. (25.9) Unidentified Cryptophyceae (55.6)

규조류, Chl. *a* 농도와 유의한 음(-)의 상관성을 보였다. 표층에서 투명도에 대한 식물플랑크톤 그룹별 상관성을 살펴보면, 규조류와는 유의한 상관성이 나타났으나($P < 0.01$), 은편모조류와는 유의한 상관관계가 성립되지 않았다. 크기가 작은 은편모그룹이 본 조사 해역에서 주로 우점하였고, 이는 우점한 규조류에 비하여 세포체적이 작기 때문에 은편모그룹의 개체수의 밀도가 높음에도 불구하고 투명도에 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. 식물플랑크톤 군집별 pH와의 상관성은 표층에서는 규조류, 저층에서는 규조류 및 은편모조류와 유의한 양의 상관관계를 보였다. 이는 해수층 pH 농도는 식물플랑크톤의 증식과 밀접한 관련이 있으며 일반적으로 식물플랑크톤이 증가하면 pH농도도 증가한다는 조 등(1998)의 연구 결과와 일치한다.

조사기간 표층에서 출현한 식물플랑크톤의 현존량은 DIN:DIP 비와 매우 유의한 양(+)의 상관성을 보인 반면, DSi:DIN 비와 DSi:DIP 비와는 음(-)의 상관성을 보였다. 이것은 규산염과 인산염 보다는 질산염이 식물플랑크톤의 증식에 중요한 요인으로 작용될 것이다. 표층에서 국지적으로 매우 높은 DIN영양염이 정점1, 2, 4, 5에서 관찰되었고, 특히 정점1, 2, 7에서는 암모니아 농도가 극히 높게 나타난 것이 특징적이었다. 이들 정점은 마산만의 반폐쇄적인 해역의 정점으로 표층이 저층에 비해 염분 농도가 일정하게 낮게 관찰된 것으로 보아 생활 오피수를 포함한 담수기원 영양염공급(DIN)이 식물플랑크톤 증식에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

영양염 농도 및 영양염 비를 통한 수계내 제한영양염 파악

식물플랑크톤 성장과 증식은 해수내 존재하는 영양염의 절대적인 양과 그 구성성분비에 의해서 조절된다(Hecky and Kiham, 1988; Howarth *et al.*, 1988; Dortch and Whittledge, 1992; Justic *et al.*, 1995; Fujiki *et al.*, 2004). Dortch and Whittledge는 DIN, DIP, DSi의 농도가 각각 <1.0 , 0.2 , $2.0 \mu\text{M}$ 이하일 경우 영양염 절대 농도의 제한을 받으며, 그 성분구성비에 의한 제한은 $\text{DSi/DIP} < 10$, $\text{DSi/DIN} < 1$ 이하이면 규산염 제한, $\text{DIN/DIP} < 10$, $\text{DSi/DIN} > 1$ 이면 질산염 제한, 그리고 $\text{DSi/DIP} > 20$, $\text{DIN/P} > 20$ 이상이면 인산염에 의해서 제한된다(Justic *et al.*, 1995; Baek *et al.*, 2009). 상기에 언급한 기준에 근거하여 진해만에서 영양염 절대농도의 제한 및 구성 성분 비에 따른 식물플랑크톤의 성장에 미치는 잠재적인 영양염 제한인자를 파악하였다. 마산만에서는 정점간 약간의 차이는 있었으나, 전반적으로 인산염에 의한 제한이 두드러졌다. 진해만에서는 원문만 정점16에서 인산염에 의한 제한 현상이 나타났으나 전반적으로 질소기원의 영양염이 제한이 관찰되었다. 특히 진해만 정점 13, 14, 18, 22에서는 질산염의 절대농도뿐만 아니라 구성 성분비에 의한 제한이 뚜렷하게 나타났다. 진해만에서 영양염 성분비의 제한은 총 14개 정점 중 9곳에서 질산염 제한이 관찰되었고, 제한된 정점 위치가 한 쪽 해역으로 편중되어 있지않고 진해만 전 해역에 산개 분포하고 있는 것으로 보아 질소기원의 영양염은 동계 진해만에서 식물플랑크톤 기초 생산력을 제한하는 중요한 인자 중 하나로 판단된다. 규산염의 절대농도에 의한 제한은 본 연구에서는 나타나지 않았으며, 구성성분비(DSi/DIP, DSi/DIN)에 의한 제한도 정점4에서만 관찰되었다. 규조류의 피각은 규산질로 되어 규산염 농도의 제한은 그들 성장의 저해요인이 될 수 있지만, 본 해역에서는 수계내 규산염 농도가 충분히 존재하는 것으로 보아 그들 성장을 저해하는 요인이 되지 않는 것으로 판단된다. 결론적으

로 진해만 광역 해역내 영양염 제한특성은, 마산만 내외측 정점을 중심으로 인(P)이 제한인자가 되고, 진해만은 질소(N)기원 영양염 제한이 식물플랑크톤의 성장에 영향을 미칠 것으로 판단되었다.

생물검정실험을 통한 수계내 제한영양염 파악

동계 진해만 광역해역에서 영양염첨가에 따른 식물플랑크톤의 반응을 살펴본 결과, 행암만 내측에 위치한 정점5를 제외한 모든 조사해역에서 질산염 첨가구가 인산염 첨가구 보다 높은 형광값을 보였다. 특히 정점 5에서는 현장에서 인산염농도가 비교적 높게 관찰되었음에도 불구하고 오히려 인산염 첨가구의 식물플랑크톤의 활성이 높게 관찰되었다. 이러한 결과는 정점 5를 제외한 생물검정 실험을 수행한 나머지 정점에서 규산염과 질산염 중 최소한 한 가지 이상이 영양염이 부족한 현상을 보였기 때문이며, 정점5에서의 규산염과 질산염(DSi:16.7 μM , DIN:19.4 μM) 로 다른 주변 정점보다 압도적으로 높게 나타난 반면, 인산염의 농도는 상대적으로 낮은 0.77 μM 로 관찰되어, 인산염 첨가후 대조군 대비 약300%의 높은 첨가효율을 얻을 수 있었다. 이는 생물이 성장을하는데 필요한 한 영양염의 부족한 상태에서 다른 영양염을 공급해 주어도 성장의 제한된다는 Liebig의 최소량의 법칙에 의해 설명되어진다. 정점5의 N(+) 실험구에서는 *Skeltonema* 속이 98%로 극우점한 반면, P(+) 실험구에서는 미동정 은편모그룹과 *Thalassiosira* 속이 68%를 차지하였고, 다음으로 *Skeltonema* 속이 27%로 관찰되어, N(+) 실험구와 다른 양상을 보였다. 앞서 언급했듯이, 은편모그룹은 인산염에 민감하게 반응하는 종으로 낮은 농도에서부터 높은 농도로 다양하게 반응하는 것을 본 실험을 통하여 확인 할 수 있었다. 결과적으로 P(+) 실험구에서 은편모그룹이 빠르게 반응한 결과 영양염 첨가효율이 대조구 대비 약 300%로 현저하게 높게 나타났다. 특히 마산만은 영양염을 첨가하지 않은 대조구에서 일정한 형광값이 관찰되었고, 이는 현장표층수에 존재한 N기원영양염을 식물플랑크톤이 효율적으로 이용한 결과, 상대적으로 대조구 대비 N(+)의 실험구의 효율이 낮게 관찰되었다. 반면, 진해만은 현장에 질소기원의 영양염이 식물플랑크톤의 성장에 제한요인이 되는 정점이 대부분이었고, 만약 질소기원의 영양염이 공급되면 식물플랑크톤의 성장효율이 높아진다는 것을 생물검정실험을 통하여 확인 할 수 있었다(Figs. 9 and 10). 결과적으로 동계 진해만에서 질산염은 식물플랑크톤의 기초생산력을 조절하는 중요한 인자중 하나로 판단되었고, 이는 진해만 수계내 절대농도와 구성성분비에 의한 제한영양염 분석 결과와 비교적 잘 일치하였다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 연구과제 “남해특별관리해역의 관리를 위한 해양 생태계 건강지수 개발(PE98532)”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 곽승국, 최만영, 조경재, 2001. 마산-진해만에서 적조원인 편모조류의 분포와 발생빈도. *Algae*, **16**: 315-323.
 김학균, 박주석, 이삼근, 안경호, 이필용, 1993. 마산만에 설치한 야외수조내의 식물성플랑크톤의 천이와 환경변화. 국립수산진흥

- 원 연구보고. **47**: 9-18.
- 박종규, 허성희, 정해진, 2001. 진해만의 식물플랑크톤: 1광 환경에 따른 광합성 특성과 일차 생산력. *Algae*, **16**: 189-196.
- 유만호, 송태윤, 김은수, 최중기, 2007. 진해만 서부해역에서 식물플랑크톤의 시·공간적 분포특성. *한국 해양학회지·바다*, **12**: 305-314.
- 이영식, 이재성, 정래홍, 김성수, 고우진, 김귀영, 박종수, 2001. 광양만에서 식물플랑크톤의 제한영양염. *한국해양학회지·바다*, **6**: 201-210.
- 이주연, 한명수, 2007. 마산만 식물플랑크톤의 대발생 양상의 변화와 군집 동태. *한국해양학회지·바다*, **12**: 147-158.
- 이진환, 한명수, 허택형, 1981. 진해만의 적조원인 생물에 관한 연구. *한국해양연구소 소보*, **3**: 97-105.
- 임동일, 김영옥, 장민란, 장풍국, 신경순, 장만, 2007. 한국 남해 마산만에서 수질환경의 계절적 변동과 기초생산 제한인자. *Ocean and Polar Res.*, **29**: 349-366.
- 임월애, 이영식, 이삼근, 2008. 2007년 남해동부해역의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생과 소멸에 미치는 환경 특성. *한국 해양학회지·바다*, **13**: 325-332.
- 장풍국, 장민철, 이우진, 신경순, 2010. 장목만에서 여름철 영양염 특성 변화가 식물플랑크톤 군집구조에 미치는 영향. *Ocean and Polar Res.*, **32**: 97-111.
- 정병관, 신용식, 장남익, 김상돈 (2008). 동북호 식물플랑크톤의 제한 영양염 규명: 장기 자료 분석 및 생물검정조사. *Korean J. Limnol.*, **41**: 412-421.
- 조경제, 최만영, 곽승국, 임성호, 김대운, 박종규, 김영의, 1998. 마산-진해만 수질 부영양화 및 계절 변동. *한국해양학회지·바다*, **3**: 193-202.
- Baek, S.H., S. Shimode, H.C. Kim, M.S. Han and T. Kikuchi, 2009. Strong bottom-up effects on phytoplankton community caused by a rainfall during spring and summer in Sagami Bay, Japan. *J. Mar. Syst.*, **75**: 253-264.
- Blanco, A.C., K. Nadaoka and T. Yamamoto, 2008. Planktonic and benthic microalgal community composition as indicators of terrestrial influence on a fringing reef in Ishigaki Island, Southwest Japan. *Mar. Environ. Res.*, **66**: 520-535.
- Conway, H.L. and P.J. Harrison, 1977. Marine diatoms growth 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.
- Cupp, E.E., 1943. Marine plankton diatoms of the west coast of North America. University of California press, Berkeley and L.A., 237pp.
- Cushing, D.H., 1989. A difference in structure between ecosystems in strongly stratified waters and in those that are only weakly stratified. *J. Plankton Res.*, **11**: 1-13.
- Dodge, J.D., 1982. Marine dinoflagellate of the British Isles. Her Majesty stationary office, London, 303pp.
- Dortch, Q. and T.E. Whittedge, 1992. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions? *Cont. Shelf. Res.*, **12**: 1293-1309.
- Fisher, T.R., E.R. Peele, J.W. Ammerman and L. Harding, 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **82**: 51-63.
- Fujiki, T., T. Toda, T. Kikuchi, H. Aono and S. Taguchi, 2004. Phosphorus limitation of primary productivity during the spring-summer blooms in Sagami Bay, Japan. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **283**: 29-38.
- Goffart, A., J. H. Hecq and L. Legendre, 2002. Changes in the development of the winter-spring phytoplankton bloom in the bay of Calvi over the last two decades a response to changing climate. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **236**: 45-60.
- Grover, J.P., 1989a. Effect of Si:P supply ratio, supply variability and selective grazing in the plankton. An experiment with a nature algal and protistan assemblage. *Limnol. Oceanogr.*, **34**: 349-367.
- Grover, J.P., 1989b. Phosphorus-dependent growth kinetics of 11 species of freshwater algae. *Limnol. Oceanogr.*, **34**: 341-348.
- Han, M.S., S.W. Kim and Y.O. Kim, 1991. Influence of discontinuous layer on plankton community structure and distribution in Masan Bay, Korea. *Bull. Korean Fish. Soc.* **24**: 459-471.
- Harrison, P.J. and C.O. Davis, 1979. The use of outdoor phytoplankton continuous cultures to analyze factors influencing species selection. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **14**: 19-23.
- Hecky, R.E. and P. Kilham, 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnol. Oceanogr.*, **33**: 786-822.
- Howarth, R.W., R. Marino and J.J. Cole, 1988. Nitrogen fixation in freshwater, estuarine, and marine ecosystems. 2. Biogeochemical controls. *Limnol. Oceanogr.*, **33**: 688-701.
- Justic, D., N.N. Rabalais, R.E. 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.
- Lagus, A., J. Suomela, G. Weithoff, K. Heikkila, H. Helminen and J. Sipura, 2004. Species-specific differences in phytoplankton responses to N and P enrichments and the N:P ratio in the Archipelago Sea, northern Baltic Sea. *J. Plankton Res.*, **26**: 779-798.
- Lee, C.K. and W.A. Lim, 2006. Variation of Harmful Algal Blooms in Masan-Chinhae Bay. *ScienceAsia*, **32**: 51-56.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press, New York. 173pp.
- Redfield, A.C., B.H. Ketchum and F.A. Richards, 1963. The influence of organisms on the composition of seawater. In: Hill, M.N., Editor, 1963. The Sea, Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas Vol. 2, Interscience, NY, pp. 26-77.
- Riley, G.A., 1942. The relationship of vertical turbulence and spring diatom flowering. *J. Mar. Res.*, **5**: 67-87.
- Ryther, J.H. and W.M. Dunstan, 1971. Nitrogen, phosphorus and eutrophication in the coastal marine environment. *Science*, **171**: 1008-1013.
- Sakshaug, E. and K. Anderson, 1986. Effect of light regime upon growth rate and chemical composition of a clone of *Skeletonema costatum* from the Trondheimsfjord, Norway. *J. Plankton Res.*, **8**: 619-637.
- Sakshaug, E. and Y. Olsen, 1986. Nutrient status of phytoplankton blooms in Norwegian waters and algal strategies for nutrient competition. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **43**: 389-396.

- Sommer, U., 1985. Comparison between steady and nonsteady state competition: experiments with natural phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, **30**: 335-346.
- Taylor, D., S. Nixon, S. GrangeOr and B. Buckley, 1995. Nutrient limitation and the eutrophication of coastal lagoons. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **127**: 235-244.
- Tomas, C.R., 1997. Identifying marine phytoplankton. Academic

Press. California. 858pp.

- Yamaji, I., 1979. Illustrations of the marine plankton of Japan. Hoikusha Publishing Co Ltd., Osaka Japan. 537pp.

2010년 8월 24일 원고접수

2010년 11월 25일 수정본 채택

담당편집위원: 박명길