

춘계 진해만에서 농도 구배로 첨가한 영양염에 의한 식물플랑크톤 성장반응과 군집구조의 명확한 특징

손문호^{1,2}, 백승호^{1*}

¹한국해양과학기술원 남해연구소, ²부산대학교 해양학과

The distinct characteristics of phytoplankton growth response and their community structure following seven different nutrients addition in spring season of Jinhae Bay

Moonho Son^{1,2}, Seung Ho Baek^{1*}

¹South Sea Research Institute, Korea Institute of Ocean Science & Technology

²Department of Oceanography, College of Natural Science, Pusan National University

요약 본 연구는 진해만에서 2010년 부영양화해역(St.1)과 빈영양화해역(St.22)에서, 2011년에는 부영양화해역(St.1, St.5), 중영양화해역(St.19), 빈영양화해역(St.22) 등 해역의 특성이 다른 정점에서 영양염농도구배(Nitrate: 0, 1, 5, 10, 20, 50, 100 μM ; Phosphate: 0, 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10 μM)에 따른 식물플랑크톤의 성장반응 및 군집구조의 특성을 파악하였다. 2010년 St.1에서 질산염과 인산염첨가군에서는 농도구별에 따른 식물플랑크톤성장의 차이를 보였으나(One-way ANOVA: $P < 0.01$), St.22에서는 영양염농도구배에 따른 영양염첨가효과가 명확하지 않았다. 2010년 St.1의 질산염 첨가군에서 와편모조류 *Heterocapsa triquetra*가 우점하였고, 인산염 실험군에서는 규조류 *Pseudo-nitzschia* spp.가 각각 우점하였다. 진해만 중앙의 빈 영양수계 St.22에서는 질산염농도가 10 μM 전 후에서 *Chaetoceros* spp.가, 20 μM 에서 *Thalassiosira* spp.가, >50 μM 에서 *Pseudo-nitzschia* spp.가 각각 우점하였고, 인산염 첨가시 2 μM 이하에서는 *Cylindrotheca* spp.로, 5 μM 이상에서는 *Pseudo-nitzschia* spp.로 우점하였다. 2011년에는 4해역 모두 영양염농도구배에 따른 식물플랑크톤 성장의 명확한 차이를 보였다(One-way ANOVA: $P < 0.01$). 하지만, 정점1, 5, 19에서는 식물플랑크톤의 성장이 2일 후부터 점차적으로 증가하였으나, 정점22에서는 실험 6일후부터 반응하였고, 이는 낮은 영양염농도에 적응된 생물군에 갑작스럽게 영양염이 공급되어도 성장 지연 현상이 일어날수 있다는 것을 의미한다. 식물플랑크톤의 우점종은 정점1의 낮은 영양염농도에서는 *Eucampia* spp., *Chaetoceros* spp.가 높게, 높은 영양염농도에서는 *Skeletonema* spp.와 *Thalassiosira* spp.로 나타났다. St.5에서는 *Skeletonema* spp.가 우점하였고, St.19에서는 *Chaetoceros* spp.와 *Skeletonema* spp.도 상대적으로 높은 비율을 차지하였다. 반면, St.22에서는 *Thalassiosira* spp.가 높은 점유율을 보였다. 결과적으로 영양염특성이 다른 해역에서 추가적으로 첨가한 영양염은 영양염 농도구배에 따라서 식물플랑크톤의 우점종 및 종조성을 차이를 보였고, 이는 각각의 해역의 특성에 따라서 식물플랑크톤의 현존량 및 우점종의 차이가 명확하게 나타나는 것을 잘 대변할 수 있는 중요한 근거라고 판단된다.

Abstract In order to estimate the characteristics of the growth and composition of phytoplankton according to the available nutrients, we added nitrate (0, 1, 5, 10, 20, 50, 100 μM) and phosphate (0, 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10 μM) to field samples in a eutrophic site (St. 1) and an oligotrophic site (St. 22) in 2010 as well as a eutrophic site (St. 1, 5), a mesotrophic site (St. 19), and an oligotrophic site (St. 22) in 2011 at Jinhae Bay, Korea. The phytoplankton growth in the areas with additional nitrates and phosphates on St. 1 were significantly different from the control (One-way ANOVA: $P < 0.01$). The dominant species at St. 1 in 2010 were *Heterocapsa triquetra* and *Pseudo-nitzschia* spp., to which nitrate and phosphate were added, respectively. The dominant species at St. 22 in 2010 differed between treatment conditions as follows: nitrate treatment *Chaetoceros* spp. ($\leq 10 \mu\text{M}$), *Thalassiosira* spp. (20 μM), and *Pseudo-nitzschia* spp. ($\geq 50 \mu\text{M}$) for nitrate treatment; *Cylindrotheca* spp. (2 μM) and *Pseudo-nitzschia* spp. (5 μM) for phosphate treatment. Phytoplankton growth in 2011 according to the added nutrient were significantly different with treatment concentrations (One-way ANOVA: $P < 0.01$). Moreover, the beginning of exponential growth in phytoplanktons was different between the eutro-mesotrophic sites (St. 1, 5, and 19) and the oligotrophic sites (St. 22) on day 2 and day 6 respectively. This implies that phytoplankton growth in the low nutrient condition may be retarded. The dominant species at St. 1 were *Eucampia* spp. and *Chaetoceros* spp. in the low nutrient treatment compared to *Skeletonema* spp., and *Thalassiosira* spp. in the high nutrient treatment. The dominant species at St. 5 and St. 19 were mostly *Skeletonema* spp. and *Chaetoceros* spp. However, the dominant species at St. 22 was *Thalassiosira* spp.. The results of this study showed that phytoplankton growth and composition were different in areas with different nutrient characteristics resulting from the additional nutrients. Therefore, the nutrients additional algal assay could be indirectly explained why the biomass and composition of phytoplankton in Jinhae Bay has shown spatial differences.

Keywords : phytoplankton, nutrients, growth rate, Jinhae Bay

본 논문은 한국해양과학기술원의 연구과제 [PE99316]으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Seung Ho Baek (Korea Institute of Ocean Science & Technology)

Tel: +82-55-639-8513 email: baeksh@kiost.ac

Received July 22, 2015

Revised (1st September 21, 2015, 2nd October 7, 2015)

Accepted October 8, 2015

Published October 31, 2015

1. 서론

식물플랑크톤의 성장은 광량, 수온, 영양염 등과 같은 환경요인에 영향을 받는다. 특히 영양염의 공급은 적조와 같은 특정 식물플랑크톤의 대발생을 유도하는 ‘방아쇠’ 역할을 하는 것으로 알려져 있다 [1]. 식물플랑크톤 성장에 영향을 미치는 제한 영양염류의 평가는 영양염 흡수에 따른 평가 [2,3], 영양염 농도 및 비율로 평가하는 방법, 그리고 현장해수에 영양염을 첨가하는 생물검정실험 등이 있다. 가장 보편적인 방법으로는 현장에서 영양염류를 측정하여 Redfield 비율(Si:N:P = 16:16:1)에 따른 영양염 성분 구성비의 차이와 더불어 영양염 최저치로 제한된 영양염을 판단할 수 있다 [1]. 하지만 이러한 방법은 어떠한 영양염이 식물플랑크톤의 성장에 제한요인으로 작용 될 수 있는지에 대한 예측은 할 수 있지만, 식물플랑크톤 군집의 생리학적 성장특성에 따른, 제한영양염을 평가하기에는 한계점이 있다. 따라서, 식물플랑크톤 군집내 영양염 재생산비율의 차이, 특정 미세조류의 종특이성을 고려하여 세포내 영양상태를 종합적으로 평가하는 것이 중요하다고 하겠다. 그러나 이와 같은 방법은 단일 분리 배양종을 대상으로 생리생태적인 특성을 규명하는데 적합하지만, 현장해역에서 일어나는 현상을 규명하기에는 적합하지 않다. 결과적으로 이러한 문제점을 보완하기 위해 현장수에 인위적으로 영양염을 첨가하여 식물플랑크톤의 성장반응 특색을 모니터링하는 생물검정실험이 보편적으로 활용되어 왔다.

영양염 첨가실험은 1960대 이후부터 호수 생태계에서 식물플랑크톤 성장특징을 규명하기 위한 목적으로 수행되었고 [4], 이후 영양염 뿐만 아니라, 극미량 금속의 농도 또한 식물플랑크톤의 성장에 중요한 영향을 미칠 수 있다고 보고되고 있다 [5, 6]. 일반적으로 온난해역에서는 2월에서 4월에 걸쳐 식물플랑크톤의 대증식(Spring bloom)이 알려져 있고, 대증식후 영양염류의 고갈로 Bloom이 소멸되어 하계까지 빈영양상태가 지속되는 경향이 강하게 나타난다. 하지만, 우리나라는 6-7월의 장마철에 강우가 집중되고, 8-9월에 산발적으로 접근하는 태풍의 영향으로 하계에도 불구하고 육상기원의 영양염류가 연안 해역으로 유입되어, 식물플랑크톤의 대발생에 빈번하게 이루어지고 있다. 진해만에서 식물플랑크톤의 대발생은 상대적으로 수온이 낮고 광량이 증가하는 2월과 3월에 빈번하게 발생하여 [4], 수계내 영양염류를 고

갈시키는 경향이 강하다. 결과적으로 본격적인 강우기에 접어드는 6월 중순까지 상대적으로 낮은 영양염류가 해역에 잔존하여 식물플랑크톤의 성장을 둔화시킬 수 있는 잠재적 요인으로 작용가능하다는 결론이다. 따라서 본 연구에서는 영양염류가 상대적으로 낮은 농도가 유지되는 5월 진해만에서 필수 영양염 (질산염 및 인산염)을 농도별로 첨가하여 식물플랑크톤의 성장반응 및 영양염 제한 특성을 살펴보았다. 이러한 결과는 진해만에서 만성적으로 발생하는 유해유독 미세조류의 성장에 직접적인 영향을 미치는 영양염류의 유입에 대한 관리방안을 제시할 수 있는 기초자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 Wasmund et al.[7]의 해역을 구분하는 영양단계와 손과 백[8]의 진해만의 영양염농도 차이에 근거하여 포괄적으로 해역을 구분하였다. 2010년에는 영양염농도가 높은 정점(부영양화수계)과 낮은 정점(빈영양화수계) 2곳 (정점 1, 22)을 선정하여 영양염 농도구배에 따른 식물플랑크톤의 성장반응을 파악하였다.

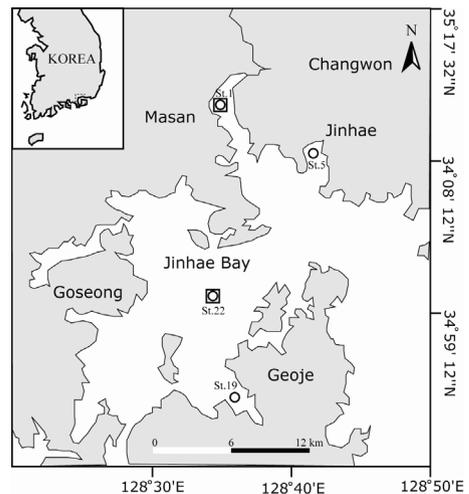


Fig. 1. Location of the nutrient additional algal assay sites in Jinhae Bay, Korea; open square and circle indicates study sites in 2010 and 2011, respectively.

아울러, 2011년에는 이들 2곳 정점을 포함하고 상대적으로 중간정도의 영양염 농도가 관찰된 1곳(중영양화

수계; 정점19)과 고농도로 관찰된 1곳 (정점 5) 등 총 4개의 정점에서 N, P영양염 농도를 일정량 첨가하는 실험을 수행하였다. 각 조사정점에서 채집한 표층해수를 mesh (200 μm pore size)로 자연여과하여 동물플랑크톤을 제거한 후 1L의 멸균팩에 옮겨 담아 실험실로 운반하였다. 실험에서 각 정점의 시료를 50mL의 시험관 (Φ 22 mm x 200 mm, PYREX)에 균일하게 분주하여 식물플랑크톤 개체수 밀도를 동일하게 유지시켰다. 영양염에 대한 반응을 조사하기 위해 질산염 첨가군(+N), 인산염 첨가군(+P)으로 설정하였고, 질산염은 KNO_3 , 인산염은 KH_2PO_4 분말을 이용하였다. +N의 최종농도는 0, 1, 5, 10, 20, 50, 100 μM , +P의 최종농도는 각각 0, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 μM 로 설정하였다. 그리고 +N의 실험군에서는 P의 제한을 방지하기 위해서 인산염 10 μM 로 균일하게 하였고, 반대로 +P 실험군에서는 질산염을 각각 100 μM 을 주입하여 실험구의 영양염 제한이 발생하지 않도록 하였다. 배양조건에서 광량은 $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 광주기는 12D : 12L로 각각 설정하였다. 온도조건은 2010년에는 현장조사의 결과와 유사한 15°C 로 설정하였으나, 2011년에는 현장수온이 17°C 전후 값을 보여, 잠재적으로 수온 상승효과를 주이기 위해서 20°C 로 설정하였다. 생물량의 변동은 2일 간격으로 *in vivo* 상태의 형광값을 Fluorometer (Turner design 10-AU, USA)로 총 14일간 측정하였고, 식물플랑크톤 군집조성을 조사하기 위해 2일간격으로 1 mL씩 subsample하여 Lugol용액으로 최종농도 1%로 고정하여 보관하였다. 식물플랑크톤의 군집분포는 최고성장기의 주요 우점종을 중심으로 분석하였고, 백분율(%)로 환산하여 결과에 반영하였다. 모든 실험은 2반복(duplicate)으로 수행되었다.

생물검정실험에서 식물플랑크톤의 성장률은 각 실험구의 최고 성장기를 기준으로 계산하였다.

$$G.R.(Growthrate) = \frac{(\log_2 N_t - \log_2 N_0)}{T}$$

여기서 N_0 ; 초기 생물량, N_t ; 최고성장기의 생물량, T; 최고성장기까지의 배양기간(day)으로 나타내었다. 계산된 성장률은 SPSS통계 프로그램을 이용하여 비선형회귀분석(nonlinear regression)을 실시하여, 질산염과 인산염 농도별 성장률의 차이를 파악하였다.

3. 결과 및 고찰

진해만에서 영양염류가 지속적으로 낮아지는 5월에 2010년 마산만 내측정점 (St.1)과 진해만 중앙해역의 대표정점 (St.22)에서 영양염 첨가 실험을 한 결과, 영양염 농도구배별 성장의 차이가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인하였다 [Fig. 2].

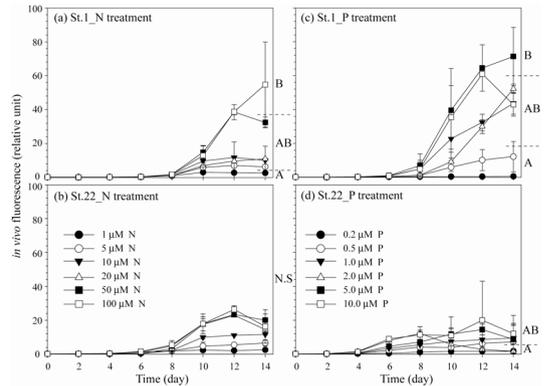


Fig. 2. Effects of nitrogen (left panel) and phosphorus (right panel) on growth of natural phytoplankton communities in 2010 in Jinhae Bay; the inoculated natural samples were kept at 15°C under $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in a 12L:12D photoperiod. Error bar indicate \pm S.D.

특히 정점 1의 질산염 농도가 $\geq 50 \mu\text{M}$ 에서 식물플랑크톤에 대한 영양염첨가효과가 두드러졌고, 이는 $\leq 20 \mu\text{M}$ 의 농도구배와 비교해 보았을 때 5배 차이를 보였다. 인산염 농도별 첨가실험에서도 높은 영양염 ($\geq 5.0 \mu\text{M}$)을 첨가한 실험군에서 높은 형광값이 관찰되었고, 이는 현장해역에서 강우에 의한 육상기원의 높은 영양염류가 마산만 인근해역에 공급될 경우 지속적으로 식물플랑크톤의 대발생할 수 있다는 것을 시사한다. 반면, 정점 22에서는 정점 1과 비교하여 $\leq 50 \mu\text{M}$ 의 질산염과 $\leq 5.0 \mu\text{M}$ 인산염 농도실험군에서 유사한 형광값이 관찰되었으나, $\geq 50 \mu\text{M}$ 의 질산염과 $\geq 5.0 \mu\text{M}$ 인산염 실험군에서는 식물플랑크톤의 현저한 증가는 나타나지 않았다. 이와 같이 높은 N, P 첨가군에서 두 정점간의 형광값의 현저한 차이는 뒷부분에서 언급하겠지만 우점한 식물플랑크톤의 군집조성의 차이에 의하여 기인된 것으로 판단된다.

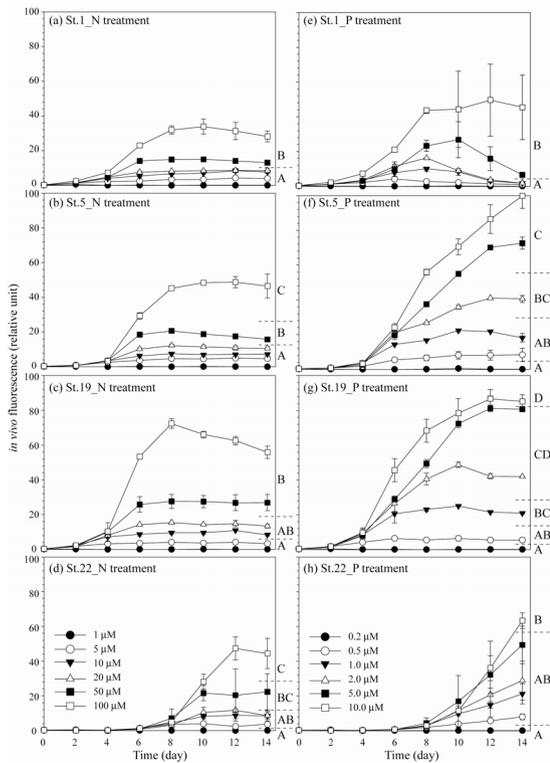


Fig. 3. Effects of nitrogen (left panel) and phosphorus (right panel) on growth of natural phytoplankton communities in 2011 in Jinhae Bay; the inoculated natural samples were kept at 20°C under 60 μmol m⁻² s⁻¹ in a 12L:12D photoperiod. Error bar indicate ± S.D.

2011년에는 해역의 특성이 다른 마산만 내측정점 (St. 1), 진해속천항 (St. 5), 거제고현만 (St. 19), 진해만 중앙해역 (St. 22) 4곳의 지역에서 농도별 영양염첨가한 결과, 2010년의 영양염첨가 실험과 유사하게 영양염 농도 구배에 따른 식물플랑크톤의 성장반응의 명확한 차이를 확인하였다 [Fig. 3]. 흥미로운 것은 반폐쇄적이며 만성적인 부영양화해역인 정점 1, 5, 19에서는 형광값이 2일 후부터 점차적으로 증가하는 경향이 강하게 나타났으나, 상대적으로 해수의 순환이 원활하여 영양염 농도가 항상 낮은 중앙해역인 정점 22에서는 실험 6일후부터 형광값이 증가하였다. 즉, 해역의 특성이 전혀 다른 정점 22에서 식물플랑크톤의 성장반응이 늦어지는 현상이 관찰되었는데, 이는 낮은 영양염농도에 적응된 생물이 갑작스럽게 일정한 높은 영양염이 공급되어도 성장의 지연현상이 발생할 수 있다는 것을 의미한다.

각각의 정점에서 농도구배로 영양염을 첨가하여 식물

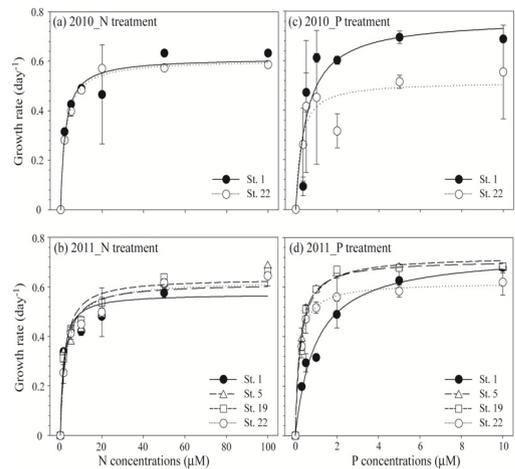


Fig. 4. Changes in specific growth rate of natural phytoplankton assemblages at different nitrogen(left) and phosphorus (right) in 2010 in Jinhae Bay.

플랑크톤의 성장을 시계열적으로 모니터링 한 형광값을 바탕으로 식물플랑크톤의 성장률을 산출하였다 [Fig. 4]. 영양염 농도구배별로 식물플랑크톤의 성장률을 비선형 회귀분석한 결과, 모든 정점에서 N, P 영양염 농도의 증가와 더불어 성장률이 기하급수적으로 증가하였으나, 일정한 영양염농도 (N:10 μM, P:1.0 μM; 2011년 정점1 제외)에서 포화되는 양상을 명확하게 관찰할 수 있었다 (P<0.001). 2010년에는 질산염 농도에 따른 정점 1과 정점 22의 성장률 차이는 나타나지 않았으나, 인산염 첨가군에서는 정점1에서 0.77 day⁻¹로, 정점 22에서 0.50 day⁻¹로 나타나, 상대적인 차이를 확인 할 수 있었다. 2011년의 식물플랑크톤 군집에 대한 성장률 결과를 살펴보면, 질산염 첨가군에서는 정점별로 유의한 성장률의 차이를 확인 할 수 없었으나 (P>0.001), 인산염 첨가군에서는 정점별로 성장률의 차이를 확인할 수 있었다. 특히, 정점 5와 19에서는 성장률 0.60 day⁻¹로 유사한 경향을 관찰하였으나, 정점 1에서는 ≤ 2.0 μM의 낮은 인산염 첨가군에서는 상대적으로 성장률이 낮게 나타났고, 정점 22는 ≥ 2.0 μM의 높은 인산염첨가군에서 성장률이 상대적으로 낮게 나타났다. 결과적으로, 영양염 농도 구배에 따른 성장률은 오염물 부하량이 상대적으로 높고 반폐쇄적 내만형 특징을 가진 부영양화된 마산만 (St. 1), 진해 속천항 (St. 5), 중영양화된 거제고현만 (St. 19)에서 영양염 농도가 높을수록 일정한 높은 식물플랑크톤의 성장을 유지할 수 있다는 것을 파악하였다. 아울러,

인산염이 상대적으로 높은 해역에 질산염이 유입될 경우, 전반적으로 식물플랑크톤의 높은 성장률이 유도될 수 있다는 것을 유추할 수 있으나, 질산염이 상대적으로 높은 해역에 인산염이 유입되었을 경우, 식물플랑크톤의 군집구조에 따라서 성장특성의 차이를 보일 것으로 추정된다.

2010년 마산만 내측 (St. 1)의 질산염 실험군에서 와편모조류 *Heterocapsa triquetra*가 우점하였고, 인산염 실험군에서는 규조류 *Pseudo-nitzschia* spp.가 각각 우점하였다 [Fig. 5]. 진해만 현장조사에서도 정점 1에서 *H. triquetra*가 전체 와편모조류의 65%를 점유하였고, 정점 22에서는 *Pseudo-nitzschia* spp.가 전체 규조류의 99%로 높게 점유하였다 [9]. 일반적으로 와편모조류는 분리배양하지 않고, 혼합된 자연상태의 식물플랑크톤 군집에서는 성장하지 않는 경향이 강하지만, 본 연구에서는 특히적으로 와편모조류 *H. triquetra*가 높은 우점률을 보였다. *H. triquetra*는 생리학적으로 활발적인 영양염공급에 민감하게 반응하여 빠른 성장을 보이는 특징이 있고, 질산염이 풍부한 해역에서 빈번하게 대발생하여, 고농도의 질산염에 대한 지표 종으로도 잘 알려져 있다[10,11]. 본 연구에서도 이러한 *H. triquetra*의 생리생태학적 특징에서 기인하여 질산염 첨가군에서 상대적으로 성장이 빠르게 유지 되어 우점한 것으로 판단된다.

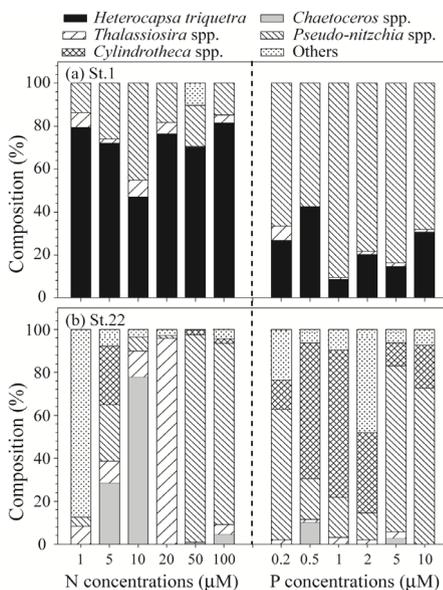


Fig. 5. Changes in phytoplankton communities composition at different nitrogen(left) and phosphorus(right); St.1, eutrophic site; St.22, oligotrophic site.

반대로, 인산염 농도별 첨가실험군에서는 *Pseudo-nitzschia* spp.의 비율이 질산염 첨가군 실험에서 관찰한 *H. triquetra*의 점유비율과 유사한 경향을 보였다. 만약 마산만 내만의 수온이 15°C 전후에서 씨앗이 될 수 있는 유영세포 *H. triquetra*가 일정량 존재하는 조건에서 N기원의 영양염의 대량 공급되면, *H. triquetra*의 대발생에 유리할 것으로 판단되고, 반대로, P기원의 영양염이 공급되면 *Pseudo-nitzschia* spp.가 높은 성장률을 보일 것으로 판단된다.

진해만 중앙해역 (St. 22)정점의 영양염 첨가 실험에서는 마산만의 정점 1과 비교하여 농도구배에 따라 다양한 식물플랑크톤이 관찰되었다. 질산염 농도구배 실험에 근거하면, 10 μM 전후의 농도에서는 *Chaetoceros* spp.가, 20 μM 전후의 농도에서는 *Thalassiosira* spp.가, 50 μM 이상의 농도에서는 *Pseudo-nitzschia* spp.가 각각 우점하였다 [Fig. 5]. 인산염 실험군에서는 상대적으로 2 μM 이하의 낮은 농도에서 *Cylindrotheca* spp.가, ≥ 5 μM 이상의 농도에서는 질산염과 유사하게 *Pseudo-nitzschia* spp.가 우점하였다. 2010년 춘계 현장조사의 정점 22에서는 *Pseudo-nitzschia* spp.가 전체 규조류 군집의 49%로 비교적 낮은 점유율을 보였으나 [7], 영양염 첨가실험의 고농도 질산염 (≥ 50 μM)과 인산염 (≥ 5 μM) 첨가군에서 *Pseudo-nitzschia* spp.가 각각 80% 와 70% 이상의 높은 비율로 우점하는 경향이 강하게 나타났다. 이러한 결과는 *Pseudo-nitzschia* spp.가 춘계 진해만에서 높은 현존량을 보이는 기존의 연구를 뒷받침하는 결과로 판단되며 [9], 만약 *Pseudo-nitzschia* spp.가 높은 영양염에 노출되었을 경우 진해만 어느 해역에서도 급격히 증가 할 수 있는 잠재성을 갖고 있을 것으로 판단된다. 특히 *Pseudo-nitzschia* spp.의 대부분의 종은 기억상실성패독 (ASP:Amnesic shellfish poisoning)을 유발하는 Domoic acid를 생성하는 것으로 잘 알려져 있어, 진해만에서 춘계 수온이 15°C 전후 조건에서 영양염이 공급되면 *Pseudo-nitzschia* spp.의 대증식을 유발할 수 있어, 홍합과 같은 이매패류의 생물독성농축에 관한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

2011년 영양염첨가에서 나타난 식물플랑크톤 군집구조는 2010년의 실험과 비교하여 우점종의 차이가 명확하게 나타났다 [Fig. 6]. 이는 매년 춘계에 출현하는 식물플랑크톤의 종구성이 다르게 나타나는 것과 더불어, 배양조건이 2010년보다 5°C 높은 20°C에서 수행한 결과

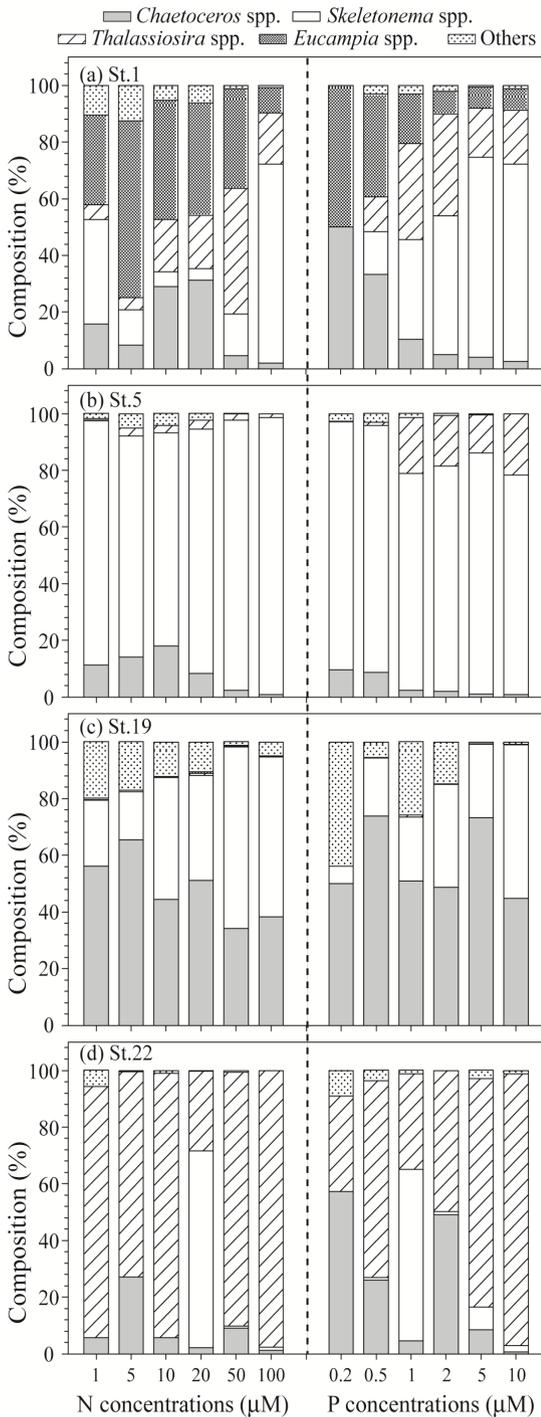


Fig. 6. Changes in phytoplankton communities composition at different nitrogen(left) and phosphorus(right); St.1, eutrophic site; St.5 and St.19, mesotrophic site; St.22, oiligotrophic site.(2℃)

로 판단된다. 각 정점에서의 영양염농도구배에 따른 식물플랑크톤의 점유율을 구체적으로 살펴보면, 마산만 정점 (St. 1)에서는 $\leq 5 \mu\text{M}$ 의 질산염과 $\leq 0.5 \mu\text{M}$ 인산염의 첨가군에서는 *Eucampia* spp.와 *Chaetoceros* spp.가 상대적으로 높은 점유율을 보였으나, 높은 질산염과 인산염 농도에서는 *Skeletonema* spp.와 *Thalassiosira* spp.로 나타났다. 진해속천항의 정점 (St. 5)에서는 모든 농도별 실험군에서 *Skeletonema* spp.가 우점하였고, 거제 고현만의 정점 (St.19)에서는 *Chaetoceros* spp.와 *Skeletonema* spp.도 상대적으로 높은 비율을 차지하였다. 진해만 중앙해역정점 (St. 22)에서는 *Thalassiosira* spp.가 높은 점유율을 보였다. 본 실험을 통하여 영양염 첨가에 따른 해역별 식물플랑크톤의 우점양상은 해역별 현장에서 출현하는 현존량과도 일정한 상관성이 있는 것으로 나타났다. 아울러, 각 정점별 우점양상의 차이는 영양염 농도구배에 따른 각 생물의 영양염 농도 적응도에 따른 생리학적 특성에 기인된 것으로 판단되었다. *Eucampia* spp. 일반적으로 낮은 수온에 증식이 빨라 동계나 냉수괴의 지표종으로 알려져 왔으나 [12], 본 연구에서는 20℃의 상대적으로 높은 수온에서도 일정한 우점율을 보였고, 낮은 영양염 농도조건에서 점유율이 상대적으로 높게 나타난 것은 수온이 최적조건이 아니라도 경쟁하는 종이 없을 경우 일정한 개체수를 유지할 수 있는 기회적인 특성을 지닌 종으로 구분할 수 있을 것이다.

Skeletonema spp.는 부영양화된 수계의 지표종으로 [13], 본 조사에서도 부영양화 및 중영양화 해역인 정점 1, 5, 19에서 높은 농도 질산염과 인산염 처리군에서 높은 점유율을 보였다. 아울러 본 종은 광염분, 광수온의 상대적으로 높은 성장률을 보이는 생리학적 특성과 하계에 진해만에서 높은 개체수밀도를 보이는 기존의 연구결과와 비교적 잘 일치하였다 [13]. *Thalassiosira* spp.는 국내 남해연안에서 흔히 관찰되는 종이나, 주로 동계에 대발생을 하는 것으로 알려져 있다 [14]. 반면, Narragansett 만에서 18년 동안 수행된 연구에서 관측된 *Thalassiosira* spp.의 개체수는 수온이 낮은 시기와 높은 시기 (17℃)에 개체수가 급증하는 것으로 나타났다 [15]. 특히 *Thalassiosira* spp.의 높은 개체수 밀도는 상대적으로 높은 수온인 17℃에서 나타난 것으로 보아, 본 연구 해역인 진해만 중앙해역에서 5-6월에 상대적으로 높게 나타날 수 있는 잠재적인 특성을 지닌 것으로 구분할 수 있다. 일반적으로 실험에서 폐쇄적인 영양염 첨가실험은

현장에 일어날 수 있는 현상을 역으로 해석하는 시도가지만, 반드시 현장의 해역에서 일어나는 현상을 명확하게 대변할 수는 없을 것이다. 하지만, 현장에서 일어날 수 있는 현상을 유추하거나 예상할 수 있는 기초자료로서 중요한 의미를 부여할 수 있다. 해역에서는 복잡 다양한 환경인자가 서로 연관되어 있어 공급된 영양염(=실험에서는 영양염첨가)은 해류 등의 요인으로 빠르게 희석될 수 있지만, 이를 효과적으로 이용하는 식물플랑크톤 군집의 동태는 폐쇄된 실험실이나 실제 현장해역이 유사한 결과를 보일 것으로 판단된다. 다만, 현장에서는 개체수의 빠른 희석효과가 있을 것으로 판단되지만, 폐쇄생태계에서는 이와 같은 점을 과대 해석할 수 있는 단점이 있으므로 추후 이와 같은 것을 보완하는 평가가 중요할 것으로 판단된다.

4. 결론

진해만에서 2010년과 2011년 해역의 특성이 다른 정점에서 영양염 첨가가 식물플랑크톤의 군집조성에 어떠한 영향을 미치는지 살펴본 결과, 만성적 부영양화 해역인 마산만의 정점1과 진해 속천항의 정점5에서도 추가적으로 영양염이 공급되면, 곧바로 식물플랑크톤이 반응하여 높은 현존량을 유지할 수 있을 것으로 파악하였다. 반면, 진해만 중앙해역에서는 해수의 순환이 원활하여 일정한 낮은 영양염농도가 지속적으로 유지되는 환경하에서 갑작스러운 영양염류가 공급되면 식물플랑크톤이 곧바로 반응하는 것이 아니라 성장의 지연현상을 나타낸 후 점차적으로 높은 밀도를 유지할 것이라 생각된다. 결과적으로 본 연구를 통하여, 영양염 첨가에 따른 식물플랑크톤의 우점종의 점유율은 해역별로 다르게 나타났고, 이는 해역 및 정점에 따라서 현장에서 출현하는 우점종 및 종구성이 일정하게 차이를 보이고 있다는 것을 잘 대변하는 결과로서 판단된다. 이와 같은 결과는 진해만 광역해역을 통합적으로 관리하고, 수산물의 공급에 중요한 먹이의 에너지 흐름을 유추하는데 중요한 정보로 활용 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] A. R. Dzialowski, S. -H. Wang, N. -C. Lim, W. W. Spotts, D. G. Huggins, "Nutrient limitation of phytoplankton growth in central plain reservoirs, USA". *J. Plankton Res.*, 27, 587-595, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/plankt/fbi034>
- [2] R. Riegman, F. Colijn, J. F. P. Malschaert, H. T. Kloosterhuis, G. C. Cadée, "assessment of growth rate limiting nutrients in the North Sea by the use of nutrient-uptake kinetics. *Netherlands J. Sea Res.*, 26, 53-60, 1990.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0077-7579\(90\)90055-L](http://dx.doi.org/10.1016/0077-7579(90)90055-L)
- [3] D. M. Nelson, Q. Dortch, "Silicic acid depletion and silicon limitation in the plume of the Mississippi river: Evidence from kinetic studies in spring and summer". *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 136, 163-178, 1996.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3354/meps136163>
- [4] C. MacPhee, "Bioassay of algal production in chemically altered waters". *Limnol. Oceanogr.*, 6, 416-422, 1961.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4319/lo.1961.6.4.0416>
- [5] M. Schallenberg, C. W. Burns, "Effects of sediment resuspension on phytoplankton production: testing apart the influences of light, nutrients and algal entrainment", *Freshwater Biol.*, 49, 143-159, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2426.2003.01172.x>
- [6] T. H. Chrzanowski, J. P. Grover, "Effects of mineral nutrients on the growth of bacterio-and phytoplankton in two southern reservoirs". *Limnol. Oceanogr.*, 46, 1319-1330, 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4319/lo.2001.46.6.1319>
- [7] M, Son, D. Kim, S.H. Baek, "Distributional characteristics of phytoplankton and nutrient limitation during spring season in Jinhae Bay. *J. Kor. Academia-Industrial coop. Soc.*, 15, 3345-3350, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.5.3345>
- [8] N, Wasmunda, A. Andrushaitis, E. Lysiak-Pastuszak, B. Muller-Kaulish, G. Nauscha, T. Neumann, H. Ojayed, I. Olenina, L. Postela, Z. Witkef, "Trophic status of the south-eastern Baltic Sea: A comparison of coastal and shelf science. *Estuar. Coast, Shelf Sci.* 53, 849-864, 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/ecss.2001.0828>
- [9] M. Son, D. Kim, S.H. Baek, "distributional characteristics of phytoplankton and nutrient limitation during spring season in Jinhae Bay". *J. Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 15, 3345-3350, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.5.3345>
- [10] C. Labry, E. E. Denn, A. Chapelle, J. Fauchot, A. Youenou, M. P. Crassous, J. LeGrand, B. Lorgeoux, "Competition for phosphorus between two dinoflagellates: A toxic *Alexandrium minutum* and a non-toxic *Heterocapsa triquetra*". *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 358, 124-135, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jembe.2008.01.025>
- [11] S. H. Baek, J. S. Ki, T. Katano, K. You, B. S. Park, H. H. Shin, K. Shin, Y. O. Kim, M.-S. Han. "Dense winter bloom of the dinoflagellate *Heterocapsa triquetra* below the thick surface ice of brackish Lake Shihwa, Korea". *Phycol. Res.*, 59, 273-285, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1440-1835.2011.00626.x>
- [12] T. Nishikawa, "Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the diatom *Eucampia zodiacus* caused bleaching of seaweed porphyra isolated

[1] A. R. Dzialowski, S. -H. Wang, N. -C. Lim, W. W.

from Harima-Nada, Seto Inland Sea, Japan". Nippon Suisan Gakkai, 68, 356-361, 2002.

DOI: <http://dx.doi.org/10.2331/suisan.68.356>

- [13] M. Takabayashi, K. Lew, A. Johnson, A. Marchi, R. Dugdale, F. P. Wilkerson, "The effect of nutrient availability and temperature on chain length of the diatom, *Skeletonema costatum*". J. Plank. Res., 28, 831-840, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/plankt/fbl018>
- [14] K. W. Park, Y. S. Suh, W. A. Lim, "Seasonal changes in phytoplankton composition in Jinhae Bay, 2011". J. Korean Soc. Mar. Environ. Safety, 18, 520-529, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2012.18.6.520>
- [15] R. W. Krawiec, "Autecology and clonal variability of the marine centric diatom *Thalassiosira rotula* (Bacillariophyceae) in response to light, temperature and salinity". Mar. Biol., 69, 79-89, 1982.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00396964>
-

손 문 호(Moonho Son)

[정회원]



- 2005년 2월 : 인제대학교 환경학과 (이학석사)
- 2008년 8월 : 부산대학교 해양학과 (박사수료)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연구사업인력

<관심분야>

해양생물학, 식물플랑크톤 생태학

백 승 호(Seung Ho Baek)

[정회원]



- 2004년 3월 : 요코하마국립대 환경정보학과 (환경학석사)
- 2007년 3월 : 요코하마국립대 환경정보학과 (환경학박사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 선임연구원

<관심분야>

해양환경오염, 수질, 해양생물학, 식물플랑크톤 생태학