

〈Original article〉

통영-사랑도 굴 양식장 주변 해역에서 일차 생산자 식물플랑크톤 군집의 계절적 변화

임 영 균^{1,2} · 백 승 호^{1,*}

¹한국해양과학기술원 남해특성연구센터, ²충남대학교 해양환경과학과

Seasonal Variation of Primary Producer Phytoplankton Community in the Vicinity of the Oyster Farming Area between Tongyeong-Saryang Island

Young Kyun Lim^{1,2} and Seung Ho Baek^{1,*}

¹South Sea Research Institute, KIOST, Geoje 53201, Republic of Korea

²Department of Oceanography and Ocean Environmental Sciences, Chungnam National University,
Daejeon 34134, Republic of Korea

Abstract - The purpose of this study was to investigate the seasonal distribution of phytoplankton as prey for oysters and to characterize the environmental factors controlling their abundance from June 2016 to May 2017, in the northeast coast between Tongyeong and Saryang Island, particularly for the oyster farming area. During the survey period, water temperature changed from 7.54°C in February to 29.5°C in August. The abnormal high temperature persisted during one month in August. Salinity was low due to summer rainfall and typhoon. The lowest level was 30.68 psu in September, and it peaked at 34.24 psu in May. The dissolved oxygen (DO) concentration ranged from 6.0–9.45 mg L⁻¹, and the DO concentration in the surface layer was like that in the bottom layers. The seasonal trends of pH were also like those of DO. The pH ranged from 7.91 to 8.50. Nitrate with nitrite, phosphate, and silicate concentrations ranged from 0.14 μM to 7.66 μM, from 0.01 μM to 4.16 μM, and from 0.27 μM to 20.33 μM, respectively. The concentration of chlorophyll *a* (Chl. *a*) ranged from 0.37 μg L⁻¹ to 2.44 μg L⁻¹ in the surface layer. The annual average concentration was 1.26 μg L⁻¹. The annual mean phytoplankton community comprised Bacillariophyta (69%), Dinophyta (17%), and Cryptophyta (10%), respectively. Dinoflagellate *Prorocentrum donghaiense* in June was the most dominant at 90%. In the summer, diatom *Chaetoceros decipiens*, *Rhizosolenia setigera* and *Pseudo-nitzschia delicatissima* were dominant. These species shifted to diatom *Chaetoceros* spp. and Cryptophyta species in autumn. In the winter, high densities of *Skeletonema* spp. and *Eucampia zodiacus* were maintained. Therefore, the researchers thought that the annual mean Chl. *a* concentration was relatively lower to sustain oyster feeding, implying that the prey organism (i.e., phytoplankton) was greatly controlled by continuous filter feeding behavior of oyster in the vicinity area of the oyster culture farm.

Keywords : oyster culture farm, Tongyeong, phytoplankton community, seasonality, Chl. *a*

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

서론

해양수서생태계에서 무기 영양염류와 광합성으로 만들어진 유기물(i.e., 식물플랑크톤)의 일부는 상위포식자인 동물플랑크톤의 먹이가 되고, 또 일부는 박테리아에 의하여 분해되어 저층으로 침강한다. 이러한 식물플랑크톤의 현존량은 수온, 염분, 광량, 광주기, 영양염류 등과 같은 물리화학적 환경요인과 더불어, 생물학적 요인인 중간 경쟁, 생물 피포식에 의하여 조절된다(Huang and Qi 1997; Baek *et al.* 2007). 이와 같이 무생물학적 환경요인과 함께 생물학적 환경인자에 의하여 각 해역에서 식물플랑크톤의 일차 생산력이 결정된다(Thompson *et al.* 2008; Guinder *et al.* 2013). 특히, 시간 및 공간에 따라 특정해역의 일차 생산이 시시각각으로 변화하기 때문에 일차 생산에 기여하는 식물플랑크톤의 현존량 및 군집구조의 시공간적 분포를 밝히는 것은 당 해역의 생산성 및 수산생물의 자원량을 가늠할 수 있는 중요한 척도가 될 수 있다. 우리나라와 같이 4계절이 뚜렷한 온대해역에서 식물플랑크톤 군집은 계절적인 광량 및 수온변화에 따라서 종의 천이현상이 명확하게 나타난다. 또한 특정 시기에 출현한 종은 호조건의 환경하에서 대발생을 일으킬 수 있으며, 반대로 어떤 종은 대발생을 일으킨 종과의 경쟁관계에서 우위를 점할 수 없어 낮은 개체수를 유지하게 된다. 이와 같이 특정 해역의 환경요인의 변화와 함께 출현 생물의 생물학적 제어에 의하여 계절적 종 다양성 및 천이 현상이 반복된다(Thompson *et al.* 2008; Baek *et al.* 2015).

본 조사 해역인 통영-사량도는 남해안 중앙에 위치하고 있고, 이 해역에서는 우리나라 굴 양식의 50% 이상을 차지하고 있다. 국내 수하식 굴(*Crassostrea gigas*)양식의 대부분은 진해만, 통영 및 사량도 주변 해역의 천해역에서 이루어지고 있다. 굴의 성장 및 생산량은 서식지 주변 해역에서 먹이생물인 식물플랑크톤과 현탁유기물(detritus)의 양이 매우 중요하게 작용된다(Lim *et al.* 1975; Nakamura and Kerciku 2000). 따라서 각 시기별 식물플랑크톤의 현존량 및 종조성의 변화양상을 추적하는 것은 당 해역 굴 양식의 생산성을 파악할 수 있는 중요한 인자로 생각된다. 특히 온난해역에서 춘계와 추계의 식물플랑크톤의 대발생과 함께 하계에 국지적으로 발생하는 와편모조류의 대발생은 굴 양식의 먹이원으로 중요하게 작용될 수 있다(Newell and Ott 1998; Nakamura and Kerciku 2000; Cressman *et al.* 2003). 결과적으로, 굴 양식장 주변 해역에서 계절적인 환경인자 및 먹이생물인 식물플랑크톤 현존량을 파악하는 것은 굴의 성장 및 생산량을 판단할 수 있는 기초자료로 활용가능할 것이다.

본 연구에서는 해양에서 일차 생산자 역할을 하는 식물플랑크톤의 현존량 및 환경인자 변화에 따른 종조성을 파악하

기 위해서 2016년 6월부터 2017년 5월까지 월별 조사를 수행하였다. 이와 같이 굴 양식장 주변 해역에서 먹이생물인 식물플랑크톤 연변동 양상을 파악하는 것은 당 해역에서 굴 양식장의 잠재적 수용능력 및 생산량을 간접적으로 평가할 수 있는 기초자료로 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

재료 및 방법

1. 현장 조사

현장 조사는 2016년 6월부터 2017년 5월까지의 통영 서부해역에 위치한 사량도 북동부해역의 M 정점에서 월별 조사를 월 1회 수행하였다(Fig. 1). 조사선에서 실시간 측정할 수 있는 CTD (Ocean Seven 319; Idronaut Co., Brughiero, Italy)를 활용하여 표층에서 저층까지 전 수층의 수온, 염분, 형광값(식물플랑크톤의 현존량)을 측정하였다. 아울러, 각 수층의 용존산소, pH값은 YSI (6500)를 사용하여 측정하였다. 조사 해역에서 표층수는 버킷으로 채수하였고, 저층수는 5 L PVC Niskin sampler (General Oceanics, Miami, FL, USA)을 이용하여 채수하였다. 표층수를 이용하여, Chlorophyll *a* (Chl. *a*), 영양염, 식물플랑크톤 종조성을 파악하였고, 저층수는 저층퇴적물에서 용출되는 무기영양염류의 계절적 변화 특성과 함께 월별 유광층에서 생성된 식물플랑크톤 현존량이 침강하여 저층에 기여할 것을 고려하여 Chl. *a* 농도를 정량화하였다. 표층수와 저층수 500 mL를 선상에서 Whatman GF/F glass fiber filters (47 mm diameter; pore size 0.45 μ m)을 통해 여과하였다. 여과한 해수는 영양염류를 측정하기 위해 50 mL conical tube (SPL LIFE SCIENCES)에 넣고 HgCl₂를 50 μ L 첨가하여 -20°C에서 냉동 보관하였다(Parsons *et al.* 1984). 여과한 각 여과지는 Chl. *a* 농도 측정

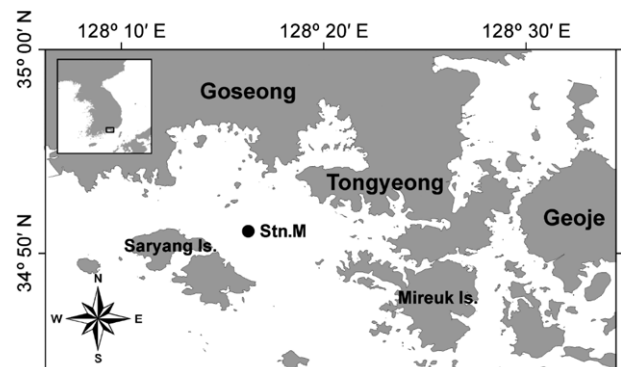


Fig. 1. Map of the study area and the sampling stations (Stn. M) in the Tongyeong-Saryang Island (Is.), Korea.

을 위해 분석 전까지 -20°C 에서 냉동/암 보관하였다. 또한 식물플랑크톤 종조성과 현존량 분석을 위하여 현장 선상에서 500 mL의 표층수를 Lugol's solution (Sournia 1978)을 이용하여 최종농도 3%로 고정하였고, 실험실에서 500 mL 시료를 50 mL로 농축시켰다.

2. 실험실 분석

실험실에서 냉동 보관한 여과지를 90% 아세톤에 넣고 냉암소에서 24시간 동안 색소를 추출한 후 형광측정기(Turner BioSystems, Sunnyvale, CA, USA)를 이용하여 Chl. *a* 농도를 분석하였다(Parsons *et al.* 1984). 또한, 실험실에서 각 시기별 냉동보관된 시료를 암조건에서 해동하여 영양염 분석을 수행하였다. 아질산과 질산성 질소(NO_2 , $\text{NO}_3\text{-N}$), 인산염($\text{PO}_4\text{-P}$), 규산염(SiO_2), 암모니아성 질소($\text{NH}_4\text{-N}$)를 Parsons *et al.* (1984)의 분석법에 따라서 영양염 자동분석기(Autoanalyzer QuikChem 8000; Lachat Instruments, Loveland, CO, USA)를 이용하여 분석하였고, 각각의 영양염 농도는 표준해수(RMNS, KANSO Technos Co., Ltd., Japanchemical Industries, Osaka, Japan)을 이용하여 보정하였다.

식물플랑크톤의 현존량 및 종조성은 농축된 시료를 Sedgewick-Rafter counting chamber에 100~300 μL 분주하여 광학현미경하(100~400배 배율)에서 분석하였다. 특히 광학현미경에서 동정이 극히 어려운 종은 속 수준에서 동정하였으며, 10 μm 이하의 매우 작은 와편모조류는 하나의 미동정 와편모그룹으로 묶었고, 은편모조류(Cryptophyceae) 또한 하나의 은편모그룹으로 묶어 동정 및 계수하였다. PRIMER version 5를 이용하여 계절별 식물플랑크톤의 군집구조의 유사도를 파악하기 위해 Cluster 분석과 multidimensional scaling (MDS)분석을 수행하였다(Clarke and Warwick 2001).

결과 및 고찰

1. 계절적 수온, 염분, 형광값의 변화

수온은 조사 시기 6월 표층(22.19°C)과 저층(18.96°C) 간의 차이가 3.23°C 로 나타났고, 성층은 7 m 부근에서 형성되었다. 이와 같은 양상은 7월 조사 시기까지 지속되었으며(Fig. 2A), 이후 8월 수온은 전 수층에서 28°C 전후로 관찰되었고, 전 수층에서 높은 수온이 유지되어 성층화 현상은 관찰되지 않았다. 8월 정점 M에서는 성층이 관찰되지 않았지만, 같은 조사 시기 주변의 수심이 70 m 정점에서는 25~30

m 층에서 강한 온도약층(thermocline layers)이 형성되었다(미공개자료), 즉, 8월 하계 표층수온의 증가로 성층심도가 깊어지면서 조사 해역의 수심 14 m에서는 성층형성이 명확하게 관찰되지 않았다는 것을 의미한다. 일반적으로 온난해역에서는 추계에는 성층이 천천히 붕괴되고, 동계에는 수층이 혼합되는 양상을 보인다(Baek *et al.* 2007). 본 조사 해역에서도 9월과 10월 점차 성층이 붕괴되면서 수층 혼합이 이루어져, 동계 12월로 갈수록 전 수층에서 수온이 낮게 관찰되었다. 동계 2월에 수온감소가 현저하게 일어났고, 전 수층에서 7°C 전후로 최소치를 기록하였다. 이후 모든 수층에서 점차적으로 수온 상승이 이루어져, 2018년 5월에는 18°C 전후를 유지하는 전형적인 온난해역의 수온변화 특색을 보였다.

염분의 변화는 6월에는 표층부에서 32.7 psu로 나타났고, 저층부에서는 33.6 psu로 관찰되었다. 7월에도 6월과 유사하게 표층과 저층의 염분의 차이가 뚜렷하게 나타났고, 6월보다는 표층과 저층의 염분차이가 뚜렷하지 않았으며, 이는 8월까지 지속되었다. 이와 같이 수온과 염분의 수직적 분포가 유사하다는 것은 6월부터 8월까지 상대적으로 수층 혼합이 일어나지 않았고, 이에 따라 높은 수괴안정도를 가졌다고 할 수 있다. 이후 9월의 염분은 30.6 psu 전후로 전수층에서 일정하게 낮게 나타나 조사 기간 중 가장 낮은 염분 값을 기록하였다(Fig. 2B). 특히 하계 이후 시간 경과에 따라 염분은 조금씩 상승하였고, 동계에 33~34 psu로 회복되었다. 이후 4월에는 저층을 중심으로 34.5 psu 전후로 조사 기간 동안 가장 높은 값을 보였다. 염분은 조사 해역 주변의 강우량과 하천을 통한 담수원의 공급과 관련이 크다. 본 조사 해역 주변에는 큰 강은 존재하지 않지만, 강우 시 섬 주변과 통영 및 고성 주변 소하천의 담수 유입은 조사지 주변 해역의 저염분 형성에 일정하게 기여하였을 것으로 사료된다. 특히 9월 조사 전 태풍 말라카스(MALAKAS)의 영향으로 높은 강우가 통영 및 고성지역에서 기록되었고($>190\text{ mm}$), 이는 강풍 기인 수층 혼합과 온도약층의 약화로 모든 수층에서 낮은 염분이 형성되었다. 이와 같이 전 수층에서 아주 낮은 염분이 관찰된 것은 태풍에 의한 수직 혼합뿐만 아니라, 태풍에 의하여 동반된 강우로 사천, 통영, 고성으로부터 흘러나온 담수 공급에 의하여 낮은 염분이 형성되었을 가능성이 높다. 특히, 본 조사정점과 떨어진 사량도 북쪽과 함께 동부 수역에도 낮은 염분이 관찰되었고(미공개자료), 이와 같이 넓은 해역에 저염분화 현상이 관찰된 것은 사량도 및 고성, 통영 인근 소하천의 영향뿐만 아니라, 섬진강 및 진주 진양호에 방출되는 담수가 사화천을 통하여 유입되어 사천, 남해도, 고성 및 통영 해역까지 일정하게 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

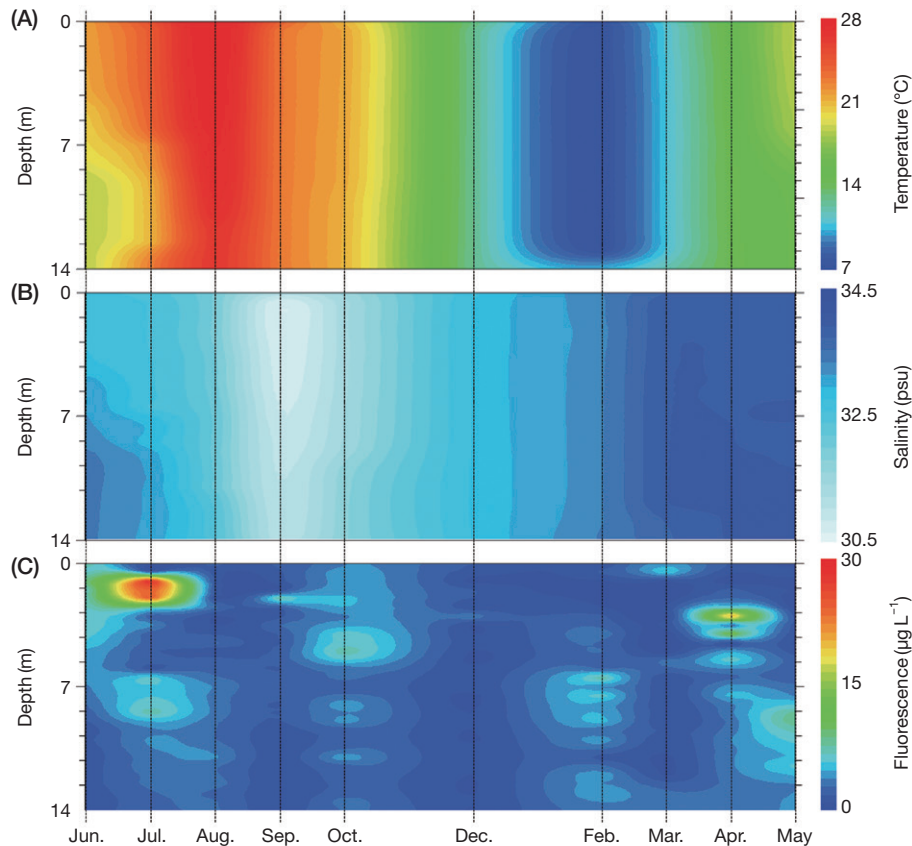


Fig. 2. Changes in the vertical distribution of temperature (A), salinity (B), and fluorescence value (C) from June 2016 to May 2017 in the Station M.

CTD를 이용하여 측정한 형광값을 통해 수계내에서 식물 플랑크톤이 집적되어 있는지를 파악함으로써 식물플랑크톤 현존량을 규명할 수 있다. 본 조사 기간 동안, 형광값은 전반적으로 2016년 7월에 2~3 m 수심에는 높게 관찰되었고, 2017년 4월에 4~5 m층에서 관찰되었다(Fig. 2C). 특히 3~5 $\mu\text{g L}^{-1}$ 형광값은 계절적인 특성과 관계없이, 특정 심도에서 일정하게 나타나는 것을 파악하였다. 반면, 8월과 9월과 함께 12월과 3월에는 전 수층에서 낮은 형광값을 기록하였다.

2. 계절적 pH와 DO의 변화

용존산소의 농도는 표층과 저층에서 5.25~9.8 mg L^{-1} 의 범위로 나타났고, 저층의 농도가 표층에 비해 상대적으로 낮게 나타났으며(Fig. 3A), 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 또한 표층수의 pH는 7.95~8.5의 범위로 나타났고, 저층수의 pH는 7.91~8.3의 범위로 표층과 저층의 차이가 큰 차이를 나타내지 않았지만 모든 조사 시기에서 표층이 저층보다 높은 값을 보였다(Fig. 3B). 용존산소의 농도는

계절적 수온변화에 따라서 영향을 크게 받으며, 특히 수온이 높아지는 6월부터 9월까지는 7.78 mg L^{-1} 에서 6.00 mg L^{-1} 로 감소하였고, 수온이 점차 낮아지는 10월부터 용존산소가 증가하여 2월 9.8 mg L^{-1} 로 조사 기간 중 최고치의 용존산소 농도를 기록하였다. 표층에 비해 저층의 수온이 낮음에도 불구하고 2월과 3월을 제외한 조사 시기에서 저층의 용존산소가 표층에 비해 낮게 관찰되었다. 이는 Pomeroy *et al.* (2006)에서 언급한 것과 같이, 굴과 같은 여과식자의 배설물이 저층에 침강하여, 유기물이 분해되는 과정에서 용존산소가 소모되어 나타난 결과로 판단된다. 또한 표층부는 대기와 상호작용을 통해 대기 중의 산소가 해수 중으로 용해되는 것과 함께, 식물플랑크톤의 광합성을 통해 산소가 생성되기 때문에 표층 용존산소의 농도가 저층보다 높게 나타난 것으로 사료된다. 현장의 계절적 pH농도는 용존산소와 유사한 경향을 보였으며, 모든 조사 시기에서 표층에서 저층에 비해 상대적으로 높은 pH값을 보인 것은 Lee *et al.* (2006)에서 규조류가 대량증식하게 되면 해수의 CO_2 를 흡수하여 탄산농도가 감소한다는 연구 결과와 유사하게, 식물플랑크톤 광합성

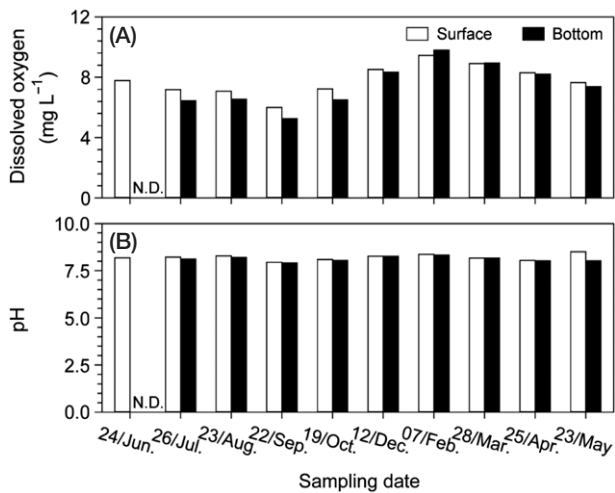


Fig. 3. Changes in the pH (A), DO (B) from June 2016 to May 2017 in the Station M. White and black bars are values from surface and bottom, respectively.

작용에 의해 표층의 pH가 저층보다 상대적으로 높게 나타난다는 것을 뒷받침할 수 있다.

3. 영양염류의 변화양상

영양염 분석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 질산염 + 아질산염의 농도는 표층수에서 $0.01 \mu\text{M}$ (8월)~ $7.34 \mu\text{M}$ (9월)로 나타났고, 저층수에서 $0.02 \mu\text{M}$ (2월)~ $7.66 \mu\text{M}$ (9월)의 범위를 보였다 (Fig. 4A). 또한 암모니아의 농도는 표층수에서 $0.08 \mu\text{M}$ (2월)~ $6.57 \mu\text{M}$ (7월)로 변동하였고 (Fig. 4B), 저층수에서 $0.06 \mu\text{M}$ (2월)~ $37.15 \mu\text{M}$ (7월)로 나타났다. 인산염은 표층수 $0.01 \mu\text{M}$ (4월)~ $0.83 \mu\text{M}$ (9월), 저층수 $0.21 \mu\text{M}$ (4월)~ $0.964 \mu\text{M}$ (9월)의 범위를 보였다 (Fig. 4C). 아울러, 규산염의 농도는 표층수에서 $2.16 \mu\text{M}$ (8월)~ $20.34 \mu\text{M}$ (9월)로 나타났고, 저층수에서 $3.17 \mu\text{M}$ (2월)~ $26.02 \mu\text{M}$ (9월)의 범위로 나타나, 조사 시기별 영양염 농도는 각기 다른 양상을 보였다 (Fig. 4D). 먼저 6월은 질산염 + 아질산염과 암모늄, 인산염의 농도가 매우 낮게 나타났지만, 표층에서 상대적으로 높은 규산염의 농도를 보였다. 이를 강우량과 더불어 식물플랑크톤 현존량과의 연계성을 살펴보았을 때 (Fig. 5), 6월 조사 15일 이전의 누적 강우량은 96 mm 로 상대적으로 높았다. 특히 6월에는 와편모조류 *Prorocentrum donghaiense*가 $3.34 \times 10^5 \text{ cells L}^{-1}$ 로 높은 밀도로 출현하여, 질산염 + 아질산염과 암모늄, 인산염 농도를 일정량 소비시키는 데 기여하였을 것으로 생각된다. 이를 뒷받침할 수 있는 근거로 다른 영양염류는 고갈되었는데 규산염이 상대적으로 표층 주변에 높게 존재하였다는 것으로 설명할 수 있다. 와편모조류는 규조류와 달리

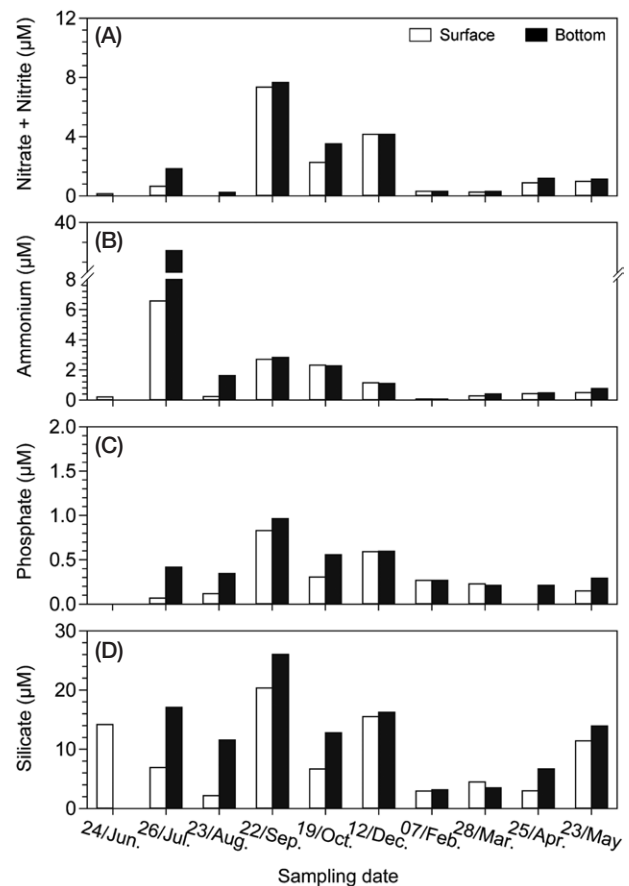


Fig. 4. Changes in nitrate + nitrite (A), ammonium (B), phosphate (C), silicate (D) from June 2016 to May 2017 in the Station M. White and black bars are values from surface and bottom, respectively.

성장 및 분열하는 과정에서 규산염을 이용하지 않으며, 그 결과 사용되지 않은 규산염의 농도가 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다. 7월 조사 전에는 55 mm 의 강우량을 기록하여 영양염류가 일정하게 공급되었지만, 식물플랑크톤 개체수가 $3.7 \times 10^4 \text{ cell L}^{-1}$ 로 낮게 유지되어 크게 소모되지 않은 특성을 보였다. 8월 조사에서는 8.5 mm 로 적은 강우량을 보였고, 유광층 내 질산염 농도가 고갈되었다. 9월의 영양염 농도는 식물플랑크톤에 직접적인 영향을 주는 아질산염 + 질산염, 인산염, 규산염 모두 전체 조사 시기 중 최고치를 기록하였다. 이는 9월 조사 전 태풍 말라카스 (MALAKAS)에 의한 197 mm 의 많은 강우를 동반하여, 육상기원의 영양염이 유입됨과 동시에, 태풍에 의한 수층 혼합으로 저층으로부터 재용출된 영양염류로 인해 전 수층에서 균등하게 높게 나타났을 가능성이 높다. 10월에는 조사 3주 전, 태풍이 남해안으로 북상하여 강우에 의한 육상기원의 영양염류가 조사지 주변 해역에 영향을 미쳤고, 그 결과, 식물플랑크톤이 빠르

계 증식하여 $2.57 \times 10^5 \text{ cell L}^{-1}$ 로 나타났으며, 이는 9월보다 약 3.7배로 증가한 결과를 초래하였다. 즉, 9월은 조사 2~3 일 전의 강우로 인하여 식물플랑크톤이 영양염류를 충분히 활용할 수 있는 시간적 여유가 없어, 수계 내 영양염류가 높게 유지된 반면, 10월에는 태풍복상 후 2~3주를 경과하여 수계 내 영양염류는 대부분 소진된 것을 알 수 있었다. 12월은 0.7 mm의 매우 적은 강우량을 기록하였지만, 동계 수층 혼합이 활발하여 표층과 저층에서 유사한 영양염 농도를 기록하였다. 2월과 3월에는 15 mm 전후의 강우량으로 육상기원 영양염이 낮게 유입되었고, 중심목 규조류 *Eucampia zodiacus*의 대량 증식($1.89 \times 10^5 \text{ cell L}^{-1}$)으로 영양염이 대부분 이용되어 아질산염 + 질산염의 농도가 $0.27 \mu\text{M}$ 이하로 낮게 관찰되었다. 또한, 규산염 농도 또한 12월에 $15.53 \mu\text{M}$ 농도에서 2월에 $3 \mu\text{M}$ 이하로 급격하게 떨어지는 양상을 확인

할 수 있었고, 이는 영양염류의 농도 변화에 따라 식물플랑크톤의 현존량을 결정하는 중요한 인자로 파악되었다.

4. Chl. a 농도와 식물플랑크톤의 계절적 변화

2016~2017년도 조사 시기의 Chl. a 농도는 표층에서 $0.37 \sim 2.44 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 6월에 가장 높았고, 4월에 가장 낮게 관찰되었다 (Fig. 6). 특히 7월과 8월, 3월, 4월, 5월의 Chl. a 농도는 표층보다 저층에서 일정하게 높게 기록되었다. 또한 식물플랑크톤의 총 개체수는 3월에 최소 $1.7 \times 10^4 \text{ cell L}^{-1}$ 에서 6월에 최대 $3.39 \times 10^5 \text{ cell L}^{-1}$ 의 범위로 나타났으며, 표층 Chl. a와의 상관관계를 분석한 결과 $r=0.65$ 로 높은 양의 상관관계를 보였다. 본 조사지역은 연안에 위치한 정점임에도 불구하고 연평균 $1.26 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 낮은 Chl. a 값을 보였다. Lee et al. (2006)의 보고에 의하면, 통영 주변에서는 Chl. a 연평균 $2.13 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났고, 이는 본 조사 연평균보다 2배가 높은 값이다. 본 조사에서 연평균 Chl. a가 낮게 나타난 것은 조사지 주변에서 굴 양식장이 극히 밀집되어 있고, 양식굴에 의한 포식압에 의해 다른 통영 주변 해역보다 상대적으로 높게 제어되고 있다는 것을 시사할 수 있다. 결과적으로 본 조사 해역에서 연평균 $1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 전후의 Chl. a 값이 낮게 관찰된 것은 굴의 지속적인 포식압에 따른 식물플랑크톤 현존량이 크게 감소한 결과로 판단된다.

식물플랑크톤 군집조성을 Class 레벨에서 분석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 규조류가 연평균 69%로 가장 높았고, 다음으로 와편모조류가 17%, 은편모조류 10% 수준으로 나타났다. 6월에는 와편모조류(94%)가 높은 밀도로 출현하였지만, 7월 조사부터 점차적으로 규조류(52%)의 점유율이 높아져, 8월 79%로, 9월과 10월에는 99%로 높게 나타났다. 특히, 추계와 동계의 저수온기 및 수층이 혼합하는 시기에는 규조류와 함께 상대적으로 은편모그룹의 비율이 증가하였다. 이후 3월부터 규조류와 함께 일정 수의 와편모조류 비율

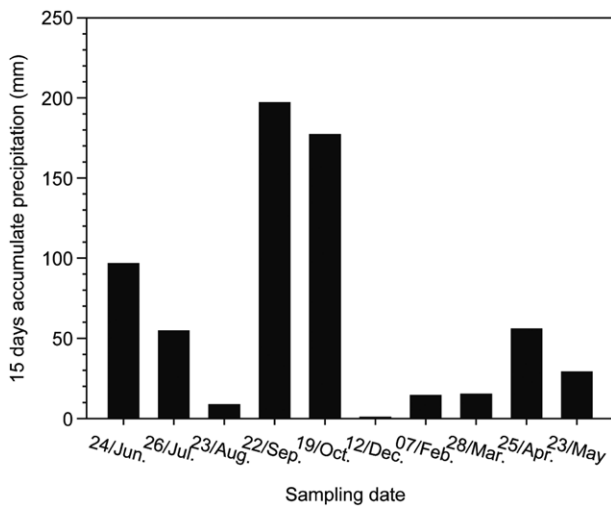


Fig. 5. Accumulated precipitation over 15 days before each survey from June 2016 to May 2017 in Tongyeong. N.D. means no data.

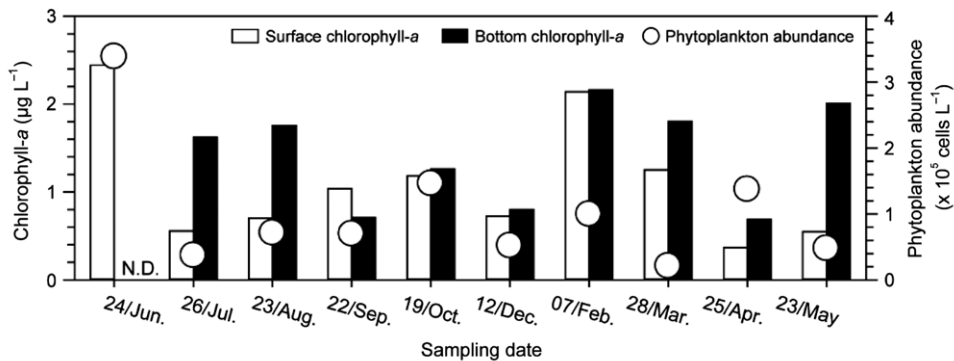


Fig. 6. Changes in the chlorophyll a concentration and phytoplankton abundance from June 2016 to May 2017 in the Station M. Black and white bars are values from surface and bottom chlorophyll a concentration, respectively. White dot is phytoplankton abundance.

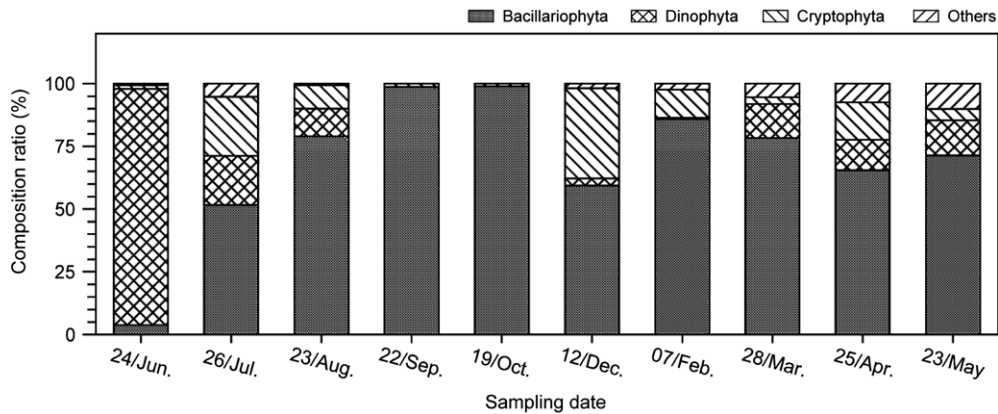


Fig. 7. Changes in the phytoplankton composition ratio from June 2016 to May 2017 in the Station M.

이 점차적으로 증가하는 양상을 보였다. 식물플랑크톤을 중수준으로 분석한 결과, 앞서 언급한 것과 같이 6월에는 와편모조류 *P. donghaiense*가 90%로 극우점하였다. 7월은 규조류 *Chaetoceros decipiens*가, 8월은 *Rhizosolenia setigera*와 *Pseudo-nitzschia delicatissima*가 각각 우점하였다. 9월에도 지속적으로 *P. delicatissima*가 3.8×10^4 cell L⁻¹로 높게 유지되었고, 10월에는 종이 천이되어 *Chaetoceros* spp.가 5.4×10^4 cell L⁻¹로 상대적으로 높게 관찰되었다. 동계 12월에는 *Skeletonema* spp.가 4.8×10^4 cell L⁻¹로, 2월과 3월에는 *Eucampia zodiacus*가 각각 6.0×10^4 cell L⁻¹와 4.0×10^3 cell L⁻¹로 전체 군집에서 높은 점유율을 보였다. 이후 성층이 점차 형성되는 4월에는 *P. delicatissima*가 5.3×10^4 cell L⁻¹로 나타났고, 5월에는 *Skeletonema* spp.가 1.9×10^4 cell L⁻¹로 높은 점유를 보였다. 결과적으로 2016년 조사에서 6월 와편모조류 우점 이후, 7월부터 규조류가 우점하였고, 시간에 경과에 따라 종이 계절적으로 천이되는 양상을 확인하였다. 2016년에는 특이적으로 하계에 통영 주변에서 대발생하는 적조생물 *Cochlodinium polykrikodes*의 우점은 관찰되지 않았다.

계절별 식물플랑크톤 중천이에 따른 군집구조의 유사도를 파악하기 위해 Cluster 분석과 MDS 분석한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 와편모조류 *P. donghaiense*가 극우점한 6월은 큰 차이를 보였고, 전반적으로 4월, 5월, 8월, 9월의 춘계와 하계에 식물플랑크톤의 군집이 *C. pseudocurvisetus*와 *P. delicatissima*로 묶였고, 2월, 3월, 12월의 추계와 동계 그룹은 *E. zodiacus*와 *Skeletonema* spp.의 우점종으로 묶이는 것을 확인하였다. 결과적으로 식물플랑크톤의 우점종은 계절적 변화에 따른 환경요인의 변화 특성이 중요한 요인으로 작용된 것으로 판단된다. 특히, 춘계와 하계 또는 추계와 동계는 유사하게 묶이는 양상을 보였으며, 이에 따른 우점종이 구분되는 특성을 파악하였다. 아울러, 2월과 3월에는 유사도가 60% 수준으로 다른 조사 시기보다 높았고, 이는 앞선 언

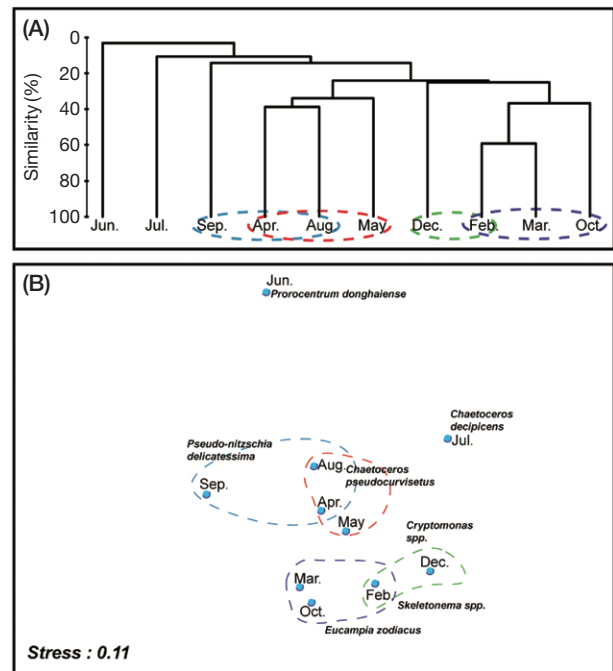


Fig. 8. Joint plots of sites association analyses obtained by cluster (A) and multidimensional scaling (MDS) ordination analyses (B), using a data set of the surface species abundances during the study period in the Station M (Each dashed circle represents a similarity of dominant species).

급한 것과 같이 *E. zodiacus*가 전체 군집조성을 결정하는 중요한 인자로 파악되었다. 규조류 *E. zodiacus*는 전세계적으로 출현하는 범세계적 종(cosmopolitan species)으로 인식되지만, 온난해역에서는 동계와 춘계에 저수온 환경하에서 기하급수적으로 증식하여 대발생을 하는 것으로 알려져 있는 종이다(Baek *et al.* 2015). 세토내만 해역의 Harima-Nada에서는 상대적으로 낮은 수온인 10~15°C의 동계 및 춘계에 걸쳐 대발생하였다는 연구 결과가 있으며(Nishikawa *et al.*

2007), 또한 Ito *et al.* (2013)는 온난해역 2월과 3월의 저수온 환경하에서도 광량의 증가와 더불어 일조 시간의 증가는 *E. zodiacus* 증식의 방아쇠 역할을 한다고 보고하였다. 결과적으로 본 연구에서 *E. zodiacus*가 대량증식하기 시작한 2월부터 3월에는 광량과 함께 일조 시간의 증가가 중요한 역할을 하였을 것이고, 현장 수온 역시 7.5~11.1°C의 범위로 성장하기에 최적의 조건으로 작용하였을 것이다.

우리나라의 굴 양식은 경남과 전남에서 각각 3,553 ha와 2,852 ha로, 두 지역이 전체 면적의 79.3%를 차지한다. 특히, 통영 주변 해역에서는 진해만 (i.e., 원문만, 고현만, 고성만), 거제도 가배와 한산만, 사량도 북부 및 고성 자란만에서 높은 밀도로 수하식 굴을 양식하고 있다 (NIFS 2012). Kobayashi (1997)와 Nakamura and Kerciku (2000)의 보고에 의하면, 양식 굴의 성장과 폐사는 수온, 수질, 먹이 생물의 농도가 중요한 요인으로 작용한다. 굴 수하식 양식 표준 지침서 (NIFS 2012)의 보고에 따르면, 연간 기초생산력은 진해만에서는 $179 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타났고, 한산만은 $189 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타났다. 특히, 여수 가막만에서는 연간 기초생산력이 $334 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 통영 주변의 굴 양식장보다 약 2배 정도 높게 나타났다. 이와 같이 통영 주변의 굴 양식장 주변에서 기초생산력이 낮게 나타난 것은 굴 양식장이 극히 밀집되어 있어, 일차 생산력이 일정하게 제어되고 있다는 것을 시사할 수 있다. 엽록소 (Chl. *a*)의 농도를 비교하면, 진해만과 한산만에서 연평균은 각각 $1.58 \mu\text{g L}^{-1}$ 과 $1.70 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 보고되었다 (NIFS 2012). 본 연구 해역인 통영 사량도 인근 해역에서는 연평균 Chl. *a*가 $1.26 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 진해만과 한산만보다 낮게 관찰되었다. 본 연구 해역에서는 Chl. *a* 농도로 다른 지역과 비교하여 일차 생산력의 결과를 유추해보면, 다른 통영 주변 해역보다 일차 생산력이 낮게 나타날 가능성이 높다. 이는 본 조사 해역에서 지속 가능하게 굴 양식을 할 수 있는 환경수용력을 일부 초과하였을 가능성을 시사할 수 있다. 추후 조사지역의 환경수용력을 평가하기 위해서 굴의 먹이원인 식물플랑크톤의 현존량과 일차 생산력, 동물플랑크톤과 저서동물의 먹이 경쟁관계에 대한 종합적인 연구가 수행될 필요성이 대두되었다. 특히 통영-사량도 주변 및 고성 자란만 해역의 굴 양식장 밀도를 단계적으로 조절하는 것은 지속 가능한 굴 생산을 위해서 중요한 행동지침이 될 것으로 생각된다.

적 요

남해안 통영-사량도 동북부의 굴 양식장 주변 해역에서 2016년 6월부터 2017년 5월까지 식물플랑크톤군집의 계절

변동 및 환경특성을 조사하였다. 본 연구는 굴의 먹이생물인 식물플랑크톤의 현존량이 계절적으로 어떻게 분포하고, 그들의 현존량을 조절하는 환경인자 특성을 규명하고자 하였다. 조사 기간 동안 수온은 2월 7.54°C에서 8월 29.5°C로 변화하였고, 하계에 고수온현상이 지속되었다. 염분은 하계 집중강우와 태풍의 영향으로 31 psu 전후로 낮게 관찰되었고, 최저치는 9월에 30.68 psu로, 최고치는 5월 34.24 psu로 관찰되었다. pH는 표층에서 7.95~8.50로, 저층의 7.91~8.3보다 조금 높게 관찰되었으며, 용존산소는 pH와 유사하게 표층에서 $6.0\sim 9.45 \text{ mg L}^{-1}$ 로 높게 나타났고, 저층에서는 하계에 5.25 mg L^{-1} 의 전후로 낮게 관찰되었다. 질산염 + 아질산염은 $0.14 \mu\text{M}$ 에서 $7.66 \mu\text{M}$ 로, 인산염은 $0.01 \mu\text{M}$ 에서 $4.16 \mu\text{M}$ 로, 규산염은 $0.27 \mu\text{M}$ 에서 $20.33 \mu\text{M}$ 로 각각 변화하였다. 표층 Chl. *a* 농도는 $0.37 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 $2.44 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 변화하였고, 연평균 $1.26 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 관찰되었다. 식물플랑크톤 군집은 연평균 규조류가 69%로 가장 높았고, 다음으로 와편모조류가 17%, 은편모조류 10% 순으로 나타났다. 6월에는 와편모조류 *P. donghaiense*가 90%로 극우점하였고, 7월은 규조류 *Chaetoceros decipiens*가 우점하였다. 하계에는 *Rhizosolenia setigera*와 *Pseudo-nitzschia delicatissima*가 높게 나타났고, 추계에는 *Chaetoceros* spp.와 함께 은편모그룹이 점차적으로 증가하였다. 동계에는 *Skeletonema* spp.와 *Eucampia zodiacus*가 높은 밀도로 출현하였다. 결과적으로 굴 양식장 주변 해역에서 계절에 관계없이 Chl. *a* 농도가 $2.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하로 나타났고, 연평균이 $1.26 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 일정하게 낮게 나타난 것은 지속적으로 여과섭식하는 굴의 성장특성 때문에 일정한 식물플랑크톤 현존량이 제어되고 있다는 것을 시사할 수 있었다.

사 사

본 연구사업은 미래창조과학부 해양극지기초원천기술개발사업 (NRF-2016M1A5A1027456)과 KIOST 주요사업의 재원을 받아 수행되었습니다 (PE99532). 현장 조사에 도움을 준 김윤지 연구원께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Baek SH, DS Kim, MH Son, SM Yun and YO Kim. 2015. Seasonal distribution of phytoplankton assemblages and nutrient-enriched bioassays as indicators of nutrient limitation of phytoplankton growth in Gwangyang Bay, Korea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 163:265-278.

- Baek SH, Shimode S and T Kikuchi. 2007. Reproductive ecology of the dominant dinoflagellate, *Ceratium fusus* in coastal area of Sagami Bay, Japan. *J. Oceanogra.* 63:35–45.
- Clarke KR and Warwick RM. 2001. Change in Marine Communities: An approach to statistical analysis and interpretation, 2nd ed. PRIMER-E, Plymouth, p. 179.
- Cressman KA, MH Posey, MA Mallin, LA Leonard and TD Alphin. 2003. Effects of oyster reefs on water quality in a tidal creek estuary. *J. Shellfish Res.* 22:753–762.
- Guinder VA, CA Popovich, JC Molinero and J Marcovecchio. 2013. Phytoplankton summer bloom dynamics in the Bahia Blanca Estuary in relation to changing environmental conditions. *Cont. Shelf Res.* 52:150–158.
- Huang C and Y Qi. 1997. The abundance cycle and influence factors on red tide phenomena of *Noctiluca scintillans* (Dinophyceae) in Dapeng Bay, the South China Sea. *J. Plankton Res.* 19:303–318.
- Ito Y, T Katano, N Fujii, M Koriyama, K Yoshino and H Yuchi. 2013. Decreases in turbidity during neap tides initiate late winter blooms of *Eucampia zodiacus* in a macrotidal embayment. *J. Oceanogr.* 69:467–479.
- Kobayashi M, EE Hofmann, EN Powell, JM Klinck and K Kusaka. 1997. A population dynamics model for the Japanese oyster, *Crassostrea gigas*. *Aquaculture* 149:285–321.
- Lee YS, YT Park, KY Kim, YK Choi and PY Lee. 2006. Characteristics of coastal water quality after diatom blooms due to freshwater inflow. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.* 12:75–79.
- Lim DB, CH Cho and WS Kwon. 1975. On the oceanographic conditions of oyster farming area near Chungmu. *Bull. Korean Fish. Soc.* 8:61–67.
- Nakamura Y and F Kerciku. 2000. Effects of filter-feeding bivalves on the distribution of water quality and nutrient cycling in a eutrophic coastal lagoon. *J. Mar. Syst.* 26:209–221.
- Newell RIE and J Ott. 1998. Macrobenthic communities and eutrophication. In *Ecosystems at the land-sea margin: drainage basin to coastal sea* (Malone TC, A Malej, LW Harding, N Smolaka and RE Turner eds.). *Coast. Estuar. Stud.* vol 55. pp. 265–293. American Geophysical Union. Washington DC.
- NIFS 2012. Standard Manual of Pacific Oyster Hanging Culture 2012. p. 205.
- Nishikawa T, Y Hori, K Tanida and I Imai. 2007. Population dynamics of the harmful diatom *Eucampia zodiacus* Ehrenberg causing bleachings of *Porphyra thalli* in aquaculture in Harima-Nada, the Seto Inland Sea, Japan. *Harmful Algae* 6:763–773.
- Parsons TR, Y Maita and CM Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Oxford, p. 173.
- Pomeroy LR, CF D’Elia and LC Schaffner. 2006. Limit to top-down control of phytoplankton by oysters in Chesapeake Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 325:301–309.
- Sournia, A. 1978. Phytoplankton manual. *Monographs on Oceanographic Methodology* 6. UNESCO, Paris. p. 337.
- Thompson PA, PI Bonham and KM Swadling. 2008. Phytoplankton blooms in the Huon Estuary, Tasmania: top-down or bottom-up control? *J. Plankton Res.* 30:735–753.

Received: 22 October 2017

Revised: 7 November 2017

Revision accepted: 8 November 2017