

## 진해만에서 춘계와 하계 성층기간 동안 환경요인과 식물플랑크톤 군집구조의 관계

손문호<sup>1,3</sup> · 현봉길<sup>1</sup> · 김동선<sup>2</sup> · 최현우<sup>2</sup> · 김영옥<sup>1</sup> · 백승호<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>한국해양과학기술원 남해특성연구부, <sup>2</sup>한국해양과학기술원 본원  
<sup>3</sup>부산대학교 해양시스템과학과

## The Correlation between Environmental Factors and Phytoplankton Communities in Spring and Summer Stratified Water-column at Jinhae Bay, Korea

Moonho Son<sup>1,3</sup>, Bong-Gil Hyun<sup>1</sup>, Dong Sun Kim<sup>2</sup>, Hyun Woo Choi<sup>2</sup>,  
Young Ok Kim<sup>1</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>Marine Environment Research Department, KIOST Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

<sup>3</sup>Department of Oceanography, College of Natural Science, Pusan National University,  
Busan 609-735, Korea

**Abstract** - We surveyed 23 sites of Jinhae Bay in spring and summer 2010 in order to study the correlation between the variation of environmental factors, including salinity, temperature, and nutrients and the characteristics of phytoplankton community structures in summer stratification. Phytoplankton biomass was high in the surface water in summer; however, it was very low in the bottom water. The results showed a negative correlation between chlorophyll *a* (chl. *a*) and nutrients (silicate, nitrate, nitrite, ammonium, and phosphate) or nutrients ratio in summer; however, there was mostly a positive correlation between chl. *a* and these nutrients in spring. This inconsistent correlation between spring and summer was attributed to the phytoplankton community, because a diverse phytoplankton community has different nutrient uptake abilities. In addition, the results of CCA (canonical correspondence analysis) showed a negative correlation between phosphate and dominant species, including *Chaetoceros* spp., *Skeletonema costatum*-like spp., and *Pseudo-nitzschia delicatissima* in summer, but a strong positive correlation between DIN (dissolved inorganic nitrogen) and the dominant species, including *Cryptomonas* spp. and *Pseudo-nitzschia multistriata* in spring. Consistently, the dominant algal species in summer showed a relatively smaller size cells compared with those in spring, suggested that it may have related with the low nutrient levels at surface layer due to strong stratified water column of summer.

**Key words** : Jinhae Bay, phytoplankton, environmental factors, stratification, Canonical Correspondence Analysis (CCA)

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

## 서론

진해만은 반폐쇄성 내만으로 외해수와의 교환이 원활하지 못하고, 해안선의 굴곡이 심하며 수심이 비교적 얇은 특징을 갖고 있다. 1970년대부터 산업의 발달과 도시화로 하·폐수의 유입량이 급증하여 수질환경이 극히 악화되어(노 등 2005), 부영양화와 더불어 적조가 빈번히 발생하는 해역으로 보고되고 있다(양 1990; 조 등 2002; 홍 등 2007). 진해만에서의 식물플랑크톤 연구는 군집 분포(김 등 1993; 백과 김 2010), 수질환경의 계절적 변동 특성(조 등 1998; 임 등 2007), 적조의 발생기작(Lee and Lim 2006) 등이 있다. 특히 당 해역에서는 패류 양식이 활발하게 행하여져 유해유독 생물의 정기적인 모니터링과 더불어(Lee *et al.* 1998; Lee *et al.* 2003; Kim *et al.* 2010), 대장균에 관한 연구도 병행되고 있다(손 등 2011).

식물플랑크톤의 군집구조의 변화와 대발생은 수계의 안정과 수온, 광량, 영양염 등이 매우 중요한 환경인자이다. 특히 용승이 일어나는 해역에서는 구조류가 우점하는 경향이 강하고, 성층이 형성되는 빈영양수계의 유평층에서는 나노(Nano)와 피코(Pico) 크기의 극미소생물이 주로 우점한다(Chisholm 1992). 또한, 해류 및 바람과 같은 물리적인 요인은 식물플랑크톤의 집적과 분산에 중요하다(Ptacnik *et al.* 2003; 백 등 2008; Baek *et al.* 2009). Jager *et al.* (2008)의 보고에 의하면, 해역의 물리적인 교란으로 인한 강한 난류(turbulence)의 형성은 저

서구조류가 재부유(re-suspension)되어 수계 내 우상목의 구조류의 우점을 유발하고, 이후 수계의 안정과 더불어 빠르게 침강하여 중심목 구조류로 천이된다. Baek *et al.* (2009)는 하계의 빈번한 집중호우에 의해 육상기원의 풍부한 영양염이 연안내만으로 유입되어 식물플랑크톤의 대증식을 유발하는 중요인자로 판단되었고, 영양염류의 절대량과 구성성분비의 변화는 식물플랑크톤의 종간 경쟁으로 인한 우점종의 천이를 유발하는 것으로 보고하였다(Redfield *et al.* 1963; Fisher *et al.* 1992; Baek *et al.* 2009).

결과적으로 진해만에서 춘계와 하계의 집중호우 등에 의한 염분변화와 성층 현상으로 인한 환경인자(수온, 염분, 영양염)의 변동이 식물플랑크톤의 군집 분포 및 생물량의 변화에 미치는 영향을 조사하는 것은 매우 중요하다. 현 등(2011)은 2010년 진해만에서 동계 수층혼합과 영양염류의 농도변화가 식물플랑크톤군집에 미치는 영향을 보고 한 바 있고, 이에 후속연구로서 춘계와 하계에 성층이 형성되는 기간을 중심으로, 환경인자가 식물플랑크톤의 군집구조에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

## 재료 및 방법

진해만 광역조사는 2010년 5월 4~5일(춘계조사)과 8월 24~25일(하계조사)에 23개 정점에서 한국해양과학기술원 연구선(R/V장목호)으로 수행되었다(Fig. 1). 각 정점에서 수심별 수온과 염분은 CTD(Sea-Bird 9, USA)

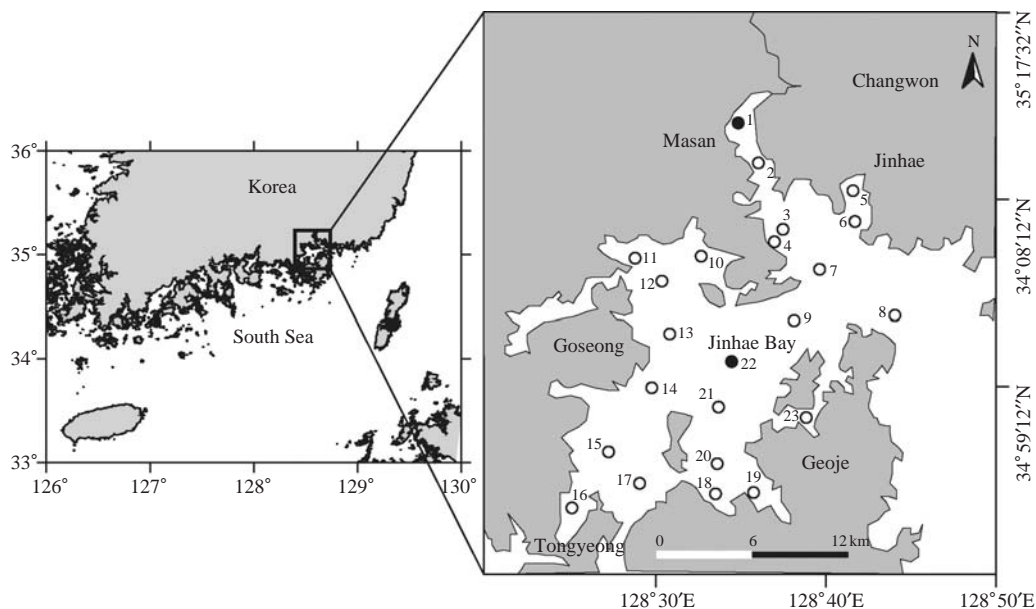


Fig. 1. Location of study sites in Jinhae Bay.

를 이용하여 측정하였고, 투명도는 30 cm 투명도판(Secchi Disc)를 이용하여 측정하였다. 표층과 저층의 해수는 니스킨 채수기를 이용하여 각각 채수하였다. Chlorophyll *a* (Chl. *a*) 측정을 위해 각 층의 해수 500 mL를 선상에서 GF/F여과지 (47 mm Whatman glass fiber filters)로 여과한 후 15 튜브에 넣어 현장에서 냉동보관하여 실험실로 운반하였다. 특히 하계에는 식물플랑크톤의 크기별 Chl. *a* 농도를 조사하기 위해 표층수를 <20  $\mu\text{m}$ , >3  $\mu\text{m}$ 의 나노(Nano)크기와, <3  $\mu\text{m}$ 의 피코(Pico)크기로 나누었다. 영양염 분석용 시료는 GF/F 여과지를 통과한 여과해수 20 mL를 30 mL PC병에 넣고 냉동 보관하였다.

Chl. *a* 분석은 90% acetone 8 mL을 넣고 24시간 냉암소에서 엽록소를 추출한 후 형광측정기(Turner Designs 10-AU Fluorometer)로 수행하였다. 영양염류는 분석전 해동

하여 규산염(SiO<sub>2</sub>-Si), 암모니아성 질소(NH<sub>4</sub>-N), 아질산과 질산성 질소(NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N), 인산염(PO<sub>4</sub>-P)를 Parsons *et al.* (1984)의 분석법에 따라서 자동영양염분석기(Bran Luebbe)로 분석하였다.

식물플랑크톤 종조성과 정량분석을 위해 500 mL용 채수병에 표층수와 저층수를 각각 500 mL를 넣고, 곧바로 Lugol 용액으로 최종농도 1%로 고정하여 실험실로 운반하였다. 운반된 시료는 실험실에서 50 mL로 농축시킨 후 100~300  $\mu\text{L}$  분주하여  $\times 20$  또는  $\times 40$  배율에서 동정 및 계수하였다. 광학현미경하에서 동정이 어려운 종은 सू सू 수준에서 동정하였다(Dodge 1982).

정점별 식물플랑크톤의 군집구조의 분포특성을 자세히 알아보기 위해서 각 정점에 출현한 식물플랑크톤을 바탕으로 PRIMER version 5를 이용해 Bray-Curtis 유이

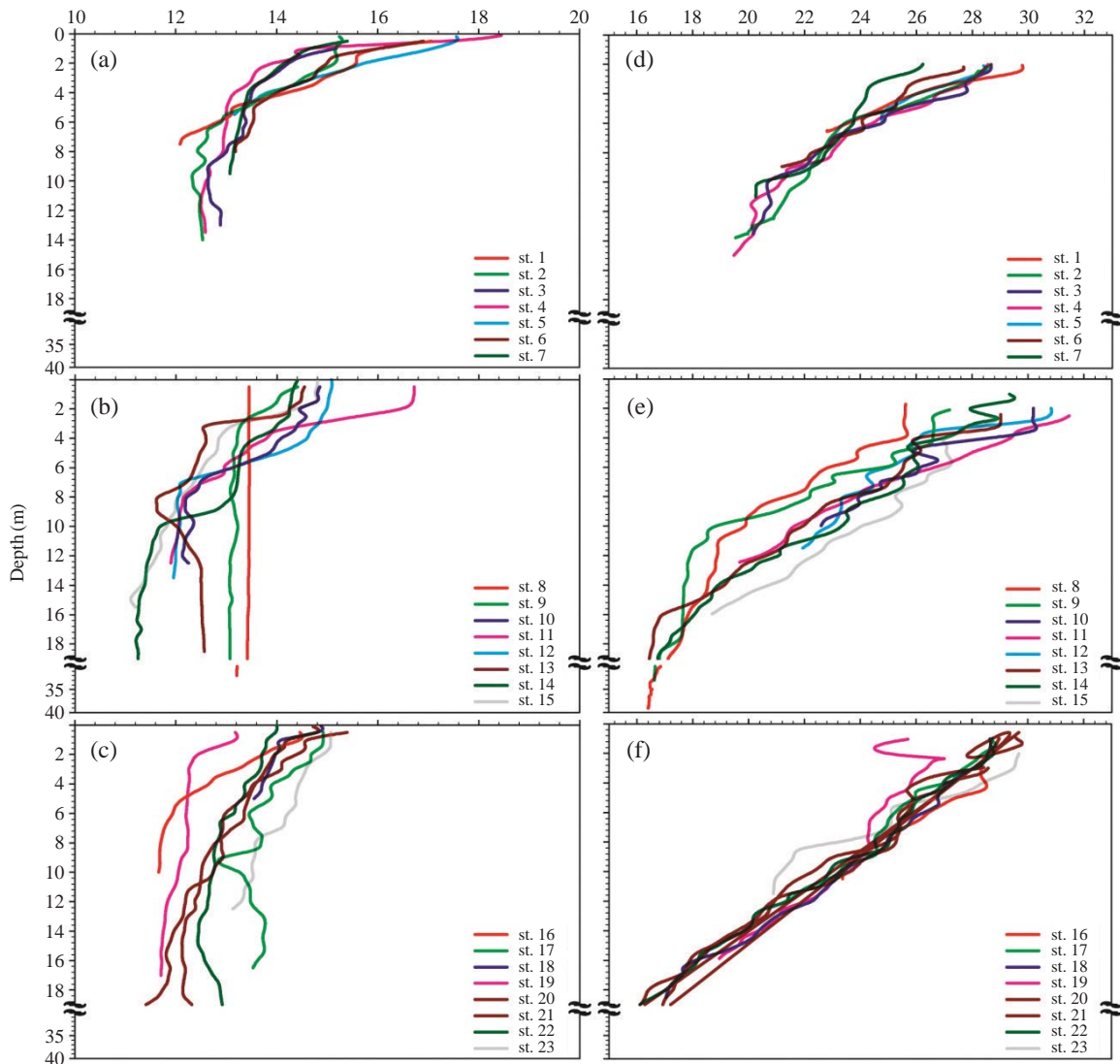


Fig. 2. Vertical profiles of temperatures in spring (a ~ c) and summer (d ~ f) in Jinhae Bay.

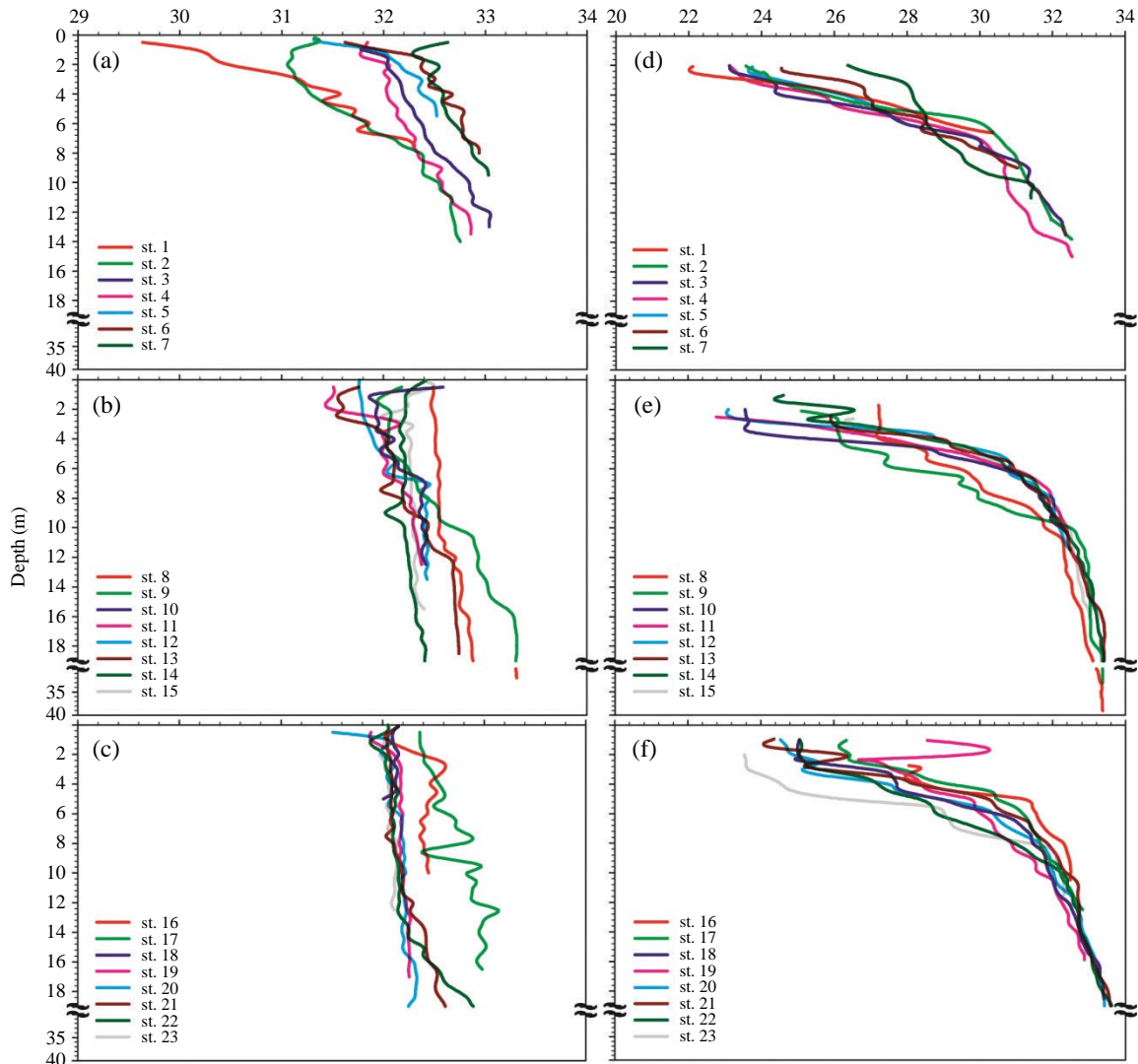


Fig. 3. Vertical profiles of salinity in spring (a~c) and summer (d~f) in Jinhae Bay.

도를 산출함과 동시에 Cluster 분석을 수행하였고, SPSS statistics 19를 이용하여 환경요인과 식물플랑크톤의 분포 및 생물량과의 상관분석을 수행하였다. 환경요인(수온, 염분, 질산염, 인산염, 규산염)과 주요 우점종 간의 상관관계를 분석하기 위해 CANOCO 4.5 software를 이용하여 CCA(Canonical Correspondence Analysis)를 수행하였다.

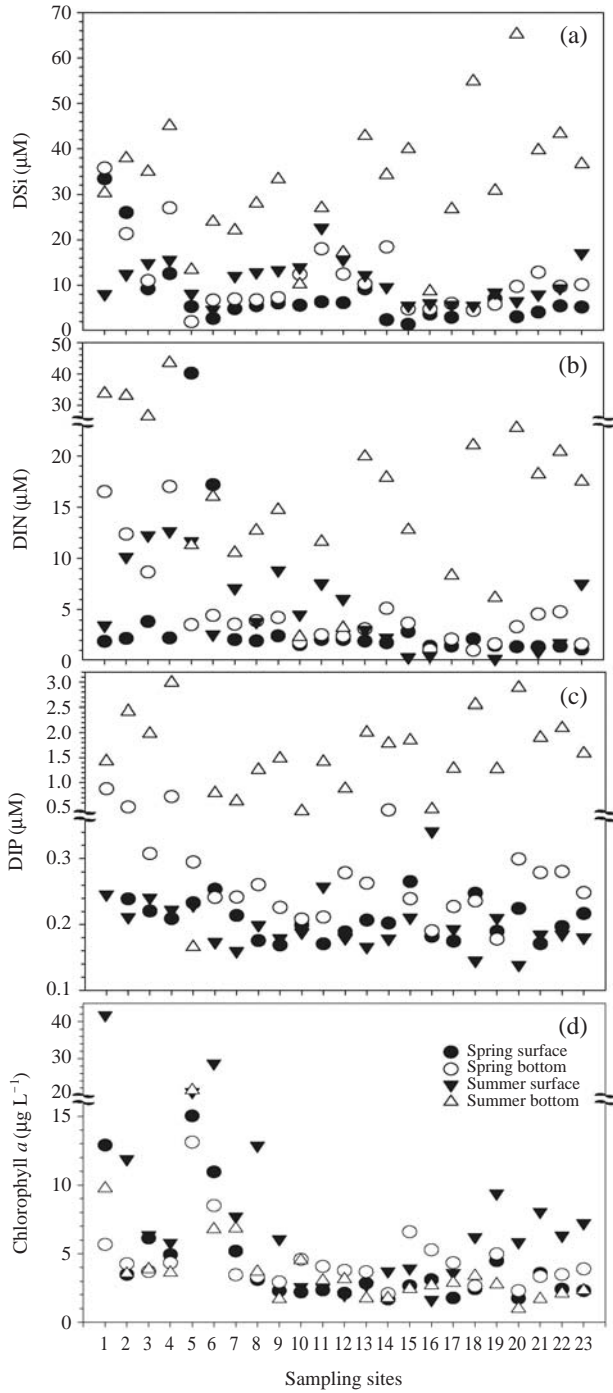
## 결 과

조사정점의 수심별 수온과 염분은 Fig. 2와 3에 나타내었다. 표층수온의 평균은 춘계  $14.6 \pm 0.6^\circ\text{C}$ 로, 하계  $28.4 \pm 1.4^\circ\text{C}$ 로 나타났고, 표층과 저층의 수온의 차이는

춘계평균  $2.7 \pm 1.3^\circ\text{C}$ 로 낮았으나, 하계에는  $9.4 \pm 2.9^\circ\text{C}$ 로 현저한 차이를 보였다. 이는 춘계에서 하계에 걸쳐 점차적으로 성층화 현상이 뚜렷하게 관찰되었다는 것을 의미한다. 20m 수심(진해만의 평균수심)을 기준으로 한 저층수온은 춘계 ( $11.9 \pm 0.9^\circ\text{C}$ )가 하계 ( $16.3 \pm 0.6^\circ\text{C}$ )보다 약  $4^\circ\text{C}$  정도 낮았다. 염분은 표층에서 하계에 평균  $25.0 \pm 1.6$  psu로, 춘계 ( $32.0 \pm 0.3$  psu)의 농도보다 현저한 차이를 보였고, 저층에서는 춘계  $32.6 \pm 0.4$  psu로, 하계  $32.5 \pm 1.3$  psu와 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 하계 집중강우에 의한 영향이 표층주변에서 현저하게 나타났다는 것을 의미한다.

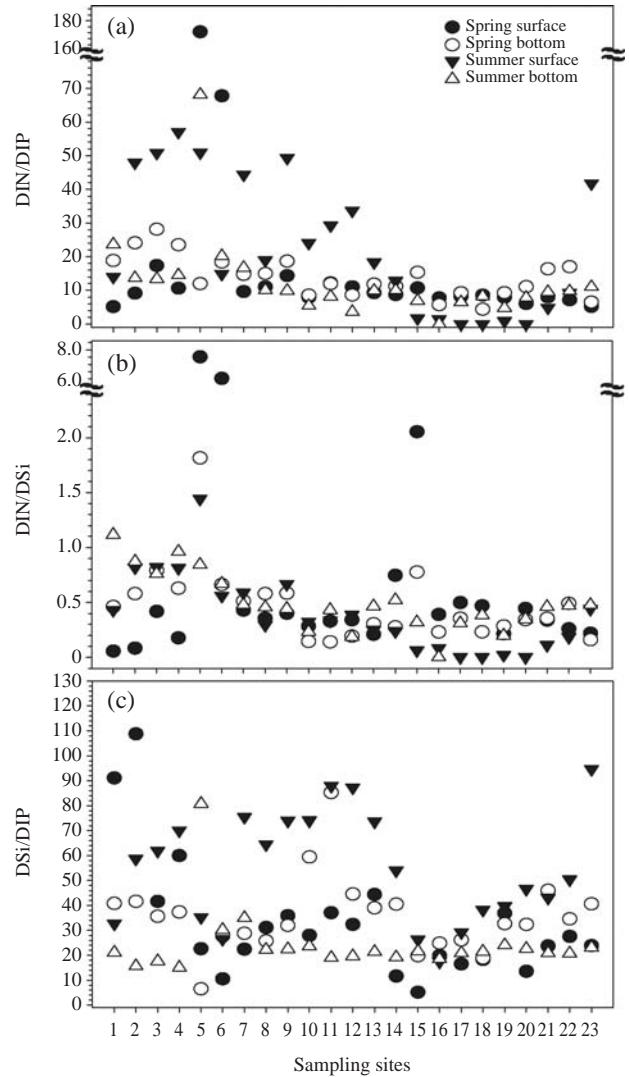
각 정점별 영양염농도의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 규산염의 평균은 표층에서 춘계에  $7.5 \pm 7.5 \mu\text{M}$ 로, 하계의  $10.8 \pm 4.6 \mu\text{M}$ 과 비교하여 큰 차이는 보이지 않았다.





**Fig. 4.** Distribution of DSi (a), DIN (b), DIP (c), and Chl. *a* (d) concentration in spring and summer on 23 sites in Jinhae Bay; Filled and open circles indicate the surface and the bottom in spring, while the filled and open triangle indicates surface and bottom in summer.

저층에서는 춘계 ( $11.5 \pm 8.0 \mu\text{M}$ )가, 하계 ( $32.4 \pm 13.6 \mu\text{M}$ )의 농도보다 현저한 차이를 보였다. DIN (질산염+아질산염+암모늄)은 춘계 대부분의 표층정점에서  $3 \mu\text{M}$  이하



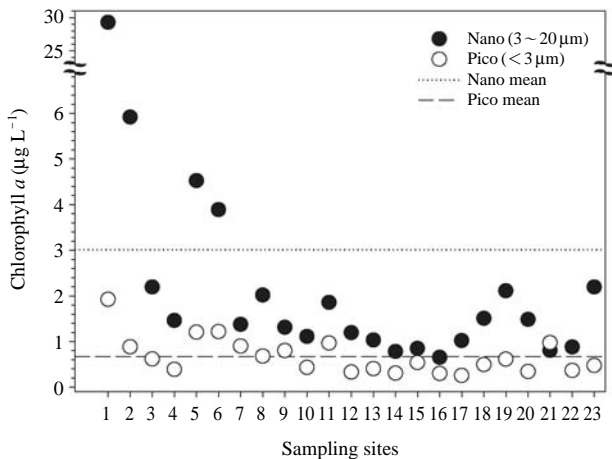
**Fig. 5.** Distribution of DIN : DIP ratios (a), DIN : DSi ratios (b) and DSi : DIP ratios (c) at spring and summer on 23 sites in Jinhae Bay; Filled and open circles indicate the surface and bottom, respectively, in spring. Filled and open triangle indicates the surface and bottom in summer.

로 낮게 나타났고, 하계 저층에서  $16.7 \pm 10.5 \mu\text{M}$ 로 높게 나타났다. 특히, 하계 마산만 내측해역 (정점 1~4)의 표층에서 상대적으로 높은 값을 보였다. 인산염은 하계 저층에서 평균  $1.5 \pm 0.8 \mu\text{M}$ 로 높게 나타났으며, 정점 4에서 최고치 ( $3.0 \mu\text{M}$ ) 농도가 관찰되었다.

DIN : DIP비는 춘계 진해내만인 정점 5 (178), 정점 6 (68)이 현저히 높았고, 하계 진해만의 서남부해역 (정점 15~22)을 제외한 나머지 해역에서는 Redfield비 (16)와 비슷하거나 높은 값을 유지하였다. DIN : DIP비가 높게 관찰된 정점 5, 6에서 DIN : DSi 비 또한 높게 나타났다는 것은 마산만과 행암만 정점에서 DIN 농도가 상대적으로

높다는 것을 의미한다 (Fig. 5).

Chl. *a* 농도 평균은 춘계 표층에서  $4.3 \pm 3.7 \mu\text{g L}^{-1}$ , 저층에서  $4.5 \pm 2.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났으며, 정점 5에서 표층과 저층 각각  $15.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 과  $13.1 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 최고치를 기록하였다. 반면 진해만 서부해역의 정점 14에서 표층과 저층 각각  $1.7 \mu\text{g L}^{-1}$ 과  $2.1 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 최저치를 보였다. 특히 마산만과 행암만의 (정점 1~7) Chl. *a* 농도의 평균 (표층:  $8.4 \pm 4.5 \mu\text{g L}^{-1}$ , 저층:  $6.2 \pm 3.5 \mu\text{g L}^{-1}$ )이 다른 정점의 평균 (표층:  $2.6 \pm 0.7 \mu\text{g L}^{-1}$ , 저층:  $3.8 \pm 1.2 \mu\text{g L}^{-1}$ )보다 약 2~3배 높게 나타났다. 또한 하계의 Chl. *a* 농도가 춘계에 비하여 현저히 높았다 (Fig. 4). 하계 나노 (Nano, 3~20  $\mu\text{m}$ )와 피코 (Pico, <3  $\mu\text{m}$ ) 크기로 분획한 Chl. *a*의 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 마산만 최내측 정점 1에서 나노와 피코 크기로 분획된 Chl. *a* 농도는 각각  $29.3 \mu\text{g}$



**Fig. 6.** Variation of chlorophyll *a* concentration of Nano (3~20  $\mu\text{m}$ ) and Pico (<3  $\mu\text{m}$ ) size phytoplankton in summer in Jinhae Bay. Filled and open circles indicate the Nano and Pico size, respectively, and the short dotted and long dotted lines indicated the mean Chl. *a* concentration of the Nano and Pico size phytoplankton respectively.

$\text{L}^{-1}$ 과  $2.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높은 값을 나타내었고, 통영의 원문만의 정점 16에서  $0.7 \mu\text{g L}^{-1}$  (Nano)과  $0.3 \mu\text{g L}^{-1}$  (Pico)로 가장 낮았다. 진해만 광역해역의 나노 크기 Chl. *a* 농도의 평균은  $3.0 \pm 1.2 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났고, 피코 크기는  $0.7 \pm 0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다.

성층기간동안의 물리 화학적 환경요인과 식물플랑크톤과의 상관관계의 결과를 Table 1에 나타내었다. 수온과 염분은 춘계와 하계 모두 음(-)의 상관관계를 보였고, 하계에는 염분과 인산염, 규산염, 암모니움 농도와 음(-)의 상관관계를 보였다. 하계와 춘계의 인산염은 규산염과 암모니움 농도와 양(+)의 상관관계를 보인 반면, 질산염과 아질산염과의 상관성은 관찰되지 않았다. Chl. *a* 농도는 춘계와 하계 수온과는 양(+)의 상관관계가 성립되었고, 염분과는 음(-)의 상관관계를 보였다. 특히 춘계의 Chl. *a* 농도는 질산염과 높은 상관성을 보였다.

춘계와 하계의 표층식물플랑크톤의 총개체수와 주요 우점종 5종에 대한 정점별 출현양상을 Fig. 7에 나타내었다. 성층기간동안 표층에서 관찰된 식물플랑크톤은 총 100여 종이었고, 그 중 규조류가 50종으로 가장 높게 나타났다. 다음으로 와편모류 42종과 더불어 은편모류, 규질편모류, 유글레나류, 침편모류 순으로 나타났다. 식물플랑크톤의 출현 종수는 춘계보다 하계에서 높게 나타났으며, 총 개체수밀도 또한 하계평균 ( $5.8 \times 10^6 \text{ cells L}^{-1}$ )이 춘계의 평균 ( $4.6 \times 10^6 \text{ cells L}^{-1}$ )보다 높게 나타났다. 성층기간동안 5~10  $\mu\text{m}$  크기의 동정이 불가능한 은편모조류와 규조류가 가장 우점하였고, 다음으로 와편모류, 규질편모류, 유글레나류의 개체수는 상대적으로 낮게 관찰되었다. 춘계에는 규조류중에서도 *Pseudo-nitzschia multistriata* (정점 14, 17, 23), *Dactyliosolen fragilissimus* (정점 15), *Cerataulina dentate* (정점 16)가 높게 나타났으며, 마산만 정점 1에서는 *Eutreptiella gymnastica*가 전체의 26.7%로 높게 나타났다. 하계에는 주요 우점 5종의 합이 총 개체

**Table 1.** Pearson correlation coefficients (*r*) indicating the relationships between abiotic and biotic factors at 23 stations in the spring (right upper part) and summer (left lower part) seasons in Jinhae Bay

	Temp.	Sal.	DIP	DSi	NO <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub>	DIN	DIN/DIP	DIN/DSi	DSi/DIP	Chl. <i>a</i>
Temp.		-.574**	-.176	-.061	.289*	.238	.253*	.348**	.383**	.046	.311*
Sal.	-.885**		.067	-.271*	-.221	-.125	-.146	-.221	-.202	-.390**	-.371**
DIP	-.836**	.793**		.754**	.139	.499**	.444**	.066	-.003	.132	.136
DSi	-.815**	.716**	.948**		.059	.256*	.226	-.051	-.215	.736**	.149
NO <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub>	-.336*	.007	.176	.240		.852**	.898**	.957**	.792**	-.049	.593**
NH <sub>4</sub>	-.512**	.519**	.858**	.786**	.078		.995**	.886**	.784**	-.097	.553**
DIN	-.590**	.455**	.823**	.787**	.494**	.906**		.919**	.803**	-.090	.573**
DIN/DIP	.349**	-.555**	-.327*	-.177	.583**	-.152	.116		.898**	-.133	.609**
DIN/DSi	-.099	-.105	.244	.254*	.696**	.431**	.672**	.679**		-.313*	.646**
DSi/DIP	.626**	-.755**	-.639**	-.439**	.152	-.482**	-.356**	.695**	.050		.054
Chl. <i>a</i>	.401**	-.523**	-.368**	-.399**	.037	-.224	-.180	.310*	.292*	.131	

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

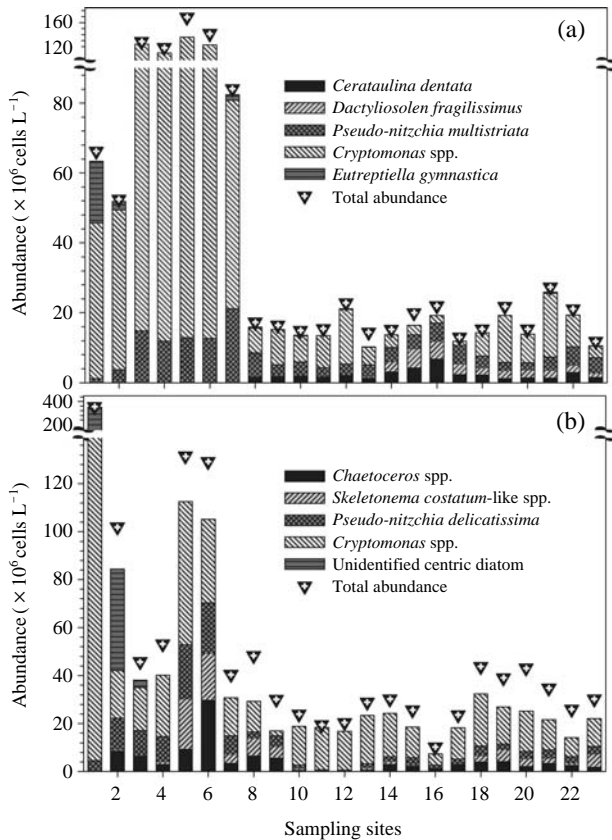


Fig. 7. Variation of total abundances and cumulative distribution of 5 dominant species at 23 sites in spring (a), and summer (b) in Jinhae Bay.

수의 평균의 75.2%를 차지하였고, 대부분의 정점에서 *Cryptomonas* spp. (45.4%)가 극우점하였다.

정점별 출현한 식물플랑크톤의 종조성을 바탕으로 Cluster 분석한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 춘계와 하계 정점별 유사도가 60% 수준에서 4개의 그룹으로 나누어졌다. 먼저 춘계의 제1그룹은 마산만 해역(정점 1~7), 제2그룹은 진동만을 포함한 진해만 서부해역의 대부분의 정점(정점 9~13, 21), 제3그룹은 원문만을 둘러싼 통영 인근해역(정점 14~17), 제4그룹은 거제도 인근해역(정점 8, 18~20, 22, 23)으로 구분되었다. 하계에는 마산만 최내측(정점 1, 2)이 1그룹으로 묶였고, 2그룹은 행암만을 포함한 진해만 동부해역(정점 6, 8, 9), 3그룹은 진동만 해역(정점 10~13)으로 나누어졌고, 4그룹은 뚜렷한 특징을 보이지 않았다.

고찰

2010년 하계 진해만의 성층현상으로 표층과 저층의

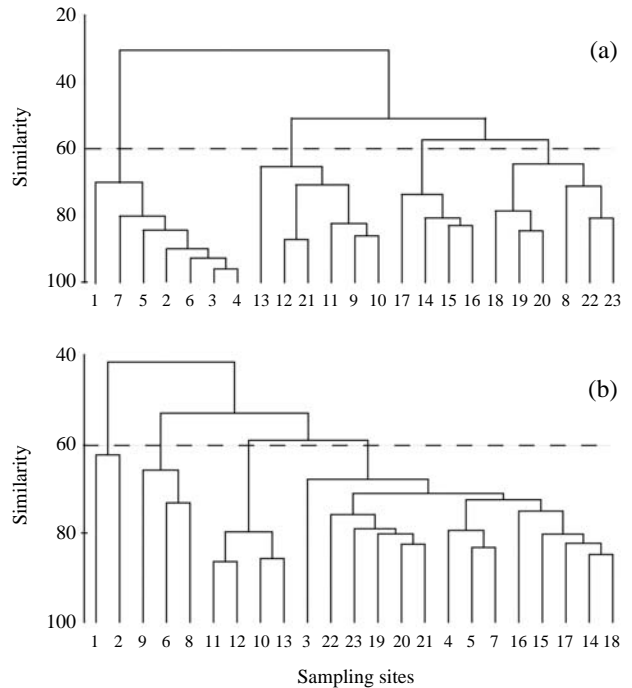


Fig. 8. Joint plots of sites association analyses obtained by cluster in spring (a) and summer (b) using a data set of environmental factors and Chl. *a* on the surface and bottom at 23 sites in Jinhae Bay. Dotted line indicates 60% similarity level.

환경요인(수온, 염분, 영양염)의 상당한 차이가 나타났다(Fig. 4). 또한 이러한 환경요인의 차이는 진해만의 조사 정점에 따라 식물플랑크톤 생물량과 군집분포에도 영향을 미쳤다. 하계의 반폐쇄적인 마산만 정점 1의 경우 Chl. *a* 농도가 큰 폭의 차이를 보였으나, 행암만 정점 5에서는 유사한 농도로 나타났다. 식물플랑크톤을 Nano와 Pico 사이즈로 나누어 Chl. *a* 농도를 조사한 결과에서도 정점 1에서 전체의 70%로 극히 높게 나타난 반면, 정점 5에서는 20%로 나타났다. 특히 정점 1에서 우점한 종은 *Cryptomonas* spp.와 직경이 10  $\mu m$  이하의 동정되지 않은 중심목의 규조류(*Cyclotella* spp., *Thalassiosira* spp.)로 나타났다, 정점 5에서는 *Cryptomonas* spp.와 *Skeletonema costatum*-like spp., *P. delicatissima*로 나타났다. Friebele *et al.* (1978) 이 세포체적의 비율에 따라 영양염 흡수율의 차이를 보고한 바와 같이, 반폐쇄적이고 표층의 영양염 농도가 낮은 정점 1에서 Nano 크기 이하 식물플랑크톤의 대량증식이 나타난 것으로 판단된다. 반면, 정점 5에서 표층과 저층간의 생물량 차이는 우점종이 각 층간에 뚜렷하게 구별되었기 때문으로 생각된다. 결과적으로 폐쇄적 내만의 성층화된 해역에서 식물플랑크톤의 현존량이 높게 나타났고, 환경조건이 유사하며 지리적으로 가까운 지역에서 조차 출현하는 생물군이 현저하게 다르

게 나타난 것은 영양염 선호도와 흡수율의 차이에서 기인된 것으로 사료된다.

하계의 성층화된 해역에 비해 수층의 혼합이 상대적으로 원활한 춘계의 경우 하계와 다른 식물플랑크톤 분포 특징을 보였다. 대부분의 정점에서 *Cryptomonas* spp.가 우점한 가운데, 정점 1에서  $12.9 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 높은 Chl. *a* 농도를 보였고, *E. gymnastica*가 특이적으로 우점하였다. Baltic Sea 연안에서 *E. gymnastica*의 영양염 흡수율에 관한 보고에 의하면, *E. gymnastica*는 과영양화된 배지에서 질산염과 암모니움은 단기간(2일내)에 빠르게 소모되었지만, 인산염 비교적 낮은 흡수율을 보였다(Olli *et al.* 1996). 정점 1의 표층은 다른 해역에 비하여 규산염과 인산염이 상대적으로 높았지만, 질산성 질소와 암모니움의 농도는 극히 낮게 관찰된 것은 *E. gymnastica*의 우점에 의한 N기원의 영양염을 빠르게 흡수한 결과로 해석된다.

춘계와 하계에 우점한 *Cryptomonas* spp.는 같은 연구팀의 진해만의 동계조사에서도 높게 우점한 생물군으로 보고한 바 있다(현 등 2011). *Cryptomonas* spp.는 넓은 범위의 환경요인(수온, 염분, 영양염, 광량 등)에 적응이 가능하기 때문에, 계절에 관계없이 광범위하게 높은 밀도로 출현하는 것으로 판단된다. 은편모조류는 비교적 크기가 작으나, 1차 생산자로서 생태학적으로 중요한 분류군에 속하며(Clay *et al.* 1999), 담수와 해수에서 폭넓게 분포하는 중요한 생물군이다. 또한 이들은 수계에서 적절한(중간) 난류가 형성될 때 최대생물량을 나타내며(Reynold 1984), 본 조사결과에서도 난류의 빈도와 강도가 적은 하계(모든 정점평균 49.4%)보다 춘계(65.9%)에 은편모조류의 출현이 높게 나타나, Reynold(1984)의 연구결과와 유사하였다. 또한 Barone and Naselli-Flores(2003)의 보고에 의하면, 은편모조류는 탁도가 높은 해역에서 낮은 광량에도 잘 적응하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 마산만의 지리, 산업적인 특징으로 인해 유기물 및 현탁 물질이 지속적으로 유입되었고, *Cryptomonas* spp.가 이러한 환경에 빠르게 적응하여 높은 밀도를 유지한 것으로 판단된다.

춘계와 하계 표층에서 관찰된 식물플랑크톤의 군집구조를 바탕으로 Cluster 분석을 수행한 결과 60% 유사성 수준에서 진해만은 4개의 그룹으로 나뉘어졌다. 김 등(2011)의 보고에 의하면, 진해만의 춘계조사자료(동일자료)로 통계학적 접근에 의한 해역별로 분포하는 수질특성을 크게 마산만 행암만의 주요정점과 그 외 18여개의 정점으로 구분하였다. 본 연구의 식물플랑크톤의 군집구조에서도 김 등(2011)의 해역의 수질특성으로 구분된 해역과 비교적 잘 일치하였다. 즉 오염원 유입원과 인접하여 비교적 높은 영양염 농도를 보이는 지역과 오염원

으로부터 멀리 떨어져 있거나 수계의 교환이 빠른 해역에서는 식물플랑크톤의 현존량뿐만 아니라 군집분포에도 차이를 보이는 것으로 해석된다. 본 연구결과에서도 Cluster 분석에서 각 정점이 크게 구분되는 주요 요인은 구조류와 은편모조류의 분포양상이었으며, 특히 마산만은 은편모조류가 극 우점하였고, 그 외 대부분의 정점에서는 구조류가 관찰되었다.

점 오염원으로부터 기인하는 특정해역으로부터의 영양염 유입은 식물플랑크톤 군집의 중간 경쟁을 유발함과 더불어, 특정 생물의 대발생을 유발한다. 아울러, 이들 관계를 파악하는 것은 해역의 오염 정도를 간접적으로 평가할 수 있는 지표로도 활용 가능하다. 식물플랑크톤 총 개체수를 Chl. *a* 농도로 나눈 비율은 크기가 다른 식물플랑크톤이 오염원 구배에 따라서 어떤 분포반응을 나타내는지 확인 가능하다(Fig. 9). 즉 진해만의 경우 오염원이 강한 지역의 만 내측에서는 크기가 작은 식물플랑크톤이 이분법으로 빠르게 재증식하여 우점하기 때문에, 상대적으로 Chl. *a* 농도에 비해 높은 비 값을 보였다. 이와 같이 식물플랑크톤의 종조성 및 밀도와 수질분포로 해역을 구분한 결과가 유사한 양상을 나타냈다는 것과 총 개체수를 Chl. *a*로 나눈 값은 해역의 오염 정도를 간접적으로 평가할 수 있는 지표로 활용 가능할 것으로 판단되었으나, 추후 세심한 검토가 요구되었다.

하계 조사시 진해만 전 해역의 평균 Chl. *a*의 농도는 표층이 저층보다 2배 높았으나, 영양염의 농도는 2~7배 이상의 차이로 저층에서 높게 나타났다. Dortch and Whitley(1992)는 DIN, DIP, DSI의 농도가 각각 1.0, 0.2, 2.0  $\mu\text{M}$  이하일 경우 영양염 절대 농도의 제한을 받는다고 보고하였으나, 원문만(정점 16)을 제외한 다른 조사해역에서 영양염 농도가 높게 나타나 영양염의 절대량에는 제한을 받지 않은 것으로 판단된다. 그리고 식물플랑크톤의 증식은 해수내 존재하는 영양염의 절대적인 양 뿐만 아니라 구성성분비에 의해서도 조절된다(Hecky and Kiham 1988; Howarth *et al.* 1988; Justic *et al.* 1995; Fujiki *et al.* 2004). 성분구성비에 의한 식물플랑크톤의 성장은  $\text{DIN/DIP} < 10$ ,  $\text{DSi/DIN} > 1$ 이면 질산염 제한,  $\text{DSi/DIP} > 20$ ,  $\text{DIN/P} > 20$ 이면 인산염 제한,  $\text{DSi/DIP} < 10$ ,  $\text{DSi/DIN} < 1$ 이면 규산염에 의해서 성장에 제한을 받는다(Justic *et al.* 1995; Baek *et al.* 2009). 하계 진해만의 저층의 대부분의 정점에서 영양염의 성분구성비가 제한을 받지 않을 정도로 높게 나타났으나, 식물플랑크톤의 현존량은 낮게 분포한 것은, 하계 진해만에 빈번하게 발생하는 빈산소 수괴와 더불어 잦은 강우로 인한 현탁물질의 유입, 유광층에서 높게 나타난 식물플랑크톤등에 의한 광량의 감소가 직접적인 원인이 되어 규산염과 인산염이 당 해역



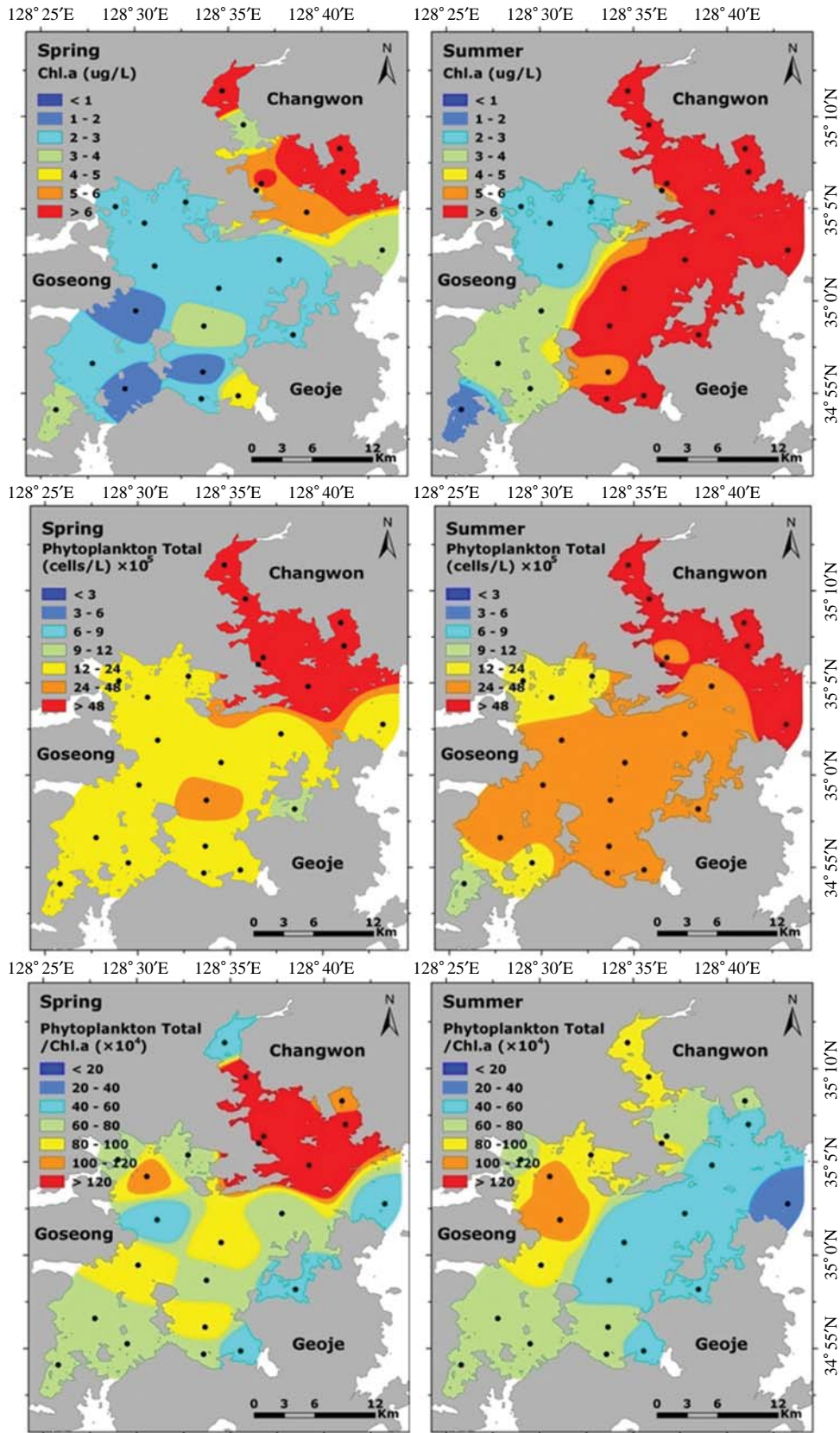
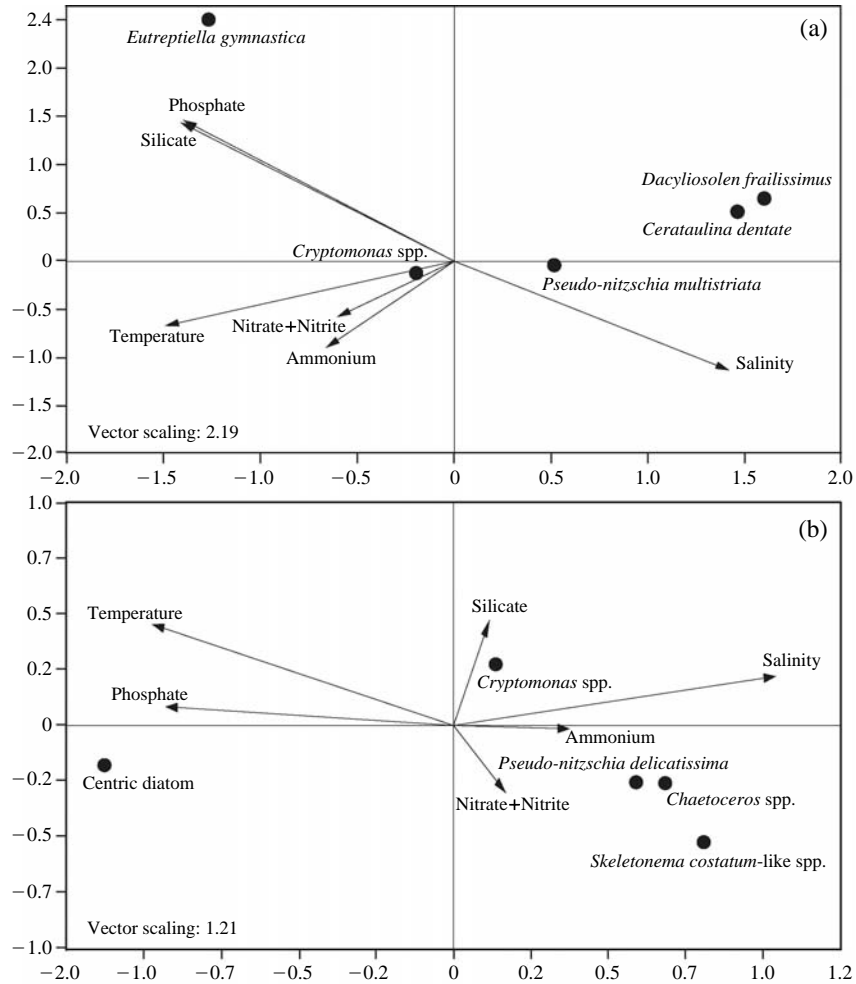


Fig. 9. Distribution of phytoplankton abundance, Chl. a, and phytoplankton abundance/Chl. a ratio in spring (left) and summer (right) in Jinhae Bay.



**Fig. 10.** Canonical Correspondence Analysis (CCA) ordination diagram with dominant phytoplankton (filled circle), and environmental factors (arrows) in spring (a) and summer (b); first axis is horizontal, second axis is vertical.

에 높게 존재하여도 규조류의 성장에 크게 기여하지 못하여 Chl. *a* 농도가 저층에서 낮게 나타난 것으로 해석된다. 식물플랑크톤 생물량과 환경요인의 다중상관분석 결과에서도 춘계에 비해 하계에는 영양염과 식물플랑크톤 생물량간의 높은 양(+)의 상관성은 나타나지 않았다. 현 등(2011)의 동계 진해만(동일한 정점)의 환경요인과 식물플랑크톤 생물량에 관한 조사결과에 의하면, 진해만은 동계 전반적으로 질소기원의 영양염이 식물플랑크톤의 성장의 제한인자로 파악되었다. 본 연구에서는 춘계에는 동계의 현 등(2011)의 보고와 같이 질산염 농도가 제한 인자로 파악되었으나, 하계에는 뚜렷한 특성을 파악할 수 없었다.

주요 우점종과 환경요인변화를 활용한 CCA 분석에서도 춘계에는 *Cryptomonas spp.*와 *Pseudo-nitzschia multistriata*가 각각 질산염과 암분에 비교적 유의한 양(+)

의 상관성을 보였고, 다중상관 분석에서도 춘계에 Chl. *a*와 질산염간의 비교적 높은 상관관계를 보였다(Fig. 10a). 특히 춘계에 우점한 규조류는 인산염과 규산염 농도에 매우 낮은 음(-)의 상관관계를 보였고, 이는 백 등(2008)의 CCA결과에서 규산염에 대한 낮은 음(-)의 상관관계가 규조류의 현저한 증식으로 높은 규산염과 인산염의 소비에 따른 결과로 분석되었으며, 본 조사의 결과와 일치하였다. 반면 하계에 우점한 *P. delicatissima*, *Chaetoceros spp.*, *S. costatum-like species*는 제4사분면에서 인접하여 분포하였다(Fig. 10b). 이러한 결과는, 환경요인의 공간분포의 차이로 인해 *P. delicatissima*, *Chaetoceros spp.*, *S. costatum-like species*의 개체수가 유사하게 나타난 것으로 해석할 수 있으나, 춘계에 비해 개체수 변화에 영향을 주는 주요 환경요인으로 해석하기는 무리가 있다.

## 적 요

2010년 진해만의 춘계와 하계를 중심으로 환경요인 변화와 식물플랑크톤의 군집구조의 상관관계에 대한 생태학적 연구를 수행하였다. 식물플랑크톤의 생물량과 환경요인과의 상관관계를 조사하기 위해 수행한 다중상관 분석과 CCA (Canonical Correspondance Analysis) 결과, 하계에 우점한 *Chaetoceros* spp., *Skeletonema costatum*-like spp., *Pseudo-nitzschia delicatissima*는 생물량 변화에 영향을 미치는 주요 요인을 선정할 수는 없었다. 반면, 춘계의 *Cryptomonas* spp.와 *Pseudo-nitzschia multistriata*는 질산염과의 양(+)의 상관관계 ( $p < 0.05$ )가 있을 것으로 판단되었다. 하계에 나타난 식물플랑크톤과 환경요인 간의 유의한 양(+) 상관관계가 나타나지 않는 것은 강우에 의해 유입된 탁도 물질등에 의한 저층의 광합성 활성의 저하와 우점종의 구성과 생물량 차이에 의해 나타난 결과로 판단되었다. 또한 환경에 적응한 우점종의 분포특성은 진해만 광역해역을 부분적으로 구분할 수 있는 생물학적 요인으로 판단되었다. 결과적으로 식물플랑크톤과 환경요인과의 상관관계는 주요 우점종의 분포와 관련이 있었고, 특히 성층화된 하계에 우점한 식물플랑크톤 분포는 해역 구분에 중요한 인자로 활용 될 수 있었다.

## 사 사

본 연구는 한국해양과학기술원 연구과제 “남해특별 관리해역의 관리를 위한 해양 생태계 건강지수 개발 (PE98745)”의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 김동선, 최현우, 김경희, 정진현, 백승호, 김영옥. 2011. 동계와 춘계 진해만 표층수질에 대한 통계분석. *Ocean and Polar Res.* 33:291-301.
- 김학균, 박주석, 이삼근, 안경호, 이필용. 1993. 마산만에 설치한 야외수조내의 식물성플랑크톤의 천이와 환경변화. *국립수산진흥원 연구보고.* 47:9-18.
- 노광수, 이인철, 김현태. 2005. 진해만 가덕수도에서의 하계 부유물질 수송량 산정. *한국해양환경공학회 2005년도 추계학술대회논문집.* 135-138.
- 백승호, 김영옥. 2010. 하계 진해만 광역조사: 식물플랑크톤 군집구조의 단기변화와 수평분포특성. *환경생물.* 28:115-124.
- 백승호, 시모데신지, 한명수, 키쿠치 토모히코. 2008. 춘계와 하계의 영양염 농도와 그 구성비가 식물플랑크톤의 군집구조에 미치는 영향평가. *한국조류학회지.* 23:277-288.
- 손문호, 백승호, 주혜미, 장풍국, 김영옥. 2011. 광양만과 진해만에서 대장균 *Escherichia coli* 분포와 수질오염 특성. *환경생물.* 29:162-170.
- 양동범. 1990. 진해만의 유기물순환과 무산소 환경 발생에 관한 연구, 한국과학기술연구원.
- 임동일, 김영옥, 강민란, 장풍국, 신경순, 장 만. 2007. 한국 남해 마산만에서 수질환경의 계절적 변동과 기초생산 제한인자. *Ocean and Polar Res.* 29:349-366.
- 조경재, 최만영, 광승국, 임성호, 김대운, 박종규, 김영의. 1998. 마산-진해만 수질 부영양화 및 계절 변동. *한국해양학회지-바다.* 3:193-202.
- 조홍연, 최장원, 전시영. 2002. 진해 마산만의 성층화 및 DO 농도변화. *한국해양 해양공학회지.* 14:295-307.
- 현봉길, 신경순, 김동선, 김영옥, 주혜미, 백승호. 2011. 생물검정실험을 통한 동계 진해만 식물플랑크톤의 군집 변동 특성 파악. *한국해양학회지-바다.* 16:27-38.
- 홍석진, 이원찬, 정태홍, 오현택, 장주형, 구준호, 김동명. 2007. 2003년 하계 진해만 수질 개선을 위한 생태계 모델링. *해양환경안전학회.* 13(2):103-110.
- Baek SH, S Shimode, HC Kim, MS 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.
- Barone R and L Naselli-Flores. 2003. Distribution and seasonal dynamics of Cryptomonads in Sicilian water bodies. *Hydrobiologia.* 502:325-329.
- Chisholm SW. 1992. Phytoplankton size. pp.213-237. In *Primary Productivity and Biochemical Cycles in the Sea* (Falkowski PG and AD Wdddhead eds.). Plenum. New York.
- Clay BL, P Kugrens and RE Lee. 1999. A revised classification of Cryptophyta. *Bot. J. Linn. Soc.* 131:131-151.
- Dodge JD. 1982. Marine dinoflagellates of the British Isles. Her Majesty's Stationery Office, London, 303pp.
- Dortch Q and TE Whitley. 1992. Does nitrogen or silcon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions? *Cont. Shelf. Res.* 12:1293-1309.
- Fisher TR, ER Peele, JW Ammerman and L Harding. 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 82:51-63.
- Friebele ES, DL Correll and MA Faust. 1978. Relationship between phytoplankton cell size and the rate of orthophosphate uptake: in situ observation of an estuarine population. *Mar. Biol.* 45:39-52.
- 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.
- Hecky RE 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 RW, R Marino and JJ Cole. 1988. Nitrogen fixation in freshwater, estuarine, and marine ecosystems. 2. Biogeochemical controls. *Limnol. Oceanogr.* 33:688-701.
- Jager CG, S Diehl and GM Schmidt. 2008. Influence of water-column depth and mixing on phytoplankton biomass, community composition, and nutrients. *Limnol. Oceanogr.* 53: 2361-2373.
- 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.
- Kim JH, KJ Lee, T Suzuki, YS Kang and HK Poong. 2010. Seasonal variability of lipophilic shellfish toxins in bivalves and waters, and abundance of *Dinophysis* spp. in Jinhae Bay, Korea. *J. Shellfish Res.* 29:1061-1067.
- Lee CK and WA Lim. 2006. Variation of Harmful Algal Blooms in Masan-Chinhae Bay. *ScienceAsia.* 32:51-56.
- Lee HO, KH Choi and MS Han. 2003. Spring bloom of *Alexandrium tamarense* in Chinhae Bay, Korea. *Aquat. Microb. Ecol.* 33:271-278.
- Lee JB, DY Kim and JA Lee. 1998. Community dynamics and distribution of dinoflagellates and their cysts in Masan-Chinhae Bay, Korea. *J. Fish Sci. Technol.* 1:283-292.
- Olli K, AS Heiskanen and J Seppala. 1996. Development and fate of *Eutreptiella gymnastica* bloom in nutrient-enriched enclosures in the coastal Baltic Sea. *J. Plankton. Res.* 18: 1587-1604.
- Parsons TR, Y Maita and CM Lalli. 1984. *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis.* Pergamon Press, New York. 173pp.
- Ptacinik R, S Diehl and S Berger. 2003. Performance of sinking and nonsinking phytoplankton taxa in a gradient of mixing depths. *Limnol. Oceanogr.* 48:1903-1912.
- Redifeld AC, BH Ketchum and FA Richards. 1963. The influence of organisms on the composition of seawater. pp.26-77. In 1963. *The Sea, Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas Vol. 2* (Hill MN ed.) Interscience, NY.
- Reynold CS. 1984. *The Ecology of Freshwater Phytoplankton.* Cambridge University Press, Cambridge. 384pp.

Received: 2 August 2012

Revised: 1 September 2012

Revision accepted: 4 September 2012