

진해만 서부해역에서 식물플랑크톤의 시·공간적 분포특성

유만호 · 송태윤¹ · 김은수² · 최중기*

인하대학교 해양학과

¹(주)에코선, ²한국해양연구원

The Characteristics on the Spatial and Temporal Distribution of Phytoplankton in the Western Jinhae Bay, Korea

MAN HO YOO, TAE YOON SONG¹, EUN SOO KIM² AND JOONG KI CHOI*

Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

¹ECOCEAN Co., Ltd., Industrial Technology R&D Center, 7-27, Songdo-Dong Yeonsu-Gu, Incheon 101-403, Korea

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

남해 진해만 서부해역에서 2003년 11월부터 2004년 8월까지 식물플랑크톤의 시·공간 분포특성 및 해양환경요인과의 상관성을 분석하였다. 대부분의 해양환경요인은 균일한 공간분포를 보였고, 식물플랑크톤 종조성은 돌말류와 외편모류가 주를 이루었으며 개체수는 연간 $16 \times 10^3 \text{ cells } l^{-1} \sim 5,845 \times 10^3 \text{ cells } l^{-1}$ (평균 $555 \times 10^3 \text{ cells } l^{-1}$)의 범위로 변화하였다. 식물플랑크톤의 대발생은 고현항 내측수역에서 하계에 발생하였다. 계절별 식물플랑크톤 현존량은 2월(동계)과 8월(하계)에 높고, 5월(춘계)과 11월(추계)에 낮았다. 연구기간동안 *Skeletonema costatum*, *Akashiwo sanguinea*, *Pseudo-nitzschia pungens*, *Dactyliosolen* sp., *Leptocylindrus danicus*, cryptomonads 등이 식물플랑크톤 우점종으로 출현하였다. 특히, *S. costatum*은 하계에 극우점하여 출현하였으며, *A. sanguinea*(추계와 춘계), *Pseudo-nitzschia* sp.(하계), *Guinardia striata*(춘계), 미동정 편모류(하계), cryptomonads(춘계) 등은 특정시기에 높은 우점률을 보였다. Chl *a* 농도는 연간 $0.6 \mu\text{g} \cdot l^{-1} \sim 16.7 \mu\text{g} \cdot l^{-1}$ (평균 $3.4 \mu\text{g} \cdot l^{-1}$)로 나타났다. 정준대응분석 결과 진해만 서부해역은 크게 두 개의 수역(고현항 내측과 외측)으로 나뉘지며, 높은 밀도의 식물플랑크톤 현존량과 Chl *a* 농도를 보인 고현항 내측의 경우 수온, 용존산소, 영양염류(SiO_2 , TN, TP and etc.) 등이 식물플랑크톤 군집에 영향을 미치는 해양환경 요인으로 나타났다. 고현항 내측수역은 동계에 가조도와 칠천도 사이의 중앙 수역까지 확장되어 나타났다.

We studied spatial and temporal distributions of the phytoplankton and their relationships to physico-chemical environmental factors in the western Jinhae Bay, Korea from November 2003 to August 2004. In most cases, physico-chemical environmental factors showed homogeneous distribution. The phytoplankton communities were composed of mainly diatoms and dinoflagellates, and their standing crops ranged from $16 \times 10^3 \text{ cells } l^{-1}$ to $5,845 \times 10^3 \text{ cells } l^{-1}$ (with a mean value of $555 \times 10^3 \text{ cells } l^{-1}$). The bloom of phytoplankton was observed in Gohyun Port in the summer. Seasonal variation of phytoplankton standing crops was higher in winter and summer than in spring and autumn. The dominant species were *Skeletonema costatum*, *Akashiwo sanguinea*, *Pseudo-nitzschia pungens*, *Dactyliosolen* sp., *Leptocylindrus danicus*, cryptomonads and etc. Especially, *S. costatum* was predominant in the summer and *A. sanguinea* (spring and autumn), *Pseudo-nitzschia* sp. (summer), *Guinardia striata* (spring), unidentified flagellates (summer) and cryptomonads (spring) appeared to be an opportunistic species. Concentrations of Chl *a* ranged from $0.6 \mu\text{g} \cdot l^{-1}$ to $16.7 \mu\text{g} \cdot l^{-1}$ (with a mean value of $3.4 \mu\text{g} \cdot l^{-1}$). The results of the canonical correspondence analysis implies the study area was grouped into the 2 water masses (inner and outer waters of Gohyun Port) and inner waters had higher abundance and Chl *a* concentration than outer waters. Also, phytoplankton standing crops were related with temperature, DO and nutrients (SiO_2 , TN, TP and etc.) in inner waters. Inner water-mass of Gohyun Port expanded between Gacho Is. and Chilchon Is. during the winter.

Keywords: Phytoplankton, Seasonal Distribution, Environmental Factors, CCA Analysis

*Corresponding author: jkchoi@inha.ac.kr

서 론

해양생태계는 다양한 생물군으로 형성되어 있으며, 그 중 식물플랑크톤은 무기물을 유기물로 전환시켜주는 해양의 생산자로서 해양생태계 먹이망의 하위 영양단계를 구성하는 주요 인자이다. 해양의 기초생산자인 식물플랑크톤은 광량, 수온, 영양염 및 미량원소 등의 물리화학적 환경요소 변화에 의해 성장률 및 생산성이 결정된다. 이들 환경요인은 식물플랑크톤의 시·공간적 분포를 결정짓는 중요한 요인이다.

남해는 해안선이 불규칙하고 리아스식 해안으로 이루어진 반폐쇄성 해역으로 파랑이 적고 해수유동이 원활하여 인근에 양식장이 밀집되었으며(박 등, 2000), 육상의 공업단지과 도시로부터 산업폐수와 생활하수 등 다량의 오염물질이 유입된다. 남해의 대부분 연안수역은 외해수와 해수교환이 원활하지 못한 내만특성으로, 매년 *Cochlodinium* 적조와 같은 식물플랑크톤 대증식이 하계에 강하게 발생한다(이 등, 2003). 특히 수심이 낮고, 조류의 소통이 원활하지 않은 특성을 보이는 본 연구해역인 진해만 서부해역은 굴, 진주담치, 피조개 등 패류양식이 성행하여 수산자원을 위한 연안해역관리가 중요한 해역이나, 오랜 양식활동으로 오염물질 축적과 저질환경의 악화로 환경용량이 초과하여 오염이 심화되고 있는 대표적 해역이다(국립수산진흥원, 1991).

진해만과 마산만에서의 식물플랑크톤에 관한 연구는 1970년대 후반부터 적조가 빈번하게 발생하면서 다른 지역에 비해 활발하게 이루어졌으며, 최근까지 적조 및 계절 변동 등의 식물플랑크톤 군집변화를 중심으로한 해양생태조사가 주로 이루어졌다(조 등, 2006; Pae and Yoo, 1991; 조 등, 1998; 윤, 2000). 또한 진해만과 마산만에서 물리화학적 환경요인과 식물플랑크톤의 상관관련성 규명을 위한 연구는 대부분 단순 상관분석을 통한 해석으로 해양환경과 식물플랑크톤과의 복합적인 관계성을 규명하기에는 한계성을 보여준다(Yoo, 1991; 조 등, 2006). 따라서 본 연구는 진해만 서부해역의 식물플랑크톤 분포특성을 살펴보고, 해양환경 요인과 식물플랑크톤의 관계를 다변량 분석방법인 정준대응분석(CCA)을 통하여 알아보려고 하였다.

재료 및 방법

식물플랑크톤 및 이화학적 환경조사는 2003년 11월, 2004년 2월, 5월 및 8월(총 4회)에 남해 진해만 서부해역(34°53.8'N ~ 35°01'N, 128°29.7'E ~ 128°37.4'E)의 총 18개 정점에서 실시하였다(Fig. 1).

식물플랑크톤 시료채집은 Kitahara type 네트(망목 20 µm)로 수직 예인하여 채집 후, 50 ml 병에 넣어 Lugol's 용액으로 고정하였다. 고정된 시료는 영구 프레파라트를 제작 후, 광학현미경(Olympus BX50)×200 ~ ×1,000에서 동정하였으며, 심(1994), Rines and Hargraves(1988), Tomas(1997), Round *et al.*(1990) 등을 참조하였다. 식물플랑크톤 현존량 시료는 Niskin 채수기를 이용하여 해수 500 ml을 채수한 후, 폴리에틸렌병에 넣고 Logol's 용액으로 고정하였다. 고정된 시료는 침전법을 이용하여 20 ml로 농축 후, Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 계수하였다. Chl *a*는 현장해수 300 ml을 여과지(47 mm GF/F, Whatman)에 필터한 후, 필터 여과지에 90% 아세톤용액 10 ml을 넣고 24시간 동안 냉

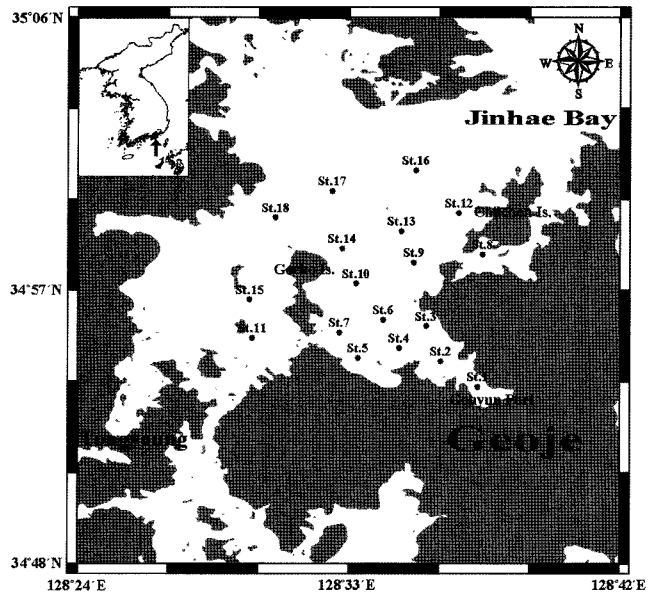


Fig. 1. A map showing the study area in the western region of Jinhae Bay, Korea.

암소 상태에서 추출하였다. 추출된 시료는 형광분석기(Turner design, 10-AU)를 이용하여 측정하였고, 측정된 자료는 Parsons *et al.*(1984)의 계산식을 이용하여 분석하였다. 연구해역의 식물플랑크톤 군집 분석은 종조성, 현존량 및 Chl *a*, 우점종 및 우점률을 분석하였고, 이화학적 환경요인으로는 수온, 염분, Secchi수심(Tr.), pH, 용존산소(DO), 규산염(SiO₂), 총인(TP), 총질소(TN) 등을 분석하였다. 연구해역의 해양환경요인이 식물플랑크톤 군집에 미치는 효과를 파악하기 위해, 정준대응분석(CCA, Canonical Correspondence Analysis)을 실시하였으며, 다변량 통계 패키지 프로그램(MVSP, ver. 3.1)을 이용하여 수행하였다. 식물플랑크톤 자료는 전체 현존량의 3% 이상을 차지하는 자료를 취하였고, 식물플랑크톤 자료 및 해양환경자료는 정규분포를 위해 로그변환[log(X+1)]하여 분석하였다. Table 3은 정준대응분석 결과(Fig. 9)에서 사용된 식물플랑크톤 조성의 약호를 나타낸다.

결 과

해양환경 요인

각 해양환경 요인의 평균 및 표준편차에 대하여 Table 1에 나타내었다. 수온(Temp.)은 8월이 가장 높았고 2월에 가장 낮았으며, 11월과 5월은 평균 16.9°C로 유사하게 나타났다. 또한 연구해역 내의 수온편차는 최대 0.6°C 미만으로 정점간 균일한 수온분포를 보였다. 염분(Sal.)도 수온과 같이 시기별로 균일한 공간분포를 보였으며, 계절에 따른 염분변화도 평균 33.01 psu을 나타낸, 2월을 제외하고는 비교적 유사한 염분분포를 보였다. 일반적으로 우리나라는 강수량이 집중되는 7-8월에 해수 염분이 낮아지는 특징이 있다. 하지만 본 연구에서는 강수의 영향을 벗어나는 시기에 조사하여 뚜렷한 염분변화가 나타나지 않았다. Secchi수심(투명도)은 연중 고현황 인근해역(정점 1~3)에서 평균 4.0 m로 다른 연구해역(평균 6.4 m)보다 낮았고, 가조도 서부해역(정점 11, 15)에서 평

Table 1. The seasonal variation of environmental factors (Aver. ±SD).

Date		Nov.-03	Feb.-04	May-04	Aug.-04
Variable	unit				
Tr.	(m)	6.6±2.1	5.7±1.4	4.8±1.0	5.9±1.9
pH	-	8.03±0.08	8.01±0.06	8.37±0.06	8.32±0.05
DO	(mg/L)	6.8±0.7	9.4±0.9	9.2±0.5	8.4±0.7
Temp.	(°C)	16.9±0.2	6.6±0.4	16.9±0.5	27.1±0.6
Sal.	(psu)	31.70±0.20	33.01±0.22	31.86±0.61	32.10±0.31
SiO ₂	(uM)	18.21±5.16	0.50±0.51	14.79±5.10	2.68±5.00
DIN	(uM)	4.77±2.94	1.29±1.23	5.16±16.83	2.20±3.32
TP	(uM)	1.40±0.28	0.49±0.12	0.66±0.41	1.40±0.80
TN	(uM)	17.80±3.61	8.22±1.57	17.47±14.09	20.98±17.69
SS	(mg/L)	1.4±1.7	0.6±0.7	1.6±1.6	1.4±1.1
COD	(mg/L)	2.5±0.5	2.3±1.0	2.8±0.5	2.2±0.5

Table 2. Summary statistics for the first two axes from CCA of phytoplankton species, station and environmental factors in the western region of Jinhae Bay, Korea.

	Nov.-03		Feb.-04		May-04		Aug.-04	
	Axis1	Axis2	Axis1	Axis2	Axis1	Axis2	Axis1	Axis2
Eigenvalues	0.07	0.05	0.16	0.03	0.13	0.10	0.15	0.09
Percentage	21.59	16.38	49.72	9.23	22.80	17.78	26.63	16.59
Cum. Percentage	21.59	37.97	49.72	58.95	22.80	40.58	26.63	43.22
Cum. Constr. Percentage	27.85	48.98	66.17	78.45	29.03	51.67	35.31	57.30
Spec.-env. correlations	0.96	0.96	0.92	0.87	0.99	0.88	0.97	0.89

Table 3. Code labels used in the CCA diagram (Fig. 9). Bold labels are dominant species.

Code	Nov.-03	Feb.-04	May-04	Aug.-04
a	<i>Actinopterychus senarius</i>	<i>Asterionellopsis glacialis</i>	<i>Chaetoceros debilis</i>	<i>Chaetoceros borealis</i>
b	<i>Chaetoceros affinis</i>	<i>Chaetoceros debilis</i>	<i>Chaetoceros didymus</i>	<i>Chaetoceros debilis</i>
c	<i>Chaetoceros constrictus</i>	<i>Chaetoceros didymus</i>	<i>Chaetoceros</i> sp.	<i>Chaetoceros didymus</i>
d	<i>Chaetoceros danicus</i>	<i>Chaetoceros</i> sp.	<i>Chaetoceros</i> spp.	<i>Chaetoceros</i> sp.
e	<i>Chaetoceros debilis</i>	<i>Dactyliosolen</i> sp.	<i>Eucampia zodiacus</i>	<i>Chaetoceros</i> spp.
f	<i>Chaetoceros pseudocrinitus</i>	<i>Leptocylindrus danicus</i>	<i>Guinardia striata</i>	<i>Coscinodiscus</i> sp.
g	<i>Chaetoceros</i> sp.	<i>Navicula</i> sp.	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	<i>Cylindrotheca closterium</i>
h	<i>Cylindrotheca closterium</i>	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>
i	<i>Nitzschia</i> spp.	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.
j	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	<i>Rhizosolenia setigera</i>	<i>Euglena</i> sp.	<i>Skeletonema costatum</i>
k	<i>Rhizosolenia</i> sp.	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Schroederia setigera</i>	cryptomonads
l	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	cryptomonads	<i>Ceratium fusus</i>
m	<i>Thalassiosira</i> spp.	cryptomonads	<i>Ceratium fusus</i>	<i>Cochlodinium</i> sp.
n	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	unid. flagellates	<i>Dinophysis fortii</i>	<i>Gonyaulax fragilis</i>
o	<i>Euglena</i> sp.		<i>Akashiwo sanguinea</i>	<i>Akashiwo sanguinea</i>
p	cryptomonads		<i>Heterocapsa triquetra</i>	unid. flagellates
q	<i>Ceratium fusus</i>		<i>Katodinium glaucum</i>	
r	<i>Akashiwo sanguinea</i>		<i>Prorocentrum triestinum</i>	
s	<i>Gyrodinium spirale</i>		<i>Scrippsiella trochoidea</i>	
t	<i>Katodinium glaucum</i>		unid. flagellates	
u	unid. flagellates			

균 8.1 m로 높았다. 규산염(SiO₂) 및 용존무기질소(DIN)는 연중 고현항 인근해역에서 타 해역에 비해 높은 농도를 보였고, 계절별로는 규산염농도가 11월과 5월에 높았고 2월과 8월에 낮은 농도를 보였으며, 용존무기질소는 5월에 가장 높았고 2월에 가장 낮았

다. 총질소(TN)는 대부분 고현항 인근해역에서 다소 높은 농도를 보였고, 계절적으로는 5월과 8월에 높은 농도분포를 보였고 2월에 다소 감소된 농도분포를 보였다. 그밖에 용존산소(DO), pH, 총인(TP) 및 화학적 산소요구량(COD)은 해역내의 분포가 조사되지

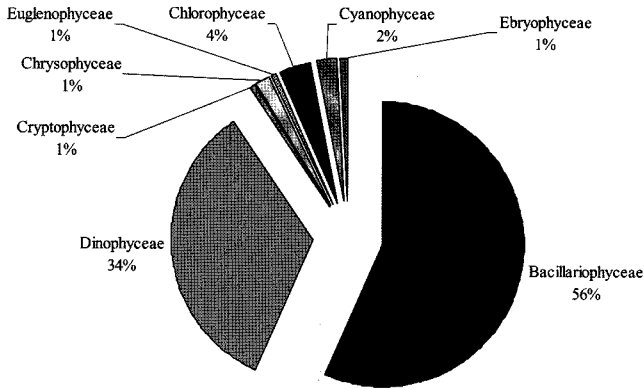


Fig. 2. Species composition of phytoplankton in western region of Jinhae Bay, Korea.

별로 비교적 균일하게 나타났으며, 계절적으로도 큰 변화를 보이지 않았다.

식물플랑크톤

식물플랑크톤 군집 조성. 식물플랑크톤은 총 64속 136종이 출현하였고, 이 중 돌말류(Bacillariophyceae)가 36속 77종으로 가장 많은 종이 출현하였다. 다음으로는 와편모류(Dinophyceae)가 18속 46종으로 많이 출현하였고, 이밖에 황색편모조류(Chrysophyceae), 은편모류(Cryptophyceae), 유글레나류(Euglenophyceae) 등이 출현하였다(Fig. 2). 계절별 식물플랑크톤 군집조성 변화는 돌말류가 11월에 가장 높게 출현하였고, 5월에 가장 낮게 출현하였으나 연중 약 50% 이상의 높은 출현율을 보였다. 와편모류는 8월에 다소 높은 출현율을 보인 시기를 제외하곤, 출현율에 큰 변화를 보이지 않았다. 기타그룹(Others)은 5월에 16%로 가장 높게 나타나, 계절별 식물플랑크톤 군집조성 변화는 돌말류와 와편모류가 주를 이루며, 기타그룹이 특정 시기에 증감하며 변화하는 특징을 보였다(Fig. 3).

식물플랑크톤 현존량. 식물플랑크톤 현존량은 연간 16×10^3 cells l^{-1} ~ $5,845 \times 10^3$ cells l^{-1} (평균 554×10^3 cells l^{-1})으로 변화하며, 계절별 식물플랑크톤 현존량 변화는 2월이 11월과 5월에 비해 다소 높은 밀도를 보였고, 8월이 평균 $1,387 \times 10^3$ cells l^{-1} 로 *Skeletonema*

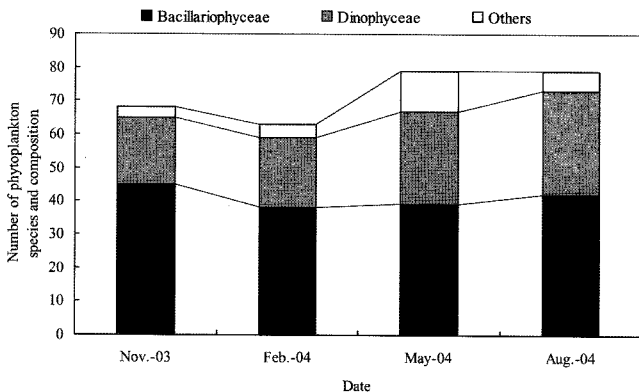


Fig. 3. Seasonal changes of phytoplankton composition in the western region of Jinhae Bay, Korea.

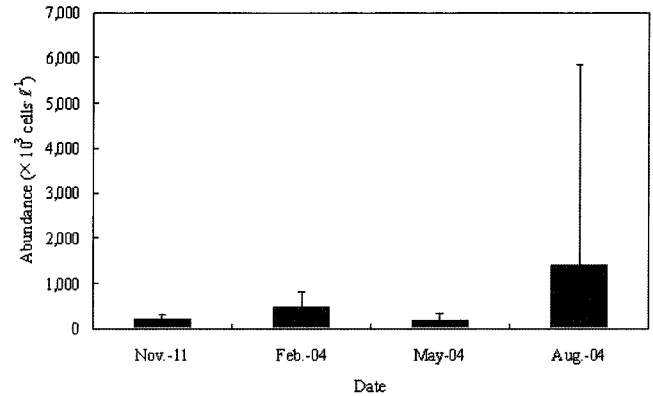


Fig. 4. Seasonal variations of phytoplankton standing crops in the western region of Jinhae Bay, Korea. Error bars are min. and max.

*costatum*의 대증식이 발생하며 가장 높게 나타났다(Fig. 4). 식물플랑크톤 공간분포는 연중 고현항 인근해역(정점 1 ~ 6)에서 높은 현존량을 보이거나, 가조도 서부해역(정점 11, 15)에서 현존량이 낮게 나타나는 공간분포특성을 보였다. 특히 하계에는 고현항 인근해역에서 평균 현존량이 $2,794 \times 10^3$ cells l^{-1} 로 폭발적인 대증식이 발생하였다(Fig. 5).

식물플랑크톤 우점종 분포. 본 연구해역은 *Skeletonema costatum*이 5월을 제외하고, 연중 높은 우점률로 출현하며, *Akashiwo sanguinea*(11월), *Dactyliosolen* sp.(2월), *Pseudo-nitzschia* sp.(2월과 5월), *Guinardia striata*(5월) 및 미동정 편모류(8월) 등이 특정 시기에 높은 우점률로 출현하였다(Table 3). 11월 식물플랑크톤 우점종 분포는 고현항 내측수역(정점 1~4)과 가조도 북부수역(정점 17, 18)에서 *S. costatum*이 높은 현존량을 보이며 우점종으로 출현하였고, 그 밖에 수역에서는 *A. sanguinea*이 높은 우점률을 보였다. 2월에도 11월과 같이 *S. costatum*이 고현항 내측수역에서 높은 현존량을 보이며 우점종으로 출현하였고, 가조도 서부수역(정점 11, 15)에서도 *S. costatum*이 높은 우점률을 보였다. 5월 고현항 인근수역(정점 1~7)에서는 cryptomonads와 미동정 편모류가 주를 이루며 출현하였고, 그 밖에 수역에서는 *G. striata*, *P. pungens*, *A. sanguinea*와 cryptomonads와 같이 우점종으로 출현하였다. 8월에는 고현항 내측수역(정점 1~5) 및 칠천도 남부수역(정점 8)에서 *S. costatum*이 높은 우점률로 출현하였고, 특히 고현항 내측수역에서는 *S. costatum*이 10^6 cells l^{-1} 정도로 매우 높은 현존량을 보였다. 그 밖에 수역에서는 미동정 편모류 및 *Pseudo-nitzschia* sp.가 높은 우점률을 보였다. 진해만 서부해역에서의 계절별 식물플랑크톤 우점종의 공간분포는 대부분 고현항 내측수역(정점 1~4)과 가조도 인근수역(정점 11, 15, 17, 18) 또는 칠천도 남부수역(정점 8)으로 나뉘어 우점종 및 우점률의 차이를 보였다. 특히 2월의 경우, 정점 1~3은 *S. costatum*이 전체 식물플랑크톤 현존량의 83% 이상을 차지하며 극우점하여 나타났다(Fig. 6).

Chl a 농도분포. Chl a 농도는 연간 0.6 ~ $16.7 \mu g l^{-1}$ (평균 $3.4 \mu g l^{-1}$)로 변화하였으며, 식물플랑크톤 현존량 변화와 달리 11월에 가장 높고, 2월에 가장 낮았다(Fig. 7). 11월에는 *A. sanguinea*의 현존량이 높게 나타난 정점 2, 3 및 9에서 $10 \mu g l^{-1}$ 이상으로 높은 Chl a 농도를 보였으며, 8월의 경우 고현항 내만해역(정점 1~3)의 Chl

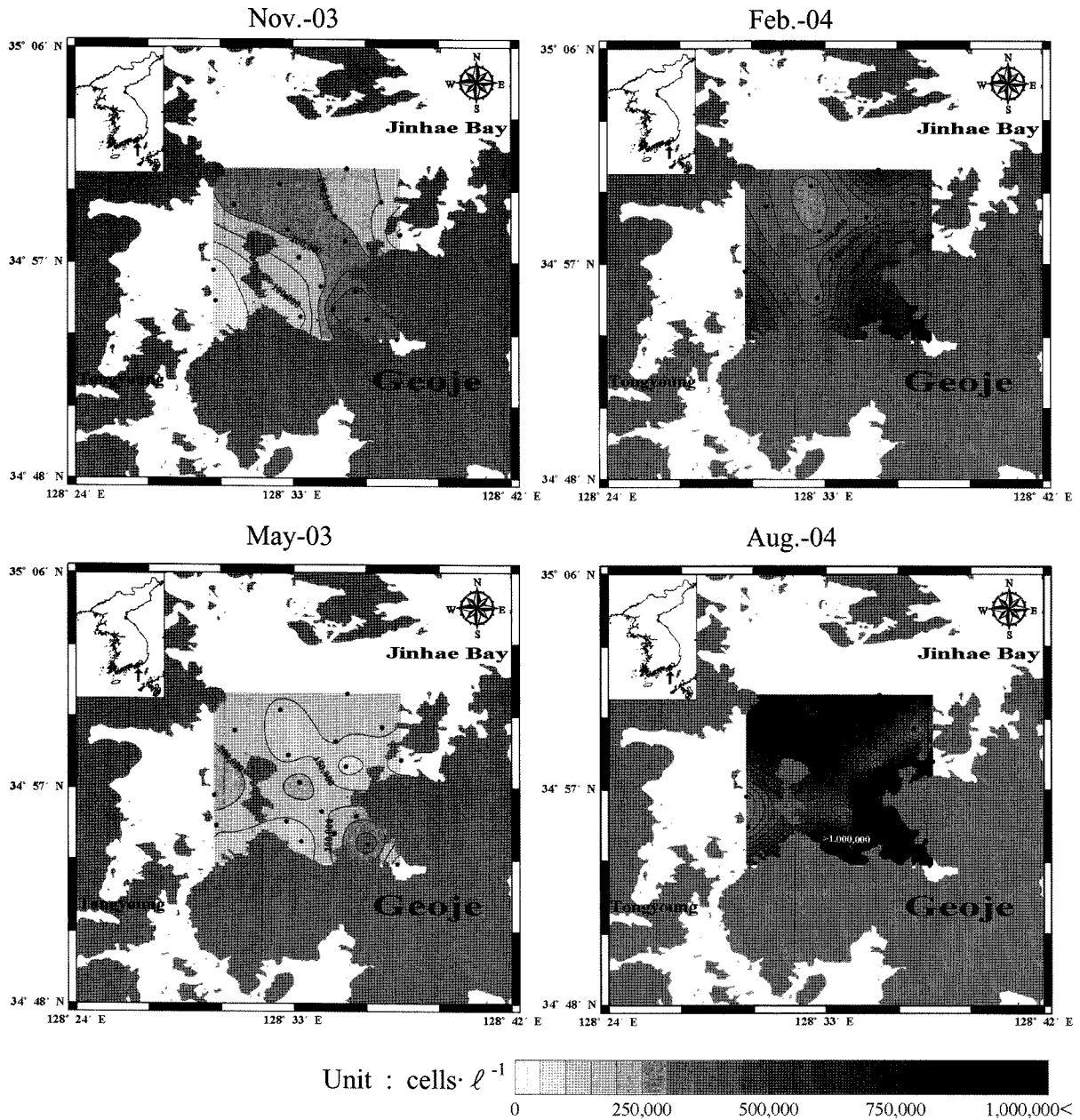


Fig. 5. Spatial distribution of phytoplankton in the western region of Jinhae Bay, Korea.

a 농도가 식물플랑크톤 대증식으로 인해 다른 해역에 비해 높게 나타나, 다른 시기에 비해 두 시기가 공간적으로 Chl *a* 농도분포 차가 컸다(Fig. 8).

식물플랑크톤과 해양환경요인의 관계분석

해양환경자료와 식물플랑크톤 현존량 자료를 기초로 정준대응 분석(CCA)을 한 결과, 제 1축(Axis 1)은 0.07(11월)~0.16(2월)의 범위로 고유치(eigenvalues)가 시기별로 변화하였고, 제 2축(Axis 2)은 0.03(2월)~0.10(5월)의 범위를 보였다(Table 2). 전체 자료에 대한 제 1, 2축의 누적 기여율(cum. percentage)은 37.97%(11월)~58.95%(2월)의 범위를 나타냈다. 식물플랑크톤과 해양환경요인의 상관계수는 제 1축이 0.92(2월)~0.99(5월)의 범위를 보였

고, 제 2축은 0.87(2월)~0.96(11월)의 범위로 제 1, 2축 모두 0.87 이상으로 매우 높은 상관성을 보였다. 11월 고현항 내만 해역(정점 1~3)과 정점 12는 수온, 총인, 총질소, 규산염 등과 높은 상관성을 보이는 해역으로 주로 *Chaetoceros*속의 식물플랑크톤이 높은 상관성을 보였다. 2월은 11월에 비해 고현항 내만 해역이 가조도와 칠천도 사이 해역까지 확장된 형태로 정점 1~10까지 유사한 수괴특성을 보였다. 반면 *Chaetoceros*속과 높은 상관성을 나타낸 11월과 달리 2월은 우점종으로 출현한 *Dactyliosolen* sp., *Pseudo-nitzschia* sp. 등과 높은 상관성을 보였다. 5월에는 고현항 내만해역(정점 1~3)과 칠천도 인근해역(정점 8, 12)이 유사한 수괴특성을 보여, 11월과 유사한 수괴특성을 보였다. 11월과 2월에 고현만 해역과 높은 상관성을 나타낸 식물플랑크톤은 *Chaetoceros*속과

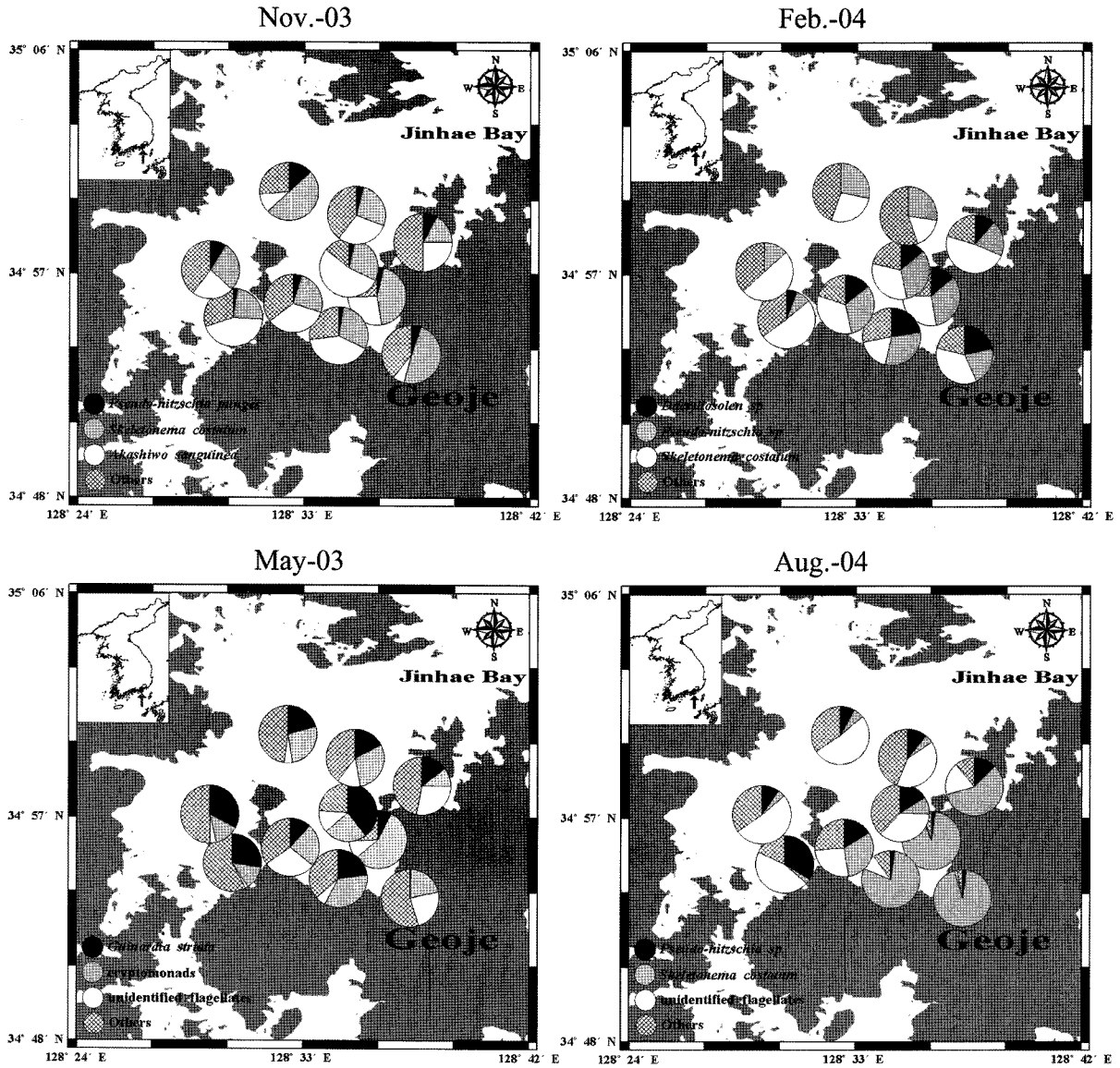


Fig. 6. Spatio-temporal distribution of dominant species in the western region of Jinhae Bay, Korea.

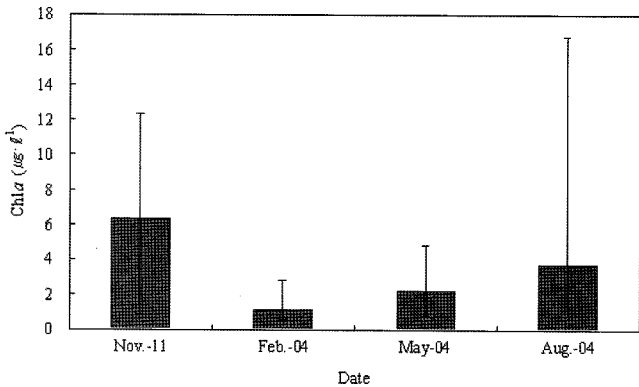


Fig. 7. Seasonal variations of Chl a concentration in the western region of Jinhae Bay, Korea. Error bars are min. and max.

Dactyliosolen sp., *Pseudo-nitzschia* sp. 등 주로 돌말류(Diatoms)인 반면 5월의 경우, *Heterocapsa trigueta*, *Ceratium fusus*, *Prorocentrum*

triestinum 등 주로 외편모류(dinoflagellates)가 높은 상관성을 보였다. 8월은 *Skeletonema costatum*이 극우점하여 나타난 고현항 내만해역(정점 1~4)이 다른 해역과 구별되었고, 수온, 염분, 용존 산소 등과 높은 상관성을 보였다. 고현항 내만 해역은 연중 수온과 높은 상관성을 보이며, 그밖에 용존산소, 영양염류 등이 식물 플랑크톤과 높은 상관성을 보였다(Fig. 9).

토 의

본 해역에 출현한 식물플랑크톤 출현종수는 광양만에서 조사된 137 종(Cho et al., 1994)과 유사하고, 진해만 동부해역에서 조사된 154 종(여와 박, 1997) 보다는 다소 낮은 종수를 보였다. 남해 해역에서는 연중 돌말류가 높은 우점률로 출현하고, 특정시기에 외편모류나 식물성 편모조류 등이 단기적으로 높게 출현하는 양상으로(윤과 고, 1995; 윤, 1999, 2000), 본 연구에서도 돌말류가

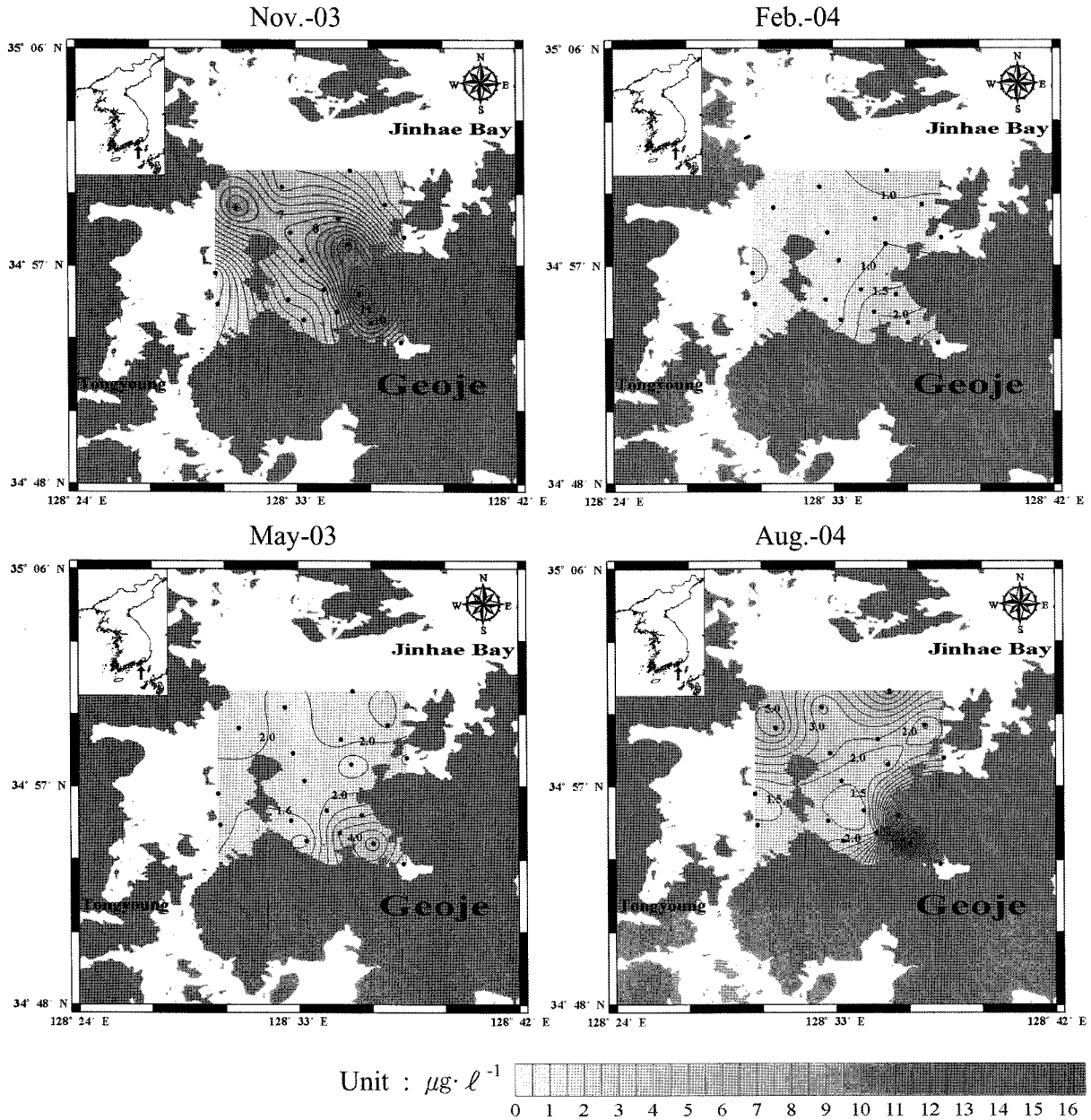


Fig. 8. Spatial distribution of Chl *a* concentration in the western region of Jinhae Bay, Korea.

총 출현종수의 57%를 차지하는 가장 큰 분류군으로 나타나 일반적인 연안환경의 특징을 보여주었다. 외편모조류 역시 본 해역의 주요 분류군으로 총 출현종수의 34%를 차지하였다. 식물플랑크톤 현존량은 $9 \sim 5,845 \times 10^3 \text{ cells l}^{-1}$ 의 큰 변동범위로 평균 $535 \times 10^3 \text{ cells l}^{-1}$ 을 나타내어, 여와 박(1997)이 조사한 $202 \times 10^3 \text{ cells l}^{-1}$ 보다 두 배 이상 높았다. 보통 연안해역의 식물플랑크톤은 봄과 가을에 대발생이 일어나는 것이 일반적이나(Zingone *et al.*, 1995; Carstensen *et al.*, 2004), 본 연구해역의 식물플랑크톤 현존량은 동계와 하계에 대발생을 보였다. 한국 남해 연안 해역은 낮은 수심으로 활발한 해수혼합과 충분한 광량 등의 해양환경 특성으로 인하여, 동계에 높은 현존량이 쉽게 관찰되어 왔고(윤과 고, 1995; 윤, 1999), 여와 박(1997)에 의하면 하계 대발생은 장마 이후 많

은 담수 유입과 함께 공급된 영양염류가 주된 요인이라고 보고하였다. 특히 동계, 하계 대발생은 고현항 내측수역에서 매우 두드러졌고, 춘계와 추계에도 조사해역 중 가장 높은 현존량 밀도를 나타냈다. 식물플랑크톤 Chl *a* 농도는 $0.6 \sim 16.7 \mu\text{g l}^{-1}$ (평균 $3.4 \mu\text{g l}^{-1}$)의 범위로 식물플랑크톤 현존량과 같이 고현항 내측수역이 대부분 높은 Chl *a* 농도를 보였고, 그 밖에 수역에서는 국지적으로 높은 Chl *a* 농도를 보였다. 계절별 Chl *a* 농도는 추계와 하계에 높았고 동계와 춘계에 낮아, 식물플랑크톤 현존량 변화와 다소 차이를 보였다. Chl *a* 농도는 식물플랑크톤 종조성 및 해양환경요인에 따라 차이를 보이며(Marisol and Catalan, 2000; Aponasenko *et al.*, 2006), 본 연구에서도 계절에 따른 식물플랑크톤 우점종, 종조성, 해양환경요인의 변화로 인해 식물플랑크톤 현존량과 Chl *a*

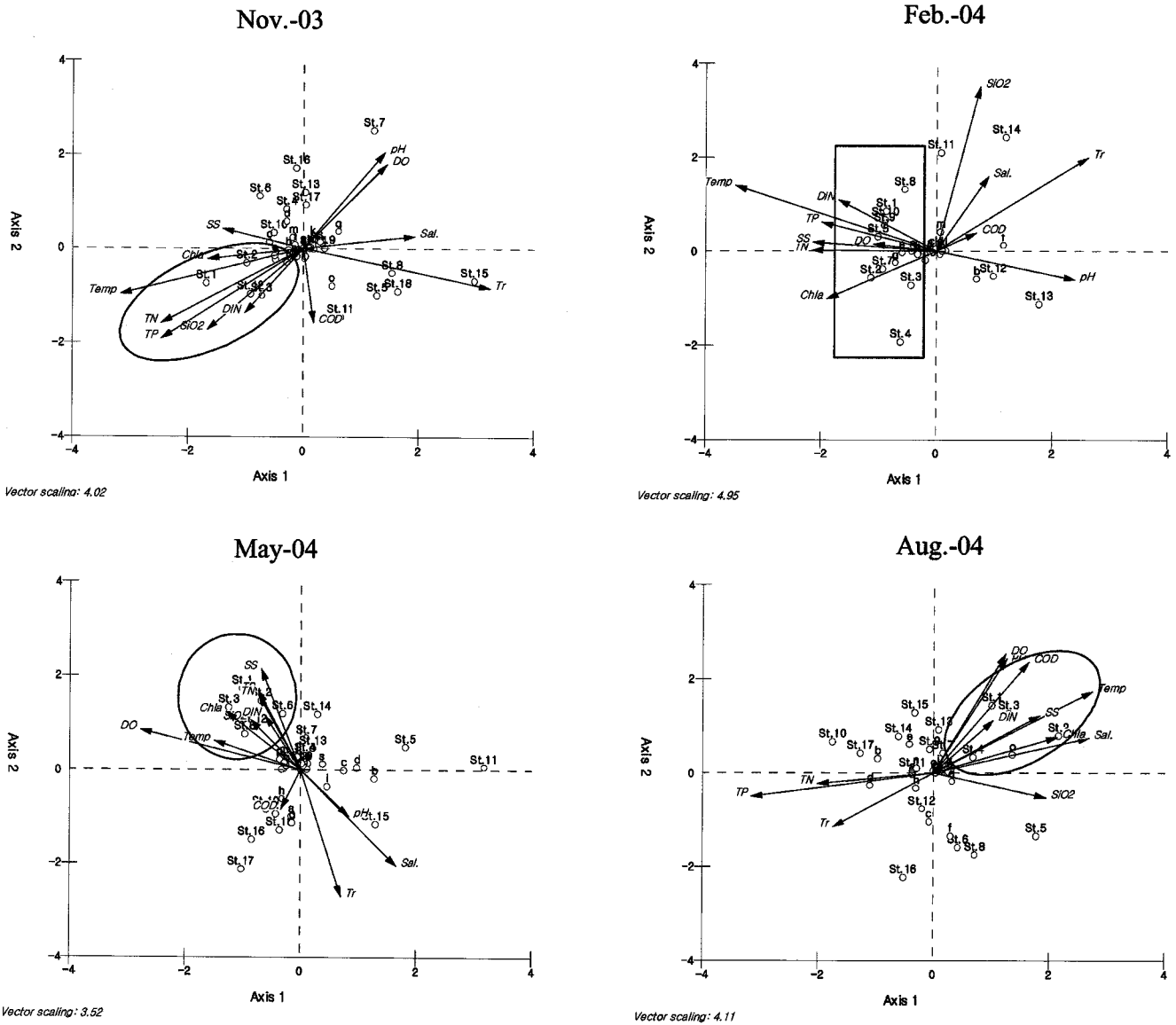


Fig. 9. Canonical correspondence analysis (CCA) for the correlated phytoplankton species. Arrows represent environmental factors, open circles station and phytoplankton species.

농도가 차이를 보였다.

계절별 우점종의 변화양상은 추계에는 *Skeletonema costatum*과 *Akashiwo sanguinea*, 동계에는 *S. costatum*과 *Pseudo-nitzschia* sp., 춘계에는 cryptomonads와 미동정 편모류, 하계에는 *S. costatum*과 미동정 편모류로, 해양환경 요인들의 변화에 따라 식물플랑크톤 군집구조 및 우점종 천이가 나타났다(Reynolds et al., 1983). 또한 각 계절별 우점종으로 출현한 식물플랑크톤은 높은 우점률을 보여, 몇몇 소수종에 의해 식물플랑크톤 군집이 영향을 받는 단순한 구조를 보였다. 춘계를 제외한 전 계절에 걸쳐 우점종으로 출현한 *Skeletonema costatum*은 광온·광염성으로 주로 기수역과 연안 해역에서 대표적인 종으로, 본 해역에서 연중 빈번하게 우점하는 것으로 보고되었다(여와 박, 1997). 특히 고현항 인근 해역에서 높은 우점률을 보였다. *A. sanguinea*는 외편모조류 중 높은 현존량 밀도를 보인 종으로, 추계와 춘계를 제외한 다른 계절에는

그 분포가 미약하거나 출현하지 않았다. 과거 진해만에서 조사된 적조 발생종은 1981년에는 *Karenia mikimotoi*였으나, 1981년 이후에는 *Prorocentrum minimum* 등 *Prorocentrum* 속과 *Heterosigma akashiwo*를 중심으로 발생하였고(곽 등, 2001), 일부 가조도 서부 해역에서는 유기물과 무기 영양염이 고농도로 존재하고 있어 적조가 일어나기 쉬운 해역이라 보고하였다(이 등, 2003). 그러나 본 연구기간에는 유독성 적조는 발생되지 않았다.

반폐쇄성 연안 및 하구역에서는 강으로부터 유입되는 여러 가지 물질(영양염류, 유기물 등)로 인해 쉽게 영향을 받으며(Paerl, 1997), 이곳에서 서식하는 식물플랑크톤도 해양환경 변화에 따라 그 군집 특성이 결정되어 진다(Townsend et al., 1992; Kawamiya et al., 1996; Huisman et al., 1999). 본 연구해역 중 고현항 내측수역은 반폐쇄성 연안으로 안정된 수괴를 형성하였다. 또한 하·폐수 및 담수의 영향을 다른 수역에 비해 크게 받아 DIN, TP, TN, SS

등의 일반 수질환경 농도가 다른 수역에 비해 높게 나타났다. 춘계를 제외하곤 연중 우점종으로 출현한 *S. costatum*은 낮은 광량과 고농도의 영양염류가 분포하는 연안에서 고밀도로 출현하며, 인산염 농도가 제한 요인으로 작용한다(Smayda, 1980; 이 등, 2005). 본 연구에서는 상대적으로 낮은 투명도와 높은 영양염 농도를 보인 고현항 내측수역에서 *S. costatum*이 고밀도로 출현하였다. *S. costatum* 등의 돌말류 증식에 의한 영양염 농도변화는 *S. costatum* 대증식이 발생한 하계(8월)에 규산염(SiO_2) 농도가 감소하는 것을 제외하고는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 하계에 cryptomonads 또는 미동정 편모류가 상대적으로 저염·고온, 고탁도 수역인 고현항 내만수역에서 우점하여, 고온·저염분 해역에 은 편모조류 및 편모조류가 우세하게 출현한다는 기존 연구와 동일한 결과를 보였다(이 등, 2005). 해양환경과 식물플랑크톤과의 다중상관분석 결과, 고현항 내측수역의 경우 식물플랑크톤 성장에 유리한 수온, 총인, 총질소, 용존산소, 규산염 등의 해양환경 요인과 식물플랑크톤 군집이 높은 상관성을 보여, 선행 연구와 유사한 경향을 보였다(이 등, 2003; Yoo, 1991; Banse, 1992). 또한 고현항 내만은 계절적 수괴특성에 따라 *Chaetoceros*속, *Dactyliosolen* sp., *Heterocapsa triquetra* 등이 다른 식물플랑크톤에 비해 영향을 크게 받는 종으로 나타났다.

종합적으로 볼 때, 본 연구해역은 크게 두 수역(고현항 내측과 외측)으로 구분되어지며, 고현항 외측에 비해 내측은 연중 높은 식물플랑크톤 현존량과 Chl *a* 농도를 보였다. 특히 하계 고현항 내측에서는 식물플랑크톤 현존량이 10^6 cells·l⁻¹ 이상으로 대증식이 발생하였다. 또한 계절에 따라 담수의 영향을 받는 고현항 내측수역은 가조도와 칠천도사이의 중양수역까지 그 범위가 확장되며, 식물플랑크톤은 수온, 용존산소, 영양염류 등의 해양환경 요인에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다.

사 사

본 논문을 세밀하게 심사해주신 두분의 심사위원께 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 인하대학교 BK21 생물공학융합 해양자원 산업화 사업단의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

곽승국, 최만영, 조경제. 2001. 마산-진해만에서 적조원인 편모조류의 분포와 발생빈도. *Algae*. 16(2): 315-323.
 국립수산진흥원. 1991. 연안 양식어장 환경용량 산정에 관한 연구.
 박홍식, 이재학, 최진우. 2000. 북포주변 해역 조하대 저서동물 시·공간적 분포. *바다지*. 5: 169-176.
 심재형. 1994. 한국동식물도감 -제34권 해양 식물플랑크톤편-. 문교부. 487pp.
 여환구, 박미옥. 1997. 진해만 동부 해역내 식물플랑크톤 군집과 수질환경의 계절변동. *한국환경과학회지*. 6(3): 231-238.
 윤양호, 고남표. 1995. 거금수도내 양식어장의 해양환경특성 1. 식물플랑크톤 군비의 계절변동. *한국양식학회지*. 8: 47-58.
 윤양호. 1999. 특량만 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 분포 특성. *한국환경생물학회지*. 17: 481-492.
 윤양호. 2000. 해창만의 생물해양학적 환경특성. 1. 식물플랑크톤

군집의 계절변동 및 분포 특성. *한국수산학회지*. 33(1): 43-50.
 이대인, 조현서, 이문옥. 2003. 수질 및 저질의 공간적 변동. *한국물환경학회지*. 19(6): 723-730.
 이상현, 신용식, 양성렬, 박철. 2005. 아산만 식물플랑크톤의 계절별 군집 분포 특성. *Ocean and Polar Research*. 27(2): 149-159.
 조경제, 최만영, 곽승국, 임성호, 김대운, 박중규, 김영의. 1998. 마산-진해만의 수질 부영양화 및 계절변동. *바다지*. 3(4): 193-202.
 조은섭, 김정배, 안경호, 유준, 권진노, 정창수. 2006. 2004년 한국 남해연안 해역에 출현하는 식물플랑크톤의 시·공간적 특성 조사. *한국환경과학회지*. 15(6): 539-562.
 Aponasenko, A.D., L.A. Shchur, and V.N. Lopatin. 2006. Relationship of the chlorophyll content with the biomass and disperse structure of phytoplankton. *Doklady Biological Sciences*. 412: 61-63.
 Banse, K. 1992. Grazing, temporal changes of phytoplankton concentrations and the microbial loop in the open sea. In: Falowski, P.G., Woodhead, A.D. (Eds.), Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea. Plenum Press, New York, pp.409-440.
 Carstensen, J., D.J. Conley and P. Henriksen. 2004. Frequency, composition and causes of summer phytoplankton blooms in a shallow coastal ecosystem, the Kattegat. *Limnology and Oceanography*. 49: 191-201.
 Cho, K.A., I.S. Wui and C.I. Choi. 1994. Ecological study of phytoplankton in the Kwang-Yang Bay. *J. Environ. Biol. Korea*. 12(2): 137-150.
 Huisman, J., P. van Oostveen, f.J. Weissing. 1999. Critical depth and critical turbulence : two different mechanisms for the development of phytoplankton blooms. *Limnology and Oceanography*. 44: 1781-1787.
 Kawamiya, M., M.J. Kishi, M.D.K. Ahmed and T. Sugimoto. 1996. Causes and consequences of spring phytoplankton blooms in Otsuchi Bay, Japan. *Continental Shelf Research*. 16: 1683-1698.
 Marisol F. and J. Catalan. 2000. The relationship between phytoplankton biovolume and chlorophyll in a deep oligotrophic lake : decoupling in their spatial and temporal maxima. *J. of Plankton Research*. 22(1): 91-105.
 Pae, S.J. and S.J. Yoo. 1991. Short term variability of the phytoplankton populations in Masan Bay: I. Dynamics. *The journal of the Oceanological Society of Korea*. 26(1): 67-76.
 Paerl, H.W. 1997. Coastal eutrophication and harmful algal blooms: importance of atmospheric deposition and groundwater ad "new" nitrogen and other nutrient sources. *Limnology and Oceanography*. 42: 1154-1165.
 Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. 173pp.
 Reynolds, C.S. , S.W. Wiseman, B.M. Godfrey and C. Butterwick. 1983. Some effects of artificial mixing on the dynamics of phytoplankton populations in large limnetic enclosures. *J. Plankton Research*. 5: 203-234.
 Rines, J.E.B. and P.E. Hargraves. 1988. The *Chaetoceros* Ehrenberg(Bacillariophyceae) Flora of Narragansett Bay, Rhode Island, U.S.A. 196pp.

- Round, F.E., R.M. Crawford and D.G. Mann. 1990. The diatoms. Cambridge university press. 746pp.
- Smayda, T.J. 1980. Phytoplankton species succession. p.493-570. In: The physiological ecology of phytoplankton. ed. by O. Morris. Blackwell, Oxford.
- Tomas, C.R. 1997. Identifying marine diatoms and dinoflagellates. Academic Press, Inc. 858pp.
- Townsend, D.W., M.D. Keller, M.E. Sieracki and S.G. Ackleson. 1992. Spring phytoplankton blooms in the absence of vertical water column stratification. *Nature*. **360**: 59-62.
- Yoo, K.I. 1991. Population dynamics of dinoflagellate community in Masan Bay with a note on the impact of environmental parameters. *Mar. Pollut. Bull.*, **23**: 185-188.
- Zingone, A., R. Casotti, M.R. Dalcala, M. Scardi and D. Marino. 1995. St-Martins summer: the case of and autumn phytoplankton bloom in the Gulf of Naples (Mediterranean Sea). *J. Plankton Research*. **17**: 575-593.

2007년 8월 13일 원고접수

2007년 10월 29일 수정본 채택

담당편집위원: 강성호