



Original Article

## 동해 남부, 울산 연안해역 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 분포 및 변동특성

윤양호<sup>1,†</sup> · 정달상<sup>2</sup>

<sup>1</sup>전남대학교 해양기술학부 교수

<sup>2</sup>한국농수산대학 수산양식학과 교수

# Spatio-temporal Distributions of Phytoplankton Community and It's Variation Characteristics in the Ulsan Coastal Waters, Southern East Sea of Korea

Yang Ho Yoon<sup>1,†</sup> and Dal Sang Jeong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Professor, School of Marine Technology, Chonnam National University, Daehak-Ro 50, Yeosu 56828, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Aquaculture, Korea National College of Agriculture and Fisheries, Jeonju 54874, Korea

### 요 약

울산 연안해역 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 분포 특성을 파악하기 위해 2016년 1월에서 10월까지 계절별 조사를 실시하였다. 결과, 출현이 확인된 식물플랑크톤 종은 61속 107종으로, 규조류가 63.6%의 점유율을 보여, 연간 규조류 출현 점유율이 높았으나, 여름과 가을은 와편모조류에 의한 점유율이 증가하였다. 특히 와편모조류 *Lepidodinium* sp. 및 *Tripos biceps*는 국내 미기록종으로 확인되었다. 표층 식물플랑크톤 현존량은 1.7~468.6 cells·mL<sup>-1</sup>의 범위로, 겨울 6.5 ± 3.31 cells·mL<sup>-1</sup>의 변동 폭을, 봄은 13.3 ± 17.4 cells/mL, 여름은 225.6 ± 94.8 cells·mL<sup>-1</sup>, 그리고 가을은 109.9 ± 77.1 cells·mL<sup>-1</sup>의 변동 폭으로 여름과 가을이 겨울과 봄에 비해 한 단위 높은 세포밀도를 보였다. 표층의 우점종은 겨울에 *Skeletonema costatum*-ls, *Chaetoceros curvisetus*, 봄은 *Scrippsiella trochoidea*, 여름은 *Chaetoceros compressus*, *Ch. curvisetus*, 그리고 가을은 *Ch. curvisetus*, *Chaetoceros debilis*가 차지하였다. 주성분분석 결과 울산 연안해역의 식물플랑크톤 군집은 계절에 따라 특성을 달리하는 환경 인자에 의해 지배되는 양상을 보이지만, 전체적으로 임해공업단지 영향보다 담수유입, 저층해수의 용승 등 수리적 특성에 의해 크게 지배되는 것으로 판단되었다.

**Abstract** – We carried out seasonal field survey to analyze the characteristics of phytoplankton parameters such as chlorophyll *a*, species composition, cell density and dominant species in the Ulsan coastal waters from January to October 2016. As a results, phytoplankton community consisted of 61 genera 107 species showing. Its controlled by diatoms all the year round, while summer and fall were relatively high by dinoflagellates, and the species number was low in spring, but high in autumn. In particular, dinoflagellates, *Lepidodinium* sp. and *Tripos biceps* were not recorded in Korean coastal waters. Phytoplankton cell density ranged from 1.7 to 468.6 cells·mL<sup>-1</sup>, with a variation of 6.5 ± 3.31 cells·mL<sup>-1</sup> in winter, 13.3 ± 17.4 cells·mL<sup>-1</sup> in spring, 225.6 ± 94.8 cells/mL in summer, and 109.9 ± 77.1 cells·mL<sup>-1</sup> in autumn. In other words, summer and fall showed a higher cell density than winter and spring. The seasonal succession of phytoplankton dominant species was distinct *Skeletonema costatum*-ls, *Chaetoceros curvisetus* in winter, *Scrippsiella trochoidea* in spring. *Chaetoceros compressus*, *Ch. curvisetus* in summer and *Ch. curvisetus*, *Chaetoceros debilis* in autumn. Although the biological oceanographic characteristics of the Ulsan coastal waters were different from season to season, it was thought that the environmental factors that controlling the hydrodynamics such as runoff freshwater, diffusion of outer seawater and upwelling, and the corresponding phytoplankton biomass were determined by principal component analysis (PCA).

**Keywords:** Ulsan coastal waters(울산 연안해역), chlorophyll *a*(엽록소 *a*), phytoplankton community(식물플랑크톤 군집), runoff freshwater(담수유입), upwelling(용승), principal component analysis (PCA, 주성분분석)

<sup>†</sup>Corresponding author: yoonyh@jnu.ac.kr

## 1. 서 론

연안해역은 육상에서 유입된 다양한 물질들이 해양학적 제반과정을 거치면서 외해로 전송되는 전이대 역할을 하는 있어 복잡한 해양환경 특성으로 환경변화의 농도구배가 큰 특징을 나타내는 곳이다. 연안생태계 또한 특성을 달리하는 다양한 생물조성으로 복잡한 생태구조를 보이며, 해역의 환경특성에 따라 서로 다른 생태반응을 나타낸다. 이러한 연안생태계에서 식물플랑크톤 군집은 태양 에너지를 흡수하여 생태계 내의 에너지흐름을 출발시키는 생산자로서 연안해역의 물질순환 및 생태구조를 결정하는 중요한 인자로 작용한다(Parsons *et al.*[1984]; Street and Paytan[2005]). 또한 식물플랑크톤 군집은 광량, 해수유동 및 육상 또는 물질순환에 의해 공급되는 영양염류 등 다양한 환경인자가 복합적인 작용으로 성장이 결정되기 때문에(Severiano *et al.*[2012]), 해역에서 식물플랑크톤 군집에 대한 정보는 연안해역의 생태구조 및 환경특성을 파악에 유용하게 사용된다(Garmendia *et al.*[2013]; Yoon[2016]).

울산 연안해역은 태화강, 외항강 및 회야강을 통한 담수와 생활하수 유입 및 1962년부터 조성되기 시작한 울산공업단지, 울산미포국가산업단지, 온산국가산업단지, 효문공업단지, 울산석유화학단지, 울산용연공업단지, 학남공업단지 등 대소의 많은 산업단지에서 배출되는 산업배수는 물론, 울산 연안해역의 남부해역에 위치하는 국내 최대의 원자력발전소 온배수 영향 등 다양한 오염물질 부하로 급격하게 해양수질 및 해양환경 변화가 발생하게 되었다. 때문에 해양수산부는 2000년 해양환경관리법에 근거하여 울산항을 포함하는 육지부 144.29 km<sup>2</sup> 및 해역부 56.56 km<sup>2</sup>를 울산연안 특별관리해역으로 지정하여, 해양환경관리에 세심한 관리를 요구하고 있다(Yoon[2017b]). 한편으로 과거 울산연안은 태화강을 중심으로 중금속, 유해유기오염물질, 유류오염사고는 물론 하구역의 적조, 수산자원의 폐사 등 다양한 환경문제가 발생하였던 곳이지만, 육상의 환경기초시설 및 하천환경복원사업으로 하천의 수질은 상당히 개선된 모범적인 환경개선지역이기도 하다(Yoon[2017b]).

울산연안 해역은 이러한 다양한 해양환경 특성으로 객관적 해양자료에 의한 해역이용과 관리, 그리고 환경개선 및 보전대책 수립이 필요한 해역이지만, 현재까지의 해양학적 연구결과는 매우 빈약하다. 울산연안 해역을 대상으로 한 해양학 연구는 유류오염(You *et al.*[2012]) 및 중금속 오염에 관한 연구(Sun *et al.*[2015]) 및 일부 기초생물에 관련된 연구 결과가 있다(Joo *et al.*[2011]; Kwon and Kang[2013]; Lee *et al.*[2016]; Yoon[2017a]). 그러나 울산시와 부산시 경계에 고리 원자력발전소 연안까지 확대하면, 1970년 이후 발전소 건설과 관련한 기초생물 관련 연구보고가 있지만(Choe [1972]; Yoo and Lee[1982]; Shim and Park[1986]; Shim *et al.*[1991], [1992]; Yeo and Shim[1992]; Kang[2008]; Kang and Choi[2001], [2002]; Kang *et al.*[2003]), 임해공업단지 인근해역을 포함한 광역적 조사에 따른 식물플랑크톤 군집 연구는 매우 제한적이다.

따라서 이 논문에서는 과학적 해양자료 축적이 요구되는 울산 연안해역을 대상으로 현재의 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 분포 특

성은 물론 공단가동과 관련한 해역의 경시적 식물플랑크톤 변동특성을 파악하여 울산 연안해역의 이용 및 관리는 물론, 해양환경 및 생태계 보전에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

울산 연안해역 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 분포를 파악하기 위해 2016년 겨울(1월), 봄(4월), 여름(7월) 및 가을(10월) 등 4회 조사를 실시하였다. 조사는 소형선박을 이용하여 Fig. 1의 15개 정점을 대상으로 하였고, 정점위치는 휴대용 GPS (Gelmen)로 확인하였다. 측정항목과 방법은 식물플랑크톤 생물량으로 Chlorophyll *a* (Chl-*a*) 농도는 현장에서 잠수형 형광광도계(JFE Advantech Co., Ltd, ASTD102)를 이용하여 측정하였다.

식물플랑크톤은 3L의 반동채수기를 이용하여 표층과 표층퇴적물 상부 2 m 수층의 해수(저층) 1,000 mL를 표본병에 채집하여 중성 포르미린으로 최종농도가 0.4% 되도록 고정하였다(Thronsen[1978]). 고정표본은 실험실에서 균체형 구조체가 완전히 침전할 수 있도록 단계별 48시간 이상 정치시켜 1000 mL → 100 mL → 50 ml → 10 mL의 최종농도가 되게 농축하여 검경시료로 하였다. 검경은 농축시료 0.1 mL를 가로 및 세로에 1.0 mm 간격으로 선이 들어 있는 계수관(Rigousha, No. 5608-C)에 취해 커버글라스를 하여 미분간섭

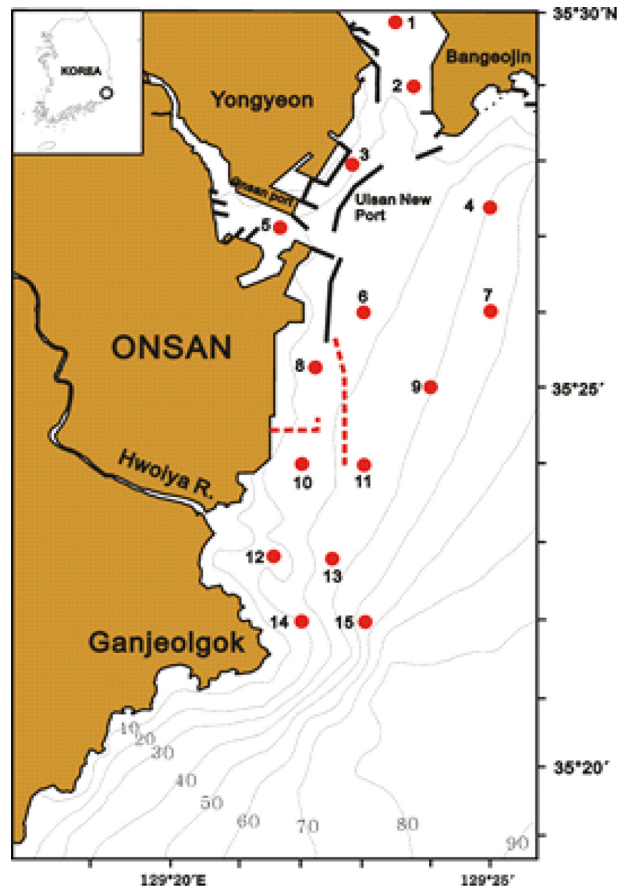


Fig. 1. Map show to sampling stations in the Ulsan coastal waters.

장치(DIC)의 광학현미경(Nikon, Eclipse 80i)에서 100X~400X 배율로 정성 및 정량분석을 실시하였다. 종 동정은 Cupp[1943], Chihara and Murano[1997], Tomas[1997], Hallegraeff *et al.*[2010] 및 Omura *et al.*[2012] 등의 문헌을 참고하였고, World Register of Marine Species(WoRMS, www.marinespecies.org)의 분류체계에 따라 종을 정리하였다. 또한 분석된 주요 식물플랑크톤 분류군 및 5% 이상 우점율을 나타내는 우점종의 세포밀도 및 잠수형 형광광도계에 부착된 센서에 의해 측정된 수온, 염분, 탁도 및 Chl-*a* 농도 자료를 이용하여 주성분분석을 실시하였다. 주성분분석은 SPSS 프로그램을 이용하여 누적기여율 70%를 기준으로 계산하였다(Yoon[1989]). 계산된 주성분분석의 인자부하량 분포도에서 식물플랑크톤 분류군 및 우점종의 출현 환경특성을 해석하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 Chlorophyll *a* 농도

울산 연안해역의 표층, 10 m 및 20 m 수층에서 Chl-*a* 농도의 계절변화는 표층에서 0.42~7.19  $\mu\text{gL}^{-1}$ 의 변동 폭으로 전체적으로 여름과 가을에 농도가 높았고, 겨울과 봄에 상대적으로 낮았다. 특히 여름에 매우 높았다. 수층별로는 전체적으로 표층이 다른 아표층보다 높아, 수층에 따른 농도 차이가 비교적 크게 나타났지만, 가을은 다른 계절과 달리 층간 변폭도 낮았으며, 표층보다 10 m 및 20 m에서 다소 높은 Chl-*a* 농도를 보였다. 그리고 표준편차에서 Chl-*a* 농도의 공간적 차이는 여름과 표층에서 상대적으로 큰 차이를 보였고, 10 m 보다 깊은 수심에서 상대적으로 낮았다(Fig. 2).

시간적으로는 겨울 표층에서 0.49~2.11  $\mu\text{gL}^{-1}$  ( $0.82 \pm 0.44 \mu\text{gL}^{-1}$ , 평균  $\pm$  표준편차로 이하 같음) 변동 폭으로 태화강 및 회야강 하구를 포함하는 연안부에서 0.5  $\mu\text{gL}^{-1}$  이하의 농도를, 개방해역에서 0.7  $\mu\text{gL}^{-1}$  전후의 농도로 보이지만, 전체적으로 1.0  $\mu\text{gL}^{-1}$  이하의 낮은 Chl-*a* 농도를 보였다. 저층은 0.49~0.85  $\mu\text{gL}^{-1}$  ( $0.59 \pm 0.10 \mu\text{gL}^{-1}$ )의 변동 폭으로 표층과는 달리 개방해역에서 0.6  $\mu\text{gL}^{-1}$  이하로 낮았고, 항만과 태화강 하구해역 등 연안부에서 0.6  $\mu\text{gL}^{-1}$  이상의 농도를 나

타내었다(Fig. 3A). 봄 표층은 0.42~1.37  $\mu\text{gL}^{-1}$  ( $0.78 \pm 0.24 \mu\text{gL}^{-1}$ )의 변동 폭으로 회야강 하구해역의 1.0  $\mu\text{gL}^{-1}$  이상 패치분포를 제외하면, 전체적으로 1.0  $\mu\text{gL}^{-1}$  이하의 농도를 보였다. 저층은 0.36~0.80  $\mu\text{gL}^{-1}$  ( $0.58 \pm 0.14 \mu\text{gL}^{-1}$ )의 변동 폭으로 표층과 같이 회야강 하구해역의 0.5  $\mu\text{gL}^{-1}$  이상 패치분포를 제외하면 0.5  $\mu\text{gL}^{-1}$  이하의 농도를 보였다(Fig. 3B). 여름 표층은 0.73~7.19  $\mu\text{gL}^{-1}$  ( $2.07 \pm 2.09 \mu\text{gL}^{-1}$ )의 변동 폭으로 높은 식물플랑크톤 세포밀도와는 달리 1.0~1.5  $\mu\text{gL}^{-1}$ 의 낮은 농도를 보였다. 다만 태화강 하구해역은 5.0  $\mu\text{gL}^{-1}$  이상의 극단적 패치분포를 나타내었다. 저층은 0.32~1.01  $\mu\text{gL}^{-1}$  ( $0.55 \pm 0.16 \mu\text{gL}^{-1}$ )의 변동 폭으로 개방해역에서 0.4  $\mu\text{gL}^{-1}$  이하, 연안부에서 0.5  $\mu\text{gL}^{-1}$  이상의 농도로 보였고, 특히 식물플랑크톤 세포밀도가 높았던 내만해역에서 1.0  $\mu\text{gL}^{-1}$  이상의 농도를 보였다(Fig. 3C). 그리고 가을 표층은 0.64~3.00  $\mu\text{gL}^{-1}$  ( $1.65 \pm 0.67 \mu\text{gL}^{-1}$ )의 변동 폭으로 회야강 하구해역과 개방해역 외측에서 2.0  $\mu\text{gL}^{-1}$  이상의 농도를, 온산항 등 연안해역에서 1.0~2.0  $\mu\text{gL}^{-1}$ 의 농도를 보였다. 저층은 1.09~3.72  $\mu\text{gL}^{-1}$  ( $2.14 \pm 0.93 \mu\text{gL}^{-1}$ )의 변동 폭으로 회야강 및 태화강 하구해역 및 연안부 그리고 개방해역의 남동부에서 2.0  $\mu\text{gL}^{-1}$  이하의 농도를 보였고, 그 외 해역에서 2.0  $\mu\text{gL}^{-1}$  이상의 농도가 관찰되었다(Fig. 3D).

#### 3.2 식물플랑크톤 군집

##### 3.2.1 종조성

2016년 울산 연안해역에서 출현이 확인된 식물플랑크톤 종은 60속 107종으로, 규조류가 39속 68종으로 63.6%, 외편모조류가 15속 32종으로 29.9%, 유글레나조류가 1속 1종으로 0.9%, 규질편모조류가 3속 4종으로 3.7%, 그리고 담수산 녹조가 2속 2종으로 1.9%의 점유율을 나타내었다(Table 1과 Fig. 4). 계절별로는 겨울에 37속 53종으로 규조류가 29속 43종으로 81.1%, 외편모조류가 5속 6종으로 11.3%, 그리고 기타 편모조류가 3속 4종으로 7.6%, 봄은 36속 49종으로 규조류가 26속 37종으로 75.5%, 외편모조류가 7속 8종으로 16.3%, 그리고 기타 편모조류가 3속 4종으로 8.2%의 출현 점유율을 보였다. 여름은 40속 66종으로 규조류가 25속 42종으로 63.6%, 외편모조류가 11속 20종으로 30.3%, 그리고 기타 편모조류가 4속 4종으로 6.1%, 가을은 46속 80종으로 규조류가 33속 56종으로 70.0%, 외편모조류가 9속 20종으로 25.0%, 그리고 기타 편모조류가 4속 4종으로 5.0%의 출현 점유율을 나타내었다(Table 1과 Fig. 5). 즉 출현 종수는 가을에 상대적으로 다양하였고, 봄에 가장 단순하였다. 수층별로는 여름을 제외하면 저층이 표층보다 다소 많은 종수가 출현하였다. 그리고 연간 규조류에 의한 출현 점유율이 높았지만, 여름과 가을은 외편모조류에 의한 출현 점유율이 증가하였다. 그리고 봄과 가을 표층에서 담수산 녹조류가 관찰되었으며, 특히 가을은 저층에서도 담수산 녹조류가 관찰되어(Table 1과 Fig. 5), 유입된 담수가 해수와 강한 혼합이 발생하고 있음을 나타내었다.

4계절 출현한 종은 *Actinoptychus senarius*, *Asterionella glacialis*, *Bidduphia sinensis*, *Chaetoceros affinis*, *Ch. curvisetus*, *Ch. lorenzianus*, *Coscinodiscus gigas*, *Dentonula pumila*, *Dictyulum brightwellii*, *Eucampia*

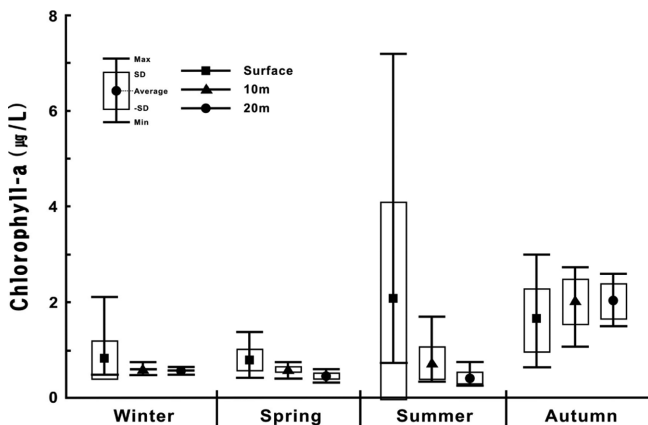


Fig. 2. Seasonal variation of chlorophyll *a* concentration in the Ulsan coastal waters.

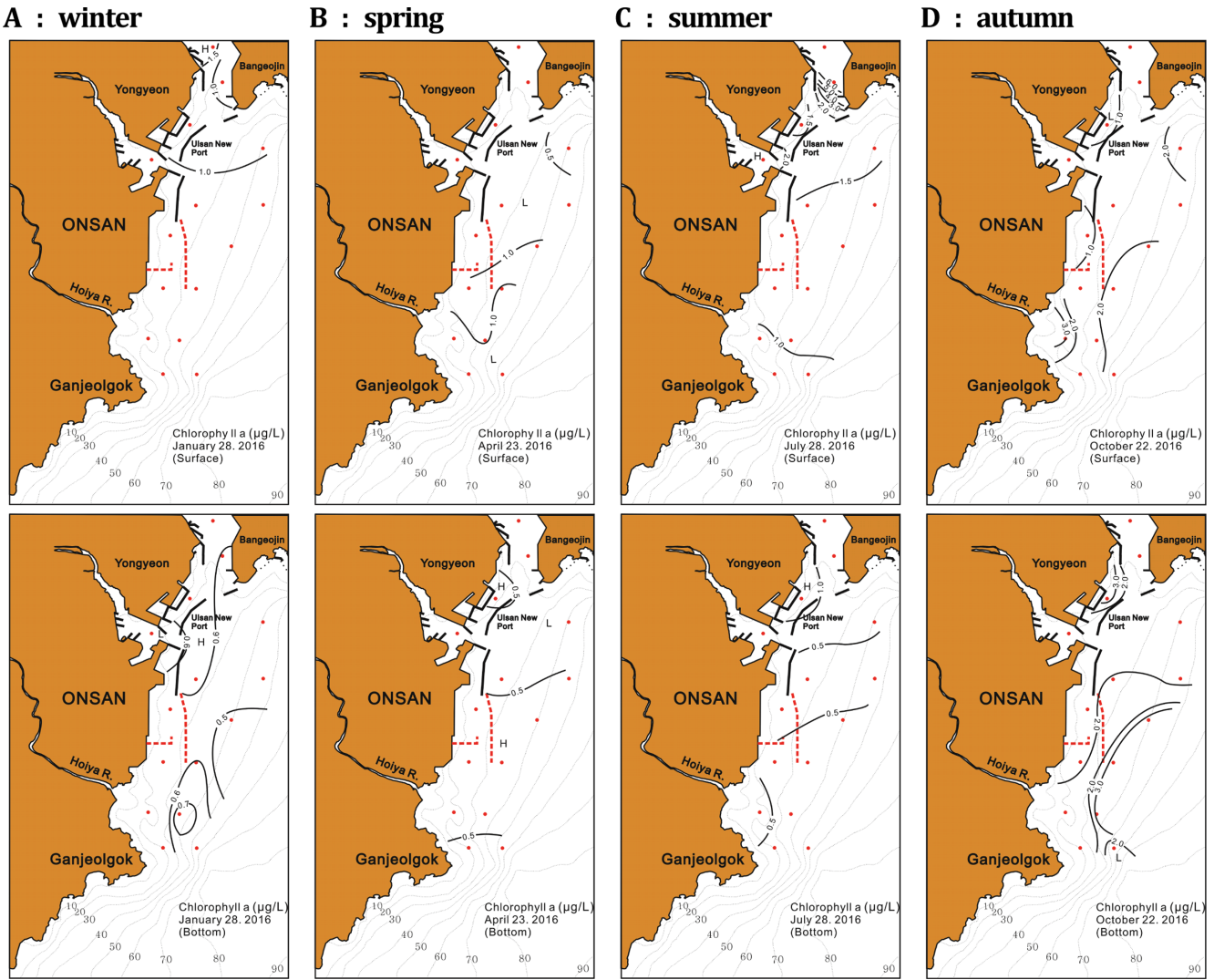


Fig. 3. Spatio-temporal distributions of chlorophyll *a* concentration at surface(upper) and bottom(lower) layers in the Ulsan coastal waters.

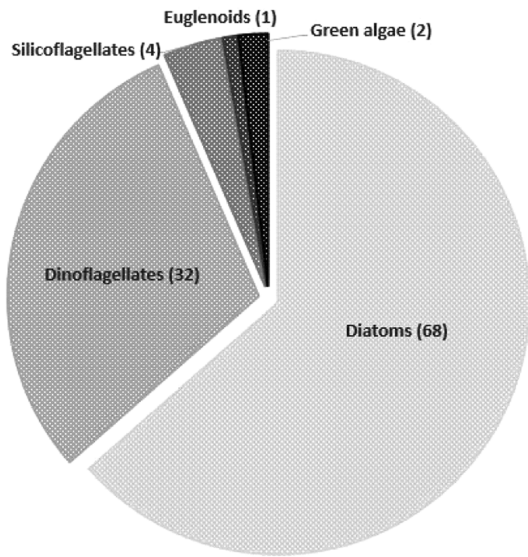


Fig. 4. Species composition of phytoplankton community in the Ulsan coastal waters.

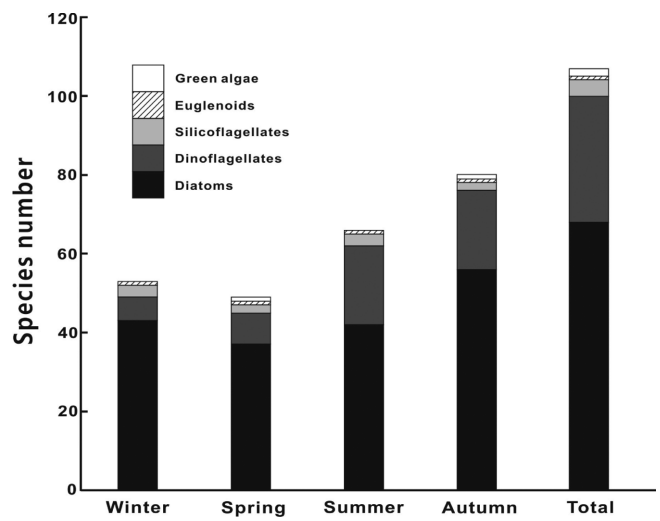


Fig. 5. Seasonal variation of phytoplankton species composition in the Ulsan coastal waters.



**Table 1.** Species composition of phytoplankton community in the Ulsan coastal waters from January to October 2016

Species name	Seasons				Species name	Seasons			
	Jan.	April	July	Oct.		Jan.	April	July	Oct.
DIATOMS					<i>Rhizosolenia seriata</i>	*	*	*	*
<i>Actinocyclus senarius</i>	*	*	*	*	<i>Rhizosolenia</i> sp.				*
<i>Asterolampra marylandica</i>	*				<i>Skeletonema coastatum</i> -ls.	*	*	*	*
<i>Asterionella glacialis</i>	*	*	*	*	<i>Stephanophyxis palmeriana</i>		*	*	*
<i>A. kariana</i>	*				<i>St. turris</i>	*			*
<i>Bacteriastrium delicatulum</i>				*	<i>Thalassionema flauenfeldii</i>	*		*	*
<i>Biddulphia sinensis</i>	*	*	*	*	<i>Th. nitzschioides</i>	*	*	*	*
<i>Campylosira cymbelliformis</i>	*		*	*	<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i>	*	*	*	*
<i>Chaetoceros affinis</i>	*	*	*	*	<i>Th. rotula</i>	*	*	*	*
<i>Ch. compressus</i>				*	<i>Th. subtilis</i>				*
<i>Ch. curvisetus</i>	*	*	*	*	<i>Trieres mobiliensis</i>	*	*	*	*
<i>Ch. danicus</i>	*		*		<i>Vibrio paxillifer</i>	*			
<i>Ch. denticulatus</i>				*	unidentified diatoms	*	*	*	*
<i>Ch. debilis</i>			*	*	PHYTOFLAGELLATES				
<i>Ch. didymus</i>			*	*	DINOFLAGELLATES				
<i>Ch. lorenzianus</i>	*	*	*	*	<i>Akashiwo sanguinea</i>	*	*	*	*
<i>Ch. messanensis</i>				*	<i>Alexandrium</i> sp.			*	
<i>Ch. pendulus</i>	*	*	*	*	<i>Ceratium trpos</i>				*
<i>Ch. pervianus</i>			*		<i>Dinophysis acuminata</i>			*	
<i>Ch. socialis</i>	*	*		*	<i>D. caudata</i>				*
<i>Chaetoceros</i> spp.	*	*	*	*	<i>Gyrodinium falcatum</i>				*
<i>Corethron hystrix</i>	*			*	<i>Karenia</i> sp.			*	
<i>Coscinodiscus gigas</i>	*	*	*	*	<i>Lepidodinium</i> sp.				*
<i>Coscinodiscus</i> spp.	*	*	*	*	<i>Lingulodinium polyedra</i>			*	
<i>Cylindrotheca closterium</i>				*	<i>Noctiluca scintillans</i>		*	*	*
<i>Dentonula pumila</i>	*	*	*	*	<i>Prorocentrum compressum</i>		*		*
<i>Dictylum brightwellii</i>	*	*	*	*	<i>P. cordatum</i>			*	
<i>Eucampia sol.</i>		*			<i>P. dentatum</i>			*	
<i>E. striata</i>	*		*	*	<i>P. gracile</i>				*
<i>E. zodiacus</i>	*	*	*	*	<i>P. micans</i>			*	*
<i>Grammatophora angulosa</i>		*			<i>P. triestinum</i>			*	*
<i>Gyrosigma</i> sp.	*	*		*	<i>Protoperdinium bipes</i>			*	
<i>Hemiaulax sinensis</i>			*	*	<i>Pt. conicum</i>				*
<i>Helicotheca tamesis</i>				*	<i>Pt. obtusum</i>				*
<i>Hobaniella longicruris</i>				*	<i>Pt. pallidum</i>			*	
<i>Leptocylindrus danicus</i>	*	*	*	*	<i>Pt. pellucidum</i>			*	
<i>Licmophora</i> spp.	*	*	*	*	<i>Pt. petagonum</i>		*		
<i>Melosira moniliformis</i>			*	*	<i>Protoperdinium</i> spp.	*	*	*	*
<i>Meuniera membranacea</i>				*	<i>Pyrocystis elegans</i>	*			*
<i>Navicula</i> spp.	*	*	*	*	<i>Pyrophacus steinii</i>			*	
<i>Neodelphineis pelagica</i>				*	<i>Scrippsiella trochoidea</i>	*	*	*	
<i>Nitzschia longissima</i>	*	*	*	*	<i>Tripes biceps</i>				*
<i>N. sigma</i>	*	*			<i>T. furca</i>	*	*	*	*
<i>Odontella aurita</i>			*	*	<i>T. fusus</i>			*	*
<i>Paralis sulcata</i>	*	*	*	*	<i>T. kofoidii</i>			*	*
<i>Planktoniella blanda</i>	*	*			<i>T. macroceros</i>				*
<i>Pleurosigma directum</i>			*	*	unidentified dinoflagellates	*	*	*	*
<i>P. normanii</i>	*	*	*	*	SILICOFLAGELLATES				
<i>Proboscica alata</i>	*		*	*	<i>Dietyocha fibura</i>	*	*	*	*
<i>Pseudo-nitzschia seriata</i>	*	*	*	*	<i>D. speculum</i>	*	*		
<i>Pn. subpacifica</i>		*	*	*	<i>Ebria trioartita</i>	*	*	*	*
<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	*	*	*	*	<i>Octactis otonarius</i>	*		*	
<i>Rhizosolenia flaccida</i>	*	*	*	*	EUGLENOIDS				
<i>Rh. fragillissima</i> f. <i>fragillissima</i>				*	<i>Eutreptiella gymnastica</i>	*	*	*	*
<i>Rh. imbricata</i>	*		*	*	GREEN ALGAE				
<i>Rh. robusta</i> var. <i>robusta</i>				*	<i>Pediastrum</i> sp.				*
					<i>Staurastrum</i> sp.		*		

*striata*, *E. zodiacus*, *Leptocylindrus danicus*, *Nitzschia longissima*, *Paralis sulcata*, *Pleurosigma normanii*, *Pseudo-nitzschia seriata*, *Rhizosolenia flaccida*, *Rh. seriata*, *Skeletonema coastatum*-ls, *Thalassionema flauenfeldii*, *Th. nitzschoides*, *Thalassiosira rotula* 등 규조류 22종과 *Akashiwo sanguinea*, *Triplos furca* 등 외편모조류 2종 및 규질편모조류 *Dictyocha fibura*, 유글레나조류 *Eutreptiella gymnastica* 등 26종이었다(Table 1). 특히 출현종에서 외편모조류 *Lepidodinium* sp. 및 *Triplos biceps*는 국내에서는 아직 보고된 적이 없는 미기록종이다.

3.2.2 현존량

울산 연안해역 식물플랑크톤 현존량은 표층에서 1.7~468.6 cells·mL<sup>-1</sup>의 범위, 저층에서 2.4~193.1 cells·mL<sup>-1</sup>의 범위로서 여름과 가을에 높고 겨울과 봄에 낮았으나, 계절에 따라서는 두 자릿수 이상 큰 차이로 변화하였다. 계절별로는 겨울 표층은 1.7~12.9 cells·mL<sup>-1</sup> (6.5±3.31 cells·mL<sup>-1</sup>)의 변동 폭을, 저층은 3.4~16.7 cells·mL<sup>-1</sup> (9.1 ± 3.60 cells·mL<sup>-1</sup>)의 변동 폭으로 낮은 세포밀도를 보였다. 봄 표층은 2.9~71.2 cells·mL<sup>-1</sup> (13.3 ± 17.4 cells·mL<sup>-1</sup>), 저층은 2.5~8.6 cells·mL<sup>-1</sup> (5.2 ± 1.95 cells·mL<sup>-1</sup>)의 변동 폭으로 겨울보다 다소 높은 세포밀도를 보였지만, 여름 표층은 78.0~468.6 cells·mL<sup>-1</sup> (225.6 ± 94.8 cells·mL<sup>-1</sup>), 저층은 4.80~141.7 cells·mL<sup>-1</sup> (20.8 ± 33.9 cells·mL<sup>-1</sup>)의 변동 폭으로 봄보다 한 단위 높은 세포밀도를 나타내었다. 그리고 가을 표층은 14.0~259.8 cells·mL<sup>-1</sup> (109.9 ± 77.1 cells·mL<sup>-1</sup>)의 변동 폭을, 저층은 28.5~193.1 cells·mL<sup>-1</sup> (109.3 ± 54.5 cells·mL<sup>-1</sup>)의 변동 폭으로 여름보다 다소 낮지만 상대적으로 높은 세포밀도를 나타내었다(Fig. 6).

시·공간분포는 겨울 표층이 육지에 인접한 연안부에서 5 cells·mL<sup>-1</sup> 이하의 낮은 세포밀도를 보였으나, 개방해역은 10 cells·mL<sup>-1</sup> 이상의 세포밀도를 보였고, 저층은 표층과 유사하여, 온산항 및 울산항 인

근해역에서 5 cells·mL<sup>-1</sup> 이하의 낮은 세포밀도를, 개방해역에서 10 cells·mL<sup>-1</sup> 이상의 상대적 높은 세포밀도를 나타내었다(Fig. 7A). 봄은 항내에 5 cells·mL<sup>-1</sup> 이하로 낮고, 개방해역에서 10 cells·mL<sup>-1</sup> 이상의 세포밀도로 높은 것은 겨울과 유사하지만, 태화강 하구해역과 방어진 남부해역에서 50 cells·mL<sup>-1</sup> 이상의 높은 세포밀도 패치가 관찰되었다. 그러나 동남부의 개방해역은 10 cells·mL<sup>-1</sup> 이하의 낮은 세포밀도를 나타내었다. 저층은 방어진 남부해역을 포함한 울산항 인근해역에서 5 cells·mL<sup>-1</sup> 이하의 세포밀도를 보였고, 회야강에서 간절곶에 이르는 남서해역에서 등수심과 평행하게 5~7 cells·mL<sup>-1</sup>의 낮은 세포밀도를 보였다(Fig. 7B). 특히 방어진 남부해역의 높은 세포밀도는 우점 외편모조류 *Scrippsiella trochoidea*에 의한 것으로 관찰되었다.

여름 표층은 전체적으로 높은 세포밀도를 보였으며, 울산 신항에서 100 cells·mL<sup>-1</sup> 이하의 세포밀도를 보이는 반면 기타 해역에서는 200 cells·mL<sup>-1</sup> 전후의 세포밀도로 높게 나타났다. 특히 태화강 하구해역의 400 cells·mL<sup>-1</sup> 이상의 세포밀도는 우점 규조류 *Chaetoceros compressus*를 주로 하는 *Chaetoceros* 속에 의한 결과였다. 저층은 표층보다 한 단위 낮은 세포밀도로 울산 신항에서 상대적으로 높은 세포밀도를 보인 반면, 항외의 상대적으로 수심이 깊은 개방해역에서 10 cells·mL<sup>-1</sup> 이하의 낮은 세포밀도를 나타내었다(Fig. 7C). 그리고 가을 표층은 여름과 같은 높은 현존량으로 태화강에서 회야강을 연결하는 울산 신항 및 온산항을 포함하는 연안부 해역에서 100 cells·mL<sup>-1</sup> 이하의 세포밀도를 보이는 반면 개방해역에서 200 cells·mL<sup>-1</sup> 이상의 높은 세포밀도가 연안으로 압박하는 양상을 나타내었다. 저층은 가장 높은 현존량으로 태화강 하구해역에서 회야강을 연결하는 항내 및 연안해역에서 100 cells·mL<sup>-1</sup> 이하의 세포밀도를 보이는 것에 반해, 개방해역의 중앙부 해역에서 100 cells·mL<sup>-1</sup> 이상의 높은 세포밀도를 보였다(Fig. 7D).

3.2.3 우점종

식물플랑크톤 우점종의 계절변화에서 겨울은 극우점종 없이 다양한 종이 낮은 우점율로 출현하여, 표층은 중심규조 *Skeletonema coastatum*-ls, *Chaetoceros curvisetus*가 10% 이상의 우점율을 보였고, 저층은 중심규조 *Paralia sulcata*가 21.5%의 우점율로 최우점 하였고, 표층에 우점 출현한 *S. coastatum*-ls, *Ch. curvisetus*도 10% 이상의 우점율을 나타내었다. 이들 우점종 이외에 표·저층에서 *Chaetoceros socialis* 및 *Thalassionema nitzschoides*가 5~10%의 낮은 우점율을 나타내었다(Table 2). 봄 표층은 외편모조류 *Scrippsiella trochoidea*가 56.8%의 우점율로 극우점 하였고, 저층은 *Paralia sulcata*가 30.2%의 우점율로 최우점하는 것을 제외하면 *Pseudo-nitzschia seriata* 및 *S. coastatum*-ls가 5% 이상의 우점율을 나타내었다. 다만 *S. trochoidea*는 태화강 하구해역인 방어진 남부해역에 제한적으로 우점하는 특징을 보였다(Table 2). 여름은 표·저층 모두에서 규조 *Chaetoceros compressus*가 각각 23.8%와 22.1%의 우점율로 최우점하였고, 차우점종은 표층에서 *Ch. curvisetus*가 11.3%의 우점율을, 저층에서는 *Th. nitzschoides*가 16.0%의 우점율로 출

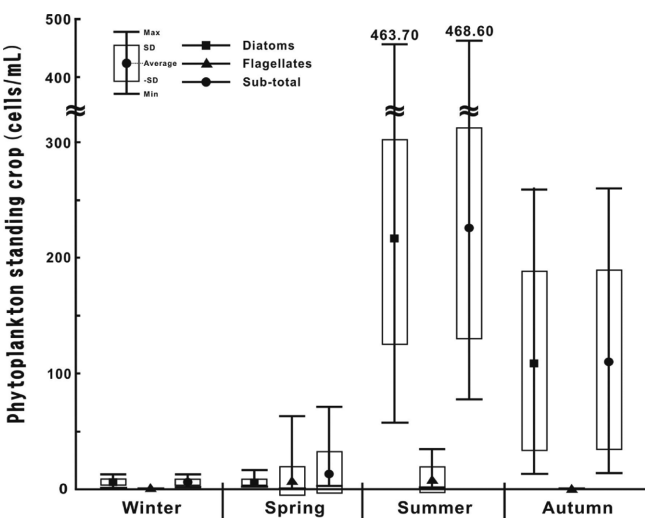


Fig. 6. Seasonal variation of phytoplankton cell density in the Ulsan coastal waters.

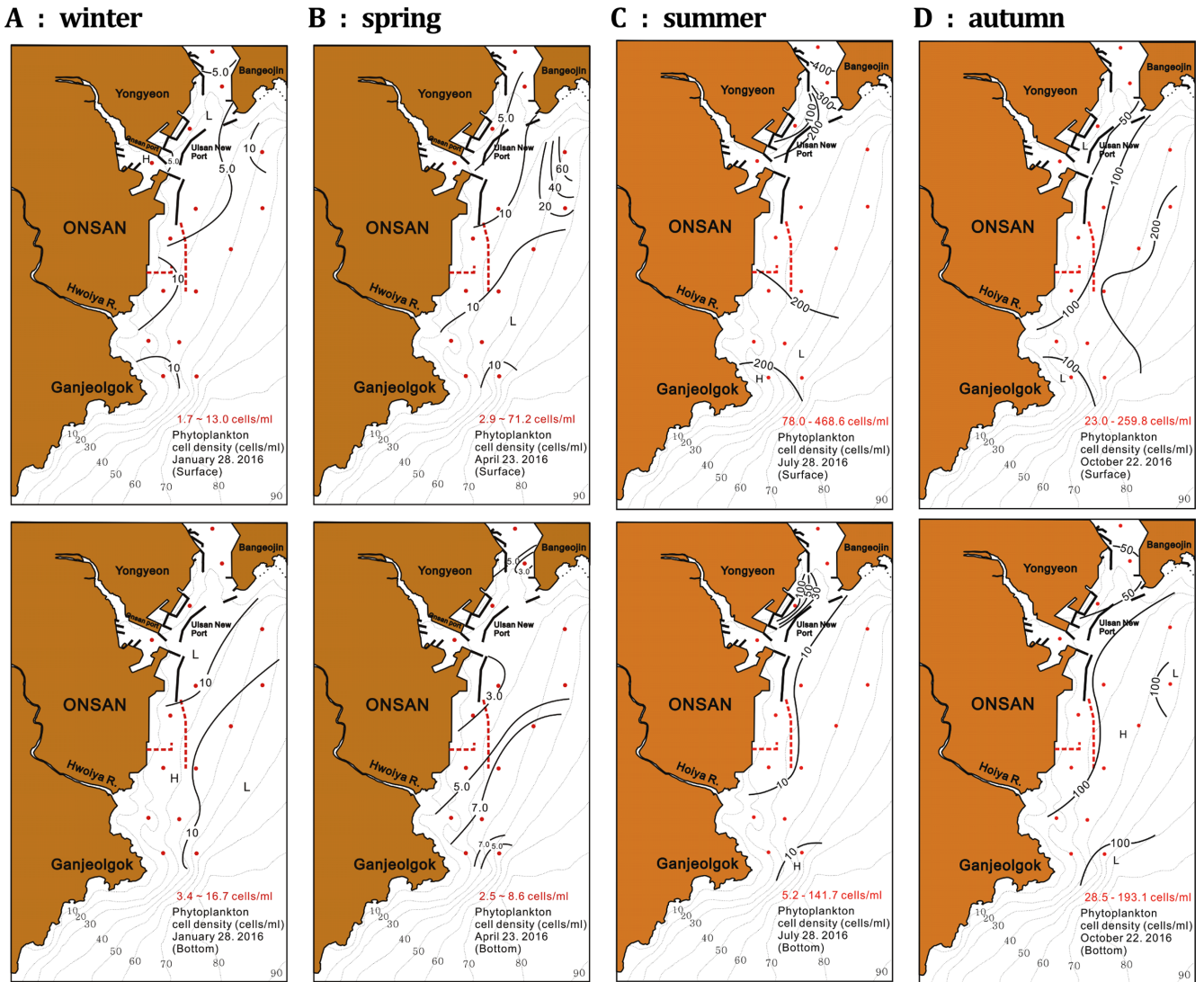


Fig. 7. Spatio-temporal distributions of phytoplankton cell density at surface(upper) and bottom(lower) layers in the Ulsan coastal waters.

Table 2. Seasonal variations of dominant species and dominance in the Ulsan coastal waters

Dominant Specieses	Jan. 2016		Apr. 2016		July 2016		Oct. 2016	
	Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom
DIATOMS	98.8	99.3	40.6	95.2	96.2	97.8	99.6	99.4
<i>Chaetoceros affinis</i>					5.1	5.1		
<i>Ch. compressus</i>					23.8	22.1		
<i>Ch. curvisetus</i>	10.6	15.3			11.3		32.0	35.8
<i>Ch. debilis</i>							12.6	15.7
<i>Ch. socialis</i>	6.8	8.5						
<i>Leptocylindrus danicus</i>					7.6		3.1	2.3
<i>Melosira moniliformis</i>							5.2	3.7
<i>Paralia sulcata</i>		21.5		30.2		9.2		
<i>Pseudo-nitzschia seriata</i>			12.6					
<i>Skeletonema costatum</i> -ls	17.7	13.1	5.2					
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	5.7	4.7				16.0		
PHYTOFLAGELLATES	1.2	0.7	59.4	4.8	3.8	2.2	0.4	0.6
<i>Scrippsiella trichoidea</i>			56.8					

현하였다. 이들 우점종 이외에 표층에서 *Chaetoceros affinis* 및 *Leptocylindrus danicus*가, 저층에서 *Ch. affinis* 및 *P. sulcata*가 10% 이하의 우점율을 나타내었다(Table 2). 그리고 가을은 표·저층에서 구조 *Ch. curvisetus*가 각각 32.0%와 35.8%의 우점율로 최우점하였고, *Chaetoceros debilis*가 표·저층에서 각 12.6%와 15.7%의 우점율로 차우점점하였다. 이외에 표층에서 *Melosira moniliformis*가 5.2%의 우점율을 나타내었다(Table 2). 특히 우점종에서 *S. costatum*-ls (like species)는 전세계 연안 및 내만해역의 대표적 부영양화 지표종으로 아직 분류학적으로 매우 불안한 위치에 있어, *Skeletonema* 속의 모든 종을 총칭하여 나타내는 명칭이다(Yamada[2013]).

3.2.4 식물플랑크톤 군집의 분포특성

울산 연안해역 식물플랑크톤의 시·공간적 분포로부터 생물해양학적 환경특성을 도출하기 위하여, 표층의 수온, 염분, 현장밀도, 탁도, Chl-*a* 농도 및 주요 식물플랑크톤 분류군 및 우점종의 세포밀도를 이용하여 계절별로 주성분분석을 실시하였다. 계절별로 계산된 주성분분석 결과는 Table 3에 나타내었다. 그리고 해석에는 제 1 및 제 2주성분까지 누적기여율이 봄을 제외하고는 60% 수준을 보이고 있어, 제 1 및 제 2주성분만을 대상으로 설명하였다(Table 3).

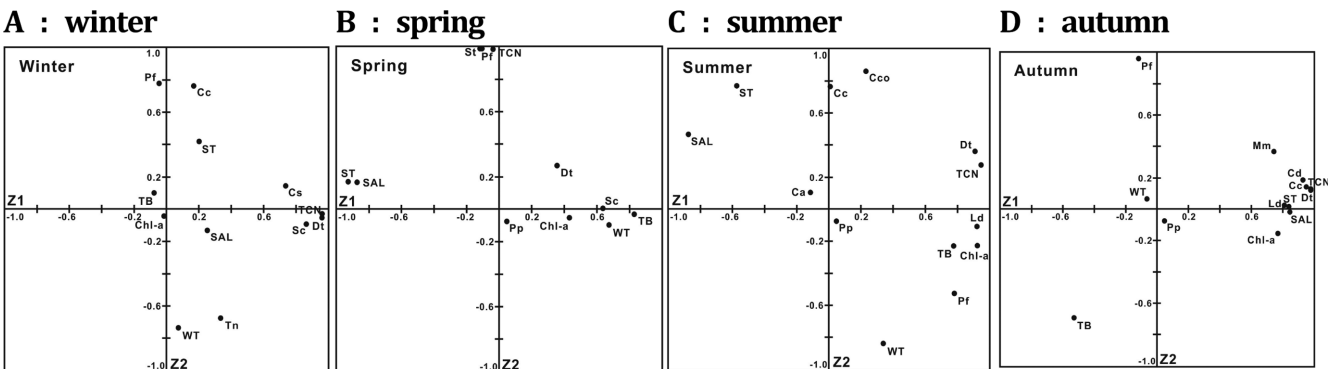
주성분분석에 의한 제 1 및 제 2주성분의 인자부하량 분포는 겨울 제 1주성분은 전체 식물플랑크톤 및 구조류, 그리고 일부 우점 구조에 강한 양의 관계를 보이는 것에서 식물플랑크톤 군집 전체와 구조류 출현을 지배하는 특성값으로 판단하였고, 제 2주성분은 식물성 편모조류와  $\sigma_t$ 에 강한 양의 관계를 보이나, 수온과 강한 음의 관

계를 보이는 것에서 저수온, 고밀도 해수를 나타내는 지표로 판단되었다. 또한 각 인자의 분포패턴에서 식물플랑크톤은 물리적 환경보다 영양염과 같은 화학적 인자에 강하게 영향을 받는 것으로 판단되었고(Parsons *et al.*[1984]), 우점종 *Chaetoceros curvisetus*는 저수온, 고밀도 해수를 선호하지만, *Thalassionema nitzschioides*는 상대적 높은 수온을 선호하는 것으로 파악되었다. 또한 Chl-*a* 농도는 식물플랑크톤 세포밀도와 유의적 인과관계가 크지 않은 것으로 파악되었다(Fig. 8A). 봄은 제 1주성분에 탁도, 수온 등의 환경인자 및 우점종 *Skeletonema costatum*-ls에 양의 관계를 보이나, 염분과 밀도에 강한 음의 관계를 보이는 것에서 상대적으로 높은 수온과 탁도를 보이는 담수유입 정도의 지표로, 제 2주성분은 우점종 외편모조류 *Scrippsiella trochoidea*와 식물성 편모조류, 그리고 전체 식물플랑크톤 세포밀도에 강한 양의 관계를 보이는 것에서 식물성 편모조류의 출현지표로 판단되었다. 각 인자의 분포패턴에서 우점종 *S. costatum*-ls는 담수유입의 강한 해수를 선호하지만, *S. trochoidea*는 해수와 담수가 혼합되는 특정해역을 선호하는 것으로 파악되었다. 또 전체 Chl-*a* 농도는 우점한 외편모조류보다 구조류의 세포밀도에 지배되는 양상을 보였다(Fig. 8B).

여름은 제 1주성분에 탁도, Chl-*a* 농도 등의 환경인자와 구조류, 식물성 편모조류 및 식물플랑크톤 지표에 강한 양의 관계를 보이나, 염분에 강한 음의 관계를 보이는 것에서 고수온, 저염분 및 고탁도의 담수유입 정도의 지표로 판단되었고, 제 2주성분은 중심구조 *Chaetoceros compressus*, *Ch. curvisetus*에 양의 관계를, 수온에 강한 음의 관계를 보이는 것으로부터 저수온, 고염분을 나타내는

**Table 3.** The results of principal component analysis (PCA) on the phytoplankton cell density, dominant species and marine environmental factors in the Ulsan coastal waters.

Principal Component	Winter			Spring			Summer			Autumn		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
Eigenvalue	3.902	2.635	1.946	4.067	3.011	1,580	6.655	2.928	1.013	7.318	1.613	1.098
Proportion (%)	32.5	22.0	16.2	37.0	27.3	14.4	55.5	24.4	8.4	61.0	13.4	9.1
Accumulative proportion (%)	32.5	54.5	70.7	30.7	64.3	78.7	55.5	79.0	88.3	61.0	74.4	83.5



WT: water temperature, SAL: salinity, ST: sigma t, TB: turbidity, TCN: total cell density, Dt: diatoms cell density, Pf: phytoflagellates cell density, Chl-*a*: chlorophyll *a*, Ca: *Chaetoceros affinis*, Cc: *Ch. curvisetus*, CCo: *Ch. compressus*, Cd: *Ch. debilis*, Cs: *Ch. socialis*, Ld: *Leptocylindrus danicus*, Mm: *Melosira moniliformis*, Pp: *Pseudo-nitzschia seriata*, Sc: *Skeletonema costatum*-ls, St: *Scrippsiella trochoidea*, Tn: *Thalassionema nitzschioides*

**Fig. 8.** Loading factors by principal component analysis (PCA) on the environmental factors and dominant species of the Ulsan coastal waters.



저층 해수의 용승을 나타내는 지표로 판단되었다(Lee and Kim[2003]; Kim *et al.*[2010]). 인자의 분포패턴에서는 규조류 및 식물성 편모조류, 우점종인 *Leptocylindrus danicus* 등은 담수유입의 강한 해역을 선호하지만, *Ch. compressus*, *Ch. curvisetus*는 저층수의 용승해역을 선호하는 것으로 파악되었다(Kim *et al.*[2014]), 또한 Chl-*a* 농도는 식물성 편모조류의 세포밀도(Honjo *et al.*[1978])에 지배되는 것으로 파악되었다(Fig. 8C). 그리고 가을은 제1주성분에 엽분, 밀도, Chl-*a* 농도 등의 환경인자와 규조류 및 우점종, 그리고 전체 식물플랑크톤 세포밀도에 강한 양의 관계를 보이지만, 탁도와 강한 음의 관계를 보이는 것에서 여름에 관찰되는 고염분의 저층해수의 용승을 표현하는 지표로 판단할 수 있었고, 제2주성분은 식물성 편모조류에 양의 관계를, 탁도에 강한 음의 관계를 보이는 것에서 식물성 편모조류의 출현 지표로 판단되었다. 인자의 분포패턴으로 규조류 및 식물성 편모조류, 그리고 우점종인 *Ch. curvisetus*, *Ch. debilis*, *L. danicus* 등은 고염분, 고밀도의 해수를 선호하며, Chl-*a* 농도는 우점종의 세포밀도에 지배되는 것으로 파악되었다(Fig. 8D).

#### 4. 고 찰

울산 연안해역의 Chl-*a* 농도는 0.42~7.19  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 로 최댓값은 상대적으로 높았지만, 전체적으로는 낮은 농도를 나타내었다. 평균값으로 울산 연안해역에서 보고된 Chl-*a* 농도의 경시적 변화는 1980년대에 높은 Chl-*a* 농도를 보이다가 1990년대 이후 감소하였다. 그러나, 2000년대 들어 재차 증가하는 경향으로 일정한 규칙성의 관찰되지 않았다(Table 4). 이러한 Chl-*a* 농도 변화는 조사해역 및 정점 수의 불일치 등에 의한 영향도 있지만, 전체적으로는 1980년대부터 본격 가동되기 시작한 울산공업단지의 영향으로 수질환경의 변화에 따라 시·공간적으로 식물플랑크톤이 극지적 패치분포를 보이고 있기 때문이다(Haury *et al.*[1978]).

식물플랑크톤 출현 종수의 경시적 변화는 1970년대 110종의 규조류가 보고된 이래(Yoo and Lee 1982), 1980년대 120~185종(Yeo and Shim[1992]), 1990년대 258~301종(Kang and Choi[2001], [2002])

등 시간의 경과와 함께 증가하였다. 그러나 2010년대에는 133종(Yoon[unpublished Data]) 및 87종(Yoon[2017a])으로 감소하였고, 이 연구에서는 107종이 출현 하였다(Table 4), 이러한 변화는 울산 연안해역은 임해공업단지가 본격 가동 되면서 수질변화와 함께 식물플랑크톤 군집에도 변화를 보여, 출현 종이 증가하였지만, 배출 규제 등 수질관리가 강화되면서 종수가 감소하는 것으로 판단할 수도 있지만, 2000년대 이전 조사에서는 플랑크톤 네트채집에 의한 정성분석과 채수법에 의한 정량분석을 별도로 실시하고 있는 것에 반해, 2010년 이후 조사해서는 채수법에 의한 정성 및 정량분석이 동시에 이루어지면서 발생하는 내용(Sournia[1978]) 및 연구자에 따른 동정범위의 차이에서 발생하는 것으로 판단할 수 있다.

세포밀도는 1.7~468.6  $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ 로 시·공간적 변동 폭이 크지만, 울산 연안해역 식물플랑크톤 세포밀도의 경시적 변화는 1960년대 0.1~10  $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$  (Choe[1972]), 1970년대 및 1980년대에는 각각 0.1~500  $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ 와 0.1~9,000  $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ 로 급격하게 증가하였고(Yoo and Lee[1982]; Yeo and Shim[1992]), 2000년대 6~1,600  $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$  (Joo *et al.*[2011]), 2010년대는 연구해역 및 시점에 따라 0.5~500  $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$  및 0.1~2,000  $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$  (Lee *et al.*[2016]; Yoon [2017a])로 1980년대 이후 해역에 따른 변동 폭은 크게 나타났다(Table 4).

식물플랑크톤 세포밀도의 경시적 변화에서 보여지는 불규칙성은 Chl-*a* 향에서 논의한 것과 같이 1978년 4월 고리원전 1호기 및 1980년대 울산산업단지 준공, 가동이후 울산연안 해역의 해양환경 변화와 맥을 같이 한다. 그러나 울산 연안해역은 상대적으로 수심 변화가 큰 개방된 해역이며, 계절에 따른 용승 및 소형 하천에 의한 담수유입 등으로 영양염 공급의 일정하지 않아 식물플랑크톤이 국지적인 패치분포가 크게 나타나는 것(Haury *et al.*[1978])으로 보여 진다. 또한 세포밀도가 겨울과 봄에 비해 여름과 가을이 단위가 다른 변동을 보이는 것 역시 육상에서 유입되는 영양염 공급과 해수확산 및 저층해수의 용승에 따른 결과라 할 수 있다(Lee and Kim[2003]; Kim *et al.*[2010]; Kim *et al.*[2014]). 용승현상에 대해서는 울산 연안해역에서 동시에 측정된 수온, 염분에 의한 T-S diagram에서 여름 표층이 봄이나 가을보다 낮은 수온과 높은 염분을

**Table 4.** Temporal variations of phytoplankton community in the Ulsan coastal waters

Survey periods	Species number	Cell density ( $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ )	Biomass (mean) (Chl- <i>a</i> , $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Reference
1960s	-	0.04 ~ 15.5	-	Choe [1972]
1970s	110	0.18 ~ 524.9	-	Yoo and Lee [1982]
1980s	120	1.65 ~ 9,866	-	Yeo and Shim [1992]
	-	-	1.89 ~ 12.68 (6.21)	Shim <i>et al.</i> [1991]
1990s	258	-	-	Kang and Choi [2001]
	301	0.18 ~ 2,632	0.94 ~ 4.43 (2.57)	Kang and Choi [2002]
2000s	-	6.0 ~ 1,602*	0.30 ~ 10.57*	Joo <i>et al.</i> [2011]
	107	1.7 ~ 468.6	0.42 ~ 7.19	this study
2010s	84	2.4 ~ 335.2	0.06 ~ 5.81	Yoon [2017a]
	-	12.0 ~ 425.5*	0.5 ~ 3.1*	Lee <i>et al.</i> [2016]
	133	0.77 ~ 2,400	0.31 ~ 19.45	Yoon (unpublished Data)

\*values calculated from mean and standard deviation of references

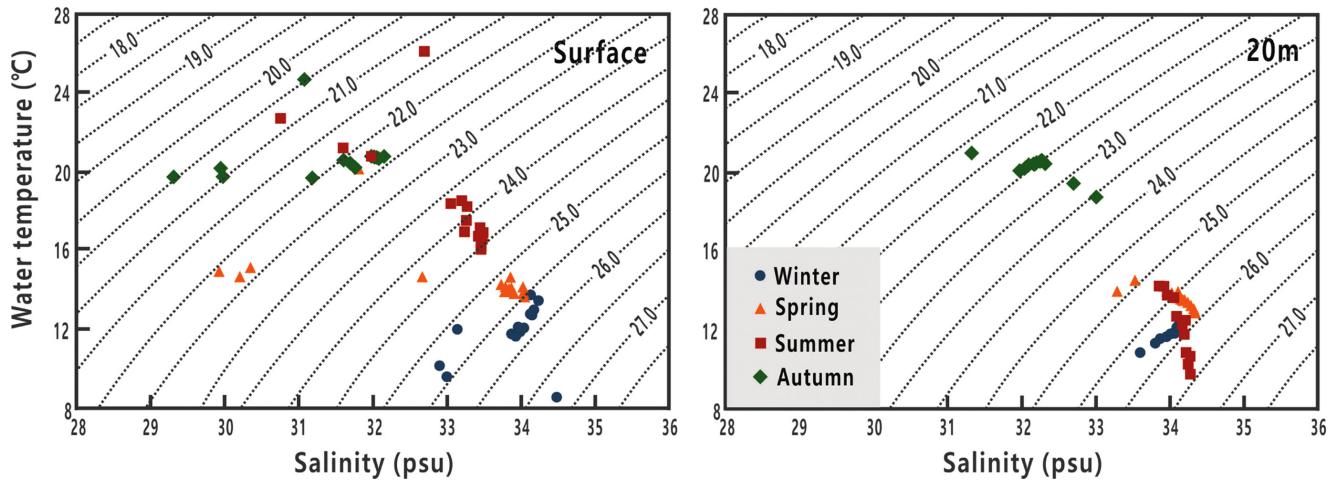


Fig. 9. T-S diagrams at surface (left) and bottom (right) layers in the Ulsan coastal waters.

나타내며, 이는 20 m 수층 해수의 계절분포 특성에서도 확인된다 (Fig. 9). 그리고 울산 연안해역에서 관찰되는  $0.1 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$  수준의 세포밀도는 동해에서 어렵지 않게 관찰된다(Choi *et al.*[2011]).

식물플랑크톤 세포밀도와 Chl-*a* 농도 사이에는 직선적 유의성이 보여지나, 울산 연안해역의 일부 계절에는 이러한 관련성이 관찰되지

않았다. 식물플랑크톤 세포밀도와 Chl-*a* 농도 사이의 불일치는 우점종의 단위세포에 포함하는 Chl-*a* 농도 함량(Honjo *et al.*[1978]), 세포크기(Curl and McLeod[1961]) 및 세포체적의 차이(Türkoğlu [2010]) 등에서 발생되며, 일부 고정시료에 의해 파괴되는 무각 편모조류의 비 및 광학현미경 관찰로 검경이 어려운 초미소플랑크톤의

Table 5. Temporal variations of dominant species of phytoplankton community in the Ulsan coastal waters

Survey periods	Domanant species				Reference
	Spring	Summer	Autumn	Winter	
1992-1996	<i>Skeletonema costatum</i> -ls	<i>Chaetoceros debilis</i>	<i>Prorocentrum triestinum</i>	<i>Chaetoceros socialis</i>	Kang and Choi [2002]
	<i>Thalassiosira decipiens</i>	<i>Ch. lorenzianus</i>	<i>Chaetoceros debilis</i>	<i>Cheatoceeros debilis</i>	
	<i>Chaetoceros debilis</i>	<i>Ch. anastomosans</i>	<i>Skeletonema costatum</i> -ls	<i>Skeletonema costatum</i> -ls	
	<i>Leptocylindrus danicus</i>	<i>Ch. compressus</i>	<i>Thalassiosira decipens</i>	<i>Thalassiosira decipiens</i>	
	<i>Pseudo-nitzschia seriata</i>	<i>Skeletonema costatum</i> -ls	<i>Proboscia alata</i>	<i>Paralia sulcata</i>	
		<i>Thalassiosira decipiens</i>	<i>Leptocylindrus danicus</i>		
		<i>Asterionellopsis glacialis</i>	<i>Nitzschia logissima</i>		
		<i>Triplos furca</i>	<i>Dityocha speculum</i>		
		<i>Prorocentrum spp.</i>	<i>Octactis octonaria</i>		
		<i>Skeletonema marioni</i>	<i>Chaetoceros socialis</i>		
2006-2008	<i>Chaetoceros curvisetus</i> , <i>Skeletonema marioni</i> , <i>Pseudo-nitzschia seriata</i> , <i>Chaetoceros compressus</i> , <i>Leptocylindrus minimus</i> , <i>Thalassiosira binata</i> , <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>				Joo <i>et al.</i> [2011]
2011	<i>Chaetoceros debilis</i>	<i>Ceratium fusus</i>	<i>Paralia sulcata</i>	<i>Grammatophora marina</i>	Yoon, unpublished data
	<i>Eucampia zodiacus</i>	<i>Eucampia zodiacus</i>	<i>Melosira nummuloides</i>	<i>Paralis sulcata</i>	
	<i>Paralia sulcata</i>	<i>Eutreptiella gymnastica</i>		<i>Skeletonema costatum</i> -ls	
	<i>Pseudonitzschia seriata</i>	<i>Dactyliosolen phuketensis</i>			
	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	<i>Skeletonema costatum</i> -ls			
2014	<i>Skeletonema costatum</i> -ls	<i>Chaetoceros debilis</i>	<i>Chaetoceros debilis</i>	<i>Chaetoceros socialis</i>	Lee <i>et al.</i> [2016] Yoon [2017a]
		<i>Chaetoceros affinis</i>	<i>Chaetoceros curvisetus</i>	<i>Skeletonema costatum</i> -ls	
		<i>Paralia sulcata</i>	<i>Skeletonema costatum</i> -ls	<i>Thalassiosira pacifica</i>	
	<i>Chaetoceros compressus</i>	<i>Nitzschia spp.</i>		<i>Cryptomonas spp.</i>	
	<i>Leptocylindrus danicus</i>	<i>Skeletonema costatum</i> -ls			
	<i>Cryptomonas spp.</i>	<i>Eutreptiella gymnastica</i>			
	<i>Eutreptiella gymnastica</i>	<i>Oscillatoria spp.</i>			
<i>Eucampia zodiacus</i>	<i>Microcystis spp.</i>				
<i>Paralia sulcata</i>	<i>Chaetoceros curvisetus</i>				
2016		<i>Chaetoceros pseudocritinitis</i>	<i>Chaetoceros curvisetus</i>	<i>Skeletonema costatum</i> -ls	this study
	<i>Paralia sulcata</i>	<i>Chaetoceros compressus</i>	<i>Chaetoceros curvisetus</i>	<i>Chaetoceros curvisetus</i>	
	<i>Pseudo-nitzschia seriata</i>	<i>Chaetoceros curvisetus</i>	<i>Chaetoceros debilis</i>	<i>Chaetoceros socialis</i>	
		<i>Leptocylindrus danicus</i>	<i>Melosira moniliformis</i>	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	
		<i>Chaetoceros affinis</i>			

점유율(Yoon *et al.*[1992]; Maita and Odate[1988]; Yoon[2011]; Guo *et al.*[2014]) 등에 의한 세포밀도의 과소평가 등에서 발생한다(Larsson and Hagatrom[1982]). 실제 과거 자료에서 동해 남부 해역의 식물플랑크톤 군집에서 미소플랑크톤의 점유 비율은 매우 높은 것으로 보고되었다(Shim *et al.*[1991], [1992]; Yeo and Shim [1992]).

울산 연안해역 식물플랑크톤 군집의 우점종은 일부 남조류를 제외하면 국내 연안해역에서 어렵지 않게 관찰되는 종들이다(Choi *et al.*[2011]; Yoon[2011]). 울산 연안해역의 계절적 우점종 천이를 파악할 수 있는 자료는 극히 제한적이다(Table 5). 한정된 자료이지만 우점종의 경시적 변화는 1990년대 봄과 겨울이 *Pseudo-nitzschia seriata*, 여름에 *Asterionella glacialis*, *Chaetoceros socialis* 등과 같은 저온성 규조류가 우점하였고, 여름과 가을은 규조류에 추가하여 와편모조류 *Tripos furca*, *Prorocentrum triestinum*, 규질편모조류 *Dityocha speculum*, *Octactis octonaria* 등이 우점하였으나, 본격적 공단가동 이후에는 부영양화 지표종(Iizuka[1985])인 *Skeletonema costatum*-Is 이외에 부영양화 연안역에서 우점 출현하는 *Thalassiosira decipiens*, *Chaetoceros debilis*, *Prorocentrum* 속 등 호영양성 종들이 연간 지속적으로 우점되었다(Kang and Choi[2002]; Cloern[2018]). 그러나 2000년대에는 계절로 구분되지는 않았지만 연중 규조류인 *Chaetoceros*, *Skeletonema*, *Pseudo-nitzschia seriata*, *Leptocylindrus*, *Thalassiosira* 속 등에 의해 우점되었고(Joo *et al.*[2011]), 2010년대 중에 천이는 보이지만 여름을 제외하면 규조류 *Chaetoceros*, *Eucampia*, *Paralia*, *Pseudo-nitzschia*, *Thalassionema*, *Skeletonema*, *Dactyliosolen*, *Melosira*, *Grammatophora* 속과 함께 여름에는 와편모조류 *Tripos fusus*와 유글레나조류 *Eutreptiella gymnastica* 추가적으로 우점하여 1990년대로 회귀하는 양상을 보였다(Lee *et al.*[2016]). 그러나 제한된 하구해역은 규조류와 함께 봄과 가을에 은편모조류, *Cryptomonas* spp. 여름에는 남조류 *Oscillatoria* spp., *Microcystis* spp. 등이 우점 출현하는 등(Lee *et al.*[2016]) 조사 시점과 해역의 범위에 따라 우점종의 차이가 큰 특징을 보였다(Table 5).

일반적으로 중위도 해역은 광량, 수괴의 연직안정도, 영양염 공급 등의 무생물 환경인자와 생물의 종간경쟁, 포식압과 같은 생물학적 인자에 따라 식물플랑크톤 군집의 특징적 계절변동 양상이 알려졌다(Parsons *et al.*[1984]). 그러나 울산 연안해역은 이러한 특징적 계절변동 양상과는 달리 여름과 가을에 높은 세포밀도를 보였고, 전체적으로 계절에 관계없이 와편모조류를 포함하는 식물성 편모조류의 세포밀도가 매우 낮았다(Yoon *et al.*[1992]; Choi *et al.*[2011]). 이는 중위도의 외양해역은 해수운동에 의해 표층으로 공급되는 영양염이 지배되지만, 울산 연안해역의 식물플랑크톤 성장을 지배하는 영양염은 육상의 산업단지 및 도시생활하수, 태화강 등의 담수유입, 그리고 계절에 따른 저층 해수의 용승 등 다양한 공급원이 존재하고 있기 때문이다. 특히 여름 태화강 하구에서 다소 떨어진 방어진 남부해역을 제외한, 울산 신항만 등 중남부 연안해역에서 광범위하게 발생하는 용승에 따른 저수온화가 고수온기 울산 연안해역에서 와편모조류 출현을 방해하는 것으로 추정할 수 있

었다(Yoon[1989], [2011]).

이러한 내용 및 주성분분석을 이용한 생물해양학적 특성 해석에서 울산 연안해역의 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 분포 특성에 영향을 미치는 환경인자는 계절 및 해역에 따라 차이를 보이고 있으며, 크게 생활하수와 산업배수를 포함하는 담수유입 및 여름과 가을 저층 해수의 용승에 의해 생물해양학적 환경특성이 결정되고 있는 것으로 판단되었다.

## References

- [1] Chihara, M. and Murano, M.(eds), 1997, An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan, Tokai Univ. Press, Tokyo.
- [2] Choe, S., 1972, Studies on the seasonal variations of plankton organisms and suspended particulate matter in the coastal area of Ko-Ri, J. Oceanogr. Soc. Korea, 7(1), 47-58.
- [3] Choi, J.K., Noh, J.H. and Kang, Y.S., 2011, The characteristics of phytoplankton distribution in the West Sea of Korea. in: Choi, J.K. (ed.), The Plankton Ecology of Korean Coastal Waters. Donghwa Tech. Pub., Seoul, 30-47.
- [4] Cloern, J.E., 2018, Why large cells dominate estuarine phytoplankton. Limnol. Oceanogr. 63, S392-S409.
- [5] Cupp, E.E., 1943, Marine plankton diatoms of the west coast of north America. Bull. Scripps Inst. Oceanogr., Univ. California, 5, 1-237.
- [6] Curl, H.Jr. and McLeod, G.C., 1961, The physiological ecology of a marine diatom, *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve, J. Mar. Res. 19(1), 70-88.
- [7] Garmendia, M., Borja, Á., Franco, J. and Revilla, M., 2013, Phytoplankton composition indicators for the assessment of eutrophication in marine waters: Present state and challenges within the European directives, Mar. Poll. Bull. 66(1/2), 7-16.
- [8] Guo, C., Liu, H., Zheng, L., Song, S., Chen, B. and Huang, B., 2014, Seasonal and spatial patterns of picophytoplankton growth, grazing and distribution in the East China Sea, Biogeosci., 11, 1847-1862.
- [9] Hallegraeff, G.M., Bolch, C.J.S., Hill, D.R.A., Jameson, I., LeRoi, J.M., McMinin, A., Murray, S., de Salas, M.F. and Saunders, K., 2010, Algae of Australia: Phytoplankton of Temperate Coastal Waters, CSIRO Publishing, Cambella.
- [10] Haurly, L.R., McGowan, J.A. and Wiebe, P.H., 1978, Patterns and processes in the time-space scales of plankton distribution, in: Steele, J.H.(ed.), Spatial Pattern in Plankton Communities, NATO Conference Series IV (Marine Science), Vol. 3, Plenum Publishing Corporation, New York, 277-327.
- [11] Honjo, T., Shimouse, T. and Hanaoka, T., 1978, A red tide occurred at the Hakozaki fishing port, Hakada Bay, in 1973 - The growth process and the chlorophyll content-. Bull. Plank. Soc. Japan 25(1), 7-21.
- [12] Iizuka, S., 1985, The results of a survey of maximum densities in cell number of phytoplankton in coastal waters of Japan, Bull.

- Plankton Soc. Japan, 32, 67-72.
- [13] Joo, H.M., Lee, J.H. and Jung, S.W., 2011, Correlations between cell abundance, bio-volume and chlorophyll *a* concentration of phytoplankton communities in coastal waters of Incheon, Tongyeong and Ulsan of Korea, Korean J. Environ. Biol., 29(4), 312-320.
- [14] Kang, Y.S., 2008, Characteristics of phytoplankton communities in the coastal waters of power plant, Algae, 23(1), 31-52.
- [15] Kang, Y.S. and Choi, J.K., 2001, Ecological characteristics of phytoplankton communities in the coastal waters of Gori. Wulseong, Uljin and Youngkwang I. Species composition and distribution (1992-1996), Algae, 16(1), 85-111.
- [16] Kang, Y.S. and Choi, J.K., 2002, Ecological characteristics of phytoplankton communities in the coastal waters of Gori. Wulseong, Uljin and Youngkwang II. Distributions of standing crops and environmental variables (1992-1996), 「The Sea」 J. Korean Soc. Oceanogr., 7(2), 108-128.
- [17] Kang, Y.S., Choi, J.K. and Eum, H.M., 2003, Ecological characteristics of phytoplankton communities in the coastal waters of Gori, Wulseong, Uljin and Youngkwang III. Distribution of dominant species and environmental variables, Algae, 18(1), 29-47.
- [18] Kim, A.R., Youn, S.H., Chung, M.H., Yoon, S.C. and Moon, C.H., 2014, The Influences of coastal upwelling on phytoplankton community in the southern part of East Sea, Korea, 「The Sea」 J. Korean Soc. Oceanogr., 19(4), 287-301.
- [19] Kim, S.W., Go, W.J., Kim, S.S., Jeong, H.D. and Yamada, K., 2010, Characteristics of ocean environment before and after coastal upwelling in the southeastern part of Korean peninsula using an in-situ and multi-satellite data, J. Kor. Soc. Mar. Environ. Safety, 16(4), 345-352.
- [20] Kwon, O.Y. and Kang, J.H., 2013, Seasonal variation of physico-chemical factors and size-fractionated phytoplankton biomass at Ulsan seaport of East Sea in Korea, J. Korea Aca.-Indus. coop. Soc., 14(11), 6008-6014.
- [21] Larsson, U. and Hagatrom, A., 1982, Fractionated phytoplankton primary production in Baltic eutrophication gradient, Mar. Biol., 67(1), 57-70.
- [22] Lee, M.J., Kim, D., Kim, Y.O., Sohn, M., Moon, C.H. and Baek, S.H., 2016, Seasonal phytoplankton growth and distribution pattern by environmental factor changes in inner and outer bay of Ulsan, Korea, 「The Sea」 J. Korean Soc. Oceanogr., 21(1), 24-35.
- [23] Lee, T. and Kim, I.N., 2003, Chemical imprints of the upwelled waters off the coast of the southern East Sea of Korea, J. Korean Soc. Oceanogr., 38(3), 101-110.
- [24] Maita, Y. and Odate, T., 1988, Seasonal change in size-fractionated primary production and nutrient concentrations in the temperate neritic water of Funka Bay, Japan, J. Oceanogr. Soc. Japan, 44(6), 268-279.
- [25] Omura, T., Iwataki, M., Borja, V.M., Takayama, H. and Fukuyo, Y., 2012, Marine Phytoplankton of the Western Pacific, Kouseisha Kouseikaku, Tokyo.
- [26] Parsons, T.R., Takahashi, M. and Hargrave, B., 1984, Biological Oceanographic Processes (3rd ed.), Pergamon Press, Oxford.
- [27] Severiano, J.d.S., Moura, A.d.N., Magalhães, E.M.d.M. and Almeida, V.L.d.S., 2012, Study about top-down and bottom-up controls in regulating the phytoplankton biomass in a eutrophic reservoir in northeastern Brazil, J. Water Res. Prot., 4(8), 616-621.
- [28] Shim, J.H. and Park, Y.C., 1986, Primary productivity measurement using carbon-14 and nitrogenous nutrient dynamics in the south eastern sea of Korea, J. Oceanogr. Soc. Korea, 21(1), 13-24.
- [29] Shim, J.H., Yeo, H.G. and Park, Y.C., 1992, Primary production system in the southern waters of the East Sea, Korea. I. Biomass and productivity, J. Oceanol. Soc. Korea, 27(2), 91-100.
- [30] Shim, J.H., Yeo, H.G. and Shin, Y.K., 1991, Ecological effect of thermal effluent in the Korean coastal waters I. Significance of autotrophic nano and picoplankton in the adjacent waters of Kori nuclear power plant, J. Korean Soc. Oceanogr., 26(1), 77-82.
- [31] Soumia, A.(ed), 1978, Phytoplankton Manual. Unesco, Paris.
- [32] Street, J.H. and Paytan, A., 2005, Iron, phytoplankton growth, and the carbon cycle, Met Ions Biol Syst., 43, 153-193.
- [33] Sun, C.I., Kim, D.J., Lee, Y.W. and Kim, S.S., 2015, Pollution and ecological risk assessment of trace metals in surface sediments of the Ulsan-Onsan coast, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 18(4), 245-253.
- [34] Thronsen, J., 1978, Preservation and storage, in: Soumia, A.(ed), Phytoplankton Manual. Unesco, Paris, 69-74.
- [35] Tomas, C.R. (ed.), 1997, Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates, Academic Press, Oxford.
- [36] Türkoğlu, M., 2010, Temporal variations of surface phytoplankton, nutrients and chlorophyll *a* in the Dardanelles (Turkish Straits System): a coastal station sample in weekly time intervals, Turk J. Biol., 34, 319-333.
- [37] Yamada, M., 2013, Recent studies on biodiversity and eco-physiological characteristics of the genus *Skeletonema* (Bacillariophyceae), Bull. Plankton Soc. Japan, 60(1), 18-28.
- [38] Yeo, H.G. and Shim, J.H., 1992, Ecological effect of thermal effluent in the Korean coastal waters 3. Abiotic environment and the community structure of primary producers in the vicinity of Kori nuclear power plant, Korean J. Environ. Biol., 10(2), 122-142.
- [39] Yoo, K.I. and Lee, J.H., 1982, Studies on the planktonic diatoms in the vicinity of Kori nuclear power plant, Bull. Korea Ocean Res. Dev. Inst., 4, 53-62.
- [40] Yoon, Y.H., 1989, Environmental analysis of phytoplankton growth in the Inland Sea of Japan with special reference to the occurrence of red tide, Ph.D. Thesis, Hiroshima Univ.
- [41] Yoon, Y.H., 2011, Marine environment and phytoplankton community in the southwest sea of Korea. in: Choi, J.K. (ed.), The Plankton Ecology of Korean Coastal Waters, Donghwa Tech. Publ. Co., Seoul, 68-93.
- [42] Yoon, Y.H., 2016, Marine environments and phytoplankton community around Jeju Island, Korea during early summer, 2016, Korean J. Environ. Biol., 34(4), 292-303.

- [43] Yoon, Y.H., 2017a, Distributions of phytoplankton community in the southern Ulsan coastal waters (SUCW) during increasing water temperature seasons, Bull. Fish. Sci. Inst., Chonnam Nat'l Univ., 25, 24-36.
- [44] Yoon, Y.H., 2017b. Marine bio-environmental characteristics with the distributions of dinoflagellate cyst assemblages in the Ulsan Coastal Waters (UCW), Korea J. Environ. Biol., 35(3), 361-372.
- [45] Yoon, Y.H., Rho, H.G. and Kim, Y.K., 1992, Seasonal succession of phytoplankton population in the Hamdok port, Northern Cheju Island, Bull. Mar. Sci. Inst., Cheju Nat'l Univ., 16, 27-42.
- [46] You, Y.S., Lee, J.H., Park, J.C., Kim, D.M. and Cho, H.S., 2012, Distribution characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons(PAHs) in riverine waters of Ulsan coast, Korean Soc. Mar. Environ. Safety, 18(5), 398-405.

---

Received 30 April 2019

1st Revised 4 June 2019, 2nd Revised 3 July 2019

Accepted 8 July 2019