

경주시 연안해역의 식물플랑크톤 군집 장기 변동

김현정 · 박재영 · 손민호 · 문창호[†]
(해양생태기술연구소 · [†]부경대학교)

Long-term Variations of Phytoplankton Community in Coastal Waters of Kyoungju City Area

Hyun-Jung KIM · Jae Yeong PARK · Min Ho SON · Chang-Ho MOON[†]
(Marine-Eco Technology Institute · [†]Pukyong National University)

Abstract

Starting from the February 2008 till the end of November 2014, abundance of phytoplankton and their composition living in the coastal waters of Kyoungju city were investigated. Environmental and biological properties were also observed at 10 different stations on a seasonal basis. Due to the environmental variables, fluctuating pattern was appeared during the entire period of observation with different degree, as compared to those found in other costal waters in the East Sea. The concentration of phosphate was turned out to be very low which was even less than threshold level in the study area. Phytoplankton community structure was dominated by diatoms (both micro- and nanoplankton fractions) for several years and seasonal succession was also relied on the diatoms. The importance of dinoflagellates in the community was relatively low. Abundance of phytoplankton was heavily affected by physical factors in the surface water, however, affected more by chemical factors including nutrients in the deep water. For periods of this study, the phosphate concentrations was observed in an extremely low, which indicates that the main limiting factor affecting phytoplankton growth could be phosphate.

Key words : Phytoplankton, Environmental variables, Phosphate

I. 서론

식물플랑크톤은 해양생태계 내에서 유기물을 생성하는 기초생산자일 뿐만 아니라 동물플랑크톤의 주요 먹이 공급원으로 활용되어 상위영양단계로 에너지를 전달하는 bottom up controller로서의 역할을 담당하고 있다(Lo et al., 2004). 따라서 식물플랑크톤은 해양생태계 전체의 물질순환 과정 중 기반이 되는 생물군으로 이들 군집 구조의 변화는 해양생태계에서 매우 중요한 의미를 가지

며(Lo et al., 2004; Poornima et al., 2005; Yoon Yang Ho, 2015), 외부 충격으로부터 군집 구조와 기능을 빠르게 회복할 수 있는 능력을 가지고 있기 때문에 해양생태계를 유지하는 기초가 되고 있다. 이러한 식물플랑크톤 군집 구조를 제어하는 주요 환경요인으로는 물리적 요인, 화학적 요인 및 생물학적 요인 등이 있으며, 특히 지구온난화와 같은 장기적이고 큰 규모의 변화는 식물플랑크톤 군집의 천이를 유발하고 결국 상위영양단계의 생물군 군집 구조 변화를 초래할 수 있다

[†] Corresponding author : 051-611-0962, chmoon@pknu.ac.kr

* 이 논문은 부경대학교 2015년 자율창의연구비 (과제번호 : C-D-2015-0970)에 의하여 수행되었음.

(Ingrid, Andersen & Vadstein, 1996; Cottingham, 1999). 식물플랑크톤은 이런 환경변화에 민감하게 반응하기 때문에 생물지표로 활용될 수도 있다 (Livingston, 2001).

최근 전 지구적으로 우려되고 있는 지구온난화는 해양의 수온을 상승시키고 이로 인한 해양환경 뿐만 아니라 수산자원도 변화시키고 있다. 하지만 이러한 변화들은 특정 해역에서 짧은 시간에 나타나는 것이 아니라 넓은 대양에서 장기간에 걸쳐 서서히 나타나는 현상들이 대부분이다. 따라서 해수온 상승에 따른 해양생태계 변화를 연구하기 위해서는 큰 규모의 공간을 대상으로 장기간에 걸쳐 변화 양상을 파악하는 것이 타당하다. 원자력발전소 주변 해역은 발전소 가동에 따라 온배수가 항상 배출되고 있기 때문에 해수온 상승에 따른 잠재적인 해양생태계 변화를 평가하는 가장 좋은 모델이 될 수 있는 공간이다 (Li et al., 2011). 우리나라에는 고리, 월성, 울진 및 영광 원자력발전소가 운용되고 있고 이 중 영광을 제외한 나머지 발전소들은 모두 동해안에 위치해 있는 것이 특징이다. 연구 대상 해역을 포함하는 우리나라 동해는 해안선이 단조롭고 외해와 바로 맞닿아 있어 파랑의 영향이 우세하며 외양수의 유동이 많은 편이다. 또한 대륙붕이 짧고 수심이 깊으며 조차(<1 m)가 작은 것이 특징이다. 여름에는 대마난류가 북상하고 겨울에는 차가운 연안수의 남하에 의해 수온 변화가 크게 나타나고 때때로 여름에는 표층 수온보다 상대적으로 3~5℃ 낮은 동해고유냉수대가 나타나는 것으로 알려져 있다(Oh Hyun Ju, Suh Young Sang & Heo Seung, 2004; Kang Pil Jun, Kim Chong Kwan & Hwang Sun Wan, 2015). 우리나라 동해 연안을 대상으로 실시된 식물플랑크톤 군집 연구는 1980년대 이후부터 동해 남부해역에 집중되었다(Shim Jae Hyung & Lee Won Ho, 1987; Chung Chang Soo et al., 1989; Shim Jae Hyung, Yeo Hwan Goo & Park Jong Gyu, 1992; 1995; Lee Joon-Baek, Han Myung-Soo & Yang Han-Seob,

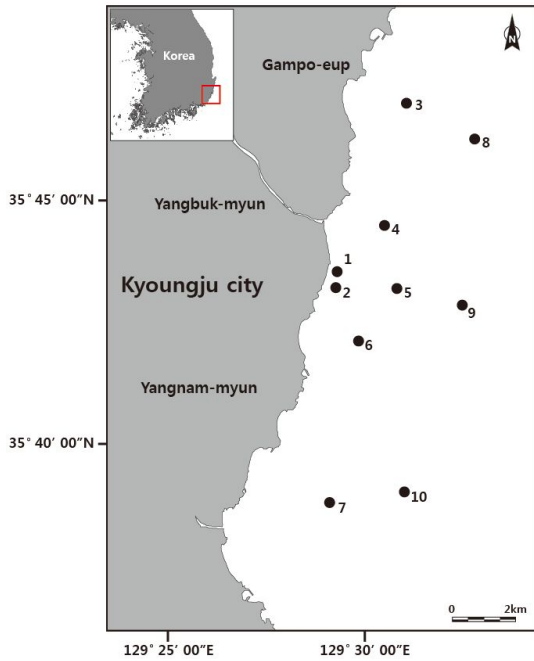
1998; Oh Hyun Ju, Suh Young Sang & Heo Seung, 2004; Kim A-Ram et al., 2014). 특히 동해안에 위치한 세 개의 발전소 주변 해역 중 고리 원자력발전소 주변해역에서 식물플랑크톤에 대한 연구가 가장 많이 이루어졌으나, 이마저도 단기간 동안의 변화 양상만 연구되어 식물플랑크톤 현존량 변화와 해양환경적 요인 간의 관계를 밝히기에는 한계가 있는 것이 사실이다. 그리고 본 연구 대상 해역에서는 냉수대 출현과 연관하여 물리·화학적 변화에 보다 초점을 맞추어 연구가 진행되었다(Lee Dong-Kyu, Kwon Jae-Il & Hahn Sang-Bok, 1998; Lee Tongsup & Kim Il-Nam, 2003).

따라서 본 연구에서는 월성 원자력발전소가 위치해 있는 경주시 연안해역에서 장기간 자료를 바탕으로 식물플랑크톤 군집 동태를 파악하고, 어떠한 환경요인에 의해서 이들 군집이 영향을 받고 있는지 알아보려고 하였다.

II. 재료 및 방법

연구해역은 동해 남부에 위치한 경주시 연안해역으로, 월성 원자력발전소 운용으로 인해 온배수가 주변 해역으로 항시 배출되고 있는 곳이다. 연구해역 인근의 주요 하천으로는 대중천과 나아천이 있으며, 이 중 대중천은 유역면적 118.4 km², 유로연장 20.9 km에 이르고, 나아천은 유역면적 13.3 km², 유로연장 7.1 km에 이른다. 이 외에도 하서천이 남동방향으로 동해에 유입되나 세 하천의 유량이 적어 인근해역의 물리·화학적 특성 변화에는 큰 영향을 주지 않는다(Korea Electric Power Corporation, 1990).

현장조사는 2008년 2월부터 2014년 11월까지 7년 간 계절별(2월, 5월, 8월 및 11월)로 총 28회에 걸쳐 실시되었다. 10개 정점의 표층과 저층에서 식물플랑크톤 및 해수 시료를 채집하였다 ([Fig. 1] 참조).



[Fig. 1] Study area of the Kyoungju city coast in the East Sea, Korea. Circles represent the sampling stations.

버킷과 변형된 van Dorn 채수기를 이용하여 표층과 저층에서 시료를 채수한 후, 다기능수질측정기(YSI-3300, USA)를 이용하여 현장에서 수온, 염분, 수소이온농도(pH)와 용존산소(DO)를 측정하였다. 부유물질(SS)과 영양염 농도 측정을 위해서 채수한 시료를 아이스박스에 담아 냉장상태를 유지하여 실험실로 이동시켜 해양환경공정시험기준(2013)에 따라 분석을 실시하였다. 영양염 농도는 흡광광도법을 이용하여, 암모니아-질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$), 아질산-질소($\text{NO}_2^-\text{-N}$), 질산-질소($\text{NO}_3^-\text{-N}$), 인산-인($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 및 규산-규소($\text{SiO}_2\text{-Si}$)를 측정하였다. 이들 무기 영양염 중 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 합을 용존무기질소(DIN: dissolved inorganic nitrogen)로 나타내었다.

식물플랑크톤 네트(망목 20 μm)를 이용하여 저층에서부터 표층까지 수직으로 끌어올려 시료를 채집한 후 정성분석을 수행하였다. 정량분석을 위해 해수 시료 500 mL를 채수하여 루골용액을

넣어 고정시키고 침전과정을 거친 후 최종 농도 50 mL가 되도록 하였다. 그 중 1 mL를 취하여 광학현미경 하에서 식물플랑크톤을 동정 및 계수하였다. 엽록소 *a* 측정을 위한 시료는 Whatman membrane (공경 0.45 μm) 여과지로 여과한 후, 90% 아세톤 10 mL를 주입하여 색소를 추출하였다(냉암소, 4°C 이하, 24시간). 추출된 시료를 원심분리하고 상등액만 취해 형광측정기(Turner Design Model 10-AU-005)를 이용하여 형광값을 측정 후 엽록소량으로 환산하였다.

식물플랑크톤의 현존량에 미치는 환경요인을 파악하기 위하여 단계적회귀분석(Stepwise regression analysis)을 실시하였으며 모든 통계분석은 SPSS (ver. 17.0) 패키지를 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 환경요인

조사기간 동안 수온은 4.90~29.10°C (평균 15.43±4.28°C)의 범위로 계절, 수층 및 정점에 따라 큰 변화를 보였으며, 계절별로는 겨울에 낮고 여름에 높은 전형적인 온대지역의 수온 분포를 나타내었다. 수층별로는 저층에 비해 표층에서 더 높았으며, 성층이 강하게 발달하는 여름에 수층 간 수온 차이가 컸다. 동해 남부 연안에서는 남풍이 강해지는 여름에 연안 용승이 일어나는 것으로 알려져 있는데(Kim Sang-Woo et al., 2010), 본 조사기간 동안에도 2010년의 여름 표층 평균 수온이 17.91°C로 낮게 나타나, 저층의 차가운 해수가 표층으로 올라오는 용승 현상이 관찰되었다. 염분은 평균 33.94±0.76 psu, 30.10~35.30 psu의 범위로 변화하였다. 강수량이 많은 여름과 가을에 비해 겨울과 봄에 높은 염분 농도를 보이고 있었으나, 조사해역 주변에는 큰 강이 존재하지 않아 일반적으로 염분 농도가 낮아지는 여름에도 다른 계절과 큰 차이를 보이지 않았다. 평균 pH는 8.12±0.10으로 최소 7.76에서 최대 8.35

로 변화하였고, 평균 SS는 6.55±2.05 mg/L, 0.60~14.70 mg/L의 범위로 변화하였다. Kang Yeon Shik & Choi Joong Ki (2001; 2002)는 동일 해역에서 1992~1996년 동안 SS의 평균 농도를 16.7 mg/L로 보고하여, 본 조사에서 보다 훨씬 높은 값을 보였다. 이는 위 조사기간 동안 월성 원자력발전소 2,3,4호기가 건설되는 공사 과정에서 발생한 SS로 인해 높은 농도를 나타낸 것으로 예측되었다. DO는 평균 7.97±1.16 mg/L, 4.66~10.85 mg/L의 범위로 변화하였고 낮은 수온으로 인해 산소 용해도가 높은 겨울과 광합성량 증가로 산소 발생량이 증가하는 봄에 상대적으로 높은 농도를 보이고 있었다(<Table 1> 참조).

DIN은 0.47~5.54 µM의 범위로 변화하였고 평균 농도는 2.43±0.95 µM이었다. P는 0.02~0.43 µM의 범위로 평균 0.18±0.09 µM, Si는 0.37~16.00 µM의 범위로 평균 5.16±2.27 µM의 농도를 나타내었다(<Table 1> 참조). DIN이 10~100 µM이면 과영양, 2~10 µM이면 부영양, <2 µM이면 빈영양 해역으로 구분되고, P의 경우에는 >3.56 µM이면 과영양, 1~3.56 µM이면 부영양, <1 µM이면 빈영양 해역으로 구분할 수 있다(Lee Ki-Sung et al., 1999). 따라서 조사해역에서 DIN만을 고려한다면 빈영양에 가까운 부영양 해역으로 간주되나, P를 고려하면 빈영양 해역에 속하였다. 식물플랑크톤

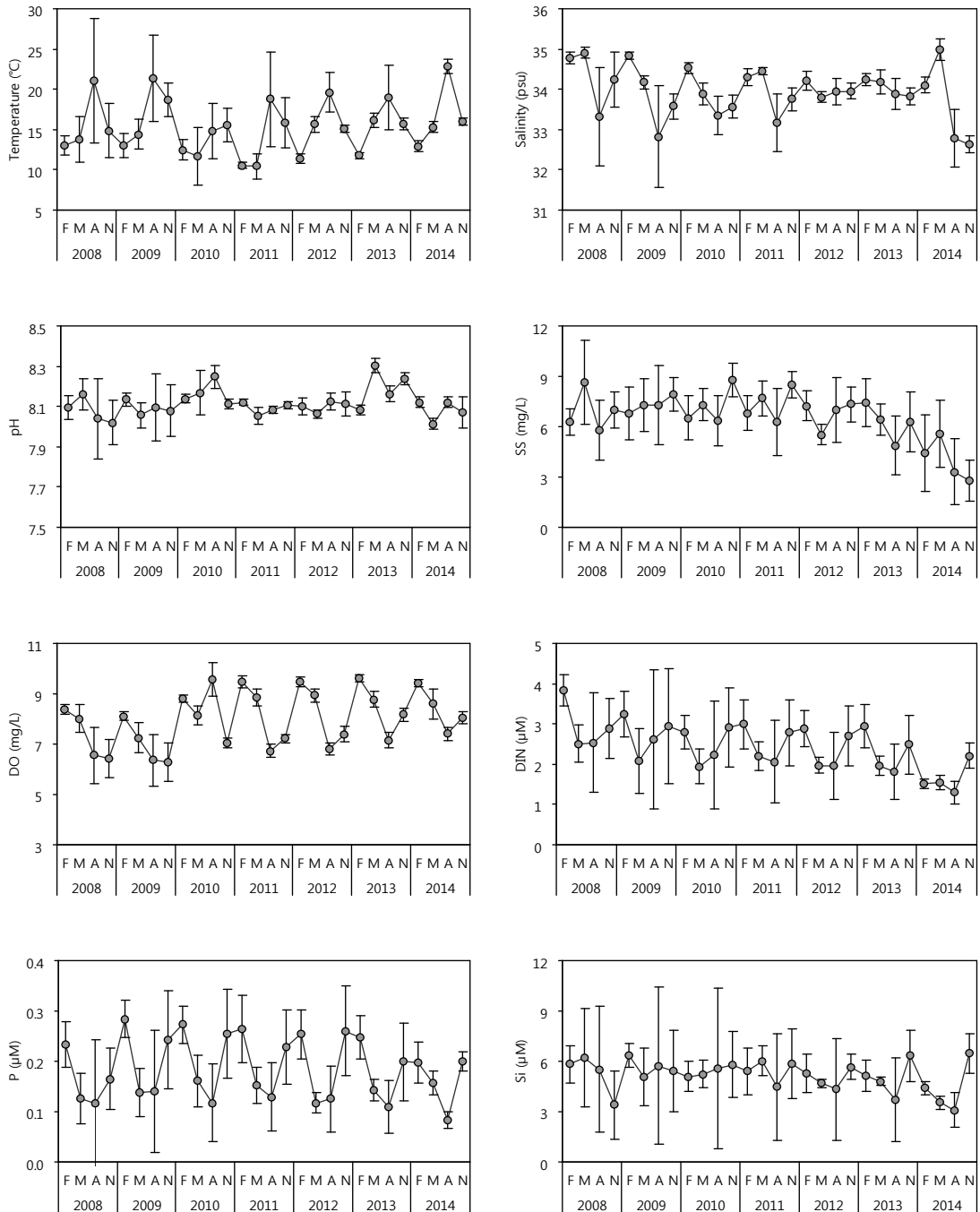
중 큰 비중을 차지하는 규조류의 성장에 필요한 규산염은 2~5 µM로(Brzezinski et al., 1997), 본 해역에서는 평균 5 µM 이상의 농도를 보임으로써 규산염이 식물플랑크톤 성장에 제한인자로 작용할 가능성은 낮은 것으로 나타났다. 또한 Dortch & Whitley (1992)는 식물플랑크톤 성장에 제한을 주는 영양염 임계농도(threshold)를 각각 질산염 1 µM, 인산염 0.2 µM, 규산염 2 µM 이하로 규정하였다. 따라서 본 해역에서 임계농도 이상의 값을 보인 DIN과 Si는 식물플랑크톤의 성장에 제한을 주지 않을 것으로 예상되었으나 P가 임계농도 미만으로 나타나 잠재적인 제한요소로 판단되었다. 이전 연구에서도 본 해역(Kang Yeon Shik & Choi Joong Ki, 2002) 뿐만 아니라, 동해 남부해역(Shim Jae Hyung, Yeo Hwan Goo & Park Jong Gyu, 1992) 및 울릉도 부근 해역(Moon Chang-Ho, Yang Han-Soeb & Lee Kwang Woo, 1996)에서 P가 식물플랑크톤의 성장 제한인자로 작용한다고 보고된 바 있다.

이들 대부분의 환경요인들은 장기변화에서 뚜렷한 경향성을 보이지 않았으나, SS와 DIN은 시간 경과에 따라 다소 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다([Fig. 2] 참조). SS의 경우, 조사해역 인근의 공사 진행 여부와 매우 밀접한 연관성을 보일 수 있는 항목으로 본 조사기간 동안

<Table 1> Range of environmental variables over the each season from 2008 to 2014

	Winter	Spring	Summer	Autumn	Total
Temperature (°C)	9.80~17.20	4.90~18.70	7.30~29.10	9.00~22.50	4.90~29.10
Salinity (psu)	33.20~35.10	33.10~35.30	30.10~35.20	32.30~35.10	30.10~35.30
pH	8.00~8.20	7.91~8.35	7.80~8.34	7.76~8.29	7.76~8.35
SS (mg/L)	1.40~10.70	2.60~14.70	0.60~13.03	0.60~11.00	0.60~14.70
DO (mg/L)	7.79~10.00	6.32~9.69	4.86~10.85	4.66~8.72	4.66~10.85
DIN (µM)	1.36~4.66	1.16~3.51	0.47~5.34	1.10~5.54	0.47~5.54
P (µM)	0.12~0.40	0.06~0.26	0.02~0.34	0.07~0.43	0.02~0.43
Si (µM)	2.12~8.15	2.30~12.92	0.37~16.00	1.20~9.87	0.37~16.00

경주시 연안해역의 식물플랑크톤 군집 장기 변동



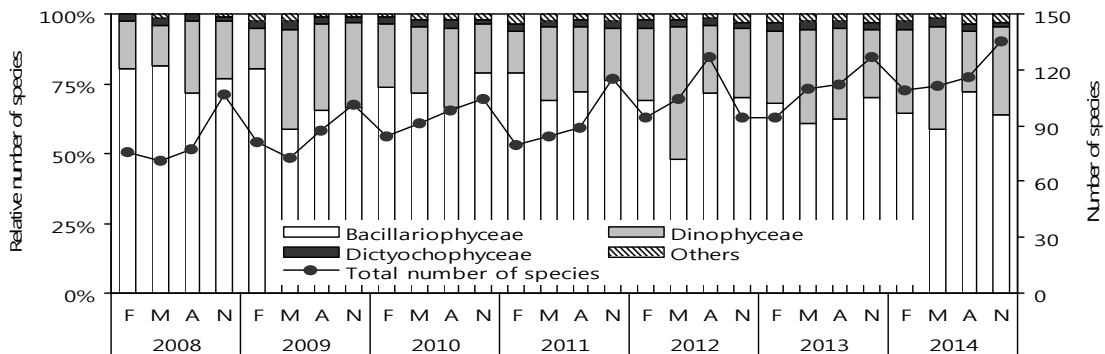
[Fig. 2] Temporal fluctuation of environmental variables from 2008 to 2014. Each monthly average with standard deviation are expressed as circles with bars. (F: February, M: May, A: August, N: November)

신월성 1, 2호기 건설 관련한 공사가 진행 중이었으나, 조사 후반기에 이르러 공사가 마무리됨으로써 SS 농도가 점차 감소하였을 것으로 추측되었다. 한편 연안해역에서 질산염 및 인산염 농도의 변동은 하천이나 강과 같은 담수의 영향에 따라 나타나는 것으로 알려져 있다(Rabalais et al., 2009). 이를 고려하면 본 조사해역에서의 DIN의 감소 경향은 주요 공급원인 하천으로부터의 영양염 공급량 감소 또는 자체 재생산량 감소로 추측해 볼 수 있다. 하지만 본 조사해역 주위에는 큰 강이 없고 유량이 적은 세 하천에서만 담수가 유입되고 있어 육지로부터의 영향은 크지 않은 것으로 생각되었고(염분과 DIN ($r=0.419$, $p<0.01$) 및 P ($r=0.441$, $p<0.01$) 사이에 양(+의 상관관계를 가짐으로써 뒷받침되었음), 결국 조사해역에서의 DIN 감소 경향은 해역 자체 내 다른 복합적인 주변 환경적 요소와 연관이 깊을 것으로 예상되었다. 이와 연관성을 가지는 기타 환경적 요소는 높은 하수 처리 능력에 따른 하천 수질 개선 또는 해역 내 활발한 질소 제거과정 등을 추측해 볼 수 있으나 본 논문에서는 명확한 원인 분석이 불가능하였다.

2. 식물플랑크톤 군집

가. 출현종수

조사기간 동안 식물플랑크톤은 7개 분류군에서 총 346종이 출현하였다. 우리나라 동해 연안에서 수행된 조사에서 나타난 식물플랑크톤은 약 80~360여 종이 출현한 것으로 보고되어(Choe Sang, 1972; Yeo Hwan Goo & Shim Jae Hyung, 1992; Shim Jae Hyung, Yeo Hwan Goo & Park Jong Gyu, 1995; Lee Joon-Baek, Han Myung-Soo & Yang Han-Seob, 1998; Kang Yeon Shik & Choi Joong Ki, 2001; Yeo Hwan-Goo & Huh Sung-Hoi, 1999; Kang Yeon Shik et al., 2005; Shim Jeong-Min et al., 2008; Kang Yeon-Shik, 2008; Kim A-ram et al., 2014; Yoon Yang Ho, 2016), 채집방법, 조사기간 및 조사해역 등에 따라 매우 큰 차이를 보이고 있었다. 동일 해역에서 조사한 Kang Yeon Shik & Choi Joong Ki (2001)는 1992년부터 1996년까지 총 356종의 식물플랑크톤이 출현한 것으로 보고하여 본 조사결과와 유사하였으며, 고리 및 울진 원자력발전소 주변해역에서도 각각 328종 및 352종을 보고하였다. 계절별 종수를 살펴보면 평균 88종이 출현한 겨울에 가장 적었고, 타 계절에 비해 규조류가 10~20종 더 많이 출현한 가을에 평균 112종으로 가장 많았다([Fig. 3] 참조). 본 해역에서 가을철에 다양한 종이 출현하고 있는 현상은 Kang Yeon-Shik (2008)도 보고한 바 있다.



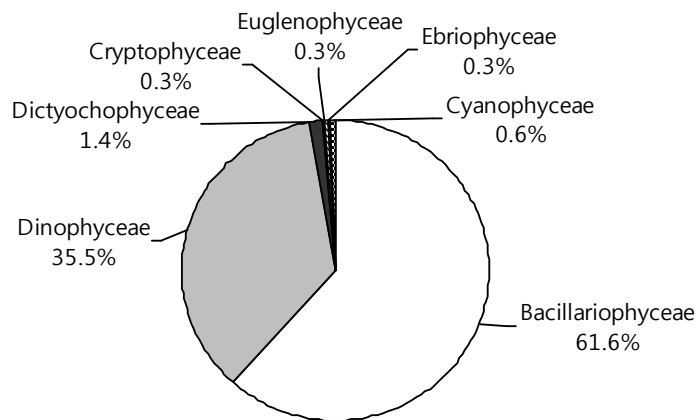
[Fig. 3] Contribution of phytoplankton groups to the total number of species and the number of species observed from 2008 to 2014. (F: February, M: May, A: August, N: November)

7개 출현 분류군에는 규조류, 외편모조류, 규질편모조류, 은편모조류, 유글레나류, 에브리아류 및 남조류가 포함되었고, 규조류가 213종(61.6%) 출현하여 시·공간에 관계없이 가장 많은 종이 출현하고 있었다. 다음으로 외편모조류 123종(35.5%), 규질편모조류 5종(1.4%)이 출현하였다 (Fig. 4 참조). 중위도 온대해역에서의 식물플랑크톤 군집 변화는 군집의 대부분을 차지하는 규조류의 변화양상에 크게 좌우되는 것이 일반적이거나 일부 고수온기에는 외편모조류 등 식물성 편모조류의 출현에 따라 영향을 받을 수 있다 (Nybakken, 1993). 하지만 본 조사에서는 외편모조류의 출현종수와 수온 간에 유의한 상관관계를 보이지 않았으며($p>0.05$), 고수온기에도 외편모조류의 출현종수가 증가하는 현상은 관찰되지 않았다. 반면 연중 규조류와 외편모조류에 의해 식물플랑크톤 군집이 지배되고 있는 현상은 우리나라의 다른 연안과 동일하였으나, 외편모조류 종의 출현 비율은 다소 높게 나타나고 있었다. Choi Joong Ki et al. (2011)은 서해보다 동해에 외편모조류 종이 더 많이 출현한다고 보고하였다. 이는 갯벌이 잘 발달된 서해에서는 다양하게 출현하는 저서성 깃돌말류의 출현이 많은 것에 비해 수심

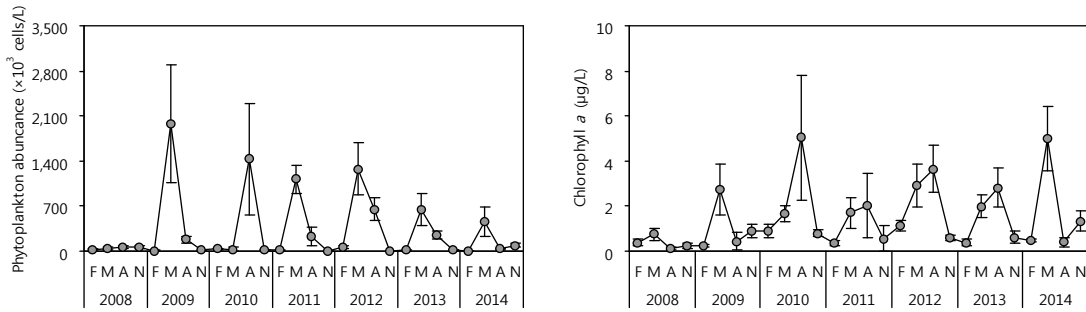
이 깊은 동해에서는 이들 종류의 출현이 극히 제한되기 때문에 돌말류(규조류)의 출현종수가 적고, 상대적으로 다소 영양염이 적은 환경에서 광조조건이 좋고 수온이 높은 수괴를 선호하는 외편모조류가 보다 다양하게 출현할 수 있기 때문이라고 언급하였다. 따라서 본 조사에서 외편모조류의 출현종수 비율이 높게 나타난 것은 조사해역 인근에 뚜렷한 오염원의 유입이 없어 질소 및 인과 같은 영양염류가 비교적 적은 환경이었고, 높은 탁도로 인해 연중 낮은 투명도를 보이는 서해(Kang Yeon Shik & Choi Joong Ki, 2002)에 비해 광조조건도 좋았기 때문으로 판단되었다.

나. 현존량과 엽록소 *a* 농도

식물플랑크톤의 현존량은 최저 1.1×10^3 cells/L에서 최고 3.4×10^6 cells/L의 범위로, 변화 폭이 매우 크고 불규칙하게 변동하여 시간 경과에 따른 경향성은 나타나지 않았다(Fig. 5 참조). 전체 평균은 3.1×10^5 cells/L로, 동해 연안에서 수행된 조사 중 고리 및 울진 연안, 축산항과 왕돌초 해역에서 본 조사와 유사한 현존량을 보이고 있었다(Kang Yeon Shik & Choi Joong Ki, 2001; Kang Yeon Shik et al., 2005, Shim Jeong-Min et al., 2008).



[Fig. 4] Species composition of phytoplankton groups over the periods from 2008 to 2014.



[Fig. 5] Temporal fluctuation of phytoplankton abundance and Chlorophyll *a* observed from 2008 to 2014. Each monthly average with standard deviation are indicated as circles with bars. (F: February, M: May, A: August, N: November)

반면 동일 해역의 이전 조사에서 보고된 평균 6.9×10^5 cells/L (Kang Yeon Shik & Choi Joong Ki, 2001) 및 1.1×10^6 cells/L (Kang Yeon-Shik, 2008) 보다 다소 적은 현존량을 보이고 있었다. 계절 및 수층별 현존량을 살펴보면, 겨울에 표층 2.3×10^4 cells/L, 저층 2.4×10^4 cells/L, 봄에 표층 8.6×10^5 cells/L, 저층 7.3×10^5 cells/L, 여름에 표층 5.4×10^5 cells/L, 저층 2.7×10^5 cells/L, 가을에 표층과 저층에서 3.0×10^4 cells/L이었다. 겨울, 봄 및 가을에는 표층과 저층의 현존량 사이에 유의한 차이가 없었으나($p > 0.05$), 성층이 발달하는 여름에는 표층과 저층의 현존량은 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 봄에 현존량이 가장 높았고 다음으로 여름, 가을, 겨울 순으로 나타나, 일반적으로 알려져 있는 온대 연안해역에서의 식물플랑크톤 대발생이 봄과 가을에 관찰되는 현상(Nybakken & Bertness, 2005)과 차이를 보였다. 과거 우리나라 연안에서도 식물플랑크톤 대발생이 봄과 가을에 나타나는 것이 일반적이었으나(Choi Joong Ki & Shim Jae Hyung, 1986), 최근에는 해역과 조사 시기에 따라 매우 불규칙한 양상을 보이고 있다 (Lee Jin Hwan, Jung Seung Won & Kim Jong-Man, 2005; Yoo Man Ho et al., 2007; Jeong Byungkwan et al., 2011; Yoon Yang Ho, 2015). 한편 동일 해역의 이전 조사에서도 봄 다음으로 여름에 많은 식물플랑크톤 현존량이 관찰되어(Kang Yeon Shik

& Choi Joong Ki, 2002), 본 조사해역은 겨울과 가을에 식물플랑크톤 성장이 둔화되는 반면, 봄과 여름에 이들의 성장이 활발한 해역으로 생각되었다. 봄철의 많은 현존량은 4~5월에 본격적으로 북상하는 대마난류와 함께 광조건도 호전되면서 식물플랑크톤이 성장하기에 최적의 조건이 형성되어 나타난 결과로 여겨지며, 특히 본 해역의 봄철 식물플랑크톤 대발생은 *Leptocylindrus danicus*에 의해서 좌우되고 있었다. 한편 조사기간 동안 2010년 여름 표층에서 *Skeletonema costatum* s.l.이 평균 2.2×10^6 cells/L의 현존량을 보이며 대발생하였다. 이 때 표층 수온은 17.91°C 로 용승으로 인한 냉수대가 관찰되었으며, 차가운 물을 선호하는 *Skeletonema costatum* s.l. (Aubry et al., 2004)의 대발생에 영향을 미친 것으로 판단되었다. 동해 남부연안 해역에서 냉수대 발달에 따라 식물플랑크톤 개체수와 엽록소 *a* 농도가 증가한다는 사실은 Oh Hyun Ju, Suh Young Sang & Heo Seung (2004)에 의해서 밝혀진 바 있다.

식물플랑크톤의 분류군별 현존량 점유율을 살펴보면, 규조류가 평균 94.2%, 와편모조류가 2.4%의 점유율에 그쳐, 중위도 온대해역은 연중 규조류에 의해 점유되는 비율이 높은 특성을 보인다는 연구결과와 유사하였다(Nybakken, 1993). 일반적으로 고수온기인 여름과 가을에는 와편모조류 등 식물성 편모조류에 의한 점유율이 증가

하는 것으로 알려져 있다. 본 조사에서 외편모조류의 평균 점유율은 여름에 4.1%, 가을에 3.9%로 나머지 두 계절(겨울: 0.7%, 봄: 0.8%)에 비해 높았으나 절대적인 비율로 본다면 동해에 위치한 타 해역에 비해 낮은 편으로, Kang Yeon Shik & Choi Joong Ki (2002)는 이들 평균 점유율이 동해 연안에서 13.1~20.0%임을 보고하였다. 남해에 위치한 장수만에서 규조류에 의한 점유율이 95% 이상이었으며(Yoon Yang Ho, 2014), 고군산군도 해역에서 외편모조류의 점유율이 0.1~2.1%로 나타나(Yoon Yang Ho, 2015) 본 조사결과와 유사하였다. 규조류와 외편모조류의 출현 비율을 바탕으로, 외편모조류의 출현 비율이 높으면 오염 해역인 반면 규조류의 출현 비율이 압도적으로 높은 경우 비오염 해역으로 간주될 수 있다(Lim Weol Ae et al., 2010). 실제 본 조사해역 인근에는 규모가 큰 강이 존재하지 않아 오염원이 유입될 확률이 상대적으로 낮고 이는 영양염 농도가 다소 낮게 나타난 결과로 연결될 수 있다. 따라서 외편모조류의 낮은 현존량 점유율과 낮은 영양염 농도는 조사해역이 비오염 해역이라는 사실을 반영하고 있는 것으로 생각되었다.

식물플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 최저 0.03 µg/L에서 최고 10.49 µg/L로 정점 및 시기에 따라 변화가 매우 컸으며, 전체 평균은 1.43 µg/L이었다([Fig. 5] 참조). 표층 평균 엽록소 *a* 농도는 1.57 µg/L, 저층은 1.29 µg/L로 표층에서 약간 더 높게 나타났으며, 성층이 이루어지는 여름에 표·저층에서 각각 2.59 µg/L 및 1.54 µg/L로 차이가 컸다. 계절별로는 겨울에 평균 0.55 µg/L, 봄에 2.39 µg/L, 여름에 2.07 µg/L, 가을에 0.72 µg/L로 봄에 가장 높고 다음으로 여름, 가을, 겨울 순으로 나타나 엽록소 *a* 농도는 계절별 현존량 변동과 유사한 양상을 보였다. 동일 해역에서 Kang Yeon Shik & Choi Joong Ki (2002)는 엽록소 *a* 농도가 평균 2.16 µg/L, Kang Yeon-Shik (2008)은 평균 2.03 µg/L로 보고하여 본 조사에서 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 본 조사해역

에서의 엽록소 *a* 농도는 울진 연안, 축산항, 왕돌초 해역의 농도와 유사하였다(Kang Yeon Shik & Choi Joong Ki, 2001; Kang Yeon Shik et al., 2005; Shim Jeong-Min et al., 2008).

식물플랑크톤 생산력의 지표로 유용한 엽록소 *a* 농도와 식물플랑크톤 현존량은 매우 높은 양(+)의 상관관계($r=0.719$, $p<0.01$)를 보이고 있었다(<Table 2> 참조). 크기가 작은 식물플랑크톤 중 특히 규조류는 다른 분류군들에 비해 상대적으로 엽록소 *a*를 많이 함유하고 있어 이들의 증가는 총 엽록소 *a* 증가를 유발할 수 있으며(Jiménez et al., 1987), 크기가 작은 소형 식물플랑크톤이 연안해역에서 많이 출현하는 경우 식물플랑크톤 현존량과 엽록소 *a* 농도 간에는 매우 높은 상관성을 보인다고 알려져 있다(Jeong Byungkwan et al., 2011). 본 조사에서 총 엽록소 *a* 농도에 큰 영향을 주었을 것으로 생각되는 주요 우점종들은 *Skeletonema costatum* s.l., *Chaetoceros* 속, *Pseudo-nitzschia* 속 등으로 미소(약 10 µm) 및 소형(20~40 µm) 크기의 규조류 식물플랑크톤 종으로 구성됨에 따라 현존량과 엽록소 *a* 농도 간 높은 상관관계를 보인 것으로 생각되었다.

그러나 계절별로 살펴보면, 겨울, 봄 및 여름에는 두 요인 간 상관계수가 각각 $r=0.695$ ($p<0.01$), $r=0.470$ ($p<0.01$) 및 $r=0.824$ ($p<0.01$)로 매우 높은 양의 상관관계를 가졌으나, 가을에는 $r=0.271$ ($p<0.01$)로 낮은 상관관계를 보였다. 동일 해역에서 2006년 11~12월 동안 초미소 및 미소플랑크톤의 엽록소 *a* 농도 기여율이 평균 약 70%로 나타나 크기가 매우 작은 초미소형플랑크톤이 가을에 중요한 역할을 하고 있었으며(Kang Yeon-Shik, 2008), 동해에 위치한 울산항에서도 가을에는 초미소 및 미소 크기의 엽록소 *a* 농도가 가장 높았다(Kwon Oh Youn & Kang Jung-Hoon, 2013). 따라서 본 조사해역에서 가을철 식물플랑크톤의 빈약한 현존량은 광학현미경 하에서 동정 및 계수가 어려운 초미소 및 미소 식물플랑크톤이 상당 부분 누락될 수 있음을 시사하였다.

<Table 2> Pearson correlation coefficients (*r*) between phytoplankton abundance and chlorophyll *a* observed from 2008 to 2014

	Phytoplankton abundance						
	Total	Layer		Season			
		Surface	Bottom	Winter	Spring	Summer	Autumn
Chl. <i>a</i>	0.719** (n=553)	0.738** (n=275)	0.719** (n=276)	0.695** (n=136)	0.470** (n=138)	0.824** (n=137)	0.271** (n=139)

** $p < 0.01$

다. 우점종

조사기간 동안 출현한 주요 우점종은 *Skeletonema costatum* s.l., *Chaetoceros* 속, *Pseudo-nitzschia pungens*, *Leptocylindrus danicus* 및 *Paralia sulcata* 등 규조류가 대부분을 차지하였고, 이 외 은편모조류(*Cryptomonads* spp.)와 와편모조류인 *Cochlodinium polykrikoides* 한 종이었다. 우점종으로 출현한 빈도가 가장 높았던 종은 *Skeletonema costatum* s.l.이었고, 다음으로 *Pseudo-nitzschia pungens*, *Chaetoceros curvisetus*, *Leptocylindrus danicus*, *Paralia sulcata* 등으로 나타났다. 표·저층 간 우점종은 유사하였다.

계절별 주요 최우점종을 살펴보면, 겨울에는 *Skeletonema costatum* s.l., *Chaetoceros socialis*, *Paralia sulcata*, 봄에는 *Leptocylindrus danicus*, 여름에는 *Chaetoceros* 속, *Skeletonema costatum* s.l., *Pseudo-nitzschia* 속, 가을에는 *Chaetoceros* 속, *Pseudo-nitzschia pungens*, *Skeletonema costatum* s.l.으로 *Skeletonema costatum* s.l.과 *Chaetoceros* 속의 종들이 계절에 관계없이 조사해역에 폭넓게 분포하고 있었다(<Table 3> 참조). 이들 주요 우점종 외 적조가 크게 발생했던 2013년 여름에 *Cochlodinium polykrikoides*가 우점종으로 출현하였다. 1992년부터 1996년까지 동일 해역에서는 *Chaetoceros debilis*, *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira decipiens* 등의 규조류가 계절에 관계없이 현존량에 기여를 하고 있었으며, 겨울에 *Chaetoceros socialis*, 여름에 *Chaetoceros* 속의 종

들이 많은 현존량을 기록하였다(Kang Yeon Shik & Choi Joong Ki, 2002). 본 조사에서 주요 우점종으로 출현하지 않은 *Thalassiosira decipiens*를 제외하면 겨울과 여름의 우점종 출현은 이전과 동일한 양상으로 지속되고 있음을 보여주었다.

조사해역에서 우점종으로 출현한 빈도가 가장 높았던 *Skeletonema costatum* s.l.은 광온, 광염성으로 기수역에서부터 해양에 이르기까지 연안해역에 널리 분포하는 보편종이며(Werner, 1977), 우리나라 연안에서는 연중 출현한다. 이 종은 질산염과 인산염이 공급되지 않는 상황에서도 이들 영양염을 세포 내에 저장할 수 있는 성장 특성을 가지고 있기 때문에(Krom et al., 1991), 다른 종들에 비해 영양염에 대한 경쟁력 우위를 보일 수 있다. *Pseudo-nitzschia pungens*는 연안종으로 우리나라의 동·서·남해 연안에서 모두 출현하며 특히 진해만에서는 봄(4~6월)에 대량증식한다고 알려져 있다(Baek Jeong Hyeon, 1996). 본 해역에서 우점종으로 출현한 빈도는 높았으나 대량증식은 관찰되지 않았으며, 겨울을 제외한 나머지 계절에 대체로 우점종으로 출현하여 봄부터 가을까지 널리 분포하고 있는 것으로 나타났다. 주로 여름에 우점한 *Chaetoceros curvisetus*는 북 온대부터 열대 해역까지 빈번하게 출현하는 연안성 종으로(Shevchenko, Orlova & Hernández-Becerril, 2006), 우리나라 연안 해역에도 종종 출현한다(Lee Jin Hwan, 1995).

<Table 3> Dominant species observed in a seasonal basis from 2008 to 2014 (Percentage of total individuals are in parenthesis.)

	February	May	August	November
2008	<i>Skeletonema costatum</i> s.l. (19.0) <i>Chaetoceros socialis</i> (16.0)	<i>Leptocylindrus danicus</i> (41.1) <i>Skeletonema costatum</i> s.l. (27.8)	<i>Chaetoceros</i> spp. (39.4) <i>Chaetoceros curvisetus</i> (23.7)	<i>Chaetoceros</i> spp. (13.8) <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> (9.7)
2009	<i>Paralia sulcata</i> (33.8) <i>Skeletonema costatum</i> s.l. (33.0)	<i>Leptocylindrus danicus</i> (98.7)	<i>Chaetoceros curvisetus</i> (30.9) <i>Chaetoceros affinis</i> (12.6)	<i>Chaetoceros</i> spp. (24.2) <i>Guinardia striata</i> (23.1)
2010	<i>Lauderia annulata</i> (56.1)	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i> (30.0) <i>Skeletonema costatum</i> s.l. (26.9)	<i>Skeletonema costatum</i> s.l. (38.3) <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> (28.5)	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i> (23.2) <i>Guinardia striata</i> (15.5)
2011	<i>Skeletonema costatum</i> s.l. (57.7) <i>Paralia sulcata</i> (15.7)	<i>Leptocylindrus danicus</i> (77.5) <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> (12.0)	<i>Chaetoceros curvisetus</i> (46.8) <i>Skeletonema costatum</i> s.l. (13.6)	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i> (13.1) Cryptomonads spp. (13.1)
2012	<i>Chaetoceros socialis</i> (41.3) <i>Skeletonema costatum</i> s.l. (16.4)	<i>Leptocylindrus danicus</i> (98.7)	<i>Skeletonema costatum</i> s.l. (31.9) <i>Chaetoceros curvisetus</i> (19.0)	<i>Skeletonema costatum</i> s.l. (10.3) <i>Paralia sulcata</i> (10.2)
2013	<i>Paralia sulcata</i> (18.5) <i>Chaetoceros curvisetus</i> (13.2)	<i>Leptocylindrus danicus</i> (93.7)	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i> (21.3) <i>Cochlodinium polykrikoides</i> (20.5)	<i>Chaetoceros debilis</i> (13.5) Cryptomonads spp. (9.3)
2014	<i>Paralia sulcata</i> (16.7) <i>Skeletonema costatum</i> s.l. (14.0)	<i>Chaetoceros debilis</i> (34.2) <i>Chaetoceros curvisetus</i> (30.9)	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp. (35.2) <i>Skeletonema costatum</i> s.l. (22.8)	<i>Thalassionema nitzschioides</i> (20.8) <i>Skeletonema costatum</i> s.l. (19.4)

한편 *Chaetoceros socialis*는 겨울에만 우점종으로 출현함으로써, 동해 연안에서 정성적으로 연중 출현하고 있으나 대발생은 주로 겨울에 간헐적으로 발생하고(Kang Yeon Shik, Choi Joong Ki & Eum Hee Moon, 2003), 가을 및 겨울에 우리나라 연안 해역에서 주요 우점종으로 출현한다는(Lee Jin Hwan, Jung Seung Won & Kim Jong-Man, 2005) 결과와 일치하였다. *Leptocylindrus danicus*는 41.1% (2008년 5월)에서 최대 98.7% (2009년 및 2012년 5월)까지 우점율을 보이며 봄철에만 우점 출현하였다. 이 종은 일시 플랑크톤으로 표층에서 대발생이 일어나고 협염성(Werner, 1977)으로 주로 4-6월에 우점하는

종으로 Kang Yeon Shik, Choi Joong Ki & Eum Hee Moon (2003)의 연구에서 본 조사해역을 비롯해서 울진에서도 봄에 가장 많은 현존량을 보이는 것으로 보고되었다. 또한 우점율에 있어서는 다소 차이가 있으나, 동해 남부해역(Shim Jae Hyung, Yeo Hwan Goo & Park Jong Gyu, 1995; Kim A-Ram et al., 2014), 고리 원자력발전소 주변해역(Yeo Hwan Goo & Shim Jae Hyung, 1992; Yeo Hwan-Goo & Huh Sung-Hoi, 1999), 통영 바다목장 해역(Lee Jin Hwan, Jung Seung Won & Kim Jong-Man, 2005; Jung Seung Won, Kwon Oh Youn & Lee Jin Hwan, 2008) 및 진해만(Park Kyung-Woo, Suh Young-Sang & Lim Weol-Ae,

2012) 등에서 봄에 주요 우점종으로 출현하여, 우리나라 동해와 남해 연안의 봄철 대표종임을 시사하였다. *Paralia sulcata*는 15.7~33.8%의 우점율을 보이며 수직혼합이 활발한 겨울철에 우점 출현하였다. 이 종은 일시성 부유 규조류로 고리, 월성, 울진 및 영광 원자력발전소 주변해역에서도 모두 겨울에 높은 점유율을 나타내고 있었다 (Cho Gi Chang, 1988; Yeo Hwan Goo & Shim Jae Hyung, 1992; Kang Yeon Shik, Choi Joong Ki & Eum Hee Moon, 2003). *Paralia sulcata*는 *Skeletonema costatum* 보다 물리적인 환경에 적응력이 더 강하기 때문에(Riley, 1967) 물리적 환경 변화가 심한 겨울철에 우점할 수 있었던 것으로 추정되었다. 동해 연안에서 *Cochlodinium polykrikoides*에 의한 적조는 주로 남해 연안에서 생겨난 적조가 해류를 타고 이동하여 동해안까지 영향을 주는 경우 발생한다(Kim Hak-Gyoon et al., 2001). 본 조사에서 이 종은 2013년 여름 표층에서 27.9%의 우점율을 보이며 최우점종으로 출현하였으나, 평균 현존량은 2.8×10^5 cells/L로 적조를 일으키는 수준에는 미치지 못하였다. 이 때 표층 수온과 염분은 각각 22.76°C와 33.55 psu로 *Cochlodinium polykrikoides*의 성장 최적 수온(25°C) 및 염분(35‰ 전후) (Lee Chang Kyu et al., 2001)에 비해 다소 낮은 수온과 염분 농도를 보임으로써, *Cochlodinium polykrikoides*를 함유한 해류가 동해안으로 올라오면서, 난류의 세기가 약화되고 해류의 성질이 변화함에 따라 *Cochlodinium polykrikoides*의 성장에 제한을 주었을 것으로 유추되었다.

라. 식물플랑크톤 현존량에 미치는 환경요인

식물플랑크톤의 현존량에 영향을 미치는 환경요인을 파악하기 위해 조사기간 전체, 표층과 저층 그리고 계절별로 구분하여 단계적회귀분석(Stepwise regression analysis)을 실시하였다. 전체 조사기간 동안 식물플랑크톤 현존량에 영향을 미친 환경요인은 염분, pH, P 및 Si이었다($R^2=0.268$,

$p<0.001$). 수층별로는 표층에서 수온, 염분, pH, DO, DIN 및 P ($R^2=0.439$, $p<0.001$), 저층에서 pH, DIN, P 및 Si ($R^2=0.379$, $p<0.001$)로 나타나 표·저층 간 식물플랑크톤 현존량에 미치는 환경요인들의 중요 변수는 물리적 요인들에 의해서 구분되었다. 즉 파도, 해류, 담수 유입, 기상(강수, 기온 등) 등의 영향을 많이 받는 표층에서는 수온, 염분, pH 및 DO 등 물리적 요인이 주요 영향변수인 반면, 이에 비해 안정된 환경인 저층에서는 화학적 요인인 영양염류들이 주요 변수로 도출되었다. 또한 계절별로는 겨울에 DO와 DIN이 영향을 미치고 있었으나, 결정계수 $R^2=0.141$ ($p<0.001$)로 아주 낮게 나타났다. 봄에는 수온, 염분 및 pH ($R^2=0.268$, $p<0.001$), 여름에는 수온, 염분, pH, SS 및 Si ($R^2=0.448$, $p<0.001$), 가을에는 염분, DO, SS, DIN 및 P ($R^2=0.415$, $p<0.001$)가 식물플랑크톤 현존량에 영향을 미치고 있었다(<Table 4> 참조).

수온은 표층($\beta=0.351$, $p<0.01$)과 봄($\beta=0.419$, $p<0.001$)에 식물플랑크톤 현존량에 양(+)의 영향을 미침으로써 단세포인 식물플랑크톤이 수온이 증가하면 세포의 활성화로 성장률이 증가한다는 것을 잘 보여주었다(Davison & Davison, 1987). 그러나 여름에는 수온이 현존량에 음(-)의 영향을 미치고 있었다($\beta=-0.294$, $p<0.01$). 이는 2010년(평균 1.4×10^6 cells/L)과 2012년(평균 6.6×10^5 cells/L)에 현존량이 다른 해에 비해 3~6배 많았던 반면 수온은 각각 평균 14.78°C 및 19.62°C로 낮게 관찰됨으로써 이들의 관계가 회귀분석 결과에 반영된 것으로 생각되었다.

다양한 환경요인 중 P의 β 값(영향력)이 -0.448~-0.774 ($p<0.001$)로 다른 환경요인 대비 큰 값을 보이고 있어 식물플랑크톤 현존량에 가장 큰 영향을 미치고 있는 인자로 판단되었다. P는 현존량에 음(-)의 영향을 미치고 있어, 식물플랑크톤이 그들의 성장에 영양염인 P를 소비한 사실을 알려주는 동시에 해당해역에서 P가 성장 제한요인이 될 수도 있음을 시사하였다.

<Table 4> Stepwise regression analysis of environmental variables affecting phytoplankton abundance from 2008 to 2014 (DV: Dependent variable, IV: Independent variable)

		DV	IV	β	F	R^2
Total	Phytoplankton abundance		Sal.	0.127**	50.107***	0.268 (n=553)
			pH	-0.140***		
			P	-0.654***		
			Si	0.155**		
Layer	Surface	Phytoplankton abundance	Temp.	0.351**	34.953***	0.439 (n=275)
			Sal.	0.283***		
			pH	-0.215***		
			DO	0.472***		
			DIN	-0.241***		
	Bottom	Phytoplankton abundance	pH	-0.099*	41.377***	0.379 (n=276)
			DIN	0.212**		
			P	-0.774***		
			Si	0.197**		
Season	Winter	Phytoplankton abundance	DO	0.187*	10.891***	0.141 (n=136)
			DIN	0.413***		
	Spring	Phytoplankton abundance	Temp.	0.419***	16.360***	0.268 (n=138)
			Sal.	-0.213*		
			pH	-0.474***		
	Summer	Phytoplankton abundance	Temp.	-0.294**	21.225***	0.448 (n=137)
			Sal.	0.377***		
			pH	0.416***		
			SS	0.369***		
	Autumn	Phytoplankton abundance	Si	-0.465***	18.862***	0.415 (n=139)
			Sal.	-0.177*		
			DO	-0.218**		
			SS	-0.528***		
			DIN	0.368**		
	P	-0.448***				

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

일반적으로 해양에서 Si:N:P는 16:16:1로 알려져 있고(Brezinski, 1985), DIN:P>22 및 Si:P>22 이면 P에 의해서 식물플랑크톤은 성장에 제한을 받는다(Justić et al., 1995). 본 조사에서 전체 DIN:P는 16.4, Si:P가 33.2로 나타났고, 표층과 저층에서 DIN:P는 각각 18.2 및 14.5, Si:P가 각각 34.7 및 31.7로 나타났다. DIN:P의 값은 비록 22 이하의 값을 보였지만, Si:P가 22 이상의 값을 보였고 P의 평균 농도가 $0.18 \pm 0.09 \mu\text{M}$ 로 임계농도 $0.2 \mu\text{M}$ 이하로 나타남으로써 P가 제한인자로 작

용할 가능성이 큰 것으로 추정되었다. 대부분의 연안역에서는 정상적인 N:P인 16 보다 낮게 나타나고 질소의 재생산 속도가 인보다 느리기 때문에 일반적으로 해양에서는 인이나 규소보다 질소가 식물플랑크톤의 성장 제한요인으로 알려져 있다(Shim Jae Hyung, 2003). 그러나 본 해역에서는 P가 제한인자로 나타났고 이러한 사실은 Kang Yeon Shik & Choi Joong Ki (2002)에 의해서도 보고되었다. 고리, 울진 및 월성 원자력발전소 주변해역에서 평균 N:P 비가 각각 18.8, 30.0 및

25.9로 나타나 P가 식물플랑크톤의 성장에 제한 인자로 작용한다고 하였다. 한편 식물플랑크톤은 주변 해수의 인산염 농도가 낮더라도 성장에 필요한 과잉의 인산염을 흡수(luxury uptake)할 수 있는 능력이 있고, 영양염류가 결핍되었을 때 세포가 유지해야하는 최저농도 보다 약 10배 이상을 세포 내에 축적할 수 있는 것으로 알려져 있다(Nalewajko & Lean, 1980). 또한 해수 중 인산염이 고갈되면 식물플랑크톤은 해수 중 유기인(DOP)을 가수분해한 후 인산염을 흡수할 수도 있다(González-Gil et al., 1998). 실제로 식물플랑크톤의 용존태 유기인 이용 실험에서는 *Skeletonema costatum*과 *Chaetoceros didymus*가 가수분해 효소 alkaline phosphatase (APase)를 이용하여 인이 제한된 환경에서 효과적으로 유기인을 가수분해하여 성장을 유지한다고 보고되었다(Oh Seok Jin, Kwon Hyeong Kyu & Yang Han-Soeb, 2010). 그리고 조사해역 인근의 DOP 농도는 울산해역에서 0.10~0.41 μM , 감포 해역에서 0.07~0.81 μM , 동해 남서해역의 혼합층 내에서 총 인의 56%인 0.32 μM 로 나타나(Kwon Hyeong-Kyu, Jeon Seul-Gi & Oh Seok-Jin, 2016), 본 조사해역도 이와 유사한 DOP가 존재하였을 것이며 식물플랑크톤(특히 우점 출현 빈도가 높았던 *Skeletonema costatum* s.l.과 *Chaetoceros* 속의 종)은 인산염의 농도가 낮았더라도 DOP를 성장에 활용하였을 것으로 추측된다. 따라서 인산염이 제한인자로 작용하고 있는 본 조사해역에서 식물플랑크톤은 luxury uptake와 DOP를 이용함으로써 성장에 불리한 환경을 극복할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구는 장기간의 자료 분석을 통해 환경변화와 식물플랑크톤 군집 변화 간 관계를 알아보고 그 결과 연구해역에서는 P가 식물플랑크톤의 성장에 가장 큰 영향을 미치는 제한인자임을 시사하였다. 따라서 향후 식물플랑크톤의 출현량 변화와 연관하여 P의 농도 변화를 주목할 필요가 있을 것으로 생각되었다.

References

- Aubry, F. B. · Berton, A. · Bastianini, M. · Socal, G. & Acri, F.(2004). Phytoplankton succession in a coastal area of the NW Adriatic, over a 10-year sampling period (1990-1999). *Continental Shelf Research* 24, 97~115.
- Baek, Jeong Hyeon(1996). Domoic acid-Producing *Pseudonitzschia multiseries* (Hasle) Hasle from Jinhae Bay, Korea: Morphology, Growth and Population Dynamics. Dissertation, Sangmyung University, 55pp.
- Brzezinski, M. A.(1985). The Si:C:N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environmental variables. *Journal of Phycology* 21, 347~357.
- Brzezinski, M. A. · Phillips, D. R. · Chavez, F. P. · Friederich, G. E. & Dugdale, R. C.(1997). Silica production in the Monterey, California, upwelling system. *Limnology and Oceanography* 42, 1694~1705.
- Cho, Gi Chang(1988). The Effects of Thermal Effluents from Nuclear Power Plants on the Ecology of Phytoplankton. Dissertation, Inha University, 80pp.
- Choe, Sang(1972). Studies on the seasonal variations of plankton organisms and suspended particulate matter in the coastal area of Ko-ri. *The Journal of the Oceanological Society of Korea* 7, 47~58.
- Choi, Joong Ki & Shim, Jae Hyung(1986). The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea III. Phytoplankton composition, standing crops, tychopelagic plankton. *The Journal of the Oceanological Society of Korea* 21, 156~170.
- Choi, Joong Ki · Kang, Yeon-Shik · Noh, Jae-Hoon & Shim, Jae Hyung(2011). Distribution of phytoplankton in coastal waters of the East Sea. In: Choi, J.-K. (ed.), *Biology of Korea -Plankton Ecology in Coastal Waters of Korea-*. Donghwa Technology Publishing Company, Seoul, pp. 68~85.
- Chung, Chang Soo · Shim, Jae Hyung · Park, Yong Chul & Park, Sang-Gap(1989). Primary productivity and nitrogenous nutrient dynamics in the East Sea of Korea. *The Journal of the Oceanological Society*

- of Korea 24, 52~61.
- Cottingham, K. L.(1999). Nutrients and zooplankton as multiple stressors of phytoplankton communities: Evidence from size structure. *Limnology and Oceanography* 44, 810~827.
- Davison, I. R. & Davison, J. O.(1987). The effect of growth temperature on enzyme activities in the brown algae *Laminaria saccharina*. *British Phycological Journal* 22, 77~87.
- Dortch, Q. & Whitley, T. E.(1992). Does nitrogen of silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions? *Continental Shelf Research* 12, 1293~1309.
- González-Gil, S. · Keafer, B. A. · Jovine, R. V. M. · Aguilera, A. · Lu, S. & Anderson, D. M.(1998). Detection and quantification of alkaline phosphatase in single cells of phosphorus-starved marine phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series* 164, 21~35.
- Ingrid, G. · Andersen, T. & Vadstein, O.(1996). Pelagic food webs and eutrophication of coastal waters: Impact of grazers on algal communities. *Marine Pollution Bulletin* 33, 22~35.
- Jeong, Byungkwan · Shin, Yongsik · Yang, Sungryull & Park, Chul(2011). Monthly variation of phytoplankton community in Asan Bay, Korea. *The Sea* 16, 238~245.
- Jiménez, F. · Rodríguez, J. · Bautista, B. & Rodríguez, V.(1987). Relations between chlorophyll, phytoplankton cell abundance and biovolume during a winter bloom in Mediterranean coastal waters. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 105, 161~173.
- Jung, Seung Won · Kwon, Oh Youn & Lee, Jin Hwan(2008). Variation and relationship between standing crops and biomass of phytoplankton dominant species in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters from 2000 to 2007. *Algae* 23, 53~61.
- Justić, D. · Rabalais, N. N. · Turner, R. E. & Dortch, Q.(1995). Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: Stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 40, 339~356.
- Kang, Pil Jun · Kim, Chong Kwan & Hwang, Sun Wan(2015). Fish assemblages collected by bottom trammel gill net around Gampo in the East Sea of Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* 33, 27~33.
- Kang, Yeon-Shik(2008). Characteristics of phytoplankton communities in the coastal waters of power plant. *Algae* 23, 31~52.
- Kang, Yeon Shik · Choi, Hyu Chang · Lim, Joo Hwan · Jeon, In Seong & Seo, Ji Ho(2005). Dynamics of the phytoplankton community in the coastal waters of Chuksan Harbor, East Sea. *Algae* 20, 345~352.
- Kang, Yeon Shik & Choi, Joong Ki(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, 85~111.
- Kang, Yeon Shik & Choi, Joong Ki(2002). Ecological characteristics of phytoplankton communities in the coastal waters of Gori, Wulseong, Uljin and Younggwang II. Distributions of standing crops and environmental variables (1992~1996). *The Sea* 7, 108~128.
- Kang, Yeon Shik · Choi, Joong Ki & Eum, Hee Moon(2003). Ecological characteristics of phytoplankton communities in the coastal waters of Gori, Wulseong, Uljin and Younggwang III. Distribution of dominant species and environmental variables. *Algae* 18, 29~47.
- Kim, A-Ram · Youn, Seok-Hyun · Chung, Mi-Hee · Yoon, Sang-Chol & Moon, Chang-Ho(2014). The influences of coastal upwelling on phytoplankton community in the southern part of East Sea, Korea. *The Sea* 19, 287~301.
- Kim, Hak-Gyoon · Jung, Chang-Su · Lim, Wol-Ae · Lee, Chang-Kyu · Kim, Sook-Yang · Youn, Sung-Hwa · Cho, Yong-Chul & Lee, Sam-Geun(2001). The spatio-temporal progress of *Cochlodinium polykrikoides* blooms in the coastal waters of Korea. *Journal of the Korean Fisheries Society* 34, 691~696.
- Kim, Sang-Woo · Go, Woo-Jin · Kim, Seong-Soo · Jeong, Hee-Dong & Yamada, Keiko(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. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety* 16, 345~352.

- Korea Electric Power Corporation(1990). Environmental Impact Assessment of Wolsong Nuclear Power Plant No.2 Construction. 530pp.
- Krom, M. D. · Kress, N. · Brenner, S. & Gordon, L. I.(1991). Phosphorus limitation of primary productivity in the eastern Mediterranean Sea. *Limnology and Oceanography* 36, 424-432.
- Kwon, Hyeong-Kyu · Jeon, Seul-Gi & Oh, Seok-Jin (2016). Effects of dissolved organic nitrogen on the growth of dominant phytoplankton in the southwestern part of East Sea in late summer. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety* 22, 042~051.
- Kwon, Oh Youn & Kang, Jung-Hoon(2013) Seasonal variation of physico-chemical factors and size-fractionated phytoplankton biomass at Ulsan seaport of East Sea in Korea. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 14, 6008~6014.
- Lee, Chang Kyu · Kim, Hyung Chul · Lee, Sam-Geun · Jung, Chang Su · Kim, Hak Gyoon & Lim, Wol Ae(2001). Abundance of harmful algae, *Cochlodinium polykrikoides*, *Gyrodinium impudicum*, *Gymnodinium catenatum* in the coastal area of South Sea of Korea and their effects of temperature, salinity, irradiance and nutrient on the growth in culture. *Journal of the Korean Fisheries Society* 34, 536~544.
- Lee, Dong-Kyu · Kwon, Jae-Il & Hahn, Sang-Bok (1998). The wind effect on the cold water formation near Gampo-Ulgi coast. *Journal of the Korean Fisheries Society* 31, 359~371.
- Lee, Jin Hwan(1995). Additional check-list of marine planktonic algae in the coastal waters of Korea; I. Bacillariophyceae. Sangmung University, *Journal of Natural Sciences* 2, 71~198.
- Lee, Jin Hwan · Jung, Seung Won & Kim, Jong-Man(2005). Effects of environmental factors on phytoplankton communities in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters, Korea. *Ocean and Polar Research* 27, 15~24.
- Lee, Joon-Baek · Han, Myung-Soo & Yang, Han-Seob(1998). The ecosystem of the southern coastal waters of the East Sea, Korea I. Phytoplankton community structure and primary productivity in September, 1994. *Journal of the Korean Fisheries Society* 31, 45~55.
- Lee, Ki-Sung · Ko, Dong-Kyu · Huh, Seung · Lee, Young-Keun · Choi, Chung-Il & Choi, Yong-Keel (1999). Distribution of nutritive salts and organic matters in the coastal area of East Sea. *Korean Journal of Environmental Biology* 17, 51~58.
- Lee, Tongsup & Kim, Il-Nam(2003). Chemical imprints of the upwelled waters off the coast of the southern east of Korea. *The Journal of the Oceanological Society of Korea* 38, 101~110.
- Li, T. · Liu, S. · Huang, L. · Huang, H. · Lian, J. · Yan, Y. & Lin, S.(2011). Diatom to dinoflagellate shift in the summer phytoplankton community in a bay impacted by nuclear power plant thermal effluent. *Marine Ecology Progress Series* 424, 75~85.
- Lim, Weol Ae · Lee, Young Sik · Kang, Young Sil · Kim, Seong-Soo · Kim, Seong Hyun · Choi, Hye Sung · Hur, Young Baek · Lee, Tae Seek & Lee, Jae Young(2010). Inter-annual variation of phytoplankton community structure in aquacultural areas of Tongyeong, SE coastal Waters of Korea. *The Sea* 15, 158~165.
- Livingston, R. J.(2001). Eutrophication Processes in Coastal Systems: Origin and Succession of Plankton Blooms and Effects on Secondary Production in Gulf Coast Estuaries. Center for Aquatic Research and Resource Management, Florida State University, CRC Press, 327pp.
- Lo, W. -T. · Hwang, J. -J. · Hsu, P. -K. · Hsieh, H. -Y. · Tu, Y. -Y. · Fang, T. -H. & Hwang, J. -S.(2004). Seasonal and spatial distribution of phytoplankton in the waters off nuclear power plants, north of Taiwan. *Journal of Marine Science and Technology* 12, 372~379.
- Moon, Chang-Ho · Yang, Han-Soeb & Lee, Kwang Woo(1996) Regeneration processes of nutrients in the polar front area of the East Sea I. Relationships between water mass and nutrient distribution pattern in autumn. *Bulletin of the Korean Fisheries Society* 29, 503~526.
- Nalewajko, C. & Lean, D. R. S.(1980). Phosphorus. In: Morris, I. (ed.), *The Physiological Ecology of Phytoplankton*. Oxford Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 235~258.
- Nybakken, J. W. & Bertness, M. D.(2005). Marine

- Biology: An Ecological Approach (6th edition). Benjamin Cummings, San Francisco, 579pp.
- Nybakken, J. W.(1993). Marine Biology: An Ecological Approach (3rd edition). Harper Collins College Publishers, New York, 462pp.
- Oh, Hyun Ju · Suh, Young Sang & Heo, Seung(2004). The relationship between phytoplankton distribution and environmental conditions of the upwelling cold water in the eastern coast of the Korean Peninsula. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 7, 166~173.
- Oh, Seok Jin · Kwon, Hyeong Kyu & Yang Han-Soeb(2010). Alkaline phosphatase activity and utilization of dissolved organic phosphorus by phytoplankton isolated from Korean coastal waters. The Sea 15, 16~24.
- Park, Kyung-Woo · Suh, Young-Sang & Lim, Weol-Ae(2012). Seasonal changes in phytoplankton composition in Jinhae Bay, 2011. Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety 18, 520~529.
- Poornima, E. H. · Rajadurai, M. · Rao, T. S. · Anupkumar, B. · Rajamohan, R. · Narasimhan, S. V. · Rao, V. N. R. & Venugopalan, V. P.(2005). Impact of thermal discharge from a tropical coastal power plant on phytoplankton. Journal of Thermal Biology 30, 307~316.
- Rabalais, N. N. · Turner, R. E. · Díaz, R. J. & Justić, D.(2009). Global change and eutrophication of coastal waters. ICES Journal of Marine Science 66, 1528~1537.
- Riley, G. A.(1967). The plankton of estuaries. In: Lauff, G.H. (ed.), Estuaries. American Association for the Advancement of Science, Washington D.C., pp. 316~328.
- Shevchenko, O. G. · Orlova, T. Y. & Hernández-Becerril, D. U.(2006). The genus *Chaetoceros* (Bacillariophyta) from Peter the Great Bay, Sea of Japan. Botanica Marina 49, 236~258.
- Shim, Jae Hyung(2003). Plankton Ecology. Seoul National University Press, Seoul, 382pp.
- Shim, Jae Hyung & Lee, Won Ho(1987). Distribution of phytoplankton species and associated environmental factors in the southwestern waters of the East Sea (Sea of Japan), Korea: A canonical correlation analysis. The Journal of the Oceanological Society of Korea 22, 34~42.
- Shim, Jae Hyung · Yeo, Hwan Goo & Park, Jong Gyu(1992). Primary production system in the southern waters of the East Sea, Korea. I. Biomass and productivity. The Journal of the Oceanological Society of Korea 27, 91~100.
- Shim, Jae Hyung · Yeo, Hwan Goo & Park, Jong Gyu(1995). Primary production system in the southern waters of the East Sea, Korea II. The structure of phytoplankton community. The Journal of the Korean Society of Oceanography 30, 163~169.
- Shim, Jeong-Min · Jin, Hyun-Gook · Sung, Ki-Tack · Hwang, Jae-Dong · Yun, Suk-Hyun · Lee, Yong-Hwa · Kim, Young Suk & Kwon, Ki-Young(2008). The community structure of phytoplankton in winter and summer around Wangdol-cho. Journal of the Environmental Sciences 17, 1403~1411.
- Werner, D.(1977). The Biology of Diatoms. University of California Press, Los Angeles, 469pp.
- Yeo, Hwan Goo & Shim, Jae Hyung(1992). Ecological effect of thermal effluent in the Korean coastal waters III. Abiotic environment and the community structure of primary producers in the vicinity of Kori Nuclear Power Plant. Korean Journal of Environmental Biology 10, 122~142.
- Yeo, Hwan-Goo & Huh, Sung-Hoi(1999). Temporal and spatial variations of phytoplankton communities in the pelagic environment of Kori, Korea. Korean Journal of Environmental Biology 17, 71~77.
- Yoo, Man Ho · Song, Tae Yoon · Kim, Eun Soo & Choi, Joong Ki(2007). The characteristics on the spatial and temporal distribution of phytoplankton in the western Jinhae Bay, Korea. The Sea 12, 305~314.
- Yoon, Yang Ho(2014). Spatio-temporal distribution of phytoplankton community in the Jangsu Bay and adjoining sea of South Sea, Korea. Korean Journal of Environmental Biology 32, 75~87.
- Yoon, Yang Ho(2015). Spatio-temporal distributions of phytoplankton community in the coastal waters of Gogunsan Islands(CoWGLs), West Sea of Korea. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society 16, 2287~2300.
- Yoon, Yang Ho(2016). Bio-environmental characteristics

of the Uljin Marine Ranching Area (UMRA), East Sea of Korea. 1. Spatio-temporal distributions of phytoplankton community. Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy 19, 37~46.

-
- Received : 03 August, 2016
 - Revised : 25 August, 2016
 - Accepted : 31 August, 2016