

Article

<https://doi.org/10.7850/jkso.2017.22.3.077>
pISSN : 1226-2978

가을철 동해 남서부해역 초미소식물플랑크톤의 전체 식물플랑크톤 생체량에 대한 기여도 변동성

박미옥 · 이예지*
부경대학교 해양학과

Variability of Contribution of Picophytoplankton in the Phytoplankton Community in the Southwestern East Sea

MI OK PARK AND YE JI LEE*

Pukyong National University, Department of Oceanography, Busan 48513, Korea

*Corresponding author: lyj5181@naver.com

Editor Choi Dong Han

Received 13 July 2017; Revised 30 August 2017; Accepted 31 August 2017

ABSTRACT

초미소플랑크톤은 빈영양해역의 중요한 일차생산자로서, 동해에서도 전체 식물플랑크톤의 생체량에 큰 기여를 하는 것으로 알려져 있다. 동해는 전 세계 평균에 비해 표층 수온이 가파르게 증가하여, 이에 따른 해양생태계의 다양한 변화가 보고되고 있다. 그러나, 기후변화에 따른 동해 생태계의 변화 중 가장 기본적인 일차생산자의 군집구조의 변동성에 대한 연구는 매우 부족한 까닭에 식물플랑크톤 군집 조성의 장기적인 변동성을 모니터링할 필요가 있다. 따라서 우리는 동해 남서부해역에서의 환경 변화에 따른 초미소플랑크톤의 생체량 기여도와 식물플랑크톤 군집구조의 변화를 알기 위해, 2011, 2013, 2015년 가을철에 초미소플랑크톤(<3 μm)의 전체 식물플랑크톤에 대한 기여도를 측정하였다. 크기별 분급 결과, 초미소플랑크톤의 전체 Chl *a* 생체량에 대한 평균 기여도는 각각 2011년 약 38%, 2013년 59%, 2015년 7%로 연변동성이 크게 나타났다. 각 연도 별, 환경요인 중 평년대비 수온 변화(ΔT)는 2013년에 +1.6°C로 최고치를, 그리고 2015년에 -0.9°C로 가장 낮게 나타났다. 동해 남부 해역의 표층수온과 식물플랑크톤 군집구조에 대한 초미소식물플랑크톤의 기여도 사이에 밀접한 양의 상관관계를 확인하였다($R^2 > 0.9$). 향후 기후 변화에 의한 동해에서의 해수 수온 증가가 미치는 일차생산자의 군집구조의 장기 변화에 대한 지속적인 모니터링과 이해가 필요하다고 판단된다.

Picophytoplankton, an important primary producer especially at the oligotrophic region, is known to contribute a significant portion of the total phytoplankton biomass in the East Sea of Korea. During autumn in the southwestern East Sea, frequent upwellings and oligotrophic conditions occur and annual variation of primary productivity is known to be significant. Moreover sea surface temperature (SST) of the East Sea is steeply increasing compared to global average increase, so various changes in marine ecosystem related with increase of SST are reported. Taking such circumstances into consideration, we measured the contribution from picophytoplankton fraction to total phytoplankton composition by size fraction of phytoplankton biomass during the autumn seasons from 2011, 2013 and 2015 and examined the variation of the phytoplankton composition. As a result of size fraction analyses, we found that the variation of contribution from picophytoplankton(<3 μm) to total community of phytoplankton was high and the average fractions of picophytoplankton were measured as 38% (2011), 59% (2013), 7% (2015), respectively. The difference between measured SST and annual mean SST (ΔT) was highest (+1.6°C) in autumn of 2013 and lowest (-0.9°C) in autumn of 2015. The close positive correlation between ΔSST and fraction of picophytoplankton was confirmed ($R^2 > 0.9$). The increase in SST at the southern East Sea was confirmed as one of the main environmental factors in the increase of the contribution from picophytoplankton. Monitoring of changes in the community structure of primary producers and the influences of the environmental factors including SST in the East Sea is necessary to understand the interactions of ecosystem of the East Sea and the climate change in the near future.

Keywords: Picophytoplankton, Size fraction, Chlorophyll *a*, ΔT , The East Sea

1. 서론

동해는 최근 수십 년 동안 수온 증가에 따른 물리화학적 환경 및 이에 수반되는 생물학적 특성들이 역동적인 변화를 겪고 있다. Jones *et al.* (2007)는 전 세계 해양의 평균 수온이 1955-1998년 기간 동안 0-3000 m 두께의 수층에서 섭씨 0.037°C 증가했다고 보고했으며, 1982-2006년 기간 동안 동아시아 해역들의 표층수온 변화를 조사한 Belkin (2009)도 1.09°C 상승한 동해의 경우가 엄청나게 빠른 수온 증가를 보였음을 밝혔다. 동해의 표층수온의 경우, 과거 1986-1998년 기간 동안 2°C (혹은 1.67°C/decade)가 증가한 것으로 이는 전 지구적 평균 상승 속도에 비해 약 12배 이상이 되는 가파른 상승 속도이다. 최근 Jo *et al.* (2014)도 동해 연안역 표층수온의 증가 속도가 약 0.04°C/년으로 전 지구적 평균치인 0.005°C/년에 비해 훨씬 빠르게 진행되고 있음을 보고했다.

수온 증가에 따른 물리화학적 환경 변화의 가장 대표적인 예로는 수온 약층의 성층화 및 그에 따른 표층 아래 수심에서의 제한된 영양염 공급을 들 수 있다. 기후 변화와 연관된 물리화학적 조건의 변화는 일차생산자의 생체량과 같은 하부 영양단계에 영향을 줄 것이라고 Joo *et al.* (2016)은 예측하였으며, 특히 식물플랑크톤 군집구조가 달라짐으로써 기초 먹이단계의 변화가 일어나 수산자원의 가입량 및 생체량과 생산력에도 영향을 줄 수 있다고 보고하였다. 이 연구는 위성자료를 활용하여 동해에서의 십 년 주기 일차생산력의 변동을 조사한 것으로 2003-2012년 기간 동안 약 13%의 감소를 보고하였다. 그러나 이 연구에서는 식물플랑크톤 군집구조의 변화에 대한 자료는 제시된 바 없다.

동해에서 전체 식물플랑크톤의 생체량에 대한 초미소식물플랑크톤 중요성이 알려진 이후, Suk and Yoo (2002)은 동해에서 크기별 분급에 의한 초미소식물플랑크톤의 조성비에 대한 계절 변동을 보고하는 동시에 동해 용승에 의한 식물플랑크톤의 군집구조 변화를 관찰하면서 미소 식물플랑크톤과 초미소식물플랑크톤의 기여도를 보고하였다. 특히 2002년 봄철(4월)과 가을철(11월)을 비교하여 봄철에 비해 가을철에 초미소식물플랑크톤의 기여도가 현저히 큰 것을 보고하였다. 최근 전 (2016)이 동해 남서부해역에서 크기별 미세, 미소, 그리고 초미소 식물플랑크톤에 대한 군집구조와 일차생산력을 보고하였으나, 질소 제한 환경 하에서 다양한 질소화합물의 이용 여부를 주로 관찰하였다. 현재까지 동해에서 초미소식물플랑크톤에 대한 조사들은 주로 초미소식물플랑크톤 중 우점종과 해양 환경에 따른 종 다양성에 대한 연구들이 주를 이루고 있다 (Choi *et al.*, 2009; 김, 2014; Yona, 2015). 이에 비해 먹이 구조의 기초로서 중요한 역할을 하는 식물플랑크톤의 크기별 군집구조의 변동에 대한 장기적인 연구가 가파른 수온 상승을 보이고 있는 동해 해역에서 거의 이루어지지 않았다는 점은 주목될 필요가 있다. 즉, 기후 변화에 따른 동해 생태계의 변화를 좀 더 자세히 알기 위해서는 일차생산자인 식물플랑크톤 군집구조의 변화 역시 지속적으로 조사할 필요가 있다.

기후변화와 관련하여 일차생산자인 식물플랑크톤 군집 구조 변화는 생태계 변동을 일으키며, 먹이로서의 일차생산자의 종 조성 변화 중 특히 식물플랑크톤의 크기의 변화는 직접적으로 먹이사슬 중 다음 단계로의 영양 전달이 원활하지 못하게 되는 직접적인 문제점을 일으킬 수 있음이 알려졌다(Decembrini *et al.*, 2008). 예를 들어 남극 반도의 경우, 빙봉이 녹은 저염수가 분포하는 해역의 식물플랑크톤 군집에서 작은 크기의 식물플랑크톤이 차지하는 비율이 증가하는 현상이 뚜렷하게 관찰되었다. 주요 식물플랑크톤의 크기의 감소는 해양 먹이망 구조에 영향을 주게 되어 탄소의 흐름을 변화시킬 수 있으므로 물질순환의 조절에 중요한 요소가 된다.

해양 환경에서 식물플랑크톤 크기는 직경이 수 백 μm 에 달하는 규조류부터 2 μm 이하의 초미소식물플랑크톤까지 매우 다양하다. 그러나 과거에는 일차생산자의 생체량이 주로 큰 크기의 규조류와 와편모조류 등의 미소플랑크톤(microphytoplankton)이 현미경 관찰을 통하여 측정되다 보니 초미소식물플랑크톤의 중요성은 거의 무시되어왔다. 그러나 최근 20여 년 간의 연구들은 초미소식물플랑크톤이 군집구조의 중요한 구성원임을 확실히 밝혀주었다(Chisholm, 1988; Valout *et al.*, 1996; Partensky

et al., 1999; Susan, 2012). 연안에서 풍부한 영양염과 강한 난류가 있는 조건에서는 큰 크기의 식물플랑크톤이 주요 구성원이나, 반면에 약한 난류와 낮은 영양염을 가진 빈 영양 조건에서는 초미소식물플랑크톤의 중요성이 커지게 된다(Cullen *et al.*, 2002). 전 지구적인 관점에서 볼 때, 낮은 영양염 농도를 보이는 외양역의 비중이 오히려 더 큰 까닭에 일차생산자로서 초미소식물플랑크톤의 중요성은 더욱 큰 주목을 받고 있다(Susan, 2012).

이번 조사에서는 가을철 동해남서부해역에서 size fraction을 통해 초미소식물플랑크톤의 전체 식물플랑크톤에 대한 기여도의 변동성을 조사하고, 표층수온 변화와 식물플랑크톤의 군집구조의 변동성 간의 상관관계를 알아보려고 한다. 이 (2012)는 황해, 남해 및 동중국해 북부 해역에서 기후변화로 인한 생태계에 미치는 영향을 이해하고자 1992년부터 2008년까지 일차생산자인 식물플랑크톤 군집구조의 변동과 일차생산력의 변동 양상을 보고한 바 있다.

본 연구에서는 또한 동해가 최근 겪고 있는 환경 변화 중 급격한 수온 증가와 성층화에 의한 영양염 공급의 제한에 의해, 동해 남서부해역의 가을철 식물플랑크톤 군집구조의 변동성과 환경 요인과의 연관성을 알아보려고 하였다. 이를 위해 2011년, 2013년, 2015년까지 3회에 걸쳐 가을철 동해 남서부해역의 초미소식물플랑크톤(<3 μm)이 차지하는 비중을 size fraction을 이용해 조사하고, 수온 변화와 영양염, 그리고 혼합층 수심에 의한 영향을 고찰하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구해역

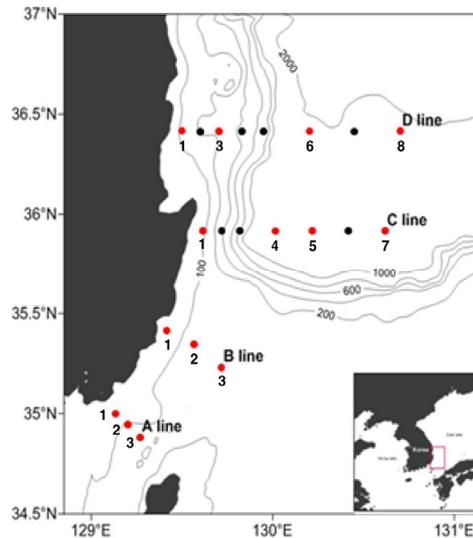


Fig. 1. A map of sampling stations in the southwestern East Sea, Korea.

본 연구가 이루어진 동해 남서부해역은(Fig. 1) 특징적으로 약 15 km 내외로 좁은 대륙붕을 가지며, 연안을 통해 인근 육상에서 매우 미비한 강물 유입의 영향을 받고 있다. 대마난류의 영향이 큰 해역으로 여름철엔 용승 현상이 빈번하게 발생하며 많은 와류현상이 관찰된다. 성 등(2012)은 지난 19년간(1990-2008년) 관측한 NOAA/AVHRR 자료를 사용하여 동북아시아 해역에 대해 표면수온의 장기변동을 분석한 결과를 보고한 바 있다. 그에 따르면 연평균 수온의 장기변동의 경향을 보면 동북아시아 해역은 대체로 수온이 상승하는 경향을 보였고, 해역에 따라 변동 경향은 다소 차이를 보였다. 우리나라 동해의 여름철 표면수온의 장기변동 경향은 대체로 전 해역에서 표면수온이 상승하고 있으며, 연간 상승률은 $0.02\sim 0.12^{\circ}\text{Cyr}^{-1}$ 범위라

고 보고하였다. 이들은 동북아시아 해역의 표층수온 연변동폭은 대체로 감소해, 여름철과 겨울철 표층수온의 차이가 줄어들고 있으나, 동중국해 북부 해역, 우리나라 남해 해역 및 동해 남부 해역에서는 겨울과 여름의 수온 차이가 오히려 더 커지고 있다고 보고하였다. 그 원인으로 동해 남서부해역의 경우 여름철은 수온이 상승하고 겨울철은 수온이 하강하기 때문에 연진폭이 증가하는 것으로 나타났다(Lin, 2005).

2.2 현장조사와 시료채취

현장 조사는 동해 남서부해역에서 2011년 9월 26~28일, 2013년 9월 30~10월 3일과 2015년 10월 5~8일 동안 총 3회에 걸쳐 부경대의 조사선 탐양호(2011년과 2013년)와 나라호(2015년)를 이용하여 4개 정선의 14개 정점들에서 해수 시료를 채취하였다(Fig. 1). 선박에 장착된 CTD(SBE 911)의 Rosette sampling system에 Niskin 채수기를 부착하여 표준 수심(0 m, 10 m, 20 m, 30 m, 50 m, 75 m, 100 m, 125 m)에서 엽록소 측정을 위해 해수 300 mL를 채수하였다. 여름철의 경우 전체 식물플랑크톤의 생체량이 상대적으로 적은 까닭에 본 연구에서는 초미소식물플랑크톤의 환경변동에 의한 군집구조에 대한 기여율과 연 변동을 더욱 민감하게 볼 수 있는 가을철을 선택하였다.

2.3 크기별 분급

채수된 해수는 식물플랑크톤의 size fraction을 위해 두 개의 여과 용기를 수직으로 연결하여 membrane filter 두 종류를(공경 3.0 μm 와 0.45 μm)를 이용해 여과하였다. 상층부 3.0 μm 공경을 가진 membrane filter에 수집된 식물플랑크톤을 micro + nanophytoplankton으로 보고, 하부에 0.45 μm 에 수집된 부분을 picophytoplankton으로 간주하였다. %picophytoplankton은 전체 엽록소 농도에 대한 picophytoplankton의 백분율로 정의하고, 이를 초미소식물플랑크톤의 생체량 기여도로써 다음과 같이 계산하였다.

$$\% \text{picophytoplankton} = \frac{\text{picophytoplankton biomass}}{\text{total biomass}} \times 100 (\%)$$

$$\text{total biomass} = (\text{picophytoplankton biomass}) + (\text{micro} + \text{nanophytoplankton biomass})$$

2.4 표층 수온자료

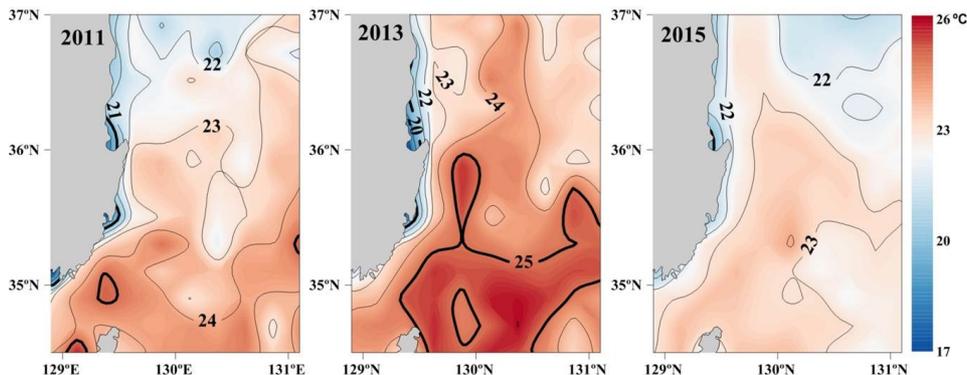


Fig. 2. Images of SST during autumn, 2011, 2013, 2015 at the southwestern East Sea (NOAA).

현장 표층 수온자료는 CTD 자료를 활용하였고, ΔT 는 국립수산물과학원 위성정보센터의 한국 근해 광역 수온 정보와 표면 수온 평년 편차를 사용하였다. 연구 해역의 가을철 표층수온에 대한 위성 이미지는 NOAA SST 위성자료를 이용하여 각 해당연도의 현장관측 기간 동안의 평균 자료로 합성하였다(Fig. 2).

2.5 식물플랑크톤 엽록소의 형광분석

해수 300 mL를 채수하여 현장에서 47 mm membrane filter(pore size 0.45 μm)로 여과하였다. 여과지를 튜브에 잘 접어 넣고 빛을 차단하여 드라이아이스가 담긴 아이스박스에 저장한 후 운반하였다. 분석 전까지 냉동 보관 되었으며, Chl *a* 농도를 측정하였다. 실험실로 운반된 여과지는 90% Acetone을 넣어 냉암소에서 24시간 이상 추출하였고, 분석 전 원심분리기로 2,500 rpm에서 10분간 원심분리 하였다. Chl *a* 농도는 10-AU Fluorometer(Turner Designs)를 사용하여 미국 Environmental Protection Agency(EPA) method 445.0(Arar and Collins, 1997)에 따라 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 표층수온 분포

동해 남서부 해역의 가을철 수온 분포 변화를 보기 위해, NOAA SST 영상을 이용해 2011년, 2013년과 2015년 연구 해역의 현장 조사기간에 대한 표층수온 분포 양상을 나타내었다(Fig. 2). 2011년 가을철 남서부 해역은 대마난류의 영향을 반영하는 고온의 표층수가 연구 해역의 남쪽에 머물고 있는 것으로 나타났고, 2013년 가을철 수온 분포는 연구 해역이 전반적으로 대마난류의 영향을 크게 받고 있는 것으로 보인다. 이와 대조적으로 2015년 동해 남서부 해역의 수온 분포는 상대적으로 36°N 이남의 해역은 대마난류의 영향을 보이나, 2011년과 2013년에 비해 낮은 표층수온을 보이며, 특히 북부 해역에 22°C 이하의 광범위한 저온 수괴가 관찰되었다. 현장조사 시기는 약 1주일 내외의 차이가 있으나, 특히 2013년 연구 해역은 예외적으로 고수온을 보인 해로 24°C이상의 고수온의 표층수가 연안을 제외한 전체 해역에 걸쳐 관찰되었다.

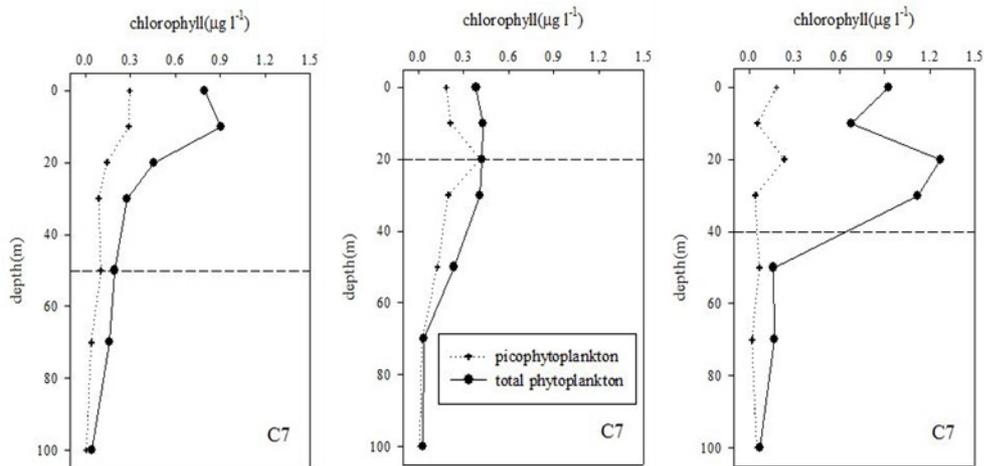


Fig. 3. Vertical distribution of Chl *a* for total phytoplankton and Picophytoplankton at St.C7 with mixed layer depth (MLD) during autumn of 2011, 2013 and 2015.

연구 해역 중 외양의 C7 정점에서 본 가을철 혼합층의 수심은 2011년과 2015년의 40~50 m 비해 2013년에 상대적으로 20 m 정도로 낮은 수심에 위치하였다(Fig. 3). 각 해당 연도의 위성자료에서(Fig. 2) 확인할 수 있는 표층수는 분포에서처럼 상대적으로 높은 수온(>25°C)의 수괴가 남서부해역에 전반적으로 자리하고 있어, 다른 두 해에 비해 2013년 가을에 따뜻한 표층수의 성층이 발달한 것으로 확인된다.

3.2 Size fraction 결과

3.2.1 평균 %picophytoplankton의 연변동

가을철 동해 남서부해역에서 size fraction별로 본 초미소식물플랑크톤의 전체 식물플랑크톤에 대한 기여는 2011년 약 38%, 2013년 59%, 그리고 2015년 7%로 측정되었다(Fig. 4). 가장 높은 초미소식물플랑크톤의 기여는 2013년 가을에 나타났다(Table 1). 정점별 및 수심별 %picophytoplankton의 변동 범위도 2013년 가을에 67%로 가장 크게 나타났으며, 2015년 가을에는 17% 정도로 가장 작았다. 봄철에 비해 가을철 초미소식물플랑크톤의 전체 식물플랑크톤의 군집구조에 기여율은 높고, 여름철에 비해서는 낮은 편이다(Park, 2006).

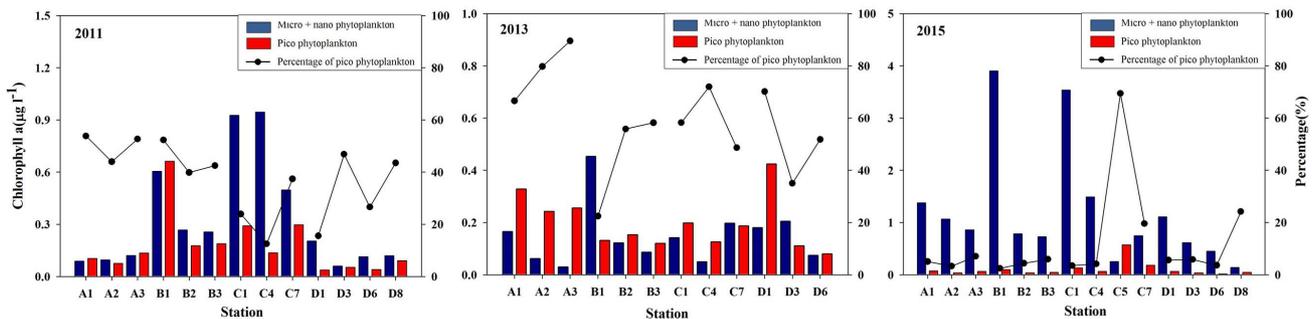


Fig. 4. Distribution of Chl *a* from different size of phytoplanktons and %picophytoplankton at the surface layer during autumn, 2011, 2013 and 2015 in the southwestern East Sea.

Table 1. %picophytoplankton at the surface and DCML and ΔT during autumn, 2011, 2013 and 2015 in the southwestern East Sea.

Depth		% picophytoplankton		
		2011	2013	2015
Surface Layer	ave.	38	59	7
	range	12~53	22~89	2~24
DCML*	ave.	28	61	6
	range	6~51	22~89	1~18
$\Delta T(^{\circ}C)^*$		+1	+1.6	-0.9

* ΔT : anomaly of mean SST

전체 식물플랑크톤의 생체량(Chl *a*)은 2013년 < 2011년 < 2015년 순으로 증가하였으며, %picophytoplankton는 이와 대조적으로 2015년(평균값: 7%) < 2011년(평균값: 38%) < 2013년(평균값: 59%) 순서로 증가하였다. Suk and Yoo (2002)은 동해에서 초미소식물플랑크톤의 전체 Chl *a*에 대한 기여도를 계절별로 조사하여 보고한 바 있다. 이들은 가을철 전체 수층에 대한 Chl *a*에 기여하는 초미소식물플랑크톤의 비중이 평균적으로 60% 정도인데 반해 봄철에는 급격히 감소하여 20% 미만~

65%이라고 보고한 바 있다. 전체적인 Chl *a* 농도가 낮은 가을철에 비해 일차생산이 증가하는 봄철에 초미소식물플랑크톤이 차지하는 비율이 상대적으로 현격히 감소하는 양상으로 계절 변동 폭이 크다는 것을 보고하였다. 본 연구에서는 같은 계절인 가을철에 2011년부터 2015년까지 짧은 기간이지만 연 변동 폭이 크다는 것을 알 수 있었다. 전 (2016)의 자료에 의하면, 수온과 염분, 용존산소의 수직분포 양상에서 2015년 연안 쪽 정점에서 상대적으로 수온이 낮고, 용존산소 농도는 높으며, 연안에서 외양으로 갈수록 고온고염의 경향이 보였으며, 혼합층 수심도 깊어졌다고 보고하였다.

3.2.2 %picophytoplankton와 SST

2015년 가을 조사기간 동안 St. A1~St. D1까지 모든 연안 쪽 정점들에서 수온의 분포 양상이 성층화 된 외양역에 비해 저층에서 상층부로 유입되는 영양염과 주변에 비해 낮은 표층 수온으로 혼합과정을 확인할 수 있었다(전, 2016). 연안을 따라 위치한 St. A1~St. D1 정점들에서 높은 Chl *a* 농도는 표층아래 수심에서 혼합층으로 공급된 영양염에 의해 영양염 요구량이 높은 미소+소형식물플랑크톤의 성장이 촉진된 결과로 보인다. 반면 이 연안역에서 낮은 수온과 성층이 깨진 환경에서 영양염 농도가 증가한 결과 초미소식물플랑크톤의 조성비는 상대적으로 낮아진 결과, 연구 기간 중 가장 낮은 %picophytoplankton을 보였다. 표층수온과 전체 %picophytoplankton의 상관관계는(Fig. 5)는 양호한 양의 상관관계를 보여주었다.

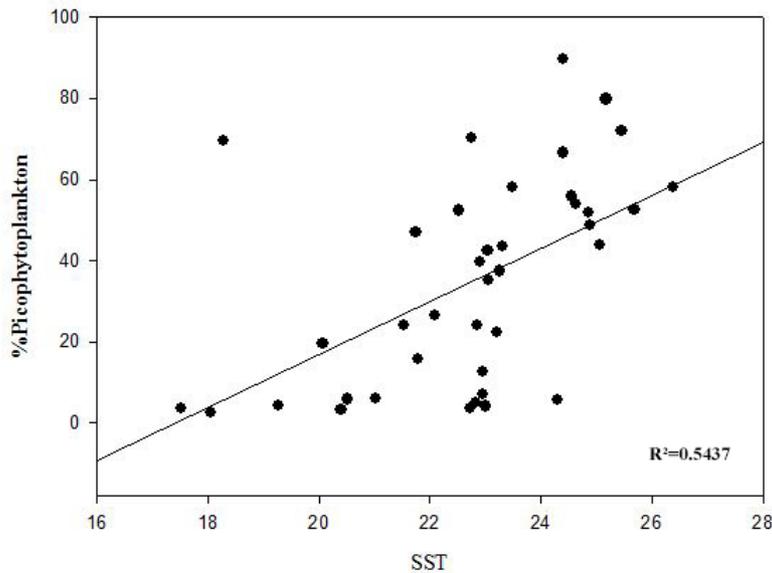


Fig. 5. Correlation between SST and %picophytoplankton during autumn of 2011, 2013 and 2015 in the southwestern East Sea.

이와 같은 초미소식물플랑크톤의 전체 식물플랑크톤에 대한 기여도의 계절변동은 많은 연구자들에(Suk and Yoo, 2002, Yona, 2014) 의해 보고된 바 있다. 해역은 다르지만 이 (2012)는 장기에 걸친 식물플랑크톤 군집구조에 대한 변동을 황해 및 동중국해 북부 해역과 남해 일부에서 관찰해 보고하였다.

3.2.3 %picophytoplankton의 수직분포양상과 혼합층 수심

2011년에서 2015년까지 St. C7에서 %picophytoplankton의 수직 분포양상과 혼합층 수심을 Fig. 3에 나타내었다. 2013년 가을철에는 혼합층 수심이 가장 낮아서 약 20m에서 관찰되었으며, 2011년과 2015년 가을철에는 40~50 m 깊이에서 나타

났다. 혼합층이 낮았던 2013년 가을철에는 높은 표층수온으로 안정된 성층이 이루어진 결과 Chl *a* 농도가 가장 낮았으며 %picophytoplankton는 가장 높게 측정되었다. 이 시기에 Chl *a*의 농도는 표층에서 최대치를 보였고 30 m 수층까지 균일하게 분포하였다. 반면 2011년과 2015년의 Chl *a* 수직 분포양상은 아표층에서 최대 분포를 보였고, 초미소식물플랑크톤과 전체 식물플랑크톤의 Chl *a* 농도 변화는 유사하였다.

본 연구해역의 크기별 분급 결과 초미소식물플랑크톤의 전체 식물플랑크톤에 대한 기여도는 표층과 최고 엽록소 농도를 보이는 DCML에서 모두 같은 연변동의 양상을 보였다. 또한 이 기여도는 수산과학원의 과거 평년 자료와의 차이로 본 각 연도별 ΔT 와 비교해 볼 때 높은 양의 상관관계를 보여주었다. 이는 수온과 %picophytoplankton이 양의 상관관계를 가짐을 의미한다. 표층수온의 증가는 성층화를 초래하며 또한 혼합층의 깊이를 조절하는데, 2011년과 2015년에는 수심 약 40~50 m에 혼합층이 발달한데 반해, 2013년의 경우는 약 20 m 수심에 혼합층이 형성된 성층 구조가 관측되었다. 특히 2013년 가을철은 %picophytoplankton의 최고치가 A3 정점 표층에서 89%로 측정되어, 여름철 고온의 성층화된 빈영양수괴의 환경과 유사할 정도로 높게 나타났다. 2013년 가을철에는 전체 엽록소의 농도도 세 해중 가장 낮은 값으로, 최고 농도 수심에서도 약 $0.5\mu\text{g/L}$ 이하로 측정되었다. Park (2006)의 연구에서 전체 식물플랑크톤에 대한 nano + picoplankton의 평균비율은 동해 남서부해역에서 여름철에 최대치는 69%로, 개별 정점별 최고치가 89%로 보고한 바 있다. 본 연구에서 7-59%의 초미소식물플랑크톤의 기여율은 가을철임에도 Park (2006) 등이 보고한 초미소플랑크톤과 소형식물플랑크톤을 합한 평균비율 최대치에 비교 할 만큼 높은 것으로 측정되었다. 또한 초미소식물플랑크톤의 농도가 최고인 수심은 대략 수온약층 하부에 위치하며, 비교적 혼합층 수심 전반에 걸쳐 균일한 농도를 보인 전체 식물플랑크톤의 분포와는 달리 표층 아래 최고 농도를 보이는 양상이었다.

3.2.4 Correlation between ΔT and %picophytoplankton

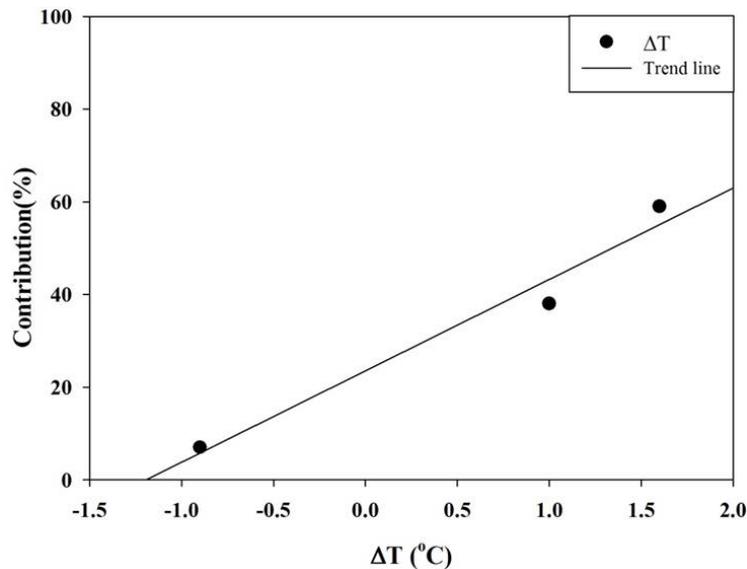


Fig. 6. Correlation between ΔT and %picophytoplankton during autumn of 2011, 2013 and 2015 in the southwestern East Sea ($R^2 = 0.9652$).

초미소식물플랑크톤의 평년대비 수온의 평년 편차(ΔT)와 %picophytoplankton의 상관관계는 $R^2 > 0.95$ 라는 높은 값으로 관측되었다. 즉, 이들의 조성비 변동에 수온이 매우 중요한 영향 요인임을 확인하였다(Fig. 6). 전체 식물플랑크톤 중 크기

가 작은 초미소식물플랑크톤의 조성비가 증가함에 따라 먹이 생태계 안에서 상위 생태계로의 에너지 전달의 효율성에 변화를 초래하고, 궁극적으로 수산자원의 가입률까지 영향을 미칠 수 있는 가능성까지도 의미한다고 볼 수 있다. 이러한 추정은 좀 더 면밀한 추후 연구를 통해 Joo (2016) 등이 보고한 동해에서의 10년간(2003-2012년) 일차생산력의 감소 현상과도 연관 지어 볼 필요가 있다.

3.2.5 %picophytoplankton과 빈영양 해역

또한 초미소식물플랑크톤의 일차생산력에 대한 기여도는 영양염이 풍부한 연안역에서는 2~25%에 지나지 않으나 빈 영양해역의 경우는 50~80%로 알려져 있다(Harold, 2002). 본 연구에서 측정된 가을철 동해 남서부해역의 초미소식물플랑크톤의 전체 식물플랑크톤의 생체량에 대한 기여도(%picophytoplankton)의 평균값은 7~59%로서, Harold (2002)가 제시한 값에 비해 낮은 편이나, 2015년을 제외한 2011년과 2013년 가을철 동해 남서부해역의 초미소식물플랑크톤의 전체 식물플랑크톤에 대한 기여도가 큰 편으로 연구해역은 빈 영양상태의 환경이었던 것으로 보인다. 전 (2016)은 동해에서의 초미소식물플랑크톤의 일차생산력에 대한 기여율이 60%로 높게 나타났다고 보고한 바 있다. 전 (2016)은 2015년 연구해역의 혼합층 내의 질산염 농도를 $0.45\mu\text{M} \sim 3.34\mu\text{M}$ 로 측정하였고, N/P비율은 약 4.09로서 전 수층의 N/P비율 13.90에 비해 매우 낮았음을 관찰한 뒤 이는 식물플랑크톤 성장에 대해 DIN이 제한된 환경이었다고 보고하였다.

2003~2012년 기간 동안, Joo (2016) 등은 표층 수온 증가를 관찰할 수 없었으나, 유광층(0-50 m) 구간의 영양염 농도가 윙분지에서 현격히 감소하였고 표층에서 50 m 수심까지 통합한 영양염과 PDO (Pacific Decadal Oscillation)간에 강한 상관관계가 있다고 주장하였고, Chiba (2002)는 일차생산력 감소에 대한 원인을 최근 수온 증가에 의한 표층 성층화의 강화와 함께 PDO (Pacific Decadal Oscillation)가 원인으로 보인다고 주장하였다. 이와 같은 최근의 일차생산력 감소 추세는 영양염 공급의 감소와 함께 일차생산자의 생체량인 엽록소 감소로 이어진 것이 원인으로 추정하고, 향후 동해 해역의 일차생산력 감소가 수산업의 어획에도 영향을 줄 수 있다고 보고하였다. 이러한 연구 결과는 모두 최근 다양한 환경과 생태계 변화의 이면에 먹이 생태계의 기본적인 구조가 변화하고 있다고 판단하고 있다(Joo *et al.* 2016).

4. 결 론

동해 남서부해역의 최근 3년간 수온 변화에 따른 식물플랑크톤 군집구조의 변화를 알아보기 위해, 2011년, 2013년, 2015년 총 3회에 걸쳐 가을철 초미소식물플랑크톤의 전체 식물플랑크톤에 대한 조성 비율을 조사하였다. 표층과 DCML에서 초미소식물플랑크톤의 전체 식물플랑크톤에 대한 기여도의 변동은 모두 유사한 경향을 보였으며, 그 비율은 2011년 38%, 2013년 59%, 2015년 7%로 측정되었다. 이는 2015년 가을철을 제외하고 전반적으로 빈 영양해역의 특징으로 보였다. 세 해에 걸쳐 측정된 동해 남부해역에서 가을철 초미소식물플랑크톤의 기여도의 연 변동은 비교적 큰 편이며, 2011년과 2015년 까지의 조사 기간 동안 뚜렷한 경향을 보이지는 않았다. 그러나 평년대비 수온 변화와 초미소식물플랑크톤의 기여도 사이에 밀접한 양의 상관관계를 확인하였으며, 이로써 동해 남서부해역의 초미소식물플랑크톤 기여도는 수온 변화에 의한 직접적인 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 특히 고온의 빈 영양수괴의 특징을 가진 대마난류의 유입에 의한 전체 표층수온이 24°C 이상이며, 36N 남서부해역에 25°C 이상의 고온의 수괴가 분포하고 있었던 2013년의 경우, 혼합층의 수심이 2011년과 2015년의 40~50 m에 비해 상대적으로 매우 낮은(10~20 m) 수심의 성층으로 존재했다. 이는 2013년 여름철의 이상 고온에 의한 강한 성층의 영향이 유지되었거나, 따뜻한 빈영양 수괴의 대마난류수의 유입으로 인한 성층화가 영양염 공급이 이루어질 수 없는 물리화학적 환경을 조성하여 영양염 요구량이 큰 미소+소형식물플랑크톤의 성장을 저해함으로써 초미소식물플랑크

톤의 조성비가 가장 높게 나타난 것으로 사료된다. 지난 10년간의 동해 남부 해역에서의 영양염 농도의 변화를 보면, pulse 형식으로 변동이 있었으나 대체로 지속적인 감소의 증상을 보이고 있다(KODC, 수산과학원 정선관측 자료 참조). 이는 대마 난류 중층수로부터 주로 유입되는 영양염(질산염)이 표층수의 성층으로 인해 차단된다는 것을 다수의 연구자들이 보고한 바 있다. 초미소식물플랑크톤의 평년대비 수온의 평년 편차(ΔT)와 %picophytoplankton의 상관관계는 $R^2 > 0.95$ 라는 높은 값으로 관측되었다. 즉, 이들의 조성비 변동에 수온이 매우 중요한 영향 요인임을 확인하였다(Fig. 6). 전체 식물플랑크톤 중 크기가 작은 초미소식물플랑크톤의 조성비가 증가함에 따라 먹이 생태계 안에서 상위 생태계로의 에너지 전달의 효율성에 변화를 초래하고, 궁극적으로 수산자원의 가입물까지 영향을 미칠 수 있는 가능성까지도 의미한다고 볼 수 있다. 이러한 추정 은 좀 더 면밀한 추후 연구를 통해 Joo *et al.* (2016)이 보고한 동해에서의 10년간(2003-2012년) 일차생산력의 감소 현상과도 연관지어 볼 필요가 있다.

사 사

본 논문은 부경대학교 2015년 자율창의 연구비에 의해 수행되었습니다. 분석 과정에 도움을 준 해양관리공단의 이용우 박사과 박현실 양에게 감사를 표합니다. 시료 채취 및 해양조사에 도움을 주신 나라호 선원들과 선장님에게도 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌(References)

- 김아람, 2014. 동해 남부해역에서 냉수대 발생이 식물플랑크톤 군집에 미치는 영향. 부경대학교 석사학위 논문, 38-61 pp.
- 성기탁, 황재동, 한인성, 고우진, 서영상, 이재영, 2010. 한국 연근해 수온의 시공간적 장기 변동 특성. 해양환경안전학회지, **16**(4): 353-360.
- 이영주, 2012. 황해의 동하계 식물플랑크톤군집 변동 및 일차생산력 변동 양상에 관한 고찰. 인하대학교 박사학위 논문.
- 전슬기, 2016. 동해 남서해역에서 용존태 유기질소 화합물이 식물플랑크톤의 생장에 미치는 영향. 부경대학교 석사학위 논문, 74-75 pp.
- Arar, E.J. and G.B. Collins, 1997. Method 445.0: *In Vitro* Determination of Chlorophyll a and Phaeophytin a in Marine and Freshwater Algae by Fluorescence. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Exposure Research Laboratory.
- Belkin, I.M., 2009. Rapid warming of large marine ecosystems. Prog. Oceanogr., **81**: 207-213.
- Chiba, S. and T. Saino, 2002. Variation in mesozooplankton community structure in the Japan/East Sea (1991-1999) with possible influence of the ENSO scale climatic variability. Prog. Oceanogr., **213**: 23-25.
- Chisholm, S.W., R.J. Olson, E.R. Zettler, R. Goericke, J.B. Waterbury and N.A. Welschmeyer, 1988. A novel free-living prochlorophyte abundant in the oceanic euphotic zone. Nature., **334**: 340-343.
- Decembrini, F., C. Caroppo and M. Azzaro, 2008. Size structure and production of phytoplankton community and carbon pathways channelling in the Southern Tyrrhenian Sea (Western Mediterranean). Deep-Sea Res. II. doi:10.1016/j.dsr2.2008.07.022
- Harold, G.M., 2002. Autotrophic picoplankton : Their presence and significance in marine and freshwater ecosystems. Virginia Journal of Science, **53**: 13-33.
- Jo, Y.H., L.C Breaker, Y.-H., Tsemg and S.-W. Yeh, 2014. A temporal multiscale analysis of the water off the east coast of south Korea over the past four decades. Terr. Atoms. Ocean. Sci., **3**: 415-434.

- Jones, P.D., K.E. Trenberth, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, T. Klein and B. Soden, 2007. Observations: surface and atmospheric climate change. *Climate Change The physical Sciences Basis*, **2007**: 235-336.
- Joo, H.T., S.H. Son, J.W. Park, J.J. Kang, J.Y. Jeong, C.I. Lee, C.K. Kang and S.H. Lee, 2016. Long-Term Pattern of Primary Productivity in the East/Japan Sea Based on Ocean Color Data Derived from MODIS-Aqua. *Remote Sens.*, **8**, 25; doi:10.3390/rs8010025.
- Kang D.J., S. Park, Y.G. Kim, K. Kim and K.-R. Kim, 2003. A moving-boundary box model (MBBM) for oceans in change: An application to the East/Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **30**:1299.
- Kang, S.W., 2008. Study on the characteristics of phytoplankton community in East China Sea in spring and autumn, 2004. Department of Oceanography, Graduate School, Pukyong National University.
- Lin, C., X. Ning, J. Su, Y. Lin and B. Xu, 2005. Environmental changes and the responses of the ecosystems of the yellow sea during 1976-2000. *J. Mar. Sys.*, **55**: 223-234.
- Mackey, D.J., H.W. Higgins, M.D. Mackey and D. Holdsworth, 1998. Algal class abundances in the western equatorial Pacific: Estimation from HPLC measurements of Chloroplast pigments using CHEMTAX. *Deep-Sea Res. I*, **45**: 1441-1468.
- Moon C.R., D.J. Kang, M.O. Park, J.H. Noh, S.J. Yoo, J.E. Moon, K.H. Shin, Y.S. Kim, J.K. Choi and Y.S. Suh, 2014. An inter-laboratory comparison study on chlorophyll a determination in seawater. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **19**: 76-87.
- Park, M.O., 2006. Composition and distribution of phytoplankton with size fraction results at Southwestern East/Japan Sea. *Ocean Sci. J.*, **41**(4): 301-313.
- Park, M.O., S.W. Kang, C.I. Lee, T.S. Choi and F. Lantoiné, 2008. Structure of the Phytoplanktonic communities in Jeju Strait and Northern East China Sea and Dinoflagellate Blooms in Spring 2004: Analysis of Photosynthetic Pigments. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **13**(1): 27-41.
- Partensky, F., J. Blanchot and D. Vaultot, 1999. Differential distribution and ecology of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in oceanic waters: a review. *Bulletin de l'Institut Oceanographique*, **19**: 457-475.
- Partensky, F., J. Blanchot, F. Lantoiné, J. Neveux and D. Marie, 1996. Vertical structure of picophytoplankton at different trophic sites of the tropical northeastern Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res. I*, **43**: 1191-1213.
- Riemann, Bo., 1978. Carotenoid interference in the spectrophotometric determination of chlorophyll degradation products from natural populations of phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, **23**(5): 1059-1066.
- Suk M.S. and S.J. Yoo, 2002. Marine ecosystem responses to climate variability in the East Sea. Korea Ocean Research and Development Institute, Report No. BSPE 817-00-1396.
- Susan, M., 2012. Introduction to Marine Biogeochemistry, 2nd Ed. A-Jin Publishing, 500-501 pp.
- Yona, D., 2014. Diversity of Cyanobacteria *Synechococcus spp.* based on DNA Analysis and phycoerythrin Chromophores in the East Sea, Korea, master thesis, 68-70 pp.