

동해 울진 바다목장해역의 크기별 식물플랑크톤 생물량의 시·공간적 분포 특성

윤 양 호*

전남대학교 해양기술학부

Spatio-temporal Fluctuation of Phytoplankton Size Fractionation in the Uljin Marine Ranching Area (UMRA), East Sea of Korea

Yang Ho Yoon*

Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

Abstract - To understand size fractionated chlorophyll *a* and material cycles of coastal ecosystem in Uljin marine ranching area (JMRA) of East Sea, 4 times of survey were conducted from April to November 2008. Picoplankton, nanoplankton and netplankton in the surface of UMRA fluctuated with an annual mean of $0.26 \mu\text{g L}^{-1}$ between the lowest value of $0.03 \mu\text{g L}^{-1}$ and the highest value of $0.87 \mu\text{g L}^{-1}$, annual mean $1.32 \mu\text{g L}^{-1}$ between $0.11 \mu\text{g L}^{-1}$ and $5.60 \mu\text{g L}^{-1}$, annual mean $0.45 \mu\text{g L}^{-1}$ between no detected (nd) and $4.68 \mu\text{g L}^{-1}$, respectively. And the relative ratio of picoplankton, nanoplankton and netplanktons on the phytoplankton biomass was on annual average 12.9%, 65.0% and 22.1%, respectively. The 10 m layer was similar to the surface. The relative ratio of pico- and nano-plankton was higher throughout the year. That is, the material cycle of UMRA consists of a microbial food web rather than traditional food chain at a lower trophic levels. Primary production is deemed to have a higher possibility of being adjusted by top-down dynamics, such as micro-zooplankton grazing pressure rather than nutrients supply.

Key words : chlorophyll *a*, spatio-temporal variation, size fractionation, nanoplankton, top-down dynamics, Uljin marine ranching area (UMRA)

서 론

시범 바다목장 사업은 인간 활동에 의한 자원고갈과 해양 환경의 악화로 황폐화된 연안해역의 생산성과 수익성 향상을 목적으로 실시되고 있다. 즉 동, 서, 남해(2개소) 및 제주도를 대상으로 해역환경특성에 알맞게 해양환경과 생물군집 구조를 개선하여 해역생태계를 자원생물의 육성에 바람직한

방향으로 변화시키고자 하는 것이다. 동해 시범 바다목장은 울진군 후포리 연안의 20 km^2 규모 해역에 2002년부터 2013년까지 355억 원을 투입하여, 바다낚시 잔교를 설치한 해상 낚시공원과 바다목장 체험관 및 홍보관 등을 포함하는 관광형 국가시범 바다목장으로 2014년 11월 준공되었다.

해양환경의 계절변화가 심한 한국 연안해역에 조성되는 바다목장의 효율적인 자원조성, 운영 및 관리를 위해서는 무생물환경과 생물군집을 연계한 생태구조 및 해양환경특성을 정확하게 이해하는 것이 매우 중요하다. 동해 바다목장 해역은 동해안을 따라 북상하는 쓰시마난류 지류인 동한난류 및

* Corresponding author: Yang Ho Yoon, Tel. 061-659-7142, Fax. 061-659-7149, E-mail. yoonyh@jnu.ac.kr

조류, 그리고 바람에 의해 발생하는 취송류 성분이 복잡하게 작용하는 해역이다. 이러한 복잡한 해수유동은 해역의 물질의 이동과 확산에 따른 물질수송은 물론, 그에 따른 해수의 영양염류 농도 및 해양생물의 공간분포에까지 큰 영향을 미친다. 그러나 이러한 해역특성을 가지는 해역에 조성되는 시범 바다목장 사업임에도 불구하고 바다목장 해역에 대한 해양환경 및 기초생물군집 등 포함하는 생태구조 관련 연구는 매우 빈약하고(Yoon 2016), 일부 해조류 및 어류에 대한 연구가 있을 뿐이다(Choi *et al.* 2006; Hwang *et al.* 2011; Hwang *et al.* 2012; Yoon *et al.* 2013). 또한 현재까지 울진 바다목장 주변해역에 대한 식물플랑크톤 군집관련 연구는 울진 원자력발전소의 온배수와 관련한 일부 연구가 보고된다(Kang and Choi 2001, 2002; Kang *et al.* 2003).

특히 연안생태계의 먹이사슬은 광합성으로 태양에너지를 합성하여 상위 영양단계인 소비자로 에너지를 공급하는 식물플랑크톤이 출발점이 된다. 식물플랑크톤은 바다의 물질순환과 영양단계의 가장 밑 부분을 담당하고 있기 때문에 전체 바다목장의 먹이사슬 특성을 결정시키는 역할을 한다(Riebesell 2004). 또한 바다목장해역에서 식물플랑크톤 군집은 외부에서 유입되는 영양염류 공급에 의해 결정되는지? 아니면 상위 영양단계인 포식자의 포식압 등 생태구조에 의해 지배되는지? 에 따라 대상해역의 생태구조 특성은 커다란 차이를 보인다(Severiano *et al.* 2012; Yoon 2014). 이러한 식물플랑크톤 군집에서 크기구조는 표영생태계의 해양환경 조건(Malone 1980)과 먹이사슬 등 탄소순환 경로에도 매우 중요한 인자가 되어(Cermeno *et al.* 2006), 비교적 크기가 큰 네트식물플랑크톤은 연안해역의 해양생태계 먹이사슬에 관여하여 높은 생물생산을 유지시킨다. 그러나 크기가 작은 나노플랑크톤은 미세먹이망에서 복잡한 저차영양단계를 구성하여, 생태계 자체의 물질순환에 의한 생물생산을 유지한다. 즉 일반적으로 네트플랑크톤은 외부에서 유광층으로 유입되는 영양염류 공급에 의한 bottom-up 방식에 의해 조절되지만(Chisholm 1992), 나노플랑크톤 등의 극소형 식물플랑크톤은 동물플랑크톤의 포식압 및 생태구조에 의한 top-down 방식에 의해 조절되는 것이 보고된다(Jyothibabu *et al.* 2006). 이외에도 식물플랑크톤 생물량은 빛, 해수유동 등 다양한 무생물적 환경요인에 의해 영향을 받는다(Castro and Huber 2010). 이러한 이유로 해역에서 식물플랑크톤 크기별 군집 특성을 파악하는 것은 생태구조 및 먹이사슬을 이해하는 데 매우 중요한 단서를 제공할 뿐만 아니라 해역의 관리 측면에서도 그 중요성은 크다.

이 연구는 국가 시범 바다목장사업을 추진하면서도 해양학적 기초자료가 매우 부족한 울진 바다목장해역의 식물플랑크톤 군집의 크기별 분포 특성에 의한 저차영양단계 및

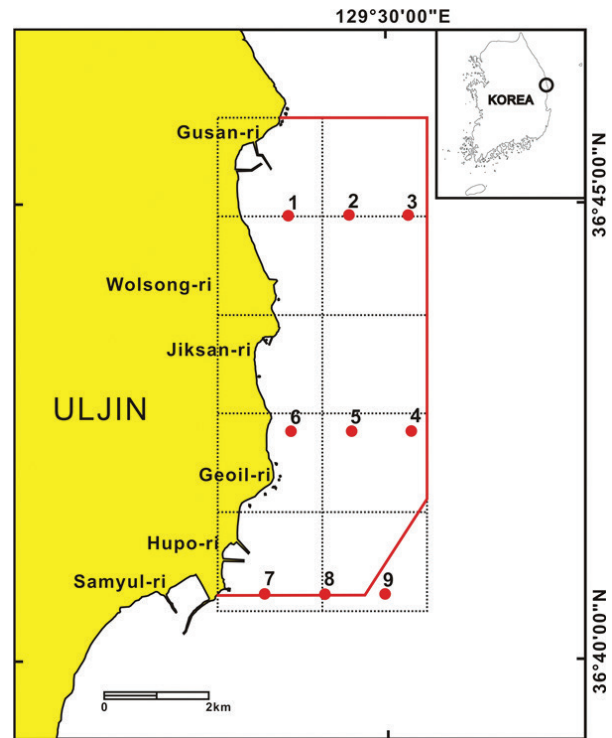


Fig. 1. Map show to sampling stations in the UMRA.

물질순환 구조를 파악하여, 바다목장 해역의 효율적 이용 및 관리에 필요한 기초자료 제공은 물론 해역의 생산성 향상을 위한 산업적 활용에 기여하고자 실시하였다.

재료 및 방법

울진 바다목장 해역에서 크기별 식물플랑크톤 조성을 파악하기 위한 현장조사는 동해 후포에서 군사리 해역에 걸친 9개 정점(Fig. 1)을 대상으로 2008년 4월 24일(음력 3. 19), 6월 27일(음력 5. 24), 9월 10일(음력 8. 11) 및 11월 4일(음력 10. 7) 등 4회에 걸쳐 실시하였다. 현장조사는 용선한 소형선박을 이용하였다. 식물플랑크톤 생물량은 각 정점의 표층과 10 m 수심의 해수를 반닫채수기(3 L)로 채수하여 분석용 시료로 제공하였다. 시료는 실험실에서 공경이 0.2 μm 와 3.0 μm 의 박막여과지(직경: 47 mm)와 망목이 20 μm 인 플랑크톤 네트지가 장착된 플라스틱 여과기(Sartorius, Germany)를 중첩하여, 해수 1 L를 진공 여과시켜 크기별 엽록소 *a*의 분석시료로 하였다. 여과 포집된 여과지는 90%(v/v) 아세트용액을 용매로 색소를 냉암소 24시간 추출시킨 다음, 원심분리기로 불순물을 분리(3,000 rpm, 15 min.)한 다음 상등액을 UV 분광광도계(Mecasys Co Ltd., Optizen 2120UV)에 의해

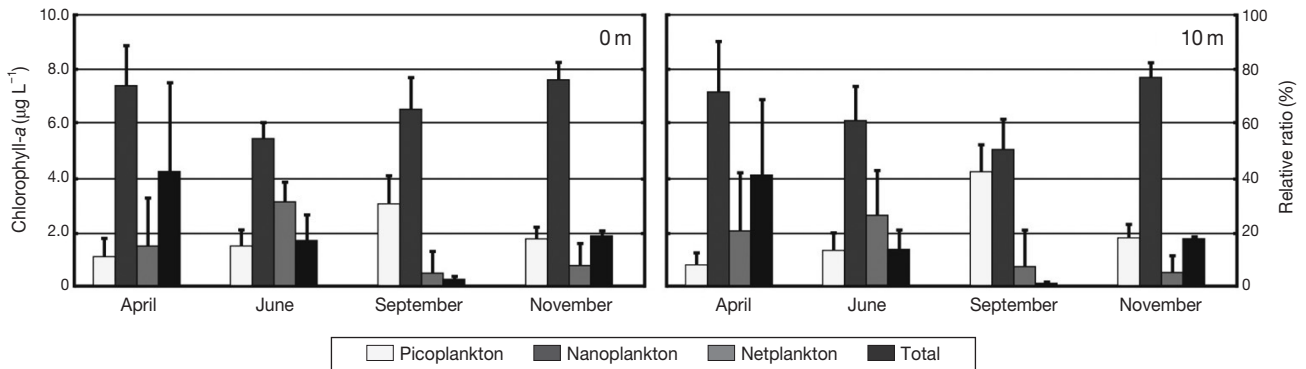


Fig. 2. Temporal variations of size fractionated chlorophyll *a* at surface and 10 m layer in the UMRA (total chlorophyll *a*; measured value, size fractionation: relative ratio, bar: standard deviation).

비색 측정하여 생물량을 계산하였다 (SCOR-Unesco 1966). 식물플랑크톤의 크기구분은 피코플랑크톤 (0.2~3.0 μm), 나노플랑크톤 (0.3~20.0 μm) 및 네트플랑크톤 (>20.0 μm) 등 3단계로 구분하였다 (Yoon 2014).

결 과

1. 크기별 생물량의 경시변화

울진 바다목장해역 표층에서 연간 전체 엽록소 *a* 변화는 가을 0.19 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 봄 10.69 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 변화하여, 연평균 2.03 $\mu\text{g L}^{-1}$ 을 보였고, 10 m 수심도 표층과 같은 시기에 0.11~9.23 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 변화하여 연평균 1.85 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 표층보다 다소 낮았다. 즉 표층과 10 m 수심 모두에서 수온 상승기인 4월과 6월에 높고, 수온이 하강하는 9월에 낮았지만, 11월에 재차 높아지는 경향을 보였다. 크기별로는 표층에서 피코플랑크톤이 0.04~0.87 $\mu\text{g L}^{-1}$ 범위에서 연평균 0.26 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 12.9%, 나노플랑크톤이 0.11~5.60 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 연평균 1.32 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 65.0%, 네트플랑크톤은 nd~4.68 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 연평균 0.45 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 22.1%를 차지하였다. 10 m 수심도 표층과 비슷하여 피코플랑크톤이 0.04~0.52 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 연평균 0.19 $\mu\text{g L}^{-1}$ 인 10.3%, 나노플랑크톤이 0.04~6.36 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 연평균 1.22 $\mu\text{g L}^{-1}$ 인 65.9%, 네트플랑크톤이 nd~4.86 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 연평균 0.44 $\mu\text{g L}^{-1}$ 인 23.8%를 차지하였다 (Fig. 2).

봄 표층의 엽록소 *a* 농도의 변동은 1.17~10.69 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 4.30±3.45 $\mu\text{g L}^{-1}$ (평균±표준편차, 이하 같음)의 범위를 보였고, 10 m 수심은 1.08~9.23 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 4.08±2.99 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 변화하였다 (Fig. 2). 크기별은 피코플랑크톤이 0.21~0.87 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 0.34 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위에서 상대비는 2.4~21.5%에서 11.3±6.8%의 범위를, 나노플랑크톤은

0.96~5.60 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 2.79 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위에서 상대비가 51.8~93.8%에서 73.5±16.0%, 그리고 네트플랑크톤은 nd~4.68 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 1.175 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위에서 상대조성비가 0~43.8%에서 15.2±18.6%로 변화하였다. 10 m 수심은 표층보다 다소 낮은 생물량으로 표층과 유사한 상대조성비를 보여, 피코플랑크톤이 0.14~0.27 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 0.21 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 상대조성비는 2.2~17.6%에서 8.1±5.1%로, 나노플랑크톤은 0.93~6.36 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 2.66 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 상대비는 40.5~94.7%에서 71.5±20.4%, 그리고 네트플랑크톤은 nd~4.86 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위에서 평균 1.21 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 상대비는 0~57.2% 범위에서 20.5±23.1%로 변화하였다. 즉 표층과 10 m 수심 모두에서 나노플랑크톤에 의한 상대조성비가 70% 이상으로 높고, 피코플랑크톤은 10% 내외로 낮았다. 특히 피코플랑크톤은 표층보다 아표층에서 낮은 상대조성비를 나타내었다 (Figs. 2 and 3).

초여름 표층의 엽록소 *a* 농도는 0.64~3.40 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 4.30±3.45 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보였고, 10 m 수심은 0.63~2.19 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 1.38±0.70 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 표층보다 낮은 생물량을 보였다 (Fig. 2). 크기별은 표층에서 피코플랑크톤이 0.02~0.72 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 0.28 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대조성비는 5.1~23.7%에서 13.2±7.2%, 나노플랑크톤은 0.28~2.10 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 0.92 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 43.8~61.9%에서 54.0±6.3%, 그리고 네트플랑크톤은 0.18~0.90 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 0.48 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 7.0~38.9% 범위에서 30.8±8.2%로 변화하였다. 10 m 수심은 피코플랑크톤이 0.04~0.27 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 0.15 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비가 5.1~23.7%에서 13.2±7.2%, 나노플랑크톤은 0.35~1.57 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 0.79 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 35.0~76.3%에서 60.8±13.6%, 그리고 네트플랑크톤은 nd~1.25 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위에서 평균 0.44 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 0~59.6%에서 26.0±18.0%로 변화하였다. 즉 6월

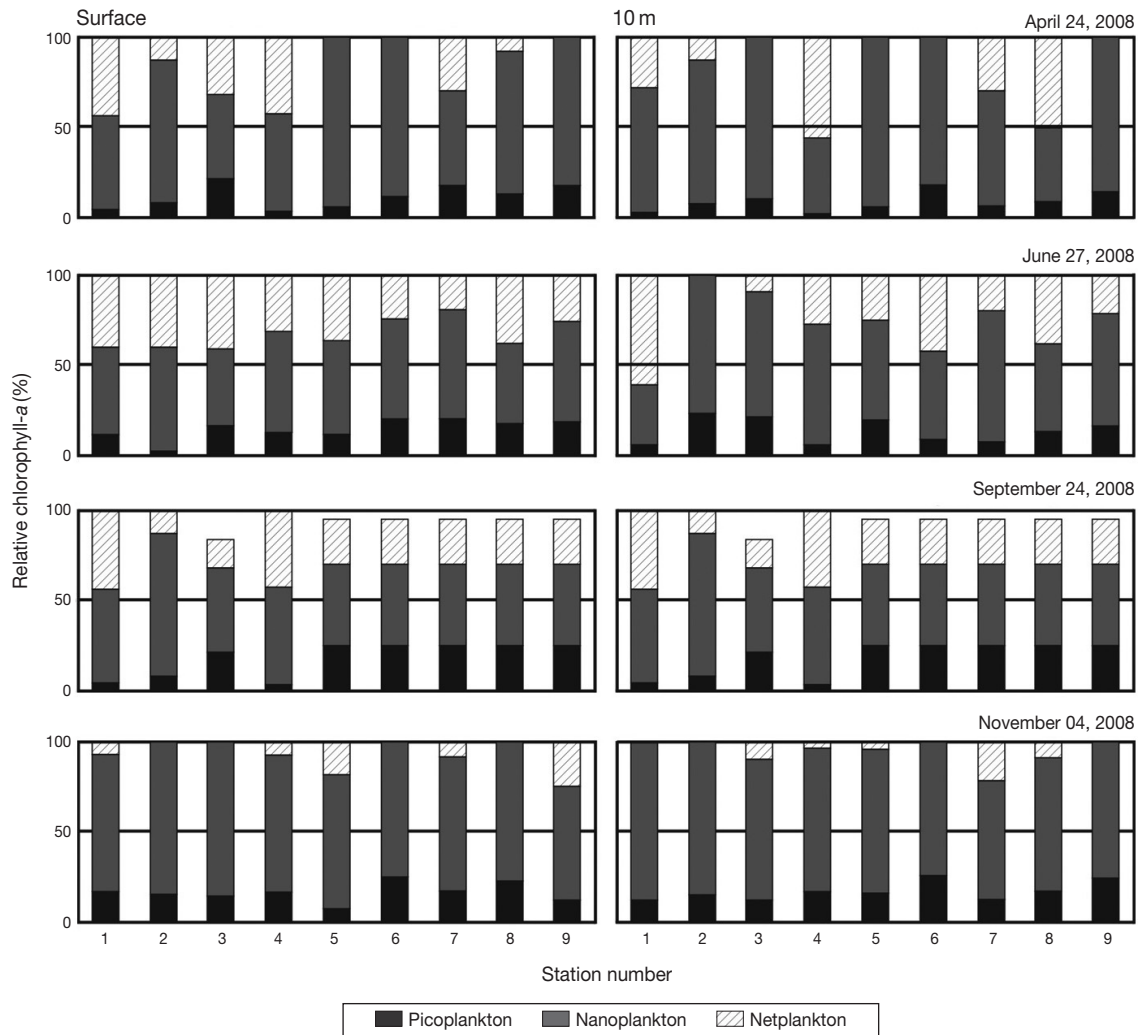


Fig. 3. Spatio-temporal variations of relative ratio for chlorophyll *a* at surface and 10 m layers in the UMRA.

은 4월에 비해 두 수층 모두에서 나노플랑크톤의 상대비는 감소하였으나, 네트플랑크톤은 증가하였다. 또한 피코플랑크톤도 13%로 다소 증가하였다(Figs. 2 and 3).

초가를 표층 엽록소 *a* 농도는 $0.19\sim 0.41\ \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 $0.28\pm 0.50\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위, 10 m 수심은 $0.11\sim 0.25\ \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 $0.17\pm 0.18\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 변화하여, 가장 낮은 생물량을 보였다. 그러나 공간적으로는 비교적 균일하였다(Fig. 2). 크기별은 표층에서 피코플랑크톤이 $0.04\sim 0.10\ \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 $0.08\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 10.2~46.7%에서 $29.9\pm 11.7\%$, 나노플랑크톤은 $0.11\sim 0.37\ \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 $0.19\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 53.3~89.8%에서 $65.0\pm 11.8\%$, 그리고 네트플랑크톤은 $\text{nd}\sim 0.07\ \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 $0.01\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 0~22.1%에서 $5.0\pm 8.0\%$ 로 변화하였다. 10 m 수심은 피코플랑크톤이 $0.05\sim 0.11\ \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평

균 $0.07\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 23.6~52.7%에서 $42.2\pm 10.6\%$, 나노플랑크톤은 $0.04\sim 0.17\ \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 $0.09\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 32.8~70.8%에서 $50.2\pm 11.8\%$, 그리고 네트플랑크톤은 $\text{nd}\sim 0.09\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위에서 평균 $0.01\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 0~43.6%에서 $7.6\pm 14.3\%$ 로 변화하였다. 즉 4월이나 6월과는 달리 수심에 관계없이 나노플랑크톤이 50% 내외로 감소한 반면, 피코플랑크톤은 30~40%로 증가하였다. 특히 피코플랑크톤 구성비는 10 m 수심에서 42%로 매우 높은 특징을 보였다(Figs. 2 and 3).

11월 표층의 엽록소 *a* 농도는 $1.57\sim 2.35\ \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 $1.85\pm 0.23\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위, 10 m 수심은 $0.23\sim 1.98\ \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 $1.77\pm 0.15\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 변화하여 공간적으로 균일하였다(Fig. 2). 크기별은 표층에서 피코플랑크톤이 $0.18\sim 0.46\ \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 $0.32\ \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 2.4~21.5%

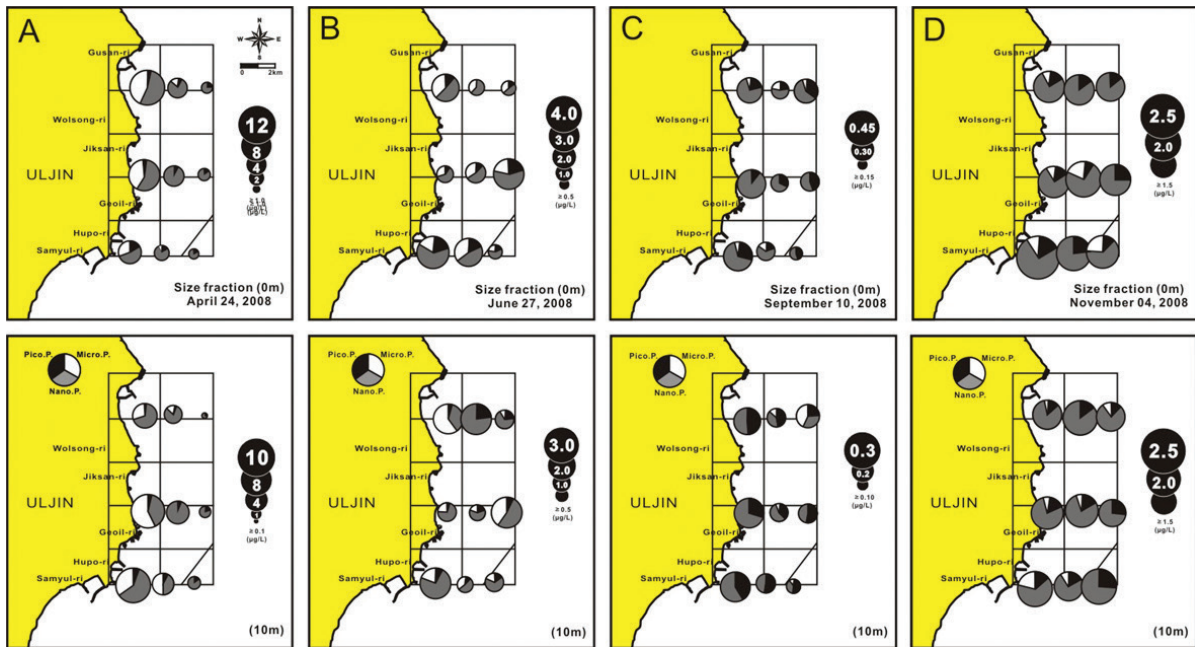


Fig. 4. Spatio-temporal distributions of size fractionated chlorophyll *a* at surface and 10 m layer in the UMRA.

에서 $11.3 \pm 6.8\%$, 나노플랑크톤은 $1.13 \sim 1.72 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 $1.38 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 $51.8 \sim 93.8\%$ 에서 $73.5 \pm 16.0\%$, 그리고 네트플랑크톤은 $nd \sim 0.44 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 $0.15 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 $0 \sim 43.7\%$ 에서 $15.2 \pm 18.6\%$ 로 변화하였다. 10 m 수심은 피코플랑크톤이 $0.20 \sim 0.52 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 $0.32 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 $2.2 \sim 17.6\%$ 에서 $8.1 \pm 5.1\%$, 나노플랑크톤은 $1.14 \sim 1.63 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서 평균 $1.35 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 $40.5 \sim 94.7\%$ 에서 $71.5 \pm 20.4\%$, 그리고 네트플랑크톤은 $nd \sim 0.40 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위에서 평균 $0.10 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 상대비는 $0 \sim 57.2\%$ 에서 $20.5 \pm 23.1\%$ 로 변화하였다. 즉 늦가을은 봄과 유사한 변동양상으로 나노플랑크톤이 70% 이상으로 상대비가 높고, 네트플랑크톤도 15~20%로 상대비가 증가하였다(Figs. 2 and 3).

동해 바다목장의 식물플랑크톤 생물량의 크기별 출현 특성은 4월과 11월 구조류에 의해 극우점 되는 시기(Yoon 2016)에는 나노플랑크톤에 의한 조성비가 70% 이상으로 높았다. 나노플랑크톤 다음으로 네트플랑크톤, 피코플랑크톤 순으로 상대비가 높았다. 그러나 편모조류로 종 천이가 발생하는 여름(Yoon 2016)에는 극미소플랑크톤 상대비가 50% (표층)에서 60% (10 m 수심)로 낮아진 반면, 네트플랑크톤이 30% (표층)에서 26% (10 m 수심)으로 높아지는 특성을 나타내었다. 그리고 식물플랑크톤 세포밀도가 가장 낮았던 9월(Yoon 2016)은 나노플랑크톤이 표층과 10 m 수심 모두에서 50%을 다소 넘기고 있지만, 초미세한 피코플랑크톤이 30%

(층)~42% (10 m 수심)까지 상대비가 높은 특징을 보였다, 즉 동해 울진 바다목장 해역에서는 여름 편모조류가 높게 출현하는 이른 여름을 제외하면, 모든 계절 피코 및 나노플랑크톤에 의한 상대조성비가 높은 특징을 보였다.

2. 공간분포

동해 바다목장 해역에서 엽록소 *a*, 즉 전체 생물량은 표층의 경우, 4월 연안정점에서 높고, 점차 외부정점으로 갈수록 감소하였다. 크기별 생물량은 나노플랑크톤은 전체 생물량과 유사하지만, 네트플랑크톤은 영양염 공급이 좋은 연안정점에서 높았고, 반대로 피코플랑크톤은 외부정점에서 상대적으로 높았다. 10 m 수심에서도 전체적으로 표층과 유사하였다(Fig. 4A). 6월 표층은 일정한 규칙성이 관찰되지 않았으나, 전체적으로 남에서 북동진하는 해역에서 상대적으로 생물량이 높은 반면, 북에서 남동진하는 해역에서 생물량이 낮았다. 크기별로는 나노플랑크톤이 50% 이상, 네트플랑크톤은 31%, 그리고 피코플랑크톤도 13%로 다른 계절에 비해 네트플랑크톤 비가 증가하였다. 10 m 수심도 표층에 비해 남쪽과 북쪽해역의 바뀐 모양이었고, 크기별도 네트플랑크톤은 남쪽해역에서 피코플랑크톤은 북쪽해역에서 높았다(Fig. 4B). 9월은 표층과 10 m 수심 모두 매우 낮은 생물량을 보였지만, 공간적으로 연안정점에서 높고, 외부정점으로 갈수록 생물량은 감소하였다. 크기별 나노플랑크톤의 구성비는 이

른 여름과 유사하지만, 네트플랑크톤보다 피코플랑크톤 구성비가 높았고, 공간분포는 전체 생물량과 유사하였다(Fig. 4C). 11월은 표층과 10m 수심 모두에서 전체 생물량은 비교적 균일한 분포를 하지만, 연안정점이 바깥정점보다 다소 높았다. 크기별은 표층에서 남쪽해역에서 네트플랑크톤의 구성비가 다소 높게 나타났다. 10m 수심도 전체적으로 표층과 유사한 균일한 분포이지만, 북쪽과 가운데 라인의 중앙부와 남쪽 연안 및 바깥정점의 생물량이 높았다. 크기별은 나노플랑크톤의 구성비가 높지만, 일부 해역에서 피코플랑크톤의 구성비도 다소 높았다(Fig. 4D).

고 찰

Table 1에는 국내의 동, 서, 남해에서 보고된 크기별 식물플랑크톤에 대한 기존 연구 및 아시아를 포함한 지구규모의 다양한 해역에서 보고된 유사결과를 정리하였다. 이들 기존 연구는 엽록소 분석 방법이 다양하여, 보고된 측정값을 단순 비교하는 것으로는 의미가 없다. 때문에 측정값 대신에 크기별 상대조성비로서 비교하였다.

국내는 개방된 환경특성으로 육상에서 담수유입이 제한적이어서 영양염류 공급이 원활하지 않는 동해를 대상으로 한 보고는 중북부의 신포(북한), 중부의 울진 및 축산, 그리고 남부의 울산연안에서는 나노플랑크톤+피코플랑크톤을 합한 값보다 네트플랑크톤의 구성비가 높거나 유사한 것으로 보고하였다(Choi *et al.* 2004; Kang *et al.* 2005, 2006; Kwon and Kang 2013). 특히 북한 신포연안은 5월 봄을 제외하면 전 계절 네트플랑크톤 비율이 훨씬 높았고(Kang *et al.* 2005), 울산은 가을 나노플랑크톤이 60% 이상으로 우세한 것을 제외하면, 모든 계절 연평균 52.3%로 네트플랑크톤이 우세하였다(Kwon and Kang 2013). 반면 남부인 고리연안은 겨울 피코플랑크톤 상대비가 가장 높았다(Shim *et al.* 1991a). 즉 남부 개방해역의 표층은 나노플랑크톤이 70% 이상, 피코플랑크톤도 29.3%를 차지하여 초미세플랑크톤이 우세하였고, 특히 피코플랑크톤은 유광층 밑에서 40% 이상으로 우세하였다(Shim *et al.* 1991b). 이러한 결과를 요약하면 동해의 경우, 해역에 따라 산업폐수나 생활하수, 그리고 대·소하천에 의해 담수유입이 원활하여 비교적 영양염이 높을 것으로 판단되는 해역은 네트플랑크톤이 우세한 반면, 개방해역 특성으로 영양염 공급이 나쁠 것으로 생각되는 해역에서 나노 및 피코플랑크톤에 의한 상대조성비가 높았다(Table 1).

기타 국내 연안 및 내만해역은 제주의 경우, 유일하게 지속적 담수유입이 관찰되는 중문연안은 네트플랑크톤 조성

비가, 담수유입이 원활하지 않는 제주 바다목장 해역은 나노플랑크톤 및 피코플랑크톤 조성비가 상대적으로 높았다(Shynn and Lee 2002; Yoon 2014). 그리고 비교적 대형하천이 유입되어 갯벌이 발달된 서해연안도 하구연으로 담수 유입이 차단되면서, 부영양화가 진행되어 높은 부유물질 농도를 보이는 반폐쇄적 성격이 강한 인천도크와 천수만은 나노플랑크톤이 각각 연평균 73.2%(Yoo 2008)와 64%를 나타내었다(Shin *et al.* 1990). 그러나 경기만은 나노플랑크톤이 47.3%인 것에 반해 네트플랑크톤 33.0%, 그리고 피코플랑크톤이 19.7%의 조성비를 보였고(Yang and Choi 2003), 영산강 및 아산호 하구역은 담수배출량에 따라 다소 차이는 있지만, 네트플랑크톤이 70% 이상을 차지하였다(Shin *et al.* 2005; Hyun *et al.* 2006). 즉 식물플랑크톤 크기별 조성은 영양염 유입 등 환경조건 및 생물학적 제반과정과 관련성이 크다는 것을 나타내는 내용이다.

지구규모에서 보면 위도에 관계없이 빈영양 특성을 나타내는 대양에서 피코플랑크톤의 중요성이 높았다(Iriarte and Purdi 1994; Yamaguchi and Imai 1996; Maita and Odate 1998; Shimoto and Hashimoto 2001; Tamaru *et al.* 2002; Ehnert and McRoy 2007; Song *et al.* 2008; Al-Hashmi *et al.* 2010; Moreno-Ostos *et al.* 2011). 즉, 열대 오만해역은 5 μm 이하 피코플랑크톤은 연평균 73.5%를 차지하였고(Al-Hashmi *et al.* 2010), 호주의 남위 45~67°S까지 온대에서 한대해역에 걸쳐 여름에 표층은 3 μm 이하의 피코플랑크톤이 온대역에서 평균 23%, 한대해역에서 16~19%를 차지하는 것이 보고된다(Ehnert and McRoy 2007). 또한 쿠로시오의 영향이 강한 서일본 연안 패류양식장에서는 피코와 나노플랑크톤이 각 40.2%와 33.0%로 미소플랑크톤이 우세하였다(Tamaru *et al.* 2002). 뿐만 아니라 중앙부가 극심한 빈영양 상태를 나타내는 북해도 훈카만도 2 μm 이하 피코플랑크톤이 연평균 60%(Maita and Odate 1998), 난류보다 풍부한 영양염을 나타내는 한류인 오야시오해역에서도 여름 유광층 밑에는 10 μm 이하의 피코 및 나노플랑크톤이 89%를 점유하는 것이 보고된다(Shimoto and Hashimoto 2001). 영국연안도 봄부터 가을까지 3 μm 이하의 피코플랑크톤이 연평균 16.3%(Iriarte and Purdi 1994)의 점유율을 보이는 등 다양한 개방해역에서 3 μm 이하 피코플랑크톤이 기초생산자로서 중요한 것이 보고된다.

빈영양 환경을 보이는 것과 동일하게 극도로 부영양화된 해역도 피코 및 나노플랑크톤 조성비가 높은 것이 보고된다. 부영양화 내만인 오사카만도 10 μm 이하의 나노플랑크톤이 45~97%을(Yamaguchi and Imai 1996), 동중국해 양자강 하구도 겨울과 봄 20 μm 이하의 나노플랑크톤이 66.7%로 높았다(Song *et al.* 2008), 또한 산둥반도의 부영양화 염호에

Table 1. Size fractionation of phytoplankton observed in the different coastal waters of Korea and global ocean areas

Area	Study conditions		Range of Chl- <i>a</i> ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Relative ratio(%)			References
	Period/Times			Picoplankton	Nanoplankton	Net Plankton	
Uljin marine ranching area	2008/04		0.19~10.69	2.4~46.7(12.9)	43.8~93.8(65.0)	0~43.8(22.5)	This study
Shinpo coast, North Korea	2001~2002/04		0.22~7.87		14.2~77.8	22.8~88.6	Kang <i>et al.</i> 2006
Uljin coast	2003~2004/04		0.52~2.26		16.4~57.5(33.9)	42.5~83.6(66.1)	Choi <i>et al.</i> 2004
Chuksan coast	2000~2002/11		0.78~3.29		35.1~76.6(58.4)	23.4~64.9(41.6)	Kang <i>et al.</i> 2005
Ulsan port and coast	2007~2009/12		0.36~7.11	22.4~38.2	58.2~74.5	3.9~81.2(52.3)	Kwon and Kang 2013
Gori coast	1988~9/4(winter)		1.89~12.68	15.7~83.2	4.6~66.0.	0.1~45.9	Shim <i>et al.</i> 1991a
Southern area of East Sea	1988~1990/spring & summer		0.5~14.9	22.2~99.1 over 80 at most stations		–	Shim <i>et al.</i> 1991b
Incheon dock	2002/12		2.1~20.1(7.3)		32.5~96.8(73.2)	–	Yoo 2008
Gyeonggi Bay	1997~1998/12			19.7	47.3	33.0	Yang and Choi 2003
Cheonsu Bay	1985~1986/09		0.91~14.93		– 19~93(64)	–	Shin <i>et al.</i> 1990
Yeongsan estuarine	2007~2009/12		–	–	–	> 70	Shin <i>et al.</i> 2005
Southern coast of Jeju Island	1999~2000/12		Mean(3.02)	6.0	82.7	11.3	Shynn and Lee 2002
Jeju marine ranching area	2008/04		1.54~3.42	5.3~42.1(17.3)	44.0~92.5(78.0)	nd~39.4(4.7)	Yoon 2014
Pearl culture area, Japan	1997~1999/10		0.5~4.4	38.1~51.4(40.2)	33.0	26.8	Tomaru <i>et al.</i> 2002
Eutrophic saline lake in China	Summer/22		< 129.4	4	88	8	Yamaguch and Imai 1996
Inner parts of Mediterranean	2007~2008/12		4.93~30.26	55	23	22	Kükrer and Büyükişik 2013
Tropical area in Indian Ocean	2006/summer	Estuary Coastal waters	13.7±8 5.3±1.8	8.5 15.6	85.1 73.2	6.5 11.2	Madhu <i>et al.</i> 2010
Arctic area	2003/summer		0.18~1.05(0.4)		89.1	10.9	Joo <i>et al.</i> 2005

Values in () was indicated mean

서 나노플랑크톤은 88%로 우세한 것이 알려진다(Zhang *et al.* 2012). 그리고 부영양화된 유럽지중해는 피코, 나노 및 네트플랑크톤 구성비가 각 55%, 23%, 22%를 나타낸 반면(Kükrer and Büyükişik 2013), 인도양 열대해역의 하구역도 계절풍 이후 하구에서 먼 해역은 피코, 나노 및 네트플랑크톤이 각 15.6%, 73.2% 및 6.5%의 상대비로 나노플랑크톤의 중요성을 높게 평가하였다(Madhu *et al.* 2010). 그러나 부영양화 정조에 따라 유럽지중해 내만인 터키연안은 20 μm 이하 나노플랑크톤구성비가 연평균 9% 이하로 네트플랑크톤이 우세하였다(Polat and Aka 2007). 빛에 의해 성장이 지배되는 북극해의 여름은 20 μm 이하의 나노플랑크톤이 89.1%,

네트플랑크톤이 10.9%(Joo *et al.* 2005)로 일시적 성장조건에 갑작스런 증식으로 세포가 작아지는 특성을 보이는 것으로 판단되었다(Curl and Mcleod 1961).

이와 같은 크기별 식물플랑크톤 생물량 조성은 조사해역과 시기, 그리고 조사 횟수에 따라 서로 다른 결과를 나타낸다. 국내에서도 2010년과 2011년 11월 동일시기의 광양만에서 나노플랑크톤 조성비는 유사하지만, 2010년은 네트플랑크톤 비율이 가장 높았던 것에 반해, 일년 후인 2011년에는 피코플랑크톤 비율이 가장 높았다(Bae *et al.* 2014). 즉 식물플랑크톤의 크기 조성은 해역의 해수유동, 영양염류의 조건, 식물플랑크톤 군집의 우점종 등(Malone 1980) 다양한 생물

해양학적 과정에 따라 크게 다르다(Armstrong 1994; Tang 1995). 우리나라 연안에서도 서해의 경우 많은 하천이 있지만, 대부분은 방조제 건설로 담수유입이 원활하지 않은 등, 환경조건이 많은 차이를 보이게 된다. 동해 및 남해의 경우도 주변에 하천의 존재 유무, 해수유동에 의한 지속적 영양염 공급의 유무 등에 의해 식물플랑크톤의 크기별 조성이 크게 차이를 나타내는 것으로 판단되었다.

일반적으로 지속적인 영양염 공급이 발생하는 용승역이나 하구 해역 및 내만해역에서는 네트플랑크톤이 우세한 것으로 보고된다(Shin *et al.* 2005; Hyun *et al.* 2006; Kwon and Kang 2013). 그러나 부영양화가 진행된 연안이나 내만에서도 영양염 공급이 지속적이지 못하고 간헐적으로 발생하거나, 영양염 사이에 불균형이 심하게 되며, 필요 영양염이 공급시기에 일시적으로 급격한 증식이 발생되어, 세포크기가 소형화 되는 것도 알려진다(Curl and Mcleod 1961). 그리고 개방된 대양해역의 초미세한 피코플랑크톤은 극히 빈영양화된 대양해역에서 중요한 기초생산자의 역할을 하는 것은 일반적이다. 그러나, 최근 이들 해역의 유광층 밑 부분에 대양의 먹이사슬을 유지하기에 충분할 정도의 높은 밀도로 피코플랑크톤이 존재하는 것도 알려지고 있다(Shiomoto and Hashimoto 2001; Tomaru *et al.* 2002; Inoue 2007).

이러한 결과와 고찰을 통해 올진 바다목장 해역의 크기별 식물플랑크톤 생물량의 시·공간적 분포는 수온상승기인 초여름 편모조류 점유율이 높은 계절에 네트플랑크톤이 30%까지 증가하지만, 피코플랑크톤과 나노플랑크톤에 의한 미소플랑크톤 구성비가 연중 70% 이상을 차지하였다. 그리고 육지연안부에 인접하는 매우 제한된 해역에서는 간헐적으로 유입되는 생활하수 등의 영향으로 네트 및 나노플랑크톤이 다소 높지만, 연안부에서 다소 떨어진 해역은 크기가 작은 피코 및 나노플랑크톤 조성비가 높다. 따라서 올진 바다목장 해역의 전체적인 물질순환 등 생태구조는 연안에서 유입되는 영양염류 공급에 의한 bottom-up 방식보다는 미세먹이망을 통한 물질순환에 지배되는 먹이사슬이 형성되는 것으로 판단되었다. 이러한 내용으로부터 올진 바다목장 해역 등 동해연안은 극히 한정된 연안부를 제외하면 외부영양염 공급보다는 영양염 순환 및 동물플랑크톤 포식압이 기초생산을 조절하는 top-down 방식의 생태구조를 하는 것으로 판단된다. 실제 동일 정점에서 분석한 동물플랑크톤과 식물플랑크톤 군집 자료(MIFAFF 2009; Yoon 2016)에서도 이와 같은 내용을 지지하는 결과를 보였다.

이러한 내용은 막대한 국가 예산이 투입된 동해 올진바다목장의 효율적 이용과 관리, 그리고 이용 도중에 발생하는 다양한 해양환경 문제를 포함한 해결을 위해서는, 무엇보다도 대상해역에 대한 기초 해양환경 자료는 물론 기초생물을

포함하는 생태구조에 대한 지속적 모니터링에 의한 자료 축적으로 보다 객관적이면서 이용 가능한 생물해양학적 환경도출이 있어야만, 바다목장이라는 국민의 혈세가 제대로 이용될 수 있는 산업기반 형성이 가능할 것으로 판단되었다.

적 요

동해 올진 바다목장해역에서 크기별 식물플랑크톤 구성비 및 물질순환 특성을 파악하기 위한 현장조사는 2008년 4월에서 11월까지 4회 실시하였다. 바다목장해역 표층의 피코플랑크톤은 $0.03\sim 0.87 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭으로 연평균 $0.26 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 12.9% 구성비를 나타내었고, 나노플랑크톤은 $0.11\sim 5.60 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 연평균 $1.32 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 65.0%, 네트플랑크톤은 $\text{nd}\sim 4.68 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 연평균 $0.45 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 22.1%를 차지하였다. 10 m 수심도 다소 측정값의 차이는 있지만, 변동양상은 표층과 유사하였다. 시간적으로는 여름 네트플랑크톤 구성비가 30%까지 상승하였지만, 연간 피코 및 나노플랑크톤 구성비가 70% 이상으로 높은 특징을 보였다. 즉 동해 바다목장해역의 물질순환은 계절에 따라 다소 차이는 있지만, 전체적으로는 담수유입이 원활한 연안해역의 먹이사슬 구조(bottom-up)보다는 빈영양 환경특성으로 생태계순환에 의한 물질순환(top-down)에 더욱 크게 영향을 받는 것으로 판단할 수 있었다.

사 사

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2013005394) 결과이다.

REFERENCES

- Al-Hashmi, KA Claereboudt, MR Al-Azri, Adnan, R Piontovski and A Sergey. 2010. Seasonal changes of chlorophyll *a* and environmental characteristics in the Sea of Oman. *Open Oceanogr. J.* 4:107-114.
- Armstrong RA. 1994. Grazing limitation and nutrient limitation in marine ecosystems: steady state solutions of an ecosystem model with multiple food chains. *Limnol. Oceanogr.* 39:597-608.
- Bae SW, D Kim, YO Kim, CH Moon and SH Baek. 2014. The influences of additional nutrients on phytoplankton growth

- and horizontal phytoplankton community distribution during the autumn season in Gwangyang Bay, Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 32:35-48.
- Castro P and ME Huber. 2010. *Marine Biology* (8th eds), McGraw Hill Comp. NY. 461pp.
- Cermeno P, E Maranon, V Perez, P Serret, E Fernandez and CG Castr. 2006. Phytoplankton size structure and primary production in highly dynamic coastal ecosystem (Ria de Vigo, NW-Spain): Seasonal and short-time scale variability. *Est. Coast. Shelf Sci.* 67:251-266.
- Chisholm SW. 1992. Phytoplankton size. pp. 213-236. In *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea* (Falkowski PG and AD Woodhead eds.). Plenum Press, New York.
- Choi CG, SN Kwak and CH Sohn. 2006. Community structure of subtidal marine algae at Uljin on the East Coast of Korea. *Algae* 21:463-470.
- Choi HC, YS Kang and IS Jeon. 2004. Phytoplankton community in adjacent waters of Ulchin nuclear power plant. *Korean J. Environ. Biol.* 22:426-437.
- Curl HJr and GC Mcleod. 1961. The physiological ecology of marine diatom, *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve. *J. Mar. Res.* 19:70-88.
- Ehnert W and CP McRoy. 2007. Phytoplankton biomass and size fractions in surface waters of the Australian sector of the southern ocean. *J. Oceanogr.* 63:179-187.
- Hwang K, IS Seo, BM Choi, HN Lee, CW Oh, MH Kim, CG Choi and JH Na. 2012. Community structure of macrobenthic assemblages near Uljin Marine Ranching Area, East Sea of Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 32:286-296.
- Hwang LJ, JB Lee, DJ Choi, SK Kim, H Cha, TY Oh and HJ Baek. 2011. Reproductive capacity in starry flounder *Platichthys stellatus* from Uljin Marine Ranching Area, Korea. *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 45:253-261.
- Hyun B, Y Shin, C Park, S Yang and YJ Lee. 2006. Temporal and spatial variations of size-structured phytoplankton in the Asan Bay. *Korean J. Environ. Biol.* 24:7-18.
- Inoue I. 2007. *The Natural History of Algae* (2nd ed), Tokai Univ. Press. Tokyo. 643pp.
- Iriarte A and DA Purdi. 1994. Size distribution of chlorophyll *a* biomass and primary production in a temperate estuary (Southampton Water): the contribution of photosynthetic picoplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 115:283-297.
- Joo HM, JH Lee, KH Chung, JS Kang and SH Kang. 2005. Phytoplankton and environmental factors in the southeastern Barents Sea during August 2003. *Ocean Polar Res.* 27:265-276.
- Jyothibabu R, NV Madhu, KV Jayalakshmi, KK Balachandran, CA Shiyas, GD Martin and KKC Nair. 2006. Impact of fresh water influx on microzooplankton mediated food web in a tropical estuary (Cochin backwaters-India). *Est. Coast. Shelf Sci.* 69:505-518.
- Kang YS, HC Choi, JW Lim, IS Jeon and JH Seo. 2005. Dynamics of the phytoplankton community in the coastal waters of Chuksan harbor, East Sea. *Algae* 20:345-352.
- Kang YS, HC Choi, JH Noh, JK Choi and IS Jeon. 2006. Seasonal variation of phytoplankton community structure in northeastern coastal waters off the Korean Peninsula. *Algae* 21:83-90.
- Kang YS and JK Choi. 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 YS and JK Choi. 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. 7:108-128.
- Kang YS, JK Choi and HM Eum. 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* 18:29-47.
- Kürker S and HB Büyükişik. 2013. Size-fractionated phytoplankton and nutrient dynamics in the inner part of İzmir Bay, eastern Aegean Sea. *Turkish J. Bot.* 37:177-187.
- Kwon OY and JH Kang. 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.* 14:6008-6014.
- Madhu NV, R Jyothibabu and KK Balachandran. 2010. Monsoon induced changes in the size fractionated phytoplankton biomass and production rate in the estuarine and coastal waters of southwest coast of India. *Environ. Monit. Assess.* 166:521-528.
- Maita Y and T Odate. 1988. Seasonal change in size-fractionated primary production and nutrient concentrations in the temperate neritic water of Funaka Bay, Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan* 44:268-279.
- Malone TC. 1980. Algal size. pp. 433-465. In *The Physiological Ecology of Phytoplankton* (Morris I ed.). Blackwell Scientific Publications. London.
- MIFAFF (Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries). 2009. *Studies on the Development of Marine Ranching Program 2008 in the East, West and Jeju Coast of Korea*, No. of Government Publication: 11-1541000-000260-10:1019pp.
- Moreno-Ostos E, A Fernández, M Huete-Ortega, B Mouriño-

- Carballido, A Calvo-díaz, KAG Morán and E Marañón. 2011. Size-fractionated phytoplankton biomass and production in the tropical Atlantic. *Sci. Mar.* 75:379-389.
- Polat S and A Aka. 2007. Total and size fractionated phytoplankton biomass off Karata?, north-eastern Mediterranean coast of Turkey. *J. Black Sea/Mediterranean Environ.* 13: 191-202.
- Riebesell U. 2004. Effects of CO₂ enrichment on marine phytoplankton. *J. Oceanogr.* 60:719-729.
- SCOR-Unesco. 1966. Determination of photosynthetic pigments. pp. 10-18. In *Determination of photosynthetic pigments in sea water*(Unesco ed.). Paris.
- Severiano J, A Moura, E Magalhães and V Almeida. 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.* 4:616-621.
- Shim JH, HG Yeo and YK Shin. 1991a. Ecological effect of thermal effluent in the Korean coastal waters I. Significance of autotrophic nano and picoplankton in adjacent waters of Kori nuclear power plant. *J. Oceanol. Soc. Korea* 26:77-82.
- Shim JH, HG Yeo and JG Park. 1991b. Primary production system in the southern waters of the east Sea, Korea I. Biomass and productivity. *J. Oceanol. Soc. Korea* 27:91-100.
- Shin YK, JH Shim, JS Jo and YC Park. 1990. Relative significance of nanoplankton in Chonsu Bay: Species composition, abundance, chlorophyll and primary productivity. *J. Oceanol. Soc. Korea* 25:217-228.
- Shin Y, H Soh and B Hyun. 2005. Effect of salinity change on biological structure between primary producers and herbivores in water column. 「The Sea」 *J. Korean Soc. Oceanogr.* 10:113-123.
- Shiomoto A and S Hashimoto. 2001. Size-fractionated chlorophyll *a* and primary productivity in the offshore Oyashio waters in July 1992. *La mer* 39:9-18.
- Shynn B and JB Lee. 2002. Spatial and temporal distribution of picoplankton, nanoplankton and microplankton in Jungmun coastal waters of Jeju Island, Korea. 「The Sea」 *J. Korean Soc. Oceanogr.* 7:78-86.
- Song SQ, J Sun, ZL Shen, D Wang and QS Luan. 2008. Size-fractionated biomass of phytoplankton in the Yangtze River estuary and its adjacent waters in winter and spring. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao* 19:658-666.
- Tang EPY. 1995. The allometry of algal growth rates. *J. Plankton Res.* 17:1325-1335.
- Tomaru Y, N Udaka, Z Kawabata and S Nakano. 2002. Seasonal change of seston size distribution and phytoplankton composition in bivalve pearl oyster *Pinctada fucata martensii* culture farm. *Hydrobiol.* 481:181-1852.
- Yamaguchi M and I Imai. 1996. Size fractionated phytoplankton biomass and primary productivity in Osaka Bay, Eastern Seto Inland Sea. *Japan. Bull. Nansei Nat'l Fish. Res. Inst.* 29:59-73.
- Yang EJ and JK Choi. 2003. The study on the seasonal variation of microbial community in Kyeonggi bay, Korea. II. Nano and microplankton. 「The Sea」 *J. Korean Soc. Oceanogr.* 8:78-93.
- Yoo JS. 2008. Productivity and abundance of bacteria and phytoplankton in Incheon Dock, western coast of Korea. *J. Environ. Biol.* 29:531-534.
- Yoon BS, JH Park, MH Sohn, JH Yang, SC Yoon and YM Choi. 2013. Community structure and distribution pattern of the pleuronectiform fishes in the Uljin Marine Ranching Area, Korea. *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 46:413-423.
- Yoon YH. 2014. Spatio-temporal variability and size fractionation of chlorophyll *a* in the Jeju Marine Ranching Area (JMRA) with special reference to the signification of nanoplankton. *J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc.* 15:6388-6398.
- Yoon YH. 2016. Bio-environmental characteristics of the Uljin marine ranching area (UMRA), East Sea of Korea. 1. Spatio-temporal distributions of phytoplankton community. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Ener.* 19:37-46.
- Zhang D, C Wang, Z Liu, X Xu, X Wang and Y Zhou. 2012. Spatial and temporal variability and size fractionation of chlorophyll *a* in the tropical and subtropical Pacific Ocean. *Acta Oceanol. Sinica* 31:120-131.

Received: 24 August 2016

Revised: 20 September 2016

Revision accepted: 20 September 2016