Article

초여름 남해광역권의 수괴별 식물플랑크톤 군집구조 특성

백승호 · 신경순* · 현봉길 · 장풍국 · 김현수 · 황옥명

한국해양연구원 남해연구소
(656-830) 경상남도 거제시 장목면 장목리 391

Distribution Characteristics and Community Structure of Phytoplankton
in the Different Water Masses During Early Summer of
Southern Sea of Korea

Seung Ho Baek, Kyoungsoon Shin*, Bonggil Hyun, Pung-Guk Jang,
Hyun-Su Kim, and Ok-Myung Hwang

South Sea Research Institute, KORDI
Geoje 656-830, Korea

Abstract : To assess short-term variation of summer phytoplankton community structure in different water masses, phytoplankton and environmental factors were monitored from 31 stations on and off the southern coasts of Korea, from June 18 to June 20 2009. According to multidimensional scaling (MDS) and cluster analysis based on phytoplankton community data from each station, the southern sea was divided into two groups. The first group included stations in the south-eastern region of Jeju Island, which is strongly influenced by the Kuroshio warm current. The second group located along the coastal region of the southern sea, which was mainly comprised of Bacillariophyceae and Cryptophyceae. Of these stations, St. 13 and 28 formed a temperature front caused by different hydrological conditions. In particular, nutrients and Chl.*a* concentrations in these two stations were significantly higher compared to those in the other stations. This indicates that phytoplankton population and subsequent microalgal growth under high nutrient concentrations vary in different water masses. Our results support the theory that phytoplankton community structure in the southern sea of Korea can be influenced on a short-term scale by different water masses and currents.

Key words : phytoplankton community structure, canonical correspondence analysis (CCA), cluster analysis, multidimensional scaling (MDS), southern sea of Korea

1. 서 론

해양생태계에서 식물플랑크톤은 기초생산자로서 중요한 위치를 차지하며, 해수의 유동과 환경요인의 변화에 따라 군집의 시공간적 분포특성이 변화한다. 따라서 식물플랑크톤의 출현 종조성과 분포특성을 파악하는 것은 당 해

역의 생산성과 수괴구조를 이해하고 먹이망을 통한 물질(에너지) 전달과정을 파악하는 데 매우 중요하다.

우리나라 남해광역해역의 연구에서 1990년대 이전까지는 해양물리 및 이화학적인 환경인자를 바탕으로 한 해양의 수괴구조 및 특성에 관한 보고가 많았고(공 1971; 김 1982; 조와 최 1988), 1990년 이후에는 동식물플랑크톤의 분포특성과 관련하여 수괴구조를 이해하려는 연구가 많이 보고되었다(이 등 1990; 박과 이 1990; 윤 1993; 임 등

*Corresponding author. E-mail : ksshin@kordi.re.kr

2003; 김 등 2008). 남해광역해역은 쿠로시오의 지류수인 대마난류수와 황해 난류수, 중국 대륙의 연안수, 남해권역의 연안수와 같은 서로 다른 다양한 수괴들이 접하는 해역으로 복잡한 수괴구조가 형성되며, 각 수괴 사이에는 전선(front)이 형성되어 식물플랑크톤의 집적을 유도한다(Yang and Kim 1990; 박 등 1998; 양 등 1998). 이와같이 수괴구조의 변화는 해양전선(ocean front)의 형성과 소멸을 반복시키고, 전선이 형성되는 위치는 각기 다른 해역의 플랑크톤성 생물의 유입을 동반할 수 있으며 당해역에 분포하는 생물상을 변화시키는 주요 원인으로 작용할 수 있다(Han et al. 1989; 추와 김 1998; 임 등 2003).

남해 광역권의 식물플랑크톤 군집 조사는 서남해역(Shim and Park 1984; 윤과 김 2003), 남해도 해역(임 등 2003; 정 등 2008), 동남해역(박 등 1998), 대한해협(진과 공 1985; Shon et al. 2008), 제주도 연안(이 등 1990; 김 등 2008)에서 주로 이루어졌으나, 대마난류의 영향을 직접적으로 받는 대한해협을 포함한 제주도 인근연안 및 남해도, 광양만 일대 주변해역의 광역권조사를 단기간 집중적으로 수행한 사례는 거의 전무한 상태이다. 또한 대부분의 연구는 종조성의 분포와 수문학적 환경특성을 이해하는데 중점을 두고 있어 통계학적 기법을 이용하여 수괴의 특성과 군집구조를 평가한 사례는 미흡하다.

본 연구에서는 대한해협과 제주도 연안을 포함한 남해

광역권의 식물플랑크톤 군집구조의 수평적 분포특성을 파악하고자 각 정점별 출현종과 현존량을 바탕으로 MDS(Multidimensional Scaling)와 Cluster 분석을 행하였다. 또한 식물플랑크톤의 분포특성에 영향을 미치는 주요 환경요인을 확인하기 위해서 CCA(Canonical Correspondence Analysis) 분석을 행하여 식물플랑크톤 군집구조의 특성을 이해하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

조사는 거제도 한국해양연구원 남해연구소를 기점(St. 1)으로 하여 부산내외해역(St. 2-3), 부산외양의 대한해협상단에서 제주도부근의 하단까지 연결되는 라인(St. 4-8), 제주도 동남해역에서 북동부 연안해역으로 연결되는 라인(St. 9-14), 제주도 북동해역에서 광양만으로 이어지는 라인(St. 15-23), 광양만에서 거제 가덕도로 이어지는 라인(St. 24-31) 등 총 31정점의 남해광역권의 정점을 선정하여, 2009년 6월 18일에서 20일에 걸쳐 표층수를 채수하였다(Fig. 1). 단기 집중조사에 의한 식물플랑크톤의 군집분포를 파악하는 것이 주 목적이었기 때문에 주간과 야간의 구분없이 시료를 채집하였다. 각 조사 정점의 위도, 경도의 좌표를 포함한 수온, 염분은 조사선 이어도에 내재된 장비로부터 얻어졌다.

Fig. 1. Location of study sites in southern sea of Korea.

표층수 1000-3000 m/를 선상에서 GF/F필터(47 mm Whatman glass fiber filters)로 여과하여, 필터는 chlorophyll-*a*(Chl.*a*) 측정을 위해 15 m/ 튜브에 넣어 냉동보관하였고, 여과 해수는 50 m/ 튜브에 넣고 냉동보관하여 영양염 분석용으로 사용하였다. 식물플랑크톤 종조성과 정량분석을 위해 500 m/의 병에 표층수 500 m/를 넣고 곧바로 루골용액(Lugol)으로 최종농도 1%가 되도록 고정했다. Chl.*a* 농도는 여과지를 90% 아세톤에 넣고 24시간 냉암소에서 엽록소를 추출한 후 형광측정기(Turner Designs 10-AU Fluorometer)로 분석하였다(Parsons et al. 1984). 영양염은 자동영양염 분석기(Lachat Quick-chem 8000 auto-analyzer Lachat, Milwaukee, WI)를 이용하여 측정하였다. 해수표준물질(CSK standard solution, Wako Pure Chemical industries, Osaka)로, 질산염+아질산염($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$), 암모니아(NH_4^+), 인산염(PO_4^{3-}), 규산염(SiO_3)의 검량선을 그려 각각의 농도를 산출하였다(Parsons et al. 1984).

식물플랑크톤의 종조성과 현존량을 파악하기 위해서 500 m/의 샘플을 20 m/로 농축시킨 후 100-300 μl 분주하여 200배율로 동정 및 계수하였다. 특히 광학현미경에서 동정이 극히 어려운 종은 속 수준에서 동정하였고, 10 μm 이하의 작은 와편모조류는 하나의 미동정 와편모그룹으로 묶었고, 은편모조류(Cryptophyceae)는 하나의 은편모그룹으로 묶었다.

식물플랑크톤의 군집은 출현 종수와 현존량을 바탕으로 Shannon-Wiener 종다양성지수(H' , species diversity index)와 균등도 지수(J')를 PRIMER version 5를 이용하여 분석하였다. 또한 정점별 식물플랑크톤의 군집구조를 자세히 알아보기 위해서 각 정점에 출현한 식물플랑크톤을 바탕으로 Bray-Curtis 유이도를 산출하였고, PRIMER version 5를 이용해 Cluster 분석, MDS 분석과 더불어 주성분 분

석을 했다(Clarke and Warwick 2001; 백 등 2008). 또한 그 결과를 바탕으로 식물플랑크톤 우점종과 환경인자 사이에 어떠한 관계가 있는지 CANOCO 4.5 software을 이용하여 CCA(Canonical Correspondence Analysis) 분석을 행하였다.

3. 결 과

환경요인의 변화

6월에 단기 집중적으로 수행한 31개의 남해광역권 정점에서 수온은 최저 17.2°C(St. 28)에서 최고 23.0°C(St.10)로 5.8°C의 차이를 보였고, 평균은 $21.01 \pm 1.4^\circ\text{C}$ 로 나타났다. 염분은 최저 32.98 PSU(St. 12)에서 최고 34.37 PSU(St. 7)로 변동하였고, 평균은 33.49 ± 0.36 PSU로 관찰되었다(Fig. 2). 수온은 거제도 장목만 정점 1에서 대한해협북단으로 이어지는 정점 5까지 조금씩 증가하는 양상을 보였으나, 대한해협을 따라 남단으로 향하는 정점과 제주부근 정점에서 높게 나타났다(St. 6-12). 반면 정점 13의 제주도 연안 정점에서는 수온이 급격히 하강하여 수괴의 특성이 전혀 다른 것을 확인할 수 있었다. 그 후 광양만으로 향하는 연안 정점 14에서 23에 걸쳐서 약간의 수온 증감 현상은 보였으나 두드러진 차이는 보이지 않았다. 광양만에서 거제도 외측 남단연안으로 향하는 정점 28에서는 급격한 수온 하강현상이 나타났고, 그 후 정점 29에서부터 반등하여 급격히 상승하는 양상을 보였다. 염분은 수온이 높은 대한해협 구간에서 비교적 높게 관찰되었으나 제주 연안과 남해도 연안에서는 33 PSU 전후로 큰 차이를 보이지 않았다. 수온이 급격히 하강한 정점 13과 28에서 주변 다른 정점과 비교하여 염분이 높은 점이 특이하였다.

물리적 특성에 의한 수괴를 구분하기 위해 T-S diagram과 Cluster 분석을 행하였다(Fig. 3). 조사기간 동안 남해

Fig. 2. Horizontal distribution changes of temperature and salinity in southern sea of Korea, from June 18 to June 20 2009. Gray areas indicate night periods during the sampling cruise. St. 13 and 28, indicated by arrowheads, are strongly influenced by different water masses.

Fig. 3. A T-S diagram (a) showing the relationship between temperature (T), salinity (S) and density. St. 13 and 28, indicated by arrows, are strongly influenced by different water masses. Gray areas are indicated based on cluster analyses. Joint plots of sites association analyses obtained by cluster analyses (b), using a data set of surface temperature and salinity during the study period in southern sea.

광역해역은 수괴특성에 따라 크게 3해역으로 구분되었다. 첫 번째 고수온(>22°C), 고염분(>34 PSU) 수괴의 정점(7, 8, 9, 10)으로 구분되었다. 두 번째는 상대적으로 저염분수괴(<33.5 PSU)가 관찰된 곳과 중간단계의 수온(>19, <22°C) 이 형성된 곳으로 구분되었다. 마지막으로 중간단계의 염분(>33.5, <34 PSU)과 저수온(<19.5°C) 수괴가 형성된 곳으로 각각 구분되었다.

각 정점에서의 영양염 농도는 규산염이 가장 높게 관찰되었고, 다음으로 질산염+아질산염으로 나타났다(Fig. 4a, 4b). 규산염은 장목만(St. 1)에서 22.87 μM 로 최고치

를 기록하였고, 정점 2에서 광양만(St. 24)에 걸쳐서 5 μM 전후의 농도를 보였으나, 그 후 거제도 연안(St. 27-31)에서는 다른 해역보다 전반적으로 높게 관찰되었다(Fig. 4a). 질산염+아질산염의 최고치는 정점 28에서 4.59 μM 로 관찰되었고, 그 주변 정점(St. 27-30)과 제주도에서 광양만으로 이어지는 일부 정점 18과 21에서 조금 높은 값을 보였다. 그 외 다른 정점에서는 뚜렷한 변화를 나타내지 않았다(Fig. 4b). 암모니움 또한 정점 1에서 2.76 μM 로 최고치를 기록하였으나, 다른 30개 정점에서는 검출 한계에 가까운 낮은 농도가 관찰되었다(Fig. 4c). 인산염은 수

Fig. 4. Horizontal distribution changes of silicate (a), nitrate + nitrite (b), ammonia (c) and phosphate (d) in southern sea from June 18 to June 20 2009. Gray areas indicate night periods during the sampling cruise. St. 13 and 28, indicated by arrowheads, are strongly influenced by different water masses.

온이 최저값을 나타낸 정점 28에서 $0.38 \mu\text{M}$ 로 최고치를 기록하였고, 그 주변의 거제 외양남단 정점(St. 27, 29)에서 상대적으로 높은 값을 보였다. 하지만, 거제외양 북단 정점(St. 30, 31)에서는 최저값을 나타내었다. 특히 대한해협에서 광양만으로 이어지는 정점 2에서 26사이에는 $0.1 \mu\text{M}$ 전후로 낮게 관찰되었다.

식물플랑크톤의 분포

각 정점별 Chl.a농도의 수평적 변화를 Fig. 5에 나타냈다. Chl.a농도의 최대값(2.36 mg m^{-3})은 최저 수온과 영양염이 높게 관찰된 정점 28에서 관찰되었고, 그 주변해역의 정점에서 비교적 높은 값을 유지했다(Fig. 5a). 또한 광양만 주변 정점 20과 23에서 단발적으로 높게 관찰되었고, 상대적인 저온수괴가 관찰된 제주도 연안에서

비교적 높게 나타났고, 장목만의 정점 1에서도 높게 관찰되었다. 식물플랑크톤 현존량은 Chl.a농도의 변화양상과 유사한 경향을 보였다(Fig. 5b). 조사기간 동안 표층수에 출현한 식물플랑크톤은 총 111종으로 동정되었으며, 그 중 규조류(Bacillariophyceae)가 2목30속57종, 와편모조류(Dinophyceae)가 6목21속43종, 규질편모조류(Chrysophyceae)가 1목1속4종, 유글레나류(Euglenophyceae) 1목2속2종, 라피도조류(Raphidophyceae) 1목1속3종으로 나타났다. 은편모조류(Cryptophyceae)는 하나의 cryptomonads 그룹이 관찰되었다.

조사 정점별 식물플랑크톤의 주요 그룹을 살펴보면, 거제도 주변 해역의 정점 1, 28, 30, 31과 제주도 주변의 저온 수괴가 형성된 정점 13에서 규조류의 높은 현존량과 더불어 전체 식물플랑크톤의 50% 이상의 점유율을 나타

Fig. 5. Horizontal distribution changes of Chl.a (a) and standing crop (b) in the southern sea from June 18 to June 20 2009. Gray areas indicate night periods during the sampling cruise. St. 13 and 28, indicated by arrowheads, are strongly influenced by different water masses.

Fig. 6. Horizontal distribution changes of phytoplankton abundance (upper), and relative contribution (lower) in the southern sea from June 18 to June 20 2009.

Fig. 7. Horizontal distribution changes of number of observed species (a), Shannon-Wiener diversity indices (H') (b) and evenness (J') (c) in southern sea of Korea from June 18 to June 20 2009. Gray areas indicate night periods during the sampling cruise. St. 13 and 28, indicated by arrowheads, are strongly influenced by different water masses.

내었다(Fig. 6). 대한해협과 제주도 연안으로 이어지는 해역에서는 극히 낮은 농도의 식물플랑크톤이 관찰되었고, 그 중 와편모조류가 상대적으로 높은 비율을 차지했다. 은편모조류는 제주도에서 광양만으로 이어지는 해역과 광양만에서 거제도 외양 남단으로 연결되는 해역에서 높게 나타났다. 규질편모조류, 유글레나조류, 라피도조류의 그룹은 출현 빈도도 낮고 개체수 밀도도 극히 낮게 관찰되었다. 정점별 출현종수와 Shannon-Wiener의 다양도지수는 식물플랑크톤의 현존량이 높게 관찰된 정점에서 비교적 높게 나타났으나, 균등도 지수는 반드시 그렇지 않았다. 이것은 출현 종수가 많음에도 불구하고 어떤 특정 종이 두드러지게 높게 나타난 결과 균등도지수가 낮게 유지되었다는 것을 의미한다(Fig. 7). 조사기간 중 규조류 *Chaetoceros curvisetus*, *Chaetoceros socialis*, *Letocylindrus danicus*, *Pseudo-nitzschia delicatissima*, *Skeletonema costatum*은 거제도 연안 정점에서 높은 밀도로 관찰되었고, 와편모조류는 *Ceratium fusus*, *Gyrodinium spirale*, *Heterocapsa niei*, *Heterocapsa tirquetra*와 같은 종이 상대적으로 높게 출현하였다. 그리고 5-10 μm 의 크기를 가진 은편모그룹은 광양만에서 거제도로 이어지는 정점에서 우

점하였다.

조사기간 중 정점별 출현한 식물플랑크톤의 군집구조를 바탕으로 Cluster 분석과 MSD 분석한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 식물플랑크톤의 군집구조와 출현양상에 따라서 형성되는 정점별 그룹의 차이는 명확하게 나누어지지 않았지만, 크게 2개의 그룹으로 구분할 수 있었다. 제1그룹은 대한해협의 상단에서 하단을 거쳐 제주도로 이어지는 정점으로 구분되었고, 제2그룹에서는 제주도에서 광양만으로 이어지는 정점과 더불어 연안 주변 정점으로 각각 구분되었다.

4. 고찰

우리나라 남해는 하계에 표층 부근에서 고온과 고염의 특성을 가진 대마난류수(Tsushima Warm Current Water)와 상대적으로 저온 저염을 가지는 남해연안수가 만나 연안에 가까운 해역에서 해양전선이 형성되며, 이들 두 수괴의 전선에는 다양한 식물플랑크톤이 분포한다(박과 이 1990; Kang et al. 2002; 임 등 2003). Seung(1992)에 의하면 제주해협과 대한해협으로 유입되는 대마난류는 세력

의 차이는 있으나 계절에 관계없이 남해연안 일대에 영향을 미친다. 본 연구에서도 수온과 염분의 분포(T-S diagram)에 따른 수괴의 특성을 크게 3그룹으로 구분할 수 있었다. 그룹 1에서는 대마난류의 영향을 직접적으로 받는 대한해협 하단(St. 6-8)정점과 제주도 남동해역(St. 10-12, 17, 18)의 정점으로 구분되었다. 그룹 2에서는 남해연안수의 영향을 강하게 받는 정점으로 상대적으로 저염분수괴 특성을 지닌 연안 정점으로 구분되었다. 마지막으로 그룹 1과 2에서 분리 되지 않는 물리특성을 가진 정점(St. 13과 더불어 St. 28전후의 정점)이 제 3그룹으로 나누어 졌다.

제주도 동남해역의 정점 9에서 12로 향할수록 수온 변동은 거의 없었으나, 염분은 조금씩 점차적으로 하강하는 경향을 보였고(Fig. 1, 2), 이것은 외양수의 영향보다 제주도 연안수의 영향을 직간접적으로 받아 염분이 낮게 관찰된 것으로 사료되었다. 하지만, 제주도 연안에 가장 가까운 제주북단 정점 13에서는 수온이 급격히 하강하였으며, 그 주변해역(St. 14, 15, 16)에서도 상대적으로 낮은 수온이 지속적으로 나타났고, 염분 또한 반등하여 33.5 PSU전후를 유지하였다. 여기서 바로 앞 정점(St. 12)과 수온이 2°C 정도의 현저한 차이를 보였다는 것은 동일해역에서 물리적 영향을 받아 변화한 것이 아니라 수괴가 전혀 다른 해역(이질적인 수괴)의 영향을 직간접적으로 받고 있다는 것을 의미할 수 있다(임 등 2003; 윤 등 2003). 본 조사 기간 동안 특징적인 것은 정점 28부근에서 저온, 고염과 더불어 상대적으로 높은 영양염 농도(질산염+아질산염, 인산염)가 관찰된 것이다. 여기서 높은 영양염 농도가 어디서 공급되었는지 2가지로 추측할 수 있다. 첫번째, 하계에 빈번히 관찰되는 호우의 영향과 두번째로 수주내의 연직혼합의 가능성이다. 하계에 빈번히 관찰되는 호우는 담수의 영향으로 연안일대에 저염분수괴를 형성하지만, 정점 28부근에서는 다른 주변 정점보다 높은 염분농도가 관찰되어 호우에 의한 영양염 공급이 이루어 졌다고는 판단하기 어렵다. 특히 정점 28의 밀도는 24.4 kg m⁻³로 조사 기간중 가장 높았고, 영양염(주로 질산염과 인산염) 또한 특이적으로 높게 관찰되었다(Fig. 3, 4). 따라서 정점 28부근은 용승에 의한 연직혼합의 가능성이 높다고 판단된다. 그러나 하계에 단발적으로 발생하는 용승과 같은 연직혼합 현상을 정확하게 파악하기 위해서는 추후 그 주변해역에서 연직수층조사와 더불어 상세한 물리적인 연구가 필요하다.

식물플랑크톤 군집은 해역과 계절적 특성에 따라 현존량, 개체수 크기 및 종조성이 다르게 나타난다. 일반적으로 온대해역의 외양에서 식물플랑크톤의 대증식은 춘계와 추계에 빈번히 발생하고(Riley 1942; Cushing 1989), 하계에는 계절적 수온약층으로 인하여 저층수의 풍부한 영양염이 유광층에 충분히 공급되지 않아 식물플랑크톤의 현

존량이 비교적 낮게 유지된다(Joint et al. 1986; Baek et al. 2009). 또한 온난해역의 연안수에서는 소형과 미소 식물플랑크톤(micro and nano size)이 높은 출현을 보이는 반면(Smayda and Reynolds 2001), 외양에서는 주로 초미소 식물플랑크톤(pico size)이 우점을 하게 된다(Johnson and Sieburth 1979; Furuya et al. 2003; 노 등 2005). 본 조사에서도 수괴의 특성에 따라서 식물플랑크톤의 분포특성이 다르게 관찰되었다. 특히 그룹 2에 해당되는 연안해역의 정점에서는 소형과 미소 크기의 규조류가 높은 현존량을 보인 반면, 그룹 1에 해당되는 외양정점에서는 그들의 세포밀도가 극히 낮게 관찰되었다. 한편, 대한해협에서 제주도 남단으로 향하는 정점에서는 현미경으로 관찰할 수 있는 종이 아주 적었고, 외편모조류의 출현률이 상대적으로 높았다. Furuya의 CHEMTAX를 기초로 한 색소분석에 의하면(Furuya et al. 2003), 제주도 남단 동중국해에서 성층이 천천히 형성되는 6월에 표층 부근 식물플랑크톤의 생물량은 극히 낮았다. 주로 Prochlorophytes, Chrysophytes, Prymnesiophytes, Chlorophytes와 같은 생물군이 출현하였고, 전체 Chl.a농도의 24-63%를 Prochlorophytes가 차지하였다. 본 연구에서도 대마난류의 영향을 강하게 받는 대한해협과 제주도 남단해역에서 Chl.a 농도가 0.1-0.2 mg m⁻³로 상대적으로 낮게 관찰되었고, 이러한 농도는 Furuya et al. (2003)이 제주남단의 동중국해역에서 관찰한 같은 시기의 농도와 유사했다. 노 등 (2005)이 제주남단의 이어도 기지 주변 수역을 모니터링한 결과에 의하면, 5월에서 10월사이 3 µm이하로 분류된 Chl.a농도가 전체 식물플랑크톤의 32-78%를 점유했고, Picocyanobacteria의 Synechococcus가 대부분을 차지하였다. 본 연구에서도 대한해협 최남단 정점 8에서 3 µm이하 크기의 생물이 전체 Chl.a의 농도의 45% 이상을 차지하였다(미공개 자료). 이 구간에서는 규산염을 제외한 모든 영양염이 검출한계선에 가까운 농도를 나타내어 미소식물플랑크톤 증식의 제한요인이 되었고, 상대적으로 낮은 영양염에서도 성장이 가능한 초미소 식물플랑크톤이 우점할 수 있었다고 사료된다.

단세포로 2개의 편모를 가지는 은편모조류는 규조류와 외편모조류에 이어 담수와 해양 생태계에서 매우 중요한 구성종이다(Hill 1991). 본 조사에서 수괴의 분포 특성에 따라 나눈 해역중 그룹 2에 해당되는 연안정점(St. 14-27)에서 은편모조류는 다른 생물군에 비하여 압도적으로 높게 점유했다. 광양만일대 해역은 섬진강을 통한 담수유입과 더불어 광양만의 산업폐수로 인한 부영양화가 여수만을 통하여 외해로 유출되는 통로 역할을 하는 해역으로 하계 식물플랑크톤의 이상증식 현상이 빈번히 관찰되는 곳이다(심 등 1984; 임 등 2003). Weng et al. (2007)에 의하면, 중국의 Pearl River Estuary에서 은편모조류 *Cryptomonas*

sp.의 성장은 퇴적물로부터 용출되는 인(phosphorus)과 철(iron)의 영향을 강하게 받았다. 이는 담수와 제철소 폐수를 통하여 인과 철의 유입 가능성이 있는 본 연구해역에서 시사하는 바가 크다. 신 등 (2000)의 보고에 의하면, 시화호에서 은편모조류의 대발생은 하계에 빈번히 관찰되었고, 그들 구성은 *Chroomonas* spp., *Cryptomonas* spp., *Rhodomonas* spp.로 나타났다. 특히 그들의 발생패턴은 매우 불규칙하였으나, 어떤 생물이 대발생을 일으키고 난 직후 출현하는 양상을 보였다. 본 조사에서도 광양만 주변 해역의 정점(St. 18-21)에서 Shannon-Wiener의 종다양도지수(H' : 0.3이하)와 균등도지수(J' : 0.3이하)가 극히 낮았다. 이것은 은편모조류가 압도적으로 많이 출현한 결과인 것으로 판단되며, 신 등 (2000)의 보고와도 일부분 일치한다. 결과적으로 외양과 경계에 있는 연안해역과 강하구역에서 은편모그룹이 불규칙하게 대증식을 한다는 것은 시시각각으로 변화하는 수역의 영양염을 효율적으로 이용하여, 구조류(보편적으로 영양염 반포화 계수가 높아 영양염 요구성이 큼)와 외편모조류(보편적으로 영양염 반포화 계수가 낮아 영양염 농도가 극히 낮은 환경에서도 증식이

가능함)의 중간에서 식물플랑크톤 종천이를 유도하고 있음을 의미한다(Smayda 1997; Baek et al. 2008b).

남해광역권에서 식물플랑크톤의 수평적 분포양상을 자세히 알아보기 위해서 Cluster분석과 MDS분석을 행하였다. 또한 주성분 분석을 행하여 수평분포 특성과 어떤 관계가 성립되는지 검토하였다. 주성분 분석에서는 대한해협과 제주도 부근 대부분의 외양정점은 Y축의 하단 좌우측으로 균등하게 배열되었다(Fig. 9 점선 참조). 이들 정점은 수괴의 특성과 식물플랑크톤의 분포특성에 따른 Cluster 분석에서도 같은 그룹(Group 1)으로 구분되었다. 그룹 1에 해당되는 정점은 고온·고염해수인 쿠로시오 기원의 대마난류의 영향을 강하게 받는 지역으로 식물플랑크톤의 현존량이 극히 낮게 관찰되었다. 식물플랑크톤의 성장은 낮은 영양염 때문에 극히 제한되었고, 낮은 영양염에도 성장이 가능한 종이 선택적으로 출현하였다. 그 중 크기가 작은 외편모조류가 우점 출현한 것은 수온이 높고 성층으로 인한 안정된 수괴가 영향을 미친 것으로 사료된다. 식물플랑크톤의 분포특성은 연안과 외양 정점으로 크게 2개의 그룹으로 나누어 졌으며, 특히 연안 정점에서는

Fig. 8. Joint plots of sites association analyses obtained by cluster (a) and non-metric multidimensional scaling (MDS) (b) ordination analyses, using a data set of the surface species abundances during the study period in southern sea of Korea.

Fig. 9. Score plot by principal component analysis (PCA) based on phytoplankton communities of all stations during the study period.

세부적으로 거제도 주변 정점과 광양만 주변 정점으로 나누어졌다. 또한 주성분 분석에서도 광양만 주변 정점은 X축 우측의 상단에, 거제도 부근의 연안 정점은 X축 좌측 상단에 각각 위치하였다(Fig. 8). X축 상단 우측의 광양만은 은편모조류 *Cryptomonas* sp.가 상대적으로 높은 밀도로 우점 출현한 곳이다. 앞에서 언급한 것과 *Cryptomonas* sp.는 광양만 주변의 담수와 체철소 폐수를 통하여 유입된 인과 철 등과 같은 미량원소에 자극을 받아 빠른 성장을 보였을 것으로 사료된다. X축 좌측 상단에 위치한 거제도 연안 정점에서는 규조류가 높은 밀도로 우점 출현하였다. 이들 정점에서는 영양염 농도가 다른 정점보다 높게 관찰되었으며, 높은 영양염 조건에서 외편모조류보다 규조류가 빠르게 성장할 수 있는 생리적인 이점을 이용하여 규조류가 영양염 경쟁에서 우위를 차지했을 가능성을 시사했다(Smayda 1997). 규조류에 대한 포식자들의 포

Fig. 10. Relationship between nutrient, temperature, salinity and phytoplankton community composition by canonical correspondence analysis (CCA). Effect of population development on each group species (a: dominant diatom group, b: Cryptophyceae, Euglenophyceae and Chrysophyceae, c: dominant dinoflagellate group) was assessed.

식압은 그들의 성장을 제어 할 수 있으나(Turner 1984; Welschmeyer and Lohrenz 1985), 돌발적으로 공급된 영양염(예를들면 연직혼합의 가능성)에 빠르게 반응할 수 있는 규조류는 포식자의 포식압에 보다 빠른 성장을 할 수 있는 가능성이 있는데 이를 증명하기 위해서는 추가적인 실내외에서의 포식압 측정 실험이 필요하다. 또한 앞에서 언급한 정점 13의 이질적 수괴가 형성된 것으로 사료된 곳은 식물플랑크톤 군집 조성에서도 주변 정점(St. 12, 14)과 전혀 다른 독립된 위치에 배열되었다. 연직혼합의 가능성을 시사한 정점(St. 28)은 거제도 연안 해역의 그룹에 같이 포함되어 있었으며, 이것은 특성이 전혀 다른 수괴가 혼합되었다는 것 보다 같은 해역의 저층수가 표층 주변으로 확산 및 혼합되었기 때문에 식물플랑크톤의 종조성과 현존량이 주변정점과 유사한 분포를 보인 것으로 사료된다. 결과적으로 그룹 1에 해당되는 수역은 남방의 쿠로시오 영향을 현저히 받고 저영양염 수괴를 형성하는 외양정점으로 식물플랑크톤 현존량과 종조성이 극히 낮았다. 반면, 그룹 2에 해당되는 광양만과 거제도 주변의 연안해역에서는 규조류와 더불어 은편모조류가 상대적으로 높은 영양염을 효율적으로 이용하여 우점출현할 수 있었고, 그 결과 연안해역에 가까운 정점에서도 하계 영양염이 제한(주로 N, P)되었다.

식물플랑크톤은 총 111종이 출현하였으나, 극히 낮은 밀도로 출현한 종이 대부분이었고, 그 중 상대적으로 높은 점유율을 보인 특정 생물을 대상으로 CCA분석을 하였다. 이 분석법은 각 출현종들 사이의 유사성 거리를 계산하여 각 개체간의 상대적 거리를 위치화 시킨 것과 각 개체의 배열과 측정된 환경요인사이에 가장 높은 상관관계를 갖는 모형을 겹쳐서 최종적으로 한 도면(diagram)상에 모든 정점의 환경인자와 대상종을 동시에 배열하여 상호간의 관계를 살펴보는 통계학적 방법이다. 먼저 규조류 우점종을 대상으로 한 CCA 분석을 살펴보면(Fig. 10A), 정점 27, 28, 29에서 높은 밀도로 출현한 *Pseudo-nitzschia* spp., *Chaetoceros* spp.는 같은 방향으로 위치하고 있었고, 이들 두 속은 질산, 아질산염과 정(+)의 관계가 형성된 반면 수온과는 음(-)의 관계가 형성되었다. 정점 30과 31에서 높은 밀도로 출현한 *Skeletonema* spp.(주로 *Skeletonema costatum*)와 *Leptocylindrus* spp.(주로 *Leptocylindrus danicus*) 또한 같은 방향을 향했고, 이들 속은 염분농도와 음(-)의 상관관계를 보였다. *Skeletonema costatum*은 광온광염성종으로 기수역과 연안해역에 널리 분포하는 종으로 우리나라 연안해역과 일본 동경만에서 계절에 관계없이 빈번히 출현하고, 하계에 저염분수에 자극을 받아 대증식을 한다(Han et al. 1992, 1994). *Leptocylindrus danicus*는 봄철 남해연안해역에서 높은 출현빈도를 보였고(유와 이 1976; Kang et al. 1999), 통영해역에서 초 여름에 우점하

였다(정 등 2008). 본 연구에서도 *S. costatum*가 높게 출현한 정점에서는 상대적으로 저염분수가 형성되었고, 이것은 선행연구와 비교적 잘 일치하였다. 규산질편모조류, 유글레나조류, 은편모조류를 대상으로 한 CCA분석을 살펴보면(Fig. 10b), 은편모조류는 연안해역의 대부분 정점에서 출현하였고, 정점 14에서 22에 걸쳐서 특히 높은 점유율을 보였으나 이 그룹과 환경인자간의 관계는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 규산질편모조류는 암모니움과 규산염의 농도와 일정한 양의 관계가 있었고, 유글레나조류는 질산염 + 아질산염과 낮은 양(+)의 관계를 관찰할 수 있었다. 외편모조류 중에서 상대적으로 높은 밀도로 출현한 생물을 대상으로 한 CCA분석에서는 *Prorocentrum* spp.와 *Heterocapsa* spp.가 같은 방향으로 위치하였고, 규산염과는 양의 관계를 형성하였다(Fig. 10c). 이것은 규산염 농도가 높아 이들 2속이 높은 개체수를 유지 할 수 있다는 것을 의미하지만, 외편모조류의 피각은 셀룰로스로 되어 있어 그들의 증식과 규산염과는 상관성이 없을 것이다. *Ceratium* spp.와 *Scrippsiella* spp.는 암모니움과 더불어 인산염과도 양(+)의 관계를 나타내었다. *Ceratium* 속 중에서는 *Ceratium fusus*가 광양만 내측(St. 23)과 장목만(St. 1)에서 비교적 높은 밀도로 우점했다. *Ceratium fusus*는 하계에 빈번한 강우에 의한 저염분 수괴에 자극을 받아 대증식이 일어나며(Baek et al. 2008a), 영양염에 대한 반포화계수가 다른 외편모조류에 비하여 극히 낮아, 영양염이 국부적으로 제한되는 해역에서도 다른 조류와 비교해 저영양염 환경하에서 지속적으로 bloom을 형성 유지할 수 있다(Baek et al. 2008b). 외편모조류의 대부분은 낮은 무기영양염에서도 증식이 가능하다. 이것은 이들 생물의 반포화계수가 낮은 것과 더불어 유기 기원의 영양염을 조달할 수 있기 때문이라 생각된다.

5. 요약 및 결론

남해 광역해역에서 하계 식물플랑크톤의 수평적 군집 구조를 파악하기 위해 2009년 6월 18일부터 20일에 걸쳐 총 31 정점의 현장조사를 수행한 결과, 식물플랑크톤은 총 111종이 출현하였다. 수괴의 분포와 식물플랑크톤의 군집구조를 바탕으로 통계분석한 결과, 하계 남해 광역해역은 크게 2 그룹으로 나누어졌다. Group 1에 해당되는 수역은 쿠로시오 분지류의 영향을 받은 저영양염 수괴를 형성하는 외양정점으로 식물플랑크톤 현존량과 종조성이 극히 낮았다. 반면, Group 2에 해당되는 연안해역에서는 규조류와 더불어 은편모조류가 상대적으로 높게 출현하였다. 그 중 제주도 연안에 위치한 정점 13과 거제도 연안에 위치한 28에서는 물리적으로 이질적인 수괴의 영향을 직·간접적으로 받고 있다는 것을 시사할 수 있었고, 이들 두

정점에서는 영양염과 Chl.*a* 농도가 상대적으로 주변 정점에 비하여 높게 나타났다. 결론적으로 남해 광역해역의 식물플랑크톤의 군집구조의 분포특성은 수괴의 특성에 따라서 영향을 강하게 받는 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 연구과제 “북서태평양이 한반도 주변해(대한해협)에 미치는 영향연구(PE98445)”와 “기후변화가 남해권역 해양생태계에 미치는 영향 및 기능평가 기술개발(PM55400)”의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구에 도움을 주신 조사선 이어도 승무원께 감사의 말씀 전합니다.

참고문헌

- 공영 (1971) 한국남해안 전선에 관한 연구. 한국해양학회지 6:25-36
- 김복기 (1982) 한국남해의 수온과 염분의 변동계수. 한국해양학회지 17:74-84
- 김형신, 정민민, 이준백 (2008) 열대 해역 지표종 *Ornithocercus* 속 외편모조류의 출현동향으로 본 한반도 온난화. 한국해양학회지 「바다」 13:303-307
- 노재훈, 유신재, 이정아, 김현철, 이재학 (2005) 현미경, Flow Cytometer, HPLC 색소자료 및 원격탐사를 이용한 이어도 관측기지 주변수의 식물플랑크톤 연구. Ocean and Polar Res 27:397-417
- 박종규, 심재형, 이준백 (1998) 한국 동해 남해역 식물플랑크톤 생물량의 장기간 변동과 의미. Algae 13:123-133
- 박주석, 이삼근 (1990) 한국남해의 식물플랑크톤의 분포와 수괴특성. 한국수산학회지 23:208-214
- 백승호, 시모데 신지, 한명수, 키쿠치 토모히코 (2008) 춘계와 하계의 영양염 농도와 그 구성비가 식물플랑크톤의 군집 구조에 미치는 영향평가. Algae 23:277-288
- 신재기, 김동섭, 조경제 (2000) 시화호에서 무기영양염과 식물플랑크톤의 동태. 한국육수학회지 33:109-118
- 심재형, 신윤근, 이원호 (1984) 광양만 식물플랑크톤에 관한 연구. 한국해양학회지 19:172-186
- 양영진, 김상현, 노홍길 (1998) 한국남, 서해 및 동중국해 북부해역에 출현하는 수온전선. 한국수산학회지 31:695-706
- 유광일, 이종화 (1976) 마산만의 환경학적 연구 2. 식물플랑크톤의 년 변화. 한국해양학회지 11:34-38
- 윤양호 (1993) 제주연근해 식물플랑크톤 군집의 계절변동과 기초 생산. 제주대학교. 해양연구보고 17:33-56
- 윤양호, 김동근 (2003) 득량만 남서해역 식물플랑크톤 군집의 시 공간적 분포특성. 환경생물학회지 21:8-17
- 윤양호, 박종식, 서호영, 황두진 (2003) 동중국해 식물플랑크톤 군집의 공간분포와 외편모조류 적조. 환경생물학회지 21:132-141
- 이준백, 고유봉, 좌종현 (1990) 제주도 해안선 주변 식물플랑크톤 군집의 구조와 동태. 한국조류학회지 5:159-171
- 임월애, 강창근, 김숙양, 이삼근, 김학균, 정익교 (2003) 여름철 남해도 연안 식물플랑크톤 군집구조의 단기 변화. Algae 18:49-58
- 정승원, 권오윤, 이진환 (2008) 2000-2007년 통영바다목장해역에서 식물플랑크톤 현존량 및 생체량에 따른 우점종의 변동 및 관계. Algae 23:53-61
- 조규대, 최용규 (1988) 대마난류 수형의 계절 변화. 한국수산학회지 21:297-306
- 진평, 공성운 (1985) 대한해협의 식물플랑크톤의 기초생산력. 한국수산학회지 18:74-83
- 추효상, 김동수 (1998) 한국 남해의 대마난류 변동이 멀치 난, 자어의 연안역 수층에 미치는 영향. 한국수산학회지 31:226-244
- Baek SH, Shimode S, Han MS, Kikuchi T (2008a) Population development of the dinoflagellates *Ceratium furca* and *Ceratium fusus* in Iwa Harbor, Sagami Bay, Japan. Ocean Sci J 43:49-59
- Baek SH, Shimode S, Han MS, Kikuchi T (2008b) Growth of dinoflagellates, *Ceratium furca* and *Ceratium fusus* in Sagami Bay, Japan: the role of nutrients. Harmful Algae 7:729-739
- Baek SH, Shimode S, Kim HC, Han MS, Kikuchi T (2009) Strong bottom-up effects on phytoplankton community caused by a rainfall during spring and summer in Sagami Bay, Japan. J Mar Syst 75:253-264
- Clarke KR, Warwick RM (2001) Change in Marine Communities: An approach to statistical analysis and interpretation, 2nd ed. PRIMER-E, Plymouth, pp 179
- Cushing DH (1989) A difference in structure between ecosystems in strongly stratified waters and in those that are only weakly stratified. J Plankton Res 11:1-13
- Furuya K, Hayashi M, Yabushita Y, Ishikawa A (2003) Phytoplankton dynamics in the East China Sea in spring and summer as revealed by HPLC-derived pigment signatures. Deep-Sea Res II 50:367-387
- Han MS, Furuya K, Nemoto T (1989) Phytoplankton distribution in frontal region of Tokyo Bay, in November 1985. J Oceanogr Soc Japan 45:301-309
- Han MS, Furuya K, Nemoto T (1992) Species-specific productivity of *Skeletonema costatum* in the inner part of Tokyo Bay. Mar Ecol Prog Ser 79:267-273
- Han MS, Kim OK, Jeon JK (1994) Changes in phytoplankton communities in the two different hydrological condition of semi-enclosed Chinhae Bay Korea. Bull Plankton Soc Japan 41:43-55

- Hill DRA (1991) A revised circumscription of *Cryptomonas* (Cryptophyceae) based on examination of Australian strains. *Phycologia* **30**:170-188
- Johnson PW, Sieburth JM (1979) Chroococcoid cyanobacteria in the sea: A ubiquitous and diverse phototrophic biomass. *Limnol Oceanogr* **24**:928-935
- Joint IR, Owens NJP, Pomroy AJ (1986) Seasonal production of photosynthetic picoplankton and nanoplankton in the Celtic Sea. *Mar Ecol Prog Ser* **28**:251-258
- Kang YJ, Ko TH, Lee JA, Lee JB, Chung IK (1999) The community dynamics of phytoplankton and distribution of dinoflagellate cysts in Tongyoung Bay, Korea. *Algae* **14**:43-54
- Kang YS, Kim HG, Lim WA, Lee CK, Lee SG, Kim SY (2002) An unusual environment and *Cochlodinium polykrikodes* blooms in 1995 in the South Sea of Korea. *J Oceanogr Soc Korea* **37**:212-223
- Parsons TR, Maita Y, Lalli CM (1984) A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Oxford, pp 173
- Riley GA (1942) The relationship of vertical turbulence and spring diatom flowering. *J Mar Res* **5**:67-87
- Seung YH (1992) Water masses and circulations around Korean peninsula. *J Oceanogr Soc Korea* **27**:324-331
- Shim JH, Park YC (1984) Community structure and spatial distribution of phytoplankton in the southwestern sea of Korea in early summer. *J Oceanol Soc Korea* **19**:68-81
- Shon DH, Shin KS, Jang PG, Kim YO, Chang M, Kim WS (2008) Effect of thermal stratification and mixing on phytoplankton community structure in the western channel of the Korea Strait. *Ocean and Polar Res* **30**:261-275
- Smayda TJ (1997) Harmful algal blooms: their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea. *Limnol Oceanogr* **42**:1137-1153
- Smayda TJ, Reynolds CS (2001) Community assembly in marine phytoplankton: application of recent models to harmful dinoflagellate blooms. *J Plankton Res* **23**:447-461
- Turner JT (1984) Zooplankton feeding ecology: contents of fecal pellets of the copepods *Eucalanus pilaetus* and *Paracalanus quasimodo* from continental shelf waters of the Gulf of Mexico. *Mar Ecol Prog Ser* **15**:27-46
- Weng HX, Qin YC, Sun XW, Dong HL, Chen XH (2007) Iron and phosphorus effects on the growth of *Cryptomonas* sp.(Cryptophyceae) and their availability in sediments from the Pearl River Estuary, China. *Estuar Coastal Shelf Sci* **73**:501-509
- Welschmeyer NA, Lohrenz CJ (1985) Chlorophyll budgets: zooplankton grazing and phytoplankton growth in a temperate fjord and the Central Pacific Gyre. *Limnol Oceanogr* **30**:1-21
- Yang HS, Kim SS (1990) A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea peninsula. *Bull. Korea Fish Soc* **23**:417-424

Received Aug. 20, 2009

Revised Dec. 3, 2009

Accepted Jan. 20, 2010