

Article

https://doi.org/10.7850/jkso.2019.24.1.092
pISSN : 1226-2978

제주연안 식물플랑크톤 군집의 시공간적 변화

김규범 · 강수민 · 이준백*

제주대학교 해양과학대학 지구해양학과

Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community in the Coastal Waters of Jeju Island

GYU-BEOM KIM, SU-MIN KANG AND JOON-BAEK LEE*

Department of Earth and Marine Sciences, College of Ocean Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

*Corresponding author: jblee@jejunu.ac.kr

Editor Gyung Soo Park

Received 10 January 2019; Revised 7 February 2019; Accepted 14 February 2019

ABSTRACT

제주 연안 식물플랑크톤 군집의 시공간적 특성을 파악하기 위해 2015년 3월부터 2016년 2월까지 10개의 정점 0, 30 m 수심에서 수온, 염분, 용존산소 등 환경 요인과 현존량 및 출현종 등을 매월 조사하였다. 조사기간 동안 제주 연안의 평균 수온은 0 m 13.7~25.9, 30 m 13.6~20.8°C의 범위로써 3월에 최소값, 8월에 최대값을 보였다. 평균 염분은 0 m 31.51~34.47, 30 m 33.03~34.47psu의 범위였으며, 7월에 최소값, 2월에 최대값을 보였다. 평균 용존산소는 0 m 6.12~8.10, 30 m 5.73~7.88 mg L⁻¹의 범위를 보였으며, 평균 Chl-a량은 0 m 0.28~2.48, 30 m 0.44~1.01 μg L⁻¹ 범위를 보였고 식물플랑크톤 현존량은 연중 5,300~639,900 cells L⁻¹ 범위로써 현존량은 전 정점에서 2월에 최소, 북부와 서부해역은 7월, 남부와 동부해역은 8월에 최대를 보였다. 조사기간 중 출현한 총 종수는 362종으로써 규조류(Bacillariophyta) 181종, 와편모조류(Dinophyta) 147종, 그리고 기타 식물편모조류(phytoflagellates) 34종으로 구성되었다. 20%이상의 현존량 점유율 차지한 우점종을 계절별로 보면, 춘계(3월)와 추계(10월)에 *Paralia sulcata*와 *Skeletonema costatum* 두 종이었으며, 하계(8월)에는 *Chaetoceros* 속 6종류, 그리고 동계(12월)에는 *Chaetoceros* 속 2종류와 *Thalassionema frauenfeldii*가 우점하여, 각 우점종의 계절적 분포가 뚜렷하였다. 해역별 식물플랑크톤 군집 동태를 보면, 북부와 서부해역의 현존량 월변화가 비슷한 경향성을 보였으며, 남부와 동부해역이 유사한 경향성을 보였다. 이상의 종조성과 우점종의 천이는 이전 조사와 다른 특징을 보이고 있으며 이러한 식물플랑크톤 군집 동태 변화는 수온과 염분, 그리고 해류 등의 물리적 환경 변화에 기인된다고 생각된다.

Spatial and temporal characteristics of phytoplankton communities around the coastal waters of Jeju Island were investigated with environmental factors such as water temperature, salinity, and dissolved oxygen. Monthly samples were collected at 0 and 30 m depths of 10 stations from March 2015 to February 2016. During the survey period, water temperature ranged in 13.7~25.9 and 13.6~20.8°C at 0 and 30 m, salinity in 31.51~34.47 and 33.03~34.47 psu at 0 and 30 m, and dissolved oxygen in 6.12~8.10 and 5.73~7.88 mg L⁻¹ at 0 and 30 m, respectively. Chlorophyll-a ranged in 0.28~2.48 and 0.44~1.01 μg L⁻¹ at 0 and 30 m, respectively. Phytoplankton abundance fluctuated in the range of 5,300~639,900 cells L⁻¹ during the year, showing the lowest in February at all stations, and the highest in July at the northern and western sea as well as in August at the southern and eastern sea of Jeju Island. A total of 362 species were occurred including 181 spp. of Bacillariophyta, 147 spp. of Dinophyta and 34 spp. of other phytoflagellates. Dominant species with occupancy rate over 20 percent of phytoplankton abundance showed apparent seasonal succession such as *Paralia sulcata* and *Skeletonema costatum* in spring and autumn, 6 spp. of genus *Chaetoceros* in summer, and 2 spp. of genus *Chaetoceros* and *Thalassionema frauenfeldii* in winter. Monthly abundance in the northern and western sea fluctuated with similar tendency, and the southern and eastern sea also showed similar pattern of monthly abundance variation. Species composition and dominant species succession mentioned above were quite different from previous studies, so some physical changes such as water temperature, salinity and current pattern might cause the changes of phytoplankton assemblages around Jeju Island.

Keywords: Jeju Island, Marine environment, Phytoplankton, Spatial-temporal variation

1. 서론

식물플랑크톤은 수생태계의 1차생산자로서 생태계 피라미드의 기반을 구성하는 중요한 요소이다. 이들은 광합성을 하여 각종 유기물을 화합하고 이들을 섭식하는 1차 포식자 군집구조에 지대한 영향을 끼친다. 제주 연안에 영향을 미치는 주요 해류는 대마난류(Tsushima Warm Current, TWC), 제주난류(Jeju Warm Current, JWC) 그리고 양쯔강 유출수(Yangtze river Discharge Flow, YDF)이다. 대마난류는 제주도 북쪽과 남동쪽으로 유입된 해류가 제주도 동쪽 해역에서 만나서 형성되고, 제주난류는 쿠로시오 해류의 분지류 영향을 받아 제주도를 시계방향으로 돌며 특히 동계에 서쪽으로 세력이 확장되는 특징을 보인다. 이와 같은 복잡한 해류 유동 특성은 제주도 주변 해역의 식물플랑크톤 군집 구조와 동태에 영향을 미치고 있다. 또한 제주도 연안 지역은 용천수의 영향과 강우 시기에 집중적으로 유입되는 담수의 영향을 받으며, 지질 및 지형학적으로는 현무암으로 이루어진 다공질의 암석 조건대로 이루어져 많은 조수 웅덩이가 발달되어 있다. 암반 조건대는 부착성 규조류를 비롯한 저서 미세조류와 대형 해조류가 번무하여 제주도 연안의 1차생산을 담당하고 있으며, 이를 주 먹이원으로 소비하는 소라, 전복 등 유용 무척추동물이 풍부한 특징을 보인다.

제주도 주변해역의 식물플랑크톤 연구는 1960년대 제주도 남방해역의 식물플랑크톤 현존량과 출현종 조사(Choe, 1966)가 이루어진 이후, 한국해협을 조사정점에 포함된 연구가 진행되었다(Choe, 1969). 1970년대는 동중국해의 미세플랑크톤 분포와 서귀포해역의 식물플랑크톤 계절변화 연구가 일부 이루어졌지만(Choe, 1978), 본격적인 연구는 1980년대부터 수행되기 시작하였다. 이 때부터 제주도 주변의 해역별 연구가 진행되어, 식물플랑크톤의 현존량과 출현종의 분포에 관한 연구(Lee *et al.*, 1989, 1990, 1993, 1995; Lee and Choa, 1990; Yoon *et al.*, 1990, 1992; Choa and Lee, 2000), 엽록소-a에 의한 식물플랑크톤 생물량 연구(Jeon and Go, 1983; Shim and Park, 1984), 그리고 Carbon-14 법에 의한 1차생산에 관한 연구(Shim and Park, 1986; Lee *et al.*, 1989; Chung and Yang, 1991) 등이 이루어졌다. 최근에는 제주도 해안 개발의 여파로 제주 근해의 식물플랑크톤 군집에 관한 연구가 각종 환경보고서 또는 바다목장(Affan *et al.*, 2007; Yoon, 2015)과 같이 특정 해역과 특정 계절의 연구가 일부 있었지만, 해양환경 변화에 따른 제주 연안 전 해역 대상으로 한 최근의 연구 결과는 부족한 실정이다. 본 연구의 목적은 제주 연안의 식물플랑크톤 군집 변화를 계절별, 해역별로 분석하고 환경요인과의 상관성을 분석하며, 과거 1980년, 1990년대와 비교하여 어떤 변화를 보이고 있는가를 분석하는데 있다.

2. 재료 및 방법

환경요인 관측과 생물 시료 채집은 제주대학교의 연구 조사선(제라호)을 이용하여 2015년 3월부터 2016년 2월까지 제주 연안 총 10개 정점의 0 m와 30 m 수심에서 기상 악화로 조사가 어려웠던 9월을 제외하고 매월 실시하였다(Fig. 1, Table 1). 환경요인은 로젯형 채수기에 장착된 CTD (Sea-Bird SBE 9 plus, USA)를 이용하여 수온, 염분, 용존산소, 그리고 엽록소-a 형광량(chlorophyll-a, Chl-a) 등을 측정하였다. 식물플랑크톤 정량시료는 Niskin 채수기로 해수 1L 를 채수하여 폴리에틸렌 병에 담고, Lugol 용액으로 최종농도 1%가 되도록 고정하였으며, 정성시료는 식물플랑크톤 네트(망목 20 μ m)로 수직 예인하여 채집한 후 formaldehyde(최종농도 1%) 또는 glutaraldehyde(최종농도 2%)로 고정하였다. 정량분석은 Lugol 고정시료를 하루 정치시킨 후 상등액을 제거하여 100 mL로 농축한 후, 농축시료 중 1 mL을 Sedgwick-Rafter Chamber에 넣어 광학현미경(Olympus BX50 Japan)으로 계수해서 단위면적당 세포수(cells L^{-1})로 환산하여 현존량(abundance)으로 표시하였다. 정성분석은 3월(춘계), 8월(하계), 10월(추계), 12월(동계)의 정량 및 정성시료를 이용하여 종 수준까지 동정하여 계절별 분석 자료를 이용하였다. 종 동정은 Shim(1994), Dodge(1982), Hoppenrath *et al.*(2014), Tomas(1993, 1996), Yamaji(1984) 등

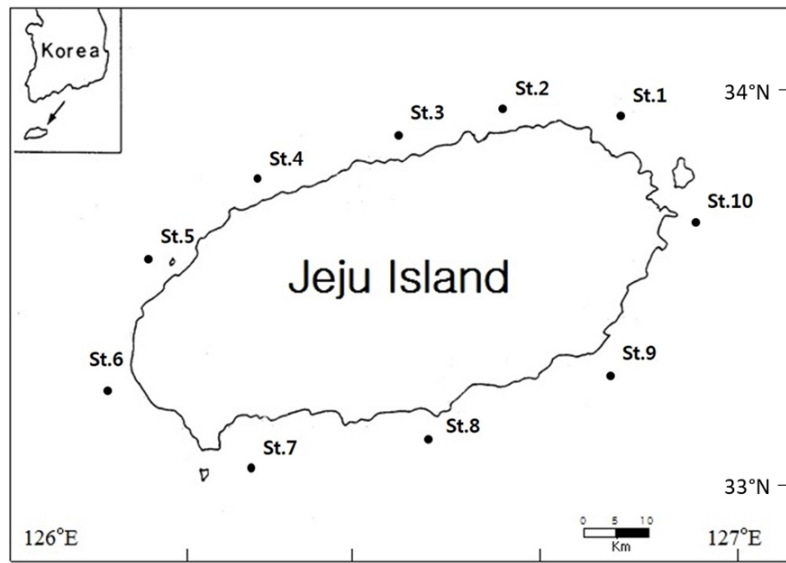


Fig. 1. Map showing sampling stations around Jeju Island.

Table 1. Geographic coordinate at sampling stations of Jeju coastal waters

Region	Station	Latitude (N)	Longitude (E)	Local name
North	St.2	33°34' 30"	126°41' 2"	Gimnyoung-ri
	St.3	33°32' 18"	126°33' 2"	Jeju-si
	St.4	33°29' 37"	126°20' 31"	Aewol-ri
West	St.5	33°26' 34"	126°14' 1"	Hanrim-ri
	St.6	33°19' 3"	126°8' 2"	Gosan-ri
South	St.7	33°10' 56"	126°20' 0"	Whasun-ri
	St.8	33°13' 31"	126°34' 17"	Seogwipo-si
	St.9	33°17' 1"	126°49' 27"	Pyoseon-ri
East	St.10	33°26' 27"	126°57' 12"	Sungsan-ri
	St.1	33°35' 5"	126°52' 60"	Sewha-ri

의 문헌을 참고하였고, 분류체계는 AlgaeBase (www.algaebase.org)의 체계를 따랐으며(Guiry and Guiry, 2018), 주요 종의 사진은 광학현미경에 장착된 디지털 카메라(JENOPTIK ProgRes C3 Germany)를 이용하여 촬영하였다. 종 다양성 지수 (H')는 월별 출현종의 현존량과 출현종수와의 관계를 이용하여 Shannon and Weaver(1963)의 식으로 계산하였고, 환경요인과 생물요인 간의 Pearson 상관계수(r)는 SPSS (ver. 24)를 이용하여 계산하였다.

3. 결 과

3.1 월별 환경요인 변화 및 식물플랑크톤 생물량 동태

제주 연안 전 정점의 평균 수온은 0 m 13.7~25.9(연평균 18.4), 30 m 13.6~20.8(연평균 17.1)°C의 범위를 보였다(Fig. 2). 월별 변화를 보면 0 m에서 3월이 가장 낮았고, 점차 상승하여 8월에 가장 높았으며 이후 낮아지는 변화를 보였다. 30 m에서 3월이 가장 낮았고 10월에 가장 높은 값을 보였다(Fig. 2). 평균 염분은 0 m 31.51~34.47(연평균 33.26), 30 m 33.03~34.47

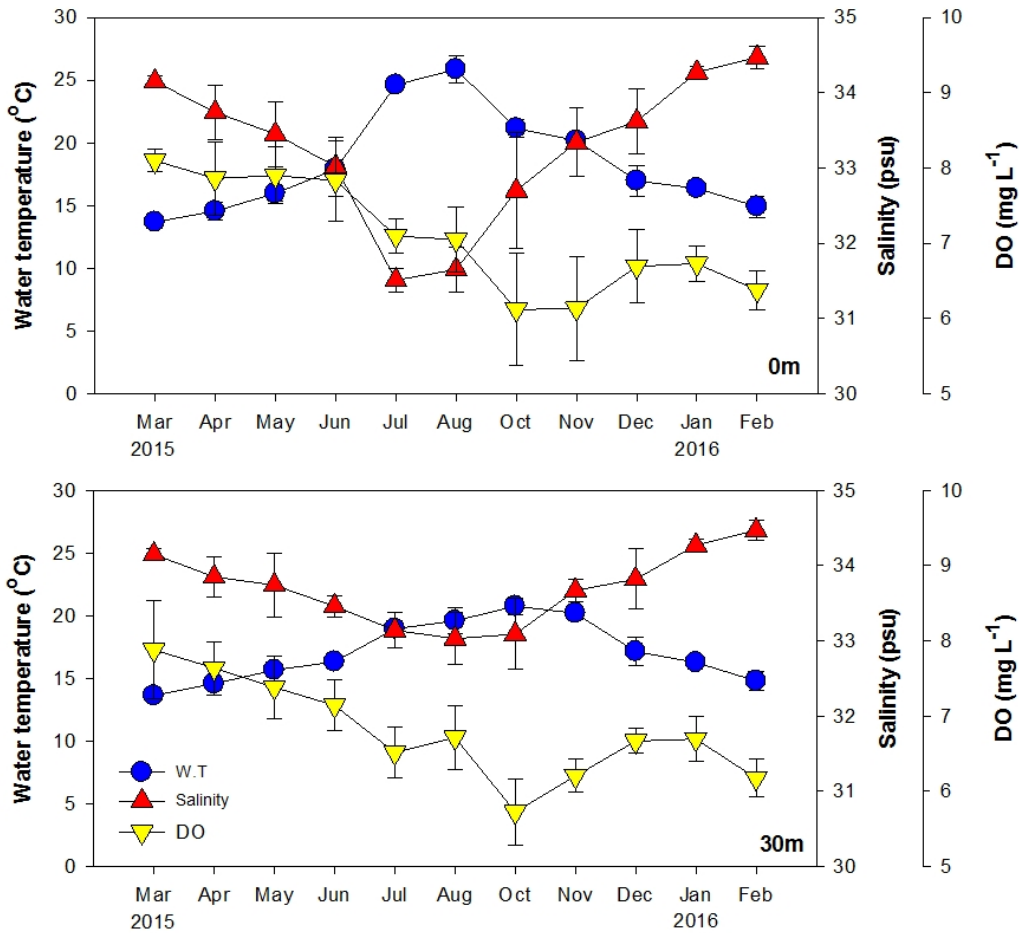


Fig. 2. Monthly variation of mean water temperature ($^{\circ}\text{C}$), mean salinity (psu) and mean dissolved oxygen (mg L^{-1}) of all stations at 0 and 30 m in Jeju coastal waters from Mar. 2015 to Feb. 2016.

(연평균 33.69) psu의 범위로서 월별 변화를 보면 0 m는 7월에 가장 낮았고, 2월에 가장 높았으며 특히 6월~7월 사이에 급격하게 염분이 감소하였다(Fig. 2). 30 m는 8월에 가장 낮았고, 2월에 가장 높았으나, 0 m 보다는 변화의 폭이 좁았다(Fig. 2). 평균 용존산소는 0 m 6.12~8.10(연평균 7.08), 30 m 5.73~7.88(연평균 6.79) mg L^{-1} 의 범위를 보였으며, 0 m와 30 m의 월별 변화는 비슷한 경향을 보였으며 3월부터 10월까지 감소하였고 그 이후 약간 증가하는 경향을 보였다(Fig. 2). 평균 Chl-a는 0 m 0.28~2.48(연평균 0.81), 30 m 0.44~1.01(연평균 0.64) $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로서 월별 변화를 보면 0 m에서 3월이 가장 낮았으며 6월에 급격히 상승하여 가장 높았고 7월에 다시 감소하였으며 8~10월 다소 상승하였다가 그 이후 낮아졌다. 30 m는 전체적으로 월별 변화가 크게 나타나지 않으며 3월에 가장 낮았고 8월에 가장 높았다(Fig. 3). 식물플랑크톤의 평균 현존량 범위는 0 m 24,900~150,500(연평균 71,400), 30 m 20,000~73,800(연평균 48,000) cells L^{-1} 의 범위로서 특히 하계 7월과 8월에 0 m와 30 m의 수심별 현존량 차이가 컸으나, 동계인 1월과 2월은 그 차이가 크지 않았다(Fig. 3).

3.2 계절별 식물플랑크톤 군집 구조 및 동태

식물플랑크톤의 계절별 출현종 종조성 분석은 춘계(3월), 하계(8월), 추계(10월), 그리고 동계(12월)의 전 정점의 0, 30 m 수심에서 실시하였다. 조사기간 중 총 출현종수는 362종으로써 규조류(Bacillariophyta) 181종, 와편모조류(Dinophyta) 147

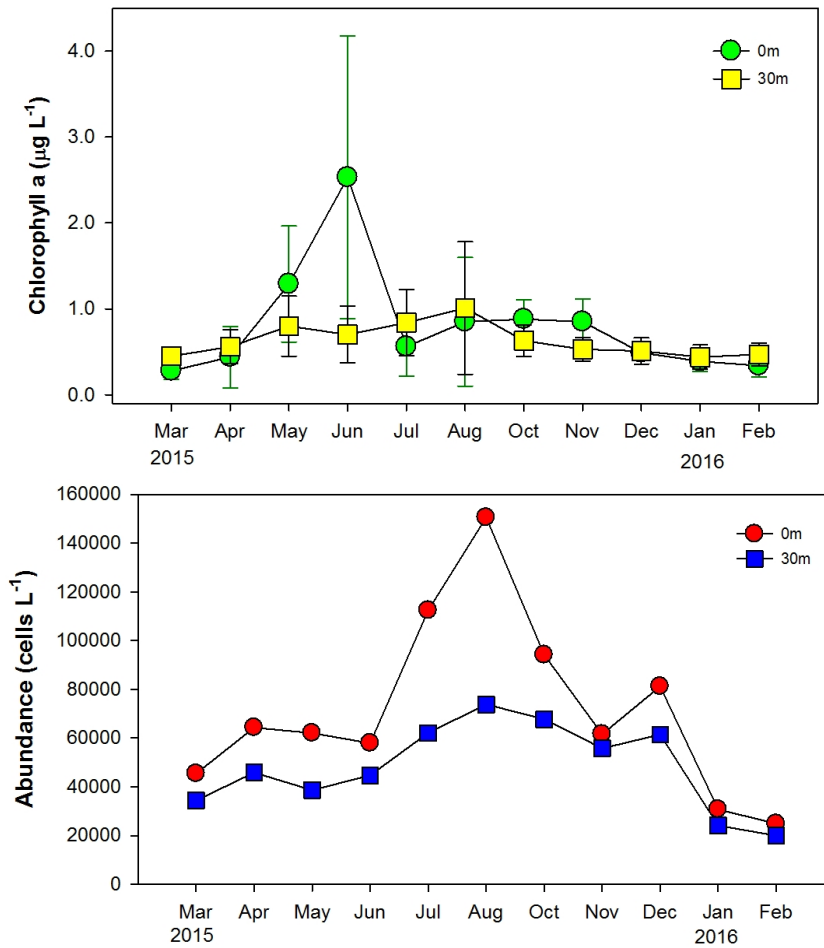


Fig. 3. Monthly variation of mean chlorophyll-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) and mean phytoplankton abundance (cells L^{-1}) of all stations at 0 and 30 m in Jeju coastal waters from Mar. 2015 to Feb. 2016.

중, 그리고 기타 식물편모조류(phytoflagellates) 34종으로 구성되었으며, 식물편모조류는 녹조류(Chlorophyta) 8종, 은편모조류(Cryptophyta) 11종, 착편모조류(Haptophyta) 6종, 대롱편모조류(Ochrophyta) 7종, 유글레나류(Euglenophyta) 2종이 출현하였다. 각 분류군의 전 계절 출현종 조성 비율은 규조류가 50.0%로 가장 높았고, 와편모조류가 40.6%, 기타 식물편모조류가 9.4%를 차지하였다(Fig. 4). 계절별 총 출현종수는 춘계(3월) 224종, 하계(8월) 170종, 추계(10월) 186종, 동계(12월) 181종으로 춘계에 가장 많은 종이 출현하였고, 하계가 가장 적은 종이 출현하였다. 계절별 분류군별 출현종 비율의 범위는 규조류가 43~48%, 와편모조류가 42~46%, 기타 식물편모조류가 9~13%를 차지하였으며, 춘계에 기타 식물편모조류의 출현종 비율이 높았지만 그 외 규조류와 와편모조류의 출현종 비율은 계절별로 그다지 큰 차이를 보이지 않았다.

조사기간 중 각 분류군별 출현빈도가 높은 종류를 보면 규조류는 *Chaetoceros affinis*, *Actinoptychus senarius*, *Chaetoceros compressus* 순으로 24% 이상의 출현빈도를 보였고, 와편모조류는 *Gymnodinium arenicola*, *G. microreticulatum*, *Karenia umbella* 순으로 20% 이상의 출현빈도를 나타내었다. 한편 기타 식물편모조류 중 은편모조류 *Hillea marina*와 녹조류 *Nephroselmis rotunda*가 45% 이상의 높은 출현빈도를 보였다.

각 분류군이 차지하는 현존량 점유율의 계절별 변화를 보면 전 계절에 걸쳐 규조류는 55~81%의 범위로 점유하였고, 와편모조류는 12~30%, 기타 식물편모조류는 6~16%의 점유율 분포를 보였다(Fig. 5). 이러한 분류군별 현존량 점유율은 계절적

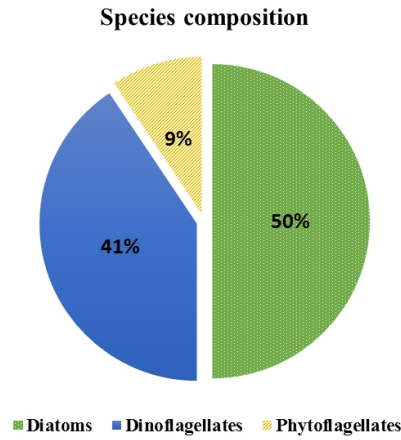


Fig. 4. Species composition rate (%) of each phytoplankton taxa in Jeju coastal waters.

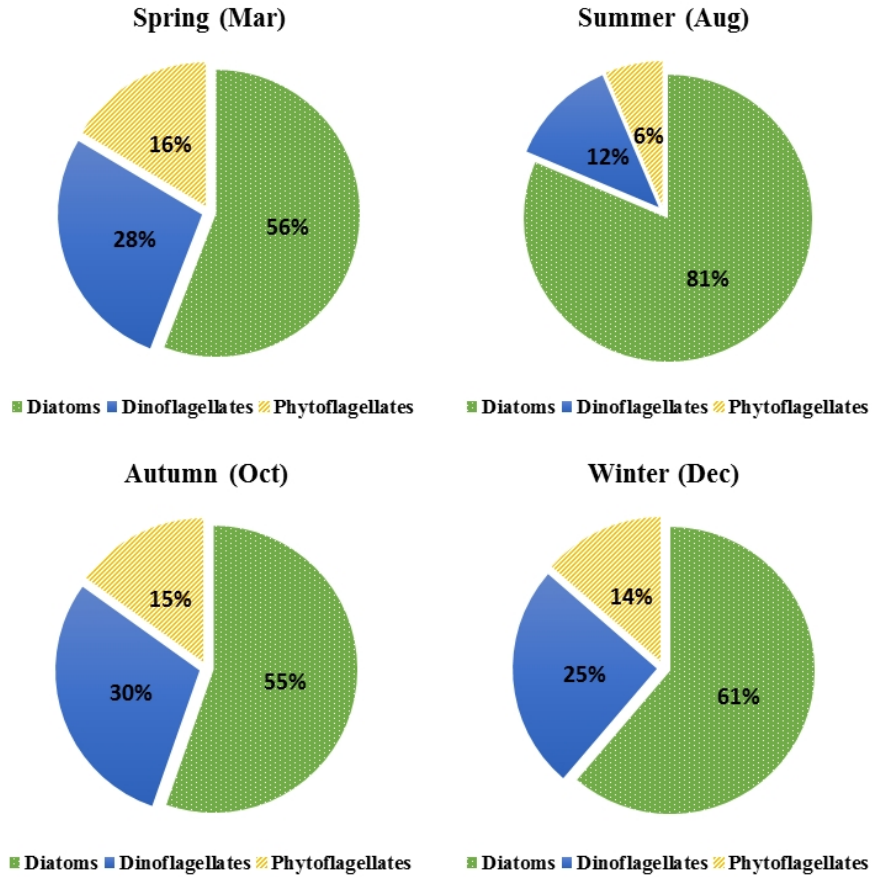


Fig. 5. Seasonal distribution of abundance occupancy rate (%) of each phytoplankton taxa in Jeju coastal waters.

으로 큰 차이를 보이고 있었는데, 규조류는 하계와 동계에 높은 점유율을 보였으나, 춘계와 추계는 상대적으로 낮은 점유율을 보였으며, 와편모조류는 춘계, 추계에 높은 점유율을 보였고, 기타 식물편모조류도 춘계와 추계에 상대적으로 높은 점유율을 보였다(Fig. 5). 따라서 규조류가 하계와 동계에는 높은 점유율, 와편모조류와 기타 식물편모조류는 하계를 제외한 나머지 계절(봄, 가을, 겨울)은 비슷한 점유율이 보임을 알 수 있었다.

3.3 해역별 식물플랑크톤 군집 동태

해역별 식물플랑크톤 군집 동태는 조사정점 중 4개의 대표 정점으로 선정하여, 북부(St. 3, 제주시), 서부(St. 6, 고산리), 남부(St. 8, 서귀포시), 동부(St. 10, 성산리)해역으로 구분하여 분석하였다(Table 1). 북부해역의 월별 현존량 동태를 보면 0 m에서 27,400~197,800, 30 m에서 20,200~121,900 cells L⁻¹의 범위로써 2월 30 m에서 가장 낮았고, 7월 0 m에서 가장 높았으며(Fig. 6), 0 m가 30 m 보다 약 12% 가량 높았다. 서부해역의 월별 현존량 범위는 0 m에서 23,700~181,900, 30 m에서 18,400~113,200 cells L⁻¹범위로써 1월 30 m에서 가장 낮았고, 7월 0 m에서 가장 높았으며 다른 시기에 비해 높은 현존량을 보였다(Fig. 6). 남부해역의 월별 현존량은 0 m에서 27,200~206,900, 30 m에서 19,900~96,700 cells L⁻¹의 범위로써 2월 30 m에서 가장 낮았고, 8월 0 m에서 가장 높았으며 다른 시기에 비해 현저히 높은 현존량을 보였다(Fig. 6). 동부해역의 월별 현존량은 0 m에서 18,600~192,600, 30 m에서 11,300~108,700 cells L⁻¹범위로써 7월 30 m에서 가장 낮았고 8월 0 m에서 다른 시기와 비교했을 때 높은 현존량을 보였다(Fig. 6).

계절별 현존량의 각 분류군 점유율 분포를 보면 북부해역(St. 3)은 규조류가 전 계절에 걸쳐 51~80%의 범위로 하계에 가장 높은 점유율을 보였고, 와편모조류는 16~34%의 범위로 춘계, 추계에 높은 점유율을 보였으며, 기타 식물편모조류의 범위는 4~17%로 하계에 가장 낮았다(Fig. 7). 서부해역(St. 6)은 규조류가 50~64% 범위로 점유하였고 동계에 가장 높은 점유율을 보였고, 와편모조류는 21~33%의 범위로써 하계와 추계에 비교적 높은 점유율을 보였고, 기타 식물편모조류는 10~23%의

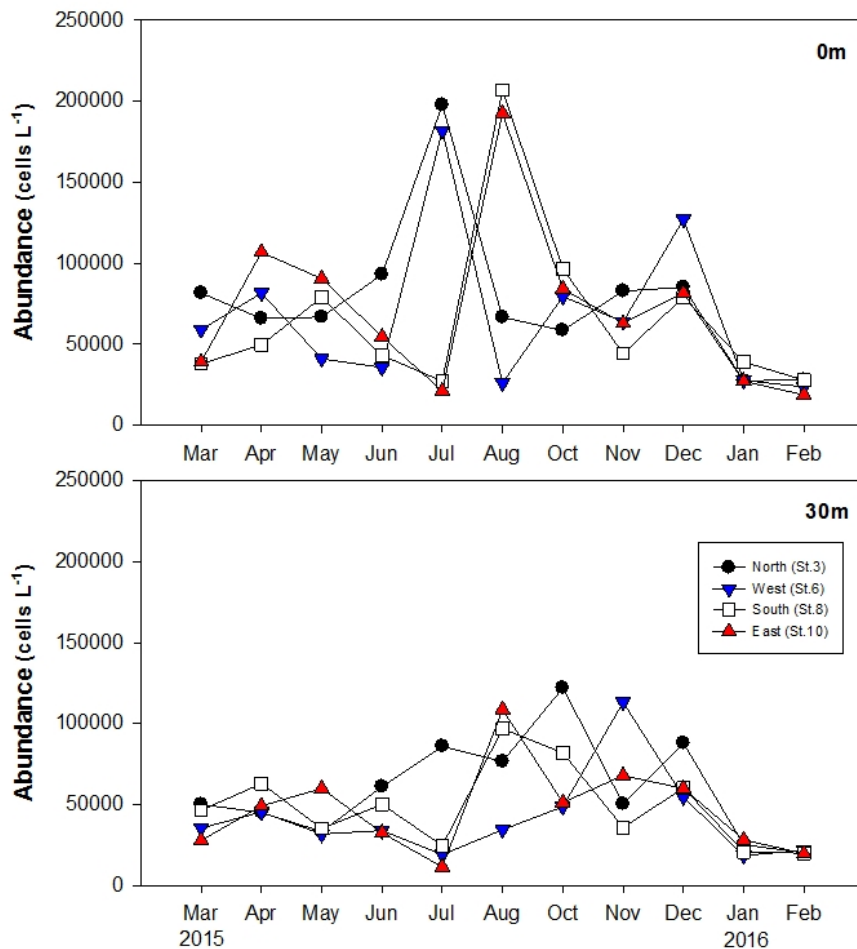


Fig. 6. Monthly variation of phytoplankton abundance (cells L⁻¹) on four areas at 0 and 30 m in Jeju coastal waters.

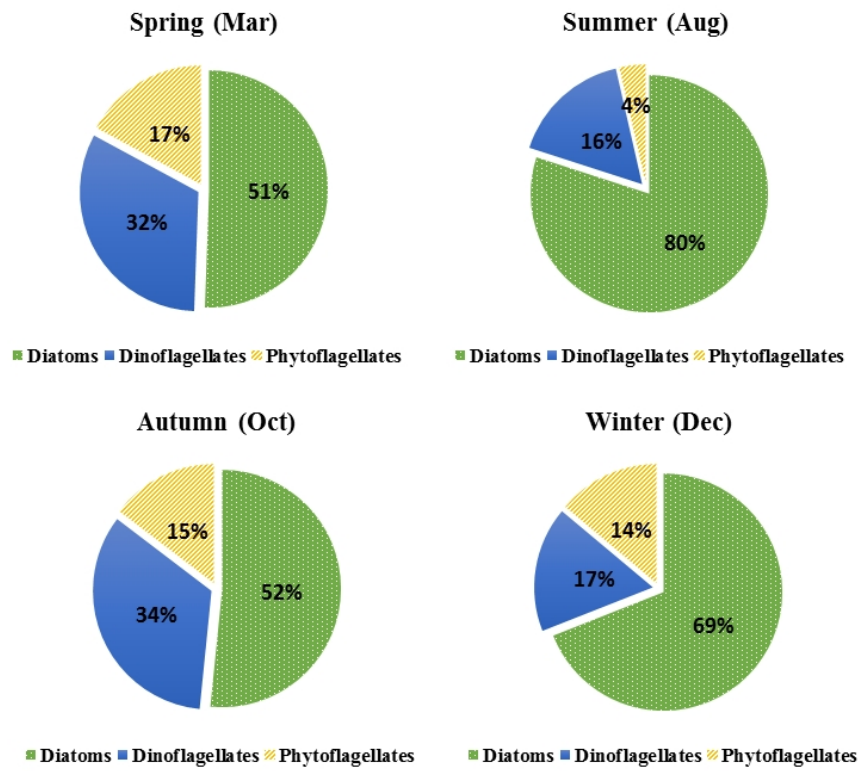


Fig. 7. Seasonal distribution of abundance occupancy rate (%) of each phytoplankton taxa on the northern sea (St. 3) of Jeju Island.

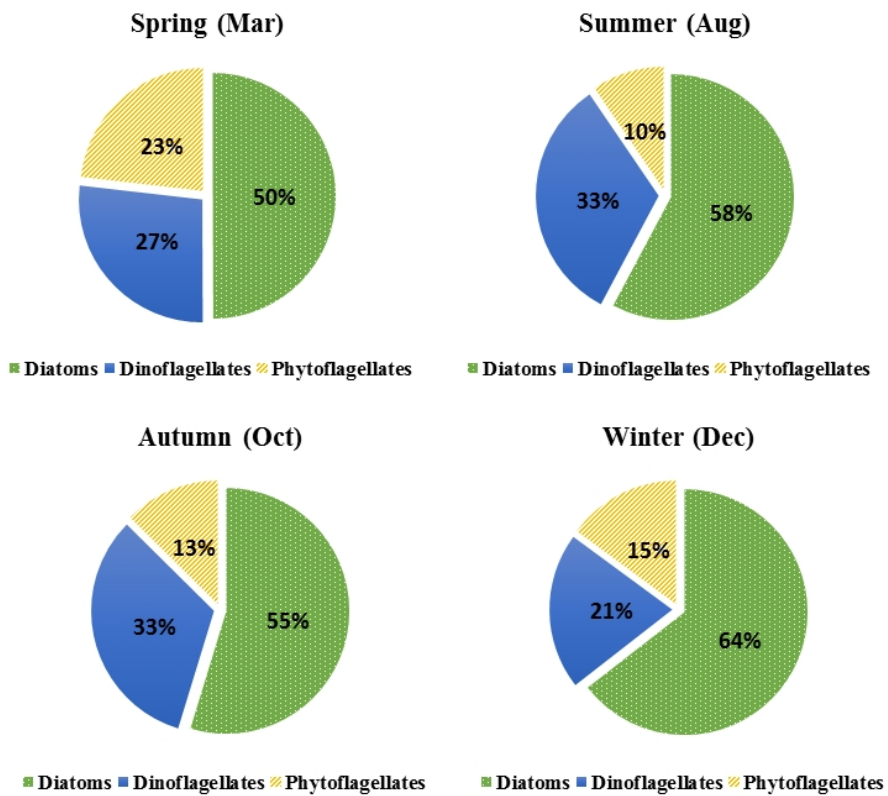


Fig. 8. Seasonal distribution of abundance occupancy rate (%) of each phytoplankton taxa on the western sea (St. 6) of Jeju Island.

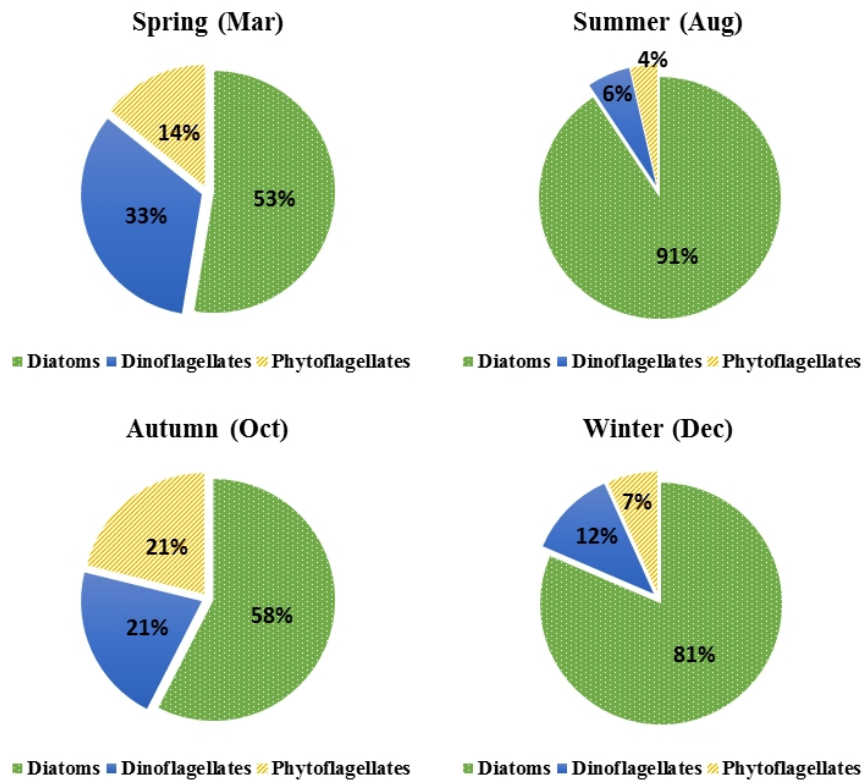


Fig. 9. Seasonal distribution of abundance occupancy rate (%) of each phytoplankton taxa on the southern sea (St. 8) of Jeju Island.

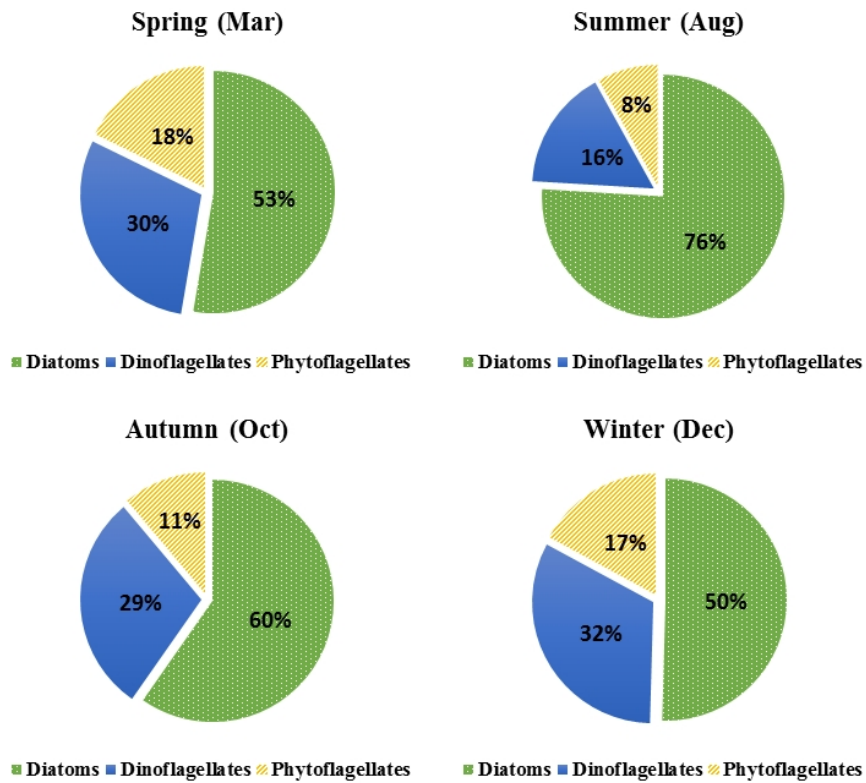


Fig. 10. Seasonal distribution of abundance occupancy rate (%) of each phytoplankton taxa on the eastern sea (St. 10) of Jeju Island.

범위로서 춘계에 비교적 높은 점유율을 보였다(Fig. 8). 남부해역(St. 8)은 규조류가 53~91% 범위로 특히 하계에 월등히 높은 점유율을 보였고, 와편모조류는 6~33% 범위로 춘계에 비교적 높은 점유율을 보였으나 하계에는 가장 낮았으며, 기타 식물편모조류는 4~21% 범위로 추계에 가장 높은 점유율을 보였으나 하계에는 가장 낮았다(Fig. 9). 동부해역(St. 10)은 규조류가 50~76% 범위로 하계에 가장 높은 점유율을 보였고, 와편모조류는 16~32% 범위로 하계가 다른 계절에 비해 낮은 점유율을 보였고, 기타 식물편모조류는 8~18% 범위로 역시 하계가 다른 계절에 비해 낮았다(Fig. 10).

3.4 종다양성지수와 우점종 동태

해역별 식물플랑크톤 종다양성 지수에서 북부해역은 0 m 2.63~3.32, 30 m 2.62~2.94 범위로 춘계(3월)와 하계(8월)에 높았다(Table 2). 서부해역은 0 m 2.50~3.12, 30 m 2.58~3.10의 범위로 0 m, 30 m 모두 춘계(3월)가 가장 높았다(Table 2). 남부해역은 0 m 2.34~2.93, 30 m 2.34~2.78의 범위로 0 m, 30 m 모두 춘계(3월)와 동계(12월)가 다른 계절에 비해 높았다(Table 2). 동부해역은 0 m 2.23~2.69, 30 m 2.02~2.83의 범위로 하계가 가장 낮은 값을 보였고, 다른 해역에 비해 전체적으로 낮은 종다양성 지수를 보였다(Table 2). 종합하면 제주연안의 식물플랑크톤 종다양성은 춘계가 가장 높았으며 북부와 서부해역이 다른 해역보다 높고, 동부해역이 낮았다.

우점종은 전 정점과 전 수심 중에서 2회 이상 현존량의 10% 이상을 차지한 총 15종을 선별하였으며(Table 3). 계절별로 보면 춘계(3월) 3종, 하계(8월) 9종, 추계(10월) 3종, 동계(12월) 4종이 우점하여 하계가 가장 많은 우점종이 출현하였다(Table 3). 분류군별로 보면 규조류가 14종으로 압도적으로 많았으며 *Bacteriastrum comosum*, *B. furcatum*, *Chaetoceros affinis*, *C. anastomosans*, *C. compressus*, *C. contortus*, *C. curvisetus*, *C. debilis*, *C. decipiens*, *C. paradoxus*, *Paralia sulcata*, *Skeletonema costatum*, *S. tropicum*, *Thalassionema frauenfeldii* 등 이었으며, 와편모조류는 *Hillea fusiformis* 1종이었다(Table 3). 이 중 20%이상의 현존량 점유율 차지한 우점종을 계절별로 보면, 춘계(3월)와 추계(10월)에 *Paralia sulcata*와 *Skeletonema costatum* 두 종이었으며, 하계(8월)에는 *Chaetoceros* 속 6종류, 그리고 동계(12월)에는 *Chaetoceros* 속 2종류와 *Thalassionema frauenfeldii*가 우점하여, 각 우점종의 계절적 분포가 뚜렷하였다(Table 3).

Table 2. Seasonal variations of species diversity index (H') of phytoplankton during the study period

Station (Region)	2015 Month	Species Diversity Index (H')	
		0 m	30 m
St. 3 (North)	Mar	3.32	2.94
	Aug	3.29	2.63
	Oct	2.65	2.62
	Dec	2.63	2.70
St. 6 (West)	Mar	3.12	3.10
	Aug	2.89	2.95
	Oct	2.50	2.72
	Dec	2.70	2.58
St. 8 (South)	Mar	2.93	2.78
	Aug	2.46	2.47
	Oct	2.34	2.34
	Dec	2.92	2.51
St. 10 (East)	Mar	2.66	2.76
	Aug	2.23	2.02
	Oct	2.65	2.83
	Dec	2.69	2.79

Table 3. Dominant species of phytoplankton in Jeju coastal waters during the study period (* > 10, ** > 20 percent of abundance occupancy rate)

Species name	St.1		St.2		St.3		St.4		St.5		St.6		St.7		St.8		St.9		St.10	
	0 m	30 m	0 m	30 m	0 m	30 m	0 m	30 m	0 m	30 m	0 m	30 m	0 m	30 m	0 m	30 m	0 m	30 m	0 m	30 m
2015 March																				
<i>Paralia sulcata</i>							*													**
<i>Skeletonema costatum</i>														*					**	
<i>Skeletonema tropicum</i>							*	*	*					*						
August																				
<i>Bacteriastrium comosum</i>									*								*			*
<i>Bacteriastrium furcatum</i>			*			*	*		*			*			*					
<i>Chaetoceros affinis</i>	*		**						**	**	*			*		**	*			
<i>Chaetoceros anastomosans</i>	*	*									*			*	*					**
<i>Chaetoceros compressus</i>			*		*	*			*						*			**		
<i>Chaetoceros contortus</i>	*		*	*											*		*		**	
<i>Chaetoceros curvisetus</i>					*											*		*		
<i>Chaetoceros debilis</i>					**		*		*						*					
<i>Chaetoceros decipiens</i>						*	**	**				*			*					
October																				
<i>Paralia sulcata</i>	*				*						**	*								
<i>Skeletonema costatum</i>	*			*											**					
<i>Hillea fusiformis</i>	*								*					*						
December																				
<i>Bacteriastrium comosum</i>														*		*	*			
<i>Chaetoceros affinis</i>		*		**						*										
<i>Chaetoceros paradoxus</i>		*	*			*			**										*	
<i>Thalassionema frauenfeldii</i>	*	*												*	**					

4. 토 의

4.1 환경 변화와 식물플랑크톤 동태

환경 변수와 식물플랑크톤 변수간의 상관관계를 보면 수온과 염분은 뚜렷한 역상관성($r=-0.794$) 보이고 있으며, 수온과 현존량은 약한 상관성($r=0.453$) 그리고 염분과 현존량도 약한 역상관성($r=-0.478$)을 보이고 있다(Table 4). 반면 Chl-a와 수온($r=0.164$), 염분($r=-0.242$), 현존량($r=0.218$)의 상관성은 통계적으로 유의하지 않았으며(Table 4), 용존산소는 수온과 약한 역상관성($r=-0.37$)를 보였지만 Chl-a 그리고 현존량과의 상관성은 없었다(Table 4). 조사기간 동안 제주 연안 수온의 범위는 0 m에서 12.84~27.06°C로 연평균 18.37°C, 30 m에서 12.82~22.07°C로 연평균 17.08°C을 나타내어 1988~1989년 제주도 해안선에서 매월 측정된 Choi *et al.*(1989)의 10.8~25.7°C(연평균 17.3°C)에 비해서 높았으며, 2005~2006년 서부연안(차귀도)에서 계절별로 측정된 Affan *et al.*(2007)의 14.2~28.9°C(연평균 20.1°C)보다는 낮았다. 염분은 0 m 31.23~34.62(연평균 33.25), 30 m 32.33~34.62(연평균 33.69) psu의 범위로 30 m가 0 m 보다 약간 높은 값을 보였으나 월변화가 뚜렷하지 않은 반면, 0 m는 7월~8월에 낮은 값을 보이며 월변화가 뚜렷하였는데 이는 하계 강우와 양쯔강 저염분수(YDF)의 영향을 받는 제주도 주변해역의 전형적인 계절적 특성이라고 생각된다.

조사 기간 중 식물플랑크톤의 현존량은 연중 5,300~639,900 cells L⁻¹의 범위였으며, Lee *et al.*(1990)의 1988~1989년 제주 해안선에서 조사된 현존량(1,834~1,190,044 cells L⁻¹) 보다 좁은 범위와 낮은 최대값을 보였다. 일반적으로 제주연안의 식물플랑크톤 군집의 계절적 현존량의 변화는 춘계와 추계에 10⁵ cells L⁻¹이상의 비교적 높은 농도인 것으로 보고 되었으나

Table 4. Pearson's correlation matrix (*r*) between environmental variables and phytoplankton variables in the study area (***p*<0.01, **p*<0.05)

	WT	Sal	DO	Chl
Sal	-0.794**			
DO	-0.370**	-0.021		
Chl	0.164*	-0.242**	0.218	
Abun	0.453**	-0.478**	0.035	0.218**

Abbreviation: WT; water temperature, Sal; Salinity, DO; dissolved oxygen, Chl; chlorophyll a, Abun; phytoplankton abundance

(Lee *et al.*, 1989), 본 연구에서는 춘, 추계에 비해 하계(7월과 8월)에 높은 현존량을 보이고 있어 식물플랑크톤의 동태가 변화하고 있음을 알 수 있었다. 우점종도 남부해역(St. 8)에서 하계 *Bacteriastrium furcatum*, *Chaetoceros* 속 종류, 추계 *Skeletonema costatum*, 동계 *Thalassionema frauenfeldii*로의 천이를 보이고 있어, 문섬 주변 조사(Choa and Lee, 2000)에서 보고된 *Paralia sulcata*, *Chaetoceros curvisetus*, *Cylindrotheca closterium*, *Dictyocha fibula* 등의 우점종과 차이가 있었으며, 남부해역의 종다양성 지수도 본 연구에서 2.34~2.93(평균 2.59)의 범위를 보여 Choa and Lee (2000)가 조사한 0.45~2.78(평균 1.84)보다 높은 종다양성 지수를 보였다.

4.2 해역별 식물플랑크톤 동태

식물플랑크톤 군집의 해역별 현존량을 비교하면 1989~1990년에 연구된 서부해역인 한림항 해역에서 3,277~1,952,809 cells L⁻¹의 범위가 보고되었고(Lee and Choa 1990), 2004년~2005년 차귀도 연안에서 22,100~486,900 cells L⁻¹의 범위가 보고되었다(Affan *et al.*, 2007). 본 연구의 서부해역 현존량은 18,400~181,900 cells L⁻¹ 범위로 대체로 과거에 비해 낮은 범위를 보였다. Affan *et al.*(2007)의 연구에서 춘계와 추계에 대발생 현상이 보고되었으나, 본 연구에서는 하계에 최대값을 보였다. 동부해역은 과거 1989~1990년도 성산항의 연구에서 6,458~1,799,870 cells L⁻¹ 범위였으며(Lee and Choa 1990), 본 연구에서 11,300~192,600 cells L⁻¹ 범위를 보여 과거 연구보다 낮았다. 1989~1990년에 연구된 북부해역인 함덕연안 해역 식물플랑크톤 현존량은 8,800~2,400,000 cells L⁻¹였으나(Yoon *et al.* 1990), 본 연구의 북부해역 현존량(20,200~197,800 cells L⁻¹) 역시 낮은 것으로 조사되었다. 남부해역인 문섬 주변 1995~1996년도 식물플랑크톤 현존량은 1,500~700,000 cells L⁻¹ 범위로 보고되었는데(Choa and Lee 2000), 본 연구의 현존량 범위는 19,900~206,900 cells L⁻¹로 현저하게 낮았다. 또한 Choa and Lee(2000)의 연구에서는 춘계와 추계에 대발생이 확인되었으나, 본 연구에서는 대발생 수준의 출현은 없었고 하계(8월)에 최대값을 보였다.

해역별 현존량의 월변화를 보면 0 m에서 북부와 서부해역은 3월부터 증가하다가 하계인 7월에 급증하고 8월에 다시 감소하고 12월에 증가하여 비슷한 경향성을 보인 반면, 남부와 동부해역은 3월부터 증가했다가 6, 7월에 감소하고 다시 8월에 증가하고, 10월에 감소하고 다시 12월에 높아지는 비슷한 경향성을 보였다(Fig. 6). 그러나 30 m에서는 남부와 동부해역이 모두 8월에 증가한 것을 제외하고 해역간 뚜렷한 경향성이 보이지 않았다. 이와 같이 남부와 동부해역의 0 m와 30 m에서 같은 경향성을 보인 것은 대마난류(TWC)의 직접적인 영향을 받고 있는 동일한 수괴 영향이라고 생각되며, 서부와 북부해역의 비슷한 경향성도 제주난류(JWC)와 양쯔강 유출수(YDF)의 계절적 영향을 받고 있는 동일 수괴의 영향이라고 생각된다. 이러한 다양한 해류들이 과거와 다른 경향성을 보이고 있다는 물리적인 연구 결과가 있어 왔으며(Yeh and Kim 2010), 이런 변화가 제주 연안 식물플랑크톤 군집 동태에도 영향을 미치고 있다고 생각되어 이에 대한 지속적인 관측이 필요하다고 생각된다.

5. 결 론

일반적으로 제주 연안의 식물플랑크톤 군집은 춘계와 추계에 현존량이 증가하는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 하계에 최고값을 보였지만 대발생 수준을 아니었다. 해역별로 보면 북부와 서부해역이 현존량의 월별 경향성이 비슷하였고, 남부와 동부해역도 비슷한 경향성을 보이는데, 이러한 특성은 제주 연안에 영향을 미치는 대마난류(TWC)와 제주난류(JWC), 양쯔강 유출수(YDF)의 복합적인 계절적 영향에 의한 것으로 생각된다. 종조성과 우점종의 천이도 과거 조사와 다른 특징을 보이고 있어 수온과 염분 등의 물리적 환경 변화가 식물플랑크톤 군집 동태에도 영향을 미치고 있다고 생각된다.

사 사

본 논문은 2019년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받은 제주씨그랜트사업의 연구로 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- Affan, A., J.B. Lee, J.T. Kim, Y.C. Choi, J.M. Kim and J.G. Myung, 2007. Seasonal dynamics of phytoplankton and environmental factors around the Chagwi-do off the West Coast of Jeju Island, Korea. *Ocean Science Journal*, **42**(2): 117-127.
- Choa, J.H. and J.B. Lee, 2000. Bioecological characteristics of coral habitats around Moonsom, Cheju Island, Korea I. Environmental properties and community structures of phytoplankton. 「The Sea」 J. Korean Soc. Oceanogr., **5**(1): 59-69 (in Korean).
- Choe, J.S., 1978. A preliminary report on the distribution of microplankton in two different areas of the East China Sea. *Korean J. Fish. Aquatic. Sci.*, **11**: 123-127 (in Korean).
- Choe, S., 1966. Phytoplankton studies in Korean waters I. Phytoplankton survey of the surface in the Korea Strait in summer of 1965. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, **1**: 14-21 (in Korean).
- Choe, S., 1969. Phytoplankton studies in Korean waters IV. Phytoplankton in the adjacent seas of Korea. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, **4**: 49-67 (in Korean).
- Choi, Y.C., Y.B. Go and J.B. Lee, 1989. Sea water characteristics around coast line of Cheju Island from June 1987 to April 1988. *Korean Earth Sci. Soc.*, **10**(1): 54-61 (in Korean).
- Chung, C.S. and D.B. Yang, 1991. The primary productivity in the southern sea of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **26**(3): 242-254.
- Dodge, J.D., 1982. *Marine Dinoflagellates of the British Isles*. London: Her Majesty's Stationery Office, 303 pp.
- Guiry, M.D. and G.M. Guiry, 2018. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>; accessed on 10 October 2018.
- Hoppenrath M., S.A. Murray, N. Chomérat and T. Horiguchi, 2014. *Marine Benthic Dinoflagellates - Unveiling Their Worldwide Biodiversity*. *Kleine Senckenberg-Reihe Vol. 54*, 276 pp.
- Jeon, D.S. and Y.B. Go, 1983. The distribution of chlorophyll a in the neighboring waters of Jeju Island. *Bull. Mar. Res. Inst., Cheju Nat. Univ.*, **7**: 23-27 (in Korean).
- Lee, J.B., Y.C. Choi and Y.B. Go, 1989. Primary production of phytoplankton around the coast line of Cheju Island. *Kor. Earth Sci. Soc.*, **10**(1): 62-67 (in Korean).
- Lee, J.B. and J. H. Choa, 1990. The dynamics of phytoplankton communities at Hanrim and Sungsan harbor of Cheju Island, Korea. *Bull. Mar. Res. Inst., Cheju Nat. Univ.*, **14**: 9-24 (in Korean).

- Lee, J.B., Y.B. Go and J.H. Choa. 1990. The structure and dynamics of phytoplankton communities around the coastline of Cheju Island, Korea. *Korean J. Phycology*, **5**(2):159-171 (in Korean).
- Lee, J.B., J.H. Choa, Y.B. Go and Y.C. Choi. 1993. Bioecological studies of the eastern coastal area in Cheju Island (II) Phytoplankton dynamics and primary productivity around U-do. *J. Korea Earth Sci. Soc.*, **14**(4): 458-466 (in Korean).
- Lee, J.B., H.B. Koh, Y.B. Go and Y.C. Choi, 1995. Bioecological studies of the northern coastal area in Cheju Island – phytoplankton dynamics and primary productivity at the Hamduk area. *Bull. Mar. Res. Inst., Cheju Nat. Univ.*, **19**: 103-113 (in Korean).
- Shannon, C.E. and W. Weaver, 1963. *The mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, USA 144 pp.
- Shim, J.H., 1994. *Illustrated Encyclopedia of Fauna and Flora of Korea Vol. 34 Marine Phytoplankton*. Ministry of Education, Korea (in Korean).
- Shim, J.H. and Y.C. Park, 1984. Community structure and spatial distribution of phytoplankton in the southwestern sea of Korea, in early summer. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **19**: 68-81.
- Shim, J.H. and Y.C. Park, 1986. Primary productivity measurement using carbon-14 and nitrogenous nutrient dynamics in the southern sea of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **21**(1): 13-24.
- Tomas, C.R. ed., 1993. *Marine Phytoplankton - a Guide to Naked Flagellates and Coccolithophorids*. Academic Press, USA.
- Tomas, C.R. ed., 1996. *Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates*. Academic Press, USA.
- Yamaji, I., 1984. *Illustrations of the Marine Plankton of Japan 3rd Edition*. Hoikusha Publishing Co. Ltd., Osaka, Japan (in Japanese).
- Yeh, S.W. and C.H. Kim. 2010. Recent warming in the Yellow/East China Sea during winter and the associated atmospheric circulation. *Cont. Shelf. Res.*, **30**: 1428-1434.
- Yoon, Y. H., 2015. Spatio-temporal variability of phytoplankton community in the Jeju marine ranching area (JMRA). *J. Korea Academia - Industrial Cooperation Society*, **16**(11): 7761-7772 (in Korean).
- Yoon, Y.H., H. K. Rho and Y.K. Kim, 1990. Variable of naked phytoflagellates in the coastal water of Hamduk, northern Cheju Island during spring and summer 1989. *Bull. Mar. Res. Inst., Cheju Nat. Univ.*, **14**: 1-8 (in Korean).
- Yoon, Y.H., H.K. Rho and Y.K. Kim, 1992. Seasonal succession of phytoplankton population in the Hamduk port, Northern Cheju Island. *Bull. Mar. Res. Inst., Cheju Nat. Univ.*, **16**: 27-42 (in Korean).