

## 영광 안마군도 주변 해역 식물플랑크톤 군집의 계절 동태

주하연, 송아영, 박지혜, 윤양호<sup>1,\*</sup>

전남대학교 대학원 환경해양학과, <sup>1</sup>전남대학교 해양융합학과

## Seasonal dynamics of phytoplankton community in the Anma Islands of Yeonggwang (AIY), West Sea, Korea

Hayeon Ju, Ayeong Song, Ji Hye Park and Yang Ho Yoon<sup>1,\*</sup>

Department of Environmental Oceanography, Graduate School, Chonnam National University, Yeosu 56828, Republic of Korea

<sup>1</sup>Department of Ocean Integrated Science, Chonnam National University, Yeosu 56828, Republic of Korea

**\*Corresponding author**

Yang Ho Yoon

Tel. 061-659-7142

E-mail. yoonyh@jnu.ac.kr

**Received:** 10 February 2022

**Revised:** 2 March 2022

**Revision accepted:** 3 March 2022

**Abstract:** A survey was conducted to analyze seasonal dynamics of the phytoplankton community at 22 stations on the surface and bottom layers in the Anma Islands of Yeonggwang (AIY) in the southern West Sea, Korea from the spring of 2020 to the winter of 2021, using a marine survey vessel Ed Ocean. Based on the survey results, there were 87 phytoplankton species in 52 genera, diatoms accounted for 67.8%, dinoflagellates 26.5%, silicoflagellates 3.5%, and cryptomonads and euglenoids accounted for 1.1% each. By season, it was simple in spring and relatively varied in winter. The phytoplankton standing crop on the surface was low ( $28.8 \pm 30.1$  cells  $\text{mL}^{-1}$ ) in summer and high ( $87.0 \pm 65.1$  cells  $\text{mL}^{-1}$ ) in spring. In the phytoplankton community, diatoms showed a high share (over 80%) throughout the year, and *Skeletonema costatum*-Is was the dominant species with a dominance of more than 60% in spring and winter, and 34.6% and 24.2% in summer and autumn, respectively. The diversity expressing the characteristics of the community structure was high ( $2.79 \pm 0.45$ ) in autumn and low ( $1.82 \pm 0.18$ ) in spring, unlike the phytoplankton standing crop. However, the dominance was high at ( $0.86 \pm 0.08$ ) in spring and low ( $0.44 \pm 0.13$ ) in autumn. Based on the results of principal component analysis (PCA) using environmental and phytoplankton-related factors, it was estimated that the biological oceanographic environmental characteristics seen through the phytoplankton community in the AIY were dominated by nutrients supplied from open seawater and surface sediments by seawater mixing, such as tidal mixing.

**Keywords:** Anma Islands of Yeonggwang (AIY), phytoplankton community, dominant species, diversity, dominance, water mixed, principal component analysis (PCA)

## 서 론

연안해역은 육상과 해양을 연결하는 전이 해역으로 개발된 외양 생태계와는 달리 복잡한 환경인자가 혼합적으로 작용하여 연안 생태계에 다양한 현상을 발생시키는 곳이며, 해양생태계의 물질순환은 태양에너지를 고정하는 기초생산자인 식물플랑크톤 군집의 변동에 지배된다(Yoon 2010). 또한, 식물플랑크톤은 무기물에서 유기물로 전환, 즉 에너지를 합성하기에 광량, 수온, 해수 유동 등의 물리 환경 및 육상에서 유입되거나, 해역의 물질 순환과정에서 재생산되는 영양염과 같은 화학적 무생물 환경인자의 복합작용으로 성장 및 분포가 결정된다(Severiano *et al.* 2012). 이러한 이유로 연안해역 식물플랑크톤 군집은 다양한 환경 변화에 따른 생태계 구조변화 및 환경 특성을 파악하는 유용한 수단으로 사용되므로(Garmendia *et al.* 2013; Yoon 2015), 특정 해역의 식물플랑크톤 동태 파악은 해역의 생태구조는 물론 생물해양학적 환경 특성을 이해하는 지표로 오랜 기간 이용되고 있다.

서해 남부에 위치하는 영광 연안은 202 km의 해안선을 가지는 리아시스식 해안으로, 도서해역으로 구성된 낙월면은 새우잡이 배인 명탕구리배로 유명한 낙월도, 자갈밭 해수욕장이 명물인 송이도, 꽃게잡이 섬 안마군도 그리고 조기잡이로 유명한 칠산도 등 64개 섬으로 구성된다. 즉, 낙월면은 전라남도 58개 도서 행정단위(면) 중 가장 많은 섬으로 구성되면서, 서해의 공해와 인접하여 실질적으로 중국과 국경을 이룬다. 안마군도는 낙월면에서 가장 큰 섬인 안마도를 시작으로 석면도, 소석만도, 오도, 횡도, 죽도, 목섬 등으로 형성되어, 아직도 원시적 자연환경을 간직하고 있어 힐링 여행으로 선호되는 곳이다(KCHS 1997; <https://tour.yeonggwang.go.kr>). 그러나 최근 안마도 해상 풍력단지, 낙월도 해상풍력단지 등 대규모 해상풍력단지 등이 개발이 예정되고 있어, 앞으로 매우 급속하게 환경 변화가 발생할 수 있는 해역이다. 그러나 영광 연안에서 보고되는 해양학적 연구 대부분은 원자력발전소의 온배수와 관련된 내용(Seo and Kim 1997; Kim and Hur 1998; Eun *et al.* 2000; Kang and Choi 2001, 2002; Lee 2003)과 자원생물(Hwang *et al.* 1998a, b)에 관련한 내용으로, 해양환경 변화와 생태구조, 그리고 기초생물과 관련한 내용은 거의 없는 실정이다(Yoon 2022).

이 논문은 안마군도 주변 해역의 식물플랑크톤 군집의

계절 동태를 명확하게 하여, 앞으로 영광 연안의 해양환경 및 생태계 보전과 관리에 필요한 기초자료는 물론, 해역의 효율적 이용에 필요한 기초자료 제공을 목적으로 수행하여, 얻어진 일부 내용을 보고한다.

## 재료 및 방법

안마군도 주변 해역 식물플랑크톤 군집의 계절 동태를 파악하기 위한 조사는 2020년 4월(봄), 7월(여름), 11월(가을) 및 2021년 1월(겨울) 등 4계절 실시하였다. 조사는 소형 해양조사선 에드오션호(7.0 tons)를 이용하여 안마군도를 중심으로 21개 정점의 표층과 저층(해저 퇴적물 상부 2 m 수심으로, 5 m 이상 수심 정점을 대상) 해수를 채수하여, 엽록소 *a* 농도(Chlorophyll *a*) 및 식물플랑크톤 군집에 관련된 항목을 분석하였다(Fig. 1). 조사정점은 선박에 장착된 플로터로 확인하였으며, 해역의 기초생물 생산 잠재능력을 표현하는 엽록소 *a* 농도는 현장에서 직접 연속 측정이 가능한 잠수형 형광광도계(ASTI 102; JFE Advantech, Japan)를 이용하여 각 정점의 표층과 저층에 대한 형광값을 측정하였다. 그리고 통계분석에 이용한 수온, 염분, 탁도 및 용존산소 등의 환경인자 역시 잠수형 형광광도계에 부착된 센서로 측정되었다.

식물플랑크톤 군집구조 및 시·공간적 변동 특성을 파악하기 위해 채수법으로 채수한 시료를 이용하여, 정성 및 정량분석을 하였다. 채수는 3.0 L용 반도채수기를 이용하였고, 현장에서 채수된 해수는 500 mL 폴리에틸렌 표본 병에 채집하여 2%의 Lugol's solution으로 고정하였다(MOF 2018). 고정한 해수 시료는 실험실에서 다양한 용량의 메스실린더를 이용하여 균체성 구조류까지 충분히 침전할

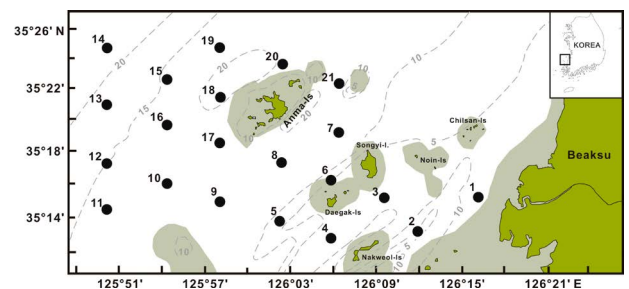


Fig. 1. Map showing the bathymetric and sampling stations in the Anma Islands of Yeonggwang (AIY).

수 있도록 48시간 이상 정치시켜 상등액을 제거하는 방법을 반복하여, 최종 농도 10 mL가 되도록 농축하였다. 검경은 농축된 시료에서 0.1 mL를 pipetman (Gilson, France)을 이용하여, 1.0 mm 간격의 가로 및 세로 선이 되어 있는 계수판(No. S608-C; Rigosha, Japan)에 올려놓고, 커버글라스를 한 다음 미분간섭장치(Differential interference contrast, DIC)가 장착된 광학 현미경(Eclipse 80i; Nikon, Japan)을 이용하여 100~400× 배율로 종의 동정과 세포 수를 계산하였다. 식물플랑크톤은 종 조성, 현존량 및 우점종 등 군집 관련 항목을 계산하였고, 종 동정은 식물플랑크톤 도감(Cupp 1943; Hustedt and Jensen 1985; Chihara and Murano 1997; Tomas 1997; Omura *et al.* 2012) 및 분류 논문을 참고하였다. 그리고 식물플랑크톤 종명은 World Register of Marine Species (WoRMS, www.marinespecies.org)에 준하여 정리하였다. 또한, 정점별 표층의 출현 종과 현존량 자료를 Primer program을 이용하여 식물플랑크톤 군집구조를 해석하는 생태지수에서 다양도 지수(H') 및 우점도 지수(D)를 다음 계산식으로 계산하였다.

다양성 지수:

$$H' = -\sum P_i \times \ln(P_i) \text{ (Shannon and Weaver 1963)}$$

$P_i$ :  $i$ 번째 종의 점유율

우점도 지수:  $D = (Y_1 + Y_2) / Y$  (McNaughton 1968)

Y: 총 세포 수,  $Y_1$ 과  $Y_2$ : 첫 번째와 두 번째 우점종 세포 수

계절별 표층의 환경자료(수온, 염분, 시그마  $t$ , 용존산소량, 탁도 등의 물리적 환경인자)와 식물플랑크톤 군집을 구성하는 출현 종수, 규조류 및 식물성 편모조류의 세포 밀도, 각 계절 식물플랑크톤 군집의 우점종의 세포 밀도를 이용하여 주성분 분석의 통계처리를 하여 식물플랑크톤 군집의 출현 특성 및 계절별 생물 해양학적 환경 특성을 고찰하였다. 주성분 분석은 SPSS 20 프로그램으로 누적 기여율 70%를 기준으로 계산하였다(Yoon 2015, 2020; Kim *et al.* 2020).

## 결과 및 고찰

### 1. 엽록소 a 농도

엽록소 a 농도의 계절 변화는 표층에서 겨울 0.59  $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 여름 8.44  $\mu\text{g L}^{-1}$  (평균 2.44  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) 범위, 저층은 겨울

0.63  $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 가을 15.16  $\mu\text{g L}^{-1}$  (평균 4.57  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) 범위로 변화하여, 표층은 봄과 여름에 높고, 가을과 겨울에 낮았으나, 저층은 여름과 가을에 높고, 봄과 겨울에 낮았고, 저층이 표층보다 높은 특징을 보였다(Fig. 2). 계절별로 봄 표층은 2.15~6.99  $\mu\text{g L}^{-1}$  범위에서 3.35  $\pm$  1.25  $\mu\text{g L}^{-1}$  (평균  $\pm$  표준편차로 앞으로 같은 방법으로 표현) 변동 폭으로 공간변동이 큰 특성을 보였고, 저층은 1.15~8.46  $\mu\text{g L}^{-1}$  범위에서 4.00  $\pm$  1.50  $\mu\text{g L}^{-1}$  변동 폭으로 표층보다 높았다. 여름 표층은 0.93~8.44  $\mu\text{g L}^{-1}$  범위에서 2.87  $\pm$  2.33  $\mu\text{g L}^{-1}$  변동 폭으로 봄보다 다소 낮았지만, 공간변동은 봄보다 크게 나타났으며, 저층은 1.11~11.82  $\mu\text{g L}^{-1}$  범위에서 5.79  $\pm$  3.95  $\mu\text{g L}^{-1}$  변동 폭으로 표층보다 높았고, 공간변동도 크게 나타났다. 가을 표층은 0.81~4.61  $\mu\text{g L}^{-1}$  범위에서 1.87  $\pm$  0.09  $\mu\text{g L}^{-1}$  변동 폭으로 봄이나 여름보다 낮았고, 저층은 2.30~15.16  $\mu\text{g L}^{-1}$  범위에서 6.53  $\pm$  0.91  $\mu\text{g L}^{-1}$  변동 폭으로 표층보다 매우 높았다. 그리고 겨울 표층은 0.59~3.62  $\mu\text{g L}^{-1}$  범위에서 1.65  $\pm$  0.91  $\mu\text{g L}^{-1}$  변동 폭으로 가을보다도 낮았으며, 공간분포도 작았다. 저층은 0.63~3.72  $\mu\text{g L}^{-1}$  범위에서 1.96  $\pm$  0.98  $\mu\text{g L}^{-1}$  변동 폭으로 4계절 중 가장 농도가 낮았다(Fig. 2).

엽록소 a 농도의 공간분포는 봄 표층에서 연안부의 5.0  $\mu\text{g L}^{-1}$  이상 높은 농도가 북서쪽으로 갈수록 감소하여 안마군도 남부에서 4.0  $\mu\text{g L}^{-1}$  이상, 남서부 및 서부에서 3.0  $\mu\text{g L}^{-1}$  이하로 감소하였다. 저층은 전체적으로 표층과 유사하여 연안부의 6.0  $\mu\text{g L}^{-1}$  이상 높은 농도가 북서쪽으로 갈수록 감소하여 안마군도 북서부에서 3.0  $\mu\text{g L}^{-1}$  이하로 낮아졌다(Fig. 3A). 여름 표층은 송이도 및 대각이도 주변부에서 5.0  $\mu\text{g L}^{-1}$  이상의 농도가 북서쪽으로 갈수록 감소하여, 안마군도 남서부에서 2.0  $\mu\text{g L}^{-1}$  이상, 서부 및 북서부에서 2.0  $\mu\text{g L}^{-1}$  이하로 낮아졌다. 저층도 안마군도 남부에

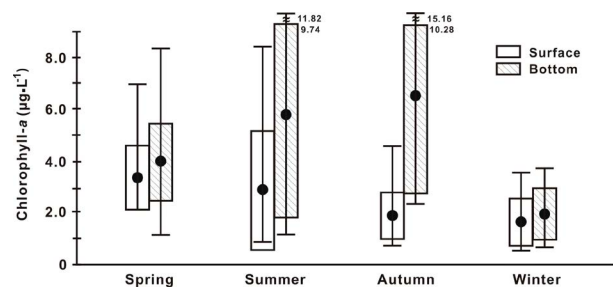


Fig. 2. Seasonal variable of chlorophyll a concentration at the surface and bottom layers in the AIY.

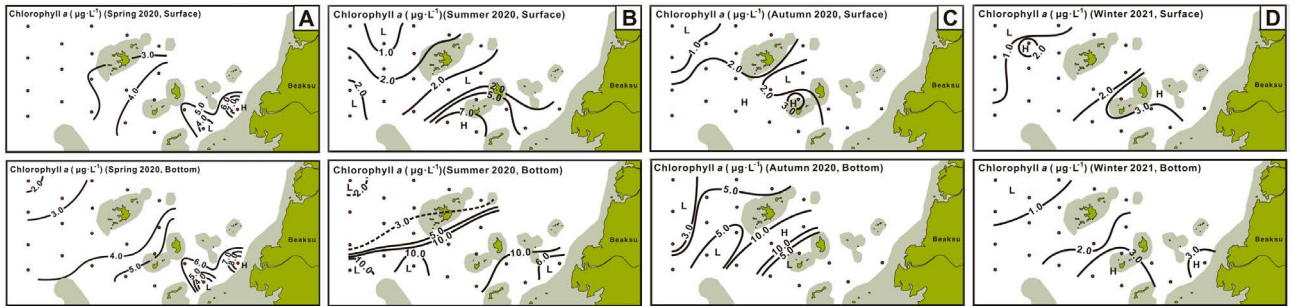


Fig. 3. Spatio-temporal distributions of chlorophyll at the surface (upper) and bottom layers (lower) in the AIY.

서 영광 연안부에서 10.0 µg L<sup>-1</sup> 이상의 농도를 보이지만, 안마군도에서 서부 및 북서부까지 3.0 µg L<sup>-1</sup> 이하로 감소하였다(Fig. 3B). 가을 표층은 안마군도 남부 및 서부에서 2.0 µg L<sup>-1</sup> 이상을 보였고, 안마군도를 포함한 북서부에서 1.0~2.0 µg L<sup>-1</sup> 이상, 송이도를 포함하는 동부에서 1.0 µg L<sup>-1</sup> 이하로 낮았다. 저층은 안마군도 남부에서 대각이도 및 송이도 주변에 10.0 µg L<sup>-1</sup> 이상 높은 농도를 보이지만, 안마군도 서부에서 5.0~10.0 µg L<sup>-1</sup> 범위, 북서부와 송이도 및 대각이도를 포함하는 해역에서 5.0 µg L<sup>-1</sup> 이하를 나타내었다(Fig. 3C). 그리고 겨울 표층은 송이도를 포함하는 남동부에서 3.0 µg L<sup>-1</sup> 이상을 보였고, 인접한 대각이도에서 연안부에 2.0~3.0 µg L<sup>-1</sup> 범위, 그리고 안마군도를 포함한 서부에서 1.0~2.0 µg L<sup>-1</sup> 범위, 안마군도 북서부에서 1.0 µg L<sup>-1</sup> 이하를 나타내었다. 저층도 전체적으로 표층과 유사하여 대각이도를 포함하는 연안부에서 3.0 µg L<sup>-1</sup> 이상을 보이지만, 안마군도를 포함한 서부에서 1.0~2.0 µg L<sup>-1</sup> 범위, 그리고 북서부에서 1.0 µg L<sup>-1</sup> 이하의 엽록소 a 농도를 나타내었다(Fig. 3D).

안마군도에 인접한 해역에서 엽록소 a 농도는 고창 연안(Yoon 2020) 0.58~10.5 µg L<sup>-1</sup>, 영광 연안(Kang and Choi 2002) 1.71~5.88 µg L<sup>-1</sup>와 0.85~15.38 µg L<sup>-1</sup> (Yoon 2022) 등보다 시·공간적인 변화 폭은 크지만, 전반적으로 높은 엽록소 a 농도로 높은 기초생산 잠재력을 나타내었다. 다만 안마군도 주변 해역에서 표층보다 저층 엽록소 a 농도가 높은 것은 서해 연안의 큰 조석 차에 따른 조석 혼합 및 얇은 수심으로 해저 퇴적물이 표층 환경으로 재부유하여 유입되는 것(Sun and Cho 2010; Kwak et al. 2013; Yoon 2014)이나 현장 측정 잠수형 형광광도계가 높은 부유물질에 반응하는 기계적 특성으로 발생하는 현상으로 판단되었다(Yoon 2021).

## 2. 식물플랑크톤 군집

### 1) 종 조성

안마군도 주변부에서 4계절 출현이 확인된 식물플랑크톤 종수는 52속 87종으로, 규조류가 34속 59종으로 67.8% 종 점유율을 나타내었고, 다음으로 와편모조류가 13속 23종으로 26.5% 점유율, 규질편모조류가 3속 3종으로 3.5%, 그리고 은편모조류 및 유글레나조류가 각 1속 1종으로 각 1.1% 출현 종 점유율을 나타내었다.

계절별로 봄은 28속 39종이 출현하여, 규조류 22속 29종으로 74.3%, 와편모조류 4속 8종으로 20.5%, 그리고 규질편모조류 및 유글레나조류가 각각 1속 1종으로 각 2.6% 점유율을 나타내었다. 또한, 공간분포는 평균 표층이 13.8종, 저층이 14.4종으로, 표준편차는 1~2의 수준으로 비교적 균일하였지만, 표층보다 저층에서 다소 많은 종이 출현하였다(Fig. 4). 여름은 30속 43종으로 봄보다 다소 많은 종이 출현하여, 규조류가 19속 25종으로 58.2%, 와편모조류 8속 15종으로 34.9%, 그리고 은편모조류, 규질편모조류 및 유글레나조류 각각 1속 1종으로 각 2.3% 점유율을 나타내어, 와편모조류 출현 종 점유율이 증가하였다. 공

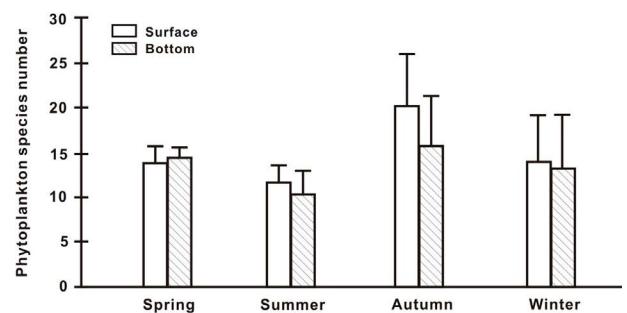


Fig. 4. Seasonal variation of phytoplankton species in the AIY.

간적으로는 평균 표층이 11.6종, 저층이 10.3종으로 표준편차는 2~3의 수준으로 봄보다 낮은 출현 종수에 공간적인 분포는 봄보다 다소 불균일하였다(Fig. 4). 가을은 30속 42종으로 여름과 비슷하여, 규조류 22속 32종으로 76.1%, 와편모조류 5속 7종으로 16.7%, 규질편모조류 2속 2종으로 4.8%, 그리고 유글레나조류 1속 1종으로 2.4% 점유율을 나타내어, 여름보다 규조류 점유율은 증가하였지만, 와편모조류 점유율은 감소하였다. 공간적으로는 평균 표층이 20.2종, 저층이 15.7종으로 표준편차는 5 이상 큰 값을 보여, 봄과 여름보다 다양한 종이 출현하였고, 매우 불균일한 공간분포를 나타내었다(Fig. 4). 그리고 겨울은 32속 52종으로 4계절 중에 가장 다양한 종 조성을 보여, 규조류 25속 42종으로 80.8%, 와편모조류 5속 8종으로 15.4%, 그리고 규질편모조류 및 유글레나조류 각각 1속 1종으로 각 1.9% 점유율을 나타내었고, 공간적으로는 평균 표층이 14.0종, 저층이 13.2종으로 표준편차는 5 이상으로 가을과 같이 매우 불균일 분포를 나타내었다(Fig. 4).

출현 종수의 공간분포는 봄, 표·저층 모두 전체해역에서 비교적 균일한 분포를 보이지만, 표층은 연안부 및 안마군도 서부에서 15종 이상 출현하였고, 기타 해역은 11~14종 수준으로 출현하였다. 저층은 표층과 다르게 안마군도 중심에서 남북방향의 띠 모양으로 15종 이하 출현하였고, 이 띠 좌우에서 15종 이상 출현하였으며, 북부에서 남북의 띠 모양으로 15종 이하가 출현하는 등, 남북으로 띠 형태가 반복되는 양상을 나타내었다(Fig. 5A). 여름 표층은 안마군도 중심으로 13종 이상 상대적 높은 종수가 출현하였으나, 서부 및 연안부의 송이도 주변 해역은 13종 이하로 낮았다. 특히 안마군도 북동부 석만도 주변부에서 15종 이상 출현하였다. 저층은 표층보다 다소 낮지만, 출현 경향은 비슷하여, 안마군도를 중심으로 10~15종이 출

현하였고, 남서부와 송이도, 대각이도 주변에서 10종 이하로 낮았다(Fig. 5B). 가을 표층은 연안부에서 10종 이하의 낮은 종수를 보이지만, 안마군도를 향해 북서쪽으로 갈수록 증가하여 안마군도 남부 및 남서부에서 10~20종, 북서부에서 20종 이하, 서부에서 20종 이상 출현하였다. 저층은 표층보다 낮은 종수로 연안부에서 송이도 및 대각이도 주변부까지 10종 이하, 표층에서 비교적 높은 출현 종수를 보였던 도서해역에서 10~20종 수준, 그리고 남서부에서 20종 이상 출현하였다(Fig. 5C). 겨울 표층은 여름과 유사하여 연안부에서 10종 이하로 낮았지만, 안마군도를 향해 북서쪽으로 갈수록 증가하여 안마군도 남부 및 남서부에서 10~15종, 북서부에서 15종 이하 출현하였고, 안마군도 북동부 석만도를 포함하는 해역에서 20종 이상으로 많은 종수가 출현하였다. 저층도 연안부에서 10종 이하로 낮은 것과 석만도 주변부에서 20종 이상 출현하는 것은 표층과 유사하였지만, 안마군도 남서부에서 20종 이상 출현하였지만, 안마군도에 인접한 오도 및 횡도 주변부는 10종 이하 낮은 종수의 패치 분포가 관찰되었다(Fig. 5D).

안마군도 주변 해역에서 4계절 관찰된 식물플랑크톤 종은 규조류, *Actinopterychus senarius*, *Coscinodiscus gigas*, *Dictyulum brightwellii*, *Nitzschia longissima*, *Nitzschia sigma*, *Paralia sulcata*, *Pleurosigma nornamii*, *Rhizosolenia setigera*, *Skeletonema coastatum*-ls, *Synedra nitzschoides* f. *nitzschoides* 및 유글레나조류, *Eutreptiella gymnastica* 등 11종이었다. 또한, 3계절 관찰된 규조류, *Cerataulina pelagica*, *Eucampia zodiacus*, *Hobaniella longicuris*, *Proboscia alata*, *Stephanopixis turris* 및 와편모조류, *Tripos furca*, *Tripos fusus*, 규질편모조류, *Dictyocha fibura* 등 8종으로 3회 이상 출현은 19종으로 상대적으로 매우 한정되었으며(Table 1), 이들 종이 안마군도 주변의 토착성 식물플랑크톤 종(Choi and Shim

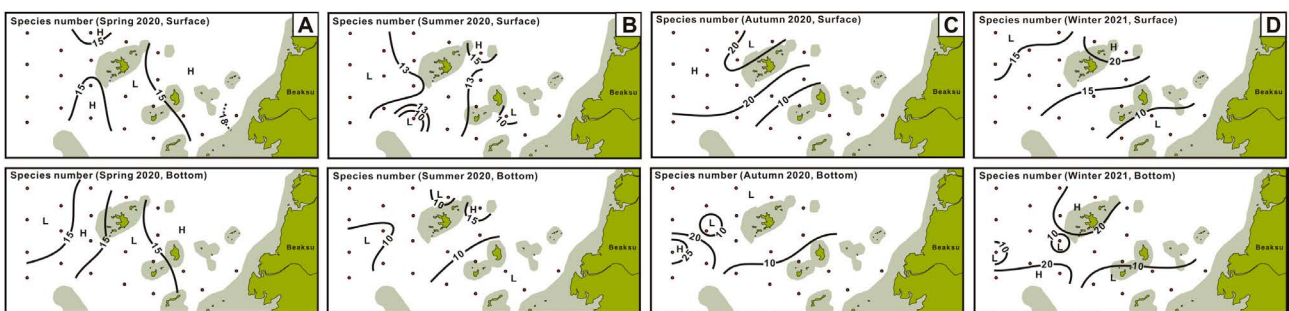


Fig. 5. Spatio-temporal distributions of phytoplankton species at the surface (upper) and bottom layers (lower) in the AIY.

**Table 1.** Seasonal dynamics of the phytoplankton species in the Anma Islands of Yeonggwang (AIY)

Phytoplankton species	Seasons				Phytoplankton species	Seasons			
	Spring	Summer	Autumn	Winter		Spring	Summer	Autumn	Winter
CHROMONADS					<i>Rhizosolenia delicatula</i>				*
<i>Chromonas</i> sp.		*			<i>Rh. flaccida</i>			*	
DIATOMS					<i>Rh. imbricata</i>			*	
<i>Achnanthes longipes</i>			*		<i>Rh. robusta</i> var. <i>robusta</i>			*	
<i>Actinoptychus senarius</i>	*	*	*	*	<i>Rh. setigera</i>	*	*	*	*
<i>Asterionellopsis glacialis</i>	*			*	<i>Skeletonema coastatum</i> -ls	*	*	*	*
<i>Bacteriastrium delicatulum</i>			*		<i>Stephanopixis turris</i>		*	*	*
<i>Campylosira cymbelliformis</i>	*				<i>Synedra nitzschioides</i> f. <i>nitzschioides</i>	*	*	*	*
<i>Cerataulina pelagica</i>	*	*	*		<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i>	*			
<i>Chaetoceros affinis</i>			*		<i>Th. rutula</i>			*	*
<i>Ch. compressus</i>			*		<i>Th. subtilis</i>			*	*
<i>Ch. curvisetus</i>			*	*	<i>Thalassiosira</i> sp.	*	*		
<i>Ch. danicus</i>			*	*	<i>Vibrio paxillifer</i>	*			
<i>Ch. lorenzianus</i>			*		unidentified centric diatoms	*	*	*	*
<i>Ch. socialis</i>			*		unidentified pennate diatoms	*	*	*	*
<i>Chaetoceros</i> spp.		*	*	*	DINOFLAGELLATES				
<i>Corethron hystrix</i>	*				<i>Akashivo sanguineum</i>			*	
<i>Coscinodiscus asteromphalus</i>	*				<i>Dinophysis acuminata</i>		*		
<i>Coscinodiscus gigas</i>	*	*	*	*	<i>D. fortii</i>		*		*
<i>C. granii</i>			*		<i>Diplopsalis lenticula</i>		*		
<i>Coscinodiscus</i> spp.	*	*	*	*	<i>Gyrodinium fissum</i>	*			
<i>Cyclotella</i> cf. <i>caspia</i>				*	<i>G. spirale</i>	*			*
<i>Cylindrotheca closterium</i>	*	*			<i>Heterocapsa triquetra</i>	*			
<i>Dactylisolen phuketensis</i>				*	<i>Karenia</i> sp.		*		
<i>Dentonula pumila</i>			*	*	<i>Noctiluca scintillans</i>			*	*
<i>Dictylum brightwellii</i>	*	*	*	*	<i>Phalacroma rotundatum</i>				*
<i>Eucampia striata</i>	*		*		<i>Prorocentrum cordatum</i>		*		
<i>E. zodiacus</i>			*	*	<i>P. dentatum</i>	*			
<i>Gyrosigma</i> sp.		*	*		<i>P. micans</i>		*		
<i>Hemiaulux hauckii</i>			*	*	<i>P. triestinum</i>	*	*		
<i>Hobaniella longicuris</i>	*		*	*	<i>Protoperidinium</i> sp.		*	*	
<i>Licmophora</i> spp.	*			*	<i>Pyrophacus steinii</i>			*	
<i>Lithodesmium undulatum</i>			*		<i>Scrippsiella trochoidea</i>	*	*		
<i>Navicula</i> spp.	*	*	*	*	<i>Tripos furca</i>		*	*	*
<i>Nitzschia longissima</i>	*	*	*	*	<i>Tr. fusus</i>		*	*	*
<i>N. membranacea</i>				*	<i>Tr. kofoidii</i>		*		
<i>N. sigma</i>	*	*	*	*	<i>Tr. macroceros</i>		*		
<i>Nitzschia</i> spp.		*		*	<i>Tr. muelleri</i>		*	*	
<i>Odontella sinensis</i>	*				unidentified dinoflagellates	*	*	*	*
<i>Paralia sulcata</i>	*	*	*	*	SILICOFLAGELLATES				
<i>Planktoniella blanda</i>			*		<i>Dictyocha fibura</i>	*	*		*
<i>Pleurosigma directum</i>	*				<i>Ebria tripartita</i>			*	
<i>Pl. nornamii</i>	*	*	*	*	<i>Octactis otonarius</i>				*
<i>Pleurosigma</i> sp.		*			EUGLEMOIDS				
<i>Proboscia alata</i>	*	*	*		<i>Eutreptiella gymnastica</i>	*	*	*	*
<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>			*	*					
<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.		*	*						

1986; Kang and Choi 2001)이라 할 수 있다.

안마군도 해역에 출현한 식물플랑크톤 87종은 천수만 262종 (Shim and Yeo 1988), 금강 하구 233종 (Shin 2013), 영광 연안 364종 (Kang and Choi 2001)에 비해 매우 낮지만, 고창 연안 86종 (Yoon 2020), 영광 연안 86종 (Yoon 2022)과 유사하였고, 목포 시아해 36종 (Yoon 2000)보다 다양하였다. 이러한 종수 차이는 해역의 환경특성, 조사 시기, 정점 수와 방법, 그리고 연구자의 종 동정 기준에 의해 발생한다. 특히 많은 종을 보고하는 논문은 정성분석(네트채집)과 정량분석(채수법)을 병행하는 것에 비해, 낮은 출현 종수는 채수법으로 정성 및 정량분석을 하고 있어, 단순한 결과 비교는 어렵다 (Sournia 1978; Kim *et al.* 2020). 특히 식물플랑크톤 종 조성은 다른 해역에 비해 단조로운 특성을 보이지만 (Choi 2011), 분류군 구성비는 연간 구조류 점유율이 높다는 한국 연안의 일반적인 결과와 유사하였고 (Yoon 2022), 출현 종 대부분은 한국 연안에서 어렵지 않게 관찰되는 종이다. 다만 현미경 관찰에서 특이한 점은 남해에서 저수온기에 큰 군체를 형성하는 *Asterionella glacialis*가 매우 적은 양의 단체 형태로 출현하는 것과 저수온기 대형 군집을 형성하는 *E. zodiacus*가 매우 짧은 군체 형태로 소량 출현하는 것이었다.

## 2) 현존량

식물플랑크톤 현존량은 표층에서 가을 1.8 cells mL<sup>-1</sup>에서 봄 247.2 cells mL<sup>-1</sup> (평균 44.8 cells mL<sup>-1</sup>) 변동 폭을, 저층은 겨울 1.2 cells mL<sup>-1</sup>에서 봄 191.6 cells mL<sup>-1</sup> (평균 38.2 cells mL<sup>-1</sup>) 변동 폭으로 여름에 낮고 봄에 높았으나, 가을과 겨울도 봄에 비해 낮은 현존량을 나타내었으며, 전체적으로 연중 낮은 현존량을 보였다. 또한, 전 계절 식물플랑크톤 현존량은 구조류에 의해 지배되었다 (Fig. 6). 계

절별로 봄 표층이 30.8~247.2 cells mL<sup>-1</sup> 범위에서 87.0 ± 65.1 cells mL<sup>-1</sup> 변동 폭을, 저층이 36.4~191.6 cells mL<sup>-1</sup> 범위에서 89.9 ± 37.6 cells mL<sup>-1</sup> 변동 폭으로 상대적으로 높은 현존량을 나타내었다. 분류군별로 표·저층에서 구조류가 각 87.0 ± 65.1 cells mL<sup>-1</sup> 및 87.0 ± 65.1 cells mL<sup>-1</sup> 변동 폭을, 식물성 편모조류는 각 14.7 ± 16.9 cells mL<sup>-1</sup> 및 6.9 ± 7.0 cells mL<sup>-1</sup>의 변동 폭으로 구조류 점유율이 높았다 (Fig. 6). 여름 표층은 4.0~150.0 cells mL<sup>-1</sup> 범위에서 28.8 ± 30.1 cells mL<sup>-1</sup> 변동 폭을, 저층은 3.0~18.8 cells mL<sup>-1</sup> 범위에서 12.7 ± 5.0 cells mL<sup>-1</sup> 변동 폭으로 표층보다 낮았으나, 공간 분포 차는 표층에서 매우 큰 특성을 보였다. 분류군별로 표·저층에서 구조류가 각 23.8 ± 30.9 cells mL<sup>-1</sup> 및 12.1 ± 4.9 cells mL<sup>-1</sup> 변동 폭을, 식물성 편모조류가 각 5.0 ± 9.6 cells mL<sup>-1</sup> 및 0.6 ± 0.8 cells mL<sup>-1</sup> 변동 폭으로 봄과 같이 구조류 점유율이 높지만, 식물성 편모조류는 수층 사이의 현존량 차이가 매우 큰 특징을 나타내었다 (Fig. 6). 가을 표층은 1.8~69.8 cells mL<sup>-1</sup> 범위에서 32.7 ± 18.5 cells mL<sup>-1</sup> 변동 폭을, 저층은 3.0~111.2 cells mL<sup>-1</sup> 범위에서 26.5 ± 22.9 cells mL<sup>-1</sup> 변동 폭으로 봄보다 낮았지만, 여름보다 높은 현존량을 나타내었다. 분류군별로 표·저층에서 구조류가 각 32.4 ± 18.5 cells mL<sup>-1</sup> 및 26.3 ± 26.8 cells mL<sup>-1</sup> 변동 폭, 식물성 편모조류가 각 0.3 ± 0.3 cells mL<sup>-1</sup> 및 0.2 ± 0.2 cells mL<sup>-1</sup> 변동 폭으로 식물성 편모조류 현존량이 매우 낮았다 (Fig. 6). 겨울 표층은 3.0~26.5 cells mL<sup>-1</sup> 범위에서 30.7 ± 26.5 cells mL<sup>-1</sup> 변동 폭을, 저층은 1.2~88.0 cells mL<sup>-1</sup> 범위에서 23.5 ± 22.2 cells mL<sup>-1</sup> 변동 폭으로 변화하여 가을과 유사하였다. 분류군별로 표·저층에서 구조류가 각 30.3 ± 26.4 cells mL<sup>-1</sup> 및 23.3 ± 22.1 cells mL<sup>-1</sup> 변동 폭을, 식물성 편모조류가 각 0.4 ± 0.3 cells mL<sup>-1</sup> 및 0.2 ± 0.3 cells mL<sup>-1</sup> 변동 폭으로 가을과 같이 식물성 편모조류 현존량이 매우 낮았다

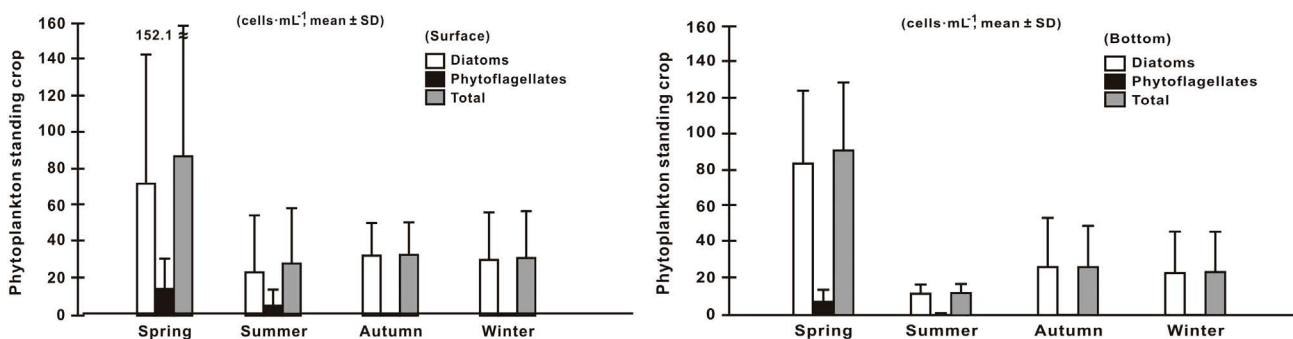


Fig. 6. Seasonal variation of phytoplankton standing crop at the surface (A) and bottom layer (B) in the AIY.

(Fig. 6).

식물플랑크톤 현존량의 시·공간 변동은 봄 표층에서 연안부에서 200 cells mL<sup>-1</sup> 이상으로 높았으나, 북서쪽으로 갈수록 감소하여, 대각이도 및 송이도 주변에서 150 cells mL<sup>-1</sup> 이상, 안마군도 북서부에서 50 cells mL<sup>-1</sup> 이하로 감소하였다. 저층도 표층과 유사하여, 낙월도 북동부의 연안부에서 150 cells mL<sup>-1</sup> 이상의 높은 현존량이 북서진함에 따라 감소하여, 안마군도 남동부에서 100 cells mL<sup>-1</sup> 이상, 안마군도 북서부는 표층보다 높지만, 100 cells mL<sup>-1</sup> 이하로 감소하였고, 일부 해역은 50 cells mL<sup>-1</sup> 이하로 낮았다(Fig. 7A). 여름 표층은 안마군도의 서남부에서 100 cells mL<sup>-1</sup> 이상의 현존량이 북동쪽으로 갈수록 감소하여, 안마군도 서부에서 10 cells mL<sup>-1</sup> 이하로 감소하였다. 그리고 대각이도, 낙월도 주변부에서 20 cells mL<sup>-1</sup> 이하, 안마군도 동부에서 20~40 cells mL<sup>-1</sup> 범위를 나타내었다. 저층은 표층과 같은 높은 현존량은 관찰되지 않았으며, 남서부에서 15 cells mL<sup>-1</sup> 이상을 제외하면, 전체적으로 10 cells mL<sup>-1</sup> 이하로 매우 낮았다(Fig. 7B). 가을 표층은 안마군도 북서부에서 50 cells mL<sup>-1</sup> 이상이 남동쪽으로 갈수록 감소하여, 안마군도 서부에서 30~50 cells mL<sup>-1</sup>, 더욱 남동진하여 대각이도 및 송이도 주변에서 10 cells mL<sup>-1</sup> 이하로 감소하였다. 저층은 표층보다 다소 복잡한 모습으로 안마군도 남서부에서 100 cells mL<sup>-1</sup> 이상 현존량이 북동쪽으로 갈수록 감소하여, 남부에서 50 cells mL<sup>-1</sup> 이하, 안마군도 서부 및 북서부, 그리고 대각이도 및 송이도 주변부에서 10 cells mL<sup>-1</sup> 이하로 급감하였다(Fig. 7C). 겨울 표층은 안마군도 서부에서 50 cells mL<sup>-1</sup> 이상, 특히 북동부인 석만도 주변에서 100 cells mL<sup>-1</sup> 이상의 현존량을 보였으나, 안마군도 북서부와 대각이도 및 남동부에서 30 cells mL<sup>-1</sup> 이하를 보였고, 더욱 북서쪽 및 남동쪽으로 진행하면서 감소하여, 연안부에서 10

cells mL<sup>-1</sup> 이하의 현존량을 나타내었다. 저층은 안마군도 북동부에서 50~80 cells mL<sup>-1</sup> 이상으로 높았으나, 안마군도를 포함하는 북서부에서 30 cells mL<sup>-1</sup> 이상, 서부 및 남동부에서 20 cells mL<sup>-1</sup> 이하로 낮아졌고, 연안부에서 10 cells mL<sup>-1</sup> 이하의 현존량을 나타내었다(Fig. 7D).

안마군도 주변의 식물플랑크톤 현존량 계절 변화에서 수온 상승기 표층보다 저층에서 높은 것은 한국 연안에서 일반적으로 관찰되는 내용이지만(Yoon 2011), 고수온기 와편모조류를 포함한 식물성 편모조류의 높은 출현은 관찰되지 않았다(Yoon *et al.* 1992; Yoon 2011). 또한, 표층 현존량의 변화 1.8~247.2 cells mL<sup>-1</sup> 범위의 변동은 서해의 1980년대 천수만(Shim and Yeo 1988) 48.0~3,720.0 cells mL<sup>-1</sup>, 군산 연안해역(Lee *et al.* 1989) 15.0~5,451.0 cells mL<sup>-1</sup>, 1990년대 영광 연안(Kang and Choi 2002) 428.7~2,292.8 cells mL<sup>-1</sup>, 2010년대 금강 하구(Shin 2013; Kim *et al.* 2020) 143~12,016 cells mL<sup>-1</sup> 및 10.0~2,904 cells mL<sup>-1</sup>, 고군산군도(Yoon 2015) 96~10,000 cells mL<sup>-1</sup> 및 고창 연안(Yoon 2020) 2.2~2,415.6 cells mL<sup>-1</sup>에 비하면, 최댓값 기준으로 매우 낮았으며, 영광 연안(Yoon 2022) 3.4~647.2 cells mL<sup>-1</sup> 및 1990년대 목포 시아해(Yoon 2000) 6.4~630 cells mL<sup>-1</sup>보다도 낮았다. 시·공간적 식물플랑크톤 현존량 차이는 해역으로 공급되는 영양염 등 환경인자 차이에서 발생하는 것으로(Parsons *et al.* 1984; Muniz *et al.* 2018; Yoon 2020), 안마군도 주변 해역은 강한 조석 혼합 등에 의해 공급되는 영양염 이외에 대형 하천 등이 부재로 상대적으로 낮은 현존량을 나타내었다. 이러한 환경 특성은 계절 및 조석주기에 따라 차이는 있지만, 앞에서 설명한 높은 엽록소 *a* 농도임에도 불구하고 식물플랑크톤 현존량이 낮은 현상과도 연결된다. 즉 해수 혼합에 따른 높은 부유물로 인해 식물플랑크톤 현존량과 엽록소 *a* 사이

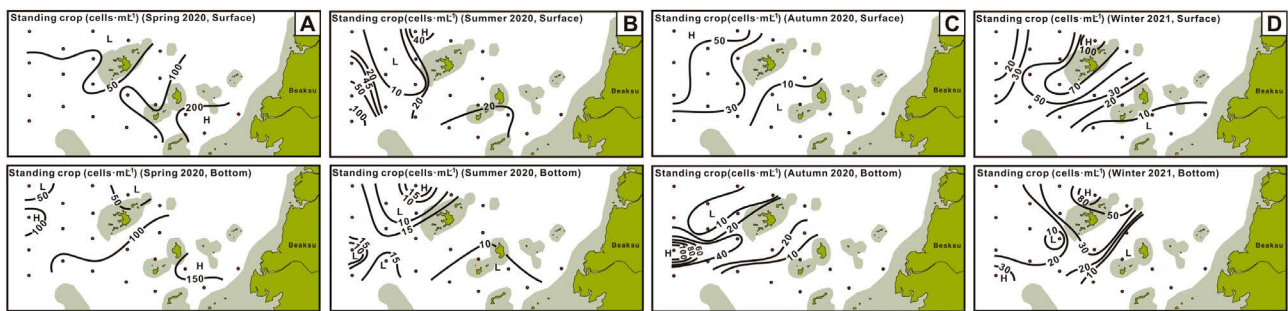


Fig. 7. Spatio-temporal distributions of phytoplankton standing crop at the surface (upper) and bottom layers (lower) in the AIY.



에 유의적 관계 성립이 어렵게 된다(Yoon 2021). 그리고 여름 표층과 저층의 식물성 편모조류의 큰 현존량 차이는 광량 차이에 따른 편모조류의 일주연직이동에 따른 결과로 판단되었다(Gerbersdrof and Schbert 2011).

### 3) 우점종과 우점율

식물플랑크톤 군집에서 전체 정점 평균 4% 이상 우점율을 보이는 우점종은 안마군도 주변부에서 연중 규조류에 의한 우점율이 매우 높았다. 중 수준에서는 *S. costatum*-ls가 연간 표·저층 모두에서 우점하였고 (Table 2), 봄은 표·저층 모두에서 규조류 점유율이 각각 83.1% 및 92.3%로 높은 점유율을 보였다. 최우점종은 *S. costatum*-ls가 표·저층에서 각 69.0% 및 74.7% 우점율로 극우점하였다. 차우점종은 와편모조류 *Prorocentrum cordatum*이 표·저층에서 각 15.1% 및 7.0% 우점율을 보였고, 기타 저층에서 *S. nitzschioides* f. *nitzschioides* (= *Thalassionema nitzschioides*) 및 *P. sulcata*가 각 4.5% 및 4.1% 우점율을 나타내었다 (Table 2). 여름은 봄과 유사하여 표·저층에서 규조류가 각 82.7% 및 95.4% 점유율을 보였고, 표층 최우점종은 *S. costatum*-ls가 34.6% 우점율, 차우점종은 소형 *Navicula* sp.가 30.9% 우점율을 보였지만, 저층은 표층과 달리 *P. sulcata*가 30.4% 우점율로 최우점종, 표층 최우점종인 *S. costatum*-ls가 25.3% 우점율로 차우점하였다. 기타 표층은 와편모조류 *Prorocentrum*

*triestinum*이 11.0%, *P. cordatum*이 7.0%, 저층 최우점종인 *P. sulcata*가 7.5%의 우점율을 나타내었으며, 저층은 표층 차우점종 *Navicula* sp.가 13.7%, *S. nitzschioides* f. *nitzschioides*가 5.5% 우점율을 나타내었다 (Table 2). 가을은 표·저층에서 규조류가 각 99.0% 및 99.3% 점유율로 매우 높았고, 표층 최우점종은 *S. costatum*-ls가 24.2% 우점율을, 차우점종은 *Rh. setigera*가 6.7% 우점율을 나타내었고, 기타 *Chaetoceros socialis*, *Pseudo-nitzschia pungens*, *E. zodiacus* 및 *P. sulcata*가 4~5% 우점율을 나타내었다. 저층은 표층과 달리 *Ch. socialis*가 17.1% 우점율로 최우점종, *Rh. setigera*가 15.8% 우점율로 차우점종을 나타내었고, 기타 *Rhizosolenia flaccida*가 12.4% 우점율, 표층 최우점종 *S. costatum*-ls가 11.6% 우점율을 나타내었다 (Table 2). 겨울은 표·저층에서 규조류가 각 98.8% 및 99.2% 점유율로 매우 높았으며, *S. costatum*-ls가 표·저층에서 각 61.2% 및 58.2% 우점율로 극우점하였다. 차우점종은 *P. sulcata*가 표·저층에서 각 11.7%와 10.6% 우점율로 출현하였다. 기타 *S. nitzschioides* f. *nitzschioides*가 표·저층에서 각 5.0%와 6.7% 우점율을 보였다 (Table 2).

식물플랑크톤 군집의 우점종은 물리·화학적 무생물 환경인자, 즉 광량, 수괴 안정도, 영양염 공급 등에 의해 결정되며, 온대해역에서 영양염이 풍부한 계절은 규조류가 우점하며, 고수온기는 와편모조류 등 식물성 편모조류로 천이된다 (Parsons et al. 1984; Yoon et al. 1992). 또한, 영양염이 풍부

**Table 2.** Seasonal variation of the dominant species and dominance at the surface and bottom layers

Dominant species	Dominance (%)							
	Spring		Summer		Autumn		Winter	
	Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom
<b>DIATOMS</b>	<b>83.1</b>	<b>92.3</b>	<b>82.7</b>	<b>95.4</b>	<b>99.0</b>	<b>99.3</b>	<b>98.8</b>	<b>99.2</b>
<i>Chaetoceros socialis</i>					5.8	17.1		
<i>Eucampia zodiacus</i>					4.9			
<i>Navicula</i> sp./small size			30.9	13.7			11.7	10.6
<i>Paralia sulcata</i>	2.8	4.1	7.5	30.4	4.3			
<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>					5.5			
<i>Rhizosolenia flaccida</i>						12.4		
<i>Rh. setigera</i>					6.7	15.8		
<i>Skeletonema costatum</i> -ls.	69.0	74.7	34.6	25.3	24.2	11.6	61.2	58.2
<i>Synedra nitzschioides</i> f. <i>nitzschioides</i>	3.5	4.5		5.5			5.0	6.7
<b>DINOFLLAGELLATES</b>	<b>16.9</b>	<b>7.7</b>	<b>17.3</b>	<b>4.6</b>	<b>1.0</b>	<b>0.7</b>	<b>1.2</b>	<b>0.8</b>
<i>Prorocentrum cordatum</i>	15.1	7.0	7.0					
<i>Pr. triestinum</i>			11.0					

한 해역은 대형 규조류, *Dictylum*, *Rhizosolenia*, *Thalassiosira* 등이 우점하지만 (Cloern 2018), 급격한 환경 변화가 발생하는 해역은 종 천이 역시 빠른 것 (Vigil et al. 2009; Bazin et al. 2014)이 일반적이다. 안마군도 주변의 식물플랑크톤 우점종은 일부 와편모조류를 제외하면, 대부분 서해 토착종 (Choi and Shim 1986)이며, 환경 변화에 민감하게 반응하는 적조생물이다 (Fukuyo et al. 1990; Taylor and Trainer 2002).

안마군도 주변에서 연중 우점하는 *S. costatum*-ls는 극해역을 제외한 범지구적 규모의 연안 및 내만 해역 부영양화 지표종으로 (Iizuka 1985; Jaanus et al. 2009), 온대해역에서 봄 대발생의 주역을 담당한다 (Homer 2002). 서해 천수만에서 비교적 높은 우점율로 보이며 (Shim and Yeo 1988), 영광 연안에 연중 우점한다 (Kang and Choi 2001). 그리고 목포 시아해의 여름과 가을 극우점 (Yoon 2000), 고창 연안에도 우점 보고된다 (Yoon 2020). 또한, 이 종은 다양한 물질을 세포 외로 분비하여 포식자 (Miralto et al. 1999) 및 다른 생물의 성장을 저해하여 (Howard et al. 1995), 종간 경쟁에 유리한 위치를 점유하며 (Yamasaki et al. 2011), 적조 발생으로 양식장의 수산생물에 피해를 발생시키는 등 (Kent et al. 1995), 다양한 사회문제도 동반하며, 한국 연안에서 보편적으로 우점한다 (Yoon 2020, 2021). 다만 영광 연안의 *S. costatum*-ls 현존량은 부영양화된 내만 및 연안해역보다 매우 낮은 밀도를 보였다 (Iizuka 1985; Yoon 2022). *P. cordatum*은 범지구적 규모의 연안 및 내만 해역의 대표적인 유해 적조생물 (Azanza et al. 2005; Olenina et al. 2016)로서 대발생하여 어류 폐사를 발생시키는 종으로 (Rabbani et al. 1989), 한국 남해에서도 고수온기 우점종 출현은 물론 적조를 발생시킨다 (Taylor and Trainer 2002; Yoon 2011). *S. nitzschoides* f. *nitzschoides*는 *Thalassionema nitzschioides*로 널리 알려진 범지구적 출현 종으로 한국 연안에서 일반적으로 출현하며 (Choi 2011), 남해 연안에서 일부 우점 보고된다 (Yoon and Koh 1995; Yoon 2011). *P. sulcata*는 온대해역의 기수 및 해수에 광범위하게 분포하며, 연안 퇴적층의 환경 지표종으로 이용된다 (McQuoid and Nordberg 2002). 또한, 서해에 보편적으로 출현하는 임시 부유 종으로, 연중 우점하여 천수만은 5월과 6월 최우점 (Shim and Yeo 1988), 금강 하구 (Shin 2013) 및 군산 연안 (Kim et al. 2020)도 겨울과 봄, 고군산군도 (Yoon 2015)는 가을과 겨울, 고창 연안 (Yoon 2020)은 가을, 그리고 목포 시아해 (Yoon 2000)는 겨울과 봄에 최우점하였다. 영광 연안도 연중 출현하지만

(Kang and Choi 2001; Yoon 2022), 극우점 보고는 없으며, 남해 진해만의 장기 조사에서 연도에 따라 다소 차이는 있지만, 전 계절 우점 출현하는 등 (Yoo and Lee 1980), 한국 서해와 남해 전형적 토착종이다. *P. triestinum*은 북서태평양 연안해역의 대표적 적조생물 (Taylor and Trainer 2002)로 봄과 가을에 적조 발생 수준으로 대발생하며 (Fukuyo et al. 1990), 한국 연안에서도 남해 내만에서 적조를 발생시킨다 (Yoon 2011). *Rh. setigera*는 난류의 영향을 받는 내만 및 연안에 연중 출현하는 종 (Fukuyo et al. 1990)으로 적조를 형성하기도 하며 (Nagasaki et al. 2004), 한국 연안은 동해에 우점종 및 서해의 토착종으로 보고되는 종이다 (Choi 2011). *Ch. socialis*는 한류성 종이지만 (Sieracki et al. 1998), 범지구적으로 연안 (Cupp 1943) 및 외양성 부유와 저서종 (Booth et al. 2002)으로 출현하며, 고위도 해역에서 봄 규조류 대발생의 중요 구성종 (Booth et al. 2002; Degerlund and Eilertsen 2010)이다. *Pn. pungens* 역시 한국 연안에 일반적으로 출현하는 종으로 (Choi 2011), 기억상실성 신경성 패류독인 domoic acid를 생산하는 유해생물이다 (Taylor and Trainer 2002). 국내 어시장에서 채집한 일부 패류에서 domoic acid가 검출되었지만 (Choi et al. 2009), 자연환경에서 독화 사례는 보고되지 않았으며, 영광 연안에서 출현하는 현존량도 매우 낮았다 (Yoon 2022). *E. zodiacus* 역시 한국 연안에 보편적으로 출현하는 종 (Choi 2011)이나, 남서해역에서는 주로 저수온기에 우점하며 (Yoon 2011, 2017), 일본 내만 및 연안해역의 김 양식장 등에 겨울 적조를 발생시켜, 영양 경쟁으로 김의 성장 악화에 의한 변색 및 생산량을 저하시키는 원인종이다 (Nishikawa et al. 2007; Yoon 2014). 그러나 서해 군산, 고창 및 영광 연안에서는 여름에 낮은 우점율로 우점하는 특성을 보였고 (Kim et al. 2020; Yoon 2020), 안마군도 주변에서도 상대적으로 수온이 높은 가을에 우점하였다. 이러한 계절적 출현 차이는 여름 황해 저층에 형성되는 저층 냉수괴와 관계있는 것으로 판단되지만, 분명한 증거가 없기에, 향후 심도 있는 검토가 요구되는 내용이다 (Yoon 2022). 그리고 *Rh. flaccida* (= *Guinardia flaccida*)는 한국 연안에 일반적으로 출현하는 종이나 (Choi 2011), 우점 출현 기록은 많지 않다. 남해 득량만에 여름 최우점하였고 (Yoon 1999), 동중국해 북부 해역에서 여름 극우점하였으며 (Yoon et al. 2020), 서해 고창 연안에서 우점하였지만 (Yoon 2020), 높은 우점율로 내만 및 연안해역에 출현하는 경우는 많지 않다 (Choi 2011). 한편 고창 및 영광

연안에서 우점 또는 극우점 현상을 보이던 *Leptocylindrus danicus*는 안마군도 주변에 우점 출현하지 않았다(Yoon 2020, 2022).

4) 생태지수

식물플랑크톤 군집 등 생물군집의 안정성 등 군집구조의 특성을 해석하는 방법으로 생태지수가 일반적으로 사용된다. 다만 생태지수의 계산 및 평가에서는 군집을 구성하는 종들에 대한 동정 수준에 의해 결과가 달라질 수가 있기에 다른 결과와 비교 평가에서는 주의가 필요하다. 생태지수에서 다양도 지수와 풍부도 지수는 서로 연동되어 변동되며, 균등도와 우점도 역시 서로 다른 경향으로 연동되기에 계절 변화는 다양도 및 우점도 지수를 대상으로 표층 식물플랑크톤 군집에 대하여 고찰하였다.

다양도 지수는 여름 1.16에서 가을과 겨울 3.16 범위로 변화하였고, 계절별로 봄은 1.26~2.02 범위에서  $1.82 \pm 0.18$  변동 폭으로 낮았으며, 여름은 1.16~2.62 범위에서  $2.15 \pm 0.24$  변동 폭으로 봄보다 다소 높았고, 가을 1.38~3.16 범위에서  $2.79 \pm 0.45$  변동 폭으로 봄과 여름보다 높았다. 그리고 겨울은 1.38~3.16 범위에서  $2.53 \pm 0.46$  변동 폭으로 가을보다는 낮지만 봄이나 여름보다는 높았다(Fig. 8). 우점도 지수는 가을 0.27에서 여름 0.98 범위로 변화하였고, 시간적으로 봄은 0.61~0.97 범위에서  $0.86 \pm 0.08$  변동 폭으로 높았으며, 여름도 0.44~0.98 범위에서  $0.73 \pm 0.16$  변동 폭으로 봄보다 다소 낮았지만, 상대

적 높은 지수를 나타내었다. 가을은 0.27~0.74 범위에서  $0.44 \pm 0.13$  변동 폭으로 봄이나 여름보다 낮았으나, 겨울은 0.34~0.87 범위에서  $0.72 \pm 0.12$  변동 폭으로 봄이나 여름보다는 낮았지만, 가을보다 높았다(Fig. 8).

다양도 지수의 시·공간분포는 봄, 안마군도를 중심으로 1.9 이상을 나타내지만, 서부와 송이도 등 남동부에서 1.9 이하로 상대적 낮았다. 특히 대각이도, 낙월도 주변은 1.7 이하로 낮았다(Fig. 9A). 여름은 안마군도를 포함하는 주변부에서 2.3~2.5 범위로 높았지만, 안마군도 서부 및 남서부는 2.3 이하, 그리고 남부 및 송이도를 포함하는 동부에서 2.0 이하로 낮았다(Fig. 9B). 가을은 안마군도 서부에서 3.0 이상으로 높았으나, 북서부 및 남동부에서 2.0~3.0 범위, 그리고 대각이도 및 송이도를 포함하는 연안부에서 2.0 이하로 낮았다(Fig. 9C). 겨울은 안마군도 북동부 석만도 주변에서 3.0 이상으로 높았고, 안마군도 서부에서 송이도를 연결하는 넓은 해역에서 2.5~3.0으로 비교적 높았으나, 대각이도를 포함하는 연안부 및 안마군도 북서부에서 2.0 이하로 낮았다(Fig. 9D).

우점도 지수의 시·공간분포는 봄, 전해역에서 *S. costatum*-Is에 의한 극우점 때문에 매우 높았으며, 특히 높은 현존량을 보였던 대각이도, 낙월도 주변 연안부에서 0.9 이상의 극단적 지수를 보였다. 그리고 안마군도 및 서부에서 0.8 이하를 제외하면, 대부분 해역에서 0.8~0.9 범위로 높았다(Fig. 10A). 여름은 안마군도 서부에서 북서부에 걸쳐 0.5 이하로 낮았지만, 남서부에서 0.7~0.9 이상으로 높았고, 안마군도를 포함하는 넓은 해역에서 0.7 이상, 연안부에서 0.8 이상으로 높았다(Fig. 10B). 가을은 봄이나 여름과는 다르게 안마군도를 포함한 서부에서 0.5 이하로 낮았으며, 안마군도 북서부에서 서부 외곽해역 및 낮은 다양도 지수를 보였던 대각이도 및 송이도를 포함하는 연안부에서 5.0 이상으로 높았다(Fig. 10C). 그리고 겨울은 안마군도를 포함하는 중앙부에서 0.8 이상으로 높았고, 안마군도 서부 및 북동부, 그리고 대각이도를 포함하는 연안부에서 0.8 이하를 나타내었다. 특히 연안부 일부 해역은 0.5

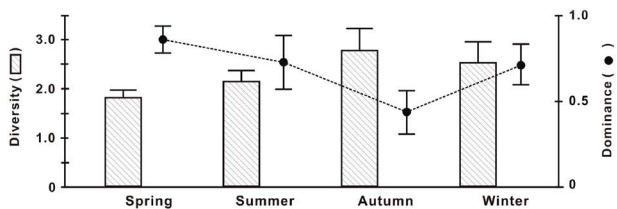


Fig. 8. Spatio-temporal distributions of diversity (upper) and dominance (lower) at the surface in the AIY (Bar in the figure represented the standard deviation).

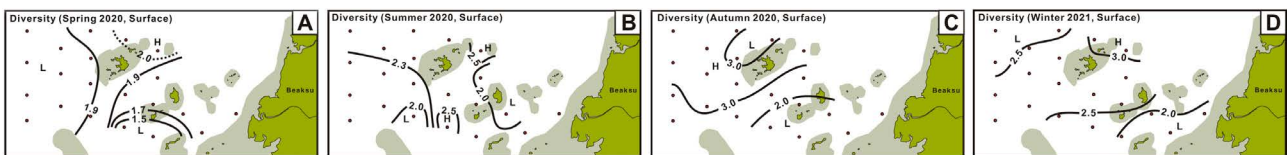


Fig. 9. Spatio-temporal distributions of diversity at the surface in the AIY.

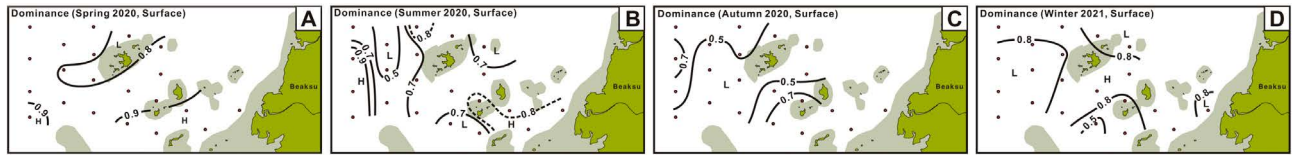


Fig. 10. Spatio-temporal distributions of dominance at the surface in the AIY.

이하로 상대적 낮은 것을 제외하면, 봄이나 여름과 같이 높은 우점도 지수를 나타내었다(Fig. 10D).

안마군도 주변부의 생태지수에서 가을을 제외하면, 다양도 지수보다 우점도 지수가 매우 높았으나, 이러한 결과는 봄과 겨울은 *S. costatum*-ls에 의한 극우점, 그리고 여름에는 *S. costatum*-ls에 추가하여 *Navicula* sp.가 전체 식물플랑크톤 군집을 지배하는 특성을 보이기 때문이라 할 수 있었다. 그러나 가을 상대적으로 높은 다양도 지수에 낮은 우점도 지수는 최우점종 *S. costatum*-ls가 25.3% 우점율을 보이지만, 이외에도 비교적 다양한 *Rh. setigera*, *Ch. socialis*, *Pn. pungens*, *E. zodiacus* 및 *P. sulcata* 등의 5~8%의 낮은 우점율을 나타내어 상대적으로 다양한 생물 종에 의한 군집 구조가 형성되고 있기 때문이다.

안마군도 주변부 식물플랑크톤 군집에서 1.16~3.16 (평균 2.33)의 다양도 지수는 서해 금강 하구(Shin 2013) 1.04~2.49 (평균 1.72), 남해 거제 연안(Yoon et al. 2020) 0.73~3.30 (평균 2.13)보다는 높지만, 군산 연안(Kim et al. 2020) 2.60~3.25 (평균 2.96), 고창 연안(Yoon 2020) 2.24~3.04 (평균 2.60), 그리고 영광 연안(Yoon 2022) 1.11~3.35 (평균 2.61)보다는 낮거나, 유사한 값으로, 비교적 양호한 군집구조를 가진다고 할 수 있었다. 우점도 지수는 0.27~0.98 (평균 0.69) 범위로 고창 연안(Yoon 2020) 0.77~0.94 (평균 0.93), 금강 하구(Shin 2013) 0.42~0.85 (평균 0.67), 군산 연안(Kim et al. 2020) 0.57~0.81 (평균 0.68),

남해 거제 연안(Yoon et al. 2020) 0.46~0.86 (평균 0.62)보다도 낮은 값이나, 영광 연안(Yoon 2022) 0.28~0.90 (평균 0.57)보다 높은 지수로, 계절변동 폭이 매우 큰 특징은 있지만, 식물플랑크톤 군집이 특정 종에 의해 지배되는 구조 특성을 나타내었다.

### 3. 식물플랑크톤 군집의 분포 및 계절변동 특성

계절별 측정된 표층 환경 및 식물플랑크톤 군집 인자를 이용하여 주성분 분석을 계산하였으며, 인자 부하량 분포에서 계절별 식물플랑크톤 군집의 출현 특성 및 생물 해양학적 환경특성을 고찰하였다. 주성분 분석의 계산 결과는 Table 3과 같다. 봄은 제2 주성분까지 누적 기여율이 70%를 상회하고 있지만, 기타 계절은 제2 주성분까지 누적 기여율이 50%를 조금 초과하는 정도로 주성분 분석에 의한 종합특성값의 집약 정도가 다소 약하지만, 해석에는 제1 및 제2 주성분만을 대상으로 하였다(Yoon 2021).

인자 부하량 분포의 계절변동은 봄, 제1 주성분에 수온, 탁도, 용존산소량, 규조류 세포 밀도, 최우점종 *S. costatum*-ls 및 엽록소 *a* 농도에 강한 양의 관계를 보이며, 염분, sigma *t*에 강한 음의 관계를 보이는 것에서 상대적 높은 수온을 보이는 연안부의 규조류 출현 특성을 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 식물성 편모조류 및 차우점종인 *P. cordatum*에 강한 양의 관계를 보이며, 규조류 및 최우점종 *S. costatum*-ls에 약한 음의 관계를 보이는 것에서 식물

Table 3. Eigenvalue, eigenvector, and proportion by principal component analysis

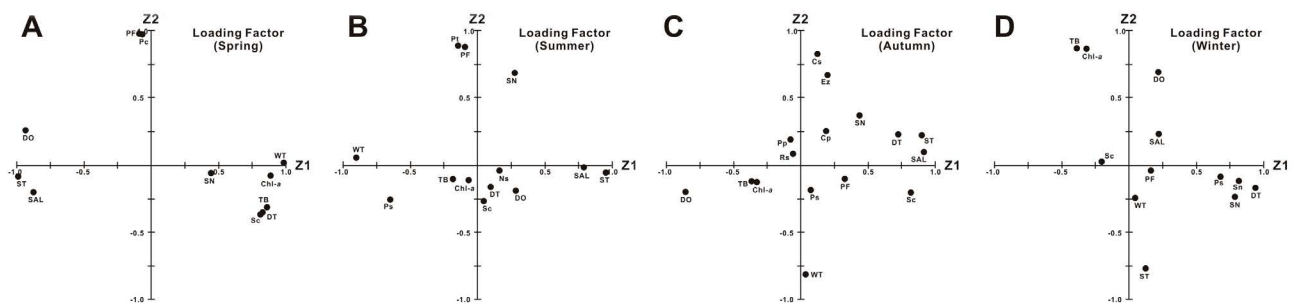
	Spring		Summer		Autumn		Winter	
	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
Eigenvalue	6.897	2.159	3.865	2.854	6.480	2.291	4.381	2.007
Proportion (%)	62.7	19.7	29.7	22.0	40.5	14.3	36.5	17.3
AP (%)	62.7	82.3	29.7	51.7	40.5	54.8	36.5	53.8

AP: Accumulative proportion (%)

성 편모조류 출현 특성을 나타내는 지표로 해석되었다. 즉 규조류가 지배하는 식물플랑크톤 군집은 복사열에 쉽게 영향을 받는 연안부 환경에 지배되고 있으며, 높은 식물플랑크톤 현존량과 엽록소 *a* 농도 사이는 유의적 관련성이 확인되었다(Fig. 11A). 여름은 제1 주성분에 엽분,  $\sigma_t$ , 탁도, 용존산소 등이 강한 양의 관계를 나타내었고, 수온, *P. sulcata* 및 엽록소 *a*가 강한 음의 관계를 보이는 것에서, 상대적 고염 특성의 외부환경 영향을 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 수온 및 식물성 편모조류 및 *P. triestinum*에 강한 양의 관계를 보이며, 규조류와 *Navicula* sp.에 강한 음의 관계를 보이는 것에서, 상대적 고수온에서 식물성 편모조류 출현 특성을 나타내는 지표로 해석되었다. 즉 여름 식물플랑크톤은 규조류와 편모조류 모두 상대적 고염의 위해 환경보다는 저염에 고온인 연안 환경 지배되었으며, 식물성 편모조류는 엽분보다 높은 수온을 선호하는 것(Parsons *et al.* 1984)으로 나타났다(Fig. 11B). 가을은 제1 주성분에 엽분,  $\sigma_t$ , 규조류 및 *S. costatum*-ls에 강한 양의 관계를 보였고, DO에 강한 음의 관계, 그리고 탁도 및 엽록소 *a*에 약한 음의 관계를 나타내는 것에서 상대적 개방해역 조건에서의 규조류 출현을 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 대형 규조류, *Cerataulina pelagica* 및 *E. zodiacus*에 강한 양의 관계를 보였고, 수온에 강한 음의 관계를 보이는 것에서 대형 부유성 규조류의 출현환경을 나타내는 지표로 해석되었다. 즉 여름 규조류는 상대적으로 높은 엽분의 개방해역을 선호였고, 용존산소 및 엽록소 *a* 농도는 식물플랑크톤 현존량보다 해수 혼합에 의한 대기 중 산소 용해와 해저 퇴적물의 재부유(Sun and Cho 2010; Kwak *et al.* 2013; Yoon 2014)에 의한 영향이 큰 것으로 해석

되었다. 그리고 대형 규조류 *C. pelagica* 및 *E. zodiacus*는 상대적으로 낮은 수온을 선호하는 것으로 나타났다(Fig. 11C). 실제 이들 대형 규조류는 겨울 연안에서 적조를 발생시키거나, 매우 높은 밀도로 우점하는 것이 보고된다(Nishikawa *et al.* 2007; Yoon 2014; Kim *et al.* 2020). 그리고 겨울 제1 주성분은 규조류, *P. sulcata*와 *S. nitzschioides* f. *nitzschioides*에 강한 양의 관계를, 그리고 엽분과 용존산소에 약한 양의 관계를 보이며, 탁도, 엽록소 *a* 및 *S. costatum*-ls에 약한 음의 관계를 나타내는 것에서, 저서성 규조류의 출현 특성을 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 탁도, 용존산소, 엽록소 *a*에 강한 양의 관계를 나타내고,  $\sigma_t$ 에 강한 음의 관계를 보이는 것에서 해수 혼합에 의한 높은 부유물 특성을 나타내는 지표로 해석되었다. 즉 겨울 저서성 규조류는 상대적 해수 혼합의 약한 환경을 선호하였으며, 가을과 같이 엽록소 *a* 농도는 해수 혼합에 의한 탁도에 크게 영향을 받는 것으로 판단되었다(Fig. 11D).

주성분 분석의 득점 분포에서 봄은 기여율 62.7%의 제1 주성분을 기준으로 상대적 높은 수온에 규조류 현존량이 높은 I 해역과 이와 상반된 특성을 보이는 II 해역으로 구분되며, 이들은 재차 기여율 19.7%의 제2 주성분을 기준으로 식물성 편모조류 현존량이 높은 I-1 및 II-1 해역과 상반된 특성을 나타내는 I-2 및 II-2 해역으로 구분되었다. 즉 안마군도 남동부의 I 해역에서 안마군도 동부에서 송이도까지의 I-1 해역과 연안부의 I-2 해역에 해당하며, 안마군도를 포함하는 서부의 II 해역은 안마군도 북서부의 II-1 해역과 남서부의 II-2 해역에 해당하였다(Fig. 12A). 여름은 다소 낮은 기여율 29.7%의 제1 주성분을 기준으로 상대적 높은 엽분과 낮은 식물플랑크톤 현존량을 나타내는 I 해역



**Fig. 11.** Spatio-temporal distributions of loading factors by principal component analysis (PCA) at the surface in the AIY (WT: water temperature, SAL: salinity, ST: sigma t, DO: dissolved oxygen, DOs: saturation of DO, TB: turbidity, Chl-*a*: chlorophyll *a*, DT: diatoms cell density, PF: phytoflagellates cell density, Cp: *Cerataulina bergonii*, Ez: *Eucampia zodiacus*, Ns: *Navicula* sp., Pc: *Prorocentrum cordatum*, Pp: *Pseudo-nitzschia pungens*, Ps: *Paralia sulcata*, Pt: *Prorocentrum triestinum*, Rs: *Rhizosolenia setigera*, Sc: *Skeletonema costatum*-ls, and Sn: *Synedra nitzschioides* f. *nitzschioides*).

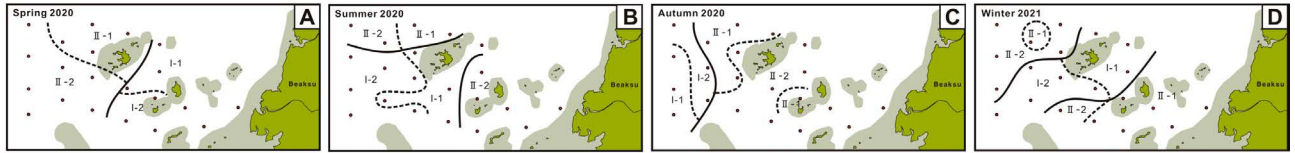


Fig. 12. Spatio-temporal variations of the sea area separation by PCA score in the AIY.

과 상반된 특성을 보이는 II 해역으로 구분되며, 이들은 재차 기여율 22.0%의 제2 주성분을 기준으로 상대적 식물성 편모조류 출현이 높은 I-1 및 II-1 해역과 상반된 특성을 보이는 I-2 및 II-2 해역으로 구분되었다. 즉 안마군도 남동부 및 남서부를 포함하는 I 해역에서 안마군도 남부의 I-1 해역 및 안마군도 남서부의 I-2 해역, 그리고 안마군도 북서부 및 송이도를 포함하는 연안부가 포함되는 II 해역에서 안마군도 북서부의 II-1 및 북서부 일부 및 연안부의 II-2 해역에 해당하였다(Fig. 12B). 가을은 기여율 40.5%의 제1 주성분 기준으로 상대적 높은 염분에 구조류 현존량이 높은 I 해역과 상대된 특성을 보이는 II 해역으로 구분되었다. 이들은 재차 기여율 14.3%의 제2 주성분을 기준으로 식물성 편모조류 현존량이 높은 I-1 및 II-1 해역과 이와 상반된 특성을 보이는 I-2 및 II-2 해역으로 구분되었다. 즉 안마군도 서부의 먼 해역을 포함하는 I 해역에서 가장 서부의 I-1 해역과 인정하는 서부 I-2 해역, 그리고 안마군도 주변부의 광역해역을 포함하는 II 해역에서 안마군도 북서부 및 송이도를 포함하는 연안부의 II-1 해역과 안마군도를 포함하는 남부해역인 II-2 해역에 해당한다(Fig. 12C). 그리고 겨울은 기여율 36.5%의 제1 주성분을 기준으로 저서성 구조류 현존량이 높은 I 해역과 상반된 특성을 보이는 II 해역으로 구분되며, 이들은 재차 17.3%의 제2 주성분을 기준으로 높은 탁도와 엽록소 *a*를 나타내는 I-1 및 II-1 해역과 이와 상반된 특성을 보이는 I-2 및 II-2 해역으로 구분되었다. 즉 안마군도를 포함하는 북동 및 남서 방향의 큰 폭을 나타내는 I 해역에서 안마군도 동부의 I-1 해역과 안마군도 남서부의 I-2 해역, 그리고 안마군도 북동부 및 연안부를 포함하는 II 해역에서 북서부의 II-1 해역과 연안부의 II-2 해역에 해당하였다(Fig. 12D).

즉 득점 분포에 의한 안마군도 주변 해역은 계절에 따라 다소 차이는 있지만, 크게 안마도를 포함하는 북서부 해역과 송이도를 포함하는 연안부 해역으로 구분되어, 서로 다른 생물해양학적 환경 특성을 나타내었다.

## 결론

안마군도 주변 해역은 인접하는 영광이나 고창 연안보다 낮은 현존량을 보였으나, 높은 엽록소 *a* 농도, 다양도 지수 및 우점도 지수는 유사하여, 식물플랑크톤 군집의 계절 변동 및 특정 종에 의한 군집 지배가 큰 특징을 나타내었다. 또한, 식물플랑크톤 군집의 분포 및 성장은 연안수의 확장보다 개방해역의 해수 확장 및 해수 혼합에 의한 해저 퇴적층에서 공급에 크게 지배되는 것으로 추정되었다.

## 적요

서해 남부 안마군도 주변 해역 식물플랑크톤 군집의 계절 동태를 파악하기 위하여 2020년 봄부터 2021년 겨울까지 소형 해양조사선 에드오션호를 이용하여 21개 정점의 표층과 저층 해수를 대상으로 현장조사를 하였다. 결과, 출현한 식물플랑크톤 종은 52속 87종으로, 구조류가 67.8%, 와편모조류가 26.5%, 규질편모조류가 3.5%, 그리고 은편모조류 및 유글레나조류가 각 1.1%를 차지하였다. 계절별로 출현 종은 봄에 단순하였고, 겨울에 상대적으로 다양하였다. 표층 현존량은 여름  $28.8 \pm 30.1$  cells mL<sup>-1</sup>로 낮았고, 봄  $87.0 \pm 65.1$  cells mL<sup>-1</sup>로 높았다. 식물플랑크톤 군집은 연중 구조류가 80% 이상 높은 점유율을 나타내었고, 우점종은 *Skeletonema costatum*-ls가 봄과 겨울에 60% 이상 극우점을 보였고, 여름과 가을 각 34.6%와 24.2%로 최우점하였다. 군집구조 특성을 나타내는 다양도 지수는 현존량과 다르게 가을에  $2.79 \pm 0.45$ 로 높았고, 봄에  $1.82 \pm 0.18$ 로 낮았다. 그러나 우점도 지수는 봄에  $0.86 \pm 0.08$ 로 높았고, 가을에  $0.44 \pm 0.13$ 로 낮았다. 환경인자 및 식물플랑크톤 군집 관련 인자를 이용한 주성분 분석 결과, 식물플랑크톤 군집을 통해 본 안마군도 주변 해역의 생물해양학적 환경 특성은 상대적 개방해역 및 조석 혼합 등 해수 혼합에 의한 해저 퇴적층에서 공급되는 영양염 등에 의해 지배되는 것으로 추정되었다.

## REFERENCES

- Azanza RV, Y Fukuyo, LG Yap and H Takayama. 2005. *Prorocentrum minimum* bloom and its possible link to a massive fish kill in Bolinao, Pangasinan, Northern Philippines. *Harmful Algae* 4:519–524.
- Bazin P, F Jouenne, T Friedl, AF Deton-Cabanillas, B Le Roy and B Véron. 2014. Phytoplankton diversity and community composition along the estuarine gradient of a temperate macro-tidal ecosystem: Combined morphological and molecular approaches. *PLoS One* 9:e94110.
- Booth BC, P Larouche, S Bélanger, B Klein, D Amiel and ZP Mei. 2002. Dynamics of *Chaetoceros socialis* blooms in the North Water. *Deep-Sea Res. Part II-Top. Stud. Oceanogr.* 49:5003–5025.
- Chihara M and M Murano. 1997. *An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan*. Tokai University Press, Tokyo.
- Choi JK. 2011. *The Plankton Ecology in Korean Coastal Waters*. Donghwa Tech. Publ., Seoul.
- Choi JK and JH Shim. 1986. The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. I. Environmental characteristics. *J. Oceanol. Soc. Korea* 21:156–170.
- Choi KD, JS Lee, JO Lee, KS Oh and IS Shin. 2009. Investigation of domoic acid in shellfish collected from Korean fish retail outlets. *Food Sci. Biotechnol.* 18:842–848.
- Cloern JE. 2018. Why large cells dominate estuarine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* 63:392–409.
- Cupp EE. 1943. Marine plankton diatoms of the west coast of north America. *Bull. Scripps Inst. Oceanogr. Univ. California* 5:1–237.
- Degerlund M and HC Eilertsen. 2010. Maine species characteristics of phytoplankton spring blooms in NE Atlantic and Arctic waters (68–80°N). *Estuaries Coasts* 33:242–269.
- Eun GYN, KW Kim, JY Kim, IS Kim, JM Cha, DJ Kim and KN Kim. 2000. Characteristics of particle size and element distribution in the coastal bottom sediments in the vicinity of Younggwang nuclear power plant. *Econ. Environ. Geol.* 33:195–204.
- Fukuyo Y, H Takano, M Chihara and K Matsuoka. 1990. *Red Tide Organisms in Japan - An Illustrated Taxonomic Guide*. Uchida Rokakuho. Tokyo.
- Garmendia M, Á Borja, J Franco and M Revilla. 2013. Phytoplankton composition indicators for the assessment of eutrophication in marine waters: Present state and challenges within the European directives. *Mar. Pollut. Bull.* 66:7–16.
- Gerbersdorf SU and H Schubert. 2011. Vertical migration of phytoplankton in coastal waters with different UVR transparency. *Environ. Sci. Eur.* 23:36.
- Horner RA. 2002. *A Taxonomic Guide to Some Common Phytoplankton*. Biopress, Bristol, UK.
- Howard AG, SDW Comber, D Kifle, EE Antai and DA Purdie. 1995. Arsenic speciation and seasonal changes in nutrient availability and micro-plankton abundance in Southampton Water, UK. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 40:435–450.
- Hustedt F and NG Jensen. 1985. *The Pennate Diatoms: a Translation of F. Hustedt's (1959) "Die Kieselalgen 2 Teil (NG Jensen)"*. Koeltz Scientific Books, Koenigstein, Germany.
- Hwang SD, YJ Im, YC Kim, HK Cha and SH Choi. 1998a. Fishery resources off Younggwang I. Species composition of catch by a stow net. *J. Korean Fish. Soc.* 31:727–738.
- Hwang SD, YJ Im, HI Song, YS Choi and HT Moon. 1998b. Fishery resources off Younggwang II. Species composition of catch by a otter trawl. *J. Korean Fish. Soc.* 31:739–748.
- Iizuka S. 1985. The results of a survey of maximum densities in cell number of phytoplankton in coastal waters of Japan. *Bull. Plankton Soc. Japan* 32:67–72.
- Jaanus A, K Toming, S Hallfors, K Kaljurand and I Lips. 2009. Potential phytoplankton indicator species for monitoring Baltic coastal waters in the summer period. *Hydrobiologia* 629:157–168.
- Kang YS and JK Choi. 2001. Ecological characteristic of phytoplankton communities in the coastal waters of Gori, Wul-seong, Uljin and Youngkwang. I. Species composition and distribution (1992–1996). *Algae* 16:85–111.
- Kang YS and JK Choi. 2002. Ecological characteristic of phytoplankton communities in the coastal waters of Gori, Wul-seong, Uljin and Youngkwang. II. Distributions of standing crops and environmental parameters (1992–1996). *J. Korean Soc. Oceanogr.* 7:108–128.
- KCHS (Korean Cultural Heritage Society). 1997. *A Field Guide to History, Jeonbuk. Dolbaegae, Paju, Korea*.
- Kent ML, JNC Whyte and C LaTrace. 1995. Gill lesion and mortality in seawater pen-reared Atlantic salmon *Salmo salar* associated with a dense bloom of *Skeletonema costatum* and *Thalassiosira* species. *Dis. Aquat. Org.* 22:77–81.
- Kim HS, H Kim, D Yang and YH Yoon. 2020. Spatio-temporal distribution patterns of phytoplankton community and the characteristics of biological oceanographic environments in the Geum River Estuary, West Sea of Korea in 2018. *Korean J. Environ. Biol.* 38:254–270.
- Kim YH and SH Huh. 1998. Species composition and biomass of marine algal community in the vicinity of Younggwang nuclear power plant on the west coast of Korea. *J. Korean Fish. Soc.* 31:186–194.
- Kwak MT, GH Seo, BJ Choi, CS Kim and YK Cho. 2013. Sensitivity of simulated water temperature to vertical mixing scheme and water turbidity in the Yellow Sea. *J. Korean Soc. Oceanogr.* 18:111–121.

- Lee HY. 2003. Studies on the distribution of the microalgae in the tidal flats of Gamami beach, Young-Gwang, Korea. *J. Environ. Sci.* 12:715–724.
- Lee WH, GH Lee, MS Choi and DM Lee. 1989. Phytoplankton and bacterioplankton in the intertidal and subtidal waters in the vicinity of Kunsan. *J. Oceanol. Soc. Korea* 24:157–164.
- McNaughton SJ. 1968. Structure and function in California grassland. *Ecology* 49:962–972.
- McQuoid MR and K Nordberg. 2003. The diatom *Paralia sulcata* as an environmental indicator species in coastal sediments. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 56:339–354.
- Miralto A, G Barone, G Romano, SA Poulet, A Ianora, GL Russo, I Buttino, G Mazzarella, M Laabir, M Cabrini and MG Giacobbe. 1999. The insidious effect of diatoms on copepod reproduction. *Nature* 402:173–176.
- MOF. 2018. Korean Standard Method of Examination for Marine Environment. Ministry of Oceans and Fisheries. Sejong, Korea.
- Muñiz O, JG Rodríguez, M Revilla, A Laza-Martínez, S Seoane and J Franco. 2018. Seasonal variations of phytoplankton community in relation to environmental factors in an oligotrophic area of the European Atlantic coast (southeastern Bay of Biscay). *Reg. Stud. Mar. Sci.* 17:59–72.
- Nagasaki K, Y Tomaru, N Katanozaka, Y Shirai, K Nishida, S Itakura and M Yamaguchi. 2004. Isolation and characterization of a novel single-stranded RNA virus infecting the bloom-forming diatom *Rhizosolenia setigera*. *Appl. Environ. Microbiol.* 70:704–711.
- Nishikawa T, Y Hori, K Tanida and I Imai. 2007. Population dynamics of the harmful diatom *Eucampia zodiacus* Ehrenberg causing bleaching of *Porphyra thalli* in aquaculture in Harima-Nada, the Seto Inland Sea, Japan. *Harmful Algae* 6:763–773.
- Olenina I, E Vaiciukynas, S Sulcius, R Paskauskas, A Verikas, A Gelzinis, M Bacauskien, V Bertasiute and S Olenin. 2016. The dinoflagellate *Prorocentrum cordatum* at the edge of the salinity tolerance: The growth is slower but cells are larger. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 168:71–79.
- Omura T, M Iwataki, VM Borja, H Takayama and Y Fukuyo. 2012. Marine Phytoplankton of the Western Pacific. Kouseisha Kouseikaku, Tokyo.
- Parsons TR, M Takahashi and B Hargrave. 1984. *Biological Oceanographic Processes* (3rd ed.). Pergamon Press. Oxford.
- Rabbani MM, A Rehman and AU Harms. 1989. Mass mortality of fishes caused by dinoflagellate bloom in Gwadar bay, Southwestern Pakistan. pp. 209–217. In: *Toxic Marine Phytoplankton: Proceedings of the Fourth International Conference on Toxic Marine Phytoplankton* (Graneli E, ed.). Elsevier Science Ltd., Netherlands.
- Seo IW and DG Kim. 1997. Current status and countermeasures for heated waters discharge of nuclear power plants. *J. Korean Soc. Civil Eng.* 45:29–36.
- 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 Resource Prot.* 4:616–621.
- Shannon CE and W Weaver. 1963. *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press. Champaign, IL.
- Shim JH and HG Yeo. 1988. Spatial and temporal variations of phytoplankton in Chonsu Bay. *J. Oceanol. Soc. Korea* 23:130–145.
- Shin YK. 2013. An ecological study of phytoplankton community in the Geum river estuary. *Korean J. Ecol. Environ.* 46:524–540.
- Sieracki ME, DJ Gifford, SM Gallager and CS Davis. 1998. Ecology of a *Chaetoceros socialis* Lauder patch on Georges Bank: Distribution, microbial associations, and grazing losses. *Oceanography* 11:30–35.
- Sournia A. 1978. *Phytoplankton Manual*. Monographs on Oceanographic Methodology 6. The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Page Brothers Ltd. Paris. p. 337.
- Sun YJ and YK Cho. 2010. Tidal front and its relation to the biological process in coastal water. *Ocean Sci. J.* 45:243–251.
- Taylor FJR and VL Trainer. 2002. *Harmful Algal Blooms in the PICES Region of the North Pacific*. PICES Scientific Report No. 23. North Pacific Marine Science Organization (PICES). Sidney, Canada.
- Tomas CR. 1997. *Identifying Marine Phytoplankton*. Academic Press. London.
- Vigil P, P Countway, J Rose, DJ Lonsdale, CJ Gobler and DA Caron. 2009. Rapid shifts in dominant taxa among microbial eukaryotes in estuarine ecosystems. *Aquat. Microb. Ecol.* 54:83–100.
- Yamasaki Y, Y Ohmichi, T Shikata, M Hirose, Y Shimasaki, Y Oshima and T Honjo. 2011. Species-specific alleopathic effects of the diatom *Skeletonema costatum*. *Thalassas* 27:21–32.
- Yoo KI and JH Lee. 1980. Environmental studies of the Jinhae Bay 3. Ecological succession of phytoplankton populations, 1974–1980. *J. Oceanol. Soc. Korea* 15:100–107.
- Yoon YH. 1999. The characteristics on the spatio-temporal distributions of phytoplankton communities in Deukryang Bay, southwestern Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 17:481–492.
- Yoon YH. 2000. On the spatio-temporal distributions of nutrients and chlorophyll *a* concentration, and the environmental factors on the variation of phytoplankton biomass in Shiahae, Southwestern part of Korean Peninsula. *Korean J. Environ. Biol.* 18:77–93.
- Yoon YH. 2010. *Red Tides - Uprising from the Sea*. Gibmoondang. Seoul.



- Yoon YH. 2011. Marine environments and phytoplankton in the Southwestern Sea of Korea. pp. 68-93. In: The Plankton Ecology in Korean Coastal Waters (Choi JK, ed.). Donghwa Tech. Publ., Seoul.
- Yoon YH. 2014. Marine environments and production of laver farm at Aphae-do based on water quality and phytoplankton community. Korean J. Environ. Biol. 32:159-169.
- Yoon YH. 2015. Spatio-temporal distributions of phytoplankton community in the coastal waters of Gogunsan Islands (CoWGLs), West Sea of Korea. J. Korean Acad. Indust. Coop. Soc. 16:2287-2300.
- Yoon YH. 2017. Spatio-temporal distributions of phytoplankton community in the coastal waters of central South Sea (CWoCSS), Korea. J. Korean Acad. Indust. Coop. Soc. 18: 441-453.
- Yoon YH. 2020. Spatio-temporal variations of marine environments and phytoplankton community in the Gochang Coastal Waters (GCW) of Southern West Sea in Korea. J. Korea Acad. Indust. Coop. Soc. 21:477-493.
- Yoon YH. 2021. Characteristics on spatial distributions of phytoplankton communities in relation to water masses in the western South Sea, Korea in early autumn 2021. Korean J. Environ. Biol. 39:559-272.
- Yoon YH. 2022. The spatio-temporal variations of water masses and phytoplankton community in the Yeonggwang Coastal Waters (YCW), where thermal discharged. J. Korea Acad. Indust. Coop. Soc. in press.
- Yoon YH, GW Baeck and HY Soh. 2020. Monthly variation characteristics of phytoplankton community in the inner bay of Southeastern Geoje Island, South Sea of Korea. J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy 28:126-133.
- Yoon YH and NP Koh. 1995. Studies on the environmental characteristics of the breeding ground in the Kogum-sudo, southern part of Korean Peninsula 1. Seasonal succession of phytoplankton population. J. Aquacult. 8:47-58.
- Yoon YH, HG Rho and YK Kim. 1992. Seasonal succession of phytoplankton population in the Hamdok port, Northern Cheju Island. Bull. Mar. Sci. Inst. Cheju Nat'l. Univ. 16:27-42.