

서해 남부, 고창연안해역의 해양환경 및 식물플랑크톤 군집의 시·공간 변동특성

윤양호
전남대학교 해양융합과학과

Spatio-temporal Variations of Marine Environments and Phytoplankton Community in the Gochang Coastal Waters (GCW) of Southern West Sea in Korea

Yang Ho Yoon

Dept. of Ocean Coverage Science, Chonnam National University

요약 고창 연안해역의 해양환경 및 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 변동 특성을 파악하기 위해 2016년 여름에서 2017년 봄까지 4계절 16개 정점을 조사하였다. 분석 결과, 수온은 표층에서 2.1℃에서 34.5℃의 범위로 큰 계절 변화를 보였지만, 염분은 표층에서 31.14 psu에서 32.64 psu의 범위로, 계절 변화가 크지 않아, 연안해역 수형은 수온에 지배되었다. Chl-*a* 역시 봄 최솟값 0.58 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 여름 최댓값 10.5 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 겨울에 높고, 가을과 봄에 낮았고, 큰 계절 변화를 보였다. 식물플랑크톤 군집은 53속 86종으로 단순하였다. 표층 현존량은 가을 최솟값 2.2 cells mL^{-1} 에서 여름 최댓값 689.2 cells mL^{-1} 의 변화 폭으로 여름에 높고, 가을에 낮았으나, 가을은 다른 계절보다 한 자릿수가 이상 낮았다. 우점종은 연중 규조류에 지배되어, 표층은 여름이 *Leptocylindrus danicus*, *Chaetoceros curvisetus*, *Skeletonema costatum*-ls, 가을은 *Paralia sulcata*, *Eucampia zodiacus*, 겨울은 *S. costatum*-ls, *Thalassiosira nordenskiöldii*, 그리고 봄은 *S. costatum*-ls, *Asterionella glacialis*가 우점하였다. 즉 고창 연안해역의 식물플랑크톤 군집은 다양성이 높지만, 연중 특정 종에 크게 지배되는 군집구조를 나타내었다. 주성분 분석 결과 고창 연안해역은 낮은 수심으로 복사열에 의해 쉽게 가열 및 냉각되며, 조석혼합 등 해수 혼합 특성으로 표층퇴적물의 재부유에 의한 영양염 공급으로 식물플랑크톤 시·공간 분포가 결정되었다.

Abstract This study conducted a seasonal survey to analyze the spatio-temporal variations of marine environments and phytoplankton community in Gochang Coastal Waters (GCW) from August 2016 to April 2017. In the results, the water temperature ranged from 2.1℃ to 34.5℃, showing a large seasonal variation, but the salinity changed from 31.14 psu to 32.64 psu. Therefore, the seasonal variations of water types in GCW were mainly determined by water temperature. The phytoplankton community consisted of 53 genera and 86 species, showing a relatively simple distribution. The phytoplankton cell density ranged from 2.2 to 689.2 cells mL^{-1} , with an average of 577.2 cells mL^{-1} , which was low in autumn and high in winter. The seasonal succession of phytoplankton dominant species was mainly diatoms during the whole year, *Leptocylindrus danicus*, *Chaetoceros curvisetus*, *Skeletonema costatum*-ls in summer, *Paralia sulcata*, *Eucampia zodiacus* in autumn, *S. costatum*-ls, *Thalassiosira nordenskiöldii* in winter, and *S. costatum*-ls, *Asterionella glacialis* in spring. In other words, the phytoplankton community showed high diversity in GCW throughout the year. According to the PCA, GCW were easily heated and cooled by radiant energy at lower depth, and the seasonal distributions of phytoplankton were determined by the supply of nutrients by re-fuelling of surface sediments due to the seawater mixing such as tidal mixing.

Keywords : GCW, Marine Environments, T-S Diagram, Phytoplankton Community, Dominant Species, PCA, Seawater Mixing

*Corresponding Author : Yang Ho Yoon(Chonnam National Univ.)

email: yoonyh@jnu.ac.kr

Received July 20, 2020

Accepted November 6, 2020

Revised August 26, 2020

Published November 30, 2020

1. 서론

연안해역은 육상에서 유입되는 무기원소 및 유기물에 의해 높은 기초생산으로 다양한 생물군에 의한 복잡한 생태구조는 물론 해역에 따른 해양환경 및 생태계의 반응도 복잡하며, 인류의 생활에 직접 관련되는 해역이다[1]. 연안해역은 전체 해양 표면적의 10%가 되지 않지만, 높은 기초생산[2]으로 대부분 해양생물자원 산란장, 성육장 및 서식지로서 가치가 높다[3]. 이러한 해양생태계에서 에너지 흐름은 식물플랑크톤이 태양에너지를 합성하는 광합성에서 출발한다[4]. 연안해역의 식물플랑크톤 성장은 육상이나 해역의 물질순환 과정에서 재생산되는 영양염류, 빛, 해수 유동, 포식압 등 물리·화학·생물학적 환경인자의 복합적인 작용으로 결정된다[5]. 때문에, 해역의 생태구조 및 해양환경특성을 파악하는데 식물플랑크톤 군집의 정보는 매우 유용하게 활용되며[6,7], 해양생태계 구조 파악에서 가장 기본이 되는 인자이다.

한국 연안해역은 해역에 따라 해양환경은 물론 식물플랑크톤 군집 및 물질순환 과정이 다른 특성을 나타낸다. 특히 3면의 바다로 둘러싸인 해양환경은 서로 다른 특성으로 동해는 해안선이 단조롭고 조석 차가 매우 작지만, 서해는 리아시스식 해안으로 복잡한 해안선과 매우 큰 조석 차를 가져 갯벌이 매우 발달되어 있다. 특히 서해는 동고서저의 한반도 지형특성으로 다량의 하천수가 유입되어, 다른 해역보다 염분이 낮다. 남해는 서해와 같은 리아시스식 해안으로 매우 복잡한 해안선 구조에 하고 있어, 반도 및 도서로 둘러싸인 내만해역이 발달하여, 수산생물의 서식 및 성육장은 물론 대규모 어류, 패류 및 해조류 양식장이 집중적으로 분포한다. 때문에 연안해역의 효율적인 이용과 관리, 그리고 보전을 위해서는 각 해역의 해양환경 및 생물해양 특성 등에 대한 기초자료 축적이 매우 중요하다. 그러나 우리나라 해양환경 등, 해양과학 연구는 주로 임해 공업단지 등 대규모 개발이 동반되는 해역을 중심으로 이루어져, 서해 남부해역은 남해, 동해, 그리고 서해 중부 해역에 비해 해양과학적 기초연구는 제한적이다.

특히 고창 연안해역은 발달된 갯벌환경으로 부안군과 고창군으로 둘러싸인 국내 최대 바지락 산지인 곰소만(=줄포만)이 위치한다[8]. 곰소만은 국내 람사르등록 습지로서 단일 최대 면적인 고창·부안갯벌(45.5 km²)이 위치하며, 대형 하천은 없지만, 주진천, 인천강, 갈곡천 등의 소형 지방하천을 통해 담수가 유입된다. 또한, 최근 고창 및 영광 연안해역에는 국내 최대의 해상풍력단지 개발이

추진되고 있어, 해역의 수산자원생물의 효율적 이용 및 관리는 물론 앞으로 풍력발전단지운영에 따른 해양환경의 관리 및 보전을 위해서도 해양과학적 기초자료가 요구되는 해역이다. 그러나 곰소만 및 고창 연안해역에서 실시된 기존의 해양과학적 연구는 매우 한정되어, 곰소만/줄포만의 갯벌환경 중심의 물리환경[9], 영양염 분포와 수지에 관한 화학 환경[10-12], 곰소만 퇴적물을 대상의 지질환경[13] 및 원생동물[14,15], 그리고 수산자원생물인 바지락 자원 및 서식지 평가[8,16,17] 등에 관한 일부 보고가 있다. 그러나 해양생태계의 저차영양단계를 구성하는 식물플랑크톤 군집에 관해서는 갯벌의 부착성 미세조류 연구[18], 색소분석에 의한 식물플랑크톤 해석[19] 및 지방하천에 대한 담수 식물플랑크톤 군집[20] 등의 결과는 있지만, 해양 표영환경의 식물플랑크톤 군집에 관한 연구는 찾기 어렵다.

이 연구는 고창 연안해역을 대상으로 기본적인 물리환경 및 해양생태계에서 에너지 흐름이 출발점이 되는 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 분포특성 및 변동 인자를 해석하여 보고한다.

2. 재료 및 방법

서해 남부 고창 연안해역 해양환경과 식물플랑크톤 군집의 시·공간 분포 특성 파악을 위한 조사는 2016년 여름(8월), 가을(11월), 2017년 겨울(2월) 및 봄(4월) 등 4회의 계절 조사를 하였다. 조사는 소형어선으로 16개 정점의 표층과 저층 해수(표층퇴적물 상부 2m 수층, B + 2)를 대상으로 하였다(Fig. 1). 정점 위치는 휴대용 GPS (Gelmen)로 확인하였으며, 그림 속 실선 영역은 대규모 서해풍력발전단지 예정해역이다.

해양환경으로 수온, 염분, sigma t (δ_t), 용존산소, 탁도, Chl-*a* 농도는 잠수형 형광광도계(JFE Advantech Co., Ltd, ASTD102)에 부착된 센서로 측정하였다. 식물플랑크톤 군집구조 파악을 위한 샘플은 반돈채수기(3L)로 채수하여, 폴리에틸렌 500 mL 용량의 샘플병에서 준비된 중성 포르마린으로 최종 농도가 0.4%가 되게 고정하였다[21]. 고정된 표본은 실험실에서 플라스틱 메스실린더를 이용하여, 단계별 48시간 이상 정지시켜 상등액을 제거하는 방법으로 4단계를 거쳐 50배 농축하여 검경 시료로 제공하였다[22]. 검경은 농축표본 0.1 mL를 1.0mm 간격의 가로 및 세로 선이 들어 있는 계수판(Rigosha, No. 5608-C)에서 커버글라스를 한 다음 미

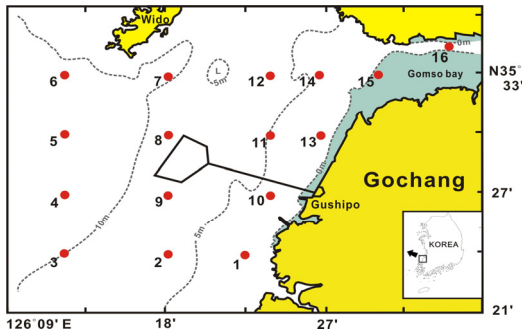


Fig. 1. Map of bathymetric and sampling stations in the Gochang Coastal Waters (GCW). (Solid line indicates the planned site of wind power complex)

분간섭장치(DIC)가 장착된 광학현미경(Nikon, Eclipse 80i)으로 100X~400X 배율에서 종의 동정과 계수를 하였다. 종 동정은 식물플랑크톤 도감[23-27]과 분류논문을 참고하였고, 분류체계 및 종명은 World Register of Marine Species (WoRMS, www.marinespecies.org)을 기준으로 정리하였다. 검경 자료를 이용하여 식물플랑크톤 종조성, 현존량 및 우점종을 도출하였고, 아래 식의 생태지수는 Primer 6 프로그램을 이용하여 산출하였다.

- 다양도지수: $H' = -\sum P_i \times \ln(P_i)$ [28], P_i : i 번째 종 점유율
- 풍부도지수: $R = (S - 1)/\ln(N)$ [29], S : 출현 종수, N : 총 출현 세포수
- 균등도지수: $J = H'/\ln(S)$ [30]
- 우점도지수: $D = (Y_1 + Y_2)/Y$ [31], Y : 총 세포수, Y_1, Y_2 : 첫째 및 둘째 우점종 세포수

그리고 식물플랑크톤의 분류군 및 5% 이상의 우점종을 보이는 우점종, 출현 종수 등 식물플랑크톤 관련 인자 및 측정된 환경자료를 이용하여 주성분분석을 하였다. 주성분분석은 SPSS 20 프로그램으로 누적 기여율 70%를 기준으로 계산하였다[32,33]. 계산된 주성분의 인자 부하량으로 고창 연안해역의 생물해양학 특성을 결정하는 환경인자의 파악과 함께 식물플랑크톤 분류군 및 우점종의 출현특성을 해석하였다. 그리고 계산된 득점으로 고창 연안해역의 해역특성을 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해양환경

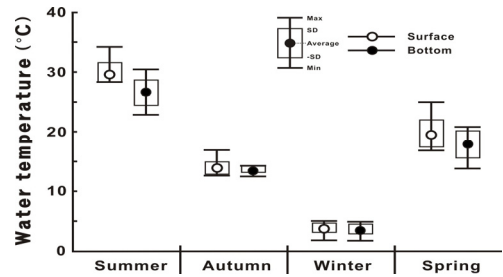


Fig. 2. Seasonal variation of water temperature in the GCW.

3.1.1 수온, 염분 및 수형 분포

수온은 표층에서 겨울 최솟값 2.1°C에서 여름 최댓값 34.5°C의 범위로, 그 차이는 32.4°C로 매우 크게 나타났으며, 저층은 2.1~30.7°C의 범위에서 28.6°C의 수온 차이를 보여, 수층 간 수온 차는 3.8°C를 나타내었다. 계절별 여름은 표층 28.6~34.5°C의 범위에서 $30.0 \pm 1.6^\circ\text{C}$ (평균 $\pm$ 표준편차, 이하 같음)의 변동 폭을, 저층은 23.3~30.7°C의 범위에서 $26.8 \pm 2.2^\circ\text{C}$ 의 변동 폭을 보여, 수층 사이에 수온 차는 3.2°C를 보였고, 공간 분포는 저층이 표층보다 큰 특징을 보였다. 가을 표층은 12.8~17.0°C의 범위로 $14.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 의 변동 폭을, 저층은 12.7~14.6°C의 범위로 $13.8 \pm 0.6^\circ\text{C}$ 의 변동 폭으로 수층간 혼합된 특성을 보였다. 겨울 표층은 2.1~5.2°C의 범위로 $3.9 \pm 0.8^\circ\text{C}$ 의 변동 폭을, 저층은 2.1~5.0°C의 범위로 $3.8 \pm 0.8^\circ\text{C}$ 의 변동 폭으로 잘 혼합된 특징을 보였다. 그리고 봄 표층은 17.0~25.3°C의 범위로 $19.8 \pm 2.3^\circ\text{C}$ 의 변동 폭을, 저층은 13.9~21.2°C의 범위로 $18.1 \pm 2.3^\circ\text{C}$ 의 변동 폭으로 수층 사이에 1.7°C의 수온 차로 가을보다 높았다. 즉 수온은 계절에 따른 변화 폭이 매우 크지만, 수층 사이의 수온 차는 여름을 제외하면 거의 없었다(Fig. 2).

염분은 표층에서 여름 최댓값 31.14 psu에서 봄 최솟값 32.64 psu, 저층이 31.19 psu(여름과 가을)~32.46 psu(봄)의 범위로서 표층과 저층의 계절 차이는 1.5 psu 및 1.27 psu로 작았다. 계절별 여름 표층은 31.14~32.14 psu의 범위로 31.55 ± 0.40 psu의 변동 폭을, 저층은 31.19~32.17 psu의 범위로 31.88 ± 0.31 psu의 변동 폭을 보여, 수층 사이에 0.33 psu의 차를 보였다. 가을 표층은 31.19~32.05 psu의 범위로 31.75 ± 0.25 psu의 변동 폭을, 저층은 31.19~32.10 psu의 범위로 31.79 ± 0.26 psu의 변동 폭을 보였으며, 겨울 표층은 31.59~32.27 psu의 범위로 32.08 ± 0.20

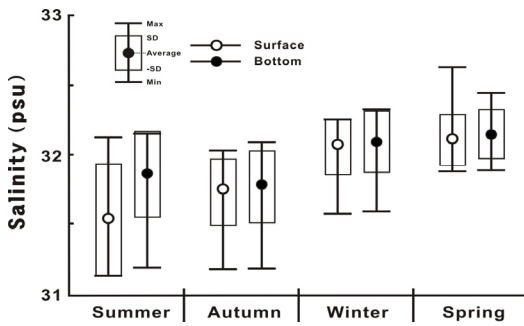


Fig. 3. Seasonal variation of salinity in the GCW

psu의 변동 폭을, 저층은 31.59~32.34 psu의 범위로 32.11 ± 0.22 psu의 변동 폭으로 가을과 겨울은 수층 사이가 잘 혼합된 특성을 보였다. 그리고 봄 표층은 31.88~32.64 psu의 범위로 32.12 ± 0.20 psu의 변동 폭을, 저층은 31.90~32.46 psu의 범위로 32.17 ± 0.17 psu의 변동 폭을 보여, 수층 사이 차이는 작았다. 즉 전 계절 염분 변화는 낮았으며, 수층 간에도 여름을 제외하면 거의 균일하였다(Fig. 3).

표층의 수온과 염분으로 T-S diagram에 의한 분석 결과, 수온은 계절에 따른 변화 폭이 크지만, 염분은 상대적으로 낮아서, 해수의 δ_t 는 수온에 지배되었다. 즉 여름은 수온과 염분의 변화 폭이 가장 큰 특징을 보여, 평균 염분은 31.55 psu, 수온은 30.0°C, δ_t 가 평균 19.14로 가벼운, 고온, 저염의 저밀도 해수 특성을 보였다. 가을은 염분이 31.75 psu로 여름보다 0.2 psu 증가하지만, 차는 작았고, 수온은 14.0°C로 여름보다 16.0°C 하강하여, δ_t 가 23.67로 여름보다 4.53 높은 저온, 저염의 고밀도 해수 특성을 보였다. 겨울은 염분이 32.08 psu로 가을보다 0.33 psu 증가하였으나, 수온은 3.9°C로 가을보다 10.1°C 하강하여, δ_t 가 25.47로, 저온, 저염의 고밀도 해수 특성을 보였다. 그리고 봄은 염분이 32.12 psu로 겨울보다 0.04 psu 상승하여 연중 가장 높지만, 수온이 19.8°C로 겨울보다 15.9°C로 급상승하여, δ_t 는 가을보다 낮은 22.60으로, 고온, 고염의 저밀도 해수 특성으로 계절에 따른 수형 변화가 비교적 명확하였다(Fig. 4).

서해의 수온 변화는 1.4~24.7°C의 범위로, 최솟값은 2월, 최댓값은 8월에 보지만, 연안해역은 강한 조석혼합으로 상대적으로 균일하다[34]. 고창 연안해역의 수온 변화도 서해의 이러한 경향과 유사하였지만, 최솟값과 최댓값은 모두 높았다. 특히 최댓값은 이상적인 결과를 보였다. 이는 고창 연안해역의 남부해역은 한빛원자력발전소의 온배수 영향을 받는 것과 해안선 가까운 낮은 수심해

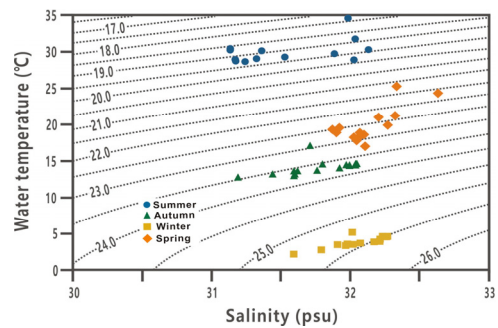


Fig. 4. Seasonal variation of water type by T-S diagrams of surface in the GCW.

역은 간조에 강한 복사열에 쉽게 수온이 영향을 받고 있기 때문이다.

염분은 강수량과 증발량, 그리고 담수 유입량 등에 영향을 받는다. 한반도의 동고서저의 지형특성은 서해로 연간 $1.2 \times 10^{11} \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ 의 담수가 다양한 하천으로 유입되어, 평균 32.84 ± 1.06 psu 범위의 염분으로 8월에 최솟값, 2월에 최댓값을 보여, 다른 해역보다 낮다[34,35]. 또한, 서해 하구역은 큰 조차를 보이는 조석 영향으로 낙조와 창조에 따라 경기만은 한 조석주기에 19.2~32.4 psu의 염분 변화가 일어진다[36]. 고창 연안해역의 염분도 전체적으로 서해의 염분 변화 폭을 나타내지만, 겨울보다 봄에 높은 염분을 나타내었다. 이는 서해 남부 목포연안에서 겨울보다 늦봄에서 초여름 최고 염분을 보이는 것과 유사하였다[37,38]. 서해의 대형 하천인 금강 하구역의 수괴 분석에서 수온 및 염분의 계절 변화가 분명하여, 수괴의 계절 변화도 명확한 것에 반해[39], 고창 연안해역은 대형 하천이 없어, 상대적으로 염분은 균일하나, 수온 변화가 수형의 계절 변화에 크게 영향을 주었다.

3.1.2 탁도

탁도는 표층에서 0.97~78.29 FTU의 범위, 저층은 1.66~99.75 FTU의 범위를 보여 계절 차는 표층이 77.32 FTU , 저층이 98.09 FTU 로 매우 큰 폭을 나타내었다. 계절별 여름은 표층이 0.97~5.67 FTU의 범위로 $2.11 \pm 1.60 \text{ FTU}$ 의 변동 폭을, 저층은 1.66~8.49 FTU의 범위로 $3.77 \pm 2.20 \text{ FTU}$ 의 변동 폭을 보여, 투명도가 높은 해수 특성을 보였다. 가을 표층은 3.29~20.21 FTU의 범위로 $9.42 \pm 4.76 \text{ FTU}$ 의 변동 폭을 보였고, 저층은 5.19~87.18 FTU의 범위로 $23.70 \pm 24.87 \text{ FTU}$ 의 변동 폭을 보여, 해역에 따라 혼탁한 해수 특성을 보였다. 겨울

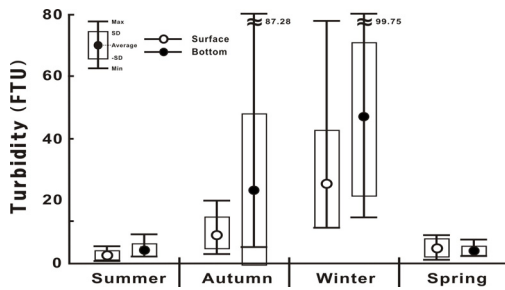


Fig. 5. Seasonal variation of turbidity in the GCW.

표층은 $11.50 \sim 78.29$ FTU의 범위로 25.91 ± 16.92 FTU의 변동 폭을, 저층은 $14.40 \sim 99.75$ FTU의 범위로 46.73 ± 25.08 FTU의 변동 폭을 보여, 전체적으로 해수가 혼탁하였다. 그리고 봄 표층은 $1.26 \sim 8.70$ FTU의 범위로 4.54 ± 2.48 FTU의 변동 폭을 보였고, 저층은 $5.61 \sim 22.43$ FTU의 범위로 12.15 ± 4.92 FTU의 변동 폭을 보여, 상대적으로 투명도가 높은 해수 특성을 보였다(Fig. 5).

서해에 형성되는 강한 조석 전선으로 서해 연안해역은 상대적으로 혼탁한 해수 특성을 보이며[40,41], 계절적으로는 여름에 조석전선이 탁월한 것이 보고 된다[42]. 그러나 고창 연안해역의 탁도는 여름과 봄보다 가을과 겨울에 높았다. 이러한 결과는 낮은 수심으로 조석 전선에 의한 혼합 이외에도 바람에 의한 혼합 등으로 표층퇴적층이 쉽게 재부유하기 때문이다.

3.1.3 Chlorophyll a 농도(Chl-a)

Chl-a 농도 변화는 $0.58 \mu\text{g L}^{-1}$ (봄)~ $10.5 \mu\text{g L}^{-1}$ (여름)의 범위로 매우 큰 계절변동을 보였다. 계절별 여름 표층은 $0.97 \sim 3.81 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 $1.83 \pm 0.86 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭을, 저층은 $1.21 \sim 10.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 $4.21 \pm 2.63 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭을 보였고, 가을 표층은 $0.90 \sim 1.92 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 $1.33 \pm 0.32 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭을, 저층은 $1.02 \sim 4.87 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 $1.79 \pm 1.44 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭을 보였다. 겨울 표층은 $1.03 \sim 5.70 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 $2.77 \pm 1.44 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭을, 저층은 $1.45 \sim 5.70 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 $3.51 \pm 1.25 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭을 보였으며, 봄 표층은 $0.58 \sim 3.10 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 $1.52 \pm 0.70 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭을, 저층은 $2.18 \sim 7.49 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 $3.53 \pm 1.35 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭을 보여, 표층은 겨울에 높고, 가을과 봄에 낮았지만, 저층은 겨울과 여름에 높고 가을에 낮았다. 그리고 전 계절 평균은 표층보다 저층에서 높은 Chl-a 농도를 나타내었다(Fig. 6).

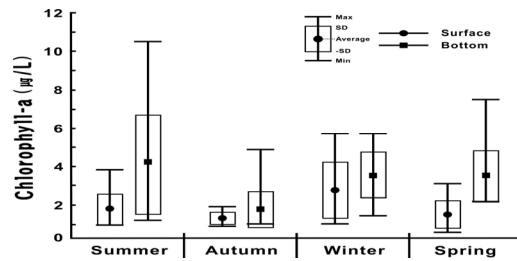


Fig. 6. Seasonal variation of chlorophyll a concentration in the GCW.

공간 분포는 여름 표층이 남동해역 및 곰소만 입구에서 $2.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상으로 높았고, 북서해역 및 중앙부에서 $2.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하로 낮았다. 저층은 표층과 다르게 남부해역에서 $5.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상으로 높았고, 북쪽해역은 $2.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하로 낮았다(Fig. 7A). 가을 표층은 북서해역에서 $1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하로 낮았으나, 곰소만 입구에서 $1.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상으로 높았으며, 중앙부 및 남부해역은 $1.0 \sim 1.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도를 보였다. 저층은 표층과 다르게 남부해역에서 $2.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상으로 높았고, 중앙부에서 북서해역은 $1.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하로 낮았지만, 곰소만 입구 및 내만해역은 표층과 같이 $1.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상으로 높았다(Fig. 7B). 겨울 표층은 연중 가장 높은 농도로 곰소만 입구에서 내만해역에 걸쳐 $4.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상으로 높았고, 중앙부 및 북서해역에서 $2.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하로 낮았다. 저층은 봄과 유사한 농도로 남부해역에서 곰소만 내만해역에 걸쳐 $3.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상으로 높았고, 북서해역에서 $2.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하로 낮았다(Fig. 7C). 그리고 봄 표층은 남부해역 및 5m 등심선 이내의 연안부에서 $1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상의 상대적 높은 농도를 보이지만, 중앙부 및 북서해역은 $1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하로 낮았다. 그러나 곰소만 내만해역은 $2.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상의 높은 농도를 보였다. 저층은 표층과 다르게 북서 및 남부해역에서 $4.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 전후로 높았고, 중앙부에서 $3.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하로 낮았지만, 정점 1에서 $7.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상의 높은 Chl-a 농도 패치 분포가 관찰되었다(Fig. 7D, lower).

고창 연안해역의 Chl-a 농도는 서해에서 부영양화된 인천 연안해역이나 새만금 방조제 전면의 고군산군도 해역에서 각 $1.32 \sim 19.35 \mu\text{g L}^{-1}$ [34] 및 $3.82 \sim 13.36 \mu\text{g L}^{-1}$ [43]에 비해 낮지만, 경기만($1.32 \sim 2.63 \mu\text{g L}^{-1}$)[44], 천수만($0.81 \sim 4.78 \mu\text{g L}^{-1}$)[45] 및 영광 연안해역($1.71 \sim 5.88 \mu\text{g L}^{-1}$)[46]의 결과와는 비슷하였다. 그러나 겨울 목포 신안해역의 $0.81 \sim 2.09 \mu\text{g L}^{-1}$ [47]보다는 높았다. 서해는 전체적으로 남해보다 Chl-a 농도가 높으며, 이는 기초생산의 높은 것으로 연결된다[48]. 고창 연안해역에서 표층보

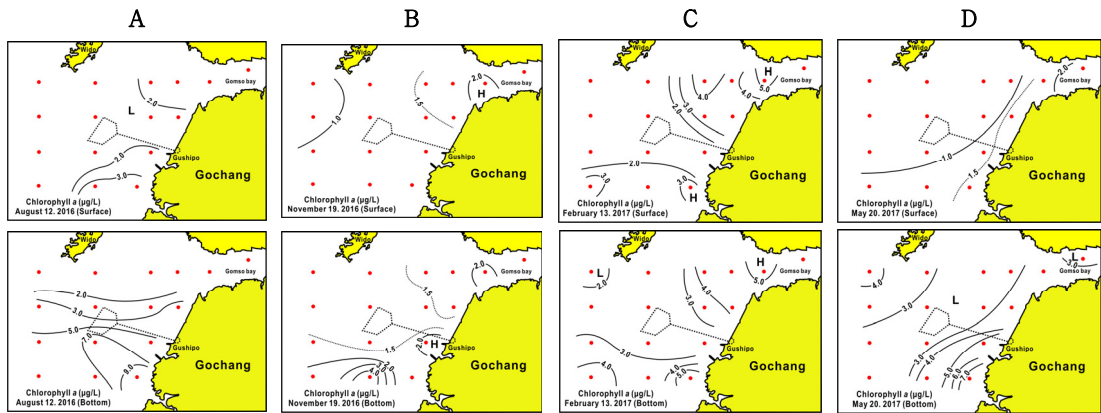


Fig. 7. Spatio-temporal variations of chlorophyll *a* concentration at surface (upper) and bottom (lower) in the GCC.

다 저층에서 높은 Chl-*a* 농도를 보이는 것은 큰 조석 차에 의해 조석혼합 등에 의한 강한 해수 혼합과 낮은 수심으로 표층퇴적물 재부유되어 표영 환경으로 유입되고 있기 때문으로[47], 이런 현상은 한국 연안해역에서 겨울 및 수온 상승기에 쉽게 관찰된다[48].

3.2 식물플랑크톤 군집

3.2.1 종조성

고창 연안해역에 출현이 확인된 식물플랑크톤 종은 53속 86종으로 단순하였다. 분류군은규조류가 33속 56종으로 65.1%, 와편모조류가 15속 25종으로 29.1%, 유글레나조류가 1속 1종으로 1.2%, 규질편모조류가 3속 4종으로 4.6%의 점유율을 나타내었다(Fig. 8). 시간적 변화는 여름에 41속 65종으로 규조류가 28속 44종, 와편모조류가 12속 20종, 그리고 규질편모조류가 1속 1종으로 상대적 다양하였다. 봄과 가을은 각 31속 46종과 33

속 44종으로 유사하였으며, 겨울은 35속 39종으로 가장 단순하였다. 공간적으로는 표층이 4~28종, 저층이 8~32종의 범위로, 여름은 16~28종의 범위로 21.8 ± 3.42 종의 변동 폭을, 저층은 19~32종의 범위로 24.0 ± 3.65 종의 변동 폭을 보였다. 가을은 5~15종의 범위로 10.0 ± 3.14 종의 변동 폭을(저층, 8~18종에 12.8 ± 3.31 종), 겨울은 11~21종의 범위로 16.6 ± 2.66 종의 변동 폭(저층, 11~17종에 14.3 ± 1.96 종)을, 그리고 봄은 4~22종의 범위로 11.9 ± 5.41 종의 변동 폭(저층, 10~23종에 14.6 ± 3.39 종)을 보여 가장 다양하게 출현하였다. 특히 겨울은 여름보다 와편모조류의 출현 종수가 급격하게 감소하였다(Fig. 9). 즉 여름은 다른 계절에 비해 와편모조류 출현 종이 다양하였고[48]. 수층별로는 여름에 저층에서 비교적 다양한 규조류가 출현하여, 표층보다 높은 출현 종수를 보인 것을 제외하면, 기타 계절은 표층이 저층보다 출현 종수가 많았다. 그리고 연간 규조류에 의한 출현 비율이 높았지만, 여름과 가을에는 와편모조류 및 규

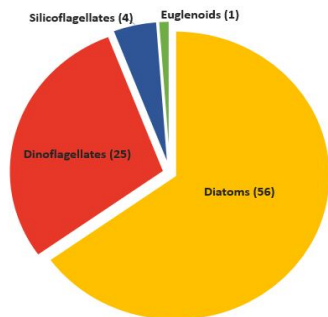


Fig. 8. Phytoplankton species composition in the GCW.

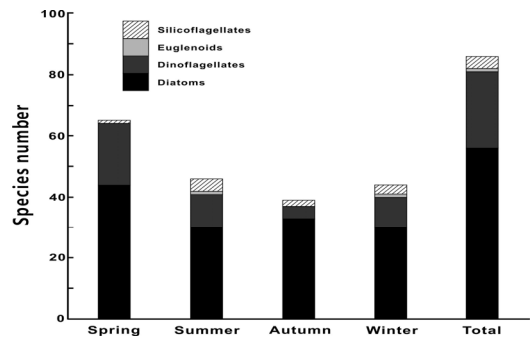


Fig. 9. Seasonal variations of phytoplankton species composition in the GCW.

질편모조류의 출현 종수가 상대적으로 다양하였다[48].

고창 연안해역에 출현한 86종의 식물플랑크톤 종수는 상대적으로 단조로웠다. 즉 서해의 경기만 228종[36], 천수만 262종[45], 금강 하구역 233종[49], 만경강 및 동진강 하구역 160종[50], 영광 연안해역 364종[51]에 비해 매우 낮은 값이다. 새만금 방조제 외곽에 위치하는 고군산군도 해역의 104종[43]보다도 낮지만, 목포 연안해역의 시아해 36종[52]보다는 높았다. 즉 식물플랑크톤 출현 종수는 해역, 시기 및 연구자에 따라 동일해역에 대해서도 많은 차이를 보였다. 특히 비교한 다양한 종이 출현한 기존 문헌은 채수법으로 정량분석을, 네트법으로 정성분석을 하고 있어, 출현 종수의 단순 비교는 어렵다. 서해에 출현하는 식물플랑크톤은 담수종에서 외양종까지 매우 다양하며, 전체적으로 규조류가 75.2~89.7%로 출현하며, 와편모조류는 겨울 6.6%에서 여름 19.1%로 증가하는 것을 보고하고 있지만[36], 고창 연안해역은 규조류가 65.1%로 낮았고, 와편모조류가 29.1%로 상대적으로 높은 점유율을 나타내었다. 그러나 출현 종수의 차이로 해역의 환경특성을 단순 비교하기는 어렵지만, 고창 연안해역은 상대적으로 다른 서해 해역에 비해 상대적으로 균일한 해양환경 특성을 보이는 것으로 판단되었다. 전체 출현 종수는 낮았지만, 식물플랑크톤 군집은 한국의 연안해역은 규조류에 의한 점유율이 높다는 결과와는 유사하였다[43,48,53].

고창 연안에 4계절 관찰된 종은 규조 11종, *Actinocyclus senarius*, *Ch. curvisetus*, *Coscinodiscus gigas*, *C. waileisii*, *Dictyulum brightwellii*, *Leptocylindrus danicus*, *Pleurosigma directum*, *P. normanii*, *Skeletonema costatum*-ls, *Thalassionema nitzschioides*, *Thalassiosira nordenskiöldii*, *Th. rotula*이고, 3계절 관찰된 종은 *Asterionella glacialis*, *Bacteriastrum hyalinum*, *Chaetoceros danicus*, *Ch. peruvianus*, *Cylindrotheca closterium*, *Eucampia zodiacus*, *Neodelphineis pelagica*, *Nitzschia longissima*, *Odontella sinensis*, *Planktoniella blanda*, *Rhizosolenia seriata*, *Thalassiosira subtilis* 등 12종의 규조와 와편모조 *Dinophysis acuminata*, *Scrippsiella trochoidea*, *Tripes kofoidii* 3종과 2종의 규질편모조 *Dictyocha fibra*, *Octactis otonarius* 등 17종으로 3계절 이상 출현한 종은 28종이었다. 이 중 *Ch. curvisetus*, *Ch. danicus*, *D. brightwellii*, *L. danicus*, *N. longissima*, *S. costatum*-ls, *E. zodiacus*, *D. fibra* 8종은 서해의 토착성 식물플랑크톤 종

[51,53]이며, *A. senarius*, *O. sinensis* 2종은 임시 부유종[53], 그리고 *Ch. peruvianus*는 난수성 외양종[34]으로 보고된다. 그러나 출현한 종에서 규조 *N. pelagica* 및 *P. blanda*를 제외하면 한국 연안해역에서 쉽게 관찰되는 종이며, 고창 연안해역에서 지속적으로 *N. pelagica* 및 *P. blanda*가 출현하는 것은 이례적이었다. 3계절 이상 출현한 종수는 동해[7], 서해[43] 및 남해[48]에 비해 많지는 않았다.

3.2.2 현존량

세포 밀도로 표현한 식물플랑크톤 현존량은 표층에서 2.2 cells mL⁻¹(가을)~689.2 cells mL⁻¹(여름), 저층은 9.2 cells mL⁻¹(가을)~2,415.6 cells mL⁻¹(여름)으로 변화하여, 표·저층 모두 시간적으로 두 자릿수 이상의 차를 보였다. 계절 변화는 여름 표층이 76.4~689.2 cells mL⁻¹의 범위로 394.6±202.4 cells mL⁻¹의 변동 폭을 보였고, 저층은 68.6~2,415.6 cells mL⁻¹에서 422.7±610.4 cells mL⁻¹의 변동 폭을 보였다. 가을 표층은 2.2~17.2 cells mL⁻¹의 범위로 8.9±4.9 cells mL⁻¹의 변동 폭을, 저층은 9.2~27.2 cells mL⁻¹에서 15.1±5.4 cells mL⁻¹으로 변화했다. 겨울 표층은 41.6~516.66 cells mL⁻¹에서 176.3±119.7 cells mL⁻¹의 변동 폭, 저층은 60.2~303.0 cells mL⁻¹에서 167.4±86.5 cells mL⁻¹의 변동 폭을 보였으며, 봄은 4.6~660.0 cells mL⁻¹에서 129.2±208.3 cells mL⁻¹의 변동 폭, 저층은 17.85~768.2 cells mL⁻¹에서 193.2±211.6 cells mL⁻¹의 변동 폭을 보여, 표·저층 모두 여름에 높고, 가을에 낮았지만, 가을은 다른 계절에 비해 한 자릿수가 이상 낮은 현존량을 보였다. 표준편차에 의한 현존량의 공간변화는 봄에 가장 크게 나타났다(Fig. 10).

시·공간 분포는 여름 표층이 Chl-a 농도 분포와 다

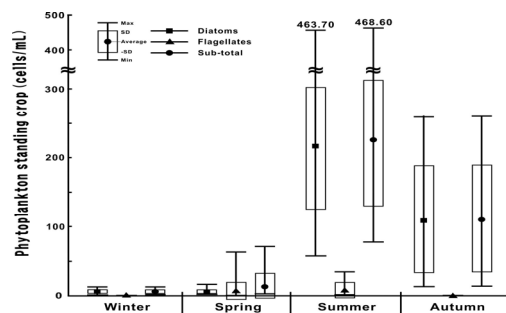


Fig. 10. Seasonal variations of phytoplankton standing crop in the GCW.

르게 *L. danicus*가 우점한 북서해역과 *Ch. curvisetus*가 우점한 남동해역에서 500 cells mL⁻¹ 전후의 현존량을, 중앙부에서 북동해역에 걸쳐 300 cells mL⁻¹ 이하의 현존량을 보였다. 저층은 표층과 다르게 정점 3 및 해안선 주변에서 300 cells mL⁻¹ 이상으로 높았고, 중앙부는 200 cells mL⁻¹ 전후로 낮았다(Fig. 11A). 가을 표층은 낮은 현존량으로 여름에 높았던 북서해역 및 남부해역이 10 cells mL⁻¹ 이하로 낮았지만, 곰소만 내만해역은 15 cells mL⁻¹ 이상으로 높았고, 중앙부는 10~15 cells mL⁻¹의 범위의 현존량을 나타내었다. 저층은 중앙부에서 15 cells mL⁻¹ 이하로 낮았고, 곰소만 입구에서 20 cells mL⁻¹ 이상으로 높았다(Fig. 11). 겨울 표층은 남서해역에서 100 cells mL⁻¹ 이하로 낮았지만, 곰소만 입구에서 내만해역에 걸쳐 300 cells mL⁻¹ 이상으로 높았다. 저층은 곰소만 입구 및 내만해역에서 200 cells mL⁻¹ 이상으로 높았지만, 해안선에서 멀어질수록 감소하여 서부해역에서는 100 cells mL⁻¹ 이하로 낮았다(Fig. 11). 그리고 봄은 다른 계절과 달리 해안선 가까운 해역에서 500 cells mL⁻¹로 높았지만, 해안에서 멀어질수록 현존량은 급감하여 중앙부에서 북서해역에 걸쳐 10 cells mL⁻¹ 이하로 낮아졌다. 저층은 표층과 유사하여 정점 1 cells mL⁻¹에서 700 cells mL⁻¹ 이상의 높은 패치 분포가 관찰되었으며, 이 정점에서 멀어질수록 현존량은 급감하여 북서해역에서 100 cells mL⁻¹ 이하로 낮아졌다(Fig. 11D).

고창 연안해역의 식물플랑크톤 현존량인 2.2~2,415.6 cells mL⁻¹의 범위는 1980년대 천수만의 48.0~3,720.0 cells mL⁻¹[54], 군산 연안해역 15.0~5,451.0 cells mL⁻¹[55]이나, 최근 금강하구역 143~12,016 cells

mL⁻¹[49] 및 10.0~2,904 cells/mL[39], 고군산군도 96~10,000 cells mL⁻¹[43]에 비하면 낮지만, '80년대 경기만 1.6~1,753.5 cells mL⁻¹[53], 군산 연안해역 200.0~2,331.5 cells mL⁻¹[56], '90년대 영광 연안해역 428.7~2,292.8 cells mL⁻¹[46], 시아해 6.4~630 cells mL⁻¹[52]에 비하면 비슷하거나 높다. 그러나 금강하구역 및 고군산군도 해역에 비해서는 최댓값으로 자릿수가 다른 차이를 보였다. 서해의 식물플랑크톤 현존량은 부영양화가 진행된 일부 남해 내만해역을 제외하면, 동해나 남해 연안해역에 비해 높다[7,48]. 해역에 따른 식물플랑크톤 현존량의 차이는 육상에서 연안해역으로 유입되는 영양염 등 무생물환경의 차이로, 한반도 지형특성으로 서해에 담수유입이 많기 때문이다[35]. 그러나 서해 연안해역은 강한 조석혼합으로 봄과 가을에 온대해역에서 관찰되는 식물플랑크톤 대발생[57,58]은 관찰되지 않았고, 도리어 담수 유입이 상대적으로 많고, 조석 전선이 발달한 여름에 높은 현존량을 보였다[41]. 이런 결과는 개방해역과 연안해역의 영양염 공급원의 차이에서 발생하는 현상으로, 연중 영양염 공급이 충분한 부영양화 해역 및 내만해역에서 쉽게 관찰된다[32,47].

또한, 계절에 따라 양상에 차이는 있지만, 고창 연안해역의 식물플랑크톤 현존량과 Chl-*a* 농도 사이에 회귀직선 관계가 성립되지 않은 것은 연안해역에서 자주 관찰되는 내용[32,48,59]으로 식물플랑크톤 군집의 우점종의 단위세포 당 Chl-*a* 함량의 차이[48,60], 동일 종에서도 영양염 공급시기에 따른 세포 크기 및 체적의 차이[61-63], 그리고 성장곡선에서 성장기 및 쇠퇴기의 위치 차이 등 다양한 원인으로 발생한다. 한편으로 기후변화와

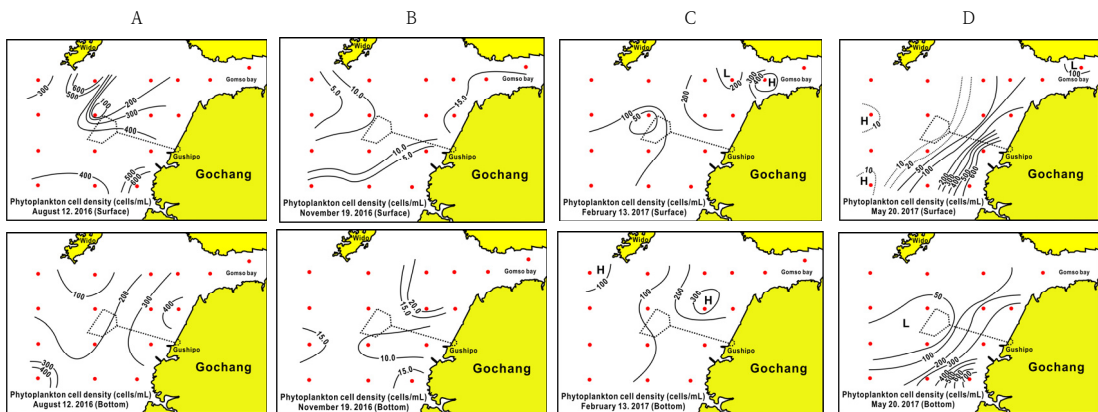


Fig. 11. Spatio-temporal variations of phytoplankton cell density at surface (upper) and bottom (lower) in the GCC.

영양염 공급의 급격한 변화에 따라 광학현미경으로 관찰하기 어려운 초미소플랑크톤에 의한 점유율이 높아지는 현상이나, 포르마린 등의 표본 고정시약에 의해 일부 표본이 파괴되는 무각종의 점유율 등도 이러한 원인으로 작용된다[64,65]. 한국 연안해역의 식물플랑크톤 군집에서 미소식물플랑크톤보다 나노식물플랑크톤 점유율이 높은 것은 어렵지 않게 관찰된다[43,53,66-68].

3.2.3 우점종

온대해역 식물플랑크톤 군집의 우점종은 빛, 수괴의 안정도, 영양염의 공급 등 물리·화학적 환경 인자의 변화에 동반하여 해수 혼합으로 표층에 영양염이 공급되는 봄과 가을에 규조가 우점하지만, 여름은 와편모조 등 식물성 편모조류로 천이되는 것이 알려진다[58,60]. 그러나 고창 연안해역 식물플랑크톤 군집은 연중 규조류가 우점하였다. 즉 여름 표층은 *L. danicus*, *Ch. curvisetus* *S. costatum*-ls가 각 29.0%, 24.3% 및 11.2%의 순으로 우점하였고, 저층은 *Ch. curvisetus*, *D. pumila*가 각 30.9% 및 12.2%의 우점율로 우점하여, 수층에 따라 우점종이 다르게 출현하였다. 여름 10% 이하의 우점율로 출현한 우점종은 표층이 *D. pumila*, 저층이 *L. danicus*, *E. zodiacus*, *S. costatum*-ls, *Rh. delicatula*, *Rh. phuketensis* 등이었다(Table 1). 가을은 여름과 달리 표층은 *P. sulcata* 및 *E. zodiacus*가 각 17.4%와 7.4%의 우점율을 보였고, 저층은 *P. sulcata* 및 표층에서 우점하지 않았던 *Ch. curvisetus*가 각 23% 및 16.9% 우점율을 나타내었다(Table 1). 겨울 표층은 *S. costatum*-ls와 *Th. nordenskiöldii*가 각 34.4%와 33.9%로 우점하였고, 가을 우점종 *P. sulcata* 및 *As.*

*glacialis*가 5% 이상의 우점율을 보였다. 저층은 *S. costatum*-ls 우점율이 41.3%로 높아졌고, *Th. nordenskiöldii* 우점율은 24.4%로 낮아졌으며, 표층에서 9.4%의 우점율을 보였던 *P. sulcata* 우점율도 13.6%로 높아졌지만, 표·층 모두 *S. costatum*-ls와 *Th. nordenskiöldii*에 의해 극우점 되었다(Table 1).

또 봄 표층은 겨울 우점했던 *S. costatum*-ls와 *A. glacialis*가 각 43.0%와 28.3%로 우점하였고, 저층은 우점 순위가 바뀌어 각 28.8% 및 33.6%로 우점하였으며, 기타 *Th. nordenskiöldii*가 표층과 저층에서 9.8% 및 13.6%로 우점하였다(Table 1). 다만 봄은 정점에 따른 우점종의 출현이나 해역에 따른 식물플랑크톤 현존량 차이가 매우 큰 특성을 나타내었다.

일반적으로 영양염 공급이 원활한 하구역이나 연안해역의 식물플랑크톤 군집을 구성하는 우점종은 상대적 대형인 *Dictylum*, *Rhizosolenia*, *Thalassiosira* 등이 우세하며[69], 무생물환경의 급격한 변화[70]로, 종 천이가 빠르다[71]. 고창 연안해역의 우점종 변화를 비교할 자료는 없지만, 우점종 대부분은 한국 연안해역에 쉽게 관찰되는 종이었다. 여름 표층 최우점종인 *L. danicus*는 범세계적으로 분포하는 종으로, 온대해역의 봄 식물플랑크톤 군집의 주요 구성원으로 대발생 한다[72]. 국내 에도 영광 연안해역에서 연중 출현하며[51], 목포 시아해는 겨울과 봄에 우점 출현하지만[52], 서해에서 높은 우점율을 기록한 사례는 거의 없다. 다만 천수만에서 *Leptocylindrus minimum*이 봄에 극우점하였고[55], 남해 진해만은 봄 80% 이상의 우점율로 극우점하였다[73]. 그리고 여름 표층의 차우점종으로 저층에 최우점한 *Ch. curvisetus* 역시 범세계적으로 분포하는 종으로, 여

Table 1. Seasonal variations of dominant species and dominance at surface and bottom layers in GCW

Dominant specis	Dominance (%)							
	Summer		Autumn		Winter		Spring	
	Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom
<i>Asterionella glacialis</i>					6.3	4.4	28.3	33.6
<i>Chaetoceros curvisetus</i>	24.3	30.9	2.5	16.9				
<i>Ch. danicus</i>			2.6	4.6				
<i>Dentonula pumila</i>	8.6	12.2						
<i>Eucampia zodiacus</i>		7.9	7.5	-				
<i>Leptocylindrus danicus</i>	29.0	8.5						
<i>Paralis sulcata</i>			17.4	23.0	9.4	13.6		
<i>Rhizosolenia delicatula</i>		5.2						
<i>Rh. phuketensis</i>		5.0						
<i>Skeletonema costatum</i> -ls	11.2	6.4			34.4	41.3	43.0	28.8
<i>Thalassionema nitzschioides</i>							9.8	13.6
<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i>					33.9	24.4		

를 대발생이 보고된다[74], 국내도 영광 연안해역에서 연중 출현하며[51], 천수만은 여름에 최우점하였고[54], 고군산군도 해역은 높은 우점율은 아니나, 가을에 우점하였고[43], 남해 진해만은 5월 최우점하였다[73]. 그리고 여름 저층과 가을 표층에서 낮은 우점율로 우점하는 *E. zodiacus*는 저수온기 남해에 주로 우점 출현하는 종으로[33], 일본 내만 및 연안해역에서 김 성장이 활발한 겨울 적조를 발생시켜 김을 변색시켜 상품 가치를 낮추는 원인종으로[75], 여름 우점 출현하는 것은 이례적이지만, 서해 금강 하구해역에서도 여름 우점 출현이 보고된다[39]. 가을에 표층과 저층에서 20% 우점율 수준으로 최우점한 *P. sulcata*는 온대해역의 기수 및 해수에 폭 넓게 분포하며, 연안퇴적층의 환경지표종 이용된다[76]. 서해에서 일반적으로 관찰되는 임시 부유종으로 경기만에서 *S. costatum*이 높은 우점율을 보이는 여름과 초가을을 제외하면, 연중 최우점하며[36], 천수만에서도 비교적 높은 우점율로 출현한다[54]. 또한, 영광 연안해역은 연중 출현하며[51], 목포 시아해에서 여름과 가을 극우점 하였다[52]. 여름에 낮은 우점율로 우점하지만, 겨울과 봄에 최우점하는 *S. costatum*-s는 범지구적 규모로 출현하는 대표적 연안 부영양화 지표종[77]으로 국내 내만 및 연안해역에서 수시로 관찰된다. 서해 경기만은 *P. sulcata*의 우점율이 높은 겨울을 제외한 기간 높은 우점율로 출현하였고[53], 천수만도 연중 우점하지만, 특히 5월과 6월에 최우점하였다[54]. 금강하구 및 군산연안해역에도 연중 출현하지만, 겨울[49]과 봄[39]에 극우점하며, 고군산군도 해역은 가을과 겨울 최우점하였다[43]. 그리고 영광 연안해역은 연중 출현하며, 목포 시아해는 겨울과 봄 최우점하였다[52], 남해 진해만은 시기에 따라

다르지만, 전 계절 우점하는[73] 등 해역에 따라 우점하는 계절이 다르다. 겨울 표층에 30% 이상으로 차우점한 *Th. nordenskiöldi*는 저수성 종으로 알려졌다, 최근 온대 및 아열대까지 널리 분포하며[78], 국내에도 동, 서, 남해 모두에서 관찰되지만[79], 우점종으로 기록된 사례는 거의 없다. 다만, 서해 금강하구역[39] 및 고군산군도 해역에서 겨울 최우점한 것이 보고되었다[43]. 그리고 봄에 높은 우점율을 보인 *A. glacialis*는 저수온기 남해 내만 및 연안해역에 우점 출현[48]. 그러나 서해는 남부 목포 연안해역인 시아해에서 겨울 우점한 것을 제외하면, 거의 우점 기록이 없다. *A. glacialis*는 아열대 용승해역인 인도 벵골만에서 3월과 4월 4.0×10^4 cells mL^{-1} 의 대발생이 보고된다[80].

3.2.4 생태지수

생태지수는 주로 생물군집의 구조특성 파악에 이용된다. 고창 연안해역의 표층 자료에 대한 생태지수를 살펴보면, 다양성 지수는 여름과 가을에 3.044 ± 0.156 및 2.242 ± 0.345 의 변동 폭을 보였으며, 겨울과 봄에는 2.743 ± 0.174 및 2.362 ± 0.465 의 변동 폭을 나타내어, 여름에 높고, 가을과 봄에 낮았다. 풍부도 지수는 여름과 가을에 4.049 ± 0.549 및 2.169 ± 0.599 의 변동 폭을 나타내었으며, 겨울과 봄은 3.134 ± 0.425 및 2.447 ± 0.943 의 변동 폭으로 다양성 지수와 같이 여름에 높고, 가을과 봄에 낮았으며, 특히 가을에 매우 낮았다. 균등도 지수도 여름과 가을에 0.992 ± 0.003 및 0.996 ± 0.001 의 변동 폭을 나타내었고, 겨울과 봄은 0.991 ± 0.001 및 0.993 ± 0.003 의 변동 폭으로 전 계절 균일한 분포를 보였다. 그리고 우점도 지수는 여름과 가

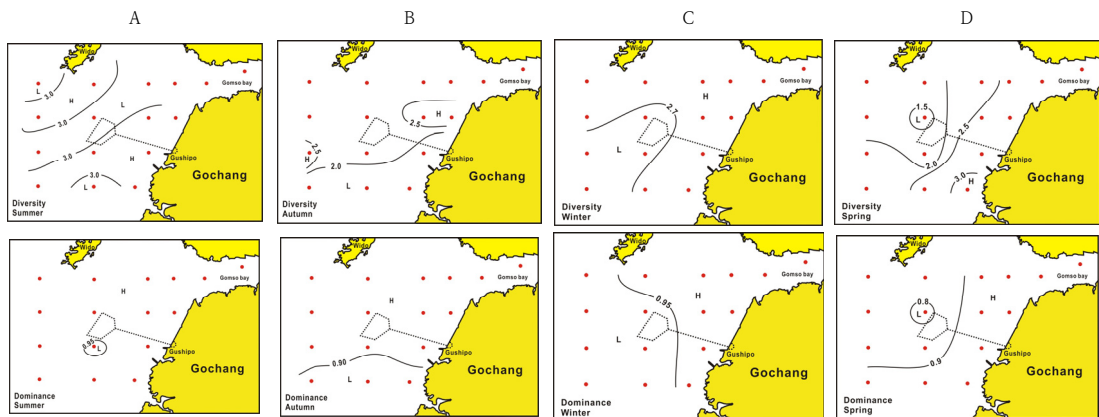


Fig. 12. Spatio-temporal variations of diversity (upper) and dominance (lower) at surface in the GCC.

을 0.956 ± 0.007 및 0.903 ± 0.036 의 변동 폭을 보였고, 겨울과 봄은 0.941 ± 0.011 및 0.906 ± 0.049 의 변동 폭을 보여, 전 계절 높은 우점도 지수를 나타내었다.

다양성 지수의 시·공간 분포는 여름 중앙부의 3.0 이하 값을 제외하면, 전체적으로 3.0 이상의 높은 지수를 보였다(Fig. 12A upper). 가을은 낮은 출현 종수와 현존량으로 4계절 중 가장 낮은 값으로 곰소만 입구에서 위도에 거친 북부해역에서 2.5 이상의 값을 보였고, 곰소만 내만해역 및 남서해역은 2.5 이하의 값을 보이나, 남부해역은 2.0 이하로 더욱 낮았다(Fig. 12B upper). 겨울은 강한 해수 혼합으로 대부분 해역에서 2.5~2.8 범위의 균일한 지수를 보이나, 곰소만 내만해역은 2.9 이상을, 중앙부 정점 8은 2.5 이하로 낮았다(Fig. 12C upper). 그리고 봄은 패치 분포를 보이는 정점 1에서 3.0 이상을 제외하면, 수심이 얇은 해안선에서 중앙부에서 2.5 이상을, 그리고 상대적으로 수심이 깊은 북서해역에서 2.0 이하로 낮았다(Fig. 12D upper).

우점도 지수는 여름 중앙부 정점 18에서 0.95 이하를 제외하면, 대부분 해역에서 0.95 이상으로 균일하였다(Fig. 12A lower). 가을도 전체적으로 높은 지수로 남부해역에서 0.90 이하를, 그리고 그 외 해역에서 0.90 이상의 높은 지수를 보였다(Fig. 12B lower). 겨울 역시 높은 지수로 중앙부의 남북선을 기준으로 서부해역은 0.95 이하를, 동부해역 및 내만해역은 0.95 이상으로 높았다(Fig. 12C lower). 그리고 봄 역시 높은 지수로 겨울보다 다소 오른쪽으로 확장된 중앙부 남북선을 기준으로 서부해역은 0.90 이하로 낮았고, 동부해역은 0.90 이상으로 높았지만, 해안선 주변의 5m 등심선 이하는 0.95 이상으로 높았다. 그러나 중앙부 정점 18은 0.8 이하로 낮은 지수를 나타내었다(Fig. 12D lower).

서해 남부의 고창 연안해역 식물플랑크톤 군집의 생태 지수 변화를 비교, 검토할 자료는 충분하지 않다. 2010년 금강 하구역의 자료[49]와 2018년 금강 하구해역을 대상으로 하였던 자료[39], 그리고 거제 연안해역에 대한 자료[81]를 대상으로 비교하였다. 즉 고창 연안해역의 다양성 지수는 평균 2.242(가을)~3.044(여름)의 범위에서 평균 2.598로서 2010년 금강 하구역의 1.04(겨울)~2.49(봄)의 범위로 평균 1.722이나, 2018년 거제도 연안의 월 변화에서 0.729(1월)~3.301(7월)의 범위로 평균 2.127보다는 훨씬 높은 값이지만, 2018년 금강 하구해역의 2.595(가을)~3.248(겨울)의 범위에서 평균 2.960보다는 다소 낮은 값으로, 출현 종수는 낮지만, 건전한 식물플랑크톤 군집구조를 보였다. 우점도 지수는

0.903(가을)~0.856(여름) 범위로 0.927로 2010년 금강 하구역의 0.42(봄)~0.85(겨울)에서 평균 0.668로 2018년 거제 연안해역의 0.462(12월)~0.861(11월)의 범위로 0.623 및 2018년 금강 하구해역의 0.573(겨울)~0.811(봄)에서 평균 0.682보다 높은 지수로, 고창 연안해역의 식물플랑크톤 군집은 다양성을 높지만, 연중 종은 다르지만, 특정 종에 지배되는 군집구조를 보였다.

3.3 식물플랑크톤 군집의 출현특성

표층의 환경인자와 식물플랑크톤 인자를 이용하여 계산된 주성분 분석은 여름 $Z=5.711Z_1+2.902Z_2+1.690Z_3$ 로 제3 주성분까지 누적기여율 73.6%, 가을 $Z=5.472Z_1+3.145Z_2+2.051Z_3$ 로 제3 주성분까지 누적기여율 76.2%, 겨울 $Z=7.737Z_1+2.260Z_2+1.478Z_3$ 로 제3 주성분까지 누적기여율 77.9%, 그리고 봄 $Z=7.858Z_1+3.229Z_2+1.105Z_3$ 로 제3 주성분까지 누적기여율 87.1%이었다. 제1 및 제2 주성분까지 누적기여율은 여름 61.5%, 가을 61.6%, 겨울 68.0%, 그리고 봄 79.2%를 나타내어, 주성분의 해석은 제2 주성분까지만 해석하였다(Table 2). 여름 인자부하량 분포에서 제1 주성분에 강한 양의 관계는 수온과 탁도, *D. pumila*, 그리고 Chl-*a* 농도와 약한 양의 관계를 보이나, δ_t 에 강한 음의 관계를 보이는 것에서, 낮은 수심에 강한 복사열로 높은 수온[58] 및 해수 혼합으로 표층퇴적물이 재부유하여 높은 탁도[41]를 보이는 5m 등심선 이하 해역의 환경특성을 나타내는 지표로 보았다. 제2 주성분은 *Ch*

Table 2. A results by principal component analysis (PCA) on the marine environments and taxon, dominant species of phytoplankton community in the GCW

Seasons		Principal Component		
		1st	2nd	3rd
Summer (Aug. 2016)	Eigenvalue	5.711	2.902	1.690
	Proportion(%)	40.8	20.7	12.1
	AP(%)	40.8	61.5	73.6
Autumn (Nov. 2016)	Eigenvalue	5.472	3.145	2.051
	Proportion(%)	39.1	22.5	14.6
	AP(%)	39.1	61.6	76.2
Winter (Feb. 2017)	Eigenvalue	7.937	2.260	1.478
	Proportion(%)	52.9	15.1	9.9
	AP(%)	52.9	68.0	77.9
Spring (May 2017)	Eigenvalue	7.858	3.229	1.105
	Proportion(%)	56.1	23.1	7.9
	AP(%)	56.1	79.2	87.1

AP : Accumulative proportion(%)

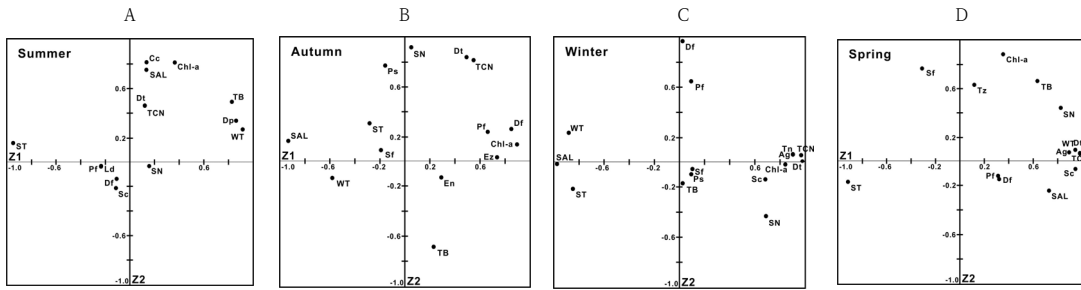


Fig. 13. Spatio-temporal variations of loading factors by PCA in the GCC.(Chl-*a*: chlorophyll *a*, Df: dinoflagellates, Dt: diatoms, En: Euglenoides, Pf: phytoflagellates, Sf: silicoflagellates, SN: species number, SAL: salinity, ST: sigma-t, TB: turbidity, TCN: total cell number, WT: water temperature, Ag: *Asterionella glacialis*, Cc: *Chaetoceros curvisetus*, Dp: *Dentonula pulima*, Ez: *Eucampia zodiacus*, Ld: *Leptocylindrus danicus*, Ps: *Paralia sulcata*, Sc: *Skeletonema costatum*-ls, Tn: *Thalassiosira nordenskioldii*, Tz: *Thalassionema nitzschioides*)

curvisetus, 염분, Chl-*a* 농도와 강한 양의 관계, *S. costatum*-ls와 식물성 편모조류와 약 한 음의 관계를 보이는 것에서, 식물플랑크톤 생물량 및 활성[57]을 나타내는 지표로 보았다(Fig. 13A). 가을은 제1 주성분에 *E. zodiacus* 및 Chl-*a* 농도, 식물성 편모조류 등이 강한 양의 관계를 보이며, 염분과 강한 음의 관계를, 그리고 δ_t 와 약한 음의 관계를 보이는 것에서, 높은 식물플랑크톤의 생물량 및 활성[57]을 나타내는 지표로 보았다. 제2 주성분은 출현 종수, *P. sulcata*, 규조류 및 전체 식물플랑크톤과 강한 양의 관계를, 탁도와 강한 음의 관계를 보이는 것에서, 상대적 외해 환경특성을 나타내는 지표로 보았다(Fig. 13B). 겨울은 제1 주성분에 전체 식물플랑크톤, 규조류, *A. glacialis*, *Th. nitzschioides*, *S. costatum*-ls, Chl-*a* 농도, 출현 종수 등에 강한 양의 관계를 나타내며, 수온, 염분 및 δ_t 등의 환경인자에 강한 음의 관계를 보이는 것에서, 식물플랑크톤의 높은 생물량 및 활성[57]을 나타내는 지표로 보았다. 제2 주성분은 식물성 편모조류에 강한 양의 관계를, 수온과 약한 양의 관계를 보이지만, 출현 종수, 탁도, 해수 밀도 등의 환경인자에 약한 음의 관계를 보이는 것에서, 상대적 고수온인 외해 환경특성을 나타내는 지표로 보았다(Fig. 13C). 그리고 봄은 제1주

성분에 전체 식물플랑크톤, 규조류, *A. glacialis*, *S. costatum*-ls 및 종수, 수온, 염분에 강한 양의 관계를 보이나, δ_t 등 환경인자에 강한 음의 관계를 보이는 것으로 식물플랑크톤 생물량 지표로 보았다. 제2 주성분은 Chl-*a* 농도, 우점종 *Th. nordenskioldii* 및 탁도에 강한 양의 관계를 보이나, 염분 및 식물성 편모조류에 약한 음의 관계를 보이는 것에서, 낮은 수심의 높은 생물량의 연안환경 지표로 보았다(Fig. 13D).

인자부하량 분포에서 여름 우점종 *D. pumila*는 낮은 수심에 조석혼합 등으로 해저에서 공급되는 영양염에 의존 하는 부분이 크지만, *Ch. curvisetus*는 비교적 고염인 외해 환경을 선호하며[74], 여름 고창 연안해역의 식물플랑크톤 생물량 및 활성을 지배하였다. 그리고 *L. danicus*와 *S. costatum*-ls는 연안 혼탁수와 외해 해수가 혼합된 해역을 선호하였다. 가을 우점종은 혼탁한 환경보다 상대적으로 맑으면서 저온, 저염의 환경을 선호하며, Chl-*a*는 세포 밀도가 높은 규조보다, 단위세포 당 Chl-*a* 함량의 높은 식물성 편모조류[60]와 대형 규조 *E. zodiacus*[75]에 크게 영향을 받았다. 그리고 *P. sulcata*는 낮은 탁도에, 상대적 고염인 외해 환경을 선호하였다. 겨울 식물플랑크톤 현존량은 해안선에 인접한 등심선 5

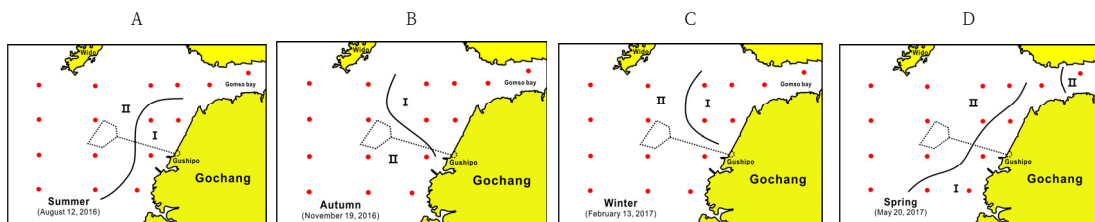


Fig. 14. Spatio-temporal variations of the separation of sea area by PCA score in the GCC.

m 이하의 천해역에 집중되었다. 이들 해역의 환경은 복사냉각으로 저온에 해수 혼합으로 표층퇴적물이 재부유하여 영양염 공급이 양호한 환경이다[41]. 그리고 Chl-*a*는 우점 규조류 영향을 강하게 받으며, 낮은 출현량을 보였던 식물성 편모조류는 상대적 높은 수온에 탁도가 낮은 외해 환경을 선호하였다[57]. 그리고 봄은 전체 식물플랑크톤, 규조류, *As. glacialis*, *S. costatum*-ls 등은 상대적 높은 수온 및 염분의 환경을 선호하지만, Chl-*a*는 이들 우점종보다 *Th. nordenskiöldii*에 더욱 큰 영향을 받았다[39].

주성분 분석 특점에 의한 해역 구분은 여름이 제1 주성분 기여율 40.8%를 기준으로 양의 영역에 낮은 수심과 *D. pumila* 우점으로 특징되는 정점군 I과 상대적 외해 환경특성으로 *L. danicus* 우점 및 식물성 편모조류 출현이 비교적 높은 정점군 II로 구분되었다. 정점군 I은 등심선 5 m 이하의 해안선 주변 해역이 해당되며, 정점군 II는 상대적으로 외해쪽 해역을 포함하였다(Fig. 14A). 가을은 기여율 39.1%인 제1 주성분 양의 영역으로 *E. zodiacus* 우점 및 높은 Chl-*a* 농도와 식물성 편모조류 세포 밀도로 특징되는 정점군 I과 높은 수온과 탁도, 그리고 *P. sulcata* 우점으로 특징되는 제1 주성분 음의 영역인 정점군 II로 구분되었고, 정점군 I은 곰소만 입구에서 내만해역이, 그리고 정점군 II는 곰소만 외역이 해당되었다(Fig. 14B). 겨울은 기여율 52.9%인 제1 주성분, 즉 전체 식물플랑크톤, 규조류, *A. glacialis*, *Th. nitzschoides*, *S. costatum*-ls 및 높은 Chl-*a* 농도로, 비교적 다양한 종 출현 특성을 보이는 양의 영역인 정점군 I과 높은 수온, 염분 및 δ_t 등으로 특징되는 음의 영역인 정점군 II로 구분되었고, 정점군 I에는 가을과 같이 곰소만 입구에서 내만해역이 해당되고, 정점군 II에는 곰소만 외역이 해당되었다(Fig. 14C). 그리고 봄은 기여율 56.1%인 제1 주성분 양의 영역으로 높은 수온과 염분, 그리고 높은 식물플랑크톤 현존량과 Chl-*a* 농도의 특성을 보이는 정점군 I과 낮은 수온과 높은 δ_t 에 상대적 식물플랑크톤 종조성의 단순하면서, 낮은 현존량을 나타내는 음의 영역인 정점군 II로 구분되었다. 정점군 I은 여름과 같이 등심선 5 m 이하의 천해해역이 해당되었으며, 정점군 II에는 곰소만 내만해역과 상대적 외해 영향이 강한 해역이 해당되었다(Fig. 14D).

이러한 결과에서 고창 연안해역은 낮은 수심으로 복사열에 의해 쉽게 가열 및 냉각되는 것은 물론 육상에서 유입되는 대규모의 하천이 없어, 염분의 계절 변화는 크지 않아, 수온에 의해 해양환경이 지배되는 특성을 나타내었

다. 또한, 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 분포는 조석 혼합과 같은 해수 혼합으로 표층퇴적물의 재부유에 의한 영양염류 공급 등으로 높은 다양성을 나타내지만, 특정 종에 의해 우점되는 특성을 나타내었다.

References

- [1] UNEP, "Marine and Coastal Ecosystems and Human Wellbeing: A Synthesis Report Based on the Findings of the Millennium Ecosystem Assessment," UNEP, pp. 1-76, 2006.
- [2] J. H. Ryther, "Photosynthesis and fish production in the sea," Science, vol. 166, no. 3901, pp. 72-76, Oct. 1969. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.166.3901.72>
- [3] R. D. Seitz, H. Wennhage, U. Bergström, R. N. Lipcius and T. Ysebaert, "Ecological value of coastal habitats for commercially and ecologically important species," ICES J. Mar. Sci., vol. 71, no. 3, pp. 648-665, Mar./Apr. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1093/icesims/fst152>
- [4] H. Street and A. Paytan, "Iron, phytoplankton growth, and the carbon cycle," Met. Ions Biol. Syst., vol. 43, pp. 153-193, Feb. 2005. DOI: [10.1201/9780824751999.ch7](https://doi.org/10.1201/9780824751999.ch7)
- [5] J. Severiano, A. Moura, E. Magalhães and V. Almeida, "Study about top-down and bottom-up controls in regulating the phytoplankton biomass in a eutrophic reservoir in northeastern Brazil," J. Water Res. Prot., vol. 4, no. 8, pp. 616-621, Jan. 2012. DOI: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.48071>
- [6] M. Garmendia, Á. Borja, J. Franco and M. Revilla, "Phytoplankton composition indicators for the assessment of eutrophication in marine waters: Present state and challenges within the European directives," Mar. Poll. Bull., vol. 66, no. 1-2, pp. 7-16, July 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.10.005>
- [7] H. Yoon, "Bio-environmental characteristics of the Uljin Marine Ranching Area (UMRA), East Sea of Korea. 1. Spatio-temporal distributions of phytoplankton community," J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, vol. 19, no. 1, pp. 37-46, Feb. 2016. DOI: <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2016.19.1.37>
- [8] H. S. Lim, "Growth of the manila clam (*Ruditapes philippinarum*) cultured in Gomso tidal flat, Korea," Korean J. Malacol., vol. 32, no. 3, pp. 189-195, Sept. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.9710/kim.2016.32.3.189>
- [9] S. H. Lee, Y. K. Cho, K. W. You, Y. G. Kim and H. Y. Choi, "Structure and variation of tidal flat temperature in Gomso bay, west coast of Korea," "The Sea" J. Korean Soc. Oceanogr., vol. 10, no. 1, pp.

- 100-112, Feb. 2005.
- [10] D. H. Kim and J. S. Yang, "Denitrification and COD, TN and SS fluxes in Komso bay, Korea," J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, vol. 4, no. 4, pp. 32-41, Nov. 2001.
- [11] J. S. Yang and Y. T. Kim, "The distribution of phosphorus in the Gomso bay tidal flat," 『The Sea』 J. Korean Soc. Oceanogr., vol. 7, no. 3, pp. 171-180, Aug. 2002.
- [12] J. S. Yang, K. H. Kim and Y. T. Kim, "Distribution of nitrogen compounds in seawater overlying the Gomso tidal flat," 『The Sea』 J. Korean Soc. Oceanogr., vol. 8, no. 3, pp. 251-261, Aug. 2003.
- [13] J. H. Chang, S. S. Chun and S. J. Kwon, "Sedimentary characteristics and evolution history of Chenier Gomso-Bay tidal flat, western coast of Korea," J. Oceanogr. Soc. Korea, vol. 28, no. 3, pp. 212-228, Sept. 1993.
- [14] B. K. Park and K. S. Lee, "Stable isotopic compositions of foraminifera of the tidal flat in the Gomso Bay of the western coast of Korea," J. Oceanogr. Soc. Korea, vol. 29, no. 2, pp. 183-187, June 1994.
- [15] H. S. Kim, Y. K. Kim, J. S. Yang and W. H. Yih, "Comparative population dynamics of photosynthetic Ciliate *Mesodinium rubrum* (= *Myrionecta rubra*) in Gomso bay and the Geum river estuary, Korea," 『The Sea』 J. Korean Soc. Oceanogr., vol. 9, no. 4, pp. 164-172, Nov. 2004.
- [16] S. Jeon, Y. S. Choi, Y. S. Cho, Y. T. Kim and Y. Choi, "Suitable site assessment using habitat suitability index for *Ruditapes philippinarum* in Gochang(Hajun), J. Korean Soc. Mar. Environ. Safety, vol. 21, no. 5, pp. 484-494, Oct. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.7837/kosomes.2015.21.5.484>
- [17] H. S. Kim, "Phytoplankton variability in digestive tract of the Manila clam *Ruditapes philippinarum* in Gomso Bay, west coast of Korea," Korean J. Malacol., vol. 32, no. 3, pp. 165-174, Sept. 2016.
DOI : <http://dx.doi.org/10.9710/kim.2016.32.3.165>
- [18] S. O. Chung, Y. S. Cho, Y. S. Choi, H. D. Jeung, J. H. Song and H. K. Han, "Spatio-temporal microalgal and environmental variations of the Hajeonri tidal flat, Gochang, Korea," Korean J. Environ. Ecol., vol. 29, no. 5, pp. 743-752, Oct. 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.13047/KJEE.2015.29.5.743>
- [19] Y. W. Lee, M. O. Park, H. Yoon and S. B. Hur, "Temporal and spatial variation of microalgal biomass and community structure in seawater and surface sediment of the Gomso Bay as determined by chemotaxonomic analysis," 『The Sea』 J. Korean Soc. Oceanogr., vol. 17, no. 2, pp. 87-94, May 2012.
DOI: <https://doi.org/10.7850/jkso.2012.17.2.087>
- [20] O. M. Lee, M. S. Yoo, B. I. Lee and A. S. Lim, "The distribution and standing crop of phytoplankton at the estuaries of Galgok stream and Incheon river in Jeollanam-do," Algae, vol. 23, no. 4, pp. 257-268, Dec. 2008.
DOI: <https://doi.org/10.4490/ALGAE.2008.23.4.257>
- [21] J. Throndsen, Preservation and storage. pp. 69-74. In: "A. Sournia (ed), Phytoplankton Manual, Unesco, Paris", 1978.
- [22] OSJ (The Oceanographic Society of Japan), "A Manual for Coastal Environmental Survey (Sediments and Biology)," Kouseisha- kouseikaku, Tokyo. pp. 1-280, 2008.
- [23] E. E. Cupp, "Marine plankton diatoms of the west coast of north America," Bull. Scripps Inst. Oceanogr. Univ. of California, vol. 5, pp. 1-237, 1943.
- [24] M. Chihara and M. Murano, "An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan," Tokai Univ. Press, Tokyo. pp. 1-1547, 1997.
- [25] C. R. Tomas, "Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates," Academic Press. Oxford, pp. 1-858, 1997.
- [26] G. M. Hallegraeff, C. J. S. Bolch, D. R. A. Hill, I. Jameson, J. M. LeRoi, A. McMin, S. Murray, M. F. de Salas and K. Saunders, "Algae of Australia: Phytoplankton of Temperate Coastal Waters," CSIRO Publ., Cambella, pp. 1-432, 2010.
- [27] T. Omura, M. Iwataki, V. M. Borja, H. Takayama and Y. Fukuyo, "Marine Phytoplankton of the Western Pacific," Kouseisha Kouseikaku. Tokyo. pp. 1-160, 2012.
- [28] C. E. Shannon, and W. Weaver, "The Mathematical Theory of Communication. Univ. Illinois, Press, Urbana," pp. 1-177, 1963.
- [29] R. Margalef, "Information theory in ecology," General Systems, vol. 3, 36-71, 1958.
- [30] E. C. Pielou, "The measurement of diversity in different types of biological collections," J. Theoretical Biol., vol. 13, pp. 131-144, Dec. 1966.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(66\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0022-5193(66)90013-0)
- [31] S. J. McNaughton, "Structure and function in California grassland," Ecol., vol. 49, no. 5, pp. 962-972, Sept. 1968.
DOI: <https://doi.org/10.2307/1936547>
- [32] Y. H. Yoon, "Environmental Analysis of Phytoplankton Growth in the Inland Sea of Japan with Special Reference to the Occurrence of Red Tide. Ph.D Thesis, Hiroshima Univ." pp. 1-361, 1989.
- [33] Y. H. Yoon, J. S. Park and B. S. Kim, "Spatial distributions of phytoplankton community in the coastal waters of South Sea, Korea during the early summer of 2018," Korean J. Environ. Biol. vol. 37n no. 2, pp. 164-176, June 2019.
DOI: <https://doi.org/10.11626/KJEB.2019.37.2.164>
- [34] J. K. Choi, J. H. Noh and Y. S. Kang, Distribution characteristics of phytoplankton in the West Sea of Korea. In: "J. K. Choi (ed.), The Plankton Ecology of

- Korean Coastal Waters, Donghwa Publ, Seoul", pp. 30-47, 2011.
- [35] J. H. Lee, B. W. An, I. K. Bang, H. J. Lie and J. Yang, Water and salt budgets for the Yellow Sea. pp. 221-234. In: "G.H. Hong, J. Zhang and C. S. Chung (eds.), Biogeochemical Processes in the Bohai and Yellow Sea, Dongjin Publ. Ass, Seoul", 1999
- [36] J. K. Choi and J. H. Shim, "The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. I. Environmental characteristics," J. Oceanol. Soc. Korea, vol. 21, no. 1, p. 56-71, Mar. 1986.
- [37] NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). " Climatic atlas of salinity in Korean waters (1966-1995), Pusan", 1997.
- [38] Y. H. Yoon, "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., vol. 18, no. 1, pp. 77-93, Mar. 2000.
- [39] H. S. Kim, H. Kim, D. Yang and Y. H. Yoon, "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., vol. 38, no. 2, pp. 254-270, June 2020. DOI: <https://doi.org/10.11626/KJEB.2020.38.2.254>
- [40] H. J. Lie, "Tidal fronts in the southeastern Hwanghae (Yellow Sea)," Continental Shelf Research, vol. 9, no. 6, pp. 527-546, June 1989. DOI: [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(89\)90019-8](https://doi.org/10.1016/0278-4343(89)90019-8)
- [41] M. T. Kwak, G. H. Seo, B. J. Choi, C. S. Kim and Y. K. Cho, " Sensitivity of simulated water temperature to vertical mixing scheme and water turbidity in the Yellow Sea," 「The Sea」J. Korean Soc. Oceanogr., vol. 18, no. 3, pp. 111 -121, August 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.7850/ikso.2013.18.3.111>
- [42] Y. J. Sun and Y. K. Cho, "Tidal front and its relation to the biological process in coastal water," Ocean Sci. J., vol 45, no. 4, pp. 243-251, Dec. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12601-010-0022-3>
- [43] Y. H. Yoon, "Spatio-temporal distributions of phytoplankton community in the coastal waters of Gogunsan Islands(CoWGs), West Sea of Korea," J. Korean Acad.-Ind.l coop. Soc., vol. 16 no.3, pp. 2287-2300, Mar. 2015. DOI : <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.3.2287>
- [44] Y. S. Kang, J. K. Choi, K. H. Chung and Y. C. Park, "Primary productivity and assimilation number in the Kyonggi Bay and the mid eastern coast of Yellow Sea," J. Oceanol. Soc. Korea, vol. 27, no. 3, pp. 237-246, Sept. 1992.
- [45] Y. K. Shin, J. H. Shim, J. S. Jo and Y. C. Park, "Relative significance of nanoplankton in Chunsu Bay: species composition, abundance, chlorophyll and primary productivity," J. Oceanol. Soc. Korea, vol. 25, no. 4, pp. 217-228, Dec. 1990.
- [46] Y. S. Kang and J. K. Choi, "Ecological characteristic of phytoplankton communities in the coastal waters of Gori, Wulseong, Uljin and Youngkwang. II. Distributions of standing crops and environmental parameters (1992-1996)," 「The Sea」 J. Korean Soc. Oceanogr., vol. 7, no. 3, pp. 108-128, Aug. 2002.
- [47] Y. H. Yoon, "Marine environments and production of laver farm at Aphae-do based on water quality and phytoplankton community," Korean J. Environ. Biol., vol. 32, no. 3, pp. 159-169, Sept. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.11626/KJEB.2014.32.3.159>
- [48] Y. H. Yoon, Marine environments and phytoplankton in the South-western Sea of Korea. In: "J. K. Choi (ed)., The Plankton Ecology in Korean Coastal Waters. Donghwa Publ.. Seoul". pp. 68-93, 2011.
- [49] Y. K. Shin, "An ecological study of phytoplankton community in the Geum river estuary. Korean," J. Ecol. Environ., vol. 46, no. 4, pp. 524-540, Dec. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.11614/KSL.2013.46.4.524>
- [50] J. H. Shim, Y. K. Shin and H. G. Yeo, "Abiotic environment and primary producer of estuarine pelagic ecosystem in the lower water of the Mankyung river and the Dongjin River I. Environmental characteristics and phytoplankton community structure," J. Oceano. Soc. Korea, vol. 26, no. 2, pp. 155-168, June 1991.
- [51] Y. S. Kang and J. K. Choi, "Ecological characteristic of phytoplankton communities in the coastal waters of Gori, Wulseong, Uljin and Youngkwang. I. Species composition and distribution (1992-1996)," Algae, vol 16. no. 1, pp. 85-111, Mar. 2001.
- [52] Y. H. Yoon, "On the seasonal variation of phytoplankton community in Shiahae, Westsouthern Korea," Korean J. Environ. Biol., vol. 16, no. 4, pp. 403-409, Dec. 1998.
- [53] J. K. Choi and J. H. Shim, "The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. III. Phytoplankton composition, standing crops, tycho pelagic plankton," J. Oceanol. Soc. Korea, vol. 21, no. 3, pp. 156-170, Sept. 1986.
- [54] J. H. Shim and H. G. Yeo, "Spatial and temporal variations of phytoplankton in Chonsu Bay," J. Oceano. Soc. Korea, vol. 23, no. 3, pp. 130-145, Sept. 1988.
- [55] W. H. Lee, G. H. Lee, M. S. Choi and D. M. Lee, "Phytoplankton and bacterioplankton in the intertidal and subtidal waters in the vicinity of Kunsan," J. Oceanol. Soc. Korea, vol. 24, no. 3, pp. 157-164, Sept. 1989.
- [56] J. H. Shim and S. J. Yoo, "Phytoplankton community off the coast of Kunsan, Korea," J. Oceanol. Soc. Korea, vol. 20, no. 1, pp. 31-42, Apr. 1985.
- [57] T. R. Parsons, M. Takahashi and B. Hargrave,

- "Biological Oceanographic Processes (3rd ed.). Pergamon Press, Oxford," pp. 1-330, 1984.
- [58] O. Muñiz, J. G. Rodríguez, M. Revilla, A. Laza-Martínez, S. Seoane and J. Franco, "Seasonal variations of phytoplankton community in relation to environmental factors in an oligotrophic area of the European Atlantic coast (southeastern Bay of Biscay)," *Reg. Studies Mar. Sci.*, vol. 17, pp. 59-72, Jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2017.11.011>
- [59] Y. H. Yoon, H. G. Rho and Y. K. Kim, "Seasonal succession of phytoplankton population in the Hamdok port, Northern Cheju Island. *Bull. Mar. Sci. Inst., Cheju Nat'l Univ.* vol. 16, pp. 27-42, Dec. 1992.
- [60] T. Honjo, T. Shimouse and T. Hanaoka, "A red tide occurred at the Hakozaki fishing port, Hakata Bay, in 1973. - The growth process and the chlorophyll content-," *Bull. Plankton Soc. Japan*, vol. 25, no. 1, pp. 7-21, July 1978.
- [61] H. J. Curl and G. C. Mcleod, "The physiological ecology of marine diatom, *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve," *J. Mar. Res.*, vol. 19, no. 2, pp. 70-88, Mar. 1961.
- [62] M. Türkoğlu, "Temporal variations of surface phytoplankton, nutrients and chlorophyll a in the Dardanelles (Turkish Straits System): a coastal station sample in weekly time intervals," *Turkish J. Biol.*, vol. 34, no. 3, pp. 319-333, Jan. 2010. DOI: [doi:10.3906/biy-0810-17](https://doi.org/10.3906/biy-0810-17)
- [63] H. M. Joo, J. H. Lee and S. W. Jung, "Correlations between cell abundance, bio-volume and chlorophyll a concentration of phytoplankton communities in coastal waters of Incheon, Tongyeong and Ulsan of Korea," *Korean J. Environ. Biol.*, vol. 29, no. 4, pp. 312-320, Dec. 2011..
- [64] M. Yamaguchi and I. Imai, "Size fractionated phytoplankton biomass and primary productivity in Osaka Bay, Eastern Seto Inland Sea, Japan," *Bull. Nansei Nat'l Fish. Res. Inst.*, vol. 29, pp. 59-73, Mar. 1996. <https://iss.ndl.go.jp/books/R100000002-1000000017825-00>
- [65] C. Guo, H. Liu, L. Zheng, S. Song, B. Chen and B. Huang, "Seasonal and spatial patterns of picophytoplankton growth, grazing and distribution in the East China Sea," *Biogeosci.*, vol. 11, pp. 1847-1862, Apr. 2014. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-11-1847-2014>
- [66] J. H. Shim, H. G. Yeo and J. G. Park, "Primary production system in the Southern waters of the East Sea, Korea I. Biomass and productivity," *J. Oceanol. Soc. Korea*, vol. 27, no. 2, pp. 91-100, June 1992.
- [67] H. G. Yeo and J. H. Shim, "Ecological effect of thermal effluent in the Korean Coastal Waters 3. Abiotic environment and the community structure of primary producers in the vicinity of Kori Nuclear Power Plant," *Korean J. Environ. Biol.*, vol. 10, no. 2, pp. 122-142, June 1992.
- [68] J. H. Shim, H. G. Yeo and Y. K. Shin, "Ecological effect of thermal effluent in the Korean Coastal Waters I. Significance of autotrophic nano and picoplankton in the adjacent waters of Kori nuclear power plant," *The Korean Society of Oceanography*, vol. 26, no. 1, pp. 77-82, Mar. 1991.
- [69] J. E. Cloern, "Why large cells dominate estuarine phytoplankton," *Limnol. Oceanogr.* vol. 63, no. S1, pp. S392-S409, Mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/lno.10749>
- [70] P. Bazin, F. Jouenne, T. Friedl, A. F. Deton-Cabanillas, B. Le Roy and B. Véron, "Phytoplankton diversity and community composition along the estuarine gradient of a temperate macrotidal ecosystem: Combined morphological and molecular approaches," *PLOS One* 9:e94110, Apr. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094110>
- [71] P. Vigil, P. Countway, J. Rose, D. J. Lonsdale, C. J. Gobler and D. A. Caron, "Rapid shifts in dominant taxa among microbial eukaryotes in estuarine ecosystems," *Aquat. Microb. Ecol.*, vol. 54, no. 1, pp. 83-100, Jan. 2009. DOI: [doi:10.3354/ame01252](https://doi.org/10.3354/ame01252)
- [72] R. Karthik, Padmavati G., S. Sai Elangovan and V. Sachithanandam, "Monitoring the diatom bloom of *Leptocylindrus danicus* (Cleve 1889, Bacillariophyceae) in the coastal waters of South Andaman Island," *Indian J. Geo Mar. Sci.*, vol. 46, no. 5, pp. 958-965, May 2017.
- [73] K. I. Yoo and J. H. Lee, "Environmental studies of the Jinhae Bay 3. Ecological succession of phytoplankton populations, 1974~1980," *J. Oceanol. Soc. Korea*, vol. 15, no. 2, pp. 100-107, Dec. 1980.
- [74] M. Begum, B. K. Sahu, A. K. Das, N. V. Vinithkumar and R. Kirubakaran, "Extensive *Chaetoceros curvisetus* bloom in relation to water quality in Port Blair Bay, Andaman Islands," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 187, no. 5, pp. 1-14, Apr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4461-2>
- [75] T. Nishikawa, Y. Hori, K. Tanida and I. Imai, "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* vol. 6, no. 6, pp. 763-773, Nov. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2007.04.005>
- [76] M. R. McQuoid and K. Nordberg, "The diatom *Paralia sulcata* as an environmental indicator species in coastal sediments," *Est. Coast. Shelf Sci.*, vol. 56, no. 2, pp. 339-354, Feb. 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00187-7](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00187-7)
- [77] Iizuka S., "The results of a survey of maximum densities in cell number of phytoplankton in coastal waters of Japan," *Bull. Plankton Soc. Japan*, vol. 32, no. 1, pp. 67-72, July 1985.
- [78] G. R. Hasle and E. E. Syvertsen, *Marine Diatoms*, pp.

- 5-385, In: "C.R. Tomas(ed.), Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates, Academic Press, San Diego, California", 1996.
- [79] J. S. Park, S. W. Jung, S. D. Lee, S. M. Yun and J. H. Lee, "Species diversity of the genus *Thalassiosira* (Thalassiosirales, Bacillariophyta) in South Korea and its biogeographical distribution in the world," *Phycol.*, vol. 55, no. 4, pp. 403-423, May 2016.
DOI: <https://doi.org/10.2216/15-66.1>
- [80] S. Mishra, G. Sahu, A. K. Mohanty, S. K. Singh and R. C. Panigrahy, "Impact of the diatom *Asterionella glacialis* (Castracane) bloom on the water quality and phytoplankton community structure in coastal waters of Gopalpur Sea, Bay of Bengal," *Asian J. Water, Environ. Poll.*, vol. 3, no. 2, pp. 71-77, Feb. 2005.
- [81] Y. H. Yoon, G. W. Baeck and H. Y. Soh, "Monthly variation characteristics of phytoplankton community in the inner bay of Southeastern Geoje Island, South Sea of Korea," *Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, vol. 28, no. 3, 126-133, Aug. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.7846/KOSMEE.2020.23.3.126>

윤 양 호(Yang Ho Yoon)

[정회원]



- 1986년 3월 : Nagasaki Univ. 대학원 수산학연구과 (수산학석사)
- 1989년 3월 : Hiroshima Univ. 대학원 생물권과학연구과 (학술박사)
- 1990년 3월 ~ 현재 : 전남대학교 해양융합과학과 교수

〈관심분야〉

연안환경생태, 적조생태, 해양환경복원, 어장환경회복