

영광 연안, 온배수 배출해역 수괴 및 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 변동 특성

윤양호
전남대학교 해양융합과학과

The Spatio-temporal Variations of Water Masses and Phytoplankton Community in the Yeonggwang Coastal Waters (YCW), Where Thermal Discharged

Yang Ho Yoon

Department of Ocean Integrated Science, Chonnam National University

요약 원자력발전소 온배수가 유입되는 서해 남부 영광 연안해역의 수괴 분포 및 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 변동 특성을 파악하기 위해 2017 봄에서 2018년 겨울까지 22개 정점을 계절 조사하였다. 결과, 표층 수온은 0.8°C에서 32.2°C로 계절 변화가 크게 나타났지만, 염분은 31.61 psu에서 32.86 psu로 계절 변동 폭이 낮아, 수괴의 계절 변화는 수온에 지배되었다. 엽록소 *a* 농도는 0.85 μgL^{-1} 에서 15.38 μgL^{-1} 범위로 가을에 높고 여름에 낮았으며, 식물플랑크톤 현존량 이외에 해수 혼합에 의한 표층퇴적물 재부유 등, 부유물질에 크게 영향을 받았다. 식물플랑크톤 군집은 55속 86종으로 단순하였고, 표층 현존량은 3.4-647.2 cells mL^{-1} 범위로서 계절 변동이 매우 큰 특징을 보였다. 우점종은 연중 구조류에 지배되어, 표층은 봄 *Asterionella glacialis*, *Skeletonema costatum*-ls, 여름 *Leptocylindrus danicus*, *Eucampia zodiacus*, 가을 *Pseudo-nitzschia pungens*, *Rhizosolenia flaccida*, 그리고 겨울 *Cerataulina bergonii*, *Coscinodiscus anguate-lineata*가 최우점 및 차우점하였다. 생태지수는 상대적으로 다양도 지수가 높았으나, 우점도 지수는 낮아, 식물플랑크톤 군집이 비교적 높은 다양성을 나타내었다. 즉 영광 연안해역에 배출되는 온배수는 식물플랑크톤 중 다양성 및 현존량에 강한 영향을 주고 있을 뿐만 아니라, 식물플랑크톤 변동성을 크게 하는 인자로서 작용하였다.

Abstract A survey was conducted to analyze the water masses and the spatio-temporal variations of the phytoplankton community at 22 stations on the surface and bottom layers of the Yeonggwang Coastal Waters (YCW). There were thermal discharges at the YCW by a nuclear power plant from May 2017 to February 2018. This analysis indicates that the water temperature ranged from 0.8°C to 32.2°C, showing differences of sizeable seasonal variation. But, the salinity changed from 31.61 psu to 32.86 psu on the surface. Therefore, the seasonal variations of water masses in YCW were mainly determined by the water temperature. The phytoplankton community consisted of 55 genera and 86 species, showing a relatively simple distribution. The phytoplankton standing crop ranged from 3.4 cells mL^{-1} (autumn) to 647.2 cells mL^{-1} (spring), with an average of 109.4 cells mL^{-1} . The average was low in autumn and high in summer. The seasonal succession of phytoplankton-dominant species was mainly diatoms during a year. In particular, the successions were *Asterionella glacialis*, *S. costatum*-ls in spring; *Leptocylindrus danicus*, *Eucampia zodiacus* in summer; *Pseudo-nitzschia pungens*, *Rhizosolenia flaccida* in autumn; and *Cerataulina bergonii*, *Coscinodiscus anguate-lineata* in winter. The ecological index showed relatively high diversity, but the dominance was low, indicating a relatively high diversity of the phytoplankton community. In other words, thermal discharge by the nuclear power plant strongly influences the phytoplankton's diversity and standing crop. In addition, thermal discharge acts as a factor that increases the volatility of the phytoplankton community in YCW.

Keywords : Yeonggwang Coastal Waters (YCW), Water Masses, Thermal Discharge, Phytoplankton Community, Dominant Species, Standing Crop, Diversity

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

email: yoonyh@jnu.ac.kr

Received January 13, 2022

Accepted April 1, 2022

Revised February 9, 2022

Published April 30, 2022

1. 서론

단일 시스템인 해양에서 연안해역은 10% 이하의 표면적을 나타내지만, 육상 및 저층에서 공급되는 풍부한 영양염으로 높은 기초생산력을 나타내기에, 해양생물 자원 대부분 이곳에서 생산된다[1]. 이런 이유로 연안생태계는 다양한 생물 종으로 복잡한 생태구조를 나타낼 뿐만 아니라 해양생물의 산란 및 서식장으로 가지는 기능이 매우 크다[2]. 또한 육상에서 다양한 인간의 산업활동에 의한 물질 역시 다량으로 유입되고 있어[3], 오염물질에 의한 해양환경 및 생태계 변화도 빈발하게 발생한다. 특히 해양생태계 저차영양단계를 구성하는 기초생산자인 식물플랑크톤 군집은 광합성에 의해 에너지를 합성하기에[4], 광량, 수온, 해수 유동 등의 물리 환경 및 육상에서 유입되거나, 해역의 물질 순환과정에서 재생산되는 영양염과 같은 화학적 무생물 환경인자가 복합적인 작용으로 성장 및 분포를 결정하게 된다[5]. 때문에, 연안해역의 식물플랑크톤 군집은 외부 환경 변화에 매우 민감하게 반응하기에, 발전소에서 배출되는 온배수 등 다양한 환경 변화에 따른 연안생태계 구조변화를 파악하는 유용한 방법이 된다[6,7].

원자력발전소 등 발전시설의 냉각수로 이용되어, 해역으로 유출되는 온배수는 연안 환경은 물론 생태계를 구성하는 식물플랑크톤에서 유영생물까지 다양한 생물군에 영향을 미치고 있다[8,9]. 온배수가 해양환경 및 생물군집을 포함한 생태계에 미치는 영향은 직접 수온을 상승시켜 생물의 서식 환경 및 생리 활동에 영향을 미치는 부분과 수온 상승으로 해수 성층화를 고착시켜 주변 환경 및 생물의 서식 환경, 그리고 어로 활동 등에 영향을 미치게 된다[10].

한빛원자력 발전소 온배수의 영향을 받는 영광 연안은 서해 남부에 위치하는 리아스식 해안으로 약 202 km의 해안선에, 새우 잡이배(=명탕구리배)로 유명한 낙월도, 자갈밭 해수욕장이 명물인 송이도, 꽃게잡이의 섬 안마도 그리고 조기잡이로 유명한 칠산도 등의 10여 개 유인도와 52개 무인도가 존재한다. 특히 범성포는 10세기(고려)부터 서남해의 중요 포구로 이용되었으며, 1970년대까지 칠산바다 조기 어장에 의한 파시가 형성될 정도로 중요한 어항이었다[11]. 특히 1980년 8월부터 상업 운전을 시작한 원자력발전소 운영에서 발생하는 온배수에 의해 천해역에서 성행하였던 김 양식에 막대한 피해가 발생하면서, 지역사회의 다양한 사회문제가 제기되 하였다.

이러한 영광 연안은 온배수 문제해결을 위한 다양한

해양학적 연구가 수행되었지만, 과학적 논문으로 발표된 자료는 매우 제한적이다. 영광 연안해역을 대상으로 한 연구논문은 온배수 배출 관련 연구[12], 표층퇴적물 퇴적상 연구[13] 등 환경 관련과 원전 주변 해역의 해조류 연구[14], 수산 동물 어획 관련 연구[15,16], 가마미 해수욕장의 부착 미세조류[17], 그리고 국내 원전 주변 해역의 식물플랑크톤 군집[18,19] 등의 생물군집에 관한 연구가 있지만, 온배수 확산과 관련한 식물플랑크톤 군집 동태에 관한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구는 한빛원자력발전소 온배수가 유입되는 영광 연안해역을 대상으로 온배수가 해양환경 및 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 변동에 미치는 영향을 고찰하여, 영광 연안해역의 온배수 배출에 따른 해양환경 보존과 수산업 및 해상풍력발전단지 등 미래 해양산업을 위한 해역의 효율적 이용과 관리에 필요한 자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

영광 연안 온배수 유입해역의 수괴 분석과 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 분포 특성을 파악하기 위한 조사는 2017년 봄(5월), 여름(8월), 가을(11월), 그리고 2018년 겨울(2월) 4회 조사를 수행하였다. 조사는 용선한 소형어선으로 22개 정점의 표층과 저층 해수(표층퇴적물 상부 2 m 수층, B+2 m)를 대상으로 하였다(Fig. 1). 정점 위치는 선박용 플로터로 확인하였고, 수심 5 m 미만인 정점은 저층 해수 채수를 생략하였으며, 온배수는 정점 21 주변 해역으로 유입된다.

해양환경 인자는 수온, 염분, 엽록소 *a* 농도를 잠수형

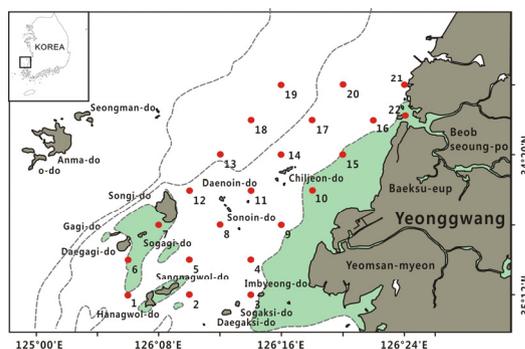


Fig. 1. Map of bathymetric and sampling stations in the Yeonggwang Coastal Waters(YCW), West Sea of Korea

형광광도계(JFE Advantech Co., Ltd, ASTD102)를 이용하여 연속 측정하였다. 식물플랑크톤 군집구조 및 사공간적 분포 특성을 파악하기 위한 표본은 채수법으로 정성 및 정량분석을 실시하였다. 채수는 용량 3 L인 반돈 채수기로 채수된 500 mL의 해수를 폴리에틸렌 시료병에 채집하여, 중성 포르말린으로 최종농도 0.4%가 되도록 고정하였다[20]. 고정한 시료는 실험실에서 플라스틱 메스실린더를 이용하여, 단계별 48시간 이상 정치시켜 상등액을 제거하는 방법을 반복하여, 최종농도가 10 mL가 되도록 50배 농축하였다[21]. 검경은 농축시료 0.1 mL를 pipetman (Gilson, France)으로 가로, 세로로 1.0 mm 간격의 선이 들어 있는 계수판(Rigoshia, No. 5608-C)에 취하여, 커버글라스를 한 다음 미분간섭장치(DIC)가 장착된 광학 현미경(Nikon, Eclipse 80i)으로 100X-400X 배율에서 종 동정과 계수를 하였다. 종 동정은 도감류[22-24]와 다양한 분류논문을 참고하였다. 그리고 많은 변화가 있는 종명은 World Register of Marine Species (WoRMS, www.marinespecies.org)를 기준으로 정리하였다. 검경 자료를 이용하여 식물플랑크톤 출현 종 조성, 현존량 및 우점종 등을 도출하였고, Primer program (Plymouth Routines in Multivariate Ecological Research)을 이용하여 생태지수에서 정점별 다양도 지수(H')와 우점도 지수(D)를 아래 계산식을 이용하여 산출하였다.

다양도 지수: $H' = -\sum P_i \times \ln(P_i)$ [25]

P_i : i 번째 종의 점유율

우점도 지수: $D = (Y_1 + Y_2) / Y$ [26]

Y : 총 세포 수,

Y_1, Y_2 : 첫 번째와 두 번째 우점종의 세포 수

또한, 식물플랑크톤 주요 분류군 및 5% 이상 우점종을 나타내는 우점종, 출현 종수 등 식물플랑크톤 관련 인자 및 CTD에서 측정된 수온, 염분, 탁도, 용존산소, 엽록소 a 농도 등의 환경자료를 이용하여 주성분 분석을 하였다. 주성분 분석은 통계프로그램 SPSS 20.0에서 누적 기여율을 70%를 기준으로 계산하였다[7,27,28]. 계산된 주성분 분석의 인자 부하량 및 득점 분포를 이용하여 영광 연안해역의 생물해양학 특성을 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해양환경 인자

3.1.1 수온, 염분 및 수괴 분포

영광 연안의 수온 변화는 표층이 겨울 0.8°C에서 여름 32.2°C 범위로 변화하여 31.4°C의 수온 차를 보였고, 저층은 겨울 0.7°C에서 여름 30.7°C 범위로 30.0°C 차이를 보였다. 계절별로 봄은 표층이 19.7-21.6°C 범위에서 19.7±1.1°C (평균±표준편차, 이하 같은 방법으로 표현) 변동 폭을 나타내었고, 저층은 16.6-21.5°C 범위에서 19.1±1.2°C 변동 폭으로 표층이 높았다. 여름 표층은 28.2-32.2°C 범위에서 28.9±1.6°C (저층 28.4±1.2°C) 변동 폭을, 가을 표층은 10.1-11.9°C 범위에서 11.7±0.4°C (저층 11.1±0.4°C) 변동 폭을 보였다. 그리고 겨울 표층은 0.8-3.6°C 범위에서 1.4±0.6°C (저층 1.2±0.5°C) 변동 폭으로 전 계절 표층과 저층 사이의 수온 차는 없었다.

또한 각 계절 표층과 저층의 평균 수온에서 정점별 수온 측정값을 뺀 차이(ΔT)를 나타낸 공간분포는 봄 표층에서 송이도에서 노인도 북단 및 칠산도 남단을 연결하는 동서 횡단선 북쪽에서 0°C 이상, 북부 해역은 1.5°C 이상을 나타내었고, 남쪽은 0°C 이하로 안마도에서 낙월도 주변에서 -1.0°C 이하를 나타내었다. 저층은 표층과 다르게 칠전도 서쪽 남북선을 기준으로 동쪽 연안에서 0°C 이상을 보였으며, 서쪽 개방해역에서 0°C 이하를 나타내었다(Fig. 2A). 여름 표층은 칠전도 서쪽 먼 해역부터 연안부 전체 해역에서 0°C 이상을 나타내어 봄보다 온배수가 더욱 남서진하였고, 북부 해역은 2.0°C 이상을 나타내었다. 저층도 봄보다 0°C 등온선이 더욱 남서진한 모습으로 표층과 유사한 분포를 보였다(Fig. 2B). 가을 표·층에서 봄이나 여름과 다르게 노인도 북단의 동서 횡단선 남쪽 및 온배수가 유입하는 북부 해역에서 0°C 이상을 보였고, 연안부에서 0°C 이하로 낮았다(Fig. 2C). 그리고 겨울도 표·저층에서 0°C 이상 등온선이 칠전도 북동 해역으로 축소되었다(Fig. 2D).

영광 연안의 온배수 영향을 검토하기 위해 계절별, 층별 관측된 수온 평균을 기준으로 평균보다 높은 수온을 보이는 해역을 온배수가 유입되는 해역으로 해석하였다. 일반적으로 저수온기 연안해역은 해수 영향을 강하게 받는 저층이 표층보다 수온이 높지만[27,28], 영광 연안해역에서 전 계절 표층 수온이 저층보다 높은 것은 태양복사열 이외에 온배수 등 다른 열원 공급이 있기 때문이며, 수층에 따른 온도 차가 작은 것은 얇은 수심과 강한 조석 혼합 때문이다. 즉 서해 수온은 2월에 최저, 8월에 최댓값을 보이며, 연안은 조석 혼합으로 비교적 균일한 분포가 보고된다[27,29]. 온배수 영향은 계절, 조석 및 조류 등 해수 유동 등에 영향을 받지만, 영광 연안해역은 주로

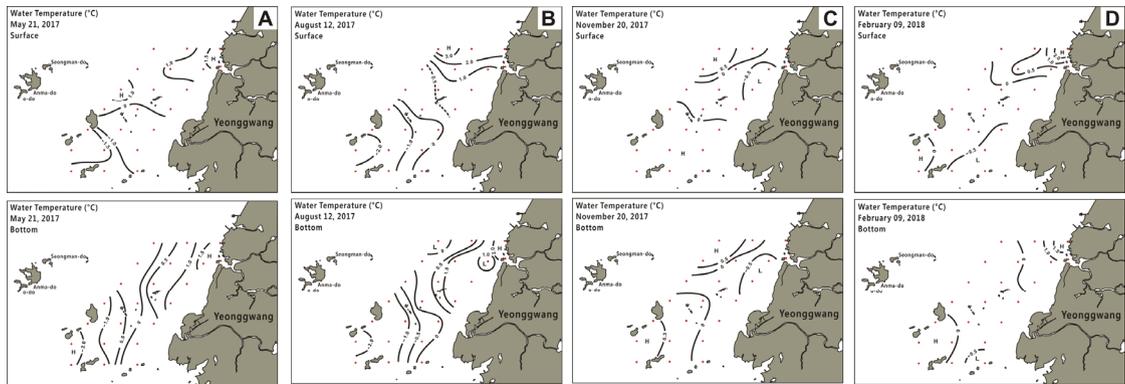


Fig. 2. Spatio-temporal distributions of water temperature difference (ΔT) at surface (upper) and bottom (lower) in the YCW.

낙조시 연안과 평행하게 남서 방향으로 확산되어, 계절 및 해수 유동에 따라 영향범위가 다르게 되어, 봄이나 여름보다 가을과 겨울의 영향범위가 축소되었다. 특히 가을 온배수가 유입하는 해역보다 남쪽에서 높은 수온을 보였던 것은 조석 주기 및 조사 당일 강한 바람에 의한 해수 혼합 결과로 추정되었다. 다만 온배수가 해양생태계에 미치는 영향은 접근방법에 따라 긍정과 부정의 상반되는 결론을 나타낸다[8-10,30,31].

염분은 표층이 여름 31.61 psu에서 봄 32.86 psu 범위, 저층은 여름 31.62 psu에서 봄 32.88 psu 범위로 변화하여, 표·저층의 공간적인 차이는 각 1.25 psu 및 1.26 psu로 매우 작았다. 계절별로 봄 표층은 32.30-32.86 psu 범위로 32.66±0.14 psu 변동 폭, 저층은 32.44-32.88 psu 범위로 32.69±0.12 psu 변동 폭으로 연중 가장 높았고, 여름 표층은 31.62-32.36 psu 범위로 32.10±0.25 psu 변동 폭을, 저층은 31.62-32.41 psu 범위로 32.14±0.23 psu 변동 폭을 나타내었다. 가

을 표층은 32.21-32.39 psu 범위로 32.28±0.05 psu, 저층은 32.19-32.42 psu 범위로 32.29±0.02 psu 변동 폭을 보였고, 겨울 표층은 31.81-32.03 psu 범위로 31.92±0.07 psu, 저층은 31.81-32.08 psu 범위로 31.94±0.07 psu 변동 폭으로 가장 낮은 평균 농도를 보였다. 즉 영광 연안해역의 염분은 계절 및 수층 사이의 변동 폭은 물론 해역에 따른 변동 폭도 매우 낮았다.

공간 분포는 봄 표층이 남동 연안부에서 32.8 psu 이상을, 일부 북서부에서 32.3 psu 이하를 보였고, 중앙부에서 32.5-32.8 psu 범위로 균일하였다. 저층은 남동부의 32.8 psu 이상 범위가 표층보다 서쪽으로 확장된 것을 제외하면, 표층과 유사하였다(Fig. 3A). 여름 표층은 봄에 비해 낮은 염분으로 와탄천이 유입되는 북부에서 32.0 psu 이하를, 안마도 주변에서 32.4 psu 이상을, 그리고 중앙부는 32.0-32.4 psu 범위로 균일하였다. 저층은 표층에 비해, 북동부 저염 해역이 축소된 것에 반해, 안마도 주변 고염 해역은 확장되었다(Fig. 3B). 가을 표

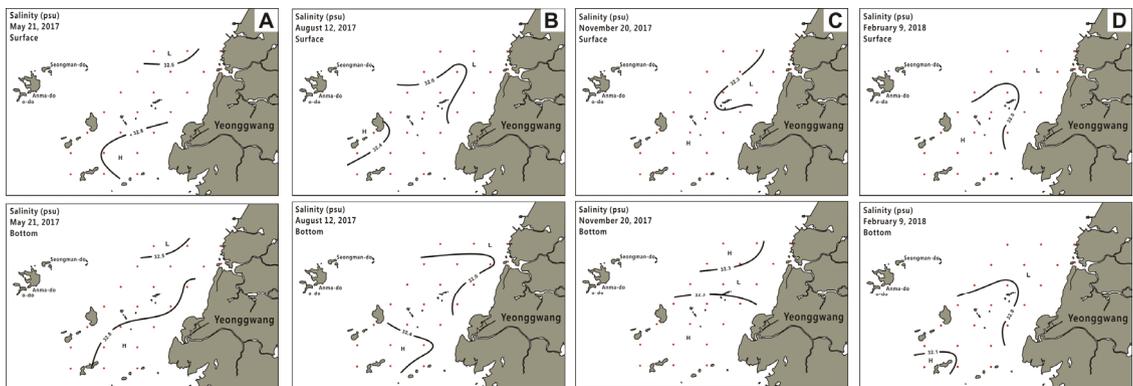


Fig. 3. Spatio-temporal distributions of salinity at surface (upper) and bottom (lower) in the YCW.

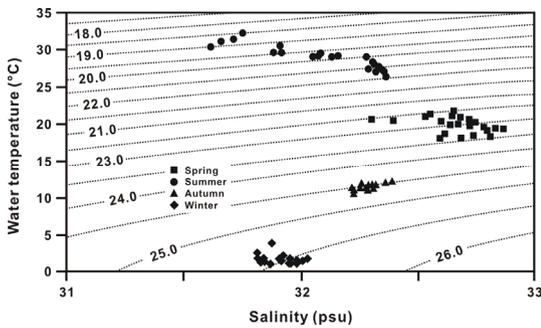


Fig. 4. Seasonal variation of water type by T-S diagrams of surface in the YCW.

층도 북부에서 32.2 psu 이하로 낮았고, 중앙부에서 남서부에 걸쳐 32.2 psu 이상으로 균일하였다. 저층은 와탄천이 유입되는 범성포 주변에서 띠 모양으로 32.3 psu 이하의 저염을 보였고, 남북으로 32.3 psu 이상으로 높았다(Fig. 3C). 겨울 표층도 북부에서 32.0 psu 이하 저염을, 칠산도를 포함하는 남서부에서 32.0 psu 이상을 보였고, 저층 역시 표층과 같이 남서부 낙월도 주변에서 32.1 psu 이상으로 높았다(Fig. 3D).

표층 각 정점의 수온과 염분을 이용한 T-S diagram 분포에서, 영광 연안은 계절에 따라 다소 다르지만, 전체적으로 염분보다 수온 변화 폭은 큰 특징으로 해수 밀도는 수온에 지배되는 비율이 크게 나타났다. 계절별로 여름(●)은 수온보다 염분 변동이 크지만, 고온, 저염으로 σ_t 가 21 이하의 가벼운 해수로 구성되었다. 봄(■)도 여름보다 작지만, 수온보다 염분변동이 큰 특징으로 σ_t 23 전후 값을 보였다. 그리고 가을(▲)과 겨울(◆)은 해역에 따른 수온, 염분 변화가 작고, σ_t 가 가을 24.5 이상, 겨울 25.5 전후로 무거운 해수로 구성되어, 염분이 높았던 봄보다도 σ_t 가 높았다(Fig. 4).

연안해역 염분은 담수 유입량에 크게 의존하여, 서해는 한반도의 동고서저 지형 특성으로 다양한 하천을 통해 연간 $1.2 \times 10^{11} \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ 담수가 유입되기에, 평균 염분이 32.84 ± 1.06 psu로 동해나 남해에 비해 낮다 [29,32]. 또한 서해 하구역은 큰 조석 차이로 인해 낙조시 상대적 저염을, 창조시 상대적 고염을 보이며, 경기만은 조석에 따라 19.2-32.4 psu 염분 변화가 보고되며 [32,33], 계절별로 8월 최저, 2월 최댓값을 보이지만 [29], 영광 연안은 서해 남부의 고창 및 목포 연안과 같이 겨울보다도 봄에 높은 염분을 나타내었다[27,34,35]. 그리고 서해에서 상대적으로 대형 하천인 금강 하구역 등은 수괴 분석에서 수온 및 염분 변화가 모두 크게 발생

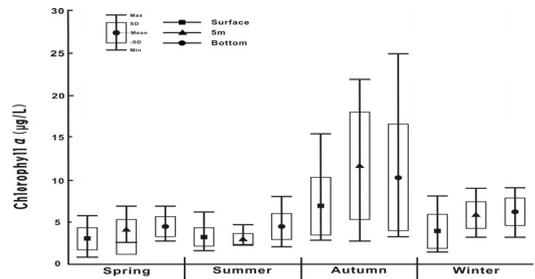


Fig. 5. Seasonal variation of chlorophyll a concentration.

하여 계절 변화 경향이 분명한 것에 반해[28], 영광 및 고창 연안해역은 내만에 대형 하천이 존재하지 않아, 염분보다도 수온에 의해 더욱 크게 영향을 받는 해역 특성을 나타내었다[27].

3.1.2 엽록소 a 농도

엽록소 a (Chlorophyll a) 농도는 표층에서 봄 $0.85 \mu\text{gL}^{-1}$ 에서 가을 $15.38 \mu\text{gL}^{-1}$ 범위로 가을에 높고 여름에 낮았다. 계절별로 봄 표층은 $0.85\text{--}5.68 \mu\text{gL}^{-1}$ 범위로 $3.03 \pm 1.35 \mu\text{gL}^{-1}$ 변동 폭을 보였고, 저층은 $2.77\text{--}6.87 \mu\text{gL}^{-1}$ 범위로 $4.43 \pm 1.22 \mu\text{gL}^{-1}$ 변동 폭, 여름 표층은 $1.62\text{--}6.11 \mu\text{gL}^{-1}$ 범위로 $3.22 \pm 1.12 \mu\text{gL}^{-1}$ 변동 폭, 저층은 $2.02\text{--}6.63 \mu\text{gL}^{-1}$ 범위로 $4.19 \pm 1.25 \mu\text{gL}^{-1}$ 변동 폭을 나타내었다. 그리고 가을 표층은 $2.83\text{--}15.38 \mu\text{gL}^{-1}$ 범위로 $6.89 \pm 3.55 \mu\text{gL}^{-1}$ 변동 폭, 저층은 $3.56\text{--}25.54 \mu\text{gL}^{-1}$ 범위로 $11.81 \pm 6.97 \mu\text{gL}^{-1}$ 변동 폭을 보였고, 겨울 표층은 $1.42\text{--}8.03 \mu\text{gL}^{-1}$ 범위로 $3.88 \pm 2.10 \mu\text{gL}^{-1}$ 변동 폭, 저층은 $3.21\text{--}9.11 \mu\text{gL}^{-1}$ 범위로 $6.17 \pm 1.67 \mu\text{gL}^{-1}$ 변동 폭으로 표층보다 아표층 및 저층에서 높았고, 공간 변동 폭 역시 크게 나타났다(Fig. 5).

공간분포는 봄 표층에서 온배수가 유입하는 연안을 따라 $3.0 \mu\text{gL}^{-1}$ 이상의 농도를 보였으며, 송이도 북서 해역에서 $2.0 \mu\text{gL}^{-1}$ 이하, 그리고 송이도 동부를 포함하는 남부에서 $2.0\text{--}3.0 \mu\text{gL}^{-1}$ 범위를 보였다. 특히 칠전도를 포함하는 얇은 수심 해역에서 $5.0 \mu\text{gL}^{-1}$ 이상으로 높았다. 저층도 표층과 유사하여 표층 $3.0 \mu\text{gL}^{-1}$ 이상 농도를 보였던 해역에서 $5.0 \mu\text{gL}^{-1}$ 이상 농도를 보였고, 송이도 북서에서 $5.0 \mu\text{gL}^{-1}$ 이하, 그리고 남부에서 $3.0 \mu\text{gL}^{-1}$ 이하를 나타내었다(Fig. 6A). 여름 표층은 봄과 유사하여, 온배수가 유입되는 연안부에서 $3.0 \mu\text{gL}^{-1}$ 이상을 보였고, 송이도를 포함하는 북서에서 $3.0 \mu\text{gL}^{-1}$ 이하의 농도를 보였으며, 온배수 영향이 강한 흥농 연안에서 $5.0 \mu\text{gL}^{-1}$ 이

상으로 높았다. 다만 봄에 높은 농도를 보였던 연안부에서 때 모양으로 2.0 μgL^{-1} 이하의 낮은 농도 해역이 관찰되었다. 저층은 북부 홍농 연안에서 표층과 같이 4.0-6.0 μgL^{-1} 이상으로 높았으나, 칠전도 및 송이도를 포함하는 중앙부 및 개방해역에서 4.0 μgL^{-1} 이하로 상대적으로 낮았지만, 남부 연안부에서 4.0-6.0 μgL^{-1} 이상의 높은 농도가 관찰되었다(Fig. 6B). 온배수 확산에 따른 수온 변화가 가장 약했던 가을 표층은 북부에서 5.0 μgL^{-1} 이하로 낮았고, 남서부에서 5.0 μgL^{-1} 이상으로 높아, 다른 계절과 상반되는 양상을 나타내었다. 특히 얇은 수심의 남동부에서 10.0 μgL^{-1} 이상으로 높았다. 저층도 표층과 유사하여 북부에서 5.0 μgL^{-1} 이하 농도를 보였고, 중앙부에서 10 μgL^{-1} , 일부 해역은 20.0 μgL^{-1} 이상 매우 높은 패치분포가 관찰되었다. 송이도를 포함하는 남부 해역은 10.0 μgL^{-1} 이상으로 높았다(Fig. 6C). 그리고 겨울 표층은 봄과 유사하여, 연안부에서 4.0-8.0 μgL^{-1} 이상으로 높았지만, 송이도 북서 개방해역에서 2.0 μgL^{-1} 이하 농도를, 남서부에서 2.0-4.0 μgL^{-1} 범위의 농도를 나타내었다. 저층은 북동에서 7.0 μgL^{-1} 이상 상대적 높은 농도를 나타내고, 남서부에서 5.0 μgL^{-1} 이상의 엽록소 *a* 농도를 나타내었다(Fig. 6D).

서해에서 보고되는 엽록소 *a* 농도는 부영양화 해역인 인천 연안[29] 1.32-19.35 μgL^{-1} , 경기만[36] 1.32-2.63 μgL^{-1} , 천수만[37] 0.81-4.78 μgL^{-1} , 고군산군도 주변 해역 [7] 3.82-13.36 μgL^{-1} , 고창 연안[27] 0.58-10.5 μgL^{-1} , 영광 연안[19] 1.71-5.88 μgL^{-1} , 그리고 겨울 압해도 김양식장[38] 0.81-2.09 μgL^{-1} 등, 계절 및 해역은 물론 분석 방법에 따라 차이가 있지만, 전체적으로 높은 엽록소 *a* 농도로서, 기초생산 잠재력이 크게 나타났다. 다만 온배수 영향을 받는 영광 연안에서 표층보다 아표층 및 저

층의 엽록소 *a* 농도가 높은 것은 서해 연안의 큰 조석 차에 따른 조석 혼합 및 얇은 수심으로 표층퇴적물이 표영(pelagic) 환경으로 재부유되기 때문이다[38-41]. 또한 현장에서 엽록소 *a* 농도를 측정할 형광광도계는 기계적 특성으로 높은 부유물질에 반응하는 특성을 보이기에 가을 높은 농도는 기계적인 특성에서 발생하였던 것으로 추정되며[41], 봄과 여름보다 수온 하강기 높은 엽록소 *a* 농도는 한국 연안에서 어렵지 않게 관찰된다[42].

3.2 식물플랑크톤 군집

3.2.1 종조성

2017년 봄부터 2018년 겨울까지 온배수 영향을 받는 영광 연안해역에서 동정된 식물플랑크톤 종은 55속 86종으로, 규조류가 40속 63종으로 73.2%, 와편모조류가 11속 18종으로 20.9%, 규질편모조류가 2속 3종으로 3.5%, 유글레나조류 및 녹조류가 각 1속 1종으로 각 1.2%의 출현 점유율을 나타내었다(Fig. 7). 종수의 계절 변화는 봄 34속 48종으로, 규조류 25속 36종에 75.0% 출현 점유율을 보였고, 와편모조류 7속 9종으로 18.7%, 규질편모조류 2속 3종으로 6.3% 출현 점유율을 보였다. 여름은 39속 61종으로 규조류 29속 44종으로 72.1% 점유율을, 와편모조류 7속 13종으로 21.3%, 규질편모조류 2속 3종으로 4.93%, 그리고 유글레나조류 1속 1종으로 1.6% 출현 점유율로 종 출현이 비교적 다양하였다. 가을은 31속 46종으로 규조류 23속 34종으로 73.9% 출현 점유율을, 와편모조류 6속 10종으로 21.7%, 규질편모조류 및 유글레나조류 각 1속 1종으로 각 2.2% 출현 점유율로 단조로운 종 조성을 보였다. 그리고 겨울은 36속 54종으로 규조류 29속 45종으로 83.3% 출현 점유율을,

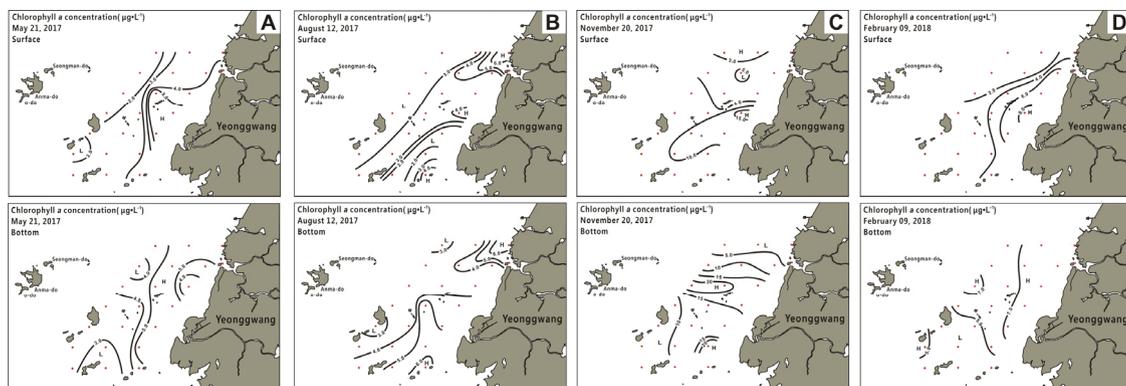


Fig. 6. Spatio-temporal distributions of chlorophyll *a* concentration at surface (upper) and bottom (lower) in the YCW.

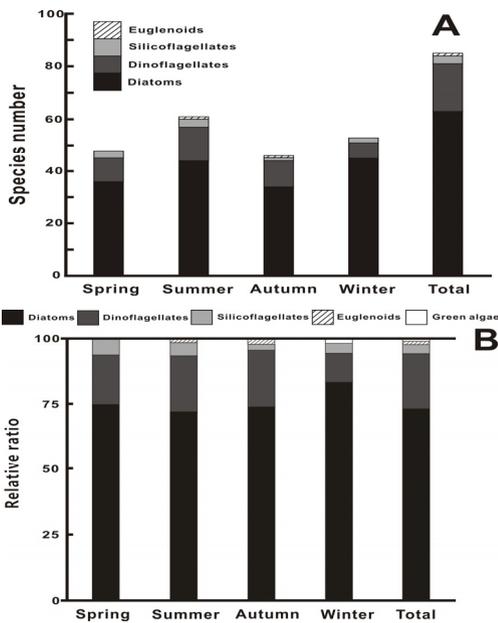


Fig. 7. Seasonal variations of phytoplankton species composition (A) and relative ratio of taxon (B)

와편모조류 4속 6종으로 11.1%, 규질편모조류 2속 2종으로 3.7%, 그리고 녹조류가 1속 1종으로 각각 1.9% 출현 점유율로 다른 계절에 비해 규조류 점유율이 높았다 (Fig. 7).

영광 연안해역 식물플랑크톤 군집이 연중 규조류에 지배되는 것은 한국 동, 서, 남해의 결과[7,42,43]와 유사하였다. 또한 상대적 고수온을 나타내는 여름과 가을은 겨울과 봄보다 와편모조류 출현이 상대적으로 높았다 [42]. 즉 일반적으로 개방된 온대 해역 식물플랑크톤 군집은 저수온기에 규조류가 우점하지만, 고수온기는 와편

모조류 등 식물성 편모조류 출현이 높은 것이 알려졌으며[44], 이러한 현상은 한국 연안해역에서 일반적으로 관찰된다[42,45,46].

4계절 모두 관찰된 종은 규조류, *Actinocyclus senarius*, *Chaetoceros curvisetus*, *Coscinodiscus gigas*, *Dictylum brightwellii*, *Leptocylindrus danicus*, *Nitzschia longissima*, *Odontella aurita*, *Paralis sulcata*, *Pleurosigma normanii*, *Proboscia alata*, *Pseudo-nitzschia pungens*, *Rhizosolenia flaccida*, *Rhizosolenia seriata*, *Skeletonema coastatum*-ls, *Synedra nitzschioides* f. *nitzschioides*, *Thalassiosira nordenskiöldii*, *Thalassiosira rotula* 등 17종, 와편모조류, *Noctiluca scintillans*, *Tripus fusus* 2종, 그리고 규질편모조류, *Dictyochoa fibura* 1종 등 20종이었다. 3계절 관찰된 종은 규조류 *Chaetoceros affinis*, *Dentonula pumila*, *Eucampia zodiacus*, *Guinadia striata*, *Hemiaulax hauckii*, *Thalassionema flauenfeldii*, *Thalassiosira subtilis* 7종, 와편모조류, *Gonyaulax polygramma*, *Scrippsiella trochoidea*, *Tripus furca*, *T. kofoidii* 4종 등 11종으로 3회 이상 출현 종은 30종 이상으로 다양하였다. 여기서 규조류, *Ch. curvisetus*, *D. brightwellii*, *E. zodiacus*, *L. danicus*, *N. longissima*, *S. coastatum*-ls, *Rh. flaccida*, *Rh. setigera* 등 8종과 와편모조류, *Tripus fusus* 1종 및 규질편모조류, *D. fibura* 1종 등 10종은 서해 토착종으로[33,36], *A. senarius*, *O. aurita*, *P. sulcata* 등 규조류 3종은 임시 부유종[33]으로 구분되나, 대부분 서해를 포함하여 한국 연안에서 일반적으로 관찰된다[27]. 즉, 영광 연안에서 3회 이상 출현하는 종은 동해[43], 서해[7] 및 남해[42]에 비해 낮았지만, 이웃

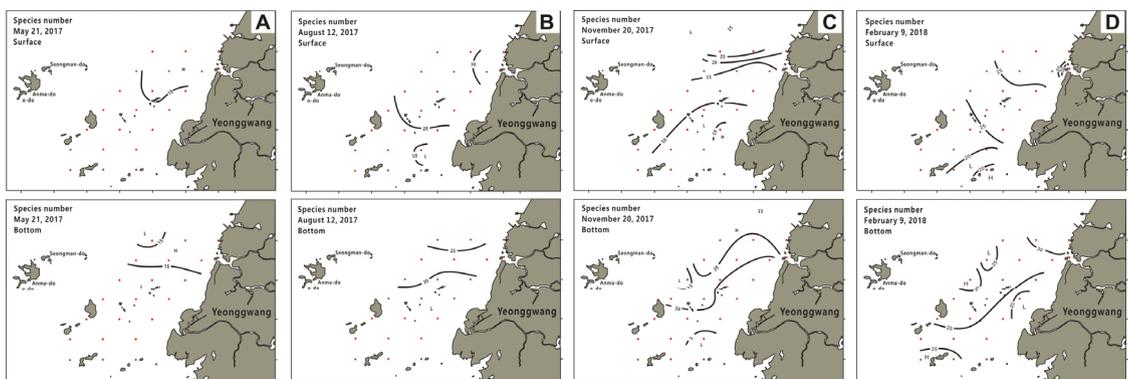


Fig. 8. Spatio-temporal distributions of phytoplankton species number at surface (upper) and bottom (lower).

하는 고창 연안보다 다양하였다[27].

중수의 시·공간 변화는 봄 표층이 8-22종 범위에서 13.7 ± 3.9 변동 폭을, 저층은 6-24 범위에서 12.4 ± 5.3 변동 폭을 보여, 해역별 차이는 다소 크지만, 수층 사이의 차이는 작았다. 공간 분포는 표층에서 온배수 영향을 받는 북동해역에서 15종 이상으로 높았고, 남서 해역에서 15종 이하로 낮았다. 저층은 15종 이상 출현 종수를 보였던 북동해역의 범위가 다소 축소되었지만, 전체적으로는 표층과 유사하였다(Fig. 8A). 여름 표층은 9-35종 범위에서 19.7 ± 7.6 변동 폭을 보였고, 저층은 5-26종 범위에서 16.8 ± 8.0 변동 폭으로 봄과 같이 해역별 차이는 크지만, 수층 사이의 차이는 작았다. 공간적으로도 봄과 유사하여 표층은 온배수 영향을 받는 북부에서 30종 이상으로 높았고, 남서 해역으로 진행함에 따라 감소하여 송이도와 노인도 주변에서 20종 이하로 감소하였다. 저층은 표층보다 다소 낮은 출현 종수로 북부 해역의 높은 종수 해역이 다소 축소되었으며, 20종 이하 등량선이 칠전도 주변으로 북동진하였다(Fig. 8B). 가을은 표층에서 5-25종 범위에서 12.9 ± 5.7 변동 폭, 저층은 3-29종 범위에서 11.8 ± 7.1 변동 폭으로 표층이 저층보다 많았으며, 공간적 불균일성은 여름과 유사하였으나, 봄보다 크게 나타났다. 가을 표층은 온배수 영향이 분명하지 않았으나, 온배수가 유입되는 북부에서 25종 이상 출현한 종수가 점차 남서진함에 따라 감소하여, 칠전도 북쪽에서 15종이 출현하였다. 그리고 더욱 남서진하여, 송이도 남서 해역은 10종 이하로 감소하였다. 저층은 표층보다 낮은 출현 종수로 북부에서 20종 이상 출현하는 해역이 바깥 정점군에 편향되었으며, 10종 등량선이 송이도에서 칠전도, 그리고 범성포 연안까지 길게 북동 방향으로 확장되었고, 남서 해역은 10종 이하로 낮았다(Fig. 8C). 겨울은 표층에서 16-31종 범위로 23.3 ± 3.3 변동 폭을, 저층은 18-33종 범위에서 25.9 ± 3.5 변동 폭으로, 저층이 표층보다 높았고, 공간적으로는 가장 균일하였다. 겨울 표층은 25종 이상의 높은 식물플랑크톤 종수는 온배수가 유입되는 흥농 및 대항월항 주변에 한정되었고, 기타 칠전도 북동 해역에서 25종 이하, 더욱 남서진한 노인도 주변에서 25종 이상이 출현하는 띠 모양의 출현 양상을 보였다. 그리고 송이도를 포함하는 남서 해역에서 20종 이상으로 4계절 중 가장 많은 종수가 출현하였다. 저층은 표층보다 다소 높은 출현 종수로 송이도 남서 해역에서 노인도, 그리고 범성포 입구를 연결하는 25종 등량선이 표층과 유사하게 연장되어, 북동 해역은 25종 이상, 남동 해역은 25종 이하로 출현하였다. 그리고 온배수가

유입하는 북부에서 30종 이상 다양한 종이 출현하였다(Fig. 8D).

온배수 영향을 받는 영광 연안에 출현한 식물플랑크톤 86종을 서해 경기만 228종[33], 천수만 262종[47], 금강 하구역 233종[46], 만경강 하구역 160종[48], 영광 연안 364종[18]에 비하면 매우 낮았다. 그러나 고군산군도 해역 104종[7], 고창 연안 86종[27]에 비하면 다소 낮거나 유사하였고, 목포 시아해 36종[35]보다 많았다. 이러한 출현 종수의 차이는 조사 방법, 대상 해역의 면적 및 해황 특성, 조사 시기, 조사 정점 및 연구자의 종 동정 기준에 따라 발생한다. 특히 서해에서 다양한 종을 보고하는 논문은 네트채집으로 정성분석, 채수법으로 정량분석을 구분하고 있는 것에 반해, 상대적으로 낮은 출현 종수는 채수법으로 정성 및 정량분석을 실시하고 있기에, 단순한 결과 비교는 어렵다[28]. 또한 서해 식물플랑크톤 군집은 담수 중에서 외양 종까지 매우 다양하고, 구조류 출현 점유율이 75.2-89.7%를 나타내지만, 와편모조류는 겨울 6.6%에서 여름 19.1%로 증가하였다[33]. 그러나 영광 연안은 구조류 출현 점유율이 73.2%로 다소 낮았고, 와편모조류가 20.9%로 높았으며, 이러한 경향은 고창 연안도 비슷하였다[27]. 출현 종수로 해양환경 특성을 단순 비교하는 것은 큰 의미가 없지만, 영광 연안의 식물플랑크톤 군집의 종 조성은 상대적으로 단조로웠다[42].

3.2.2 식물플랑크톤 현존량

현존량은 표층에서 가을 $3.4 \text{ cells mL}^{-1}$ 에서 봄 $647.2 \text{ cells mL}^{-1}$ 범위로, 변화 폭이 매우 큰 특징을 보였다. 계절별로 봄 표층은 $15.0-647.2 \text{ cells mL}^{-1}$ 범위로 $128.1 \pm 159.8 \text{ cells mL}^{-1}$ 변동 폭을 보였고, 저층은 $16.8-671.4 \text{ cells mL}^{-1}$ 범위로 $150.7 \pm 222.1 \text{ cells mL}^{-1}$ 변동 폭으로 표층보다 저층의 현존량이 많았고, 공간 변동이 크게 나타났다. 여름 표층은 $5.0-626.6 \text{ cells mL}^{-1}$ 범위로 $147.9 \pm 186.5 \text{ cells mL}^{-1}$ 변동 폭, 저층은 $2.8-308.8 \text{ cells mL}^{-1}$ 범위에서 $102.4 \pm 112.3 \text{ cells mL}^{-1}$ 변동 폭으로 봄과 다르게 표층 현존량이 저층보다 높았고, 공간 변동도 봄과 같이 크게 나타났다. 가을 표층은 $3.4-51.0 \text{ cells mL}^{-1}$ 범위로 $16.7 \pm 13.6 \text{ cells mL}^{-1}$ 변동 폭, 저층은 $1.8-52.3 \text{ cells mL}^{-1}$ 범위에서 $15.1 \pm 14.0 \text{ cells mL}^{-1}$ 변동 폭으로 가장 낮은 현존량을 보였고, 공간 변동도 작았다. 겨울 표층은 $42.6-264.0 \text{ cells mL}^{-1}$ 범위로 $144.9 \pm 58.7 \text{ cells mL}^{-1}$ 변동 폭, 저층은 $49.6-355.8 \text{ cells mL}^{-1}$ 범위에서 $155.7 \pm 90.4 \text{ cells mL}^{-1}$ 변동 폭으로 표층보다 높았으나, 공간 변동은

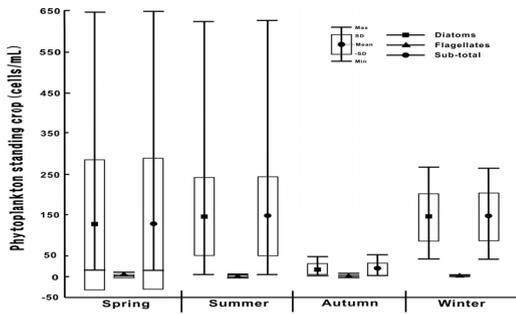


Fig. 9. Seasonal variation of phytoplankton standing crop.

가장 작았다. 또한 모든 계절 식물플랑크톤 현존량은 구조류에 지배되며, 와편모조류를 포함하는 식물성 편모조류 점유율이 매우 낮은 특징을 보였다(Fig. 9).

공간분포는 봄 표층이 온배수 영향을 받는 북부에서 600 cells mL⁻¹ 이상을 보이나, 남서 해역으로 진행할수록 감소하여 칠전도 북동에서 100 cells mL⁻¹ 이하로 감소하였고, 노인도 주변은 50 cells mL⁻¹ 이하를 보였다. 그러나 송이도 주변인 남서 해역은 재차 50 cells mL⁻¹ 이상으로 증가하였다. 저층도 표층과 유사하여, 표층에서 600 cells mL⁻¹을 보였mL⁻¹을 보였던 북부에서 100 cells mL⁻¹의 낮은 현존량을 나타내는 등 전체적으로 표층보다 낮았다(Fig. 10A). 여름 표층은 온배수 영향을 받는 북부에서 500 cells mL⁻¹ 이상 높은 현존량이 남서진함에 따라 감소하여, 칠전도에서 100 cells mL⁻¹, 노인도에서 50 cells mL⁻¹를 나타내었다. 저층도 표층과 유사하지만, 현존량은 표층의 약 1/2 수준으로 북부 300 cells mL⁻¹가 남서진함에 따라 급격히 감소하여 칠산도 주변에서 50 cells mL⁻¹를 나타내었다(Fig. 10B). 가을

은 온배수 영향이 불분명하였으며, 다른 계절에 비해 한 단위 낮은 현존량을 보였으나, 표층은 온배수가 유입되는 북부에서 50 cells mL⁻¹ 이상을 보였고, 남서진하면서 감소하여, 칠전도 주변에서 20 cells mL⁻¹ 이하로 중앙부에서 낮고 양쪽 해역에서 높은 띠 모양의 분포를 나타내었다. 그리고 송이도에서 칠전도 북동을 연결하는 남쪽에서 10 cells mL⁻¹ 이하로 낮아졌고, 더욱 남서진하여 함평만 주변에서 5 cells mL⁻¹ 이하를 나타내었다. 저층도 표층과 유사하여, 북부의 협소한 해역에서 30 cells mL⁻¹ 이상 현존량이 남서진하면서 급격히 감소하여 칠전도 주변에서 10 cells mL⁻¹ 이하, 함평만 주변에서 5 cells mL⁻¹ 이하로 낮아졌다(Fig. 10C). 겨울 표층은 온배수가 영향을 받는 북부에서 200 cells mL⁻¹ 이상 높은 현존량은 다른 계절과 유사하였지만, 칠전도 및 노인도를 포함하는 중앙부에서 100 cells mL⁻¹ 이하 낮은 현존량이 사방으로 확산되면서 증가하여, 150 cells mL⁻¹ 또는 200 cells mL⁻¹ 이상으로 증가하는 경향으로 다른 계절과는 차이를 나타내었다. 저층은 온배수가 유입되는 북부에서 300 cells mL⁻¹ 이상의 높은 현존량이 남서진하면서 감소하여, 칠전도 주변에서 150 cells mL⁻¹ 이하를 보였으나, 더욱 남서진하여 송이도 북동 해역은 200 cells mL⁻¹ 이상으로 증가하였고, 연안부에서 100 cells mL⁻¹ 이하를 나타내었다(Fig. 10D).

영광 연안의 식물플랑크톤 현존량은 온배수 유입에 크게 영향을 받지만[49], 온배수가 해양생태계에 미치는 영향은 아직도 긍정과 부정에 대한 평가가 상황에 따라 다르다. 다만 겨울부터 봄까지 수온 상승기 영광 연안의 식물플랑크톤 현존량이 표층보다 저층에서 높은 것은 해수 유입이 강한 한국 연안 환경에서 일반적으로 관찰되지만 [42], 남해에서 일반적으로 관찰되는 고수온기 와편모조

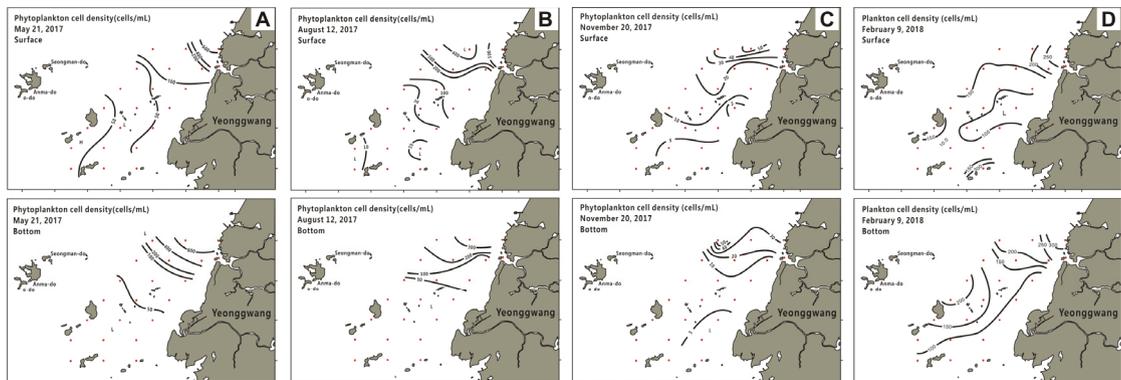


Fig. 10. Spatio-temporal distributions of phytoplankton standing crop at surface (upper) and bottom (lower).

류를 포함한 식물성 편모조류의 높은 출현[42,45]은 관찰되지 않았다.

영광 연안의 3.4-647.2 cells mL⁻¹ 범위의 현존량 변동은 1980년대 경기만[33] 1.6-1,753.5 cells mL⁻¹, 천수만[47] 48.0-3,720.0 cells mL⁻¹, 군산 연안해역[50] 15.0-5,451.0 cells mL⁻¹ 및 200.0-2,331.5 cells mL⁻¹, 1990년대 영광 연안[19] 428.7-2,292.8 cells mL⁻¹, 2010년대 금강하구[28,46] 143-12,016 cells mL⁻¹ 및 10.0-2,904 cells mL⁻¹, 고군산군도 96-10,000 cells mL⁻¹[7], 고창 연안[27] 2.2-2,415.6 cells mL⁻¹에 비하면 최댓값으로 매우 낮으나, 1990년대 시아해[35] 6.4-630 cells mL⁻¹와 유사하였다. 시·공간적인 식물플랑크톤 현존량 차이는 해역으로 공급되는 영양염과 서해의 강한 조석 혼합 등 해수 유동 차이에서 발생하는 것으로[27,44,51], 영광 연안은 한정적 영역이지만, 원자력발전소의 온배수에 강하게 영향을 받는 것으로 나타났다[10,52]. 또한 계절에 따라 차이는 있지만, 영광 연안의 식물플랑크톤 현존량과 엽록소 *a* 농도 사이에 유의적 관련성이 성립되지 않은 것은 엽록소 *a* 농도 향에서 설명한 것처럼 조석 혼합 등에 의한 표층퇴적층 재부유 등에 의한 높은 부유물질에 의해 발생하는 것이라 할 수 있었다[41].

3.2.3 우점종

동일 시점 정점 평균으로 전체 식물플랑크톤 현존량에서 5% 이상 점유하는 종을 우점종으로 하여, 계절 변화를 살펴보면, 봄 표층은 *Asterionella glacialis*가 34.9% 우점율로 최우점하였고, *S. costatum*-ls가 23.6% 우점율로 차우점, *S. nitzschoides f. nitzschoides*와 *Asterionella kariana*가 각 12.0% 및 10.1% 우점율을 보였다. 저층은 *S. costatum*-ls, *A. glacialis*, *S. nitzschoides f. nitzschoides* 및 *A. kariana*가 각각 29.2%, 26.3%, 16.6% 및 9.8% 우점율로, 표층의 최우점종 및 차우점종이 교체되었다(Table 1). 여름 표층은 *L. danicus*가 52.1% 우점율로 극우점하였고, 다음 *E. zodiacus*와 *Ch. curvisetus*가 각 9.6%와 9.2% 우점율을 보였으나, 저층은 표층과 다르게 극우점 종은 없지만, 표층에서 우점하지 않았던 *Guinadia delicatula*가 19.8% 우점율로 최우점하였고, 다음으로 *G. striata*, *S. costatum*-ls가 각 9.3% 및 6.2% 우점율로 출현하였다(Table 1). 가을은 높은 부유물질 및 낮은 현존량으로 극우점 종은 없지만, 표층은 *Pn. pungens*가 우점율

11.2%로 최우점, *G. striata*, *Ch. curvisetus*, *Th. nordenskioldii*가 각각 9.8%, 6.7% 및 5.4% 우점율을 보였다. 저층은 표층과 달리 *P. sulcata*와 *C. gigas*가 각 12.6% 및 10.4% 우점율을, *Pn. pungens*, *Ch. curvisetus* 및 *Th. rotula*가 각각 8.7%, 6.7% 및 5.1% 우점율로 출현하였다(Table 1). 겨울 표층은 *Cerataulina bergonii*, *Coscinodiscus anguste-lineata*가 각 32.1%, 15.5% 우점율로 최우점종 및 차우점종으로 출현하였다. *S. costatum*-ls는 14.9% 우점율을 나타내었다. 저층도 표층과 유사하여 *C. bergonii*, *C. anguste-lineata* 및 *S. costatum*-ls가 각각 23.1%, 17.2% 및 14.8% 우점율을 보였고, 표층에 우점하지 않았던 *Th. nordenskioldii*와 *P. sulcata*가 각 8.2%와 5.8% 우점율로 출현하였다(Table 1).

식물플랑크톤 군집에서 우점종은 광량, 수괴 안정도, 영양염 공급 등 물리·화학적 환경인자에 의해 결정되어, 영양염이 풍부한 계절은 구조류에 의해 우점되지만, 고수온기 온대 해역은 와편모조류 등 식물성 편모조류로 천이된다[44,45]. 또한 영양염 공급이 원활한 해역은 *Dictylum*, *Rhizosolenia* 등과 같은 대형 구조류가 우점하며[53], 급격한 환경 변화가 발생하는 해역은 중천이도 빠른 것[54,55]이 일반적이다. 영광 연안의 우점종 대부분은 서해 토착종이며[33], 대부분 환경 변화에 민감하게 반응하는 적조생물로 취급하는 종이다[56,57].

봄 표·저층 우점종인 *A. glacialis*는 남해 내만 및 연안에 저수온기 우점하며[42], 인도 벵골만 용승해역에 3, 4월에 대발생이 보고되지만[58], 서해는 시아해 및 고창 연안에서 겨울과 봄 우점한 것 이외에 국내에서 우점 기록은 없다. 가을 이외에 우점한 *S. costatum*-ls는 범지구적으로 출현하는 대표적인 부영양화 지표종[59]으로 극 해역을 제외하면, 매우 일반적인 종이며, 온대 해역의 봄 대발생 주역을 담당한다[60]. 서해 경기만에 여름과 초가을을 이외에 연중 최우점하며[33], 천수만에도 비교적 높은 우점율을 보이고[47], 영광 연안은 연중 우점한다[18]. 그리고 목포 시아해에 여름과 가을 극우점하며[25], 고창 연안에도 우점된다[27]. 또한, 이 종은 다양한 물질을 세포 외로 분비하여 포식자[61] 및 다른 종의 성장을 저해하여[62], 중간 경쟁에 유리한 위치를 점유하며[63], 적조발생으로 양식장 수산생물에 피해를 발생시키는 등[64], 다양한 사회문제도 동반하는 종으로 한국 연안에 보편적으로 우점한다[27,42]. 다만 영광 연안의 *S. costatum*-ls 현존량은 부영양화된 내만 및 연안해역에 비해 낮은 밀도를 보였다[65].

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

Dominant species	Dominance (%)							
	Surface				Bottom			
	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter
DIATOMS	99.2	98.8	95.7	99.4	99.5	99.9	96.8	99.6
<i>Asterionella glacialis</i>	34.9				26.3			
<i>A. kariana</i>	10.1				9.8			
<i>Cerataulina bergonii</i>				32.1				23.1
<i>Cheatocecos curvisetus</i>		9.2	6.7			11.5	6.7	
<i>Coscinodiscus anguste-lineata</i>				15.5				17.2
<i>C. gigas</i>							10.4	
<i>Eucampia zodiacus</i>		9.6				12.3		
<i>Guinadia delicatula</i>						19.8		
<i>G. striata</i>						9.3		
<i>Leptocylindrus danicus</i>		52.1				14.4		
<i>Paralia sulcata</i>							12.6	5.8
<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>			11.2				8.7	
<i>Rhizosolenia flaccida</i>			9.8					
<i>Skeletonema costatum</i> -ls	23.6			14.9	29.2	6.2		14.8
<i>Synedra nitzschioides</i> f. <i>nitzschioides</i>	12.0				16.6			
<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i>			5.4					8.2
<i>Th. rotula</i>							5.1	
PHYTOFLAGELLATES	0.8	1.2	4.3	0.6	0.5	0.1	3.2	0.4

기타 봄 우점종 *S. nitzschioides* f. *nitzschioides*는 *Thalassionema nitzschioides*로 알려진 지구적 범용종으로 한국 연안에서 보편적으로 출현하며[66], 일부 해역은 우점한다[66,67]. *A. kariana*는 해양 및 담수 종으로 한국 연안에 일반적으로 출현하지만, 우점 출현한 기록은 거의 없다[66]. 다만 봄 거금수로에 *S. nitzschioides* f. *nitzschioides*와 함께 우점 출현이 보고된다[67].

여름 표층에 극우점한 *L. danicus*는 세계 연안해역에 봄과 여름에 우점 출현하며[68], 환경적응 능력이 탁월하여 지구온난화 지표종으로도 이용된다[69]. 서해 영광 연안에 연중 출현이 보고되며[18], 여름 고창 연안[27]과 겨울과 봄 목포 시아해[35]에 우점한 보고가 있다. 또한 남해 진해만의 봄 식물플랑크톤 군집에서 80% 이상 극우점하는 등[70]. 한국 연안에 보편적으로 우점한다[66]. 그리고 여름 낮은 우점율로 출현한 *E. zodiacus*는 한국 연안에 보편적으로 출현하는 종으로[66], 한국 남서 해역에서 주로 저수온기에 우점하며[42,71], 일본 내만 및 연안해역의 김 양식장 등에 겨울 적조를 발생시켜, 영양 경쟁으로 김의 성장 악화에 의한 변색 및 생산량을 저하시키는 원인종이다[72]. 그러나 서해 군산, 고창 및 영광 연안에서는 여름에 우점하는 특성을 보인다[27,28]. 이러한 계절적 출현 차이는 여름 황해 저층에 형성되는 저층

냉수괴와 관계있는 것으로 판단되지만, 분명한 증거가 없기에, 향후 심도 있는 검토가 요구되는 내용이다. 여름과 가을에 우점한 *Ch. curvisetus*는 범지구적으로 초여름 대발생하는 종[73]으로, 서해 천수만에서 여름 최우점 출현하며[47], 고군산군도 및 고창 연안에도 가을 또는 여름에 우점 출현한다[7,27]. 영광 연안에도 연중 출현하며[18], 봄 5월 남해 진해만에서 최우점 출현하는 등[70], 한국 연안에서 일반적으로 출현한다[66].

가을 표층에 최우점한 *Pn. pungens* 역시 한국 연안에 일반적으로 출현하는 종으로[66], 기억상실성 신경성 패류독인 domoic acid를 생산하는 유해생물이다[57]. 국내 어시장에서 채집한 일부 패류에서 domoic acid가 검출되었지만[74], 자연환경에서 독화 사례는 보고되지 않았으며, 영광 연안에서 출현하는 현존량도 매우 낮았다. 저층에서 최우점한 *P. sulcata*는 온대 해역의 기수 및 해수에 광범위하게 분포하며, 연안 퇴적층의 환경 지표종으로 이용된다[75]. 이 종은 서해에 보편적으로 관찰되는 임시 부유종으로, 대부분 해역에 연중 우점하며, 특히 경기만 겨울에 우점율이 높고[33], 천수만은 5월과 6월 최우점[47], 금강 하구 및 군산 연안도 겨울[46]과 봄[28], 고군산군도는 가을과 겨울[7], 고창 연안은 가을[27], 목포 시아해는 겨울과 봄에 최우점하였다[35]. 영광 연안도 연중 출현하지만[18], 최우점 보고는 없으며,

남해 진해만의 장기 조사에서 조사 연에 따라 다소 차이는 있지만, 전 계절 우점 출현하는 등[70], 한국 서해 및 남해의 전형적 토착종이라 할 수 있다. 기타 가을 표·저층에서 낮은 우점율로 우점한 *Rh. flaccida* (= *Guinardia flaccida*)는 한국 연안에 일반적으로 출현하는 종이냐[66], 우점 출현 기록은 많지 않다. 남해 득량만에 여름 최우점하였고[76], 동중국해 북부 해역에서 여름 극우점하였으며[77], 서해 고창 연안에서 우점하였지만[27], 높은 우점율로 내만 및 연안해역에 출현하는 경우는 많지 않다[66]. *Th. nordenskiöldii*는 원래 저온성으로 알려졌으나[78], 최근 온대 및 아열대까지 널리 분포하는 것이 보고되며, 한국 동, 서, 남해에서 일반적으로 관찰되지만[79], 우점종으로 기록된 사례는 거의 없다. 다만 서해 군산, 고군산 군도 및 고창 연안에 겨울 최우점하였다[7,27,28]. *Th. rotula*는 온대에서 한대에 걸쳐 분포하나[80], 한국 연안은 봄 동해에 우점보고된 것[66] 이외에는 없다. 일본에 적조생물로 기록되지만, 적조 발생 기록은 없다[56]. *C. gigas*는 대형 규조류로 한국 연안에 보편적으로 출현하지만, 우점 출현한 보고는 없다[66].

겨울 최우점한 *C. bergonii* (= *C. pelagica*)는 범지구적인 종[78]으로 미국 및 일본 등 북태평양 연안에 일반적으로 분포하는 종[22,56]으로 한국 연안에 일반적으로 출현하지만, 우점 출현은 영광 연안 이외에 서해 군산 연안에 겨울에서 여름까지 우점하였다[28]. 그리고 *C. anguste-lineata* (= *Thalassiosira anguste-lineata*)는 열대 및 온대 해역에 분포하지만[56,79], 한국 동해, 서해, 남해에서도 광범위하게 분포하는 종이냐[79], 국내 우점 기록은 아직 없다.

3.2.4 생태지수

생태지수는 생물군집 구조 특성을 표현하는 지표로 이용된다. 영광 연안은 정점에 따른 수심 차이가 크기에 표층 자료만으로 생태지수를 설명한다. 다양도 지수는 가을 1.11에서 겨울 3.35 범위로 평균 2.61 수준을 보였다 계절별로 봄 1.78-2.96 범위로 2.34±0.324 변동 폭을 보였고, 여름 2.07-3.47 범위로 2.77±0.44, 가을은 1.11-3.12 범위로 2.30±0.50, 그리고 겨울은 2.62-3.35 범위로 3.03±0.15 변동 폭을 보여, 겨울과 여름에 높고, 가을과 봄에 낮았다. 우점도 지수도 가을 0.28에서 봄 0.90 범위로 평균 0.57 수준을 보였다. 계절별로 봄은 0.41-0.90 범위로 0.64±0.11 변동 폭을 보였고, 여름은 0.35-0.84 범위로 0.58±0.13, 가을은 0.28-0.82 범위로 0.51±0.15, 그리고 겨울은 0.36-0.76 범위로 0.55±0.10 변동 폭을 보여, 봄에 높고, 여름에서 겨울까지 상대적으로 낮았다.

다양도 지수의 공간분포는 봄에 온배수 영향을 받는 북부에서 2.5 이상을 보였으나, 남서진하면서 감소하여 칠전도 이남에서 2.3 이하를 나타내었다. 그러나 남부 각 시도 주변에서 2.5 이상으로 재차 증가하였다(Fig. 11A upper). 여름은 봄보다 전체적으로 높았으며, 온배수 영향을 받는 북부에서 3.4 이상의 지수가 남서진함에 따라 감소하여 칠전도에서 낙월도 사이에서 2.5-3.0, 낙월도 및 각시도를 포함하는 남동 해역에 2.5 이하를 낮아졌다(Fig. 11B upper). 가을은 강한 해수 혼합으로 온배수 영향이 불분명하여, 북서부에서 2.5 이상, 범성포 입구에서 칠전도, 송이도를 연결하는 중앙부에서 2.0-2.5, 그리고 낙월도, 각시도를 포함하는 남부에서 2.0 이하로 낮았다(Fig. 11C upper). 그리고 겨울은 온배수 영향을 받는 북부에서 칠전도, 낙월도에 이르는 중앙부에서 3.0 이상을, 북동부 및 각시도를 포함하는 남부에서 3.0 이하의

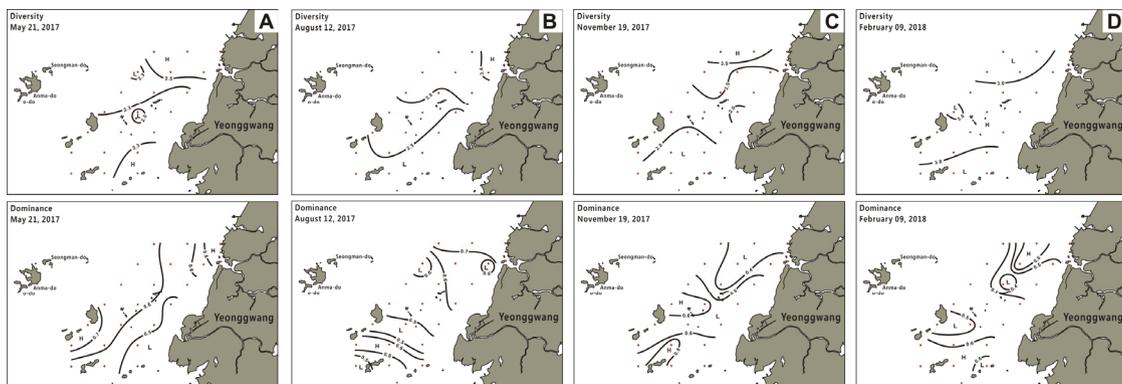


Fig. 11. Spatio-temporal distributions of diversity (upper) and dominance (lower) at surface in the YCW.

지수로 비교적 균일한 분포를 보였다(Fig. 11D upper).

우점도 공간분포는 봄 온배수 영향을 받는 북부 및 해안선에 평행한 중앙부 개방해역에서 0.6 이상, 연안부에서 0.5 이하로 낮았다(Fig. 11A lower). 여름은 봄과 달리 해안선에 직각 방향으로 온배수 영향을 받는 북부에서 0.7 이상을, 점차 남진하면서 감소하여 송이도 동부에서 0.5 이하를, 더욱 남진하여 낙월도 북부에서 각시도 주변은 0.6 이상으로 재차 높아졌다(Fig. 11B lower). 가을은 다른 계절과는 다르게 북부에서 0.4 이하로 낮았고, 송이도 북부 및 낙월도와 각시도를 포함하는 남부에서 0.7 이상 높았으나, 칠전도를 포함한 중앙부에서 0.6 이하를 나타내었다(Fig. 11C lower). 그리고 겨울은 온배수 영향을 받는 북부에서 0.5 이상 높았으나, 남서진하면서 감소하여 칠전도 주변에서 0.5 이하를 보였다. 그러나 더욱 남서진하면 지수가 상승하여 낙월도 및 각시도를 포함하는 남부에서 0.6 이상의 지수를 보였고, 송이도 동부에서 0.5 이하의 지수로 낮았다(Fig. 11D lower).

영광 연안 다양도 지수는 1.11-3.35 범위(평균 2.61)로 2010년 서해 금강 하구역[46] 1.04 -2.49(평균 1.72)이나, 고창 연안[27] 2.24-3.04 (평균 2.60) 보다는 높거나 유사하지만, 2018년 군산 연안[28] 2.60-3.25(평균 2.96) 보다는 낮았으며, 2018년 남해 거제 연안[81] 0.73-3.30(평균 2.13) 보다는 높았다. 우점도는 0.28-0.90(평균 0.57)로, 금강하구역[46] 0.42-0.85(평균 0.67), 군산 연안[28] 0.573-0.811(평균 0.68), 고창 연안[27] 0.77-0.94(평균 0.93)보다 매우 낮은 값이며, 남해 거제 연안[81] 0.46-0.86(평균 0.62)보다도 낮은 값으로, 영광 연안해역의 식물플랑크톤 군집은 서해 다른 해역에 비해 다양한 종들에 의해 비교적 건전한 군집 구조를 형성하는 것으로 판단되었다.

3.3 식물플랑크톤 군집의 출현 특성

계절별로 측정된 표층 환경 및 식물플랑크톤 군집 관련 인자를 이용하여 주성분 분석을 실시한 인자 부하량

분포에서 계절별 식물플랑크톤 군집의 출현 특성 및 생물 해양학적 환경특성을 고찰하였다. 주성분 분석 계산 결과는 Table 2와 같다. 여름은 제2 주성분까지 누적 기여율이 79.7%로 종합적 특성값 도출이 좋았지만, 제1 주성분 기여율이 40% 전후, 제2 주성분은 20% 전후의 누적 기여율이 약 60% 전후를 나타내었고, 제3 주성분까지 누적 기여율이 약 75% 전후를 나타내었다. 따라서 주성분의 해석은 제1, 2 주성분만을 대상으로 하였다[41].

인자 부하량 분포에서 봄 제1 주성분은 전체 식물플랑크톤, 규조류, 출현 종수 및 우점종 *A. glacialis*, *S. costatum*-ls에 강한 양의 관계, 그리고 수온 등 환경 인자에 약한 양의 관계를 보이지만, sigma t, 염분 등과 약한 음의 관계를 보이는 것에서, 온배수 영향해역의 규조류 출현 특성을 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 수온에 강한 양의 관계를, 출현 종수와 약한 양의 관계를 보이나, sigma t와 *A. kariana*와 강한 음의 관계를 보이는 것에서 종 다양성을 나타내는 지표로 해석되었다(Fig. 12A). 여름도 봄과 유사하여 제1 주성분은 전체 식물플랑크톤, 규조류, 식물성 편모조류, 극우점종 *L. danicus* 및 낮은 우점율을 보이는 우점종, *S. costatum*-ls, *Ch. curvisetus*에 강한 양의 관계, 출현 종수, 엽록소 a 농도 및 *E. zodiacus* 등과 약한 양의 관계를 나타내지만, 염분 및 sigma t와 강한 음의 관계, 그리고 탁도와 약한 음의 관계를 보이는 것에서, 온배수 영향해역의 식물플랑크톤 출현 특성을 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 *G. striata*, *E. zodiacus*, 출현 종수와 강한 양의 관계를 보이나, 염분과 약한 음의 관계를 보여, 출현 종 다양성을 나타내는 지표로 해석되었다(Fig. 12B). 가을은 *G. flaccida*, *Ch. curvisetus*, *Th. nordenskioldii* 및 식물플랑크톤 현존량, 규조류 및 식물성 편모조류 및 출현 종수에 강한 양의 관계를 보이지만, 탁도, 엽록소 a 농도, sigma t와 약한 음의 관계를 보이는 것에서 식물플랑크톤 군집의 다양성을 나타내는 지표로 해석되었다. 다만 가을은 봄이나 여름과는 다르

Table 2. Eigenvalue, proportion and accumulative proportion by principal component analysis

	Spring			Summer			Autumn			Winter		
	Principal Component									1st	2nd	3rd
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd			
Eigenvalue	5.068	2.450	2.391	7.187	3.974	1.385	4.996	3.631	2.626	7.140	2.610	1.727
Proportion (%)	39.0	18.8	18.4	51.3	28.4	9.9	33.3	24.2	17.5	44.6	16.3	10.8
AP (%)	39.0	57.8	76.2	51.3	79.7	89.6	33.3	57.5	75.0	44.6	60.9	71.7

AP : Accumulative proportion (%)

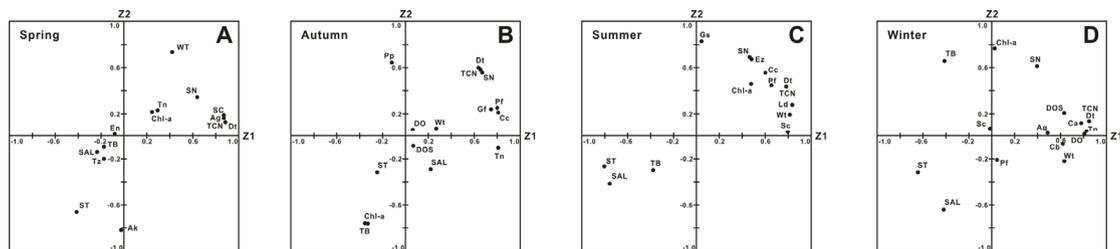


Fig. 12. Spatio-temporal distributions of loading factors by principal component analysis (PCA) at surface. (WT: water temperature, Sal: salinity, ST: sigma t, DO: dissolved oxygen, DOs: saturation of DO, TB: turbidity, Chl-*a*: chlorophyll *a*, SN: species number, TCN: total cell density, Dt: diatoms cell density, Pf: phytoflagellates cell density, Ag: *Asterionella glacialis*, Ak: *A. kariana*, Ca: *Coscinodiscus anguste-lineata*, Cb: *Cerataulina bergonii*, Cc: *Chaetoceros curvisetus*, Cs: *Ch. socialis*, Ez: *Eucampia zodiacus*, Gf: *Rhizosolenia flaccida* (= *Guinadia flaccida*), Gs: *Guinadia striata*, Ld: *Leptocylindrus danicus*, Pp: *Pseudo-nitzschia pungens*, Sc: *Skeletonema costatum*-ls, Tn: *Thalassiosira nordenskiöldii*, Tz: *Thalassionema nitzschioides* (= *Synedra nitzschioides* f. *nitzschioides*)).

계 식물플랑크톤 군집과 수온에 유의적인 관계는 관찰되지 않았다. 제2 주성분은 *Pn. pungens*, 출현 종수와 식물플랑크톤 현존량 및 규조류에 강한 양의 관계를 보이지만, 탁도 및 엽록소 *a* 농도에 강한 음의 관계를 보이는 것에서 해수의 혼탁 정도를 나타내는 지표로 해석되었다 (Fig. 12C). 겨울은 제1 주성분에 현존량, 규조류, *Th. nordenskiöldii*, *C. anguste-lineata*, *C. bergonii*, *A. glacialis* 등 우점종 및 수온, 용존산소 포화도 등에 강한 양의 관계를 보이지만, sigma t에 강한 음의 관계를, 그리고 염분 및 탁도에 약한 음의 관계를 보이는 것에서 온배수 해역을 중심으로 하는 식물플랑크톤 군집의 다양성을 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 엽록소 *a* 농도, 출현 종수, 탁도에 강한 양의 관계를 보이지만, 염분에 강한 음의 관계를 보이는 것에서, 폭설로 인한 연안부의 담수유입 정도를 나타내는 지표로 해석되었다 (Fig. 12D).

인자부하량 계절 분포에서 봄 *A. glacialis*, *S. costatum*-ls 및 *Th. nordenskiöldii* 등은 수온에 크게 지배되지만, *S. nitzschioides* f. *nitzschioides* 및 *A. kariana*는 수온보다 염분에 의해 지배되는 것으로 판단되었다. 여름에도 *L. danicus*, *S. costatum*-ls, *Ch. curvisetus*는 수온의 영향을 강하게 받지만, *G. striata*는 낮았다. 가을은 *G. flaccida*, *Ch. curvisetus*, *Th.*

nordenskiöldii 및 식물성 편모조류까지 수온의 영향이 낮았으며, *P. pungens*는 수온보다 해수 혼탁 정도에 지배되었다. 또한 엽록소 *a* 농도는 식물플랑크톤 현존량보다 높은 탁도, 즉 퇴적물의 재부유에 지배되었다. 겨울은 *Th. nordenskiöldii*, *C. anguste-lineata*, *C. bergonii*, *A. glacialis*가 수온에 지배되었지만, *S. costatum*-ls 및 식물성 편모조류는 수온의 영향이 크지 않았다. 또한 용존산소는 식물플랑크톤 현존량과 밀접한 관련성을 나타내지만, 엽록소 *a* 농도는 식물플랑크톤 현존량 이외의 탁도와 밀접하게 관련되었다[41]. 즉 주성분 분석 결과에서 가을을 제외한 계절의 영광 연안해역의 식물플랑크톤 군집의 출현에 온배수가 밀접하게 관련되고 있었으며, 엽록소 *a* 농도는 식물플랑크톤 현존량 이외에 낮은 수심 등으로 조석 혼합 등에 의한 표층퇴적물의 재부유 현상 등 부유물질량에 크게 지배되는 특성을 나타내었다.

주성분 분석 득점 분포로 해역을 구분하면, 봄 제1주 성분 양(+)의 영역인 높은 수온과 현존량을 보이는 정점군 I에서 상대적으로 다양한 종이 출현하는 온배수 영향해역 북부 I-1과 종 출현이 단조로운 송이도 주변 I-2으로 구분되었다. 제1주 성분 음(-)의 영역인 낮은 수온과 현존량을 보이는 정점군 II에서는 상대적으로 출현 종이 다양한 칠전도 북동 II-1과 상대적 종 출현이 단조

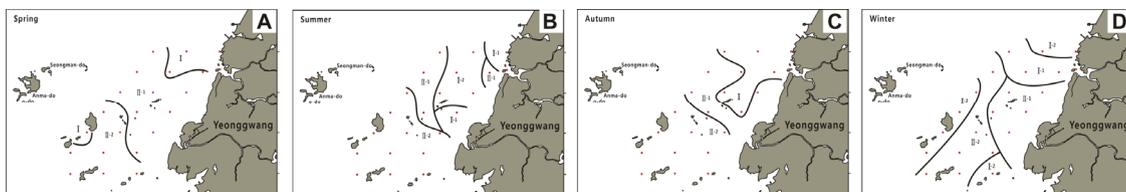


Fig. 13. Spatio-temporal variations of the separation of sea area by PCA score in the YCW.

로운 낙월도, 각시도를 포함하는 남서 해역의 II-2로 구분되었다(Fig. 13A). 여름은 제1주성분 양(+)의 영역인 높은 수온과 현존량을 나타내는 정점군 I에서 온배수 영향으로 비교적 다양한 종이 출현하는 북부 및 천해 연안인 I-1 해역과 출현 종이 상대적으로 단조로운 칠전도 동부 해역인 I-2 해역으로 구분되며, 제1주성분 음(-)의 영역인 낮은 수온과 현존량을 보이는 정점군 II에서 상대적으로 출현 종이 다양한 칠전도 서부의 II-1과 출현 종이 단조로운 남서부 광역해역인 II-2로 구분되었다(Fig. 13B). 가을은 제1주성분의 양(+)의 영역으로 비교적 높은 현존량과 다양한 종이 출현하는 북부에서 중앙부의 정점군 I과 제1주성분 음(-)의 영역으로 낮은 현존량과 종 출현이 다양한 칠전도 서부의 II-1과 상대적 종 출현이 단조로운 남서부 해역인 II-2로 구분되었다(Fig. 13C). 그리고 겨울은 봄 및 여름과 유사하여 제1주성분 양(+)의 영역으로 높은 수온과 현존량을 보이는 정점군 I에서 출현 종이 다양한 범성포 전면부인 I-1과 상대적으로 출현 종이 단조로운 북단 및 송이도 주변의 I-2로 구분되었다. 제1주성분 음(-)의 영역으로 상대적으로 낮은 수온과 현존량을 보이는 정점군 II에서 출현 종이 다양한 중앙부의 II-1과 출현종이 상대적으로 단조로운 중앙부 및 남서 해역 II-2로 구분되었다(Fig. 13D). 즉 원자력발전소의 온배수 영향을 받는 북부 해역은 계절에 따라 범위의 차이는 있지만, 모든 계절 다른 해역과 구별되었다.

4. 결론

온배수가 배출되는 영광 연안의 수괴 및 식물플랑크톤 군집 시·공간적 분포는 가을을 제외하면, 온배수 영향이 강한 해역에 상대적으로 높은 식물플랑크톤 현존량과 종 출현이 다양하여, 온배수가 식물플랑크톤 분포에 미치는 영향이 크게 나타났다. 그리고 온배수 유입은 연안해역의 식물플랑크톤 변동성을 크게 만드는 요인으로 작용하였다. 이러한 내용은 앞으로 영광 연안해역의 해양 환경 보전은 물론 해양산업의 장으로서 효율적 이용과 관리라는 측면에서도 중요하게 고려해야 할 내용이다.

References

- [1] J.H. Ryther, "Photosynthesis and fish production in the sea", *Science*, vol. 166, no. 3901, pp. 72-76, 1969. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.166.3901.72>
- [2] R.D. Seitz, H. Wennhage, U. Bergström, R.N. Lipcius, T. Ysebaert, "Ecological value of coastal habitats for commercially and ecologically important species", *ICES J. of Marine Science*, vol. 71, no. 3, pp. 648-665, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1093/icesims/fst152>
- [3] UNEP, "Marine and Coastal Ecosystems and Human Wellbeing: A Synthesis Report Based on the Findings of the Millennium Ecosystem Assessment", UNEP, Kenya, pp. 1-76, 2006.
- [4] H. Street, A. Paytan, "Iron, phytoplankton growth, and the carbon cycle", *Metal Ions in Biological Systems*, vol. 43, pp. 153-193, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780824751999.ch7>
- [5] J. Severiano, A. Moura, E. Magalhães, V. Almeida, "Study about top-down and bottom-up controls in regulating the phytoplankton biomass in a eutrophic reservoir in northeastern Brazil", *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 4, no. 8, pp. 616-621, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.48071>
- [6] M. Garmendia, Á. Borja, J. Franco, M. Revilla, "Phytoplankton composition indicators for the assessment of eutrophication in marine waters: Present state and challenges within the European directives", *Marine Pollution Bulletin*, vol. 66, no. 1-2, pp. 7-16, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.10.005>
- [7] Y.H. Yoon, "Spatio-temporal distributions of phytoplankton community in the coastal waters of Gogunsan Islands (CoWGs), West Sea of Korea", *Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 16, no. 3, pp. 2287-2300, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.3.2287>
- [8] F.J.P. Briand, "Effects of power-plant cooling systems on marine phytoplankton", *Marine Biology*, vol. 33, pp. 135-146, 1975. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00390718>
- [9] Z.B. Jiang, Y.B. Liao, J.J. Liu, L. Shou, Q.Z. Chen, X.J. Yan, F.H. Zhu, J.N. Zeng, "Effects of fish farming on phytoplankton community under the thermal stress caused by a power plant in a eutrophic, semi-enclosed bay: Induce toxic dinoflagellate (*Prorocentrum minimum*) blooms in cold seasons", *Marine Pollution Bulletin*, vol. 76, no. 1-2, pp. 315-324, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.006>
- [10] F. Huang, J. Lin, B. Zheng, "Effects of thermal discharge from coastal nuclear power plants and thermal power plants on the thermocline characteristics in sea areas with different tidal dynamics", *Water*, vol. 11, no. 12, 2577, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11122577>

[1] J.H. Ryther, "Photosynthesis and fish production in

- [11] Hanggummunhwayusandabsahoe (Korean Cultural Heritage Society), "A Field Guide to History, Jeonbuk", *Dolbaegae*, pp. 1-280, 1997.
- [12] I.W. Seo, D.G. Kim, "Current status and countermeasures for heated waters discharge of nuclear power plants", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 45, no. 9, pp. 29-36, 1997.
- [13] G.Y.N. Eun, K.W. Kim, J.Y. Kim, I.S. Kim, J.M. Cha, D.J. Kim, K.N. Kim, "Characteristics of particle size and element distribution in the coastal bottom sediments in the vicinity of Younggwang nuclear power plant", *Economic and Environmental Geology*, vol. 33, no. 3, pp. 195-204, 2000.
- [14] Y.H. Kim, S.H. Huh, "Species composition and biomass of marine algal community in the vicinity of Yonggwang nuclear power plant on the west coast of Korea", *Journal of the Korean Fisheries Society*, vol. 31, no. 2, pp. 186-194, 1998.
- [15] S.D. Hwang, Y.J. Im, Y.C. Kim, H.K. Cha, S.H. Choi, "Fishery resources off Younggwang I. Species composition of catch by a stow net", *Journal of the Korean Fisheries Society*, vol. 31, no. 5, pp. 727-738, 1998.
- [16] S.D. Hwang, Y.J. Im, H.I. Song, Y.S. Choi, H.T. Moon, "Fishery resources off Younggwang II. Species composition of catch by a otter trawl", *Journal of the Korean Fisheries Society*, vol. 31, no. 5, pp. 739-748, 1998.
- [17] H.Y. Lee, "Studies on the distribution of the microalgae in the tidal flats of Gamami beach, Young-Gwang, Korea", *Journal of the Environmental Sciences*, vol. 12, no. 7, pp. 715-724, 2003.
- [18] Y.S. Kang, 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, 2001.
- [19] Y.S. Kang, 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)", *Journal of the Korean Society of Oceanography*, vol. 7, no. 3, pp. 108-128, 2002.
- [20] J. Thronsdon, "Preservation and storage. In: Phytoplankton Manual (ed. A. Sournia)", *Unesco*, France, pp. 69-74, 1978.
- [21] OSJ (The Oceanographic Society of Japan), "A Manual for Coastal Environmental Survey (Sediments and Biology)", *Kouseisha-kouseikaku*, Japan. pp. 1-280, 2008.
- [22] E.E. Cupp, "Marine plankton diatoms of the west coast of north America", *Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography of the University of California*, vol. 5, pp. 1-237, 1943.
- [23] M. Chihara, M. Murano (eds), "An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan," *Tokai University Press*, Japan, pp. 1-1547, 1997.
- [24] T. Omura, M. Iwataki, V.M. Borja, H. Takayama, Y. Fukuyo, "Marine Phytoplankton of the Western Pacific", *Kouseisha Kouseikaku*. Japan. pp. 1-160, 2012.
- [25] C.E. Shannon, W. Weaver, "The Mathematical Theory of Communication", *University of Illinois Press*, USA, pp. 1-177, 1963.
- [26] S.J. McNaughton, "Structure and function in California grassland", *Ecology*, vol. 49, no. 5, pp. 962-972, 1968.
DOI: <https://doi.org/10.2307/1936547>
- [27] Y.H. Yoon, "Spatio-temporal variations of marine environment and phytoplankton community in the Gochang Coastal Waters (GCW) of Southern West Sea in Korea", *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 21, No. 11 pp. 477-493, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.11.477>
- [28] H.S. Kim, H. Kim, D. Yang, 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", *The Korean Journal of Environmental Biology*, vol. 38, no. 2, pp. 254-270, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.11626/KJEB.2020.38.2.254>
- [29] J.K. Choi, J.H. Noh, Y.S. Kang, "Distribution characteristics of phytoplankton in the West Sea of Korea. In: The Plankton Ecology of Korean Coastal Waters (ed, K. Choi)", *Donghwa Technology Publishing Co.*, Korea, pp. 30-47, 2011.
- [30] A.L. Muthulakshmi, U. Natesan, V.A. Ferrer, K. Deepthi, V.P. Venugopalan, S.V. Narasimhan "Impact assessment of nuclear power plant discharge on zooplankton abundance and distribution in coastal waters of Kalpakkam, India", *Ecological Processes*, vol. 8, Article number: 22, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0173-9>
- [31] T.P. Teixeira, L.M. Neves, F.G. Araújo, "Effects of a nuclear power plant thermal discharge on habitat complexity and fish community structure in Ilha Grande Bay, Brazil", *Marine Environmental Research*, vol. 68, no. 4, pp. 188-95, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2009.06.004>
- [32] J.H. Lee, B.W. An, I.K. Bang, H.J. Lie, J. Yang, "Water and salt budgets for the Yellow Sea. In: Biogeochemical Processes in the Bohai and Yellow Sea(eds; G.H. Hong, J. Zhang and C.S. Chung)", *Dongjin Publication Association*, Korea, pp. 221-234, 1999.
- [33] J.K. Choi, J.H. Shim, "The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. I. Environmental characteristics", *Journal of the Oceanological Society of Korea*, vol. 21, no. 1, pp. 56-71, 1986.

- [34] NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). "Climatic atlas of salinity in Korean waters (1966-1995), *NFRDI, Korea*", 1997.
- [35] 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", *The Korean Journal of Environmental Biology*, vol. 18, no. 1, pp. 77-93, 2000.
- [36] Y.S. Kang, J.K. Choi, K.H. Chung, Y.C. Park, "Primary productivity and assimilation number in the Kyonggi Bay and the mid eastern coast of Yellow Sea", *Journal of the Oceanological Society of Korea*, vol. 27, no. 3, pp. 237-246, 1992.
- [37] Y.K. Shin, J.H. Shim, J.S. Jo, Y.C. Park, "Relative significance of nanoplankton in Chunsu Bay: species composition, abundance, chlorophyll and primary productivity", *Journal of the Oceanological Society of Korea*, vol. 25, no. 4, pp. 217-228, 1990.
- [38] Y.H. Yoon, "Marine environments and production of laver farm at Aphae-do based on water quality and phytoplankton community", *Korean Journal of Environmental Biology*, vol. 32, no. 3, pp. 159-169, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11626/KJEB.2014.32.3.159>
- [39] Y.J. Sun, Y.K. Cho, "Tidal front and its relation to the biological process in coastal water", *Ocean Science Journal*, vol. 45, no. 4, pp. 243-251, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12601-010-0022-3>
- [40] M.T. Kwak, G.H. Seo, B.J. Choi, C.S. Kim, Y.K. Cho, "Sensitivity of simulated water temperature to vertical mixing scheme and water turbidity in the Yellow Sea", *Journal of the Korean Society of Oceanography*, vol. 18, no. 3, pp. 111-121, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7850/jkso.2013.18.3.111>
- [41] Y.H. Yoon, "Characteristics on spatial distributions of phytoplankton communities in relation to water masses in the western South Sea, Korea in early autumn 2021", *Korean Journal of Environmental Biology*, vol. 39, no. 4, pp. 559-272, 2021.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11626/KJEB.2021.39.4.559>
- [42] Y.H. Yoon, "Marine environments and phytoplankton in the Southwestern Sea of Korea. In: The Plankton Ecology in Korean Coastal Waters (ed: J.K. Choi)", *Donghwa Technology Publishing Co.*, Korea. pp. 68-93, 2011.
- [43] Y.H. Yoon, "Bio-environmental characteristics of the Uljin Marine Ranching Area (UMRA), East Sea of Korea. 1. Spatio-temporal distributions of phytoplankton community", *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, vol. 19, no. 1, pp. 37-46, 2016.
DOI: <http://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2016.19.1.37>
- [44] T.R. Parsons, M. Takahashi, B. Hargrave, "Biological Oceanographic Processes (3rd ed.)", *Pergamon Press*, England, pp. 1-330, 1984.
- [45] Y.H. Yoon, H.G. Rho, Y.K. Kim, "Seasonal succession of phytoplankton population in the Hamdok port, Northern Cheju Island", *Bulletin of Marine Science Institute, Cheju National Univ.*, vol. 16, pp. 27-42, 1992.
- [46] Y.K. Shin, "An ecological study of phytoplankton community in the Geum river estuary", *Korean Journal of Ecology and Environment*, vol. 46, no. 4, pp. 524-540, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11614/KSL.2013.46.4.524>
- [47] J.H. Shim, H.G. Yeo, "Spatial and temporal variations of phytoplankton in Chonsu Bay", *Journal of the Oceanological Society of Korea*, vol. 23, no. 3, pp. 130-145, 1988.
- [48] J.H. Shim, Y.K. Shin, 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", *Journal of the Oceanological Society of Korea*, vol. 26, no. 2, pp. 155-168, 1991.
- [49] K.H. Choi, Y.O. Kim, J.B. Lee, S.Y. Wang, M.W. Lee, *et al.*, "Thermal impacts of a coal power plant on the plankton in an open coastal water environment", *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 187-194, 2012.
DOI: <https://jmst.ntou.edu.tw/journal/vol20/iss2/9>
- [50] W.H. Lee, G.H. Lee, M.S. Choi, D.M. Lee, "Phytoplankton and bacterioplankton in the intertidal and subtidal waters in the vicinity of Kunsan", *Journal of the Oceanological Society of Korea*, vol. 24, no. 3, pp. 157-164, 1989.
- [51] O. Muñiz, J.G. Rodríguez, M. Revilla, A. Laza-Martínez, S. Seoane, 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)", *Regional Studies in Marine Science*, vol. 17, pp. 59-72, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.risma.2017.11.011>
- [52] Y. Ye, K. Chen, Q. Zhou, P. Xiang, Y. Huo, M. Lin, "Impacts of thermal discharge on phytoplankton in Daya Bay", *Journal of Coastal Research*, special issue no. 83, pp. 135-147, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.2112/SI83-022.1>
- [53] J.E. Cloern, "Why large cells dominate estuarine phytoplankton", *Limnology and Oceanography*, vol. 63, pp. 392-409, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1002/lno.10749>
- [54] P. Bazin, F. Jouenne, T. Friedl, A.F. Deton-Cabanillas, B. Le Roy, 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>
- [55] P. Vigil, P. Countway, J. Rose, D.J. Lonsdale, C.J. Gobler, D.A. Caron, "Rapid shifts in dominant taxa among microbial eukaryotes in estuarine ecosystems", *Aquatic Microbial Ecology*, vol. 54, no. 1, pp. 83-100, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.3354/ame01252>
- [56] Y. Fukuyo, H. Takano, M. Chihara, K. Matsuoka (eds), "Red Tide Organisms in Japan-An Illustrated Taxonomic Guide-", *Uchida Rokakuho*, Japan, pp. 1-407, 1990.
- [57] F.J.R. Taylor, V.L. Trainer (eds), "Harmful algal blooms in the PICES region of the North Pacific", PICES Scientific Report No. 23, *North Pacific Marine Science Organization (PICES)*, pp. 1-152, August 2002.
- [58] S. Mishra, G. Sahu, A.K. Mohanty, S.K. Singh, 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 Journal of Water, Environment and Pollution*, vol. 3, no. 2, pp. 71-77, 2005.
- [59] A. Jaanus, K. Toming, S. Hällfors, K. Kaljurand, I. Lips, "Potential phytoplankton indicator species for monitoring Baltic coastal waters in the summer period", *Hydrobiologia*, vol. 629, no. 1, pp. 157-168, 2009.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-3385-7_14
- [60] R.A. Horner, "A Taxonomic Guide To Some Common Phytoplankton", *Biopress Limited, Dorset Press*, England, pp. 1-195, 2002.
- [61] A. Miralto, G. Barone, G. Romano, S.A. Poulet, A. Ianora, G.L. Russo, I. Buttino, G. Mazzarella, M. Laabir, M. Cabrini, M.G. Giacobbe, "The insidious effect of diatoms on copepod reproduction", *Nature*, vol. 402, pp. 173-176, 1999.
DOI: <https://doi.org/10.1038/46023>
- [62] A.G. Howard, S.D.W. Comber, D. Kifle, E.E. Antai, D.A. Purdie, "Arsenic speciation and seasonal changes in nutrient availability and micro-plankton abundance in Southampton Water, U.K", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 40, no. 4, pp. 435-450, 1995.
DOI: <https://doi.org/10.1006/ecss.1995.0030>
- [63] Y. Yamasaki, Y. Ohmichi, T. Shikata, M. Hirose, Y. Shimasaki, Y. Oshima, T. Honjo, "Species-specific alleopathic effects of the diatom *Skeletonema costatum*", *Thalassas: An International Journal of Marine Science*, vol. 27, no. 1, pp. 21-32, 2011..
- [64] M.L. Kent, J.N.C. Whyte, C. LaTrace, "Gill lesion and mortality in seawater pen-reared Atlantic salmon *Salmo salar* associated with a dense bloom of *Skeletonema costatum* and *Thalassiosira* species", *Diseases of Aquatic Organisms*, vol. 22, No. 1, pp. :77-81, 1995. .
- [65] Iizuka S., "The results of a survey of maximum densities in cell number of phytoplankton in coastal waters of Japan", *Bulletin of Plankton Society of Japan*, vol. 32, no. 1, pp. 67-72, 1985.
- [66] J.K. Choi (ed), "The Plankton Ecology in Korean Coastal Waters", *Donghwa Technology Publishing Co.*, Korea. pp. 1-427, 2011.
- [67] Y.H. Yoon, N.P. Koh, "Studies on the environmental characteristics of the breeding ground in the Kogum-sudo, southern part of Korean Peninsula 1. Seasonal succession of phytoplankton population", *Journal of Aquaculture*, vol. 8, no. 1, pp. 47-58, 1995.
- [68] R. Karthik, G. Padmavati, S. Sai Elangovan, V. Sachithanandam, "Monitoring the diatom bloom of *Leptocylindrus danicus* (Cleve 1889, Bacillariophyceae) in the coastal waters of South Andaman Island", *Indian Journal of Geo-Marine Science*, vol. 46, no. 5, pp. 958-965, 2017.
- [69] P.A. Ajani, K. Petrou, M.E. Larsson, D.A. Nielsen, J., Burke, S.A. Murray, "Phenotypic trait variability as an indication of adaptive capacity in a cosmopolitan marine diatom", *Environmental Microbiology*, vol. 23, no. 1, pp. 207-223, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15294>
- [70] K.I. Yoo, J.H. Lee, "Environmental studies of the Jinhae Bay 3. Ecological succession of phytoplankton populations, 1974~1980.:", *Journal of the Oceanological Society of Korea*, vol. 15, no. 2, pp. 100-107, 1980.
- [71] Y.H. Yoon, J.S. Park, B.S. Kim, "Spatial distributions of phytoplankton community in the coastal waters of South Sea, Korea during the early summer of 2018", *Korean Journal of Environmental Biology*, vol. 37, no. 2, pp. 164-176, 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11626/KJEB.2019.37.2.164>
- [72] T. Nishikawa, Y. Hori, K. Tanida, I. Imai, "Population dynamics of the harmful diatom *Eucampia zodiacus* Ehrenberg causing bleachings of *Porphyra thalli* in aquaculture in Harima-Nada, the Seto Inland Sea, Japan". *Harmful Algae*, vol. 6, no. 6, pp. 763-773, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2007.04.005>
- [73] M. Begum, B.K. Sahu, A.K. Das, N.V. Vinithkumar, R. Kirubakaran, "Extensive *Chaetoceros curvisetus* bloom in relation to water quality in Port Blair Bay, Andaman Islands", *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 187, no. 5, 4461, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4461-2>
- [74] K.D. Choi, J.S. Lee, J.O. Lee, K.S. Oh, I.S. Shin, "Investigation of domoic acid in shellfish from retail outlets", *Food Science and Biotechnology*, vol. 18, no. 4, pp. 842-848, 2009.
- [75] M.R. McQuoid, K. Nordberg, "The diatom *Paralia sulcata* as an environmental indicator species in coastal sediments", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 56, no. 2, pp. 339-354, 2003.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00187-7](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00187-7)

- [76] Y.H. Yoon, "The characteristics on the spatio-temporal distributions of phytoplankton communities in Deukryang Bay, southwestern Korea", *Korean Journal of Environmental Biology*, vol. 17, no. 4, pp. 481-492, 1999.
- [77] Y.H. Yoon, J.H. Park, H.J. Lee, H.Y. Soh, "Characteristics of ecological structure and spatial distribution of micro-plankton in relation to water masses in the northern East China Sea(nECS) in summer 2019", *Korean Journal of Environmental Biology*, vol. 38, no. 3, pp. 355-370, 2020.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11626/KJEB.2020.38.3.355>
- [78] G.R. Hasle, E.E. Syvertsen, "Marine Diatoms, In: Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates (ed: C.R. Tomas)", *Academic Press*, USA, pp. 5-385, 1996.
- [79] J.S. Park, S.W. Jung, S.D. Lee, S.M. Yun, J.H. Lee, "Species diversity of the genus *Thalassiosira* (Thalassiosirales, Bacillario -phyta) in South Korea and its biogeographical distribution in the world", *Phycologia*, vol. 55, no. 4, pp. 403-423, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.2216/15-66.1>
- [80] M. Hoppenrath, B. Beszteri, G. Drebes, H. Halliger, J.E.E. Van Beusekom, S. Janisch, K.H. Wiltshire, "*Thalassiosira* species (Bacillariophyceae, Thalassiosirales) in the North Sea at Helgoland (German Bight) and Sylt (North Frisian Wadden Sea)—a first approach to assessing diversity, *European Journal of Phycology*, vol. 42, no. 3, pp. 271-288, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1080/09670260701352288>
- [81] Y.H. Yoon, G.W. Baeck, H.Y. Soh, "A characteristics of monthly variation of phytoplankton community in the inner bay of Southeastern Geoje Island, South Sea of Korea", *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, vol. 28, no. 3, 126-133, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.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>

연안환경생태학, 적조생리·생태, 해양환경복원