# Article



# 남해 진해만의 환경 및 식물플랑크톤 변동 패턴: 2017-2022년 유해 플랑크톤을 중심으로

김한 $2^{1^{\dagger}} \cdot$ 김태희 $^{1^{\dagger}} \cdot$ 박태 $\mathbf{h}^{2} \cdot$ 기장서 $^{1^{*}}$ 

<sup>1</sup>상명대학교 생명과학과 (03016) 서울 종로구 홍지문2길 20 <sup>2</sup>국립수산과학원 (46083) 부산광역시 기장군 기장해안로 216

# Identification of Environmental and Phytoplankton Fluctuation Patterns in Jinhae Bay, South Sea: Focusing on Harmful Plankton from 2017 to 2022

Han-Sol Kim<sup>1†</sup>, Taehee Kim<sup>1†</sup>, Tae-Gyu Park<sup>2</sup>, and Jang-Seu Ki1<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Life Science, Sangmyung University, Seoul 03016, Korea <sup>2</sup>National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

**Abstract :** This study investigated recent seasonal changes in the phytoplankton community in the southern coast of Korea, analyzing monthly samples collected at four stations (St.1–4) in Jinhae Bay from 2017 to 2022. Environmental factors except nutrients were similar each station. Water temperature ranged from 6.0 to 29.0°C and DO ranged from 2.7 to 11.6 mg L<sup>-1</sup> with salinity ranging from 25.9 to 33.8 psu. There was no significant differences in environmental factors between stations except for nutrients. Phytoplankton cell concentrations ranged from  $5.0 \times 10^3$  cells L<sup>-1</sup> to  $7 \times 10^5$  cells L<sup>-1</sup>, with patterns similar to chlorophyll-*a* at each site. Phytoplankton taxa identified here were 42 genera and 77 species, including 49 diatoms, 27 dinoflagellates, and one Dictyochophyceae species. Diatoms dominated throughout all monitoring stations and seasons; however, dinoflagellates exhibited sporadic patterns during spring seasons. Nine harmful phytoplankton were identified, including one diatome *Psuedo-nitzschia* and eight dinoflagellate *Alexandrium* spp., *Akashiwo sanguinea, Margalefidinium polykrikoides, Dinophysis* spp., *Gymnodinium* spp., *Pheopolykrikos hartmannii, Polykrikos kofoidii* and *Prorocentrum* spp. The appearance pattern of the harmful phytoplankton showed a high correlation with seasonal factors. This study provides fundamental data on the composition of phytoplankton and their relationship with environmental factors in Jinhae Bay. In addition, they may be useful for understanding long-term changes in harmful phytoplankton in the southern coasts of Korea.

Key words : Jinhae Bay, phytoplankton, monitoring, diatom, dinoflagellate

<sup>\*</sup>Corresponding author. E-mail: kijs@smu.ac.kr

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>These authors contributed equally to this work.

# 1. 서 론

남해에 위치한 진해만은 해안선 굴곡이 심하며, 거제도 와 가덕도에 둘러싸인 반폐쇄성 내만이다. 지형적으로 두 개의 좁은 수로(가덕수로, 견내량수로)를 통해 외측 연안 과 연결되어 있어 해수 교환이 원활하지 않은 해역이다. 하지만 기상 조건에 따라서 해황의 변동이 심하며, 외양과 내만의 혼합 정도가 커서 난류 형성이 보고되기도 한다 (Han et al. 1991). 수문학적으로 진해만은 외해수와 담수 등 여러 수괴가 접하는 지역으로 매우 복잡한 구조를 가 지고 있다. 진해만에 포함되어 있는 마산만과 행암만, 원 문만 및 고현만은 해수의 유동이 원활하지 못한 온대 내 만 해역으로서 일반적으로 여름철에 육지로부터 담수가 유입되고 표층수의 수온 상승으로 저층으로의 산소 공급 이 원활하지 못해 저산소 수괴를 형성한다(Lee 1993).

진해만은 지난 수십 년간 어패류의 산란과 성육장 역할 을 해왔으며, 패류양식이 성행하여 국내 굴 생산량의 63% 를 차지하고 있다(2012년 기준, Jin et al. 2019). 해산물의 수요가 증가하면서 이에 높은 비중을 차지하는 패류의 양 식 규모도 증가하는 추세이지만, 부영양화로 인한 적조, 빈산소수괴 발생 등의 환경문제가 연안생태계 및 양식장 에 부정적 영향을 미친다(Kim and Kim 2003; Kim et al. 2012; Lee et al. 2017, 2018, 2020). 특히, 봄철에 독성 플 랑크톤이 과다 증식하면, 이매패류는 세포를 여과 섭식하 여 체내에 독소를 축적한다. 패류독소는 국민의 식품위생 및 건강과 직결되어 있기 때문에 어패류 식중독 방지를 위해 패류독소 및 독성 플랑크톤 모니터링이 꾸준하게 진 행되고 있다.

진해만 해역을 중심으로 다양한 식물플랑크톤 연구가 수행되었으며, 플랑크톤의 분류(Yoo and Lee 1979), 분포 와 군집구조(Park et al. 2001; Yoo et al. 2007; Baek and Kim 2010), 적조생물의 분포 특성 및 발생 기작(Park 1982; Lee et al. 2005)이 주요하게 파악되었다. 특히 적조 발생 과 관련하여 환경인자와 식물플랑크톤의 성장특성(Yoo and Lee 1979, 1980), 적조원인생물 분포 및 발생 기작 (Cho 1978, 1979; Lee et al. 1981, 2005; Park 1982), 부영 양화 제어 수치 모델과 식물플랑크톤 군집 구조 수치모델 (Kim et al. 1995), 광환경에 따른 광합성 특성(Park et al. 2001) 등의 개별적인 연구들이 수행되었다. 지금까지 보 고된 진해만 대상의 연구는 단기간의 식물플랑크톤 분포 및 군집 구조에 관한 것이다.

최근의 해양환경 변화는 식물플랑크톤 군집 및 조성의 변화를 야기하고 있다. 1980년대 이후, 진해만 해역의 식 물플랑크톤은 군집의 천이가 다수 보고되었으며, 이에 따 라 장기적 정기 모니터링 자료 구축이 필요하다. 따라서, 본 연구는 2017년부터 2022년까지 6년간 진해-마산만의 물리화학적 요인과 식물플랑크톤을 모니터링하여, 공간 적, 환경적 요인에 따른 식물플랑크톤 군집구조의 변화를 조사하여 보고하였다.

# 2. 재료 및 방법

# 환경요인 분석

본 연구를 위해 2017년부터 2022년까지(매년 3월부터 11월까지 월 1회) 진해만의 4개의 정점에서 표층수를 대 상으로 식물플랑크톤 군집 및 환경요인을 분석하였다 (Fig. 1).

수온과 염분은 CTD (Sea-Bird 9, USA)를 이용하여 측 정하였고 해수 중 용존산소량(Dissolved oxygen, DO)은 다항목 자동수질측정기(YSI-6600E)를 이용하여 측정하였 다. 영양염 분석(용존무기질소(Dissolved Inorganic Nitrogen, DIN), PO<sub>4</sub>-P, SiO<sub>2</sub>-Si) 현장 해수를 확보하여GF/F (25 mm diameter; Whatman, Maidstone, UK) 여과지와 주사기형 여 과세트로 여과한 후, 냉동상태로 보관하여 실험실로 옮겨 영양염 자동분석기(Seal analytical, Model QuAatro)로 분 석하였다. 엽록소-a는 300 mL의 해수시료를 GF/F 필터(47 mm diameter; Whatman)로 여과한 후, 90% 아세톤에 24시 간(4°C, 암조건) 보관하여 색소를 추출하였고, 3,000 × g에 서 5분간 원심분리하여 상등액을 분리하였다. 분리한 상등 액의 흡광도는 DU730 분광광도계(Beckman, Fullerton, CA)를 사용하여 측정하였다. 엽록소-a 농도는 750 nm의 조정값을 기준으로 663 nm, 645 nm, 630 nm 순으로 흡광 도를 분석하여 Parsons (2013)에 따라 추정하였다.



Fig. 1. A map of the sampling location from South Korea, Jinhae Bay. Red dots indicate sampling stations (St.1-4)

#### 식물플랑크톤 분석

식물플랑크톤의 정량, 정성분석은 루골(Lugol) 1% 농 도로 고정된 해수시료를 사용하였다. 정량분석은 Sedgwick-Rafter counting chamber에 시료를 1 mL 분주하여 광학현 미경(Axioskop, Carl Zeiss, Jena, Germany)을 이용해 200 배율에서 3회 계수하여 평균을 구하였다. 정성분석은 농 축된 시료를 슬라이드 글라스 위에 놓고 광학현미경 (Axioskop, Carl Zeiss, Jena, Germany) 400–1,000배율에서 검 경·동정하였다. 광학현미경하에서 동정이 어려운 종은 속 수준에서 동정하였다.

정점 별 식물플랑크톤 출현과 계절 간의 선형상관관계 를 분석하기 위해 Heatmapper를 이용하였다(Babicki et al. 2016). 분석을 위해 3-5월을 봄철, 6-8월을 여름철, 9-11 월을 가을철로 지정하여 식물플랑크톤 출현 종의 계절별 평균 현존량을 계산하였다. 또한, 유해식물플랑크톤에 의 한 각 정점의 시공간적 분포를 설명하기 위해 Paleontological Statistics Software Package version 4.02를 이용하여 주성분 분석(Principal component analysis, PCA)을 실시 하였다(Hammer 2001).

# 3. 결 과

# 수온, 염분, 용존산소, 영양염의 변화

조사기간 중 각 정점의 수온, DO, 염분은 정점 간에 서 로 비슷하였다(Fig. 2). 수온의 경우 6°C에서 29°C의 범위 로 여름철에 상승한 수온이 가을철에 하강하는 패턴이었 다. 이러한 수온의 변화양상은 6년간의 연구에서 동일하 였다. 하지만 DO는 계절에 따른 일관적 변화를 보이지 않 았다. 연구기간 동안 DO는 일반적으로 약 6에서 12 mg L<sup>-1</sup>의 범위로 분석되었으나, 2017년 6월과 7월에는 각각 약 4, 3 mg L<sup>-1</sup>로 연도 별 평균값에 비해 낮은 값을 가졌 다. 염분은 25.9-33.8 psu의 범위를 보였으며 주로 여름에 하강하였다. 이러한 양상은 6년의 연구기간 동안 동일하 였으나 2019에서 2021년의 기간동안 더 큰 하강폭을 나타 내었다. 수계 내 필수 영양염(N, P, Si)을 나타내는 DIN, PO<sub>4</sub>-P, SiO<sub>2</sub>-Si의 농도는 뚜렷한 연도 및 계절별 변화 양 상을 보이지 않았으나 특정한 시기 및 정점에서 크게 상 승하였다(Fig. 2). 예를 들어 총 연구기간동안 모든 정점에 서의 DIN의 평균농도는 4.5 µM이나 2021년 7월 정점 3에 서는 약 8배 높은 38.2 μM의 농도로 분석되었다. PO4-P의 전체평균농도는 0.21 µM이었지만 2018년 10월 정점 2에 서 약 8.5배 높은 1.79 μM의 농도를 보였다. SiO<sub>2</sub>-Si는



Fig. 2. Annual and monthly changes of water properties (water temperature, dissolved oxygen and salinity) and nutrient factors (dissolved inorganic nitrogen, PO4-P and SiO2-Si) at Jinhae Bay from 2017 to 2022

9.74 μM의 전체평균농도로 분석되었으나 2022년 6월 정 점 4에서 약 7.2배 높은 70.9 μM의 농도를 나타내었다.

### 식물플랑크톤 현존량 및 엽록소-a 변화

식물플랑크톤 평균 현존량은 연구기간 동안 정점 1에 서  $4.3 \times 10^2$  cells mL<sup>-1</sup>, 정점 2에서  $7.2 \times 10^2$  cells mL<sup>-1</sup>, 정점 3에서 5.5 × 10<sup>2</sup> cells mL<sup>-1</sup>, 정점 4에서 6.5 × 10<sup>2</sup> cells mL-1로 계수되었다(Fig. 3a). 연도별 최대 식물플랑크톤 현존량을 분석한 결과, 2017년에는 7월 정점 1에서 4.0 × 10<sup>3</sup> cells mL<sup>-1</sup> 농도로 출현하였고 Chatoceros spp.가 우점 하였다. 2018년에는 9월에 정점 2에서 7.9 × 10<sup>3</sup> cells mL<sup>-1</sup>의 농도로 분석되었으며, Chatoceros spp.가 우점하였 다. 2019년에는 9월에 정점 2에서 7.1 × 10<sup>3</sup> cells mL<sup>-1</sup> 농 도의 식물플랑크톤이 출현하였으며 Pseudo-nitzschia spp. 가 우점하였다. 2020년에는 6월에 정점 4에서 7.9 × 10<sup>3</sup> cells mL<sup>-1</sup>의 식물플랑크톤이 출현하였는데 Chatoceros spp.가 우점하였다. 2021년에 기록된 최대 식물플랑크톤 현존량은 10월 정점 3에서 1.2 × 10<sup>3</sup> cells mL<sup>-1</sup>의 비교적 낮은 농도로 Chatoceros spp.가 우점하였다. 2022년에는 10월 정점 4에서 3.2 × 10<sup>3</sup> cells mL<sup>-1</sup> 농도의 식물플랑크 톤이 출현하였으며, Chatoceros spp.가 우점하였다. 종합 하면 연구기간동안 식물플랑크톤은 대체로 가을철에 최 대 현존량을 나타내었으며, 이 때 *Chatoceros* spp.가 우점 하는 양상을 보였다. 실제로 계절별 식물플랑크톤 평균 현 존량을 분석한 결과 봄철에 2.3 × 10<sup>2</sup> cells mL<sup>-1</sup>, 여름철에 6.9 × 10<sup>2</sup> cells mL<sup>-1</sup>, 가을철에 8.4 × 10<sup>2</sup> cells mL<sup>-1</sup>로 점점 현존량이 높아지는 양상을 보였다.

엽록소-*a*는 식물플랑크톤 현존량의 증감과 유사한 패 턴을 보였다(Fig. 3b). 구체적으로, 정점 1에서 평균 6.9 μg L<sup>-1</sup>, 정점 2에서 평균 12.7 μg L<sup>-1</sup>, 정점 3에서 평균 4.5 μg L<sup>-1</sup>, 정점 4에서 평균 5.0 μg L<sup>-1</sup>로 정점 2가 가장 높은 농도로 분석되었다. 계절별 평균은 봄철에 3.0 μg L<sup>-1</sup>, 여 름철에 12.3 μg L<sup>-1</sup>, 가을철에 6.2 μg L<sup>-1</sup>로 여름에 가장 높았다.

### 식물플랑크톤 종조성 및 변화

연구기간 동안 식물플랑크톤 총 42속 77종의 분류군이 진해만에서 관찰되었다. 규조류가 종 조성에서 가장 많았 으며 총 49종이 출현하였다. 그 다음으로는 와편모조류 (27 종), 규질편모조류(1종)가 출현하였다. 정점별로는 정 점 1에서 68 종, 정점 2에서 70종, 정점 3에서 70종, 정점 4에서 77종이 출현하여 정점 4를 제외하고 비슷한 출현



Fig. 3. Annual and monthly changes of phytoplankton and chlorophyll a at Jinhae Bay from 2017 to 2022

종수를 보였다. 2017년 6월에 53종으로 가장 많았고, 2020년도 7월에 정점 1에서 *Ceratium furca* 1종만이 출현 하였다. 규조류는 모든 정점에서 대부분의 기간동안 우점 하였다. 정점별 분석에서 와편모조류 평균 출현양은 차이 가 있었는데, 정점 1과 2는 약 1.5 × 10<sup>1</sup> cell mL<sup>-1</sup>이였으나 정점 3과 4는 각각 약 5.0 × 10<sup>-1</sup> cells mL<sup>-1</sup>, 1.0 × 10<sup>-1</sup> cell mL<sup>-1</sup>의 출현양을 보여 최대 15배 이상의 차이로 분석 되었다. 연도별 분석에서는 와편모조류는 2019년과 2020 년에 각각 평균 출현 비율은 21.2 %와 16.9 % 였으나, 다

른 연도들은 5% 이하의 값을 보였다. 특히 2020년 7월 정점 1과 3에서 100%의 출현비율로 분석되었으며, 이때 *Ceratium furca*가 우점하였다. 계절별 분석에서는 와편모 조류는 봄철에 15.0 %, 여름철에 8.2 %, 가을철에 1.8 % 의 출현비율을 보여 봄철에 강세를 보였다.

Heat map 분석결과 연구기간동안 출현한 식물플랑크 톤 종들이 서로 다른 연도별 출현양상을 가졌다(Fig. 4). 비슷한 출현양상을 가지는 종들을 Group별로 묶은 결과, Group 1에 속하는 *Chaetoceros* spp., *Leptocylindrus* spp.,



Fig. 4. A heatmap showing correlations among seasonal samples with abundance of phytoplankton species from each station of Jinhae Bay. On the right are the species of phytoplankton for which correlations with the seasonal samples were determined. Below are the seasonal samples of the spring (blue color), summer (green color) and autumn (orange color). The four samples within each season represent St.1, St.2, St.3, and St.4 in that order. The colored scale bar indicates the degree of correlation between the variables. Red indicates a close correlation between the taxa and the samples, while light blue indicates a more distant correlation

Psuedo-nitzschia spp., Skeletonema costatum은 특정한 연 도에 뚜렷한 강세를 보이지 않고 보편적으로 출현하였으 나, 2019년 봄철에 낮은 선형상관관계를 보였다. Group 2에 속하는 생물들은 2017년도에서 2018년도까지 강세를 보였으나, 그 이후에는 거의 출현하지 않았다. 이는 Group 4에서도 동일하였다. 시간의 흐름에 따라 연속적인 선형 상관관계를 보이는 식물플랑크톤 종들과는 달리, 대부분 의 와편모조류는 Group 3에 속하여 특정시기에 간헐적으 로 높은 선형상관관계를 보였다. 이러한 간헐적 출현은 2017년에서 2019년 사이의 기간동안 더 빈번하게 발생하 였다. Group 5에 속하는 생물들은 2017년에서 2019년 까 지는 특정한 시기를 선호하지 않고 보편적으로 출현하였 으나, 2020년 이후로는 앞선 시기보다 낮은 선형상관관계 를 가지는 것으로 분석되었다. 각 Group에 속하지 않는 종들은 비교적 고유한 출현 패턴을 가졌다. 예를 들어, 대 부분의 종이 연구기간동안 2022년에 가까워질수록 낮은 선형상관관계를 보였으나, 규조류 Guinardia delicatula는 2021년과 2022년에 다른 년도보다 높은 선형상관관계로 분석되었다. 와편모조류 Ceratium fusus는 2019년과 2021 년 여름에 높은 선형상관관계를 보였다. 이에 반해 Alexandrium spp.는 2017, 2019, 2020, 2021년의 봄철에 비교 적 높은 선형상관관계로 분석되었다.

#### 주요 유해 식물플랑크톤 출현 양상

연구기간에 출현한 유해 식물플랑크톤은 규조류 1종, 와편모조류 8종으로 파악되었다. 유해 규조류 Psuedonitzschia는 연중 출현하였으며, 최대 현존량은 5.4 × 10<sup>3</sup> cells mL<sup>-1</sup>(정점 2, 2019년 9월) 로 파악되었다(Fig. 5a). 유해 와편모조류는 Alexandrium spp., Akashiwo sanguinea, Margalefidinium polykrikoides, Dinophysis spp., Gymnodinium spp., Pheopolykrikos hartmannii, Polykrikos kofoidii, Prorocentrum spp.가 출현하였다. 마비성 패류독소를 생 성하는 것으로 알려진 Alexandrium은 주로 봄철에 출현하 였으며, 정점 1과 2에서 각각 8.2 × 10<sup>1</sup> cells mL<sup>-1</sup>(2020년 4월), 1.1 × 10<sup>2</sup> cells mL<sup>-1</sup>(2021년 4월)의 높은 현존량을 보였다(Fig. 5b).

유해 식물플랑크톤의 출현양상은 주성분 분석에서 계 절적 요인과 높은 상관성을 보였다(Fig. 6a). 주성분 분석 결과, PCA1은 68.9%의 변이를 보이며 봄철과 여름철 시 료를 분리하였고, 각각 와편모조류와 규조류가 주성분으 로 작용하였다. PCA2는 15.6%의 변이를 보이며 *Psuedonitzschia*와 *Chaetoceros* spp.가 주성분으로 작용하여 각 정점을 분리하였다(Fig. 6b). 규조류 *Psuedo-nitzschia*와 와편모조류 *Alexandrium*은 수온에 따라 서로 다른 출현양 상을 보였다(Fig. 7). *Psuedo-nitzschia* (6.0–29.0°C)와 *Alexandrium* (9.1–28.6°C) 모두 넓은 수온 적응범위를 보였으



Fig. 5. Monthly change of harmful phytoplankton Pseudo-nitzschia (a) and Alexandrium (b) from the Jinhae Bay



Fig. 6. Principal component analysis (PCA) plot (a) of the seasonal variation of phytoplankton recorded monthly in Jinhae Bay from 2017 to 2022. Axis values of the PCA were given (b)



Fig. 7. Scatter diagram between the harmful algal cells and water temperature. Blue dots represent *Pseudonitzschia* cells. Red dots represent *Alexandrium* cells

나, 두 유해 식물플랑크톤의 대발생을 유도하는 적정 수온 이 다르게 파악되었다.

# 4. 고 찰

식물플랑크톤 발생 및 군집의 종조성은 빛, 온도, pH 및 영양염류와 같은 다양한 환경요인에 민감하게 반응하 므로, 수질변화를 감지하는 생물학적 지표로 사용되어 왔 다(Peng et al. 2012; Lee et al. 2023). 이중 식물플랑크톤 의 대발생을 유발하는 데 필요한 조건은 불확실하지만, 환 경요인과 식물플랑크톤 종조성에는 유의미한 상관관계가 존재한다(Sathyendranath et al. 2015; Grigorszky et al. 2017; Oliveira et al. 2020). 이는 역으로 특정 식물플랑크 톤의 출현은 서식지의 수질 및 환경변화에 의해 발생하는 것으로 해석될 수 있다. 따라서 식물플랑크톤 모니터링은 유해조류 적조현상을 제어하고 해양 생태계의 건강성을 평가하는 데 있어 중요하다(Jia et al. 2022). 본 연구는 최 근 6년간의 진해만에서 출현한 유해식물플랑크톤의 종류 를 밝히고 이들의 출현양상을 보고함으로, 장기간의 식물 플랑크톤 변화를 분석하기 위한 기초자료를 제시하였다. 식물플랑크톤은 서로 다른 생태학적 지위를 가지며, 계

절에 따른 수질변화는 생물의 천이를 유발한다(Alley 1982). 본 연구에서 샘플링 기간 동안 규조류 및 와편모조류는 서로 다른 출현양상을 보였다. 규조류 Chaetoceros 및 Psuedo-nitzschia는 보편적으로 존재하며 하계에 대발생 하는 경향을 보였으나, 와편모조류는 춘계에 간헐적인 적 조를 발생시켰다. 특히 와편모조류 종들의 전체적인 출현 량은 2019년 봄철에 뚜렷한 강세를 보였는데 이때Chaetoceros 및 Psuedo-nitzschia와 같은 규조류는 낮은 출현양이 었다(Fig. 4) 이는 와편모조류와 규조류가 선호하는 환경 이 다름을 의미한다. 계절적 차이 이외에도 진해만은 공간 적 차이가 뚜렷한 지역으로 식물플랑크톤의 출현에도 영 향을 미친 것으로 분석되었다(Kwon et al. 2014). 외해수 와의 교류가 상대적으로 잦은 정점 1, 2에서는 주로 와편 모조류에 의한 적조가 발생하였으나, 담수유입의 양이 많 아 영양염이 풍부하고, 유속이 느린 것으로 알려진 정점 3, 4에서는 와편모조류가 약세를 보였다(Lee 1993; Kwon et al. 2014). 이는 규조류와 와편모조류의 영양염 반응에 대한 특성 및 경쟁관계에 의한 것으로 보인다(Smayda 1997). 규조류는 영양염 반포화 계수가 높아 영양염 요구 성이 큰 조류로 높은 영양염 조건에서 와편모조류보다 빠 르게 성장할 수 있다(Smayda 1997; Baek et al. 2008). 이 에 반해 와편모조류는 영양염 농도가 낮은 환경에서도 성 장이 가능해 상대적으로 영양염이 낮은 정점 1, 2에서 생 리적 이점을 가졌을 가능성을 시사하였다 (Smayda 1997).

진해만의 적조는 1981년 7월에 발생한 Chaetoceros sp. 의 대발생 이후로 지금까지 다양한 종이 출현하여 시기별 로 우젂종이 다른 특성을 보여왔다(이 등 2023). 예를 들 어, 독성 와편모조류인 Karenia mikimotoi는 1970년대부 터 1980년대까지 주로 출현하였으나(이 등 2023), 본 연구 에서는 출현하지 않았다. 1990년도 이후에는 Margalefidinium polykrikoides에 의한 적조현상이 두드러져 2008년 도까지 이어졌으나 그 이후 출현 빈도가 감소하였다(Lee et al. 2013). 본 연구 기간 동안 출현한 M. polykrikoides 세포 농도는 최대 7.2 × 10<sup>-1</sup> cell mL<sup>-1</sup>로 국립수산과학원 의 적조경보기준(1.0 × 10<sup>3</sup> cell mL<sup>-1</sup>)에 비해 1/130에 해 당되는 낮은 농도를 유지하였다. M. polykrykoides 출현의 감소는 식물성 플랑크톤 생장에 필수적인 요소인 수온, 염 분 및 영양소 수준의 변화로 인해 영향을 미칠 수 있다. 특히, DIN, PO<sub>4</sub>-P, SiO<sub>2</sub>-Si 등의 영양소는 식물성 플랑크 톤의 성장과 증식에 중요한 역할을 한다(Peng et al. 2012). 이러한 영양소의 감소는 M. polykrykoides에 의한 적조현 상에 필수적인 자원의 공급을 제한할 수 있다(Gobler et al. 2008). 실제로 M. polykrykoides 적조현상은 질소 농도

가 높은 지역과 관련이 있다(Gobler et al. 2008).

본 연구 기간 동안, 와편모조류의 경우 Alexandrium 및 Ceratium에 의한 적조가 주를 이루었으며 다른 유해 와편 모조류 종들은 미량만이 출현하였다. 2007년 오염총량관 리제 등 오염저감 정책 실시 이후 진해만의 수질이 개선 되었는데, 이러한 수질변화가 종조성 변화에 영향을 끼쳤 을 것으로 사료된다(Cho and Yang 2012). Alexandrium은 질소 고갈 시, 질소를 세포 내에 축적하는 능력이 있으며, 혼합영양을 통해 다른 식물플랑크톤 및 박테리아를 섭식 하여 낮은 영양 조건에서 유리한 생장특성을 보인다(Collos et al. 2004; Purz et al. 2021). 마찬가지로, Ceratium 속의 종들은 종속영양을 통해 영양소를 얻을 수 있으며, 이는 인 제한 조건에서 개체군을 유지하는데 기여한다(Baek et al. 2008). 즉, 빈영양상태에서 다른 종들에 비해 경쟁 우 위에 있는 Alexandrium 및 Ceratium이 연구기간 동안 적 조를 발생시킨 것으로 사료된다(Smayda 1997; Collos et al. 2004; Purz et al. 2021). 진해만의 Alexandrium 및 Ceratium 등의 유해 식물플랑크톤의 출현은 해양 생태계 의 균형을 깨뜨리고, 공공 건강에 위협이 될 수 있으며, 환경 변화의 지표가 될 수 있다(Shin et al. 2014). 예를 들어 Ceratium의 대발생 이후 세포가 부패하면서 많은 양 의 산소를 소비해 저산소증이 유발될 수 있으며 어류, 무 척추동물 및 기타 해양 동물군과 같은 해양 생물에 해로 운 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 2020년 7월에 Ceratium에 의한 적조가 발생하였으나, 실제 저산소증 현 상까지는 이어지지 않았다.

Alexandrium은 대표적인 유해조류로 마비성 패류독소 를 생성하는 것으로 알려져 있어, 각별한 주의가 필요하다 (John et al. 2014). 본 연구에서 Alexandrium에 의한 적조 현상은 봄철에 관찰되었으나(Shin et al. 2014), 여름 및 가을에도 미량의 Alexandrium 세포가 진해만에서 검출되 었다. 9.1°C에서 28.6°C의 범위에서 Alexandrium이 출현 하였는데, 이는 단일종에 의한 출현이 아닌 다수 종에 의 한 계절적 천이 현상으로 분석된다. 적조의 원인이 되는 플랑크톤의 휴면포자는 종마다 발아 온도가 다르다(Shin et al. 2014, 2021). 예를 들어, 진해만에 발생하는 마비성 패류독소의 원인이 되는 A. catenella의 휴면포자 발아온 도는 10°C인 반면, A. pacificum은 10-25°C의 온도범위에 서 발아할 수 있다(Shin et al. 2021). 이외에도 무독성 종 인 A. affine는 20°C의 수온에서 최대 발아율을 보였으나, A. insuetum은 25°C의 수온에서 최대 성장률을 보였다 (Band-Schmidt et al. 2003; Shin et al. 2014). 이는 서로 다른 Alexandrium spp.의 휴면포자가 최적 수온에 발아하 면서 독성 종과 무독성 종이 동시 출현할 수 있음을 의미 한다. 따라서, 적조 및 패류독소 발생을 조기에 경고하고 대응하기 위해서는 종 수준에서의 Alexandrium 출현 패턴

및 최적 수온 범위에 대한 연구가 필요하다.

Alexandrium 속은 분류학적으로 현재 33종이 보고되었 다(Guiry and Guiry 2023). 하지만 이들 중 일부 종만이 패류독소 발생의 원인이 됨으로, 환경 모니터링 시 독성종 과 무독성 종을 구분하여 검출하는 것이 중요하다. 본 연 구에서는 현미경 관찰을 통해 Alexandrium 속을 조사하였 기 때문에, 형태학적 유사성이 높은 독성 종과 무독성 종 을 구분하는데 한계가 있었다. 이들을 형태학적으로 종 수 준으로 동정하기 위해서는 종구에 위치한 각판의 배열 및 정단부의 세부구조를 전자현미경을 이용해 분석해야 한 다(Balech and Tangen 1985). 하지만 전자현미경을 이용 한 분석은 환경모니터링 시, 정량적 분석에 한계가 존재한 다. 최근 분자생물학적 기술 발달과 함께 형태학적으로 모 호한 Alexandrium 종들의 분자적 동정을 가능하게 하였다 (John et al. 2014). 이어서 실시간 중합효연쇄반응(quantitative real time polymerase chain reaction, qPCR)과 같은 분자모니터링 기법이 등장함에 따라 적조 및 패독 원인 종의 환경모니터링 정확도가 높아질 것으로 기대되고 있 다. 일부 Alexandrium 종은 독력이 높아 미량으로도 마비 성 패독을 발생시킬 수 있어, 검출 민감성 및 정확도가 높 은 분자모니터링 기반 장기 분석이 필요하다.

# 5. 적 요

본 연구는 2017년부터 2022년까지 진해만 4개 정점의 월별 시료를 분석하여 최근 남해안 식물플랑크톤 군집구 조의 계절별 변화 양상을 파악하였다. 각 정점에서 영양염 류를 제외한 다른 환경요인은 그 수치가 유사하였다. 수온 변동은 6.0-29.0℃으로 확인되었고, 용존산소량은 2.7-11.6 mg L<sup>-1</sup>의 범위를 보여 전형적인 온대기후의 환경 패 턴을 보였다. 염분은 25.9에서 33.8의 범위를 형성하였다. 식물플랑크톤 현존량은 5.0 × 10<sup>-1</sup>-7.9 × 10<sup>2</sup> cells mL<sup>-1</sup>의 범위를 보였고, 각 정점의 엽록소-a 또한 현존량과 비슷한 패턴을 보였다. 총 42속 77 종의 식물플랑크톤 분류군이 기록되었으며, 규조류 49종, 와편모조류 27종 그리고 1종 의 규질편모조류로 구성되었다. 규조류는 모든 정점과 계 절에서 우점하였다. 반면, 와편모조류는 봄철에 간헐적으 로 적조를 형성하였다. 연구기간동안 9종의 유해조류를 검출하였는데, 규조류 Psuedo-nitzschia와 와편모조류 Alexandrium spp., Akashiwo sanguinea, Margalefidinium polykrikoides, Dinophysis spp., Gymnodinium spp., Pheopolykrikos hartmannii, Polykrikos kofoidii, Prorocentrum spp.가 조사되었다. 이들 유해 식물플랑크톤의 출현양상 은 계절적 요인과 높은 상관성을 보였다. 본 연구는 진해 만 식물플랑크톤의 종류 및 계절별 변화를 분석한 것으로, 향후 진행될 후속 연구와 환경변화에 따른 남해안 유해

식물플랑크톤의 장기간 변동을 이해하기 위한 좋은 기초 자료가 될 것이다.

# 사 사

본 연구는 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학 기술진흥원(선제부작생물 관리 및 평가기술개발, 20210 651)과 2024년도 국립수산과학원 수산과학연구사업 (R20 24040)의 지원으로 수행된 연구입니다.

# 참고문헌

- 이문옥, 김종규, 김병국 (2023) 한국 진해만 적조의 발생역사 와 연구현황. In: 2023년도 한국해양환경·에너지학회 학 술대회논문집, Bexco, 부산, 2023년 5월 2-4일, pp 116-121
- Alley TR (1982) Competition theory, evolution, and the concept of an ecological niche. Acta Biotheor **31**(3):165-179
- Babicki S, Arndt D, Marcu A, Liang Y, Grant JR, Maciejewski A, Wishart DS (2016) Heatmapper: web-enabled heat mapping for all. Nucleic Acids Res 44(W1):W147– W153
- Baek SH, Kim YO (2010) The study of summer season in Jinhae Bay - Short-term changes of community structure and horizontal distribution characteristics of phytoplankton. Korean J Environ Biol 28(3):115–124
- Baek SH, Shimode S, Han MS, Kikuchi T (2008) Growth of dinoflagellates, *Ceratium furca* and *Ceratium fusus* in Sagami Bay, Japan: the role of nutrients. Harmful algae 7(6):729–739
- Balech E, Tangen K (1985) Morphology and taxonomy of toxic species in the tamarensis group (Dinophyceae): Alexandrium excavatum (Braarud) comb. nov. and Alexandrium ostenfeldii (Paulsen) comb. nov. Sarsia **70**(4):333–343
- Band-Schmidt CJ, Lechuga-Devéze CH, Kulis DM, Anderson DM (2003) Culture studies of *Alexandrium affine* (Dinophyceae), a non-toxic cyst forming dinoflagellate from Bahía Concepción, Gulf of California. Bot Mar **46**(1):44–54
- Cho BH, Yang KC (2012) A Study on the total pollutant load management of Masan Bay using GIS technique. J Wetl Res 14(1):89–99
- Cho CH (1978) On the *Gonyaulax* red tide in Jinhae Bay. Bull Kor Fish Soc **11**(2):111-114
- Cho CH (1979) Mass motalitys of oyster due to red tide in Jinhae Bay in 1978. Bull Kor Fish Soc **12**(1):27-33
- Collos Y, Gagne C, Laabir M, Vaquer A, Cecchi P, Souchu

P (2004) Nitrogenous nutrition of *Alexandrium catenella* (Dinophyceae) in cultures and in Thau Lagoon, Southern France. J Phycol **40**(1):96–103

- Gobler CJ, Berry DL, Anderson OR, Burson A, Koch F, Rodgers BS, Moore LK, Goleski JA, Allam B, Bowser P, Tang Y (2008) Characterization, dynamics, and ecological impacts of harmful *Cochlodinium polykrikoides* blooms on eastern Long Island, NY, USA. Harmful Algae 7(3): 293–307
- Grigorszky I, Tihamér Kiss K, Pór G, Dévai G, Nagy AS, Somlyai I, Berta C, Duleba M, Trábert Z, Ács É (2017) Temperature and growth strategies as the essential factors influencing the occurrence of *Stephanodiscus minutulus* (Kützing) Cleve & Möller and *Palatinus apiculatus* (Ehrenberg). Fundam Appl Limnol **189**(2):167–175
- Guiry MD, Guiry GM (2023) AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. https://www.algaebase.org Accessed 1 Sep 2023
- Hammer O (2001) PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontol electron **4**:9
- Han MS, Kim SW, Kim YO (1991) Influence of discontinuous layer on plankton community structure and distribution in Masan Bay, Korea. Korean J Fish Aquat Sci 24(6):459–471
- Jia J, Gao Y, Sun K, Lu Y, Wang J, Shi K (2022) Phytoplankton community composition, carbon sequestration, and associated regulatory mechanisms in a floodplain lake system. Environ Pollut **306**:119411
- Jin SH, Ryu SH, Lee IC, Kim KH (2019) Estimation of oyster farming water quality index (OWQI) in Jinhae Bay, Korea. J Korean Soc Mar Environ 22(4):246–252
- John U, Litaker RW, Montresor M, Murray S, Brosnahan ML, Anderson DM (2014) Formal revision of the *Alexandrium tamarense* species complex (Dinophyceae) taxonomy: the introduction of five species with emphasis on molecularbased (rDNA) classification. Protist 165(6):779–804
- Kim DS, Kim SW (2003) Mechanism of oxygen deficient water formation in Jindong Bay. The Sea 8(2):177-186
- Kim JG, Park CK, Shin SG (1995) The eutrophication modelling for Jinhae Bay in summer-Simulation of phytoplankton distribution by ecosystem model. J Korean Soc Environ Eng 17(2):121–135
- Kim SY, Lee YH, Kim YS, Shim JH, Jeon JJ, Hwang JR, Jeon SH (2012) Characteristics of marine environmental in the hypoxic season at Jinhae Bay in 2010. Korean J Nat Conserv 6(2):115–129
- Kwon J-N, Lee J, Kim Y, Lim J-H, Choi T-J, Ye M-J, Jun J-W, Kim S (2014) Long-term variations of water quality

in Jinhae Bay. J Kor Soc Mar Environ Ene 17(4):324-332

- Lee CK, Lee OH, Lee SG (2005) Impacts of temperature, salinity and irradiance on the growth of ten harmful algal bloom-forming microalgae isolated in Korean Coastal Waters. The Sea **10**(1):79–91
- Lee CK, Park TG, Park YT, Lim WA (2013) Monitoring and trends in harmful algal blooms and red tides in Korean coastal waters, with emphasis on *Cochlodinium polykrikoides*. Harmful Algae **30**:S3–S14
- Lee J, Kim SG, An S (2017) Dynamics of the physical and biogeochemical processes during hypoxia in Jinhae Bay, South Korea. J Coast Res **33**(4):854–863
- Lee J, Park KT, Lim JH, Yoon JE, Kim IN (2018) Hypoxia in Korean coastal waters: a case study of the natural Jinhae Bay and artificial Shihwa Bay. Front Mar Sci **5**:70
- Lee JH, Han MY, Huh HT (1981) Studies on the causative organisms of red tide in the Jinhae Bay. Bull Korea Ocean Res Dev Inst **3**:97–105
- Lee MO, Kim JK, Kim BK, Kim MW (2020) Past, present, and future directions in the study of Jinhae Bay, Korea. J Korean Soc Mar Environ Energy 23(2):57–69
- Lee PY (1993) Occurrence and seasonal variation of oxygendeficient water mass in Wonmun Bay. Bull Korean Fish Soc 26(4):392–400
- Lee YS, Kim T, Muhammad BL, Ki JS (2023) Comparison of the phytoplankton community compositions between the temperate reservoir and the downstream river areas of the Han River, Korea. J Freshw Ecol **38**(1):2205874
- Oliveira SA, Ferragut C, Bicudo CEM (2020) Relationship between phytoplankton structure and environmental variables in tropical reservoirs with different trophic states. Acta Bot Bras **34**(1):83–93
- Park JG, Huh SH, Jeong HJ (2001) Phytoplankton in Chinhae Bay: 1. Photosynthetic properties and primary production in variant light environments. Algae 16(2):189–196
- Park JS (1982) The characteristics of marine environment and red tide in Jinhae Bay. Annu Rep Natl Fish Res Dev 28: 55–88
- Parsons TR (2013) A manual of chemical & biological methods for seawater analysis. Elsevier, United Kingdom, pp 1–189
- Peng S, Qin X, Shi H, Zhou R, Dai M, Ding D (2012) Distribution and controlling factors of phytoplankton assemblages in a semi-enclosed bay during spring and summer. Mar Pollut Bull 64(5):941–948
- Purz AK, Hodapp D, Moorthi SD (2021) Dispersal, location of bloom initiation, and nutrient conditions determine the dominance of the harmful dinoflagellate *Alexandrium*

*catenella*: a meta-ecosystem study. Limnol Oceanogr **66** (11):3928-3943

- Sathyendranath S, Ji R, Browman HI (2015) Revisiting Sverdrup's critical depth hypothesis. ICES J Mar Sci 72(6):1892–1896
- Shin HH, Baek SH, Zhun LI, Han MS, Oh SJ, Youn SH, Kim YS, Kim D, Lim WA (2014) Resting cysts, and effects of temperature and salinity on the growth of vegetative cells of the potentially harmful species *Alexandrium insuetum* Balech (Dinophyceae). Harmful Algae 39: 175–184.
- Shin HH, Li Z, Kim HJ, Park BS, Lee J, Shin AY, Park TG, Lee KW, Han KH, Youn JY, Kwak KY, Seo MH, Kim D, Son MH, Kim DJ, Shin K, Lim WA (2021) *Alexandrium catenella* (Group I) and *A. pacificum* (Group IV) cyst germination, distribution, and toxicity in Jinhae-Masan Bay, Korea. Harmful Algae **110**:102122
- Smayda TJ (1997) Harmful algal blooms: their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea. Limnol Oceanogr **42**(5, part2):1137–1153
- Yoo KI, Lee JH (1979) Environmental studies of the Jinhae Bay. 1. annual cycle of phytoplankton in relation to phytoplankton population dynamics. J Oceanol Soc Kor 14(1): 26–31
- Yoo KI, Lee JH (1980) Environmental studies of the Jinhae Bay. 2. environmental parameters in relation to phytoplankton population dynamics J Oceanol Soc Kor 15(1): 62–65
- Yoo MH, Song TY, Kim ES, Choi JK (2007) The characteristics on the spatial and temporal distribution of phytoplankton in the Western Jinhae Bay, Korea. The Sea 12(4):305–314

#### 국문 참고자료의 영문표기

# English translation / Romanization of references originally written in Korean

Lee M, Kim J, Kim B (2023) Occurrence of algal blooms and current research situations in Jinhae bay, Korea In: The Korean Society for Marine Environment and Energy, BEXCO, Busan, 2-4 May 2023

#### Author's Information

#### Han-Sol Kim

Ph.D. Student, Sangmyung University

#### Taehee Kim

Ph.D. Student, Sangmyung University

#### Tae-Gyu Park

Ph.D., National Institute of Fisheries Science

### Jang-Seu Ki

Professor, Sangmyung University

Received Sep. 18, 2023 Revised Jan. 6, 2024 Accepted Jan. 9, 2024

## Copyright © 2024 Ocean and Polar Research

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http:// creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/), which permits unrestricted educational and non-commercial use, provided the original work is properly cited.