

## 2014년 부산 연안 해역에서 계절적 환경특성에 따른 식물플랑크톤 군집의 변화양상

윤지남<sup>1,2</sup>, 임영균<sup>1,2</sup>, 김동선<sup>3</sup>, 김영옥<sup>4</sup>, 백승호<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>한국해양과학기술원 위해성분석연구센터, <sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교, <sup>3</sup>한국해양과학기술원 해양환경연구센터,

<sup>4</sup>한국해양과학기술원 해양생태연구센터

## Seasonal changes in phytoplankton community related with environmental factors in the Busan coastal region in 2014

Ji Nam Yoon<sup>1,2</sup>, Young Kyun Lim<sup>1,2</sup>, Dong Sun Kim<sup>3</sup>, Young Ok Kim<sup>4</sup> and Seung Ho Baek<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Risk Assessment Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Geoje 53201, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Ocean Science, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Republic of Korea

<sup>3</sup>Marine Environmental Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Republic of Korea

<sup>4</sup>Marine Ecosystem Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Republic of Korea

### \*Corresponding author

Seung Ho Baek

Tel. 055-639-8513

E-mail. baeksh@kiost.ac.kr

Received: 11 January 2022

First Revised: 18 February 2022

Second Revised: 5 March 2022

Third Revised: 15 March 2022

Revision accepted: 17 March 2022

**Abstract:** To assess the influence of environmental factors on the phytoplankton community structure and total phytoplankton biomass during four seasons in 2014, we investigated the abiotic and biotic factors at 25 stations in the Busan coastal region. The phytoplankton community and total phytoplankton biomass were strongly dependent on the discharge from the Nakdong River, and the high density of phytoplankton was related with the introduction of the Tsushima Warm Current (TWC), particularly in the thermohaline fronts of the fall season. The relationship between the salinity and nutrient (Dissolved inorganic nitrogen = DIN:  $R^2 = 0.72$ ,  $p < 0.001$  and Dissolved inorganic silicon = DSi:  $R^2 = 0.78$ ,  $p < 0.001$ ) highly correlated with the river discharge, implying that those nutrients have played a crucial role in the growth of diatom and cryptophyta. The total phytoplankton biomass was highest in the summer followed by autumn, spring, and winter. Diatom and cryptophyta species were dominant species during the four seasons. Additionally, there were strong positive correlations between Chlorophyll *a* and total phytoplankton biomass ( $R^2 = 0.84$ ,  $p < 0.001$ ), cryptophyta ( $R^2 = 0.76$ ,  $p < 0.001$ ) and diatom ( $R^2 = 0.50$ ,  $p < 0.001$ ), respectively. In particular, we found that there were significant differences in the nutrients, phytoplankton community compositions, and total phytoplankton biomass between the inner and the outer coastal region of Busan, depending on the amount of river discharge from the Nakdong River, particularly during rainy seasons. Therefore, the seasonal change of TWC and river discharge from the Nakdong River serve an important role in determining phytoplankton population dynamics in the Busan coastal region.

**Keywords:** river discharge, Nakdong river, Tsushima Warm Current (TWC), phytoplankton community, nutrients

## 서론

기초생산자로서 해양 생태계의 유지에 중요한 역할을 하는 식물플랑크톤은 하위 및 상위 영양단계의 피포식, 중간 경쟁 등 생물학적 요인뿐만 아니라 지리학적 위치, 수온, 염분, pH, 용존산소, 영양염 등과 같은 무생물학적 요인의 영향을 강하게 받는다(Lee *et al.* 2016; Lee *et al.* 2020; Yoon *et al.* 2021). 특히, 연안 해역에서 식물플랑크톤 군집구조는 육상에서 유입되는 담수의 염분과 영양염의 영향을 지대하게 받는다(Kwon *et al.* 2004). 한국 연안 해역에서 하구역은 담수와 해수가 만나는 해역으로 지형과 기상 등의 영향을 크게 받고, 특히 하계에는 집중호우에 따른 담수 유입의 증가로 다량의 영양염이 유입되며 계절적으로 영양염의 변동이 큰 특성이 있다(Yoon *et al.* 2017; Park *et al.* 2021). 또한, 하구역은 담수 공급과 더불어 수심이 얇은 퇴적물에서 용출되는 영양염의 영향을 받아 높은 1차 생산력을 유지하는 데 유리하다(Lee *et al.* 2021).

부산 연안 해역은 낙동강과 수영강의 담수가 혼합하는 내측 지역과 대마난류의 영향을 받는 외측 지역으로 구분할 수 있다. 내측 지역은 하천 방류에 의해 유기물과 영양염이 대량 유입되어 염분, 영양염의 변화폭이 크게 나타난다(Lim and Baek 2017). 또한, 외측 지역은 하구역으로부터 높은 영양염의 공급 그리고 여름과 가을에 강하게 발달하고 봄에 약해지는 고수온 고염분의 대마난류가 혼합 및 희석되면서 복잡한 해양 환경 특성을 보이며, 특히, 부영양화를 유발하는 400만 인구의 도시 하수, 국제선 화물선, 공

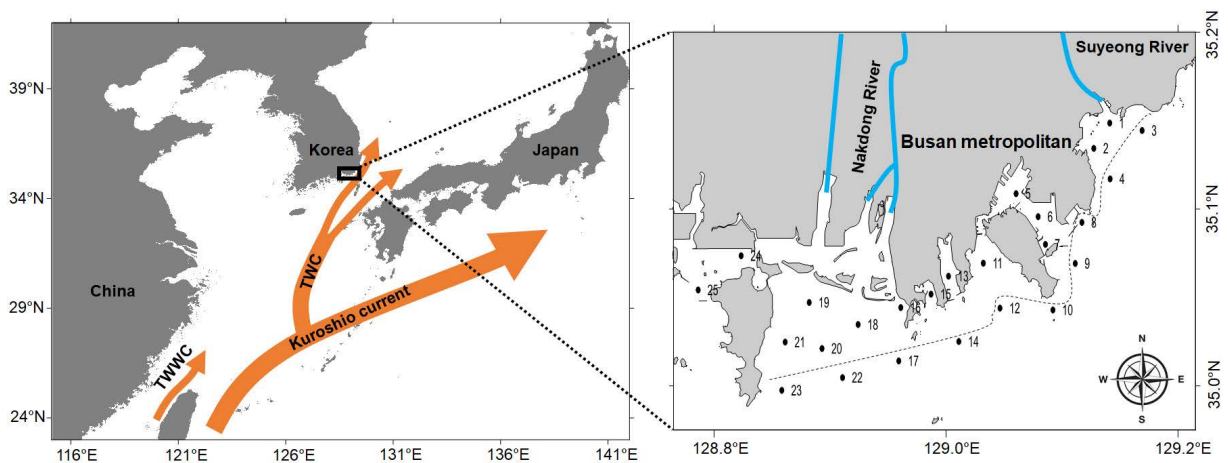
업화에 따른 다양한 환경오염물질이 부산 연안지역의 식물플랑크톤 군집구조에 영향을 미친다(Baek *et al.* 2019). 하지만, 4계절 동안 낙동강과 대마난류에 의한 해양 환경 변화에 따른 식물플랑크톤 군집구조 변화를 조사한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구는 2014년 4계절 조사를 통해 부산 연안 해역에서 낙동강, 수영강의 담수 유입과 외양에서 공급되는 대마난류의 계절적 수괴혼합 특성에 따른 식물플랑크톤의 군집구조 및 현존량의 변화 경향을 분석하여, 복잡한 해양 환경을 갖는 부산 연안역 식물플랑크톤의 성장 및 쇠퇴에 미치는 주요 인자를 파악하고자 하였다. 이 해석 자료는 부산 연안의 해양생태계의 변화를 이해하는데 기초 자료로 활용될 것이다.

## 재료 및 방법

### 1. 현장조사

본 조사는 부산 연안역의 총 25개 정점을 선정하여 2014년 동계(2월 11~12일), 춘계(5월 7~9일), 하계(8월 5~7일), 추계(11월 3~5일)에 한국해양과학기술원 연구조사선 장목1호 및 2호를 이용하여 조사하였다. 또한, 부산 연안 해역을 지리적, 물리적 특성에 맞추어 정점을 내측, 외측으로 나누어 평가하였다(Fig. 1). 내측(정점 1, 2, 5, 6, 7, 11, 13, 15, 16, 18, 19, 20, 21)은 낙동강과 수영강에 의한 담수 유입의 영향을 강하게 받는 지역, 외측(정점 3, 4, 8, 9, 10,



**Fig. 1.** Map of the study area and the sampling stations in the coast of Busan, Korea. TWC: Tsushima Warm Current; and TWWC: Taiwan Warm current.

12, 14, 17, 22, 23)은 상대적으로 담수 유입의 영향을 작게 받으며, 대마난류의 영향을 받는 지역이다. 각 정점별 수온과 염분은 CTD (Ocean Seven319; Ironaut Co., Brugherio, Italy)를 이용하여 저층 바다 1~2m까지 수직으로 내려 실시간 자료를 산출하였고, 표층수는 버킷으로 저층수는 5 L PVC 니스킨 채수기를 이용하여 채수하였다. 아울러, 각 정점에서 식물플랑크톤은 종조성과 정량분석을 위해 해수 500 mL를 폴리에틸렌 채수병에 넣고 Lugol's solution으로 최종농도 3%가 되도록 고정하였다. Chlorophyll *a* (Chl. *a*) 농도와 SS (Suspended Solids) 측정을 위해서 표층수와 저층수(계절에 따라 0.2~1.0L로 조절)를 채수하여 GF/F (47 mm, pore size 0.7 µm; Whatman, Middlesex, UK) 필터를 이용하여 여과하였고, 그 필터는 측정 전까지 -20°C의 암실에서 냉동보관했다. GF/F 필터로 여과된 해수는 영양염 분석에 사용하기 위해 산세척한 폴리에틸렌 병에 넣고 HgCl<sub>2</sub>를 첨가해 -20°C의 암실에서 냉동보관했다.

## 2. 시료분석

Chl. *a* 농도는 냉동보관한 여과지를 90% 아세톤에 넣고 24시간 동안 냉암소에서 색소를 추출한 후 형광측정기(Turner Designs 10-AU Fluorometer)로 분석하였다(Parsons *et al.* 1984). SS는 필터 전, 후의 필터지 무게를 측정 후, 그 차이를 통해 측정하였다. 영양염은 냉동보관한 시료를 분석 전 해동하여 규산염(Si(OH)<sub>4</sub>), 암모니아염(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), 아질산염+질산염(NO<sub>2</sub><sup>+</sup>+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), 인산염(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)을 Parsons *et al.* (1984)의 분석법에 따라 영양염 자동분석기(Auto analyzer QuikChem 8000; Lachat Instru-

ments, Loveland, CO, USA)를 이용하여 분석하였고, 영양염 농도는 표준시약인 KANSO (Technos Co., Ltd., Japan-chemical Industries, Osaka, Japan)를 이용하여 보정하였다.

식물플랑크톤은 종조성과 현존량을 파악하기 위해서 500 mL의 샘플을 약 50 mL로 농축하였고, 농축된 시료는 현미경 검경 전 혼합시킨 후 Sedgewick-Rafter 계수 챔버에 분주하여 광학 현미경을 이용해 200배율로 계수하고, 400배율로 동정을 했다.

## 3. 기상자료 및 통계분석

낙동강의 방류량과 부산의 강수량은 각각 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr), 기상청(www.weather.go.kr)의 자료를 활용하였다. 식물플랑크톤과 환경인자 간의 특성을 파악하기 위해 SPSS version 17.0 (SPSS, Inc., Chicago, IL USA)를 이용하여 주성분분석(PCA, principal component analysis)과 회귀분석(Regression analysis)을 실시하였으며, *p* < 0.05 수준에서 통계적 유의성을 검증하였다.

## 결 과

### 1. 환경요인의 변화

2014년 부산과 낙동강의 월별 강수량과 방류량을 Fig. 2에 나타내었다. 부산지역의 월별 강수량과 낙동강의 방류량은 하계에 가장 유사한 변화양상을 보였고, 하계 집중호우가 관찰되는 8월 강수량은 642 mm month<sup>-1</sup>로 가장 높게

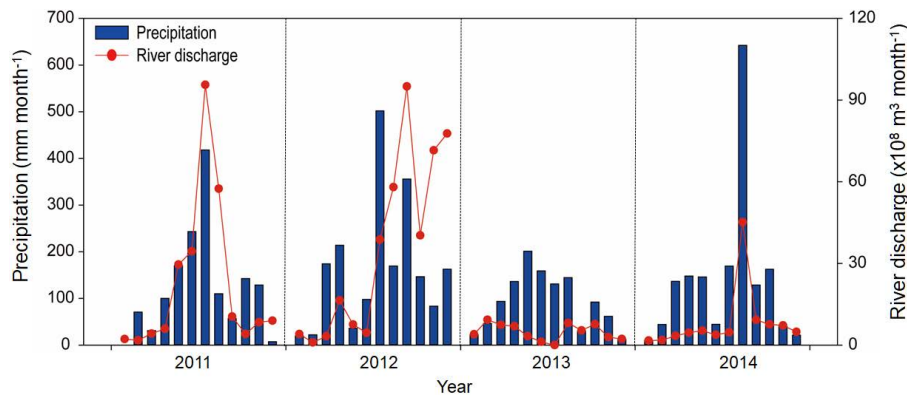
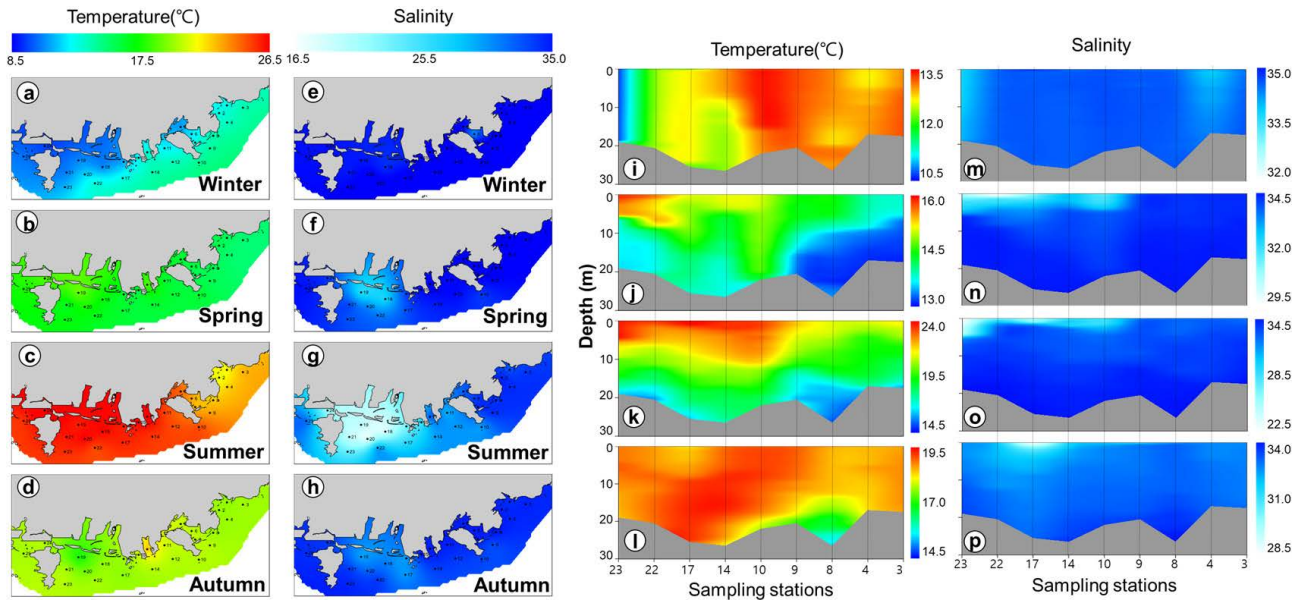


Fig. 2. Monthly precipitation and water flux for the Nakdong River 2011–2014. The blue bar represents precipitation, and the red dot connected with red line represents river discharge.



**Fig. 3.** Seasonal and spatial changes in temperature (a–d) and salinity (e–h), Seasonal and vertical profiles in temperature (i–l) and salinity (m–p) in the coast of Busan, Korea.

관찰되었으며, 방류량 또한  $45.2 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ month}^{-1}$ 로 가장 높았다. 2013년과 비교하여 2014년의 총 강수량과 방류량이 크게 증가한 특성을 보였으며, 이는 특히 하계에 뚜렷하게 나타났다.

2014년 부산 연안 해역 25개 정점에서 표층의 수온, 염분 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 동계 수온은 낙동강 하구 주변 정점( $8.70 \pm 0.55^\circ\text{C}$ )에서 낮고, 대마난류의 영향을 강하게 받는 해역인 외측 정점( $13.54 \pm 1.37^\circ\text{C}$ )에서는 상대적으로 높은 경향을 보였다(Fig. 3a). 동계에는 활발한 수층 혼합으로 수층 간 수온이 일정하였고, 이러한 경향은 수온이 낮은 낙동강 하구역에서 뚜렷하게 나타났다(Fig. 3i). 춘계 수온은  $14.13 \sim 17.86^\circ\text{C}$ 의 범위를 보였고, 수심 약 5 m에서 성층이 약하게 형성되었다(Fig. 3b and 3j). 하계 수온은  $19.76 \sim 26.08^\circ\text{C}$ 의 범위를 보였고, 표층 수온의 증가로 인해 수심 약 10 m에서 강한 성층이 형성되었다(Fig. 3c and 3k). 이후, 추계 수온은  $16.23 \sim 21.40^\circ\text{C}$ 의 범위로 하계보다 감소하였고, 표층 수온의 감소로 성층이 약화되어 수층 간 수온차 또한 감소하였다(Fig. 3d and 3l).

염분은 동계 평균  $33.71 \pm 1.21 \text{ psu}$ 로 관찰되었고, 외측과 내측 간에 큰 차이가 나타나지 않았다(Fig. 3e). 춘계 평균 염분은  $32.28 \pm 2.46 \text{ psu}$ 를 보였으며, 낙동강 하구 정점에서는 담수 유입의 영향으로 낮은 염분( $28.30 \pm 2.48 \text{ psu}$ )이

관찰되었다(Fig. 3f). 하계의 평균 염분은  $27.16 \pm 5.20 \text{ psu}$ 로 집중호우에 의해 증가한 낙동강 방류수의 영향으로 낙동강 하구 인근 정점에서는 평균  $18.09 \pm 0.96 \text{ psu}$ 의 극히 낮은 염분이 관찰되었고, 외측에서도 평균  $30.00 \pm 3.68 \text{ psu}$  전후로 다른 계절( $32.15 \pm 2.65 \text{ psu}$ )과 비교하여 상대적으로 낮았다(Fig. 3g). 추계에는 방류량의 감소로 염분이 회복되어  $28.09 \sim 33.13 \text{ psu}$ 로 증가한 경향을 보였다(Fig. 3h).

2014년 부산 연안 해역 표층의 영양염 농도 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 질산염 + 아질산염 농도 분포는 동계  $5.48 \sim 19.77 \mu\text{M}$ , 춘계  $0.99 \sim 41.86 \mu\text{M}$ , 하계  $1.28 \sim 62.61 \mu\text{M}$ , 추계  $4.39 \sim 28.49 \mu\text{M}$ 의 범위로 변화하였고, 전 계절에서 낙동강과 수영강 주변 하구 정점에서 높게 나타났다(Fig. 4a~d). 암모니아염은 동계  $0.56 \sim 14.40 \mu\text{M}$ , 춘계  $0.44 \sim 5.99 \mu\text{M}$ , 하계  $0.64 \sim 21.57 \mu\text{M}$ , 추계  $0.29 \sim 7.42 \mu\text{M}$ 의 범위를 보였고, 동계 수영강 주변에서 평균  $12.97 \mu\text{M}$ 로 높은 농도를 보였다(Fig. 4e~h). 또한, 하계에 최대값과 최소값의 차이가  $20.93 \mu\text{M}$ 로 모든 계절 중 가장 크게 나타났다. 인산염의 농도 분포는 동계  $0.42 \sim 0.97 \mu\text{M}$ , 춘계  $0.11 \sim 0.66 \mu\text{M}$ , 하계  $0.15 \sim 2.10 \mu\text{M}$ , 추계  $0.12 \sim 0.90 \mu\text{M}$ 의 범위로 관찰되었다(Fig. 4i~l). 다른 영양염들의 공간분포 경향과 유사하게 낙동강과 수영강 주변에서 상대적으로 높은 농도를 보였으나, 그 차이는 크지 않았다. 규산염의 농도는 동

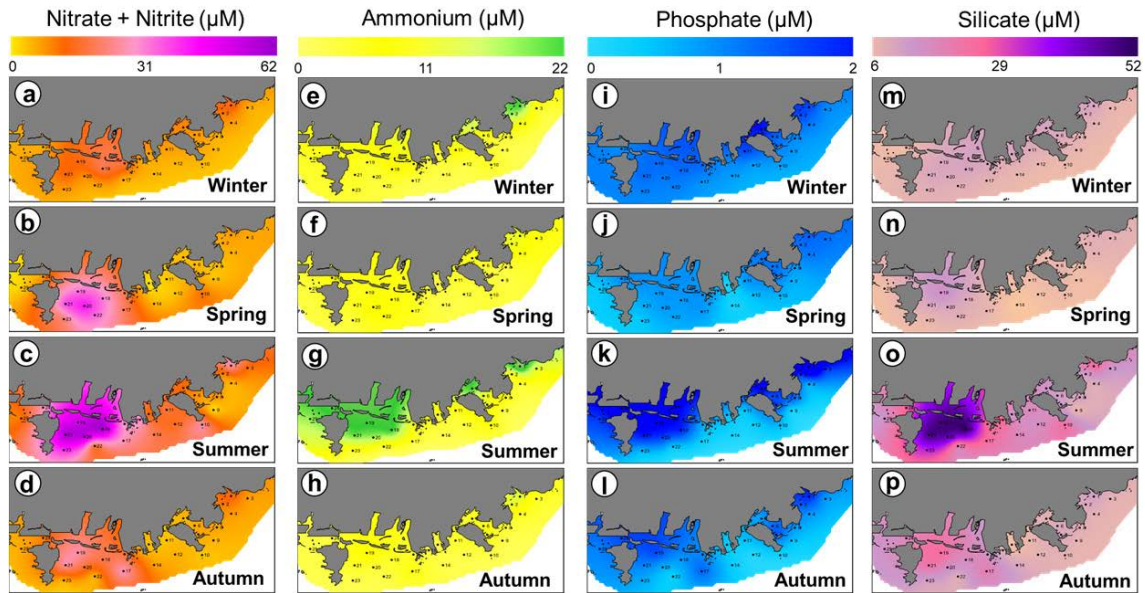


Fig. 4. Seasonal and spatial changes of nitrate + nitrite (a-d), ammonium (e-h), phosphorus (i-l), and silicate (m-p) in the coast of Busan, Korea.

계 7.86~13.13  $\mu\text{M}$ , 춘계 5.99~17.71  $\mu\text{M}$ , 하계 8.17~51.30  $\mu\text{M}$ , 추계 6.56~25.61  $\mu\text{M}$ 의 범위에서 변동하였고, 연구기간 동안 5.99  $\mu\text{M}$  아래로 떨어지지 않는 경향을 보였다(Fig. 4m~p). 또한 하계 낙동강 하구 지역에서 평균  $40.68 \pm 11.40 \mu\text{M}$ 으로 가장 높은 농도를 보였다. 또한, 담수유입에 따른 영양염 공급 여부 파악을 위한 염분과 영양염 농도의 상관관계에서는 염분이 감소함에 따라 DIN과 DSi의 농도가 증가하는 뚜렷한 음의 상관관계를 보였다(Fig. 5).

2014년 부산 연안 해역의 표층 SS농도를 Fig. 6에 나타내었다. 각 계절별 평균농도는 동계  $34.72 \pm 4.95 \text{ mg L}^{-1}$ , 춘계  $30.82 \pm 2.22 \text{ mg L}^{-1}$ , 하계  $4.07 \pm 1.43 \text{ mg L}^{-1}$ , 추계  $4.36 \pm 2.06 \text{ mg L}^{-1}$ 로 동계와 춘계가 하계와 추계에 비해 약 8배 높았다. 또한, 동계 낙동강 하구 인접 정점(정점 18~25)에서 평균  $39.21 \pm 2.22 \text{ mg L}^{-1}$ 의 값으로 다른 정점( $32.61 \pm 3.51 \text{ mg L}^{-1}$ )보다 높았다.

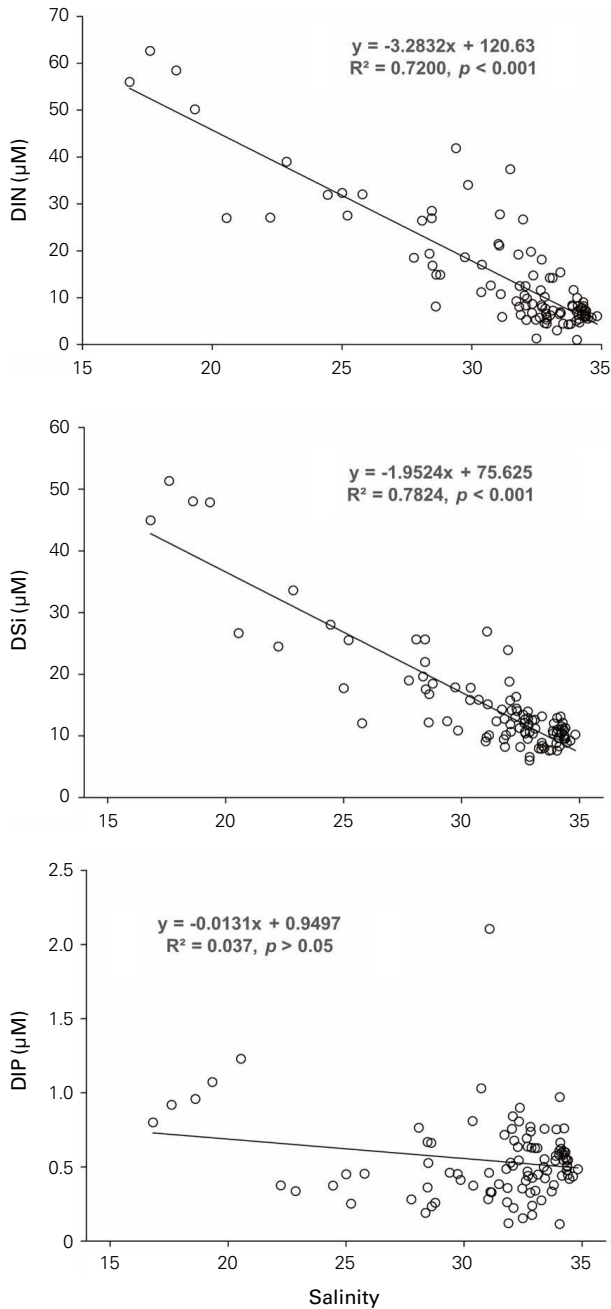
## 2. 식물플랑크톤 군집구조 및 Chl. a 농도 변화

2014년 부산 연안 해역의 계절별 식물플랑크톤의 수평분포와 Chl. a의 농도 변화는 Fig. 7에 나타내었다. 동계 식물플랑크톤의 평균 현존량은  $0.7 \times 10^5 \text{ cells L}^{-1}$ 로, 4 계절 중 가장 낮았다. 동계 식물플랑크톤 군집은 은편모조류(47%)와 규조류(46%)가 대부분을 차지하였으

며, 우점종은 *Cryptomonas* sp., *Chaetoceros decipiens* 그리고 *Chaetoceros socialis*였다. 동계 정점 18~25에서 *Thalassiosira pacifica*와 *Thalassiosira rotula*는 평균  $0.05 \times 10^5 \text{ cells L}^{-1}$ 로 높은 현존량을 기록하였다. 또한 정점 5, 6에서 와편모조류 *Alexandrium tamarense* (= *Alexandrium catenella* (Group I))의 현존량이 평균  $0.08 \times 10^5 \text{ cells L}^{-1}$ 로 다른 정점에 비해 높게 나타났고, 정점 20, 21에서 규조류 *Leptocylindrus danicus*의 현존량이 평균  $0.07 \times 10^5 \text{ cells L}^{-1}$ 로 가장 높았다.

춘계 식물플랑크톤의 평균 현존량은  $1.7 \times 10^5 \text{ cells L}^{-1}$ 이었으며, 은편모조류와 규조류가 각각 총 식물플랑크톤 현존량의 48%와 39%를 차지하고, 우점종은 *Cryptomonas* sp.와 *Chaetoceros socialis*로 동계와 유사한 군집구조를 보였다. 뿐만 아니라, 춘계에도 동계와 유사하게 정점 5, 6에서 *A. catenella* (Group I)가 평균  $0.17 \times 10^5 \text{ cells L}^{-1}$ 로 높은 현존량을 보였다.

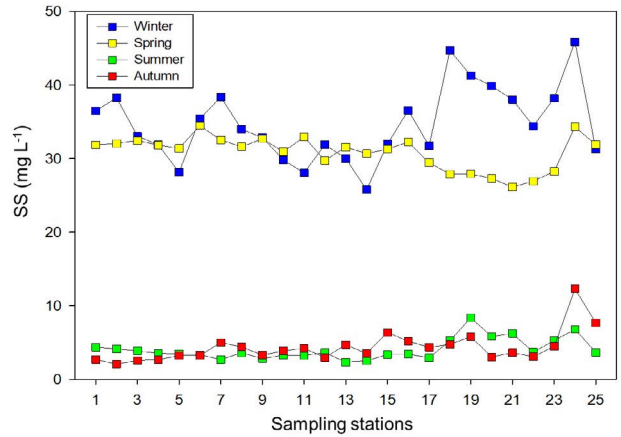
하계 식물플랑크톤의 평균 현존량은  $14.8 \times 10^5 \text{ cells L}^{-1}$ 로 다른 계절과 비교해 가장 높았고, 그중 정점 23에서  $43.0 \times 10^5 \text{ cells L}^{-1}$ 로 최고치를 보였다. 규조류가 식물플랑크톤 총 현존량의 55%로 우점했고, 우점종은 *Chaetoceros socialis*, *Nitzschia longissima*, *Cylindrotheca closterium*이었다. 또한, 모든 정점에서 *Skeletonema costatum*-like species가 출현하였으며, 와편모조류는 대부분의 정점에서 거의 관찰



**Fig. 5.** Relationships between salinity and nutrients (DIN, DIP and DSI) in the coast of Busan, Korea.

되지 않았다.

추계 식물플랑크톤의 평균 현존량은  $5.1 \times 10^5$  cells  $L^{-1}$ 이며 규조류가 총 현존량의 83%로 우점하였다. 우점 규조류는 *Chaetoceros curvisetus*, *Chaetoceros socialis*, *S. costatum*-like species였으며, 추계 은편모조류의 현존량은 전체 식물플



**Fig. 6.** Seasonal and horizontal distribution of SS for winter (blue), spring (yellow), summer (green), autumn (red).

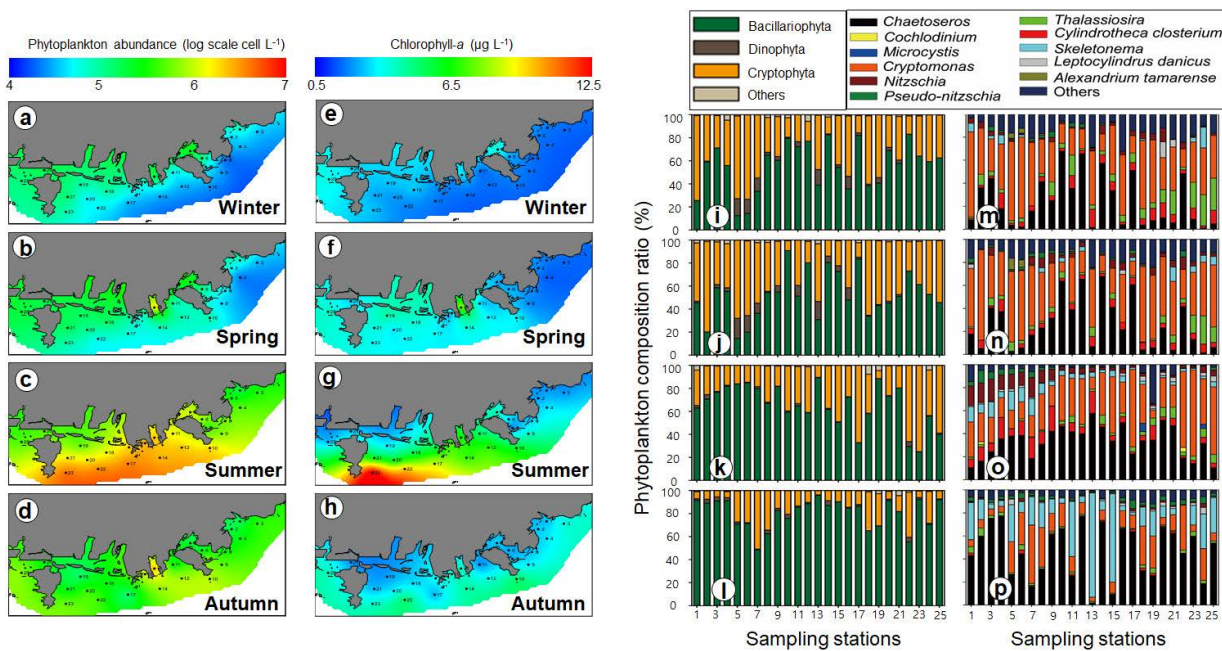
랑크톤의 14%로 4계절 중 가장 낮은 비율을 보였다. 아울러 *S. costatum*-like species의 현존량이 하계보다 추계에 약 3배 이상의 높은 현존량을 기록하였고, 특히 정점 13, 15에서 각각 90%, 76%로 극우점하였다.

Chl. *a*의 농도는 동계  $0.63 \sim 2.76 \mu g L^{-1}$ , 춘계  $0.50 \sim 7.49 \mu g L^{-1}$ , 하계  $1.04 \sim 12.80 \mu g L^{-1}$ , 추계  $1.01 \sim 4.22 \mu g L^{-1}$ 로 변화하였다. 동계 5번 정점에서 최대  $2.76 \mu g L^{-1}$ 로 내측 정점에서 Chl. *a*의 농도가 높은 경향을 보였으며, 영양염 농도가 상대적으로 높은 낙동강 하구 지역을 중심으로 동계부터 춘계까지 증가하였다. 반면, 하계는 정점 23번에서 최대  $12.80 \mu g L^{-1}$ 의 농도로 외측에서 높은 경향을 보였다. 또한, 영양염 농도가 높은 지역에서 Chl. *a*의 농도는 낮게 관찰되었으며, 식물플랑크톤의 총 현존량 ( $R^2 = 0.84, p < 0.001$ )과 강한 양의 상관관계를 보였다(Fig. 8).

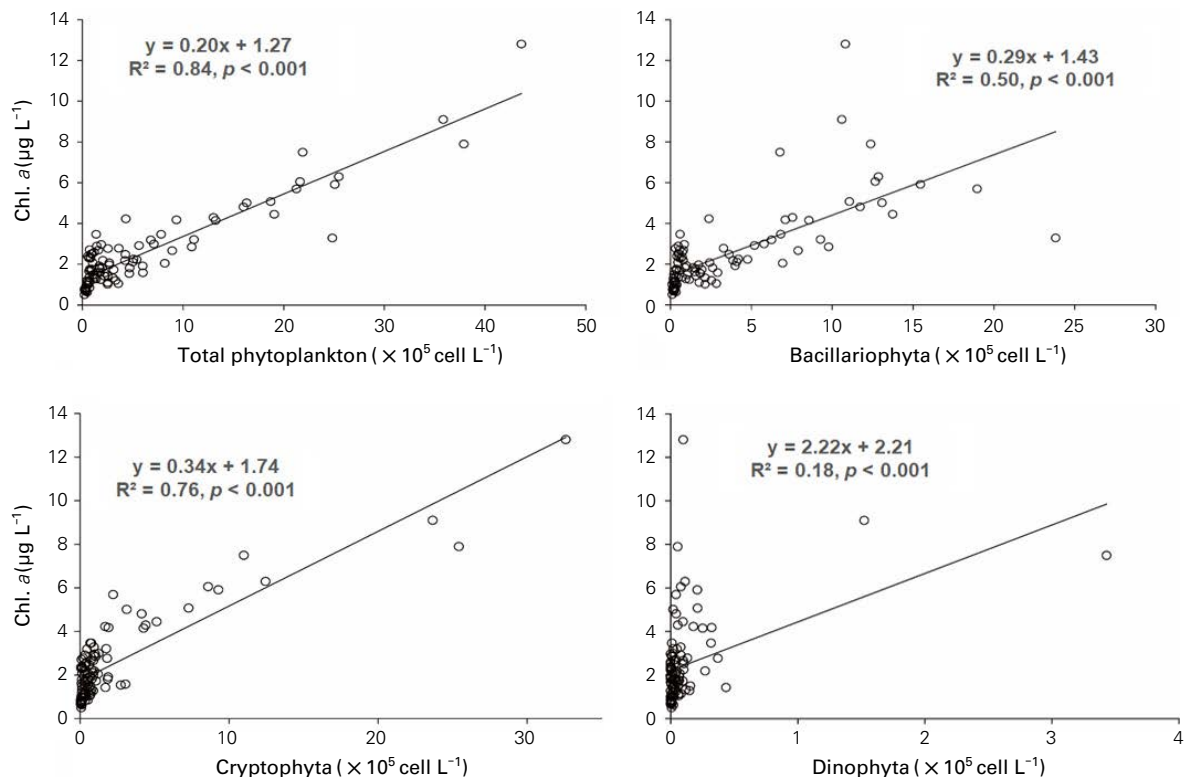
## 고 찰

### 1. 환경인자특성

연안 해역의 영양염 농도는 강우 및 방류수에 의한 담수 공급량의 영향을 크게 받는다(Jang *et al.* 2005). 전형적인 온대해역의 계절특성을 보이는 한국의 강수량은 집중호우의 영향으로 하계에 높고, 동계에는 낮은 뚜렷한 경향을 보인다. 본 조사해역인 부산 연안 해역은 수영강과 낙동강의 영향으로 염분과 영양염은 DIP를 제외하고 영양염과 뚜렷한 음의 상관관계를 보였다(DIN:  $R^2 = 0.72, p < 0.001$ ;



**Fig. 7.** Seasonal and spatial changes in total phytoplankton (a–d), chlorophyll-*a* (e–h), relative contribution of different taxonomic classes (i–l) and relative contribution of different species (m–p) in the coast of Busan, Korea.



**Fig. 8.** Relationships between chlorophyll-*a* and phytoplankton (Total, Bacillariophyta, Cryptophyta, and Dinophyta) in the coast of Busan, Korea.

DSi:  $R^2=0.78$ ,  $p<0.001$ ). 일반적으로 하구역에서 담수의 유입은 DIN, DIP, DSi의 농도를 증가시킨다고 알려져 있으나(Justic *et al.* 1995), 본 연구에서는 염분과 인산염은 유의한 상관관계가 관찰되지 않았다(DIP:  $R^2=0.037$ ,  $p>0.05$ ). Yoon *et al.* (2017)은 낙동강에서 DIP는 하구둑의 영향으로 방조제 내측 체류시간과 부유물질이 증가함에 따라 흡착 및 공침되어 제거되는 특성을 보고하였다. 반면, 하구둑에 의해 담수의 정체가 나타나는 낙동강 하구역과 달리 자연 하구역인 섬진강 하구역에서는 DIP를 포함한 모든 영양염류가 염분과 유의한 상관관계가 나타난다(Baek *et al.* 2015). 따라서 본 결과에서 나타난 염분과 DIP의 불명확한 상관관계는 낙동강 내측보에 의한 수괴의 정체의 영향으로 판단되며, 염분과 DIN, DSi와의 유의한 상관관계는 낙동강 방류량의 증가가 부산 연안 해역에 질산염과 규산염 기원의 영양염 공급을 촉진시킬 수 있다는 것을 시사한다.

## 2. 식물플랑크톤과 Chl. a 농도의 계절적 분포특성

본 연구에서 낙동강 방류수의 영향으로 10°C 전후의 낮은 수온이 관찰된 동계 낙동강 인접 정점에서 높은 Chl. a 농도( $1.49 \pm 0.23 \mu\text{g L}^{-1}$ )를 보였다. Kim *et al.* (2014)은 수괴가 혼합됨에 따라 저층의 영양염이 표층으로 공급되면 식물플랑크톤의 개체수가 증가하고 Chl. a 농도 또한 증가함을 보고하였다. 또한, Son *et al.* (2012)은 해양의 성층화가 가속되면 아표층으로부터 영양염 공급이 제한되어 Chl. a 농도가 감소함을 보고하였다. 동계는 수괴 혼합으로 인해 영양염이 저층에서 표층으로 공급되고, 낙동강은 방류량이 가장 적은 동계조차도 DIN과 DSi를 공급하여 하구역에 농도가 높게 존재했다(Fig. 4a and 4m). 따라서 낙동강 인접 정점에서 상대적으로 풍부한 DIN과 DSi를 통한 식물플랑크톤의 성장이 Chl. a 농도 증가에 기여한 것으로 판단된다. 낙동강 인접 정점에서 높은 점유율을 가진 규조류는 *T. pacifica*와 *T. rotula*였다. Popovich and Gayoso (1999)의 보고에 의하면, *T. pacifica*와 *T. rotula*는 낮은 광조건과 저수온(5~10°C) 조건에서 최대 성장률을 보이는 경향이 있다. 또한, 수심이 얇은 연안 해역의 동계에는 수층 혼합으로 인해 퇴적층의 미세입자가 재부유하고 상층에 존재하는 부유물질과 혼합되어 수층의 광투과도를 감소시킨다(Bae *et al.* 2014). 본 조사에서 SS의 농도는 동계 낙동강 인접 정점이 다른 정점보다 높았으며, 이로 인해 광량이

감소하였을 것으로 판단된다(Fig. 6). 따라서 동계 낙동강 인접 정점에서 *T. pacifica*와 *T. rotula*는 부유물질의 증가로 인한 광량 감소, 담수 유입에 의한 수온 감소로 인해 다른 식물플랑크톤에 비해 상대적으로 성장에 유리한 환경이 조성되어 우점한 것으로 판단된다.

은편모조류는 다양한 환경범위에 적응이 가능하며, 특히적으로 해수, 담수 및 기수역에 폭넓게 분포한다(Clay *et al.* 1999). 또한, 은편모조류는 기회종으로 연안 해역의 탁도가 높고 낮은 광조건에서 잘 적응하여 기회적으로 우점하는 특성이 있는 반면 규조류의 성장은 둔화되는 경향이 있다(Barone and Naselli-Flores 2003; Bae *et al.* 2014). 본 조사에서 은편모조류는 SS의 농도가 높은 동계와 추계에 높은 점유율을 보였고, 하계와 추계는 SS의 농도가 급격하게 낮아짐과 동시에 점유율 또한 감소했다. 따라서, 동계와 추계 *Cryptomonas sp.*의 대발생은 다량의 부유물질에 의해 낮아진 광조건에서 상대적으로 빠르게 적응할 수 있는 생태적 특성을 이용하여 기회적으로 출현한 것으로 판단된다. 결과적으로 *Cryptomonas sp.*의 대발생을 명확하게 설명할 수 없지만 부유물질 증가에 의한 광량의 감소가 그들의 성장에 일정하게 관여하였을 가능성이 있다.

규조류는 영양염이 풍부한 환경에서 와편모조류와의 경쟁에서 유리한 생태학적 지위를 가진다. 반면, 남해안과 같이 하계 성층의 발달로 표층 영양염이 고갈된 환경에서는 주야수직이동을 통해 저층의 영양염을 활용할 수 있는 와편모조류가 규조류와의 경쟁에서 유리하다(Oh *et al.* 2008b). 남해의 연안 및 내만은 규조류가 연중 우점하는 비율이 높지만, 하계는 앞서 언급한 이유로 인해 와편모조류가 우점한다(Kim *et al.* 1999; Yoon *et al.* 2003). 반면, 본 연구의 조사해역은 낙동강과 수영강에 의한 담수의 유입의 영향을 직접적으로 받는 지역으로 하계 표층 수온의 증가로 성층이 발달하지만, 저염분화 및 고영양염화 현상과 같이 일반적인 남해안의 계절특성과 차이를 보였다(Lim and Baek 2017a, 2017b). 따라서, 일반적으로 와편모조류가 우점하는 하계 남해안의 식물플랑크톤의 군집구조와 달리, 본 조사해역의 하계 많은 양의 육상 기원 영양염의 공급은 규조류 증식을 촉진하여 *C. socialis*, *N. longissima*, *C. closterium*, *S. costatum*-like species의 우점을 이끌었다. 한편, Chl. a의 농도는 상대적으로 영양염 농도가 낮은 외측을 중심으로 높게 나타났다. 식물플랑크톤은 염분에 민감하게 반응하며, 급격한 염분의 변화는 세포를 파괴한다(Oh



et al. 2010). 하계 염분은 영양염이 가장 높은 낙동강 인접 해역에서는 대량 방류의 영향으로 최소 16.82 psu로 낮은 반면 외측에서는 평균  $30.00 \pm 3.68$  psu로 관찰되었다. 따라서 외측의 높은 Chl. *a*의 농도는 염분 스트레스를 받지 않을 수 있는 외측 해역에서 식물플랑크톤이 높은 현존량을 유지했기 때문으로 판단된다. 본 조사기간 동안 Chl. *a*의 농도는 총 식물플랑크톤의 현존량과 높은 양의 상관관계를 보였으며 ( $R^2=0.84, p<0.001$ ), 그중에서 은편모조류 ( $R^2=0.76, p<0.001$ ), 규조류 ( $R^2=0.50, p<0.001$ ) 그리고 와편모조류 ( $R^2=0.18, p<0.001$ ) 순으로 유의한 상관성을 보였다. 결과적으로 부산 연안 해역은 강우에 의한 낙동강 방류수의 증가와 하구역 및 연안역이 특이적으로 시시각각 변할 수 있는 환경에 적응이 빠른 은편모조류, 규조류가 우점할 수 있는 좋은 환경이라는 것을 시사한다 (Bae et al. 2014). 또한, 와편모조류가 4계절 동안 가장 낮은 현존량을 보인 이유는 앞서 언급한 바와 같이 하계 집중호우의 영향으로 낙동강 하구역에 담수의 유입과 영양염 공급이 규조류 성장을 빠르게 촉진시켰기 때문이다. 따라서 상대적으로 와편모조류는 Chl. *a* 농도에 대한 기여율이 낮은 것으로 사료된다.

추계에는 쿠로시오의 지류수인 대마난류가 남해안으로 강한 영향을 주는 시기이고, 부산 연안 해역은 추계와 동계에 대마난류수의 높은 수온이 연안수와의 명확한 차이를 보여, 전선이 형성되는 특성이 있다 (Jang et al. 2013a, 2013b; Baek et al. 2019). 또한, 연안 전선역은 기초 생산력이 높은 특성이 있다 (Jung et al. 2013). 본 연구에서도 외측의 대마난류 영향권의 전선역에서 Chl. *a* 농도가 높게 나타났으며, 규조류 *C. curvisetus*와 *C. socialis*가 우점하였다. *C. curvisetus*와 *C. socialis*는 남해 연안에서 추계와 동계에 우점종으로 빈번히 출현한다 (Jung et al. 2008). 외측에서 *Chaetoceros* 종의 우점은 추계 대마난류에 의해 형성된 전선역에서 생물집적이 이루어진 것으로 판단되며, 이에 따라 Chl. *a* 농도 또한 외측에서 높은 것으로 판단된다. *S. costatum*-like species은 4계절 중 추계에 가장 높은 현존량을 보였으며, 하계와 비교해 약 3배 높았고, 특히 정점 13, 15에서 뚜렷하게 나타났다. *S. costatum*-like species은 국내는 물론 남극해를 제외하고 널리 분포하는 범지구적 연안 우점 규조류이며 광온, 광염성 종으로 알려져 있다 (Hasle 1973; Kooistra et al. 2008; Park et al. 2009; Yamada et al. 2010). 또한, 이 종은 광량이 낮은 해역에서 성장

이 빠르며, 폐쇄성 연안역에서 잘 성장할 수 있는 종이다 (Kwon et al. 2002; Oh et al. 2008a; Kim et al. 2012). 따라서 *S. costatum*-like species은 추계 낮아지는 광량과 수층혼합으로 인한 부유물질 증가로 인해 상대적으로 낮은 광량에도 성장을 할 수 있는 특성을 이용해 우점한 것으로 판단된다. 또한, 정점 13번과 15번은 감천항과 다대포항으로 화물선의 이동량이 많은 폐쇄성 연안역이기 때문에, 화물선의 활발한 이동에 따른 부유물질의 증가가 *S. costatum*-like species의 대량 증식에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 결과적으로 *S. costatum*-like species은 하계뿐만 아니라, 광량, 지형 등의 요인 변화에 따라 추계에도 극우점할 수 있는 잠재성을 재차 확인할 수 있었다.

### 3. 주성분 분석에 의한 부산 연안 해역 해석

부산 연안 해역의 계절별 환경인자와 식물플랑크톤의 상관관계를 파악하기 위해서 주성분분석(PCA)을 수행하였다 (Table 1). 동계 제1 주성분(기여율 47.54%)과 은편모조류, 와편모조류 그리고 영양염(DIN, DIP, DSi)은 양(+)의 상관관계, 수온과 염분은 음(-)의 상관관계가 나타났고, 제2 주성분(기여율 21.43%)과 영양염은 양(+)의 상관관계, Chl. *a*, 규조류는 음(-)의 상관관계가 나타났다. 이는 동계의 저수온, 고영양염의 담수유입에 의해 공급된 영양염이 은편모조류의 우점을 이끈 반면 규조류는 상대적으로 영양염이 높은 환경에서 낮은 점유율을 나타낸 것으로 판단된다. 앞서 언급한 바와 같이 은편모조류는 낮은 광조건에서 성장이 유리하고 규조류의 성장은 둔화되는 경향이 있다. 따라서 본 PCA 결과는 동계 높은 부유물질 농도에 의한 낮은 광조건에서 담수에 의해 공급된 영양염을 통해 성장한 은편모조류가 우점할 수 있었음을 시사한다. 춘계 제1 주성분(기여율 50.82%)과 수온, Chl. *a*, 규조류, 와편모조류, 은편모조류는 양(+)의 상관관계, 영양염은 음(-)의 상관관계를 보였고, 제2 주성분(기여율 32.11%)과 수온, DIN, DSi는 양(+)의 상관관계, 염분은 음(-)의 상관관계를 보였다. 이는 춘계 식물플랑크톤은 광량과 수온 증가에 의해 성장이 촉진되어 담수를 통해 유입된 영양염을 소비하였고, 이에 따라 높은 Chl. *a* 농도를 나타내는 것으로 해석할 수 있었다. 하계 제1 주성분(기여율 42.98%)과 수온, 규조류, 은편모조류, DIN, DSi는 양의 상관관계, 염분은 음(-)의 상관관계를 보였고, 제2 주성분(기여율 32.6%)과 염분, Chl. *a*, 규조류, 와편모조류, 은편모

**Table 1.** Loading factor of parameters for the first and two principal components in the coast of Busan, Korea

Parameters	Winter		Spring		Summer		Autumn	
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2
Temperature	<b>-0.69</b>	0.41	<b>0.68</b>	<b>0.59</b>	<b>0.83</b>	-0.03	<b>0.76</b>	-0.37
Salinity	<b>-0.50</b>	-0.12	-0.06	<b>-0.94</b>	<b>-0.85</b>	0.46	<b>0.67</b>	<b>-0.56</b>
DIN	<b>0.61</b>	<b>0.52</b>	-0.11	<b>0.89</b>	<b>0.66</b>	<b>-0.73</b>	<b>-0.89</b>	0.18
DIP	<b>0.79</b>	0.45	<b>-0.70</b>	0.02	-0.21	<b>-0.82</b>	<b>-0.74</b>	-0.42
DSi	<b>0.69</b>	<b>0.55</b>	-0.16	<b>0.86</b>	<b>0.76</b>	<b>-0.60</b>	<b>-0.87</b>	0.26
Chl. <i>a</i>	<b>0.78</b>	<b>-0.54</b>	<b>0.95</b>	0.22	<b>0.76</b>	<b>0.57</b>	<b>0.69</b>	<b>0.59</b>
Diatoms	0.36	<b>-0.82</b>	<b>0.97</b>	-0.12	<b>0.67</b>	0.45	<b>0.67</b>	0.09
Dinoflagellates	<b>0.73</b>	0.01	<b>0.92</b>	-0.21	0.17	<b>0.54</b>	<b>0.59</b>	<b>0.57</b>
Cryptophytes	<b>0.91</b>	-0.12	<b>0.94</b>	-0.13	<b>0.60</b>	<b>0.58</b>	0.34	-0.21
Eigenvalue	4.27	1.92	4.57	2.89	3.87	2.93	4.51	1.45
Proportion (%)	47.5	21.4	50.8	32.1	42.9	32.6	50.0	16.0
Cumulative (%)	47.54	68.97	50.82	82.93	42.98	75.58	50.09	66.18

Loadings > 0.5 are bold

DIN: Dissolved inorganic nitrogen, DIP: Dissolved inorganic phosphate, DSi: Dissolved inorganic silicon, Chl. *a*: Chlorophyll *a*

조류는 양(+)의 상관관계, 영양염은 음(-)의 상관관계가 나타났다. 하계 집중호우로 증가한 고수온, 저염분 특성의 낙동강 방류수는 식물플랑크톤의 성장에 필요한 다량의 영양염을 공급하고, 이러한 낙동강 방류수의 영향으로 인접 해역에서는 매우 높은 수준의 영양염이 분포하였으나, Chl. *a*의 공간분포는 영양염이 상대적으로 낮은 해역에서 높은 경향을 보였다(Figs. 4 and 7). 따라서 하계 PCA 결과와 환경요인 및 식물플랑크톤의 공간분포를 종합적으로 고려해 보면, 외측 해역에서의 높은 Chl. *a*의 농도분포는 염분 스트레스를 받지 않을 수 있는 외측 해역의 식물플랑크톤 군집이 영양염을 소모하여 증식하였음을 시사한다. 추계 제1 주성분(기여율 50.09%)과 수온, 염분, Chl. *a*, 규조류, 와편모조류는 양(+)의 상관관계, 영양염은 음(-)의 상관관계를 보였으며, 제2 주성분(기여율 16.09%)과 Chl. *a*와 와편모조류는 양(+)의 상관관계, 염분과 DIP는 음(-)의 상관관계를 보였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 추계 영양염 농도가 낮은 외측 해역에서 우점한 규조류 *C. curvisetus*와 *C. socialis*가 높은 Chl. *a* 농도분포에 기여한 것으로 해석할 수 있었다. 반면, 와편모조류와 다른 인자와의 관계는 명확하게 파악할 수 없었다. 이는 측정되지 않은 외부 물리적인 환경의 영향을 받았을 것으로 사료된다. 외부 물리적인 요인 중 하나로 쿠로시오의 지류수인 대마난류의 영향을 제시하는 바이다. 한국 남해안에 영향을 미치는 대마난류 세기는 추계에 가장 강한 것으로 알려져 있

으며(Baek *et al.* 2019), 본 연구의 추계 조사에서 역시 외측에서 높은 수온이 관찰되어 대마난류의 영향을 받고 있음을 시사했다. 따라서, 대마난류가 식물플랑크톤 군집에 미치는 영향을 명확하게 파악하기 위해서는 장기 모니터링을 통한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. PCA 결과를 종합하면 부산 연안 해역은 낙동강 방류수의 저염분수와 영양염의 공급이 식물플랑크톤 군집을 결정하는 가장 중요한 요인으로 작용함을 확인하였다.

## 적 요

본 연구는 2014년 동계, 춘계, 하계, 추계 부산 연안 해역에서 식물플랑크톤 군집구조와 그들의 성장에 미치는 환경요인을 파악하기 위해 25개의 정점에서 생물학적 요인과 무생물학적 요인을 조사하였다. 부산 연안 해역에서 식물플랑크톤의 현존량 및 군집조성은 강우에 의한 낙동강 방류수에 크게 의존되는 특성과 더불어, 염분 분포가 생물의 집적에 중요하게 작용하는 것으로 파악됐다. 염분은 영양염 DIN ( $R^2=0.72$ ,  $p<0.001$ ) 및 DSi ( $R^2=0.78$ ,  $p<0.001$ )와 유의한 상관관계를 확인하였으나, DIP ( $R^2=0.037$ ,  $p>0.05$ )는 염분과 유의한 관계성은 없었다. 이는 2014년 하계 강우에 의한 연안역으로 담수의 유입은 질소와 규소기원의 영양염 공급을 초래하였고, 식물

플랑크톤 중 규조류와 은편모조류의 증식에 중요하게 작용하였다. 계절적으로 식물플랑크톤의 현존량은 하계, 추계, 춘계, 동계 순으로 높게 나타났다. Chl. *a* 농도에 대한 기여율은 식물플랑크톤의 총 현존량과 높은 양의 상관관계 ( $R^2=0.84, p<0.001$ )를 보였고, 그중에서도 은편모조류 ( $R^2=0.76, p<0.001$ ) 및 규조류 ( $R^2=0.50, p<0.001$ )의 기여율이 상대적으로 높게 나타난 것을 파악하였다. 결과적으로 부산 연안 해역은 낙동강 하구와 부산 도심 및 항만 기원의 유기물 부하로, 식물플랑크톤의 증식이 빠르게 일어날 수 있는 환경변화를 파악하였다. 특히, 내측과 외측은 영양염 농도뿐만 아니라, 식물플랑크톤의 군집구조 및 현존량의 차이도 크게 나타났고, 이는 계절적으로 상이한 특성을 보였다.

## 사 사

본 연구는 한국해양과학기술원 연구과제 “생지화학 순환 및 해양환경변동 연구(PEA0012)” 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Bae SW, DS Kim, YO Kim, CH Moon and SH Baek. 2014. The influences of additional nutrients on phytoplankton growth and horizontal phytoplankton community distribution during the autumn season in Gwangyang Bay, Korea. Korean J. Environ. Biol. 32:35-48.
- Baek SH, DS Kim, MH Son, SM Yun and YO Kim. 2015. Seasonal distribution of phytoplankton assemblages and nutrient-enriched bioassays as indicators of nutrient limitation of phytoplankton growth in Gwangyang Bay, Korea. Estuar. Coast. Shelf Sci. 163:265-278.
- Baek SH, DS Kim, YO Kim, MH Son, YJ Kim, MJ Lee and BS Park. 2019. Seasonal changes in abiotic environmental conditions in the Busan coastal region (South Korea) due to the Nakdong River in 2013 and effect of these changes on phytoplankton communities. Cont. Shelf Res. 175:116-126.
- Barone R and L Naselli-Flores. 2003. Distribution and seasonal dynamics of Cryptomonads in Sicilian water bodies. Hydrobiologia 502:325-329.
- Clay BL, P Kugrens and RE Lee. 1999. A revised classification of Cryptophyta. Bot. J. Linn. Soc. 131:131-151.
- Hasle GR. 1973. Morphology and taxonomy of *Skeletonema costatum* (Bacillariophyceae). Nor. J. Bot. 20:109-137.
- Jang PG, BG Hyun, HG Cha, HS Chung, MC Jang and KS Shin. 2013a. Seasonal variation of phytoplankton assemblages related to surface water mass in the Eastern part of the South Sea in Korea. Ocean Polar Res. 35:157-170.
- Jang PG, HH Shin, SH Baek, MC Jang, TS Lee and K Shin. 2013b. Nutrient distribution and effects on phytoplankton assemblages in the western Korea/Tsushima Strait. N. Z. J. Mar. Freshw. Res. 47:21-37.
- Jang PG, WJ Lee, MC Jang, JD Lee, WJ Lee, M Chang, KC Hwang and KS Shin. 2005. Spatial and temporal distribution of inorganic nutrients and factors controlling their distributions in Gwangyang Bay. Ocean Polar Res. 27:359-379.
- Jung DH, HH Shin, SW Jung and DI Lim. 2013. Variations and characters of water quality during flood and dry seasons in the Eastern Coast of South Sea, Korea. Korean J. Environ. Biol. 31:19-36.
- Jung SW, OY Kwon and JH Lee. 2008. Variation and relationship between standing crops and biomass of phytoplankton dominant species in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters from 2000 to 2007. Algae 23:53-61.
- Justić D, NN Rabalais, RE Turner and Q Dortch. 1995. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences. Estuar. Coast. Shelf Sci. 40:339-356.
- Kim AR, SH Youn, MH Chung, SC Yoon and CH Moon. 2014. The influences of coastal upwelling on phytoplankton community in the southern part of East Sea, Korea. The Sea 19:287-301.
- Kim BH, DH Won and YJ Kim. 2012. Spring bloom of *Skeletonema costatum* and lake trophic status in the Hwajinpo Lagoon, South Korea. Korea. J. Ecol. Environ. 45:329-339.
- Kim KC, HS Yang, CK Kim, CH Moon and ST Jang. 1999. Variations of physical oceanographic environment caused by opening and closing the floodgate in Nakdong estuary. J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy 2:49-59.
- Kooistra WH, D Sarno, S Balzano, H Gu, RA Andersen and A Zingone. 2008. Global diversity and biogeography of *Skeletonema* species (Bacillariophyta). Protist 159:177-193.
- Kwon KY, CH Kim, CK Kang, CH Moon, MO Park and SR Yang. 2002. Limiting nutrients for phytoplankton growth in the Seomjin River estuary as determined by algal bioassay experiment. Korean J. Fish. Aquat. Sci. 35:455-461.
- Kwon KY, CH Moon, JS Lee, SR Yang, MO Park and PY Lee. 2004. Estuarine behavior and flux of nutrients in the Seomjin river estuary. The Sea 11:153-163.
- Lee M, JY Seo and SH Baek. 2021. Water quality characteristics and spatial distribution of phytoplankton during dry and rainy seasons in Bunam Lake and Cheonsu Bay, Korea. Korea. J.

- Environ. Biol. 39:184–194.
- Lee MJ, DS Kim, YO Kim, MS Sohn, CH Moon and SH Baek. 2016. Seasonal phytoplankton growth and distribution pattern by environmental factor changes in inner and outer bay of Ulsan, Korea. *The Sea* 21:24–35.
- Lee M, YB Kim, JH Kang, CH Park and SH Baek. 2020. Seasonal distribution of phytoplankton and environmental factors in the offshore waters of Dokdo: Comparison between 2018 and 2019. *Korean J. Environ. Biol.* 38:47–60.
- Lim YK and SH Baek. 2017a. Assessment of phytoplankton viability along the salinity gradient in Seomjin River Estuary, Korea. *Korean Soc. Mar. Environ. Saf.* 23:513–523.
- Lim YK and SH Baek. 2017b. Seasonal variation of primary producer phytoplankton community in the vicinity of the oyster farming area between Tongyeong-Saryang Island. *Korean J. Environ. Biol.* 35:492–500.
- Oh SJ, CH Kim, HS Yang and HK Kwon. 2010. Effects of water temperature, salinity and irradiance on the growth of harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Margelef isolated from South Sea of Korea in 2008. *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 43:715–722.
- Oh SJ, IS Kang, YH Yoon and HS Yang. 2008a. Optical characteristic on the growth of centric diatom, *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve isolated from Jinhae Bay in Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 26:57–65.
- Oh SJ, JS Lee, JS Park, IH Noh and YH Yoon. 2008b. Environmental factor on the succession of phytoplankton community in Jinju Bay, Korea. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy* 11:98–104.
- Park JS, CJ Cheong and YH Yoon. 2021. Characteristics of the spatio-temporal distributions of water quality and phytoplankton communities in the Isa Stream systems (ISS). *Korean J. Environ. Biol.* 39:273–288.
- Park JS, YH Yoon and SJ Oh. 2009. Variational characteristics of phytoplankton community in the mouth parts of Gamak Bay, Southern Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 27:205–215.
- Parsons TR, Y Maita and CM Lalli. 1984. *A Manual of Biological and Chemical Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press. New York. p. 173.
- Popovich CA and AM Gayoso. 1999. Effect of irradiance and temperature on the growth rate of *Thalassiosira curviseriata* Takano (Bacillariophyceae), a bloom diatom in Bahía Blanca estuary (Argentina). *J. Plankton Res.* 21:1101–1110.
- Song YB, JH Ryu, JH Noh, SJ Joo and SH Kim. 2012. Climatological variability of satellite-derived sea surface temperature and Chlorophyll on the South Sea of Korea and East China Sea. *Ocean Polar Res.* 33:281–290.
- Yamada M, E Katsuki, M Otsubo, M Kawaguchi, K Ichimi, H Kaeriyama, K Tada and PJ Harrison. 2010. Species diversity of the genus *Skeletonema* (Bacillariophyceae) in the industrial harbor Dokai Bay, Japan. *J. Oceanogr.* 66:755–771.
- Yang YH. 2003. A summary on the characteristics of marine environment and phytoplankton community in the Southwest Sea of Korea. *Bull. Fish. Sci. Inst. Yosu Nat'l Univ.* 12:1–17.
- Yoon SC, SH Youn and YS Suh. 2017. The characteristics of spatio-temporal distribution on environmental factors after construction of artificial structure in the Nakdong River estuary. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy* 20:1–11.
- Yoon YH. 2021. Characteristics on spatial distributions of phytoplankton communities in relation to water masses in the western South Sea, Korea in early autumn 2021. *Korean J. Environ. Biol.* 39:559–572.