

## 2018년 금강 하구해역 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 분포 및 생물해양학적 환경특성

김혜선, 김하련, 양동우, 윤양호<sup>1,\*</sup>

국립해양생물자원관 생태보전실, <sup>1</sup>전남대학교 해양융합과학과

### 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

Hye Seon Kim, Haryun Kim, Dongwoo Yang and Yang Ho Yoon<sup>1,\*</sup>

National Marine Biodiversity Institute of Korea, Seocheon 33662, Republic of Korea

<sup>1</sup>Department of Ocean Convergence Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

**\*Corresponding author**

Yang Ho Yoon

Tel. 061-659-7142

E-mail. yoonyh@jnu.ac.kr

**Received:** 10 April 2020

**First Revised:** 1 May 2020

**Second Revised:** 20 May 2020

**Revision accepted:** 21 May 2020

**Abstract:** We conducted a seasonal field survey to analyze the distribution patterns of a phytoplankton community and biological oceanographic characteristics in the Geum river estuary in 2018. The results showed that the phytoplankton community consisted of 58 genera and 116 species, showing a relatively simple distribution. It was controlled by diatoms at 70.2%, a low number of species in winter and spring, and a high number in summer and autumn. The phytoplankton cell density ranged from 10.0 to 2,904.0 cells mL<sup>-1</sup>, with an average layer of 577.2 cells mL<sup>-1</sup>, which was low in autumn and high in winter. The seasonal succession of phytoplankton dominant species was mainly centric diatoms from winter to summer, including *Thalassiosira nordenskioldii*, *Cerataulina bergonii*, and *Skeletonema costatum*-ls in winter, *S. costatum*-ls and *C. bergonii* in spring, and *Eucampia zodiacus* and *Th. nordenskioldii* in summer. However, the autumn species depended upon the regions, with the inner bay dominated by the centric diatom, *Aulacoseira* cf. *granulata*, the mixed areas by *S. costatum*-ls, and the open sea by the dinoflagellate, *Lingulodinium polyedra*. According to principal component analysis (PCA), the phytoplankton community was greatly affected by the inflow and expansion of freshwater, including high nutrients, which are introduced annually through the river-mouth weir in Geum river estuary. However, the estuary, which is strongly affected by annual freshwater, was limited to areas near Geumran Island, which is adjacent to the river-mouth weir.

**Keywords:** Geum river estuary, Phytoplankton community, Species composition, Spatio-temporal distribution, Biological oceanographic environments, Freshwater

## 서론

하구해역은 하천수가 바다로 유출되어, 해수와 혼합되는 해역으로 육상에서 다양한 유기물과 무기원소 등이 유입되기에 생물해양학은 물론 환경해양학에서도 관심이 높은 곳이다(Hopkinson and Smith 2005; Cloern *et al.* 2014). 이러한 하구해역은 담수 유입 강도에 따라 썩기 모양의 염분 성층구조를 보이는 등 다양한 혼합특성을 나타내어(Pritchard 1989), 물리·화학적 환경인자는 물론 생물학적 인자의 농도 경도도 큰 특징을 보인다(Hoshiai 1964; McLusky 1993). 특히 서해처럼 조석차가 큰 하구해역은 담수 유입과 조석주기에 따른 해수 혼합 정도에 따라 생물의 시·공간분포가 다른 특성을 나타내며(Trigueros and Orive 2000), 영양염 공급이 원활하여 높은 농도를 나타내기에도 상대적으로 대형이면서, 환경변화에 적응 가능한 식물플랑크톤 종들이 우점하는 특성을 나타낸다(Cloern 2018).

금강은 소백산맥(전북 장수)에서 발원하여 충청북도 남서부를 거쳐 충청남도과 전라북도의 도계를 형성하는 하천으로, 유역길이가 401 km로 1990년 군산시과 서천군 사이의 길이 1,841 m인 금강 하굿둑에 의해 형성된 담수호로 해역과 격리되어, 하천수의 유출이 제한된다(doopedia: <http://www.doopedia.co.kr>). 하굿둑에 인접한 해역인 금강 하구해역에는 북동쪽으로 서천군을 따라 광활한 서천갯벌이 분포하며, 남쪽으로는 군산 산업단지가 조성되어 있어, 외적인 환경변화의 압력이 상대적으로 큰 환경을 나타내고 있지만, 해양학적 기본연구는 매우 제한적이다.

금강 하구해역을 대상으로 연구된 식물플랑크톤 군집 관련 기존 연구는 하굿둑 건설 이전 하굿둑보다 상류 수역까지를 포함하는 하구역의 연구(Shim and Yang 1982; Jeong *et al.* 1985) 및 하구역의 한정된 정점을 포함한 서해 중부의 광역해역을 대상으로 한 연구(Shim and Yoo 1985), 하굿둑에 인접한 하구역에서 계절변동을 포함한 연구(Yih *et al.* 2005; Shin 2013; Kim *et al.* 2018) 및 한 개 정점을 대상으로 한 모니터링 결과(Kim and Hwang 2018) 등이 있다. 그리고 새만금 방조제 축조와 관련한 방조제 인근 해역에 대한 다수의 연구(Yoo *et al.* 2002; Kim *et al.* 2009; Yeo 2010, 2012) 및 고군산 군도 연안해역(Yoon 2015) 등이 있지만, 하구해역을 포함한 광역적 해역을 대상으로 한 연구결과는 없다. 그리고 최근 환경을 포함한 금강 하구역의 종합관리시스템 개발에 관한 연구보고(Kim *et al.* 2018; Kim and

Hwang 2018; Lee and Ryu 2018; Noh *et al.* 2018)가 일부 있으나, 이 역시 하굿둑 인근 해역에 제한된 결과이다.

이처럼 하구해역을 포함하는 해역의 효율적 관리 및 보전에 절대적으로 필요한 기초자료 수집 및 제공을 위하여 금강 하굿둑 인근의 하구해역은 물론 군산 및 서천 연안해역 등을 포함하는 광역해역을 대상으로 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 특성 및 생물해양학적 환경특성을 규명하고자 하였다.

## 재료 및 방법

금강 하구해역 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 변동 특성을 파악하기 위해 2018년 2월(겨울), 5월(봄), 8월(여름) 및 11월(가을) 4회에 걸쳐 금강 하굿둑에서 연안 외해역에 거친 넓은 해역에 15개 정점에 대해 현장조사를 실시하였다(Fig. 1). 조사는 소형선박을 이용하였고, 정점은 선박에 장착된 플로터 또는 휴대용 GPS (Gelmen)로 확인하였다. 표본은 채수법으로 용량 3.0 L의 반돈채수기를 이용하여 표층 해수 500 mL를 플라스틱 표본병에 채수하였다. 채수된 표본은 루골용액을 최종 농도가 2.0%가 되도록 첨가하여, 고정된 다음 광분해를 방지하기 위해 차광하였다. 고정된 표본은 실험실에서 차광된 플라스틱 메스실린더를 이용 48시간 이상 정치시켜 수 회 상등액을 제거하는 방법으로 500 mL → 100 mL → 50 mL → 10 mL의 농축단계를 거쳐 10 mL가 되도록 50배 농축하였다(OSC 1986). 검경은 1.0 mm 간격의 가로와 세로 선이 들어 있는 계수판(No. 5608-C, Rigosha, Japan)을 사용하여 농축 시료 0.1 mL를 미분간섭장치(DIC)가 있는 광학 현미경(Eclipse 80i, Nikon, Japan)으로 100×~400× 배율로 종의 동정과 계수를 실시하였다. 식물플랑크톤 종 동정은 Cupp (1943), Chihara and Murano (1997), Tomas (1997), Hallegraeff *et al.* (2010) 및 Omura *et al.* (2012) 등의 도감을 중심으로 다양한 분류논문을 참고하였다. 그리고 최근 식물플랑크톤 분류체계는 World Register of Marine Species (WoRMS, [www.marinespecies.org](http://www.marinespecies.org))를 기준으로 정리하였다.

검경자료를 이용하여 식물플랑크톤 출현 종조성, 세포밀도에 의한 현존량 및 우점종 등을 산출하였고, Primer 6.0 program을 이용하여 정점별 다양도 지수(H', Shannon and Weaver 1963)와 우점도 지수(D, McNaughton 1968)를 아

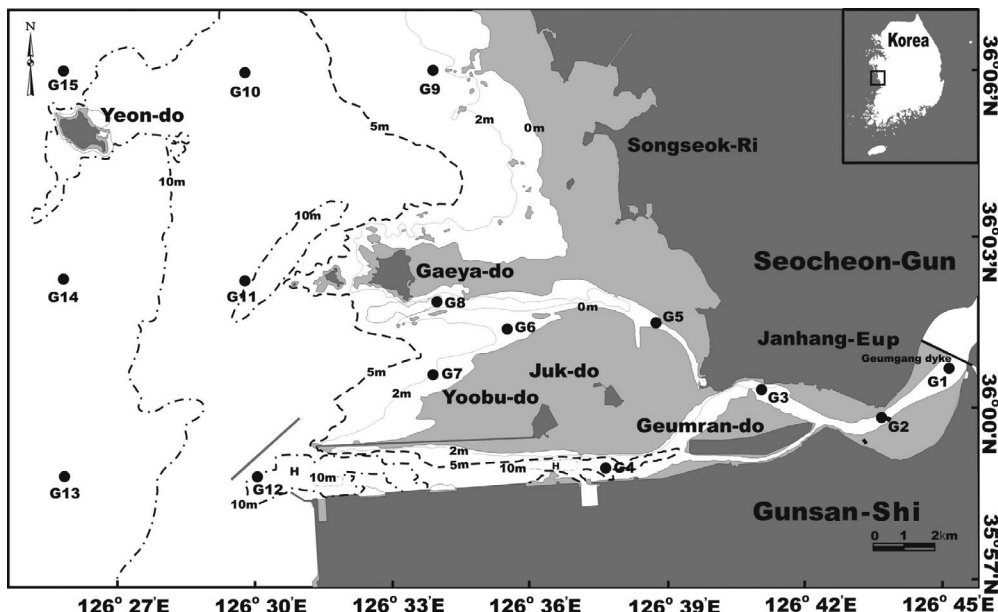


Fig. 1. Map of the bathymetric and sampling stations in the Geum river estuary.

래 계산식을 이용하여 산출하였다.

① 다양도 지수:  $H' = -\sum P_i \times \ln(P_i)$   
 $P_i$ :  $i$ 번째 종의 점유율

② 우점도 지수:  $D = (Y_1 + Y_2) / Y$   
 $Y$ : 총 세포수,  $Y_1$ 과  $Y_2$ : 첫 번째와 두 번째 우점종의 세포수

주성분 분석(PCA; principal component analysis)은 식물 플랑크톤 군집의 주요 분류군, 우점종, 출현 종수 등 식물 플랑크톤 관련 인자 및 잠수형 형광광도계 (ASTD102, JFE Advantech Co., Ltd, Japan)로 측정된 수온, 염분, 탁도, 용존 산소, Chl-a 농도 등 환경 인자를 이용하였다. 더불어 발색 법에 의해 분광광도계로 측정된 비색법으로 암모니아염, 질산염, 용존무기질소, 인산염 및 N/P ratio 등의 영양염류 항목도 이용하였다(MOF 2018). 주성분 분석은 SPSS 프로그램을 이용하여 누적 기여율 70%를 기준으로 계산하였다(Yoon 1989, 2016, 2019). 계산된 주성분 분석의 인자 부하량 분포로 금강 하구해역의 생물해양학적 특성을 결정하는 환경 인자를 파악하여, 식물플랑크톤 분류군 및 우점종의 출현 환경특성을 해석하였다. 또한, 계산된 득점을 이용하여 계절별 금강 하구해역의 해역 구분 및 해역 특성을 해석하였다. 다만 이 논문에서 사용하는 용어에서 하구

역은 하굿둑의 담수 영향을 직접받는 정점 G1~G5까지의 한정된 해역을 나타내는 용어로, 하구해역은 하구역과 연안해역을 포괄하는 용어로 사용하고 있다.

## 결 과

### 1. 식물플랑크톤 군집

#### 1) 종조성

2018년 4계절 동안 금강 하구해역에 출현한 식물플랑크톤 종은 58속 116종으로, 분류군별로는 남조류가 1속 1종으로 0.9%의 점유율을 보였고, 규조류(담수종 포함)가 34속 72종으로 62.1%, 와편모조류가 15속 32종으로 27.6%, 규질편모조류가 3속 4종으로 3.4%, 담수 녹조류가 4속 5종으로 4.3% 그리고 유글레나조류가 1속 2종으로 1.7%의 점유율을 나타내었다(Fig. 2). 출현 종수의 계절 변화는 겨울 종조성이 25속 50종으로 단순하였고, 분류군별로 규조류 21속 44종으로 88.0%, 와편모조류 3속 5종으로 10.0% 그리고 규질편모조류 1속 1종으로 2.0%의 점유율을 나타내었다. 봄은 33속 53종으로 겨울과 유사하여 단순한 종조성을 보였으며, 분류군별로 규조류 24속 42종으로 79.20%, 와편모조류 5속 7종으로 13.2%, 유글레나조류 1속 1종으로

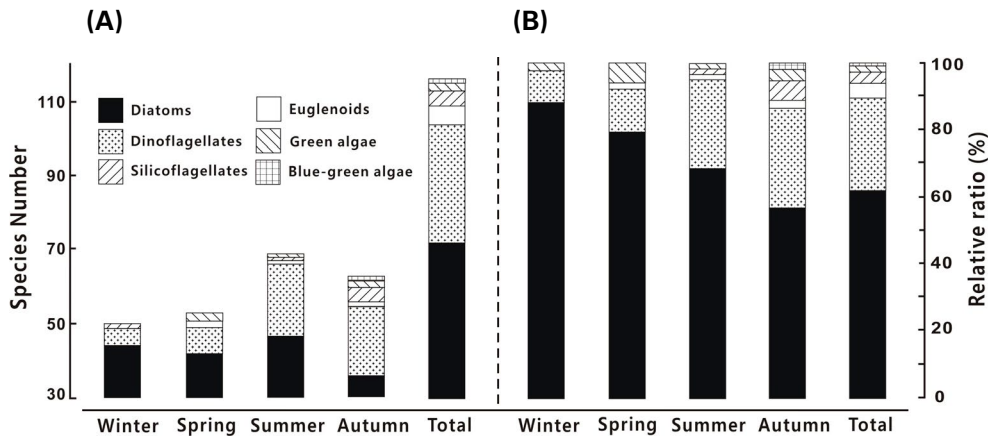


Fig. 2. Seasonal variation in phytoplankton species composition (A) and its relative ratio (B) in the Geum river estuary.

로 1.9%, 그리고 담수산 녹조류 3속 3종으로 5.7%의 점유율을 나타내었다. 여름은 37속 69종으로 상대적으로 다양하였고, 분류군별로 규조류 24속 47종으로 68.1%, 와편모조류 10속 19종으로 27.6%, 규질편모조류 및 유글레나조류가 각 1속 1종으로 소계 2.9%, 기타 담수산 녹조류 1속 1종으로 1.4%의 점유율을 나타내었다. 가을은 41속 63종으로 분류군별로 규조류 23속 36종으로 57.1%, 와편모조류 11속 19종으로 30.2%, 규질편모조류 3속 4종으로 6.3%, 유글레나조류 1속 1종으로 1.6% 그리고 담수산 녹조류와 남조류가 각 2속 2종 및 1속 1종으로 각 3.2% 및 1.6%의 점유율을 나타내었다(Fig. 2). 즉 식물플랑크톤 군집을 구성하는 전체 종조성은 겨울과 봄에 단순하고, 여름과 가을에 상대적으로 다양하게 보이지만(Fig. 2), 정점별 출현 종수의 변화는 겨울( $29.8 \pm 4.66$ , 평균  $\pm$  표준편차, 이하 동일)과 여름( $25.9 \pm 5.65$ )에 상대적으로 높고, 봄( $22.2 \pm 3.61$ )과 가을( $17.0 \pm 5.26$ )에 낮았다. 또한, 출현 종수가 낮은 겨울과 봄은 대부분 규조류에 의해 점유되고 있었지만, 여름과 가을에는 와편모조류 등 식물성 편모조류의 점유율이 상대적으로 높은 특징을 나타내었고, 담수산 녹조류, 남조류 및 규조류 등은 금강 하굿둑 주변의 하구역에 제한적으로 출현하였다.

출현 종수의 시·공간적 분포는 겨울에 외해역인 서쪽 정점 G13에서 23종으로 낮았고, 개야도 동쪽의 정점 G6에서 38종으로 높았으나, 전체 해역에서  $29.8 \pm 4.66$ 종의 변동 폭으로 금강 하굿둑에 인접한 장항항에서 개야도에 이르는 해역에서 35종 이상의 높은 종수를 보였다. 그리고 하굿둑 주변의 하구역과 북동부의 서천 마량포구에서

연도를 연결하는 서부해역에서 30종 이하로 낮았다(Fig. 3A). 봄은 하구역에서 25종 이하로 낮았고, 군산시에 인접하는 남부해역에서 25종 이상을 보였으나, 북부해역은 20종 이하로 더욱 낮았다(Fig. 3B). 여름은 개야도를 포함하는 북동부해역에서 군산 산업단지 서쪽인 남서부의 대각선 해역에서 30종 이상으로 높았고, 외해역의 북서부해역과 남동부의 내만해역에서 30종 이하로 낮았다. 또한, 하굿둑에 인접한 하구역에서 20종 이하로 상대적으로 낮았다(Fig. 3C). 가을은 하굿둑을 통해 유출된 담수와 해수가 혼합하는 유부도와 죽도를 포함하는 해역에서 20종 이상으로 높았고, 하구역과 연도를 포함하는 북서부해역에서 15~20종의 범위를, 그리고 서쪽의 외해역 중앙부에서 10종 이하로 매우 낮았다(Fig. 3D).

## 2) 현존량

현존량의 계절 변화는 가을  $10 \text{ cells mL}^{-1}$ 에서 겨울  $2,904.0 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 변동 폭으로 평균  $577.2 \text{ cells mL}^{-1}$ 을 나타내어, 상대적으로 높은 현존량으로 봄과 가을에 낮고, 여름과 겨울에 높았다. 가을 이외의 전체 식물플랑크톤 현존량은 규조류에 지배되지만, 가을은 와편모조류 점유율이 높았다(Fig. 4). 계절별로 겨울은 외해역의 정점 G14에서 최솟값  $164.2 \text{ cells mL}^{-1}$ 에서 하굿둑에 인접한 정점 G01에서 최댓값  $2,904.0 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 범위에서  $1,014.9 \pm 871.8 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 변동 폭으로 높은 현존량을 보였다. 봄은 하구역의 정점 G3에서 최솟값  $77.4 \text{ cells mL}^{-1}$ 에서 중앙부의 정점 G8에서 최댓값  $352.8 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 범위에서  $182.9 \pm 89.9 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 변동 폭으로 겨울보다는 한 자릿수가 낮은 현존량을 보

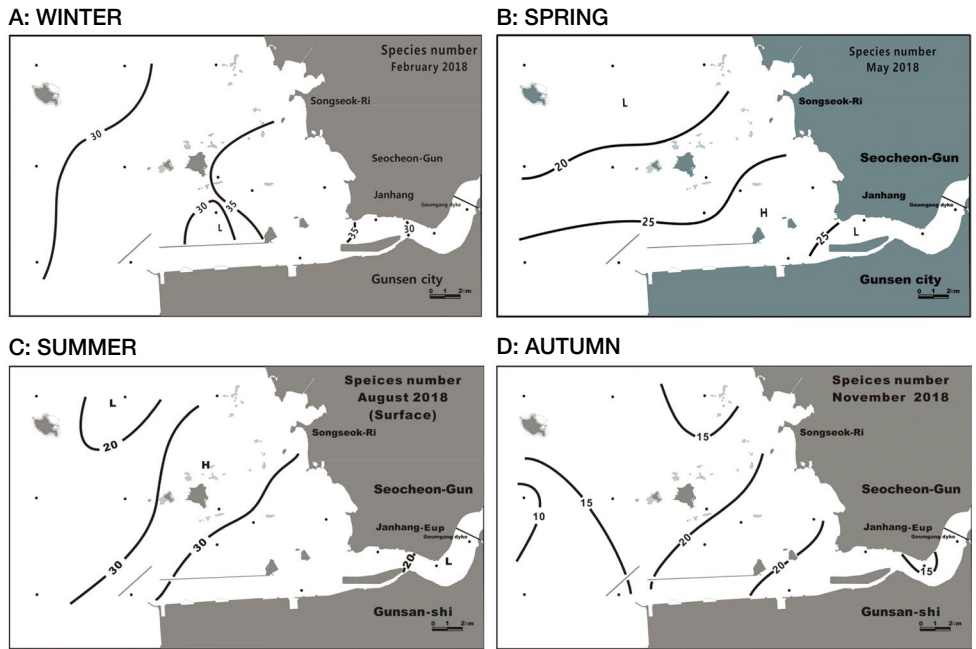


Fig. 3. Spatio-temporal variations in the number of phytoplankton species in the Geum river estuary.

였고, 여름은 외해역 정점 G14에서 최솟값  $288.0 \text{ cells mL}^{-1}$ 에서 하구역의 정점 G4에서 최댓값  $2,012.2 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 범위에서  $1,081.9 \pm 574.3 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 변동 폭으로 겨울과 유사한 높은 현존량을 나타내었다. 그리고 가을은 북부해역의 정점 G9에서 최솟값  $10.8 \text{ cells mL}^{-1}$ 에서 외해역 남쪽 정점 G13에서 최댓값  $119.3 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 범위에서  $29.2 \pm 28.6 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 변동 폭으로 겨울이나 여름보다 두 자릿수가 낮은 현존량으로 연중 가장 낮았다(Fig. 4).

현존량의 시·공간 분포는 겨울에 하구역에서  $2,000 \text{ cells mL}^{-1}$  이상으로 높으나, 외해역으로 진행할수록 감소하여 서천군에서 군산 금란도 서단을 연결하는 동쪽해역에서  $1,500 \text{ cells mL}^{-1}$  수준을 나타내었다. 그리고 개야도 주변 해역에서  $1,000 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 감소하였고, 수심 10 m 이상을 보이는 정점 G10에서 G12를 연결하는 해역에서  $300 \text{ cells mL}^{-1}$ , 서쪽 외해역에서  $200 \text{ cells mL}^{-1}$  이하로 급격히 감소하였다(Fig. 5A). 봄은 하구역에서 서천군 연안해역에 걸쳐  $200 \text{ cells mL}^{-1}$  이상의 현존량을 보였고, 군산 연안해역에서  $150 \text{ cells mL}^{-1}$  이하의 낮은 현존량을 보여 겨울과는 다른 경향을 보였다(Fig. 5B). 여름은 개야도를 포함하는 중앙부 북동 및 남서 방향의 대각선 영역의 해역에서  $1,000 \text{ cells mL}^{-1}$  이상(개야도 동남해역은  $2,000 \text{ cells mL}^{-1}$  이상)의 높은 현존량을 보였고, 죽도, 유부도에서 개야도

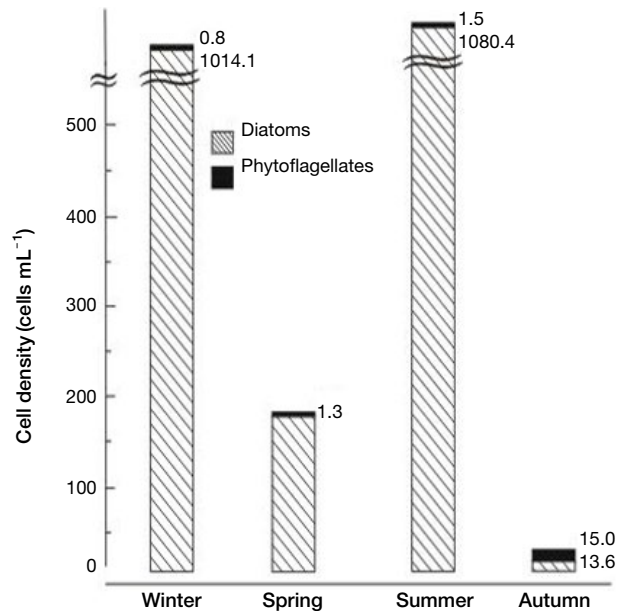


Fig. 4. Seasonal variation in the phytoplankton cell density in the Geum river estuary.

에 거친 하구역 바깥 해역과 외해역에서  $500 \sim 1,000 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 범위를, 그리고 하구역 및 일부 외해역에서  $500 \text{ cells mL}^{-1}$  이하로 낮았다(Fig. 5C). 가을은 전체 해역에서  $20 \text{ cells mL}^{-1}$  전후의 현존량을 보였으나, 담수산 남조, 규



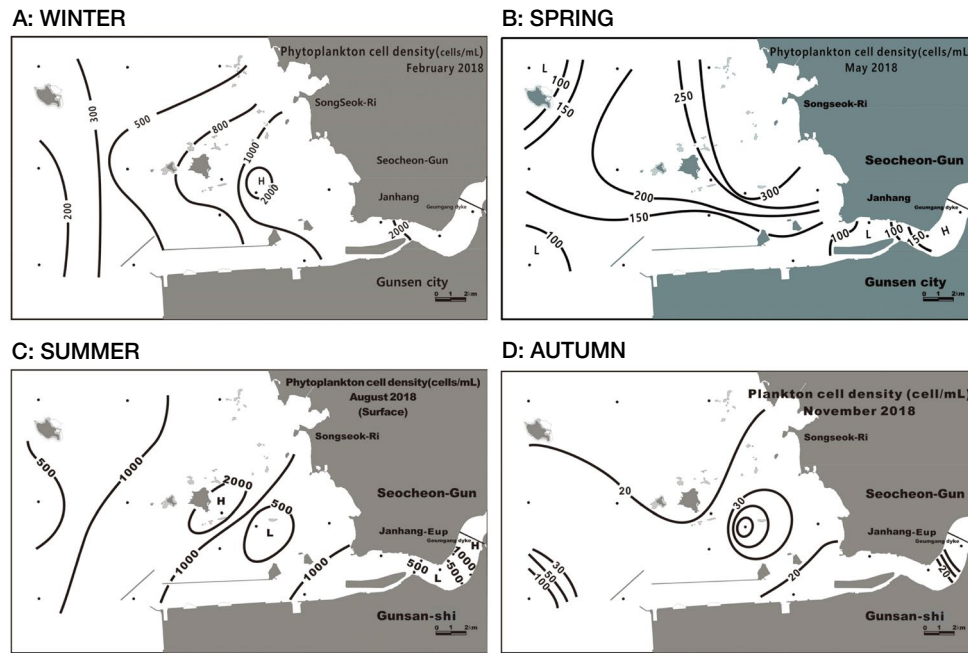


Fig. 5. Spatio-temporal variations in the phytoplankton cell density in the Geum river estuary.

조 및 녹조가 높게 출현하는 하구역에서  $30 \text{ cells mL}^{-1}$  이상의 현존량을 나타내었다. 그러나 개야도 동쪽 정점 G6에서 규조 *Skeletonema costatum*-ls의 우점에 의해  $60 \text{ cells mL}^{-1}$  이상의 현존량을 보였고, 외해역 남쪽에서 외편모조 *Lingulodinium polyedra*의 우점에 의해  $100 \text{ cells mL}^{-1}$  이상의 극단적인 패치 분포가 관찰되었다(Fig. 5D).

### 3) 우점종

식물플랑크톤 군집에서 규조류 점유율은 가을 46.4%를 보이는 것을 제외하면, 겨울 99.1%, 그리고 봄과 여름에 각 99.3% 및 99.9%로 매우 높아, 규조류 점유율이 높았다. 계절별 우점종은 겨울 *Thalassiosira nordenskioldii* 및 *Cerataulina bergonii*가 각 41.0% 및 22.6%의 우점율로 최우점종과 차우점종을 차지하였고, 이외에는 *S. costatum*-ls 및 *Coscinodiscus anguste-lineata*가 각 10.5%와 10.2%의 우점율로 출현하였다. 다만 *Th. nordenskioldii*의 우점율은 하구역에서 51.8%로 높았다(Table 1). 봄은 *S. costatum*-ls이 우점율 64.2%로 극우점하였고, *C. bergonii* 및 *Astellionella glacialis*가 각 13.8%와 4.1%의 우점율을 나타내었다(Table 1). 여름은 *Eucampia zodiacus* 및 *Th. nordenskioldii*가 각 48.8%와 10.9%의 우점율로 최우점 및 차우점하였고, 기타 *Chaetoceros* 속의 *Ch. curvisetus* 및 *Ch. radicans*가 각 7.9%

와 6.80%의 우점율로 출현하였다(Table 1). 최우점종 *E. zodiacus*는 전체 정점에서 높은 우점율을 보였으나, 차우점종인 *Th. nordenskioldii*는 겨울과 같이 하구역에서 극우점하였다(Table 1). 가을은 외편모조류를 주로 하는 식물성 편모조류가 51.5%의 점유율로 규조류보다 높았으나, 다른 계절과는 달리 남조류가 2.1% 점유율을 나타내었다. 우점종은 하구역에서 규조류 *Aulacoseira cf. granulata* 및 남조류 *Arthrospira sp.*, 녹조류 *Closterium cf. pronum*이 우점하였고, 중앙부에서 *S. costatum*-ls이 13.7%로 우점하였으나, 외해역은 외편모조류 *L. polyedra*가 43.5%로 최우점하여(Table 1), 해역에 따른 우점종 차이가 분명하였다.

### 4) 생태지수

생물군집 구조 이해에 필요한 생태지수는 연구자에 따른 종 동정 기준을 달리하고 있기에 단순한 생태지수 비교가 쉽지 않지만, 생물군집 안정성 등을 평가할 때 중요한 지표로 활용된다. 금강 하구해역의 식물플랑크톤 군집의 생태지수에서 다양도 지수와 연동되는 풍부도 지수 및 우점도 지수에 연동되는 균등도 지수를 제외한 계절 변화를 보면, 다양도 지수는 출현 종수 및 현존량이 낮았던 가을에 1.916에서 겨울 3.520의 범위로 평균 2.960을 나타내었고, 우점도 지수도 가을에 0.345에서 0.978의 범위로

**Table 1.** Seasonal variation in dominant species and dominance in the Geum river estuary

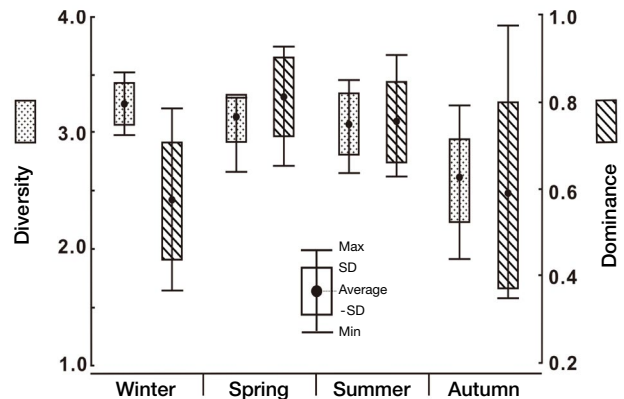
Dominant species	Dominance (%)			
	Winter	Spring	Summer	Autumn
BLUE-GREEN ALGAE	-	-	-	2.1
DIATOMS	99.1	99.3	99.9	46.4
<i>Asterionella glacialis</i>		4.1		
<i>Aulacoseira cf. granulata</i>				5.6
<i>Cerataulina bergonii</i>	22.5	13.8		
<i>Chaetoceros curvisetus</i>			7.9	
<i>Chaetoceros radicans</i>			6.8	
<i>Coscinodiscus cf. anguste-lineata</i>	10.2			
<i>Eucampia zodiacus</i>			48.8	
<i>Skeletonema costatum</i> -ls	10.5	64.2		13.7
<i>Thalassisira nordenskiöldii</i>	41.0	2.7	10.9	
PHYTOFLAGELLATES	0.1	0.7	0.1	51.5
<i>Lingulodinium polyedra</i>				43.5

**Table 2.** Seasonal variation in ecological indices in the Geum river estuary

Seasons		Ecological Indices (EI)	
		Diversity	Dominance
Winter	Minimum	2.969	0.366
	Mean	3.248	0.573
	Maximum	3.520	0.783
	SD	0.171	0.133
Spring	Minimum	2.458	0.654
	Mean	2.922	0.811
	Maximum	3.114	0.930
	SD	0.206	0.089
Summer	Minimum	2.666	0.627
	Mean	3.075	0.754
	Maximum	3.465	0.906
	SD	0.252	0.090
Autumn	Minimum	1.916	0.345
	Mean	2.595	0.588
	Maximum	3.248	0.978
	SD	0.348	0.212

SD: Standard Deviation

평균 0.681를 나타내었다(Table 2, Fig. 6). 겨울 다양도 지수는 2.969 (G14)~3.520 (G6) 범위로 평균  $2.969 \pm 0.171$



**Fig. 6.** Seasonal variation in the diversity and dominance in the phytoplankton community in the Geum river estuary.

의 변동 폭으로 높았고, 우점도 지수는 0.366 (G14)~0.783 (G1) 범위로  $0.573 \pm 0.133$  변동 폭으로 상대적으로 낮은 지수를 나타내었다(Table 2, Fig. 6). 봄의 다양도 지수는 2.458 (G10)~3.114 (G5) 범위로  $2.922 \pm 0.206$ 의 변동 폭을 보였고, 우점도 지수는 0.654 (G4)~0.930 (G9)로  $0.811 \pm 0.089$ 의 변동 폭으로 변화하여, 겨울보다 높았다(Table 2, Fig. 6). 즉 봄의 우점도 지수가 겨울에 비해 높은 것은 전체 해역에서 *S. costatum*-ls가 극우점하기 때문이다. 여름의 다양도 지수는 2.666 (G1)~3.456 (G12)의 범위로  $3.075 \pm 0.252$ 의 변동 폭으로 겨울이나 봄보다 다소 높았고, 우점

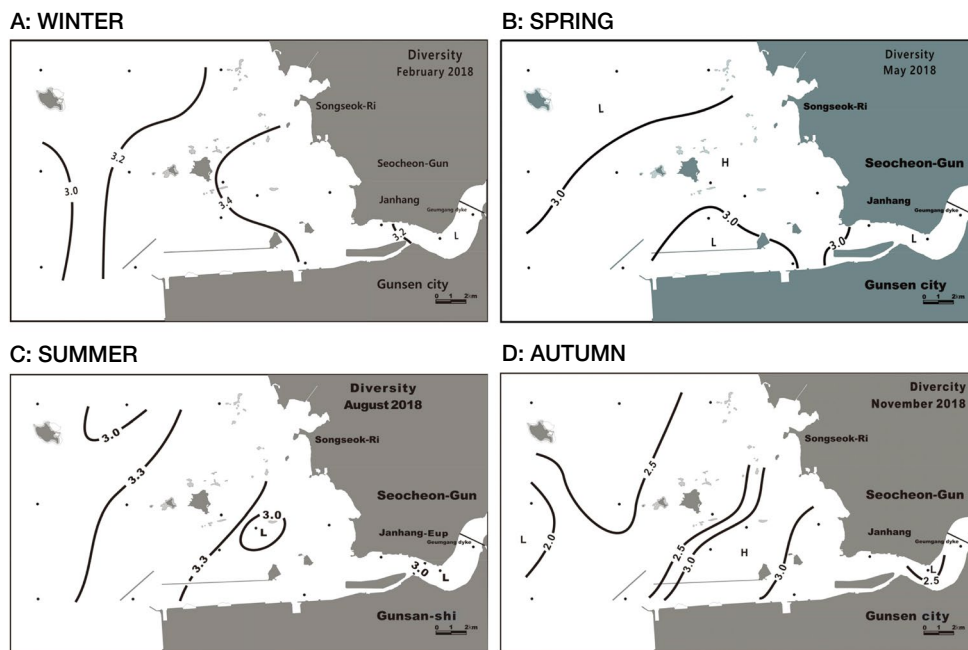
도 지수는 0.627 (G9)~0.906 (G10) 범위로  $0.754 \pm 0.090$ 의 변동 폭으로 겨울보다 높고 봄보다 다소 낮았다(Table 2, Fig. 6). 이처럼 여름이 겨울과 유사한 현존량을 보이지만 생태지수에서 차이를 보이는 것은 *E. zodiacus*가 전체 해역에서 높은 우점율을 나타내기 때문이다. 가을의 다양성 지수는 1.961 (G14)~3.248 (G7) 범위로  $2.595 \pm 0.348$ 의 변동 폭으로 가장 낮은 값을 보였고, 우점도 지수는 0.345 (G10)~0.930 (G13)로  $0.588 \pm 0.213$ 의 변동 폭으로 해역에 따른 차이가 큰 특징을 보였다(Table 3, Fig. 6). 가을에 우점도 지수가 최저값, 최댓값을 보이는 것은 현존량은 낮지만, 외해역에서 *L. polyedra* 및 중앙부 해역에서 *S. costatum*-ls에 의한 극단적 패치 분포를 나타내기 때문이다. 다양도 지수의 시·공간적 분포는 겨울 식물플랑크톤 현존량이 가장 낮았던 외해역 및 하구역에서 3.2 이하로 낮

았고, 개야도를 중심으로 중앙부에서 3.4 이하를, 그리고 하구역에 인접하는 중앙부에서 3.4 이상으로 높았다(Fig. 7A). 봄은 식물플랑크톤 현존량이 높았던 하구역 및 중앙부에서 각 3.0 및 4.0 이상으로 높았고, 하구역과 북부해역에서 상대적으로 낮았다(Fig. 7B). 여름은 개야도를 포함하여 서천군 연안에서 군산 산업단지 서단을 연결하는 대각선 띠 모양의 해역, 즉 높은 출현 종수와 현존량을 보였던 해역에서 3.3 이상으로 높았고, 외해역인 북서 및 하구역의 남동해역에서 3.3 이하로 낮았다(Fig. 7C). 가을은 중앙부 해역에서 3.0 이상으로 높았지만, 하구역 및 외해역의 남부에서 2.5 이하로 낮았고, 외해역 북서쪽에서 2.5 이상으로 높았다(Fig. 7D).

우점도 지수는 겨울 하구역에서 0.7 이상으로 높았고, 개야도 북서해역인 외해역에서 0.5 이하로 낮아 하구역에

**Table 3.** The results of principal component analysis (PCA) of phytoplankton cell density, dominant species, and marine environmental factors in the Geum river estuary

Principal component	Winter		Spring		Summer		Autumn	
	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>
Eigenvalue	10.10	2.739	9.660	2.657	8.594	2.960	8.817	3.171
Proportion (%)	63.1	17.1	60.4	16.6	53.7	18.5	51.9	18.7
Accumulative proportion (%)	63.1	80.2	60.4	77.0	53.7	72.2	51.9	70.6



**Fig. 7.** Spatio-temporal variations in the diversity in the Geum river estuary.



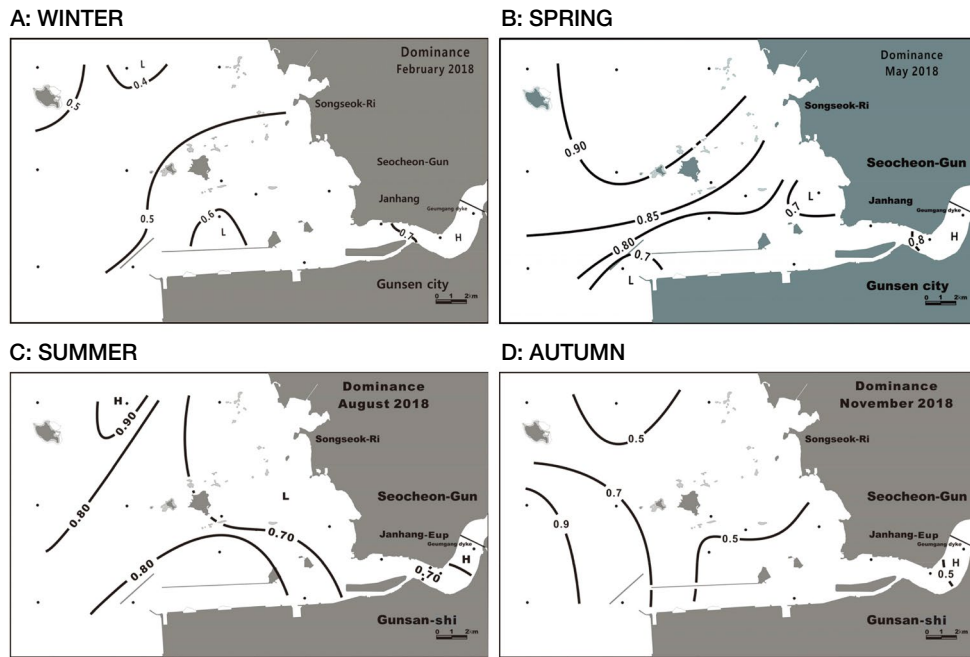


Fig. 8. Spatio-temporal variations in the dominance in the Geum river estuary.

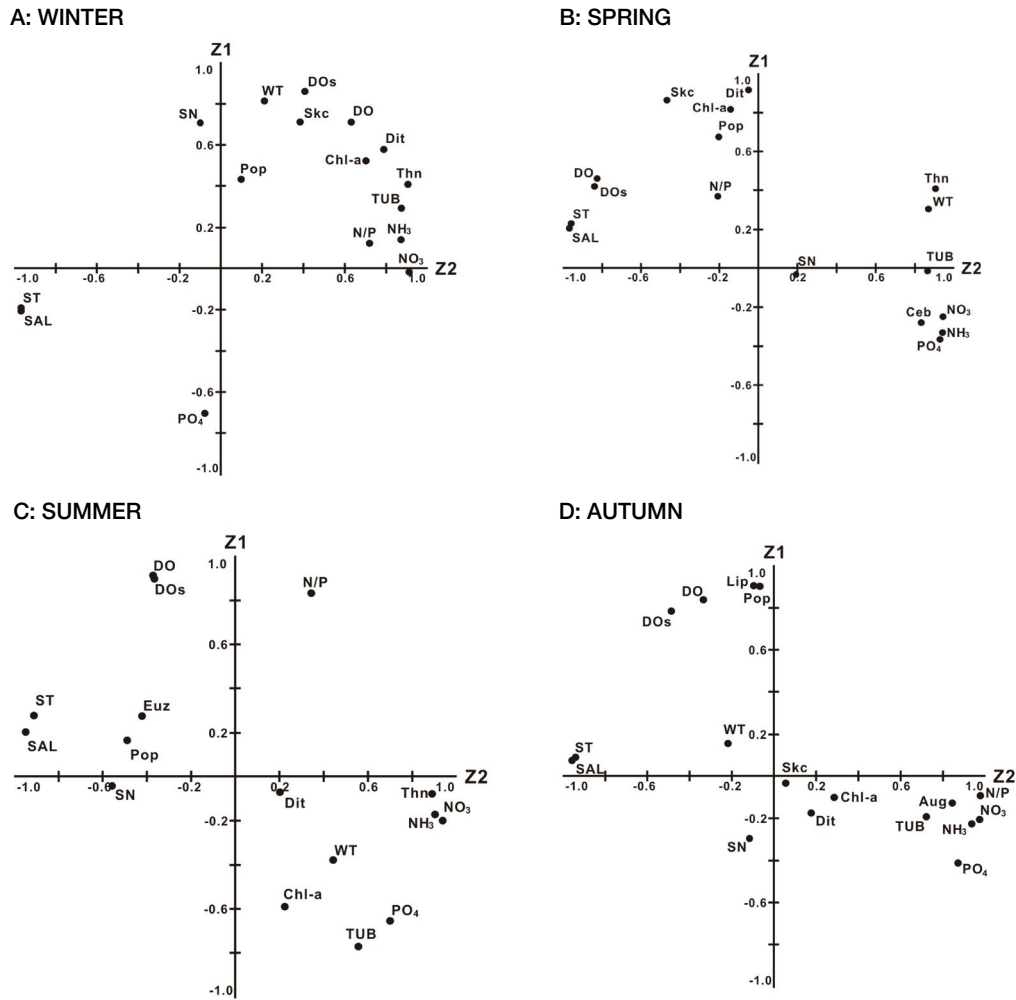
서 특정 종에 의한 지배가 높은 특징을 보였다(Fig. 8A). 봄은 겨울 분포와 반대로 출현 종수와 현존량이 낮은 북부해역에서 0.90 이상으로 높았고, 출현 종수가 상대적으로 다양했던 군산 연안해역에서 0.70 이하로 상대적으로 지수가 낮았지만, 전체적으로는 높은 우점도 지수를 나타내었다(Fig. 8B). 여름은 군산 산업단지 서부해역 및 외해역의 북서부, 그리고 하구역에서 0.80 이상으로 높았고, 개야도 동부의 서천군 연안해역에서 0.70 이하로 상대적으로 낮았으며, 개야도 서남부해역에서 0.70~0.80 범위의 지수를 보였다(Fig. 8C). 가을은 하구역에서 0.5 이하로 낮았고, *L. polyedra*가 우점한 외해역에서 0.8 이상의 지수를, 그리고 *S. costatum*-ls가 우점한 중앙부 해역에서 0.6 이상을 나타내었다(Fig. 8D).

## 2. 식물플랑크톤 출현 특성

계절별 식물플랑크톤 군집 및 환경 인자를 이용하여 주성분 분석을 한 결과는 Table 3에 나타내었다. 해석에는 모든 계절 제1 및 제2 주성분까지 누적 기여율이 70% 이상이 도출되고 있어(Yoon 1989; 2006; 2019), 제1 및 제2 주성분만을 대상으로 의미 부여를 하였다.

겨울 인자 부하량 분포에서 제1 주성분에 탁도, 영양염

인 암모니아염, 질산염, N/P ratio 및 용존산소 등 환경인자와 최우점종 *Th. nordenskioldii* 및 Chl-a 농도 등 생물인자에 강한 양의 관계를 보이지만, 염분 및  $\sigma_t(\delta_t)$ 에 강한 음의 관계를 보이는 것으로부터, 금강 하굿둑을 통한 담수 유입 및 혼합 정도를 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 수온, 용존산소, 출현 종수 및 우점종 *S. costatum*-ls 등에 강한 양의 관계를 보이나, 인산염에 강한 음의 관계를, 그리고 약하지만 염분과  $\delta_t$  등과도 음의 관계를 나타내고 있어, 인산염 흡수를 통한 식물플랑크톤 성장을 나타내는 지표로 해석되었다. 그리고 인자의 분포에서 식물플랑크톤 및 Chl-a 농도, 탁도 등은 담수 유입에 영향을 받으며(Parsons et al. 1984; Jeong et al. 2005), 식물플랑크톤 성장은 수온과 인산염에 크게 영향을 받는 것으로 해석되었다(Jeong et al. 2005). 또 최우점종 *Th. nordenskioldii*는 하구역을 주 서식지로 하고 있지만, 대표적 부영양 지표종(Iizuka 1985)인 *S. costatum*-ls는 해수의 혼합 정도가 강한 해역을 주 서식지로 하고 있으며(Cupp 1943), 출현 종수 역시 해수 혼합 정도가 강한 해역에 다양하게 출현하는 것으로 해석되었다(Fig. 9A). 봄은 제1 주성분에 수온, 탁도, 암모니아염, 질산염, 인산염 등의 환경인자 및 우점종 *C. bergonii*와 *Th. nordenskioldii*에 강한 양의 관계를, 염분과  $\delta_t$ , 용존산소 등의 환경인자에 강한 음의 관계를 보이는 것에서,



**Fig. 9.** Seasonal variations in loading factors on 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> principal components by principal component analysis (PCA). WT: water temperature, SAL: salinity, ST: sigma  $t$  ( $\delta$ ), DO: dissolved oxygen, DOs: DO saturation, TUB: turbidity, NH<sub>3</sub>: ammonia, NO<sub>3</sub>: nitrate, PO<sub>4</sub>: phosphate, N/P: N/P ratio, Chl-a: chlorophyll *a*, SN: species number, Dit: diatoms cell density, Pop: phytoplankton cell density, Skc: *Skeltonema costatum*-ls, Thn: *Thalassiosira nordenskiöldii*, Ceb: *Carataulina bergonii*, Euz: *Eucampia zodiacus*, Aug: *Aulacoseira granulata*, Lip: *Lingulodinium polyedra*.

겨울과 같이 하굿둑을 통한 담수 유입 및 혼합 정도를 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 규조류, 최우점종 *S. costatum*-ls, Chl-*a* 농도, 식물성 편모조류 등의 생물 인자에 강한 양의 관계를, 인산염, 암모니아염 등의 영양염류에 약한 음의 관계를 보이고 있어, 무기 영양염 공급에 따른 식물플랑크톤의 생산활동을 나타내는 지표로 해석되었다. 그리고 인자의 분포패턴에서 *C. bergonii*와 *Th. nordenskiöldii*는 하구역을 선호하지만, *S. costatum*-ls는 해수의 혼합이 강한 해역을 선호하며, Chl-*a* 농도 역시 해수 혼합역에서 높았다(Fig. 9B). 여름은 제1 주성분에 암모니아염, 질산염 등의 영양염과 최우점종 *Th. nordenskiöldii*

에 강한 양의 관계를 보이나, 염분과  $\delta_t$  등에 강한 음의 관계를 보여, 겨울이나 봄과 같이 하굿둑을 통한 담수 유입 및 혼합 정도를 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 용존산소, N/P ratio에 강한 양의 관계를, 그리고 최우점종 *Eucampia zodiacus*에 약한 양의 관계를 보이지만, 탁도, 인산염, Chl-*a* 농도 등에 강한 음의 관계를 보이는 것에서 규조류의 성장을 나타내는 지표로 해석되었다. 그리고 인자의 분포패턴에서 *Th. nordenskiöldii*는 하구역을 선호하지만, *E. zodiacus*는 상대적으로 높은 염분에 낮은 수온의 외해역을 선호하는 것으로 해석되며, 규조류의 성장에 인산염이 제한되는 것(Jeong *et al.* 2005)으로 나타났다(Fig.

9C). 가을은 제1 주성분에 암모니아염, 질산염, 인산염, N/P ratio, 탁도 등의 환경인자와 기수성 *A. granulata*에 강한 양의 관계를, 염분과  $\delta_t$ 에 강한 음의 관계를, 그리고 용존 산소에 약한 음의 관계를 보여, 다른 계절과 같이 하굿둑을 통한 담수 유입 및 혼합 정도를 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 용존산소, 식물성 편모조류 및 최우점종 *L. polyedra*에 강한 양의 관계를, 약하지만 인산염, 출현 종수 등에 음의 관계를 보여, 외해역 우점종 *L. polyedra*의 광합성 활성을 나타내는 지표로 해석되었다. 그리고 인자의 분포패턴에서 *A. granulata*는 하구역을 선호하지만, *L. polyedra* 및 식물성 편모조류는 하구역보다 상대적 높은 염분의 외해역 선호하는 것으로 나타났다(Fig. 9D).

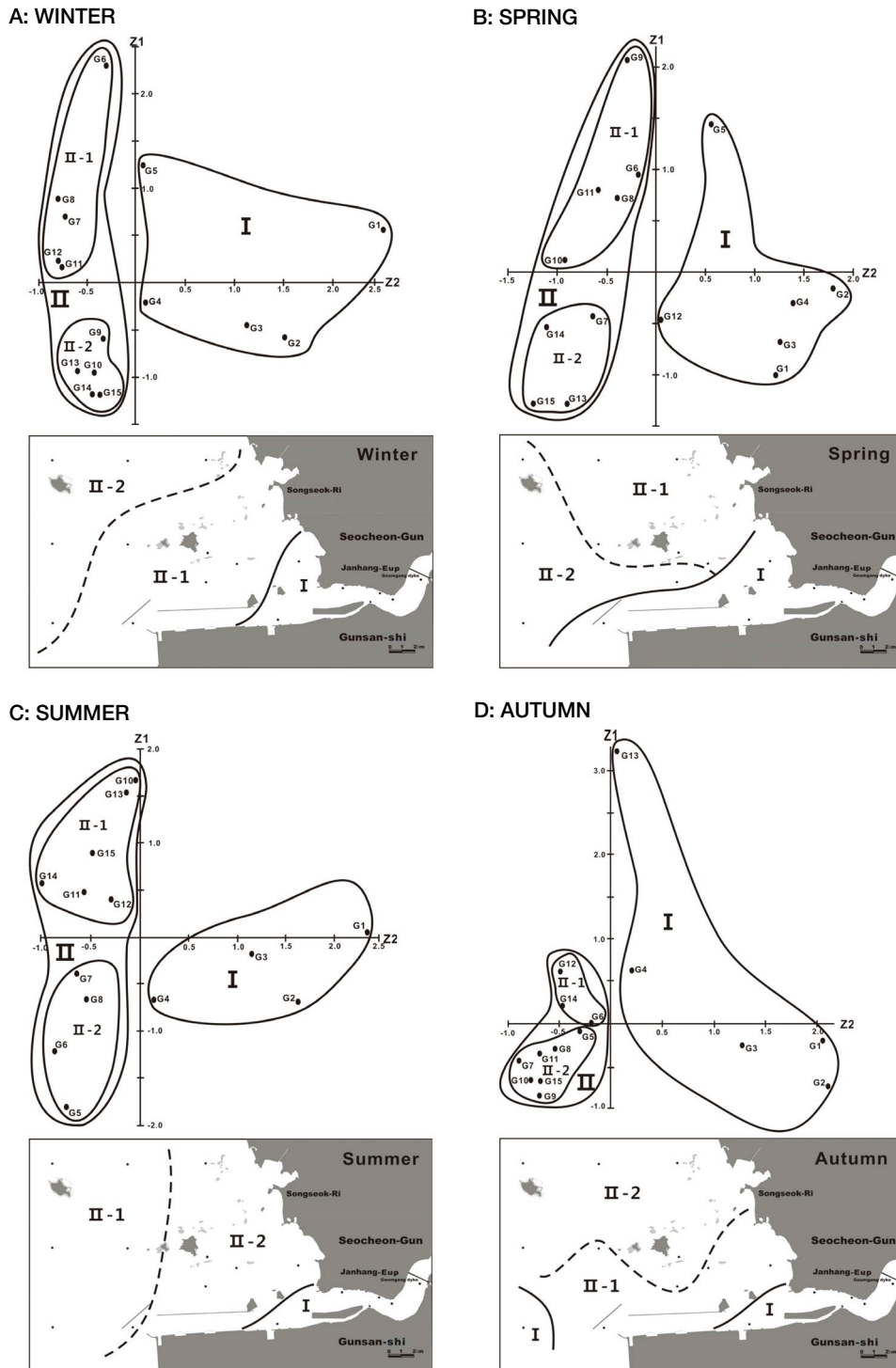
주성분 분석의 득점분포에 따라 계절별 해역을 구분하고 각 해역 특성을 해석하면, 겨울은 기여율 63.1%인 제1 주성분을 기준으로 담수 유입 및 혼합 정도가 강한 그룹 I과 상대적으로 해수 혼합 정도가 강한 그룹 II로 구분되며, 그룹 II는 재차 기여율 17.1%인 제2 주성분을 기준으로 활발하게 식물플랑크톤 성장하는 그룹 II-1 및 성장이 상대적으로 낮은 그룹 II-2로 구분되었다. 이러한 결과를 해역에 대입하면, 그룹 I은 정점 G1에서 정점 G5가 포함되는 하구역에 해당하며, 그룹 II-2는 북서의 외해역, 그리고 그룹 II-1은 군산 산업단지 서쪽 해역을 포함하는 외해역에 해당한다(Fig. 10A). 봄은 기여율 60.4%인 제1 주성분을 기준으로 담수 유입 및 혼합 정도가 강한 그룹 I과 상대적으로 해수 혼합이 높은 그룹 II로 구분되며, 그룹 II는 재차 기여율 16.6%인 제2 주성분을 기준으로 식물플랑크톤 생산이 높은 그룹 II-1 및 생산이 상대적으로 낮은 그룹 II-2로 구분되었다. 이러한 결과를 해역에 대입하면, 그룹 I은 G1에서 정점 G5, 그리고 정점 G12를 포함하는 하구역과 군산 산업단지에 인접하는 수로부 해역이 해당하였고, 그룹 II-1은 북부 동쪽의 서천군 연안해역, 그리고 그룹 II-2는 외해역에 해당한다(Fig. 10B). 여름은 기여율 53.7%인 제1 주성분을 기준으로 담수 유입 및 혼합 정도가 강한 그룹 I과 상대적 해수 혼합이 높은 그룹 II로 구분되며, 그룹 II는 재차 기여율 18.5%인 제2 주성분을 기준으로 규조류 성장이 활발한 그룹 II-1 및 성장이 상대적으로 낮은 그룹 II-2로 구분되었다. 이러한 결과를 해역에 대입하면, 그룹 I은 정점 G1에서 정점 G3 및 정점 G5의 하구역에 해당하며, 그룹 II-1은 중앙부에서 북동의 서천군 연안, 그리고 그룹 II-2는 넓은 외해역에 해당한다(Fig. 10C). 가을은 기여율 51.9%인 제1 주성분을 기준으로 담수 유입 및 혼합 정

도가 강한 그룹 I과 상대적 해수 혼합이 강한 그룹 II로 구분되며, 그룹 II는 재차 기여율 18.7%인 제2 주성분을 기준으로 *L. polyedra*의 광합성 활성이 높은 그룹 II-1 및 낮지만 *S. costatum*-Is에 지배되는 그룹 II-2로 구분되었다. 이러한 결과를 해역에 대입하면, 그룹 I은 정점 G1에서 정점 G4의 하구역과 군산 산업단지 서쪽의 정점 G13이 해당하며, 그룹 II-1은 서천군에서 군산 산업단지 서쪽을 연결하는 중앙부 및 남쪽해역, 그리고 그룹 II-2는 북서쪽 외해역에 해당한다(Fig. 10D).

주성분 분석의 득점으로 구분된 금강 하구역의 결과를 수괴 분석의 전통적 방법인 수온과 염분을 이용한 T-S diagram에 의한 결과와 비교하였다(Fig. 11). 두 방법의 결과 모두 유사한 구획선을 나타내지만, 득점에 의한 결과가 T-S diagram에 의한 결과보다 다소 하굿둑에 가까운 결과를 나타내었다. 즉 득점에 의한 결과가 단순한 T-S diagram 분석보다 구체적인 해역 구분을 나타내었다. 즉 금강 하구역은 홍수 등 하굿둑을 통한 이상적 담수 유출이 없을 때, 담수 혼합이 상대적으로 강한 금관도를 포함하는 하굿둑 인근의 하구역, 상대적으로 해수 혼합 정도가 강한 해역으로 구분되며, 해수 혼합이 강한 해역은 하구역과 외해역의 혼합된 성격을 보이는 혼합해역 및 기타 해안선에서 다소 이격된 서쪽의 외해역으로 구분되어, 해양환경은 물론 생물해양학적 특성도 다르게 나타났다.

## 고 찰

서해의 하구역은 대부분 하굿둑이 건설되어, 해역으로 담수 유입이 차단되어, 하구둑을 통해 간헐적으로 담수가 유출되고 있어 해양생물의 생산에 매우 불리한 환경특성을 나타낸다. 이에 따라 식물플랑크톤 군집도 담수의 유입과 혼합 정도에 의해 크게 영향을 받게 된다(Cloern et al. 2014), 금강 하구 및 하구역에서 식물플랑크톤 군집 관련 기존 연구결과를 정리하여 Table 4에 나타내었다. 식물플랑크톤의 종조성은 동일 해역일지라도 연구자의 전문성 및 숙련 정도, 조사방법, 조사 시점, 정점 수, 그리고 검정 기준에 따라 크게 다르게 되기에 단순 비교는 어렵다. 금강 하구역에서도 이 연구에 비해 기존 연구는 매우 한정된 해역 등 해역, 조사 시점 및 정점 수 등에서 차이가 있어 객관적 비교는 쉽지 않다. 그러나 이러한 차이를 고려하여 식물플랑크톤 출현 종수를 비교하면 하굿둑



**Fig. 10.** Seasonal distributions of 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> principal component scores by principal component analysis (PCA).

건설 이전인 1990년 이전에는 99~131종으로 상대적 단순한 종조성을 보이거나(Shim and Yang 1982; Shim and Yoo 1985), 하굿둑이 운영되어 10여 년이 지난 2000년 이후에

는 171~233종으로 (Yih *et al.* 2005; Shin 2013), 이 연구의 116종보다 매우 다양하였다(Table 4). 그러나 2011년 고군산군도 해역의 31개 정점을 대상으로 한 연구에서는 104



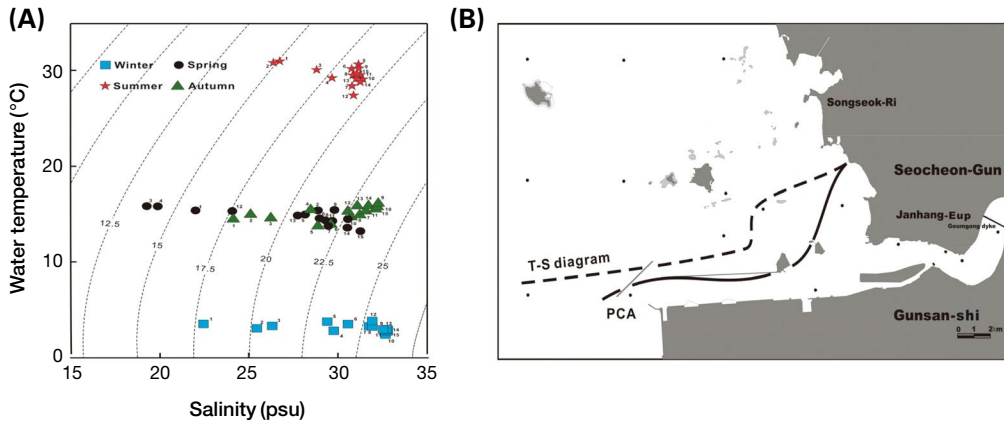


Fig. 11. Seasonal changes in T-S diagrams on the surface (A) and the separation of principal component analysis (PCA) score plots and T-S diagrams (B) in the Geum river estuary.

종이 출현하여 본 연구와 유사하였지만 (Yoon 2015), 종 조성은 달랐다. 하굿둑 건설 이전은 현재 하굿둑보다 상류까지 정점을 설정되었고, 하천수가 해역으로 직접 유출되기에, 담수산 남조, 녹조 등이 다양하게 출현하였다 (Shim and Yang 1982; Jeong et al. 1985). 하굿둑 준공 이후 계절에 따라 다르나, 하굿둑 인근인 하구역에는 다양한 담수산 남조류, 녹조류 및 구조류가 출현하였다 (Yih et al. 2005; Shin 2013; Kim et al. 2018). 특히 군산 하구역은 외해역에서 유입되는 해수와 불규칙하게 방류되는 담수의 영향으로 표층은 해양종, 기수종 및 담수종이 혼합 출현하였으나, 저층은 외부에서 해수가 유입되기에 해양종이 주로 출현하게 되어, 표층보다 종수가 낮은 것으로 보고하였다 (Jeong et al. 1985; Shin 2013). 또 연안 및 내만해역에서 고수온기에는 상대적으로 외편모조류를 포함한 식물성 편모조류 점유율이 높지만 (Yoon et al. 1992; Yoon 2011, 2015; Shin 2013), 이 연구에서는 이런 현상이 관찰되지 않았다.

이 연구의 출현 종수가 하굿둑 조성 이후의 다른 연구보다 낮은 것은 연구 방법 및 종 동정 기준의 차이에서 오는 차이가 크다고 할 수 있다. 즉 기존 연구에서는 네트채집으로 별도의 정성분석을 하고 있으나, 이 연구는 채수법에 의한 표본으로 정성 및 정량분석을 동시에 하고 있었으며, 구조류에 많은 종을 포함하는 *Chaetoceros* 속에 대해 주요종만 동정했던 것이 결과에 영향을 미치고 있는 것으로 판단되었다. 그러나 연중 출현 종 대부분이 구조류의 점유율에 지배되는 것은 국내 다른 해역과 유사하였다 (Yoon 2011, 2016; Shin 2013).

현존량은 하구역에 한정된 해역에 대한 계절 변화 (Shin 2013) 및 한 정점을 대상으로 연간 조사한 결과 (Kim et al. 2018)보다는 최댓값, 평균에서 자릿수가 다른 낮은 현존량을 보였지만, 서해 중부의 광역해역을 대상으로 하였던 결과 (Shim and Yoo 1985)보다는 한 자릿수 높은 값을 보였다. 그리고 보다 넓은 범위를 대상으로 한 하구역 (Jeong et al. 2005) 및 고군산군도 (Yoon 2015)의 계절 변화의 결과와는 유사하였다 (Table 4). 이러한 결과는 하구역에 한정된 연구결과는 군체를 형성하는 소형 담수산 남조류를 포함하는 특정 종이 계절에 따라 대발생을 보일 정도로 출현하고 있기 때문이다. 그러나 현존량의 계절 변화에서 봄과 가을에 발생하는 식물플랑크톤 대발생 (Parsons et al. 1984; Muñiz et al. 2018)은 관찰되지 않았다. 이는 중위도 외해역과 하구역은 영양염 공급원이 다르기 때문으로, 부영양화 해역 및 내만해역에서는 어렵지 않게 관찰된다 (Yoon 1989, 2011). 실제 금강 하구역은 4계절 모든 정점 평균으로 질산염은  $8.40 \mu\text{M L}^{-1}$ , 인산염은  $0.45 \mu\text{M L}^{-1}$ 로 인산염에 비해 질소원이 매우 높은 농도를 보였다. 그리고 겨울에 높은 현존량은 얇은 수심으로 충분한 광량 및 영양염이 풍부한 국내외 내만해역에서 종종 않게 관찰된다 (Wafer et al. 1983; Yoon 1999, Tiselius et al. 2016). 또한 국내 연안 및 내만해역에서 고수온기에 미약하지만 편모운동을 하는 외편모조류의 일주연직이동 (Kamykowski and Zentara 1977; Gerbersdorf and Schubert 2011)에 의해, 주간 표층과 저층에서 현존량 차이가 많이 되지만, 군산 하구역에서는 관찰되지 않았다 (Yoon et al. 2019).

일반적으로 하구역이나 내만해역은 육상에서 공급되는



**Table 4.** Temporal variations in the parameters of the phytoplankton communities studied in the Geum river estuary

Survey time	No. of stations	Species no.	Cell density (cells mL <sup>-1</sup> )	Dominant species	References
Nov.-Dec. 1980 & April 1981 (2 times)	10 (estuarine)	99	115 (Winter mean) 1,320 (Spring mean)	<i>Skeletonema costatum</i> <i>Paralia sulcata</i> <i>Asterionella kariana</i>	Shim and Yang 1982
Oct. 1980 & March 1981 (2 times)	24 (coasts)	131	16.5–294.8 (Oct.) 48.4–197.8 (Mar.)	<i>Chroomonas amphioxeia</i> (O) <i>Paralia sulcata</i> (M) <i>Campylosira cymbelliformis</i> (M)	Shim and Yoo 1985
Aug., Nov. 1984 & May 1985 (3 times)	5 (estuarine)	96	60.0–1,574.0 (583.9)	<i>Asterionella formosa</i> <i>Coscinodiscus excentricus</i> <i>Thalassionema frauenfeldii</i>	Jeong <i>et al.</i> 1985
Feb.–June 2004 (semiweekly) (15 times)	2 (estuarine)	131–184	(9,484)	<i>Cyclotella meneghiniana</i> <i>Skeletonema costatum</i> <i>Thalassiosira nordenskiöldii</i> <i>Aulacoseira granulata</i> <i>Guinardia delicatula</i>	Yih <i>et al.</i> 2005
Apr.–Dec. 2010 (seasonal) (4 times)	9 (estuarine)	233	143.0–12,016.0 (2,010.0)	<i>Skeletonema costatum</i> <i>Phormidium</i> sp. <i>Plagioselmis</i> sp. <i>Fragilaria crotonensis</i> <i>Cyclotella</i> sp.	Shin 2013
Dec. 2014–Oct. 2015 (weekly)	1 (estuarine)	171	27–225,723 (7,545)	–	Kim <i>et al.</i> 2018
Feb.–Nov. 2018 (seasonal) (4 times)	15 (estuarine + coasts)	116	10.0–2,904.0 (577.2)	<i>Cerataulina bergonii</i> <i>Eucampia zodiacus</i> <i>Lingulodinium polyedra</i> <i>Skeletonema costatum</i> -ls <i>Thalassiosira nordenskiöldii</i>	this study
			( ): mean	(O): October, (M): March	

풍부한 영양조건에 의해 식물플랑크톤 군집의 우점종은 *Dictylum*, *Rhizosolenia*, *Thalassiosira* 등과 같은 대형 종에 의해 구성 (Cloern 2018) 될 뿐만 아니라, 무생물적 환경의 급격한 변화로 (Bazin *et al.* 2014), 종 천이가 빠르게 진행되는 것으로 알려진다 (Vigil *et al.* 2009). 그러나 금강 하구해역의 우점종 변화를 객관적으로 비교할 자료는 많지 않다. 대부분 기존 연구에서 우점종은 규조류에 의해 점유되고 있지만, 일부 가을에 은편모조류 *Chroomonas amphioxeia* (현재 명, *Teleaulax amphioxeia*) 나 (Shim and Yoo 1985), 담수 남조류 *Phormidium* sp., 은편모조류 *Plagioselmis* sp. (Shin 2013) 에 의한 우점이 보고되기도 하며, 이 연구에서는 와편모조류 *Lingulodinium polyedra* 가 우점 출현하는 특성을 보였다 (Table 4). 계절별 조사시점이 차이는 있지만, 하구역의 겨울 (2010. 12) 에 우점종으로 출현한 종은 모두 중심규조로

*Stephanodiscus hantzschii* 와 *Skeletonema costatum* 이 57.9% 및 29.7% 우점율을 보였고, 기타 *Chaetoceros debilis*, *C. socialis*, *Rhizosolenia delicatula* 가 우점하였다 (Shin 2013). 고군산군도 해역의 겨울 (2011. 01) 역시 모두 중심규조 *Skeletonema costatum*-ls 가 31.4%의 우점율을, 그리고 *Thalassiosira nordenskiöldii*, *Rhizosolenia fragillissimus*, *Ch. debilis* 가 10%의 우점율을 나타내었다 (Yoon 2015). 봄은 하구역 (2010. 04) 에서 중심규조 *Cyclotella* sp. 및 *S. costatum* 이 각 19.0%와 10.1%의 우점율을 보였고, 기타 남조류 *Phormidium* sp., 규조류 *Aulacoseira ambigua* 및 우상규조 *Nitzschia longissima* 가 정점별로 우점하였다 (Shin 2013). 고군산군도 해역 (2011.04) 은 중심규조 *Guinardia delicatula* (= *Rhizosolenia delicatula*) 가 89.4%로 극우점하여 (Yoon 2015), 이 연구와 많은 차이를 나타내었다. 여름 하구역 (2010. 07) 은

은편모조류 *Plagiosemis* sp.가 최우점, 그리고 담수 유독플랑크톤인 남조 *Microcystis* sp.가 차우점하여, 금강하구연에서 녹조 상태의 담수가 유입된 양상을 보였다(Shin 2013). 고군산군도 해역(2011. 07)은 *Eucampia zodiacus* 및 우상규조 *Cylindrotheca closterium*가 각 43.1%와 24.9%의 우점율을 보였고, 기타 중심규조 *Ch. debilis*, *Ch. curvisetus*가 10% 전후의 우점율을 나타내어(Yoon 2015), 하구역은 이 연구의 여름 우점종과 차이가 크지만, 고군산군도 해역과 유사한 결과를 보였다. 가을 하구역(2010. 10)은 여름과 같이 은편모조류 *Plagiosemis* sp.가 최우점하였고, 기타 *Cyclotella* sp. 및 *S. costatum*이 우점하였다(Shin 2013). 고군산군도 해역(2011. 10)은 *S. costatum*-Is가 39.1%의 우점율을, *Ch. curvisetus*와 *Ch. debilis*가 15% 전후의 우점율을 보여(Yoon 2015), 이 연구와 차이가 있었다.

즉 겨울은 이 연구와 기존 연구 사이에 명확한 우점종 천이는 관찰되지 않았으나, 금강 하구해역의 식물플랑크톤 군집은 하구역, 외해역 및 이 두 해역의 혼합 해역에 따라 우점종은 확실하게 다르게 출현하였다. 다만 겨울 중심규조에 의한 우점 현상 및 특정 종에 의해 극우점 되는 공통점을 보였으며, 봄에 우점한 *S. costatum*-Is 및 *A. glalis*는 영양조건 등 성장 환경이 좋으면, 체인을 길게 연결하는 종이지만, 관찰되는 대부분 종이 세포 크기가 작고, 군체가 분리된 모습으로 관찰되었다. 특히 여름 최우점하는 *Eucampia zodiacus*는 한국 남서해역에서 저수온기에 주로 우점 출현하는 종으로(Yoon et al. 2019), 일본 내만 및 연안해역에서는 김 성장이 활발한 겨울 적조를 발생시켜 영양 경쟁에 의해 양식장 김의 성장을 저해시키는 원인종(Nishikawa et al. 2007)으로 알려져, 여름 우점하는 것은 매우 이례적이다. 이렇게 인접하는 해역에서도 동일 계절에 우점하는 식물플랑크톤 종에 많은 차이는 환경변화에 따른 종 천이라고 할 수도 있지만(Vigil et al. 2009; Cloern 2018), 영양염류 농도의 차이에서 발생하는 부분이 크다고 할 수 있다. 즉 군산 하구해역은 하굿둑에 인접하는 하구역에서 4계절 평균 질산염이  $20.53 \mu\text{M L}^{-1}$ , 인산염이  $0.82 \mu\text{M L}^{-1}$ 로 매우 높은 농도를 보이지만, 외해역의 평균 질산염과 인산염은 각  $1.77 \mu\text{M L}^{-1}$  및  $0.22 \mu\text{M L}^{-1}$ 를 나타내어, 두 수괴에서 영양염류 농도는 큰 차이를 보였다. 때문에, 이 두 수괴 사이에는 영양염류 기준으로 혼합되는 해역을 형성하게 되었고, 이러한 무생물학적 환경인자의 일시적 변화가 식물플랑크톤 군집에 매우 민감하게 반응하고 있었다(Bazin et al. 2014; Lim and Baek 2017).

금강 하구해역의 생태지수 변화를 비교, 검토할 자료는 2010년 하구역을 중심으로 실시하였던 결과(Shin 2013) 뿐이기에, 2010년과 2018년 계절 평균으로 검토하였다. 2010년은 다양도 지수가 1.04(겨울)~2.49(봄)에서 평균 1.722, 그리고 우점도 지수는 0.42(봄)~0.85(겨울)에서 평균 0.668을 나타내어, 2010년 매우 다양한 종이 높은 현존량을 나타내고 있었지만, 다양도 지수에서는 2018년보다 낮았다. 그러나 우점도 지수는 유사하였지만, 2018년이 2010년에 비해 다소 낮았다. 이러한 결과를 단순한 숫자로만 평가하면, 2010년에 비해 2018년 식물플랑크톤 군집이 안정화되고 있다고 할 수도 있지만, 2010년은 종조성을 네트 표본으로 정량분석은 채수표본으로 구분되어 실시되어, 정량분석과 정성분석의 결과가 일치하지 않기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다.

통계분석에서 금강 하구해역의 식물플랑크톤 군집은 연간 금강 하굿둑을 통한 담수 유입 및 해수의 혼합 정도에 의해, 담수 영향이 강한 하구역은 하굿둑 인근 및 얕은 수심을 나타내는 금란도 주변 해역에 한정되어 외부 해역과 격리된 환경특성을 나타내었다. 그리고 해수 영향이 강한 해역도 하구역과 인접하는 혼합해역과 외해역으로 구분되어, 계절 및 담수 유입량에 따라 영역 범위를 달리하고 있어, 이들 해역의 확장 정도에 의해 금강 하구해역의 생물해양학적 특성을 결정하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 하구해역의 식물플랑크톤 군집은 하굿둑을 통해 공급되는 영양염 농도에 크게 영향을 받지만, 특히 인 농도가 성장을 지배하였으며, 이러한 결과는 기존의 연구결과와도 유사하였다(Jeong et al. 2005; Yih et al. 2005).

## 적 요

금강 하구해역 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 변동 및 생물해양학적 환경특성을 파악하기 위해 2018년 2월, 5월, 8월 및 11월, 4계절에 걸쳐 15개 정점을 대상으로 현장조사를 실시하였다. 조사기간 동안 출현한 식물플랑크톤 종은 58속 116종으로 겨울과 봄에 단순하였고, 여름과 가을에 상대적으로 다양하게 출현하였다. 현존량은 가을에  $10 \text{ cells mL}^{-1}$ 에서 겨울에  $2,904.0 \text{ cells mL}^{-1}$ 까지 큰 변동 폭으로 평균  $577.2 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 높은 현존량을 보였으며, 출현 종과는 달리 봄과 가을에 낮고, 여름과 겨울에 높은 현존량을 나타내었다. 우점종은 연중 규조류 점유율

이 높았으며, 겨울은 *Thalassiosira nordenskiöldii*, *Cerataulina bergonii*, *Skeletonema costatum*-Is 및 *Coscinodiscus angustelineata*, 봄은 *S. costatum*-Is 및 *C. bergonii*, 여름은 *Eucampia zodiacus* 및 *Th. nordenskiöldii*, 그리고 가을 하구역은 *Aulacoseira cf. granulata*, 혼합해역은 *S. costatum*-Is 및 외해역은 *Lingulodinium polyedra*가 우점하였다. 그리고 주성분 분석에 의하면 금강 하구역의 식물플랑크톤 군집은 연간 금강 하굿둑을 통해 유입되는 높은 영양염을 포함하는 담수의 유입량과 확장 정도에 크게 영향을 받고 있었다. 그러나 하굿둑을 통한 직접적인 담수 영향은 금란도 주변까지의 영역에 한정되었고, 그 외 해역은 해수와 담수가 강하게 혼합되었다.

## 사 사

이 논문은 국립해양생물자원관 연구사업 “해양수산생명자원 정밀조사 및 보전연구(2020M00300)”의 연구비 지원에 의해 작성되었습니다.

## REFERENCES

- Bazin P, F Jouenne, T Friedl, AF Deton-Cabanillas, B Le Roy and B Véron. 2014. Phytoplankton diversity and community composition along the estuarine gradient of a temperate macrotidal ecosystem: Combined morphological and molecular approaches. *PLoS One* 9:e94110.
- Chihara M and M Murano. 1997. An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan. Tokai Univ. Press, Tokyo.
- Cloern JE. 2018. Why large cells dominate estuarine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* 63:S392-S409.
- Cloern JE, SQ Foster and AE Kleckner. 2014. Phytoplankton primary production in the world's estuarine-coastal ecosystems. *Biogeosciences* 11:2477-2501.
- Cupp EE. 1943. Marine plankton diatoms of the west coast of north America. *Bull. Scripps Inst. Oceanogr. Univ. California* 5:1-237.
- Gerbersdorf SU and H Schubert. 2011. Vertical migration of phytoplankton in coastal waters with different UVR transparency. *Environ. Sci. Eur.* 23:1-14.
- Hallegraeff GM, CJS Bolch, DRA Hill, I Jameson, JM LeRoi, A McMinn, S Murray, MF de Salas and K Saunders. 2010. *Algae of Australia: Phytoplankton of Temperate Coastal Waters*. CSIRO Publ., Clayton, Australia.
- Hopkinson CJ and EM Smith. 2005. Estuarine respiration: an overview of benthic, pelagic and whole system respiration. pp. 122-146. In: *Respiration in Aquatic Ecosystems* (PA del Giorgio and PJ Williams eds.). Oxford Univ. Press, New York.
- Hoshiai T. 1964. Synecological study on the intertidal zonation of the Asamushi coastal area with special reference to its reformation. *Bull. Mar. Biol. Stn. Asamushi. Tohoku Univ.* 12:93-126.
- Iizuka S. 1985. The results of a survey of maximum densities in cell number of phytoplankton in coastal waters of Japan. *Bull. Plankton Soc. Japan* 32:67-72.
- Jeong YH, OM Lee and KH Noh. 1985. Annual (1984-1985) dynamic of phytoplankton in Kum river estuary. *Bull. Korean Ass. Cons. Nature* 7:17-25.
- Jeong YH, YT Kim, YJ Chae, CW Rhee, KR Ko, SY Kim, JY Jeong and JS Yang. 2005. Analysis of long-term monitoring data from the Geum river estuary. *The Sea* 10:139-144.
- Kamykowski D and SJ Zentara. 1977. The diurnal vertical migration of motile phytoplankton through temperature gradients. *Limnol. Oceanogr.* 22:148-151.
- Kim J, C Choi, BS Kim, SY Kim, K Jang and JG Park. 2018. Appearance state of freshwater phytoplankton in the Geumgang estuary and growth characteristics of dominant species with salinity gradient. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy* 21:361-367.
- Kim NH and JH Hwang. 2018. Reconstruction of TS spatial distribution using minimum points in Geumgang estuary. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy* 21:351-360.
- Kim YG, JW Park, KG Jang and W Yih. 2009. Cyclic change of phytoplankton community in Mankyeong river estuary prior to the completion of the Saemankeum seawall. *Ocean Polar Res.* 31:63-70.
- Lee JH and J Ryu. 2018. Short-term variations in spatial distribution of the macrozoobenthic community near the Geum river estuary, Korea. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy* 21:368-380.
- Lim YK and SH Baek. 2017. Seasonal distributional characteristics of phytoplankton adjacent to the oyster farming area of Hansan-Geoje Island. *Korean J. Environ. Biol.* 36:647-658.
- McLusky DS. 1993. Marine and estuarine gradients - An overview. *Neth. J. Aquat. Ecol.* 27:489-493.
- McNaughton SJ. 1968. Structure and function in California grassland. *Ecology* 49:962-972.
- MOF. 2018. Korean Standard Method of Examination for Marine Environment. Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong, Korea.
- Muñiz O, JG Rodríguez, M Revilla, A Laza-Martínez, S Seoane and J Franco. 2018. Seasonal variations of phytoplankton community in relation to environmental factors in an oligotro-

- phic area of the European Atlantic coast (southeastern Bay of Biscay). Reg. Stud. Mar. Sci. 17:59–72.
- Nishikawa T, Y Hori, K Tanida and I Imai. 2007. 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 6:763–773.
- Noh J, SJ Yoon, C Lee, BO Kwon and JS Khim. 2018. Optimal environmental monitoring system for ecosystem assessment in the Geum river estuary, Korea. J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy 21:334–350.
- Omura T, M Iwataki, VM Borja, H Takayama and Y Fukuyo. 2012. Marine Phytoplankton of the Western Pacific. Kouseisha Kouseikaku, Tokyo.
- OSC. 1986. A Manual for Coastal Environmental Survey (Sediments and Biology). The Oceanographic Society of Japan. Kouseisha Kouseikaku, Tokyo.
- Parsons TR, M Takahashi and B Hargrave. 1984. Biological Oceanographic Processes (3rd eds.). Pergamon Press, Oxford, UK.
- Pritchard DW. 1989. Estuarine classification - a help or a hindrance. pp. 1–38. In: Estuarine Circulation (Neilson BJ, A Kuo and DJ Brubaker (eds.)). Humana Press, Clifton, NJ.
- Shannon CE and W Weaver. 1963. The Mathematical Theory of Communication. Univ. Illinois Press, Urbana, IL.
- Shim JH and JS Yang. 1982. The community structure and distribution of phytoplankton of the Keum river estuary. J. Oceanol. Soc. Korea 17:1–11.
- Shim JH and SJ Yoo. 1985. Phytoplankton community of the coast of Kunsan, Korea. J. Oceanol. Soc. Korea 20:31–42.
- Shin YK. 2013. An ecological study of phytoplankton community in the Geum river estuary. Korean J. Ecol. Environ. 46:524–540.
- Tiselius P, A Belgrano, L Andersson and O Lindahl. 2016. Primary productivity in a coastal ecosystem: a trophic perspective on a long-term time series. J. Plankton Res. 38:1092–1102.
- Tomas CR. 1997. Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates. Academic Press, Oxford, UK.
- Trigueros JM and E Orive. 2000. Tidally driven distribution of phytoplankton blooms in a shallow, macrotidal estuary. J. Plankton Res. 22:969–986.
- Vigil P, P Countway, J Rose, DJ Lonsdale, CJ Gobler and DA Caron. 2009. Rapid shifts in dominant taxa among microbial eukaryotes in estuarine ecosystems. Aquat. Microb. Ecol. 54:83–100.
- Wafer MVM, P Le Corre and JL Birrien. 1983. Nutrients and primary production in premanently well mixed temperate coastal waters. Estuar. Coast. Shelf Sci. 17:431–446.
- Yeo HG. 2010. Diversity of planktonic micro algae in Saemangeum water regions. J. Korea Acad.-Indust. Coop. Soc. 11:3610–3614.
- Yeo HG. 2012. Annual variations (2001–2010) of phytoplankton standing stocks in Saemangeum water region. J. Korea Acad.-Indust. Coop. Soc. 13:4326–4333.
- Yih W, G Myung, YD Yoo, YG Kim and HJ Jeong. 2005. Semi-weekly variation of spring phytoplankton community in relation to the freshwater discharges from Keum River estuarine weir, Korea. The Sea 10:154–163.
- Yoo YD, HJ Jeong, JH Shim, JY Park, KJ Lee, WH Yih, HK Kweon, SJ Pae and JK Park. 2002. Outbreak of red tides in the coastal waters off the southern Saemankeum areas, Jeonbuk, Korea 1. Temporal and spatial variations in the phytoplankton community in the Summer-fall of 1999. The Sea 7:129–139.
- Yoon YH. 1989. Environmental Analysis of Phytoplankton growth in the Inland Sea of Japan with special reference to the occurrence of red tide. Ph.D Thesis. Hiroshima University, Hiroshima, Japan.
- Yoon YH. 1999. The characteristics on the spatio-temporal distributions of phytoplankton communities in Deukryang Bay, Southwestern Korea. Korean J. Environ. Biol. 17:481–492.
- Yoon YH. 2011. Marine Environments and Phytoplankton in the South-western Sea of Korea. pp. 68–93. In: The Plankton Ecology in Korean Coastal Waters (Choi CK (ed.)). Donghwa Pub., Seoul.
- Yoon YH. 2015. Spatio-temporal distributions of phytoplankton community in the coastal waters of Gogunsan Islands (CoW-GIs), West Sea of Korea. J. Korea Acad.-Indust. Coop. Soc. 16:2287–2300.
- Yoon YH. 2016. Bio-environmental Characteristics of the Uljin Marine Ranching Area (UMRA), East Sea of Korea. 1. Spatio-temporal distributions of phytoplankton community. J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy 19:37–46.
- Yoon YH, HG Rho and YK Kim. 1992. Seasonal succession of phytoplankton population in the Hamdok port, Northern Cheju Island. Bull. Mar. Sci. Inst., Cheju Nat'l Univ. 16:27–42.
- Yoon YH, JS Park and BS Kim. 2019. Spatial distributions of phytoplankton community in the coastal waters of South Sea, Korea during the early summer of 2018. Korean J. Environ. Biol. 37:164–176.