

ORIGINAL ARTICLE

## 담수 유입에 따른 천수만 해역의 식물플랑크톤 군집 변화

이승민\* · 장수정 · 허승

국립수산과학원 서해수산연구소 자원환경과

### Changes in Phytoplankton Community Structure by Freshwater Input in the Cheonsu Bay, Korea

Seung-Min Lee\*, Soo-Jung Chang, Seung Heo

West Sea Fisheries Research Institute, NIFS, Incheon 22383, Korea

#### Abstract

Environmental factors and changes in phytoplankton community structure before (August 5, 2017), during (August 18 and 25) and after (August 30 and September 15) freshwater input were analyzed to investigate the effects of freshwater input from Ganwol and Bunam lakes located in the upper part of Cheonsu Bay. Due to the large amount of freshwater input in the Cheonsu Bay, the surface salinity of the bay decreased by more than 8 psu, and the thermocline existing in the bay during August weakened. In addition, hypoxic phenomena occurred temporarily in the bay as the low oxygen water mass from the freshwater lakes flowed into the bay, and chemical oxygen demand, nutrients, and N/P increased with freshwater inflow. The density of phytoplankton during the freshwater inflow increased owing to their input from the freshwater lakes. Diatom species (*Eucampia zodiacus*) dominated the phytoplankton community in the bay before freshwater input; nanoflagellates, chlorophyta, cyanobacteria, and diatoms (*Pseudonitzschia delicatissima*, *Chateoceros* spp.) entered during freshwater input; and after freshwater inflow ended, diatoms (*Chateoceros* spp.) again became predominant indicating a return to previous conditions. The amount of phytoplankton standing crops increased sharply due to the inflow of freshwater species into the bay on the second day of discharge compared to before freshwater input; pre-discharge conditions were restored at most stations except at some sites close to the Bunam Lake three days after discharge. Therefore, the large amount of freshwater flowing into the bay affects not only the geochemical circulation in the bay but also the phytoplankton community structure. In particular, the high concentration of nutrients in the freshwater lake affect the marine ecosystem of the bay during August.

**Key words** : Phytoplankton community structure, Cheonsu Bay, Freshwater discharge

#### 1. 서론

황해 중부 연안에 위치한 천수만은 남북으로 길이 35 km, 동서로 폭 10 km, 평균 수심 20 m 내외의 천해성

내만으로 주변 방조제로부터 담수가 유입되어 내만과 하구역의 특성을 갖는다. 또한 수산 생물들의 보육 및 산란장으로 이용되어 왔으며 생물 생산성이 높아 황해 생태계 내에서 중요한 역할을 담당하고 있다(Park et al.,

Received 1 November, 2019; Revised 21 November, 2019;  
Accepted 25 November, 2019

\*Corresponding author: Seung-Min Lee, WSFRI, National Institute of Fisheries Science, Incheon 22383, Korea  
Phone: +82-32-745-0652  
E-mail: sminlee@korea.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© 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 non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2006a; Lee et al., 2014). 황해와 연결된 천수만은 좁은 입구로 인해 만내로 유입되는 해수의 유속감소와 유수량이 작은 특징을 보인다. 서산 A지구 방조제(간월호)는 1983년에 건설되었고, 서산 B지구 방조제(부남호)는 1985년에 건설되었으며, 1999년에 홍성 방조제와 2000년에 보령 방조제가 건설되었다. 여름에 북쪽에 위치한 간월호와 부남호로부터 부정기적으로 유입되는 많은 양의 담수로 인해 염분과 영양염 농도에 급격한 변화를 주며, 생활 폐수와 인근 농경지로부터 화학 비료의 유입은 서식중인 플랑크톤 생태계에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2005; Park et al., 2006a; Lee et al., 2014). 과거 천수만에서 이루어진 생태학적인 연구로는 방조제 건설 이전의 Yoo(1962)와 Shim and Lee(1979)에 의해서 이루어진 식물플랑크톤의 종 조성과 양에 관한 연구가 있으며, 방조제 건설 이후에는 전반적인 생태계 분석 보고서(Shim et al., 1988), 식물플랑크톤과 일차생산력(Shim and Yeo, 1988; Shim et al., 1988; Shim and Shin, 1989; Shin and Shim, 1990), 동물플랑크톤(Shim et al., 1988; Shim and Yun, 1990), 어류(Lee and Seok, 1984; Lee, 1989; 1996; 1998) 그리고 저서동물(Park et al., 2006b) 등에 관한 연구들이 이루어져 왔다. 특히 여름철 장마기 전후에 만내에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 추정되는 담수 유입에 따른 동물플랑크톤 군집 변화에 대한 연구는 Lee et al.(2012)과 Lee et al.(2014)의 연구가 있다. 본 연구는 천수만에서 여름철 담수 방류에 따른 인위적 환경요인의 변화가 식물플랑크톤 군집의 시간적 동태에 미치는 영향을 파악하고자 담수방류에 따른 환경요인과 식물플랑크톤 현존량 및 우점종의 변동성을 살펴보았다. 본 연구가 담수유입에 따른 식물플랑크톤의 생태학적 영향에 대한 기초자료로 활용되길 기대한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 정점도 및 채집 시기

여름철 장마기 동안 부남호(서산 B지구 방조제)와 간월호(서산 A지구 방조제)로부터 대량의 담수가 집중적으로 천수만으로 유입될 때 그 영향을 직접적으로 받는데, 죽도 북쪽에 위치한 7개 정점에서 식물플랑크톤 군집의 영향을 파악하고자 2017년 담수 방류전(8월 5일), 방류

중(8월 18일, 8월 25일), 방류후(8월 30일, 9월 15일)의 수온, 염분, 엽록소 *a* 농도, 용존무기영양염류 농도와 식물플랑크톤의 종조성 및 현존량 분포를 조사하였다(Fig. 1).

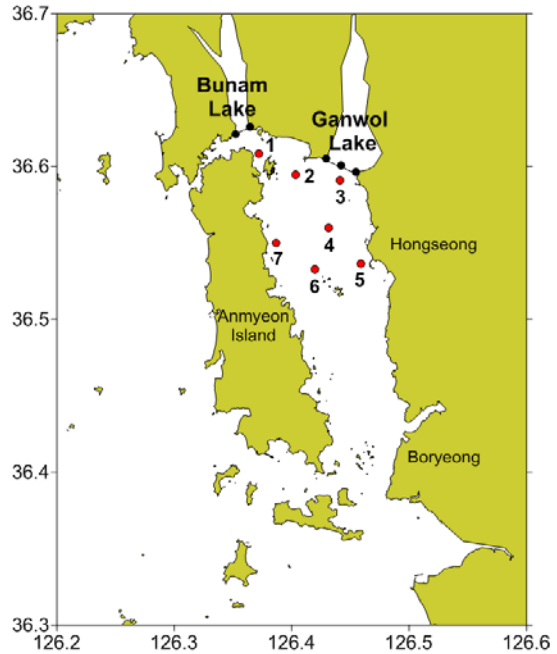


Fig. 1. A Map showing the sampling sites in Cheongsu bay.

### 2.2. 환경요인

수온 및 염분은 현장에서 CTD (SBE-911plus; Seabird co.)를 이용하여 측정하였다. 영양염의 시료 채취는 현장에서 니스킨 채수기로 채수한 다음 막여과지(membrane filter, 직경 47 mm, pore size 0.45  $\mu\text{m}$ )로 여과후 시료 15 mL을 채취하여 코니칼튜브에 넣어 냉동 보관하였다. 용존무기영양염류는 영양염자동분석기(QUAATRO, BLTEC)를 이용하여 측정하였으며 장비에 대한 기기 보정은 해수 표준물질을 이용하였고, 각 용존무기영양염류에 대한 정밀도는 5% 이내로 측정하였다.

엽록소 *a*는 채수한 해수시료의 일정 양을 막여과지로 여과한 후 여과지를 15 mL 원심분리용 튜브에 넣고 호일로 감싸 빛을 차단시킨 후 냉동 보관하여 실험실로 옮긴 후 분석 전까지 냉동보관 하였다. 분석 시 90% 아세톤 10 mL을 넣은 후 교반시킨 다음 빛을 차단시킨

**Table 1.** Discharge time and amount of freshwater input from the Bunam and Ganwol lakes into Cheonsu bay, 2017

2017 Date	Amount of freshwater discharge from Bunam lake (discharge time)	Amount of freshwater discharge from Ganwol lake (discharge time)	Total amount of freshwater discharge (10,000tons)	Accumulated discharge amount (10,000tons)
Aug.-17		426 (15:20-18:30)	426	426
Aug.-18		451 (16:40-19:40)	451	877
Aug.-20	172 (19:30-22:30)		172	1,049
Aug.-21	31(08:30-10:30) 141(20:00-23:20)	1177 (18:45-00:05)	1,349	2,398
Aug.-22	16(08:50-09:30) 203(20:20-00:00)	1097 (20:20-00:40)	1,316	3,714
Aug.-23	156(09:30-12:40) 172(21:20-00:40)	1041 (20:40-01:10)	1,369	5,083
Aug.-24	94(10:20-12:00) 187(22:00-01:20)	713 (21:45-01:30)	994	6,077
Aug.-25	140 (23:00-02:00)	488 (22:35-01:50)	628	6,705
Aug.-26	140 (23:40-02:20)		140	6,846
Aug.-27	125 (00:30-02:40)		125	6,970

냉장고에서 24시간 용출시켰다. 추출된 용액 중에 섞여 있는 입자를 제거하기 위해 4,000 rpm에서 10분 동안 원심분리시킨 후 상등액을 취하여 형광광도계(Turner Designs 10-AU Fluorometer)로 측정하였다(Parsons et al., 1984).

### 2.3. 식물플랑크톤

식물플랑크톤 분석을 위해 표층과 저층의 해수 1 L를 루골용액으로 고정된 후 실험실로 운반하였다. 고정된 시료는 메스실린더에 옮겨 하루 이상 침전시킨 후 상등액을 제거하여 50 mL로 농축하였다. 농축된 시료에서 1 mL을 취하여 Sedgewick-Rafter counting chamber에 옮겨 광학현미경(Olympus BX 51)으로 식물플랑크톤을 동정 및 계수하였다. 계수된 자료는 단위부피 mL당 세포수인 현존량으로 환산하여 사용하였으며 총 현존량의 10% 이상을 차지하는 종을 우점종으로 분류하였다. 식물플랑크톤의 동정은 Jung(1993), Tomas(1997) 및 Omura(2012)를 참고하였다.

### 2.4. 통계분석

생물량의 경우 로그 변환한 후 생물 및 무생물 변수들 간의 상호관계를 순위상관분석(Spearman rank correlation analysis)을 하였고, 식물플랑크톤 군집과 환경인자간의

관계를 살펴보기 위하여 CANOCO 패키지(version 4.5)를 이용하여 정준대응분석(Canonical Correspondence Analysis; 이하 CCA)을 수행하였다(ter Braak and Šmilauer, 2002). CCA에 이용된 생물변수는 식물플랑크톤 총현존량의 1% 이상인 종을 이용하였고, 종분포와 환경인자간 상관관계의 유의성 검정을 위하여 Monte Carlo permutation test( $p < 0.05$ )를 수행하였다.

## 3. 결과

### 3.1. 담수 방류에 따른 물리·화학적 환경 변화

천수만 내측으로 방류된 담수량은 부남호에서 8일(8.20~8.27)동안 1,577 만톤이 방류되었고, 간월호에서 9일(8.17~8.25)동안 5,393 만톤이 방류되어 총 누적 방류량은 6,970 만톤이었다(Table 1). 간월호로부터 2017년 8월 17일에 담수방류가 시작되어 담수 방류 2일째(8월 18일) 서산 A 방조제와 가까운 정점 3의 표층 해수 염분은 29.97, 정점 4는 31.15, 정점 6은 31.34로 관측되었다. 담수방류 9일째(8월 25일)는 지속적인 담수 유입으로 표층해수의 염분이 22.61까지 낮아졌으며, 방류 종료 후 3일(8월 30일) 이후부터 다시 방류전으로 염분이 회복되었다(Fig. 2).

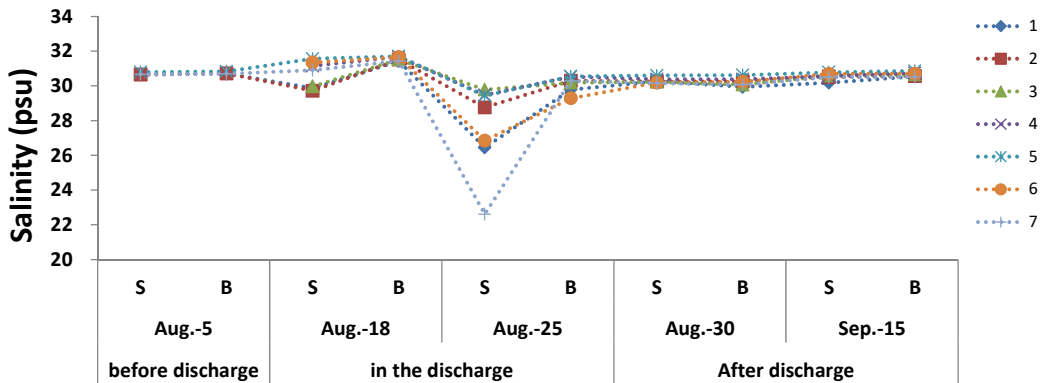


Fig. 2. Changes in salinity at each sampling site during the study periods (numbers: sampling sites, S: surface, B: near bottom).

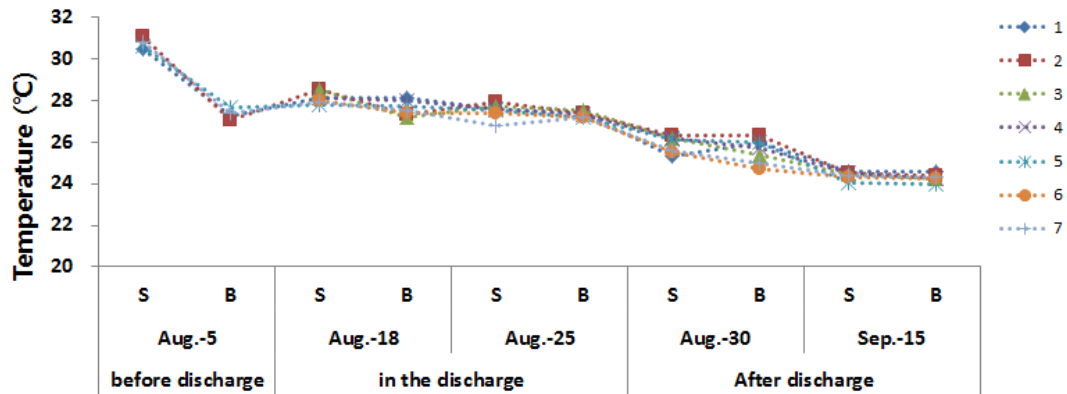


Fig. 3. Changes in seawater temperatures at each sampling site during the study periods (numbers: sampling sites, S: surface, B: near bottom).

천수만의 수온은 2017년 7월 31일 천수만의 수온이 28°C에 도달하여 고수온 주의보가 발령되었고, 28°C 이상 수온이 3일 이상 지속되어 8월 6일 고수온 경보가 발령되었다. 방류전 8월 5일 조사시 천수만의 표층 수온이 31.1°C까지 상승하였다가 8월 중순 이후 하강하기 시작하여 기온이 점차 낮아지면서 수온도 하강하였다(Fig. 6). 방류전 표층과 저층은 3~4°C 수온 차이를 보이며 수온 약층이 형성되었다가, 짧은 시간동안 많은 양의 담수 방류로 물리적 안정이 깨지면서 수온 약층이 약화되고, 조석에 의한 수직 혼합으로 방류중인 8월 18일과 8월 25일은 표층과 저층간의 수직 혼합이 강하게 나타났다(Fig. 3).

용존산소는 담수 방류전(8월 5일) 표층의 용존산소는 10 mg/L 이상의 높은 값을 나타낸 반면, 간월도 선착장에 위치한 정점 2의 저층에서 2.86 mg/L로 빈산소가 관측되었다(Fig. 4). Jung et al.(2013)에 의하면 장마철 천수만 북부로 유입된 부영양화된 담수가 밀도류를 타고 1~2 km/tidal cycle의 속도로 남하하여 10~15일 이내에 천수만 입구를 빠져나가야 하지만 북향하는 잔류수가 오랜 시간 지속되어 만 내로 유입된 물질들이 쉽게 외해로 빠져나가지 못하고 천수만 북부에서 체류시간이 증가하여 빈산소 수괴가 발생된다는 연구 내용과 일치하였다. 담수 방류가 시작되면서 담수 방류전 형성되었던 수온 약층이 깨지고 수직혼합으로 표층과 저층간 용존산소의

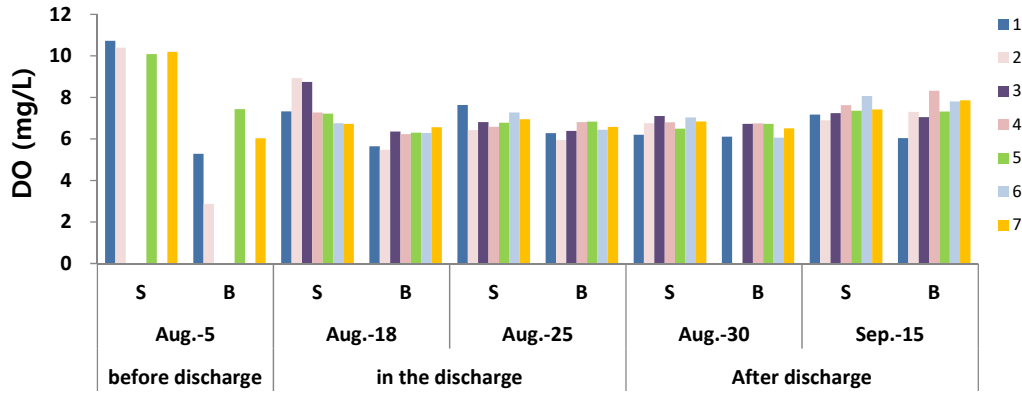


Fig. 4. Changes in dissolved oxygen concentration (mg/L) at each sampling site during the study periods (numbers: sampling sites, S: surface, B: near bottom).

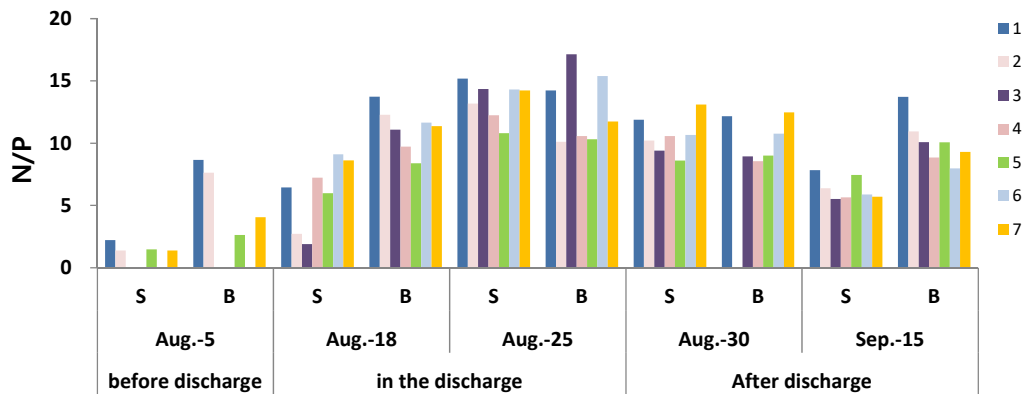


Fig. 5. Changes in DIN/DIP at each sampling site during the study periods (numbers: sampling sites, S: surface, B: near bottom).

농도 차이가 없었다(Fig. 4).

화학적산소요구량은 담수방류전(8월 5일) 화학적산소요구량은 평균 2.12 mg/L (1.04~2.63 mg/L)로 수질이 좋은 편은 아니었으나, 담수방류 2일째(8월 18일) 서산 A지구 방조제 바로 앞에 위치한 정점 3에서 3.19 mg/L로 높은 화학적산소요구량 값을 보여 간월호로부터 방류된 담수의 수질이 더 좋지 않음을 알 수 있었다. 죽도와 가까운 곳에 위치한 정점 6에서 방류 9일째(8월 25일) 4.07 mg/L로 수질이 좋지 않았으며, 방류 종료후 3일(8월 30일)까지 3.07 mg/L로 매우 높은 값을 유지하다가 방류 종료후 19일(9월 15일)에 1.59 mg/L로 회복되었다(Fig. 6).

용존무기질소의 농도는 담수 방류전(8월 5일) 표층 평균 1.28  $\mu\text{M}$ , 저층 평균 13.04  $\mu\text{M}$ 로 표층과 저층간 11.76  $\mu\text{M}$ 의 큰 농도 차이를 보였다. 방류중(8월 18일, 25일)과 방류종료후 3일(8월 30일)까지 표층 평균 14.77  $\mu\text{M}$ (10.49~19.86  $\mu\text{M}$ )과 저층 평균 17.11  $\mu\text{M}$ (13.84~19.26  $\mu\text{M}$ )로 높은 농도를 보였고, 방류 종료후 19일(9월 15일)에 표층과 저층 평균 농도가 각각 5.23  $\mu\text{M}$ , 5.48  $\mu\text{M}$ 로 회복되었다(Fig. 6).

용존무기인은 방류전(8월 5일) 0.8  $\mu\text{M}$ , 방류중 1.5~1.8  $\mu\text{M}$ , 방류종료후 3일(8월 30일)에 1.3  $\mu\text{M}$ , 방류 종료후 19일(9월 15일)에 0.8  $\mu\text{M}$ 로 방류전 수준으로 회복되었으며, 조사기간동안 0.8  $\mu\text{M}$  이상의 높은 값을

**Table 2.** Spearman rank correlation among physico-chemical and biological factors in the surface waters of Cheonsu bay during the study periods (\*\* $p < 0.01$ , \* $p < 0.05$ ). Abbreviations are: FD=amount of freshwater discharge, DO=Dissolved oxygen, ppl.=phytoplankton density

Aug.5~ Sep.15	FD	T	Sal	pH	DO	COD	NH <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	DIN	TN	DIP	TP	SiO <sub>2</sub>	SS	Chl- <i>a</i>	ppl
FD	1																
T	0.40*	1															
Sal	-0.51**	-0.05	1														
pH	-0.17	0.63**	0.33	1													
DO	-0.22	0.61**	0.13	0.84**	1												
COD	0.23	0.12	-0.43*	-0.04	0.10	1											
NH <sub>4</sub>	0.62**	-0.03	-0.53**	-0.71**	-0.69**	0.15	1										
NO <sub>2</sub>	0.37*	-0.23	-0.60**	-0.72**	-0.66**	0.27	0.82**	1									
NO <sub>3</sub>	0.51**	-0.06	-0.57**	-0.61**	-0.61**	0.27	0.82**	0.96**	1								
DIN	0.62**	-0.04	-0.55**	-0.72**	-0.70**	0.17	0.99**	0.87**	0.87**	1							
TN	0.77**	0.12	-0.78**	-0.42*	-0.39*	0.43*	0.78**	0.78**	0.81**	0.81**	1						
DIP	0.70**	0.29	-0.23	-0.19	-0.41*	0.13	0.65**	0.49**	0.56**	0.65**	0.70**	1					
TP	-0.11	0.75**	0.04	0.60**	0.78**	0.10	-0.28	-0.39*	-0.34	-0.30	-0.27	-0.26	1				
SiO <sub>2</sub>	0.72**	0.15	-0.47**	-0.45*	-0.54**	0.27	0.83**	0.81**	0.86**	0.86**	0.88**	0.86**	-0.34	1			
SS	-0.24	-0.02	0.29	0.17	-0.15	-0.10	-0.10	0.08	0.13	-0.06	-0.06	0.23	-0.23	0.15	1		
Chl- <i>a</i>	0.21	-0.01	-0.43*	-0.03	-0.09	0.15	0.18	0.28	0.26	0.20	0.48**	0.33	-0.18	0.34	0.10	1	
ppl.	-0.37*	0.08	0.36*	0.46*	0.27	-0.10	-0.49**	-0.24	-0.27	-0.46**	-0.26	0.03	-0.02	-0.12	0.38*	0.30	1

보여 제한 요인으로 작용하지 않았다(Fig. 6).

용존무기질소와 용존무기인의 비로 계산된 N/P 비는 방류전 표층에서 1.6, 저층 5.7로 redfield raio 16:1 보다 매우 낮은 비를 보였으며, 방류중(6.0~13.5)과 방류후(6.3~10.6) 모두 16보다 낮은 값을 보였으나, 방류전과 비교하여 용존무기인의 농도는 일정한 반면 용존무기질소의 농도가 1.9~2.7배 증가하여 N/P 비가 다소 올라갔다. 천수만은 용존무기인과 용존무기질소가 식물플랑크톤 성장에 제한적 요인이 될 정도로 낮지 않으나 용존무기질소의 농도에 더 영향을 받는 것으로 사료된다(Fig. 5).

부남호와 간월호로부터 방류된 담수와 환경요인과의 순위상관분석 결과, 염분은 유의한 음의 상관관계( $p < 0.01$ )로 방류되는 담수의 영향으로 낮아지는 경향을 보였고 용존무기영양염류(용존무기질소, 용존무기인, 용존무기규소)와 수온은 유의한 양의 상관관계( $p < 0.01$ )를 보임으로써 두 담수호로부터 육상기원의 용존무기영양염류가 천수만 내측으로 유입되었음을 시사하였다

(Table 2).

### 3.2. 담수 방류에 따른 식물플랑크톤 현존량 및 우점종 변화

#### 3.2.1. 엽록소 *a*

엽록소 *a*의 농도는 담수 방류전(8월 5일)에는 표층보다 저층에서 높은 농도를 보였고, 방류중(8월 18일, 8월 25일) 담수 식물플랑크톤의 만 내로 유입됨에 따라 표층수의 엽록소 *a* 농도가 높았으며, 방류 종료후(8월 30일, 9월 15일)에는 표층과 저층의 엽록소 *a* 농도는 비슷하였다(Fig. 7). 방류전 대형 규조류인 *Eucampia zodiacus*, *Chaetoceros pseudocurvisetus*가 우점하여 식물플랑크톤의 현존량은 적으나 엽록소 *a*의 농도가 높았다.

#### 3.2.2. 식물플랑크톤 현존량

8월 17일 서산 A지구 방조제의 수문 개방을 시작으로 간월호의 담수 방류에 이어 8월 20일 서산 B지구 방조제로부터 부남호 담수가 천수만 내측으로 방류되어 8월 한 달 동안 천수만 내측으로 6,970 만톤의 담수가 방류되었

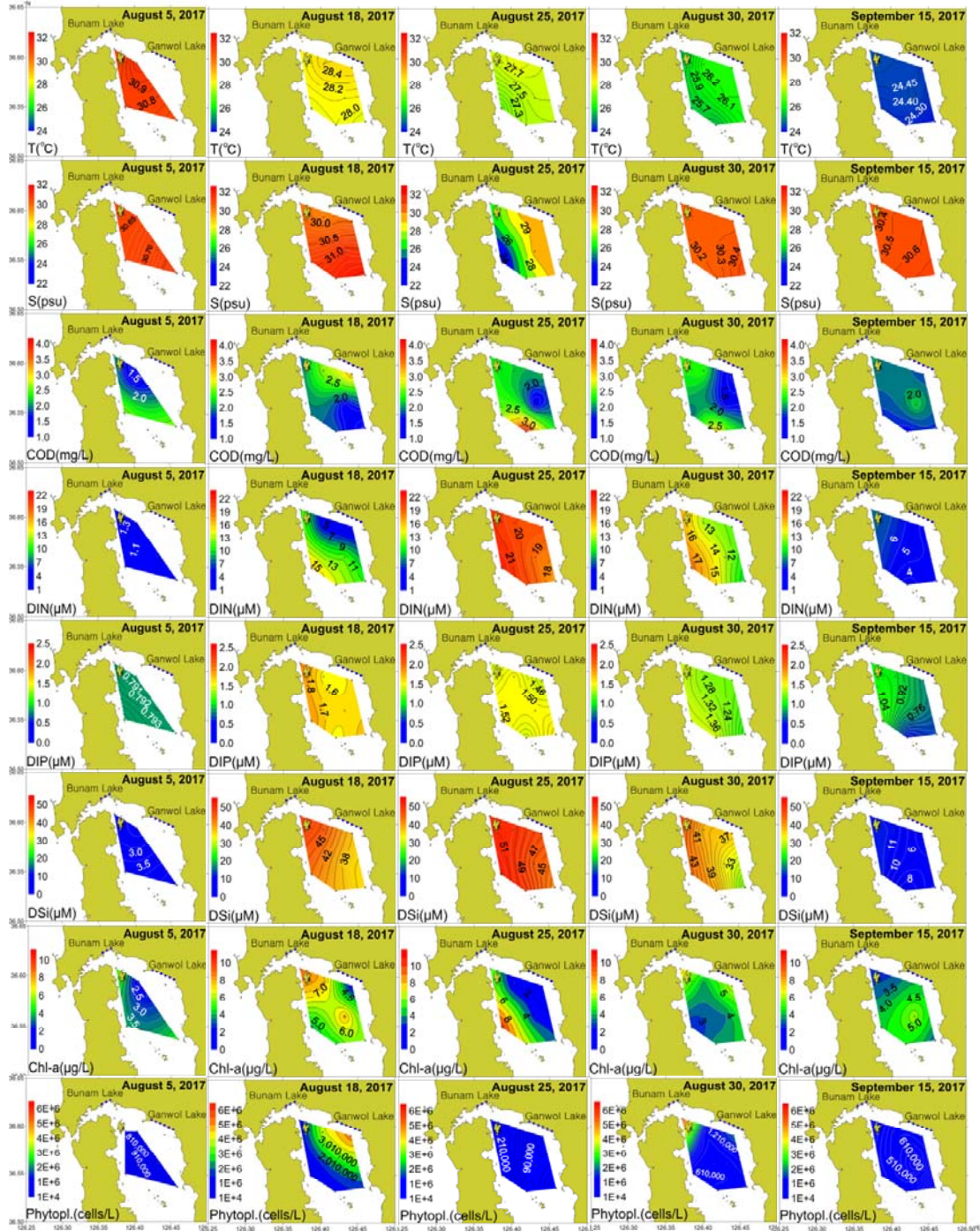


Fig. 6. Temporal and spatial changes in physical, chemical and biological parameters by the freshwater input to Cheonsu bay, Korea in 2017.

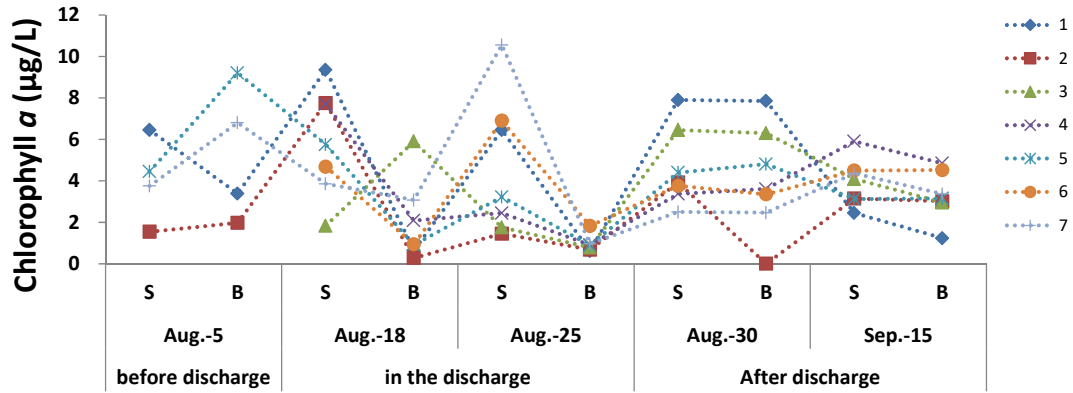


Fig. 7. Changes in chlorophyll a concentration ( $\mu\text{g/L}$ ) at each sampling site during the study periods (numbers: sampling sites, S: surface, B: near bottom).

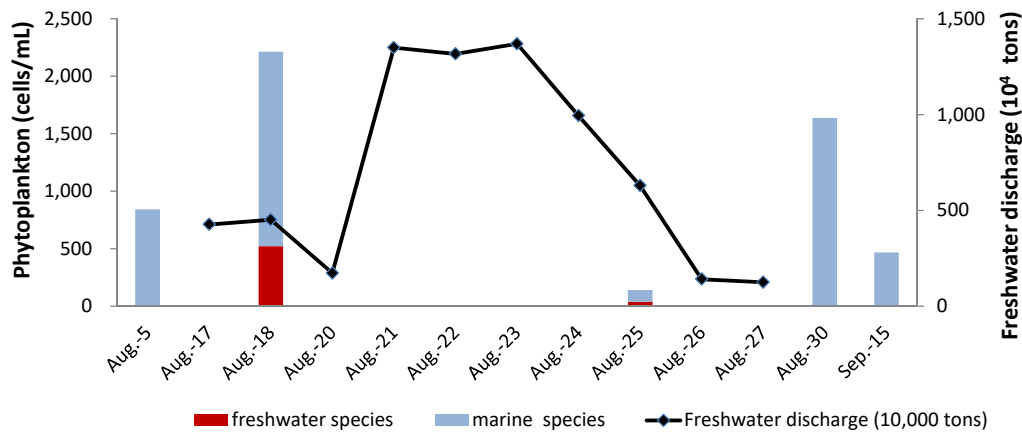


Fig. 8. Freshwater discharge ( $10^4$  tons) and phytoplankton mean abundances (cells/mL).

다(Table 1). 이에 따라 식물플랑크톤 현존량은 방류 전(8월 5일)에는 572~1,317 cells/mL(평균 843 cells/mL)에서 간월호 방류 2일째(8월 18일)에 99~5,374 cells/mL(평균 2,215 cells/mL)로 담수종의 유입으로 식물플랑크톤 현존량이 급격히 증가하였다(Fig. 8, Fig. 9). 특히 간월호와 가까운 정점(3 > 2 > 4 > 5 > 6)에서 매우 높은 값을 보였다(Fig. 6, Fig. 9). 방류 9일째(8월 25일)는 계속되는 담수 방류로 39~257 cells/mL(평균 140 cells/mL)로 육상 기원의 풍부한 용존무기영양염류(DIN, DIP, DSI)의 농도에도 불구하고 식물플랑크톤 생물량이 현저히 감소하였다(Fig. 6, Fig. 8, Fig. 9). 방류 종료 후 3일(8월 30일)에는 504~6,209 cells/mL(평균

1,637 cells/mL)로 부남호 인근에 위치한 정점 1을 제외하고 대체적으로 방류전으로 회복되었으며, 방류종료 후 19일(9월 15일)에는 200~823 cells/mL(평균 467 cells/mL)로 식물플랑크톤의 현존량은 감소하였다(Fig. 6, Fig. 9).

### 3.2.3. 식물플랑크톤 우점종

식물플랑크톤은 규조류에 속하는 *Chaetoceros* spp., *Pseudonitzschia delicatissima*, *E. zodiacus*, *Skeletonema costatum*, *C. pseudocurvisetus*, *Thalassiosira* spp., *Chaetoceros curvisetus*, 편모조류인 nanoflagellates, 은편모조류인 *Cryptomonas* spp.가 2017년 하계(담수 방류 전, 중, 후)동안 우점하였다(Table 3).



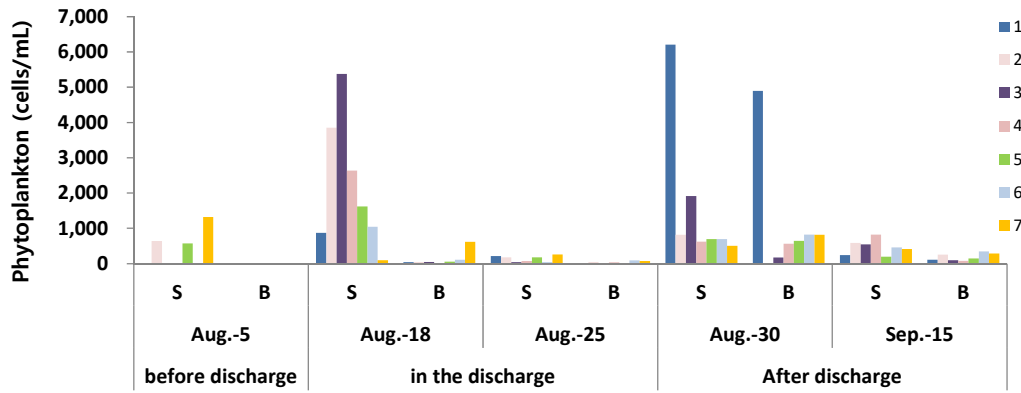


Fig. 9. Spatio-temporal variations of phytoplankton abundance (cells/mL) at surface and near bottom waters (numbers: sampling sites, S: surface, B: near bottom).

Table 3. Mean abundances (cells/mL) of major phytoplankton species in surface waters of Cheonsu bay from August to September 2017 (bold; Dominant species)

Taxon	species	Aug.-5	Aug.-18	Aug.-25	Aug.-30	Sep.-15	Com.(%)
BACILLARIOPHYCEA	<i>Chaetoceros</i> spp.	82	<b>555</b>	9	<b>1,326</b>	<b>308</b>	46.3
BACILLARIOPHYCEA	<i>Pseudonitzschia delicatissima</i>	69	<b>1,001</b>	<b>74</b>	3	29	23.6
DINOPHYCEAE	nanoflagellates	22	<b>503</b>	<1			10.6
BACILLARIOPHYCEAE	<i>Skeletonema costatum</i>	12	18	3	<b>221</b>	21	5.6
BACILLARIOPHYCEAE	<i>Eucampia zodiacus</i>	<b>379</b>	<1		2	<b>41</b>	4.3
BACILLARIOPHYCEAE	<i>Thalassiosira</i> spp.	<1	38	1	27	6	1.5
CRYPTOPHYCEAE	<i>Cryptomonas</i> sp.	9	52	2		<1	1.2
BACILLARIOPHYCEAE	<i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>	<b>115</b>		2		3	1.1
Sum of the above listed taxa		688	2,167	90	1,579	408	94.2
Others		154	47	50	58	59	5.8
Total		842	2,215	140	1,637	467	100.0

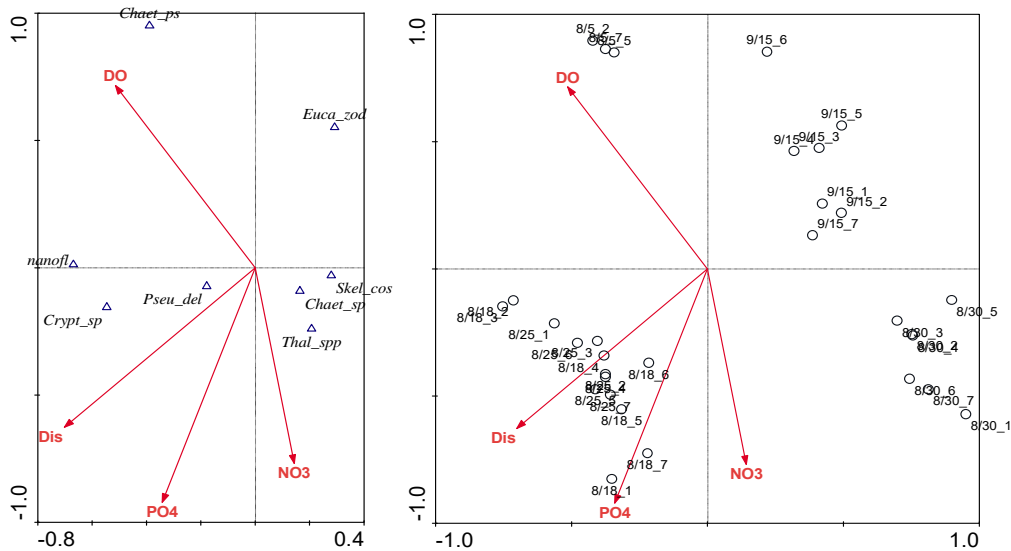
방류 전(8월 5일) 규조류인 *E. zodiacus*, *C. pseudo-curvisetus*가 우세하게 출현하였으며, 간월호 방류 2일째(8월 18일) 규조류인 *P. delicatissima*와 *Chaetoceros* spp.와 20 µm 이하 크기의 미소편모조류가 극우점하였다. 방류 9일째(8월 25일)에도 규조류인 *P. delicatissima*가 우점하였으며, 남세균인 *Oscillatoria* spp.와 담수 녹조류인 *Oedogonium* spp.가 우세하게 출현하였으며, 특히 5×5 µm 크기의 담수산 *Chaetoceros* sp.가 출현하였다. 방류종료후 3일(8월 30일) *Chaetoceros* spp., *S. costatum*가 극우점하였으며, 방류 종료후 19일(9월 15일)에 다시 *Chaetoceros* spp., *E. zodiacus*가 우세하게

출현하여 담수방류 이전의 식물플랑크톤 종조성을 보였다(Table 3).

담수방류 전, 중, 후 천수만 내의 식물플랑크톤 분포와 환경변수의 상관관계를 분석한 CCA 결과에 의하면, 4개의 환경변수에 대한 제한조건 하에서 CCA 축 1 (eigenvalue=0.18)과 축 2 (eigenvalue=0.13)는 식물플랑크톤 종 분포에 대해서 총 변동량의 50.1%를 설명하였고, 식물플랑크톤 종과 환경과의 관계에 대한 변동에 대해서는 86.5%의 설명력을 보였다(Table 4). 환경변수들간의 상관관계를 보면, 방류량, 용존무기인, 용존무기질소, 용존산소가 정준축과 높은 상관관계를 보였다

**Table 4.** Summary of CCA results based on the species composition and environmental parameters in the surface waters of Cheonsu bay during the study periods (Monte Carlo permutation test)

Axes	Axis1	Axis2	Axis3	Axis4
Eigenvalues	0.18	0.13	0.04	0.01
Species-environment correlations	0.91	0.86	0.68	0.43
Cumulative percentage variance				
of species data	28.9	50.1	56.0	57.9
of species-environment relation	49.8	86.5	96.7	100
Amount of Freshwater Discharge	-0.641	-0.538	0.217	0.051
DO	-0.470	0.614	-0.318	0.031
NO3	0.131	-0.659	0.090	0.262
PO4	-0.312	-0.790	-0.108	-0.045

**Fig. 10.** Distributions of eight major phytoplankton species (triangle), including only top 1% species weight range to increase presentation clarity, samples (circles) and environmental variables (arrows) in surface waters of Cheonsu bay during the study periods relative to the first 2 canonical axes. Lengths of arrows and their angles to the axes give a qualitative indication of their relative importance to the ordination. Abbreviations are: Dis=discharge, DO=Dissolved oxygen, nanofl=nanoflagellates, Chaet\_ps=*Chaetoceros pseudocurvisetus*, Chaet\_sp=*Chaetoceros* spp., Crypt\_sp=*Cryptomonas* sp., Euca\_zod=*Eucampia zodiacus*, Thal\_spp=*Thalassiosira* spp., Pseu\_del=*Pseudonitzschia delicatissima*, Skel\_cos=*Skeletonema costatum*.

(Table 4). 첫번째 축은 주로 방류량에 의해 정의되었고, 두번째 축은 용존무기인, 용존무기질소, 용존산소에 의해 정의되었다. 두 축과 연관된 종들의 위치는 축에 표시된 환경변수와의 상관성을 보여주었다(Fig. 10). CCA 축 1을 따라 분포한 규조류 *P. delicatissima*, 편모조류

인 nanoflagellates, 은편모조류인 *Cryptomonas* sp. 는 담수 방류전(8월 5일)부터 만 내에 서식하던 종이고, 부남호와 간월호로부터 담수방류시 천수만 내측으로 추가로 많은 양이 유입되어 생물량이 급증한 종으로 기수 환경에서 잘 서식하였다. 담수 방류전에 높은 생물량을

보였던 *C. pseudocurvisetus*는 용존산소가 10 mg/L 이상으로 풍부했던 담수방류전 환경요인과 유의적 상관성을 보였고, *E. zodiacus*는 담수방류 시기에 관찰되지 않고 방류전과 후에 출현하였다(Table 4, Fig. 10).

담수 방류전(8월 5일) 천수만의 식물플랑크톤 군집은 규조류가 92%로 거의 대부분을 차지할 정도로 규조류인 *E. zodiacus*, *C. pseudocurvisetus*가 우세하게 출현하였고, 담수방류 2일째(8월 18일)에는 규조류 83%, 미소편모조류 13%로 20 µm 크기 이하의 편모조류가 증가하였으며, 남세균과 담수 녹조류가 출현하였다. 특히 규조류 중 *P. delicatissima*가 방류전과 비교하여 14배 이상 증가하여 극우점하였는데, 방류로 인하여 성층화된 수온약층이 깨지면서 저층에 존재하던 *P. delicatissima*가 표층으로 부유되고 담수호(부남호, 간월호) 저층에 서식하던 종이 담수방류시 천수만 내로 유입되어 현존량이 증가된 것으로 추정된다. 담수방류 9일째(8월 25일)는 식물플랑크톤 현존량이 급격히 감소하여 일부 염분 변화에 내성이 있는 종은 생존하고 그 외의 종들은 사멸된 것으로 보인다. 비록 적은 현존량이지만 군집을 구성하는 식물플랑크톤은 규조류 74%, 남세균 12%, 담수 녹조류 10%였으며 방류 2일째와 마찬가지로 *P. delicatissima*가 가장 많은 현존량을 나타내었다. 담수방류 종료 후 3일째(8월 30일)는 다시 규조류가 99.8%로 대부분 규조류로 구성된 식물플랑크톤 군집을 관찰할 수 있었으며 규조류인 *Chaetoceros* sp.가 우세하게 출현하였으며 방류전과 비교하여 2배 높은 식물플랑크톤 현존량을 보였다. 규조류가 99%로 극우점하는 식물플랑크톤 군집 구성은 방류 종료 후 19일째(9월 15일)까지 지속되었으며 방류 종료 후 3일째와 마찬가지로 규조류인 *Chaetoceros* sp.가 우점하게 출현하였다(Table 3).

#### 4. 고찰

담수 방류가 시작되는 초기에는 담수 녹조류인 *Oedogonium* spp., *Senedasmus* spp.와 남세균인 *Oscillatoria* spp., *Merismopedia* sp.를 포함한 육상기원의 식물플랑크톤이 만 내로 유입되어 식물플랑크톤의 현존량이 급격히 증가하였다가, 9일째 지속적으로 이어지는 담수유입에 따른 염분 변화 및 물리적 충격으로 생리적 내성이 약해진 식물플랑크톤의 대부분은 사멸되고

기수 환경에서 적응 가능한 일부 종들만 생존하여 식물플랑크톤 현존량이 급격히 감소하였음에도 불구하고 높은 엽록소 *a*의 농도를 보였다. 또한 부남호와 간월호로부터 대량의 담수가 만 내로 유입될 때 극미소형(< 2 µm) 크기 이하의 남세균을 포함한 식물플랑크톤의 개체수는 광학현미경하에서 간과된 부분이 있다. 질소고정을 할 수 있는 남세균의 천수만 내측으로의 유입은 암모니아 형태를 포함한 질소공급을 증가시켜 담수방류중 매우 높은 용존무기질소 농도를 보였다(Schindler et al., 1973).

2017년 담수방류 관련 조사에 이어 2018년 7월 18일(담수방류 8일째)에 천수만 담수방류와 관련하여 식물플랑크톤 군집을 분석한 결과, 정점 1은 외편모조류(36%)인 *Gyrodinium* spp.을 포함하여 은편모조류(32%)인 *Cryptomonas* sp., 규조류(32%)인 *Pseudonitzschia seriata*가 우점하였고, 정점 2는 규조류(93%)인 *Chaetoceros* spp. 종이 우세하게 출현하였다. 담수방류전(2018년 7월 7일) 정점 2의 식물플랑크톤 현존량 분석결과(8,017 cells/mL ; 규조류 95%, 은편모조류 3%, 외편모조류 2%) 대비 정점 1은 0.05%, 정점 2는 2.23%로 매우 낮은 현존량을 보여, 8일 동안의 지속적인 담수 방류는 2017년과 2018년 모두 식물플랑크톤의 성장을 억제하거나 사멸시키는 것으로 보인다(Fig. 11).

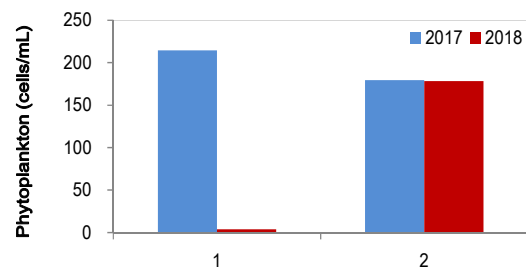


Fig. 11. Comparison of the phytoplankton standing crops at the two survey sites after freshwater discharge in the Bunam lake in 2017 and 2018.

간월호와 부남호로부터 고수온기인 여름철 부영양화된 담수가 천수만 내로 지속적으로 방류됨에 따라 환경 변화에 따른 식물플랑크톤 군집의 변화가 발생하였다. 용존무기영양염류의 유입이 식물플랑크톤 증식을 유발하고, 다량의 담수 유입이 식물플랑크톤 성장 및 사멸에 영향을 줄 수 있다는 과거의 연구 결과와 일치하였다(Cloern et al., 1983; Malone et al., 1988; Boyer et al.,

1993; Shin et al., 2005; Lee et al., 2007; Lee et al., 2014; Song et al., 2014). 본 연구를 통하여 일시적 담수 방류에 따른 용존무기영양염류의 증가 및 환경요인의 변화는 식물플랑크톤 현존량을 증가시키나, 지속적인 담수 방류는 식물플랑크톤을 사멸에 이르게 함을 알 수 있었다.

## 5. 결론

규조류가 극우점하던 천수만의 식물플랑크톤 군집은 담수 방류에 따른 인위적 환경교란으로 염분 변화와 용존무기영양염류의 공급에 의해 규조류를 비롯한 편모조류, 남세균과 담수 녹조류로 구성된 군집으로 조성변화가 있었다. 담수방류 초기에는 담수산 식물플랑크톤의 유입으로 현존량이 증가하였으나, 지속되는 담수방류로 인한 환경변화는 식물플랑크톤의 사멸 및 급격한 현존량 감소로 이어졌다. 이후 환경 적응종 및 해류를 따라 새로 유입된 종들에 의해 방류종료 3일 후부터 담수방류 이전의 식물플랑크톤 종조성 및 현존량을 보였으나, 담수 방류시 만 내로 유입된 육상기인 오염원의 지화학적 순환은 더 오랜 시간동안 생태환경 변화를 초래할 것으로 보인다. 따라서 향후 천수만 내로 유입되는 담수호의 정화 시설 확충을 통한 오염원의 저감대책 마련과 지속적인 모니터링이 요구된다.

## 감사의 글

본 연구는 국립수산과학원 경상과제(R2019025) 연구비 지원으로 국립수산과학원 서해수산연구소에서 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Boyer, J. P., Christian, R. R., Stanley, D. W., 1993, Patterns of phytoplankton primary productivity in the Neuse River estuary, North Carolina, U.S.A. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 97, 287-297.
- Cloern, J. E., Alpine, A. E., Cole, B. E., Wong, R. L. J., Arthur, J. F., Ball, M. D., 1983, River discharge controls phytoplankton dynamics in the northern San Francisco bay estuary, *Estur. Coast. Shelf Sci.*, 16, 415-429.
- Jeong, J., 1993, Illustration of the freshwater algae of Korea, Joo, S. P., Academy publishing company, 496.
- Jung, K. Y., Noh, Y. J., Kim, B. J., 2013, Tidal and sub-tidal current characteristics in the central part of Chunsu bay, Yellow Sea, Korea during the summer season, *Jour. of the Kor. Soc. of Oce.*, 18, 53-64.
- Kim, D. S., Lim, D. I., Jeon, S. K., Jung, H. S., 2005, Chemical characteristics and eutrophication in Cheonsu bay, west coast of Korea, *Oce. and Pol. Res.*, 27, 45-58.
- Lee, D. B., Park, C., Yang, S. Y., Shin, Y. S., 2007, Changes in mesozooplankton community around the rainy season in Asan bay, Korea, *Jour. of the Kor. Soc. of Oce.*, 12, 337-348.
- Lee, J. K., Park, C., Lee, D. B., Lee, S. W., 2012, Variations in plankton assemblage in a semi-closed Chunsu bay, Korea, *Jour. of the Kor. Soc. of Oce.*, 17, 95-111.
- Lee, S. W., Park, C., Lee, D. B., Lee, J. K., 2014, Effect of freshwater discharge on plankton in Cheonsu bay, Korea during the rainy season, *Jour. of the Kor. Soc. of Oce.*, 19, 41-52.
- Lee, T. W., 1989, Seasonal fluctuation in abundance and species composition of demersal fishes in Cheonsu bay of the Yellow Sea, Korea, *Jour. of the Kor. Fis. Soc.*, 22, 1-8.
- Lee, T. W., 1996, Change in species composition of fish in Chonsu bay 1. Demersal fish, *Jour. of the Kor. Fis. Soc.*, 29, 71-83.
- Lee, T. W., 1998, Change in species composition of fish in Chonsu bay 3. Pelagic Fish, *Jour. of the Kor. Fis. Soc.*, 31, 654-664.
- Lee, T. W., Seok, K. J., 1984, Seasonal fluctuations in abundance and species composition of fishes in Cheonsu bay using trap net catches, *Jour. of the Kor. Soc. of Oce.*, 19, 217-227.
- Malone, T. C., Crocker, L. H., Pike, S. E., Wendier, B. W., 1988, Influences of river flow on the dynamics of phytoplankton production in a partially stratified estuary, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 48, 235-249.
- Omura, T., Iwataki, M., Borja, V. M., Takayama, H., Fukuyo, Y., 2012, Marine phytoplankton of the western pacific, Kouseisha Kouseikaku, Tokyo, 160.
- Park, S. Y., Park, G. S., Kim, H. C., Kim, P. J., Kim, J. P.,

- Park, J. H., Kim, S. Y., 2006a, Long-term changes and variational characteristics of water quality in the Cheonsu bay of Yellow Sea, Korea, *Jour. of Env. Sci. int.*, 15, 447-459.
- Park, H. S., Kang, R. S., Lee, J. H., 2006b, Distribution patterns of the dominant macrobenthos and the benthic environments on subtidal soft-bottom in Chonsu bay, Korea, *Jour. of the Kor. Fis. Soc.*, 39, 214-222.
- Parsons, T. R., Maita, Y., Lalli, C. M., 1984, A manual of chemical and biological methods for seawater analysis, Pergamon Press, Oxford, 173.
- Schindler, D. W., Kling, H., Schmidt, R. V., Prokopowich, J., Frost, V. E., Reid, R. A., Capel, M., 1973, Eutrophication of lake 227 by addition of phosphate and nitrate: the second, third, and fourth years of enrichment, 1970, 1971, and 1972, *Jour. of the fish. Res. Boa. of Canada*, 30, 1415-1440.
- Shim, J. H., Ko, C. H., Lee, T. W., Kim, S. J., Park, Y. C., 1988, Marine ecosystem analysis in the Yellow Sea, Korea Science Foundation Report, 246.
- Shim, J. H., Lee, W. H., 1979, On phytoplankton of the Cheonsu bay, west coast, *Jour. of the Kor. Soc. of Oce.*, 14, 6-14.
- Shim, J. H., Shin, Y. G., 1989, Biomass of primary producer in the Cheonsu bay, relationships between phytoplankton carbon, cell number and chlorophyll, *Jour. of the Kor. Soc. of Oce.*, 24, 194-205.
- Shim, J. H., Yeo, H. G., 1988, Spatial and temporal variations of phytoplankton in Chonsu bay, *Jour. of the Kor. Soc. of Oce.*, 23, 130-145.
- Shim, J. H., Yun, K. H., 1990, Seasonal variation and production of zooplankton in Chonsu bay, Korea, *Jour. of the Kor. Soc. of Oce.*, 25, 229-239.
- Shin, Y. G., Shim, J. H., 1990, Relative significance of nanoplankton in Chonsu bay: species composition, abundance, chlorophyll and primary productivity, *Jour. of the Kor. Soc. of Oce.*, 25, 217-228.
- Shin, Y. S., Suh, H. Y., Hyun, B. K., 2005, Effect of salinity change on biological structure between primary producers and herbivores in water column, *Jour. of the Kor. Soc. of Oce.*, 10, 113-123.
- Song, T. Y., Yoo, M. H., Lee, I. H., Kim, E. T., Kim, M. O., Choi, J. K., 2014, The effect of hydrology on phytoplankton assemblages and its adaptive strategies in lake Hwaseong, estuarine reservoir with seawater exchange, Korea, *Kor. Jour. Eco. Env.*, 47-2, 71-81.
- Ter Braak, C., Šmilauer, P., 2002, CANOCO reference manual and cano draw for windows user's guide: software for canonical community ordination(version 4.5), Microcomputer Power.
- Tomas, C. R., 1997, Identifying marine phytoplankton, 1<sup>st</sup> ed. Academic press, 858.
- Yoo, S. K., 1962, A Study on the amount and composition of microplankton in the chungcheongnam-do coastal area (Eocheong-do, Cheonsu bay, Gunsan area), *Bas. Sur. Rep. Cen. Bal. Bas.*, 2, 57-72.

- 
- 이승민, 국립수산과학원 서해수산연구소 환경연구사  
sminlee@korea.kr
  - 장수정, 국립수산과학원 서해수산연구소 해양수산연구사  
sjchang7@korea.kr
  - 허승, 국립수산과학원 서해수산연구소 과장  
seungheo@korea.kr