

ORIGINAL ARTICLE

## 인위적 담수 유입에 의한 도암만의 환경변화와 식물플랑크톤 변동

양응렬 · 정병관 · 이어진 · 류동기<sup>1)</sup> · 신용식\*

목포해양대학교 환경·생명공학과, <sup>1)</sup>군산대학교 해양과학대학 해양생명과학과

### Size and Species Composition of Phytoplankton Related to Anthropogenic Environmental Changes in Doam Bay

Eeng-Ryul Yang, Byung-Kwan Jeong, Eo-Jin Lee, Dong-Ki Ryu<sup>1)</sup>, Yong-Sik Shin\*

Department of Environmental Engineering & Biotechnology, Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

<sup>1)</sup>Department of Aquaculture & Aquatic Science, College of Ocean Science & Technology, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

#### Abstract

Doam Bay is an estuary where harmful algal blooms (HABs) such as red tides develop frequently in summer. The bay also is influenced by freshwater inflow from Tamjin River in upper regions as well as from an artificial lake in lower regions. Phytoplankton size and species composition were investigated at six stations located in the lower regions in April, June and July, 2007. Physical properties (temperature, salinity and SS) were intensively measured for 3 days (5 occasions) after the freshwater discharges from the dike. The freshwater discharge affected temperature, salinity and turbidity in the study sites adjacent to the freshwater lake. Phytoplankton biomass was larger in April than June and it increased more in July. An explicit shift of species composition was observed. Diatoms were dominant in April and June (>70%) whereas their abundances greatly decreased and chlorophytes increased in July. Pseudo-nitzschia sp. was dominant at all stations (except St. 2) and this change was also detected in ecological indices such as diversity and dominance index.

**Key words** : Phytoplankton, Size structure, Doam Bay, Freshwater inputs

#### 1. 서론

연안 생태계에서 식물플랑크톤은 일차생산자로서 상위 영양단계를 구성하는 종속영양체 및 어업 생산량에 영향을 미칠 뿐만 아니라 탄소와 영양염류의 순환에도 중요한 역할을 담당한다(Kemp 와 Boynton, 1981; Sundback 등, 1990). 영양염류가 풍부한 연안하구는 일

차생산량이 갑자기 증가하기도 하는데 이때 동물플랑크톤 등의 상위 포식자들의 반응이 늦어져서 대발생을 형성하게 된다. 대발생시 포식되지 않고 바닥에 가라앉은 식물플랑크톤은 미생물 대사 작용에 의해서 저층의 용존 산소를 고갈시켜 수질을 악화시킬 수 있다(Sundback 등, 1990). 방조제에 의하여 인위적으로 하구가 차단된 서해안의 시화호와 평택항에서도 지속적인 영양염 공급으로

Received 19 March, 2014; Revised 7 May, 2014;

Accepted 2 June, 2014

\*Corresponding author: Yong-Sik Shin, Department of Environmental Engineering & Biotechnology, Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea  
Phone: +88-61-240-7312  
E-mail: yongsik@mmu.ac.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.

인한 부영양화가 식물플랑크톤 대증식을 유발하였고, 유기물질 및 식물플랑크톤 사체의 침전으로 미생물의 산소 소모가 증가하여 무산소상태의 저서환경을 조성하여 무생물구역을 출현시킨다고 보고하였다(Hong 등, 1997; Shin, 2003). 또한 부영양화 된 환경에서 *Alexandrium tamarence* 등과 같은 독성을 가지는 조류의 급격한 증식은 적조를 일으켜 수생태계 및 수산업에 치명적인 피해를 입히기도 한다(Harper, 1992). 1차 생산을 담당하는 식물플랑크톤의 동태를 자세히 이해하기 위해서는 크기 구조와 군집을 연구할 필요가 있는데 세포 크기는 환경 변화에 대한 식물플랑크톤 군집의 반응 민감도(Hein 등, 1995; Malone 과 Chervin, 1979; Sin 등, 2000)와 먹이 사슬을 통한 에너지 흐름을 결정하기 때문이다(Parsons 와 LeBrasseur, 1970; Ryther, 1969; Walsh, 1976).

연안해역의 인위적인 환경변화(방파제, 방조제 건설 및 연안 매립과 준설 등)는 연안 환경오염의 원인이 될 뿐만 아니라 해수의 자연적인 흐름을 인위적으로 방해함으로써 해역의 수리학적인 조건을 변화시킨다. 이는 연안 생태계에 직·간접적인 영향을 주고, 연안에 서식하는 생물군의 변화를 야기시킨다(Courrat 등, 2009; Hummel 등, 1994; Ponti 등, 2011). 본 조사 해역인 도암만은 탐진강이 유입하는 하구형 만으로 정남향의 깔대기 모양을 띠고 있다. 만입구 인근 해역에는 사내방조제가 건설(2002년 완공)되어 사내·만덕호가 조성되었고 2006년에는 상류지역에 장흥다목적댐이 건설되었다. 특히, 방조제 건설 이후, 전기에 담수호에 저장된 담수가 우기에 일시적으로 다량 방출되면서 만내 환경 및 서식생물들에게 많은 영향을 미칠 것으로 예상되는 해역이다. 실제로 2004년도 태풍 매미의 내습시 사내호에서 다량의 담수가 일시에 방류되었고, 하류 해역인 완도항에 규조류인 *Thalassiosira* sp.가 최대 24,000 cells/mL 발생하여 많은 문제가 야기되기도 하였다. 이러한 인위적인 담수 유입이 하구해역에 주는 영향은 낙동강·영산강 하구역과 남대천 하구 등 일부 하구에서만 조사되었다(Kwon 등, 2005; Sin 등, 2013; Yang 등, 2001). 도암만은 특별관리어장에서 환경보전해역으로 변경 지정되었고, 여름철에는 빈번하게 적조가 발생했음에도 불구하고 지금까지 인위적 담수유입과 관련된 식물플랑크톤 동태에 대한 학술적 보고가 전무한 실정이다. 따라서 본 연구는 건조기와 장우기 특히 담수 방류 이후의 물리적 환

경변화와 식물플랑크톤의 크기 및 군집구조를 파악하여 도암만의 효율적인 수질 및 생태계 관리에 기여하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 현장 조사

도암만 해역에서 인위적 담수 방류에 따른 물리환경 변화를 확인하기 위하여 2007년 6월 30일부터 7월 2일까지 6개 정점(Fig. 1)에 대하여 3일간 연속 조사를 실시하였다. 2007년 6월 30일에 발생한 2시간동안의 방류(14:00-16:40)를 시작으로 방류 직후 저조부터 창조시까지 1차 조사(6월 30일 16:06-18:18, 저조), 약12시간 후 저조시에 2차 조사(7월 1일 05:28-07:12, 저조), 18시간 후에 3차 조사(7월 1일 10:08-11:48, 고조), 24시간 후에 4차 조사(7월 1일 16:09-17:51, 저조), 36시간 후에 5차 조사(7월 2일 05:09-06:24, 저조)를 실시하였다. 식물플랑크톤 크기구조와 종조성 변동 조사를 위해 건조기인 2007년 4월 1일, 6월 16일과 사내호 담수 방류 이후인 7월 1일(2차 조사), 7월 2일(5차 조사)에 현장조사를 실시하였다(Fig. 1). 조사해역의 평균 수심은 6.5 m로 시료 채취는 3 L van Dorn 채수기를 이용하였고, 수표면의 1 m 아래와 퇴적층의 1 m 위에서 채수 하였다.

### 2.2 분석방법

#### 1) 환경인자 조사

물리적 환경 인자로는 수온(Temperature)과 염분(Salinity)을 측정하였으며, 수층의 탁도를 알아보기 위하여 부유물질(Suspended Solids)을 분석하였다. 수온과 염분은 Salinometer (Tsurumi Seiki Co., Digi-Auto 3G)를 이용하여 측정하였고, 부유물질은 시수 1 L를 GF/C filter에 여과시켜 105 °C에서 2시간동안 건조시킨 후, 건조 전·후 필터지 무게의 차이를 통해 계산하였다(MOF, 2007). 물리적 환경 인자의 공간분포는 정점 위경도와 조사자료의 Interpolation기법(Surfer 11)을 이용하여 도시하였다.

#### 2) 식물플랑크톤 분석

##### 가) 클로로필 $a$ 측정

본 연구에서는 식물플랑크톤을 3개의 크기로 분류하여 분석 하였다: micro-size (>20  $\mu$ m), nano-size (2~

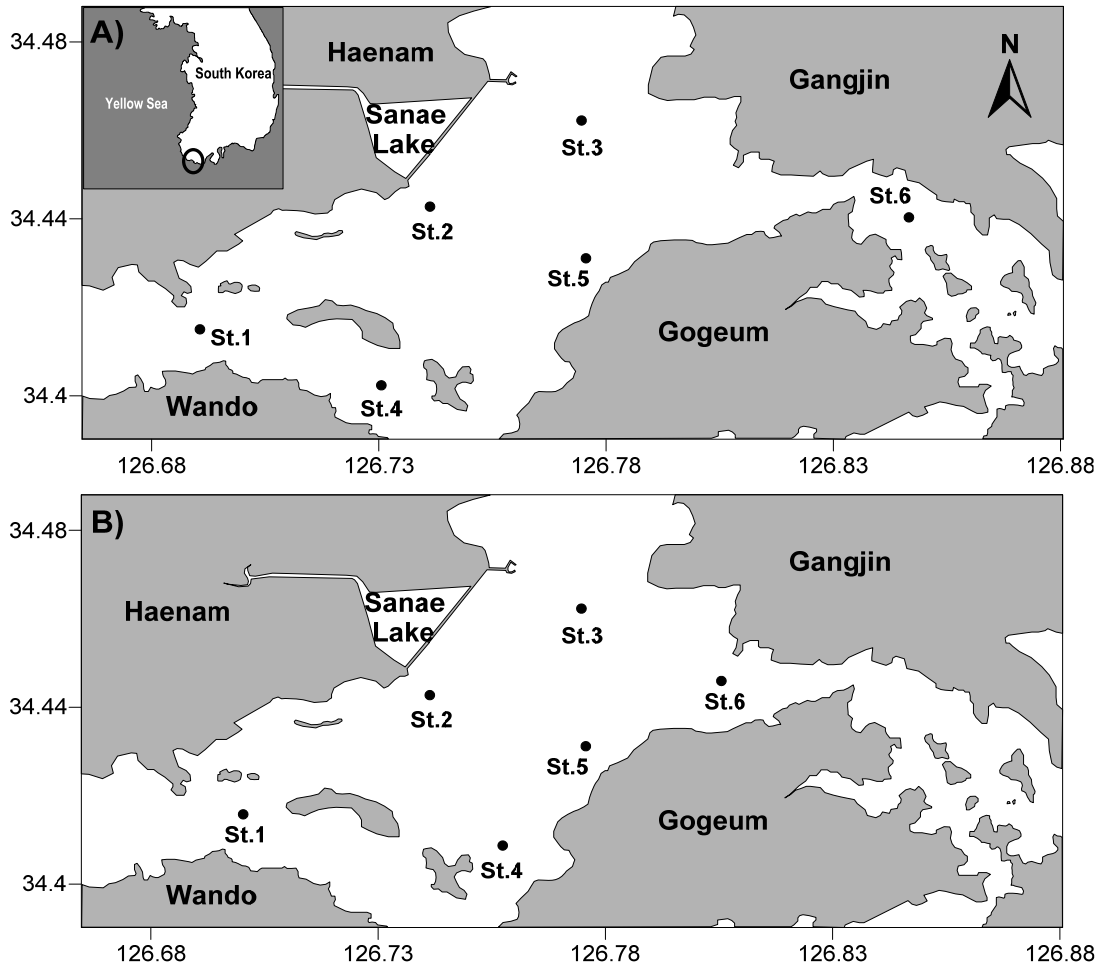


Fig. 1. Sampling stations located in Wando-doam Bay in April, June and July. Location of sampling stations differed in April-June (A) and July (B).

20  $\mu\text{m}$ ), pico-size (<2  $\mu\text{m}$ ). 전체 클로로필 *a*는 채수된 시료 200 mL를 유리섬유여과지(GF/F filter, 직경 25 mm, Whatman<sup>®</sup>, pore size 0.7  $\mu\text{m}$ )로 필터하였다. 식물플랑크톤을 크기별로 분류하기 위해 20  $\mu\text{m}$  Nytex mesh 와 2  $\mu\text{m}$  polycarbonate membrane filter (직경 47mm, Whatman<sup>®</sup>, pore size 2  $\mu\text{m}$ )를 이용하여 채수된 시료 200 mL을 여과 한 후에, 여과된 여액을 유리섬유 여과지를 통해 여과 하였다. 여과에 사용된 필터지를 클로로필 *a* 추출용액인 90% 아세톤 8 mL가 담긴 차광 시험관에 넣고 12시간이 지난 후 24시간 내로 Turner Designs<sup>®</sup> 10-AU Fluorometer를 사용하여 클로로필 *a*

를 측정하였다.

#### 나) 식물플랑크톤 동정 및 군집분석

식물플랑크톤의 계수 및 동정을 위해 Lugol's solution 을 이용한 S-R Chamber 계수법을 사용하였다. 현장에서 1 L 채수병에 시료 900 mL와 Lugol's solution (5% 고정액) 약 4 mL를 넣어 잘 흔들어 준 후 약 2일 정도 농축을 시켰다. 농축시킨 시료를 순환펌프를 이용해서 상등액을 제거하였으며, 제거 되지 않고 남은 여액 200 mL를 잘 흔들어 준 후, 50 mL용 시험관(conical tube)에 넣은 후 약 1~2일 정도 농축 시키고, 다시 45 mL를 제거하고 남은 5 mL중 1 mL를 S-R Chamber에 넣고 계수

하였다. 계수는 영상 분석 장치 시스템(colored image analyzer)을 갖춘 Axioskop 2 MAT (ZEISS®)를 이용해서 계수하였다.

군집구조의 생태지수 분석은 조사정점별로 출현한 분류군의 수를 비교하여 출현 개체수, 우점종, 종다양성지수(i.e. Shannon Weiner index), 풍부도지수(i.e. Margalef index), 균등도지수(i.e. Pielou index), 우점도지수(i.e. Simpson index)를 계산하였으며, 각 지수는 다음 식에 의해 산출하였고(Simpson, 1949; Margalef, 1958; Whittaker, 1972; Ludwig 와 Reynolds, 1988), PRIMER 5를 이용하였다.

$$\text{Shannon Weiner index : } H' = -\sum_{i=1}^s P_i \ln(P_i)$$

$$\text{Margalef index : } R = \frac{S-1}{\ln(N)}$$

$$\text{Pielou index : } J = \frac{H'}{\ln(S)}$$

$$\text{Simpson index : } D = \sum_{i=1}^s \frac{n_i(n_i-1)}{N(N-1)}$$

$P_i$ :  $i$  번째 종의 점유율

$S$ : 출현종수

$N$ : 총개체수

$n_i$ :  $i$  번째 종의 점유율

물리적 환경인자들과 식물플랑크톤 군집의 생태지수와의 상관성은 통계분석 프로그램인 SPSS 18.0을 이용하였다.

### 3. 결과

#### 3.1 물리환경 변화

조사해역의 표층수온 분포를 보면(Fig. 2), 4월에서 7월로 갈수록 높아지는 계절적 변동을 보였고 사내호 인근해역에서 방류전인 6월 16일에 비해 방류직후인 30일(1차)에 수온이 4°C 정도 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 고조시인 3차조사에서는 그 증가폭이 감소하였다가 이후 다시 다소 증가하는 경향을 보였다. 염분은 4월, 6월에 비해 사내호 담수 방류 이후에 사내호 인근 해역을 중심으로 감소하였다가 3차조사에서 다시 증가하는 경향을 보였다(Fig. 3). 이후 4차조사시에 염분이 다소 감

소하였고 5차조사시에 최상부정점인 정점 3을 중심으로 다시 24 psu까지 감소하였다. 7월 2일에는 강우가 1.5 mm 내렸고 이러한 강우의 영향을 받을 것으로 예상된다. 수층의 탁도에 영향을 주는 부유물질(SS)은 4월과 6월에 비해 방류 이후에 약 3-4배정도 증가하였고 특히 고조시(3차조사)에 높은 부유물질의 농도를 보였다(Fig. 4).

#### 3.2 식물플랑크톤 변동: 크기구조와 종조성

클로로필  $a$ 는 4월과 6월에는 낮은 농도를 보이다가 7월에는 정점5, 6을 제외하고 2배이상 증가하는 분포를 나타냈으며, 특히 정점 3에서 최대치를 보였다(Fig. 5). 7월 1일(3차조사)에는 micro-size, nano-size, pico-size가 모두 증가하였고, 2일(5차조사)에는 크기가 큰 micro-size가 주로 증가하였다. 전체 클로로필  $a$ 에 대한 크기별 기여율을 보면(Fig. 6), 4월에는 아래쪽 해역에서 위쪽으로 올라갈수록 크기가 큰 식물플랑크톤의 기여율이 증가하는 것으로 나타났다. 나머지 조사일에는 특별한 공간적 분포를 보이지 않았지만, 7월 1일에는 사내호 바로 앞에 위치한 정점2에서 다른 정점들에 비해 크기가 큰 micro-size의 기여율이 높았다. 또한 7월 2일에는 정점3에서 크기가 큰 micro-size의 증가폭이 상당히 크게 나타났다.

4월의 식물플랑크톤 종조성 분포를 보면, 총 4개 분류군(규조류, 은편모조류, 와편모조류, 유글레나류)에서 대체로 규조류가 높은 분포로 출현하고 있었다(Fig. 7). 우점종은 *Thalassiosira* sp.로 나타났으며(Table 1), *Coscinodiscus* sp.가 차우점 하였다. 정점별 현존량 분포를 보면, 정점3이 69 cells/mL로 가장 높은 현존량을 보였고, 정점2가 20 cells/mL로 가장 낮은 현존량을 나타냈다(Table 2).

6월에는 총 4개 분류군(규조류, 남조류, 은편모조류, 유글레나류)에서 4월과 같이 규조류가 높은 분포로 출현하였다(Fig. 7). *Chaetoceros* sp.가 우점하였고(Table 1), *Synedra* sp.가 차우점 하였다. 정점별로는 정점2가 29 cells/mL로 가장 높은 현존량을 나타냈으며, 정점1이 가장 낮은 현존량을 나타냈다. 4월과 6월에 유사한 분포를 보인 생체량(클로로필  $a$ ) 결과(Fig. 5)와는 달리 전체 현존량의 평균은 4월에 39 cells/mL, 6월에 18.5 cells/mL로 4월에 높은 분포를 보였다(Table 2).

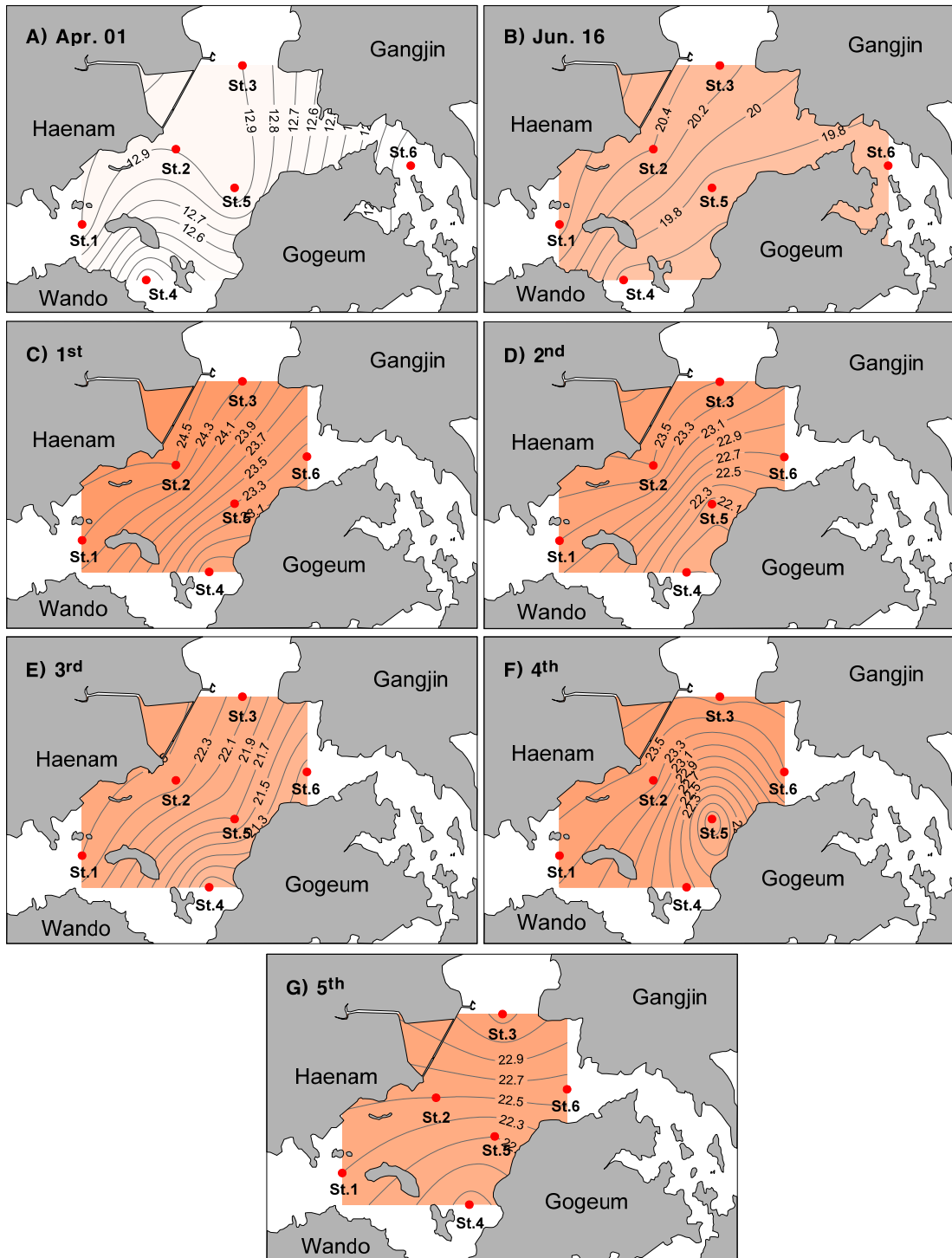


Fig. 2. Spatial distributions of surface water temperature measured during the sampling period.

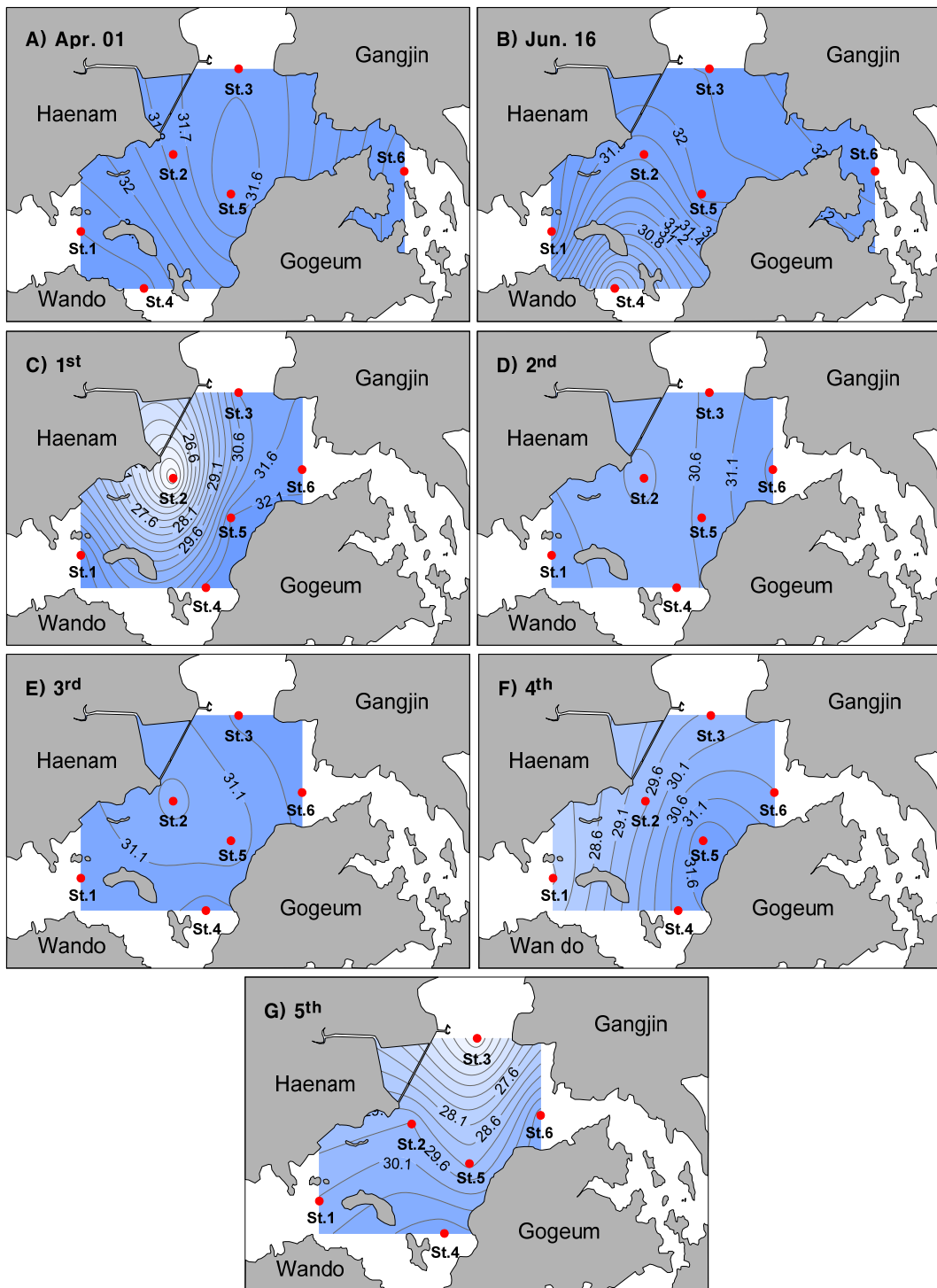


Fig. 3. Spatial distributions of surface salinity measured during the sampling period.

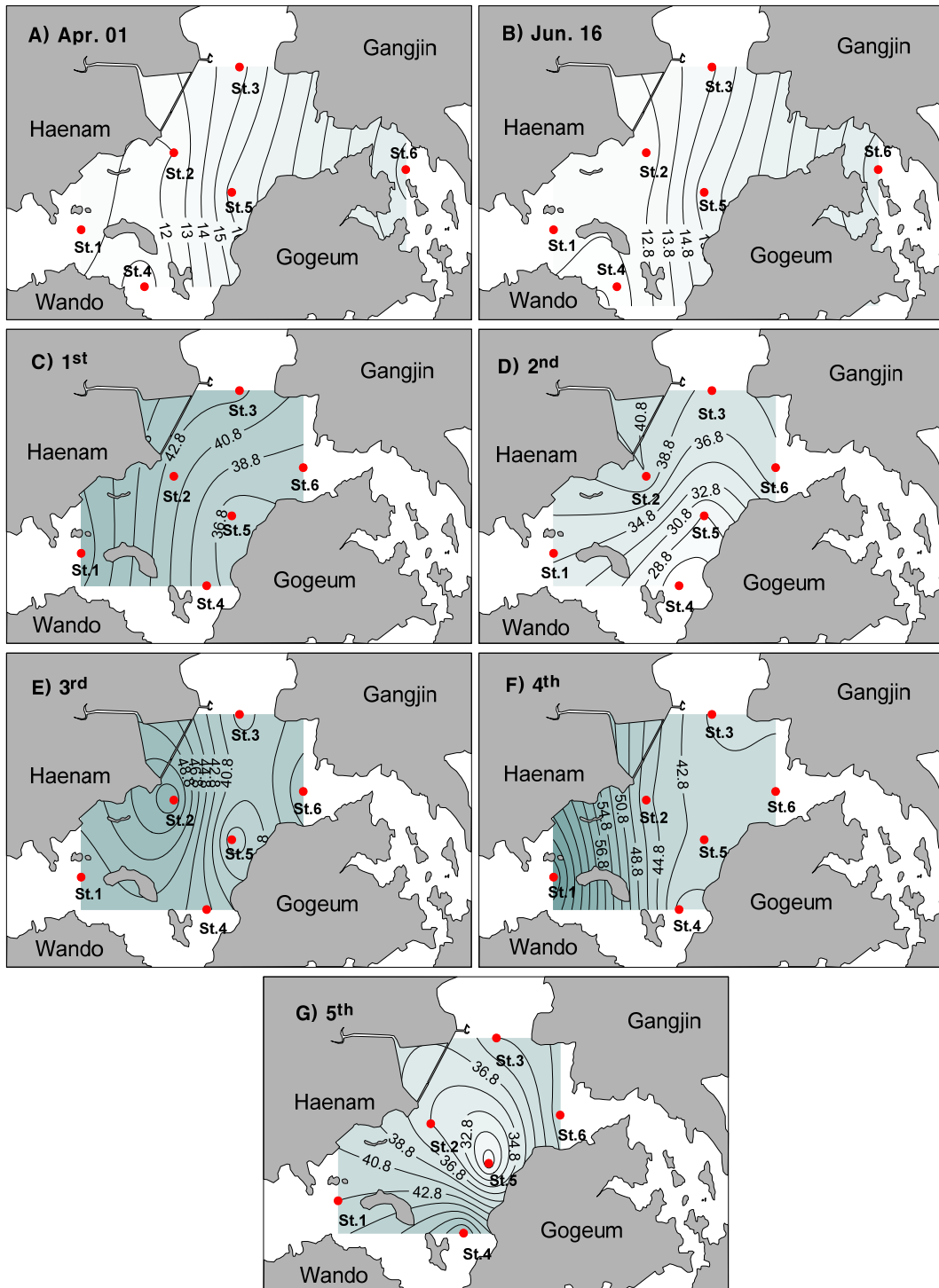


Fig. 4. Spatial distributions of suspended solids (SS) measured during the sampling period.

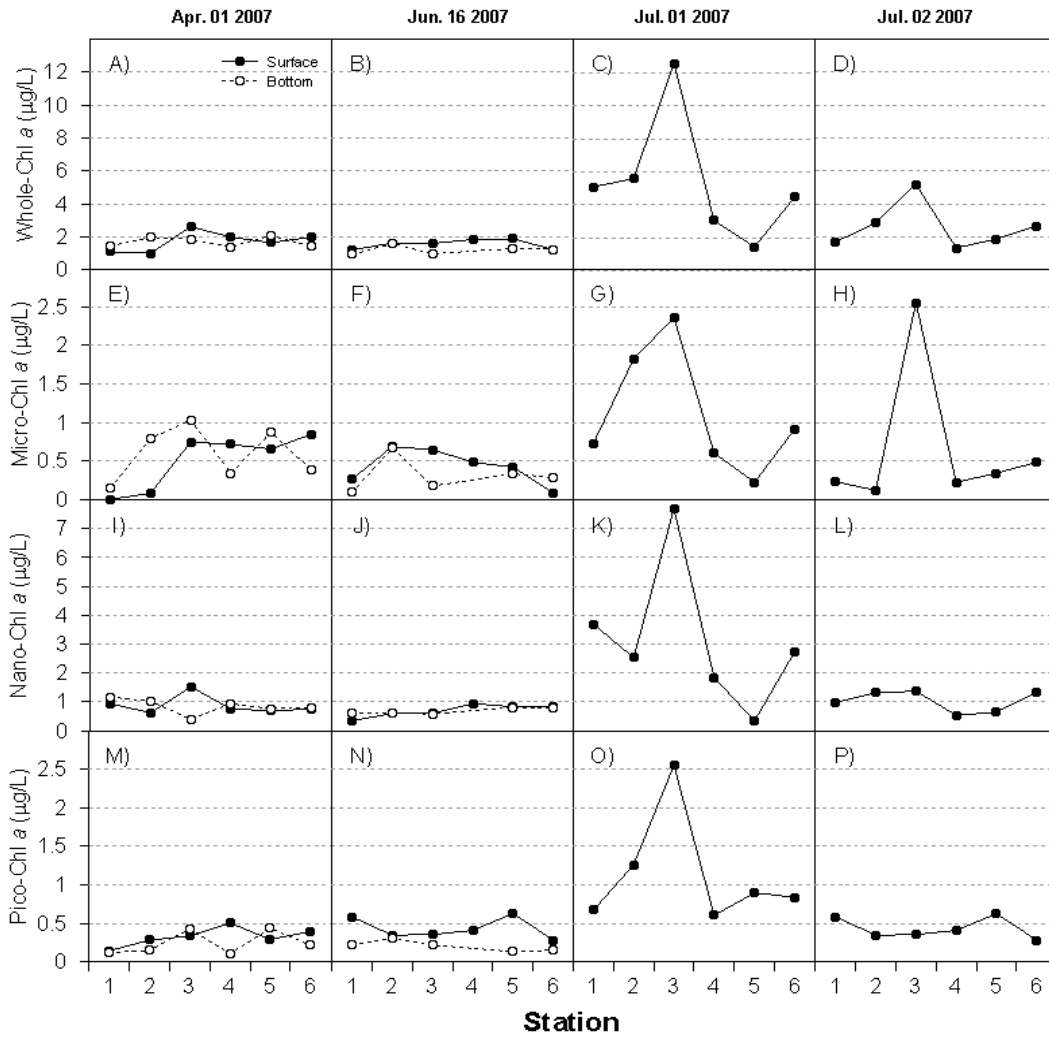


Fig. 5. Distribution of phytoplankton biomass (chlorophyll a) grouped by three size classes.

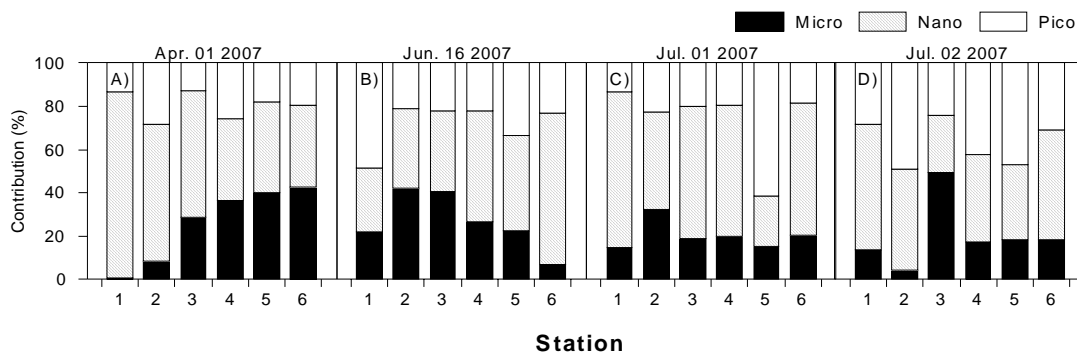


Fig. 6. Percent contribution of chlorophyll a to total chlorophyll a concentrations.



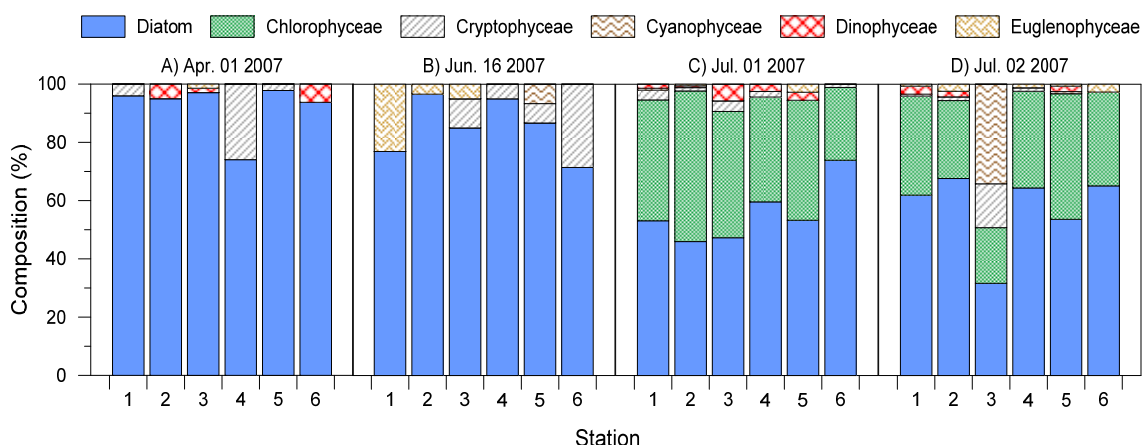


Fig. 7. Percent contribution of phytoplankton groups to total abundances.

7월 1일에는 총 6개 분류군(규조류, 녹조류, 남조류, 은편모조류, 외편모조류, 유글레나류)에서 4월, 6월에는 보이지 않았던 녹조류의 개체수가 전 정점에서 증가하여 (Fig. 7) *Monoraphidium* sp.가 차우점하는 결과를 보였다. 하지만 여전히 규조류(*Pseudo-nitzschia* sp.)가 우점종으로 출현하였다(Table 1). 정점3에서 836 cells/mL로 가장 높은 현존량을 나타냈으며 정점5가 91 cells/mL로 가장 낮은 현존량을 나타냈다. 본 조사시기의 모든 정점의 평균 현존량은 559.8 cells/mL를 나타냈다(Table 2).

7월 2일은 1차조사(1일)와 마찬가지로 6개 분류군에서 규조류인 *Pseudo-nitzschia* sp. 우점종으로 확인되었으며(Table 1), 녹조류인 *Monoraphidium* sp.가 차우점종으로 나타나 1일조사 결과와 유사하였다. 다만 정점3에서 규조류의 우점율이 감소하고 *Anabaena* sp.와 같은 남조류의 출현이 증가하는 결과를 보였다(Fig. 7). 정점별 현존량 분포에서는 정점5가 429 cells/mL로 가장

높은 현존량을 나타냈고 정점1이 147 cells/mL로 가장 낮은 현존량을 나타냈다(Table 2). 7월 1일과 2일의 우점종과 차우점종은 같은 종으로 나타났으며, 전체 현존량은 생체량(클로로필 *a*)과 동일하게 7월 1일에 가장 높게 나타났다.

3.3 생태지수, 상관성 분석

4월의 풍부도지수를 보면 정점2에서 2.67로 가장 높은 값을 나타냈고, 정점1에서 1.55로 가장 낮은 수치를 보였다(Table 2). 4월의 전체 평균 값은 2.15를 나타냈다. 6월에는 정점4에서 3.00으로 가장 높았으며 정점2에서 1.48로 가장 낮은 수치를 보였고 평균적으로는 2.34의 수치를 나타냈다. 4월의 해역 평균 균등도지수는 0.68이었고 6월에는 0.85로 다소 높게 나타났다. 담수 방류 후인 7월 1일과 2일의 풍부도지수를 보면, 전 정점의 풍부도지수 평균은 각각 0.89, 0.80의 분포를 보였고 이는 4월과 6월에 비하여 현저히 낮아진 수치임을 알 수 있다.

Table 1. Dominant species and contribution % during the sampling period

Station	April		June		July 1 <sup>st</sup>		July 2 <sup>nd</sup>	
1	<i>Thalassiosira</i> sp.	(44.0)	<i>Synedra</i> sp.	(38.5)	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	(50.8)	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	(61.9)
2	<i>Coscinodiscus</i> sp.	(30.0)	<i>Chaetoceros</i> sp.	(65.5)	<i>Monoraphidium</i> sp.	(51.7)	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	(67.6)
3	<i>Thalassiosira</i> sp.	(76.8)	<i>Chaetoceros</i> sp.	(25.0)	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	(44.0)	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	(31.7)
4	<i>Thalassiosira</i> sp.	(51.9)	<i>Synedra</i> sp.	(30.0)	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	(59.0)	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	(64.4)
5	<i>Thalassiosira</i> sp.	(44.4)	<i>Synedra</i> sp.	(46.7)	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	(44.0)	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	(53.6)
6	<i>Thalassiosira</i> sp.	(45.8)	<i>Cryptomonas</i> sp.	(28.6)	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	(71.4)	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	(60.3)

균등도 지수는 4월에 비해 6월에 높게 나타났으며 7월 1일과 2일 평균은 0.54, 0.57로 4월, 6월보다 현저하게 낮아진 경향을 보였다. 4월의 평균 다양도지수는 1.46을 나타냈고 6월에는 1.73으로 4월에 비하여 다소 증가하였다. 하지만 방류 이후인 7월 1일과 2일의 평균 다양도 지수는 각각 0.99, 0.97로 감소하였다. 이에 반해 4월과 6월의 우점도지수는 각각 0.32, 0.20으로 나타났고, 4월에 비하여 6월이 상대적으로 낮은 우점도지수를 나타냈다. 7월 1일과 2일에는 방류 전 조사기간 보다 높은 우점도지수를 나타냈다. 담수가 방류된 기점으로 전과 후를 비교하면, 담수가 방류된 이후 풍부도, 균등도, 다양도 지수는 감소하였고 우점도지수는 증가하는 경향을 보였다 (Table 2).

수온, 염분, 부유물질(SS)과 각 생태지수의 상관분석 결과, 수온과 염분은 생태지수와 특이한 상관관계를 나타내지 않았다. 하지만 부유물질(SS)은 풍부도, 균등도 그리고 다양도지수와 각각 -0.86, -0.57, -0.71로 유의한 음의 상관관계를 나타냈으며, 우점도지수는 0.60으로 유의한 양의 상관관계를 나타냈다(Table 3).

#### 4. 고찰

방조제를 통한 담수 방류는 하구역의 염분(Salinity)의 감소, 탁도(Secchi depth), 영양염(Nutrient) 증가 등 많은 환경적 변화를 일으킨다고 보고하였다(Sin 등, 2013). 하구시스템에서 가장 큰 변동을 보이는 것은 염

**Table 2.** Cell abundance (cells/mL) and ecological indices during the sampling period

Season	Station	Abundance	Richness	Evenness	Diversity	Dominance
April	1	25	1.55	0.74	1.32	0.31
	2	20	2.67	0.87	1.92	0.14
	3	69	1.89	0.43	0.94	0.60
	4	27	2.12	0.68	1.42	0.32
	5	45	2.10	0.64	1.42	0.32
	6	48	2.58	0.73	1.76	0.25
	mean	39.0	2.15	0.68	1.46	0.32
June	1	13	2.34	0.89	1.73	0.15
	2	29	1.48	0.65	1.16	0.44
	3	20	2.34	0.93	1.94	0.12
	4	20	3.00	0.88	2.02	0.13
	5	15	2.22	0.83	1.62	0.22
	6	14	2.65	0.92	1.91	0.11
	mean	18.5	2.34	0.85	1.73	0.20
July 1 <sup>st</sup>	1	748	1.06	0.51	1.05	0.42
	2	435	0.66	0.51	0.82	0.48
	3	836	0.89	0.60	1.17	0.38
	4	521	0.80	0.50	0.89	0.48
	5	91	1.32	0.66	1.28	0.35
	6	728	0.61	0.46	0.75	0.57
	mean	559.8	0.89	0.54	0.99	0.45
July 2 <sup>nd</sup>	1	147	0.80	0.52	0.83	0.50
	2	411	1.00	0.46	0.89	0.52
	3	199	0.94	0.85	1.53	0.24
	4	249	0.54	0.55	0.76	0.52
	5	429	0.66	0.52	0.84	0.47
	6	295	0.88	0.54	0.96	0.47
	mean	288.3	0.80	0.57	0.97	0.45

**Table 3.** Correlations (R) of water temperature, salinity and SS vs. ecological indices

		Temp.	Sal.	SS	Richness	Evenness	Diversity	Dominance
Temp	R	1	<b>-.449</b>	<b>.614</b>	<b>-.601</b>	-.173	-.343	.201
	P		.032	.002	.002	.430	.109	.359
	n		23	23	23	23	23	23
Sal	R		1	<b>-.422</b>	.398	.054	.139	-.084
	P			.045	.060	.807	.527	.703
	n			23	23	23	23	23
SS	R			1	<b>-.855</b>	<b>-.567</b>	<b>-.707</b>	<b>.595</b>
	P				.000	.005	.000	.003
	n				23	23	23	23
Richness	R				1	<b>.761</b>	<b>.902</b>	<b>-.802</b>
	P					.000	.000	.000
	n					24	24	24
Evenness	R					1	<b>.943</b>	<b>-.972</b>
	P						.000	.000
	n						24	24
Diversity	R						1	<b>-.969</b>
	P							.000
	n							24
Dominance	R							1
	P							
	n							

Temp: water temperature, Sal: salinity, SS: suspended solids

분의 변화이고 이는 담수의 유입량에 따라 조절되어지며 식물플랑크톤 생체량의 변동은 염분의 변화에 의하여 영향을 받는다(Fisher 등, 1988). 본 연구 결과에서도 사내호 수문개방 이후인 1차조사에서 방조제 인근해역에서 표층 염분이 23.6 psu까지 감소하고 수온 또한 24℃까지 증가하였다가 다시 회복되는 것으로 나타났다. 하지만 사내호 방류 이후 36시간이 지난 후에 정점3에서 염분이 감소하는 결과는 만의 주변에 다른 담수 유입원(만덕호, 도암천, 탐진강)에 의한 영향일 것으로 사료된다. 인위적 담수 확산은 방류 지점을 중심으로 동심원의 염분분포가 나타났으며 수문입구부와 도암만 중앙부와는 최대10 psu의 농도 차이를 나타내었으나, 담수의 확산 범위를 보

면 해역 전역에 영향을 미치는 것이 아니라 방류구를 중심으로 염분 변화를 나타내었다(Fig. 3). 본 조사는 저조 2시간 전에 약 2시간 30분 동안 사내호의 담수가 방류되어 담수가 외해로 나가기 전에 창조류에 의한 희석으로 담수의 방류 영향이 상당부분 감소 하였을 것으로 사료된다. 실제로 3차조사시에 염분이 증가하는 패턴을 보여 주고 있다. 하지만 염분과는 달리 표층 탁도(부유물질)는 방류 이후 약 3-4배정도 증가하였고, 실제로 상관분석 결과에서도 염분이 감소함에 따라 탁도가 증가하는 상관성을 보여 담수 유입과 함께 부유물질이 유입되고 있음을 시사하는 결과라 할 수 있다. 하지만 이들 환경인자들은 담수 방류의 양과 조석에 따라 그 확산범위나 분포가 달

라질 것으로 사료된다. 왜냐하면 고조와 저조와 같은 semidiurnal cycle뿐만 아니라 대조와 소조와 같은 fortnight tidal cycle에 따라 조류의 방향이나 세기가 상이하고, 수층 혼합(tidal mixing)을 통해 부유물질(탁도), 영양염 등과 같은 환경인자들과나 식물플랑크톤의 분포에 영향을 미치기 때문이다(Arndt 등, 2007; Cloern 등, 1989; Cloern, 1991).

인공담수호인 사내호의 4월과 6월의 영양염 분포를 보면, 해역에 비해 호소의 영양염의 농도가 높은 것으로 나타났다(Yang, 2009). 실제로 6월 16일의 최대 암모니아 농도는 1.59 mg/L로 도암만의 0.056 mg/L에 비해 월등히 높은 분포를 보였다. 인산염 농도 또한 0.4-0.6 mg/L로 해역 농도인 0.02-0.04 mg/L에 비하면 부영양화된 호소임을 알 수 있다. 이렇게 높은 농도의 영양염은 인위적 담수 유입과 함께 도암만으로 제공되면서 식물플랑크톤의 성장에 필요한 영양염의 중요한 공급원으로 작용하고 있을 것으로 판단된다. 그러나 이렇게 공급된 풍부한 영양염이 바로 식물플랑크톤의 증가로 이어지지 않는다. 왜냐하면 담수가 하구로 직접적으로 유입되면서 체류시간이 감소하고 탁도 증가, 염분 감소 등이 식물플랑크톤 생체량 증가에 부정적인 영향을 미치기 때문이다(Aizdaicher 과 Markina, 2010; Lehrter, 2008; Murrell 등, 2007; Sin 등, 2012). 하지만 인위적 담수 유입 후 1-2일이 지나면 체류시간, 염분, 탁도가 방류전의 상태로 복귀되면서 대증식을 일으키는 경우가 발생하기도 한다(Jeong, 2008). 본 조사결과에서도 담수 방류 후 12-36 시간 정도가 지나면서 식물플랑크톤의 증식이 발생하는 것으로 나타나 유입된 영양염이 증식에 기여했을 것으로 판단된다. 물리환경 인자 중에서 수온이나 염분은 방류 전 상태로 어느 정도 회복되었지만 탁도는 오히려 증가하였는데 이는 광량과 비교해서 영양염의 중요성을 보여주는 결과라 사료된다.

일반적으로 크기가 작은 식물플랑크톤은 영양염 농도가 낮은 해역에서 우세하고 큰 식물플랑크톤은 영양염이 풍부한 해역에서 우세한 것으로 보고되고 있다(Cermeño 등, 2006; Samuelsson 등, 2002; Sin 등, 2000). 이는 크기에 따라 표면적비가 달라지면서 영양염과 광이용 효율이 다르게 나타나기 때문이다(Hein 등, 1995). 하지만 조사결과에서는 정점 3과 6을 제외하고는 건조기인 6월보다 인위적 영양염 농도가 높았을 것으로

예상되는 담수 유입 이후인 7월에 크기가 큰 식물플랑크톤의 기여율이 오히려 감소하는 경향을 보였다. 6월에 사내호 담수의 식물플랑크톤 생체량은 45.8 µg/L로 매우 높았고, *Monoraphidium* sp.와 같이 크기가 작은 nano-size가 우점 하였다(Yang, 2009). 이렇게 담수 방류 시 유입된 작은 식물플랑크톤들이 조사해역의 식물플랑크톤 생체량 증가, 크기구조와 군집 변화에 영향을 준 것으로 사료된다. 실제로 조사해역의 군집에서도 7월 1, 2일에는 모든 정점에서 담수에서 주로 출현하는 녹조류의 기여율이 증가하였다. 하지만 7월 1일에 사내호 방류가 이루어지는 방조제 바로 앞에 위치한 정점 2에서 다른 정점에 비해 크기가 큰 세포의 기여율이 증가한 것은 담수 방류와 함께 유입된 영양염의 영향으로 사료된다. 정점 3의 경우에도 탐진강을 통한 담수 유입 기원 영양염과 크기가 큰 *Anabaena* sp.와 같은 남조류의 이송이 크기가 큰 종들의 증가에 기여했을 가능성이 있다.

종들의 생물다양성 집합체인 종 다양성은 생태계의 안정과 아주 밀접한 관계를 갖고 있다(McNaughton, 1977; Pimm, 1984; Tilman 과 Downing, 1994; Tilman, 2000). 담수의 방류 전과 후를 비교하면 담수가 방류된 이후 풍부도, 균등도, 다양도는 감소하였고 우점도는 증가하였다. 또한 부유물질(SS)과 염분 그리고 생태지수와의 상관관계에서 염분, 풍부도, 균등도, 다양도와는 유의한 음의 상관성을 보여주었고, 우점도와 유의한 양의 상관관계를 나타내었다. 이는 인위적 담수 유입에 의한 부유물질 증가가 식물플랑크톤 일부 종들에 영향을 주어 최종적으로 식물플랑크톤의 종 다양성에도 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 수문개방전인 6월에는 다양한 종들이 우점 하였지만 불과 2주 후인 7월(1일, 2일)에는 *Pseudo-nitzschia* sp.가 대부분의 조사해역에서 절대적으로 우점 하였다. 방류 이후 염분이 감소하고 탁도가 증가함으로써 광량이 감소되는 불리한 여건에서 적응할 수 있는 특정종만 우점하고, 이로 인해 종 다양성이 감소하여 건조기에 비해 낮은 생태적 안정성을 나타낸 것으로 사료된다. *Pseudo-nitzschia* 속의 일부종은 적조 생물이고(Bates, 2000), 여름철에 주로 대발생 한다고 알려져 있다(Fehling 등, 2006). 또한 담수 유입과도 연관이 있고(Lee, 2002), 낮은 염분에도 내성을 가진 것으로 보고되고 있다(Thessen 등, 2005). 본 연구결과에서는 인위적 담수 유입으로 인한 급격한 환경변화가 특

정종이 우점하는 대발생을 일으킬 수 있고 이는 곧 적조로 이어질 수 있는 가능성도 제시한다고 할 수 있다. 실제로 도암만에서 적조가 계속 발생되어 피해를 주고 있고 특히, 수온이 비교적 높은 8-9월경에 독성이 있는 *Cochlodinium polykrikoides*가 주로 발생해왔다(국립수산과학원 적조정보시스템, <http://portal.nfrdi.re.kr/redtide/>). 본 조사기간 동안에는 이 종들이 출현하지 않았고 대신 *Prorocentrum* sp.와 같은 종이 출현하였다. 따라서 적조 발생에 대한 이들 담수 방류의 직접적인 영향을 파악하기 위해서는 8월, 9월을 포함하는 조사가 필요할 것으로 사료된다.

결론적으로 좁은 만(灣)으로 이루어진 도암만에서 인공호소인 사내호의 담수 유입은 수온, 염분, 탁도와 같은 환경인자의 급격한 변화를 야기하고, 이는 식물플랑크톤의 생체량, 크기구조, 종조성에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 이러한 환경변화는 특정종이 우점하는 요인으로 작용하여 적조와 같은 유해조류들의 대증식에도 기여하고, 종 다양성을 감소시킴으로써 해양생태계의 안정성을 악화시킬 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 도암만 생태계 관리를 위해서는 영양염과 같은 화학적 환경인자 및 탐진강 등의 담수 유입 영향권인 상부해역을 포함하여 생태계 차원의 좀더 세밀한 조사가 필요하고, 이러한 조사 결과를 토대로 사내호로부터 인위적으로 유입되는 담수의 양, 방류시기 등의 조절이 필요할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2011년 호남씨그랜트사업단 연구개발(완도 신지대교 주변 연산호 군락지 정밀조사)과제와 광양만권경제자유구역청, 여수시 재원의 울촌묘도 바지락 폐사 원인규명 용역(2011-2013년)의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- Aizdaicher, N.A., Markina, Z.V., 2010, The effect of decrease in salinity on the dynamics of abundance and the cell size of *Corethron Hystrix* (Bacillariophyta) in laboratory culture, *Ocean Sci. J.*, 45, 1-5.
- Arndt, S., Vanderborght, J.P., Regnier, P., 2007, Diatom growth response to physical forcing in a macrotidal estuary: Coupling hydrodynamics, sediment transport, and biogeochemistry, *J. Geophys. Res.*, 112, C05045.
- Bates, S.S., 2000, Domoic-acid-producing diatoms: Another genus added!, *J. Phycol.*, 36, 978-983.
- Cermeño, P., Marañón, E., Pérez, V., Serret, P., Fernández, E., Castro, C.G., 2006, Phytoplankton size structure and primary production in a highly dynamic coastal ecosystem (Ria de Vigo, NW-Spain): Seasonal and short-time scale variability, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 67, 251-266.
- Cloern, J.E., 1991, Tidal stirring and phytoplankton bloom dynamics in an estuary, *J. Mar. Res.*, 49, 203-221.
- Cloern, J.E., Powell, T.M., Huzzey, L.M., 1989, Spatial and temporal variability in South San Francisco Bay (USA). II. Temporal changes in salinity, suspended sediments, and phytoplankton biomass and productivity over tidal time scales, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 28, 599-613.
- Courrat, A., Lobry, J., Nicolas, D., Laffargue, P., Amara, R., Lepage, M., Girardin, M., Le Pape, O., 2009, Anthropogenic disturbance on nursery function of estuarine areas for marine species, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 81, 179-190.
- Fehling, J., Davidson, K., Bolch, C., Tett, P., 2006, Seasonality of *Pseudo-nitzschia* spp. (Bacillariophyceae) in Western Scottish waters, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 323, 91-105.
- Fisher, T.R., Harding Jr, L.W., Stanley, D.W., Ward, L.G., 1988, Phytoplankton, nutrients, and turbidity in the Chesapeake, Delaware, and Hudson Estuaries, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 27, 61-93.
- Harper, D., 1992, Eutrophication of freshwater: principles, problems and restoration, Chapman and Hall, London, 2, 329.
- Hein, M., Foldager Pedersen, M., Sand-Jensen, K., 1995, Size-dependent nitrogen uptake in micro- and macroalgae, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 118, 247-253.
- Hong, J., Jung, R., Seo, I., Yoon, K., Choi, B., Yoo, J., 1997, How are the spatio-temporal distribution patterns of benthic macrofaunal communities affected by the construction of Shihwa dike in the

- west coast of Korea?, J. Kor. Fish. Soc., 30, 882-895.
- Hummel, H., Fortuin, A., Bogaards, R., Meijboom, A., Wolf, L., 1994, The effects of prolonged emersion and submersion by tidal manipulation on marine macrobenthos, *Hydrobiologia*, 282-283, 219-234.
- Jeong, B., 2008, An investigation of discharge effect and phytoplankton distribution in the Yeongsan Estuary, Master's Thesis, Mokpo National Maritime University, Mokpo.
- Kemp, W.M., Boynton, W., 1981, External and internal factors regulating metabolic rates of an estuarine benthic community, *Oecologia*, 51, 19-27.
- Kwon, K.-Y., Kim, J.-K., Hong, G.-E., Seong, K.-B., Lee, C.-H., Moon, C.-H., 2005, Variation of phytoplankton and nutrients in the Namdaechon Estuary, Korea, J. Kor. Fish. Soc., 38, 55-64.
- Lee, Y.S., 2002, An influence of inflowing freshwater on the diatom blooms in the Eastern Coast of Dolsan, Yosu, Korea, J. Kor. Soc. Environ. Eng., 24, 477-488.
- Lehrter, J.C., 2008, Regulation of eutrophication susceptibility in oligohaline regions of a Northern Gulf of Mexico Estuary, Mobile Bay, Alabama, *Mar. Pollut. Bull.*, 56, 1446-1460.
- Ludwing, J.A., Reynolds, J.F., 1988, *Statistical ecology : A primer on methods and computing*, John Wiley & Sons, New York.
- Malone, T.C., Chervin, M.B., 1979, The production and fate of phytoplankton size fractions in the plume of the Hudson River, New York Bight, *Limnol. Oceanogr.*, 24, 683-696.
- Margalef, R., 1958, Information theory in ecology, *Gen. Syst.*, 3, 36-71.
- McNaughton, S.J., 1977, Diversity and stability of ecological communities: A comment on the role of empiricism in ecology, *Am. Nat.*, 111, 515-525.
- MOF, 2007, *Marine Standard Method*, Ministry of Oceans and Fisheries, In Korean.
- Murrell, M.C., Hagy, J.D., III, Lores, E.M., Greene, R.M., 2007, Phytoplankton production and nutrient distributions in a sub-tropical estuary: Importance of freshwater flow, *Estuaries Coast.*, 30, 390-402.
- Parsons, T.R., LeBrasseur, R.J., 1970, The availability of food to different trophic levels in the marine food chain, *Limnol. Oceanogr.*, 21, 325-343.
- Pimm, S.L., 1984, The complexity and stability of ecosystems, *Nature*, 307, 321-326.
- Ponti, M., Casselli, C., Abbiati, M., 2011, Anthropogenic disturbance and spatial heterogeneity of macrobenthic invertebrate assemblages in coastal lagoons: The study case of Pialassa Baiona (Northern Adriatic Sea), *Helgol. Mar. Res.*, 65, 25-42.
- Ryther, W.S., 1969, Photosynthesis and fish production in the sea, *Science*, 166, 72-76.
- Samuelsson, K., Berglund, J., Haecky, P., Andersson, A., 2002, Structural changes in an aquatic microbial food web caused by inorganic nutrient addition, *Aquat. Microb. Ecol.*, 29, 29-38.
- Shin, J.-K., 2003, Seasonal dynamics of aquatic environment and phytoplankton in Pyeongtaek Reservoir, Korea, *Algae*, 18, 145-156.
- Simpson, E.H., 1949, Measurement of diversity, *Nature*, 163, 688.
- Sin, Y., Hyun, B., Bach, Q., Yang, S., Park, C., 2012, Phytoplankton size and taxonomic composition in a temperate estuary influenced by monsoon, *Estuaries Coast.*, 35, 839-852.
- Sin, Y., Hyun, B., Jeong, B., Soh, H., 2013, Impacts of eutrophic freshwater inputs on water quality and phytoplankton size structure in a temperate estuary altered by a sea dike, *Mar. Environ. Res.*, 85, 54-63.
- Sin, Y., Wetzel, R.L., Anderson, I.C., 2000, Seasonal variations of size-fractionated phytoplankton along the salinity gradient in the York River estuary, Virginia (USA), *J. Plankton Res.*, 22, 1945-1960.
- Sundback, K., Jonsson, B., Nilsson, P., Lindstrom, I., 1990, Impact of accumulating drifting macroalgae on a shallow-water sediment system: an experimental study, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 58, 261-274.
- Thessen, A.E., Dortch, Q., Parsons, M.L., Morrison, W., 2005, Effect of salinity on *Pseudo-Nitzschia* species (Bacillariophyceae) growth and distribution, *J. Phycol.*, 41, 21-29.
- Tilman, D., 2000, Causes, consequences and ethics of biodiversity, *Nature*, 405, 208-211.
- Tilman, D., Downing, J.A., 1994, Biodiversity and stability in grasslands, *Nature*, 367, 363-365.
- Walsh, J.J., 1976, Herbivory as a factor in patterns of nutrient utilization in the sea, *Limnol. Oceanogr.*, 21, 1-13.

- Whittaker, R.H., 1972, Evolution and measurement of species diversity, *Taxon*, 21, 213-251.
- Yang, E., 2009, An effect of freshwater discharge on the phytoplankton size-structure and dynamics in coastal area, Master's Thesis, Mokpo National Maritime University, Mokpo.
- Yang, S.R., Song, H.S., Moon, C.H., Kwon, K.Y., Yang, H.S., 2001, Changes in marine environment and primary production due to freshwater input in the Nakdong Estuary, *Algae*, 16, 165-177.