

## 해수유통 중인 간척담수호 화성호에서 식물플랑크톤의 군집과 적응전략에 대한 수문학적 영향

송태윤 · 유만호 · 이인호<sup>1</sup> · 강의태<sup>1</sup> · 김미옥<sup>1</sup> · 최중기\*

인하대학교 해양학과, <sup>1</sup>한국농어촌공사

**The Effect of Hydrology on Phytoplankton Assemblages and Its Adaptive Strategies in Lake Hwaseong, Estuarine Reservoir with Seawater Exchange, Korea. Song, Tae Yoon, Man Ho Yoo, In Ho Lee<sup>1</sup>, Eue-tae Kang<sup>1</sup>, Mi Ok Kim<sup>1</sup> and Joong Ki Choi\*(Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea, <sup>1</sup>Korea Rural Community Corporation)**

**Abstract** A survey was carried out to understand the influence of hydrology on the composition, abundance and adaptive strategies of phytoplankton in artificial Lake Hwaseong, an estuarine reservoir with seawater exchange through a sluice. Samples were collected seven times from May to October 2012. Hydrological events (seawater exchange, rainfall) resulted in a wide variation in salinity along with nutrients and turbidity. Shifts in the dominant phytoplankton composition occurred on every survey. Chlorophyll-*a* ranged from 9.7 to 104.1  $\mu\text{g L}^{-1}$ . Multivariate analysis allowed us to identify the four phases on phytoplankton community change. Phase I (May ~ June) was characterized by small-sized *Gymnodinium* sp. and *Heterosigma akashiwo* dominated in warm temperature and high salinity derived from seawater exchange, and followed by *Cylindrotheca closterium* blooms due to rainfall and winds during phase II (July and September). During phase III (August), the dominance of *Oscillatoria* spp. was correlated with high temperature and low salinity. Abundant cryptomonads were associated with lower temperature during phase IV (October). Adaptive strategies were identified in the phytoplankton as morphological and physiological characteristics. These strategies identified small-sized flagellates as CR-strategists, fast-growing opportunistic species, which might favor the weak stratification of lake due to the seawater exchange during phase I and IV. Dominant species during phase II and III were characterized with R-strategists, medium-sized stress-tolerant species, which might favor turbulence by river flow. The results indicate that stronger stratification following the termination of seawater exchange for the freshening might intensify the predominance of smaller flagellates. In conclusion, this study suggests that hydrology may drive phytoplankton community change and blooms through the controls of salinity, turbulence and nutrients.

**Key words:** Hwaseong Lake, estuarine reservoir, phytoplankton, hydrology, adaptive strategy, canonical correspondence analysis

Manuscript received 21 January 2014, revised 3 March 2014,  
revision accepted 22 April 2014

\* Corresponding author: Tel: +82-32-860-7704, Fax: +82-32-860-5236,  
E-mail: jkchoi@inha.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. 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, provide the original work is properly cited.

## 서 론

간척담수호는 담수호 조성을 목적으로 하구역을 방조제와 수문으로 막은 간척호로서, 자연적인 물질순환체계의 변형과 체류시간의 증가로 인해 부영양화에 취약하다(Seo, 1997; Shin and Jun, 2002; Hwang *et al.*, 2003; Choi *et al.*, 2013). 부영양화 과정에서 식물플랑크톤은 물질대사에 중심적인 역할을 하기 때문에 식물플랑크톤의 시간적 동태를 이해하는 것은 부영양화 메커니즘을 밝히는 데 필수적이다. 일반적으로 간척담수호는 물막이 공사 이후 하천으로부터 담수를 공급받고 호내 염수를 배출하는 제염과정을 거쳐 담수호가 완성되지만, 수질관리가 어려운 경우에는 상당기간 수문을 통한 해수유통으로 호수의 물과 해수를 교환하게 된다. 이 때 주기적인 수문학적 이벤트(계절주기를 갖는 홍수, 조석주기에 맞추어 운용되는 해수유통)는 간척담수호에서 직접적인 생물 유입, 유출뿐만 아니라 염분, 성층강도, 체류시간, 영양염류 공급, 빛 가용성에 큰 변동을 일으킨다. 결국 이러한 서식환경의 시간적 이질성(heterogeneity)은 식물플랑크톤 종조성과 생물량에 상당한 시간적 변동성을 초래하기 때문에(Bonilla *et al.*, 2005; Tolotti *et al.*, 2009; Stević *et al.*, 2013) 간척담수호의 식물플랑크톤 동태에 대한 이해는 어려운 문제가 되고 있다.

최근 여러 연구에서 계통분류학적으로 복잡한 식물플랑크톤의 천이패턴을 탐지하는데 있어서 Reynolds(1991)가 제안한 C-S-R적응전략모델이 유용하게 적용되어 왔다(Anneville *et al.*, 2002; Bonilla *et al.*, 2005; Alves-de-Souza *et al.*, 2008). 이 모델은 식물플랑크톤의 형태-기능적 접근법으로써, 형태적, 생리적 특성이 유사한 식물플랑크톤 기능그룹(functional group)은 유사한 환경조건을 반영하며, 각기 C-S-R 적응전략을 선택한다는 것이다(Alves-de-Souza *et al.*, 2008). 이러한 Reynolds의 세 가지 적응전략(C-S-R)에 의하면, C-전략종(colonist-invasives)은 세포크기가 작고, 표면적/부피 비(S/V ratio)가 크며, 성장이 빠른 종이다. 이 종은 포식에 민감하고, 빛 가용성이 높으며 영양염이 풍부한 성층환경에서 우점한다. R-전략종(ruderals)은 모양이 길지만 S/V 비가 커서 수괴혼합 환경에서도 빛 획득에 유리하며 영양염이 풍부한 환경에 우점한다. S-전략종(stress-tolerants)은 S/V 비가 낮고 세포 크기가 큰 종으로써, 성장이 느리다. 이 종들은 빈영양과 빛 조건이 좋은 환경에서 주로 우점하며, 영양분을 얻기 위하여 수직이동하거나 혼합영양(mixotrophy)을 할 수 있다. 온대 여러 호수에서 각각의 호수가 다른 성층순환과 영양염 수지특성을 갖거나, 혹

은 홍수와 같은 외부 요인의 간섭으로 그 순환이 변할 경우 식물플랑크톤의 반응은 달라진다(Smayda and Reynolds, 2001). 따라서 만일 간척담수호가 부영양화되었다면 S-전략종보다는 C- 또는 R-전략종이 우점할 것이며 여기에 성층의 물리적 교란 정도에 따라 C-와 R-전략종의 발달은 민감하게 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다.

화성호(구 화옹호)는 경기도 화성시 남양천 갯벌에 조성된 간척담수호로, 1991년 착공하여 2002년 물막이 공사가 완료되었다. 그러나 이내 호 수질이 악화됨에 따라 배수갑문을 통해 주기적인 해수유통을 현재까지 실시하고 있다(Hwang *et al.*, 2003; KRC, 2011). 화성호에 대한 연구는 대부분 물막이 공사 직후인 형성초기 단계에 이루어졌다. 형성초기(2002년 6~10월) 화성호 염분은 21.8 psu 이상으로, 물막이 이전의 해수특성이 강하게 남아 있었다(Hwang *et al.*, 2003). 하지만 이후 4년이 경과하는 동안 염분은 0.3~32.3 psu의 큰 변동폭과 함께 전반적으로 수직적 염분차가 강화되었다(Shin *et al.*, 2006). 우기에는 저염수가 상류에서 하류로 확장되면서 하천 토사에 의해 탁수층을 형성하며 상류부는 염분경사에 의한 혼합이 이루어졌다(Shin *et al.*, 2006). 해수유통 효과는 시화호의 경우 염분의 수직적 차이를 감소시켜 성층이 약화되고, 물 교환에 따른 수체의 유동성이 나타난다고 보고하였다(Choi *et al.*, 2000; Shin *et al.*, 2006). 따라서 화성호의 환경특성은 형성초기와 달리 하천수 유입과 해수유통에 따라 물리적 교란이 크게 증가하였기 때문에 식물플랑크톤 군집특성은 해산 규조류가 우점했던 초기상태(Chung *et al.*, 2004)와는 상당한 차이를 보일 것으로 예상되었다.

본 연구는 화성호에서 수문학적 변동에 따른 환경요인이 식물플랑크톤 군집의 시간적 동태에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 이를 위해 환경인자, 식물플랑크톤 종조성 및 생물량의 시간적 변동성을 살펴보고, 다변량 통계분석을 통한 식물플랑크톤 천이와 환경인자간의 관계, Reynolds의 C-S-R 모델을 이용한 우점종 서식특성과 적응전략을 파악하였다. 본 연구는 간척담수호의 담수화에 따른 생태학적 영향에 대한 기초자료로 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

## 방 법

### 1. 조사지 개황

화성호는 지리적으로는 126° 40'E ~ 127° 00'E, 37°

15°N, 행정적으로는 경기도 화성시에 위치하고 있다. 유역은 235.8 km<sup>2</sup>로 시화호 유역의 1/2이며 해안에서 유역경계까지의 거리가 짧아 유량이 풍부한 하천은 없으며, 수리상 빈약한 남양천, 자안천, 어은천 등 3개의 준용하천과 농경배수로 또는 실개천에 의해 화성호로 유입된다. 이 가운데 자안천은 상대적으로 긴 유로연장(약 13 km)과 넓은 유역면적(약 53 km<sup>2</sup>)을 가지며, 환경기초시설이 없어 농경배수, 공장폐수, 축산폐수가 가장 많이 유입되는 곳이다(KRC, 2011). 호수 면적은 14.5 km<sup>2</sup>이고, 방조제 길이는 9.8 km이며 총저수량은 약 54 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>으로서 시화호의 1/6 규모이다. 화성호 중심 수로 수심은 약 4~10 m이고 어은천 말단부 부근은 수심 2 m 이하로 공사 이전에는 갯벌이 넓게 발달하였던 지역이다.

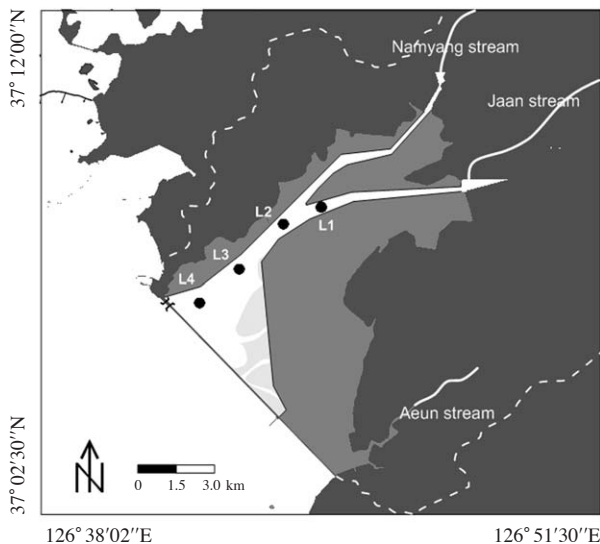
**2. 현장조사와 환경인자**

현장조사는 강우 사정을 고려하여 2012년 5월부터 10월까지 총 7회에 걸쳐 매월(9월에는 2회) 수행하였다. 조사지점은 유입하천의 특성과 육상부 오염원 분포를 고려하여 화성호 4개 지점을 조사하였다(Fig. 1). 강수량과 풍향·풍속 자료는 조사지역과 가장 가까운 수원기상대의 측정자료를 이용하였고 풍향·풍속 자료로 바람의 벡터성분(U, V)을 구하였다. 배수갑문을 통한 유·출입량에 대한 수문자료는 한국농어촌공사로부터 제공받았다. 수온, 염분은 보정된 측정장비(Hydrolab Quanta)를

이용하여 현장에서 직접 측정하였으며 투명도는 Secchi 원판(직경 0.25 m)으로 측정하였다. 수질분석을 위한 시료는 Van Dorn 채수기로 표층 채수하였으며, 실험실로 운반된 시료는 GF/F 여과지에 여과한 후 여과액은 용존 무기영양염, 그리고 원수는 입자성 영양염과 클로로필-*a* 분석에 이용하였다. 모든 시료는 냉동보관(-20°C 이하)하였으며 분석은 일주일 이내에 완료하였다. 수질항목은 수질오염공정시험기준(KME, 2008) 및 Standard Methods(APHA, 1995)에 따라 분석하였다. 부유물질농도(SPM)은 GF/C 거름종이법으로 측정하였고, 총질소와 총인온 자동수질분석기를 이용한 연속흐름법으로 분석하였다. 클로로필-*a* 농도는 Lorenzen(1967)에 따라 멤브레인(membrane) 여과지(0.45 µm, Millipore)로 여과한 후 90% 아세톤을 사용하여 색소를 추출하고 흡광광도계로 측정하였다.

**3. 식물플랑크톤 군집**

식물플랑크톤 정량시료는 표층수 1 L에 Lugol 용액으로 고정된 후 실험실로 운반하였다. 고정된 시료는 메스 실린더에 옮겨져 3일 이상 침강시킨 뒤 상등액을 제거하여 50 mL로 농축하였다. 농축 시료는 광학현미경(Olympus BX 51)으로 40~1000배율에서 종조성을 파악하는데 사용하였고, 시료 1 mL를 Sedgwick-Rafter chamber에 고르게 주입한 후 200배율에서 검경과 동시에 세포수를 계수하였다. 계수된 자료는 단위부피 mL당 세포수인 현존량으로 환산하여 사용하였으며 총 현존량의 10% 이상을 차지하는 종을 우점종으로 분류하였다. 식물플랑크톤의 동정은 Hirose *et al.* (1977), Fukuyo *et al.* (1990), Tomas (1997)를 참고하였다. 세포부피와 표면적은 동일종 10~30개체에 대한 세포크기를 잴 후 기하학적 모양에 근거하여 계산하였다(Hillebrand *et al.*, 1999). 제1우점종(총 현존량의 35% 이상)에 대하여 Reynolds(1991)가 개발한 세가지 적응전략모델(invasives: C-전략종, ruderals: R-전략종, stress tolerants: S-전략종)을 적용하였다. 주요 우점종의 적응전략은 형태학적 변수(세포체적, MLD: Maximal Linear Dimension, S/V: Surface area: Volume ratio)에 근거하여 판별하였다. C-전략종은 작은 세포체적(< 5 × 10<sup>3</sup> µm<sup>3</sup>), 높은 S/V 비(> 0.3 µm<sup>-1</sup>), 작은 MLD(< 80 µm)의 특징을 갖는다. S-전략종은 큰 세포, 군체, 또는 사상체(> 10<sup>4</sup> µm<sup>3</sup>), 낮은 S/V 비(< 0.3 µm<sup>-1</sup>), 큰 MLD(< 500 µm)의 특징을 갖는다. R-전략종은 중간 크기(500~10<sup>5</sup> µm<sup>3</sup>), 높은 S/V 비(> 0.3 µm<sup>-1</sup>), 중간 크기의 MLD(10~300 µm)의 특징을 갖는다(Reynolds, 1991).



**Fig. 1.** Map of the Hwaseong Lake, showing sampling stations. Light gray color indicates area having low depth as tidal flat before construction of Lake.

#### 4. 통계분석

일원 분산분석 (one-way ANOVA)을 통해 정점간 그리고 조사시기에 따라 환경변수들의 분포가 유의한 차이를 보이는지를 검정하였다. 분석 전에 자료는 정규성과 등분산성에 대해 검정하였고 필요한 경우 로그변환하였다. 처리 평균간 비교는 LSD (Least Significant Differences) 검정 방법을 이용하였다. 생물 및 무생물 변수들간의 상호관계는 스피어맨 순위상관분석 (Spearman rank correlation analysis)를 통해 수행하였으며 통계적 유의수준은  $p < 0.05$ 를 기준으로 하였다 (SPSS 10.0). 수온, 염분자료를 바탕으로 시기별 물리적 환경특성을 파악하기 위하여 PRIMER version 5를 이용하여 Bray-Curtis 유이도를 산출하고 다차원척도 (multidimensional scaling: MDS) 분석을 수행하였다. 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). CCA는 생물과 환경인자 행렬로부터 합성된 구배 (gradient)를 추출하고, biplot에 화살표로 정량적인 값을 표시한다. 화살표의 길이는 설명변수 (explanatory variable)의 중요도를, 화살표의 방향은 상관관계를 의미한다. CCA에 이용된 생물변수는 식물플랑크톤 총 현존량의 0.1% 이상인 종 (species)만을 이용하였고, 생물 및 환경자료는 분석 전에 로그 변환하였다. 전진선택법 (forward selection)으로 변수를 선택하였고, 종 분포와 환경인자간 상관관계의 유의성 검정을 위하여 Monte Carlo test (499 permutation;  $p < 0.05$ )를 수행하였다.

## 결 과

### 1. 환경인자의 시간적 변동

조사기간 중 강수량 변동은 우리나라 여름철 우기 패턴을 뚜렷하게 보였다 (Fig. 2). 이 시기의 일 강수량의 범위는 0~277 mm의 범위로 최대치는 장마시기인 7월 상순에 기록되었다. 장마 전인 5~6월 동안 총 강수량은 117 mm로 전년도(466 mm)에 비해 매우 적었다. 장마(6월 하순~7월 중순) 중에는 총 강수량이 667 mm를 나타냈고, 이어 여름철 고온이 8월 중순까지 지속되었다. 이후 8월 중순부터 9월 중순까지는 태풍과 함께 총 강수량 664 mm가 내렸다. 조사기간 중 화성호 배수갑문을 통한 총 유입량과 유출량은 각각  $30 \times 10^6 \text{ m}^3$ 과  $47$

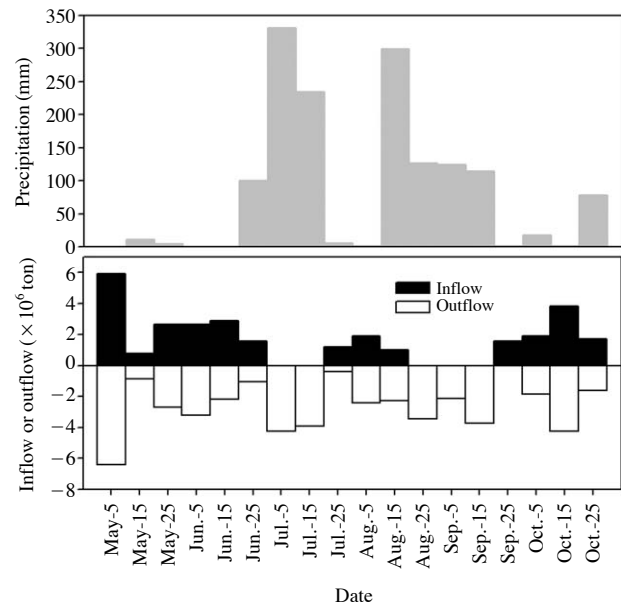
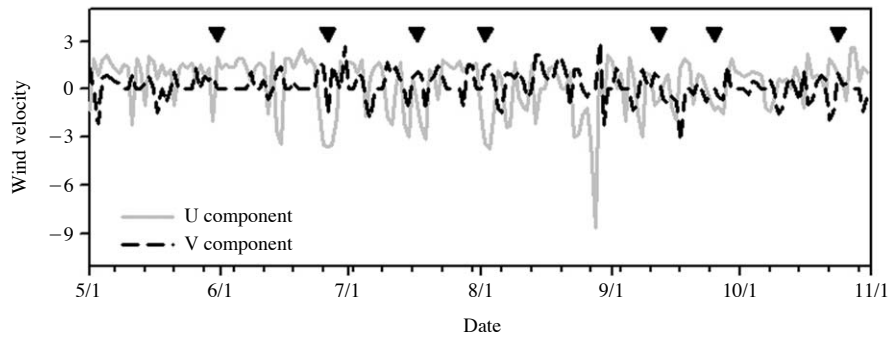


Fig. 2. Precipitation and volumes of Inflow and outflow through the opening gate at the 10-day intervals from May to October 2012.

$\times 10^6 \text{ m}^3$ 으로, 각각 총저수량의 56%와 87%를 차지하는 양이다. 5월 상순에는 화성호 내·외측 수역간 교환이 활발하였으며 장마철에는 유입없이 유출만 이루어졌다. 그밖의 시기에는 5월에 비해 양은 적었지만 유입과 유출이 거의 반복적으로 일어났다 (Fig. 2). 5~10월 사이에 풍속  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  이상의 발생일수는 총 15일이었으며, 이 중 조사일로부터 5일 이내에 발생한 경우는 6월, 7월, 9월 (1차) 조사에 해당하였다. 또한 풍속의 특징은 전반적으로 남북방향 풍속 (V성분)보다 동서방향 풍속 (U성분)이 더 크고, 동서방향 중에서도 동풍(음수 방향)이 더 컸다 (Fig. 3).

조사기간 동안 이화학적 변수의 정점간 차이는 통계적으로 유의하지 않았으나, 계절적으로는 뚜렷한 차이가 있었다 ( $p < 0.01$ ; Table 1). 수온은 장마철을 지나면서 크게 증가하여 8월에 평균  $32.7^\circ\text{C} (\pm 0.7)$ 로 가장 높았고 이후 감소하여 10월에 평균  $14.8^\circ\text{C} (\pm 0.7)$ 로 가장 낮았다. 염분은 6월 ( $29.5 \pm 0.9 \text{ psu}$ )에 가장 높았고 이후 급격히 낮아져 7~9월 (1차)동안 약 3 psu 정도를 유지하다가 10월에 다소 증가하였다. 총질소, 총인 모두 강우량이 가장 많았던 7월에 최대로써 다른 시기와 유의한 차이를 보였다. 부유물질은 집중호우 시기 (7월, 9월 1차)에 피크를 보였고, 이 시기에 투명도는 가장 낮았다 ( $p < 0.01$ ).



**Fig. 3.** Mean wind force ( $m \cdot s^{-1}$ ) values in the region of Hwaseong Lake, in the period from May to October 2012. Triangles indicate dates of survey and the largest negative peak indicates wind driven due to typhoon Bolaven in last August.

**Table 1.** Physical and chemical parameters in Lake Hwaseong from May to October, 2012.

	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep. 1st	Sep. 2nd	Oct.
Inner WT ( $^{\circ}C$ )	$21.4 \pm 0.2$	$23.6 \pm 1.3$	$24.4 \pm 0.6$	$32.7 \pm 0.7$	$24.4 \pm 0.5$	$23.5 \pm 0.5$	$14.8 \pm 0.7$
Sal (psu)	$26.4 \pm 0.6$	$29.1 \pm 0.8$	$3.8 \pm 3.2$	$2.9 \pm 0.6$	$3.1 \pm 0.3$	$3.1 \pm 0.7$	$16.7 \pm 4.7$
TN ( $mg L^{-1}$ )	$0.661 \pm 0.078$	$0.612 \pm 0.103$	$2.448 \pm 0.125$	$1.195 \pm 0.113$	$1.347 \pm 0.243$	$1.303 \pm 0.25$	$1.306 \pm 0.66$
TP ( $mg L^{-1}$ )	$0.072 \pm 0.007$	$0.09 \pm 0.009$	$0.185 \pm 0.013$	$0.076 \pm 0.015$	$0.097 \pm 0.02$	$0.096 \pm 0.025$	$0.137 \pm 0.045$
SPM ( $mg L^{-1}$ )	$13.2 \pm 4.6$	$16.2 \pm 4.6$	$23.8 \pm 4.4$	$10.3 \pm 2.1$	$16.6 \pm 2$	$10.4 \pm 1$	$12.3 \pm 7.6$
Trans ( $m^{-1}$ )	$0.5 \pm 0.1$	$0.6 \pm 0$	$0.3 \pm 0$	$0.7 \pm 0.06$	$0.4 \pm 0.05$	$0.6 \pm 0.05$	$0.6 \pm 0.21$
Chla ( $\mu g L^{-1}$ )	$18.0 \pm 7.2$	$9.7 \pm 1.3$	$26.0 \pm 24.5$	$30.7 \pm 8.2$	$104.1 \pm 17.6$	$61.5 \pm 13.5$	$18.2 \pm 7.1$
Abun (cells $mL^{-1}$ )	$2165 \pm 1219$	$783 \pm 606$	$3110 \pm 2639$	$10896 \pm 3375$	$27877 \pm 10864$	$13911 \pm 4031$	$1181 \pm 308$

WT, water temperature; Sal, Salinity; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus; SPM, suspended particulate matter; Trans, transparency; Chla, chlorophyll a; Abun, phytoplankton abundance

## 2. 식물플랑크톤 종조성과 생물량의 시간적 변동

정량조사에서 관찰된 식물플랑크톤은 해산종, 기수종, 담수종으로 총 59종이 출현하였다. 이 중 외편모조류가 20종(총 출현종의 34%)으로 가장 많았고 그 다음으로 녹조류 12종, 규조류 10종, 남조류 9종, 은편모조류 4종, 유글레나류 3종, 침편모조류 1종 순으로 많았다. 조사시기에 따른 출현종수는 10월에 8종으로 가장 적었고 녹조류와 남조류의 출현이 크게 증가한 9월(1차)에 30종으로 가장 많았다. 조사시기별 평균 식물플랑크톤 현존량과 클로로필-*a* 농도는 각각  $783 \sim 27,877 \text{ cells mL}^{-1}$ 와  $9.7 \sim 104.1 \mu g L^{-1}$ 의 범위로 분포하였고 두 변수 모두 6월에 최소, 9월(1차)에 최대를 나타냈다.

제1우점종은 시기별로 강(Class) 수준에서 다르고 35~93%의 높은 우점율을 보였다. 5월에는 해산 외편모조류 *Gymnodinium* sp.1 (MLD:  $< 13 \mu m$ )이 현존량의 93%를 차지하였고 6월에는 침편모조류로 광염성의 연안종인 *Heterosigma akashiwo* (MLD:  $14 \mu m$ )가 58%를 차지하였다. 7월과 9월(1차) 두 차례에 걸쳐 일시부유성(tychopelagic) 저서 규조류인 *Cylindrotheca closterium* (MLD:  $85 \mu m$ )이 각각 35%, 58%로 우점하였다. 남조류

*Oscillatoria* spp. (MLD:  $313 \mu m$ )은 7월부터 9월까지 지속적으로 출현하였으며, 특히 고수온기인 8월에 가장 높은 현존량과 함께 51% 우점율을 나타냈다. 9월(2차)에는 은편모조류 *Rhinomonas* sp.가 42%, 10월에는 unidentifed (unid.) cryptomonad (MLD:  $< 12 \mu m$ )가 59%로 우점하였다.

우점종의 세포 크기 (MLD)는  $12 \sim 313 \mu m$ , S/V 비는  $0.43 \sim 2.67 \mu m^{-1}$ , 세포 부피는  $93 \sim 6,136 \mu m^3$ 의 범위를 보였다. 이러한 형태적 특성에 근거하여 우점종을 C-S-R 전략으로 분류하면, S-종이나 C-종은 없었고, R-종으로는 *Cylindrotheca closterium*과 *Oscillatoria* spp.이 있었으며, CR-종으로는 *Gymnodinium* sp.1, *Heterosigma akashiwo*, unid. cryptomonad가 있었다(Fig. 4). CR-종에 해당하는 종은 모두 편모조류라는 공통점과 함께 염분이 높은 봄, 가을시기의 우점종이었고, R-종은 홍수시를 포함한 여름철의 우점종이었다.

## 3. 통계분석

수질 및 생물인자들 상호간 상관관계는 Table 3과 같다. 화성호의 강수량과 양의 상관관계를 보인 변수는 총

Table 2. Temporal abundance (cells mL<sup>-1</sup>), dominance (%) and occurring frequency of dominant species.

Region	Name of species	Abbre.	May	June	July	Aug.	Sep. 1st	Sep. 2nd	Oct.	Dominance	F. of occurrence
Inner	<i>Cylindrotheca closterium</i>	CyClo			621 ~ 2078	50 ~ 105	8,007 ~ 32,269	0 ~ 10,647	0 ~ 841	40.5	15
	<i>Skeletonema costatum</i>	SkCos		0 ~ 14		3,837 ~ 10,829			0 ~ 33	11.4	6
	<i>Oscillatoria</i> spp.	Oscill			7 ~ 87	3791 ~ 13,759	8 ~ 44	0 ~ 491		11.2	14
	<i>Rhomonas</i> sp.	Rhino						1,474 ~ 10,670		10.2	4
	unid. cryptomonad (< 10 μm)	Crymo	0 ~ 14		59 ~ 3463		2,129 ~ 4,754		306 ~ 983	9.5	14
	<i>Rhodomonas</i> sp.	Rhodo				287 ~ 6,192	44 ~ 74			4.8	8
	<i>Gymnodinium</i> sp. (< 10 μm)	Gymn1	785 ~ 3411							3.3	4
	<i>Cyclotella</i> sp.	Cyclo				0 ~ 25		0 ~ 6,716	0 ~ 175	2.9	5
	<i>Spirulina</i> sp.	Spiru				346 ~ 1,516	0 ~ 19	0 ~ 218		1.7	8
	<i>Heterosigma akashiwo</i>	HeAka	0 ~ 21	183 ~ 1554						0.9	5
	<i>Cryptomonas</i> sp.	Cryto		0 ~ 3	10 ~ 635					0.5	5
	<i>Microcystis</i> sp.2	Micy2				225 ~ 374				0.5	4
	<i>Eutreptiella</i> sp.	Eugle	7 ~ 187	3 ~ 70					0 ~ 11	0.3	14
	<i>Monoraphidium contortum</i>	MoCon			0 ~ 10					0.2	7
	<i>Prorocentrum triestinum</i>	ProTr		29 ~ 176						0.2	4
	<i>Paralia sulcata</i>	PaSul								0.2	1
<i>Cosmarium</i> sp.	Cosma				38 ~ 168				0.2	4	

unid: unidentified

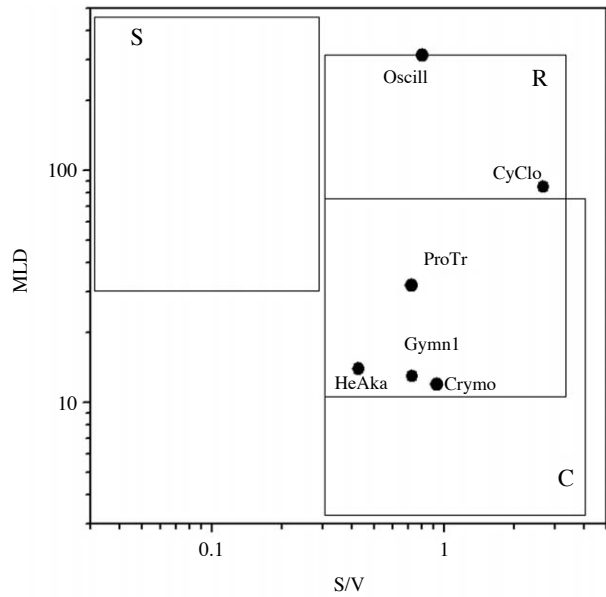


Fig. 4. Adaptive strategies (C, S and R) of phytoplankton from Lake Hwaseong as a function of morphology. Boxes indicate the range limit for MLD (μm) and S : V ratio (μm<sup>-1</sup>) for each strategy. Codes for species as follow: Crymo: unid. cryptomonad, CyClo: *Cylindrotheca closterium*, Gymn1: *Gymnodinium* sp.1, HeAka: *Heterosigma akashiwo*, Oscill: *Oscillatoria* spp., ProTr: *Prorocentrum triestinum*.

질소, 총인, 클로로필-*a*, 식물플랑크톤 현존량이었고, 음의 상관관계를 보인 변수는 염분, 투명도였다. 염분과 음의 상관관계를 보인 변수는 수온, 총질소, 클로로필-*a*로 나타났다. 이는 강우를 통한 하천수 유입과 해수유통이 화성호 표층의 염분, 영양염류를 조절함으로써 식물플랑크톤 생물량 증가에 영향을 미쳤음을 의미한다.

수온, 염분에 기초한 MDS 분석결과는 조사기간을 4개의 시기로 구분하였다 (Fig. 5). 봄철 갈수기 (5~6월)는 고염-중온 (26.4~29.1 psu; 21.4~23.6°C) 시기로, 강수량이 적어 유입하천수 영향은 미약한 반면에, 빈번한 해수유통은 호수 염분을 고염 (18~30 psu) 수준으로 증가시켰으며 수온은 비교적 높았다. 집중강우 시기 (7월, 9월)는 저염-중온 (3.1~3.8 psu; 23.5~24.4°C) 시기로, 집중호우로 유입하천수가 증가하였고, 해수유통이 없었기 때문에 염분이 저염 (0.2~3 psu) 수준으로 급격히 감소하였다. 여름철 고온기 (8월)는 저염-고온 (2.9 psu; 32.7°C) 시기로, 하천수 유입이 지속되면서 염분은 조사기간 중 가장 낮았고 수온은 가장 높았다. 가을 (10월)은 중염-저온 (10~21 psu; 14~16°C) 시기로, 강수량은 줄고 해수유통은 증가하면서 염분이 증가하였으며 수온은 여름철에 비해 큰 폭으로 떨어졌다.



1의 양의 방향에 분포한 반면에, 나머지 시기의 샘플은 CCA 축 2의 양쪽 방향으로 분포하였다. CCA 축 1을 따라 분포한 와편모조류 *Prorocentrum triestinum*, *Katodinium glaucum*, *Scrippsiella trochoidea*, *Gymnodinium* sp.1, *Prorocentrum minimum*, 침편모조류 *Heterosigma akashiwo*, 유글레나류 *Eutreptiella* sp.는 고염분성 환경에 잘 서식하였다. 남조류 *Anabaena circinalis*, *Microcystis* sp.1, *Microcystis* sp.2, *Spirulina* sp., *Oscillatoria* spp.와 녹조류 *Cosmarium* sp., *Sphaerocystis* sp., *Monoraphidium contortum*, 유글레나류 *Trachelomonas* sp.1, 은편모조류 *Rhodomonas* sp.은 저염 환경과 고수온을 선호하였다. 남조류 *Merismopedia* sp., 녹조류 *Selenastrum* sp., *Scenedesmus quadricauda*, 규조류 *Cyclotella* sp. 그리고 은편모조류 *Rhinomonas* sp.은 저염 환경과 함께 고온과 저온사이의 수온에서 서식하였다. 규조류 *Cylindrotheca closterium*, *Skeletonema costatum*, 은편모조류 *Cryptomonas* sp., unid. cryptomonad, 그리고 와편모조류 *Gymnodinium* sp.2, *Gymnodinium* sp.3은 강수량, 수온, 바람, 총인에 복합적으로 영향을 받았다.

## 토의 및 결론

간척담수호에서 담수화 과정이나 부영양화같은 환경 변화는 식물플랑크톤 군집의 급격한 변동을 초래한다 (Zhu *et al.*, 2013). 화성호 형성초기와 본 조사결과를 비교해보면, 화성호 형성 초기(2002년 6~11월) 식물플랑크톤 군집은 주로 해산 규조류로써 내·외측 우점종은 거의 차이가 없었으며 현존량은  $150 \sim 1,880 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 범위를 보였다 (Chung *et al.*, 2004). 하지만 본 조사에서 화성호 외측은 주로 규조류인 반면에, 내측은 와편모조류, 침편모조류, 남조류, 녹조류, 규조류, 은편모조류가 출현하여 완전히 다른 군집구조를 보였고, 현존량은  $783 \sim 27,877 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 형성초기에 비해 크게 증가하였다 (Table 2). 이는 화성호처럼 인공호인 시화호와 새만금호가 건설 후 부영양화되면서 식물플랑크톤 종조성이 크게 바뀌고 현존량이 급격히 증가한 양상과 유사하였다 (Choi *et al.*, 1997; Shin *et al.*, 2000; Choi *et al.*, 2013).

MDS 분석과 CCA 분석결과에 의하면, 염분과 수온으로 구분되는 시기적 특성은 식물플랑크톤 군집의 계절적 천이 양상과 우점종의 서식특성을 잘 설명하였다. I) 봄철(5~6월; 고염-중온 시기)은 다양한 해산 와편모조류와 함께 *Gymnodinium* sp.1 (5월)과 *Heterosigma*

*akashiwo* (6월)가 우점하였다. 이 시기 출현한 대부분의 와편모조류는 Smayda and Reynolds (2001)가 와편모조류를 형태-서식지 특성에 의해 9가지 생활형 (life-form Type)으로 분류한 것 중 Type I (Gymnodinioides; e.g. *Gymnodinium* spp.)과 Type II (Peridinians/Prorocentroids; e.g. *Scrippsiella trochoidea*, *Prorocentrum micans*, *Prorocentrum minimum*)에 해당하였다. Type I, II의 와편모조류는 작은 크기에서 중간 크기까지의 특징을 가지며, 비교적 수심이 낮고 영양염이 풍부하며 외해수와의 교환이 적은 기수역에서 우점한다는 점에서 화성호의 환경조건과 매우 일치하였다 (Smayda and Reynolds, 2001). 또한 *H. akashiwo*는 와편모조류는 아니지만 작은 크기의 편모조류로써 Type I과 같은 특성을 가지는 것으로 볼 수 있다. 한편 인접한 시화호에서 출현한 와편모조류는 대체로  $>20^{\circ}\text{C}$ 의 수온범위이고, *H. akashiwo*의 최적 수온은  $23 \sim 25.4^{\circ}\text{C}$  범위인 점을 볼 때 (Choi *et al.*, 1997; Shin *et al.*, 2000; Kang *et al.*, 2013), 화성호의 봄, 가을은 해산 와편모조류와 침편모조류의 출현이 가장 많은 시기로 볼 수 있다. 따라서 봄철 작은 크기의 해산 와편모조류와 침편모조류의 우점은 해수유통에 따른 염분 증가, 성층, 비교적 높은 수온에서 기인한 것으로 보인다. II) 집중호우 시기 (7월, 9월)에는 *Cylindrotheca closterium*이 높은 현존량을 보였다. 이 종은 주로 하구와 갯벌 퇴적물에 부착하여 서식하며, 수층으로 부유될 때 빠르게 성장하는 생존전략을 가진다 (Kingston, 2009). 또한 *C. closterium*은 세포에서 분비되는 EPS (extracellular polymeric substances) 물질로 퇴적물 표면에 부착하고 이동하지만, 급격한 염분감소로 EPS 분비가 감소하거나 강한 바람 (풍속  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  이상)으로 수층교란이 일어날 때 재부유하게 된다 (De Jonge and Van Beusekom, 1995; Moita *et al.*, 2003; Underwood *et al.*, 2004; Apoya-Horton *et al.*, 2006). 따라서 수로 주변의 수심 1 m 이하 수역은 과거 조간대가 크게 발달했던 곳으로써 *C. closterium*의 서식지로 추정된다 (Fig. 1). 이 지역은 집중호우시 지천을 통한 담수유입의 영향을 받기 쉬울 뿐만 아니라, 조사 3~4일 전  $3.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (동서방향 성분  $U = -2.96 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )의 바람은 얇은 수층을 교란시킴으로써 *C. closterium*의 대량 재부유를 촉진했을 가능성이 높다. III) 여름철 고온기 (8월)에는 강수량은 적었지만 7월보다 더 낮아진 저염 상태로 보아 하천수 유입이 지속되었음을 알 수 있다. 이 시기에 식물플랑크톤 군집은 기수중에서 담수중으로 대체되어 남조류 *Oscillatoria* spp.의 높은 출현밀도와 함께 남조류 *Anabaena circinalis*, *Microcystis* spp., 녹조류 *Cosmarium* sp., *Monoraphidium contortum* 등이



출현하였다. *Oscillatoria* spp., *Anabaena circinalis*, *Microcystis* spp.는 부영양화가 심한 호수에서 출현하는 전형적인 남조류다(Karadžić *et al.*, 2010). 특히 *Oscillatoria* spp.가 7월부터 9월까지 출현하면서 8월에 최대밀도를 나타낸 것은 남조류가 일반적으로 고수온(>25°C)에서 최대 생장율을 갖기 때문이다(Robarts and Zohary, 1987). 또한 *Oscillatoria* spp.는 여름철 수심이 낮은 호수와 강에서 매우 흔한 종으로, 사상체를 형성하고 부상능력(buoyancy capacity)이 있기 때문에 매우 낮은 광조건에도 잘 적응한다(Kim *et al.*, 2005; Karadžić *et al.*, 2010). 이러한 서식특성으로 볼 때, 이 시기 화성호에 출현한 담수산 식물플랑크톤은 유역내 저수지나 하천에서 고수온기를 거치면서 성장한 종들이 호수로 유입되었을 것으로 사료된다. IV 가을(10월)에는 9월에 이어 *C. closterium*이 지속적으로 우점하였지만 현존량은 크게 감소한 반면에 은편모조류인 unid. cryptomonad의 현존량이 증가하였다. 일반적으로 은편모조류는 연중 출현하지만 대발생은 봄, 가을에 특히 담수의 영향을 받을 때 일어날 수 있다(Mallin, 1994). 가을은 봄과 함께 외편모조류의 출현 가능성이 높은 시기이지만 염분이 봄에 비해 다소 낮았고 수온은 16°C 이하로 크게 떨어지면서 외편모조류보다는 은편모조류의 증가를 유도하였다.

형태-기능적 접근법인 Reynolds(1991)의 적응전략은 우점종의 서식특성을 파악하는데 유용할 수 있다. Reynolds의 가정(Reynolds, 1991; Smayda and Reynolds, 2001)에 따라 화성호의 우점종들은 계절에 따라 CR-과 R-전략을 선택하였다. 전형적인 온대 호수와 달리 S-전략종이 출현하지 않은 것은 화성호가 영양염류 과잉상태에 있음을 의미하였다. 그리고 화성호가 성층화되었음에도 C-가 아닌 CR-전략종이 출현하는 것은 빈번한 해수유통에 따른 수체 교란 때문이다. 따라서 향후 담수화 과정에서 호수가 기수 상태로 내외층의 물 교환이 차단될 경우 작은 크기의 해산 외편모조류를 비롯한 편모조류(C-전략종)의 극우점이 심화될 수 있다(Smayda and Reynolds, 2001). 일 예로, 최근 시화조력발전소 운영 전과 후의 적조발생종을 비교한 연구(Kang *et al.*, 2013)에 따르면, 운영 전 제한적으로 해수유통이 있었으나 그 물리적 영향이 적은 시화호 상류에서는 작은 크기(약 10~20 µm)의 외편모조류(*Gymnodinium aureolum*, *Paragymnodinium shiwhaense*, *Karlodinium veneficum* 등)와 picoeukaryotes, phototrophic nanoflagellates가 빈번하게 우점하였다. 하지만 조력발전소 운영 후에는 이러한 종들에서 규조류(*Thalassiosira* spp., *Skeletonema costatum*, *Cylindrotheca closterium* 등)로 우점양상이 변화하였는데,

그 원인이 수체 교란과 관련이 있는 것으로 보았다. 우점 식물플랑크톤의 정확한 형태학적 자료는 알 수 없지만, 이처럼 운영 전 시화호 상류부는 해수유통의 영향이 적기 때문에 대략 pico 크기(<2 µm)~20 µm의 크기범위를 갖는 우점종이 CR- 또는 C-전략을 갖는 것으로 추정된다. 화성호 초기의 우점종 천이와 유일하게 일치한 *Cylindrotheca closterium* (Chung *et al.*, 2004)은 R-전략종으로써, 홍수시 수층교란과 저염수 환경에서 재부유하고 빠르게 성장하는 생존전략 때문에 화성호 건설 후에도 서식할 수 있었던 것으로 보인다. 또 다른 R-전략종으로, 고온기에 부영양 환경을 선호하는 *Oscillatoria* spp.가 호수에서 높은 개체수 밀도로 출현한 것은 풍수기에 유역으로부터 공급된 풍부한 영양염 환경에서 저수지나 하천에서 서식하다가 하천수와 함께 유입된 것으로 보인다. 이와 같이 화성호에 출현한 R-전략종들은 수괴혼합으로 광조건이 불량하고 영양염이 풍부한 환경을 선호하는 R-전략종의 전형적 특성을 나타내었다(Reynolds, 1991). 또한 이 R-전략종들의 출현은 공통적으로 강수량에 크게 의존하기 때문에, 만일 강수량이 적을 경우 R-전략종보다 CR-전략종(예를 들어, 해산 외편모조류)이 경쟁적 우위속에서 출현할 수 있다. 따라서 화성호에서 CR-과 R-전략종의 출현양상은 해수유통과 함께 강수량의 연변동에 의해 영향을 받는다.

본 연구는 겨울시기에 대한 조사와 저층수에 대한 조사가 이루어지지 못함으로써 식물플랑크톤의 연간 변화와 그 과정에서 성층환경의 영향을 파악하는데는 한계가 있었다. 그렇지만 봄부터 가을까지는 화성호의 수생태환경이 가장 급변하는 시기이기 때문에 이 시기에 매일 조사를 통해 빠르게 성장하는 식물플랑크톤의 변화양상과 그 특성을 이해할 수 있었다.

요약하면, 본 연구결과는 화성호 식물플랑크톤 종조성과 생물량의 계절적 변화를 이끄는 주요 인자가 수문학적 이벤트(해수유통과 강수량), 수온, 바람임을 제시한다. 식물플랑크톤 종조성 측면에서 수문학적 이벤트에 따른 급격한 염분변동은 해산종에서 담수종 식물플랑크톤까지 출현하는 서식조건을 제공한다. 여기에 수온은 중온에서 고온으로 증가하면서 외편모조류를 비롯한 편모조류에서 남조류로의 계절적 종 천이를 이끌며, 바람은 기수성 저서규조류의 재부유를 돕는다. 생물량 측면에서 보면, 호수로의 하천수 유입은 생물의 씻김효과(washout effect)와 영양염류 공급을 통해 직간접적으로 생물량을 증가시킨 반면에, 해수유통은 물 교환을 통해 생물량 축적을 희석한다. 화성호로의 영양염류 부하가 크게 감소되지 않는 한, 식물플랑크톤 우점종은 주로 강수량에 의

한 하천수 유입 강도에 따라 CR-전략 또는 R-전략을 선택할 것이다. 더 나아가 담수화 과정에서 해수유통을 차단할 경우 식물플랑크톤 생물량의 축적뿐만 아니라 정체와 성층 강화로 인해 빠른 성장특성을 갖는 C-전략종이 출현하면서 현재 수준보다 높은 생물량 증가가 예상된다. 그러므로 이러한 자가 오염증가를 방지하기 위해서는 화성호 유역의 비점처리시설 등 환경기초시설의 확충을 통한 영양염류 저감대책이 마련되어야 할 것으로 사료된다.

## 적 요

해수유통 중인 화성호에서 수문학적 변동이 식물플랑크톤 군집과 적응전략에 미치는 영향을 파악하기 위하여 2012년 5월부터 10월까지 7회에 걸쳐 식물플랑크톤 종조성, 생물량, 환경변수를 조사하였다. 수문학적 이벤트(해수유통, 강수량)는 화성호의 급격한 염분변동(2.9~29.1 psu)과 함께 영양염, 투명도를 조절하였다. 식물플랑크톤 종조성은 매 조사마다 강(class) 수준에서 급격히 변화였고, 클로로필-*a*는 9.7~104.1  $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 6월에 낮고 9월에 높았다. 다변량 분석결과, 식물플랑크톤 천이는 4개의 시기로 구분되었다. Phase I(5~6월)은 해수유통이 빈번한 고염-중은 시기로, 작은 크기의 *Gymnodinium* sp., *Heterosigma akashiwo*이 우점하였다. Phase II(7월, 9월)에는 집중호우와 바람의 영향으로 *Cylindrotheca closterium*가 우점하였고, Phase III(8월)에는 저염-고은 시기로 *Oscillatoria* spp.가 우점하였으며, Phase IV(10월)는 해수유통이 다시 증가하고 수온이 급감하면서 작은 편모조류인 unid. cryptomonad가 우점하였다. 화성호 식물플랑크톤 군집은 형태적, 생리적 특성에 따라 구분되는 세가지 적응전략, 즉 C(colonist-invasives), S(stress-tolerants), R(ruderals)전략에 따라 구분되었다. Phase I와 IV의 우점종은 CR-전략종으로써, 약한 성층조건을 선호하는 작은 크기의 기회종이었고, Phase II와 III의 우점종은 R-전략종으로써, 유입하천수의 교란에 적응된 중간 크기의 종이다. 이 결과는 향후 해수유통차단에 의한 성층강화가 현재의 식물플랑크톤 군집을 더 작은 편모조류의 극우점으로 변화시킬 수 있음을 보여주었다. 결론적으로 화성호의 수문학적 이벤트(해수유통, 강수량)는 염분, 영양염, 성층환경 교란을 조절함으로써 식물플랑크톤의 천이와 대발생을 이끄는 중요한 요인임을 제시한다.

## 사 사

본 연구는 해양수산부의 해양환경기술개발사업의 일환인 “하구역종합관리시스템개발연구”(No-41873-01)의 지원으로 수행되었습니다. 현장조사에 도움을 주신 한국농어촌공사 이상근 연구원께 감사드립니다.

## REFERENCES

- Alves-de-Souza, C., M.T. Gonzalez and J.L. Iriarte. 2008. Functional groups in marine phytoplankton assemblages dominated by diatoms in fjords of southern Chile. *Journal of Plankton Research* **30**: 1233-1243.
- Anneville, O., S. Souissi and F. Ibanez. 2002. Temporal mapping of phytoplankton assemblages in Lake Geneva: annual and interannual changes in their patterns of succession. *Limnology and Oceanography* **47**: 1355-1366.
- APHA. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed. American Public Health Association.
- Apoya-Horton, M.D., L. Yin, G.J.C. Underwood and M.R. Gretz. 2006. Movement modalities and responses to environmental changes of the mudflat diatom *Cylindrotheca closterium* (bacillariophyceae). *Journal of Phycology* **42**: 379-390.
- Bonilla, S., D. Conde, L. Aubriot, M. del Carmen Pérez and M.D.C. Pérez. 2005. Influence of hydrology on phytoplankton species composition and life strategies in a subtropical coastal lagoon periodically connected with the Atlantic Ocean. *Estuaries* **28**: 884-895.
- Choi, C.H., S.W. Jung, S.M. Yun, S.H. Kim and J.G. Park. 2013. Changes in phytoplankton communities and environmental factors in Saemangeum artificial lake, South Korea between 2006 and 2009. *Environmental Biology Research* **31**: 213-224.
- Choi, J.K., E.H. Lee, J.H. Noh and S.H. Huh. 1997. The study on the phytoplankton bloom and primary productivity in Lake Shihwa and adjacent coastal areas. [*The Sea*] *The Journal of the Korean Society of Oceanography* **2**: 78-86.
- Choi, J.H., K.Y. Kim and D.B. Hong. 2000. Impact of seawater inflow on the temperature and salinity in Shihwa Lake, Korea. *Journal of Korean Earth Science Society* **21**: 541-552.
- Chung, M.H., H.S. Kim, C.I. Choi and S.J. Hwang. 2004. Phytoplankton and environmental factors in Lake Hwaeng. *Korean Journal of Limnology* **37**: 193-204.
- De Jonge, V.N. and J.E.E. Van Beusekom. 1995. Wind-and tide-induced resuspension of sediment and microphytobenthos from tidal flats in the Ems estuary. *Limnology and Oceanography* **40**: 766-778.

- Fukuyo, Y., H. Takano, M. Chihara and K. Matsuoka. 1990. Red-tide organisms in Japan, An illustrated taxonomic guide, Uchida Rokakuho.
- Hillebrand, H., C.D. Dürselen, D. Kirschtel, U. Pollinger and T. Zohary. 1999. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology* **35**: 403-424.
- Hirose, H., T. Yamagishi, M. Akiyama, T. Ioriya, K. Imahori, H. Kasaki, S. Kumano, H. Kobayasi, E. Takahashi, K. Tsunmura and M. Hirano. 1977. Illustrations of the Japanese Freshwater Algae, Uchidarokakuho Publishing Co., Ltd.
- Hwang, S.J., H.S. Kim, M.H. Chung and C.I. Choi. 2003. Water quality and chlorophyll-*a* at the birth stage of a large reclaimed estuarine lake in Korea (Lake Hwaong). *Korean Journal of Limnology* **36**: 455-462.
- Kang, N.S., K.H. Lee, H.J. Jeong, Y.D. Yoo, K.A. Seong, É. Potvin, Y.J. Hwang and E.Y. Yoon. 2013. Red tides in Shihwa Bay, western Korea: A huge dike and tidal power plant established in a semi-enclosed embayment system. *Harmful Algae* **30**: S114-S130.
- Karadžić, V., G. Subakov-Simić, J. Krizmanić and D. Natić. 2010. Phytoplankton and eutrophication development in the water supply reservoirs Garaši and Bukulja (Serbia). *Desalination* **255**: 91-96.
- Kim, H.S., D.S. Kong and S.J. Hwang. 2005. Characteristic community dynamics of phyto- and zooplankton in a shallow eutrophic reservoir. *Korean Journal of Limnology* **38**: 18-29.
- Kingston, M.B. 2009. Growth and motility of the diatom *Cylindrotheca closterium*: Implications for commercial applications. *Journal of the North Carolina Academy of Science* **125**: 138-142.
- Korea Rural Community Corporation (KRC). 2011. Report for water quality management of freshwater lake in the Hwaong regional reclamation development project, Gyeonggi, Korea.
- Korean Ministry of Environment (KME). 2008. The Korean standard method of environmental pollutions for water quality.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography* **12**: 343-346.
- Mallin, M.A. 1994. Phytoplankton ecology of North Carolina estuaries. *Estuaries* **17**: 561-574.
- Moita, M.T., P.B. Oliveira, J.C. Mendes and A.S. Palma. 2003. Distribution of chlorophyll *a* and *Gymnodinium catenatum* associated with coastal upwelling plumes off central Portugal. *Acta Oecologica* **24**: S125-S132.
- Reynolds, C.S. 1991. Functional morphology and adaptive strategies of freshwater phytoplankton, p. 388-426. *In: Growth and Reproductive Strategies of Freshwater Phytoplankton* (Sandgren, C. ed.). Cambridge University Press.
- Robarts, R.D. and T. Zohary. 1987. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **21**: 391-399.
- Seo, D. 1997. Analysis of water quality problems in the Sihwa Lake, Korea. *Korean Journal of Limnology* **30**: 518-523.
- Shin, J.K., D.S. Kim and K.J. Cho. 2000. Dynamics of inorganic nutrients and phytoplankton in Shihwa Reservoir. *Korean Journal of Limnology* **33**: 109-118.
- Shin, J.K., S.J. Hwang and C.G. Yoon. 2006. Spatial structure and seasonal variation of temperature and salinity in the early stage of reclaimed brackish lake (Hwaong Reservoir). *Korean Journal of Limnology* **39**: 352-365.
- Shin, Y.K. and S. Jun. 2002. Ecological studies on the Asan Reservoir 1. Physicochemical characteristics and trophic Status. *Korean Journal of Limnology* **35**: 181-186.
- Smayda, T.J. and C.S. Reynolds. 2001. Community assembly in marine phytoplankton: application of recent models to harmful dinoflagellate blooms. *Journal of Plankton Research* **23**: 447-461.
- Stević, F., M. Mihaljević and D. Špoljarić. 2013. Changes of phytoplankton functional groups in a floodplain lake associated with hydrological perturbations. *Hydrobiologia* **709**: 143-158.
- Ter Braak, C. and P. Šmilauer. 2002. CANOCO reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: software for canonical community ordination (version 4.5), Microcomputer Power.
- Tolotti, M., A. Boscaini and N. Salmaso. 2009. Comparative analysis of phytoplankton patterns in two modified lakes with contrasting hydrological features. *Aquatic Sciences* **72**: 213-226.
- Tomas, C.R. 1997. Identifying Marine Phytoplankton, 1st ed. Academic Press.
- Underwood, G.J.C., M. Boulcott, C.A. Raines and K. Waldron. 2004. Environmental effects on exopolymer production by marine benthic diatoms: Dynamics, changes in composition, and pathways of production. *Journal of Phycology* **40**: 293-304.
- Zhu, W., Y. Pan, J. Tao, X. Li, X. Xu, Y. Wang and Q. Wang. 2013. Phytoplankton community and succession in a newly man-made shallow lake, Shanghai, China. *Aquatic Ecology* **47**: 137-147.