

## 2006년~2009년 새만금호에서 식물플랑크톤 군집과 환경요인의 변화

최충현 · 정승원 · 윤석민 · 김성현<sup>1</sup> · 박종규<sup>1,\*</sup>

한국해양과학기술원 해양시료도서관, <sup>1</sup>군산대학교 해양학과

### Changes in Phytoplankton Communities and Environmental Factors in Saemangeum Artificial Lake, South Korea between 2006 and 2009

Chung Hyun Choi, Seung Won Jung, Suk Min Yun, Sung Hyun Kim<sup>1</sup> and Jong Gyu Park<sup>1,\*</sup>

*Library of Marine Samples, Korea Institute of Ocean Science & Technology (KIOST),*

*<sup>1</sup>Department of Oceanography, Kunsan National University*

**Abstract** - Between May 2006 and November 2009, we investigated the relationship between fluctuations in environmental factors and phytoplankton communities in Saemangeum Artificial Lake, South Korea. Nutrient concentrations in the lake increased because of the inflow of water from Mankyung and Dongjin Rivers during the summer rainy season; in particular, high concentrations were detected at an inner zone close to the estuaries. During the summer rainy season, salinity at the inner zone reduced more rapidly than that at the other zones, and it was similar to the changes in nutrient concentrations. Variations in phytoplankton communities were caused by fluctuations in environmental factors: the abundance of phytoplankton at the inner zone was higher than that at the other zones. Diatoms were the dominant species in the phytoplankton communities. A small centric diatom, *Skeletonema costatum* like species, was predominant, with a mean abundance of 19.5% in Saemangeum lake. Because of accelerated eutrophication in the lake, phytoplankton abundance increased continuously and the total number of species present in the community decreased. In particular, some dinoflagellates could intermittently cause red tides during low temperature and salinity conditions (at the inner zone). In 2006~2007, a red tide-forming dinoflagellate, *Prorocentrum minimum*, was the predominant species, while *Heterocapsa triquetra*, *Karlodinium veneficum*, and *Heterocapsa rotundata* were the newly recorded species in late 2008 to early 2009. Therefore, the dynamics of phytoplankton communities under the perennially eutrophic conditions in Saemangeum lake appear to be primarily affected by changes in water temperature and salinity. In particular, the growth of harmful algae may have been accelerated by the low salinity and temperature conditions during the spring season at the inner zone.

**Key words** : Saemangeum lake, phytoplankton, harmful algal bloom species, salinity, water quality

\* Corresponding author: Jong Gyu Park, Tel. 063-469-4608,  
Fax. 063-469-4601, E-mail. [rtjgpark@kunsan.ac.kr](mailto:rtjgpark@kunsan.ac.kr)

## 서 론

새만금 방조제는 농경지 및 공업부지 확보를 위하여 총 16년(1991년 11월 착공~2006년 4월 완공) 동안 총 길이 33.9km에 이르는 대규모 공사를 통하여 완공되었다. 이 공사를 통하여 전라북도 군산시·김제시·부안군 공유수면의 401 km<sup>2</sup>가 육지로 바뀌었는데 이는 서울시 면적의 3분의 2에 해당한다(Kim *et al.* 2009). 새만금 방조제 건설 전에는 동진강과 만경강에서 유입된 토사가 침적되어 잘 발달된 갯벌을 이루고 있어 다양한 생물들이 상호 복합적이고 유기적인 관계로 건강한 연안생태계를 유지하고 있었다(An and Koh 1992). 그러나, 방조제 건설 후에는 조류세기의 변화와 주변 갯벌의 침식 및 훼손에 의해 생태계가 변화하고 있다(Koo *et al.* 2008). 새만금호와 같이 방조제가 건설된 후에 형성된 대표적인 인공호수인 시화호는 인근 공단에서 오염된 폐수가 유입되어 부영양화가 빠르게 진행되었고, 특히 방조제가 서해연안으로 물의 유출을 차단하여 수질악화를 더욱 가속화하였다(Shin *et al.* 2000a). 새만금호도 시화호와 같이 인근에 공단이 발달해 있고, 만경강 및 동진강으로부터 부영양화된 담수가 유입되고 있어 수질 악화가 빠르게 진행될 것으로 예상된다.

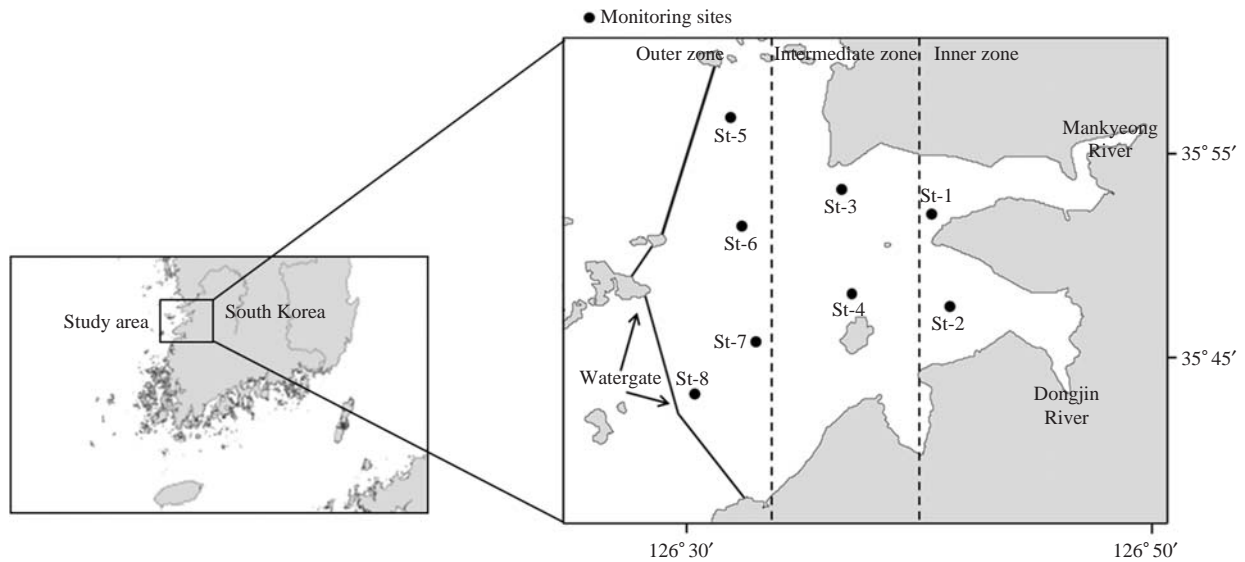
식물플랑크톤은 해양의 중요 기초생산자로서 각 구역에 따라 특이적인 분포를 하고 있다. 특히, 하천 및 강이 잘 발달된 기수역에서는 담수, 해수 및 기수 중 등 다양한 생태적 특징을 가지는 식물플랑크톤이 출현하며, 종에 따른 천이양상이 뚜렷하다(Lee 1989). 그러나 새만금호와 같은 인간의 인위적인 개발에 의해 형성된 호수에서는 자연생태계와 다른 식물플랑크톤 생태계가 나타나고(Shin *et al.* 2000a), 급격한 환경 변화로 유독성 식물플랑크톤이 빈번하게 적조를 일으키기도 한다(Gomez and Claustre 2000). 지금까지 새만금호에서 수행된 환경요인과 식물플랑크톤의 변화에 대한 연구로는 식물플랑크톤 대번식(Yoo *et al.* 2002), 식물플랑크톤 유기탄소의 분포(Park *et al.* 2009), 만경강 담수 유입에 따른 식물플랑크톤 변동(Kim *et al.* 2009), 식물플랑크톤 개체수의 장기 변동(Yeo 2012) 등 다양한 연구가 있다. 그러나 담수 유입이 새만금호 내에서 식물플랑크톤에 미치는 영향 및 대발생 원인 종의 변화에 관한 연구는 아직까지 미비하다. 본 연구는 2006년에서 2009년까지 4년에 걸쳐 새만금호에서 담수 유입에 따른 환경요인의 변화 및 식물플랑크톤 군집 거동의 변화와 대발생 원인 종의 계절별 발생 변화를 보고하고자 한다.

## 재료 및 방법

조사지역은 새만금 간척사업에 의해 형성된 새만금호로서 크게 3개 구역으로 구분하여 정점을 선정하였다. 내측 구역(Inner zone; INZ)은 만경강과 동진강 담수 유입의 영향을 가장 먼저 받는 두 정점(정점 1, 2), 중간 구역(Intermediate zone: ITZ)은 새만금호의 중간영역인 정점 3, 4, 외곽 구역(Outer zone: OTZ)은 만경강 및 동진강 하구에서 가장 멀리 떨어진 새만금 방조제 인근의 정점 5, 6, 7, 8이다(Fig. 1). 조사 기간은 2006년 5월부터 2009년 11월까지로 총 34회 조사를 수행하여 2006년 4월 새만금 방조제 완공 후 새만금호의 식물플랑크톤 및 환경요인의 변화를 파악하고자 하였다. 시료 채집은 식물플랑크톤의 광주기와 암주기 사이에서 세포분열 및 chlorophyll *a* 함량의 차이를 고려하여 08:00~12:00시에 동일하게 수심 0.5 m에서 수행하였다.

환경요인 중 수온, pH, 전기전도도, 용존산소는 휴대용 수질 측정기(YSI, model 85, model 60)를 이용하여 현장에서 즉시 측정하였다. 화학적산소요구량(COD)은 과망간산칼륨을 환원제인 티오황산나트륨으로 역적정하는 방법으로 분석하였다. 영양염류[용존무기인(DIP), 용존규소(DSi), 용존무기질소(DIN: Nitrate+Nitrite+Ammonia)] 농도를 분석하기 위해 채수된 해수 시료를 GF/F 여과지로 여과한 후, 여과된 해수 200 mL을 채취하여 scintillation vial에 넣고 -80°C에서 냉동 보관하였다. 암모니아를 측정하기 위한 시료는 여과한 해수 50 mL에 8N 황산 100 µL을 넣고 -80°C에서 냉동 보관하였다. 영양염류 농도는 자동해수 영양염류 분석기(Alliance, Continuous FlowManager)를 이용해 측정하였다. 모든 시료에 대하여 3~4회 중복분석과 표준해수 시료(Wako CSK standard solution) 분석을 통하여 분석자료의 신뢰도를 높였다.

식물플랑크톤 개체수 분석을 위해 현장에서 Niskin 채수기를 이용하여 해수를 채집하였다. 채집된 해수는 1 L polyethylene 병에 가득 채우고 Lugol 용액으로 고정된 후 실험실에 운반하여 침전법에 의해 150~200 mL로 농축하였다. 농축된 시료를 균일하게 섞은 후 Sedgwick Rafter counting chamber에 넣고 광학현미경(Zeiss, Axioskop 40, Germany)하에서 시료당 400개체 이상을 계수한 후 부피당 개체수로 환산하였다. Chlorophyll-*a* 농도 측정을 위해 해수 1 L를 47 mm 직경의 GF/F 여과지로 여과한 후, 여과지를 90% acetone에 넣고 암실에서 24시간 이상 보관하여 Chlorophyll을 추출하였다. 최종 Chlorophyll *a* 농도는 추출된 Chlorophyll의 형광량을 형광광도계(Turner 10 AU)로 측정된 후 Chlorophyll과 형광



**Fig. 1.** A map showing the surveyed sampling zone and sites. Inner zone; site 1 and 2, Intermediate zone; site 3 and 4, Outer zone; site 5, 6, 7 and 8.

량의 관계식을 이용하여 계산하였다 (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs 2010).

남해 서부 연안역의 환경요인 및 식물플랑크톤 군집의 구역별 차이를 보기 위해 one-way ANOVA 분석을 하였고 Scheffe's post hoc test로 사후 분석을 실시하였다. 환경요인 및 식물플랑크톤의 상관관계를 파악하기 위해 Pearson 상관분석 (Pearson Correlation Analysis)을 수행하였다. 또한 식물플랑크톤 개체수에 영향을 미치는 환경요인을 파악하고자 다중회귀분석 (Multiple Regression Analysis)을 실시하였다. 일련의 분석은 SPSS (ver. 10.0) 통계 패키지를 이용하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 환경요인의 변화

새만금호에서 계절별 강수량은 여름철 풍수기(6월~9월)에 평균 218 mm로 가장 높았으며, 갈수기(11월~5월)에는 50 mm 이하의 값을 기록하였다. 특히, 2007년 9월 태풍 나리가 한반도로 북상했을 때 새만금호 유역에서는 575.6 mm로 최대값을 보였다. 수온은 조사 구역(내측, 중간, 외측)별로 차이를 보이지 않았으며 ( $p > 0.05$ , Table 1), 조사기간 중 24.14°C의 연교차를 보이며 온대지역의 전형적인 계절적 주기성을 나타내었다. 염분은 하계의 집중강우와 담수 유입의 영향을 받아 수온 변화와 반대로 여름(평균 17.1 psu)에 낮고 겨울(28.3 psu)에

높은 양상을 보였다. 염분은 구역별 차이가 뚜렷이 나타났는데 하계에는 만경강과 동진강과 인접한 내측 구역에서 10.5 psu로 가장 낮았으며, 외측 구역에서 24.2 psu로 높아 두 구역의 염분차는 13.7 psu에 이르렀다. 특히, 내측 구역에서는 여름철을 제외한 다른 계절에 20.0 psu 이상의 염분을 보여 담수 유입에 따른 계절적인 영향이 뚜렷이 나타났다. Lee *et al.* (2003)에 의하면 새만금호의 염분이 만경강 및 동진강에서 유출된 담수에 기원을 두고 있다고 보고하였고, Suh and Lee (2008)에 따르면 하구 안쪽이 유입수의 영향으로 낮고, 외해로 갈수록 높은 경향을 보이며, Shim *et al.* (1991)은 만경강 및 동진강 하구에서 염분의 변화는 0.7~31.7 psu로 갈수기에 해수가 만경강 상류까지 침입하고 풍수기에는 새만금 인근 해역까지 담수가 영향을 미친다고 보고하였다. 따라서, 새만금호의 염분은 담수 유출에 절대적으로 영향을 받고 있으며, 새만금 방조제 건설 이후 외측 해역과 새만금호의 염분의 차이는 커지고 있었다. 새만금호와 같은 대표적 인공호인 시화호에서는 1996~2001년까지 평균 염분이 21.9 psu로 새만금호와 같이 낮았으나 (Park *et al.* 2003), 시화호 방조제의 수문 개방과 함께 조력발전소 운영에 따라 염분은 28.8 psu로 증가하였다. 이는 새만금호에서 유입대비 유출을 고려한 방조제 수문의 주기적인 개방 없이는 담수의 영향을 크게 받을 수 있음을 의미한다.

pH는 구역별로 차이를 보이지 않았으며 (Table 1), 계절별로 2006년과 2007년에는 하계의 집중강우에 의해 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 2008년 내

**Table 1.** Spatial changes between inner zone (st. 1 and 2), intermediate zone (st. 3 and 4) and outer zone (st. 5, 6, 7, and 8) in environmental factors and biological factors (chlorophyll-*a* concentration and phytoplankton abundances) in Saemangeum artificial lake

Group	Variable (unit)	Inner zone	Intermediate zone	Outer zone	F value (p)
Environmental factor	DO (mg L <sup>-1</sup> )	9.71 ± 2.99	9.33 ± 2.4	9.48 ± 1.78	NS
	Water temperature (°C)	20.24 ± 7.96	19.84 ± 8.05	19.58 ± 6.79	NS
	pH	8.3 ± 0.43	8.28 ± 0.36	8.33 ± 0.21	NS
	Salinity (psu)	17.6 ± 8.54 <sup>C</sup>	22.67 ± 7.08 <sup>B</sup>	27.09 ± 4.66 <sup>A</sup>	18.70***
	COD (mg L <sup>-1</sup> )	6.87 ± 3.21 <sup>A</sup>	5.19 ± 2.52 <sup>B</sup>	3.75 ± 1.56 <sup>B</sup>	15.32***
	DIN (mg L <sup>-1</sup> )	0.74 ± 0.7 <sup>A</sup>	0.42 ± 0.49 <sup>B</sup>	0.2 ± 0.29 <sup>B</sup>	10.51***
	DIP (µg L <sup>-1</sup> )	45.31 ± 41.32 <sup>A</sup>	32.32 ± 32.49 <sup>A,B</sup>	16.90 ± 20.88 <sup>B</sup>	8.04**
	DSi (mg L <sup>-1</sup> )	1.99 ± 1.13 <sup>A</sup>	1.47 ± 0.98 <sup>A,B</sup>	1.14 ± 0.91 <sup>B</sup>	7.18*
Biological factor	Chl- <i>a</i> (µg L <sup>-1</sup> )	10.48 ± 22.53	7.17 ± 10.46	3.98 ± 5.23	NS
	Phytoplankton (cells mL <sup>-1</sup> )	8097 ± 10003 <sup>A</sup>	5122 ± 8075 <sup>A,B</sup>	3248 ± 4614 <sup>B</sup>	3.85*

Results were analysed by one-way ANOVA and Scheffe's post hoc test. Letters (<sup>A, B, and C</sup>) represent significant differences. Data showed the mean ± standard deviation. \*, p < 0.05; \*\*, p < 0.01; \*\*\*, p < 0.001; NS, no significance; DO, dissolved oxygen; COD, chemical oxygen demand; DIN, dissolved inorganic nitrogen; DIP, dissolved inorganic phosphorus; DSi, dissolved silica; Chl-*a*

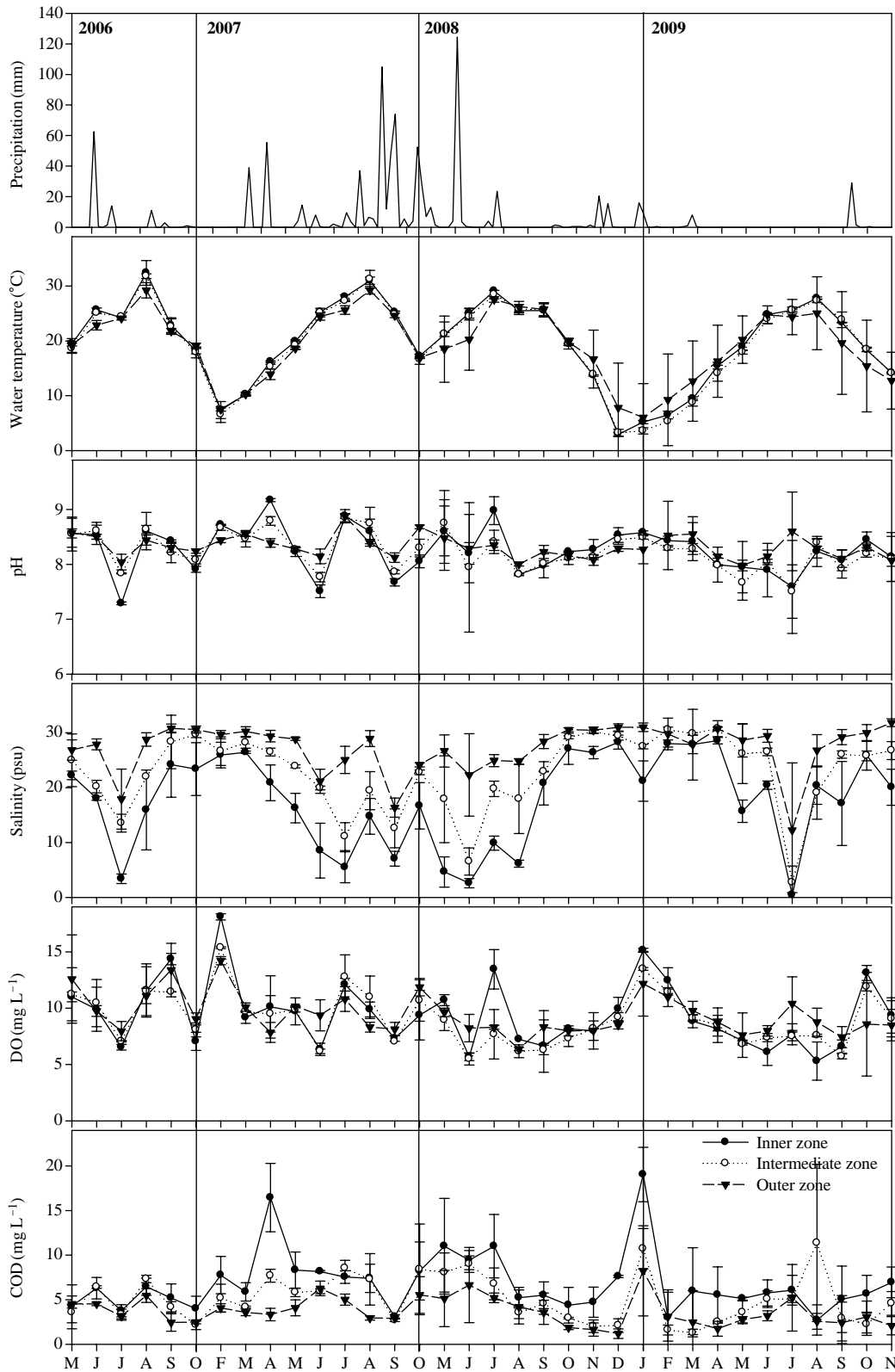
**Table 2.** Pearson correlation analysis of phytoplankton abundance and environmental factors in Saemangeum artificial lake

Variables	DO	WT	pH	Sal	COD	DIN	DIP	DSi	Chl- <i>a</i>	Phyto
Inner zone (St. 1 and 2, N=40)										
DO		NS	0.668	NS	0.405	-0.389	-0.593	-0.508	NS	NS
WT	-0.342		NS	-0.663	NS	NS	0.424	0.448	NS	NS
pH	0.655	NS		0.312	0.452	-0.564	-0.595	-0.542	0.561	0.403
Sal	0.211	-0.548	0.183		NS	-0.777	-0.627	-0.624	NS	NS
COD	0.324	NS	0.365	-0.410		NS	NS	NS	0.584	0.346
DIN	-0.328	0.310	-0.459	-0.837	0.276		0.637	0.456	NS	NS
DIP	-0.540	0.366	-0.570	-0.601	NS	0.623		0.694	NS	NS
DSi	-0.465	0.377	-0.484	-0.610	NS	0.520	0.661		NS	NS
Chl- <i>a</i>	0.247	NS	0.463	-0.281	0.602	NS	NS	NS		0.611
Phyto	0.224	NS	0.328	NS	0.452	NS	NS	NS	0.589	
Saemangeum lake (Total, N=120)										
Variables	DO	WT	pH	Sal	COD	DIN	DIP	DSi	Chl- <i>a</i>	Phyto
Outer zone (St. 5, 6, 7 and 8, N=40)										
DO		-0.361	0.692	NS	NS	-0.441	-0.651	-0.570	0.434	NS
WT	-0.400		NS	-0.634	NS	0.392	0.411	0.386	NS	NS
pH	0.552	NS		NS	0.421	-0.461	-0.645	-0.601	0.528	NS
Sal	NS	-0.497	NS		-0.402	-0.847	-0.513	-0.522	NS	NS
COD	0.381	NS	0.365	-0.411		NS	NS	NS	0.662	0.525
DIN	NS	0.320	NS	-0.855	NS		0.557	0.490	NS	NS
DIP	-0.445	NS	-0.435	NS	NS	NS		0.684	NS	NS
DSi	-0.440	NS	NS	-0.430	NS	0.436	0.381		NS	NS
Chl- <i>a</i>	NS	NS	NS	-0.573	0.383	0.481	NS	0.382		0.573
Phyto	0.350	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.454	
Intermediate zone (St. 3 and 4, N=40)										

p value, < 0.05; NS, no significance; N, Number; DO, dissolved oxygen; Sal, Salinity; WT, water temperature; COD, chemical oxygen demands; DIN, dissolved inorganic nitrogen; DIP, dissolved inorganic phosphorus; DSi, Dissolved silica; Phyto, phytoplankton abundance

측 구역에 8.98로 다른 구역들에 비해 상대적으로 높았다. 이때 식물플랑크톤 군집 중 규조류의 개체수가  $8.46 \times 10^3$  cells mL<sup>-1</sup> (전체 식물플랑크톤 군집의 63%)로 다른 구역에 비해 월등히 높은 개체수를 보여 규조류의 증가가 pH 변화에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 또한 pH와 chlorophyll-*a* 농도를 비교해 본 결과, 상관관계

(r)가 세 구역 평균 0.463 (p < 0.05)로 chlorophyll-*a* 농도의 증가에 따라 pH가 증가하였다 (Table 2). 따라서, 비록 일시적으로 담수 유입시 pH는 감소하나, 새만금호에서 pH의 증가는 식물플랑크톤의 대발생에 따른 결과로 판단된다. DO의 평균 연별 변화는 2006년에 10.22 mg L<sup>-1</sup> (6.54 ~ 14.37 mg L<sup>-1</sup>), 2007년에 10.19 mg L<sup>-1</sup> (6.17 ~

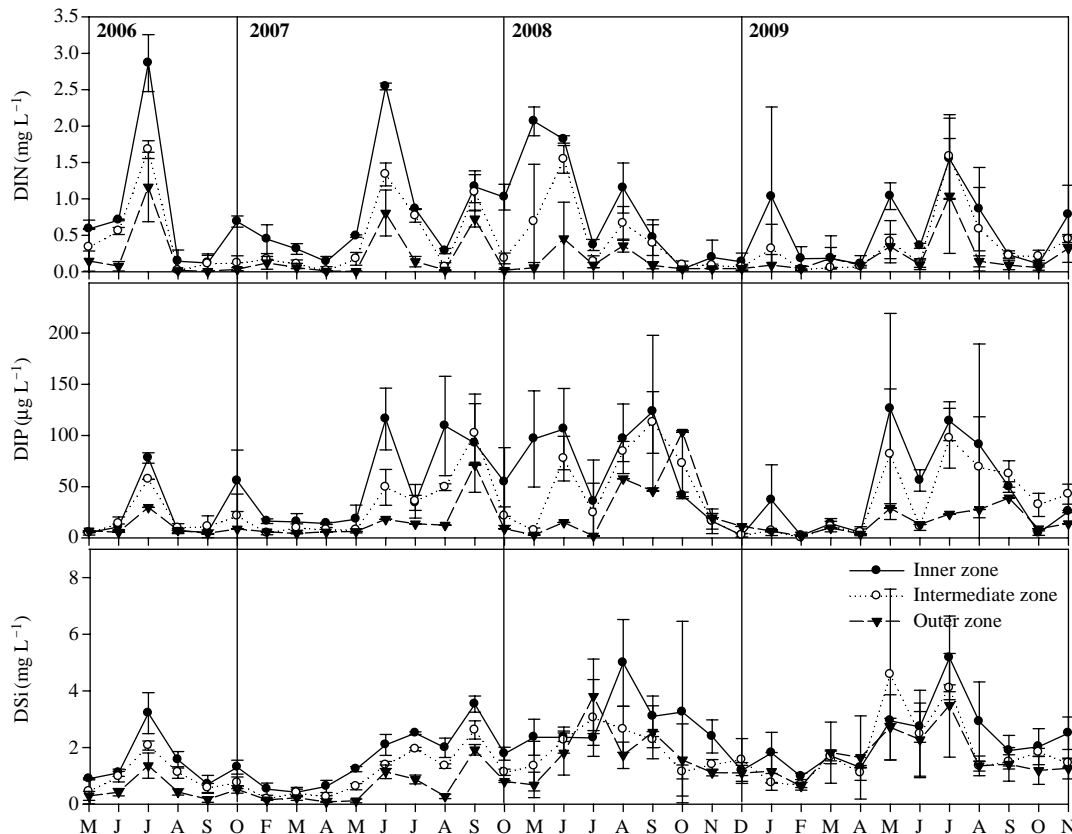


**Fig. 2.** Changes in environmental factors [precipitation, water temperature, pH, salinity, dissolved oxygen (DO) and chemical oxygen demands (COD)] at the three zones (inner, intermediate and outer zone) in the Saemangeum artificial lake from 2006 to 2009. Data is the mean  $\pm$  SD.

18.12 mg L<sup>-1</sup>)로 유사하였으나, 2008년과 2009년에는 각각 8.10 mg L<sup>-1</sup> (5.49 ~ 13.46 mg L<sup>-1</sup>), 9.07 mg L<sup>-1</sup> (5.30 ~ 15.14 mg L<sup>-1</sup>)로 감소하였다. DO의 계절별 변화는 봄철에 평균 9.37 mg L<sup>-1</sup>, 여름철에 평균 8.61 mg L<sup>-1</sup>, 가을철에 평균 8.90 mg L<sup>-1</sup>, 겨울철에 평균 12.58 mg L<sup>-1</sup>로 봄과 겨울철에 높은 값을 나타내었다. 일반적으로 DO의 변화는 크게 생물학적 요인과 물리학적 요인에 영향을 받는다. 생물학적 요인은 주로 광합성을 통하여 산소를 생산하는 식물플랑크톤의 증식과, 반대로 산소를 소비하며 유기물을 분해하는 미생물 등의 활동이고 물리학적 요인은 수온 및 해황의 영향이다(Nybakken and Bertness 2005). 새만금호에서 DO의 변화는 수온과 음의 상관성을 보이고 있었으며 (Table 2), 식물플랑크톤이 증식 할 때 DO도 증가하는 양상을 보였다. 남해 반폐쇄적인 마산만에서 DO의 변화의 주된 영향인자는 수온으로 새만금호와 유사한 양상을 보이고 있었다(Jung *et al.* 2011). 따라서 새만금호에서 DO의 변화는 일차적으로 수온에 의해 조절되고 있었으나, 식물플랑크톤 성장 변

화와 같은 요인 또한 중요한 인자로 작용하고 있었다.

COD의 연평균 변화는 2006년 새만금 방조제가 완공된 후 4.42 mg L<sup>-1</sup>에서 2007~2009년까지 평균 5.42 mg L<sup>-1</sup>로 증가하였다. COD의 계절별 변화는 봄철에 평균 5.28 mg L<sup>-1</sup>, 여름철에 5.94 mg L<sup>-1</sup>, 가을철에 3.91 mg L<sup>-1</sup>, 겨울철에 6.13 mg L<sup>-1</sup>로 여름철 강우로 인해 유기물이 새만금호로 유입되고 있음을 시사하고 있었으며, Fig. 2와 같이 겨울철에 높은 COD 농도는 주로 식물플랑크톤과 같은 생물기원 유기물질(Biogenic Organic Matter)의 영향으로 해석된다(Oostdam and Jordan 1972). 새만금호내 구역별 COD의 농도 차이는 뚜렷이 나타났는데, 내측 구역에서 가장 높았으며, 중간 및 외곽 구역이 유사한 농도를 보여, 하구의 담수 유기물의 유입이 강한 것으로 파악되었다. Park *et al.* (2009)의 새만금호에서 유기물 거동에 관한 연구에서 새만금 방조제 내측해역에서는 육상기원 유기물질의 농도(Terrigenous Organic Matter)가 높고, 방조제 인근 외측 구역에서는 생물기원 유기물이 상대적으로 높은 농도를 보인다고 보고하였다. 따라



**Fig. 3.** Changes in concentrations of nutrients [dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphorus (DIP) and dissolved silica (DSi)] at the three zones (inner, intermediate and outer zone) in the Saemangeum artificial lake from 2006 to 2009. Data is the mean  $\pm$  SD.



서 Park *et al.* (2009)의 보고와 본 결과를 종합하여 분석해 볼 때, 새만금호에서는 육상기원과 생물기원의 유기물질이 공존하고 있었으며, 하천이 직접 유입되는 저염분 구간에서는 육상기원 유기물질이, 그리고 고염분 구간에서는 상대적으로 생물기원 유기물질이 높게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 영양염류의 변화는 Fig. 3과 같다. DIN의 연평균 농도는 2006년에  $0.52 \text{ mg L}^{-1}$  ( $0.01 \sim 2.86 \text{ mg L}^{-1}$ ), 2007년에  $0.48 \text{ mg L}^{-1}$  ( $0.01 \sim 2.54 \text{ mg L}^{-1}$ )였고, 2008년과 2009년에는 각각  $0.46 \text{ mg L}^{-1}$  ( $0.04 \sim 2.07 \text{ mg L}^{-1}$ ),  $0.39 \text{ mg L}^{-1}$  ( $0.03 \sim 1.58 \text{ mg L}^{-1}$ )로 큰 차이를 보이지 않았다. DIN의 계절별 평균 농도는 봄철에  $0.32 \text{ mg L}^{-1}$ , 여름철에  $0.75 \text{ mg L}^{-1}$ , 가을철에  $0.31 \text{ mg L}^{-1}$ , 겨울철에  $0.22 \text{ mg L}^{-1}$ 로 여름철 집중 강우시 증가하였다. 구역별로는 만경강 및 동진강 하구에 인접한 지역에서 외곽 구역으로 갈수록 점차 낮아지는 경향을 보였다. DIP의 연평균 농도는 2006년에는  $16.00 \mu\text{g L}^{-1}$ 이었으나, 2007~2009년에는 평균  $32.71 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 증가하였다. DIP의 계절별 농도는 DIN 농도 변화와 같이 여름철에 높고 다른 계절에는 감소하는 양상을 보였다(평균  $r=0.623$ ,  $p<0.001$ , Table 2). 특히, 담수유입에 가장 크게 영향을 받은 만경강과 동진강 하구 인접지역에서 DIP는 평균  $45.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높았다. Sohn *et al.* (2000)에 따르면 연안해역에서 영양염류의 증가는 강수량과 밀접한 관련이 있고, 새만금호에서 무기질소와 무기인 계열의 영양염류는 만경강과 동진강의 담수 유입이 절대적으로 영

향을 미치므로(Kim *et al.* 2009) 본 연구 결과는 이런 점들을 잘 반영하고 있다. DSi 농도의 변화는 DIN과 DIP 농도의 변화와 같이 여름철 집중강우에 따라 육상기원 규소원의 공급으로 증가하는 양상을 보였다. DSi는 식물플랑크톤 중 큰 비중을 차지하는 규조류의 증감을 조절하는 주요인자로(Brezeinski *et al.* 1997), 본 연구 결과에서는 저수온시(늦겨울-봄 중순) DSi의 농도가 가장 낮게 나타났는데, 이는 당시 전체 개체수에 90% 이상을 차지하는 규조류들의 높은 성장에 의해 규산염이 빠르게 소모됨으로써 나타난 결과로 판단되며, 집중강우시 DSi 증가를 보였고, 집중강우 후 규조류가 증가하는 양상을 보였다. 이는 반폐쇄적인 만인 마산만에서 규소원이 규조류 성장에 주요 조절인자로 작용하는 것과 유사한 결과이다(Jung *et al.* 2011). 따라서 다른 연안해역과 같이 새만금호에서도 DSi는 식물플랑크톤 군집 중 규조류의 성장에 밀접한 영향을 미치고 있다고 판단된다.

## 2. 식물플랑크톤 군집의 변화

새만금호의 식물플랑크톤 개체수는 2006년에 평균  $1,458 \text{ cells mL}^{-1}$ 에서 2007~2009년에는 평균  $5,930 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 약 4배 증가하였다(Fig. 4). 이는 방조제 건설 이후 해수 유통의 억제에 따른 수체의 정체시간 증가와 담수에서 유입되는 영양염의 지속적 누적에 따른 부영양화의 결과라 판단된다. Suh and Lee (2008)는 새만금호

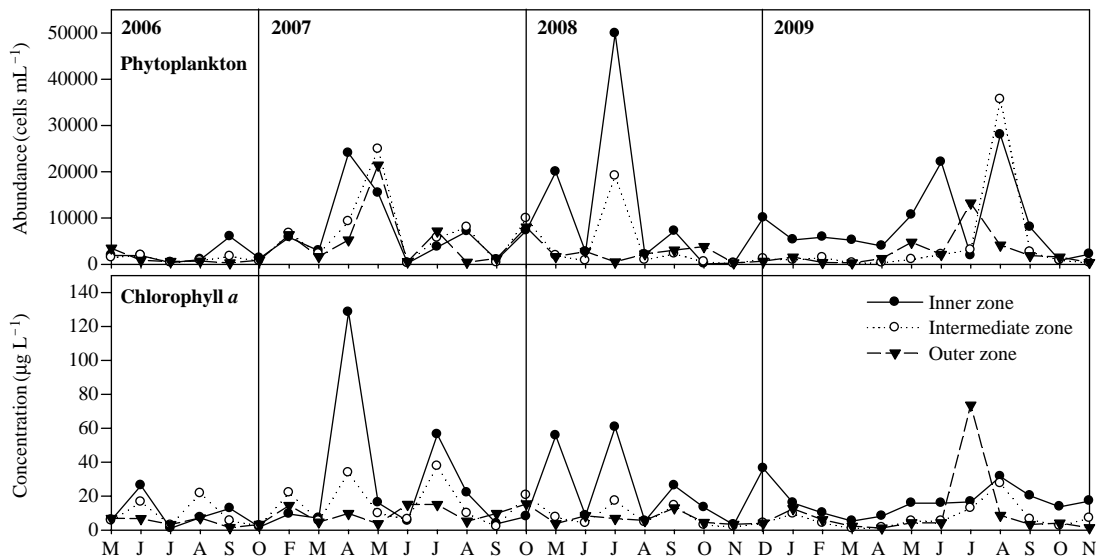


Fig. 4. Changes in phytoplankton abundance and chlorophyll-*a* concentration at the three zones (inner, intermediate and outer zone) in the Saemangeum artificial lake from 2006 to 2009.

**Table 3.** Multiple regression analysis of phytoplankton abundance as dependent variable and the environmental factors as independent variables in Saemangeum artificial lake

Zone	Temperature	Salinity	DIN	DIP	DSi	F	R <sup>2</sup>	N
Saemangeum lake (Total)	-0.16*	-0.73***	-0.54***	NS	NS	9.02***	0.12	320
Inner zone (St. 1 and 2)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.02	80
Intermediate zone (St. 3 and 4)	NS	-0.66**	-0.64**	NS	NS	2.86*	0.11	80
Outer zone (St. 5, 6, 7, and 8)	-0.31**	-0.70***	-0.48**	NS	NS	4.59**	0.10	160

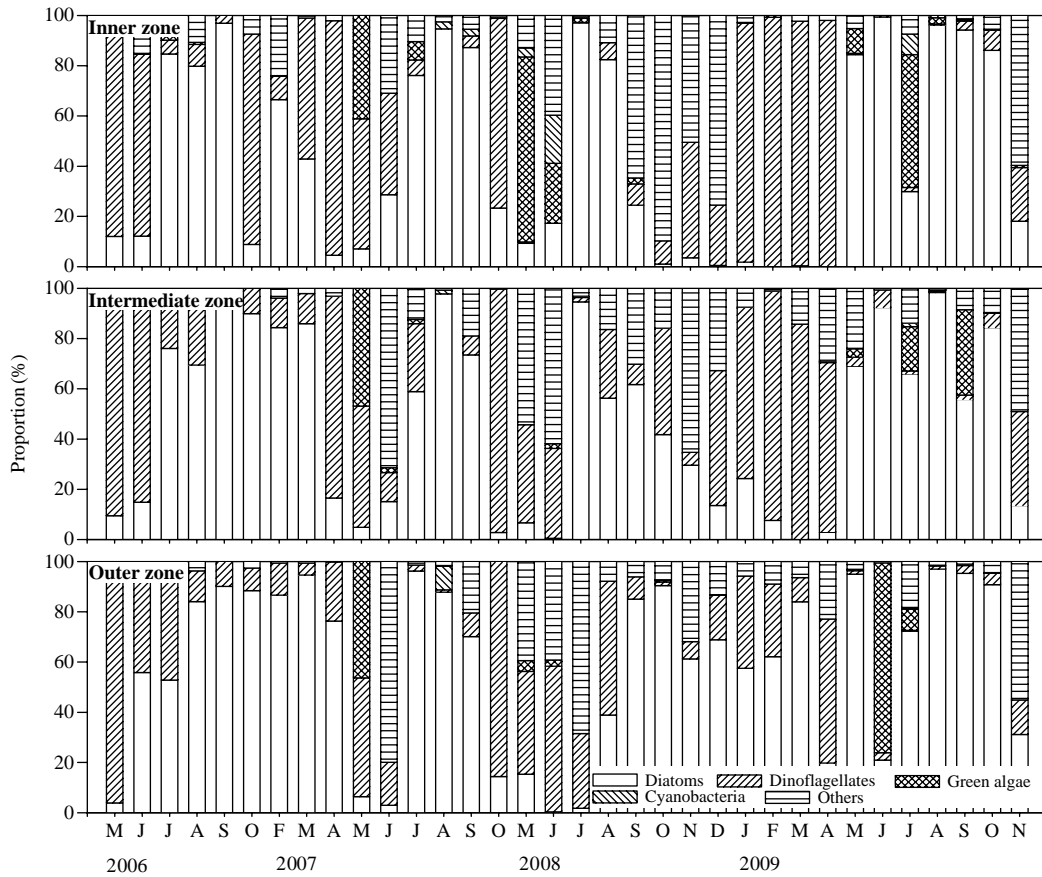
\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ ; DIN, dissolved inorganic nitrogen; DIP, dissolved inorganic phosphorus; DSi, dissolved silica; NS, no significance; N, Number.

배수갑문을 통한 해수유통 기능이 배제되어 담수가 유입되는 인접 구역에서는 수질 저하 현상이 일어나고 있다고 보고하였다. 또한 2008년부터는 영양염류 농도와 더불어 식물플랑크톤 개체수가 급격하게 증가하였다. 새만금호에서 식물플랑크톤 군집의 개체수 변화에 영향을 미치는 환경요인을 파악하고자 다중회귀분석을 한 결과, 새만금호에서는 수온, 염분 및 DIN이 음의 관계를 보이고 있었다(Table 3). 세부적으로 외곽 구역의 다중회귀분석 결과는 전체 수역과 유사하였고, 중간 구역에서는 염분과 DIN이 관련이 있었으며, 내측 구역에서는 관련 있는 환경요인이 나타나지 않았다. 비록 본 조사가 월별 또는 계절별로 등간격으로 이루어지지 않아 변화양상을 명확하게 규명하기는 어려우나, 위 결과에 비추어 볼 때 새만금호에서 식물플랑크톤 개체수는 주로 저수온 및 저염분에 상대적으로 빠르게 반응하며, DIN 농도와도 밀접하게 연관되어 있음을 알 수 있다. 식물플랑크톤 군집의 계절적 변화는 담수의 영향을 잘 받고 있었다. 계절별로 담수 유입이 적은 가을철, 겨울철, 봄철에는 각각 평균 2,501 cells mL<sup>-1</sup>과 3,858 cells mL<sup>-1</sup>, 6,882 cells mL<sup>-1</sup>를 보였으며, 여름철에 평균 6,528 cells mL<sup>-1</sup>를 보였다. 특히, 2008년 7월에는 평균 49,866 cells mL<sup>-1</sup>로 조사기간 중 가장 높은 개체수를 보였다. 이는 식물플랑크톤 군집과 염분 사이의 음의 관계를 잘 설명하고 있다(Table 3). 새만금호 내에서 구역별 식물플랑크톤 개체수는 담수 인접 구역에서 외곽 구역으로 갈수록 뚜렷한 차이를 보였다(Table 1). 담수 유입이 많은 동진강과 만경강 인접 구역에서 식물플랑크톤 개체수는 평균 7,692 cells mL<sup>-1</sup>로 가장 높았으며, 중간 구역 및 외곽 구역에서는 각각 평균 5,164 cells mL<sup>-1</sup>와 3,084 cells mL<sup>-1</sup>로 내측 구역에서 외곽 구역으로 갈수록 점차 낮은 개체수를 보였다(Fig. 4). 이는 Jang *et al.* (2009)의 보고와 같이 동진강, 만경강에서 영양염류가 공급되어 내측 구역에서 저염분에 생존할 수 있는 담수 식물플랑크톤 *Scenedesmus quadricauda* (녹조), *Aulacoseira granulata* 및 *Cyclotella meneghiniana* (규조류) 및 유글레나류, 남조류가 출

현했기 때문이다. 새만금 수역에서 식물플랑크톤 군집을 장기간 관찰한 결과에 따르면, 식물플랑크톤 개체수는 담수역 > 방조제 내부 담수 혼합수역 > 방조제 바깥 해수역 순으로 증가하여 (Yeo 2012) 본 결과와 일치하였다. 시화호에서도 내측 유입하천의 영향에 의해 담수 녹조 *Scenedesmus capricornutum* 및 남조 *Microcystis* spp., 담수규조 *Cyclotella meneghiniana*가 높은 개체수로 출현하여 (Shin *et al.* 2000b) 본 연구의 식물플랑크톤의 군집 변화와 유사하였다. 또한 Choi *et al.* (1997)은 새만금 인접지역에서 출현한 대부분의 식물플랑크톤은 기수환경에 장기적으로 적응한 기수종들이 아니고, 만경강과 동진강에서 새만금 인접지역으로 유입된 담수종들이기 때문에 갈수기에 염분이 증가하면 개체수가 급격히 감소하는 것으로 보고하였는데, 본 연구에서도 가을철과 겨울철에는 담수 유입종의 개체수가 감소하였다. Chlorophyll-*a* 농도는 연별, 계절별로 식물플랑크톤 개체수와 유사하게 변화하였으며 ( $r = 0.589$ ,  $p < 0.001$ , Table 2, Fig. 4), 여름철에 평균 16.18  $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높았다. 또한 구역별로는 식물플랑크톤 개체수 변동과 유사하게 변화하여 담수 유입 인접 구역에서는 평균 20.42  $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 높은 농도를 보인 반면 외곽 구역에서는 8.30  $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 낮아 인접 구역과 농도 차이를 보였다(Fig. 4).

식물플랑크톤 군집의 변화를 보면 2006~2007년에는 규조류, 녹조류, 와편모조류, 남조류 등의 군집이 다양하게 출현하였으나, 2009년 이후에는 점차적으로 군집이 단조로워져 규조류와 와편모조류의 출현 비율이 높았다. 특히 저수온기인 이른 봄철에는 와편모조류의 출현이 급등하였고(Fig. 5), 2009년에는 와편모조류가 높은 비중을 차지하며 극우점하는 모습을 보였다. 종수의 변화에서도 식물플랑크톤 군집의 변화를 파악할 수 있는데, 중요 분류군인 규조류와 와편모조류가 2006년에는 각각 189종, 92종이 출현한 반면, 2009년에는 99종, 45종이 출현하여 급감하였다. 식물플랑크톤 군집 중 소형 중심목 규조인 *Skeletonema costatum*-like species는 전체 개체수의 평균 19.5%를 차지하며 가장 높은 비율로 상시 출현





**Fig. 5.** Changes in proportion of phytoplankton communities categorized into five taxonomic groups, including diatoms, dinoflagellates, green algae, cyanobacteria and other phytoplankton (Each different shape of stacked bar represents each phytoplankton population) at the three zones (inner, intermediate and outer zone) in the Saemangeum artificial lake from 2006 to 2009.

하였고 그 외, 유각와편모조류 *Prorocentrum minimum*, *Heterocapsa rotundata*, *Heterocapsa triquetra*와 무각와편모조류인 *Karlodinium veneficum*은 저수온기 및 저염분 환경에서 높은 개체수로 출현하였다(Fig. 6). 특히 와편모조류는 명확한 계절별 변동을 보였는데, *P. minimum*은 2006~2007년 봄철에 평균 45.5%의 높은 점유율을 보였으며, 2006년 5월에는 89.5%로 단일적조를 일으켰다(Fig. 6). 이 종은 시화호에서도 봄철과 가을철에 적조를 일으키는 주요 종으로, 만과 같은 반폐쇄적인 환경의 저염분 및 부영양화 수계에 주로 출현한다(Choi *et al.* 1997; Shin *et al.* 2000a). 그러나 2009년에는 *P. minimum*에서 *H. rotundata*, *H. triquetra*와 *K. veneficum*으로 주요 종의 출현양상이 변화하였다. *H. triquetra*는 2009년 2월에 전체 식물플랑크톤 군집 중 49.9%, *K. veneficum*은 2009년 3월에 48.2%로 높게 출현하였고, *H. rotundata*는 2009년 1~4월에 평균 17.5%로 저수온기에 빈번하게

출현하였다(Fig. 6). 위 종들은 주로 저수온기에 적조를 일으키는 종들로, 부영양화된 저염분 수계에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있다(Kondo *et al.* 1990; Grzebyk and Berland 1996; Hajdu *et al.* 2000). *H. triquetra*는 저염분의 내측 구역에서  $3,274 \text{ cells mL}^{-1}$  (전체 개체수의 55.6%)의 높은 출현을 보였다. 이 종은 저수온에서 성장율이 높은 것으로 알려져 있으며(Litaker *et al.* 2002), 1~3월의 동계에 주로 시화호에서 대발생되는 종으로 알려져 있다(Baek *et al.* 2011). 이처럼 새만금호에서 *H. rotundata*, *H. triquetra*, *K. veneficum*은 부영양화의 가속과 수괴 정체성의 증가에 따른 환경 변화로 크게 증가하였다. 또한 적조발생 양상이 *P. minimum*에서 위 종들로 일시적으로 변화한 것인지 계속 유지될 것인지에 대해서는 지속적인 연구가 필요하다. 2009년에는 담수 유입 구역에서 국지적으로 대발생하였으나, 해수 유동을 억제함에 따라 담수 영향력이 확장되면 위 종들의 적조는 새만금호 전

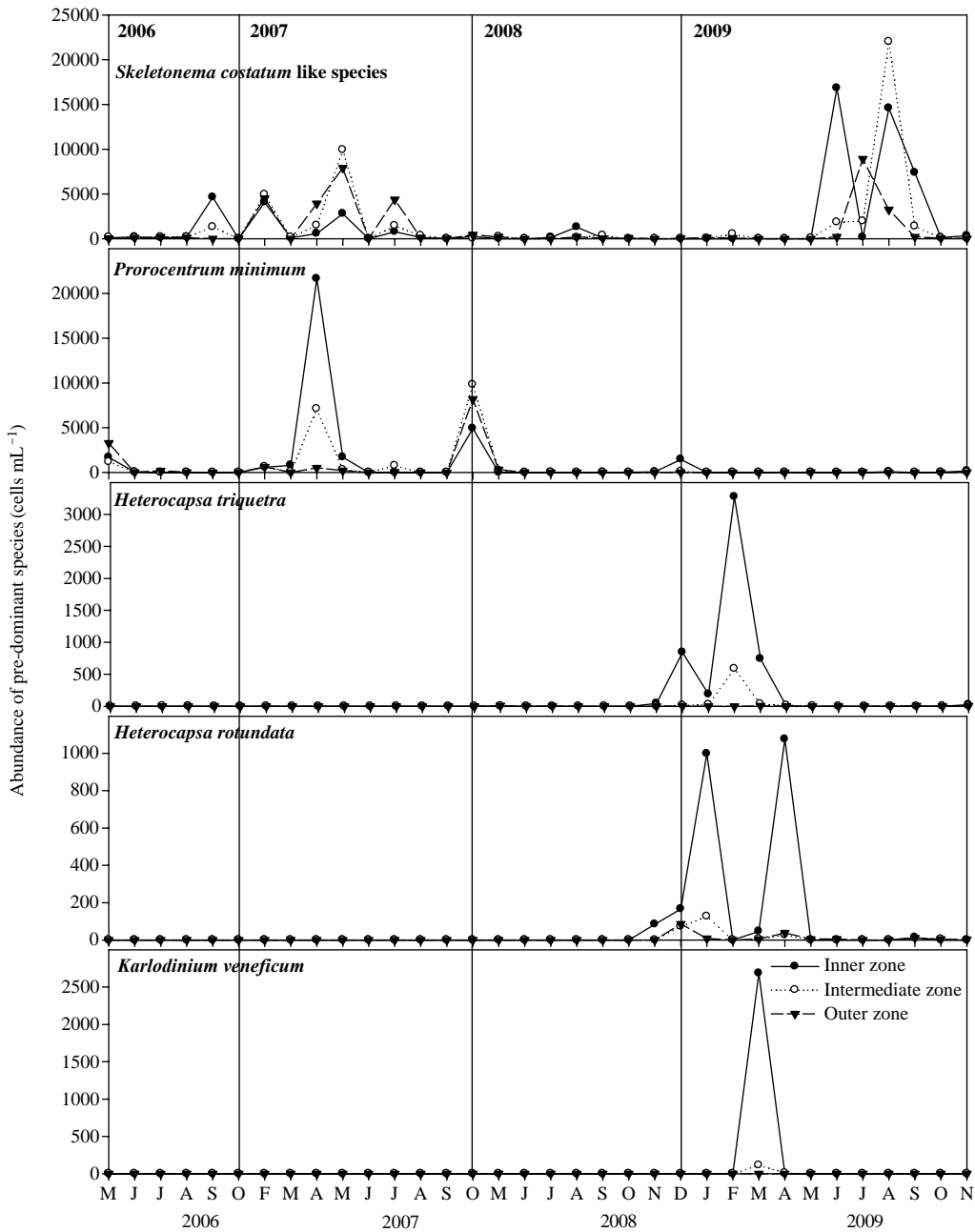


Fig. 6. Changes in abundance of pre-dominant species in phytoplankton communities at the three zones (inner, intermediate and outer zone) in the Saemangeum artificial lake from 2006 to 2009.

체 수역으로 확장될 수 있다. 이상과 같이 새만금호에서 식물플랑크톤 군집은 부영양 가속화와 담수 영향으로 종 다양성이 감소하였고 환경 변화에 적응한 일부 외편모조류의 점유 양상이 증가하였다. 향후 식물플랑크톤의 생태학적 변화 기작을 파악하기 위하여 종 출현양상 및 환경요인에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다.

적 요

새만금호는 만경강과 동진강에서 유입되는 담수를 통해 영양염을 지속적으로 공급받아 부영양이 가속화되고 있었다. 또한 담수 유입에 따라 구역별로 환경요인들이

차이를 보이고 있었다. 이러한 환경의 차이는 식물플랑크톤 군집의 출현양상의 변화를 가져오고 있었다. 새만금호의 부영양화된 수계에서 식물플랑크톤 군집은 개체가 증가하고 종 다양성이 감소하고 있었으며, 와편모조류 등의 일부 종이 대발생을 일으키고 있었다. 특히 2009년에는 기존에 크게 출현하지 않았던 *Heterocapsa triquetra*, *Karlodinium veneficum*, *Heterocapsa rotundata*가 우점하여 새만금호 내부의 부영양화에 따른 수환경 변화로 식물플랑크톤 군집에 변화가 나타났다. 이와 같이, 새만금호의 서식환경의 변화는 와편모조류의 적조 발생 등 식물플랑크톤 군집의 환경 적응력과 연관하여 파악하여야 하며, 이를 위해서는 지속적인 모니터링이 필요하다.

## 사 사

본 연구는 한국해양과학기술원의 기본연구과제(과제 번호 PE98988)에 의해 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- An S and CH Koh. 1992. Environments and distribution of benthic animals on the Mangyung-Donjin tidal flat, west coast of Korea. J. Kor. Soc. Oceanogr. 27:78-90.
- Baek SH, JS Ki, T Katano, K You, BS Park, HH Shin, K Shin, YO Kim and MS Han. 2011. Dense winter bloom of the dinoflagellate *Heterocapsa triquetra* below the thick surface ice of brackish lake Shihwa, Korea. Phycol. Res. 59:273-285.
- Brzezinski MA, DR Phillips, FP Chavez, GE Friederich and RC Dugdale. 1997. Silica production in the Monterey, California, upwelling system. Limnol. Oceanogr. 42:1694-1705.
- Choi JK, EH Lee, JH Noh and SH Huh. 1997. The study on the phytoplankton bloom and primary productivity in lake Shihwa and adjacent coastal areas. J. Korean Soc. Oceanogr. (The Sea) 2:78-86.
- Gomez F and H Claustre. 2000. Spreading of *Gymnodinium catenatum* Graham in the western Mediterranean Sea. Harmful Algae News 22:1-3.
- Grzebyk D and B Berland. 1996. Influences of temperature, salinity and irradiance on growth of *Prorocentrum minimum* from the Mediterranean Sea. J. Plankton Res. 18:1837-1849.
- Hajdu S, L Elder, I Olenina and B Witek. 2000. Spreading and establishment of the potentially toxic dinoflagellate *Prorocentrum minimum* in Baltic Sea. Int. Rev. Hydrobiol. 85: 561-575.
- Jang KG, JW Park, JH Park, N Ha and W Yih. 2009. Drastic change of phytoplankton community at the station 'Mankyeong Bridge' of the new Saemankeum lake during 2006-2007. Ocean Polar Res. 31:71-76.
- Jung SW, D Lim, HH Shin, DH Jeong and YH Roh. 2011. Relationship between physico-chemical factors and chlorophyll-*a* concentration in surface water of Masan bay: Daily monitoring data. Korean J. Environ. Biol. 29:98-106.
- 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.
- Kondo K, Y Seike and Y Date. 1990. Red tides in the brackish Lake Nakanoumi (II), Relationships between the occurrence of *Prorocentrum minimum* red tide and environmental conditions. Bull. Plankton Soc. Jap. 37:19-34.
- Koo BJ, SH Shin, HJ Woo, ES Kim and JG Je. 2008. Changes in macrobenthic community structure on Gunsan tidal flat after the closing of the Saemangeum 4th Dyke. Ocean Polar Res. 30:497-507.
- Lee RD. 1989. Phycology. 2nd edition. Cambridge University Publishing. NY. USA, 645pp.
- Lee SH, HY Choi, YT Son, HK Kwon, YK Kim, JS Yang, HJ Jeong and JG Kim. 2003. Low-salinity water and circulation in summer around Saemangeum area in the west coast of Korea. J. Korean Soc. Oceanogr. (The Sea) 8:138-150.
- Litaker RW, PA Tester, CS Duke, BE Kenney, JL Pinckney and J Ramus. 2002. Seasonal niche strategy of the bloom-forming dinoflagellate *Heterocapsa triquetra*. Mar. Ecol. Prog. Ser. 232:45-62.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. 2010. Standard methods for marine environments. 495 pp.
- Nybakken JW and MD Bertness. 2005. Marine Biology: An Ecological Approach. Benjamin Cummings, San Francisco.
- Oostdam BL and RR Jordan. 1972. Suspended sediment transport in Delaware Bay. Geol. Soc. Amer. Memoir. 133:143-149.
- Park JK, ES Kim, SR Cho, KT Kim and YC Park. 2003. Annual variation of water qualities in the Shihwa lake. Ocean Polar Res. 25:459-468.
- Park JK, ES Kim, KT Kim, SR Cho, TY Song, JK Yoo, SS Kim and YC Park. 2009. Characteristics in organic carbon distribution in the Saemangeum area during the construction of artificial sea dike, Korea. J. Korean Soc. Mar. Environ. Engineer. 12:75-83.
- Shim JH, YK Shin and W Yih. 1991. Environmental properties and phytoplankton community of the lower Mankeong River. Kor. J. Limnol. 24:45-54.

- Shin JK, DS Kim and KJ Cho. 2000a. Dynamics of inorganic nutrients and phytoplankton in Shihwa Reservoir. *Kor. J. Limnol.* 33:109-118.
- Shin JK, DS Kim and KJ Cho. 2000b. Dynamics of water environmental factors and phytoplankton before and after inflow of seawater in Shihwa Reservoir. *JESI.* 9:115-123.
- Sohn JH, TY Ahn and SJ Kim. 2000. Environmental factors affecting distribution of heterotrophic bacteria and chlorophyll *a* content in the water column of Masan and Haengam Bays, Korea. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Engineer.* 3:65-75.
- Suh SW and HY Lee. 2008. Water Quality Simulations after Completion of Saemangeum Reservoir Construction. *KSCE J. Civ. Eng.* 28:79-93.
- Yeo HG. 2012. Annual Variations (2001 ~ 2010) of Phytoplankton Standing Stocks in Saemangeum Water Region. *J. Korea Acad. Indust. Cooper. Soc.* 13:4326-4333.
- Yoo YD, HJ Jeong, JH Shim, JY Park, KJ Lee, W 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. *J. Korean Soc. Oceanogr. (The Sea)* 7:129-139.

Received: 16 August 2013

Revised: 8 September 2013

Revision accepted: 8 September 2013