

청계만 식물플랑크톤의 종조성과 개체수의 계절적 변동

정병관 · 지 성 · 신용식*

목포해양대학교 해양시스템공학부

(2011년 11월 11일 접수; 2011년 12월 12일 수정; 2012년 2월 1일 채택)

Seasonal Variation of Taxonomic Composition and Standing Crop of Phytoplankton in the Chunggye Bay

Byung-Kwan Jeong, Sung Ji, Yong-Sik Shin*

Division of Ocean System Engineering, Mokpo Maritime National University, Mokpo 530-729, Korea

(Manuscript received 11 November, 2011; revised 12 December, 2011; accepted 1 February, 2012)

Abstract

Three embankments, namely Changpo, Bokkil and Guil, in Chunggye Bay were investigated to assess the influence of environmental changes to phytoplankton size structure, distribution of species and standing crops. Three stations were sampled near each embankment in Nov. 2006, Feb. 2007, May 2007 and Aug. 2007. Phytoplankton were classified into net-size (>20 μ m) and nano-size (<20 μ m). In summer, the freshwater discharge seemed to have influence in the decrease of salinity and in the increase of turbidity, ammonium and phosphorus concentrations. Chl *a* concentration and phytoplankton abundance in Feb. 2007 were observed to be generally higher in all stations compared to other periods. Net-size phytoplankton was observed to be higher in Feb. 2007 and May 2007 compared to nano-sized phytoplankton. However, there was shift in phytoplankton composition in Nov. 2006 and Aug. 2007. Phytoplankton under seven class (Bacillariophyceae, Chlorophyceae, Chrysophyceae, Cryptophyceae, Cyanophyceae, Dinophyceae, Euglenophyceae) was identified during the study period. It was found out that the major phytoplankton class was Bacillariophyceae. Phytoplankton was more diverse in autumn compared to any other season. Cyanophyceae was increased in summer. In rainy season, change in physical factors (salinity, transparency) seemed to have more influence on phytoplankton growth compared to inorganic nutrients.

Key Words : Phytoplankton, Size structure, Chunggye bay, Phytoplankton community

1. 서론

식물플랑크톤이란 수(水)중에서 부유생활을 하고 있는 작은 단세포 조류의 총칭으로 수 생태계에서 일차생산자로서, 수계의 물성변화에 대하여 민감하게 반응하여 환경변화 및 오염의 지표로 중요하게 활용

되고 있다(Bold 와 Wynne, 1985; Brook, 1965; Chapman, 1968; Dodge, 1975; Hellawell, 1986; Watanabe, 1962). 식물플랑크톤 동역학(dynamics)을 자세히 이해하기 위해서는 크기구조에 따라 연구할 필요가 있는데 이는 생태계 먹이사슬을 통한 에너지의 흐름(Ryther, 1969; Walsh, 1976)과 침전속도 및 이동속도(Michaels 와 Silver, 1988)에도 영향을 미치기 때문이다.

일반적으로 수 생태계에서 일차생산성은 크게 두 가지 기작에 의해 조절된다. 포식자에 의한 섭식과 같은 생물학적 작용(하향식 조절: top-down control)과

*Corresponding author : Yong-Sik Shin, Division of Ocean System Engineering, Mokpo Maritime National University, Mokpo 530-729, Korea
Phone : +82-61-240-7312
E-mail : yongsik@mmu.ac.kr

영양물질의 공급(상향식 조절: bottom-up control)이다(Armstrong, 1994; Caraco 등, 1997; Carpenter 등, 1987; Kivi 등, 1993; Sin 등, 1999). 식물플랑크톤의 개체수와 우점종은 상향식과 하향식 조절인자에 의해서 민감하게 변화하기 때문에 수질에 대한 지표로 의미가 있다(김 등, 1998; 문과 최, 1991; James, 1979; UNESCO, 1978; Whitton, 1979). Schoeman (1973)은 *Nitzschia*와 *Achnanthes*를 통하여 수질을 지표화하고자 하였고, Palmer 와 Adams (1977)는 수질 변화에 따른 식물플랑크톤 분포를 종과 속의 수준에서 정의하였다. 이와 같은 식물플랑크톤 분포에 의한 환경 해석은 특수 환경 요인인 광(light), 수온, 염분(salinity), 영양염류(nutrients)등에 의해 어느 정도 종의 출현과 천이를 결정한다는 사실에 근거를 두고 있다(Raymont, 1980).

조사 해역은 무안반도와 압해도로 싸여 있는 작은 내만으로 영산강 유역 농업 종합개발계획의 제 4단계 사업(2006-2020)이 시행되고 있는 지역이다. 청계만에는 길이가 1.21 km로 1976년에 완공된 북길방조제, 북으로는 길이 0.93 km로 1976년에 완공된 창포방조제와 무안반도에 위치하고 있는 길이 1.25 km인 구일방조제로부터 유입되는 담수로 인한 연안 환경의 변화가 예상된다. 이러한 환경에서 수(水)중의 일차 생산자이며 환경에 민감하게 반응하는 식물플랑크톤에 대한 연구는 중요하다고 하겠다. 지금까지 청계만 환경에 대한 조사로는 북길간척지 주변의 식물플랑크톤 군집에 관한 연구(박, 1994), 저서무척추동물 및 담수 어류상(송, 1997)에 관한 연구, 청계만 식물플랑크톤 크기구조의 계절적 변동(지 등, 2008)에 관한 연구, 목포항 주변해역의 수질 및 식물플랑크톤 변동 특성(조, 2010)에 관한 연구가 이루어 졌지만 식물플랑크톤의 크기구조를 고려한 군집구조(종조성) 및 개체수 변화에 관한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구는 식물플랑크톤 크기구조를 고려한 군집구조를 파악함으로써 청계만 수계의 식물플랑크톤 변동을 이해하는데 기여하고자 한다.

2. 재료 및 방법

현장조사는 계절별 특성을 나타낼 수 있는 2006년

11월(가을), 2007년 2월(겨울), 5월(봄), 8월(여름)에 창포방조제, 북길방조제 구일방조제의 전방 해역에서 각각 3개 정점을 선정하였다(Fig. 1). 채수는 3 L Vandon water sampler를 이용하여 표층(해수 표면에서 1 m 아래)에서 채집 하였다. 조사기간 동안 강수량 및 일조시간은 인접 지역인 전남 목포시 기상청 자료(<http://www.kma.go.kr>)를 이용하였다(Fig. 2).

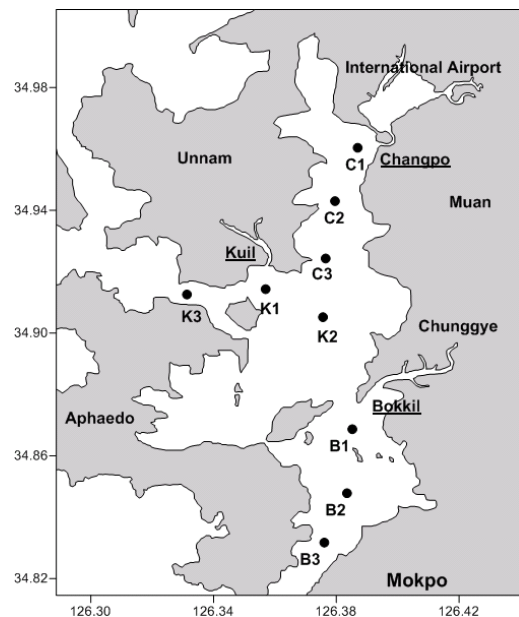


Fig. 1. Sampling station in the study area.

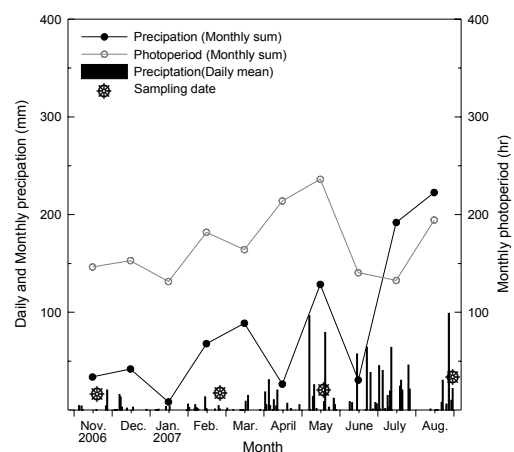


Fig. 2. Photoperiod (monthly sum), precipitation (daily mean and monthly sum) in the study area.

2.1. 물리화학적 환경인자

조사기간 동안 수온, 염분(Salinity)은 수온, 염분 수심 센서형광광도계가 부착되어 있는 CTD (Alec Co., ACL1150-DK)를 이용하여 측정하였고, 투명도는 Secchi disk를 이용하여 측정하였다.

무기영양염류 측정을 위해 Syringe Filter (Acrodis[®])로 여과한 일정량의 시료를 냉장 운반하였고, Auto Analyzer (Bran Luebbe[®])를 이용하여 암모늄(NH₄⁺), 아질산+질산염(NO₂⁻+NO₃⁻), 인산염(PO₄³⁻) 그리고 규산염(Si)을 분석하였다(Parsons 등, 1984).

2.2. 엽록소 a 측정

식물플랑크톤은 대형식물플랑크톤(net-plankton (>20 μm))과 소형식물플랑크톤(nano-plankton (<20 μm))으로 분류하였다. 전체 엽록소 a는 시료 적당량을 GF/F filter와 펌프(<120 mmHg)를 사용하여 여과하였고, 크기 분류를 위해 20 μm mesh (Nytex[®])를 이용하였다. 사용된 필터들을 90% Acetone 8 mL가 담긴 차광 시험관에 넣고 12시간이 지난 후 24시간 이내에 10-AU Fluorometer (Turner Designs[®])로 측정하였다. 각 측정된 엽록소 a의 농도차이를 이용하여 크기별 엽록소 a를 계산하였다.

2.3. 식물플랑크톤 군집

식물플랑크톤 군집 파악을 위해 현장에서 채집된 시료를 1 L 채수병에 시료 900 mL와 Lugol's solution (Sourinia, 1978) 5 mL를 넣어 고정시켰다. 암실에서 약 2-3일 정도 자연 침전시킨 시료를 순환 펌프를 이용하여 여액 200 mL이 남게 상등액을 제거한 후 남은 여액을 잘 혼합하여 50 mL 시험관(Conical tube)에 넣고 약 1-2일 정도 농축시킨다. 농축된 시료에서 다시 45 mL의 상등액을 제거하고 남은 5 mL중 1 mL를 S-R Chamber에 넣고 광학 현미경(ZEISS[®])하에서 동정을 실시하였다.

2.4. 통계분석

전체 및 크기별 식물플랑크톤과 군집, 물리·화학적 환경요인과의 상관성은 Pearson's correlation analysis를 통해 수행하였으며 통계적 분석을 위하여 프로그램은 SPSS 11을 이용하였다.

3. 결과

3.1. 기후요인

2006년 11월부터 2007년 8월까지 조사지역의 월합 일조시간을 보면, 2007년 4, 5월에 각각 213.9, 236.1 hr로 길게 나타났고 6, 7월에 각각 140.5, 132.6 hr로 짧게 나타났다(Fig. 2). 강수량은 갈수기인 봄과 겨울에 적고 여름에 많게 나타나는 우리나라의 계절에 따른 분포와 비슷하게 나타났다(Fig. 2).

3.2. 물리적 환경인자

창포, 복길, 구일방조제 해역에서 염분은 강수량이 집중되었던 2007년 8월에 가장 낮았다(Fig. 3A). 창

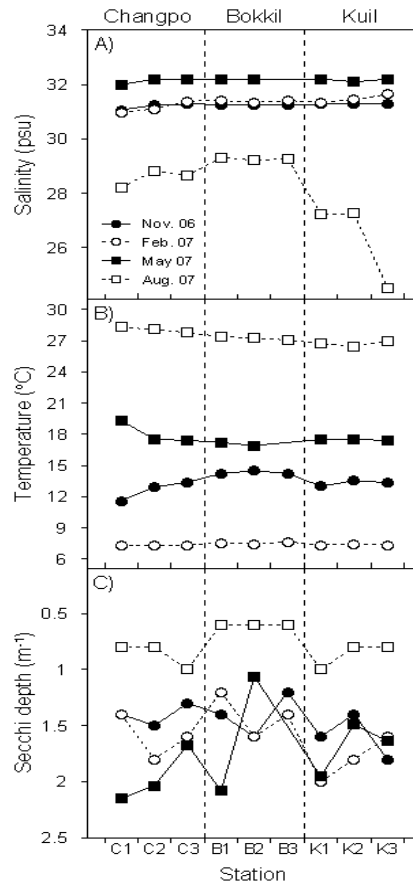


Fig. 3. Temporal and spatial variations of water temperature, salinity, and Secchi depth in surface water of Chunggye Bay.

포, 북길방조제 해역에서는 조사기간별로 내·외측정점이 유사하였고, 구일방조제 해역에서는 2007년 8월에 창포, 북길방조제 해역에 비하여 상대적으로 낮은 염분을 보였으며 K1, K2, K3정점이 각각 27.2, 27.3, 24.5 psu로 K3정점이 다른 정점에 비하여 낮게 나타난 것을 제외하고 조사기간별로 모든 정점이 유사한 분포를 나타냈다(Fig. 3A). 수온은 조사기간 동안 각 방조제 해역에서 우리나라의 계절에 따른 패턴과 유사하게 나타났다(Fig. 3B). 투명도는 창포, 북길, 구일방조제 해역에서는 강수량이 집중되었던 8월에 가장 낮은 시간적 분포를 나타냈다(Fig. 2, 3C).

3.3. 무기영양염류

조사기간 동안 암모늄(NH_4^+)은 모든 조사정점에서 2007년 8월에 가장 높았으며, 2006년 11월에 가장 낮았다. 특히 2007년 8월 창포방조제 인접한 C1 정점은 $5.08 \mu\text{M}$ 로 조사기간 중 농도가 가장 높았으며 방조제에서 멀어질수록 감소하였다(Fig. 4A).

아질산+질산염($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$)은 2006년 11월에 가장 높은 분포를 보였으며, 각 방조제 중 북길방조제 정점에서 상대적으로 농도가 높았다. 2007년 5월은 가장 낮은 평균 농도를 보였으나, 구일방조제 정점인 K2에서는 $13.53 \mu\text{M}$ 로 조사기간 중 가장 높은 농도를 보였다(Fig. 4B).

인산염(PO_4^{3-})은 아질산+질산염과 마찬가지로 2006년 11월에 $1.00 \mu\text{M}$ 로 가장 높은 평균 농도를 보였으며, 각 정점간에 유사한 농도를 나타내었다. 2007년 2월에는 평균 농도가 $0.41 \mu\text{M}$ 로 가장 낮았으며 2007년 5월에는 정점간 인산염 농도가 큰 차이를 보이며 증감하였다(Fig. 4C).

규산염(Si)은 암모늄과 마찬가지로 2007년 8월에 높은 분포를 보였으며, 창포방조제의 C1정점에서 $28.35 \mu\text{M}$ 로 가장 높았고 방조제에서 멀어질수록 감소하였다. 2007년 2월에는 전체 해역의 평균 농도가 $9.42 \mu\text{M}$ 로 가장 낮은 분포를 보였다. 2006년 11월의 규산염 농도는 정점별로 유사한 농도로 분포하였다(Fig. 4D).

해수내 존재하는 영양염의 구성비를 이용하여 잠재적인 영양염 제한인자를 파악한 결과, 2007년 2월 창포방조제의 C1~C3 정점과 북길방조제의 B2정점,

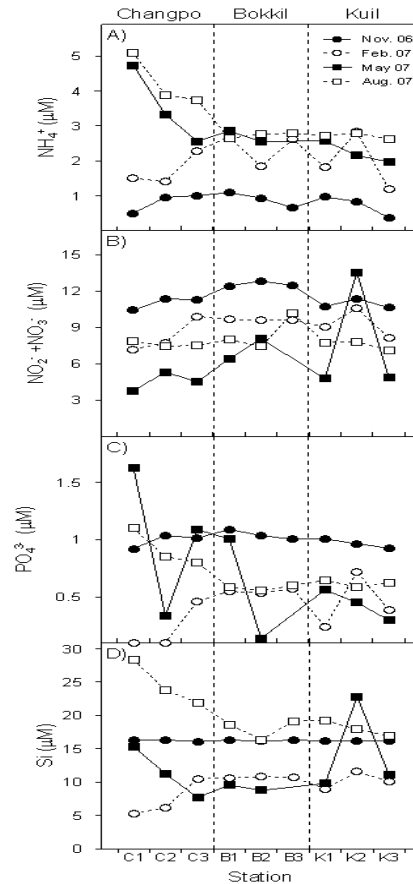


Fig. 4. Temporal and spatial variations of inorganic nutrient in surface water of Chunggye Bay.

구일방조제의 K2 정점에서 인산염이 제한 영양염으로 확인되었다. 2007년 5월에는 창포방조제의 C1, C3, B1 정점에서는 질소가 제한 영양염으로 나타났고 C2 정점과 북길방조제의 B2 정점, 구일방조제의 K2, K3 정점에서는 인산염이 제한인자로 파악되었다. 하계인 2007년 8월에는 북길방조제의 B3 정점에서만 인산염이 제한인자로 확인되었다(Table 1).

3.4. 크기별 엽록소 *a*와 개체수

전체 엽록소 *a* 분포를 보면 창포방조제 해역에서는 2006년 11월에 가장 낮고 2007년 2월에 가장 높았다(Fig. 5A). 2006년 11월 창포방조제 해역에서는 약 $1.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 유사하게 분포했으며, 2007년 5월에는 외측해역으로 갈수록 증가하였다(Fig. 5A). 2007년 2

Table 1. Evaluation of potential limitation of nutrients using nutrient stoichiometry (DIN, DIP, DSi)

Date	St.	S:N	N:P	S:P	N		P		S		Nutrient Limit
					N/P<10	S/N>1	S/P>20	N/P>20	S/P<10	S/N<1	
Nov. 2006	C1	1.5	11.9	17.7		○					
	C2	1.3	11.9	15.7		○					
	C3	1.3	12.1	15.9		○					
	B1	1.2	12.4	15.0		○					
	B2	1.2	13.3	15.6		○					
	B3	1.2	13.1	16.2		○					
	K1	1.4	11.6	16.1		○					
	K2	1.3	12.7	16.8		○					
	K3	1.5	11.9	17.5		○					
Feb. 2007	C1	0.6	86.9	52.4			○	○		○	P
	C2	0.7	91.6	62.0			○	○		○	P
	C3	0.9	26.6	22.9			○	○		○	P
	B1	0.9	22.6	19.4				○		○	
	B2	0.9	21.3	20.2			○	○		○	P
	B3	0.9	21.5	18.9				○		○	
	K1	0.8	45.0	37.2			○	○		○	P
	K2	0.9	18.7	16.1						○	
	K3	1.1	24.2	26.1		○	○	○			P
May 2007	C1	1.8	5.2	9.4	○	○			○		N
	C2	1.3	25.9	33.6		○	○	○			P
	C3	1.1	6.5	7.1	○	○			○		N
	B1	1.0	9.2	9.5	○	○			○		N
	B2	0.8	77.7	64.2			○	○		○	P
	B3										
	K1	1.3	13.1	17.5		○					
	K2	1.5	34.9	50.7		○	○	○			P
	K3	1.6	23.2	37.4		○	○	○			P
Aug. 2007	C1	2.2	11.8	25.8		○	○				
	C2	2.1	13.3	27.9		○	○				
	C3	1.9	14.0	27.3		○	○				
	B1	1.8	18.2	31.9		○	○				
	B2	1.6	18.4	29.6		○	○				
	B3	1.5	21.7	32.0		○	○	○			P
	K1	1.8	16.2	29.8		○	○				
	K2	1.7	18.1	30.6		○	○				
	K3	1.7	15.8	27.3		○	○				

월에는 창포방조제의 C1, C2, C3 정점이 각각 8.4, 8.3, 5.2 $\mu\text{g L}^{-1}$ 이고 2007년 8월에는 각각 2.4, 2.8, 1.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 C1, C2 정점은 유사하였으며, C3 정점에서는 낮아지는 분포를 보였다(Fig. 5A). 복길방조제는 2007년 2월과 5월에 높은 엽록소 a 를 보였으며 2006년 11월과 2007년 8월에 낮은 분포를 보였다(Fig. 5A). 복길방조제의 해역에서는 2006년 11월과 8월에 각각 1.3~1.5 $\mu\text{g L}^{-1}$, 1.3~1.4 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 내·외측해역이

유사한 분포를 나타냈고, 2007년 2월과 5월에는 외측해역으로 갈수록 증가하였다(Fig. 5A). 구일방조제 해역에서는 조사기간 동안 2007년 2월에 높고 2007년 8월로 갈수록 낮아지는 시간적 분포를 나타냈다(Fig. 5A-D). 2007년 2월 구일방조제에서는 K1, K2, K3 정점이 각각 7.0, 3.9, 6.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 K2 정점이 상대적으로 낮았으며, 2007년 8월에 1.2~1.4 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 유사하였다(Fig. 5B, D). 대형식물플랑크톤은 전체 식물플랑크톤과 시·

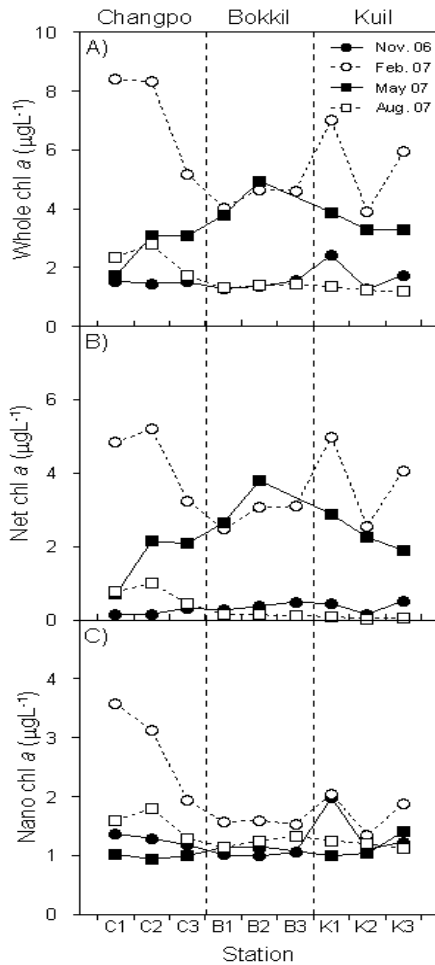


Fig. 5. Temporal and spatial variations of phytoplankton biomass of size classes in surface water of Chunggye Bay.

공간적으로 유사한 경향을 보였다(Fig. 5A-B).

소형 Chl *a* 농도를 보면, 창포방조제 해역에서는 2007년 2월에 가장 높고 2007년 5월에 가장 낮았다(Fig. 5C). 2007년 2월에는 외측해역으로 갈수록 감소하였고, 2006년 11월과 2007년 5월에는 공간적으로 유사한 농도를 보였다(Fig. 5C). 북길방조제 해역에서는 2007년 2월에 가장 높았으며 여름으로 갈수록 감소하였고, 조사기간별로 내·외측정점이 유사한 공간적 분포를 나타냈다(Fig. 5C). 구일방조제 해역에서는 2007년 2월에 가장 높은 시간적 분포를 나타냈다(Fig. 5C). 2007년 2월에는 구일방조제의 K1, K2, K3정점이 각각 2.0, 1.4, 1.9 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 K2정점이 다른 정점에 비해 낮았으며, 2006년 11월에 각각 2.3, 1.1, 1.2 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 K1정점이 다른 정점에 비해 높았다(Fig. 5C). 2007년 5월과 8월에 구일방조제 해역에서는 1.0~1.4 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 유사하였다(Fig. 5C).

식물플랑크톤 기여율 분포를 보면 2007년 5월에 C1 정점에서 소형식물플랑크톤이 59.4%로 높게 나타난 것을 제외하고 그 외 정점과 2007년 2월에는 대형식물플랑크톤 우점하였다(Fig. 6B, D). 2006년 11월과 2007년 8월에는 소형식물플랑크톤이 약 65% 이상으로 우점하는 것으로 나타났다(Fig. 6A, C).

조사기간 동안 식물플랑크톤 개체수는 엽록소 *a*와 유사한 경향을 보였으며 각 방조제 해역의 평균 개체 밀도는 2007년 2월이 169 cells mL^{-1} 로 가장 높았으며 특히, 창포 방조제의 C1 정점에서는 368 cells mL^{-1} 로 최대치를 보였다. 2007년 8월에는 42 cells mL^{-1} 로 가장 낮은 개체가 출현하였다(Fig. 7).

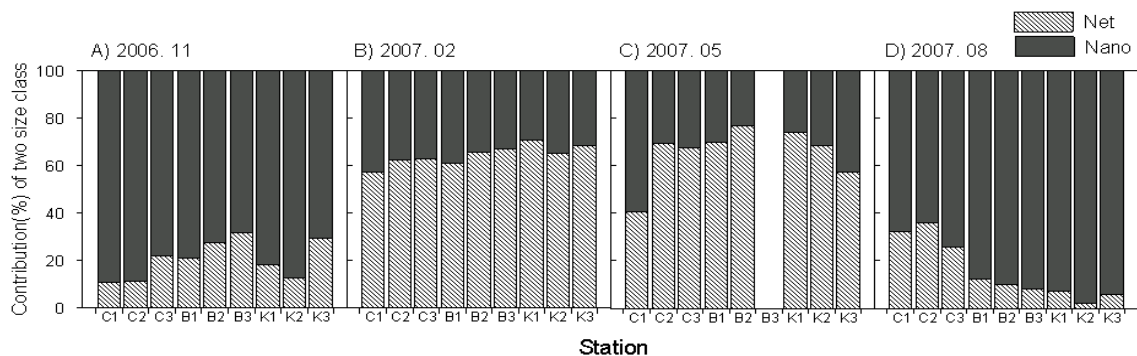


Fig. 6. Size structure of phytoplankton (% contributions of size classes to total chlorophyll *a*) in surface water of Chunggye Bay.

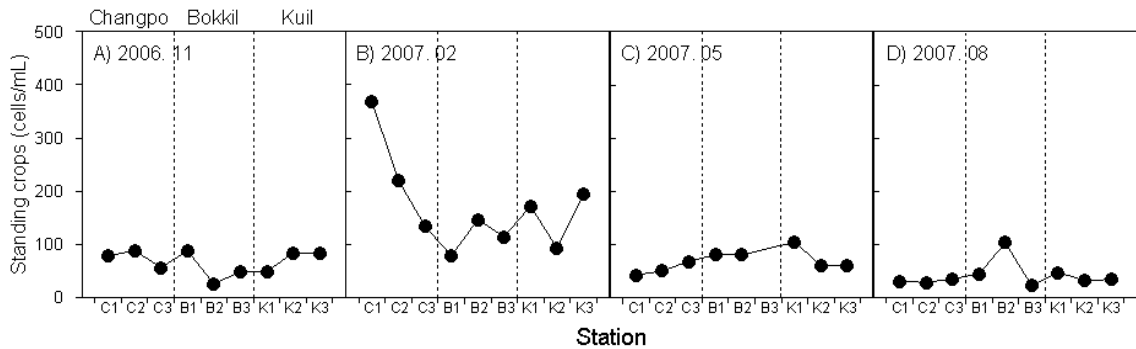


Fig. 7. Temporal and spatial variations of standing crops of phytoplankton in surface water of Chunggye Bay.

3.5. 군집구조 및 우점종

2006년 11월 창포방조제의 C1, C2, C3정점에서는 은편모조류가 각각 40.5, 45.5, 35.7%로 높게 나타났고, 은편모조류인 *Cryptomonas* sp.가 각각 40.5, 45.5, 35.7%로 우점함으로써 *Cryptomonas* sp.가 당시 군집구조 중 은편모조류에 절대적인 기여를 나타내었다 (Fig. 8A, Table 2). 북길방조제의 B1정점에서는 규조류가 77.3%를 차지했고, 규조류인 *Coscinodiscus* sp.와 *Nitzschia* sp.가 각각 29.5, 27.3%로 우점 및 차우점하였다. 이 시기에 출현한 *Nitzschia* sp.는 체인구조(chain) 형성하였다(Fig. 8A, Table 2). B2, B3정점에서는 규조류가 각각 100, 78.3%였으며, 우점종은 규조류인 *Coscinodiscus* sp.가 각각 50.0, 56.5%로 매우 높게 출현하였다(Fig. 8A, Table 2). 구일방조제의 K1정점에서는 45.8%로 은편모조류가 높게 분포하였으

며, 은편모조류인 *Cryptomonas* sp.가 45.8%로 우점하였다(Fig. 8A, Table 2). K2정점에서는 남조류가 40.5%였으며 *Microcystis* sp.가 40.5%로 우점하였다 (Fig. 8A, Table 2). K3정점에서는 와편모조류와 은편모조류가 각각 41.5, 41.5%로 높게 출현하였으며 우점종은 은편모조류의 *Cryptomonas* sp.가 41.5%를 차지하였다(Fig. 8A, Table 2).

2007년 2월에는 해역 전반에 걸쳐 규조류가 75% 이상으로 높게 분포하였으며, 우점종은 규조류인 *Cyclotella* sp.로 동정되었다(Fig. 8B, Table 2). 2007년 5월 창포방조제 해역에서는 규조류가 60% 이상으로 나타났고, 규조류인 *Eucampia* sp.가 우점하였다 (Fig. 8C, Table 2). 북길, 구일방조제 해역 역시 규조류가 80%이상으로 나타났고, 우점종 또한 *Eucampia* sp.로 동일하였다(Fig. 8C, Table 2).

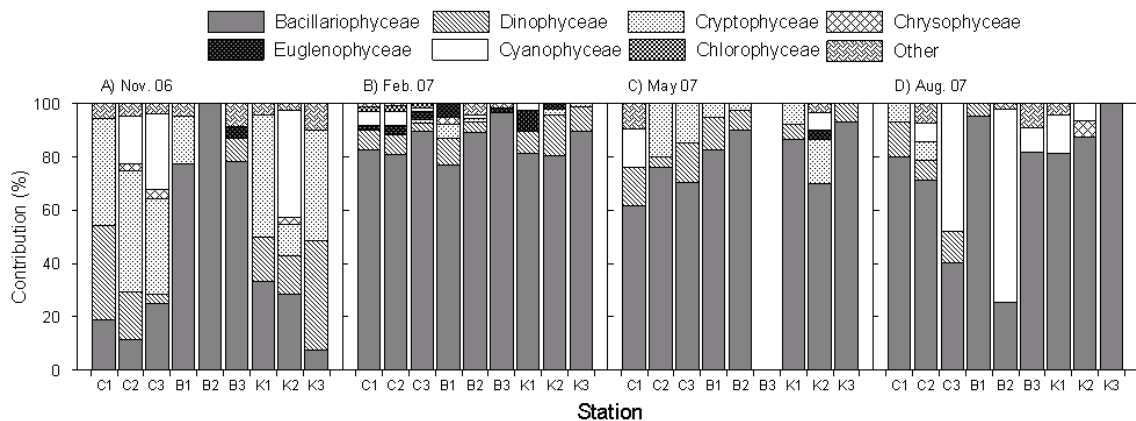


Fig. 8. Contribution (%) of phytoplankton group in surface water of Chunggye Bay.

Table 2. Dominant genus of phytoplankton community during the sampling period in surface water of Chunggye Bay

Month	St.	Dominant	(%)	Subdominant	(%)
Nov. 06	C1	<i>Cryptomonas</i> sp.	40.5	<i>Chroomonas</i> sp.	21.6
	C2	<i>Cryptomonas</i> sp.	45.5	<i>Microcystis</i> sp.	18.2
	C3	<i>Cryptomonas</i> sp.	35.7	<i>Chroomonas</i> sp.	18.2
	B1	<i>Cryptomonas</i> sp.	35.7	<i>Microcystis</i> sp.	28.6
	B2	<i>Coscinodiscus</i> sp.	29.5	<i>Nitzschia</i> sp.	27.3
	B3	<i>Coscinodiscus</i> sp.	50.0	<i>Nitzschia</i> sp.	25.0
	K1	<i>Coscinodiscus</i> sp.	56.5	<i>Nitzschia</i> sp.	13.0
	K2	<i>Cryptomonas</i> sp.	45.8	<i>Coscinodiscus</i> sp.	33.3
	K3	<i>Microcystis</i> sp.	40.5	<i>Coscinodiscus</i> sp.	14.3
Feb. 07	C1	<i>Cryptomonas</i> sp.	41.5	<i>Chroomonas</i> sp.	14.3
	C2	<i>Cyclotella</i> sp.	54.9	<i>Prorocentrum</i> sp.	31.7
	C3	<i>Cyclotella</i> sp.	53.6	<i>Thalassiosira</i> sp.	8.7
	B1	<i>Cyclotella</i> sp.	70.1	<i>Melosira</i> sp.	8.2
	B2	<i>Cyclotella</i> sp.	46.2	<i>Coscinodiscus</i> sp.	4.5
	B3	<i>Cyclotella</i> sp.	64.4	<i>Coscinodiscus</i> sp.	10.3
	K1	<i>Cyclotella</i> sp.	61.4	<i>Thalassiosira</i> sp.	9.6
	K2	<i>Cyclotella</i> sp.	68.6	<i>Synedra</i> sp.	12.3
	K3	<i>Cyclotella</i> sp.	63.0	<i>Trachelomonas</i> sp.	8.1
May 07	C1	<i>Cyclotella</i> sp.	63.0	<i>Chaetoceros</i> sp.	8.7
	C2	<i>Eucampia</i> sp.	23.8	<i>Skeletonema costatum</i>	6.2
	C3	<i>Eucampia</i> sp.	36.0	<i>Oscillatoria</i> sp.	14.3
	B1	<i>Eucampia</i> sp.	44.1	<i>Cryptomonas</i> sp.	20.0
	B2	<i>Eucampia</i> sp.	60.0	<i>Cryptomonas</i> sp.	14.7
	B3	<i>Eucampia</i> sp.	65.0	<i>Rhizosolenia</i> sp.	7.5
	K1	-	-	<i>Synedra</i> sp.	10.0
	K2	<i>Eucampia</i> sp.	53.8	<i>Synedra</i> sp.	15.4
	K3	<i>Eucampia</i> sp.	33.3	<i>Cryptomonas</i> sp.	16.7
Aug. 07	C1	<i>Eucampia</i> sp.	50.0	<i>Fragilaria</i> sp.	10.0
	C2	<i>Cyclotella</i> sp.	33.3	<i>Chaetoceros</i> sp.	26.7
	C3	<i>Chaetoceros</i> sp.	42.9	<i>Navicula</i> sp.	14.3
	B1	<i>Oscillatoria</i> sp.	33.3	<i>Synedra</i> sp.	13.3
	B2	<i>Synedra</i> sp.	63.6	<i>Fragilaria</i> sp.	13.6
	B3	<i>Oscillatoria</i> sp.	40.0	<i>Anabaena</i> sp.	20.0
	K1	<i>Synedra</i> sp.	36.4	<i>Chaetoceros</i> sp.	18.2
	K2	<i>Fragilaria</i> sp.	28.6	<i>Nitzschia</i> sp.	23.8
	K3	<i>Fragilaria</i> sp.	25.0	<i>Synedra</i> sp.	18.8
		<i>Synedra</i> sp.	29.4	<i>Nitzschia</i> sp.	23.5

2007년 8월 창포방조제의 C1 정점에서는 규조류가 80% 출현하였으며, 규조류인 *Cyclotella* sp.가 33.3%로 우점하였다(Fig. 8D, Table 2). C2정점 역시 규조류가 71.4%로 높았으며, 규조류인 *Chaetoceros* sp.가 42.9%로 우점하였다(Fig. 8D, Table 2). C3정점에서는 규조류와 남조류가 각각 40.4, 48.1%로 출현하였고, 남조류인 *Oscillatoria* sp.가 33.3%로 우점하였다(Fig. 8D, Table 2). 복길방조제의 B1, B3정점에서는 규조류가 각각 95.5% 81.8%로 현저히 높았으며, 규

조류인 *Synedra* sp.가 각각 63.6, 36.4%로 우점하였다(Fig. 8D, Table 2). B2정점에서는 남조류가 72.7%로 높게 나타났고, 남조류인 *Oscillatoria* sp.가 40%로 우점하였다(Fig. 8D, Table 2). 구일방조제의 K1, K2정점에서는 규조류가 각각 81.4, 87.5%로 높았으며, 규조류인 *Fragilaria* sp.가 각각 28.6, 25.0%로 우점하였다(Fig. 8D, Table 2). K3정점에서는 규조류가 100%로 나타났고, 규조류인 *Synedra* sp.가 29.4%로 우점하였다(Fig. 8D, Table 2).

Table 3. Pearson's correlation analyses among environmental and biological parameters

	Bac	Din	Cry	Chr	Eug	Cya	Chl	Temp	Sal	SD	NH ₄	NO _x	PO ₄	Si	Whole	Net	Nano
Bac	1																
Din		1															
Cry			1														
Chr				1													
Eug					1												
Cya						1											
Chl							1										
Temp								1									
Sal									1								
SD										1							
NH ₄											1						
NO _x												1					
PO ₄													1				
Si														1			
Whole															1		
Net																1	
Nano																	1

$P^2 < 0.1$, $P^2 < 0.05$ Bacillariophyceae (Bac), Dinophyceae (Din), Cryptophyceae (Cry), Chrysophyceae (Chr), Euglenophyceae (Eug), Cyanophyceae (Cya), Chlorophyceae (Chl), Temperature (Temp), Salinity (Sal), Secchi disk (SD), Ammonia (NH₄), Nitrite+Nitrate (NO_x), Phosphate (PO₄), Silicate (Si), Whole Chl α (Whole), Net Chl α (Net), Nano Chl α (Nano)

3.6. 통계분석

청계만의 식물플랑크톤의 군집(genus), 크기별 식물플랑크톤 그리고 환경인자들간의 상관분석을 실시하여 상호간의 영향을 파악하였다. 규조류는 암모늄과는 유의한 양의 상관관계를 보였으며 인산염과는 유의한 음의 상관관계를 나타내었다. 또한 전체식물플랑크톤(Whole chlorophyll *a*)과 대형식물플랑크톤(Net chlorophyll *a*)과는 유의한 양의 상관관계를 보였다. 와편모조류는 인산염과 유의한 양의 상관관계를 나타내었다. 은편모조류는 암모늄과 대형식물플랑크톤과는 유의한 음의 상관관계를 나타냈으며 아질산+질산성질소와 규산염과 유의한 양의 상관관계를 보였다. 유글레나류는 수온과 인산염에서 유의한 음의 상관관계를 보였으며, 전체식물플랑크톤 및 대형, 소형식물플랑크톤과는 유의한 양의 상관관계를 나타내었다. 남조류는 대형식물플랑크톤과 유의한 음의 상관관계를 보였다. 녹조류는 수온, 인산염, 규산염과 유의한 음의 상관관계를 보였고 전체 및 대형, 소형식물플랑크톤과는 유의한 양의 상관관계를 나타내었다. 엽분과 인산염은 유의한 음의 상관관계를 보였으며, secchi disk와는 유의한 양의 상관관계를 나타내었다. 엽록소 *a*와 환경인자와의 상관관계에서는 대형과 소형 그리고 전체 식물플랑크톤 모두 수온과는 유의한 음의 상관관계를 보였고, 엽분과 secchi disk와는 전체 식물플랑크톤과 대형식물플랑크톤이 유의한 양의 상관관계를 나타냈다. 전체 및 대형, 소형 식물플랑크톤과 영양염류와의 상관관계를 보면 인산염, 규산염에서 유의한 음의 상관관계를 보였다(Table 3).

4. 고찰

하구는 육상에서 유입되는 담수와 해양의 염수가 만나는 해역으로 담수유입정도에 따라 환경 변화가 조절된다. 이러한 하구에서 서식하는 식물플랑크톤은 담수유입에 의한 영양염류의 변화보다는 불안정한 수피나 높은 탁도 그리고 급격한 엽분 변화 등에 더 민감하게 반응한다(Fisher 등, 1988). 양 등(2001)은 낙동강 하구역에서 풍수기에는 담수의 유입으로 엽분의 급격한 감소와 탁도의 증가로 Chl *a*와 생산력이 감소한다고 보고한 바 있고, 실제로 많은 연구에서 부유물

질유입에 따른 탁도의 증가가 생물의 조성과 분포에 영향을 미치는 것으로 알려져 왔다(Arruda 등, 1983; Hart, 1988; Kirk 1991; Zurek, 1980). 본 조사에서는 각 방조제로부터 유입되는 담수유입량을 직접적으로 확인할 수 없었지만 엽분의 변화를 통해 여름에 담수 유입이 가장 많다는 것을 간접적으로 파악할 수 있었다. 담수유입이 많았던 2007년 8월에는 암모늄과 규산염의 농도가 높았으며, 인산염 역시 절대농도에 제한을 받는 기준(<2 μM) 이상의 농도를 보였지만 Chl *a*는 낮은 결과를 보였다. 상관분석에서 Chl *a*와 엽분 및 secchi disk의 유의한 양의 상관관계를 고려하면, 본 해역 역시 영양염류보다는 물리적 환경인자(엽분-투명도)가 식물플랑크톤 성장에 민감하게 작용하는 것으로 판단된다(Fig. 3, 4, Table 3).

일반적으로 식물플랑크톤 성장에 영향을 주는 제한 영양염을 파악하기 위해서는 N:P:Si비에 의한 평가가 가장 보편적으로 이용되고 있다. 하지만 저농도의 지역에서는 측정오차로 인해 명확한 해석이 어려울 수 있으며(이 등, 2001), 같은 구성비라도 절대농도가 높은 경우 제한 영양염을 판단하기 어렵다. DIN, DIP, DSi의 농도가 각각 1.0, 0.2, 2.0 μM 이하일 경우 영양염 절대농도에 제한을 받으며, DIN/DIP<10, DSi/DIN>1 이면 질산염 제한, DSi/DIP>20, DIN/DIP>20 이면 인산염 제한 그리고 DIN/DIP<10, DSi/DIN>1 경우에는 규산염이 제한인자로 작용한다고 보고하였다(Dortch 와 Whitlege, 1992; Justic 등, 1995). 이와 같은 기준을 적용했을 때, 조사기간 동안 대부분 DIN, DIP, DSi 농도는 각각 1.0, 0.2, 2.0 μM 이상이었으나 2007년 2월 창포방조제의 C1, C2 정점과 2007년 5월 복길방조제의 B2 정점에서는 인산염이 0.2 μM 보다 낮은 농도를 보임으로서 인산염이 제한인자로 작용하는 것으로 판단된다(Fig. 4C). 또한, 성분 구성비를 이용한 결과에서도 인산염이 제한인자로 확인되었다(Table 1). 성분 구성비를 이용한 제한 영양염 판단 결과, 2007년 2월에는 대부분 정점에서 인산염이 제한인자로 파악되었으나 2007년 5월에는 창포방조제의 C1, C3, B1 정점에서 질산염이 제한인자로 파악되었다(Table 1). 식물플랑크톤 증식시 급격한 인산염 소모는 해역을 인 제한 상태로 전환시킬 수 있다. 본 연구에서도 규조류에 의해 높은 Chl *a*를 보

였던 2007년 2월에 인산염과 규산염이 2006년 11월보다 2배정도 감소하였고, 특히 Chl *a*가 높았던 창포방조제 해역에서 급격히 감소하였다(Fig. 4, 5). 규조류와 인산염 그리고 Chl *a*와 인산염 및 규산염의 유의한 음의 상관성을 고려할 때, 대형 규조류의 증식에 의해 규산염과 인산염이 소비되었을 것으로 판단된다. 이러한 과정을 통하여 본 시기의 해역은 일시적인 인산염 제한이 나타났을 것으로 사료된다(Table 1, 3). 식물플랑크톤이 영양염을 흡수하여 영양염 농도가 낮게 나타난 결과는 아산만 및 섬진강 하구(권 등, 2004; 이 등, 2005)에서도 보고된 바 있다.

조사기간 동안 본 해역은 총 7개 분류군(규조류, 와편모조류, 은편모조류, 남조류, 황금색편모조류, 유글레나류, 녹조류)으로 분류되었다. 조사기간 동안 규조류가 높은 분포를 보였으며 특히, 겨울철에 규조류가 극우점하는 경향을 보였다. 여름철과 가을철에는 상대적으로 규조류가 감소하고 와편모조류, 은편모조류, 남조류등이 증가하였다(Fig. 8). 박(1994)에 의한 선행연구에서도 전반적으로 규조류가 높은 비율을 차지하였으며, 겨울철에 증가하였고 하계에는 다른 군집이 증가하는 결과가 보고되었다.

가을철 창포방조제 해역에서 우점종은 *Cryptomonas* sp. 가 35% 이상으로 나타났고, 복길방조제 해역에서 우점종과 아우점종은 *Coscinodiscus* sp.와 *Nitzschia* sp.로 나타났는데 *Nitzschia* sp.는 간혹 군체의 형태로 출현하였다. *Nitzschia* sp.를 포함하고 있는 니트시아과(科)는 다발과 같은 군체를 나타내거나 끝과 끝이 연결되어 긴 리본모양 군체를 형성하거나 점액질 속에 싸이는 특징을 가진다고 보고된바 있다(심, 1994). 구일방조제 해역에서는 *Cryptomonas* sp.와 *Microcystis* sp.가 우점하였고, 해역 전반에 걸쳐 소형식물플랑크톤이 우세하였다(Fig. 6, Table 2). 겨울철에는 전 해역에서 *Cyclotella* sp.가 약 46~74%의 비율로 극우점(Table 2) 하였는데 당시의 군집은 규조류가 높은 비율로 나타났으며(Fig. 8), 식물플랑크톤의 크기구조는 대형식물플랑크톤이 높은 비중을 차지하였다(Fig. 6). 봄에 각 방조제의 해역에서 우점종은 *Eucampia* sp.가 나타났는데, 이 속을 포함한 반원통돌말아과(亞科)는 실폐돌말과(科)에 속하는데 대부분 부유성으로 많은 종이 휴면포자를 만드는 특징이 있다(심, 1994). 여름

철 우점종의 특징을 보면 남조류인 *Oscillatoria* sp.와 규조류인 *Fragilaria* sp., *Synedra* sp. 와 같은 담수성 조류가 우점종으로 동정되었다(Table 2). 박 등(1994)에 의한 선행연구에서는 *Thalassiosira* 속은 2월과 4월 그리고 7월에 우점하며, *Skeletonema costatum*와 *Paralia sulcata*는 각각 4월과 5월에 우점한다고 보고하였다. 또한 하계인 7월에는 조사정점에 따라 우점종이 다른 양상을 보였으며, 10월에는 모든 조사정점에서 *Eucampia zodiacus*가 우점하였다. 본 연구와 선행연구간의 조사시기에 따른 우점종은 다소 차이를 보였으나 하계에 다양한 종들이 우점하는 결과는 일치하였다. 이는 담수의 유입이 존재하는 하구에서는 환경 변화에 따라 종조성이 변화할 수 있음을 시사한다. Nybakken (1997)은 하구역에 서식하는 생물들은 염분변화에 따라 종조성과 개체수가 큰 차이를 보이며, 하구역에서는 담수와 해수가 혼합되어 담수, 해수, 그리고 기수에 서식하는 생물군이 혼재되어 나타나게 된다고 하였다. 또한 서해안에 위치한 아산만에서도 여름철에 은편모조류와 남조류가 높은 점유율로 나타났는데, 이는 담수 유입으로 인한 낮은 염분의 영향으로 추정되었다(이 등, 2005). 본 조사해역의 경우 여름철에 모든 정점에서는 규조류가 가장 높은 구성비율을 나타냈지만 다른 조사기간에 비하여 남조류가 증가하였는데(Fig. 8D) 이는 담수의 유입으로 인한 염분의 저하와 기수역이 형성됨으로서 서식하는 생물군이 혼재되어 나타난 것으로 판단된다.

식물플랑크톤의 군집구조는 크기구조에 영향을 미치게 되는데 조사기간 동안 군집구조와 크기구조를 비교하면 대형식물플랑크톤이 우점하는 시기에는 규조류가 높은 비율로 존재하였으며, 소형식물플랑크톤이 증가하는 시기에는 대체적으로 규조류가 감소하고 와편모조류, 은편모조류, 녹조류 그리고 남조류의 비율이 높아졌다(Fig. 6, 8). 통계분석 결과에서도 규조류는 대형 식물플랑크톤과 유의한 양의 상관관계를 나타내었다(Table 3).

5. 결론

본 연구는 청계만 해역의 환경변화에 따른 식물플랑크톤 변동과 식물플랑크톤 크기구조에 따른 군집

(종조성)의 계절변화를 파악하기 위하여 계절별로 총 4회 조사를 실시하였다. 수온은 우리나라 계절에 따른 패턴과 유사하였으며, 염분은 강우가 집중되는 여름철에 낮은 분포를 보였고, 염분 변화를 통해 간접적으로 담수유입이 존재함을 확인하였다. 여름철에 암모늄과 규산염이 높은 농도를 보였으며, 투명도는 감소하였다. Chl *a*와 환경인자와의 상관분석에서 본 해역은 염분과 투명도와 유의한 양의 상관관계를 보임으로써 본 해역의 식물플랑크톤은 영양염류보다는 물리적 환경인자에 더 민감하게 반응하였다. 식물플랑크톤 성장에 영향을 주는 제한 영양염을 확인하기 위하여 영양염 절대농도와 성분 구성비를 이용하였다. 본 해역의 경우 대부분의 조사에서 DIN, DIP, DSI의 농도가 각각 1.0, 0.2, 2.0 μM 이상으로 영양염 절대농도에 제한을 받지 않았으며, 성분 구성비를 이용한 제한 영양염 판단에서는 겨울철에는 인이, 봄철에는 조사 정점에 따라 인과 질소가 복합적으로 제한 인자로 작용하였다. 식물플랑크톤의 대증식(bloom)시에는 성장에 필요한 영양염을 다량 소모하기 때문에 해역을 일시적으로 영양염 제한 상태로 전환시킬 수 있다. 규조류에 의해 높은 Chl *a*를 보였던 겨울철에는 인산염과 규산염이 낮은 농도를 나타내었으며, 규조류와 인산염 그리고 Chl *a*와 인산염 및 규산염의 상관분석 결과를 고려할 때, 겨울철의 인 제한은 대형 규조류의 증식에 의하여 나타난 결과로 판단된다. 조사기간 동안 본 해역은 총 7개 분류군(규조류, 와편모조류, 은편모조류, 남조류, 황금색편모조류, 유글레나류, 녹조류)으로 분류되었다. 조사기간 동안 규조류가 높은 군집을 보였으며 특히, 겨울철에 규조류가 극우점하는 경향을 보였다. 여름철과 가을철에는 상대적으로 규조류가 감소하고 와편모조류, 은편모조류 남조류 등이 증가하였다. 조사기간 동안 주로 규조류가 우점하였으나 가을에는 일부 정점에서 은편모조류와 남조류가 우점종으로 동정되었으며 여름철에는 일부 담수성 규조류가 우점을 나타내었다. 조사기간 동안 군집구조와 크기구조를 비교하면 대형식물플랑크톤이 우점하는 시기에는 규조류가 높은 비율로 존재하였으며, 소형식물플랑크톤이 증가하는 시기에는 대체적으로 규조류가 감소하고 와편모조류, 은편모조류, 녹조류 그리고 남조류의 비율이 증가하였다. 이러한 식물플랑

크톤의 종조성 변화는 크기구조 변화를 야기할 수 있으며, 이는 전체 멍이망 구조에도 영향을 미칠 수 있다. 본 연구결과는 연안하구에서의 식물플랑크톤 동역학(dynamics) 이해와 연안하구의 효율적인 관리에 기여할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 김용재, 김명운, 김상중, 1998, 한강 중하류 수계에서 식물플랑크톤 군집의 생태학적 특성, 조류학회지, 13(3), 331-338.
- 권기영, 문창호, 이재성, 양성렬, 박미옥, 이필용, 2004, 섬진강 하구역에서 영양염의 하구내 거동과 플럭스, 한국해양학회지, 9, 153-162.
- 문창호, 최혜지, 1991, 낙동강 하구 환경특성 및 식물플랑크톤의 군집구조에 관한 연구, 한국해양학회지, 26(2), 144-154.
- 박경양, 1994, 복길 간척지 주변 해역의 식물플랑크톤의 군집에 관한 연구, Bulletin of Institute of Littoral Environment, 11, 81-90.
- 송태곤, 1997, 전남 무안군의 4개 소하천의 저서무척추동물 및 담수어류상, Bulletin of Institute of Littoral Environment, 14, 27-34.
- 심재형, 1994, 한국동식물도감 제34권 식물편 해양식물플랑크톤, 141.
- 양성렬, 송환석, 문창호, 권기영, 양한섭, 2001, 낙동강 하구역의 담수유입에 따른 해양환경 및 일차생산력 변화, 한국조류학회지, 16(2), 165-177.
- 이상현, 신용식, 양성렬, 박철, 2005, 아산만 식물플랑크톤의 계절별 군집 분포 특성, Ocean and Polar Research, 27(2), 149-159.
- 이영식, 이재성, 정래홍, 김성수, 고우진, 김귀영, 박중수, 2001, 광양만에서 식물플랑크톤 제한영양염, 한국해양학회지(바다), 6, 201-210.
- 조은섭, 2010, 목포항 주변해역의 수질 및 식물플랑크톤 변동 특성, 한국환경과학회지, 19(11), 1323-1336.
- 지 성, 신용식, 서호영, 2008, 청계만 식물플랑크톤 크기구조의 계절적 변동, 한국해양학회지, 13(4), 333-341.
- Amstrong, R. A., 1994, Grazing limitation and nutrient limitation in marine ecosystems: steady state solution of an ecosystem model with multiple food chains, Limnol. Oceanogr, 39(3), 597-608.
- Arruda, J. A., Marzolf, G. R., Faulk, R. T., 1983, The role of suspended sediments in the nutrition of

- zooplankton in the turbid reservoirs, *Ecology*, 64, 1225-1235.
- Bold, H. C., Wynne, M. J., 1985, Introduction to the algae, 2nd Ed., Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 720.
- Brook, A. J., 1965, Planktonic Algae as indicators of lake types, with special reference to the desmidiaceae, *Limnol. Oceanogr.*, 10, 403-411.
- Caraco, N. F., Cole, J. J., Raymond, P. A., Strayer, D. L., Pace, M. L., Findlay, S. E. G., Fisher, D. T., 1997, Zebra mussel invasion in a large, turbid river: Phytoplankton response to increased grazing, *Ecol.*, 78(2), 599-602.
- Carpenter, S. R., Kitchell, J. F., Hodgson, J. R., Cochran, P. A., Elser, J. J., Elser, M. M., Lodge, D. M., Kretchmer, X., He, X., von Ende, C. N., 1987, Regulation of lake primary productivity by food web structure, *Ecol.*, 68, 1863-1876.
- Chapman, V. J., 1968, The algae, Macmillan London, Melbourne, Toronto St Martis Press, New York, 472.
- Dodge, J. D., 1975, The fine structure of algal cells, Academic Press, Inc. London, 261.
- Dortch, Q., Whitley, T. E., 1992, Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions?, *Continental Shelf Research*, 12, 1293-1309.
- Fisher, T. R., Harding, L. W., Jr., Stanley, D. W., Ward, L. G., 1988, Phytoplankton, nutrient and turbidity in the Chesapeake, Delaware and Hudson estuaries, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 27, 61-93.
- Hart, R. C., 1998, Zooplankton feeding rates in relation to suspended sediment content: Potential influence on community structure in a turbid reservoir, *Freshwater Biol.*, 19, 123-139.
- Hellawell, J. M., 1986, Biological indicators of freshwater pollution and environmental management, Elsevier Applied Science Publishers, 546.
- James, A., 1979, The value of biological indicators in relation to other parameter of water quality, in: James, A. and Evison, L. (eds.), Biological indicators of water quality, Chapter 1. John Wiley and Sons, USA.
- Justic, D., Rabalais, N. N., Turner, R. E., Dortch, Q., 1995, Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences, *Estuar. Coast. Shelf. Sci.*, 40, 339-356.
- Kirk, K. L., 1991, Suspended clay reduces Daphnia feeding behavioural mechanism, *Freshwater Biol.*, 25, 357-365.
- Kivi, K., Kaitala, S., Kuosa, H., Kuparinen, J., Leskinen, E., Lignell, R., Marcussen, B., Tamminen, T., 1993, Nutrient limitation and grazing control of the Baltic plankton community during annual succession, *Limnol. Oceanogr.*, 38(5), 893-905.
- Michaels, A. E., Silver, M. W., 1988, Primary production, sinking fluxes and the microbial food web, *Deep-Sea Res.*, 35, 473-490.
- Nybbaken, J. W., 1997, Marine biology: An ecological approach, Wesley Educational Publishers Inc., 304-308.
- Palmer, C. M., Adams, S., 1977, Algae and water pollution, Municipal environmental research and development, U.S. EPA, Cincinnati, Ohio, USA.
- Parsons, T. T., Maita, Y., Lalli, C. M., 1984, A manual of chemical and biological methods for seawater analysis, Peramon Press, New York, 22-25.
- Raymont, J. E. C., 1980, Plankton and productivity in the ocean, 2nd, Phytoplankton, Peramon. Press. Oxford, 330.
- Ryther, J. H., 1969, Photosynthesis and fish production in the sea, *Sci.*, 166, 72-76.
- Schoeman, F. R., 1973, A systematic and ecological study of the diatom flora of Lesotho with special reference to the water quality, 365, in: James, A. and Evison, L. (eds.), Biological indicators of water quality, John Wiley and Sons, USA.
- Sin, Y. S., Wetzel, R. L., Anderson, I. C., 1999, Spatial and temporal characteristics of nutrient and phytoplankton dynamics in the YORK River, Virginia: analyses of long-data, *Estuarine.*, 22, 260-275.
- UNESCO, 1978, Water quality surveys, UNESCO, WHO, 350.
- Walsh, J. J., 1976, Herbivory as a factor in patterns of nutrient utilization in the sea, *Limnol. Oceanogr.*, 21, 1-13.
- Watanabe, T., 1962, On the Biotic. Index of Water Pollution based upon the species Number of Bacillariophyceae in the Tokoro River in Hokkaido (in Japanese), *Japan J. Ecol.*, 12, 216-222.

- Whitton, B. A., 1979, Plants as indicators of river water quality, in : James, A. and Evison, L. (eds.), Biological indicators of water quality, Chapter. 5., John Wiley and Sons, USA.
- Zurek, R., 1980, The effects of suspended materials on the zooplankton. I Natural environments, Acta Hydrobiol., 22, 449-471.