

화진포호의 돌말 *Skeletonema costatum* 대발생과 영양상태

김 백 호 · 원 두 희¹ · 김 용 재^{2,*}

한양대학교 생명과학과, ¹(주)두희생태연구소, ²대진대학교 생명과학과

Spring Bloom of *Skeletonema costatum* and Lake Trophic Status in the Hwajinpo Lagoon, South Korea. Kim, Baik-Ho, Doo-Hee Won¹ and Yong-Jae Kim^{2,*} (Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea; ¹Doohee Institute of Ecological Research, Seoul 153-768, Korea; ²Department of Life Science, Daejin University, Gyeonggi 478-711, Korea)

In the spring (March to June) in 2010, one diatom *Skeletonema costatum* occurred outbreaks in Lake Hwajinpo, one of the typical lagoons on the east coast of South Korea. We compared the characteristics of the phytoplankton community during the bloom and extinction period of *S. costatum*, and evaluated the water quality based on nutritional indices. Results indicate that 1) this bloom showed the highest cell density ($>10^5$ cells mL⁻¹) among outbreaks of *S. costatum* occurred Korea, 2) occurred in below or over 20°C water temperature, and 3) was destroyed in the early summer with higher temperature than the bloom period. Water quality or trophic status of the lake was eutrophic to hypertrophic with high salinity, BOD, COD and phosphate, and low N/P ratios and transparency. Phytoplankton community in the spring bloom had a high dominance and low diversity, but rightly recovered to low dominance and high diversity in the summer season. Therefore, we temporarily conclude that the bloom of *S. costatum* in Hwajinpo was triggered by the extended spring drought and the reduced influx of river water, and appeal that the bloom can happen repeatedly every year.

Key words : *Skeletonema costatum*, spring bloom, Hwajinpo lagoon, TSI

서 론

한반도 석호(lagoon)는 주로 해빙기 해수면 상승으로 인하여 만입된 하곡이 사주나 사구의 발달로 인하여 형성된 자연호로서 동해안에 집중적으로 분포하며 점차적으로 하천으로부터 운반되어 들어온 퇴적물이 증가하면서 수표면적이나 수위를 감소시키고 더욱 심화되면 습지단계

를 거쳐 최종적으로 해안평야로 진행될 것이다(WREO, 1997~2009). 석호들은 내륙에서 유입되는 담수와 간헐적으로 유입되는 해수가 혼합되기 때문에 저수지 염분농도가 시간에 따라 변동되고 따라서 염분에 대한 내성의 정도에 따라 담수 및 해양 생물들이 공존하는 등 독특한 생태계를 형성한다(Hwang and Yoon, 2008).

하구나 석호와 같이 해수와 담수가 혼합되는 수역에서 영양염은 강우가 빈번한 여름철 풍수기에 유기물을 포함

* Corresponding author: Tel: 031) 539-1851, Fax: 031) 539-1850, E-mail: yjkim@daejin.ac.kr

한 각종 하, 폐수가 유입되는데 만일 특정한 오염원(예, 독성물질)이 없다면 대개 인보다 질소가 상대적으로 높다(Hecky and Kilham, 1988; Taylor *et al.*, 1995). 따라서 석호와 같은 수역에서 여름철(고수온, 풍수기)에는 N/P가 높아 인이 식물플랑크톤 성장의 제한 영양염으로 작용한 반면 봄철(저수온, 갈수기)에는 N/P비가 낮아 질소가 제한 영양염으로 작용한다(Smith, 1982; Fisher *et al.*, 1992).

화진포호는 군사지역으로서 일반인의 출입이 제한되어 다른 석호들에 비해 인위적인 교란이 적고 자연상태를 잘 보존되어 왔으나 1991년부터 국민 휴양지로 지정되면서 주변에 박물관, 숙박 및 위락시설 등이 조성되고, 농작물을 경작함으로써 호수내 영양물질 농도가 점차 증가하는 추세다(Heo *et al.*, 1999, 2004). 지금까지 화진포호에서는 61종의 식물플랑크톤이 분포하며, 북호에서는 남조 *Anabaena spiroides*가, 남호에서는 녹조 *Schroedria* sp.가 각각 우점한다고 알려져 왔다(Heo *et al.*, 2004). 그러나 최근(2010년) 봄철에 돌말 *Skeletonema costatum*가 대발생을 하였으며, 당시 세포밀도는 지금까지 보고된 것 중 가장 높은 수준($> 10^5$ cells mL⁻¹)이었다.

*S. costatum*은 광온 및 광염성종으로 기수역과 연안해역에 널리 분포하며, 국내에서는 남서해안 전역에서 출현하고 있다(Lee *et al.*, 1997; Yeo *et al.*, 1997; Yoon, 1999; Yoon and Kim, 2003; Park *et al.*, 2009; Baek and Kim,

2010; Cho, 2010). 이들은 주로 여름철 고수온기 저염분 조건에서 빠른 성장을 보였으며(Han *et al.*, 1992), 섬진강하구에서 저수온기(2월)에 높은 밀도가 보고된 바 있으며(Baek *et al.*, 2011; Min *et al.*, 2012)도 겨울철 저수온기($< 10^{\circ}\text{C}$)에 광양만에서 우점한다고 보고하였다. 최근 담수화가 진행되고 있는 시화호에서도 4~7월까지 수온에 상관없이 지속적으로 높은 밀도를 보였다(Shin *et al.*, 2000).

이처럼 *S. costatum*의 분포는 해양은 물론 기수역에서도 높은 밀도를 나타내지만 대발생조건에 대해서는 불분명하며 특히 화진포호와 같이 해수와 담수가 혼합되는 석호에서의 대발생은 물론 이로 인한 수질 및 식물플랑크톤 군집에 미치는 영향은 정확하지 않다. 따라서 본 연구는 화진포호의 *S. costatum* 발생특성 및 저수지 수질을 평가하고자, 조류발생기와 소멸기 동안 수질 및 식물플랑크톤 군집을 서로 비교하고, Carlson (1977)과 Yang and Dickman (1993)의 영양지수를 근거로 저수지의 수질상태를 평가하였다.

재료 및 방법

1. 조사호수

화진포호(19.9 km²)는 동해안에 분포하는 7개 자연호



Fig. 1. A map showing sampling stations in the Hwajinpo Lagoon, South Korea. S1 and S2 are located in the south parts of lagoon, S3 is within the north part of lagoon.

중 경포호 (54.1 km²), 청초호 (29.6 km²)에 이어 3번째로 크다. 강원도 고성군 현내면과 거진읍을 포함하는 5개 마을을 포함하는 기수호이다. 유입하천은 중평천과 월안천, 그리고 2, 3개 소형하천으로 구성되어 있다. 호소는 크게 북호와 남호의 두 개로 나뉘어져 있으며 두 저수지는 중간이 병목형태로 되어 물의 상호이동이 원활하지 못하다. 화진포호는 규모가 작은 북호는 남호에 비해 높은 염분을 갖는 기수호 특성을 보이는 반면 남호는 유입하천의 영향이 크고 염분농도가 낮다. 저수지의 수심은 비록 낮지만(최대 3.6 m) 수심에 따른 염분농도 차이로 인한 화학성층을 형성한다(Heo *et al.*, 1999; Nam, 2003).

2. 환경 및 생물분석

조사는 *Skeletonema costatum*의 발생기(2010.4~6)와 소멸기(2010.7~10)의 수질 및 식물플랑크톤 군집을 비교하기 위하여, 월 1회씩 조사를 실시하였다. 현장조사는 규모가 큰 남호에 2개 지점(S1; 강원도 고성군 거진읍 원당리, S2; 강원도 고성군 현내면 죽정리)과 작은 북호에 1개 지점(S3; 강원도 거진읍 화포리) 등 총 3개 지점에 실시하였다(Fig. 1).

환경요인인 수온, 용존산소, pH, 전기전도도, 염도 및 탁도 등은 Portable multi-parameter (YSI 600QS-O-M, YSI inc., USA)를 이용하여 현장에서 직접 측정하였고, 영양염 및 엽록소 등은 Vandorn식 채수기로 현상수를 채수한 다음 실험실로 옮겨 각각 분석하였다. 총질소(TN)는 자외선 흡광도법, 질산(NO₃-N)는 불루신법, 아질산(NO₂-N)은 디아조법, 암모니아(NH₃-N)는 인도페놀법, 총인(TP)은 아스코르빈산 환원법, 인산(PO₄-P)는 염화제일 주석환원법으로 각각 분석하였다(APHA, 2001). 엽록소(Chl-*a*)는 현장에서 시료를 채취하여 실험실로 운반한 다음 정량 시료를 Whatman GF/C filter로 여과하고, 90% 아세톤액에 넣어 냉암소에서 24시간 추출한 후, 익일 630, 663, 645, 750 nm에서 각 흡광도를 측정하여 Chl-*a* 양을 산출하였다(APHA, 2001).

식물플랑크톤 분석은 현장에서 1 L polyethylene 병에 정량 채수하여 3~5% Lugol's solution을 처리하여 24시간 이상 정치한 다음, 상등액은 siphon으로 제거하고 남은 시료를 이용하여 광학현미경(Zeiss Axioscop 20, ×400)하에서 동정하였다. 정량분석은 시료를 균일하게 섞은 후 Sedgwick-Rafter chamber에 시료 1 mL을 넣고 계수하였다. 돌말류 분석은 정량 채집한 시료를 KMnO₄법(Hendey, 1977)을 사용하여 산처리하고 영구표본을 제작한 다음 광학현미경(Zeiss Axioscop 20, ×1000~2000)하에

서 동정하였다. 한편 동정된 조류의 분류는 식물플랑크톤의 경우 Smith (1950)의 분류체계에 따랐고, 남조류, 녹조류, 황갈조류 등의 동정은 Hirose *et al.* (1977), Prescott (1962), Hindak (1977), Huber-Pestalozzi (1938, 1955) 등을 참조하였으며, 돌말류의 동정 및 분류는 Lange-Bertalot (1987), Round *et al.* (1990), Patrick and Reimer (1966)와 정 (1993) 등을 참조하였다. 군집분석은 출현종과 생물량을 근거로 각 조사지점별 우점도(Shimpson, 1949), 다양도(Shannon-Weaver, 1963), 균등도(Pielou, 1966), 풍부도(Margalef, 1958) 등을 산출하였고, 저수지의 영양상태를 평가하기 위하여 TSI(Trophic State Index, Carlson, 1977)와 LTSI(Lake Trophic State Index, Yang and Dickman, 1993)를 계산하였다. 한편 조류발생기와 소멸기의 환경 및 생물요인의 평균치 비교는 신뢰도는 0.05 수준으로 하는 Student t-test를 실시하였다(SPSS, 2004).

결과 및 고찰

조사기간 동안 화진포호에서 출현한 식물플랑크톤은 총 149종으로 Smith (1950) 분류체계에 따라 정리하면 7강 11목 21과 56속 146종 3변종으로 구성되었다. 이들은 녹조 13종(2목 5과 8속), 유글레나 4종(1목 2과 3속), 황갈조 5종(1목 2과 2속), 돌말 96종(2목 7과 26속), 와편모조 4종(1목 1과 3속), 은편모조 7종(1목 1과 4속), 남조 20종(2목, 3과 10속) 등으로 구성되었다. 따라서 식물플랑크톤 군집은 돌말이 출현종의 60% 이상을 차지하였고 이어 남조(13.4%), 녹조(8.7%), 와편모조(4.7%), 황갈색조(3.4%), 유글레나, 은편모조(각 2.7%) 순으로 나타났다(Table 2).

계절별로는 봄철(4~6월)에 평균 54분류군, 여름철(7~10월)에는 평균 65분류군으로 *S. costatum*의 발생기보다 발생 이후에 출현종수가 상대적으로 많았다. 조사지점별로는 S2지점(봄철)에서 15분류군으로 가장 낮았으며, S1지점(여름철)에서 38분류군으로 가장 높았다. 분류군별로는 계절에 상관없이 돌말은 높은 출현을 보였으며 남조는 봄철보다 여름철에 상대적으로 다양한 종이 출현하였다(Table 2).

조사기간 동안 출현된 총 149종 가운데 기수 또는 해양에서만 출현한 종은 유글레나 *Euglena splendens*, 돌말 *Skeletonema costatum*, *Cyclotella striata*, *Opephora martyi*, *Licmophora flabellata*, *Licmophora lyngbyei*, *Navicula halophila*, *Navicula muticopsis*, *Nitzschia closterium*, 와편모조 *Glenodinium dynobryoneis*, *Gymnodi-*

Table 1. Biological and chemical parameters (average) during the bloom and non-bloom periods of *Skeletonema costatum* in Hwajinpo Lagoon 2010.

Chemical parameters		Bloom	Non-bloom	R	
I	PO ₄ -P	μg L ⁻¹	0.02±0.01	0.01±0.00	281.47*
	Turbidity	NTU	59.10±57.95	22.61±5.03	261.39*
	Salinity	μg L ⁻¹	23.83±4.49	10.33±3.14	230.65*
	Chlorophyll- <i>a</i> (CHL)	μg L ⁻¹	60.08±26.42	26.32±15.02	228.27*
	Electric conductivity	μS cm ⁻¹	35100.0±9180.6	17400.0±4752.7	201.72*
II	Dominance		0.84±0.05	0.50±0.05	167.44*
	Total phosphate	μg L ⁻¹	0.04±0.02	0.03±0.01	157.00
	Biomass	cells mL ⁻¹	10710.5±4943.2	7625.0±1465.0	140.47*
	BOD	μg L ⁻¹	4.37±1.52	3.38±1.64	129.06
	COD	μg L ⁻¹	6.58±0.80	5.25±1.76	125.40*
	DO	mg L ⁻¹	10.39±0.68	8.45±2.26	122.98
	pH		8.55±0.14	7.54±0.55	113.47
	NO ₃ -N	μg L ⁻¹	0.07±0.01	0.06±0.02	111.39
III	No. species		27.67±4.03	30.00±5.97	92.22
	Secchi depth	cm	98.83±43.90	110.17±15.08	89.71
	Total nitrogen	μg L ⁻¹	0.61±0.39	0.74±0.23	83.23
	Richness (J)		2.67±0.77	3.25±0.64	82.08
	Water temp.	°C	20.33±6.95	25.32±3.70	80.32*
	N/P ratios		14.46±9.25	21.03±11.35	68.79
	NO ₂ -N	μg L ⁻¹	0.13±0.06	0.24±0.12	55.85*
IV	Evenness (E)		0.34±0.05	0.68±0.07	49.51*
	NH ₄ -N	μg L ⁻¹	0.22±0.11	0.44±0.14	49.34*
	Diversity (H')		1.58±0.35	3.34±0.35	47.43*

BOD; biochemical oxygen demand, COD; chemical oxygen demand, DO; Dissolved oxygen, LTSI; lake trophic state index TSI; trophic state index, R=(bloom/non-bloom)*100, I; increase of over 2 times higher to non-blooming periods, 200>II>100%, 100>III>50%, IV; decrease of over 2 times higher to non-blooming periods, Asterisk is significantly different at 0.05% confidence.

nium inversum, 남조 *Myxosarcina burmensis* 등을 포함한 46분류군으로 출현종의 31%를 차지하였다(Table 2).

식물플랑크톤 생물량은 조류발생 동안에는 55,808~143,200 cells mL⁻¹의 범위를 보였으며, S1에서 6월에 가장 높은 밀도를 보였고, S3에서 4월에 가장 낮았다. 조류발생이 소멸된 시기(5,784~10,064 cells mL⁻¹)에는 S1에서 가장 최대치를 보였고, S3에서 8월에 최소치를 나타냈다. 한편 조류발생 기간 가장 우점하였던 *S. costatum*는 전체적으로 45,604~123,056 cells mL⁻¹의 범위를 보였으나 8월~10월 동안에는 모든 지점에서 거의 출현하지 않았다. *S. costatum*에 이어 높은 밀도를 보인 *Cyclotella striata*, *Navicula tenera*는 총생물량의 3.4% 1.4%를 각각 보였는데, 전자는 조류발생기와 발생후기에 서로 비슷한 생물량을 보인 반면 후자는 조류대발생기가 소멸기보다 오히려 1/3 정도 낮은 생물량을 나타냈다(Table 2).

S. costatum 대발생기 동안 다른 식물플랑크톤의 분포를 살펴보면 크게 4가지 타입으로 나타났다. 조류발생기 동안 절대적인 우점을 보였던 타입(ADM, Absolutely dominant) - *Skeletonema costatum*, *Phormidium tenue*,

Navicula yuraensis, 비교적 높은 우점을 보인 타입(RDM, Relatively dominant) - *Achnanthes frigida*, *Nitzschia fonticola*, *Synedra fasciculate*, *Navicula halophila* 약간의 증가 또는 감소를 보인 타입(FSDM, Fairly or similarly dominant) - *Navicula incertata*, *Cyclotella atomus*, *Cyclotella striata* 그리고 절대적인 감소를 보인 타입(ADF, Absolutely defeat) - *Navicula tenera*, *Cryptomonas* sp., *Achnanthes delicatula* 등이다. 참고로 타입 ADM은 조류발생기에만 출현한 반면 소멸기에는 전혀 출현하지 않았으며, 타입 ADF는 반대로 조류발생기에는 전혀 출현하지 않았고 소멸기에만 출현한 분류군이다(Table 2).

화진포호에서 2010년 봄철 대발생을 한 *S. costatum*는 조류발생기(4~6월)와 소멸기(7~10월) 동안 환경요인의 뚜렷한 차이를 보였는데 그 정도에 따라 4가지 그룹(I, II, III, IV)으로 구분되었다(Table 1). 그룹I은 조류발생기 동안 수질은 조류가 소멸된 여름철보다 2배 이상의 높은 수준을 보인 요인으로 인산염, 탁도, 염분도, 엽록소, 전도도 등의 높은 증가를 의미한다. 이중 인산염과 염분도를 제외하고는 모두 조류발생으로 인한 결과적 산물이지만,

Table 2. Mean phytoplankton abundance (cells mL⁻¹) during the bloom and non-bloom periods of *Skeletonema costatum* in Hwajinpo Lagoon 2010.

	List of phytoplankton	Bloom	Non-bloom	Log (R)
Absolutely dominant	<i>Achnanthes alteragricillima</i>	186.7±457.4	0	+
	<i>Achnanthes bioretii</i>	56.0±137.2	0	+
	<i>Amphora exigua</i>	56.0±137.2	0	+
	<i>Amphora ovalis</i>	172.2±268.2	0	+
	<i>Amphora ventricosa</i>	79.2±194.0	0	+
	<i>Aulacoseira distans</i> var. <i>alpigena</i>	18.7±45.7	0	+
	<i>Chromulina</i> sp.	3.3±8.2	0	+
	<i>Cocconeis placentula</i>	34.7±84.9	0	+
	<i>Cymbella affinis</i>	34.7±84.9	0	+
	<i>Gymnodinium inversum</i>	96.7±114.8	0	+
	<i>Kephyrion spirale</i>	111.7±173.3	0	+
	<i>Licmophora flabellata</i>	358.7±673.8	0	+
	<i>Navicula accomoda</i>	53.3±88.0	0	+
	<i>Navicula rotunda</i>	182.8±447.6	0	+
	<i>Navicula salinarium</i>	69.3±116.6	0	+
	<i>Navicula veneta</i>	210.2±409.6	0	+
	<i>Navicula yuraensis</i>	778.1±1146.9	0	+
	<i>Nitzschia acicularis</i>	79.0±193.5	0	+
	<i>Nitzschia angusta</i>	68.0±166.5	0	+
	<i>Nitzschia calida</i>	437.0±540.3	0	+
	<i>Nitzschia constricta</i>	39.6±97.0	0	+
	<i>Nitzschia littoralis</i>	79.2±194.0	0	+
	<i>Nitzschia paleacea</i>	45.4±111.1	0	+
	<i>Nitzschia pellucida</i>	45.4±111.1	0	+
	<i>Nitzschia reversa</i>	186.5±456.8	0	+
	<i>Ochromonas pelata</i>	13.3±32.7	0	+
	<i>Opephora martyi</i>	18.7±45.7	0	+
	<i>Oscillatoria luridum</i>	441.7±1081.9	0	+
	<i>Phormidium tenue</i>	646.7±1312.2	0	+
	<i>Pleurosigma delicatum</i>	247.7±367.7	0	+
<i>Rhopalodia gibberula</i>	39.6±97.0	0	+	
<i>Scenedesmus acutus</i>	16.7±40.8	0	+	
<i>Scenedesmus armatus</i>	6.7±16.3	0	+	
<i>Scenedesmus opoliensis</i>	33.3±81.6	0	+	
<i>Skeletonema costatum</i>	76075.9±31516.2	0	+	
<i>Stauroneis spicula</i>	79.2±194.0	0	+	
<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	231.3±472.1	0	+	
<i>Surirella minuta</i>	46.6±114.2	0	+	
<i>Tabellaria flocculosa</i>	39.6±97.0	0	+	
Relatively dominant	<i>Achnanthes frigida</i>	784.3±1676.2	1.4±3.5	4.7
	<i>Cyclotella ocellata</i>	334.7±437.6	1.6±4.0	4.3
	<i>Navicula cincta</i>	210.2±409.6	1.4±3.5	4.2
	<i>Gomphonema angustum</i>	66.6±163.2	0.8±2.0	3.9
	<i>Nitzschia fonticola</i>	693.0±1335.0	13.0±31.9	3.7
	<i>Navicula saprophila</i>	78.7±137.4	1.8±2.8	3.6
	<i>Synedra fasciculata</i>	497.3±919.3	14.3±23.4	3.5
	<i>Nitzschia hybrida</i>	212.9±316.2	6.5±15.9	3.5
	<i>Navicula lanceolata</i>	211.6±319.5	6.5±15.9	3.5
	<i>Navicula halophila</i>	739.5±1696.2	30.3±34.9	3.4
	<i>Nitzschia palea</i>	367.1±459.9	21.3±48.3	3.2
	<i>Nitzschia capitellata</i>	45.4±111.1	2.8±6.9	3.2
	<i>Punctastriata ovalis</i>	22.7±55.5	1.4±3.5	3.2
<i>Navicula alpinum</i>	186.7±457.4	16.1±37.2	3.1	

Table 2. Continued.

	List of phytoplankton	Bloom	Non-bloom	Log (R)
Relatively dominant	<i>Navicula cryptocephala</i>	231.3±472.1	20.3±33.3	3.1
	<i>Bacillaria paradoxa</i>	113.8±195.6	11.0±26.9	3.0
	<i>Cyclotella pseudostelligera</i>	161.3±254.4	15.8±31.2	3.0
	<i>Navicula tripunctata</i>	308.4±432.4	30.3±60.8	3.0
	<i>Achnanthes convergens</i>	34.7±84.9	3.7±9.0	3.0
	<i>Nitzschia perminuta</i>	186.5±456.8	19.9±48.8	3.0
Fairly or similarly dominant	<i>Amphora coffaeiformis</i>	93.2±228.4	10.5±25.8	2.9
	<i>Gyrosigma acuminatum</i>	79.2±194.0	10.0±24.4	2.9
	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>euglypta</i>	86.2±134.2	11.0±26.9	2.9
	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	39.6±97.0	7.3±17.9	2.7
	<i>Navicula incertata</i>	469.4±766.8	93.6±101.9	2.7
	<i>Amphora strigosa</i>	212.4±332.7	51.2±57.8	2.6
	<i>Amphora montana</i>	194.9±256.2	52.1±124.9	2.6
	<i>Navicula gregaria</i>	45.4±111.1	13.0±31.9	2.5
	<i>Fragilaria elliptica</i>	18.7±45.7	6.5±15.9	2.5
	<i>Navicula muticopsis</i>	37.3±91.5	13.0±31.9	2.5
	<i>Achnanthes clevei</i>	240.0±377.6	112.4±113.5	2.3
	<i>Nitzschia dissipata</i>	80.0±125.6	39.0±95.6	2.3
	<i>Achnanthes brevipes</i>	46.6±114.2	24.7±34.8	2.3
	<i>Cyclotella atomus</i>	492.3±463.5	282.0±115.2	2.2
	<i>Kephyrion ovale</i>	8.3±20.4	5.3±13.1	2.2
	<i>Achnanthes exigua</i>	22.7±55.5	16.6±20.4	2.1
	<i>Melosira</i> sp.	169.9±204.4	129.6±317.5	2.1
	<i>Chroomonas</i> sp.	141.7±347.0	113.3±236.6	2.1
	<i>Cyclotella striata</i>	1772.0±1967.8	1604.5±1199.1	2.0
	<i>Amphora</i> sp.	118.8±291.0	117.5±168.4	2.0
Absolutely defeat	<i>Amphora holsatica</i>	112.0±274.5	142.4±233.8	1.9
	<i>Navicula cryptotenella</i>	39.6±97.0	53.6±68.2	1.9
	<i>Gomphonema angustatum</i>	18.7±45.7	25.6±62.7	1.9
	<i>Navicula tenera</i>	368.8±316.3	1025.6±1379.9	1.6
	<i>Licmophora lyngbyei</i>	39.6±97.0	158.4±258.4	1.4
	<i>Cryptomonas</i> sp.	13.3±32.7	584.0±502.7	0.4
	<i>Cryptomonas marsonii</i>	0	1.3±3.3	-
	<i>Dinobryon acuminatum</i>	0	1.3±3.3	-
	<i>Euglena splendens</i>	0	1.3±3.3	-
	<i>Tetraedron minimum</i>	0	1.3±3.3	-
	<i>Achnanthes laterostriata</i>	0	1.4±3.5	-
	<i>Achnanthes minutissima</i>	0	1.4±3.5	-
	<i>Diploneis oblongella</i>	0	1.4±3.5	-
	<i>Navicula clementis</i>	0	1.6±4.0	-
	<i>Navicula subminuscula</i>	0	1.6±4.0	-
	<i>Trachelomonas volvocina</i>	0	4.0±9.8	-
	<i>Merismopedia glauca</i>	0	5.3±13.1	-
	<i>Navicula detenta</i>	0	5.7±14.1	-
	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i>	0	6.5±15.9	-
	<i>Nitzschia sociabilis</i>	0	6.5±15.9	-
	<i>Anabaena crassa</i>	0	9.3±22.9	-
	<i>Monoraphidium dyboewski</i>	0	9.3±22.9	-
	<i>Melosira varians</i>	0	11.9±23.9	-
	<i>Gyrosigma balticum</i>	0	10.0±24.4	-
	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	0	21.6±30.9	-
	<i>Cocconeis disculus</i>	0	13.0±31.9	-
	<i>Achnanthes delicatula</i>	0	28.7±47.7	-
	<i>Navicula pellucida</i>	0	25.9±63.4	-

Table 2. Continued.

List of phytoplankton	Bloom	Non-bloom	Log (R)
<i>Nitzschia inconspicuae</i>	0	41.0±67.5	-
<i>Diloneis subovalis</i>	0	42.4±78.5	-
<i>Fragilaria pinnata</i>	0	50.4±105.4	-
<i>Cocconeis scutellum</i>	0	66.0±107.2	-
<i>Nitzschia closterium</i>	0	72.0±131.6	-
<i>Navicula meniscula</i>	0	80.5±138.7	-
<i>Gomphosphaeria lacustris</i>	0	178.7±167.0	-
<i>Navicula concentrica</i>	0	152.2±169.1	-
<i>Synechococcus aeruginosa</i>	0	129.3±181.3	-
<i>Oscillatoria angustissima</i>	0	128.0±203.5	-
<i>Ochromonas</i> sp.	0	138.7±220.8	-
<i>Chroococcus dispersus</i>	0	273.3±304.3	-
<i>Oscillatoria profunda</i>	0	194.7±344.4	-
<i>Myxosarcina burmensis</i>	0	224.0±391.9	-
<i>Marsoniella elegans</i>	0	274.7±657.2	-
<i>Merismopedia elegans</i>	0	485.3±1188.8	-

$R=(\text{bloom}/\text{non-bloom})\times 100$

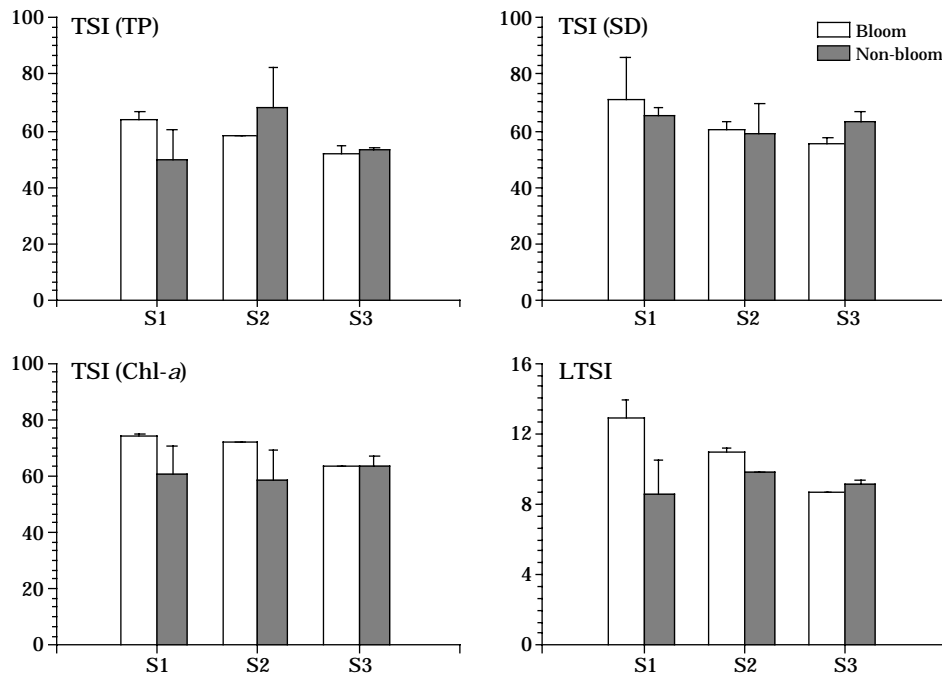


Fig. 2. A trophic state indices of the Hwajinpo lagoon based on the water quality during the bloom and non-bloom periods of diatom *Skeletonema costatum* in 2008. TSI; trophic state index (Carlson, 1977), LTSI; lake trophic state index (Yang and Dickman, 1993).

염분도는 *S. costatum*의 직접적인 요인이라기 보다 해수 유입으로 인한 증가로 보이며, 조류발생이 해수유입과 직, 간접적으로 관련이 있을 것으로 판단되었다. 그룹II는 *S. costatum* 소멸기보다 비교적 높은 수준을 보인 것으로, 총인, BOD, COD, 용존산소, pH, 질산염 등이었다. 이

들은 비록 그룹I보다는 낮지만 대부분 조류발생으로 인하여 증가된 요인들로서 엽록소, pH, 유기물, 총인 증가 등은 전형적인 조류발생의 산물로 판단되었다. 그룹III은 그룹I, II와 반대로 조류발생기 동안 감소하는 요인들이며, 투명도(SD), 총질소, 수온, N/P비, 아질산염 등이다. 수

은, N/P비의 감소 등이 조류발생에 직접적인 원인이 되는지는 불분명하지만, *S. costatum*의 성장조건으로 비교적 낮은 수온과 높은 인 농도가 관여했을 것으로 판단되었다. 그룹IV는 조류발생기 동안 가장 뚜렷한 감소현상을 보인 것으로 암모니아 농도가 약 2배 이상 감소하였다. 이는 *S. costatum*의 성장에 직, 간접적으로 영향을 주는 것으로 판단되며, 특히 질소보다 인에 대한 요구가 높은 것으로 판단되었다.

화진포호의 영양(등급)은 조류발생기나 소멸기 모두 심한 증가나 감소를 보이지 않고 약간의 증가와 감소를 보인 그룹 II와 III에 해당되었다(Fig. 2). Carlson 지수의 경우, TSI (CHL)과 TSI (TP)는 조류발생기가 발생 이후보다 다소 높은 반면, TSI (SD)는 반대로 약간 낮았으며, 돌말류를 이용한 호수의 영양평가지수 LTSI는 조류발생기간이 발생이후보다 약 20% 이상 높게 나타났다. 결국 *S. costatum*의 대발생으로 인하여 호수의 TSI (CHL)와 LTSI는 비교적 높게 증가한 반면, TSI (TP)와 TSI (SD)는 발생이후와 크게 차이를 보이지 않았다. 한편 식물플랑크톤 군집지수는 예상했던 바와 같이, 생물량의 분포가 반영된 결과를 나타냈는데 조류발생기는 세포밀도와 우점도지수가 높았으며, 반대로 균등도와 종다양도 지수는 뚜렷하게 감소하였다(Table 1).

S. costatum 대발생은 국내는 물론 일본 근해에서도 계절에 관계없이 빈번하게 일어나고 있으며, 지금까지는 고수온기 저염분조건에서 발생하는 것으로 알려져 왔다(Shim, 1985; Han *et al.*, 1992; Yoo and Kim, 2004). 본 연구에서도 봄철 수온이 낮은 4월(16.7°C)보다 다소 높았던 6월(24.7°C)에 대발생을 보였다. 그러나 4월에도 평균 7.1×10^4 cells mL⁻¹의 높은 밀도를 보였으며, 여름철 S3지점보다 높은 밀도를 보여, 결국 화진포호에서 *S. costatum* 대발생은 조사지점이나 발생시기(수온)의 문제는 아닌 것으로 판단되었다.

Kwon *et al.* (2002)는 섬진강 하구에서 *S. costatum* 대발생의 주된 원인은 염분에 대한 반응성이 빠르고 인산염의 농도에 민감하게 반응하는 본 종의 특이성으로 보고한 바 있다. 이들은 또한 수온에 상관없이 상대적으로 낮은 염분농도와 인 첨가시에 나타났는데 최고 성장을 보였는데 최적조건은 8월(20°C), 10 psu 상태였다. 국내 연안에서 저농도 질산염이나 인산염의 조건에서도 *S. costatum*의 지속적인 분포는 성장이 크게 감소하지 않고 지속적으로 생물량이 유지되는 종 특이성으로 판단된다(Lee *et al.*, 2000). 본 연구에서도 *S. costatum* 대발생을 보였던 봄철의 N/P비는 14.5로서, 여름철(21.0)에 비해 상대적으로 낮았다. 결국 *S. costatum*는 수온에 상관없이

영양물질(특히 인)이 풍부하고 강우 등에 염분농도가 감소한 시기에 근해에서 대발생하는 것으로 사료되었다.

조류발생기 동안 화진포호의 영양지수(3개 Carlson 지수)는 모두 부영양상태였으며, 특히 S1, S2가 S3보다 높은 수준을 보였으며 소멸기에도 중영양 또는 부영양상태를 나타냈다. 그러나 지점간 차이는 크지 않았다. 한편 제 1우점종인 돌말 *S. costatum*는 4~6월에 높은 생물량(75.3~91.3%)을 보인 반면, 8월에는 *Cyclotella striata*, 10월에는 *Navicula tenera*와 *Merismopedia glauca* 등이 26.4~37.5%로 우점하였다. 호수의 종합적 영양평가지수(LTSI)는 부유물질에 의한 투명도 감소영향을 최소화한 것으로 돌말 출현특성을 근거로 계산 결과, 전체적으로 7.1~13.6의 범위였으며, 6월에 S2, S3 그리고 10월에 S1 등이 부영양, 나머지 시기에는 모두 과영양이었다. 또한 화진포호의 COD(평균 6.6 mg L⁻¹)는 2004~2008년까지 5년간 평균(7.6 mg L⁻¹)보다 다소 감소하였으나 호소환경기준에 의하면 III~IV등급(보통~약간나쁨), TN(평균 0.744 mg L⁻¹)는 5년간 평균(0.593 mg L⁻¹)보다 반대로 증가하였으며 IV등급(약간 나쁨), 총인(평균 0.0437 mg L⁻¹)은 과거 5년간 평균(0.0555 mg L⁻¹)보다 약간 감소하였으며, 호소생활환경기준에 의하면 III등급(보통)의 수질을 각각 나타내었다.

2010년도 화진포호의 *S. costatum* 대발생은 지금까지 보고된 국내에서 발생한 것들 중 가장 높은 세포밀도를 보였으며, 고수온기와 저염분 농도에서 주로 발생한다는 보고들과 차이를 보였다(Han *et al.*, 1992; Kwon *et al.*, 2002; Yoo *et al.*, 2007). 염분농도는 북호 S3(20~22 psu)와 남호 S2(20~24 psu)보다 상대적으로 높았던 남호 S1(25~32 psu)에서 가장 높은 세포밀도를 나타내 낮은 염분농도에서 높은 성장을 보인다는 보고(Han *et al.*, 1992; Baek *et al.*, 2010)와도 상반된 결과를 보였다. 뿐만 아니라 조류발생기 저수지의 수온은 봄철이지만 20°C보다 낮거나 높았는데, 이보다 더욱 높았던 여름철(7월이후)에는 오히려 소멸하였다. 돌말 대발생의 정확한 원인이 되는 환경요인에 대한 추후 연구가 요구된다 하겠다.

아직까지 *S. costatum*의 대발생으로 인한 독성물질 분비 또는 생태계 교란 등은 아직 정확하게 알려진 바가 없지만 이로 인한 투명도 감소, BOD, COD 증가 등 수질 악화가 예상된다. 따라서 화진포호 같은 석호에서 봄철 가뭄이 오래되고 이로 인하여 하천수 유입이 감소하고 저수지내 염분농도 증가 및 N/P비 감소가 조성된다면 이러한 돌말류 대발생은 반복적으로 일어날 가능성이 높다고 사료되었다.

적 요

한반도 동해안에 분포하는 대표적인 석호종의 하나인 화진포호에서 2010년 봄철(4~6월)에 돌말 *Skeletonema costatum*가 대발생하였다. 본 연구는 대발생기와 소멸기 동안 저수지의 식물플랑크톤 군집의 특성을 파악하고 수질을 근거로 하는 호수의 영양지수를 산출하여 수질을 평가하였다. 분석결과 국내에서 가장 높은 세포밀도(>10⁵ cells mL⁻¹)를 보였으며, 수온은 20°C 전후였으나 더 높았던 여름철(7월 이후)에는 소멸하였다. 저수지의 수질은 높은 염분도, BOD, COD, 인산염, 낮은 N/P비, 투명도 등으로 부영양~과영양 상태로 나타났다. 식물플랑크톤 군집은 돌말류가 높은 세포밀도를 보인 조류발생기 동안에는 높은 우점도와 낮은 다양도를 보였으며, 소멸기에는 다시 회복되는 특성을 나타냈다. 결국 2010년 화진포호의 *Skeletonema costatum* 대발생은 봄철 가뭄이 장기간 진행되고 하천수의 유입이 감소함으로써 비롯된 것으로 판단되며 매년 반복될 가능성을 시사해 주었다.

사 사

본 연구는 2012년도 대전대학교 교내연구비에 의해 수행함.

인 용 문 헌

권상용. 2002. 화진포호의 육수생태학적 연구. 삼척대학교 공학석사 학위논문.
 백승호, 신경순, 현봉길, 장풍국, 김현수, 황옥명. 2010. 초여름남해광역권의 수괴별 식물플랑크톤의 군집 구조 특성. *Ocean and Polar Research* **32**: 1-13.
 정 준. 1993. 한국담수조류도감. 아카데미서적.
 APHA. 2001. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th ed. American Public Health Association. Washington, D.C. USA.
 Baek, S.H. and Y.O. Kim. 2010. The study of summer season in Jinhae Bay-short-term changes of community structure and horizontal distribution characteristics of phytoplankton. *Korean Journal of Environmental Biology* **28**(3): 115-124.
 Baek, S.H., D.S. Kim, B.G. Hyun, H.W. Choi and Y.O. Kim. 2011. Characteristics of horizontal community distribution and nutrient limitation on growth rate of phyto-

plankton during a winter in Gwangyang Bay, Korea. *Ocean and Polar Research* **33**: 99-111.
 Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography* **22**: 361-369.
 Cho, E.S. 2010. Variations in marine environments and phytoplankton community around Mokpo Harbour. *Journal of Environmental Science* **19**(11): 1323-1336.
 Davies-Colley, R.J. and D.G. Smith. 2001. Turbidity, suspended sediment, and water clarity: A review. *Journal of American Water Resources Association* **37**(5): 1085-1101.
 Fisher, T.R., E.R. Peele, J.W. Ammerman and L.W. Harding Jr. 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. *Marine Ecology Progress Series* **82**: 51-63.
 Hahm, K.H., M.S. Kim and H.H. Lee. 2002. The acute and chronic toxicity of triorganotin on the growth of microalgae, *Skeletonema costatum*. *Journal of Korean Fisheries Society* **35**(5): 534-541.
 Han, M.S., K. Furuya and T. Nemoto. 1992. Species-specific productivity of *Skeletonema costatum* in the inner part of Tokyo Bay. *Marine Ecology Progress Series* **79**: 267-273.
 Heckey, R.E. and P. Kilham. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnology and Oceanography* **33**: 796-822.
 Hendey, N.I. 1977. The permanganate method for cleaning freshly gathered diatoms. *Microscopy* **32**: 423-426.
 Heo, W.M., B.C. Kim and M.S. Jun. 1999. Evaluation of eutrophication of lagoons in eastern coast of Korea. *Korean Journal of Limnology* **32**(2): 141-151.
 Heo, W.M., S.Y. Kwon, J.I. Lee, D.J. Kim and B.C. Kim. 2004. The limnological survey of a coastal lagoon in Korea (3). Lake Hwajinpo. *Korean Journal of Limnology* **37**(1): 12-25.
 Hindák, F. 1977. Studies on the chlorococcal algae (Chlorophyceae). - Biologické Práce 23/4. Veda, Bratislava.
 Hirose, H. and T. Yamagishi. 1977. Illustration of the Japanese Fresh-water Algae. Uchidaroka-kuno Publishing Co.
 Huber-Pestalozzi, G. 1938. Das Phytoplankton des Süßwasser. Systemak und Biologie. Teil 1. Blaualgen Bakterien. Schweiz. Verl. Stuttgart.
 Huber-Pestalozzi, G. 1955. Das Phytoplankton des Süßwasser. Systemak und Biologie. Teil 4. Euglenophyceen. Schweiz. Verl. Stuttgart.
 Hwang, S.I. and S.O. Yoon. 2008. Geomorphic characteristics of coastal lagoons and river basins, and sedimentary environment at river mouths along the middle east coast in the Korean peninsula. *Journal of Korean Geomorphology Association* **15**(3): 17-33.
 Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1991a. Süßwasser

- flora von Mitteleuropa, Band 2/3 : Bacillariophyceae 3.Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer, eds.). Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg Berlin.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1991b. Süswasser flora von Mitteleuropa, Band 2/4 : Bacillariophyceae 4.Teil: Achnanthaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema Gesamtliteraturverzeichnis (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer, eds.). Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg Berlin.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 2007a. Süswasser flora von Mitteleuropa, Band 2/1: Bacillariophyceae 1.Teil : Naviculaceae (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer, eds.). Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg Berlin.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 2007b. Süswasser flora von Mitteleuropa, Band 2/2: Bacillariophyceae 2.Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer, eds.). Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg Berlin.
- Kwon, K.Y., C.H. Kim, C.K. Kang, C.H. Moon, M.O. Park and S.R. Yang. 2002. Limiting nutrients for phytoplankton growth in the Seomjin River estuary as determined by algal bioassay experiment. *J. Kor. Fish. Soc.* **35**(5): 455-462.
- Lange-Bertalot, H. 1979. Pollution tolerance of diatoms as a criterion for water quality estimation. *Nova Hedwigia* **64**: 285-304.
- Lange-Bertalot, H. and K. Krammer. 1987. Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. Neue und wenig bekannte Taxa, neue Kombinationen und Synonyme sowie Bemerkungen und Ergänzungen zu den Naviculaceae. Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg Berlin.
- Lee, J.H., H.S. Song and E.H. Lee. 1997. Red-tide on phytoplankton diatoms in Incheon Dock of Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **15**(2): 119-129.
- Lee, T.K., M.H. Park and M. Jang. 2000. Comparison on growth and biochemical composition of *Gymnodinium sanguineum* and *Skeletonema costatum* grown in different N, P concentrations. *Korean Journal of Environmental Biology* **18**(4): 395-401.
- Margalef, R. 1958. Information theory in ecology. *General Systems* **3**: 36-71.
- Min, J.O., S.Y. Ha, M.H. Chung, B.H. Choi, Y.J. Lee, S.H. Youn, W.D. Yoon, J.S. Lee and K.H. Shin. 2012. Seasonal variation of primary productivity and pigment of phytoplankton community structure in the Seomjin Estuary. *Korean Journal of Limnology* **45**: 139-149.
- Nam, M.R. 2003. A study on the conservation strategy of ecosystem in Kangwon - Conservation of lagoons on the East Coast. Yonsei University. M.S. thesis.
- Park, J.S., Y.H. Yoon and S.J. Oh. 2009. Variation characteristics of phytoplankton community in the mouth parts of Gamak Bay, Southern Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **27**(2): 205-215.
- Patrick R. and C.W. Reimer. 1966. The Diatoms of the United States. Exclusive of Alaska and Hawaii, Vol. 1. The Academy of Natural Sciences, Philadelphia.
- Pielou, E.C. 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology* **13**: 131-144.
- Prescott, G.W. 1962. Algae of the Western Great Lakes area with an Illustrated Key to the Genera of Desmids and Freshwater Diatoms. Wm. C. Brown, Dubuque, Iowa.
- Round, F.E., R.M. Crawford and D.G. Mann. 1990. The Diatoms: Biology and Morphology of the Genera. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1963. The Mathematical Theory of Communication, University of Illinois Press, Urbana, Illinois.
- Shim, J.H., W.H. Lee and S.Y. Bak. 1995. Studies on the plankton in the Southwestern waters of the East Sea (Sea of Japan) (II) Phytoplankton - standing crop, non-fraction, and primary production. *Journal of the Korean Society of Oceanography* **20**: 37-54.
- 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**(2): 109-118.
- Simpson, E.H. 1949. Measurement of diversity. *Nature* **163**: 688.
- Smith, G.M., 1950. The Freshwater Algae of the United States. 2nd Edn., McGraw-Hill Book Co., New York.
- Smith, S.V. 1982. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes. An empirical and theoretical analysis. *Limnology and Oceanography* **27**: 1101-1112.
- Taylor, D., S. Nixon, S. Granger and B. Buckley. 1995. Nutrient limitation and the eutrophication of coastal lagoons. *Marine Ecology Progress Series* **127**: 235-244.
- Wonju Regional Environmental Office (WREO). 1997-2009. Reports on the investigation and management plans of ecosystem conservation and restoration of the east coastal lagoon of Korea.
- Yang, J.R. and M. Dickman. 1993. Diatoms as indicators of Lake Trophic Status in Central Ontario, Canada. *Diatom Research* **8**: 179-193.

- Yeo, H.G. and M.O. Park. 1997. Seasonal variations of phytoplankton community and water quality in the east area of Chinhae Bay. *Korean Journal of Environmental Science* **6**(3): 231-238.
- Yoo, J. and H. Kim. 2004. Suppression and enhancement of the spring bloom in the Southwestern East Sea/Japan Sea. *Deep-Sea Research II*. **51**: 1093-1111.
- Yoon, Y.H. 1999. The characteristics on the spatio-temporal distribution of phytoplankton community in Deukyang bay, Southwestern Korea. *Korean Journal of Environmental Science* **17**(4): 481-492.
- Yoon, Y.H. and D.G. Kim. 2003. On the spatio-temporal distribution of phytoplankton community in the southwestern parts of Deukyang bay, South Korea. *Korean Journal of Environmental Science* **21**(1): 8-17.
- (Manuscript received 5 September 2012,
Revised 24 September 2012,
Revision accepted 26 September 2012)