

2000~2007년 통영바다목장해역에서 환경요인의 영향에 따른 식물플랑크톤 현존량의 변화

정승원^{1,2} · 권오윤³ · 주형민⁴ · 이진환^{3,*}

¹한양대학교 자연과학대학 생명과학과, ²(주)한국연안환경생태연구소,

³상명대학교 생명과학과, ⁴한국해양연구원 부설 극지연구소

Variations of Phytoplankton Standing Crops Affecting by Environmental Factors in the Marine Ranching Ground of Tongyeong Coastal Waters from 2000 to 2007

Seung Won Jung^{1,2}, Oh Youn Kwon³, Hyoung Min Joo⁴ and Jin Hwan Lee^{3,*}

¹Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-743,

²Korea Institute of Coastal Ecology, Inc. Incheon 402-835, Korea,

³Department of Life Science, Sangmyung University, Seoul 110-743,

⁴Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, Korea

Abstract – In order to investigate the dynamics of phytoplankton standing crops affecting by environmental factors, biological and environmental factors, this study was examined in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters from 2000 to 2007. During the study, mean water temperature and salinity were 16.7°C and 32.9 psu, respectively. pH, DO and SS varied from 7.81~8.09, 3.02~8.97 mg L⁻¹ and 2.7~32.2 mg L⁻¹, respectively. Mean concentrations of dissolved inorganic nitrogen, phosphate and silicate were 21.75 μM, 0.90 μM and 14.38 μM, respectively. Chlorophyll *a* concentrations varied from 0.02 μg L⁻¹ to 25.29 μg L⁻¹ with mean a value of 2.0 μg L⁻¹. These factors did show significant differences on each layer and season, while did not show on the sampling stations. Phytoplankton standing crops varied from 4.21 × 10³ cells L⁻¹ to 1.44 × 10⁶ cells L⁻¹ with a mean value of 1.92 × 10⁵ cells L⁻¹. Especially, variations of phytoplankton standing crops had an unimodal pattern as only bloomed in autumn rather than a bimodal pattern as generally bloomed in spring and autumn. In results of stepwise multiple regression analysis, the coefficient of determination (R²) for total standing crops was 0.35 and the standing crops were affected by water temperature, salinity, phosphate and silicate. The factors affected were different seasonally; water temperature in spring, salinity in summer, water temperature, salinity and silicate in autumn and water temperature, salinity and suspended solids in winter. Therefore, the results from the statistical analysis showed that the environmental factors influencing on the variations of the phytoplankton standing crops were predominantly water temperature and salinity.

Key words : phytoplankton, environmental factors, statistical analysis, Tongyeong, marine ranching ground

* Corresponding author: Jin Hwan Lee, Tel. 02-2287-5152,
Fax. 02-2287-0070, E-mail. jhlee@smu.ac.kr

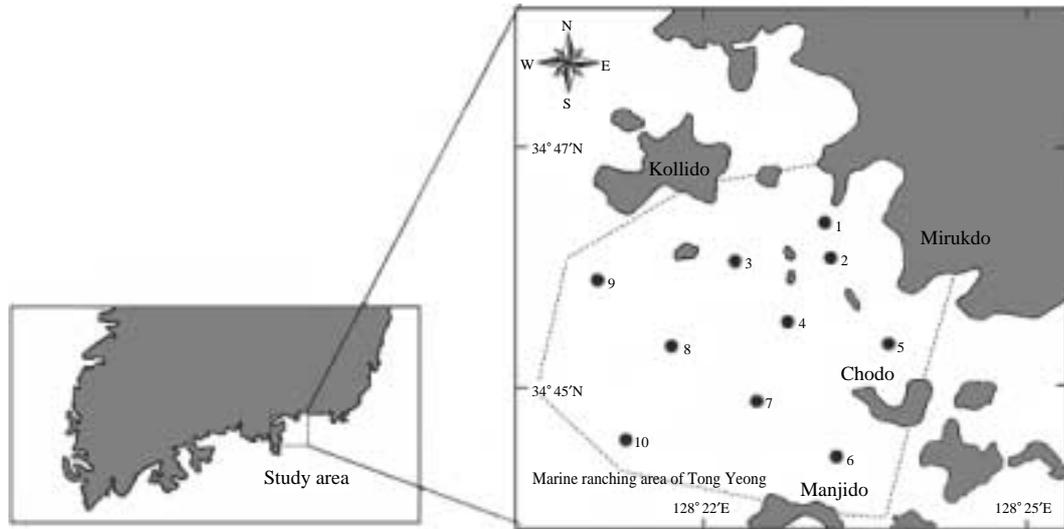


Fig. 1. A map showing the sampling stations in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters, Korea.

서론

바다목장사업은 연안의 해양 어류 자원을 지속적으로 높은 생산력을 유지시키면서 환경 친화적인 자원 잠재력을 증대시키는데 그 초점을 두고 있다. 우리나라 첫 번째 바다목장 연구 사업지인 통영바다목장은 남해안 다도해의 입구에 위치해 있으며, 해안선이 불규칙적이고 굴곡이 심하며 쓰시마 난류의 지류가 통과하여 연중 수온이 10~28°C이고, 수심은 10~40m로 비교적 얇아 수산 동·식물의 서식에 좋은 조건을 갖추고 있으며, 100여종 이상의 수산물이 생산되는 풍부한 자원을 가지고 있는 곳이다(한국해양연구소 1998).

바다목장 해역에서 생물학적 구성요소 중 1차 생산자인 식물플랑크톤은 해역에서 생물에 에너지를 공급하는 주요 요소이다(Nybakken and Bertness 2005). 식물플랑크톤 군집의 변동은 물리·화학 및 생물학적 환경요인들의 변화와 해양학적 특성에 따라 시·공간적으로 다르다. 특히 빛의 세기, 수온 및 염분 등의 물리적인 요인(Margalef 1978; Estrada 1984; Sommer 1994)과 질산염, 인산염, 규산염과 같은 화학적인 요인(Mukai 1987; Thompson *et al.* 1989) 및 생물학적 요인(Wimpenny 1973; Frost 1991) 등 다양한 인자들에 의해 영향을 받는다.

통영해역에서 식물플랑크톤과 환경요인에 대한 연구는 적조 발생기작(강 1998; 강 등 2003; 임과 이 2004), 동·식물플랑크톤 변화(Lee *et al.* 2001) 및 환경요인에 따른 식물플랑크톤 변화(이 등 2005) 등 단기간의 조사

연구가 대부분이었다.

본 연구는 2000~2007년 장기간에 걸쳐 통영바다목장 해역에서 식물플랑크톤 현존량에 영향을 미치는 환경요인들을 통계적인 방법으로 해석하여 향후 사업 종료 후 사후관리체제로 전환 시 바다목장 해역의 환경요인 및 식물플랑크톤 변동 양상을 예측할 수 있는 기초 자료로 활용하는데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

통영바다목장해역에서 식물플랑크톤 및 환경요인을 조사하기 위하여 2000년 4월부터 2007년 1월까지 10개 정점의 표·저층에서 계절별 조사를 원칙으로 매년 3~4회 간격으로 총 24회 조사하였다(Fig. 1). 물리·화학적 환경요인은 T-S meter (YSI-550A, YSI-63)를 이용하여 수온, 염분, 수소이온농도, 용존산소를 현장에서 측정하였으며, 용존산소는 Winkler 명암법으로 보정하였다. 부유물질은 시수 1L를 사전에 건조시켜 무게를 측정된 여과지로 여과하고, 이 여과지를 다시 24시간 건조시킨 후 여과 전 무게를 뺀 값을 최종 농도로 하였다. 투명도는 직경이 30 cm인 투명도판을 이용하여 0.5 m 단위로 측정하였다.

영양염류(암모니아, 질산염, 아질산염, 인산염, 규산염) 분석을 위하여 500 mL를 산 세척한 PE병에 채수하여 4°C로 보관한 후 실험실로 옮겨 Nitrocellulose membrane (Millipore, HA type)으로 여과한 후 여과액을 Parsons *et al.* (1984)의 방법에 따라 분석하였다.

Table 1. ANOVA analysis for groupings as stations, layers and seasons affected by environmental and biological factors in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters (n=420, *: p<0.05; **: p<0.01; ***: p<0.001; WT: Water temperature, DO: Dissolved oxygen, SS: Suspended solids, DIN: Dissolved inorganic nitrogen, SC: Standing crops)

Contents	WT (°C)	SAL (PSU)	DO (mg L ⁻¹)	pH	SS (mg L ⁻¹)	NO ₂ -N (μM)	NO ₃ -N (μM)	NH ₄ -N (μM)	DIN (μM)	PO ₄ -P (μM)	SiO ₂ -Si (μM)	Chl <i>a</i> (μg L ⁻¹)	SC (× 10 ⁵ cells L ⁻¹)
1	17.8	32.8	5.95	8.08	17.20	1.91	11.67	9.90	23.48	0.93	14.69	2.0	2.37
2	17.8	32.6	5.99	8.09	17.38	2.00	11.08	8.82	21.90	0.91	14.64	2.3	3.08
3	17.7	32.7	5.96	8.10	17.41	1.95	11.23	9.68	22.86	1.21	15.56	1.9	1.92
4	17.9	32.6	6.01	8.10	17.11	1.70	11.00	9.80	22.50	1.10	15.30	2.1	1.89
5	17.7	32.7	6.02	8.09	17.36	1.93	11.21	8.86	22.00	0.98	14.29	2.1	2.14
6	18.5	32.6	6.12	8.11	17.46	2.06	8.30	9.30	19.66	0.88	13.42	2.6	3.01
7	18.4	32.5	6.16	8.12	16.82	1.60	8.86	9.04	19.50	1.00	14.00	2.4	2.27
8	17.9	32.8	6.07	8.12	17.49	1.98	10.51	8.39	20.88	0.98	15.35	1.8	2.04
9	17.8	32.7	5.95	8.11	17.84	1.89	11.13	9.68	22.60	1.07	15.85	1.8	1.82
10	17.8	32.8	5.98	8.11	17.04	1.66	11.99	8.57	22.22	1.08	14.72	1.9	1.82
F	0.15	0.10	0.14	0.34	0.14	0.09	0.32	0.18	0.21	0.30	0.25	0.54	0.47
Surface	18.8 ^a	32.3 ^b	6.25 ^a	8.12 ^a	16.42 ^b	2.50 ^a	8.12 ^b	9.67	19.02 ^b	0.88 ^a	12.94 ^b	2.8 ^a	2.91 ^a
Bottom	17.1 ^b	33.1 ^a	5.80 ^b	8.09 ^b	18.20 ^a	1.23 ^b	13.28 ^a	8.72	24.50 ^a	1.15 ^b	16.63 ^a	1.4 ^b	1.36 ^b
F	15.39***	29.50***	14.02***	3.94*	14.74***	15.00***	15.98***	1.47	9.25***	5.42*	15.51***	46.33***	23.22***
Spring	13.7 ^c	33.4 ^a	7.83 ^a	8.11 ^b	19.02 ^a	1.06 ^b	3.04 ^c	8.43 ^{bc}	12.54 ^b	0.52 ^c	10.11 ^b	1.7 ^{bc}	1.19 ^{bc}
Summer	21.3 ^a	32.0 ^c	5.74 ^c	8.10 ^b	18.93 ^a	1.50 ^{ab}	14.36 ^a	9.78 ^{ab}	25.65 ^a	1.26 ^a	12.30 ^b	2.1 ^b	1.85 ^b
Autumn	20.3 ^b	32.6 ^b	5.35 ^d	8.04 ^c	15.47 ^b	2.40 ^a	8.61 ^b	6.81 ^c	17.82 ^b	1.06 ^{ab}	16.24 ^a	3.0 ^a	4.36 ^a
Winter	11.5 ^d	33.7 ^a	6.56 ^b	8.17 ^a	16.25 ^b	2.15 ^{ab}	10.40 ^{ab}	11.41 ^a	23.96 ^a	0.77 ^{bc}	18.87 ^a	1.1 ^c	0.30 ^c
F	506.39***	26.55***	73.49***	16.50***	16.80***	2.60	9.80***	6.78***	8.25***	6.61***	14.50***	14.47***	36.03***

a,b,c,d: Results of the Duncan's multiple comparison test and different character means significantly different value.

엽록소 *a* 농도는 정해진 정점과 수심에서 시수 1L를 산으로 세척된 PE 병에 넣은 후 선상에서 Nitrocellulose 여과지 (Millipore, HA type)으로 여과 하였다. 이때, 여과 마지막 단계에서 1% 탄산마그네슘 (MgCO₃) 3~5방울을 첨가하여 엽록소 *a*의 산화를 방지하였다. 여과된 여과지는 90% 아세톤에 24시간 동안 냉암소에 보관한 후 UV/VIS 분광광도계 (Shimadzu, UV-1700)에서 흡광도를 측정 한 후 농도를 측정하였다 (Parsons *et al.* 1984).

식물플랑크톤 현존량 변화를 파악하기 위하여 van Dorn 채수기를 이용하여 1L PE 병에 최종농도 4% 중성 포르말린으로 고정 후 실험실에 운반하여 침전법에 의해 150~200 mL로 농축하여 공시재료로 하였다. 또한 외부골격이 약한 무가 외편모조 등의 식물플랑크톤은 따로 500 mL PE 병에 2% 글루타알데하이드 용액으로 고정하여 위와 같이 전처리 후 분석하였다. 정량분석을 위

하여 농축된 시료를 균일하게 희석 후 0.5 mL을 취하여 Sedgwick Rafter counting chamber에 넣고 광학현미경 (Zeiss, Axioskop 40, Germany) 400배 하에서 3회 계수한 후 평균치를 단위체적당 세포수로 환산하여 식물플랑크톤 현존량으로 하였다. 정성분석은 농축된 시료를 적당량 slide glass 위에 놓고 100~1,000배 하에서 동정하였다.

식물플랑크톤의 정점별, 계절별, 수심별 환경요인의 차이를 알아보기 위하여 일변량분석 (ANOVA)을 실시하였으며, 사후분석으로는 Duncan's test를 실시하였다. 식물플랑크톤 현존량과 환경요인과의 상관관계를 파악하기 위하여 Pearson 상관계수를 구하였고, 식물플랑크톤 현존량에 영향을 미치는 환경요인을 파악하기 위하여 단계적 회귀분석 (stepwise multiple regression analysis)을 실시하였다. 이때, 요인들의 다중공선성 (multicollineari-

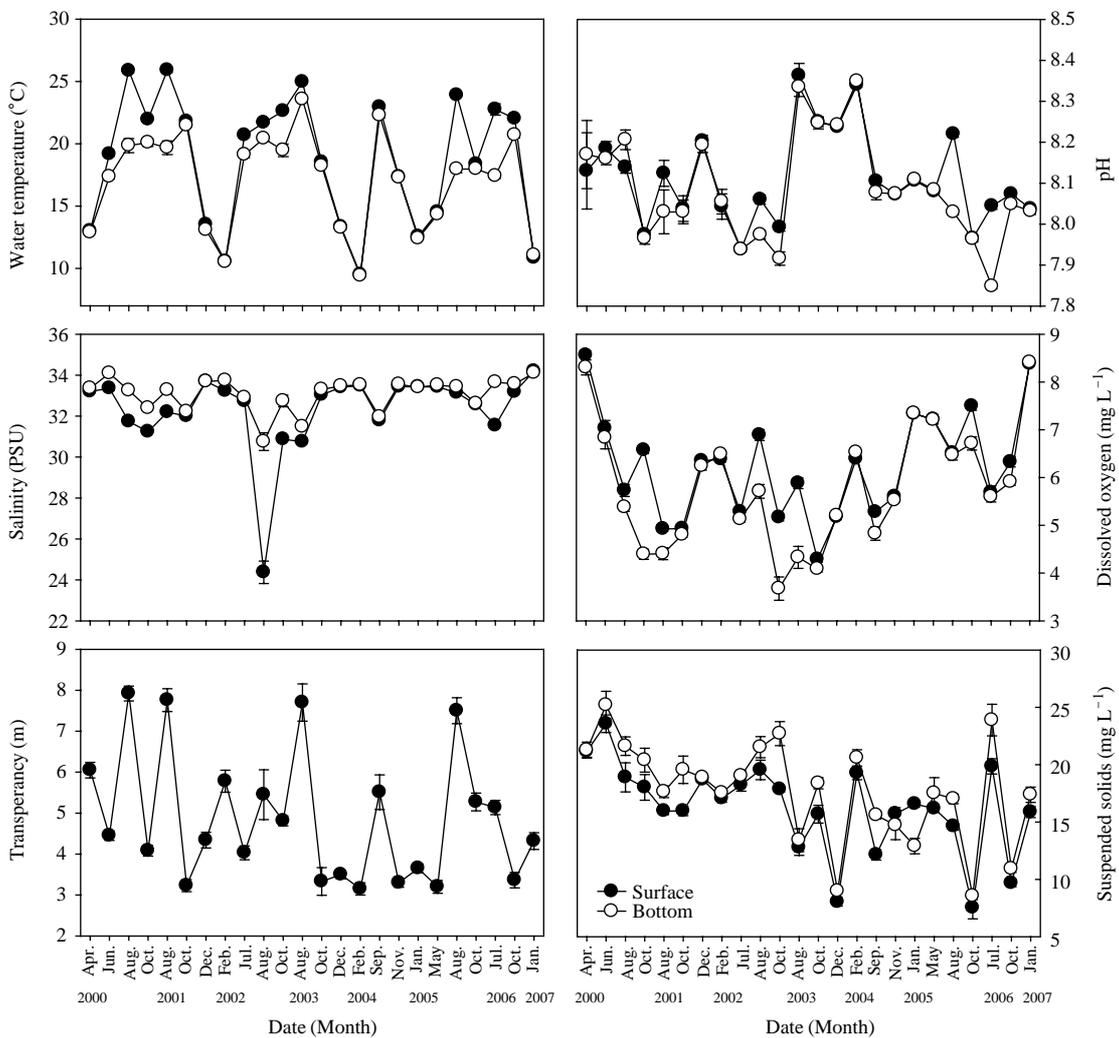


Fig. 2. Variation of physicochemical factors in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters from 2000 to 2007.

ty)의 문제를 피하기 위하여 독립변수 사이의 상관관계가 큰 요인들을 ($r > 0.80$) 제외시켜 사용하였고, 물리·화학적 환경요인이 식물플랑크톤의 변동에 기여하는 정도를 파악하기 위해서 각 요인들의 자료를 표준화시킨 다음 사용하였다. 통계처리에 따른 모든 분석은 SAS (Statistical Analysis System, v 9.1.3) 프로그램을 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 물리·화학적 환경요인

통영 바다목장 해역에서 조사기간 중 물리·화학적 요인의 변화는 Table 1과 Fig. 2와 같았다. 수온은 전형적인 온대기후에 영향으로 여름철에 높고 겨울철에 낮았다. 즉, 2001년 8월 표층에서 평균 25.9°C 로 가장 높았으며,

2004년 2월 저층에서 평균 9.4°C 로 가장 낮은 온도로 각 계절별 차이를 보였으며 (ANOVA, $p < 0.001$), 표층과 저층 역시 차이를 나타내었다 ($p < 0.001$). 특히, 여름철에는 표·저층간의 온도차가 약 평균 3.7°C 보여 수온약층이 형성되었다. 염분은 계절별로 겨울철이 평균 33.7 psu로 높았고, 여름철에는 평균 32.0 psu로 낮았다. 표층에서 평균 32.3 psu이었고 저층에서 33.1 psu로 저층이 평균 0.8 psu 높았다. 여름철에는 표층에서 평균 31.2 psu로 표·저층간이 1.7 psu로 가장 큰 폭의 차이를 보였으며, 특히 2002년 8월 표층에서는 24.3 psu의 낮은 염분을 나타내었다. 우리나라 내만에서는 일반적으로 여름철 장마가 끝나면 많은 육수의 유입으로 인하여 여름과 가을철에 염분농도가 낮아지는 경향이 일반적이다 (이 등 2005). 특히 광양만의 경우 (이 등 2001), 담수유입이 적은 시기에는 약 30 psu를 상회하다가 여름철의 담수유입

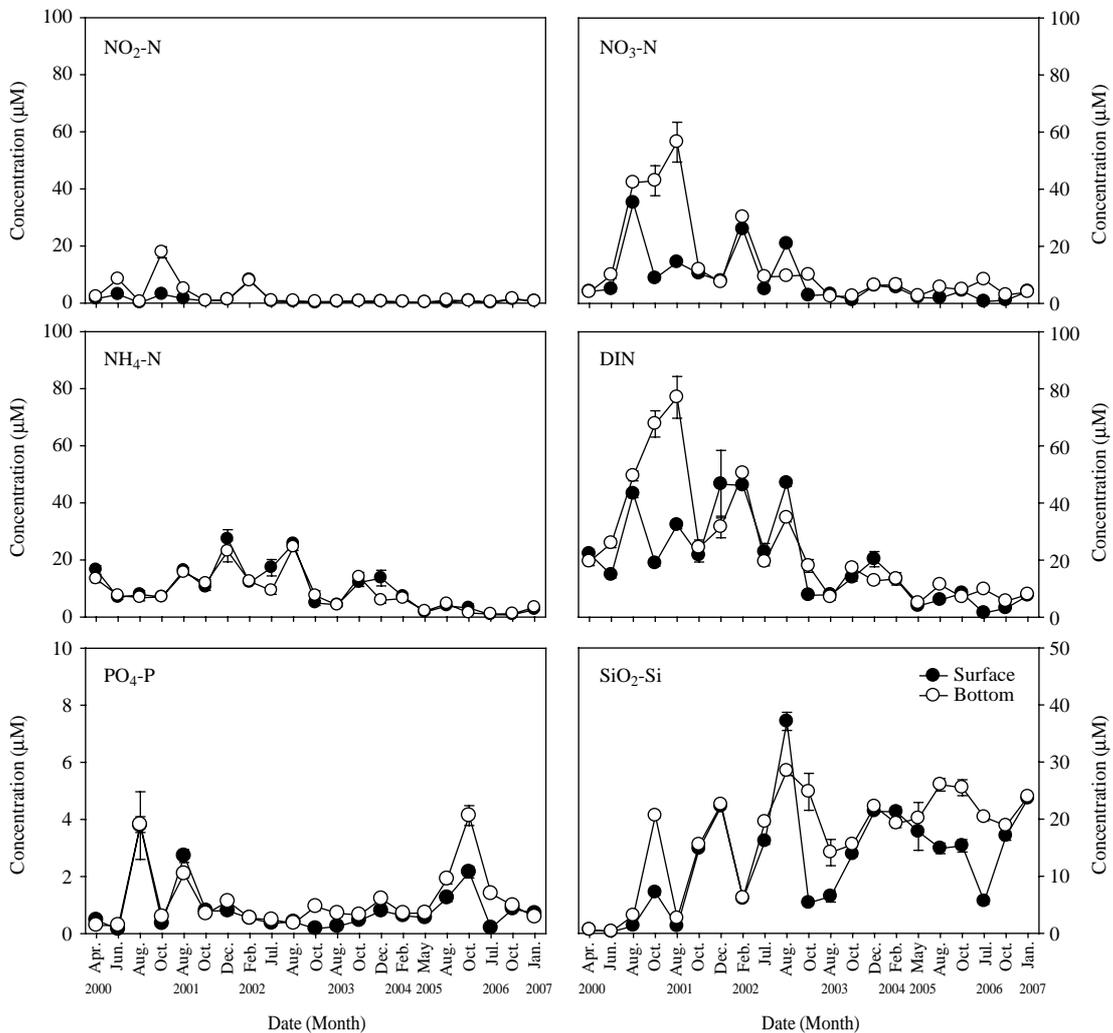


Fig. 3. Variations of each nutrient concentration in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters from 2000 to 2007.

이 많은 시기에는 24.0 psu까지 낮아진다고 보고하였다. 따라서 본 해역에서도 여름철 집중 강우에 의한 표층의 담수 유입에 따라 염분이 변화함을 알 수 있었다. pH는 겨울철에 평균 8.17로 다른 계절(봄철 8.11, 여름철 8.10, 가을철 8.04)에 비해 상대적으로 높은 값을 보였고, 표층이 저층에 비해 높은 pH값을 보였다($p < 0.05$). 평균 용존산소는 수온에 따라 여름철 (5.74 mg L^{-1})과 가을철 (5.35 mg L^{-1})에 비해 봄철 (7.83 mg L^{-1})과 겨울철 (6.56 mg L^{-1})에 각각 높았으며, 표층 (8.12 mg L^{-1})이 저층 (8.09 mg L^{-1})보다 약간 높았다(ANOVA, $p < 0.001$). 부유물질은 저질의 영향을 받고 있으므로 평균 표층 (16.42 mg L^{-1})보다 저층 (18.20 mg L^{-1})에서 높은 농도를 보였고, 계절별로는 봄철과 여름철, 가을철과 겨울철이 각각 유사하게 2개의 구별된 양상을 보였다(ANOVA, $p < 0.001$). 이는 담수의 유입이 강한 금강 하구역(이와 양 1997)이나 광양만(조 등 1994), 득량만(이와 이 1999), 여자만(이와 윤 2000)과 비교 시 낮은 농도를 보여, 육상으로부터 유입이 크지 않은 것으로 판단됨과 아울러 저질이나 양식장 등 상시 조사 해역 내에서 자체 발생하는 부유물질에 따른 연관성이 더 강하다고 판단된다(이 등 2005). 투명도의 평균 값은 최저 3.0 m(2004년 2월)에서 최고 8.0 m(2000년 8월)였으며, 계절별로는 봄철과 가을철, 겨울철에 평균 4.0 m를, 여름철에는 6.0 m 이상의 높은 값을 보였고, 동해 및 진해만, 남해 등 각 조사해역마다 시기 및 계절에 따른 다른 변화를 보이고 있었다(임 1975, 1978; 최 1993; Nagata 1994; 엄 2002).

영양염류의 변화양상은 Table 1과 Fig. 3과 같았다. 조사기간 중 암모니아, 질산염, 아질산염은 각각 평균 $9.18 \mu\text{M}$, $10.71 \mu\text{M}$, $1.86 \mu\text{M}$ 로 용존무기질소는 평균 $21.75 \mu\text{M}$ 을 나타내었다. 계절별로는 각각 질소계 영양염류들의 변화가 다른 양상을 보였으며, 용존무기질소는 봄철과 가을철, 여름철과 겨울철로 두 그룹의 구별된 변화를 보였고, 평균 수심별로는 저층 ($24.50 \mu\text{M}$)이 표층 ($19.02 \mu\text{M}$)보다 높은 양상을 보였다(ANOVA, $p < 0.001$). 이와 같이 질소계 영양염류는 득량만(양 등 1995), 동해 남부해역(Shim *et al.* 1985), 여자만(이와 윤 2000)보다 높은 농도를 보였다. 인산염은 평균 여름철에 $1.26 \mu\text{M}$ 로 높은 농도를 보였으며, 봄철에 $0.52 \mu\text{M}$ 의 낮은 농도를 나타내었다. 계절별로는 여름철에 높다가 점차 감소하여 봄철에 최저치를 나타내었고, 수심별로는 저층 ($1.15 \mu\text{M}$)이 표층 ($0.88 \mu\text{M}$)보다 높은 농도를 보였다(ANOVA, $p < 0.001$). 이와 같이 본 조사해역에서 여름철의 높은 농도를 보이는 이유는 염분 및 부유물질의 변화와 같이, 집중 강우에 따른 육지 등의 외부에서의 공급으로 판단되며, 강(1998)과 이 등(2001)의 조사에서 유사한 양상을

보였다. 규산염은 최저 $0.28 \mu\text{M}$ (2000년 6월 표층)에서 최고 $37.12 \mu\text{M}$ (2002년 8월 표층)로 그 변화폭이 매우 컸으며, 최저 봄철(평균 $10.11 \mu\text{M}$)에서 점차 증가하여 겨울철(평균 $18.87 \mu\text{M}$)에 최고를 보였고, 봄철과 여름철, 가을철과 겨울철의 두 그룹으로 구분되었다(ANOVA, $p < 0.001$). 또한 평균 표층에서 $12.94 \mu\text{M}$ 보다 저층의 $16.63 \mu\text{M}$ 로 높은 농도를 보였다. 영양염류는 식물플랑크톤 변동에 직접적인 영향을 주는 요인으로(Perkins 1974; Howarth 1988; Mingazzini *et al.* 1990; Taylor *et al.* 1995), 성장에 영향을 미치며 해양 생태계 기능 파악에 있어 중요 정보를 제공한다. 연안해역의 영양염류의 유입은 하천수에 의한 유입, 저질의 용출, 인근 해역에서 해류로부터의 이동 등이 있다(Hong *et al.* 1995). 본 해역의 영양염류의 공급은 해류 및 저질에서의 공급 뿐 아니라 인근 양식장 등에서의 먹이원의 분해에 따른 자체 공급으로 판단된다. Goldman and Gilbert (1983)에 따르면 식물플랑크톤의 DIN (dissolved inorganic nitrogen)의 흡수 농도는 $0.01 \sim 10.3 \mu\text{M}$ 로, 조사해역의 평균 $21.69 \mu\text{M}$ 의 높은 질소 농도를 보여 질소원이 식물플랑크톤의 성장에 제한요인으로 작용하지 않았을 것이라고 사료된다.

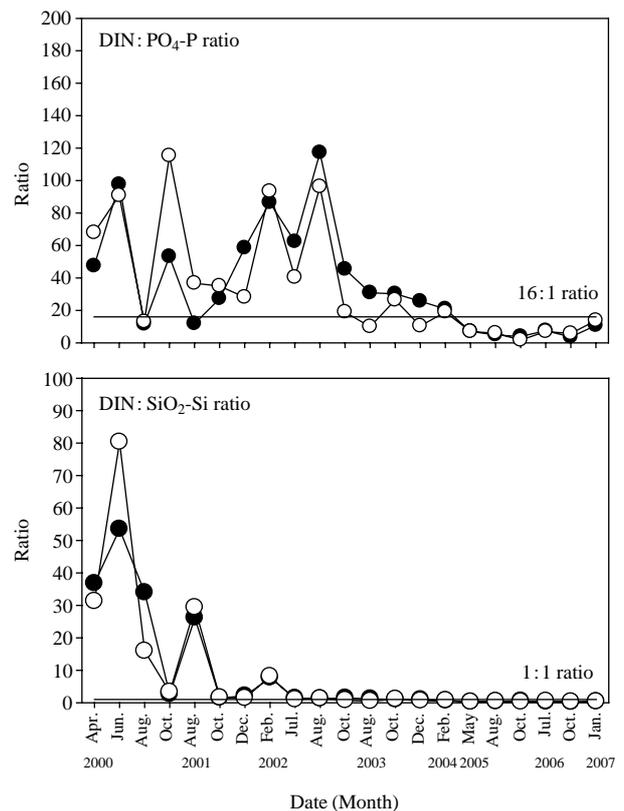


Fig. 4. Variations of the ratio between DIN and phosphate (upper), and DIN and silicate (lower) in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters from 2000 to 2007.

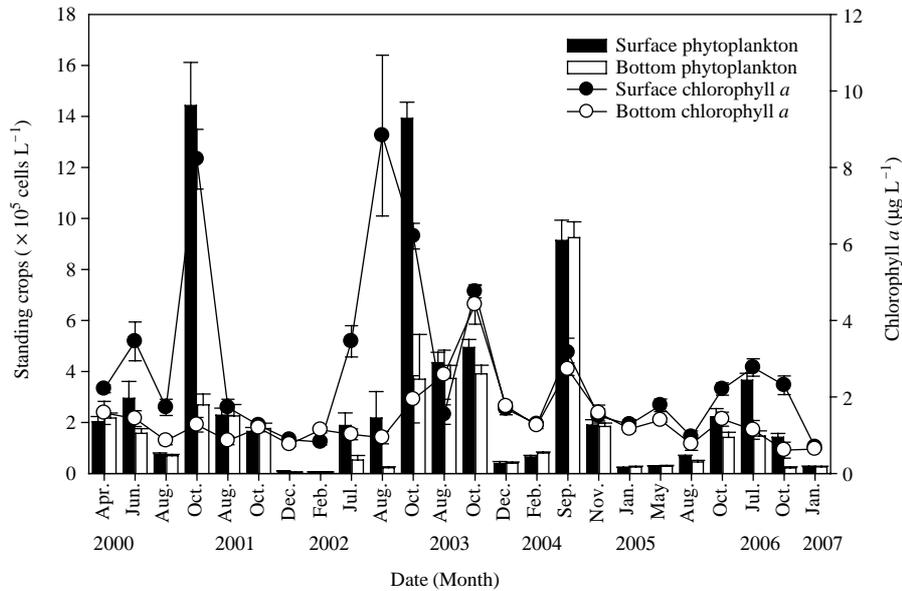


Fig. 5. Variations of phytoplankton standing crops and chlorophyll *a* concentrations in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters from 2000 to 2007.

규산염은 식물플랑크톤 중 돌말류의 성장을 조절하는 중요 요인으로, 하천수등에 따른 공급이나 수괴 혼합이 활발할 때 높다(강과 최 2002). 본 해역에서 규산염은 봄철과 여름철에는 상대적으로 낮다가 수괴혼합이 활발한 가을철과 겨울철에 증가하는 양상을 보였다. 이와 같이, 식물플랑크톤의 성장제한요인으로 주로 작용을 하는 것은 질소(N), 인(P), 규소(Si)로, 각 주요 영양염류의 비에 따라 제한 영양염류가 결정이 된다(Goldman *et al.* 1979; Dufour *et al.* 1999). 조사해역에서 각각의 영양염류 비율을 분석해 보면, 용존무기질소와 인산염의 비율은 평균 35.85 at:at으로, 최적 Redfield ratio인 16 at:at보다 질소원이 2배 이상 높았고 용존무기질소와 규산염의 비는 평균 8.4 at:at로 최적 성장 비율인 1 at:at보다(Nelson and Dortch 1996) 질소의 농도가 8배 이상 높게 나타났다(Fig. 4). 본 조사 결과를 볼 때, 용존무기질소보다 인산염이 식물플랑크톤 증감에 상대적으로 더 큰 작용을 할 것으로 판단된다. 또한 용존무기질소 농도가 규산염보다 높은 비율의 농도를 보이고 있으나, 규산염의 평균 농도가 14.38 μM 로 Brezeinski *et al.* (1997)에 따른 식물플랑크톤 성장농도인 2~5 μM 보다 높았다. 이는 용존무기질소와 규산염의 비율로 볼 때 규산염이 성장제한인자로 작용되어야 하나, 본 해역에서 성장 제한인자로의 역할은 크지 않을 것으로 판단된다. 따라서 통영바다 목장 해역에서 분석된 요인들에 대해 정점별 차이가 거의 없어 동일 해역으로 판단되었으며, 표·저층간은 암모니아를 제외한 모든 항목이 차이를 보였다. 또한 무기

질소이온과 인산염, 수온 및 용존산소는 계절별 차이를 보였고, 부유물질 및 규산염은 봄 여름철, 가을 겨울철의 유사한 변화를 보이고 있어, 본 조사해역은 환경요인별로 특색있는 계절적 차이를 나타내었다.

2. 식물플랑크톤 현존량과 Chlorophyll *a*

식물플랑크톤 현존량은 최저 4.20 $\times 10^3$ cells L^{-1} (2001년 12월 저층)에서 최고 1.44 $\times 10^6$ cells L^{-1} (2000년 10월 표층)로 변화 폭이 매우 컸으며(Fig. 5), 계절별 평균 현존량은 봄철에 1.19 $\times 10^5$ cells L^{-1} , 여름철 1.85 $\times 10^5$ cells L^{-1} , 겨울철 2.99 $\times 10^4$ cells L^{-1} 로 겨울철에는 낮다가 봄철과 여름철에 유사하였고, 가을철에는 4.36 $\times 10^5$ cells L^{-1} 로 가장 높았다(Table 1). 또한 표·저층의 평균 현존량은 표층에서 2.91 $\times 10^5$ cells L^{-1} 를, 저층에서는 1.36 $\times 10^5$ cells L^{-1} 로 표층이 약 2배 정도 높았다(ANOVA, $p < 0.001$). 일반적으로 온대 연안 해역에서 식물플랑크톤은 봄철과 가을철에 증가를 보이는 bimodal pattern이 나타나는 반면(Nybakken and Bertness 2005), 본 연구해역에서의 식물플랑크톤 개체수는 평균적으로 다른 계절에 비해 가을철에 높은 증가를 나타내고 있었다.

엽록소 *a*는 식물플랑크톤 현존량과 변화양상이 유사하였다($r=0.67$, $p < 0.01$). 계절적으로 평균 봄철(1.7 $\mu\text{g L}^{-1}$), 여름철(2.1 $\mu\text{g L}^{-1}$), 가을철(3.0 $\mu\text{g L}^{-1}$), 겨울철(1.1 $\mu\text{g L}^{-1}$)로 봄철과 여름철, 겨울철에는 유사한 농도를 보이다가 가을철에 구별되게 가장 높은 농도를 보였다

Table 2. Stepwise multiple regression analysis of environmental factors affecting phytoplankton standing crops in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters (n=420, *: p<0.05; **: p<0.01; ***: p<0.001; DV: Dependent variables, IV: Independent variables, WT: Water temperature, SS: Suspended solids)

	DV	IV	β	Remarks	
Total	Standing crops	WT	0.3811**	R ² =0.3448 F=23.97*** (n=420)	
		Salinity	1.1166**		
		Phosphate	1.4005**		
		Silicate	0.1596***		
Layer	Surface	Standing crops	Salinity	-0.4315***	R ² =0.3604 F=12.52*** (n=210)
			Silicate	-0.3550***	
	Bottom	Standing crops	WT	0.1996*	R ² =0.3642 F=12.73*** (n=210)
			Salinity	-0.3420***	
Season	Spring	Standing crops	WT	0.7284*	R ² =0.8077 F=14.00*** (n=40)
			Salinity	-0.5026**	
	Summer	Standing crops	WT	0.4736***	R ² =0.7886 F=45.60*** (n=120)
			Salinity	0.8154***	
	Autumn	Standing crops	WT	0.7292***	R ² =0.8043 F=41.09*** (n=100)
			Salinity	0.3265***	
Winter	Standing crops	WT	0.2314**		
		SS	0.2314**		

(ANOVA, p<0.001). 또한 평균 수층별로는 표층(2.8 $\mu\text{g L}^{-1}$)이 저층(평균 1.43 $\mu\text{g L}^{-1}$)보다 약 2배 정도 높은 값을 보였다. 엽록소 *a*는 여자만(이와 윤 2000), 마산만(Han *et al.* 1991)보다는 낮고, 거제도(진과 홍 1985)와 남해도 연안(임 등 2003)보다는 높은 값을 보여 해역간의 구별된 특성을 보였다.

3. 식물플랑크톤 현존량에 영향을 미치는 환경요인

식물플랑크톤 현존량 변화에 미치는 환경요인을 파악하고자 단계적 중회귀분석을 하였다(Table 2). 본 조사기간 중 전체 식물플랑크톤 현존량에 영향을 미치는 중요 변수로는 수온, 염분, 인산염, 규산염으로 나타났다(R²=0.3448, p<0.001). 수층별로는 표층에서 염분과 규산염(R²=0.3604, p<0.001)이, 저층에서 수온, 염분, 규산염(R²=0.3642, p<0.001)으로 나타나 표·저층 간 차이를 보이는 중요 변수는 수온으로 판단된다. 또한, 계절별로 식물플랑크톤군집에 영향을 미치는 요소는 봄철에 수온이었고(R²=0.8077, p<0.001), 여름철에 염분이었으며(R²=0.3079, p<0.001), 가을철에는 수온, 염분, 규산염(R²=0.7886, p<0.001), 겨울철에 수온, 염분(R²=0.8043,

p<0.001)으로 분석 되었다. 이는 2000년 본 조사해역에서 식물플랑크톤 현존량에 영향을 미치는 환경요인인 규산염, 질산염, 암모니아, 인산염, 염분 및 광량과 유사하였으며(이 등 2005), 동해 남서부 해역에서의 식물플랑크톤 변화에 중요 영향인자로 수온과 염분을 보고한 바와도 유사하였다(Shim and Lee 1987).

따라서 통영바다목장 해역에서 식물플랑크톤 현존량에 영향을 미치는 중요 요인은 수온 및 염분, 인산염이 식물플랑크톤 거동에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

적 요

통영 바다목장 해역에서 식물플랑크톤 군집에 미치는 물리·화학적 환경요인을 파악하기 위하여 2000년 4월부터 2007년 1월까지 10개 정점의 표·저층에서 계절별 조사를 원칙으로 총 24회 조사하였다.

수온은 각 계절별 차이가 뚜렷한 전형적인 온대성 기후의 영향을 받고 있었으며, 염분은 쿠로시오 난류의 영향에 따른 고염분과 여름철 장마와 폭우에 따라 낮은 염분농도를 보였다. 부유물질은 표층보다 저층이 높은 농도를 보였으며, 투명도는 계절별로 여름철에 6.0 m 이상의 높은 값을 보였다. 영양염류 중 용존무기질소, 인산염, 규산염의 각각 평균 21.75 μM , 0.90 μM , 14.38 μM 을 보여 중영양 해역으로 판단된다. 따라서 통영바다목장 해역에서 분석된 요인들에 대해 정점별 차이가 거의 없어 동일 해역으로 판단되었으며, 표·저층간은 암모니아를 제외한 모든 항목이 차이를 보였고, 계절별로도 구별되었다. 식물플랑크톤 현존량은 가을철에 4.36×10^5 cells L^{-1} 로 가장 높았으며, 다른 계절에는 평균 1.13×10^5 cells L^{-1} 로 유사하였다. 일반적으로 온대 연안 해역에서는 봄철과 가을철에 증가를 보이는 bimodal pattern이 발생되나, 본 해역에서는 가을철에만 증가를 보이는 unimodal pattern을 나타내었다. 엽록소 *a*는 식물플랑크톤 현존량과 변화양상과 유사하였으며, 다른 계절에 비해 가을철에만 높은 농도를 보였다. 본 해역에서 조사된 자료를 이용하여 회귀분석한 결과 식물플랑크톤 현존량에 크게 영향을 미치는 중요 환경요인들은 수온 및 염분이며 영양염류 중 규소와 인이 성장 제한요인으로 작용하여 식물플랑크톤 군집에 영향을 미치는 것으로 파악되었다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원의 2000~2006년 “통영해

역의 바다목장화 개발 연구 용역사업”으로 수행되었음을 밝히며, 본 연구에 도움을 준 박성환, 윤석제, 박준상, 신상원군에게 감사를 표한다.

참 고 문 헌

- 강병준. 1998. 한국 남해안 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생시 환경학적 특성과 동물플랑크톤 군집 동태. 이학 석사학위논문, 한양대학교, 55pp.
- 강양순, 권정노, 손재경, 정창수, 홍석진, 공재열. 2003. 2002년 통영연안의 적조발생전후의 식물플랑크톤 군집구조의 특성. 한국수산학회지. 36:515-521.
- 강연식, 최중기. 2002. 고리, 월성, 울진 및 영광 연안해역에서 식물플랑크톤 군집의 생태학적 특성 II. 현존량 분포 및 환경요인들(1992~1996). 한국해양학회지. 7:108-128.
- 양한섭, 김성수, 김규범. 1995. 득량만 표층 수층 영양염류의 시공간적 분포특성 I. 영양염류의 계절변화와 기초생산 제한인자. 한국수산학회지. 28:475-485.
- 염말구. 2002. 통영 내만 투명도의 변동. 해양산업연구소보. 15:1-6.
- 이영식, 이재성, 정래홍, 김성수, 고우진, 김귀영, 박종수. 2001. 광양만에서 식물플랑크톤증식의 제한영양염. 한국해양학회지. 6:201-210.
- 이용혁, 양재삼. 1997. 금강 하구역에서 영양염류, 엽록소, 부유물질과 염분변화에 대한 500일간의 연속관측. 한국해양학회지. 2:1-7.
- 이진환, 이은호. 1999. 득량만 수질과 식물플랑크톤 적조. 환경생물. 17:271-278.
- 이진환, 윤수미. 2000. 여자만의 수질과 식물플랑크톤 군집. Algae. 15:89-98.
- 이진환, 정승원, 김종만. 2005. 통영 바다목장 해역에서 식물플랑크톤군집에 미치는 환경요인의 영향. Ocean Polar Res. 27:15-24.
- 임두병. 1975. 충무근해 연안수의 광학적 성질에 관하여. 통수논문집. 10:13-20.
- 임두병. 1978. 추계의 진해만 해황. 통수논문집. 13:1-3.
- 임월애, 강창근, 김숙양, 이삼근, 김학균, 정익교. 2003. 여름철 남해도 연안 식물플랑크톤 군집 구조의 단기 변화. Algae. 18:49-58.
- 임월애, 이창규. 2004. 초여름 남해 동부연안의 *Cochlodinium polykrikoides* 분포와 세포 특징. 한국해양학회지. 9:106-109.
- 조기안, 위인선, 최철일. 1994. 광양만 식물플랑크톤의 생태학적 연구. 환경생물. 12:137-150.
- 진 평, 홍성윤. 1985. 대한해협식 식물플랑크톤의 기초생산력. 한국수산학회지. 18:63-66.
- 최우정. 1993. 진해만의 빈 산소 수괴 형성에 관한 시물레이션. 박사학위 청구논문, 부산수산대학교, 97pp.
- 한국해양연구소. 1998. '98 통영해역의 바다목장 연구개발용역사업 보고서, 해양수산부, 980pp.
- 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.
- Dufour P, L Charpy, S Bonnet and N Garcia. 1999. Phytoplankton nutrient control in the oligotrophic South Pacific subtropical gyre (Tuamotu Archipelago). Mar. Ecol. Prog. Ser. 179:285-290.
- Estrada M. 1984. Phytoplankton distribution and composition off the coast of Galicia (northwest of Spain). J. Plank. Res. 6:417-434.
- Frost BW. 1991. The role of grazing in nutrient-rich areas of the open sea. Limnol. Oceanogr. 36:1616-1630.
- Goldman JC, JJ McCarthy and DG Peavy. 1979. Growth rate influence on the chemical composition of phytoplankton in oceanic waters. Nature 279:210-215.
- Goldman JC and PM Gilbert. 1983. Kinetics of inorganic nitrogen uptake by phytoplankton. pp. 233-274. In Nitrogen in the marine environment (Carter EJ and DG Capone eds.). Academic Press. New York.
- Han M-S, SW Kim and YO Kim. 1991. Influence of Discontinuous Layer on Plankton Community Structure and Distribution in Masan Bay, Korea. Bull. Korean Fish. Soc. 24:459-471.
- Hong GH, SH Kim and CS Chung. 1995. Contamination in the Yellow Sea proper: A review. Ocean Res. 19:55-62.
- Howarth RW. 1988. Nutrient limitation of net production in marine ecosystem. Ann. Rev. Ecol. 19:89-110.
- Lee JH, JH Chae, W-R Kim, SW Jung and JM Kim. 2001. Seasonal variation of phytoplankton communities in the coastal waters off Tongyeong in Korea. Ocean Polar Res. 23:245-253.
- Margalef R. 1978. Life-forms of phytoplankton as a survival alternatives in an unstable environment. Oceanologica Acta. 1:493-509.
- Mingazzini M, A Rinaldi and G Montanari. 1990. Multi-level nutrient enrichment bioassays on Northern Adriatic coastal waters pp. 115-131. In Marine coastal eutrophication (Vollenweider RA, R Marchetti and R Viviani eds.). Elsevier Science Publishers. Amsterdam.
- Mukai T. 1987. Effects of micro-scale in situ environmental gradients concerning water qualities on the structure of the phytoplankton community in a coastal embayment. Estu., Coa. and Shel. Sci. 25:447-458.
- Nagata H. 1994. A preliminary report on distributions and seasonal changes of transparency in the Japan sea. Bull. Natl. Fish. Res. Inst. 44:31-38.
- Nelson DM and Q Dortch. 1996. Silicic acid depletion and silicic acid limitation in the plume of the Mississippi River: evi-

- dence from kinetic studies in spring and summer. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 136:163-178.
- Nybakken JW and MD Bertness. 2005. *Marine Biology. An ecological approach 6th.* Pearson Education Inc. San Francisco, CA.
- Parsons TR, Y Maita and GM Lalli. 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis.* Pergamon Press.
- Perkins EJ. 1974. *The biology of estuaries and coastal waters.* Academic Press. London.
- Shim JH and WH Lee. 1987. Distribution of phytoplankton species and associated environmental factors in the Southwestern Waters of the East Sea, Korea. *J. Oceanogr. Soc. Korea.* 22:34-42.
- Shim JH, WH Lee and SY Bak. 1985. Studies on the plankton in the Southwestern Waters of the East Sea (Sea of Japan) (II) Phytoplankton Standing crops, nanofraction and primary production. *J. Oceanogr. Soc. Korea.* 20:37-54.
- Sommer U. 1994. The impact of light intensity and daylength on silicate and nitrate competition among marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* 39:1680-1688.
- Taylor D, S Nixon, S Granger and B Buckley. 1995. Nutrients limitation and the eutrophication of coastal lagoons. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 127:235-244.
- Thompson PA, ME Levasseur and PJ Harrison. 1989. Light-limited growth on ammonium vs. nitrate: what is the advantage for marine phytoplankton? *Limnol. Oceanogr.* 34:1014-1024.
- Wimpenny RS. 1973. The size of diatoms V. the effects of animal grazing. *J. Mar. Bio. Ass. U.K.* 53:957-974.

Manuscript Received: June 5, 2007
Revision Accepted: September 11, 2007
Responsible Editor: Hwan-Goo Yeo