

Article

통영 바다목장 해역에서 식물플랑크톤군집에 미치는 환경요인의 영향

이진환^{1*} · 정승원¹ · 김종만²¹상명대학교 자연과학대학 자연과학부
(110-743) 서울시 종로구 홍지동 7²한국해양연구원 해양생물자원연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Effects of Environmental Factors on Phytoplankton Communities in the Marine Ranching Ground of Tongyeong Coastal Waters, Korea

Jin Hwan Lee^{1*}, Seung Won Jung¹, and Jong-Man Kim²¹Division of Natural Science, Sangmyung University
Seoul 110-743, Korea²Marine Living Resources Research Division, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract: In order to investigate the structures and dynamics of phytoplankton communities, each physicochemical environmental factor, species composition, standing crop, and dominant species were examined in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters from April to October, 2000. During the studies, mean water temperature and salinity were 18.8°C and 33.1 psu, respectively. DO, SS and transparency varied from 5.43 to 11.39 mg/l, 14.6 to 32.4 mg/l and 3.5 to 9.0 m, respectively. Light intensities varied from 0.02 to 966 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$, which decreased with depth. $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, and $\text{SiO}_2\text{-Si}$ were fluctuated from 0.059 to 0.332 mg/l, 0.040 to 0.800 mg/l, 0.001 to 0.468 mg/l, 2.3 to 143.0 $\mu\text{g}/\text{l}$, and 0.007 to 0.600 mg/l, respectively. chlorophyll *a* concentrations were fluctuated from 0.7 to 8.9 $\mu\text{g}/\text{l}$. Among 130 taxa of phytoplankton communities observed, diatoms occupied more than 81.54% of the total species, and the others were dinoflagellates and silicoflagellates. Phytoplankton standing crops ranged from 4.6×10^4 to 2.6×10^6 cells/l. In October, the standing crops were at bloom level showing more than 10^6 cells/lat all stations. Dominant species changed by month and station. *Leptocylindrus danicus* occupied 59.84% in April and 22.03% in June. *Pseudo-nitzschia pungens* in August and *Chaetoceros socialis* and *Skeletonema costatum* in October were predominant species. In order to investigate factors influencing the total phytoplankton standing crops the correlations between the standing crops of diatoms, dinoflagellates, all phytoplanktons occurred and environmental factors were calculated using a multiple regression analysis. The coefficient of determination (R^2) for total standing crops was 0.63 which explained 63% of variance and that of R^2 for diatom was 0.82. In statistical analysis, the results showed that the environmental factors influencing the size of the communities were predominantly water temperature, salinity and silicate.

Key words: 환경요인 영향(Environmental effects), 식물플랑크톤(phytoplankton), 회귀분석(regression analysis), 통영(Tongyeong)

*Corresponding author. E-mail : jhlee@smu.ac.kr

1. 서론

해양생태계는 환경요인, 생산자, 소비자, 분해자 등이 하나의 계(system)를 이루어 생태학적 기능을 발휘하고 있다. 최근 우리 사회는 경제적인 측면만을 강조하고 환경 보존을 도외시한 나머지 무분별한 연안매립과 해양투기로 해양생태계가 파괴되고 있다. 또한 원활한 물류 이동을 위한 입해 공업단지 건설과 이에 따른 인구 집중화 현상으로 산업폐수 및 생활하수가 해양에 유입되어 생태계의 자정능력이 감소하고 그 안정성이 깨어지고 있는 실정이다. 특히 연안 해역에서는 부영양화로 인한 식물플랑크톤의 대발생으로 어패류 폐사같은 사례가 날로 증가하는 등 어족 자원이 고갈되고 있다.

바다목장은 연안어장의 생산성을 증가시키며, 가두리 양식에 따른 유기물 오염문제를 해소하며, 환경 친화적인 자원 잠재력을 증대시키기 위함을 그 목적을 두고 있다(한국해양연구소 1998). 본 조사해역인 통영 바다목장 해역은 남해안 다도해의 초입에 위치하며, 해안선이 불규칙적이고 굴곡이 심하며 쓰시마 난류의 지류가 통과한다. 특히 연중 수온이 10~28°C이고, 수심은 10~40 m로 알아 수산 동·식물의 서식에 좋은 조건을 갖추고 있으며, 실제로 자연산 수산물이 100여종에 이를 정도로 풍부한 자원을 갖고 있는 곳이다(한국해양연구소 1999). 본 연구는 통영 바다목장 해역에서 물리·화학적 환경요인이 식물플랑크톤 군집에 미치는 영향을 파악하고 통계적으로 영향인자를 규명하는데 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

본 연구를 위해 2000년 4월, 6월, 8월, 10월에 통영 바다목장 해역의 수심 0 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30 m에서 물리·화학적 환경요인과 식물플랑크톤 군집을 조사하였다(Fig. 1).

물리·화학적 환경요인 중 수온, 용존산소, 염분은 현장에서 T-S meter(model 85, YSI)로, 부유물질은 Parsons *et al.*(1984)에 따라, 투명도는 현장에서 직경 30 cm의 Secchi disc를 이용하여 각각 측정하였다. 광도는 Quantum/Radio/Photometer(model LI-189, Li-Cor)로 측정하였으며, 광도측정 시간은 매 조사시기마다 정점 1에서 07시 50분, 정점 2에서 09시 00분, 정점 3에서 10시 50분, 정점 4에서 12시 10분에 동일하게 측정하였다. 영양염류는 채수후 선상에서 여과지(HA type, Millipore)로 여과한 다음 4°C 보관후 실험실로 가져와 자동영양염류분석기(Continuous Flow Manager, Alliance)로 분석하였다. Chlorophyll *a*는 시료 1 l를 여과지(HA type, Millipore)로 여과 후, Spectrophotometer(UV 1201, Shimadzu)로 분석하였다

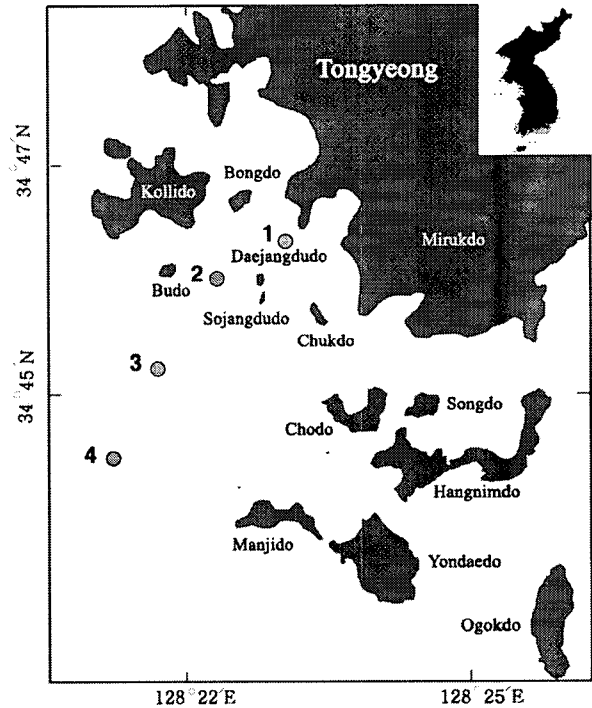


Fig. 1. A map showing the sampling stations in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters, Korea.

(Parsons *et al.* 1984).

식물플랑크톤은 각 수심에서 van Dorn 채수기로 채수한 다음, 시수 1 l를 최종 농도 4%와 2%의 중성 formalin과 glutaraldehyde로 각각 고정하였다. 중성 formalin으로 고정한 시료는 실험실로 운반한 후 침전법에 의해 상등액을 제거하여 농축된 시료를 균일하게 섞은 후 Sedgwick Rafter counting chamber를 이용하여 계수하였다. 정성분석을 위하여 농축된 시료 적당량을 slide glass 위에 놓고 $\times 400 \sim \times 1000$ 하에서 검경·동정하였으며, 광학현미경에서 동정이 어려운 돌말류는 Hasle and Fryxell(1970)의 방법을 변형하여 세포내 유기물을 강산(H_2SO_4 , HNO_3)으로 제거한 후 주사전자현미경(Jeol, JSM-5600LV)하에서 동정하였다. 또한 외부골격이 약한 외편모조류 등은 Reimann *et al.*(1980)의 방법을 변형하여 고정 후 Critical Point Dryer(CPD-Dryer, SPI)로 건조시킨 후 상기 주사전자현미경으로 검경·동정하였다.

식물플랑크톤 군집에 미치는 물리·화학적 환경요인의 영향을 규명하기 위하여 Pearson 상관계수를 분석하였고, 이를 바탕으로 단계적 회귀분석(stepwise regression analysis)을 하였다. 회귀분석에서 데이터의 다중공선성(multicollinearity)의 문제를 피하기 위하여 독립변수 사이의 상관관계가 큰 요인들($r > 0.80$) 제외시켜 사용하였

고, 환경요인이 식물플랑크톤의 변동에 기여하는 정도를 파악하기 위해서 각 요인들의 데이터를 표준화시켰다. 통계처리에 따른 모든 분석은 SAS(Statistical Analysis System, v 6.12) program을 사용하였다.

3. 결 과

물리·화학적 환경요인

조사기간 중 수온은 12.8~26.5°C의 분포를 보였다. 4월과 10월에 수층의 수직혼합으로 인하여 표·저층간의 수온차가 크지 않았으나, 8월에는 6.13°C의 차이로 수온 약층이 형성되었다. 염분은 31.1~34.4 psu의 범위로 갈수기인 4월과 6월에 평균 34.0 psu 내외의 고염분을, 풍수기인 8월과 10월에는 장마와 폭우로 각각 평균 32.53 psu와

31.79 psu의 상대적으로 낮은 값을 보였다. 평균 용존산소량은 4월, 6월, 8월에 각각 10.26 mg/l, 8.23 mg/l, 11.39 mg/l로 높았고, 10월에는 5.43 mg/l로 낮았다. 용존산소량의 수심별 차이는 4월, 6월, 10월에 표·저층간의 차이가 거의 나타나지 않았으나, 8월에는 성층에 따라 상대적으로 차이를 보였다. 부유물질 농도는 14.6~32.4 mg/l의 변화를 보였으며, 월별 평균 변화는 4월에 20.3 mg/l, 6월에 23.5 mg/l, 8월에 21.2 mg/l, 10월에 21.7 mg/l로 조사시기별·수심별 차이가 그리 크지 않았다. 투명도는 3.5~9.0 m의 범위로 4월에 평균 6.4 m, 6월 4.3 m, 8월 8.2 m, 10월에 4.3 m였다. 광도는 0.02~1,130 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 범위로 대수적인 변화 폭을 나타내었다. 월별 평균 변화는 4월에 160 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$, 6월에 44 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$, 8월에 218 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$, 10월에 12 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 조사당일의 기후변화에 따라 변화하였으나

Table 1. The mean of physicochemical factors at each depth in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters, Korea.

Factor	WT	Sal	DO	SS	LI	Tr	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NO ₂ -N	PO ₄ -P	SiO ₂ -Si	DIN:	DISi:	DIN:	
Month	(°C)	(psu)	(mg/l)	(mg/l)	($\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$)	(m)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	($\mu\text{g}/\text{l}$)	(mg/l)	DIP	DIP	DISi	
Apr.	0 m	13.1	33.73	10.91	20.17	769.73	0.222	0.066	0.019	14.0	0.019	48.56	1.50	32.32	
	5 m	13.0	34.10	10.71	19.95	134.46	0.225	0.055	0.017	9.3	0.019	70.71	2.26	31.26	
	10 m	13.0	34.10	10.43	20.00	40.85	0.233	0.047	0.016	8.0	0.016	81.93	2.21	37.00	
	15 m	12.9	34.15	9.96	19.65	9.63	6.4	0.224	0.044	0.028	8.5	0.017	77.11	2.21	34.82
	20 m	12.9	34.13	9.98	20.35	3.42	0.207	0.040	0.023	6.5	0.017	91.98	2.90	31.76	
	30 m	12.9	34.10	9.60	21.95	1.27	0.222	0.047	0.038	8.2	0.019	82.90	2.57	32.32	
	mean	13.0	34.05	10.26	20.34	159.73	0.222	0.050	0.024	9.1	0.018	72.03	2.19	32.89	
Jun.	0 m	19.2	33.63	9.54	23.75	222.43	0.094	0.301	0.040	67.5	0.008	14.27	0.13	108.75	
	5 m	19.0	33.93	8.47	23.20	31.55	0.100	0.346	0.042	50.5	0.008	21.40	0.18	122.00	
	10 m	18.4	34.00	7.80	23.90	8.89	0.091	0.369	0.089	67.0	0.009	18.14	0.15	122.00	
	15 m	17.6	34.10	8.32	23.30	2.30	4.3	0.116	0.419	0.093	75.8	0.008	18.35	0.12	157.00
	20 m	17.4	34.13	7.83	23.00	0.71	0.102	0.485	0.107	58.3	0.009	26.36	0.17	154.22	
	30 m	17.0	34.13	7.44	23.70	0.14	0.110	0.513	0.132	64.0	0.009	26.12	0.16	167.78	
	mean	18.1	33.98	8.23	23.48	44.331	0.102	0.406	0.084	63.8	0.008	20.55	0.14	148.00	
Aug.	0 m	25.9	33.50	12.61	21.60	965.50	0.183	0.488	0.002	6.5	0.036	229.26	6.13	37.39	
	5 m	25.5	31.75	12.66	24.10	223.88	0.166	0.494	0.002	8.2	0.037	178.76	5.00	35.78	
	10 m	24.2	31.80	12.00	21.80	75.92	0.109	0.510	0.003	9.2	0.049	149.70	5.90	25.39	
	15 m	22.5	32.23	11.14	22.20	31.22	8.2	0.111	0.515	0.005	12.2	0.068	114.53	6.17	18.56
	20 m	20.8	32.88	10.33	18.30	8.77	0.138	0.564	0.008	18.4	0.091	85.44	5.48	15.60	
	30 m	19.3	33.05	9.61	19.40	2.38	0.139	0.590	0.006	23.9	0.108	68.10	5.00	13.61	
	mean	23.0	32.53	11.39	21.23	217.95	0.141	0.527	0.004	13.1	0.065	113.59	5.49	20.68	
Oct.	0 m	22.0	32.57	6.54	21.45	53.40	0.095	0.119	0.057	5.6	0.201	107.16	39.74	2.70	
	5 m	21.7	31.30	6.19	21.45	11.01	0.104	0.154	0.078	6.0	0.246	124.00	45.39	2.73	
	10 m	21.7	31.55	5.80	21.75	3.62	0.107	0.220	0.177	6.3	0.276	177.14	48.50	3.65	
	15 m	21.4	31.57	5.11	21.50	1.01	4.3	0.100	0.325	0.288	6.2	0.421	254.64	75.18	3.39
	20 m	21.0	31.83	4.67	22.80	0.40	0.109	0.513	0.349	6.3	0.418	341.28	73.46	4.65	
	30 m	20.0	31.93	4.30	21.47	0.04	0.101	0.718	0.204	6.6	0.579	343.21	97.13	3.53	
	mean	21.3	31.79	5.43	21.74	11.58	0.103	0.341	0.192	6.2	0.357	227.14	63.75	3.56	

WT; Water Temperature, Sal; Salinity, Tr; Transparency, LI; Light Intensity.

수심 20 m 이하에서는 일정한 광량을 보였다(Table 1).

영양염류 중 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도는 0.059~0.332 mg/l의 범위로, 4월에 평균 0.222 mg/l, 6월 0.102 mg/l, 8월 0.141 mg/l, 10월에 0.103 mg/l로 4월에 높았다. 수심별로는 4월과 10월에 수심별 큰 차이가 없었으나, 6월에는 저층이 높은 농도를, 8월에는 낮은 농도를 보였다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도는 0.040~0.800 mg/l로 비교적 큰 차이를 보였다. 월별 평균 변화는 4월에 0.050 mg/l, 6월 0.406 mg/l, 8월 0.527 mg/l, 10월에 0.341 mg/l로 4월부터 8월까지 점차 증가하다가 10월에 감소하였으며, 정점별 차이는 거의 없었다. 수심별로는 4월을 제외한 6월, 8월, 10월에 저층으로 갈수록 높은 농도를 나타내었다. $\text{NO}_2\text{-N}$ 은 0.001~0.468 mg/l로, 4월에 평균 0.024 mg/l, 6월 0.084 mg/l, 8월 0.004 mg/l, 10월에 0.192 mg/l였고, 수심별로는 4월과 8월에 차이가 거의 없었으나 6월과 10월에는 저층으로 갈수록 높았다. $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 2.3~143.0 $\mu\text{g/l}$ 의 범위로 큰 차이를 보였고, 월 평균 변화는 4월에 9.1 $\mu\text{g/l}$, 6월 63.8 $\mu\text{g/l}$, 8월 13.1 $\mu\text{g/l}$, 10월에 6.2 $\mu\text{g/l}$ 였다. 4월에 표층에서 높은 농도를 보였으나

8월에는 저층에서 높은 농도를 나타내었으며, 6월과 10월에는 수심간 큰 차이를 보이지 않았다. $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 의 변화는 0.007~0.600 mg/l를 나타내었고, 월별 변화는 4월에 0.018 mg/l, 6월에 0.008 mg/l, 8월에 0.065 mg/l, 10월에 0.357 mg/l로 6월에 농도가 가장 낮았다.

chlorophyll *a*의 농도는 0.7~8.9 $\mu\text{g/l}$ 의 범위였으며, 월 평균은 4월, 6월, 8월, 10월에 각각 1.8 $\mu\text{g/l}$, 2.6 $\mu\text{g/l}$, 1.3 $\mu\text{g/l}$, 4.1 $\mu\text{g/l}$ 로 비교적 낮았다(Fig. 2). 다만, *Chaetoceros socialis*의 대발생을 보인 10월에 가장 높은 농도를 보였으며, 정점간 차이는 거의 없었다. 수심별 농도는 6월과 10월에 차이가 비교적 컸으나 4월과 8월에는 상대적으로 낮았다.

식물플랑크톤군집

조사기간 중 출현한 식물플랑크톤은 돌말류 106종, 와편모류 22종, 규질편모류 2종 등 총 130종으로 구성되어 있었다. 돌말류는 2목 5아목 17과 37속 88종 4변종 4품종 10미동정종으로, 와편모류는 3목 5과 5속 18종 1품종 3미

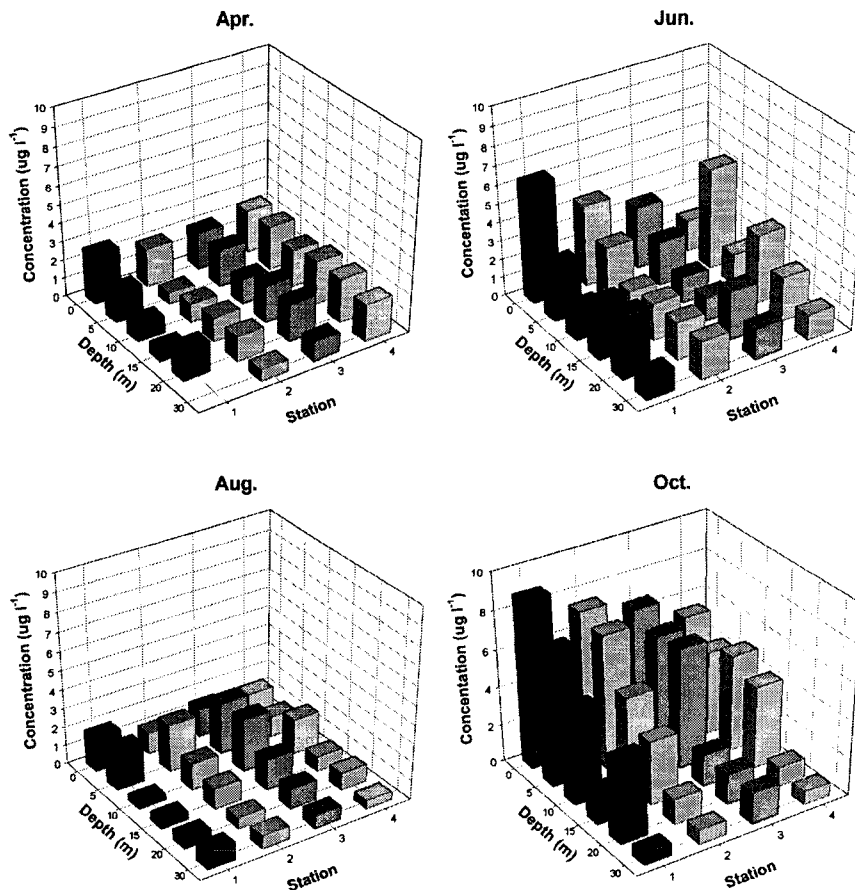


Fig. 2. Seasonal variations of spatial and temporal chlorophyll *a* concentrations in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters, Korea.

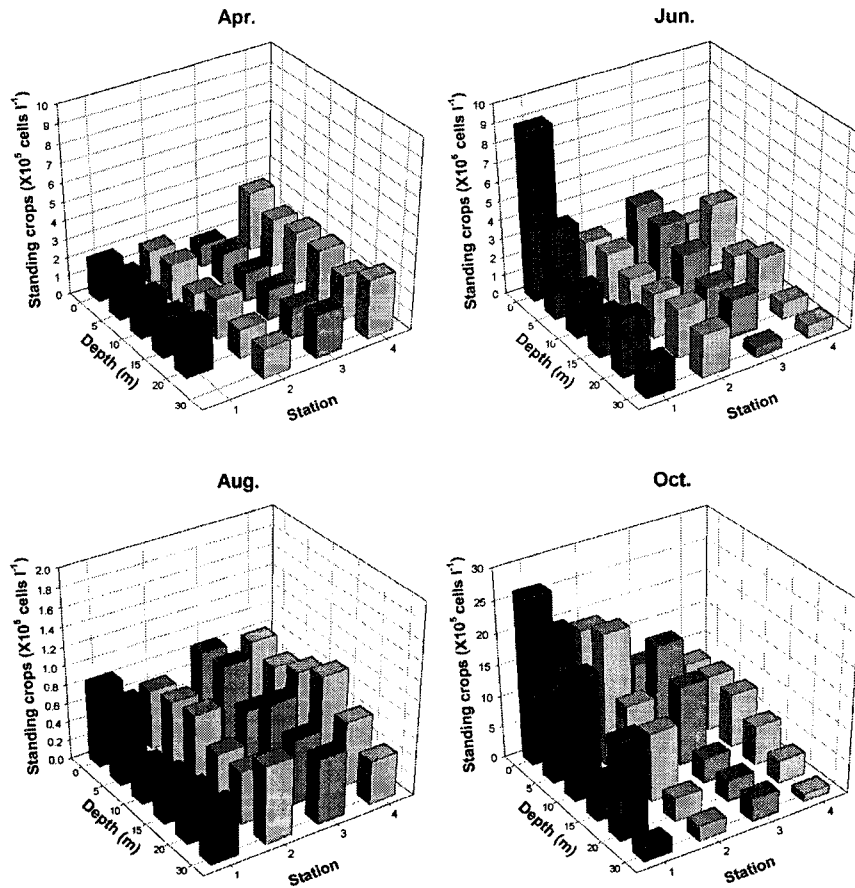


Fig. 3. Spatial and temporal distribution of phytoplankton standing crops in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters, Korea.

동정종으로, 규질편모류는 1목 1과 2속 2종으로 구성되어 있었다. 식물플랑크톤의 현존량은 최저 4.6×10^4 cells/l(8월, 정점 4의 30 m)에서 최고 2.6×10^6 cells/l(10월, 정점 1의 0 m)로 57배의 큰 변화 폭을 보였다(Fig. 3). 월별 평균 현존량은 4월과 6월은 각각 2.1×10^5 cells/l와 2.5×10^5 cells/l를, 8월과 10월에 각각 6.9×10^4 cells/l와 1.0×10^6 cells/l를 보였고, 조사기간 중 정점별로 차이는 그리 크지 않았다. 수심별 변화는 4월과 8월에는 차이가 크지 않았으나 6월과 10월에는 저층으로 갈수록 낮은 현존량을 보였다. 조사기간중 주요 우점종은 *Asterionellopsis glacialis*, *Chaetoceros curvisetus*, *Chaetoceros decipiens*, *Chaetoceros socialis*, *Leptocylindrus danicus*, *Pseudo-nitzschia pungens*, *Skeletonema costatum* 등이었다. 월별 우점종은 4월과 6월에 전 정점과 수심에서 *Leptocylindrus danicus*가 평균 59.84%, 22.03%로 각각 제 1우점종을 차지하였고, 8월에는 *Pseudo-nitzschia pungens*가 23.64%를 점유하였다. 10월에는 *Chaetoceros socialis*가 35.22%와 *Chaetoceros*

*curvisetus*가 25.47%를 점유하였다(Fig. 4).

통계분석

조사기간 중 식물플랑크톤 현존량과 물리·화학 환경 요인과의 상관관계는 Table 2와 같았다. 수온은 염분과 음의 상관관계($r = -0.77$, $n = 96$, $p < 0.01$)를, SiO_2 -Si는 돌말류와 전체 식물플랑크톤 현존량과 각각 $r = 0.76$ ($n = 96$, $p < 0.01$)와 $r = 0.77$ ($n = 96$, $p < 0.01$)로 비교적 높은 양의 상관관계를 보였다. Chlorophyll *a*는 돌말류와 전체 식물플랑크톤 현존량 사이에 상관관계수는 각각 $r = 0.82$ ($n = 96$, $p < 0.01$), $r = 0.85$ ($n = 96$, $p < 0.01$)의 높은 양의 상관관계를 보였다. 투명도와 식물플랑크톤 현존량은 0.54 ($n = 16$, $p < 0.05$)로 낮은 상관관계를, 부유물질과는 통계적 유의성이 거의 없었다. 또한 부유물질은 식물플랑크톤 현존량과는 낮은 양의 상관성($r = 0.21$, $n = 96$, $p < 0.05$)을 보였다.

결과적으로 높은 상관관계를 나타내는 환경요인들은 수온과 NH_4 -N, 염분은 음의 상관성을 보였고 SiO_2 -Si와 돌

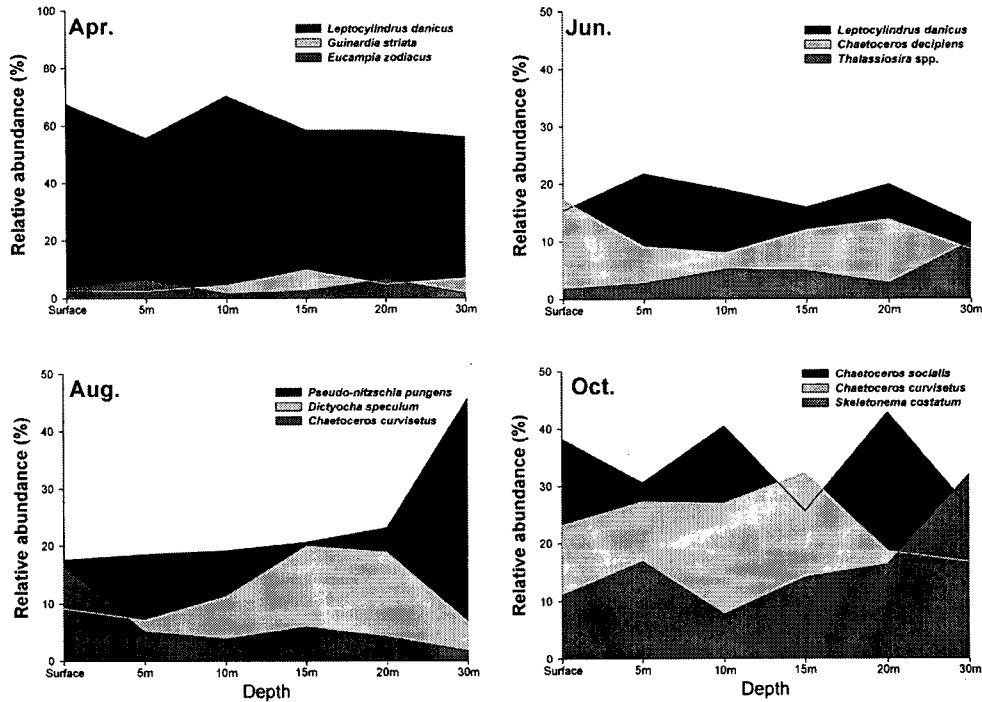


Fig. 4. Seasonal variations of the dominant species in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters, Korea.

Table 2. Pearson correlation coefficient matrix among chlorophyll *a*, phytoplankton standing crops and environmental factors in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters, Korea.

D																			
WT	-0.24																		
LI	-0.51*	-																	
pH	-	-0.45*	-																
DO	-0.32*	-	0.46*	0.42*															
Sal	0.29*	-0.77*	-	0.51*	0.22														
SS	-	-	-	-	-	0.24													
NH ₄	-	-0.53*	-	0.41*	0.51**	0.30*	-												
NO ₃	-0.47*	0.59**	-	-0.38*	-	-0.21	-	-0.49*											
NO ₂	-0.31*	-	-	-0.49*	-0.80*	-0.30*	-	-0.24	0.31*										
DIN	-0.55*	0.53*	-	-0.44*	-	-0.49*	-	-0.29*	0.91*	0.62*									
PO ₄	-	-	0.31*	-	-	0.46**	-	-0.24	0.23	-0.35*	-								
SiO ₂	-0.22	0.33*	-	-0.62*	-0.74*	-0.57*	-	-0.27*	0.32*	0.76*	0.53*	-							
Chl- <i>a</i>	-0.45*	0.21*	-	-0.51*	-0.37*	-0.39*	-	-	0.37	0.75*	0.59*	-0.28*	0.67*						
DI	-0.27*	0.24	-	-0.46*	-0.46*	-0.56*	-0.26	-	0.31*	0.79*	0.56*	-0.25*	0.76*	0.82*					
DF	-0.46*	0.25	-	-	-	-	-	-	0.41*	-	0.39*	-	-	0.31*	-				
TSC	-0.28	0.21	-	-0.47*	-0.51*	-0.55*	-0.21	-	0.28*	0.83*	0.55*	-0.28*	0.77*	0.85*	0.98*	-			
	D	WT	LI	pH	DO	Sal	SS	NH ₄	NO ₃	NO ₂	DIN	PO ₄	SiO ₂	Chl- <i>a</i>	DI	DF	TSC		

D: Depth, WT: Water Temperature, LI: Light Intensity, DO: Dissolved Oxygen, Sal: Salinity, SS: Suspended Solids, NH₄: Ammonia, NO₃: Nitrate, NO₂: Nitrite, DIN: Dissolved Inorganic Nitrogen, PO₄: Phosphate, SiO₂, Silicate, DI: Diatoms, DF: Dinoflagellates, TSC: Total Standing Crops. r values are shown significant (n = 96; p ≤ 0.05; *p ≤ 0.01; and - is not significant).

말류, 식물플랑크톤 현존량, chlorophyll *a*와 양의 상관성을 보였으며 나머지 환경요인은 통계적으로 낮은 유의성을 보였다. 본 해역에서 식물플랑크톤 현존량의 변동에 영향을 미

Table 3. Stepwise regression analysis for total standing crops, diatoms and dinoflagellates in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters, Korea.

DV	IV	Parameter estimates			Sample size	F(p)	R ²
		β	Probability	Importance (%)			
TSC	NO ₃ -N	-0.6346	0.0001	19.52	96	21.86 (0.0001)	0.6349
	NH ₄ -N	-0.1943	0.05	5.98			
	PO ₄ -P	0.2427	0.05	7.47			
	SiO ₂ -Si	0.1195	0.05	3.68			
	Salinity	-0.6921	0.0001	21.29			
	Light intensity	-0.1805	0.05	5.55			
DI	NO ₃ -N	-0.1285	0.05	10.25	96	18.65 (0.0001)	0.8174
	SiO ₂ -Si	0.6876	0.0001	54.85			
	Salinity	-0.2086	0.0001	16.64			
DF	PO ₄ -P	-0.3748	0.05	24.26	96	5.06 (0.01)	0.4934
	Light intensity	-0.3876	0.05	25.08			

TSC: Total Standing Crops, DI: Diatoms, DF: Dinoflagellates, DV: Dependent Variable, β : Standard Estimate, -: Not significant at $p > 0.05$.

치는 물리·화학적 환경요인을 파악하기 위하여 단계적 회귀분석(stepwise multiple regression analysis)을 한 결과 Table 3과 같았다. 총 식물플랑크톤 현존량에 미치는 환경요인, 즉 독립변수의 결정계수(R²)는 0.6349였으며, 주요 변수로는 NO₃-N, NH₄-N, PO₄-P, SiO₂-Si, 염분, 광량이었다. 돌말류 현존량에 미치는 변수의 결정계수(R²)는 0.8174였으며 NO₃-N, SiO₂-Si, 염분이 주요 요인으로 작용하였다. 또한 와편모조류 현존량에 있어서는 결정계수(R²)는 0.4934로 낮았으며, PO₄-P와 광량이 중요한 환경요인으로 작용하였다.

4. 고찰

남해는 고염분의 대만난류의 영향을 받으며, 여름철에는 양자강의 저염수가 남해를 포함한 제주도 주변해역에 영향을 미치고 있어 이 두 수괴가 남해안의 염분을 변화시키는 것으로 알려져 있으나(김 등 1998; 이 1999), 본 조사해역은 내만으로 4월과 6월에 염분은 해류의 영향보다 갈수기에 기인한 것으로 판단된다. 부유물질은 낮은 수심과 느린 유속으로 저층 퇴적물의 용승작용이 활발하지 않아 일정한 양상을 보이는 것으로 판단된다(한국해양연구소 2000). 투명도는 부유물질 양보다 식물플랑크톤 현존량에 상대적으로 높은 상관성을 보여 식물플랑크톤 현존량에 따른 광 산란 및 흡수가 더 크다고 생각된다. 수중의 광은 해수를 구성하는 물, 비생물성 고형물질, 식물플랑크톤 등의 각종 성분들에 의하여 흡수되므로 해수의 각 구성 성분들이 흡수하는 광의 상대적 비율은 소광 계수(K_d)에 기여하는 정도에 비례한다(Kirk 1994). 본 조사해역의 소광 계수는 평균 0.59/m로 빈영양화 해역인 네덜란

드 외양에서 0.4/m와 조지아 만에서 1.8/m(Kirk 1994), 북아메리카의 허드슨 강 하구에서 0.6~5.0/m(Stross and Sokol 1989)와 비교하면, 낮은 소광 계수를 나타내 광량의 분산요인의 영향을 크게 받지 않는다고 판단된다.

영양염류는 식물플랑크톤에 직접적인 영향을 주는 환경요인으로 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 분포에 결정적으로 작용하므로 해양 생산력 파악에 있어 중요 정보를 제공한다(Howarth 1988; Mingazzini *et al.* 1990; Taylor *et al.* 1995). 연안역의 영양염류의 유입은 인근 담수의 유입, 해저퇴적층 및 해류로부터의 유입등을 들 수 있다. 본 조사해역의 영양염류중 NH₄-N는 월성, 울진해역과 서해보다 높았으며(강과 최 2002; Han and Choi 1991; You *et al.* 1994), NO₃-N은 고리, 월성, 울진해역(강과 최 2002), 서해 연안해역(Han and Choi 1991), 득량만(양 등 1995) 등보다 높은 농도를 보였다. 본 조사해역의 용존무기질소는 다른 연안해역의 용존 무기질소보다 높은 양상을 보여, 중영양 수준이었으며, PO₄-P의 평균 농도는 23 $\mu\text{g/l}$ 로 부영양화 기준치와 비교해 보면 빈~중 영양 해역이었다(吉田 1973). 규소는 식물플랑크톤 돌말류의 구성요소로서 돌말류의 대발생을 조절하는 중요한 환경요인이나(Lewin 1962; Veronique *et al.* 2000), 4월과 6월, 8월에는 낮은 SiO₂-Si 농도를 보인 반면, 10월의 높은 SiO₂-Si 농도는 돌말류의 증식을 높이는 결과를 가져온 것으로 판단된다. 본 조사해역에서 평균 DIN:DIP가 108.33:1 at:at으로, 6월의 20.55:1 at:at로 상대적으로 낮은 질소원을 보였으나, 전반적으로 본 조사해역에서는 질소원이 높아 PO₄-P가 식물플랑크톤의 제한인자로 작용하고 있었다. DIN:DISi는 51.28:1 at:at으로 돌말류의 최적 성장 비율인 1:1 at:at보다(Nelson and Dortch 1996) 질소의 농도가 높아 SiO₂-

Si의 낮은 농도를 보인 4, 6, 8월에 SiO₂-Si가 제한인자로 작용했을 것이라 판단된다. 따라서 식물플랑크톤군집에 영향을 미치는 영양염류로는 4월과 8월에 저농도의 PO₄-P와 SiO₂-Si가 조사해역의 성장제한 요인으로 작용하였으나, 10월에 높은 현존량은 수온약층의 파괴로 인해 저층의 영양염류의 상승으로 인한 주 영양염류원(N, P, Si source)이 증가되어 대발생이 일어났다고 판단된다.

Chlorophyll *a*는 동화율에 따른 기초 생산력을 측정하는 중요 요인으로 0.7~8.9 µg/l의 농도를 나타내었다. 이는 마산만 3.0~19.6 µg/l(Han et al. 1991)보다 낮고, 동해의 영일만, 고리, 월성, 울진 연안 해역의 0.3~3.1 µg/l, 0.9~4.4 µg/l, 0.9~4.5 µg/l, 0.7~4.0 µg/l보다 높은 농도이다(강과 최 2002).

본 해역에서 출현한 식물플랑크톤은 돌말류가 81.54%를 차지하였고, 그 중 중심 돌말류가 76.42%인 81종, 깃돌말류가 23.58%인 25종을 차지하고 있어, 중심 돌말류가 큰 범위를 차지하는 전형적인 해양성 식물플랑크톤 출현양상을 보였다(이와 이 1999; 한국해양연구소 1999). 본 조사해역에서 식물플랑크톤 현존량의 계절적 변화는 4월과 6월에 높았다가 8월에 감소를 하였고, 10월에 표층에서 대발생을 일으키는 온대해역의 전형적인 bimodal pattern을 나타내었다(Nybakken 1993). 본 조사해역에서 4월과 6월에 우점한 *Leptocylindrus danicus*는 單頂型(monoacmic)인 일시 플랑크톤으로 최적 염분이 31.8‰의 협염성으로 주로 봄철에 우점을 하나(Brunel 1962; Werner 1977; 유와 이 1976), 이번 연구에서는 비교적 고염분인 34‰ 이상의 협염에서 우점하여 특이 하였다. 8월에 우점한 *Pseudo-nitzschia pungens*는 연안종으로 진해만, 월성해역, 울진해역 등에서 봄철과 여름철에 주요 우점종으로 나타나는 것으로 알려져 있다(Lee 1994; 강 등 2003). 10월에 주요 우점종인 *Chaetoceros socialis*는 북·온대 연안성 종으로 본 조사해역과 남해연안에서 가을과 겨울철의 주요 우점종으로 기록되었으며(이와 허 1983; 한국해양연구소 2000), 월성, 고리, 울진해역에서도 겨울철에 주요 우점종으로 나타나(강 등 2003), 가을철 및 겨울철의 우리나라 연안해역에서 주요 우점종으로 판단된다. *Chaetoceros curvisetus*는 우리나라 연안해역에서 빈번히 출현하는 종으로 알려져 있으며(Lee 1995), 인천항(이와 변 1991)과 득량만(이와 이 1999)에서 대량 발생을 하였다. *Skeletonema costatum*은 연안성으로 우리나라 전역에서 계절에 관계없이 매우 빈번하게 출현하는 종으로 알려져 있다(Lee 1995). 진해만에서 1980년 9월에 1.1×10⁷ cells/l 정도였고(이 등 1981), 1990년 8월 4일에도 인천항 선거내 표층의 전 해역에서 식물플랑크톤 현존량이 0.7~1.25×10⁷ cells/l인 적조가 발생하였는데, 이 중 *Skeletonema costatum*이 전체 현존량의 60%에 이르렀다(이와 변

1991). 이같이 본 해역에서 주 우점하는 식물플랑크톤은 연안종이 높은 출현빈도를 보이고 있어, 내만의 특성을 잘 나타내고 있었다(Round 1981).

본 해역에서의 조사된 자료를 이용하여 회귀분석한 결과 식물플랑크톤 현존량에 크게 영향을 미치는 환경요인은 SiO₂-Si, NO₃-N, NH₄-N, PO₄-P, 염분 및 광량이었다. 이는 본 조사기간 중 주요 우점종이 돌말류였으며, 특히 봄철 고염분 농도에 우점한 *Leptocylindrus danicus*와 가을철에 우점한 *Chaetoceros socialis* 등이 큰 영향을 미쳤다고 판단된다. 또한 외편모조류에 영향을 미치는 환경요인은 PO₄-P와 광량으로 본 영향인자에 따라 여름철 외편모류의 발생에 영향을 미쳤다고 판단된다. 본 연구해역은 식물플랑크톤 군집은 낮은 종 다양성과 연안종 구성으로 특징지을 수 있으며, 영양염류 중 규소와 인이 성장 제한 요인으로 작용하여 식물플랑크톤 군집에 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 규소가 식물플랑크톤의 영향인자로 작용하는 것은 본 조사해역의 식물플랑크톤 현존량 중 돌말류가 차지하는 비율이 99%인 점을 감안하면 잘 일치한다고 할 수 있다.

5. 결 론

통영 바다목장 해역에서 식물플랑크톤 군집에 미치는 물리·화학적 환경요인을 파악하기 위하여 2000년 4, 6, 8, 10월 총 4회에 걸쳐 수심 0 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30 m에서 조사하였다.

수온은 각 계절별 차이가 뚜렷한 전형적인 온대성 기후의 영향을 받고 있었으며, 염분은 쿠로시오 난류의 영향에 따른 고염분과 여름철 장마와 폭우에 따라 약간 낮은 염분농도를 보였다. 부유물질은 수심에 관계없이 낮은 값을 나타내었고, 투명도는 평균 5.4 m로 높은 값을 보여 소광계수 및 외부 요인에 따른 영향이 크다고 사료된다. 수역의 광도는 낮은 소광계수(평균 0.59/m)를 보였고, 수심에 따른 광량의 투과 방해요인인 부유물질, 식물플랑크톤의 현존량, chlorophyll *a*와 상관성을 보이지 않아, 광도만을 고려할 때 빈영양 해역의 특성을 보여주었다. 용존무기질소 중 NO₃-N의 농도가 가장 높아 중영양 수준의 수계특성을 띠었다. PO₄-P는 2~143 µg/l로 빈·중 영양해역이라 판단되며, SiO₂-Si는 0.007~0.600 mg/l로 4월과 6월의 고농도가 조사해역의 식물플랑크톤 성장제한요인으로 작용하여 협염 및 저영양염에서 높은 성장률을 보이는 *Leptocylindrus danicus*가 우점했다고 판단된다.

식물플랑크톤 현존량은 남해의 다른 연안 해역보다 전반적으로 낮았으나 4월과 6월에 약간 높고, 8월에 낮았다가 10월에 대발생을 보이는 전형적인 bimodal pattern을 나타내었다. 4월과 6월에 우점종은 *Leptocylindrus danicus*

가 각각 60.38%와 20.93%를 차지하였고, 8월에는 낮은 현존량과 특별한 우점종이 없었으며, 10월에는 *Chaetoceros socialis*, *Chaetoceros curvisetus*, *Skeletonema costatum* 등이 비교적 높은 출현량을 나타내었다. 본 해역에서 조사된 자료를 이용하여 회귀분석한 결과 식물플랑크톤 현존량에 크게 영향을 미치는 환경요인은 염분, SiO₂-Si 및 NO₃-N 등이었다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원의 통영 바다목장화 사업의 연구비 지원(BSPM 00065-00-1284-3)에 의해 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- 강연식, 최중기, 엄희문. 2003. 고리, 월성, 울진과 영광 연안 해역에서 식물플랑크톤 군집의 생태학적 특성 III. 우점종 분포와 환경요인들. *한국조류학회지*, 18, 29-47.
- 강연식, 최중기. 2002. 고리, 월성, 울진 및 영광 연안해역에서 식물플랑크톤 군집의 생태학적 특성 II. 현존량 분포 및 환경요인들(1992-1996). *한국해양학회지 바다*, 7, 108-128.
- 吉田 陽一. 1973. 低質生産における生物生産の變化. 水産學 series 1. 恒星社 厚生閣, 東京, 日本. 239 p.
- 김성수, 고우진, 조영조, 이필용, 전경압. 1998. 1996년 여름철 남해 표층수의 이상저염수 현상과 영양염류 분포 특성. *한국해양학회지 바다*, 3, 165-170.
- 양한섭, 김성수, 김규범. 1995. 득량만 표층 수층 영양염류의 시공간적 분포특성 I. 영양 염류의 계절변화와 기초생산 제한인자. *한국수산학회지*, 28, 475-485.
- 유광일, 이종화. 1976. 마산만의 환경학적 연구. 2. 식물성플랑크톤의 년변화. *한국해양학회지*, 11, 34-38.
- 이동섭. 1999. 여름과 겨울철 남해의 영양염 분포 특성. *한국해양학회지 바다*, 4, 371-382.
- 이진환, 변정신. 1991. 인천항 선거내의 식물플랑크톤 구조류의 주년동태에 대하여. *한국조류학회지*, 6, 69-82.
- 이진환, 이은호. 1999. 득량만 수질과 식물플랑크톤 적조. *환경생물학회지*, 17, 271-278.
- 이진환, 한명수, 허형택. 1981. 진해만의 적조원인 생물에 관한 연구. *해양연구소보*, 3, 97-105.
- 이진환, 허형택. 1983. 득량만에 있어서 식물플랑크톤과 적조 발생에 관한 연구. *해양연구소보*, 5, 21-26.
- 한국해양연구소. 1998. '98 통영해역의 바다목장연구 개발용 역사업 보고서. 해양수산부. 980 p.
- 한국해양연구소. 1999. '99 통영해역의 바다목장화 개발 용역 사업 보고서. 해양수산부, BSPM 99021-00-1203-3, 902 p.
- 한국해양연구소. 2000. 통영해역의 바다목장화 개발 연구 용역사업 보고서. 해양수산부, BSPM 00065-00-1284-3, 829 p.
- Brunel, J. 1962. Le phytoplancton de la Baie des Chaleurs. Les Preses de l'Universite de Montreal, Montreal. 365 p.
- Han, B.S. and J.K. Choi. 1991. A study on the environmental conditions and phytoplankton ecology in the tidal front area of the Yellow Sea. *Yellow Sea Res.*, 4, 39-55.
- Han, M.S., S.W. Kim, and Y.O. Kim. 1991. Influence of discontinuous layer on plankton community structure and distribution in Masan Bay, Korea. *Bull. Kor. Fish. Soc.*, 24, 459-471.
- Hasle, G.R. and G.A. Fryxell. 1970. Diatoms: cleaning and mounting for light microscopy. *Trans. Am. Microsc. Soc.*, 89, 469-474.
- Howarth, R.W. 1988. Nutrient limitation of net primary production in marine ecosystem. *Ann. Rev. Ecol.*, 19, 89-110.
- Kirk, J.T.O. 1994. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge Univ. Press, New York. 509 p.
- Lee, J.H. 1994. Neurotoxin-producing diatoms, *Pseudonitzschia pungens* Grunow f. *multiseries* Hasle, off the coastal waters of southern Korea. I. Morphological features. *Kor. J. Phycol.*, 9, 125-134.
- Lee, J.H. 1995. Additional check-list of marine planktonic algae in the coastal waters of Korea. *J. Nat. Sci., Sangmyung Univ.*, 2, 71-198.
- Lewin, J.C. 1962. Silicification. p. 445-455. In: *Physiology and biochemistry of algae*. ed. by R.A. Lewin. Academic Press.
- Mingazzini, M., A. Rinaldi, and G. Montanari. 1990. Multi-level nutrient enrichment bioassays on northern Adriatic coastal waters. p. 115-131. In: *Marine coastal eutrophication* ed. by Vollenweider, R.A., R. Marchetti, and R. Viviani. Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Nelson, D.M. and Q. Dortch. 1996. Silicic acid depletion and silicon limitation in the plume of the Mississippi River: evidence from kinetic studies in spring and summer. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 136, 163-178.
- Nybakken, J.W. 1993. Marine Biology. An ecological approach. Harper Collins College Publisher, New York. 462 p.
- Parsons, T.R., Y. Maita, and G.M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. 173 p.
- Reimann, B.E.F., E.L. Duke, and G.L. Floyd. 1980. Fixation, embedding, sectioning and staining of algae for electron microscopy. p. 285-303. In: *Handbook of phycological methods*. ed. by G. Elisabeth. Camb. Univ. Press. London.
- Round, F.E. 1981. The Biology of the Algae. Edward Arnold, London. 278 p.
- Stross, R.G. and R.C. Sokol. 1989. Runoff and flocculation

- modify underwater light environment of the Hudson River estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 29, 305-316.
- 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.
- Véronique, M.J., M. Hildebrand, and M.A. Brzezinski. 2000. Silicon metabolism in diatoms: Implications for growth. *J. Phycol.*, 36, 821-840.
- Werner, D. 1977. *The Biology of Diatoms*. Blackwell Scientific Publications. 469 p.
- You, S.J., J.G. Kim, and G.S. Kim. 1994. Water quality of the Yellow Sea in summer. *Bull. Kor. Fish. Soc.*, 27, 825-835.

Received Jul. 28, 2004

Accepted Dec. 16, 2004