

Note

질산염 첨가에 따른 중형폐쇄생태계 내 플랑크톤 군집의 변화

강정훈^{1*} · 김응서² · 신경순¹ · 장 만¹ · 황근춘¹

¹한국해양연구원 남해연구소
(656-830) 경남 거제시 장목면 장목리 391번지
²한국해양연구원 해양자원연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

The Effect of Enhanced Nitrate Input on the Temporal Variation of the Plankton Community in a Mesocosm

Jung-Hoon Kang^{1*}, Woong-Seo Kim², Kyoungsoon Shin¹,
Man Chang¹, and Keun-Choon Hwang¹

¹South Sea Institute, KORDI
Geoje 656-830, Korea

²Marine Resources Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : Temporal variation of the natural planktonic community in the Southern Sea of Korea was investigated by using four floating enclosed bags (3.2 m deep and 2,500 liter) in order to understand the effect of enriched nitrate on the planktonic community in the spring (March-April) of 2002. Prior to beginning the incubation, the bags were placed in two different concentrations of nitrate, which consisted of control (ambient water) and experimental mesocosms (final concentration of 12 μ M). The nitrate concentration in the experimental mesocosms remained significantly higher than those in control mesocosms throughout the study period (ANOVA, $p < 0.001$). Following the addition of nitrate, abundance and chl-*a* concentration of phytoplankton peaked on Day 1, when diatoms established the peak in the experimental mesocosms. Diatoms consisted mainly of *Thalassiosira decipiens*, *Pseudo-nitzschia pungens*, *Leptocylindrus danicus*, *Thalassionema nitzschioides*, *Chaetoceros pseudocrinitus* and *Actinopterychus senarius*. However, the peak did not lead to the difference in abundance and composition of phytoplankton between control and experimental mesocosms during the study period. The dinoflagellates began to increase soon after the diatoms decreased in all mesocosms. Copepods, as a dominant group in the mesozooplankton community, showed no immediate peak in relation to the nitrate addition, but only their own developmental process from the eggs to adult stage during the study period. The bottom-up control from enriched nitrate via phytoplankton to adult copepods was not distinguished in terms of the abundance of the planktonic community. This might stem from the relatively low nitrate availability of phytoplankton at no N-limited seawater and the weak coupling between rapidly sunken diatoms and copepods through the water column.

Key words : 중형폐쇄생태계(mesocosm), 질산염(nitrate), 식물플랑크톤(phytoplankton), 규조류(diatoms), 중형동물플랑크톤(mesozooplankton)

*Corresponding author. E-mail : jhkang@kordi.re.kr

1. 서 론

식물플랑크톤의 대발생은 연안역, 반 폐쇄성 해역 그리고 용승역에서 주로 일어나며, 생물 및 무생물 요인들 간의 다양한 상호관계에 기인한다. 온대 연안역에서 발생하는 식물플랑크톤 대발생은 규조류에 의해 주도되며, 겨울철에서 봄철로 바뀌는 시기에 관찰된다(Jacobsen *et al.* 1995). 연안 용승과 적도 용승대 그리고 소용돌이 구조에서 관찰된 식물플랑크톤 증가는 수직적 물리적 강제(physical forcing)를 통해 표층으로 유입된 높은 질산염 농도를 갖는 저층수에 반응하는 규조류에 의해 주도된다(Chavez and Barber 1987; Dickson and Wheeler 1995; Ryan *et al.* 2001; Kang *et al.* 2004; Lee Chen *et al.* 2004). 반 폐쇄성 해역으로 유입되는 영양염은 인간활동에서 비롯된 질산염과 인산염이 대부분이며, 이를 활발히 이용하여 대발생을 일으킨 식물플랑크톤은 해수내의 규산염 농도를 감소시켜 규조류가 아닌 식물플랑크톤이 우점하는 환경을 야기한다(Escaravage *et al.* 1999). 이 과정에서 빈번히 나타나는 식물플랑크톤의 대발생의 결과로 저 산소층 환경이 형성되거나(Vollenweider *et al.* 1992), 독성물질로 인한 어류의 대량폐사를 일으키기도 한다(Chang *et al.* 1995). 식물플랑크톤의 대발생은 영양염 농도 증가에 따른 이용도 증가 외에, 동물플랑크톤의 낮은 섭식압에 의해 일어날 수 있으며(Turner *et al.* 1999), 상위 포식자인 해파리류가 요각류의 초식압을 현저히 낮추어 대발생이 빈번해진다는 가설(Kim *et al.* 1992)과 맥락을 같이 한다. 그 반대로 강한 초식압에 의해 대발생이 제어되는 경우가 있다(Nakamura *et al.* 1996). 따라서 식물플랑크톤의 변화는 영양염 공급에 대한 반응과 동물플랑크톤의 포식압에 의한 상호 균형의 결과로 볼 수 있으며, 플랑크톤과 영양염의 동태(dynamics)를 파악함으로써 그 균형을 이해할 수 있다. 그 변화의 이해는 동일한 플랑크톤 군집을 대상으로 시간에 따른 변화를 추적함으로써 가능하다. 그러나 현장에서는 동일한 군집을 대상으로 처리효과에 대한 반응을 확인한다는 것이 거의 불가능하며, 그와같은 연구 결과가 국내에는 전무한 상태이다. 현재까지 영양염과 관련한 식물플랑크톤 대발생에 대한 연구가 대부분이며(Jacobsen *et al.* 1995; Escaravage *et al.* 1996, 1999), 상위 영양단계의 플랑크톤과 같이 연구된 바는 국내에서 매우 부족한 상태이다. 따라서 영양염 처리에 대한 플랑크톤의 군집수준의 반응을 추적하기 위한 적절한 실험도구로 중형폐쇄생태계(mesocosm)를 들 수 있다. 중형폐쇄생태계는 수 톤 이상의 수생환경을 고스란히 담을 수 있어 자연환경에 가까운 조건을 조성할 수 있으며, 다양한 영양단계의 플랑크톤을 포함하는 동일한 군집을 대상으로 장기간 반복 채집이 가능하다. 특히 연구목적에 부합하는 처리

효과에 대해 생물들이 어떻게 반응하는지를 알기 위한 연구에 쓰일 수 있다(Kim 2001).

남해안에 위치한 거제도 장목 연안역에서 2000년 3월에 나타난 수온은 10°C 안팎을 나타내 식물플랑크톤의 성장에 적절한 조건이었으나, 질소 제한 환경으로(질산염 농도: $<1.8 \mu\text{M}$) 봄철 대발생이 지연되는 특징을 나타냈다(양 2000). 이 조건은 질산염에 대한 식물플랑크톤의 반응 확인에 적절할 것으로 여겨져, 동일한 시기인 3월에 중형폐쇄생태계를 이용하여 플랑크톤 군집을 대상으로 질산염 농도를 상향 첨가하였다. 본 논문에서는 질산염 첨가이후 나타나는 중형폐쇄생태계 내의 플랑크톤 군집의 시간적인 변화를 기술하였고, 영양염-식물플랑크톤-동물플랑크톤의 먹이사슬을 통한 상호조절 관점에서 이해하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

중형폐쇄생태계의 설치 및 특징

실험은 2002년 3월부터 4월까지 30일간 거제도 장목만에 위치한 부유수상구조물에서 2,500리터 용량의 폴리에틸렌 재질의 중형폐쇄생태계 4개를 이용하여 대조구와 실험구로 2개씩 처리하여 수행되었다(Fig. 1). 본 실험이 수행된 중형폐쇄생태계는 KOMES(KORDI Mesocosm) (김 2001)의 형태를 향상시켜 여러 개의 실험백을 설치하여 운용할 수 있는 메조코즘 부유구조물(mesocosm raft)이다. 이 부유구조물은 폴리에틸렌 재질의 부이로 고정하여 계류되어 있으며, 최대 8개의 실험백(폐쇄 혹은 반폐쇄 생태계)을 장착하여 실험할 수 있게 고안되었다. 접근성 및 작업효율을 한층 높여 기존 KOMES의 작업 제한성을 개선하였고, 새의 배설물이나 강수(rainfall)에 의한 영향을 제거하기 위해 뚜껑이 제작, 설치되었다. 실험백을 바다에 직접 띄워 놓음으로써 빛과 수온 조건을 자연과 유사하게 유지할 수 있고, 어느 정도 파도에 의한 자연적 교란을 기대할 수 있다. 본 실험에서는 내부와 외부간의 해수 및 생물의 교환이 없는 폴리에틸렌 백을 사용하였다. 실험백에 배양해수를 담기 위해 입구를 가급적 수주(water column) 밑 부분까지 담갔다가 끌어올리면서 해수를 채워 넣었다. 파도에 의해 외부해수가 실험백 안으로 들어가는 것을 방지하고자 실험백 윗 부분 1m 정도는 해수면에 나와 있도록 설계하였다. 실험백의 바닥 부분의 네 곳에는 남으로 된 추를 매달아 해수의 유동이나 와류 때문에 형태가 변형되는 것을 방지하고자 하였다.

시료채집 및 실험실 분석

양(2000)에 따르면 3월의 장목만은 최대 $1.8 \mu\text{M}$ 의 질산염 농도와 4미만의 N/P 비를 나타내는 질산염 제한 환

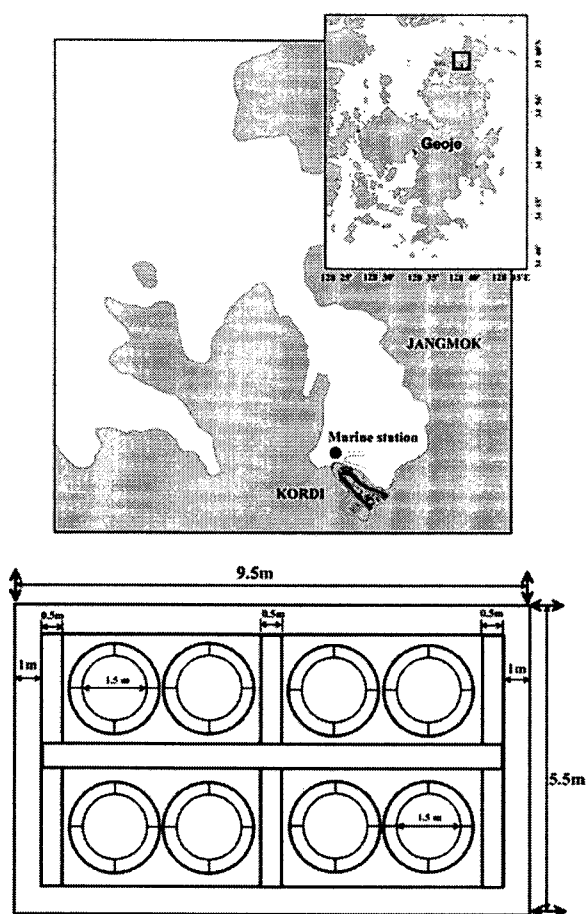


Fig. 1. A map showing the study site and a diagram of suspended raft holding 8 mesocosms.

경이었다. 이에 근거하여 KNO_3 (ACS reagent, Sigma, USA)를 이용하여 실험구의 최종 질산염 농도를 $12 \mu M$ 이 되도록 하여, 6배의 차이를 두었다. 중형폐쇄생태계 내의 플랑크톤 군집 및 환경변화 확인을 위한 채집은 폐쇄생태계에 주변 해수를 담은 첫 날, 영양염 투입 이전과 직후 그리고 1일째, 2일째, 3일째, 7일째, 10일째, 13일째, 20일째, 28일째에 이루어졌다. 채집항목은 수온, 염분, 영양염 농도, 식물플랑크톤 및 중형동물플랑크톤이며, 채집 시간대는 14:00~16:00이었다. 강우량 자료는 기상청에서 한국 해양연구원 남해연구소에 설치한 자동관측장치(AWS: Automatic Warming System)의 자료를 사용하였다. 수온과 염분은 니스킨 채수기(Niskin water sampler)로 바닥에 근접한 깊이 3.2m에서 채수한 뒤, ISTEK 전도계(model 43C, ISTEK, Korea)를 이용하여 측정하였다. 용존무기영양염 분석을 위해 GF/F 여과지로 거른 해수를 급속 냉동하였으며, 암모니움(NH_4^+), 질산염(NO_3^-), 아질산염(NO_2^-), 인산염(HPO_4^{2-}) 및 규산염($Si(OH)_4$)을 Parsons *et al.*

(1984)에 따라 분석하였다. 엽록소 농도분석을 위해, 각 폴리에틸렌 백에서 채수한 해수를 1/씩 걸러낸 GF/F 여과지를 실험실에서 90% 아세톤에 24시간 동안 용출시킨 후 형광측정기(Field Fluorometer 10AU, Turner-Designs, USA)로 측정하였다. 식물플랑크톤 현존량 분석은 두 개의 폴리에틸렌 병(500 ml)에 해수를 담아 루골용액(Lugol solution)으로 고정하여 48시간 침전 후, 1m/을 채취하여 Sedgwick-Rafter 계수판에서 광학현미경(Microscope BHS, Olympus, Japan)하에 계수하였다. 동물플랑크톤 개체수 분석을 위해 니스킨 채수기로 3.2 m 깊이에서 채수한 해수(5 l)를 $60 \mu m$ 망목의 메쉬(mesh)에 걸러 최종농도 5%가 되도록 포르말린으로 고정하였다. 동물플랑크톤 동정 및 계수는 요각류의 경우 중 수준까지 하였고, 나머지는 분류군으로 구분하였다. 질산염 처리에 대한 효과는 귀무가설을 대조구와 실험구간의 차이가 없다고 설정하여 통계 패키지 프로그램(SPSS 10.0)을 이용하여 분산분석(ANOVA)을 통해 검정하였다.

3. 결 과

수온, 염분, 강우량 및 영양염

연구기간동안 강우량은 실험초기보다 후기로 갈수록 높았으며, 실험 17일, 25일 및 26일째의 강우량이 모두

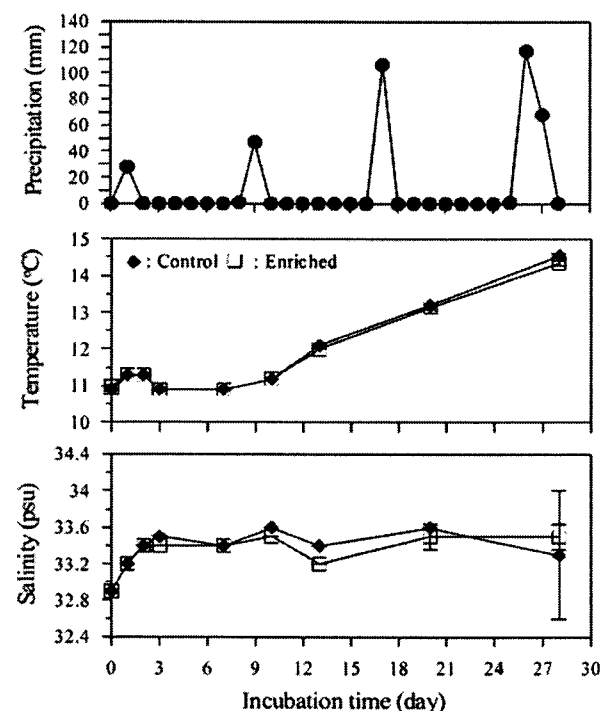


Fig. 2. Temporal variations of precipitation, temperature and salinity in control and nitrate-enriched mesocosms in March-April 2002.

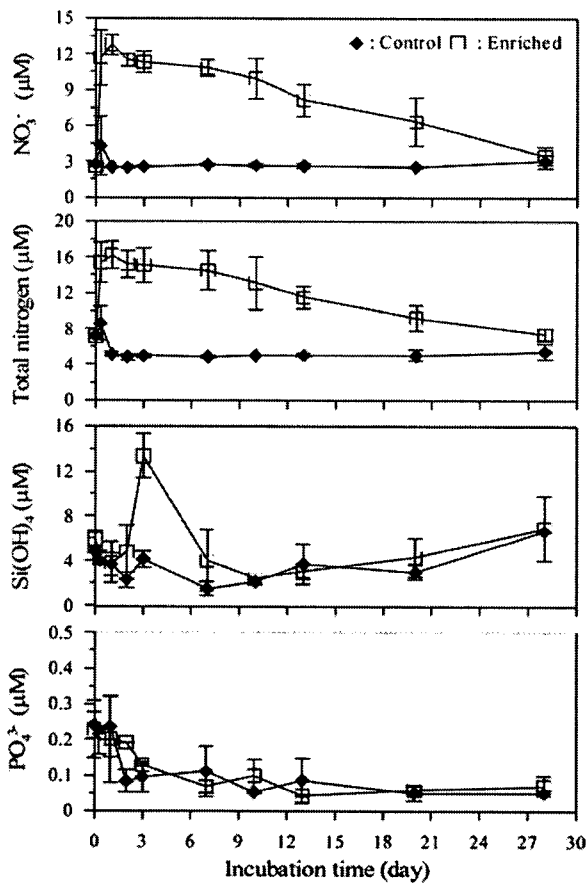


Fig. 3. Temporal variations of nitrate, total nitrogen, silicate, phosphate concentrations in control and nitrate-enriched mesocosms in March-April 2002.

100 mm를 넘는 기록을 나타냈다(Fig. 2). 수온은 10.9~14.6°C의 범위 하에서 증가 경향을 보였고, 특히 실험 9일째 이후부터 급속히 증가한 반면, 염분은 32.9~33.5 psu의 범위에서 뚜렷한 변이는 없었다(Fig. 2). 예외적으로 대조구 폐쇄생태계에서 관찰된 28일째의 높은 염분 편차는 덮개의 손상과 관련된 빗물유입에 의한 것으로 여겨졌다.

인위적인 질산염 첨가 이전의 평균 질산염 농도는 대조구에서 $2.78 \pm 0.06 \mu\text{M}$ 을, 실험구에서 $2.61 \pm 0.08 \mu\text{M}$ 을 나타냈고(Fig. 3), 질산염 첨가 이후에는 대조구에서 $4.33 \pm 2.45 \mu\text{M}$, 실험구에서 $11.69 \pm 2.34 \mu\text{M}$ 을 각각 나타내 처리효과가 분명하였다(Fig. 3). 연구기간 동안 총 무기질소 농도는 대조구와 처리구가 뚜렷한 차이를 나타냈으나(ANOVA, $p < 0.001$) (Table 1), 계속 감소하는 유형은 같았고, 실험 28일째에 이르러서는 거의 유사한 값을 나타냈다. 규산염은 실험구에서 실험 3일째에 $13.3 \mu\text{M}$ 로 연구기간 중 최대를 나타냈으며, 이는 식물플랑크톤 현존량이 최대를 나타낸 후 급감한 시기와 일치하였다. 그러나 실험 10일째부터는 처리구간의 농도차이가 없었다(ANOVA,

Table 1. Results of ANOVA (repeated measure analyses) showing main effects of nitrate addition on inorganic nutrients, phytoplankton, and mesozooplankton between control and experimental mesocosms.

Variables	Treatment effects × time interactions	
	F	P
Nitrate	42.959	0.00001
Nitrite	36.126	0.00002
Ammonia	13.219	0.00222
Phosphate	0.0418	0.841
Silicate	2.150	0.161
Standing crop (cells · ml ⁻¹)	0.149	0.705
Chl- <i>a</i> (µg · l ⁻¹)	1.070	0.316
Copepod eggs	2.408	0.140
Copepod nauplii	0.00052	0.982
Immature copepods	0.079	0.783
Adult copepods	0.611	0.446
Total abundance	0.373	0.549

All analysis was carried out at $\alpha = 0.01$ level.

$p > 0.05$). 인산염은 0.05~0.24 µM의 농도범위에서 점차 감소하는 경향이 대조구와 실험구에서 동일하게 나타났으며, 농도의 차이도 없었다(ANOVA, $p > 0.05$) (Table 1).

식물플랑크톤 현존량 및 엽록소-a 농도

식물플랑크톤 전체 현존량은 대조구와 실험구에서 각각 41~607 cells ml⁻¹와 94~893 cells ml⁻¹의 범위를 나타냈다. 실험구의 식물플랑크톤 현존량은 질산염 첨가 이후 1일째에 급격한 증가를 나타낸 이후, 다시 급격히 감소하여 낮게 유지되었다. 그러나 대조구에서는 실험구와 같은 1일째의 증가가 관찰되지 않았고, 다만 초기에 전반적으로 높게 나타났던 현존량이 점차 감소한 경향만 유사하였다(Fig. 4). 식물플랑크톤 군집을 이루는 분류군 중 규조류가 가장 우점하였으며, 대조구에서 24~593 cells ml⁻¹의 범위에서 60%의 점유율을 나타낸 반면, 실험구에서는 65~873 cells ml⁻¹의 범위에서 70%의 점유율을 나타내 더 높은 범위를 나타냈다. 그러나 실험 2일째까지 높은 현존량을 유지한 후 남은 연구기간동안 낮은 범위를 나타낸 경향은 대조구와 실험구에서 서로 유사하였다. 엽록소 농도의 경우도 전체 현존량의 변화와 유사하였으며, 대조구와 실험구에서 각각 0.76~8.14 µg l⁻¹와 1.86~10.67 µg l⁻¹의 범위를 나타냈다(Fig. 4). 연구기간동안 대조구와 실험구간의 엽록소 농도의 차이는 유의성이 없었고(ANOVA, $p > 0.05$), 다만 평균 엽록소 농도 관점에서 실험구의 값이 더 높게 나타난 것이 특징적이었다(Table 1).

모든 폐쇄생태계에서 규조류가 높은 현존량에서 실험

3일째에 감소한 이후 낮게 유지되는 경향과 달리, 와편모류는 실험 3일째 이후부터 증가하였다(Fig. 5). 실험 1일째에 실험구에서 와편모류의 증가가 관측되기는 하였으나, 처리구 간의 차이를 나타낼 정도로 뚜렷한 정도는 아니었다. 와편모류는 식물플랑크톤 군집의 2~40%의 점유율을 나타냈으며, 대조구와 실험구에서 각각 8~32 cells ml⁻¹와 5~39 cells ml⁻¹의 범위를 나타냈다(Fig. 5).

대조구의 규조류 내에서 *Thalassiosira decipiens*가 가장 높은 점유율(34.8%)을 나타냈고, 다음으로 *Pseudonitzschia pungens*(18.7%), *Leptocylindrus danicus*(17.0%) 그리고 *T. gravida*(10.6%)의 순서를 나타냈다(Fig. 6). 대부분의 규조류들이 초기에 높은 현존량을 나타낸 후 빠르게 감소한 것과 달리 *Cylindrotheca closterium*은 그 반대의 경향을 나타냈고, *P. pungens*는 다른 규조류와 달리 완만한 감소경향을 나타냈다(Fig. 6).

실험구의 규조류에서 *T. decipiens*가 가장 우점(39.9%)하였으며, 다음으로 *P. pungens*(18.9%), *L. danicus*(14.3%) 그리고 *T. gravida*(8.0%)가 우점하였다(Fig. 6). 실험구에서 질산염이 첨가된 이후 *T. decipiens*, *P. pungens*, *L.*

danicus, *Thalassionema nitzschoides*, *Chaetoceros pseudo-crinitus* 그리고 *Actinopterychus senarius*가 즉시 반응하여 증가한 반면, *T. gravida*, *C. closterium* 그리고 *Lauderia borealis*의 3종은 크게 반응하지 않았다(Fig. 6). 우점한 와편모류는 대조구 폐쇄생태계에서 *Protoperidinium bipes*(1.7%), *Gyrodinium spirale*(1.5%) 그리고 *Peridinium gracile*(0.5%)로 나타났고, 실험구에서 와편모류는 *P. bipes*(2.1%), *G. spirale*(1.3%) 그리고 *P. gracile*(0.8%)로 나타났(Fig. 6). 와편모류는 모든 처리구에서 규조류가 감소한 이후 바로 증가하는 경향을 나타냈다.

동물플랑크톤

요각류 유생과 알을 포함한 전체 동물플랑크톤 개체수의 변화는 대조구와 실험구간에 서로 유사하였으며, 실험구의 평균 개체수가 대조구에 비해 다소 높았다(Fig. 7). 동물플랑크톤의 최대 개체수는 식물플랑크톤의 현존량 및 엽록소 농도가 최대를 나타낸 후 약 4일 후에 나타났으며, 실험구에서 다소 높게 나타났다. 모든 처리구에서 동물플랑크톤 개체수가 최대를 나타낸 후에 남은 배양기간 동안 점차 감소하는 추세를 나타냈다. 이 경향은 동물플랑크톤 군집을 우점하는 요각류에 의해 주도되었다. 요각류 유생과 알은 전체 동물플랑크톤 개체수 변화를 이끌었고, 미성숙체와 성체는 실험 13일째 이후부터 증가하였다. 동물플랑크톤의 전체 개체수는 대조구와 실험구에서 각각 1,700~44,050 inds.m⁻³와 2,400~53,000 inds.m⁻³의 범위를

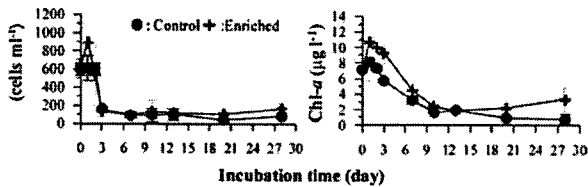


Fig. 4. Temporal variations of chlorophyll-a and standing crop of phytoplankton in control and nitrate-enriched mesocosms in March-April 2002.

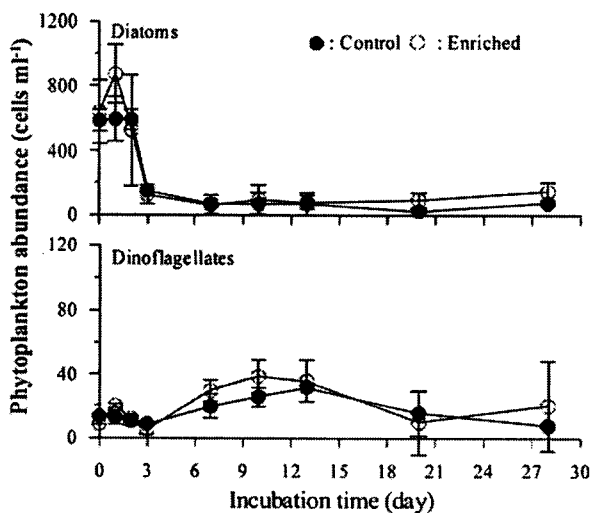


Fig. 5. Temporal variations of two dominant groups in the phytoplankton community in control and nitrate-enriched mesocosms in March-April 2002.

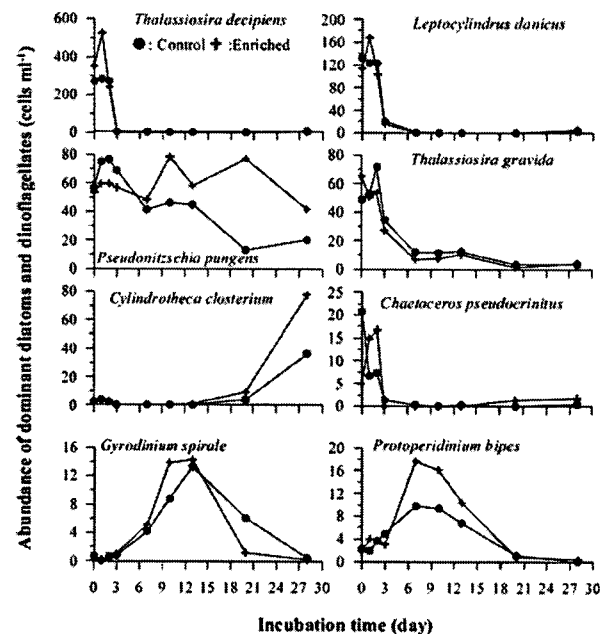


Fig. 6. Temporal variations of dominant diatoms and dinoflagellates in the phytoplankton community in the mesocosms in March-April 2002.

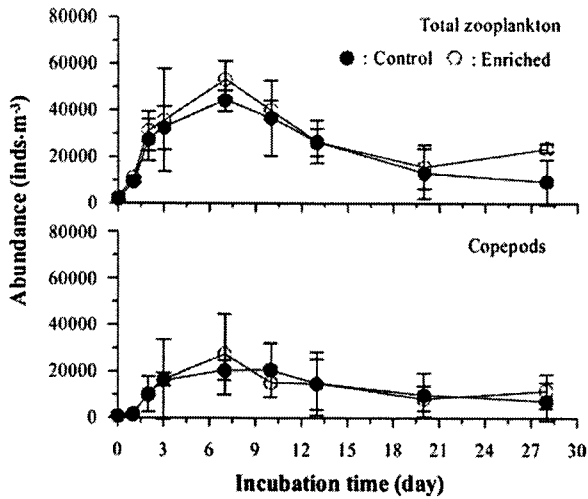


Fig. 7. Temporal variations in total zooplankton and copepods in the control and nitrate-enriched mesocosms in March-April 2002.

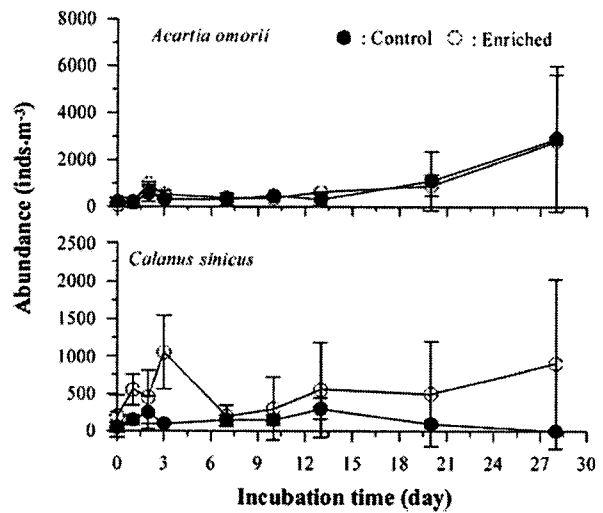


Fig. 9. Temporal variations of representative copepods in the zooplankton community in the control and nitrate-enriched mesocosms in March-April 2002.

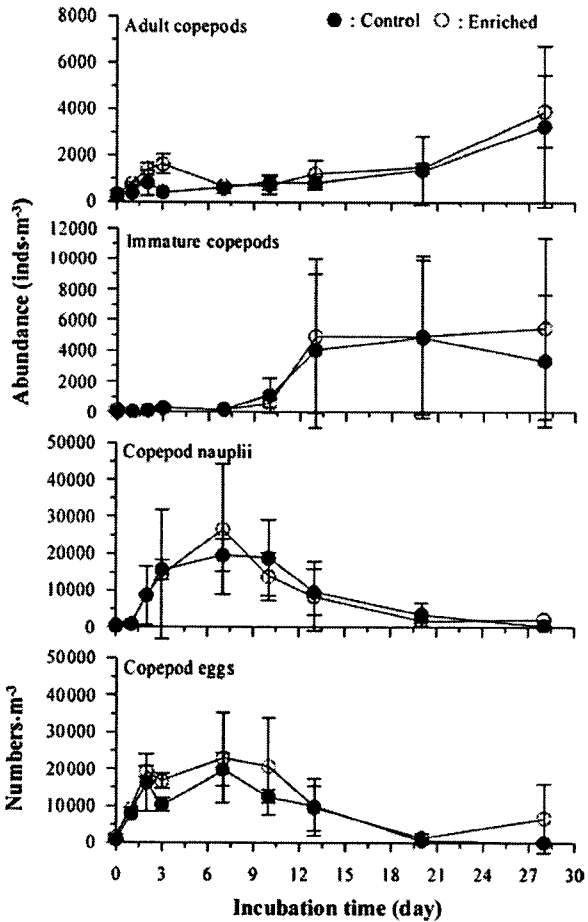


Fig. 8. Temporal variations in eggs, nauplii, immature and adult copepods in the control and nitrate-enriched mesocosms in March-April 2002.

나타냈다(Fig. 7). 동물플랑크톤 군집에서 우점한 요각류 개체수는 대조구와 실험구에서 각각 900~20,700 inds.m⁻³와 650~27,350 inds.m⁻³의 범위를 나타냈다(Fig. 7). 요각류 성체의 개체수는 대조구와 실험구에서 각각 300~3,250 inds.m⁻³와 250~3,900 inds.m⁻³의 범위를, 미성숙체는 0~4,850 inds.m⁻³와 50~5,500 inds.m⁻³의 범위를, 요각류 유생은 550~19,550 inds.m⁻³와 250~26,550 inds.m⁻³의 범위를 나타냈다(Fig. 8). 요각류 알은 각각 50~19,800 number m⁻³와 1,350~22,950 number m⁻³의 범위를 나타냈다(Fig. 8). 요각류 성체는 *Acartia omorii*와 *Calanus sinicus*가 우점하였고, 전체 요각류 개체수의 변이와 유사하게 실험 20일째 이후부터 증가한 *A. omorii*와 달리, *C. sinicus*는 실험 3일째에 최대값을 나타냈다(Fig. 9).

요약하면, 질산염 첨가로 인한 처리구 간의 총 무기질소의 농도 차이는 유의하였으나(ANOVA, $p < 0.0001$), 식물플랑크톤의 현존량과 엽록소 농도의 차이는 유의하지 않았다[ANOVA, $p > 0.05$ (standing crop); $p > 0.05$ (chl-*a*)]. 또한 동물플랑크톤(ANOVA, $p > 0.05$)의 개체수에도 유의성 있는 차이를 주지 못했다(Table 1).

4. 토 의

식물플랑크톤의 성장은 빛과 수온이 적절할 경우 영양염 이용도에 제한 받을 수 있는 것으로 알려져 있다(Hecky and Kilham 1988). 해양 및 염하구역에서는 질산염이 식물플랑크톤의 성장을 제한하고, 담수 식물플랑크톤은 인산염에 제한을 받는다는 것이 현재의 지배적인 주장이다(Fisher et al. 1999). 거제도 장목 연안역은 질소 제

한 환경으로 (질산염 농도: $<1.8 \mu\text{M}$) 분철 대발생이 지연되는 특징을 나타냈다(양 2000). 질산염에 대한 식물플랑크톤의 반응 확인에 적절한 시기로 판단되어 같은 시기인 3월에 중형 폐쇄생태계를 이용하여 질산염 농도를 상향 조정 첨가 후 플랑크톤 군집의 반응을 확인하였다. 그러나 예상하였던 식물플랑크톤의 현존량과 엽록소 농도의 유의성 있는 증가는 없었고(ANOVA, $p>0.05$), 질산염 첨가 직후 적은 폭의 한번의 증가만이 관찰되었다. 이들을 섭식하는 초식성 요각류의 개체수 또한 유의성 있는 증가가 없었다(ANOVA, $p>0.05$). 오직 실험구내의 질산염 농도만이 대조구에 비해 높게 나타나(ANOVA, $p<0.001$), 본 연구시기가 질산염이 식물플랑크톤에 의해 활발히 이용되지 않았던 것으로 보이며 질산염 농도 제한 환경이 아님을 시사한다. 이는 질산염 첨가 후 식물플랑크톤의 이용도에 따라 그 농도가 빠르게 감소하였던 기존연구(Jacobsen *et al.* 1995; Escaravage *et al.* 1999)와 상반된 결과이다.

실험 시작시 해수의 N/P 비는 16(Conley and Malone 1992)보다 높아 더 이상 질소 제한환경이 아니었으며, 춘계 규조류 대발생이 이미 진행 중이었던 것으로 판단된다. 크기가 큰 중심형 규조목은 질산염을 암모니아와 같은 속도로 섭취하므로 춘계 대발생 시기에 주로 형성되며(Takahashi *et al.* 1982), 또한 사슬형태의 규조류(Chang *et al.* 1995)가 출현하는 것으로 알려져 있다. 중형폐쇄생태계에 주변수가 채워졌을 때 채집된 초기 규조류 조성이 위의 형태와 유사하여 대발생이 이미 시작되었음을 뒷받침하였다. 일반적으로 춘계 대발생 후 성충화된 상층부에서 질산염이 고갈되면 규조류가 감소하면서, 소형편모류 혹은 초미세플랑크톤이 적은 양의 질산염을 이용하고, 규산염이 낮은 농도 하에서 크기가 큰 와편모류도 증가한다(Cullen 1982). 그러나 본 연구에서 관측된 규조류 현존량의 감소는 질산염 농도가 감소하기 이전에 나타난 것으로 이에 대한 이유를 다양한 측면에서 생각할 수 있다. Takahashi *et al.*(1982)은 수층교란과 관련된 지속적인 질산염 공급이 있을 시에 규조류의 높은 수도가 유지되었다고 하였다. 본 연구기간동안 실험구의 질산염 농도가 대조구에 비해 높은 값을 나타낸 상태에서 대조구와 실험구 모두 동일하게 실험 3일째 이후에 감소한 경우를 보면 질산염 농도의 차이가 현존량 감소의 주요인이 아닌 것으로 판단된다. 주변수가 폐쇄생태계에 담기면서 그 내부의 물리적 환경은 주변수 환경과 독립적이 되며, 특히 수층교란에 의한 저층에서 표층으로의 영양염 유입은 사실상 없어진다. 이와 더불어 대발생을 이루었던 규조류에 의한 규산염 이용은 폐쇄생태계 내의 규산염 농도를 감소시키는 주요인이 된다. 이는 실험이 진행될 때 주변수에서 채수된 해수의 규산염 농도와 비교하였을 때 더욱 명료해진다. 또한 주변수에서 끊임없이 일어나는 수층 내 교란(turbulence)

은 식물플랑크톤의 침강율을 낮추는 것으로 알려져 있고, 반대로 폐쇄생태계 내에 해수가 채워진 이후에 내부에서 침강율은 주변수보다 높게 나타나며, 시간의 경과에 따라 그 차이는 점차 커지는 것으로 나타났다(Bienfang 1982). 폐쇄생태계 내에서 급속히 증가하였다가 감소한 대부분의 규조류들은 *Thalassiosira*, *Thalassionema*, *Leptocylindrus* 속의 중심형 규조목이며, 이들의 평균 침강율이 0.33~1.58 m/day(Bienfang 1982) 인 것을 감안하면 실험시작 후 2~3일 이후에 나타난 전반적인 감소가 침강과 무관하지 않은 것으로 보인다. 그러나 우상형 규조류인 *Pseudo-nitzschia pungens*와 *Cylindrotheca closterium*은 그와 같은 감소 경향을 보이지 않았고, *P. pungens*가 느린 속도로 감소한 반면, *C. closterium*은 오히려 증가하였다. *C. closterium*은 적은 농도의 규산염 하에서도 존재하는 것으로 알려져 있고(Davis 1982), 실험 13일째 이후의 소폭의 규산염 농도 증가와 함께 증가하였다. 이미 춘계 대발생이 시작된 와중에 1회에 그친 질산염 첨가는 일시적인 증가 이외에 식물플랑크톤 전체 변화에 영향을 주지는 못했다. 오히려 규조류의 감소 후 나타난 와편모류의 증가는 규조류 대발생 이후 나타나는 일반적인 천이과정과 일치하였다(Jacobsen *et al.* 1995).

해양환경에서 자연적으로 일어나는 대발생은 용승 후 안정상태, 하천수 유입 그리고 해류에 의한 순환에 의해 일어나며, 인위적으로는 지속적인 영양염 축적으로 인한 부영양화가 있으며(Sellner *et al.* 2003), 이로 인해 규산염이 덜 필요한 유독미세조류의 대발생을 야기한다. 이로 미루어 본다면 본 연구결과에서 규산염 제한 환경하에 와편모류가 증가 하였으며, 이때 추가적인 고농도의 질산염 투입이 이루어진다면 낮은 수도에 머물러 있던 적조 원인종인 *Protoperdinium bipes*, *Gyrodinium spirale* 그리고 *Prorocentrum gracile*의 수도가 크게 증가할 것으로 여겨졌다. 이와 같은 이유로 인해, 실험구 폐쇄생태계에 인위적으로 투입된 질산염의 효과는 단 하루 정도에 그쳐 식물플랑크톤의 현존량 및 생물량에 큰 차이를 주지 못했다. 게다가 식물플랑크톤의 주요 초식자인 요각류의 개체수 차이에 영향을 주지 못했으며, 오히려 같은 실험구 폐쇄생태계 간의 차이가 더 크게 나타났다. 상향조절 측면에서 중형동물플랑크톤은 미소동물플랑크톤에 비해 수적인 변화반응이 느린 경향이 있다(Hansen 1992). *Acartia omorii*와 *Calanus sinicus*로 구성된 성체 요각류와 미성숙체는 즉각적인 반응이 없었고, 오히려 요각류 유생과 알이 실험 2~3일째에 높게 나타났다. 높은 요각류 알의 개수는 규조류 대발생이 붕괴되면서 감소하였는데, 이는 포란율이 먹이농도와 과거섭식내용(past feeding history)과 관련이 있음을 시사한다. 성체 *A. omorii*는 먹이농도 감소에 민감하게 반응하여 낮은 포란율을 나타내고(Uye 1981),

Acartia 속의 소형 요각류의 포란율은 앞선 24시간동안 섭취한 먹이의 양과 관련이 있다(Tester and Turner 1990). 따라서 요각류 알이 시간에 따라 감소한 것은 먹이인 엽록소 농도의 급감과 관련이 있어 보이며, 이외에 부화, 침강 및 섭식에 의한 것으로 판단된다. 먹이가 충분한 상태에서 요각류 란에서 *A. omorii* 성체로 발달하는데 소요되는 기간은 실험실 조건(15°C)에서 대략 20일이 걸리고(Iwasaki 1977), 현장(10°C)에서는 30일이 걸린다(McLaren 1978). 또한 *C. sinicus*의 경우에는 10~15°C의 범위에서 유생 1기에서 성체까지 이르는데 대략 20~40일 정도 소요된다(cited in Uye 1988). 11~15°C 범위 수온에서 실험 2일~7일째까지 높은 먹이농도하의 높은 수의 유생을 고려하면, 13일째에 나타난 미성숙체의 증가와 성체 요각류의 증가는 어느 정도 예측할 수 있다. 유생의 개체수가 감소하면서 미성숙체가 증가한 것은 다른 동물플랑크톤과 요각류 성체 및 미성숙체가 유생을 포식한 결과와 미성숙체로의 탈피 등 복합적 요인으로 여겨진다(Turner et al. 1999). 먹이 농도는 요각류의 포란율과 유생 개체수에 직접적인 영향을 끼치며, 요각류 생활사에서 각 성장단계간 소요기간을 결정짓는 요인 중 하나이다.

요약하면, 질산염의 첨가가 식물플랑크톤을 거쳐 동물플랑크톤에까지 미치는 영향은 본 연구결과에서 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 더 이상 질산염 제한 조건이 아닌 환경에 적응한 식물플랑크톤이 높은 현존량을 나타내 고농도의 질산염 첨가에 반응하지 않았기 때문이었다. 또한 폐쇄생태계 내의 감소된 물리적 교란은 식물플랑크톤의 침강을 가져와 수층내에서의 빠른 현존량 감소를 가져왔고, 결과적으로 첨가된 질산염은 폐쇄생태계 내에서 빠르게 소비되지 않았다. 이는 수층 내의 성체 요각류가 먹이와 만날 확률을 낮추어 개체수가 증가하지 못한 것으로 보인다. 다만 실험 13일째 이후에 나타난 미성숙체와 성체 요각류의 개체수 증가는 초기에 높은 수를 보였던 요각류알과 유생의 성장 때문인 것으로 보인다. 본 실험기간 동안 이미 자연상태에서 증가된 질산염에 반응한 식물플랑크톤은 첨가된 질산염을 거의 소비하지 않았고, 오히려 인 이용의 증가로 인한 인 제한환경으로 전이되어 배양기간이 경과할수록 점차 높은 N/P 비를 나타냈다. 따라서 이와 동일한 시기에 플랑크톤 군집에 대한 영양염의 영향을 판별하기 위해서는 본 실험보다 더 긴 연구기간동안 자연상태와 유사한 물리적 교란 하에서 목표하는 영양염을 지속적으로 첨가해야할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 남해 특별관리해역의 환경위해성 평가 연구: (1) 마산연안 중심연구(PE91800)와 환경부 사업인 “수서

생태계(미소생태계) 구조 및 기능 연구를 통한 생태환경 평가 기술 연구(PN53400)”의 지원으로 수행되었습니다. 중형폐쇄생태계 설치 시 도움을 주신 한국해양연구원의 장민철, 이우진, 장풍국 선생님과, 현장조사와 영양염 및 생물 분석에 많은 도움을 주신 손승규 박사님, 김경홍, 손주원, 조규희 선생님께 감사드립니다.

참고문헌

- 양동범. 2000. 연안역에서의 육지와 해양 상호작용연구(1) 남해 동부연안역의 영양물질 유입과 생물생산력 개발 환경 조성 기반기술. 해양연구소, BSPE 00784-00-1294-4. 508 p.
- Bienfang, P.K. 1982. Phytoplankton sinking-rate dynamics in enclosed experimental ecosystems. p. 261-274. In: *Marine Mesocosms: Biological and Chemical Research in Experimental Ecosystems*. ed. by G.D. Grice and M.R. Reeve. Springer-Verlag, New York.
- Chang, M., W.-S. Kim, and J.H. Lee. 1995. Phytoplankton blooms in the coastal waters of Korea - Red tides in Masan and Chinhae Bays. *Ocean Res.*, 17, 137-156.
- Chavez, F.P. and R.T. Barber. 1987. An estimate of new production in the equatorial Pacific. *Deep-Sea Res.*, 34, 1229-1243.
- Conley, D.J. and T.C. Malone. 1992. Annual cycle of dissolved silicate in Chesapeake Bay: implications for the production and fate of phytoplankton biomass. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 81, 121-128.
- Cullen, J.J. 1982. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll-*a*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 39, 791-803.
- Davis, C.O. 1982. The importance of understanding phytoplankton life strategies in the design of enclosure experiments. p. 324-332. In: *Marine Mesocosms: Biological and Chemical Research in Experimental Ecosystems*. ed. by G.D. Grice and M.R. Reeve. Springer-Verlag, New York.
- Dickson, M.L. and P.A. Wheeler. 1995. Nitrate uptake rates in a coastal upwelling regime: a comparison of PN-species, absolute, and chl-*a* specific rates. *Limnol. Oceanogr.*, 4, 533-543.
- Escaravage, V., T.C. Prins, A.C. Smaal, and J.C.H. Peeters. 1996. The response of phytoplankton communities to phosphorus input reduction in mesocosm experiments. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 198, 55-79.
- Escaravage, V., T.C. Prins, C. Nijdam, A.C. Smaal, and J.C. Peeters. 1999. Response of phytoplankton communities to nitrogen input reduction in mesocosm experiments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 179, 187-199.
- Fisher, T.R., A.B. Gustafson, K. Sellner, R. Lacouture, L.W.

- Haas, R.L., Wetzel, R., Magnien, D., Everitt, B., Michaels, and R. Karrh. 1999. Spatial and temporal variation of resource limitation in Chesapeake Bay. *Mar. Biol.*, 133, 763-778.
- Hansen, P.J. 1992. Prey size selection, feeding rates and growth dynamics of heterotrophic dinoflagellates with special emphasis on *Gyrodinium spirale*. *Mar. Biol.*, 114, 327-334.
- Hecky, 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. *Limnol. Oceanogr.*, 33, 796-822.
- Iwasaki, H., H. Katoh, and T. Fujiyama. 1977. Cultivation of the marine copepod *Acartia clausi* Giesbrecht. I. Factors affecting the generation time and egg production. *Bull. Plankton Soc. Jpn.*, 24, 55-61.
- Jacobsen, A., J.K. Egge, and B.R. Heimdahl. 1995. Effects of increased concentration of nitrate and phosphate during a spring bloom experiment in mesocosm. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 187, 239-251.
- Kang, J.H., W.-S. Kim, K.I. Chang, and J.H. Noh. 2004. Distribution of plankton related to the mesoscale physical structure within the surface mixed layer in the southwestern East Sea, Korea. *J. Plankton. Res.*, 26, 1515-1528.
- Kim, W.-S. 2001. Application of enclosed experimental ecosystem to the study on marine ecosystem. *Kor. J. Environ. Biol.*, 19, 183-194.
- Kim, W.-S., M. Chang, and J.H. Shim. 1992. Multitrophic interactions as a trigger of the *Gyrodinium aureolum* bloom in Reeves Bay. New York. *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 27, 268-276.
- Lee Chen, Y.L., H.Y. Chen, G.C. Gong, Y.H. Lin, S. Jan, and M. Takahashi. 2004. Phytoplankton production during a summer coastal upwelling in the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, 24, 1321-1338.
- McLaren, I.A. 1978. Generation lengths of some temperate marine copepods : estimation, prediction, and implications. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, 35, 1330-1342.
- Nakamura, Y., S.Y. Suzuki, and J. Hiromi. 1996. Development and collapse of a *Gymnodinium mikimotoi* red tide in the Seto Inland Sea. *Aquat. Microb. Ecol.*, 10, 131-137.
- Parsons, T.R., Y. Maita, and C.M. Lalli. 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press, New York. 173 p.
- Ryan, J.P., J.A. Yoder, and D.W. Townsend. 2001. Influence of a Gulf Stream warm-core ring on water mass and chlorophyll distributions along the southern flank of Georges Bank. *Deep-Sea Res. II.*, 48, 159-178.
- Sellner, K.G., G.J. Doucette, and G.J. Kirkpatrick. 2003. Harmful algal blooms: causes, impacts and detection. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 30, 383-406.
- Takahashi, M., I. Koike, K. Iseki, P.K. Bienfang, and A. Hattori. 1982. Phytoplankton species responses to nutrient changes in experimental enclosures and coastal waters. p. 333-340. In: *Marine Mesocosms: Biological and Chemical Research in Experimental Ecosystems*. ed. by G.D. Grice and M.R. Reeve. Springer-Verlag, New York.
- Tester, P.A. and J.T. Turner. 1990. How long does it take copepods to make eggs? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 141, 169-182.
- Turner, J.T., P.A. Tester, J.A. Lincoln, P. Carlsson, and E. Graneli. 1999. Effects of N:P:Si ratios and zooplankton grazing phytoplankton communities in the northern Adriatic Sea. III. Zooplankton populations and grazing. *Aquat. Microb. Ecol.*, 18, 67-75.
- Uye, S.I. 1981. Fecundity studies of neritic calanoid copepods *Acartia clausi* Giesbrecht and *A. steuerei* Smirnov: A simple empirical model of daily egg production. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 50, 255-271.
- Uye, S.I. 1988. Temperature-dependent development and growth of *Calanus sinicus* (Copepoda:Calanoida) in the laboratory. *Hydrobiologia*, 167/168, 285-293.
- Vollenweider, R.A., A.G. Rinaldi, and G. Montanari. 1992. Eutrophication, structure and dynamics of a marine coastal system: results of ten years monitoring along the Emilia Romagna coast (Northwest Adriatic Sea). p. 63-106. In: *Marine Coastal Eutrophication*. ed. by R.A. Vollenweider, R. Marchetti, and R. Viviani. Elsevier, Amsterdam.

Received May 27, 2005

Accepted Sep. 2, 2005