

## 옥계만 단일정점에서 극미소 및 미소플랑크톤의 시간적 분포

이 원 제

경남대학교 환경공학과

(2007년 4월 16일 접수; 2007년 6월 2일 채택)

## Temporal Distribution of Pico- and Nanoplankton at a Station in Okkye Bay

Won Je Lee

*Department of Environmental Engineering, Kyungnam University, Kyeongnam 631-701, Korea*

*(Manuscript received 16 April, 2007; accepted 2 June, 2007)*

In order to understand the temporal distribution of pico- and nanoplankton and factors controlling its distribution at a station in Okkye Bay of Masan Bay located in the southern part of Korea, this study was conducted on two weeks interval from April 2005 to April 2006, and several abiotic and biotic factors were measured. During the study, picoplankton consisted of picoflagellates, cyanobacteria and heterotrophic bacteria, and nanoplankton consisted of nanoflagellates excluding dinoflagellates. The concentration of chlorophyll-a (chl-a) was a mean of 4.33  $\mu\text{g/L}$ , and the nanoplanktonic ( $<20 \mu\text{m}$ ) chl-a size fraction was a mean of 39.5 % and significantly correlated with water temperature. The abundances of cyanobacteria and photosynthetic flagellates (PF) were means of  $24.4 \times 10^3$  cells/mL and  $2.87 \times 10^3$  cells/mL, respectively. The contribution of picoflagellates to the PF abundance varied among the sampling occasions and was a mean of 29 %, but to the PF carbon biomass was 2.6 % only. The PF abundance had significant relationships with water temperature, and silicate and TIN concentrations, suggesting that the PF abundance seemed to be primarily bottom-up regulated. The abundance of heterotrophic bacteria was a mean of  $3.18 \times 10^6$  cells/mL and unlike other ecosystems it did not have relationships with chl-a and heterotrophic flagellates (HF), suggesting that bacterial abundance did not seem to be bottom-up or top-down regulated. HF mostly consisted of cells less than 5  $\mu\text{m}$  and its abundance was a mean of  $2.71 \times 10^3$  cells/mL. Of the HF abundance, picoflagellates occupied about 31 %, and occupied about 9 % of the HF carbon biomass. HF grazing activity on heterotrophic bacteria was relatively low and removed about 10 % of bacterial abundance, suggesting that HF might not be major consumers of bacteria and there seems to be other consumers in Okkye Bay. These results suggest that Okkye Bay may have a unique microbial ecosystem.

Key Words : Flagellates, Cyanobacteria, Bacteria, Nanoplankton, Picoplankton, Masan Bay, Okkye Bay

### 1. 서 론

일반적으로 극미소플랑크톤(picoplankton)은 원핵 생물인 구형의 남조류(cocoid cyanobacteria)와 중속영양박테리아(heterotrophic bacteria) 그리고 진핵 생물인 극미소식물플랑크톤(picophytoplankton)과 극

미소동물플랑크톤(picozooplankton)을 포함하며, 미소플랑크톤(nanoplankton)은 주로 미소식물플랑크톤(nanophytoplankton)과 미소동물플랑크톤(nanozooplankton)으로 구분된다.

여러 수서생태계에서 극미소 및 미소식물플랑크톤은 매우 중요한 일차생산자로 알려져 있으며 특히 빈영양환경에서는 극미소식물플랑크톤이 총 식물플랑크톤 생물량 및 일차생산에서 우점하는 것으로 보고되었다<sup>1-5)</sup>. 또한 극미소식물플랑크톤은 중속

Corresponding Author : Won Je Lee, Department of Environmental Engineering, Kyungnam University, Kyeongnam 631-701, Korea  
Phone: +82-55-249-2212  
E-mail: wonje@kyungnam.ac.kr

영양박테리아 만큼 빠른 성장률을 가지고 있어 미소생물먹이망(microbial foodweb)의 중요한 구성 요소이다. 극미소 및 미소동물플랑크톤은 주로 용존 유기물을 섭취하거나 재무기화의 촉매역할, 박테리아 등의 포식자 그리고 소형 및 중형동물플랑크톤의 먹이생물 등 생태계내에서 다양한 역할을 수행하는 것으로 알려졌다<sup>6,7)</sup>. 1970년대 이전에는 이들은 크기가 너무 작고 채집 및 정량화 방법의 부재로 연구가 소홀히 되었던 관계로 소형플랑크톤(microp plankton) 연구가 주를 이루었다. 하지만 1970년대 후반 이후 작은 크기의 미생물을 정량화 할 수 있는 형광현미경 등과 같은 기기 발달과 생산력 측정 등 다양한 연구방법의 발달로 극미소 및 미소플랑크톤의 연구가 활발히 진행되어 왔다.

우리나라 주변해역에서 극미소 및 미소플랑크톤의 연구는 대체적으로 1990년대 들어 시작되었으며 현재는 비교적 다수의 연구<sup>8~17)</sup>가 이루어졌고 연구의 대부분은 현존량 분포에 관한 것이었다. 본 연구 구역인 옥계만은 마산만내의 작은 만(bay)이다. 옥계만내에서 이러한 연구가 수행된 바 없었지만 마산만내에서는 Lee 등<sup>16)</sup>에 의해 극미소 및 미소플랑크톤의 현존량이 보고되었고 Park과 Cho<sup>17)</sup>에 의해서 종속영양포류와 박테리아의 상호작용에 관한 연구가 실시되었다. 본 연구의 목적은 옥계만에서 극미소 및 미소플랑크톤의 분포 및 이들의 분포에 미치는 요인을 파악하는 것이다.

## 2. 재료 및 방법

현장조사는 마산만내 옥계만에서 2005년 4월부터 2006년 4월까지 약 1년간 수행되었으며 시료는 옥계만에 위치한 경남대학교 수련원내 해양환경실 실험실 앞에서 격주 간격으로 만조시 표층에서 채집되었다(Fig. 1). 시료를 채취한 정점은 깊이가 약 2.5 m이내인 관계로 저층시료는 채집하지 않았다. 또한 조사정점 부근으로 직접 유입되는 하천은 없으며 채취 정점이 옥계만 입구에 위치한 관계로 밀물시 마산만의 영향을 직접적으로 받는다.

수온, 염분과 용존산소량(DO)은 현장에서 CTD (Hydrolab, Co.)를 사용하여 측정하였다. 수소 이온 농도는 수온이온 측정기(Istek model 720p)를 이용하여 측정하였다. 용존유기탄소(DOC)를 측정하기 위하여 해수 500 ml를 Whatman GF/F 여과지로 거른 후, 시료를 일정량 채취하여 2개의 20 ml 갈색병에 넣어 냉동 보관하여 실험실로 운반하였으며 분석은 Multi n/c 3000 (Jena Analytic)를 이용하여 분석하였다. 영양염의 시료 채취는 현장에서 Whatman GF/F 여과지로 거른 후, 시료를 일정량 채취하여

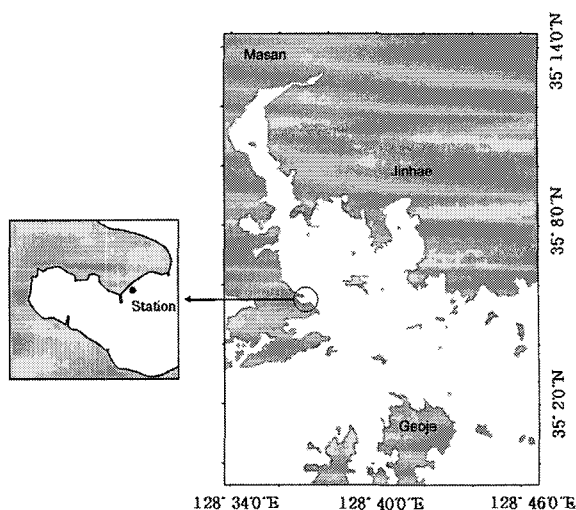


Fig. 1. Map showing a sampling station in Okkye Bay of Masan Bay.

50 ml의 원심분리용 튜브에 넣어 냉동 보관하였다. 영양염류는 발색법<sup>18)</sup>을 이용한 FIA (Flow Injection Analyzer, Quickchem 8000, Lachat Co.)로 분석하였다.

총 엽록소-a 농도를 측정하기 위하여 표층에서 해수 500~1000 ml을 Whatman GF/F로 거른 후 산화방지를 위해  $MgCO_3$ 를 첨가하였다. 여과한 뒤 GF/F를 15 ml 원심분리용 튜브에 넣어 냉동 보관하였다. 20  $\mu m$  이하의 식물플랑크톤의 엽록소-a 측정은 해수를 일차적으로 20  $\mu m$  mesh로 거른 다음 GF/F를 이용하여 총 엽록소 측정과 동일한 방법으로 채취하여 보관하였다. 냉동 보관한 시료는 실험실로 옮겨 90 % 아세톤을 주입하고, 냉장 보관하여 24시간 동안 용출시켰다<sup>18)</sup>. 추출된 용액은 3000 rpm으로 원심분리시킨 다음 상등액만을 취하여 10AU (Turner Design)를 이용하여 농도를 측정하였다.

극미소 및 미소플랑크톤의 생물량을 파악하기 위하여 해수 20 ml를 채수하여 글루타알데하이드로 최종농도 1~2 %가 되게 고정된 후 냉동 보관하여 실험실로 운반하였다. 냉동 보관된 시료는 다음과 같은 방법으로 일주일 이내에 처리하였다. 냉동시료를 해동 후 2~5 ml의 시료를 취하여 DAPI로 염색(최종농도 5 mg/L) 하고 0.2  $\mu m$  black filter로 여과한 후 형광현미경 (Leica DM2500) 하에서 계수 및 크기를 측정하였다. 이들의 탄소량(carbon biomass)을 측정하기 위하여 박테리아는 형광현미경하에서 계수된 현존량에 전환 값 19.8 fgC/cell<sup>19)</sup>을 적용하여 계산하였고 남조류는 현존량에 294 fgC/ $\mu m$ 의 전환 값<sup>20)</sup>을 적용하여 계산하였다. 20  $\mu m$  이하의 중

속영양편모류와 자가영양편모류의 탄소량 계산은 Edler<sup>21)</sup>의 방법에 따라 용적을 구한 후 Bøstheim와 Bratbak<sup>22)</sup>의 전환 값인 220 fgC/ $\mu\text{m}^3$ 을 이용하여 계산하였다. 본 연구에서는 중속영양편모류와 자가영양편모류의 생물량에 와편모류(dinoflagellates)를 포함시키지 않았다.

통계 분석은 Minitab 12 통계분석 프로그램을 이용하여 상관 분석을 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 일반 환경요인의 변화

조사기간 중 연중 수온은 5.2~28 °C (평균 15.8 °C)의 분포 범위를 보였고 여름에 높고 겨울철에 가장 낮아 계절에 따른 변화가 뚜렷하였으며 수심이 낮은 관계로 수온약층은 관찰되지 않았다. 염분은 연중 23.1~35.2 psu (평균 30.3 psu)의 범위를 보였고 측정시기가 고조인 관계로 만 바깥쪽 고염수의 유입으로 인해 전반적으로 높았으며 계절에 따른 변화는 관찰되지 않았다. 단지 강우 시 염분의 감소가 비교적 뚜렷이 나타났다. 수소이온 농도(pH)는 7.3~8.7의 범위를 보였다. 용존산소(DO)는 5.88~17.2 mg/L (평균 9.56 mg/L)의 범위를 보였으며, 2005년 4월에서 10월까지 10 mg/L 이하의 농도를 유지하다가 온도가 17 °C이하로 감소한 11월부터 2006년 3월까지 10 mg/L 이상의 비교적 높은 농도를 보였다. 조사기간 동안 용존산소 농도는 수온과 밀접한 관계 ( $r=-0.775$ ,  $p<0.001$ )를 보였지만 생물요인과는 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다. 따라서 11월 이후 용존산소농도의 증가는 생물요인에 기인하였다기보다는 오히려 수온의 감소에 따른 해수의 산소 용해도가 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 수소이온 농도는 용존산소농도와 유사한 변화 양상 ( $r=0.627$ ,  $P<0.001$ )을 보인 반면에 수온과 염분과는 상반되는 경향을 보였다 (수온  $r=-0.599$ ,  $p<0.001$ , 염분  $r=-0.479$ ,  $p<0.01$ ). 용존유기탄소(DOC)는 1.87~24.9 mg/L (평균 8.56 mg/L)의 넓은 농도 범위를 보여 시료채취 시기에 따라 상당한 차이가 있었으며 불규칙한 변동양상을 보였다(Fig. 2).

연안역에서 미생물의 성장에 요구되는 영양염은 주로 육상으로부터의 유입, 유기물의 분해, 수직 혼합과 플랑크톤에 의한 영양염의 재생산 등으로 공급된다. 본 연구지역에서 무기영양염(inorganic nutrients)의 농도 분포는 연중 매우 넓은 범위를 보였으며(Fig. 3) 전반적으로 계절에 따른 변화양상은 나타나지 않았다. 총 무기질산염(total inorganic nitrogen)은 1.63~33.4  $\mu\text{M}$  (평균 12.4  $\mu\text{M}$ )의 범위를 보였으며 조사 초기에 가장 높았고 6월~9월간 그

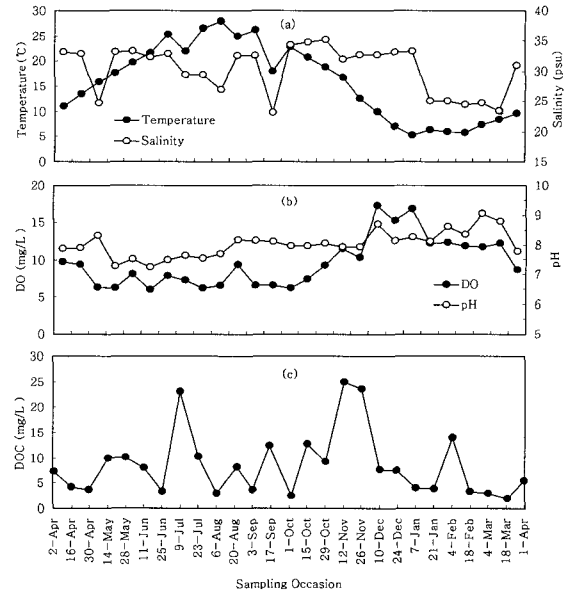


Fig. 2. Variations of (a) temperature and salinity, (b) pH and dissolved oxygen (DO), (c) dissolved organic carbon (DOC).

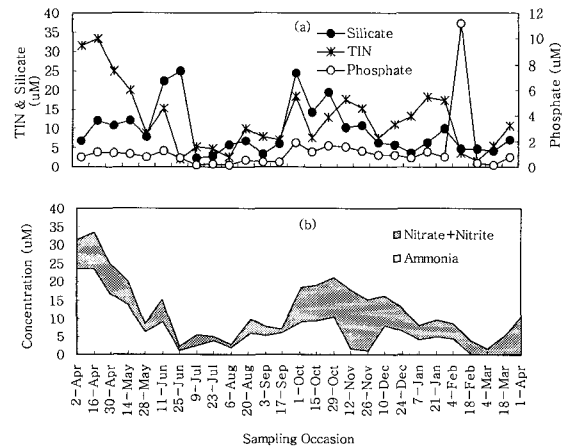


Fig. 3. Variations of (a) inorganic nutrients (TIN, Si, P), (b) TIN (total inorganic nutrients).

리고 12월~3월간에 비교적 10  $\mu\text{M}$  이하의 낮은 농도를 보였다. 암모니아( $\text{NH}_4$ )와 질산성 질소(Nitrate와 Nitrite)는 각각 0.03~23.6  $\mu\text{M}$  (평균 6.66  $\mu\text{M}$ )와 0.60~16.2  $\mu\text{M}$  (평균 6.04  $\mu\text{M}$ )의 범위를 보였다. 질산성 질소의 경우, 총 무기질산염의 변화 양상하고 유사하게 변화하였으며 암모니아의 경우도 9월까지 같은 변화양상을 보이다가 10월부터 2  $\mu\text{M}$  이하로 급격히 감소하면서 2006년 4월까지 유지되었다. 본 연구수역에서의 총 무기질산염 농도는 국내 연안의

덕양만, 여자만, 가막만과 광양만의 외만<sup>23)</sup>에 비해서는 다소 높았고 광양만의 내만과는 비교적 유사한 농도를 보였으나 마산만과 시화호<sup>23)</sup>의 경우는 본 연구 결과에 비해 5배 가량 높았다.

인산염(P)은 0.12~11.2  $\mu\text{M}$  (평균 1.23  $\mu\text{M}$ )의 범위를 보였으며 조사 초기인 4월부터 9월까지 낮은 농도를 보이다가 10월에 높은 농도를 보였고 다시 11월에 감소, 12월~2월 사이에 비교적 높은 농도를 보였다(Fig. 3). 본 연구수역의 인산염 농도는 광양만에서의 농도와 유사하였으며 시화호, 새만금 수역, 덕양만, 여자만, 가막만<sup>23)</sup>에 비해 다소 높았다.

규산염(Si)은 2.36~25.0  $\mu\text{M}$  (평균 9.47  $\mu\text{M}$ )의 범위를 보였으며 6월과 10월~11월에 비교적 높은 농도를 보였다(Fig. 3).

3.2. 엽록소-a 및 자가영양 생물(autotrophs)

3.2.1. 엽록소-a

총 엽록소-a 농도는  $4.33 \pm 4.16 \mu\text{g/L}$ 를 보였으며 8월 22일에 가장 높은 농도를 보였고 9월 3일에 가장 낮았다(Fig. 4). 이중 20  $\mu\text{m}$  이하 자가영양생물(극미소 및 미소식물플랑크톤)의 엽록소-a 농도는 총 엽록소-a 농도에서 4.89~71.2 % (평균 39.5 %)를 점유하였으며 특히 5월~7월초 기간에는 60 % 이상의 높은 점유율을 보였다. 가장 높은 점유율(71 %)을 보인 시기는 총 엽록소-a 농도가 가장 낮았던 9월 3일이었다. 총 엽록소-a 농도는 총 무기질산염 농도와 음의 상관관계를 보여 성장에 이용하였던 것으로 보인다(Table 1). 20  $\mu\text{m}$  이상의 엽록소-a 농도는 규산염(Si)과 역 상관관계를 보였던 반면, 20  $\mu\text{m}$  이하의 엽록소-a 농도는 상관관계를 갖지 않았다(Table 1). 이는 20  $\mu\text{m}$  이상의 자가영양생물이 대

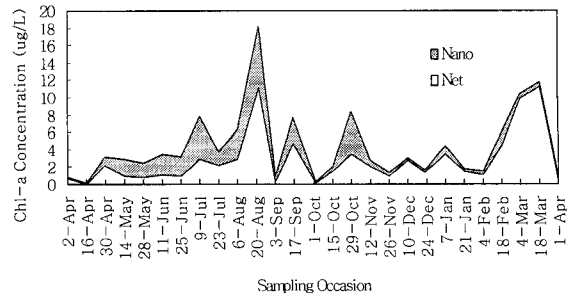


Fig. 4. Variations of nano- and micro-fractions of chlorophyll-a.

부분 구조류로 구성되었으며 이들은 성장하면서 피각을 형성하는데 규산염을 이용하는 반면, 20  $\mu\text{m}$  이하의 자가영양생물(대부분 편모류)은 규산염을 효과적으로 이용하지 않기 때문인 것으로 사료된다. 20  $\mu\text{m}$  이하의 자가영양생물은 수온과 밀접한 양의 상관관계를 보여 수온이 높은 하계에 높은 농도 및 점유율을 보였다.

국내 다른 연안 수역에서의 20  $\mu\text{m}$  이하 자가영양생물의 점유율은 황해에서 46 %<sup>24)</sup>와 68~83 %<sup>25)</sup>, 경기만에서 28~92 %<sup>15,26)</sup>와 천수만에서 39~93 %<sup>8)</sup>이 보고되었다. 또한 영광 연안수역에서는 35~92 % (평균 64 %)가 보고<sup>27)</sup>되었다. 따라서 본 연구수역에서는 다른 지역에 비해 비교적 낮은 점유율을 보이고 있어 일차생산자로서의 역할이 타 지역에 비해 다소 작았을 것으로 판단된다.

3.2.2. 광합성박테리아(남조류)

20  $\mu\text{m}$  이하의 자가영양생물은 원핵생물인 광합

Table 1. Pearson's correlation coefficients between organisms and environmental factors (Temp.: Temperature, Sal.: Salinity, Si: Silicate, P: Phosphate, TIN: Total inorganic nitrogen, N: Nitrogen). Significant correlations were defined as \*P<0.1, \*\*P<0.05, \*\*\*P<0.001

	DOC	DO	Temp.	Sal.	pH	Si	P	TIN	N/P	Si/N
Total Chl-a					0.33*			-0.452**		
Chl-a (>20 $\mu\text{m}$ )				-0.442**	0.583***	-0.34*		-0.428**		
Chl-a (<20 $\mu\text{m}$ )			0.52**							
Bacteria		-0.333*								0.407**
Cyanobacteria					-0.399**	0.417**				
Photosynthetic flagellates (PF)			0.471**			0.453**		-0.339*		0.901***
-NanoPF			0.487**			-0.327*		-0.34*		0.877***
-PicoPF			0.34*			0.415**				0.947***
Heterotrophic flagellates (HF)							0.666***	-0.358*		
-NanoHF							0.78***			
-PicoHF	0.34*			0.342*				-0.336*		
Grazing by HF	0.437**					-0.371*		-0.324*		

성박테리아(남조류)와 진핵생물인 자가영양편모류로 구성되었다. 조사기간 동안 남조류의 현존량 및 탄소량은 각각  $24.4 \pm 72.4 \times 10^3$  cells/mL과  $7.17 \pm 21.3$   $\mu\text{gC/L}$ 의 범위를 보였고 6월에 가장 높았으며 11월 이후부터 낮았다(Fig. 6). 국내 연안역에서 광합성박테리아의 현존량 분포를 보면, Lee 등<sup>16)</sup>에 의해 1994년 하계에 행암만 속천부두 앞에서  $0.04 \sim 2.49 \times 10^3$  cells/mL (평균  $0.95 \times 10^3$  cells/mL)의 현존량이 보고되었고 경기만 지역에서 Lee와 Choi<sup>15)</sup>에 의해서  $0.17 \sim 2.57 \times 10^3$  cells/mL (평균  $0.77 \times 10^3$  cells/mL)이 보고되었다. 따라서 옥계만에서의 현존량은 국내 다른 해역에 비해 상당히 높게 나타나 일차생산자로서 중요한 위치를 차지하고 있을 것으로 판단된다. 환경요인과의 관계를 살펴보면 수소이온 농도와 역상관관계를 보였고 규산염과 양의 상관관계를 보였다(Table 1).

### 3.2.3. 자가영양편모류(<20 $\mu\text{m}$ )

총 자가영양편모류의 현존량과 탄소량은 각각 평균  $2.87 \pm 4.18 \times 10^3$  cells/mL과  $48.1 \pm 49.1$   $\mu\text{gC/L}$ 로 나타났으며, 겨울에 낮고 여름과 가을에 높은 분포양상을 보였다(Fig. 6). 극미소자가영양편모류는 총 자가영양편모류 현존량의 평균  $3.12 \pm 7.04$  %를 차지하였으며 탄소량은  $0.23 \pm 0.57$  %를 보여 상당히 작은 부분을 점유하였다. 가장 높은 점유율을 보인시기에도 현존량의 29 %, 탄소량의 2.62 %의 점유율을 보여 옥계만에서 일차생산자로서의 극미소 자가영양생물의 역할은 크지 않았을 것으로 보인다. 총 자가영양편모류는 총 무기질산염 농도와 음의 상관관계를 보였다(Table 1). 총 자가영양편모류, 극미소자가영양편모류와 미소자가영양편모류는 온도와 밀접한 양의 관계를 보였으며, 이는 수온의 증가이 성장에 영향을 주기 때문이다. 또한 이들은 규산염과 Si/N 비와도 상당히 의미있는 양의 상관관계를 보였다(Table 1). 이러한 원인은 성장에 규산염을 이용하는 규조류와 깊은 연관성을 가지고 있다. 다시 말하면 규산염 농도의 증가는 이를 이용하는 규조류의 현존량 감소를 의미하는 반면 일반적으로 규산염을 이용하지 않는 자가영양편모류의 증가를 불러올 수 있기 때문이다. 이와 같은 영양염 농도의 변화로 인해 식물플랑크톤의 우점그룹이 변화된다<sup>28,29)</sup>.

국내 연안역에서 자가영양편모류 현존량은 1994년 하계에 행암만 속천부두앞 정점에서  $4.74 \sim 9.76 \times 10^3$  cells/mL (평균  $7.09 \times 10^3$  cells/mL)과 경기만 지역에서  $0.86 \sim 5.88 \times 10^3$  cells/mL (평균  $3.15 \times 10^3$  cells/mL) 이 각각 Lee 등<sup>16)</sup>과 Lee와 Choi<sup>15)</sup>에 의해 보고되었다. 따라서 본 연구에서의 현존량은 다른 지역보다 낮은 현존량을 보였다.

### 3.3. N/P와 Si/N 비의 변화 및 자가영양생물과의 연관성

N/P 비는  $0.3 \sim 40.8$  (평균 16.6)의 범위를 보였으며, 총 27회 관측에서 16번 N/P비가 16이상으로 나타났다(Fig. 5). 이 시기는 2005년 4월부터 5월 중순과 7월에서 9월기간동안에 집중적으로 나타나 무기인산염이 식물플랑크톤의 성장제한요인으로 나타났다. N/P 비는 극미소 및 미소식물플랑크톤과 연관성을 찾을 수 없었다(Table 1). Si/N 비는  $0.2 \sim 11.7$  (평균 1.3)의 범위를 보였으며, 총 27회 관측에서 8번 Si/N 비가 1이상으로 나타났다(Fig. 5). 따라서 이를 제외한 대부분의 시기에 규산염이 식물플랑크톤의 성장제한요인으로 작용할 것으로 판단된다. Si/N 비는 종속영양박테리아와 양의 상관관계를 보였고 자가영양편모류의 현존량과도 상당히 의미있는 양의 상관관계를 보였다(Table 1).

### 3.4. 종속영양생물(Heterotrophs): 종속영양박테리아, 종속영양 편모류

#### 3.4.1. 종속영양박테리아

종속영양박테리아의 현존량은  $3.18 \pm 2.07 \times 10^6$  cells/mL의 범위를 보였으며 9월에 가장 높은 현존량 ( $7.30 \times 10^6$  cells/mL)을 보였다(Fig. 7). 탄소량은 평균  $70.2 \pm 65.9$   $\mu\text{gC/L}$ 를 보였다. 마산만에서 종속영양박테리아 분포에 관한 연구로 Lee 등<sup>16)</sup>은 여름철 속천항에서  $1.5 \sim 5.8 \times 10^6$  cells/mL (평균  $3.9 \times 10^6$  cells/mL)의 현존량을 보고하였고 Park과 Cho<sup>17)</sup>는 여름철 소모도 안쪽 지역에서 평균  $16 \times 10^6$  cells/mL의 높은 현존량을 보고하였다. 마산만과 인근지역인 거제 장목만에서는  $0.39 \sim 1.88 \times 10^6$  cells/mL (평균  $1.08 \times 10^6$  cells/mL)<sup>30)</sup>의 현존량을 보였다. 마산만 외 다른 지역에서 박테리아 생물량은 경기만  $0.26 \sim 5.4 \times 10^6$  cells/mL<sup>13,15,16)</sup>, 시화호  $1.6 \sim 19.5 \times 10^6$  cells/mL<sup>31)</sup>, 독도 주변 해역  $0.1 \sim 0.2 \times 10^6$  cells/mL<sup>32)</sup>와 새만금 수역  $0.10 \sim 2.3 \times 10^6$  cells/mL<sup>33)</sup>이 보고

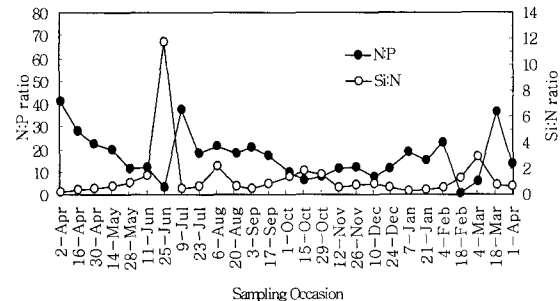


Fig. 5. Variations of ratios of N:P (total inorganic nitrogen: phosphate) and Si:N (silicate: total inorganic nitrogen).

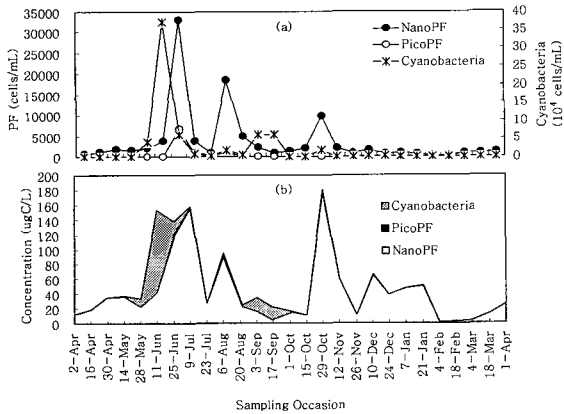


Fig. 6. Variations of autotrophs, (a) abundances and (b) carbon biomass. PF: photosynthetic flagellates.

되어 오염된 지역과 연안에서 비교적 높은 생물량을 보였다.

일반적으로 중속영양 박테리아는 성장하기 위하여 식물플랑크톤으로부터 유래된 용존 유기물에 의존하는 관계로 엽록소-a 농도와 높은 상관관계를 보이지만<sup>34)</sup> 때때로 유의하지 않거나 약한 상관관계를 보이는 경우<sup>35,36)</sup>도 나타난다. 본 연구수역에서는 중속영양박테리아와 유의성 있는 상관관계를 보이지 않아 다른 지역과는 달리 에너지원으로 공급되지 않은 것으로 판단되며 다른 유기물 공급원이 있을 것으로 판단된다. 용존유기탄소 또한 엽록소-a와 유의성 있는 상관관계를 보이지 않고 있어 용존유기탄소가 식물플랑크톤으로부터 유래된 것으로 추정하기가 어렵다. 중속영양박테리아와 다른 환경요인과의 관계를 살펴보면 용존산소량과 약한 음의 상관관계( $r = -0.333, p < 0.1$ )를 보였으며, 광합성박테리아 및 엽록소 농도( $20 \mu\text{m}$  이하)과 양의 상관관계(남조류  $r = 0.521, p < 0.01$ ; 엽록소량  $r = 0.392, p < 0.05$ )를 보여 유사한 변화양상을 가졌다.

### 3.4.2. 중속영양편모류

일반적으로 중속영양편모류는 수서생태계에서  $10^2 \sim 10^5$  cells/mL의 농도로 분포한다<sup>15,16,37)</sup>. 이들은 대부분  $10 \mu\text{m}$  이하의 작은 크기로 존재하며<sup>37)</sup> 중속영양박테리아나 남조류와 같은 극미소플랑크톤의 주 포식자로 알려져 있다<sup>6,39,40)</sup>. 본 연구수역에서 출현한 중속영양미소편모류는 대부분이  $5 \mu\text{m}$  이하의 세포들로 구성되었으며 현존량은  $2.71 \pm 1.71 \times 10^3$  cells/mL과 탄소량은  $9.63 \pm 6.65 \mu\text{gC/L}$ 를 보였고 전반적으로 9월과 2월에 높게 나타났다(Fig. 7). 극미소 중속영양 편모류가 총  $20 \mu\text{m}$  이하의 중속영양편모류 현존량의 약 0~71.4 % (평균 30.9 %)와 탄소

량의 0~28.1 % (평균 9.3 %)를 차지하였다. 이들의 분포나 현존량은 주로 먹이생물의 생물량이나 포식자의 포식활동에 의해 조절<sup>40)</sup>되는 관계로 때때로 명확한 계절적 분포양상을 볼 수 없으며 본 연구에서도 계절에 따른 명확한 시간적 변동 양상은 나타나지 않았다.

육계만 인근에서 보고된 중속영양미소편모류의 현존량은 1994년 하계 행암만에서  $2.3 \sim 21 \times 10^3$  cells/mL (평균  $9.4 \times 10^3$  cells/mL)<sup>16)</sup>와 1999년 하계 소모도 안쪽 수역에서  $0.2 \sim 4.5 \times 10^3$  cells/mL<sup>17)</sup>이 있다. 기타 연안환경에서는 경기만과 새만금해역에서 각각  $0.39 \sim 44 \times 10^3$  cells/mL<sup>14~16)</sup>와  $0.12 \sim 1.5 \times 10^3$  cells/mL<sup>33)</sup>의 현존량이 보고되었다. 이러한 연구결과를 비교해 볼 때 중속영양미소편모류의 현존량 분포는 특이한 경우를 제외하고는 수역별로 큰 차이를 보이지 않았다.

수서생태계에서 중속영양박테리아는 중속영양 박테리아와 중속영양미소편모류의 상호관계를 알아보는 방법으로는 상관성 분석, 섭식을 측정 및 상대적인 현존량 비를 이용하는 방법 등이 있다. 일반적으로 중속영양편모류는 중속영양박테리아와 양의 상관관계를 보이는데<sup>15,36)</sup> 본 연구수역에서는 전혀 상관성을 보이고 있지 않았다. 섭식을 측정 방법 중 가장 일반적으로 사용하는 방법은 형광 표지 박테리아(FLB)<sup>42)</sup>를 이용하는 것이다. 본 연구에서는 섭식을 직접 측정하지 않은 관계로 Park과 Cho<sup>17)</sup>에 의해 마산만에서 측정된 섭식률 값( $3.3 \sim 81$  bacteria/HF/h)의 최대값을 본 연구에 적용한 결과 중속영양편모류 군집이 중속영양박테리아 현존량의 0.61~27.9 % (평균 10.2 %)를 제거하는 것으로 추정되었으며 본 연구수역에서 박테리아에 미치는 영향은 비교적 작게 나타났다. 마지막으로 부유생태계에서 중속영양박테리아와 중속영양편모류의 현존량 비(BAC/HF)는 일반적으로 ~1000:1로 알려져 있다<sup>43,44)</sup>. 만약 모든 박테리아가 중속영양편모류에 의해 포식된다고 가정할 때, 중속영양편모류의 성장을 위해서 약 1,000 마리의 박테리아를 필요로 한다. 본 연구수역에서는 BAC/HF의 비가 290~13,321 (평균 2,022)의 범위를 보였고 7월부터 1월까지의 1000이하로 나타나 중속영양편모류가 성장하는데 박테리아의 생물량이 충분하지 않았을 것으로 사료되며(Fig. 8), 따라서 이 시기에는 박테리아에 대한 포식압이 상당히 컸을 것으로 판단된다. 또한 먹이생물이 중속영양편모류의 성장에 필요한 양보다 훨씬 적은 생물량으로 존재하므로 박테리아의 다른 미생물이나 용존 또는 입자성 유기물을 먹이원으로 이용하였을 것으로 판단된다. 반면에 6월과 9월의 경우에는

육계만 단일정점에서 극미소 및 미소플랑크톤의 시간적 분포

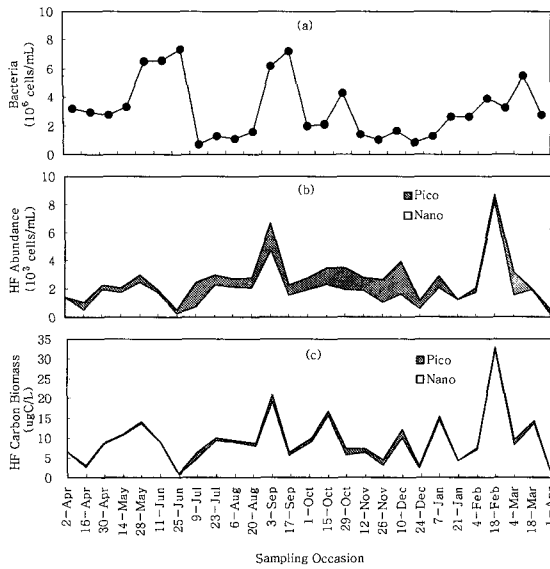


Fig. 7. Variations of heterotrophs, (a) heterotrophic bacteria, (b) heterotrophic nanoflagellate abundance, (c) heterotrophic nanoflagellate biomass.

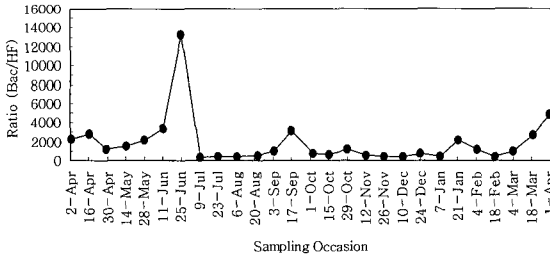


Fig. 8. Ratio of bacteria to heterotrophic flagellates (BAC/HF).

BAC/HF의 비가 상당히 높게 나타났다. 다시 말하면, 박테리아가 종속영양편모류의 성장에 필요한 양보다 많이 존재하므로 박테리아를 먹이원으로 하는 다른 생물과 종속영양편모류의 다양한 포식자(예, 소형섬모충류나 종속영양와편모류)가 존재할 수 있음을 시사하였다. 이와 같은 결과를 볼때 종속영양편모류는 특정시기를 제외하고는 종속영양 박테리아의 생물량에 의해 영향(bottom-up control)을 크게 받지 않을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 육계만에서 극미소 및 미소플랑크톤 현존량과 분포에 영향을 주는 환경요인들을 파악하기 위하여 2005년 4월부터 2006년 4월까지 격주 간

격으로 조사되었다. 수온변화는 일반적인 온대해역의 특성을 잘 반영하였고 염분은 유입하천이 없는 관계로 강우기인 여름철에도 강우시에만 비교적 낮은 농도를 보였고 다른 계절과 큰 차이를 보이지 않았다. 용존산소는 식물플랑크톤 성장이 활발한 시기보다는 용해도가 높은 겨울철에 높게 나타났으며 영양염류는 뚜렷한 계절양상을 보이지 않았다.

육계만에서 극미소 및 미소플랑크톤의 생물량 및 분포에 영향을 미치는 요인은 다음과 같다. 총 엽록소-a 농도(평균 4.33 µg/L)에서 20 µm 이하 식물플랑크톤의 점유율은 평균 39.5 %이었으며 수온의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 광합성박테리아인 남조류는 평균  $24.4 \times 10^3$  cells/mL의 현존량과 7.17 µgC/L의 탄소량을 보였으며 때때로 상당히 높은 출현량을 보여 시기에 따라 일차생산자로서 중요한 역할을 할 수 있음을 보였다. 자가영양편모류는 평균  $2.87 \times 10^3$  cells/mL (48.1 µgC/L)를 보였고 이 중 극미소자가영양편모류는 약 29 % (탄소량 2.6 %)를 차지하였다. 자가영양편모류는 수온 및 규산염과 밀접한 양의 상관관계를 보였던 반면 총 무기질산염과는 음의 상관관계를 보여 bottom-up control 현상을 보였다. 종속영양박테리아는 평균  $3.18 \times 10^6$  cells/mL (70.2 µgC/L)를 보였고, 일반적으로 종속영양박테리아는 엽록소-a와 종속영양편모류와 상관성을 보이지만 특이하게 본 연구에서는 이들 요인들과 상관성을 보이지 않았다. 따라서 종속영양박테리아는 이들로부터 에너지원으로써의 유기물 공급이나 포식압의 영향을 크게 받지 않는 것으로 판단된다. 종속영양편모류는 평균  $2.71 \times 10^3$  cells/mL (9.63 µgC/L)로 나타났으며 대부분 5 µm 이하의 작은 생물로 구성되었다. 이중 극미소종속영양편모류는 현존량 및 탄소량은 각각 30.9 %와 9.3 %를 보였으며 규산염과도 양의 상관관계를 보였다. 종속영양편모류의 종속영양박테리아 현존량에 대한 제거율은 상당히 낮은 10 %로 추정되었으며 대부분의 시기에 BAC/HF비가 상당히 낮게 나타났다. 이러한 결과로 볼때 육계만에서는 종속영양편모류가 박테리아의 주포식자가 아닌 것으로 판단되며, 박테리아 또는 편모류의 포식자들(종속영양와편모류나 소형섬모충류 등)이 존재하는 것으로 판단된다. 또한 육계만은 미소생태계의 일반적인 특징들(예, 박테리아-엽록소, 박테리아-종속영양편모류의 관계 등)이 나타나지 않는 특이한 생태계를 가지고 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 경남대학교 신진교수지원 연구비(2005

년)에 의해서 실시되었다. 시료 채취에 도움을 준 김태준, 박문수, 주재우, 한국보 학생에게 고마움을 전하고 영양염 분석에 도움을 준 한국해양연구원의 장풍국 연구원에게도 감사를 전한다. 또한 본 논문을 심사해주신 심사위원님들께 감사드린다.

### 참 고 문 헌

- 1) Johnson P. W., Sieburth J. McN., 1979, Chroococcoid cyanobacteria in the sea: a ubiquitous and diverse phototrophic biomass, *Limnol. Oceanogr.*, 24, 928-935.
- 2) Waterbury J. B., Watson S. W., Guillard R. R. L., Brand L. E., 1979, Widespread occurrence of a unicellular, marine, planktonic cyanobacterium, *Nature*, 277, 293-294.
- 3) Stockner J. G., 1988, Phototrophic picoplankton: an overview from marine and freshwater ecosystems, *Limnol. Oceanogr.*, 33, 765-775.
- 4) Stockner J. G., Antia N. J., 1986, Algal picoplankton from marine and freshwater ecosystems: a multidisciplinary perspective, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 43, 2472-2503.
- 5) Weisse T., 1993, Dynamics of autotrophic picoplankton in marine and freshwater ecosystems, p.327-370, In: *Advances in microbial ecology*, ed. by Jones J. G., Plenum Press, New York.
- 6) Azam F., Fenchel T., Field J. G., Gray J. s., Meyer-Reil L. A., Thingstad F., 1983, The ecological role of water-column microbes in the sea, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 10, 257-263.
- 7) Porter K. G., Sherr E. B., Sherr B. F., Pace M., Sanders R. W., 1985, Protozoa in planktonic food webs, *J. Protozool.*, 32, 409-415.
- 8) 신윤근, 심재형, 조준성, 박용철, 1990, 천수만 식물플랑크톤의 상대적 중요성: 종조성, 개체수 및 일차생산력, *한국해양학회지*, 25, 217-228.
- 9) 심재형, 여환구, 신윤근, 1991, 한국연안해역에 있어서 온배수 배출의 생태학적 영향. I. 고리원자력 발전소 주변해역에서 미소 및 초미소 자가영양 플랑크톤의 중요성, *한국해양학회지*, 26, 77-82.
- 10) 강연식, 최중기, 정경호, 박용철, 1992, 서해 중동부 연안수역과 경기만에서 일차생산력과 동화계수에 관한 연구, *한국해양학회지*, 27, 237-246.
- 11) 정익교, 강윤향, 김영진, 권오섭, 1998, 한국연안 초미세플랑크톤 생태: I. 대한해협 서수도 해역, *Algae*, 13, 101-107.
- 12) 신범, 이준백, 2002, 제주 중문연안역의 초미세, 미소, 소형플랑크톤 시·공간적 분포, *한국해양학회지 바다*, 7, 78-86.
- 13) 양은진, 최중기, 2003, 경기만 수역에서 미세생물 군집의 계절적 변동 연구 II. 미소형 및 소형 동물 플랑크톤, *한국해양학회지 '바다'*, 8, 78-93.
- 14) 양은진, 최중기, 현정호, 2003, 경기만 수역에서 미세생물 군집의 계절적 변동 연구 I. 박테리아와 종속영양 미소편모류, *한국해양학회지 바다*, 8, 44-57.
- 15) Lee W. J., Choi J. K., 2000, The role of heterotrophic protists in the planktonic community of Kyeonggi Bay, Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 35, 46-55.
- 16) Lee W. J., Park N. J., Choi J. K., 2002, Abundance of heterotrophic- and photosynthetic dinoflagellates and factors controlling their abundance in Korean coastal waters during summer 1994, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 37, 201-211.
- 17) Park J. S., Cho B. C., 2002, Active heterotrophic nanoflagellates in the hypoxic water-column of the eutrophic Masan Bay, Korea, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 230, 35-45.
- 18) Parsons T. R., Maita Y., Lalli C. M., 1984, A manual of chemical and biological methods for seawater analysis, Pergamon Press, Oxford, 173pp.
- 19) Lee S. H., Fuhrman J. A., 1987, Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton, *Appl. Environ. Microbiol.*, 53, 1298-1303.
- 20) Cuhel R. L., Waterbury J. B., 1984, Biochemical composition and short term nutrient incorporation patterns in a unicellular marine cyanobacterium, *Synechococcus* (WH 7803), *Limnol. Oceanogr.*, 29, 370-374.
- 21) Edler L., 1979, Recommendations on methods for marine biological studies in the Baltic Sea. *Phytoplankton and chlorophyll*, Baltic Marine Biologists Publication, 5, 1-38.
- 22) Børsheim K. Y., Bratbak G., 1987, Cell volume to cell carbon conversion factors for a bacterivorous *Monas* sp. enriched from sea waters, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 36, 171-175.
- 23) 장풍국, 이원제, 장민철, 이재도, 이우진, 장만, 황근춘, 신경순, 2005, 광양만에서 무기 영양염의 시공간적 분포를 조절하는 요인, *Ocean Pol. Res.*,



- 27, 359-379.
- 24) Chang M., Shim J. H., Huh H. T., 1987. Nanoplankton of the Korean coastal waters. *Ocean Res.*, 9, 7-14.
- 25) 최중기, 박용철, 김용철, 이영철, 정창수, 손승규, 황학진, 한범석, 1988, 서해 연안어장의 생산력 조사, *수진연구보고*, 42, 143-168.
- 26) 정경호, 박용철, 1988, 서해 경기만이 기초생산력과 질소계 영양염의 재생산에 관한 연구, *한국해양학회지*, 23, 194-206.
- 27) 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.
- 28) Billen G. C., Lancelot C., Mayberk M., 1991, N. P. Si retention along the aquatic continuum from land to ocean, p.19-44. In: *Ocean Margin Processes in Global Change*. eds. by Matoura R. F. C., Martin J. M., Wollast R., John Wiley & Sons, New York.
- 29) Humborg C., Ittekkot V., Cociasu A., Bodungen B. V., 1997, Effects of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure, *Nature*, 386, 385-388.
- 30) Lee W. J., 2007, Daily distribution of planktonic protists and factors controlling their distribution in Jangmok Bay, Unpublished.
- 31) Choi D. H., Na S. C., Park Y. C., Huh S. H., Cho B. C., 1999, Characteristics of microbial abundance in hypoxic water of brackish Lake Shiwa, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 34, 236-240.
- 32) Cho B. C., Shim J. H., 1998, Bacterial abundance and production in July 1997 in the vicinity of Tokdo, East Sea, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 33, 205-211.
- 33) Lee W. J., 2007, Spatial distribution of planktonic protists in Saemanguem reclamation area, Unpublished.
- 34) Bird D. F., Kalff J., 1984, Empirical relationships between bacterial abundance and chlorophyll concentration in fresh and marine waters, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 41, 1015-1023.
- 35) 심재형, 신윤근, 조병철, 1993, 만경동진강 염하구에서의 박테리아 및 식물플랑크톤의 역할과 상호관계, *한국해양학회지*, 28, 107-113.
- 36) Cho B. C., Choi J. K., Chung C. S., Hong G. H., 1994, Uncoupling of bacteria and phytoplankton during a spring diatom bloom in the mouth of the Yellow sea, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 115, 181-190.
- 37) Berninger U.-G., Caron D. A., Sanders R. W., Finlay B. J., 1991, Heterotrophic flagellates of planktonic communities, their characteristics and methods of study, p. 39-56. In: *The biology of free-living heterotrophic flagellates*, eds, by Patterson D. J., Larsen J., Clarendon Press, Oxford.
- 38) Lee W. J., Patterson D. J., 2002, Abundance and biomass of heterotrophic flagellates, and factors controlling their abundance and distribution in sediments of Botany Bay, *Microb. Ecol.*, 43, 467-481.
- 39) Caron D. A., Finlay B. J., 1994, Protozoan links in food webs, p.125-130. In: *Progress in Protozoology*, eds, by Hausmann K., Hülsmann N., Proceedings of the IX International Congress of Protozoology (Berlin 1993), Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- 40) Dietrich D., Arndt H., 2000, Biomass partitioning of benthic microbes in a Baltic inlet: relationships between bacteria, algae, heterotrophic flagellates and ciliates, *Mar. Biol.*, 136, 309-322.
- 41) Gasol J. M., Vaqué D., 1993, Lack of coupling between heterotrophic nanoflagellates and bacteria: a general phenomenon across aquatic systems? *Limnol. Oceanogr.*, 38, 657-665.
- 42) Sherr B. F., Sherr E. B., Fallon R. D., 1987, Use of monodispersed, fluorescently labeled bacteria to estimate In situ protozoan bacterivory, *Appl. Environ. Microbiol.*, 53, 958-965.
- 43) Andersen P., Fenchel T., 1985, Bacterivory by microheterotrophic flagellates in seawater samples, *Limnol. Oceanogr.*, 30, 198-202.
- 44) Sanders R. W., Caron D. A., Berninger U.-G., 1992, Relationships between bacteria and heterotrophic nanoplankton in marine and fresh waters: an inter-ecosystem comparison, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 86, 1-14.