

시화호 주변 부영양화 기수유역의 미소생물 군집의 계절적 변화

백승호 · 유카이^{1,2} · 박범수¹ · 한명수^{1,*}

(한국해양연구원 남해연구소, ¹한양대학교 생명과학과, ²중국해양대학교)

The Seasonal Variation of Microbial Community in the Eutrophic Brackish Water of Lake Shihwa. Baek, Seung Ho, Kai You^{1,2}, Bum Soo Park¹ and Myung-Soo Han^{1,*} (Korea Ocean Research and Development Institute South Sea Institute, Geoje 656-830, Korea; ¹Department of Life Science, Hanyang University, 17 Haengdang, Seongdong, Seoul 133-791, Korea; ²Department of Fisheries Science, Ocean University of China, 5 Yushan Road, Qingdao 266003, China)

The seasonal variation of microbial community, based on the bacteria, heterotrophic nanoflagellates (HNF), phytoplankton and ciliates, was investigated at three sites in the eutrophic brackish water of Lake Shihwa and its adjacent areas from May 2007 through May 2008. At the upstream-region site St. 1, compared to the other two sites, significantly lower salinities and higher concentrations of nutrients and chlorophyll *a* (Chl. *a*) were recorded. The annual average abundances of bacteria at St. 1, St. 2 and St. 3 were 6.8×10^6 , 7.4×10^6 and 4.6×10^6 cells mL⁻¹, respectively. As for the annual average concentrations of HNF, 19×10^2 , 6.7×10^2 and 5.9×10^2 cells mL⁻¹, were recorded in St. 1, St. 2 and St. 3 respectively. The highest ciliate abundance appeared at St. 1 on 29 April, 2008 and in which, 99% were autotrophic ciliate *Mesodinium rubrum* (*Myrionecta rubra*). Significant linear correlations between the biomass of bacteria and Chl. *a* were found, however, no significant relationships between ciliates abundance/biomass and their prey organisms were detected in all three sites, implying relatively low energy transfer efficiencies between them. These results indicated that the trophic relationship between ciliates and their prey organisms in the microbial community might be influenced by indirect route since higher trophic level organisms did not directly correlate to those of lower trophic level, although high primary productions were detected in the eutrophic brackish water of Lake Shihwa and its adjacent areas.

Key words : eutrophic brackish water, microbial community, seasonal variation, Lake Shihwa

서 론

1980년대 초반부터 미생물의 생물량과 그들의 생산에

관한 연구가 비약적으로 진전되었고, 그 결과 용존유기물을 종속성 영양박테리아가 이용하고, 또 그 박테리아를 종속영양성 미소편모충류(Heterotrophic Nano Flagellates; HNF)가 섭식하며, 그것은 다시 섬모충류에 의해 포식되

* Corresponding author: Tel: 02) 2290-0956, Fax: 02) 2296-1741, E-mail: hanms@hanyang.ac.kr

는 새로운 에너지 흐름의 계(System), 즉 신 개념의 미세 생물 먹이환(Microbial loop)이 Azam 등에 의해서 밝혀졌다(Azam *et al.*, 1983). 이 개념은 수서생태계의 먹이연쇄와 물질순환 과정을 이해하는 데 있어서 중요한 역할을 담당하게 되었다.

국토확장과 농업용수의 확보를 목적으로 경기도 서해안 일대에 12.7km의 시화방조제 건설이후 담수화된 시화호는 인접한 시화공단과 육상기원의 하천을 통하여 과도한 영양염이 유입되고 수계의 정체화로 인하여 식물플랑크톤의 대량발생, 심층의 무산소층 형성 그리고 저서생태계의 교란이 심각하였다(한국수자원공사, 1996; 한국해양연구소, 1997, 1998; 신 등, 2000). 이에 따라 수질개선의 일환으로 정부는 시화호수질개선종합대책을 수립하여 시행하였고, 그 결과 시화호의 수질은 상당히 개선되었지만(해양수산부, 2005), 여전히 부영양화된 수계라 할 수 있다. 또한, 1997년 이후 배수갑문을 통한 시화호 수체와 해수의 인위적 교환이 가능해진 이래, 시화호의 수리학적 체류시간이 상당히 짧아졌을 뿐만 아니라, 수질개선에도 상당한 영향을 미쳤다(해양수산부, 2005). 그러나 2000년 초기도 시화호 상류 및 중앙 유역의 저층수에는 하계에 용존산소 고갈 현상이 나타나, 저서 생물이 생존하기 어려운 환경이 조성되고 있다(박 등, 2003).

부영양화 수계에서는 빈영양수계보다 박테리아의 생물량과 생산량이 상대적으로 높아 플랑크톤 먹이망에 지대한 영향을 미치며, 상위생물의 생산성에도 영향을 줄 수 있다(Sherr and Sherr, 1988; Fukami *et al.*, 1999). 일반적으로 해수와 담수가 만나는 기수유역은 염분도의 차이에 의해 성층이 쉽게 발생하기 때문에 상류에서 유입되는 과도한 영양염이 정체 및 체류하여 전선(front)을 형성한다. 이와 같은 유역에서는 각기 다른 수계의 플랑크톤성 부유물질을 비롯하여 조류가 쉽게 집결하게 되어 식물플랑크톤 대발생 현상(algal bloom)이 빈번히 관찰되고, 용존산소의 고갈현상도 쉽게 나타난다(Gray *et al.*, 2002; McLusky and Elliott, 2004; 최 등, 2008). 결과적으로 이와 같은 유역은 식물플랑크톤에 의한 자체 생성유기물이 상당한 양을 차지함과 동시에 계속적으로 유입되는 담수기원의 영양염이 수질을 지속적으로 악화시켜 만성적인 부영양화 현상을 초래함으로써 부유성 생물의 먹이망에 부정적인 영향을 미칠 것으로 사료된다.

1960년대 이후 국내에서는 동·식물플랑크톤의 시공간적 분포에 대한 단편적인 보고는 많이 있었으나, 수중의 미소생물 먹이환의 주된 구성요소인 용존유기물, 박테리아, 종속영양성 미소편모조류 그리고 점모충류간의 에너지 흐름을 해석하려는 시도는 국외에 비하여 빈약하였다

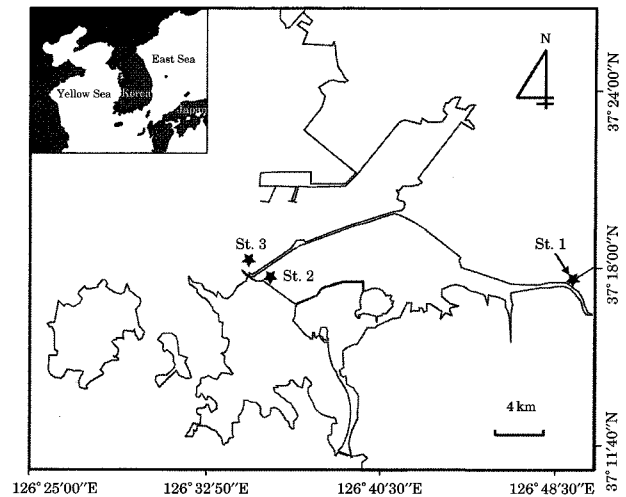


Fig. 1. Three sampling stations in the inner and outer areas of brackish Lake Shihwa.

(Azam *et al.*, 1983; Sherr and Sherr, 1988). 하지만, 국내에서도 1990년대 이후 종속영양성 미소편모충류에 관한 연구가 경기만(이, 1993), 마산만(Park and Cho, 2002; 이, 2007; 이 등, 2007) 그리고 동해(Cho *et al.*, 2000)를 중심으로 한 해수유역과, 동진강 유역(심 등, 1995), 한강수계의 팔당호 및 경안천(이와 한, 2004; 손 등, 2006; 노와 한, 2008)을 중심으로 한 담수유역의 조사가 이루어져 왔다. 그러나, 담수와 해수가 서로 교차하는 기수유역의 미세생물 먹이환의 연구는 매우 빈약하다고 하겠고(심 등, 1993; 심 등, 1995), 이와 같은 유역에서 먹이망 구성요소들의 분포와 그 기능과 역할은 기수 생태계의 에너지 흐름을 이해하는 데 중요하다고 하겠다.

여기서 본 연구는 시화호를 중심으로 한 기수유역의 미세먹이망의 흐름을 이해하기 위해 환경인자와 미생물 간의 관계 그리고 이들의 계절적인 변화양상과 특이성을 검토하고자 한다.

재료 및 방법

조사는 2007년 5월부터 2008년 5월까지 시화호 주변 3개 정점(시화호 상류; St. 1, 배수갑문 내측; St. 2, 배수갑문 외측; St. 3)에서 실시하였다(Fig. 1). 시화호 배수갑문 외측 정점의 조사는 어선을 이용하였다. 특히 여름철 미소생물 군집조성의 특성을 상세히 파악하기 위해서 2007년 5월 말부터 9월 중순까지는 주간조사, 그 이외의 기간에는 월간조사를 수행하였다. 또한, 동계 결빙기간인 1월과 2월에는 St. 1에서 얼음을 깨고 채수하였다. 수온, 염분, 전기

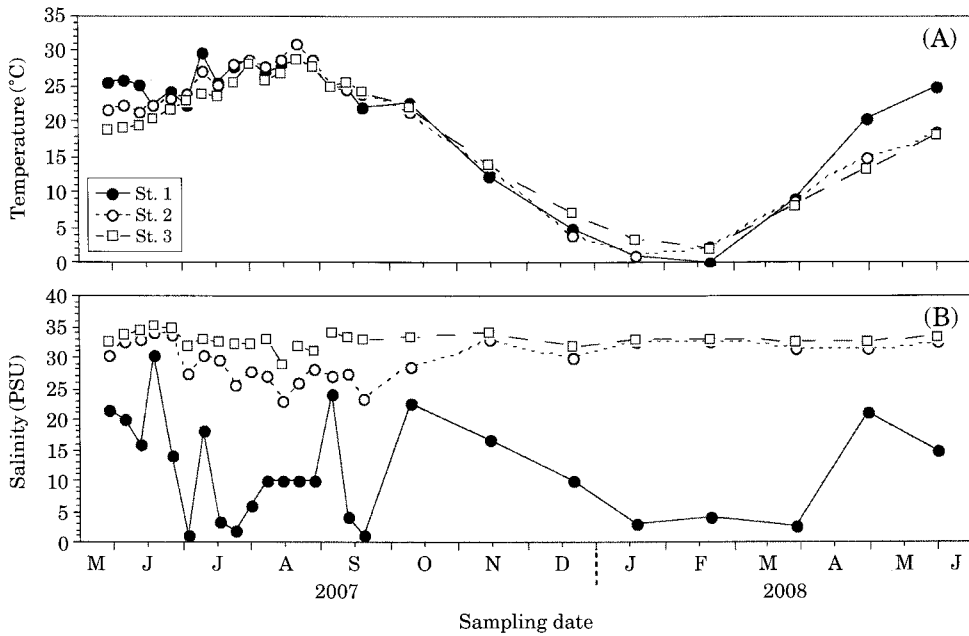


Fig. 2. Seasonal changes of water temperature (A) and salinity (B) at the three stations during the study period.

Table 1. Annual average values of environmental factors and main microbial-loop components at three stations in the inner and outer areas of the brackish Lake Shihwa.

Parameter	Station (mean ± SD)		
	St. 1	St. 2	St. 3
Temperature (°C)	21.5 ± 8.8	20.8 ± 8.7	19.9 ± 7.7
Salinity (PSU)	11.8 ± 8.4	29.5 ± 3.2	32.9 ± 1.3
Silicate (μM)	87.0 ± 59.3	13.3 ± 8.7	9.7 ± 6.5
Amononia (μM)	16.1 ± 11.8	1.4 ± 1.7	1.0 ± 1.0
Nitrate+Nitrite (μM)	14.3 ± 8.2	3.3 ± 2.1	4.0 ± 2.7
Phosphate (μM)	2.9 ± 1.8	0.9 ± 0.8	0.7 ± 0.6
Chl. <i>a</i> (mg m ⁻³)	56.4 ± 79.2	15.6 ± 22.9	9.1 ± 8.0
Bacteria (× 10 ⁶ cells mL ⁻¹)	6.81 ± 4.68	7.41 ± 5.24	4.60 ± 0.29
HNF (× 10 ² cells mL ⁻¹)	19.75 ± 29.17	0.67 ± 0.31	0.59 ± 0.40
Aloricate ciliates (× 10 ² cells L ⁻¹)			
< 40 μm	12.84 ± 24.48	25.72 ± 94.32	3.84 ± 5.60
> 40 μm	12.04 ± 19.84	13.12 ± 18.09	5.40 ± 3.79
Loriccate ciliates (× 10 ² cells L ⁻¹)	1.28 ± 3.29	6.12 ± 11.44	1.64 ± 1.77

전도도, 용존산소는 현장에서 수질측정 장비 (Water checker U-10, HORIBA, Japan)를 이용하여 측정하였다. 영양염류와 Chl-*a*량을 측정하기 위해서 표층수 5L를 채수하여 냉장 상태로 보관하였고, 박테리아와 HNF의 생물량 조사를 위해 글루타르알데하이드로(최종 농도 2%)로 고정된 50mL의 시료와 함께 실험실로 운반하였다. 실험실에 운반한 시료는 즉시, GF/F필터로 일정량을 여과하였다. 여과한 필터는 Chl-*a*를 측정하기 위해 90% 아세톤에서 추출하였고, 여과액은 영양염류를 측정하기 위해서 냉동보관(-60

°C) 하였다.

영양염류중 암모니아성 질소(NH₄-N)는 암모니아가 차염소산나트륨(Sodium hypochlorite) 존재하에서 페놀(Phenol)과 반응하여 생기는 인도페놀 청색의 흡광도를 측정하여 정량하는 인도페놀법(Penenate method)을 이용하였고, 아질산과 질산(NO₂+NO₃-N)성 질소는 하이드라진 환원 방법(Hydrazine Reduction method)으로 측정하였다(Kamphake *et al.*, 1967). 인산염인(PO₄-P)은 인산이온이 몰리브덴 산(Molibdate solution)과 반응하여 생기

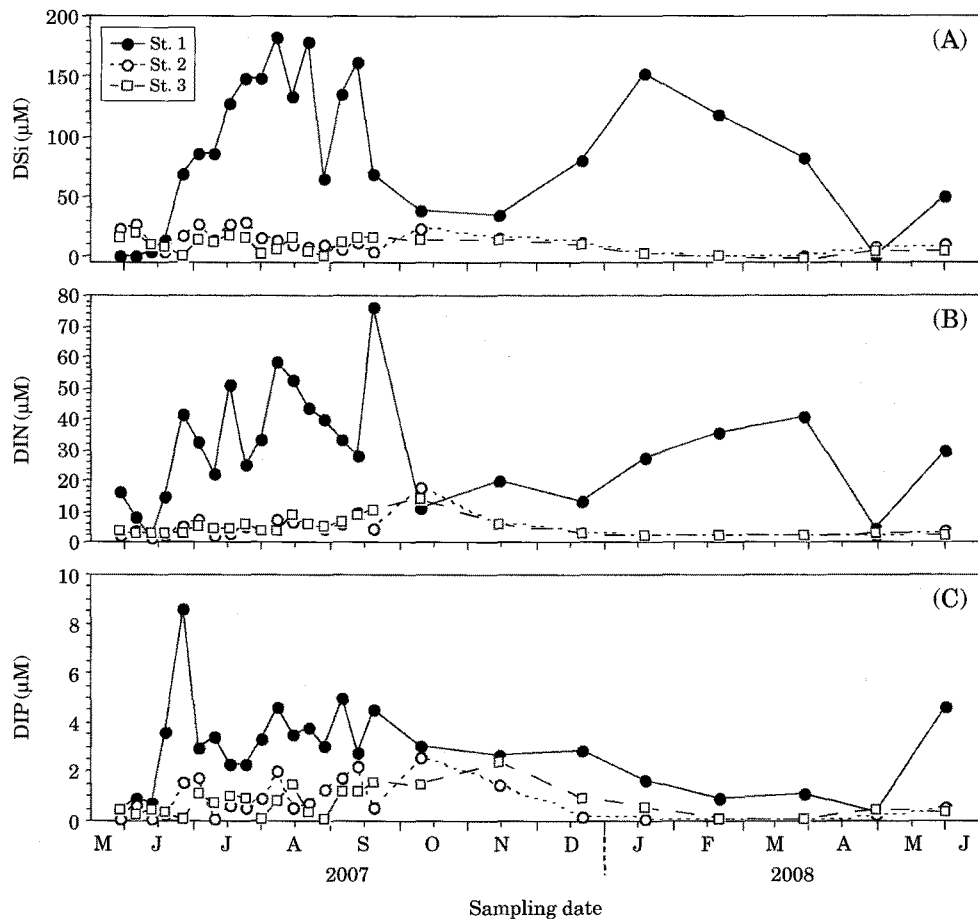


Fig. 3. Seasonal changes of DSi (Dissolved Inorganic Silicate; A), DIN (Dissolved Inorganic Nitrogen; B), and DIP (Dissolved Inorganic Phosphate; C) at the three stations during the study period.

는 황색의 폴리브덴산 착제를 아스코르빅산 (Ascorbic acid)으로 환원시켜 그 흡광도를 측정하여 정량하는 아스코르빅 방법을 이용하여 분석하였다. 규산염은 폴리브덴산청법을 이용하여 측정하였다.

Chl- α 량은 냉암소에서 24시간 추출후 UV-VIS Spectrophotometer (HEWLETT PACKARD, USA)로 흡광도를 측정하고, Jeffrey and Humphery (1975)의 식에 따라 값을 산출하였다.

박테리아의 생물량은 수단블랙 (Sudan Black)용액에 0.2 μm 여과지 (Millipore)를 염색한 후 고정된 시료를 잘 혼합 희석하여 일정량 (0.5~2 mL)을 취해 여과후 DAPI (4',6-diamidino-2-phenylindole)로 5분간 염색하여 형광현미경 (Axioplane, Zeiss)으로 1,000배 하에서 검경 및 계수하였다. 각 샘플은 임의의 field에서 총 세포수가 300개 이상 되도록 계수하고, 그에 해당하는 field 수가 전체에서 차지하는 부분을 환산하여 총 박테리아의 생물량을

산출하였다 (Porter and Feig, 1980).

HNF의 생물량은 수단블랙 (Sudan Black)용액에 2 μm 여과지 (Millipore)를 염색한 후 고정된 시료를 일정량 (10~30 mL)을 취해 Primulin 염색후 1,000배 하에서 계수하였다 (Caron, 1983).

섬모충류의 생물량은 500 mL의 표층수를 Lugol 용액으로 현장에서 고정하여 실험실로 운반후 24시간 이상 자연 침강후 10~50 mL로 농축시켜 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 광학현미경하에서 피갑 (Lorica)을 가지고 있는 것과 그렇지 않은 종으로 구분하여 계수하였다.

미소생물군집과 환경인자 사이에 어떠한 관계가 있는지를 파악하기 위해서 CANOCO 4.5 software을 이용하여 CCA (Canonical correspondence analysis) 분석을 행하였다. 이 분석법은 미소생물군집의 각 생물들 사이의 유사성 거리를 계산하여 각 생물군의 상대적 거리를 위치화 시켜 배열한 공간에서 각 생물군의 배열과 측정된 환경요인 사

이에 가장 높은 상호관계를 갖는 모형을 겹쳐서 최종적으로 한 도면(diagram)상에 배열하는 기법이다.

결 과

1. 환경요인의 변화

조사기간중 수온은 3개 정점 모두 전형적인 온대수역의 계절적 특성이 뚜렷하게 나타났고, 정점간의 차이는 크지 않았다(Fig. 2a). 3개 정점의 평균수온은 하계(6~8월)가 $25.6 \pm 3.1^\circ\text{C}$ 로 가장 높았고, 다음으로 춘계(3~5월; $19.5 \pm 4.1^\circ\text{C}$), 추계(9~11월; $19.0 \pm 7.5^\circ\text{C}$), 동계(12~2월; $4.0 \pm 3.6^\circ\text{C}$) 순으로 나타났다. 특히, 2008년 1월과 2월 St. 1에서 결빙이 관찰되었다. 염분은 시화호 배수갑문 외측 정점(St. 3)에서는 연중 30~35 PSU로 높게 나타났고, 내측(St. 2)에서는 하계 7월과 8월 사이에 25~30 PSU로 비교적 낮았다. 특히 시화호 상류(St. 1)에서는 염분의 계절적 특이성은 관찰되지 않았고, 그 변동폭이 현저하게 나타났다(0~30 PSU). St. 1의 연평균 염분은 다른 두 정점에 비하여 두드러진 차이를 보였다(Table 1). 특히 St. 1의 염분은 강우뿐만 아니라 배수갑문의 수위 조절에도 직접적인 영향을 받고 있었다. 즉 배수갑문을 통하여 외측 해수가 유입 될 때는 염분농도가 높았고, 반대의 경우는 하천수의 영향을 받아 아주 낮게 관찰되었다.

각 정점에서의 영양염 농도는 각기 다른 양상을 나타내었다(Fig. 3). 영양염류가 가장 높게 관찰된 St. 1에서는 다른 두 정점보다 큰 폭으로 변화하였고, 용존무기규소(DSi)와 용존무기질소(DIN; 질산염, 아질산염, 암모니아)의 농도는 하계와 동계에 높게, 추계와 춘계에는 상대적으로 낮게 관찰되었다. DSi, DIN, DIP의 최고치는 St. 1에서 각각 $183.8 \mu\text{M}$, $76.68 \mu\text{M}$, $8.57 \mu\text{M}$ 로, St. 2에서 $28.9 \mu\text{M}$, $17.8 \mu\text{M}$, $2.6 \mu\text{M}$ 로, St. 3에서 $19.7 \mu\text{M}$, $14.1 \mu\text{M}$, $2.4 \mu\text{M}$ 로 관찰되었다. 영양염농도가 상대적으로 낮게 관찰된 St. 2와 St. 3에서는 계절적 변동이 뚜렷히 관찰되지 않았다. 조사기간 동안 염분과 DSi, DIN, DIP 관계는 각각 $r^2=0.66$, $r^2=0.68$, $r^2=0.33$ 으로 유의하게 높은 상관관계를 보였다($P < 0.001$; Fig. 4).

Chl-*a*량의 계절적 변동은 Fig. 5에 나타내었다. 각 정점 Chl-*a*량의 연평균은 St. 1이 $59.4 \pm 79.2 \text{ mg m}^{-3}$ 로 가장 높았고 다음으로 St. 2($15.6 \pm 22.8 \text{ mg m}^{-3}$), St. 3($9.1 \pm 8.0 \text{ mg m}^{-3}$) 순으로 나타났다(Table 1). St. 1에서는 7월 9일 최고치 342 mg m^{-3} 을 기록하였고, 3정점의 Chl-*a*량의 계절적 평균은 춘계($33.1 \pm 55.8 \text{ mg m}^{-3}$), 하계($30.6 \pm 58.6 \text{ mg m}^{-3}$), 추계($21.1 \pm 41.7 \text{ mg m}^{-3}$), 동계($13.3 \pm 5.8 \text{ mg m}^{-3}$) 순으로 각각 관찰되었다. 특히 2008년 1월에는 St. 1에서 결빙이 관찰되었음에도 불구하고 Chl-*a*량이 높게 (15.4 mg m^{-3}) 기록되었다.

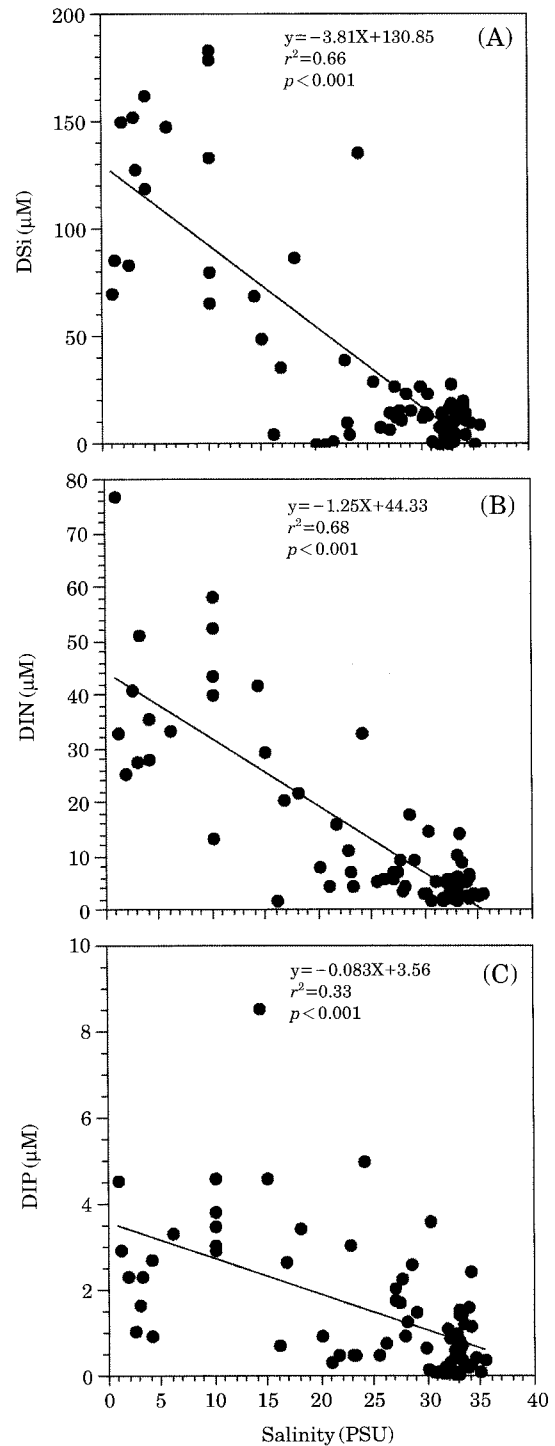


Fig. 4. Relationships between salinity and DSi (A), DIN (B), and DIP (C).

mg m^{-3} 순으로 각각 관찰되었다. 특히 2008년 1월에는 St. 1에서 결빙이 관찰되었음에도 불구하고 Chl-*a*량이 높게 (15.4 mg m^{-3}) 기록되었다.

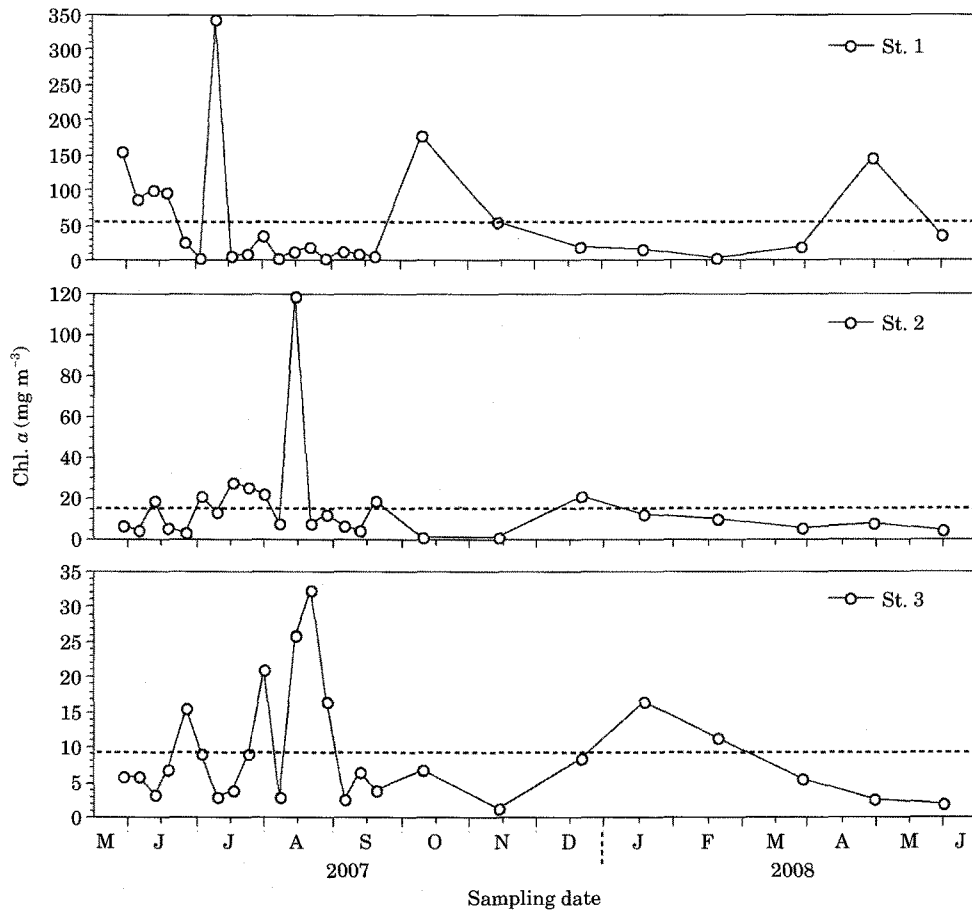


Fig. 5. Seasonal changes of Chl. *a* concentrations at the three stations during the study period. The dotted lines indicate the annual average in each station.

2. 박테리아, 종속영양성 미소편모충류 (HNF), 섬모충의 현존량

조사기간 동안 3개 정점에서 박테리아의 생물량은 동계에 비교적 낮게 관찰되었고, 그 이외의 기간은 상대적으로 높게 나타났다(Fig. 6). 각 정점의 연평균은 St. 1, 2, 3에서 각각 $6.8, 7.4, 4.6 \times 10^6$ cells mL^{-1} 로 관찰되었다. 모든 정점에서 수온이 상승하는 하계에 박테리아의 생물량이 비교적 높게 관찰되었으나, 주간적으로 큰 폭으로 변동하는 특이성을 보였고, 춘계와 추계는 연평균에 가까운 밀도를 유지했다(Fig. 6). 박테리아의 최고 밀도는 St. 2에서 2.4×10^7 cells mL^{-1} (2007년 7월 16일)로, 최저치는 St. 1에서 5.7×10^5 cells mL^{-1} (2007년 7월 2일)로 그 차이는 현저했다. 특히 St. 1에서는 담수와 해수 박테리아가 공존했고, 강우로 인한 담수의 유입이 많은 기간(7/2과 7/16)에는 해수의 박테리아는 전혀 관찰되지 않았고, 박테리아의 전체 밀도 또한 극히 낮게 관찰되었다. 반대로 조사기간 동안 다

른 2개의 정점(St. 2, 3)에서는 해수산 박테리아만 관찰되었다.

종속영양성 미소편모충류(HNF)의 계절적 변동은 Fig. 7에 나타내었고, 각 정점의 연평균은 St. 1에서 19×10^2 cells mL^{-1} , St. 2에서 6.7×10^2 cells mL^{-1} , St. 3에서 5.9×10^2 cells mL^{-1} 순으로 나타났다. 3개 정점의 계절평균은 춘계에 가장 높은 16×10^2 cells mL^{-1} 을 보였고, 다음으로 추계(11×10^2 cells mL^{-1}), 하계(10×10^2 cells mL^{-1}), 동계(5×10^2 cells mL^{-1})순으로 나타났다.

섬모충의 동정은 QPS(Quantitative protargol stain)방법을 이용하지 않고 광학현미경하에서 단순히 피각을 가진 것(Loricated ciliate)과 그렇지 않은 것(Aloricated ciliate)으로 구분하여 Fig. 8에 나타내었다. 모든 정점에서 섬모충의 계절적 변화 양상은 뚜렷하지 않았고, 수온이 극히 낮은 동계에도 일정한 생물량이 관찰되었다. 또한, St. 1에서는 염분이 극히 낮은 기간에는 섬모충이 거의 관찰되지 않았지만, St. 2와 St. 3에서는 염분변동과 관계없이 그들

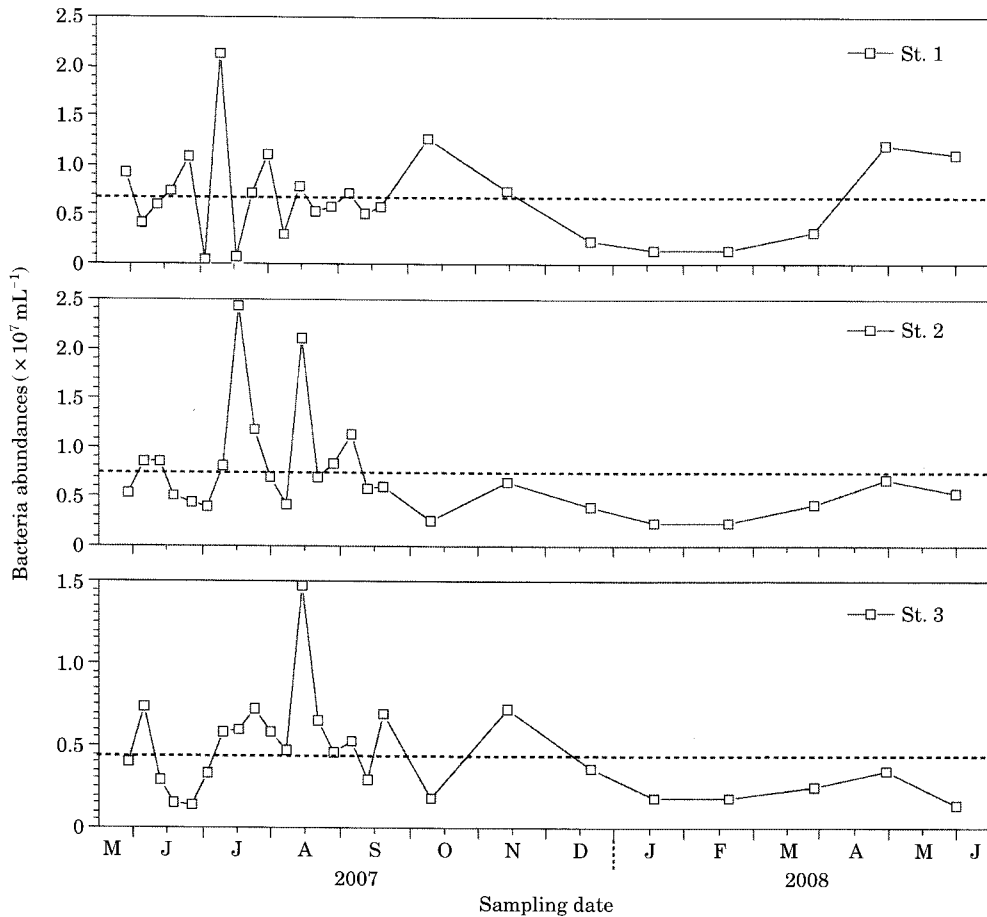


Fig. 6. Seasonal changes of bacteria abundances at the three stations during the study period. The dotted lines indicate the annual average in each station.

의 개체가 출현하지 않은 시기가 때때로 관찰되었다. 2007년 7월 23일 St. 2에서 빈모류(Oligotrichs)가 높은 밀도 (4.7×10^4 cells L⁻¹)를 기록하였는데, 그 중 98%가 *Strombidium* spp.이었다. 특히 조사기간중 최고치 (2.0×10^5 cells L⁻¹)는 St. 1에서 2008년 4월 29일에 관찰되었고, 그 중 99% 이상이 *Mesodinium rubrum* (*Myrionecta rubra*)으로 구성되었다.

고 찰

기수호유역은 조석간만의 차이로 해수와 담수가 만나는 장소로 복잡한 수문학적 특성을 가지고 있다. 본 연구에서도 St. 1에서 이와 같은 양상이 두드러졌고, 조사시기의 염분 변화양상을 통해 해수와 담수의 혼합율을 간접적으로 예측할 수 있었다. 그러나 시화호 배수갑문 주변의 두 정점에서는 이와 같은 양상이 뚜렷하지 않았고, 일정하게

높은 염분농도를 유지하고 있는 것으로 보아, 담수의 직접적인 영향을 적게 받고 있는 것으로 판단된다. 염분 변동은 하구연안 생물상의 시공간적 변화에 크게 영향을 미치며 (Marshall and Alden, 1990; Gameiro *et al.*, 2007), 영양염 농도의 변화를 초래할 수 있다. 조사기간 동안 염분과 DSi, DIN, DIP의 관계는 각각 $r^2=0.66$, $r^2=0.68$, $r^2=0.330$ 으로 유의하게 높은 음(-)의 상관관계를 보였다는 것은 염분농도의 감소와 더불어 영양염류 농도의 상승효과가 있다는 것을 의미한다 ($P < 0.001$). 시화호의 체류시간(하천수의 총유입량/총저수량)은 일반 담수호와 같이 계산하면 1년 이상이 소요되지만, 1997년 이후의 배수갑문을 통한 해수의 유입과 유출을 고려한 수리학적 체류시간은 30일 이하로 짧아졌다(최 등, 2008). 따라서, 담수 유입로인 시화호 상류 St. 1의 고농도 영양염류는 배수갑문을 통한 물 교환으로 인하여 St. 2와 St. 3으로 간접적으로 빠르게 희석되고 있다고 판단된다. St. 1과 같은 기수역은 해수유입량이 제한적이기 때문에 염분성층의 형

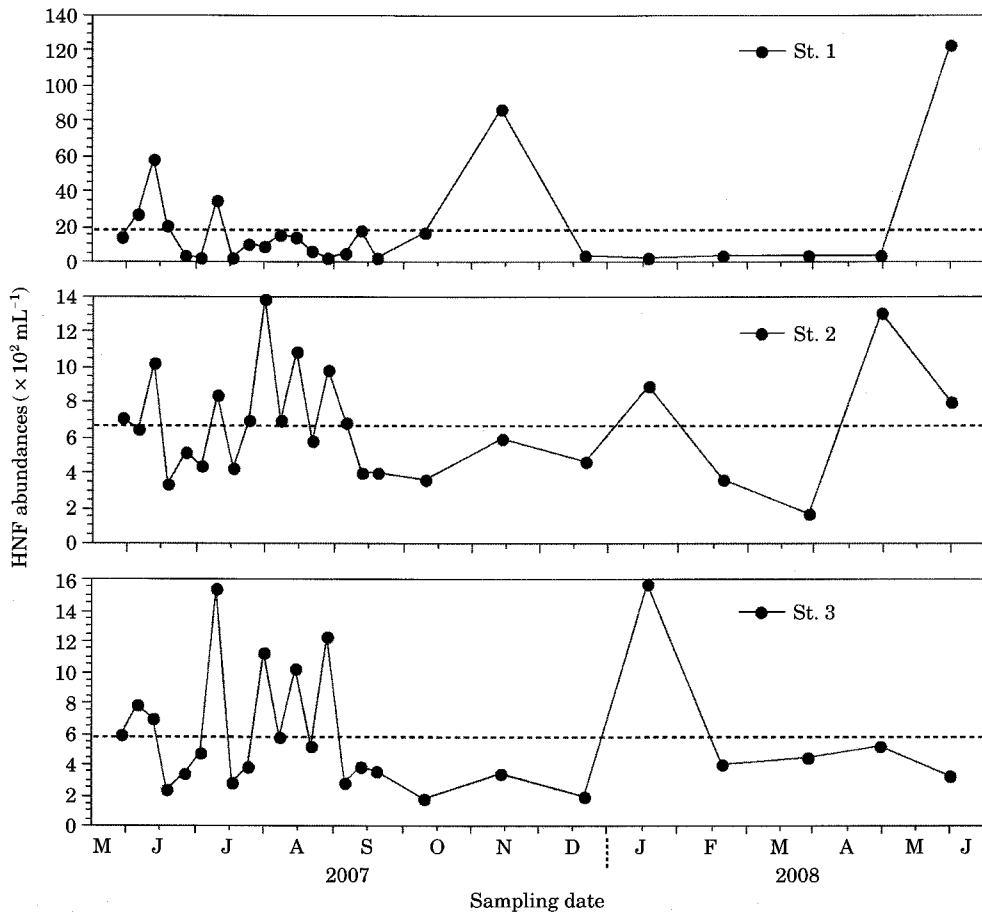


Fig. 7. Seasonal changes of HNFs abundances at the three stations during the study period. The dotted lines indicate the annual average at each station.

성과 소멸을 반복하는 과정에서 전선(front)을 형성하며, 각기 다른 수괴의 플랑크톤성 부유물질을 비롯한 조류가 쉽게 집결하게 되었다(신 등, 2000; Gray *et al.*, 2002; McLusky and Elliott, 2004). 이곳은 식물플랑크톤의 대증식을 유발하기에 충분한 영양염이 하천수로부터 계속적으로 공급되기 때문에 Chl-*a* 농도의 극대가 빈번히 관찰되었고, 연평균이 약 60 mg m^{-3} 로 극히 높은 값을 유지했다. 결과적으로 시화호는 상류를 중심으로 한 과영양상태의 영양염과 대증식한 기수성 식물플랑크톤은 시간의 경과와 더불어 시화호 배수갑문쪽으로 희석 정화되며, 그 과정에서 식물플랑크톤의 개체군의 분산과 이동을 유발해 St. 2와 St. 3에서도 높은 밀도로 어떤 특정종이 우점 출현할 수 있는 독특한 환경이라고 할 수 있겠다.

박테리아의 시공간적 분포 양상은 용존유기물과 영양염 농도에 의해 bottom-up control과 상위의 포식자의 top-down control에 의해서 결정된다(Weisse, 1991; Jardillier *et al.*, 2004). 또한, 박테리아의 성장은 식물플랑크톤 대증

식후 분해되는 과정에서 생성되는 대량의 용존성 유기물질을 먹이원으로 하기 때문에 일반적으로 박테리아와 식물플랑크톤의 현존량(Chl-*a*)은 상관성이 높다(Bird and Kalff, 1984, 1986; Naganuma and Miura, 1997; Kormas *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2001). 본 연구의 3개 정점에서 연평균 박테리아 개체수 밀도는 $4.5 \sim 7.4 \times 10^6 \text{ cells mL}^{-1}$ 로, 빈영양수역인 동해 $0.2 \sim 1.8 \times 10^6 \text{ cells mL}^{-1}$ (Cho *et al.*, 2000), 중영양수역인 경기만 $0.2 \sim 5.4 \times 10^6 \text{ cells mL}^{-1}$ (양 등, 2003), 부영양수역인 마산만 $0.5 \sim 4.5 \times 10^6 \text{ cells mL}^{-1}$ (Park and Cho, 2002; 이 등, 2007) 보다 현저히 높게 나타났다. 또한, 최 등(1997)이 시화호에서 보고한 $1.6 \sim 19.5 \times 10^6 \text{ cells mL}^{-1}$ 밀도와 본 연구에서 나타난 3정점의 계절적 변화 양상은 유사했다. 이 등(2007)에 의하면, 마산만의 Chl-*a* 농도의 연간 변동은 $0.2 \sim 60 \text{ mg m}^{-3}$ (평균 9.78 mg m^{-3})로 보고하였고, 이 농도는 시화호 St. 3의 연평균 농도와 유사했다. 회귀분석에서도 알 수 있듯이, 박테리아의 생물량은 Chl-*a* 농도와 유의한 상관관계가 관찰되었다($r =$

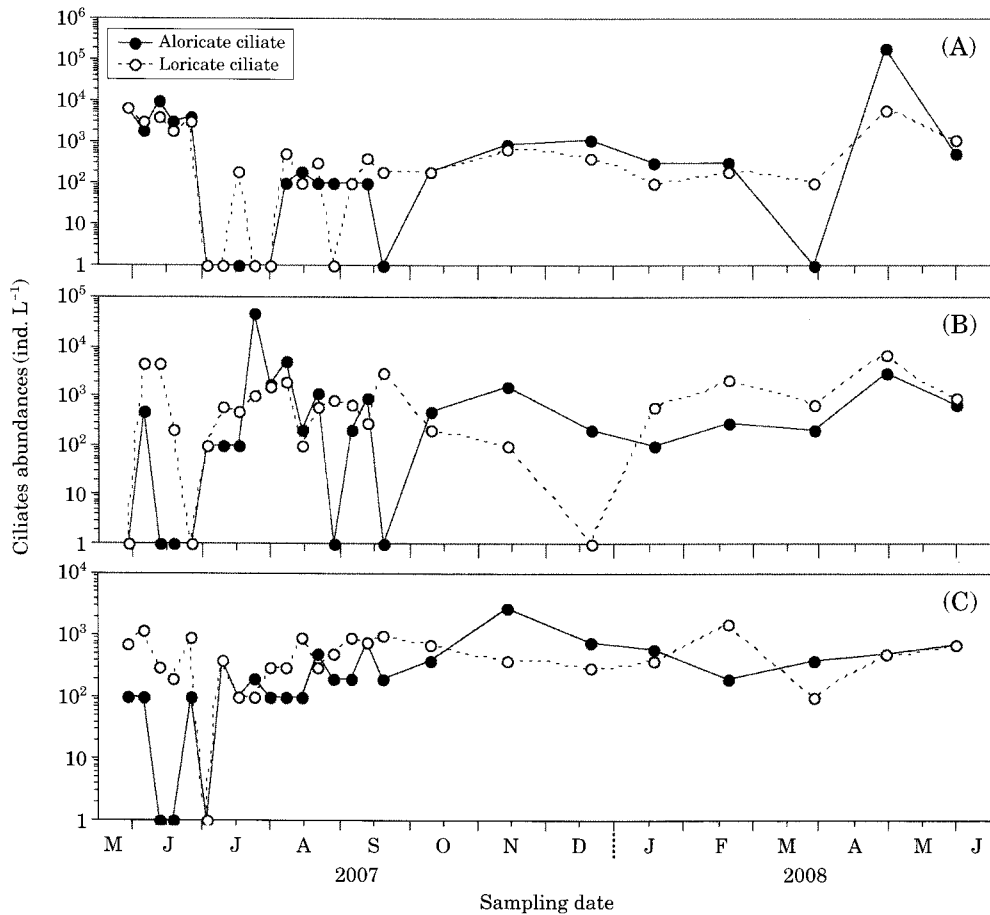


Fig. 8. Seasonal changes of ciliate abundances at three stations (A: St. 1, B: St. 2, C: St. 3) during the study period.

0.57, $P < 0.001$) (Fig. 9A). 결과적으로 마산만과 시화호 같은 부영영화 수계에서는 우리나라의 다른 수계에 비해 식물플랑크톤의 대량증식에 따른 Chl-*a* 증대와 더불어 박테리아의 현존량 또한 극히 높게 유지되고 있다는 것을 시사했다. 상위포식자인 HNF와 먹이원인 박테리아의 관계를 살펴보는 회귀분석에서도 박테리아와 HNF의 두 생물간의 상관성은 그다지 높게 관찰되지 않았다 ($r = 0.23$, $P < 0.05$) (Fig. 9B). 따라서 시화호 주변 기수구역의 박테리아 증감 경향성은 상위포식자의 영향보다는 식물플랑크톤 유래의 용존유기물에 의한 bottom-up control의 영향이 클 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 용존유기물을 측정하지 않았기 때문에 추후 보다 세심한 검토가 필요하다.

박테리아의 성장은 수온에 의한 영향을 받으며, 수온이 높을 때 상대적으로 박테리아 밀도가 증가한다 (양 등, 2003). 본 조사 정점과 같이 수심이 얇은 시화호 주변 수역은 동계에 급격히 수온이 하강하였고, 동계의 현저한 수층 혼합에 의하여 입자성 부유물질의 농도가 높았을 것

로 간주할 때, 이 시기의 낮은 박테리아 생물량은 식물플랑크톤에 의한 영향보다는 저수온에 의한 영향이 더 클 것으로 사료된다. Pomeroy and Deibel (1986)의 보고에 의하면, 동계와 춘계의 식물플랑크톤의 대증식기간 동안 박테리아와 식물플랑크톤의 현존량과의 상관관계는 찾을 수 없었고, 낮은 수온 환경하에서는 박테리아의 증식이 일정하게 낮게 나타난다는 것을 제안했다. 본 조사기간 동안 수온이 낮은 동계의 박테리아 생물량은 모든 정점에서 전체 평균보다 낮게 관찰되었다. 이것은 낮은 수온에서 박테리아의 활성이 떨어져 그들의 생물량 또한 낮게 관찰된다는 선행연구와 일치한다 (Pomeroy and Deibel, 1986; 양 등, 2003).

중속영양성 미소편모조류(HNF)는 미소생물의 먹이 흐름과 영양염의 재순환에 중요한 역할을 담당한다. HNF는 박테리아나 남조류와 같은 크기가 작은 생물의 소비자로서 뿐 아니라 부유성 섬모충류의 먹이원으로 이용되기 때문에 물질순환의 연결고리로서 중요한 위치를 차지한다 (Fenchel, 1982; 양 등, 2003). HNF의 생물분포는 박테리

아 생물량과 높은 상관관계를 가지며, 그들의 계절적 분포 양상도 뚜렷하게 나타난다(Davis *et al.*, 1985; Mostajir *et al.*, 1995). 본 조사에서도 HNF는 박테리아 생물량과 낮은 상관관계를 보였으나, 춘계 > 추계 > 하계 > 동계 순으로 온난지역의 계절적 분포특성을 나타내었다. 조사지와 인접한 인천 연안의 양 등(2003)의 보고에 의하면, HNF는 박테리아의 생물량이 가장 높았던 직후 또는 박테리아의 생물량이 높아던 시기에 높게 분포하였다. 본 조사에서도 6~8월 사이 일주일 간격으로 수행한 결과에 의하면, 수계가 비교적 안정된 St. 2와 3에서 박테리아 생물량이 높은 시기에 HNF의 생물량도 연동하여 변화하는 경향이 관찰되었으나, St. 1에서는 강우가 관찰된 직후 담수의 영향을 현저하게 받아 담수와 해수산 박테리아와 HNF가 혼재되어 그들의 동태를 명확하게 파악할 수 없었다. 결과적으로 본 연구에서는 박테리아와 HNF의 출현양상은 비교적 유사하였으나 그들의 상관관계는 그다지 높지 않았고, 그 이유는 단발적인 강우와 조석간만의 차이를 이용한 시화호 배수갑분의 개폐로 인하여 발생하는 유량의 변화에 따른 영향을 크게 받았기 때문이라 사료되었다.

섬모충류는 박테리아, 미세조류와 같은 먹이 생물의 분포에 민감하게 반응하는 생물군으로 하계의 고수온기에 활발히 증식하여 때때로 높은 밀도의 군집을 형성한다(김과 장, 2008). Kim *et al.*(2007)이 보고한 시화호 내측의 하계 단기 조사에 의하면, 섬모충류는 HNF뿐만 아니라 종속영양 박테리아와도 높은 상관성이 있는 것으로 파악하였고, 박테리아-HNF-섬모충류로 이어지는 미세생물 먹이환의 상위 포식자로서 중요한 역할을 담당한다고 보고했다. 아울러 섬모충류의 분포는 식물플랑크톤의 현존량과 밀접한 관계가 있고, 식물플랑크톤이 우점 출현하는 시기에 섬모충류도 높은 밀도로 출현한다(Suzuki and Taniguchi, 1998; 양 등, 2003). 본 조사에서 섬모충류는 박테리아, HNF, 식물플랑크톤과 같은 먹이원과의 관계는 뚜렷하지 않았으나(Fig. 9C), 일시적으로 박테리아의 밀도가 높게 관찰되었을 때 빈모류(oligotrichs)인 *Strombidium* spp. (< 40 μm) 또한 높은 밀도를 보였다. 특히 크기가 작은 *Strombidium* spp.은 박테리아를 포식하는 대표적인 종으로 잘 알려져 있다(Fenchel and Jonsson, 1988; Kisand and Zingel, 2000; 김과 장, 2008; 문 등, 2008). *Mesodinium rubrum*은 2008년 4월 29일 St. 1에서 대발생하였다. 섬모충류에 속하는 *M. rubrum*은 식물플랑크톤(주로 갈색편모류; Cryptophyceae)을 포식하며, 포식한 생물의 엽록소를 이용하여 광합성을 하면서 대증식하여 때때로 적조를 형성하는 원생생물이다(Gustafson *et al.*, 2000; Yin *et al.*, 2004). 상기에 언급한 섬모충류 2속은

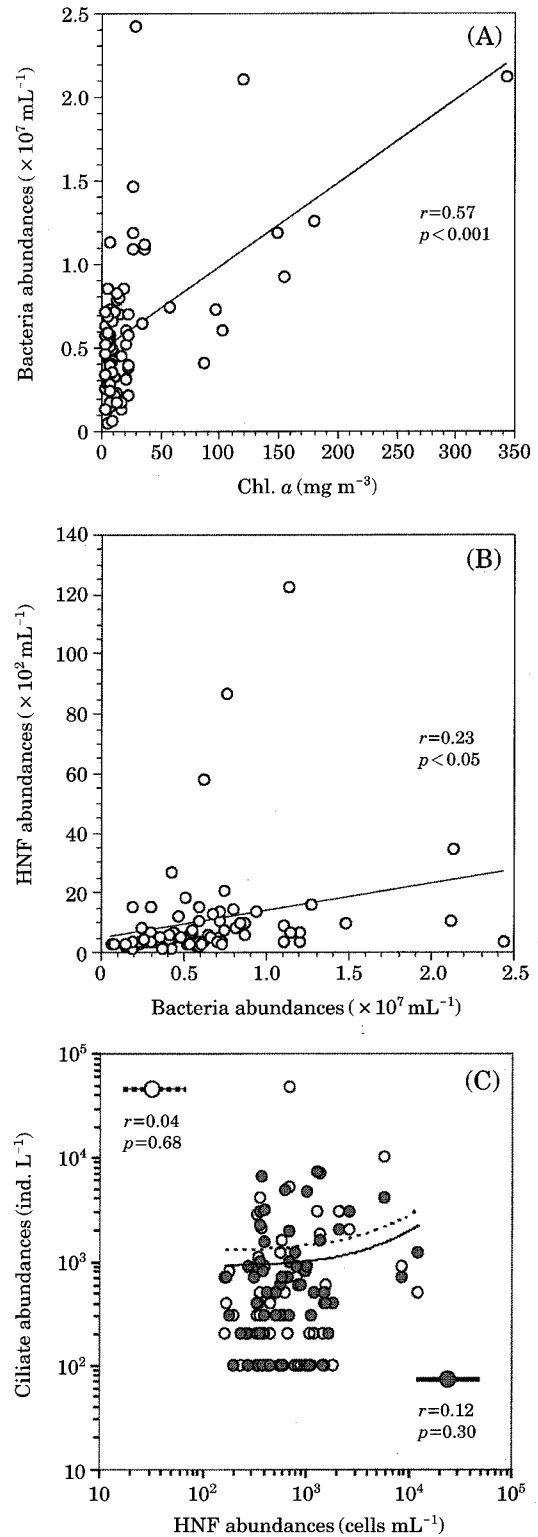


Fig. 9. Relationships between bacteria abundances and Chl. a concentrations (A), between HNF and bacteria abundances (B) and between ciliate and HNF abundances (C). White and gray circles indicate oligotrich ciliate and loricate ciliate, respectively.

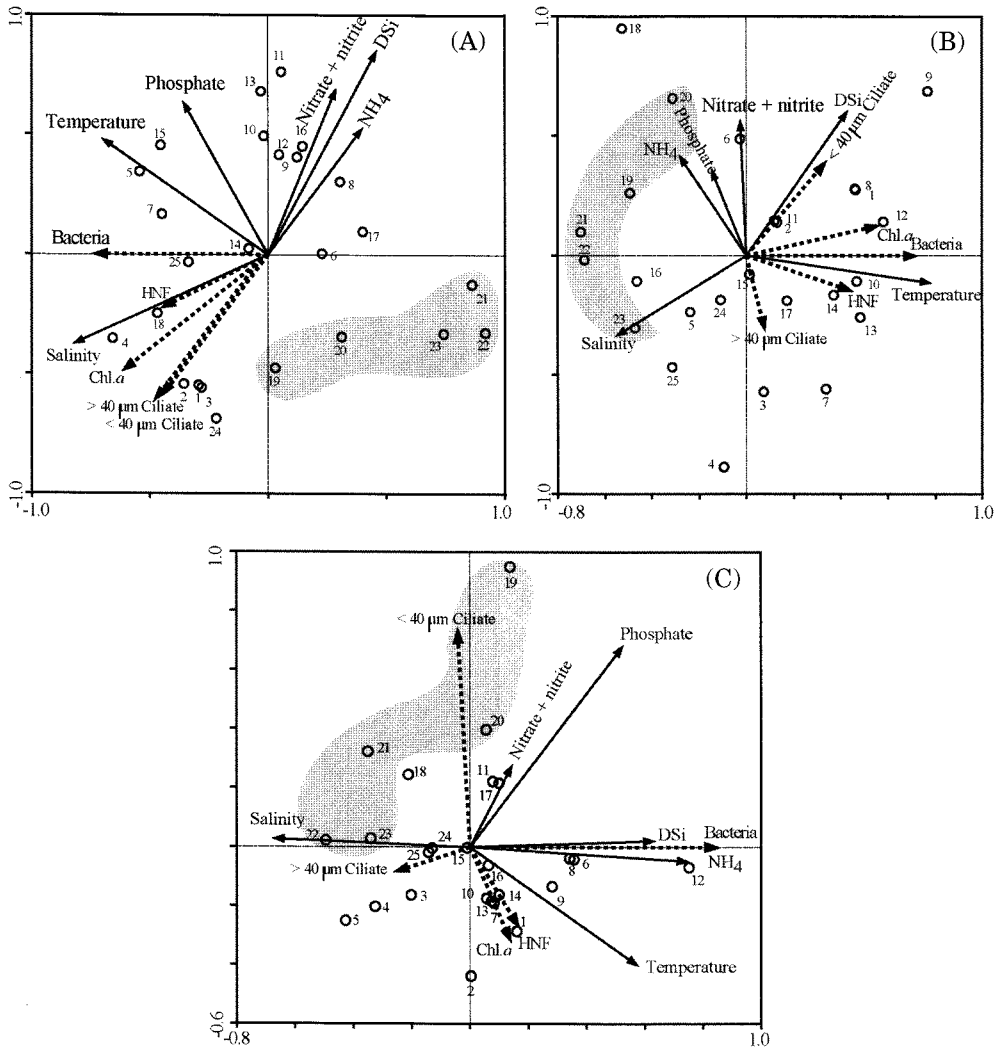


Fig. 10. Relationship among temperature, salinity, nutrients and the main microbial-loop components by canonical correspondence analysis (CCA) at each station (A: St. 1, B: St. 2, C: and St. 3) during the one year study in Lake Shihwa. Gray areas indicate winter season periods.

수역이 안정되고 부영양화된 수괴에서 우점 출현하는 대표종이다(Gustafson *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2007). 결과적으로 본 연구에서 섬모충류와 하위 먹이생물군(박테리아, HNF, 식물플랑크톤)과는 상관관계는 시간 지연(Time lag)으로 인하여 도출할 수 없었으나, *Strombidium*과 *Mesodinium*속과 같은 섬모충류가 시화호에서 어떤 특정 시기에 대발생할 수 있었다는 것은 먹이원이 되는 하위 생물군이 풍부하게 존재하고 있다는 것을 간접적으로 시사할 수 있다.

시화호 주변 기수구역의 환경인자와 미소생물의 군집간 상관관계를 파악하려고, 각 정점별로 CCA(Canonical correspondence analysis)분석을 하였다. 이 분석은 각 미소생

물군집의 변화와 환경요인들과 공통요인을 갖는 좌표와의 상관관계를 벡터로 나타내어 미소생물군집과 환경요인과의 상호관계를 직접 관찰 할 수 있는 방법이다. 하천수의 영향을 직·간접적으로 강하게 받는 St. 1의 CCA 분석을 살펴보면 (Fig. 10A), 염분농도와 규산염, 질소기원의 영양염과 부(-)의 상관관계를 나타내었고, 염분농도와 식물플랑크톤의 현존량을 대표할 수 있는 Chl-a농도와 정(+)의 상관관계를 나타내었다. 또한 Chl-a농도, HNF, 섬모충류는 같은 방향으로 치우쳐 분포하였고, 이들 생물군은 영양염과의 부(-)의 상관성을 보였다. 즉 St. 1에서의 식물플랑크톤은 염분농도가 상대적 낮은 시기에 현저히 증식을 하였고, 그들의 증식으로 인하여 질소기원의 영양염류가

대량 소모되었다고 판단된다. 또한 섬모충류는 먹이생물인 식물플랑크톤과 HNF의 현존량에 영향을 받고 있다는 것을 시사할 수 있다. St. 2와 St. 3의 CCA 분석에서는 환경요인과 미소생물 간의 상호관계는 St. 1의 분석과 다른 양상을 보였다(Fig. 10B, C). 이들 두 정점(St. 2, St. 3)은 시화호 배수갑문 주위에 위치하고 있고 주기적인 수문 개방으로 인하여 내측과 외측의 수체가 교환되기 때문에 환경요인과 미소생물군집의 계절적 변화가 유사했을 것으로 사료되었으나, CCA 분석에서는 환경요인과 미소생물의 배열되는 위치와 각도가 조금씩 차이를 보였다. 먼저 St. 2에서는 박테리아, Chl-*a*, HNF는 같은 방향으로 몰려 있었고, 환경요인 수온과는 정(+)의 관계가 성립되었다. St. 3에서는 Chl-*a*와 HNF에 관해서는 St. 2의 양상과 유사했으나, 이들 두 그룹 생물과 박테리아의 관계는 다르게 나타났다. 즉 St. 2와 St. 3에서는 수온이 높은 시기에 식물플랑크톤과 HNF의 현존량이 높게 나타났다는 것을 의미한다. 특히 모든 정점에서 동계 기간은 한 쪽으로 묶여 있는 특성을 관찰할 수 있었고(Fig. 10 회색표기), 이것은 수온이 급격히 하강하는 11월부터 3월까지의 환경요인과 미소생물군집 간의 변화양상이 유사하다는 것을 간접적으로 시사한다.

요약하면, 시화호 상류에서는 담수의 영향을 직접적으로 받아 영양염 농도가 극히 높았고, Chl-*a*농도 또한 높게 나타났다. 박테리아는 식물플랑크톤 기원의 유기물을 이용하여 현저히 증식한 결과 Chl-*a*농도와 높은 상관성이 관찰되었으나, 미소생물 먹이원으로 연결되는 상위포식생물과의 관계는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 특히 상류의 높은 영양염과 더불어 고밀도의 미소생물군집은 배수갑문의 개방으로 인하여 시화호 전체로 희석 및 확산을 유발하여 호수 전체에 높은 생산성을 유지하게 하였다.

적 요

박테리아, HNF, 식물플랑크톤 그리고 섬모충류로 이어지는 미소생물군집의 계절적 변화를 2007년 5월에서 2008년 5월까지 부영양화된 기수호유역 시화호의 3개 정점에서 조사하였다. 배수갑문 주변의 두 정점과 비교하여 상류의 정점에서 염분농도가 낮게 나타났고, 영양염 농도와 더불어 Chl-*a*가 현저하게 높게 기록되었다. 박테리아의 연 평균은 St. 1에서 6.8×10^6 cells mL⁻¹로, St. 2에서 7.4×10^6 cells mL⁻¹로, St. 3에서 4.6×10^6 cells mL⁻¹로 각각 관찰되었다. HNF의 연 평균은 St. 1에서 19×10^2 cells mL⁻¹로, St. 2에서 6.7×10^2 cells mL⁻¹로, St. 3에서 $5.9 \times$

10^2 cells mL⁻¹로 각각 기록되었다. 최고치의 섬모충 개체수는 St. 1에서 2008년 4월 29일에 관찰되었고, 전체의 99%가 자가영양성 섬모충 *Mesodinium rubrum* (= *Myrionecta rubra*)이었다. Chl-*a*농도는 박테리아와 높은 상관관계가 관찰되었으나, 박테리아는 HNF와 섬모충으로 이어지는 상위 포식자 간의 상관성이 높게 나타나지 않았다. 이것은 상위 포식자로 이어지는 에너지 흐름의 효율이 비교적 낮다는 것을 의미한다. 부영양화된 시화호에서 일차생산자의 생물량이 높게 관찰되었음에도 불구하고, 미소생물군집의 상위 영양단계 생물과 하위 생물군과의 상관성이 나타나지 않았다는 것은 미소생물환의 먹이 연쇄는 고전적인 먹이망과 같은 간접적인 경로와 더불어 시간 지연의 영향을 받았을 것으로 사료되었다.

사 사

본 연구는 2008년도 정부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행하였다(KRF-2008-314-C00319). 연구수행에 도움을 주신 카타노 토시아 박사님께 진심으로 감사드립니다.

인 용 문 헌

- 김영옥, 장민철. 2008. 남해 거제도 장목만에서 부유성 섬모충의 시기별 분포 특성. *Ocean and Polar Research* **30**: 419-426.
- 노성유, 한명수. 2008. 팔당호 플랑크톤 군집의 탄소생물량 동태. *한국하천호수학회지* **41**: 174-187.
- 문은영, 김영옥, 공동수, 한명수. 2008. 팔당호 유입부 경안천의 섬모충 플랑크톤 계절적 분포. *한국하천호수학회지* **41**: 11-18.
- 박준진, 김은수, 조성록, 김경태, 박용철. 2003. 시화호 수질의 연 변화 양상에 대한 연구. *Ocean and Polar Research* **25**: 459-468.
- 손주연, 황순진, 공동수. 2006. 팔당호와 경안천에서 박테리아와 원생생물의 생물량과 세포크기의 시·공간적 분포. *한국육수학회지* **39**: 379-389.
- 신재기, 김동섭, 조경제. 2000. 시화호에서 무기영양염과 식물플랑크톤의 동태. *한국육수학회지* **33**: 109-118.
- 심재형, 신윤근, 조병철. 1993. 만경동진강 염하구에서의 박테리아 및 식물플랑크톤의 역할과 상호관계. *한국해양학회지* **28**: 107-113.
- 심재형, 윤성화, 윤상신, 최동한, 조병철. 1995. 만경동진강 염하구에서 종속영양성 및 혼합영양성 미소 편모류의 수도와 박테리아 섭식. *한국해양학회지* **30**: 413-425.
- 양은진, 최중기, 현정호. 2004. 경기만 수역에서 미세생물 군집의

- 계절적 변동 연구 I. 박테리아와 종속영양 미소 편모류. 바다 8: 44-57.
- 이옥세, 한명수. 2004. 체류시간이 서로 다른 부영양 수계에서 플랑크톤군집의 생태학적 특성. 한국육수학회지 37: 263-271.
- 이원제. 2007. 육계만 단일정점에서 극미소 및 미소플랑크톤의 시간적 분포. 한국환경과학회지 16: 855-863.
- 이원제, 신경순, 이재도. 2007. 마산만에서 부유원생생물의 연구. Ocean and Polar Research 29: 401-410.
- 이원제. 1993. 경계만 유영생태계에서 부유원생생물의 역할에 관한 연구. 인하대학교 석사학위논문.
- 최광순, 김세원, 김동섭, 허우명, 이윤경, 황인서, 이한진. 2008. 물 교환이 제한적인 시화호 상류 기수역의 부영양화. 한국하천호수학회지 41: 216-227.
- 최동환, 강석원, 송기돈, 허성희, 조병철. 1997. 과영양성 시화호에서 박테리아의 분포 및 성장. 바다 2: 92-100.
- 한국수자원공사. 1996. 시화호 수질개선 종합관리대책 기본계획 보고서. 한국수자원공사.
- 한국해양연구소. 1997. 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(1차년도). 과학기술처.
- 한국해양연구소. 1998. 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(2차년도). 과학기술처.
- 해양수산부. 2005. 시화호 해양환경개선 연구용역. 해양수산부.
- Azam, F., T. Fenchel, J.G. Field, J.S. Gray, L.A. Meyer-Reil and F. Thingstad. 1983. The ecological role of water column microbes in the sea. Marine Ecology Progress Series 126: 97-102.
- Bird, D.F. and J. Kalff. 1984. Empirical relationships between bacterial abundance and chlorophyll concentration in fresh and marine water. Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences 41: 1015-1023.
- Bird, D.F. and J. Kalff. 1986. Bacterial grazing by planktonic algae. Science 231: 493-495.
- Caron, D.A. 1983. Technique for enumeration of heterotrophic and phototrophic nanoplankton, using epifluorescent microscopy, and comparison with other procedures. Applied and Environmental Microbiology 46: 491-498.
- Cho, B.C., S.C. Na and D.H. Choi. 2000. Active ingestion of fluorescently labeled bacteria by mesopelagic heterotrophic nanoflagellates in the East sea, Korea. Marine Ecology Progress Series 206: 23-32.
- Davis, P.G., D.A. Caron, P.W. Johnson and J.Mc.N. Sieburth. 1985. Phototrophic and apochlorotic components of picoplankton and nanoplankton in the North Atlantic: geographic, vertical, seasonal and diel distributions. Marine Ecology Progress Series 21: 15-26.
- Fenchel, T. 1982. Ecology of heterotrophic microflagellates? Quantitative occurrence and importance as bacterial consumers. Marine Ecology Progress Series 9: 35-42.
- Fenchel, T. and P.R. Jonsson 1988. The functional biology of *Strombidium sulcatum*, a marine oligotrich ciliate (Ciliophora, Oligotrichina). Marine Ecology Progress Series 48: 1-15.
- Fukami, K., A. Watanabe, S. Fujita, K. Yamaoka and T. Nishijima. 1999. Predation on naked protozoan microzooplankton by fish larvae. Marine Ecology Progress Series 185: 285-291.
- Gameiro, C., P. Cartaxana and V. Brotas. 2007. Environmental drivers of phytoplankton distribution and composition in Tagus Estuary Portugal. Estuarine, Coastal and Shelf Science 75: 21-34.
- Gray, J.S., R.S.S. Wu and Y.Y. Or. 2002. Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment. Marine Ecology Progress Series 238: 249-279.
- Gustafson, D.E., D.K. Stoecker, M.D. Johnson, W.F. Van Heukelem and K. Snaider. 2000. Cryptophyte algae are robbed of their organelles by the marine ciliate *Mesodinium rubrum*. Nature 405: 1049-1052.
- Jardillier, L., M. Basset, I. Domaizon, A. Belan, C. Amblard, M. Richardot and D. Debroas. 2004. Bottom-up and top-down control of bacterial community composition in the euphotic zone of a reservoir. Aquatic Microbial Ecology 35: 259-273.
- Jeffrey, S.W. and G.F. Humphrey. 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁, *c*₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton. Biochem. Physiologie der Pflanzen 167: 191-194.
- Kamphake, L., S. Hannah and J. Cohen. 1967. Automated analysis for nitrate by hydrazine reduction. Water Research 1: 205-216.
- Kim, Y.O., E.J. Yang, J.H. Kang, K.S. Shin, M. Chang and C.S. Myung. 2007. Effects of an artificial breakwater on the distributions of planktonic microbial communities. Ocean Science Journal 42: 9-17.
- Kisand, V. and P. Zingel. 2000. Dominance of ciliate grazing on bacteria during spring in a shallow eutrophic lake. Aquatic Microbial Ecology 22: 135-142.
- Kormas, K.Ar., K. Kaporis, M. Thessalou-Legaki and A. Nicolaidou. 1998. Quantitative relationships between phytoplankton, bacter and protists in an Aegean semi-enclosed embayment (Maliakos Gulf, Greece). Aquatic Microbial Ecology 15: 255-264.
- Lee, C.W., I. Kudo, M. Yanada and Y. Maita. 2001. Bacterial abundance and production and heterotrophic nanoflagellate abundance in subarctic coastal waters (Western North Pacific Ocean). Aquatic Microbial Ecology 23: 263-271.
- Marshall, H.G. and R.W. Alden. 1990. A comparison of phy-

- toplankton assemblages and environmental relationships in three estuarine rivers of the lower Chesapeake bay. *Estuaries* **13**: 287-300.
- McLusky, D.S. and M. Elliott. 2004. The estuarine ecosystem ecology, threats, and management. Oxford University Press.
- Mostajir, B., J.R. Dolan and F. Rassoulzadegan. 1995. Seasonal variations of pico- and nano-detrital particles (DAPI yellow particles, DYP) in the Ligurian Sea (NW Mediterranean). *Aquatic Microbial Ecology* **9**: 267-277.
- Naganuma, T. and S. Miura. 1997. Abundance, production and viability of bacterioplankton in the Seto Island Sea, Japan. *Journal of Oceanography* **53**: 435-442.
- Park, J.S. and B.C. Cho. 2002. Active heterotrophic nanoflagellates in the hypoxic water-column of the eutrophic Masan Bay, Korea. *Marine Ecology Progress Series* **230**: 35-45.
- Pomeroy, L.R. and D. Deibel. 1986. Temperature regulation of bacterial activity during the spring bloom in Newfoundland coastal waters. *Science* **233**: 359-361.
- Poter, K.G. and Y.S. Feig. 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnology and Oceanography* **25**: 943-948.
- Sherr, B.F. and E.B. Sherr. 1988. Role of microbes in pelagic food webs: a revised concept. *Limnology and Oceanography* **33**: 1225-1227.
- Suzuki, T. and A. Taniguchi. 1998. Standing crops and vertical distribution of four groups of marine planktonic ciliates in relation to phytoplankton chlorophyll *a*. *Marine Biology* **132**: 375-382.
- Weisse, T. 1991. The annual cycle of heterotrophic freshwater nanoflagellates: role of bottom-up versus top-down control. *Journal of Plankton Research* **13**: 167-185.
- Yih, W.H., H.S. Kim, H.J. Jeong, G.M. Myung and Y.G. Kim. 2004. Ingestion of cryptophyte cells by the marine photosynthetic ciliate *Mesodinium rubrum*. *Aquatic Microbial Ecology* **36**: 165-170.

(Manuscript received 12 January 2010,
Revision accepted 19 February 2010)