

〈Original article〉

경기만에서 박테리아와 종속영양편모류의 계절변화에 미치는 환경요인 분석

백승호 · 유카이¹ · 한명수^{2,*}

한국해양과학기술원 남해연구소, ¹중국해양대학교 수산학부,

²한양대학교 생명과학과

Analysis of Environmental Factors Related to Seasonal Variation of Bacteria and Heterotrophic Nanoflagellate in Kyeonggi Bay, Korea

Seung Ho Baek, Kai You¹ and Myung-Soo Han^{2,*}

*Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST) /South Sea Institute,
Geoje 53201, Republic of Korea*

¹*Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao, China*

²*Department of Life Science, Hanyang University, 17 Haengdang, Seongdong,
Seoul 04763, Republic of Korea*

Abstract - From June 2007 to May 2008, seasonal variations of bacterial abundance and heterotrophic nanoflagellate (HNF), together with environmental factors, were investigated at weekly and monthly intervals in Kyeonggi Bay. During the study period, the water temperature and salinity varied from 1.9°C~29.0°C and 31~35.1 psu, respectively. The concentration of ammonia, nitrate + nitrite, phosphate, and silicate ranged from 0.01 to 3.22 μM, 2.03 to 15.34 μM, 0.06 to 1.82 μM, and 0.03 to 18.3 μM, respectively. The annual average concentration of Chl. *a* varied from 0.86 μg L⁻¹ to 37.70 μg L⁻¹; the concentration was twice as much at the surface than at the deeper layers. The abundance of bacteria and HNF ranged from 0.29 × 10⁶ to 7.62 × 10⁶ cells mL⁻¹ and 1.00 × 10² to 1.26 × 10³ cells mL⁻¹, respectively. In particular, there were significant correlations between bacteria and HNF abundance ($p < 0.05$), and then the high abundance of HNF was frequently observed with an increase of bacterial abundance in summer ($p < 0.001$). Our results therefore indicate that bacterial abundance in the bay was mainly controlled by resources supplied as organic and inorganic substances from Lake Shihwa due to the daily water exchange after dike construction. Also, the bacterial abundance was significantly controlled by HNF grazing pressure (top-down) in the warm seasons, i.e. excluding winter, in the Kyeonggi Bay.

Key words : eutrophic water, microbial community, bacteria, HNF, Kyeonggi Bay

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

서론

미소생물환(Microbial loop)이라는 신개념의 수계 내 먹이망구조는 용존유기물을 종속영양박테리아가 이용하고, 또 그 박테리아를 종속영양편모류(HNF; Heterotrophic Nano Flagellates)가 섭식하며, 그것이 다시 섬모충류에 의해 포식되는 새로운 에너지 흐름의 계(system)를 총칭하며, 이들 구성원은 수서생태계에서 중요한 기능을 담당한다(Azam *et al.* 1983). 그 구성요소 중 종속영양박테리아는 해양환경에서 유기물의 분해, 재생산, 영양염 흡수 등을 통하여 해양의 생지화학적 순환에 영향을 미치며(Simon *et al.* 1992), 종속영양편모류는 유기물의 공급과 박테리아의 섭식으로 박테리아의 생물량과 생산력을 조절하는 중요한 요소로 알려져 있다(Sherr and Sherr 1988). 특히 부영양화 수계에서는 빈영양 수계보다 박테리아의 생물량과 생산량이 상대적으로 높고, 이는 플랑크톤성 먹이망에 지대한 영향을 미치며, 상위생물의 생산성에도 영향을 줄 수 있다(Sherr and Sherr 1988; Fukami *et al.* 1999).

우리나라에서는 Microbial loop와 관련된 용존유기물, 박테리아, 종속영양편모류, 섬모충의 에너지흐름을 해석하려는 연구가 진행되어 왔다. 박테리아를 포함한 종속영양미소편모류에 관한 연구가 경기만(Yang *et al.* 2003), 마산만(Park and Cho 2002; Lee *et al.* 2007), 동해(Cho *et al.* 2000)를 중심으로 해수유역과, 한강수계의 팔당호, 경안천(Lee and Han 2004; Son *et al.* 2006)을 중심으로 담수유역의 조사가 진행되었다. 또한 담수와 해수가 서로 교차하는 기수유역의 미세 먹이망에 대해서도 일부 연구자에 의하여 부분적으로 진행되어 왔다(Baek *et al.* 2010). 하지만 연안 생태계는 수온, 염분, 조석, 조류 등의 복잡한 환경에 노출되어 있고, 이러한 환경에 서식하는 박테리아, 종속영양편모류와 같은 미소생물 그룹의 계절적 영향을 미치는 요인이 다양하게 존재하기 때문에 어떤 특정해역에서 조사한 것으로 이들 미소생물그룹에 대하여 충분히 이해하였다고 판단하기는 어렵다.

경기만은 반폐쇄성 해역으로 약 8 m의 평균대조차와 약 3.5 m의 평균소조차를 가지고 있다. 이러한 대소조차의 특성으로 인하여 점토질/사질 퇴적물이 혼재된 조간대가 광범위하게 발달되어 있으며, 한강으로부터 유입되는 담수의 영향과 시화호 주변수역에서 유입되는 극도로 부영양화된 수계가 공존하는 것과 함께 주기적인 조석의 형성과 강한 유속으로 인해 수역이 극히 불안정한 부영양화된 수역이라고 할 수 있다(Kim *et al.* 2007). 이와 같은 해역에서 박테리아와 종속영양편모류에 관한 연구로는 Yang *et al.*(2003)이 유일하고 그들 연구 또한 시화호방조제 건설 전 1997년에 수행되어, 시화호의 방류 등과 같은 해양환경요인이 변화된 시점에서

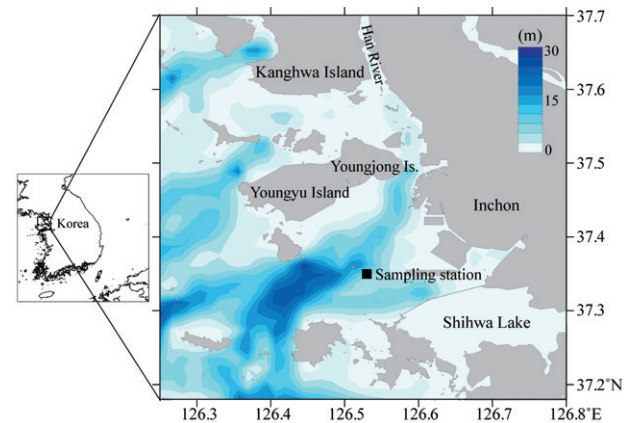


Fig. 1. Map of sampling station in Kyeonggi Bay, Korea.

미소생물환 관여하는 미생물군집구조의 계절적 특성이 어떠한 양상을 나타나는지 비교분석하는 것도 중요하다고 하겠다. 따라서 본 연구는 경기만에서 박테리아와 종속영양편모류의 계절적 변동 양상을 조사하여 그들 생물량에 영향을 미치는 계절적 특성에 관하여 논의하고자 하였다.

재료 및 방법

조사수역은 경기만의 인천연안 수괴와 시화호 수괴, 경기만 바깥수괴가 만나는 팔미도 부근 수역에서 2007년 6월부터 2008년 5월까지 조사를 계절적 조사를 수행하였다(Fig. 1; 37°21'01"N, 126°31'38"E). 특히 여름철 미소생물 군집조성의 특성을 상세히 파악하기 위해서 2007년 6월 말부터 9월 중순까지는 주간조사를 수행하였다. 조사는 표층, 2 m, 4 m, 8 m, 12 m층에서 조사하였고, 표층수는 버킷(10 L)으로 2 m층부터는 니스킨 채수기(5 L: General Oceanics, USA)를 이용하였다. 수온, 염분, 전기전도도, 용존산소는 현장에서 호리마(Water checker U-10, HORIBA, Japan)를 이용하여 측정하였다. 영양염류와 Chl. *a*량을 측정하기 위해서 각 수심별 채수한 현장수(5 L)를 채수병에 넣은 후 얼음을 채운 아이스박스에 넣어 실험실로 운반하였다. 현장에서 박테리아와 종속영양편모류의 생물량조사는 채수한 시료를 50 mL의 코닝튜브에 넣고 바로 글루타르 알데하이드로 고정(최종농도 2%)하여 실험실로 운반하였다. 실험실에 운반한 시료는 즉시, GF/F필터로 일정량을 여과하였다. 여과한 필터는 Chl. *a*를 측정하기 위해서 90% 아세톤에 추출하였고, 여과된 해수는 영양염류를 측정하기 위해서 냉동(-60°C)보관하였다.

영양염류 중 암모니아성 질소(NH₄-N)는 암모니아가 차염소산나트륨(sodium hypochlorite) 공존하에서 페놀(phen-

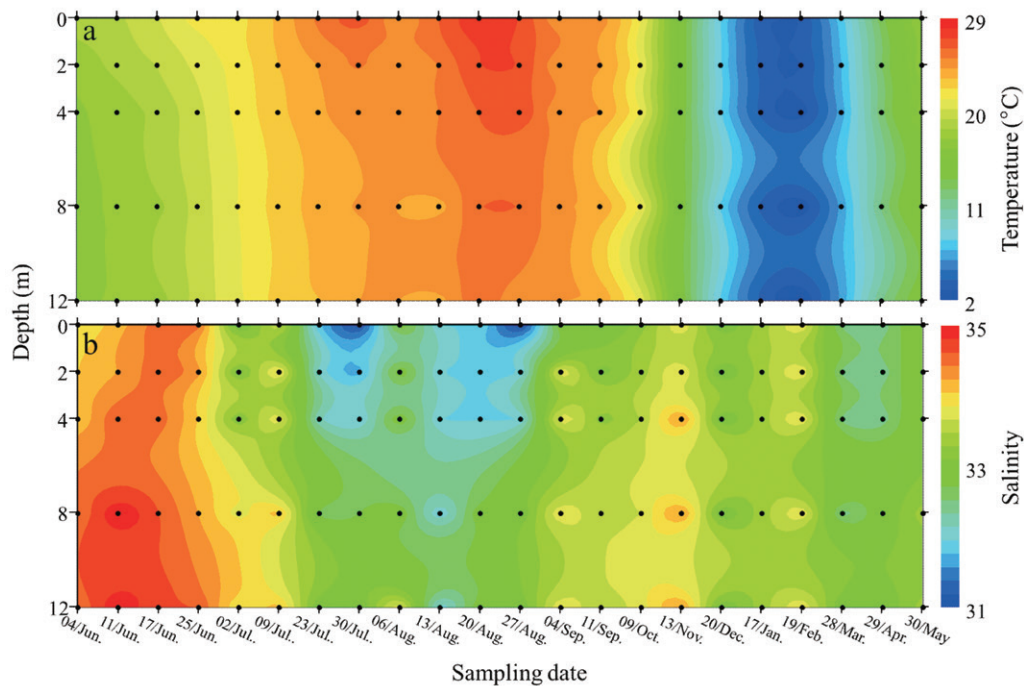


Fig. 2. Seasonal changes in water temperature (a) and salinity (b) in Kyeonggi Bay, Korea.

nol)과 반응하여 생기는 블루 흡광도를 측정하여 정량하는 인도페놀법 (penenate method)을 이용하였고, 아질산과 질산($\text{NO}_2 + \text{NO}_3\text{-N}$)성 질소는 하이드라진 환원 방법 (Hydrazine Reduction method)으로 측정하였다 (Kamphake *et al.* 1967). 인산염 ($\text{PO}_4\text{-P}$)은 인산이온이 몰리브덴 산 (molibdate solution)과 반응하여 생기는 황색의 몰리브덴 산 착제를 아스코르빅 산 (ascorbic acid)으로 환원시켜 그 흡광도를 측정하여 정량하는 아스코르빅 방법을 이용하여 분석하였다. Chl. *a*량은 냉암소에서 24시간 추출 후 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 membrane filter (Millipore)를 염색한 후 고정된 시료를 잘 혼합 희석하여 일정량 (0.5~2 mL)을 취해 여과 후 DAPI (4',6-diamidino-2-phenylindole)로 5분간 염색하여 형광현미경 (Axioplane, Zeiss, Germany)으로 1000배 하에서 검경 및 계수하였다. 각 샘플은 임의의 field에서 총 세포수가 300개 이상 계수하여 그에 해당하는 field 수가 전체 field 수에 해당하는 부분을 환산하여 총 박테리아의 생물량을 산출하였다 (Porter and Feig 1980). HNF의 생물량은 수단블랙 (Sudan Black) 용액에 2 μm membrane filter (Millipore)를 염색한 후 고정된 시료를 일정량 (10~30 mL)을 취해 Primulin 염색 후

1000배 하에서 계수하였다 (Caron 1983).

경기만의 수환경요인과 및 미소생물자료에 대한 주성분 분석을 수행하기 전 각 항목의 단위와 값의 차원 (order)이 상이하여 평균과 표준편차를 이용한 표준화를 각각 수행하였다. 주성분 분석 시 요인 수는 하나의 요인이 변수 한 개 이상의 분산을 설명할 수 있는 고유치 (eigenvalue)가 1 이상을 기준으로 결정하고, 각 요인에 해당되는 변수를 설명하는 요인부하량 (loading factor)를 각각 산출하였다. 주성분 분석과 군집 분석을 위한 제반 통계처리는 XLSTAT 2010 (AddinSoftTM) 프로그램을 이용하였다. 아울러, 각 환경요인과 미소생물인자 간의 상관관계를 파악하기 위해서 Pearson's 상관계수를 산출하였다. 각 항목별 통계치의 유의 수준은 $p < 0.05$ 로 구분하였다.

결 과

조사기간 중 수온은 전형적인 온대수역의 계절적 특성이 뚜렷하게 나타났고, 수심별 차이는 크지 않았으나, 하계에는 성층이 형성되는 경향이 강하였다 (Fig. 2a). 모든 수심의 계절 평균수온은 하계 (6월 중순~8월)가 $24.3 \pm 2.7^\circ\text{C}$ 로 가장 높았고, 다음으로 추계 (9~11월; $21.8 \pm 4.2^\circ\text{C}$), 춘계 (4~6월초; $16.7 \pm 2.6^\circ\text{C}$), 동계 (12~3월; $5.2 \pm 2.3^\circ\text{C}$) 순으로 나타

Table 1. Annual average values of environmental factors and main microbial-loop components in Kyeonggi Bay, Korea (n = 110)

Parameter	Seasons (mean \pm SD)			
	Spring (n = 10)	Summer (n = 60)	Fall (n = 20)	Winter (n = 20)
Temperature ($^{\circ}$ C)	16.68 \pm 2.58	24.27 \pm 2.66	21.81 \pm 4.19	5.20 \pm 2.29
Salinity (psu)	33.78 \pm 0.88	33.11 \pm 1.10	33.76 \pm 0.48	33.28 \pm 0.55
Silicate (μ M)	8.38 \pm 5.64	8.57 \pm 5.17	13.64 \pm 1.97	6.94 \pm 4.72
Amononia (μ M)	1.06 \pm 0.57	1.35 \pm 0.77	0.77 \pm 1.37	0.08 \pm 0.22
Nitrate + Nitrite (μ M)	2.43 \pm 0.35	4.02 \pm 1.67	7.73 \pm 4.53	2.26 \pm 0.12
DIN (μ M)	3.48 \pm 0.57	5.37 \pm 1.95	9.10 \pm 3.90	2.34 \pm 0.26
Phosphate (μ M)	0.36 \pm 0.12	0.68 \pm 0.38	1.36 \pm 0.21	0.54 \pm 0.37
Chl. <i>a</i> (μ g L $^{-1}$)	3.59 \pm 2.50	10.30 \pm 8.48	4.94 \pm 2.90	9.00 \pm 2.94
Bacteria ($\times 10^6$ cells mL $^{-1}$)	2.76 \pm 2.05	4.15 \pm 1.75	4.40 \pm 1.86	1.80 \pm 0.56
HNF ($\times 10^2$ cells mL $^{-1}$)	4.58 \pm 1.83	5.21 \pm 2.78	3.05 \pm 1.36	4.21 \pm 2.72

났다 (Table 1). 특히, 동계 2월에는 1.9 $^{\circ}$ C로 연중 최저를 기록하였다. 염분은 연중 31.0~35.2 psu로 변화하였고, 하계에 표층 염분이 상대적으로 낮게 관찰되었다 (Fig. 2b). 모든 수심에서 염분에 대한 계절 평균의 차이는 크지 않았고, 33 psu 전후로 관찰되었다. 계절별 영양염 농도는 각기 다른 양상을 나타내었다 (Fig. 3). 암모니아의 농도는 0.01~3.22 μ M로 변동하였고, 춘계와 하계에 상대적으로 높은 밀도가 관찰되었다. 질산염 + 아질산염의 농도는 2.03~15.34 μ M로 변동하였고, 추계 (7.73 μ M \pm 4.53) > 하계 (4.02 μ M \pm 1.67) > 춘계 (2.43 μ M \pm 0.35) > 동계 (2.26 μ M \pm 0.12) 순서로 높게 관찰되었다. 인산염의 농도는 0.06~1.82 μ M로 변동하였고, 추계 (1.36 μ M \pm 0.21)에 높게 나타났고, 다른 계절의 평균은 0.5 μ M 전후로 계절적으로 큰 차이는 보이지 않았다. 규산염은 0.03~18.26 μ M으로 변화하였고, 질산염 + 아질산염의 변동과 유사하게 추계 (13.64 μ M \pm 1.97) > 하계 (8.57 μ M \pm 5.17) > 춘계 (8.38 μ M \pm 5.64) > 동계 (6.94 μ M \pm 4.72) 순으로 높게 나타나는 특색을 보였다 (Table 1).

Chl. *a* 농도는 최저 0.86 mg m $^{-3}$ 로 최고 37.70 μ g L $^{-1}$ 로 각각 관찰되었다 (Fig. 4). 각 수심별 Chl. *a* 농도의 연평균은 표층에서 10.35 \pm 8.54 μ g L $^{-1}$ 로 가장 높았고, 2 m (8.72 \pm 6.47 μ g L $^{-1}$), 4 m (8.63 \pm 7.68 μ g L $^{-1}$), 8 m (6.16 \pm 4.83 μ g L $^{-1}$), 12 m (5.79 \pm 4.31 μ g L $^{-1}$) 순서로 나타났다. 계절별 Chl. *a* 량의 변화는 하계 (10.30 \pm 8.48 μ g L $^{-1}$) > 동계 (9.00 \pm 2.94 μ g L $^{-1}$) > 추계 (4.94 \pm 2.90 μ g L $^{-1}$) > 춘계 (3.59 \pm 2.05 μ g L $^{-1}$)의 순서로 높게 나타났다.

조사기간 동안 경기만에서 박테리아의 생물량은 동계인 2월 (1.80 $\times 10^6$ cells mL $^{-1}$)에 비교적 낮게 관찰되었고, 아울러 2008년 5월 전수층 (<0.4 $\times 10^6$ cells mL $^{-1}$)에서 최저치가 관찰되었다. 특히, 7월에서 9월 사이에 표층과 2 m층, 4 m층에서 극히 높은 값을 보였다 (Fig. 5a). 각 수심별 연평균은 표층, 2 m, 4 m, 8 m, 12 m에서 각각 4.23, 3.82, 3.77, 2.97, 2.78 $\times 10^6$ cells mL $^{-1}$ 로 관찰되었다. 전반적으로 수온이 상승하는

하계에 박테리아의 생물량이 비교적 높게 관찰되었고, 춘계와 추계는 연평균에 가까운 세포수를 유지하였다. 특히 하계 표층 주변에서 현저하게 높았으며 수심의 증가와 더불어 감소하는 경향을 관찰하였다.

중속영양편모류의 연평균은 4.52 $\times 10^2$ cells mL $^{-1}$ 이며, 최저치는 1.00 $\times 10^2$ cells mL $^{-1}$ 로, 최고치는 2 m층에서 1.25 $\times 10^3$ cells mL $^{-1}$ 로 각각 관찰되었다. 계절별 중속영양편모류의 개체수 밀도는 하계가 가장 높았고, 다음으로 춘계, 동계, 추계 순으로 나타났다 (Fig. 5b). 수심별로는 표층과 2 m층에서 연평균 5.00 $\times 10^2$ cells mL $^{-1}$ 전후로 가장 높았고, 다음으로 중층 (4 m~8 m)과 저층 (12 m)의 순서로 나타났다.

Pearson's의 상관계수는 박테리아와 수온 ($r=0.58$, $p<0.05$), 박테리아와 규산염 ($r=0.41$, $p<0.05$), 박테리아와 암모니아 ($r=0.35$, $p<0.05$), 박테리아와 DIN ($r=0.23$, $p<0.05$), 박테리아와 인산염 ($r=0.33$, $p<0.05$)과는 양의 관계를 보였다. 반면, 박테리아와 염분과는 음 ($r=-0.32$, $p<0.05$)의 상관성이 관찰되었고, 박테리아와 Chl. *a*과는 유의한 상관관계가 나타나지 않았다 (Table 2).

고 찰

조사기간 동안 경기만에서 박테리아의 생물량은 0.29 $\times 10^6$ cells mL $^{-1}$ ~7.62 $\times 10^6$ cells mL $^{-1}$ 로 변동하였다. Baek *et al.* (2010)에 의한 본 조사지역과 인접한 시화호 내측의 보고에 의하면, 박테리아의 생물량은 4.5~7.4 $\times 10^6$ cells mL $^{-1}$ 로 본 조사 수역보다 최저값의 차이는 명확하게 다르게 나타났으나, 최고치는 유사하였다. 우리나라해역에서 연간 박테리아 개체수 밀도의 변화는, 빈영양수역인 동해 0.2~1.8 $\times 10^6$ cells mL $^{-1}$ (Cho *et al.* 2000), 중영양수역인 경기만 0.2~5.4 $\times 10^6$ cells mL $^{-1}$ (Yang *et al.* 2003), 부영양수역인 마산만 0.5~4.5 $\times 10^6$ cells mL $^{-1}$ (Park and Cho 2002; Lee *et al.* 2007)로

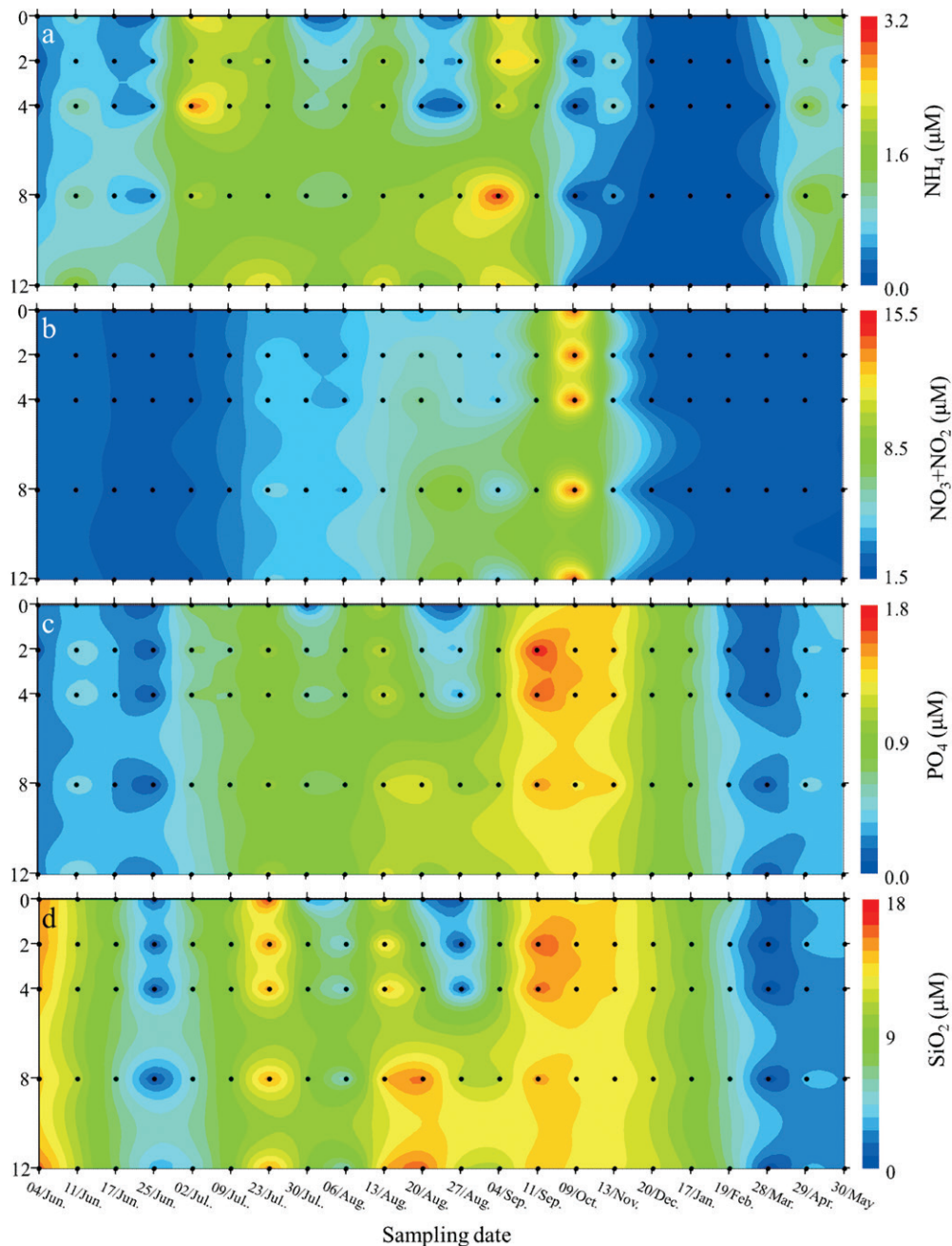


Fig. 3. Seasonal changes in ammonium (a), nitrate + nitrite (b), phosphate (c) and silicate (d) in Kyeonggi Bay, Korea.

보고되고 있다. 특히, Choi *et al.* (1997)이 시화호에서 보고한 $1.6 \sim 19.5 \times 10^6$ cells mL⁻¹와 Yang *et al.* (2003)이 보고한 경기만 수역의 계절적 변화와 본 조사결과와 유사하였으나, 최고치는 본 조사결과가 1.5~2배 정도 높게 나타났다. 이와 같은 이유는 부영양화된 시화호의 개방으로 경기만 내만에 일정량 영향을 미친 결과로 판단된다. 즉 시화호 외측해역은 조석간만의 차이로 복잡한 수문학적 특성을 가지고 있다 (Kim *et al.* 2007). 특히 시화호방조제 건설 후 조석간만의

차이를 이용하여 하루에 한 두차례의 배수갑문의 개방은 시화호 내측의 부영양화된 영양염뿐만 아니라 과다의 유기물이 시화호외측해역으로 유출되어, 경기만 주변해역에 지대하게 영향을 미칠 것으로 사료된다. 시화호수역은 식물플랑크톤의 대증식을 유발하기에 충분한 무기질 영양염이 반월공단과 시화공단으로부터 계속적으로 공급되기 때문에 만성화된 부영양화된 해역으로 유명하며, 이와 같은 부영양화 및 하계의 빈산소수괴의 완화시키기 위한 일환으로 배수갑문의

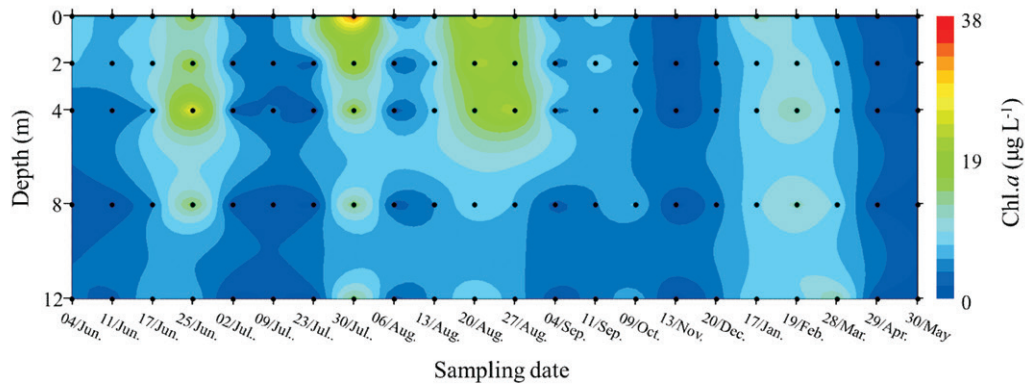


Fig. 4. Seasonal changes in Chl. *a* concentrations in Kyeonggi Bay, Korea.

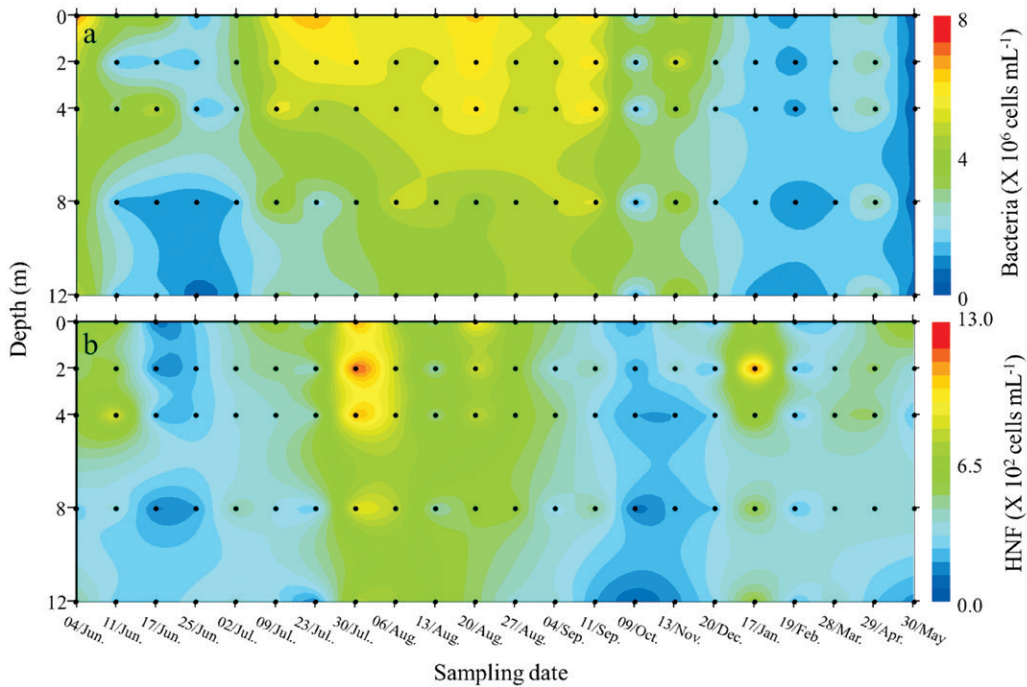


Fig. 5. Seasonal changes in bacterial abundances (a) and heterotrophic nanoflagellate (b) in Kyeonggi Bay, Korea.

개방을 정책적으로 시행하고 있는 실정이다. 결과적으로 본 조사수역에서 박테리아의 개체수 밀도가 우리나라의 다른 해역보다 높게 나타난 것 또한 시화호유역에서 생성된 유기 및 무기물이 배수갑문의 개방으로 인하여 시화호 외측의 경기만 내만 연안 유역에 지대하게 영향을 미칠 수 있는 독특한 환경이라고 할 수 있겠다.

일반적으로 박테리아의 시공간적 분포 양상은 용존유기물과 영양염 농도에 의한 bottom-up control과 상위 포식자에 의한 top-down control에 의해서 결정된다(Weisse 1991; Jardillier *et al.* 2004). 박테리아의 성장은 식물플랑크톤 대증식 후 분해되는 과정에서 생성되는 용존성 유기물질을 먹이

원으로 활용하기 때문에 일반적으로 박테리아와 식물플랑크톤의 현존량(Chl. *a*) 사이에는 일정한 상관성을 보고하고 있다(Bird and Kalff 1984, 1986; Naganuma and Miura 1997; Kormas *et al.* 1998; Lee *et al.* 2001). Yang *et al.* (2003)에 의하면, 박테리아의 생물량은 박테리아의 생산성뿐만 아니라, Chl. *a* 농도와 수온과도 유의한 관계를 보고하였다. 박테리아와 Chl. *a*의 상관관계는 박테리아 생물량 유지를 위한 유기물의 중요한 부분이 식물플랑크톤에 의하여 공급됨을 의미한다(Simon *et al.* 1992; Lee *et al.* 2001). 본 연구에서는 계절적인 박테리아 개체수와 Chl. *a*과는 유의한 관계를 확인할 수 없었으나, Chl. *a* 농도가 높은 하계에 전반적으로 박테리

Table 2. Correlation between environmental parameters and microbial communities in Kyeonggi Bay, Korea

(n = 110)

Variables	Tem.	Salinity	SiO ₂	NH ₄	NO ₂ + NO ₃	DIN	PO ₄	Chl. <i>a</i>	Bacteria
Salinity	-0.227								
SiO ₂	0.242	0.091							
NH ₄	0.557	-0.107	0.271						
NO ₂ + NO ₃	0.409	-0.142	0.433	0.016					
DIN	0.550	-0.166	0.491	0.303	0.958				
PO ₄	0.287	-0.122	0.732	0.380	0.608	0.689			
Chl. <i>a</i>	0.163	-0.348	-0.292	-0.353	0.038	-0.065	-0.318		
Bacteria	0.581	-0.318	0.410	0.350	0.138	0.232	0.328	0.139	
HNF	0.217	-0.436	-0.113	0.031	-0.130	-0.115	-0.087	0.408	0.362

Values in bold are different $p = 0.05$.**Table 3.** Loading factors for seasonal environmental variables and microbial community on the first three varimax rotated principal components for all water columns in Kyeonggi Bay, Korea

(Loading >0.5 are bolded)

Variable	Components		
	PC1	PC2	PC3
Temperature	0.689	0.399	0.168
Salinity	-0.237	-0.675	0.130
SiO ₂	0.714	-0.303	0.117
NH ₄	0.536	0.015	0.682
NO ₂ + NO ₃	0.758	-0.124	-0.610
DIN	0.876	-0.114	-0.385
PO ₄	0.832	-0.261	-0.009
Chl. <i>a</i>	-0.151	0.722	-0.473
Bacteria	0.564	0.491	0.353
HNF	0.022	0.790	0.116
Eigenvalue	3.703	2.190	1.405
Variability (%)	37.026	21.901	14.049
Cumulative (%)	37.026	58.928	72.977

아의 개체수 밀도도 높게 나타나는 경향은 관찰할 수 있었다. 반면, 동계(1~3월)의 저수온기에도 식물플랑크톤의 생물량(Chl. *a*)은 상대적으로 높게 나타났음에도 불구하고 박테리아의 생물량은 그다지 높지 않았다. 따라서 동계에는 수층의 혼합이 활발하게 나타나 박테리아의 생물량 또한 모든 조사 수심에서 낮게 관찰되는 양상을 보였다. 결과적으로, 박테리아의 생물량은 하계에 일정하게 높게 나타났고, 이는 식물플랑크톤의 증가와 일정한 연관성이 있는 것으로 판단되었다. 즉 수온은 연안해역에서 박테리아의 생물량과 생산력의 계절적 변화를 일으키는 중요한 요인으로 판단된다. 박테리아와 모든 영양염농도와의 유의한 양의 상관성이 관찰된 것은 박테리아는 영양염의 농도가 높았을 때 또는 식물플랑크톤의 현저한 증식 후에 개체수가 높게 유지될 수 있다는 것을 의미한다. 앞서 언급한 것과 같이 시화호의 배수갑문의 개방으로 인하여 시화호 내측의 높은 영양염 농도가

외측으로 유입되는 것은 경기만 박테리아 증식에 중요한 역할을 할 수 있는 가능성을 시사하였다. 아울러, 시화호의 내측(수괴의 혼합이 극히 제한됨)에서 현저하게 증식한 식물플랑크톤이 경기만으로 유입되는 과정에서 희석되었기 때문에 본 조사 정점에서의 박테리아와 Chl. *a*와의 유의한 상관관계가 형성되지 않았지만, 시화호로부터 공급된 높은 영양염(유·무기물)은 시화호 외측의 경기만 내만의 박테리아 증식의 중요한 요인으로 파악되었다. 결과적으로 경기만에서 박테리아의 생물량을 조절하는 데 있어 조사정점에서의 식물플랑크톤 증식보다는 다른 물리적인 환경요인이 더욱 강하게 작용함을 알 수 있다는 것을 시사할 수 있었고, 하계의 수온 증가와 더불어 성층의 형성은 박테리아의 증식에 지대한 영향을 미쳤을 것으로 사료되었다.

본 조사에서 종속영양편모류는 1.00×10^2 cells mL⁻¹ ~ 1.26×10^3 cells mL⁻¹로 변동하였고, 계절적으로는 하계 박테리아의 생물량이 현저하게 높게 관찰되었을 때 종속영양편모류 또한 높게 나타났다. 종속영양미소편모류는 미소생물의 먹이 흐름, 영양염의 재순환과 탄소원의 전달자로서 중요한 역할을 담당한다(Sherr and Sherr 1988; Fukami *et al.* 1999; Baek *et al.* 2010). Fenchel(1982), Fenchel and Jonsson (1988)와 Yang *et al.*(200)의 보고에 의하면, 종속영양편모류는 박테리아나 남조류같이 사이즈가 작은 생물의 소비자로서 뿐 아니라 부유성 섬모충류의 먹이원으로 이용되어 물질순환의 연결고리로서 중요한 위치를 차지한다(Sherr and Sherr 1988). 특히 종속영양편모류의 생물분포는 박테리아 생물량과 높은 상관관계를 가지며, 그들의 계절적 분포 양상에서도 뚜렷하게 차이를 보였다(Davis *et al.* 1985; Mostajir *et al.* 1995). 본 조사에서도 종속영양편모류는 박테리아 생물량($r=0.36, p<0.05$)뿐만 아니라 Chl. *a*농도($r=0.41, p<0.05$), 수온($r=0.22, p<0.05$), 염분($r=-0.44, p<0.05$)과 각각 유의한 상관관계를 보였다(n=110). 다시 말하면, 종속영양편모류의 계절적 분포는 먹이생물인 박테리아의 개체수의 증가와 더불어 식물플랑크톤의 현존량이 높은 하계 고

수온기에 높게 증식하여 하계에 우점하는 특성을 파악할 수 있었다. 본 연구의 조사 정점과 인접한 인천 연안의 Yang *et al.* (2003)의 보고에 의하면, 종속영양편모류는 박테리아의 생물량이 가장 높았던 직후 또는 박테리아의 생물량이 높아던 시기에 높게 분포하는 특성을 보였다. 그들의 연구에서도 월 간격으로 조사한 결과를 바탕으로 논의 되었기에 먹이생물과의 관계를 직접적으로 연결시키기에는 많은 한계점을 지적하였다. 본 연구에서는 하계 6월에서 9월 사이에는 주간격으로 조사하여, 종속영양편모류의 먹이원이 박테리아의 연관성을 보다 자세하게 파악할 수 있었다. 즉 종속영양편모류의 생물량은 박테리아 및 극미소 식물플랑크톤이 현저하게 높은 시기 또는 일주일의 시간차(time lag)를 두고 높게 나타나는 경향을 관찰하였다. Baek *et al.* (2010)의 시화호 내측의 연구에서는 박테리아와 종속영양미소편모류의 상관성을 파악하지 못하였으나, 본 연구 정점인 경기만 내만에서는 종속영양편모류의 생물량은 먹이 생물인 박테리아 및 극미소 생물의 출현과 일정한 높은 연관성이 있다는 것을 파악할 수 있었다(전계절: $r=0.36$, $p<0.05$ ($n=110$); 하계(6~9월): $r=0.40$, $p<0.001$ ($n=70$)). 결과적으로 경기만에서 종속영양편모류의 증식은 하계를 중심으로 먹이원인 박테리아를 현저하게 포식하여 극히 높은 개체수 밀도를 유지할 수 있는 연안 내만의 환경이라는 것을 알 수 있었다.

박테리아와 종속영양편모류의 출현과 수문학적 환경요인과의 관계를 파악하기 위해서 주성분 분석을 수행하였다 (Table 3). 제1주성분에서는 수온, 규산염, 암모니아, DIN, 인산염 등이 37% 정도로 유의한 값이 나타난 것으로 보아, 하계 고수온기에 영양염 증가와 더불어 박테리아의 증식에 긍정적으로 영향을 미친 것으로 판단된다. 제2성분에서 종속영양편모류는 염분(음의 관계)과 Chl. *a* 등이 21%로, 누적 58% 정도의 값으로 나타난 것은 하계 강우기에 시화호로부터 개방되는 배수갑문의 영향으로 저염분수위가 일정량 경기만 내만에 기여한 것으로 판단되었다. 결과적으로 주성분 분석에서 나타난 것과 같이 탄소원 및 영양염의 주요 공급원으로는 시화호로 판단되며, 갑문의 개방으로 저염분 수위와 함께 공급된 높은 농도의 영양염은 박테리아 증식의 촉진제 역할을 할 것으로 사료되었다. 아울러, 하계를 중심으로 높은 밀도로 증가한 극미소 식물플랑크톤과 박테리아는 종속영양편모류의 먹이원으로 중요한 역할을 하고 있었다.

적 요

수환경요인이 미소생물 그룹 박테리아와 종속영양편모류의 계절적 분포에 미치는 영향을 파악하기 위해서 2007

년 6월에서 2008년 5월 사이에 경기만에서 그들의 동태 및 환경요인을 조사하였다. 조사기간 동안 수온과 염분은 $1.9^{\circ}\text{C}\sim 29.0^{\circ}\text{C}$ 와 $31\sim 35.1$ psu로 변화하였으며, 하계에 현저한 수온 증가와 함께 표층 염분이 상대적으로 낮게 관찰되었다. 영양염 중 암모니아의 농도는 $0.01\sim 3.22\ \mu\text{M}$ 로, 질산염 + 아질산염의 농도는 $2.03\sim 15.34\ \mu\text{M}$ 로, 인산염의 농도는 $0.06\sim 1.82\ \mu\text{M}$ 로, 규산염은 $0.03\sim 18.3\ \mu\text{M}$ 로 각각 변동하였다. Chl. *a* 농도는 $0.86\ \mu\text{g L}^{-1}\sim 37.70\ \mu\text{g L}^{-1}$ 로 관찰되었으며, 각 수심별 Chl. *a* 농도의 연평균은 표층에서 $10.35\pm 8.54\ \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높았고, 수심증가와 더불어 감소하였다. 박테리아와 종속영양미소편모류는 $0.29\times 10^6\ \text{cells mL}^{-1}\sim 7.62\times 10^6\ \text{cells mL}^{-1}$ 와 $1.00\times 10^2\ \text{cells mL}^{-1}\sim 1.26\times 10^3\ \text{cells mL}^{-1}$ 로 변동하였고, 계절적으로는 하계 박테리아의 생물량이 현저하게 높게 관찰되었을 때 종속영양편모류 또한 높게 나타났다. 결과적으로, 시화호에서 단 주기로 개방되는 배수갑문의 영향으로 경기만 내만일대에 일정한 높은 유·무기물이 공급되면, 이들 탄소원으로 박테리아의 현저한 증식이 하계를 중심으로 일어나며, 이는 미소생물고리로 연결되는 종속영양편모류의 증식에 중요한 역할을 할 것이다.

사 사

본 연구는 한국해양과학기술원 “주요사업 (PE99532)”으로 수행되었으며, 해양수산부의 재원으로 해양생명공학기술개발사업 연구개발비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Azam F, T Fenchel, JG Field, JS Gray, LA Meyer-Reil and F Thingstad. 1983. The ecological role of water column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 126:97-102.
- Baek SH, K You, BS Park and MS Han. 2010. The Seasonal variation of microbial community in the eutrophic brackish water of Lake Shihwa. *Korean J. Limnol.* 43:55-68.
- Bird DF and J Kalff. 1984. Empirical relationships between bacterial abundance and chlorophyll concentration in fresh and marine water. *Canadian J. Fisher. Aquat. Sci.* 41:1015-1023.
- Bird DF and J Kalff. 1986. Bacterial grazing by planktonic algae. *Science* 231:493-495.
- Caron DA. 1983. Technique for enumeration of heterotrophic and phototrophic nanoplankton, using epifluorescent microscopy, and comparison with other procedures. *Appl. Environ. Microb.* 46:491-498.

- Cho BC, SC Na and DH Choi. 2000. Active ingestion of fluorescently labeled bacteria by mesopelagic heterotrophic nanoflagellates in the East sea, Korea. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 206:23-32.
- Choi DH, SW Kang, KD Song, SH Huh and BC Cho. 1997. Distribution and growth of bacteria in the hypertrophic Lake Shiwha. *The Sea* 2:92-100.
- Davis PG, DA Caron, PW Johnson and JMcN Sieburth. 1985. Phototrophic and apochlorotic components of picoplankton and nanoplankton in the North Atlantic: geographic, vertical, seasonal and diel distributions. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 21:15-26.
- Fenchel T. 1982. Ecology of heterotrophic microflagellates? Quantitative occurrence and importance as bacterial consumers. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 9:35-42.
- Fenchel T and PR Jonsson. 1988. The functional biology of *Strombidium sulcatum*, a marine oligotrich ciliate (Ciliophora, Oligotrichina). *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 48:1-15.
- Fukami K, A Watanabe, S Fujita, K Yamaoka and T Nishijima. 1999. Predation on naked protozoan microzooplankton by fish larvae. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 185:285-291.
- 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. *Aquat. Microb. Ecol.* 35:259-273.
- Jeffrey SW and GF 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 Res.* 1:205-216.
- Kim CS, HS Lim, JA Kim and SJ Kim. 2009. Residual flow and its implication on macro-tidal flats in Kyunggi Bay Estuary of Korea. *J. Coast. Res.* SI 56:976-980.
- Kim YO, EJ Yang, JH Kang, KS Shin, M Chang and CS Myung. 2007. Effects of an artificial breakwater on the distributions of planktonic microbial communities. *Ocean Sci. J.* 42:9-17.
- 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). *Aquat. Microb. Ecol.* 15:255-264.
- Lee CW, I Kudo, M Yanada and Y Maita. 2001. Bacterial abundance and production and heterotrophic nanoflagellate abundance in subarctic coastal waters (Western North Pacific Ocean). *Aquat. Microb. Ecol.* 23:263-271.
- Lee WJ, KS Shin and JD Lee. 2007. Studies on marine heterotrophic protists in Masan Bay, Korea. *Ocean Polar Res.* 29:401-410.
- Lee WS and MS Han. 2004. Community structure of plankton in eutrophic water systems with different residence time. *Korean J. Limnol.* 37:263-271.
- Mostajir B, JR Dolan and F Rassoulzadegan. 1995. Seasonal variations of pico- and nano-detrital particles (DAPI yellow particles, DYP) in the Ligurian Sea (NW Mediterranean). *Aquat. Microb. Ecol.* 9:267-277.
- Naganuma T and S Miura. 1997. Abundance, production and viability of bacterioplankton in the Seto Island Sea, Japan. *J. Oceanogr.* 53:435-442.
- Park JS and BC Cho. 2002. Active heterotrophic nanoflagellates in the hypoxic water-column of the eutrophic Masan Bay, Korea. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 230:35-45.
- Poter KG and YS Feig. 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnol. Oceanogr.* 25:943-948.
- Sherr BF and EB Sherr. 1988. Role of microbes in pelagic food webs: a revised concept. *Limnol. Oceanogr.* 33:1225-1227.
- Simon M, BC Cho and F Azam. 1992. Significance of bacterial biomass in lakes and the ocean: comparison to phytoplankton biomass and biogeochemical implications. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 86:103-110.
- Son JY, SJ Hwang and DS Kong. 2006. Temporal and spatial distribution of biomass and cell size of bacteria and protozoa in Lake Paldang and Kyungan Stream. *Korea J. Limnol.* 39:379-389.
- Weisse T. 1991. The annual cycle of heterotrophic freshwater nanoflagellates: role of bottom-up versus top-down control. *J. Plankton Res.* 13:167-185.
- Yang EJ, JK Choi and JH Hyun. 2003. The study on the seasonal variation of microbial community in Kyeonggi Bay, Korea: I. bacteria and heterotrophic nanoflagellates. *The Sea* 8:44-57.

Received: 22 May 2017

Revised: 13 June 2017

Revision accepted: 13 June 2017