JMLS 한국해양생명과학회지[Journal of Marine Life Science]
December 2019; 4(2): 53-62
http://jmls.or.kr

[보 문]

영산강 하구의 박테리아 분포 및 식물플랑크톤과의 관계

김세희 · 신용식*

목포해양대학교 해양시스템공학과

Bacterial Distribution and Relationship with Phytoplankton in the Youngsan River Estuary

Se Hee Kim, Yong Sik Sin*

Department of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

Corresponding Author
Yong Sik Sin
Department of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea
E-mail : yongsik@mmu.ac.kr

Received : November 23, 2019
Revised : November 24, 2019
Accepted : December 09, 2019

해양 종속영양 박테리아는 수생태계에서 미소생물환의 주요 구성원으로 유기물의 분해 등 생지화학적 순환에서 중요한 역할을 한다. 해양 생태계의 물질 순환과 에너지 흐름을 이해하기 위해서는 박테리아의 변동에 대한 연구 조사가 중요하다. 본 연구는 방조제 건설로 변형된 영산강 하구 해수역을 대상으로 박테리아와 환경인자들의 월 변동 양상을 조사하였고, 박테리아 변동의 주요인자인 식물플랑크톤(chlorophyll-a)과의 상관성을 크기별로 구분하여 파악하고자 하였다. 연구 결과, 영산강 하구의 박테리아는 저층보다 표층에서 높은 개체수를 보였으며, 겨울철보다 여름철에 개체수가 높았다. 그리고 방조제에 가까울수록 개체수가 증가하였으며, 방조제와 가장 인접한 정점에서 2018년 8월, 9월 그리고 2019년 6월에 최대치로 증가하였다. 박테리아의 개체수가 높았던 정점과 시기에 식물플랑크톤의 생체량도 증가하면서 통계분석결과에서도 양의 상관성을 보였고 크기별로도 모두 유사한 상관성을 보였다. 이러한 결과는 식물플랑크톤 기원의 유기물이 박테리아 변동에 영향을 미치고 있고 크기별로 그 영향의 차이가 없음을 제시하고 있다. 또한 수온에 비례하여 증가하는 박테리아의 계절 분포는 박테리아의 성장에 대한 수온의 영향을 보여주는 결과라 볼 수 있다. 그 외에 간헐적인 담수 유입을 통한 영양염 공급과 박테리아의 개체수 변동의 연관성은 관찰되지 않았다. 본 연구에서는 또한 특정시기에 성층이 거의 없는 조건에서 용존산소가 고갈되는 빈산소층이 관찰되었는데 이는 식물플랑크톤 기원 유기물 공급과 박테리아의 분해로 인한 산소 소모의 결과로 추정된다.

Heterotrophic bacteria are a major member of the microbial loop in the marine ecosystem and play an important role in the biogeochemical cycle decomposing organic matter. Therefore study of bacterial variation is important to understand the material cycle and energy flow of marine ecosystems. We investigated the monthly variations of bacteria and environmental factors in the Youngsan River estuary, and the correlation between bacteria and phytoplankton biomass (chlorophyll-a) including size-structure. As a result, bacteria of the Youngsan River estuary were higher in the surface than in the bottom layer, and higher in the summer than in winter. And the closer to the dike, the abundance increased, and it increased to the peaks in August, September, and June 2019 at the station closest to the dike. The chlorophyll-a also increases at the stations and time when the bacterial abundance was high and they correlates positively displaying no difference between size fractions. The results indicate that organic matter derived from phytoplankton has an effect on bacterial variation but no size-dependent effects. In addition, the seasonal pattern of bacteria increasing in proportion to the water temperature suggests the effect of water temperature on the growth of bacteria. No association of bacterial abundance variation with nutrient supply due to freshwater input was observed. In this study, dissolved oxygen was depleted and hypoxia was observed for a short time when a strong stratification was not developed. This may be resulted from the supply of organic matter from phytoplankton and the consumption of oxygen due to bacterial decomposition.

Keywords: Bacteria(박테리아), Youngsan River estuary(영산강 하구), Monthly variation (월 변동), Phytoplankton(식물플랑크톤), Size-structure(크기구조)

서 론

해양 종속영양 박테리아는 미소생물환(Microbial loop)의 주요 구성원으로서(Azam et al., 1983; Sherr and Sherr, 1987; Pomeroy and Wiebe, 1993) 유기물 분해와 영양염 재생산 및 흡수 등을 통해 해양의 생지화학적 순환에 매우 중요한 역할을 담당한다(Cole et al., 1988; Ducklow and Carlson, 1992). 따라서 해양 생태계의 물질 순환과 에너지 흐름을 이해하기 위해서는 박테리아와 같은 이차생산자의 변동에 대한 연구 조사가 중요하다(Sim et al., 2010). 또한, 박테리아는 용존유기물(DOM)을 분해하는 과정에서 산소를 소모하기 때문에 수층 내 저산소 및 무산소 환경 형성에 직접적인 영향을 미칠 수 있다(McDonough et al., 1986; Cole and Pace, 1995; Ochs et al., 1995; Rabalais et al., 2002). 결국 해양생태계를 이해하고 관리하기 위해서는 박테리아의 변동 조사를 포함한 생태 연구가 필요한 상황이다.

미소생물환에서 종속영양 박테리아의 탄소원인 용존유기물의 주요 공급원은 식물플랑크톤으로(Azam et al., 1983) 이들 미생물 간의 상호작용은 수질이나 생태계 건강성에 영향을 미칠 수 있다. 특히, 육지로부터 공급되는 영양염으로 인해 매우 생산적인 시스템으로 보고되어 있는(Ryther, 1969) 하구에서는 부영양화 여건에서 식물플랑크톤 대증식이 발생할 수 있기 때문에 이들의 상호작용에 대한 이해가 수질 및 생태계 관리 측면에서 필수적이다. 하구는 담수와 해수가 혼합되는 전이수역으로 조석, 파랑, 담수 유입 등과 같은 수리역학적 요인의 영향을 받아 물리·화학적, 생물학적으로 복잡한 환경이다. 따라서 하구의 박테리아 분포와 식물플랑크톤의 상호작용에 대한 조사는 해양미소생물환의 구조를 파악하는데 중요한 정보를 제공할 수 있다.

영산강 하구는 1981년에 방조제가 축조되면서 자연형 하구에서 인공형 하구로 변형되었다. 방조제 내측은 담수역, 외측은 해수역으로 분리되었으며, 담수역에서는 생활하수 및 농·축산 폐수의 유입으로 영양염 농도가 증가할 수 있는 여건을 가지고 있다(Cho and Park, 1998). 더불어 2011년에는 4대강 사업의 일환으로 승촌보와 죽산보가 건설되었고, 이로 인해 수체의 흐름이 정체되면서 녹조가 빈발하는 등 수질 악화의 원인이 될 것으로 예상되고 있다(Sin et al., 2015). 이러한 담수가 간헐적으로 방조제 수문을 통해 해수역으로 유입되면서 하구의 수질 및 식물플랑크톤 생체량에 크게 영향을 주는 것으로 보고되었다(Yoon et al., 2013; Sin and Jeong, 2015). 이렇게 인위적으로 담수가 유입되는 변형 하구에서 박테리아가 반응하는 형태 그리고 식물플랑크톤과의 상호작용에 대한 연구(Kim, 2015)는 매우 미흡한 상황이다. 특히 식물플랑크톤을 크기별로 구분하여 박테리아와 상관성을 조사한 연구는 전무하다. 식물플랑크톤 크기구조는 수생태계 먹이망을 통한 에너지 흐름을 결정한다고 보고된 바 있다(Walsh, 1976). 따라서 본 연구에서는 영산강 하구 해수역을 대상으로 박테리아와 식물플랑크톤의 월 변동과 기타 환경인자들을 조사하여 박테리아 변동에 영향을 미치는 주요인자를 파악하고자 하였다. 특히 박테리아 변동과 식물플랑크톤 크기구조와의 상관성은 식물플랑크톤 생체량을 크기별로 구분(size-fractionated chlorophyll-a)하여 조사하였다.

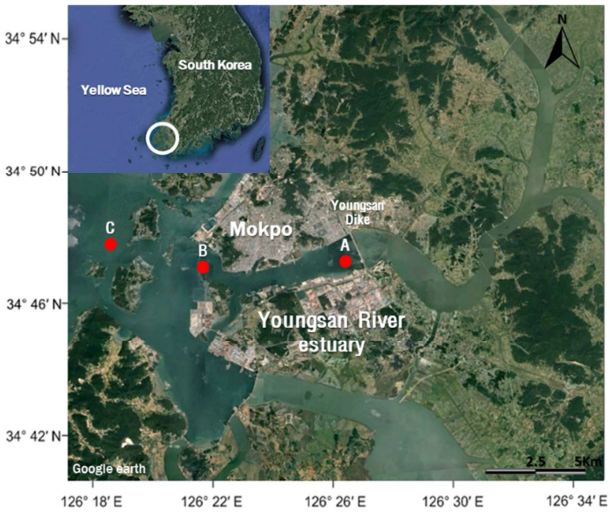

Fig. 1. Sampling stations in the Youngsan River estuary.

재료 및 방법

1. 조사지역 및 시료 채취

본 연구에서는 영산강 하구 해수역의 주요 채널에 따라 영산강 방조제 인근 지점부터 외달도까지 3개 정점(St. A~C)을 선정하였고(Fig. 1), 2018년 7월부터 2019년 6월까지 이들 정점에 대한 월별 조사를 실시하였다.

2. 시료 분석방법

2.1 물리·화학적 환경인자

조사지역(목포)의 강수량은 기상청(www.kma.go.kr)에서 제공된 자료를 활용하였고 조사일을 포함하여 5일간의 총 강수량을 조사하였다. 수온(temperature), 염분(salinity), 탁도(turbidity), 용존산소(DO)는 CTD (YSI-model 6600 V2) 장비를 이용하여 측정하였다. 영양염(NO_2^-+NO_3^-, NH_4^+, DSi, PO_4^{3-})는 표·저층에서 채집된 시료 일정량을 GF/F (∅ 25 mm, pore size 0.7 μm, Whatman®)에 여과한 후, 냉장 보관하여 운반하였으며 Parsons et al. (1984)에 준하여 Auto-analyzer (QuAAtro, SEAL Analytical®)로 분석하였다.

2.2 크기별 chlorophyll-a

크기별 chlorophyll-a 측정을 위해 식물플랑크톤을 micro-size (>20 μm), nano-size (2~20 μm), pico-size (<2 μm)로 분류하였다. 표·저층에서 채집한 시료 일정량(200 ml)을 20 μm Nytex® mesh와 Polycarbonate membrane filter (∅ 47 mm, pore size 2 μm, Whatman®)를 사용하여 여과한 후 농도 차이를 이용하여 크기별 chlorophyll-a를 계산하였다. GF/F (∅ 25 mm, pore size 0.7 μm, Whatman®)에 여과한 후 90% 아세톤 8 ml가 담긴 차광 시험관에 넣고 12~24시간 냉장 보관하여 추출하였다. 추출된 시료는 시험관에 옮겨 담아 10-AU Fluorometer (Turner Designs®)를 이용해 측정하였다. Chlorophyll-a의 산출방법은 다음과 같다.

$$\text{Chlorophyll-a } (\mu g\ l^{-1}) = Ra\left(\frac{V_e}{V_f}\right)$$

Ra = Fluorometer 측정값(μg l^{-1})

V_e = 아세톤의 부피(ml)

V_f = 여과된 시수의 샘플 부피(ml)

2.3 박테리아

박테리아 개체수를 파악하기 위한 시료 채집은 표·저층에서 해수를 채수하였으며 글루타르알데히드로 최종 농도 1%가 되게 고정한 후 냉동 보관하였다. 고정된 시료 1 ml를 0.2 μm nuclepore polycarbonate black filter로 여과하여 최종 농도 1 μg l^{-1}인 DAPI로 염색 후 형광현미경(Carl zeiss, DE/Axiovert 200)으로 계수하였다(Porter and Feig, 1980).

3. 상관분석

조사기간 동안 박테리아와 식물플랑크톤 크기구조, 물리·화학적 환경인자(수온, 염분, 탁도, 용존산소, 영양염)의 연관성을 파악하기 위해 SPSS 26.0을 이용하여 상관분석(Pearson's correlation analysis)을 실시하였다.

결 과

1. 물리·화학적 환경인자

수온의 분포를 보면 4.9~27.9℃로 겨울철에 낮고, 여름철에 높은 계절적인 경향을 나타냈다(Fig. 2). 수문을 통해 방류되는 담수의 영향을 직접적으로 받을 수 있는 A 정점은 조사기간 동안 대부분의 시기에 표·저층간 수온차(-0.3~4.5℃)를 보였으며, 특히 2018년 10월에서 2019년 2월까지는 수온 역전(-1.1~-0.3℃) 현상이 발생하였다. 담수 유입의 영향을 직접적으로 판단할 수 있는 지표인 염분은 21.3~34.0 psu 분포를 보였으며 방조제 인근인 A 정점에서 외해인 C 정점으로 갈수록 표·저층의 염분차가 감소하였다(Fig. 2). A 정점은 일부 시기(2018년 8월, 2019년 6월)를 제외하고 조사기간 동안 저층의 염분 농도가 표층보다 높게 나타났다. 5일 동안의 누적 강수량은 0.2~18.5 mm의 분포를 보였다. 강수량이 없었던 2018년 1월에는 표층 염분이 21.3 psu까지 감소하였는데 이는 방조제를 통한 인위적 담수 유입의 영향을 보여주는 결과라 할 수 있다. 탁도의 표·저층 분포는 A 정점에서 0.6~5.9 (1.9±1.1) NTU, B 정점 0.6~12.3 (4.8±3.2) NTU, C 정점 1.6~11.1 (6.1±3.5) NTU로, 세 정점 간에 서로 다른 농도 분포를 보이며 외해인 C 정점으로 갈수록 높은 분포를 나타냈다(Fig. 2). 또한 A 정점에서는 2018년 7~11월에 2.2~5.9 NTU로, B, C 정점은 0.6~12.3 NTU로 대부분의 시기 저층에서 더 높은 탁도 분포를 보였다. 용존산소는 세 정점의 표·저층에서 각각 1.58~12.14 mg l^{-1}, 2.20~16.11 mg l^{-1}, 1.04~13.12 mg l^{-1}의 분포를 보였다(Fig. 2). 2018년 9월 시기에 A, C 정점에서 각각 1.6~2.0 mg l^{-1}, 1.0~1.2 mg l^{-1}로 빈산소층이 형성되었으며 B 정점은 2.2~4.9 mg l^{-1}로 빈산소에 가까운 농도로 감소하였다.

영양염의 분포를 살펴보면(Fig. 3), 아질산+질산성 질소(NO_2^- + NO_3^-)는 0.57~90.08 μM의 분포를 보였으며, 2019년 1월, 4월, 6월에 A 정점에서 표층 농도가 42.83~83.87 μM로 높게 나타냈다. 같은 시기에 표층 규산염(DSi) 또한 12.85~21.97 μM로 높은 분포를 보였다. 암모니아성 질소(NH_4^+)는 0.14~37.90 μM의 분포를 보였으며, 2018년 7월에 28.27~37.90 μM로 세 정점에서 모두 높은 분포를 나타냈다. 인산염(PO_4^{3-})은 0.03~1.16 μM의 분포를 보였다.

2. 크기별 chlorophyll-a

식물플랑크톤 생체량의 지표인 chlorophyll-a는 세 정점의 표·저층에서 0.31~26.88 μg l^{-1}의 분포를 나타냈다(Fig. 4). 시간적으로는 2018년 8, 9월에 2.17~26.88 (7.33±7.20) μg l^{-1}로 높은 표·저층 분포를 보였으며 12월에 0.94~6.40 (0.52±0.20) μg l^{-1}로 낮은 표·저층 분포를 나타냈다. A 정점의 표·저층 분포는 2019년 2월에 7.39~10.45 μg l^{-1}로 다시 증가하는 경향을 보였고, B 정점은 3월에 3.76~4.98 μg l^{-1}, C 정점은 5월에 1.85~1.97 μg l^{-1}의 농도로 다소 증가하는 경향을 나타냈다. Chlorophyll-a는 방조제 인근 정점일수록 높은 농도를 보였으며(Table 1), 크기별 chlorophyll-a 또한 같은 양상을 나타냈다. 크기별 chlorophyll-a 월 변동을 살펴보면(Fig. 4), 2018년 8, 9월에 micro-size가 1.16~10.86 μg l^{-1}로 높은 분포를 보였다. 또한 9월에는 nano-size가 1.11~14.66 μg l^{-1}로 높은 분포를 나타냈다. 2018년 11, 12월에 micro-size는 0.01~0.46 μg l^{-1}로 낮은 분포를 나타냈으며 nano-size 또한 12월에 0.13~0.33 μg l^{-1}로 낮은 분포를 보였다. 전체적으로 높은 chlorophyll-a 분포를 보였던 9월에 pico-size는 표층에서 0.29~1.46 μg l^{-1}로 높게 나타났으나 저층은 0.04~0.08 μg l^{-1}로 낮은 분포를 보였다.

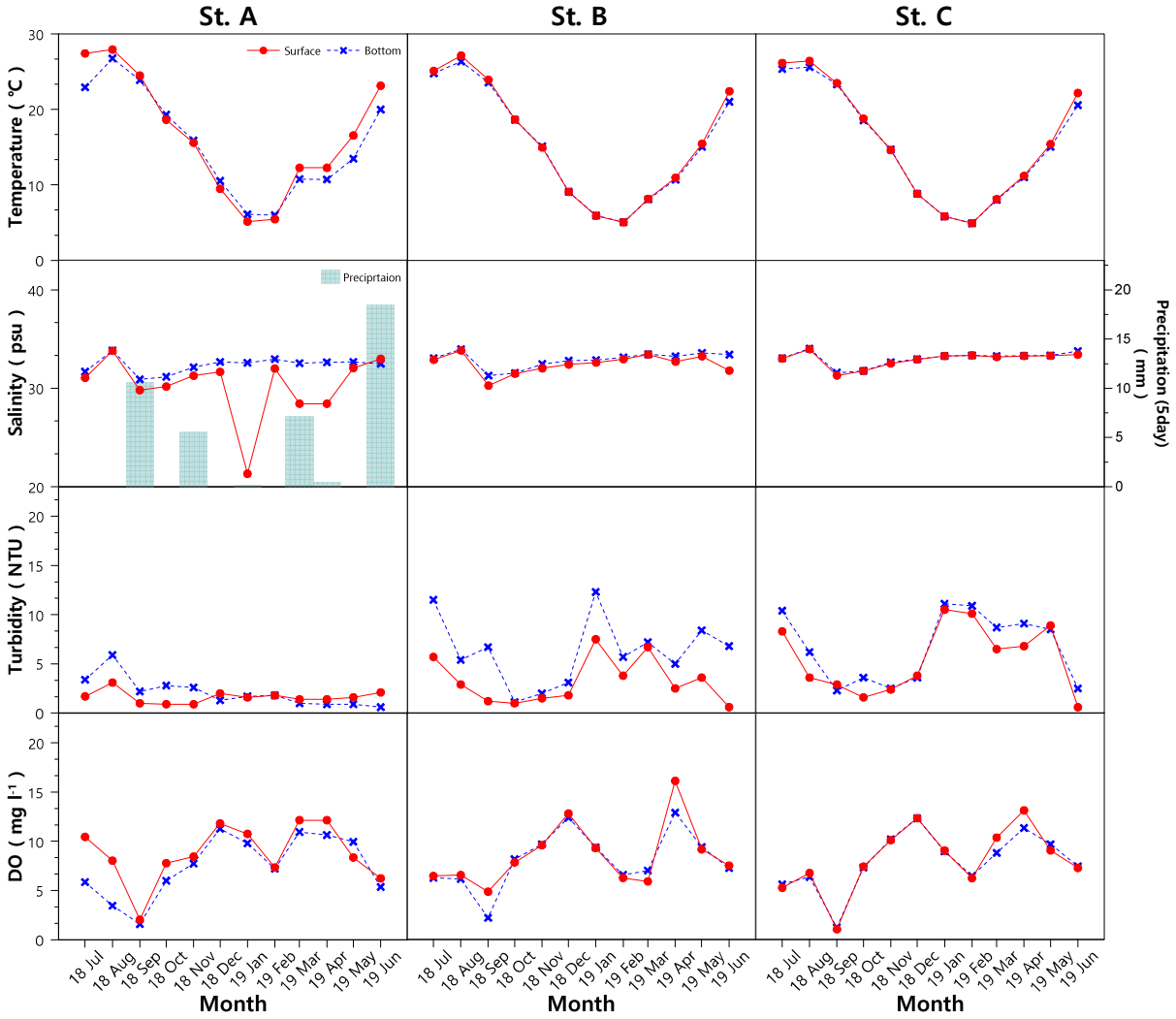

Fig. 2. Monthly variations of physical and chemical properties in the Youngsan River estuary.

3. 박테리아 개체수

영산강 하구에서 2018년 7월부터 2019년 6월까지 박테리아 변동을 살펴보면(Fig. 4), 표층은 0.49~2.76 (1.27±0.51)×10^6 cell ml^{-1}의 분포를 보였으며 저층은 0.38~1.48 (0.92±0.32)×10^6 cell ml^{-1}로 나타나 전체적으로 표층의 개체수가 높았다. 표·저층 평균 농도는 A~C 정점에서 각각 1.30×10^6 cell ml^{-1}, 1.10×10^6 cell ml^{-1}, 0.88×10^6 cell ml^{-1}로 나타났고 방조제에 가까운 A 정점으로 갈수록 증가하는 경향을 보였다(Table 1). 시간적으로는, 2018년 8, 9월에 세 정점의 표층에서 1.23~2.16×10^6 cell ml^{-1}의 높은 분포를 보였으며, 9월에는 저층에서도 1.06~1.32×10^6 cell ml^{-1}로 높은 개체수를 보였다. 또한, 12월에 저층은 1.00~1.20×10^6 cell ml^{-1}로 높은 분포를 보였다. 2019년 5월은 세 정점의 표·저층에서 0.38~1.12×10^6 cell ml^{-1}로 모두 낮은 분포를 보였다가, 6월에 1.23~2.76×10^6 cell ml^{-1}로 다시 증가하여 높은 분포를 나타냈다.

4. 상관분석

박테리아와 크기별 chlorophyll-a, 물리·화학적 환경인자들과의 관계를 파악하기 위해 상관성을 분석한 결과(Table 2), 박테리아 개체수는 크기별 chlorophyll-a (micro-, nano-, pico-size), 수온과 유의한(p<0.01) 양의 상관관계를 보인 반면 탁도와는 유의한(p<0.01) 음의 상관성을 보였다. 크기별 chlorophyll-a는 수온과 양의 상관관계를 보였다. 또한 micro-, nano-size는 용존산소와 유의한 음의 상관관계를 나타냈다. Pico-size는 염분, 탁도와 음의 상관관계를 나타내 다른 크기(micro-, nano-)와 다른 양상을 보였다. 수온

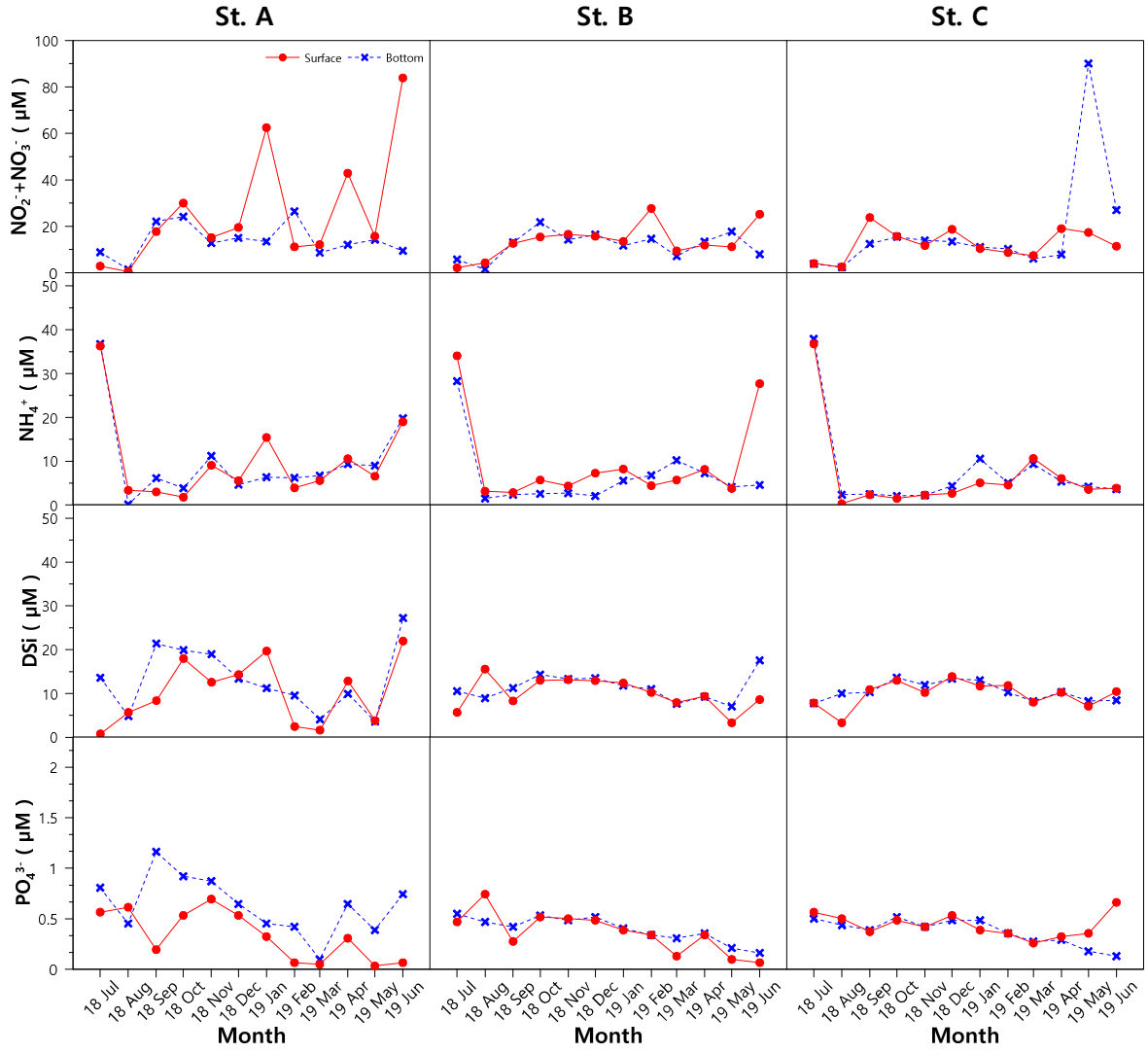

Fig. 3. Monthly variation of nutrient concentration in the Youngsan River estuary.

은 용존산소와 유의한($p<0.01$) 음의 상관관계를 나타냈으며, 암모니아성 질소, 인산염과 유의한($p<0.05$) 양의 상관관계를 보였다. 염분은 탁도와 유의한($p<0.01$) 양의 상관관계를 나타냈으며, 아질산+질산성 질소, 규산염과 유의한($p<0.01$, $p<0.05$) 음의 관계를 보였다.

고 찰

박테리아의 시·공간적 변동은 일반적으로 물리적 특성, 용존유기물, 영양염 등에 의한 bottom-up control과 상위 포식자에 의한 top-down control에 의해서 결정된다(Weisse, 1991; Jardillier et al., 2004). 박테리아는 특히 식물플랑크톤의 대증식 이후 생성되는 용존유기물을 먹이원으로 활용하기 때문에 박테리아와 chlorophyll-a 사이에는 상관성이 있다고 보고되었다(Bird and Kalff, 1984, 1986; Naganuma and Miura, 1997; Kormas et al., 1998). 이러한 박테리아와 chlorophyll-a의 상관성은 박테리아 생물량 유지 및 증가를 위한 유기물 중에서 상당 부분이 식물플랑크톤에 의하여 공급됨을 의미한다(Simon et al., 1992; Lee et al., 2001). 본 연구의 조사지역인 영산강 하구에서도 박테리아 월 변동은 chlorophyll-a와 유의한 양의 상관관계를 보였다. 이러한 결과는 영산강 하구의 박테리아 역시 식물플랑크톤에 의해 제공되는 유기물의 영향을 받는다는 사실을 시사한다. 하지만 박테리아 개체수와 chlorophyll-a의 상관관계에서 크기별로 차이를 보이지 않은 것은 식물플랑크톤의 크기구조가 박테리아 생물량 변화에 미치는 영향이 제한적임을 암

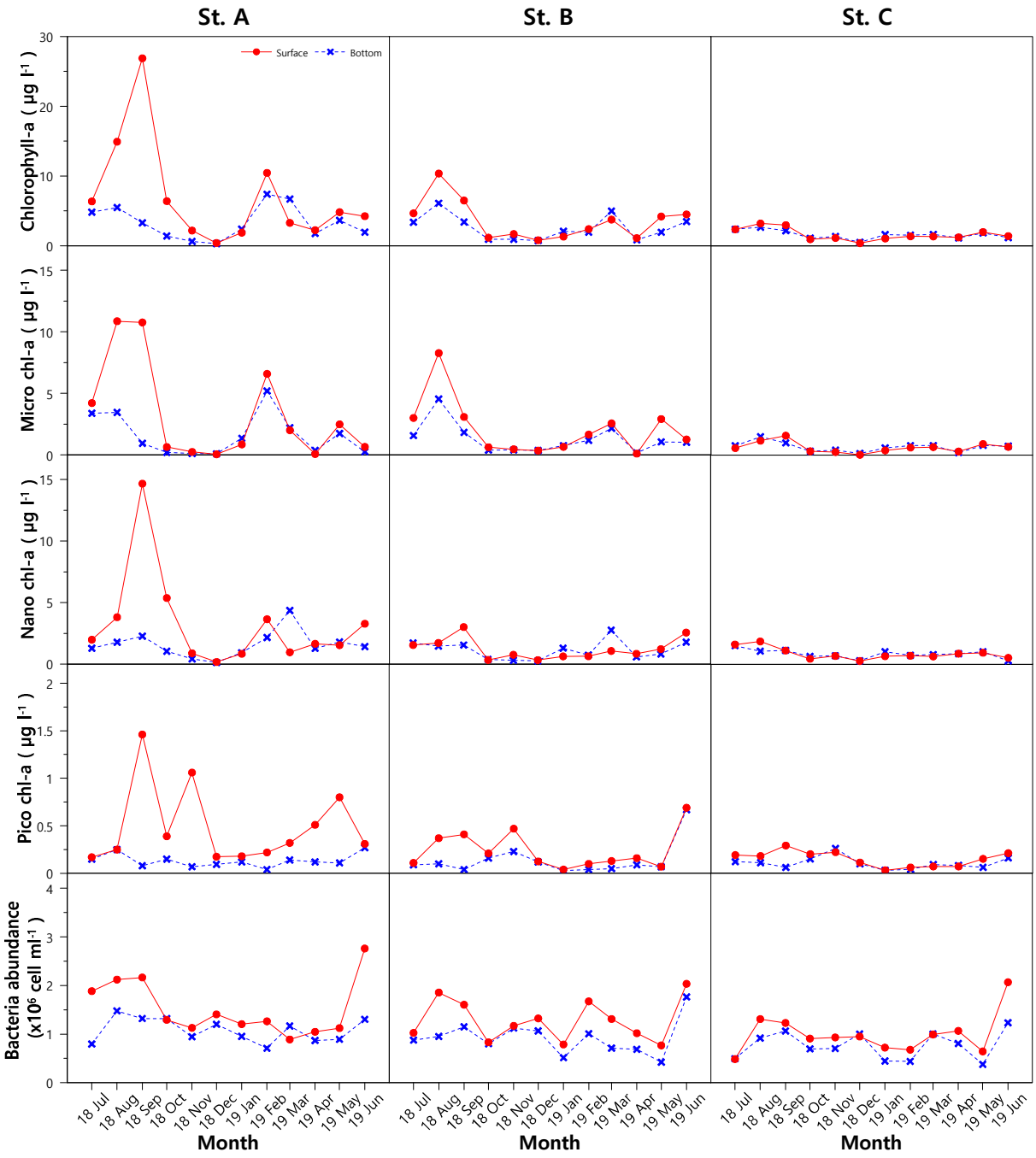

Fig. 4. Monthly variations of chlorophyll-a concentration and bacteria abundance in the Youngsan River estuary.

시하는 결과라 할 수 있다.

조사해역에서 박테리아 개체수는 수온과 유의한 양의 상관관계(r=0.41, p<0.01)를 보였다. 이러한 결과는 박테리아 개체수와 chlorophyll-a, 수온이 상관성을 보인 Yang et al. (2003)의 연구 결과와 일치한다. 수온이 높았던 2018년 8, 9월, 2019년 6월에 박테리아 개체수가 높은 분포 양상을 보인 것은 박테리아의 월 변동에 수온의 영향도 작용한 것으로 사료된다. 실제로 물리적 요인인 수온은 연안수역에서 박테리아 개체수의 계절적 변화를 설명하는데 중요한 요소 중에 하나로 설명되어 왔다(White et al., 1991; Shiah and Ducklow, 1994a, b). 또한 박테리아의 성장률과 증식이

Table 1. Bacteria abundance and chlorophyll-a concentrations (ranges and average, standard deviation) in Youngsan River estuary

Parameter \ Station	St. A		St. B		St. C	
	Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom
Bacteria ($\times 10^6$ cell ml^{-1})	0.89~2.76 (1.52±0.57)	0.71~1.48 (1.08±0.25)	0.77~2.03 (1.28±2.81)	0.42~1.76 (0.92±0.35)	0.49~2.07 (1.00±0.41)	0.38~1.23 (0.76±0.28)
Chl-a ($\mu g\ l^{-1}$)	0.40~26.88 (7.0±7.46)	0.31~7.39 (3.31±2.34)	0.80~10.36 (3.54±2.81)	0.75~6.10 (2.57±1.73)	0.38~3.20 (1.61±0.85)	0.50~2.66 (1.59±0.61)
Micro chl-a ($\mu g\ l^{-1}$)	0.05~10.86 (3.28±4.01)	0.11~5.19 (1.61±1.66)	0.10~8.27 (2.07±2.25)	0.17~4.54 (1.29±1.20)	0.01~1.57 (0.61±0.43)	0.12~1.49 (0.65±0.38)
Nano chl-a ($\mu g\ l^{-1}$)	0.17~14.66 (3.23±3.91)	0.13~4.36 (1.57±1.09)	0.34~3.01 (1.22±0.85)	0.30~2.76 (1.14±0.75)	0.26~1.85 (0.85±0.47)	0.28~1.51 (0.83±0.35)
Pico chl-a ($\mu g\ l^{-1}$)	0.17~1.46 (0.49±0.41)	0.04~0.27 (0.13±0.07)	0.04~0.69 (0.24±0.20)	0.03~0.67 (0.14±0.18)	0.03~0.29 (0.15±0.08)	0.03~0.26 (0.10±0.06)

Bacteria: bacteria abundance, Chl-a: total chlorophyll-a, Micro chl-a: micro-size chlorophyll-a, Nano chl-a: nano-size chlorophyll-a, Pico chl-a: pico-size chlorophyll-a

Table 2. Correlation matrix of bacteria and phytoplankton size structure, physical and chemical properties, nutrient in Youngsan River estuary (N=72)

	Chl-a	Micro	Nano	Pico	Temp.	Sal.	DO	Turb.	NOx	NH_4^+	DSi	PO_4^{3-}
Bacteria	.48**	.42**	.43**	.48**	.41**	-.12	-.22	-.51**	.16	.003	.14	-.03
Chl-a	1	.92**	.90**	.57**	.35**	-.09	-.37**	-.19	-.09	.005	-.26*	-.15
Micro		1	.66**	.36**	.34**	.02	-.33**	-.14	-.20	-.01	-.35**	-.09
Nano			1	.63**	.28*	-.18	-.35**	-.18	.04	.02	-.13	-.18
Pico				1	.30**	-.29*	-.17	-.40**	.08	-.01	.01	-.17
Temp.					1	.06	-.55**	-.19	-.13	.27*	-.03	.27*
Sal.						1	-.03	.40**	-.39**	-.09	-.24*	.003
DO							1	-.08	.08	-.07	-.10	-.17
Turb.								1	-.17	.14	-.14	-.13
NOx									1	-.05	.34**	-.23
NH_4^+										1	-.04	.13
DSi											1	.51**
PO_4^{3-}												1

**p<0.01, *p<0.05, Bacteria: bacteria abundance, Chl-a: total chlorophyll-a, Micro chl-a: micro-size chlorophyll-a, Nano chl-a: nano-size chlorophyll-a, Pico chl-a: pico-size chlorophyll-a, Temp.: temperature, Sal.: salinity, DO: dissolved oxygen, Turb.: turbidity, NOx: nitrite+nitrate, NH_4^+: ammonium, DSi: dissolved silicate, PO_4^{3-}: phosphate

수온에 의해 직접적으로 영향을 받고(Felip et al., 1996), 유광대의 수온 상승에 따른 식물플랑크톤 성장률 증가가 용존유기물의 농도 상승으로 연결되면서 박테리아의 성장을 유도한다고 보고된 바 있다(Cho et al., 2001).

본 연구에서 박테리아 개체수는 유일하게 탁도와 유의한 음의 상관관계(r=0.51, p<0.01)를 보였다. 하구에서 탁도를 결정하는 부유물질 농도는 하구혼합(estuarine mixing) 특히, 조석혼합(tidal mixing)이 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Cho and Shim, 1992).

상관분석 결과에서도 염분과 탁도가 유의한(p<0.01) 양의 상관성을 보였고, 외해로 갈수록 탁도가 증가하는 경향을 보임으로써 조석의 영향을 암시하고 있다. 이러한 조석혼합은 저층 유기 퇴적물을 재부유시켜 수층의 유기물 농도가 증가하면서 박테리아 생물량에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Plummer et al., 1987; Painchaud and Therriault, 1989; Wainright, 1990; Shim et al., 1993). 하지만 본 연구에서 확인된 박테리아 개체수와 탁도의 음의 상관성은 영산강 하구 해수역에서는 재부유된 부유물질이 박테리아에 미치는 영향이 제한적일 가능성을 내포하고 있다. 이는 재부유된 부유물질이 함유하고 있는 유기물의 양이 적거나 염분과 같은 환경인자와의 자기상관(autocorrelation) 때문일 가능성 있지만 정확한 해석을 위해서는 추가적인 조사가 필요할 것으로 사료된다.

측정된 영양염 농도는 박테리아의 개체수와 유의한 상관성을 보이지 않은 반면, 염분과 일부 영양염(아질산+질산성 질소, 규산염)이 유의한(p<0.01, p<0.05) 음의 상관성을 보였다. 이는 담수 유입이 일부 영양염의 공급원이지만 박테리아의 개체수 증가로는 연결되지 않는다는 것을 보여준다. 영양염의 공급은 일반적으로 식물플랑크톤과 박테리아의 성장을 촉진시킨다는 점에서 영산강 하구 해역의 영양염 공급에 대한 미생물 반응에는 불일치(mis-match) 혹은 시간차(lag-time)가 존재할 가능성이 있다. 또한 식물플랑크톤 증가와 박테리아 반응에도 시간차가 있을 수 있는데 이는 용존유기물이 식물플랑크톤의 대증식 이후 세포들이 사멸되면서 물의 용해(hydrolysis)로 생성되기 때문이다. 하지만 살아있는 식물플랑크톤의 용출(exudation)을 통해서도 용존유기물이 공급되므로 정확한 기작을 이해하기 위해서는 이들 공급원에 대한 추가적 규명이 필요하다고 본다. 또한 하구에서 박테리아의 성장과 분포는 담수 유입량이 많을수록 식물플랑크톤이 아닌 외부기원 유기물에 의해 조절된다는 연구들이 보고된 바 있다(Findlay et al., 1992; Hoch and Kirchman, 1993). 따라서 영산강 하구와 같은 변형하구에서는 박테리아 변동과 그 요인을 더 정확하게 파악하기 위해서는 인위적이고 간헐적으로 발생하는 담수 유입에 따른 유기물 거동에 대한 조사가 필요할 것으로 사료된다. 이외에도 종속영양 편모류와 같은 원생동물의 포식압, 바이러스에 의한 용균 등에 대한 연구도 필요할 것이다.

최근 산업화의 영향으로 부영양화가 진행되면서 수중의 용존산소가 부족해서 생물이 서식하기 힘든 빈산소(hypoxia)층을 가진 Dead Zone이 전 세계적으로 확산되고 있는 것으로 보고된 바 있다(Diaz and Rosenberg, 1995). 빈산소(hypoxia)는 수괴의 용존산소 농도가 2 mg l^{-1} 이하로 저하될 경우를 말하는데(Ritter and Montagna, 1999; Vaquer-Sunyer and Duarte, 2008), 본 연구에서 2018년 9월에 일시적으로 빈산소층이 관찰되었다. 용존산소의 농도가 A, C 정점의 표·저층에서 2018년 9월에 1.6~2.0 mg l^{-1}, 1.0~1.2 mg l^{-1}로 급감하였다. 또한 빈산소층이 형성되기 전인 2018년 8월부터 9월까지 박테리아 개체수와 chlorophyll-a가 상당 폭 증가한 것으로 나타났다. 용존산소는 또한 상관분석결과에서 수온과 유의한(p<0.01) 음의 상관관계를 보였다. 일반적으로 수온은 산소의 용해도에 영향을 미치며 수온이 높을수록 산소의 용해도가 낮아지는 것으로 알려져 있다(Weiss, 1970). 더불어 기온이 높은 하계에는 표층 수온이 크게 상승하면서 수온약층이 형성되어 수층의 성층화가 발생할 수 있다. 이러한 성층화는 대기에서 해수면으로 용해되어 유입되는 용존산소가 저층으로 교환 및 확산되는 것을 방해하거나 차단하게 되고, 저층의 용존산소가 지속적으로 소모되면서 빈산소층이 형성될 수 있다(Cho et al., 1994; Kimura and Izumi, 1994). 본 연구에서 관찰된 빈산소 발생은 결국 수온 증가로 산소용해도가 감소함과 동시에 박테리아의 유기물 분해로 인해 산소 소모량이 증가되면서 수괴의 용존산소가 고갈된 결과로 보인다. 하지만 이 시기에 수온과 염분에 의한 수층의 성층이 발생하지 않았던 것으로 보아 이 특정시기의 빈산소층 형성은 물리적 순환보다는 식물플랑크톤 기원의 유기물 공급과 박테리아의 호흡에 의한 생물학적 과정이 상대적으로 중요한 것으로 판단된다. 해양에서 빈산소층이 지속될 경우 생물의 대량 폐사를 유발하고(Zarkanellas, 1979; Stachowitsch, 1984), 생물학적으로 살 수 없는 Dead Zone으로 확산되면서 해양 생태계에 악영향을 미칠 수 있다(Diaz, 2001). 따라서 단기적이지만 빈산소가 발생한 영산강 하구의 경우 박테리아 변동과 수질 환경에 대한 장기적인 모니터링을 통해 지속적인 관리가 필요할 것으로 사료된다.

요약하자면 영산강 하구에서 박테리아는 저층보다 표층에서 높은 개체수를 보였으며, 겨울철보다 여름철에 개체수가 높았다. 방조제에 가까울수록 개체수가 증가하였으며, 방조제와 가장 인접한 정점에서 2018년 8월, 9월 그리고 2019년 6월에 최대치로 증가하였다. 박테리아의 개체수가 높았던 정점과 시기에 식물플랑크톤의 생체량도 증가하면서 양의 상관성을 보였고 이러한 결과는 식물플랑크톤 기원의 유기물이 박테리아 변동에 영향을 미치고 있음을 제시하고 있다. 다만 식물플랑크톤의 크기구조가 박테리아 변동에 미치는 영향은 제한적인 것으로 확인되었다. 더불어 수온에 비례하여 증가하는 계절 분포는 박테리아의 성장에 대한 수온의 영향을 보여주는 결과라 할 수 있다. 담수 유입을 통한 영양염 공급과 박테리아의 개체수 변동과의 연관성은 관찰되지 않았다. 다만 영양염과 함께 유입되는 유기물이나 포식압 등에 대한 조사를 통해 보다 정확한 변동 기작을 파악할 필요가 있다고 본다. 본 연구에서는 또한 특정시기에 성층이 거의 없었음에도 불구하고 용존산소가 고갈되면서 빈산소층이 형성되는 것으로 확인되었다. 본 연구 결과는 영산강 하구의 수질 관리를 위해서는 박테리아의 거동에 대한 지속적인 모니터링과 더불어 식물플랑크톤 대발생을 포함한 식물플랑크톤 변동에 대한 이해의 필요성을 제시하고 있다.

사 사

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의

지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2018R1D1A1B05049865).

참고문헌

Azam F, Fenchel T, Field JG, Gray JS, Meyer-Rei LA, Thingstad F. 1983. The ecological role of water column microbes in the sea. Mar Ecol Progr Ser 126: 97-102.

Bird DF, Kalff J. 1984. Empirical relationships between bacterial abundance and chlorophyll concentration in fresh and marine waters. Can J Fish Aquat Sci 41: 1015-1023.

Bird DF, Kalff J. 1986. Bacterial grazing by planktonic lake algae. Science 231: 493-495.

Cho BC, Choi JK, Chung CS, Hong GH. 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.

Cho BC, Park MG, Shim JH, Choi DH. 2001. Sea-surface temperature and f-ratio explain large variability in the ratio of bacterial production to primary production in the Yellow Sea. Mar Ecol Progr Ser 216: 31-41.

Cho BC, Shim JH. 1992. Significance of Estuarine Mixing in Distribution of Bacterial Abundance and Production in the Estuarine System of the Mankyung River and Dongjin River, Korea. J Kor Soc Oceanogr 27: 154-163.

Cho YG, Park KY. 1998. Heavy metals in surface sediments of the Youngsan Estuary, West Coast of Korea. J Environ Sci Int 7: 549-557.

Cole JJ, Findlay S, Pace ML. 1988. Bacterial production in fresh and saltwater ecosystem: a cross-system overview. Mar Ecol Pro Ser 43: 1-10.

Cole JJ, Pace ML. 1995. Bacterial secondary production in oxic and anoxic freshwaters. Limnol Oceanogr 40: 1019-1027.

Diaz RJ, Rosenberg R. 1995. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. Oceanogr Mar Biol Ann Rev 33: 245-303.

Diaz RJ. 2001. Overview of hypoxia around the world. J Environ Qual 30: 275-281.

Ducklow HW, Carlson CA. 1992. Oceanic bacterial production: In Advances in microbial ecology. Springer, Boston, MA 12: 113-181.

Felip M, Pace ML, Cole JJ. 1996. Regulation of planktonic bacterial growth rates: The effects of temperature and resources. Micro Ecol 31: 15-28.

Findlay S, Pace ML, Lints D, Howe K. 1992. Bacterial metabolism of organic carbon in the tidal freshwater Hudson estuary. Mar Ecol Prog Ser 89: 147-153.

Hoch MP, Kirchman DL. 1993. Seasonal and inter-annual variability in bacterial production and biomass in a temperate estuary. Mar Ecol Prog Ser 98: 283-295.

Jardillier L, Basset M, Domaizon I, Belan A, Amblard C, Richardot M, 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.

Kim SH. 2015. Ecological and biogeochemical processes in the Yeongsan River estuary, Yellow Sea. Department of environmental marine sciences. Doctor of philosophy. Graduate school of Hanyang University.

Kimura H, Izumi M. 1994. Effect of oxygen deficiency of the sea bottom on environment of bay. Fish Eng 31: 41-45.

Kormas KA, Kapiris K, Thessalou-Legaki M, Nico-laidou A. 1998. Quantitative relationships between phyto-plankton, bacter and protists in an Aegean semi-enclosed embayment (Maliakos Gulf, Greece). Aquat Microb Ecol 15: 255-264.

Lee CW, Kudo I, Yanada M, Maita Y. 2001. Bacterial abundance and production and heterotrophic nanoflagellate abundance in subartic coastal waters (Western North Pacific Ocean). Aquat Microb Ecol 23: 263-271.

McDonough RJ, Sanders RW, Porter KG, Kirchman DL. 1986. Depth distribution of bacterial production in a stratified lake with an anoxic hypolimnion. Appl Environ Microbiol 52: 992-1000.

Naganuma T, Miura S. 1997. Abundance, production and viability of bacterioplankton in the Seto Island Sea. Japan J Oceanogr 53: 435-442.

Ochs CA, Cole JJ, Likens GE. 1995. Population dynamics of bacterioplankton in an oligotrophic lake. J Plankton Res 17: 365-391.

Painchaud J, Therriault JC. 1989. Relationships between bacteria, phytoplankton and particulate organic carbon in the Upper St. Lawrence Estuary. Mar Ecol Prog Ser 56: 301-311.

Parsons TR, Maita Y, Lalli C. 1984. A manual of chemical and biological method for seawater analysis. Pergamon Press Inc., New York, pp 173.

Plummer DH, Owens NJP, Herbert RA. 1987. Bacteria—particle interactions in turbid estuarine environments. Cont Shelf Res 7: 1429-1433.

Pomeroy LR, Wiebe WJ. 1993. Energy sources for microbial food webs. Mar Microb Food webs 7: 101-118.

Porter KG, Feig YS. 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. Limnol Oceanogr 25: 943-948.

Rabalais NN, Turner RE, Wiseman Jr WJ. 2002. Gulf of Mexico

hypoxia, aka "The dead zone". Ann Rev Ecol Evol S 33: 235-263.

Ritter C, Montagna PA. 1999. Seasonal hypoxia and models of benthic response in a Texas bay. Estuaries 22: 7-20.

Ryther JH. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. Science 166: 72-76.

Sherr EB, Sherr BF. 1987. High rates of consumption of bacteria by pelagic ciliates. Nature 325: 710-711.

Shiah FK, Ducklow HW. 1994a. Temperature regulation of heterotrophic bacterioplankton abundance, production, and specific growth rate in Chesapeake Bay. Limnol Oceanogr 39: 1243-1258.

Shiah FK, Ducklow HW. 1994b. Temperature and substrate regulation of bacterial abundance, production and specific growth rate in Chesapeake Bay, USA. Mar Ecol Prog Ser 103: 297-308.

Shim JH, Shin YK, Cho BC. 1993. The roles and the inter relationship between bacteria and phytoplankton in estuarine system of Mankyung and Dongjin rivers. Korea J of Kor Soc Oceanogr 28: 107-113.

Sim JH, Kim YS, No I, Park YC, Park JG, Park C, Sin YG, Yang SR, Yang JS, Yeo HG, Yu SJ, Lee DS, Lee WH, Jeong HJ, Jo BC, Cha SS, Choi JK. 2010. Heterotrophic micro-plankton. Plankton ecology. 4st ed. Seoul National University, Korea. pp 155-171.

Simon M, Cho BC, Azam F. 1992. Significance of bacterial biomass in lakes and the ocean: comparison to phytoplankton biomass and biogeochemical implications. Mar Ecol Progr Ser 86: 103-110.

Sin Y, Jeong B. 2015. Short-term variations of phytoplankton communities in response to anthropogenic stressors in a highly altered temperate estuary. Estuar Coast Shelf Sci 156: 83-91.

Sin Y, Lee E, Lee Y, Shin K-H. 2015. The river estuarine continuum of nutrients and phytoplankton communities in an estuary physically divided by a sea dike. Estuar Coast Shelf Sci 163: 279-289.

Stachowitsch M. 1984. Mass mortality in the Gulf of Trieste: the course of community destruction. Mar Ecol 5: 243-264.

Vaquer-Sunyer R, Duarte CM. 2008. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 105: 15452-15457.

Wainright SC. 1990. Sediment-to-water fluxes of particulate material and microbes by resuspension and their contribution to the planktonic food web. Mar Ecol Prog Ser 62: 271-281.

Walsh JJ. 1976. Herbivory as a factor in patterns of nutrient utilization in the sea. Limnol Oceanogr 21: 1-13.

Weiss RF. 1970. The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. Deep Sea Res 17: 721-735.

Weisse T. 1991. The annual cycle of heterotrophic freshwater nomoflagellates: role of bottm-up versus top-down control. J Plankton Res 13: 167-185.

White PA, Kalff J, Rasmussen JB, Casol JM. 1991. The effect of temperature and algal biomass on bacterial production and specific growth rate in freshwater and marine habitats. Microb Ecol 21: 99-118.

Yang EJ, Choi JK, Hyun JH. 2003. The study on the seasonal variation of microbial community in Kyeonggi Bay, Korea. I. Bacteria and heterotrophic nanoflagellates. J Kor Soc Oceanogr 8: 44-57.

Yoon B-B, Lee E-J, Kang T-A, Shin Y-S. 2013. Long-term change of phytoplankton biomass (chlorophyll-a), environmental factors and freshwater discharge in Youngsan Estuary. Korean J Ecol Environ 46: 205-214.

Zarkanellas AJ. 1979. The effects of pollution-induced oxygen deficiency on the benthos in Elefsis Bay, Greece. Mar Environ Res 2: 191-207.