Article

새만금 주변 해역에서 박테리아 개체수 및 생산력의 공간 분포

최동한* · 노재훈

한국해양연구원 해양생물자원연구부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Spatial Distribution of Bacterial Abundance and Production in the Saemangeum Area

Dong Han Choi* and Jae Hoon Noh

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

Abstract: Distribution of bacterial abundance and production was investigated in seawater around Saemangeum dike 7 times during March, 2007~July, 2008. In the inner area of the dike, salinity variation was great due to river runoff from Mangyung and Dongjin Rivers and high chlorophyll *a* (chl *a*) concentrations up to 124.3 $\mu\text{g l}^{-1}$ was found. In the outer area of the dike, salinity was higher than in the inner area of the dike, and chl *a* was lower up to 10 times than in the inner area of the dike. Thus, the area of Saemangeum showed meso- to hypereutrophic conditions. Bacterial abundance and production ranged from 0.3 to 4.3 $\times 10^9$ cells l^{-1} and from 5.2 to 570 $\text{pmol l}^{-1} \text{h}^{-1}$ in outer area of the dike, respectively, while in the inner area of the dike bacterial abundance and production was 3 to 4 times higher (0.4~12.7 $\times 10^9$ cells l^{-1} and 12.3~1309 $\text{pmol l}^{-1} \text{h}^{-1}$, respectively) than those in the outer area. In both areas, bacterial abundance and production was highest in summer and lowest in winter. However, the variations of bacterial parameters was very large in each season. These large variations seemed to be related with the supply of organic matter. Bacterial abundance and production showed significant negative correlations with salinity in the inner area, suggesting that allochthonous organic matter input by river runoff could be an important factor in regulating the distribution of bacterial abundance and production. In addition, bacterial production also correlated positively with chl *a* in the inner area, suggesting that autochthonous substrate might be another regulating factor of bacterial growth in the area. These results suggest that the supply of both allochthonous organic substrates introduced by river runoff and autochthonous substrates produced by phytoplankton could be important in regulating bacterial growth and utilization of organic matter in the area. Thus, to manage water quality in the inner area of dike, it seems to be important to lower the load of both organic and inorganic nutrients from adjacent rivers.

Key words : Saemangeum, bacteria, abundance, production, seawater

1. 서 론

초기에 해양 박테리아는 유기물질을 분해하여 일차생산자에게 무기물질을 공급하는 분해자로서 그 중요성이 인

식되어 왔었다. 그러나 1980년경에 박테리아의 개체수를 측정할 수 있는 형광현미경 기법이 도입되고(Hobbie *et al.* 1977; Poter and Feig 1980), 이와 더불어 박테리아의 생산력을 측정할 수 있는 [^3H -methyl]thymidine 고정법(Fuhrman and Azam 1980, 1982)이 개발되면서, 해양 환경에서 박테리아 생체량이 기존에 생각하였던 것보다 훨

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

썩은 크며 성장도 매우 활발함이 밝혀졌다. 이는 박테리아가 분해자로서 뿐만 아니라 용존 유기물을 이용하여 성장하고 이를 다시 중속영양성 미소편모류와 같은 상위 단계의 포식자에게 전달하여 최종적으로 섭식먹이망(grazing food chain)으로 에너지를 전달함으로써, 기존과 다른 경로를 통한 물질 이동을 보여주는 미생물 먹이망(Azam *et al.* 1984)의 개념을 확립하게 하였다. 미생물 먹이망에 대한 개념이 도입된 이후 박테리아의 분포와 성장에 대한 연구는 다양한 영양 상태의 해역에서 수행되었으며(Cho and Azam 1988, 1990; Ducklow and Carlson 1992; Shiah and Ducklow 1994a), 박테리아가 물질의 생지화학적 순환에 있어서 매우 중요함이 규명되었다. 또한 박테리아의 분포와 성장은 자생성 또는 외래성 기질의 공급 및 수온에 의해 주로 조절이 되며, 박테리아 개체수는 박테리아의 성장, 섭식 및 바이러스에 의한 사망에 의해 주로 조절됨이 알려졌다(Fuhrman and McManus 1984; Cole *et al.* 1988; Kirchman 1990; Bratbak *et al.* 1990; Proctor and Fuhrman 1990; White *et al.* 1991; Shiah and Ducklow 1994a, b). 특히 강하구에 인접한 연안 환경에서 박테리아의 성장은 외래성 유기물의 공급이 중요함이 보고되었으며(Coveney and Wetzel 1995; Almeida *et al.* 2005), 또한 외래성 무기 영양염의 공급에 의한 일차생산력의 증가와 이로 인한 유기물의 공급도 박테리아의 분포와 성장을 증가시키는데 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 여겨진다. 따라서 염하구 해역에 인공 방조제의 건설은 하천의 유입수와 해수의 교환을 제한함으로써 방조제 내측에 유기물 조건을 변화시키고 박테리아의 생태에 변화를 야기할 것이다. 유사하게 시화 방조제 건설 이후 방조제 내측 해역의 수질이 과영양성 특성으로 변화되어, 박테리아 개체수와 생산력이 방조제 외측 환경에 비해 각각 4배와 30배까지 크게 증가된 결과가 보고되었다(최 등 1997).

새만금 해역에서의 해양 조사는 대부분 간척사업과 관련하여 광범위하게 수행되어 왔으며, 특히 생물 분야에서는 저서 생물과 식물·동물 플랑크톤에 대해 주로 연구가 수행되었다(이 2006). 그러나, 유기물의 분해 및 미생물 먹이망의 주요 성분인 박테리아 생태에 대한 연구는 1992년 만경강 및 동진강 하구역에서 수행된 연구(조와 심 1992)를 제외하면 거의 보고된 바 없는 실정이다. 본 연구는 2006년 4월 방조제 끝막이 공사 이후에 방조제 내측과 외측에서 박테리아 개체수와 생산력의 측정을 통해 박테리아 분포 및 성장의 공간 특성을 규명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

연구 해역

새만금 방조제는 전라북도 군산, 김제, 부안에 이르는

총길이 33 km의 방조제로, 매립을 통해 농업 및 산업 용지를 확보하고, 일부 담수호를 조성하기 위해 계획되었다. 방조제 건설은 새만금 간척종합개발사업에 의해 1991년부터 진행되어 2006년 4월 끝물막이 공사로 완료되었으며, 현재 새만금 해역은 방조제 내측의 하구 환경과 외측의 해양 환경으로 분리 되어 신시 갑문과 가력 갑문을 통해 제한적으로 해수가 소통되고 있다. 방조제 내측은 잘 발달된 갯벌과 만경강과 동진강 하구역이 위치하고 있으며, 방조제 외측 전면에 고군산군도와 북측에는 금강하구가 자리하고 있다. 그 결과로 방조제 내측은 인접한 만경강과 동진강을 통해 연간 수억톤의 담수가 유입되어 공간적으로 넓은 염분 구배를 보이며, 강수량에 따라 시기적으로도 큰 염분 변이를 나타낸다. 특히 하계에는 이들 강을 통해 하루에 수백만톤의 담수가 유입되며, 동시에 입자성 유기탄소와 용존 유기탄소도 하루에 각각 4톤에서 20톤정도씩 유입되는 것으로 보고되어(국토해양부 2007), 방조제 내측의 경우 강물의 유입에 의해 유기물 조건이 크게 영향을 받을 것으로 여겨진다.

조사 정점 및 기간

본 연구는 2007년 3, 5, 7, 10월과 2008년 3, 5, 7월에 방조제 내측의 7-11개 정점과 외측의 7-16개 정점에서 수행되었다(Fig. 1). 조사는 공간적인 분포 양상을 규명하기 위해 표층 시료에 대해서 연구가 수행되었으며, 시료는 플라스틱 버킷을 이용하여 채수하였다.

박테리아 개체수 및 생산력

박테리아 개체수 측정을 위한 시료는 현장에서 0.2 μ m polycarbonate 여과지로 미리 여과한 파라포름알데하이드와 글루타르알데하이드의 혼합액(최종 농도 각각 1%와

Fig. 1. A map showing the sampling stations during the study period.

0.125%)으로 고정한 후 냉동 보관하였으며, 박테리아는 Porter and Feig(1980)의 방법에 따라 DAPI 염색 후 에피 형광현미경(Nikon 80i)을 이용하여 계수하였다. 박테리아의 생산력 측정은 ice-cold TCA(trichloroacetic acid)로 핵산을 추출하는 Fuhrman and Azam(1982)의 방법(2008년 5월과 7월 조사)이나 ice-cold TCA와 80% 에탄올로 추출하는 Ducklow *et al.*(1992)의 방법(2007년과 2008년 3월 조사)으로 측정하였다. 배양에 이용한 시료의 부피는 5~10 mL, [^3H -methyl] thymidine(TdR, Amersham, specific activity; 78~80 Ci mmol $^{-1}$)의 최종 농도는 20 nM, 배양 시간은 30분 정도였으며 현장 온도($\pm 1^\circ\text{C}$)에서 암배양하였다. 박테리아 생산력은 단위시간, 단위 부피당 박테리아에 고정된 thymidine의 몰수(단위: pmol $l^{-1} h^{-1}$)로 제시하였다.

환경요인 및 통계 분석

수온 및 염분은 CTD를 이용하여 측정하였으며, 엽록소 *a*는 spectrophotometer(Lambda 19, Perkin-Elmer)와 fluorometer(10-AU, Turner Designs)를 이용하여 측정하였다(Parsons *et al.* 1984). 직선회귀분석 및 다중회귀분석은 SYSTAT과 SPSS 통계 프로그램을 이용하여 수행하였다.

3. 결 과

수온, 염분 및 엽록소 *a*

조사 기간 동안 방조제 내·외측에서 수온은 각각 7.1~28.5°C와 6.8~26.7°C 범위의 값을 나타내었다. 각 조사 시기에 내·외측에서 평균 수온은 0.4~2.2°C의 차이를 보여, 그 차이는 크지 않았다(Fig. 2). 시기적으로는 전형적인 계절 변동을 보여 3월에 평균 7~8°C로 낮았으며, 여름인 7월에 가장 높은 수온을 보였다. 염분은 방조제 외측에서 28~33 psu로 높은 범위의 값을 보였으며, 시기적인 변동도 크지 않았다(Fig. 2). 그러나 내측에서는 2.6~31.8 psu로 넓은 범위의 값을 나타내었다(Fig. 2). 방조제 내측에서의 염분 범위는 인접 강으로부터의 담수의 유입에 의해 크게 영향을 받아, 강하구에 인접한 정점들에서 낮고 방조제에 인접한 정점에서 높은 경향을 나타냈으며, 강수량이 매우 높았던 2007년 7월 조사에서는 만경강 하구에 위치한 정점 2와 201에서 염분이 2.6~5.5 psu까지 낮아졌다. 그러나 2007년 3월과 5월에는 장기간의 갑문 부분 개방과 전체 개방으로 인한 해수 유입으로 내측에서의 염분이 높게 나타났으며, 정점간 변이도 적었다(Fig. 2).

조사 해역에서 엽록소 *a* 농도의 시·공간적 변이는 매우 크게 나타났다(Fig. 2). 방조제 외측에서는 1.3~27.3 μg

Fig. 2. Temporal variations of temperature, salinity, and chlorophyll *a* (Chl *a*) concentration in the inner area (black bar) and the outer area (gray bar) of the Saemangeum dike. Error bars represent 1SD.

l^{-1} 범위의 엽록소 *a* 농도를 나타내어 20배 정도의 변이를 나타내었으며, 대체로 중영양 혹은 부영양 해역에서의 값과 유사한 범위의 값을 보였다. 반면, 방조제 내측에서 엽록소 *a*의 농도는 1.5~124.3 $\mu\text{g l}^{-1}$ 범위로 큰 변이를 보였으며, 방조제 외측에 비해 평균 10배까지 높아 과영양성 특성을 나타내었다. 특히 60 $\mu\text{g l}^{-1}$ 이상의 높은 엽록소 *a*의 농도가 만경강 하구에 위치한 정점 2, 201, 0에서 주로 나타나, 식물플랑크톤의 대번성을 야기하는 무기영양염이

인접한 만경강을 통해 주로 유입되고 있는 양상을 보였다. 한편, 2007년 10월 이후 방조제 내측에서 평균 엽록소 a 농도는 이전에 비해 두 배 이상 증가하는 경향을 보여 방조제 내측의 부영양화가 심화되는 경향을 나타내었다 (Fig. 2).

박테리아 개체수 및 생산력

방조제 외측

방조제 외측에서 박테리아 개체수는 $0.3 \sim 4.3 \times 10^9$ cells l^{-1} 범위로 시기적으로 큰 변이를 나타내었다 (Fig. 3). 박테리아 개체수는 2007년 5월에 평균 0.5×10^9 cells l^{-1} 로 낮

Fig. 3. Contour plots of bacterial abundances (BA) and thymidine incorporation rates (TTI) measured in surface waters around the Saemangeum dike in each sampling date.

았으며, 2008년 3월과 7월에 각각 평균 2.7×10^9 cells l^{-1} 와 2.2×10^9 cells l^{-1} 로 높은 값을 나타내었다. 방조제 외측에서 박테리아 개체수는 대체로 방조제에 인접한 정점과 방조제 남부 해역에서 다소 높은 경향을 보였으나, 2007년 7월을 제외하면 정점별로 볼 때 대체로 2~3배의 작은 변이만 나타내었다. 그러나, 2007년 7월에는 방조제의 배수 갑문에 인접한 정점 21과 220에서 $3.7 \sim 4.2 \times 10^9$ cells l^{-1} 의 높은 값이 관측되었는데, 이들 정점에서 관측된 28 psu의 낮은 염분과 높은 강수량을 고려하면, 홍수기에 갑문의 전체 개방으로 인한 내측수의 대량 유출과 관련된 것으로 여겨진다. 박테리아 생산력은 $5.2 \sim 570$ pmol $l^{-1} h^{-1}$ 범위로 큰 변이를 나타내었다. 공간적으로는 박테리아 개체수와 유사하게 대체로 방조제에 인접한 남부 해역의 정점들에서 다소 높은 값이 관측되었으며, 시기적으로는 수온이 높은 7월 조사에서 다른 시기에 비해 높은 값이 관

측되었다. 특히 하계에 배수갑문 인근 정점에서 박테리아 개체수와 마찬가지로 높은 박테리아 생산력이 관측되었다.

방조제 내측

방조제 내측에서 박테리아 개체수는 $0.4 \sim 12.7 \times 10^9$ cells l^{-1} 범위로 외측에 비해 높은 범위의 값을 나타내었다(Fig. 3). 평균 박테리아 개체수는 2007년 5월과 10월에 1.5×10^9 cells l^{-1} 와 2.2×10^9 cells l^{-1} 로 낮았으며, 2007년과 2008년 7월에 5.7×10^9 cells l^{-1} 와 7.9×10^9 cells l^{-1} 로 높은 값을 나타내었다. 공간적으로 볼 때 박테리아 개체수는 대체로 만경강 하구쪽에서 방조제쪽으로 가면서 감소하는 경향을 보였으나, 담수의 유입이 많았던 2007년과 2008년 7월의 조사에서는 방조제에 인접한 정점에서 최대 값이 나타났다. 박테리아 생산력은 $12.3 \sim 1309$ pmol $l^{-1} h^{-1}$ 범위로 약 100배의 큰 변이를 나타내었다. 시기적으로

Fig. 3. Continued.

는 여름철에 높고 봄과 가을철에 낮은 경향을 나타내어 외측과 유사한 시기적 변동 양상을 나타내었다. 공간적 변이는 박테리아 개체수와 유사하게 만경강 하구쪽 정점에서

서 높고 방조제 인접 정점에서 낮은 경향을 나타내었으나, 2007년 7월에는 정점 203에서 가장 높은 값이 관측되었다.

Table 1. Bacterial abundances and productions reported in meso- to eutrophic environments

Site	Bacterial abundance ($\times 10^9$ cells l^{-1})	Bacterial production ($\mu gC\ l^{-1}\ h^{-1}$)	Source
York River Estuary (Virginia, USA)	1-8	0.29-3.13	Ducklow (1982)
Mediterranean (Barcelona, Spain)	4.2-8.3	1.42-6.10	Vives-Rego <i>et al.</i> (1988)
Georgia Bight (Georgia, USA)	0.8-7.6	0.07-3.5	Griffith <i>et al.</i> (1990)
Mankyung and Dongjin River Estuary (Korea)	0.4-5.8	0.004-0.93	Cho and Shim (1992)
Chesapeake Bay (USA)	1-22	0.4-9.2	Shiah and Ducklow (1994)
Shiwha lake (Korea)	1.4-19.5	1.2-38.1	Choi <i>et al.</i> (1997)
Saemangeum			
- Inner area of dike	0.4-12.7	0.3-28.8*	This study
- Outer area of dike	0.3-4.3	0.1-12.6*	

*Bacterial carbon production was estimated using a conversion factors of 1.1×10^{18} cells mol^{-1} TdR (Bell 1990) and 20 fg C cell $^{-1}$ (Lee and Fuhrman 1987).

Fig. 4. Relationships between physical variables (temperature and salinity) and bacterial variables [bacterial abundance (BA) and thymidine incorporation rates (TTI)] measured in the inner area (closed circle) and the outer area (open circle) of the Saemangeum dike. Solid and dotted lines represent regression lines obtained in the inner area and the outer area, respectively. Insets are enlarged figures showing the data from the outer area. Data enclosed by solid circle were excluded in the regression analyses.

4. 고 찰

박테리아 개체수 및 생산력의 분포를 볼 때, 새만금 방조제의 주변 해역은 부영양 해역의 특성을 나타내었다 (Table 1). 특히 방조제 내측은 과영양성 특성을 보인 시화호 방조제 내측에서 측정된 값보다 다소 낮은 범위의 값을 보였으나, 다른 부영양 해역에서 측정된 박테리아 생산력의 값보다 높은 범위의 값을 나타내어, 과영성 특성을 나타내었다. 방조제 외측도 1992년 만경강과 동진강 주변 염하구 해역에서 측정된 생산력에 비해 10배 이상 높은 값을 보였으며, 배수 갑문 주변 해역에서 때때로 부영양 해역에서와 유사하거나 다소 높은 범위의 값도 나타나, 갑문의 개방에 의해 내측의 해수가 방류됨에 따라 인접 해역이 부영양화 될 수 있음을 시사하였다.

방조제 내측에서 박테리아 개체수와 생산력은 수온 및 염분과 유의한 상관관계를 나타내어, 수온 및 담수의 유입이 박테리아의 성장에 중요한 조절 요인으로 작용함을 보여주었다(Fig. 4). 해양에서 박테리아 개체수 및 생산력이 수온에 의해 조절되는 양상은 중영양 및 부영양 해역에서 측정된 다른 연구(Cole *et al.* 1988; White *et al.* 1991)에서와 일치하는 결과이다. 그러나, 박테리아 개체수와 생산력은 유사한 수온 범위에서 매우 큰 변이를 나타내었다. 박테리아 개체수와 생산력은 염분에 대해서도 수온 보다 더 높거나 유사한 결정계수(r^2) 값을 보였다(Fig. 4). 이러한 점에서 볼 때, 새만금 방조제 내측에서 박테리아의 분포와 성장은 담수의 유입을 통한 외래성 유기물의 공급도 중요한 것으로 여겨진다. 방조제 내측에서 박테리아 개체수와 생산력은 엽록소 a 와도 유의한 양의 상관관계(각각 $r^2=0.12$, $p=0.007$ 과 $r^2=0.12$, $p=0.013$)를 나타내어, 일차생산자로부터의 자생성 유기물의 공급도 박테리아 성장의 한 조절 요인임을 보여주었으나 그 결정계수의 값은 낮았다(Fig. 6 참조). 이상의 결과는 담수의 유입이 활발한 염하구나 연안에서 박테리아의 성장이 식물플랑크톤 이외에 강으로부터의 외래성 기질에 의해 조절된다는 연구들과 일치한다(Findlay *et al.* 1992; Hoch and Kirchman 1993; Coveney and Wetzel 1995; Lee *et al.* 2001). 박테리아 생산력을 종속변수로 하고 수온, 염분 및 엽록소 a 를 독립변수로 한 다중회귀분석의 결과도 수온 및 염분이 약 50%의 박테리아 생산력의 변이를 설명할 수 있는 것으로 나타나(adj. $r^2=0.50$, $p<0.001$, $n=43$), 방조제 내측에서 수온 및 담수의 유입이 박테리아의 성장에 중요함을 시사하였다. 한편, 염분이 5 psu 이하의 값을 나타낸 경우 박테리아 개체수와 생산력은 염분과 박테리아 생산력의 관계로부터 기대되는 값에 비해 매우 낮은 값을 나타내(Fig. 4), 다량의 담수 유입에 의한 염분의 급격한 감소가 박테리아의 성장을 저해할 수 있음을 시사하였다. 방조제 외측에서

Fig. 5. Relationship between bacterial abundance (BA) and thymidine incorporation rates (TTI) measured in the inner area (closed circle) and the outer area (open triangle) of the Saemangeum dike. Solid and dotted lines represent regression lines obtained in the inner area and the outer area, respectively.

도 박테리아 생산력은 수온 및 염분과 유의한 상관관계를 나타내었다. 특히 염분과 박테리아 생산력 사이의 음의 상관관계는 갑문의 개방에 의한 내측 유출수에 의해 인근 해역의 박테리아 생산력이 증가될 수 있음을 시사한다.

한편, 방조제 내측에서 박테리아의 개체수는 박테리아 생산력과 높은 유의한 양의 상관관계를 나타내어, 박테리아 개체수의 분포가 박테리아의 성장에 의해 강하게 조절되는 양상(bottom-up control)을 나타내었다(Fig. 5). 그러나, 외측에서는 내측에 비해 낮은 기울기를 보였으며 결정계수도 낮아, 내측에 비해 상대적으로 성장 이외의 다른 요인(박테리아의 섭식 및 바이러스 감염에 의한 용해)들에 의해 조절(top-down control)될 가능성을 시사하였다(Billen *et al.* 1990).

새만금 해역에서 박테리아의 성장과 식물플랑크톤 생물량과의 관계를 평가하기 위해 새만금 방조제 내·외측 해역과 시화호 방조제 내측[최 등(1997)의 자료]에서 측정된 박테리아 개체수 및 생산력과 엽록소 a 의 관계를 비교하였다(Table 2, Fig. 6). 박테리아 개체수와 엽록소 a 의 관계는 새만금 방조제 내측과 시화호에서 동일한 관계를 나타내었으며, 방조제 외측에서는 두 해역과 기울기는 같으나 낮은 y-절편을 나타내었다. 방조제 내측과 시화호에서 높은 y-절편은 두 해역이 인접한 하천을 통해 유입된 외래성 유기물에 의해 엽록소 a 에 비해 높은 박테리아 개체수가 유지되고 있기 때문으로 판단된다. 또한 박테리아 생산력과 엽록소 a 의 관계도 새만금 방조제 내측에서 방조제 외측에 비해 높은 기울기를 나타내어(Fig. 6), 하천을 통해 엽록소 a 농도의 증가를 야기한 무기 영양염의 유입과 병

Table 2. Best models selected by stepwise multiple regression method (significant level, $\alpha=0.05$), coefficients of determination (r^2), F -statistics, and p -values. Analyses tested whether relationships between 2 variables were identical in 3 different groups (Shiwha, inner area and outer area of Saemangeum dike). Adopted model was: $Y=\beta_0+\beta_1X+\beta_2Z_1+\beta_3Z_2+\beta_4Z_1X+\beta_5Z_2X$. We assigned different values to Z_1 and Z_2 for different groups (Shiwha: 0, 0; inner area of dike: 1, 0; outer area of dike: 0, 1). Common-log transformed data were used for each variable

Y variable	X variable	Selected model	r^2	F	p
Bacterial abundance	Chlorophyll <i>a</i>	$Y=0.28+0.23X-0.27Z_2$	0.42	63.7	<0.001
Thymidine incorporation rate	Chlorophyll <i>a</i>	$Y=1.66+0.41Z_1X$	0.25	50.1	<0.001

Fig. 6. Scatter plots of chlorophyll *a* (Chl *a*) vs. bacterial abundance (BA) and Chl *a* vs. bacterial thymidine incorporation rates (TTI). Symbols represent the data from the inner (closed circle) and the outer (open triangle) areas of Saemangeum dike and the Lake Shiwha (cross). Regression lines represent the best fit for each data group selected by stepwise multiple regression method (See Table 2) (A: solid line-Shiwha and inner dike, dotted line-outer dike; B: solid line-inner dike, dotted line-outer dike and Shiwha). Outliers enclosed in dotted circle were not included in the regression analysis because the data were from winter season showing extremely low temperature of ca. 2°C.

행하여, 외래성 유기물도 함께 유입되어 박테리아의 성장이 더 촉진되었기 때문으로 판단된다.

3. 결 론

새만금 방조제의 끝물막이 공사 완료 후 새만금 해역은 방조제를 중심으로 내·외측으로 나누어졌으며, 배수 갑문을 통해 해수의 교환이 제한적으로 이루어지고 있다. 그 결과 방조제 내측에서 박테리아 개체수와 생산력은 외측에 비해 높아져 과영양성 상태를 나타내었으며, 방조제 외측에서도 갑문의 개방에 의해 때때로 부영양 상태의 높은 값을 나타내었다. 방조제 내측에서의 높은 박테리아 성장은 인접한 만경강으로부터 유입된 외래성 유기물로 인해 방조제 내측의 유기물 조건이 매우 높아졌기 때문으로 판단되었으며, 이와 병행하여 식물플랑크톤에 의해 생산된 자생성 유기물도 다른 한 요인으로 파악되었다. 따라서 새만금 해역의 수질 관리를 위해서는 강으로부터 유입되는

유기물의 저감을 통한 유입수 관리가 선행되어야 할 것으로 여겨진다. 또한 방조제 내측의 염록소 *a* 농도가 증가하는 양상을 나타내고 있는 상황을 고려하면, 방조제 내측의 유기물 농축 그리고 이의 분해를 통한 무기 영양염의 재공급과 같은 재순환도 수질 관리를 위해 고려할 필요가 있는 것으로 여겨진다.

사 사

본 연구는 2007년과 2008년도 국토해양부의 “새만금해양환경보전을 위한 조사연구(PM51003, PM43702)”의 사업비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

국토해양부. 2007. 새만금해양환경보전대책을 위한 조사연구-해양수질환경 모니터링분야. 한국해양연구원 보고서,

- BSPM43701-1956-4. 250 p.
- 이흥재. 2006. 새만금 간척사업과 해양환경의 변화상. *Ocean Polar Res.*, **28**, 353-360.
- 최동한, 강석원, 송기돈, 허성희, 조병철. 1997. 과영양성 시화호에서 박테리아의 분포 및 성장. *한국해양학회지* 「바다」, **2**, 92-100.
- Almeida, M.A., M.A. Cunha, and F. Alentara. 2005. Relationship of bacterioplankton production with primary production and respiration in a shallow estuarine system (Ria de Aveiro, NW Portugal). *Microbiol. Res.*, **160**, 315-328.
- 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. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **10**, 257-263.
- Bell, R.T., G.M. Ahlgren, and I. Ahlgren. 1983. Estimating bacterioplankton production by measuring ^3H -thymidine incorporation in a eutrophic Swedish lake. *Appl. Environ. Microbiol.*, **45**, 1709-1721.
- Billen, G., P. Servais, and S. Becquevort. 1990. Dynamics of bacterioplankton in oligotrophic and eutrophic aquatic environments: Bottom-up or top-down control? *Hydrobiologia*, **207**, 37-42.
- Bratbak, G., M. Haldal, S. Norland, and T.F. Thingstad. 1990. Viruses as partners in spring bloom microbial trophodynamics. *Appl. Environ. Microbiol.*, **56**, 1400-1405.
- Cho, B.C. and F. Azam. 1988. Major role of bacteria in biogeochemical fluxes in the ocean's interior. *Nature*, **332**, 441-443.
- Cho, B.C. and F. Azam. 1990. Biogeochemical significance of bacterial biomass in the ocean's euphotic zone. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **63**, 253-259.
- Cho, B.C. and J.H. Shim. 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. Oceanol. Soc. Kor.*, **27**, 154-163.
- Cho, B.C. and J.H. Shim. 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. Oceanol. Soc. Kor.*, **27**, 154-163.
- Cole, J.J., S. Findlay, and M.L. Pace. 1988. Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: A cross-system overview. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **43**, 1-10.
- Coveney, M.F. and R.G. Wetzel. 1995. Biomass, production, and specific growth rate of bacterioplankton and coupling to phytoplankton in an oligotrophic lake. *Limnol. Oceanogr.*, **40**, 1187-1200.
- Ducklow, H.W. 1982. Chesapeake bay nutrient and plankton dynamics. 1. Bacterial biomass and production during spring tidal destratification in York River, Virginia estuary. *Limnol. Oceanogr.*, **27**, 651-659.
- Ducklow, H.W. and C.A. Carlson. 1992. Oceanic Bacterial Production. *Adv. Microb. Ecol.*, **12**, 113-181.
- Ducklow, H.W., D.L. Kirchman, and H.L. Quinby. 1992. Bacterioplankton cell growth and macromolecular synthesis in seawater cultures during the North Atlantic spring phytoplankton bloom, May, 1989. *Microb. Ecol.*, **24**, 125-144.
- Findlay, S., M.L. Pace, D. Lints, and K. Howe. 1992. Bacterial metabolism of organic carbon in the tidal freshwater Hudson Estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **89**, 147-153.
- Fuhrman, J.A. and F. Azam. 1980. Bacterioplankton secondary production estimates for coastal waters of British Columbia, Antarctica, and California. *Appl. Environ. Microbiol.*, **39**, 1085-1095.
- Fuhrman, J.A. and F. Azam. 1982. Thymidine incorporation as a measure of heterotrophic bacterioplankton production in marine surface waters: evaluation and field results. *Mar. Biol.*, **66**, 109-120.
- Fuhrman, J.A. and G.B. McManus. 1984. Do bacteria-sized marine eukaryotes consume bacterial production. *Science*, **224**, 1257-1260.
- Griffith, P.C., D.J. Douglas, and S.C. Wainright. 1990. Metabolic activity of size-fractionated microbial plankton in estuarine, nearshore, and continental shelf waters of Georgia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **59**, 263-270.
- Hobbie, J.E., R.J. Daley, and S. Jasper. 1977. Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl. Environ. Microbiol.*, **33**, 1225-1228.
- Hoch, M.P. and D.L. Kirchman. 1993. Seasonal and inter-annual variability in bacterial production and biomass in a temperate estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **98**, 283-295.
- Kirchman, D.L. 1990. Limitation of bacterial growth by dissolved organic matter in the subarctic Pacific. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **62**, 47-54.
- Lee, C.H., 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, S. and J.A. Fuhrman. 1987. Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton. *Appl. Environ. Microbiol.*, **53**, 1298-1303.

- Parsons, T.R., Y. Maita, and C.M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, 173 p.
- Porter, K.G. and Y.S. Feig. 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnol. Oceanogr.*, **25**, 943-948.
- Proctor, L.M. and J.A. Fuhrman. 1990. Viral mortality of marine bacteria and cyanobacteria. *Nature*, **343**, 60-62.
- Shiah, F.-K. and H.W. Ducklow. 1994a. Temperature regulation of heterotrophic bacterioplankton abundance, production, and specific growth rate in Chesapeake Bay. *Limnol. Oceanogr.*, **39**, 1243-1258.
- Shiah, F.-K. and H.W. Ducklow. 1994b. Temperature and substrate regulation of bacterial abundance, production and specific growth rate in Chesapeake Bay, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **103**, 297-308.
- Vives-Rego, J., J. Martinez, and J. Garca-Lara. 1988. Assessment of bacterial production and mortality in Mediterranean coastal water. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **26**, 331-336.
- White, P.A., J. Kalff, J.B. Rasmussen, and J.M. Gasol. 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.

Received Oct. 20, 2008

Accepted Dec. 4, 2008