

## 인공 수초재배섬에서 세균의 활성과 세균 군집 구조

전남희 · 박혜경<sup>†</sup> · 변명섭 · 최명재

국립환경과학원 한강물환경연구소

### The Activity and Structure of Bacterial Community within Artificial Vegetation Island (AVI)

Nam-Hui Jeon · Hae-Kyung Park<sup>†</sup> · Myeong-Seop Byeon · Myung-Jae Choi

Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

(Received 19 July 2007, Accepted 12 September 2007)

#### Abstract

The bacterial number, extracellular enzyme activities and structure of bacterial community which are major constituent of aquatic ecosystem within the artificial vegetation island (AVI) were compared to those of the nearby pelagic lake waters in order to evaluate the possibility of the AVI as a eco-technological measure for water quality improvement and restoration of littoral zone in man-made reservoirs. There was not a significant difference in the total number of bacteria, but the number of active (viable) bacteria within the AVI was about 0.7 to 4.1 times higher than nearby pelagic lake water. The ratio of the number of active bacteria versus the total number of bacteria was also higher in the AVI than nearby pelagic lake water. The activities of  $\beta$ -glucosidase and phosphatase were 1.0 to 13.1 and 0.8 to 7.3 times higher respectively in the AVI than nearby pelagic lake water, showing that microorganisms were more active within the AVI. The bacterial communities of the two waters, examined by FISH method, did not indicate a clear difference in the springtime when the growth of macrophytes was immature, but during summer and fall it showed a clear difference indicating the formation of distinct bacterial community within the AVI compared to nearby lake water. From the results of this study, we conclude that AVI can contribute to make up the littoral ecosystem which show rapid cycling of matters through active detritus food chain in the dam reservoirs which have unstable aquatic ecosystem due to short hydraulic residence time and to strengthen the self-purification capacity of the lake.

**keywords** : Artificial vegetation island (AVI), Bacterial community, Man-made reservoirs, Phosphatase activity,  $\beta$ -glucosidase activity

## 1. 서론

우리나라 호수는 대부분이 하천에 댐을 건설하면서 형성된 인공 댐호로 상류 하천에서의 유입량과 댐 방류량에 따른 수리학적 체류시간의 변화에 따라 이화학적, 생물학적 특성이 직접적으로 영향을 받고 있다(공 등, 1996; 박 등, 2003). 즉 댐 수문조작에 의해 불규칙적인 체류시간을 보이며 자연호에 비해 체류시간이 짧아 호내 수중생태계가 불안정하다. 또한 상류의 대형 댐에서는 홍수 및 갈수기의 댐 수위조절로 연간 수위변동이 수십 미터에 달해 호안에 수변 생태계가 거의 형성되지 못하였다. 이에 따라 수위 변동으로 파괴된 수변 생태계의 복원을 위한 대안으로 생태공학적인 방법인 인공 수초재배섬에 대한 연구가 진행되고 왔으며(권, 2006; 안 등, 2001), 우리나라의 대표적인 댐호인 팔당호, 소양호, 의암호, 대청호, 주암호 등에서 수초재배섬이 설치, 운영되고 있다(변, 2007).

초기의 수초재배섬(Artificial vegetation island: AVI)은 자연 습지에서 발견되는 floating mat나 floating marsh를 모방하여 사라져 가는 습지를 조성하기 위해 개발되었다(Mueller et al., 1996). Floating mat는 외부로부터 무기 퇴적물의 공급이 없고 퇴적물이 유기화되어 가뭄될 때 부력이 생겨서 형성되며, 퇴적물이 부상하면서 식물이 불규칙한 침수로부터 벗어나고 퇴적물의 표면이 침수되지 않고 항상 습윤한 상태로 유지되어 식물 생장이 안정화된다(Sasser et al., 1984). 또한, floating mat에서는 두터운 유기물 기질에 뿌리가 얽혀 있어 식물의 수상부 성장보다는 수층 생장이 활발한 것으로 알려져 있다(Mitsch et al., 1993). 이런 원리를 이용하여 수초재배섬은 부력을 가지는 부채위에 수생식물을 식재하고 식물의 뿌리와 지하경을 고정하는 기질로 구성되어 물에 뜨도록 설계되었으며, 자연 상태의 floating mat와 동일한 기능을 수행하는 생태공학적인 방법이라 할 수 있다.

수초재배섬의 수생식물은 호안과 하안의 수변부에 습지대를 형성하게 되고, 수초재배섬은 무기 혹은 유기물을 흡수 또는 흡착하는 미생물을 포함하여 각종 수생 생물의 서

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
parkhk@me.go.kr

식공간을 제공한다(조, 1992). 또한 수초재배섬에 갈대, 달뿌리풀, 꽃창포 등 영양염류의 흡수율이 좋은 수초를 식재하여 수중의 영양염류를 이용하여 수초가 성장하게 한 후 고사기 이전에 수초 지상부를 절취, 수역 외로 제거하여 수중의 영양염류를 제거함으로써 수질개선의 효과를 가질 수 있다(변, 2007). 한편 수초재배섬의 세균은 식물뿌리와 인공 식생기반재에 부착하여 주위의 낮은 농도의 유기물과 영양염류를 흡수하여 고농도의 세균 생체물질로 전환하며, 수생식물의 뿌리 부분을 통하여 산소를 공급받아 유기물 분해를 촉진한다(최 등, 2004). 뿐만 아니라 유기물과 영양염류를 흡수하는 과정에서 수중 유기물의 상당량이 미생물 및 식물플랑크톤의 호흡으로 소비되고, 상위 포식자인 동물플랑크톤과 원생동물은 미생물과 식물플랑크톤을 섭취하고 그들이 흡수하는 90% 이상의 유기물은 호흡으로 소비되며, 동물플랑크톤과 원생동물은 어류의 먹이로 섭취됨으로써 수초재배섬이 설치된 수역에서는 다른 자연 수역에 비해 먹이연쇄를 통한 물질 순환이 빠르게 일어나고 이에 따른 유기물 제거량이 크다고 알려져 있다(Shimatani, 1996).

세균은 환경변화에 민감하며 수생태계에서 유기물 잔재(detritus)를 분해하여 에너지를 얻고 그 자신은 다시 동물플랑크톤 등의 1차소비자에 의해 포식되어 먹이연쇄로 연결되는 Microbial loop의 중요한 구성요소로서 수중의 물질 순환에 중요한 역할을 하며 또한 세균은 환경 상태를 나타내는 지표로 사용될 수 있으므로(Lampert et al., 1997) 인공적으로 설치된 새로운 생태계인 수초재배섬에서 세균에 관한 연구는 수초재배섬의 환경 상태에 관해 유용한 정보를 제공해 줄 수 있다.

따라서 본 연구에서는 국내 인공 댐호에서 수변생태계 복원과 수질 개선을 위한 생태공학적인 방법으로서 수초재배섬의 가능성을 평가하기 위해 수초재배섬과 인근 호수의 수중생태계에서 세균의 현존량 및 체외효소활성도, 세균군집구조를 비교하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 조사 대상 지역 및 기간

본 연구의 조사대상은 팔당호 경안천 수역에 설치된 수초재배섬으로 2000년 5월에 완공된 수초재배섬은 총면적 2,690 m<sup>2</sup>, 식재면적 2,560 m<sup>2</sup>이며 인공 부유물에 갈대, 달뿌리풀, 미나리, 꽃창포 등이 식재되어 있다(Fig. 1). 비교 수역으로는 수초재배섬이 설치되어 있는 경안천 수역의 호수 중심부를 조사하였다. 조사기간은 시설이 운영된 지 약 5년이 경과된 2005년 4월부터 11월까지이며 격주로 조사하였다.

### 2.2. 시료 채취

수초재배섬 내부의 시료 채취는 수초가 조밀하게 성장하고 있는 세 지점(AVI 1, AVI 2, AVI 3 : AVI)에서 각각 채취하여 일반수질 측정 및 환경인자 분석 후 평균값을 사용하였다. 세균과 체외효소활성도 분석을 위해 별도로 무균

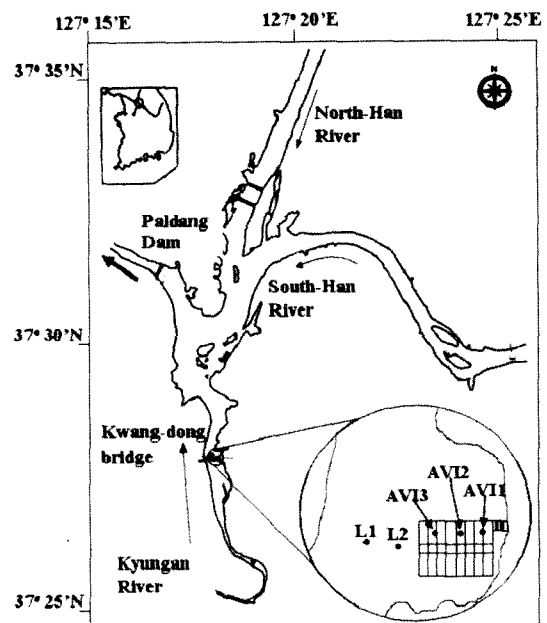


Fig. 1. Map showing the study sites in Lake Paldang.

채수병에 채취하여 채취된 세 지점의 시료를 혼합하여 분석하였다. 비교 수역으로 경안천 수역의 호수 중심부(L1, L2 : Lake water)에서 표층수를 채취하여 각각 분석 후 평균하였으며, 세균과 체외효소활성도 분석은 마찬가지로 두 지점의 시료를 균질하게 혼합하여 분석하였다(Fig. 1).

### 2.3. 일반수질 및 환경인자

수온과 용존산소(DO)의 측정은 현장에서 다항복현장측정기(YSI650, YSI Inc.)로 측정하였고, BOD<sub>5</sub>는 DO meter (YSI5100, YSI Inc.)를 이용하여 격막 전극법으로 구하였다(APHA, 2005). 용존유기탄소(DOC)는 450°C에서 열처리한 GF/F로 시료를 여과한 후 여과수를 TOC analyzer(Shimadzu TOC-VCTH)로 분석하였고, 입자상 유기탄소(POC)는 위의 GF/F 여과지 위에 남은 입자를 원소분석기(CHN analyzer: Elementar vario EL)를 이용하여 분석하였다. 클로로필 a, 총인, 인산염인의 분석은 Standard method(APHA, 2005)에 준하여 흡광광도법으로 측정하였다.

### 2.4. 총세균수와 활성세균수

총세균수는 현장에서 formalin(최종농도 2%)으로 고정된 시료를 black polycarbonate membrane filter(Millipore, pore size 0.2 μm, φ 25 mm)에 넣고, 2 mM acridine orange (C17H20Cl3N3Zn, Merck)용액으로 염색 후(Hobbie et al., 1977), 형광현미경(Olympus BX60, exciting filter: B, Lamp: Mercury lamp HBO 100W/2, OSRAM)으로 계수하는 acridine orange direct count(AODC) 방법을 이용하여 측정하였다.

활성세균수는 qDVC(quantitative direct viable count)법을 이용하여 다음과 같이 측정하였다(Daisaku et al., 2000). 시료 9 mL와 cephalixin(0.01%) 1 mL, nalidixic acid(0.02%) 1 mL, yeast extract(2.5%) 50 μL, glycine(최종농도: 2%)을

첨가하여 현상온도에서 24시간 동안 암실 배양 후, 액체질 소처리를 하여 formalin(최종농도 2%)으로 고정하였다. 고정시킨 시료는 총세균수와 같은 방법으로 염색하여 계수하였고, 활성세균수 값은 총세균수 값에서 qDVC법으로 나타난 세균수를 빼 결정하였다.

## 2.5. 체외효소활성도

체외효소활성도는  $\beta$ -glucosidase와 phosphatase 활성도를 조사하였다. Methylumbelliferyl-substrate(MUF- $\beta$ -glucoside; 10 mM), MUF-phosphate(10 mM)를 최종농도 25, 50, 100, 200, 400  $\mu$ M로 시료에 첨가하여 현상온도에서 30분간 배양하였다. 배양 후 반응을 정지시키기 위해 glycine-NaOH (pH 10.5, 0.2 M) 0.5 mL을 첨가하였다. 효소에 의해 분해된 MUF의 양을 형광분광광도계(Spectrofluorophotometer RF-1501, Shimadzu, Ex : 380 nm, Em : 445 nm)로 정량 분석하였다.

분석 후, Lineweaver-Burk식 [ $T/F=Kt+Sn+A/V_{max}$ , T: 배양시간, F: 전체 기질 중에서 세포 내로 흡수되거나 CO<sub>2</sub>로 변화된 기질의 비율, Sn: 자연계에 존재하는 기질 농도, A: 첨가한 기질의 농도, V<sub>max</sub>: 최대흡수속도(nmol/L/hr)]을 이용하여 최대분해속도(V<sub>max</sub>)를 구하였다(Chróst, 1989; Chróst et al., 1987).

## 2.6. 세균군집구조

세균군집구조는 FISH(fluorescent in situ hybridization)방법으로 실험하였다(Amann et al., 1995). 사용한 rRNA probe는 Cy3로 표지하였고, probe의 염기서열은 Table 1과 같다. 시료는 현장에서 paraformaldehyde 용액(농도 4%)으로 고정하고, polycarbonate membrane filter(Millipore, pore size 0.2  $\mu$ m,  $\phi$  25 mm)로 여과 후 1xPBS로 세척 후, 50%, 80%, 99%의 에탄올을 차례대로 각각 3분씩 건조시켰다.

전처리한 시료를 16  $\mu$ L의 hybridization 용액(0.9 M NaCl, 20 mM Tris-HCl(pH 7.4), 0.01% SDS, 20%(EUB,  $\alpha$ -group) 또는 35%( $\beta$ ,  $\gamma$ , CF-group) formamide)과 4  $\mu$ L의 probe(농도 25 ng/ $\mu$ L)를 첨가하여 38°C(EUB) 또는 46°C( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , CF-group)에서 90분 동안 반응시켰다. 이 후 세척용액(20 mM Tris-HCl(pH 7.4), 5 mM EDTA, 0.01% SDS, 0.18 M(EUB,  $\alpha$ -group) 또는 0.04 M( $\beta$ ,  $\gamma$ -group) NaCl)에 담귀 40°C(EUB) 또는 48°C( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , CF-group)에서 20분간 방치한 다음 증류수로 세척하고 공기 중에서 건조시켰다. 총세균수는 FISH 방법을 적용한 후, DAPI로 염색하여

형광현미경(Olympus BX60, exciting filter: U-DAPI, exciting filter:G-Cy3)으로 계수하였다.

## 2.7. 통계분석

수초재배섬 내부와 비교 수역인 경안천 수역 호수 중심부의 환경인자 및 세균수 평균의 차이를 알아보기 위해 MS Excel 프로그램을 사용하여 t-검정을 하고 P값을 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 일반 수질 항목

수초재배섬과 호수 중심부에서 세균 활성도 및 체외효소 활성도에 영향을 미치는 물리, 화학적 수질환경인자의 경시적 변동을 Fig. 2에 나타내었다. 수온은 두 수역 간에 거의 차이가 없이 유사한 변동을 보였으나( $P<0.87$ , N=18), 용존 산소농도(DO)는 두 수역에서 현격한 차이를 보여 ( $P<0.000$ , N=18), 전 조사기간 동안 수초재배섬 내부에서 현저히 낮은 값을 보였고 특히 5월 중순 이후부터 8월 초순까지 2.0 mg/L 미만의 빈산소 상태를 보였다. 호수 중심부의 용존 산소농도(DO)는 수초재배섬과 유사한 경시적 변동패턴을 보여 4월에 높았던 농도가 5월부터 서서히 감소하여 8월까지 낮은 농도를 보인 후 9월 이후 증가하였으나 농도가 낮은 시기에도 최소 5.2 mg/L로 수초재배섬에 비해 높은 농도를 보였다.

수중 유기물 농도의 지표인 BOD, DOC, POC 중에서 DOC를 제외한 BOD와 POC는 모두 두 지점의 차이가 뚜렷하게 나타났으며( $P<0.004$ ,  $P<0.003$ , N=18) 수초재배섬에서 높은 농도를 보였다. 즉, BOD는 수초재배섬과 호수 중심부에서 평균 5.2, 3.4 mg/L로 관찰되었으며, POC는 평균 3.5, 2.8 mg/mL로 나타났다. 그러나 DOC는 두 지점에서 평균 2.1 mg/L를 보여 거의 차이를 보이지 않았고( $P<0.53$ , N=18) 일시적으로 호수 중심부에서 약 0.4 mg/L 더 높은 농도를 보였다. 식물플랑크톤 현존량을 지표하는 클로로필 a 농도도 두 수역에서 뚜렷한 차이를 보였으나( $P<0.001$ , N=35) 수초재배섬에 비해 호수 중심부에서 훨씬 높은 농도를 보여 수초재배섬에 의해 식물플랑크톤 증식 억제가 이루어지는 것으로 나타났다. Phosphatase의 기질이 되는 총인(TP)과 분해산물인 인산염인(PO<sub>4</sub>-P) 농도를 수역 간에 비교한 결과, 전 조사기간 동안 총인은 수초재배섬에서 평균 0.190 mg/L으로 호수 중심부(평균 0.130 mg/L)보다 더

Table 1. Probe sequences and their target organism (Amann et al., 1995)

Probe	Sequences	Target organisms	E.coli position
ALF1b	5'-CGTTCG(C/T)TCTGAGCCAG-3'	$\alpha$ -proteobacteria	19 ~ 35
BET42a	5'-GCCTTCCCACTTCGTTT-3'	$\beta$ -proteobacteria	1027 ~ 1043
GAM42a	5'-GCCTTCCACATCGTTT-3'	$\gamma$ -proteobacteria	1027 ~ 1043
CF319a	5'-TGGTCCGTGTCTCAGTAC-3'	<i>Cytophaga-Flavobacterium</i>	319 ~ 336
EUB338	5'-GCTGCCTCCCGTAGGAGT-3'	Eubacteria	338 ~ 355
Non labeled beta42a	5'-GCCTTCCCACTTCGTTT-3'	$\gamma$ -proteobacteria	1027 ~ 1043
Non labeled gam42a	5'-GCCTTCCACATCGTTT-3'	$\beta$ -proteobacteria	1027 ~ 1043

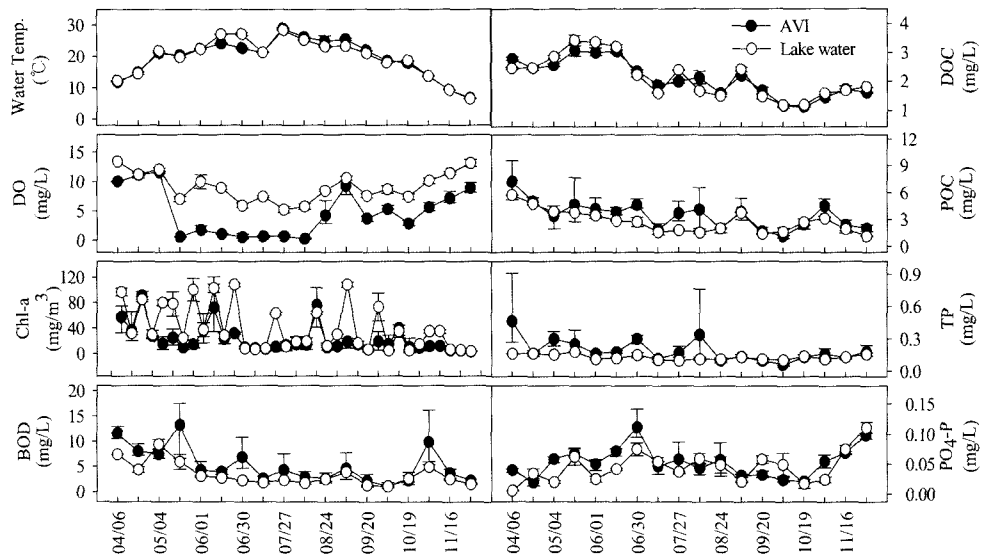


Fig. 2. The temporal variations of environmental factors in artificial vegetation island (AVI) and nearby pelagic lake water from April to November, 2005.

높은 농도를 보였다( $P < 0.012$ ,  $N = 18$ ). 인산염인은 수초재배섬과 호수 중심부에서 평균 0.054, 0.045 mg/L로 수초재배섬에서 다소 높았으나 통계 처리시에는 두 수역 간에 차이가 거의 없는 것으로 나타났다( $P < 0.16$ ,  $N = 18$ ). 시기적으로 보면 7월까지의 수초재배섬 내부에서 인산염인( $PO_4\text{-P}$ )이 약 1.5배 높은 농도를 보였다(Fig. 2).

3.2. 총세균수와 활성세균수

수초재배섬과 호수 중심부에서 총세균수는 각각 조사기간 평균  $2.6 \times 10^6$  cells/mL와  $2.2 \times 10^6$  cells/mL로 큰 차이는 보이지 않았다( $P < 0.2$ ,  $N = 18$ )(Fig. 3). 그러나 활성세균수의 경우 수초재배섬 내부와 호수 중심부가 평균  $1.9 \times 10^6$  cells/mL,  $1.3 \times 10^6$  cells/mL으로 조사되어 총세균수와는 달리 수초재배섬 내부가 호수 중심부에 비해 최대 4.1배 높은 값을 보였다( $P < 0.03$ ,  $N = 18$ ). 일반적으로 세균의 성장과 활성은 수온과 이용할 수 있는 유기물 농도에 따라서 증가하는데(최, 1996) 조사기간 동안 수온은 두 수역에서 거의 비슷한 값을 보였기 때문에 세균수에 수온의 영향은 크지 않았던 것으로 판단된다(Fig. 2). 그러나, 수초재배섬에서 BOD, POC 등의 유기물이 호수 중심부에 비해 높은 값을 보여( $P < 0.004$ ,  $P < 0.003$ ,  $N = 18$ ) 높은 유기물 농도가 수초재배섬에서 활성세균수의 증가에 큰 기여를 한 것으로 생각된다. 또한, 다른 시기에 비해 유기물 농도가 가장 높았던 봄철에 두 지점에서 총세균수와 활성세균수가 높은 것으로 보아 유기물에 의해 세균의 성장이 직접적으로 영향을 받았던 것으로 판단된다(Fig. 2).

석 등(2001)은 우리나라 소양호의 경우 총세균수에 대한 활성세균수의 비율은 1년 동안 3.7~44.6%라고 보고하였고, 여름철 일본의 Takiue 강은 평균 30.3%의 활성세균수의 비율을 나타냈으며, Tarumi Shrine(springwater)에서 연간 활성세균수의 비율은 평균 37.0%이었다(Daisaku et al., 2000). 본 연구 결과 총세균수에 대한 활성세균수의 비율은

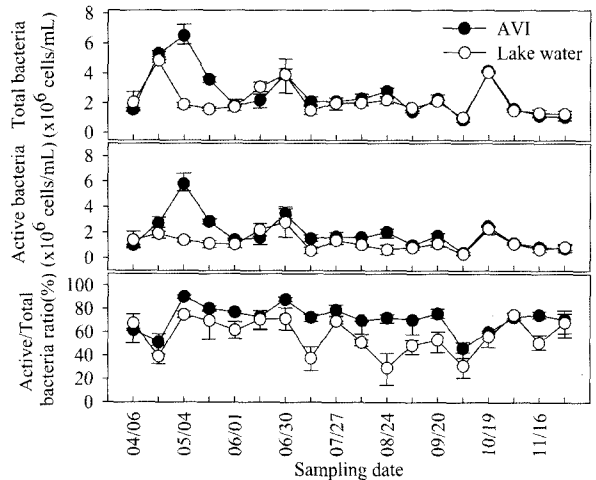


Fig. 3. The temporal variations of total bacteria, active bacteria and ratio of active bacteria versus total bacteria in artificial vegetation island (AVI) and nearby pelagic lake water from April to November, 2005.

호수 중심부의 경우 평균 57.1%, 수초재배섬 내부는 평균 71.5%로 관찰되어(Fig. 3) 위의 다른 수생태계와 비교하면 과영양상태인 팔당호 경안천 수역에서(박 등, 2005) 활성세균수의 비율이 더 높은 것으로 나타났으며 특히 수초재배섬 내부는 경안천 수역의 호수 중심부에 비해 훨씬 높은 비율을 보였다( $P < 0.0001$ ,  $N = 18$ ).

본 연구의 조사대상인 수초재배섬에서 동물플랑크톤의 생체량은 호수 중심부에 비해 평균 13.9배 더 높게 나타났다(유 등, 2007). 동물플랑크톤은 식물플랑크톤이 부족하거나 독성을 가진 cyanobacteria가 많은 수생태계에서는 먹이원이 식물플랑크톤에서 세균으로 전환된다(심 등, 1992). 따라서 수초재배섬 내부에서는 호수 중심부에 비해 동물플랑크톤에 의한 세균의 섭식압이 컸을 것이며 이에 따라 총세균수가 비슷한 값을 보인 것으로 판단된다. 또한 두 지

점에서 총세균수가 차이를 보이지 않은 반면, 활성세균수와 활성세균수의 비율이 높게 관찰된 것은 동물플랑크톤의 섭식에 대한 stress로 인해 세균의 활성이 증대되었기 때문으로 판단된다(Byeon et al., 2002). 한편 부착세균은 POC와 같은 입자상 유기물질에 부착하여 성장하고 수체 내의 고분자 물질을 분해하기 위해 활성이 증대되며(Kogure, 1989) 부착세균은 부유세균보다 왕성한 생리적 활성과 다양성을 가지고 있어 기질에 대한 대사율이 부유세균보다 빠르다(Lehman et al., 2002). 따라서 수초재배섬에서 대량 번성한 동물플랑크톤의 배설물과 수초의 잔재에서 기원한 부식질 등으로 POC와 BOD의 농도가 호수 중심부에 비해 약 1.5배, 1.3배 높아, 부착세균의 활발한 성장과 활동을 가져왔을 것이다. 또한 수초재배섬의 경우 부착세균을 지지할 수 있는 식물뿌리와 식생기반재 등의 매질이 풍부하여 부착매질이 적은 호수 중심부에 비해 세균의 활성이 높게 나타난 것이라 생각된다.

### 3.3. 체외효소활성도

호수에서는 유기물질의 95% 이상이 입자형태의 고분자 물질로 구성되어 있다(Münster et al., 1990). 이런 형태의 물질은 미생물이 바로 이용하지 못하고 주로 세균에 의해 분비되는 체외효소(extracellular enzyme)에 의해 분해된 후 이용이 가능하므로 세균의 활성이 높을수록 체외효소활성도가 높으며, 체외효소활성도를 측정함으로써 그 분해산물이 이용되는 정도와 효소학적 조절과정을 파악할 수 있는 지표로 이용할 수 있다(Chróst, 1989). 따라서 본 연구에서는 대표적인 체외효소인  $\beta$ -glucosidase와 phosphatase의 활성도를 최대분해속도인  $V_{max}$  값으로 나타내어 수초재배섬 내부와 호수 중심부에서 비교하였다.

이당류나 다당류를 단당류로 분해하는 즉  $\beta$  고리를 monomer로 가수분해시켜 세균이 바로 이용하게 하는(Chróst, 1989)  $\beta$ -glucosidase의 활성도는 51.2~764.4 nmol/L/hr, 호수 중심부에서 19.0~111.2 nmol/L/hr로 수초재배섬 내부에서 높게 나타났다( $P < 0.005$ ,  $N=18$ ). 특히 수초가 성장하는 4월부터 8월까지 호수 중심부에 비해 수초재배섬이 약 5배 더 높게 관찰되었으며, 봄철 이후 지속된 유기물 농도의 감소로 인해 가을철에는 두 지점에서 거의 비슷한 값으로 관찰되었다(Fig. 2, 4). 대부분의 담수에 있는 고분자 물질(다당류 형태)은 식물로부터 기원되는데(Wetzel, 1993), 수초재배섬에서 수초의 성장에 따라 고분자물질이 생성되어 호수 중심부에 비해  $\beta$ -glucosidase 활성도가 높았던 것으로 보인다. 또한  $\beta$ -glucosidase 활성은 95% 이상이 세균에 의한 것으로(Chróst, 1989) 총세균수와 활성세균수가 높았던 봄철에  $\beta$ -glucosidase 활성도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 그러나 호수 중심부는 세균수와 상관없이 측정 시기에 따라  $\beta$ -glucosidase의  $V_{max}$  값에 큰 변동이 없어 두 지점 간에 다른 패턴을 나타냈다(Fig. 3, 4).

Phosphatase는 입자성유기인(POP)이나 용존유기인(DOP)을 용존무기인(DIP) 형태로 분해하며, 그 분해된 DIP는 세균과 식물플랑크톤이 이용한다(Chróst et al., 1987; Cothier

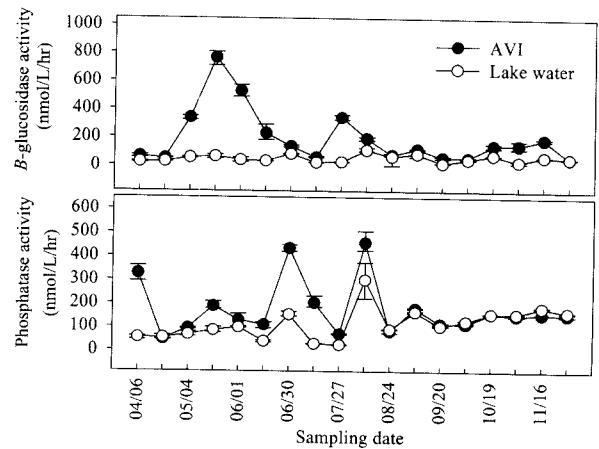


Fig. 4. The temporal variations of  $\beta$ -glucosidase and phosphatase activity in artificial vegetation island (AVI) and nearby pelagic lake water from April to November, 2005.

et al., 1988). Phosphatase 활성도는  $\beta$ -glucosidase 활성도와 유사하게 수초재배섬이 호수 중심부에 비해 4월부터 8월까지 약 2.7배 더 높았고 이후에는 비슷한 값을 보였다( $P < 0.015$ ,  $N=18$ ). Phosphatase의 기질이 되는 총인의 농도도 수초재배섬에 비해 호수 중심부가 낮았고( $P < 0.012$ ,  $N=18$ ) phosphatase 활성도와 총인의 변화 패턴이 유사하게 나타나 총인 농도가 높을수록 세균에 의한 phosphate 분비가 촉진되는 것으로 조사되었다(Fig. 2, 4). 또한 phosphatase 활성도가 수초재배섬에서 호수중심부에 비해 뚜렷하게 높았던 4월부터 7월까지 용존무기인 형태인  $PO_4$ -P의 농도도 호수 중심부(평균 0.037 mg/L)에 비해 수초재배섬(평균 0.059 mg/L)에서 높은 것으로 나타나, 이 시기에 세균에 의해 분비된 phosphatase의 활발한 분해로  $PO_4$ -P의 생성이 많았으며 이런 결과는 수초재배섬에서 빠른 인의 순환이 일어났음을 시사하였다.

### 3.4. 세균군집구조

Bacteria(Eubacteria) 중 proteobacteria는 자연환경에 80%로 존재하며(Hugenholtz et al., 1998) proteobacteria는 다시  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ -proteobacteria로 나뉜다. Eubacteria에 포함되는 *Cytophaga-Flavobacterium* 또한 담수에 많이 분포되어 있다. 따라서 본 연구에서는 세균 군집구조를 조사하기 위해  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -groups과 *Cytophaga-Flavobacterium*(CF) group으로 구분하여 FISH 방법으로 분석하였다. 경안천 수역의 호수 중심부에서 세균군집구조를 분석한 결과 총세균수에 대한 Eubacteria의 비율이 49.9~83.6%로 나타났고 수초재배섬에서 총세균수에 대한 Eubacteria의 비율이 54.5~90.1%로 나타나 수초재배섬이 호수 중심부에 비해 Eubacteria의 비율이 다소 높았다. 국내, 외에서 FISH 방법으로 조사된 총세균수에 대한 Eubacteria의 비율을 살펴보면, 바이칼호에서 44%, Baltic sea에서 72.8±8%(Glöckner et al., 1999), 소양호에서는 1998년부터 1999년까지 30.7~97.9%의 범위로 보고되어(홍, 2001), 본 연구에서 조사된 팔당호 경안천 수역의 결과와 큰 차이를 보이지 않았다.

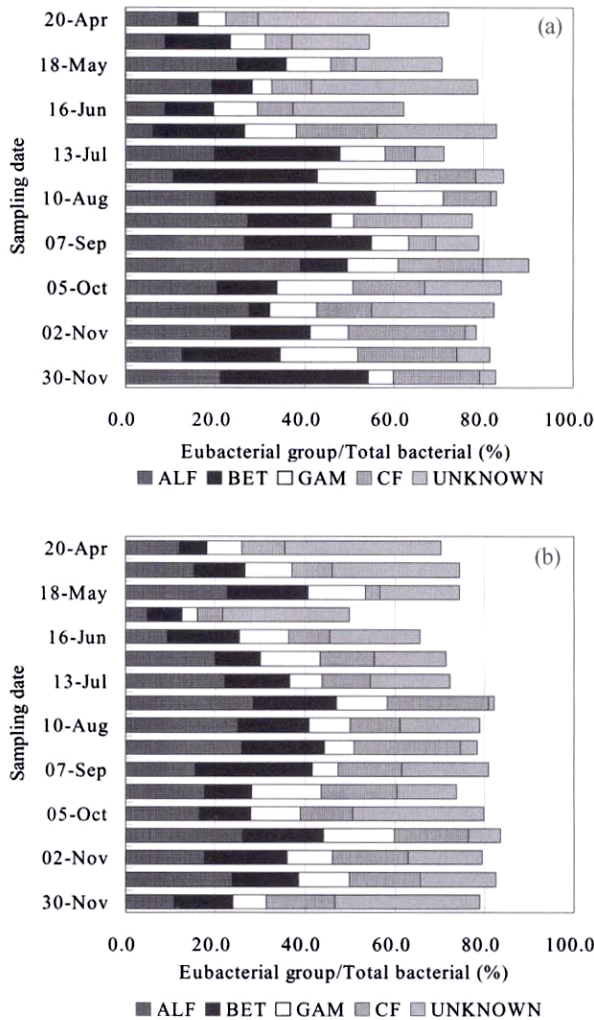


Fig. 5. Bacterial community structure in artificial vegetation island (a) and nearby pelagic lake water (b) from April to November, 2005 (ALF= $\alpha$ -proteobacteria, BET= $\beta$ -proteobacteria, GAM= $\gamma$ -proteobacteria, CF=Cytophaga-Flavobacterium).

4월부터 6월까지 수초재배섬에서 총세균수에 대한 각 group 비율은 unknown bacteria의 비율이 17.4~43.6%로 매우 높게 나타난 반면 다른 group 들은 8.3~13.3%의 범위로 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 5). 호수 중심부도 수초재배섬과 유사하게 특별히 우점하는 group은 없었으며, 수초재배섬과 호수 중심부에서 세균군집의 차이가 뚜렷이 보이지 않았다. 그러나 수초재배섬과 호수 중심부는 7월부터 서로 다른 세균군집 구조를 보였다. 즉 수초재배섬은 7월부터 11월까지 unknown bacteria 비율이 호수 중심부(평균 13.0%)에 비해 6.6%가 감소하였으며 9월초까지  $\beta$ -group의 비율이 평균 28.6%로 가장 높은 비율을 나타냈고  $\alpha$ -group은 평균 20.8%로 관찰되었다. 반면, 호수 중심부는  $\alpha$ -group(평균 23.4%)이  $\beta$ -group(평균 18.6%)보다 많은 비율을 차지하고 있었고 CF-group(평균 16.5%)도  $\beta$ -group과 비슷한 비율을 보였다.  $\beta$ -group은 산소가 없는 서식처에서 유기물이 부패되면서 나오는 물질을 이용하여 성장하며(Lansing

et al., 2005), 영양염이나 식물의 낙엽 등에서 유래되는 휴믹산과 영양염류가 풍부할 경우 많이 분포한다(Ulrike et al., 2003). 본 연구에서 5월말부터 8월까지 수초재배섬 내부에서 용존산소농도가 매우 낮은 빈산소 상태(약 2.0 mg/L 미만)를 보였는데(Fig. 2), 낮은 용존산소농도의 영향으로 인해  $\beta$ -group이 다른 group에 비해 우점한 것으로 판단된다. 반면, 여름철 호수 중심부에서는  $\beta$ -group(평균 18.6%)보다는  $\alpha$ -group(평균 23.4%)이 우점하였다. 소양호의 경우 수온 증가에 따라  $\alpha$ -group이 증가한다고 보고되었는데(홍, 2001), 본 연구에서는 수온 증가에 따라 총세균수나 활성세균수는 증가는 나타나지 않았으나 총세균을 군집별로 분석한 결과 수온에 영향을 받는  $\alpha$ -group이 많이 분포하여 세균의 군집 구성에는 수온의 영향이 컸던 것으로 보인다(Fig. 2, 3, 5).

이 후 호수 중심부는 9월말부터 11월까지  $\gamma$ -group은 평균 11.8%, 나머지 group은 14.3~18.7%의 범위로 고르게 분포하였으나 수초재배섬은  $\alpha$ -group(평균 24.0%)과 CF-group(평균 19.2%)이 다른 group에 비해 많이 분포하였다. CF-group은 호기성 상태에서 다양한 단백질, 탄수화물, 구충제에서 고분자 물질의 살충제까지 다양한 범위의 기질을 분해할 수 있다(Glöckner et al., 1999). 그러나 수초재배섬 내부는 호수 중심부에 비해 고분자물질을 포함한 유기물 농도가 높았음에도 봄과 여름철의 CF-group의 비율은 가을철에 비해 낮았다. 수초재배섬에서는 수초로 인한 대기의 순환 저해, 수초에 의한 차광효과로 인한 식물플랑크톤의 광합성 저해, 동물플랑크톤의 과다 증식 및 미생물의 유기물 분해활동에 의한 산소 소모 증가 등 복합적인 요인에 의해 여름철에 용존산소 농도가 크게 감소하였는데 이 때문에 호기성 상태에서 성장하는 CF-group이 영향을 받았으며, 9월 이후 용존산소가 높아지기 시작하면서 CF-group의 분포도 증가한 것으로 판단된다(Fig. 2, 5).

#### 4. 결론

수질개선 및 수변생태계 복원을 목적으로 팔당호 경안천 수역에 설치된 수초재배섬 내부의 세균수, 체외효소활성도 및 세균군집구조 등을 대조 수역인 경안천 수역의 호수 중심부와 비교한 결과, 수초재배섬에서 활성세균수 및 총세균수에 대한 활성세균수의 비율이 호수 중심부에 비해 각각 1.5배, 1.3배 높았으며,  $\beta$ -glucosidase와 phosphatase 등 대표적인 체외효소의 활성도도 3.8배, 1.5배 더 높게 나타나 수초재배섬 설치로 인해 세균의 활성도가 매우 높아졌음을 알 수 있었다. 뿐만 아니라 수초재배섬 내부의 세균군집구조가 호수 중심부와 시기별로 차이를 보여 수초재배섬 설치로 인해 세균 군집구조가 변화되었음을 알 수 있었다. 이런 결과로 볼 때 인공 댐호에 설치된 수초재배섬은 세균의 높은 활성도가 기초가 되어 microbial loop를 통해 빠른 물질순환이 일어나는 수변생태계를 생성하고 또한 이를 통해 호내 자정능력을 강화시키는 생태공학적인 방법으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 2005년 한강수계관리위원회 팔당호 수질개선 사업 「수초재배섬 운영·관리 사업」의 일부로 수행되었다.

## 참고문헌

- 공동수, 윤일병, 류재근, 팔당호의 물수지 및 수문특성, *한국육수학회지*, **29**(1), pp. 51-64 (1996).
- 권오병, 인공식물섬 조성에 의한 수생태계 개선효과에 관한 연구, 박사학위논문, 강원대학교 (2006).
- 박혜경, 이현주, 김은경, 정동일, 팔당호 조류발생 특성 및 수질환경인자의 통계적 분석, *한국물환경학회지*, **21**(6), pp. 584-594 (2005).
- 박혜경, 정원화, 팔당호의 장기간 식물플랑크톤 발생 추이, *한국물환경학회지*, **19**(6), pp. 673-684 (2003).
- 변명섭, 팔당호에서 수초재배섬에 의한 수환경 개선효과에 관한 연구, 박사학위논문, 강원대학교 (2007).
- 석정현, 홍선희, 김광규, 안태석, 소양호에서 황성세균주의 계절적·수직적 변화, *한국미생물학회지*, **37**(1), pp. 80-84 (2001).
- 심두섭, 안태석, 소양호에서 동물 플랑크톤의 섭식작용에 관한 연구, *한국미생물학회지*, **30**, pp. 129-133 (1992).
- 안태석, 박현진, 21세기의 새로운 환경기술, *생태기술 국제 심포지움 호수연안복원과 인공식물섬 발표논문집*, pp. 129-146 (2001).
- 유경아, 박혜경, 변명섭, 전남희, 최명재, 윤석환, 공동수, 팔당호에서 인공 수초재배섬 설치에 따른 동물플랑크톤 군집 변화, *한국물환경학회지*, **23**(3), pp. 339-347 (2007).
- 조강현, 팔당호에서 대형수생식물에 의한 물질생산과 질소와 인의 순환, 박사학위논문, 서울대학교 (1992).
- 최승익, 소양호의 세균 개체수와 활성도 변화에 관한 연구, 박사학위논문, 강원대학교 (1996).
- 최정현, 박석순, 퇴적물내의 산소와 물 수송에 관한 습지 식물의 역할, *한국육수학회지*, **37**(4), pp. 436-447 (2004).
- 홍선희, 담수생태계에서 세균군집구조의 분석, 박사학위논문, 강원대학교 (2001).
- Amann, R., Ludwig, W. and Schleifer, K. H., Phylogenetic and in situ detection of individual microbial cells without cultivation, *Microbiol. Rev.*, **59**, pp. 143-169 (1995).
- APHA, Standard methods for the examination of water and wastewater, American Public Health Association, Washington D.C. USA (2005).
- Byeon, M. S., Yoo, J. J., Kim, O. S., Choi, S. I. and Ahn, T. S., Bacterial abundances and enzymatic activities under artificial vegetation island in Lake Paldang, *Kor J. Limnol.*, **35**(4), pp. 266-272 (2002).
- Chróst, R. J., Characterization and significance of  $\beta$ -glucosidase activity in lake water, *Limnol. Oceanogr.*, **34**, pp. 660-672 (1989).
- Chróst, R. J. and Overbeck, J., Kinetics of alkaline phosphatase activity and phosphorus availability for phytoplankton and bacterioplankton in Lake Plußsee, *Microb. Ecol.*, **13**, pp. 229-248 (1987).
- Cother, J. and Heath, R. T., Potential phosphate release from phosphomonoesters by acid phosphatase in a bog lake, *Arch. Hydrobiol.*, **111**, pp. 329-338 (1988).
- Daisaku, Y., Nobuyasu, Y. and Masao, N., Improved direct viable count procedure for quantitative estimation of bacterial viability in freshwater environments, *Appl. Environ. Microbiol.*, **66**, pp. 5544-5548 (2000).
- Glöckner, F. O., Bernhard, M. F. and Aman, R., Bacterioplankton compositions of Lakes and Ocnas: A first comparison based on fluorescence in situ hybridization, *Appl. Environ. Microbiol.*, **65**, pp. 721-726 (1999).
- Hobbie, J. E., Daley, R. F. and Japer, S., Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy, *Appl. Environ. Microbiol.*, **33**, pp. 1225-1228 (1977).
- Hugenholtz, P., Goebel, B. M. and Pace, N. R., Impact of culture-independent studies on the emerging phylogenetic view of bacterial community, *J. Bacteriology*, **180**, pp. 4765-4774 (1998).
- Kogure, K., Attachment of aquatic bacteria-Overview, In T. Hattori et al.(eds) Recent advances in microbial ecology, Japan Scientific Societies Press, Tokyo, pp. 131-134 (1989).
- Lampert, W. and Sommer, U., *Limnoecology*, The ecology of lakes and streams, Oxford University press, New York, pp. 292-293 (1997).
- Lansing, M. P., Harley, J. P. and Klein, D. A., *Microbiology*, 6th Ed. A Division of the McGraw-Hill Companies (2005).
- Lehman, R. M. and O'Connell, S. P., Comparison of extracellular enzyme activities and community composition of attached and free-living bacteria porous medium columns, *Appl. Environ. Microbiol.*, **68**, pp. 1569-1575 (2002).
- Mitsch, W. J. and Gosselink, J. G., *Wetlands*, Van Nostrand Reinhold, New York (1993).
- Mueller, G., Sartoris, J., Nakamura, K., and Boutwell, J., Ukishima, floating islands, or Schwimmkampen Lakeline, pp. 18-26 (1996).
- Münster, U. and Chróst, R. J., Origin composition and microbial utilization of dissolved organic matter, pp. 8-46 in Overbeck, J. and Chróst R. J.(eds), *Aquatic Microbial Ecology; Biochemical and Molecular Approaches*. Springer Verlag, New York (1990).
- Sasser, C. E. and Gosselink, J. G., Vegetation and primary production in a floating fresh marsh in Louisiana, *Aquat. Bot.*, **20**, pp. 245-255 (1984).
- Shimatani, Y., The effect and ecosystem of an artificial vegetated island, Ukishima, in Lake Kasumigaura, Proc. Korean Japan Joint Symposium on Ecological Engineering (1996).
- Ulrike, B., Falk, W., Dieter, B., Elke, Z. and Jakob, P., Members of a readily enriched  $\beta$ -Proteobacterial clade are common in surface waters of a humic lake, *Appl. Environ. Microbiol.*, **69**, pp. 6550-6559 (2003).
- Wetzel, R. G., Compound from wetlands; Complexation, inactivation, and reactivation of surface-bound and extracellular enzymes, *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, **25**, pp. 122-128 (1993).