

팔당호 인공식물섬 공극수에서 미생물 개체수와 체외효소활성도

김 용 전 · 최 승 익¹ · 안 태 석*

(강원대학교 환경과학과, ¹강원대학교부속환경연구소)

Bacterial Numbers and Exoenzymatic Activities in Pore Water of Artificial Floating Island Installed in Lake Paldang. Kim, Yong Jeon, Seung Ik Choi¹ and Tae Seok Ahn* (Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea; ¹Institute of Environmental Research of Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

To evaluate the functions of vegetation mat of artificial floating island (AFI) installed in Lake Paldang, nutrients, such as total phosphorus (TP), dissolved inorganic phosphorus (DIP), total nitrogen (TN) and nitrate (NO₃) and microbial factors such as total bacterial numbers, active bacterial numbers and exoenzymatic activities of β -glucosidase and phosphatase in pore water of medium and bulk lake water were analyzed. The concentration of TN and NO₃ in pore water ranged from 4.4 to 7.5 mg L⁻¹, from 1.2 to 3.8 mg L⁻¹, respectively, which were ca. 2 times higher than those of lake water. The ranges of TP and DIP of were 1.4~4.1 mg L⁻¹ and 0.003~0.137 mg L⁻¹ in pore water of media which were 4~25 and 5 times higher than those of lake water, respectively. The numbers of total bacteria and active bacteria in pore water were about 10 times higher than those of lake water. Also, both phosphatase and β -glucosidase activities of pore water were on an average 10 times higher than those of lake water. These results suggest that the bacteria were playing important role for nutrients concentrating and cycling in media of artificial floating island. And the medium of artificial floating island contained newly created microbial ecosystem, which is responsible for sustaining the growth of macrophytes and the creation of new aquatic ecosystem.

Key words : active bacteria, artificial floating island, bacteria, enzymatic activity, nutrients

서 론

팔당호는 우리나라에서 가장 많은 인구가 의존하고 있는 중요한 상수원이다. 정부에서는 이 지역을 1975년부터 상수원보호구역으로, 1990년에는 특별대책지역으로 지정하는 등 수질 보존을 위해 노력하여 왔고 그 대책으

로 『팔당호 등 한강수계 상수원수질 관리 특별종합대책』을 마련하였다. 인공식물섬에 의한 영양염류 저감 계획은 이 대책의 하나로 시행되었다(환경관리공단, 2000). 인공식물섬은 호소 내에 갈대 등의 수생식물을 인공 부유물에 재배하여 수중의 영양염류 제거를 통한 수질정화, 어류와 동식물 플랑크톤 등 각종 수생생물의 산란 및 서식공간 제공, 생태계 먹이 사슬을 이용한 조류 증식 억제

* Corresponding author: Tel: 033) 250-8574, Fax: 033) 251-3991, E-mail: ahnts@kangwon.ac.kr

등 자연환경 기능 향상을 도모하는 목적으로 설치되었다 (환경관리공단, 2000).

인공식물섬은 1972년 독일에서 Schwimmender Pflanzensinseln으로 소개된 것이 최초이다(Dahl, 1972). 일본에서 ukishima로 불리는 식물섬은 가스미가우라호에 수질정화와 생태계 안정도모를 목적으로 설치되었고(권, 1999), 우리나라에서는 1998년 충남 아산시 마산저수지에 식물섬이 수질 개선 목적으로 설치되었으며(이 등, 1999), 호수 연안대가 파괴되어 수초대가 사라진 파로호에는 생태계 복원의 목적으로 인공식물섬이 설치되었다(김 등, 2007).

팔당호에 설치된 인공식물섬은 수질개선을 목적으로 설치되었으나, 수질개선 보다는 동물플랑크톤, 무척추동물, 어류, 조류 등이 서식할 수 있는 새로운 생태계를 조성하는 기능이 더 크다고 보고되었다(Byeon *et al.*, 2002). 즉, 인공식물섬과 그 주위는 호수생태계에서 호수물과 다른 또 하나의 생태계임이 확인되었다.

팔당호는 평지형 호수로 수심이 비교적 낮고, 호안에 수생식물대가 잘 발달되어 있다(한강수계관리위원회, 2006). 호소생태계에서 연안의 수생식물은 수질정화, 수생태계 유지 등에 중요한 역할을 하고 있다(안, 1998). 그러나 수생식물의 뿌리는 저질토에 줄기부는 수중에 잠겨있고, 잎은 공기중에 노출되어 있어, 수생식물이 가지고 있는 생리적, 생태학적 기능을 확인하기는 어렵다. 이러한 관점에서 팔당호에 설치된 인공식물섬은 수생식물이 호수 생태계에 미치는 영향과 미생물과의 관계를 확인하는 모델생태계로 사용할 수 있다. 이 생태계에서 식물섬의 식생기반재와 여기에 서식하는 수생식물이 중요한 역할을 하고 있어, 식생기반재에서 영양염류의 농도가 높아지고 있고 이 과정에서 미생물의 역할을 확인할 필요가 있다.

이러한 목적으로 팔당호에 새롭게 조성된 생태계인 인공식물섬 식생기반재에서 미생물의 역할을 파악하기 위하여 공극수와 호수물을 채취하여 총인, 총질소, 세균수와 세균활성도를 측정하였다.

재료 및 방법

1. 조사대상 지역 및 기간

연구대상은 2000년 5월에 설치 운영되고 있는 경기도 광주시 퇴촌면 오리에 위치한 팔당호 인공식물섬을 대상으로 하였다. 인공식물섬의 총면적은 2,690 m²이고, 설치 초기에는 갈대, 줄, 애기부들과 달뿌리풀이 식재되었다

(환경관리공단, 2000). 조사시기는 2004년 4월 21일부터 12월 17일까지였으며, 영양염류의 농도, 총세균수, 활성세균수와 체외효소활성도를 측정하였다.

2. 실험방법

1) 시료 채취 및 영양염류 분석

시료는 멸균주사기를 이용하여 인공식물섬 식생기반재 내의 공극수를 채수하였다. 대조구로는 인공식물섬에서 50 m 정도 떨어진 팔당호의 표층수를 멸균채수병으로 채수하여 사용하였다. 총질소(TN)와 질산염(NO₃⁻)은 카드롬 환원법으로, 총인(TP)과 인산염인(DIP)은 아스코르빈산 환원 방법으로 각각 3회 측정하였다(APHA, 2001).

2) 세균수 측정

총세균수 측정은 Acridine orange direct count (AODC) 방법을 사용하였으며, 형광현미경(Olympus BX60, 배율: ×1,000)을 이용하여 관찰하였다(Hobbie *et al.*, 1977). 활성세균수는 quantitative direct viable count (qDVC) 방법(Yokomaku, 2000)을 사용하였다. 멸균된 50 mL conical tube에 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 배양한 후, 액체질소로 얼린 후 녹이는 freeze-thaw 방법으로 처리한 뒤 AODC 방법과 같은 방법으로 실험하였으며, 활성세균수 값은 총세균수 값에서 qDVC법으로 나타난 세균수를 빼주어 계산하였다.

모든 미생물의 계수는 형광현미경(Olympus BX60; exciting filter: B, Lamp: Mercury lamp HBO 100W/2, OSRAM)을 이용하여 계수하였고, 각 세균 수는 20개 이상의 화상에서 측정한 값을 평균하여 사용하였다.

3) 체외효소활성도

세균의 체외효소활성도를 측정하기 위한 기질로 methylumbelliferyl-substrate (MUF-β-glucoside: 10 mM, MUF-phosphate: 10 mM, Sigma)를 사용하였다. 시료 4.5 mL에 기질의 최종 농도가 각각 25, 50, 100, 200, 400 μM이 되도록 첨가한 후 암실에서 1시간 배양하였다. 배양 후 glycine-NaOH (pH 10.5, 0.2 M) 0.5 mL를 각각 첨가하여 반응을 정지시킨 다음 생성된 MUF의 양을 형광분광광도계(TD-360 Mini Fluorometer, Emission: 460 nm, Excitation: 365 nm)를 사용하여 정량분석하였다(Chróst, 1989). 분석된 값은 Lineweaver-Burk식을 이용하여 최대분해속도인 V_{max}를 구하였으며, 모든 분석시료는 3회 측정하여 평균값을 사용하였다.

결 과

1. 영양염류

총질소의 농도는 인공식물섬 식생기반재의 공극수와 호숫물에서 각각 4.4~7.5 mg L⁻¹, 2.1~4.9 mg L⁻¹의 값이었으며, 평균 3.5 mg L⁻¹과 6.6 mg L⁻¹의 값을 보였다 (Fig. 1). 인공식물섬의 공극수가 호숫물보다 약 1.3~3.6 배 높게 나타났으며, 특히 수온이 높아지고 장마비가 내리는 7월에 두 정점 모두 각각 4.9 mg L⁻¹와 7.5 mg L⁻¹로 가장 높은 값을 보였다.

질산성 질소 농도는 인공식물섬 식생기반재 공극수에서 1.2~3.8 mg L⁻¹, 호숫물에서는 0.1~2.7 mg L⁻¹ 범위 값이었으며, 식물섬과 호숫물의 평균값은 각각 2.2 mg L⁻¹, 1.0 mg L⁻¹ 값으로 식물섬이 호숫물보다 약 2배의 높은 값을 나타내었다 (Fig. 1). 인공식물섬에서 질산성질소의 농도는 식물의 발아가 시작되는 4월에 가장 높은 3.8 mg L⁻¹ 값을 보였고 5월부터 1.2 mg L⁻¹로 낮아져 12월까지 서서히 증가하는 경향을 보였다.

총인은 인공식물섬 공극수에서는 1.4~4.1 mg L⁻¹ 범위로 나타났고, 호숫물에서는 0.1~0.3 mg L⁻¹ 범위로 (Fig. 2), 인공식물섬 공극수가 호숫물보다 약 4~25배 높게 나타났다. 무기인산염 (DIP)은 인공식물섬 공극수에서는 0.003~0.137 mg L⁻¹, 호숫물에서 0.003~0.042 mg L⁻¹ 범위였다 (Fig. 2). 인공식물섬 공극수의 경우, 5월 조사까지 DIP농도는 0.015 mg L⁻¹ 미만의 값을 보이다가 총인의 농도가 급격히 높아진 6월에 0.052 mg L⁻¹로 높아졌

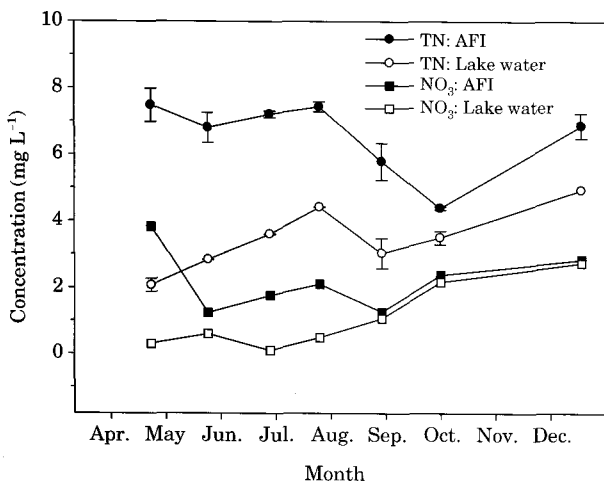


Fig. 1. The temporal changes of total nitrogen and nitrate concentration in pore water of artificial floating island (AFI) and lake water of Lake Paldang.

으며, 8월부터는 다시 급증하여 10월에 0.137 mg L⁻¹로 최대값이 나타나 호숫물보다 5.3배 높은 값을 보였다. 호숫물의 경우에는 용존인의 농도변화가 인공식물섬 공극수에서 보다 연 중 변화가 크지 않았다.

2. 총세균수 및 활성세균수

조사기간 동안 총세균수는 인공식물섬과 호숫물에서 각각 2.5 × 10⁷ ~ 5.5 × 10⁷ cells mL⁻¹, 2.8 × 10⁶ ~ 7.4 × 10⁶ cells mL⁻¹, 범위였으며 (Fig. 3), 활성세균수는 각각 1.9 × 10⁷ ~ 4.8 × 10⁷ cells mL⁻¹, 0.3 × 10⁶ ~ 6.3 × 10⁶ cells mL⁻¹로 조사되었다 (Fig. 3). 인공식물섬 공극수에서 호숫물보

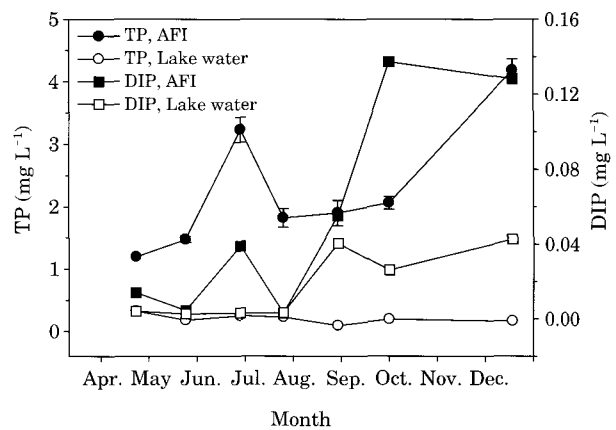


Fig. 2. The temporal changes of total phosphorus and dissolved inorganic phosphate concentration in pore water of artificial floating island (AFI) and lake water of Lake Paldang.

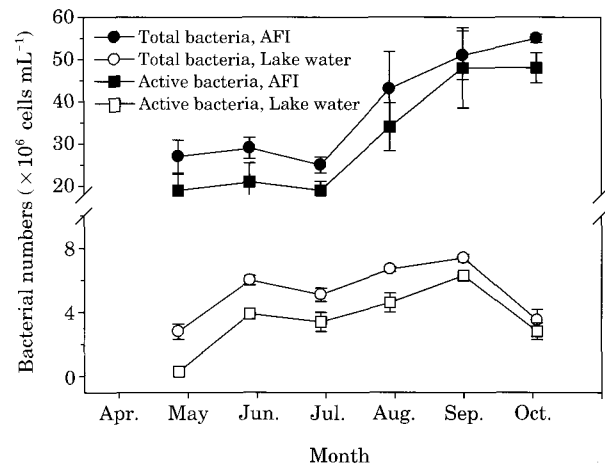


Fig. 3. The temporal changes of total and active bacterial numbers in pore water of artificial floating island (AFI) and lake water of Lake Paldang.

다 총세균수는 약 4.8~15.7배, 활성세균수는 약 5.4~63.3배 높게 나타났다.

3. 체외효소 활성도

인공식물섬 식생기반재의 공극수와 호숫물에서 β -glucosidase 활성도는 각각 $0.46\sim 5.94\ \mu\text{mol L}^{-1}\text{ hr}^{-1}$, $0.02\sim 0.25\ \mu\text{mol L}^{-1}\text{ hr}^{-1}$ 범위였다(Fig. 4). 인공식물섬 공극수에서 β -glucosidase 활성도는 조사기간 내내 호숫물보다 6~24배 이상의 높은 결과를 보였으며, 5월에는 $5.94\ \mu\text{mol L}^{-1}\text{ hr}^{-1}$, $0.25\ \mu\text{mol L}^{-1}\text{ hr}^{-1}$ 값으로 인공식물섬과 호숫물 모두 가장 높은 값을 보였다.

Phosphatase 활성도는 인공식물섬 공극수와 호숫물에서 각각 $2.19\sim 11.39\ \mu\text{mol L}^{-1}\text{ hr}^{-1}$, $0.03\sim 0.11\ \mu\text{mol L}^{-1}\text{ hr}^{-1}$ 로 나타났다(Fig. 5). β -glucosidase 활성도와 마찬가지로 인공식물섬 공극수와 호숫물에서 모두 5월 27일에 가장 높은 결과를 보였다. 조사기간 모두 인공식물섬 공극수가 호숫물보다 약 10배 이상 높았다.

고 찰

인공식물섬에 사용된 식생기반재의 주요기능은 수생식물에게 뿌리가 활착되는 장소를 제공하는 것이다. 이번 연구에서 확인된 식생기반재의 또 다른 기능은 호숫물보다 높은 농도로 영양염류를 유지하는 능력이다. 팔당호에 설치된 식생기반재의 공극수에서는 호숫물보다 총질소는 1.3~3.6배, 총인은 4~25배 높게 나타났다. 즉, 식생기반재 안에서는 농도 차이로 나타나는 확산에 의하여 외부로 빠져 나가는 힘보다 더 강력한 힘이 작용하여 식생기반재 내부에 높은 농도의 영양염류가 존재하고 있음을 확인하였다. 이러한 영양염의 농축은 세균에 의한 것으로 사료된다. 세균은 저농도의 영양염을 흡수하여 체내에 높은 농도상태로 전환시킬 수 있는 능력을 가지고 있으며(Chróst and Rai, 1994), 입자상 유기물과 용존유기물질을 동화하여(Münster and Chróst, 1990) 상위 먹이망에 탄소와 에너지를 전달하는 중요한 역할을 수행한다(Azam *et al.*, 1983). 세균은 빈영양호인 파로호 안에서도 질소와 인을 농축시켜 식물 성장에 충분한 농도의 영양염류를 제공하고 있음을 확인하였으며(안, 2003), 이를 이용하여 파로호 인공식물섬에 노랑꽃창포(*Iris pseudoacorus*)를 식재하여 노랑꽃이 만개한 식물섬으로 만들 수 있어 수생식물이 성장하기에 충분한 인과 질소가 농축됨을 보고하였다(김 등, 2007). 이러한 영양염 농축은

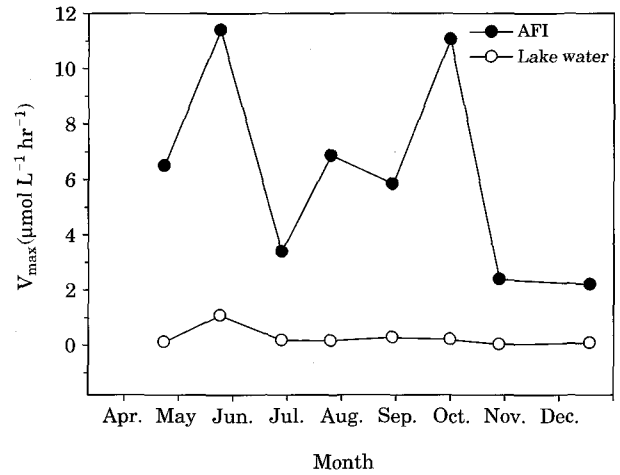


Fig. 4. The temporal changes of β -glucosidase activity in pore water of artificial floating island (AFI) and lake water of Lake Paldang.

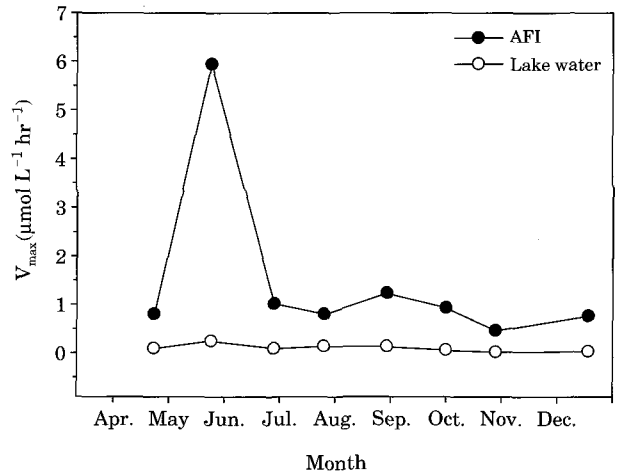


Fig. 5. The variations of phosphatase activity in artificial floating island (AFI) and lake water of Lake Paldang.

미생물의 기능에 의하여 진행되는 것으로 사료된다.

식생기반재 공극수에서 총세균수는 호숫물보다 4.8~15.7배, 활성세균수는 5.4~63.3배, 미생물활성도는 β -glucosidase와 phosphatase가 각각 6~24배와 약 10배 이상 높은 값을 보여 세균이 탄소순환과 인순환에 있어서 중요한 역할을 하고 있을 가능성이 확인되었다.

총세균수에 대한 활성세균수의 비율을 보면 호숫물에서는 10.7~85.0%이었으나, 식생기반재 공극수에서는 72.0~94.8%로 식생기반재에서 활성세균수의 비율이 높았고, 이 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. 첫째는 원생동물

및 동물플랑크톤의 포식압이다. 동물플랑크톤은 먹이환경에 따라 즉 먹이질이 낮은 남조류 등이 우점하면 세균을 포식하고 있어(심과 안, 1992) 동물플랑크톤에 의한 세균포식압이 높아지면 세균의 성장률이 빨라져 활성세균의 비율이 증가 한다(Sherr *et al.*, 1988). 실제로 소양호에서 동물플랑크톤의 포식압이 높을 때 FDC (frequency of dividing cell) 값이 증가하는 것으로 현상이 관찰되었다(최, 1996). 호수에서 세균밀도는 하향조절("top-down"; predation)에 영향을 받으며(McQueen *et al.*, 1986), 포식압과 같은 하향조절에 의해 조절될 수 있음을 보고하였다(Ducklow and Carlson, 1992). 팔당호의 인공식물섬 아래 수체에서 동물플랑크톤의 개체수가 20배 이상 높게 나타난 연구 결과(Byeon *et al.*, 2002)를 참조하면, 동물플랑크톤의 포식압으로 활성세균 개체수가 증가한 것으로 사료된다. 또 다른 이유는 인공식물섬 식생기반재 내에 유기물이 증가하였기 때문이다. BOD값이 수초섬 표층에서 평균 5.2 mg L^{-1} 이고, 호숫물에서는 3.6 mg L^{-1} 였다(변, 2007). 이러한 유기물 농도 차이 때문에 식생기반재에서 활성세균비율이 높은 것으로 사료된다. 실제로 소양호 댐 앞에서 활성세균수의 비율이 10% 내외였으며, 상대적으로 유기물 농도가 높은 가두리 양식장 인근에서 활성세균의 비율이 40% 이상이었다(최, 1992).

Phosphatase 최대분해속도 (V_{max})가 호숫물에서는 $1 \mu\text{mol L}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 이하인 반면 인공식물섬 식생기반 내의 공극수에서는 $2.1 \sim 11.4 \mu\text{mol L}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 로 그 변화폭이 매우 크게 나타났다. Phosphatase는 세균, 동·식물 플랑크톤, 식물 잎과 뿌리 등이 분비하며(Jansson *et al.*, 1988; Hernández *et al.*, 1994), 수체 내에서 DIP가 부족할 때 분비된다(Wynne, 1977). 식생기반재 공극수에서는 식물플랑크톤의 밀도가 낮아 phosphatase의 기원은 동물플랑크톤, 부착세균과 수생식물에서 분비된 것으로 사료된다. 이 인공식물섬 아래 수역에서는 동물플랑크톤의 밀도가 호숫물보다 20배 높은 값을 보였다(Byeon *et al.*, 2002). 이렇게 높은 밀도 때문에 동물플랑크톤이 자체 배출하는 phosphatase와 동물플랑크톤이 algae나 세균을 포식하는 과정에서 배출되는 phosphatase, 노쇠한 세포나 사멸한 세포에서 용출된 phosphatase가 포함된 것으로(Currie *et al.*, 1986) 사료된다.

인공 식물섬 식생기반재 공극수에서 10월에 DIP 농도는 0.14 mg L^{-1} 였으며, 호숫물에서는 0.03 mg L^{-1} 값으로 식생기반재 공극수에서 호숫물보다 5.3배 높은 값이었다. DIP는 phosphatase의 활성을 억제하는 것으로 알려져 있다. 그러나 식생기반재의 공극수에서는 DIP 값이 높음에도 phosphatase 활성도도 역시 높게 나타났다. 그 이유

는 다음과 같이 설명할 수 있다. 세균과 조류의 세포 내에 P surplus (Ps)가 감소할 경우 phosphatase 활성도가 증가한다. Plussee호수에서 조사된 바에 따르면 세포 내에 존재하는 Ps (% of particulate P)가 10% 이하로 낮아질 때 세균이 분비하는 phosphatase의 specific activity는 급격히 증가하고 15% 이상일 때 서서히 감소하는 것으로 나타났다(Chróst, and Overbeck, 1990). 또한 식물플랑크톤에서 기인된 phosphatase는 낮은 농도의 DIP변화에 빠르게 반응하지만, 세균에서 기인된 phosphatase는 $200 \mu\text{mol L}^{-1}$ 의 농도까지도 저해를 받지 않는다(Chróst *et al.*, 1986). 따라서 인공식물섬 식생기반재에서 DIP 농도가 호숫물보다 높음에도 불구하고 phosphatase 활성이 10배 이상 높다는 것은 식생기반재 내부에 존재하는 phosphatase는 세균이 분비하고, 세균의 세포 내 Ps가 낮은 상태이고, 이 과정에서 생성된 DIP는 세균세포로 동화되거나 수생식물에게 이용되는 것으로 사료된다.

β -Glucosidase는 비교적 기질특이성이 넓고, 다당류 및 이당류의 β 고리를 가수분해시켜 monomer로 분해시키는 효소로(Barman, 1969), 수중에서 β -glucosidase 활성도는 수중유기물의 존재형태를 알려주는 지표이다(Chróst, 1994). 수중에서 β -glucosidase 활성의 95% 이상은 세균에서 기원되며(Chróst and Overbeck, 1990), β -glucosidase는 glucose와 같은 monomer에 의하여 효소활성이 억제되고 cellobiose와 같은 dimer에 의하여 유도된다(Chróst, 1994). 또한 수중에 고분자 (high molecular weight) 유기물질이 많을 경우 β -glucosidase 활성도가 높게 나타난다(Sell, 1994). 팔당호 인공식물섬의 식생기반재 공극수에서 β -glucosidase 활성도는 호숫물보다 6~24배 높게 나타났다. 세균당 분비하는 활성도를 알아보기 위하여 β -glucosidase 활성도를 활성세균수로 나눈 값인 specific activity를 보면 5월 자료를 제외하고는 인공식물섬 식생기반재와 호숫물에서 각각 $5.4 \sim 50.9 \text{ amol cell}^{-1} \text{ hr}^{-1}$, $21.2 \sim 64.3 \text{ amol cell}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 범위로 인공식물섬 식생기반재 공극수와 호숫물 사이에 큰 차이가 없었다(Fig. 6). 즉, 공극수와 호숫물에서 세균 한 개체가 분비하는 β -glucosidase 활성도가 같다는 것이 확인되었다. 따라서 호숫물보다 공극수에서 β -glucosidase 활성도가 높은 것은 활성세균수가 호숫물보다 훨씬 많기 때문으로 사료된다.

인공식물섬 식생기반재에서 측정된 총인(TP), 용존인(DIP), phosphatase, β -glucosidase, 활성세균수의 상관분석결과($P < 0.05$) 활성세균수와 DIP의 상관계수가 0.65, TP와 phosphatase가 -0.53 , phosphatase와 β -glucosidase가 0.59로 나타나 다소 높은 상관관계를 보였다

Table 1. Correlation coefficients between active bacteria, TP, DIP, phosphatase and β -glucosidase activity in pore water of artificial floating island and lake water in Lake Paldang.

	Active bacteria	TP	DIP	Phosphatase	β -Glucosidase
Active bacteria	1				
TP	-0.04 ^a -0.81 ^b	1			
DIP	0.65 ^a 0.36 ^b	0.28 ^a -0.76 ^b	1		
Phosphatase	0.25 ^a 0.29 ^b	-0.53 ^a -0.34 ^b	0.30 ^a -0.19 ^b	1	
β -Glucosidase	-0.32 ^a 0.31 ^b	-0.30 ^a -0.31 ^b	-0.34 ^a -0.28 ^b	0.59 ^a 0.91 ^b	1

a: AFI, b: lake water, $p < 0.05$

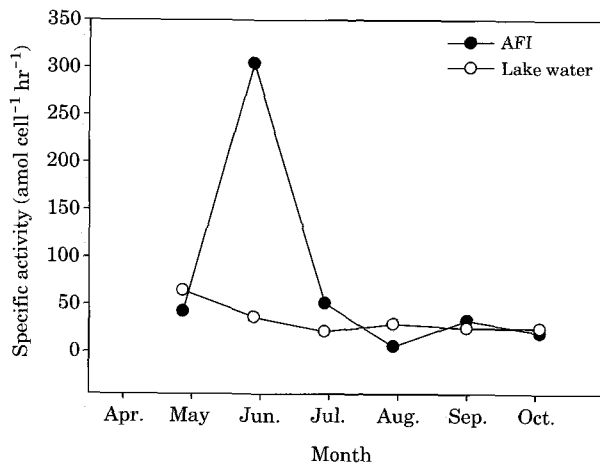


Fig. 6. The variations of specific activity of β -glucosidase in artificial floating island (AFI) and lake water of Lake Paldang.

(Table 1). 즉 활성세균수의 증가가 DIP 농도 증가와 다소 높은 관련성이 있으며, TP와 phosphatase 활성도의 경우에는 총인의 농도가 증가하면 phosphatase 활성도는 감소하고, 총인농도가 감소하면 phosphatase 활성도는 증가하는 경향을 보인다는 것을 의미한다. 그러나 호숫물에서는 활성세균과 TP가 -0.81 , TP와 DIP가 -0.76 로 높은 음의 상관성을 보였으며, phosphatase와 β -glucosidase가 0.91 로 매우 높은 상관관계를 보였다. 따라서 인공식물섬 식생기반재 내의 공극수와 호숫물에서 세균의 구성과 생태학적 기능이 전혀 다른 것으로 확인되었다. 활성세균과 DIP와의 상관계수가 호숫물에서는 0.36 으로 낮

은 상관성을 보인 반면 인공식물섬 식생기반재에서는 0.65 로 다소 높은 양의 상관성을 나타내어 인공식물섬 식생기반재 내에서 활성세균이 DIP 농도 변화에 대한 기여도가 큼을 나타내었다.

이상의 결과를 총합하여 보면 인공식물섬 식생기반재 내부는 부착세균이 활착하여 호숫물과는 다른 미생물 생태계를 조성하고, 이들이 용존유기물질과 영양염류를 흡수하여 기반재 내에 이들의 농도가 높아진다. 높은 농도의 영양염류는 세균이 왕성히 분해하고 분해산물은 수생식물이 빠르게 흡수하고, 세균 자체는 동물플랑크톤에 피식되어 상위 먹이망으로 연결된다. 즉 식생기반재 내부에서는 세균의 작용으로 영양염류의 농축과 왕성한 물질분해가 일어나고, 이 과정을 통하여 인공식물섬 위에서는 왕성한 수초의 성장이, 수생태계에서는 동물플랑크톤의 증식이 일어나는 것으로 사료된다.

적 요

팔당호에 설치된 인공식물섬 식생기반재 내에서 세균의 생태학적 기능을 파악하기 위하여 식생기반재 내의 공극수와 호숫물에서 총인(TP), 용존인(DIP), 총질소(TN), 질산성질소(NO_3), 총세균수, 활성세균수와 체외호소활성도를 측정하였다. 인공식물섬 식생기반재의 공극수에서 TN과 NO_3 농도는 각각 $4.4 \sim 7.5 \text{ mg L}^{-1}$, $1.2 \sim 3.8 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 호숫물보다 약 2배 높게 나타났으며, TP와 DIP 값도 식생기반재 공극수에서 각각 $1.4 \sim 4.1 \text{ mg L}^{-1}$, $0.003 \sim 0.137 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 TP 값은 호숫물보다 약 4~25배, DIP 값은 5.3배 높은 값이었다. 총세균수와 활성세균수는 호숫물보다 10배 이상 값을 보였다. 또한 phosphatase 및 β -glucosidase 활성도도 인공식물섬 공극수에서 호숫물보다 10배 이상의 높은 결과를 보여 식생기반재 내부에서 세균에 의한 영양염류의 농축과 왕성한 유기물질분해가 일어나고, 이 과정에서 수초의 성장, 동물플랑크톤의 증식 등 새로운 수생태계가 조성된 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 한강수계관리위원회·국립환경과학원 한강물환경연구소에서 시행한 한강수계 2004년도 환경기초조사사업의 “한강수계 생태계 복원방법 및 기술표준화 연구”지원 연구비로 수행되었습니다.

인 용 문 헌

권오병. 1999. 인공식물 설치한 호소의 수질개선 및 생태계 변화에 관한 연구. 한양대학교대학원 석사학위논문.

김용진, 허재규, 남종현, 김인선, 최경숙, 최승익, 안태석. 2007. 파로호에 설치된 인공식물섬 식생기반재의 공극수에서 세균 분포와 체외효소활성도. 한국미생물학회지 43(1): 40-46.

변명섭. 2007. 팔당호에서 수초재배섬에 의한 수환경 개선효과에 관한 연구. 강원대학교대학원 이학박사학위논문.

안태석. 1998. 골프장 수질관리를 위한 인공습지 이용에 관한 연구. 재단법인 연강재단.

안태석. 2003. 여재를 이용한 자연순환방식의 수질정화시스템 개발. 강원지역환경기술개발센터.

이광석, 장정렬, 김영경, 박병훈. 1999. 저수지 수질개선을 위한 인공식물섬 조성에 관한 연구. 육수지 22: 219-225.

심두섭, 안태석. 1992. 소양호에서 동물플랑크톤의 섭식작용에 관한 연구. 한국미생물학회지 30(2):129-133.

최승익. 1992. 소양호에서의 유기인산염 분해율에 관한 연구. 강원대학교대학원 이학석사학위논문.

최승익. 1996. 소양호의 세균개체수와 활성도변화에 관한 연구. 강원대학교대학원 이학박사학위논문.

한강수계관리위원회. 2006. 한강수계 생태계 복원방법 및 기술 표준화 연구. 한강수계관리위원회.

환경관리공단. 2000. 수초재배섬 운영결과 보고서. 환경관리공단.

APHA. 2001. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th ed. American Public Health Association, New York.

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.

Barman, T.E. 1969. *Enzyme Handbook*. Springer Verlag, Berlin. 2: 928.

Byeon, M.S., J.J. Yoo, O.S. Kim, S.I. Choi and T.S. Ahn. 2002. Bacterial abundances and enzymatic activities under artificial vegetation island in Lake Paldang. *Korean J. Limnol.* 35(4): 266-272.

Chróst, R.J. and H. Rai. 1994. Bacterial secondary production. In: Overbeck, J. and R.J. Chróst (eds.) *Microbial ecology of Lake Plussee*. Springer-Verlag, N.Y., p. 92-117.

Chróst, R.J. and J. Overbeck. 1990. Substrate-ectoenzyme interaction: Significance of β -glucosidase activity for glucose metabolism by aquatic bacteria. *Arch. Hydrobiol. Beih, Ergeb. Limnol.* 34: 93-98.

Chróst, R.J., W. Siuda, D. Albrecht and J. Overbeck. 1986. A method for determining enzymatically hydrolyzable phosphate (EHP) in natural waters. *Limnol. Oceanogr.* 31: 662-667.

Chróst, R.J. 1989. Characterization and significance of β -glucosidase activity in lake water. *Limnol. Oceanogr.* 34: 660-672.

Chróst, R.J. 1994. Microbial enzymatic degradation and utilization of organic matter. In: Overbeck, J. and R.J. Chróst (eds.) *Microbial ecology of Lake Plussee*. Springer-Verlag, N.Y., p. 118-174.

Currie, D.J., E. Bentzen and J. Kalff. 1986. Does algal-bacterial phosphorus partitioning vary among lakes? A comparative study of orthophosphate uptake and alkaline phosphatase activity in freshwater. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 43: 311-318.

Dahl, H.J. 1972. Untersuchung von Pflanzenarten auf ihre Eignung zum Bau schwimmender Pflanzeninseln. Doktor Dissertation, Technischen Univeritaet Hannover.

Ducklow, H.W. and C.A. Carlson. 1992. Oceanic bacterial production. *Adv. Microb. Ecol.* 12: 113-181.

Hernández, I., F.X. Niell and J.A. Fenández. 1994. Alkaline phosphatase activity in marine macrophytes: histochemical localization in some widespread species in southern Spain. *Marine Biology* 120: 501-509.

Hobbie, J.E., R.F. Daley and S. Jape. 1977. Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl. Environ. Microbiol.* 33: 1225-1228.

Jansson, M., H. Olsson and K. Peterson. 1988. Phosphatase: Origin, characteristics and function in lake. *Hydrobiologia* 170: 157-176.

McQueen, D.J., J.P. Post and E.L. Mills. 1986. Trophic relationships in freshwater pelagic ecosystems. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 43: 1571-1581.

Münster, J. and R.J. Chróst. 1990. Origin, composition and microbial utilization of dissolved organic matter. p. 8-46. In *Aquatic microbial ecology; Biochemical and molecular approaches*.

Sell, A.F. 1994. Phytoplankton-excreted organic carbon. In: Overbeck, J. and R.J. Chróst (eds.) *Microbial ecology of Lake Plussee*. Springer-Verlag, N.Y., p. 81-91.

Sherr, B.F., E.B. Sherr and C.S. Hopkinson. 1988. Trophic interactions within pelagic microbial communities: indications of feedback regulation of carbon flow. *Hydrobiologia* 159: 19-26.

Wynne, D. 1977. Alterations in activity of phosphatases during the Peridinium bloom in Lake Kinneret. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 21: 523-527.

Yokomaku, D., N. Yamaguchi and M. Nasu. 2000. Improved direct viable count procedure for quantitative estimation of bacterial viability in freshwater environments. *Appl. Environ. Microbiol.* 66: 5544-5548.

(Manuscript received 5 December 2007, Revision accepted 24 February 2008)