

파로호에 설치된 인공식물섬 식생기반재의 공극수에서 세균 분포와 체외효소활성도

김용전 · 허재규 · 남종현 · 김인선 · 최경숙 · 최승익 · 안태석*

강원대학교 환경학과

생태계가 파괴된 파로호에 수초대를 복원하는 방법으로 rubberized coconut fiber를 식생기반재로 사용한 인공식물섬을 2003년 8월에 설치하였다. 인공식물섬 식생기반재에서는 식물이 자랄 수 있을 정도로 영양염이 농축되어 꽃창포(*Iris ensata*), 노랑 꽃창포(*Iris pseudoacorus*), 갈대(*Phragmites communis*) 등 식재된 식물이 잘 자랐다. 이 과정에서 세균의 역할을 알아보기 위하여 2004년 4월부터 10월까지 2주 간격으로 총세균수, 활성세균수, β -glucosidase, phosphatase를 조사한 결과 인공식물섬 식생기반재의 공극수에서 각각 평균 28.6×10^6 cells/ml, 22.7×10^6 cells/ml, 452.9 nM/L/hr, 16381.9 nM/L/hr로 조사되어 파로호 호수물보다 각각 10배, 15배, 22배, 38배 높았다. 그리고 영양염류농도는 총인과 총질소가 식생기반재 공극수에서 각각 평균 1.06 mg/L, 12.5 mg/L으로 조사되어 호수물보다 12배, 3배 높았다. 이 결과 인공식물섬 식생기반재에서 새로운 생태계가 만들어졌으며, 이 생태계에서 세균이 중요한 역할을 하여 빈-중영양상태의 호수물에서도 식물이 잘 자랄 수 있었다.

Key words □ artificial floating island, attached bacteria, new microbial ecosystem, pore water, rubberized coconut fiber

강원도 화천군에 위치한 파로호는 1939년 화천댐에 의하여 만들어진 인공호수로 1987년까지는 안정된 수생태계를 유지하였으며, 천연 기념물인 황쏘가리의 국내 최대 서식지였다. 1978년 조사에 의하면 어획량의 50% 이상이 쏘가리였으며, 수질은 BOD 평균 2.0 mg/L 이하의 비교적 수질이 양호한 호수였다(4). 이 호수는 1987년에 '평화의 댐'공사를 위하여 댐의 중앙부에 배수구를 만들어 호수 수위를 낮추었고, 또다시 2002년부터 '평화의 댐'증축 공사를 하면서 또 한번 수위를 낮추었다.

이 과정에서 호수 연안대는 완전히 파괴되어 수초대가 전혀 없는 지역으로 변하였고, 토사가 밀려오면서 바닥이 펄로 덮여 버렸다. 수초대는 물고기가 알을 낳고 성장하는 주요한 생태계의 구성원이다(23). 이 수초대가 사라짐으로서 수생태계내의 서식환경이 변하게 되었다. 그 결과, 2002년 조사에서는 포획된 물고기의 98%가 피라미였고, 쏘가리는 만여 개체 중 단 1마리에 불과할 정도였다(3). 파로호의 수생태계를 복원하려면 연안대의 수초대를 살리고 바닥의 펄을 제거하여야 한다. 바닥의 펄을 제거하는 것은 현실적으로 불가능하고, 연안 수초대를 복원하는 것도 잦은 수위변동으로 인하여 불가능하다. 파로호의 훼손된 생태계를 복원하기 위하여 불완전하지만, 현재 기술로 만들 수 있는 생태복원 시설인 인공식물섬을 수위변동의 영향이 없는 호수 중앙에 설치하여 수초대의 기능을 대신하였다(6).

인공식물섬은 이미 팔당호와 소형 저수지 등에 수질 개선 목

적으로 설치되었다(8). 그러나 인공식물섬에 의한 수질 개선 효과는 수체의 이화학적 분석으로는 확인이 되지 않았다. 오히려, 미생물의 응집 작용으로 유기물, 총인, 총질소의 농도가 더 높게 나와 수질 악화라는 현상으로 잘못 이해되기도 하였다. 그러나 팔당호와 백곡지를 대상으로 연구한 결과, 인공식물섬 아래에서는 동물플랑크톤의 밀도가 호수물보다 20배 정도 높았고, β -glucosidase, phosphatase 등 효소활성도도 훨씬 높아 인공식물섬에서는 물질 순환율이 빠르며, 식물플랑크톤의 질이 좋아 동물플랑크톤의 증가와 이에 따른 치어 증가가 눈에 띄게 늘어났다. 따라서 인공식물섬은 수질 개선보다는 생태계 복원으로 사용하는 것이 효과적임이 확인되었다(12).

파로호는 2002년의 수질측정 결과 총질소, 총인의 농도가 각각 1.5 mg/L, 22.6 μ g/L로 조사되었다(7), 이는 인공식물섬에 식재된 식물이 자랄 수 없을 정도로 낮은 농도이다. 따라서, 부유물에 의해 호수 위에 떠있는 인공식물섬의 식생기반재에 꽃창포(*Iris ensata*), 노랑 꽃창포(*Iris pseudoacorus*), 갈대(*Phragmites communis*) 등을 식재할 경우, 식생기반재내에 비료를 넣어 주는 등의 특별한 기능이 추가되어야 한다. 그러나, 호수에 어떤 상태로든 비료를 넣는 것은 부영양화 등의 문제 때문에 불가능한 일이다. 호수물에는 농도가 낮은 상태이지만 질소와 인이 존재하며, 이 영양염류는 낮은 농도의 영양염류를 체내에 농축하는 세균의 기능(16)을 이용하면 농축이 가능하다. 여기에서 식생기반재의 역할이 매우 중요하게 부각이 된다. 즉, 식생기반재내에서 세균이 부착하여 증식하면서 파로호의 낮은 총질소와 총인 농도를 식물이 자랄 수 있을 정도의 높은 상태로 만들어 줄 수 있다

*To whom correspondence should be addressed.
Tel: 82-33-250-8574, Fax: 82-33-251-3991
E-mail: ahnts@kangwon.ac.kr

(16). 이러한 이론을 바탕으로 세균이 부착하기 쉬운 소수성 성질의 rubberized coconut fiber를 식생기반재로 사용한 결과 식물이 왕성하게 자랐다(Fig. 1).

이 연구는 세균의 기능으로 식물이 잘 자란 인공식물섬에서 미생물 생태계를 이해하기 위하여 총세균수와 활성세균수, 체외효소활성도를 조사하였고, 총인과 총질소의 농도가 식생기반재내에서 얼마나 높아지는가를 확인하였다.

재료 및 방법

조사 대상 지역 및 기간

조사대상인 인공식물섬은 2003년 8월 파로호 태산리 일대에 실험면적 1,800 m² 로 조성되었으며, 여기에 식재된 식물은 꽃창포(*Iris ensata*), 노랑 꽃창포(*Iris pseudoacorus*), 갈대(*Phragmites communis*) 등 3종류이다(6). 세균의 분포, 체외효소활성도, 총질소와 총인을 분석하기 위한 시료는 인공식물섬 식생기반재(깊이 10 cm) 내의 공극수를 사용하였다. 공극수는 휴대용 sonicator (Philips, HX-7500) 를 1분간 작동시킨 후 멸균된 50 ml 주사기를 이용하여 인공식물섬 식생기반재내에서 채취하였다. 식생기반재의 공극수와 비교하기 위한 호수물은 인공식물섬과 30 m 떨어진 곳의 표층수를 멸균 채수병으로 채취하여 분석하였다. 조사기간은 2004년 4월부터 2004년 10월까지 2주 간격으로 실시하였다.

세균수 측정

총세균수는 acridine orange direct count (AODC) 방법을 사용하였으며(20), 활성세균수는 quantitative direct viable count (qDVC) 방법을 사용하였다(1). 활성세균수를 계수하기 위하여, 멸균된 50 ml conical tube에 시료 9 ml과 cephalixin (0.01%) 1 ml, nalidixic acid (0.02%) 1 ml, yeast extract (2.5%) 50 µl, glycine (최종농도: 2%)을 첨가하여 현탁온도에서 24시간 동안

암실 배양 한 후, freeze-thaw (액체질소처리) 처리를 한 뒤 중성 formaline (최종농도 2%)으로 고정하여 black polycarbonate membrane filter (Nuclepore, pore size 0.2 µm, Φ 25 mm)로 여과하고, AODC 방법으로 계수하였다. 활성세균수 값은 총세균수 값에서 qDVC법으로 나타난 세균수를 빼주어 계산한 값을 사용하였다.

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

체외효소 활성도의 측정

β-glucosidase 활성도는 Chrst (14)의 방법으로 측정하였다. 기질로 methylumbelliferyl-substrate (MUF-β-glucoside: 5 mM, Sigma)를 사용하였고, MUF-β-glucoside의 최종 농도가 25, 50, 100, 200, 400 µM이 되도록 첨가한 후 현탁 온도에서 1시간 배양하였다. 배양 후 glycine-NaOH (pH 10.5, 0.2 M) 0.5 ml를 각각 첨가하여 반응을 정지시킨 후 생성된 MUF의 양을 형광광도 분석계(TD - 360 Mini Fluorometer Emission : 460 nm, Excitation : 365 nm)를 사용하여 정량분석 하였다. 모든 분석시료는 3회 측정하여 평균값을 사용하였다. Specific β-glucosidase 활성도는 β-glucosidase의 Vmax값을 활성세균수로 나누어 구하였다. Phosphatase 활성도는 4-methylumbelliferyl-phosphate (MUF-PO₄, Sigma)기질을 사용하였으며 β-glucosidase activity 방법과 동일한 분석방법을 사용하였다.

총 인(TP), 용존무기인산염(DIP), 총 질소(TN) 및 질산염(NO₃⁻)

Standard Method (10)로 측정하였다.

결 과

세균수의 변화

파로호에 설치된 인공식물섬에서 갈대(*Reed*)와 창포(*Iris*)가 식재된 식생기반재의 공극수와 인공식물섬이 설치되지 않은 호수물 등 총 3지점에서 조사한 결과, 총세균수는 갈대가 식재된 식생기반재의 공극수에서 $11.0 \times 10^6 - 56.0 \times 10^6$ cells/ml, 창포가 식재된 식생기반재의 공극수에서 $14.0 \times 10^6 - 55.0 \times 10^6$ cells/ml, 호수물에서 $1.2 \times 10^6 - 6.4 \times 10^6$ cells/ml로 조사되었다(Fig. 2A). 갈대와 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재의 공극수 시료가 호수물보다 각각 6.5-26.2배, 5.4-18.1배 높은 결과를 보였으며, 호수물의 경우 총세균수는 큰 변화 없이 일정하지만, 인공식물섬 식생기반재의 경우 수온이 올라가기 시작하는 5월 이후부터 총세균수가 증가하다가 8월 달에 최대값을 보였고, 이후 감소하는 결과를 보였다.

활성세균수는 갈대가 식재된 식생기반재의 공극수에서 $6.6 \times 10^6 - 47.0 \times 10^6$ cells/ml, 창포가 식재된 식생기반재의 공극수에서 $7.3 \times 10^6 - 51.0 \times 10^6$ cells/ml, 호수물에서 $0.2 \times 10^6 - 3.4 \times 10^6$ cells/

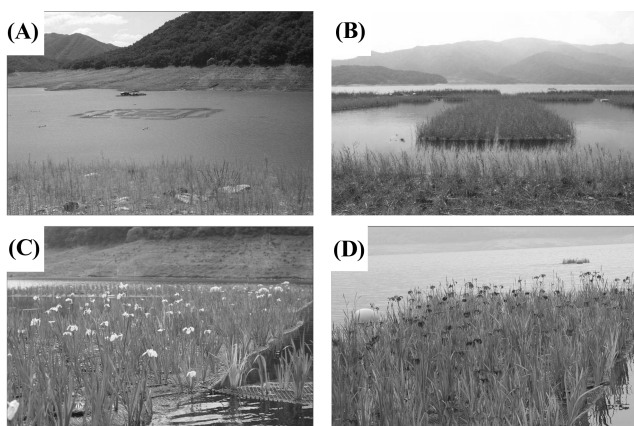


Fig. 1. Artificial floating island just after installation on Aug. 2003 in Lake Paro (A), Macrophytes are growing on artificial floating island (July, 2004). *Phragmites communis* (B), *Iris pseudoacorus* (C), *Iris ensata* (D).

m로 조사되었다(Fig. 2B). 갈대와 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재의 공극수 시료가 호수물보다 각각 8.6-45.8배, 5.7-42.9배 높은 결과였으며, 총세균수와 마찬가지로 호수물에서는 활성세균수의 큰 변화가 없었고, 갈대와 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재 공극수의 활성세균수도 총세균수 변화와 마찬가지로 5월부터 증가하다가 8월을 지나 감소하는 결과를 보이고 있다.

총세균수에 대한 활성세균수의 비율은 갈대가 식재된 식생기반재의 공극수에서 47.1-86.8%, 창포가 식재된 식생기반재의 공극수에서 52.1-92.7%, 호수물에서 14.2-73.9%로 조사되었다(Fig. 2C). 갈대와 창포가 식재된 식생기반재의 공극수에서 호수물보다 높은 비율을 보이고 있으며, 호수물의 경우 총세균수와 활성세균수에서 큰 변화폭을 관찰할 수 없었으나 총세균수에 대한 활성

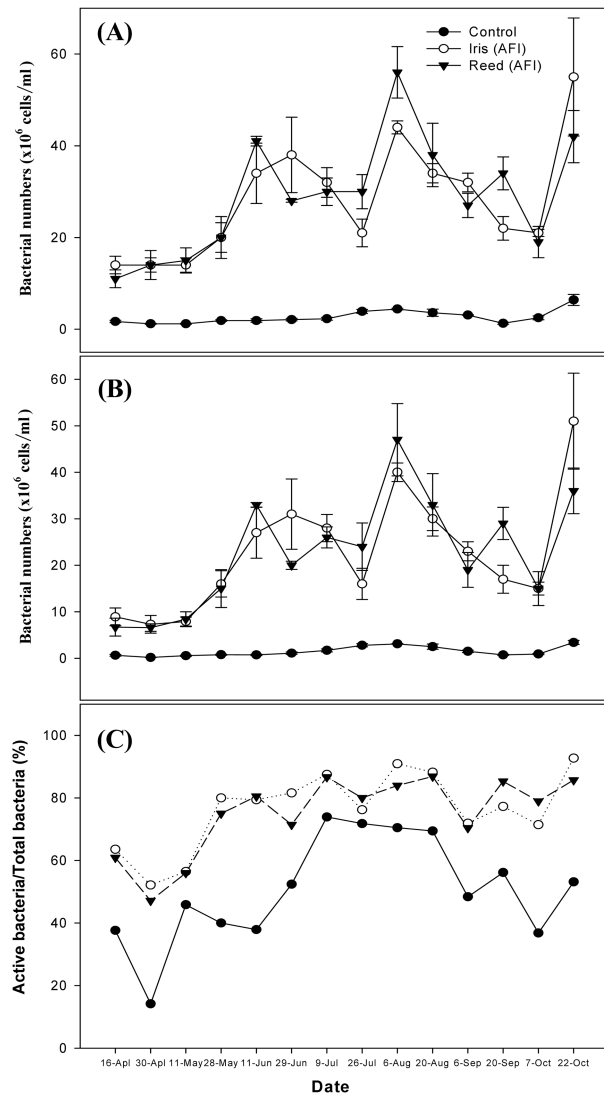


Fig. 2. The variations of total bacterial numbers (A), active bacterial numbers; (B) and ratio of active bacterial numbers to total bacterial numbers; (C) in artificial floating island (AFI) and control site of Lake Paro.

세균수의 비율에서는 수온에 따라 변화하는 경향을 보이고 있다.

체외효소활성도

인공식물섬 식생기반재의 공극수와 호수물의 β -glucosidase 활성도는 갈대를 식재한 식생기반재에서 161.3-801.7 nM/L/hr, 창포를 식재한 식생기반재에서 176.4-832.3 nM/L/hr, 호수물에서 5.3-36.7 nM/L/hr 범위였다(Fig. 3A). 갈대와 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재의 공극수 시료가 호수물보다 각각 9.4-43.8 배, 10.3-76.7 배 높은 값을 보였다.

활성세균 한 마리가 분비하는 specific β -glucosidase 활성도는 갈대를 식재한 식생기반재에서 7.3-50.0 aMcel/L/hr, 창포를 식재한 식생기반재에서 6.6-51.6 aMcel/L/hr, 호수물에서 4.0-47.6 aMcel/L/hr 범위였다(Fig. 3B). 4월 달의 경우 호수물에서 평균 47.31 aMcel/L/hr, 갈대와 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재에서 각각 27.66 aMcel/L/hr, 29.07 aMcel/L/hr로 조사되어 호수물에서 높았으나, 수온이 높아지는 5월 이후부터는 호수물에서 평균 16.23 aMcel/L/hr, 갈대와 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재에서 평균 22.12 aMcel/L/hr, 25.88 aMcel/L/hr로 조사되었다.

Phosphatase 활성도의 결과는 갈대가 식재된 식생기반재의 공극수에서 4873.1-28201.3 aMcel/L/hr, 창포가 식재된 식생기반재의 공극수에서 7036.6-30409.0 nM/L/hr, 호수물에서 11.2-1405.7

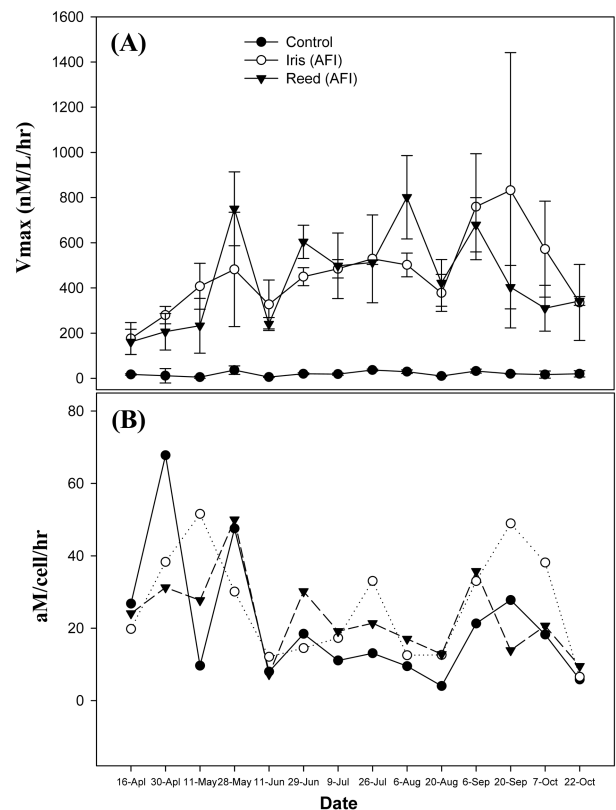


Fig. 3. The variations of β -glucosidase enzyme activity (A) and specific β -glucosidase enzyme activity (B) in artificial floating island (AFI) and control site of Lake Paro.

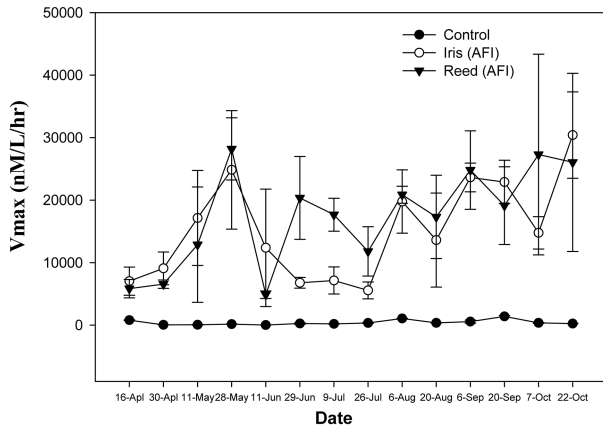


Fig. 4. The variations of phosphatase enzyme activity in artificial floating island (AFI) and control site of Lake Paro.

nM/L/hr 범위로 조사되었다(Fig. 4). 갈대가 식재된 식생기반재의 공극수는 호수물보다 7.3-436.0 배 높았으며, 창포가 식재된 식생기반재의 공극수 경우 8.8-1107.1 배 높은 값을 보였다.

영양염류

갈대와 창포를 식재한 인공식물섬 식생기반재내 공극수에서 영양염류의 농도를 조사한 결과, 총인의 경우 갈대를 식재한 식생기반재의 공극수에서 0.64-0.91 mg/L, 창포를 식재한 식생기반재의 공극수에서 0.49-1.06 mg/L, 호수물에서 0.05-0.08 mg/L로 조사되었다(Fig. 5A). 조사기간 모두 호수물보다 인공식물섬 식생기반재의 공극수 시료에서 총 인의 농도가 높았으며, 갈대와 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재의 공극수 시료가 호수물에 비해 각각 9.9-13.9배, 8.4-16.5배 높은 결과를 보였다.

용존무기인산염 분석 결과는 6월 11일 결과에서 호수물이 갈대와 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재의 공극수 시료보다 높게 조사되었으나, 6월 11일을 제외하면 갈대와 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재의 공극수 시료가 호수물보다 각각 1.1-2.0배, 1.2-2.4배 었다(Fig. 5B).

총질소 농도 역시 총인의 결과와 마찬가지로 조사기간 동안 모두 인공식물섬 식생기반재의 공극수 시료가 호수물보다 높게 조사되었다. 갈대가 식재된 인공식물섬 식생기반재와 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재에서 각각 4.6-12.5 mg/L, 4.9-9.0 mg/L, 호수물에서 1.9-2.8 mg/L 범위였으며(Fig. 6A), 갈대가 식재된 인공식물섬 식생기반재 내 공극수 시료가 호수물보다 2.4-6.1배 높았고, 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재의 공극수 시료는 호수물에 비해 2.2-4.7배 높은 값을 보였다.

질산염 분석 결과도 인공식물섬 식생기반재의 공극수에서 호수물에 비해 모두 높게 조사되었으며, 갈대가 식재된 식생기반재의 공극수에서 1.6-2.1 mg/L, 창포가 식재된 식생기반재의 공극수에서 1.3-3.1 mg/L, 호수물에서 0.8-1.1 mg/L 범위였다(Fig. 6B). 갈대와 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재의 공극수 시료가 호수물보다 각각 1.7-2.3배, 1.3-3.4배 이었다.

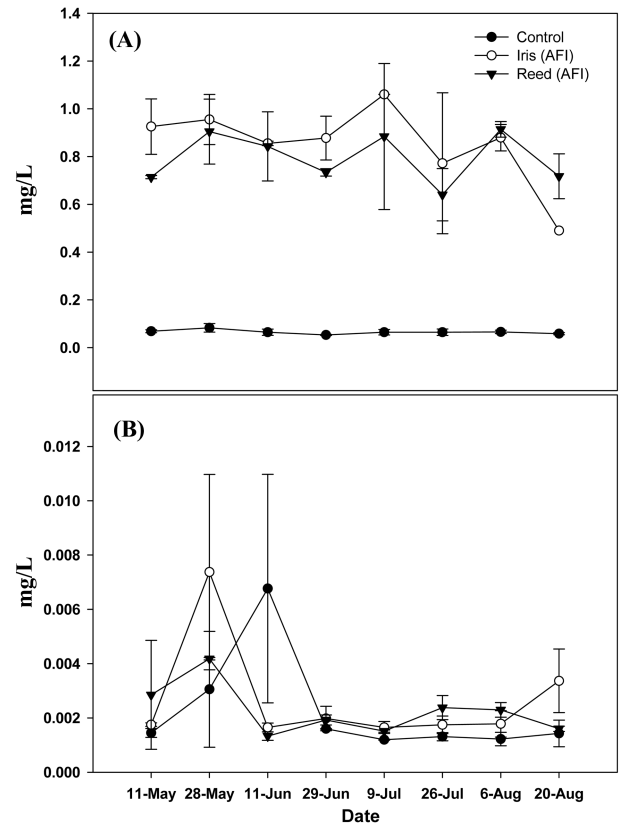


Fig. 5. The variations of total phosphorus concentration (A) and DIP concentration (B) in artificial floating island (AFI) and control site of Lake Paro.

고찰

인공식물섬 식생기반재의 가장 중요한 기능은 영양염을 농축시켜 식물의 활착과 성장을 돕는 것이다. 파로호에 설치된 인공식물섬의 경우, 총질소는 호수물보다 갈대와 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재의 공극수 시료에서 각각 2.4-6.1배, 2.2-4.7배 높은 값을 보였고, 총인은 갈대와 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재의 공극수 시료가 호수물보다 각각 9.9-13.9배, 8.4-16.5배 높은 값을 보였다. 세균은 낮은 농도의 인, 질소를 농축하여 높은 농도의 인, 질소로 만들 수 있는 능력을 갖고 있어(16), 파로호와 같은 중, 빈영양호에서도 세균이 부착하기 좋은 기질을 식생기반재로 사용하면 식물을 키울 수 있는 충분한 양의 영양염을 공급할 수 있다고 보고되었다(3). 파랑에 의해 호수물이 식생기반재에 여과되어 부유물이 식생기반재에 흡착하게 되고, 물에 잠긴 식생기반재는 유기물이 쉽게 집락화되어 입자상 물질과 고분자 물질·세균, 균류를 포함하는 생물막(biofilm)을 생성한다고 보고하였다(21). 따라서 인공식물섬 식생기반재의 공극수에서는 인과 질소의 농도가 농축되어 식물이 잘 자랄 수 있을 정도로 충분한 농도의 총질소와 총인이 있음을 확인하였고, 이들이 식생기반재내에서 높아질 수 있는 것은 바로 세균의 기능으로 볼 수 있다.

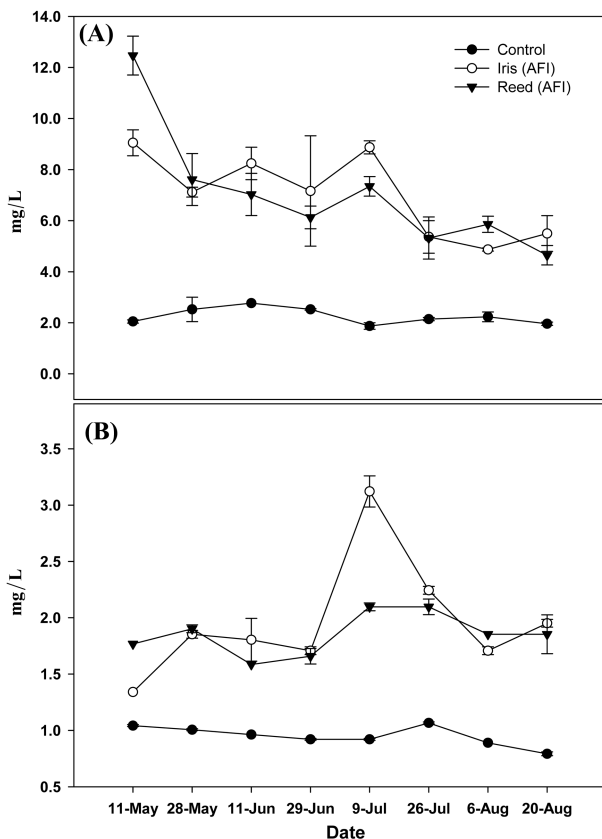


Fig. 6. The variations of total nitrogen concentration (A) and NO_3^- concentration (B) in artificial floating island (AFI) and control site of Lake Paro.

세균의 부착은 기질의 소수성과 관련이 있다(19). 식생기반재 선정을 위해 백탄, 참숯, 자갈, rubberized coconut fiber를 가지고 질소와 인의 농축효과를 조사한 연구결과에서 rubberized coconut fiber의 공극수에서 총질소, 총인의 농도가 대조구와 비교하여 각각 20배, 100배 이상 높아졌고, 백탄, 참숯, 자갈 등의 총질소와 총인의 농도는 대조구보다 각각 16.6-36.8배, 91.5-122.5배 높게 조사되었다(5). 특히 rubberized coconut fiber의 압착수에서, 총 질소는 250배 이상, 총 인은 1000배 이상 높아져, rubberized coconut fiber를 식생기반재로 선정하였다. Rubberized coconut fiber는 기존의 coconut fiber 표면에 고무를 덧씌운 것으로, 이 고무성분이 소수성을 높여주어 다른 기질보다 높은 질소와 인이 농축되었을 것으로 사료된다. Rubberized coconut fiber를 식생기반재로 사용한 파로호 인공식물섬에서는 식물이 자라고 식생기반재 아래로 식물 뿌리가 내려왔으며, 여기에도 세균이 부착한 생물막(biofilm)을 확인할 수 있었다. 그러나 이 뿌리의 소수성은 rubberized coconut fiber 보다 낮고, 호수물에 직접 노출되어 있으므로 파랑 등의 물리적인 작용에 의하여 세균이 쉽게 탈리될 수 있기 때문에 세균의 밀도는 식생기반재보다 훨씬 낮을 것으로 사료된다.

파로호 인공식물섬 식생기반재의 공극수와 호수물에서 총세균

수와 활성세균수의 변화를 살펴보면 수온이 낮은 시기인 4월에서 수온이 높아지는 여름기간까지 점점 증가함을 보였다. 조사기간 동안 총세균수는 갈대와 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재의 공극수 시료가 호수물보다 최고 20배 이상 높은 결과를 보였다. 특히 활성세균수의 경우 갈대와 창포가 식재된 인공식물섬 식생기반재의 공극수 시료가 호수물보다 최고 40배 이상 높은 결과를 보였다. 호수 생태계에서 세균은 생활형에 따라 크게 부유세균과 부착세균으로 나눌 수 있는데 부착세균은 유기물 등 매질에 부착하여 성장한다. 유기물에 부착한 세균은 부유세균보다 세포 크기가 매우 크며, 활성도가 높아 영양염류가 풍부하지 않은 깊은 수심에서도 높은 활성도를 나타낸다(9). 또한, 인공식물섬의 식물 뿌리나 식생기반재는 입자성 물질을 흡착시켜 미생물의 먹이원을 제공할 뿐만 아니라 수생식물은 통기조직을 통해 산소를 식물뿌리로 전달시켜 세균의 유기물 분해 활동을 촉진시키는 것으로 사료된다. 인공식물섬에 존재하는 세균은 식물의 뿌리나 식생기반재에 부착된 부착세균이 많이 존재하기 때문에(2), 인공식물섬 식생기반재 내의 공극수에서 세균의 활성이 더 높게 나타난 것으로 사료된다.

β -Glucosidase 효소는 glucose, cellulose, carboxy-methyl-cellulose 등의 β 고리를 가수분해시켜 monomer로 분해하는 효소이며(11), 생태계에서 β -glucosidase 활성의 95% 이상이 세균에 의한(15). 즉 cellobiohydrolase에 의해 분해된 oligomer나 dimer를 세포막을 통과할 수 있는 monomer로 분해하는 효소이다(14). 파로호 인공식물섬의 갈대와 창포가 식재된 식생기반재 공극수에서의 최대 분해속도(V_{max})는 호수물보다 각각 최고 43.8배, 76.7배 높게 관찰되었다.

수생식물과 미생물에 의해 생성되는 고분자 유기물 질은 매우 다양하며, 노쇠한 세포의 분해, parasite infection, 동물플랑크톤의 sloppy feeding 등에 의해 생성되는 배출물은 체외효소에 의해 가수분해된 후 쉽게 흡수할 수 있는 고분자 물질로 구성되어 있고(18), 담수에서 고분자 유기물질의 대부분이 식물에 기인된 것으로 보고되었다(24). 따라서 인공식물섬의 식생기반재에 서식하는 수생식물과 세균에 의해 고분자 유기물질이 생성되기 때문에 β -glucosidase 활성도가 식생기반재의 공극수에서 더 높은 것으로 사료된다.

Specific β -glucosidase 활성도 값을 보면 파로호 인공식물섬의 갈대와 창포가 식재된 식생기반재에서 4월을 제외하고 각각 최고 5배, 3배 이상 높게 나타나, 식생기반재의 공극수에서 호수물보다 높은 활성도를 보였다. 즉, 부착세균이 부유세균보다 활성이 크고, 식생기반재가 세균이 부착하기 좋은 소수성으로 구성되어 있기 때문에, 식생기반재에 형성된 생물막(biofilm)은 호수물과는 다른 미생물 생태계로 구성되어 있음을 확인하였으며, 식생기반재의 공극수에서 고분자 유기물질의 생성과 분해, 세균과 식물의 관계 등은 앞으로 연구하여야 할 과제이다.

인인 생물체의 구성물질 중 필수적인 요소이다. 이러한 인이 생물체로 흡수되는 것은 용존무기인(DIP)의 형태여야만 하며, 생물체로 들어간 유기인산염은 먹이연쇄에 따라 다음 단계로 전달된다. 생물체가 직접 이용 가능한 용존무기인의 양은 5% 미만인

며, 대부분의 인은 생물체, 사체, 또는 배설물에 포함된 유기인산염의 형태가 90% 이상을 차지하고 있어(23) 단순한 인산염의 화학적 분석만으로는 그 기능을 알 수 없다. 유기인산염은 phosphatase에 의해 무기인산염형태로 분해되어 세균이나 조류에 의해 흡수 이용되므로 이 효소는 수체 내에 인의 동태를 이해하는데 좋은 지표가 된다(13). Phosphatase는 유기인산염에서 생물체가 이용할 수 있는 무기인산염형태로 용출시키는 유도효소(inducible enzyme)로, 인이 제한 요인인 수생태계에서 부영양화와 밀접한 관계가 있는 고(17), 세균, 식물 뿌리, 식물플랑크톤 등이 분비한다(22).

파로호 인공식물섬 식생기반재내의 공극수에서 phosphatase 최대 분해속도는 갈대와 창포가 식재된 식생기반재에서 호수물보다 각각 최고 436.0배, 1107.1배 높게 관찰되었다. 식생기반재에서는 총인의 농도가 호수물보다 평균 13배 이상 높으며, phosphatase 활성도도 1000배 이상 높게 나타났다. 그러나, 용존 무기인산염 농도는 호수물에 비해 약 2배 정도 높은 결과였다. 이는 식생기반재에서 phosphatase에 의하여 생성된 용존무기인산염을 식물체가 바로 흡수하기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

파로호에 설치된 인공식물섬은 식재한 식물뿐만 아니라 새롭게 침투한 식물들도 잘 자라고, 물고기와 새가 모여드는 새로운 생태계를 조성하였다(6). 이러한 생태계 복원과정에서 인공식물섬의 식생기반재에 서식하는 미생물이 가장 중요한 역할을 담당함을 확인하였다. 즉, 인공식물섬 식생기반재에서 새로운 미생물 생태계가 조성되었고, 이들의 작용으로 영양상태가 낮은 호수에서도 식물이 성장할 수 있었다. 이 새로운 생태계는 부착세균의 기능, 식물과 미생물 간의 상호작용을 확인할 수 있는 좋은 모델 생태계이다.

감사의 말

이 연구는 2006년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음. 참여한 연구자는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받았음.

참고문헌

- 김미리, 서은영, 최승익, 안태석. 2006. 호수 생태계에서 살아있는 세균을 측정하기 위한 qDVC 방법의 적용. 한국미생물학회. 42, 205-209.
- 박현진, 권오병, 안태석. 2000. 인공식물섬을 이용한 소형 저수지의 수질개선. 한국환경복원녹화학회지 4, 90-97.
- 안태석. 2003. 수자원의 개발과 생태계의 보전. 춘천 물포럼 2003 논문집 441-455.
- 안태석. 2005. 파로호의 환경 복원을 위한 생태기술. 생태낙원화천 포럼 2005 보고서. Eco paradise Hwacheon Forum 조직위원회 15-29.
- 안태석. 2004. 여재를 이용한 자연순환방식의 수질정화 시스템 개발. 강원지역환경기술개발센터.
- 안태석. 2005. 한강수계 생태계 복원방법 및 기술표준화 연구. 한강수계관리위원회.
- 안태석. 2003. 파로호 생태계 실태조사. 강원지역환경기술개발센터. 화천군.
- 환경관리공단. 2000. 수초재배섬 운영 결과 보고서.
- Aldredge, A.L. and M.W. Silver. 1988. Characteristics dynamics, and significance of marine snow. *Prig. Oceanogr.* 20, 41-82.
- APHA. 2001. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 20th ed. APHA. N.Y., USA
- 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, 266-272.
- Chrst, K. and J. Overbeck. 1987. Kinetics of alkaline phosphatase activity and phosphorus availability for phytoplankton and bacterioplankton in Lake PluBsee. *Microb. Ecol.* 13, 229-248.
- Chrst, R.J. 1989. Characterization and significance of β -glucosidase activity in lake water. *Limnol. Oceanogr.* 34, 660-672.
- Chrst, 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.
- Chrst, R.J. and H. Rai. 1994. Microbial Ecology of Lake Plusee. p. 92-117 In J. Overbeck and Chrst, R.J. (editors), Bacterial secondary production. Springer-Verlag. New York. USA
- Chrst, R.J., W. Siuda, and G.Z. Halemejk. 1984. Longterm studies on alkaline phosphatase activity (APA) in a lake with fish aquaculture in relation to lake eutrophication and phosphorus cycle. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 70, 1-32.
- Cottrell, M. and C. Suttle. 1991. Wide-spread occurrence and clonal variation in viruses which cause lysis of a cosmopolitan, eucaryotic marine phytoplankter *Micromonas pusilla*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 78, 1-9.
- Fletcher, M. 1996. Bacterial adhesion. p. 1-24. In Fletcher, M. (editor), Bacterial attachment in aquatic environments: a diversity of surfaces and adhesion strategies. WILEY-LISS. New York, USA
- Hobbie, J.E., R.J. Daley, and S. Japer. 1977. Use of nuclepore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl. Environ. Microbiol.* 33, 1225-1228.
- Hunik, J.H., M.P. Hoogen, W. Boer, M. Smit, and J. Tramper. 1993. Quantitative determination of the spatial distribution of *Nitrosomonas europaea* and *Nitrobacter agilis* cells immobilized in K Carrageenan gel beads by a specific fluorescent antibody labelling technique. *Appl. Environ. Microbiol.* 59, 1951-1954.
- Jansson, M., H. Olsson, and K. Peterson. 1988. Phosphatase: Origin, characteristics and function in lakes. *Hydrobiologia* 170, 157-176.
- Wetzel, R.G. 1983. Limnology 2nd (ed.), CBS College Publishing. 159-614.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology Lake and river Ecosystems, 3rd ed., Academic press, San Diego, USA

(Received December 29, 2006/Accepted February 9, 2007)

ABSTRACT : Bacterial Abundances and Enzymatic Activities in the Pore Water of Media of Artificial Floating Island in Lake Paro

Yong Jeon Kim, Jai Kyou Hur, Jong Hyun Nam, In Seon Kim, Kyoung Suk Choi, Seung Ik Choi, and Tae Seok Ahn* (Dept. of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

For restoration of disturbed ecosystem in Lake Paro, artificial floating island (AFI) was installed. Even though the lake water was oligo-mesotrophic, the macrophytes, such as *Iris ensata*, *Iris pseudoacorus*, *Phragmites communis* were growing well in the rubberized coconut fiber media. For elucidating this process, total bacterial numbers, active bacterial numbers and exoenzymatic activities of β -glucosidase and phosphatase of pore water of media and lake water were analyzed. The average of total bacterial numbers, active bacterial numbers and exoenzymatic activities of β -glucosidase and phosphatase were 28.6×10^6 cells/ml, 22.7×10^6 cells/ml, 452.9 nM/L/hr and 16381.9 nM/L/hr which were 10, 15, 22 and 38 times higher than those of lake water, respectively. Moreover, the total phosphorus and total nitrogen concentration of media showed high values of 0.82 mg/L and 7.0 mg/L, respectively, while those of lake water 0.07 mg/L and 2.3 mg/L. This results suggest that the bacteria was playing an important role for restoration of disturbed ecosystem with newly created microbial ecosystem in media of artificial floating island.