

습지 식물이 퇴적물의 생지화학적 반응에 미치는 영향

최정현

이화여자대학교 환경공학과

(2008년 6월 23일 접수, 2008년 8월 19일 채택)

The Effect of Aquatic Macrophytes on the Biogeochemistry of Wetland Sediments

Jung Hyun Choi

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

ABSTRACT : This research investigates the influences of the presence of aquatic macrophytes on the changes of biogeochemistry in the sediments through the comparative analysis of porewater and sediments. From the *in situ* measurements, elevated SO_4^{2-} concentrations were observed in the rhizosphere during the growing season, which was resulted from the oxidation of reduced sulfide in the sediments by the oxygen release from the plant roots. There was sufficient AVS in the sediments to induce observed SO_4^{2-} concentrations. The amount of oxygen in the oxidation of AVS to produce observed SO_4^{2-} concentrations is $0.85 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ which is relevant to the results of other researches. The AVS concentrations in the vegetated sediments increased with the depth whereas there is higher mass of AVS in the surface of the non-vegetated sediments. This shows that evapotranspiration induces the transportation of SO_4^{2-} in the surface water into the anaerobic sediments. In addition, the elevated organic content caused by the presence of plants increased β -glucosidase activities which play an important role in the carbon cycle of the sediments.

Key Words : Aquatic Macrophytes, Wetland Sediments, Biogeochemistry, Enzyme Activity, Rhizosphere, AVS

요약 : 이 연구는 습지의 수생 식물이 퇴적물에 유발하는 생지화학적 변화들을 식물이 존재하는 퇴적물과 존재하지 않는 퇴적물의 공극수 및 퇴적물을 비교 분석함으로써 살펴보았다. 현장 실험을 통하여 식물의 성장기간 동안 rhizosphere에서 높은 SO_4^{2-} 농도가 관찰되었고, 이는 식물의 뿌리에서 방출된 산소가 주변 퇴적물에 존재하고 있는 sulfide를 산화시킨 결과라 판단된다. 측정된 AVS의 농도는 SO_4^{2-} 농도 증가를 보여주기엔 충분한 양이 존재하였고, 관찰된 SO_4^{2-} 농도를 발생시키기 위해 AVS 산화에 요구되는 산소량은 $0.85 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 다른 연구자들의 연구결과와 부합되는 결과를 도출하였다. 식물이 존재하지 않는 퇴적물의 경우 대부분의 AVS가 지표면에 존재하고 있는데 비해 식물이 존재하는 경우 rhizosphere에서 가장 높은 농도의 AVS가 존재하고 있는 것으로 보아 식물의 evapotranspiration에 의해 지표수내 SO_4^{2-} 가 혐기성 상태인 퇴적물 내부로 활발히 이동되어 졌음을 알 수 있다. 그 외에도, 식물에 의해 증가된 유기물은 퇴적물에서 탄소 순환에 중요한 역할을 하는 β -glucosidase 효소의 활성도를 증가시켰다.

주제어 : 수중식물, 습지 퇴적물, 생지화학, 효소활성도, 근권, AVS

1. 서론

공공수역의 수질관리를 위하여 하수관거의 정비 및 하수종말처리장 건설 등 환경 기초 시설을 지속적으로 확충하고 있으나 전체 오염원의 20% 이상을 차지하고 있는 비점오염원의 관리가 적절히 이루어지지 않아 만족스러운 수질 개선이 이루어지지 않고 있다.^{1,2)} 비점오염원의 관리 방안으로 제안되고 있는 습지는 초기 건설비가 낮고, 에너지 사용이 적으며 유량 및 부하량의 변동에 유연하게 대처할 수 있는 자연친화적인 방법으로,^{3,4)} 퇴적물에 존재하고 있는 미생물 군집과 수생식물들이 유발하는 다양한 물리적·화학적·생물학적 반응들에 의해 오염물질을 제거하

고 있다.⁵⁾

습지 퇴적물은 연중 대부분의 기간 동안 물에 잠겨 있기 때문에 혐기성 상태를 유지하고 있고, 이러한 혐기성 토양에서 자라기 위해 습지 식물은 공기중의 산소를 식물 줄기내 빈 공간을 통해 뿌리로 이동시키는 특별한 적응 기작을 발달시켜 혐기성 토양에서 살아갈 수 있다.^{6,7)} 뿌리로 이동된 산소는 주변 토양으로 방출되어 뿌리 주변 토양의 산화환원력을 변화시키고, 이에 따라 미생물 군집과 퇴적물의 생지화화적인 특성들이 변화하게 된다.^{5,8)} 또한 식물은 evapotranspiration에 의해 식물내 부족한 수분을 뿌리주변 퇴적물의 공극수를 통해 공급받기 때문에 지표수가 퇴적물 내부로 이동하는 원동력을 제공하게 된다. 습지 퇴적물의 표면은 식물체의 잔류물이 많은 부분을 차지하고 있으므로 입자의 크기가 작아 지표수의 침투가 느리지만,⁹⁾ 식물의 evapotranspiration은 지표수가 퇴적물 내부로 이동하는 양

† Corresponding author

E-mail: jchoi@ewha.ac.kr

Tel: 02-3277-6686

Fax: 02-3277-3275

과 속도를 증대시키게 된다. 지표수의 이동은 지표수에 존재하고 있는 용존성 물질을 동시에 퇴적물 내부로 이동시키게 되어 퇴적물의 생지화학적 반응에 영향을 주게 된다.

그 외에도 식물은 뿌리, 삼출액(exudate), 잔류물(residue) 등에 의해 퇴적물에 유기물을 공급하게 된다.^{10,11)} 증가된 유기물은 퇴적물에서 효소를 생성하는 미생물 군집의 수와 성장에 중요한 영향을 끼치게 된다.^{12~14)} 토양에서 진흙이나 휴믹산(humic acid)과 결합하고 있는 체외 효소(extracellular enzyme)는 토양의 상태나 질을 나타내는 지표로 사용되어질 수 있다.^{15~18)} 그러므로, 효소의 활성도 변화를 통해 식물에 의한 퇴적물의 상태와 질의 변화를 살펴볼 수 있다.

위와 같이 습지의 퇴적물은 식물이 서식함으로써 유기물 함량이 증가되고 퇴적물의 산화환원력이 변화되며 지표수의 움직임이 활발해진다. 습지 식물에 의해 유발되는 물리적·화학적·생물학적 변화들은 오염물질을 제거하는 습지의 기능 및 그 효율에 중대한 영향을 주기 때문에 수질 관리의 방안으로 습지를 사용하기 위해서는 습지의 수생 식물이 퇴적물에 유발하는 생지화학적 변화들을 살펴보는 것이 필요하다. 따라서 이 연구에서는 이러한 식물의 작용기작들이 퇴적물내 생지화학적 반응에 어떠한 영향을 주며, 그에 따라 어떠한 변화들이 발생하는지를 식물이 존재하는 퇴적물과 존재하지 않는 퇴적물의 공극수 및 퇴적물을 비교 분석함으로써 살펴보고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 공극수의 분석

퇴적물에 존재하는 SO_4^{2-} 의 수직적인 분포를 살펴보기 위해서 공극수 채취기(Pore Water Samper)를 사용하여 2002년 4월부터 2003년 8월까지 현장(in-situ) 실험을 수행하였다. 공극수 채취기는 1976년 Hesslein에 의해 처음으로 고안된 다양한 연구자들의 목적에 따라 크기와 모양이 변화되어져 사용되어오고 있다.^{19~21)} 공극수 채취기는 폭 12 cm, 길이 35 cm로, 중앙에 일정한 크기의 작은 홈(8 cm × 2.5 cm × 1 cm)들이 0.5 cm 간격으로 배열되어 있다. 홈들은 질소가스로 산소가 제거된 증류수가 채워진 후 공극의 크기가 0.2 μm 이고 유기물 흡착능이 작은 반투과성(semipermeable) 막(HT Tuffryn-200, Gelman Sciences Inc.)으로 덮여지게 된다.

준비되어진 공극수 채취기는 식물이 존재하는 퇴적물과 식물이 존재하지 않는 퇴적물에 3개씩 30 cm 간격을 두고 삽입되어졌다. 2주후 퇴적물 속 공극수와 공극수 채취기 홈에 들어있는 증류수가 반투과성막에 의해 평형상태(equilibrium)에 도달하게 되면 공극수 채취기를 회수한 후 홈속에 들어있는 시료를 주사기를 사용하여 고무 septum으로 밀폐된 유리병으로 옮긴 후 분석하였다. SO_4^{2-} 의 농도는 음이온 칼럼(AS4A-SC)을 가진 이온 크로마토그래피로 측정되었고, 모든 시료는 분석이 될 때까지 -15°C에서 보관되어졌다.

2.2. 퇴적물의 분석

퇴적물 분석은 연구의 2차년인 2003년 4월부터 2003년 7월에 수행되었다. 퇴적물로부터 공극수 채취기 회수하기 전에 코어(core)를 사용하여 공극수 채취기 옆 퇴적물을 샘플링하였다. 퇴적물 코어는 내경이 5 cm, 길이가 30 cm 인 아크릴 관으로 주변 퇴적물의 교란을 최소화하면서 샘플링하기에 용이하도록 끝이 뾰족하게 고안되어졌다. 샘플링된 코어는 공기와의 접촉을 피하기 위하여 비닐백에 넣어져 분석이 될 때까지 -15°C에서 보관되어졌고, 분석시에는 해동한 후 4 cm 간격으로 잘라 분석을 수행하였다.

Di Toro 등²²⁾의 방법에 따라 AVS(Acid Volatile Sulfide) 분석이 수행되어졌다. 이 방법은 1개의 반응 용기와 2개의 포집 용기가 밀봉된 관으로 연결되어 있는 실험 장치에 질소 가스를 1시간 동안 불어넣어 공기를 없앤 후 퇴적물을 반응용기에 집어넣으면, 퇴적물에 포함된 고체상태의 sulfide는 H_2S 로 변환되고 이를 포집용기에서 Ag_2S 로 침전시키게 된다. 1시간의 반응시간 후 포집용기에 침전된 Ag_2S 를 1.2 μm GF 필터로 포집하여 102°C 오븐에서 2시간 동안 말린 후 무게를 잰다.

유기물 함량 분석은 일정량의 퇴적물을 105°C 오븐에서 건조시킨 후 600°C furnace에서 유기물을 태워 제거한 후 그 무게의 차이를 측정하였다.

2.3. 효소 활성도 측정

탄소와 황의 영양물질 순환에 중요한 역할을 담당하고 있는 β -glucosidase의 효소 활성도는 Freeman 등²³⁾에 의한 방법을 사용하여 측정하였다. 형광성의 methylumbelliferyl [MUF]기를 포함하는 MUF- β -D-glucoside는 2.5 mL methylcellosolve에 녹여 준비한 후 20 mL vial에 1 cm^3 토양 덩어리를 넣고 400 μmol MUF- β -D-glucoside 5 mL를 주입한다. vial을 세계 흔들어 토양과 기질이 충분히 섞이게 한 후 60분간 배양한다. 배양이 끝나면 토양과 기질 혼합액 중 2 mL를 취하여 10,000 rpm에서 10분간 원심분리시킨 후 상등액 1 mL와 증류수 2 mL를 혼합하여 fluorometer (Turner Design, TD-700)를 사용 형광도를 측정한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. rhizosphere에서 sulfide의 산화

연구 대상지역은 갈대(*P. australis*)와 줄(*Z. latifolia*)이 주로 서식하는 하변습지(riparian wetlands)로서 식물이 존재하는 퇴적물에서 샘플링된 코어를 살펴보면 퇴적물이 크게 세가지 층으로 나누어짐을 알 수 있다. (i) 식물에서 유래한 debris 때문에 밀도가 낮은(0.3~0.4 g/cm^3) 어두운 갈색 토양으로 구성된 표층(< 4 cm); (ii) 높은 농도의 FeS와 유기물을 함유하고 있고 중간 정도의 밀도를 가지는 어두운 진회색 토양으로 구성된 중층(> 4 cm, < 8 cm); (iii) 높은 밀도(0.6~0.7 g/cm^3)의 어두운 회색으로 구성된 심층

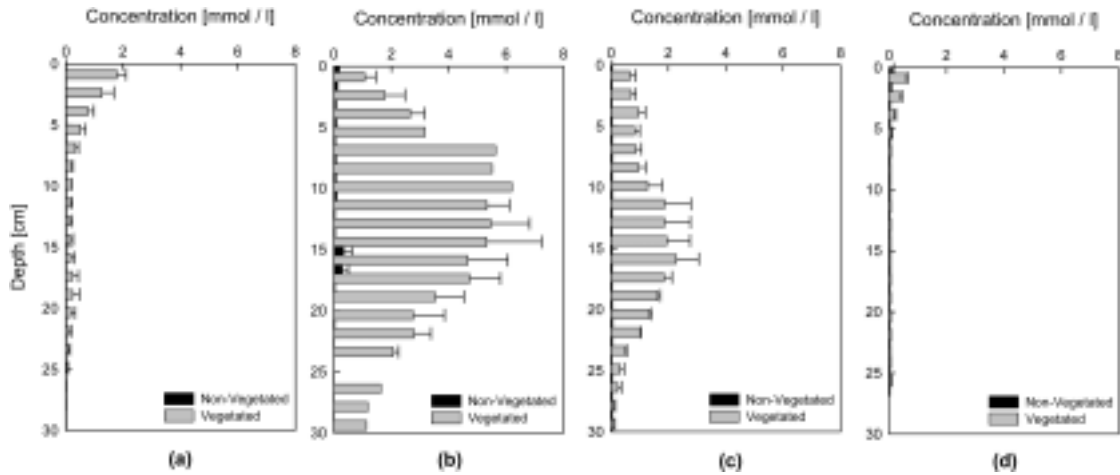


Fig. 1. Vertical distribution of SO_4^{2-} in the pore water collected from vegetated and non-vegetated sediments during 2002: (a) April, (b) May, (c) June, (d) October. Error bar represents \pm S.E.(n = 3).

(> 8 cm). 식물이 존재하지 않는 퇴적물도 표층에서는 심층보다 높은 유기물 농도와 낮은 밀도를 나타내었다. 식물이 존재하는 퇴적물의 경우 식물의 뿌리가 존재하는 rhizosphere는 중층에 존재하였다.

식물의 존재 여부가 퇴적물에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 공극수 채취기를 사용하여 현장 실험을 수행한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 갈대와 줄로 덮여있는 퇴적물의 경우 식물의 생장이 왕성한 기간(5~6월)에 10 cm에서 20 cm 사이에서 높은 SO_4^{2-} 농도를 보였다. 연중 SO_4^{2-} 농도를 살펴보면 식물의 생장이 없는 기간에 가장 낮은 0.2 mmol/L의 값을 나타냈고 식물의 생장이 왕성한 기간에 rhizosphere에서 6.20 mmol/L의 최대값을 나타내었다. 반면 식물이 존재하지 않는 퇴적물의 경우에는 연중 SO_4^{2-} 농도의 수직분포에 변화가 거의 없었고, 측정된 SO_4^{2-} 의 최대 농도는 0.25 mmol/L였다. 식물의 생장이 왕성한 5월과 6월에 측정된 SO_4^{2-} 농도를 살펴보면 식물이 존재하는 퇴적물의 SO_4^{2-} 농도가 식물이 존재하지 않는 퇴적물의 SO_4^{2-} 농도의 4배에서 20배 정도 큼을 알 수 있었다.

대부분의 경우 황은 해수 및 해안 퇴적물에 많이 분포하고 있다고 알려져 있으나, 담수 습지의 경우 식물의 잔류물에 존재하고 있는 유기황이 분해되어 지표수에 높은 농도의 SO_4^{2-} 를 발생시킬 수 있다.^{24,25)} 수체에 많이 존재하고 있는 SO_4^{2-} 는 식물의 evapotranspiration에 의해 퇴적물 내부로 이동되어지고, 유기물이 풍부한 혐기성의 퇴적물 내부에서 SO_4^{2-} 는 유기물을 분해하는 과정에서 전자 수용체로 사용되어질 수 있다. 전자 수용체로 사용된 SO_4^{2-} 는 환원된 상태인 sulfide를 발생시키게 된다.²⁶⁾ 증가된 sulfide는 퇴적물 속 철 화합물과 결합하여 FeS나 pyrite와 같은 물질을 생성하게 된다.²⁷⁾

식물이 존재하지 않는 경우 혐기성 상태를 유지하고 있는 습지 퇴적물이 식물의 생장기간 동안 식물이 존재하는 퇴적물의 공극수가 높은 SO_4^{2-} 농도를 나타내는 것이 식물이 공기 중의 산소를 rhizosphere로 이동시켜 식물뿌리 주

변에 존재하고 있는 sulfide를 산화시킨 결과^{8,28)}인가를 살펴보기 위하여 연구 2차년인 2003년에 퇴적물 코어를 샘플링하여 AVS의 농도를 측정하였다. AVS의 분석 결과는 퇴적물에 존재하고 있는 AVS의 농도가 측정된 SO_4^{2-} 의 농도 증가를 보여주기에 충분한 양이 존재하는지, 그렇다면 AVS 농도의 감소와 SO_4^{2-} 농도의 증가가 상관관계를 보여주는지에 대한 해답을 제시할 수 있다고 가정하였다.

2003년 5월과 6월은 평균 일사량이 12.61 MJ/m²로 24.24 MJ/m²를 보인 2002년과 비교해보면 일사조건이 식물생장에 적합하지 않음을 알 수 있다. 이러한 기상의 변화로 2003년 식물의 생체량과 성장속도는 2002년에 비해 현저히 줄어들었고, 그 결과 식물에 의한 퇴적물 공극수내 SO_4^{2-} 농도 변화도 미미하였다. 하지만 여전히 rhizosphere에서는 식물이 존재하는 퇴적물이 식물이 존재하지 않는 퇴적물에 비해 5배 이상 높은 최고 0.1 mmol/L의 SO_4^{2-} 농도를 나타내어 식물에 의해 이동된 산소가 퇴적물내 sulfide를 산화시키고 있음을 알 수 있었다(Fig. 2).

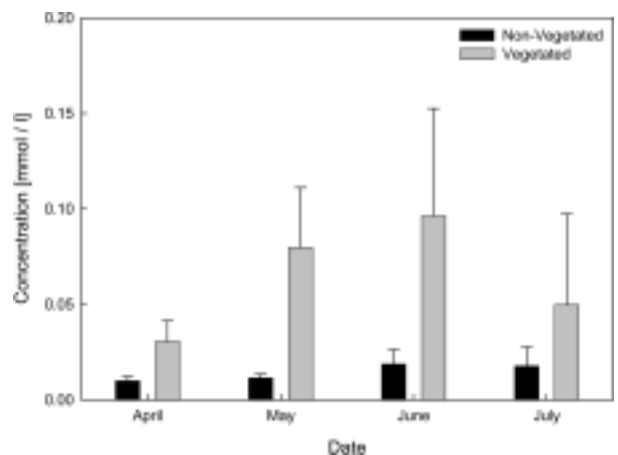


Fig. 2. Comparison of SO_4^{2-} concentrations in the rhizosphere of the vegetated and non-vegetated sediments during 2003.

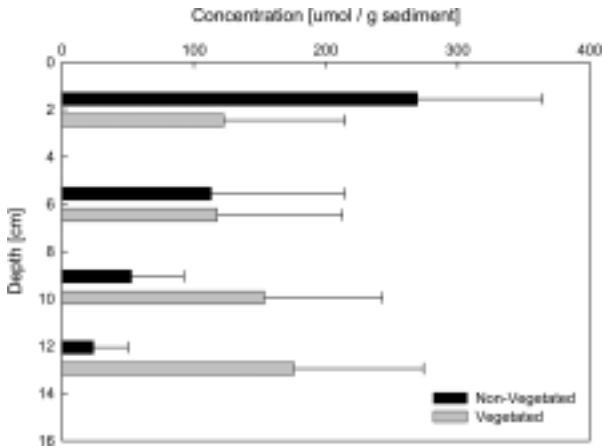


Fig. 3. Vertical distribution of AVS in the vegetated and non-vegetated sediments. Shown here is the average and S.D.(n=28 for vegetated sediment, n=18 for non-vegetated sediments) for all cores collected on a monthly basis from March to August, 2003.

3.2. AVS analysis

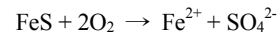
퇴적물에서 AVS의 수직 농도분포를 살펴보면 식물이 존재하지 않는 퇴적물의 경우 표층에서 269.5 µmol/g sediment의 농도로 존재하다가 퇴적물 깊이가 깊어짐에 따라 급격히 감소하여 깊이 13 cm 부근에서는 24.0 µmol/g sediment의 낮은 농도를 나타낸다(Fig. 3). 하지만 식물이 존재하는 퇴적물의 경우 표층에서 122.7 µmol/g sediment로 존재하던 AVS가 식물의 뿌리가 위치하고 있는 rhizosphere에서는 176.0 µmol/g sediment로 증가되는 상반된 경향을 보여주었다. 이러한 경향은 식물이 존재하는 퇴적물에서 지표수에 존재하는 용존성 물질(i.e. SO₄²⁻)의 움직임이 식물의 evapotranspiration에 의해 증가되었기 때문이다. 식물이 존재하지 않는 퇴적물의 경우 지표수는 주로 확산(diffusion)에 의해 퇴적물 내부로 이동되는 것에 비해, 식물의 evapotranspiration은 지표수가 퇴적물로 침투되는 이류현상(advection)을 증진시키고,²⁹⁾ 증진된 이류현상은 SO₄²⁻와 같은 용존성 물질을 퇴적물 내부로 이동시키게 된다. 퇴적물 내부로 이동된 SO₄²⁻는 혐기성 조건하에서 AVS와 같은 혐기성 산물로 변화하게 되므로 식물이 존재하는 경우 퇴적물 깊이가 깊어짐에 따라 더 높은 농도의 AVS를 관찰할 수 있게 된다.

퇴적물에서 1 µmol/g sediment의 AVS가 산화되면 퇴적물내 공극수에서 0.92 mmol/L의 SO₄²⁻를 발생시키므로 공극수 분석에서 관측된 SO₄²⁻ 농도(0.2~6.20 mmol/L)를 발생시키기 위해서는 퇴적물내 6.52 µmol/g sediment 이상의 AVS가 존재하여야 한다. 측정된 AVS 농도를 살펴보면 대부분의 지역에서 요구농도 이상의 AVS가 존재하고 있어 관측된 SO₄²⁻ 농도를 유발시키기에 충분한 AVS가 존재함을 알 수 있었다(Table 1). 그러나 퇴적물의 불균질성(heterogeneity) 때문에 식물이 존재하는 퇴적물의 경우 AVS 분석의 표준오차가 42.0 µmol/g sediment보다 크게 나타났고, 이러한 퇴적물의 불균질성 때문에 증가된 SO₄²⁻ 농도에 대응하는 AVS 농도의 감소를 파악하는 것이 불가능하였다.

Table 1. Average concentration of AVS[µmol/g sediment] and S.D.(n=6) in the sediments at depths between 8 cm and 16 cm

	Vegetated Sediments	Non-vegetated Sediments
April	175.10±85.28	35.78±32.69
May	181.44±80.18	14.29±13.54
June	165.31±99.17	72.17±61.64
July	187.60±82.38	

식물의 성장기간 동안 증가된 SO₄²⁻ 농도를 나타내는 것은 식물의 뿌리에서 나온 산소에 의해 rhizosphere가 산화된 상태를 유지하였기 때문이다. 공극수 분석에서 관측된 농도의 SO₄²⁻ 발생시키기 위해 요구되는 산소량을 산정해 보기 위하여 AVS가 뿌리에서 확산된 산소에 의하여 산화되는 현상을 다음과 같이 나타내었다.



AVS 분석은 퇴적물내에 존재하고 있는 FeS를 정량적으로 밝혀내는 방법³⁰⁾이므로 FeS를 사용하였고 2차년에 걸쳐 진행된 실험에서 관측된 SO₄²⁻ 농도를 나타내기 위해 요구되는 산소량을 계산하여 Table 2에 나타내었다.

관측된 결과를 보면 연구지역 퇴적물의 SO₄²⁻ 총량은 0.1 g/m²부터 24.66 0.1 g/m²의 범위를 가지고 있음을 알 수 있고, 최대 산소 요구량은 식물의 활동이 활발한 2002년 4월에서 5월 사이에 공극수내 sulfate양을 증가시키기 위해 AVS 산화에 요구되는 산소량인 0.85 g/m²·day임을 알 수 있다. 이번 연구에서 계산된 산소량은 유기물이나 퇴적물내 다른 환원물질들의 산화작용을 고려하지 않았으므로 실제로 식물 뿌리에서 나온 산소량은 더 많았으리라 예상된다. Dunbabin 등³¹⁾은 실험실 조건에서 식물의 뿌리에서 rhizosphere로 방출되는 산소량을 측정하여 0.52~0.72 g/m²·day의 결과를 얻었고, Armstrong과 Armstrong³²⁾은 빛이 있을 때 1.62 g/m²·day의 산소량을 측정하였다. 이러한 결과들과 비교해보면 이번 연구에서 산출된 값들이 기존의 연구결과와 부합되는 결과를 도출함을 알 수 있다.

Table 2. in situ measured total mass of SO₄²⁻[g/m²] within the rhizosphere(10~20 cm) in the vegetated sediments and required O₂ flux[g/m²·day] of the study site

2002			2003		
Date	Total SO ₄ ²⁻	O ₂ Flux	Date	Total SO ₄ ²⁻	O ₂ Flux
April	1.020	0.045	April	0.151	0.005
May	24.657	0.865	May	0.428	0.016
June	6.478	0.227	June	0.176	0.008
September	0.167	0.006	July	0.264	0.013
October	0.240	0.010	August	0.133	0.006
November	0.189	0.006			

3.3. 효소 활성도(Enzyme Activity)

식물의 존재 여부에 따른 퇴적물내 유기물 함량을 비교해보면 식물이 존재하는 퇴적물, 특히 rhizosphere에서 높은 유기물 함량을 보이는 것을 알 수 있다(Fig. 4). 또한, 실험의 결과로부터 식물이 존재하고 있는 퇴적물에서 β -glucosidase의 활성도는 식물이 존재하지 않는 퇴적물에 비해 훨씬 높음을 알 수 있다(Fig. 5). 식물의 성장기간에 식물이 존재하는 퇴적물의 경우 표층에서 $25.82 \mu\text{mol/g} \cdot \text{min}$, 식물의 뿌리가 존재하는 rhizosphere에서 $15.21 \mu\text{mol/g} \cdot \text{min}$ 의 활성도를 보이는데 비해, 식물이 존재하지 않는 퇴

적물의 경우 각각 $5.74 \mu\text{mol/g} \cdot \text{min}$ 와 $1.82 \mu\text{mol/g} \cdot \text{min}$ 의 활성도가 측정되었다. 식물의 존재 여부가 퇴적물의 β -glucosidase 효소 활성도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 지역(식물이 존재하는 퇴적물, 식물이 존재하지 않는 퇴적물)과 퇴적물의 깊이에 따라 측정되어진 효소 활성도의 차이를 t-test($p < 0.05$)를 이용하여 분석하였고, 그 결과 효소의 활성도는 오직 지역에 의해서만 유의한 차이를 보여주었다(data not shown).

식물은 뿌리, 삼출액(exudate), 잔류물(residue) 등에 의해 퇴적물에 유기물을 공급하게 되므로 퇴적물에서 효소를 생성하는 미생물 군집의 수와 성장에 중요한 영향을 끼치게 된다.^{12~14)} 증가된 미생물 군집의 성장은 효소의 합성 및 분비를 촉진시키므로 식물이 존재하는 토양의 경우 유기물 함량과 효소의 활성도 사이에 양의 상관관계를 가지게 된다.³³⁾

4. 결론

이 연구에서는 현장 실험을 통하여 식물의 성장기간 동안 식물의 뿌리에서 방출된 산소가 주변 퇴적물에 존재하고 있는 sulfide를 산화시켜 rhizosphere에서 SO_4^{2-} 농도가 높아질 수 있음을 보여주었다. 측정된 AVS의 농도는 SO_4^{2-} 농도 증가를 보여주기에 충분한 양이 존재하였고, 관찰된 SO_4^{2-} 농도를 발생시키기 위해 AVS 산화에 요구되는 산소량은 $0.85 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 다른 연구자들의 연구결과와 부합되는 결과를 도출하였다. 퇴적물 깊이에 따른 AVS 농도의 분포를 살펴보면 식물이 존재하는 퇴적물의 경우 지표면에 비해 rhizosphere에 1.4배 많은 AVS가 존재하고 있음을 알 수 있다. 또한 식물이 존재하지 않는 퇴적물의 경우 대부분의 AVS가 지표면에 존재하고 있는데 비해 식물이 존재하는 경우 rhizosphere에서 가장 높은 농도의 AVS가 존

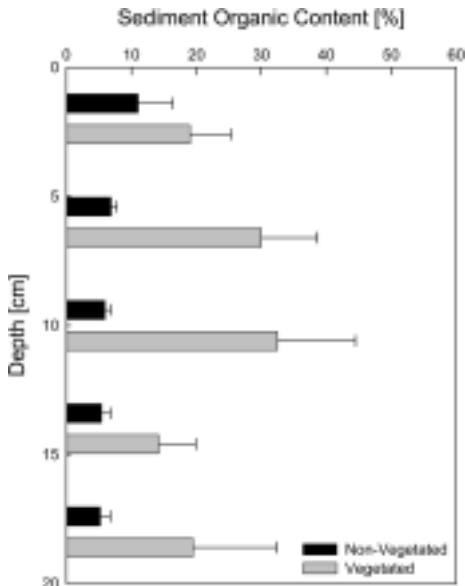


Fig. 4. Vertical distribution of sediment organic content for all cores collected from March to June, 2003. Error bar represents \pm S.E.(n=4 for vegetated sediments and n=3 for non-vegetated sediments).

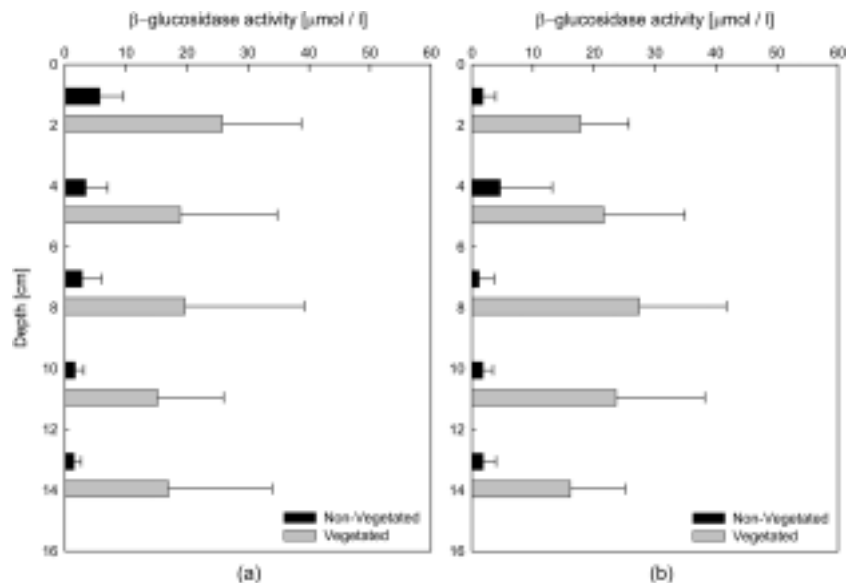


Fig. 5. Vertical distribution of β -glucosidase activity in the vegetated and non-vegetated sediments: (a) growing season, (b) senescence. Error bar represents \pm S.E.(n=24 for growing season and n=15 for senescence).

재하고 있는 것으로 보아 식물의 evapotranspiration에 의해 지표수내 SO₄²⁻가 혐기성 상태인 퇴적물 내부로 활발히 이동되어져, 혐기성 환경에서 AVS로 환원되었음을 알 수 있다. 그 외에도, 식물에 의해 증가된 유기물은 퇴적물에서 탄소 순환에 중요한 역할을 하는 β-glucosidase 효소의 활성도를 증가시켰다.

습지는 다양한 탄소원을 가지는 폐수의 처리에 효과적인 장소로 이용되어 오고 있다. 이러한 습지에서 유기물의 분해에 중요한 역할을 하는 효소의 활성도가 증가된다면 습지의 수처리 효율을 증대시킬 수 있으리라 기대된다.

사 사

본 연구는 학술진흥재단 BK21(지표수환경관리기술 인력 양성 팀)의 지원으로 일부 진행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 권순국, “우리나라 비점원 수질오염 관리의 문제점과 개선방안,” 대한환경공학회지, **20**(11), 1497~1510(1998).
2. 환경부, 2004 환경백서, 환경부, 445~447(2005).
3. 박병훈, 장정렬, 이광식, 윤경섭, 권순국, “저수지 수질개선을 위한 식생정화시스템,” 한국농공학회지, **42**(4), 87~95(2000).
4. 장정렬, 최선화, 권순국, “식생습지와 개방수역의 배열에 따른 인공습지의 수처리 특성,” 한국물환경학회지, **23**(1), 122~130(2007).
5. Brix, H., “Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?,” *Water Sci Technol.*, **35**, 11~17 (1997).
6. Armstrong, W., “Aeration in higher plants,” *Adv. Bot. Res.*, **7**, 225~232(1979).
7. Mendelssohn, I. A., Keiss, B. A., and Wakeley, J. S., “Factors controlling the formation of oxidized root channels: a review,” *Wetlands*, **15**, 37~46(1995).
8. Flessa, H. and Fischer, W. R., “Plant-induced changes in the redox potentials of rice rhizosphere,” *Plant Soil*, **143**, 55~60(1992).
9. Fleming-Singer, M. S. and Horne, A. J., “Enhanced nitrate removal efficiency in wetland microcosms using an episediment layer for denitrification,” *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 1231~1237(2002).
10. Whiting, G. J., Chanton, J. P., Berlett, D. S., and Happpell, J. C., “Relationships between CH₄ emission, biomass and CO₂ exchange in a subtropical grassland,” *J. Geophys. Res.*, **96**, 3067~3071(1991).
11. Roura-Carol, M. and Freeman, C., “Methane release from peat soils: effects of Sphagnum and Juncus,” *Soil Biol. Biochem.*, **31**, 323~325(1999).
12. Speir, T. W. and Ross, D. J., “Effects of storage on

- the activities of protease, urease, phosphatase and sulphatase in three soils under pasture,” *NewZeal. J. Sci.*, **18**, 231~237(1975).
13. Sinsabaugh, R. L., Antibus, R. K., and Linkins, A. E., “An enzymic approach to the analysis of microbial activity during plant litter decomposition,” *Agr. Eco. Environ.*, **34**, 43~54(1991).
14. Ravit, B., Ehrenfeld, J. G., and Häggblom, M. M., “Effects of vegetation on root-associated microbial communities: A comparison of disturbed versus undisturbed estuarine sediments,” *Soil Biol. Biochem.*, **38**, 2359~2371(2006).
15. Burns, R. G., “Enzyme activity in soil: location and a possible role in microbial ecology,” *Soil Biol. Biochem.*, **14**, 423~427(1982).
16. Voets, J. P., Meerschman, P., and Verstraete, W., “Soil Microbiological and biochemical effects of long-term atrazine applications,” *Soil Biol. Biochem.*, **6**, 149~152 (1974).
17. Kowalenko, C. G. and Lowe, L. E., “Mineralisation of sulphur from four soils and its relationship to soil carbon, nitrogen and phosphorus,” *Can. J. Soil Sci.*, **55**, 9~14(1975).
18. Speir, T. W., Lee, R., Pansier, E. A., and Cairns, A., “A comparison of sulphatase, urease and protease activities in planted and in fallow soils,” *Soil Biol. Biochem.*, **12**, 281~291(1980).
19. Carignan, R., “Interstitial water sampling by dialysis: methodological notes,” *Limnol. Oceanogr.*, **29**, 667~670(1984).
20. Doig, L. and Liber, K., “Dialysis minipeeper for measuring pore-water metal concentrations in laboratory sediment toxicity and bioavailability tests,” *Environ. Toxicol. Chem.*, **19**, 2882~2889(2000).
21. Shati, M. R., Ronen, D., Mandelbaum, R., “Method for in situ study of bacterial activity in aquifers,” *Environ. Sci. Technol.*, **30**, 2646~2653(1996).
22. Di Toro, D. M., Mahony, J. D., Hansen, D. J., Scott, K. J., Hicks, M. B., Mayr, S. M., Redmond, M. S., “Toxicity of cadmium in sediments: the role of acid volatile sulfide,” *Environ. Toxicol. Chem.*, **9**, 1487~1502 (1990).
23. Freeman, C., Liska, G., Ostle, N. J., Jones, S. E., and Lock, M. A., “The use of fluorogenic substrates for measuring enzyme activity in peatlands,” *Plant Soil*, **175**, 147~152(1995).
24. Lefroy, R. D. B., Chaitep, W., and Blair, G. J., “Release of sulfur from rice residues under flooded and non-flooded soil conditions,” *Aust. J. Agr. Res.*, **45**, 657~667(1994).
25. Wind, T., Conrad, R., “Sulfur compounds, potential turnover of sulfate and thiosulfate, and numbers of sulfate-reducing bacteria in planted and unplanted paddy soil,” *FEMS Microbiol. Ecol.*, **18**, 257~266(1995).

26. Urban, N. R., Brezonik, P. L., Baker, L. A., Sherman, L. A., "Sulfate reduction and diffusion in sediments of Little Rock Lake. Wisconsin," *Limnol. Oceanogr.*, **39**, 797~815(1994).
27. Berner, R. A., "Sedimentary pyrite formation: an update," *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 605~615(1984).
28. Brix, H., "Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?," *Water Sci. Technol.*, **35**, 11~17 (1997).
29. Xu, S., Leri, A. C., Myneni, S. C. B., and Jaffé, P. R., "Uptake of bromide by two wetland plants(*Typhalatifolia* L. and *Phragmites australis*(Cav.) Trin. ex Steud)," *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 5642~5648(2004).
30. Di Toro, D. M., Mahony, J. D., and Gonzalez, A. M., "Particle oxidation model of synthetic FeS and sediment acid-volatile sulfide," *Environ. Toxicol. Chem.*, **15**, 2156~2167(1996).
31. Dunbabin, J. S., Pokorny, J., Bowmer, K. H., "Rhizosphere oxygenation by *Typha domingensis* Pers. in miniature artificial wetland filters used for metal removal from wastewaters," *Aquat. bot.*, **29**, 303~317(1988).
32. Armstrong, J. and Armstrong, W., "Light-enhanced convective throughflow increases oxygenation in rhizomes and rhizosphere of *Phragmites australis*(Cav.) Trin, ex Steud," *New Phytol.*, **114**, 121~128(1990).
33. Speir, T. W., "Studies on a clinosequence of soils in tussock grasslands 11. Urease, phosphatase and sulphatase activities of topsoils and their relationship with other properties including plant available sulphur," *NewZeal J. Sci.*, **20**, 159~166(1977).