

한강하구 퇴적물의 생지화학적 반응에 관한 연구

A Study on the Biogeochemistry of the Sediments in the Han River Estuary

임보미 · 기보민 · 최정현 †
Bomi Lim · Bomin Ki · Jung Hyun Choi †

이화여자대학교 환경공학과
Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

(2009년 7월 8일 접수, 2009년 8월 8일 채택)

ABSTRACT : This research investigates the importance of the microbial metabolic pathways such as denitrification, iron reduction, and methanogenesis, in the degradation of organic matters of the sediments. There are statistically significant differences ($P < 0.05$) in the rates of denitrification, iron reduction, and methanogenesis according to the location: Site A has no plant, Site B is dominated by Scirpus, and Site C is dominated by Phragmites. Among them, Site C showed different methanogenesis rate depending on the sediments depth. The organic matter content increased from Site A to Site C. Site A had the smallest organic matter content whereas it showed the largest denitrification rate and iron reduction rate. Site C had the largest methanogenesis rate. Denitrification is the dominant pathways based on the assumption that anaerobic degradation of organic matter is mainly carried out through denitrification, iron reduction, and methanogenesis.

Key words : Sediments, Biodegradation, Anaerobic Metabolism, Plants, Han River Estuary

요약 : 이 연구는 담수 퇴적물에서 주되게 일어나는 탈질(denitrification), 철 환원(iron reduction), 메탄 환원(methanogenesis) 반응이 퇴적물 유기물 분해에서 차지하는 중요도를 파악하였다. 탈질률, 철환원률, 메탄환원률 모두 식물이 존재하지 않는 Site A, 새섬매자기 군락이 서식하는 Site B, 갈대 군락이 서식하는 Site C에서 통계적으로 유의한 차이를 보였고($P < 0.05$), 퇴적물 깊이에 따라서는 메탄환원률만이 유의한 차이를 보였다. 유기물 함량은 Site A, Site B, Site C 순으로 식물의 존재와 밀도 증가에 따라 증가하였다. Site A가 가장 낮은 유기물 함량을 나타내면서도 불구하고 가장 높은 탈질률과 철환원률을 나타내었고, 메탄환원률의 경우 Site C에서 가장 큰 값을 나타내었다. 유기물의 혐기성 분해가 주로 탈질, 철 환원, 메탄 환원에 의해 일어난다고 가정한다면, 한강하구의 경우 탈질이 유기물을 분해하는 가장 주된 반응임을 알 수 있었다.

주제어 : 퇴적물, 분해반응, 혐기성 대사, 식물, 한강하구

1. 서론

퇴적물에 함유된 오염물질의 거동(Mobility)은 흡착과 탈착(Adsorption/Desorption), 용해와 침전(Dissolution/Precipitation), 확산현상(Diffusion), 미생물에 의한 유기물 분해과정(Biodegradation), 그리고 저서생물에 의한 퇴적물 교란현상(Bioturbation) 등과 같은 물리학적·화학적·생물학적 작용들에 영향을 받는다. 생물화학적 변화 기작은 미생물에 의한 유기물 분해과정에 의해 유발되며 일련의 전자 수용체(Electron Acceptor)를 필요로 하게 된다.^{1,2)} 퇴적물에 서식하는 미생물이 전자 수용체를 이용하여 유기물을 분해하는 반응들은 열역학적으로 발생하는 자유에너지 크기(Free Energy)에 따라 다음과 같이 6개의 층으로 구분되어질 수 있다: (1) 호

기성 분해(Aerobic Respiration), (2) 탈질(Denitrification), (3) 망간 환원(Manganese Reduction), (4) 철 환원(Iron Reduction), (5) 황 환원(Sulfate Reduction), (6) 메탄 환원(Methanogenesis). 이러한 반응들은 분해 가능한 유기물의 양과 이용 가능한 전자수용체의 종류에 따라 다양한 형태의 미생물 물질대사 과정을 보여주게 된다.^{1,3,4)}

식물이 존재하고 있는 습지의 퇴적물은 식물의 성장 및 사멸에 수반되는 다양한 반응기작들에 영향을 받게 된다. 식물은 퇴적물에 유기물을 공급하여 퇴적물 내 유기물 분해에 관여하는 미생물을 활성화 시킬 수 있다. 공기 중의 산소를 뿌리로 이동시켜 뿌리의 호흡을 도와주고, 이동된 산소의 일부는 뿌리 주변 퇴적물로 방출되어 혐기성 퇴적물의 유기물 분해에 사용되었던 환원된 물질들을(NH_4^+ , Fe^{2+} , HS^-) 산화시키기도 한

† Corresponding author : E-mail : jchoi@ewha.ac.kr Tel : 02-3277-6686 Fax : 02-3277-3275

다.^{5~7}) 또한 식물은 증발산작용(evapotranspiration)에 의해 지표수 및 지표수에 포함된 용존 물질을 근권(rhizosphere)으로 이동시킴으로써 해서 퇴적물 내 오염물질의 거동을 가속화시킨다.^{8,9)}

퇴적물에 함유된 유기물이 분해되는 과정에서 이용되어지는 전자 수용체의 종류와 농도, 그리고 이들이 환원된 물질의 농도는 함유된 중금속의 재용출과 생물이용도를 조절하는 주요인이 되며 동시에 유독성 화학물질의 분해 경로와 속도를 변화시켜 최종산물과 잔류 유해물질 농도를 변화시킨다.^{10~13)} 따라서 퇴적물에서 일어나는 오염물질의 거동을 파악하기 위해서는 퇴적물에서 일어나는 유기물 분해과정을 살펴보는 것이 중요하다.

이 연구에서는 식물의 존재 여부 및 식생 종류와 같은 환경 조건에 따라 퇴적물의 생물학적 유기물 분해과정의 변화 양상을 살펴보고, 담수 퇴적물에서 주되게 일어나는 탈질, 철 환원, 메탄 환원 반응이 퇴적물 유기물 분해에서 차지하는 중요도를 파악해 보았다.

2. 실험방법

2.1. 연구대상지역

한강하구는 육상생태계와 해양생태계를 연결하는 전이지대로, 두 생태계 사이의 물질순환과 에너지 흐름 등을 조절하고 습지가 발달해서 높은 생산성을 유지하고 있다. 수리·수문적 시스템을 고려할 때 고양, 파주, 김포 및 임진강, 예성강, 강화수로 및 주문도, 볼음도 등이 한강하구의 범주에 포함될 수 있으며, 이곳에 존재하고 있는 습지의 총면적은 356.43 km²이다. 연평균기온은 11.0~12.2℃이며, 연강수량은 1,152~1,344 mm로 여름철은 고온다습하고 강수량이 많은 반면 겨울철은 건조한 것이 특징이다.¹⁴⁾

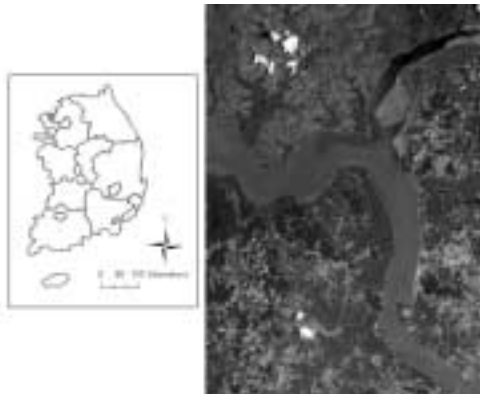


Fig. 1. The location of study site.

연구의 대상지는 한강하구 양안에 발달해 식물 분포가 뚜렷한 성동습지로, 새섬매자기(Scirpus planiculmis)와 갈대군락(Phragmites communis Trin.)이 우점종으로 자생하고 있다(Fig. 1).¹⁴⁾ 평균적으로 연구대상지역 1 m²당 새섬매자기 3,711개체, 갈대 1,011개체가 자라고 있다.

2.2. 연구 방법

퇴적물 분석은 식물의 최대 성장시기(7월~9월) 전과 후인 2008년 6월과 11월에 수행되었다. 퇴적물 채취 지점은 하변으로부터 10 m, 20 m, 30 m 떨어진 Site C, Site B, Site A의 3지점을 선정하였다. 선정된 지점은 식생 존재 여부에 따른 생태적 특성을 대표하는 지점으로 Site A에는 식물이 존재하지 않고, Site B에는 새섬매자기 군락이 서식하며, Site C에는 갈대 군락이 서식한다. 퇴적물을 샘플링하기 위한 코어는 내경이 5 cm, 길이가 30 cm인 아크릴 관으로 주변 퇴적물의 교란을 최소화하면서 샘플링하기에 용이하도록 끝이 뾰족하게 고안되어졌다. 샘플링된 퇴적물은 공기와 접촉을 피하기 위하여 비닐백에 넣어져 분석이 될 때까지 -15℃에서 보관되어졌고, 분석 시에는 해동한 후 표면으로부터 15 cm 깊이까지 5 cm 간격으로 잘라 분석을 수행하였다.

수분 함량 및 유기물 함량 분석은 일정량의 퇴적물을 105℃ 오븐에서 건조시킨 후 무게를 측정하고 600℃ furnace에서 유기물을 태워 제거한 후 그 무게의 차이로 측정하였다.⁴⁾

탈질(denitrification)은 유기물 분해시 사용되어진 NO₃⁻가 N₂O를 거쳐 N₂로 진행되는 과정으로, acetylene을 주입하여 N₂O에서 N₂로의 변화를 차단시킨 후 시간에 따른 N₂O 발생량을 측정하여 탈질률(denitrification rate)을 계산할 수 있다.^{15~17)} 혐기성 chamber에서 채취된 토양시료를 잘 섞은 후 serum bottle에 토양시료를 넣고 산소가 제거된 증류수를 가한 후 capping한다. N₂O에서 N₂로의 변화를 차단시키기 위해 acetylene gas 10 mL를 serum bottle에 주입한다. 이때 압력을 맞추기 위해 주사바늘을 하나 더 꽂아 병 안의 N₂ 가스가 밖으로 나올 수 있게 한다. 탈질 반응이 진행됨에 따라 headspace에 축적되어지는 N₂O를 gas chromatograph (HP 6890 Series GC system)를 이용하여 측정한다.

철환원률(iron reduction rate)은 혐기성 토양 슬러리(9 mL soil + 9 mL oxygen-free D-water)에서 Fe(II)의 발생량을 관찰함으로써 측정할 수 있다.^{18,19)} 혐기성 chamber에서 채취된 토양시료를 잘 섞은 후 산소가 제거된 증류수를 가하여 토양 슬러리를 만든다. 만들어진 토양 슬러리는 여러 개의 serum bottle에 넣어진 후 밀봉되어 5~10일 동안 배양하며 시간에 따른 Fe(II) 발생량을 측정하는데 사용되어진다. Fe(II)

Table 1. Difference in mineralization rate depending on environmental factors

	Denitrification rate	Ironreduction rate	Methanogenesis rate
Site	●	●	●
Depth	○	○	●
Season	○	●	-
Site*Depth	○	○	○
Site*Season	●	○	-
Depth*Season	○	○	-
Site*Depth*Season	●	○	-

Note: ● and ○ represent statistically significant and not significant, respectively. Statistical significance was set at $P < 0.05$

발생량을 측정하기 위해서는 혐기성 chamber에서 토양 슬러리 0.5 mL 취하여 0.5 mol/L HCl 10 mL에 넣어 용존성 및 부착성의 Fe(II)를 추출한 후 Muir spectrophotometric법을 사용하여 510 nm 파장에서 흡광도를 분석하였다. Fe(II)의 발생률은 실험초기에는 선형적으로 증가하나 배양 후기에 가면 줄어들게 되는데 이는 사용되어질 수 있는 Fe(III)나 분해되어질 유기물의 양이 한정되어 있기 때문이다. 실험초기 시간에 따른 Fe(II) 발생량에 관한 그래프는 철환원률을 계산하는데 사용되어졌다.

메탄환원률(methanogenesis rate)을 측정하기 위해서는 철환원률 측정과 같은 방법으로 밀봉된 serum bottle에 혐기성 토양 슬러리를 5~10일 동안 배양하며 시간에 따른 headspace내 CH₄의 발생량을 gas chromatograph (Hewlett Packard M600D)를 이용하여 측정하였다.^{18,19)} serum bottle에서 측정을 위한 gas 시료를 추출하기 전에 동량의 질소가스를 주입하여 serum bottle의 gas 부피를 일정하게 유지하였다. 실험초기에 발생하는 CH₄의 발생량을 사용하여 메탄환원률을 계산하였다.

2.3. 통계분석

측정된 데이터들의 통계적 유의성을 파악하고자 three way ANOVA test를 유의수준 0.05에서 SPSS 15.0(SPSS Inc. Chicago, IL.)을 이용하여 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

식생의 생장 여부에 따른 변화, 식생의 존재 유무, 식생의 종류, 퇴적물의 깊이 등이 탈질률, 철환원률 및 메탄발생률에 미치는 영향을 파악하기 위하여 three-way ANOVA test를 유의수준 0.05에서 수행하였다(Table 1). 탈질률, 철환원률,

Table 2. Averages of denitrification rate [mg/g/d] according to location

	Site A [mM/g/d]	Site B [mM/g/d]	Site C [mM/g/d]
Level 1 (0-5 cm)	1.785 ± 0.624	0.511 ± 0.331	0.324 ± 0.167
Level 2 (5-10 cm)	1.463 ± 1.562	1.203 ± 0.565	0.216 ± 0.158
Level 3 (10-15 cm)	1.932 ± 0.246	0.612 ± 0.160	0.449 ± 0.362

Note: Values are mean ± S.D. [n=9] with statistical significance of $P < 0.05$.

Table 3. Averages of iron reduction rate [mg/g/d] according to location

	Site A [mM/g/d]	Site B [mM/g/d]	Site C [mM/g/d]
Level 1 (0-5 cm)	0.171 ± 0.035	0.167 ± 0.043	0.130 ± 0.048
Level 2 (5-10 cm)	0.185 ± 0.044	0.122 ± 0.029	0.053 ± 0.061
Level 3 (10-15 cm)	0.207 ± 0.073	0.108 ± 0.026	0.039 ± 0.041

Note: Values are mean ± S.D. [n=3] with statistical significance of $P < 0.05$.

Table 4. Averages of methanogenesis rate [mg/g/d] according to location

	Site A [mM/g/d]	Site B [mM/g/d]	Site C [mM/g/d]
Level 1 (0-5 cm)	0.0205 ± 0.0081	0.0388 ± 0.0143	0.0379 ± 0.0147
Level 2 (5-10 cm)	0.0170 ± 0.0050	0.0213 ± 0.0066	0.0164 ± 0.0040
Level 3 (10-15 cm)	0.0214 ± 0.0149	0.0305 ± 0.0134	0.0481 ± 0.0519

Note: Values are mean ± S.D. [n=9] with statistical significance of $P < 0.05$.

메탄환원률 모두 식물이 존재하지 않는 Site A, 새섬매자기 군락이 서식하는 Site B, 갈대 군락이 서식하는 Site C에서 통계적으로 유의한 차이를 보였고, 퇴적물 깊이에 따라서는 메탄환원률이 유의한 차이를 보였다. 11월에 수행된 실험에서는 메탄 발생을 측정하지 못했으므로 식생의 생장 여부가 메탄환원률에 미치는 영향을 파악하지는 못하였다. 철환원률의 경우 식생의 생장 여부에 따른 변화가 통계적으로 유의함을 알 수 있었다. 또한 세 반응속도 모두 식생의 종류와 퇴적물의 깊이 사이의 상관관계에 의해 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 식생의 활동이 활발한 6월에 관측된 탈질률, 철환원률, 메탄환원률의 값의 변화를 자세히 살펴보면 Table 2~4에 자세히 설명하였다.

탈질률은 전체적으로 Site A가 가장 큰 값을 나타내며 Site B가 중간값, Site C가 가장 낮은 값을 보였다(Table 2). 퇴적물 깊이에 따른 탈질률은 Site B를 제외하고는 Level 3에서 가장 높은 값이 측정되었고 그 다음으로 Level 1, Level 2 순으로 높은 탈질률이 관찰되었지만, 깊이에 따른 탈질률의 변화는 지역의 변화에 비해 작은 변동폭을 나타내었다.

철환원률의 경우에도 전체적으로 Site A가 가장 큰 값을 나타내며 Site B가 중간값, Site C가 가장 낮은 값을 보였다(Table 3). 탈질률에 있어서 Site A와 Site B 사이의 변동폭은 작았고, Site B와 Site C 사이의 변동폭은 큼을 알 수 있었다. 퇴적물 깊이에 따른 철환원률은 Site A의 경우 깊이에 따라 증가하였으나, Site B와 Site C는 깊이에 따라 줄어드는

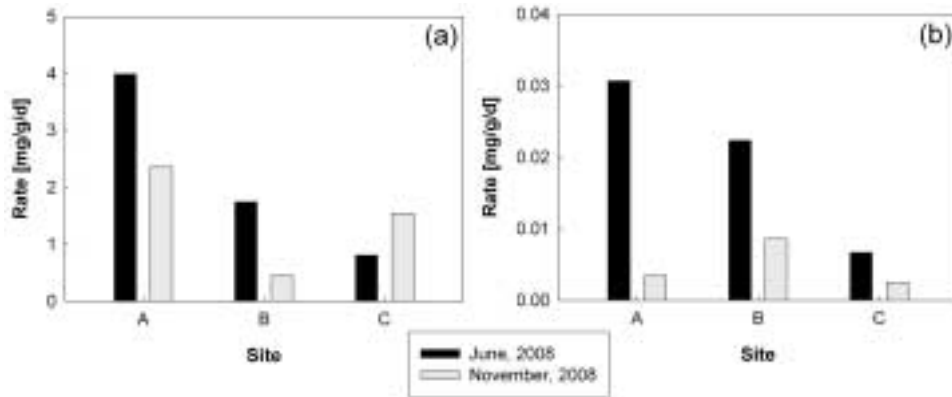


Fig. 2. Soil organic carbon mineralization rates (a) Denitrification rate, (b) Iron reduction rate.

경향을 보였다. Site C의 경우에는 깊이에 따른 철환원률의 변동폭이 컸지만, 대부분의 지역에서 깊이에 따른 철환원률의 변화는 지역의 다른 변화에 비해 작은 변동폭을 나타내었다.

메탄환원률의 경우에는 전제적으로 Site C가 가장 큰 값을 나타내며 Site B가 중간값, Site A가 가장 낮은 값을 보였다 (Table 4). Site A와 Site B 사이의 변동폭은 작았고, Site B와 Site C 사이의 변동폭은 커서 철환원률과 비슷한 경향을 나타내었다. 퇴적물 깊이에 따른 메탄환원률은 Site A의 경우 깊이에 따라 비슷한 값을 보였으나 Site C의 경우에는 큰 차이를 보였고, 그 중 Level 3이 가장 큰 값을 나타내었다. Site C의 경우 다른 반응속도와 달리 깊이에 따른 메탄환원률의 변화가 지역에 따른 변화보다 더 큰 변동폭을 나타내었다.

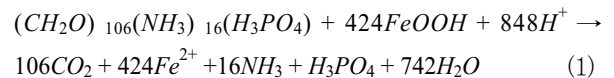
유기물 분해 반응 속도는 깊이에 따라 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않으므로 깊이에 따른 값들을 평균하여 6월과 11월 사이 반응속도의 변화를 살펴보았다(Fig. 2).

탈질률의 경우에는 식물이 존재하지 않는 Site A와 새삼매 자기 군락이 서식하는 Site B에서는 식물이 활동하지 않는 11월에 값이 줄어들었으나, 갈대 군락이 서식하는 Site C에서는 11월에 값이 증가하는 경향을 보였다. 철환원률의 경우에는 11월에 모든 지역에서 값이 줄어드는 경향을 보였다.

퇴적물에서 유기물 분해에 관여하는 반응들의 상대적인 크기를 비교하기 위하여 환원물질의 발생량을 사용되어진 유기탄소의 양으로 환산하였다. 1 mole의 유기탄소가 분해되어지기 위해서는 4 mole의 Fe(III)가 Fe(II)로 환원되어지므로, 발생되어지는 Fe(II)의 양을 측정하여 사용되어진 유기탄소의 양으로 환산하였다.¹⁸⁾ 메탄환원률의 경우에는 토양 슬러리의 혐기성 분해에 의해 1:1의 CO₂:CH₄의 발생량이 관측되어지므로 2 mole의 유기탄소가 분해되어져 1 mole의 CH₄이 발생함을 실험적으로 알 수 있다.¹⁸⁾

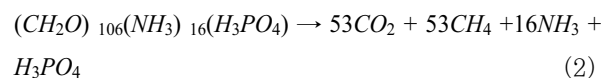
발생되어지는 환원물질의 양과 사용되어지는 유기탄소의

양 사이의 관계는 실험을 통해서 뿐만 아니라 stoichiometric equation을 이용하여서도 밝혀낼 수 있다. 유기물 분해 시 Fe(III)가 electron acceptor로 사용된 stoichiometric equation은 다음과 같이 표현될 수 있다. 이 때 유기물을 표현하기 위하여 Redfield ratio²⁰⁾를 사용하였다.

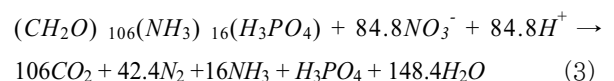


위의 stoichiometric equation을 보면 이론적으로 1 mole의 유기탄소가 분해되어지기 위해서는 4 mole의 Fe(III)가 Fe(II)로 환원되어짐을 알 수 있다.

유기물이 혐기성 상태에서 메탄을 발생시키는 경우에도 1:1의 CO₂:CH₄ 발생량을 다음의 stoichiometric equation을 통해 알 수 있다.



같은 방식으로 탈질의 경우를 살펴보면, 유기물 분해 시 nitrate가 electron acceptor로 사용된 다음의 stoichiometric equation을 이용하여 1 mole의 유기탄소가 분해되어지기 위해서는 1.25 mole의 nitrate가 N₂ 가스로 환원되어짐을 알 수 있다.



환원물질의 발생량을 사용되어지는 유기탄소의 양으로 환산하면 퇴적물에서 유기물 분해에 관여하는 반응들의 상대적

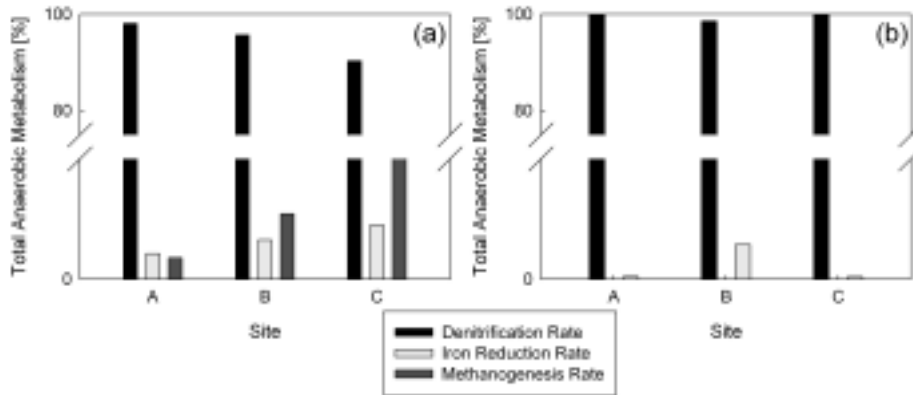


Fig. 3. The relative importance of measured microbial metabolic pathways. (a) June 2008, (b) November 2008.

인 크기를 비교할 수 있다. 6월의 결과를 살펴보면 각각의 반응속도들이 지역에 따라서는 차이를 보였지만, 메탄환원률을 제외하고는 퇴적물 깊이에 따라서는 차이를 보이지 않았으므로 지역별로 평균한 평균값을 사용하여 시간에 따른 유기탄소의 분해량을 살펴보았다. 각 분해반응의 상대적인 중요도를 계산하기 위하여 유기물의 total anaerobic metabolism을 탈질(denitrification), 철 환원(iron reduction), 메탄 환원(methanogenesis)의 합이라 가정 한 후, total anaerobic metabolism에 대한 각 분해반응의 상대적인 크기를 계산하였다(Fig. 3).

유기물의 total anaerobic metabolism을 탈질, 철 환원, 메탄 환원의 합이라 가정한다면, 한강하구의 경우 탈질이 유기물을 분해하는 가장 주된 반응임을 알 수 있었다. 모든 지역(Site A, B, C)에서 탈질률은 anaerobic metabolism의 95% 이상을 차지하고 있었고, 그 중 Site A에서 가장 큰 값이 관측되었다. 식생이 존재하지 않는 Site A의 경우에는 탈질이 유기물 분해의 98% 이상을 차지하고 있었으나, 새섬매자기가 존재하는 Site B, 갈대가 존재하는 Site C로 옮겨감에 따라 철 환원 및 메탄 환원 반응이 유기물 분해에 차지하는 비율이 증가되었다. 시간에 따른 변화를 살펴보면, Site A의 경우 탈질이 차지하는 비율이 6월에 98.0%에서 11월에 99.9%로 증가하였고, Site B와 Site C의 경우에도 식물의 생장이 끝난 직후인 11월에 철 환원 및 메탄 환원 반응의 비율이 감소함에 따라 탈질이 차지하는 비율이 증가되었다.

강열감량을 통해 각 지역의 유기물 함량을 살펴보면 식물이 존재하지 않는 Site A(2.89±0.22)가 가장 낮은 유기물 함량을 나타내었고, 갈대가 존재하는 Site C(6.07±0.19)가 가장 높은 유기물 함량을 나타내었다. Site A가 가장 낮은 유기물 함량을 나타내에도 불구하고 가장 높은 탈질률과 철환원률을 나타내는 것은 한강하구의 수리적인 특성 때문인 것으로

판단된다. 연구대상 지역인 한강하구의 성동습지는 서해 조석간만의 영향을 받아서 주기적으로 퇴적물이 공기 중에 노출되게 된다. 또한 지리적으로 식물이 존재하지 않는 Site A가 중심부에 위치하고, 하변에 갈대가 존재하는 Site C가 위치하며, 새섬매자기가 존재하는 Site B는 Site A와 Site C의 중간부분에 위치하므로 Site A의 퇴적물이 공기 중에 노출되어 있는 시간이 가장 길게 된다. 퇴적물이 공기 중에 노출되게 되면 퇴적물 내부에 존재하는 환원된 물질들(NH₄⁺, Fe²⁺)이 산화되어질 가능성이 높아지게 되므로 유기물의 혐기성 분해에 필수적인 전자수용체(NO₃⁻, Fe³⁺)의 공급을 용이하게 할 수 있다. 이러한 수리적인 특성은 유기물과 산소를 제공하는 식물의 영향보다 퇴적물에 더 큰 영향을 주기 때문에 Site A의 탈질률과 철환원률이 가장 높게 관찰된다고 판단된다. 전자 수용체를 사용하지 않고 혐기성 상태에서 진행되는 메탄환원률의 경우 Site C에서 가장 큰 값을 나타내고, Site C에서 차지하는 비율이 가장 큰 결과를 통해서도 한강하구 퇴적물은 수리의 영향을 가장 많이 받음을 알 수 있다.

4. 결론

이 연구는 담수 퇴적물에서 주되게 일어나는 탈질, 철 환원, 메탄 환원 반응이 퇴적물 유기물 분해에서 차지하는 중요도를 파악해 보고자 하였다. 탈질률, 철환원률, 메탄환원률 모두 식물이 존재하지 않는 Site A, 새섬매자기 군락이 서식하는 Site B, 갈대 군락이 서식하는 Site C에서 통계적으로 유의한 차이를 보였고, 퇴적물 깊이에 따라서는 메탄환원률만이 유의한 차이를 보였다. 유기물 함량은 Site A, Site B, Site C 순으로 식물의 존재와 밀도 증가에 따라 증가하였다. Site A가 가장 낮은 유기물 함량을 나타내에도 불구하고 가

장 높은 탈질률과 철환원률을 나타내었고, 메탄환원률의 경우 Site C에서 가장 큰 값을 나타내었다. 이는 유기물을 증가시키고, 산소를 공급하는 식물의 영향보다, 퇴적물에 산소 공급이 활발히 이루어지는 한강하구의 수리적인 특성이 유기물 분해작용에 더 큰 영향을 주었기 때문이라 판단된다. 또한, 담수 퇴적물에 함유되어 있는 유기물의 혐기성 분해반응은 탈질(denitrification), 철 환원(iron reduction), 메탄 환원(methanogenesis)의 합이라 가정한다면, 한강하구의 경우 탈질이 유기물을 분해하는 가장 주된 반응임을 알 수 있었다.

KSEE

사 사

이 연구는 2008학년도 이화여자대학교 교내연구비 지원에 의한 연구입니다. 연구비를 지원해 주신 이화여자대학교에 감사드립니다.

참고문헌

- Berner, R. A., Early diagenesis: a theoretical approach, Princeton University Press, Princeton, NJ, 241(1980).
- 최정현, 박석순, "퇴적 유기물 분해과정에 따른 물질 거동 변화 예측을 위한 수침모델 적용," 대한환경공학회지, **27**(2), 151~157(2005).
- Froelich, P. N., Klinkhammer, G. P., Bender, M. L., Luedtke, N. A., Heath, G. R., Cullen, D., Dauphin, P., Hammond, D., Hartman, B., and Maynard, V., "Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis," *Geochim. Cosmochim. Acta*, **43**, 1075~1090(1979).
- Megonigal, J. P., Hines, M. E., and Visscher, P. T., "Anaerobic metabolism: linkages to trace gases and aerobic processes," in W. H. Schlesinger, editor. Biogeochemistry, Elsevier-Pergamon, Oxford, UK, 317-424(2004).
- Armstrong, W., "Aeration in higher plants," *Adv Bot Res*, **7**, 225~232(1979).
- 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).
- Sorrell, B. K., "Effect of external oxygen demand on radial oxygen loss by juncos roots in titanium citrate solutions," *Plant Cell Environ.*, **22**, 1587-1593(1999).
- El-Shatnawi, M. K. J. and Makhadmeh, I. M., "Ecophysiology of the plant-rhizosphere system," *J. Agron. Crop Sci.*, **187**, 1~9(2001).
- 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).
- Forstner, U., Ahlf, W., Calmano, W., Kersten, M., and Salomons, W., "Mobility of heavy metals in dredged harbour sediments," *Sediments and water interactions* (Ed. P.G. Sly), Springer-Verlag, New York, NY, 371-380(1986).
- 오강호, 고영구, 기주용, 김혜경, "화순천의 퇴적환경 및 퇴적물과 하천수의 지구화학적 특성," 한국환경과학회지, **11**(9), 881~895(2002).
- Wang, S., and Park, S.S., "Modeling the fate and transport of arsenic in wetland sediments," *Korean J. Limnol.*, **36**(4), 434~446(2003).
- 이미경, 배우근, 엄인권, 정희수, "영일만 해역 표층퇴적물의 금속 분포 특성," 대한환경공학회지, **26**(5), 543-551(2004).
- 이상미, 토양성분과 우점종이 다른 하구습지의 갈대군집 비교, 이화여자대학교, 석사학위 청구논문(2008).
- Groffman, P. M., Altabet, M. A., Böhlke, J. K., Butterbach-Bahl, K., David, M. B., Firestone, M. K., Giblin, A. E., Kana, T. M., Nielsen, L. P., Voytek, M. A., "Methods for measuring denitrification: diverse approaches to a difficult problem," *Ecol. Appl.*, **16**, 2091~2122(2006).
- Klememdtsson, L., Svensson, B. H., Lindberg, T., Rosswall, T., "The use of acetylene inhibition of nitrous oxide reductase in quantifying denitrification in soils," *Swedish J. Agricul. Res.*, **7**, 179~185(1977).
- Yoshinari, T., Hynes, R., Knowles, R., "Acetylene inhibition of nitrous oxide reduction and measurement of denitrification and nitrogen fixation in soil," *Soil Biol. Biochem.*, **9**, 177~183(1977).
- Roden, E. E. and Wetzel, R. G., "Organic carbon oxidation and suppression of methane production by microbial Fe(III) oxide reduction in vegetated and unvegetated freshwater wetland sediments," *Limnol. Oceanogr.*, **41**(8), 1733-1748(1996).
- Neubauer, S. C., Givler, K., Valentine, S. K., and Megonigal J. P., "Seasonal patterns and plant-mediated controls of subsurface wetland biogeochemistry," *Ecology*, **86**(2), 3334-3344(2005).
- Redfield A.C., Ketchum B.H., and Richards F.A. "The influence of organics on the composition of seawater," in M. N. Hill, editor. The Sea, Wiley-Interscience, New York, **2**, 26-77(1963).