

하변토양의 미생물체외효소활성에 미치는 침입성 식물의 영향

Influences of Invasive Plant on Extracellular Enzyme Activities in Riparian Ecosystems

박 순 영* / 김 재 근** / 강 호 정***+

Soonyoung Park* / Jae-Keun Kim** / Hojeong Kang****

요약 : 하변에 침입하는 외래종 식물은 하변 토양의 생태구조 및 기능에 영향을 미칠 수 있기 때문에 관심의 대상이다. 이에 본 연구에서는 1년간 국내 하변 총 네 지점에서 유기물질 분해율을 대표할 수 있는 미생물 체외효소 활성(β -glucosidase, N-acetylglucosaminidase, phosphatase, arylsulfatase)을 외래종 유무에 따라 측정하였다. 하변 침입종인 환삼덩굴과 가시박 생장구 및 외래종 제거구의 토양을 분석한 결과 일부 침입성 덩굴식물 실험구에서 효소활성이 높았으나 계절 및 효소별로 그 특성이 달라 어떤 경향을 밝혀낼 수는 없었다. 그러나, 교란이 발생한 하변 생태계에서는 침입성 덩굴 식물이 토양의 유기물질 분해를 가속화시키는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 침입성 식물, 토양 미생물 효소활성, 하변생태계, 물질순환

Abstract : We have measured soil enzyme activities, which represent the rates of organic matter decomposition, in four riparian ecosystems in Korea. β -glucosidase, N-acetylglucosaminidase, phosphatase and arylsulfatase activities were determined in five occasions over a year period in soils of control plots and plots with invasive plants, namely *Sicyos angulatus* and *Humulus japonicus*. Significantly higher enzyme activities were found in soils with invasive plant in barren land, but the difference was season and enzyme-specific. Although it was not universal changes, the invasive plants appeared to accelerate organic matter decomposition in some disturbed riparian ecosystems.

Keywords : Invasive plant, soil enzyme activities, riparian ecosystems, nutrient cycle

1. 서 론

하변(Riparian zone)은 하천을 따라 선형으로 형성된 지역으로 육상생태계와 하천생태계가 만나 다양한 환경 분포를 나타낸다(Gregory *et. al.*, 1991; Martin *et. al.* 1999). 육상에서 공급되는 영양염류와 하천에서 공급되는 수분으로 인해 하변은 일반적으로 생산성이 높게 나타나며 수위변화에 따른 수분경사는 다양한 생물이 서식할 수

있는 환경을 제공한다(Boothroyd and Langer, 1999).

생산성 및 생물다양성이 높은 하변은 서식 생물종에 따라 육상생태계에서 하천생태계로 유입되는 영양염류의 배출량을 조절할 수 있다(Schueler 1995, Malanson 1993). 영양염류의 배출량을 조절하는 인자는 토양 미생물과 식생에 의해 주도되며 특히 토양 미생물은 영양물질의 분해에 관여한다(Haycock and Pinay. 1993).

+ Corresponding author : hj_kang@yonsei.ac.kr

* 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 · E-mail : alexpark@yonsei.ac.kr

** 정희원 · 서울대학교 생물교육학과 교수

*** 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수 · E-mail : hj_kang@yonsei.ac.kr

미생물 체외효소는 유기물질의 초기 분해 과정의 촉매로 작용하며(Tate III, 1987) 토양 입자나 유기물질에 결합한 영양물질을 고분자에서 저분자로 분해하는 역할을 한다(Freeman *et al.* 1995). 즉, 미생물 체외효소는 고분자의 영양물질을 저분자로 분해해 식물이나 미생물이 이용할 수 있게 하므로 미생물 체외효소활성도는 해당 생태계의 물질 순환을 대표하는 주요 인자가 될 수 있다(정, 2003).

또한 하변 식생대는 물리적 지지대 기능 및 수문학적 제어 기능을 제공한다(Gregory *et al.*, 1991; Martin *et al.*, 1999). 하변 식생대는 급격한 수위변화에 적응한 종으로 구성되어 있어, 제방의 물리적 안정성을 유지할 수 있고 동시에 유량의 급격한 변동 시 유속을 감소시켜 수체의 수리적 안정성까지 확보할 수 있다. 즉, 하변 식생대는 물질 제거능을 포함하여 수리·물리적으로도 다양한 기능을 수행함으로써 하천 생태계의 건강성을 유지시키는데 매우 중요한 역할을 담당하고 있다(Mitsch and Gosselink, 2000).

하변의 다양한 생태적 기능을 저해하는 가장 큰 문제점은 바로 외래종 침입에 따른 생태계 변화라 할 수 있다(환경부, 2006; Kim and Kim, 2009). 식생종 및 해당생태계에 따라 외래종이 토양생태계에 미치는 영향은 다양하게 나타날 수 있으나(표 1) 대체적으로 외래종은 기존 토착종과의 경쟁에서 우위를 확보하는 기작으로써 기존 물질순환을 교란하여 침입종에게 유리한 토양환경을 만드는 것으로 보인다(Schilling and Lockaby, 2006). 외래종 유입시 해당 생태계의 생물다양성 및 물리적 안정성 감소, 습지의 육지화 등 다양한 문제가 발생가능하며 이중 토양생태계에 미치는 영향은 유기물질의 분해를 가속화시켜 토양물질순환, 즉 하변생태계의 물질순환을 교란시킬 수 있다(Grout *et al.* 1997; Alfred and O'sullivan, 2001; Kim and Kim, 2009).

외래종으로 인한 생태계 교란은 심각한 문제를 내포하고 있으나 국내에서 진행된 하변 관련 연구

는 연구대상이 주로 생물다양성 변화이며 극히 일부만이 생태계 기능에 관한 연구이다(환경부, 2006; Kim and Kim, 2009). 특히, 이렇게 도입된 육상식물 중 환삼덩굴(*Humulus japonicus*)은 전국의 하천정비구역에 고루 출현하는 것으로 알려져 있으며 도입 후 급격하게 식물 종 다양성을 낮추는 것으로 보고되고 있다(환경부, 2006). 본래 육상 초지식물인 환삼덩굴은 습지 식물과 달리 뿌리가 깊지 못해 수문학적 제어 기능이나 제방을 지탱해 주는 힘이 약해 홍수 시에는 큰 문제가 발생할 수 있다(박, 2006). 또한 Kim과 Kim(2009)에 따르면 환삼덩굴은 물억새(*Miscanthus sacchariflorus*) 및 갈대(*Phragmites australis*)의 낙엽 분해를 가속화시켜 물질순환 가속화 및 수질악화의 문제까지 발생할 수 있다. 이외에도 한강생태계보전구역인 밤섬에서는 가시박(*Sicyos angulatus*)이 수년 사이에 급격히 증가하여 본래 토착수종이었던 버드나무의 생장까지 억제하여 밤섬의 물리적 안정성까지 위협하는 것으로 알려져 있다(환경부, 2006). 하지만 이들 연구결과는 낙엽(detritus)의 분해율, 식물의 생장을, 우점도, 생물다양성 변화 등을 분석하였을 뿐 하변토양이 받는 영향에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 앞서 밝혔듯이 외래종 도입에 따른 급격한 식생 변화는 토양 미생물효소활성 및 이용 가능한 영양물질의 종류·양을 변화시킬 수 있으므로(Lohrer *et al.* 2004) 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 하천정비구역에 자주 출몰하며 하변의 식물종 다양성 및 물리적 안정성을 감소시킬 수 있는 침입성 덩굴식물이 하변생태계에 미치는 영향 중 토양의 물질순환을 미생물 체외효소 활성화에 어떤 변화가 발생하는지 관찰하고자 하였다. 이를 위해 이 연구에서는 침입성 덩굴식물인 환삼덩굴(*Humulus japonicas*)과 가시박(*Sicyos angulatus*)을 대상종으로 하여 기존 토착종과 비교해 하변 토양의 물질순환에 미치는 영향을 밝히고자 한다.

표 1. 외래종 도입에 따른 토양의 물질순환 변화 관련 국외 연구

Ecosystem	Species	Effects	Ref.
Great plain	<i>Agropyron cristatum</i>	Soil available N, TN, C + Shoot mass +, root:/shoot -	Christian and Wilson (1999)
Shortgrass steppe	<i>Kochia scoparia</i>	C & N mineralization + Microbial biomass C, N +	Vinton and Burke (1995)
Shrubland	<i>Melinus minutiflora</i>	Soil TKN, N mineralization + Nitrification, Extractable N +	Asner and Beatty (1996)
Patagonian steppe	<i>Melinus minutiflora</i>	Soil TKN, Extractable N + N mineralization, Nitrification +	Aguiar <i>et. al.</i> (1996)
Coastal grassland	<i>Mesembryanthemum crystallinum</i>	Extractable N +	Vivrette and Muller (1977)
Wetland	<i>Lythrum salicaria</i>	Leaf decomposition rate + Stem decomposition -	Emery and Perry (1996)
Humid lowland	<i>Piper Aduncum</i>	Leaf litter decomposition rate +	Alfred and O'Sullivan (2001)
Coastal lowland	<i>Acacia auriculiformis</i>	Decomposition, C mineralization rate -, N fixation +	Witkowski (1991)
Estuary	<i>Lythrum salicaria</i>	Decomposition rate +	Grout <i>et. al.</i> (1997)
Cape ecosystem	<i>Accaia saligna</i>	Soil TKN, Plant biomass N +	Vivrette and Muller (1977)
Freshwater marsh	<i>Lythrum salicaria*</i> & <i>Phragmites australis</i>	Porewater phosphate +, Inorganic P -, Plant tissue N +	Templer <i>et. al.</i> (1998)
Freshwater tidal marsh	<i>Lythrum salicaria</i> & <i>Phragmites australis</i>	Soil TKN -	Otto (1999)
Freshwater & brackish marsh	<i>Phragmites australis</i>	Plant biomass +, diversity - Porewater dissolved inorganic nitrogen -	Meyerson <i>et. al.</i> (2000)
Brackish tidal marsh	<i>Phragmites australis</i>	Leaf decomposition, Biomass production + Stem decomposition - Carbon accumulation	Windham (2001)

(+ : 증가, - : 감소, TKN : Total Kjeldahl Nitrogen)

2. 재료 및 방법

2.1 연구대상

연구지는 서울 및 인근도시를 통과하는 하천(한강, 탄천, 오산천)의 하변을 대상으로 침입성 덩굴식물이 우점하는 지점 4개소로 선정하였다(표 2). 2004년 6월에 각 지점별로 방형구(2×2m) 10

구를 설치하였고 이 중 5구는 침입성 덩굴식물을 제거하여 대조구로 활용하였다. 연구지별로 침입성 덩굴식물 우점종에 차이가 있으며 이에 따라 본 연구에서는 침입성 덩굴식물 대상종을 환삼덩굴과 가시박을 대상으로 하였다.

환삼덩굴은 본래 조선 중기에 도입된 귀화종으로 하변에서 문제시되는 이유는 환삼덩굴이 본래

서식지인 초지가 아닌 하변생태계로 침입하여 교란을 일으키기 때문이다. 이는 미국 등 국외에서도 관찰되는 현상으로 이들 국가에서는 환삼덩굴을 습지와 초지 모두에서 성장할 수 있는 FAC종으로 분류하고 있다(USDA). 가시박은 환삼덩굴과 달리 도입기간이 비교적 짧고 생육지가 환삼덩굴과 달리 주로 하변 등의 습한 지역으로 FACU(조건부 육상식물), FACW(조건부 습지식물) 중에 해당한다(USDA). 북미가 원산지임에도 미국에서

는 가시박을 침입성 식물(invasive plant)로 지정하여 관리하고 있는데 이는 가시박의 번식력이 우수하며 가시박의 씨앗이 크기가 작은 원형 씨앗으로 제거가 어렵고 하변을 따라 씨앗의 분산이 빠르기 때문이다. 특히 이들 식물은 본래 서식하던 토착종을 타고 올라 토착종의 광합성을 저해하여 기존 식생을 고사시키기 때문에 이같이 분류되고 있다.

표 2. 연구지 좌표 및 주요 출현종

연구지	좌표	주요 출현종	출처
암사	N 37°32' E 127°07'	<i>Phragmites communis</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> <i>Salix koreensis</i> , <i>Humulus japonicus</i> (40%)¹⁾	SDI, 2001
오산천	N 37°28' E 127°07'	<i>Humulus japonicus</i> (20.4%)¹⁾	SDI, 2001
탄천	N 37°05' E 127°02'	<i>Humulus japonicus</i> (31.4%)¹⁾ <i>Phragmites communis</i> , <i>M. sacchariflorus</i>	SDI, 2001
밤섬	N 37°32' E 126°55'	<i>Sicyos angulatus</i>¹⁾ , <i>Artemisia selengensis</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Phragmites communis</i> , <i>Humulus japonicus</i>	SDI, 2004

¹⁾ 우점종 및 피복율

2.2 연구방법

토양 시료 채취는 2004년 7월~2005년 9월에 계절별로 총 5회 실시하였으며 각 방형구별로 깊이 10cm의 토양을 3반복 채취하였다. 채취한 토양은 2mm 체로 친 뒤 분석하는 동안 4℃에서 보관하였다. 토양 분석항목은 크게 하변토양의 이화학적 특성 및 물질순환에 관여하는 미생물 체외효소활성도로 구분하였다. 하변토양의 이화학적 분석항목은 칼륨, 칼슘, 암모니아성 질소, 질산성 질소, 인산염 인, 양이온치환능(CEC), 유기물함량, pH 등으로 암모니아성 질소는 인도페놀법, 질산성 질소는 0.5M K₂SO₄ 추출법, 인산염 인은 Bray P1 추출법을 이용하여 발색시킨 후 흡광광도계를 이용하여 정량하였다(Page *et. al.*, 1982).

암모니아성질소, 질산성질소, 인산염인, 유기물함량, pH 등은 계절별로 측정하였으며 나머지 항목은 실험 초기에 1회에 한하여 조사하였다.

미생물 체외효소활성 측정 항목은 cellulose를 glucose로 분해하는 β-glucosidase, chitin을 N-acetylglucosamine으로 분해하는 N-acetylglucosaminidase, 유기인을 인산염인으로 분해하는 phosphatase, 그리고 유기황을 SO₄로 분해하는 arylsulfatase이다(Freeman *et. al.*, 1995). 하변에서 채취한 토양 1.5g에 Methylumbelliferyl 형태의 기질(MUF-glucoside, 400μM; MUF-N-acetylglucosamine, 400μM; MUF-phosphate 800μM; MUF-arylsulfate, 400 μM)를 5mL 주입 후 60분 동안 배양하여 효소에 의해 기질이 이용되는 정도를 형광광도계

(TD-700)를 이용하여 측정하였다(송, 2003). 계절별로 실험구와 대조구간의 효소활성도 차이가 발생하는지 독립표본 t 검정을 이용하여 실험구간의 유의한 차이를 알아보하고자 하였다(SPSS 18.0).

3. 결과 및 토의

각 지점별 토양의 이화학 분석 결과, 표 3과 같이 실험구와 대조구간에 유의한 차이를 발견하기 어려웠으며 이보다 각 지점별 차이를 발견할 수 있었다. 특히, 오산천의 경우 다른 연구지에 비해 무기질, 유기물질, pH, 양이온치환능(CEC) 등의 분석수치가 크게 낮음을 확인할 수 있었다. 이는 조사 당시 오산천이 복원사업 실시 직후였기 때문에 상대적으로 척박한 환경이었음을 짐작할 수 있다.

미생물 체외효소활성 분석 결과 밤섬(가시박 출현지역)의 경우 2005년 춘기에 실험구가 대조구보다 유의하게 높게 나타났다(그림 1, $n=4$; $P<0.05$). 실험구가 대조구보다 미생물체외효소활성이 높게 관찰된 경향성은 환삼덩굴이 출현하는 오산천과 암사동 생태계보전구역의 β -glucosidase 측정 결과에서 동일하게 확인되었다(그림 2, 암사 지역 결과는 미수록). 이 결과는 하변에 침입한 덩굴식물이 하변토양의 유기물질 분해 및 탄소 무기화를 가속화시키는 것으로 볼 수 있으나 특정시기에 한해 그 특성이 나타났으며 탄천은 이와 같은 경향성조차 발견하기 어려웠다(그림 3). 이와 같이 특정시기에 실험구의 효소활성이 우수한 이유를 설명할 수 있는 방법은 오산천의 결과에서 추론가능하다. 오산천은 다른 조사지역과 달리 토양이화학분석 결과와 마찬가지로 미생물체외효소활성도 매우 낮음을 확인할 수 있었으며, 다른 조사지와 달리 계절적 변동보다는 시간이 지남에 따라 효소활성이 증가하는 것을 관찰하였다(표 4, 그림 2). 즉, 척박한 환경의 오산천은 시간이 지남에 따라 토양 생태계가 복원되는 과정이었으며 특히, 실험구와 대조구간에 복원속도가 서로 다음

을 보여주는 예라 할 수 있다.

하변 토양의 미생물체외효소활성을 연구한 기존 연구에 따르면 계절·지역별 특성에 따라 크게 다르게 나타났다(표. 4). 국내 하변의 β -glucosidase 활성도를 측정한 관련 연구 결과, 한강의 토지이용 형태에 따라 하변토양의 미생물효소활성을 측정한 김영주(2009)의 연구에 따르면 $0.76\sim 1.42\text{ nmol g}^{-1}\text{ min}^{-1}$, 오산천 하변토양의 미생물효소활성을 조사한 이지은(2010)의 경우 $0.70\sim 0.76\text{ nmol g}^{-1}\text{ min}^{-1}$ 의 활성도가 확인되었다. 이들 연구결과는 본 연구에서 측정한 효소활성도와 큰 차이를 보이는 것으로 본 연구결과의 겨울철 측정결과보다도 낮음을 확인할 수 있다. 예를 들어 한강(김영주, 2009)은 삼림이나 농경지 등 서식 식생이 밤섬, 암사지역과 매우 판이하여 이런 차이가 발생한 것으로 보인다. 이는 연구대상지가 본래 침입성 덩굴식물이 우점하던 지역으로 침입성 덩굴을 제거하였더라도 기존의 국내 하변보다는 높은 미생물효소활성이 관찰된 것으로 판단된다(Park and Kang, 2010). Blank(2002)의 연구에 따르면 미국서부 내 습지 및 하변생태계에 *Lepidium latifolium*의 침입이 성공적이었던 이유는 *Lepidium latifolium*의 체내 N uptake가 높은 동시에 토양의 미생물체외효소활성(urease, amidase, glutaminase, asparaginase), 이용가능한 질소 및 N mineralization potential이 토착종보다 높기 때문이라고 보고하였다. 육상생태계의 생산성을 결정짓는 주요 인자가 질소나 인, 특히 생물에 의해 계 내 유출입이 결정되는 질소의 경우 토양 미생물이나 식물의 영향이 매우 커(Schlesinger, 1997) 관련 연구가 많은 반면 육상생태계에서 탄소는 제한인자가 아닌 까닭에 관련 연구가 부족한 것이 사실이다. 허나 질소와 마찬가지로 탄소 또한 침입성 덩굴인 환삼덩굴이 탄소의 이용가능성을 높여 탄소 순환을 가속화시키는 것으로 보인다(Vinton and Burke, 1995). 이를 확인하기 위해서는 토착종 및 침입성 덩굴 식물 및 근권 토양의 C/N 비 분석이 추가로 필요할 것으로 판단된다.

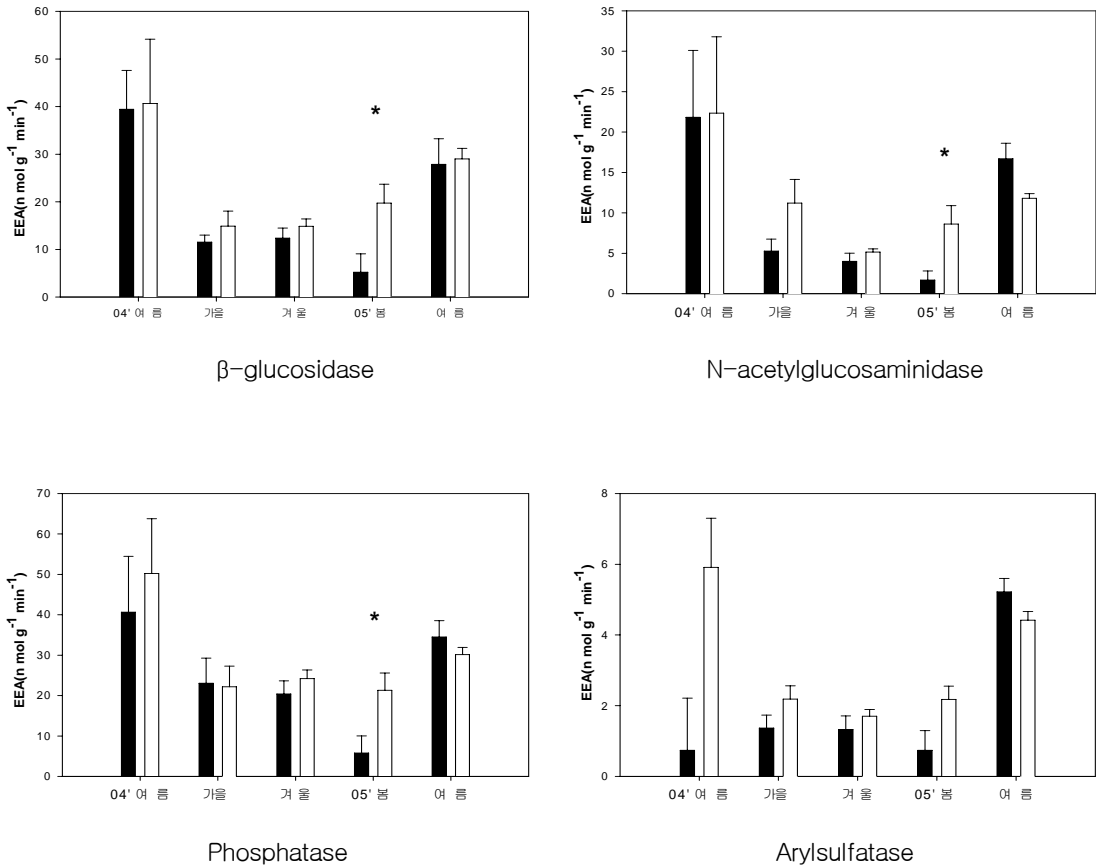


그림 2. 밤섬의 가시박 실험구(백) 및 대조구(흑) 토양의 미생물 체외효소 활성도(EEA; Extracellular Enzyme Activities). 유의한 차이는 * 표기(t-검정; n=4; P<0.05).

4. 결 론

분석결과, 오산천과 같이 척박한 환경일 경우 침입성 덩굴식물이 우점하는 하변토양에서 일부 미생물 체외효소활성이 더 높은 것을 확인할 수 있었다. 즉, 외래종이 토착종보다 토양환경을 유리하게 변화시킬 수 있어 외래종 분포의 확산이 빠를 수 있다는 것이다(Lohrer *et al* 2004). 안정된 하변생태계인 암사, 탄천 등에서는 외래종과 토착종 간의 체외 미생물 효소 활성에 차이가 발생하지 않아 침입성 덩굴식물이 미생물체외효소

활성에 미치는 영향은 단언할 수는 없으나 영양 물질이 부족하거나 교란된 생태계일수록 침입성 덩굴식물의 성장에 알맞도록 하변토양의 물질순환을 가속화시키는 것으로 보이며 이렇게 변화된 물질순환을 미생물 체외효소활성도 변화로 유추 가능할 것으로 본다. 그리고 안정된 생태계(밤섬)라 할지라도 단기간의 교란이라도 충분히 외래종이 유입되어 우점할 수 있음을 알 수 있어 하변의 경우 외래종 관리에 주의를 기울여야 함을 알 수 있었다.

표 3. 연구지 하변토양의 이화학분석 결과

연구지		K ⁺ (mg/kg)	Ca ²⁺ (mg/kg)	NH ₄ ⁺ (ng NH ₄ ⁺ g ⁻¹ soil)	NO ₃ ⁻ (ng NO ₃ ⁻ g ⁻¹ soil)	PO ₄ ³⁻ (ng PO ₄ ³⁻ g ⁻¹ soil)	양이온 치환능 (CEC)	유기물 함량(%)	pH
암사	대조구	221.7	1406.8	0.89~29.95	9.62~17.83	39.02~70.85	14.75	9.41~12.11	5.47~6.55
	실험구	235.0	1453.0	0.86~82.5	8.65~24.91	41.69~99.50	19.35	8.97~14.78	5.87~6.85
오산천	대조구	85.3	254.8	1.31~41.26	1.30~6.51	54.15~126.51	2.06	1.54~4.07	4.92~6.38
	실험구	108.2	284.0	0.84~43.14	3.23~9.84	42.94~68.81	3.08	1.80~4.81	4.95~7.14
탄천	대조구	183.9	1378.0	0.37~70.92	4.63~13.26	26.28~61.61	12.17	7.33~14.60	5.72~6.90
	실험구	154.6	1314.0	0.06~48.62	5.30~13.68	27.90~68.38	11.14	7.49~15.97	5.86~7.05
밤섬	대조구	166.8	1382.0	4.50~29.15	7.17~12.88	31.67~52.34	14.91	9.55~14.28	5.94~6.83
	실험구	301.0	3076.0	4.85~31.98	7.11~19.96	31.42~54.71	26.66	7.83~30.91	5.89~7.04

표 4. 기존연구와 본연구지의 하변토양 미생물체외효소활성도 비교(NAG; N-acetylglucosaminidase, *: 표준오차)

대상지	미생물체외효소활성도(nmol g ⁻¹ min ⁻¹)				출처
	β-glucosidase	NAG	phosphatase	arylsulfatase	
한강(도시부)	1.42±0.33*	0.21±0.05	0.79±0.07	0.09±0.01	김영주(2009)
한강(삼림)	1.03±0.14	0.74±0.29	1.58±0.29	0.31±0.09	김영주(2009)
한강(농경지)	0.76±0.09	0.20±0.02	0.91±0.05	0.10±0.01	김영주(2009)
오산천	0.70~0.76	0.72~0.77	0.68~0.76	0.71~0.76	이지은(2010)
경안천	0.70~0.34	0.66~5.7	0.65~1.93	0.11~0.89	이지은(2010)
Elbe River(독일)	0.07~0.53	-	0.15~1.83	-	Wilczek 등(2005)
Ogwen Valley(영국)	28~85	-	26~64	6~18	Bonnett 등(2006)
River Dee(영국)	6800~8000	-	9100~18200	-	Stutter 등.(2009)
암사	11.37~80.04	5.90~20.12	37.56~82.12	1.51~4.62	본 연구
오산천	1.05~4.46	0.55~2.49	5.62~24.00	0.21~0.51	"
탄천	6.16~32.72	2.33~11.13	7.73~40.86	0.71~19.21	"
밤섬	14.86~40.63	1.69~21.82	5.77~40.65	0.73~5.91	"

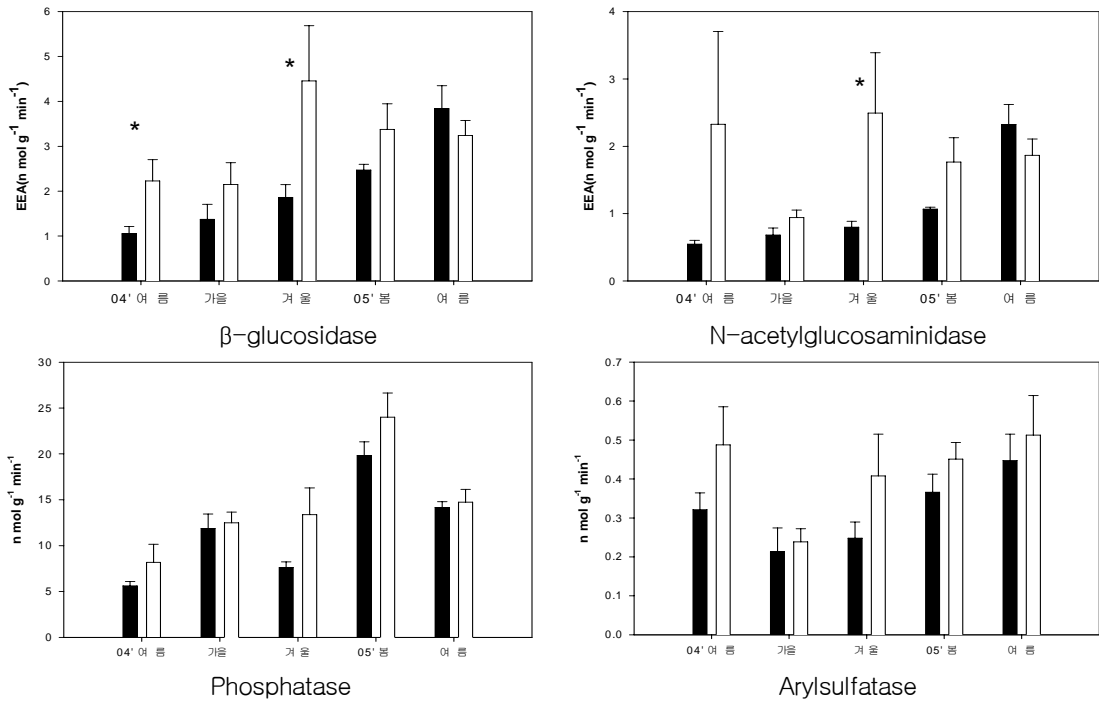


그림 2. 오산천의 환상덩굴 실험구(백) 및 대조구(흑) 토양의 미생물 체외효소 활성도 (EEA; Extracellular Enzyme Activities). 유의한 차이는 * 표기(t-검정; n=4; P<0.05).

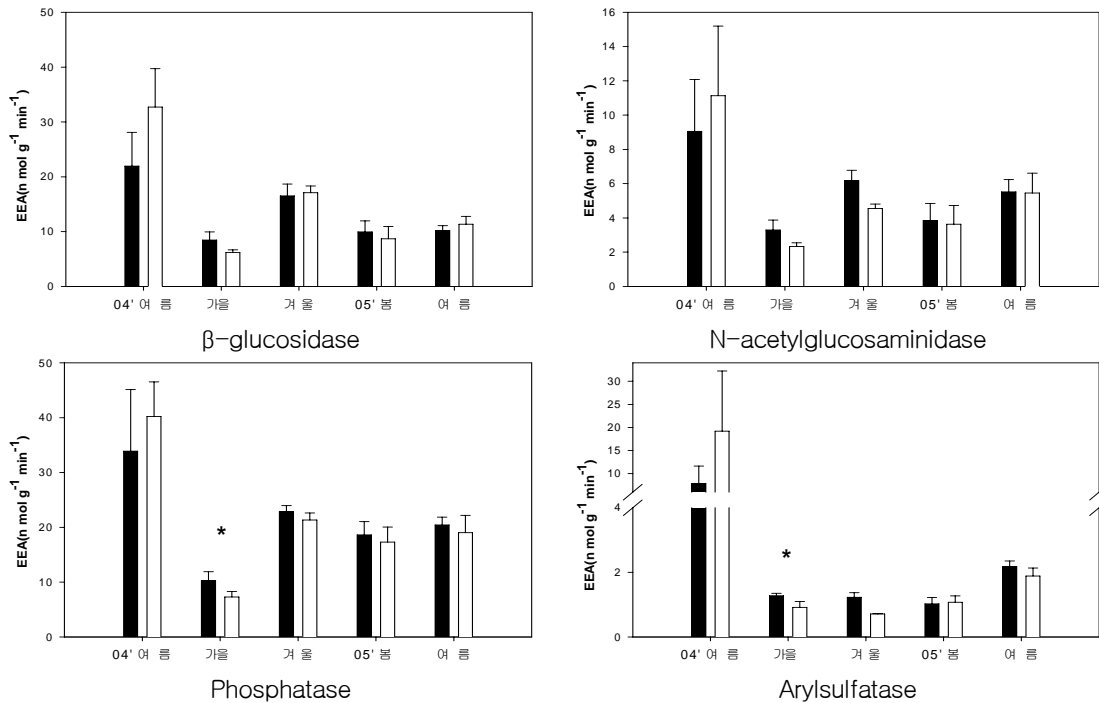


그림 3. 단천의 환상덩굴 실험구(백) 및 대조구(흑) 토양의 미생물 체외효소 활성도 (EEA; Extracellular Enzyme Activities). 유의한 차이는 * 표기(t-검정; n=4; P<0.05).

감사의 글

본 연구는 2011년도 한국과학재단의 도약연구(과제번호 2011-0029802), 선도연구센터사업(과제번호 2011-0030843) 및 환경부의 Eco-STAR Project(과제번호 08-III-12)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 김영주. 2009. 한강 지류에서 수변의 토지이용 특성에 따른 탈질능 평가 및 조절인자 규명. 석사학위 논문. 연세대학교. pp. 39.
- 박순영. 2006. 침입성 덩굴 식물이 하변 토양의 미생물 활성에 미치는 영향. 석사학위 논문. 이화여자대학교. pp. 35-37, 41-43.
- 송근예. 2003. 습지의 형태 및 수리조건에 따른 영양염류 제거와 미생물 체외효소 활성도에 관한 연구. 석사학위 논문. 이화여자대학교. pp. 23.
- 이지은. 2010. 하천 복원에 따른 생태환경성 평가 기법 개발, 석사학위 논문. 연세대학교. pp. 79-83.
- 정수현 2003. 환경 조건 변화에 따른 연안 퇴적물의 미생물 체외 효소 활성도 변화에 관한 연구, 석사학위 논문. 이화여자대학교. pp. 5.
- 환경부. 2006. 생태환경 이용 및 관리기술: 하천변 침입성 덩굴식물이 생물다양성 및 생태적 기능에 미치는 생태적 위해성 평가 및 관리방안 연구보고서. pp. 57-71.
- Alfred E. H, O'Sullivan J. N. 2001. Leaf litter decomposition of *Piper aduncum*, *Gliricidia sepium* and *Imperata cylindrica* in the humid lowlands of Papua New Guinea. *Plant and Soil* 230: 115-124.
- Aguiar M. R, Paruelo J. M, Sala O. E, Laurenroth W. K. 1996. Ecosystem responses to changes in plant functional type composition: an example from the Patagonian steppe. *Journal of Vegetation Science* 7; :381-90.
- Asner G. P. and Beatty S. W. 1996. Effects of an African grass invasion on Hawaiian Shrubland nitrogen biogeochemistry. *Plant Soil*. 186; 205-211.
- Beaumont L. J, Gallagher R. V, Downey P. O, Thuiller W, Leishman M. R, Hughes L. 2009. Modelling the impact of *Hieracium spp.* on protected areas in Australia under future climates. *Ecography* 32: 757-764.
- Blank, R. R. 2002 Amidohydrolase activity, soil N status, and the invasive crucifer *Lepidium latifolium*. *Plant and Soil* 239: 155-163.
- Bonnett S. A. F, Ostle N, Freeman C. 2006. Seasonal variations in decomposition processes in a valley-bottom riparian peatland. *Science of the Total Environment* 370: 561-573.
- Boothroyd, I. K. G. and Langer, E. R. 1999. Forest harvesting and riparian management guidelines: a review. NIWA Technical Report 56. pp. 5-45.
- Christian J. M. and Wilson S. D. 1999. Long-term ecosystem impacts of an introduced grass in the northern great plains. *Ecology* 80: 2397-2407.
- Davis M. 1997. Comparative nutrient responses by *Pinus radiata*, *Trifolium repens*, *Dactylis glomerata*, and *Hieracium pilosella* on a Mackenzie Basin outwash plain soil. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 40: 9-16.
- Emery S. L. and Perry J. A. 1996. Decomposition Rates and Phosphorus Concentrations of Purple Loosestrife (*Lythrum salicaria*) and Cattail (*Typha spp.*) in fourteen Minnesota Wetlands.

- Hydrobiologia 323: 129-138.
- Freeman C, Kosda G, Ostle N. J, Jones S. E. Lock M. A. 1995. The use of fluorogenic substrates for measuring enzyme activity in peatlands. *Plant and soil* 175: 147-152.
- Grout, J. A, Levings C. D, Richardson J. S. 1997. Decomposition rates of purple loosestrife (*Lythrum salicaria*) and Lyngbyei's sedge (*Carex lyngbyei*) in the Fraser River estuary. *Estuaries* 20: 96-102.
- Haycock, N. E. and Pinay. G. 1993. Groundwater nitrate dynamics in grass and poplar vegetated riparian buffer strips during the winter. *Journal of Environmental Quality* 22: 273-278.
- Kim S and Kim JG. 2009. *Humulus japonicus* Accelerates the Decomposition of *Miscanthus sacchariflorus* and *Phragmites australis* in a Floodplain. *Journal of Plant Biology* 52: 466-474.
- Kourtev P. S, Ehrenfeld J. G, Huang WZ. 2002. Enzyme activities during litter decomposition of two exotic and two native plant species in hardwood forests of New Jersey. *Soil Biology & Biochemistry* 34: 1207-1218.
- Lohrer A. M, Thrush S. F, Gibbs M. M. 2004. Bioturbators enhance ecosystem function through complex biogeochemical interactions. *Nature* 431: 1092-1095.
- Malanson, G. P. 1993. *Riparian Landscapes*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. pp. 12-38.
- Martin, T. L., Kaushik, N. K., Trevores, J. T. and Whiteley, H. R. 1999. Review: Denitrification in temperate climate riparian zones. *Water, Air, and Soil Pollution* 111: 171-186.
- Meyerson LA, Saltonstall K, Windham L, Kiviat E, Findlay S. 2000. A comparison of *Phragmites australis* in freshwater and brackish marsh environments in North America. *Wetlands Ecology and Management* 9: 89-103.
- Mitsch W. J. and Gosselink J. G., 2000. *Wetlands* (3rd edition). John Wiley and Sons Inc.
- Otto S, Groffman PM, Findlay SEG, Arreola AE. 1999. Invasive plant species and microbial processes in a tidal freshwater marsh. *Journal of Environment Quality* 28: 252-257.
- Page, A. L., Miller, R. H., Keeney, D. R. 1982. *Methods of soil analysis part 2: chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy Madison, Soil Science Society of America.
- Park, S. and Kang, H. 2010. Impact of invasive plant and environmental conditions on denitrification potential in urban riparian ecosystems. *Chemistry and Ecology* 26: 353-360.
- Schilling, E. and Lockaby. B. G. 2006. Relationships between productivity and nutrient circulation within two contrasting southeastern U.S. Floodplain forests. *Wetlands* 26: 81-192.
- Schueler, T. 1995. The architecture of urban stream buffers. *Watershed Protection Techniques*. 1: 155-163.
- Seoul Development Institute. 2001. *Close Investigation of Natural Ecosystems in Seoul*. Seoul City. pp. 283-316.
- Seoul Development Institute. 2004. *Ecological Monitoring and Management Plan in Bam Island*. Seoul City. pp. 243.
- Schlesinger W. H, 1997. *Biogeochemistry : An Analysis of Global Change* (2nd

- Edition). Academic Press. pp. 383-398.
- Stutter M, Langan S. J, Lumsdon A. G. 2009. Vegetated Buffer Strips Can Lead to Increased Release of Phosphorus to Waters: A Biogeochemical Assessment of the Mechanisms. *Environmental Science Technology* 43: 1858-1863.
- Tate III R. L. 1987. Soil organic matter-biological and ecological effects. John Wiley & Sons.
- Templer P., Findlay S. and Wigand C. 1998. Sediment chemistry associated with native and non-native emergent macrophytes of a Hudson River marsh ecosystem. *Wetlands* 18; 70-78.
- USDA Plants Database <https://plants.usda.gov/java/>
- Vinton, M. A. and Burke I. C. 1995. Interactions between individual plant species and soil nutrient status in short grass steppe. *Ecology* 76: 1116-1133.
- Vivrette N. J. and Muller C. H. 1977. Mechanism of invasion and dominance of coastal grassland by *Mesembryanthemum crystallinum*. *Ecological Application* 47: 301-318.
- Wilczek S, Fischer H, Pusch, M. T. 2005. Regulation and seasonal dynamics of extracellular enzyme activities in the sediments of a large lowland river. *Microbial Ecology* 50: 253-267.
- Windham L. 2001. Comparison of biomass production and decomposition between *Phragmites australis* (Common Reed) and *Spartina patens* (Salt Hay Grass) in Brackish Tidal Marshes of New Jersey, USA. *Wetlands* 21: 179-188.
- Witkowski E. T. F. 1991. Effects of invasive alien acacias on nutrient cycling in the coastal lowlands of the Cape fynbos. *Journal of Applied Ecology* 28: 1-15.
- 논문접수일 : 2011년 12월 05일
○ 심사의뢰일 : 2011년 12월 06일
○ 심사완료일 : 2012년 01월 30일