

시화호 인공습지에서 수생식물의 유기물 생산과 낙엽 분해

최광순* · 김호준 · 김동섭 · 조강현*

한국수자원공사 K-water연구원
*인하대학교 생명해양과학부

Primary Production and Litter Decomposition of Macrophytes in the Sihwa Constructed Wetlands

Choi, Kwangsoon+ · Kim, Ho Joon · Kim, Dong Sub · Cho, Kang Hyun*

K-water Institute

*Department of Biology and Oceanography, Inha University

요 약

수생식물의 수처리 기능을 고려한 습지관리에 대한 정보를 제공하기 위하여 시화호 인공습지에서 유입수의 수질특성이 다른 2개의 습지(동화천과 반월천 습지)를 대상으로 갈대와 애기부들의 성장특성, 유기물 생산량과 분해속도를 조사하였으며, 또한 유기물 생산량과 분해량을 토대로 습지내로의 유기물 부하량을 추정하였다. 갈대와 애기부들의 길이생장은 기온이 상승하는 3월에 증가하여 7~8월에 최고치(갈대 340cm, 부들 320cm)를 보였다. 경엽부의 밀도는 갈대가 100~170 개체/m²의 범위로 애기부들의 밀도(최대 78 개체/m²)보다 큰 것으로 나타났다. 갈대의 경엽부 최대 현존량은 1,350~1,980 g DM/m²의 범위로 반월천고습지에서 가장 컸고, 저습지에 비해 고습지에서 큰 것으로 나타났다. 한편 애기부들의 현존량은 1,940 g DM/m²로서 반월천고습지 갈대의 최대 현존량과 비슷한 값을 보였다. 갈대의 유기물생산력은 반월천고습지 2,050 g DM/m²/yr > 동화천저습지 1,840 g DM/m²/yr > 반월천저습지 1,570 g DM/m²/yr ≒ 동화천고습지 1,540 g DM/m²/yr의 순으로 나타났으며, 애기부들은 2,210 g DM/m²/yr로서 갈대보다 생산력이 높게 나타났다. 시화호 인공습지 갈대와 애기부들의 연간 총 유기물 생산량은 845 ton DM/yr (423 ton C/yr)이었으며, 이중 갈대에 의한 생산량이 90%를 차지했다. 수생식물의 낙엽분해 속도(k)는 갈대와 애기부들 모두 잎이 줄기보다 빠른 것으로 나타났다(갈대: 잎 0.0062/day, 줄기 0.0018/day; 애기부들: 잎 0.0031/day, 줄기 0.0018/day). 그리고 줄기 낙엽의 분해속도는 갈대와 애기부들이 같은 반면 잎의 분해속도는 갈대가 애기부들보다 약 2배 빠른 것으로 나타났다. 수생식물의 연간 총 낙엽 분해량(285 ton C/yr, 연간 총 유기물생산량의 67.3%)으로부터, 수생식물의 의해 생산된 유기물의 32.7%는 습지내에 퇴적되는 것으로 추정되었다.

핵심용어 : 인공습지, 수생식물, 유기물, 생산, 분해

Abstract

To provide the information for the wetland management considering the water treatment ability of macrophytes, the growth characteristics and primary production by reed (*Phragmites australis*) and cattail (*Typha angustifolia*), and the decomposition rate of organic matter produced were investigated in two sub-wetlands (Banweol and Donhwa wetlands) of the Sihwa Constructed Wetland (CW) with different chemistry of inflows. The shoot height of *P. australis* and *Typha angustifolia* began to increase in March, and reached its peaks in July and August (340cm and 320cm, respectively). The shoot density of *P. australis* ranging 100~170 EA/m² was higher than that of *T. angustifolia* (max. 78EA/m²). Standing biomass of *P. australis* ranged from 1,350~1,980 g DM/m², with maximal biomass in Banwol Upper Wetland. And it was larger in upper wetlands than lower wetlands. On the other hand standing biomass of *T. angustifolia* (1,940 g DM/m²) was similar to that of *P. australis* in Banwol Upper Wetland. Primary productivity of *P. australis* was in the order of Banwol Upper Wetland (2,050 g DM/m²/yr) > Donghwa Lower Wetland (1,840 g DM/m²/yr) > Banwol Lower Wetland (1,570 g DM/m²/yr) ≒ Donghwa Lower Wetland (1,540 g DM/m²/yr), and that of *T. angustifolia* (2,210 g DM/m²/yr) was higher than *P. australis*. Annual production of organic matter produced by *P. australis* and *T. angustifolia* was 845 ton DM/yr (423 ton C/yr), and about 90% was comprised of that by *P. australis*. From the litter decomposition rate (k) (*P. australis*: leaf 0.0062/day, stem 0.0018/day; *T. angustifolia*: leaf 0.0031/day, stem 0.0018/day), leaf was rapid degraded compare to stem in both *P. australis* and *T. angustifolia*. The litter decomposition rate of leaf was two times rapid *P. australis* than *T. angustifolia*, whereas that of stem was same in both. Annual litter decomposition amount of *P. australis* than *T. angustifolia* was 285 ton C/yr(67.3% of organic matter produced by macrophytes), indicating that 32.7% of organic matter produced by macrophytes is accumulated in the Sihwa CW.

Keywords : Constructed Wetland, Degradation, Macrophytes, Organic Matter, Production

+ To whom correspondence should be addressed
kchoi@kwater.or.kr

1. 서론

습지는 육상생태와 수생태를 연결하는 전이대이며 지구상에서 생산력이 가장 큰 생태계로 알려져 있다 (Mitsch and Gosselink, 2000). 이러한 습지의 높은 생산성은 다양한 생물의 서식환경을 제공해 줄 뿐만 아니라 수질개선에 큰 역할을 한다. 수처리용 인공습지는 자연습지의 수질정화능력을 이용하여 다양한 형태의 하수 및 폐수를 정화시킬 목적으로 1960년대부터 미국과 유럽에서 조성되어 왔으며(US EPA, 2000; Cronk and Fennessy, 2001), 일반적으로 부유물질, BOD, 질소, 인 및 금속을 제거하는데 효과적인 것으로 알려져 있다 (Kadlec and Knight, 2001).

인공습지에 의한 오염물질 제거효율은 습지의 형태, 식재식물의 종류, 토양환경, 처리수의 농도, 그리고 수리학적 특성 등에 의해 영향을 받는다(USEPA, 2000). 특히 수처리용 인공습지에서 수생식물은 수중 영양소의 수용부(sink), 공급원(source) 혹은 전환자(transformer)로서의 기능을 동시에 가지고 있기 때문에 수생식물의 생산력과 영양염류 흡수량 그리고 이러한 기능을 증대시키기 위한 연구는 매우 중요하다(Graneli and Solander, 1988; Mitsch and Gosselink, 2000).

수질정화를 목적으로 수생식물에 대한 영양염류 제거능 및 유기물생산성에 대한 연구는 1970년대 많은 국외 연구진(Grant and Patrick, 1970; Patrick et al., 1971; Queen, 1977)에 의해 수행되어 왔다. 국내에서도 하구지역이나 호소의 연안 또는 강가에 서식하는 다양한 수생식물을 대상으로 하는 연구가 있었으며, 또한 돈사폐수, 양어장 배출수 등을 대상으로 하는 소규모 연구시설에서 수생식물의 제거효율에 관한 연구가 수행된 바 있다 (Kim et al., 1972; Mun and Kim, 1985; Kim et al., 1989; Kim et al., 1991; Cho, 1992; Jun and Kim, 1999; Mun et al., 1999; Yoon et al., 1999; Kim et al., 2012). 그러나 실제 처리시설로 운영되고 있는 대규모 인공습지에 대한 물질생산과 순환에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 논문의 연구대상지인 시화호 인공습지는 “시화호 수질개선대책”의 일환으로 시화호 상류유역의 비점오염물질을 처리하기 위해 조성된 국내 최대 인공습지로 2002년부터 운영되어 왔다. 본 연구의 목적은 시화호 인공습지에서 우점하는 갈대와 애기부들을 대상으로 이들에 의한 유기물 생산과 분해과정을 조사하여 습지의 수질정화기능을 증대시키기 위한 방안을 도출하는데 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사지 개요

시화호 인공습지는 1996년 “시화호 수질개선대책”의

일환으로 상류의 유입지천인 반월천, 동화천, 삼화천을 통해 유입되는 비점오염물질을 저감하기 위하여 3개 하천이 만나는 지점의 갯벌을 매립하여 조성하였다. 인공습지는 각 하천의 이름을 명명하여 반월천습지, 동화천습지 및 삼화천습지로 나뉘어져 있으며, 총 습지면적 1,037,500m²에 달한다(Fig. 1). 인공습지는 크게 갈대가 식재된 폐쇄수역(closed water), 개방수역(open water), 그리고 인공섬으로 구성되어 있으며, 인공섬을 제외한 면적의 약 80%가 폐쇄수역이고 개방수역은 20%로 조성되었다. 조성당시 폐쇄수역에 갈대만을 식재하였으나, 일부 구역에 애기부들이 자연적으로 이입되어 습지의 식생을 이루고 있다.

반월천습지와 동화천습지는 지형 특성상 고습지(바닥고 E.L. +3.5 m)와 저습지(바닥고 E.L. +1.5 m)로 구분되어 있으며, 고습지는 저류보에 저장된 물을 펌핑에 의해 유입시키는 반면 저습지는 저류보의 일정 수위 이상에서 물이 자연적으로 유하되어 습지로 유입된다. 한편 삼화천습지는 고습지와 저습지의 구분이 없고 펌프시스템이 없어 저류보를 통해 자연유하식으로 하천수가 유입된다.

2.2 조사방법

2.2.1 조사지점 및 시기

수생식물에 의한 유기물생산과 분해는 규모가 큰 반월천습지와 동화천습지를 대상으로 하여 2005년 3월부터 10월까지 매월 조사하였다. 갈대(*Phragmites australis*)에 대한 유기물생산 조사지점은 동화천고습지(PDU), 동화천저습지(PDL), 반월천고습지(PBU), 반월천저습지(PBL)를 선정하였고, 애기부들(*Typha angustifolia*)은 동화천고습지(TDU)를 선정하였다(Fig. 1). 그리고 수생식물의 유기물 분해속도를 측정하기 위하여 갈대는 반월천고습지(PBU), 그리고 애기부들은 동화천고습지(TDU)에 낙엽주머니(litterbag)를 설치하였다.

2.2.2 유기물 생산

갈대와 애기부들 조사지에 각각 5개의 50 cm x 50 cm 크기 방형구를 지면에 설치하고 저토 표면에서 경엽부를 절취하였다. 이때 경엽부의 밀도와 길이생장을 측정하였다. 절취한 경엽부를 고사부 및 부위별로 나누고 용수철 저울로 생중량을 측정하고 일부의 시료는 실험실로 운반하여 80°C에서 향량이 될 때까지 건조시킨 후, 수분함량을 구하여 건조량으로 환산하였다(Cho, 1992). 한편 방형구안의 낙엽을 수거하여 체로 받치면서 물로 씻은 후 실험실로 운반하여 건조량을 측정하였다.

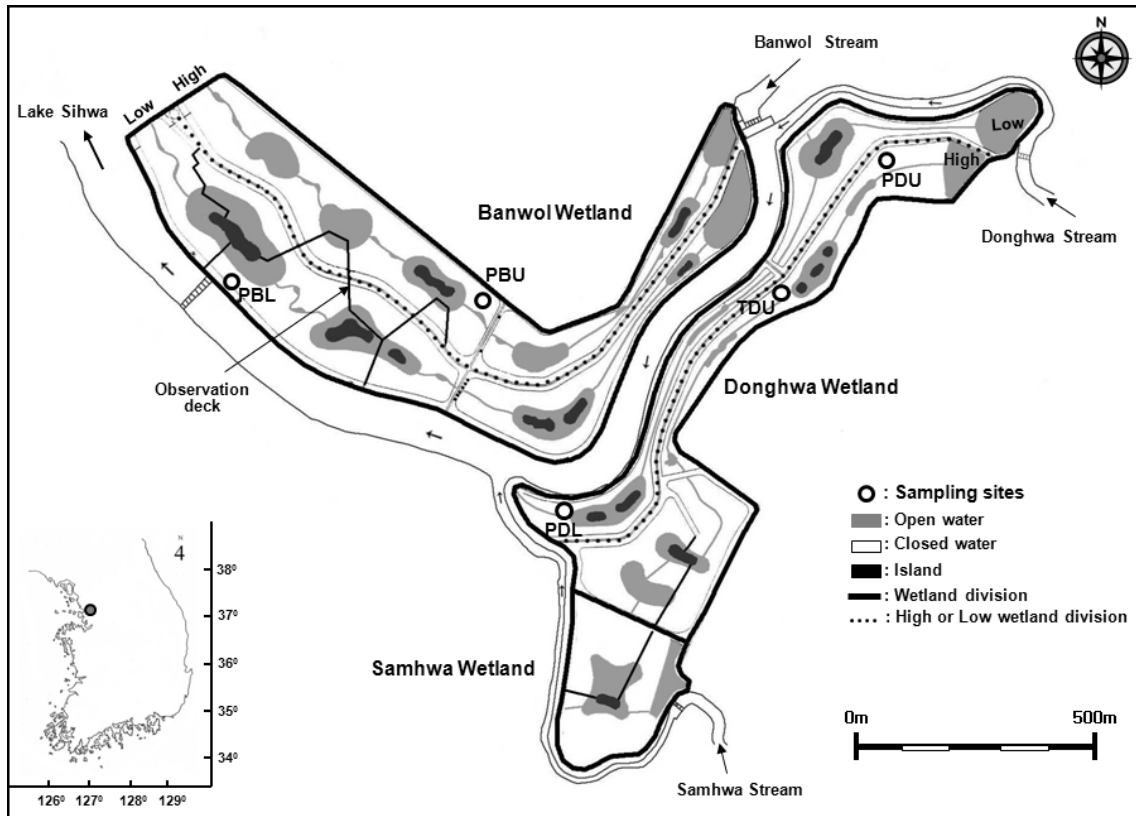


Fig. 1. Map showing the sampling sites in the Sihwa Constructed Wetland. PDU; *P. australis* in the Upper wetland of Donghwacheon, PDL; *P. australis* in the Lower wetland of Donghwacheon, PBU; *P. australis* in the Upper wetland of Banwolcheon, PBL; *P. australis* in the Lower wetland of Banwolcheon, TDU; *T. angustifolia* in the Lower wetland of Donghwacheon.

2.2.3 낙엽 분해

갈대와 애기부들의 낙엽 분해속도는 낙엽주머니를 이용하여 측정하였다. 2005년 2월에 현장에서 갈대와 애기부들의 고사체를 수집하여 실내에서 충분히 음건하였다. 준비된 낙엽주머니에 갈대의 잎과 줄기를 각각 15 g 및 20 g을 애기부들의 잎과 줄기를 각각 10 g 및 15 g을 넣었다. 낙엽주머니는 나이론 망사천(눈 크기 1 mm)으로 20 cm x 20 cm의 크기로 제작하였다. 낙엽 시료가 담긴 주머니를 모기장으로 제작한 주머니에 넣어 2005년 3월 5일에 각 식물의 생육지의 물속에 설치하였다. 설치된 낙엽은 2005년 3월 23일을 포함하여 10월까지 1개월 간격으로 매회 3개씩 수거하였다. 회수한 낙엽주머니를 수돗물로 씻어낸 후, 80°C에서 건조하여 건조량을 측정하였다.

2.2.4 자료의 처리

갈대와 애기부들의 단위면적당 생산성은 월별 측정된 현존량 중에서 최대현존량을 구하여 이것이 나타난 시기 이전의 고사체량을 합하여 산출하였다. 습지 전체에서의 생산량은 단위면적당 생산성에 분포면적을 곱

하여 계산하였다. 한편 유기물 분해속도는 낙엽주머니에서 측정된 낙엽잔존량을 지수함수($L_t = L_0 e^{-kt}$, 여기서 L_t 와 L_0 는 각각 초기와 t 시간 후의 낙엽량, k 는 분해속도 상수, t 는 시간임)에 적용하여 계산하였다(Olson, 1963). 낙엽분해에 의한 유기물 부하량은 낙엽현존량에 낙엽분해속도를 적용하여 계산하였다. 식물체의 탄소(C) 함량은 식물 건조량의 45-55%(Schlesinger, 1991)의 평균값인 50%로 간주하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수생식물에 의한 유기물 생산

3.1.1 경엽부 밀도와 길이생장

(1) 밀도

갈대 경엽부의 밀도는 동화천 고·저습지와 반월천 고습지에서 4월까지 급격히 증가한 후에 약 100~120 개체/m²의 범위에서 안정되었다(Fig. 2a). 그러나 반월천 저습지는 경엽부의 밀도가 7월까지 170 개체/m²까지 증가하였다. 이후 10월에 갈대가 고사하면서 경엽부의 밀도가 급격히 감소하였다. 한편 8월 이후에는 갈대 경엽

부의 일부가 쓰러졌고 쓰러진 줄기 마디에서 새로운 경엽부가 출현하는 것이 관찰되었다. 본 연구의 결과로부터 시화호 인공습지의 갈대밀도는 2002년 조성당시 4 개체/m² 에서 3년이 지난 후에는 최고 40배 정도 증가한 것으로 나타났다.

일반적으로 갈대의 밀도는 습지의 환경요인에 의해 영향을 받는다. 우리나라 4대강 수계의 8개 자연습지를 대상으로 갈대밀도를 조사한 결과, 평균 갈대밀도가 기수역습지(172 개체/m²)>염습지(86개체/m²)>담수역습지(67 개체/m²) 순으로 기수역습지에서 높은 것으로 나타났으며, 토양의 염분농도와 유기질함량, 수환경의 전기전도

도, pH 등이 영향을 갈대 밀도에 영향을 주는 것으로 보고되었다(Choi, 2011). 시화호 인공습지의 갈대밀도는 Choi(2011)의 연구대상지 중 기수역습지보다 낮고 담수역습지보다는 높은 것으로 나타났다.

한편 자연적으로 이입된 애기부들의 경엽부의 밀도는 갈대에 비하여 낮은 것으로 나타났으며, 4월에 78 개/m²로 급격히 증가한 후에 감소하여 10월에 30 개/m²으로 낮아지는 양상을 보였다(Fig. 2b). 애기부들 경엽부의 밀도가 갈대에 비하여 낮은 이유로는 생육 초기에 경엽부의 경쟁에 의한 것으로 판단된다.

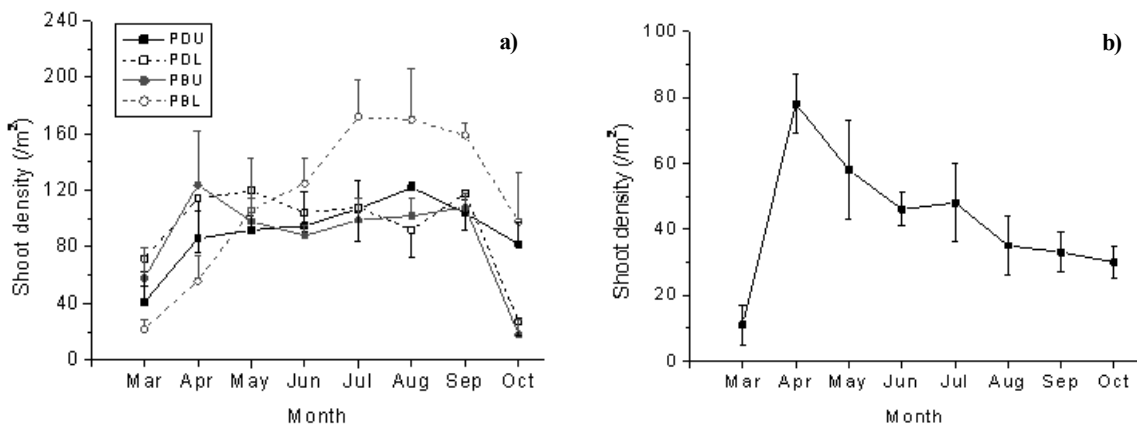


Fig. 2. Seasonal changes of shoot density (EA/m²) of *P. australis* (a) and *T. angustifolia* (b) in the Sihwa Constructed Wetland.

(2) 길이성장

갈대 경엽부의 길이생장은 동화천 고·저습지와 반월천고습지에서 기온이 상승하는 3월부터 시작하여 7월까지 증가한 반면, 반월천저습지에서는 다른 습지에 비하여 약 1개월 정도 경엽부의 신장이 느리게 일어나 8월까지 증가하였다(Fig. 3a). 반월천저습지의 갈대성장이 늦어진 것은 겨울에 결빙되어 있던 습지내 토양이 가장 늦게 해동되면서 발아가 지연되었기 때문으로 판단된다. 갈대 경엽부의 최대 길이생장은 반월천저습지와 동화천고습지에서 약 270 cm로 동화천저습지와 반월천고습지(약 340 cm)에 비해 작았는데, 이는 반월천저습지의 경우는 초봄의 유입수량이 적어서 갈대 생장이 지체된 것으로 보이며, 동화천 고습지에서는 수심이 다소 깊어서 갈대보다 애기부들의 생장이 우세하였기 때문으로 판단된다.

애기부들 경엽부의 길이생장도 갈대와 유사하게 3월부터 7월까지 증가하여 최대 320 cm까지 성장한 것으로 나타났다(Fig. 3b). 고사기인 10월의 길이생장은 250 cm로 작아졌다. 본 연구의 결과로부터 애기부들과 갈대의 길이생장은 대체로 7월말까지 일어나는 것으로 판

단되었다.

3.1.2 경엽부 현존량

단위면적당 건물량으로 표시한 갈대의 경엽부 현존량은 길이생장의 계절적 변화와 유사하게 반월천저습지를 제외한 3개 습지에서 7월까지 증가하였다가 이후 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4). 한편 반월천저습지의 갈대 현존량은 9월에 최대에 도달하였다. 경엽부 현존량의 최대치는 반월천고습지(1,980 g DM/m²)>동화천고습지(1,710g DM/m²)>동화천 저습지(1,460 g DM/m²)>반월천저습지(1,350 g DM/m²)의 순으로 반월천고습지에서 가장 많았고, 저습지에 비해 고습지에서 큰 것으로 나타났다.

갈대의 현존량은 이용할 수 있는 영양염류의 양과 식물체의 지상부 밀도에 의해 영향을 받을 수 있다 (Mun et al., 1999), 또한 토양의 염분도에 따라 다를 수 있는데, 일반적으로 염분도가 높을수록 갈대의 현존량이 적다(Kim, 1975). 시화호 인공습지에서 갈대의 최대 현존량은 팔당호 연안대 갈대의 최대 현존량(800~2,210 g DM/m²)의 범위에 포함된다(Cho, 1992). 그리고

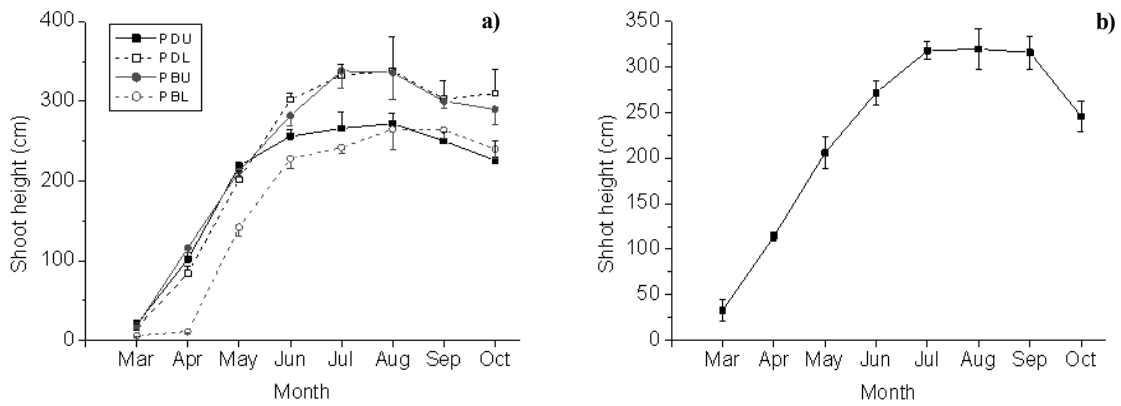
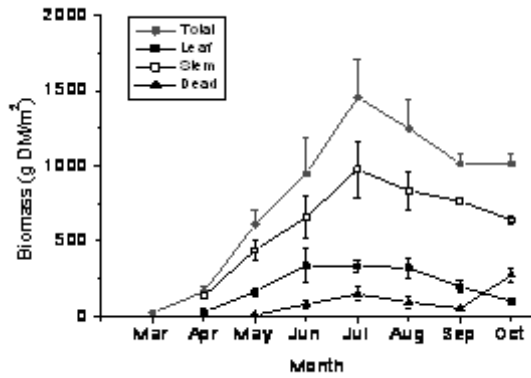
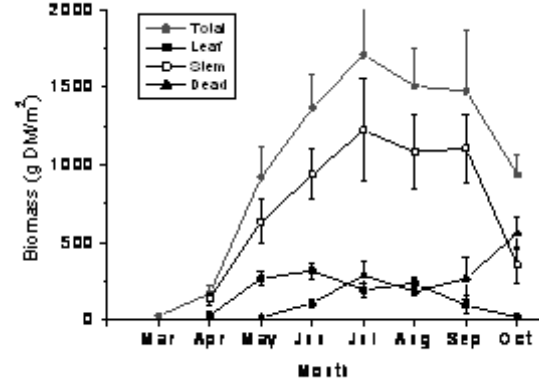


Fig. 3. Seasonal changes of shoot height(cm) of *P. australis* (a) and *T. angustifolia* (b) in the Sihwa Constructed Wetland.

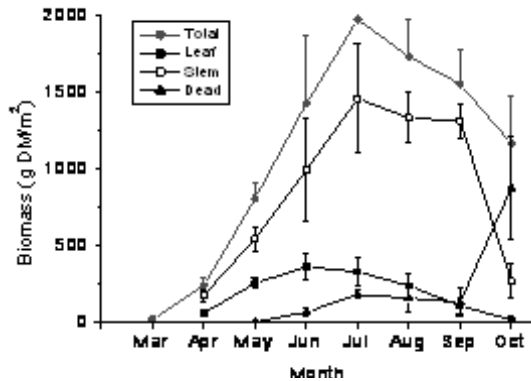
a) Upper wetland of Donghwacheon



b) Lower wetland of Donghwacheon



c) Upper wetland of Banwolcheon



d) Lower wetland of Banwolcheon

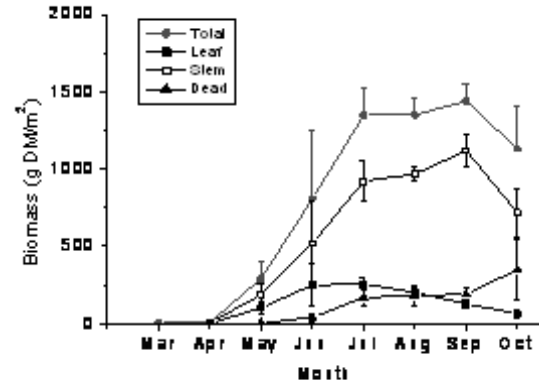


Fig. 4. Seasonal changes of the standing biomass (g DM/m²) of *P. australis* in the Sihwa Constructed Wetland.

갈대밀도가 142 개/m²인 충청도 농경지 수로의 최대 현존량 3,504 g DM/m²에 비해서는 적은 값을 보였으며 (Mun et al., 1999), 갈대 밀도가 115~165개/m²인 삼진강 하구의 염습지에서 843~1,120 g DM/m²(Oh and Ihm, 1983)보다는 많았다. 습지 토양과 갈대의 현존량 관계만으로 볼 때 시화호 인공습지는 조성 당시 갯벌

을 매립하여 조성되었지만 운영이후 유역의 하천수를 유입시켜 담수 환경으로 전환되고 있음을 반영한다.

경엽부 전체 생물량 중에서 각 부위가 차지하는 비율을 살펴보면, 줄기가 약 70%, 잎이 약 20%, 고사부가 약 10%로서 줄기의 생물량이 상대적으로 많았다. 줄기 생물량의 최대치는 반월천저습지에서는 9월에 나타난

반면, 다른 3 습지에서는 7월에 나타났다. 잎의 생물량은 4개 습지 모두 6월에 최대에 도달하였다. 고사부는 4월 이후부터 나타나기 시작하였고 10월까지 계속 증가하였다.

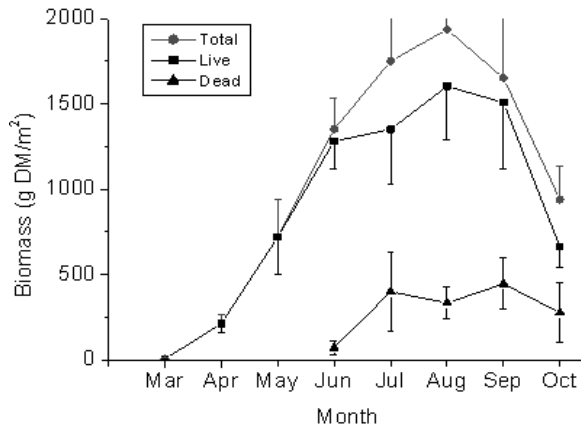


Fig. 5. Seasonal changes of biomass (g DM/m²) of *T. angustifolia* in the Lower wetland of Donghwacheon.

애기부들 경엽부 생물량은 8월에 1,940 gDM/m²로서 최대에 달한 후에 급격히 감소하였다(Fig. 5). 경엽부 중에서 살아있는 부분이 총 생물량의 약 80%를 차지하였으며, 고사부는 6월부터 증가하기 시작하였다. 애기부들의 현존량은 반월천고습지의 갈대 현존량과 유사하였다. 시화호 인공습지에서 애기부들에 의한 최대 현존량은 Cho(1992)가 팔당호에서 조사한 값(830~2,010 g

DM/m²)의 범위에 포함되었으나, Mun et al.(1999)이 연구한 농경수로에서 애기부들의 최대 현존량(2,800 g DM/m²)보다 적은 값을 보였다.

3.1.3 유기물 생산량

건물량으로 표시한 습지별 갈대의 생산력은 반월천 고습지 2,050 g DM/m²/yr > 동화천저습지 1,840 g DM/m²/yr > 반월천저습지 1,570 g DM/m²/yr ≒ 동화천 고습지 1,540 g DM/m²/yr의 순으로 나타났다(Table 1). 한편 애기부들의 생산력은 2,210 g DM/m²/yr(1,105 g C/m²/yr)로서 갈대보다 컸다.

동화천과 반월천의 고습지와 저습지를 포함하는 시화호 습지 전체에서 수생식물에 의하여 연간 생산되는 유기물량은 총 845 ton DM/yr (423 ton C/yr)이며, 이중 갈대에 의한 것이 761 ton DM/yr (381 ton C/yr) 이고 애기부들에 의한 것이 84 ton DM/yr (42 ton C/yr)으로 나타났다(Table.1). 그러므로 전습지에서 갈대에 의한 유기물 생산량이 수생식물에 의한 생산량의 90%를 차지하는 것으로 나타났다.

한편 기존 연구에 의하면 시화호 인공습지의 또 다른 일차생산인 식물플랑크톤과 갈대부착조류의 연간 유기물 생산량이 각각 187 ton C/yr(Choi et al., 2007)와 300 ton C/yr(Choi et al., 2009)으로 조사되었는데, 이는 시화호 인공습지의 최대 일차생산자가 수생식물이라는 것을 시사한다.

Table. 1. Primary productivity by *P. australis* (a) and *T. angustifolia* (b) in the Sihwa Constructed Wetland.

| Site | Species | Productivity per unit area | | Area (m ²) | Production in whole wetland | |
|-------------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|----------|
| | | g DM/m ² /yr | g C/m ² /yr | | ton DM/yr | ton C/yr |
| Upper wetland of Donghwacheon | <i>P. australis</i> | 1,540 | 770 | 96,618 | 149 | 74 |
| | <i>T. angustifolia</i> | 2,210 | 1,105 | 21,779 | 48 | 24 |
| | Total | - | - | 118,397 | 197 | 98 |
| Lower wetland of Donghwacheon | <i>P. australis</i> | 1,840 | 920 | 61,526 | 113 | 57 |
| | <i>T. angustifolia</i> | 2,210 | 1,105 | 3,924 | 9 | 4 |
| | Total | - | - | 65,450 | 122 | 61 |
| Upper wetland of Banwolcheon | <i>P. australis</i> | 2,050 | 1,025 | 134,635 | 276 | 138 |
| | <i>T. angustifolia</i> | 2,210 | 1,105 | 6,416 | 14 | 7 |
| | Total | - | - | 141,051 | 290 | 145 |
| Lower wetland of Banwolcheon | <i>P. australis</i> | 1,570 | 785 | 142,128 | 223 | 112 |
| | <i>T. angustifolia</i> | 2,210 | 1,105 | 5,796 | 13 | 6 |
| | Total | - | - | 147,924 | 236 | 118 |
| The whole wetland | <i>P. australis</i> | 1,725 | 875 | 434,907 | 761 | 381 |
| | <i>T. angustifolia</i> | 2,210 | 1,105 | 37,915 | 84 | 42 |
| | Total | - | - | 472,822 | 845 | 423 |

3.2 수생식물의 낙엽 분해

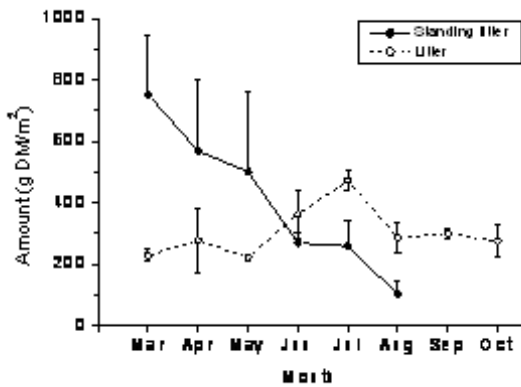
3.1.1 낙엽 현존량

(1) 갈대

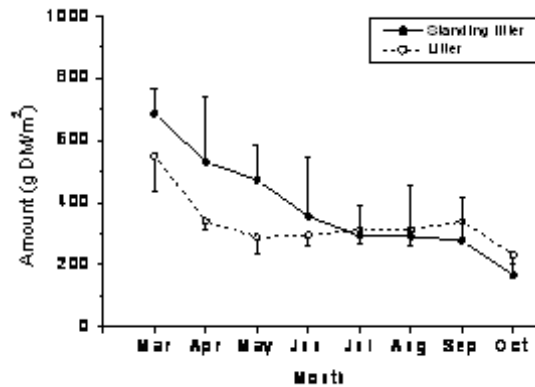
전년도에 성장 후 고사한 갈대 경엽부가 금년에 수면 위에 서 있는 선 낙엽(standing litter)의 현존량(고사체량)은 4월에 약 700~800 g DM/m²의 범위로 최고치를 보이다가 시간이 경과함에 따라서 점차 감소하였다(Fig. 6). 그리고 동화천고습지와 반월천저습지의 선 낙엽은 9월까지 모든 선 낙엽이 쓰러져서 사라진 반면 동화천저습지와 반월천고습지에서는 10월말까지도 약 200 g DM/m²이 잔존하였다.

한편 저토 위에 침수되어 있는 낙엽량은 습지별로 변동이 비교적 심하였다(Fig. 6). 동화천고습지의 갈대에서는 낙엽량이 7월에 470 g DM/m²까지 증가한 후 감소하는 경향을 보인 반면 동화천저습지에서는 3월에 550 g DM/m²에서 점차 감소하여 5월 이후에는 약 300 g DM/m² 정도에서 변동하였다(Fig. 6a, b). 그리고 반월천고습지에서는 낙엽량이 약 300 g DM/m²에서 큰 변동이 없었으나, 반월천저습지에서는 낙엽량이 3월에 870 g DM/m²으로 매우 많았으며, 그 이후에 급속히 감소하는 경향을 보였다(Fig. 6c, d). 연평균 낙엽량은 반월천저습지가 480 g DM/m²으로 가장 많았고 나머지 3 습지에서는 300~330 g DM/m²의 범위로 유사하였다.

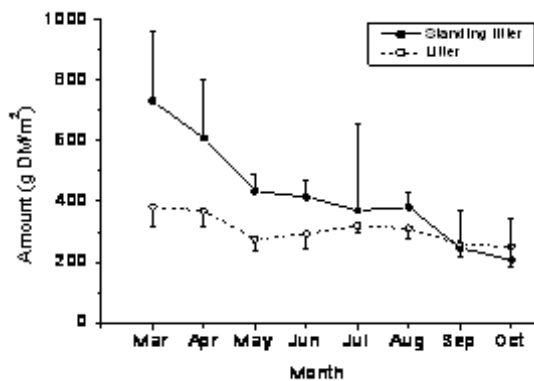
a) Upper wetland of Donghwacheon



b) Lower wetland of Donghwacheon



c) Upper wetland of Banweolcheon



d) Lower wetland of Banweolcheon

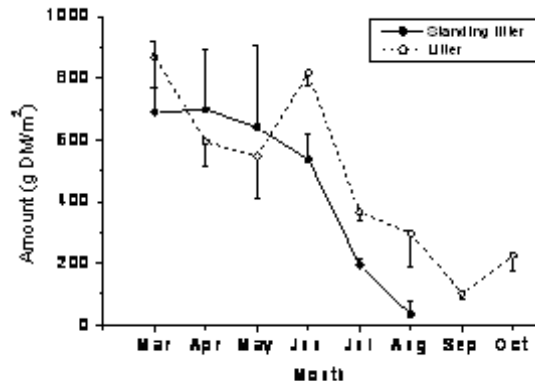


Fig. 6. Seasonal changes of litter amount (g DM/m²) of *P. australis* in the Sihwa Constructed Wetland.

(2) 애기부들

애기부들의 선 낙엽은 3월에 680 g DM/m²이었으나, 그 후 감소하여 5월에 390 g DM/m²이었고 6월에는 모두 쓰러져서 침수되었다(Fig. 7). 애기부들의 빠른 침수는 애기부들의 고사체가 갈대에 비하여 연약하기 때문으로 사료된다.

애기부들의 침수된 낙엽량은 3월에 110 g DM/m²으로 매우 적은 양이었으나, 선 낙엽이 쓰러져 유입되면서 6월에 660 g DM/m²으로 크게 증가한 후 낙엽이 분해됨에 따라서 감소하였다(Fig. 7). 또한 9월 이후에는 금년에 성장한 고사부가 떨어지면서 다시 낙엽량이 증가하였다.

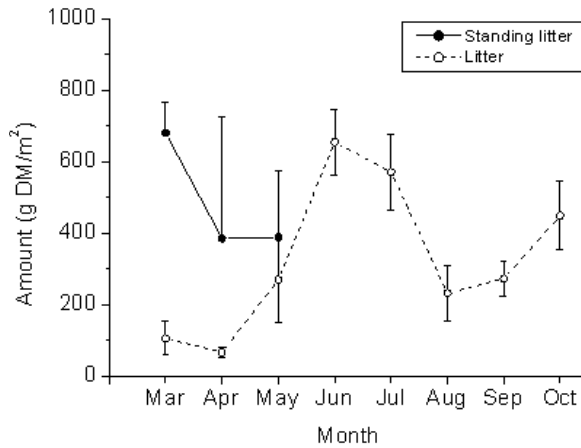


Fig. 7. Seasonal changes of litter amount (g DM/m²) of *T. angustifolia* in the Lower wetland of Donghwacheon.

3.1.2 낙엽 분해속도

낙엽주머니법으로 측정한 갈대 낙엽의 현존량을 지수함수 분해식($L_t = L_0 e^{-kt}$)에 회귀하여 산출한 잎과 줄기의 분해속도 상수(k)는 각각 0.0062/day 및 0.0018/day로서 잎의 분해가 줄기의 분해보다 약 3.4배 빠르게 일어났다(Fig. 8). 낙엽량이 절반으로 줄어드는 시간인 분해 반감기는 잎과 줄기의 낙엽이 각각 112 days 및 392 days이었다.

애기부들의 잎과 줄기의 분해속도 상수(k)는 각각 0.0031/day 및 0.0018/day이었으며, 분해 반감기는 잎과 줄기의 낙엽이 각각 221 days 및 393 days으로 갈대와

마찬가지로 잎의 분해속도가 갈대보다 더 빠른 것으로 나타났다(Fig. 8, Table 2). 본 연구의 결과로부터 잎의 분해속도는 갈대가 애기부들보다 약 2배 빨랐으나, 줄기 낙엽의 분해속도는 두 식물이 비슷한 것으로 나타났다.

한편, 시화호 인공습지에서 애기부들의 낙엽 분해속도 상수는 팔당호 연안대의 애기부들의 고사체(낙엽+줄기)를 대상으로 한 Cho(1992)의 낙엽 분해속도 상수(0.0037/day)에 비해 작게 나타났다. 이러한 분해속도 차이는 Cho(1992)의 연구에서 사용된 낙엽은 12월에 채취한 반면 본 연구에서는 낙엽의 일부가 이미 분해되고 남은 2월의 낙엽을 채취하여 실험하였기에 분해속도가 작은 것으로 사료된다.

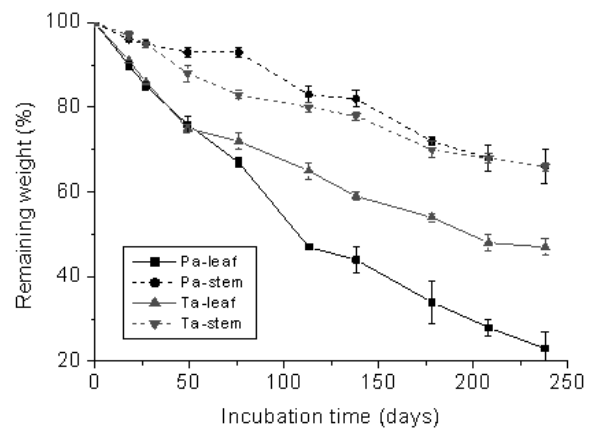


Fig. 8. Change of remaining weight(%) in the litter decomposition experiment for leaf and stem of *P. australis* (Pa) and *T. angustifolia* (Ta).

Table. 2. Loading of organic matter by *P. australis* (a) and *T. angustifolia* (b) in the Sihwa Constructed Wetland.

| Site | Species | Loading per unit area | | Area (m ²) | Loading in whole wetland | |
|-------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|----------|
| | | g DM/m ² /yr | g C/m ² /yr | | ton DM/yr | ton C/yr |
| Upper wetland of Donghwacheon | <i>P. australis</i> | 1,040 | 520 | 96,618 | 100 | 50 |
| | <i>T. angustifolia</i> | 1,500 | 750 | 21,779 | 33 | 16 |
| | Total | - | - | 118,397 | 133 | 66 |
| Lower wetland of Donghwacheon | <i>P. australis</i> | 1,250 | 625 | 61,526 | 77 | 38 |
| | <i>T. angustifolia</i> | 1,500 | 750 | 3,924 | 6 | 3 |
| | Total | - | - | 65,450 | 83 | 41 |
| Upper wetland of Banwolcheon | <i>P. australis</i> | 1,390 | 695 | 134,635 | 187 | 94 |
| | <i>T. angustifolia</i> | 1,500 | 750 | 6,416 | 10 | 5 |
| | Total | - | - | 141,051 | 197 | 99 |
| Lower wetland of Banwolcheon | <i>P. australis</i> | 1,060 | 530 | 142,128 | 151 | 75 |
| | <i>T. angustifolia</i> | 1,500 | 750 | 5,796 | 9 | 4 |
| | Total | - | - | 147,924 | 160 | 79 |
| The whole wetland | <i>P. australis</i> | 1,185 | 592 | 434,907 | 515 | 257 |
| | <i>T. angustifolia</i> | 1,500 | 750 | 37,915 | 58 | 28 |
| | Total | - | - | 472,822 | 573 | 285 |

3.1.3 유기물부하량

수생식물의 일차생산에 의하여 생산된 유기물이 모두 낙엽으로 회수되고 이 낙엽이 분해되어 물로 부하된다고 가정하였을 때, 시화호 인공습지에서 수생식물에 의해 생산된 유기물이 수체로 유입되는 유기물 부하량은 애기부들이 1,500 g DM/m²/yr로서 갈대의 평균치 1,185 g DM/m²/yr보다 높았다(Table 2). 시화호 습지 전체에서 수생식물에 의한 유기물 부하량은 총 573 ton DM/yr (285 ton C/yr)이며, 이중 갈대에 의한 것이 515 tonDM/yr(257 tonC/yr)이고 애기부들에 의한 것이 58 ton DM/yr (28 ton C/yr)이었다. 탄소로 표시한 유기물 부하량은 건물량의 절반에 해당한다. 전습지에서 갈대에 의한 유기물 부하량이 수생식물에 의한 총부하량의 90%를 차지하였다.

본 연구의 결과로부터 시화호 인공습지에서 갈대와 부들에 의해 생산된 유기물이 모두 낙엽으로 회수되고 이 낙엽이 분해되어 물로 부하된다고 가정하면, 생산된 유기물의 67.3% 인 285 ton C/yr이 미생물에 의해 분해되어 수중으로의 영양소를 공급을 하고, 나머지 분해가 되지 않고 남은 고사체는 습지내에 퇴적이 되어 천천히 분해되거나 축적됨을 추정할 수 있다.

4. 결론

시화호 인공습지에서 수생식물의 밀도, 길이성장, 생물량 및 유기물생산량에 영향을 미치는 주요한 요인은 수심인 것으로 사료된다. 특히 반월천저습지는 초봄의 유입수량이 적어서 갈대 생장이 지체된 것으로 보이며, 동화천 고습지에서는 수심이 다소 깊어서 갈대 성장보다 애기부들 생장이 우세한 것으로 판단된다. 수생식물의 1차 순생산성은 애기부들이 갈대보다 높은 것으로 나타났으나, 시화호 인공습지의 총 유기물생산량은 서식면적 넓은 갈대가 90%로 우세한 것으로 나타났다. 한편 수생식물의 낙엽 분해속도는 갈대와 애기부들 모두 줄기에 비해 잎이 빠른 것으로 나타났다. 그리고 잎 낙엽 분해속도는 갈대가 애기부들보다 약 2배 빨랐으나, 줄기 낙엽의 분해속도는 두 식물이 유사한 것으로 나타났다. 시화호 인공습지에서 수생식물에 의해 생산된 유기물 중 많은 부분은 미생물에 의해 분해되어 습지내 수체로 영양소를 공급하는 한편 일부 분해되지 않고 남은 고사체는 습지내에 축적되어 습지의 육상화 및 물흐름 저해 등 습지의 수질정화효율에 영향을 줄 수 있을 것으로 추정된다. 그러므로 인공습지의 효율적인 관리방안 수립을 위해서는 향후 습지의 환경요인에 따른 수생식물의 생산성의 변화, 식물 고사체의 발생 동향, 환경요인에 따른 낙엽분해 변화 등에 대한 연구를 통해 습지에서 식물의 기능적 역할을 명확히 규명

하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한국수자원공사 “시화호 인공습지 수질정화기능 향상 연구(2006)” 과제의 연구비로 수행되었습니다.

References

- Cho, KH (1992). *Matter production and cycles of nitrogen and phosphorus by aquatic macrophytes in Lake Paldang*, Ph.D. Dissertation, Seoul University, Seoul, Korea. [Korean Literature]
- Choi, BS (2011). *Development of planting model and growth characteristics depending on the fundamental environment of hydrophytes for aquatic ecosystem restoration*, Ph.D. Dissertation, Sangmyung University, Seoul, Korea. [Korean Literature]
- Choi, DH, Choi, K, Hwang, G, Kim, DS, Kim SW, Kang, H (2009). Primary production by epiphytic algae attached on the reed in constructed wetlands for water treatment, *J. of KSEE*, 31(10), pp. 893-900. [Korean Literature]
- Choi, K, Hwang, G, Kim, DS, Kim, SW, Kim, HJ, Joh, SJ and Park, JC (2007). Photosynthetic characteristics and primary production by phytoplankton with different water quality of influent in open waters of constructed wetlands for water treatment, *Korean J. of Limnol.*, 40(1), pp. 61-71. [Korean Literature]
- Cronk, JK and Fennessy, MS (2001). *Wetland Plants-Biology and Ecology*, Lewis Publishers, New York.
- Graneli, W and Solander, D (1988). Influence of aquatic macrophytes on phosphorus cycling in lakes. *Hydrobiologia*, 170, pp. 145-266.
- Grant, RR and Patrick, R (1970). *Tinicum marsh as a water purifier. Two studies of Tinicum Marsh*. The conservation foundation. Washington D.C., pp. 105-123.
- Jun, MS and Kim B (1999). Nutrient removal potential of water hyacinth cultured in nutrient-enriched water and swinery wastewater, *Korean J. of Environ. Biol.*, 17(1), pp. 117-124. [Korean Literature]
- Kadlec, RH and Knight, RL (2001). *Treatment wetlands*, Lewis Publishers, New York.
- Kim, BY, Lee, SY, Kwean, CS, So, KH and Yun EH (1991). Studies on the purification of sewage water by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), *Korean J. of*

- Environ. Agric.*, 10(1), pp. 51-57. [Korean Literature]
- Kim, CM, Yim, YJ and Rim, YD (1972). Studies on the primary production of the *Phragmites longivalvis* community in Korea. *Korean IBP Report*. Vol. 5, pp. 5-17. [Korean Literature]
- Kim, CS (1975). A study on standing crops in *Phragmites communis* communities and their environmental factors, *Korean J. of Bot.*, 18(3), pp. 129-134. [Korean Literature]
- Kim, KJ, Kim, JS, Kim LY and Yang, KC (2012). Characteristics of nutrient uptake by aquatic plant in constructed wetlands for treating livestock wastewater, *J. of Wetlands Research*, 14(1), pp. 121-130. [Korean Literature]
- Kim, JH, Mun, HT, Min, BM and Cho KJ (1989). Nitrogen and phosphorus dynamics in an salt marsh in the Nakdong River estuary. *J. Ecol. Field Biol.*, 12(1), pp. 1-7. [Korean Literature]
- Mitsch, WJ and Gosselink, JG (2000). *Wetlands*. Jon Wiley and Sons, Inc, New Jersey.
- Mun, HT and Kim, JH (1985). Studies on plant succession of sand bars at the Nagdong River estuary I. Vegetation and soil environment, *Korean J. of Bot.*, 28(1), pp. 79-93. [Korean Literature]
- Mun, HT, Namgung J, Kim, JH (1999). Production, nitrogen and phosphorus absorption by macrohydrophytes, *Korean J. of Environ. Biol.*, 17(1), pp. 27-34. [Korean Literature]
- Oh, KH and Ihm, BS (1983). Seasonal changes in the productivity and soil nutrients of *Phragmites communis* community in the salt marsh of the Sumjin-River estuary, *J. Ecol. Field Biol.*, 6(2), pp. 90-97. [Korean Literature]
- Olson, JS (1963). Energy storage and balance of producers and decomposers in ecological systems, *Ecology*, 44, pp. 322-331.
- Patric, WH, Delaune, RD, Antio, DA and Engler, RM (1971). Nitrate removal from water at the water-soil interface in swamps, marshes and flooded soils, *Ann. Progr. Rep.*, PEWOA, EPA(Project 1605 FJR, LSU).
- Queen, WH (1977). Human uses of salt marshes, *Ecosystems of the world I. Wet coastal Ecosystems*, VJ Chapman(eds.), Elsevier Scientific Publ. Company. New York, pp. 363-368.
- Schlesinger, WH (1991). *Biogeochemistry: An analysis of global change*, Academic Press, New York.
- USEPA (2000). *Design Manual; Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*, U.S. EPA 625/R-99/010, Cincinnati, Ohio, pp. 12~20.
- Yoon, CG, Kwun, SK, Woo, SH and Kwon, TY (1999). Review of 3-year experimental data from treatment wetland for water quality improvement in rural area, *J. of KWSWQ*, 15(4), pp. 581~589. [Korean Literature]

- 논문접수일 : 2013년 04월 23일
- 심사의뢰일 : 2013년 04월 29일
- 심사완료일 : 2013년 05월 07일