

비점오염원 처리를 위한 자유수면형 인공습지에서 수생식물의 영양염류 흡수특성 평가

강세원,^{1†} 서동철,^{1†} 최익원,¹ 이준배,² 임병진,² 박종환,² 김갑순,² 김상돈,² 허종수,³ 조주식^{1*}

¹순천대학교 생물환경학과, ²영산강 물환경연구소, ³경상대학교 응용생명과학부

Characteristics of Nutrient Uptake by Water Plants in Free Water Surface Constructed Wetlands for Treating Non-point Source Pollution

Se-Won Kang,^{1†} Dong-Cheol Seo,^{1†} Ik-Won Choi,¹ Jun-Bae Lee,² Byung-Jin Lim,² Jong-Hwan Park,² Kap-Soon Kim,² Sang-Don Kim,² Jong-Soo Heo³ and Ju-Sik Cho^{1*} (Department of Bio-Environmental Sciences, Suncheon National University, ²Yeongsan River Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research Ministry of Environment, ³Division of Applied Life Science, Gyeongsang National University)

Received: 09 September 2011 / Accepted: 23 September 2011
© 2011 The Korean Society of Environmental Agriculture

Abstract

BACKGROUND: Generally, water plants may play an important role in nutrients(N, P) removal in constructed wetlands(CWs). Previous studies considered nutrients uptake by water plants in various CWs for treating point source pollution. On the other hand, few studies considered nutrients uptake by water plants in free water surface(FWS) CWs for treating non-point source pollution.

METHODS AND RESULTS: To investigate characteristics of nutrient uptake by water plants in FWS CWs, dry weights, nutrients content and nutrients uptake by water plants were investigated from April, 2008 to October, 2008. Dominance plants were *Phragmites japonica* STEUD (PHRJA), *Nymphaea tetragona* ANGUSTA(NTMTE), *Typha orientalis* PRESL(TYHOR), *Phragmites communis* TRINIUS(PHRCO) and *Zizania latifolia* TURCZ(ZIZLA) in FWS CWs. The dry weights of water plants in August were higher in the order of TYHOR(54.27 g/plant) > PHRJA(44.30 g/plant) ≥ PHRCO(39.60 g/plant) ≥

ZIZLA(37.80 g/plant) ≅ NTMTE(36.75 g/plant). The T-N and T-P contents by water plants were not significantly differences regardless of cultivation period. The maximum amount of T-N uptake by water plants in August were 773 mg/plant for PHRJA, 625 mg/plant for NTMTE, 1206 mg/plant for TYHOR, 754 mg/plant for PHRCO and 768 mg/plant for ZIZLA. The maximum amounts of T-P uptake by PHRJA, NTMTE, TYHOR, PHRCO and ZIZLA were 397, 177, 411, 261 and 229 mg/plant in August, respectively. **CONCLUSION(s):** The results of this study suggest that optimum water plant was *Typha orientalis* PRESL in free water surface constructed wetlands.

Key Words: Water Plants, Free Water Surface Constructed Wetlands, Nutrient Uptake, Non-point Source Pollution, Nitrogen, Phosphorus

서론

우리나라 4대강 유역의 비점오염원이 차지하는 오염부하는 한강 30%, 낙동강 25%, 금강 21% 및 영산강·섬진강이 37%로 알려져 있으며, 특히, 팔당 상수원의 비점오염원이 차지하는 오염부하는 44%에 달하여 비점오염원의 오염부하가 심각하다(Choi *et al.*, 2006; Ministry of Environment, 2004). 또한 영산강, 섬진강의 비점오염원이 차지하는 오염부

*교신저자(Corresponding author),
Phone: +82-61-750-3297; Fax: +82-61-752-8011;
E-mail: chojs@suncheon.ac.kr

[†]공동 제 1 저자

하는 37%로 4대강 중 가장 높은 비율을 보여 비점오염원의 관리가 시급한 실정이다(Ministry of Environment, 2004). 이에 지난 수년간 주암호 등 영산강수계 물관리 종합대책을 수립하여 하수처리장 방류수를 재처리하고 비점오염원을 처리하기 위한 인공습지를 주암호 및 동북호 상류지역에 많이 조성하였으나, 관리 소홀과 습지 운영방안의 미숙 등으로 인해 효율적으로 운영이 되지 않고 있다고 본다(Seo *et al.*, 2011a; Seo *et al.*, 2011b).

그동안 몇몇 연구자들에 의해 인공습지 하수처리장에서 수생식물의 영양염류 흡수특성에 관한 연구가 수행되었으며, Jung(2006)은 인공습지에서 인 제거 효율은 부레옥잠 > 미나리 > 창포 > 애기부들 순으로 높았고, 질소의 제거효율은 미나리 > 부레옥잠 > 창포 > 애기부들의 순으로 높았다고 보고하였다. 하지만 비교적 높은 농도의 점오염원 처리 연구와 달리 낮은 농도로 유입되는 비점오염원의 처리를 위한 인공습지에서 수생식물의 영양염류 흡수특성에 관한 연구는 거의 이루어지지 않은 실정으로, 비점오염원 처리를 위한 인공습지에서 수생식물의 흡수특성을 파악하여 비점오염원 처리를 위한 인공습지에서 효율적인 수생식물의 관리 방안을 확립할 필요가 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구는 비점오염원 처리를 위한 자유수면형 인공습지에서 우점된 수생식물의 생육상황, 수생식물 내 영양염류 함량 및 흡수량을 조사하였으며, 이들 결과를 이용하여 향후 자유수면형 인공습지에서 효율적인 수생식물 관리 방안을 확립하고자 하였다.

재료 및 방법

조사 대상지역 특성

본 조사 대상지역은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 복내 하수종말처리장의 방류수와 농경지 비점오염원인 강우수를 처리하기 위해 환경관리공단에서 2002년도에 전라남도 보성군 복내면 복내리 하수종말처리장의 하단부에 설치한 자유수면형 인공습지인 복내 바이오파크 인공습지(E 127°07'44", N 34°

53'48")이었다(Cho, 2009; Jung, 2006; Seo *et al.*, 2011a). 복내 바이오파크 인공습지는 침강저류지, 습지연못(1차 습지, 2차 습지 및 3차 습지) 및 마이크로폴(micropool)로 구성되어 있다. 전체면적은 약 23,000 m²이고, 습지 면적은 약 13,500 m²이며, 인공습지의 총 용량은 7,941 m³이었다. 그 중 침강저류지의 용량은 3,225 m³(평균수심 1.5 m)이었으며, 습지조의 용량은 3,726 m³(수심 0.2-0.7 m)이었고, 방류전의 마이크로폴(micropool)의 용량은 960 m³(평균수심 1.2 m)이었다. 인공습지의 용량에 따른 체류시간은 평상시의 경우 10일 정도이며, 강우시의 경우 2일 정도로 유지되도록 설계되었다(Cho, 2009).

실험방법 및 조사시기

복내 바이오파크 인공습지에서 BOD, SS, T-N 및 T-P 처리효율을 2008년 4월부터 12월까지 월 1회 주기로 조사하였다(Seo *et al.*, 2011a). 수처리효율에 수생식물이 미치는 영향을 조사하기 위해 복내 바이오파크 인공습지에서 수생식물의 영양염류 흡수특성을 조사하였다. 복내 바이오파크 인공습지에서 수생식물의 생육상황 및 무기성분 함량을 2008년 4월, 6월, 8월 및 10월에 총 4회에 걸쳐 조사하였으며, 수생식물의 영양염류 흡수량은 무기성분 함량에 건물생산량을 고려하여 산출하였다.

분석방법

수질 분석은 수질오염공정시험법(Choi *et al.*, 2004) 및 APHA의 standard method(APHA, 1995)에 준하여 BOD의 분석은 잉클러자이드화나트륨변법을 사용하였고, SS의 분석은 유리섬유여과법을 사용하였으며, T-N 및 T-P의 분석은 자외선 흡광광도법(UV2550PC, Perkinelmer) 및 아스코르빈산 환원법(UV2550PC, Perkinelmer)으로 분석하였다.

수생식물의 영양염류 흡수특성을 조사하기 위해 인공습지에서 채취한 시료는 수생식물체를 열풍건조기로 80℃에서 건조하여 40 mesh 이하로 분쇄한 후 70℃ dry oven에서 36 시간동안 건조 시킨 후 사용하였다. 수생식물체의 T-N 및

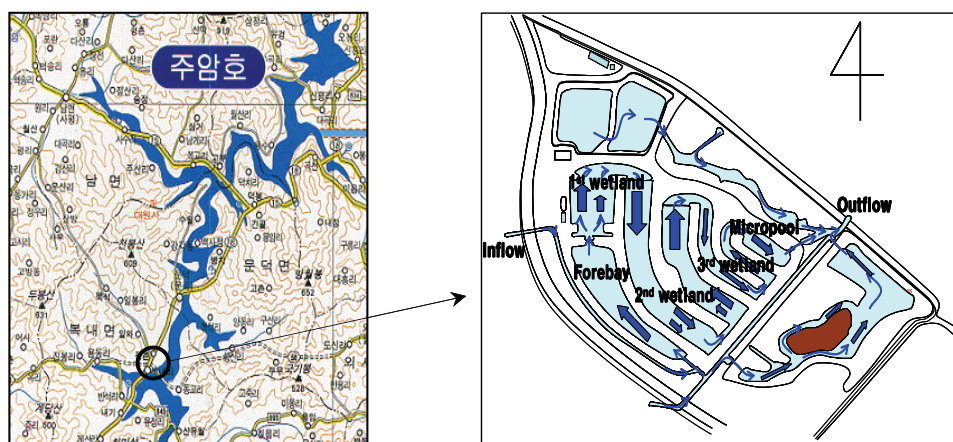


Fig. 1. Location and water flow diagram in Boknae Bio-park constructed wetlands.

T-P 분석을 위한 전처리는 NIAST(2000)법에 준하여 습식분해법(H₂SO₄ + H₂O₂)으로 하였으며 T-N의 분석은 Kjeldahl법(질소자동분석기, Gerhardt autosampler Vapodest 50 carouse, Germany) 및 T-P의 분석은 Vanado molybdate법(UV2550PC, Perkinelmer)으로 하였다.

결과 및 고찰

자유수면형 인공습지의 수처리효율

북내 바이오파크 인공습지의 연간 유입수의 BOD, SS, T-N 및 T-P 함량은 각각 2.86±0.94 mg/L, 15.35±6.11 mg/L, 9.57±3.19 mg/L, 및 0.51±0.19 mg/L이었으며, 연간 수처리효율은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 BOD, SS, T-N 및 T-P의 처리효율은 각각 26, 43, 62 및 83%로 유기물과 부유물질을 제외한 T-N 및 T-P는 비교적 높은 수처리효율을 보였다(Seo *et al.*, 2011a). 본 인공습지에서 BOD와 SS의 처리효율이 낮은 것은 수생식물이 생육하기 시작한 4월에 이들의 처리효율이 낮았기 때문이다. Seo *et al.*(2011a)은 인공습지에서 BOD와 SS 등의 오염물질 처리효율은 수생식물의 생육과 밀접한 연관이 있는 것으로 보고한 바 있다.

Choi *et al.*(2006)은 수생식물의 종류에 따른 처리구별 T-N 및 T-P의 수처리효율을 조사한 결과 대조구에 비해 갈대 및 애기부들 처리구에서 유입수의 농도에 비해 유출수의 농도가 많이 감소된 것으로 보고하였는데, 이는 인공습지에서 수생식물의 식재가 수처리효율에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다. 따라서 수처리효율에 수생식물이 미치는 영향을 조사하고 수생식물의 생육상황, 수생식물내 무기성분 함량 및 흡수량을 조사하였다.

자유수면형 인공습지내 수생식물의 생육상황

북내 바이오파크 인공습지에서 조사한 수생식물의 분포 특성은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 습지내 수생식물은 23과 36속 46종 6변종으로 총 52분류군이 조사되었다. 주요 분포종은 달뿌리풀, 수련, 부들, 갈대 및 줄 등 이었으며, 주요 특징종으로는 흑삼릉, 선가래, 생이가래, 자라풀, 물질경이, 물방동사니, 우산방동사니 등이 분포하였다. 인공습지 시스템별 식생 분포 특성은 침강저류지에 부들이 가장자리에 성장하고 있었으며, 제 1습지에는 달뿌리풀과 미나리, 제 2습지 전단부 및 후단부에는 부들 및 갈대, 제 3습지에는 줄, 부들, 마이크로풀에는 줄과 수련이 주요 우점종으로 분포되어 있었다. 북내 바이오파크 인공습지내 주요 우점종의 피도는 Table 1에서 보는 바와 같이(Cho, 2008) 침강저류지에는 부들이 약 35% 분포되어 있고 제 1습지에는 달뿌리풀이 40%, 제 2습지 전단부에는 갈대가 45%, 부들이 30% 및 수련이 5% 분포되어 있었다. 제 2습지 후단부에는 줄이 45% 및 갈대가 45%, 제 3습지에는 부들이 40%, 줄이 50% 및 마이크로풀에는 줄이 10%, 수련이 30%로 분포되어 있었다(Cho, 2008).

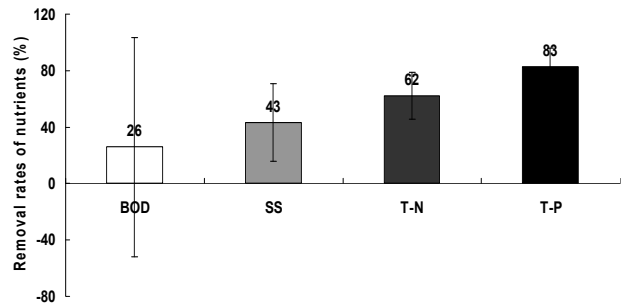


Fig. 2. Removal rates of BOD, SS, T-N and T-P in effluent in Boknae Bio-park constructed wetlands.

Table 1. Cover degree of dominance plants in Boknae Bio-park constructed wetlands

Constructed wetlands	Water plants	Cover degree (%)	
		Cover	Open surface water
Forebay	TYHOR	35	60
1 st wetland	PHRJA	40	30
	PHRCO	45	
2 nd wetland forward	TYHOR	30	20
	NTMTE	5	
2 nd wetland backward	ZIZLA	45	10
	PHRCO	45	
3 rd wetland	TYHOR	40	10
	ZIZLA	50	
Micropool	ZIZLA	10	60
	NTMTE	30	

(TYHOR: *Typha orientalis* PRESL, PHRJA: *Phragmites japonica* STEUD, PHRCO: *Phragmites communis* TRINIUS, NTMTE: *Nymphaea tetragona* ANGUSTA, ZIZLA: *Zizania latifolia* TURCZ.)

이와 같이 북내 바이오파크 인공습지의 경우 수생식물을 습지 단계별로 다양화 시켜 생육하도록 하였는데, Mistsch(2002)는 다양한 식물종의 서식은 병충해와 천적의 공격으로부터 안정화되고, 다양한 생물들에게 서식환경 및 먹이원 등을 공급하는 이점이 있다고 보고하였다.

북내 바이오파크 인공습지내 수생식물의 종류별 생육특성을 시기별로 조사한 결과는 Fig. 4에서 보는 바와 같다. 수생식물의 건물생산량은 4월부터 6월까지 전체적으로 증가하였으며 6월 이후 급격히 증가하여 8월에 최대 건물생산량을 보였고, 10월에는 계절적인 영향으로 인해 건물생산량이 약간 감소하는 경향이었으며, 10월 이후 습지 내에 고사된 수생식물은 절취되었다. 북내 바이오파크 인공습지에서 최대 건물생산량을 보인 8월의 각 수생식물의 한 주당 건물생산량은 달뿌리풀, 수련, 부들, 갈대 및 줄이 각각 44.30, 36.75, 54.27, 39.60 및 37.80 g/plant로 평균 42.54 g/plant이었으며 부들이 다른 수생식물의 건물생산량에 비해 비교적 높았다. Seo

복내 바이오파크 인공습지내 수생식물의 지상부 인 함량은 달뿌리풀이 9400~9900 mg/kg 범위로 다른 수생식물에 비해 약간 높았으며, 지하부의 인 함량은 줄이 4964~6452 mg/kg 범위로 다른 수생식물에 비해 약간 높았으나, 시기에 따른 인 함량은 큰 차이 없이 비슷하였다.

자유수면형 인공습지내 수생식물의 종류별 무기성분 흡수량

복내 바이오파크 인공습지내 수생식물의 생육시기별 건물 생산량과 수생식물의 질소 및 인 함량을 이용하여 수생식물의 종류별 질소 및 인 흡수량을 산출한 결과는 Fig. 5에서 보는 바와 같다.

복내 바이오파크 인공습지내 수생식물의 시기에 따른 질소 및 인 흡수량은 전반적으로 4월부터 8월까지 점점 증가하는 경향이였으며, 10월에는 수생식물의 잎과 줄기가 고사한 것으로 보아 계절적인 영향이 작용하여 질소 및 인 흡수량이 감소된 것으로 판단된다. 수생식물의 시기에 따른 질소 흡수량은 건물생산량과 비슷한 경향이였으며, 8월에 최대 질소 흡

수량을 나타내었고, 그 이후 건물생산량이 감소됨에 따라 질소 흡수량도 감소되었다. 이와 같은 결과는 Seo *et al.*(2006)가 보고한 인공습지 하수처리장에서 수생식물의 무기성분 흡수량을 조사한 결과와 유사하였다. 8월 이후 각 수생식물의 질소 흡수량은 수생식물 한 주당 달뿌리풀, 수련, 부들, 갈대 및 줄이 각각 약 773, 625, 1206, 754 및 768 mg/plant로서 부들 > 달뿌리풀 ≥ 줄 ≥ 갈대 > 수련 순이었다.

수생식물의 시기에 따른 인 흡수량은 질소 흡수량과 비슷한 경향으로 8월에 최대 인 흡수량을 나타내었다. 8월에 조사한 달뿌리풀, 수련, 부들, 갈대 및 줄의 한 주당 인 흡수량은 각각 약 397, 177, 411, 261 및 229 mg/plant로 건물생산량이 높은 부들이 가장 높은 인 흡수량을 나타내었는데 이는 Seo *et al.*(2006)가 보고한 결과와 유사하였으며, Seo *et al.*(2011b)가 보고한 신평천 인공습지에서의 시기별 및 수생식물의 종류별로 조사한 질소 및 인 흡수량 결과와도 유사한 경향이였다.

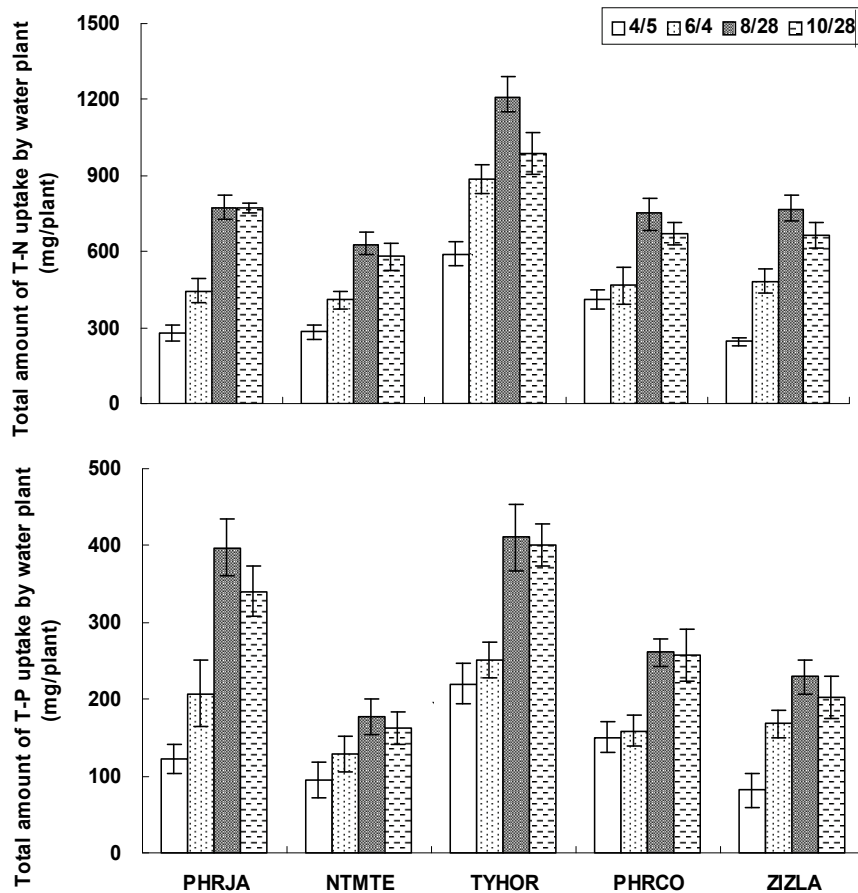


Fig. 5. T-N and T-P uptake by water plants in Boknae Bio-park constructed wetlands (PHRJA: *Phragmites japonica* STEUD, NTMTE: *Nymphaea tetragona* ANGUSTA, TYHOR: *Typha orientalis* PRESL, PHRCO: *Phragmites communis* TRINIUS, ZIZLA: *Zizania latifolia* TURCZ).

요 약

본 연구는 비점오염원 처리를 위한 자유수면형 인공습지인 복내 바이오파크 인공습지에서 수생식물에 의한 영양염류의 흡수특성을 평가하고자 하였다. 복내 바이오파크 인공습지내 주요 우점종은 달뿌리풀, 수련, 부들, 갈대 및 줄이였으며 최대 건물생산량을 보인 8월의 주요 우점식생의 한 주당 건물생산량은 부들(54.27 g/plant) > 달뿌리풀(44.30 g/plant) ≥ 갈대(39.60 g/plant) ≥ 줄(37.80 g/plant) ≈ 수련(36.75 g/plant) 순으로 높았다. 복내 바이오파크 인공습지내 수생식물의 질소 함량은 지상부의 경우 달뿌리풀, 수련, 부들, 갈대 및 줄이 각각 1.80~2.06%, 1.94~2.14%, 2.07~2.57%, 2.20~2.33% 및 2.20~2.33% 범위로 부들이 다른 수생식물에 비해 약간 높았으나 시기별로 큰 차이 없었으며 지하부의 질소 함량도 이와 유사한 경향이었다. 복내 바이오파크 인공습지내 수생식물의 인 함량은 지상부에서는 달뿌리풀(9400~9900 mg/kg 범위) 및 지하부에서는 줄(4964~6452 mg/kg 범위)이 다른 수생식물에 비해 약간 높았으나 시기에 따른 수생식물의 인 함량은 큰 차이 없이 비슷하였다. 복내 바이오파크 인공습지내 수생식물의 최대 질소 흡수량은 8월에 달뿌리풀이 773 mg/plant, 수련이 625 mg/plant, 부들이 1206 mg/plant, 갈대가 754 mg/plant 및 줄이 768 mg/plant 이었다. 수생식물의 최대 인 흡수량은 8월에 달뿌리풀이 397 mg/plant, 수련이 177 mg/plant, 부들이 411 mg/plant, 갈대가 261 mg/plant 및 줄이 229 mg/plant 이었다. 복내 바이오파크 인공습지내 수생식물 중 부들의 영양염류 흡수량이 가장 많았다. 이상의 결과는 향후 비점오염원 처리를 위한 인공습지 시공시 습지특성에 맞는 최적의 수생식물을 선정하는데 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

This research was supported by a fellowship from the Yeongsan & Sumjin River Watershed Management Fund of South Korea. This work was also supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korea Government (Ministry of Education, Science and Technology), [NRF-2010-0025548, NRF-2010-359-F00003].

참고문헌

APHA, AWWA, WCF. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC, 4-112.

Cho, J.S. 2008. Alternative of Optimum Management and Analysis of Removal Efficiency for Treating the Wastewater in Constructed Wetland to Upper Region of Juam Lake. Yeongsan River Environmental

Research Center, National Institute of Environmental Research Ministry of Environment, Gwangju, Korea.

Cho, J.S. 2009. Selection of standard model for installing constructed wetlands suitable for watershed characteristics. Yeongsan River Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research Ministry of Environment, Gwangju, South Korea.

Choi, K.C., O.U. Kwun, Y.D. Kim, Y.H. Kim, W.S. Lee, J.Y. Lee, S.J. Jun, and S.K. Jung. 2004. Annotation for standard methods of water quality. printed in Dong Hwa Technology Publishing Co.

Choi, S.H., Y. An, and H.I. Kim. 2006. Evaluation of water purification in the constructed wetland. Korean Society on Water Quality and Korean Society of Water Wastewater Meeting Conference Proceedings, Korea National Open University, Incheon, p. 349-356.

Jung, Y.J. 2006. Operation of the Juam constructed wetland for effluent from a sewage treatment plant and diffuse pollution for two years. *J. Korean Soc. Wat. Qual.* 22, 1031-1037.

Ministry of Environment. 2004. Environment a white book. 399-429.

Mitsch, W.J. 2002. Development of macrophyte communities and subsequent ecosystem function in two created wetlands. A Whole-Ecosystem Experiment, In proceedings of the Nanjing International wetlands symposium, Society of Wetland scientists, Nanjing. pp. 55-65

NIAST. 2000. Methods of soil and plant analysis, National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.

Seo, D.C., B.I. Jang, I.S. Jo, S.C. Lim, H.J. Lee, J.S. Cho, H.C. Kim, and J.S. Cho. 2006. Selection of optimum water plant in constructed wetland by natural purification method for municipal sewage treatment. *Korean J. Environ. Agric.* 25, 25-33.

Seo, D.C., S.W. Kang, H. Kim, M.J. Han, B.J. Lim, J.H. Park, K.S. Kim, Y.J. Lee, I.W. Choi, J.S. Heo, and J.S. Cho. 2011a. Evaluation of treatment efficiencies of pollutants in Boknae bio-park constructed wetlands. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44, 263-270.

Seo, D.C., S.W. Kang, B.J. Lim, J.H. Park, K.S. Kim, J.B. Lee, H. Kim, J.S. Heo, N.I. Chang, H.H. Sung, and J.S. Cho. 2011b. Evaluation of aquatic ecological characteristics in Sinpyongcheon constructed wetlands for treating non-point source pollution. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44, 400-407.