

인공습지를 이용한 하구담수호 유입하천수의 4년간 실험결과 분석

Analysis of 4-year experimental data from water quality improvement
of inflow stream in estuary using wetland

김형철*·윤춘경·한정윤·이새봄(건국대)·신현범(농어기반공사)

Kim, Hyung Chul·Yoon, Chun Gyeong·Han, Jung Yoon·Lee, Sae Bom, Shin, Hyun Bhum

Abstract

The field scale experiment was performed to examine the effect of plant coverage on the constructed wetland performance and recommend the optimum development and management of macrophyte communities. Four sets(each set of 0.88ha) of wetland (0.8ha) and pond(0.08ha) systems were used. Water flowing into the Seokmoon estuarine reservoir from the Dangjin stream was pumped into wetland system. Water depth was maintained at 0.3~0.5m and hydraulic retention time was managed to about 2~5days; emergent plants were allowed to grow in the wetlands. After three growing seasons of the construction of wetlands, plant coverage was about 95%, even with no plantation, from bare soil surfaces at the initial stage. Dead vegetation affected nitrogen removal during winter because it is a source of organic carbon which is an essential parameter in denitrification. Biomass harvesting is not a realistic management option for most constructed wetland systems because it could only slightly increase the removal rate and provide a minor nitrogen removal pathway due to lack of organic carbon.

I. 서론

최근 담수화 과정에서 많은 오염부하의 노출에 의해 심각한 수질 문제를 야기시켜, 자연환경적인 측면뿐만 아니라 사회환경에도 복잡한 문제를 일으키고 있다. 유역 하류 인공 담수호의 경우 자연호와 같은 형성과정이 근본적인 측면에서도 다른 저수지의 특성을 가지고 있을 뿐만 아니라 유역의 최말단에 위치하고 있어 유역에서 발생된 유기물, 영양염류, 유해물질 등이 과다유입 되어 수질오염 문제를 야기하고 수자원의 가치를 떨어뜨릴 뿐만 아니라 국가적인 환경문제로 부각되고 있다.

담수호의 수질개선을 위해서는 오염부하량을 저감시켜야하며, 이를 위해서는 점원오염원(Point Pollution)과 비점원오염원(Non-point Pollution)을 동시에 고려해야 하는데, 지금까지 수질개선의 노력은 주로 점원오염원을 저감하는데 치중해 왔고 배출규제가 어려운 비점원오염원의 경우 관리 대상에서 대부분 제외되어 왔다. 최근 들어 유역단위로 배출되는 오염원의 40% 이상을 차지하는 비점원오염원의 제거를 중요하게 인식하고 있다. 하지만 비점원오염부하량을 삭감시키는 뚜렷한 방법이 개발되지 못하고 있는 상황에서 유역으로부터 발생하여 운송되는 오염물질은 하천을 통하여 담수호로 유입되고 담수호에 유입된 후에는 수질관리가 더욱 어려워지므로 유입하기 전에 담수호 입구에서 처리하는 방안을 모색해야한다. 따라서 담수호의 수질개선에 적용하고 수질개선공법은 가급적 유지관리가 용이하고 환경친화적인 자연정화공법인 인공습지를 통한 연구가 하수 및 오염된 지표수처리를 위해 전 세계적으로 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 2002년 6월에서 2005년 9월까지 인공습지에서 실측한 수질측정 자료를 바탕으로 자연정화시설의 수처리 효율을 검증하고 장기간 인공습지를 운영함에 있어서 식생피도가 수체에 미치는 규명하고 합리적인 인공습지의 관리방안을 제시하고자 한다.

II. 재료 및 방법

인공습지를 이용한 비점오염원 제어효율을 검증하기 위해 2001년에 충남 당진군의 석문담수호 유입부에 인공습지와 우수지를 각각 4개씩 조성하였으며, 각각의 면적은 0.8ha와 0.08ha이고, 총 면적은 약 3.6ha이다(Table 1). 실험시설의 평면도는 Fig. 1과 같다. 습지와 우수지의 배치에 따른 처리효율을 비교하기 위해 습지가 우수지 앞에 놓인 습지-우수지 시스템(cell 2와 cell 4)과 습지가 우수지 뒤에 놓이는 우수지-습지 시스템(cell 1과 cell 3)으로 배치하였다. 또한 습지의 가로-세로비에 따른 처리효율의 변화를 조사하기 위해 개략적인 가로-세로비가 1:1인 형태(cell 2와 cell 3)와 가로-세로비가 2:1인 형태(cell 1과 cell 4)로 조성하였다Table 1.

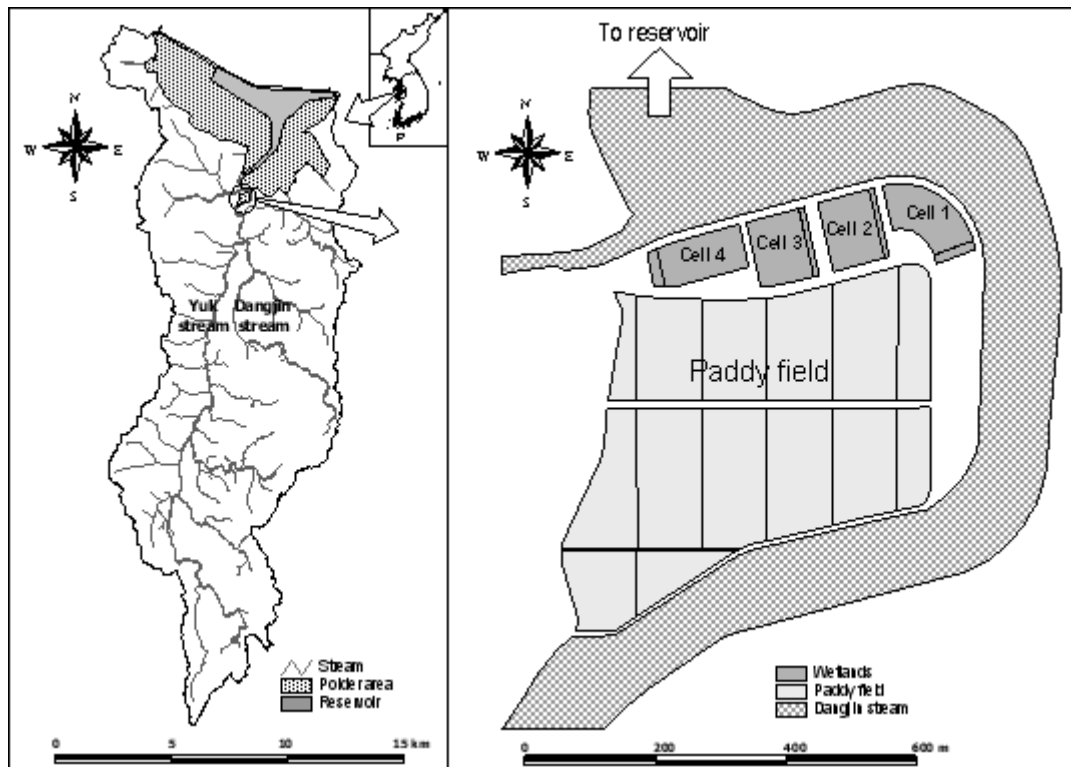


Fig. 1. Seokmoon watershed and experimental facility.

Table 1. Design parameters of constructed wetland systems

	System	Width (m)	Length (m)	Area (m ²)	Depth (m)	Detention Time (days)	Flow (m ³ /day)	Hydraulic loading (cm/day)
Cell 1	Pond-Wetland	64	125.0	8,000	0.3~0.5	2~5	500~1,500	6.25~18.75
Cell 2	Wetland-Pond	101	79.2	8,000	0.3~0.5	2~5	500~1,500	6.25~18.75
Cell 3	Pond-Wetland	101	79.2	8,000	0.3~0.5	2~5	500~1,500	6.25~18.75
Cell 4	Wetland-Pond	61	131.1	8,000	0.3~0.5	2~5	500~1,500	6.25~18.75

실험시설은 2001년 3월부터 2001년 12월까지 조성되었다. 습지 식생은 인공습지 조성 전 주변 식생조사 결과 주변에 대규모 갈대군락이 존재하고 공사과정 중 일부 갈대군락이 포함된 토양이 유입되었기 때문에, 자연적으로 습지식물이 도래할 수 있을 것으로 판단되어 인공적인 식재를 실시

하지 않고 자연도래를 유도하였다. 또한 습지로 유입되는 유량을 조절하기 위해 밸브를 설치하였으며, 습지수위를 조절하기 위해 웨어를 설치하였다. 본격적인 수질개선실험은 2002년 6월부터 시작하였으며, 2005년 9월까지 4년간 각 습지별로 유입, 중앙, 유출 3개 지점에 대해서 월 평균 약 2회 정도로 시료를 채취하여 수질분석을 실시하였다. 조사기간 동안 각 Cell당 총 240회 샘플링을 하였으며, 수질측정 항목은 수온, pH, EC, DO, BOD₅, TSS, T-N, T-P 및 Chl-*a*이었고, 모든 항목은 Standard Methods (APHA, 1995)에 따라 분석하였다.

습지 조성 후 습지의 식생피도 변화를 분석하기 위해 식물상을 잘 반영할 수 있는 위치를 선택하여 각 습지에 총 6개의 고정 방형구(2m×2m)를 2002년 5월에 설치하였으며 식생조사는 2002년부터 매년 6, 8, 10월에 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 식생조사

인공습지 완공된 2002년 3월부터 5월까지 습지의 식생이 조기에 활착할 수 있도록 물 관리를 실시한 결과 인공습지를 운영한 첫해에 높은 피도를 나타내었다(Fig. 2). 2002년도에 식생조사를 실시한 결과 갈대(*Phragmites australis*), 애기부들(*Typha angustifolia* Bory et Chamb), 새섬매자기(*Scirpus planiculmis* Fr. Schm.), 미국개기장(*Panicum dichotomiflorum* Michx.), 물피(*Echinochloa crus-galli* var. *oryzicola* Ohwi), 큰개여뀌(*Persicaria nodosa* Opiz) 등 여러 종의 식생들이 발견되었고, cell 4를 제외한 각 습지별 평균 식생피도는 약 35%를 나타내었다(Fig. 2). 2003년도가 지나면서 갈대, 애기부들, 새섬매자기를 중심으로 우점 하였으며, 평균 70~80%의 식생피도를 나타내었다. 2004년도와 네 번의 생장기를 거친 2005년 식생조사결과 각 습지별로 평균 95%의 이상의 식생피도는 나타내었다(Fig. 2).

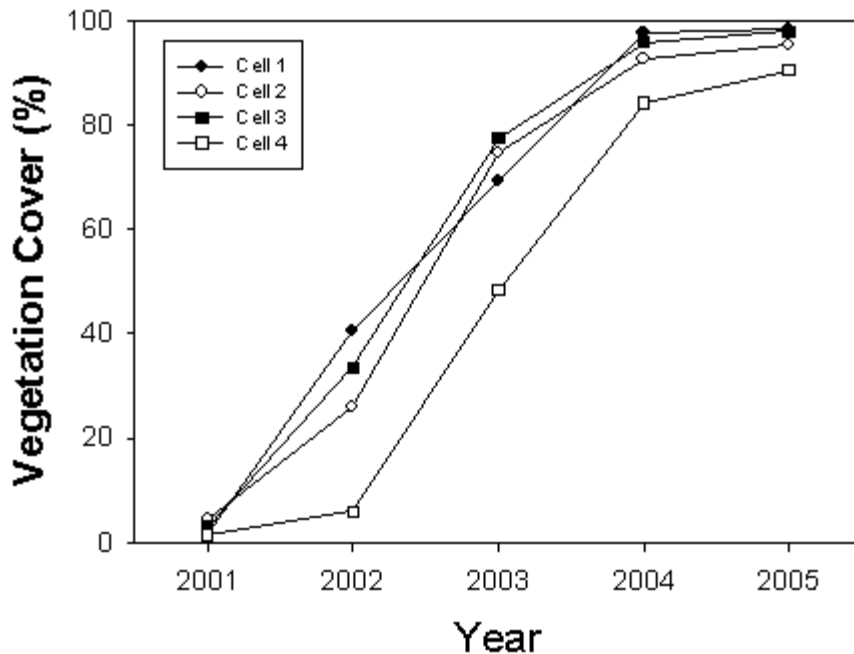


Fig. 2. Development of plant coverage in the constructed wetlands.

반면에 수문 고장으로 인해 2002년 5월 중순까지 약 40cm의 수심을 유지하던 cell 4는 2002년에 다른 cell 보다 훨씬 낮은 식생피도(<5%)를 나타내었다. 이는 습지식물이 전혀 뿌리가 발달하지 않은 상황에서 조성 시 유입된 줄기, 뿌리 및 씨앗으로부터 발아를 하여 성장을 하여야 하는데,

발아가 되는 4~5월 동안 깊은 수심이 유지되어 발아가 일어나지 못했기 때문이다. 2003년에는 다른 cell과 같이 4월 한 달 동안 물을 제거하여 습지토양이 습윤한 상태가 되도록 관리한 결과 다른 cell보다는 낮지만 전년도 보다는 높은 피도(약 50%)를 나타내었으며, 2004년도에는 약 85%, 2005년도에는 90%로 높게 나타났다.

습지조성 초기에 인공식재를 실시하지 않았음에도 불구하고, 4번의 성장기간을 거치면서 식생이 습지에 완전히 정착되었다. 그러므로 타 지역에서 인공습지를 조성할 경우에도 본 연구에서와 같이 습지조성 전에 습지조성 예정지와 주변에 습지식물들이 자생하고 있다면, 인공식재를 실시하지 않아도 적정 물관리를 통해 일정 시간이 경과 후 자연적인 식물 활착에 의해 습지식물조성이 가능할 것으로 판단된다.

2. 수질분석

습지에서 질소제거의 주요 기작은 유기질소의 침전 암모니아성질소로의 분해, 암모니아의 휘발, 식물과 조류(algae)를 포함한 미생물에 의한 용존성 질소의 흡수, 질산화 및 탈질이다. 식물과 조류를 포함한 미생물에 의해 흡수되어 제거되는 질소는 1~34%를 차지하는 반면에 탈질화에 의해 제거되는 질소는 60~95%를 차지함으로 탈질화가 질소제거의 주요 기작이다. 탈질에 관여하는 미생물들은 주로 종속영양 박테리아(heterotrophic bacteria)로 무산소(anoxic)상태에서 최종 전자 수용체로 산화된 질소의 형태인 NO_2^- 와 NO_3^- 를 이용하고, 탄소원(carbon source)으로는 유기탄소를 이용하여 질산성질소를 N_2 가스형태로 대기 중으로 방출하여 제거한다. 이와 같이 원활한 탈질화를 위해서는 유기탄소가 필수적인데, 고사한 식물체가 탈질화에 필요한 유기탄소를 제공하는 역할을 한다. 본 연구에서 인공습지로 유입되는 유입수의 태별 질소 구성비는 유기질소 41%, 암모니아성질소 5%, 아질산성질소 3%, 질산성질소 51%로 유기질소와 질산성질소가 대부분을 차지하고 있다. 침전에 의해 주로 제거되는 유기질소는 식생피도에 큰 영향을 받지 않는 반면에 탈질화와 식물에 의한 흡수에 의해 제거되는 질산성질소는 식생피도에 큰 영향을 받는다.

Table 2. Water quality and removal in wetlands system during the study period

Constituents	2002 ~ 2004		2005		
	Influent	Effluent	Influent	Effluent	
DO Conc. \pm S.D.* (mg/L)	12.0 \pm 2.62	12.5 \pm 2.18	12.1 \pm 2.86	8.1 \pm 2.41	
T-N	Conc. \pm S.D.* (mg/L)	3.75 \pm 0.63	2.03 \pm 0.52	4.27 \pm 0.449	2.30 \pm 0.66
	Removal rate (%)		47.2 \pm 16.18		48.7 \pm 11.77
T-P	Conc. \pm S.D.* (mg/L)	0.33 \pm 0.10	0.16 \pm 0.06	0.35 \pm 0.10	0.26 \pm 0.06
	Removal rate (%)		51.6 \pm 17.39		29.9 \pm 23.58

* : Standard deviation.

2004년부터 90% 이상의 식생피도(fig.2)를 보이고 있는 인공습지는 2004년 이전의 경우 고사한 식물체에 의해 제공되는 유기탄소량이 적어 Table. 2와 같이 질소처리율이 47.2%의 수준으로 보이고 있으나 실제 2004년 성장기를 제외한 처리율은 40% 정도에 지나지 않았다. 2004~2005년의 경우 높은 식생피도로 인해 동절기 고사한 식물체의 양이 많아져 2005년의 경우 48.7%의 제거율을 보여주고 있으나 2005년 성장기만을 보았을 때 60%이상의 처리율을 보이고 있다. 또한 fig. 3과

같이 2005년 5월 성장기 DO의 농도가 0.4 ~ 5.0 mg/L의 낮은 농도를 보이고 있는데 이는 90% 이상의 식생피도를 보였던 2004년의 식물체들이 동절기를 거치면서 고사한 식생들이 부패하면서 수체의 용존산소를 소모해 혐기성 상태를 유지하여 습지의 51%를 차지하는 질산성질소의 탈질화 작용으로 높은 처리율을 보여준다. 새로 조성된 인공습지에서 최대 탈질화를 얻기 위해 필요한 유기물질(유기탄소)을 습지바닥에 축적시키기 위해서는 약 5~10년 정도가 소요된다는 연구가 발표되었다. 그러므로 새로 조성한 인공습지에서는 충분한 유기물질을 습지에 축적시키기 위해 성장기 동안이나 성장기가 끝났을 때 식물체를 습지에 제거하지 않는 것을 좋을 것으로 판단된다.

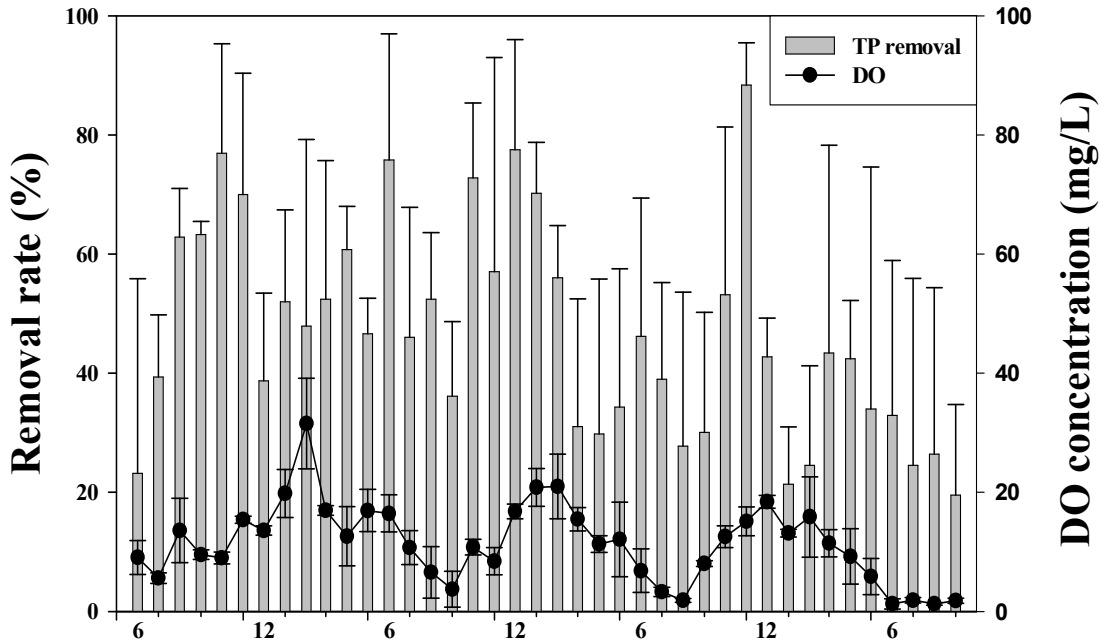


Fig. 3. Monthly average T-N removal for the wetlands and comparison of DO concentration.

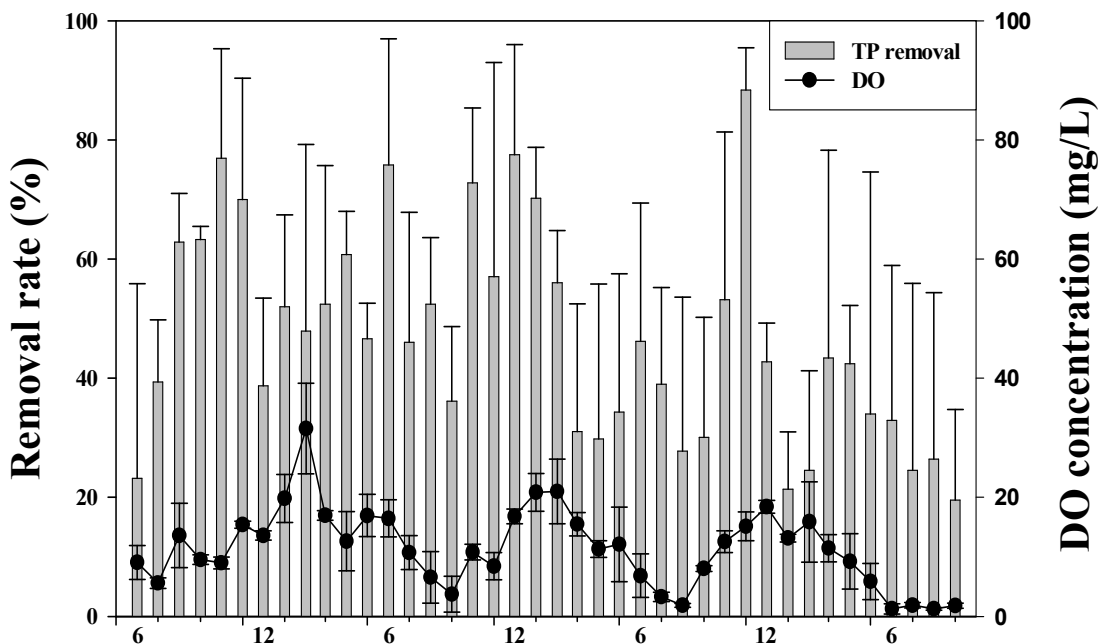


Fig. 4. Monthly average T-P removal for the wetlands and comparison of DO concentration.

T-P의 경우 습지에서 2004년까지 결과를 보았을 때 50% 이상의 높은 처리율을 보여주고 있다 (Table 2). 인의 제거 기작은 흡착, 침강, 조류 및 습지식물의 흡수 등 여러 물리적, 화학적, 생물학적 과정에 의해 이루어진다. 습지의 식생이 2004년과 2005년 90%이상의 피복 상태를 보이면서 동절기를 지나 고사한 식생들이 습지 바닥에 가라앉아 온도가 상승하는 5월경부터 유기물질을 분해하면서 수체내의 산소를 소모하고 이에 따라 혐기성 상태로 되면서 습지바닥에 있던 퇴적물이나 고사한 식생에 의한 인의 용출을 초래하는 결과로 T-P의 처리율을 떨어지는 현상이 나타난 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 자유수면형 인공습지를 이용한 비점원오염원의 처리를 위해 2002년 6월 ~ 2005년 9월 까지 장기적으로 습지를 운영한 연구로 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 습지의 조성초기 식생의 경우 인공식재를 실시하지 않았음에도 불구하고 4번의 성장기를 거치면서 식생피복이 90%이상을 유지하면서 습지에 완전히 정착되었다. 따라서 습지조성 전에 습지 예정지와 주변 습지식물이 자생하고 있다면 인공식재를 실시하지 않아도 적정 물관리를 통해 자연적인 식물 활착에 의해 습지식물조성이 가능할 것으로 판단된다.
2. DO의 경우 식생피복이 90%이상을 유지하는 습지에서 동절기를 지나면서 고사한 식물체들이 습지 바닥에 가라앉아 온도가 상승하는 5월부터 유기물 등을 분해하는 과정에서 수체내의 용존산소를 소모하여 생기는 현상으로 판단된다.
3. T-N은 전체적인 처리율은 동절기에 다소 떨어지는 경향이 있으나 성장기를 거치면서 50~70%의 높은 처리율을 보여주고 있다. 특히 2005년 성장기를 거치면서 DO의 농도가 떨어져 혐기성을 유지하고 있어 질소의 처리율은 더욱 증가하는 현상을 보이고 있다. 습지로 유입하는 질소는 51%가 질산성질소로 혐기성에서 탈질화가 잘 이루어져 처리율이 증가한 것으로 판단된다.
4. T-P의 경우 계절적인 차이에 따라 처리율의 변화는 없는 것으로 판단되고 전체적인 처리율은 50%이상의 처리율을 보이고 있으나 2005년 성장기를 거치면서 습지에서 처리율이 떨어지는 현상을 볼 수 있다. 이는 수체내의 용존산소량의 부족으로 습지바닥의 퇴적물이나 고사한 식생에서 인의 용출현상이 일어나 전체적인 처리율이 떨어진 것으로 판단된다.

본 연구는 농어촌 연구원 과제 '수질개선용 자연정화 시설 현장시험연구'의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. 농어촌연구원, 2004 인공습지 및 유수지에 의한 수질개선 현장실험 보고서, 농업기반공사
2. 함중화, 윤춘경, 구원석, 김형철, 심현범. 2004. 인공습지를 이용한 하구담수호 유입하천수 수질개선 현장실험결과 분석. 한국농공학회지 46(5): 141-153.
3. 함중화, 윤춘경, 구원석, 김형철, 심현범. 2005. 자유수면형 인공습지에 의한 저농고 고유량의 하천수질개선 효과 분석. 한국농공학회지 47(1): 79-91.