

시화호 인공습지의 수질정화기능 향상을 위한 사례연구

최 돈 혁*+ / 장 호** / 최 광 순***

Case Study on the Improvement of Pollutant Removal Efficiency in Sihwa Constructed Wetland

Don-Hyeok Choi*+ / Ho Kang** / Kwangsoon Choi***

요약 : 본 연구에서는 국내 최대 인공습지인 시화호 인공습지에서 수질정화기능 향상을 위해 수립된 3개의 방안 (물 흐름 개선방안, 혐기성환경 개선을 위한 산소공급장치 설치방안, 탁도유발 물고기 제어방안)에 대한 효율평가 및 습지의 적용성을 제시하였다. 인공습지 하류구역(가로 122m×세로 103m)에 설치한 물 흐름 유도시설에 의한 BOD, SS, TN, TP의 평균 제거효율은 12.8~7.4%로 나타났으며, BOD가 가장 높은 제거효율을 보였다. 이는 습지내 물흐름이 수질정화기능 향상에 매우 중요하며, 시화호 인공습지와 같이 규모가 큰 습지의 경우 유출부의 일부 구간에 물 흐름 개선만으로도 습지의 수질정화기능을 향상시킬 수 있음을 시사한다. 산소공급장치 가동 후 DO농도 증가율이 산기식폭기장치에서 15.5%과 표면폭기장치에서 37.2%를 보였고, 습지내 DO 농도가 낮은 구역에 한하여 새벽시간에 운영하는 것이 효율적인 것으로 사료된다. 그리고 물고기를 포획을 한 실험군과 대조군의 평균 탁도가 6.2 NTU와 10.6 NTU로 물고기 포획에 의해 41.5%의 탁도 제거효율을 보였다. 습지내 어류현황과 하류부의 탁도에 대한 지속적인 모니터링을 통한 체계적인 어류관리 방안이 필요할 것으로 본다.

핵심용어 : 인공습지, 수질정화기능, 향상방안, 사례연구

Abstract : Three plans(induction of water flow, supply of oxygen into water, control of fish causing resuspension of solids) proposed to improve the pollutant removal efficiency of Sihwa Constructed Wetland(CW) were estimated by considering the their efficiency and application to the wetland. After construction of facility for induction of water flow in lower part(W 122m×L 103m) of the wetland, the mean removal efficiencies of BOD, SS, TN and TP were in range of 12.8~37.4% and BOD was showing the highest efficiency. This result indicates that water flows is one of very important factors in the pollutant removal of wetland, especially near the outlet of a large scale wetland such as Sihwa CW. Dissolved oxygen(DO) concentrations after operation of two oxygen supply systems such as Air Bubble Diffuser and Surface Aeration System increased 15.5% and 27.2%, respectively. For maintaining effective DO concentration in Sihwa CW, the operation of oxygen supply system may be desirable during midnight to dawn in the location in which DO concentration is not enough, for instance less than 2 mg/L in CW. In experiments of the fish removal from Sihwa CW, the mean turbidity was lower in test site(6.2 NTU) than control site(10.6). The removal efficiency of thurbidity by th fish removal from the wetland was 41.5%. Therefore, a relevant fish management through a periodical monitoring of fish and turbidity is needed.

Keywords : *Constructed wetland, removal efficiency, improvement plans, case study*

+ Corresponding author : choihd@kwater.or.kr

* 정희원 · 한국수자원공사 시화호환경관리센터

** 비희원 · 충남대학교 토목환경공학부

*** 정희원 · 한국수자원공사 수자원연구원

1. 서 론

수질정화용 인공습지는 1960년대부터 미국과 유럽에서 주로 생활하수와 축산 및 공장폐수를 처리할 목적으로 조성되어 왔다(USEPA, 2000). 우리나라의 경우는 90년초부터 다양한 수생식물을 이용한 오염물질의 제거효율을 검증하기 위한 소규모 연구시설들이 조성되었고(김, 1993, 이와 이, 1994; 전, 1994, 안과 공, 1995, 윤 등, 1999), 실제 현장에 처리시설로의 인공습지는 90년 중반부터 시화호와 주암호 등 저수지의 수질개선을 위해 상류부에 조성되어 운영되고 있다. 또한 최근에는 4대강 비점오염원관리를 위한 저감시설로서 인공습지의 조성이 고려되고 있다(관계부처합동, 2004).

인공습지에서 오염물질의 제거는 주로 침전, 분해, 흡수, 흡착, 응집과정을 거쳐 이루어지며(Reddy and DeBusk, 1987), 제거효율은 습지의 형태, 식재식물의 종류, 토양환경, 처리수의 농도, 그리고 수리학적 특성 등에 의해 영향을 받는다(USEPA, 2000). 또한 조성 후 습지의 운영기간이 길어질수록 오염물질의 제거효율이 저하되는 것으로 나타났으며, 그 주요 원인을 표층퇴적도에 유기물의 과도한 축적 등에 의한 습지내 환경변화에 의한 것으로 보고되었다(USEPA, 2000; Kadlec and Knight, 2001; 농림부와 농업기반공사, 2004; Song *et al.*, 2006; 최 등, 2008).

본 논문의 연구대상지인 시화호 인공습지는 “시화호 수질개선대책”의 일환으로 시화호 상류유역의 비점오염물질을 처리하기 위해 조성된 국내 최대 인공습지로 2002년부터 운영되어 왔다. 습지의 수처리효율은 조성초기에 유기물과 영양염류 모두 50%의 양호한 수준을 보였으나, 2004년부터 급격히 저하되는 경향을 보였다(한국수자원공사, 2007). 이에 한국수자원공사(2006)는 시화호 인공습지에 대한 정밀조사를 통하여 수처리효율 저하의 주요 원인을 습지내 균등하지 못한 물흐름, 과도한 유기물 증가에 의한 혐기성환경, 그리

고 하류부 물고기에 의한 퇴적도 교란으로 보고하였다. 또한 개선방안으로 습지내 내 물흐름 유도 시설 설치, 산소공급장치 운영, 그리고 탁수유발 물고기 조절방안을 수립하였다.

수처리를 목적으로 조성된 인공습지는 조성 이후 내외적인 환경변화에 의해 오염물질의 제거효율이 저하될 수 있기 때문에 지속적인 모니터링을 통한 수질정화기능 평가와 함께 개선방안의 수립 및 적용이 필요하다. 본 연구에서는 시화호 인공습지의 수질정화기능 향상을 위해 수립된 방안들에 대한 검증실험을 토대로 각 방안에 대한 효율 평가 및 습지관리의 적용성에 대하여 논하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사지 개요

시화호 인공습지는 시화호로 유입되는 비점오염물질을 저감하기 위해 안산시의 반월천과 화성시 구역의 동화천과 삼화천이 합류지점에 조성한 습지로 총 면적이 1,037,500 m²에 달하는 국내 최대 규모의 수처리 시설이다(Fig. 1). 인공습지는 반월천습지(415,952 m²), 동화천습지(265,999 m²) 및 삼화천습지(68,972 m²)로 3개의 습지로 나뉘어져 있다. 반월천습지와 동화천습지는 습지 조성 지역의 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. 그리고 시화호 인공습지는 크게 식물의 식재 여부에 따라 폐쇄수역(closed water)과 개방수역(open water)으로 나뉘어져 있다. 폐쇄수역은 수심이 0.5~0.6 m로 인공습지의 수질정화기능을 담당하는 갈대와 부들로 채워져 있으며, 개방수역은 식물이 식재되어 있지 않는 구간으로 수심이 1.0~1.1 m로 유지되어 어류 및 야생동물의 서식 공간을 제공해 줄 뿐만 아니라 습지내 산소공급의 기능을 가지고 있다.

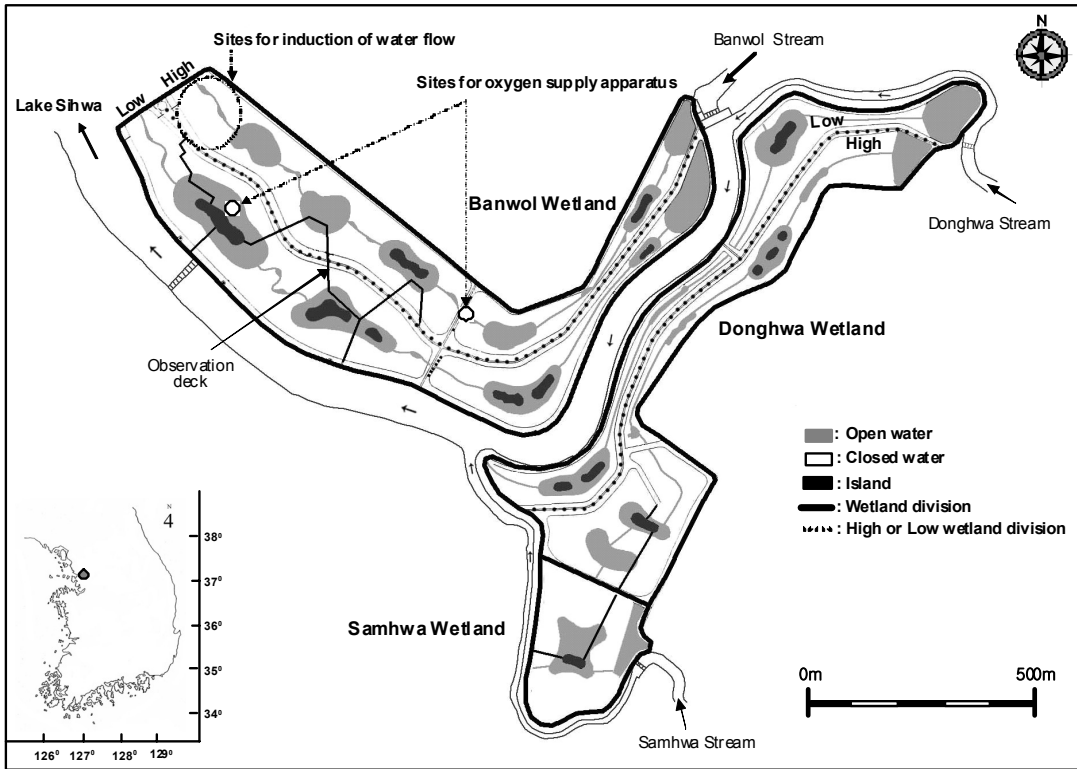


Fig. 1. Map showing the sampling sites in the Sihwa Constructed Wetland

2.2 검증실험

2.2.1 물흐름 유도시설

물흐름 유도시설은 습지의 중앙수로로 집중되었던 물 흐름을 양쪽 식생대로 유도시키기 위한 시설로 반월천고습지 하류부에 횡축으로 122m와 종축으로 103m의 규모로 조성하였다(Figs. 1, 2). 우선 기존에 개방수역(open water)과 연결되어 있던 중앙수로 상부에 stop-log를 설치하여 open water에서 중앙수로의 물 흐름을 차단시키고 양쪽 식생대로 물이 흐를 수 있도록 하였다(Fig. 2). 유도시설은 stop-log를 중심으로 좌안(left bank)과 우안(right bank) 구역으로 나누어져 있으며, open water에서 유입된 물은 각각 좌안과 우안으

로 유입된 후 유출부에서 다시 합류된다. 유도시설내에는 흙제방(폭0.5m×높이0.8m)을 Zig-Zag형태로 쌓아 유입된 물이 식생대에 최대한 접촉할 수 있도록 하였다.

오염물질의 제거효율 분석을 위한 시료채취는 물흐름 유도시설내 좌안과 우안의 유입부(L-In, R-In)와 유출부(L-Out, R-Out)에서 2007년 7월 19일부터 8월 31일까지 주단위로 총 8회 실시하였다. 제거효율 분석은 생물학적산소요구량(BOD), 부유성고형물(SS), 총인(TP), 그리고 총질소(TN) 항목을 대상으로 유입부와 유출부의 수질농도 차이로부터 산정하였다. BOD는 20℃ 암실에서 5일간 배양한 후 배양전과 후의 농도차로 구하였다. SS는 미리 무게를 잰 GF/C filter에 일정 시료를 여과한 후 105℃에서 1시간 건조시킨 다음 여과

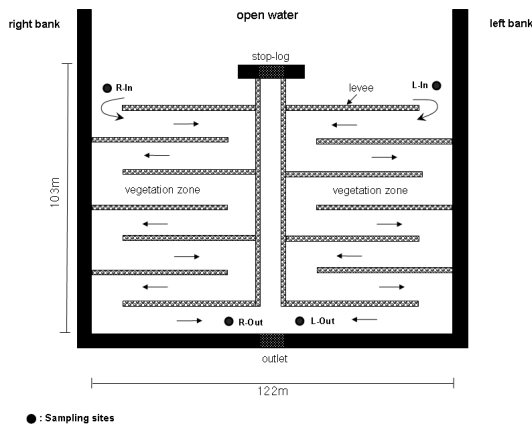


Fig. 2. A schematic design showing the induction facility of water flow constructed in lower part of the Sihwa Constructed Wetland



전과 후의 무게차이로 구하였다. TP와 TN은 여과하지 않은 시료를 사용하여 persulfate digestion 후 TP는 ascorbic acid법, TN은 cadmium reduction법으로 수질자동분석기(SKALAR, SAN plus Analyzer 5000)로 분석하였다. 모든 수질분석은 수질공정시험법(환경부, 1999)과 Standard

method (APHA, 2001)에 따라 수행하였다.

2.2.2 산소공급장치

습지내 혐기성환경 개선을 위한 방안으로 2종류의 산소공급장치에 대한 검증실험을 반월천고습지(Banweol Higher Wetland)와 저습지(Lower Wetland)에서 수행하였다(Fig. 1). 라인형 산기식 폭기장치(Air Bubble Diffuser System; ABDS)는 3개의 송풍구가 있으며 반월천고습지 유하방향으로 중앙부의 수로 전단부에 설치하였고, 설치 전과 후의 DO 농도를 측정하여 효율분석을 하였다. 그리고 표면폭기장치(Surface Aeration System; SAS)는 2개의 날개가 회전하면서 표층수를 혼합시키면서 공기중의 산소를 공급시키는 장치로 반월천저습지 하류부의 open water 구역에 설치하여 가동전과 후의 DO농도차로부터 장치의 효율분석을 하였다(Table 1). DO 농도측정은 DO 농도가 낮아지는 저녁부터 30분 간격으로 YSI 6600으로 실시하였다.

Table 1. Two types of oxygen supply apparatus installed in Sihwa Constructed Wetland

Apparatus type	Air Bubble Diffuser(ABD)	Surface Aeration System(SAS)
Description	3 blower 0.5m ³ /min	4.99kgO ₂ /hr L160mm×W165mm×H87mm
Installation site	Middel part of Banweol Higher Wetland	Open water of Banweol Lower Wetland
Installation photograph		

2.2.3 물고기 제어

습지에서 바닥을 교란시켜 탁도를 유발시키는 물고기 제어방안에 대한 검증실험은 반월천고습지 하류부의 open water를 대상으로 하였고, 대조군은 저습지 하류부의 open water로 하였다. 물고기 포획을 효과적으로 하기 위하여 우선 습지의 수위를 낮추어 폐쇄수역의 물고기를 수심이 깊은 open water로 유인한 후 20cm 이상의 물고기를 포획할 수 있는 망목 5호 그물을 이용하였다. 포획한 물고기는 종에 따른 개체수, 길이, 중량을 측정하였다. 물고기 포획에 따른 수질개선 효과는 물고기 포획 익일부터 실험군과 대조군의 탁도를 측정하여 그 차로부터 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 물흐름 유도시설

물흐름 유도시설내 유입수와 유출수의 BOD, SS, TN, TP 농도를 측정한 결과 유입수에 비해 유출수의 농도가 낮게 나타나 유도시설의 수질개선효과가 있는 것으로 나타났다(Table 2). 오염물질의 제거효율은 모든 항목에서 좌안에 비해 우안 쪽이 높은 경향을 보였으며, 특히 SS와 TP의 경우는 좌안에 비해 우안의 제거효율이 각각 2배와 3배 이상 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 인공습지의 수질정화기능이식생밀도, 부착미생물 군집, 토양환경 등에 영향을 받는 것으로 볼 때

(USEPA, 2000), 좌안과 우안의 환경조건이 서로 상이한 것으로 사료된다.

항목별 좌안과 우안의 평균 제거효율은 BOD(31.2%) > SS(29.3%) > TN(14.3%) > TP(8.7%) 순으로 영양염류에 비해 유기물의 제거효율이 높은 것으로 나타났다. 한편 물흐름 유도시설 설치 전인 2005년에 동일한 조사지점의 제거효율은 BOD는 -5.2%, SS는 11.4%, TN은 -1.5%, TP는 -15.7%으로 보고되었는데(한국수자원공사, 2007), 이를 고려하면 유도시설 설치에 의한 항목별 제거효율은 BOD(37.4%) > TP(24.4%) > SS(17.9%) > TN(12.8%) 순으로 나타나 BOD와 함께 TP도 높은 효율을 보였다(Fig. 3).

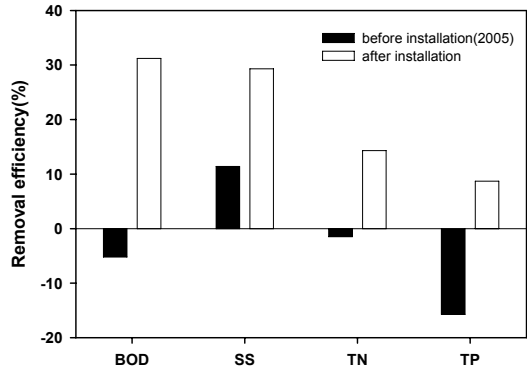


Fig. 3. Comparison of pollutant removal efficiencies before and after installation the induction facility of water flow in the Sihwa Constructed Wetland

Table 2. Removal efficiency of pollutants by the induction facility of water flow

Item	Inflow		Outflow		Removal efficiency(%)	
	leff bank	right bank	leff bank	right bank	leff bank	right bank
BOD	2.7 (1.7~3.8)	2.8 (2.3~3.5)	1.8 (1.1~3.3)	2.0 (1.4~2.9)	26.7	35.6
SS	20.3 (5.7~40.2)	18.6 (7.2~30.7)	16.5 (3.5~33.5)	11.2 (2.3~35.0)	18.7	39.8
TN	4.12 (2.71~6.06)	4.13 (2.61~5.89)	3.66 (1.64~5.70)	3.42 (1.57~5.32)	11.2	17.4
TP	0.104 (0.045~0.171)	0.104 (0.055~0.169)	0.100 (0.036~0.176)	0.090 (0.035~0.136)	3.8	13.50

습지내 물 흐름의 균일화를 위한 수리특성 개선을 위해서는 유량 흐름 패턴을 수평방향에 대해 균등하게 유입 및 유출이 될 수 있도록 상시 관리가 필요하며 고르게 전 지역에 대해 흐름을 균일하게 하는 것이 중요하다(USEPA, 2000). 그러나 시화호 인공습지와 같이 규모가 크고 하나의 segment로 되어 있는 경우에 습지 전체를 대상으로 물 흐름 개선을 위한 방안은 많은 비용이 소요된다. 본 연구에서 시화호 인공습지내 물흐름 유도시설은 종축 전체길이가 1,700m에 달하는 반월천습지의 하류부에 약 100m 구간에 설치하였음에도 불구하고 오염물질의 제거에 매우 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 시화호 인공습지와 같이 규모가 큰 경우에는 습지 하류부의 일부 구간의 물 흐름 개선만으로도 수처리효율을 향상시키는데 효과적일 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 물의 흐름을 유도하는 격벽으로는 판자와 같은 인공적인 구조물을 이용하는 방안도 있지만 시화호 인공습지와 같이 습지내의 퇴적토로 제방을 만들어 주는 친환경적인 방안도 있다. 퇴적토로 제방을 만들어 주는 방안은 동물의 섭터를 제공할 수 있으며 수질모니터링을 위한 조사통로로 활용할 수 있으므로 현 인공습지에 물 흐름개선에 가장 적합한 방안으로 사료된다.

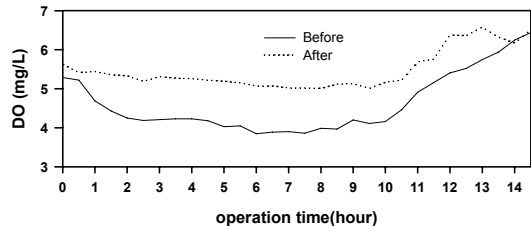
3.2 산소공급장치

산소공급장치를 가동하기 전 반월천고습지 중간부와 저습지 하류부의 DO 농도는 각각 3.9~6.4 mg/L와 1.3~3.3 mg/L의 범위로 낮은 값을 보였으며, 고습지 중류에 비해 저습지 하류부에서 낮게 나타났다(Fig. 4). 일반적으로 습지는 다른 수체에 비해 생산력이 크고 유기물양이 많아 수중의 DO 농도가 낮은 경향을 보인다(Reddy and DeBusk, 1987; Mitsch and Gosselink, 1993). 특히 습지내 1차생산자의 광합성활동에 의한 산소공급이 없는 시간대(일몰후~일출전)에는 DO 농도가 급격히 낮아질 수 있다. 한편 중류부에 비해 하류부의 낮은 DO 농도는 하류부의 유기물함량이

중류부에 비해 높음을 시사한다.

산소공급장치를 가동한 후 DO 농도변화를 보면 산기식폭기장치(ABDS)는 5.0~6.6 mg/L, 표면폭기시설(SAS)은 3.3~4.3 mg/L의 범위를 보였고, 가동 전의 DO 농도에 비해 각각 0.1~1.2 mg/L와 0.2~2.1 mg/L의 범위 만큼 증가하였다(Fig. 4). 가동전과 가동후의 DO 농도차는 두 장치 모두 새벽으로 갈수록 커지다가 해가 뜨기 직전인 오전 6시에서 8시경에 최고치를 보였으며 그 이후 다시 작아지는 것으로 나타났다(Fig. 4). 이는 유기물농도가 높은 습지내의 하루 중 DO 농도변화에 기인되는 것으로 산소공급장치를 새벽부터 해가 뜨기 전까지 운영하는 것이 효과적이라는 것을 시사한다. 특히 습지 하류부의 경우 DO 농도가 1.5 mg/L 이하로 낮아지는 경향을 보였는데, 이 시기에 산소공급장치 운영을 통해 수중생물을 보호하고 유기물분해에 필요한 산소공급이 필요할 것으로 판단된다.

(a) Air Bubble Diffuser System(ABDS)



(b) Surface Aeration System(SAS)

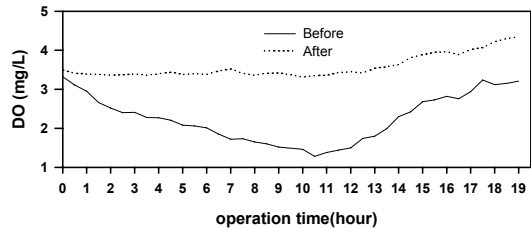


Fig. 4. Variation of dissolved oxygen concentration before and after operation of two air supply systems, (a) air bubble diffuser and (b) surface aeration system, in the Sihwa Constructed Wetland

3.3 물고기 제어

반월천고습지 하류부에서 포획한 물고기는 가물치, 잉어, 붕어, 메기 등 4종 총 600 개체이었다 (Table 3). 개체수는 가물치(310) > 잉어(232) > 붕어(51) > 메기(49)로 가물치와 잉어가 우점종으로 나타났다. 물고기의 평균 개체크기는 가물치(47cm) > 메기(46cm) > 잉어(35cm) > 붕어(25cm) 순으로 나타났다.

물고기를 제거한 후 익일부터 42일간 실험군의 탁도는 6.2~19.4 NTU의 범위로 대조군(10.0~43.9 NTU)에 비해 낮은 값을 보였으며, 탁도의 변동도 적었다(Fig. 5). 평균 탁도는 실험군에서 6.2 NTU로 대조군(10.6 NTU)에 비해 4.4 NTU 낮은 값을 보여, 물고기 포획에 의해 41.5%의 탁도 제거효율을 보였다. 인공습지에서 유출부의 부유물질 농도를 증가시키는 주요 원인으로서는 하류부 open water에서 증식한 식물플랑크톤의 유출 이외에 습지내에 서식하는 물고기(특히 잉어)에 의한 습지바닥의 교란을 들 수 있다(한국수자원공사, 2006). 미국 일리노이스주 Des Plaines Wetlands에서도 습지 유출부의 SS 증가하여 수처리효율을 저하시키는 현상이 나타났는데, 그 주요 원인은 습지바닥을 긁어 먹이를 섭식하는 잉어의 대량증식이었으며 겨울에 습지의 수위를 낮추어 20cm 이상의 잉어를 얼려 죽인 후 제거하여 문제를 해결하였다고 보고하였다(USEPA, 1993).

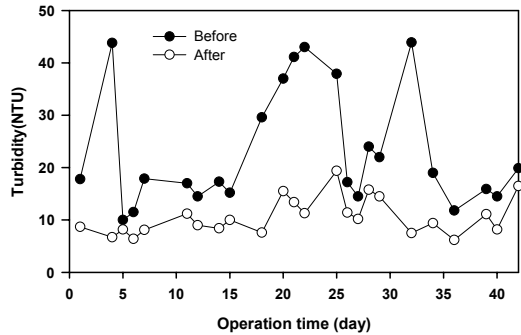


Fig. 5. Variation of turbidity with and without fish removal in the Sihwa Constructed Wetland

이는 수질개선용 인공습지에서 수처리효율을 유지시키기 위해서는 하류부 open water의 물고기에 대한 관리가 필요함을 시사한다.

4. 결 론

본 연구는 시화호 인공습지의 수질정화기능 향상을 위해 수립된 물 흐름 및 혐기성환경 개선방안과 탁도유발 물고기 제어방안 대한 효율평가 및 습지관리의 적용성을 제시하였다. 습지내 원활한 물 흐름은 처리수를 식생대로 유도하여 정화기능을 향상시키는 효과 이외에 용존산소 공급을 원활히 해주는 효과를 얻을 수 있기 때문에 수처리용 인공습지의 설계기준에 가장 기본적이며 중요한

Table 3. Species composition and characteristics of fishes removed from wetland

Species	Number(EA)	Length(cm)		Weight(kg)	
		Mean	Range	Mean	Range
Snakeheaded fish	310	47	37~70	1.1	0.6~2.5
Common carp	232	35	32~38	0.7	0.6~0.9
Curucian carp	51	25	20~30	0.3	0.2~0.4
Catfish	49	46	41~52	0.8	0.6~1.1

요인이다. 시화호 인공습지에서 하류부 일부구간에 설치한 유도시설의 BOD, SS, TN, TP의 제거효율은 12.8~37.4%으로 나타나 물 흐름 개선에 의해 수질정화기능이 향상됨을 알 수 있었다. 습지내 설치한 두 종류의 산소공급장치를 운영한 결과 산기식폭기장치(ABDS)는 15.5%, 표면폭기시설(SAS)은 37.2%의 DO 농도가 증가하였으며, DO 농도가 2 mg/L 이하인 구역에서 새벽시간에 운영하는 것이 효율적인 것으로 나타났다. 그리고 물고기가 대량증식한 습지에서는 습지의 하류부의 물고기제어가 유출부의 탁도저감에 제거에 효율적인 것으로 나타났다. 단, 물고기도 습지생태계를 이루는 구성요소이므로 탁도를 주로 유발시키는 20cm 이상의 개체에 한하여 선택적으로 제거하는 것이 필요하다. 또한 어류제어에 적절한 시기 선정을 위해 습지내 어류현황과 하류부의 탁도에 대한 지속적인 모니터링이 이루어져야 할 것으로 본다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

관계부처합동 (2004). 물관리 종합대책의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책. 국무조정실, 행정자치부, 농림부, 산업자원부, 환경부, 건설교통부, 산림부.

김도선 (1993). 인공습지를 이용한 군부대 오수 정화 효율성. 자연보존, 제105권, pp. 29~34.

농림부, 농업기반공사 (2004). 농업용수 수질개선을 위한 인공습지 설계관리 요령. 농업기반공사 농어촌연구원.

안윤주, 공동수 (1995). 생이가래를 이용한 영양물질의 제거방안. 대한환경공학회지, 제17권, 6호, pp. 193~203.

윤춘경, 권순국, 우선호, 권태영 (1999). 농촌지역 수질개선을 위한 인공습지실험시설의 3년간 실험결과 검토. 한국물환경학회지, 제15권, 4호, pp. 581~589.

이병현, 이남희 (1994). 부레옥잠을 이용한 돈사폐수의 처리. J. of Korea Society of Water and Waste Water Treatment Technology, 제2권, 2호, pp. 29~38.

전만식 (1994). 부레옥잠을 이용한 수중의 영양염 제거에 관한 연구. 강원대학교석사학위논문.

최돈혁, 최광순, 김동섭, 김세원, 최동호, 황인서, 이윤경, 강호 (2008). 시화호 인공습지에서 시공간적 수질분포 및 오염물질 제거효율 평가. 대한환경공학회지, 제30권, 10호, pp. 1013~1020.

한국수자원공사 (2007). 시화호 인공습지 수질조사 보고서, 한국수자원공사. pp. 53~64.

한국수자원공사 (2006). 시화호 인공습지 수질정화기능 향상연구 보고서, 한국수자원공사. pp. 157~223.

환경부 (1999). 수질공정시험법. 환경부.

APHA (2001). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th Ed. American Public Health Association, Washington, D.C.

Kadlec, R. H. and Knight R. L. (2001). Treatment wetlands, Lewis Publishers, New York.

Mitsch, W.J. and Gosselink, J. G. (1993). Wetlands. Van Nostrand Reinhold, New York.

Reddy, K. R. and DeBusk, T. A. (1987). State-of-the-art utilisation of aquatic plants in water pollution control. *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 19, No. 10, pp. 61~79.

Song, K. Y., Zoh, K.D. and Kang, H. (2006). Release of phosphate in a wetland by changes in hydrological regime. *Sci. Tot. Environ.*, Vol. 380, pp. 13~18.

USEPA (1993). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Wildlife Habitat : 17 Case Studies. U.S. EPA 932/R-93/005.
USEPA (2000). Design Manual; Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters, U.S. EPA 625/R-99/010,

Cincinnati, Ohio, pp. 12~20.

- 논문접수일 : 09년 10월 30일
- 심사의뢰일 : 09년 11월 03일
- 심사완료일 : 10년 05월 13일