

생태적 인공습지를 이용한 회야댐 수질개선에 관한 연구

이 상 현* / 조 윤 철**†

A Study on Water Quality Improvement of Hoeya Dam Reservoir Using Ecological Constructed Wetland

Sanghyeon Lee* / Yunchul Cho**†

요약 : 본 연구의 목적은 인공습지를 이용하여 회야댐으로 유입되는 비점오염물질을 제어함으로써 수질을 향상시키는데 있다. 인공습지에 부들과 갈대를 식생하여 부영양화 유발물질인 질소(N)와 인(P)의 제거효율을 조사하였다. 또한, 인공습지 운영에 있어 계절적 및 수리학적 영향을 조사하였다. 인공습지에 의한 총 N와 P의 제거율은 평균적으로 20.7%와 42.7%로 나타났으며 계절적으로는 식생식물의 성장기(6월~7월)와 개화기(9월~11월)에 높은 제거 효율을 보였다. 이러한 결과로부터 인공습지는 회야댐으로 유입되는 비점오염물질인 N와 P을 효과적으로 제어하기 위한 대안으로 판단된다.

핵심용어 : 인공습지, 부영양화, 수생식물, 질소, 영양염류, 인

Abstract : In this study the main purpose is to reduce non-point source pollution and improve water quality of Hoeya reservoir using constructed wetlands. As part of the efforts to improve water quality of the reservoir, cattail and reed-wetland cells were constructed in front of the reservoir to remove nitrogen(N) and phosphorus(P). Also, effects of hydraulic and seasonal variation on removal efficiencies of N and P were investigated. Total P and N removal efficiencies of the wetland system were approximately 20.7% and 42.7%, respectively. Removal efficiencies of N and P during the growth season (july to august) and blooming season of cattail and reed (september to october) were higher than other seasons. These results suggest that wetland system could be an effective alternative for control of non-point source pollutant such as N and P of reservoir.

keywords : *Constructed wetland, Eutrophication, Hydrophyte, Nitrogen, Nutrient Substance, Phosphorus*

1. 서 론

습지는 얇은 물을 담은 습한 땅으로 다양한 동식물들의 서식처로써 중요한 역할을 수행한다. 또한 수자원의 조절, 토양침식의 억제 및 인간의 여가활동을 위한 장소로써 역할을 함과 동시에 육지로부터 유입되는 각종 오염물질을 정화하는 기능도 가지고 있다(Adamus and Stockwell, 1983). 하지만 현재 전 세계적으로 농경지 확장,

제방건설, 갯벌매립 등과 같은 산업활동에 의해 습지가 지속적으로 감소하였으며 현재 약 50%이상이 소실된 실정이다. 최근 들어 습지는 생태학적인 가치와 인간에게 유용한 환경자원이라는 인식이 커짐에 따라 습지에 관한 국제 협약이 마련되었다. 이러한 이유로 1997년 우리나라도 습지의 보호와 지속가능한 이용에 관한 국제조약인 람사르 협약(Ramsar Convention)에 가입하였다.

습지는 형성된 위치와 상황에 따라 자연습지

† Corresponding author : ycho@dju.ac.kr

* 비회원 · 울산발전연구원 선임연구위원, E-mail : shlee@udi.re.kr

** 정회원 · 대전대학교 환경공학과 교수, E-mail : ycho@dju.ac.kr

(natural wetland)와 인공습지(constructed wetland)로 분류할 수 있다(Gerberg et al., 1986). 자연습지에는 강 주변이나 냇가 등에 생성되어 홍수조절과 지하수를 제공하는 내륙습지와 해안을 따라 발달하여 바닷물을 정화하고 태풍과 해일의 피해를 막아주며 다양한 생물의 서식지로 연안 어업활동의 근간이 되는 연안습지가 있다(환경부, 2010). 인공습지는 자연습지의 다양한 기능 중에서 수질정화 기능을 강화시킨 수처리 시스템으로 주로 생활하수, 축산폐수, 농업 및 광산 배수를 처리하는 목적으로 1960년대부터 미국과 유럽에서 운영되어 왔다(EPA, 2000). 인공습지는 과거에는 주로 1차 처리용으로 사용되어 왔으나 현재에 이르러 2차 처리, 3차 처리 개념으로 발전하고 있고 전 세계적으로 도시하수, 합류식 하수관거, 낙농폐수, 매립지 침출수, 상수원 비점오염원 시설 등 다양한 분야에서 적용되고 있다. 특히 상수원 비점오염물질 처리시설로서 중요한 역할을 하고 있다. 국내에서는 최근 중앙정부차원에서 4대강 비점오염원관리 종합대책의 일환으로 하천 주변의 비점오염원 저감시설로서 인공습지의 적용을 검토하고 있으며, 실제 시화호 인공습지와 주암댐 인공습지 등을 조성하여 운영 중이다(관계부처합동, 2004).

영양염류의 대표적인 물질인 질소(N)와 인(P)은 미생물 및 식물의 성장에 필수적인 영양물질 또는 생물축진제로 알려져 있다. 따라서 N와 P는 생물학적 처리의 가능성을 평가하는 지표로서 활용되고 있다. 하지만 호수 및 저수지에 다량의 N와 P가 유입될 경우, 부영양화를 가속시킬 수 있다. 예를 들어 N 농도가 높은 경우 수자원의 용존산소를 고갈시키고, 수중생물에 독성을 유발시킬 수 있기 때문에 적절한 처리가 필요하다(Metcalf and Eddy, 2003). 최근 들어 비점오염원으로부터 유입되는 영양염류 처리를 위해 국내에서도 인공습지를 이용한 친환경적 공법이 적용되고 있다. 전라남도 순천에 주암호 복내천 유역에 설치된 인공습지는 점·비점오염원의 수질정화 기능과 더불어 레크리에이션·학습공간을 제

공하는 생태공원으로 활용되고 있다(주암호환경연구소, 2006). 또한 경기도 시화호 유역에 3개 하천(반월천, 동화천 및 삼화천)이 합류하는 지점에 설치된 인공습지에는 갈대를 비롯한 수생식물을 식재하여 시화호내 수질관리를 하고 있다(수자원공사, 2007). 국외 사례로는 영국의 런던에 위치한 Gillespie Park에 설치된 인공습지의 경우, 다양한 수생생물이 자라는 연못, 습지 및 초지지역을 조성함으로써 예전에 석탄저장소로 이용되던 지역을 복원하는데 활용되었다. 한편 독일의 베를린에 위치한 Block 6 지역에서는 661 m² 면적에 갈대밭을 조성하여 정화조에서 1차 처리된 가정생활하수를 처리하고 있다.

기존에 수행된 인공습지를 이용한 수질관리에 관한 연구는 유체흐름의 속도를 지연시켜 습지를 통과할 때 유기 및 무기성 고형물의 침강할 수 있는 체류시간을 최적화 또는 수생식물의 종류에 따른 오염물질 저감 효율 평가가 주된 내용이었다(최동호 등, 2007; 서동철 등, 2009; Ouyangm et al., 2011). 이와 같이 오염물질을 정화시키는 연구와 유체 흐름 반응에 대해 연구는 지속되고 있지만, 인공습지의 계절적인 요인에 대한 생태관리 및 수리학적 해석이 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 회야댐 인공습지를 대상으로 하여 계절적 변화에 따른 정화효율을 평가하고자 하였다. 이러한 노력의 일환으로 회야댐 인공습지의 계절별 유입수와 유출수의 수질 분석을 하였다. 또한 부영양화의 원인물질인 N와 P의 처리효율, 식재된 식물의 성장률, 및 계절변화간에 상관관계를 이해하고자 하였다.

2. 연구방법

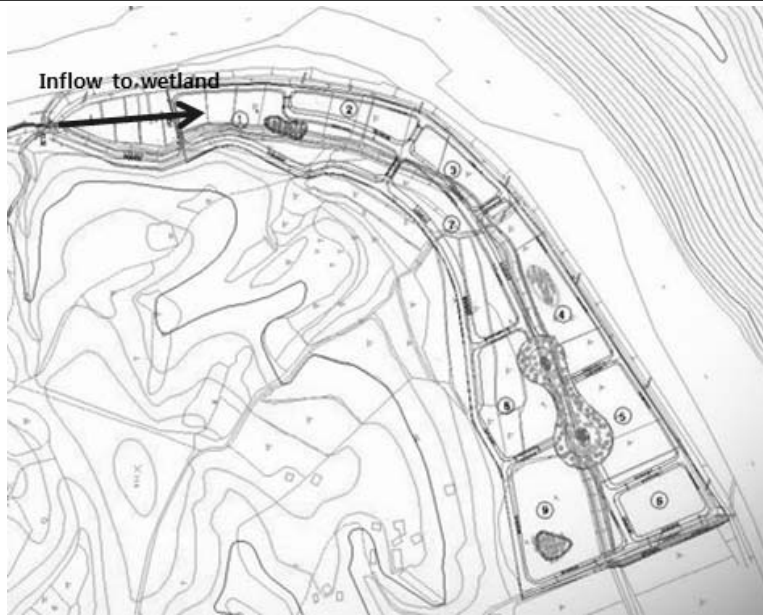
2.1 연구대상지역

회야댐 인공습지는 울산시 상수원인 회야댐 상류 비점오염원에 의한 영양물질 유입에 대한 회야댐의 부영양화를 방지하고, 댐 상류 유희지 활용과 동시에 수질개선을 목적으로 2002년부터 조성되어 2004년 완료된 자유수면형 인공습지이다.

회야댐에 두 개의 인공습지를 조성하였으며, 그중 하나인 노방들 인공습지가 본 연구의 대상지역이다. Fig. 1은 회야댐에 조성된 인공습지의 현황을 보여주고 있다. 인공습지의 총 면적은 49,300 m²이며 유입지 3,000 m²를 제외한 약 46,000 m²를 9개의 구역을 나누어 수생식물을 식생하였다. 인공습지의 식생된 수생식물로는 부들, 갈대, 그리고 연꽃이 었다. 저수지 내 유입량 중 유량의 70%(74,400 m³/d)를 기준으로 평균 체류시간을 5~6 시간으로 설계되었으며 평균수심은 0.3~0.38 m이다. Fig. 2는 회야댐 인공습지의 구체적인 제원과 현황을 보여주고 있다.



Fig.1 Aerial photo of constructed wetlands for water quality improvment of Hoeya Dam



계	유입지	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	
면적 (m ²)	49,300	3,000	7,669	2,369	2,315	6,739	5,536	3,255	5,529	5,212	7,676
수생식물	부들 갈대	부들 갈대	부들 갈대	부들 갈대	부들 갈대	부들 갈대	연꽃	연꽃	갈대 부들	갈대 부들	갈대 부들
인공섬, 도로	13,200m ² (인공섬 : 3,989m ² , 관리도로 : 9,211m ²)										
전체면적	62,500m ²										
설계기준	저수기 유량기준 70% (74,400m ³ /d 기준) 적용										
체류시간(hr)	5 ~ 6										
수심(m)	0.3 ~ 0.38										

Fig. 2 Characteristics of each wetland unit

2.2 조사분석 방법

2.2.1 수질분석

상류지점에서 유입되는 비점오염원의 특성을 알아보기 위해 인공습지 유입구인 1지에서 수질을 분석을 수행하였다(Fig. 2). 분석항목은 생물학적 산소요구량(Biochemical Oxygen Demand, BOD), 화학적 산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD), 영양염류인 질소(as total nitrogen, T-N)와 인(as total phosphorus, T-P)이었다. 또한 인공습지 처리효율을 조사하기 위해 인공습지의 최종지(9지)에서 유출수 수질분석을 시행하였으며(Fig. 2), 유입수 수질조사와 마찬가지로 동일한 분석항목들(BOD, COD, T-N, T-P)에 대해 분석을 수행하였다. 모든 항목의 분석은 수질오염공정시험법에 의거하여 수행하였다. 본 연구에서 제시된 분석자료는 2007년부터 2010년까지 월별 채취된 물시료를 대상으로 얻어진 결과이다. 하지만 인공습지의 보수공사 또는 풍수기와 갈수기의 유량상황 등을 고려하여 분석하기 때문에 해당기간에 누락된 월별 수질자료도 있다.

2.2.2 식생을 이용한 자료 분석

인공습지 시스템은 9개의 구간(9개의 sub-units)으로 나누어 다양한 수생식물을 재배함으로써 오염물질 제거에 대한 효율을 알아보았다. 식재된 수생식물은 부들, 갈대 및 연꽃을 이용하였으며 구간별 식생된 수생식물 조성은 Fig. 2에 표시하였다. 국립환경연구원에서 보고된 수생식물의 수질정화 특성인자(흡수능력, 영양염류 제거능

력, 운반성, 재활용성, 내한성)을 고려하여 식재 수생식물은 선정하였으며, 선정된 식물들은 Table 1에 정리하였다(환경부, 1998). 최초 유입지역에는 부들과 갈대를 집중적으로 재배하여 수질 정화 효율을 높이도록 하였으며 유출지 부분에는 연꽃을 재배하였다. 2007년부터 2010년까지의 유입수와 유출수의 농도를 매월 측정하여 평균을 구했다. 또한, 계절적 영향에 따른 처리효율을 알아보기 위해 월별 처리효율과 식생식물과의 연관을 검토하였다.

2.2.3 인공습지의 수리학적 특성

습지내 유체흐름에 의해 발생하는 수체의 순환, 그리고 사수역(dead space)에서의 유체흐름 저해 등으로 인해 입자성 물질의 불균일한 퇴적이 일어나며 경사도가 바뀌어 일부지역의 수심이 낮아지고 유기성 오염물질의 퇴적으로 인해 혐기성화가 빠르게 진행될 수 있다. 그러므로 습지의 유체의 흐름에 대한 특성은 오염 제거효율의 중요한 요소이다. 일반적으로 습지내 유체흐름 특성을 파악하기 위해서는 염료를 이용한 체류시간 조사를 시행하고 있다. 하지만 대상지역이 상수원일 경우 염료에 의한 2차적인 오염이 유발될 수 있으므로 각별한 주의가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 상수원 지역인 회야댐 상류에서의 염료테스트 대신 입자성 물질(suspended solid, SS)의 공간분포를 통해 간접적인 유체흐름 특성을 평가하였다. 습지내 ③번과 ⑦번 구간을 제외한 구간에서 왼쪽(left, L), 중앙(center, C), 오른쪽(right, R)으로부터 각 3회 시료를 채취하여 SS 농도를 측정하였다.

Table1. Purification capacity of major hydrophyte (○: good, △: fair, and ×: bad)

수종	개선효과가 검증된 정화가능물질	흡수능력	영양염류 제거능력	수집능력	운반성	재활용성	내한성	내공해성
갈대	N, P, K, Ca, Mg	○	○	△	△	△	○	○
애기부들	N, P, K, Ca, Mg	○	○	△	○	○	○	○
연꽃	-	△	△	×	△	△	×	○

3. 결과 및 고찰

3.1 수질 분석을 통한 습지내 처리효율

Table 2는 인공습지로 유입수의 항목별 분석 결과 및 수질항목별 평균 처리효율을 연도별로 보여주고 있다. 각 측정값은 매월 1회 3개의 시료를 채취분석한 평균값을 나타낸다. 분석결과에서 알 수 있듯이 연평균 유입농도는 일정하지 못하였으며, 이러한 이유는 비점오염원으로부터의 오염물질 부하가 불균일하였기 때문으로 판단된다. 한편, BOD와 COD의 처리 효율을 비교해 볼 때 상대적으로 BOD의 처리효율이 높음을 알 수 있었다. 따라서 인공습지내에서 난분해성 오염물질이 효과적으로 처리되지 않고 있다고 판단된다. 하지만 조사기간(2007년에서 2010년)동안 유입수내 평균 BOD/COD 비율은 0.41(범위 0.33~0.45)이었으므로 화학적 처리공정(침전법, 산화법)보다는 인공습지를 이용한 생물학적 처리법을 적용 가능하다고 판단된다. 일반적으로 BOD/COD 농도 비율은 화학적으로 분해 가능한 유기물과 생물학적으로 분해 가능한 유기물의 비율로 평가 할 수 있는데(조흥연와 조범준, 2006), BOD/COD비율이 0.3보다 크면 상대적으로 생물학적 처리공정이 유리하다고 보고되고 있다(Chun and Yizhong, 1999). 4년 동안 BOD 제거효율은 평균 32.1%이고, 최저 6.3%에서 최고 84.1%까지 변동하고 있

으며 COD의 경우는 평균 12.1%이고, 최저 2.6%에서 최고 30.8%까지 제거효율을 보이고 있다. 유기물 분해는 COD 성분보다는 BOD 성분의 제거효율이 상대적으로 높게 나타나고 있다. 회야댐 인공습지와 시화호 인공습지의 수질 및 수처리 효율을 Table 2에 정리하였다. 단순 비교할 경우, 제거효율측면에서 시화호 인공습지는 BOD는 28.2%~54.8%이고, 회야댐 인공습지는 9.2%~66.9%로 분석되었다. 유기물 제거효율 측면에서 보면, 시화호 인공습지나 회야댐 인공습지는 비슷한 수치를 보이고 있다.

한편 T-N의 경우는 T-P에 비해 상대적으로 낮은 제거효율을 보였는데, 4년 평균 제거효율이 20.7%이고, 최저 1.1%에서 최고 46.0%이며 T-P의 경우는 4년 평균 42.7%이고, 최저 5.6%에서 최고 88.5%로 나타났다. 일반적으로 N:P=16:1일 때 식물플랑크톤이 최적으로 성장할 수 있다(Hecky and Kilham, 1988). 이 비율이 넘으면 P가 제한인자이고, 이보다 작으면 N을 제한인자로 볼 수 있다. 일반적으로 담수에서 P이 제한인자(limiting factor)가 되는데 이는 질소화합물은 대체로 암모늄이온, 질산이온 등과 같은 이온상태로 존재하므로 지하수 및 지표수를 통한 유입이 비교적 자유롭기 때문이다. 따라서 회야댐 인공습지의 경우, N:P의 평균비율이 68:1로 P에 비해 N이 월등하게 높기 때문에, P를 제어함으로써 부

Table 2. Comparison between BOD, TN, and TP removal efficiency of constructed wetland system for water quality improvement of Hoeya dam and Shihwa reservoir

습지	년도	오염물질(mg/L)						제거효율(%)		
		BOD		TN		TP		BOD	TN	TP
		유입	유출	유입	유출	유입	유출			
시화호 습지	2002	9.3	4.2	28.0	21.5	0.728	0.365	54.8	23.2	49.8
	2003	7.0	4.1	28.0	19.5	0.662	0.549	41.4	30.3	17.0
	2004	7.8	5.6	22.6	15.9	0.549	0.610	28.2	29.6	-11.1
회야댐 습지	2007	2.2	1.4	2.000	1.62	0.049	0.027	35.6	20.1	42.9
	2008	3.1	0.9	2.068	1.550	0.065	0.018	66.9	23.6	69.7
	2009	2.0	1.9	2.594	2.130	0.105	0.073	9.2	22.7	31.1
	2010	2.2	1.6	1.840	1.618	0.058	0.042	35.1	16.3	26.9

영양화를 효과적으로 억제 할 수 있을 것으로 판단된다. 한편 유럽과 미국의 인공습지 처리효율을 검토한 결과, 통상적으로 BOD 76%, T-N 52% 그리고 T-P 51%수준으로 보고되었다(Song et al. 2007; 강호정과 송근예, 2004). 또한 일본 가스미가우라호 Bio-park 인공습지 경우, 연평균 BOD 제거율은 28%, T-N 제거율은 15%, T-P 제거율은 21%로 보고되었다(Nakamura et al., 2002; 농림부와 농업기반공사, 2004). 따라서 회야댐 인공습지가 수처리 효율측면에서 국외 인공습지와 비교하여 비슷한 처리효율을 보여주었다.

3.2 수생식물의 계절적 영향

유입수의 농도는 계절별로 건기와 우기를 거치면서 불규칙적인 수량변동과 연동되어 있어 최종 유출수내 N과 P의 농도관리가 어려웠다. 울산시의 2007년에서 2010년까지 월별 평균 강우량을 산출하였고, 월별 유입수내의 평균 T-N과 T-P의 농도를 Fig. 3에 나타내었다(기상청, 2010). T-N의 경우, 겨울철(1월~2월)의 T-N 농도가 다른

계절에 비해 평균 2배 이상 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 상대적으로 겨울철에 T-N의 축적비율이 높기 때문으로 사료된다. 한편, T-P의 경우도 T-N의 경우와 비슷한 경향을 보였다.

Fig. 4에 회야댐 인공습지의 2007년~2010년까지 월별 평균 유입수와 유출수내 N과 P의 농도 및 처리효율을 나타내었다. 시료채취는 월별로 3회 수행하여 평균 농도값을 나타내었다. Fig. 4에서 보여지는 것과 같이 T-N은 6월과 11월에 최대 제거효율을 보였으며 겨울 기간(12월~2월)은 낮은 효율을 보였다. T-P의 경우, 7월을 기점으로 10월까지 가장 좋은 처리 효율을 보였다. 이는 수생식물의 성장시기와 연관성이 있을 것으로 사료된다. 즉, 식생된 수생식물의 성장률이 최대일 때 최대 수질정화 효율을 보였다. 한편, 겨울철에는 여름철에 비해 상대적으로 영양염류의 T-N과 T-P의 양이 많이 검출되었다. 이러한 영양염류의 농도가 상대적으로 높았던 주요 요인은 겨울철에 상대적으로 적은 강우량(유입량)에 기인하는 것으로 판단된다.

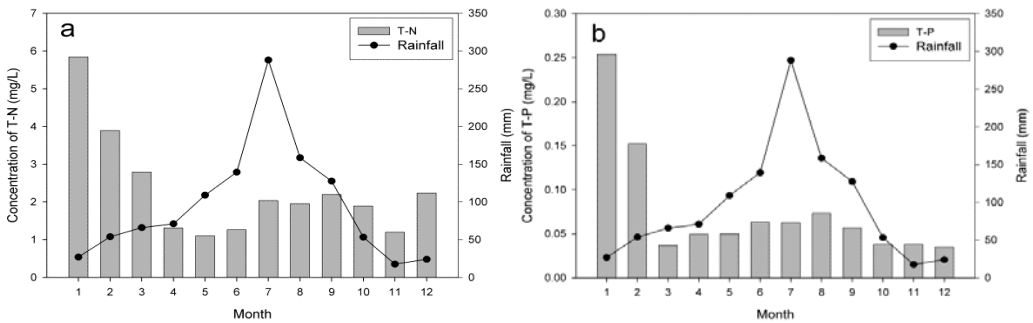


Fig. 3 Average monthly rainfall during 2007 – 2010 and its corresponding inflow T-N concentration (a) and T-P concentration (b)

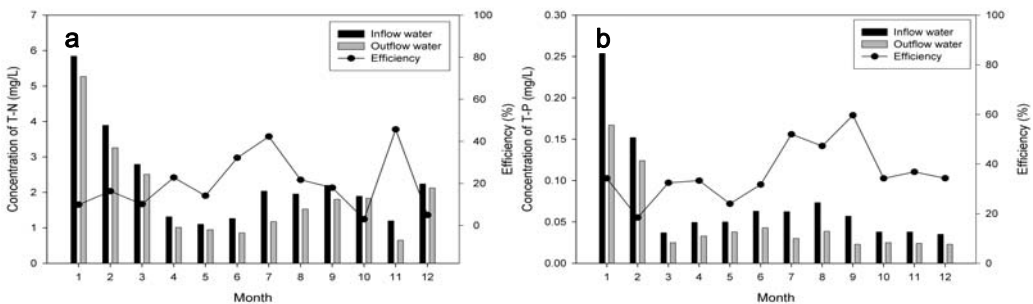


Fig. 4 Seasonal effects on removal efficiency of T-N (a) and T-P (b)

3.3 인공습지 정화 환경

Fig. 5는 회야댐 인공습지내의 입자성 물질인 SS의 농도분포를 보여주고 있다. 그림에서 나타나듯이 회야댐 인공습지내의 SS 농도분포는 중앙 지점(C)에서 높게 나타났다. SS 농도분포 자료를 통해 유체흐름 특성을 평가해 볼 때, 회야댐 인공습지는 물흐름 분포가 중앙으로 집중되는 것을 알 수 있다. 따라서 향후 인공습지 운영시 불균일한 퇴적으로 인해 경사도가 바뀌어 일부지역의 수심이 낮아지는 등 오염물질 제거에 부정적 영향을 초래할 것으로 판단된다(최동호 등, 2007).

현재 회야댐 인공습지내의 퇴적물을 조사한 결과를 근거로 보면, Table 3에 나타나듯이 유기물 함량이 높기 때문에 이로 인한 혐기화가 진행되어 수질 악화의 우려가 있다. 최돈혁 등(2009)는 습지 내 환경변화에 따라 표층퇴적토의 산화환원상태가 결정되고, 결국 P의 제거효율에 영향을 미칠 수 있다고 보고하였다. 즉, 퇴적층에 축적된 유기물질로부터 혐기성 조건에서 용출된 영양염류가 상층으로 이동하여 수질을 악화시키는 현상이 일

어난다(Charpra, 1997; 나은혜 등, 2002). 따라서 주기적으로 유기물 함량과 SS를 측정하여 내부오염으로 인한 2차 오염을 대비해야 할 것이다. 일반적으로 습지내부의 퇴적물 깊이가 15cm 이상일 때는 준설을 시행하는 것이 바람직하다고 보고되고 있다(환경부, 2010). 또한 부영양화는 수심이 얕은 호소에서 쉽게 이뤄진다. 내부 오염부하인 퇴적층에서 영양염류인 P가 용출되면 수심이 얕고 내부 오염부하가 큰 호소에서는 외부오염원을 차단할지라도 호소 내의 수질은 크게 개선되지 않을 수 있기 때문에 운영시 새심한 주의가 필요하다(이홍수, 등, 2008). 따라서 습지내부의 퇴적된 오염물질을 주기적으로 준설하여 습지토양시스템이 정상적으로 기능할 수 있게 관리할 필요가 있을 것으로 판단된다. 향후 인공습지의 적정 운영을 위해서는 퇴적물 모니터링 시스템을 구축할 필요가 있을 것으로 판단된다. 이러한 퇴적물 모니터링 시스템 구축할 때 인공습지내 유속 및 퇴적특성 등을 고려하여 모니터링 지점을 선정하여야 할 것이다.

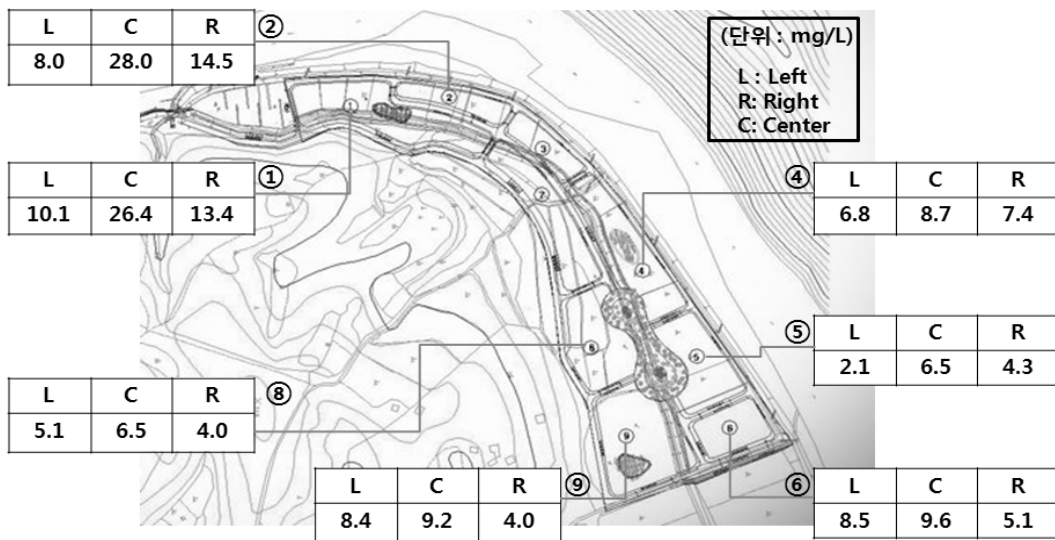


Fig. 5 Distribution of suspended solids in the each wetland unit

Table 3 Characteristics of bottom sediments in the wetland units

구분	강열감량	휘발성고형물	구분	강열감량	휘발성고형물
1지	56.8 %	12.9 %	6지	45.4 %	3.9 %
2지	55.6 %	10.8 %	7지	51.1 %	5.4 %
3지	52.6 %	9.3 %	8지	48.6 %	6.8 %
4지	49.0 %	8.5 %	9지	50.3 %	5.2 %
5지	53.9 %	4.3 %			

4. 결 론

본 연구는 상수원 수질보호와 비점오염물질 제어를 위해 조성된 회야댐 인공습지를 대상으로 수질자료 등을 통해 문제점을 도출하고 향후 수처리 운영부분의 바람직한 개선방안을 제시함으로써 상수원 수질개선과 수자원 확보의 기초자료로 활용하고자 하였다. 또한 도시하천이나 기타 상수원의 비점오염원 관리에 있어 인공습지 운영에 중요한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

- 1) 상수원 수질보호와 비점오염물질 효과적인 처리를 위해 설계된 회야댐 인공습지의 정화 효율을 알아보기 위해 수질 분석을 실행하였다. 2007년~2010년까지의 유입수와 유출수의 BOD와 COD의 제거 효율을 비교한 결과, 각각 32.1%, 12.1%이다. 이는 생분해가 용이한 오염물질 처리에 인공습지시스템이 보다 효과적임을 알 수 있다.
- 2) T-N의 경우 4년 평균 제거효율은 20.7%이고, T-P의 경우는 4년 평균 42.7%로 나타났다.
- 3) 수생식물인 갈대와 부들에 의한 제거효율을 검토해 본 결과, 갈대는 왕성한 성장시기인 여름(6월~8월)과 개화 및 결실기인 가을(9월~10월)에 N와 P과 같은 부영양화 유발물질을 최대 흡수함으로써 최대 처리효율이 보였다. 하지만 겨울철에는 적은 강우량

으로 인해 상대적으로 영양염류의 농도가 높았다. 따라서 갈수기때 수질 악화가 예상되므로 이에 대한 관리가 필요할 것으로 판단된다.

- 4) 입자성 물질(SS)의 공간분포를 통해 간접적인 유체흐름 특성을 평가하였다. 그 결과, 회야댐 인공습지내의 SS 농도분포의 특성은 유체흐름이 균등하지 못하고, 중앙으로 집중되는 것을 알 수 있었다. 따라서 퇴적물 측정망 구축을 통한, 지속적인 모니터링을 통해 퇴적물 관리가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011학년도 대전대학교 신진교수연구장려금에 의해 지원되었음

참 고 문 헌

1. 강호정, 송근예, 2004. 인공습지를 이용한 수처리 효율 및 향후 연구제언, 한국습지학회지, 6(2), pp. 57-63.
2. 기상청, 2010. 지상관리관측자료(2007년-2010년); <http://www.kma.go.kr>
3. 관계부처합동, 2004. 물관리 종합대책의 추진 강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책, 국무조정실, 행정자치부, 농림부, 산업자원부, 환경부, 건설교통부, 산림부.

4. 나은혜, 안규홍, 박석순, 2002. 팔당호의 계절별 전도 현상과 연직 수온 분포에 관한 모델 연구. *대한환경공학회지*, 24(5), pp. 901-910.
5. 농림부, 농업기반공사, 2004. 농업용수 수질개선을 위한 인공습지 설계관리 요령.
6. 서동철, 임석천, 조인성, 이병주, 이홍재, 김사돈, 이준배, 조주식, 허중수, 2009. 단일통풍형과 이중 통풍형 인공습지시스템의 하수처리 효율 비교, *한국환경농학회지*, 28(3), pp. 258-265.
7. 수자원공사, 2007. 시화호 인공습지 수질조사 보고서.
8. 이홍수, 정세웅, 최정규, 신상일, 2008. 소규모 생태연못(원흥이 방죽)의 부영양화 평가, *한국물환경학회지*, 24(6), pp. 741-749.
9. 조홍연, 조범준, 2006. 시화호 및 인천연안의 COD 오염부하량 추정기법, *해안해양공학회지* 18(3), pp. 262-267.
10. 주암호환경연구소, 2006. 주암호유역 비점오염물질 저감시설 수질개선 효과분석(2차년도).
11. 최돈혁, 최광순, 김동섭, 김세원, 황인서, 이미경, 강호, 김은수, 2009. 시화호 인공습지에서 표층퇴적토의 오염물질 함량 분포와 제거효율 평가, *대한환경공학회*, 31(9), pp. 755-764.
12. 최동호, 최광순, 김세원, 오영택, 김동섭, 조성주, 2007. 시화호 인공습지의 물흐름 분포 및 입자성물질 퇴적특성, *대한환경공학회지*, 29(4), pp. 425-437.
13. 환경부, 1998. 팔당호 수질관리 특별대책수립 계획
14. 환경부, 2010. 습지보전법
15. Adamus, P.R., Stockwell, L.T., 1983. A method for wetland functional assessment; Volume I: Critical review and evaluation concepts. Report No. FHWA-IP-82-23, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC.
16. Chapra, S.C., 1997. *Surface water-Quality Modeling*, McGraw-Hill, New York, NY.
17. Chun, H., Yizhong, W., 1999. Decolorization and Biodegradability of Photocatalytic Treated Azo dyes and Wool Textile Wastewater, *Chemosphere*, 39(12), pp. 2107-2115.
18. EPA, 2000. Design Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewater, EPA 625/R-99/010, Cincinnati, Ohio, pp. 12-20.
19. Gerberg, R M, Elkins, B.V., S.R Lyon, S.R., Goldman, C.R., 1986. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetland. *Water Research* 20(3), pp. 363-368.
20. Hecky, R.E. Kilham, P., 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment, *American Society of Limnology and Oceanography*, 33(42), pp. 796-822.
21. Metcalf & Eddy(revised by Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D.) 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, McGraw-Hill, New York, NY.
22. Nakamura, K., Chiba, T., Sato, K., 2002. A survey of construction wetlands in Japan”, in *Proceeding of the 8th international conference on wetland system for water pollution control*, pp. 1128-1132.
23. Ouyangm, Y., Luo, S.M. Cui, L.H. 2011. Estimation of nitrogen dynamics in a vertical-flow constructed wetland, *Ecological Engineering*, 37(3), pp. 453-459.
24. Song, K.Y., Zoh, K.D., Kang, H., 2007. Release of phosphate in a wetland by change in hydrological regime, *Science of the Total Environment*, 380, pp. 13-18.

- 논문접수일 : 2011년 08월 19일
- 심사의뢰일 : 2011년 08월 22일
- 심사완료일 : 2011년 11월 11일