

농업용 저수지 수질개선을 위한 지하흐름 갈대 인공습지의 적용

Application of Subsurface Flow Wetland using the *Phragmites australis* for Water Quality Improvement of the Agricultural Reservoir

남 귀 숙* / 배 요 섭** / 김 형 중*** / 이 상 준**** / 이 광 식*****
Gui Sook Nam / Yo Sop Pae / Hyung Joong Kim / Sang Joon Lee / Gwang Sik Lee

:: Abstract ::

Constructed wetlands are regarded as an important water treatment system for agricultural water quality improvement and management. The purpose of this study is to evaluate the application of subsurface flow wetland(SFW), using the *Phragmites australis* as macrophytes, and to clarify the basic and essential factors to be considered in the construction and management of constructed wetlands. This study was carried out relatively short hydraulic residence time(HRT), 6hr ~ 72hr (3days), using eutrophic reservoir water with relatively low concentrations of influent and large quantity to be treated. The effluent satisfied the criteria of agricultural water quality. Removal efficiencies of Biochemical oxygen demand(BOD), Chemical oxygen demand(COD), Suspended solids(SS) and Chlorophyll a(Chl-a) were high in HRT 24hr, not any more significant increasement of removal efficiencies in HRT 48hr and 72hr. However, removal efficiencies of nitrogen and phosphorus increased as HRT increased, showing the highest efficiency at the 72hr of HRT in nitrogen, and 48hr in phosphorous. The SFW was very effective system for reservoir water quality improvement, and had the advantages of the reduction of purchasing cost to land required, lack of odors, and harmful insects, especially mosquito, the improvement of the scenic beauty and minimal risk of public exposure. Therefore, it was evaluated that the SFW was very available water treatment system for the water quality improvement of agricultural reservoir. However, it was need to consider with application of the SFW in high cost of construction and troublesome of management.

* 정회원·농업기반공사 농어촌연구원 주임연구원-e-mail: leo612@karico.co.kr

** 농업기반공사 농어촌연구원 연구원-e-mail: paeyo@karico.co.kr

*** 농업기반공사 농어촌연구원 연구원-e-mail: iamwater@karico.co.kr

**** 부산대학교 자연과학대학 미생물학과 교수-e-mail: sangjoon@pnu.ac.kr

***** 정회원·농업기반공사 농어촌연구원 수석연구원-e-mail: imull@karico.co.kr

:: 요 지 ::

농업용수 수질기준을 초과하는 부영양화된 농업용저수지의 수질개선을 위해 갈대를 이용한 지하흐름 인공습지를 적용하였다. 처리수량이 많고 처리대상 농도가 비교적 낮은 저수지 오염특성상 인공습지의 운영은 수리학적 부하율이 높은 체류시간 6시간 ~ 72시간으로 운영하였다. 체류시간에 따른 수질 항목별 유출농도는 농업용수 수질기준보다 낮게 감소되었으며, 정화효율은 BOD와 COD, SS와 Chl-a는 체류시간 24시간 조건에서 높은 정화효율을 보여 주었으며, 그 이상의 체류시간 연장에서는 정화효율의 뚜렷한 증가를 보이지 않았다. 반면, 질소와 인은 체류시간이 증가할수록 정화효과가 현저히 증가하여 질소는 체류시간 72시간에서, 인은 48시간에서 최고의 정화효율을 나타내었으며, 질소의 정화효과가 특히 우수하게 나타났다. 따라서 저농도의 농업용수 수질개선을 위한 지하흐름습지는 질소 등 오염물질의 정화효과가 우수하고, 용지매수비용의 절감, 모기 등 병충해방지, 친수공간의 안전성 등 이점이 많으므로 넓은 면적의 인공습지 적용시 일부구간에 지하흐름습지의 적용을 검토해 볼 수 있다. 그러나 설치비용상승 및 유지관리 문제 등 여러 가지 측면의 고려가 필요할 것이다.

핵심용어: 농업용수 수질개선, 인공습지, 수질정화, 수리학적체류시간, 정화효율, 탈질작용

1. 서 론

농촌지역 생활하수 및 농공단지 공장폐수, 축산폐수, 각종 위탁시설의 폐수 발생량의 증가에도 불구하고 농촌취락의 하수처리, 축산폐수처리 및 분뇨처리 등 환경기초시설의 미비 등은 농촌의 수질환경을 오염시키고 있다. 특히, 우리나라의 농업용저수지들은 중산간지역에 위치하여 강우시 비점오염물질 유출에 취약하며, 또한 저수지 대부분이 축조된 지 50년 이상의 노후화상태로 부영양화 발생가능성이 아주 높다(윤경섭, 2002; 농업기반공사, 2003). 자연정화기능을 활용한 수질개선기법은 농촌의 자연환경이 가지는 자정능력과 넓은 부지 가용성 등을 최대한 활용할 수 있는 방법(윤경섭, 2002, Moshiri, 1993)으로 그중 인공습지는 최근들어 국내 많은 연구와 적용사례를 가지고 있다. 최근까지는 축산폐수, 생활하수, 산업폐수, 2차 방류수 처리 등을 고농도 오염물질의 인공습지 처리에 대한

연구 및 시도가 주로 이루어져 왔으며(양홍모, 2002a; 양 등, 2003; 강 등, 2004; EPA, 1993, Moshiri, 1993) 오염농도가 비교적 낮은 호소수나 하천수 등 비점오염물질을 대상으로 인공습지 처리는 비교적 적었다(농업기반공사, 2003).

특히, 우리나라의 경우에는 인공습지에 관한 많은 시도가 이루어지지 않았지만, 그 초기의 시도는 대부분이 군부대오수처리, 축산폐수, 생활하수 처리에 국한되어져 왔으며, 최근들어 하천수 정화 또는 대청호, 주암호 등 대형댐호, 감둔저수지, 마산저수지 등 농업용저수지의 적용이 이루어지고 있는 초보적 단계이다(강 등, 2004, 농업기반공사, 2003). 인공습지는 크게 습지토양에 식물을 심고 그 토양 표면위로 물을 일정수심 유지하며 흘러가게 하는 지표흐름습지(Free water Surface : FWS), 투수성이 큰 여재층에 식물을 식재하고 그 지하부로 물이 흘러가게 하는 지하흐름습지(Subsurface Flow :

SF), 2가지 방식을 병용한 수직유수습지 (Vertical Flow Wetland : VF)) 등 3가지로 구분되며, 오염농도가 상대적으로 낮은 하천수, 2차 처리장 방류수, 강우 유출수 등을 정화하기 위해서는 일반적으로 자유수면 인공습지를 많이 활용하고 있으며, 이 경우 BOD 제거보다는 질소와 인의 제거가 습지조성의 주목적으로, 질소 부하량이 중요한 설계인자가 된다(양 등, 2003; Moshiri, 1993). 지하흐름인공습지는 오염물질 농도가 높은 축산 및 생활하수의 처리에 이용되어지고 있으며, 악취 및 해충 발생문제가 낮은 마을하수 처리시설에도 일부 적용이 시도되고 있다[Moshiri, 1993; EPA, 1993]. 또한, 지하흐름인공습지는 습지위로 사람의 접근이 용이해 식물을 적절히 배치하여 휴식공간으로도 활용할 수 있다.

본연구에는 비교적 오염농도가 낮은 부영양화된 농업용저수지의 수질개선을 목적으로 인공습지를 적용할 때 대규모 인공습지 적용시 단계의 지표흐름습지 공종중에 단위공종으로 지하흐름습지를 도입하여 유기물 및 영양물질의 정화효과 기능을 분석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 인공습지 구조

본 연구의 인공습지는 부영양화된 중규모 농업용저수지인 충남 아산의 마산저수지의 물을 끌어들여 오염물질을 저감시킨 뒤 저수지로 다시 유출시키는 구조로서 Fig. 1에 나타내었다. 인공습지의 구성 및 물의 흐름도는 저수지 침출수 → 접근수로 → 양수장 → 송수관 → 침전조 → 인공습지 → 유출관로 → 저수지 침출부의 순으로 진행되며, 인공습지의 형태는 Fig. 2, Fig. 3과 같다.

습지여재의 충전은 바닥에서부터 40mm 자갈 (공극율 40%) 45cm, 식물식재용 모래 15cm로 하여 총 60cm의 두께로 포설하였으며, 습지 유출수는 바닥으로부터 10cm높이에 50cm간격으로 뚫린 직경 5cm의 구형의 유출구로 유출되는 구조로 되어있다. 식물은 갈대를 적용하여 5월에 식재하였으며, 초기 식재밀도는 9 본/m² 이었다. 갈대는 우리나라 수변환경에 적응능이 우수하고, 유기물질 및 질소등 영양염류 제거능도 다른 정수식물에 비해 효과적이라고 알려져 수질정화

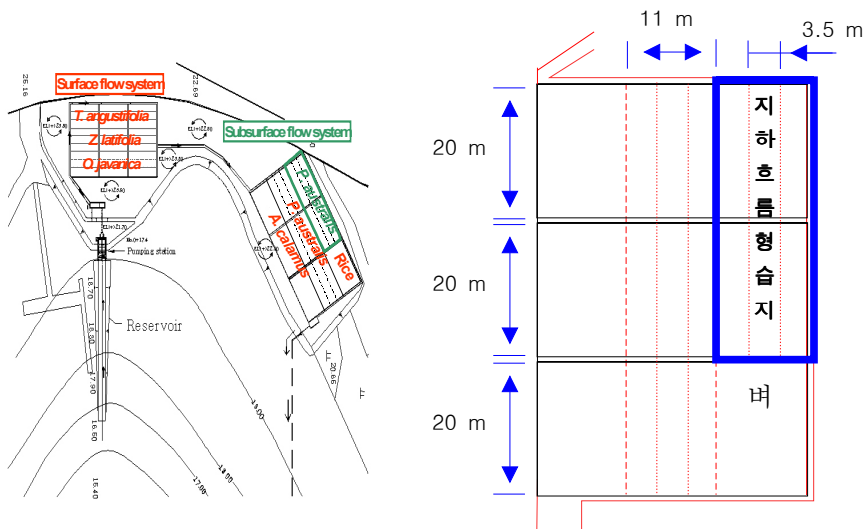


Fig 1. Layout of SFW

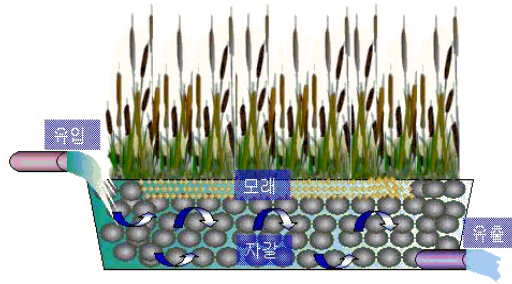


Fig 2. Description of SFW



Fig 3. Photographs of SFW

식물로 가장 많이 선호하고 있으며(양, 2003), 또한 내염분성(0.06~0.03%)이 있고, 강산성 및 유기오염에 강하고 풍파에 강한 특성을 가지고 있다(中村圭吾 등, 2002).

2.2 운영조건

수리학적 체류시간을 달리한 인공습지의 운영 조건들을 Table 1에 나타내었다.

인공습지에 식재한 수생식물은 갈대이며, 체류시간은 6시간~72시간, 수면적부하는 0.064~0.759 m³/m²의 조건으로 EPA(2000)에서

제시한 0.07~0.3 m³/m²/d의 범위와 비교하면 6시간과 72시간을 제외한 나머지 조건들이 지하 흐름습지의 전형적 수리부하조건을 만족하였다.

2.3 정화효율분석

인공습지의 정화효율을 분석하기 위한 수질 시료채취는 유입수 1지점과 체류시간별 각 습지의 유출부 1지점에서 실시하였으며, '03년 5월~' 03년 12월, '04년 4월~' 04년 9월에 걸쳐 월 1회 조사, 분석하였으며, 농업용수의 특성상 그 기능을 상실하는 동절기는 제외하였다.

Table 1. Operation conditions of SFW

Macrophyte	Flow Distance (m)	Year	HRT (hr)	Flow rate (m ³ /d)	Hydraulic loading (m ³ /m ² /d)
<i>P. australis</i>	40	2003	6	112	0.759
			12	56	0.379
			24	28	0.190
		2004	24	28	0.190
			48	14	0.095
			72	9	0.064

시료의 채취는 인공습지의 각 지점에서 용기를 이용하여 채취하였으며, 채취한 시료는 전처리하여 냉암소에 보존한 상태로 분석실로 운반하여 실내분석 하였다. 인공습지의 유량과 체류시간을 현장에서 계산하였으며, 휴대용 수질측정장치를 사용하여 수온, pH, 전기전도도, 용존산소량 등을 바로 측정하였다. 분석항목은 BOD₅, COD_{Mn}, SS, Chl-*a*, TN, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, TP, PO₄-P 등이며 수질오염공정시험법(2000) 및 APHA(1995)에 준하여 실시하였다.

인공습지의 정화효율은 유입수 농도와 유출수 농도의 차를 이용하여 백분율(%)로 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유입수와 유출수 농도

본 연구의 인공습지에 적용된 주요 수질항목의 유입수 농도는 Table 2에 나타내었다. 2003년은 체류시간 6시간~24시간 조건에서 운영한 결과이며, 2004년은 24시간~72시간 조건으로 운영한 결과로서 2004년의 유입수의 농도가 2003년보다 다소 감소하여 시기별로 유입수 농도의 조건이 동일하지 못했다. 그러나

공통적인 운영조건인 체류시간 24시간의 운영 결과는 유입수 농도 변화보다 체류시간에 따른 인공습지의 수질정화기능이 더욱 주요하게 작용함을 보여준다.

인공습지의 평균 유입수 농도는 BOD 4.7 mg/L, COD 8.4 mg/L, SS 4.0 mg/L, TN 1.321 mg/L, TP 0.130 mg/L로서 COD, TN, TP 항목에서 호소환경기준 IV등급인 농업용수 기준을 초과하고 있으나, 인공습지의 처리수로는 상당히 낮은 수준이다(EPA, 2000).

갈대 지하흐름 인공습지의 각 체류시간별 DO, BOD, COD, SS, Chl-*a*, TN, TP의 평균 유입 및 유출농도를 Table 3에 나타내었다.

지하흐름습지의 용존산소량(DO)의 변화를 보면, 유입수 평균 농도 7.6 mg/L, 7.0 mg/L가 6시간~72시간으로 체류시간이 길어짐에 따라 물질분해에 필요한 산소소모량의 증가 때문에 DO의 농도가 감소하였으나, 최저농도가 4.4 mg/L로 산화적 물질분해를 제한 받는 혐기적 환경은 형성하지 않은 것으로 판단되었다. BOD는 유입수 농도 자체가 상당히 낮은 평균 4.7 mg/L, 3.3 mg/L의 농도를 보였으며, 6시간~24시간 조건까지는 체류시간의 증가에 따라 유출 농도가 감소하였으나 24시간이상의 조건에서는 유출농도

Table 2. Concentrations of Influent (mean ± Standard Deviation (SD), n=7)

Parameter		Year of 2003	Year of 2004	Average
BOD	mg/L	4.7 ± 1.0	3.3 ± 1.7	4.0 ± 1.3
COD	mg/L	8.4 ± 1.6	8.2 ± 0.9	8.3 ± 0.9
SS	mg/L	2.6 ± 0.5	11.1 ± 10.3	6.9 ± 6.6
Chl- <i>a</i>	mg/m ³	18.4 ± 9.4	14.9 ± 6.5	16.6 ± 5.8
T-N	mg/L	1.321 ± 0.332	0.986 ± 0.408	1.154 ± 0.350
Org-N	mg/L	0.634 ± 0.177	0.419 ± 0.205	0.526 ± 0.153
NH ₄ -N	mg/L	0.156 ± 0.165	0.147 ± 0.085	0.151 ± 0.085
NO ₃ -N	mg/L	0.305 ± 0.270	0.381 ± 0.288	0.343 ± 0.197
T-P	mg/L	0.130 ± 0.033	0.094 ± 0.068	0.112 ± 0.045
Org-P	mg/L	0.088 ± 0.023	0.059 ± 0.024	0.074 ± 0.024
PO ₄ -P	mg/L	0.042 ± 0.028	0.034 ± 0.050	0.038 ± 0.031

Table 3. Variations of Concentrations between Influent and Effluent with HRT(mean±SD, n=7)

Parameter	DO	BOD	COD	SS	Chl- <i>a</i>	T-N	T-P
	mg/L				mg/m ³	mg/L	
Conc. of Influent	7.6	4.7 ± 1.0	8.4 ± 1.6	2.6 ± 0.5	18.4 ± 9.4	1.321 ± 0.332	0.130 ± 0.033
6hr	6.7	2.3 ± 1.1	5.3 ± 0.7	1.7 ± 1.3	3.6 ± 3.6	0.831 ± 0.339	0.096 ± 0.014
12hr	5.8	1.7 ± 1.0	4.7 ± 0.7	1.4 ± 0.5	0.8 ± 0.8	0.744 ± 0.265	0.090 ± 0.021
24hr	5.3	1.3 ± 0.8	4.9 ± 0.8	1.2 ± 0.3	1.6 ± 1.8	0.646 ± 0.201	0.087 ± 0.022
Conc. of Influent	7.0	3.3 ± 1.7	8.2 ± 0.9	11.1 ± 10.3	14.9 ± 6.5	0.986 ± 0.408	0.094 ± 0.068
24hr	5.3	1.1 ± 1.1	4.9 ± 1.5	2.7 ± 3.0	0.7 ± 0.6	0.378 ± 0.149	0.043 ± 0.012
48hr	4.7	0.9 ± 0.7	4.4 ± 1.6	1.7 ± 1.8	0.1 ± 0.2	0.251 ± 0.137	0.028 ± 0.010
72hr	4.4	1.1 ± 1.2	4.2 ± 0.5	1.3 ± 1.2	0.6 ± 1.3	0.221 ± 0.099	0.031 ± 0.009

의 차이가 없었다. 이는 인공습지의 BOD 한계 허용농도 (background concentration) 1~10 mg/L의 최저농도인 1 mg/L에 근접한 조건으로 체류시간의 연장에 따른 더 이상의 농도감소는 어려울 것으로 판단된다(EPA, 2000). BOD와 달리 COD의 유입수 평균 농도는 호소수질환경 기준 IV등급인 농업용수 수질기준을 초과하는 8.4 mg/L, 8.2 mg/L를 나타내었으며, 지하흐름습지를 통과하면서 4.2~5.3 mg/L로 체류시간이 길어짐에 따라 농도가 감소하여 호소수질기준 III 등급의 수질을 나타내었다. 입자성물질인 SS의 경우 '03년에는 평균 2.6 mg/L의 매우 낮은 유입농도를 보였으며, 유출농도는 1.2~1.7 mg/L로 체류시간이 길어질수록 더 낮은 농도로 감소하였으며, '04년에는 유입 평균 11.1 mg/L로 전년도 보다 다소 높았으나 습지를 통과하면서 1.3~2.7 mg/L로 체류시간에 따라 농도감소를 보여주었다. '04년의 경우 유입농도가 증가 하였다고 하나 체류시간 연장에 따른 유출농도의 감소는 전년도 최저농도인 1.2 mg/L와 유사한 특성을 보여 평균 유출 한계농도의 수준으로 판단되어지며, 일부시기에는 SS가 불검출되기도 하여 지하흐름습지의 적절한 조건에서 완벽하게 제거되어질 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구는 부영양화된 농업용저수지의 물을 양수하여 인공

습지를 통한 수질개선을 도모한 형태로서 호소수의 식물플랑크톤의 제거 역시 인공습지처리의 주요 목적이 된다. 식물플랑크톤의 간접지표인 Chl-*a* 농도변화를 보면, 유입수에서 14.9, 18.4 mg/m³, 습지 유출수에서 0.1~3.6 mg/L의 수준으로 낮게 감소하여 녹조제거의 기능을 충분히 나타내 주었다.

총질소(TN)는 0.986, 1.321 mg/L로 유입되어 0.221 mg/L~0.831 mg/L로 체류시간이 길어질수록 유출 평균 농도가 현저히 감소하였다. 총인(TP)은 체류시간 6~24시간 조건에서는 평균 0.130 mg/L의 농도로 유입되어 0.087~0.096 mg/L로 체류시간 24~72시간의 조건에서는 평균 0.094 mg/L로 유입되어 0.028~0.043 mg/L의 농도로 현저히 감소하여, 농업용수 수질기준을 초과하는 유입수가 습지를 통과하면서 수질기준보다 상당히 낮은 수준을 유지하였으며, 체류시간이 증가할수록 농도 감소폭이 증가하였다. 특히, Table 4에서는 습지의 한계농도를 TN은 1~3 mg/L, TP는 < 0.2mg/L로 나타내어 저농도의 영양염류를 가지는 오염수의 처리에 한계가 있음을 간접적으로 나타내고 있으나, 본 연구에서 TN 0.986, 1.321mg/L, TP 0.094, 0.130mg/L의 오염수를 대상으로 한 결과 습지자체가 가지는 한계농도로 인한 정화효

Table 4. Background SF wetland concentrations (Reed et al., 1995 and U.S. EPA, 1993.)

Constituent	Units	Concentration Range
BOD ₅	mg/L	1 ~ 10
TSS	mg/L	1 ~ 6
TN	mg/L	1 ~ 3
TP	mg/L	< 0.2

율의 감소는 관찰하기 어려웠으며, 오히려 낮은 영양염류의 유입이 습지의 물질순환을 재촉진시켜 안정적인 유출수농도를 지속적으로 유지할 수 있게 해주었다.

따라서, 갈대를 도입한 지하흐름인공습지가 고농도 뿐 만 아니라 비교적 저농도의 오염물질에도 유출수의 현저한 농도감소를 관찰할 수 있어 습지의 충분한 처리기능을 확신할 수 있었다.

3.2 정화효과

지하흐름 인공습지의 체류시간에 따른 수질정화효과는 Table 5에 나타내었다. BOD는 체류시간 6시간의 짧은 체류시간에도 평균 52 %의 정화효율을 보였으며, 체류시간이 24시간까지 증가하여 평균 71.8%로 높게 나타났다(Fig. 4). 그러나 체류시간 24시간 이후에는 체류시간 증가에 따른 정화효과의 뚜렷한 증가가 관찰되지 않았는데, 이는 체류시간 24시간이후 정화효과의 뚜렷한 증가를 관찰할수 없었고 항상 60%이

상의 정화효율을 보여주고 있는 EPA(1993)의 결과와 일치하였다. 또한, 강 등(2004)이 열거한 국내 14개 고농도 인공습지의 BOD 정화효율이 평균 84%에 비교하면 본 연구결과의 정화효율이 낮게 나타났으나, EPA의 경우와 같이 BOD 10mg/L이상의 고농도의 폐수처리에 비해 상당히 낮은 농도를 적용하였음에도 불구하고 60%이상의 일정한 정화효율을 보이는 것은 지하흐름습지가 저농도의 유입수에 대한 BOD 제거효과를 가지고 있음을 보여주는 것이며, 저농도 BOD제거를 위한 지하흐름습지의 설계시 최소 체류시간은 24시간으로 권장한다.

미생물학적 분해가 용이한 형태인 BOD와 달리 일부 난분해성 유기탄소를 포함하고 있는 COD는 체류시간별 평균 정화효율이 35.6% ~ 48.6%의 범위로 체류시간이 길어짐에 따라 정화효율의 현저한 증가는 관찰할 수 없었다(Fig. 4). 입자성 부유물질인 SS는 지하흐름 습지의 여재를 통과하면서 상당히 쉽게 제거되는 물질로서(박 등, 2004), 시설운영초기에 해당되는

Table 5. Removal Efficiencies (%) of water quality parameters by SFW

HRT	BOD	COD	SS	Chl- <i>a</i>	T-N	T-P
6hr	52.0 ± 17.2	35.6 ± 12.0	64.8 ± 12.3	83.7 ± 10.7	35.0 ± 25.3	21.0 ± 27.5
12hr	63.2 ± 18.4	43.3 ± 9.6	53.9 ± 20.0	95.1 ± 5.0	41.3 ± 21.4	27.9 ± 19.5
24hr	71.3 ± 19.0	40.9 ± 5.2	50.8 ± 22.0	90.8 ± 9.0	48.7 ± 19.4	27.3 ± 32.9
24hr	66.9 ± 44.1	40.7 ± 11.1	82.8 ± 15.3	96.8 ± 3.3	55.8 ± 24.4	35.4 ± 38.5
48hr	65.2 ± 29.9	47.7 ± 13.1	84.9 ± 13.8	99.4 ± 0.8	71.1 ± 19.4	60.8 ± 20.0
72hr	69.8 ± 27.7	48.6 ± 4.5	89.7 ± 16.7	93.8 ± 16.5	74.3 ± 15.2	57.0 ± 22.3

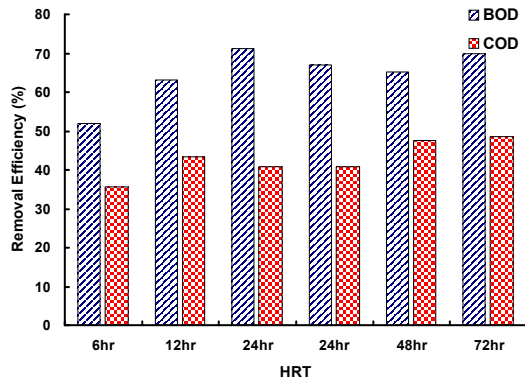


Fig 4. Removal Efficiencies of Hydrocarbon (BOD and COD) by SFW

'03년의 경우에는 체류시간 6~24시간 조건에서는 50~65%의 비교적 낮은 정화효율을 보였으며, 1년간의 안정기를 거친 '04년의 24시간~72시간 조건에서는 82.8%~89.7%로 상당히 증가하였다(Fig. 5). SS의 정화효율은 체류시간이 증가할수록 다소 증가하는 경향을 나타내기는 하였으나 그차이가 너무 적었다. EPA (1993)는 지하흐름습지에서 SS의 제거는 체류시간 1일 조건이내에서 60%이상의 정화효과를 나타낸 후 체류시간의 연장에 따른 정화효과 개선이 관찰안됨을 보고하였다. 또한, 농업용저수지의 식물플랑크톤, 즉, 녹조제어를 위한 정화기구로서 지하흐름 습지의 정화효과를 보면, 체류시간 12시간 이후 조건부터 90.8%~99.4%의 높은 정화효율로 체류시간이 증가하여도 유사한 경향을 보여주어 녹조제거 목적을 인공습지를 통해 얻는다면, 최소 체류시간 12시간이 요구됨을 알 수 있었다(Fig. 5).

저수지의 부영양화 물질인 질소와 인의 정화효과를 보면, 체류시간이 증가할수록 정화효율이 증가하였다. 총질소의 경우 체류시간 6시간에서 72시간으로 증가함에 따라 정화효율이 35.0%에서 74.3%로 증가하였다. 지하흐름 인공습지를 통해 제거되는 총질소는 체류시간이 6시간으로

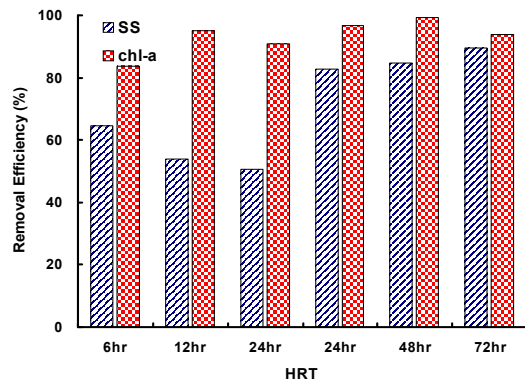


Fig 5. Removal Efficiencies of Suspended solid (SS) and Chlorophyll a (Chl-a) by SFW

짧은 경우에는 입자성총질소(PTN)의 정화효율이 상대적으로 높았으나, 체류시간이 길어짐에 따라 용존성 총질소(DTN)의 정화효율이 증가하였다(Fig. 6). 또한, 질소의 형태별 정화특성을 보면(Fig. 7), 체류시간이 짧은 6시간 및 12시간 조건에서는 암모니아성 질소의 정화효과가 높았으며, 질산성질소보다 유기질소의 제거효과가 높게 나타났으며, 24시간에서는 역시 암모니아성질소의 제거효과가 가장 높았고, 유기질소의 정화효과에 비해 질산성질소의 정화효과가 증가하여 높게 나타났다. 체류시간 48시간의 조건에서 유기질소의 정화효과가 가장 낮고, 암모니아성질소와 질산성질소의 정화효과가 75%의 유사한 수준으로 높게 나타났으며, 체류시간 72시간 조건에서는 오히려 질산성질소의 정화효율이 95%로 가장 높은 수준을 보여, 인공습지내에서 질산화 및 탈질 작용이 활발히 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 습지에서 탈질작용이 활발하게 이루어지면 질소제거가 상대적으로 높아지며, NO₃-N의 저거량으로 습지의 탈질화정도를 알 수 있다. 또한 체류시간이 길어질수록 탈질화가 일어날 수 있는 시간이 길어져 총질소의 정화효율이 증가한다(양홍모, 2002a; 양홍모, 2002b). 따라서 탈질작용을 통한 질소의 완벽한 제거를

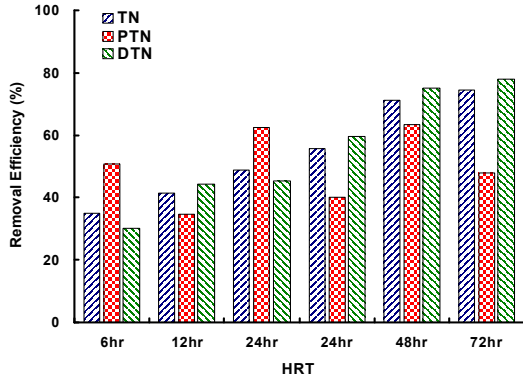


Fig 6. Removal Efficiencies of Total Nitrogen (TN, PTN, and DTN) by SFW

위해서는 적어도 48시간, 72시간의 체류시간이 필요함을 알 수 있었다. EPA(1993)는 지하흐름인공습지를 통한 유기질소와 암모니아성질소의 많은 제한사항을 나타내었으며, 여러지역의 습지처리에서 (-)의 효과, 즉 습지를 통해 유입수보다 더 많은 양이 유출되어짐을 보고하였다. 또한 질소의 효과적 제거를 위해 조류(algae)가 없어야하고, 근권의 발달등으로 산소가 충분히 공급되어야하며, 긴체류시간을 가져야 한다고 했다. 본 연구에서도 근권의 발달이 왕성한 갈대를 적용하여 체류시간을 72시간까지 연장한 결과 총질소의 정화효율이 체류시간 6시간 조건에서 평균 35%인 것이 체류시간 72시간에서 74.3%로 크게 증가하였으며, 체류시간이 길어질수록 질산성질소가 효과적으로 제거되어 탈질작용이 활발하였다. 또한, 강 등(2004)이 보고한 국내 14개 인공습지의 질소정화효율이 평균 49%였음과 처리대상이 대부분 유입농도가 높은 하수처리수였음을 감안하면 저농도를 처리한 본연구의 질소정화효과가 상당히 우수함을 알 수 있으며 오염농도가 비교적 낮은 농업용수의 질소제거를 위해 지하흐름습지의 도입은 상당히 효과적으로 판단된다.

총인은 체류시간 6시간~24시간 조건에서는

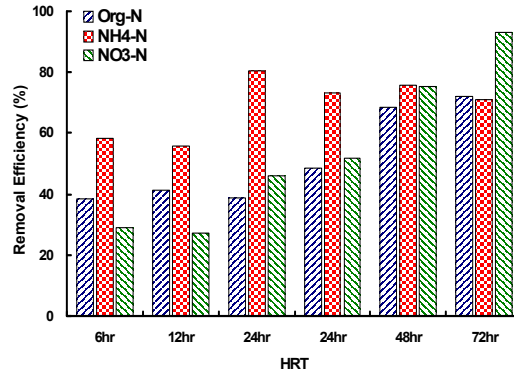


Fig 7. Removal Efficiencies of Nitrogen (Org-N, NH4-N, and NO3-N) by SFW

21%~35%의 낮은 정화효율을 보이는 반면, 체류시간 48시간, 72시간으로 증가함에 따라 57.0%, 60.8%의 높은 정화효율을 보였다. 총질소와 같이 총인도 체류시간이 짧은 6~24시간의 조건에서는 입자성총인(PTP)의 제거효과만 나타나고, 용존성총인(DTP)은 오히려 증가하는 결과를 초래하였다(Fig. 8). 2004년 동일한 24시간 운영시 용존성인의 제거효과가 나타나는 것으로 전년도에는 시설초기 여재로부터 용출되는 영양염류의 양이 다소 포함되었음을 알 수 있다. 24시간에서 72시간의 운영조건에서는 체류시간이 증가할수록 입자성 총인의 제거효과도 증가하였으나, 용존성 총인의 제거효과도 증가하였다. 그러나, 체류시간 48시간과 72시간의 조건에서는 큰 차이를 나타내지 않아 총인의 효과적 제거를 위해 최소 48시간의 체류시간이 필요함을 알 수 있었다. 인의 형태적 특성에 있어서도(Fig. 9) 유기인은 체류시간이 증가할수록 정화효율이 증가하였으나 무기인인 인산염인은 체류시간 6시간에서 24시간 조건에서는 (-)의 값을 보였으며, 점차 (-)의 값이 감소하여 24시간 이후부터 정화효율이 40~60%로 증가하였으므로 인의 효과적, 안정적으로 제거하기 위해 48시간 이상의 체류시간이 요구되어짐을 알 수 있었다.

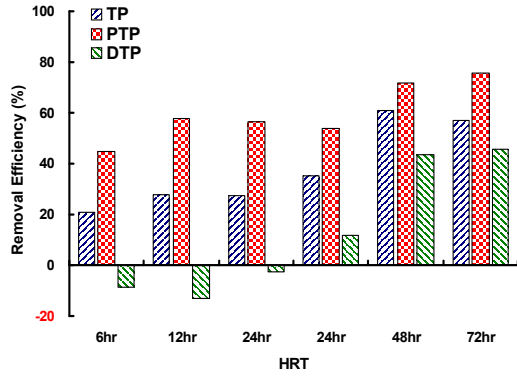


Fig 8. Removal Efficiencies of Total Phosphorus (TP, PTP, and DTP) by SFW

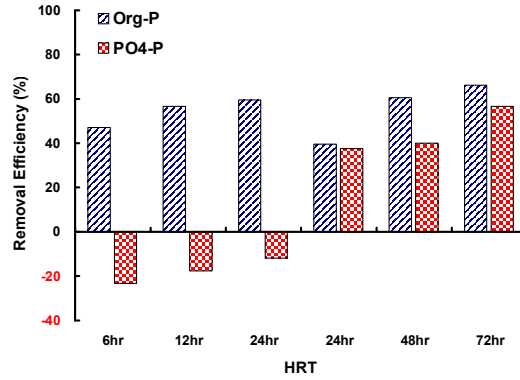


Fig 9. Removal Efficiencies of Phosphorus (Org-P and PO₄-P) by SFW

4. 결 론

지금까지 국내외에서 지하흐름습지는 축산폐수, 생활하수, 2차 처리수 등 고농도의 폐수처리에 만 적용되어 왔으며, 비교적 낮은 오염농도를 가지는 부영양화 농업용저수지의 수질개선을 위해서는 적용된 사례가 없다. 그러나, 본 연구에서는 수질개선에 소요되는 인공습지의 면적 증질소제거기능 증가와 부가 가치의 증대를 위한 친수공간 조성 등의 목적으로 일부 구간에 지하흐름습지의 도입을 시도하여 농업용저수지의 수질개선에 지하흐름습지의 적용타당성에 대한 검토를 하고자 하였다. 지하흐름인공습지는 지표흐름인공습지에 비해 냄새, 악취, 해충의 피해가 거의없고, 지하여재의 표면 미생물막의 발달에 의해 수질정화의 속도가 빨라 동일유량의 수질개선에 소요면적이 줄어드는 장점과 지하흐름습지의 보온효과로 겨울철 식물의 냉해 피해를 최소화시켜주며, 사람들의 접근에도 안전하다 (EPA, 1993).

본 연구에서는 일반적으로 적용되어온 지하흐름 인공습지와 달리 비교적 낮은 오염농도인 연평균 BOD 3.3~4.7 mg/L, TN 1.321~0.986mg/L, TP 0.130~0.094 mg/L의 인공습지 1차 유

출수를 적용하여 체류시간 6시간~72시간의 조건에서 수질정화효과를 평가하였다.

체류시간에 따른 지하흐름습지의 수질 항목별 유출농도는 유입수의 농도가 낮았음에도 불구하고 농업용수 수질기준보다 현저히 감소하였다. 정화효율은 BOD와 COD는 체류시간 24시간 이후 뚜렷한 증가 없이 일정수준을 보였으며, SS와 Chl-a 역시 24시간이내의 조건에서 80%이상의 정화효율을 보여 주었다. 질소와 인은 체류시간이 증가할수록 정화효과가 현저히 증가하였는데 질소는 체류시간 72시간에서, 인은 48시간에서 최고의 정화효율을 나타내었다. 특히 질소는 체류시간이 증가할수록 질산성질소의 효과적 제거가 이루어져 이때의 탈질작용이 활발하였음을 추정케 해준다.

결과적으로 지하흐름 인공습지의 정화효율은 농업용수의 수질기준을 만족할 정도로 개선 효과가 나타났으며, 특히, 질소의 제거효과가 우수하였다. 또한 지표흐름습지에 비해 소요되는 습지부지 면적이 적어 용지매수비용의 절감효과, 모기등 병충해방지, 사람의 접근성 용이 등의 보편적인 이점이 있어 넓은 면적의 인공습지 적용시 질소제거를 목적으로 하는 일부구간에 지하흐름습지의 적용을 검토해 볼 수 있다. 그러나 비교

적 저농도의 농업용수원의 수질개선을 위한 인공 습지의 설계 및 조성시에는 시설 설치 단가가 비싸고, 사용년한이 증가함에 따른 여재의 퇴적물 관리 등 유지관리가 다소 어려운 점을 반영할 때 상당한 고려가 필요할 것으로 사료되었다.

감사의 글

본 연구는 농림부의 국고연구과제로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 강호정, 송근혜. 2004. 인공습지를 이용한 수처리 효율 및 향후 연구제언. 한국습지학회 6(2): 57-63.
2. 김형중. 1997. 자연정화법을 이용한 농촌지역의 소규모오수처리시스템. 건국대학교 박사학위논문.
3. 농림부 농업기반공사. 2003. 농업용수 수질개선 시험사업 보고서(VII).
4. 농림부 농업기반공사. 2003. 농업용수 수질측정망 조사 보고서.
5. 박재홍, 최의소, 조일형. 2004. 인공습지를 이용한 축산폐수의 처리. 한국수자원학회지 20(2): 157-162
6. 양홍모. 2002-a. 하천수정화 근자연형 인공습지의 초기질소 제거. 한국환경농학회지 21(4): 269-273.
7. 양홍모. 2002-b. 하천수정화 연못습지시스템의 갈대 초기습지셀 초기 질산성질소 제거. 한국환경농학회지 21(4): 274-278.
8. 양재삼, 정주영. 2002. 수질정화법의 새로운 대안 인공습지. 소화.
9. 윤경섭. 2000. 자연형 수질정화공법에 의한 농업용수 수질개선. 환경친화적 농업생산기반정비 방안 세미나 발표집: 85-128.
10. 환경부. 2000. 수질오염공정시험방법 고시 제99-208호.
11. APHA. 1995. Standard Methods for the Examination of water and Wastewater. 19th edition.
12. Moshiri, G.A.(ed). 1993. Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. CRC Press, Boca Raton, FL.
13. U. S. EPA. 1993. Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment/A technology assessment. EPA/832-R-93/008.
14. U. S. EPA. 2000. Wastewater technology fact sheet/Wetlands: Subsurface Flow. EPA 832-F-00-023. Washington, D.C.
15. 中村圭吾, 細見正明, 酒井義尙, 宮下明雄, 通井仁. 2002. 日本における表面流下方式の植生浄化實例の整理. 土木研究所 home page.