

Original article

유입수 조건에 따른 인공습지 수질 정화효율 비교: 경안천 유역을 중심으로

이설준 · 은범진 · 김종환 · 최이송¹ · 오종민^{1,*}

경희대학교 환경응용과학과, ¹경희대학교 환경학 및 환경공학과

Comparison and Management of Water Purification Efficiency of Artificial Wetland according to Inflow Water Conditions: Focusing on the Gyeongancheon Basin. Seol Jun Lee (0009-0009-8129-8294), Beomjin Eun (0000-0003-2715-5283), Jong Hwan Kim (0009-0000-3905-862X), I Song Choi¹ (0000-0001-8809-802X) and Jong-Min Oh^{1,*} (0000-0002-1104-5867) (College of Engineering, Kyung Hee University International Campus, Yongin 17104, Republic of Korea; ¹College of Engineering, Kyung Hee University International Campus, Yongin 17104, Republic of Korea)

Abstract In this study, in order to analyze the water purification efficiency according to the influent water conditions of artificial wetlands, the purification efficiency was compared at two points where sewage treatment water flows in and one point where good effluent flows in. As a result of reviewing the results of the analysis of influent and effluent and the removal efficiency, the T-N and T-P removal efficiency was calculated at 54.7% and 77.4%, respectively, for the two points where sewage treatment water was treated, the treatment efficiency of SS 90.8%, BOD 51.1%, TOC 30.6%, T-N 38.8%, T-P 55.3% was shown. As a result, the efficiency of removing pollutants in the artificial wetland was found to be proportional to the concentration of influent water, and in order to create an efficient artificial wetland, it is judged that thorough review and management at the design stage are necessary considering that the removal efficiency of high-concentration contaminated water was high.

Key words: sewage treatment water, rainfall runoff water, inflow concentration, elimination efficiency

서 론

환경부에서 시행한 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 제 53조 ‘비점오염원의 설치신고제도’에 의거하여 국내에 많은 비점오염저감시설이 설치되었다(MOE, 2016). 비점오염저감시설은 크게 장치형 시설과 자연형 시설로 분류되며, 고가의 설치비용과 지속적인 유지관리가 필요한 장치형 비점오염저감시설보다 최소한의 유지관리와 자연적인 관리방안을 추구하는 인공습지와 같은 자연형 시설의 설치가 계획되

고 있다(Kang and Lee, 2016). 인공습지는 비점오염저감시설 중 하나로, 갈대와 같은 수생 식물을 통해 영양염류를 제거할 뿐만 아니라 최근 문제가 되는 기후변화와 토지이용의 고도화에 따른 문제의 해결에도 기여할 수 있는 자연친화적 기술이라는 점에서 관련 연구 및 기술개발이 진행되었다(Park and Cho, 2023). 습지를 이용한 수질 정화기술은 1970년대 이후 미국을 중심으로 개발되었으며, 서구에서는 인공습지를 점오염원뿐만 아니라 비점오염원 처리에 이용하였다. 우리나라의 경우 1990년대부터 자연형 하천정화기술에 대한 관심이 높아지면서 2010년대 초반 수질오염총량제의 도입으로 비점오염원 저감을 위한 처리기술의 개발 및 관련 정책 시행이 활발하게 이루어졌다(Park *et al.*, 2019). 이후 생태하천 조성사업 추진 및 기후변화와 탄소중립에 대한 정책

Manuscript received 26 February 2024, revised 25 March 2024,

revision accepted 26 March 2024

* Corresponding author: Tel: +82-31-201-2461,

E-mail: jmoh@khu.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

적 관심 등으로 자연형 정화기술 필요성이 높아지면서 인공 습지의 장점에 따른 관심도 및 기술개발이 크게 증가하였다 (KEM, 2003).

인공습지는 육상생태계 및 수생태계가 복합적으로 형성 되어 있어 물순환, 수질정화, 경관 등 다양한 분야에 적용되고 있으며, 습지가 가지고 있는 다양한 기능을 활용하기 위하여 인위적으로 조성한 습지를 말한다(Lee *et al.*, 2015). 수질정화 및 비점오염원 저감을 위해 조성된 인공습지는 다방면에서의 기능과 장점들이 존재하고 있다. 하지만 현재 국내에서는 하수처리장 방류수의 재처리, 농업배수 및 비점오염원 등과 같은 저농도 고유량(高流量) 처리 그리고 고농도의 비점오염원 처리와 같이 유입수 조건에 따른 인공습지 처리 및 정화효율 관련 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다 (Jung, 2006). 또한, 인공습지 처리 효율은 유입수의 특성을 비롯하여 유입량 및 유출량, 수심분포, 식생 등 많은 요인에 의해 영향을 받기 때문에 유입수 조건에 따른 인공습지의 정화효율을 고려할 필요가 있다고 판단된다(Choi *et al.*, 2014).

이에 따라 본 연구에서는 2022년 11월 기준 경기도 75곳의 비점오염시설 중 인공습지를 포함한 가장 많이 비점오염저감시설이 설치된 Y시 경안천 유역을 중심으로 유입수 조건에 따른 정화효율을 비교하고자 한다.

분포 현황자료를 활용하여 총 75개소의 비점오염저감시설 중 23개소의 시설이 설치된 Y시 경안천 유역을 주요 조사지로 선정하였다. Y시에는 총 23개의 비점오염저감시설 중 12개의 인공습지가 설치되어 있다(Fig. 1). Y시의 12개 인공습지에 대해 사전조사를 실시하여 각 습지에 대한 특성을 Table 1에 제시하였다.

사전조사를 바탕으로 중요성, 활용성, 지속성, 효율성의 자체적 평가 기준에 따라 중점조사 대상습지 3개(Y-1, Y-2, Y-3)를 선정하였다. 중요성 항목은 방류하천의 수질적 중요

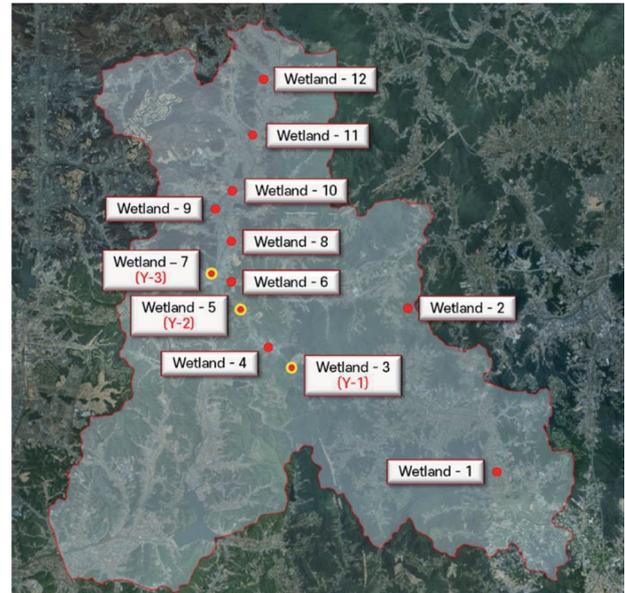


Fig. 1. Location of constructed wetlands in Y city.

자료 및 방법

1. 조사지 개요

본 연구에서는 경기도 내 비점오염저감시설의 지자체별

Table 1. Results of investigation of artificial wetland characteristics in Y city.

Site	Inflow water	Site area (m ²)	Facility area (m ²)	Processing capacity (m ³ day ⁻¹)	Facility capacity (m ³)	Inflow system	Flow state	Discharged stream
Wetland - 1	River water	-	-	-	-	Pumping	Intermittent flow	C stream
Wetland - 2	River water	-	-	-	-	Natural	Periodic flow	G stream
Wetland - 3	Sewage treatment water	37,558	19,443	10,000	9,666	Pumping	Intermittent flow	G stream
Wetland - 4	River water	9,955	3,256	1,123	977	Natural	Periodic flow	G stream
Wetland - 5	Sewage treatment water	36,021	22,484	20,000	11,919	Pumping	Intermittent flow	G stream
Wetland - 6	River water	6,145	1,908	2,780	954	Natural	Periodic flow	G stream
Wetland - 7	River water	3,973	1,207	2,500	853	Natural	Periodic flow	G stream
Wetland - 8	River water	11,465	5,830	5,000	3,068	Natural	Periodic flow	G stream
Wetland - 9	River water	23,271	9,727	8,200	5,394	Natural	Not flowing	G stream
Wetland - 10	River water	32,670	15,097	8,500	7,977	Natural	Not flowing	G stream
Wetland - 11	River water	8,063	4,964	10,000	3,175	Pumping	Intermittent flow	G stream
Wetland - 12	River water	24,441	3,881	4,719	2,142	Natural	Periodic flow	G stream

Table 2. Results of evaluation for selecting intensive constructed wetlands.

Site	Importance	Usability	Sustainability	Efficiency	Score	Rank
Wetland - 1	△	○	△	△	4	6
Wetland - 2	◎	×	◎	○	8	4
Wetland - 3	◎	◎	◎	◎	12	1 (Y-1)
Wetland - 4	◎	○	△	○	7	5
Wetland - 5	◎	◎	◎	○	11	1 (Y-2)
Wetland - 6	◎	○	△	○	8	4
Wetland - 7	◎	○	○	◎	10	2 (Y-3)
Wetland - 8	◎	○	△	○	8	4
Wetland - 9	◎	○	×	△	7	5
Wetland - 10	◎	○	×	△	7	5
Wetland - 11	◎	◎	△	○	9	3
Wetland - 12	◎	○	△	△	8	4

◎: 3 point , ○: 2 point , △: 1 point , X: 0 point

성을 고려하였으며, 활용성 항목의 평가기준은 처리용량 기준 $5,000 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 이상, $2,000 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 이상, $700 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 이상 및 이하로 습지의 규모를 중심으로 평가하였다. 지속성 항목은 수 시료를 외부적 환경에 크게 영향을 받지 않고 지속적으로 취수할 수 있는 구조인지를 기준으로 평가하였다. 구체적으로는 자연유입 구조이면서 지속적 유입이 가능한 경우, 간헐적이지만 안정적이거나 지속적이지만 불안정한 유입인 경우, 간헐적이거나 불안정하지만 확정하기 어려운 경우, 마지막으로 유입이 어려워 취수를 할 수 없는 경우로 구분하여 평가하였다. 효율성 항목의 경우 습지에 대한 일부 정보가 부정확하고 확인이 어려워 조사연구에 영향을 미칠 우려가 있거나 수 시료의 채수 용이점 등을 기준으로 판단하였다. 이를 바탕으로 중점조사 대상 습지 선정을 위해 항목별 3점을 만점으로 점수화를 진행하였고, 항목별 평가기준에 따라 매우 적합하다고 판단되면 3점, 적합하다고 판단되면 2점, 보통의 경우 1점, 부적합하다고 판단되면 0점으로 점수를 산출하여 3곳의 습지(Y-1, Y-2, Y-3)를 선정하였다(Table 2).

2. 현장조사 및 시료 채수

선정된 중점조사 대상 습지의 제거효율을 파악하고자 23년 7~9월 중 3곳의 중점조사 대상 습지에 대해 각 2회 조사를 시행하였다. 하수처리수가 유입되는 Y-1과 Y-2 지점은 Table 1을 통해 일일처리용량과 시설용량을 바탕으로 각각 0.96일(24시간 기준 약 23시간), 0.56일(24시간 기준 약 13시간)로 체류시간을 계산하였다. 체류시간을 고려한 효율적인 유입 및 유출수 채수를 진행하기 위해 펌프시설 작동일지를 바탕으로 주기를 확인하였으나 일정한 시간에 작동하지 않는 것을 파악하였고, 시료 채수 전 펌프가동시간을 정한 후

Table 3. Hourly precipitation at point Y-3 on July 4~5.

Date	Time	Hourly precipitation (mm)	Cumulative precipitation (mm)
July 4th	12:00	0	0
	13:00	0	0
	14:00	0	0
	15:00	6	6
	16:00	5	11
	17:00	1	12
	18:00	0	12
	19:00	2.5	14.5
	20:00	11	25.5
	21:00	7.5	33
	22:00	0.5	33.5
	23:00	3	36.5
	July 5th	0:00	0
1:00		3.5	40
2:00		23.5	63.5
3:00		4	67.5
4:00		1	68.5
5:00		0.5	69
6:00		0	69

30분 간격으로 7회, 습지의 구간별 채수를 진행하였다.

우수 유출수를 처리하는 Y-3 지점은 강우 시 측정을 진행하였으며, 강우가 시작된 시간부터 종료될 때까지 Y시에서 가장 가까운 처인역삼 관측소에서 측정한 시간별 강수량과 누적강수량을 Table 3과 Table 4에 나타냈다. 강우 시 조사의 경우 수위변화에 따라 농도가 변하는 특징이 있어 대상

습지의 기능 및 목적상 강우 시 유출이 발생하는 시점을 기준으로 수질정화 효과를 평가하는 것이 중요하다(Kim *et al.*, 2017). 따라서 기본적으로 환경부에서 제시하고 있는 10 mm 이상의 강우 특성을 대상으로 초기우수 유출수에 대한 처리 효율을 분석하였다. 또한 우리나라 강우 특성을 고려하여 10 mm 이상의 강우사상에 대한 조사가 어려울 경우에는 최소 5 mm 이상에서 유출이 발생할 때 시료를 30분 간격으로 7회 채류시간을 고려하여 조사를 진행하였다.

추가적으로 수질개선 효과에 크게 영향을 미칠 수 있는 요소기술이 적용된 지점(Y-1, Y-2) 내 구간을 추가로 선정하여 시료 채수 후 항목들을 분석하였다.

3. 시료 분석 및 평가방법

시료 분석은 현장측정항목과 실내측정항목을 분류하여 Table 5와 같이 분석하였다. 현장측정항목(pH, Water temperature, EC, DO)은 휴대용 다목적 측정기(Orion Star A329; Thermo, USA)를 이용하여 현장에서 채수한 후 즉시 측정하였고, 실내측정항목(BOD, TOC, SS, T-N, T-P)은 현장에서 2 L 무균채수병을 통해 채수 후 실험실로 운반하여 수질오염공정시험기준(MOE, 2022)에 따라 분석하였다.

결과 및 고찰

Table 4. Hourly precipitation at point Y-3 on September 13~14.

Date	Time	Hourly precipitation (mm)	Cumulative precipitation (mm)
September 13th	8:00	0	0
	9:00	0	0
	10:00	0	0
	11:00	0.5	0.5
	12:00	3.5	4
	13:00	1.5	5.5
	14:00	1	6.5
	15:00	4	10.5
	16:00	4.5	15
	17:00	3.5	18.5
	18:00	7.5	26
	19:00	4	30
	20:00	3.5	33.5
21:00	2.5	36	
22:00	1	37	
23:00	0.5	37.5	
September 14th	0:00	0.5	38

중점조사 대상 습지에 대한 분석항목들의 결과를 Table 6 과 Table 7에 나타냈다. Y-1 지점과 Y-2 지점은 하수처리수가 유입되는 지점으로, 유입수의 EC가 높았으며 인공습지를 거치면서 감소하는 경향을 보였다. 또한 유입수의 DO 농도가 유출수에서 크게 감소하는 경향을 보여 습지 내에서 일어나는 생물학적 작용과 유출 전 침전조 역할을 하는 연못에서 물이 정체되어 DO 농도가 감소한 것으로 사료된다. 반면 Y-3 지점은 하천수가 유입되는 지점으로, 앞선 두 지점과 반대되는 경향을 보였다. 유입수의 EC 값이 낮지만 유출수에서 일부 증가하는 경향을 보였으며, DO 농도도 마찬가지로 증가하는 경향을 보였다. 이는 Y-3 지점의 유입수의 EC 농도가 낮고, 습지를 거치면서 이온성 물질의 농도가 증가한 것으로 판단되며 보다 정확한 분석과 유입수 조건에 따른 처리효율을 파악하기 위해 측정항목들의 결과(Tables 6, 7)를 바탕으로 지점별 수질 특성을 다음과 같이 분석하였다.

1. Y-1 인공습지에서의 수질변화 특성

Y-1 지점의 1·2차 조사는 비강우 시 하수처리수가 유입되

Table 5. Analysis equipment and method by parameters.

Parameter	Measuring instrument	Method	Site
Water temperature	Multi sensor meter (Orion Star A329)	Glass electrode method	Outdoor (Field)
pH	Multi sensor meter (Orion Star A329)	Ion electrode method	Outdoor (Field)
EC	Multi sensor meter (Orion Star A329)	Ion electrode method	Outdoor (Field)
DO	Multi sensor meter (Orion Star A329)	Electrode method	Outdoor (Field)
BOD	Incubator	Winkler-azide variation method	Indoor (Laboratory)
TOC	Total organic carbon analyzer (TOC-V CSN, Shimadzu, Japan)	High temperature combustion method	Indoor (Laboratory)
SS	Electric muffle furnace	Fiberglass paper filtering method	Indoor (Laboratory)
T-N	UV absorption photometry (220 nm)	UV spectrophotometer method	Indoor (Laboratory)
T-P	Ascorbic acid reduction (880 nm)	UV spectrophotometer method	Indoor (Laboratory)

Table 6. Summary of field measurement parameter results.

Parameters	Water temperature						pH			EC			DO				
	0 min	60 min	120 min	180 min	0 min	60 min	120 min	180 min	0 min	60 min	120 min	180 min	0 min	60 min	120 min	180 min	
Site	Number of measurements																
Y-1	in	22.1	22.4	22.5	22.5	7.4	7.4	7.3	7.3	1879	1846	714	1966	7.7	7.7	7.8	7.6
	out	23.4	24.3	25	24.8	7.2	7.1	7.2	7.2	1317	681	789	901	2.9	3.2	3.4	4.1
Y-1	in	-	-	-	-	7.7	7.8	7.6	7.6	714	773	718	729	9.3	10.3	10.7	9.6
	out	-	-	-	-	7.3	7.6	7.4	7.5	521	536	528	523	6.5	8.8	6.5	8.8
Y-2	in	27	26.6	25.9	28.5	7.1	7.1	7.1	7.1	1748	1755	1758	877	7.0	7.2	7.4	7.2
	out	27.7	26.3	29.7	28.5	6.9	6.9	6.9	6.8	1785	1827	719	727	2.7	3.3	6.3	2.7
Y-2	in	23.1	23.4	23.3	23.5	7.0	7.2	7.2	7.1	713	703	686	609	6.2	6.2	6.1	6.8
	out	21.9	21.7	22.1	21.8	7.0	6.9	6.9	7.0	485	485	481	482	2.1	1.3	1.4	2.4
Y-3	in	25	25.1	24.9	24.7	9.0	8.6	7.9	7.8	462	462	295	229	8.4	7.3	5.8	6.6
	out	22.6	21.9	22.8	22.4	9.0	7.4	7.9	7.8	461	454	453	512	4.5	3.8	2.4	4.4
Y-3	in	22.6	22.2	22.2	22.7	7.6	7.8	7.8	7.9	363	290	206	167	9.7	8.9	10.3	9.3
	out	22.8	22.6	21.9	22.5	7.4	7.5	7.5	7.4	432	430	424	423	10.7	9.3	10.2	10.8

Table 7. Summary of indoor measurement parameter results.

Parameters	BOD			TOC			SS			T-N			T-P								
	0 min	60 min	120 min	180 min	0 min	60 min	120 min	180 min	0 min	60 min	120 min	180 min	0 min	60 min	120 min	180 min					
Site	Number of measurements																				
Y-1	in	2.0	2.1	1.7	1.6	18.8	4.9	5.1	5.3	2.8	1.2	0.8	0.8	2.93	3.02	3.14	3.02	0.090	0.120	0.146	0.396
	out	3.2	1.9	2.3	2.1	19.8	5.1	5.1	4.9	5.6	3.6	8.4	1.2	13.86	1.76	1.23	0.81	0.328	0.018	0.050	0.028
Y-1	in	2.2	2.1	2.8	2.1	5.5	5.0	5.1	5.1	0.4	2.0	0.8	0.4	1.68	2.12	1.51	1.91	0.038	0.031	0.045	0.016
	out	2.7	2.2	3.0	2.6	5.9	5.5	5.5	5.4	5.2	3.2	0.8	3.2	1.32	1.05	0.57	0.51	0.028	0.082	0.032	0.003
Y-2	in	1.4	3.1	1.1	1.0	18.3	5.1	5.2	5.1	4.0	9.6	2.8	8.4	3.07	4.77	3.11	2.83	0.104	0.090	0.074	0.082
	out	3.7	4.6	4.2	4.5	19.0	8.0	7.9	8.3	6.0	8.8	2.8	9.2	0.55	0.46	0.62	0.50	0.054	0.048	0.028	0.058
Y-2	in	1.4	0.9	1.9	0.7	4.9	5.4	5.1	5.0	1.2	0.4	0.4	2.4	1.54	1.95	2.08	1.57	0.109	0.100	0.060	0.102
	out	2.5	1.5	3.1	1.8	5.5	5.7	5.7	5.8	6.4	4.4	3.6	0.4	0.57	0.54	0.53	0.49	0.027	0.051	0.092	0.017
Y-3	in	2.5	3.6	10.1	7.8	2.8	4.2	4.3	3.9	4.0	2.4	56.4	58.4	2.13	3.75	3.03	2.21	0.126	0.268	0.224	0.138
	out	3.5	4.3	5.2	5.8	3.0	2.8	3.0	3.4	7.6	2.4	21.8	1.2	1.91	1.77	2.06	2.04	0.148	0.132	0.134	0.174
Y-3	in	10.2	7.5	6.9	6.0	5.8	5.4	4.7	3.7	51.6	366.4	194.7	246.0	1.20	2.13	1.17	1.42	0.184	0.323	0.223	0.205
	out	2.4	2.1	1.9	2.0	2.8	3.0	3.4	3.1	10.0	4.0	5.2	2.0	0.72	1.26	0.62	0.77	0.080	0.075	0.083	0.089

는 시점에 조사를 실시하였다. 조사 결과, 유입수와 유출수 평균농도를 비교하였을 때 유기물질 및 SS의 처리효율은 1차 및 2차 모두 유입수 대비 유출농도가 증가하여 음의 효율을 보인 반면 T-N, T-P 항목에 대한 처리효율은 양의 처리효율을 보였다(Table 8). SS 항목의 경우, 하수처리의 공정상 여과작용을 거쳐 SS성 입자물질을 대부분 제거하고 낮은 농도로 방류하여 유입되기 때문에 습지의 여과작용이나 침전 작용 등 SS성 입자물질을 제거하는 기작의 역할이 크게 작용하지 못하였고, 더욱이 습지 내 성장하는 식생의 부스러기나 내부에서 생성된 입자물질이 유출수에 포함되는 경우가 많아 SS 농도가 증가한 것으로 사료된다(Choi *et al.*, 2008). BOD 항목도 유입수보다 유출수의 농도가 더 높았던 것으로 조사되었으며, 이와 같은 결과는 유출수 중 SS 농도의 영향

도 있었을 것으로 판단된다. 습지의 경우 용존성 유기물은 생물작용 등에 의해 제거가 가능하지만 습지를 통과하는 과정에서 증가한 SS물질에는 BOD성 물질도 포함되어 있었기 때문에 증가한 것으로 사료된다. TOC 농도는 유입수와 유출수의 평균농도가 큰 차이를 보이지 않았으며, 이는 습지 내에서 BOD 유발물질이 생성될 수 있지만, TOC를 증가시키는 내부생성 유기물이 많지 않았기 때문인 것으로 사료된다.

반면 T-N, T-P 항목에 대해서는 습지의 처리효율이 상대적으로 높게 나타났으며, T-P의 경우 1차 조사와 달리 2차 조사에서 음의 효율로 나타났는데, 이는 1차 조사 시 0.188 mg L⁻¹였던 유입수 평균농도가 2차 조사 시에는 0.035 mg L⁻¹로 낮아져 제거효율이 감소한 것으로 사료된다. 또한 2차 조사 시 수질개선 효과에 크게 영향을 미칠 수 있는 침전지, 습

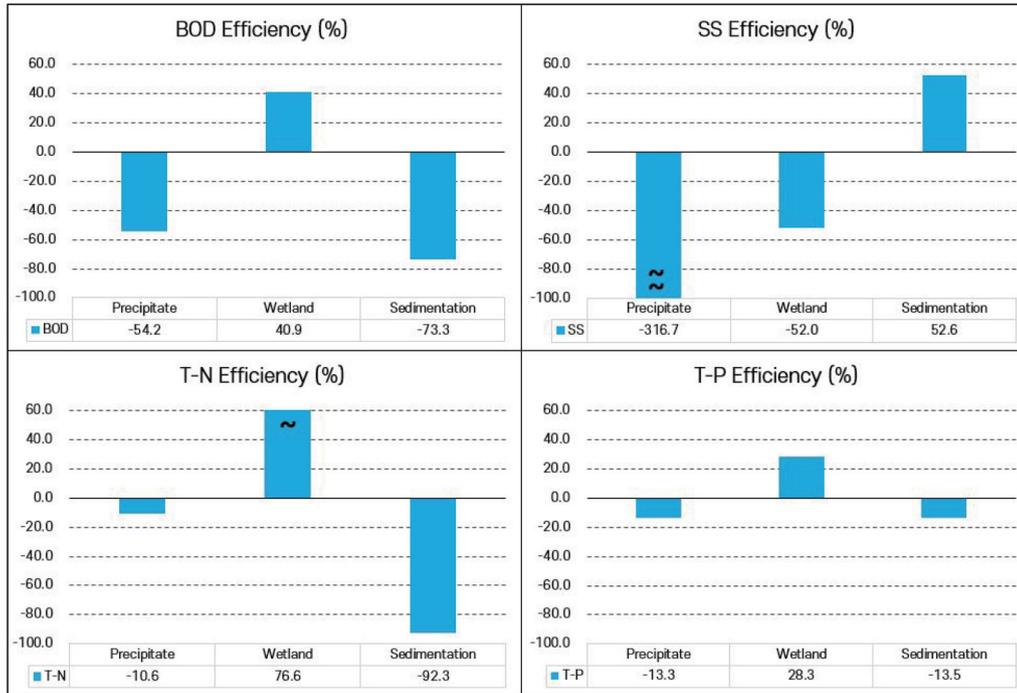


Fig. 2. Removal efficiency of parameters by location at Y-1.

Table 8. Inflow & outflow concentration and reduction efficiency by parameters at Y-1.

	Y-1	BOD	TOC	SS	T-N	T-P
First survey	In _{avg} (mg L ⁻¹)	1.9	8.5	1.4	3.03	0.188
	Out _{avg} (mg L ⁻¹)	2.4	8.7	4.7	1.30	0.106
	Efficiency (%)	-29.1	-1.8	-235.7	57.2	43.6
Second survey	In _{avg} (mg L ⁻¹)	2.3	5.1	0.9	1.8	0.033
	Out _{avg} (mg L ⁻¹)	2.6	5.6	3.1	0.86	0.036
	Efficiency (%)	-14.8	-8.3	-244.4	52.2	-11.5

지 및 침강지와 같이 요소기술이 적용된 지점을 선정하여 시료 채수 진행 후 항목들을 분석하였는데, Fig. 2를 통해 알 수 있듯이 침전지와 침강지에 비해 습지에서의 저감효과가 가장 높은 것으로 나타났다.

2. Y-2 인공습지에서의 수질변화 특성

Y-2 지점도 마찬가지로 Y-1 지점과 같은 항목 및 방법으로 분석하였다. 결과적으로 Y-1 지점과 비슷한 경향을 보였다. SS의 평균처리효율은 모두 음의 처리효율을 보였으며 Table 9를 통해 알 수 있듯이, 유입농도가 가장 낮았던 2차 조사에서 처리효율이 가장 낮게 나타났고, 유입농도가 가장 높았던 1차 조사에서 처리효율이 가장 높은 것으로 분석되었다. 이를 통해 인공습지는 유입농도의 영향을 받으며, 하수처리수와 같은 낮은 SS 농도가 유입되는 경우 현재의 인공습지 구

조로는 SS에 대한 양의 처리효율을 기대하기 어려울 것으로 사료된다.

BOD의 저감효율은 -155.6%로 유입수 농도 대비 유출수 농도가 약 2.5배 증가한 것으로 나타났으며, TOC 농도도 습지를 거치면서 증가하였다. T-N의 저감효율은 84.5%, T-P의 저감효율은 46.3%로 높은 처리효율을 나타내기도 하였으며, 2차 조사 결과 또한 1차 조사와 비슷한 경향을 보여 하수처리수에 대한 인공습지의 수질정화 효과는 입자성물질과 유기물보다는 T-N 및 T-P가 높은 것으로 평가되었다. 특히 인에 대한 저감효과가 크게 나타나 공공수역에서의 부영양화 방지에 비교적 유용한 수질 정화기술 중 하나로 판단된다.

2차 조사 시 Y-1 지점과 동일하게 요소기술이 적용된 침강지, 침전지, 습지 침전지를 추가지점으로 선정하여 실내측정 항목에 대한 농도를 분석하였다. 대부분 항목이 침전지와 습

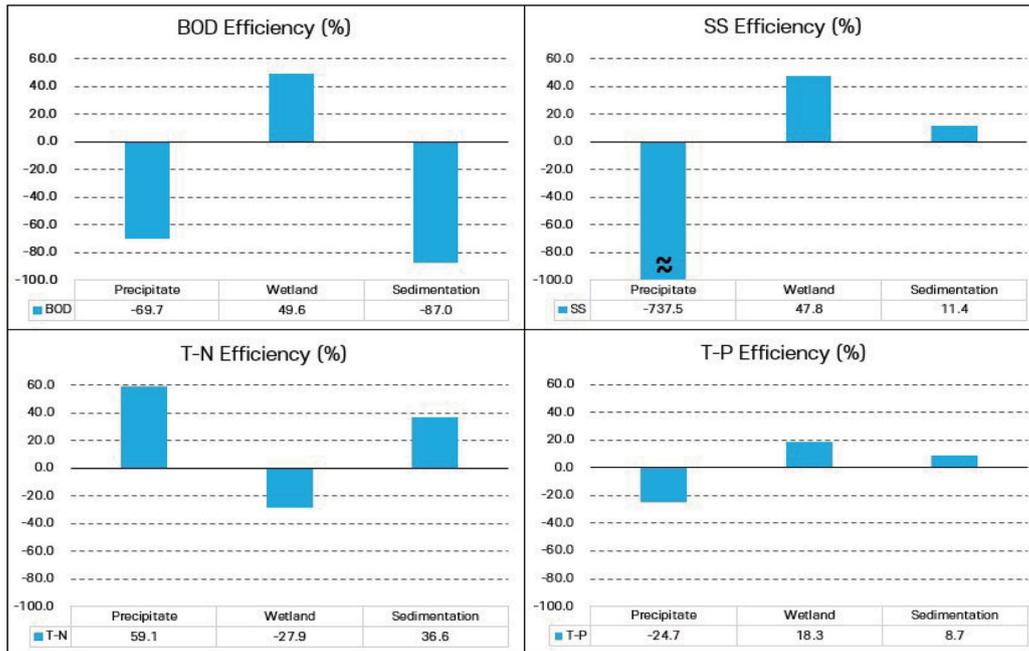


Fig. 3. Removal efficiency of parameters by location at Y-2.

Table 9. Inflow & outflow concentration and reduction efficiency by parameters at Y-2.

Y-2		BOD	TOC	SS	T-N	T-P
First survey	In _{avg} (mg L ⁻¹)	1.7	8.4	6.2	3.45	0.088
	Out _{avg} (mg L ⁻¹)	4.3	10.8	6.7	0.53	0.047
	Efficiency (%)	-155.6	-27.7	-8.1	84.5	46.3
Second survey	In _{avg} (mg L ⁻¹)	1.2	5.1	1.1	1.78	0.093
	Out _{avg} (mg L ⁻¹)	2.2	5.7	3.7	0.53	0.047
	Efficiency (%)	-77.9	-10.9	-236.4	70.3	49.6

지에서 농도가 증가했다가 침강지에서 감소한 것으로 보아 습지에서의 오염물질 제거 효과가 가장 큰 것으로 나타났다 (Fig. 3).

3. Y-3 인공습지에서의 수질변화 특성

Y-3 인공습지 지점은 비점오염물질을 처리할 목적으로 설치하였으며, 강우 시 현장조사를 통해 비점오염물질이 포함된 하천수의 유입수가 인공습지를 통과하면서 어느 정도 처리되는지를 평가하고자 하였다. Y-3 지점의 경우 다른 지점들과 달리 1차, 2차 조사에서 모든 항목(SS, BOD, TOC, T-N, T-P)에 대한 처리효율이 양의 값으로 도출되었다(Table 10). 특히 SS 항목의 경우 시간의 흐름에 따라 처리효율이 크게 증가하였는데, 이는 강우강도가 높아짐에 따라 유입수의 농도가 크게 증가하여 처리효율이 증가한 것으로 사료된다.

1차 조사 시 시간에 따른 유입수의 농도변화는 강우 후 30분이 지난 시점에서 2.4 mg L⁻¹로 가장 낮았고, 2시간이 지난 시점에서 가장 높은 106.4 mg L⁻¹의 농도로 나타났다. 유출수의 농도변화는 유입수와 달리 변동 폭이 크지 않은 것으로 나타나, 유입수 및 유출수의 평균 농도를 토대로 처리효율을 산정한 결과 85.3%인 것으로 나타났다(Fig. 4). 이와 같은 결과는 하천수가 유입되는 Y-3 지점이 강우 시 비점오염의 형

태로 주변 토사 및 협잡물이 다량 하천수에 유입되어 유입농도가 높아지고, 유입된 물질들이 습지 내에서 침전, 여과 등의 다양한 기작에 의해 제거됨으로써 처리효율이 높아진 것으로 판단된다.

2차 조사 시 유입수 및 유출수의 SS 농도 범위가 각각 51.6~143.6 mg L⁻¹, 0.4~10.0 mg L⁻¹인 것으로 조사되었다. 이에 따른 유입수 및 유출수의 평균농도는 각각 100.2 mg L⁻¹, 3.8 mg L⁻¹인 것으로 조사되어 전체적인 처리효율은 96.2%로 높게 나타났다. 이는 SS 항목의 처리효율이 강우특성에 따라 유입수의 농도의 영향을 받고 있으며, 1차 조사와 비교해 보았을 때, 유입수 농도가 약 2.5배 증가한 것 때문인지 전체적인 처리효율이 크게 증가하여 유입농도가 높을수록 처리효율은 크게 증가하는 것으로 판단된다(Fig. 5).

4. 유입수의 농도변화에 따른 인공습지의 처리효율 특성

전체 조사의 유입수 및 유출수 분석 결과와 처리효율을 검토한 결과, 유입수의 종류와 농도에 따라 처리효율 차별성이 나타났다. 우선 SS의 경우 하수처리수와 우수 유출수의 유입수 농도 차가 크게 나타났으며, 주로 비점오염원을 포함한 하천수는 고농도이면서 유입농도의 변동성이 큰 결과를 보였다. 결과적으로 유입수 농도가 높을 때 유출수 농도가 감소하

Table 10. Inflow & outflow concentration and reduction efficiency by parameters at Y-3.

Y-3		BOD	TOC	SS	T-N	T-P
First survey	In _{avg} (mg L ⁻¹)	6.0	3.8	30.3	2.78	0.189
	Out _{avg} (mg L ⁻¹)	4.7	3.1	8.3	1.95	0.147
	Efficiency (%)	22.1	19.6	72.8	29.9	22.2
Second survey	In _{avg} (mg L ⁻¹)	7.7	4.9	214.7	1.48	0.234
	Out _{avg} (mg L ⁻¹)	2.1	3.1	5.3	0.84	0.082
	Efficiency (%)	72.5	37.6	97.5	43.1	65.0

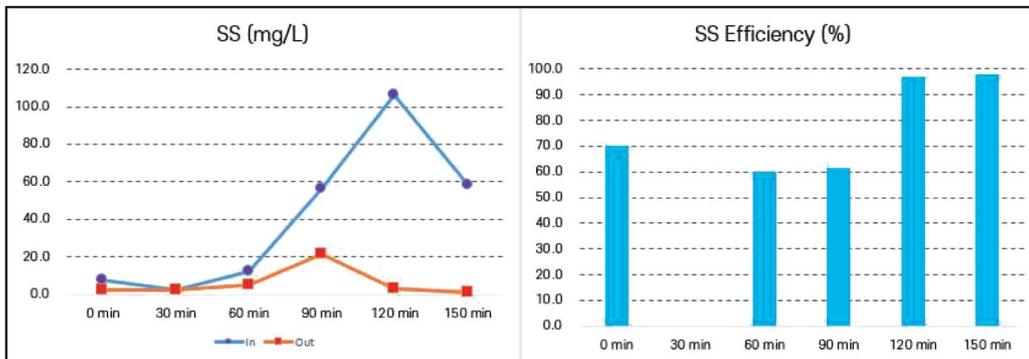


Fig. 4. SS concentration changes and SS efficiency over time in the first survey of Y-3.

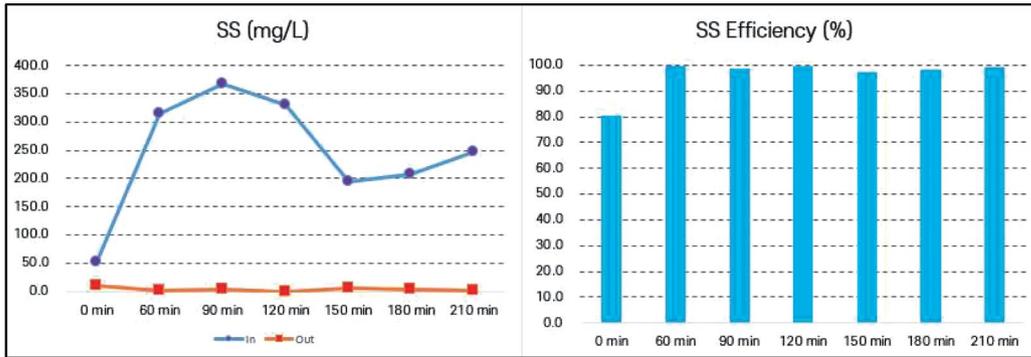


Fig. 5. SS concentration changes and SS efficiency over time in the second survey of Y-3.

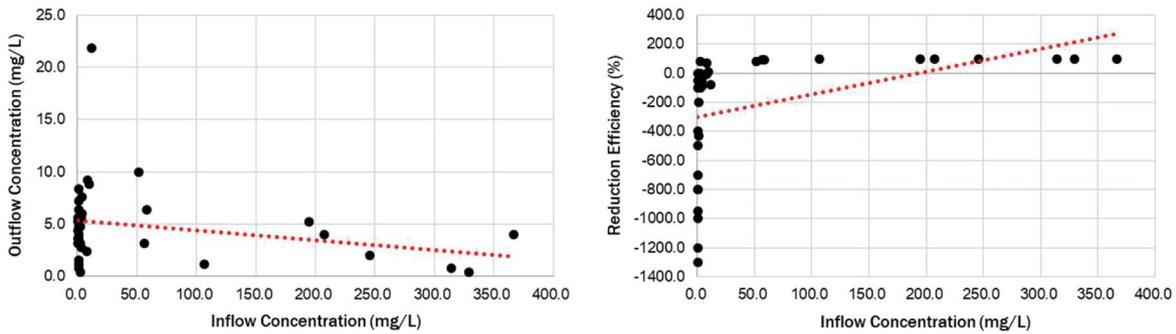


Fig. 6. Relations between inflow & outflow concentration and efficiency in SS,

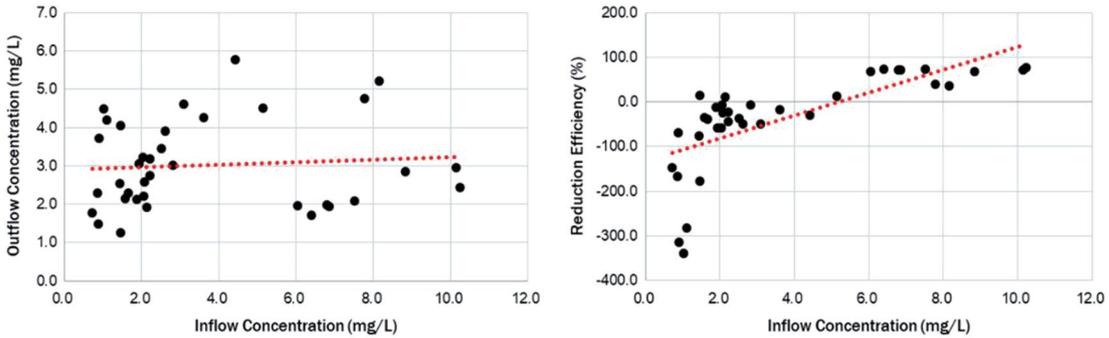


Fig. 7. Relations between inflow & outflow concentration and efficiency in BOD.

는 경향을 나타내고 있었다(Fig. 6). SS의 유입농도가 약 50 mg L^{-1} 이상에서 비교적 높은 처리효율을 나타냈으며, 이에 따라 유입농도가 높을수록 처리효율이 크게 증가하는 결과를 나타냈다.

BOD의 경우 SS와 마찬가지로 유입수의 농도가 대부분 저농도였으나, 고농도에서도 SS만큼 편차가 크지 않은 것으로 나타났다. 유입농도와 유출농도의 관계는 증가하는 경향을 보여 유입농도 증가에 따라 유출농도가 증가하는 것으로 나

타났으며, 유입농도와 처리효율의 관계도 증가하는 직선형태로 나타났다(Fig. 7). 결과적으로 BOD는 SS와 마찬가지로 유입농도가 높아질수록 처리효율이 증가하는 것으로 나타났으며, BOD의 농도가 5 mg L^{-1} 이상일 경우 정상적인 저감효과가 나타나는 것으로 판단된다.

T-N과 T-P도 마찬가지로 유입농도와 유출농도의 관계에서 증가하는 경향을 보였으나, 유출농도의 증가량이 유입농도의 증가량보다 크게 낮았으며, 낮은 농도에서도 비교적 처

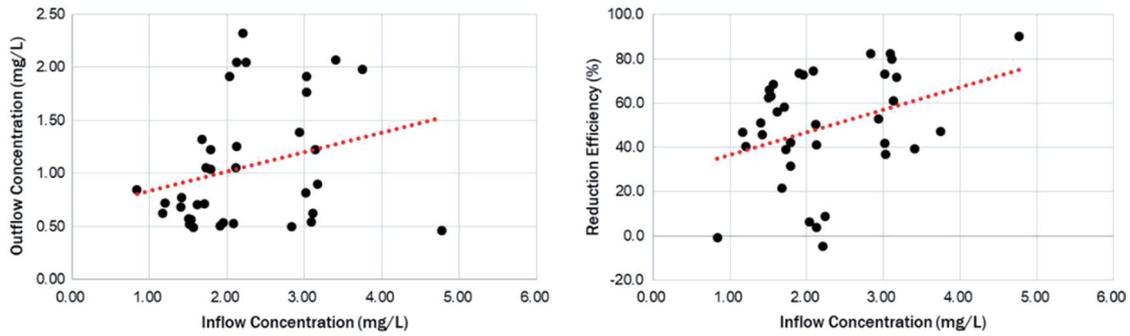


Fig. 8. Relations between inflow & outflow concentration and efficiency in T-N.

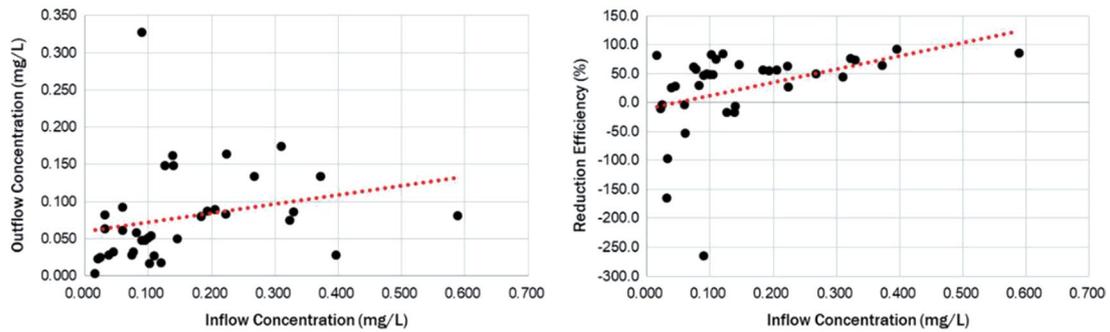


Fig. 9. Relations between inflow & outflow concentration and efficiency in T-P.

리가 잘 이루어지는 것으로 나타났다. 또한 유입농도와 처리 효율의 관계에서도 증가하는 경향으로 나타났으며, 전반적으로 처리효율이 높고 BOD와 SS와 비교했을 때 유입농도의 영향을 상대적으로 적게 받는 것으로 나타났다. 전반적으로 T-N과 T-P는 비슷한 경향을 보였으나, 유입농도에 따른 처리효율은 T-P가 더 크게 영향을 받는 것으로 나타났다 (Figs. 8, 9).

이와 관련된 선행연구(Choi *et al.*, 2011)에서도, 인공습지에 유입되는 오염물질 부하량이 높아짐에 따라 오염물질 처리량도 증가한다는 결과를 통해 인공습지로 유입되는 유입원수의 농도에 따른 처리효율은 상관성이 있음을 확인할 수 있다.

결론

하수처리수가 유입되는 Y-1과 Y-2 지점은 1·2차 조사에서 SS, BOD, TOC의 처리효율이 대부분 음의 값으로 나타나며 유입수 수질농도 대비 유출수의 수질농도가 더 높은 것으로 조사되었다. 이는 하수처리수가 물리적·생물학적 처리를 거쳐 저농도로 유입되기 때문에 처리효율이 저하되며, 특히 인공습지 내 식생의 광합성 작용에 의해 유기탄소가 생산되고

수중으로 방출되어 유출수의 탄소성 유기물질량이 증가한 것으로 사료된다. 그러나 T-N과 T-P의 경우, Y-1과 Y-2 지점의 T-N 처리효율은 평균 54.7%와 77.4%였으며, T-P 처리효율은 평균 16.0%와 47.9%로 양호한 제거효율을 보였다. 질소 및 인은 내부생산이 거의 없고 주로 외부에서 유입된 오염원을 소비하기 때문에 저농도의 유입수에도 유출수의 T-N과 T-P의 농도는 감소한 것으로 판단된다. 또한 질소와 인은 모든 생물체에 필수적인 물질이므로 식생이 성장하는 과정에서 흡수되었거나, 습지 내 토양층에서 흡착 및 입자물질 제거과정에서 공침 등의 영향에 의해 저감된 것으로 판단되기도 하며, 유기물의 분해(조류의 사멸) 시 영양염류를 고려할 필요가 있다고 판단된다.

반면 하천수와 강우 시 초기우수 유출수가 유입되는 Y-3 지점의 경우 모든 항목에서 높은 처리효율을 보였으며, 강우 시 항목별 평균 유입농도에 따른 유출수의 처리효율은 SS 90.8%, BOD 51.1%, TOC 30.6%, T-N 38.8%, T-P 55.3%로 나타났다. 이는 강우 시 초기우수 유출수로서 고농도 유입수로 인해 높은 처리효율이 나타난 것으로 판단된다.

결과적으로 하수처리수가 유입되는 Y-1과 Y-2 지점의 경우 T-N과 T-P 저감효과가 크기 때문에 부영양화 방지에 효과적이며, 하천수와 초기우수 유출수 처리를 목적으로 하는

Y-3 지점은 비점오염원에 의한 초기 유출부하량 감축에 효과적이라고 판단된다. 또한, 인공습지는 생태공간과 인근 주민들의 친수공간으로 활용되며, 난분해성 물질이나 이온성 물질 등에 대한 완충지로서 활용될 수 있다. 이를 통해 효과적인 인공습지 활용을 위해서는 처리대상 물질이 무엇인지에 따라 오염물질에 따른 처리기작을 고려하여 설계에 반영하는 것이 필요하다. T-N과 T-P 제거를 목적으로 인공습지를 조성하는 경우 인공습지의 구조변화를 통해 식생 점유율을 높이는 방법을 고려할 수 있다. 또한, 고농도 오염수에 대한 처리효율이 높았던 점을 고려하였을 때, 초기 고농도의 우수 유출수가 유입될 수 있도록 설계단계에서의 철저한 검토와 원활한 유입을 위한 관리가 필요할 것으로 사료된다.

적 요

본 연구에서는 인공습지의 유입수 조건에 따른 수질정화 효율을 분석하기 위하여 하수처리수가 유입되는 2개 지점과 우수 유출수가 유입되는 1개 지점에 대해 정화효율을 비교하였다. 유입수 및 유출수 분석 결과와 제거효율을 검토한 결과, 하수처리수를 처리하는 2개 지점의 경우 T-N과 T-P 제거효율이 각각 54.7%, 77.4%로 산출되었으며 우수 유출수가 유입되는 1개 지점의 경우 SS 90.8%, BOD 51.1%, TOC 30.6%, T-N 38.8%, T-P 55.3%의 처리효율이 나타났다. 결과적으로 인공습지의 오염물질 제거효율은 유입수 농도에 비례하는 것으로 나타났으며, 효율적인 인공습지를 조성하기 위해서는 고농도 오염수에 대한 제거효율이 높았던 점을 고려하여 설계단계에서의 철저한 검토와 관리가 필요한 것으로 판단된다.

저자 정보 이설준(경희대학교 환경응용과학과 석사과정), 은범진(경희대학교 환경응용과학과 석사과정), 김종환(경희대학교 환경응용과학과 박사과정), 최이송(경희대학교 환경학 및 환경공학과 겸임교수), 오종민(경희대학교 환경학 및 환경공학과 교수)

저자 기여도 개념설정: I.S. Choi, 방법론: I.S. Choi, 자료수집: S.J. Lee, B.J. Eun & J.H. Kim, 자료 관리: S.J. Lee, B.J. Eun, 분석: S.J. Lee, B.J. Eun & J.H. Kim, 원고 초안작성: S.J. Lee, B.J. Eun, 원고 교정: S.J. Lee, B.J. Eun, J.H. Kim, 원고 편집 및 검토: J.M. Oh, I.S. Choi, 과제관리: J.M. Oh, I.S. Choi, 연구비 수주: J.M. Oh, I.S. Choi

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

연구비 본 연구는 경기녹색환경지원센터의 연구비지원(1-70-71-05)의 지원을 받아 이루어졌습니다.

REFERENCES

- Choi, D.H., K.S. Choi, D.S. Kim, S.W. Kim, D.H. Choi, I.S. Hwang, Y.K. Lee and H. Kang. 2008. Temporal and Special Distributions of Water Quality and Evaluation of Pollutant Removal Efficiency in the Sihwa Constructed Wetland. *Journal of the Korean Society of Environmental Engineering* **30**(10): 1013-1020.
- Choi, I.W., S.D. Moon, D.C. Seo, S.W. Kang, B.J. Lim, J.H. Park, K.S. Kim, J.B. Lee, J.S. Heo and J.S. Cho. 2011. Evaluation of treatment efficiencies of pollutants in Bongsan constructed wetlands for treating non-point source pollution. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **44**(6): 1089-1094.
- Choi, K.S., S.W. Kim, D.S. Kim and Y.S. LEE. 2014. Operation Status and Improvement Plans of Ten Wetlands Constructed in Dam Reservoirs in Korea. *Journal of Wetlands Research* **16**(3): 431-440.
- Jung, Y.J. 2006. Case Study: Operation of the Juam Constructed Wetland for Effluent from a Sewage Treatment Plant and Diffuse Pollution for Two Years. *Journal of Korean Society on Water Quality* **22**(6): 1031-1037.
- Kang, T.W. and S.J. Lee. 2016. A simulation method for reduction facilities of natural type for non-point pollution by the SWMM. *Journal of Korean Hazard Mitigation Society* **16**(2): 123-131.
- Kim, P.J., E.Y. Han and Y.C. KIM. 2017. A Case Study Stormwater Treatment by Channel-Type Wetland Constructed on the Flood Plane of the Stream. *Journal of Wetlands Research* **19**(1): 80-89.
- Korean Environmental Management Corporation. 2003. A Study on the Creation Of Artificial Wetlands for Natural River Purification.
- Lee, S.Y., J.Y. Choi and L.H. Kim. 2015. Suggestion of appropriate design and maintenance in a constructed wetland using monitoring results. *Journal of Wetlands Research* **17**(4): 428-435.
- Ministry of Environment. 2016. Operation Manual for the Installation and Management of Non-point Pollution Reduction Facilities.
- Ministry of Environment. 2022. Water Pollution Process Test Criteria.
- Park, J.H., J.C. Rye, D.S. Shin and J.K. Lee. 2019. The Effective Approach for Non-Point Source Management. *Journal of Korean Wetlands Research* **21**(2): 140-146.
- Park, P.N. and Y.C. Cho. 2023. Removal Efficiency of Non-point Source Pollutants through Constructed Wetland: Case Study of Annaecheon Wetland in Daechong Reservoir. *Journal of Environmental Impact Assessment* **32**(5): 291-304.