

Research Paper

인공습지를 이용한 호소 유입 비점오염물질 제거 효율 평가: 대청호 안내천 습지 사례 분석

박별님^{*,**} · 조영철^{**}

K-water^{*}, 충북대학교 환경공학과^{**}

Removal Efficiency of Non-point Source Pollutants through Constructed Wetland: Case Study of Annaecheon Wetland in Daecheong Reservoir

Pyeol-Nim Park^{*,**} · Young-Cheol Cho^{**}

K-water^{*}

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University^{**}

요약: 녹조로 널리 알려진 남조류 과다증식은 심미적 불편감뿐만 아니라 독성물질을 생성하기 때문에 댐 수질 관리에 있어 큰 문제가 되고 있다. 녹조 발생을 억제하기 위하여 호소 유역으로부터 유입되는 비점오염물질 특히, 영양염류 저감이 필요하다. 본 연구에서는 친환경적 방법으로 알려진 인공습지의 장기간 운영 결과를 분석하여 비점오염물질 제어 수단으로서 인공습지의 적용 가능성 및 공정운영 관련 기초자료를 구축하기 위하여, 2014~2020년 동안 대청호 유역에 위치한 안내천 인공습지의 오염물질 처리효율을 분석하였다. 분석 결과, BOD 14.3%, COD 17.9%, SS 50.0%, T-N 19.0%, T-P 35.4%로 인공습지가 오염물질 제거에 효과적임을 확인하였다. 계절별 처리효율은 오염물질별로 다른 경향을 보였는데, 주로 미생물의 반응에 의해 제거되는 BOD, COD, T-N은 겨울철에 비해 봄~가을에 높은 처리효율을 나타내었다. 그러나 수생식물에 의해 주로 제거되는 T-P는 처리효율에 있어 겨울에도 안정적인 처리효율을 나타내 호소 유입부하를 저감하는 데 효과적임을 확인하였다. 오염부하에 따른 제거율은 모든 오염물질이 유입수의 중간농도 및 고농도 구간에서 유출수 농도가 통계적으로 유의하게 감소한 것으로 나타났다. 이는 초기 강우와 같은 고부하 조건에서도 인공습지가 호소로 유입되는 비점오염물질을 안정적으로 제거해 호소의 부영양화를 억제하는 데 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다. 다만, 습지는 자연정화에 기반한 시설로 인위적인 공정 제어가 어렵기 때문에 향후 유역별 특성에 따라 다양한 운영사례 연구가 정립된다면 우리나라 호소의 녹조 문제 해결을 위해 유용한 방법이 될 것으로 판단된다.

주요어: 인공습지, 비점오염 저감시설, 영양염류, 녹조, 안내천, 대청호

Abstract: Harmful algal blooms (HABs) have become an increasing concern in terms of human health risks as well as aesthetic impairment due to their toxicity. The reduction of water pollutants,

especially nutrients from non-point sources in a reservoir watershed, is fundamental for HABs prevention. We investigated the pollutant removal efficiencies of a constructed wetland to evaluate its feasibility as a method for controlling non-point sources located in the Annaecheon stream within the Daechong Reservoir watershed. The overall removal efficiencies of pollutants were as follows: BOD 14.3%, COD 17.9%, SS 50.0%, T-N 19.0%, and T-P 35.4%. These results indicate that constructed wetlands are effective in controlling pollutants from non-point sources. The seasonal variation in removal efficiency depended on the specific pollutants. The removal efficiencies of BOD, COD, and T-N were stable throughout the year, except during winter, which might have been influenced by lower microorganism activity. In contrast, T-P showed a consistent removal efficiency even during the winter season, suggesting that the wetland can reduce external phosphorus loading to the reservoir. Regarding the effects of pollutant loadings on removal efficiency, the effluent concentrations of all pollutants were significantly decreased compared to those in the influent in case of middle and high loadings. This demonstrates that constructed wetlands can handle high pollutant loads, including the initial runoff during rainfall, to prevent reservoir eutrophication. Despite the various strengths of wetland water purification, there are limitations as passive treatment. Therefore, more case studies should be conducted to suggest optimum operational conditions for constructed wetlands, taking into consideration reservoir-specific characteristics.

Keywords : constructed wetland, non-point source, nutrient, harmful algal blooms, Annaecheon stream

I. 서론

우리나라는 홍수피해 최소화와 더불어 음용수, 농업용수 등 안정적인 물 공급을 목적으로 전국에 많은 수의 댐을 설치하여 운영하고 있다. 이에 따라 댐·저수지는 국가 전체 취수량의 47.7%로 국내 수원별 취수원에서 가장 큰 비중을 차지하고 있다(MOE, 2021). 그러나 대부분의 댐에서는 매년 여름 수온상승과 강우로 인한 비점오염물질의 집중적인 유입으로 흔히 녹조로 알려진 남조류 과다증식이 주기적으로 발생해 문제가 되고 있다(Paul 2008; Ahn et al, 2015). 남조류는 anatoxin-a, saxitoxin 등의 신경독소, microcystins, nodularin 등의 간 독소를 생성해 심미적인 문제 뿐 만 아니라 사람의 건강위해 측면에서 큰 위협이 되고 있다(Rao et al, 2002; Christensen & Khan 2020; Karosiené et al, 2020). 녹조 발생은 기온, 강수, 호소 성층화(stratification) 등 다양한 인자와 연관성이 있지만(Chapra et al, 2017), 주로 질소, 인과 같은 영양염류 외부 유입에 의해 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Michalak et al, 2013; Ahn et al, 2015). 따라서 호소로 유입되는 영양염류

부하를 저감하는 것이 녹조 발생 및 이와 관련된 수질 악화를 제어하는 가장 근원적인 방법이라 할 수 있다.

취수원으로 활용되는 댐 유역은 수도법, 금강수계물관리 및 주민지원 등에 관한 법률 등 4대강 수계법에 의해 상수원 보호구역, 수변구역으로 지정되어 공장과 같은 수질오염물질 배출원의 설치가 엄격히 제한되기 때문에, 호소로 유입되는 영양염류는 주로 인근 지역 농경 활동에 기인하는 경우가 많다. 즉, 배출원을 특정하기 어렵고 강우와 함께 유입되는 비점오염원을 통해 배출되는 질소, 인 등의 영향을 크게 받는다. 우리나라 중부권의 중요 식수원인 대청호의 경우는 저수 면적에 대한 유역 면적의 비가 크고, 상류 지역 거주인구가 많아 강우시 다량의 영양염류가 유입되는 특성이 있다(Park et al, 2016). 또한 넓은 유역면적으로 인해 서화천, 안남천, 안내천, 회인천 등 다양한 지천이 호소로 직접 유입되기 때문에 비점오염원 관리에 어려움이 있다(Shim et al, 2015). 이에 따라 2000년대 이후 대청호 유역의 주요 지천에 비점오염물질 제어를 목적으로 인공습지가 설치되어 운영되고 있다.

인공습지는 비점오염원 제어방법 중 하나로 수생

식물 식재를 통해 영양염류를 제거하는 것으로 (Maucieri et al, 2020; Kill et al, 2022) 여과장치형 시설, 우수 분리 장치형 시설 등이 대규모 배수지역에 설치가 힘든 것과 달리, 댐과 같은 넓은 유역에 적용할 수 있는 장점이 있다. 또한 수변공간을 활용한 경관개선, 휴식처 제공 등 심미적, 사회적 부가효과도 기대할 수 있어 비점오염원 제어의 방법으로 활용되고 있다(Choi & Ban 2007; Lee et al, 2015). 하지만 인공습지는 자연형 처리시설로 다른 처리시설과 다르게 목적에 따른 단위공정의 인위적인 제어에 한계가 있다. 또한 우리나라의 경우 습지 운영에 참조할 만한 운영사례가 충분히 구축되어 있지 않으며, 운영 효율에 대한 연구 기간이 건설 초기의 수개월에서 3년 이내로 인공습지 처리효율에 대한 단기간 연구가 많이 수행되었다. 이에 따라 본 연구에서는 대청호 상류 유역의 하천인 안내천에 설치된 인공습지의 유입수 및 유출수 중 오염물질을 분석하여 물질별 처리효율을 분석하였다. 연구 기간은 2014년부터 2020년까지 총 7년으로, 장기간 분석을 통하여 평균적인 오염물질 제거효율뿐만 아니라 계절별, 유입농도 구간별

제거특성 및 연도별 제거효율 등 습지 운영에 필요한 시사점을 도출하고자 하였다. 이를 바탕으로 비점오염원 제어방법으로서 인공습지의 적용 가능성을 평가하였고, 유입농도, 계절 등 여러 인자에 따른 처리효율 특성을 분석하여 인공습지 장기운영을 위한 기초 자료를 마련하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구의 대상시설인 안내천 인공습지는 안내천의 대청호 합류부인 충청북도 옥천군 안내면 현리에 2004년 12월 준공되어 현재까지 운영되고 있으며, 총 면적은 22,450m²이고, 시설용량은 13,062m³, 수리학적 체류시간(HRT)는 48시간이다. 습지의 주요 유입수는 다양한 비점오염원이 유입되는 안내천의 하천수이며, 고정적으로 안내하수처리장 방류수가 최대 190m³/day 유입되도록 건설되었으며(K-water 2014), 맨홀에서 차집한 하수처리장 방류수는 관로를 통해 자연유하로 EL. 75.5 m 지점의 침강지로 유입

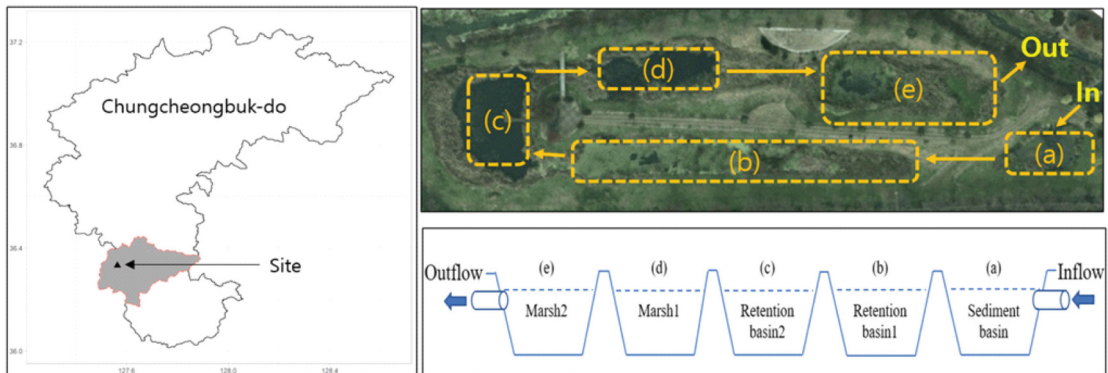


Figure 1. Geographical locatoion of study facility and layout of each unit

Table 1. Specification of the unit in Annaecheon wetland

Unit	Area (m ²)	Capacity (m ³)	Depth (m)	Water level (EL.)	Floor height (EL.)
Sediment basin	2,130	1,888	2.5	77.0	74.5
Retention basin1	6,220	3,104	1.4	76.0	74.6
Retention basin2	4,980	3,471	1.8	76.0	74.2
Marsh1	4,420	1,725	1.5	76.0	74.5
Marsh2	4,700	2,874	1.5	76.0	74.5
Total	22,450	13,062	-	-	-

된다. 대상 습지는 Figure 1에 제시된 바와 같이 5개의 단위공정으로 구성되어 있으며, 각 단위공정별 면적과 용량은 Table 1과 같다.

하천수의 원활한 유입을 위해 안내천의 하상고 EL. 76 m에서 0.3 m 높이를 수제(돌 징검다리)를 설치하여 하천수를 습지의 유입구로 유인하고 침강지로 유입되도록 하였다. 하천 제방에 설치한 유입구는 폭 1 m, 높이 1.2 m의 상자 형태이며 전단부에 협잡물을 제거하기 위한 스크린이 설치되어 있다. 침강지는 유입수에 포함된 부유물 및 고형물을 제거하기 위한 자연 침강 방식으로 이루어져 있으며, 저류지는 2개소로 저류지1의 일부에는 저수기 및 갈수기에도 물이 유통되도록 하며, 저류지2와 인공습지1은 평수기 이상의 수위에서 물흐름이 있도록 설계되었다. 습지의 주요 식재식물은 물억새, 갈대, 애기부들, 창포 등이었으며, 저류지와 습지에서는 미생물에 의한 작용과 갈대 등 수생식물에 의해 유기물과 영양염류를 제거하도록 하였다. 유출구는 처리된 하천수의 방류 및 평상시 하천수의 역류를 방지하기 위한 시설로 구성되어 있다(K-water, 2014).

2. 시료채취 및 분석

안내천 인공습지의 수질오염물질 처리효율 산정을 위해 2014년 1월부터 2020년 12월까지 유입수 및 유출수를 각각 월 2회 채수하여 84회 분석하였다. 유입수는 침강지 유입지점에서, 유출수는 습지2 유출부에서 채수하였다. 시료 분석은 총 14개 항목에 대해 이루어졌으며 수온, pH, 용존산소(DO), 전기전도도(EC)와 같은 현장측정 항목은 휴대용 수질자동계측기(YSI 6600VD, YSI Inc., OH, USA)를 사용하여 측정하였다. 수중 유기물질의 지표인 생물화학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD), 부유물질(SS) 및 암모니아성 질소(NH₃-N), 질산성 질소(NO₃-N), 용존성 총질소(DTN), 총질소(T-N), 인산염인(PO₄-P), 용존성 총인(DTP), 총인(T-P)의 영양염류 항목은 수질오염공정시험기준(MOE, 2016)에 따라 채수 후 실험실에서 분석하였다.

3. 통계분석

본 연구의 주요 목적인 인공습지를 통한 오염물질의 제거효율은 유입부와 유출부에서 84회 채수하여 분석한 오염물질별 농도를 이용해 산정하였다. 또한, 인공습지 처리후 오염물질의 농도가 통계적으로 유의하게 감소하였는지를 확인하고자 정규성 검정을 실시한 결과 정규성이 확인되지 않았기에 비모수적 통계 방법인 Wilcoxon rank sum test를 이용하였다. 데이터의 정규분포 여부는 Kolmogorov-Smirnov test를 이용해 검정하였다(Mishra et al, 2019). 모든 분석은 통계 소프트웨어인 R(version 4.1.1)을 이용하여 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 오염물질별 처리효율

유기물질의 지표인 BOD, COD, SS의 평균 제거율은 각각 14.3%, 17.9%, 50.0%로 습지의 느린 유속에 의해 SS가 크게 저감되는 것으로 확인되었다(Table 2). 강우의 영향으로 SS 유입농도는 최소 0.2 mg/L부터 최대 183.3 mg/L까지 변동이 크게 나타났다. 대청호의 다른 인공습지인 서화천 인공습지의 경우 같은 기간 동안 유입수의 SS의 농도는 0.4~24.0 mg/L의 범위를 나타낸 것을 고려할 때(Park & Cho 2023), 연구대상 습지의 유입수 중 SS가 상대적으로 큰 폭의 변동을 나타냈음을 알 수 있다. 이는 서화천 인공습지의 경우 상류 옥천하수처리장 방류 유량이 습지 설계용량의 66%인 반면 안내천의 인공습지는 설계용량(13,062 m³/day) 대비 하수처리장 방류수의 유입유량(190 m³/day)인 약 1.5%로 낮아 상대적으로 강우의 영향을 크게 받기 때문으로 판단된다.

유입농도의 높은 변동에도 불구하고, SS는 습지에서 안정적으로 처리되어 유출농도, 유출농도 범위, 편차가 모두 상당히 감소한 것으로 나타났다. SS는 습지에서 느려진 유속에 침전되거나 식생에 의한 여과, 토양에 의한 흡착으로 제거되는데, 이 과정을 통해 SS와 밀접한 비용존성의 BOD 및 COD도 침전, 여과, 흡착 등 물리적 처리와 가수분해를 통한 용존성 유기물

Table 2. Descriptive statistics of pollutant concentrations in inflow and outflow

Pollutant	Site	Concentration (mg/L)				Removal Efficiency (%)
		Avg. (S.D.)	Min	Median	Max.	
BOD	In	2.1 (1.2)	0.3	1.8	8.5	14.3
	Out	1.8 (1.0)	0.1	1.5	8.9	
COD	In	3.9 (1.6)	0.6	3.6	10.6	17.9
	Out	3.2 (1.0)	1.0	3.1	6.9	
SS	In	5.6 (16.0)	0.2	2.8	183.3	50.0
	Out	2.8 (3.4)	0.3	2.0	27.6	
T-N	In	3.743 (1.256)	1.743	3.617	10.759	19.0
	Out	3.031 (1.312)	1.037	2.906	10.435	
NH3-N	In	0.070 (0.167)	0.008	0.046	2.130	40.0
	Out	0.042 (0.046)	0.000	0.029	0.390	
NO3-N	In	1.836 (0.935)	0.198	1.666	7.694	26.5
	Out	1.350 (1.057)	0.009	1.194	9.468	
T-P	In	0.110 (0.172)	0.017	0.069	1.785	35.4
	Out	0.071 (0.111)	0.006	0.047	1.337	
PO4-P	In	0.050 (0.072)	0.000	0.025	0.593	46.0
	Out	0.027 (0.034)	0.000	0.017	0.181	

Table 3. Correlation between pollutant removal efficiency and rainfall during 2014-2020

Pollutant	Coefficient	95 percent confidence interval
BOD	0.113	-0.104 ~ 0.320
COD	-0.033	-0.246 ~ 0.183
SS	0.090	-0.126 ~ 0.299
T-N	-0.052	-0.264 ~ 0.164
T-P	-0.262	-0.451 ~ -0.051

로 변화되는 생물학적 처리 과정을 통해 제거되는 것으로 알려져 있다(Seo et al, 2009; Lee et al, 2011). 월별 누적 강우량과 오염물질 제거율의 상관분석을 실시한 결과 다른 물질과 더불어 SS 역시 상관관계가 확인되지 않아 유입농도 뿐만 아니라 유량이 변동되는 조건하에서도 안정적으로 처리가 이루어짐을 보여 준다(Table 3).

T-N, T-P의 처리효율은 각각 19.0%, 35.4%로 양호하게 나타나 습지가 호소 부영양화 원인 물질인 영양염류 제어에 있어 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다. NO₃-N 및 NH₃-N의 처리효율은 각각 26.5%, 40.0%였으며, 습지 내 질소의 제거는 질산화 세균에 의해 암모니아성 질소를 질산화 질소로 변화

시키는 질산화와 통성 혐기성 미생물에 의해 일어나는 탈질 과정을 거친다. 질산화 과정에는 유기물질이 탄소원으로 사용되며, DO, pH, 온도 등의 영향을 받는다(Jeong et al, 2009). 또한 탈질이 원활하게 이루어지기 위해서는 무산소상태가 요구되며, 주로 습지 내 침전물, 산소 결핍상태의 수층 또는 수생식물 뿌리 부근에서 질산이온의 환원이 일어난다(Lee et al, 2009; Shin et al, 2009). 이와 같이 질소는 습지 내 수생식물에 의한 흡수 및 흡착에 의해서도 제거가 되지만 주요 제거 기작은 질산화 및 탈질 미생물에 의한 생물학적 처리로 인공습지 내 질소 제거의 42.9%가 질산화, 탈질에 의해 이루어진다고 알려져 있다(Mander et al, 2003). 본 연구에서 탈질 단계의 질소 형태인 NO₃-N 처리효율과 T-N 처리효율의 상관관계를 분석한 결과 상관계수는 0.655로 강한 양의 상관관계를 갖는 것도 이를 뒷받침한다. 안내천 생태습지의 유입수 내 DTN/T-N의 비는 0.903이었으며, DTN/T-N의 비가 0.5이하인 경우만 별도로 분석한 결과 T-N의 총 처리효율은 15.7%로 평균 처리효율보다 낮게 나타나 유입수 중 질소의 형태가 질소 제거에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 질소의 제

거 효율을 높이기 위해서는 질산화를 위한 충분한 산소 공급, 탈질을 위한 유기물의 공급 등 적정 반응 조건의 충족이 필요하지만 인공습지는 인위적 환경 조성이 어렵기 때문에 최적의 처리조건 조성이 어렵다 (Bayley et al. 2003). 특히, 안내천 인공습지는 수리학적 체류시간이 48시간으로 상대적으로 다른 인공습지에 비해 짧았는데 질소 처리에 있어 제한 인자로 작용한 것으로 판단된다. 이는 체류시간이 길수록 질산화, 탈질화 반응을 할 수 있는 시간이 길어 질소 제거율이 높아지기 때문이다(Yang 2001). 안내천 인공습지보다 수리학적 체류시간이 긴 신평천 인공습지, 동복천 인공습지에서는 질소제거율이 각각 24.0%, 31.0%로 높게 나타난 것이 이를 뒷받침한다(Seo et al., 2011, lee et al., 2011).

반면, T-N에 비해 높은 34.5%의 제거효율을 보인 T-P는 식생의 영향을 더 많이 받는데, 습지 내 인은 습지식물에 의한 흡수, 토양 내 침전·흡착, 수체 내 침전물 형성, 미생물에 의한 흡수 등으로 처리된다 (Song et al. 2007; Ko et al. 2010). 입자성 인의 경우 SS와 마찬가지로 침전, 흡착, 여과등의 물리적 기작에 의해 주로 처리된다. 안내천 생태습지의 경우 T-P의 31.1%에 해당하는 입자성 인이 유입되었으며,

T-P의 농도가 높아질수록 입자성 인의 비율이 높아졌으며 T-P의 제거효율도 상승하는 것으로 분석되었다. 인 제거의 가장 중요한 기작은 흡착으로 호기성 상태에서 PO₄-P 이온이 Fe³⁺, Al³⁺, Ca³⁺ 등과 결합해 침전물을 형성하여 제거되는 것으로 알려져 있다(Sundaravadivel & Vigneswaran 2001). 안내천 인공습지에서 PO₄-P의 제거효율은 46.0% 였으며 T-P 대비 PO₄-P 비율이 유입수는 45.0%에서 방류수는 38.9%로 PO₄-P 이온의 제거가 원활히 이루어진 것으로 분석되었다. 수생식물에 의해 직접적으로 흡착, 제거되는 인 화합물이 효과적으로 제거되는 것으로 판단할 수 있다.

2. 계절별 처리효율

우리나라와 같은 몬순기후는 강우가 여름에 편중되어 있고, 계절에 따른 평균기온의 차이가 크기 때문에 기후가 수생태계 및 식생에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Kim & Hwang 2004). 식생을 비롯한 습지 생태계는 인공습지의 오염물질 처리에 있어 핵심적인 역할을 하기 때문에 습지 운영 및 관리를 위해 계절에 따른 처리효율 분석이 필요하다. 계절별 처리특성을 확인하기 위해 봄(3월~5월), 여름

Table 4. Seasonal average and range of pollutant concentrations in inflow and outflow

Pollutant	Site	Spring	Summer	Fall	Winter
BOD (mg/L)	in	2.0 (0.3-4.1)*	2.0 (0.8-5.2)	2.4 (0.4-8.5)	2.0 (0.9-6.2)
	out	1.8 (0.1-7.4)	1.6 (0.3-3.5)	2.0 (0.6-8.9)	1.8 (1.0-6.0)
COD (mg/L)	in	3.9 (1.8-7.2)	4.1 (2.1-9.1)	4.1 (0.6-10.6)	3.3 (1.4-8.8)
	out	3.1 (1.3-6.0)	3.5 (1.3-6.9)	3.3 (1.4-5.4)	3.0 (1.0-5.0)
SS (mg/L)	in	3.4 (0.4-14.0)	8.9 (0.4-183.3)	7.1 (0.2-77.6)	2.9 (0.4-11.2)
	out	2.4 (0.4-11.6)	3.7 (0.8-23.3)	3.5 (0.3-27.6)	1.7 (0.4-4.4)
T-N (mg/L)	in	3.469 (2.105-6.677)	3.341 (1.752-9.041)	3.673 (1.743-8.691)	4.490 (2.651-10.759)
	out	2.642 (1.037-4.776)	2.645 (1.192-8.271)	2.901 (1.183-6.664)	3.957 (2.205-10.435)
NH ₃ -N (mg/L)	in	0.060 (0.011-0.219)	0.055 (0.012-0.152)	0.054 (0.008-0.148)	0.111 (0.010-2.130)
	out	0.031 (ND-0.170)	0.038 (ND-0.175)	0.038 (ND-0.105)	0.060 (0.003-0.390)
NO ₃ -N (mg/L)	in	1.931 (0.914-4.025)	1.474 (0.640-3.376)	1.623 (0.481-3.543)	2.316 (0.198-7.694)
	out	1.244 (0.076-3.908)	0.984 (0.009-2.294)	1.094 (0.055-2.281)	2.096 (0.072-9.468)
T-P (mg/L)	in	0.074 (0.022-0.265)	0.109 (0.017-1.785)	0.152 (0.021-1.101)	0.105 (0.028-0.394)
	out	0.047 (0.006-0.261)	0.085 (0.009-1.337)	0.078 (0.015-0.287)	0.073 (0.015-0.198)
PO ₄ -P (mg/L)	in	0.030 (0.001-0.173)	0.045 (0.005-0.593)	0.074 (ND-0.385)	0.048 (0.002-0.241)
	out	0.013 (ND-0.104)	0.026 (0.001-0.152)	0.033 (ND-0.179)	0.038 (0.001-0.181)

* Numbers in parentheses indicate the range(minimum to maximum) of data

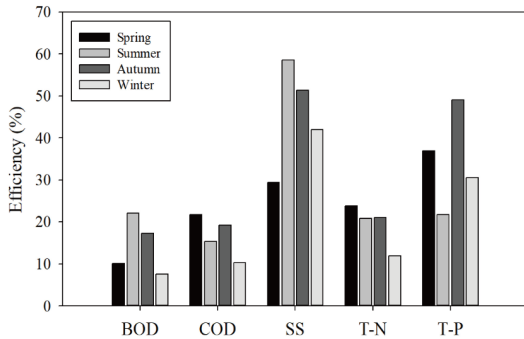


Figure 2. Seasonal removal efficiency of major pollutants during 2014-2020

(6월~8월), 가을(9월~11월), 겨울(12월~2월)로 그룹을 나누어 유입수 및 유출수 중 농도를 분석하여 (Table 4), 계절별 처리효율을 산정하였다(Figure 2).

유기물질 중 BOD는 제거효율이 여름에 22.1%로 가장 높았으며, 겨울에 7.6%로 가장 낮은 것으로 나타났다. 이는 BOD 중 주로 미생물에 의해 제거되는 용존성 BOD가 영향을 받았기 때문으로 추정된다. 즉, 침전에 의해 제거되는 비용존성 BOD는 온도에 따른 영향이 적지만, 겨울철에 갈대 등 습지 식생이 고사되고 온도에 따라 미생물의 활성이 크게 낮아져 용존성 BOD의 제거가 낮아진 것으로 판단된다(Seo et al. 2011). COD 역시 겨울철 처리효율이 10.3%로 다른 계절의 처리효율이 15.3%에서 21.7%인 것에 비해 낮게 나타났다. 습지에서의 COD 제거는 BOD와 마찬가지로 침전과 미생물에 의한 분해에 기인하는데, 겨울철의 낮은 온도로 인해 미생물의 활성이 저하되어 처리효율이 영향을 받은 것으로 판단된다.

BOD, COD와 다르게 SS는 모든 계절에서 약 30% 이상의 높은 제거효율을 보였으며 앞서 BOD, COD의 겨울철 낮은 제거율이 용존성 유기물 분해에 기인했을 것이라는 추정을 뒷받침한다. SS는 여름에 58.6%로 가장 높은 효율이 확인되었다. 여름철의 경우 집중적인 강우로 인해 SS 부하가 높게 유입되는 경우가 다른 계절에 비해 빈번히 발생하는데, 침전 및 식생에 의한 여과가 효과적으로 이루어져 제거효율이 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한 침전 및 여과에 의해 습지에서 상대적으로 신속하게 제거되고, 생물학적 반응에 의한 제거되는 분율이 적어 BOD, COD

에 비해 처리효율이 수온의 영향을 적게 받은 것으로 보인다.

오염물질 제거 기전에 따른 계절별 처리효율의 영향은 영양염류에서도 확인되었다. T-N의 경우 봄, 여름, 가을철 각각 23.8%, 20.8%, 21.0%로 20% 이상의 처리효율을 지속적으로 나타냈으나, 겨울철에는 11.9%로 매우 낮은 값을 보였다. 질산화 미생물의 성장률은 온도에 많은 영향을 받으며, 저온에서는 *Nitrobacter*에 의한 질산성 질소 생성이 전체 질산화 속도를 결정하게 된다. 일반적으로 10℃에서는 30℃ 대비 질산화 반응이 27% 정도로 감소하며, 탈질 미생물도 온도 저하에 따라 활성이 저하되어 5℃에서의 탈질율은 20℃ 대비 20%인 것으로 알려져 있다(Ahn et al. 2011). 이는 T-N의 약 49.0%인 NO₃-N의 처리효율이 봄, 여름, 가을에는 모두 30% 이상이었으나 겨울에 9.5%로 급격히 낮아진 것에서도 확인되었다.

T-P는 SS와 마찬가지로 모든 계절에서 양호하게 제거되었으며, 가을철에 49.1%로 처리효율이 가장 높았으며 겨울철에도 30.5%의 제거효율을 보였다. 반면에 여름철에는 21.7%로 다른 계절에 비해 처리효율이 낮았다. 습지 내 인의 95% 이상은 유기물의 침전과 고사된 습지식물 잔재물로 이루어진 습지바닥의 퇴적층에 흡착되어 있다. 봄, 가을, 겨울철에는 퇴적층의 교란이 발생하지 않지만 여름철에는 집중 강우로 인해 퇴적층의 교란, 유실로 다른 계절에 비해 T-P 제거율이 낮아진 것으로 판단된다(Yang 2001). T-P는 습지의 건조 후 재 담수되거나 혐기화 될 경우 금속이온과 결합되어 있는 인삼염인이 재 용출되어 처리효율이 낮아질 수 있다(Song et al. 2007; Ko et al. 2010). 그러나 안내천 인공습지의 경우 안정적인 유입, 유출 흐름으로 항상 담수상태를 유지하며 식생의 주기적 제거로 T-P의 제거에 효과적인 것으로 분석되었다.

3. 유입농도별 처리효율

식생에 의한 흡수 및 흡착은 인공습지에서 오염물질의 주요 제거 기전으로 체류시간, 기후조건 등 다양한 인자의 영향을 받는다(Saeed & Sun 2012). 특히, 식생에 의한 오염물질 처리용량은 한정되어 있

Table 5. Interval of inflow pollutants concentrations

Pollutant	Low	Middle	High
BOD (mg/L)	< 1.4	1.4 - 2.4	> 2.4
COD (mg/L)	< 2.9	2.9 - 4.3	> 4.3
SS (mg/L)	< 1.6	1.6 - 4.3	> 4.3
T-N (mg/L)	< 2.956	2.956 - 4.243	> 4.243
T-P (mg/L)	< 0.039	0.039 - 0.126	> 0.126

기 때문에 오염부하는 습지 운영에 있어 중요한 인자로 작용하며(Li et al, 2018), 질소, 인의 경우 상대적으로 더 큰 영향을 받기 때문에 유입부하에 따른 오염물질 제거 특성을 분석할 필요가 있다(Wu et al, 2015). 유입부하가 처리효율에 미치는 영향을 분석하기 위해 오염물질의 유입농도를 세 구간으로 나누어 각 구간의 처리효율을 분석하였다. 농도 구간 구분은 각 오염물질의 유입농도 분포에서 1분위수, 3분위수를 기준으로 활용해 유입농도가 1분위 미만의 경우 저농도(Low), 1분위 이상 3분위 이하일 경우 중간농도(Middle), 3분위 초과인 경우 고농도(High)로 구분하였다(Figure 3; Table 5).

유기물질의 지표인 BOD, COD, SS는 공통적으로 중간농도 및 고농도 구간에서 유출수 중 농도가 유입수 농도에 비해 통계적으로 유의하게 감소된 것이 확

Table 6. Wilcoxon rank sum test p-value for inflow and outflow concentrations for each interval

Pollutant	Low	Middle	High
BOD	0.534	< 0.001**	< 0.001**
COD	0.372	< 0.001**	< 0.001**
SS	0.045*	< 0.001**	< 0.001**
T-N	< 0.001**	< 0.001**	< 0.001**
T-P	< 0.001**	< 0.001**	< 0.001**

*, **: significant at 95% and 99% confidence level, respectively

인되었다($p < 0.001$; Table 6). 또한, 고농도 구간에서 처리효율이 가장 높아 연구기간 동안 습지로 유입된 오염부하가 식생에 의한 처리용량 이하로 유입되었으며, 높은 부하 조건에서도 수질 정화가 충분히 이루어짐을 알 수 있다. 그러나 저농도 구간에서는 BOD, COD, SS의 처리효율이 각각 -14.9%, -15.7%, -69.6%로 유출수의 농도가 유입수보다 높게 나타났다. 습지 내 고사한 수생식물의 부패와 조류 성장은 많은 연구에서 인공습지에서 음의 처리효율이 나타나는 주요 원인으로 보고되었는데(Lee et al, 2012; Seres et al, 2017; Choi et al, 2021), 유입수 중 유기물 농도가 매우 낮은 경우 더욱 영향을 받은 결과로 판단된다. SS의 경우 유입농도 1.6 mg/L 이상 4.3 mg/L 이하의 중간

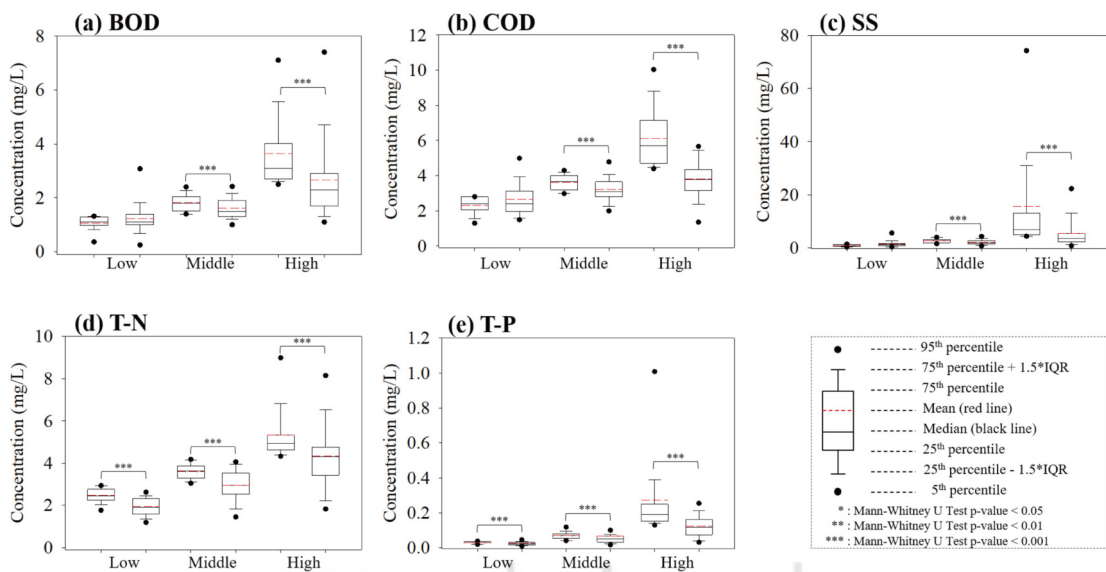


Figure 3. Boxplot of inflow and outflow concentration of BOD, COD, SS, T-N, and T-P for inflow concentration interval during 2014-2020

농도 구간에서는 23.4%, 4.3 mg/L를 초과하는 고농도 구간에서 65.3%의 높은 제거율을 나타내, 유입수 농도가 높아질수록 처리효율이 증가하는 뚜렷한 경향을 보였다. 고농도의 유입농도는 42.9%가 여름에 발생하였다. 이는 여름철 장마 기간의 영향을 받은 것으로 유입수의 수질이 중간농도구간 이하의 평균이 2.2mg/L인데 반해 고농도 구간은 평균 15.6mg/L로 상승하였으나 인공습지 처리를 거친 유출수 평균 수질은 5.4mg/L로 집중적인 강수에 의해 발생한 고농도의 SS가 호소에 유입되기 전 습지에서 상당히 저감될 수 있음을 보여준다.

영양염류인 T-N, T-P의 경우 유기물질과 다르게 전 구간에서 유입수와 유출수 중 농도가 통계적으로 유의한 차이가 있음이 확인되었다($p < 0.001$; Table 6). 부유물질이 기여하는 비율이 상대적으로 큰 BOD, COD와 다르게 질소, 인 화합물은 용존성 물질 비율이 각각 90.3%, 69.5%였으며 DTN 및 DTP의 처리효율은 21.8%, 53.2%였다. 이에 따라 저농도 구간에서도 T-N, T-P의 처리효율이 각각 21.1%, 14.5%로 미생물 및 식물 등에 의해 양호하게 처리된 것으로 판단된다. 구간별 제거효율에 있어서 T-N은 저농도 구간 21.1%, 중간농도 구간 18.1%, 고농도 구간 18.8%의 처리효율을 보여 유입부하에 따른 처리효율의 차이가 크지 않았다. 다만 농도 구간별 DTN/T-N 비는 고농도에서 0.81이었으며, 저농도 구간에서는 0.935로 저농도 구간에서 용존성 질소 비율이 상대적으로 높아 질산화, 탈질 반응이 원활히 일어나 고농도 구간보다 T-N 제거효율이 높게 나타난 것으로 판단된다. 반면에 T-P는 고농도 구간에서 54.8%로 저농도 및 중간농도 구간에 비해 상당히 높은 처리효율을 보였다. 고농도 부하에서의 높은 처리효율은 다양한 인공습지 연구 사례에서 보고되었으며(Kang & Song 2004; Choi et al. 2008), T-P의 유입 농도가 고농도 구간에서 입자성 인의 비율이 40.5%로 서화천 인공습지와 유사하게(Kim & Park 2020; Park & Cho 2023) 입자성 인이 침강으로 많은 부분이 제거가 되어 T-P 처리효율이 높아진 것으로 판단된다.

4. 연도별 처리효율

인공습지의 장기운영에 따른 처리효율 변화 특성을 확인하고, 운영을 위한 기초자료를 확보하고자 2014년부터 2020년 동안 기간 경과에 따른 오염물질의 연도별 처리효율을 분석하였다. 분석 결과 모든 오염물질에 적용되는 공통적인 경향은 확인되지 않았으나, 일부 오염물질 사이에서 몇 가지 유사한 특성이 확인되었다. BOD와 COD의 경우 운영 기간 경과에 따른 처리효율의 증감은 뚜렷하게 존재하지 않았으며,

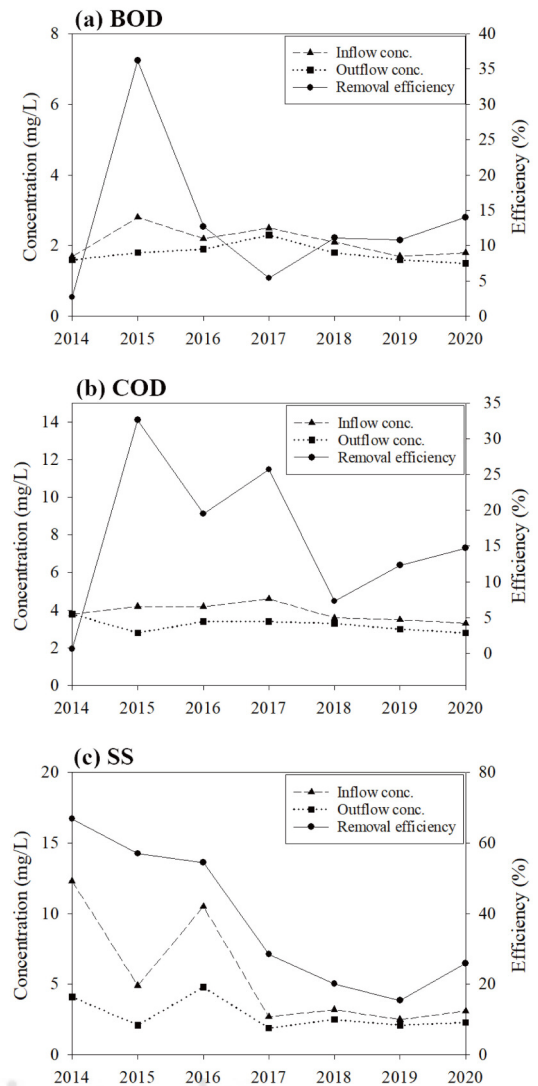


Figure 4. Yearly trends of removal efficiency and concentration of BOD, COD, SS

2017년도에 BOD의 경우 처리효율은 5.4%이었으나, COD의 제거효율은 25.7%로 BOD와 다르게 COD의 처리효율이 높은 결과가 나왔다. 그러나 그 외의 연구기간 동안에서는 연도별 처리효율의 증감이 대체적으로 비슷한 경향을 나타내었다(Figure 4). 이는 제거효율이 시기별로 수생식물 성장 정도, 유입된 유기물의 조성, 미생물 활성화 등 복합적인 요인의 영향을 받은 결과로 판단된다. 반면, 유기물질 중 SS는 연도별 처리효율이 유입수 중 농도가 높은 기간에 대체적으로 높아지는 경향을 보였는데, 이는 앞서 분석한 오염부하에 따른 처리효율 분석에서 고농도 구간에서 가장 높은 처리효율이 확인된 것과 일치하는 결과라고 할 수 있다. 저농도 유입수 농도 구간의 SS는 평균 유입수질이 0.9 mg/L이나 유출수 수질이 1.5 mg/L로 습지 내 고사한 식물의 부패 및 침전물의 재부상에 의해 제거효과가 뚜렷하지 않지만, 유입농도가 높을수록 침전으로 제거되는 SS 질량농도가 커져 제거율이 높아지기 때문이다. 유입수 중 농도가 높은 구간에 처리효율도 유사하게 증가하는 경향은 T-P에서도

확인되었는데, 인공습지에서 T-P의 제거가 주로 식생에 의해 이루어지며, 일정한 한계용량(threshold) 이하의 오염부하에서는 제거율이 유입부하에 비례하기 때문으로 추정된다(Nairn & Mitsch 1999). T-N은 계절 및 유입부하에 따른 제거효율에서 확인된 것과 마찬가지로 연도별 처리효율에 있어서도 편차가 적었고 안정적인 특성을 나타내었다(Figure 5). 앞서 기술한 바와 같이 인공습지 내 질소 화합물 제거는 미생물에 의한 질산화-탈질이 주요 기전으로 해당 반응에 충분한 시간이 소요되는데, 연도별 체류시간에 있어 큰 변화가 없었기 때문에 처리효율도 유사한 경향을 나타낸 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구는 호소 내 녹조 제어를 위한 비점오염물질 저감을 위해 설치된 생태습지 적용 가능성을 평가하기 위해 2014년부터 2020년까지의 기간 동안 대청호 유역 안내천 인공습지의 주요 오염물질 처리효율을 분석하였으며, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

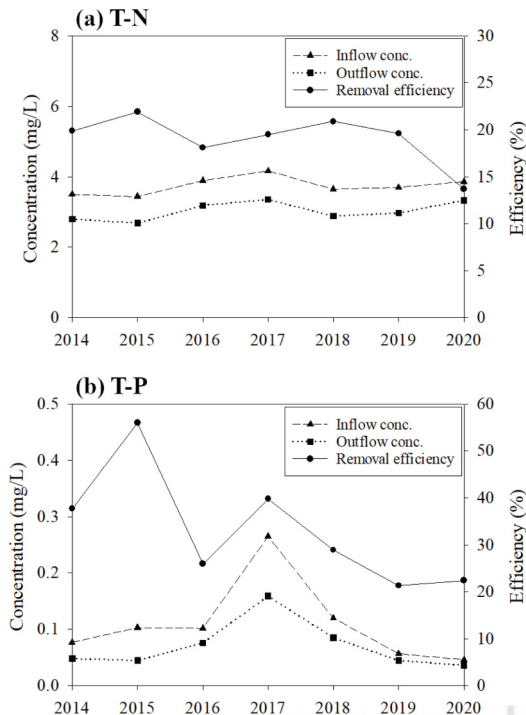


Figure 5. Yearly trends of removal efficiency and concentration of T-N, and T-P

1. 오염물질별 처리효율은 각각 BOD 14.3%, COD 17.9%, SS 50.0%, T-N 19.0%, T-P 35.4%로 인공습지를 통해 오염물질이 효과적으로 제거되는 것으로 나타났다. 특히, 유입수 중 SS는 강우의 영향으로 평균 농도 5.6 mg/L, 범위 0.2 mg/L~183.3 mg/L로 큰 변동을 보였으나 유출수 농도는 2.8(± 3.4) mg/L로 안정적으로 처리되어 평균 농도 및 편차가 크게 줄어들어 초기 강우와 같은 고농도 부하에도 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.
2. 계절별 처리효율을 분석한 결과 온도가 낮은 겨울철에 미생물의 활성 저하로 미생물에 의한 분해가 주요 제거 기전인 BOD, COD, T-N의 경우 처리 효율이 다른 계절에 비해 낮게 나타났다. 그러나 식생에 의해 주로 제거되는 T-P의 경우에는 계절별 처리효율의 편차가 적고, 겨울철에도 30.5%의 안정적인 처리효율을 나타내어 호소 부영양화 억제에 효과적임을 보여주었다.

3. 유입부하에 따른 처리효율 분석 결과 모든 오염 물질이 고농도 구간에서도 통계적으로 유의하게 감소된 것이 확인되었다. 이는 인공습지가 오염물질의 고부하 조건에서도 충분히 수질정화 능력을 유지함으로써, 호소에 직접 유입되는 오염물질 부하를 상당부분 완충시킬 수 있음을 의미한다.
4. 안내천 인공습지의 질소 제거효율은 국내 타 인공습지에 비해 낮은 것으로 확인되었다. 이는 질소제거에 있어 중요한 인자인 체류시간이 상대적으로 짧기 때문에 나타난 결과로 판단되기 때문에 구조변경, 유로연장 등의 방법을 통해 체류시간을 증가시켜 처리효율을 개선할 필요가 있다.

인공습지는 댐 유역의 비점오염물질 제어 방법의 하나로서 운영에 에너지가 많이 필요하지 않아 유지 관리비가 저렴하며 부하 변동에 적응성이 높은 장점이 있다. 또한 야생동물의 서식지 제공 및 우수한 경관을 형성하여 친수공간 제공의 기능도 있다. 그러나 자연 처리(passive treatment) 방식이기 때문에 공정의 인위적인 제어가 어렵고 각각의 인공습지에 대한 운영 및 관리 기술에 대한 정립이 이루어지지 않아 일정한 처리효율을 지속적으로 달성하는데 한계가 있다. 인공습지의 처리효율은 유입수 특성, 수생식물의 생장등에 따라 달라지므로 각 호소 유역의 특성에 맞는 사례 연구를 통해 인공습지가 최적의 기능을 유지할 수 있는 설계 및 운영기술이 정립될 필요가 있다.

References

- Ahn C-Y, Lee CS, Choi JW, Lee S, Oh H-M. 2015. Global occurrence of harmful cyanobacterial blooms and N, P-limitation strategy for bloom control, Korean J. Environ Biol. 33: 1-6. [Korean Literature]
- Ahn J-S, Park W-K, Cho J-H. 2011. Characteristics of wastewater treatment of sewage mixed with industrial wastewater. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 12: 3341-3352. [Korean Literature]
- Bayley M, Davison L, Headley TR. 2003. Nitrogen removal from domestic effluent using subsurface flow constructed wetlands: influence of depth, hydraulic residence time and pre-nitrification. Water Sci Technol. 48: 175-182.
- Chapra SC, Boehlert B, Fant C, Bierman Jr. VJ, Henderson J, Mills D, Mas DML, Rennels L, Jantarasami L, Martinich J, Strzepek KM, Paerl HW. 2017. Climate change impacts on harmful algal blooms in US freshwaters: a screening-level assessment. Environ Sci Technol. 51(16): 8933-8943.
- Choi DH, Choi K, Kim DS, Kim SW, Choi DH, Hwang IS, Lee YK, Kang H. 2008. Temporal and spacial distributions of water quality and evaluation of pollutant removal efficiency in the Sihwa constructed wetland. J. of KSEE. 30(10): 1013-1020. [Korean Literature]
- Choi H, Reyes NJD, Jeon M, Kim LH. 2021. Constructed wetlands in South Korea: current status and performance assessment. Sustainability. 13: 10410.
- Choi JY, Ban WJ. 2007. Improving artificial wetlands for nonpoint source pollution control. KEI Report WO-06. [Korean Literature]
- Christensen VG, Khan E. 2020. Freshwater neurotoxins and concerns for human, animal, and ecosystem health: a review of anatoxina and saxitoxin. Sci Total Environ. 736: 139515.
- Jeong GT, Park SH, Park JH, Lim ET, Bang SH, Park DH. 2009. Effect of factors of nitrification process in wastewater treatment.

- KSBB Journal. 24(3): 296-302. [Korean Literature]
- Kang HJ, Song KY. 2004. Water treatment using constructed wetlands and research perspectives in Korea, *Journal of Wetlands Research*. 6(2): 57-63. [Korean Literature]
- Karosienė J, Savadova-Ratkus K, Toruńska-Sitarz A, Koreivienė J, Kasperovičienė J, Vitonytė I, Błaszczuk A, Mazur-Marzec H. 2020. First report of saxitoxins and anatoxin-a production by cyanobacteria from Lithuanian lakes. *Eur J Phycol*. 55: 327-538.
- Kill K, Grinberga L, Koskiahio J, Mander Ü, Wahlroos O, Lauva D, Parn J, Kasak K. 2022. Phosphorus removal efficiency by in-stream constructed wetlands treating agricultural runoff: influence of vegetation and design. *Ecol Eng*. 180:106664.
- Kim DO, Park JC. 2020. Cycling of matters in the constructed wetland. *Journal of Environmental Science International*, 29(3): 299-306. [Korean Literature]
- Kim HS, Hwang SJ. 2004. Seasonal variation of water quality in a shallow eutrophic reservoir. *Korean Journal of Ecology and Environment*, 37: 180-192. [Korean Literature]
- Ko DH, Chung YC, Seo SC. 2010. Removal mechanisms for water pollutant in constructed wetlands. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 32: 379-392. [Korean Literature]
- K-water. 2014. Annual Operation Report of Soakcheon and Annae-cheon constructed wetland in 2013. [Korean Literature]
- Lee CG, Fletcher TD, Sun G. 2009. Nitrogen removal in constructed wetland systems. *Eng Life Sci*. 9: 11-22.
- Lee SG, Seo DC, Kang SW, Choi IW, Lim BJ, Park JH, Kim KS, Lee JB, Heo JS, Cho JS. 2011. Evaluation of wastewater treatment efficiency in Dongbokcheon constructed wetlands for treating non-point source pollution at different treatment time and wastewater loading. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 44: 929-936. [Korean Literature]
- Lee S-G, Seo D-C, Choi I-W, Kang S-W, Seo Y-J, Lim B-J, Lee J-B, Kim S-D, Heo J-S, Cho J-S. 2012. Evaluation of Aquatic Ecological Efficiency in Juam Lake Eco-Wetlands for Reducing Non-Point Source Pollutants. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 45: 317-24.
- Lee SY, Choi JY, Kim L-H. 2015. Suggestion of appropriate design and maintenance in a constructed wetland using monitoring results. *Journal of Wetlands Research*, 17: 428-435.
- Li X, Ding A, Zheng L, Anderson BC, Kong L, Wu A, Xing L. 2018. Relationship between design parameters and removal efficiency for constructed wetlands in China. *Ecological Engineering*, 123: 135-140.
- Mander U, Kuusemets V, Lohmus K, Muring T, Teiter S, Augustin J. 2003. Nitrous oxide, dinitrogen and methane emission in a subsurface flow constructed wetland. *Water Sci Technol*. 48: 135-142.
- Maucieri C, Salvato M, Borin M. 2020. Vegetation contribution on phosphorus removal in constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 152:105853.
- Michalak AM, Anderson EJ, Beletsky D, Boland S, Bosch NS, Bridgeman TB, Chaffin JD, Cho K, Confesor R, Daloglu I, DePinto JV, Evans MA, Fahnenstiel GL, He L, Ho JC, Jenkins L, Johengen TH, Kuo KC, Laporte E, Liu X, McWilliams MR, Moore MR, Posselt DJ, Richards RP, Scavia D,

- Steiner AL, Verhamme E, Wright DM, Zagorski MA. 2013. Record-setting algal bloom in Lake Erie caused by agricultural and meteorological trends consistent with expected future conditions. *Proc Natl Acad Sci USA*. 110: 6448-6452.
- Mishra P, Pandey CM, Singh U, Gupta A, Sahu C, Keshri A. 2019. Descriptive statistics and normality tests for statistical data. *Annals of Cardiac Anaesthesia*. 22: 67.
- MOE (Ministry of Environment, Korea). 2016. Standard Methods for Analysis of Water Pollution. Ministry of Environment, Sejong, Republic of Korea. [Korean Literature]
- MOE (Ministry of Environment, Korea). 2021. Waterworks Statistical Annual Report. Ministry of Environment, Sejong, Republic of Korea. [Korean Literature]
- Nairn RW, Mitsch WJ. 1999. Phosphorus removal in created wetland ponds receiving river overflow. *Ecological Engineering*, 14(1-2): 107-126.
- Park HS, Yoon SW, Chung SW, Hwang HS. 2016. Effect of pollutants control measures in So-oak watershed on the control of algae growth in Daechong Reservoir. *J. Environ Impact Assess*. 25:248-260. [Korean Literature]
- Park PN, Cho YC. 2023. Evaluation of removal efficiency of pollutants in constructed wetlands for controlling nonpoint sources in the Daechung Reservoir watershed. *Korean Journal of Ecology and Environment*, 56: 127-139. [Korean Literature]
- Paul VJ. 2008. Global warming and cyanobacterial harmful algal blooms. In: Hudnell HK, editor. *Cyanobacterial Harmful Algal Blooms: State of the Science and Research Needs. Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol. 619. New York, NY: Springer; pp. 239-257.
- Rao P, Gupta N, Bhaskar A, Jayaraj R. 2002. Toxins and bioactive compounds from cyanobacteria and their implications on human health. *J Environ Biol*. 23: 215-224.
- Saeed T, Sun G. 2012. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *J. Environ Manage*, 112: 429-448.
- Seo DC, Jo IS, Lim SC, Lee BJ, Park SK, Cheon YS, Park JH, Lee HJ, Cho JS, Heo JS. 2009. Evaluation of pollutant removal efficiency in environmentally friendly full-scale constructed wetlands for treating domestic sewage during long-term monitoring. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 28: 97-105. [Korean Literature]
- Seo DC, Kang SW, Lim BJ, Park JH, Kim KS, Lee JB, Kim HO, Heo JS, Chang NI, Seong HH. 2011. Evaluation of aquatic ecological characteristics in Sinpyongcheon constructed wetlands for treating non-point source pollution. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 44: 400-407. [Korean Literature]
- Seres M, Hnatkova T, Vymazal J, Vanek T. 2017. Removal efficiency of constructed wetland for treatment of agricultural wastewaters. *Chemistry Journal of Moldova*. 1: 45-52.
- Shim MJ, Yoon JY, Lee SH. 2015. Water quality properties of tributaries of Daechung Lake, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment*, 48: 12-25. [Korean Literature]
- Shin JS, Kim SC, Cho KJ, Choi CH, Choi IW, Park JJ, Park GH. 2009. Application of the hybrid constructed wetland for a reuse of the effluent from bio-industrial wastewater

- treatment plant. *Journal of Wetlands Research*, 11(1): 115-121. [Korean Literature]
- Song KY, Zoh KD, Kang H. 2007. Release of phosphate in a wetland by changes in hydrological regime. *Sci Total Environ*. 380(1-3): 13-18.
- Sundaravadivel M, Vigneswaran S. 2001. Constructed wetlands for wastewater treatment. *Crit Rev Environ Sci Technol*. 31: 351-409.
- Wu J, Jin C, Yang Z, Tian J, Yang R. 2015. Synthesis of phosphorus-doped carbon hollow spheres as efficient metal-free electrocatalysts for oxygen reduction. *Carbon*. 82: 562-571.
- Yang HM. 2001. Treatment efficiency of a surface-flow wetland system constructed on floodplain. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 20(4): 277-283. [Korean Literature]