

하수처리장 방류수를 이용한 하이브리드형 인공습지의 수질 개선 특성 분석

김혜량* · 길경익***

*서울과학기술대학교 건설시스템공학과

Analysis of Water Quality Improvement Characteristics in a Hybrid Constructed Wetland Using Effluent from a Municipal Wastewater Treatment Plant

Hyeryang Kim* · Kyungik Gil***

*Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea

(Received : 24 October 2025, Revised : 18 November 2025, Accepted : 18 November 2025)

요약

본 연구는 하수처리장 방류수 내 잔류 오염물질의 추가 저감을 위해 하이브리드형 인공습지(Hybrid Constructed Wetland)를 조성하여 제거 특성과 환경적 잠재력을 평가하였다. 운영 단계에 따라 BOD, TOC, TN, TP의 농도 변화를 분석하고 오염부하 저감 특성을 평가한 결과, BOD 제거효율은 86.3 %, TN은 97.2 %, TP는 69.23 %, TOC는 28.4 %의 효율을 보였다. 이를 전국 방류수에 적용할 경우 총 147.3 ton/day의 오염부하 저감 효과가 예상되었다. 이러한 결과는 하이브리드형 인공습지가 하수처리장 방류수 내 오염물질을 추가적으로 저감하는 물환경 관리의 핵심 자연기반해법(Nature-based Solutions)으로 활용 가능성을 확인하였다.

핵심용어 : 하이브리드형 인공습지, 방류수, 오염부하 저감, 자연기반해법

Abstract

This study established a hybrid constructed wetland (HCW) to further reduce residual pollutants in the treated effluent from a municipal wastewater treatment plant (MWTP) and evaluated its removal characteristics and environmental potential. Concentration changes in BOD, TOC, TN, and TP were analyzed according to the operational phases, and pollutant load reduction was assessed. The removal efficiencies were 86.3 % for BOD, 97.2 % for TN, 69.23 % for TP, and 28.4 % for TOC. When applied to nationwide effluent discharge, the total pollutant load reduction was estimated to be 147.3 ton/day. These findings indicate that hybrid constructed wetlands can serve as an effective nature-based solution (NbS) for additional mitigation of pollutants in MWTP effluent within aquatic environmental management frameworks.

Key words : Hybrid Constructed Wetland, Effluent, Pollutant Load Removal, Nature-based Solution

1. 서론

하수처리장(Municipal Wastewater Treatment Plant, MWTP)은 도시화와 인구 증가에 따라 발생하는 생활하수 및 산업폐수를 처리하여 수계로 방류함으로써 공중보건과 환경보전에 핵심적인 역할을 한다. 그러나 방류수에는 여전히 다양한 잔류 오염물질이 존재하며, 수생태계에 지속적인 영향을 미친다. 특히 질소(N)와 인(P) 등 영양염류는 처리

과정에서 상당 부분 제거되지만 완전한 제거는 어렵고, 방류수를 통해 하천으로 유입되어 부영양화를 유발한다(Carpenter *et al.*, 1998; Smith *et al.*, 1999). 한국의 경우, 하수처리장 하류에서 총질소와 총인 농도가 상류 대비 증가하는 현상이 보고되었으며(Jang *et al.*, 2009), 이는 방류수가 하천 수질 악화에 미치는 영향이 상당함을 시사한다. 부영양화된 수계는 조류 번성(algal bloom), 용존산소 고갈(hypoxia), 어류 폐사 등을 초래하며, 생물다양성 감소와 수

*To whom correspondence should be addressed.

Seoul National University of Science and Technology, Korea
E-mail : kgil@seoultech.ac.kr

• Hyeryang Kim Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea(25510134@seoultech.ac.kr)
• Kyungik Gil Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea(kgil@seoultech.ac.kr)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

자원 이용의 제약으로 이어진다(Yang *et al.*, 2008; Heisler *et al.*, 2013). 하수처리장 방류수는 처리 후에도 잔류하는 질소와 인 부하로 인해 수계 부영양화의 주요 원인으로 작용하며, 이는 전 세계적인 환경 관리 과제이다(Lan *et al.*, 2024). 이러한 환경 관련 문제는 단순한 수질오염을 넘어 생태계 기능 저하 및 사회·경제적 손실로 이어진다. 이처럼 기존 하수처리 공정은 일정 수준의 오염물질 제거에는 효과적이지만, 처리 후에도 영양염류와 유기물이 일부 잔류하는 한계가 존재하며, 방류수 수질 개선을 위한 추가적인 후처리 방안이 요구된다. 이러한 배경을 고려할 때, 인공습지(Constructed Wetland, CW)는 하수처리장 방류수의 수질 개선을 위한 대표적인 자연기반해법(Nature-based Solutions, NbS)으로 주목받고 있다(Justino *et al.*, 2023; Reyes *et al.*, 2020). 자연기반해법은 자연 생태계의 물리·화학·생물학적 기능을 모방하거나 활용하여 환경 문제를 해결하는 접근으로, 전통적인 회색 인프라(grey infrastructure)에 비해 에너지 소모가 적고 생태계 서비스를 동시에 증진한다는 장점이 있다. 최근 연구에 따르면 인공습지는 오염물질 제어뿐만 아니라 생태적 회복탄력성, 폭풍우 관리, 기후 적응 및 생물다양성 증진 등 다면적인 공동 이점(Co-benefits)을 제공함으로써 지속가능한 환경 조성에 핵심적인 역할을 수행하는 것으로 평가된다(Barman *et al.*, 2024). 인공습지는 자연습지의 정화 메커니즘을 공학적으로 모방한 시스템으로, 습지 식생, 토양, 미생물의 상호작용을 통해 오염물질을 저감한다. 이러한 과정에서 영양염류의 흡수, 흡착, 탈질화, 침전 등 다양한 기작이 동시에 작동하며, 복합적 작용은 습지의 유형과 구성요소에 따라 상이하다(Vymazal, 2007; Tang *et al.*, 2021). 인공습지는 유입수의 특성과 목표 부하저감 수준에 따라 수직흐름형(Vertical Subsurface Flow, VSSF), 수평흐름형(Horizontal Subsurface Flow, HSSF), 자유수면형(Free Water Surface, FWS) 등 다양한 형태로 설계된다. 본 연구에서는 하수처리장 방류수를 유입수로 하는 수직흐름형과 수평흐름형 습지 연계 하이브리드형 인공습지를 운영하며 수질 모니터링을 통해 수질 개선 효과를 평가하고, 방류수 내 잔류 오염물질을 저감하기 위한 실용적 후처리 대안으로서의 적용 가능성을 확인하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 하이브리드형 인공습지의 구성 및 수질분석 방법

하수처리장 방류수 내 잔류 오염물질을 추가 저감하기 위해 Test-Bed 규모의 하이브리드형 인공습지를 조성하였다. 본 인공습지는 유입수의 흐름 경로에 따라 수직흐름형(Vertical Subsurface Flow, VSSF) 습지와 수평흐름형(Horizontal Subsurface Flow, HSSF) 습지를 직렬로 연결한 2단 구조로 구성되었다. 수직흐름형과 수평흐름형 습지는 길이(L) 2.0 m, 폭(W) 1.0 m, 깊이(D) 1.0 m 규격으로 동일하게 설계되었다. 또한, 각 습지의 말단부에는 유출수 채수를 위해 길이(L) 0.5 m, 폭(W) 1.0 m, 깊이(D) 1.0 m 크기의 집수정을 각각 설치하여 전체 길이가 2.5 m로 구성하였다. 본 시스템은 교내에 조성된 Test-bed로, 동일 시설은 선행 연구에서 각각 오염저감 성능과 탄소 저장 잠재력 검증에 활용된 바 있다(Hong and Gil, 2024; Hong and Gil, 2025). 따라서 본 연구에서는 해당 검증된 실험 기반을 활용하여 장기 운영에 따른 수질 개선 특성과 전국 단위 확장 가능성을 평가하였다. 조성한 하이브리드형 인공습지는 Fig. 1에 제시하였다.

수직흐름형 습지는 상부에서 하부로 모래 20 cm, 바이오차 15 cm, 모재 20 cm, 기능성 여재 20 cm, 자갈 20 cm의 순서로 층상 구성되었다. 각 여재층의 구조와 두께는 투수성, 안정성, 표면적, 반응성 등 여재의 기본 특성과 층간 기능적 분담을 고려하여 결정되었으며, 이러한 층상 구조는 유기물 여과, 영양염류 흡착, 미생물 부착 및 산소 교환이 단계적으로 이루어질 수 있도록 설계되었다. 수평흐름형 습지는 식생의 고사를 방지하고 안정적인 생육을 위해 여재를 혼합하여 조성하였다. 식생은 수직흐름형 습지에는 부들(*Typha orientalis*)을, 수평흐름형 습지에는 갈대(*Phragmites australis*)를 식재하였다. 인공습지의 설계 부피는 수직흐름형 습지와 수평흐름형 습지의 길이 2.0 m와 말단 집수정 길이 0.5 m를 합한 전체 길이를 적용하여 2.5 m³로 산정하였다. 유입수는 3 m³ 용량의 물탱크에 저장하여 유입하였으며 일일 총 유입유량 0.429 m³/day가 되도록 유지하였다. 이 유입유량을 기준으로 산정한 단일 습지부의 수리

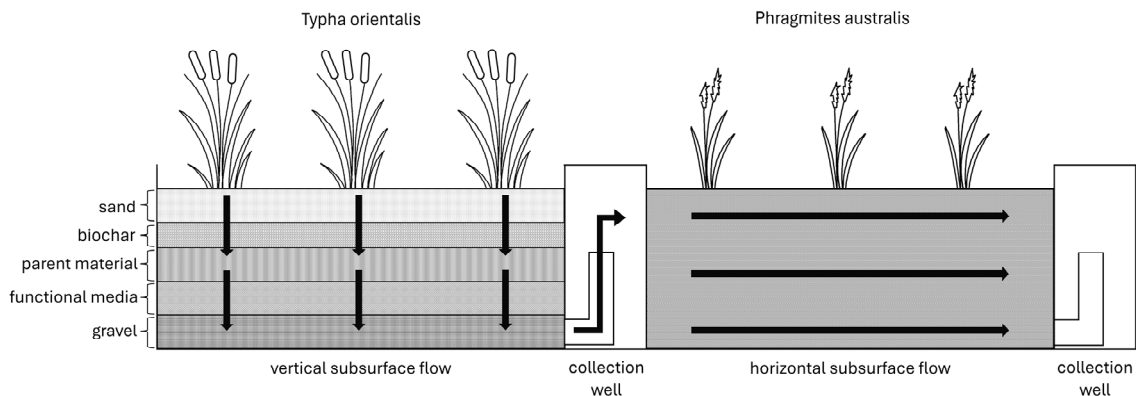


Fig. 1. Configuration of the hybrid constructed wetland

학적 체류시간(Hydraulic Retention Time, HRT)은 약 5.8일이다. 본 연구의 운영은 2024년 5월부터 2025년 10월까지 수행되었으며, 실제 수질 모니터링이 이루어진 기간은 총 약 180일이었다. Phase 1(2024.05-06), Phase 2(2024.10), Phase 3 (2025.05-10)으로 구분하여 운영하였다. 수질 분석은 수직흐름형 습지 유입수와 수평흐름형 습지 유출수를 대상으로 실시하였으며, 수질 분석 항목은 BOD, TOC, TN, TP이다. 수질 분석은 수질오염공정시험법에 기반하여 수행되었다. BOD는 ORION STAR A213 RDO/DO Meter (Thermo Fisher Scientific)를 이용해 측정하였고, TOC는 vario TOC cube (Elementar), TN과 TP는 DR3900 (HACH)을 이용하여 측정하였다.

2.2 하수처리장 방류수 및 인공습지 유입수의 수질 특성

본 연구에서 하이브리드형 인공습지는 G시에 위치한 하수처리장의 방류수를 유입수로 사용하였다. 해당 시설의 일처리용량은 160,000 m³ /day이며 본 시설은 표준활성슬러지법, CNR, MLE, I3(Innovation 3)를 적용하고 있다. 방류수는 Ⅲ지역 수질기준을 적용받으며 하수처리장의 유입수 및 방류수 수질은 Table 1과 같다. 인공습지의 유출수는 약 180일간의 운영 기간의 전체 평균값을 산정하였다.

2.3 오염부하량 산정

오염부하량은 각 항목별 농도와 유량을 이용하여 산정하였으며, 산정식은 Eq. (1)에 제시하였다.

$$L = C \times Q \times 10^{-3} \quad (1)$$

여기서,

- L : 오염부하량 (kg/day)
- C : 오염물질 농도 (mg/L)
- Q : 유량 (m³ /day)
- 10⁻³ : 단위환산계수

유입수와 유출수의 부하량 차이를 이용하여 부하 저감량과 제거 효율을 산정하였으며, 산정식은 Eq. (2)에 제시하였다.

$$Removal\ Efficiency(\%) = \frac{(L_{inf} - L_{eff})}{L_{inf}} \times 100 \quad (2)$$

여기서,

- L_{inf} : 유입부하 (kg/day)
- L_{eff} : 유출부하 (kg/day)

또한 전국 하수처리장 방류수의 유량을 대상으로 잠재적 오염부하 저감량을 추정하기 위해 Eq. (3)을 이용하였다.

$$R = C_{eff} \times Q_{nat} \times RE \times 10^{-3} \quad (3)$$

여기서,

- R : 오염물질 저감량 (ton/day)
- C_{eff} : 방류수 농도 (mg/L)
- Q_{nat} : 전국 방류수 유량 (m³ /day)
- RE : Phase 3에서 산정된 제거 효율

3. 결과 및 고찰

3.1 운영 기간 및 단계별 모니터링

본 연구는 장기간의 수질 모니터링을 통해 인공습지의 처리 성능을 평가하기 위해 2024년 5월부터 2025년 10월까지 약 520일 동안 수행되었으며, 이 중 실제 수질 데이터가 확보된 기간은 약 180일이었다. 운영 특성에 따라 세 개의 운영 단계(Phase)로 구분하였다. Phase 1은 2024년 5월부터 6월까지 2개월 동안 정상 운영되었고, 7월부터 9월까지 3개월간 운영 특성 변화를 평가하기 위한 목적으로 운영을 계획적으로 중단하였다. Phase 2는 10월 1개월간 정상 운영을 재개하였으며, 이후 11월부터 2025년 4월까지의 저온기에 시설이 노출됨에 따라 펌프 및 배관 동결을 예방하기 위한 시설 보호 조치로 운영을 일시 중단하였다. Phase 3는 2025년 5월부터 10월까지 6개월간 정상 운영되었다. 각 운영 단계의 수질 데이터와 Phase 구간은 Fig. 2에서 확인할 수 있으며, 그래프에는 중단 기간을 제외한 실제 운영 기간의 수질 변화만을 제시하였다. Fig. 2는 각 운영 단계에서 하이브리드형 인공습지 유입수와 유출수의 BOD, TOC, TN, TP의 시간적 변동성을 시계열로 나타낸 것으로, 그래프 내 수직선은 단계 전환 시점을 의미한다. 이를 통해 운영 단계별 농도 변화와 운영 안정성의 차이를 시각적으로 확인할 수 있다.

Table 1. Comparison of water quality standards and effluent characteristics

Section	BOD (mg/L)	TOC (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
Treatment capacity of 500 m ³ /day or above (Ⅲ District)	≤ 10	≤ 25	≤ 20	≤ 0.5
G City MWTP Effluent	3.30	4.10	7.14	0.12
CW Effluent	1.16	4.65	0.09	0.03

3.2 BOD 제거율 분석

Fig. 2(a)는 인공습지 유입수와 유출수의 BOD 농도를 나타낸 그래프이다. 연구 기간 전반에 걸쳐 유입 BOD 농도는 2.0 mg/L ~ 7.0 mg/L 수준으로 유지되었으나, 유출 농도는 운영 단계별로 뚜렷한 차이를 보였다. 초기 적응기인 Phase 1에서는 유출 BOD 농도가 2.17 mg/L ~ 4.59 mg/L로 유입 대비 차이가 작아 제거 효율이 상대적으로 낮았다. 그러나 정상 운영기인 Phase 2 이후부터는 유출 농도가 현저히 감소하여 대부분 0.00 mg/L ~ 1.31 mg/L 범위 내에 안정적으로 분포하였다. 특히, Phase 3에서는 유출수가 검출한계 수준에 근접한 낮은 값으로 안정적으로 유지되었으며, 이는 시스템의 장기적인 최적화된 처리 능력을 나타낸다. 이러한 경향은 Fig. 3을 통해 더욱 명확히 확인되었다. Phase 1의 BOD 제거 효율이 19.57%로 낮았으며, 효율의 변동성 또한 커서 인공습지의 불안정성을 시사했다. 또한 일시적으로 음(-)의 극값이 관찰된 것은 초기 운전 시 안정화 관리가 필수적임을 보여주었다. 반면, 정상 운영기인 Phase 2와 Phase 3에서는 BOD 제거효율이 Phase 1에 비해 크게 향상되어 Phase 2는 62.22%, Phase 3는 86.33%로 높은 효율을 달성했다. 또한, 이 기간에는 데이터의 분포 범위가 좁아져 제거효율의 변동성이 낮아지는 경향을 보였다. 이는 본 인공습지가 장기 운영을 통해 BOD에 대한 높은 처리 효율과 안정성을 확보했음을 나타낸다. 본 연구에서 확인된 Phase 3의 BOD 제거 효율은 수평흐름형 기반 인공습지의 운영 연구에 보고된 BOD 제거 효율보다 높은 효율을 보였다(Zurita *et al.*, 2009). 이는 하수처리장 방류수와

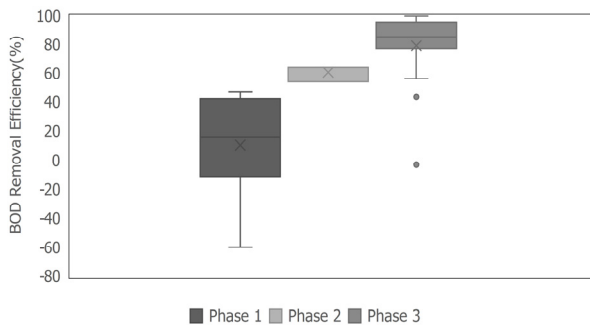


Fig. 3. BOD removal efficiency

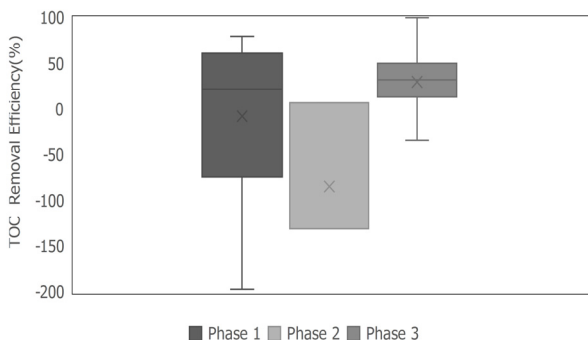


Fig. 4. TOC removal efficiency

같은 저농도의 유기물 유입 조건에서 잔류 유기물의 충분한 제거가 가능함을 시사하며, 본 연구 시스템이 수직흐름형 습지와 수평흐름형 습지의 직렬 구조를 통해 충분한 유기물 분해가 일어나도록 설계되었기 때문이다.

3.3 TOC 제거율 분석

본 인공습지의 TOC 처리 성능은 BOD와 달리 초기 운영 단계에서 처리 효율이 저조하였으나, 장기 운영을 통해 점진적으로 개선되는 양상을 보였다. Fig. 2(b)는 인공습지 유입수와 유출수의 TOC 농도를 나타낸 그래프이다. Fig. 2(b)와 Fig. 4를 통해 초기 적응기인 Phase 1과 재가동 직후인 Phase 2에서 유출 TOC 농도가 유입 TOC 농도보다 현저히 높아짐이 나타났다. 이 기간의 TOC 제거효율은 -58.01%와 -84.71%의 음(-)의 제거율을 보였다.

Phase 1에서 관찰된 -58.01%의 음(-)의 제거율은 운영 초기 단계에서 여재 내부 존재하던 식생과 미생물 기원의 초기 용존성 유기탄소 DOC(Dissolved Organic Carbon)이 용출되었기 때문이라고 해석된다. 이러한 초기 DOC 용출 현상은 인공습지에서 보고되는 초기 불안정 단계의 특성으로 보고된 바 있다(Tanner *et al.*, 1998). 이후 Phase 2에서 제거율이 -84.71%로 하락한 것은 본 인공습지 유출 구조와 관련이 있다. 유공관을 통해 흐름이 집수정으로 모이고, 집수정에서 수위차를 이용해 월류하는 구조인데, 운영 중단 기간 동안 유공관 내부는 유속이 거의 없는 정체 구역이 형성되기 쉬워 용존성 난분해성 유기탄소 R-DOC(Refractory-Dissolved Organic Carbon)가 축적되었을 가능성이 높다. Phase 2 운영 재개 시점에 축적된 R-DOC가 방출되면서 TOC 유출 농도를 증가시켰고 이로 인해 -84.71%의 음(-)의 제거율이 발생한 것으로 해석된다. 한편 동일한 시기에 BOD 제거율은 62.22%로 상승한 바 있다. 이는 BOD와 달리 TOC는 난분해성 유기물까지 포함하는 총량 지표라는 차이에서 기인한다. 여재 표면의 생물막 형성과 호기성 조건이 개선되며 생분해성 유기물은 제거되는 반면, 정체 구역에 축적된 R-DOC의 방출로 인해 TOC는 일시적으로 증가할 수 있다(García *et al.*, 2010). 반면 Phase 2 종료 후 운영 재개 전 배수 조치와 장기적으로 안정화된 Phase 3에 이르러 TOC 제거율은 28.36%의 양(+)의 제거율로 전환되었으며, 유출수 농도 역시 1.35 mg/L ~ 4.12 mg/L로 낮아져 안정적으로 유지되었다. 이는 시스템이 초기 불안정성을 극복하고 안정성을 점진적으로 확보했음을 보여준다.

3.4 TN 제거율 분석

TN 처리는 모든 운영 단계에서 안정적인 수준을 유지하였으며, 특히 유입 부하가 크게 증가했음에도 높은 효율을 유지하는 강점을 보였다. Fig. 2(c)에 따르면 유입수의 TN 농도가 Phase 1의 평균 0.27 mg/L에서 Phase 3의 평균 4.70 mg/L로 약 17.4배 증가했음에도 불구하고, 유출수 TN 농도는 연구 기간 전반에 걸쳐 약 0.09 mg/L로 낮은 농도가 안정적으로 유지하였다. 이러한 성능은 Fig. 5에서

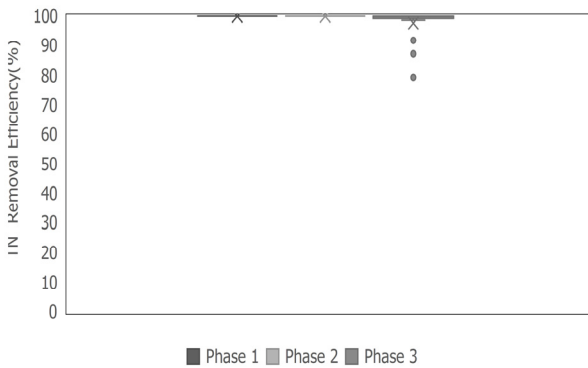


Fig. 5. TN removal efficiency

확인된다. 초기 운영 단계인 Phase 1과 Phase 2가 제거율 100%로 나타났으며, 장기 운영기인 Phase 3에서도 97.23%의 높은 효율을 보였다. 종합적으로 하이브리드형 인공습지는 TN에 대해 높은 처리 효율과 안정성을 확보하였으며, 이는 장기간 운전 및 다양한 부하 조건에서도 좋은 성능을 유지함을 보여주었다.

3.5 TP 제거율 분석

본 인공습지의 TP 처리 성능은 TN과 유사하게 높은 효율을 나타냈으나, 장기 운영 단계인 Phase 3에서 효율의 변동성이 증가하는 특징이 관찰되었다.

Fig. 2(d)에 따르면, 유입수 TP 농도가 Phase 1과 Phase 2에서 0.1 mg/L 이하의 낮은 농도를 유지하다가, Phase 3에 이르러 소폭 증가하는 경향을 보였다. 유출수 TP 농도는 평균 0.04 mg/L 이하의 낮은 농도를 안정적으로 유지하였다. Fig. 6에 따르면 초기 운영 단계인 Phase 1은 98.18%, Phase 2는 100%의 높은 제거율을 나타냈다. 그러나 장기 운영

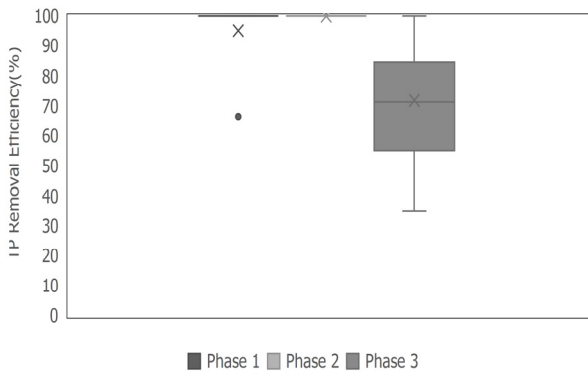


Fig. 6. TP removal efficiency

Table 2. Pollutant load of Phase 1 in hybrid constructed wetland

Parameter	Avg. Inf. Conc. (mg/L)	Avg. Eff. Conc. (mg/L)	Influent Load (kg/day)	Effluent Load (kg/day)	Load Reduction (kg/day)	Removal Efficiency (%)
BOD	4.19	3.37	0.00180	0.00145	0.00035	19.33
TOC	5.93	9.37	0.00254	0.00401	-0.00148	-58.01
TN	0.27	0	0.00012	0	0.00012	100
TP	0.069	0.001	0.00003	0.00000	0.00003	98.55

기인 Phase 3에서는 제거율 데이터가 55%에서 85% 사이로 분포하며 변동성 폭이 증가하였다. 이러한 경향은 인공습지 시스템에서 인의 흡착은 유한한 과정(finite process)이며, 장기 운영에 따라 여재의 인 결합 부위가 점차 포화(P-saturation)에 도달함으로써 화학적 흡착 기반의 제거 기작이 감소했을 가능성을 시사한다(Drizo *et al.*, 2002; Gao and Zhang, 2022). 그럼에도 불구하고 평균 약 70%의 제거 효율을 유지하며 안정적인 처리 성능을 보였다.

3.6 오염부하 저감 잠재력 분석

3.6.1 test-bed 규모의 일일 오염부하 분석

하이브리드 인공습지 시스템의 각 운영 단계별 오염부하 처리 능력은 유량 0.429 m³ /day와 단계별 평균 농도를 기준으로 산정하였다. Phase별 부하 분석에는 운영 단계의 평균 유입·유출 농도를 대표값으로 적용하였으며, 시간적 변동성은 Fig. 2의 시계열 자료를 통해 제시하였다. 이러한 구성은 부하 산정이 단계 간 비교 가능하도록 정량적 대표값을 중심으로 수행되도록 하기 위함이다.

Table 2는 Phase 1의 오염부하 처리 결과를 제시한다. TN(100%)과 TP(98.55%)에서 부하 저감에 있어 높은 성능을 보였으나, BOD는 19.33%로, 상대적으로 낮은 0.00035 kg/day의 저감에 그쳤다. TOC의 경우 음(-)의 제거율을 보였으며, 이는 운영 초기 단계에서 유출의 불안정성을 나타내며, 시스템의 안정화를 위한 지속적인 모니터링이 필요함을 시사한다.

Table 3은 Phase 2의 오염부하 처리 결과를 제시한다. TN과 TP는 100%의 부하 저감을 보이며 안정적인 처리 성능을 유지하였다. BOD는 62.22%로 Phase 1 대비 개선되었다. 다만, TOC는 -84.71%로 음(-)의 제거율을 나타냈는데, 이는 운영 중단 기간 중 집수정과 유공관 내 축적된 정체수가 운영 재개 시점에 방출된 영향으로 해석된다.

Table 4는 Phase 3의 오염부하 처리 능력을 제시한다. TN의 경우 유입 부하 0.00202 kg/day 중 0.00196 kg/day를 저감하여 97.23%의 높은 제거 효율을 보였다. BOD 또한 86.34%의 높은 제거율을 나타내며 0.00060 kg/day를 저감하였다. TP는 69.23%의 제거 효율로 0.00004 kg/day를 제거하여 영양염류 전반의 안정적인 처리 능력을 확인하였다.

특히 TOC는 Phase 1과 2에서 음(-)의 제거율을 보였으나, Phase 3에서는 28.36%의 양(+)의 제거율로 전환되어

총 0.00050 kg/day의 TOC를 제거하였다. 이는 Phase 1에서 관찰된 초기 불안정성이 운영 중단기마다 수행된 유공관 및 집수정 내 잔류수 배수 조치, 그리고 Phase 3 기간의 장기 연속 정상 운전 등과 같은 운영 관리 개선을 통해 해소되었음을 시사한다. 또한 이러한 조치들이 시스템 안정화 및 처리 성능 향상에 결정적으로 기여한 것으로 판단된다.

3.6.2 전국 단위 방류수 내 오염물질 잠재력 확장 분석

안정적으로 운영된 Phase 3의 결과를 기반으로, Test-Bed 규모에서 확인된 오염물질 제거 성능을 전국 하수처리장 방류수 규모로 확장하여 하이브리드형 인공습지 적용 시 기대할 수 있는 이론적 잠재적 저감 효과를 산정하였다. 현재 국내 공공하수처리시설은 약 4,470개소가 운영 중이며, 2024년 기준 총 방류 유량은 20,455,202.2 m³ /day로 보고된다 (Ministry of Environment, 2025). 본 분석은 하이브리드형 인공습지 Test-Bed에서 확인된 Phase 3의 안정적인 제거 효율을 대표값으로 적용하여, 전국 단위 방류수에 대한 잠재적 오염부하 저감 가능성을 산정하였다.

Table 5는 Phase 3의 결과를 전국 단위 방류수에 대한 잠재적 오염부하 저감 효과를 제시한다. 잠재 부하(Potential Load)는 전국 하수처리 방류수가 Phase 3의 유입 농도를 가진다고 가정할 때 추가 처리 대상 오염물질의 총량을 의미하며, 이는 하이브리드형 인공습지가 해결해야 하는 문제의 최대 오염부하 규모를 나타낸다. 추가 저감량(Additional Load Reduction)은 잠재 부하에 Phase 3에서 검증된 제거

효율을 적용하여 산정한 값으로, 하이브리드형 인공습지 적용 시 기대할 수 있는 환경적 기여도를 제시하기 위한 개념적 분석 결과이다. Table 5에 따르면 TN과 BOD는 각각 93,352.31 kg/day(93.35 ton/day)와 28,398.19 kg/day(28.40 ton/day)의 추가 저감이 가능하며, 총 121.75 ton/day의 오염부하를 감소시킬 수 있는 잠재력을 보인다. 이는 국내 수계의 부영양화를 해결하고 용존 산소 고갈 문제를 완화하는 데 중요한 환경적 가치를 가진다. TP는 1,897.73 kg/day(약 1.90 ton/day)의 추가 저감을 통해 TN과 함께 부영양화를 다각적으로 완화할 수 있는 환경 개선 효과를 보여준다. TOC의 제거 효율은 23,724.69 kg/day(23.72 ton/day) 부하를 추가 저감한다. 이는 수계 내 용존산소의 고갈을 완화하고, 녹조 등 부영양화와 2차 오염 발생 위험을 감소시킨다.

4. 결론

본 연구는 2024년 5월부터 2025년 10월까지 18개월 동안 하이브리드형 인공습지의 오염물질 처리 성능을 운영 단계에 따라 3단계로 구분하여 평가하였다. 초기 적응기(Phase 1)에서는 BOD 제거효율이 19.38%로 낮았으나, 정상 운영이 재개된 Phase 2에서 62.30%로 상승하였고, 최종 안정화 단계인 Phase 3에서는 86.30%에 도달하였다. 이는 인공습지 운영이 안정화되고, 처리 효율이 점진적으로 향상되었음을 보여준다. 오염물질 별 특성을 살펴보면, TN은 모든 운영 단계에서 97.23%의 높은 제거 효율을 유지하여

Table 3. Pollutant load of Phase 2 in hybrid constructed wetland

Parameter	Avg. Inf. Conc. (mg/L)	Avg. Eff. Conc. (mg/L)	Influent Load (kg/day)	Effluent Load (kg/day)	Load Reduction (kg/day)	Removal Efficiency (%)
BOD	3.15	1.19	0.00135	0.00051	0.00084	62.22
TOC	3.99	7.37	0.00171	0.00316	-0.00145	-84.71
TN	4.68	0	0.00201	0.00000	0.00201	100.00
TP	0.07	0	0.00003	0.00000	0.00003	100.00

Table 4. Pollutant load of Phase 3 in hybrid constructed wetland

Parameter	Avg. Inf. Conc. (mg/L)	Avg. Eff. Conc. (mg/L)	Influent Load (kg/day)	Effluent Load (kg/day)	Load Reduction (kg/day)	Removal Efficiency (%)
BOD	1.61	0.22	0.00069	0.00009	0.00060	86.34
TOC	4.09	2.93	0.00175	0.00126	0.00050	28.36
TN	4.70	0.13	0.00202	0.00006	0.00196	97.23
TP	0.13	0.04	0.00006	0.00002	0.00004	69.23

Table 5. National-scale pollutant load reduction based on Phase 3

Parameter	Avg. Inf. Conc. (mg/L)	Potential Load (kg/day)	Additional Load Reduction (kg/day)	Additional Load Reduction (ton/day)
BOD	1.61	32,906.36	28,398.19	28.40
TOC	4.09	83,684.96	23,724.69	23.72
TN	4.70	96,081.01	93,352.31	93.35
TP	0.13	2,640.51	1,897.73	1.83

유입 부하가 약 17.4배 증가하였음에도 안정적인 처리를 보여주었다. BOD는 86.30%의 효율로 제거되어 수계의 용존 산소 고갈을 방지하는 역할을 수행하며, TP는 69.23%의 효율로 부영양화 문제 완화에 기여하였다. TOC는 초기 음(-)의 제거율(-84.60%)에서 최종적으로 28.35%의 양(+)의 제거율로 전환되어 시스템이 안정화 및 최적화되었음을 입증하였다. Test-bed 규모의 하이브리드형 인공습지(유량 0.429 m³/day)의 Phase 3 결과에 따르면 TN 0.00202 kg/day 중 0.00196 kg/day를 제거하며 높은 처리 효율을 보여주었다. 전국 하수처리 방류 유량(20,455,202.2 m³/day)에 Phase 3의 제거효율을 적용할 경우, BOD 28.40 ton/day, TOC 23.72 ton/day, TN 93.35 ton/day, TP 1.83 ton/day의 오염부하를 추가적으로 저감할 수 있는 이론적 잠재력을 보인다. 특히 BOD와 TN의 합산 저감량은 121.75 ton/day로 국내 하수처리 방류수의 수질 개선에 실질적으로 기여할 수 있는 규모이다. 본 연구의 하이브리드형 인공습지는 TN 저감을 통한 부영양화 완화, BOD 저감을 통한 수생태계 보호, TP 및 TOC 저감을 통한 수질 개선이라는 세 가지 환경 가치를 실현한다. 이를 통해 하이브리드형 인공습지는 향후 물 환경 관리의 주요 기술로 활용될 잠재력을 갖는 것으로 판단된다. 또한 본 연구는 하수처리장 방류수를 대상으로 Test-Bed 규모의 인공습지를 장기 운영하여, 운영 단계별 수질 변동과 안정성을 단계별로 확인하였다. 이를 기반으로 부하 저감 잠재력을 산정함으로써, 방류수 내 오염물질을 저감을 위한 하이브리드형 인공습지의 적용성을 검토하는데 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사 (Acknowledgement)

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 습지생태계 가치평가 및 탄소흡수 가치증진 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2022-KE002164).

References

- Barman, J., Kundu, S., and Majumder, M. (2024). "Integrating wetlands as nature-based solutions for sustainable built environments." *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 14, No. 1, pp. 18,670–18,680.
- Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., and Smith, V. H. (1998). "Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen." *Ecological Applications*, Vol. 8, No. 3, pp. 559–568.
- Drizo, A., Comeau, Y., Forget, C., and Chapuis, R. P. (2002). "Phosphorus saturation potential: A parameter for estimating the longevity of constructed wetland systems." *Environmental Science & Technology*, Vol. 36, No. 21, pp. 4642–4648.
- Farruggia, D., Licata, M., Leto, C., Urso, G., Salamone, F., and Sousa Coutinho Calheiros, C. (2025). "Long-term investigation of pollutant removal efficiency in two constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in urban areas." *Frontiers in Environmental Science*, Vol. 13, pp. 1–18.
- Gao, P., and Zhang, C. (2022). "Study on phosphorus removal pathway in constructed wetlands with thermally modified sepiolite." *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 29, pp. 12535–12546.
- García, J., Rousseau, D. P. L., Morató, J., Lesage, E., Matamoros, V., and Bayona, J. M. (2010). "Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: A review." *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 40, pp. 561–661.
- Heisler, J., Glibert, P. M., Burkholder, J. M., Anderson, D. M., Cochlan, W., Dennison, W. C., and Others. (2013). "Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus." *Harmful Algae*, Vol. 8, pp. 3–13.
- Hong, J., and Gil, K. (2024). "Analysis of pollutant reduction characteristics in a hybrid constructed wetland using effluent from a municipal wastewater treatment plant." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 26, No. 4, pp. 338–343.
- Hong, J., and Gil, K. (2025). "Estimation of carbon storage through constructed wetland operated with STP effluent." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 58, No. 8, pp. 637–645.
- Jang, A., Park, Y., and Kim, K. (2009). "Nutrient characteristics in effluents and their effects on downstream water quality in municipal wastewater treatment plants in Korea." *Journal of Korea Water Environment*, Vol. 25, No. 3, pp. 383–391.
- Justino, S., Calheiros, C., Castro, P., and Gonçalves, D. (2023). "Constructed wetlands as nature-based solutions for wastewater treatment: A review." *Hydrology*, Vol. 10, No. 7, pp. 153.
- Lan, J., Liu, P., Hu, X., and Zhu, S. (2024). "Harmful algal blooms in eutrophic marine environments: Causes, monitoring, and treatment." *Water*, Vol. 16, No. 2525, pp. 1–64.
- Ministry of Environment (ME). (2025). Sewerage Statistics 2024. Korea Environment Corporation. Accessed 20 January 2025. <https://www.hasudoinfo.or.kr>

- Reyes, C. A., Ghermandi, A., and Broekman, A. (2020). "Nature-based solutions for wastewater management and reuse in developing countries: A review." *Environmental Research*, Vol. 191, pp. 110111.
- Smith, V. H., Tilman, G. D., and Nekola, J. C. (1999). "Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems." *Environmental Pollution*, Vol. 100, No. 1–3, pp. 179–196.
- Tang, X., Wu, M., Dai, Y., and Sun, Y. (2021). "A review on constructed treatment wetlands for removal of nutrients from wastewater." *Sustainability*, Vol. 13 (24), pp. 13578.
- Tanner, C. C., Sukias, J. P. S., and Upsdell, M. P. (1998). "Organic matter accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters." *Water Research*, Vol. 32, No. 10, pp. 3046–3054.
- Vymazal, J. (2007). "Removal of nutrients in various types of constructed wetlands." *Science of the Total Environment*, Vol. 380, No. 1–3, pp. 48–65.
- Yang, X. E., Wu, X., Hao, H. L., and He, Z. L. (2008). "Mechanisms and assessment of water eutrophication." *Journal of Zhejiang University Science B*, Vol. 9, No. 3, pp. 197–209.