

인공습지 식생 선택을 위한 인산 가용화 미생물 활성 분석

김혜량* · 길경익***

*서울과학기술대학교 건설시스템공학과

Functional Evaluation of Phosphate-Solubilizing Microorganism (PSM) Activity for Constructed Wetland Vegetation Selection

Hyeryang Kim* · Kyungik Gil***

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

(Received : 29 October 2025, Revised : 18 November 2025, Accepted : 18 November 2025)

요약

하이브리드형 인공습지에서 인(P)의 제거 효율 저하가 확인되었다. 이에 식생 근권 내 인산가용화미생물(Phosphate-Solubilizing Microorganisms, PSM) 활성을 인산가용화지수(Phosphate Solubilization Index, PSI)로 평가하여 기능적 식생 선정 정량적 기준을 마련하고자 하였다. 이를 위해 수크령(*Pennisetum alopecuroides*), 비비추(*Hosta longipes*), 노랑꽃창포(*Iris pseudacorus*), 부처꽃(*Lythrum anceps*), 갈대(*Phragmites australis*)의 근권 토양을 채취하였다. Pikovskaya's agar 배지에서 PSM을 배양한 후, colony 및 halo 직경을 측정하여 PSI를 산정하였다. 실험 결과, 비비추의 평균 PSI(3.43 ± 0.86)가 가장 높았으며, 갈대는 2.59 ± 0.17로 가장 낮고 안정적인 근권 환경을 보였다. 이는 PSI가 근권 미생물 활성을 정량적으로 비교·평가할 수 있는 유효 지표임을 시사한다. 본 연구는 고효율 PSM 식생의 우선 도입을 통해 근권 인 순환을 촉진하고, 인공습지의 수처리 성능과 탄소 저장 효과를 동시에 향상시킬 수 있는 생물학적 기반을 제시한다.

핵심어 : 인산가용화미생물, 인공습지, 인산가용화지수

Abstract

This study evaluated phosphate-solubilizing microorganism (PSM) activity in rhizospheric soils of five macrophyte species to establish a biological criterion for plant selection in constructed wetlands. Declining phosphorus removal efficiency in a test-bed hybrid CW treating wastewater effluent indicated the need for functional improvement. Rhizospheric soils from *Pennisetum alopecuroides*, *Hosta longipes*, *Iris pseudacorus*, *Lythrum anceps*, and *Phragmites australis* were cultured on Pikovskaya's agar, and the Phosphate Solubilization Index (PSI) was calculated. Results showed *H. longipes* had the highest PSI (3.43 ± 0.86), while *P. australis* had the lowest (2.59 ± 0.17). PSI effectively distinguishes rhizospheric microbial activity among species, providing a biological basis for selecting high-PSI plants to enhance phosphorus cycling and treatment performance in constructed wetlands.

Key words : Phosphate-Solubilizing Microorganisms, Constructed Wetland, Phosphate Solubilization Index

1. 서론

인공습지(Constructed Wetland)는 하수처리장 방류수의 재순환과 오염물질 저감을 위한 지속가능한 수처리 공법으로 널리 활용되고 있다(Brix, 1997; Vymazal, 2008). 이러한 시스템은 수질정화뿐만 아니라 대기 중의 탄소를 격리

저장(Zhang *et al.*, 2025; Robles *et al.*, 2023), 생물다양성 보전(Zhang *et al.*, 2020), 도시열섬 완화(Wu *et al.*, 2021) 등 다양한 생태계 서비스를 제공하며 도시 내 녹색 인프라로 주목받고 있다(Matter *et al.*, 2024). 특히 도심 지역의 인공습지는 하수처리장 방류수를 유입수로 활용하여 처리수의 재순환과 오염물질의 2차 저감, 탄소 저감의 시너지


*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.

효과를 기대할 수 있다. 인공습지의 수질정화 성능은 물리·화학적 과정뿐 아니라 식생과 토양 미생물 간의 생물학적 상호작용에 크게 의존한다(Wang *et al.*, 2025). 식생의 활발한 성장은 오염물질 흡수와 동시에 생물량(biomass) 축적을 통한 탄소 격리(carbon sequestration)에 기여하며, 장기적인 습지 성능 유지에 핵심적 역할을 한다(Overbeek *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2024). 또한 하수처리장 방류수를 유입수로 활용한 인공습지 연구에서 식생에 따라 탄소 저장 특성이 달라짐이 보고된 바 있어(Hong and Gil, 2025), 식생 선택이 수질정화뿐 아니라 탄소 기능에도 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 그러나 방류수는 상대적으로 낮은 영양염 농도를 가지므로 식물 성장 단계에서 인 가용성 부족이 발생할 가능성이 있다. 이는 식생의 초기 활착과 생물량 축적에 영향을 줄 수 있다(Carpenter *et al.*, 1998; Smith *et al.*, 1999). 또한 하수처리장 방류수의 인은 총인(TP)이 낮을 뿐 아니라, 생물학적 이용이 어려운 용존 비반응성 인(DUP)과 입자성 인(PP)의 비율이 높고, 식생이 직접 이용 가능한 용존 반응성 인(DRP)은 제한적인 것으로 보고되어 왔다(Ekholm and Krogerus, 1998). 이러한 조건에서는 식생의 초기 활착과 인 흡수가 제약될 수 있어, 근권에서 불용성 인을 가용화하는 PSM의 역할이 상대적으로 중요해질 가능성이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 인공습지 설계는 수질정화 중심의 공정 설계에서 벗어나 생물학적 기능 기반의 설계로 확장할 필요가 있다. 기존 인공습지 연구는 근권 미생물의 기능, 특히 인산가용화미생물(Phosphate Solubilizing Microorganisms, PSM)을 활용한 생물학적인 인 순환 강화 전략은 충분히 논의되지 않았다. 인은 생태계 내 필수 영양소이지만 대부분 불용성 형태로 존재하여 식물이 직접 이용하기 어렵다. 근권 토양 내 PSM은 유기산과 효소를 분비하여 불용성 인을 가용화하고, 식물의 인 이용 효율을 개선한다. 따라서 PSM은 근권 내 인 순환에 핵심 요소로 작용한다(Rodríguez and Fraga, 1999; Chen *et al.*,

2006; Vassilev *et al.*, 2006). 본 연구는 하수처리장 방류수를 유입수로 하는 인공습지의 설계 시 식생 선택 기준에 수질정화 능력뿐 아니라 근권 토양 내 PSM 활성을 고려한 기능적 선정 방안을 제시하고자 한다. 특히, 초기 식생 활착 이전 단계에서 PSM의 활성은 인공습지의 미생물 기반 인 순환 촉진에 핵심적인 역할을 수행하는 것으로 보고되었다(Kim and Gil, 2024). 이를 위해 식생별 인산 가용화지수(Phosphate Solubilization Index, PSI)를 산정해 인 활용 능력을 비교하였으며, 이를 기반으로 낮은 영양염류 환경에서도 성장 잠재력을 극대화할 수 있는 식생을 도입하는 과학적 선정 방안을 제시하고자 한다. 이러한 접근은 인공습지의 지속가능한 수처리 성능과 탄소 저감 기능을 동시에 향상시키는 새로운 설계 방향을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구는 현장 운전 중인 인공습지 test-bed의 모니터링 결과를 배경으로 수행되었다. 본 시스템은 수직흐름형(Vertical Subsurface Flow, VSSF)과 수평흐름형(Horizontal Subsurface Flow, HSSF) 습지를 직렬로 연결한 하이브리드형 인공습지이다. 유입수는 VSSF를 통과한 뒤 HSSF를 거쳐 흐르고 최종 방류된다. 선행 연구에서는 VSSF 유입수, VSSF 유출수, HSSF 유출수 세 지점에서 수질 모니터링이 수행되었다. 선행 연구에 따르면, 가동 초기 약 80일 동안 총인(TP)이 완전히 제거되어 방류수에서 검출되지 않았다. 그러나 약 80일 이후 VSSF 습지의 유출수에서 TP가 검출되었으며, 이후 HSSF 습지 유출수에서도 TP 농도가 재상승하는 경향이 확인되었다(Hong and Gil, 2024). 이는 인 제거 효율의 시간적 불안정성을 시사한다. 이에 본 연구는 PSM의 활성이 인 순환의 중요 요소라는 점에 주목하여 인 제거 효율 저하의 원인을 근권 미생물의 인산 가용화 활성 측면에서 분석하고자 하였다. 이를 위해 식생별 근권 토양에서

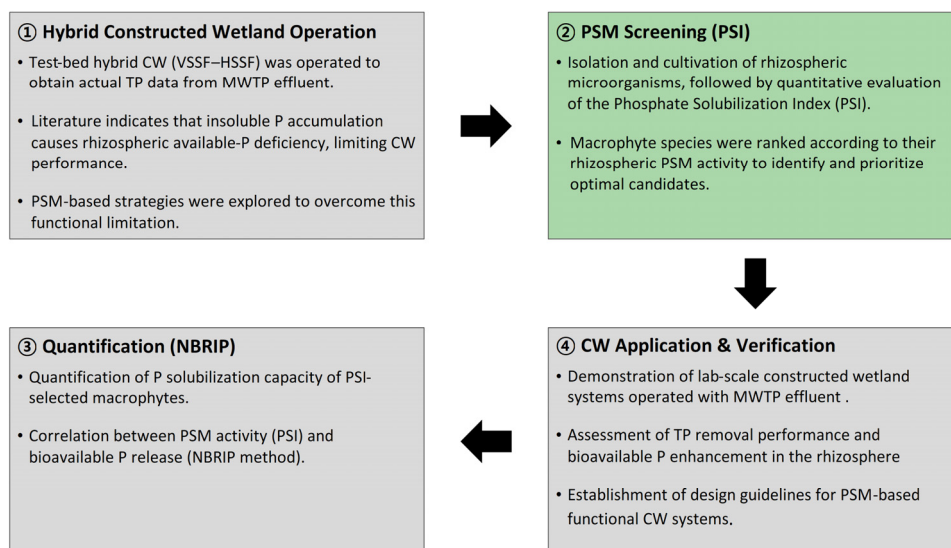


Fig. 1. Analysis and verification framework for PSM-based functional design of constructed wetlands

PSM 활성을 평가하고 PSI를 이용해 비교하였다. PSI 분석 결과를 바탕으로 인 순환 기능 향상에 기여할 수 있는 식생 후보군을 도출하였으며, 향후 인 용출 잠재력 검증과 인공 습지 적용 및 실증 성능 평가로 연구 범위를 확장할 계획이다. 전체적인 연구 설계와 방법론의 단계별 흐름은 Fig. 1에 도식화하였다.

2.1 실험 식생 재배 조건

본 연구에서는 하수처리장 방류수 기반 인공습지에서 적용 가능한 식생을 대상으로 PSM의 활성을 비교하였다. 식생 선정은 인공습지에서의 수질정화 가능, 생태적 안정성, 경관적 활용성을 종합적으로 고려하여 수행하였다. 실험에는 수크령 (*Pennisetum alopecuroides*), 비비추(*Hosta longipes*), 노랑꽃창포(*Iris pseudacorus*), 부처꽃(*Lythrum anceps*), 갈대 (*Phragmites australis*)을 선정하였다. 노랑꽃창포와 부처꽃은 질소 및 인 제거 성능이 보고된 바 있으며(Kwon and Park, 2003; Yousefi and Mohseni-Bandpei, 2010; Cho, 2007), 갈대는 발달된 근계와 근권 산화 능력으로 인공습지에서 대표적 정수식물로 활용된다(Armstrong *et al.*, 1992; Kwon and Park, 2003; Vymazal, 2011). 반면 비비추와 수크령은 경관성 및 피복 효과를 고려하여 선정하였다. 모든 식생은 동일한 토양 조건에서 재배하고, 실외 자연광 하에서 생육시켰다.

2.2 인산가용화미생물 배양 및 PSI 산정

식생의 활착 후 2주 경과한 시점에 각 식생별 근권 토양(rhizosphere soil)을 채취하였다. 근권 시료는 뿌리 주변 토양을 중심으로 채취하였으며, 채취한 토양 시료는 냉장 상태(4°C)에서 보관 후 24시간 이내에 인산 가용화 활성 분석에 사용하였다. PSM의 활성을 평가하기 위해 Pikovskaya's agar (PVK agar)를 사용하였다(Pikovskaya, 1948; Edi-Premono *et al.*, 1996; Nautiyal, 1999). PVK agar는 불용성 인산염인 Ca₃(PO₄)₂를 포함하며, 미생물이 생성하는 유기산에 의해 인산이 가용화되면 콜로니(colony) 주변에 투명한 halo zone이 형성된다(Abd-Alla, 1994; Rodriguez *et al.*, 2004). 배양 후 halo zone이 형성된 colony를 PSM으로 판별하였으며, 사용한 PVK agar의 조성은 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Pikovskaya's agar chemical composition

Ingredients	g/L
Yeast extract	0.500
Dextrose (Glucose)	10.000
Calcium phosphate	5.000
Ammonium sulfate	0.500
Potassium chloride	0.200
Magnesium sulfate	0.100
Manganese sulfate	0.0001
Ferrous sulfate	0.0001
Agar	15.000

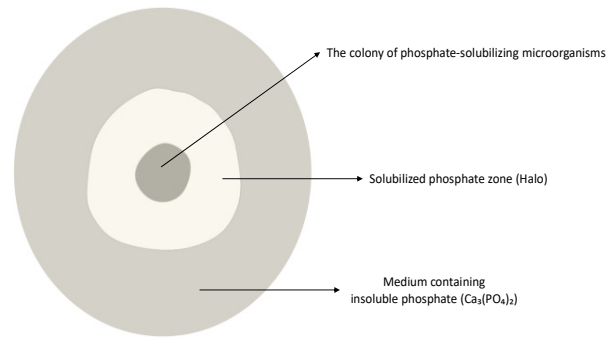


Fig. 2. Halo zone formation by phosphate-solubilizing microorganisms on PVK agar

Fig. 2는 PVK agar 배지에서 PSM의 인산 가용화 과정과 halo 구조 형성을 도식화한 것이다. 중앙의 colony는 접종된 미생물이 증식한 부위이며, 이때 PSM은 유기산 등 대사 산물을 분비하여 배지 내 불용성 인산염을 용해시킨다. 이 과정에서 주변의 pH가 감소하고, 용해된 인산이 존재하는 영역이 투명하게 변하여 halo zone이 형성된다. halo zone의 크기는 불용성 인산의 가용화 정도를 시각적으로 나타내며, 그 폭이 넓을수록 인산 용해 능력이 높음을 의미한다. 반면 colony의 직경은 PSM의 배지 적응도와 성장 능력을 반영한다.

본 연구에서는 colony와 halo 직경을 측정하여 PSI를 산정하였으며, 산정식은 Eq. (1)에 제시하였다(Edi-Premono *et al.*, 1996; Nautiyal, 1999; Pande *et al.*, 2017).

$$PSI = \frac{Colony\ diameter + Halo\ zone\ diameter}{Colony\ diameter} \quad (1)$$

각 식생의 PSI는 동일 조건에서 3회 반복 측정된 값으로 평균 PSI 값을 산출하여 근권 미생물의 인산 가용화 활성 지표로 활용하였다. 측정된 PSI 결과는 식생 간 미생물 활성의 차이를 비교하고, 인공습지 식생 선정 시 생물학적 근거를 제시하는 자료로 활용하였다. 반복 측정값의 평균(Mean)과 표준편차(Standard deviation, SD)는 기본 통계 절차에 따라 산출하였다.

3. 결론 및 고찰

3.1 식생별 근권 토양 인산 가용화 지수(PSI) 측정 결과

식생의 근권 토양에서의 PSM의 활성은 PVK agar 배지에서 형성된 halo와 colony의 직경을 측정하여 평가하였다. 각 식생별 halo의 직경 분포를 Fig. 3에 나타냈다.

식생별로 PSM의 인산 용해에 뚜렷한 차이가 관찰되었다. 5종의 식생 중 비비추가 가장 큰 평균 halo 직경과 넓은 변동 범위를 나타냈다. 중앙값은 중간 수준이지만 평균값이 상대적으로 높게 나타났는데, 이는 일부 개체에서 활발한 인산 용해가 일어나 전체 평균을 올린 결과로 해석된다. 즉, 근권 내 PSM의 활성 편차가 크다는 점을 의미한다. 반면

수크령은 좁은 사분위 범위와 작은 halo 직경을 보이며, 전반적으로 낮고 균일한 PSM 활성을 보였다. 이는 PSM의 제한된 인산 가용화 활성이 일어났음을 의미한다. 노랑꽃창포와 부처꽃은 중간 수준의 halo 직경을 보였으며, 평균과 중

양값이 유사한 대칭적 분포를 보였다. 갈대의 halo 직경과 변동폭도 중간 수준으로 나타나, 균일하고 안정적인 인산 가용화 활성을 보였다.

Fig. 4는 식생별 colony 직경의 분포를 비교한 결과이다.

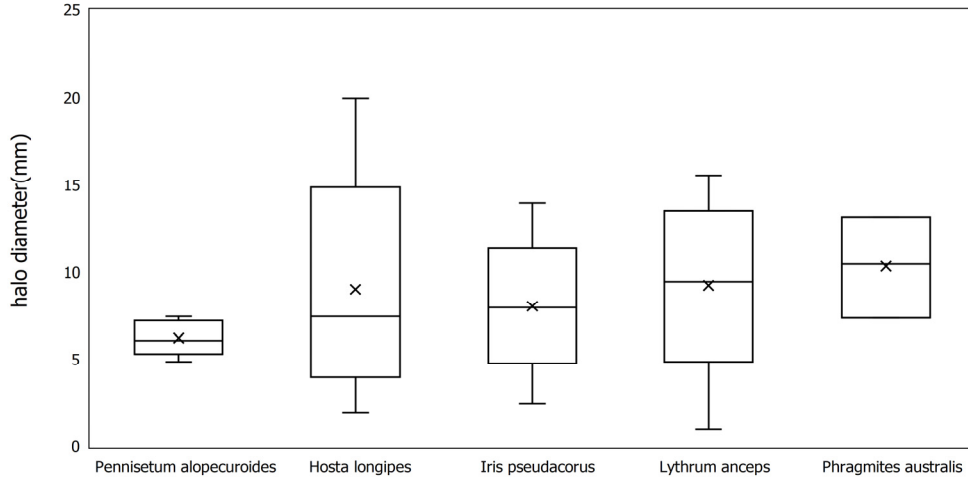


Fig. 3. Variation in halo diameter of PSM among macrophyte species

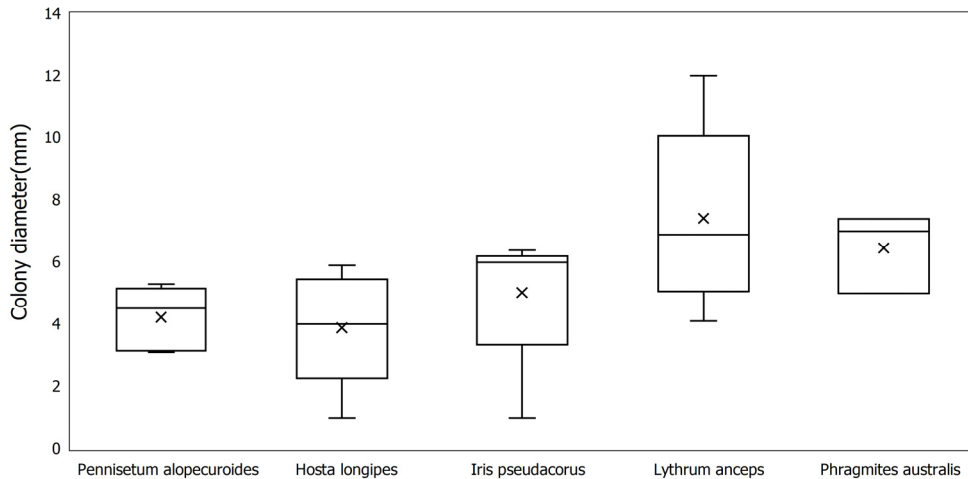


Fig. 4. Variation in colony diameter of PSM among macrophyte species

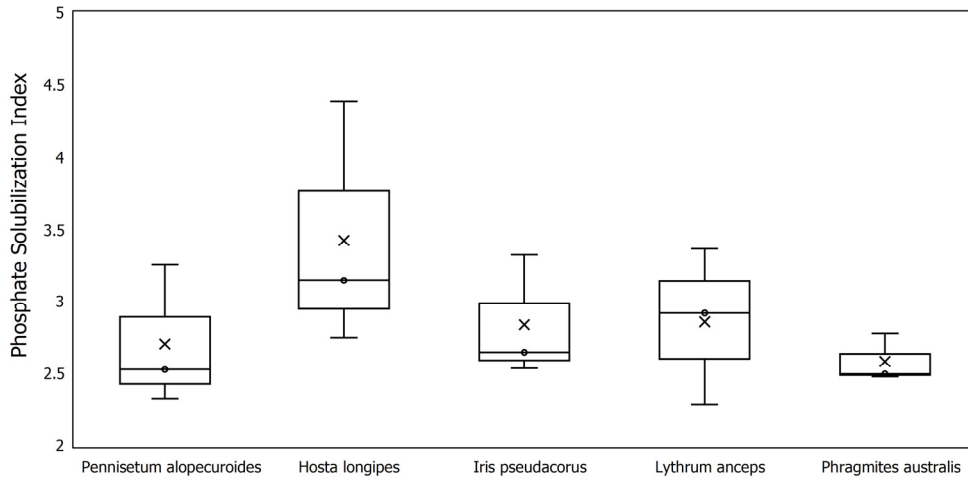


Fig. 5. Distribution of phosphate solubilization index among macrophyte species

수크령은 전반적으로 작은 값과 좁은 사분위 범위를 보여 낮고 균질한 생장을 보였다. 비비추는 중앙값과 평균값이 거의 일치하며 분포가 대칭적으로 나타났다. 이는 근권 내 PSM이 일정한 수준의 생장을 유지하며 과도한 성장 없이 안정적으로 활성됨을 의미한다. 노랑꽃창포는 중앙값이 평균보다 높게 나타나, 일부 개체에서 작은 colony 직경이 관찰되었음을 시사한다. 부처꽃은 넓은 사분위 범위를 보이며 중앙값이 상위 사분위에 가까워 일부 개체에서 colony의 직경이 크게 관찰되어 변동성이 큰 것으로 평가되었다. 갈대는 중앙값이 평균보다 다소 높게 나타났으며, 좁은 사분위 범위를 보여 전반적으로 균일한 colony 성장을 보였다. 이는 근권 내 PSM 활성이 일정하고 안정적인 수준에서 유지되고 있음을 시사한다. 이러한 halo와 colony 직경을 기반으로 산정한 PSI의 분포는 Fig. 5에 제시하였으며 PSM 활성이 유의미한 차이가 관찰되었다.

Fig. 5는 식생 별 PSI의 분포를 나타낸다. 평균 PSI는 비비추가 가장 높게 나타났으며, 그 뒤로 부처꽃, 노랑꽃창포, 수크령, 갈대 순으로 확인되었다. 이는 비비추 근권에서 인 PSM의 활성이 상대적으로 높음을 의미하며, 미생물 활성에 유리한 환경을 제공하고, 불용성 인산(tricalcium phosphate, TCP)의 용해에 관여하는 유기산 생성이 활발하게 일어났을 가능성을 시사한다. 식생별 PSI의 평균 범위는 약 2.3~3.4로, 모든 식생 근권에서 일정 수준 이상의 인산 가용화 활성을 확인하였다. 특히 비비추의 중앙값은 약 3.2, 최댓값은 약 4.4로 측정되어, 본 연구에서 관찰한 식생 중 가장 높은 활성을 나타냈다. 반면 갈대의 PSM 활성이 가장 낮게 나타났으며, 중앙값은 약 2.5로 확인되었다. 또한 사분위 범위가 약 2.5±0.1 범위로 가장 좁아 데이터 변동성이 매우 작은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 갈대 근권 환경이 미생물 군집의 수렴(convergence)을 유도하는 강한 환경적 필터링 역할을 했기 때문으로 해석된다. 실제로 갈대 근권 퇴적물에서 박테리아 군집의 공간적 변동성(β -diversity)이 주변 퇴적물(bulk sediment)보다 현저히 낮게 나타났다는 보고가 있으며(He *et al.*, 2021), 이는 식물 뿌리 분비물에 의해 서식 미생물이 선택적으로 모집(selective recruitment)과 환경적 이질성(heterogeneity)의 영향이 약화되어 PSM 활성이라는 기능적 지표의 변동성까지 제한되었을 가능성을 시사한다(He *et al.*, 2021). 나머지 식생 그룹인 부처꽃, 노랑꽃창포, 수크령의 PSM 활성은 중간 수준을 보였으며, 각 식생의 중앙값은 부처꽃 약 3.0, 노랑꽃창포 약 2.8, 수크령 약 2.7으로 나타났다. 이는 식물 종에 따라 근권 환경이 달라지고, 이에 따라 PSM 군집의 구성과 활성 역시 상이하다는 것을 시사한다(Hu *et al.*, 2018). 결과적으로, 비비추 근권은 인산 가용화 미생물의 활성과 다양성이 모두 높아, 인공습지 내에서 인산의 생물학적 가용화를 촉진할 잠재력이 높은 식생으로 평가된다. 특히 높은 PSI와 함께 상대적으로 큰 변동 폭을 보인다는 점은 근권 내 다양한 미생물종이 공존하며 상호작용을 하는 환경임을 나타낸다. 반면, 갈대는 낮은 PSI와 좁은 사분위 범위를 보여 미생물 활성의 다양성

이 제한된 안정적 근권 환경을 형성하고 있음을 시사한다. 이러한 식생 간 차이는 인공습지 설계 시 식생 구성의 중요성을 강조하며, PSM 활성이 높은 식생을 우선 도입할 경우 인산 제거 및 순환 효율이 향상될 것으로 판단된다.

3.2 PSI 변동성을 통한 근권 미생물 활성의 안정성 평가

각 식생 근권 토양에서 측정된 인산가용화지수(PSI)의 표준편차(Standard deviation, SD)를 이용하여 미생물 활성의 변동성과 근권 환경의 안정성을 비교·분석하였다. 표준편차 분석 결과는 Table 2에 제시되었다.

비비추는 평균 PSI 3.43, 표준편차 0.86으로 가장 높은 변동성을 보였다. 이는 비비추 근권 내 다양한 PSM이 공존하며 개체 간 활성 차이가 뚜렷했음을 의미한다. 이러한 결과는 근권 내 미생물 다양성이 높고, 여러 대사 경로가 복합적으로 작용하고 있음을 시사한다(Chaparro *et al.*, 2014; Raymond *et al.*, 2021; Sharma *et al.*, 2013). 반면 갈대는 PSI 2.59, 표준편차 0.17로 가장 낮은 변동성을 보였다. 이는 갈대 근권이 상대적으로 균질하고 안정적인 미생물 활성 환경을 형성하고 있음을 시사한다. 환경적 필터링에 의해 특정 개체가 우점하여 기능적 다양성이 제한되는 경향이 보고된 바 있으며(He *et al.*, 2021), 본 연구의 결과도 이러한 경향을 나타냈다. 노랑꽃창포, 부처꽃, 수크령의 PSI 평균은 각각 2.84, 2.86, 2.71이며, 표준편차는 각각 0.43, 0.54, 0.49로 중간 수준의 변동성을 나타냈다. 이는 각 식생이 형성한 근권 환경에 따라 PSM 활성 수준이 일정 범위 내에서 변동하며, 이는 미생물 군집의 대사적 다양성이 반영된 결과일 가능성이 있다. 이러한 결과는 식물-미생물 상호작용이 뿌리 분비물과 같은 근권 화학적 성분을 통해 미생물 군집의 다양성 및 구성을 결정하며, 미생물 군집 내 경쟁과 협력의 상호작용이 군집의 구조와 기능에 영향을 미친다. 결과적으로, 식생의 종 특성에 따라 근권 내 미생물 활성 수준 뿐 아니라 활성의 일관성과 변동성도 달라짐을 확인하였다.

3.3 PSI 기반 식생 선정 우선순위 평가

Fig. 6은 식생별 PSI와 평균 halo 직경의 관계를 나타낸다. PSI는 산정식의 구조적 특성상 halo 직경이 증가와 함께 상승하는 경향을 보인다. 본 연구의 다섯 식생에서도 전체적인 경향은 이와 일치하였으나, 모든 종에서 동일한 순위를 보이진 않았다. 그럼에도 불구하고, 비비추는 두 지표 모두 가장 높은 값을 보이며, PSI와 halo 직경이 인공습지

Table 2. PSI (mean ± SD) of rhizospheric microbes from macrophytes

Macrophyte species	PSI (mean ± SD n=3)
<i>Pennisetum alopecuroides</i>	2.71±0.49
<i>Hosta longipes</i>	3.43±0.86
<i>Iris pseudacorus</i>	2.84±0.43
<i>Lythrum anceps</i>	2.86±0.54
<i>Phragmites australis</i>	2.59±0.17

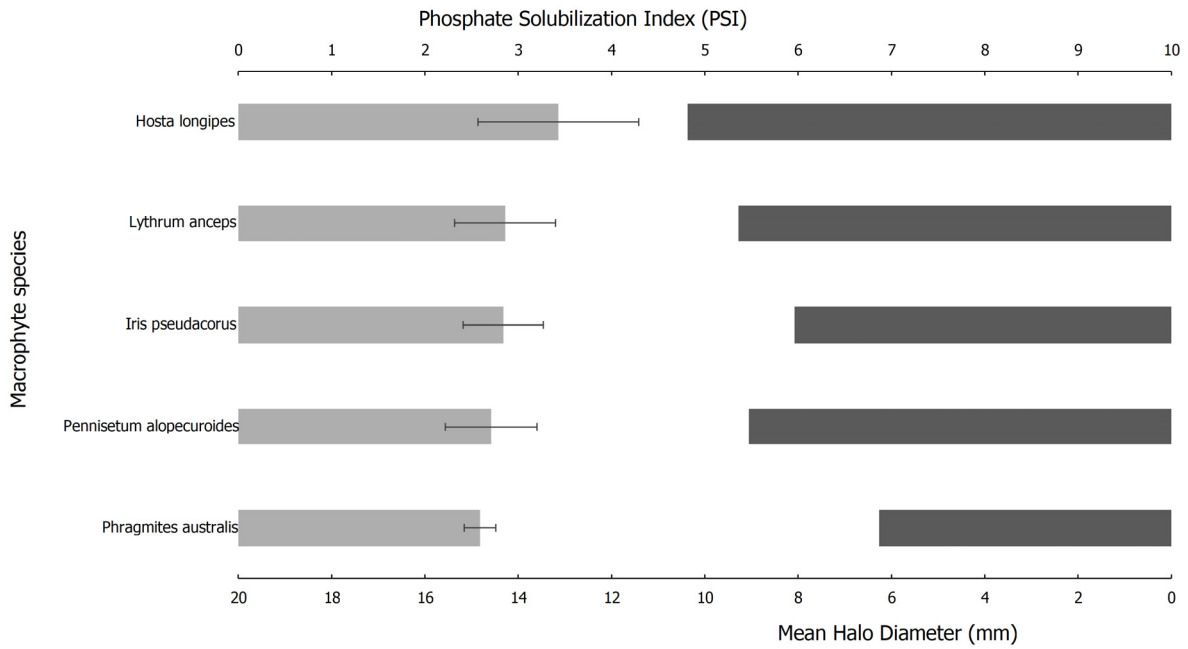


Fig. 6. Relationship between mean PSI and halo diameter of rhizospheric microorganisms associated with macrophyte species

식생 선정에서 일관된 지표로 활용될 수 있음을 보여주는 사례이다. 반면 수크령은 노랑꽃창포보다 더 큰 평균 halo 직경을 보였지만 PSI는 다소 낮아 두 지표 간 종별 순위가 부분적으로 상이하였다. 이는 halo 직경이 PSI에 기여하는 주요 요소임에도 불구하고, colony 성장도·균주의 대사활성 차이 등 추가적 요인들이 종별 PSI 값에 영향을 주기 때문으로 해석된다. Fig. 6에서는 식생별 평균 PSI가 높은 순서로 배열되어 있으며, 인공습지 식생 선정을 위한 실질적 지표로 제시한다. 측정된 평균 PSI 값은 비비추, 부처꽃, 노랑꽃창포, 수크령, 갈대 순으로 확인되었다. 그중 비비추는 평균 PSI 3.43 및 표준편차 0.86을 나타내어, 가장 높은 변동성을 나타냈다. 근권 내 다양한 PSM이 공존하며 균주 간 활성이 뚜렷했음을 의미한다. 이러한 결과는 근권 내 미생물 다양성이 높고, 대사 경로가 복합적으로 작용하고 있음을 시사한다(Chaparro *et al.*, 2014; Raymond *et al.*, 2021; Sharma *et al.*, 2013). 따라서 비비추는 인공습지 내 인산의 생물학적 제거 및 순환을 촉진할 우선 후보종으로 평가된다. 부처꽃, 노랑꽃창포, 수크령은 중간 수준의 PSI와 변동성을 보였다. 근권 내 PSM 활성이 일정 수준 유지되면서도 개체 간 활성 차이가 존재함을 의미하며, 근권 미생물 군집의 대사적 다양성이 반영된 결과일 가능성이 있다. 따라서 이들 식생은 인공습지에서 PSM 활성을 보완하고 인산 순환 기능을 유지하는 보완 식생으로 활용될 수 있다. 한편 갈대는 평균 PSI 2.59로 가장 낮은 활성 수준을 보였으며, 표준편차 0.17로 가장 낮은 활성 변동성을 나타냈다. 이는 갈대 근권이 균질하고 안정적인 미생물 활성 환경을 형성하고 있음을 의미한다. 근권 내 환경적 필터링에 의해 특정 균주가 우점함으로써 기능적 다양성이 제한된 경향이 보고된 바 있으며(He *et al.*, 2021). 따라서 갈대는 인산의 생물학적 가용화보다는 수리학적 안정성 확보 및 장기적 기능

유지에 적합한 식생으로 평가된다. 결과적으로, 식생의 종 특성에 따라 근권 내 미생물 활성 수준뿐 아니라 활성의 일관성과 변동성에서도 차이를 확인하였다. 이는 식물-미생물 상호작용이 근권의 화학적 성분을 통해 미생물 군집의 다양성과 구성을 조절하며, 미생물 간 경쟁과 협력이 군집의 구조와 기능에 영향을 미친다는 점을 시사한다. 이러한 결과를 바탕으로 인공습지 운영에서 유입수의 인 농도가 낮고 불용성 인의 비율이 높은 조건을 고려할 때, 비비추와 같이 PSI가 높은 식생은 초기 유입부에서 인산 가용화를 촉진하는 역할을 수행할 수 있다. 반면, PSI는 낮지만 근권 미생물 활성의 변동성이 작은 갈대는 습지 말단부나 장기적 안정성이 필요한 구간의 식재에 적합할 것으로 판단된다. 중간 수준의 PSI를 보인 부처꽃·노랑꽃창포·수크령은 인산 순환 기능을 보완하는 보조 식생으로 배치함으로써 전체 습지의 생물학적 인 처리 잠재력을 보완하는 데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 인공습지 식생의 근권 토양에서 PSM의 활성을 평가하고, 식생별 PSI를 비교하여 인공습지 식생 선정 시 근권 미생물 기능 기반 식생 선정 기준을 제시하였다. 분석 결과, 비비추의 평균 PSI가 3.43으로 가장 높게 나타났으며, 넓은 변동 범위가 확인되어 PSM의 활성이 활발히 이루어지는 근권 환경을 형성하는 식생으로 평가되었다. 부처꽃과 노랑꽃창포는 각각 PSI 2.86과 2.84로 나타나며 중간 수준의 PSM 활성과 변동성을 가진 식생군으로 확인되었다. 수크령 역시 PSI 2.71로 나타나 부처꽃, 노랑꽃창포, 수크령은 보완적 기능을 수행할 수 있는 식생으로 판단되었다. 반면 갈대는 PSI 2.59와 표준편차 0.17로 가장 낮은 변

동성을 보여, 안정적인 근권 환경을 형성하나 인산 가용화 능력은 제한적인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 결과는 인공습지 내 인의 생물학적 제거 및 순환 효율 향상을 위해, PSM 활성이 가장 높은 비비추를 중심으로 부처꽃, 노랑꽃창포, 수크령을 보완 식생으로 혼합 식재하는 전략이 인공습지 내 인산의 생물학적 가용화 및 순환을 촉진하는데 효과적이라고 판단된다. 또한, 유입수의 인 농도가 낮은 하수처리장 방류수 기반 습지 특성을 고려할 때, PSI가 높은 식생을 유입부에 배치하고, 안정성이 높은 식생을 습지의 중·하류부에 조합하는 전략은 인공습지의 인 순환 기능을 향상시키는 데 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 식생 조합은 근권 미생물의 활성과 안정성을 동시에 고려할 설계 체계라는 점에서 의미가 있다. 본 연구의 PSI 기반 선정 기준은 인공습지 설계·운영 단계에서 근권 미생물 기능에 근거한 식생 구성의 정량적 근거로 활용될 수 있을 것이다.

사 사 (Acknowledgement)

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

References

- Abd-Alla, M. H. (1994). Phosphatases and the utilization of organic phosphorus by *Rhizobium leguminosarum* biovar viceae. *Letters in Applied Microbiology*, 10, 294–296.
- Armstrong, J., Armstrong, W., and Beckett, P. M. (1992). *Phragmites australis*: Venturi- and humidity-induced pressure flows enhance rhizome aeration and rhizosphere oxidation. *New Phytologist*, 120, 197–207.
- Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, 35(5), 11–17.
- 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*, 8(3), 559–568.
- Chaparro, J. M., Badri, D. V., and Vivanco, J. M. (2014). Rhizosphere microbiome assemblage is affected by plant development. *The ISME Journal*, 8, 790–803.
- Chen, Y. P., Rekha, P. D., Arun, A. B., Shen, F. T., Lai, W.-A., and Young, C. C. (2006). Phosphate-solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate-solubilizing abilities. *Applied Soil Ecology*, 34(1), 33–41.
- Cho, H.-Y. (2007). A study on the effect of the water purification by *Lythrum anceps*, *Pistia stratiotes*, *Oenanthe javanica*, and *Phragmites japonica*. *Journal of Environmental Science International*, 16(3), 380–384.
- Edi-Premono, M., Moawad, A. M., and Vlek, P. L. G. (1996). Effect of phosphate-solubilizing *Pseudomonas putida* on the growth of maize and its survival in the rhizosphere. *Indonesian Journal of Crop Science*, 11, 13–23.
- He, S., Chen, W., Wang, X., Peng, Y., Zhang, J., and Wang, J. (2021). Decreased spatial variation and deterministic processes of bacterial community assembly in wetlands under nitrogen loading. *Molecular Ecology*, 30, 2055–2069.
- Hong, J., and Gil, K. (2024). Test-bed scale hybrid constructed wetland for pollutant load reduction. *Journal of Wetlands Research*, 26(1), 1–12.
- Hong, J., and Gil, K. (2025). Estimation of carbon storage in constructed wetlands receiving WWTP effluent. *Journal of Korea Water Resources Association*, 27(2), 45–58.
- Hu, L., Robert, C. A. M., Cadot, S., Zhang, X., Ye, M., Li, B., Manzo, D., Chervet, N., Steinger, T., van der Heijden, M. G. A., Schlaeppli, K., and Erb, M. (2018). Root exudate metabolites drive plant-soil feedbacks on growth and defense by shaping the rhizosphere microbiota. *Nature Communications*, 9, 2738.
- Kim, S., and Gil, K. (2024). Evaluation of phosphate solubilization microbe (PSM) activity during initial operation of constructed wetland. *Wetlands*, 44, Article 40.
- Kwon, A., and Park, C. (2003). A study on water quality remediation using aquatic plants. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 25(4), 415–420.
- Matter, N. M., and Gado, N. G. (2024). Constructed wetlands: Nature-based solutions to enhance urban resilience in Egyptian cities. *HBRC Journal*, 20(1), 231–255.
- Nautiyal, C. S. (1999). An efficient microbiological growth medium for screening phosphate-solubilizing microorganisms. *FEMS Microbiology Letters*, 170, 265–270.
- Overbeek, C. C., Kettunen, R., van Bodegom, P. M., and Verhoeven, J. T. A. (2020). Drivers of vegetation development, biomass production and carbon sequestration in a new constructed wetland. *Ecosystems*, 23(2), 237–250.

- Pande, A., Pandey, P., Mehra, S., Singh, M., and Kaushik, S. (2017). Phenotypic and genotypic characterization of phosphate-solubilizing bacteria and their efficiency on the growth of maize. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 15, 379–391.
- Pikovskaya, R. I. (1948). Mobilization of phosphorus in soil in connection with the vital activity of some microbial species. *Mikrobiologiya*, 17, 362–370.
- Raymond, N. S., Gómez-Muñoz, B., van der Bom, F. J. T., Nybroe, O., Jensen, L. S., Müller-Stöver, D. S., Oberson, A., and Richardson, A. E. (2021). Phosphate-solubilising microorganisms for improved crop productivity: A critical assessment. *New Phytologist*, 229, 1268–1277.
- Robles, M. E. L., Reyes, N. J. D. G., Choi, H. S., Jeon, M. S., and Kim, L. H. (2023). Carbon storage and sequestration in constructed wetlands: A systematic review. *Journal of Wetlands Research*, 25(2), 132–144.
- Rodríguez, H., Gonzalez, T., Goire, I., and Bashan, Y. (2004). Gluconic acid production and phosphate solubilization by the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* spp. *Naturwissenschaften*, 91, 552–555.
- Rodríguez, H., and Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 17(4–5), 319–339.
- Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., and Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2, 587.
- 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*, 100, 179–196.
- Vassilev, N., Vassileva, M., and Nikolaeva, I. (2006). Simultaneous P-solubilizing and biocontrol activity of microorganisms: Potentials and future trends. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 71(2), 137–144.
- Vymazal, J. (2008). Constructed wetlands for wastewater treatment: A review. In: Sengupta, M. and Dalwani, R. (eds.), Proceedings of Taal 2007, the 12th World Lake Conference, 965–980. International Lake Environment Committee Foundation.
- Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review. *Hydrobiologia*, 674, 133–156.
- Wang, L., Dai, X., Zhang, T., and Chi, C. (2025). A review on constructed wetlands in Beijing–Tianjin–Hebei region of China: Application in water treatment, problem, and practical solution. *Ecological Engineering*, 213, 107568.
- Wu, S., Yang, H., Luo, P., Luo, C., Li, H., Liu, M., Ruan, Y., Zhang, S., Xiang, P., Jia, H., and Cheng, Y. (2021). The effects of the cooling efficiency of urban wetlands in an inland megacity: A case study of Chengdu, Southwest China. *Building and Environment*, 204, 108128.
- Yang, Y., Zhang, Z., Chen, X., and Wu, J. (2024). A review of emerged constructed wetlands based on biochar: Wastewater purification and carbon sequestration. *Environmental Engineering Research*, 29(1), 105–116.
- Yousefi, Z., and Mohseni-Bandpei, A. (2010). Nitrogen and phosphorus removal from wastewater by subsurface wetlands planted with *Iris pseudacorus*. *Ecological Engineering*, 36, 777–782.
- Zhang, C., Wen, L., Wang, Y., Liu, C., Zhou, Y., and Lei, G. (2020). Can constructed wetlands be wildlife refuges? A review of their potential biodiversity conservation value. *Sustainability*, 12(4), 1442.
- Zhang, Y., Zhang, X., Fang, W., Cai, Y., Zhang, G., Liang, J., Chang, J., Chen, L., Wang, H., Zhang, P., Wang, Q., and Zhang, Y. (2025). Carbon sequestration potential of wetlands and regulating strategies response to climate change. *Environmental Research*, 269, 120890.