

철도 교량 강우유출수를 대상으로 한 비점오염원 저감시설의 성능평가

김재원* · 길경익**†

*서울과학기술대학교 건설시스템공학과

Performance Evaluation of Non-Point Source Pollution Reduction Facility for Runoff Drainage from Railway Bridge

Jaewon Kim* · Kyungik Gil**†

Seoul National University of Science and Technology Civil Engineering, Korea

(Received : 21 February 2025, Revised : 12 May 2025, Accepted : 16 May 2025)

요약

철도 교량과 같은 콘크리트 포장 구조물은 불투수성이 높아, 강우 시 건기 동안 축적된 비점오염물질이 단시간 내 대량 유출되는 특성을 가진다. 특히 철도 인프라에서는 이러한 유출수가 적절히 처리되지 않을 경우, 인근 수계로 직접 유입되어 수질 오염을 유발할 수 있다. 그럼에도 불구하고 철도 교량을 대상으로 한 비점오염 저감시설의 성능 분석 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구는 수도권 내 철도(지하철) 교량을 대상으로, 초기우수처리시설을 통한 오염물질 저감 효과를 정량적으로 평가하고자 수행되었다. 총 3회의 강우사상에 대해 유입수와 유출수의 유량가중평균농도(EMC)를 산정하고, BOD, COD, TOC, TSS, TN, TP 항목의 처리효율을 분석하였다. 그 결과 COD와 TP는 최대 100%, BOD와 TOC는 각각 최대 64.8%, 71.0%의 처리효율을 나타냈으며, TSS는 최소 10.4%로 편차가 크게 나타났다. 본 연구는 철도 교량에서의 비점오염 저감시설 설치 필요성을 실증적으로 제시하며, 향후 관련 정책 수립 및 지속적인 성능 모니터링의 기반자료로 활용될 수 있다.

핵심용어 : 유량가중평균농도, 처리 효율성, 유입수, 유출수

Abstract

Concrete-paved railway bridges exhibit high imperviousness, causing the rapid discharge of accumulated non-point source pollutants during rainfall events. Without proper treatment, these pollutants are often directly discharged into nearby water bodies, raising concerns about water quality degradation. Despite this, few studies have assessed the pollutant removal performance of treatment facilities installed at railway infrastructure. This study aims to quantitatively evaluate the removal efficiency of non-point source pollutants using BMP(Best management Practice) facility installed at a subway bridge in the metropolitan area. Three rainfall events were monitored to calculate the event mean concentration (EMC) of influent and effluent, focusing on BOD, COD, TOC, TSS, TN, and TP. The results showed removal efficiencies up to 100% for COD and TP, and up to 64.8% and 71.0% for BOD and TOC, respectively. However, TSS exhibited a wide range of removal efficiencies, from 10.4% to 57.8%, indicating the facility has sensitivity to rainfall characteristics. This study provides empirical evidence supporting the need for runoff treatment systems at railway bridges and offers foundational data for future policy development and long-term performance monitoring.

Key words : event mean concentration (EMC), removal efficiency, non-point source pollution, monitoring

*To whom correspondence should be addressed.

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

• Jaewon Kim Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea(jk4577@naver.com)

• 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.

1. 서론

환경부는 일정한 지역으로부터 배출되는 오염물질의 총량을 규제하는 Total Pollution Load Management System(오염총량관리제)를 도입했다.(환경부, 2022) 이 규정에는 기존방식으로 방류수 수질기준 중심의 수계관리에서 하천의 유입된 유량을 포함한 오염물질 총량개념으로 수계를 관리하도록 정리되었다. 이러한 Total Pollution Load Management System(오염총량관리제)는 도시하수나 축산폐수 및 산업폐수 등의 점오염원 뿐만 아니라 넓은 지역(공원, 농지 등)에 걸쳐서 분포하는 비점오염원 관리의 중요성을 부각시켰다(Yi and Kim., 2014).

강우 시 발생하는 강우 유출수를 통해 배출되며 기상학적, 수문학적, 인구학적 특성에 따라 유출특성이 변화한다(Lee et al., 2009; Lee et al., 2012). 점오염원 대비 비점오염원 배출부하량의 비중은 지속해서 증가 추세에 있다(Kim and Kang, 2004). 현재 국내 4대강(한강, 낙동강, 금강, 영산강)에서의 수계별 염총량 목표수질 (Total Pollution Target Water Quality)은 BOD 기준 (1~6mg/L) 범위로 산정되어 있으며, 4대강의 비점오염원에 대한 오염부하량 백분율은 개략적으로 22~37%정도 범위를 차지하고 있다 (Kim et al., 2006a 2006b; 환경부, 2005; Jeong et al., 2008). 따라서, 환경부는 환경보전법 제53조의 2에서 상수원 수질보호를 위하여 고속도로를 포함하여 기존 도로에 비점오염 저감시설을 설치할 것을 요구하고 있다(Jeon et al., 2024). 2004년 6월에 관계기관 합동으로 ‘물관리 종합대책의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책’을 발표하였다(Jeong et al., 2008; 환경부, 2004).

따라서, 본 연구는 수도권 내 지하철 지역 중 철도(지하철) 교량을 시작하여 비점오염절감시설 유입·유출되는 강우 유출수 내 비점

오염물질의 유출 특성 및 초기우수처리시설의 절감효율을 파악하고자 수행되었다. 본 연구가 산정한 EMC(Event Mean Concentration, 유량기중평균농도)는 향후 철도(지하철) 교량 지역의 비점오염원 연구에 있어 자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구방법

2.1 모니터링 지점 및 방법

본 연구 선정된 지역은 Fig. 1에 나타나 있으며, N시 J읍에 위치한 철도(지하철) 교량으로 배수유역은 교각 P13에서 교각 P19까지 (연장 252.2m, 폭 10m) 측정 면적은 2,522㎡이다. 철도(지하철)교량은 콘크리트 표면의 교량으로서 강우 시 비점오염물질이 교각 각각의 배수관과 집수정으로 합류하여 구간별 초기우수처리시설을 통해 방류되고 있는 지역이다.

본 연구에 해당되는 모니터링 수행을 위해 강우 시작 전 현장으로 이동 대기하며, 모니터링 준비를 완료하다.(Jeong et al., 2012) 강우 시작 후 강우로 인한 초기우수처리시설로 유입·유출이 시작된 시점부터 강우 유입·유출이 종료되는 것까지를 1회 모니터링으로 선정하여 수행하였다. 모니터링수행 시 유량 측정 수단으로 사용한 방법은 5ℓ 용기를 사용하여 채워진 t시간으로 유량을 계산 산출하였다. 비점오염 분석을 위한 시료 채취는 강우 시작 후 유입 및 유출이 발생하는 즉시 실시하였으며, 초기에는 탁도 측정과 함께 시료를 채취하였다.(Kim et al., 2011, Kim et al., 2011) 이후 유입·유출량 및 오염물질 농도의 변화 추이를 반영하여, 약 10분 간격으로 시료를 채취하였고, 상황에 따라 현장에서 채취 간격을 조정하였다.

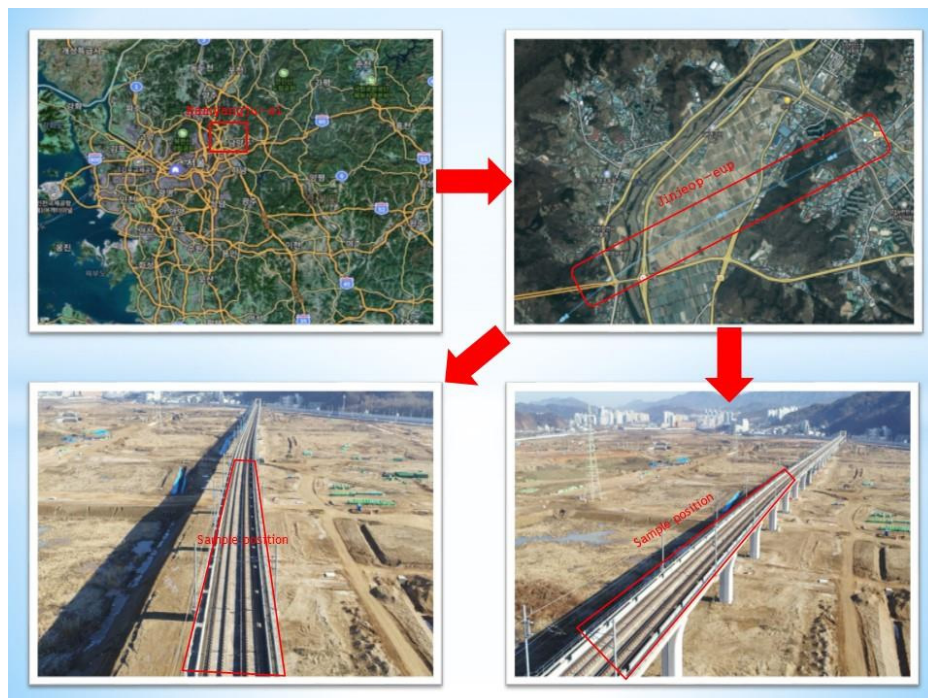


Fig. 1. Monitoring location

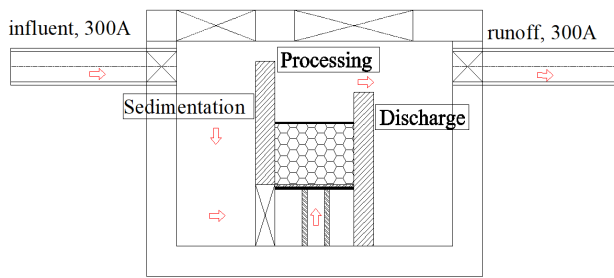


Fig. 2. Schematic diagram of BMP

Table 1. BMP Facility Summary

BMP Facility Summary	
Facility Specification	3.4m×2.0m
Processing Capacity	Q = 30m³/hr
Sedimentation tank capacity	2.56m³
Processing tank capacity	0.96m³
Discharge tank capacity	2.56m³

2.2 현장 초기우수처리시설

본 연구에 이용된 초기우수처리시설은 강우 시 강우 유출수 내 비점오염물질 ML 처리를 위해 설치하였으며, Fig. 2에서 보는 바와 같이 유입수가 침전조 → 처리조 → 방류조 통해 침전하는 처리원리를 가진다.

초기우수처리시설의 처리용량은 시간당 30m³이며, 침전조, 처리조, 방류조의 유효 용량은 각각 2.56m³, 0.96m³, 2.56m³이다. 바이오여재(0.6m)를 거쳐 방류된다.

2.3 강우 유출수의 EMC산정

강우 모니터링 결과를 도출하는데 있어서 분석 방법 및 모니터링 방법 등 택하는 것도 중요하고, 분석된 결과값에 대한 해석방법의 선택도 중요하다. 평균농도를 산정하는 가장 쉬운 방법인 산술 평균농도(arithmetic mean concentration)는 일정한 시간간격인 경우, 적당한 평균농도로서 제시될 수 있지만 비점오염원의 초기우수처리시설 유입·유출의 시간으로 변화되는 유입·유출량과 탁도의 변화가 있고, 샘플채취가 일정 시간간격으로 이루어지지 않아 산술평균에 대한 평균농도는 보편성을 갖지 못하는 단점이 있다. 강우 시 초기우수처리시설을 통해 유출되는 비점오염물질의 부하량 산정은 모니터링을 통해 수집되고 강우 유출수의 강우 유출량과 오염물질 농도를 이용하여 산정하며, 비점오염원의 초기우수처리시설 모니터링 연구 결과 해석을 위해 EMC를 선정하였다.(Chung *et al.*,2013) EMC는 전체 강우 지속시간 t시간 동안 유출(유입)된 전체 누적 오염물질의 양을 전체 누적유출

(유입)량으로 나누어 계산한다. (Chung *et al.*, 2013, Seung *et al.*, 2008)비점오염원에 관련된 연구 결과를 해석할 때, 가장 많이 사용하는 계산방법으로 아래에 식 (1)을 통해 계산할 수 있다.(Chung *et al.*,2013, Seoul Metropolitan Council., 2017)

$$EMC(mg/L) = \frac{\int_0^t C(t) \cdot Q_{TRu}(t) dt}{\int_0^t Q_{TRu}(t) dt} \quad \text{식 (1)}$$

EMC = Event Mean Concentration (mg/L)

C(t) = 시간t에서의 오염물질의 유출(유입)농도 (mg/L)

$Q_{TRu}(t)$ = 시간t에서 단위 시간당 유출(유입)되는 강우량 (m³/d)

t = 강우지속시간(min)

2.4 강우 유출수의 오염물질 처리효율 산정

강우 유출수의 오염물질 처리효율은 모니터링 수행 결과에 따라 수집된 자료를 이용하여 각각의 제거 효율성은 다음 식(2)에 의해서 계산하였다.(Kim *et al.*, 2010)

$$\text{Removal Efficiency}(\%) = \frac{\int_0^t C_{in}(t) \cdot Q(t) dt - \int_0^t C_{out}(t) \cdot Q(t) dt}{\int_0^t C_{in}(t) \cdot Q(t) dt} \times 100 \quad \text{식 (2)}$$

Removal Efficiency= 제거 효율성 (%)

C_{in} = 시간t에서의 유입부 오염물질 농도 (mg/L)

C_{out} = 시간t에서의 유출부 오염물질 농도 (mg/L)

$Q(t)$ = 시간t에서 단위 시간당 유출되는 강우량 (m³/d)

t = 강우지속시간(min)

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 강우사상 개요

현재 3회의 강우사상에 대하여 모니터링(Monitoring)을 수행하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2는 강우사상 번호(event number), 강우 지속시간(runoff duration), 강우 전 건조일수(ADD, antecedent dry days), 전체 강우량(total rainfall), 발생일자(event date), 평균 강우강도(average rainfall intensity)가 정리되어 있다.

3.2 강우유출 특성

Fig 3, Fig 5, Fig 7은 초기우수처리시설 유입수의 BOD, TOC,

Table 2. Characteristic of monitored rainfall

Event No.	Event Date [yy/dd/mm]	ADD [days]	Rainfall [mm]	Runoff Duration [hr]	Avg. Rainfall Intensity [mm/hr]
1	24/08/21	21	107.2	5.5	6.87
2	24/09/20	3	85.1	5.0	2.56
3	24/10/01	9	2.5	2.2	0.73

COD 측정된 값이고, Fig 4, Fig 6, Fig 8은 유출수의 BOD, TOC, COD 측정된 값을 그래프로 표현하였다. Fig 3은 초기우수처리시설 1차 유입수의 BOD는 0.6~4.4 mg/L의 범위, TOC는 0.50~2.86 mg/L의 범위로 나타내고, COD는 6.38~13.51 mg/L 범위로 보이고 있다.

Fig 4.은 초기우수처리시설 1차 유출수의 BOD는 0.34~2.07 mg/L의 범위, TOC는 0.31~1.38 mg/L의 범위로 나타내고, COD는 0.17~2.02 mg/L 범위로 보이고 있다. 1차 모니터링에서 초기우수처리시설이 통과한 오염물 처리효율이 BOD, TOC, COD 전반적으로 높게 나타내고 있다. 처리효율이 높은 이유는 선행일수가 길고, 강우 일수가 보편적으로 적어 초기우수처리시설의 사용 빈도가 적어 제거 효율이 높은 것으로 판단된다.

Fig 5.은 2차 유입수의 BOD는 4.76~8.44 mg/L의 범위, TOC는 4.18~6.54 mg/L의 범위로 나타내고, COD는 1.50~22.87 mg/L 범위로 보이고 있다.

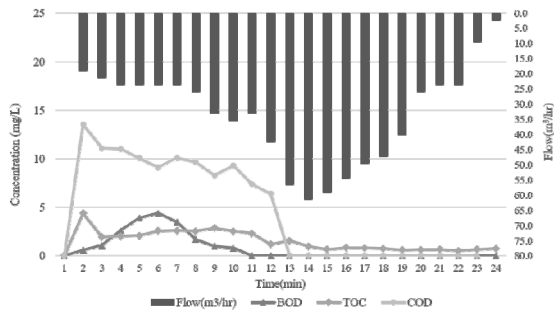


Fig. 3. Influent water pollution in Event 1(BOD, TOC, COD)

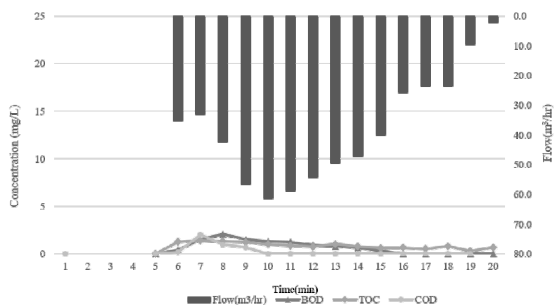


Fig. 4. Effluent water pollution in Event 1 (BOD, TOC, COD)

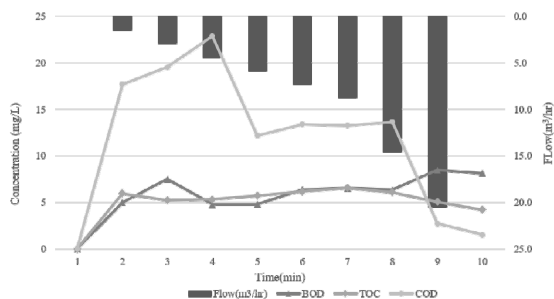


Fig. 5. Influent water pollution in Event 2 (BOD, TOC, COD)

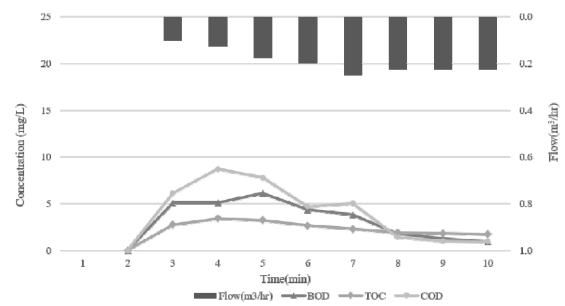


Fig. 6. Effluent water pollution in Event 2 (BOD, TOC, COD)

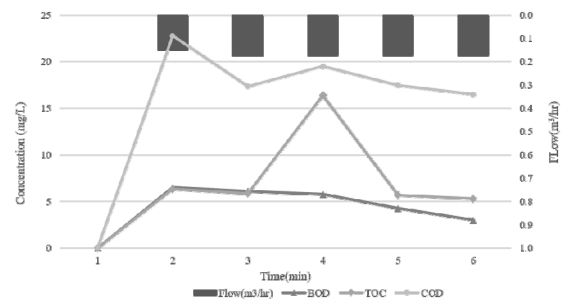


Fig. 7. Influent water pollution in Event 3 (BOD, TOC, COD)

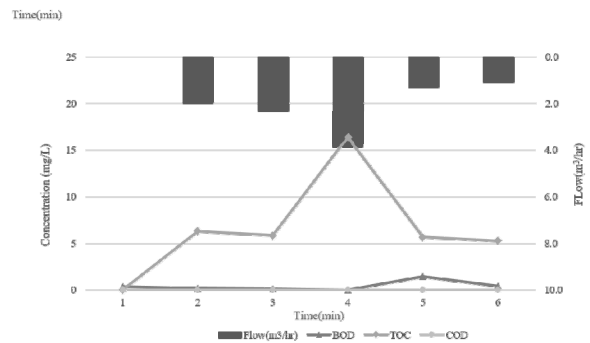


Fig. 8. Effluent water pollution in Event 3(BOD, TOC, COD)

Fig 6.은 2차 유출수의 BOD는 0.95~6.15 mg/L의 범위, TOC는 1.73~3.43 mg/L의 범위로 나타내고, COD는 0.93~8.7 mg/L 범위로 보이고 있다. 2차 모니터링에서는 1차 대비 BOD, TOC, COD 수치가 더 높게 나타났는데, 이는 시간당 집중호우로 인해 더 많은 오염물질이 유입된 결과로 해석된다. 제거효율 역시 1차와 유사하게 높은 수치를 기록하였다.

Fig 7.은 3차 유입수의 BOD는 3.0~6.5 mg/L의 범위, TOC는 5.28~16.0 mg/L의 범위로 나타내고, COD는 1.50~22.87 mg/L 범위로 보이고 있다.

Fig 8.은 3차 유출수의 BOD는 0.12~1.47 mg/L의 범위, TOC는 1.28~2.37 mg/L의 범위로 나타내고, COD는 검출되지 않았다. 1차 모니터링에서 3차 모니터링까지의 모니터링 결과 시간당 강우량에 비례하고, 선행일수, 계절 변화에서도 차이가 보이는 것으로 확인되고, 초기우수처리시설의 사용 빈도가 적어 제거 효율성이 높은 것으로 보인다.

3.3 오염물질의 EMC

현재 3회의 강우사상에 대하여 모니터링을 수행된 모니터링의 결과를 이용하여 EMC를 산정하였으며, 그 결과가 Table 3에 강우 사상별로 정리되어 있다. 각 오염물질의 EMC는 표에서 보는 바와 같이 강우 사상별 유입·유출로 구분하여 계산하였으며, 현재 3회의 모니터링을 수행한 결과로 강우사상에 따라 EMC값의 변화가 있음을 알 수 있다.

3.4 오염물질의 처리효율

현재 3회의 강우사상에 대하여 모니터링을 수행된 모니터링의 결과를 이용하여 초기우수처리시설의 오염물 제거율을 산정하였으며, 그 결과가 Table 4에 강우 사상별로 정리되어 있다. TSS 처리효율은 10.4~57.8%의 범위, BOD 처리효율은 48.1~64.8%의 범위를 나타내고 있으며, COD 처리효율은 55.3~100%의 범위를 보이고 있다. 그리고 TOC 처리효율은 45.6~71.0%의 범위, TN, TP, Turbidity의 처리효율은 각각 100%, 76.7~100%, 0.0~37.9%를 나타내고 있으며, TN은 1차 모니터링에서만 검출되고 이후 모니터링에서는 검출되지 않았다. 이는 신설 철도(지하철)교량으로 차량의 운행이 많지 않고 또한 초기우수처리시설의 여과기(필터) 효율이 감소되지 않아 처리효율이 높은 것으로 판단된다.

Table 4에 나타난 각 오염물질의 처리효율 결과 넓은 처리효율 범위를 나타내고 있음을 확인 할 수 있다. 이는 강우량, 강우 전 강우강도, 건조일수 등 강우량 특성에 따라 민감하게 반응하는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 철도(지하철) 교량에서 강우 시 강우 유출수내

비점오염물질을 저감시키기 위한 초기우수처리시설의 유입·유출수에 대한 연구 결과를 보면 다음과 같은 결과를 내릴 수 있다.

1. 각 오염물질별 유입수 EMC의 경우, TSS은 0.0004~171.6 mg/L, BOD은 5.57~11.02 mg/L, COD는 14.87~20.91 mg/L 및 TOC는 9.56~941.84 mg/L로 산정되었다. 그리고 TN의 경우 113.78 mg/L 1차 모니터링에서 검출되었지만 이후 모니터링 값에서는 검출되지 않았다. TP의 경우 0.01~7.50 mg/L로 3회의 모니터링 수행 결과 모니터링 횟수가 작업 오차 범위가 크게 나오는 것으로 보이며, 또한 신설 노선으로 운행시간이 적고, 농경지역을 통과하는 타 연구자료 보다 오차 범위가 큰 것으로 보인다.
2. 각 오염물질별 유출수 EMC에서의 TSS은 0.00~108.78 mg/L, BOD은 1.96~5.43 mg/L, COD는 0~7.65 mg/L 및 TOC는 3.84~512.38 mg/L로 산정되었다. 그리고 TN의 유출수에서 검출되지 않고, TP의 경우 0~0.056 mg/L로 산정되었다.
3. 초기우수처리시설의 각 오염물질별 처리효율의 경우, TSS가 10.4~57.8%, BOD가 48.1~64.8%, COD가 55.3~100% 및 TOC가 45.6~71.0%를 나타낸 것으로 산정되었고, TN은 100% 또는 검출되지 않았다, TP가 76.7~100%로 산정되었고 3회의 모니터링 수행 결과 모니터링 횟수가 작업 오차 범위가 크게 나오는 것으로 보이며, 또한 신설 노선으로 운행시간이 적고, 농경지역을 통과하는 타 연구자료 보다 오차 범위가 큰 것으로 보인다.

본 연구가 시사하는 바는 다음과 같다. 본 시설을 지하철 철도마다 설치한다면 철도에서 발생하는 인근 하천과 같은 공공수역으로 유출되는 배출부하량을 조절할 수 있을 것으로 보인다. 또한

Table 3. EMC value of the each rainfall event

Parameters (mg/L)	Event 1		Event 2		Event 3	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent
BOD	5.57	1.96	11.02	4.95	10.46	5.43
COD	17.13	7.65	20.91	7.45	14.87	0
TOC	941.84	512.38	9.56	3.84	66.17	19.19
SS	171.60	108.7750	2.0750	0.8750	0.00	0.00
TN	113.78	-	-	-	-	-
TP	7.50	0.06	0.01	0.00	0.03	-
Turbidity	229.89	142.65	15.30	15.32	22.03	20.62

Table 4. Summary of the pollutants removal efficiency for the each rainfall event

Parameters (mg/L)	Event 1	Event 2	Event 3
	Removal rate(%)	Removal rate(%)	Removal rate(%)
BOD	64.8	55.1	48.1
COD	55.3	64.4	100
TOC	45.6	59.8	71.0
SS	36.6	57.8	10.4
TN	100	-	-
TP	99.3	76.7	100
Turbidity	37.9	0	6.4

비점오염 절감시설의 필요성과 처리기술 개발 시, 기초 자료로 이용이 가능하다. 또한 현재 J선의 경우 개통 연수가 오래되지 않았기에 추후 절감시설의 지속적으로 연구 할 가치가 있다고 판단된다.

사 사

본 결과물을 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 습지 생태계 가치평가 및 탄소흡수 가치증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2022-KE002164).

References

- Chung, C.,(2013). *Investigation and analysis of non-point pollutants on the railway site*, Master's Thesis, Woosong University. Daejeon, Korea.[Korean Literature]
- Jeong, J., (2012). *Investigation and analysis of non-point pollutants*, Master's Thesis, Seoul National University of Science and Technology, Seoul. Korea.[Korean Literature]
- Jeon, M., Choi, H., Kang, H., Kim, L., (2024). Assessment of Water and Pollutant Mass Balance by Soil Amendment on Infiltration Trench. *Journal of wetlands research*, 22(2), pp. 145–152. <https://doi.org/10.17663/JWR.2020.22.2.145> [Korean Literature]
- Jo, W., Shim, N., Shin, S., Cho, Y., Kim, I., Lee, E., Kim, Y., (2008). Bioceramic for water purification and its manufacturing method(Patent No. 10-0807175)
- Kim, L., & Kang, J., (2004). Determination of event mean concentrations and pollutant loadings in highway storm runoff. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 20(6), pp. 631–640. [Korean Literature]
- Kim, T., (2010). *The purification of the first flush by Vortex Type Facilities And Filter Facilities*, Master's Thesis, Kyungpook National University Graduate School, Daegu, Korea. [Korean Literature]
- Kim, T.,(2011). *Runoff Characteristics of Non-point Pollution from Bridge Pavement*, Seoul National University of Science and Technology Graduate School, Seoul, Korea. [Korean Literature]
- Kim, T. and Gil, K.,(2011). Comparison of Estimation Methods of Pollutants Unit Loads from Bridge Area. *Journal of Korean Society on Water Quality*, 27(5), pp. 597–604 [Korean Literature]
- Lee, J., Maniquiz, M., Choi, J., Lee, J., & Kim, H., (2009). Washoff characteristics of NPS pollutants from artificial grassland. *Journal of Wetlands Research*, 11(3), pp. 145–151. [Korean Literature]
- Lee, J., Yi, Y., Kwon, H., Yoon, J., Lee, C., & Cheon, S., (2012). Estimation of Runoff Characteristics of Non-point Pollutant Source by Land Cover Characteristics. *Journal of Environmental Sciences*, 21(8), pp. 977–988. <https://doi.org/10.5322/JES.2012.21.8.977> [Korean Literature]
- Ministry of Environment. (2022). Basic Guidelines for total Pollution Load Management Partial Amended (Ministry of Environment Instruction Article 1562, Amended 2022. 8. 19.). Ministry of Environment, pp. 1~6.[Korean Literature]
- Seoul Council (2017). A Study on the Characteristics of Non-Point Pollution Spill in Railway Bridge in Seoul, Seoul Council. [Korean Literature]
- Wee, S., Kim, L., Jung, Y., Gil, K.(2008) Washoff Characteristics and Correlation of Nonpoint pollutants in a Bridge Storm Runoff, *Journal of Korean Society on Water Quality*, 24(3), pp. 378–382
- Yi, S., & Kim, Y., (2014). Improvement on management of non-point source pollution for reasonable implementation of TMDL-Focusing on selection of non-point source pollution management region and management of non-point source pollutant. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 36(10), pp. 719–723. <https://doi.org/10.4491/KSEE.2014.36.10.719> [Korean Literature]