

초기강우 이후 발생 강우유출수의 대규모 저류를 위한 유입수 설계 수질농도 산정

오유경* · 이가현* · 이동훈** · 김극태** · 김이형**

*국립공주대학교 건설환경공학과

**동국대학교 바이오환경과학과

Estimation of Design Influent Water Quality Concentrations for Large-Scale Storage of Post-First Flush Stormwater Runoff

Yugyeong Oh* · Gahyun Lee* · Dong Hoon Lee** · Keugtae Kim** · Leehyung Kim**†

*Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Korea

**Department of Biological and Environmental Science, Dongguk University, Korea

(Received : 14 October 2025, Revised : 17 November 2025, Accepted : 25 November 2025)

요약

본 연구는 도시지역 강우유출수의 수질특성을 종합적으로 분석하고, 초기강우와 초기강우 이후 유출수의 농도차이를 정량화하여 대규모 지하저류조 설계에 필요한 유입수 수질범위를 제시하고자 수행되었다. 이를 위해 국내외 문헌 28편을 분석하여 토지이용별(도로, 주차장, 교량) EMC 특성과 초기강우(0-30분) 및 이후 구간의 오염물질 농도범위를 비교하였다. 분석결과, 초기강우 구간에서는 전체 오염부하의 50~80%가 집중되며 TSS, COD, TN, TP뿐 아니라 Zn, Cu, Pb 등 중금속이 급격히 증가하는 강한 초기강우현상이 확인되었다. 반면 초기강우 이후 유출수는 상대적으로 안정된 범위를 보였으나 여전히 높은 오염물질 농도를 보였다. 따라서, 대규모 지하저류조의 평균 설계농도는 TSS 30-150mg/L, COD 25-80mg/L, TN 2-6mg/L, TP 0.20-0.80mg/L, Zn 0.10-0.30mg/L로 산정되었다. 또한 하수도법, 물환경보전법, 환경정책기본법, 물순환촉진법 등 국내 법체계 및 미국·일본·독일의 사례 검토를 통하여 대규모 지하저류조는 단순 치수시설이 아닌 수질관리시설로 기능해야 함을 확인하였다. 본 연구결과는 도시침수 대응과 수질보전을 동시에 달성하기 위한 지하저류조 설계·운영의 기초자료로 활용될 수 있다.

핵심용어 : 도심침수, 대규모 지하저류조, 유량가중 평균농도, 초기강우, 초기강우 이후 유출수

Abstract

This research analyzed the water quality characteristics of urban stormwater runoff and quantified the differences in pollutant concentrations between the first flush and the post-first flush period, with the aim of presenting appropriate influent water quality ranges for designing large-scale underground storage facility. The analysis revealed that 50-80% of the total pollutant load occurred during the first flush, with high increases in TSS, COD, TN, TP, and heavy metals such as Zn, Cu, and Pb. In contrast, pollutant concentrations in the post-first flush period stabilized but still remained relatively high concentrations. The average design influent concentrations for large underground storage facilities were estimated as TSS 30-150mg/L, COD 25-80mg/L, TN 2-6mg/L, TP 0.20-0.80mg/L, and Zn 0.10-0.30mg/L. In addition, a review of Korean legislation and U.S., Japanese, and German case studies confirmed that large-scale underground storage facilities should serve not only for flood control but also as water quality management infrastructure. The findings of this study provide basic data for the design and operation of underground storage facilities aimed at simultaneously reducing urban flooding and improving water quality.

Key words : EMC, Large-scale underground storage facility, First flush, Post-first flush runoff, Urban flooding

†To whom correspondence should be addressed.

Daon Solution co., Ltd.

E-mail : leehyung@kongju.ac.kr

- Yugyeong Oh Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Korea(yugyeong@smail.kongju.ac.kr)
- Gahyun Lee Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Korea(leegahyun@smail.kongju.ac.kr)
- Dong Hoon Lee Department of Biological and Environmental Science, Dongguk University, Korea(leedonghoon@dgu.ac.kr)
- Keugtae Kim Department of Biological and Environmental Science, Dongguk University, Korea(kkt38@dongguk.edu)
- Leehyung Kim Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Korea(leehyung@kongju.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

기후변화로 인한 이상기후와 도시화는 도시 수자원의 수질 및 수량관리에 어려움을 초래하고 있다. 기상청 자료에 의하면 우리나라는 관측 이래 연평균 기온상승과 더불어 강수패턴의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있으며, 특히 여름철 국지성 집중호우의 빈도와 강도가 과거보다 크게 증가하였다(Geronimo et al., 2021; Maniquiz-Redillas et al., 2016). 이러한 기상학적 변화는 도시지역의 침수 위험을 가중시킬 뿐 아니라, 강우유출수에 포함된 오염물질의 하천 유입을 증가시켜 수질오염 및 수생태계 건강성을 악화시키는 원인이 되고 있다. 도시지역은 인구와 산업이 밀집되어 있고, 인간의 활동을 위한 도로, 주차장, 교량, 건축물의 지붕 등 불투수면적이 지표면을 덮고 있기에 강우 시 빗물이 빠르게 유출된다(Sansalone and Buchberger, 1997). 이러한 유출과정에서 대기 중 및 지표면에 축적된 다양한 오염물질이 빗물에 의해 씻겨 내려가면서 도시하천은 강우시 높은 부하의 오염물질에 노출된다. 도시 강우유출수에 포함된 대표적 오염물질로는 부유물질(TSS), 유기물(BOD, COD), 영양염류(TN, TP), 중금속(Zn, Cu, Pb 등), 석유계 물질, 미생물, 미량오염물질 등 다양하다(Kim, 2003; Kim and Kang, 2004a, 2004b). 일반적으로 오염물질들은 서로 다른 환경적 영향을 초래한다. TSS와 유기물은 하천의 탁도 상승과 용존산소 고갈을 초래하며, TN과 TP는 부영양화를 유발하여 조류 대발생 및 수질악화를 초래한다. 또한 중금속 및 미량오염물질은 수생태계에 독성을 일으키고 먹이사슬을 통해 인체에도 영향을 줄 수 있다. 오염물질의 농도는 토지 이용, 교통량, 선행건기일수(antecedent dry days, ADD), 강우강도 및 지속시간 등 다양한 인자에 따라 달라지기에 도시 비점오염원의 관리가 어렵고 불확실성이 높다(Kim et al., 2004; 2005).

그동안 도시 강우유출수관리에서 주요 관리대상은 초기강우(first flush)였다. 초기강우란 강우 시작 후 일정 시간 동안 지표면과 대기 중에 축적된 오염물질이 빗물에 의해 집중적으로 높은 농도로 유출되는 현상을 말한다. 초기강우 기준은 국내외 다양한 연구에서 강우유출 시간 또는 유출량 등의 개념을 활용하여 다양한 기준(강우 초기 약 15~30분 이내, 초기 1시간 이내, 누적유출량 약 30% 이내 등)으로 제시되고 있다(Marsalek, 1978; Bertrand-Krajewski et al., 1998; Kim, 2003). 그러나 이러한 초기강우 기준은 비용효율적 수질오염관리 측면에서 제안되고 있으며, 도심침수나 홍수관리와는 무관한 기준에 해당된다(Kim, 2003; Lee et al., 2007a; Mercado et al., 2015).

최근 기후변화로 인한 이상기후 발생빈도와 강도가 강해지면서 도시 배수시스템을 초과하는 집중호우가 늘어나고 있다. 이상기후로 인한 집중호우는 도심침수를 유발하여 심각한 인명 및 재산상의 피해를 발생시키기에 도시 수자원관리에서 중요한 문제로 대두되고 있다. 도심침수 저감의 실질적 대안은 대규모 지하저류조 건설이며, 이는 초기강우

이후 발생하는 강우유출수를 일시적으로 저장한 후 방류하는 시설이다. 일본 도쿄의 지하방수로는 세계 최대 규모의 지하저류조로 홍수 피해를 저감하는 동시에 초기강우 유출수의 직접적 유입은 차단하고 있다. 독일 함부르크와 영국 런던, 미국 시카고 등에서도 합류식 하수월류(CSO)와 초기강우 유출수 문제를 해결하기 위해 대규모 지하저류조 및 빗물터널을 운영하고 있으며, 일정 체류시간을 통해 침전 유도 및 필요 시 추가처리를 실시한 후 하천으로 방류하고 있다(Yun et al., 2010). 국내에서도 지하저류조가 건설되고 있으나 주로 치수측면에서 추진되면서 수질관리 기능은 반영되어 있지 않다. 특히 합류식 하수도관거 시스템과 연계되는 지하저류조는 초기강우 이후 발생하는 침투유량 부근 강우유출수 유입시 하수 기원 미생물, 영양염류, 용존물질 등 다양한 오염물질 포함할 수 있다(Kim et al., 2004; Lee et al., 2008; Wee et al., 2008). 그러나 대규모 지하저류조 설계시 유입수의 설계농도와 저류조의 오염물질 저감효율이 별도로 연구되지 못하면서 설계시 비점오염저감시설의 저류형 설계기준을 준용하고 있다. 대규모 저류조 설계시 비점오염저감시설의 설계기준 활용은 입자상물질의 함량이 높은 초기강우관리를 목표로 하고 있기에 초기강우 이후 발생 침투유량이 유입되는 대규모 지하저류조 설계시 이를 이용하는 것은 적절하지 않다. 따라서 본 연구는 도시 강우유출수의 종합적 오염특성 분석과 초기강우 및 초기강우 이후 유출수의 차이를 정량적으로 비교하여 대규모 지하저류조의 친환경적 설계에 필요한 유입수 농도 범위를 제시하고자 수행되었다. 본 연구결과는 치수와 수질관리의 통합적 접근을 통해 향후 대도시에서의 대규모 지하저류조 설계·운영 및 정책수립에 중요한 기초자료를 제공할 것이다.

2. 연구방법

대규모 지하저류조의 설계·운영에 필요한 초기강우 이후 강우유출수의 특성을 분석하기 위한 연구 자료 범위는 google scholar를 활용하여 “도시지역 강우유출수 배출농도”를 산정한 논문으로 한정하였다. 그 중에서 대규모 지하저류조의 설치를 고려하는 한국의 상황을 고려하여 “한국 도시 강우유출수”와 초기강우 이후 강우유출수 특성을 분석하기 위하여 “국내외 초기강우 기준” 관련 논문을 검색하여 총 28개의 논문을 선정하였다. 자료분석에 활용된 28편의 자료 중 국내 자료는 한국물환경학회, 한국습지학회, 한국방재학회 등의 학술지를 중심으로 출판되었으며, 해외 자료는 Science of the Total Environment, Water Science and Technology, Journal of Environmental Engineering 등 환경·수자원 분야 저널에서 선정되었다(Jeon et al., 2019; Kim and Lee, 2005; Kim et al., 2006a, 2006b, 2006c; Lee et al., 2007a, 2007b, 2008, 2010; Reyes et al., 2020; Son et al., 2008). 각 논문에서 보고된 EMC는 가능한 원자료를 활용하거나 추출하였다.

자료 분석에 활용된 주요 수질항목은 BOD, COD, TSS,

TN, TP, 금속류(Zn, Cu, Pb 등) 등이다. 연구의 분석절차는 다음과 같이 수행되었다. 첫째, 수집된 EMC (Event mean concentration) 자료를 토지이용 유형별(도로, 교량, 주차장)로 분류하였다. 각 교통시설 유형별 EMC 범위를 산정하고, 교통시설 전체를 통합하는 평균 EMC의 범위와 평균을 산출하여 수질특성을 비교하였다. 둘째, 초기강우 구간(강우 유출 시작 후 30분)과 이후 구간을 구분하여 EMC 농도범위를 산정하였다. 셋째, 대규모 지하저류조 유입수의 설계 농도범위를 산정하기 위하여 초기강우 이후에 대한 오염물질 범위 및 평균 EMC를 산정하였으며, 국내 법적 근거에 기반하여 대규모 지하저류조 유입수의 수질관리 필요성을 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 도시 강우유출수의 EMC 특성

실측 기반 모니터링 결과를 포함하는 28편의 논문에 대하여 초기우수 및 강우유출 특성, 교통지역 토지이용에서의 비점오염 유출특성, 입경분포(particle size distribution, PSD) 및 침강속도 기반 침전성능, 중금속 및 PAH 등 오염물질의 형태·이동특성, EMC 산정 등에 대하여 개별 논문별 특성을 분석하였다(Table 1). 대부분 연구에서 공통적으로 확인되는 사항은 강우 초기의 오염세척 효과가 매우 크며, 전체 오염부하의 50~80%가 초기강우 구간에서 발생한다는 점이다. 특히 TSS, COD, TN, TP 등의 농도 뿐 아니라 Zn, Cu, Pb와 같은 중금속 오염물질도 초기 30분 또는 초기 10mm 누적유출고에서 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 오염물질 배출특성은 차량 이동량, 기상조건, 토지이용, 선행건기일수와 밀접한 관련이 있으며, 불투수율이 높고 차량활동이 많은 지역에서 더욱 뚜렷하게 나타났다.

Table 2는 도시 교통기반시설에서 발생하는 강우유출수의 수질을 시설유형에 따라 분석한 것이다. 교량은 대부분의 수질항목에서 가장 높은 농도를 나타내어 높은 비점오염 잠재성을 가진 구간으로 평가된다. 교량에서 측정된 TSS는

30 - 305mg/L로 도로의 20.7 - 284.8mg/L보다 전반적으로 높은 범위를 보였으며, 주차장의 12 - 33mg/L와 비교하면 그 차이가 더욱 뚜렷하다. COD는 교량에서 90 - 200mg/L로 도로(24 - 160mg/L)보다 상한값이 높고, 주차장(31 - 70mg/L)에 비해서도 뚜렷하게 높은 수준을 유지한다. 이러한 결과는 교량이 도로보다 오염물질이 축적량이 많고 강우시 강우유출수에 의한 빠른 세척효과가 원인으로 판단된다. 영양염류 농도에서도 유사한 경향이 나타난다. 교량의 TN은 2.3 - 5.4mg/L로 도로의 1.2 - 10mg/L와 비교해 평균적으로 높은 수준을 보여주며, TP의 경우에도 교량은 0.39 - 1.15mg/L로 주차장의 0.10 - 0.30mg/L보다 3배 이상 높은 농도범위를 보였다. 도로는 교량보다는 낮지만 주차장보다는 높아, 차량 통행량, 포장 마모, 표면에 축적되는 미세입자의 양 등에 따라 오염도 수준이 좌우되는 것을 확인할 수 있다. 중금속 농도는 세 유형 간 차이를 더욱 명확히 보여준다. 교량은 Zn, Cu, Pb 모두에서 꾸준히 높은 농도범위를 유지하고 있으며, 도로는 이보다 범위 폭이 넓지만 평균값으로는 교량 수준과 유사하거나 그보다 약간 낮은 수준을 보인다. 이에 비해 주차장은 차량 이동량이 적고 마찰에 의한 금속입자 발생이 상대적으로 적기 때문에 중금속 농도가 가장 낮게 나타난다. 이러한 경향으로 볼때, 교량은 도로와 주차장에 비해 입자상 물질, 유기물, 영양염류, 중금속 항목 모두에서 높은 농도를 뚜렷하게 보이지만, 도로는 교량보다는 낮으나 주차장보다 높은 중간 수준의 오염특성을 나타낸다. 반면 주차장은 세 유형 중 가장 낮은 오염도를 유지한다. 이러한 결과를 종합할 때 교통 관련 시설에서 발생하는 강우유출수내 오염물질의 농도는 도로, 교량, 주차장 등 시설유형에 따라 매우 넓게 나타난다. 특히 초기강우에서 오염물질 농도가 급격히 높아지고 이후 강우에서는 상대적으로 낮아지는 특성이 뚜렷하다. 이러한 변동성을 하나의 유입수 기준으로 처리하면 시설 규모산정과 수질목표 설정에 오류가 발생할 수 있다. 따라서 초기강우는 비점오염저감시설로 우선 처리하고, 초기강우 이후 유출수를 지하저류조 저류시에는 별도 유입수 농도로 설계하는 최적화된 처리전

Table 1. Key Characteristics Extracted from 28 Urban Stormwater Runoff

Category	Extracted Key Findings
EMC Ranges (General Concentration Ranges)	Provided representative EMC ranges for TSS, COD, TN, TP, and metals in urban runoff (e.g., TSS 12 - 305mg/L, COD 24 - 200mg/L), highlighting land-use dependent differences.
First Flush Effects (Initial 0 - 30 min)	Confirmed that 50 - 80% of total pollutant load occurs in the first flush. Strong early spikes observed in TSS, COD, Zn, Cu, especially at roads and bridges.
Particle Size, Sedimentation, Hydrodynamics	Identified particle size distributions (2 - 880 μm), settling velocities, and metal association with fine particles. Provided design foundations for sedimentation-based BMPs and detention structures.
Transportation Land Uses (Roads, Highways, Bridges, Parking Lots)	High TSS, Zn, Cu, Pb concentrations observed in transportation corridors. Traffic volume, brake/tire wear, and roadway dust accumulation strongly influence pollutant levels.
Modeling & Predictive Analysis	Developed regression and statistical models for predicting EMCs. Demonstrated that pollutant wash-off exhibits nonlinear relationships with ADD and rainfall intensity.
PAHs and Heavy Metals (Special Contaminants)	Showed that PAHs and metals are predominantly particle-bound and discharged rapidly during early runoff. Identified transportation-related sources and sediment-associated pathways.

략이 필요하다.

Table 3은 도시지역 교통시설(도로, 주차장, 교량 등)에서 발생하는 전체 강우유출수의 대표적인 EMC 범위를 교통시설 토지이용으로 묶어서 오염물질 항목별로 도출하였다. TSS는 12-305mg/L의 넓은 범위에서 분포하였으며, 평균 농도의 범위는 60-150mg/L를 보였다. TSS의 높은 농도는 교통량, 포장재 특성, 도로 표면의 퇴적물 축적 정도가 유출수의 탁도와 입자성 오염물질 농도에 큰 영향을 끼치기 때문이다. 유기물의 경우, BOD는 4.8-51mg/L, COD는 24-200mg/L의 범위를 보였는데 대부분 노면 축적 축적 유기성 잔재물, 차량 배기가스 입자, 미세먼지 등이 강우 시 유출되기 때문이다. 영양염류인 TN은 1.0-10mg/L 범위, TP는 0.10-1.50mg/L 범위에 분포하였으며, 일반적으로 TN 3-6mg/L, TP 0.3-0.8mg/L의 평균값 범위를 보였다. 도시 강우유출수의 영양염류는 대기침적, 차량 배출기원 영양염류, 도로 퇴적물 등 다양한 오염원이 강우 시 복합적으로 유출되었기 때문이다. 금속류는 항목별 변동성이 가장 크게 나타났으며, Zn은 0.02-1.236mg/L로 가장 넓은 범위를 보였으며, Cu는 0.003-0.928mg/L, Pb는 0.001-0.344mg/L 범위로 산정되었다. 평균적으로 Zn은 0.10-0.40mg/L, Cu는 0.02-0.10mg/L, Pb는 0.01-0.05mg/L 수준으로 도출

되었다. 중금속은 타이어 마모, 브레이크 패드, 금속 부식, 도로 퇴적물 등 교통 기인 오염원이 강우유출수의 금속류 농도에 지속적으로 영향을 끼치기 때문이다. 이러한 교통시설 기인 오염물질의 EMC는 전체 강우유출수에 대한 농도 범위가기 때문에 비점오염원 측면이 중요하게 고려되는 초기강우 EMC와 재해측면에서 관리되는 초기강우 이후 유출수 관리를 위해서는 EMC 분리가 필요하다.

3.2 비점오염관리 측면의 초기강우 EMCs

도시 강우유출수에서 초기강우(0-30분) 구간의 EMC 농도는 비점오염저감시설 설계에서 중요하다. Table 4는 초기강우 내 EMC의 범위를 정리한 것이다. 총부유물질(TSS)은 초기강우가 시작된 직후 가장 급격한 농도 상승을 보이며, 교량과 도로와 같이 차량 이동과 마모입자의 축적이 많은 지점에서 150-300mg/L 이상으로 증가하였다. BOD는 도로 표면 및 인접 지역에 축적된 유기성 잔재물의 유출로 인하여 초기강우에서 15-40mg/L 범위로 나타났다. COD는 200-1,000mg/L의 매우 큰 농도차이를 보이는데 낙엽잔재물, 탄화수소 등 다양한 유기·무기물질의 초기유출이 원인이다. 초기강우 내 영양염류(TN, TP)는 차량 배출물, 대기 침적물, 도로 퇴적물 등 다양한 오염원이 원인이며, TN은 3-

Table 2. EMCs for different transportation land uses

Land use	TSS (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	Zn (mg/L)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)
Roads	20.7-285	4.8-51	24-160	1.2-10	0.10-2.61	0.043-1.236	0.003-0.928	0.001-0.344
Parking lots	12-33	10-20	31-70	1.0-2.5	0.10-0.30	0.02-0.052	0.003-0.017	0.001-0.011
Bridges	30-305	10-32	90-200	2.3-5.4	0.39-1.15	0.09-0.175	0.033-0.112	0.03-0.16
Mean EMCs	95	21.3	85	3.0	0.60	0.269	0.183	0.091

Table 3. EMC ranges of urban transportation land uses

Pollutant	Overall EMC Range (mg/L)	Typical Mean Range (mg/L)	Notes
TSS	12-305	60-120	Large variability observed across road, bridge, and parking lot sites. High values (100-150mg/L) common in highways and bridges; parking lots typically lower (10-30mg/L).
BOD	4.8-51	10-25	Represents organic buildup and wash-off. Urban roads commonly show 15-20mg/L; parking lots around 10-15mg/L.
COD	24-200	50-100	Higher in bridges and highways (80-150mg/L). Parking lots generally range between 30-70mg/L.
TN	1.0-10	3-6	Stable across land uses. Typical EMC is 3-6mg/L; upper values (8-10mg/L) occur under high ADD or heavy traffic.
TP	0.10-1.50	0.30-0.80	Mostly particulate phosphorus. Strongly correlated with TSS; occasional high values (>1mg/L) observed on major roads.
Zn	0.02-1.236	0.10-0.40	Tire wear and galvanized surfaces are dominant sources. High EMC (0.20-0.40mg/L) typical in highways and bridges.
Cu	0.003-0.928	0.02-0.10	Mainly from brake pad wear and metal corrosion. Average EMC generally 0.03-0.07mg/L; occasional peaks >0.1mg/L reported.
Pb	0.001-0.344	0.01-0.05	Though unleaded fuel reduced Pb levels, fine sediment still carries detectable Pb, especially during early runoff or at bridge sites.

8mg/L, TP는 0.3–1.0mg/L 범위로 나타났다. 총인(TP)은 TSS의 초기 농도 패턴과 유사하게 움직이며, 초기 고탁도·고입자성 상태에서 함께 증가하는 특성을 보여준다. 중금속류(Zn, Cu, Pb) 중에서 Zn은 초기강우에서 0.5–1.0mg/L 을 보이며 대부분 타이어 마모, 도로표면 열화, 금속 구조물 부식 등에서 기인한다. Cu는 0.05–0.20mg/L 범위, Pb은 0.02–0.10mg/L로 나타났는데, 이들 금속류는 대부분 미세 입자(<75 μm)에 부착된 형태로 존재하기 때문에 강우 초기 입자의 유출과 함께 동시에 배출되는 것으로 나타났다. 이러한 초기강우 내 오염물질의 농도범위는 비점오염관리 측면에서 비점오염저감시설 설계 농도로 활용될 수 있다.

3.3 재해관리 측면의 초기강우 이후 EMCs

초기강우 구간을 제외한 약 30분 이후의 강우유출수는 초기우수 대비 오염물질 농도가 크게 감소하지만 여전히 도시 비점오염원으로 작용한다. Table 5는 초기강우 이후 안정화 단계에서 나타나는 대표적인 EMC 범위를 산정한 결과이다. TSS는 30–300mg/L 범위를 보였으며, BOD는 10–60mg/L, COD는 25–150mg/L로 나타났다. 이러한 값의 범위는 초기강우에 비해 시간이 경과함에 따라 점진적으로 낮아졌지만 여전히 하천 수질에 영향을 초래할 수 있는 수준임을 의미한다. 영양염류인 TN은 2–12mg/L, TP는 0.2–1.5mg/L 범위에서 형성되었으며, 이는 교통활동, 대기침

Table 4. Ranges of EMCs in first flush periods

Parameter	Ranges of EMCs in first flush (0–30 min)	Evidence & Explanation
TSS (mg/L)	150–300	Sharp spike during the first 10–30 minutes across bridges, highways, and parking lots. Bridge study reported 150–250 mg/L → decreasing to 40–60 mg/L after 30 min (strong wash-off effect).
BOD (mg/L)	15–40	Early-stage BOD is typically 2–4 times higher than baseline due to organic buildup, microbial wash-off, and initial detachment of particulate organic matter.
COD (mg/L)	200–1,000	Bridges showed extremely high initial COD (1,004 mg/L → 476 mg/L after 30 min). Parking lots also showed COD 137 → 76mg/L. COD is one of the strongest early flush indicators.
TN (mg/L)	3–8	Bridge measurements: 5.9mg/L → 2.3mg/L after 30 min. Nitrogen increases in the early stage due to buildup from atmospheric deposition and roadway residues.
TP (mg/L)	0.3–1.0	Elevated particulate phosphorus in early runoff. Bridge TP ranged 0.39–1.15mg/L. TP strongly correlates with early TSS spikes.
Zn (mg/L)	0.5–1.0	Bridge Zn: 0.98mg/L → 0.41 mg/L after 30 min. One of the most sensitive metals in first flush, associated with tire wear and galvanized materials.
Cu (mg/L)	0.05–0.20	Copper increases rapidly in the first 10–20 min, commonly 2–4× higher than later phases. Dominantly attached to fine particulates.
Pb (mg/L)	0.02–0.10	Lead concentrations increase during early wash-off due to strong binding to road-deposited fine sediments; highest values occur in first flush periods.

Table 5. Ranges of EMCs after first flush periods

Pollutant	EMC Range After First Flush (mg/L)	Notes
TSS	30–300	Suspended solids; remains relatively high on roads and bridges even after the initial wash-off peak.
BOD	10–60	Organic matter indicator; stabilized concentrations after excluding the early first-flush peak.
COD	25–150	Oxidizable organic and inorganic substances; decreases from early spikes (>1,000mg/L) and converges to this equilibrium range.
TN	2–12	Nitrogen from atmospheric deposition and roadway residues; generally stable after the first 30 minutes.
TP	0.2–1.5	Mostly particulate phosphorus; follows the trend of TSS and remains present at moderate levels after first flush.
Zn	0.10–0.40	Derived from tire wear and galvanized materials; represents typical concentrations of post-first-flush inflow.
Cu	0.05–0.20	Originates from brake pad wear and metal corrosion; persists due to attachment to fine particulates.
Pb	0.02–0.05	Associated with road dust and legacy fuel residues; remains detectable after first flush at low but steady levels.

Table 6. Avg. design concentration ranges for post-first flush stormwater treatment

Pollutant	Mean Concentration Range (mg/L)	Notes
TSS	30–150	Typical stabilized range after the early wash-off peak; highways and bridges commonly exhibit 60–120mg/L.
BOD	10–30	Represents organic matter washed off after the initial peak; most studies report 15–25mg/L.
COD	25–80	Early spikes (>1,000 mg/L) drop rapidly, with equilibrium concentrations typically between 50–100mg/L.
TN	2–6	Stable across land uses; generally 3–6mg/L, with occasional values approaching 8–10 mg/L under high ADD conditions.
TP	0.20–0.80	Dominated by particulate phosphorus; follows TSS stabilization trends, excluding outliers (>1mg/L).
Zn	0.10–0.30	Tire wear and galvanized surfaces are key sources; average post-first flush values generally fall within this range.
Cu	0.03–0.10	Mostly associated with brake pad wear and metal corrosion; typical means between 0.03–0.07mg/L.
Pb	0.01–0.04	Bound to fine sediments; persists at low concentrations after first flush, typically 0.01–0.04mg/L.

적, 도로 퇴적물 등 다양한 오염원이 초기강우 이후에도 지속적으로 유입되고 있음을 보여준다. 금속류는 초기강우 이후에도 비교적 뚜렷한 농도 분포를 유지하였다. Zn은 0.10–0.40mg/L, Cu는 0.05–0.20mg/L로 도출되었는데, 이는 타이어 마모, 차량 제동장치, 도로 금속성 잔재물 등이 계속적으로 유출수에 영향을 미치기 때문이다. Pb도 0.02–0.05mg/L 범위에서 검출되어 초기강우가 지나간 이후에도 미세입자와 결합된 형태로 잔류하는 양상이 확인되었다. 이러한 결과는 초기강우 구간 이후에도 강우유출수에는 여전히 높은 수준의 오염물질이 함유되어 있다는 것을 의미하며, 대규모 지하저류조 설계 및 도시 비점오염 관리전략 수립 시 초기강우 이후 구간의 특성을 반드시 고려해야 함을 보여준다. 특히 TSS, COD, Zn 등 주요 오염항목은 초기강우 이후에도 높은 농도범위를 유지하기에 지하저류조 유입수의 설계농도 설정과 방류수 수질기준 마련에 중요한 참고자료로 활용될 수 있다.

Table 6은 초기강우 이후 유출수가 대규모 지하저류조 유입시 사용할 수 있는 평균 설계농도 범위를 산정한 값이며, TSS는 30–150mg/L, BOD는 10–30mg/L, COD는 25–80mg/L로 나타났다. TN의 평균 설계농도 범위는 2–6mg/L, TP는 0.20–0.80mg/L로 산정되었으며, Zn은 0.10–0.30mg/L, Cu는 0.03–0.10mg/L, Pb는 0.01–0.04mg/L 범위를 산정되었다. 따라서, 지하저류조 설계시 이러한 오염물질의 농도범위를 고려하여 설계되어야 하며, 필요시 전처리 시설로 저영향개발기법을 포함하여 자연기반해법의 도입이 필요하다.

3.4 대규모 지하저류조의 방류수 수질관리 필요성 검토

도시지역에서는 초기강우 이후 본격적으로 발생하는 대량의 강우유출수가 오염부하를 배출하며, 도시침수 위험을 증가시키기 때문에 안전하게 저장하고 수질을 관리할 수 있는

대규모 지하저류조의 역할이 매우 중요하다. 초기강우는 LID와 같은 비점오염저감시설로 관리할 수 있지만 이후 유량이 급격히 증가하는 강우유출수의 입자상 물질, 유기물질, 영양염류, 중금속 등의 지속적 유입은 저류조 내부의 수질 악화, 침전물 형성, 악취, 2차 오염 문제를 발생시킬 수 있다. 이러한 이유로 Table 7과 같이 관련 법체계에서도 초기강우 이후 유출수에 대한 관리 필요성을 강하게 명시하고 있다. 「하수도법」은 공공하수도와 하수처리시설이 공공수역의 수질보전을 위한 시설임을 명확히 하고(제1조), 처리시설의 용량·유입수 처리방법·방류수 수질기준 등을 규정하여 강우 시 저류조의 수질관리가 필수적임을 제도적으로 요구한다. 「도시침수방지법」은 기후변화로 증가하는 집중호우 상황에서 침수피해를 줄이기 위한 시설 연계·홍수량 분담·예보체계 구축을 규정하며, 이는 대규모 저류조가 수질관리 기능과 함께 도시 안전인프라로 운영되어야 함을 의미한다. 즉, 단순 저장이 아니라 저장된 물의 안정적 수질유지가 도시재해 대응력과 연결된다는 것이다. 「물순환촉진법」은 도시 물순환 왜곡을 해결하기 위해 침투·저류·재이용 중심의 그린인프라 도입을 제도화하며, 저류조는 물순환 체계의 핵심 구성요소로 규정된다. 이는 초기우수 이후 들어오는 유출수를 저류조에서 관리·정화·재이용하는 체계가 법적으로 뒷받침됨을 의미한다. 「물환경보전법」은 비점오염의 지속적 유입을 규제하고 비점오염저감시설·완충저류시설 기준을 제시해, 강우유출수가 저류조로 들어가기 전 또는 저류과정에서 오염물질을 제거·감사·개선하도록 한다. 이는 대규모 저류조가 비점오염 관리체계의 직접적인 관리대상임을 보여준다. 「환경정책기본법」은 수질환경기준과 특별대책지역 기준을 통해 하위 법령의 방류수 기준을 강화할 수 있는 법적근거를 제공한다. 따라서 저류조는 단순 빗물 저장시설이 아닌 환경기준 준수를 위한 수질관리 시설이다.

Table 7. Legal basis of water quality control for post-first flush stormwater treatment facility

Legal Framework	Necessity for Management (Disaster Perspective)	Water Quality Management System (Key Provisions / Functions)	Water Quality Management Methods (Tools / Measures)
Sewerage Act (Act / Enforcement Decree)	Preventing urban flooding caused by sewer overflow and preserving water environment is a core legal purpose (Art. 1).	20-year Sewerage Master Plan must include flood management, rainfall response, and water quality elements (Art. 5).	Requirements for sewage storage facilities (capacity, inflow treatment methods), effluent quality testing, and operational standards (Enf. Decree Art. 7-2, Art. 15).
Urban Stream Basin Flood Damage Prevention Act (Urban Flood Prevention Act)	Addresses large-scale floods and urban inundation driven by climate change and urbanization (Art. 1).	Establishes the Urban Flood Prevention Master Plan (design floods, flood distribution, hydraulic criteria, facility linkage) (Art. 6).	Operation of Integrated Water Disaster Management Center and Urban Flood Forecasting System for real-time monitoring and response (Art. 14-15).
Act on the Promotion and Support of Water Circulation (Water Cycle Promotion Act)	Responds to distorted water circulation, drought, and flooding to restore a sustainable urban water cycle (Art. 1).	Designation of Water Circulation Promotion Zones, formulation of Basic/Master Plans and implementation plans, defining water-circulation facilities (infiltration, storage, reuse) (Enf. Decree Arts. 2, 3, 5).	Application of green infrastructure (infiltration, storage, reuse) and watershed-scale integration of LID → storage → reuse (facility certification included in subordinate regulations).
Water Environment Conservation Act (Act / Decree / Rules)	Preventing public health and environmental damage caused by water pollution, managing nonpoint pollution sources (Art. 1, Art. 2).	System for Total Maximum Daily Load (TMDL) management, water-quality alerts, nonpoint pollution reduction plans and designated management areas; monitoring networks (multiple decree/rule provisions).	Nonpoint source reduction facilities defined (Rules, Annex 6); water-quality alerts, buffer storage, mandatory improvements, TMS remote monitoring for inflow and effluent conditions.
Framework Act on Environmental Policy (parent framework act)*	Provides the national water quality standards and special countermeasure zones, forming the basis for stricter requirements in other laws—e.g., stricter effluent standards in the Sewerage Act refer to special countermeasure regions under this Act (Art. 38).	Serves as an upper-level environmental standard for urban planning and sewerage plans, requiring consistency with water-quality environmental standards (referenced by Sewerage Master Plan requirements).	(No direct facility requirements) Functions as the top-level policy framework guiding the Sewerage Act, Water Environment Act, Water Cycle Act, and Urban Flood Prevention Act.

4. 결론

본 연구는 도시지역 강우유출수의 수질특성을 분석하고, 초기강우와 초기강우 이후 유출수 변화를 비교하여 대규모 지하저류조 설계에 필요한 수질범위를 산정하기 위하여 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 초기강우(0-30분) 구간에서 TSS, COD, TN, TP, Zn, Cu, Pb 등 대부분의 오염물질이 매우 높은 농도(전체 부하의 50-80%)로 배출되는 강한 초기강우 현상이 확인되었다. 반면, 초기강우 이후 구간에서는 오염농도가 감소하여 상대적으로 안정된 범위로 수렴하였다.
- 2) 초기강우 이후 유출수의 EMC는 TSS 30-300mg/L, BOD 10-60mg/L, COD 25-150mg/L, TN 2-12mg/L, TP 0.2-1.5mg/L, Zn 0.10-0.40mg/L, Cu 0.05-0.20mg/L, Pb 0.02-0.05mg/L 범위로 나타났다.
- 3) 대규모 지하저류조의 평균 설계농도는 TSS 30-150mg/L, COD 25-80mg/L, TN 2-6mg/L, TP 0.20-0.80mg/L, Zn 0.10-0.30mg/L 등으로 산정되었다.

이는 대규모 저류조가 초기우수를 직접 처리하는 LID 기반 소규모 시설과는 달리, 초기 이후 대량 유입되는 비교적 고농도의 유출수를 저장·침전·처리해야 한다는 점을 명확히 보여준다.

- 4) 국내 「하수도법」, 「물환경보전법」, 「환경정책기본법」, 「물순환촉진법」 등 관련 법·제도를 검토하여, 대규모 지하저류조 유입수의 수질관리가 법적·정책적으로도 필수적임을 확인하였다. 해외 사례에서도 미국 NPDES-CSO 정책, 일본의 합류식 월류 저감 프로그램, 독일 DWA A-128 기준 등이 모두 저류조를 단순한 치수시설이 아닌 수질관리시설로 명확히 규정하고 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 초기강우 이후 강우유출수의 유입 농도범위는 향후 대규모 지하저류조의 환경친화적 설계, 방류수 수질기준 설정, 전처리 공정 도입, 비점오염 부하 감소전략 수립 등 다양한 정책·기술 분야에서 활용 가능한 기초자료로서 중요한 의미를 가진다.

사 사

This work was supported by Korea Environment Industry & Technology Institute(KEITI) through Technology development project to optimize planning, operation, and maintenance of urban flood control facilities, funded by Korea Ministry of Environment(MOE)(RS-2024-00398012)

References

- Bertrand-Krajewski, J.L., Chebbo, G., and Saget, A. (1998). Distribution of pollutant mass vs. volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon, *Water Research*, 32(8), 2341-2356. doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00420-X
- Geronimo, F.K., Reyes, N.J., Choi, H., Yano, K., and Kim, L.H. (2021). Selection of appropriate nature-based solution for stormwater through multi-criteria performance indices, *Desalination and Water Treatment*, 219, (2021) 392-398. doi.org/10.5004/dwt.2021.26959
- Jeon, J., Hong, J., Jeon, M., Shin, D., and Kim, L.H. (2019). Assessment of hydrologic and environmental performances of green roof system for improving urban water circulation, *Desalination and Water Treatment*, 158(2019), 14-20. 10.5004/dwt.2019.24020
- Kim, L.H. (2003). Determination of event mean concentrations and first flush criteria in urban runoff, *Environmental Engineering Research*, 8(4), 163-176.
- Kim, L.H., and Kang, J.H. (2004a). First flush characteristics and criteria of highway runoff, *J. of Korean Society on Water Environment*, 20(6), 641-646.
- Kim, L.H., and Kang, J.H. (2004b). Event mean concentration and unit loads of highway stormwater runoff, *J. of Korean Society on Water Environment*, 20(6), 631-640.
- Kim, L.H., Kayhanian, M., and Stenstrom, M.K. (2004). Event mean concentration and loading of litter from highways during storms, *Science of the Total Environment*, 330, 101-113. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.02.012
- Kim, L.H., Kayhanian, M., Lau, S.L., and Stenstrom, M.K. (2005). A new modeling approach in estimating first flush metal mass loading, *Water Science and Technology*, 51(3-4), 159-167. doi.org/10.2166/wst.2005.0587
- Kim, L.H., and Lee, S.H. (2005). Characteristics of nonpoint pollutants and dynamic EMCs from parking lot and bridge stormwater runoff, *J. of Korean Society on Water Environment*, 21(3), 248-255.
- Kim, L.H., Ko, S.O., Lee, B.S., and Kim, S.G. (2006a). Estimation of pollutant EMCs and loadings in highway runoff, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Ser. B (Environmental), 26(2B), 225-231.
- Kim, L.H., Lee, E.J., Ko, S.O., and Kang, H.M. (2006b). Trends of pollutant runoff by storm duration in asphalt-paved highways. *J. of Korean Society of Road Engineers*, 8(1), 99-106.
- Kim, L.H., Lee, E.J., Ko, S.O., Kang, H.M., Lee, J.G., Lee, B.S., and Im, K.H. (2006c). Comparison of EMCs and grab samples in stormwater runoff from paved areas, *J. of Korean Society on Water Environment*, 22(1), 104-109.
- Lee, S.Y., Lee, E.J., Son, H.G., Kim, C.M., Maniquiz, M.C., Son, Y.G., Kim, J.H., and Kim, L.H. (2007a). Sediment characteristics in parking lot ditch, *J. of Wetland Research*, 9(3), 43-49.
- Lee, S.Y., Lee, E.J., Kim, C.M., Maniquiz, M.C., Son, Y.G., Kim, J.H., and Kim, L.H. (2007b). Physico-chemical characteristics of sediment in sedimentation tank of infiltration trench and filtration system, *J. of Wetland Research*, 9(3), 35-42.
- Lee, S.Y., Lee, E.J., Maniquiz, M.C., and Kim, L.H. (2008). Determination of pollutant unit loads from various transportation land uses, *J. of Korean Society on Water Environment*, 24(5), 543-549.
- Lee, S.Y., Maniquiz, M.C., and Kim, L.H. (2010). Determination of the number of storm events representing the pollutant mean concentration in urban runoff, *Desalination and Water Treatment*, 171(1-4), 529-542. doi.org/10.1080/19443994.2013.781002
- Marsalek, J. (1978). Pollution due to urban runoff: unit loads and abatement measures. PLUARG Report, International Joint Commission, Windsor, Ontario, Canada.
- Maniquiz-Redillas, M.C., and Kim, L.H. (2016). Understanding the factors influencing the removal of heavy metals in urban stormwater runoff, *Water Science and Technology*, 73(12), 2921-2928. doi.org/10.2166/wst.2016.153
- Mercado, J.M.R., Maniquiz-Redillas, M.C., and Kim, L.H. (2015). Laboratory study on the clogging potential of a hybrid best management practice, *Desalination and Water Treatment*, 53(11), 3126-3133. doi.org/10.1080/19443994.2014.922287
- Reyes, N.J., Geronimo, F.K., Choi, H., Jeon, M., and Kim, L.H. (2020). Utilization of berm technology for reducing sediment loads from construction sites, *Desalination and Water Treatment*. 200, 450-458. doi.org/10.5004/dwt.2020.26128

- Sansalone, J.J., and Buchberger, S.G. (1997). Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater, *Water Science and Technology*, 36(8-9), 155-160. doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00605-7
- Son, H.G., Lee, S.Y., Lee, E.J., and Kim, L.H. (2008). Runoff characteristics and relationship between nonpoint source pollutants from national road, *J. of Korea Society of Hazard Mitigation*, 8(5), 59-64.
- Wee, S.K., Kim, L.H., Jung, Y.J., and Gil, K.I. (2008). Washoff characteristics and correlation of nonpoint pollutants in bridge storm runoff, *J. of Korean Society on Water Environment*, 24(3), 378-382.
- Yun, Y., Park, H., Kim, L.H., and Ko, S.O. (2010). Size distributions and settling velocities of suspended particles from road and highway runoff, *KSCE J. of Civil Engineering*, 14(4), 481-488.