

도시유역에서 재생자원기반 유기성 토양개량제 적용에 따른 비점오염물질 관리 효과 평가

박윤경^{1a} · 안창혁^{1b,2,†}

¹한국건설기술연구원 환경연구본부 · ²서울대학교 건설환경공학부

Evaluation of Nonpoint Pollutant Management Effect by Application of Organic Soil Ameliorant Based on Renewable Resources in Urban Watershed

Yoonkyung Park^{1a} · Chang Hyuk Ahn^{1b,2,†}

¹Department of Environmental Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

(Received 28 February 2024, Revised 8 May 2024, Accepted 9 May 2024)

Abstract

This study investigated the chemical properties of Organic Soil Amendments (OSAs) made from organic waste. It also assessed the effectiveness of using these OSAs in the soil layer of Green Infrastructure (GI) to reduce stormwater runoff and non-point source pollutants. The goal was to improve the national environmental value through resource recycling and contribute to the circular economy transformation and carbon neutrality of urban GI. The OSAs used in this study consisted of spent coffee grounds and food waste compost. They were found to be nutrient-rich and stable as artificial soils, indicating their potential use in the soil layer of GI facilities. Applying OSAs to bio-retention cells and permeable pavement resulted in a reduction of approximately 11-17% in stormwater runoff and a decrease of about 16-18% in Total Phosphorus (TP) discharge in the target area. Increasing the proportion of food waste compost in the OSAs had a positive impact on reducing stormwater runoff and pollutant emissions. This study highlights the importance of utilizing recycled resources and can serve as a foundation for future research, such as establishing parameters for assessing the effectiveness of GI facilities through experiments. To enable more accurate analysis, it is recommended to conduct studies that consider both the chemical and biological aspects of substance transfer in OSAs.

Key words : Green infrastructure, Non-point sources pollution, Organic soil ameliorant, Recycled resources, Stormwater runoff

^{1a} 수석연구원(Senior Researcher), parkyoonkyung@kict.re.kr, <https://orcid.org/0000-0003-1567-1125>

^{1b,2} Corresponding author, 수석연구원(Senior Researcher), chahn@kict.re.kr, <https://orcid.org/0000-0002-2136-7712>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

20세기 이후 급격한 산업기반의 자원이용은 글로벌 물질소비량의 증가와 함께 다양한 환경문제들을 야기하였다(Geyer et al., 2017; Schaffartzik et al., 2014; Zhang et al., 2022). 또한, 경제발전이 따른 대량생산 및 소비 체제의 증가는 환경수용력을 위협하는 폐기물 발생의 가속화에 밀접한 영향을 주고 있다(Sarkar, 2022). 최근 이러한 현상들을 완화하기 위해 재활용 산물들을 포함한 단순 또는 1차 정제된 제품들에 대한 순환경제(Circular economy)로의 전환이 우선적으로 요구되고 있다(Jacobs et al., 2022). 관련하여, 유기성 도시 고형 폐기물(Organic Fraction of Municipal Solid Waste, OFMSW)의 적절한 처리는 폐기물 총량의 최소화와 자원이용효율을 향상시킬 수 있는 첫 번째 대안 중 하나로 손꼽힌다(Paritosh et al., 2018). OFMSW는 도시고형폐기물 중 가장 높은 비율을 차지할 뿐만 아니라 상대적으로 다양한 형태로 개질이 가능한 잠재력이 있어 가치향상을 위한 다양한 분야의 연구 테마로 활용될 수 있다(Al-Ghouti et al., 2021).

대표적인 OFMSW의 하나인 커피박(Spent Coffee Grounds, SCGs)은 한국에서 매년 지속적으로 증가 중인 폐자원이다. 국내 커피 수입량은 2016년 기준 11만 4천톤으로써 대부분의 질량이 커피찌꺼기 형태로 배출될 뿐만 아니라 서울특별시에서 약 30%를 소비할 정도로 도시에 집중된 유기성 폐기물이다(Nam et al., 2017). 음식물 쓰레기(Food Waste, FW) 또한 대표적인 OFMSW 중 하나로 경제적 가치(총 생산액 \$1 trillion)가 높고 지구환경적으로 막대한 영향(온실가스 배출 영향 6.8%)을 주기 때문에 UN의 지속가능한 개발 목표의 주요 아젠다(2030년까지 1인당 절반 수준으로 축소)로 선정될 정도로 관리가 중요하다(Slorach et al., 2019).

기존의 OFMSW의 관리전략은 가축사료, 바이오연료 및 에너지 등으로 전환하는데 주로 초점을 두어 왔다(Pour et al., 2021). 그 중 Food Waste Compost (FWC)의 이용과 같은 유기성 토양개량제(Organic Soil Ameliorants, OSAs)으로써 퇴비화 전략은 기질의 질량을 줄이고 영양분 회수를 위한 실용적인 접근법으로 여겨져 왔지만(Adhikari et al., 2009), 최근 연구에 따르면 증가하는 친환경 시장으로 인해 농업 지역을 대상으로 한 전통적인 퇴비의 반복 살포 방식에는 한계가 있다고 지적하고 있다(Voběrková et al., 2020). 이러한 점에서 기존 재활용 산물에 대한 생산·유통, 품질, 수요·공급의 불균형 등의 이슈를 해결할 수 있는 지속가능하고 다변화된 활용처 확보를 위한 새로운 시각과 융합연구개발이 필요하다(Tchonkouang et al., 2023). 이러한 움직임에 맞추어 재생된 OSAs와 도시 그린인프라(Green Infrastructure, GI)와의 협력은 자원순환과 환경회복을 동시에 달성할 수 있는 전략 중 하나로 손꼽힌다(Chen et al., 2014). GI는 도시 커뮤니티로 인해 집중된 불투수층 또는 압밀된 토양층에 의한 물순환 왜곡이나 오염물질의 비정상적인 유출을 완화하기 위한 전략적인 생태공학적 접근법이다(Xu et al., 2022). 여기서, 재생된 OSAs는 오염된 강우유출수를 대상으로 수분 보유, 탄소 저장, 오염물질 제거, 토양 침식 제어와 같은 중요한 기능

을 수행할 수 있는 잠재력을 가진다(Paramisparam et al., 2021). 그러나 이 접근법은 토양환경공학을 기반으로 하는 몇 가지 과학적 해결과제(예: 생물학적 성숙도 향상, 환경 수용력 고려 등)와 사회적 합의가 필요하다(Deeb et al., 2020). 그럼에도 불구하고 이러한 접근법은 재생가능한 OFMSW의 지속가능한 이용과 순환경제 측면의 새로운 활용처 확보 차원에서 다각적으로 논의될 가치가 있다.

따라서, 본 연구에서는 SCGs와 FWC를 활용하여 국토환경가치를 향상시키고 탄소중립에 기여할 수 있는 도시 GI 조성 기술의 적용 효과를 사전 분석하고자 하였다. 본 연구에서 중점적으로 다루는 부분들은, 1) SCGs와 FWC를 기반으로 한 OSAs의 제조에 따른 이화학 특성 분석, 2) 재생된 OSAs의 GI 토양층 적용에 따른 강우 유출특성 분석, 3) EPA SWMM 모델의 LID 모듈을 활용한 비점오염물질 관리 분석이다. 사례연구 성격의 본 연구는 재생자원의 활용성 확장 측면에서 타당성 분석의 취지로 수행되었으며 향후 관련 연구에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

2. Materials and Methods

2.1 OSAs 제조 및 매개변수 분석

OSAs의 제조를 위해 batch 형태의 생물반응기(25 L)를 이용하여 인공적인 중호열성(Meso to thermophilic) 조건에서 혼합·교반하여 제조하였다. 생물반응기는 25.5-48.6°C, 10 rpm 조건에서 10일 운영, 10일 방치로 가동되었다. 재생자원의 재료는 도시구역에서 발생된 OFMSW 중 GI에서 활용 가능할 것으로 예상되는 SCGs와 FWC를 주재료로 하였으며, 시나리오 분석을 위해 서로 다른 질량비율(w/w)에 따라 분류하였다(OSA01: SCGs 80% + FWC 20%, OSA02: SCGs 40% + FWC 60%, OSA03: SCGs 20% + FWC 80%, OSA04: SCGs 10% + FWC 90%, OSA05: FWC 100%).

pH는 최종산물을 증류수로 희석 추출(1:5)하여 센서(MultiLab IDS, YSI, USA)로 측정하였다. 수분(Moisture) 및 습윤 중량 휘발성 고형물(Volatile Solids, VS_{sw})은 각각 105°C 24시간, 회분 550°C 6시간 동안 ash-free dry weight (AFDW) 방법을 이용하였다. 유기탄소(Organic Carbon, OC)는 환산계수(1.8)로 계산하였다(Pribyl, 2010). 건조 용적밀도(ρ_{th})는 건조된 샘플의 질량과 부피의 비율로 결정되었다. 영양성분(e.g., TN, P₂O₅, K₂O) 분석은 농촌진흥청 비료분석법(제2011-46호)에 의거하여 수행하였다. C/N비는 OC과 TN의 농도로 추정하였다.

간극률(Porosity)은 계산식(1-용적밀도/입자밀도)으로 산출했으며, 보수력(Field capacity)은 Ahn et al. (2008), 위조점(Wilting point)은 Nourbakhsh et al. (2005)의 경험식에 따랐다. K_s는 OSAs에 대해 실험실 규모의 falling head method로 도출하였다(METER Group, Inc. USA).

2.2 비점오염물질 유출 모형 구축

재생자원을 활용한 GI기술 적용에 따른 비점오염물질의 관리 효과를 알아보기 위하여 부산광역시에 위치한 부경대



Fig. 1. Study area of this study.

학교 대연캠퍼스를 연구 대상 지역으로 선정하였다. 전체면적은 34.9478 ha로, 유역면적의 약 60%가 불투수 지역으로 확인되었으며, 나머지 40%는 침엽수림, 인공초지 등으로 구성되어 있다(Fig. 1). Park et al. (2016)에서 구축한 EPA SWMM을 활용하여, 본 연구에서는 강우자료 기간을 변경하여 모형 매개변수를 새롭게 추정하였다. 모형 매개변수를 추정하는 자세한 방법은 Park et al. (2016)을 참조할 수 있다.

Park et al. (2016)은 강우유출수 및 TP 배출부하량 모의와 관련한 매개변수 보정을 위하여 2005년부터 2014년까지 총 10년간의 기상자료를 이용하였다. 해당 모형의 매개변수 보정 결과, 강우유출수의 경우 결정계수가 0.9921, TP 배출부하량의 결정계수가 0.8928로 유의하게 유역의 강우유출수 및 TP 배출부하량을 모의할 수 있는 것으로 확인되었다. Fig. 2는 매개변수 검증결과로서, 보정기간과 상이한 2018년부터 2022년의 기상자료를 활용하여 수행하였다. 검증 결과, 강우유출수 모의의 결정계수가 0.9920, TP 배출부하량 모의의 결정계수가 0.8782로 산정되었다. 해당 결과 역시 유역의 강우유출수 및 TP 배출부하량을 모사함에 있어 유의한 결과를 가짐을 의미한다.

2.3 OSAs를 고려한 GI시설의 적용

EPA SWMM에서 표현할 수 있는 GI시설은 식생체류지(Bio-retention cells), 빗물정원(Rain gardens), 옥상녹화(Green roofs), 침투 트렌치(Infiltration trenches), 투수성 포장(Permeable pavement), 빗물통(Rain barrels), 선홈통 단절(Rooftop disconnection), 식생수로(Vegetative swales)이다. 본 연구에서는 여러 가지 GI시설 중 토양층 적용이 가능한 식생체류지와 투수성 포장을 선택하여 적용하고자 하였으며, 각 시설의 개념도는 Fig. 3와 같다.

식생체류지는 표면층(Surface layer), 토양층(Soil layer), 저류층(Storage layer)으로, 투수성 포장은 표면층(Surface layer), 포장층(Pavement layer), 토양층(Soil layer), 저류층(Storage layer)으로 구성하였다. 표면층은 강우 또는 강우유출수가 직접적으로 유입되는 층이다. 식생체류지에서는 식생이 차지하는 비율을 고려할 수 있다. 포장층은 투수성 포장에서 고려되는 것으로서 다공성 콘크리트, 아스팔트 및 블록으로 구성되며, 표면층에서 침투된 강우유출수가 유입되고 이후 저류층으로 침투(Percolation)된다. 저류층은 식생체류지, 투수성 포장 모두 고려되는 층으로서 침투된 강우유출수

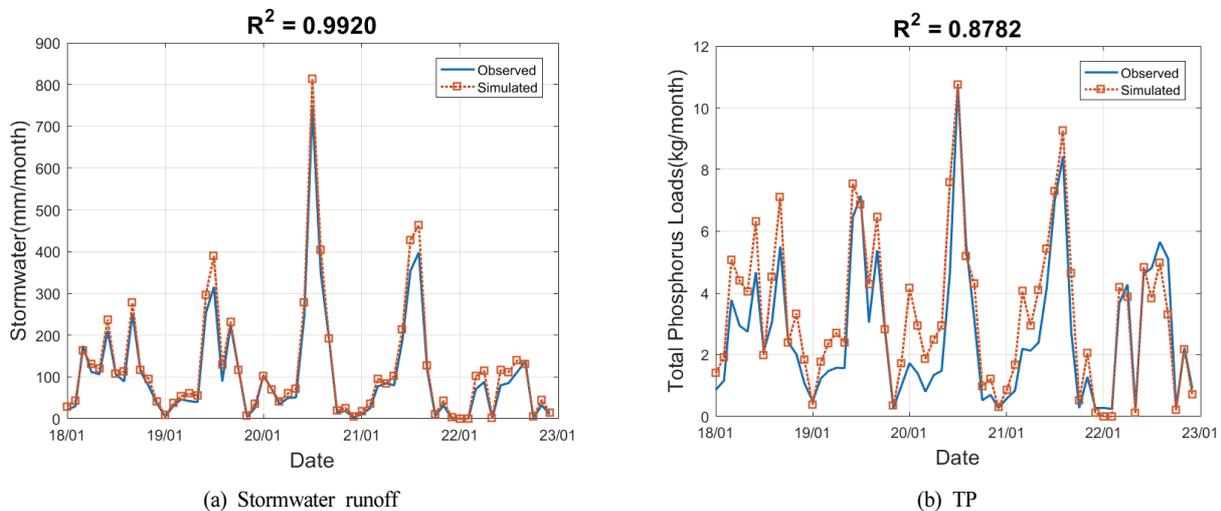


Fig. 2. Model parameter verification.

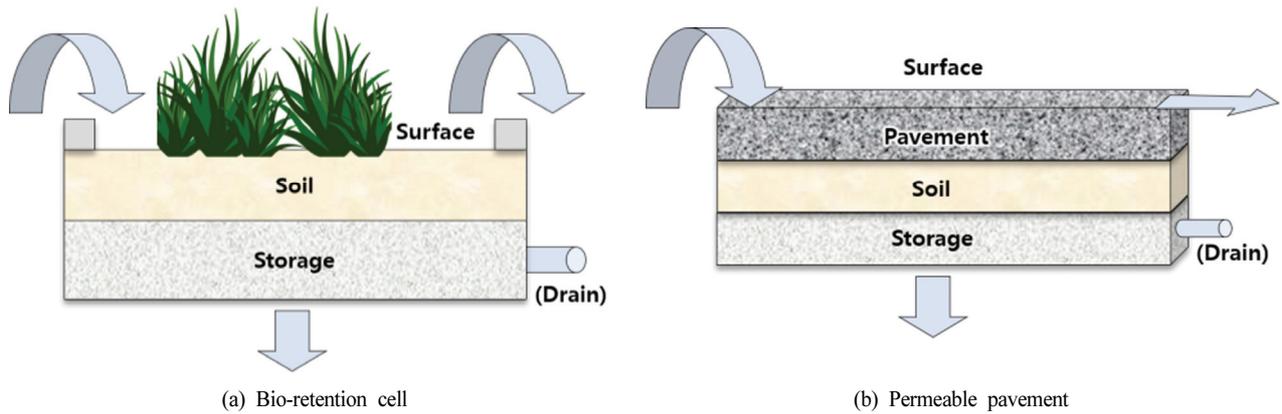


Fig. 3. Concept of GI facilities used in this study.

Table 1. Parameters of the soil layer for GI facilities

Parameters	Description
Thickness (inches or mm)	Typical values range from 18 to 36 inches (450 to 900 mm) for rain gardens, street planters and other types of land-based bio-retention units, but only 3 to 6 inches (75 to 150 mm) for green roofs
Porosity (fraction)	The volume of pore space relative to total volume of soil
Field capacity (fraction)	Volume of pore water relative to total volume after the soil has been allowed to drain fully. Below this level, vertical drainage of water through the soil layer does not occur.
Wilting point (fraction)	Volume of pore water relative to total volume for a well dried soil where only bound water remains. The moisture content of the soil cannot fall below this limit.
Conductivity (K_s) (in/hr or mm/hr)	Hydraulic conductivity for the fully saturated soil.
Conductivity slope (unitless)	Average slope of the curve of log (conductivity) versus soil moisture deficit (porosity minus moisture content). Typical values range from 30 to 60. It can be estimated from a standard soil grain size analysis as $0.48 \times (\%Sand) + 0.85 \times (\%Clay)$.
Suction head (inches or mm)	The average value of soil capillary suction along the wetting front. This is the same parameter as used in the Green-Ampt infiltration model.

가 저류되는 공간으로 비교적 공극이 큰 자갈로 구성된다. GI시설에서 추가 선택사항으로 저류층에 저류된 강우유출수가 배출되는 지하배수시스템(Underdrain system)이 고려될 수 있으나, 연구대상지의 토양 상태는 투수 성능이 가장 낮은 ‘Type D’이기 때문에 이는 제외하였다. 개발된 토양개량제는 도로에서 발생하는 비점오염물질을 효과적으로 관리하

기 위해 GI시설의 토양층에 적용하는 것으로 고려되었다. EPA SWMM 내 토양층에서 고려되는 매개변수 목록은 Table 1과 같다(U. S. EPA., 2015).

대상지역에서 건물, 주차장, 도로 이외의 토지이용을 활용하고 있는 공간 중 일정 규모 이상의 시설을 설치할 수 있는 지역을 선정하였으며, 투수성 포장을 설치할 수 있는 장소를

Table 2. Installable area for GI facilities

Sub-catchment	Available facility types	Usable area (ha)	Sub-catchment	Available facility types	Usable area (ha)
A05	PP	0.217	C04	PP	0.083
A06	PP	0.030	C06	PP	0.045
A08	PP	0.066	C08	PP	0.180
A11	PP	0.230	C10	PP	0.013
A13	PP	0.045	D02	PP	0.318
A16	PP	0.042	D03	PP	0.213
B01	PP	0.323	D05	BioR	0.706
B04	BioR	0.876	D09	PP	0.040
B05	PP	0.088	F05	PP	0.010
B06	PP	0.011	F06	PP	0.302
C02	PP	0.048	G03	BioR	0.197

Note: PP means permeable pavement. BioR means bio-retention cell

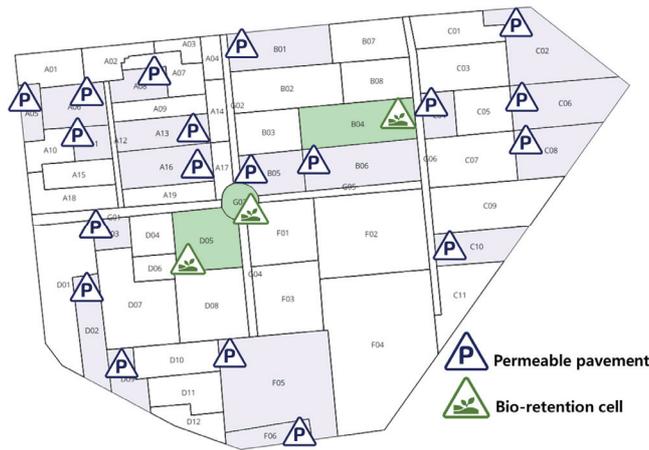


Fig. 4. Available sites for GI facilities in this study.

주차장으로 제한하여 적용하였다. 다양한 OSAs의 성능을 확인하기 위하여 적용되는 GI시설은 최대한 지역 전체에 적용 가능한 규모로 가정하였으며, GI시설이 적용되는 배수분구, 적용시설 및 설치면적을 Fig. 4와 Table 2에 표기하였다.

3. Results and Discussion

3.1 OSAs의 특성인자 분석을 통한 모델 매개변수 산정

EPA SWMM을 활용하여 GI시설에 대한 적용효과 분석에 필요한 매개변수를 산정하기 위하여 제조된 OSAs의 물리화학적 특성들을 분석하고 Table 3에 나타내었다. 제조된 OSAs는 전반적으로 낮은 수분 함량(9.5~19.7%), 낮은 ρ_{db} (455.6~504.6 kg m⁻³), 높은 VS_{sw} (70.2~82.9%)의 유기물 특성을 보였다. 영양성분으로써 OSAs의 TN, P₂O₅, K₂O는 각각 22.7~40.6, 3.5~16.2, 6.5~8.2 mg g⁻¹을 나타내었다. 여기서, NPK 비율은 4.2:1.3:1 수준이었으며 거시적 관점에서 식물의 이상적인 영양비 수준(4:2:1)과 유사하였으므로 GI 시설에 활용 가능할 것으로 판단되었다(Bora, 2022). 여기서, SCGs 함량 증가는 높은 OC 농도로 인해 TN, P₂O₅의

단계적인 희석과 C/N의 유의한 증가에 기여하였다. 그럼에도 불구하고 생물학적 안정성(Biological stability)을 판단할 수 있는 적정 C/N 범위가 10~20임을 고려할 때(Sánchez et al., 2017), OSA01을 제외하고 모두 만족하는 것으로 나타났다. pH는 유기산으로 추정되는 5.43~5.81 수준의 약산성 조건을 보였다. 일반적으로, 퇴비화와 같은 생물학적 분해과정에 기여하는 미생물들의 활성 pH 범위는 본 연구와 유사한 5.50~8.00 수준으로 리그닌과 셀룰로오스 분해에 유리할 뿐만 아니라(Dantroliya et al., 2022), 잠재적인 중금속 안정화와 같은 추가적인 기능에도 기여할 수 있을 것으로 판단되었다(Rosal et al., 2012).

OSAs의 적용이 고려된 토양층은 식생 성장을 지원할 수 있는 인공토양혼합체(Engineered soil mixture)로 구성되었다. Table 4에는 EPA SWMM을 통한 GI시설의 성능평가를 위해 본 연구에서 분석된 시나리오별 OSAs의 물리화학적 매개변수 값을 나타내었다. 보통, 토양층은 강우유출수의 저류, 침투, 증산에 기여하며, 관련 매개변수들은 장기적인 강우유출수의 지연시간과 보유용량에 중요한 영향을 준다고 알려져 있다(Leimgruber et al., 2018). 본 연구에서 도출된 OSAs

Table 3. Physicochemical properties of five different OSAs used in this study (n=2~5)

Description	Moisture (%)	pH	ρ_{db} (kg m ⁻³)	VS _{sw} (%)	OC (mg g ⁻¹)	TN (mg g ⁻¹)	P ₂ O ₅ (mg g ⁻¹)	K ₂ O (mg g ⁻¹)	C/N
OSA01	9.5±0.8	5.81±0.07	504.6±16.9	82.9±2.4	498.2±11.8	22.7±0.0	3.5±0.5	6.5±0.4	22.0±0.9
OSA02	14.9±1.3	5.51±0.09	469.0±4.7	80.1±2.8	507.3±14.1	28.1±0.8	8.0±0.8	7.7±0.6	18.0±0.5
OSA03	19.5±2.7	5.43±0.11	455.6±22.1	75.5±3.2	489.2±16.6	32.4±1.3	9.1±0.4	8.2±0.3	15.1±0.9
OSA04	19.2±1.8	5.76±0.16	499.9±19.7	70.8±2.6	462.5±9.2	36.5±0.5	15.1±2.9	7.9±0.3	12.7±0.1
OSA05	19.7±1.1	5.69±0.09	501.2±7.7	70.2±1.1	463.7±13.3	40.6±1.9	16.2±0.9	7.7±0.3	11.4±0.5

Table 4. OSAs values as the soil layer parameters for EPA SWMM simulation

Description	OSA01	OSA02	OSA03	OSA04	OSA05
Porosity	0.68±0.01	0.71±0.00	0.72±0.01	0.69±0.01	0.69±0.00
Field capacity	1.10±0.08	1.04±0.04	1.00±0.09	1.03±0.07	1.06±0.06
Wilting point	0.37±0.03	0.38±0.00	0.36±0.00	0.34±0.01	0.35±0.00
K _s (mm h ⁻¹)	1.2±0.9	3.0±0.6	3.6±2.0	6.1±5.4	21.6±2.8

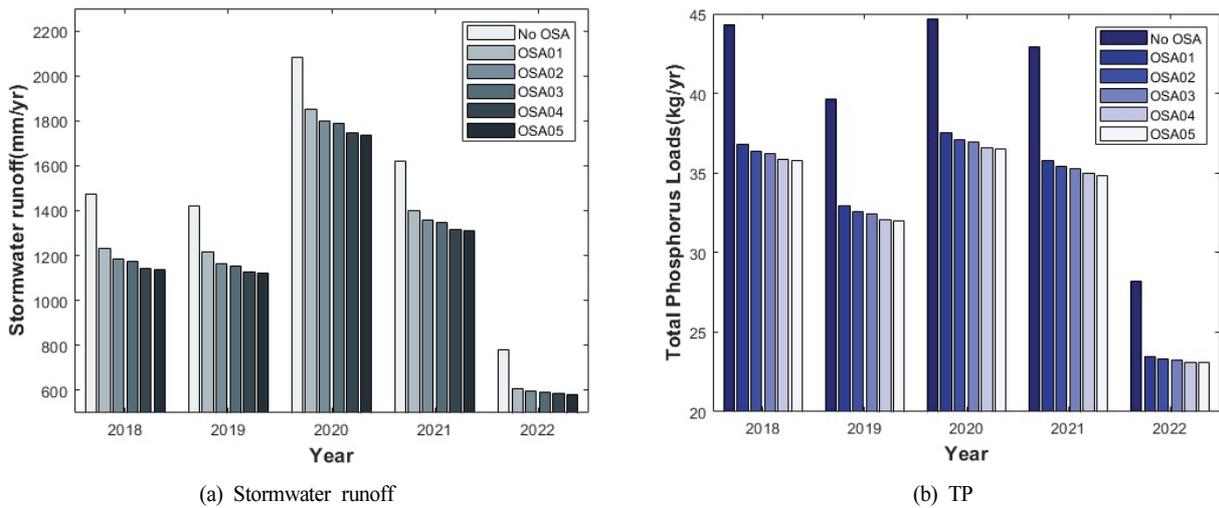


Fig. 5. Annual simulation results according to OSAs scenarios.

의 토양층 매개변수들은 각각 높은 Porosity (0.68~0.72), 높은 Field capacity (1.00~1.10), 높은 Wilting point (0.34~0.38)의 특징을 보였다(Table 4). 또한, 다공성 매질에서 물질 이동수준을 나타내는 지표인 K_s 값은 1.2~21.6 mm h⁻¹의 범위를 보였으며, FWC의 함량이 증가할수록 증가하였다. 이러한 매개변수 값들의 범위는 대부분 EPA SWMM 매뉴얼이나 선행연구 결과와 유사하였지만 OSAs의 재료 특성 및 구성요소에 따라 일부 인자들은 차이를 보였다(Kim et al., 2017; Savabi et al., 2005; U. S. EPA., 2015). 더욱이 OSAs는 기존 토양층에서 주로 활용되었던 재료인 사질토(Sandy loam)보다 현저히 높은 유기탄소 함량으로 인해 강우유출수의 우수한 보유용량(Retention capacity) 잠재력이 예상되었다(Kim et al., 2017; U. S. EPA., 2015). 관련하여, SCGs의 단독사용보다 FWC와 혼합사용이 토양층의 침투기능을 향상시킬 수 있으므로 더 나은 강우유출수관리가 가능하다고 판단되었다. 이러한 유기성 재료로써의 특성들은 EPA SWMM 모의를 위한 수리학적 매개변수로써 최대한 반영되었다.

3.2 OSAs 적용 시나리오에 따른 비점오염물질 저감 효과

OSAs를 적용함에 따라 대상 구역에서 발생하는 강우유출수량 및 TP 배출부하량을 확인하기 위하여 2018년부터 2022년까지의 부산기상관측소의 관측자료를 활용하였다. 해당 기간 중 2020년 연강우량이 2,281.6 mm가 발생하였으며, 2022년에는 연강우량이 991.9 mm로 강우량 차이가 약 2배 이상 차이가 발생하며, 이러한 기상 조건이 강우유출수량 및 TP 배출부하량에도 영향을 미치고 있음을 Fig. 5와 Fig. 6을 통해 확인할 수 있다. 대상 구역에 GI시설이 아무것도 적용되지 않은 경우를 ‘No OSA’로 하여 토양개량체가 적용된 시나리오(OSA01~05)를 비교하였다. 그 결과, 강우유출수는 최소 11.07%, 최대 25.12%의 저감 효율이 발생하였다. 연간 강우유출수의 저감 효율은 상대적으로 강우량에 반비례하였으며, 월별 강우유출수 역시 유사한 경향을 보이는 것으로 파악되었다(Fig. 5a, Fig. 6a). 이는 GI시설의 처리 용량을 초과하는 강우가 발생하게 되면 유역 밖으로 배출되는 강우유

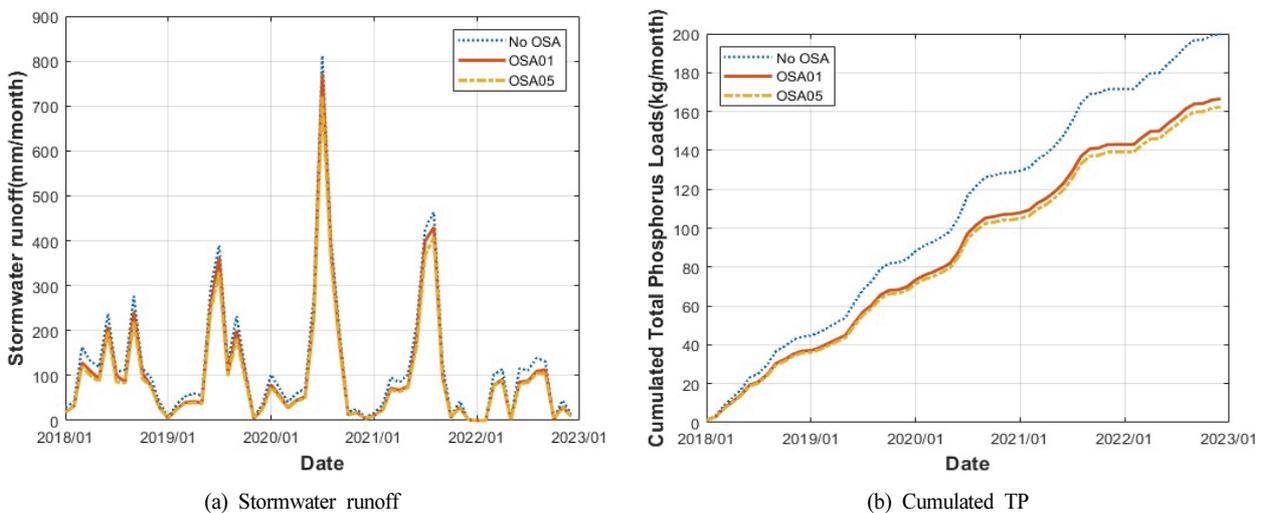


Fig. 6. Monthly simulation results according to OSAs scenarios.

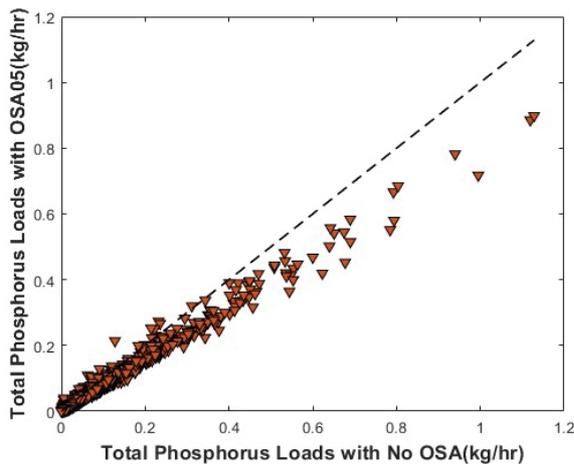


Fig. 7. Comparison of TP loads between the No OSA scenario and the OSA05 scenario.

출수가 증가하므로, 강우량이 집중되는 여름철에는 처리 효율이 감소하며 상대적으로 강우량이 적은 시기에는 처리 효율이 개선되기 때문이다. TP 배출부하량은 강우유출수에 비해 강우량 증감으로 인한 영향이 적은 것으로 파악되었다. 이는 청천 시 축적된 잠재적인 TP 부하량이 강우 시 강우유출수 형태로 배출되는 형태이기 때문에 강우량뿐만 아니라 무강우 기간이 주요한 영향을 미치기 때문으로 확인된다. 또한, 본 연구에서는 GI 시설물에서 토양-기후-식생의 상호작용으로 인해 인공토양혼합체 발생가능한 자체적인 TP의 용출은 최소화되는 것으로 가정하였다. 이는 영양성분의 유출을 최소화하기 위해서 SCGs와 같이 N, P 함량이 적은 저영양 재료(Low-nutrient materials)를 포함한 점, 식생의 상호작용을 최대화 할 수 있는 토양층 깊이(300 mm)를 고려한 점, 적절한 표면층 피복을 감안한 점, 전체 유역면적 대비 상대적으로 작은 GI 시설물 면적(11.7%)과 같은 잠재적인 최적 유역관리 전략들을 고려했기 때문이다. 유사하게, 선행연구에서는 식생 또는 모래 피복을 활용했을 경우 N, P의 74.6~86.5% 유출 저감이 가능하다고 보고한 바 있다(Logsdon and Sauer, 2016).

시나리오별로 처리 효율을 비교하였을 때, OSAs는 FWC의 함량이 증가할수록(ex: OSA05) 처리 효율이 가장 높았다. 이러한 현상은 토양층에서 배수를 담당하는 K_s 와 같은 수리학적 매개변수가 주요하였으며, FWC의 비율이 높은 실험구에서 유기성 재료의 입자크기 다변화에 따라 자연스러운 interstitial packing을 유도하기 때문으로 판단된다. 결국, OSAs의 이용과, 인공토양혼합체에서 FWC의 비율의 증가는 환경수리학적으로 K_s 의 증가, 강우유출수 저감, TP 배출부하량 완화에 기여할 수 있었다. OSAs 적용에 따른 TP 배출부하량의 저감 경향(Fig. 7)은 배출 부하량과 GI시설에 의한 처리량이 비례하는 것으로 확인되었는데, 이는 유입되는 TP 부하량이 GI시설의 처리 수용력에 적합한 결과로 판단된다.

4. Conclusion

본 연구는 자원순환을 통해 국토환경가치를 향상시키고 선형경제 및 탄소중립에 기여할 수 있는 도시 GI 조성기술의 적용효과를 분석하고자 하였다. 전반적으로 본 연구에서는 대표적인 OFMSW를 이용하여 제조된 OSAs의 이화학적 특성을 검토한 후 GI시설의 토양층에 적용하는 전략을 수립하였으며 그 결과 강우유출수와 비점오염물질의 저감과 같은 도시 물순환 개선 효과 가능성을 확인하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결론은 아래와 같다.

- 1) 중효열성 생물반응기를 통해 제조된 OSAs는 물리화학적으로 영양성분이 풍부하고 안정된 인공토양혼합체로써 GI 시설의 토양층에 활용될 수 있는 잠재력을 나타내었다. 특히 OSAs는 균형있는 영양성분 비율(e.g., NPK=4.2:1.3:1)과 생물학적 안정성(e.g., C/N=11.4~22.0)을 보유하여 GI 시설의 표면층에 식생성장의 지원이 가능한 중간 지지층의 역할이 가능할 것으로 판단되었다.
- 2) GI시설인 식생체류지와 투수성 포장의 토양층에 적용된 OSAs는 강우유출수와 TP 배출부하량 저감에 효과적이었다. OSAs를 적용함에 따라 강우유출수는 약 11~17%, TP 배출부하량은 약 16~18%의 저감효과가 발생하였다. 이때 강우유출수는 강우량 변화에 민감하였으며, TP 배출부하량은 강우량을 포함하여 노면에 축적되는 양에 복합적인 영향을 받는 것으로 확인되었다.
- 3) OSAs의 구성성분인 FWC의 비율 증가는 강우유출수, TP 배출부하량의 저감에 긍정적으로 기여하였다. 높은 비율의 FWC는 완전히 포화된 토양층에서 상대적으로 개선된 물리적 특성, 공극구조, 유기탄소 함량 등으로 인해 우수한 강우유출수의 보유 및 투수 잠재력을 암시하였다. EPA SWMM LID 모듈에서 강우유출 모의 시 다공성 매질에서 물질이동수준을 나타내는 K_s 가 중요하므로, 유기성 재료의 입자크기 다변화에 따라 FWC의 구성비율을 높이는 것이 강우유출수, TP 배출부하량을 동시에 저감측면에서 효과적일 것으로 판단된다. 다만 복합체 특성에 따른 부가적인 환경적 기능, 부지특성, 유역최적관리 전략 등을 종합적으로 고려될 필요가 있을 것이다.

본 연구에서는 상용화된 EPA SWMM LID 모듈의 물질이동에 근거한 강우유출수의 수리학적 결과를 나타내었다. 하지만 OSAs가 가지는 화학적 기작, 생물학적 반응을 고려하지 못한 점은 한계점으로 여겨진다. 따라서 보다 정확한 분석을 위해서는 모델 운영의 제한사항을 고려한 추가연구가 필요하다고 판단된다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서는 재생자원으로써 OFMSW를 활용하고 GI시설을 적용하여 그 효과를 분석하는 선순환 전략을 수립하고 구체화하였으며, 필요한 매개변수를 단순히 문헌값이 아닌 실측치를 통해 확보한 값을 활용한 점, 재생자원의 활용범위 확장을 고려한 점 등은 향후 다양한 인공토양 적용유무에 따른 GI시설의 성

능평가 등과 같은 관련 연구의 기반이 될 것으로 판단 된다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비 지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20240125-001, 탄소중립을 위한 차세대 환경기술 연구).

References

- Adhikari, B. K., Barrington, S., Martinez, J., and King, S. (2009). Effectiveness of three bulking agents for food waste composting, *Waste Management*, 29(1), 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.04.001>
- Ahn, H. K., Richard, T. L., and Glanville, T. D. (2008). Laboratory determination of compost physical parameters for modeling of airflow characteristics, *Waste Management*, 28(3), 660-670. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.04.008>
- Al-Ghouti, M. A., Khan, M., Nasser, M. S., Al-Saad, K., and Heng, O. E. (2021). Recent advances and applications of municipal solid wastes bottom and fly ashes: Insights into sustainable management and conservation of resources, *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101267. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101267>
- Bora, K. (2022). Spatial patterns of fertilizer use and imbalances: Evidence from rice cultivation in India, *Environmental Challenges*, 7, 100452. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100452>
- Chen, Y., Day, S. D., Wick, A. F., and McGuire, K. J. (2014). Influence of urban land development and subsequent soil rehabilitation on soil aggregates, carbon, and hydraulic conductivity, *Science of The Total Environment*, 329-336. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.099>
- Dantoliya, S., Joshi, C., Mohapatra, Shah, Bhargava, P., Bhanushali, S., Pandit, R., Joshi, C., and Joshi, M. (2022). Creating wealth from waste: An approach for converting organic waste in to value-added products using microbial consortia, *Environmental Technology & Innovation*, 25, 102092. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102092>
- Deeb, M., Groffman, P. M., Blouin, M., Egender, S. P., Vergnes, A., Vasenev, V., Cao, D. L., Walsh, D., Morin, T., and Séré, G. (2020). Using constructed soils for green infrastructure-challenges and limitations, *Soil*, 6, 413-434. <https://doi.org/10.5194/soil-6-413-2020>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., and Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made, *Science Advances*, 3(7), e1700872. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700872>
- Jacobs, C., Soulliere, K., Sawyer-Beaulieu, S., Sabzwari, A., and Tam, E. (2022). Challenges to the circular economy: Recovering wastes from simple versus complex products, *Sustainability*, 14, 2576. <https://doi.org/10.3390/su14052576>
- Kim, J., Choi, S., and Joo, J. (2017). EPA SWMM-LID modeling for low impact development, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 17(2), 415-424. [Korean Literature] <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.2.415>
- Leimgruber, J., Krebs, G., Camhy, D., and Muschalla, D. (2018). Sensitivity of model-based water balance to low impact development parameters, *Water*, 10, 1838. <https://doi.org/10.3390/w10121838>
- Logsdon, S. D. and Sauer, P. A. (2016). Nutrient leaching when compost is part of plant growth media, *Compost Science & Utilization*, 24, 238-245. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2016.1147398>
- Nam, G., Kim, M. S., and Ahn, J. W. (2017). Analyses for current research status for the coffee by-product and for status of coffee wastes in Seoul, *Journal of Energy Engineering*, 26(4), 14-22. [Korean Literature] <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2017.26.4.014>
- Nourbakhsh, F., Afyuni, M., and Abbaspour, K. C. (2005). Research note: Estimation of field capacity and wilting Point from basic soil physical and chemical properties, *Arid Land Research and Management*, 1(1), 81-85. <https://doi.org/10.1080/15324980590887353>
- Paramisparam, P., Ahmed, O. H., Omar, L., Ch'ng, H. Y., Johan, P. D., and Hamidi, N. H. (2021). Co-application of charcoal and wood ash to improve potassium availability in tropical mineral acid soils, *Agronomy*, 11(10), 2081. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102081>
- Paritosh, K., Yadav, M., Mathur, S., Balan, V., Liao, W., Pareek, N., and Vivekanand, V. (2018). Organic fraction of municipal solid waste: overview of treatment methodologies to enhance anaerobic biodegradability, *Frontiers in Energy Research*, 6, 75. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00075>
- Park, Y., Jang, S. H., and Kim, S. (2016). Optimum installation of permeable pavement using multi-objective optimization technique, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 16(4), 313-321. [Korean Literature] <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2016.16.4.313>
- Pour, F. H. and Makkawi, Y. T. (2021). A review of post-consumption food waste management and its potentials for biofuel production, *Energy Reports*, 7, 7759-7784. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.10.119>
- Rosal, A., Chica, A. F., Arcos, M. A., and Dios, M. (2012). Use of organic acids in the composting of municipal solid waste: a pilot-scale study, *Environmental Technology*, 33, 2149-2158. <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.660653>
- Pribyl, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor, *Geoderma*, 156, 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>
- Sánchez, Ó. J., Ospina, D. A., and Montoya, S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process, *Waste Management*, 69, 136-153. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.012>
- Sarkar, A. (2022). Minimalonomics: A novel economic model to address environmental sustainability and earth's carrying capacity, *Journal of Cleaner Production*, 371, 133663. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133663>

- Savabi, M. R., Shinde, D., Konomi, K., Nkedi-Kizza, P., and Jayachandran, K. (2005). Modeling the effect of soil amendments (composts) on water balance and water quality, *Journal of Environmental Hydrology*, 13, 1-14.
- Schaffartzik, A., Mayer, A., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Loy, C., and Krausmann, F. (2014). The global metabolic transition: Regional patterns and trends of global material flows, 1950-2010, *Global Environmental Change*, 26, 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.03.013>
- Slorach, P. C., Jeswani, H. K., Cuéllar-Franca, R., and Azapagic, A. (2019). Environmental and economic implications of recovering resources from food waste in a circular economy, *Science of The Total Environment*, 693, 133516. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.322>
- Tchonkouang, R. D., Tchonkouang, H., and Miri, T. (2023). From waste to plate: Exploring the impact of food waste valorisation on achieving zero hunger, *Sustainability*, 15(13), 10571. <https://doi.org/10.3390/su151310571>
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA.). (2015). Storm water management model user's manual Version 5.1 – manual, U.S. EPA Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/R-14/413 (NTIS EPA/600/R-14/413b).
- Voběrková, S., Maxianová, A., Schlosserová, N., Adamcová, D., Vršanská, M., Richtera, L., Gagić, M., Zloch, J., and Vavřková, M. D. (2020). Food waste composting-is it really so simple as stated in scientific literature?-a case study, *The Science of the Total Environment*, 723, 138202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138202>
- Xu, Q., Jia, Z., Tang, S., and Luo, W. (2022). The effect of flow partition on storm runoff and pollutant retention through raingardens with and without subsurface drainage, *Journal of Environmental Management*, 302(Pt A), 114038. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114038>
- Zhang, L., Xu, M., Chen, H., Li, Y., and Chen, S. (2022). Globalization, green economy and environmental challenges: state of the art review for practical implications, *Frontiers in Environmental Science*, 10, 870271.