

할당부하량을 고려한 도심 지역에서의 비점오염 저감시설 비용-효율적 최적 배치

장유진* · 우철호* · 김윤지** · 전성우***†

*고려대학교 환경생태공학과 박사과정, **고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수, ***고려대학교 환경생태공학부 교수

Cost-effective optimization of BMP placement with consideration of allocated load

Jang, Yu Jin* · Woo, Cheol Ho* · Kim, Yoon Ji** and Jeon, Seong Woo***†

*Doctoral Student, Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

**Research Professor, Ojeong Resilience Institute, Korea University, Seoul, Korea

***Professor, Dept. of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Urban development has led to an increased proportion of impervious surfaces, leading to the accumulation and runoff of nonpoint source pollutants that degrade water quality. Effective mitigation requires the strategic allocation of best management practices (BMPs) considering both pollutant reduction and cost. This study optimized the spatial allocation of three BMP types—bioretention cells, permeable pavement, and green roofs—in a 43,893 m² urban catchment in Seoul using the Storm Water Management Model (SWMM) and the multi-objective NSGA-II algorithm. Total phosphorus (TP) load targets were calculated for each subcatchment using local water quality standards, with differential safety factors (15–40%) applied to account for uncertainty. Representative scenarios were selected from Pareto-optimal solutions based on TP loads for each safety factor with minimal installation costs. Results showed 136 Pareto-optimal solutions from 4,102 scenarios, highlighting a trade-off between installation costs and TP reduction. Permeable pavement dominated the installation areas due to its low cost and wide applicability, while bioretention cells were limited by spatial and cost constraints. Green roofs were concentrated near downstream areas, consistent with prior findings on placement efficiency. The study presents a systematic, cost-efficient framework for BMP allocation that incorporates site-specific hydrological and topographical conditions and local water quality standards. This approach can help guide urban water management by identifying priority installation sites and supporting phased implementation under varying budget and water quality objectives.

Key words : BMP, SWMM, NSGA-II, Safety Factor, Allocated Load

1. 서론

최근 도시 개발로 인해 불투수면이 지속적으로 증가하고 있다. 불투수면에 누적되는 비점오염물질은 강우 시 인근 수계로 유출되어 수질 악화를 유발한다(Arnold and Gibbons, 1996). 이러한 수질 악화는 종 다양성 감소 등 하천 생태계에 부정적인 영향을 미칠 뿐만 아니라, 수변 공간을 통해 제공되는 심리적 안정과 휴식 기능을 저해함

으로써 인간의 삶의 질에도 영향을 끼친다(McDougall et al., 2022).

한편, 최근 기후변화로 인해 강우 패턴의 변동성이 증대되고 있다(Zhang et al., 2024). 이러한 강우 사상의 변화는 도시 표면에 축적된 비점오염물질의 동원과 유출을 반복적으로 야기하여, 수계로의 누적 오염 부하를 증가시킨다. 이로 인해 도시 유역에서는 수질 악화가 단기적 사건이 아닌 장기적·만성적 문제로 전환되는 경향이 나타난

†Corresponding author : cepps.korea@korea.ac.kr (Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Korea. Tel. +82-2-3290-3043)

ORCID 장유진 0009-0007-6072-4421
우철호 0009-0009-8327-0703

김윤지 0000-0003-1490-0782
전성우 0000-0001-5928-8510

다. 특히 불투수면 비율이 높은 도시 지역에서는 이러한 반복적 유출에 따른 누적 비점오염 부하 관리가 중요한 수질 관리 과제로 부각되고 있다.

국내에서는 수질오염총량관리제에 따라 유역 단위로 목표 수질을 설정하고, 이를 달성하기 위해 점오염원과 비점오염원을 포함한 총 오염 부하를 관리하고 있다. 이 제도 하에서 각 단위 유역에는 목표 수질을 달성하기 위해 허용 가능한 오염부하량인 ‘할당부하량’이 설정되며, 이는 해당 유역에서 관리되어야 할 정책적 기준으로 기능한다. 특히 도시 지역에서는 비점오염원의 기여도가 점차 증가하고 있어, 할당부하량을 준수하기 위한 수단으로 비점오염저감시설의 계획적 도입이 요구되고 있다.

이에 따라 식생체류지, 투수성 포장, 옥상녹화와 같은 비점오염저감시설이 다양한 도시 유역에 적용되어 왔다. 비점오염저감시설은 강우 유출 저감과 오염물질 제거에 효과적인 수단으로 평가되지만, 설치 및 유지관리 비용이 적지 않아 시설의 설계 및 배치 과정에서 비용을 함께 고려하는 것이 필수적이다.

이러한 비용 제약을 고려하여 비용과 저감 효율을 동시에 고려한 최적화 연구가 다수 수행되어 왔다. 해외 연구로, Harrell and Ranjithan (2003)은 유전 알고리즘을 활용하여 비용 및 오염물질 제거율을 고려한 저류지 설계 및 토지이용 배치를 도출하였다. Alamdari and Sample (2019)은 SWMM과 NSGA-II 알고리즘을 결합하여 비용을 최소화하면서 유출량 및 오염물질 제거율을 극대화할 수 있는 우수 관리 대책 조합을 제시하고, 일 최대 총부하량(Total Maximum Daily Load, TMDL)을 만족하는 3가지 최적안을 제시하였다. 그러나 위 연구들은 해외 사례를 기반으로 수행되어 국내 수질 관리 기준을 반영하기 어렵다는 점에서 한계가 존재한다. Cui et al. (2025)은 NSGA-II 알고리즘을 통해 시설의 비용과 이에 따른 유출량 및 오염물질 제거율을 최적화한 뒤 TOPSIS 기법을 통해 가중치를 부여하여 최종 대안을 제시하였으나, 가중치 부여 과정에서 연구자의 주관적 판단이 개입될 가능성이 존재한다.

국내 연구로는 Lee et al. (2013)이 비용 대비 오염물질 저감 효율을 기준으로 저영향개발 시설의 규모 및 개소수를 산정하였으나, 최적인 도출 시 국내 수질 관리 기준을 반영하지 않고 저감 목표를 임의로 설정하였다는 점에서 한계가 있다. 또한, Park et al. (2016)은 투수성 포장 설치에 따른 비용과 총인(TP) 부하량의 최적화를 수행하였으나, 비점오염저감시설을 투수성 포장 단일 시설로 적용하여 다양한 비점오염저감시설의 조합 효과를 고려하지 못

하였다. 더불어 최적 설치 면적을 단순 효율의 변곡점을 기준으로 판단함으로써, 실제 관리 목표를 초과 달성하여 불필요한 예산 투입이 발생할 가능성이 있다.

이와 같이 기존 국내 연구는 (1) 정책적 관리 기준을 명시적으로 반영하지 못하였고, (2) 복수 시설의 조합 효과를 충분히 고려하지 않았으며, (3) 관리 목표 충족 여부보다는 효율성 중심의 기술적 최적화에 초점을 두었다는 한계를 가진다. 그 결과, 도출된 최적이 실제 수질오염총량관리제 하에서 요구되는 행정적 의사결정 기준과 직접적으로 연결되기 어려운 문제가 발생한다.

기후변화로 인한 강우 특성 변화에 대응하기 위해서는, 단순한 저감 효율 비교를 넘어 국내 수질 관리 기준을 고려한 비점오염 관리 전략이 필요하다. 특히 수질오염총량관리제에 따라 설정된 할당부하량은 유역 단위에서 목표 수질을 관리하기 위한 핵심 기준으로 활용되므로, 이를 기반으로 비점오염저감시설의 배치와 규모를 합리적으로 결정하는 접근이 요구된다.

따라서 기존 연구의 한계를 보완하기 위해서는, 첫째, 할당부하량을 의사 결정의 평가 기준으로 통합하고, 둘째, 다양한 비점오염저감시설의 조합 효과를 동시에 고려하며, 셋째, 관리 기준을 충족하는 범위 내에서 비용을 최소화하는 방향으로 대안을 선정할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 국내 수질오염총량관리제에 따라 단위 유역에 설정된 할당부하량을 고려하여 비점오염저감시설 배치의 비용 효율 최적화를 수행하였다. 본 연구에서는 식생체류지, 투수성 포장, 옥상녹화의 총 세 가지 비점오염저감시설을 대상으로 도시유출모형인 SWMM을 활용한 수질 모의를 수행하고, TP 부하량 저감과 설치 비용 최소화를 동시에 고려하기 위해 다목적 최적화 알고리즘인 NSGA-II를 적용하였다. 또한 도출된 파레토 최적해 집합에 할당부하량을 새로운 평가 기준으로 적용하고, 차등 안전율을 반영하여 관리 기준을 충족하는 범위 내에서 최적의 대표안을 선정하는 의사 결정 프레임워크를 구축하였다.

이는 기존 연구에서 임의로 설정되었던 저감 목표를 정책 기준으로 대체함으로써, 정책 목표와 최적화 모형 간의 정합성을 확보하였다는 점에서 차별성을 가진다. 특히, 할당부하량을 단순한 입력조건이 아닌 파레토 최적해 집합 내에서 대안을 선별하기 위한 의사결정 기준으로 활용함으로써, 최적화 결과와 실제 정책 의사결정 간의 연결성을 강화하였다. 나아가 본 연구는 할당부하량이라는 정책적 관리 기준을 최적화 모형의 평가 체계에 통합함으로

써, 기후변화에 따른 강우 특성 변화에 대응 가능한 도시 비점오염 관리 전략을 제시한다는 점에서 의의를 가진다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 연구 대상지

연구 대상지는 서울특별시 서초구 양재1동의 일부 지역으로 선정하였다(Fig. 1). 선정한 대상지의 총 면적은 43893.42m²이며, 토지피복 대분류상 시가화/건조지역이 96.76%를 차지하는 도심지역이다. 그 중 도로가 56.96%로 가장 많은 비율을 차지하며, 공동주거시설이 29.01%, 상업·업무시설이 6.90%, 단독주거시설이 4.99%, 기타 공공시설이 2.14%로 건물 비중은 총 41.65%에 달한다. 또한 대상지 중 3.05%가 초지이며, 모두 기타초지로 분류된다. 해당 지역은 상업 및 주거 기능이 밀집된 도심 지역으로, 비점오염원이 집중적으로 발생할 가능성이 높으며, 하수 관망 체계상 타 유역으로부터의 유입 영향이 비교적 적어 독립적인 유출 해석이 가능하다는 장점이 있다. 또

한, 건물, 도로, 초지 등 토지이용 유형 간의 구획이 명확하여 다양한 비점오염저감시설을 적용하고 효과를 확인하기에 적합하다고 판단하였다. 따라서 주변 유입의 영향이 적고, 도심지의 토지이용 특성을 나타내는 해당 지역을 본 연구의 대상지로 설정하였다.

2.2. 연구 방법

2.2.1. SWMM 모델 구축

SWMM (Storm Water Management Model)은 EPA에서 개발한 도시우수유출모형으로, 유출 뿐만 아니라 수질 모의 및 저감시설 투입에 따른 변화도 모의가 가능하여 널리 활용되고 있는 모델이다. 본 연구에서는 비점오염저감시설 배치에 따른 비점오염물질 부하량을 모의하기 위해 SWMM을 활용하였다. SWMM을 구동하기 위해서는 소유역(Subcatchment)과 관거(Conduit), 절점(Junction)에 대한 매개변수를 입력해주어야 한다. 소유역은 비점오염저감시설의 적용이 용이하도록 구획하였다. 소유역 관련 매개변수는 세분류 토지피복지도와 10 m × 10 m DEM을 기

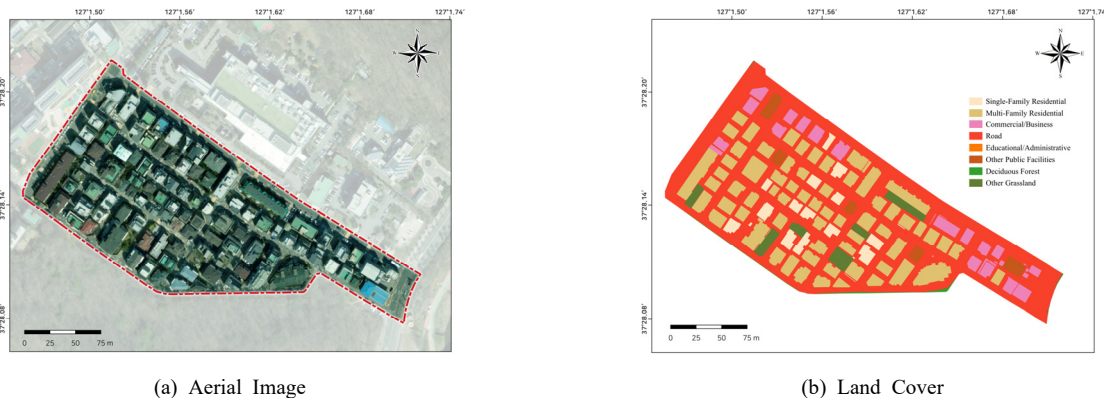


Fig. 1. Study area

Table 1. Subcatchment parameters

Subcatchment	Area (m ²)	Imperv (%)	Slope (%)	Width (m)
1S	145.16	100.00	0.00	6.19
2S	347.07	100.00	0.00	24.34
3S	248.74	100.00	0.00	14.73
4S	622.32	100.00	0.00	32.93
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
147S	186.31	100.00	4.57	16.92
148S	246.22	100.00	16.69	18.05
149S	307.43	100.00	6.47	17.95

반으로 QGIS 3.28을 통해 도출하였으며, 이때 소유역의 폭(Width)은 면적 대비 유출 경로 길이를 고려하여 산정하였다(Table 1). 투수지역에 대해서는 Horton 침투 공식을 적용하였으며, 불투수지역 및 투수지역의 조도계수는 각각 0.02, 0.3으로 설정하였다. 관거 및 절점에 대한 매개 변수는 서울시청으로부터 제공받은 서초구 하수관망도 자료의 하수관거 및 맨홀 자료에 기반하여 입력하였으며, 관거의 조도계수는 0.017로 일괄 적용하였다. 최종적으로 149개의 소유역, 45개의 절점, 44개의 관거를 구축하였으며, 유출구(Outfall)는 하수가 양재천으로 방류되는 지점의 위치를 고려하여 선정하였다.

제 3차 비점오염관리종합대책(Ministry of Environment, 2020b)에서 TP를 5% 감축하는 것을 주요 목표로 설정하고 있는 점을 고려하여, 모의 대상 비점오염물질을 TP로 설정하였다. SWMM에서 수질 모의를 수행하기 위해서는 축적(Buildup)과 유실(Washoff) 관련 수식을 선택하고, 관련 매개변수를 입력해야 한다. 축적이란 건기 시 지표면에 비점오염물질이 쌓이는 정도를 의미하며, 이를 모의하기 위해 POWER Linear 공식을 적용하였다. Yu et al. (2020)에 따르면, 토지계 비점오염원 부하량 산정 시 지척도를 기반으로 하는 기존 방법에 비해 세분류 토지피복지

도를 활용하는 것이 산정의 정확성을 높일 수 있음을 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 국립환경과학원에서 제공하는 토지계 지목별 연평균 발생부하원단위를 세분류 토지피복지도의 중분류 항목과 매칭시켜 축적 관련 변수를 산정하였다(National Institute of Environmental Research, 2022). 유실은 누적된 오염물질이 쓸려가는 정도를 의미하며, 본 연구에서는 EMC (Event Mean Concentration) 공식을 적용하였다. 관련 변수는 Kwon et al. (2016)의 연구를 참고하여 입력하였다(Table 2).

강우 사상 선정을 위해 강우시 하수도시스템 모니터링 및 모델링 가이드라인(Ministry of Environment, 2018)을 참고하였다. 해당 가이드라인은 모의 시 과거 30년간의 강우 자료를 검토하여 평균 강우량에 가장 근접하는 연도를 선정하도록 권고하고 있다. 자료의 한계로 인하여 AWS 서초 지점의 1997년부터 2024년까지의 연강우량 데이터를 검토한 결과 2006년의 연강우량이 연평균 강우량과 가장 근접한 것으로 나타났다. 따라서 AWS 서초 지점에서 제공하는 2006년 1월 1일 ~ 2006년 12월 31일까지의 시간당 강수량 자료를 모델에 입력하였다.

모의한 비점오염저감시설은 총 3가지로, 식생체류지, 옥상녹화, 투수성 포장이다. 소유역 149개 중 84개를 비점

Table 2. Buildup and washoff parameters

Landcover	Area (m ²)	Buildup Rate Constant (kg/ha/day)	Event Mean Concentration (mg/L)
Residential area	14,437.98	0.00600	0.20
Industrial area	2,930.85	0.00600	0.50
Transportation area	24,189.29	0.00391	0.20
Public facilities area	911.01	0.00295	1.30
Artificial grassland	1,336.63	0.00447	0.30

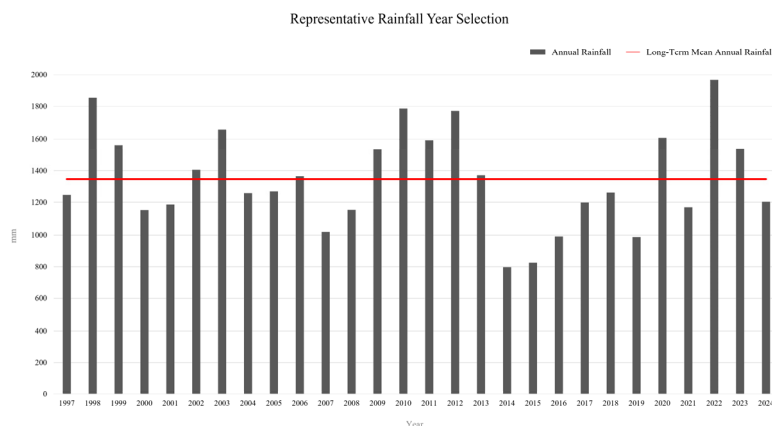


Fig. 2. Rainfall event selection

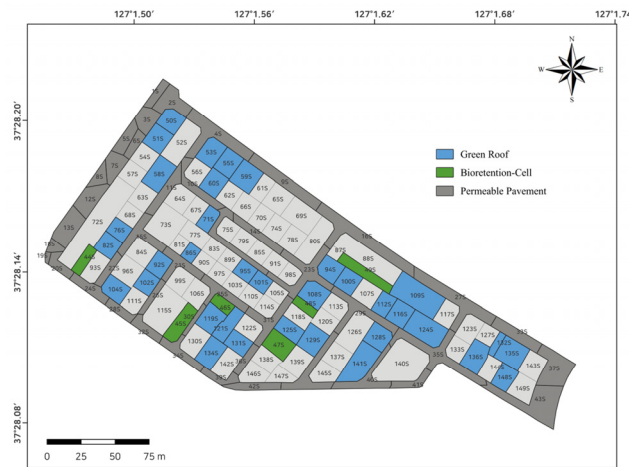


Fig. 3. BMP type

오염저감시설 조성 대상지로 선정하였으며, 이 중 식생체류지 대상지는 6개, 옥상녹화 대상지는 35개, 투수성 포장 대상지는 43개이다. 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼(Ministry of Environment, 2020a)에 따르면 식생체류지는 식물이 식재된 토양층과 모래층 및 자갈층 등으로 구성되어 강우유출수를 침투 및 여과시켜 비점오염 물질을 저감시키는 시설로, 기존 녹지를 설치 부지로써 활용할 수 있다. 따라서 토지피복 세분류 상 기타초지 지역을 조성 대상지로 설정하였다. 옥상녹화는 건물 옥상에 토양과 식물을 조성하여 강우유출수를 일시적으로 저장하고 비점오염물질의 유출을 저감시키는 시설로, 국토교통부가 제공하는 용도별 건물 정보 자료를 활용하여 철근 콘크리트 구조 및 평지붕 조건을 만족하는 건물들을 조성 대상지로 설정하였다. 마지막으로 투수성 포장은 포장체를 통해 강우유출수 내 오염물질을 침투시켜 제거하는 시설로, 토지피복 세분류 상 도로를 조성 대상지로 설정하였다. Fig. 3은 세 가지 비점오염저감시설의 조성 대상지를 색으로 구분한 그림이다. 회색은 투수성 포장(Permeable Pavement, PP)을, 연두색은 식생체류지(Bioretention Cell, BC)를, 하늘색은 옥상녹화(Green Roof, GR)를 의미한다.

2.2.2. NSGA-II를 활용한 다목적 최적화

본 연구에서는 TP 부하량 저감과 비점오염저감시설 설치 비용 절감이라는 두 가지 상충하는 목적을 동시에 최적화하기 위해서 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II)를 적용하였다. NSGA-II는 유전 알

고리즘 기반의 다목적 최적화 알고리즘으로, 상충하는 두 개 이상의 목적을 동시에 고려하여 파레토 최적해 집합을 탐색하는 것을 목적으로 한다(Deb et al., 2002). 선택, 교차, 변이를 통해 새로운 세대의 해 집단을 생성하며, 비지배 정렬(non-dominated sorting)을 통해 우수한 해를 선별한다. 해당 과정의 반복을 통해 파레토 최적해를 도출한다. 모델 구동을 위해 Python 3.13 및 DEAP 패키지를 활용하였으며, 두 가지 목적 함수는 각각 SWMM 모형을 통해 산정되는 최종 유출구의 TP 부하량 최소화과 비점오염저감시설 설치 비용 최소화로 정의하였다. 설치 비용은 Rahman et al. (2025)의 연구를 참고하여 단위 면적 당 비용을 기준으로 산정하였다(Table 3). 결정 변수는 세 가지 비점오염저감시설 유형이 각 대상 소유역에 적용되는지에 대한 여부를 나타내는 이진 변수로 설정하여 적용하는 경우를 1, 적용하지 않는 경우를 0으로 설정하였다. 초기 개체군 시나리오는 다양한 해를 탐색할 수 있도록 84개 소유역 중 절반인 42개는 적용, 나머지 42개는 미적용으로 설정한 후 무작위로 생성하도록 하였다. 개체군 크기는 100, 세대 수는 50으로 설정하였으며 교차 확률 0.7, 돌연변이 확률은 0.2로 설정하여 구동하였다. 각각의 시나리오에는 무작위로 생성된 고유 식별자를 부여하였다.

Table 3. Unit costs by BMPs

BMPs	Unit Costs (₩/m ²)
Bioretention Cell	31,983
Green Roof	42,643
Permeable Pavement	21,322

2.2.3. TP 할당부하량 산정

할당부하량이란 허용배출부하량에 배경부하량 및 안전율을 고려한 값을 말하며, 이때 허용배출부하량은 수질오염총량관리제 목표 달성을 위해 단위 유역에 할당된 오염물질의 최대 허용 배출량을 의미한다. 허용배출부하량은 수질오염총량관리기술지침(National Institute of Environmental Research, 2022)에서 제시된 시군구별 TP 비점오염원 허용배출부하량(kg/day) 자료에 토지계 비점오염원 비율 및 면적비를 곱하여 산정하였다. 배경부하량은 임야에 의한 부하량으로, 대상지 내 임야가 존재하지 않아 식에서 제외하였다. 안전율이란 계산 과정의 불확실성을 고려한 여유분을 의미하며, 통상적으로 10%를 적용한다. 그러나 여러 선행 연구에서 지역 특성 및 수질 기준 초과 위험을 고려하지 않고 일괄적으로 10%를 적용하는 것이 부적합하다고 지적된 바 있다(Chin, 2009; Langseth and Brown, 2011). 특히, 본 연구의 대상지와 같은 고밀도시화가 지역은 강우 시 유출량의 변동성이 크고, 오염물질 유출이 집중되는 특성이 있어 보다 보수적인 수질 관리 기준 검토가 요구된다. 이에 본 연구에서는 기후변화로 인한 강우 패턴의 변동성 증가와 수질 모델링의 매개변수 불확실성을 폭넓게 포괄하기 위해 안전율을 15%에서 최대 40%까지 설정하여 할당부하량을 산정하였다(Table 4). 이는 특정 안전율을 실무적 설계 기준으로 제시하기 위함이 아니라, 고도의 안전성을 요구하는 시나리

Table 4. Allocated load calculation by safety factor

Safety Factor	Allocated TP Load (kg)
15%	3.550
20%	3.341
25%	3.132
30%	2.924
35%	2.715
40%	2.506

오를 포함하여 안전율 변화에 따른 비점오염저감시설의 배치 양상과 그에 따른 경제적 비용의 증감 폭을 분석하기 위함이다. 즉, 예산 규모와 목표 수질에 따른 의사결정을 지원하기 위한 비교 시나리오로서 해당 범위를 설정하였다. 각 할당부하량별 대표 시나리오는 NSGA-II를 통해 도출된 파레토 최적해 집합 중 안전율별 TP 할당부하량을 만족하면서 설치 비용이 최소인 시나리오로 선정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. NSGA-II를 활용한 다목적 최적화 결과

설정된 개체군 및 세대 수에 따른 NSGA-II 구동 후 중복되는 시나리오를 제외하여 총 4,102개의 시나리오가 생성되었으며, 이 중 136개의 파레토 최적해가 도출되었다. Fig. 4는 각 시나리오에 따른 비점오염저감시설 설치 비용과 TP 부하량의 관계를 나타낸 산점도이다. 비점오

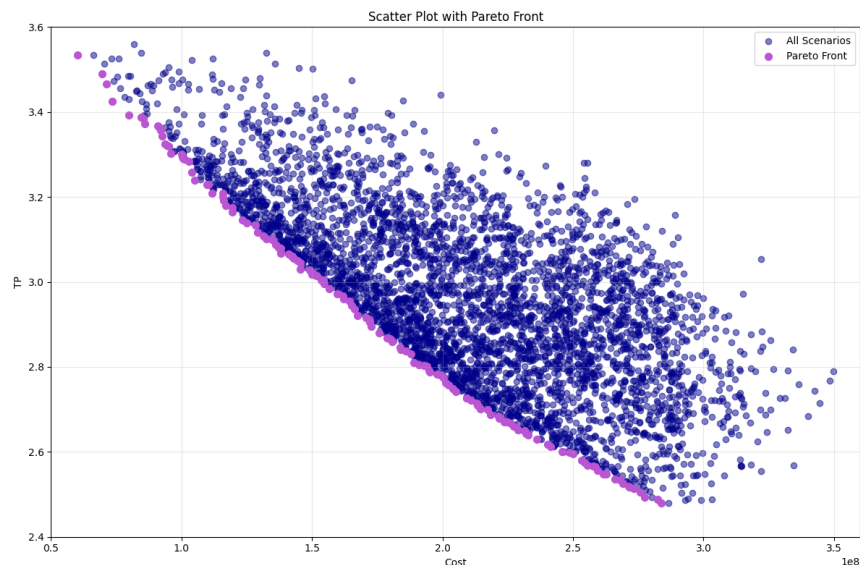


Fig. 4. Scatter plot with Pareto front

Table 5. Representative scenarios based on the TP allocated load

Representative Scenarios	TP (kg)	TP Reduction Rate (%)	Cost (₩)
Baseline Scenario	3.790	-	-
Safety Factor 15%	3.534	6.3	60,287,555
Safety Factor 20%	3.324	11.8	93,720,514
Safety Factor 25%	3.303	17.4	95,842,053
Safety Factor 30%	2.921	22.8	167,312,872
Safety Factor 35%	2.714	28.4	213,219,138
Safety Factor 40%	2.493	33.9	277,386,439

염저감시설 설치 비용이 증가할수록 TP 부하량이 감소하는 상충관계(Trade-off)를 확인할 수 있다. 파레토 최적해 집합은 그래프 가장 안쪽에 조성되며, 보라색 점으로 구분하여 표시하였다. 이 중 비점오염저감시설 설치 비용이 최소이고 TP 부하량이 최대인 시나리오의 설치 비용은 60,287,555원, TP 부하량은 3.5340 kg로 도출되었다. 반면 비점오염저감시설 설치 비용이 최대이고 TP 부하량이 최소인 시나리오의 설치 비용은 283,825,549원, TP 부하량은 2.479 kg로 도출되었다. 도출된 파레토 최적해 집합은 비점오염저감시설 설치 비용과 수질 개선 효과 간의 상충관계를 정량적으로 제시함으로써, 동일한 수질 개선 수준에서도 비용 효율이 높은 비점오염저감시설의 조합 및 배치를 식별할 수 있는 정책적 의사결정의 근거를 제공한다.

3.2. TP 할당부하량을 고려한 비점오염저감시설 최적 배치

비점오염저감시설을 적용하지 않은 시나리오(Baseline Scenario)의 TP 부하량은 3.790kg으로 산정되었으며, 이를 기준으로 분석한 결과 각 안전율별 TP 저감율은 6.9%에서 33.9%의 분포를 보였다. 본 연구에서는 각 안전율별 TP 할당부하량에 따른 대표 시나리오를 도출하였으며 (Table 5), 각 시나리오에서 비점오염저감시설의 공간적 배치는 Fig. 5와 같다. 옥상녹화는 타 소유역에 비해 유출구에 인접한 소유역에 우선적으로 조성되는 양상이 확인되었으며, 안전율이 상향됨에 따라 유출구 주위로 점차 확대되는 경향을 보였다. 이는 저영향개발 시설의 설치 위치에 따라 성능이 달라지며, 하류 설치가 상류 설치보다 오염물질 저감에 더 효과적이라고 제시한 여러 선행연구의 결론과도 일치한다(Fan et al., 2022; Lee et al., 2022). 또한, 투수성 포장의 경우 안전율이 상향될수록 직전 안전율에서 조성된 지역에 인접한 지역으로 연결되며

확장되는 경향을 확인하였다. 이는 인접한 소유역들이 대체로 유사한 지형적 조건과 토지이용 특성을 공유하고 있기 때문으로 해석된다.

본 연구는 할당부하량을 기준으로 비점오염저감시설의 비용 효율 최적의 공간적 배치를 도출함으로써, 대상지의 지형 및 유출 특성에 따른 효율적인 배치 전략을 마련할 수 있음을 시사한다. 이러한 방법은 향후 다양한 수질 목표나 비용 조건을 적용하여 도시 규모 내 비점오염저감시설의 우선 설치 지역을 선정하고 이를 단계적으로 확대하는 배치 전략을 수립하는 데에 활용될 수 있다.

대표 시나리오별 각 비점오염저감시설의 설치 면적 및 설치율은 Table 6과 같으며, 설치율은 각 비점오염저감시설의 설치 가능 면적 대비 설치 면적으로 산정하였다. 모든 대표 시나리오에서 비점오염저감시설 중 투수성 포장의 설치 면적이 가장 높게 나타났으며, 설치율 또한 비용 최소 시나리오를 제외한 모든 시나리오에서 투수성 포장의 가장 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 투수성 포장의 적용 가능 면적이 식생체류지의 약 9.5배, 옥상녹화의 약 2.7배로 비교적 넓은 동시에, 타 시설에 비해 단가가 저렴하기 때문으로 해석된다. 반면 식생체류지는 수질 개선에 효과적이라는 다수의 선행 연구 결과에도 불구하고 (Hunt et al., 2008; Nazarpour et al., 2023), 일부 시나리오에서 채택되지 않았다. 이는 본 연구의 대상지가 고밀도 도심 지역에 위치하여 식생체류지의 설치 가능 면적 자체가 제한된 결과로 판단된다. 또한 위의 결과는 도심지 내 도로 면적이 넓어 투수성 포장의 적용 가능성이 높고 단가가 저렴하여 비용 효율성이 우수한 반면, 식생체류지는 건축 규제와 비용 제약으로 인해 부지 확보가 어렵다는 Zeng et al. (2020)의 연구 결과와도 부합한다. 이는 현재의 도시 구조가 생태적 해법 기반의 비점오염저감시설을 수용하는 데 있어 구조적 한계가 존재함을 보여준다. 시설 부지의 사전적 고려 없이는, 수질 개선에 효과적인 시설임

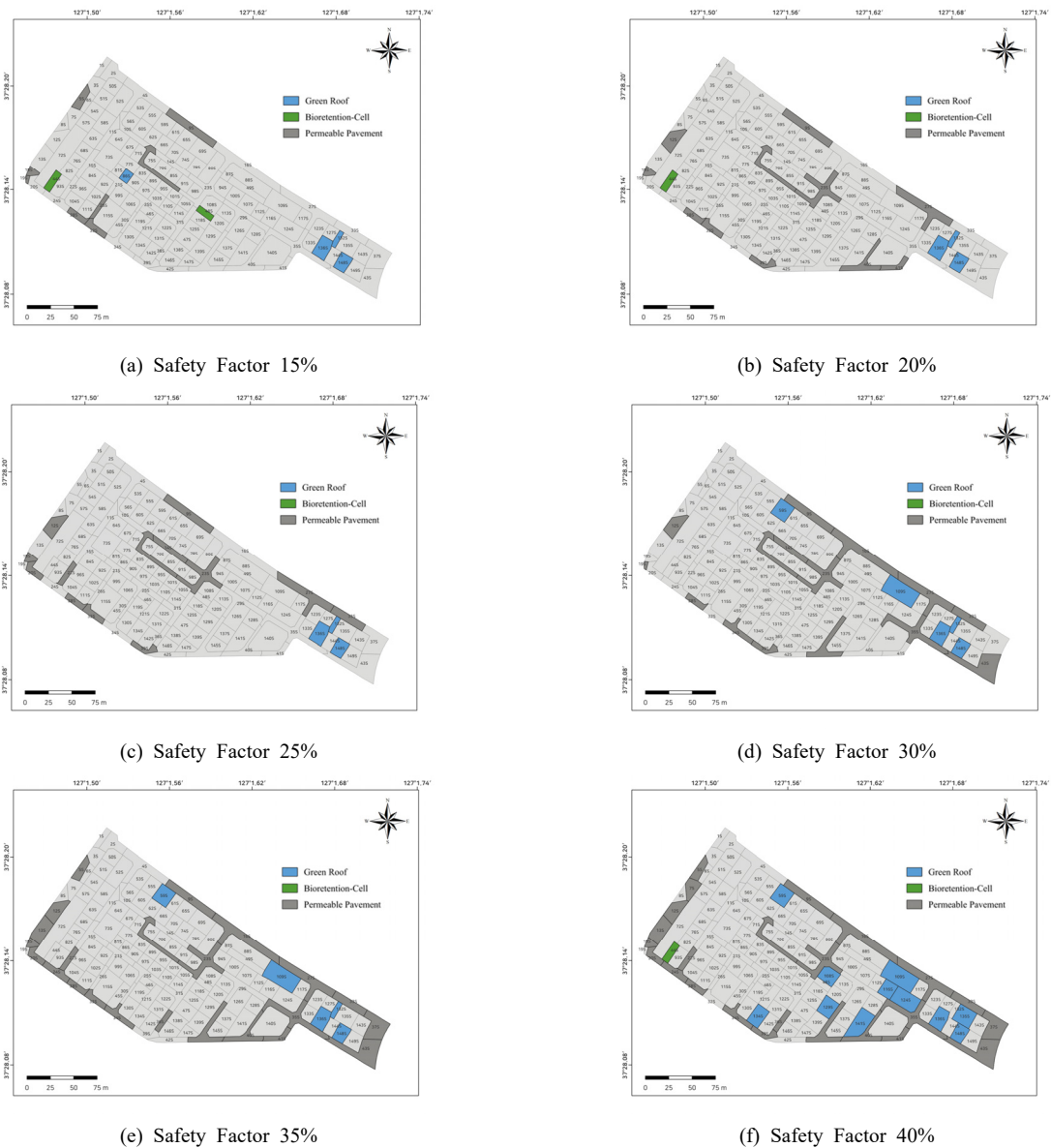


Fig. 5. Representative scenarios by allocated load

Table 6. BMP area of scenarios

Representative Scenarios	PP (m ²)	PP (%)	BC (m ²)	BC (%)	GR (m ²)	GR (%)
Safety Factor 15%	1,572	11.8	303	21.8	400.5	8.1
Safety Factor 20%	3,458	26.1	175	12.6	337.5	6.8
Safety Factor 25%	3,820	28.8	0	0.0	337.5	6.8
Safety Factor 30%	6,122	46.1	0	0.0	862.5	17.4
Safety Factor 35%	8,275	62.3	0	0.0	862.5	17.4
Safety Factor 40%	8,507	64.1	175	12.6	2120	42.8
Available Area	13,274	100	1390	100	4924.5	100

에도 실제 도시 구조 내에서 적용이 제한될 가능성이 높다. 따라서, 본 연구 결과는 향후 도시 개발 과정의 계획 단계에서 비점오염저감시설 설치 가능한 부지를 선제적으로 확보하고, 토지이용계획 내에 비점오염저감시설을 구조적으로 통합할 필요성을 시사한다. 나아가 차등 안전율을 적용하여 산정한 할당부하량과 이에 따른 시설 조합 및 필요 면적을 제시함으로써, 개발계획 수립 및 인허가 협의 과정에서 목표 저감부하량 충족 여부를 판단하는 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 차등 안전율을 적용하여 산정한 할당부하량을 기준으로, SWMM과 NSGA-II를 연계하여 비점오염저감시설의 비용-효율 최적 배치를 도출하였다. 총 136개의 파레토 최적해 중 6개의 시나리오가 대표 시나리오로 선정되었으며, 비용 최소 시나리오를 제외한 모든 대표 시나리오에서 투수성 포장의 설치율이 높게 나타났다. 반면 식생체류지는 일부 대표 시나리오에서 포함되지 않은 결과를 보였는데, 이는 시설의 단가 차이 뿐만 아니라 도로 기반의 투수성 포장에 비해 식생체류지의 부지 확보가 상대적으로 어렵기 때문으로 판단된다. 이러한 결과는 도시계획 단계에서 비점오염저감시설 설치 가능 부지를 사전에 확보하고, 토지이용계획에 구조적으로 통합해야 함을 시사한다.

또한 대표 시나리오의 공간 배치 결과는 유출이 집중되는 하류부를 중심으로 시설이 배치되는 경향을 보여 기존 연구 결과와 부합하였다. 이는 본 연구에서 제안한 최적화 방법론이 지형 및 유출 특성을 고려한 합리적인 배치 전략을 도출하는 데 활용될 수 있음을 의미한다.

이러한 결과는 기후변화로 인해 강우 특성 변화와 수질 관리 여건이 복합적으로 변화하는 상황에서, 단순한 저감 효율 비교를 넘어 관리 기준과 비용 효율성을 함께 고려한 비점오염 관리 전략의 필요성을 시사한다. 본 연구에서 제안한 평가 체계는 향후 다양한 수질 목표와 예산 조건을 반영하여 도시 내 비점오염저감시설의 우선 설치 지역을 선정하고, 단계적 설치 전략을 수립하는 데 기초 자료로 활용될 수 있다.

다만, 본 연구에서는 설치 비용과 수질 개선 효율을 중심으로 최적화를 수행하였기 때문에 각 시설에 대한 기능적·환경적 특성을 충분히 반영하지 못한 한계가 있다. 투수성 포장의 경우, 실질적인 적용을 위해 지반의 침투 성

능이나 교통 하중에 따른 내구성 등 현장 여건이 추가로 고려되어야 하며, 유지·관리 비용을 고려하여 장기적인 비용 구조를 반영할 필요가 있다. 또한, 식생체류지는 수질 개선 외에도 생태적 복원, 경관 개선 등 다양한 기능을 수행하나 본 연구에서는 해당 측면을 반영하지 못하였다.

이와 더불어 안전율을 최대 40%까지 설정한 것은 극한 상황을 가정한 분석을 위함이나, 실무 적용 측면에서는 다소 보수적인 시나리오가 포함되었을 가능성이 있다. 향후 연구에서는 시설의 사회·생태적 편익을 고려한 다각적 평가와 함께, 관리 목표 설정의 합리성을 검토함으로써 본 연구의 방법론을 확장할 필요가 있다.

사사

본 성과는 기후에너지환경부의 재원을 지원받아 한국 환경산업기술원 “신기후체제 대응 환경기술개발사업”의 연구개발을 통해 창출되었습니다(RS-2022-KE002123).

References

- Alamdari N, Sample DJ. 2019. A multiobjective simulation-optimization tool for assisting in urban watershed restoration planning. *J Cleaner Prod* 213: 251-261. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.108
- Arnold CL Jr, Gibbons CJ. 1996. Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator. *J Am Plann Assoc* 62(2): 243-258. doi: 10.1080/01944369608975688
- Chin DA. 2009. Risk-based tmdls in pathogen-impaired waters. *J Water Resour Plann Manage* 135(6): 521-527. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2009)135:6(521)
- Cui T, Gao Q, Long Y. 2025. Multi-objective optimal planning and deciding of low impact development for an intending urban area. *Water* 17(2): 154. doi: 10.3390/w17020154
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE Trans Evol Comput* 6(2): 182-197. doi: 10.1109/4235.996017
- Fan G, Lin R, Wei Z, Xiao Y, Shangguan H, Song Y. 2022. Effects of low impact development on the

- stormwater runoff and pollution control. *Sci Total Environ* 805: 150404. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150404
- Harrell LJ, Ranjithan SR. 2003. Detention pond design and land use planning for watershed management. *J Water Resour Plann Manage* 129(2): 98-106. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:2(98)
- Hunt W, Smith J, Jadlocki S, Hathaway J, Eubanks P. 2008. Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in urban charlotte, nc. *J Environ Eng* 134(5): 403-408. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:5(403)
- Kwon HG, Kim KH, Na SM, Yoon HJ, Shin DS, Im TH. 2016. Analysis of nonpoint source pollutant load according to the land cover classification system (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Hazard Mitigation* 16(6): 411-419. doi: 10.9798/KOSHAM.2016.16.6.411
- Langseth DE, Brown N. 2011. Risk-based margins of safety for phosphorus tmdls in lakes. *J Water Resour Plann Manage* 137(3): 276-283. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000097
- Lee J, Kim J, Lee JM, Jang HS, Park M, Min JH, Na EH. 2022. Analyzing the impacts of sewer type and spatial distribution of lid facilities on urban runoff and non-point source pollution using the storm water management model (swmm). *Water* 14(18): 2776. doi: 10.3390/w14182776
- Lee JH, Park YK, Shin HS, Kim JS, Kim SD. 2013. A study on applicability of sustain in a Korean urban catchment (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Water Environ* 29(6): 730-738.
- McDougall CW, Hanley N, Quilliam RS, Oliver DM. 2022. Blue space exposure, health and well-being: Does freshwater type matter? *Landscape Urban Plann* 224: 104446. doi: 10.1016/j.landurbplan.2022.104446
- Ministry of Environment (Korea). 2018. Guidelines for monitoring and modeling of sewer systems during rainfall events. Korea: Ministry of Environment.
- Ministry of Environment (Korea). 2020a. Installation, management, and operation manual for non-point source pollution reduction facilities. Korea: Ministry of Environment.
- Ministry of Environment (Korea). 2020b. The 3rd comprehensive plan for non-point source pollution control by stormwater runoff (2021-2025). Korea: Ministry of Environment.
- National Institute of Environmental Research (Korea). 2022. Technical guidelines for total pollutant load management. Korea: National Institute of Environmental Research.
- Nazarpour S, Gnecco I, Palla A. 2023. Evaluating the effectiveness of bioretention cells for urban stormwater management: A systematic review. *Water* 15(5): 913. doi: 10.3390/w15050913
- Park YK, Jang SH, Kim SD. 2016. Optimum installation of permeable pavement using multi-objective optimization technique (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Hazard Mitigation* 16(4): 313-321. doi: 10.9798/KOSHAM.2016.16.4.313
- Rahman MR, Kang S, Lee S, Lee J. 2025. A green infrastructure planning approach for enhanced flood control and resilience in urban areas. *Land Use Policy* 153: 107535. doi: 10.1016/j.landusepol.2025.107535
- Yu J, Kim YJ, Sung HC, Lee KI, Choi JY, Jeon SW. 2020. Method for calculating the pollution load amount of agricultural non-point sources using land cover map (in Korean with English abstract). *J Environ Sci Int* 29(12): 1249-1260. doi: 10.5322/JESI.2020.29.12.1249
- Zeng J, Huang G, Mai Y, Chen W. 2020. Optimizing the cost-effectiveness of low impact development (lid) practices using an analytical probabilistic approach. *Urban Water J* 17(2): 136-143. doi: 10.1080/1573062X.2020.1748208
- Zhang W, Zhou T, Wu P. 2024. Anthropogenic amplification of precipitation variability over the past century. *Science* 385(6707): 427-432. doi: 10.1126/science.adp0212