

그린인프라의 확대가 도시홍수 위험 저감에 미치는 영향: 부산시 2040 도시기본계획을 기반으로*

The Impact of Urban Park Expansion on Urban Flood Risk Reduction:
A Study Based on Busan's 2040 Comprehensive Plan

심지수 Jisoo Sim**

Abstract

This study examines the effect of expanding urban park areas on mitigating urban flood risks under the 2040 Busan Urban Master Plan. Using the InVEST-UFRM (Urban Flood Risk Mitigation) model, flood-prone areas in Busan were identified, and a scenario was applied where urban park areas expand annually. The expansion aims to increase per capita park area from 13.7m² in 2020 to 21.5m² by 2040. ArcGIS Pro and Python were employed for spatial analysis. The results show that flood risks are highest in Gangseo-gu and Sasang-gu, with significant risk reduction observed in these areas through phased park expansion. This study highlights the importance of green infrastructure in addressing urban flood risks and provides quantitative evidence supporting the role of urban parks in enhancing climate resilience and sustainable development.

Keywords: Urban Flood, Green Infrastructure, Urban Park Expansion, InVEST-UFRM Model, Urban Resilience

I. 서론

도시화의 가속화와 기후변화로 인해 도시홍수의 빈도와 강도가 증가하면서 도시의 회복력(resilience) 강화가 중요한 정책 과제로 부상하고 있다. 도시홍수는 강우 시 불투수면적에서 유출수가 빠르게 증가하고 급경사지역에서 저지대로 단시간 내 우수가 집중되는 현상 등과 같은 다양한 요인에 의해 발생하는 것으로, 강우량이 배수 시스템의 용량을 초과할 경우 도로 침수, 건물 피해, 기반시설 마비 등 다양한 도시 문제를 야기한다(Lennon, Scott and O'Neill 2014; 손민수, 박지영, 김홍석 2013). 이러한 홍수는 도시의

경제적 손실뿐만 아니라 시민들의 안전과 복지에도 부정적인 영향을 미친다. 특히 기후변화로 인해 예측이 어려운 강우 패턴이 지속되면서 그레이인프라(Grey Infrastructure) 중심의 홍수 대응 방식은 한계에 직면하고 있다(Green, O'Donnell, Johnson and Slater et al. 2021). 기존의 그레이인프라는 불투수면적이 높은 도시 지역에서 집중호우 시 신속한 배수를 가능하게 하는 기능을 수행하며, 단기간 내 다량의 강우를 처리하는 데 효과적이다(Mrekva 2024; Zheng, Li, Zeng and, Huang et al. 2024). 하지만 배수 시스템의 용량을 초과하는 극한 홍수 발생 시 그레이인프라만으로는 대응이 한계에 직면할 수 있으며, 기후변

* 본 논문은 2023학년도 부산대학교 교내학술연구비(신임교수연구정착금)에 의한 연구임.

** 부산대학교 조경학과 조교수 | Assistant Prof., Dept. of Landscape Architecture, Pusan National University | jisooim@pusan.ac.kr

화로 인해 불확실성이 커지는 상황에서 지속가능한 홍수 저감 전략이 필요하다.

이에 따라, 자연 기반 해법(Nature-Based Solution)의 하나로 그린인프라가 점점 더 주목받고 있으며, 이를 통해 도시의 물 순환을 회복하고 홍수 저감효과를 극대화하는 전략이 강조되고 있다. 그린인프라는 도시공원, 옥상녹화, 빗물정원, 투수성 포장 등으로 구성되며, 물을 흡수하고 저장하는 기능을 통해 강우로 인한 지표유출을 저감한다. 이를 통해 도시홍수의 위험을 완화하고, 대기질 개선, 열섬 현상 저감, 생물 다양성 증진 등 다양한 부수적 혜택을 제공한다(Alves, Gersonius, Kapelan and Vojinovic et al. 2019; Carter, Handley, Butlin and Gill 2018; 심자수, 구형수 2024). 연구에 따르면, 그린인프라는 기존의 배수 시스템을 보완하는 방식으로 도시 내 회복력을 높이는 중요한 전략으로 평가되고 있다. 특히, 도시공원은 지표유출을 억제하고 도시의 스펀지 기능을 강화하는 대표적인 그린인프라로서 도시홍수 저감에 핵심적인 역할을 수행한다(Junqueira, Serrao-Neumann and White 2021).

부산시는 대한민국 제2의 도시로서, 급격한 도시 개발로 인한 불투수면적의 확대 및 해양성 기후의 영향으로 인해 급격한 기후변화 및 이로 인한 도시홍수 위험이 증가하고 있다. 이에 대한 대응 중 하나로 부산시는 2040 도시기본계획을 통해 도시 내 그린인프라 확대를 주요 전략으로 설정하였다. 해당 계획은 1인당 도시공원 면적을 2020년 13.7㎡에서 2040년 21.5㎡로 확대하는 것을 목표로 하며, 국가도시공원 및 국가정원 추진을 포함해 부산시 전역에서 공원녹지의 체계적인 확대를 구상하고 있다(부산광역시 2023). 그러나 이러한 정책적 접근에도 불구하고, 도시공원 확대가 실제로 도시 내 도시홍수 위험 저감에 미치는 영향에 대한 연구는 제한적이다. 특히, 국내에서 진행된 도시홍수 및 그린인프라 연구는 개별 시설

에 대한 효과 분석에 초점이 맞춰져 있어, 도시 전체를 대상으로 한 실증적 분석은 부족한 실정이다.

이 연구는 부산시 2040 도시기본계획에 기반하여 향후 약 20년간 도시공원 면적의 확대가 부산시의 도시홍수 위험 저감에 미치는 영향을 확인하고자 하는 연구이다. 도시기본계획의 목표 중 하나인 그린인프라의 확대가 도시홍수 위험의 저감에 기여하는지를 검토하는 것을 연구의 주요 목적으로 하며 정책적 목표인 그린인프라 확대 전략이 도시 내 홍수 저감효과를 가질 수 있는지를 분석하는 데 연구의 초점을 맞추고 있다. 이를 위해 부산시 전역을 대상으로 도시홍수 위험지역을 도출하고, 연차에 따라 그린인프라를 확대하였다. 이때 연차별 그린인프라의 확장 면적은 현재 도시공원 면적(13.7㎡/인)을 기준으로 2040년 목표한 도시공원의 면적(21.5㎡/인)까지 매년 균등하게 증가시키는 것을 가정하였다. 이후 같은 방식으로 도시홍수 위험지역을 산출하여 연차별 그린인프라 면적의 확장이 도시홍수 위험 저감에 미치는 영향을 확인하였다. 이는 도시 내 도시공원이라는 그린인프라의 역할이 여가와 문화 공간에서 도시 내 극한 기후에 대응할 수 있는 공간으로 그 의미가 다각화되고 있는 시점에서 도시공원 면적의 확장이 갖는 의미를 재확인하는 점에서 연구의 의의를 찾을 수 있다.

II. 선행연구

1. 도시계획과 그린인프라

전 세계적으로 도시화와 기후변화로 인한 도시침수의 위험이 증가하고 있으며 주요 국가들은 도시침수 위험 저감을 위해 지속가능한 접근으로 그린인프라의 활용을 강조하고 있다. 그중 영국의 지속가능한 도시 배수시스템(Sustainable Urban Drainage Systems), 미국의 저영향개발(Low Impact Developments: LIDs)

및 최적관리기법(Best Practice Management: BPM), 중국의 스폰지시티 프로그램(Sponge Cities Program)은 대표적인 프로그램으로 도시계획 단계에서 그린인프라의 적극적인 활용을 포함한 프로그램이다(Li, Uyttenhove and Van Eetvelde 2020; Green, O'Donnell, Johnson and Slater et al. 2021; Vijayaraghavan, Biswal, Adam and Soh et al. 2021).

Li, Collins, Cheshmehzangi and Chan(2020)는 지속가능한 도시침수 대응을 위한 상기 두 프로그램이 실천의 측면에서 한계가 있음을 발견하고, 보다 적극적인 그린인프라의 활용에 필요한 사항을 전문가 심층 인터뷰의 방식으로 접근하였다. 이들은 영국과 중국의 도시침수 위험 대응을 위한 프로그램을 촉진하는 요소로 그린인프라가 갖는 다양한 혜택과 정부 차원의 지원이 중요함을 강조했다. 장벽으로는 그린인프라 확대를 위한 예산 및 유지관리에 필요한 재정 지원의 부족과 영국과 중국 모두에서 그린인프라에 대한 이해 부족과 그린인프라의 효과에 대한 모니터링 부족을 꼽았다. 이들은 그린인프라의 확대 정책의 실효성을 위해 그린인프라에 대한 인식 제고와 지역사회와 정책 입안자의 적극적인 참여가 필요하며 새로운 재정 메커니즘 및 민관협력 모델 도입이 필요함을 주장했다(Li, Collins, Cheshmehzangi and Chan 2020).

국내에서도 도시기본계획 내에서 기후변화로 인한 재해 위험을 체계적으로 평가하고 대응하기 위한 제도적 틀이 마련되어 있다. 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제20조에 따라, 도시 기후변화 재해취약성 분석이 포함되어 있으며, 이는 도시계획 수립 시 강우 패턴 변화, 침수 가능 지역, 배수 용량 등을 종합적으로 분석하여 기후변화에 따른 재해 위험을 사전에 평가하고, 도시공간 구조 및 토지 이용 계획에 이를 반영하는 것을 목표로 한다. 특히, 재해예방형 도

시계획은 홍수 및 침수 위험을 고려한 계획적 접근을 강조하는 계획으로, 도시 내 용도지역 등 특성에 따른 취약성을 반영한 재해예방형 도시계획 수립의 중요성이 점차 증가하고 있다(한우석 2023; 최유라, 한우석 2024; 이종소, 이상은 2018). 이에 따라 도시 내 그린인프라 배치를 전략적으로 수립하는 것이 중요한 정책적 과제가 되고 있다.

국내 연구에서는 기존의 공원녹지 개념에서 그린인프라로 확장하여 공원녹지가 갖는 다기능성을 고려한 도시기본계획이 필요하다는 관점의 연구가 진행되고 있다. 최희선, 안소은, 이후승, 송슬기 외(2019)는 도시계획시설로서 공원녹지에서 도시 내 녹지의 다기능성을 고려하는 그린인프라로 패러다임이 전환되고 있음에 주목하여 공원녹지의 개념을 그린인프라로 확장하고 도시공간계획 수립 단계부터 그린인프라를 계획할 필요가 높음을 지적하였다. 이를 위해서는 도시의 공원녹지를 그린인프라로 포괄하고 다기능성을 강화하여 지역에 적합한 그린인프라로 활용이 필요함을 강조하였다(최희선, 안소은, 이후승, 송슬기 외 2019).

보다 실천적인 측면에서 강정은, 이명진, 구유성, 조연희(2014)의 연구는 도시기본계획에 적용할 수 있는 그린인프라 공간계획 수립 방안을 도출하였다. 강정은, 이명진, 구유성, 조연희(2014)의 연구는 도시홍수에 대한 방재력 향상을 위한 그린인프라 계획 프레임워크를 개발했다. 이 연구는 현황 및 여건 분석 단계에서 도시가 당면한 특징과 자연재해(특히 홍수)가 발생한 지역을 파악하고 이후 도시홍수 취약지역을 도출하고, 해당 지역에 대한 구체적인 그린인프라 조성 계획의 수립이 필요하다는 총 3단계의 프레임워크를 제안하였다. 또한 이 프레임워크를 기반으로 부산시 연제구와 남구를 대상으로 그린인프라 공간계획을 수립하였다(강정은, 이명진, 구유성, 조연희 2014).

도시계획에서 그린인프라는 기존의 공원녹지가 가

졌던 여가, 휴양의 의미에서 확장하여 기후변화 대응, 재해재난 방재 등을 위한 시설로 그 의미와 중요도가 전환되고 있다. 그린인프라를 어디에 어떻게 배치하는가 또한 이전과는 다른 의사결정을 요구하며 그린인프라의 활용 및 모니터링을 통한 성능 개선이 필요한 시점이다.

2. 도시홍수와 그린인프라의 역할

기후변화와 극한기후의 출현 빈도 및 강도의 증가는 도시 내 피해를 가속화하고 있다. 특히 시설 중심의 접근방식이 가진 경직성과 용량 등에 대한 문제의식은 예측이 어려운 기후변화에 대응하기 점차 어려워졌다. 1990년대부터 기존의 기반 시설에 내재된 경직성을 보완하는 시설로 그린인프라가 부상하기 시작했다. 그중 극한강수와 그로 인한 도시홍수 피해 저감에 대응하는 그린인프라의 효과와 그 효과의 검증 방법에 대한 연구는 다음과 같다.

Lennon, Scott and O'Neill(2014)은 도시홍수위험 관리에 필요한 세 가지 접근법과 각 접근방식이 지향하는 설계방식에 대해 연구했다. 도시홍수 관리에 필요한 세 가지 접근방식은 지속, 적응, 변형이 있으며 여기서 지속은 과거의 공학적 방식을 유지하는 것이며, 적응은 기존의 공학적 접근을 보완하기 위한 접근이 추가된 것, 그리고 변형은 적응의 다음 단계로 자연과 상호작용을 고려한 통합적 도시설계를 의미한다. 이들은 그린인프라는 자연기반해법으로 홍수위험을 완화하는 방안이자 생태적, 경제적, 사회적 혜택 등을 제공하는 다기능성 접근으로 도시 내 회복력 확보를 위해 그린인프라를 적극적으로 활용할 필요가 높음을 강조했다(Lennon, Scott and O'Neill 2014). 이들의 연구는 도시홍수에 대한 전통적이고 공학적인 접근방식이 도시의 변화 및 기후변화와 같은 빠른 변화에 대응하기에 경직되어 있

다는 점에서 그린인프라가 갖는 유연성이 변화에 대한 도시의 적응력을 확보하는 데 중요한 전략임을 주장한다.

Alves, Gersonius, Kapelan and Vojinovic et al.(2019)은 도시홍수에 대한 그린-블루-그레이인프라의 복합활용이 전통적인 접근방식과 어떤 차별성이 있는지를 경제적인 관점에서 비용-편익 분석(Cost Benefit Analysis)을 통해 검증하였다. 이들은 그린-블루-그레이인프라를 독립적으로 평가한 후, 이들을 결합 활용한 경우를 비교하여 그린-블루-그레이인프라 전략이 단일 인프라 활용보다 도시홍수 대응에 경제적인 전략임을 도출하였다. 각 인프라 활용의 경제성은 비용-편익 분석을 통해 산출되었으며 혜택으로는 자원과 에너지 절약, 대기질 개선, 탄소 중립에 기여 등이 경제적 가치로 산출되었고, 비용은 투자비용과 유지관리비용을 포함하여 산출한 후, 순현재가치(Net Present Value)를 통해 단일 인프라의 활용과 복합활용이 갖는 경제적 효율성을 비교하였다. 연구 결과, 그린-블루-그레이인프라를 결합하여 활용하는 것이 각 인프라를 단독으로 활용한 것보다 효과적으로 도시홍수 위험을 저감하고 경제성이 높은 것으로 도출되었으며 기후변화 적응 및 도시의 지속가능성에도 기여하는 전략으로 평가되었다(Alves, Gersonius, Kapelan and Vojinovic et al. 2019).

Green, O'Donnell, Johnson and Slater et al. (2021)의 연구는 도시의 홍수 회복력을 향상하는 그린인프라의 역할에 대해 정리하였다. 이들은 그린인프라는 자연기반해법에 포함되며 도시 내에서 자연의 생태적 시스템을 유지하면서 도시 내 유출수로 인한 도시홍수의 위험을 감소하는 데 기여하는 역할을 강조했다. 특히 최근 기후변화로 인해 도시홍수의 위험이 전 세계적으로 중요해지면서 전통적인 방식으로 대응하는 관점이 도시 내 빠른 변화의 속도에 대응하기 힘들다는 점이 그린인프라를 활용한 폭우관리

가 필요한 부분임을 지적하였다. 이들의 연구는 그린 인프라의 역할을 도시홍수 위험 완화뿐만 아니라 수질 개선, 도시 열섬 완화, 생물 종 다양성 증진과 같은 그린인프라의 환경적, 사회적 혜택으로 확장하였다. 다만 그린인프라를 활용하는 데 있어서 물리적인 기술력과 공간의 제약이 발생한다는 점에 유의해야 하며, 향후 그린인프라의 효과를 모니터링하는 시스템 구축 및 연계를 통해 장기적인 효과 검증의 필요성을 강조하였다(Green, O'Donnell, Johnson and Slater et al. 2021).

이러한 연구는 극한 강우에 대한 기존의 대응 방식이 갖는 경직성은 빠른 기후변화에 대응하기에 한계가 있으며 그린인프라는 이를 보완하는 역할로 활용도가 높음을 시사한다. 다음의 연구는 그린인프라의 효과를 그린인프라의 유형과 시나리오에 기반하여 보다 실증적으로 검증한 연구이다.

Junqueira, Serrao-Neumann and White(2021)는 그린인프라의 유형을 분류하고 도시홍수에 대한 회복력(resilience)을 향상하는 효과에 대한 연구를 종합하였다. 이들은 기존 연구를 통해 그린인프라의 확대가 가져오는 사회적, 환경적, 경제적 혜택과 그린인프라를 확보하는 데 필요한 기술적, 경제적, 사회적 한계를 검토하여 시사점을 도출했다. 그린인프라의 유형별 효과에서는 빗물 정원(rain garden)의 일시적인 우수 저장 효과와 옥상녹화의 집수력 등을 통한 도시홍수 위험의 완화 효과를 강조하였고, 이에 대한 한계로 그린인프라의 불확실한 효과와 높은 비용, 시민들의 그린인프라에 대한 낮은 수용성을 지적하였다. 이를 통해 그린인프라 활용을 확대하기 위해서는 도시계획 및 하수도 시스템을 통합하여 그린인프라의 효율성을 개선하고 지속가능한 도시환경 수립을 위해 장기적 관점에서 접근이 필요하다고 주장한다(Junqueira, Serrao-Neumann and White 2021).

Carter, Handley, Butlin and Gill(2018)은 그린

인프라가 지역 단위의 도시홍수에 미치는 영향을 영국 내 두 지역을 대상으로 그린인프라의 확대가 도시홍수 위험을 저감하는 효과를 실증 분석하였다. 이들은 기존 연구가 소규모의 단일 그린인프라의 효과에 치중하고 있다는 점과 기후변화 시나리오를 반영하고 있지 않다는 점에 착안하여 전체 지역의 그린인프라가 지역에 미치는 거시적 영향을 밝히는 데 초점을 두었다. 도시 내 그린인프라의 확대 혹은 감소가 기후변화 시나리오에 따라 도시 내 강우의 유출량에 미치는 영향을 실증한 결과, 전체 지역에 그린인프라를 10% 증가하는 경우에 약 5% 내외의 강우 유출량이 감소하고, 그린인프라를 10% 감소시킬 때는 약 5% 내외의 강우 유출량이 증가하는 것을 도출했다(Carter, Handley, Butlin and Gill 2018).

Junqueira, Serrao-Neumann and White(2021)의 연구는 그린인프라의 유형에 따라 도시홍수 위험의 완화효과가 다를 수 있음을 시사하였고, Carter, Handley, Butlin and Gill(2018)의 연구는 그린인프라의 확대 혹은 감소가 도시홍수 위험에 미치는 영향을 시나리오에 기반하여 도출하였다. 이들의 연구는 그린인프라의 도시홍수 위험 완화 효과를 실증적으로 분석했다는 점과 시나리오를 설정하고 그 효과의 변화를 추적했다는 점에서 의미가 있다.

3. 도시홍수 위험의 평가

도시홍수가 발생할 수 있는 지역을 파악하는 것은 도시홍수에 대한 사전적 대응으로 중요한 단계이다. 도시홍수를 주제로 하는 연구에서 도시홍수 위험지역, 취약지역 등 궁극적으로 도시홍수가 발생할 수 있는 잠재력이 높은 지역을 파악하는 단계를 포함한다. 도시홍수의 공간적 위험도를 평가하고 시각화하는 도구로는 주로 GIS 프로그램을 사용하고 있다.

Lopez-Valencia(2019)는 콜롬비아 칼리시의 카

나베라레호(Cañaveralejo)강을 중심으로 도시홍수 취약성을 평가하고 그린인프라의 효과를 시뮬레이션 하는 방법론을 제시하였다. 이 연구에서 취약성 평가는 사회적 취약성, 공간적 취약성으로 구분하여 각각 평가하고 결과는 GIS 기반의 다기준 분석방법으로 도출하였다. 사회적 취약성은 주민을 대상으로 설문 조사를 통해 주민들의 위험에 대한 인식과 과거 홍수 경험, 대처 능력 등을 평가하였고, 공간적 취약성은 도시 블록 단위로 건물의 구조적 특성과 주변 환경을 분석하여 도시의 물리적 취약성을 평가하였다. 두 취약성 지표는 GIS에서 통합하여 종합하였고, 그린인프라 개입 전후의 변화를, 시뮬레이션을 통해 도출했다. 사회적 취약성 관점에서 주민들의 도시홍수에 대한 인식은 지역마다 차이가 있었으며 저소득 지역에서 더 높은 수준의 대처 능력 및 개입 의지가 확인되었으나 대부분의 주민들이 홍수에 대한 경험이 부족하고 대처에 대한 준비가 미흡한 상황이었다. 공간적 취약성으로는 높은 밀도로 건물이 밀집된 지역 및 인프라가 부족한 지역이 취약성이 높게 평가되었다. 이후, 두 취약성 지표를 종합하여 도시홍수 취약성 지도를 도출하고, 취약성이 높은 지역에 그린인프라를 배치한 후 도시홍수 위험이 얼마나 저감되었는지를 평가하였다. 연구 결과, 도시홍수 취약성이 높은 지역의 면적이 감소하는 효과를 확인하였다(Lopez-Valencia 2019).

Li, Uyttenhove and Vaneetcelde(2020)는 벨기에의 겐트시(Ghent)를 대상으로 도시 내 유출수로 인한 홍수위험 완화를 위한 그린인프라의 배치 방안을 GIS 기반의 다기준 평가법(Multi-Criteria Evaluation)을 사용하여 제안하였다. 이들은 폭우 유출량 저감, 사회적 취약층 보호, 홍수에 민감한 도로 인프라 보호, 홍수에 민감한 건물 보호, 환경 정의의 다섯 가지 기준을 계층화 분석법(Analytic Hierarchy Process)으로 도출하고 이 기준에 따라 도시 내 홍수위험 완화를

위해 그린인프라를 최적 배치하는 방안을 도출하였다. 도출된 그린인프라의 입지를 실제 도시 내 그린인프라의 위치와 비교한 결과, 그린인프라가 필요한 지역에 공급되고 있지 않음을 발견했으며 도시 중심부에 더 많은 그린인프라가 필요함을 강조하였다. 이 연구는 그린인프라가 도시 내 홍수 위험을 저감하는데 효과적인 전략이 될 수 있음을 실증 분석하고, 그린인프라가 필요한 지역을 선정하는 데 활용할 수 있는 데이터와 기준, 분석방법을 제시했다는 점에서 의미가 크다(Li, Uyttenhove and Vaneetcelde 2020).

도시홍수 위험을 정량적으로 평가하는 방법으로 InVEST-UFRM(Urban Flood Risk Mitigation) 모델이 있다. 이 모델은 생태계서비스를 평가하는 InVEST 모델 중 도시홍수위험을 평가하는 세부 모델로 최근 도시홍수를 대상으로 하는 연구에서 활용하고 있는 모델이다. Bose and Mazumdar(2023)는 인도 콜카타시의 도시홍수 위험을 평가하기 위해 InVEST-UFRM 모델을 적용하였다. 연구 결과, 콜카타의 75%가 불투수면적으로 덮여 있으며, 2시간 동안의 강우로 발생한 강우량의 80% 이상이 유출로 전환되는 것으로 나타났다. 특히, 콜카타 북부 지역은 홍수 취약성이 높은 것으로 분석되었다. 강우량이 71% 증가할 경우 홍수량이 47% 증가하며, 녹지 공간이 강우 유출 저감에 가장 효과적이었다(Bose and Mazumdar 2023). Leta and Adugna(2024)는 에티오피아 아마다시의 도시홍수 위험을 평가하기 위해 InVEST-UFRM 모델을 적용하였다. 연구는 불법 및 무계획적 도시화로 인해 홍수 피해가 심각한 저지대에서 진행되었으며, 다양한 강우 시나리오를 통해 유출 및 홍수 위험을 분석하였다. InVEST-UFRM 모델은 유역별 유출 저감 능력과 홍수 생성 지역을 공간적으로 표현하였으며, 구조적 및 비구조적 완화 대책의 상충 관계를 정량화하는 데 효과적임을 확인하였다(Leta and Adugna 2024). Quagliolo, Comino and Pezzoli

(2021)은 이탈리아 리구리아(Liguria) 해안 도시를 대상으로 InVEST-UFRM 모델을 활용해 도시홍수 위험을 평가하였다. 연구는 2시간 내 강우로 인한 급속 홍수를 시뮬레이션하여 도시의 취약성과 완화 전략을 분석하였다. 결과에 따르면 불투수면적이 높은 지역에서 홍수 위험이 증가하며, 녹지 공간이 유출 저감에 효과적인 것으로 나타났다. 연구는 홍수 위험 완화를 위한 도시계획에 있어 InVEST-UFRM 모델이 실용적이고 효율적인 도구임을 강조하고 있다(Quagliolo, Comino and Pezzoli 2021). 이러한 연구는 InVEST-UFRM 모델이 도시홍수 위험을 평가하고 완화 전략을 분석하는 데 효과적인 도구임을 입증하고 있다. 도시회복력 및 지속 가능한 도시 개발을 위한 정책 수립에서 InVEST-UFRM 모델은 실증적인 분석 도구로 활용 가능성이 높다.

III. 연구 방법

1. 연구의 범위

이 연구는 부산시를 대상으로 한다. 부산시는 한반도의 남동쪽에 위치하여 온대 계절풍 기후대에 속하고 전형적인 해양성 기후의 영향으로 연간 기온의 차이가 비교적 크지 않은 지역이다. 부산시는 최근 30년간 연평균 기온과 연평균 최고기온이 각각 0.3℃ 상승¹⁾하여 전국 평균기온의 상승 속도보다 빠르며, 이에 따라 극한기후의 발생빈도가 잦아지는 등 기후변화로 인한 피해가 점차 증가하고 있다. 지역의 94.64%가 도시지역으로 지정된 부산시는 2023년 기준, 서울시와 광주시를 이어 전국에서 세 번째로 도시지역의 비

중이 높으며 인구밀도 또한 서울시(1만 5,506명/km²) 다음으로 높은 도시(부산시: 4,252명/km²)²⁾로 극한기후로 인한 피해 또한 클 것으로 예상된다. 부산시는 기후변화로 인한 극한기후의 영향을 받고 있으며 극한기후로 인한 피해의 발생 가능성이 높다는 점에서 연구대상지로 선정하였다(〈그림 1〉 참조).

2. 단계별 연구 방법

연구는 총 3단계로 구분하여 진행하였다(〈그림 2〉 참조). 1단계에서는 2020년을 기준으로 부산시 전역을 대상으로 도시홍수 위험지역을 추출하였다. 이후 2단계에서는 위험이 높은 지역에 그린인프라를 배치하였다. 그린인프라는 부산시에서 발표한 2040년 도시공원 인당 면적을 기준으로 2020년 도시공원 인당 면적에서 추가되어야 하는 총 2만 8,418km²를 20년으로 균등 분할하여 매년 1,420km²씩 확장을 가정하였다. 그린인프라의 배치는 토지 소유, 최소 면적, 지목, 홍수위험, 토지 이용을 고려하여 다음과 같이 배치하

그림 1 연구대상지



1) 부산광역시. <https://www.busan.go.kr/depart/greengas03> (2024년 6월 9일 검색).

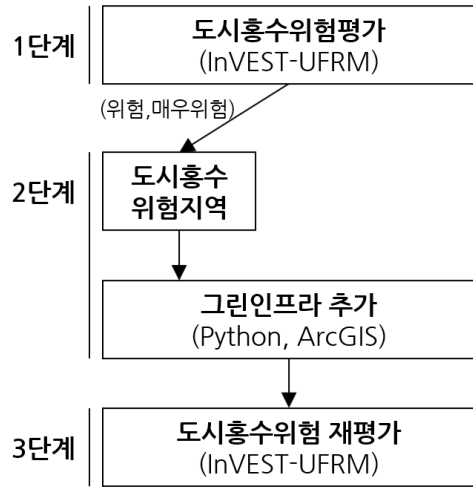
2) 국가통계포털. <https://kosis.kr> (2024년 6월 9일 검색).

였다. 토지 소유는 국유지이거나 공유지로 한정하여 토지 구매에 별도로 비용이 발생하지 않도록 했고, 필지의 최소 면적은 1,500㎡로 하여 도시공원의 최소 단위를 충족하도록 하였다. 지목은 전, 답, 대로 한정하고 홍수의 위험은 위험지역(4단계)과 매우 위험지역(5단계)으로 한정하였다. 토지 이용은 도시지역인 곳에 그린인프라를 배치하였다. 상기 조건을 만족한 필지 중 랜덤 선택으로 1년, 5년, 10년, 20년에 해당하는 면적을 선택하여 연차별 그린인프라를 배치하였다. 그린인프라의 배치는 ArcGIS와 Python을 함께 사용했다. 3단계에서는 2단계에서 진행한 그린인프라 배치 이후의 도시홍수 위험을 재평가하여 그린인프라의 도시홍수 위험 저감효과를 측정하고자 하였다.

이 연구에서 도시홍수 위험지역을 평가하는 분석 모델로는 InVEST®) 중 하위 모델인 도시홍수 위험 완화(UFRM: Urban Flood Risk Mitigation) 모델을 선정하였다. 해당 모델은 도시 내 생태계가 제공하는 서비스에 대한 영향을 정량화하는 모델(Natural Capital Project 2024)로 도시홍수의 위험과 그린인프라의 활용 효과를 검증하는 데 적합하다.

InVEST-UFRM 모델은 토지 이용과 토양의 특성을 고려하여 유출량을 산출하는 방식으로 도시홍수의 위험을 평가한다. 이 모델은 각 단위(i)당 토지 이용의 유형과 토양이 갖는 특성(배수등급)에 따라 유출량을 추정하는 원리이다. 유출은 토지 이용 및 토양의 특성에 따라 일정 단위의 토양이 내포할 수 있는 잠재적 함수량($\lambda \cdot S_{max,i}$, $\lambda=0.2$)을 강우량(P)이 초과할 때 발생하는 것으로 수식은 <식 1>과 같다. 이는 토양의 특성으로 배수가 어려워서 잠재적 함수량이 작은 경우에 그만큼 최소 한계 유출 시작점에 빠르게 도달하는 구조이다. 이 식에서 유출을 저감하는 정도는

그림 2 단계별 연구흐름도



함수지수인 $S_{max,i}$ 로 특정할 수 있으며 이는 유출곡선(CN_i , Curve Number) 값을 활용하여 <식 2>와 같이 산출한다.

$$Q_{p,i} = \begin{cases} (P - \lambda S_{max,i})^2 & \text{if } P > \lambda \cdot S_{max,i} \\ P + (1 - \lambda)S_{max,i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad < \text{식 1} >$$

$$S_{max,i} = \frac{25400}{CN_i} - 254 \quad < \text{식 2} >$$

InVEST-UFRM 모델에 필요한 데이터는 토지 이용, 강우량, 토양그룹(배수등급), 생물물리학적표(Biophysical Table)⁴⁾이다. 토지 이용에 관련된 정보는 환경공간정보서비스에서 제공하는 토지피복지도 중 중분류 토지피복지도를 사용하였다. 강우량은 전체 강우의 정도를 mm 단위로 표기한 것으로 2024년 9월 발생한 3일 연속 강우량인 404.2mm를 사용하였다. 3일 연속 강우량은 도시홍수 위험지역을 평가할 때 사용할 수 있는 강우량 산정 방식(Ma 2024)이며 최근 부산시

3) InVEST®. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>

4) 생물물리학적표(Biophysical Table)는 InVEST model에서 제공하는 표로 토지피복에 따른 배수등급 등을 수치화.

의 강우 현황을 가장 직접적으로 반영하기 위해 3일 연속 강우량 지표를 사용하였다. 토양그룹은 토양의 배수등급을 의미하며 InVEST-UFRM 모델은 미국 농무부(United States Department of Agriculture, USDA)가 제시한 분류에 따라 토양그룹을 총 4개(A, B, C, D)로 분류하고 있다. 이 연구에서는 국립농업과 학원이 제공하는 토양환경지도 내 배수등급을 미국 농무부의 토양그룹으로 재분류하여 사용하였다.

역은 InVEST- UFRM을 사용하여 최근 부산시의 3일 연속 강우량을 적용하였다. 이렇게 도출한 부산시 필지별 유출량을 Natural Breaks 방식으로 총 5단계로 구분하여 도시홍수 위험지역을 도출할 수 있었다. 연구 결과, 부산시의 도시홍수 위험지역은 주로 강서구와 사상구가 매우 위험한 지역이 집중되어 있고, 동래구, 연제구와 같은 도심 지역은 위험지역이 밀집해 있다. 수영구와 해운대구와 같이 해안과 인접한 지역도 매우 위험한 지역으로 도출되었다.

IV. 연구 결과

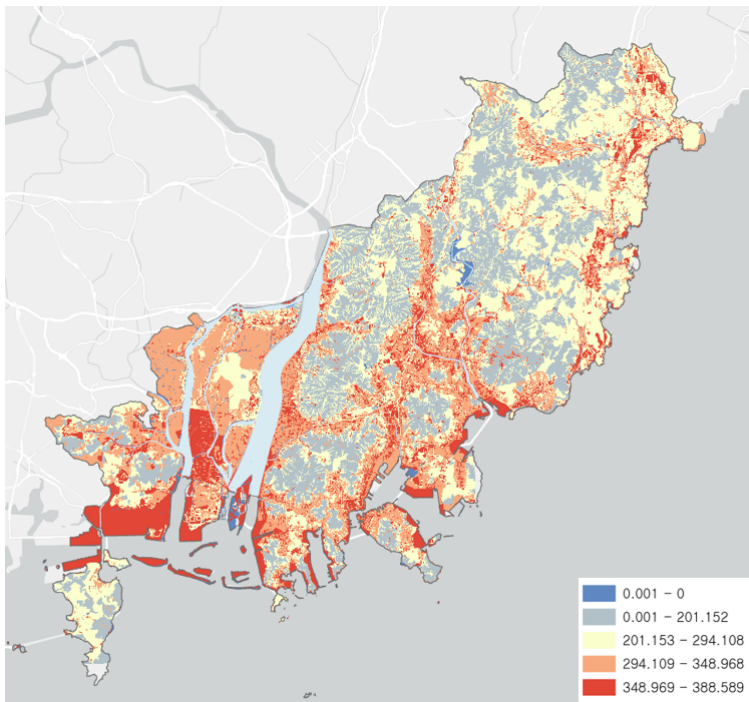
1. 도시홍수 위험지역

1단계에서는 현재 부산시의 도시홍수 위험지역을 도출하였다(그림 3) 참조). 부산시의 도시홍수 위험지

2. 그린인프라의 배치

앞서 도출한 도시홍수 위험지역 중 위험지역(4단계)과 매우 위험지역(5단계)이고, 현재 토지 이용이 도시지역인 곳을 대상으로 도시공원의 최소 필요 면적인 1,500㎡ 이상인 필지 중 국공유지이고 현재 도시

그림 3 부산시 도시홍수 위험지역



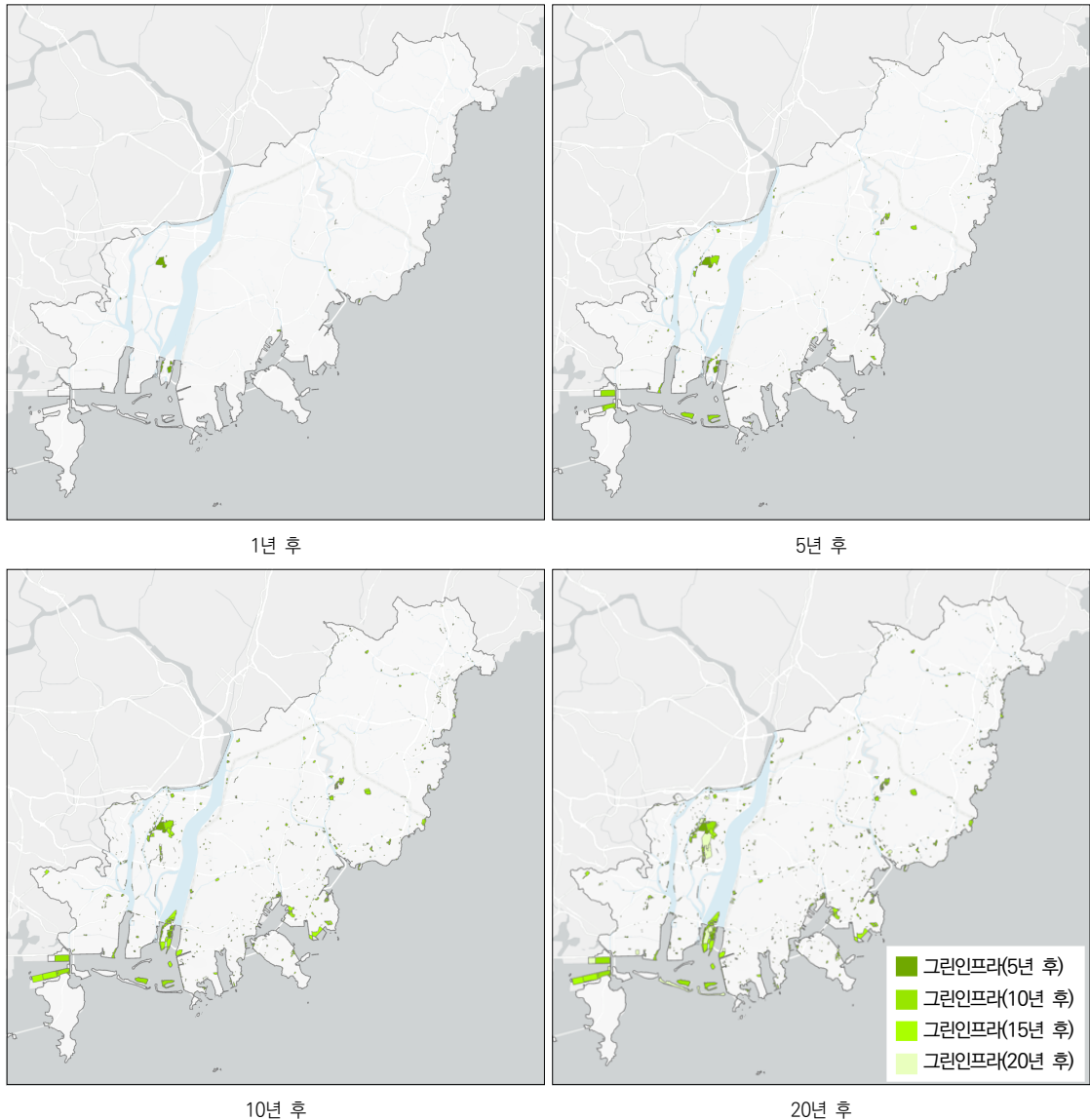
지역인 필지를 대상으로 그린인프라를 랜덤으로 배치하였다. 그린인프라의 배치는 매년 142만㎡씩 추가해서 배치했으며 매년 추가할 경우에 20년 후인 2040년에 부산시 인당 도시공원 면적의 목표인 21.5㎡/인을 달성할 수 있는 정도로 배치하였다. 그린인프라의 배치는 위의 조건을 만족하는 필지를 AcrGIS 내 Python을 활용하여 무작위로 선택했고, 1년, 5년, 10년, 20년 후 그린인프라의 배치는 <그림 4>와 같다. 이 같은 그린인프라의 배치는 기존의 토지 이용에서 도시공원으로 토지 이용이 변경된 것으로 가정하였다.

3. 그린인프라의 도시홍수 위험 저감효과

3단계에서는 2단계에서 배치한 그린인프라의 도시홍수 위험 저감효과를 검증하고자 하였다. 이를 위해 2단계에서 배치한 그린인프라를 적용하여 시점마다 도시홍수 위험지역을 다시 도출하였다(그림 4) 참조).

다음으로 그린인프라를 확대 배치한 이후의 도시홍수 위험지역과 기존의 도시홍수 위험지역을 비교하여 그린인프라의 도시홍수 위험 저감효과를 최종적으로 도출하였다(그림 5) 참조). 그린인프라를 배치한 이후의 도시홍수 위험은 현재 도시홍수 위험과 비교했을 때, 그린인프라를 배치한 지역은 직접적으

그림 4 그린인프라의 배치

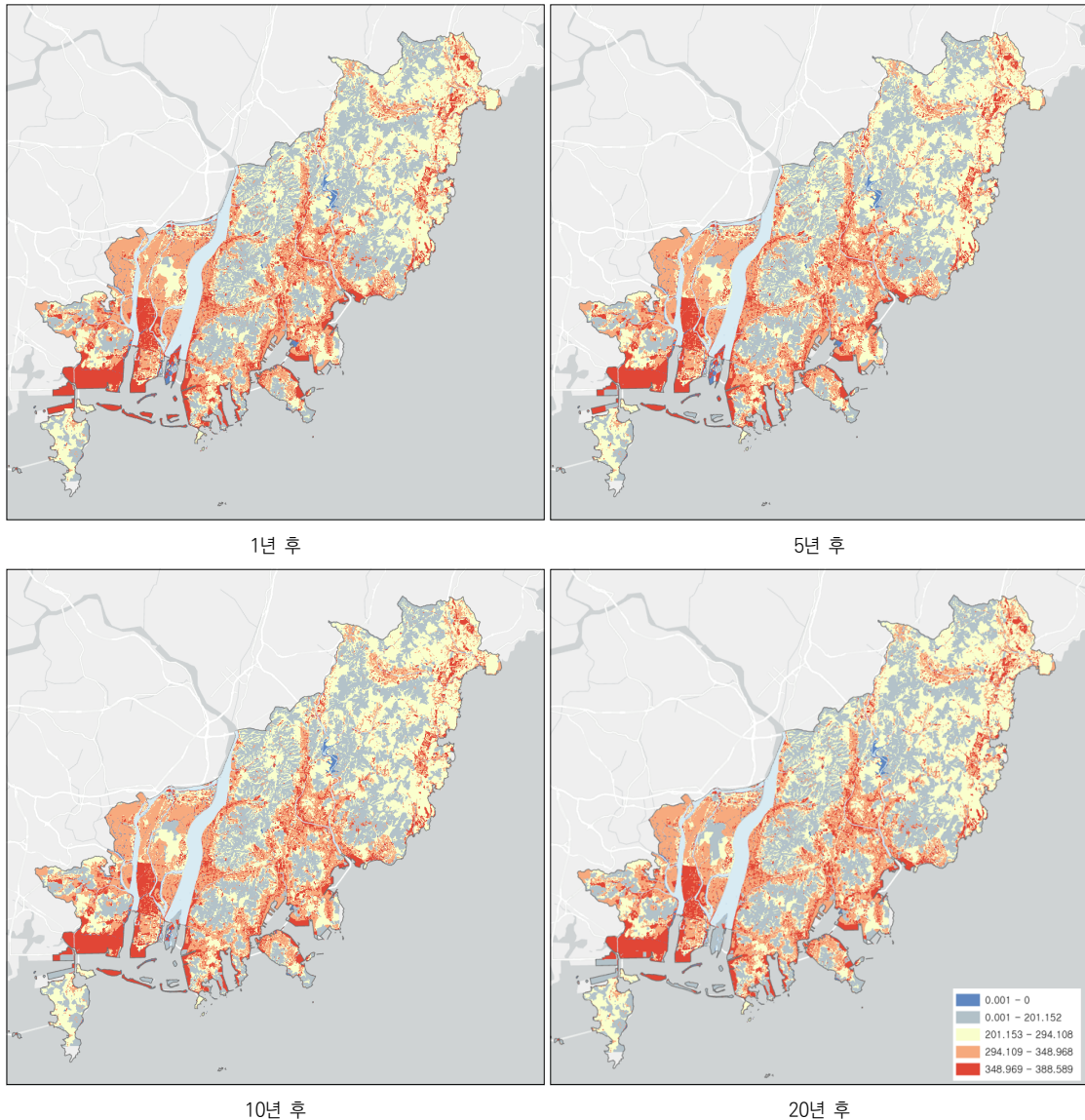


주: 매년 142만㎡씩 그린인프라의 확대를 가정.

로 도시홍수 위험이 저감된 것을 확인할 수 있었다 (<그림 6> 참조). 그린인프라를 확장한 지 5년 후에는 강서구를 중심으로 대형 비교적 대형 그린인프라가 공급되었고, 이는 강서구의 도시홍수 위험 저감에 영

향을 미쳤다. 이후 수영구와 남구에 그린인프라가 확장되었고, 이 또한 해당 지역 내 도시홍수 위험 저감에 영향을 미친 것으로 도출되었다.

그림 5 그린인프라의 배치 후 도시홍수 위험지역



주: 매년 142만㎡씩 그린인프라의 확대를 가정.

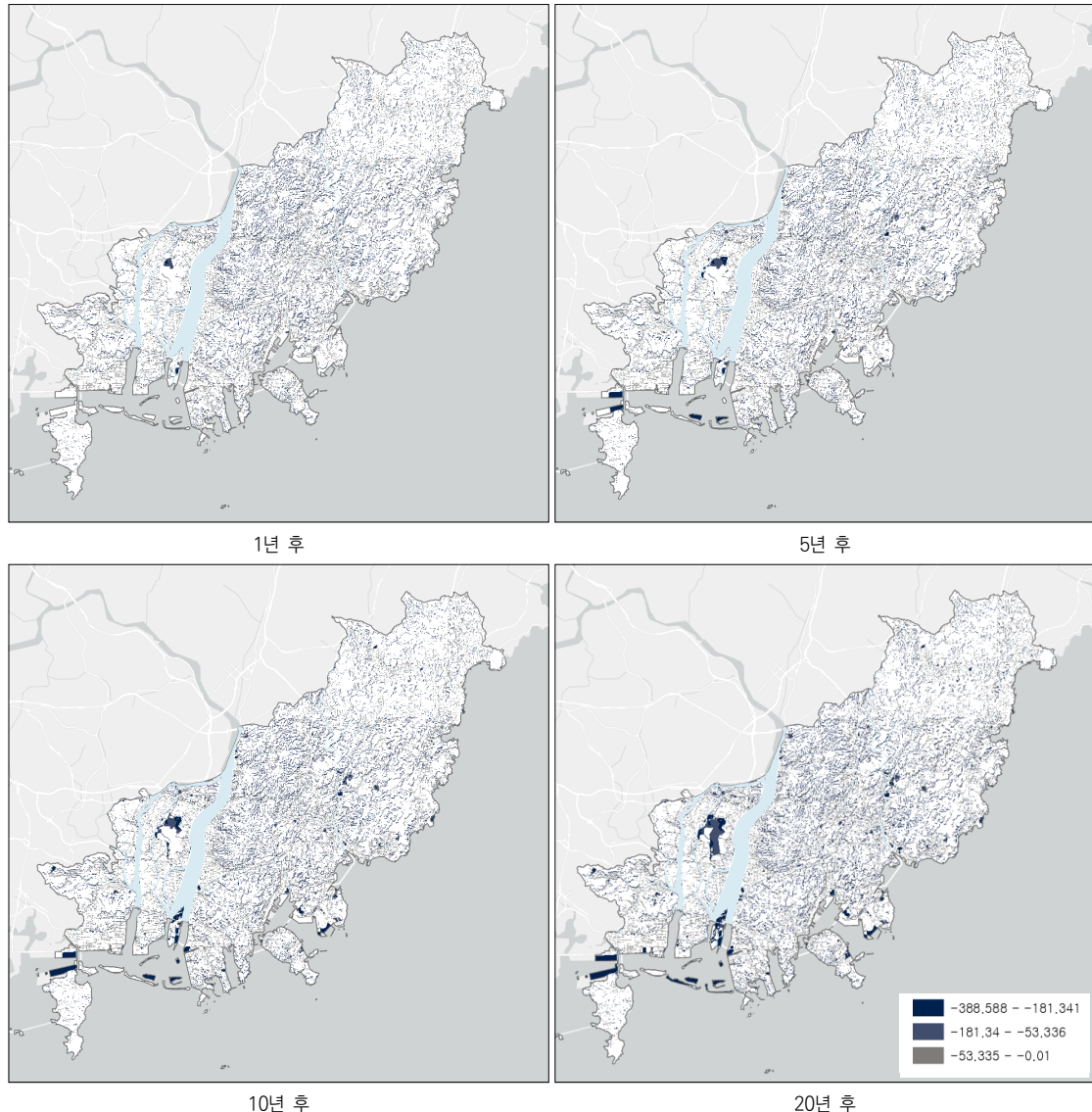
V. 결론

본 연구는 부산시 2040 도시기본계획을 기반으로 향후 20년간 도시공원 면적의 확대가 도시홍수 위험 저감에 미치는 영향을 분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 통해 그린인프라의 단계적 확장이 도시 내 기후

변화 대응과 홍수 방지에 기여하는 방안을 제시하고자 하였다. 특히, 도시공원의 면적 확대가 물리적인 도시 홍수 완화 효과로 이어지는 과정을 실증적으로 검토하고, 이를 통해 부산시의 지속가능한 도시개발 전략에 기여하는 정책적 시사점을 도출하고자 하였다.

연구 방법으로는 InVEST-UFRM 모델을 활용하여

그림 6 그린인프라의 도시홍수 위험 저감효과



주: 매년 142만㎡씩 그린인프라의 확대를 가정.

부산시 전역의 도시홍수 위험지역을 평가하고, 연차별 도시공원의 확장에 따라 도시홍수 위험이 저감되는 효과를 분석하였다. 도시공원의 확장 규모는 2040년 목표한 1인당 도시공원 면적(21.5㎡/인)을 기준으로 설정하였으며, 매년 균등하게 그린인프라를 확대하는 시나리오를 적용하였다. 그린인프라의 배치는 토지 이용, 지목, 필지 면적, 소유 형태 등의 기준을 반영하여 단계적으로 이루어졌으며, ArcGIS와 Python을 활용하여 공간적 분석을 수행하였다.

연구 결과, 부산시의 도시홍수 위험지역은 강서구와 사상구 등 도심 외곽 지역에서 상대적으로 높게 나타났으며, 도시공원의 단계적 확장은 해당 지역의 도시홍수 위험을 유의미하게 저감하는 것으로 분석되었다. 특히, 5년 후에는 강서구와 수영구 일대에서 그린인프라 확대 효과가 뚜렷하게 나타났으며, 장기적으로는 부산 전역에서 도시홍수 위험 완화 효과가 고르게 분포하였다. 이는 도시 내 불투수 면적이 높은 지역에 도시공원을 추가하는 방식이 홍수 위험을 직접적으로 줄이는 데 기여할 수 있음을 시사한다.

본 연구의 의의는 도시기본계획에서 제시하는 그린인프라 확대 목표가 기후변화 대응 및 도시홍수 저감이라는 실질적인 효과로 이어질 수 있음을 정량적으로 검증하였다는 점에 있다. 또한, InVEST-UFRM 모델을 활용한 공간적 분석을 통해 도시홍수 완화 정책의 실효성을 높이는 방안을 제시하였으며, 그린인프라의 지속적인 관리와 확장의 필요성을 강조하였다. 본 연구는 연차별 공원 면적 확대가 균등하게 이루어진다는 가정에 기반하고 있으며, 실제 공원 조성 시 발생할 수 있는 행정적, 재정적 제약을 반영하지 못한 한계가 있다. 그린인프라의 공급은 예산 확보, 토지 매입, 인허가 절차 등 다양한 행정적 요인에 따라 달라질 수 있으며, 이는 연구에서 고려하지 못한 변수로 작용할 가능성이 있다. 따라서 향후 연구에서는 공원 조성의 현실적 제약을 반영한 확장 시나리오를 추가적으로

고려하여 보다 실효성 있는 정책적 시사점을 도출할 필요가 있다. 또한, 기후변화로 인한 강우 강도 및 빈도의 증가를 고려한 추가적인 시나리오 분석이 이루어진다면, 보다 현실적인 도시홍수 저감효과를 검토할 수 있을 것이다. 이러한 분석을 통해 도시공원 확대가 기후변화 대응 및 도시홍수 저감에 미치는 효과를 더욱 실질적으로 평가할 수 있을 것이다.

• 참고문헌

References

1. 강정은, 이명진, 구유성, 조연희. 2014. 도시물순환 개선을 위한 그린인프라 계획 프레임워크 개발 및 시범적용 - 부산시 연제구 및 남구를 대상으로. 환경정책연구 13권, 3호: 43-73.
2. 박효석, 오규식, 이상현. 2014. 도시 그린인프라 확충에 따른 탄소저감 증진효과 분석: 서울시를 대상으로. 도시행정학보 27권, 4호: 1-23.
3. 부산광역시. 2023. 2040 부산도시기본계획. Busan. 2023. 2040 Busan Comprehensive Plan.
4. 손민수, 박지영, 김홍석. 2013. 서울시 도시환경의 홍수 위험도 평가. 서울도시연구 14권, 4호: 127-140.
5. 송봉근, 이택순, 박경훈. 2014. GIS 기반의 도시지역 침수 취약성 평가 - 창원시를 대상으로. 한국지리정보학회지 17권, 4호: 129-143.
6. Song, B., Lee, T. and Park, K. 2014. Assessment of flooding vulnerability based on gis in urban area - Focused on Changwon City. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 17, no.4: 129-143.

6. 송인주, 김상균, 윤초롱. 2022. 도시계획 관점에서 서울시 그린인프라 특성과 구축 전략. 서울: 서울연구원.
Song, I., Kim, S. and Yoon, C. 2022. *A Strategy for Constructing Green Infrastructure in Seoul from the Perspective of Urban Planning*. Seoul: The Seoul Institute.
7. 심지수, 구형수. 2024. 그린인프라의 도시침수 위험 완화 효과: 전라남도 구례군을 대상으로. 토지주택연구 15권, 4호: 81-95.
Sim, J. and Koo, H. 2024. mitigating urban flood risk with green infrastructure: A case study of Gurye-gun, Jeollanam-do. *Land and Housing Review* 15, no.4: 81-95.
8. 여성준, 이창현. 2017. 시나리오별 부산시 연안 침수 분석 및 피해 규모 산정 연구. 도시연구 11호: 143-174.
Yeo, S., and Lee, C. 2017. A study of coastal flooding and calculation of damage scale by scenario. *IDI Urban Research*, no.11: 143-174.
9. 이종소, 송창근, 이상은. 2018. 도시침수 사전관리를 위한 고위험지역 선정. 국토연구 98권: 99-111.
Lee, J., Song, C. and Lee, S. 2018. Evaluation of risk hotspots to urban flood for a spatial disaster risk management: A case study of Jeju City. *The Korea Spatial Planning Review* 98: 99-111.
10. 이종소, 이상은. 2018. 재해예방형 도시계획 지원을 위한 도시침수 위험도 공간정보 개발. 대한토목학회논문집 38권, 2호: 203-213.
Lee, J. and Lee, S. 2018. Development of urban flood risk maps for strengthening urban planning toward disaster prevention. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 38, no.2: 203-213.
11. 최유라, 한우석. 2024. 용도지역별 폭우재해 취약지역의 재해예방형 도시계획 수립방안: 창원시를 중심으로. 국토연구 120권: 77-95.
Choi, Y. and Han, W. 2024. A study on establishing urban planning methods for disaster prevention in use areas vulnerable to heavy rainfall disasters: Focus on Changwon City. *The Korea Spatial Planning Review* 120: 77-95.
12. 최희선, 안소은, 이후승, 송슬기, 이길상. 2019. 도시의 지속가능성을 위한 공원녹지 정책의 재정립 방안. 세종: 한국환경연구원.
Choi, H., Ahn, S., Lee, H., Song, S. and Lee, G. 2019. *The Transformation of Urban Park and Green Space Policy for Sustainability*. Sejong: Korea Environment Institute.
13. 한우석. 2023. 발표① 도시 기후변화 재해취약성 분석제도 및 방재지구 등 국토부의 도시방재 제도. 한국도시행정학회 2023년 하반기 학술발표대회 논문집: 121-139. 서울: 한국도시행정학회.
Han, W. 2023. Presentation ① Urban Climate Change Disaster Vulnerability Analysis System and Disaster Prevention Zones: Urban Disaster Prevention System of the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. *In Proceedings of the 2023 Fall Conference of the Korean Association for Urban Administration*, 121-139. Seoul: South Korea.
14. Alves, A., Gersonius, B., Kapelan, Z., Vojinovic, Z. and Sanchez, A. 2019. Assessing the co-benefits of green-blue-grey infrastructure for sustainable urban flood risk management. *Journal of Environmental Management* 239: 244-254.
15. Bose, S. and Mazumdar, A. 2023. Urban flood risk assessment and mitigation with InVEST-UFRM model: A case study on Kolkata city, West Bengal state (India). *Arabian Journal of Geosciences* 16, no.5: 320.
16. Carter, J. G., Handley, J., Butlin, T. and Gill, S. 2018. Adapting cities to climate change – Exploring the flood risk management role of green infrastructure landscapes. *Journal of Environmental Planning and Management* 61, no.9: 1535-1552.
17. de Oliveira, F. L. 2025. Nature in nature-based solutions in urban planning. *Landscape and Urban Planning* 256: 105282.
18. Green, D., O'Donnell, E., Johnson, M., Slater, L., Thorne, C., Zheng, S., Stirling, R., Chan, F., Li, L., and Boothroyd, R. 2021. Green infrastructure: The future of urban flood risk management? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 8, no.6: e1560.
19. Junqueira, J. R., Serrao-Neumann, S. and White, I. 2021. Managing urban climate change risks: Prospects for using green infrastructure to increase urban resilience to floods. *In The Impacts of Climate Change*, 379-396. Amsterdam: Elsevier.
20. Lennon, M., Scott, M. and O'Neill, E. 2014. Urban design and adapting to flood risk: The role of green infrastructure. *Journal of Urban Design* 19, no.5: 745-758.
21. Leta, B. M. and Adugna, D. 2024. Quantifying flood risk using InVEST-UFRM model and mitigation strategies: The case of Adama City, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment* 10, no.3: 1-21.
22. Li, L., Collins, A. M., Cheshmehzangi, A. and Chan, F. K. S. 2020. Identifying enablers and barriers to the implementation of the green infrastructure for urban flood

- management: *A comparative analysis of the UK and China. Urban Forestry & Urban Greening* 54: 126770.
23. Li, L., Uyttenhove, P. and Van Eetvelde, V. 2020. Planning green infrastructure to mitigate urban surface water flooding risk – A methodology to identify priority areas applied in the city of Ghent. *Landscape and Urban Planning* 194: 103703.
 24. López-Valencia, A. P. 2019. Vulnerability assessment in urban areas exposed to flood risk: Methodology to explore green infrastructure benefits in a simulation scenario involving the Cañaveralejo River in Cali, Colombia. *Natural Hazards* 99, no.1: 217-245.
 25. Ma, B. 2024. Flood risk identification of Zhengzhou Metropolitan Area based on InVEST model. *Academic Journal of Science and Technology* 9, no.1: 172-175.
 26. Mrekva, L. 2024. Addressing the different aspects of urban land use and urban flood risk together, and identifying ways to manage them successfully. *Védelem Tudomány* 9, no.4: 115-129. <https://doi.org/10.61790/vt.2024.17660>
 27. Thorne, C. R., Lawson, E. C., Ozawa, C., Hamlin, S. L. and Smith, L. A. 2018. Overcoming uncertainty and barriers to adoption of bluegreen infrastructure for urban flood risk management. *Journal of Flood Risk Management* 11, Supplement S1: S960-S972.
 28. Quagliolo, C., Comino, E. and Pezzoli, A. 2021. Experimental flash floods assessment through urban flood risk mitigation (UFRM) model: The case study of Ligurian coastal cities. *Frontiers in Water* 3: 663378.
 29. Vijayaraghavan, K., Biswal, B. K., Adam, M. G., Soh, S. H., Tsen-Tieng, D. L., Davis, A. P. and Chew, S. H. et al. 2021. Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects. *Journal of Environmental Management* 292: 112766.
 30. Zheng, J., Li, J., Zeng, J., Huang, G. and Chen, W. 2024. Application of a time-dependent performance-based resilience metric to establish the potential of coupled green-grey infrastructure in urban flood management. *Sustainable Cities and Society* 112: 105608. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105608>

- 논문 접수일: 2025. 1. 7.
- 심사 시작일: 2025. 2. 4.
- 심사 완료일: 2025. 3. 10.

요약

본 연구는 부산시 2040 도시기본계획을 기반으로 도시공원 면적 확대가 도시홍수 위험 저감에 미치는 영향을 분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 InVEST-UFRM(Urban Flood Risk Mitigation) 모델을 활용하여 부산시 전역의 도시홍수 위험지역을 도출하고, 매년 도시공원 면적이 균등하게 확대되는 시나리오를 적용하였다. 도시공원의 확장은 2020년 기준 1인당 13.7㎡에서 2040년 21.5㎡로 증가하는 것을 목표로 하여 공간 분석을 수행하였다. 연구 결과, 강서구와 사상구 등 외곽 지역의 도시홍수 위험이 높게 나타났으며, 도시공원의 단계적 확대는 해당 지역의 홍수 위험을 유의미하게 저감하는 것으로 확인되었다. 본 연구는 도시기본계획에서 제시하는 그린인프라 확장이 기후변화 대응 및 도시회복력 강화에 실질적으로 기여할 수 있음을 정량적으로 검증하였다는 점에서 의의가 있다.

- **주제어:** 도시홍수, 그린인프라, 도시공원 확대, InVEST-UFRM, 도시회복력

