

폭우에 대한 도시 기후탄력성 제고를 위한 그린인프라 평가체계 구축방안 연구

윤은주*[†] · 이지우**

*국토연구원 도시연구본부 도시정책·환경연구센터 부연구위원, **국토연구원 도시연구본부 도시정책·환경연구센터 연구원

A study on a green infrastructure evaluation system for enhancing urban climate resilience to heavy rainfall

Yoon, Eun Joo*[†] and Lee, Ji-woo**

*Associate Research Fellow, Urban Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements, Sejong, Korea

**Researcher, Urban Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements, Sejong, Korea

ABSTRACT

Urban climate resilience, which involves transforming cities to adapt to climate change, has gained significant attention in recent years. Although previous research has explored urban climate resilience, the inherent complexity and constant evolution of urban environments present challenges for quantitative approaches. This study focuses specifically on 'heavy rain' – the most damaging climate event – and 'green infrastructure,' a crucial component of urban climate resilience. It introduces a conceptual framework and a quantitative evaluation methodology based on supply and demand metrics. The study posits that urban climate resilience can be enhanced as the supply of green infrastructure increases relative to demand. Demand is evaluated through factors such as precipitation, topography, land cover, and population characteristics, enabling simulations of changes due to future climate and socioeconomic shifts. Supply, on the other hand, is evaluated based on the type and area of green infrastructure, allowing the methodology to account for efforts to expand or enhance green infrastructure. The pilot application of this methodology to Suwon City, Gyeonggi-do, revealed that 43.8% of the entire area had insufficient supply compared to demand (indicating low climate resilience), and this was particularly pronounced around the Gosaek and Mangpo stations in the southern region. The study demonstrated that the calculated climate resilience values accurately reflected the actual urban space and the historical or potential damage from heavy rain.

Key words : Climate Change, Adaptation, Demand, Supply, Dynamic Equilibrium

1. 서론

기후변화는 미래에 대한 전망이 아닌, 우리가 이미 경험하고 있는 현상으로서 그에 대한 대응이 강조되고 있다. 폭우, 폭염의 강도가 나날이 높아지고 있어 역대 최고치가 갱신되는 경우도 빈번히 발생하고 있다(IPCC, 2021; KMA, 2023). 특히 폭우는 그동안 가장 많은 인명피해 및

재산피해를 유발한 재해로 알려져 있다(Han, 2012). 우리 정부가 2020년 12월 2050년 탄소중립 목표를 선언한 이후¹⁾ 온실가스 감축에 대한 관심과 노력이 집중되어 왔지만 산업화시대 이후 지속적으로 배출된 온실가스로 기후변화 영향은 필연적이기 때문에 그에 대한 적응(adaptation) 역시 고려해야 한다. 최근에는 영향에 적응하는 수동적인 접근법에서 더 나아가 적응하는 과정에서의 발전적인 변

[†]Corresponding author : yoonej@krihs.re.kr (Urban Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements, Sejong-si, 30147, Korea. Tel. +82-43-960-0219)

ORCID 윤은주 0000-0002-6531-206X

이지우 0009-0000-7156-2543

Received: May 8, 2024 / Revised: June 14, 2024 1st, July 31, 2024 2nd / Accepted: August 23, 2024

1) 2020년 12월 문재인 정부는 2050년 탄소중립을 선언하였으며, 이후 2021년 제정된 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 제7조제1항에서는 2050년 탄소중립을 국가 비전으로 규정하였다.

화(transition)와 전환(transformation)까지도 강조되면서 기후변화에 대한 회복탄력성, 즉 기후탄력성이 강조되는 추세이다(Adger et al., 2005; Tyler and Moench, 2012).

도시지역은 사람과 시설이 밀집되어 있어 기후변화 영향으로 인한 피해 또한 집중적으로 발생하는 공간이다. 같은 맥락에서 회복탄력성을 높임으로써 얻는 편익 역시 큰 공간이기도 하다. 이에 따라 기존에 도시의 회복탄력성 개념을 정립 및 평가하는 연구가 다수 수행되어 왔다(Douxchamps et al., 2017; Meerow et al., 2016; Ribeiro and Gonçalves, 2019; Sharifi and Yamagata, 2016). 그럼에도 도시공간은 다양한 요소들이 기능적·구조적으로 연계되어 복잡성이 높고, 또 계속 변화하기 때문에 지금의 수준을 진단하거나, 사건(event) 이후 원 상태로 돌아오는 전통적인 회복탄력성 개념을 적용하는 데에는 여전히 어려움이 존재한다(Meerow et al., 2016). 또한, 기후탄력성 개념과 유사한 기후변화 적응 관점에서 제공되던 취약성 평가도구와 영향 정보 등은 읍면동, 1 km 격자 또는 유역 단위 등 낮은 해상도로 제공되고 있어²⁾ 실행 계획과의 연계하기 어려웠다. 이에 따라 도시의 회복탄력성을 평가할 때에는 회복탄력성에 영향을 미치는 특정 요소에 집중하여 복잡성을 낮추면서도 ‘동적 평형(Dynamic equilibrium)’의 개념에 기초하여 변화하는 도시공간을 적절히 다룰 수 있어야 하고, 공간해상도를 높임으로써 회복탄력성을 향상시키기 위한 계획과의 연계성을 높일 필요가 있다.

그린인프라는 기후변화를 완화 및 적응하는 데 있어 고편익(Co-benefit)이 가장 높은 수단인 동시에 도시민이 생활하는 데 필수적인 서비스를 제공하는 기반시설이다(Demuzere et al., 2014; Kabisch et al., 2016). 그린인프라의 개념적 범위는 국가 및 연구자에 따라 다소 상이하다(Kim and Son, 2012). Benedict and McMahon (2002)는 그린인프라를 “자연생태계 가치와 기능을 보전하고, 깨끗한 대기질 및 수질을 유지하며 인간과 야생동물에게 광범위한 편익을 제공하는 자연지역과 오픈스페이스가 상호연계된 네트워크” 등 포괄적으로 정의하였다. 반면에 미국의 환경보호청(EPA, Environmental Protection Agency)에서는 그린인프라를 “우수와 유출수를 흡수, 증발, 재활용하는 자연적 물순환의 과정을 유사하게 모방하거나 사용하는 시스템과 기술”로 정의하면서(EPA, 2008) 저영향 개발(LID, Low Impact Development) 관련 시설을 강조하고 있다. 도시 차원에서 정량적 평가를 할 때에는 데이터

가용성 등으로 인해 그린인프라의 포괄적 개념이 적절하나, 이에 기초하여 계획을 할 때에는 LID 등의 실질적 계획수단에서 접근할 수 있다. 이러한 개념적 차이에도 불구하고 그린인프라는 공통적으로 그 수준이 높아질수록 온실가스의 흡수량이 많아지고 도시열섬의 강도를 낮추며, 도시에서의 자연적 물 순환의 비율을 높임으로써 폭우에 대한 대응력을 높이는 특성이 있다(Gunawardena et al., 2017; Lovell and Taylor, 2013; Norton et al., 2015). 더불어, 그린인프라를 이용하는 도시민의 신체적, 정신적 건강을 향상시킬 수 있다는 연구사례 역시 꾸준히 보고되고 있다(Watts et al., 2015). 즉, 그린인프라는 기후변화에 대한 도시의 대응력뿐만 아니라 도시공간 자체를 보다 적절한 상태(Desired state)로 변화시킬 수 있는 구성요소이다. 그러나 그린인프라의 양적, 질적 개선과 도시 기후탄력성 간의 서로 비례하는 관계에 있더라도, 도시공간의 어디를 중심으로 하느냐에 따라 기후탄력성의 향상 수준은 달라질 수 있다.

이에 따라 본 연구에서는 도시 기후탄력성 관점에서, 그동안 가장 큰 피해를 초래했던 폭우에 대한 그린인프라 공급의 적절성(이하 그린인프라 기후탄력성)을 격자단위에서 평가하는 체계를 제안하고자 한다. 구체적으로, 이미 발생한 폭우의 기록뿐만 아니라 기상청에서 제공하는 미래 기후변화 시나리오에서의 강수량 변수에도 적용할 수 있도록 구성하였으며, 100 m 격자단위에서 그린인프라 공급의 적절성을 평가함으로써 그린인프라의 확충 및 개선에 관한 공간 의사결정에 활용될 수 있도록 하였다. 최근 지자체가 수립하는 환경계획 및 적응대책 등에서는 공간 계획으로 구체화하는 것이 강조되는데, 본 연구에서 다루는 100 m 격자 단위는 기존 기후변화 영향평가 연구에서 활용하던 1 km 격자에 비해 세밀한 공간식별이 가능하므로 활용도가 높다. 더불어, 격자단위에서 평가된 그린인프라 기후탄력성을 도시차원에서 종합할 수 있도록 함으로써 지역 간 비교 또는 국토의 유형 구분 등에도 활용할 수 있도록 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 도시 기후탄력성 관점에서 첫째, 그린인프라를 평가하기 위한 프레임워크를 설정하고, 둘째, 그에 따른 평가방법론을 도출한 다음, 셋째, 경기도 수원시를 대상으로 시범 적용하여 그 결과를 고찰하였다.

2) 지자체에서는 기후위기 적응 대책 및 계획을 수립할 때 여건 분석의 단계에서 국가기후적응센터에서 운영하는 기후위기 취약성 평가 도구(VESTAP)(<https://vestap.kei.re.kr/loginPage.do>)와 MOTIVE (<http://motive.kei.re.kr/login.do>) 자료를 활용하고 있다.

2. 연구방법

본 연구의 흐름은 다음과 같다. 첫째, 그린인프라 기후탄력성의 개념을 4Rs의 관점에서 조작적으로 정의하고, 수요 및 공급으로 구성되는 평가 프레임을 도출하였다. 둘째, 수요 및 공급을 격자단위에서 정량적으로 평가할 수 있는 항목을 도출하였다. 셋째, 수요 및 공급 간 균형 수준(기후탄력성 수준)을 평가하는 방법, 수요 대비 공급이 부족한 지역을 선정하는 방법을 도출하였다. 넷째, 경기도 수원시에 시범 적용하고 평가체계의 적절성을 고찰하였다.

2.1. 그린인프라 기후탄력성 평가 프레임

관련 선행연구에서는 회복탄력성 개념을 4Rs (Redundancy, Robustness, Rapidity, Resourcefulness)로 구조화함으로써 해당 개념의 이해도 및 활용도를 높인 바 있다(Bruneau et al., 2003; Simonovic and Arunkumar, 2016). 본 연구에서 다루는 그린인프라 기후탄력성 개념 역시 상기의 4Rs에 기초하였으나, 도시차원의 그린인프라 확충이 도시 공간 구조의 변화를 전제로 하는 중장기적이면서도 점진적인 과정이란 점을 고려하여 다음과 같이 조작적으로 정의하였다. 먼저 가외성(Redundancy)은 현재를 기준으로 하였을 때 필요 이상의 그린인프라를 확보함으로써 추가적인 기후변화 영향에도 도시의 기능이 저하되지 않도록 하는 것을, 견고성(Robustness)이란 도시 기능이 저하되더라도 수용 가능한 범위 내로 조절하는 것을 의미한다. 또한, 그린인프라는 도시의 각종 자연적·반자연적 요소를 포괄하면서도 즉각적·공학적 수단은 아니기 때문에, 신속성

(Rapidity) 및 자원동원성(Resourcefulness)은 공통적으로 기후변화 영향에 대비하여 선제적으로 신속하게 그린인프라 확충을 하는 것을 의미한다(Fig. 2a). 본 연구에서는 이상의 4Rs를 기후변화라는 충격에 대한 회복탄력성을 설명하는 척도에서 더 나아가, 회복탄력성을 보다 적절한 상태로 변화시키기 위한 접근법으로도 활용하였다. 즉, 수요와 공급 관점에서 그동안 경험하지 못했던 기후변화 문제로 그린인프라에 대한 새로운 수요가 발생하더라도 ‘선제적 또는 즉각적으로(Rapidity, Resourcefulness)’ ‘해당 수요 이상의(Redundancy)’ 그린인프라가 ‘적재적소에 체계적으로 공급(Robustness)’되어 있다면 4Rs가 개선되는데, 이것은 결국 회복탄력성이 저하되지 않거나 저하되었더라도 허용 가능한 범위 내에서 관리되거나 빠르게 회복되는 것으로 이어지게 된다.

또한, 그린인프라 기후탄력성을 수요와 공급의 관점에서 평가하는 것은 다음의 측면에서 유용할 것으로 판단하였다. 첫째, 그린인프라의 개념 자체가 도시민에게 필수적인 서비스를 제공하는 기반시설임을 의미하는데, 기반시설은 그 서비스 수요에 기초하여 공급되는 것을 기본 원칙으로 한다. 선행연구에서 역시 그린인프라의 생태계서비스를 대상으로 수요와 공급 간의 관계를 분석한 경우가 많았다(Dai et al., 2021; Hegetschweiler et al., 2017; Meng et al., 2020; Vallecillo et al., 2018). 둘째, 해당 관점은 기후변화로 인한 영향을 시간에 따른 ‘수요의 변화’로서 규정하고, 현재의 공급 수준과의 간극에 따라 기후탄력성의 변화를 평가할 수 있다. 셋째, 수요 변화에 대응하여 공급이 적절하게 변화하는 상태를 기후탄력적인 상태로 정의함으로써 ‘동적 평형’의 개념과도 연계할 수 있다(Fig. 2b). 시간의 흐름에 따라 기후탄력적인 그린인프라, 즉 평형 상태의 그린인프라를 정의하는 척도는 수요 대비 공급의 적정성으로서 동일하지만, 해당 평형을 이루기 위한 ‘수요’와 ‘공급’의 각 수준은 지속적으로 변화하기 때문에 본 연구에서는 이를 ‘동적 평형’으로 정의하였다. 그린인프라 수요와 공급은 다양한 공간 규모에서 평가할 수 있으나, 그린인프라가 긍정적인 영향을 미치는 공간적 범위가 한정되어 있음을 고려하였을 때 도시 차원보다는 그 하위 공간 단위에서 평가가 적절하다. 선행연구에서는 다양한 공간 단위를 적용하였으나, 본 연구에서는 1 km 격자 단위로 제시되는 기후변화 시나리오의 상세화 가능성, 그 외 각 평가항목과 연계되는 인구 및 지형 관련 입력자료의 해상도 등을 종합 고려하여 100 m 격자 단위에서 평가를 수행하였다.

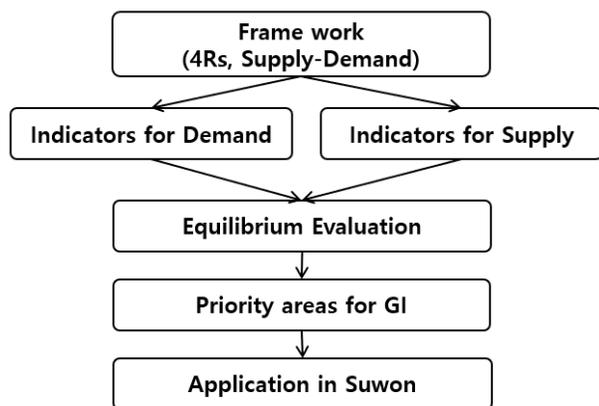


Fig. 1. Research flow

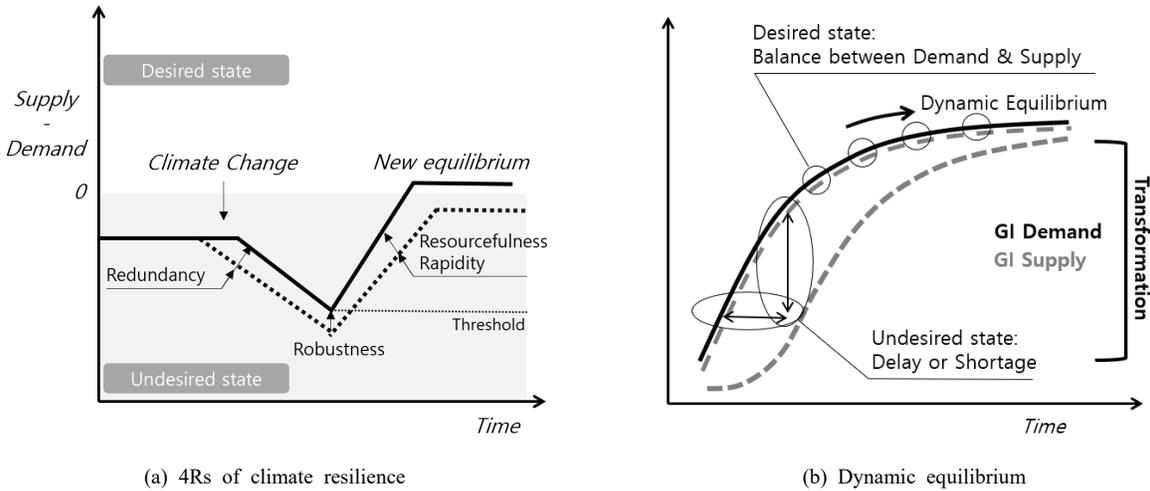


Fig. 2. Climate resilience of green infrastructure

이에 따라 본 연구에서의 그린인프라 기후탄력성 평가 체계는 크게 그린인프라에 대한 수요 평가, 그린인프라의 공급 평가, 그린인프라 수요 공급 간 균형 평가 및 그린인프라의 우선 확충이 필요한 지역 선정으로 구분된다. 수요 및 공급의 평가항목의 구성은 본 연구의 주요 대상이 그린인프라임을 고려하여, 기존의 폭우 취약성 또는 위험도 관련 평가 항목 중 그린인프라 현황에 관한 부분은 공급으로, 그 외의 부분을 그린인프라에 대한 수요로 정리하였다. 또한 기후변화 관련 연구임을 고려하여 미래 자료를 구축하기 어렵거나 구축에 따른 효용이 낮을 것으로 판단되는 평가항목은 제외하였다. 수요 및 공급은 여러 개의 평가항목으로 구성되어 있으므로 그 복잡성을 완화하고자, 핵심이 되는 평가항목과 이를 보완하는 성격의 평가항목을 구분하고 후자의 평가항목은 가중치로 변환하여 적용하였다. 폭우에 대한 취약성 또는 기후탄력성을 다루었던 선행연구에서 공통적으로 활용되는 평가항목을 ‘핵심적 성격의 평가항목’으로 활용하였고, 연구에 따라 선택적으로 활용되거나 설정된 가중치가 낮은 경우, 또는 관련 통계 및 물리모형 등에서 변수 또는 계수로 활용되는 평가항목을 ‘보완적 성격의 평가항목’으로 구분하였다. 예를 들어, 폭우를 다루는 대부분의 연구에서 공통적으로 활용하는 평균 및 극한 사상에서의 강우량은 핵심적인 평가항목으로, 강우량에 따른 유출량을 추정하는 합리식 중 유출계수 등에 직·간접적인 영향을 미치는 지형, 피복 상태 등은 보완적 평가항목으로 활용하였다(Fig. 3, Step1). 또한, 이것은 1 km 해상도로 구축된 강우량 자료를 1:5,000의 축

적에서 구축된 지형, 피복 등의 자료를 통해 100 m 격자 단위로 상세화 하는 효과도 기대할 수 있다. 수요 부분에서 핵심적인 평가항목 값은 보완적 평가항목의 값을 가중치로 이용하여 1.5 배 내에서 상향조정 되는데, 여러 개의 보완적 평가항목이 하나의 가중치를 구성하는 경우에는 각 항목이 동일한 비중을 가지면서 그 합이 최대 1.5가 되도록 하였다. 물론 가중치의 범위는 향후 시범 적용 결과가 축적된다면 환류되어 조정되거나 고도화될 수 있을 것으로 판단된다. 한편 공급 부문에서 그린인프라 유형별 중요도를 나타내는 가중치는 선행연구에서 제시된 0~1의 범위의 가중치를 그대로 활용하였다(Fig. 3, Step2). 각 단계에서 도출되는 값은 단위의 차이, 분포 값 범위의 차이에 따른 가중 효과가 발생하지 않도록 0에서 1의 값으로 표준화하였는데, 모든 평가항목의 값이 정규분포를 보이지 않으므로 Z-score로 변환하지 않고 min-max 표준화를 활용하였다(Fig. 3, Step1-3).

해당 평가체계는 2018년을 기준으로 경기도 수원시에 시범 적용하였다. 시범대상지인 수원특례시는 도시생태환경지도 등의 환경 데이터가 체계적으로 구축되어 있고, 다양한 관점에서의 그린인프라 연구가 축적되어 본 연구 방법론의 구축하거나 그 결과를 비교 검토하는데 적절하였다. 또한 수원시의 회복탄력성에 관한 보고서에 따르면, 수원시는 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에 따라 2040년 연간강수량이 현재 대비 최대 50~103%까지 상승할 것으로 전망된다. 특히, 온실가스 저감 효과가 어느 정도 내재된 RCP 4.5 시나리오에서 역시 크게 상승하는 것으로 나타나 관

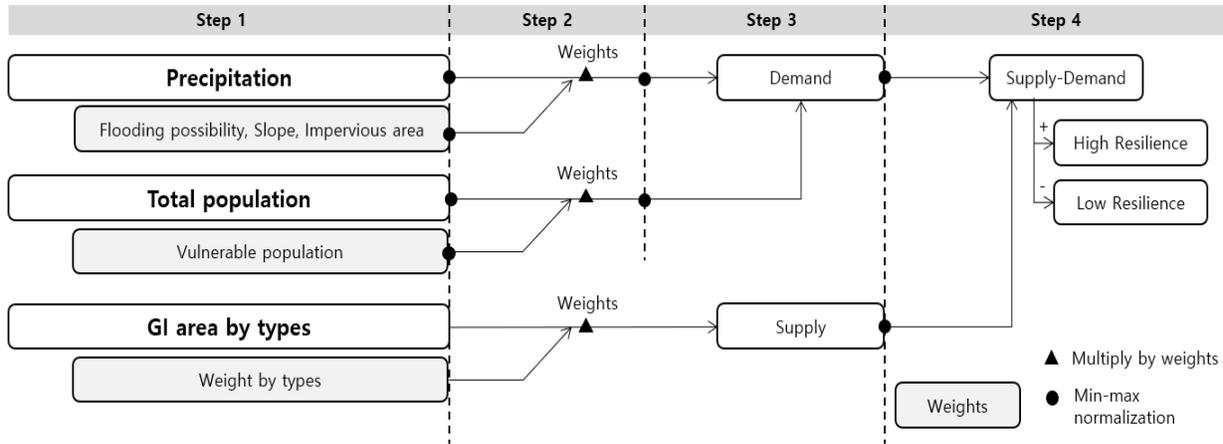


Fig. 3. Flow of analysis

런 대비가 필요함이 지적되었다(Kim et al., 2017). 또한, 2018년은 폭염 및 폭우 등의 이례적인 기상 관련 재해가 발생하였던 해로서, 특히 10월에는 전국 강수량이 1973년 이후 최다로 기록되는 등 계절적 변동이 크게 나타나 연구의 시간적 범위로 설정하였다(KMA, 2019).

2.2. 그린인프라 수요 평가항목

폭우와 관련된 그린인프라 수요는 강우량이 많을수록, 공간 특성으로 인해 침수 위험이 높을수록, 거주하는 인구 규모가 클수록 높은 것으로 가정하였다. 먼저, 강우량에 관한 부문을 평가하기 위하여 WMO (World Meteorological Organization)에서 제공하는 강우 관련 11개 지수 중 (ETCCDI: Expert Team on Climate Change Detection and Indices) 평균사상 지수로서 SDII를³⁾, 극한사상에 관한 지수로서 R80 mm⁴⁾을 선정한 다음, 기상청에서 제공하는 기후변화 시나리오의 해상도를 고려하여 1 km 격자 단위로 구축하였다. 그린인프라는 도시의 자연적인 물순환 비율을 높임으로써 평균사상 변화에 대한 도시의 대응력을

높일 수 있을 뿐만 아니라, 단기적인 침투 유출량 및 유출 시간을 지연시킴으로서 극한사상으로 인한 영향을 저감할 수 있기 때문이다.

다음으로 침수위험을 평가하기 위하여 사전에 모의된 침수 가능성, 그 외에 직·간접적으로 영향을 미치는 경사도와 불투수 면적을 반영하였다. 여기에서의 사전에 모의된 침수 가능성이란 환경부에서 제공하는 하천범람지도 및 내수침수지도에서 제시된 홍수·침수의 공간적 범위를 통합한 것을 의미하는데⁵⁾, 해당 자료의 구축이 아직 완료되지 않았고 기후변화로 전제가 되는 극한사상이 달라질 수 있으므로 경사도 및 불투수 면적 등을 보완적으로 활용하였다(Kaur and Gupta, 2022; Li et al., 2020; Oh, 2015; Senes et al., 2021). 경사도는 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model) 30 m 해상도 DEM을 활용하여 산정한 평균 경사도를 활용하였고, 불투수 면적은 격자 중 도시생태현황도 작성 지침에서 불투수 지역으로 분류되는 토지피복 유형⁶⁾의 면적 비율을 활용하였다.

마지막으로 폭우에 영향을 받는 인구를 평가하기 위하

3) ETCCDI는 강우 관련 평균사상 지수로 SDII (Simple Precipitation Intensity Index)와 PRCPTOT (Precipitation total)을 제공하는데, 그린인프라를 통한 자연적인 물순환은 시간의 흐름에 따라 반복되는 기작에 의한 것임을 고려하여, 강우 총량을 나타내는 PRCPTOT보다 평균적인 양을 나타내는 SDII가 적절한 것으로 판단하였다.
 4) ETCCDI는 강우 관련 극한사상 지수로 특정기간 내 1일 또는 5일 최대 강수량을 활용하는 Rx1day 및 Rx5day, 특정 기간 내 특정수준 이상의 강우량이 내린 날수 또는 내린 날의 총 강수량을 활용한 Rnnmm 또는 Rnnp 등을 제공하는데, 국내 고유한 특성이 고려된 기상청의 호우주의보 기준이 일일 80 mm 이상임을 고려했을 때, R80 mm이 적절한 것으로 판단하였다.
 5) 환경부에서 제공하는 하천범람지도는 80 ~ 110 mm 이상의 극한강우 상황에서 하천제방의 설계기준을 초과하여 제방붕괴, 제방월류가 발생하는 것을 가정하여 하천 주변지역의 침수 범위를 예측한 정보를 제공한다. 또한 내수침수지도는 극한강우 상황에서 빗물 펌프장과 저류조 등의 우수배제시설의 용량이 초과됨에 따라 방색하는 침수범위 및 침수심에 대한 정보를 제공한다.

Table 1. Types and weights of green infrastructure

Green infrastructure type		Weight	Land cover map (code)
Natural GI	Forest	1	Broad-leaved forest (310), Coniferous forest (320), Mixed forest (330)
	Grassland	1	Natural grassland (410)
	Water	1	Inland water (710), Ocean (720), Inland wetland (510), Coastal wetland (520)
Parks and semi-natural urban GI	Urban parks (medium to large)	0.8	Constructed Grassland (420)
	Urban parks (small)	0.6	Constructed Grassland (420)
	Agricultural Land	0.4	Rice paddy (210), Field (220), House plantation (230), Orchard (24), Other plantations (250)
Potential GI	Barren	0.5	Natural Barren (610), Constructed Barren (620)

Table 2. Evaluation system of green infrastructure considering climate resilience

Categories		Index/Indicator	Data	Source
Demand	Precipitation	SDII ¹	MKPRISM	KMA, 2018
		R80 mm ²		
	Spatial characteristic	Flooding possibility	Flood map	MOE, 2023
		Mean slope	DEM	SRTM, 2014
		Impervious surface ratio	Land cover map	MOE, 2020
	Population	Total population	SGIS	Statistics Korea, 2021
Vulnerable population (age ³)				
Vulnerable population (business type ⁴)				
Supply	Green infrastructure	Quantity of green infrastructure	Land cover map	MOE, 2020
		Quality of green infrastructure		

1. $SDII = \frac{PR_{wj}}{W}$ is the daily precipitation amount on wet days in period j , W is number of wet days in j

2. Annual count of days when precipitation amount ≥ 80 mm (80 mm is a defined threshold)

3. Under 16 or Over 65

4. Manufacturing, wholesale and retail, watermelon and restaurant industry, agriculture, forestry and fisheries

여 전체 인구밀도와 취약계층의 비율을 반영하였다. 기후 변화 취약성에 관한 연구에서 총 인구수 또는 인구밀도가 민감도 요인으로 활용하고 있어(Cho and Kim, 2015; Lee et al., 2019), 본 연구에서 역시 격자별 총 인구수, 즉 인구 밀도를 반영하였다. 또한 취약계층으로서 연령 기준 16세 이하 및 65세 이상 인구수를(Kim et al., 2013, Kim J et al., 2020; Lee et al., 2016), 사업체 유형 기준으로는 제조

업, 도소매업, 숙박 및 음식점업, 농림어업에 대한 종사자 수를 반영하였다(Han et al., 2020; Lee et al., 2017).

2.3. 그린인프라 공급 평가항목

그린인프라의 공급은 그린인프라의 양적, 질적 수준이 좋을수록 높아지는 것으로 가정하였다. 먼저, 관련 선행연구 중 Yeo et al. (2022, pp. 60-65) 및 Song et al. (2022)

6) 토지피복 중분류 기준으로 주거지역, 공업지역, 상업지역, 문화체육휴양지역, 교통지역, 공공시설지역, 시설배치, 기타배치가 불투수 지역으로 분류된다(ME, 2021)

를 참고하여 그린인프라 범위에 토지피복 중분류 기준 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역을 포함하고, 유형을 크게 자연형 그린인프라, 조성된 그린인프라, 잠재적 그린인프라로 구분하였다(Table 1). 조성된 그린인프라 유형에 포함되는 공원녹지(대부분 토지피복 중분류 기준 인공초지에 해당)의 경우, 그 규모에 따라 미기후 조절 기능이 달라짐을 고려하여 7) 1ha를 기준으로 소형 및 중대형 공원녹지의 세부 유형으로 다시 구분하여 활용하였다. 이처럼 본 연구는 도시 차원에서 적용 가능한 평가체계를 제안하고자 토지피복 기반의 포괄적인 그린인프라 개념을 활용하였다. 폭우에 대한 대응력이 높은 LID 시설 등의 그린인프라 유형은 관련 정보 구축이 미흡하여 제외하였으나, 이후 평가결과를 활용한 조치 계획 단계에서는 반영 가능할 것으로 예상된다.

다음으로 그린인프라 유형별 가중치를 설정하였다. 관련 선행연구에서는 전문가 설문에 기초하여 자연형에 가까운 그린인프라일수록 높은 가중치를 적용한 경향이 있었으나 연구에 따라 그 편차가 있어 신뢰성 확보가 어려웠다(Song et al., 2022). 따라서 영국 런던에서 도시환경에서의 녹지에 정책적으로 적용하고 있는 Urban Greening Factor를 본 연구에서 도출한 그린인프라 유형에 연계하여 활용하였다(GLA, 2023; Table 1). 마지막으로 개별 격자에서 그린인프라 유형별 면적을 산정한 다음, 상기의 가중치를 적용하여 합산함으로써 그린인프라의 질적, 양적 수준을 종합적으로 반영하였다. 기존에는 격자 단위에서 고해상도의 값을 임계값 기준으로 1 또는 0으로 변환하는 리샘플링(resampling) 방식이 적용되기도 하였으나, 본 연구에서는 1:5,000에서 작성된 토지피복 중분류 정보를 격자 단위에서 집계하여 그대로 활용함으로써 데이터 손실을 방지하였다.

2.4. 그린인프라 수요 및 공급 간 균형 수준 평가방법

그린인프라의 수요 및 공급 수준 간 균형 수준을 평가하기 위하여, 수요 및 공급 각각을 최대-최소 정규화(min-max normalization)에 따라 0에서 1의 범위에서 표준화한 다음(Dai et al., 2021; Langemeyer et al., 2015; Wang et al., 2020), 공급과 수요 값 간의 차이를 통해 균형수준을 평가하였다(Larondelle and Lauf, 2016). 양의 값이 나

타나는 격자는 수요에 비해 공급이 충분히 이뤄졌음을(균형을 이루었으므로 기후탄력성이 높은 것으로 판단), 음의 값이 나타나는 격자는 수요에 비해 공급이 부족함을 의미한다. 또한, 도시 전체에 대해서는 격자별 산정된 값의 분포도를 작성하였을 때 평균의 값이 커질수록, 평균이 유사하다면 음의 값 비중이 작을수록 수요와 공급 간 균형 수준이 높은, 즉 기후탄력성이 높은 것으로 판단할 수 있다.

단, 격자 단위에서 단순히 공급과 수요 값 간의 차이가 같은 경우더라도 공급이 상대적으로 높은 편이지만 수요는 더 높았기 때문인지, 수요가 상대적으로 높지는 않으나 공급이 크게 부족했기 때문인지를 파악하기 어렵다는 단점이 있다. 이에 따라 추가적으로, 공간자기상관성지수를 적용하여 수요가 높은 핫스팟과 공급이 낮은 콜드스팟이 중첩되는 범위를 도출하고, 해당 범위를 그린인프라 기후탄력성이 다른 지역 보다 확연히 낮은 지역, 즉 그린인프라의 우선 확충이 필요한 지역으로 고려하였다. 활용 가능한 공간상관성 지수 중 Getis-Ord G^* 는 전체 공간 대비 절대적 기준에서의 핫/콜드스팟을, Local Moran's I 는 주변 지역 대비 상대적 기준에서의 핫/콜드스팟을 도출하는데 적합하므로, 각각을 중첩하여 활용하였다(Yoon et al., 2016).

3. 결과 및 고찰

3.1. 그린인프라의 수요 및 공급 수준

수원시에 대해 시범 적용하였을 때, 그린인프라 수요에 대한 결과는 FFig. 4(a)와 같다. 수원의 남서쪽을 중심으로 수요가 높은 지역이 집중적으로 나타나는데, 해당 지역은 공통적으로 수원 내 다른 지역에 비해 80 mm 이상 일수 및 일평균 강우량이 높게 나타났고, 홍수 및 침수의 발생 가능성이 있었던 지역이다. 특히, GIS에서 제공하는 급간의 분류 기법인 Natural Break를 활용하여 수요를 5개 등급으로 구분하였을 때, 1, 3, 5등급 구분에 큰 영향을 미친 평가항목은 일평균 강우량인 것으로 해석된다. 또한, 2와 3등급, 3과 4등급 구분에는 전체 인구수 및 취약계층의 인구수가 크게 영향을 미친 것으로 해석된다.

그린인프라 공급과 관련하여 그린인프라의 전체 면적은 약 7,154 ha로, 유형별 비중은 산림 2,621 ha (36.63%), 경작

7) 연속된 공원녹지의 면적 규모에 따라 생태적 건강성, 도시열섬 완화 효과에 차이가 있는 것으로 나타났다(Aram et al., 2019; Kim J et al., 2020; Park and Cho, 2016). 폭우의 저감과 공원녹지 규모 간의 관계성 연구는 상대적으로 미흡하나, 공원녹지의 규모가 커질수록 녹지대 등의 투수성 표면 면적의 비율, 수목의 수 등이 커지기 때문에 본 연구에 반영하였다.

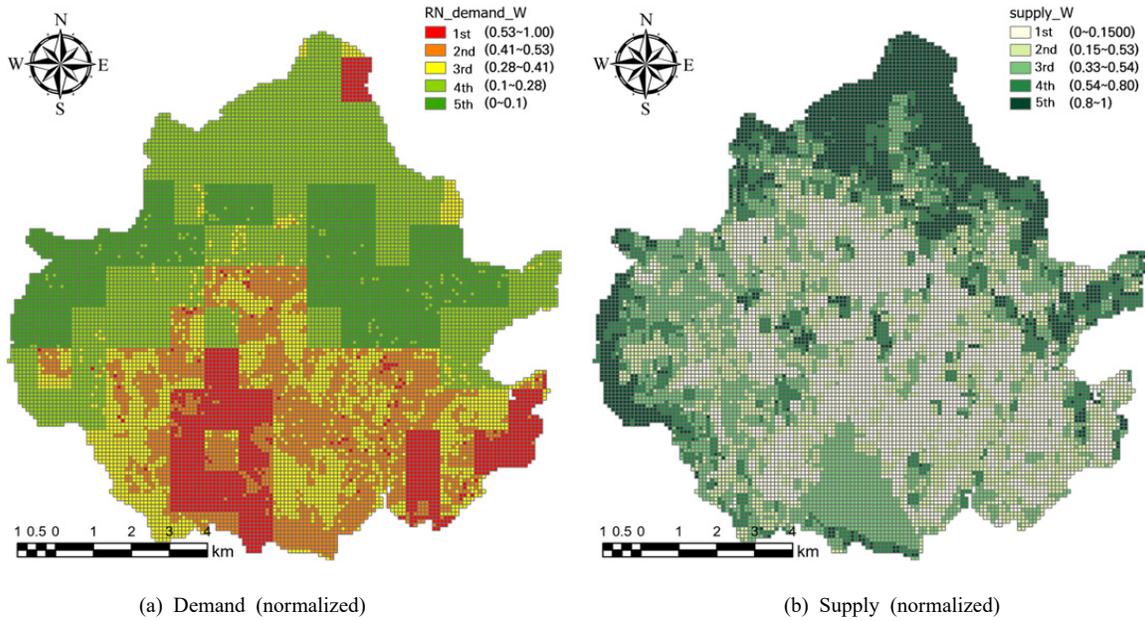


Fig. 4. Climate resilience of green infrastructure

지 1,724 ha (24.09%), 소형 공원녹지 1,172 ha (16.38%), 중대형 공원녹지 674 ha (9.42%) 순으로 높게 나타났다. 공원녹지 유형의 경우 면적 기준으로 세부유형을 구분하지 않았을 때, 산림 다음으로 그 비중이 크다. 중대형 공원녹지 유형은 하천 변을 따라 연속적으로 분포하는 경우가 많았고, 소규모 공원 및 조경공간을 포함하는 소형의 공원녹지 유형과 잠재적인 그린인프라에 해당하는 나지 유형은 도시 전역에 고르게 분포되어 있었다. 해당 면적에 유형별 가중치를 적용하는 결과는 Fig. 4(b)와 같다. 개발이 주로 이루어진 남쪽 지역은 중대형 공원녹지 유형이 분포하는 일부 지역을 제외하고는 산림이 분포하는 북쪽에 비해 공급 수준이 전반적으로 낮게 나타났다. 앞서 기술한 수요의 공간적 패턴과 비교하였을 때, 수요가 높게 나타났던 지역에서 그린인프라가 질적, 양적 수준은 낮게 나타나는 경향이 관찰되었다.

3.2. 그린인프라 수요 및 공급의 균형 수준

기후변화에 대한 그린인프라의 수요 및 공급 간 균형 수준을 평가한 결과는 Fig. 5와 같다. 먼저 격자 단위 평가에서 수요 대비 공급이 부족한 격자들은 붉은색 계열로 평가되었는데(Fig. 5a), 전체 격자 중 약 43.8% 수준인 것으로 나타났다. 특히, 수요 대비 공급 수준이 특히 낮았던

남서쪽의 고색역 일대는 상대적으로 경사는 평탄하나 불투수성 면적의 비율과 침수 위험이 크게 나타났던 지역으로서, 실제로도 2020~2023년에 지하차도 및 건물의 지하공간 중심으로 침수 피해가 발생하였다(Fig. 5a), 남동쪽 망포역 일대는 국지적인 호우가 상대적으로 빈도 높게 발생하였으나 지역이나 실제 침수피해 기록이 없었던 반면, 고층 주거용 건물과 상업건물이 혼재되어 있고 도로는 협소하여 그린인프라 공급이 부족하였다(Fig. 5a). 수요 대비 공급이 부족한 지역의 기후탄력성을 높이기 위해 기후 및 인구조로 인한 수요를 낮추는 것은 사실상 어려우므로, 그린인프라 공급 수준을 높여 균형을 이루어야 한다. 다만, 고밀의 도시공간에서 그린인프라 확충을 위한 신규 부지를 확보하는 것 역시 장애요인이므로, 기존에 확보된 그린인프라의 정비, 건물 및 시설물을 이용한 입체녹화, 공공의 이용 가능성까지 고려한 입체 도시공원의 조성 등 다각적인 접근법이 강구될 필요가 있다.

다음으로, 공간자기상관성지수에 기초하여 선정된 그린인프라 우선 확충지역은 1개 격자를 제외하고는 수요 대비 공급 수준이 낮은 격자에 해당하였으며(음의 값), 주변의 격자와 확연히 구분되면서도 연속적이면서 응집된 공간 패턴이 나타났다(Fig. 5b). 선행연구에서는 Bivariate Local Moran's I를 단독으로 활용한 경우가 많았으나(Dai

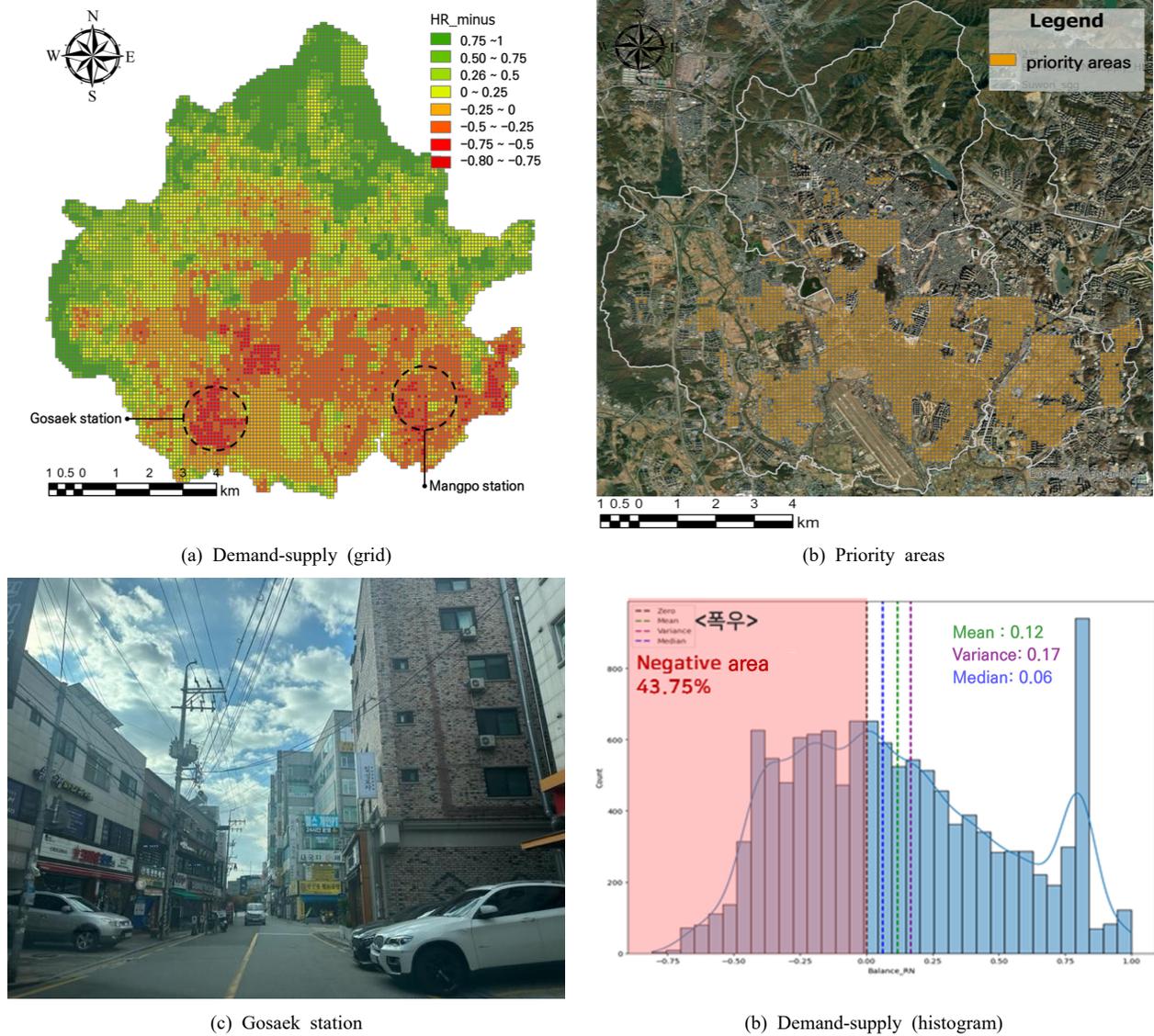


Fig. 5. Climate resilience of green infrastructure

et al., 2021; Zhong et al., 2020), 본 연구에서 두 개의 공간자기상관지수를 조합하여 도출한 결과와 비교했을 때 그 면적이 약 23.2% 증가하면서 공간적 패턴은 파편화되었고, 수요 대비 공급수준이 양호한(양의 값으로 산정된) 격자도 27개 포함하는 것으로 나타났다. 그린인프라 우선 확충지역의 면적이 일종의 비용이고 이에 포함된 격자들의 수요 및 공급 간 차이가 그린인프라가 확충되었을 때 해소 가능한 문제 크기, 즉 기대효과라고 가정하였을 때 본 연구에서 적용한 방법은 비용 대비 효과가 높은 것으로 판단하였다. 또한, 그린인프라 우선 확충지역은 격자별

로 상이하게 나타나는 수요 및 공급 간 균형 수준에 기초하여 통계적으로 유의미한 공간적 범위를 특정함으로써, 기후탄력성 관련 전문성이 낮은 관계자의 이해도를 높이는데 유리할 것으로 판단된다. 다만, 이 경우 그린인프라 우선 확충지역 내에서의 상대적 중요도는 파악하기 어려우므로, 수요 및 공급 간 차이를 평가한 결과와 상호보완적으로 활용할 필요가 있다. 마지막으로 도시 단위에서의 그린인프라 기후탄력성은 격자별 기후탄력성 값의 분포에 기초하여 판단하였는데, 평균은 0.06, 분산은 -0.02, 음의 값으로 나타나는 격자의 비율은 43.8% 수준으로 나타

났다. 평균값의 부호가 양(+)에 해당하므로 전체적인 그린 인프라의 수요 대비 공급 수준은 양호하나, 국지적으로는 그린인프라의 확충을 통해 공급 수준을 높여야 할 지역이 상당 수 있는 것으로 판단하였다. 다만, 해당 결과는 기후 변화 취약성평가와 같이 다양한 도시 간 상대적인 비교가 가능할 때 구체적인 해석이 가능할 것으로 예상된다.

본 연구에서 제안한 평가체계는 그린인프라에 대한 기후변화 관련 수요 변화와 계획적 관점에서의 공급 변화를 각각 평가하고, 그에 따른 수요 및 공급 간의 평형 수준을 평가할 수 있다. 즉, 현재와 비교하였을 때 미래에 수요가 변화하여도 그에 적절한 공급을 한다면 새로운 평형상태를 도달하게 되는데, 본 연구에서는 이를 동적 평형의 개념을 통해 제시하였다. 다만, 본 연구는 이를 구현하기 위한 평가체계 프레임과 방법론 제시에 중점을 두었으며, 시범 적용은 2018년의 단일 시점을 기준으로 하여 동적 평형에 대한 정량적 결과를 제시하지는 못하였다. 향후, 미래 다양한 시점에 대해 기상청에서 제공하고 있는 기후변화 시나리오를 대입한다면 수요의 공간적 분포 변화를 모의할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 현재 시점에서의 적절한 공급과 미래 시점에서의 적절한 공급 사이의 간극을 계획적으로 해소하기 위한 공간 의사결정 방법론과 연계된다면, 동적 평형을 가시화할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 도시 기후탄력성 관점에서 폭우에 대한 그린인프라 공급의 적절성을 격자 단위에서 평가하는 체계를 마련하고자 다음의 방법론과 결과를 제시하였다. 첫째, 기후변화에 대한 그린인프라 기후탄력성 개념을 4Rs의 관점에서 조작적으로 정의하고, 수요 및 공급으로 구성되는 평가체계의 틀을 제시하였다. 둘째, 격자 단위에서 그린인프라의 수요와 공급을 평가할 수 있는 항목을 도출하였다. 셋째, 그린인프라의 수요와 공급 간 균형 수준(기후탄력성 수준)을 격자 및 도시 단위에서 평가하는 방법과, 공간자기상관성에 기초하여 수요 대비 공급이 부족한 지역을 선정하는 방법을 제시하였다. 넷째, 이상의 평가체계를 경기도 수원시에 시범 적용한 다음, 수요 대비 공급이 부족한 격자가 실제 피해정보와 일치하는지를 비교함으로써 제시된 평가체계의 적절성을 검토하였다.

국토·도시 분야의 최상위 계획인 ‘제5차 국토종합계획’에서 확인할 수 듯이 그린인프라(또는 녹색인프라)에 대한 개념은 오래전부터 정책적으로 활용되고 있으나, 실제

계획에서 도시의 기반시설로서 녹지를 다루었던 사례는 거의 없었다. 본 연구에서 제안한 그린인프라 평가체계는 도시의 녹지 역시 도시 내 다른 기반시설처럼 수요에 따라 계획적으로 공급될 수 있는 기반을 마련한 것으로 판단된다. 다만, 도시의 기후탄력성을 다루는 초기 연구로서 다음과 같은 한계점을 도출할 수 있었으며, 이를 해소하기 위해서는 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

첫째, 본 연구는 기후변화 시나리오를 반영할 수 있는 구조를 평가체계를 구성하였으나 현재 시점을 기준으로 시범 적용을 하였다. 이에 따라 실제의 피해 기록이나 도시의 공간구조 등과 비교할 수 있다는 이점이 있었으나, 미래 기후변화에 따른 수요 및 기후탄력성의 변화는 개념적으로만 제시하였다는 한계 역시 있었다. 추가연구를 통해 기후탄력성과 관련한 현재 및 미래의 진단(Baseline)과, 조치에 따른 변화 수준 등을 정량적으로 분석할 필요가 있다. 둘째, 본 연구는 도시 기후탄력성 개념에 대한 사회적 합의가 이뤄지지 않은 현 시점에서, 좋고 나쁨을 판단할 수 있는 절대적 기준을 제안하지 못하였다. 상대적 기준에서 도출된 격자 단위의 값은 도시 내 그린인프라 확충의 우선순위 판단에는 활용할 수 있으나, 도시 단위의 값은 수원시 외에 다른 도시에 적용해야만 해석할 수 있을 것으로 예상된다. 셋째, 도시의 기후탄력성에 영향을 주는 다양한 요소 중 그린인프라에 한정하여 접근하였다. 향후 연구에서는 그린인프라 외에 이미 개발된 시가지 건조지역의 특성, 또는 물리적인 공간은 아니지만 도시의 변화에 직접적인 영향을 미치는 사회경제적인 구조 등을 포함하여 다룰 필요가 있다. 넷째, 기존 공간계획 체계에 그린인프라 기후탄력성의 평가결과를 내재화하기 위해서는 공간의사결정 지원에 관한 추가 연구가 필요하다. 구체적으로는 계획의 목표를 나타내는 계획지표와 연계하는 방안, 기후변화 시나리오의 변화에 따른 불확실성을 내재화하는 방안, 접근성 및 연결성 등 기존에 주요하게 다루었던 다른 계획목표와 통합하는 방안 등이 논의될 필요가 있다.

사사

본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 “신기후체제 대응 환경기술개발사업”의 연구개발을 통해 창출되었습니다(2022003570002).

References

- Adger WN, Hughes TP, Folke C, Carpenter SR, Rockstrom J. 2005. Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science* 309(5737): 1036-1039. doi: 10.1126/science.1112122
- Aram F, García EH, Solgi E, Mansournia S. 2019. Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon* 5(4): E01339. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01339
- Benedict MA, McMahon ET. 2002. Green infrastructure: Conservation for the 21st century. *Renew Resour J* 20(3): 12-17.
- Bruneau M, Chang SE, Eguchi RT, Lee GC, O'Rourke TD, Reinhorn AM, Shinozuka M, Tierney K, Wallace WA, Von Winterfeldt D. 2003. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthq Spectra* 19(4): 733-752. doi: 10.1193/1.1623497
- Cho HJ, Kim KB. 2015. Assessment of the social vulnerability in the climate change induced-flood risk: Focused on the city of Incheon (in Korean with English abstract). *J Clim Res* 10(4): 341-354.
- Dai X, Wang L, Tao M, Huang C, Sun J, Wang S. 2021. Assessing the ecological balance between supply and demand of blue-green infrastructure. *J Environ Manag* 288: 112454. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112454
- Demuzere M, Orru K, Heidrich O, Olazabal E, Geneletti D, Orru H, Bhave AG, Mittal N, Feliú E, Faehnle M. 2014. Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *J Environ Manag* 146: 107-115. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.07.025
- Douxchamps S, Debevec L, Giordano M, Barron J. 2017. Monitoring and evaluation of climate resilience for agricultural development - A review of currently available tools. *World Dev Perspect* 5: 10-23. doi: 10.1016/j.wdp.2017.02.001
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 2008. Managing wet weather with green infrastructure action strategy. Washington, DC: EPA.
- GLA (Greater London Authority). 2023. Urban Greening Factor (UGF) guidance; [accessed 2024 May 3] <https://www.london.gov.uk/programmes-strategies/planning/implementing-london-plan/london-plan-guidance/urban-greening-factor-ugf-guidance>
- Gunawardena KR, Wells MJ, Kershaw T. 2017. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Sci Total Environ* 584-585: 1040-1055. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.158
- Han D. 2020. Economic impacts of flood disaster by climate change on industry and selection of structural measures for flood prevention in the basin using economic analysis [dissertation] (in Korean with English abstract). Inha University.
- Hegetschweiler KT, de Vries S, Amberger A, Bell S, Brennan M, Siter N, Olafsson AS, Voigt A, Hunziker M. 2017. Linking demand and supply factors in identifying cultural ecosystem services of urban green infrastructures: A review of European studies. *Urban For Urban Greening* 21: 48-59. doi: 10.1016/j.ufug.2016.11.002
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2021. Climate change 2021 - The physical science basis: Working group I contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157896
- Kabisch N, Frantzeskaki N, Pauleit S, Naumann S, Davis M, Artmann M, Haase D, Knapp S, Korn H, Stadler J. 2016. Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: Perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. *Ecol Soc* 21(2): 39. doi: 10.5751/ES-08373-210239
- Kaur R, Gupta K. 2022. Blue-Green Infrastructure (BGI) network in urban areas for sustainable storm water management: A geospatial approach. *City Environ Interact* 16: 100087. doi: 10.1016/j.cacint.2022.100087
- Kim B, Kang J, Park C, Kim H. 2020. Analysis of Urban Heat Island (UHI) alleviating effect of urban parks and green space in seoul using Deep Neural Network (DNN) model (in Korean with English abstract).

- J Korean Inst Landsc Archit 48(4): 19-28. doi: 10.9715/KILA.2020.48.4.019
- Kim EY, Jung HJ, Jung KM. 2017. Evaluating and improving urban resilience to climate change in Suwon (in Korean with English abstract). Suwon, Korea: Suwon Research Institute. SRI-Basic-2017-04.
- Kim HM, Lee DG, Park C. 2013. A study on selection for vulnerable area of urban flooding adaptable capacity using MaxEnt in Seoul (in Korean with English abstract). J Korea Plan Assoc 48(4): 205-217.
- Kim J, Park JH, Cho BH, Lee SS. 2020. A comparative analysis of disaster vulnerability factors between declining areas and urban areas (in Korean with English abstract). J Digit Contents Soc 21(11): 2021-2032. doi: 10.9728/dcs.2020.21.11.2021
- Kim YG, Son YH. 2012. Study on the green infrastructure application with planning system -Focused on green infrastructure planning and policy in the UK- (in Korean with English abstract). J Korean Plan Assoc 47(5): 69-86.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2018. SSP Scenarios; [accessed 2023 May 30]. http://www.climate.go.kr/home/CCS/contents_2021/info/download.html
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2019. Weather characteristics in 2018 (Korea Meteorological Administration Press Release. 2019. 01. 08.); [accessed 2024 May 3] <https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156312314#pressRelease>
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2023. This summer, the national average temperature was 1°C higher than the average year, and precipitation fell 291.2mm more (Korea Meteorological Administration Press Release. 2023. 09. 07.); [accessed 2024 May 3] <https://www.kma.go.kr/kma/news/press.jsp?bid=press&mode=view&num=1194272&page=8&&field1=&text1=&field2=&text2=&field3=&text3=&field4=&text4=>
- Langemeyer J, Baró F, Roebeling P, Gómez-Baggethun E. 2015. Contrasting values of cultural ecosystem services in urban areas: The case of Park Montjuïc in Barcelona. Ecosyst Serv 12: 178-186. doi: 10.1016/j.ecoser.2014.11.016
- Larondelle N, Lauf S. 2016. Balancing demand and supply of multiple urban ecosystem services on different spatial scales. Ecosyst Serv 22(Part A): 18-31. doi: 10.1016/j.ecoser.2016.09.008
- Lee GS, Lee HS, Jung KS. 2017. The analysis of flood damage assessment using MD-FDA based on inundation trace map (in Korean with English abstract). J Korean Cadastre Inf Assoc 19(3): 29-40.
- Lee JS, Kim KR, Cho C, Kang M, Ha JC, Kim DS. 2019. Evaluating the accuracies of the WBGT estimation models and their onsite applicability in Korea (in Korean with English abstract). J Korean Soc Hazard Mitig 19(4): 53-63. doi: 10.9798/KOSHAM.2019.19.4.53
- Li L, Uyttenhove P, 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. Landsc Urban Plan 194: 103703. doi: 10.1016/j.landurbplan.2019.103703
- Lovell ST, Taylor JR. 2013. Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States. Landsc Ecol 28: 1447-1463. doi: 10.1007/s10980-013-9912-y
- ME (Ministry of Environment). 2021. Guidelines for preparation of urban ecological maps; [accessed 2024 May 3] [https://www.law.go.kr/%ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99%EB%8F%84%EC%8B%9C%EC%83%9D%ED%83%9C%ED%98%84%ED%99%A9%EC%A7%80%EB%8F%84%EC%9D%98%20%EC%9E%91%EC%84%B1%EB%B0%A9%EB%B2%95%EC%97%90%20%EA%B4%80%ED%95%9C%20%EC%A7%80%EC%B9%A8/\(2021-110,20210621\)](https://www.law.go.kr/%ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99%EB%8F%84%EC%8B%9C%EC%83%9D%ED%83%9C%ED%98%84%ED%99%A9%EC%A7%80%EB%8F%84%EC%9D%98%20%EC%9E%91%EC%84%B1%EB%B0%A9%EB%B2%95%EC%97%90%20%EA%B4%80%ED%95%9C%20%EC%A7%80%EC%B9%A8/(2021-110,20210621))
- Meerow S, Newell JP, Stults M. 2016. Defining urban resilience: A review. Landsc Urban Plan 147: 38-49. doi: 10.1016/j.landurbplan.2015.11.011
- Meng S, Huang Q, Zhang L, He C, Inostroza L, Bai Y, Yin D. 2020. Matches and mismatches between the supply of and demand for cultural ecosystem services in rapidly urbanizing watersheds: A case study in the guanting reservoir basin, China. Ecosyst Serv 45: 101156. doi: 10.1016/j.ecoser.2020.101156

- MOE (Ministry of Environment). 2020. Land Cover Map; [accessed 2023 Apr 20]. <https://egis.me.go.kr/>
- MOE (Ministry of Environment). 2023. Flood Risk Map; [accessed 2023 Aug 20]. <https://floodmap.go.kr/natreg/natregList.do>
- Norton BA, Coutts AM, Livesley SJ, Harris RJ, Hunter AM, Williams NS. 2015. Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landsc Urban Plan* 134: 127-138. doi: 10.1016/j.landurbplan.2014.10.018
- Oh S. 2015. A study on the optimal pervious/impervious map generation method for urban impervious ratio estimation based on GIS [dissertation] (in Korean with English abstract). Inha University.
- Park JH, Cho GH. 2016. Influence of park size on the park cooling effect -Focused on Ilsan new town in Korea- (in Korean with English abstract). *J Korea Plan Assoc* 51(5): 247-261. doi: 10.17208/jkpa.2016.10.51.5.247
- Ribeiro PJG, Gonçalves LAPJ. 2019. Urban resilience: A conceptual framework. *Sustain Cities Soc* 50: 101625. doi: 10.1016/j.scs.2019.101625
- Senes G, Ferrario PS, Cirone G, Fumagalli N, Frattini P, Sacchi G, Valè G. 2021. Nature-based solutions for storm water management - Creation of a green infrastructure suitability map as a tool for land-use planning at the municipal level in the province of Monza-Brianza (Italy). *Sustainability* 13(11): 6124. doi: 10.3390/su13116124
- Sharifi A, Yamagata Y. 2016. Urban resilience assessment: Multiple dimensions, criteria, and indicators. In: Yamagata Y, Maruyama H (eds). *Urban resilience: A transformative approach*. Cham: Springer. p. 259-276. doi: 10.1007/978-3-319-39812-9_13
- Simonovic SP, Arunkumar R. 2016. Comparison of static and dynamic resilience for a multipurpose reservoir operation. *Water Resour Res* 52(11): 8630-8649. doi: 10.1002/2016WR019551
- Song IJ, Kim SG, Yoon C. 2022. A strategy for constructing green infrastructure in Seoul from the perspective of urban planning (in Korean with English abstract). Seoul, Korea: The Seoul Institute. SI 2021-PR-43.
- SRTM (shuttle radar topography mission). 2014. SRTM 1 Arc-Second Global; [accessed 2023 May 10]. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Statistics Korea. 2021. Population Map; [accessed 2023 Aug 20]. <https://sgis.kostat.go.kr/view/pss/openDataIntrcn>
- Tyler S, Moench M. 2012. A framework for urban climate resilience. *Clim Dev* 4(4): 311-326. doi: 10.1080/17565529.2012.745389
- Vallecillo S, Polce C, Barbosa A, Castillo CP, Vandecasteele I, Rusch GM, Maes J. 2018. Spatial alternatives for green infrastructure planning across the EU: An ecosystem service perspective. *Landsc Urban Plan* 174: 41-54. doi: 10.1016/j.landurbplan.2018.03.001
- Wang K, Li Z, Zhang J, Wu X, Jia M, Wu L. 2020. Built-up land expansion and its impacts on optimizing green infrastructure networks in a resource-dependent city. *Sustain Cities Soc* 55: 102026. doi: 10.1016/j.scs.2020.102026
- Watts N, Adger WN, Agnolucci P, Blackstock J, Byass P, Cai W, Chaytor S, Colbourn T, Collins M, Cooper A, et al. 2015. Health and climate change: Policy responses to protect public health. *Lancet* 386(10006): 1861-1914. doi: 10.1016/S0140-6736(15)60854-6
- Yeo U, Oh D, Kim K, Park S, Lee Y. 2021. A study on enhancing response to climate change using spatial analysis of green infrastructure (in Korean with English abstract). Busan, Korea: Busan Development Institute. Creative Research 2021-12-999.
- Yoon EJ, Lee DK, Kim H, Choi KL. 2016. Vulnerable homogeneous hotspot areas of the industrial sector for the climate change -Focused on mitigation and adaptation perspective- (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 7(1): 69-75. doi: 10.15531/ksccr.2016.7.1.69
- Zhong J, Li Z, Sun Z, Tian Y, Yang F. 2020. The spatial equilibrium analysis of urban green space and human activity in Chengdu, China. *J Clean Prod* 259: 120754. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120754