

Research Paper

생태면적률을 통한 자연기반해법 적용 효과 연구

– 택지개발지구 사례를 중심으로 –

최다정*** · 박 찬***

국립생태원*, 서울시립대학교 대학원 조경학과**, 서울시립대학교 도시과학대학 조경학과***

A Study on the Effectiveness of Nature-based Solutions through the Biotope Area Factor

– Focusing on the Case of Residential Development Districts –

Dajeong Choi*** · Chan Park***

National Institute of Ecology*

Department of Landscape Architecture, Graduate School, University of Seoul**

Department of Landscape Architecture, College of Urban Sciences, University of Seoul***

요약: 본 연구는 생태면적률(Biotope Area Factor, BAF)이 도시 개발 과정에서 자연기반해법(Nature-based Solutions, NbS)의 도구로서 생태계서비스(Ecosystem Services, ES)에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 것을 목적으로 하였다. 연구 대상지로 김포 한강신도시, 고양 삼송지구, 안성 아양지구를 선정하고, InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)의 Annual Water Yield, Carbon Storage, Habitat Quality, Urban Cooling, Sediment Delivery Ratio (SDR) 모델을 활용하여 주요 생태계서비스의 변화를 분석하였다. 분석 결과, 수량 공급을 제외한 대부분의 생태계서비스 지표가 감소하는 경향을 보였으며, 특히 탄소 저장과 서식처 질의 감소가 두드러졌다. 이러한 결과는 생태계서비스의 질적 개선이 필요함을 시사하며, 양적 확보만으로는 도시 생태계의 지속가능성을 보장하기 어렵다는 한계를 드러낸다. 따라서, 생태면적률을 효과적으로 적용하기 위해서는 질적 개선이 필수적이며, 도시 내 녹지의 생태적 기능을 강화하는 전략적 접근이 필요하다. 또한, 본 연구는 그린인프라 구축을 통한 생태적 네트워크의 중요성, 그리고 생태계서비스 변화를 지속적으로 평가하고 모니터링할 수 있는 체계 마련의 필요성을 강조하였다. 이러한 결과는 생태면적률이 자연기반해법의 실효성을 높이는 중요한 도구로 활용될 수 있음을 보여주며, 도시 개발 과정에서 생태계서비스를 극대화할 수 있는 정책적 시사점을 제공한다.

주요어: 생태면적률, 생태계서비스, 자연기반해법, InVEST 모델, 도시 개발

Abstract: This study aims to quantitatively evaluate the impact of the BAF as a tool for Nature-based Solutions (NbS) on ecosystem services in the urban development process.

The study sites selected were Gimpo Hangang New Town, Goyang Samsong District, and Anseong

Ayang District. To analyze changes in major ecosystem services, the study utilized InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) models, including Carbon Storage, Sediment Delivery Ratio (SDR), Urban Cooling, Annual Water Yield, and Habitat Quality.

The analysis results showed a decreasing trend in most ecosystem service indicators, except for water supply, with significant declines in carbon storage and habitat quality. These findings suggest the need for qualitative improvements in ecosystem services, highlighting the limitations of relying solely on quantitative measures to ensure the sustainability of urban ecosystems. Therefore, the effective application of the BAF requires qualitative improvements and a strategic approach to enhancing the ecological functions of urban green spaces.

This study also emphasizes the importance of establishing ecological networks through green infrastructure and the need for a continuous monitoring system to evaluate changes in ecosystem services. The results demonstrate that the BAF can be an important tool for enhancing the effectiveness of NbS and provide policy implications for maximizing ecosystem services during urban development.

Keywords: Biotope Area Factor, Ecosystem Services, Nature-based Solutions, InVEST model, Urban Development

I. 서론

기후위기가 심화되면서 전 세계적으로 기후변화와 도시화가 생태계서비스에 미치는 영향이 심각해지고 있다. 기온 상승과 강수 패턴 변화, 극단적 기상 현상의 증가는 도시 생태계의 온도 조절, 대기 질 유지, 빗물 관리와 같은 핵심적인 생태계서비스에 부정적 영향을 미치며(Pandey & Ghosh 2023), 이는 도시 생태계의 기능 저하와 함께 생물다양성 감소와 생태적 복원력 저하로 이어질 수 있다. 이러한 문제들은 새로운 적응 전략을 통한 생태계서비스 유지 및 강화의 필요성을 시사하며(Humbal et al. 2023), 이는 도시 환경 내 기후위기에 효과적으로 대응하기 위한 접근법을 재고하게 한다.

이에 따라 자연기반해법은 자연의 원리를 활용해 환경, 사회, 경제 문제를 해결하는 접근법으로, 생태계 서비스를 강화하고 생태계 복원과 인간 복지 증진에 기여한다. 자연기반해법은 기후변화 대응과 지속가능한 생활환경 조성에 효과적인 대안으로 주목받고 있다. 특히 유럽연합(European Union, EU)과 세계자연보전연맹(International Union for Conservation of Nature, IUCN)을 중심으로 자연기반해법의 정책적 적용이 활발히 논의되고 있다(Myung & Oh 2021).

국내에서도 기존 도시의 그린인프라 조성은 양적 확충에서 질적 향상과 편의성 증진을 반영한 자연기반해

법의 관점으로 변화하고 있지만(Park et al. 2021; Song et al. 2022), 여전히 자연기반해법의 중요한 요소인 생물다양성과 생태계서비스를 충분히 반영하여 기후변화 대응 및 적응을 논의하는 것은 여전히 미흡한 상황이다(Lee et al. 2024).

이는 자연기반해법의 국내 사례 부재와 더불어 이를 뒷받침할 구체적인 연구와 실증 사례가 부족하기 때문이라고 할 수 있다. 그 결과, 기후변화에 대응할 수 있는 효과적인 수단으로서의 활용 가능성은 여전히 제한적이다.

우리나라 도시는 산업화 과정에서 과도한 토양포장으로 인해 토양의 자연환경 완충기능과 생태기반 기능이 상실되면서, 도시홍수, 대기오염, 열섬현상, 생물서식처 감소 등 다양한 문제가 발생하였다. 이를 해결하기 위해 도시 물순환 환경을 개선하고 녹지 확충을 통해 도시 생태기능을 증진하고자 도입된 대표적인 지표가 바로 생태면적률이다(Oh & Kim 2021). 생태면적률은 이러한 문제 해결의 일환으로, 자연기반해법의 실현 도구로써 활용될 수 있으며, 본 연구는 김포 한강신도시, 고양 삼송지구, 안성 아양지구를 대상으로 생태면적률이 생태계서비스에 미치는 영향을 분석함으로써 자연기반해법의 효과성을 평가하고자 한다.

이를 바탕으로 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) 모델을 활용하여 수량 공급, 탄

소 저장, 서식처 질, 도시 열섬 완화, 토양 침식 조절 등을 정량적으로 평가하였다. 이러한 분석은 도시 개발 과정에서 생태계서비스를 유지하고 증진시키는 생태면적률의 효과를 확인하고, 자연기반해법의 실효성을 극대화할 방안을 모색하는 데 기여한다. 본 연구는 생태면적률의 질적 개선을 통해 자연기반해법의 실효성을 높이고, 이를 기후위기 적응과 생태계서비스 개선의 관점에서 정책적 시사점을 도출하는 데 목적을 둔다.

II. 연구방법

1. 연구범위

본 연구의 공간적 범위는 국내 택지개발지구를 대상으로 하며, 시간적 범위는 2000년과 2022년의 두 시점을 중심으로 설정하였다. 2000년은 개발 이전의 상태를 나타내며, 2022년은 개발 완료 후의 상태를 반영하여, 도시화와 개발이 생태계서비스에 미친 영향을 비교 분석하는 데 활용하였다.

연구의 내용적 범위는 InVEST 모델을 활용하여 생태계서비스의 변화를 정량적으로 평가하고, 도시화로 인한 변화 양상을 파악하며, 자연기반해법의 효과성을

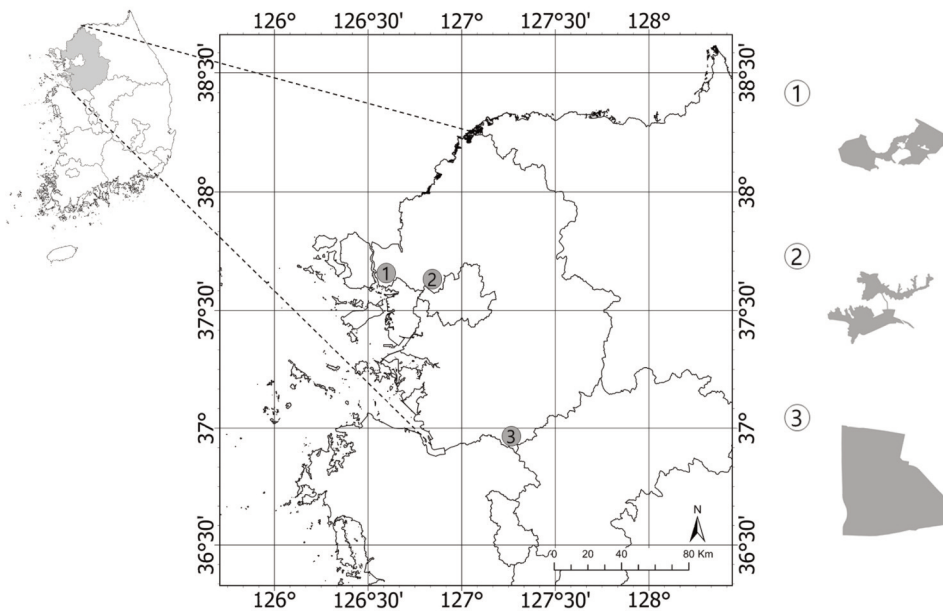
분석하는 데 중점을 두었다. 이를 통해 도시 생태계서비스 증진 및 지속 가능한 도시 개발을 위한 정책적 시사점을 도출하고자 하였다.

2. 연구 대상지

본 연구에서는 다음 두 가지 기준을 바탕으로 연구 대상지를 선정하였다.

첫째, 2005년 제정된 생태면적률 적용 지침에 따라, 생태면적률은 사전환경검토 및 환경영향평가 대상 중 '택지개발 및 공동주택 건설과 관련된 개발사업'에 우선 적용되었다. 이후 단계적으로 적용 범위가 확대되었으며, 2006년부터 본격적으로 시행된 이후의 개발사업들을 대상으로 하였다(An et al. 2024). 이 지침에 따라 생태면적률이 도시 개발과 생태계서비스에 미치는 효과를 평가할 수 있는 적합한 지역을 선정하였다.

둘째, 환경부에서 제작한 세분류 토지피복도(2022년 기준)를 바탕으로, 해당 연도에 개발이 완료된 지역을 선정하였다. 이는 개발이 완료된 상태에서 생태면적률이 생태계서비스에 미친 영향을 명확하게 분석하기 위한 기준으로 설정되었다. 특히, 도시 개발 전(2000년)과 개발 완료 후(2022년)의 생태계서비스를 비교 평



① Gimpo Hangang New Town, ② Goyang Samsong District, ③ Anseong Ayang District

Figure 1. Study site

Table 1. Weighted Values by Land Cover Type

Land Cover Type	Weight
Forest (Broadleaf Forest, Coniferous Forest, Mixed Forest) Wetland (Inland Wetland, Coastal Wetland) Barren Land (Natural Barren Land, Other Barren Land)	1.0
Agricultural Land (Rice Paddy, Field Crop, Orchard) Grassland (Natural Grassland, Artificial Grassland)	0.8
Agricultural Land (Greenhouse Cultivation Area, Other Cultivated Area)	0.6
Urbanized Area (Cultural, Sports, Recreational Area)	0.3
Urbanized Area (Residential Area)	0.1
Urbanized Area (Industrial, Commercial, Transportation, Public Facility Area)	0.0

가함으로써, 생태면적률 제도가 적용된 택지개발지구에서의 구체적 효과를 도출하고자 하였다.

이 두 가지 기준에 따라 최종적으로 김포 한강신도시, 고양 삼송지구, 안성 아양지구(안성뉴타운)를 연구 대상으로 선정하였다(Figure 1). 이들 지역은 모두 2022년 기준으로 사후환경영향평가서 상 공정률이 100%이며, 도시 개발이 완료된 상태에서 생태면적률의 적용 효과를 분석하는 데 적합하다. 각 지역의 개발 전후 생태계 서비스 변화를 정량적으로 분석하여 생태면적률의 실질적인 영향을 평가하고자 한다.

3. 대상지별 생태면적률 산정

대상지별 생태면적률 산정을 위해, 개발 전 생태면적률은 환경영향평가서에 명시된 계획 생태면적률을 참고하였고, 개발 후인 2022년의 생태면적률은 2016년 환경부에서 발표한 생태면적률 지침의 산정 기준을 적용하여 계산하였다.

현재 상태의 생태면적률은 사업 대상지의 토지피복 지도를 바탕으로 유형별 면적을 산출하고, 각 유형에 부여된 가중치(Table 1)를 곱하여 산정한다. 이를 통해 각 토지피복 유형의 생태적 기여도를 반영한 사업 대

상지의 생태면적률을 도출할 수 있다. 현재 상태의 생태면적률 산정은 이후 목표생태면적률 및 계획생태면적률을 설정하는 기초자료로 활용된다.

4. 2000년과 2022년 간 생태계서비스 변화 평가

본 연구에서는 InVEST 모델을 활용하여 2000년과 2022년 사이의 생태계서비스 변화를 평가하였다. InVEST 모델은 미국 National Capital Project의 일환으로 스탠포드 대학, The Nature Conservancy, WWF (World Wildlife Funds)가 공동 개발한 도구로, 자연 자산과 경제적 상관관계를 분석하여 생태계서비스의 가치를 평가하고 이를 정책 의사결정에 반영하기 위해 만들어졌다(Choi & Lee 2018; Sharp et al. 2015). 구체적인 생태계서비스 지표는 환경부(2005)의 '신도시 조성 등에 적용할 생태면적률 기준 도입 방안에 관한 연구'에서 제시된 공간유형별 생태적 가치 평가 기준을 참고하여 선정하였다. InVEST 모델의 실행은 국내 선행 연구에서 적용된 방법론을 참조하였다. 평가에 사용된 지표와 관련된 참고문헌과 입력자료는 Table 2와 Table 3에 정리되어 있다. 이러한 지표들을 기반으로, 수량 공급, 탄소 저장, 서식처 질, 도시 열섬 완화, 토양 침식 조

Table 2. Ecosystem Services Indicators and References

Ecosystem Services Indicator	Model	References
Water Supply	Water Yield Model of InVEST 3.14.0	Song et al. 2015
Carbon Storage	Carbon Storage Model of InVEST 3.14.0	Kim et al. 2018, NIE 2022
Habitat Quality	Habitat Quality Model of InVEST 3.14.0	Kim et al. 2019
Urban Heat Island Mitigation	Urban Cooling Model of InVEST 3.14.0	Kwon & Kim 2022
Erosion Control	Sediment Delivery Ratio Model of InVEST 3.14.0	NIE 2023

Table 3. Ecosystem Services Indicators and References

Model	Data Needs	Input data with scale	Data sources and references
Water Yield	Land Use/Land Cover	Level-2 and Sub-divided Land Cover Map	https://egis.me.go.kr/
	Plant Available Water Content	Precision soil map (1:25,000)	http://soil.rda.go.kr
	Watersheds	Water resource unit map	https://egis.me.go.kr/
	Reference Evapotranspiration	Terra MODIS 16A3GF.006,500m, yearly ET_500m/ (kg/m ² /year)	https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS
	Depth To Root Restricting Layer (Raster)	Precision soil map (1:25,000)	http://soil.rda.go.kr
	Z parameter	14.9	-
	Biophysical Table	-	Song et al. 2015
Carbon Storage	Land Use/Land Cover	Level-2 and Sub-divided Land Cover Map	https://egis.me.go.kr/
	Biophysical Table	Carbon Pools	Korea Forest Service IPCC, 2006
Habitat Quality	Land Use/Land Cover	Level-2 and Sub-divided Land Cover Map	https://egis.me.go.kr/
	Biophysical Table	Threats	Wilcove et al., 1998 https://www.bigdata-map.kr/
		Sensitivity	Kim et al. 2019
Urban Cooling	Land Use/Land Cover	Level-2 and Sub-divided Land Cover Map	https://egis.me.go.kr/
	Reference Evapotranspiration	Terra MODIS 16A3GF.006,500m, yearly ET_500m/ (kg/m ² /year)	https://appears.earthdatacloud.nasa.gov/task/area
	Watersheds	Water resource unit map	https://egis.me.go.kr/
	Biophysical Table	-	Kunapo, J.et al.,2018 Zardo, L., et al.,2017
Sediment Delivery Ratio	Land Use/Land Cover	Level-2 and Sub-divided Land Cover Map	https://egis.me.go.kr/
	Plant Available Water Content	Precision soil map (1:25,000)	http://soil.rda.go.kr
	Watersheds	Water resource unit map	https://egis.me.go.kr/
	Digital Elevation Model	ALOS Global Digital Surface Model ALOS World 3D - 30m (AW3D30)	https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS
	Erosivity	WorldClim version 2.1 Bioclimatic variables, 30s ,BIO18	https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html
	Soil Erodibility	Precision soil map (1:25,000)	http://soil.rda.go.kr
	K value		NIE 2023
	Biophysical Table	-	Hamel et al . A.,2015

절 등 주요 생태계서비스 지표를 분석하였다.

첫째, Water Yield (WY) 모델은 연구 대상지의 연간 물 공급량을 계산하였다. 강수량, 증발산량, 토양 특성을 고려하여 수자원의 가용성과 물 생산량을 평가함으로써 도시 내 물 자원 관리와 관련된 생태계서비스를 분석하였다(Song et al. 2015).

둘째, Carbon Storage (CS) 모델은 연구 대상지의 토지피복과 각 토지피복의 탄소밀도를 바탕으로 탄소저장량을 추정한다(Hwang et al. 2021a). 탄소밀도는 지상

부(C_Above), 지하부(C_Below), 토양탄소(C_Soil), 고사 유기물(C_Dead)로 나뉘며, 이러한 정보는 Carbon Pool Table로 정리된다.

셋째, Habitat Quality (HQ) 모델은 연구 지역의 서식처 질을 평가하기 위해 사용되었으며, 이는 위협 인자와 각 토지피복 유형 간의 상호작용을 반영하여 서식처의 질적 수준을 평가하였다. 서식처 질은 0에서 1 사이로 표시되며, 0은 인간 활동으로 서식이 불가한 지역, 1은 이상적인 야생생물 서식지를 의미한다(Kim et al.

Table 4. Biotope Area Factor and Natural Ground Greenery Ratio by Development District

Development Districts	Year	Site Area (m ²)	Planned Biotope Area Ratio (%)	Current Biotope Area Ratio (%)	Natural Ground Greenery Ratio (%)
Gimpo Hangang	2007	10,864,559	41.97	45.17	14.57
Goyang Samsung	2007	5,085,421	-	44.62	17.25
Anseong Ayang	2011	848,732	31.90	47.20	9.06

2019; Kim et al. 2018).

넷째, Urban Cooling (UC) 모델은 도시 열섬 완화 효과를 평가하는 데 사용되었다. 이 모델은 그늘, 증발산량, 알베도를 기반으로 냉각용량 지수(Cooling Capacity, CC)를 산출하고, 이를 통해 녹지 공간의 열 완화 효과를 정량화하였다(Sharp et al. 2020).

마지막으로, Sediment Delivery Ratio (SDR) 모델은 지형, 기후, 식생 범위 등을 고려하여 연구 대상지의 토양 보유 능력을 평가하였다. 이 모델은 토양 침식 문제를 해결하기 위한 필수적인 정보로, 도시화로 인한 토양 침식 위험을 평가하고 조절 능력을 분석하였다.

이러한 분석을 통해 2000년과 2022년 사이 생태계서비스의 변화 양상을 파악하고, 생태면적률이 적용된 이후 도시 개발이 생태계에 미친 영향을 정량적으로 평가하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 생태면적률과 생태계서비스 분석 결과

1) 생태면적률과 자연지반녹지 면적 변화

① 김포 한강신도시

계획 생태면적률은 41.97%로 설정되었으나, 현재 생태면적률은 45.17%로 목표치를 초과하였다. 그러나 자연지반녹지율은 14.57%에 불과하여, 실제 녹지의 질적 개선에는 한계가 있음을 보여준다. 이는 생태면적률이 양적으로는 충족되었으나, 자연지반녹지가 인공지반 녹지로 대체되면서 생태계서비스에 대한 질적 기여는 제한적일 수 있음을 시사한다.

② 고양 삼송지구

계획 생태면적률은 제시되지 않았지만, 현재 생태면적률은 44.62%로 나타났다. 이 지역은 자연지반녹지율이 17.25%로 비교적 높은 편이다. 이는 녹지의 자연

지반 비율이 높아 탄소 저장 및 서식처 질과 같은 생태계서비스의 유지가 상대적으로 양호할 수 있음을 보여준다. 다만, 계획 생태면적률이 제시되지 않아 계획 대비 성과를 평가하기 어렵다.

③ 안성 아양지구

계획 생태면적률은 31.90%로 설정되었으며, 현재 생태면적률은 47.20%로 목표치를 초과하였다. 그러나 자연지반녹지율은 9.06%로 매우 낮게 나타났다. 이는 생태면적률의 양적 목표는 달성했으나, 대부분이 인공지반녹지로 대체되었음을 의미하며, 실제 생태계서비스에 미치는 효과는 제한적일 수 있다.

2) 생태계서비스 변화

각 생태계서비스의 2000년과 2022년의 평가 결과는 Figure 2에 제시되어 있으며, 이를 통해 연구 대상지의 도시화에 따른 주요 생태계서비스의 변화를 시각적으로 확인할 수 있다.

① 수량 공급

수량 공급 분석 결과, 도시화로 인해 수량 공급이 증가하는 현상이 나타났으나, 이는 비투수면적 증가로 인한 유출량 증가에 기인한 결과이다. 따라서, 수자원 관리와 관련하여 자연 녹지의 보존과 인공지반의 효율적 관리가 중요하다.

② 탄소 저장

연구 결과, 김포 한강신도시와 고양 삼송지구는 자연지반녹지의 급격한 감소로 인해 탄소 저장량이 크게 줄어들었다. 반면, 안성 택지개발지구는 자연지반 녹지의 보존율이 높아 탄소 저장량의 감소가 상대적으로 적게 나타났다. 이는 생태면적률의 적용이 자연지반녹지를 보호하는 데 중요한 역할을 할 수 있음을 시사한다.

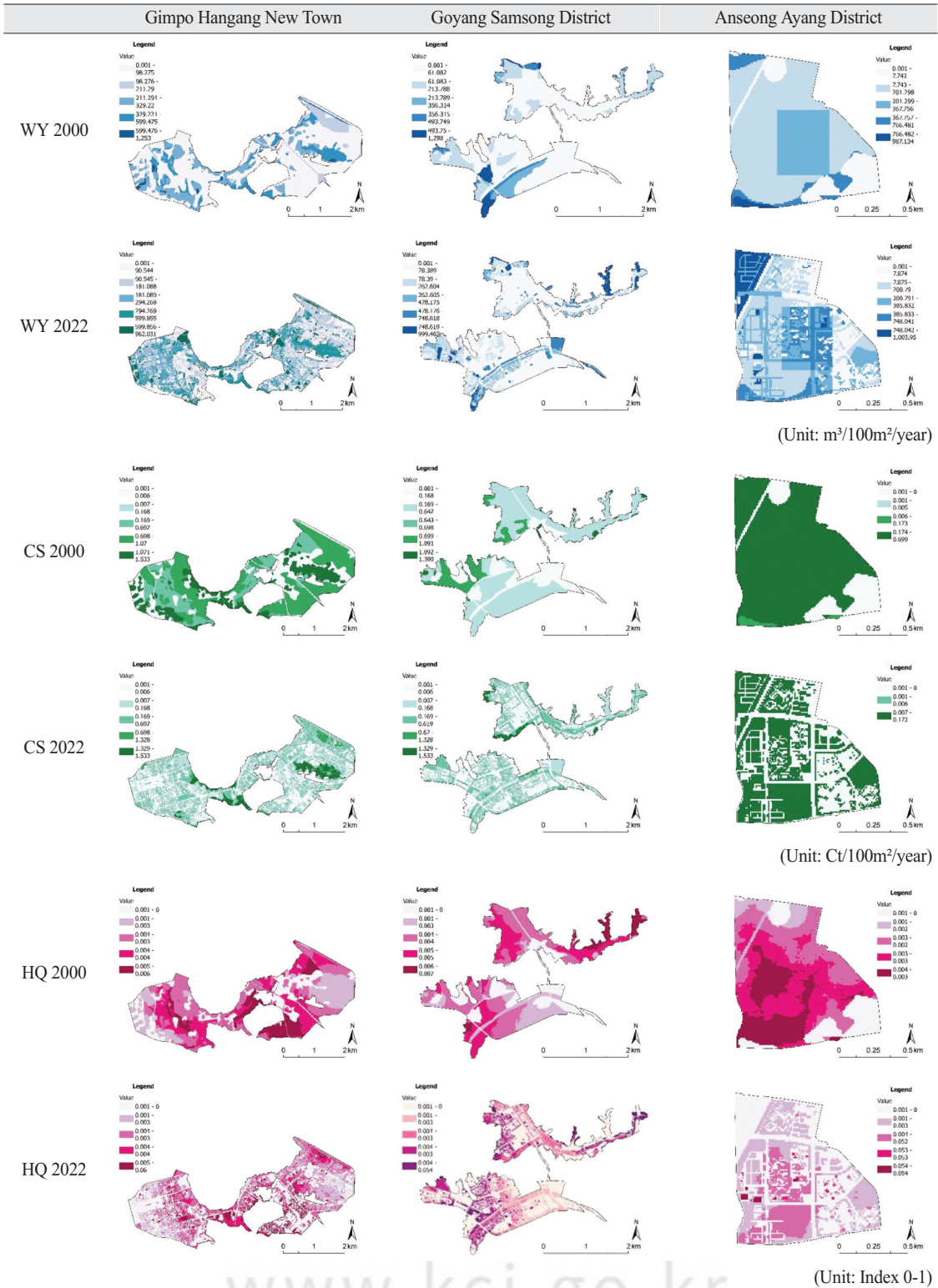
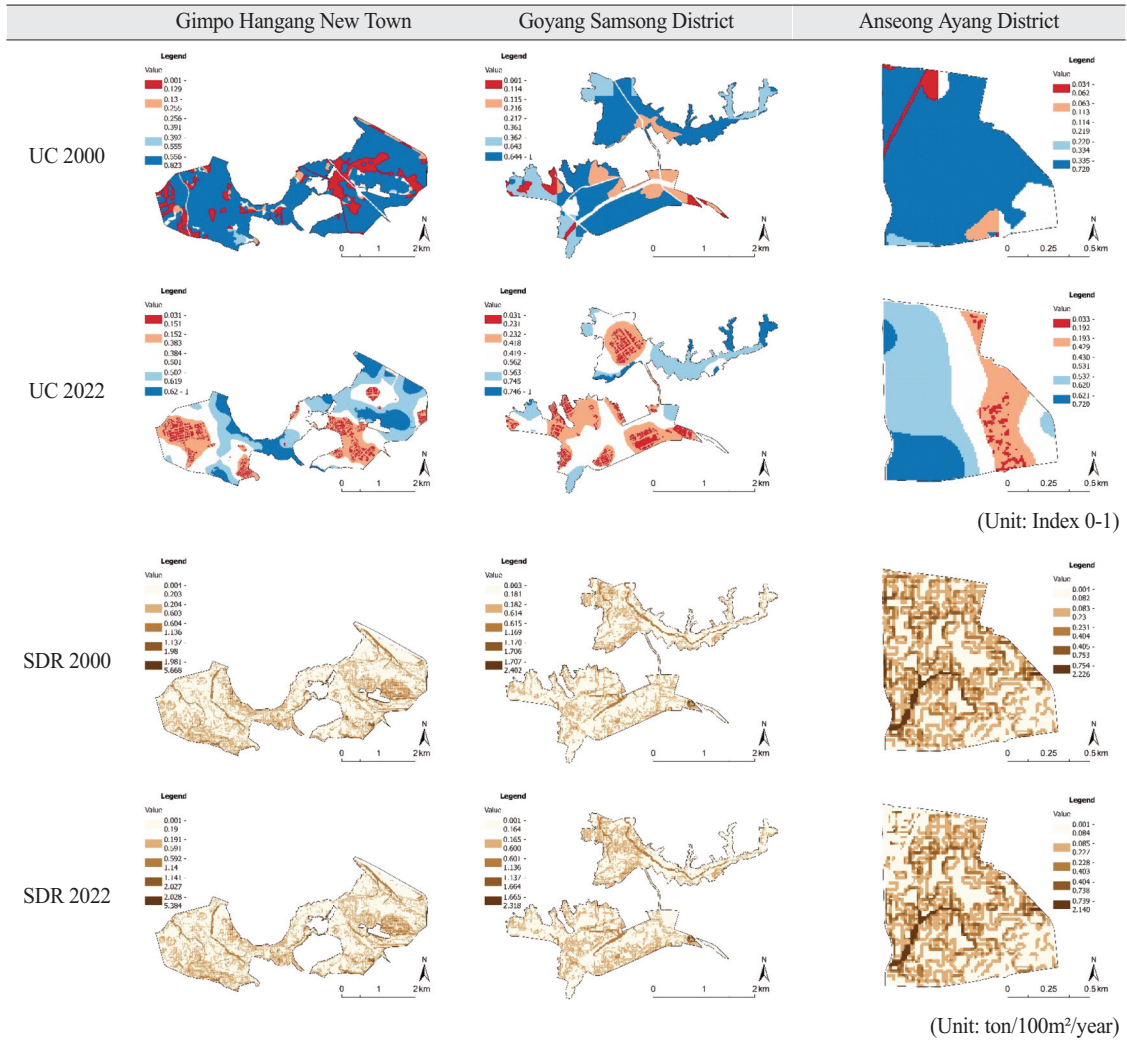


Figure 2. Mapping of Ecosystem Service Evaluation Results



WY: Annual Water Yield, CS: Carbon Storage, HQ: Habitat Quality, UC: Urban Cooling, SDR: Sediment Delivery Ratio

Figure 2. Continued

③ 서식처 질

서식처 질의 분석 결과, 도시화로 인해 서식처가 파편화되면서 서식처 질이 전반적으로 저하되었다. 특히, 인공지반녹지가 많이 조성된 지역에서 서식처 질의 저하가 뚜렷하게 나타났다. 이는 서식처 연결성을 유지하기 위한 생태적 연결 네트워크가 필요함을 시사한다.

④ 도시 열섬 완화

생태면적률 적용 전후의 도시 열섬 완화 효과를 분석한 결과, 생태면적률이 적용된 지역에서 기온 저감

효과가 나타났다. 특히, 녹지 면적이 충분히 확보된 지역에서는 도시 열섬 현상이 상대적으로 완화되었으며, 이는 생태면적률이 도시 기후 개선에 기여할 수 있음을 보여준다.

⑤ 토양 침식 조절

토양 침식 조절 기능을 분석한 결과, 자연지반녹지의 감소로 인해 토양 침식 문제가 발생할 수 있음을 확인하였다. 특히, 산림 지역이 인공지반으로 전환된 지역에서 침식 위험이 증가하였다. 이를 방지하기 위해서는 침식 방지 식재와 같은 전략이 필요하다.

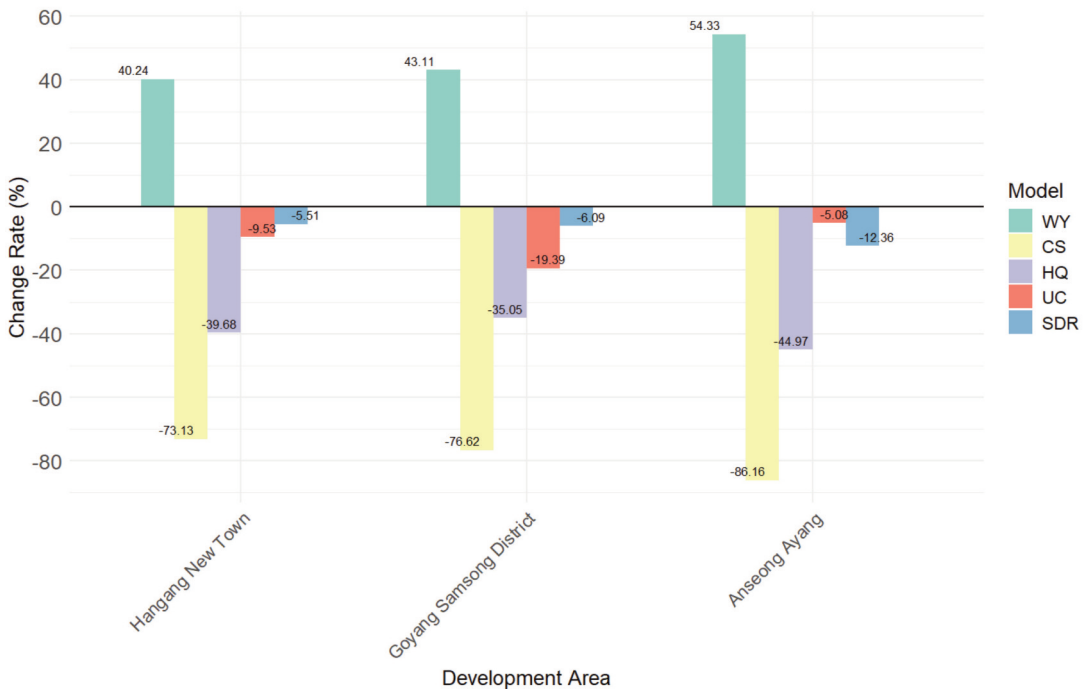
3) 개발 지구별 생태계서비스 변화율과 지표 간 불균형

각 개발 지구의 생태계서비스 변화율을 요약한 그래프(Figure 3)를 통해 연구 대상지에서 발생한 주요 변화를 시각적으로 확인할 수 있다. 수량 공급(WY)은 세 지역 모두에서 도시화로 인한 불투수면적 증가로 인해 상승했으며, 특히 안성 양성지구에서 가장 큰 증가율(54.33%)을 보였다. 반면, 탄소 저장(CS)은 자연지반녹지의 감소로 인해 각각 -73.13%, -76.62%, -86.16%로 큰폭의 감소를 보였다. 서식처 질(HQ) 역시 도시화로 인해 저하되었으며, 특히 인공지반 녹지가 많은 지역에서 감소폭이 두드러졌다. 도시 열섬 완화(UC) 기능은 원형 보존 녹지나 조성형 녹지와 같은 녹지 면적이 확보된 지역의 영향으로 다른 지표들에 비해 감소폭이 적었으나, 여전히 -9.53%, -19.39%, -5.08%로 소폭 감소하는 경향을 보였다. 토양 침식 조절(SDR) 기능은 자연지반녹지가 감소한 지역에서 특히 취약한 양상을 보였다.

이와 같은 분석을 통해 도시화로 인한 생태계서비스

변화가 토지피복 변화와 밀접하게 연관되어 있으며, 지표 간의 불균형이 두드러짐을 확인하였다. 수량 공급(WY)은 모든 지역에서 증가한 반면, 탄소 저장(CS)과 서식처 질(HQ)은 크게 감소하여, 각 생태계서비스 지표가 상반된 변화를 보였다. 이는 도시화가 생태계서비스의 공간적 및 기능적 불균형을 초래함을 시사한다. 생태계의 구성 요소들은 특정 생태계서비스에만 영향을 미치는 것이 아니라, 다양한 생태계서비스에 동시에 영향을 미치며 상호작용을 발생시킨다(Bennett et al. 2009). 이러한 상호작용은 시너지와 트레이드오프 형태로 나타나며, 이를 고려하지 않을 경우 서비스 간의 불균형이 심화될 수 있다.

따라서, 생태계서비스 간의 불균형을 완화하기 위해 녹지의 질적 개선과 관리가 필요하다. 자연지반녹지의 보존과 인공지반녹지의 생태적 기능 강화를 동시에 추진해야 하며, 다양한 생태계서비스 간의 상호작용을 고려한 통합적 정책 수립이 요구된다(MA 2010). 이는 지속 가능한 도시 생태계 구축을 위한 중요한 단계라 할 수 있다. 본 연구의 결과는 생태면적률을 활용한 도



WY: Annual Water Yield, CS: Carbon Storage, HQ: Habitat Quality, UC: Urban Cooling, SDR: Sediment Delivery Ratio

Figure 3. Ecosystem Service Change Rate (%) by Development District

시 개발 계획에서 생태계서비스 간의 균형을 유지하는 관리 전략이 필요함을 시사하며, 이를 통해 도시 생태계의 기능적 회복력을 강화할 수 있음을 보여준다.

2. 생태면적률과 연결성

생태면적률과 연결성 강화를 통해 도시 생태계의 건강성과 기후 적응력을 높이는 방안을 마련하는 것은 매우 중요하다.

구체적으로는 자연기반녹지의 비율을 높이고, 인공기반녹지의 생태적 기능을 강화함으로써 도시 생태계의 건강성과 기후 적응력을 향상시키는 방안을 마련하는 것이 필요하다. 자연기반녹지에는 자생종을 활용한 다층구조 식재 방식을 적용하여 생물다양성을 증진하고, 지역 생태계와의 조화를 이루는 것이 중요하다. 인공기반녹지의 경우, 지상부 녹지 면적을 최대화하기 위해 주차 공간을 지하로 배치하고, 전면녹지, 측면녹지, 완충녹지 등으로 구역별 특성을 반영해 효율적으로 배치하는 방안을 고려할 수 있다(Lee 2009).

개발 후 도시화로 인해 농경지와 산림지가 크게 줄어든 반면, 인공나지나 운동장과 같은 개발 지역에서는 수량 공급이 집중되는 양상이 뚜렷해졌다. 이는 불투수 표면이 증가하여 물이 지하로 침투하지 못하고 유출량이 증가한 결과로, 자연적 물 순환이 방해받고 특정 지역으로 물 공급이 집중되는 현상으로 해석된다. 이러한 변화는 도시화 과정에서 물 자원의 관리 필요성을 더욱 부각시킨다.

또한, 도시화로 인해 서식처 질과 탄소 저장 기능은 약화되었지만, 일부 원형 보존된 공원녹지에서는 도시 냉각 기능이 다소 효과를 보인 것으로 나타났다. 자연 식생을 크게 훼손하지 않고 조성된 원형 보존형 근린 공원은 도시 내 중요한 핵심 녹지(Hubs)로 기능하며, 생태계서비스의 핵심 영역(Hotspot)으로 작용하였다. 이를 기반으로 도로변과 수변 등의 연결녹지를 강화하여 도시 내 생태계서비스의 연속성을 유지하고, 질적 향상을 도모하는 것이 필요하다.

따라서 도시 내 생태적 네트워크 구축을 통해 생태계서비스의 연속성을 강화하고, 도시 환경에서 지속 가능한 생태계서비스를 실현할 수 있을 것이다.

3. 생태면적률 질적 개선과 관리 방안

생태면적률의 적용이 도시 환경에서 생태계서비스를 극대화하기 위해서는 양적 목표와 더불어 질적 개선이 필수적임을 강조한다. 이를 위해 녹지의 질적 개선과 생태적 기능 강화를 위한 다양한 방안이 요구된다. 다음의 방안들은 생태면적률의 질적 개선을 통해 도시 생태계의 지속 가능성과 자연기반해법의 실효성을 높이는 데 중요한 시사점을 제공한다

첫째, 녹지의 질적 개선과 관리가 필요하다. 도시 개발 과정에서 생태계서비스의 기능을 유지하고 증진시키기 위해서는 단순한 녹지 면적 확보만이 아닌, 자연기반녹지의 보존과 더불어 인공기반녹지(도시녹지)의 유형 다양화와 공원의 수나 면적보다는 입지적 특성을 고려와 생태성 및 다기능성 강화를 위한 조성기법을 마련해야 한다(Choi et al. 2019).

둘째, 생태면적률 지표의 개선이 필요하다. ‘도시 생태계서비스 통합 유지·관리 기술 개발’ 연구(Ministry of Environment 2023)에 따르면, 공간 유형의 세분화와 가중치 설정을 통해 생태적 성능을 보다 정확하게 반영해야 한다. 예를 들어, 옥상녹화, 수공간, 벽면녹화 등 입체적 녹화 개념을 도입함으로써 기존의 평면적 생태면적률 계산의 한계를 보완하고, 도시 환경의 질적 개선을 도모할 수 있다. 이러한 개선 방안은 본 연구에서 강조한 자연기반해법의 효과성 증진을 위한 생태면적률 질적 개선 방향과 일맥상통하며, 도시의 생태적 건전성과 환경 질을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

셋째, 도심 외곽의 산림 및 녹지의 연결을 통해 도시 생활공간에서 단절된 생태적 네트워크를 강화해야 한다(Han et al. 2023). 도시 내의 개별 녹지를 연결하여 하나의 생태적 네트워크를 형성함으로써, 도시 열섬현상 등 도시 미기후를 조절하고 생물다양성을 보호할 수 있다(Choi et al. 2022).

넷째, 지속적인 모니터링 체계 구축이 중요하다. 녹지의 생태적 기능을 유지하기 위해서는 질적 평가를 기반으로 한 자연기반해법을 적용하여 그린인프라를 구축하고, 이를 체계적으로 관리하고 지속적인 모니터링이 필요하다(Cho 2023). InVEST 모델과 같은 정량적

도구를 활용해 생태계서비스의 변화를 평가하고, 이를 통해 정책의 실효성을 평가할 수 있다. 이는 정책 수립 과정에서 생태계서비스 평가가 정책 집행의 지속가능성을 확보하는 데 기초자료로 활용될 수 있음을 보여준다(Choi 2020).

넷째, 다양한 생태계서비스의 균형적 고려가 필수적이다. 도시 계획에서는 특정 서비스에만 집중하기보다는 다양한 생태계서비스의 상호작용을 이해하고 이를 균형 있게 반영함으로써, 생태계의 다기능성을 유지하고 지속가능성을 높일 수 있다(Raudsepp-Hearne et al. 2010).

이와 같은 방안들은 생태면적률을 활용하여 자연기반해법의 실효성을 높이고, 도시 개발 과정에서 생태계서비스를 극대화하기 위한 구체적인 방향을 제시하는데 중요한 시사점을 제공한다. 이를 통해 지속 가능한 도시 생태계 조성을 위한 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결론

본 연구는 도시화가 생태면적률과 주요 생태계서비스에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여, 도시 내 생태적 기능을 유지하고 증진하기 위한 자연기반해법의 적용 가능성을 탐색하였다. 연구 결과, 도시 개발 과정에서 생태면적률의 양적 확보는 일부 지표에 긍정적인 영향을 미쳤으나, 탄소 저장, 서식처 질 등 주요 생태계서비스의 기능 향상에는 한계가 있음을 확인하였다. 특히, 김포 한강신도시와 고양 삼송지구에서 자연기반 녹지의 감소는 탄소 저장과 서식처 질 저하를 초래하였으며, 이러한 경향은 생태면적률의 질적 개선이 도시 생태계의 지속 가능성 확보에 필수적임을 시사한다. 본 연구는 생태면적률을 통해 도시화가 생태계서비스에 미치는 복합적인 영향을 종합적으로 분석하고, 생태계서비스를 유지·증진시키기 위한 질적 개선 방안을 제안했다는 점에서 의의가 있다. 생태면적률의 질적 향상이 자연기반해법의 실효성을 높이고, 도시의 기후 적응력과 생태계서비스의 지속성을 강화할 수 있음을 실증적으로 확인하였으며, 이를 통해 정책적 시사점을 제공하였다. 또한, 서식처 연결성 유지와 그린네트워

크 구축의 중요성을 강조함으로써 도시 내 생태적 네트워크를 강화하고, 다양한 생태계서비스의 균형적 관리를 위한 방향을 제시하였다

그러나 본 연구에는 몇 가지 한계가 있다. 첫째, 연구 대상 지역의 특수성이 연구 결과의 일반화에 한계를 줄 수 있다. 김포, 고양, 안성 지역에 국한된 분석 결과가 다른 도시의 생태계서비스 변화와 완전히 일치하지 않을 수 있으며, 다양한 도시 유형에서의 추가 연구가 필요하다. 둘째, InVEST 모델을 사용한 분석은 생태계서비스의 정량적 평가에 효과적이지만, 모델 적용에 있어 데이터의 시간적·공간적 해상도가 한정적이어서, 일부 생태계서비스 변화의 세부적인 요인은 반영되지 못할 수 있다. 향후 연구에서는 더 다양한 환경적 요인과 상호작용을 고려한 심층 분석이 필요하며, 지속적인 모니터링과 질적 평가 체계를 마련하여 도시 생태계서비스 관리의 효과성을 높이는 방안이 모색되어야 할 것이다.

사사

본 논문은 국립생태원 연구과제 생태계의 기후변화 리스크에 대응한 적응역량 강화 연구(NIE-고유연구-2024-35)의 지원을 받아 작성되었음.

References

- An SB, Kim CH, Lee CS. 2024. Analysis of the application characteristics of Biotope Area Factor in apartment complexes: Focused on Biotope Area Ratio, Biotope Area diversity, and Biotope Area connectivity. *LHI J Land Hous Urban Aff.* 15(1): 77-97. [Korean Literature]
- Cho MK. 2023. Evaluation of carbon absorption and thermal environment improvement effects of urban nature-based solutions. [PhD dissertation]. Seoul (South Korea): University of Seoul. [Korean Literature]
- Choi HS, Ahn SE, Lee HS, Song SG, Lee GS. 2019. The transformation of urban park and green

- space policy for sustainability. [Basic research report]. Korea Research Institute for Human Settlements. 1-258. [Korean Literature]
- Choi JY, Kim SR, Park C, Song WK, Jung KM, Kim EY. 2022. Research on the urban green space connection paths for the enhancement of ecological function - Focused on Suwon. *J Environ Impact Assess.* 31(4): 201-213. <https://doi.org/10.14249/EIA.2022.31.4.201>. [Korean Literature]
- Choi JY, Lee SD. 2018. Valuation of ecosystem services using the InVEST model - Focusing on the distribution of Korean fir (*Abies koreana*). *Environ Impact Assess.* 27(2): 181-193. [Korean Literature]
- Hong KD. 2023. Evaluation of the effects of carbon absorption and thermal environment improvement by nature-based solutions in urban areas: Focusing on Seoul. [PhD dissertation]. Seoul (South Korea): University of Seoul. <https://www.riss.kr/link?id=T16807191>. [Korean Literature]
- Humbal A, Chaudhary N, Pathak B. 2023. Urbanization trends, climate change, and environmental sustainability. In: *Climate Change and Urban Environment Sustainability. Disaster Resilience and Green Growth (DRGG)*. Springer, pp. 151-166. doi: 10.1007/978-981-19-7618-6_9.
- Kang WM, Song YK, Kim HG, Kim NC, Song WK. 2019. Quantitative analysis and visualization of terrestrial landscape connectivity in South Korea. *J Korean Cadastre Inf Assoc.* 21(2): 198-207. [Korean Literature]
- Kim TY, et al. 2015. Habitat value assessment using the InVEST model. *J Korean Env Res Tech.* 18(5): 1-11. [Korean Literature]
- Kim HN, Kim CK, Park SC. 2019. Development of the green corridor planning technique for urban environment improvement - A case study of Daejeon Metropolitan City. *J Korean Landsc Archit.* 51(2): 28-41. [Korean Literature]
- Kwon HS, Kim JS. 2022. Application of InVEST Urban Cooling Model to evaluate surface cooling capacity of urban green areas. *J Assoc Korean Geogr.* 11(4): 449-463. doi:10.25202/JAKG.11.4.4. [Korean Literature]
- Kim HN, Ahn SE, Kim CK. 2018. Estimating the economic value of water supply services by region. *Environ Forum* 227: 1-15. [Korean Literature]
- Ministry of Environment. 2023. Development of Integrated Maintenance and Management Technology for Urban Ecosystem Services. [Research report]. Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment. 2016. Revised guidelines for biotope area ratio. [Korean Literature]
- National Institute of Ecology. 2023. Evaluation and application plans for ecosystem services: Final report. Ministry of Environment, Nature Ecology Policy Division. [Korean Literature]
- National Institute of Ecology. 2022. Evaluation and application plans for ecosystem services (4th phase): Final report. Ministry of Environment, Nature Ecology Policy Division. [Korean Literature]
- Lakes T, Kim HO. 2012. The urban environmental indicator "Biotope Area Ratio": An enhanced approach to assess and manage the urban ecosystem services using high-resolution remote-sensing. *Ecol Indic.* 13(1): 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.029>.
- Lee DW. 2019. Analysis of changes in green space layout and planting structure in apartment complexes in Seoul. [Master's thesis]. University of Seoul, Graduate School of Urban Science. [Korean Literature]
- Lee HW, Kim CK, Hong HJ, Roh YH, Kang SI, Kim JH, Shin SC, Lee SJ, Kang JY, Wood S, Fisher

- D. 2015. Development of decision supporting framework to enhance natural capital sustainability: focusing on ecosystem service analysis. Report No. 2015(0): 3479-3651. [Korean Literature]
- Lee JW, Park C, Jung SK, Kim YJ. 2024. Implementation principles and means of nature-based solutions (NbS). *J Clim Change Res.* 15(4): 447-461. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2024.15.4.447>. [Korean Literature]
- Lee KJ, Hong SH, Choi IT, Han BH. 2007. Study on the application method of Biotope Area Ratio through analysis of land use and cover status by type in urbanized areas. *J Korean Landsc Archit.* 35(4): 40-47. [Korean Literature]
- Myung SJ, Oh IC. 2021. A study on nature-based solutions (NbS) for responding to environmental crises. [Research report]. Seoul: Korea Environment Institute. 1-136. [Korean Literature]
- Oh CH, Kim HS. 2006. Analysis about Biotope Area Factor of new town housing complex in the metropolitan area of Korea. *Proc Korean Soc Environ Ecol Conf.* 2006(2): 175-180. [Korean Literature]
- Pandey B, Ghosh A. 2023. Urban ecosystem services and climate change: a dynamic interplay. *Front Sustain Cities.* 5: 1281430. doi: 10.3389/frsc.2023.1281430.
- Raudsepp-Hearne C, Peterson GD, Bennett EM. 2010. Ecosystem Service Bundles for Analyzing Tradeoffs. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(11): 5245-5250.
- Sharp R, Tallis HT, Ricketts T, Guerry AD, Wppd SA, Chaplin-Kramer R, Nelson E, Wolny S, Pwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim CK, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Glowinski K, Chaumont N, Perelaman A, Lacayo M, Mandle L, Hamel P, Vogl AL, Rogers L, Bierbower W. 2015. InVEST User's Guide. Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund.
- Song CH, Lee WK, Choi HA, Jeon SW, Kim JU, Kim JS, Kim JT. 2015. Application of the InVEST Water Yield model for evaluating the ecosystem services of forest water resources. *J Korean Geogr Inf Sci.* 18(1): 120-134. [Korean Literature]