

부산의 생태계 기능 기반 우선보전지역 선정 연구 - 서식지 질 및 생태연결성 평가 -

김 지 환¹⁾

¹⁾규슈대학교 아시아·오세아니아 연구소 교수

A Study on the Selection of Priority Conservation Areas Based on Ecosystem Functions in Busan

- Evaluation of Habitat Quality and Ecological Connectivity -

¹⁾Kim, Ji-Hwan

¹⁾Professor, Asia-Oceania Research Center, Kyushu University.

ABSTRACT

Urban planning in rapidly urbanizing cities like Busan, Korea, faces substantial challenges in balancing development with conservation. The imbalance between development pressures and conservation efforts threatens urban resilience, undermining critical ecosystem functions and increasing vulnerability to environmental risks. In this study, we identified priority conservation areas in Busan by analyzing habitat quality and ecological connectivity using the InVEST model and the Omniscape algorithm. Two conservation scenarios were considered, targeting 17% and 30% of the total area in alignment with international biodiversity goals. The analyses revealed that areas where urban regions intersect with forests are critical for preserving ecological functions, particularly in maintaining species movement and habitat connectivity. Under the 17% conservation target, priority areas included urban areas constituting 46% and forests 42% of these areas. When the target was increased to 30%, priority areas expanded to include interior forests and existing protected areas, with urban areas constituting 47% and forests 42%, and protected areas increasing from 12% to 23%. These results suggest that expanding conservation areas can improve ecological connectivity while maintaining urban functionality. This research provides actionable insights into land-use planning strategies that enhance urban sustainability by prioritizing ecologically sensitive areas without compromising urban development goals.

First author : Kim, Ji-Hwan, Professor, Institute for Asian and Oceanian Studies, Kyushu University,
Tel: *** - **** - **** E-mail: kim.jihwan.073@m.kyushu-u.ac.jp

Corresponding author : Kim, Ji-Hwan, Professor, Institute for Asian and Oceanian Studies, Kyushu University,
Tel: *** - **** - **** E-mail: kim.jihwan.073@m.kyushu-u.ac.jp

Received : 9 September, 2024. **Revised** : 15 November, 2024 **Accepted** : 12 November, 2024

Key Words: *Urban planning, Conservation planning, Systematic conservation prioritization, Omniscape algorithm, Prioritiz*

I. 서론

현대 도시계획은 인구 증가와 도시화로 인한 개발 압력과 환경 보전의 필요성 사이에서 중요한 도전에 직면해 있다(Cameron et al., 2022; Peng et al., 2018). 이 둘 사이의 불균형은 장기적으로 도시의 지속 가능성을 위협하는 주요 요인으로 작용할 수 있다. 급격한 도시화는 자연 서식지의 파괴와 생태계 기능의 감소를 초래할 수 있으며, 이로 인해 도시 내 생물다양성이 급격히 줄어들고, 공기 및 수질 오염이 심화될 수 있다(Anderson et al., 2023; Yun et al., 2021). 또한, 이러한 생태계 파괴는 홍수나 열섬 현상 등 자연재해에 대한 도시의 취약성을 높이는 결과를 가져오며, 이는 도시 거주자의 삶의 질에 심각한 영향을 미칠 수 있다(Lyu et al., 2018).

현재 당면한 문제를 해결하기 위해서는 한정된 예산 속에서 개발과 보전의 균형을 맞추는 효율적인 관리 방안이 필요하다(Kim et al., 2024; Strassburg et al., 2020). 장기적인 도시계획을 수립하고 생태적 접근 방식을 도입하는 것은 도시 환경 내에서 인간 활동과 자연환경이 조화롭게 공존할 수 있도록 하는 핵심 전략이 된다(Kim et al., 2022; Sohn et al., 2023). 특히, 생태계 기능을 고려한 환경계획은 생물다양성 보전과 생태계서비스의 지속 가능성을 보장하는 데 필수적이다(Kim & Song, 2023). 이러한 계획은 자연 자원의 효율적 활용과 보전 전략을 통해 도시가 환경적, 경제적 지속 가능성을 동시에 달성할 수 있도록 돕는다(O'Bryan et al., 2023). 그러나 최대의 보전 효과를 달성하기 위해서는 체계적이고 전략적인 토지 이용 계획과 함께 효과적인 보전 노력이 이뤄져야 하며, 이를 위한 적절한 투자가 필요하다(Anderson et

al., 2023; Kukkala & Moilanen, 2017).

최근에는 생태계 기능을 반영하여 우선보전 지역을 도출하는 연구가 증가하고 있다(Kim & Song, 2023; Peng et al., 2018). 여기서 말하는 생태계 기능은 단순히 토지유형의 변화뿐만 아니라 생태계 내에서 다양한 생물과 환경 요소들이 상호작용하여 수행하는 역할과 과정을 의미한다(Haines-Young & Potschin, 2010). 서식지 질과 생태연결성은 생태계 기능 중 일부에 속하지만, 전체 생태계 기능에 있어서 중요한 역할을 한다(Cardinale et al., 2012; Kukkala & Moilanen, 2017). 특히, 생태연결성은 서식지 질과 밀접한 관련이 있는 항목으로, 두 지표는 상호 보완적으로 작용한다(Mu et al., 2024). 이러한 접근법은 도시 내 생물다양성 유지뿐만 아니라, 도시민들의 삶의 질 향상에도 기여할 수 있다(O'Bryan et al., 2023; Schwartz et al., 2018).

본 연구에서는 서식지 질과 생태연결성에 초점을 맞추어 우선보전지역을 도출하고자 한다. 서식지 질은 특정 지역이 생물종에게 얼마나 적합한 서식지를 제공하는지를 평가하며, 생태연결성은 생물종이 이동하고 상호작용할 수 있는 서식지 간의 연결성을 나타낸다(Choi et al., 2021; Mu et al., 2024). 이를 통해 생물다양성 보전과 생태계서비스 유지에 핵심적인 역할을 하는 우선보전지역을 식별하고자 한다. 특히, 우리나라처럼 개발이 주로 소규모 산림 패치와 산림의 가장자리에 집중된 반면 보전지역은 대규모 산림 중심인 점을 고려했을 때, 생태연결성과 같은 생태계 기능을 함께 고려하는 것이 적절할 것으로 보인다(Yoon et al., 2019).

본 연구의 우선보전지역 지정 목적은 급격한 도시화로 인한 생태계 파괴를 최소화하고, 생태계 기능을 유지하여 도시의 지속 가능성을 강화

하는 것이다. 이를 위해 서식지 질과 생태연결성을 평가하고, 이를 바탕으로 우선보전지역을 식별함으로써 도시 개발이 생태계에 미치는 부정적 영향을 최소화하고, 장기적으로 도시의 지속 가능성을 높일 수 있는 전략을 제시하고자 한다. 또한, 본 연구의 결과는 향후 도시 개발 정책 및 생태계 보전 전략 수립에 중요한 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 연구방법

1. 연구대상지

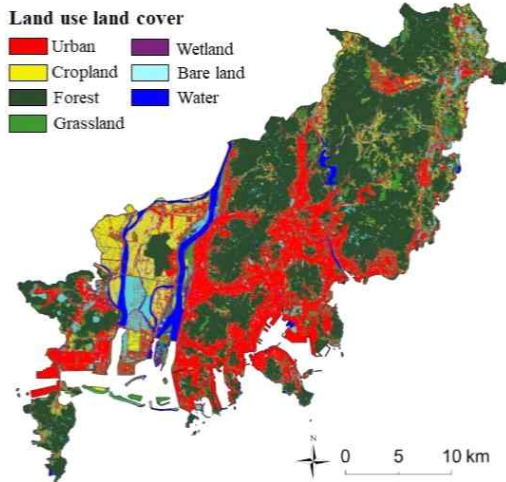


Figure 1. Study site: Busan

본 연구는 행정구역상 부산광역시(이하 ‘부산’)를 대상으로 우선보전지역을 선정하는 연구를 진행하였다. 부산은 면적이 767.4 km²로 경기도와 서울특별시 다음으로 인구가 많은 곳이다. 2024년 기준 약 320만명이 거주하고 있다. 부산항을 중심으로 도심지가 발달되어 있으며, 동쪽은 주로 해발고도 300-700 m의 산림으로 구성되어 있다. 서쪽은 주로 평야가 발달되어 있으며, 농경지와 공업단지가 주로 분포하고 있다.

부산의 토지이용 현황을 살펴보면, 산림이 전체 면적의 42.81%인 330.88 km²를 차지하고 있

으며, 도시는 27.92%인 215.74 km²를 차지한다. 그 외에 초지(10.08%, 77.86 km²), 농경지(8.63%, 66.65 km²), 나지(5.81%, 44.84 km²), 수역(3.9%, 30.07 km²), 습지(0.9%, 6.91 km²) 등이 분포하고 있다(Figure 1). 이러한 토지이용 분포는 부산이 산림과 도시 지역이 공존하는 특성을 보여준다.

최근에는 강서구를 중심으로 대규모 아파트 단지 개발 사업이 예정되어 있어 토지이용 변화로 인한 생태계 영향이 예상된다(Kim et al., 2023). 따라서 본 연구에서는 이러한 지역적 특성을 고려하여 우선보전지역을 선정하고자 한다.

2. 서식지 질과 경관 연결성

본 연구에서는 생태계 기능을 반영하여 우선보전지역을 도출하기 위하여 서식지 질과 생태연결성을 활용하였다. 환경부 환경공간정보서비스에서 제공하는 2023년 세분류 토지피복도를 활용하였으며(<https://egis.me.go.kr/>), 41가지로 분류된 토지피복도를 분석의 용이성을 위해 10가지로 재분류하였다(Table 2, 3). 이는 각 토지유형이 생태계 기능에 미치는 영향을 명확하게 평가하기 위함이다. 예를 들어, 산림 지역은 높은 서식지 질과 낮은 저항값을 가져 생물다양성 유지와 생태연결성에 기여하며, 도시 지역은 그 반대로 작용한다. 이러한 방법으로 토지피복 데이터를 생태계 기능 평가의 기초 자료로 활용하였다. 서식지 질과 생태연결성 모두 토지피복도를 바탕으로 분석되었지만, 이는 단순한 토지유형의 분포를 넘어 생태계의 기능적 측면을 정량화하기 위함이다. 본 연구는 각 토지유형이 생태계 기능—즉, 서식지 질과 생태연결성—에 미치는 영향을 평가하였다. 이는 토지피복 데이터를 생태계 기능의 공간적 패턴을 파악하고, 우선보전지역을 선정하는 데 핵심적인 자료로 활용하였다.

연구대상지의 행정구역 경계에서 최소 5 km 이상의 버퍼 지역을 포함시켜 지리적 경계를 넘

Table 1. Threat factors and weights in habitat quality based on land cover types.

Max_Dist	Weight	Threat	Decay	Descript
5.9	0.88	Urban	exponential	Lee et al., 2015; Kim & Song., 2023
2.4	0.59	Road	linear	
5	0.5	Industrial area	exponential	
3.4	0.57	Cropland	linear	
3.8	0.62	Cultivation facilities	linear	

Table 2. Habitat sensitivity data in habitat quality. ua(urban area), rd(road), id(industrial area), cl(cropland), cf(cultivation facilities).

Land cover	Habitat	ua	rd	id	cl	cf
Urban	0	0	0	0	0	0
Cropland	0.3	0.69	0.67	0.75	0	0.1
Cultivation facilities	0.05	0.1	0.1	0.2	0	0
Forest land	1	0.82	0.8	0.85	0.65	0.7
Natural grassland	1	0.68	0.65	0.7	0.57	0.6
Artificial grassland	0.8	0.65	0.62	0.67	0.54	0.57
Wet land	0.7	0.7	0.55	0.8	0.75	0.78
Natural barenland	0.5	0.15	0.2	0.24	0.17	0.2
Artificial barenland	0.08	0.13	0.18	0.22	0.15	0.18
Water	0.65	0.73	0.55	0.73	0.65	0.68

에서 발생하는 부분을 함께 고려하였다(Arponen et al., 2012). 서식지 질은 특정 지역이 생물종에게 얼마나 적합한 서식지를 제공하는지를 나타내며, 이는 생물다양성에 필수적인 요소이다(Mengist et al., 2021; Sharp et al., 2020). 서식지 질은 InVEST 모델을 사용하였으며, 이 모델은 각 지형적 요소의 상대적인 서식지 기여도를 평가하는 데 활용된다. 서식지 질 계산은 위협 요소(예: 도시 지역, 농업 지역, 도로)와 토지유형에 따른 서식지의 민감도를 고려하여 서식지의 변화 정도를 평가한다(Kim & Song, 2023). 본 연구에서 사용한 위협요소 값과 서식지 민감도는 Table 1 과 Table 2 를 바탕으로 계산하였다. 서식지 질 계산에 사용된 위협 요소는 Table 1 에 제시된 바와 같이, 도시 지역, 도로, 농경지 등으로 구분되며,

각 위협 요소는 해당 지역의 생태적 중요도에 따라 가중치(0 에서 1 사이의 값)와 영향 거리가 설정되었다. 예를 들어, 도시 지역은 가중치 0.88 과 영향 거리 5.9 km 를 가지며, 생물다양성에 가장 강한 위협을 주는 요소로 설정되었다. 반면, 농경지는 가중치 0.57 과 거리 3.4 km 로 설정되어 상대적으로 중간 정도의 위협 요소로 평가되었다(Table 1).

서식지 민감도는 토지유형별로 다르게 설정되었으며, 이는 특정 토지유형이 위협 요소에 얼마나 민감하게 반응하는지를 나타낸다(Table 2). 산림 지역은 민감도 1.0 으로 가장 높은 서식지 질을 제공하는 지역으로 설정되었으며, 반대로 인공나지는 민감도 0.08 로 설정되어 생태적 가치가 낮게 평가되었다. 특히, Table 2 의 서식

Table 3. Resistance values in ecological connectivity based on land cover types.

Land cover	Resistance	Reference
Urban	100	
Cropland	30	
Cultivation facilities	50	
Forest	5	
Natural grassland	10	McRae et al., 2016; Kim & Song, 2023
Artificial grassland	20	
Wetland	15	
Natural bareland	25	
Artificial bareland	75	
Water	50	

지 민감도 값은 한국환경연구원(KEI)의 Lee et al. (2015) 연구와 Kim & Song (2023) 연구를 참고하여 설정하였다. Table 1에서 제시된 각 위협에 따른 가중치와 위협이 미치는 범위를 설정하고, Table 2의 토지유형에 따른 민감도에 따라 위협요인이 미치는 영향을 계산하게 된다.

생태연결성은 옴니스케이프(Omniscape) 알고리즘을 사용하여 분석되었다. 이 알고리즘은 회로이론을 바탕으로 다양한 서식지 간의 연결성을 평가한다(McRae et al., 2016). 생태연결성은 특정 지역에서 종이 이동하고 상호작용할 수 있는 능력을 평가하며, 서식지 질이 높은 지역일수록 낮은 저항값이 할당되어 생태적 연결성이 증가한다(McRae et al., 2016). 생태연결성은 저항표면(resistance surface)과 결합하여 평가되었으며, 저항값이 낮을수록 생태연결성이 높아지는 방식으로 분석되었다. 이를 통해 생물종의 이동 경로를 식별하고, 생태적 경계가 어떻게 서식지의 기능을 방해하거나 강화하는지 파악하였다(Kim & Song, 2023). 생태연결성 평가에 활용한 저항 표면값은 Table 3를 참고하였다.

분석 결과의 해석과 시각화를 용이하게 하기 위해 서식지 질과 생태연결성의 최종 결과를 오분위수(quintiles)로 분류하였다(Choe & Thorne,

2019). 이는 위치별 상대적인 조건을 쉽게 표현하기 위한 것으로, 전체 데이터 범위를 다섯 개의 동일한 구간으로 나누어 각 등급이 전체의 20%씩을 차지하도록 하였다.

3. 우선보전지역 선정방법

서식지 질과 생태연결성을 기반으로 우선보전지역을 도출하기 위해, 체계적 보전 계획(systematic conservation planning) 접근법을 활용하였다(Kukkala & Moilanen, 2017). 이 연구에서는 서식지 질과 생태연결성 지표를 결합하여 생태계의 주요 기능을 유지하는 데 필수적인 지역을 식별하고, 최적의 보전 전략을 설계하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 정수 선형 계획법(Integer Linear Programming)을 사용하여 최적의 관리 지역을 도출하였다. 정수 선형 계획법은 담금질 기법(Simulated Annealing)에 비해 더 빠르고 비용 효율적인 결과를 제공하는 것으로 알려져 있으며(Kim et al., 2024; Schuster et al., 2020), 이 연구에서는 이를 통해 공간적 우선순위 설정을 수행하였다. 최적화 과정에서는 구로비 옵티마이저(Gurobi Optimizer)를 사용하여 정수 선형 계획법을 적용하였다(Hanson et al., 2024a).

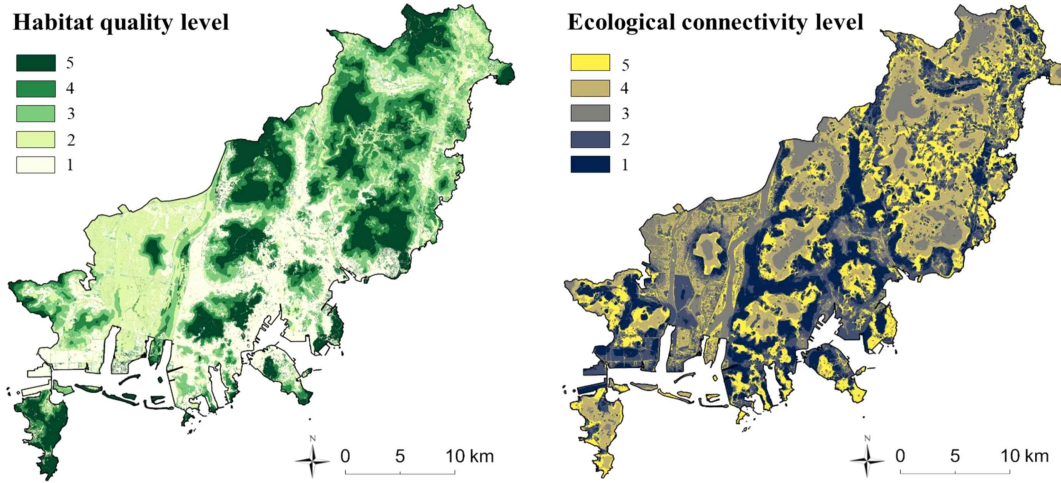


Figure 2. The results of habitat quality and ecological connectivity in Busan

본 연구에서는 서식지 질과 생태연결성 지표를 통합하여 각 계획 단위에 대한 보전 가치를 산출하였다. 육각형 그리드의 각각의 보전 가치는 해당 그리드의 서식지 질 값과 생태연결성 값을 표준화하여 합산하였다. 이를 통해 두 지표의 중요성을 동시에 고려하였다. 우선보전지역을 도출할 때의 계획 단위는 1 km^2 육각형 그리드로 설정하였다. 육각형 계획 단위는 사각형에 비해 면적 대비 경계선 길이가 짧아 공간적으로 효율적인 패턴을 제공하며, 클러스터링에 유리하다는 장점을 가지고 있다(Nhancale & Smith, 2011). 이후 R 프로그램(버전 4.4.1)에서 Prioritizr 패키지(버전 8.0.4.5)를 사용하여 정수 선형 계획법 알고리즘을 적용하였다(Hanson et al., 2024a). 이를 통해 보전 가치의 총합을 최대화하면서도 설정된 보전 목표를 달성하기 위한 최소한의 계획 단위 집합을 도출하였다.

우선보전지역 선정 목표는 두 가지 시나리오를 기반으로 설정되었다. 첫 번째 시나리오는 국제 생물다양성 목표인 '아이치 목표'에 따라 전체 면적의 17%를 보호지역으로 설정한 것이며, 두 번째 시나리오는 아이치 목표 이후 생물다양성 협약에서 채택된 '쿤밍-몬트리올 글로벌 생물다양성 프레임워크'에 따라 2030년까지 30%의

보호지역 설정 목표를 반영하였다(CBD, 2022). 각 시나리오에서는 보전 가치의 총합 중 해당 비율(17% 또는 30%)을 달성하도록 계획 단위를 선택하였다. 이를 통해 보전 목표에 따른 우선보전지역의 공간적 분포 변화를 분석하였다. 분석에서는 모든 계획 단위에 동일한 비용 값을 할당하였다. 이는 비용보다 생태적 중요도를 우선시하여, 보전 가치가 높은 지역을 우선적으로 선정하기 위함이다(Hanson et al., 2024b).

III. 결과 및 고찰

1. 서식지 질과 생태연결성 평가 결과

생태계 기능에 따른 우선보전지역을 도출하기 위하여 먼저 서식지 질과 생태연결성을 분석하였다. 등급 1은 하위 20%를 나타내며, 등급 5는 상위 20%를 나타낸다. 서식지 질은 산림이 밀집되어 있는 동쪽 지역과 중앙의 일부 산림지역을 중심으로 높게 나타났다(Figure 2). 반면, 서식지 질이 낮은 곳은 주로 서쪽의 농경지가 분포한 지역과 중앙의 도심지역에서 나타났다. 생태연결성 분석 결과, 도심지역과 그 주변의 경계 구역에서 생태연결성이 상대적으로 높게 나타났으며, 농경지와 산림지역에서도 연결성이

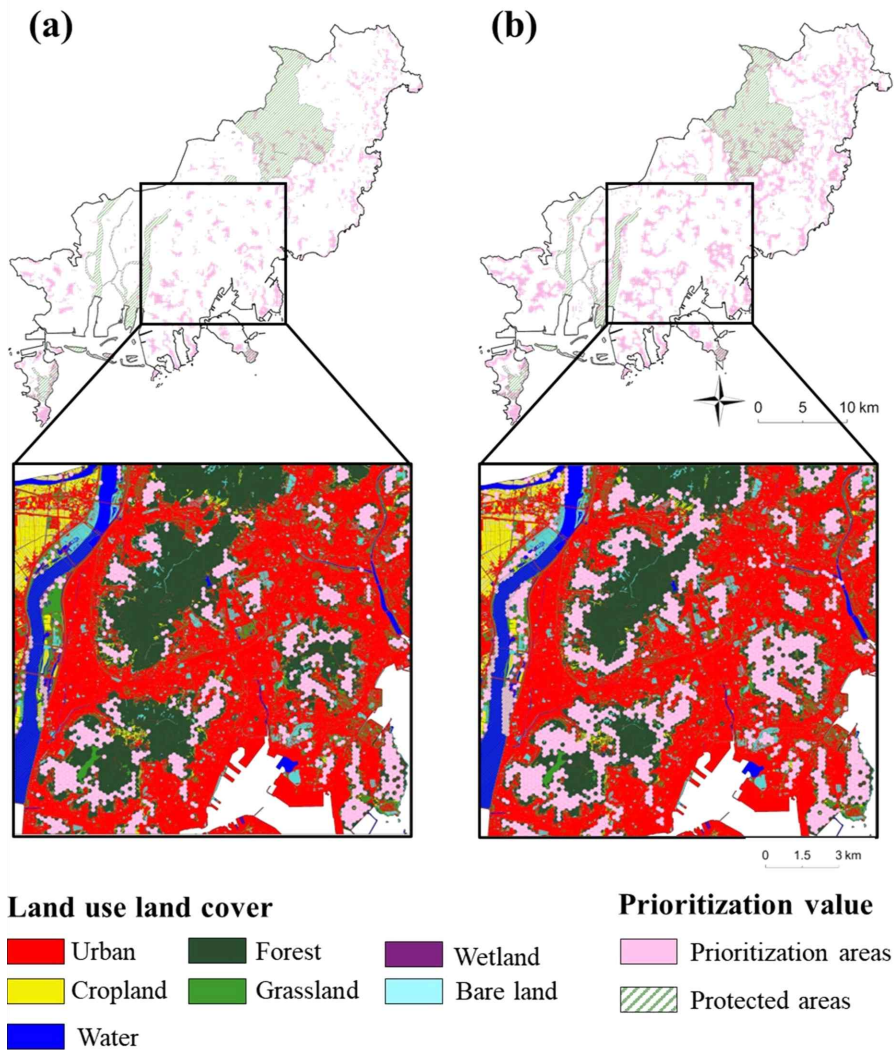


Figure 3. Priority management areas considering ecosystem functions: (a) 17% conservation target, (b) 30% conservation target.

유지되는 것을 확인할 수 있었다(Figure 2). 이러한 결과는 도심 주변의 산림 및 녹지 패치가 도시 내 서식지 간의 이동 경로를 제공하여 연결성을 높이는 데 기여하고 있음을 의미한다.

특히, 생태연결성은 저항값이 높은 도시를 가로질러 저항값이 낮은 산림으로 전류가 흐르는 것처럼, 생물종이 이동할 수 있는 잠재적 통로가 산림과 도심 간 경계 지역에서 형성되는 경향을 보였다. 이러한 경계 지역에서 생태적 연

결성이 높아지는 이유는 도심 내에서 자연적인 서식지와 인접한 녹지 패치들이 이동 경로를 제공하기 때문이다. 따라서 서식지 질과 생태연결성의 개별 분석 결과는 서로 다른 공간적 패턴을 보여주며, 서식지 질은 주로 산림의 분포에 따라 결정되고, 생태연결성은 도심과 산림의 경계 지역에서 두드러진다.

이러한 결과를 종합하면, 두 지표를 통합하여 우선보전지역을 선정하는 것이 종합적인 생태계

기능을 향상시키는 데 유리할 수 있다. 또한, 도심지 내에서 생태연결성을 높이기 위한 도시계획 방안을 마련할 때, 대규모 녹지 패치를 구성하는 것이 현실적으로 어려운 점을 고려해야 한다. 따라서 소규모의 녹지 패치들을 서로 연결하는 형태의 도시공원이나 초지를 조성하는 것이 도심 내 생물종 이동 경로를 유지하고 강화하는데 효과적인 것으로 판단된다. 이는 도심 지역의 제한된 공간을 효율적으로 활용하여 생태적 연결성을 높이는 전략으로 작용할 수 있다.

2. 서식지 질과 생태연결성을 고려한 우선보전지역 결과

우선보전지역 도출 결과 연구대상지 전역에 걸쳐 소규모의 관리 지역이 나타났으며, 특히 도심지와 산림 지역이 인접한 곳에서 집중되는 것을 확인할 수 있었다(Figure. 3). 우선보전지역의 목표를 17%로 설정한 경우, 도심과 산림이 만나는 경계 지역이 주로 선정된 반면 목표를 30%로 상향 조정하였을 때는 산림 내부 지역과 기존의 보호지역까지 포함하여 우선보전지역이 확대되었다. 이는 개별 지표만을 고려했을 때와는 다른 결과로, 서식지 질은 낮지만 생태연결성이 높은 지역이나, 반대로 서식지 질은 높지만 연결성이 낮은 지역도 우선보전지역으로 선정되었음을 의미한다.

우선보전지역에 포함된 토지피복 유형을 분석한 결과, 17%와 30% 보전 목표 시나리오 모두에서 도시 지역이 가장 높은 비율을 차지하였으며, 각각 46%와 47%로 나타났다(Table. 4). 그 다음으로는 산림 지역이 17% 시나리오에서 42%, 30% 시나리오에서도 42%를 차지하였다. 이는 우선보전지역이 주로 도시 지역과 산림 지역에 집중되어 있음을 보여주며, 도시 지역이 생태계 보전에서 중요한 역할을 하고 있음을 시사한다.

일반적으로 도시 지역은 서식지 질이 낮고 생태적 가치가 낮게 평가된다. 그러나 본 연구에서는 도심과 산림이 인접한 경계 지역에서 생태연

결성이 높게 나타나 도시 지역이 우선보전지역에 많이 포함되었다. 이는 도시 내부 또는 주변의 녹지 공간이 생물종의 이동 경로로서 중요한 역할을 하고 있으며, 도시화로 인한 생태계 단절을 완화하는 데 기여하고 있음을 의미한다. 또한, 우선보전지역에 포함된 기존 보호지역의 면적은 17% 보전 목표 시나리오에서 12.06%(14.36 km²)였으나 30% 시나리오에서는 23.14%(27.57 km²)로 크게 증가하였다. 이는 보전 목표를 높임에 따라 기존 보호지역이 우선보전지역에 더 많이 포함되며, 보호지역 간의 연결성을 강화하고 생태계 기능을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

따라서 도시 지역에서의 생태계 관리와 녹지 조성이 우선보전지역의 효과적인 관리에 필수적이며, 도심 지역의 네트워크와 녹지 패치 규모를 함께 고려한 관리 방안을 제시해야 할 것이다. 또한, 보전 목표를 높임에 따라 산림 지역의 비율이 증가한 것은 서식지 질이 높은 지역을 추가적으로 보호함으로써 종합적인 생태계 기능을 향상시킬 수 있음을 보여준다. 특히, 산림이 발달하고 개발 압력이 낮은 부산의 동쪽 지역은 장기적인 생태계 보전을 위한 핵심 지역으로 고려될 수 있다.

결론적으로, 우선보전지역은 도시와 산림 간의 경계 지역에서 생태연결성을 강화하고, 도시 지역 내의 녹지 공간을 보전 및 확대하는 데 중점을 두어야 한다. 이를 통해 도시화로 인한 생태계 파편화를 최소화하고, 생물종의 이동과 유전자 흐름을 촉진하여 생태계의 건강성과 복원력을 높일 수 있을 것이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 급격한 도시화로 인한 생태계 파괴와 환경 보전의 필요성 사이에서 발생하는 문제를 해결하기 위해 생태계 기능 기반의 우선보전지역을 선정하였다. 서식지 질과 생태연결성을 통합적으로 평가함으로써 도시 개발과 생

태계 보전을 균형 있게 달성할 수 있는 전략을 제시하였다.

서식지 질 분석 결과, 산림이 밀집된 동쪽 지역과 중심부에서 서식지 질이 높게 나타났으며, 생태연결성 분석에서는 도심지와 농경지 인근에서 생태적 연결성이 중요한 지역이 확인되었다. 본 연구는 서식지 질과 생태연결성을 통합적으로 고려하여 우선보전지역을 선정하였다. 이를 통해 개별 지표만으로는 파악하기 어려운 종합적인 생태계 기능을 보전할 수 있는 전략을 제시하였다. 또한, 정수 선형 계획법을 활용하여 공간적으로 효율적인 우선보전지역을 도출하였다.

우선보전지역 선정에 있어 두 가지 시나리오를 적용하였다. 첫 번째 시나리오는 국제적인 생물다양성 목표인 17% 보호지역 설정을 목표로 하였으며, 두 번째 시나리오는 최근 30%로 확대 논의된 보호지역 목표를 반영하였다. 30% 목표를 적용한 결과, 산림 내부 지역과 기존 보호지역이 추가로 포함되어 보다 포괄적인 관리가 가능함을 확인하였다. 이는 보전 목표를 높일수록 생태계 기능 향상과 보호지역 간의 연결성 강화에 기여함을 보여준다. 그러나 본 연구는 부산의 주요 생태축인 낙동강 수계를 충분히 고려하지 못한 한계가 있다. 낙동강과 그 지류는 생물종의 이동과 서식지 기능에 중요한 역할을 하므로, 향후 연구에서는 수계 네트워크를 생태연결성 평가에 통합하여 보다 정확하고 종합적인 생태계 기능 분석이 필요하다.

본 연구는 생태적 중요도를 우선시하여 관리지역을 도출하였다. 도시 개발로 인한 생태계 파괴를 최소화하고 장기적으로 도시의 지속 가능성을 강화할 수 있는 전략적 방안을 제시하였다. 이러한 연구 결과는 향후 도시계획과 생태계 보전 정책 수립 시 중요한 참고자료로 활용될 수 있을 것이다. 특히, 도시와 산림 간의 경계 지역에서의 생태계 관리와 녹지 조성을 통해 도시화로 인한 생태계 파편화를 최소화하고, 생물종의 이동과 유전자 흐름을 촉진하여 생태계

의 건강성과 복원력을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Anderson, M. G., Clark, M., Olivero, A. P., Barnett, A. R., Hall, K. R., Cornett, M. W., Ahlering, M., et al. (2023). A resilient and connected network of sites to sustain biodiversity under a changing climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120(7), e2204434119.
- Arponen, A., Lehtomäki, J., Leppänen, J., Tomppo, E., & Moilanen, A. (2012). Effects of connectivity and spatial resolution of analyses on conservation prioritization across large extents. *Conservation Biology*, 26(2), 294-304.
- Cameron, D. R., Schloss, C. A., Theobald, D. M., & Morrison, S. A. (2022). A framework to select strategies for conserving and restoring habitat connectivity in complex landscapes. *Conservation Science and Practice*, 4(6), e12698.
- Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., & Naeem, S. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486(7401), 59-67.
- CBD. Decision 15/4: Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework. 2022.
- Choe, H., & Thorne, J. H. (2019). Omnidirectional connectivity of urban open spaces provides context for local government redevelopment plans. *Landscape and Ecological Engineering*, 15, 245-251.
- Choi, H., Song, Y., Kang, W., Thorne, J. H., Song, W., & Lee, D. K. (2021). LiDAR-derived three-dimensional ecological connectivity

- mapping for urban bird species. *Landscape Ecology*, 36(2), 581–599.
- Haines-Young, R., & Potschin, M. (2010). The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. *Ecosystem Ecology: a new synthesis*, 1, 110-139.
- Hanson, J. O., Schuster, R., Morrell, N., Strimas-Mackey, M., Edwards, B. P. M., Watts, M. E., Arcese, P., Bennett, J. R., & Possingham, H. P. (2024a). prioritizr: Systematic conservation prioritization in R (Version 8.0.4.1)
- Hanson, J. O., Schuster, R., Morrell, N., Strimas-Mackey, M., Edwards, B. P. M., Watts, M. E., Arcese, P., Bennett, J. R., & Possingham, H. P. (2024b). Systematic conservation prioritization with the prioritizr R package. *Conservation Biology*, e14376.
- Kim, G. H., Kong, S. J., Kim, H. N., & Koo, K. A. (2023). Probability Map of Migratory Bird Habitat for Rational Management of Conservation Areas* - Focusing on Busan Eco Delta City (EDC) -. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 26(6), 67-84.
- Kim, J., Choi, H., Shin, W., Yun, J., & Song, Y. (2022). Complex spatiotemporal changes in land-use and ecosystem services in the Jeju Island UNESCO heritage and biosphere site (Republic of Korea). *Environmental Conservation*, 49(4), 272–279.
- Kim, J., & Song, Y. (2023). Integrating ecosystem services and ecological connectivity to prioritize spatial conservation on Jeju Island, South Korea. *Landscape and Urban Planning*, 239, 104865.
- Kim, J., Shin, W., Kim, S., Choe, H., Tanaka, T., & Song, Y. (2024). Use of ecosystem services and land ownership to prioritize conservation areas on Jeju Island, Republic of Korea. *Ecosystem Services*, 66, 101605.
- Kukkala, A. S., & Moilanen, A. (2017). Ecosystem services and connectivity in spatial conservation prioritization. *Landscape Ecology*, 32(1), 5–14.
- Lee, H., Kim, C., Hong, H., Rho, Y., Kang, S., Kim, J., Shin, S., Lee, S., Kang, J., Wood, S., Fisher, D., 2015. Development of Decision Supporting Framework to Enhance Natural Capital Sustainability: Focusing on Ecosystem Service Analysis. KEI (Korea Environment Institute).
- Lyu, R., Zhang, J., Xu, M., & Li, J. (2018). Impacts of urbanization on ecosystem services and their temporal relations: A case study in Northern Ningxia, China. *Land Use Policy*, 77, 163–173.
- McRae, B. H., Popper, K., Jones, A., Schindel, M., Buttrick, S., Hall, K., ... & Platt, J. (2016). Conserving nature's stage: mapping omnidirectional connectivity for resilient terrestrial landscapes in the pacific northwest. *The Nature Conservancy*, Portland, Oregon.
- Mengist, W., Soromessa, T., & Feyisa, G. L. (2021). Landscape change effects on habitat quality in a forest biosphere reserve: Implications for the conservation of native habitats. *Journal of Cleaner Production*, 329, 129778.
- Mu, H., Guo, S., Li, X., Zhou, Y., Lü, Y., Du, X., ... & Du, P. (2024). Quantifying landscape connectivity gaps between protected area and natural habitat. *Journal of Cleaner Production*, 437, 140729.
- Nhancale, B. A., & Smith, R. J. (2011). The influence of planning unit characteristics on the efficiency and spatial pattern of systematic

- conservation planning assessments. *Biodiversity and Conservation*, 20, 1821-1835.
- O'Bryan, C. J., Rhodes, J. R., Osunkoya, O. O., Lundie-Jenkins, G., Mudiyansele, N. A., Sydes, T., & Bode, M. (2023). Setting conservation priorities in multi-actor systems. *BioScience*, 73(7), 522-532. <https://doi.org/10.1093/biosci/biad043>
- Peng, J., Yang, Y., Liu, Y., Hu, Y., Du, Y., Meersmans, J., & Qiu, S. (2018). Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. *The Science of the Total Environment*, 644, 781-790.
- Schuster, R., Hanson, J. O., Strimas-Mackey, M., & Bennett, J. R. (2020). Exact integer linear programming solvers outperform simulated annealing for solving conservation planning problems. *PeerJ*, 8, e9258.
- Schwartz, M. W., Cook, C. N., Pressey, R. L., Pullin, A. S., Runge, M. C., Salafsky, N., Sutherland, W. J., & Williamson, M. A. (2018). Decision support frameworks and tools for conservation. *Conservation Letters*, 11(2), e12385.
- Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K., Bernhardt, J., Bierbower, W., Chaumont, N., Denu, D., Fisher, D., Glowinski, K., Griffin, R., Guannel, G., Guerry, A., Johnson, J., Hamel, P., Kennedy, C., Kim, C. K., Lacayo, M., Lonsdorf, E., Mandel, L., & Ro, K. (2020). InVEST 3.10.2.post34+ug.ga66060d user's guide. The Natural Capital Project.
- Sohn, H. J., Kim, N. Y., & Song, Y. K. (2023). Assessing the ecological aspects of urban parks based on ecological design indicators and location characteristics. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 26(4), 35-50.
- Strassburg, B. B., Iribarrem, A., Beyer, H. L., Cordeiro, C. L., Crouzeilles, R., Jakovac, C. C., ... & Visconti, P. (2020). Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*, 586(7831), 724-729.
- Yoon, E. J., Kim, E. Y., Kim, J. Y., & Lee, D. K. (2019). Connectivity assessment based on circuit theory for suggestion of ecological corridor. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 28(3), 275-286.
- Yun, J. W., Shin, W. H., Kim, J. H., Yi, S. Y., Kim, D. H., Kim Y. V., Ryu Y. R., & Song Y. K. (2021). Spatial Usage and Patterns of *Corvus frugilegus* after Sunrise and Sunset in Suwon Using Citizen Science. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 24(6), 35-48.