연구논문 「환경정책」 제34권 제3호 2026. 9: 245-277
DOI http://dx.doi.org/10.15301/jepa.2026.34.3.245
pISSN 1598-835X eISSN 2714-0601

SSP 시나리오 기반 토지피복변화 예측 자료를 활용한 지자체 공간환경계획 적용 방향:
울산광역시 사례를 중심으로*

Application of SSP-Based Land-Cover Change Projections to Local-Government Spatial Environmental Planning: A Case Study of Ulsan Metropolitan City

조혜련** · 강영은*** · 한성일****
Hyeryeon Jo · Youngeun Kang · Seongil Han

요약: 기후변화와 급속한 도시화로 토지피복 변화가 가속되면서 국토계획과 환경계획의 통합 필요성이 높아지고 있지만, 미래의 훼손 압력을 선제적으로 진단하는 정량 도구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구는 도시·산업·자연 토지이용이 공존하는 울산광역시를 대상으로, SSP 시나리오 기반 미래 토지피복 예측 자료(FLUS-SD)와 두 공식 환경등급 자료인 국토환경성평가지도 및 생태·자연도를 결합하여 미래 보전등급 훼손 위험을 시·군·구, 읍면동, 100m 격자 단위로 정량 진단하였다. 이를 위해 미래 보전등급 훼손 위험을 정량화하는 환경등급 훼손지수(Environmental Grade Degradation Index, EDI)와 자연등급 훼손지수(Natural Grade Degradation Index, NDI)를 새롭게 개발하고, 이를 활용하여 산림 패치의 파편화 변화도 함께 분석하였다. 두 지수는 일부 중첩되는 자료를 기반으로 산정되어 공간적 일치도가 높게 나타났으나(IoU 59.7%, Cohen's κ = 0.70), EDI가 단독으로 식별하는 영역이 존재하여 서로 보완적인 정보를 제공하는 것으로 확인되었다. 또한 분석한 두 시나리오 모두에서 산림 파편화가 지속적으로 심화되는 경향을 보였으며, 친환경 시나리오에서는 보전되지만 고개발 시나리오에서는 훼손되는 시나리오 민감 격자 3,198개(약 3,198 ha, 2100년 기준)와 고개발 시나리오(SSP5-8.5)의 2100년을 기준으로 1 ha 이상의 잠재 훼손 위험지 1,922개소(16,786 ha)를 우선 모니터링 대상지로 도출하였다. 본 연구는 미래 시나리오를 기반으로 환경 훼손 위험을 정량적으로 진단함으로써 기존의 현황 중첩 분석 중심 공간환경계획을 미래 위험을 예측하는 사전 진단 체계로 확장하였다는 점에서 의의가 있다. 또한 개발 이전 단계에서 보전 우선지역을 도출하여 국토계획과 환경계획의 통합적 의사결정을 지원하는 공간적 근거를 제시하며, 데이터 기반의 맞춤형 환경관리 정책과 지방자치단체 공간환경계획의 실행력을 높이는 정량적 근거로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.
핵심주제어: 공간환경계획, SSP 시나리오, 토지피복변화, 훼손지수, 국토-환경계획

Abstract: Climate change and rapid urbanization are accelerating land-cover change, increasing the need for integrated land-use and environmental planning. However,

* 본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 신기후체제 대응 환경기술개발사업의 지원을 받아 수행되었음(과제번호: 2022003570008).
** 주저자, 경상국립대학교 조경학과 박사수료
*** 교신저자, 경상국립대학교 조경학과 부교수
**** 공동저자, 한국환경연구원 국토관리연구실 위촉연구원

quantitative tools capable of proactively diagnosing future environmental degradation remain limited. This study uses Ulsan Metropolitan City, where urban, industrial, and natural land uses coexist, as a case study to quantitatively assess future conservation-grade degradation across multiple spatial scales, including administrative units (city, county, district, town, and village) and 100-m grid cells. To achieve this, SSP-based future land-cover projections generated by the FLUS-SD model were integrated with two official environmental assessment datasets: the Environmental Conservation Value Assessment Map (ECVAM) and the Ecosystem and Nature Map. We developed two novel indicators-the Environmental Grade Degradation Index (EDI) and the Natural Grade Degradation Index (NDI)-to quantify future conservation-grade degradation while simultaneously evaluating changes in forest patch fragmentation. Because the two indices are derived from partially overlapping datasets, they showed high spatial agreement (IoU = 59.7%; Cohen's κ = 0.70); nevertheless, the areas identified by EDI alone indicate that the two indices provide complementary information for assessing future environmental risks. Forest fragmentation consistently increased under both scenarios analyzed. Furthermore, approximately 3,198 ha were identified as scenario-sensitive areas that remained conserved under the environmentally friendly scenario but were degraded under the high-development scenario, while 1,922 potential degradation risk areas (16,786 ha in total), each covering at least 1 ha of projected degradation under SSP5-8.5 in 2100, were identified as priority monitoring targets. This study demonstrates that scenario-based environmental diagnosis can extend conventional spatial environmental planning beyond static assessments toward proactive risk prediction. By integrating future land-cover projections with national environmental assessment systems, the proposed framework provides a quantitative basis for identifying conservation priorities before development occurs, thereby supporting integrated land-use and environmental planning. The framework is consistent with the growing policy emphasis on data-driven and spatially customized environmental management and offers practical evidence for strengthening the implementation of local governments' spatial environmental plans.

Key Words: Spatial Environmental Planning, SSP Scenarios, Land-Cover Change, Degradation Index, Integrated Land-Environmental Planning

I. 서론

기후변화와 급속한 도시화는 전 세계적으로 토지피복 변화를 가속화하는 핵심 동인이다(Seto, Guneralp and Hutyra, 2012; Winkler, Fuchs, Rounsevell and Herold, 2021). 이로 인해 산림, 습지 등 주요 생태적 거점이 훼손되고 있으며, 생물다양성 감소 위험 또한 심화되고 있다(Newbold et al., 2015). 이러한 경향은 우리나라에서도 뚜렷하게 관찰되는 실정이다. 1980년대 이후 지속된 시가화 및 산업 용지의 확장은 자연, 농업지역의 급격한 전환

을 초래하였으며(Han, Kang, Jo, Ahn, Kim and Son, 2025), 이는 제한된 국토 공간 내에서 개발과 보전이 끊임없이 충돌하게 되는 결과로 이어졌다. 우리나라는 이러한 상충 관계를 해소하고자 국토계획과 환경계획의 유기적 연계를 강화하기 위한 제도적 틀(계획 간 연계 규정과 「국토계획 및 환경계획의 통합관리에 관한 공동훈령」 등)을 지속적으로 발전시켜 왔다.

이러한 제도적 정교화 과정에도 불구하고, 실제 계획 집행 현장에서의 이행력은 여전히 미흡한 실정이다. 최근 35개 지자체의 도시계획 및 환경계획의 수립 현황 분석 연구에 따르면, 계획수립협의회의 구성 및 구체적 협의 내용이 계획서에 명시된 사례는 극히 일부였으며, 도시계획의 개발축과 환경계획의 생태축이 공간적으로 중첩되는 모순이 존재하는 것으로 나타났다(송지윤·송슬기·박창석·최정석·오혜정, 2024). 이는 양 계획의 통합관리가 여전히 선언적 수준에 머물고 있다는 오랜 비판(송지윤 등, 2024; 최정석, 2021)을 뒷받침하며 나아가서는 '환경계획의 공간화' 과제가 여전히 보완이 필요한 상황임을 보여준다(송지윤 등, 2024; 이상대·송인주, 2002).

국토계획-환경계획 간 연계 간극의 근본적인 원인은 공간정보 활용 방식의 한계에서도 찾아볼 수 있다. 현재 지자체 차원에서 공간정보를 선도적으로 활용한 우수 사례에서도 생태·자연도나 국토환경성평가지도 등 '현재 시점'의 정적 등급 자료를 단순 중첩하는 수준에 그치고 있다(배민기, 2017; 이양주·장누리, 2022). 2021년 개정된 「환경정책기본법」 제18조제5항·제19조제5항을 통해 지자체의 공간환경정보 관리 의무가 법제화되었으나, 제도적 요건이 현황 데이터의 수집, 저장, 관리에 국한되어 있다는 점은 한계로 작용할 수 있다. 즉, 현행 제도는 기구축된 환경 정보의 사후적 관리에 초점을 맞출 뿐, 국토 공간의 가변성을 고려한 '미래 예측성 정보'의 생산과 활용까지는 요구하지 못하고 있다. 결과적으로 공간 정보 자체의 부재보다는 정보 내의 시간적 차원(중장기 예측)이 결여되어 있다는 점이 핵심 문제라고 할 수 있다. 이는 국토의 미래 변화에 선제적으로 대응하는 실효성 있는 공간환경계획 수립을 저해하는 가장 큰 요인이라 판단된다. 미래 시나리오 기반의 공간환경계획 진단의 필요성은 특히 대도시, 산업단지, 풍부한 자연환경이 공

존하는 복합도시 구조에서 두드러진다. 이러한 지역은 한정된 공간 내에서 개발 압력과 보전 가치가 상충할 가능성이 매우 높기 때문에, 시나리오별 미래 토지피복 변화가 어느 지역의 보전 등급을 얼마나 훼손할지 선제적으로 예측하지 않는다면 환경 관리는 국토계획과 단순 비교나 사후 대응적 관리에 머무를 수밖에 없다.

이러한 연구 공백은 미래 토지피복 변화 예측 모델과 고해상도 환경공간 자료의 결합을 통해 보완할 수 있다. 시공간적 토지 피복 변화를 모델링하는 FLUS(Future Land Use Simulation) 계열 모형 등은 자연환경적 요인과 인구, 개발 등 인위적 개발 압력 간의 복합적 상호작용을 통합 시뮬레이션함으로써, 특정 보전 등급 지역의 미래 시공간적 전환 경로와 훼손 위험에 대한 예측 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있다(Liang, Guan, Clarke, Liu, Wang and Yao, 2021; Liu et al., 2017). 특히 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)의 제6차 평가 보고서(AR6)에서 채택된 사회경제 시나리오(Shared Socioeconomic Pathways, SSP)(O'Neill et al., 2017)를 적용함으로써, 미래 토지피복을 신뢰성 있게 예측할 수 있는 기반이 마련되었다.

이에 본 연구에서는 대표적인 다기능 복합 도시인 울산광역시를 대상으로, 미래 토지피복 변화 예측 자료(FLUS-SD)와 기후에너지환경부의 공식 환경공간자료인 '국토환경성평가지도' 및 '생태·자연도'를 활용하여 미래의 보전 등급 훼손 위험을 선제적으로 진단하고자 한다. 구체적으로는 시·군·구, 읍면동 행정구역, 100m 단위 격자별로 미래 훼손 위험도를 정량화하여 향후 훼손 위험이 높은 '잠재 훼손 위험지'를 우선 모니터링 대상지로 도출한다. 최종적으로는 도출된 대상지의 공간 분포를 울산도시기본계획상의 개발·발전축 및 녹지축과 비교·대조함으로써, 향후 공간환경계획이 국토·도시계획과 실질적 연동을 위해 반영하고 검토해야 할 구체적인 방안을 제시하고자 한다.

II. 선행연구

1. 한국의 국토-환경계획 통합관리 제도

국토계획과 환경계획을 통합·연계하려는 제도적 노력은 개별 기본법의 정비에서 비롯되었다. 「환경정책기본법」(1990년 제정)과 「자연환경보전법」(1991년 제정)이 각각 환경계획과 자연환경계획의 근거를, 「국토기본법」과 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」(2002년 제정)이 국토계획의 근거를 마련하였다. 그러나 두 계획 체계는 오랫동안 별도로 운영되어, 개발과 보전이 충돌하는 지점을 사전에 조정하기 어려웠다. 이러한 분절을 해소하기 위한 국토·환경계획 통합관리는 2010년대 이후 본격화되었다. 2013년 양 계획의 연계 방안이 논의된 이후(송지윤 등, 2024), 2015~2016년 「환경정책기본법」 제4조제3항(환경계획 수립 시 국토계획과의 연계방안 강구 의무)과 「국토기본법」 제5조의 개정으로 국토계획과 환경계획의 연계 의무가 법제화되었다. 2018년에는 「국토계획 및 환경계획의 통합관리에 관한 공동훈령」이 제정되어 통합관리의 절차와 기초자료 공유가 규정되었고(2023년·2025년 개정), 2021년에는 같은 법 제18조제5항·제19조제5항이 신설되어 지방자치단체의 공간환경정보 관리가 의무화되었다. 나아가 2025년 개정으로 양 부처가 공동으로 연계방법을 정할 수 있는 근거(제4조제4항)가 명확해졌다. 이상의 계획·제도 위계와 근거 법령은 〈표 1〉과 같다.

〈표 1〉 국토-환경계획 및 공간환경 관련 법령·계획의 위계

구분	계획·제도 (수준)	근거 법령	수립·작성 → 승인	주기·갱신	비고
환경계획축	국가환경종합계획 (국가)	「환경정책기본법」 제14조~제16조	기후에너지환경부장관 → 국무회의 심의	20년 (정비 5년)	최상위 환경계획
	시·도 환경계획 (광역)	「환경정책기본법」 제18조·제18조의2	시·도지사→ 기후에너지환경부장관	국가계획 연동	—
	시·군·구 환경계획 (기초)	「환경정책기본법」 제19조·제19조의2	시장·군수·구청장 → 시·도지사	국가·시·도 계획 연동	—

	자연환경보전 기본계획 (부문)	「자연환경보전법」 제8조~제10조	기후에너지환경부 장관	10년	자연환경 부문
국토 계획축	국토종합 계획 (국가)	「국토기본법」 제7조제3항· 제9조·제12조	국토교통부장관→ 대통령(국무회의 심의)	20년	최상위 국토계획
	도종합계획 (광역)	「국토기본법」 제13조·제15조	도지사→ 국토교통 부장관	—	—
	시·군종합계획 (기초)	「국토기본법」 제6조제2항· 「국토계획법」	시장·군수	도시·군 기본 20년	「국토계획법」상 도시·군계획 으로 수립
국토· 환경 통합 관리	국토·환경 계획 연계 (국가·광역·기초)	「환경정책기본법」 제4조제3항·제4항· 「국토기본법」 제5조제1항·제4항	기후에너지환경 부·국토교통부	—	2015~2016 법제화 (연계 의무)
	통합관리 공동훈령 (국가·광역·기초)	기후에너지환경부· 국토교통부 공동훈령	양 부처 공동 발령	—	2018 제정· 2025.11.5 현행
	공간환경정보의 관리(광역·기초)	「환경정책기본법」 제18조제5항· 제19조제5항	시·도 / 시·군·구	—	2021 신설
환경 공간 자료	국토환경성 평가지도(전국)	「환경정책기본법」 제23조제2항	기후에너지 환경부 작성	연 1회 갱신	환경가치5등급 (본 연구 활용)
	생태·자연도 (전국)	「자연환경보전법」 제34조	기후에너지 환경부 작성	5년 (자연환경 조사)	1·2·3등급+ 별도관리지역 (본 연구 활용)

자료: 국가법령정보센터(www.law.go.kr) 현행 법령·훈령(2026년 6월 15일 조회) 기반 저자 재구성

이러한 연계·통합관리의 실질적 수단으로는 표준화된 환경공간자료의 공유를 들 수 있다. 「국토계획 및 환경계획의 통합관리에 관한 공동훈령」 제12조는 두 계획이 상호 공유·연계할 수 있는 공간정보로 국토환경성평가지도·생태·자연도 등을 열거하고 있다. 본 연구는 전국에 공통으로 제작되는 등급 자료인 국토환경성평가지도와 생태·자연도를 활용하며, 그 구체적 선택 근거는 연구방법에서 기술한다.

2. 환경계획의 공간분석 흐름

앞서 살펴본 국내 제도가 보여주듯, 환경 정보 자체는 계획이 수립되는 시점에 고정된 자료라는 공통된 한계를 지닌다. 이는 제도의 문제라기보다, 그 정보를 생산해 온 공간분석 방법론 자체의 한계에서 비롯된 결과에 가깝다.

환경계획의 공간화 방법론에서 정성적 도면 중첩(엄정희·최희선·이길상, 2010; 최희선·박주현·김현, 2011; McHarg, 1969)은 여러 현황 주제도를 겹쳐 전문가가 판단하는 방식이므로, 애초에 시간적 축에 대한 고려가 없었다. 특정 적지를 탐지하는 공간 최적화 연구(윤은주·이동근·허한결·성현찬, 2018; Sarkar et al., 2006)는 주어진 현재 데이터셋 안에서 보전지역의 배치를 수리적으로 최적화하는 것이지, 그 데이터셋 자체가 미래 수요를 어떻게 바꿀지를 예측하는 모델과는 거리가 멀다. 서술형 비전 시나리오(김수련 등, 2020)는 미래를 다루었다는 점에서 진일보했지만, 정성적 서사에 의존한 탓에 계량적으로 재현하거나 다른 지역·다른 시나리오로 일반화하기 어려운 한계가 있다.

최근 십여 년간 축적된 계산모델링 기법은 이러한 한계를 기술적으로 보완하고 있다. 토지이용변화 예측 모델은 크게 세 가지 유형으로 발전해왔으며, 그 특성과 한계가 서로 다르다. 첫째, 마르코프 체인 기반 모델(CA-Markov, Cellular Automata-Markov)(Sang, Zhang, Yang, Zhu and Yun, 2011)은 과거 두 시점 간 토지이용 전환확률을 통계적으로 추정해 미래에 투영하는 방식으로, 계산이 간편하지만 사회경제적 동인을 명시적으로 반영하지 않아 과거 추세가 지속된다는 가정에서 벗어나기 어렵다. 둘째, 규칙 기반 셀 배당 모델(CLUE-S, Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent)(Verburg, Soepboer, Veldkamp, Limpiada and Espaldon, 2002)은 여러 토지이용 유형 간의 경쟁을 지역별 특성에 맞게 정교하게 배당할 수 있으나, 지역마다 별도의 규칙 세트를 구축해야 하는 자료 요구가 커서 전국 단위의 일관된 시나리오 적용에는 부담이 따른다. 셋째, 행위자 기반 모델(Agent-Based Model)(Parker, Manson, Janssen, Hoffmann and Deadman, 2003)은 이질적 행위자의 의사결정을 개별적으로 시뮬레이션한다는 점에서 가장 정교하지만, 계산 부담이 크고 검증이 까다로워 국가 단위 SSP 시나리오와 결합된 사례는 드물다.

FLUS(Future Land Use Simulation) 모형은 세 가지 유형과는 다른 절충 지점에 있다. 거시적인 사회경제적 토지 수요를 시스템 다이내믹스(SD)로 추정하고, 그 수요를 미시적인 격자 단위에 배당하는 절차는 셀룰러 오토마타(CA)가 맡는, 하향식 추정과 상향식 배당을 결합한 구조다(Liu et al., 2017).

이러한 구조적 특성으로 SSP 시나리오의 거시 변수를 SD 모델의 구동 조건으로 투입하는 것만으로 전국적으로 일관된 시나리오를 유지하면서도, CA의 이웃효과·적합도 확률을 통해 지역별 공간 배당의 현실성을 함께 확보할 수 있다(Han et al., 2025). 이 구조는 한 가지 시사점을 제시할 수 있다. EDI·NDI가 다루는 법정 등급자료 역시 국가·광역 단위의 등급 판정(거시)과 100m 격자 단위의 공간 배치(미시)라는 이중 구조를 갖고 있다. FLUS-SD의 거시-미시 결합 구조는 이 법정 등급자료의 이중 구조와 규모(Scale) 면에서 정합성이 높으며, 이는 두 자료를 직접 결합하는 것이 단순한 편의적 선택이 아니라 방법론적으로 타당함을 뒷받침한다.

Ⅲ. 연구방법

1. 연구대상지

연구대상지는 울산광역시로, 한반도 동남부에 위치하며 면적 약 1,061 km^2의 한국 최대 중공업 도시다. 특히 도심·산업·자연이 단일 광역시 안에 뚜렷이 공존하는 복합 토지이용 구조를 지닌다. 남구·중구는 도시 토지피복 80% 이상의 도심, 울산만 석유화학단지와 동구 조선단지는 산업, 울주군은 산림 70% 이상의 자연 지역을 이루며, 여기에 태화강 국가정원, 신불산~대운산 산림 회랑, 동해안 경관축이 더해져 산업·자연·해안의 압력이 한 지역 안에서 동시에 작용한다. 이러한 구분은 공식 통계로도 뒷받침되어, 용도지역상 중구·남구·동구는 도시지역이 100%인 반면 울주군은 비도시지역 45.8%·녹지지역 85.1%이고, 도시지역 인구 비율은 99.8%에 이른다(한국국토정보공사, 2024). 이러한 구조는 미래 토지피복 변화의 시나리오 민감도와 보전 등급 훼손 위험을 광역시 내부에서 동시에 검증할 수 있게 한다. 또한 울산은 5개 구·군이 모두 시·군·구 환경계획을 수립하였으며, 『2035년 울산도시기본계획』(울산광역시, 2021)이 발전축·도시녹지축 등의 계획 부문 도면을 보고서로 공개하고 있어 미래 토지피복과의 공간 비교 분석이 가능하다.

2. 데이터 수집

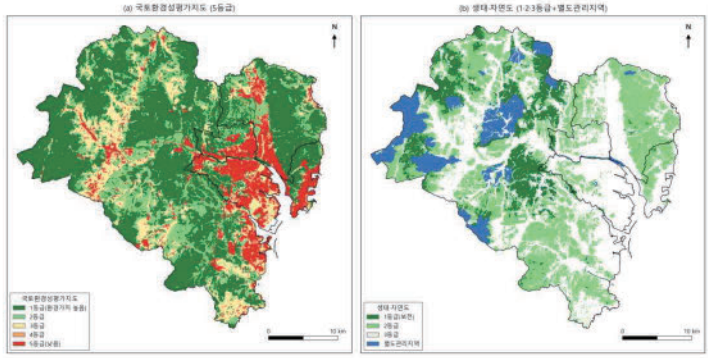
1) 미래 토지피복 자료

미래 토지피복 자료로는 Han et al.(2025)의 FLUS-SD 모형 산출물(EPSG:5179, 100m 해상도)을 이용한다. FLUS-SD는 Liu et al.(2017)의 미래 토지이용 시뮬레이션(FLUS) 모형을 한국 17개 시·도 단위 SSP-RCP 시나리오로 산출한 것으로, 시스템 다이내믹스 기반 토지 수요 추정과 셀룰러 오토마타 기반 화소 할당을 결합하여 2020년 기준 토지피복으로부터 미래 시점별 토지피복을 예측한다. 이때 FLUS-SD의 구동변수로는 표고·경사·접근성 등 지형·교통 정보와 인구·GDP·기후 자료가 투입되고, 토지피복지도가 기반 자료로 사용된다. 따라서 본 연구는 훼손지수 산출에 두 등급자료를 직접 활용하되, 그 입력 단계에서 이미 국토(지형·교통)와 환경(토지피복·기후) 공간정보를 결합하고 있다. Han et al.(2025)은 2020년 실측 토지피복과의 대조를 통해 예측 정확도를 검증한 바 있으며, 본 연구는 그 산출물을 입력 자료로 활용한다. 다만 2100년에 이르는 장기 투영은 사회경제 가정의 불확실성을 내포하므로, 본 연구 결과는 확정적 예측이 아니라 시나리오별 상대적 훼손 위험의 진단으로 해석할 필요가 있다. 산출물은 시가화·건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역의 대분류 토지피복(7개 유형)을 100m 격자로 제공하는 시계열이다. SSP는 IPCC 제6차 평가보고서가 채택한 사회경제 발전 경로로, SSP1(지속가능성), SSP2(중도), SSP3(지역 간 경쟁), SSP4(불평등), SSP5(화석연료 기반 발전)의 다섯 경로로 구성되며 복사강제력을 나타내는 RCP와 결합한다(예: SSP1-2.6, SSP5-8.5). FLUS-SD 산출물은 네 시나리오(SSP1-2.6·SSP2-4.5·SSP3-7.0·SSP5-8.5)에 대해 2020년 기준선과 2030~2100년 10년 간격의 토지피복을 제공한다. 본 연구는 훼손지수·파편화·공간 일치율·잠재 훼손 위험지 분석을 대비가 뚜렷한 두 시나리오(SSP1-2.6·SSP5-8.5)와 장기 시점(2050·2100년)을 중심으로 수행하고, 네 시나리오 간 차이는 NDI 훼손용도 격자의 시점별 비교로 제시한다.

2) 환경공간자료[1)]

국가와 지방자치단체가 제작하는 환경공간자료는 전국에 공통으로 제작되는 것부터 지방자치단체 단위로 작성되는 것까지 종류가 다양하다(명수정·김재훈·유헌석·이현우·이현정, 2018). 본 연구는 그중 전국에 일관된 등급 체계로 제작·운영되는 국토환경성평가지도와 생태·자연도를 사용한다(〈그림 1〉). 두 자료는 평가 목적과 작성 주체가 달라 상호 보완적이다. 국토환경성평가지도는 「환경정책기본법」 제23조제2항 및 같은 법 시행령 제11조의2에 근거하며, 『국토환경성평가지도 작성 및 운영지침』에 따라 국토의 환경적 가치를 종합·과학적으로 평가하여 1등급(환경가치 높음)부터 5등급(낮음)까지 구분한 5등급 평가지도다. 평가는 법·제도에 따른 입지의 타당성을 검토하는 항목과 생태계·생물다양성 등 환경·생태적 가치를 평가하는 항목으로 구분하여 수행하며(제8조), 개별 평가항목의 평가 결과 중 가장 높은 평가등급을 최종 등급으로 지정하는 최소지표법(제3조제9호)을 적용해 환경가치를 최우선으로 반영한다.

〈그림 1〉 울산광역시 국토환경성평가지도(좌)와 생태·자연도(우)



1) 환경공간자료는 국토환경성평가지도의 경우 국토환경성평가지도 (data.neins.go.kr)에서 2025년 구축본을 EPSG:5179, 100m 격자로, 생태·자연도는 에코뱅크(nie-ecobank.kr)에서 울산광역시 최종 반영본(기후에너지환경부 고시 제2025-59호, 2025년 12월 15일)을 1:25,000 도엽 단위 벡터로 취득하였다.

생태·자연도는 「자연환경보전법」 제34조 및 같은 법 시행령 제27조제1항에 근거하며, 국립생태원이 자연환경조사 결과(식생보전등급·멸종위기 야생생물·지형보전등급 등)를 종합해 작성하는 법정 도면으로, 보전가치에 따라 1·2·3등급 권역과 별도관리지역(자연공원·습지보호지역·생태경관보전지역 등 개별 법률로 지정된 보호지역)으로 구분된다. 즉 국토환경성평가지도가 생태·자연도를 포함한 여러 항목을 종합한 메타평가라면 생태·자연도는 자연환경 그 자체의 법정 보전등급이라는 점에서, 본 연구는 전자로 환경등급 훼손지수(EDI)를, 후자로 자연등급 훼손지수(NDI)를 산출해 환경 가치 종합 측면과 법정 자연 측면을 함께 진단한다.

이 두 자료를 선택한 이유는 세 가지다. 첫째, 앞서 살펴본 공동훈령 제12조가 이 두 자료를 계획 간 공유·연계 공간정보로 열거하고 있어, 두 계획의 상호 참조를 전제로 하는 본 연구의 취지와 부합한다. 둘째, 두 자료는 전국 17개 시·도에 일관된 등급 체계로 작성·운영되어 FLUS-SD 산출물과 시점·해상도를 정합할 수 있고 향후 전국 확장이 용이하다. 셋째, 도시생태현황지도·비오톱등급도 등 정밀 자료는 일부 지방자치단체만 제작하여 전국에 고르게 존재하지 않고, 제작된 경우에도 시점·등급 기준·해상도의 차이가 커 미래 시나리오와 일관되게 결합하기 어렵다. 따라서 본 연구는 두 법정 자료를 사용하되, 환경계획이 활용하는 공간자료 전체를 대체하기보다 현황 진단에 미래 시점 진단을 더하는 보완적 위치에 둔다.

3. 자료 분석 방법

모든 공간 자료는 EPSG:5179 좌표계의 100m 정사각 격자로 정합한다. 격자형 자료인 미래 토지피복과 국토환경성평가지도는 최빈값(majority) 기준으로 100m 격자에 리샘플링하고, 벡터 자료인 생태·자연도는 동일 격자로 변환(rasterize)하여 등급 값을 부여한다. 미래 토지피복은 17개 시·도 산출 타일에서 울산광역시 영역을 추출하여 사용한다. 분석은 100m 격자 단위로 수행하고, 그 결과를 시·군·구 수준과 읍면동 수준으로 집계·해석하여 환경계획의 행정 단위 수준별 활용방안을 제시한다. 이때 집계 단위인 시·군·구·

읍면동 행정경계는 브이월드에서 취득하였다. 본 연구의 분석은 네 부분으로 구성된다. 첫째, 환경 가치 종합 측면과 법정 자연 측면의 미래 훼손 위험을 환경등급 훼손지수(EDI)와 자연등급 훼손지수(NDI)로 산출한다. 둘째, 산림 보전 영역의 광역적 연결성 약화를 산림 패치 파편화 지수의 시계열로 측정한다. 셋째, 환경등급 훼손지역과 자연등급 훼손지역의 차별성 정도를 100m 격자 수준의 공간 일치율로 검토한다. 넷째, 미래에 훼손이 예상되는 영역을 군집화하여 우선 모니터링이 필요한 잠재 훼손 위험지(potential degradation risk area)로 도출한다.

4. 지표의 정의와 잠재 훼손 위험지 도출

1) 환경등급·자연등급 훼손지수(EDI·NDI)

환경등급 훼손지수(EDI)와 자연등급 훼손지수(NDI)는 기준연도의 보전 영역에 속하는 100m 격자 가운데 미래 시점의 예측 토지피복이 훼손용도에 해당하는 격자의 비율로 정의한다. EDI의 기준연도 보전 영역은 국토환경성평가지도 1·2등급 격자이고, NDI의 기준연도 보전 영역은 생태·자연도 1·2등급 및 별도관리지역 격자이다. 훼손용도는 대분류 토지피복상 시가화·건조지역, 농업지역, 나지의 세 유형(이하 시가화·농지·나지)을 가리킨다. 기준연도는 FLUS-SD 산출물의 기준 토지피복 시점인 2020년으로 두며, 두 등급자료는 시점별 갱신본이 제공되지 않으므로 취득 시점의 최신본(국토환경성평가지도 2025년 구축본, 생태·자연도 2025년 최종 반영본, 각주 1 참조)을 전 시점에 대하여 고정된 보전 영역으로 사용한다. 두 지수의 산식은 각각 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$EDI(s,t) = n_{ED}(s,t)/n_E \quad (1)$$

$$NDI(s,t) = n_{ND}(s,t)/n_N \quad (2)$$

여기서 s는 SSP 시나리오를, t는 미래 시점을 의미한다. n_E는 집계 단위 안

에서 기준연도에 국토환경성평가지도 1·2등급으로 분류된 격자의 수이고, $n_{ED}(s,t)$는 이 n_E개 격자 가운데 시나리오 s의 시점 t에 예측 토지피복이 훼손용도에 해당하는 격자의 수이다. n_N과 $n_{ND}(s,t)$는 기준연도에 생태·자연도 1·2등급 및 별도관리지역으로 분류된 격자에 대하여 같은 방식으로 정의한다. 이하 분자에 해당하는 격자, 즉 기준연도 보전 영역 가운데 시점 t에 훼손용도에 해당하는 격자를 훼손용도 격자라 부른다. 100m 격자 한 개의 면적이 1 ha이므로 격자 수를 기준으로 한 산식은 면적(ha)을 기준으로 한 산식과 같은 값을 갖는다. 두 지수에서 분모는 기준연도 보전 영역으로 고정되고, 시나리오와 시점에 따라 달라지는 값은 분자의 토지피복 판정뿐이다. 따라서 미래 시점의 등급 재판정 결과나 집계 단위의 전체 면적은 산정에 관여하지 않는다. 값의 범위는 0에서 1 사이이고, 1에 가까울수록 기준연도 보전 영역 가운데 훼손용도에 해당하는 비중이 크다는 것을 뜻한다. 훼손용도 해당 여부의 판정은 100m 격자 단위로 수행하고, 시·군·구 및 읍면동 수준의 값은 해당 행정구역에 속하는 격자를 식 (1), 식 (2)로 집계하여 산출한다. 별도관리지역은 「자연환경보전법」 시행령상 생태·자연도를 구성하는 정식 범주로, 자연공원·습지보호지역·백두대간보호지역·생태경관보전지역 등 개별 법률로 지정된 보호구역을 포괄한다. 이들은 등급평가 대상에서는 제외되나 법정 보전 영역이자 미래 개발 압력의 관리 대상이므로 NDI의 기준연도 보전 영역, 즉 식 (2)의 분모 n_N에 포함한다.

농지를 훼손용도에 포함한 근거는 다음 세 가지다. 첫째, 두 지수의 분모와 분자가 모두 기준연도 보전 영역 안에서 정의된다. 판정 대상은 국토환경성평가지도 1·2등급(EDI)과 생태·자연도 1·2등급 및 별도관리지역(NDI)으로 한정되므로, 보전 등급이 부여되지 않은 영역에 분포하는 기존 농지는 두 지수의 산정에 반영되지 않는다. 두 지수가 농지를 훼손용도로 판정하는 범위는 보전 등급이 부여된 격자 안에 분포하는 농지에 한정된다. 또한 잠재 훼손 위험지는 기준연도 피복이 자연용도(산림·초지·습지·수역)인 격자에서 발생하는 전환만을 대상으로 하므로, 기준연도에 이미 농지인 격자는 도출 대상에 포함되지 않는다. 둘째, 두 등급 자료는 생태계·생물다양성 등 환경·생태적

가치 항목과 식생보전등급을 비롯한 자연환경조사 결과를 근거로 등급을 부여한다. 따라서 기준연도 보전 영역의 자연식생이 농지로 전환되면 해당 격자에 보전 등급이 부여된 실질적 근거가 약화된다고 볼 여지가 있다. 셋째, 농지 전환은 토지이용 강도 증가의 핵심 동인이며(Newbold et al., 2015), 농지는 토지피복 분류상 시가화·나지와 함께 자연식생에 대비되는 인공·반자연 피복에 해당한다. 여기에 더하여 한국의 도시화는 자연 식생에서 농지를 거쳐 도시로 이어지는 단계적 전환(Han et al., 2025)을 따르므로, 기준연도 보전 영역에서 발생하는 농지 전환은 후속 시가화의 선행 단계로 볼 수 있다. 다만 농지, 특히 논은 계절적 담수 환경으로서 수문 조절과 일부 생물의 서식처 기능을 수행하는 것으로 알려져 있다. 이 점에서 농지로의 전환을 시가화·나지로의 전환과 동일한 강도의 훼손으로 간주하는 처리는 훼손 정도를 다소 과대평가할 여지가 있으므로, 두 지수는 기준연도 보전 영역에 가해지는 개발 압력의 상대적 크기를 나타내는 진단 지표로 해석하는 것이 적절하다.

같은 격자라도 시나리오에 따라 훼손 여부가 달라질 수 있다. NDI의 기준연도 보전 영역(생태·자연도 1·2등급 및 별도관리지역)에 해당하는 격자 가운데, 2100년 시점에 SSP1-2.6에서는 보전되나 SSP5-8.5에서는 훼손용도에 해당하는 격자를 시나리오 민감 격자로 정의하며, 이는 시나리오 선택에 따라 보전 여부가 달라지는 영역에 해당한다.

2) 산림 패치 파편화 지수

산림 패치 파편화는 대분류 토지피복도에서 산림 클래스를 추출하여 패치 수(Number of Patches, NP)와 평균 패치 면적(Mean Patch Size, MPS)을 주 지표로, 최대 패치 지수(Largest Patch Index, LPI)·유효 매시(Mesh Size, MESH)를 보조 지표로 하여 pylandstats 패키지를 활용하여 분석한다(Bosch, 2019). 이 지수들은 광역 산림 회랑의 분열·약화를 패치 개수·면적·연결성 차원에서 진단하는 표준 경관생태학 지표이다(〈표 2〉).

〈표 2〉 산림 패치 파편화 지표의 정의와 산식

지표(약어)	산식(단위)[2]	정의와 생태적 의미
패치 수 (NP)	NP = n (개)	산림이 분리된 패치의 개수. 값이 클수록 경관 분할이 심화됨
평균 패치 면적 (MPS)	MPS = Ac / n (ha)	패치 하나의 평균 규모. 패치 수 증가가 실제 규모 축소를 동반하는지 확인함
최대 패치 지수 (LPI)	LPI = (max a_i / A_L) × 100 (%)	최대 패치가 경관 전체에서 차지하는 비중. 핵심 서식지의 우점 정도를 나타냄
유효 매시 (MESH)	MESH = Σa_i^2 / A_L (ha)	두 지점이 같은 패치에 속할 확률에 근거한 연결성. 대형 패치의 분절에 민감함

자료: McGarigal and Marks(1995), Jaeger(2000)의 정의를 pylandstats(Bosch, 2019) 구현 기준으로 저자 정리

3) 공간 일치율

EDI와 NDI가 같은 지역을 위험지로 지목하는 정도는 100m 격자 수준에서 IoU(Jaccard)와 Cohen's Kappa로 측정한다. 대상은 두 자료 중 하나 이상에서 1·2등급(생태·자연도는 별도관리지역 포함)으로 분류된 격자로 한정한다. SSP5-8.5 2100년 시점의 훼손용도 격자를 ① EDI·NDI 모두 훼손, ② EDI 단독 훼손, ③ NDI 단독 훼손, ④ 모두 보전의 네 범주로 교차 분류하고, 구·군별 단독 식별 비율을 함께 산출한다.

4) 잠재 훼손 위험지 도출

잠재 훼손 위험지는 토지피복 변화로부터 훼손지를 탐지한 이길상과 손승우(2024)의 방법을 참고하여 도출하였다. 이들은 자연용도에서 비자연용도로 전환된 격자를 선별해 8-인접 군집화하고 면적 임계로 거르는 절차를 적용하였는데, 본 연구는 이를 연구 목적에 맞게 재구성하였다. 다만 원 방법론과는 목적과 정의가 다르다는 점을 분명히 한다. 이길상과 손승우(2024)는 과거 두 시점의 세분류 토지피복도에서 자연지역(산림·초지·습지)이 기타초지·기타나지로 황폐화된 지역을 탐지하되, 합법적 개발행위와 인가 건축

2) a_i는 개별 산림 패치의 면적, n은 산림 패치 수, Ac는 산림 총면적, A_L은 연구대상지 전체 면적을 의미한다.

물이 위치한 토지를 배제하고 복원 가능성이 있는 영역만을 '훼손 의심지'로 정의한 뒤 현장조사로 실제 훼손 여부를 확인하였다. 반면 본 연구는 기준연도(2020년)에서 미래 시점으로의 전환을 대상으로 하고, 합법 개발의 배제 없이 보전 등급에 가해지는 미래 개발 압력 전반을 진단하는 것이 목적이므로 훼손용도를 EDI·NDI와 정합하도록 시가화·농지·나지로 정의하였다. 또한 미래 투영 자료의 특성상 현장검증을 수행할 수 없으므로 결과를 확정 훼손지가 아니라 환경계획의 우선 모니터링 후보로 활용한다. 이에 따라 탐지 절차는 원 방법론에서 참고하되, 용어는 미래 투영 자료의 성격을 반영하여 '잠재 훼손 위험지'로 구분하여 사용한다. 여기서 자연용도는 대분류상 산림·초지·습지·수역을, 훼손용도는 시가화·농지·나지를 가리킨다. 본 연구는 기준연도(2020년)에 자연용도이던 격자가 미래 시점에 훼손용도로 전환되는 영역을 8-인접 군집화하여 면적이 1 ha 이상인 군집을 잠재 훼손 위험지로 정의하며, 별도관리지역은 법정 보전 영역이므로 NDI 분모와 잠재 훼손 위험지 산출 범위에 포함하였다. 면적 임계는 선행연구 방법론(이길상·손승우, 2024)이 세분류 토지피복도에 근거해 2,500㎡를 적용한 것과 달리, 본 연구는 100m 해상도의 대분류 자료를 사용하므로 격자 1개 면적에 해당하는 1 ha를 최소 임계로 둔다. 따라서 격자 한 개 규모의 전환도 도출 대상에 포함된다. 잠재 훼손 위험지는 시나리오와 시점에 따라 달리 도출되므로, 본 연구는 개발 압력이 가장 큰 경로인 SSP5-8.5의 2100년 결과를 대표로 제시하고, 시나리오 간 차이는 앞서 정의한 시나리오 민감 격자로 별도 검토한다.

Ⅳ. 연구결과

1. 시·군·구 수준 훼손지수 분포

〈표 3〉에서 2100년 SSP5-8.5 시점의 자연등급 훼손지수(NDI)는 남구 0.769, 중구 0.577, 북구 0.348, 동구 0.225, 울주군 0.187로 구·군 간 격차가 크게 나타났다. 환경등급 훼손지수(EDI)도 같은 시점에 남구 0.791, 중구

0.636, 북구 0.422, 동구 0.253, 울주군 0.235로 NDI와 일관된 순위를 보였다. 두 지수 모두 도심 우세 구·군(남구·중구)에서 높고 자연 우세 구·군(울주군)에서 낮아, 울산의 복합 토지이용 구조와 부합한다.

〈표 3〉 울산 5개 구·군 EDI·NDI (2100, SSP1·SSP5)

구·군	EDI (SSP1)	EDI (SSP5)	NDI (SSP1)	NDI (SSP5)
남구	0.780	0.791	0.760	0.769
중구	0.621	0.636	0.556	0.577
북구	0.396	0.422	0.315	0.348
동구	0.247	0.253	0.225	0.225
울주군	0.219	0.235	0.171	0.187

중구는 NDI 0.577로 남구에 이어 높으면서도 시나리오 간 차이(+0.021)가 도심 구 가운데 가장 커, 차기 환경계획 갱신 시 사전 진단의 효과가 클 것으로 예상되는 지역이다. 〈그림 2〉와 같이 100m 격자 결과를 읍면동 수준으로 집계하면, 자연용도 훼손은 도심에서 외곽 산림지대로 이행하는 경계대의 읍·동에 집중된다.

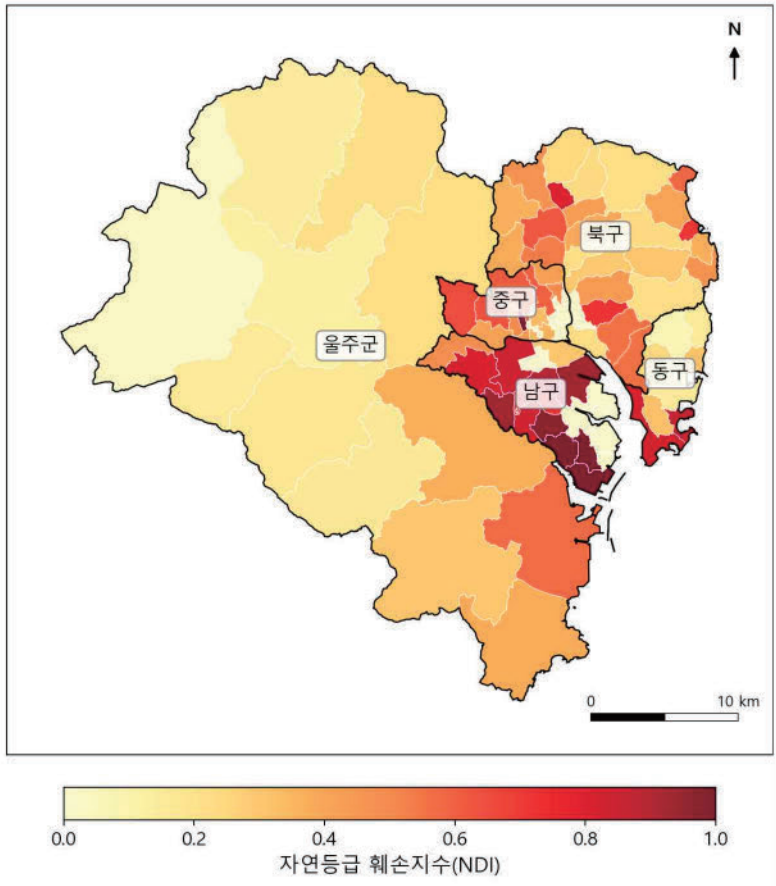
2. 100m 격자 수준 훼손의 시나리오 민감도

100m 격자 단위로 산출한 2100년 NDI의 SSP1-2.6과 SSP5-8.5 차이는 북구에서 +0.033(상대 +10.6%), 울주군에서 +0.016(+9.7%)로 시나리오 간 차이가 큰 구·군에 해당한다(〈표 4〉). 반면 남구는 SSP1에서 이미 0.760으로 포화되어 차이가 +0.009(+1.1%)에 그쳤고, 동구는 보전이 우세하여 +0.001(+0.3%)로 거의 나타나지 않았다.

같은 격자를 2100년 시점의 SSP1-2.6과 SSP5-8.5로 교차 비교하면, 생태·자연도 1·2등급 및 별도관리지역 격자 62,140개 중 양쪽 모두 보전되는 격자가 73.47%, 양쪽 모두 훼손되는 격자가 18.08%, 친환경 시나리오에서는 보전되나 고개발 시나리오에서는 훼손되는 시나리오 민감 격자가 5.15%(3,198개, 약 3,198 ha)로 식별되었다(〈그림 3〉). 반대로 SSP1-2.6에서 훼손되나

SSP5-8.5에서 보전되는 격자도 3.30%로 나타나, 순(net) 시나리오 민감도는 약 1.85%p(약 1,147개 격자)에 그친다. 이는 시나리오 경로별 방향성 차이보다 두 경로에 공통된 훼손 진행이 더 지배적임을 시사한다. 시나리오 민감 격자는 도시화 경계와 산림 회랑 가장자리에 집중되어, 고개발 시나리오의 추가 보전 우선 영역으로 해석된다.

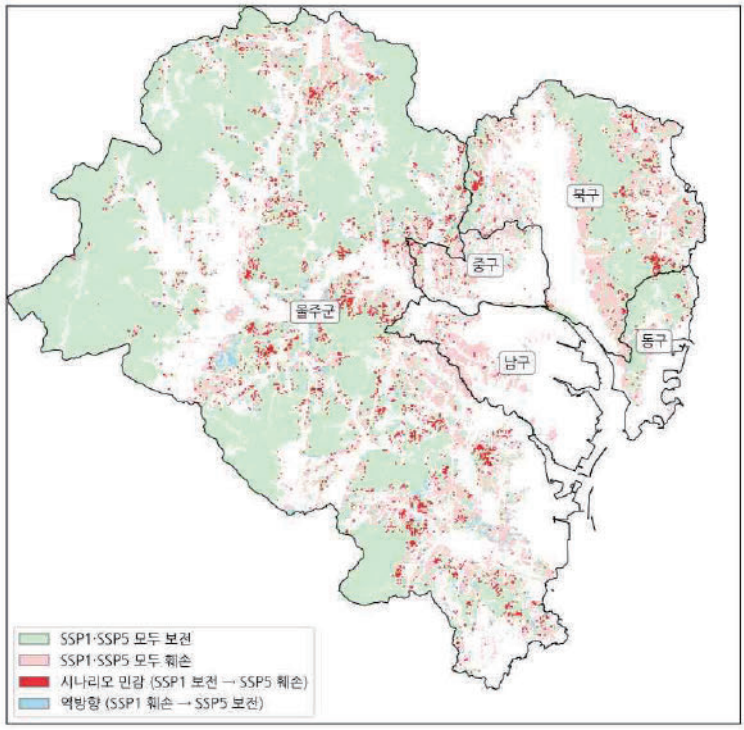
〈그림 2〉 읍면동 수준 자연등급 훼손지수(NDI) 분포(SSP5-8.5, 2100)



〈표 4〉 울산 5개 구·군 100m 격자 수준 SSP1·SSP5 (2100) 차이

구·군	NDI (SSP1)	NDI (SSP5)	⊿NDI (절대)	⊿NDI (상대)	EDI (SSP1)	EDI (SSP5)	⊿EDI (절대)	⊿EDI (상대)
남구	0.760	0.769	+0.009	+1.1%	0.780	0.791	+0.012	+1.5%
중구	0.556	0.577	+0.021	+3.8%	0.621	0.636	+0.015	+2.3%
북구	0.315	0.348	+0.033	+10.6%	0.396	0.422	+0.026	+6.6%
동구	0.225	0.225	+0.001	+0.3%	0.247	0.253	+0.007	+2.7%
울주군	0.171	0.187	+0.016	+9.7%	0.219	0.235	+0.016	+7.2%

〈그림 3〉 시나리오 민감 격자 집중 영역: SSP1·SSP5 교차 분류(2100)



〈그림 4〉와 같이 네 시나리오의 NDI 훼손용도 격자를 시점별로 비교하면, 2050년에는 시나리오 간 훼손용도 격자 차이가 작고 SSP3-7.0이 오히려 가장 적게 나타나지만 SSP5-8.5에서 가장 많으며 2100년에는 그 증가가 더 두드러져 시나리오 간 격차가 후반기로 갈수록 커진다. 2030·2050년 일부 구·

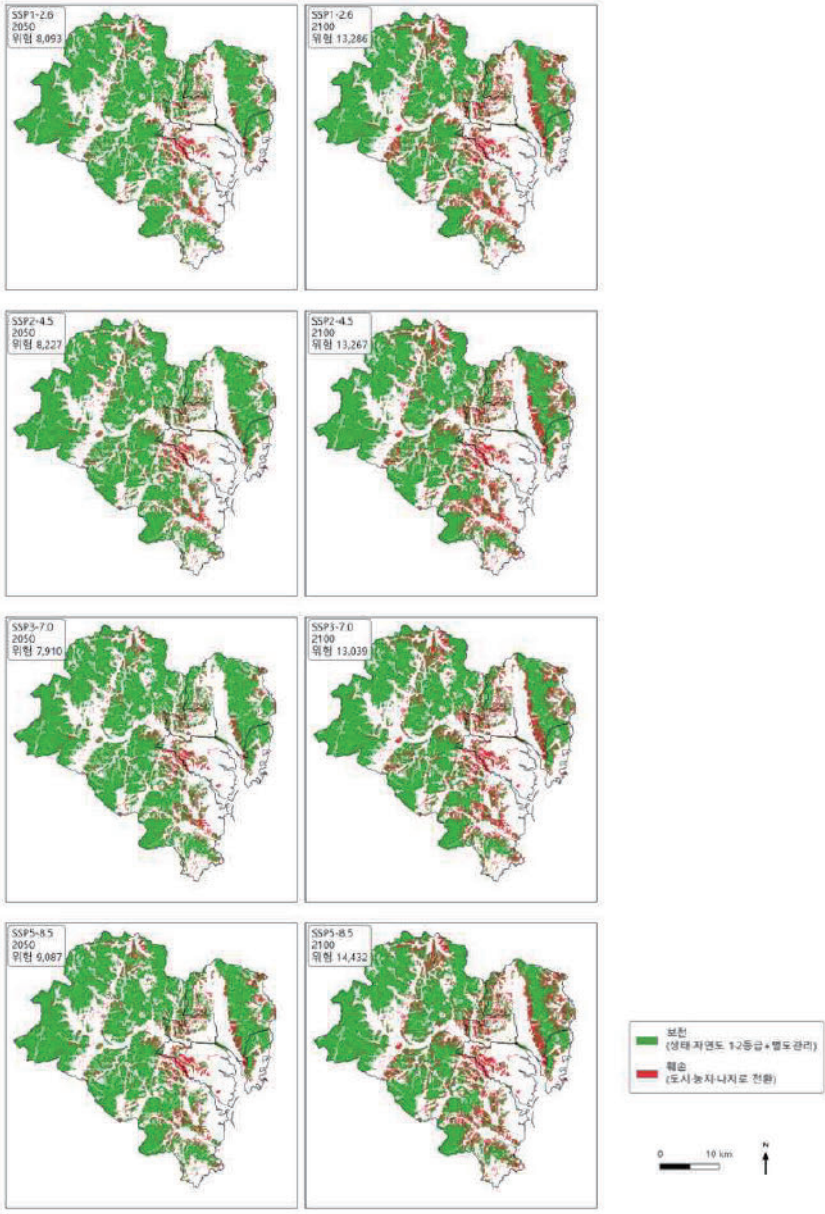
군에서는 SSP1-2.6의 NDI가 SSP5-8.5보다 큰 역전이 나타나는데, 이는 FLUS-SD의 시·도별 사회경제 가정에 따른 시점별 토지 수요 변동에 기인한다(Han et al., 2025). 2100년에는 동구를 제외한 4개 구·군에서 고개발 시나리오(SSP5-8.5)의 NDI가 친환경 시나리오(SSP1-2.6)보다 높게 나타나고, 동구는 두 시나리오의 값이 같게 나타났으며(〈표 3〉), 시나리오 간 위계가 반전되는 구·군은 없는 것으로 확인되었다.

3. 산림 패치 파편화 추이

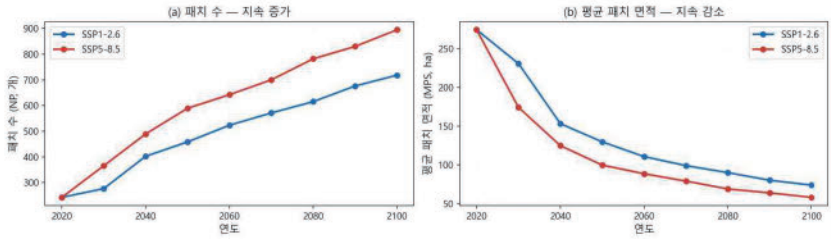
울산 전체 산림 패치의 파편화를 pylandstats로 산출한 결과, 패치 수(NP)는 2020년 242개에서 2100년 895개(SSP5-8.5)로 증가하고, 평균 패치 면적(MPS)은 274.5 ha에서 58.0 ha로 감소하여, 산림의 분절화가 전 기간에 걸쳐 방향 전환 없이 진행됨을 보여준다(〈그림 5〉). NP와 MPS의 악화는 고개발 경로(SSP5-8.5)에서 다소 빠르게 나타나지만, 진행 방향은 시나리오 경로와 무관하게 일관된다.

한편 보조 지표인 최대 패치 지수(LPI)와 유효 매시(MESH)도 같은 기간에 악화되는 경향을 보인다. LPI는 2020년 27.52%에서 2100년 SSP1-2.6 15.79%, SSP5-8.5 16.16%로, MESH는 11,221.8 ha에서 각각 4,700.1 ha와 4,672.3 ha로 감소하여, 최대 산림 패치의 우점 정도와 산림 연결성이 함께 축소된다. 다만 두 지표의 감소는 전 기간에 고르게 나타나지 않고 두 시나리오 모두 2060년과 2070년 사이에 집중되는 반면, 같은 구간에서 NP와 MPS의 변화는 다른 구간과 뚜렷이 구분되지 않는다. 2070년 이후에는 두 시나리오의 LPI가 모두 16% 안팎에서 유지되어, 시나리오 간 진행 속도의 차이가 이 지표에서는 뚜렷하게 나타나지 않는다.

〈그림 4〉 NDI 훼손용도 격자 SSP 시나리오별 2050·2100 년 비교



〈그림 5〉 울산광역시 산림 패치 파편화 시계열 추세



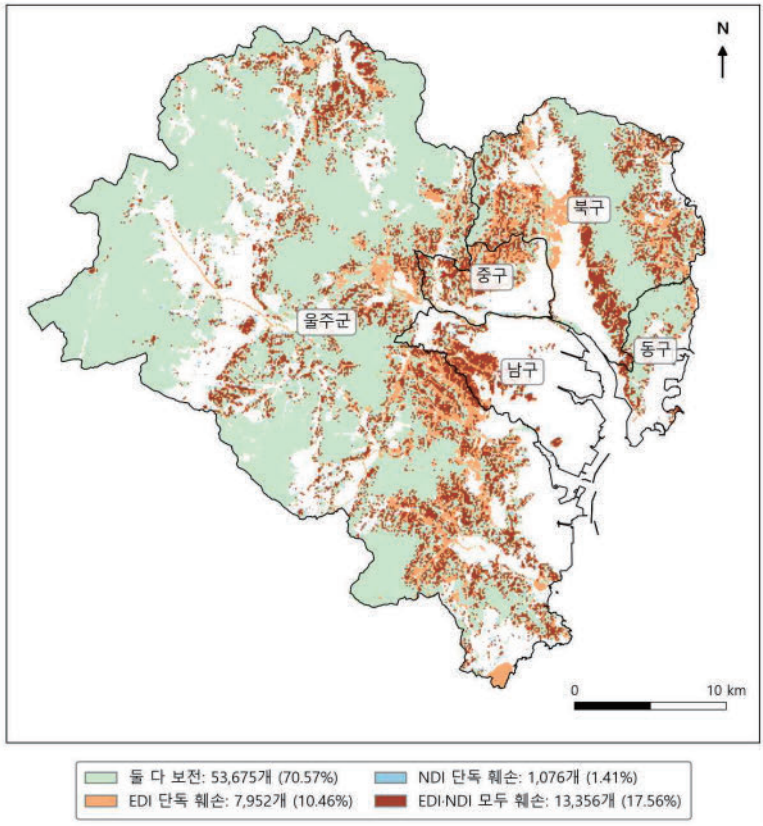
4. EDI·NDI 공간 일치율 분석

EDI와 NDI는 시·군·구 평균 순위가 일관되게 나타났으나, 두 지수의 입력 자료(국토환경성평가지도·생태·자연도)는 작성 기관·기준이 다르되 국토환경성평가지도가 생태·자연도를 평가항목의 하나로 포함하는 부분 중복 관계이므로, 100m 격자 수준에서 두 훼손용도 격자 집합의 공간 일치율을 별도로 분석하였다. 대상은 두 자료 중 하나 이상에서 1·2등급(생태·자연도는 별도관리지역 포함)으로 분류된 격자이며, 2100년 SSP5-8.5 시점을 ① EDI·NDI 모두 훼손, ② EDI 단독 훼손, ③ NDI 단독 훼손, ④ 모두 보전의 네 범주로 교차 분류하였다(〈그림 6〉).

두 지수를 동시에 산출한 결과는 위험 영역의 공간적 일관성과 상호 보완이라는 두 측면에서 해석할 수 있다. 첫째, 공간 일치율(IoU) 59.67%와 Cohen's Kappa 0.70은 작성 기관과 평가 기준이 서로 다른 두 공식 등급체계가 같은 위험 영역을 상당 부분 일관되게 지목하고 있음을 보여준다. 다만 두 자료가 앞서 서술한 것과 같이 부분 중복 관계에 있으므로, 이 수치는 두 자료에 기반한 진단 결과가 공간적으로 어느 정도 일관되게 나타나는지를 확인하는 지표로 해석하는 것이 적절하다. 별도관리지역을 NDI에 포함하기 전(IoU 56.97%)보다 일치율이 높아지는데, 이는 자연공원·습지보호지역 등 법정 보호구역이 국토환경성평가지도에서도 대부분 1등급으로 평가되어(별도관리지역의 98.3%가 국토환경성평가지도 1·2등급과 일치) 두 자료가 같은 핵심 보전축을 공유함을 보여준다. 둘째, EDI 단독 훼손용도 격자 10.46%(7,952개)는 국토환경성평

가지도가 종합 평가 자료로서 생태·자연도가 포착하지 못한 보전 가치 영역을 추가로 식별함을 뜻하며, 두 지수를 함께 산출할 때 상호 보완이 이루어짐을 보여준다. NDI 단독 훼손은 1.41%(1,076개)로 여전히 작은데, 이는 국토환경성평가지도가 생태·자연도를 평가항목으로 포함하기 때문이다.

〈그림 6〉 EDI·NDI 훼손용도 격자 4개 범주 교차 분류 지도(SSP5-8.5, 2100)



EDI·NDI 단독 훼손용도 격자의 시·군·구 분포는 두 지수의 상호 보완이 광역시 내부에서 비대칭적임을 보여준다(〈표 5〉). 도심 우세 구·군인 중구(27.66%)와 남구(20.60%)에서 EDI 단독 식별 비율이 가장 높다. 이는 두 지역의 국토환경성평가지도 1·2등급 가운데 생태·자연도 외부에 있는 도시 환경

가치 영역(도시공원·완충녹지 등)이 미래 도시화로 훼손되는 부분이 가장 두드러지게 잡히기 때문이다. 외곽 우세 구·군인 울주군은 8.53%로 낮은데, 외곽에서는 생태·자연도 1·2등급 및 별도관리지역이 국토환경성평가지도 1·2등급과 넓게 겹쳐 단독 식별 영역이 줄기 때문이다. 이러한 불균형은 환경계획 갱신 시 도심 구·군에서는 EDI를, 자연환경복원 후보지 선정에서는 NDI를 우선 검토하는 근거로 활용될 수 있다.

〈표 5〉 시·군·구별 EDI·NDI 단독 훼손용도 격자 비율 (SSP5-8.5, 2100)

구·군	EDI 단독 비율[3]	NDI 단독 비율	모집단 (개)
남구	20.60%	6.07%	1,714
중구	27.66%	2.23%	2,064
북구	15.89%	0.90%	12,056
동구	7.27%	1.79%	2,007
울주군	8.53%	1.34%	58,218

5. 잠재 훼손 위험지 분석

위 절차(이길상·손승우, 2024의 전환 탐지·군집화 착안을 재구성)를 SSP5-8.5의 2100년 시점에 적용한 결과, 울산의 1 ha 이상 잠재 훼손 위험지는 1,922개소·총 16,786 ha로 식별되어 공간환경계획의 우선 모니터링 영역으로 산출되었다(〈표 6〉, 〈그림 7〉). 패치 크기 분포에서는 1~5 ha 소규모 패치가 79.1%를 차지하는 한편, 50 ha 이상 대형 패치가 50개로 식별되어 사전 회피·집중 모니터링의 핵심 단위에 해당한다.

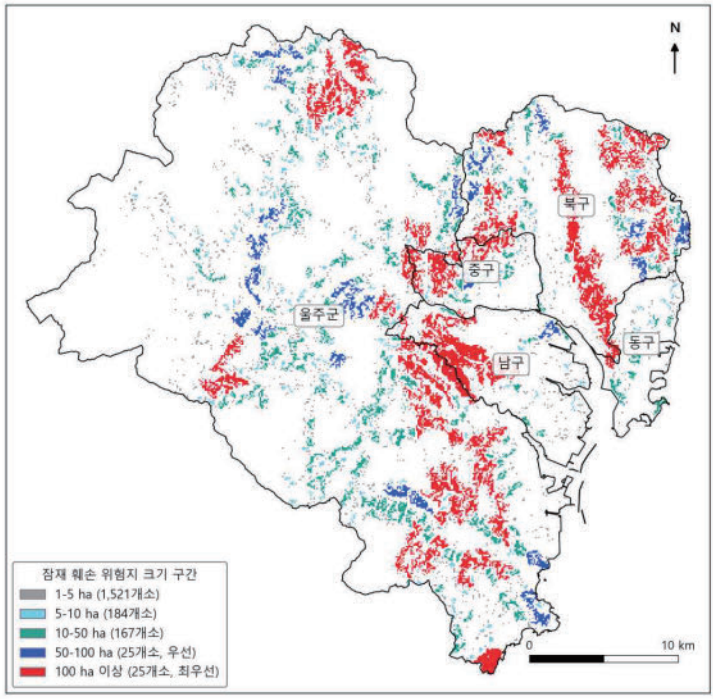
〈표 6〉 잠재 훼손 위험지 크기 구간별 개소 및 면적 (SSP5-8.5, 2100)

패치 크기	개소	비율	총 면적 (ha)	모니터링 우선순위
1-5 ha	1,521	79.1%	2,360	소규모
5-10 ha	184	9.6%	1,178	—
10-50 ha	167	8.7%	3,337	중규모

3) 단독 비율의 분모는 시·군·구 내 EDI∪NDI 1·2등급(생태·자연도는 별도관리지역 포함) 격자 모집단이다.

50–100 ha	25	1.3%	1,769	우선 후보
100 ha 이상	25	1.3%	8,142	최우선 후보
총계	1,922	100.0%	16,786	—

〈그림 7〉 잠재 훼손 위험지 크기 구간별 분포(SSP5-8.5, 2100)



V. 고찰 및 결론

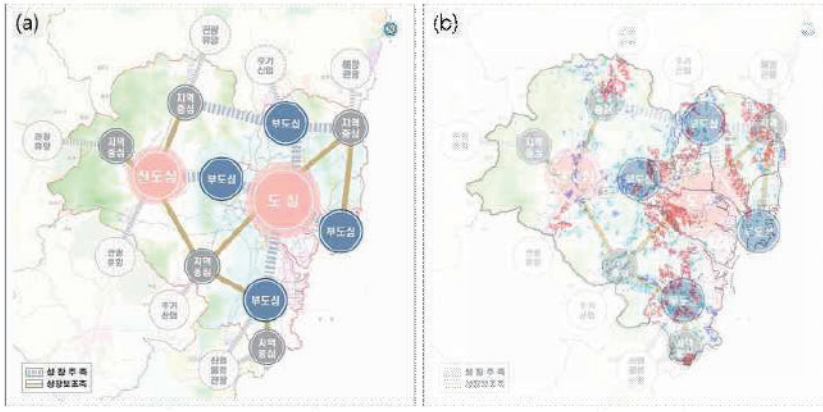
1. 미래 훼손 위험 진단을 통한 양적 지표 보완 방안

EDI·NDI가 보인 도심-외곽 격차는 한국 도시화의 경로와 관련이 있다. Han et al.(2025)이 보고한 바와 같이 도시화가 산림에서 농지를 거쳐 시가지로 이어지고 농지를 매개로 한 훼손이 모든 SSP에서 일관되게 나타나므로, 친환경 시나리오의 환경친화적 가정도 도심 구의 좁은 보전 면적과 농지 매개

훼손을 줄이지 못한다. 이는 『시·군·구 환경계획 수립지침』(기후에너지환경부, 2021)에 따른 시·군·구 환경계획에서 시나리오별 차등 관리보다 시나리오와 무관한 일관된 사전 회피·보전 원칙이 우선되어야 함을 뒷받침한다.

미래 훼손 위험의 공간 분포는 개발 압력의 배치와 공간적으로 상당 부분 일치한다(〈그림 8〉). 『2035년 울산도시기본계획』의 성장주축(남북축·동서1축·동서2축)이 모두 지나는 남구는 2100년 SSP5-8.5 기준 NDI 0.769, EDI 0.791로 5개 구·군 가운데 가장 높게 나타났다. 반면 발전축 통과가 가장 적고 동서2녹지축이 외곽 산림지대를 따라 형성되는 울주군은 NDI 0.187, EDI 0.235로 가장 낮아 두 구·군의 NDI 격차는 약 4.1배에 이른다(〈표 3〉). 발전축이 밀집한 도심 구·군에서는 EDI 단독 훼손용도 격자 비율이 중구 27.66%, 남구 20.60%로 높게 나타났으며(〈표 5〉), 생태·자연도만으로 판별할 경우 도시공원·완충녹지와 같은 도시 환경 가치 영역이 누락될 여지가 있다.

〈그림 8〉「2035년 울산도시기본계획」 발전축(a)과 미래 잠재 훼손 위험지의 공간 중첩(b)



자료: 발전축 계획도(울산광역시, 2021), 2100년 SSP5 잠재 훼손 위험지(저자 작성)

다만 이러한 대응은 구·군 행정구역 단위로 집계한 지수와 계획 도면상의 축 배치를 대조한 결과이므로, 발전축에 완충구역을 설정하여 그 내부의 잠재 훼손 위험지 면적 비율을 산출하는 직접 중첩 분석과는 구분하여 이해할 필요가 있다. 이처럼 훼손 위험의 공간 분포가 개발축·녹지축의 배치와 겹치므로, 본 연구가 제시한 미래 훼손 위험 진단은 사전 회피·연결망 계획의 정

량 근거로 활용될 필요가 있다. 이때 본 도구가 지목하는 지점은 산림·습지 등 자연 지역, 특히 보전 1·2등급의 고가치 영역이 개발 압력에 노출되는 곳이다. 따라서 본 도구는 개발을 일률적으로 억제하기보다, 이러한 고가치 핵심 지역의 회피·보전을 우선하면서 완충·생태 연결망 확보 등 개발과 보전을 사전에 조율하는 근거를 제공한다.

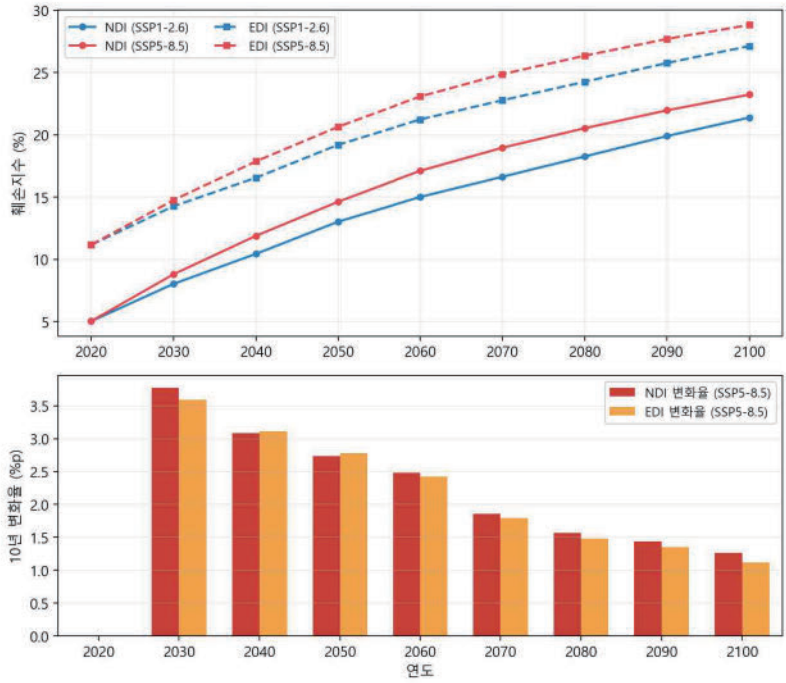
2. 환경계획 부문별 활용 방안

본 연구가 산출한 시·군·구 수준 EDI·NDI, 읍면동 수준 훼손 분포, 100m 격자 수준 시나리오 민감 격자는 시·군·구 환경계획의 수립·정비 과정에서 행정 단위 수준별로 나누어 활용할 수 있다. 시·군·구 수준 결과는 사전 회피·보전 도면 작성의 진단 자료로, 읍면동 수준 분포는 흩어진 보전지역을 생태축으로 연결하거나 회피 대상을 식별하는 자료로 쓸 수 있다. 약 3,198 ha의 시나리오 민감 격자는 친환경 경로에서는 보전되나 고개발 경로에서는 훼손되는 조건부 회피 영역으로, 잠재 훼손 위험지를 면적 단위로 미리 보전 대상에 넣는 데 활용할 수 있다.

산림 회랑 차원에서는 회랑의 약화와 시나리오 민감 격자가 공간적으로 산림 패치 가장자리와 도시화 경계부에 집중된다. 따라서 본 도구의 적용 지점은 보호구역 바깥의 산림 패치 가장자리와 도시화 경계부에 두는 것이 적절하며, 도시기본계획 녹지축 정책의 그린벨트·생태통로 설치도 이 가장자리에서 우선 검토할 필요가 있다. 또한 50 ha 이상의 대형 잠재 훼손 위험 패치는 도시기본계획 발전축·녹지축 도면과 중첩하면 우선 회피 대상 공간으로 구체화할 수 있다.

본 결과의 활용에는 시점도 중요하다. EDI·NDI는 2020~2030년 구간에서 변화율이 가장 크고(SSP5-8.5 기준 NDI +3.8%p, EDI +3.6%p) 이후 점차 둔화하므로(〈그림 9〉), 보전 등급의 훼손 위험에는 조기 개입이 가장 효과적이다. 반면 산림 파편화(NP·MPS)는 특정 임계 시점 없이 전 기간에 걸쳐 지속되므로, 산림 회랑 연결망의 보전은 특정 시점에 집중하기보다 계획 갱신 주기마다 일관되게 관리되어야 한다.

〈그림 9〉 NDI·EDI 시계열 및 10년 단위 변화율(2020~2100)



보조 지표인 LPI와 MESH가 2060년과 2070년 사이에 집중적으로 낮아지는 것은, 같은 구간에 NP와 MPS의 변화가 뚜렷하지 않다는 점을 함께 고려하면 대상지에서 가장 넓은 산림 패치가 이 시기에 둘 이상으로 끊긴 결과로 볼 수 있다. 따라서 이 구간은 경관 전반의 파편화가 가속되는 시점보다는, 광역 산림 회랑의 중심을 이루는 핵심 대형 패치가 분절되는 시점을 지시하는 신호로 해석할 여지가 있다. 동일한 면적이 보전되더라도 최대 패치가 분할되면 연결성은 크게 낮아지므로, 생태축 관리에서는 보전 면적의 총량과 함께 핵심 대형 패치의 완결성을 별도의 점검 항목으로 둘 필요가 있다. 이에 따라 시·군·구 환경계획의 생태축 도면에서 최대 패치를 우선 보전 단위로 명시하고, 그 내부를 가로지르는 잠재 훼손 위험지와 시나리오 민감 격자가 겹치는 구간을 연결성 확보의 우선 대상으로 다루는 방안을 검토할 수 있다. 다만 LPI·MESH의 하락 시점은 FLUS-SD 산출물의 격자 배당 결과에 의존하고 시

나리오에 따라서도 달라지므로, 해당 시점을 확정적인 분절 시기로 해석하기보다 최대 패치가 분할될 위험이 존재하는 구간을 지시하는 정보로 활용하는 것이 적절하다.

이상의 활용 방향과 주요 대응 시점은 〈표 7〉과 같다.

〈표 7〉 본 연구 결과의 공간환경계획 활용 방향

활용 방향	본 연구 활용 지표	주요 대응 시점
사전 회피·보전 도면 작성	시·군·구 수준 EDI·NDI	EDI·NDI 변화율이 2020~2030년에 최대 → 조기 진단·개입
보전지역의 생태축 연결	읍면동 수준 훼손 분포 + 산림 패치 NP·MPS	산림 파편화가 전 기간 방향 전환 없이 진행 → 계획 갱신 주기마다 회랑 관리
집중 모니터링 구역 지정	100m 격자 시나리오 민감 격자 + 50 ha 이상 잠재 훼손 위험 패치	시나리오 간 격차가 후반기에 커짐 → 친환경 경로 조기 고정

3. 결론

본 연구는 SSP 시나리오 기반 미래 토지피복변화 예측 자료를 지자체 공간환경계획에 적용하는 방향을 세 측면에서 제시하였다. 첫째, 한국 공간환경계획 연구에 미래 시간축을 도입해 현황 중첩에 머물던 진단을 미래 훼손 위험까지 확장하였으며, 이는 국토 계열 정보로 구동된 토지피복 예측에 환경등급자료를 결합해 국토·환경 정보의 통합을 방법 차원에서 구현한 것으로 볼 수 있다. 둘째, EDI·NDI 공간 일치율 분석을 통해 두 지수가 지목하는 위험 영역이 상당 부분 공간적으로 일관되게 나타나는 동시에, EDI 단독 식별 영역을 매개로 서로 보완적인 정보를 제공함을 확인하였다. 셋째, SSP5-8.5의 2100년 시점에서 1 ha 이상 잠재 훼손 위험지 1,922개소를 도출하여, '어디가·언제 훼손될 것인가'라는 정량 진단이 통합관리의 제도적 처방과 협의의 공간적 수단으로 활용될 수 있음을 제시하였다.

그러나 본 연구의 한계와 향후과제는 다음과 같다. 첫째, 훼손지수(EDI·NDI) 산출에 국토환경성평가지도와 생태·자연도 두 자료만을 사용하였다. 비오톱등급도·도시생태현황지도와 같은 정밀 자료는 일부 지방자치단체만 제작하여 전국 단위 활용이 어렵다. 또한 전국 단위로 구축되는 국토환경 지

리정보는 광역 수준의 정책 방향 설정에는 유용하나 기초지방자치단체나 개별 사업 단위의 정밀 분석에는 제약이 있다는 점이 지적되어 왔다(명수정 등, 2018). 따라서 본 연구의 시·군·구·읍면동 단위 결과 역시 확정적 판단보다 초기 진단 자료로 활용하는 것이 적절하다. 향후 이러한 정밀 환경공간자료가 전국에 일관되게 구축된다면 진단의 정밀도와 확장성이 한층 높아질 것이다. 둘째, 연구대상지를 울산광역시 한 곳으로 한정하였다. 향후 다양한 지자체로 분석을 확대할 필요가 있다. 셋째, 기존 환경계획 및 도시기본계획과의 정밀한 공간적 정합성 비교가 부족하였다. 『2035년 울산도시기본계획』의 발전축·도시녹지축은 보고서에 수록된 계획 부문 도면의 형태로 공개되어 있어 중첩 분석에 직접 투입할 수 있는 벡터 자료로는 확보하지 못하였고, 본 연구의 비교는 구·군 단위로 집계한 EDI·NDI와 계획 도면상의 축 배치를 대조하는 수준에 머물렀다. 향후 해당 계획의 공간계획 도면을 벡터 자료로 구득하여 축 완충구역 기반의 정밀 정합 분석과 통합 진단을 수행할 필요가 있다. 넷째, 본 연구는 실측 토지피복이 아닌 FLUS-SD의 예측 산출물을 대분류 체계로 활용하므로, 실측 세분류 토지피복도에 근거해 원 방법론(이길상·손승우, 2024)이 수행한 현장검증 절차를 적용할 수 없다. 따라서 도출된 잠재 훼손 위험지는 확정된 훼손지로 보기 어려우며, 사전 진단 및 우선 모니터링 후보로 해석하여 계획 수립 단계에서 현황 자료 및 전문가 검토와 함께 활용할 필요가 있다. 마지막으로, 본 연구 결과의 신뢰도와 타 지자체 확장성은 입력 예측자료(FLUS-SD)의 정확도에 의존하므로, 입력 예측자료의 정확도 향상이 향후 핵심 과제로 남는다. 아울러 FLUS-SD 산출물에는 법정 보호구역인 별도관리지역 내부의 전환(SSP5-8.5 기준 546 ha)이 포함되어 있어, NDI가 약 0.9%p 과대 산정될 수 있다. 이에 본 연구의 진단은 미래 개발압력 하에서 보전 등급이 훼손될 상대적 위험 수준을 나타내는 것으로 보수적으로 해석할 필요가 있다. 향후 산림 회랑 가장자리의 분열 위치를 구간별로 식별하는 형태측정 분석, 시·군·구 환경계획 갱신을 사전 진단하는 자동 시뮬레이터 개발, 시나리오 민감 격자의 전국 분포 도면화, 전국 229개 시·군·구로의 확장이 후속 과제이다.

본 분석 체계는 한국 공간환경계획이 도면화 단계를 넘어 미래 시나리오 기반 정량 진단으로 나아가는 기반이 될 수 있으며, 전국 확장 시 전 국토·전 피복에 통용되는 통합관리의 상충지점 사전 진단 지표로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

▮참고문헌▮

기후에너지환경부, 2021, 『시·군·구 환경계획 수립지침』, 세종: 기후에너지환경부.

_____, 2025, 『국토환경성평가지도 작성 및 운영지침』(기후에너지환경부 예규 제4호), 세종: 기후에너지환경부.

기후에너지환경부·국토교통부, 2018(2025년 일부개정), 『국토계획 및 환경계획의 통합관리에 관한 공동훈령』, 세종: 기후에너지환경부·국토교통부.

김수련·박진한·송원경·성선용·손학기·권혁수 등, 2020, "지역의 미래 환경 비전 공간화를 위한 토지이용계획 시나리오 체계 연구," 『국토계획』, 55(5), pp.120-133.

명수정·김재훈·유헌석·이현우·이현정, 2018, 『우리나라 국토환경 지리정보의 활용성 제고 방안』(연구보고서 2018-07), 세종: 한국환경정책·평가연구원.

배민기, 2017, "지자체의 공간화기반 환경보전계획 수립 방안: 청주시를 사례로," 『환경정책』, 25(2), pp.25-60.

송지윤·송슬기·박창석·최정석·오혜정, 2024, "지자체 국토계획 및 환경계획 통합관리 현황과 개선방안," 『환경정책』, 32(3), pp.183-211.

엄정희·최희선·이길상, 2010, "공간환경계획 수립을 위한 환경정보의 체계화와 개선방안," 『환경정책연구』, 9(2), pp.111-133.

울산광역시, 2021, 『2035년 울산도시기본계획』, 울산: 울산광역시.

윤은주·이동근·허한결·성현찬, 2018, "공간최적화모델을 활용한 환경계획의 공간화 방안," 『한국환경복원기술학회지』, 21(2), pp.27-38.

이길상·손승우, 2024, "토지피복 변화 기반의 자연환경 훼손지역 탐색: 경기도 성남시를 중심으로," 『환경정책』, 32(2), pp.131-155.

이상대·송인주, 2002, "우리나라 공간계획과 환경계획간 연계체제 및 실태분석," 『국토계획』, 37(7), pp.29-44.

이양주·장누리, 2022, 『강산벨트론 적용한 공간환경계획 연구: 포천시와 과천시 사례 중심으로』, 수원: 경기연구원.

최정석, 2021, "국토·환경 통합관리의 실현성 강화를 위한 제도적 개선방안," 『환경정책』, 29(4), pp.27-58.

최희선·박주현·김현, 2011, "생태환경 보전을 위한 공간환경계획 수립방안: 경기도 일원에의 사례 적용," 『한국조경학회지』, 39(1), pp.22-34.

한국국토정보공사, 2024, 『도시계획현황』, 전주: 한국국토정보공사.

Bosch, M., 2019, "PyLandStats: an open-source Pythonic library to compute landscape metrics," PLOS ONE, 14(12), e0225734.

Han, S., Y. Kang, H. Jo, M. Ahn, T. Kim and S. Son, 2025, "Future land use and cover modeling in South Korea: linking SSP-RCP with FLUS model," Land, 14(12), 2380.

Jaeger, J. A. G., 2000, "Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation," Landscape Ecology, 15(2), pp.115-130.

Liang, X., Q. Guan, K. C. Clarke, S. Liu, B. Wang and Y. Yao, 2021, "Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China," Computers, Environment and Urban Systems, 85, 101569.

Liu, X., X. Liang, X. Li, X. Xu, J. Ou and Y. Chen et al., 2017, "A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects," Landscape and Urban Planning, 168, pp.94-116.

McGarigal, K. and B. J. Marks, 1995, FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure(General Technical Report PNW-GTR-351), Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.

McHarg, I. L., 1969, Design with Nature, New York: Natural History Press.

Newbold, T., L. N. Hudson, S. L. L. Hill et al., 2015, "Global effects of land use on local terrestrial biodiversity," Nature, 520, pp.45-50.

O'Neill, B. C., E. Kriegler, K. L. Ebi et al., 2017, "The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century," Global Environmental Change, 42, pp.169-180.

Parker, D. C., S. M. Manson, M. A. Janssen, M. J. Hoffmann and P. Deadman, 2003, "Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review," Annals of the Association of American Geographers, 93(2), pp.314-337.

Sang, L., C. Zhang, J. Yang, D. Zhu and W. Yun, 2011, "Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model," Mathematical and Computer Modelling, 54(3-4), pp.938-943.

Sarkar, S., R. L. Pressey, D. P. Faith et al., 2006, "Biodiversity conservation planning tools: present status and challenges for the future," Annual Review of Environment and Resources, 31, pp.123-159.

Seto, K. C., B. Guneralp and L. R. Hutyra, 2012, "Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools," Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(40), pp.16083-16088.

Verburg, P. H., W. Soepboer, A. Veldkamp, R. Limpiada and V. Espaldon, 2002, "Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model," Environmental Management, 30(3), pp.391-405.

Winkler, K., R. Fuchs, M. Rounsevell and M. Herold, 2021, "Global land use changes are four times greater than previously estimated," Nature Communications, 12, 2501.

웹사이트

국토환경성평가지도, 2025, "국토환경성평가지도 울산시 자료," https://data.neins.go.kr/, [검색일: 2026. 6. 15.]

브이월드, 2026, "시·군·구·읍면동 행정경계 자료(통계청 센서스경계·국토지리정보원 연속수치지형도)," https://www.vworld.kr, [검색일: 2026. 6. 15.]

에코뱅크, 2025, "생태·자연도 울산광역시 자료," https://www.nie-ecobank.kr, [검색일: 2026. 6. 15.]

조혜련: 경상국립대학교 조경학과 박사과정 수료연구생으로 재직 중이다. 기후변화 시나리오 기반 토지피복·인구 변화 예측과 이를 활용한 국토-환경계획 통합 진단 연구, 설명가능한 머신러닝(XAI) 기반 공간분석 연구 등을 수행하고 있다(svooc6@gnu.ac.kr).

한성일: 경상국립대학교 조경학과에서 석사학위를 취득하고 현재 한국환경연구원 국토관리연구실에서 위촉연구원으로 재직 중이다. 토지이용·피복 변화 예측, 공간 환경계획, 생태복원 분야를 주로 연구하며, GIS와 생태계서비스 평가 모형을 활용한 국토환경 분석 연구를 수행하고 있다(sihan@kei.re.kr).

강영은: 서울대학교 조경학과에서 조경학 박사학위를 취득하고 현재 경상국립대학교 조경학과 부교수로 재직 중이다. 주요 연구 분야는 기후변화 적응과 탄소중립, 도시 녹지 및 지역 재생을 중심으로 연구하고 있으며, AI 기반 공간모델링 등을 통해 지속가능한 국토 및 환경 계획 연구를 수행하고 있다(yekang@gnu.ac.kr).

투 고 일: 2026년 07월 30일
심 사 일: 2026년 08월 11일
게재확정일: 2026년 08월 18일