한국조경학회지 54(5): 27~50, 2026. 10.
J. KILA Vol. 54, No. 5, pp. 27~50, October, 2026
pISSN 1225-1755 eISSN 2288-9566
https://doi.org/10.9715/KILA.2026.54.5.027

기초지자체 탄소중립 전환의 공간적 취약성 진단 및 유형화

- 그린인프라 적응역량을 중심으로 -

Diagnosis and Classification of Spatial Carbon Neutrality Transition Vulnerability in Local Governments - Focusing on Green Infrastructure Adaptive Capacity -

최철민*,, 최동아*****
*한양대학교 도시대학원 도시 · 지역개발경영학과 박사수료, **㈜러반어스 대표, ***한양대학교 도시대학원 도시 · 지역개발경영학과 조교수

Choi, Chul-Min*,, Choi, Dong-Ah*****
*Ph.D. Candidate, Dept. of Urban and Regional Development Management, Graduate School of Urban Studies, Hanyang University
**Representative Director, rUbanUs Co., Ltd.
***Assistant Professor, Dept. of Urban and Regional Development Management, Graduate School of Urban Studies, Hanyang University

Received: July 20, 2026
Revised: August 4, 2026 (1st)
August 21, 2026 (2nd)
Accepted: August 24, 2026
3인익명 심사필

Corresponding author :
Dong-Ah Choi
Assistant Professor, Dept. of Urban and Regional Development Management, Graduate School of Urban Studies, Hanyang University, Seoul 04763, Korea
Tel.: +82-2-2220-0273
E-mail: dachoi@hanyang.ac.kr

국문초록

본 연구는 전국 229개 기초지자체를 대상으로 탄소중립 전환의 공간적 취약성(carbon neutrality transition vulnerability, CNTV)을 정량적으로 진단하고, 취약성의 구조적 유형을 도출하기 위한 진단체계를 제시하는 데 목적이 있다. 탄소중립 전환 과정에서 지역이 부담하는 감축 압력과 사회적 영향, 이를 완화할 수 있는 공간적 적응역량은 지역의 탄소배출 구조, 사회경제적 여건 및 생태 · 녹지 기반에 따라 다르게 나타날 수 있다. 이에 기존 기후변화 취약성의 노출-민감도-적응역량 프레임워크를 탄소중립 전환의 공간계획적 맥락으로 재구성하여 탄소배출 압력(carbon emission pressure, CE), 사회적 민감도(social sensitivity, SS), 그린인프라 적응역량(green infrastructure adaptive capacity, GIAC)의 3개 영역, 총 20개 지표로 CNTV 진단체계를 구축하였다. 영역별 주성분분석(PCA)을 통해 대표 점수를 도출하고 이를 z-score로 표준화하여 CNTV를 산정하였으며, PI-GIAC 사분면 분석, K-means 군집분석 및 공간자기상관 분석을 통해 취약성의 구조와 공간적 분포를 분석하였다. 분석 결과, 탄소중립 전환 취약성은 단순한 탄소배출 규모보다는 탄소배출 압력과 사회적 민감도로 형성되는 잠재적 전환부담과 이를 완화하는 그린인프라 적응역량 간의 상대적 불균형에 따라 서로 다른 구조로 나타났다. K-means 군집분석 결과, 전국 기초지자체는 초고배출 · 그린인프라 부족 고취약형, 사회민감도 · 그린인프라 부족 전환부담형, 도시생활권 그린인프라 부족형, 저압력 · 고그린인프라 전환안정형, 고민감도 · 고그린인프라 관리형의 5개 유형으로 구분되었다. 또한 CNTV는 통계적으로 유의한 양(+)의 공간자기상관을 보여 유사한 취약성을 가진 지자체가 일정한 권역을 형성하는 경향이 확인되었다. 본 연구는 탄소중립 전환 취약성을 배출량 중심으로 평가하는 데 그치지 않고, 탄소배출 압력, 사회적 민감도 및 그린인프라 적응역량의 조합을 통해 전국 기초지자체 간 상대적 공간 취약성과 그 형성 구조를 함께 진단하였다는 점에 의의가 있다. 특히 그린인프라를 지방정부가 공간계획을 통해 확보 · 관리할 수 있는 적응역량으로 설정함으로써, 지역별 전환 부담을 완화하는 공간적 기반으로 해석하였다. 도출된 CNTV와 유형화 결과는 기초지자체별 탄소중립 · 녹색성장 기본계획의 정책 우선순위 설정과 지역 특성을 반영한 그린인프라 및 공간계획 전략 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

주제어: 탄소배출 압력, 사회적 민감도, 주성분분석, 기초지자체 유형화, 그린인프라 공간계획

ABSTRACT

This study aims to develop a spatial diagnostic framework for assessing carbon neutrality transition vulnerability (CNTV) and identifying its structural types across 229 local governments in South Korea. The conventional exposure–sensitivity–adaptive capacity framework was reconstructed in the context of carbon neutrality transition using three dimensions: Carbon emission pressure (CE), social sensitivity (SS), and green infrastructure adaptive capacity (GIAC). A total of 20 indicators were selected, and principal component analysis (PCA) was applied to derive representative scores for each dimension. The standardized scores were integrated into the CNTV index, followed by PI–GIAC quadrant analysis, K-means clustering, and spatial autocorrelation analysis. The results show that CNTV is shaped not simply by the magnitude of carbon

emissions, but by the relative relationship between potential transition burdens and green infrastructure adaptive capacity. K-means clustering identified five structural types: ultra-high-emission and green infrastructure-deficient high-vulnerability type, socially sensitive and green infrastructure-deficient transition-burden type, urban green infrastructure-deficient type, low-pressure and high-green infrastructure transition-stable type, and high-sensitivity and high-green infrastructure management type. Significant positive spatial autocorrelation was also observed, indicating spatial clustering of similar vulnerability levels. This study provides an integrated framework for assessing relative spatial vulnerability to carbon neutrality transition by considering carbon emission pressure, social sensitivity, and green infrastructure adaptive capacity together. The findings can support region-specific policy prioritization and spatial planning strategies for carbon neutrality transition.

Keywords: Carbon Emission Pressure, Social Sensitivity, Principal Component Analysis, Government Typology, Green Infrastructure Spatial Planning

1. 서론

전 세계적 아젠다인 기후위기에 대응하기 위한 2050 탄소중립(carbon neutrality)은 국제사회의 공동 목표이자 각국의 핵심 정책 의제로 구체화되고 있다. 우리나라는 「탄소중립·녹색성장 기본법」을 제정하여 2030년 국가온실가스감축목표(NDC)와 2050년 탄소중립 달성을 법제화하였으며(Eum, 2025), 이에 따라 지방자치단체는 탄소중립·녹색성장 기본계획을 수립하고 지역 단위의 탄소중립 정책을 추진해야 하는 제도적 책무를 갖게 되었다(탄소중립녹색성장위원회, 2025). 그러나 탄소중립은 중앙정부의 정책과 기술적 감축 노력만으로 달성되기 어려우며, 실제 정책이 실행되는 공간 단위인 지방자치단체의 정책 역량과 도시공간 구조가 중요한 변수로 작용한다(안예현 등, 2022). 지역마다 탄소배출 특성, 인구·사회경제적 여건, 생태·녹지 기반 등 공간적 여건이 크게 다르므로 동일한 국가 목표 아래에서도 기초지자체별 탄소중립 이행 부담과 정책 효과에는 상당한 차이가 발생할 수 있다.

최근 정부는 「지역사회 탄소중립 달성을 위한 실행전략」을 통해 '지역이 주도하는 2050 탄소중립'을 비전으로 제시하고, 지역 중심의 탄소중립 이행 체계를 강화하고 있다. 특히 에너지, 폐기물, 수송, 주택·건물, 흡수원, 기후적응, 시민실천·녹색일자리 등 7대 녹색 기반시설(인프라) 사업을 주요 실행수단으로 제시하고 있으며, 이 가운데 흡수원 분야에서는 도시·해안·산악 등 지역 특성에 적합한 자연기반해법(nature-based solutions)의 적용과 흡수원 확대를 강조하고 있다(기후에너지환경부, 2026). 이는 탄소중립 정책이 에너지 및 산업부문의 직접적인 감축을 넘어 도시공간과 생태기반을 활용한 공간정책으로 확대되고 있음을 보여준다. 그러나 지역별 산림과 도시녹지의 양과 질, 생활권 녹지 접근성, 생태적 연결성 및 관리 여건에는 상당한 차이가 존재하므로, 동일한 그린인프라(Green Infrastructure) 정책을 일률적으로 적용하기보다 지역별 공간적 특성과 기반을 고려한 차등적 접근이 요구된다.

국제사회에서도 녹색전환(green transition), 에너지전환(energy transition), 저탄소 전환(low carbon transition) 과정에서 지역 간 구조적 불균형과 전환 부담의 격차가 발생할 수 있다는 논의가 확대되고 있다(McDowall et al., 2023; Rodríguez-Pose and Bartalucci, 2023; Ulpiani and Vetters, 2023). 따라서 단순히 온실가스 배출량이나 감축량을 비교하는 것을 넘어, 어떤 지역이 왜 탄소중립 전환 과정에서 더 큰 부담을 경험하는지를 설명할 수 있는 진단체계가 요구된다.

이러한 문제는 취약성(vulnerability) 개념을 통해 접근할 수 있다. 취약성은 기후변화 적응 분야에서 노출(exposure), 민감도(sensitivity), 적응역량(adaptive capacity)의 상호 관계를 중심으로 발전해 왔으며(IPCC, 2001), 지역의 구조적 위험과 대응능력을 진단하는 대표적인 분석 틀로 활용되고 있다. 기후변화 취약성이 폭염, 홍수, 가뭄 등 외부 위해(hazard)에 의해 발생하는 피해 가능성과 적응 우선순위를 평가하는 것을 목적으로 한다면, 본 연구에서의 탄소중립 전환 취약성은 탄소중립 정책 이행 과정에서 발생하는 지역 간 전환 부담과 대응역량의 차이를 공간적 관점에서 진단하는 개념이다. 즉 기후변화 취약성이 외부 기후 위험에 대한 적응(adaptation)을 목적으로 한다면, 탄소중립 전환 취약성은 공간계획과 정책을 통해 중장기적으로 변화시킬 가능성이 있는 도시공간 구조와 전환 부담을 진단하고 개선하기 위한 공간계획 지향적 개념이라는 점에서 차이가 있다. 기후변화 취약성 평가에서 노출 영역은 폭염·홍수·가뭄 등 자연적 기후위해의 발생·강도 또는 그 영향권에 놓이는 정도를 반영하는 반면, 본 연구의 탄소배출 압력은 건축물 및 수송부문의 배출구조와 도시공간 특성 등 정책과 공간계획을 통해 중·장기적으로 변화시킬 수 있는 요소를 대상으로 한다.

이러한 접근은 취약성 프레임워크의 적용범위를 기후위험을 넘어 다양한 환경·사회 변화의 맥락으로 확장한 연구에서도 확인할 수 있다. 해외 연구에서는 VSD(vulnerability scoping diagram)을 통해 노출·민감도·적응역량을 중심으로 서로 다른 변화 취약성을 비교할 수 있는 일반화된 진단구조를 제시하였으며(Polsky et al., 2007), 이를 에너지전환 취약성 평가에도 적용하여 노출을 전환 압력, 민감도를 사회경제적 취약성, 적응역량을 지역 대응역량으로 재구성한 연구도 확인된다(Carley et al., 2018). 이는 기존 취약성 프레임워크가 기후변화 적응뿐 아니라 정책적 전환 과정의 지역별 부담을 진단하는 데에도 확장될 수 있음을 보여준다. 본 연구는 이러한 접근을 도시·공간계획 관점으로 확장하여 탄소배출 압력(carbon emission pressure), 사회적 민감도(social sensitivity) 및 그린인프라 적응역량(green infrastructure adaptive capacity)의 관계를 통해 탄소중립 전환 취약성(carbon neutrality transition vulnerability, CNTV)을 공간적으로 진단하고자 한다.

적응역량은 재정, 기술, 제도, 사회적 자본 등 다양한 요소로 구성될 수 있으나, 이러한 요소들은 공간계획을 통한 직접적인 물리적 개입과는 성격이 다르다. 반면 그린인프라는 탄소흡수 및 저장뿐 아니라 건축물 에너지 소비 저감, 도시 열환경 완화, 물순환 회복, 생태계서비스 제공 등 탄소중립 완화와 기후적응 기능을 동시에 수행하는 대표적인 공간 기반 인프라이다(박효석 등, 2014; Cong et al., 2023; Chen et al., 2024). 지방정부가 토지이용계획과 도시계획을 통해 직접 확충·관리할 수 있는 공공정책 수단이라는 점에서 다른 적응역량과 차별성을 갖는다. 또한 도시 그린인프라가 탄소흡수와 에너지 수요 저감에 기여하는 동시에 기후적응 측면의 공동편익(co-benefits)을 제공할 수 있는 도시 차원의 완화수단임을 제시하고 있다(Lwasa et al., 2022; Chen et al., 2024; Herath and Bai, 2024). 그린인프라는 탄소흡수뿐 아니라 에너지 수요 저감, 열환경 개선, 생태계서비스 증진 등 다양한 공동편익을 제공하며, 도시 인프라와 연계하여 경제적·기술적·사회적·환경적 측면에서 높은 잠재적 실현가능성을 갖는 공간계획 수단으로 평가되고 있다(IPCC, 2022; 허한결과 박종훈, 2024).

이에 본 연구에서는 탄소중립 전환 취약성을 지역의 탄소배출 구조에서 발생하는 감축 압력, 전환 과정의 영향을 상대적으로 크게 받을 수 있는 사회적 민감도, 공간계획을 통해 확보·관리할 수 있는 그린인프라 적응역량 간의 상대적 불균형으로 인해 지역의 탄소중립 전환 부담이 구조적으로 증폭될 가능성으로 조작적으로 정의하였다. 이를 위해 IPCC 취약성 프레임워크를 탄소중립 전환의 공간계획 관점으로 재구성하여 탄소배출 압력, 사회적 민감도, 그린인프라 적응역량의 세 영역을 통합한 탄소중립 전환 취약성 지수(CNTV)를 구축하고, 전국 기초지자체를 대상으로 취약성 수준과 구조적 특성을 유형화함으로써 지역 맞춤형 탄소중립 정책과 그린인프라 기반 공간계획 전략 수립을 위한 기초 진단체계를 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경 및 선행연구

2.1 탄소중립 전환과 취약성

탄소중립은 인간 활동으로 발생하는 이산화탄소 배출과 제거가 균형을 이루어 순배출량(net emissions)이 0이 되는 상태를 의미하며(IPCC, 2018), 이를 달성하기 위해서는 에너지·산업·교통·토지이용 등 사회 전반의 구조적 전환이 요구된다. 최근에는 탄소중립을 단순한 온실가스 감축의 문제가 아니라 지역의 산업구조, 사회경제적 특성 및 도시공간 구조의 변화를 수반하는 전환(transition)의 관점에서 이해하려는 논의가 확대되고 있다.

동일한 탄소중립 목표라 하더라도 지역이 가진 산업·공간구조와 인구·사회경제적 특성에 따라 전환 과정에서 발생하는 부담은 다르게 나타날 수 있다. Rodríguez-Pose and Bartalucci(2023)는 유럽 지역을 대상으로 녹색전환 취약성 지수를 구축하여 개발수준이 낮거나 주변부·농촌지역에서 전환취약성이 상대적으로 높게 나타날 수 있음을 제시하였다. Ulpiani and Vetters(2023)는 유럽 도시의 기후중립 전환과정에서 발생할 수 있는 정치·재정·규제·운영 등 다차원적 위험을 분석하였으며, McDowall et al.(2023)은 탄소집약산업의 고용감소와 지역의 기존 사회경제적 여건 및 적응역량을 결합하여 에너지전환에 대한 지역별 경제적 취약성을 진단하였다. 이러한 연구는 저탄소 전환의 부담이 지역적으로 균등하게 발생하지 않으며 지역의 구조적 조건에 따라 차별적으로 나타날 수 있음을 보여준다.

국내에서도 탄소중립 도시의 물리적 환경과 탄소배출 특성을 활용한 유형화, 지자체 관리권한 부문의 배출·흡수 특성을 활용한 탄소중립 기여도 분석, 광역지자체의 기후변화 대응 유형 분석, 온실가스 배출의 공간적 군집과 우선 관리지역 도출 등이 수행되고 있다(진상현, 2024; 박지용과 정승현, 2025). 실제 전국 기초지자체의 물리적 환경변수와 배출 특성을 결합하여 유형을 도출하고, 전국 시·군·구의 배출자료를 활용하여 공간적 핫스팟과 탄소관리 공간계획 방향을 분석하였다(Lee and Jung, 2023; 손희정 등, 2024). 그러나 기존 연구는 주로 탄소배출 특성, 감축경로 또는 도시 유형화에 초점을 두고 있어, 탄소배출 압력과 사회적 민감도, 공간적 대응기반을 통합하여

지역의 전환 부담이 어떠한 구조로 형성되는지를 설명하는 연구는 상대적으로 부족하다. 따라서 지역별 전환 부담과 대응역량의 차이를 통합적으로 설명할 수 있는 탄소중립 전환 취약성 진단체계가 요구된다.

2.2 취약성 개념 및 평가 프레임워크

기후변화 취약성은 외부 기후자극에 노출된 시스템이 부정적 영향을 받을 가능성과 이에 대처하거나 적응할 수 있는 능력을 설명하기 위한 개념으로 발전해 왔다. IPCC AR4에서는 취약성을 노출(exposure), 민감도(sensitivity), 적응역량(adaptive capacity)의 함수로 정의하였으며(IPCC, 2007), 이러한 구조는 지역별 취약성을 구성요소별로 진단하는 데 폭넓게 활용되어 왔다(Brooks, 2003; 고재경과 김희선, 2010; 김선희, 2012; Sharma and Ravindranath, 2019; Smith and Diedrich, 2024). 이후 IPCC AR5에서는 기후위험(risk)을 위해(hazard), 노출(exposure), 취약성(vulnerability)의 상호작용으로 설명하면서 취약성을 민감도와 대응·적응능력을 포함하는 개념으로 재구성하였다(IPCC, 2014).

취약성 프레임워크는 기후변화 적응뿐 아니라 다양한 환경·사회 변화 과정의 지역별 구조적 차이를 진단하는 데에도 확장되어 왔다. Polsky et al.(2007)은 VSD(vulnerability scoping diagram)을 통해 서로 다른 취약성 평가를 노출·민감도·적응역량의 공통구조로 비교할 수 있는 일반화된 진단체계를 제시하였다. Carley et al.(2018)은 이러한 접근을 에너지전환에 적용하여 정책 전환에 대한 노출, 사회경제적 민감도, 지역의 적응역량을 결합함으로써 에너지전환에 따른 지역 간 취약성 격차를 평가하였다. 이는 취약성 프레임워크가 자연적 기후위험에 대한 적응뿐 아니라 정책·경제·사회구조의 전환과정에서 발생하는 지역별 부담을 설명하는 데에도 활용될 수 있음을 보여준다.

그러나 본 연구에서 다루는 탄소중립 전환 취약성은 기존 기후변화 취약성과 평가대상 및 정책적 목적에서 차이가 있다. 기존 기후변화 취약성 평가에서 노출은 폭염·홍수·가뭄 등 자연적으로 발생하는 기후위험 또는 그 영향권에 놓이는 정도를 반영하는 반면, 탄소중립 전환에서는 건축물과 수송부문의 배출구조, 도시공간 특성 등 정책과 공간계획을 통해 중·장기적으로 변화시킬 수 있는 구조적 감축부담이 중요한 전환압력으로 작용한다. 따라서 본 연구는 일반화된 취약성 접근과 전환취약성 접근을 이론적 기반으로 하여 IPCC 취약성 프레임워크를 탄소중립 전환의 공간적 맥락에 맞게 재구성하고, 탄소배출 압력, 사회적 민감도, 그린인프라 적응역량의 세 영역으로 구성된 진단체계를 설정하였다.

2.3 탄소중립 전환을 위한 그린인프라 적응역량

그린인프라는 산림, 공원, 하천, 습지 등 자연·반자연 공간과 도시 내 다양한 녹지요소를 네트워크로 활용하여 생태계서비스를 제공하는 공간적 기반으로, 자연기반해법을 도시·지역 공간에 구현하는 주요 수단 중 하나로 논의되고 있다(Raymond et al., 2017; Jones et al., 2022). 그린인프라는 탄소흡수·저장뿐 아니라 도시 열환경 완화, 물순환 조절, 생물다양성 증진 및 건강·복지 향상 등 다양한 공동편익을 제공하며, 최근에는 건축물 에너지소비 저감과 탄소흡수를 함께 고려하는 탄소중립 공간전략으로 그 역할이 확대되고 있다(Xiao et al., 2023; Chen et al., 2024; Hautamäki et al., 2025). 선행연구에서는 자연기반해법이 건축물 에너지사용 감소와 탄소격리를 통해 탄소중립 커뮤니티에 기여할 수 있음을 검토하였으며, 도시의 그린·블루 인프라가 탄소흡수와 에너지 수요 저감에 기여하는 동시에 기후적응 측면의 공동편익을 제공할 수 있음을 제시하고 있다(Choi et al., 2021; Strbac et al., 2023).

기존 취약성 평가에서 적응역량은 재정, 기술, 제도, 사회적 자본 등 다양한 사회·경제적 대응능력을 포괄한다. 그러나 이러한 요소들은 공간계획을 통한 직접적인 물리적 개입과는 성격이 다르며, 지방정부가 단기간에 공간적으로 확보·관리하기에도 한계가 있다. 반면 그린인프라는 토지이용계획, 공원·녹지계획, 도시개발 및 재생사업 등을 통해 지방정부가 공간적으로 확보·보전·관리할 수 있으며, 탄소흡수와 기후완충, 생태계서비스를 지속적으로 제공할 수 있다는 특성을 가진다. 따라서 본 연구에서는 그린인프라를 전체 적응역량과 동일시하기보다, 탄소중립 전환부담을 공간적으로 완충할 수 있는 적응역량의 생태·공간적 하위차원으로 설정하였다.

본 연구에서 그린인프라 적응역량은 지역이 보유한 그린인프라의 탄소흡수·저장, 생태적 완충 및 생태계서비스 기능을 통해 탄소배출 압력과 사회적 민감도로 인해 발생하는 전환부담을 완화할 수 있는 공간적 잠재역량으로 정의하였다. 이는 재정·행정·기술·거버넌스 등을 포함하는 지역의 전체 적응역량을 의미하는 것이 아니라, 지방정부의 공간계획과 관리를 통해 확보·유지·개선할 수 있는 생태·녹지 기반의 적응역량에 초점을 둔 개념이다. 이러한 관점에서 GIAC는 기존 사회·경제 중심의 적응역량을 대체하는 것이 아니라, 탄소중립 전환의 공간계획적 대응 가능성을 설명하기 위한 공간적·생태적 하위역량으로 해석할 수 있다.

3. 탄소중립 전환 취약성 진단 방법

3.1 분석 대상 및 단위

기초지방자치단체는 「탄소중립·녹색성장 기본법」에 따라 지역 단위 탄소중립·녹색성장 기본계획을 수립·이행하는 정책 실행의 기본 공간 단위이다. 또한 지역별 탄소배출 특성, 사회경제적 여건 및 그린인프라 기반의 차이를 반영할 수 있다는 점에서 탄소중립 전환 취약성을 진단하기에 적합한 분석단위로 판단하였다. 이에 본 연구는 전국 229개 기초지방자치단체(시·군·구)를 분석 대상으로 설정하였으며, 동일한 지표체계를 적용하여 지역 간 상대적 탄소중립 전환 취약성을 비교·평가하였다.

분석 자료는 지표별 최신성과 공간적 일관성을 고려하여 2024년 자료를 원칙으로 구축하였으며, 2024년 자료 확보가 어려운 지표는 2020–2023년 중 최신 가용자료를 활용하였다. 자료는 국토교통부 탄소공간지도, 국가통계포털(KOSIS), 환경부 환경공간정보, 산림청 국가산림통계, Landsat 위성영상 등 국가 공공데이터를 활용하였다.

3.2 탄소중립 전환 취약성 개념 및 지표 체계

본 연구의 탄소중립 전환 취약성 분석틀은 IPCC 취약성 프레임워크의 노출–민감도–적응역량 구조를 탄소중립 전환의 공간적 맥락으로 재구성하여 설정하였다(그림 1 참조). 노출 영역은 탄소중립 이행 과정에서 지역이 감당해야 하는 구조적 감축 부담인 탄소배출 압력으로 재구성하고, 민감도는 전환 과정에서 정책 및 비용 변화의 영향을 상대적으로 크게 받을 수 있는 인구·사회·주거 특성을 반영하는 사회적 민감도로, 적응역량은 이러한 전환 부담을 공간적으로 완화할 수 있는 생태·녹지 기반의 그린인프라 적응역량으로 재구성하였다.

지표는 각 영역의 개념을 설명할 수 있는 개념적 적합성, 지방정부의 공간계획 및 도시 관리와의 정책적 연계성, 전국 기초지자체에 동일한 기준을 적용할 수 있는 공간적 비교 가능성, 자료의 시점 및 출처의 일관성을 기준으로 선정하였다. 이를 위해 기후변화 및 전환 취약성, 탄소배출과 도시공간, 사회적 전환부담 및 그린인프라 관련 선행연구와 국가 공공데이터 구축 현황을 종합적으로 검토하였다. 최종적으로 CE 7개, SS 6개, GIAC 7개 등 총 20개 지표를 선정하였으며, 각 지표별 개념적 의미와 선정근거, 근거문헌, 산정방식 및 자료출처는 표 1에 제시하였다. CE와 SS는 값이 클수록 취약성이 증가하는 방향으로, GIAC는 값이 클수록 취약성을 완화하는 방향으로 설정하였으며, 지표별 단위와 규모 차이는 z-score 표준화를 통해 보정하였다(Salleh et al., 2023).

지표 구축 과정에서는 최종 20개 지표 외에도 SS 영역의 영유아 인구비율과 외국인 인구비율, 적응역량 관련 지표로 환경예산, 재정자립도, 도시공원 접근성 등을 검토하였다. 그러나 영유아 인구비율과 외국인 인구비율은 탄소중립 전환 과정에서의 사회적 부담을 전국 기초지자체에 일관되게 설명하는 데 한계가 있었으며, 환경예산과 재정자립도 역시 일반적인 행·재정 여건이 실제 탄소중립 및 그린인프라 대응역량과 직접적으로 일치한다고 보기 어려워 제외하였다. 도시공원 접근성은 그린인프라의 서비스 이용성과 공간적 형평성을 나타내는 중요한 지표이나, 본 연구에서 설정한 GIAC가 생태·녹지 기반의 물리적·생태적 완충역량을 평가하는 데 초점을 둔다는 점에서 개념적 범위가 상이하여 최종 지표에서는 제외하였다. 이러한 후보지표는 향후 CNTV의 제도적·사회적 적응역량 또는 그린인프라 서비스 형평성을 확장하여 평가하는 보완지표로 검토할 수 있다.

3.2.1 탄소배출 압력(carbon emission pressure, CE)

탄소배출 압력(carbon emission pressure, CE)은 탄소중립 전환 과정에서 지방자치단체가 공간계획 및 도시관리

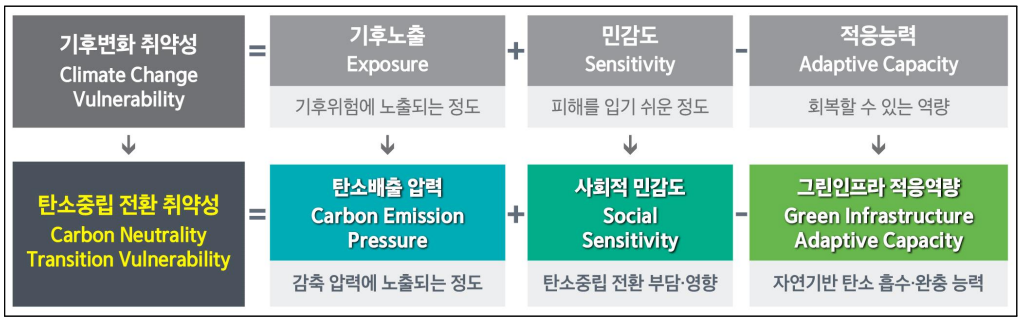


그림 1. 탄소중립 전환 취약성 분석틀

표 1. 탄소중립 전환 취약성 진단을 위한 지표체계 및 선정근거

지표			산정방법	개념 및 선정근거	참고문헌	출처
탄소배출 압력 (CE)	직접 배출규모	건축물 탄소배출량	기초지자체별 건축물 부문 연간 탄소배출량 합계	• 건축물 에너지소비에 따른 직·간접 배출규모 • 공간·건축정책을 통한 중·장기적 관리 가능한 감축압력	Lee and Jung(2023); Jeong et al.(2024)	국토부 탄소공간지도
		수송 탄소배출량	기초지자체별 수송 부문 연간 탄소배출량 합계	• 도로교통 활동에 따른 배출규모 • 공간·교통계획을 통한 중·장기적 관리 가능한 감축압력	Lee and Jung(2023); Jeong et al.(2024)	국토부 탄소공간지도
	배출 집약도	탄소배출 밀도	(건축물 + 수송 배출량) / 행정구역 면적	• 지역규모를 보정한 단위면적당 배출집중도 • 배출의 공간적 집약 정도 반영	Son et al.(2018); 안예현 등(2022)	자체산정
		GRDP 대비 배출량	(건축물 + 수송 배출량) / 시군구 GRDP	• 지역경제 규모 영향을 보정한 탄소집약도 • 경제활동 대비 구조적 배출부담 반영	Son et al.(2018); 안예현 등(2022)	KOSIS 국가통계포털
		1인당 배출량	(건축물 + 수송 배출량) / 총인구	• 인구규모를 보정한 1인당 배출수준 • 지역별 구조적 배출특성 반영	Son et al.(2018); 안예현 등(2022); Lee and Jung(2023)	자체산정
	도시공간 압력	인구밀도	총인구 / 행정구역 면적	• 도시활동 강도를 나타내는 공간구조 대리지표 • 건축·수송 활동이 집중되는 도시공간 압력 보완	Son et al.(2018); Lee and Jung(2023)	KOSIS 국가통계포털
		불투수면적 비율	불투수면적 / 행정구역 면적 × 100	• 시가화 및 개발집약도를 나타내는 대리지표 • 도시화된 물리적 공간기반 보완 반영	Lee and Jung(2023); Hanna et al.(2024)	KOSIS 국가통계포털
사회적 민감도 (SS)	인구사회 취약성	고령인구 비율 (65세 이상)	65세 이상 인구 / 총인구 × 100	• 비용·생활양식, 정책 변화 부담을 상대적으로 크게 경험할 가능성이 있는 집단 규모 반영	Carley et al.(2018); 김해동과 남지현(2023); Sovacool et al.(2023)	KOSIS 국가통계포털
		기초생활수급자 비율	기초생활수급자 / 총인구 × 100	• 에너지가격 상승 및 주거·이동 전환에 따른 추가 비용부담에 민감한 저소득계층 반영	Carley et al.(2018); 김해동과 남지현(2023); Sovacool et al.(2023)	한국사회보장정보원
		장애인 인구 비율	등록장애인 / 총인구 × 100	• 이동·정보·서비스 이용 제약으로 전환정책·생활환경 변화의 영향을 상대적으로 크게 받을 가능성 반영	김해동과 남지현(2023); Sovacool et al.(2023)	KOSIS 국가통계포털
		독거노인 가구 비율	독거노인 가구 / 전체 가구 × 100	• 고령과 사회적 고립·돌봄 취약성이 중첩된 사회적 민감도 반영	김해동과 남지현(2023); Sovacool et al.(2023)	KOSIS 국가통계포털
	주거공간 취약성	노후건축물 비율 (20년 이상)	20년 이상 건축물 / 전체 건축물 × 100	• 낮은 에너지성능과 성능개선 필요성에 따른 비용 및 물리적 전환부담 반영	김현진과 최세진(2019); 김해동과 남지현(2023)	KOSIS 국가통계포털
		노후 단독주택 비율 (20년 이상)	20년 이상 단독주택 / 전체 주택 × 100	• 개별 소유·관리구조에 따른 에너지개선사업 적용 및 비용부담의 상대적 한계 반영	김해동과 남지현(2023); 서효정과 변나향(2024)	KOSIS 국가통계포털
그린인프라 적응역량 (GIAC)	탄소흡수 기능	산림 탄소흡수량*	행정구역 내 산림 연간 탄소흡수량 합계	• 지역 산림이 제공하는 탄소흡수 기능의 절대규모 • 배출압력을 완충하는 직접적 생태기능 반영	강영은(2021); 고영진 등(2024); Chen et al.(2024)	국토부 탄소공간지도
		탄소흡수밀도	산림 연간 탄소흡수량 / 행정구역 면적	• 지역규모를 보정한 단위면적당 탄소흡수 집약도 • 절대 흡수량과 구별되는 공간적 기능강도 반영	강영은(2021); 고영진 등(2024)	자체산정
	생태적 지속기반	NDVI (0.6 이상**)	NDVI ≥ 0.6 면적 / 행정구역 면적 × 100	• 녹지면적만으로 파악하기 어려운 식생의 활력·밀도와 생육상태 및 생태적 건강성 반영	USGS(2018) Stowell et al.(2023);	Landsat 자체산정
		생태·자연도 등급 (1·2 등급)	생태·자연도 1·2등급 면적 / 행정구역 면적 × 100	• GI 기능의 지속성을 뒷받침하는 자연성·생태적 질 • 자연환경의 보전가치를 보완적으로 반영	Hanna et al.(2024) 국립생태원(2025);	환경빅데이터 플랫폼
		임목축적량 (5년 평균)	최근 5년 임목축적량 평균 / 행정구역 면적	• 산림의 생물량·성숙도 및 자원 축적기반 • 중·장기적 탄소저장·생태기능 유지 기반 반영	고영진 등(2024); Chen et al.(2024)	KOSIS 국가통계포털
	공간적 확보·관리기반	그린인프라 확보율	자연·반자연 녹지·수계 면적 / 행정구역 면적 × 100	• 산림·농경지·초지·습지·수계 등 GI 기능을 제공할 수 있는 생태·녹지 공간기반의 상대적 확보수준	Raymond et al.(2017) Jones et al.(2022);	환경부 토지피복지도
		1인당 도시공원면적	도시공원 면적 / 총인구	• 인구규모를 고려한 계획적 공공녹지 공급수준 • 지방정부가 계획·관리하는 도시형 GI 기반 반영	박효석 등(2014); Jones et al.(2022); Chen et al.(2024)	KOSIS 국가통계포털

*탄소공간지도에서는 탄소흡수량(저장량)으로 병기하고 있으나, 산정방법론에서 수종별 생장량 기반 탄소흡수량을 산정하고 있어 본 연구에서는 산림 탄소흡수량으로 표기.
**USGS는 NDVI 약 0.6–0.9를 산림·생육이 왕성한 고밀도 식생 범위로 제시, 본 연구에서는 NDVI 0.6 이상을 고밀도·고활력 식생공간 기준 적용.

차원에서 대응해야 하는 감축 부담을 의미한다. 본 연구는 공간계획을 통해 중·장기적으로 관리 및 개선이 가능한 배출원을 대상으로 CE를 구성하였으며, 전국 기초지자체 간 비교 가능성과 자료의 일관성을 고려하여 건축물과 수송 부문의 탄소배출을 중심으로 지표를 설정하였다(안예현 등, 2022).

건축물과 수송 부문은 도시공간 구조, 토지이용, 개발밀도, 건축물 에너지효율 및 교통체계와 밀접하게 연계되는 대표적인 배출원으로, 지방자치단체의 도시계획과 공간정책을 통해 중·장기적으로 개선이 가능한 부문이다(Lee and Jung, 2023; Jeong et al., 2024). 따라서 본 연구는 국가 전체 온실가스 배출구조를 포괄적으로 평가하기보다는, 공간계획을 통해 관리 가능한 탄소배출 압력을 진단하는 데 연구의 범위를 두었다.

건축물과 수송 부문의 탄소배출량은 국토교통부 탄소공간지도를 활용하였다. 국가 온실가스 인벤토리 자료는 국가 온실가스 배출구조를 파악하는 데 유용하지만, 본 연구에서 요구되는 건축물·수송 부문의 전국 기초지자체 공간분포를 동일한 공간체계에서 직접 비교하는 데에는 한계가 있다. 반면 탄소공간지도는 건축물의 전력·가스·지역난방 사용량에 해당 에너지원별 공인 배출계수를 적용하고, 수송부문은 도로구간별 차량주행거리(VKT)와 속도자료에 국가 온실가스 배출 계수를 적용하여 공간단위 배출량을 구축하고 있다. 이에 전국 기초지자체의 건축물 및 수송부문 배출 특성을 동일한 공간체계에서 비교할 수 있다는 점을 고려하여 본 연구의 CE 자료로 활용하였다. 산업공정·농업·폐기물 부문은 국가 온실가스 배출구조에서 중요한 부문이나, 지역의 산업구조와 생산활동, 축산 규모 및 폐기물 처리체계 등 부문별 산업·경제활동의 영향을 크게 받으며, 건축물·수송 부문에 비해 본 연구가 설정한 도시·공간계획적 비교틀과의 직접적 연계성이 상대적으로 낮다. 또한 전국 기초지자체의 공간분포를 동일한 단위와 방법으로 비교할 수 있는 자료의 제약을 고려하여 본 연구 범위에서는 제외하였다.

배출집약도는 탄소배출 밀도, GRDP 대비 배출량 및 1인당 배출량으로 구성하였다. 탄소배출 밀도는 총배출량을 행정구역 면적으로 나누어 공간적 배출집중도를 나타내며, GRDP 대비 배출량은 지역경제 규모 대비 탄소집약도를, 1인당 배출량은 인구규모를 보정한 배출수준을 나타낸다. 이를 통해 절대 배출량만으로 파악하기 어려운 지역별 공간적·경제적·인구학적 배출 특성을 함께 반영하였다(Son et al., 2018).

도시공간 압력은 인구밀도와 불투수 면적 비율로 측정하였다. 인구밀도는 건축물 이용과 교통 활동이 집중되는 도시 활동 강도를 나타내며, 불투수면 비율은 시가화 정도와 토지이용 집약도를 반영한다. 두 지표는 직접적인 온실가스 배출량은 아니지만 도시공간 구조에 의해 형성되는 개발 집약도와 에너지 수요를 설명하는 보조 지표로 활용하였다.

본 연구의 CE는 지역 전체의 온실가스 배출구조를 대표하는 지표가 아니라, 지방자치단체가 공간계획을 통해 관리 가능한 건축물 및 수송 부문의 공간 기반 탄소배출 압력을 진단하기 위한 지표이다. 본 연구에서 제시하는 CNTV는 전국 기초지자체의 절대적인 탄소중립 취약성을 의미하는 것이 아니라, 공간계획 중심의 지표체계에 기반한 상대적 전환 취약성(relative transition vulnerability)을 비교하기 위한 결과로 해석할 필요가 있다. 향후에는 국가 온실가스 인벤토리와 연계하여 산업공정·농업·폐기물 부문까지 포함하는 보다 포괄적인 탄소중립 전환 취약성 평가 체계로 확장할 필요가 있다.

3.2.2 사회적 민감도(social sensitivity, SS)

사회적 민감도는 탄소중립 정책 이행 과정에서 발생하는 비용 및 생활환경 변화에 상대적으로 큰 영향을 받을 가능성이 있는 인구·사회 및 주거환경적 특성을 의미한다. 에너지 가격 변화, 건축물 에너지 성능 개선, 이동 및 생활양식의 변화와 같은 전환 정책은 지역 주민에게 동일한 수준으로 영향을 미치지 않으며, 소득·연령·신체적 제약과 주거 환경에 따라 정책 변화로 인한 영향과 부담 정도에 차이가 발생할 수 있다(Carley et al., 2018; 김해동과 남지현, 2023; Sovacool et al., 2023). SS는 인구사회 취약성과 주거공간 취약성으로 구분하였다.

인구사회 취약성은 65세 이상 고령인구 비율, 기초생활수급자 비율, 장애인 인구 비율, 독거노인 가구 비율로 측정하였다. 고령인구는 에너지 비용 증가와 생활양식 변화, 관련 정책·서비스 이용 과정에서 상대적으로 더 큰 부담을 경험할 가능성이 있으며, 기초생활수급자는 추가적인 에너지·주거 개선 비용에 대한 경제적 부담이 큰 집단을 나타낸다. 장애인 인구는 이동성과 정보·서비스 접근의 제약을, 독거노인 가구는 고령과 사회적 고립이 중첩된 취약성을 반영한다. 각 지표는 국가통계포털 및 관련 행정 통계에서 전체 인구·가구 대비 해당 집단의 비율로 산정하였다.

주거공간 취약성은 20년 이상 노후건축물 비율과 20년 이상 노후 단독주택 비율을 활용하였다. 노후건축물은 단열·설비 등 에너지 성능이 낮아 탄소중립 전환 과정에서 성능 개선 필요성과 비용 부담이 상대적으로 높을 가능성이 있으며, 특히 노후 단독주택은 개별 소유·관리 구조로 인해 공동주택에 비해 집단적 에너지 개선 사업의 적용이 어려울 수 있다는 점에서 별도 지표로 구성하였다(서효정과 변나향, 2024). 두 지표는 건축물 및 주택 관련

공공 통계를 이용하여 전체 건축물 또는 주택 대비 해당 건축물의 비율로 산정하였다. 따라서 본 연구의 SS는 기존 기후취약계층 지표를 그대로 적용하기보다, 탄소중립 전환 과정에서 비용 증가와 정책 변화, 주거 성능개선 등에 상대적으로 민감하게 영향을 받을 수 있는 사회·공간적 조건을 반영하도록 구성하였다.

3.2.3 그린인프라 적응역량(green infrastructure adaptive capacity, GIAC)

그린인프라 적응역량(GIAC)은 탄소중립 전환 과정에서 지역이 보유한 생태·녹지 기반이 탄소배출 압력과 사회적 민감도로부터 발생하는 전환 부담을 공간적으로 완충할 수 있는 역량을 의미한다. 이는 지방정부의 재정·행정·기술·거버넌스 등을 포함하는 전체 적응역량을 의미하는 것이 아니라, 공간계획과 관리를 통해 확보·유지·개선할 수 있는 그린인프라 기반의 공간적 완충역량에 초점을 둔 하위 개념이다.

그린인프라는 산림, 공원, 농경지, 하천 및 습지와 같은 자연·반자연 공간뿐 아니라 옥상녹화, 벽면녹화, 빗물정원, 식생수로 등 도시공간에 조성되는 다양한 유형을 포괄한다(강정은, 2012; 이은엽, 2021). 그러나 국내에서는 이러한 개별 그린인프라의 위치·규모·기능을 전국 기초지자체 단위에서 동일한 기준으로 비교할 수 있는 통합 공간정보 체계가 충분히 구축되어 있지 않으며, 특히 옥상·벽면녹화 및 소규모 분산형 빗물관리시설은 지자체별 구축·관리 방식과 자료 수준에 차이가 있다(허한결과 박종훈, 2024). 이에 본 연구에서는 전국 229개 기초지자체에 동일하게 적용 가능한 토지피복·산림·생태·위성 및 도시공원 자료를 활용하여 GIAC를 조작화하였다. 따라서 본 연구의 GIAC는 그린인프라의 모든 유형을 포괄적으로 평가하는 지표가 아니라, 전국 단위에서 비교 가능한 생태·녹지 기반의 공간적 완충역량을 상대적으로 평가하기 위한 지표체계로 해석할 필요가 있다.

GIAC 지표는 개별 그린인프라 유형의 존재 여부를 단순 합산하기보다, 그린인프라가 제공할 수 있는 서로 다른 기능적 차원을 반영하도록 구성하였다. 그린인프라의 역할을 탄소흡수 기능, 생태적 질·기능 지속기반, 공간적 확보·관리기반의 세 측면으로 구분하여 구성하였다. 탄소흡수 기능은 현재 제공되는 탄소흡수의 규모와 집약도를, 생태적 질·기능 지속기반은 식생 활력과 자연성·생태적 질 및 산림자원의 축적 수준을, 공간적 확보·관리기반은 지역이 보유한 자연·반자연적 생태공간과 계획적 공공녹지의 확보 수준을 의미한다. 동일한 산림 또는 녹지자원에서 파생되는 지표라 하더라도 절대적 기능량, 단위면적당 기능수준, 생물량과 성숙도, 공간적 확보량 및 생태적 질 등 측정하는 개념적 차원이 상이하도록 구성하였다.

먼저 지역의 직접적인 탄소흡수 기능을 반영하기 위해 산림 탄소흡수량과 탄소흡수밀도를 활용하였다(강영은, 2021). 산림 탄소흡수량은 지역이 보유한 산림 전체에서 발생하는 탄소흡수의 절대 규모를 나타내며, 탄소흡수밀도는 이를 행정구역 면적으로 보정하여 단위면적당 탄소흡수 기능의 집약도를 나타낸다. 두 지표는 동일한 탄소흡수 현상과 관련되어 있으나 각각 지역이 보유한 총 흡수기능의 규모와 지역 규모의 영향을 보정한 공간적 흡수강도를 측정한다는 점에서 차이가 있다. 임목축적량은 직접적인 탄소흡수량을 나타내기보다 산림의 생물량과 성숙도, 자원의 축적상태를 나타내는 지표로 활용하였다. 이는 현재 시점의 흡수기능을 나타내는 산림 탄소흡수량과 달리, 장기적으로 탄소흡수·저장 및 산림 생태기능을 유지할 수 있는 자원 기반의 수준을 의미하며, 연도별 변동의 영향을 완화하기 위해 최근 5년간 평균값을 적용하였다.

그린인프라의 질적 차원은 NDVI와 생태·자연도를 활용하여 보완하였다. NDVI는 Landsat 위성영상을 이용하여 산출하였으며, 식생의 활력과 피복 수준을 나타내는 객관적 위성기반 지표로 활용하였다(Stowell et al., 2023). 본 연구에서는 고밀도·고활력 식생지역을 구분하기 위해 NDVI 0.6 이상 지역의 면적 비율을 적용하였다(USGS, 2018). 이는 동일한 녹지 면적을 보유하더라도 식생의 생육 상태와 광합성 활동 수준이 다를 수 있다는 점을 고려한 것이다. 생태·자연도는 1·2등급 지역의 면적 비율을 활용하여 자연성과 생태적 보전가치가 높은 공간의 확보 수준을 반영하였다. 생태·자연도 1·2등급은 생태적 가치와 보전 필요성이 높은 지역을 구분하는 공간정보로 활용되고 있다. 다만 생태·자연도 자체를 탄소중립 적응역량과 직접적으로 동일시한 것은 아니며, 자연성과 생태적 기능이 높은 그린인프라가 탄소격리와 기후조절 등 다양한 생태계서비스 제공과 관련될 수 있다는 선행연구(Hanna et al., 2024)를 바탕으로, 그린인프라 완충기능의 생태적 질과 기능 지속성을 보완적으로 나타내는 지표로 활용하였다.

그린인프라 확보율은 지역 전체가 보유한 자연·반자연적 생태·녹지 공간 기반의 양적 수준을 나타내는 대리지표로 설정하였다. 본 연구에서는 환경부 토지피복지도를 활용하여 자연·반자연적 생태·녹지 기반을 나타내는 토지피복 유형을 선정하고, 해당 면적의 합을 행정구역 면적으로 나누어 GI 확보율을 산정하였다. 이는 개별 그린인프라 시설의 조성 여부를 의미하기보다 지역이 보유한 그린·블루 인프라의 공간적 기반 규모를 나타낸다. 1인당 도시공원면적은 도시계획시설로 지정·조성된 도시공원 면적을 인구로 표준화하여, 산림·농경지·습지 등 자연·반자연적 공간의 절대량으로는 파악하기 어려운 도시지역의 계획적 공공 그린인프라 공급 수준을 반영하였다. 따라

서 GI 확보율이 행정구역 전체의 생태적 공간 기반을 나타낸다면, 1인당 도시공원면적은 인구규모를 고려한 도시지역의 계획적 공공녹지 수준을 나타낸다는 점에서 차이가 있다.

이와 같이 GIAC는 산림 탄소흡수량, 탄소흡수밀도, 임목축적량과 같이 상호 관련된 산림지표를 포함하고 있으나, 각각 탄소흡수의 절대 규모, 공간적 집약도, 산림자원의 축적 기반이라는 상이한 측면을 측정하도록 구성하였다. 또한 그린인프라 확보율과 1인당 도시공원면적 역시 모두 녹지의 양과 관련되어 있으나, 그린인프라는 행정구역 전체의 자연·반자연적 공간 기반을, 도시공원면적은 도시지역의 계획적 공공녹지 공급 수준을 나타낸다는 점에서 구분된다. 이를 통해 특정한 산림 또는 녹지 지표 하나에 의존하기보다 탄소흡수 기능, 생태적 질·기능 지속기반, 공간적 확보·관리기반을 함께 고려하여 지역의 그린인프라 기반 적응역량을 다차원적으로 평가하고자 하였다.

다만 전국 기초지자체에 동일하게 적용 가능한 공간자료의 제약으로 인해 본 연구의 GIAC는 산림 및 자연·반자연적 생태기반의 특성을 상대적으로 많이 반영하였다. 옥상녹화, 벽면녹화, 빗물정원, 식생수로 등 도시 내 소규모·분산형 그린인프라는 전국적으로 표준화된 자료가 충분히 구축되어 있지 않아 본 분석에 포함하지 못하였다. 따라서 본 연구의 GIAC는 그린인프라 전체의 절대적 적응역량을 의미하기보다, 전국 기초지자체 간 동일한 기준으로 비교 가능한 생태·녹지 기반 공간적 완충역량의 상대적 수준으로 해석할 필요가 있다.

3.3 주성분분석(PCA) 기반 탄소중립 전환 취약성(CNTV) 지수 개발

탄소중립 전환 취약성을 구성하는 다수의 지표를 통합하기 위한 방법으로 주성분분석(principal component analysis, PCA)을 적용하였다. 취약성 지수 개발에 활용되는 방법으로는 전문가 판단에 기반한 AHP(analytic hierarchy process), 정보량에 기반한 엔트로피 가중치법(entropy weight method), 단순 표준화 합산 방식 등이 활용될 수 있다. 그러나 AHP는 전문가의 주관적 판단에 의존한다는 한계가 있으며, 엔트로피 가중치법은 변수 간 상관관계를 충분히 반영하기 어렵다. 반면 PCA는 서로 상관된 다수의 변수를 소수의 주성분으로 축약하면서 자료가 갖는 주요 변동구조를 보존할 수 있으며, 변수 간 상관구조를 기반으로 대표 차원을 도출할 수 있다는 장점이 있다(Jolliffe and Cadima, 2016). 본 연구는 탄소배출 압력·사회적 민감도·그린인프라 적응역량을 구성하는 다수의 지표를 통합적으로 설명하기 위하여 PCA를 적용하였다. CE, SS, GIAC를 각각 독립된 영역으로 보고, 각 영역별로 PCA를 수행한 후 제1주성분(PC1)을 해당 영역의 대표 점수로 활용하였다. 각 영역에서는 제1주성분이 해당 영역의 공통된 변동구조를 가장 많이 설명하는지를 확인하고, PC1 성분계수와 개별 변수의 개념적 의미를 종합적으로 검토한 후 대표점수로 활용하였다.

PCA 적용 가능성을 검토하기 위해 각 영역별로 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin) 표본적합도 검정과 Bartlett 구형성 검정을 수행하였다. KMO 값은 0.60 이상을 분석 가능 기준으로 설정하고, Bartlett 구형성 검정은 유의수준 0.05 이하일 경우 변수 간 상관구조가 적합한 것으로 판단하였다(Black et al., 2010). 또한 개별 변수의 MSA(measure of sampling adequacy)를 검토하여 각 지표가 공통요인 구조에 기여하는 정도를 확인하였다. PCA 분석 결과는 각 영역의 제1주성분(PC1)을 대표 차원으로 활용하였으며, PC1의 설명 분산비율(EVR), 성분계수, 해석 가능성을 종합적으로 검토하여 영역 대표 점수로서의 적절성을 판단하였다.

분석 절차는 먼저 영역별 원자료를 지표 방향에 맞게 정리한 후 z-score 표준화를 수행하였다. 이후 CE, SS, GIAC 각 영역에 대해 PCA를 적용하여 제1주성분 점수(PC1 score)를 산출하였다. 다음으로 영역 간 비교 가능성을 확보하기 위해 각 영역의 PC1 점수를 다시 z-score로 표준화하여 CE_z, SS_z, GIAC_z를 도출하였다. 최종적으로 탄소중립 전환 취약성 지수(CNTV)는 다음과 같이 산정하였다.

$$CNTV = (CE_z + SS_z) - GIAC_z \quad \text{(식 1)}$$

$$PI = (CE_z + SS_z) \quad \text{(식 2)}$$

이 식은 탄소배출 압력(CE)과 사회적 민감도(SS)가 높을수록 전환 취약성이 증가하고, 그린인프라 적응역량(GIAC)이 높을수록 취약성이 완화되는 구조를 반영한다. CE_z와 SS_z의 합은 잠재영향(potential impact, PI)을 의미하며, GIAC_z는 이를 완화시켜주는 그린인프라 기반 적응역량 축으로 작용한다. CNTV 값이 높을수록 탄소중립 전환 과정에서 상대적으로 큰 부담과 취약성을 가질 가능성이 높은 지역으로 해석된다. 본 연구의 CNTV는 전국 기초지자체의 전체 탄소중립 대응역량이나 절대적 위험수준을 평가하는 지수가 아니라, 공간계획과 직접 연계되는 탄소배출 압력, 사회적 민감도 및 그린인프라 기반 공간적 적응역량을 토대로 지역 간 상대적 전환 취약성을 비교하기 위한 진단 지표이다.

3.4 K-means 기반 구조 유형화 분석

취약성의 전체적인 구조와 세부적인 조합 특성을 구분하여 파악하기 위해 사분면 분석과 K-means 군집분석을 병행하였다. 먼저, PI와 그린인프라 적응역량(GIAC_z)을 두 축으로 하는 사분면 분석을 수행하였다. PI는 탄소배출 압력과 사회적 민감도가 결합되어 형성되는 전환 부담의 잠재적 크기를 의미하며, GIAC_z는 부담을 완화할 수 있는 적응역량을 의미한다.

사분면은 PI와 GIAC_z의 평균값인 0을 기준으로 구분하였다. Q1(PI+, GIAC+)은 잠재영향과 적응역량이 모두 높은 고압력-고적응역량 유형, Q2(PI−, GIAC+)는 잠재영향이 낮고 적응역량이 높은 저압력-고적응역량 유형, Q3(PI−, GIAC−)은 잠재영향과 적응역량이 모두 낮은 저압력-저적응역량 유형, Q4(PI+, GIAC−)는 잠재영향은 높지만 적응역량이 낮은 고압력-저적응역량 유형으로 해석하였다.

세부적인 구조 유형을 도출하기 위한 K-means 군집분석을 수행하였다. 군집분석의 입력변수는 영역별 대표점수를 표준화한 CE_z, SS_z, GIAC_z의 3개 변수로 설정하였다. CNTV는 이들 세 축의 결합으로 산정되는 결과지표이므로, 군집분석의 입력변수에는 포함하지 않고 군집별 취약성 수준을 해석하는 데 활용하였다. K-means 군집분석은 복합 지표 기반 도시·지역 유형화 연구에서 널리 활용되어 온 방법으로, 유사한 지표 조합을 갖는 지역을 유형화하고 유형별 정책 대응 방향을 도출하는 데 유용하다(Mun et al., 2025).

3.5 Moran's I 기반 공간 자기상관 분석

공간 자기상관 분석은 탄소중립 전환 취약성이 공간적으로 무작위하게 분포하는지, 또는 특정 지역에 군집적으로 집중되는지를 확인하기 위해 수행하였다. 만약 취약성이 공간적으로 군집되어 나타난다면, 이는 개별 지자체 차원의 대응을 넘어 권역 단위 또는 광역적 정책 접근이 필요함을 시사한다. 이에 본 연구는 전역 Moran's I를 활용하여 공간적 군집성을 검정하고(Moran, 1950), 국지적 공간 자기상관(Local Indicators of Spatial Association; LISA) 분석을 통해 취약지역과 안정지역의 공간적 집중 특성을 파악하고자 하였다(Anselin, 1995). 공간 가중치 행렬은 지자체 간 경계 접촉 여부를 기준으로 하는 Queen 인접성(Queen contiguity) 방식으로 구축하였으며, 행 표준화(row-standardization)를 적용하였다. 전역 Moran's I는 전체 분석대상에서 CNTV 값이 공간적으로 양(+) 또는 음(−)의 자기상관을 갖는지를 검정하는 데 활용하였다. $p < 0.05$ 수준에서 통계적으로 유의한 경우 공간 자기상관이 존재하는 것으로 판단하였다(Yang et al., 2025).

LISA 분석은 개별 지자체와 인접 지자체 간의 국지적 공간 연관성을 확인하기 위해 수행하였다. 국지적 군집의 통계적 유의성과 공간적 집중 패턴을 확인하는 데 활용하였으며, 주요 유형화 해석은 CNTV 등급 및 K-means 군집분석 결과와 연계하였다.

4. 탄소중립 전환 취약성 진단 및 유형화

4.1 주성분분석(PCA) 적용 적합성 및 영역별 공통구조

탄소중립 전환 취약성을 구성하는 3개 영역 탄소배출 압력(CE), 사회적 민감도(SS), 그린인프라 적응역량(GIAC) 기반 주성분분석 적용 적합성과 영역별 공통구조를 검토하였다. 영역별 KMO, 단위, 연도, 표준편차, 변수별 MSA, 설명분산비율 등은 표 2에 나타내었다.

KMO 검정 결과, 세 영역 모두 0.60 이상으로 나타났다(CE = 0.69, SS = 0.87, GIAC = 0.88). 각 영역의 지표들이 PCA 적용에 필요한 표본 적합성을 확보하고 있음을 확인하였다. Bartlett 구형성 검정 역시 $p < 0.001$로 유의하게 나타나, 상관행렬이 단위행렬이라는 귀무가설이 기각되었다. 각 영역의 지표들은 독립적으로 분산되어 있기보다 PCA 적용에 필요한 상관구조가 확인되었다. 변수별 MSA도 전반적으로 권장 기준(≥ 0.50)을 충족하여, 영역별 PCA 적용을 위한 통계적 적합성이 대체로 확보된 것으로 확인되었다(Arunachalam et al., 2023).

CE 영역에서는 전체 KMO가 0.60 이상으로 PCA 적용 가능 수준을 충족했으나, 탄소배출 중 수송 부문의 탄소배출량의 MSA가 0.50 미만(0.282)으로 나타났다. 이는 수송 부문 지표가 CE 영역 내 다른 지표들과 동일한 변동구조를 공유하지 못한다는 점을 의미한다. 그러나 수송부문은 국가 탄소중립 정책 및 지자체 탄소중립·녹색성장 기본계획에서 건축물 부문과 함께 핵심 감축 대상으로 제시되고 있으며, 기초지자체 단위에서도 교통체계, 통행 패턴, 공간구조 등에 의해 탄소배출 특성이 결정되는 중요한 정책 변수이다. 특히 수송 부문의 낮은 MSA는 광역 통행과 교통망 등 외부 요인의 영향을 크게 받는 공간적 특성과 관련될 가능성이 있는 것으로 해석하였다. 이에 본

표 2. 탄소중립 전환 취약성 진단을 위한 주성분분석(PCA) 적용 적합성

지표			단위	연도	방향	최솟값	최댓값	표준편차	변수별 MSA	성분계수	설명분산비율
탄소배출 압력 (CE*) KMO: 0.69	직접 배출규모	건축물 탄소배출량	tCO_2eq	2024	+	14,645.3	40,168,395.8	5,370,894.4	0.756	0.479	PC1: 0.514 PC2: 0.275 PC3: 0.149 PC4: 0.029 PC5: 0.016 PC6: 0.010 PC7: 0.007
		수송 탄소배출량	tCO_2eq	2024	+	6,500.3	2,342,788.5	374,897.8	0.282	0.121	
	배출 집약도	탄소배출 밀도	tCO_2eq/km^2	2024	+	70.9	776,290.8	77,349.7	0.773	0.491	
		GRDP 대비 배출량	tCO_2eq/억원	2024	+	2.0	483.4	41.8	0.738	0.491	
		1인당 배출량	tCO_2eq/인	2024	+	2.5	130.4	15.0	0.773	0.486	
	도시공간 압력	인구밀도	인/km^2	2024	+	18.5	25,027.7	5,836.0	0.521	0.123	
		불투수면적 비율	%	2024	+	1.4	84.7	20.8	0.526	0.149	
사회적 민감도 (SS*) KMO: 0.87	인구사회 취약성	고령인구 비율(65세 이상)	%	2024	+	10.4	46.9	8.9	0.873	0.435	PC1: 0.834 PC2: 0.117 PC3: 0.028 PC4: 0.009 PC5: 0.009 PC6: 0.003
		기초생활수급자	%	2024	+	1.6	12.7	2.0	0.841	0.286	
		장애인 인구	%	2024	+	2.6	12.1	2.4	0.947	0.435	
		독거노인 가구 비율	%	2024	+	5.0	28.5	6.0	0.815	0.440	
	주거공간 취약성	노후건축물 비율(20년 이상)	%	2024	+	11.5	87.8	13.5	0.891	0.402	
		노후 단독주택 비율(20년 이상)	%	2024	+	2.3	77.9	20.7	0.859	0.429	
그린인프라 적응역량 (GIAC*) KMO: 0.88	탄소흡수 기능	산림 탄소흡수량	tCO_2eq	2024	+	2.3	4,523,860.4	757,472.0	0.928	0.359	PC1: 0.716 PC2: 0.130 PC3: 0.062 PC4: 0.045 PC5: 0.025 PC6: 0.012 PC7: 0.010
		탄소흡수밀도	tCO_2eq/km^2	2024	+	0.0	2,539.4	636.4	0.872	0.407	
	생태적 지속기반	NDVI(0.6 이상)	%	2024	+	2.4	94.4	23.5	0.845	0.424	
		생태 · 자연도 등급(1 · 2 등급)	%	2024	+	0.6	89.3	18.7	0.927	0.408	
		임목축적량(5년 평균)	m^3/km^2	2020	+	0.0	1.8	0.4	0.873	0.423	
	공간적 확보 · 관리기반	그린인프라 확보율	%	2023	+	9.7	96.9	21.7	0.832	0.383	
		1인당 도시공원면적	m^2/인	2024	+	0.0	92.3	12.5	0.941	0.182	

*CE, SS영역 지표는 값이 클수록 취약성이 높은 방향, GIAC 영역 지표는 값이 클수록 적응역량이 높은 방향이며, 모든 지표는 z-score 표준화 적용 후 CNTV 산정식에서 GIAC를 완화하는 방향(−)으로 반영.

연구는 통계적 기준만을 근거로 해당 지표를 제외하기보다 정책적 중요성과 연구 목적을 고려하여 최종 지표체계에 포함하였으며, PCA 결과 해석에서는 수송 부문의 통계적 기여도를 과대 해석하지 않고 보완적 의미로 해석하였다.

영역별 PCA 결과에서 도출된 제1주성분(PC1)은 각 영역의 대표 차원으로 해석이 가능하였다. PC1의 설명분산비율과 성분계수를 종합적으로 검토한 결과, CE, SS, GIAC 모두 영역 내 주요 지표들이 동일한 방향의 대표 구조를 형성하는 것으로 나타났다. GIAC 영역에서는 산림 탄소흡수량, 생태 · 자연도(1, 2등급), 임목축적량 등 생태적 흡수 · 완충 기능을 반영하는 지표가 PC1의 주요 값을 형성하였다. 이는 GIAC의 PC1이 단순한 녹지면적보다는 탄소흡수 기능, 식생 · 생태적 질, 산림자원 축적 및 공간적 확보수준이 복합된 생태적 완충구조를 반영하고 있음을 보여준다(안예현 등, 2023).

분석 결과를 바탕으로 각 영역의 PC1 점수를 영역 대표점수로 활용하였다. 영역 간 결합 시 단위와 분포 차이에 따른 가중치 왜곡을 방지하기 위해 CE · SS · GIAC PC1 점수를 각각 z-score로 재표준화한 후 CNTV 산정에 활용하였다.

4.2 탄소중립 전환 취약성(CNTV) 지수 분포 및 취약성 등급(5단계) 특성

PCA를 통해 도출된 각 영역의 대표점수는 영역 간 비교 가능성을 확보하기 위해 z-score로 표준화하였으며, 이를 바탕으로 탄소중립 전환 취약성 지수(CNTV)를 산정하였다. 전국 229개 기초지자체의 CNTV는 최고 8.830(경기 오산시)에서 최저 −2.837(강원 인제군)까지 분포하였다. 이는 기초지자체 간 탄소중립 전환 취약성의 격차가 크고, 일부 지역에서 극단적 고취약성이 나타날 수 있음을 보여준다.

정책 적용성과 해석의 직관성을 고려하여 CNTV를 상대적 5단계로 구분하였다. CNTV는 표준화된 CE_z, SS_z, GIAC_z를 결합한 복합지수이므로, 본 연구에서는 0을 중심으로 −0.2부터 0.2를 전환 중립 구간으로 설정하고, ±1.0을 상대적 고·저 취약 수준을 구분하기 위한 조작적 경계로 적용하였다. 이러한 등급은 정책적 해석의 편의를 위한 상대적 구분이며, CNTV 자체 분포의 1 표준편차에 해당하는 절대적 임계값을 의미하지 않는다. 각 등급은 전환 위기(crisis, CNTV 〉 1.0), 전환 주의(caution, 0.2 〈 CNTV ≤ 1.0), 전환 중립(neutral, −0.2 ≤ CNTV ≤ 0.2), 전환 안정(stable, −1.0 ≤ CNTV 〈 −0.2), 전환 선도(leading, CNTV 〈 −1.0)로 구분된다. 고취약 지역(전환 위기·주의)과 저취약 지역(전환 안정·선도)이 권역 및 도시–농촌 맥락에 따라 비균등하게 분포함을 확인하였으며, CNTV 5단계 등급 공간분포를 제시하였다(그림 2 참조).

상·하위 지자체의 구조를 비교한 결과, 고취약 지자체는 잠재영향(PI)이 크게 형성되는 반면 GIAC_z가 낮아, 그린인프라 기반 적응역량이 전환 취약성을 충분히 완화하지 못하는 구조적 불균형을 보였다. CNTV 상위권에는 경기 오산시, 경기 광명시, 대전 유성구, 인천 중구, 대전 서구 등이 포함되며, 이들 지자체는 탄소배출 압력, 특히 배출 규모·배출집약도·도시밀도 관련 지표가 상대적으로 높게 나타나는 동시에 GIAC_z가 낮은 경향을 보였다. 반대로 저취약 지자체는 GIAC_z가 높고 CE_z가 낮아 전환 취약성이 완화되는 구조가 뚜렷했으며, 강원·경북 산간 지역을 중심으로 상대적으로 집중되는 경향을 보였다. 대표적으로 강원 인제군, 강원 춘천시, 강원 홍천군, 강원 평창군 등이 이에 해당한다. 상·하위 지자체의 세부 지표값은 표 3에 제시하였다.

이러한 결과는 탄소중립 전환 취약성이 단순히 배출량의 절대적 수준만으로 결정되지 않으며, 잠재영향(PI)과 GIAC의 상대적 불균형 구조에 의해 증폭 또는 완화될 수 있음을 시사한다. 특히 일부 상위 지자체에서는 SS_z가 음(−)의 값을 보이더라도 CE_z가 매우 크고 GIAC_z가 낮은 경우 CNTV가 높게 산정되었다. 이는 사회적 민감도가 상대적으로 낮은 지역이라도, 탄소배출 압력이 압도적으로 크고 이를 완화할 그린인프라 적응역량이 부족할 경우 전환 고취약 지역으로 분류될 수 있음을 보여준다.

4.3 PI-GIAC 사분면·CE-SS-GIAC 3차원 구조 분석

탄소중립 전환 취약성의 수준, 지수 분포만으로는 설명하기 어려운 내부 구조를 파악하기 위해 잠재영향(PI = CE_z + SS_z)과 그린인프라 적응역량(GIAC_z)의 관계를 사분면으로 구분하였다(그림 3 참조).

전국 229개 기초지자체는 Q1(PI+, GIAC+) 65개, Q2(PI−, GIAC+) 52개, Q3(PI−, GIAC−) 81개, Q4(PI+,

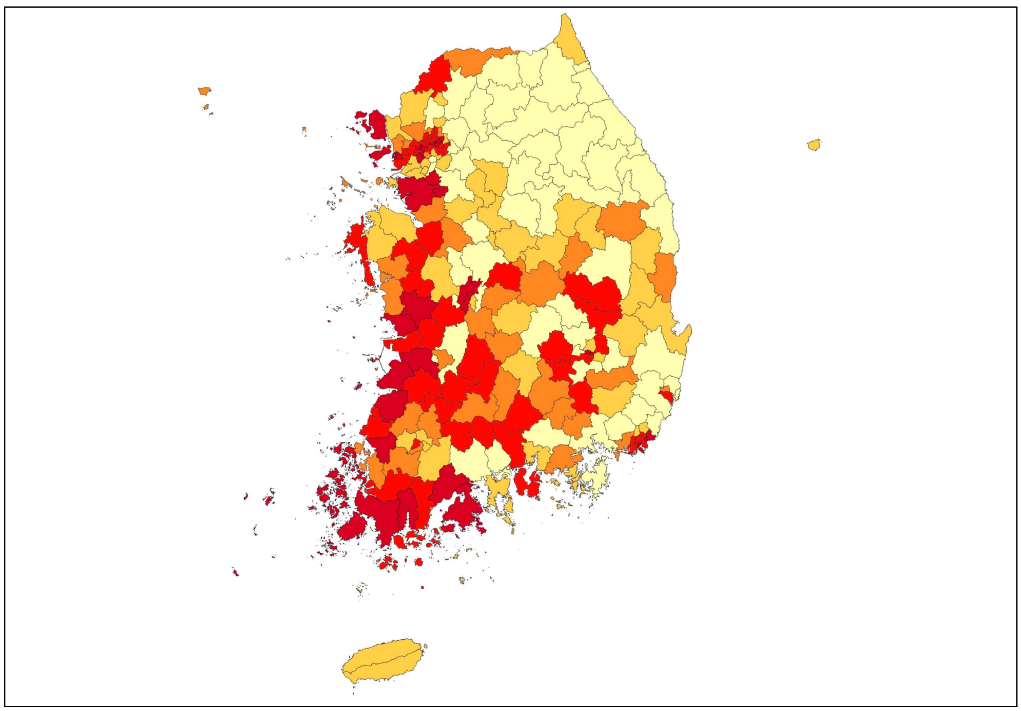
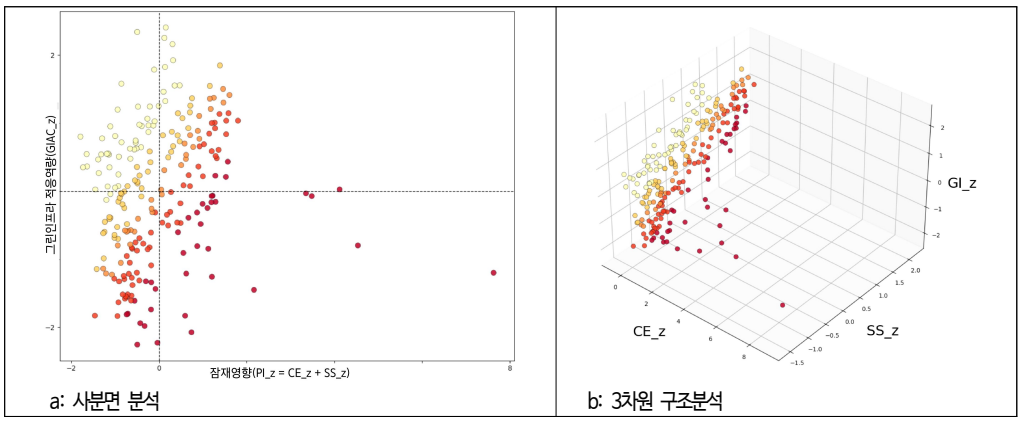


그림 2. 탄소중립 전환 취약성 분포지
범례: 위기(〉 1.0, n = 37), 주의(0.2~1.0, n = 60), 중립(−0.2~0.2, n = 33), 안정(−1.0~−0.2, n = 46), 선도(〈 −1.0, n = 53)

표 3. 탄소중립 전환 취약성(CNTV) 지수 분포 및 상·하위 지자체 목록

기초지자체	탄소배출 압력 (CE_z)	사회적 민감도 (SS_z)	그린인프라 적응역량 (GIAC_z)	탄소중립 전환 취약성 (CNTV)	취약성 순위	취약성 수준	사분면 분석	취약성 유형
경기 오산시	9.021	−1.390	−1.199	8.830	1	〉 1	PI+, GI−	유형 1
경기 광명시	5.628	−1.091	−0.798	5.334	2	〉 1	PI+, GI−	유형 1
대전 유성구	5.564	−1.444	0.026	4.093	3	〉 1	PI+, GI+	유형 1
인천 중구	3.162	−0.996	−1.450	3.617	4	〉 1	PI+, GI−	유형 1
대전 서구	4.498	−1.015	−0.072	3.556	5	〉 1	PI+, GI−	유형 1
부산 해운대구	3.958	−0.606	−0.033	3.384	6	〉 1	PI+, GI−	유형 1
부산 중구	0.223	0.518	−2.073	2.814	7	〉 1	PI+, GI−	유형 3
경기 수원시	2.526	−1.318	−1.257	2.465	8	〉 1	PI+, GI−	유형 3
대구 서구	0.068	0.528	−1.830	2.426	9	〉 1	PI+, GI−	유형 3
인천 동구	−0.007	−0.028	−2.227	2.192	10	〉 1	PI−, GI−	유형 3
...								
경남 양산시	−0.234	−0.877	0.952	−2.062	220	〈 −1	PI−, GI+	유형 4
경남 거제시	−0.382	−0.914	0.776	−2.073	221	〈 −1	PI−, GI+	유형 4
세종시	−0.263	−1.470	0.350	−2.083	222	〈 −1	PI−, GI+	유형 4
강원 평창군	−0.258	0.380	2.252	−2.130	223	〈 −1	PI+, GI+	유형 5
강원 원주시	−0.244	−0.698	1.198	−2.141	224	〈 −1	PI−, GI+	유형 4
울산 북구	−0.312	−1.337	0.545	−2.195	225	〈 −1	PI−, GI+	유형 4
강원 홍천군	−0.335	0.490	2.405	−2.250	226	〈 −1	PI+, GI+	유형 5
강원 춘천시	−0.335	−0.521	1.579	−2.436	227	〈 −1	PI−, GI+	유형 4
경기 과천시	−0.307	−1.483	0.801	−2.592	228	〈 −1	PI−, GI+	유형 4
강원 인제군	−0.384	−0.113	2.340	−2.837	229	〈 −1	PI−, GI+	유형 5



a: 사분면 분석 b: 3차원 구조분석

그림 3. 잠재영향(PI)−그린인프라 적응역량(GIAC) 사분면 및 3차원 구조분석
범례: 위기(〉 1.0, n = 37), 주의(0.2~1.0, n = 60), 중립(−0.2~0.2, n = 33), 안정(−1.0~−0.2, n = 46), 선도(〈 −1.0, n = 53)

GIAC−) 31개로 분포하였다(그림 4 참조). 이 중 Q4(PI+, GIAC−)는 잠재영향이 높지만 GIAC가 낮아 전환 취약성이 구조적으로 증폭될 가능성이 큰 유형으로 해석된다. 해당 유형은 탄소배출 압력 또는 사회적 민감도에 의해 잠재영향이 높게 형성되는 반면, GIAC가 이를 충분히 완화하지 못하는 구조를 보인다. Q4 유형은 단일 감축 수단만으로 접근하기보다, 탄소배출 저감과 그린인프라 기반 완충역량 강화를 함께 고려해야 하는 우선 검토 대상이라고 볼 수 있다. 반대로 Q2(PI−, GIAC+)는 잠재영향이 낮고 GIAC가 높은 구조로, 상대적으로 안정적인 전환 여

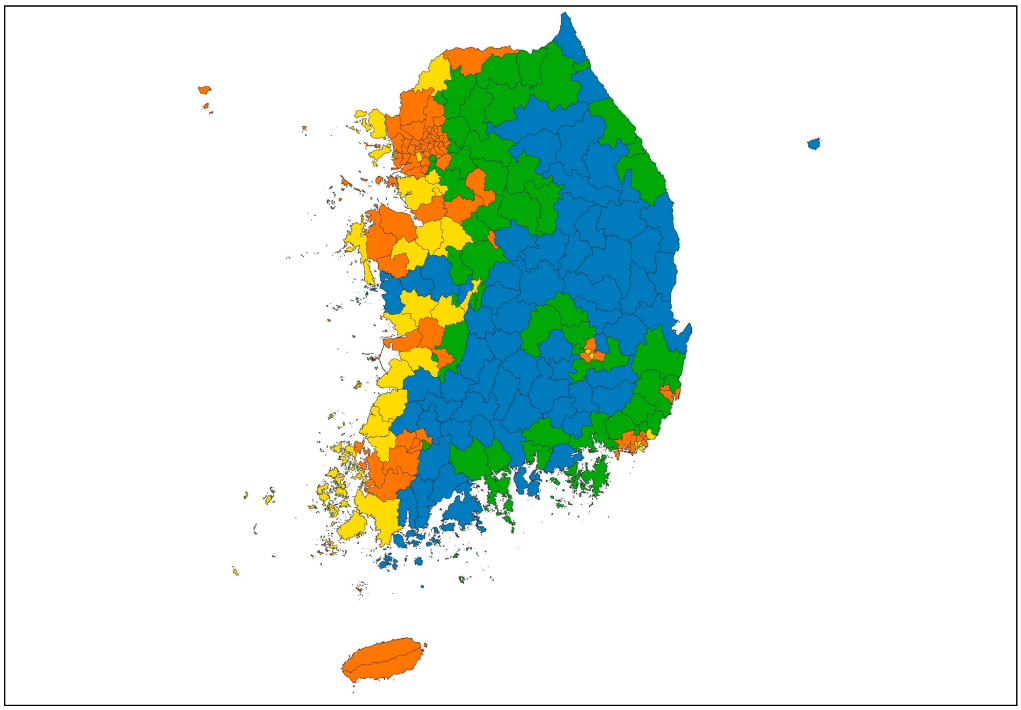


그림 4. 잠재영향(PI)-그린인프라 적응역량(GIAC) 사분면 기반 탄소중립 전환 취약성(CNTV) 분포도
범례: Q1(PI+/GI+, n = 65), Q2(PI−/GI+, n = 52), Q3(PI−/GI−, n = 81), Q4(PI+/GI−, n = 31)

건을 갖춘 유형으로 해석된다.

CE-SS-GIAC 3차원 구조 분석은 동일한 CNTV 수준이라도 취약성 형성 메커니즘이 서로 다를 수 있음을 보여준다. 일부 지자체는 잠재영향 중에서도 탄소배출량이 압도적으로 크게 나타나 탄소배출 압력이 CNTV를 주도하는 탄소배출 주도형 구조를 보였다. 반면 CE가 높지 않더라도 SS가 상대적으로 크게 나타나 사회·주거 민감도가 취약성을 증폭시키는 민감도 기여형 구조도 확인되었다. 또한 잠재영향이 일정 수준으로 압력을 받더라도 GIAC가 높아 탄소중립 전환 취약성을 완화하는 완충형 구조도 함께 나타났다. 이러한 결과는 탄소중립 전환 취약성 진단에서 단순히 CNTV 값의 높고 낮음만을 판단하는 것보다, 취약성이 어떤 요인 조합에 의해 형성되는지를 함께 해석할 필요가 있음을 보여준다. 특히 Q4 유형은 잠재영향이 크고 GIAC가 낮은 구조를 보이므로, 향후 정책 설계 단계에서 CE 주도형인지 SS 기여형인지에 따라 배출저감, 사회적 전환지원, 그린인프라 확충의 우선순위를 차등적으로 검토할 필요가 있다.

CNTV는 탄소중립 전환 취약성의 단일 순위 지표인 동시에 CE-SS-GIAC의 영향과 지역 간 패턴을 통해 취약성의 원인을 해석할 수 있는 진단 도구로 기능할 수 있다.

4.4 K-means 군집분석: 탄소중립 전환 취약성 유형

기초지자체별 탄소중립 전환 취약성 지수의 구조적 유형을 보다 정교하게 도출하기 위해 CE_z, SS_z, GIAC_z를 입력변수로 K-means 군집분석을 수행하였다. 이들 변수는 각 영역의 PC1 기반 대표점수를 z-score로 표준화한 값으로, 탄소배출 압력, 사회적 민감도, 그린인프라 적응역량의 상대적 조합을 나타낸다. 군집 수(k)는 3-6 범위에서 비교하였으며, 군집 수별 실루엣(silhouette) 계수는 k = 3에서 0.455, k = 4에서 0.394, k = 5에서 0.382, k = 6에서 0.387로 나타났다.

실루엣 계수만을 기준으로 할 경우 k = 3이 가장 높은 분리도를 보였으나, k = 3은 세 영역의 조합 차이를 소수의 큰 군집으로 통합하여 정책 설계 관점에서 유형의 해상도가 제한될 수 있다. k = 4는 k = 3보다 유형 해상도는 높아졌으나, 초고배출 극단군과 사회민감도 기반 취약군이 충분히 분리되지 않아 본 연구가 의도한 정책 수단의 우선순위와 지역별 대응방향을 차등화하기에 한계가 있었다. k = 5는 실루엣 계수가 0.382로 k = 3보다 낮지만, CE·SS·GIAC의 조합 차이를 보다 세분화하여 탄소배출 감축, 사회적 전환 부담 대응, 그린인프라 관리 등 유형별정책방향을 차별화하여 해석하는 데 상대적으로 유용한 구조를 제공하였다. 특히 초고배출 특성을 갖는 극단군(n = 6)을 독립 군집으로 분리함으로써 별도 관리 대상의 식별력을 높일 수 있었다. k = 6에서는 1개 지자체만

으로 구성된 군집이 발생하여, 유형의 일반화 가능성과 정책적 해석력이 낮아지는 문제가 확인되었다. 군집 간 통계적 분리도의 단순 최댓값보다 유형 해석 가능성, 정책적 차등 설계 가능성, 극단적 고취약군의 식별력을 종합적으로 고려하여 k = 5를 최종 군집 수로 채택하였다. 최종 군집별 CE_z, SS_z, GIAC_z, PI, CNTV의 평균 프로파일을 제시하였으며(표 4 참조), 사분면 분석과 군집분석 교차 분석결과는 표 5와 같다. 군집별 공간 분포는 별도로 제시하였다(그림 5 참조).

4.4.1 유형 1: 초고배출 · 그린인프라 부족 고취약형(초고CE · 저GIAC, n = 6)

유형 1은 CE_z 평균이 5.305로 5개 군집 중 압도적으로 높게 나타났으며 SS_z는 −1.090, GIAC_z는 −0.588로 나타났다. 잠재영향(PI) 평균은 4.215, CNTV 평균은 4.802로 전체 유형 중 가장 높은 수치의 전환 취약성을 보였다. 사분면 교차 결과에서도 유형 1은 Q4(PI+, GIAC−) 비중이 83.3%로 가장 높으며, 일부 지자체만 Q1(PI+, GIAC+)에 포함되었다. 유형 1은 높은 잠재영향(특히, 탄소배출 압력)과 낮은 그린인프라 적응역량이 결합된 극단적 고취약 구조임을 보여준다.

대표 지자체는 경기 오산시 · 광명시, 대전 유성구 · 서구, 인천 중구, 부산 해운대구로 나타났다(표 4 참조). 이들 지역은 사회적 민감도(SS)가 상대적으로 낮게 나타나더라도, 탄소배출 압력(CE)이 매우 크게 형성되어 CNTV가 극

표 4. 탄소중립 전환 취약성 유형별 구조적 특성 및 우선 공간계획 방향

유형		주성분분석 평균	우선 공간계획 방향 및 기초지자체 목록
유형 1 (초고CE · 저GIAC, n = 6)	초고배출 그린인프라 부족 고취약형	CNTV: 4.802 PI: 4.215 CE_z: 5.305 SS_z: −1.090 GIAC_z: −0.588	직접적인 탄소감축을 위한 고배출 도시공간의 에너지 · 교통구조 개선을 우선하고, 재개발 · 도시재생 등 지역개발 사업과 연계한 생활권 녹지 및 선형 · 입체형 GI 확충 병행
			경기(오산시, 광명시), 대전(유성구, 서구), 인천(중구), 부산(해운대구)
유형 2 (고SS · 저GIAC, n = 34)	사회민감도 그린인프라 부족 전환부담형	CNTV: 0.778 PI: 0.611 CE_z: −0.343 SS_z: 0.954 GIAC_z: −0.167	노후주거지 · 취약계층 밀집 생활권을 중심으로 소규모 GI와 생활SOC를 확충하고, 주거 · 에너지 개선을 연계한 전환부담 완화
			부산(서구, 동구, 영도구), 대구(남구), 인천(강화군, 옹진군), 경기(연천군), 강원(철원군), 충남(공주시, 보령시, 논산시, 부여군, 서천군, 청양군, 예산군, 태안군), 전북(정읍시, 김제시, 고창군, 부안군), 전남(나주시, 고흥군, 강진군, 해남군, 영암군, 함평군, 영광군, 장성군, 완도군, 진도군, 신안군), 경북(예천군), 경남(함안군, 창녕군)
유형 3 (저GIAC, n = 73)	도시생활권 그린인프라 부족형	CNTV: 0.514 PI: −0.600 CE_z: 0.181 SS_z: −0.781 GIAC_z: −1.114	공원 · 하천 · 학교 · 공공시설 · 가로녹지를 연계한 생활권 GI 네트워크 구축과 유휴 · 소규모 공간의 녹지화로 연결성 · 기능 강화
			서울(종로구, 중구, 용산구, 성동구, 광진구, 동대문구, 중랑구, 성북구, 강북구, 도봉구, 노원구, 은평구, 서대문구, 마포구, 양천구, 강서구, 구로구, 금천구, 영등포구, 동작구, 관악구, 서초구, 강남구, 송파구, 강동구), 부산(중구, 부산진구, 동래구, 남구, 사하구, 강서구, 연제구, 수영구, 사상구), 대구(중구, 서구, 달서구), 인천(동구, 연수구, 남동구, 부평구, 계양구, 서구, 미추홀구), 광주(서구, 남구, 북구, 광산구), 대전(대덕구), 울산(중구, 남구), 경기(수원시, 안양시, 부천시, 평택시, 안산시, 고양시, 구리시, 시흥시, 군포시, 파주시, 이천시, 김포시, 화성시), 충남(천안시, 아산시, 서산시, 당진시), 전북(전주시, 군산시, 익산시), 전남(목포시, 무안군)
유형 4 (저PI · 고GIAC, n = 59)	저압력 고그린인프라 전환안정형	CNTV: −1.202 PI: −0.778 CE_z: −0.203 SS_z: −0.575 GIAC_z: 0.424	산림 · 하천 · 농경지 등 기존 GI와 생태축을 우선 보전하고, 개발관리와 녹지총량 관리를 통해 우수한 완충기능의 훼손 예방
			부산(북구, 금정구, 기장군), 대구(동구, 북구, 수성구, 달성군), 광주(동구), 대전(동구, 중구), 울산(동구, 북구, 울주군), 세종시, 경기(성남시, 의정부시, 동두천시, 과천시, 남양주시, 의왕시, 하남시, 용인시, 안성시, 광주시, 양주시, 포천시, 여주시, 양평군), 강원(춘천시, 원주시, 강릉시, 동해시, 속초시, 양구군), 충북(충주시, 청주시, 진천군, 음성군, 증평군), 충남(계룡시, 홍성군), 전북(완주군), 전남(여수시, 순천시, 광양시), 경북(포항시, 경주시, 구미시, 경산시, 칠곡군), 경남(진주시, 통영시, 사천시, 김해시, 거제시, 양산시, 창원시), 제주(제주시, 서귀포시)
유형 5 (고SS · 고GIAC, n = 57)	고민감도 고그린인프라 관리형	CNTV: −0.384 PI: 0.765 CE_z: −0.376 SS_z: 1.141 GIAC_z: 1.149	기존 산림 · 공원 · 하천 GI를 보전하면서 취약계층 생활권과의 접근 · 연계를 강화하고, GI 서비스 활용을 통한 사회적 전환부담 완충
			대구(군위군), 경기(가평군), 강원(태백시, 삼척시, 홍천군, 횡성군, 영월군, 평창군, 정선군, 화천군, 인제군, 고성군, 양양군), 충북(제천시, 보은군, 옥천군, 영동군, 괴산군, 단양군), 충남(금산군), 전북(남원시, 진안군, 무주군, 장수군, 임실군, 순창군), 전남(담양군, 곡성군, 구례군, 보성군, 화순군, 장흥군), 경북(김천시, 안동시, 영주시, 영천시, 상주시, 문경시, 의성군, 청송군, 영양군, 영덕군, 청도군, 고령군, 성주군, 봉화군, 울진군, 울릉군), 경남(밀양시, 의령군, 고성군, 남해군, 하동군, 산청군, 함양군, 거창군, 합천군)

표 5. 잠재영향(PI)-그린인프라 적응역량(GIAC) 사분면 및 K-means 군집 교차 분석

구분	유형 1	유형 2	유형 3	유형 4	유형 5	합계
Q1 (PI+, GI+)	1 (1.5% / 16.7%)	11 (16.9% / 32.4%)	0 (0.0% / 0.0%)	2 (3.1% / 3.4%)	51 (78.5% / 89.5%)	65 (100.0%)
Q2 (PI−, GI+)	0 (0.0% / 0.0%)	0 (0.0% / 0.0%)	0 (0.0% / 0.0%)	46 (88.5% / 78.0%)	6 (11.5% / 10.5%)	52 (100.0%)
Q3 (PI−, GI−)	0 (0.0% / 0.0%)	4 (4.9% / 11.8%)	66 (81.5% / 90.4%)	11 (13.6% / 18.6%)	0 (0.0% / 0.0%)	81 (100.0%)
Q4 (PI+, GI−)	5 (16.1% / 83.3%)	19 (61.3% / 55.9%)	7 (22.6% / 9.6%)	0 (0.0% / 0.0%)	0 (0.0% / 0.0%)	31 (100.0%)
합계	6 (100.0%)	34 (100.0%)	73 (100.0%)	59 (100.0%)	57 (100.0%)	229 (100.0%)

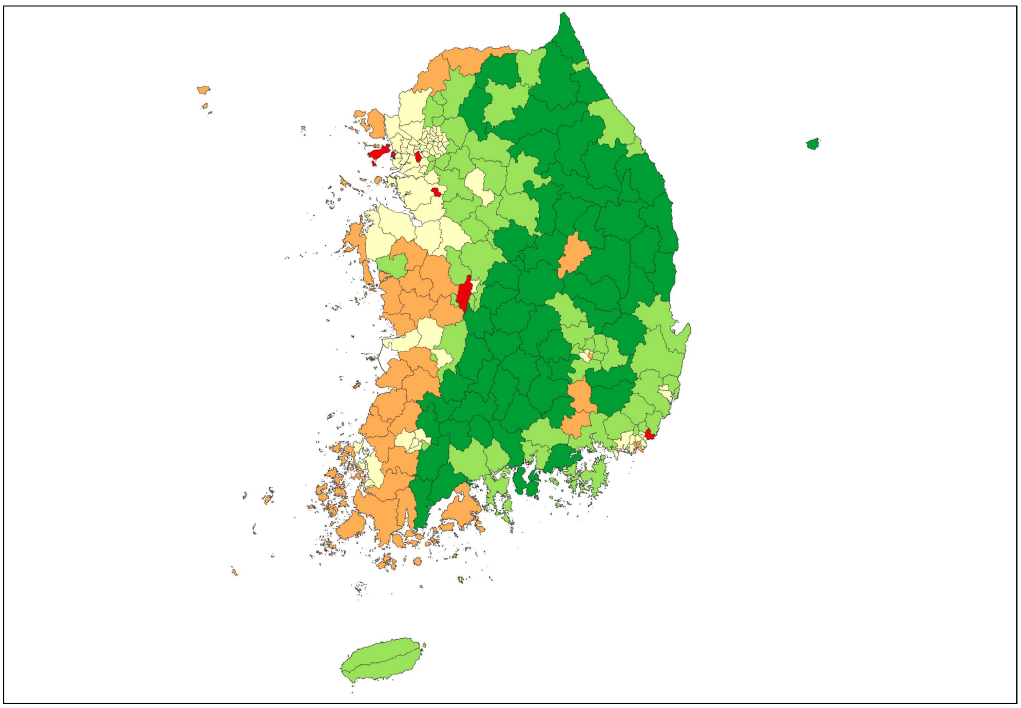


그림 5. K-means 군집분석에 따른 탄소중립 전환 취약성 유형화
범례: 유형 1, 초고배출 · 그린인프라 부족 고취약형(초고CE · 저GIAC, n=6),
유형 2, 사회민감도 · 그린인프라 부족 전환부담형(고SS · 저GIAC, n=34),
유형 3, 도시생활권 그린인프라 부족형(저GIAC, n=73),
유형 4, 저압력 · 고그린인프라 전환안정형(저PI · 고GIAC, n=59),
유형 5, 고민감도 · 고그린인프라 관리형(고SS · 고GIAC, n=57)

단적으로 상승하는 특성을 보인다. 유형 1의 취약성은 사회적 민감도보다는 배출 규모, 배출집약도, 도시활동 밀도 등 CE 요인에 의해 주도되는 것으로 해석된다. 대도시권의 고밀 개발과 업무·교통활동이 집중된 지역에서 이러한 구조가 나타나는 경향을 보였다. 특히 일부 신도시에서는 지역난방 관련 건축물 탄소배출량이 다른 지역보다 매우 높게 집계되어, 건축물 부문의 배출압력이 유형 1의 높은 CE에 크게 기여하는 것으로 나타났다. 또한 교통·물류 거점지역에서는 수송부문의 배출압력도 함께 나타나는 특성을 보였다.

정책적으로 유형 1은 일반적인 취약지역이라기보다 탄소배출 저감과 공간구조 전환이 동시에 요구되는 우선관리 지역으로 해석된다. 단기적으로는 건축물 에너지 성능 개선, 지역난방 효율화, 친환경 교통체계 구축 등 직접적인 탄소배출 감축수단을 우선 적용할 필요가 있다. 그러나 이들 지역은 대부분 고밀 시가지로 대규모 신규 녹지 확보가 제한적이므로, 단순한 녹지 확충보다 기존 도시공간을 활용한 그린인프라 전환 전략이 요구된다. 따라서 공공유휴부지, 학교, 공공청사, 주차장 등 기존 공간의 녹지화와 함께 옥상녹화, 벽면녹화, 입체녹화 등 입체형 그린인프라

를 확대하고, 재개발·재건축 및 도시재생 등 지역개발 사업과 연계하여 그린인프라를 단계적으로 확보하는 전략이 효과적일 것으로 판단된다. 또한 교통축과 물류거점을 중심으로 선형 녹지축과 완충녹지를 구축하여 도시공간 내 탄소흡수 기능과 생태 연결성을 동시에 강화할 필요가 있다.

4.4.2 유형 2: 사회민감도·그린인프라 부족 전환부담형(고SS·저GIAC, n = 34)

유형 2는 SS_z 평균이 0.954로 높게 나타났으나, CE_z는 −0.343으로 평균보다 낮고 GIAC_z는 −0.167로 다소 낮은 구성을 보였다. 잠재영향(PI) 평균은 0.611, CNTV 평균은 0.778로 산정되어 중상위 수준의 전환 취약성을 나타냈다. 사분면 교차 결과에서도 Q4(PI+, GIAC−) 비중이 55.9%, Q1(PI+, GIAC+) 비중이 32.4%로 나타나, 잠재영향이 양(+)인 지자체가 다수를 차지하였다. 취약성이 탄소배출 압력보다는 사회적 민감도와 상대적으로 낮은 GIAC의 결합에 의해 형성되는 구조임을 보여준다.

충남 서천군·부여군·보령시·공주시, 전남 해안 군지역, 부산 일부 구도심 등 해안·군지역 및 일부 노후 도시지역에서 관찰되는 경향이 있다(표 4 참조). 이들 지역은 배출 압력이 극단적으로 높지는 않지만, 고령인구, 기초생활수급자, 장애인, 독거노인, 노후주거지 등 사회·주거 취약성이 전환 부담을 확대할 가능성이 크다고 판단된다. 또한 GIAC가 충분히 높지 않아 이러한 사회적 민감도로 인해 발생하는 전환부담을 완충할 수 있는 공간 기반 적응역량이 제한되는 특성을 보인다.

유형 2는 탄소배출 저감보다 탄소중립 정책 이행 과정에서 발생할 수 있는 사회적 부담을 완화하는 전략이 우선되어야 하는 유형으로 해석된다. 특히 고령인구와 취약계층의 비중이 높은 지역 특성을 고려할 때, 생활권 단위에서 누구나 접근 가능한 그린인프라를 우선 확보하는 것이 중요하다. 따라서 근린공원, 마을숲, 생활권 녹지, 그늘쉼터, 보행녹도 등 일상생활과 밀접한 소규모 그린인프라를 확충하고, 복지시설·보건시설·공공청사 등 지역 생활SOC와 연계한 녹지공간을 조성하여 폭염 대응과 보행환경 개선 기능을 함께 강화할 필요가 있다. 또한 노후주거지 정비사업, 에너지효율 개선사업, 농산어촌개발사업 등 기존 지역사업과 연계하여 그린인프라를 단계적으로 확충함으로써 사회적 민감도로 인해 발생하는 전환부담을 완충하는 공간계획 전략이 요구된다. 유형 2는 탄소배출 감축 중심의 접근보다 취약계층과 노후주거지가 집중된 생활권을 우선 대상으로 그린인프라와 생활SOC, 주거·에너지 개선을 연계함으로써 전환 형평성과 정의로운 전환을 지원하는 공간전략이 요구되는 유형으로 해석된다.

4.4.3 유형 3: 도시생활권 그린인프라 부족형(저GIAC, n = 73)

유형 3은 GIAC_z 평균이 5개 군집 중 가장 낮게 나타나, 그린인프라 기반 적응역량 부족이 구조적으로 부각되는 유형이다. CE_z 평균은 0.181, SS_z 평균은 −0.781로 나타나 잠재영향 자체는 크지 않았다. PI 평균은 −0.600으로 낮았으나 GIAC_z 평균이 −1.114로 더욱 낮게 나타나 CNTV 평균이 0.514의 양(+)의 값을 보였다. 이는 잠재영향 자체가 크지 않더라도 그린인프라 적응역량의 부족이 상대적 전환 취약성을 높일 수 있음을 보여준다. 사분면 결과에서도 Q3(PI−, GIAC−) 비중이 90.4%로 압도적으로 높아, 저PI·저GIAC 구조가 강한 것으로 확인되었다. 이는 배출 압력이나 사회적 민감도가 극단적으로 높아서 취약성이 형성되는 유형이라기보다, 도시생활권 내 그린인프라 적응역량이 구조적으로 부족한 상태가 전환 취약성의 기반 조건으로 작용하는 유형으로 해석된다.

서울 전역과 인천·경기 일부 지역, 광주·부산 일부 구 등 대도시 생활권이 다수 포함된다는 점은, 고밀 도시지역에서 녹지의 양적 확보뿐 아니라 식생 활력, 생태적 질, 흡수 기능 부족 등으로 인해 탄소중립 전환 취약성이 높아질 수 있음을 보여준다(표 4 참조). 이러한 도시들은 배출저감 중심의 접근만으로는 한계가 있으며, 그린인프라 적응역량 자체를 강화하는 전략이 핵심 과제가 될 수 있다.

정책적으로 유형 3은 탄소배출 저감보다 도시생활권 내 부족한 그린인프라 기반을 체계적으로 확충하는 전략이 우선되어야 하는 유형으로 해석된다. 이들 지역은 대규모 신규 녹지를 확보하기 어려운 고밀 도시지역이 대부분이므로 단순한 녹지 면적 확대보다 기존 도시공간을 활용한 네트워크형 그린인프라 구축이 중요하다. 따라서 하천, 공원, 학교, 공공시설, 가로 공간 등 기존 녹지 자원을 연결하여 생활권 단위의 그린네트워크를 형성하고, 단절된 녹지축을 복원하며, 소규모 공원, 자투리 녹지, 공개공지, 옥상 및 벽면녹화 등을 연계하여 도시 전반의 그린인프라 연결성과 공간적 연속성을 강화할 필요가 있다. 또한 단순한 녹지면적 확보를 넘어 식생 활력 향상, 생태적 질 개선, 도시숲의 탄소흡수 기능 강화 등 그린인프라의 질적 성능을 함께 향상시키는 전략이 요구된다. 유형 3은 생활권 단위에서 그린인프라의 입지 적정성과 네트워크 연계전략을 우선적으로 검토할 필요가 있는 도시형 취약 유형으로 해석된다.

4.4.4 유형 4: 저압력 · 고그린인프라 전환안정형(저PI · 고GIAC, n = 59)

유형 4는 CE_z 평균 −0.203, SS_z 평균 −0.575로 잠재영향(PI) 평균 −0.778로 분석되었다. GIAC_z 평균은 0.424로 양(+)의 값을 보여, 그린인프라 기반 적응역량이 상대적으로 높은 조합을 보였다. CNTV 평균은 −1.202로 5개 군집 중 가장 낮게 나타나, 상대적으로 안정적인 전환구조를 보였다. 사분면 교차 결과에서도 Q2(PI−, GIAC+) 비중이 78.0%로 핵심을 이루며, 일부 지자체는 Q3(PI−, GIAC−)에 포함되었다(표 5 참조).

잠재영향이 낮고 GIAC가 높은 구조를 보이기 때문에, 현재 시점에서 탄소중립 전환 취약성이 상대적으로 낮은 지역으로 해석된다. 이 유형은 적극적인 그린인프라 확충보다 현재 확보된 그린인프라의 기능과 공간구조를 유지·관리하는 전략이 우선되어야 하는 유형으로 해석된다. 이들 지역은 산림과 녹지 등 생태적 완충기반이 비교적 안정적으로 확보되어 있으므로, 향후 도시개발이나 토지이용 변화로 인해 그린인프라 기능이 저하되지 않도록 예방적 공간 관리 체계를 구축하는 것이 중요하다. 따라서 산림 및 핵심 녹지의 보전, 생태축 연속성 유지, 개발사업 시 그린인프라 확보 기준 강화, 녹지 총량 관리 등 선제적 공간 관리 전략을 우선 적용할 필요가 있다. 또한 기존 그린인프라의 탄소흡수 기능과 생태적 건전성을 지속적으로 모니터링하고, 훼손된 녹지에 대해서는 복원과 질적 개선을 병행함으로써 현재의 전환 안정성을 유지하는 것이 중요하다. 유형 4는 신규 그린인프라 공급보다 기존 그린인프라의 보전과 예방적 관리가 핵심인 전환 안정 유형으로 해석된다.

4.4.5 유형 5: 고민감도 · 고그린인프라 관리형(고SS · 고GIAC, n = 57)

유형 5는 GIAC_z 평균이 1.149로 5개 군집 중 가장 높고, SS_z 평균도 1.141로 높게 나타나는 특징을 보인다. CE_z는 −0.376으로 낮아 탄소배출 압력은 상대적으로 낮지만, 사회적 민감도가 높기 때문에 잠재영향(PI) 평균은 0.765로 양(+)의 값을 보였다. CNTV 평균은 −0.384로 낮게 나타나, 높은 GIAC가 사회적 민감도로 인해 형성되는 잠재영향을 공간적으로 완충하여 CNTV를 낮추는 구조로 해석된다. 사분면 결과에서도 Q1(PI+, GIAC+) 비중이 89.5%로 매우 높아, 잠재영향이 존재하지만 그린인프라 기반 적응역량이 이를 완화하는 적응형 구조가 뚜렷하게 나타났다(표 5 참조). 강원·경북·전남 내륙 등 산간·농촌·산림 기반 지자체에서 상대적으로 많이 나타나며 산림, 녹지, 생태자원 등 그린인프라 기반 흡수·완충역량이 높아 전환 취약성을 낮추는 적응역량을 보유하고 있다. 그러나 SS_z가 높다는 점은 고령화, 생활여건 취약성, 주거 취약성 등 사회적 전환부담 요인이 함께 존재할 가능성을 의미한다. 단순히 안정적인 지역으로 분류하기보다, 높은 GIAC가 사회적 민감도로 인해 형성된 잠재영향을 공간적으로 완충하여 CNTV를 낮추는 구조로 이해할 필요가 있다.

정책적으로 유형 5는 풍부한 그린인프라를 적극적으로 활용하여 사회적 민감도로 인해 발생하는 전환부담을 완충하는 전략이 우선되어야 하는 유형으로 해석된다. 이들 지역은 산림과 녹지 등 탄소흡수 기반은 충분히 확보되어 있으나, 고령화와 생활서비스 부족 등 사회적 취약성이 동시에 존재하므로, 기존 그린인프라를 생활권 복지와 기후적응 서비스에 연계하는 공간계획 전략이 중요하다. 따라서 산림과 도시공원, 하천 등 기존 그린인프라를 활용한 폭염 저감, 건강 증진, 산림치유, 녹색복지, 생태교육 등 생활밀착형 서비스를 확대하고, 고령층과 취약계층의 접근성을 고려한 보행환경 및 생활권 녹지체계를 구축할 필요가 있다. 또한 산불, 병해충, 기후변화 등으로 그린인프라 기능이 저하되지 않도록 지속적인 유지관리와 생태적 건전성 확보를 병행하여 현재의 완충기능을 유지할 필요가 있다. 유형 5는 기존 산림·공원·하천 등 그린인프라의 보전과 유지관리를 기본으로 하되, 고령층과 취약계층이 실제 생활권에서 그린인프라의 기후조절·건강·휴양 등의 서비스를 이용할 수 있도록 보행 접근성과 생활SOC 연계를 강화하는 것이 중요하다.

군집분석 결과는 탄소중립 전환 취약성이 배출량 수준만으로 결정되지 않고, 탄소배출 압력, 사회적 민감도, 그린인프라 적응역량의 조합 구조에 따라 서로 다른 메커니즘으로 형성됨을 보여준다. 사분면 교차 결과는 군집 유형의 구조적 특성을 명확히 뒷받침한다. Q4(PI+, GIAC−)는 주로 유형 1과 유형 2에서 나타났으며, 유형 1에서는 초고배출 압력이, 유형 2에서는 높은 사회적 민감도가 각각 낮은 GIAC와 결합하여 취약성을 높이는 구조를 보였다. Q3(PI−, GIAC−)는 유형 3에서 압도적으로 나타나, 잠재영향이 크지 않더라도 그린인프라 적응역량 부족이 취약성의 기반 조건으로 작용할 수 있음을 보여준다. Q2(PI−, GIAC+)는 유형 4를 중심으로 나타나 저압력·고GIAC 기반의 전환 안정 구조를 설명하며, Q1(PI+, GIAC+)는 유형 5에서 지배적으로 나타나 높은 사회적 민감도가 존재하더라도 GIAC가 이로 인해 발생하는 전환부담을 완충하는 완충형 관리 구조를 보여준다.

이러한 결과는 사분면 분석과 K-means 군집분석이 상호 보완적으로 탄소중립 전환 취약성의 구조를 설명할 수 있음을 보여준다. 사분면 분석은 잠재영향과 그린인프라 적응역량의 거시적 관계를 제시하는 반면, 군집분석은 탄소배출 압력, 사회적 민감도, 그린인프라 적응역량의 조합에 따라 동일한 사분면 내에서도 서로 다른 취약성 형성

메커니즘을 구체화하였다. 특히 유형별 분석 결과는 동일한 탄소중립 정책이라 하더라도 지역이 직면한 취약성의 원인에 따라 공간계획의 우선순위와 정책수단이 달라져야 함을 시사한다. 유형 1은 고배출 도시공간의 직접 감축과 공간구조 재편, 유형 2는 취약생활권 중심의 전환부담 완화와 전환 형평성 강화, 유형 3은 도시생활권 그린인프라 네트워크 구축과 질적 기능 향상, 유형 4는 기존 그린인프라 보전과 예방적 개발관리, 유형 5는 기존 그린인프라의 생활권 연계·활용을 통한 사회적 전환부담 완충이 각각 우선적으로 고려될 필요가 있다. 이는 탄소중립 전환 정책이 단일한 감축 또는 그린인프라 확충 방식이 아니라, 지역별 취약성의 구조적 원인에 대응하는 차등적 공간계획 전략으로 추진될 필요가 있음을 보여준다(Vrontisi et al., 2024).

4.5 탄소중립 전환 취약성(CNTV) 공간분포의 자기상관 특성

CNTV의 공간적 분포 특성을 확인하기 위해 인접성 기반 공간가중치(queen contiguity, row-standardized)를 적용하여 전역(global) Moran's I를 산정하였다. 분석 결과, CNTV의 Moran's I는 0.3488로 나타났으며, 몬테카를로 순열검정(permutations = 999) 결과 z = 8.1555, p = 0.001로 통계적으로 유의한 양(+)의 공간 자기상관을 보였다. 이는 탄소중립 전환 취약성이 전국적으로 무작위하게 분포하기보다는 유사한 취약성 수준을 가진 지자체들이 일정한 공간적 군집을 형성하고 있음을 의미한다. 특정 지역의 전환 취약성은 해당 지자체의 개별적 특성뿐 아니라 인접 지역의 구조적 특성과도 연관되어 나타날 가능성이 있음을 시사한다. 구체적인 공간 군집 특성을 파악하기 위하여 Local Moran's I(LISA) 분석(α = 0.05)을 수행하였다. 분석 결과, not significant 169개, LL(low-low) 39개, HH(high-high) 11개, HL(high-low) 8개, LH(low-high) 2개로 나타났다. 유의한 군집은 전국적으로 광범위하게 분포하기보다는 특정 권역에 제한적으로 나타나는 것으로 확인되었다(그림 6 참조).

HH(high-high) 유형은 수도권 서부 및 일부 대도시 인접 지역에서 확인되었으며, 이는 높은 전환 취약성을 가진 지자체들이 공간적으로 인접하여 분포하는 국지적 취약성 집적지역으로 해석할 수 있다(Chen, 2016). 이러한 지역은 탄소중립 전환 과정에서 유사한 구조적 문제를 공유할 가능성이 높아 개별 지자체 차원의 대응뿐 아니라 광역적 차원의 협력과 지원정책이 요구될 수 있다.

LL(low-low) 유형은 강원 산간지역과 경북 북부 군지역을 중심으로 상대적으로 넓게 분포하였다. 이는 낮은 CNTV를 보이는 지자체가 인접하여 분포하는 공간적 안정 군집으로 해석할 수 있다. 또한 앞서 유형화 결과와 함께 살펴보면, 이들 지역 중 상당수는 상대적으로 높은 그린인프라 적응역량을 보유한 지역으로 나타나 지역의 생태·환경적 강점을 활용할 수 있는 잠재력이 높은 권역으로 볼 수 있다.

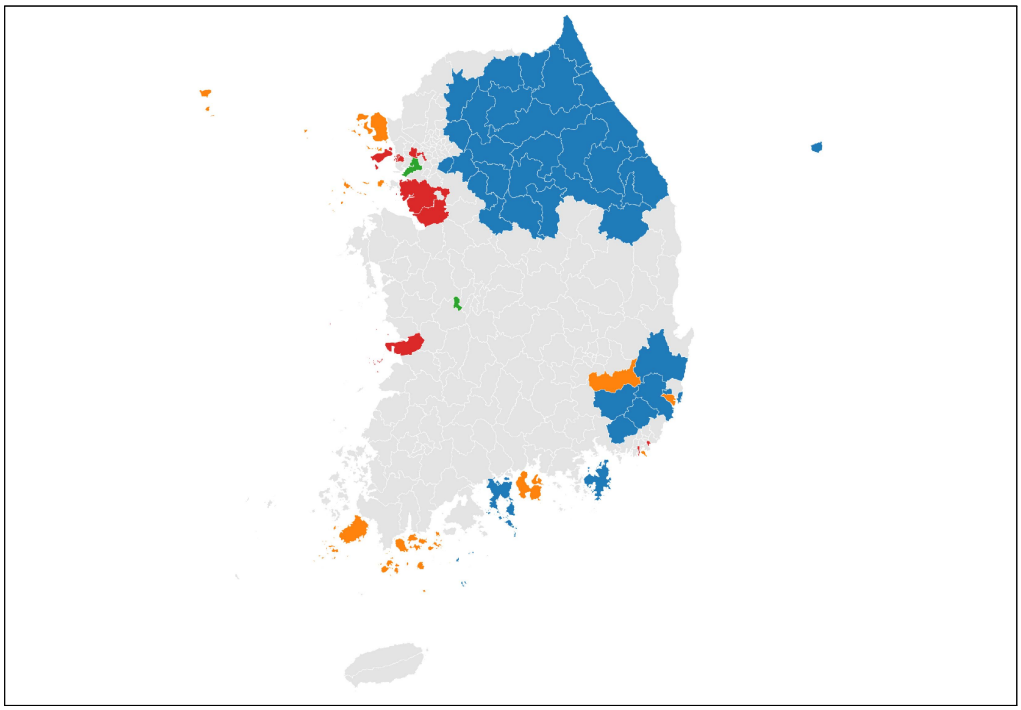


그림 6. 탄소중립 전환 취약성의 LISA 공간군집 분포
범례: HH(n = 11), HL(n = 8), LH(n = 2), LL(n = 39), not sig.(n = 169)

CNTV 지수와 유형화 분석이 개별 지자체의 취약 수준과 취약성 형성 구조를 진단하는 데 중점을 둔다면, 공간자기상관 분석은 이러한 취약성이 공간적으로 어떤 권역적 패턴을 형성하는지를 보여준다. HH 군집지역은 유사한 전환 부담이 인접 지역에 집중된 공간적 취약권역으로 해석될 수 있으며, 개별 지자체 중심의 대응을 넘어 광역적 협력과 연계 정책이 요구되는 지역으로 볼 수 있다. LL 군집지역은 낮은 전환 취약성이 공간적으로 연속되는 안정 군집으로, 유형화 결과와 연계할 경우 기존 생태·녹지 기반의 보전 및 광역 생태축 관리전략을 검토할 수 있는 권역으로 해석된다. 따라서 공간자기상관 분석은 탄소중립 전환 취약성의 공간적 군집성과 권역적 특성을 파악함으로써, 기초지자체 단위 정책을 보완하는 광역 차원의 전략 수립 근거를 제공한다.

5. 결론

본 연구는 전국 229개 기초지자체를 대상으로 탄소중립 전환 과정에서 나타나는 지역 간 공간적 취약성을 정량적으로 진단하고 구조적 유형을 도출하였다. 이를 위해 기존 취약성 평가의 노출-민감도-적응역량 구조를 탄소중립 전환의 공간적 맥락으로 재구성하여, 탄소배출 압력, 사회적 민감도, 그린인프라 적응역량의 3개 영역과 총 20개 지표로 구성된 탄소중립 전환 취약성 진단체계를 구축하였다. 영역별 PCA를 통해 대표 점수를 산출하고 표준화한 후 CNTV를 산정하였으며, PI-GIAC 사분면 분석, K-means 군집분석 및 공간 자기상관 분석을 통해 취약성의 수준과 구조적·공간적 특성을 종합적으로 분석하였다.

분석 결과, 탄소중립 전환 취약성은 단순한 탄소배출 규모만으로 결정되기보다 탄소배출 압력과 사회적 민감도로 형성되는 잠재적 전환부담과 이를 완화하는 그린인프라 기반 공간적 적응역량의 상대적 관계에 따라 서로 다른 구조로 나타났다. K-means 군집분석에서는 ① 초고배출·그린인프라 부족 고취약형, ② 사회민감도·그린인프라 부족 전환부담형, ③ 도시생활권 그린인프라 부족형, ④ 저압력·고그린인프라 전환안정형, ⑤ 고민감도·고그린인프라 관리형의 5개 유형이 도출되었다. 이는 유사한 CNTV 수준을 보이는 지역이라 하더라도 취약성을 형성하는 주요 요인과 대응 우선순위가 다를 수 있음을 의미하며, 전국 기초지자체의 탄소중립 전환을 단일한 감축 기준으로 접근하기보다 지역별 취약구조를 고려한 차등적 대응이 필요함을 보여준다.

본 연구는 기존 탄소중립 연구가 주로 배출량, 감축 효과 또는 도시 유형화에 초점을 두어 온 것과 달리, 탄소배출 압력-사회적 민감도-공간적 완충역량을 하나의 분석 체계에서 통합함으로써 탄소중립 전환의 지역적 불균형을 취약성의 관점에서 진단하였다는 데 의의가 있다. 특히 다양한 적응역량 가운데 지방정부가 공간계획을 통해 직접 확보·관리할 수 있는 생태·녹지 기반을 그린인프라 적응역량으로 조작화하고, 이를 취약성을 완화하는 독립적인 축으로 설정하였다. 이는 그린인프라를 단순한 탄소흡수원이나 조경요소가 아니라, 탄소흡수·기후완충·생태계 서비스를 통해 지역의 전환 부담을 완화할 수 있는 공간적 완충 기반으로 해석하였다는 점에서 기존 배출 중심의 탄소중립 진단과 차별성을 갖는다.

조경 및 공간계획 측면에서도 본 연구의 유형화 결과는 지역별 그린인프라 전략의 우선순위를 설정하기 위한 기초 진단 자료로 활용될 수 있다. 초고배출·그린인프라 부족 유형에서는 고밀 도시공간의 탄소배출 저감과 기존 시가지의 녹색전환이 우선될 필요가 있으며, 사회민감도·그린인프라 부족 유형에서는 생활권 그린인프라 확충과 취약계층의 전환부담 완화를 결합한 접근이 요구된다. 도시생활권 그린인프라 부족 유형에서는 공원·하천·가로·공공시설 등 기존 공간자원의 연결과 질적 개선을 통한 그린인프라 네트워크 구축이 중요하며, 전환안정 유형에서는 기존 흡수원과 생태축의 보전 및 예방적 관리가 우선되어야 한다. 고민감도·고그린인프라 유형은 풍부한 그린인프라의 기능을 유지하면서 이를 고령층 및 취약계층의 생활환경 개선과 연계하는 활용·관리 전략이 필요하다. 따라서 CNTV 유형화는 단순히 취약지역의 순위를 제시하는 데 그치지 않고, 어떤 지역에서 어떠한 공간계획적 개입이 우선되어야 하는지를 구분하기 위한 1차 진단체계로 활용될 수 있다.

정책적으로는 CNTV를 지방자치단체의 탄소중립·녹색성장 기본계획 및 지역 주도형 녹색인프라 사업과 연계하여 지역별 지원 우선순위와 정책수단을 차등화하는 데 활용할 수 있다. 특히 본 연구는 “어디에서 얼마나 탄소를 배출하는가”뿐 아니라 “어떤 지역이 어떠한 구조로 전환 부담을 갖는가”를 함께 제시함으로써 기존 탄소정보의 활용범위를 확대하였다. 향후 국토교통부 탄소공간지도와 연계하여 CNTV의 공간단위를 격자 또는 필지 수준으로 세분화한다면, 지역 내부의 취약 공간을 식별하고 그린인프라의 입지와 연결구조를 계획하는 데 활용할 수 있을 것이다(김민과 정승현, 2024). 이는 탄소중립 정책을 배출량 감축 중심의 접근에서 지역별 사회·공간적 조건과 흡수·완충역량을 함께 고려하는 공간계획 기반 접근으로 확장할 필요성을 시사한다(Menconi et al., 2024).

다만 본 연구에는 다음과 같은 한계가 있다. CNTV는 개념적 적합성, 선행 연구 및 정책적 연계성, 전국 단위 비교 가능성, 자료의 시점·출처 일관성을 고려하여 선정한 20개 지표로 구성된 복합 상대 지수이므로, 지표의 추

가·제외 또는 대체, 가중방식의 변화에 따라 지역별 CNTV 값과 유형화 결과가 달라질 가능성이 있다. 본 연구에서는 지표별 이론적·정책적 근거를 검토하고 KMO, Bartlett 검정, MSA를 통해 PCA 적용의 통계적 적합성을 검토하고, 영역별 공통구조를 확인하였으나, 지표 조합을 달리한 민감도 분석이나 외부 기준과의 비교를 통한 별도의 강건성 검증까지 수행하지는 못하였다. 따라서 향후 연구에서는 지표 대체·제외에 따른 민감도 분석, 동일가중치 및 다른 가중방식과의 비교 등을 통해 지수의 안정성과 재현성을 추가적으로 검증할 필요가 있다. CE는 국가 전체 온실가스 배출구조를 포괄하기보다 지방정부의 공간계획과 상대적으로 직접 연계 가능한 건축물 및 수송 부문의 배출압력을 중심으로 구성하였다. 이에 산업공정·농업·폐기물 등의 배출은 분석 범위에 포함하지 않았으며, 본 연구에서 제시한 CNTV는 전국 기초지자체의 절대적인 탄소중립 위험 수준이나 전체 온실가스 배출 구조를 의미하지 않는다. 따라서 결과는 공간계획 중심의 지표체계를 바탕으로 전국 평균 대비 상대적 전환 취약성을 비교한 것으로 해석할 필요가 있다. 향후에는 국가 온실가스 인벤토리와의 연계를 통해 산업·농업·폐기물 부문을 포함하는 보다 포괄적인 진단체계로 확장할 필요가 있다. SS와 GIAC 역시 전국 단위에서 비교 가능한 자료를 중심으로 구성하였기 때문에 정책 이행역량과 관련된 재정·행정·거버넌스 요인이나 지역 내부의 미시적인 그린인프라 차이를 충분히 반영하지 못하였다. 수송부문 탄소배출량은 PCA 과정에서 상대적으로 낮은 MSA를 보였으므로, 향후 통행량, 통근구조, 대중교통 분담률 등 공간적 이동특성을 보다 정교하게 반영하는 지표의 적용을 검토할 필요가 있다. GIAC는 전국 단위 자료의 비교 가능성을 고려하여 토지피복, 산림, 생태 및 도시공원 자료를 중심으로 구성하였으므로, 옥상·벽면녹화, 빗물정원, 식생수로 등 도시 내 소규모·분산형 그린인프라를 충분히 반영하지 못하였다. 향후 관련 공간정보가 구축될 경우 이러한 요소를 포함한 보다 정밀한 GIAC 평가가 필요하다. 또한 군집분석에서는 정책적 해석 가능성을 고려하여 k = 5를 채택하였으므로, 계층적 군집분석이나 Gaussian Mixture Model 등 다른 유형화 방법과의 비교를 통해 유형의 안정성을 추가 검증할 필요가 있다. 본 연구는 전국 기초지자체 수준의 거시적 진단체계를 구축하는 데 초점을 두었기 때문에, 실제 도시 내부에서 CNTV가 어떠한 공간구조로 나타나며 이에 대응하는 그린인프라가 어디에 배치되어야 하는지까지 실증하지는 못하였다. 향후에는 대표 유형의 사례 도시를 대상으로 격자 또는 필지 단위로 CE, SS, GIAC를 세분화하고, 토지이용, 기존 공원·녹지, 공공시설, 유휴부지 및 도시개발사업 등 실제 공간계획 여건과 중첩하여 그린인프라의 우선 입지와 계획 방향을 구체화할 필요가 있다. 나아가 계획 적용 전·후의 CNTV 변화와 탄소저감·기후적응 효과를 정량적으로 검증함으로써, 본 연구에서 제시한 전국 단위 진단체계를 실제 조경 및 도시 공간계획의 실행 수단으로 발전시키는 후속 연구가 요구된다.

References

1. 강영은(2021) 탄소중립을 위한 도시 탄소흡수원의 활용. 국토 476: 28-34.
2. 강정은(2012) 기후변화 적응형 도시구현을 위한 그린인프라 전략 수립. 한국환경정책·평가연구원.
3. 고영진, 송철호, 정유정, 홍민아, 김준, 이우균(2024) 기초지자체의 공간기반 탄소흡수원관리를 위한 마을단위 산림탄소흡수지도 개발. 한국기후변화학회지 15(6): 989-1000.
4. 고재경, 김희선(2010) 지방자치단체 기후변화 취약성 평가에 관한 연구: 경기도 기초지자체를 중심으로. 환경정책 18(2): 79-105.
5. 국립생태원(2025) 생태·자연도 해설서(2025년 개정판). 국립생태원.
6. 기후에너지환경부(2026) 지역사회 탄소중립 달성을 위한 실행전략 공개. 보도자료.
7. 김민, 정승현(2024) 탄소공간지도 발전 방향에 관한 연구: 미국, 영국, 일본, 한국 사례 비교 분석을 중심으로. 환경정책연구 32(2): 43-68.
8. 김선희(2012) 기후변화 취약성 평가에 관한 연구: 전라남도 22개 시·군을 중심으로. 한국거버넌스학회보 19(2): 99-123.
9. 김현진, 최세진(2019) 20년 이상 경과된 노후건축물의 단열재 성능평가에 관한 실험적 연구. 한국건축시공학회지 19(6): 539-547.
10. 김해동, 남지현(2023) 한국의 탄소중립 공정전환을 위한 취약계층 정의: 탄소세 부과 시나리오를 중심으로. 환경정책 31(4): 175-200.
11. 박지용, 정승현(2025) 지자체 관리권한 인벤토리 부문별 도시 및 지역 단위 탄소중립 기여도 평가: 탄소중립 순항 및 이탈 경로를 중심으로. 한국기후변화학회지 16(5-1): 845-857.
12. 박효석, 오규식, 이상헌(2014) 도시 그린인프라 확충에 따른 탄소저감 증진효과 분석: 서울시를 대상으로. 도시행정학보 27(4): 1-23.

13. 서효정, 변나향(2024) 노후 단독주택 리모델링 지원 방안 연구: 민간 건축물 그린리모델링 지원사업 중심으로. 대한건축학회논문집 40(4): 187-194.
14. 손희정, 이길상, 손승우(2024) 온실가스 배출 분포 패턴 분석을 통한 탄소관리 공간계획 연구. 환경정책 32(2): 189-211.
15. 안예현, 윤은주, 박종화, 김은화, 홍나은(2022) 탄소중립 전환 취약지역 지원방안 연구. 국토연구원.
16. 안예현, 장경은, 박소영(2023) 탄소중립 실현을 위한 도시공원·녹지 재원 다각화 방안. 국토연구원.
17. 이은엽(2021) 탄소중립을 위한 그린인프라 조성방안. 건축 66(1): 30-33.
18. 진상현(2024) 기후변화 대응 관련 광역지방자치단체의 유형 및 특성 분석: 군집분석 및 지수분해분석을 중심으로. 한국정책과학학회보 28(2): 77-104.
19. 탄소중립녹색성장위원회(2025) 탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획, 2050 탄소중립녹색성장위원회.
20. 허한결, 박종훈(2024) 탄소중립사회 달성을 위한 그린인프라 정보체계 개발방향 연구. 건축공간연구원
21. Anselin, L.(1995) Local indicators of spatial association-LISA. Geographical Analysis 27(2): 93-115.
22. Arunachalam, M., J. Saravanavel and A. Joseph Kochuparampil(2023) PCA-based approach for mapping social vulnerability to hazards in the Chennai metropolitan area, east coast of India. Annals of GIS 29(4): 529-552.
23. Black, W. C., B. J. Babin, R. E. Anderson and J. F. Hair(2010) Multivariate Data Analysis: A Global Perspective. Pearson.
24. Brooks, N.(2003) Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework. Tyndall Centre for Climate Change Research.
25. Carley, S., T. P. Evans, M. Graff and D. M. Konisky(2018) A framework for evaluating geographic disparities in energy transition vulnerability. Nature Energy 3(8): 621-627.
26. Chen, H., L. Wang, Y. Wang, Z. Ni, B. Xia and R. Qiu(2024) New perspective to evaluate the carbon offsetting by urban blue-green infrastructure: Direct carbon sequestration and indirect carbon reduction. Environmental Science & Technology 58(29): 12966-12975.
27. Chen, Y.(2016) New approaches for calculating Moran's index of spatial autocorrelation. arXiv preprint arXiv:1603.00315.
28. Choi, C., P. Berry and A. Smith(2021) The climate benefits, co-benefits, and trade-offs of green infrastructure: A systematic literature review. Journal of Environmental Management 291: 112583.
29. Cong, C., H. Pan, J. Page, S. Barthel and Z. Kalantari(2023) Modeling place-based nature-based solutions to promote urban carbon neutrality. Ambio 52(8): 1297-1313.
30. Eum, S.(2025) Conversion of the green mission for transformation-oriented industrial innovation: Green growth and 2050 carbon neutrality in South Korea. In Transformative Mission-Oriented Innovation Policies. Edward Elgar Publishing. pp. 172-197.
31. Hanna, E., D. Bruno and F. A. Comín(2024) The ecosystem services supplied by urban green infrastructure depend on their naturalness, functionality and imperviousness. Urban Ecosystems 27(1): 187-202.
32. Hautamäki, R., L. Kulmala, M. Ariluoma and L. Järvi(2025) How urban green infrastructure contributes to carbon neutrality. Current Opinion in Environmental Sustainability 72: 101511.
33. Herath, P. and X. Bai(2024) Benefits and co-benefits of urban green infrastructure for sustainable cities: Six current and emerging themes. Sustainability Science 19(3): 1039-1063.
34. IPCC(2001) Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge University Press.
35. IPCC(2007) Impacts, adaptation, and vulnerability. In Climate Change 2007: Fourth Assessment Report. Cambridge University Press.
36. IPCC(2014) Summary for policymakers. In Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge University Press. pp. 1-32.
37. IPCC(2018) Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews,

Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor and T. Waterfield(Eds.), Global Warming of 1.5℃. World Meteorological Organization.

38. IPCC(2022) Summary for policymakers. In Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
39. Jeong, Y., S. Lee, M. Hong, Y. Ko and H. W. Jo(2024) Are there carbon-neutral cities in South Korea: Using residual modeling on different spatial scales. EGU General Assembly 2024. EGU2024-16205.
40. Jolliffe, I. T. and J. Cadima(2016) Principal component analysis: A review and recent developments. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences 374(2065): 20150202.
41. Jones, L., S. G. Anderson, J. Læssøe, E. Banzhaf, A. Jensen, D. N. Bird, J. D. Miller, M. Hutchins, J. Yang, J. K. Garrett, T. Taylor, B. W. Wheeler, R. Lovell, D. Fletcher, Y. Qu, M. Vieno and M. Zandersen(2022) A typology for urban green infrastructure to guide multifunctional planning of nature-based solutions. Nature-Based Solutions 2: 100041.
42. Lee, J. and S. Jung(2023) Towards carbon-neutral cities: Urban classification based on physical environment and carbon emission characteristics. Land 12(5): 968.
43. Lwasa, S., K. C. Seto, X. Bai, H. Blanco, K. R. Gurney, Ş. K ı lk ı ş, O. Lucon, J. Murakami, J. Pan, A. Sharifi and Y. Yamagata(2022) Urban systems and other settlements. In Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press.
44. McDowall, W., T. Reinauer, P. Fragkos, M. Miedzinski and J. Cronin(2023) Mapping regional vulnerability in Europe's energy transition: Development and application of an indicator to assess declining employment in four carbon-intensive industries. Climatic Change 176(2): 7.
45. Menconi, M. E., L. Bonciarelli and D. Grohmann(2024) Assessment of the potential contribution of the urban green system to the carbon balance of cities. Environments 11(5): 98.
46. Moran, P. A. P.(1950) Notes on continuous stochastic phenomena. Biometrika 37(1/2): 17-23.
47. Mun, H., J. Yeom, J. Oh and J. Jung(2025) Does a compact city really reduce consumption-based carbon emissions? The case of South Korea. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science 52(3): 545-562.
48. Polsky, C., R. Neff and B. Yarnal(2007) Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram. Global Environmental Change 17(3-4): 472-485.
49. Raymond, C. M., N. Frantzeskaki, N. Kabisch, P. Berry, M. Breil, M. R. Nika, D. Geneletti and C. Calfapietra(2017) A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. Environmental Science & Policy 77: 15-24.
50. Rodríguez-Pose, A. and F. Bartalucci(2023) Regional vulnerability to the green transition. Single Market Economics Papers WP2023/16.
51. Salleh, S. A., N. A. Isa and N. A. Siman(2023) The development of the vulnerability index (VI) using principal component analysis (PCA). International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology 14(5): 234-245.
52. Sharma, J. and N. H. Ravindranath(2019) Applying IPCC 2014 framework for hazard-specific vulnerability assessment under climate change. Environmental Research Communications 1(5): 051004.
53. Smith, B. and A. Diedrich(2024) A systematic review of current progress in community based vulnerability assessments. Regional Environmental Change 24(1): 21.
54. Son, C. H., J. I. Baek and Y. U. Ban(2018) Structural impact relationships between urban development intensity characteristics and carbon dioxide emissions in Korea. Sustainability 10(6): 1838.
55. Sovacool, B. K., P. Upham, M. Martiskainen, K. E. H. Jenkins, G. A. Torres Contreras and N. Simcock(2023) Policy prescriptions to address energy and transport poverty in the United Kingdom. Nature Energy 8: 273-283.
56. Strbac, S., M. Kasanin-Grubin, L. Pezo, N. Stojić, B. Lončar, L. Ćurčić and M. Pucarević(2023) Green

infrastructure designed through nature-based solutions for sustainable urban development. International Journal of Environmental Research and Public Health 20(2): 1102.

57. Stowell, J., C. Ngo, M. P. Jimenez, P. L. Kinney and P. James(2023) Development of a global urban greenness indicator dataset for 1,000+ cities. Data in Brief 48: 109140.
58. Ulpiani, G. and N. Vetters(2023) On the risks associated with transitioning to climate neutrality in Europe: A city perspective. Renewable and Sustainable Energy Reviews 183: 113448.
59. U.S. Geological Survey(USGS)(2018) NDVI, the Foundation for Remote Sensing Phenology. Remote Sensing Phenology, U.S. Geological Survey.
60. Vrontisi, Z., I. Charalampidis, K. Fragkiadakis and A. Florou(2024) Towards a just transition: Identifying EU regions at a socioeconomic risk of the low-carbon transition. Energy and Climate Change 5: 100129.
61. Xiao, Z., H. Ge, M. A. Lacasse, L. Wang and R. Zmeureanu(2023) Nature-based solutions for carbon neutral climate resilient buildings and communities: A review of technical evidence, design guidelines, and policies. Buildings 13(6): 1389.
62. Yang, Q., L. Wang, L. Lu, P. X. Li, Y. Fan, G. Zhu and Y. Wang(2025) Regional differences and spatial spillover effects of urban carbon emission efficiency in Yangtze River Delta, China. Huan Jing Ke Xue 46(1): 19-29.