

온실가스 배출 분포 패턴 분석을 통한 탄소관리 공간계획 연구

A Study on Carbon Spatial Planning Through the Analysis of Greenhouse Gas Emission Distribution Patterns

손희정* · 이길상** · 손승우***

Heejung Sohn · Gil-Sang Lee · Seung-Woo Son

요약: 인구 증가와 도시화에 따른 온실가스 배출은 지속적으로 증가하고 있다. 이에 2050년까지 탄소중립을 실현하겠다는 목표를 제시하는 등 전 지구적 기후변화 대응에 발맞추어 나가고 있다. 하지만 국가 차원의 노력만으로는 탄소중립 목표를 달성하는 데 한계가 있다. 이에 본 연구는 2010년, 2015년, 2020년의 전국 시군구별 온실가스 배출 시계열 데이터를 활용하여 온실가스 배출의 공간적 군집분석 통해 핫스팟 지역 분석 및 지자체 기반의 탄소 공간계획 연구를 수행하였다.

온실가스의 주요 배출지역으로 경기도 남부 및 충청북도(8개 시)와 전라남도(7개 시)가 선정되었다. 또한 5년 단위로 국지적 Moran's I 분석 기준 95% 이상의 신뢰도 기반의 핫스팟 분석 결과 충청북도 서쪽과 전라남도 남부지역의 도시가 지속적으로 순배출량이 높은 지역임으로 분석되었다. 사회경제적 조건을 포함하여 우선순위 지역을 도출하였을 때는 대도시 중심의 대상지에 탄소 우선 지역 설정이 필요한 것으로 분석되었다. 이 결과를 종합하여 충청·수도권, 전라남도 남부 구역, 부산·대구·울산 구역 등 세 구역을 탄소우선관리구역으로 제안하였다. 본 연구의 결과는 탄소우선관리구역이 어느 곳을 중심으로 이루어져야 하는지, 그 필요성과 시급성, 효율성을 제시하였다. 차후 정책 활용성 측면에서 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심주제어: 온실가스 시계열 분석, 탄소우선관리구역, 환경계획, 핫스팟 분석

Abstract: The continuous increase in greenhouse gas emissions driven by population growth and urbanization necessitates global action towards climate change mitigation, exemplified by the commitment to achieve carbon neutrality by 2050. However, to meet these ambitious targets, national-level efforts alone are insufficient. This study leverages time-series data of greenhouse gas emissions at the municipal and district levels across the country for the years 2010, 2015, and 2020 to perform spatial clustering analyses, identify emission hotspots, and propose localized carbon spatial planning strategies.

The analysis identified southern Gyeonggi Province, Chungcheongbuk-do (8 cities), and Jeollanam-do (7 cities) as major emission hotspots. Furthermore, results from local Moran's I analysis with a 95% confidence level, conducted every five years, indicated that cities in western Chungcheongbuk-do and southern Jeollanam-do were consistently exhibiting high net emissions. When incorporating socio-economic conditions to prioritize regions, it was determined that urban centers require the designation of carbon priority areas. The results of this study indicate where carbon priority management areas should be focused, highlighting their necessity, urgency, and efficiency. These findings can serve as foundational data for future policy applications.

Key Words: Greenhouse Gas Time Series Analysis, Carbon Priority Management Areas, Environmental Planning, Hotspot Analysis

* 주저자, 한국환경연구원 환경계획연구실 초빙연구원

** 공동저자, 한국환경연구원 연구원

*** 교신저자, 한국환경연구원 환경계획연구실 부연구위원

I. 서론

인구 증가와 도시화에 따른 온실가스 배출은 지속적으로 증가하고 있다. 이에 파리협정에서 2030년까지 BAU(business-as-usual) 대비 온실가스를 37% 감축하겠다는 계획을 설정하였다. 우리나라에서도 국제적인 움직임에 발맞춰 2018년 국가 온실가스 감축 로드맵 수정 이후 2020년 탄소중립을 선언하고, 2021년에는 2050년 탄소중립을 목표로 2030년까지 국가 온실가스 배출량을 2018년 대비 40% 감축하는 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution: NDC)를 제시하였다(국토연구원, 2024). 아울러 2050년까지 탄소중립을 실현하겠다는 목표를 제시하는 등 전 지구적 기후변화 대응에 발맞추어 나가고 있다(관계부처합동, 2020).

우리나라는 2020년에 처음 2050년 탄소중립이 선언되었고, 2022년 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장기본법」(이하 탄소중립기본법)을 시행하여 법적 근거를 마련하였다. 하지만 국가 차원의 노력만으로는 탄소중립 목표를 달성하는 데 한계가 있다. 점차 사회가 복잡해지고 세분화됨에 따라 각 지역별 인구증감, 출산율 등에 차이 등 지역 실정을 고려한 차별적 정책 대응이 필요하다(지방시대위원회, 2023). 특히 탄소중립·녹색성장 기본법 시행으로 기후위기 및 탄소중립 정책의 실질적 이행 주체이자, 경제·사회·생활의 변화가 이루어지는 공간으로서 광역 및 기초지자체의 역할이 강조된다(Kuramochi et al., 2020; 고재경과 예민지, 2022; 장남정 외, 2023). 「탄소중립기본법」에 따라 지자체는 10년을 계획기간으로 5년마다 '시·도, 시·군·구 탄소중립 녹색성장 기본계획'을 수립하고 이행 성과를 제출하도록 규정되어 있다. 하지만 지자체의 기후변화 대응의 정책 실효성은 낮은 상황으로 현재까지는 큰 효과를 거두지 못하고 있다(오수미, 2022; 박진경 외, 2022; 국토연구원, 2024). 이에 본 연구에서는 전국 시군구별 온실가스 배출 자료를 활용하여 지자체 기반의 탄소공간계획 연구를 수행하고자 하였다.

한국 온실가스감축 관련 정책과 사업은 배출원 중심의 접근으로 '지자체와 공간단위' 접근이 취약하다(최영국 외, 2008; 오상원 외., 2023). 또한 대부

분의 연구에서는 특정 시점만 연구하여 시간 변수를 배제하거나(남궁근 외., 2010; 양혜미와 송재민, 2017; 이진원, 2017) 특정 지자체를 중심으로 수행되었다(정민선 외, 2015; 조항훈과 김흥순, 2023). 하지만 단개년도를 기반으로 제한된 국토의 온실가스 배출의 현황 분석을 수행하는 것은 장기적인 변화의 경향을 파악하기 어렵다는 점에서 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 환경부 온실가스종합센터에서 제공하는 국가 온실가스 인벤토리(National GHGs Inventory Report, NIR) 자료를 바탕으로 10년 이상의 시계열 데이터를 활용하여 1) 지자체 별 장기적인 변화 양상을 바탕으로 온실가스 배출량을 분석하고 2) 온실가스 배출의 공간적 군집분석 통해 핫스팟 지역을 도출하고자 한다. 이후 3) 사회경제적 자료를 함께 고려하여 탄소 우선 관리 계획을 제안하고자 한다. 이를 통해 보다 효율적인 탄소 공간 계획 방안을 제시하고자 한다.

II. 연구방법

1. 온실가스 배출 영향 변수 선정

시군구 단위 탄소배출에 영향을 미치는 변수를 파악하기 위해 국내의 탄소 배출 관련 문헌연구를 수행하였다. 대표적 사례를 기반으로 본 연구는 국내 온실가스 관련 연구를 바탕으로 온실가스에 주요 변수를 선정하고자 하였다.

이진원(2017)은 전국 232개 시군구를 대상으로 인구수, 인구밀도, 세대수, 경제활동 인구수, 고령인구 비율, 주간인구 비율, 지방세 부담액, 재정자립도, 시 예산, 고용 밀도, 1차, 2차, 3차 산업 비율, 산림면적, 녹지 비율, 공원 비율 등을 고려하였다.

오상원 외(2023)은 지역별 온실가스 배출량에 따른 지역유형화를 위해 선행연구 기반하여 온실가스 관련 특성, 사회·인구적 특성(인구수, 인구밀도), 경제적 특성(1인당 지방세 납부금액), 토지이용 특성(상업, 주거, 공업, 녹지 지역 면적 비율), 교통환경 특성(차량등록대수), 산업 특성, 자연환경 특성(산

림면적)의 항목을 바탕으로 요인분석 및 주성분 분석을 실시하여 대단지 산업에너지 사용량 및 발전소 입지의 특징이 더 큰 영향을 주고 있음을 분석하였다.

박창석 외(2022)는 인벤토리 자료가 있는 시도별 유형화를 위해 탄소 배출량 DB를 구축하여 5가지로 유형분류를 실시하였다. 최종적으로 우리나라 시·도 및 시·군·구 단위 지역 유형화 분석 결과를 매칭·중첩하여 총 17개 지역 유형을 산출하였고 유형별 특성을 제시하였다.

〈표 1〉 온실가스배출 특성 분류 문헌 검토

특성분류	이건원(2017)	박창석 외(2022)	오상원 외(2023)	장남정 외(2023)
연구범위	2015년, 전국 232개 시군구	전국 227개 시군구	전국 232개 시군구	전라북도
온실가스 관련 특성	온실가스 배출량	온실가스 배출량 (톤CO ₂ eq.)	1인당 온실가스 (직간접)배출량, 석유 사용량, 전력사용량, 발전소 유무	배출량/인 (톤CO ₂ eq./인), 에너지소비량 (1,000 toe)
인구 사회 특성	인구수, 인구밀도, 세대수, 경제활동 인구수, 고령인구 비율, 주간인구 비율	도시 파편화 지수 (엔트로피 지수, 지니계수, 모란지수) 인구밀도	인구수, 인구밀도	인구(명),
경제적 특성	지방세 부담액, 재정자립도, 시 예산, 고용밀도	1인당 지방세 납부금액 (명/천원)	1인당 지방세 납부금액	GRDP/인
토지이용 특성	행정구역 면적, 도시지역 비율, 주거 건축허가율, 상업 건축허가율, 공업 건축허가율	상업지역 비율(%), 주거지역 비율(%), 녹지지역 비율(%)	상업지역 비율(%), 주거지역 비율(%), 공업지역 비율(%), 녹지지역 비율(%)	용도별 (도시/비도시) 지목별(임야/대지/전/답/기타)
교통 환경 특성	차량등록대수, 주차장 비율, 등록된 대중교통 수	1인당 차량등록대수 (명/대)	차량등록대수	자동차 등록대수
산업 특성	사업체 수, 사업체 수 (300명 이상), 1차산업 비율, 2차산업 비율, 3차산업 비율	1차산업 비율(%), 2차 산업 비율(%), 에너지 다소비 업종 비율(%)	1차산업비율, 2차 산업비율, 에너지 다소비 업종 비율	산업단지, 농공단지, 업체수 개소 폐기물(톤/일)
흡수원 특성	산림면적, 녹지비율, 공원비율	1인당 산림면적(명/ha)	산림면적	-

장남정 외(2023)에서는 인구, 배출량, GRDP/인, 에너지소비량, 토지이용, 자동차등록대수, 산업단지, 폐기물 등을 주요 지표로 선정하였다. 주요 지표

의 온실가스 배출특성에 따라 도시유형, 산업유형, 도농유형, 농산어촌 등 4개 대유형으로 분류하고, 감축 전략 수립을 위해 세부유형은 7개 유형으로 구분하였다. 우선순위를 설명하기 위한 보조지표로는 시·군별 배출 수준(고배출, 중점배출, 중배출, 저배출)과 우선순위 지표 결과(선도, 중점, 협력, 지원)를 조합하여 표기하였다.

사례를 참고했을 때 온실가스 배출량과 관련된 변수, 인구 사회 특성, 경제 특성, 토지이용 특성, 산업 특성 등을 고려한 것을 볼 수 있었다 (<표 1>). 이에 본 연구는 크게 온실가스 배출량 관련 자료, 사회인구 특성, 경제 특성, 토지이용 특성으로 구분하여 변수를 설정하였다. 산업특성의 경우 경제 특성에 포함이 된다고 판단하여 제외하였고, 본 연구의 경우 공간계획을 목적으로 하고 있어 교통환경 특성을 제외하고 토지이용 특성을 보다 세분화하여 분석하고자 하였다.

본 연구는 국내 온실가스 관련 연구를 바탕으로 온실가스에 주요 요인으로 총 12가지를 선정하였다(<표 2>). 온실가스 배출량의 경우 온실가스종합정보센터에서 수집한 순배출량 값을 이용하였다. 순배출량 값의 경우 총배출량에서 LULUCF(Land Use, Land-Use Change and Forestry)에 따른 저감 효과를 제외한 값이다. 이에 시간 변화에 따른 토지이용변화를 반영하고 있다고 판단하여 해당 자료를 활용하였다. 시군구는 통계청 전국 센서스 행정동경계 229개 시군구 지역(통계청, 2024)을 기준으로 공간 분석을 진행하였다.

<표 2> 시군구 단위 온실가스배출 영향 요인 및 변수 선정

구분	구분	단위	연도	데이터 출처	참고문헌
온실가스 배출량	순배출지역	톤 CO2eq	2021	온실가스정보센터	유성필 외(2015) 이건원(2017) 장남정 외(2023)
사회인구 특성	인구밀도	명	2021	통계청	노승철과 이희연(2013) 이건원(2017) 양혜미와 송재민(2017) 장남정 외(2023)
	지방소멸 우려지역	%	2021	통계청	이건원(2017),
경제특성	GRDP/인	명/천원	2010-2021	통계청	장남정 외(2023)

토지이용 특성	상업지역 비율	%	2010-2021	국토교통부 용도지역	노승철 외(2013) 박창석 외(2022)
	주거지역 비율	%		국토교통부 용도지역	노승철과 이희연(2013) 이건원(2017) 장남정 외(2023)
	공업지역 비율	%		국토교통부 용도지역	노승철과 이희연(2013) 유성필 외(2015) 박창석 외(2022)
	녹지지역 비율	%		국토교통부 용도지역	박창석 외(2022)
	산림 면적	ha	5년 단위	산림청	노승철과 이희연(2013) 이건원(2017), 박창석 외(2022)
	노후화 건물 비율	%	2010-2021	국토교통부	김치백 외(2014) 정민선 외(2015a)
	건물연면적	ha	2010-2021	국토교통부	김치백 외(2014) 조항훈과 김흥순(2023)

2. 온실가스 배출 영향 변수 통합 분석

본 연구에서는 지역단위의 다각적 효율적 탄소중립 이행 전략을 마련하기 위해 탄소중립 효율개선 지역 고려가 필요함에 따라 단년도 기반의 분석과 더불어 장기적인 시간의 흐름의 관점에서의 분석을 수행하고자 하였다. 이를 위해 선행연구를 참고하여 동태변수(Dynamic Index)와 상태변수(Status Index)를 모두 고려하였다(Pohlan & Strite, (2017))(〈그림 1〉). 동태변수는 탄소 시계열 변화를 분석하기 위해 지자체별 순배출량 10년의 평균 증감률 비교 분석하였고(〈표 3〉), 상태변수는 현재 탄소와 관련된 현황을 분석하기 위해 5년 단위로 (2010년, 2015년, 2020년) 기반으로 각 변수들의 현황을 분석하여 정의하였다.

각각의 변수의 경우 단위가 모두 다르기 때문에 표준편차(SD)를 활용하여 등급으로 분류하였다. 11개의 상태변수의 경우 ArcGIS 상의 Natural Break 기능을 활용하여 다섯 가지 등급(1~5)개의 등급으로 분류하였다. Natural Break 는 각각의 그룹 내의 분산은 최소화하고, 그룹 간의 분산은 최대화하는 방법으로 이에 각 등급의 지역 수가 고정되지 않았고, 값의 통계적 분포에 맞춰 조정되었다. 동태변수의 경우 탄소 순배출량 연평균증감률을 활용하여

질적 분석을 통해 7가지 등급으로 분류하였다. 순배출량이 배출에서 흡수로 전환된 경우가 가장 좋은 등급으로(0등급) 분류하였고, 순배출량 흡수에서 배출로 전환된 지역의 경우 6등급으로 분류하였다. 상태변수와 동태변수를 동시에 검토하여 종합 지수를 산출하기 위해 등급의 숫자가 높을수록 온실가스 배출이 많은 것으로 분석되도록 설정하였다(〈표 3〉).

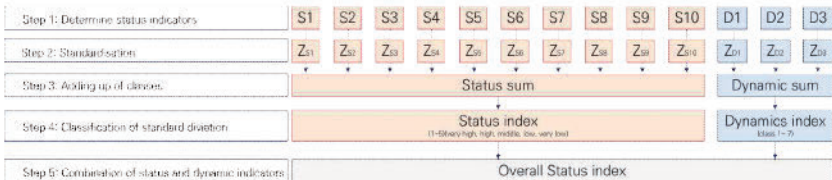
우선지역 선정을 위해 상태변수와 동태변수를 통합적으로 분석하였다. 관련하여 Nicholls et al.(2014)은 개발도상국의 재생에너지 보급 정책을 평가하기 위하여 효과성, 효율성, 형평성, 제도적 타당성이라는 4가지 기준에 따른 평가지표를 도출하였다. 국내 연구로 이상엽 외(2022)는 국가 탄소중립 추진전략 이행기반 방안 연구를 위해 환경 효과성(감축목표의 명확성), 경제 효율성(비용 효율성, 사회적 편익 고려), 제도적 기반(제도적 역량), 국민 수용성(이해관계자 참여, 간접 영향권 내 계층 고려) 등의 기준을 활용하였다. 이에 본 연구는 두 지표를 통합적으로 판단하기 위해 시급성(순배출량 등, 연평균 증감률 등), 효율성(고밀도지역, GRDP 등), 필요성(노후화건물면적, 지방소멸 고위험지역 등)을 고려하여 탄소중립을 고려한 공간환경전략 방향 설정을 하고자 하였다.

시급성의 경우는 순배출량이 높고, 연평균 증감률이 높으며 배출량을 저감할 녹지 비율이 낮은 공간을 시급한 지역으로 선정하였고, 효율성의 경우 현재 대규모 공장 등이 없어 순배출량은 적지만, 도시화가 높은 지역으로서 탄소중립 노력이 필요할 뿐만 아니라 생태계서비스의 기대효과도 함께 전해질 수 있는 측면을 고려하였다. 필요성이 경우 에너지 중심으로 계산된 순배출량과 더불어 탄소배출의 주요 요인인 노후화건물면적과 사회적 측면에서 지방소멸이 이루어지는 공간을 고려하였다. 이를 통해 최근 지역의 사회경제적 현황과 지난 10년 동안의 변화를 모두 고려하여 탄소우선관리구역을 도출하고자 하였다.

〈표 3〉 탄소 우선관리 지역 설정을 위한 변수

상태 변수(현황 분석)		동태 변수(과거로부터 변화율 분석)	
온실가스 배출량		탄소 배출 현황	탄소 시계열 변화 (순배출량 연평균증감율)
사회 경제적 특성		인구 현황 (인구 고밀도 지역)	6 순배출량 흡수(-)에서 배출(+)로 전환
		지방소멸우려지역	5 급격한 증가(>10%)
		GRDP/인	4 증가
토지이용특성		토지이용특성 (공업, 상업, 주거)	3 유지
		산림 면적 비율	2 감소
		노후화 건물 비율	
		건물 연면적	1 급격한 감소(<-10%)
	0 순배출량 배출(+)에서 흡수(-)로 전환		

〈그림 1〉 변수 통합 프로세스*



* Pohlan & Strote(2017)의 방법을 일부 변경하여 활용

3. 공간적 군집패턴 분석

공간적 군집패턴 분석을 하고자 국지적 Moran's I 분석과(LISA, Local Indicator of Spatial Association) Getis-Ord Gi* 분석을 통해 핫스팟 분석을 실행하였다. 첫 번째로 특정 지역과 그 주변을 비교 분석하여 주변과 뚜렷한 차이가 나는 지역을 찾기 위해, 공간자기상관 분석인 LISA로 국지적 모란지수(Local Moran's I)를 사용하였다.

$$I_i = \frac{(Z_i - \bar{Z})}{S_z^2} \sum_{j=1}^n [w_{ij}(Z_j - \bar{Z})] \quad (1)$$

S_z : 분산,

w_{ij} : 해당 지역의 속성 변수

Z : 공간가중치

국지적 모란지수 I는 인접 지역(Z_j)과 해당 지역(Z_i)의 차이에 대한 표준화 값이며, 그 크기는 인접 지역과 해당 지역의 유사성 혹은 차이성을 나타낸다(Anselin., 1995). 국지적 모란지수는 4개로 분류되는데 높은 값끼리 인접할 때 HH(High-High), 낮은 결과 값끼리 인접하는 LL(Low-Low), 높고 낮은 지수들이 인접한 HL(High-Low), LH(Low-High) 등으로 구분된다(Anselin, 1995; Ren et al, 2020). 본 연구에서는 Arc map pro에서 Cluster and Outlier analysis를 활용하여 분석하였다.

두 번째로 핫스팟을 도출하기 위해 Getis-ord Gi* 값을 활용하였다. 각각의 군집 정도를 보여주는 Getis-Ord Gi*는 객체의 z-score를 계산한 값으로, 속성데이터가 유의미하게 특정 공간에 집중되어 있는지를 분석한다. 해당 지역과 인접 지역의 값이 높은 군집은 핫스팟(Hot Spot), 반대로 해당 지역과 인접 지역의 값이 낮은 군집은 콜드스팟(Cold Spot)을 의미한다(Getis and Ord, 1992; 고영주와 조기환, 2020; 박진경 외, 2022).

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{\sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{i,j}\right)^2]}{n-1}}} \quad (2)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2}$$

i, j : unit of analysis(공간적 분석단위)

x_i, x_j: attribute data(속성데이터)

w_{ij}: spatial weight(i와 j지역 간 공간가중치)

n: the number of unit of analysis(공간적 분석단위 수)

III. 연구 결과 및 고찰

1. 권역별 온실가스 배출 기초 분석

1) 한강수도권

한강 수도권은 서울특별시, 인천광역시, 경기도를 포함하고 있는 지역으로 국토의 약 11.8%에 불과하지만 인구의 약 49.5% 이상이 살고 있는 지역으로(관계부처합동, 2020) 다양하고 복잡한 환경문제가 일어나고 있는 권역이다. 특히 서울시의 경우 온실가스인벤토리에서 구 단위로 자료를 제공하고

있어 구별 변화 분석이 가능하다.

한강수도권역에서 가장 10년간 가장 높은 비율로 순배출량이 증가한 지역은 경기 연천, 가평, 양평으로 분석되었다. 세 지역이 2010년 기준 대비하여 순배출량이 -에서 +로 전환되었으며, 인천 강화군, 동두천시, 포천시, 하남시 등 최근 10년 이내 주거타운으로서 중요도가 높아진 지역이 그 뒤를 이었다. 순배출량 절대값 자체가 가장 높은 지역은 인천 옹진군, 인천서구 등 기존의 공단이 많은 지역이 분석되었다. 인천 동구, 서울 중구, 용산구, 동대문구, 인천의 미추홀구 등은 노후건물의 비율 및 인구밀도, 토지이용률이 높아 총합이 높게 분석되었다.

〈표 4〉 한강수도권

기준 순위	구분	총합	평균증감률 (10~21)	순배출량	GRDP /인구	GFAA 비율	인구밀도	지방 소멸지수	토지이용
1	인천동구	41	3	1	3	4	3	4	26
2	서울중구	40	2	1	5	5	4	3	25
3	용산구	39	4	1	2	5	4	3	22
4	동대문구	39	2	1	1	4	5	3	24
5	미추홀구	39	2	1	1	4	4	3	25
6	양천구	38	2	1	1	4	5	3	23
7	구로구	38	2	1	2	3	5	3	24
8	영등포구	38	2	1	4	4	4	2	25
9	송파구	37	2	1	2	5	4	3	22
10	부평구	37	2	1	1	4	4	3	23
11	부천시	37	2	2	1	3	4	3	23
12	성동구	36	2	1	2	3	4	3	23
13	마포구	36	4	2	2	3	4	2	21
14	동작구	36	2	1	1	3	5	3	22
15	광진구	35	2	1	1	4	5	2	21
16	서대문구	35	2	1	1	4	4	3	21
17	금천구	35	2	1	3	3	5	3	21
18	강남구	35	2	1	4	4	4	3	21
19	강동구	35	2	1	1	5	4	3	20

2) 태백 강원권

태백 강원권은 약 20,569km²으로 넓은 면적을 가지고 있지만 면적 대비 인구가 적고, 일부 도시지역만을 중심으로 인구가 집중되어 있는 권역이다. 산림환경이 우수하여 상대적으로 온실가스 저감효과가 큰 지역이지만, 인구 소멸 및 노후 건축물 등의 문제를 가지고 있다(관계부처합동, 2020). 태백 강원권에서 10년간 가장 높은 비율로 순배출량이 증가한 지역은 철원군, 춘천시 순으로 분석되었다. 2010년 기준 대비하여 철원군의 경우 순배출량에서 +로 전환되었으며, 그 뒤를 춘천시, 동해시, 원주시 등 대표 도시지역이 그 뒤를 이었다. 순배출량 절대값의 경우 동해시 삼척시 강릉시 등 순으로 높았지만, 수도권 및 국토 전체적 경향과 비교하여 모두 3등급 밑으로 순배출량이 비교적 적은 권역으로 분석되었다. 특히 홍천, 횡성, 인제, 양양 등은 2010년 대비 순배출량에서 +에서 -로 전환되었다.

〈표 5〉 태백강원권

기준 순위	총합		평균증감 (10-21)	순배출량	GRDP /인구	GFAA 비율	인구밀도	지방 소멸지수	토지이용
1	동해시	26	4	3	2	3	1	4	11
2	원주시	24	4	1	1	2	1	3	13
3	삼척시	24	4	3	2	3	1	4	9
4	철원군	24	6	1	2	2	1	4	10
5	양구군	24	4	1	2	2	1	4	12
6	속초시	23	2	1	1	4	1	4	11
7	횡성군	23	0	1	2	3	1	5	13
8	고성군	23	2	1	2	4	1	4	11
9	강릉시	22	2	2	1	3	1	4	10
10	춘천시	21	5	1	1	2	1	3	9
11	태백시	20	2	1	1	5	1	4	7
12	영월군	20	2	2	1	2	1	5	8
13	화천군	20	4	1	2	2	1	4	8
14	평창군	19	1	1	1	2	1	5	9
15	양양군	18	0	1	2	2	1	4	10
16	정선군	17	1	1	1	2	1	5	7
17	인제군	16	0	1	2	1	1	4	9
18	홍천군	15	0	1	2	2	1	4	7

3) 금강 충청권

금강 충청권은 중앙에 위치하는 지역으로 기존 화력발전소 등의 문제가 및 농촌지역 노후화, 세종 청주시 등의 개발 관련된 이슈가 있다(관계부처합동, 2020). 증감율의 경우 충북 보은군, 옥천군, 괴산군이 과거 2010년 대비 하여 순배출량이 -에서 +로 전환되었으며, 청양군, 영동군, 충주시, 제천시, 세종시 순서로 높게 나타났다. 순배출량의 경우 화력발전소가 많은 충남 당진, 충남 서산시, 충남 태안군 충남 보령시 순으로 높은 순배출량을 나타내었다. 대전중구, 충북 단양군, 대전동구, 부여군, 옥천군, 보은군 등이 노후화된 건축물의 비율이 높게 분석되었으며, 지역내 총생산의 경우 충남 서산, 충북 진천, 충남 아산시 순으로 높은 경향을 보였다.

〈표 6〉 금강충청권

기준 순위	총합		평균증감률 (10~21)	순배출량	GRDP /인구	GFAA 비율	인구밀도	지방 소멸지수	토지 이용
1	보은군	30	6	1	2	4	1	5	13
2	음성군	29	4	1	3	2	1	4	17
3	당진시	29	2	5	3	1	1	4	16
4	대전중구	28	2	1	1	5	2	3	15
5	서산시	28	4	4	4	2	1	4	13
6	서천군	28	2	2	2	3	1	5	15
7	태안군	28	3	4	2	2	1	5	13
8	대전서구	26	4	1	1	2	2	3	14
9	대덕구	26	2	1	2	3	2	3	15
10	괴산군	26	6	1	1	3	1	5	10
11	보령시	26	2	4	2	2	1	4	13
12	아산시	26	2	2	4	1	1	3	17
13	세종	25	5	2	2	1	1	2	14
14	충주시	25	5	1	2	3	1	4	11
15	옥천군	25	6	1	1	4	1	5	8
16	진천군	25	4	1	4	2	1	3	14
17	단양군	25	4	3	2	5	1	5	7
18	증평군	25	4	1	1	3	1	3	13
19	청양군	25	5	1	2	3	1	5	10
20	예산군	25	4	1	2	3	1	4	12
21	제천시	23	5	2	1	3	1	4	8
22	청주시	23	4	2	2	2	1	3	11

4) 낙동강 영남권

낙동강 영남권은 부산, 대구, 울산 등 3개의 광역시를 포함하는 권역으로 우리나라 양대 중심거점 지역이다(관계부처합동, 2020). 최대 항구인 부산을 비롯하여, 창원, 구미 등 산업 기반의 도심이 있지만 경북 경남의 내륙지역의 경우 고령화 및 지역쇠퇴로 지역에 따른 특성이 다양한 권역이다. 증감율의 경우 경북 안동시, 문경시, 군위군, 고령군, 성주군, 예천군, 밀양시, 남해군, 산청군, 함양군 등이 과거 2010년 대비하여 순배출량이 -에서 +로 전환되었으며, 경남 합천군, 의령군, 청도군, 창녕군, 영천시, 김천시 등의 순서로 높게 나타났다. 순배출량의 경우 기존 대도시 및 산업도시로 개발된 울산 울주군, 경북 포항시, 울산남구 순으로 높은 순배출량을 나타내었다. 종합점수위 경우 부산, 대구, 울산 등 대도심을 중심으로 높게 분석되었다.

〈표 7〉 낙동강영남권

기준 순위	총합	평균증감률 (10~21)	순배출량	GRDP /인구	GFAA 비율	인구밀도	지방 소멸지수	토지이용	
1	부산중구	41	2	1	3	5	5	4	24
2	대구중구	40	2	1	3	5	4	3	25
3	대구서구	40	2	1	1	5	3	4	25
4	부산동구	38	2	1	2	5	3	4	23
5	울산남구	37	3	4	3	3	2	3	22
6	연제구	36	3	1	1	4	4	3	21
7	동래구	35	2	1	1	4	4	3	21
8	수영구	35	2	1	1	5	4	3	20
9	부산진구	34	2	1	1	4	4	3	20
10	부산남구	34	3	1	1	3	3	4	20
11	사하구	33	2	2	1	4	3	4	18
12	대구남구	33	2	1	1	5	3	4	18
13	부산서구	32	2	1	1	5	3	4	17
14	달서구	32	2	1	1	2	3	3	21
15	울산동구	32	3	1	2	4	2	3	19
16	영도구	31	1	1	1	4	3	4	18
17	사상구	31	2	1	1	4	2	3	19
18	히동군	31	2	4	2	4	1	5	15
19	울산중구	29	3	1	1	3	2	3	17
20	포항시	29	4	4	2	3	1	4	13
21	예천군	29	6	1	1	3	1	4	14

5) 영산강 호남권

영산강 호남권은 1차산업 중심으로 신규 개발지역의 지속적 확대와 기존 도심지역의 쇠퇴가 동시에 일어나고 있는 지역이다(관계부처합동, 2020). 증감율의 경우 전북 진안군이 과거 2010년 대비하여 순배출량이 -에서 +로 전환되었으며, 전북 순창군, 전북 임실군, 전북 군산시, 전북 완주군, 전남 여수시, 전남 순천시, 전남 곡성군 등의 순서로 높게 나타났다. 순배출량의 경우 기존 대도시 및 산업도시로 개발된 전남 여수시, 전남 광양시, 전북 군산시, 광주 광산구 순으로 높은 순배출량을 나타내었다.

영산강 호남권의 종합점수의 경우 여수시, 광주시, 광양시, 군산시, 익산시, 목포시 등 주요 공업도시가 높게 나타났다. 그 다음으로 노후화된건물 비율이 높고 지방소멸 위기가 높은 해남군, 완도군 등 지방소멸 위기가 높은 지역의 총합이 높게 나타났다.

〈표 8〉 영산강호남권

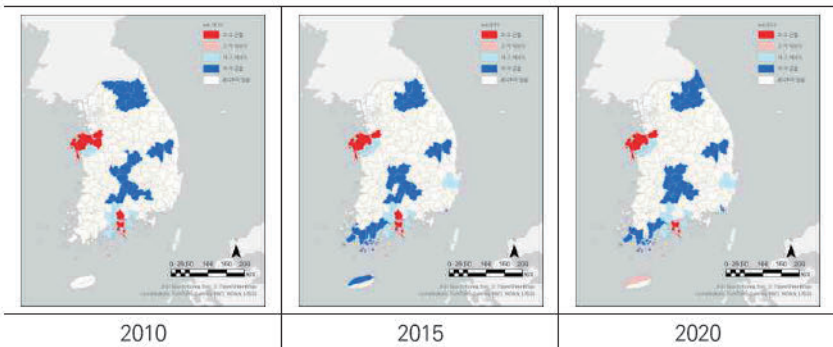
기준 순위	총합		평균증감률 (10~21)	순배출량	GRDP /인구	GFAA 비율	인구밀도	지방 소멸지수	토지이용
1	여수시	33	4	5	4	4	1	4	15
2	광주서구	31	3	1	2	2	2	3	20
3	광양시	31	4	5	3	4	1	3	14
4	군산시	30	4	3	2	2	1	4	16
5	광주남구	29	4	1	1	3	2	3	16
6	전주시	29	2	2	1	3	2	3	17
7	익산시	29	3	2	1	3	1	4	16
8	목포시	29	3	1	1	3	2	3	17
9	광주북구	27	2	1	1	3	2	3	16
10	해남군	26	2	1	1	3	1	5	14
11	광주동구	25	2	1	2	4	2	3	13
12	김제시	25	2	1	2	3	1	4	14
13	완도군	25	4	1	1	5	1	5	9
14	광산구	24	3	2	2	1	1	2	15
15	나주시	24	3	1	2	3	1	4	12
16	강진군	24	2	1	1	5	1	5	10
17	영암군	24	2	1	3	2	1	4	14
18	함평군	24	4	1	1	2	1	5	11

2. 온실가스 공간적 군집패턴 분석

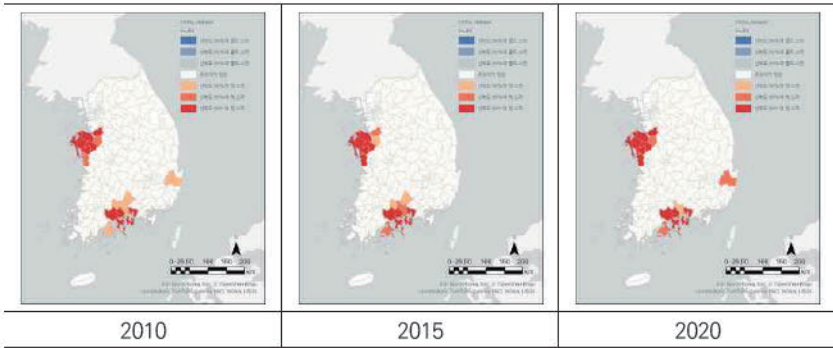
2010년부터 5년 단위로 국지적 Moran's I 분석을 통해 상대적으로 많은 순배출량을 가지고 있는 지역을 도출하였다. 2010년 유의한 HH 밀집지역은 충청북도 인근(평택시, 아산시, 당진시, 서산시, 태안군) 5개 도시와 전남(광양시, 여수시) 총 7개 시군으로 2개 일대에 집중된 것으로 나타났다. LL 지역의 경우 총 17개 시군구로 주로 강원도 일대(철원군, 화천군, 양구군, 춘천시, 인제군, 홍천군)와 경상도(상주시, 거창군, 합천군, 창녕군, 함양군, 안동시, 영양군), 전라남도 내륙지역(무주군, 남원시) 충청도 내륙지역(영동군, 금산군)으로 분석되었다.

2015년의 경우도 2010과 비슷한 양상으로 나타난다. HH 지역의 경우 총 6개 시군으로 당진, 서산 인근과 전남의 2개 일대에 집중되었다. 2010년과 비교했을 때 아산시가 제외되었다. LL 지역의 경우는 2010년과 비교적 다르게 나타난다. 전남지역의 진도군, 해남군, 강진군, 장흥군, 보성군 등이 새로 LL 지역을 분류되었으며, 강원도의 화천, 철원군 등이 제외되었다. 2020년에도 HH지역(5개 시군구) 및 LL(28개 시군구)로 일부 개수의 차이는 있지만, 명확하게 순배출량이 높은 지역은 충청북도와 남쪽 여수, 광양 인근으로, 낮은 지역은 강원도 경상도 내륙지역, 전남지역으로 공간적으로 밀집되어 분포한다는 것을 알 수 있다.

〈표 9〉 국지적 Moran's I 분석 결과



〈표 10〉 Getis-Ord G_i^* 분석 결과



핫스팟 결과는 국지적 Moran's I와 유사한 경향을 보여주고 있다. G_i^* z-score 기준 95% 이상의 신뢰도로 핫스팟으로 분류된 공간을 보면 경기 남부 및 충청북도 (8개소)와 전라남도의(7개소) 등으로, 개수의 차이는 있지만 서쪽과 남부지역의 대상지가 지속적으로 순배출량이 높은 지역임을 나타낸다. 추가로 2020년 경주시 또한 높은 지역으로 분석되었다.

3. 온실가스 배출 영향 변수를 고려한 공간환경 전략 제안

기구축한 동태변수 및 상태 변수를 활용하여 핫스팟과 공간적 군집패턴 분석을 통한 결과와 통합적으로 분석하였다. 이를 통해 탄소 우선관리구역 설정 시 사회경제적 측면을 통합적으로 고려하였다. 순배출량이 높은 지역 뿐만 아니라, 정책적으로 효과가 큰지, 더 많은 사람에게 도움이 되는지를 고려하고자 하였다. 이에 본 연구에서는 시급성(순배출량 등, 연평균 증감률, 녹지비율 낮음 등), 효율성(고밀도지역, GRDP 높은 지역, 도시, 주거, 상업, 공업 비율이 높은 등), 필요성(노후화건물면적, 지방소멸 고위험지역 등)을 종합하였다.

총 12개의 변수를 모두 종합했을 때와 효율성 평가값의 경우 서울 중구, 대구 중구, 서울 동대문구, 양천구, 부산 중구, 인천 미추홀구 등 한강수도권 및 대도시 중심의 공간이 가장 우선 지역으로 선정되었다. 이는 인구밀도, 도시

화, GRDP 등 시급성과 효율성 측면에서 국내 대도시가 다른 지역과는 분명한 차별성을 가지고 있기 때문이다. 시급성을 중심으로 분석했을 때는 인천 용진군, 울산 남구, 전남 여수, 광양, 충남 당진 등 주요 공업단지가 위치한 지역으로, 순배출량이 높은 지역이 선정되었다. 필요성 측면에서는 부산 중구, 대구 서구, 부산 동구 등의 건물의 노후도가 높은 구도심 지역이 높게 분석되었다. 또한 일부 지방소멸 고위험지역인 동시에 노후화 건물 면적 비율이 높은 전남 완도, 강진, 충남 보성 등이 필요성이 높은 지역으로 분석되었다.

〈표 11〉 사회경제적 변수를 고려한 지자체 평가 현황

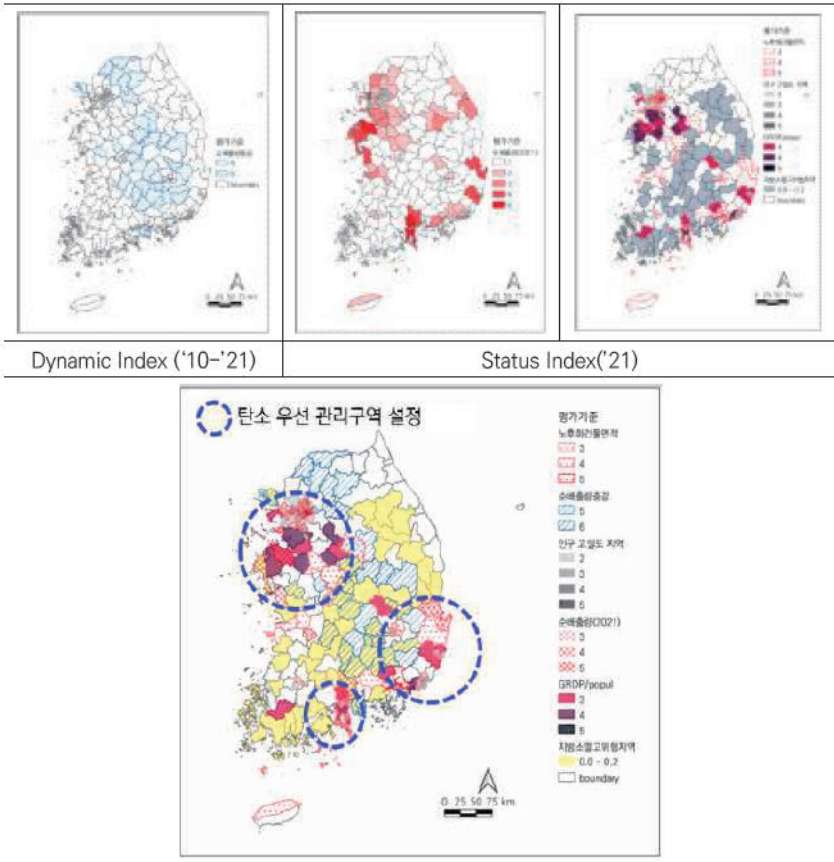
순위 \ 기준	시급	효율	필요
1	용진군	서울중구	완도군
2	울산남구	대구중구	강진군
3	여수시	동대문구	보성군
4	광양시	양천구	신안군
5	당진시	부산중구	봉화군
6	하동군	미추홀구	진도군
7	인천동구	구로구	의성군
8	인천서구	영등포구	단양군
9	평택시	용산구	부산중구
10	보은군	동작구	대구서구
11	군산시	송파구	부산동구
12	음성군	광진구	대구남구
13	포항시	대구서구	부산서구
14	서산시	부천시	상주시
15	성주군	마포구	청송군
16	파주시	성동구	하동군
17	연수구	연제구	보은군
18	부산강서구	강남구	부여군
19	태안군	동래구	곡성군
20	산청군	강동구	부안군

시급성이 높은 지역의 경우는 순배출량이 높고, 연평균 증감률이 실제로 높으며 배출량을 저감할 녹지 비율이 낮은 공간이기 때문에 탄소 배출 원인

에 대한 적극적인 대책과 탄소 배출 저감 방안이 필요하다. 효율성이 높은 지역의 경우 현재 대규모 공장 등이 없어 순배출량 절대값은 작지만, 도시화가 높은 지역으로 탄소중립 노력이 필요할 뿐만 아니라 생태계서비스를 늘리기 위한 정책 방안 설정이 필요하다. 필요성이 높은 지역의 경우 탄소배출의 주요 요인인 노후화건물면적과 사회적 측면에서 지방소멸이 이루어지는 공간으로 노후화되고 소멸되는 공간에 대한 대책이 필요하며, 비교적 공간적 여유가 많으므로 식재 및 산림 확대 등 토지이용변화를 적극적으로 활용할 필요가 있다.

현재 제5차 국가환경종합계획 공간환경전략에서는 기후탄력성 개선구역(Zone)을 공간전략으로 제시하여 기후변화에 따른 취약성이 높은 지역, 재난 재해 관리 지역, 한계취락 밀집 지역, 유해오염 물질 등의 세부 항목을 통해 전략을 수립하도록 하고 있다. 하지만 최근 지역 정책 수립의 관점에서 보다 세분화된 단위의 공간전략이 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 순배출량의 군집분석의 결과인 충청북도와 남쪽 여수, 광양 HH 지역과, 동태분석 및 사회경제적 분석 결과를 종합하여 3 곳의 탄소우선관리구역 설정 등을 제안하고자 한다(〈표 12〉). 충청·수도권, 전라남도 남부 구역, 부산·대구·울산 구역 등 세 구역을 탄소우선관리구역으로 제안하였다.

〈표 12〉 탄소우선관리구역 제안



IV. 결론

본 연구는 온실가스 GIR 자료를 바탕으로 10년 이상의 시계열 데이터를 활용하여 온실가스 배출의 공간적 군집분석 통해 핫스팟 지역을 도출하였다. 또한 사회경제적 자료를 함께 고려하여 증첩적으로 탄소 우선 관리 계획을 제안하고자 하였다.

온실가스의 주요 배출지역으로 경기도 남부 및 충청북도(8개소)와 전라남도(7개소) 등이 선정되었으며, 5년 단위로 국지적 Moran's I 분석 기준

95% 이상의 신뢰도 기반의 핫스팟 분석 결과 간의 개수의 차이는 있지만 서쪽과 남부지역의 대상지가 지속적으로 순배출량인 높은 지역임으로 분석되었다. 사회경제적 조건을 포함하여 우선순위 지역을 도출하였을 때는 서울 구로구, 양천구, 인천의 미추홀구 및 안양시, 수원시 등 대도시 중심의 대상지에 탄소 우선 지역 설정이 필요한 것으로 분석되었다. 이 결과를 종합하여 3곳의 탄소우선관리구역 설정 등을 제안하였다.

본 연구의 결과는 탄소우선관리구역이 어느 곳을 중심으로 이루어져야 하는지, 그 필요성과 시급성, 효율성을 제시하였다. 차후 정책 활용성 측면에서 기초자료로 활용할 수 있을 것이다. 하지만 주요 활용 데이터인 온실가스 인벤토리 자료의 경우 광역시 및 특별시는 구단위에서 자료가 제공되고 있으나, 다른 자치구는 시단위로 제공되고 있어 공간적 해상도에서 차이가 있었다. 이 때문에 주요 광역시 등이 통계적으로 핫스팟으로 도출되지 않는 한계점이 있었다. 또한 순배출량의 경우 에너지 사용량을 바탕으로 계산되기 때문에, 비교적 공장과 산업단지가 많은 지자체의 점수가 높게 나오는 경향성이 있었다. 차후 다른 권역 간 일치된 데이터 해상도를 활용하여 보다 세분화된 사회경제적 조건을 고려하면 정책적 활용성 측면에서 더욱 의미 있는 연구가 될 것이라고 예상된다.

■ 참고문헌 ■

- 고재경·예민지, 2022, 광역자치단체 온실가스 배출량과 경제성장의 탈동조화 분석, 「지방행정연구」 제36권 제1호(통권 128호) 003~032.
- 고영주·조기환, 2020, 핫스팟 분석을 이용한 도시열섬 취약지 특성 분석- 전주시를 대상으로, 「한국조경학회지」 48(5): 67~79.
- 관계부처합동, 2020, 「제 5차 국가환경종합계획」.
- 국토연구원, 2024, 국토·도시 부문 온실가스 감축지표 선정 및 활용방안, 국토정책 Brief 958.
- 김치백·신동우·한주연·황영규, 2014, 공동주택 재건축과 리모델링의 친환경성 비교분석 - CO2 배출량 분석을 중심으로 -, 「한국건설관리학회논문집」, 15(1), 87-100.
- 남궁근 외, 2010, 에너지 소비특성에 따른 도시유형별 정책방향 연구, 「국토계획」,

- 45(1), 대한국토·도시계획학회, pp.237-250.
- 노승철·이희연, 2013, 가구 부문의 에너지 소비량에 영향을 미치는 요인 분석, 「국토계획」, 48(2): 295~ 312.
- 박진경 외, 2022, 탄소중립을 향한 지방자치단체 정책추진 강화방안, 한국지방행정연구원.
- 박창석 외, 2022, 「지역단위 탄소중립 이행 전략」, 한국환경연구원.
- 양혜미·송재민, (2017). “에너지 소비특성에 따른 도시 유형화 및 유형별 특성 분석”. 「한국지역개발학회지」, 29(3): 113-133.
- 오상원·박지용·정주철, 2023, 지역별 온실가스 배출량에 따른 지역유형화 및 특성분석 연구. 「환경정책」, 31(1), 1-30.
- 오수미, 2022, 기초자치단체의 기후변화대응정책모의실험-침상·소비·산업도시사례를 중심으로, 「한국정책학회보」, 제 31권 2호: 201-243.
- 유성필·황지욱, 2015, “지역별 도시특성이 이산화탄소 배출에 미치는 영향.” 「국토계획」, 50(2), pp.197-210.
- 이건원, 2017, 도시 유형별 도시특성요소와 온실가스 배출량 간의 관계 분석. 「한국산학기술학회논문지」, 18(11), 62-71.
- 이상엽·양유경·김소희, 2022, 「국가 탄소중립 추진전략 이행기반 강화 및 활성화 방안」, 한국환경연구원.
- 장남정·라영·양술·장진혁·최효진, 2023, 기초지자체 온실가스 배출특성 분석 및 탄소중립 전략 연구, 전북연구원.
- 정민선·조희선·변병설, 2015, 도시특성요소가 온실가스 배출에 미치는 영향: 수도권 지역을 중심으로, 「국토지리학회지」, 49(3): 297~306.
- 조항훈·김홍순, 2023. 도시특성이 건축물의 탄소배출에 미치는 영향에 관한 연구: 서울시 424개 행정동에 대한 공간회귀분석의 적용. LHI Journal, 14(3), 77-92.
- 지방시대위원회, 2023, 「제 1차 지방시대 종합계획 2023-2027」.
- 최영국 외, 2008, 기후변화에 대응한 지속가능한 국토관리 전략 (I): 지역별 온실가스 인벤토리 구축 및 지역특성 분석. 국토연구원.
- Anselin, L., 1995, Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, 27: 93-115.
- Getis, A. and J. K. Ord, 1992. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis* 24(3): 189-206.
- Pohlan, Jörg & Strote, Jenni, 2017, Cities under observation: Social monitoring in integrated neighbourhood development in Hamburg, *Procedia Computer Science*, Volume 112, Pages 2426-2434.
- Kuramochi, T., Roelfsema, M., Hsu, A., Lui, S., Weinfurter, A., Chan, S., … Höhne, N., 2020, Beyond National Climate Action: the Impact of Region, City, and Business Commitments on Global Greenhouse Gas Emissions. *Climate*

Policy, 20(3): 275-291.

Nicholls, J. et al., 214, Evaluating Renewable Energy Policy: A Review of Criteria and Indicators for Assessment, IRENA.

Ren H, Shang. Y, Zhang. S., 2020, Measuring the spatiotemporal variations of vegetation net primary productivity in Inner Mongolia using spatial autocorrelation, Ecological Indicators Volume 112, 106108.

온실가스종합정보센터, 2022, 2023년 지역 온실가스 배출량(2010-2021) 시범산정 결과 <https://www.gir.go.kr/home/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=36&boardId=61&boardMasterId=2&boardCategoryId>, 검색일: 24년 3월 2일.

통계청, 2024, (센서스경제) 행정동경제, https://www.vworld.kr/dtmk/dtmk_ntads_s002.do?dsId=30017, 검색일: 24년 5월 2일.

손희정: 서울대학교에서 공학 박사학위를 취득하고, 현재 한국환경연구원 환경계획연구실에서 초빙연구원으로 재직 중이다. 생태계획, 자연환경복원, 공간환경계획, 환경유전자를 활용한 중 모니터링 등의 연구를 수행하고 있다(hjsohn@kei.re.kr).

이길상: 서울대학교에서 협동과정 조경학 박사과정을 수료하였으며, 현재 한국환경연구원 환경계획연구실에서 연구원으로 재직 중이다. 자연환경복원, 환경계획 및 공간환경계획, 토지이용 기반의 온실가스 감축 등의 연구를 수행하고 있다(kslee@kei.re.kr).

손승우: 서울대학교에서 공학 박사학위를 취득하고 현재 한국환경연구원 환경계획연구실에서 부연구위원으로 재직 중이다. 환경계획 수립, 녹색복원, AI를 이용한 생태계 모니터링 기술 개발, 정보시스템 개발 및 관리 등 ICT 기반의 연구를 수행하고 있다(swson@kei.re.kr).

투 고 일: 2024년 06월 09일
심 사 일: 2024년 06월 17일
게재확정일: 2024년 06월 30일