

Research Paper

도시공간구조의 단핵-다핵 변화와 온실가스 배출 간의 동태적 관계 분석

오상원 · 서세교 · 정주철

부산대학교 도시공학과

Urban Spatial Structure Transition from Monocentric to Polycentric Form and Its Dynamic Relationship with Greenhouse Gas Emissions

SangWon Oh · SeGyo Seo · JuChul Jung

Department of Urban Planning & Engineering, Pusan National University

요약: 본 연구는 도시공간구조의 중심성 변화가 온실가스 배출에 미치는 영향을 실증적으로 규명하고자 하였다. 경기도 20개 시군구를 대상으로 2010년과 2020년 간의 중심성 분포 변화를 통해 단핵에서 다핵 구조로의 전환 정도를 정량화하였으며, 이를 Scope 1 직접배출량 변화와 비교·분석하였다. 중심성은 종사자 수 분포를 기반으로 공간자기상관 지표(LISA, Getis-Ord G, G*, Geary's C)를 활용해 측정하였고, 분석 방법으로는 공간적 상호작용과 시계열 효과를 반영한 공간패널회귀모형을 적용하였다. 또한 지역별 반응의 이질성을 확인하기 위해 산점도 분석을 병행하였다. 분석 결과, 다핵성이 증가할수록 온실가스 배출도 유의하게 증가하는 경향이 나타났으며, 일부 지역에서는 중심성이 강화되었음에도 배출량이 감소하는 사례도 확인되었다. 이는 도시 내 중심성 구조의 변화가 모든 지역에서 동일한 환경효과를 유발하지 않음을 의미하며, 교통 인프라와 산업 입지 등 도시 맥락이 중요한 조절 변수로 작용함을 시사한다. 본 연구는 도시공간구조의 중심성 변화를 시공간적으로 통합 분석함으로써, 지역 맞춤형 탄소 감축 전략 수립의 필요성을 제언한다.

주요어: 공간자기상관, 공간패널회귀분석, 도시중심성변화, 다핵화

Abstract: This study empirically investigates the impact of changes in urban spatial centrality on greenhouse gas (GHG) emissions. Focusing on 20 cities and districts (si/gun/gu) within Gyeonggi Province, the study quantifies the shift from monocentric to polycentric structures by analyzing the distributional changes in centrality between 2010 and 2020. Centrality is measured using spatial autocorrelation indices-LISA, Getis-Ord G, G*, and Geary's C-based on the distribution of employment. A spatial panel regression model, which accounts for both spatial interactions and temporal dynamics, is employed as the main analytical framework. In addition, scatterplot analyses are conducted to examine regional heterogeneity in responses.

First Author: SangWon Oh, E-mail: ohssang1006@naver.com, ORCID: 0000-0001-7170-2745

Corresponding Author: JuChul Jung, Tel: +82-51-510-3521, E-mail: jchung@pusan.ac.kr, ORCID: 0000-0003-2152-2345

Co-Author: SeGyo Seo, E-mail: plan_ssg@pusan.ac.kr, ORCID: 0009-0002-5240-7737

Received: 10 March, 2025. Revised: 12 May, 2025. Accepted: 1 June, 2025.

The results indicate that a higher degree of polycentricity is generally associated with an increase in Scope 1 direct GHG emissions. However, certain regions show a decline in emissions despite strengthened centrality, suggesting that changes in urban spatial structure do not yield uniform environmental effects across all areas. This highlights the contextual role of factors such as transportation infrastructure and industrial location as key moderating variables. By integrating spatial and temporal perspectives in the analysis of urban centrality, this study underscores the need for region-specific carbon reduction strategies tailored to urban structural dynamics.

Keywords: spatial autocorrelation, spatial panel regression, urban centrality transformation, polycentric transition

I. 서론

20세기 중반 이후 산업화와 도시화의 급속한 확산은 기후변화와 온실가스 배출 증가 등 심각한 환경문제를 야기하였으며(UNEP, 2019), 이는 성장 중심 도시발전 모델의 한계를 지적하고 지속가능성과 환경 고려의 필요성을 부각시켰다(Meadows et al., 1972). 이러한 문제의식은 브룬트란트 보고서(1987)와 유엔 리우 회의(1992)를 통해 국제적으로 제도화되었고, 지속가능한 발전 개념은 이후 온실가스 감축과 기후변화 대응을 중심 목표로 통합되었다(IPCC, 2014; UNDESA, 2016). 이에 따라 IPCC(2023)는 “지속가능한 발전은 온실가스 감축 없이는 실현될 수 없다”고 명확히 언급하였다. 또한 Newman & Kenworthy(2015)는 도시의 공간구조를 이해하는 것이 온실가스를 효과적으로 줄일 수 있는 전략을 파악하는 데 근본적으로 중요하다고 강조하였다. 이러한 논의는 도시의 공간구조가 기후변화 대응 전략의 핵심 변수로 작용함을 시사한다. 이는 도시의 구조 변화가 에너지 소비 증가, 토지이용 방식의 확산, 교통 수요 확대 등을 통해 온실가스 배출에 구조적으로 영향을 미치고 있기 때문이다(Newman & Kenworthy, 1989). 따라서 도시공간구조를 이해하고 그 변화 양상을 분석하는 일은 지속가능한 발전을 위한 온실가스 감축 정책을 실질적으로 수립하기 위한 전제조건이라 할 수 있으며(Seto et al., 2014), 이는 도시공간구조와 온실가스 배출 간의 연계성에 대한 실증적 분석의 필요성을 강조한다(Newman & Kenworthy, 1989; Chen et al., 2023).

그러므로 도시공간구조의 변화가 온실가스 배출에 미치는 차별적 영향을 분석하기 위해서는, 도시공간

구조의 변화를 정량적으로 식별하고 해석하는 것이 선행되어야 한다(Seto et al., 2014; Chen et al., 2023). 도시공간구조를 정량적으로 식별하기 위한 대표적 지표로는 종사자 수 기반의 고용 밀도가 활용되어 왔다(Gordon et al., 1986; McMillen & McDonald, 1998). 이는 도시경제학 및 중심지 이론에 따르면, 고용이 집중된 지역은 산업, 상업, 서비스 기능이 밀집되어 교통 수요를 유발하는 도시 기능의 중심지로 간주되기 때문이다(Giuliano & Small, 1991). 따라서 종사자 수는 도시의 기능적 집중도와 경제활동의 집적성을 반영하는 중심성 대리변수로서 타당성을 가진다. 실제로 다수의 기존 연구들은 이러한 고용 밀도 분포를 기반으로 도시를 단핵 구조(monocentric)와 다핵 구조(polycentric)로 구분하고 있으며(Gordon & Richardson, 1996; Zhang & Li, 2022), 구조 유형에 따라 온실가스 배출에 미치는 영향이 상이하게 나타나는 경향을 보고하였다(Makido et al., 2012). 그러나 도시공간구조와 배출 간의 관계에 대한 기존 연구들은 분석 단위의 차이, 중심성 식별 방식의 다양성, 공간적 상호작용의 미반영 등으로 인해 결과가 일관되지 않다는 한계를 가진다(Redfearn, 2007; Choo et al., 2024). 특히 단핵 구조를 전제로 한 전통적 모수적 접근은 다핵화 경향을 포착하기 어렵고(Alonso, 1964; Fujita, 1989), 비모수적 방법 역시 인접 지역 간의 공간적 의존성(spatial dependence)을 고려하지 못하는 한계가 있다. 이에 따라 최근에는 Moran's I, Getis-Ord G, Local Indicators of Spatial Association (LISA) 등과 같은 공간 자기상관 지표를 도입하여 중심지의 클러스터링과 구조적 연계성을 실증적으로 분석하려는 시도가 확대되고 있다(Anselin, 1995; Rey &

Anselin, 2010). 이에 본 연구는 도시공간구조를 단핵 구조와 다핵 구조를 식별하고, 이를 공간 자기상관 지표(Local Moran's I, Getis-Ord G, G*)를 통해 실증적으로 식별한 뒤, 온실가스 배출량과의 관계를 공간패널 회귀분석을 통해 분석하고자 한다. 특히 2010년과 2020년을 기준으로 도시공간구조의 변화 양상을 계량적으로 추적함으로써, 도시공간구조의 시계열적 변화가 온실가스 배출에 미치는 영향을 규명하는 데 목적이 있다. 이를 통해 본 연구는 도시공간구조의 다핵화가 온실가스 배출 감축에 기여하는가에 대한 실증적 근거를 제공하고, 지속가능한 도시공간계획 수립을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 선행연구 검토

1. 단핵 및 다핵 구조 측정방법

도시공간구조의 단핵성과 다핵성을 분석하는 데 있어, 중심성의 정의와 이를 계량적으로 식별하는 방식 간의 불일치는 분석 결과의 상이함을 초래하는 핵심 요인으로 지적되어 왔다(Choo et al., 2024). 도시경제학 및 중심지 이론에 따르면, 고용이 집중된 지역은 상업, 산업, 교통 기능이 집적된 도시 기능의 중심지로 간주되며(Giuliano & Small, 1991), 이를 실증적으로 식별하기 위한 대표 변수로 종사자 수 기반의 고용 밀도가 활용되어 왔다(McMillen & McDonald, 1998). 근로자와 종사자는 대부분 유사하게 사용되나 근로자는 임금을 받는 사람만 포함되고 종사자수는 근로자보다 넓은 개념이며, 산업규모, 지역산업구조, 사업체 기반 활동 인구 규모 파악에 적합하다(Statistics Korea, 2023). 대부분의 기존 연구들 역시 종사자 분포를 중심성 판단의 주요 지표로 사용해 단핵 및 다핵 구조를 정량화해 왔다. 그러나 중심성 식별 방법은 연구마다 상이하며, 이는 도시공간구조가 독립된 단일 중심지로만 형성되는 것이 아니라, 인접 지역 간의 기능적 상호작용에 의해 복합적으로 형성되기 때문이다(Fotheringham et al., 2002). 실제로 현대 도시에서는 단핵성과 다핵성이 혼재하거나 지역의 발전단계에 따라 다양한 중심성 패턴이 나타나며(McMillen & Smith, 2003), 단일 중심지 접근만으로는 이러한 복잡성을 포착하기 어렵다

(Gordon & Richardson, 1996). 그럼에도 불구하고 전통적인 모수적 방법론은 중심업무지구를 전제로 한 거리 기반 접근에 머물러 복수 중심지를 포착하는 데 한계를 보이며(Muth, 1969; Mills, 1972), 비모수적 접근 또한 중심지 식별에만 집중되어 인접 지역 간 상호작용을 반영하지 못한다는 비판이 제기되어 왔다(Kanakou et al., 2015). 이러한 한계를 극복하기 위해, 최근에는 Moran's I, LISA, Getis-Ord G, G*, Geyary's C 등 공간자기상관 지표가 도입되어 중심지 간의 상호작용, 응집도, 이질성 등을 정량적으로 식별하는 데 활용되고 있다(Anselin, 1995; Rey & Anselin, 2010). 이들 지표는 지역 간 밀도의 유사성과 군집 패턴을 계량화함으로써, 도시공간구조의 복잡성과 다핵적 경향을 실증적으로 분석할 수 있는 기반을 제공한다. 따라서 본 연구는 기존 중심성 분석의 한계를 보완하고, 종사자 수를 기반으로 한 공간적 자기상관 지표(Local Moran's I, Getis-Ord G 등)**를 활용하여 중심성을 계량적으로 식별하고자 한다.

2. 단핵 및 다핵구조에 따른 온실가스 배출 영향 분석 방법

도시공간구조는 고정된 속성이 아니라, 사회경제적 변화에 따라 시계열적으로 재편되는 동적인 특성을 지니므로 도시공간구조 변화가 온실가스 배출에 미치는 영향 또한 시점에 따라 상이하게 나타날 수 있다(Ye et al., 2022; Li et al., 2024). 따라서 도시공간구조와 온실가스 배출 간의 관계를 정밀하게 분석하기 위해서는 시간적 변화와 공간적 상호작용을 동시에 고려한 공간적 분석틀이 요구된다는 것을 시사한다(Chen et al., 2023). 그러나 기존 연구들은 대부분 단일 시점의 횡단면 자료에 기반하여 회귀분석이나 상관분석에 국한되었으며, 시간적 변화에 도시공간구조의 동태성을 반영하지 못했다는 한계를 지닌다(Zhang et al., 2022). 기존 도시공간구조와 온실가스 배출 영향분석을 실증한 선행연구들을 살펴보면, Ryu et al.(2012)은 2010년 단일년도, 서울시 생활권 25개구 지역범위를 요인분석과 다중회귀 분석을 통해 영향관계를 보았다. Kim et al.(2013)은 2010년 단일년도, 전국 231개 시군구로 범위를 지정하여 군집분석 후 분산분석을 수행하였다.

연구범위에 해당되는 시군구의 단핵 및 다핵 공간구조 측정시 각 행정구역에 포함된 읍·면·동 단위의 종사자 수 데이터를 활용하여 해당 시군구의 중심성 분포 양상을 식별하였다. 이를 통해 각 시군구의 단핵 또는 다핵 구조를 구분하고, 공간구조의 변화를 정량적으로 식별하였다.

시간적 분석 범위는 2010년과 2020년 두 시점으로 설정하였다. 2010년은 제4차 수도권정비계획(2006-2020)의 중반기로, 수도권의 다핵화, 산업기능 분산, 자족기능 강화 등 공간구조 개편 정책이 본격화되기 시작한 시점이다. 해당 시기는 정책적 공간구조 개입이 구조적 변화를 유발하기 시작한 기점으로, 분석 기준의 출발점으로 적합하다.

반면 2020년은 제3차 국가 온실가스 감축 기본계획(2019)의 이행 기반이 가시화되고, 지역 단위 온실가스 통계체계가 안정적으로 구축되기 시작한 시점이다(MOE, 2019). 동시에 이는 코로나19 팬데믹 이전의 마지막 시점으로, 두 시점은 각각 공간구조 개편의 시작기와 정책·통계 체계가 성숙된 시점이라는 점에서 도시기능의 정상 상태에서 공간구조와 배출 간의 관계를 왜곡 없이 실증적으로 분석할 수 있는 조건을 갖추고 있다.

이에 따라 본 연구는 2010년과 2020년 두시점 사이의 도시공간구조 변화가 온실가스 배출에 미친 영향을 비교 분석하였다. 이 분석을 통해 공간구조의 재편이 온실가스 배출에 미치는 구조적 영향을 시계열적으로 검증하고자 하였다.

2. 데이터 설정 및 분석모형

본 연구는 도시공간구조의 변화가 온실가스 배출에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해, 환경부 온실가스종합정보센터에서 제공하는 시군구 단위의 온실가스 직접배출량(Scope 1) 데이터를 종속변수로 활용하였다. 해당 데이터는 교통, 산업, 건물 등 도시 내 활동을 통해 해당 지역 내에서 실제로 발생한 온실가스 배출만을 포함하고 있어, 도시공간구조와 배출 간의 인과관계를 분석하는 데 적합하다(IPCC, 2023).

반면, 간접배출(Scope 2)은 전기 및 열 사용에 따른 배출로서 실질적인 발생지는 지역 외부에 해당하므로,

도시 내 공간구조와의 직접적인 연관성이 낮다. 이에 따라 지역 단위의 공간구조 분석에서는 간접배출을 제외하였다(2050 Carbon Neutrality and Green Growth Commission, 2021). 또한, 1인당 배출량 지표는 인구 규모의 변동에 민감하게 반응하여 도시구조 변화와 온실가스 배출 간의 구조적 관계를 왜곡할 가능성이 있다. 특히, 동일한 공간구조 하에서도 인구수의 변화에 따라 단위당 배출량이 과대 또는 과소 평가될 수 있기 때문에, 도시공간구조 변화에 따른 총량적 배출 효과를 명확히 분석하는 데 한계가 존재한다(Glaeser & Kahn, 2010). 이러한 점을 종합적으로 고려하여, 본 연구는 해당 지역 내에서 실질적으로 발생한 온실가스 총량만을 반영하는 직접배출량을 종속변수로 설정하였다.

독립변수의 경우 선행연구에서 도시공간구조를 파악하기 위해 중심지를 식별하는 종사자수 데이터를 기반으로 공간분석방법론을 활용하여(LISA 지수, Geary's C 지수, Getis-Ord G 및 Getis-Ord G*) 분석을 통해 각 개별값을 사용하였다. 위의 공간분석방법 모두 공간적 자기상관을 측정하기 위한 공간통계 기법이지만, 각 분석 방법이 강조하는 측면과 계산 방식에 차이가 있으므로 차이를 보기 위해 다음 Table 1과 같이 4개의 모델로 구분하여 도시공간구조의 변화를 파악하였다.

LISA(Local Indicators of Spatial Association) 지수는 지역적 수준의 공간 상관관계를 평가하는데 중점을 두는 지수로서, 각 지역 단위에 대한 개별적인 클러스터링 정보를 제공한다(Anselin, 1995). Geary's C 지수의 경우 공간적 불연속성을 강조하여 Moran's I와 상보적인 역할을 수행하며, 인접 관측치 간의 차이를 중점적으로 분석하므로 공간적 경계나 변화를 탐지하는 데 유용하나 작은 값의 분포에서 민감도가 낮을 수 있다(Geary, 1954). Getis-Ord G 지수는 특정 값이 높은 지역이 주변 지역과 함께 집중되는 경향, 즉 핫스팟(hot spot) 또는 콜드스팟(cold spot)을 식별하는 데 효과적이다(Getis & Ord, 1992). 이는 공간적 자기상관을 정밀히 측정하기보다는 값의 공간적 집적 현상(concentration)을 강조하는 방식이다. 이에 비해 Getis-Ord G* 지수는 분석 단위를 포함하여 공간 집중도를 측정하며, 보다 정교한 중심지 구분과 클러스터 경계 식별이 가능하다는 장점을 지니지만 주변 지역의 영향

Table 1. Formula for each model

Model	Index name	Formula	
Model 1	Lisa coefficient Weight value	$I_i = z_i \sum_j w_{ij} z_j$ $z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$ Values of a standardized variable w_{ij} : Space weighting of area i and area J (Eupmyeondong unit) \bar{x} : Average value for the relevant municipal variables σ : Standard deviation of a variable	(2)
Model 2	getis ord G Weight value	$G = \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} x_i x_j}{\sum_i \sum_j x_i x_j}$ $x_i x_j$: Average value for the relevant municipal variables (Eupmyeondong unit) w_{ij} : space weight of region i and region ' j ' (Eupmyeondong unit)	(3)
Model 3	getis ord Gi* Weight value	$G_i^* = \frac{\sum_j w_{ij} x_j}{\sum_j x_j}$ x_j : value for the relevant municipal variables (Eupmyeondong unit) w_{ij} : space weight of region i and region ' j ' (Eupmyeondong unit)	(4)
Model 4	Geary coefficient Weight value	$G = \frac{(n-1) \sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - x_j)^2}{2S \sum_i (x_i - \bar{x})^2}$ w_{ij} : space weight of region i and region ' j ' (Eupmyeondong unit) $S = \sum_i \sum_j w_{ij}$: Sum of space weights	(5)

에 민감하게 반응하여 왜곡된 결과가 도출되는 잠재적 한계도 존재한다(Ord & Getis, 1995).

이들 공간분석 기법은 모두 지역을 핫스팟과 콜드스팟으로 구분하는 형태로 결과를 도출하며, 이를 통해 도시공간구조의 중심성과 집적 양상을 시각화할 수 있다.

하지만 다핵적 도시구조는 기존의 단핵 중심 모델과 달리, 복수의 중심지 형성과 이들 간의 네트워크적 연결성을 핵심으로 하는 구조이기 때문에(Davoudi, 2003; Meijers & Burger, 2010), 중심성 유형에 따른 위계적 분석 및 정량적 평가가 필요하다(Krehl & Siedentop, 2019). 이러한 이유로 본 연구에서는 공간 클러스터 유형에 따라 가중치를 차등 적용하는 방식을 도입하였다. 분석 결과에서 특정 지역의 클러스터 값이 0 또는 매우 작게 나타나는 경우, 중심성 판단이 불확실해질 수 있으며, 다핵화 정도를 보다 정밀하게 파악하기 위해 가중치 보정이 필요하다(Ord & Getis, 1995).

$$CI = \frac{(High - High: count \times 1) + (High - Low: count \times 0.5) + (Low - High: count \times 0.25) + (Low - Low: count \times 0.25)}{n} \quad (1)$$

이와 같은 가중치를 부여하는 방식은 각 지역 간 특성을 반영하여 크거나 작은 값의 지역 간 차이를 세밀하게 보아 공간적 이질성을 반영할 수 있으며(Abdulhafedh, 2017), 가중치 적용이 데이터의 이상치, 비정규성, 불균형 등의 문제를 완화할 수 있다. 도시공간구조의 다핵화의 정도를 보기 위해 식(1)과 같이 가중치를 적용하여 도시공간구조의 변화 동태를 분석하였다. 본 연구에서는 도시 공간 구조 내에서 중심지의 역할과 영향력을 고려하여 가중치를 차등적으로 부여하였다.

High-High 클러스터(가중치 = 1.0): 도시 내에서 가장 중요한 중심지를 의미하며, 강한 공간적 집중도를 보이는 지역이다. 이러한 지역은 다핵적 도시 구조에서 핵심적인 역할을 수행하므로 최댓값의 가중치를 부여하는 것이 타당하다.

High-Low 클러스터(가중치 = 0.5): 고밀도의 중심지와 저밀도 지역이 혼재하는 경우로, 중심성과 공간적 연결성이 상대적으로 약화된다. 따라서 다핵성을 감소시키는 요소로 고려할 수 있으며, 중심지의 영향력이 감소하는 정도를 반영하여 가중치를 0.5로 설정하였다.

Low-High 클러스터(가중치 = 0.25): 상대적으로 중심성이 낮은 지역이지만 주변에 높은 밀도의 중심지가 존재하는 경우이다. 이는 다핵적 구조에서 부분적으로

중심지 기능을 수행할 가능성이 있으나, 주요 중심지보다는 낮은 영향을 가지므로 가중치를 0.25로 설정하였다.

Low-Low 클러스터(가중치 = 0.25): 저밀도의 지역이 집중된 지역으로, 도시 중심지와 연계성이 낮고 독립적인 공간적 특성을 지닌다. 따라서 다핵성 평가에서 상대적으로 낮은 가중치를 부여하였다.

Krehl & Siedentop (2019)은 중심지의 영향력과 공간적 연계를 기준으로 도시 내 중심지를 위계적으로 분류하였으며, 중심성이 낮은 주변부 지역은 제한적 기능을 수행하는 보조적 중심지(secondary centers)로 해석하였다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 Low-High 클러스터를 중심지로 간주하되, 해당 지역 자체의 중심성은 약하고 중심 구조 내 기여가 제한적이라는 점에서 중심성과 공간 연계성이 모두 낮은 Low-Low 클러스터와 실질적인 영향력 측면에서 유사하다고 판단하였다. 따라서 다핵 구조 내 주요 중심지가 아닌 두 유형에 대해 동일한 낮은 가중치(0.25)를 부여하였으며, 이는 절대적 중심성의 차이보다 다핵성 기여 수준에 따른 상대적 영향력 평가를 반영한 결과이다.

본 연구에서는 도시 공간구조의 변화를 정량적으로 평가하기 위해 네 가지 공간 자기상관 지표인 LISA (Model 1), Getis-Ord G (Model 2), Getis-Ord G* (Model 3), Geary's C (Model 4)를 활용하였다. 각 지표는 중심성 개념을 서로 다른 방식으로 반영하고 있으며, 이에 따라 Figure 2와 같이 지역별 분석 결과에도 차이를 보인다.

LISA (Model 1)는 특정 지역이 그 이웃 지역들과 얼마나 유사한 중심성 수준을 갖는지를 측정하는 국지적 공간 자기상관 지표로, 다핵성이 증가한 지역으로는 김포시, 군포시, 광명시, 화성시, 양평군 등이 있다. 이들 지역은 인접 지역과 함께 중심성이 강화되는 양상을 보이며, 국지적 다핵 구조로의 전환 가능성을 시사한다. 반면 성남시, 수원시, 시흥시, 의정부시 등은 중심성이 약화되며, 중심 기능이 주변으로 분산되거나 단핵 구조로 회귀하는 경향을 나타낸다.

Getis-Ord G (Model 2)는 중심성이 높은 지역들이 얼마나 서로 근접하여 공간적으로 응집되어 있는지를 평가하는 지표로, 분석 결과 안성시, 김포시, 광명시, 화

성시, 양평군 등에서 중심성의 공간적 응집 수준이 증가한 것으로 나타났다. 이들 지역은 인접한 중심지 간의 값이 고르게 높게 분포하며, 다핵적 공간구조의 특성이 관측되었다. 반면 성남시, 하남시, 시흥시에서는 중심성이 높은 지역들이 넓게 분산되어 나타났으며, 중심지 간 공간적 연계가 상대적으로 낮은 양상을 보였다.

Getis-Ord G* (Model 3)는 대상 지역뿐만 아니라 주변 지역까지 포함한 전역적 공간 집중도를 측정한다. 이 지표에서 다핵성이 크게 증가한 지역은 김포시, 구리시, 화성시, 이천시, 수원시, 양평군 등으로 나타났으며, 이는 광역권 수준에서 중심성이 함께 강화되는 양상으로 해석된다. 반면 성남시, 하남시, 용인시, 파주시 등은 중심성과 주변의 동시 약화가 발생하여 광역 단위에서 중심성이 분산되는 형태로 나타나고 있다.

Geary's C (Model 4)는 인접 지역 간의 값 차이를 기반으로 공간 이질성을 측정하는 지표이며, 값이 낮아질수록 인접 지역 간 중심성 유사성이 커져 응집된 구조를 의미하고, 값이 높을수록 중심성 차이가 커져 공간적으로 분산된 구조를 나타낸다. 중심성이 상대적으로 응집된 방향으로 변화한 지역은 김포시, 화성시, 용인시 등이 있으며, 이는 공간 집중 강화에 따른 다핵화 양상을 의미한다. 반면 성남시, 시흥시, 광주시 등은 공간적 이질성이 증가하여 중심 기능의 약화 또는 구조의 비균질화가 진행된 것으로 해석된다.

네 가지 공간 자기상관 지표의 상이한 분석 결과는 도시공간구조 변화가 단일 차원이 아닌 국지적·광역적, 응집적·이질적 특성이 중첩되는 다차원적 현상임을 의미한다.

전체적으로 네 가지 모델 모두에서 공통적으로 다핵성이 증가한 지역으로는 김포시, 화성시, 양평군 등이 확인되었으며, 이들 지역은 다양한 공간 자기상관 지표에서 일관되게 다핵화 경향을 나타내었다. 반면 성남시, 하남시, 시흥시는 대부분의 지표에서 중심성이 감소하거나 약화되는 경향을 보였으며, 이는 중심 기능이 주변으로 분산되거나 단핵적 구조로 회귀하고 있을 가능성을 시사한다. 이러한 결과는 도시 공간구조의 변화가 지역별로 상이한 양상으로 나타날 수 있음을 보여주는 것으로, 공간 구조 변화의 특성과 그 영향

력을 보다 정밀하게 분석하기 위해서는 단일 지표에 의존하기보다는 다양한 공간 자기상관 지표를 병행 활용하는 다각적인 접근이 필요함을 의미한다. 아울러 본격

적인 회귀분석에 앞서, 분석에 활용된 주요 변수들의 전반적인 분포 특성을 파악하고자 기술통계 분석을 실시하였다. 종속변수인 온실가스 배출량(GHG)의 평균

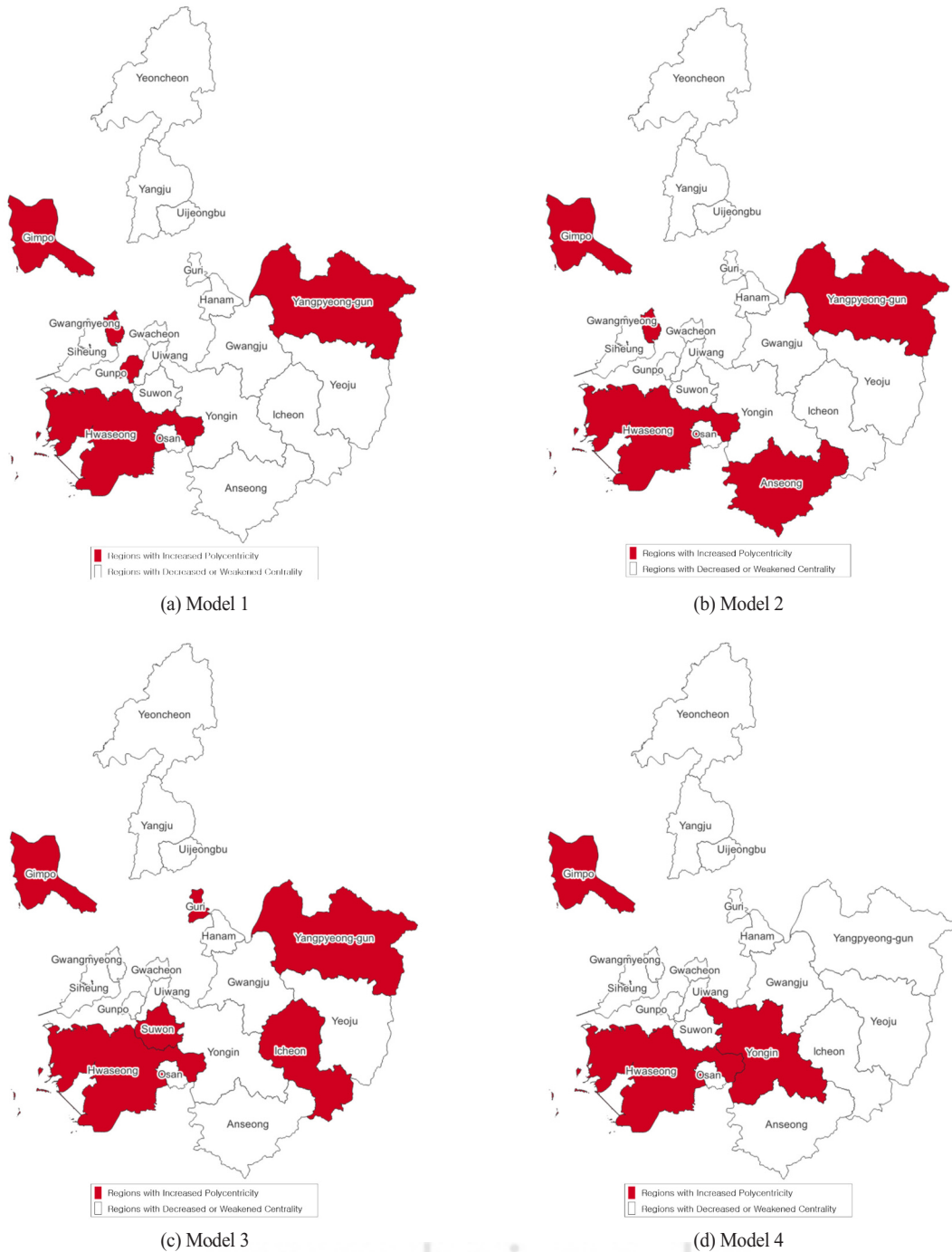


Figure 2. Polycentricity enhanced areas and Polycentricity weakened areas

Table 2. Descriptive Statistics

Variable	Mean	Std. Dev.	Min	Max
GHG	1575.32	1836.45	142.15	8195.38
LISA	1.29	2.21	0	12
Getis Ord G	1.58	3.02	0	16
Getis Ord G*	1.71	3.23	0	16
Geary	1.55	1.74	0	9

은 1,575.32톤, 표준편차는 1,836.45톤으로 지역 간 배출 수준에 상당한 차이가 존재하는 것으로 나타났으며, 최소값은 142.15톤, 최대값은 8,195.38톤으로 일부 지역에서 매우 높은 배출량이 관찰되었다.

중심성 지표의 경우, LISA(Local Indicators of Spatial Association)는 국지적 공간 자기상관을 측정하는 지표로, 평균값은 1.29로 다소 낮은 수준이지만 최대값이

12에 달해 일부 지역에서 강한 클러스터링 현상이 확인되었다. Getis-Ord G는 중심성 응집도를 반영하는 지표로 LISA와 유사한 분포를 보였으며, Getis-Ord G*는 분석 단위를 포함한 전역적 집중도를 측정하는 지표로, 평균값은 1.71, 표준편차는 3.23으로 지역 간 집중도 차이가 크게 나타났다. 마지막으로 Geary's C는 공간적 이질성을 측정하는 지표로 평균값은 1.55였으며,

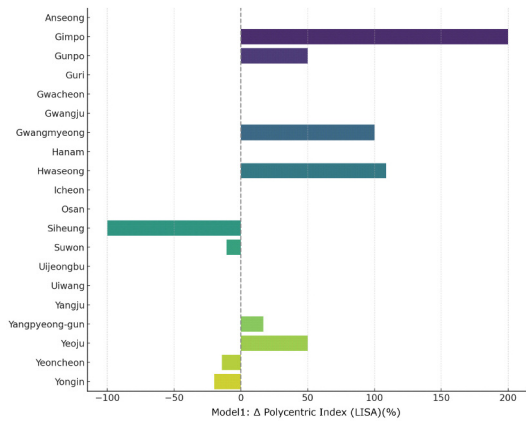


Figure 3. Rate of change in the Polycentric index (Model 1)

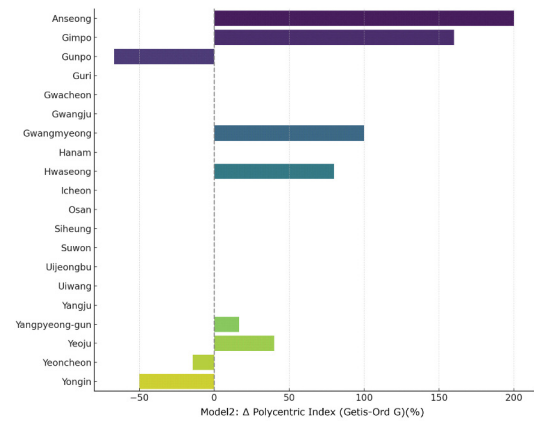


Figure 4. Rate of change in the Polycentric index (Model 2)

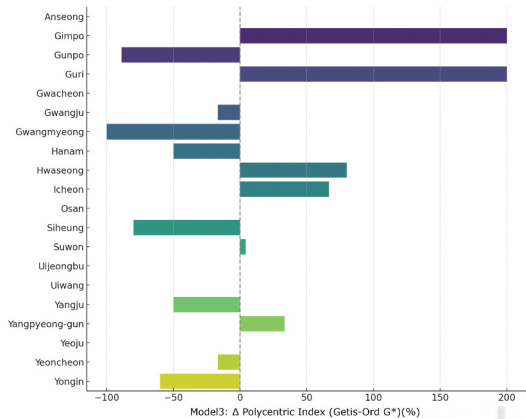


Figure 5. Rate of change in the Polycentric index (Model 3)

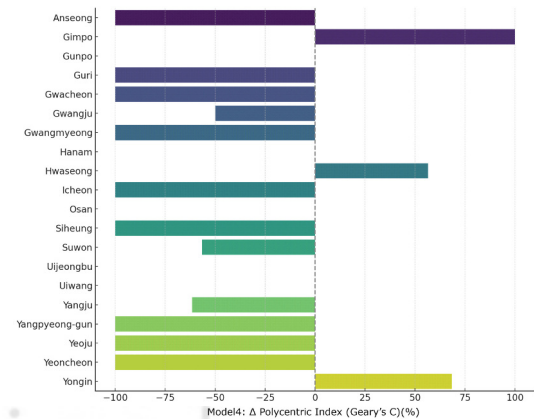


Figure 6. Rate of change in the Polycentric index (Model 4)

Table 3. Hausman Test Results

Model	Chi-sq Statistic	Degrees of Freedom (df)	p-value	Conclusion
Model 1	0.425080	1	0.5144	Alternative hypothesis: one model is inconsistent (RE preferred)
Model 2	0.077316	1	0.7810	Alternative hypothesis: one model is inconsistent (RE preferred)
Model 3	0.000514	1	0.9819	Alternative hypothesis: one model is inconsistent (RE preferred)

최대값이 9로 일부 지역에서 중심성의 불연속성이 매우 큰 것으로 나타났다.

이러한 결과는 본 연구의 공간적 범위의 시군구 단위에서 단핵 및 다핵 구조가 혼재하고 있으며, 온실가스 배출량 또한 지역 간에 뚜렷한 차이를 보이고 있음을 시사한다. 이에 따라 도시공간구조의 단핵화 또는 다핵화 변화가 온실가스 배출에 미치는 시간적 및 공간적 영향을 보다 정밀하게 규명하기 위해, 본 연구는 공간의 종속성과 시간적 차이를 동시에 고려할 수 있는 분석기법인 공간패널회귀모형(Spatial Panel Regression Model)을 적용하였다(Anselin, 1988; Elhorst, 2003). 구체적으로는 공간 자기회귀모형(SAR, Spatial Autoregressive Model)을 활용하였으며, 그 수식은 다음의 식(6)과 같다.

$$Y_{it} = \rho WY_{it} + X_{it}\beta + \mu_i + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

- Y_{it} : 종속변수(온실가스 배출량: GHG)
 WY_{it} : 공간적 자기상관 반영(공간가중행렬W 적용)
 $X_{it}\beta$: 독립변수들의 계수(LISA, Getis Ord G, Getis Ord G*, Geary 지수)
 μ_i : 개별 지역 고정효과
 λ_i : 시간 고정효과
 ε_{it} : 오차항
 ρ : 공간적 자기회귀 계수

공간패널회귀분석에 적절한 분석 모형을 설정하기 위해 하우스만 검정(Hausman Test)을 실시하였다. 이를 통해 지역 간 이질성을 고려할 수 있는 고정효과(fixed-effects) 모형과 확률효과(random-effects) 모형 중 보다 적합한 모형을 판별하였으며, 검정 결과에 따라 선택된 모형을 기반으로 공간패널회귀분석을 수행하였다.

또한, 본 연구에서는 공간패널회귀 분석을 통해 도시 중심성 변화가 온실가스 배출량에 미치는 영향을 실증적으로 검토함과 동시에, 공간적 관계가 지역마다 달라질 수 있으므로 정량모형과 함께 시각화 기법 병행될 필요가 있다(Fotheringham, 2002). 정량적 분석

결과를 보완하고 지역 간 이질성을 시각적으로 해석(Anselin, 1995; Wang, 2015)하기 위해 산점도 분석을 병행하였다. 변화율(%)을 X축으로, 시군구별 온실가스 배출량 변화율(%)을 Y축으로 설정하여 2010년 대비 2020년의 변화율을 산정하고 시각화하였다.

각 산점도는 사분면 기준으로 분류되며, 이를 통해 중심성이 증가하면서 배출도 증가한 지역(1사분면), 중심성은 증가했으나 배출은 감소한 지역(4사분면) 등 다양한 유형별 분포를 확인할 수 있다. 이러한 시각화 기법은 공간패널회귀 분석에서 포착하기 어려운 지역별 공간적 이질성을 파악하는 데 활용되었다.

IV. 연구결과

1. 공간패널 회귀모형 결정을 위한 모형 적합성 검정 결과

본 연구에서는 공간 패널 회귀 분석을 수행하여 공간구조변화가 온실가스 배출량에 영향을 미치는지에 대한 분석을 진행하였다. 분석 결과, 하우스만 검정의 유의확률(p-value)이 Table 3와 같이 0.5144(Model 1), 0.7810(Model 2), 0.9819(Model 3)로 나타나, 세 모델 모두에서 확률효과(Random Effects, RE) 모형이 적합한 것으로 나타났다. 확률효과모형은 개별 단위의 고유한 특성을 확률적(random)으로 처리하며, 이 특성들이 회귀식에 독립적으로 영향을 미친다고 가정한다. 즉, 이러한 결과는 본 연구에서 다루는 주요 변수 간의 개별 지역이 아닌 전반적인 관계를 강조하는 모형으로 설명할 수 있다.

2. 단핵 및 다핵에 따른 온실가스배출량 간 영향 분석 결과

따라서 본 연구에서는 확률효과 모형을 기반으로 분석 결과를 해석하였으며, 각 모델별 온실가스 배출량 간

Table 4. Spatial Panel Regression Results (Random-Effects Model)

Model	Variable	Estimate	Std. Error	z-value	p-value	Significance
Model 1	Intercept	950.01	213.27	3.48	***	***
	LISA	401.06	69.75	5.75	***	***
Model 2	Intercept	770.33	313.63	2.46	*	*
	Getis-Ord G	354.24	44.21	8.01	***	***
Model 3	Intercept	778.70	312.36	2.49	*	*
	Getis-Ord G*	321.57	44.19	7.28	***	***

***:p<0.001, **:p<0.01, *:p<0.05

Table 5. Variance Components

Model	Effect Type	Variance (var)	Standard Deviation (std.dev)	Variance Share (Ratio)
Model 1	Idiosyncratic	206597.5	454.5	0.155
	Individual	117292	1061.7	0.845
Model 2	Idiosyncratic	81485.6	285.5	0.044
	Individual	1776939	1333	0.956
Model 3	Idiosyncratic	99059.5	314.8	0.054
	Individual	1718753	1311	0.946

의 영향의 결과는 Table 4와 같이 나타났다. 공간패널회귀 분석 결과로는 Model 4를 제외한 Model 1, Model 2, Model 3이 모델의 설명력과 유의한 모형으로 나타났다.

먼저, Model 1에서는 LISA 지수가 온실가스 배출량과 유의한 양의 관계를 보였으며, LISA값이 1단위 증가할 때, 종속 변수인 직접배출량(VDT_G)은 평균적으로 401.055 증가하는 것으로 결과가 나타났다. 이는 특정 지역에서 높은 종사자수가 집중될수록 온실가스 배출량이 증가하는 경향이 있음을 의미한다.

Model 2에서는 Getis-Ord G 지수가 유의미한 설명변수로 작용하였으며, Getis-Ord G값이 1단위 증가할 때, 종속 변수(VIT_G)는 평균적으로 354.235 증가하였다. 이는 여러 개의 중심지에 분산될수록 온실가스 배출량이 증가하는 경향이 있음을 시사한다.

Model 3 Getis-Ord G*가 1단위 증가할 때, 종속 변수(VIT_G)는 평균적으로 321.567 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 다핵적 구조가 강화될수록 온실가스 배출량이 증가하는 패턴이 존재함을 확인할 수 있다.

이러한 결과는 도시 공간 구조가 다핵적일수록 온실가스 배출량이 증가할 가능성이 있으며, 단핵적 구조에서 오히려 온실가스 배출량이 더 낮을 수 있음을 시

사한다.

효과 분해 및 분산 분석결과로는 오차 항을 개별적 요인(Idiosyncratic)과 개별 효과(Individual Effect)로 분해한 결과는 Table 5와 같으며, 개별 효과의 분산이 Idiosyncratic 분산보다 훨씬 크다는 점이 확인되었다. Model 1에 개별 효과의 분산이 117292, Idiosyncratic 분산이 206597.5로 나타났으며, 전체 변동성 중 84.5%가 개별 효과에서 기인하는 것으로 분석되었다.

Model 2와 Model 3에 대한 개별 효과의 분산이 각각 1776939 (95.6%), 1718753 (94.6%)로 나타나, 도시 공간 구조(다핵화 수준)가 온실가스 배출량의 변동을 결정하는 주요 요인임을 시사한다.

즉, 개별 지역 간 다핵화 수준의 차이가 온실가스 배출량을 결정하는 중요한 요소로 작용하며, 개별적 요인(Idiosyncratic error)보다는 도시의 공간적 구조(다핵화 정도)가 온실가스 배출량 변동성을 설명하는 데 중요한 역할을 함을 의미한다.

3. 중심성 변화율과 온실가스 배출량 변화율 간의 지역별 비교 분석

본 절에서는 다핵성지수 변화가 온실가스 배출량 변화에 미치는 지역별 영향을 시각적으로 해석하기 위

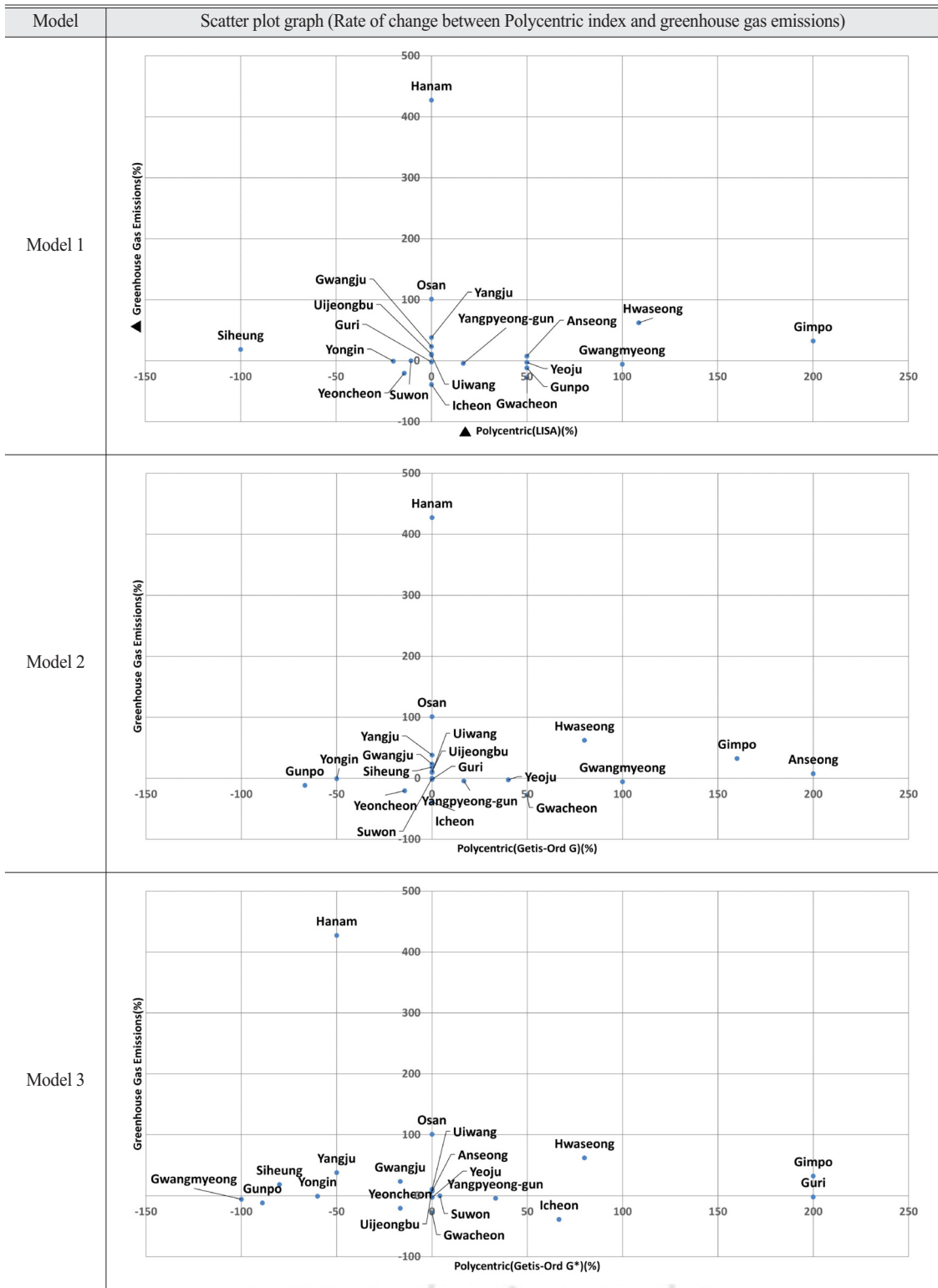


Figure 7. Scatter plot graph (Rate of change between Polycentric index and greenhouse gas emissions)

하여, 시군구별 중심성 지수의 변화율과 온실가스 배출량 변화율 간의 관계를 산점도를 통해 분석하였다. 중심성 지수는 공간 자기상관 기반의 지표 세 가지(LISA, Getis-Ord G, Getis-Ord G*)를 각각 Model 1, Model 2, Model 3으로 설정하여 분석하였으며, 시계열 비교를 위해 2010년 대비 2020년 변화율을 산정하였다. 결과는 Figure 7과 같다.

Model 1(LISA 기준 산점도)에서는 중심성 지수가 증가하면서 동시에 온실가스 배출량도 증가한 지역(1사분면)에 김포시와 화성시가 위치하였으며, 반대로 중심성이 증가하면서도 온실가스 배출량이 감소한 지역(4사분면)에는 광명시, 군포시, 여주시, 양평군 등이 해당되었다. 이는 일부 지역에서 다핵화가 오히려 환경 효율성을 높이는 데 기여하였음을 시사한다. 중심성이 약화되면서도 배출량이 증가한 지역(2사분면)으로는 수원시, 시흥시가 포함되었으며, 이는 도시공간구조의 분산화가 환경적으로 부정적인 결과를 유발한 사례로 해석할 수 있다.

Model 2(Getis-Ord G 기반 분석)에서도 유사한 경향이 관찰되었다. 중심성이 강화되고 온실가스가 증가한 지역으로는 안성시, 김포시, 화성시가 포함되었으며, 중심성이 강화되었음에도 온실가스가 감소한 지역(4사분면)으로는 광명시, 여주시, 양평군이 해당되었다. 다만 중심성이 약화되면서 배출이 증가한 2사분면에는 해당 시군구가 관찰되지 않아, 본 지표에서는 다핵화의 부정적 효과가 상대적으로 적게 나타난 것으로 볼 수 있다.

Model 3(Getis-Ord G* 기준) 분석 결과는 보다 다양한 공간적 양상을 보여준다. 중심성이 강화되고 배출이 증가한 지역은 수원시, 김포시, 화성시이며, 중심성이 약화되면서도 배출이 증가한 시흥시, 하남시, 광주시, 양주시 등의 시군구가 2사분면에 위치하였다. 이는 중심성 약화가 교통 수요 증가, 혼잡도 심화 등을 통해 온실가스 배출을 유발하는 경향이 비교적 명확히 나타난 결과로 해석된다. 중심성은 약화되었지만 배출량은 감소한 지역(3사분면)과 중심성이 강화되며 배출량도 감소한 지역(4사분면)도 다수 분포하고 있어, 중심성 변화의 영향이 단일한 방향성을 가지지 않음을 보여준다.

이러한 산점도 분석은 공간패널회귀 분석 결과와 비교할 때 상이한 해석을 가능케 한다. 앞서 Table 6에서 제시된 바와 같이, 공간패널회귀 분석에서는 세 모델 모두에서 중심성 지수가 낮아질수록 온실가스 배출량이 유의하게 증가하는 정량적 경향이 도출되었으며, 이는 중심성 저하가 교통거리 증가, 대중교통 효율 저하, 토지이용 분산 등의 구조적 문제를 유발할 수 있다는 기존 문헌의 결과와도 부합한다(Kennedy et al., 2009; Glaeser & Kahn, 2010). 그러나 산점도 분석은 각 시군구 단위의 변화율을 기반으로 구성되었기 때문에, 평균적 경향을 넘어서 지역별 맥락에 따라 달라지는 이질성을 시각적으로 보여준다. 실제로 중심성 증가가 온실가스 저감으로 연결된 시군구(예: 광명, 군포, 여주, 양평군 등)의 사례는, 중심성 지수의 상승이 무조건 배출 증가로 이어지는 것이 아니라, 정책 실행력, 교통체계 개선 여부, 산업구조 차이에 따라 효과가 달라질 수 있음을 보여준다.

따라서 본 분석 결과는 중심성 변화가 온실가스 배출에 유의한 영향을 미친다는 정량적 결론에 더해, 동일한 도시공간구조 변화도 지역의 조건에 따라 상이한 환경효과를 초래할 수 있음을 시사하며, 이는 향후 도시 공간계획 및 탄소 중립 전략 수립 시 지역 맞춤형 정책 설계의 필요성을 강조하는 근거가 된다.

V. 결론

1. 연구 목적 및 분석 개요 요약

본 연구는 도시공간구조의 변화가 온실가스 배출량에 미치는 영향을 실증적으로 분석하고자 하였다. 이를 위해 경기도 시군구 단위를 대상으로 중심성 지수를 활용하여 도시의 단핵성과 다핵성을 정량화하고, 각 지수를 변수로 설정한 공간패널회귀모형을 구성하여 분석을 수행하였다. 중심성 지수는 Local Moran's I(LISA), Getis-Ord G, Getis-Ord G*, Geary's C를 각각 Model 1~4로 설정하여 적용하였다.

2. 주요 분석 결과

공간패널회귀모형의 적합성 검증 결과, 모든 모델에서 확률효과 모형이 통계적으로 유의한 것으로 나타나,

개별 지역의 고유 특성보다는 도시공간구조 변화의 일반적 경향이 온실가스 배출에 더 큰 영향을 미친다는 점이 확인되었다. 공간자기상관 기반 중심성 지수를 활용한 분석에서 Model 1(LISA), Model 2(Getis-Ord G), Model 3(Getis-Ord G*) 모두에서 중심성이 낮아질수록 온실가스 배출량이 유의하게 증가하는 양상을 보였다. 이는 도시의 다핵화가 심화될수록 통근 거리 및 교통량 증가, 에너지 소비 확대 등의 구조적 변화가 배출량 증가로 이어질 수 있음을 시사한다.

특히 LISA 지수 1단위 증가는 평균 401.1톤, Getis-Ord G는 354.2톤, G*는 321.6톤의 배출 증가와 연관되어, 중심 간 연결이 약화된 다핵적 구조에서 온실가스 배출이 구조적으로 유발될 수 있는 가능성을 보여준다. 더불어, 효과 분해 결과 전체 변동성의 85~96%가 개별 효과(Individual effect)에서 기인한 것으로 나타나, 온실가스 배출의 변동은 지역 간 구조 차이에 의해 결정되는 비중이 크다는 점이 실증되었다. 이는 시간상의 우연적 요인보다는 다핵화수준과 같은 구조적 특성이 배출량을 결정하는 주요 요소임을 의미한다.

본 연구에서는 다핵화가 온실가스 배출을 증가시키는 경향을 정량적으로 확인하였지만, 이는 단순한 통계적 상관 이상으로, 도시 내부 구조 변화에 따른 통행 거리 증가, 교통수단 분산, 대중교통망 연계 약화 등의 구조적 메커니즘이 작동했을 가능성과 연계된다. 기존 단핵구조에서는 중심지에 통합된 활동이 집중되며, 교통 인프라도 하나의 중심에 집중되어 있어 효율적 통행이 가능하다. 그러나 다핵화는 복수의 중심지로 통근·이동 수요가 분산되고, 중심 간의 거리가 멀어지는 경우 오히려 총 통행거리를 증가시킬 수 있다(Ewing et al., 2008; Zhang & Li, 2022). 이러한 구조 변화는 자동차 의존도를 증가시키며, 이는 다시 에너지 소비 증가와 온실가스 배출 확대를 유발할 수 있다.

예를들면 김포시는 LISA, Getis-Ord G, G* 지표 모두에서 다핵화 경향이 두드러지며, 동시에 온실가스 배출량 증가도 유의하게 나타났다. 이는 김포시의 도시성장 방향이 자족적인 중심지 분산이 아니라, 서울로의 통근 교통량 증가 및 대중교통망 부족 등으로 인해 고외화된 다핵 구조가 형성되었기 때문일 가능성이 높다.

실제 김포는 지하철 인프라 확장이 늦었고, 2010~2020년 동안 서울-김포 간 통근 통행량이 지속 증가하였다(통계청, 2022). 반면, 광명시는 중심성 지표가 상승하였음에도 불구하고 온실가스 배출량은 감소하였다. 이는 광명시가 KTX 광명역, 지하철 7호선 등 교통 인프라가 중심에 밀집되어 있고, 자족적 활동권이 도시 내에 형성되어 있어 통근거리가 상대적으로 짧은 내포형 다핵 구조로 작동했기 때문으로 해석된다.

중심성 변화율과 온실가스 배출 변화율 간의 산점도 분석 결과는 이러한 정량적 분석을 보완해 지역 간 이질성을 드러냈다. 예컨대 광명시, 군포시, 여주시, 양평군 등은 중심성이 증가했음에도 온실가스 배출이 감소하여, 다핵화가 항상 배출 증가로 이어지는 것은 아님을 보여준다. 이는 지역의 교통 인프라, 산업 구조, 정책 운영 여건 등 맥락적 요인이 중심성 변화 효과를 조절할 수 있음을 시사하며, 구조적 경향성과 더불어 지역별 특성을 반영한 차별적 접근의 필요성을 강조한다.

3. 정책적 시사점 및 연구 한계

이러한 결과는 다음과 같은 정책적 시사점을 제공한다. 첫째, 다핵화를 기반으로 한 도시계획이 온실가스 감축 효과를 담보하기 위해서는 지역 맥락을 반영한 교통 및 토지이용 전략이 병행되어야 한다. 둘째, 중심성 강화만으로는 온실가스 감축에 효과적이지 않을 수 있으며, 중심 간 기능 연계, 저탄소 교통체계 구축 등과 통합된 접근이 필요하다. 셋째, 본 연구에서 사용된 공간통계 기반 중심성 지수는 향후 탄소중립형 도시계획 수립 시 정량적 기초자료로 활용 가능성이 높다.

다만 본 연구는 경기도 시군구를 중심으로 분석하였고, 분석 시점도 2010년과 2020년의 두 시점으로 제한되어 있어 대도시·중소도시 간 구조적 차이나 장기적 변화 분석에 한계가 존재한다. 향후에는 보다 긴 시계열 자료와 다양한 맥락 변수(도시 규모, 산업구조, 교통망 등)를 통합하여 분석을 고도화할 필요가 있다. 또한 건축물 에너지 소비, 토지이용 패턴, 교통 네트워크 등을 포함한 다차원적 도시공간지표 개발을 통해 보다 정밀한 정책적 해석이 가능할 것이다.

사사

“본 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022 R1A2C10077131162182065300101).”

“본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 “신기후체제 대응 환경기술개발사업”의 연구개발을 통해 창출되었습니다(RS-2022-KE002124).”

References

- Abdulhafedh, A. (2017). A novel hybrid method for measuring the spatial autocorrelation of vehicular crashes: Combining Moran's index and Getis-Ord G_i^* statistic. *Open Journal of Civil Engineering*, 7(2), 208-221. <https://doi.org/10.4236/ojce.2017.72013>
- Anselin, L. (1988). *Spatial econometrics: Methods and models*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association-LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93-115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Bae, C. H. C., & Richardson, H. W. (1993). Automobiles, the environment and metropolitan spatial structure. In *Proceedings of the Federal Highway Administration-Lincoln Institute of Land Policy Conference* (pp. xx-xx). Arlington, VA.
- Baltagi, B. H. (2008). *Econometric analysis of panel data* (4th ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Bartholomew, K., & Ewing, R. (2011). Hedonic price effects of pedestrian- and transit-oriented development. *Journal of Planning Literature*, 26(1), 18-34. <https://doi.org/10.1177/0885412210386540>
- Bender, A., & Hwang, C. (1985). Hedonic housing price indices and secondary employment centers. *Journal of Urban Economics*, 17(1), 90-107. [https://doi.org/10.1016/0094-1190\(85\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0094-1190(85)90030-2)
- Bertaud, A. (2004). The spatial organization of cities: Deliberate outcome or unforeseen consequence? Washington, DC: World Bank. (World Development Report background paper)
- Bivand, R. S., Pebesma, E., & Gomez-Rubio, V. (2013). *Applied spatial data analysis with R* (2nd ed.). New York, NY: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7618-4>
- Bleicher, H. (1892). *Statistische Beschreibung der Stadt Frankfurt am Main und ihrer Bevölkerung*. Frankfurt am Main, Germany: J. D. Sauerlander's Verlag.
- Boarnet, M. G., Hong, A., Lee, J., & Wang, X. (2011). *Land use and vehicle miles of travel in California: A guide to the evidence*. Davis, CA: University of California, National Center for Sustainable Transportation.
- Boeing, G. (2018). Measuring the complexity of urban form and design. *Urban Design International*, 23(4), 281-292. <https://doi.org/10.1057/s41289-018-0072-1>
- Breheny, M. (1995). The compact city and transport energy consumption. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 20(1), 81-101.
- Brunsdon, C., Fotheringham, S., & Charlton, M. (1996). Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity. *Geographical Analysis*, 28(4), 281-298.
- Calthorpe, P. (1993). *The next American metropolis: Ecology, community, and the American dream*. New York, NY: Princeton Architectural Press.
- 2050 탄소중립녹색성장위원회. (2021). 2050 탄소중립 녹색성장 전략 및 이행계획. 대한민국 환경부.
- Carbon Neutrality and Green Growth Commission. (2021). 2050 Carbon Neutral Strategy and Implementation Plan. Ministry of Environment, Republic of Korea.
- Chen, Z., & Park, A. F. (2021). Smart city frameworks: A comparative analysis. *Sustainable Cities and Society*, 64, Article 102552. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102552>

- Chen, Y., Wang, S., & Xu, X. (2023). The spatiotemporal evolution of urban polycentricity and its carbon emission implications in China. *Sustainable Cities and Society*, 90, Article 104451. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104451>
- Chiu, L. H. (2002). Social equity in housing in the Hong Kong Special Administrative Region: A social sustainability perspective. *Sustainable Development*, 10(3), 155-162. <https://doi.org/10.1002/sd.187>
- Choo, M., Park, E., Han, Z., & Yoon, D. K. (2024). Urban spatial structure and carbon emissions: A meta-analytic review. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5076271>
- Clark, C. (1951). Urban population densities. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)*, 114, 490-496.
- Clark, C. (2000). Monocentric to polycentric: New urban forms and old paradigms. In G. Bridge & S. Watson (Eds.), *A companion to the city* (pp. 141-154). Oxford, UK: Blackwell Publishing.
- Creutzig, F., Baiocchi, G., Bierkandt, R., Pichler, P. P., & Seto, K. C. (2015). Global typology of urban energy use and potentials for an urbanization mitigation wedge. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(20), 6283-6288. <https://doi.org/10.1073/pnas.1315545112>
- Davoudi, S. (2003). Polycentricity in European spatial planning: From an analytical tool to a normative agenda. *European Planning Studies*, 11(8), 979-999.
- Deng, Z., Li, L., & Du, Y. (2024). Can polycentric urban morphology improve transportation carbon emission efficiency? Evidence from 285 Chinese cities, 2005-2020. *Transportation*.
- Dodman, D. (2009). Blaming cities for climate change? An analysis of urban greenhouse gas emissions inventories. *Environment and Urbanization*, 21(1), 185-201. <https://doi.org/10.1177/0956247809103016>
- Elhorst, J. P. (2003). Specification and estimation of spatial panel data models. *International Regional Science Review*, 26(3), 244-268.
- Elhorst, J. P. (2014). *Spatial econometrics: From cross-sectional data to spatial panels*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-40340-8>
- Elkin, T., McLaren, D., & Hillman, M. (1991). *Reviving the city: Towards sustainable urban development*. London, UK: Friends of the Earth.
- Ewing, R., & Cervero, R. (2010). Travel and the built environment: A meta-analysis. *Journal of the American Planning Association*, 76(3), 265-294. <https://doi.org/10.1080/01944361003766766>
- Ewing, R., & Hamidi, S. (2014). Measuring urban sprawl and validating sprawl measures. *Journal of Urban Design*, 19(1), 1-23. <https://doi.org/10.1080/10630732.2012.626703>
- Ewing, R., Pendall, R., & Chen, D. (2003). Measuring sprawl and its transportation impacts. *Transportation Research Record*, 1831, 175-183. <https://doi.org/10.3141/1831-20>
- Ewing, R., Bartholomew, K., Winkelman, S., Walters, J., & Chen, D. (2007). *Growing energy: How biofuels can help end America's oil dependence*. New York, NY: Natural Resources Defense Council.
- Feng, T., & Zhou, B. (2023). Impact of urban spatial structure elements on carbon emissions efficiency in growing megacities: The case of Chengdu. *Scientific Reports*, 13, Article 9939. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36575-6>
- Fotheringham, A. S., Brunson, C., & Charlton, M. (2002). *Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships*. Chichester, UK: Wiley.
- Geary, R. C. (1954). The contiguity ratio and statistical mapping. *The Incorporated Statistician*, 5(3), 115-146.
- Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical*

- Analysis, 24(3), 189-206.
- Glaeser, E. L., & Kahn, M. E. (2010). The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of Urban Economics*, 67(3), 404-418. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2009.11.006>
- Gordon, P., Richardson, H. W., & Wong, H. L. (1986). The distribution of population and employment in a polycentric city: The case of Los Angeles. *Environment and Planning A*, 18(2), 161-173. <https://doi.org/10.1068/a180161>
- Gordon, P., & Richardson, H. W. (1989). Gasoline consumption and cities: A reply. *Journal of the American Planning Association*, 55(3), 342-345. <https://doi.org/10.1080/01944368908975421>
- Gordon, P., & Meentemeyer, V. (2021). Polycentricity and the evolution of metropolitan spatial structure. *Growth and Change*, 52(4), 2201-2218. <https://doi.org/10.1111/grow.12599>
- Greene, R. P. (1982). Urban-suburban population density gradients and changes in core-fringe relationships in metropolitan areas. *Economic Geography*, 58(3), 249-262.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377. <https://doi.org/10.2307/2118443>
- Han, S., & Miao, C. (2022). Does a polycentric spatial structure help to reduce industry emissions? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 8167. <https://doi.org/10.3390/ijerph19138167>
- Handy, S. (2005). Smart growth and the transportation-land use connection: What does the research tell us? *International Regional Science Review*, 28(2), 146-167. <https://doi.org/10.1177/0160017604273626>
- Hankey, S., & Marshall, J. D. (2010). Impacts of urban form on future US passenger-vehicle greenhouse gas emissions. *Energy Policy*, 38(9), 4880-4887. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.005>
- Hankey, S., Marshall, J. D., & Brauer, M. (2012). Health impacts of the built environment: Within-urban variability in physical inactivity, air pollution, and ischemic heart disease mortality. *Environmental Health Perspectives*, 120(2), 247-253. <https://doi.org/10.1289/ehp.1103806>
- Holden, E., & Norland, I. T. (2005). Three challenges for the compact city as a sustainable urban form: Household consumption of energy and transport in eight residential areas in the greater Oslo region. *Urban Studies*, 42(12), 2145-2166. <https://doi.org/10.1080/00420980500332064>
- Huang, D., Liu, Z., & Zhao, X. (2015). Monocentric or polycentric? The urban spatial structure of employment in Beijing. *Sustainability*, 7(9), 11632-11656. <https://doi.org/10.3390/su70911632>
- Huang, Y., & Liao, R. (2021). Urban heat islands: Spatial patterns and mitigation strategies. *Urban Climate*, 38, Article 100872. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100872>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report.*
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report.*
- 정민선, 조희선, & 변병철. (2015). 도시특성요소가 온실가스 배출에 미치는 영향: 수도권 지역을 중심으로. *국토지리학회지*, 49(3), 297-306.
- Jung, M. S., Cho, H. S., & Byun, B. S. (2015). Effects of urban characteristics on greenhouse gas emissions from Seoul Metropolitan Area. *The Geographical Journal of Korea*, 49(3), 297-306.
- Kamruzzaman, T., & Baker, D. (2019). Understanding autonomous vehicles: A systematic literature

- review on capability, impact, planning, and policy. *Journal of Transport and Land Use*, 12(1), 45-72. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2019.1405>
- Kanakou, C., Jin, Y., & Shepherd, J. (2015). The spatial structure of cities and the impact of polycentricity on urban performance. *Urban Studies*, 52(8), 1415-1435. <https://doi.org/10.1177/0042098014539402>
- 강창덕. (2011). 공간계량모형에 의한 서울시 에너지 소비 분석과 정책과제: 전력과 도시가스 소비를 중심으로. *서울도시연구*, 12(4), 1-22.
- Kang, C. D. (2011). An analysis of energy consumption in Seoul using spatial econometric models and policy implications: Focusing on electricity and city gas consumption. *Seoul Studies*, 12(4), 1-22.
- Kennedy, C., Steinberger, J., Gasson, B., Hansen, Y., Hillman, T., Havranek, M., Pataki, D., Phdungsilp, A., Ramaswami, A., & Mendez, G. V. (2009). Greenhouse gas emissions from global cities. *Environmental Science & Technology*, 43(19), 7297-7302. <https://doi.org/10.1021/es900213p>
- 김보현, 장성만, & 이승일. (2013). 도시 유형별 교통에너지 소비에 영향을 미치는 요인 연구: 통행패턴과 개발밀도에 따른 도시유형 구분을 기초로. *국토계획*, 48(3), 129-148.
- Kim, B. H., Jang, S. M., & Lee, S. I. (2013). A study on the influencing factors on transport energy consumption by city types: On the basis of city types classified by travel pattern and urban density. *Journal of Korea Planning Association*, 48(3), 129-148.
- 김호용. (2021). 도시균형발전을 위한 도시공간구조 변화 진단. *한국지리정보학회지*, 24(2), 40-51. <https://doi.org/10.11108/kagis.2021.24.2.040>
- Kim, H. Y. (2021). Diagnosing spatial structural changes for balanced urban development using Moran's I. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 24(2), 40-51. <https://doi.org/10.11108/kagis.2021.24.2.040>
- 한국에너지공단. (2022). 2022 에너지총조사 통계보고서. 한국에너지공단.
- Korea Energy Agency. (2022). 2022 Annual Energy Statistics Report. Korea Energy Agency. [Korean Literature]
- 권수현, 김승원, & 강준모. (2016). 도시구성요소가 기후 변화에 미치는 영향: 수도권지역의 이산화탄소 배출량을 중심으로. *도시설계*, 17(1), 117-134.
- Kwon, S., Kim, S., & Kang, J. (2016). Effects of urban components on climate change: Focusing on CO₂ emissions in the Seoul metropolitan area. *Journal of Urban Design*, 17(1), 117-134.
- 이건원. (2017). 도시 유형별 도시특성요소와 온실가스 배출량 간의 관계 분석. *한국산학기술학회 논문지*, 18(11), 62-71.
- Lee, G. W. (2017). Analysis of the relationship between urban characteristic factors and greenhouse gas emissions by urban type. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 18(11), 62-71.
- Lemoy, R. (2024). Modeling urban systems: Theory and practice. *Urban Studies*. (Forthcoming)
- LeSage, J. P., & Pace, R. K. (2009). Introduction to spatial econometrics. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420064254>
- Li, M., Zuo, M., Chen, S., Tang, S., Chen, T., & Liu, J. (2024). Impact of urban spatial compactness on carbon emissions: Heterogeneity at the county level in the Beijing-Tianjin-Hebei area, China. *Land*, 13(12), 2104. <https://doi.org/10.3390/land13122104>
- Li, W., & Schmidt, S. (2024). The spatial-temporal evolution of urban development patterns in Chinese cities: Dynamics and interpretations. *Growth and Change*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1111/grow.12722>
- Liu, Z., & Liu, S. (2018). Polycentric development and the role of urban polycentric planning in China's mega cities: An examination of Beijing's metropolitan

- area. Sustainability, 10(5), 1588. <https://doi.org/10.3390/su10051588>
- Makido, Y., Dhakal, S., & Yamagata, Y. (2012). Relationship between urban form and CO₂ emissions: Evidence from fifty Japanese cities. *Urban Climate*, 2, 55-67. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2012.10.006>
- McMillen, D. P., & McDonald, J. F. (1998). Suburban subcenters and employment density in metropolitan areas. *Journal of Urban Economics*, 43(2), 157-180.
- McMillen, D. P. (2001). Nonparametric employment subcenter identification. *Journal of Urban Economics*, 50(3), 448-473.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. III. (1972). *The limits to growth: A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. New York, NY: Universe Books.
- Meijers, E., & Burger, M. (2010). Spatial structure and productivity in US metropolitan areas. *Environment and Planning A: International Journal of Urban and Regional Research*, 42(6), 1383-1402. <https://doi.org/10.1068/a42151>
- Milakis, D., Vlastos, T., & Barbopoulos, N. (2005). The optimum density for the sustainable city: The case of Athens. In *Sustainable Development and Planning II* (pp. 25-34). Bologna, Italy: Southampton, UK: WIT Press.
- Mills, E. S. (1972). *Studies in the structure of the urban economy*. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press.
- Mindali, O., Raveh, A., & Salomon, I. (2004). Urban density and energy consumption: A new look at old statistics. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(2), 143-162. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2003.10.004>
- 환경부. (2019). 제3차 국가 온실가스 감축 기본계획 (2018~2030). 환경부.
- Ministry of Environment (MOE). (2019). The 3rd National Greenhouse Gas Reduction Basic Plan (2018-2030). Ministry of Environment (MOE). Korean Literature]
- 국토교통부. (2006). 수도권경비계획(2006-2020). 국토교통부.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2006). Capital Region Readjustment Plan (2006-2020). Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). Korean Literature]
- Mori, T. (2016). Urbanization and the evolution of international trade patterns. *Regional Science and Urban Economics*, 60, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2016.06.005>
- Muth, R. F. (1969). *Cities and housing: The spatial pattern of urban residential land use*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- 남상우, 우한수, & 김은아. (2023). 통계적 지역 분류체계 활용방안 연구 (연구보고서 2023-09). 통계청 통계개발원.
- Nam, S. M., Woo, H. S., & Kim, E. A. (2023). A study on the utilization of statistical regional classification system (Research Report 2023-09). Statistical Development Institute of Statistics Korea. [Korean Literature]
- Neuman, M. (2005). The compact city fallacy. *Journal of Planning Education and Research*, 25(1), 11-26. <https://doi.org/10.1177/0739456X04270466>
- Newman, P., & Kenworthy, J. R. (1989). Gasoline consumption and cities: A comparison of U.S. cities with a global survey. *Journal of the American Planning Association*, 55(1), 24-37. <https://doi.org/10.1080/01944368908975398>
- Newton, P. W. (2012). Liveable and sustainable? Socio-technical challenges for twenty-first-century cities. *Journal of Urban Technology*, 19(1), 81-102. <https://doi.org/10.1080/10630732.2012.626703>
- Norman, J., MacLean, H. L., & Kennedy, C. A. (2006). Comparing high and low residential density: Life-cycle analysis of energy use and greenhouse

- gas emissions. *Journal of Urban Planning and Development*, 132(1), 10-21. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-9488.2006.132.1.10>
- 오규식, & 정해범. (2007). 도시의 개발밀도 변화가 대기 오염에 미치는 영향: 서울시 이산화질소(NO₂) 및 미세먼지(PM₁₀)를 중심으로. *국토계획*, 42(5), 197-210.
- Oh, K. S., & Jeong, H. B. (2007). The influence of urban development density on air pollution: Focused on nitrogen dioxide (NO₂) and particulate matter (PM₁₀) in Seoul. *Journal of Korea Planning Association*, 42(5), 197-210.
- 오상원, 박지용, & 정주철. (2023). 지역별 온실가스 배출량에 따른 지역 유형화 및 특성분석 연구. *환경정책·행정학회보*, 31(1), 1-30. <https://doi.org/10.15301/jepa.2023.31.1.1>
- Oh, S., Park, J., & Jung, J. (2023). A study on regional typology and characteristics based on greenhouse gas emissions by region. *Journal of Environmental Policy and Administration*, 31(1), 1-30. <https://doi.org/10.15301/jepa.2023.31.1.1>
- Ord, J. K., & Getis, A. (1995). Local spatial autocorrelation statistics: Distributional issues and an application. *Geographical Analysis*, 27(4), 286-306.
- Owens, S. (1992). Energy, environmental sustainability and land-use planning. In M. Breheny (Ed.), *Sustainable development and urban form* (pp. 79-105). London, UK: Pion.
- Páez, A., & Scott, D. M. (2004). Spatial statistics for urban analysis: A review of techniques with examples. *GeoJournal*, 61(1), 53-67. <https://doi.org/10.1023/B:GEJO.0000034736.63525.d3>
- Reckien, D., Ewald, M., Edenhofer, O., & Ludeke, M. K. B. (2007). What parameters influence the spatial variations in CO₂ emissions from road traffic in Berlin? Implications for urban planning to reduce anthropogenic CO₂ emissions. *Urban Studies*, 44(2), 339-355. <https://doi.org/10.1080/00420980601136588>
- Redfearn, C. L. (2007). The topography of metropolitan employment: Identifying centers of employment in a polycentric urban area. *Journal of Urban Economics*, 61(3), 519-541. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2006.08.003>
- Rey, S. J., & Anselin, L. (2010). Spatial analysis of income inequality in urban areas using local Moran's I. *Geographical Analysis*, 42(1), 55-77. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2009.00777.x>
- Rickaby, P., Owens, S. E., & Rickaby, P. A. (1992). Settlements and energy revisited. *Built Environment*, 18(4), 247-252.
- Rodier, C. (2009). A review of the international modeling literature: Transit, land use, and auto pricing strategies to reduce vehicle miles traveled and greenhouse gas emissions. University of California Transportation Center.
- 유윤진, 손세형, & 김도년. (2012). 도시공간구조와 탄소배출량간 상관관계 실증 분석. *한국대기환경학회지*, 28(3), 273-281.
- Ryu, Y. J., Sohn, S. H., & Kim, D. N. (2012). An empirical analysis on correlation between carbon emission and urban spatial structure. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(3), 273-281. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.3.273>
- Sarzynski, A. (2012). Bigger is not always better: A comparative analysis of cities and their air pollution impact. *Urban Studies*, 49(14), 3121-3138. <https://doi.org/10.1177/0042098012448572>
- Schwanen, T., & Mokhtarian, P. L. (2005). What affects commute mode choice: Neighborhood physical structure or preferences toward neighborhoods? *Journal of Transport Geography*, 13(1), 83-99. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2004.11.001>
- Seto, K. C., Guneralp, B., & Hutyrá, L. R. (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), 16083-16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>
- Sharma, S. S. (2011). Determinants of carbon dioxide emissions: Empirical evidence from 69 countries. *Applied Energy*, 88(1), 376-382.
- 신서경, 손재선, & 이다예. (2023). 탄소중립 실현을 위한 도시공간 정책 개선 방안. 국토연구원.
- Shin, S., Son, J., & Lee, D. (2023). Improvement of urban space policy to realize carbon neutrality. Korea Research Institute for Human Settlements. *Korean Literature*]
- Small, K. A., & Song, S. (1994). Population and employment density: Structure and change. *Journal of Urban Economics*, 36(3), 292-313.
- 송기욱, & 남진. (2009). 압축형 도시특성요소가 교통에너지 소비에 미치는 영향에 관한 실증분석. *국토계획*, 44(5), 193-206.
- Song, K. W., & Nam, J. (2009). An analysis on the effects of compact city characteristics on transportation energy consumption. *Journal of Korea Planning Association*, 44(5), 193-206.
- 송미령. (1998). 수도권 통근행태에 영향을 미치는 요인: 공간구조특성과 통근행태의 관계를 중심으로. *국토계획*, 33(4), 55-75.
- Song, M. R. (1998). Factors influencing commuting behavior in the Seoul Metropolitan Area: Focusing on the relationship between spatial structure and commuting patterns. *Journal of Korea Planning Association*, 33(4), 55-75.
- Sovacool, B. K., & Brown, M. A. (2010). Twelve metropolitan carbon footprints: A preliminary comparative global assessment. *Energy Policy*, 38(9), 4856-4869. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.001>
- 통계청. (2023). 2023년 기준 전국사업체조사 개요 및 용어 정의. 세종: 통계청.
- Statistics Korea. (2023). 2023 National Business Survey: Definitions and Concepts. Sejong: Statistics Korea.
- Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the Environmental Kuznets Curve. *World Development*, 32(8), 1419-1439.
- Stone, B., Jr., Mednick, A. C., Holloway, T., & Spak, S. N. (2007). Is compact growth good for air quality? *Journal of the American Planning Association*, 73(4), 404-418. <https://doi.org/10.1080/01944360708978521>
- Stone, B., Jr. (2008). Urban sprawl and air quality in large U.S. cities. *Journal of Environmental Management*, 86(4), 688-698. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.12.034>
- Sun, C., & Wu, Y. (2023). Industrial agglomeration and carbon emissions in polycentric urban structure: Evidence from China. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 4823-4836. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23648-1>
- Taniguchi, M. (2003). The new guideline for sustainable urban layout: To reduce the reliance on the automobile. In *Proceedings of WCTR-SIG1 Meeting in Sendai on Increasing Roles of Land Use-Transport Instruments for Sustainable Cities and Communications (July 22-23)*. Sendai, Japan.
- Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46(sup1), 234-240. <https://doi.org/10.2307/143141>
- United Nations. (1992). Agenda 21: Programme of Action for Sustainable Development. United Nations.
- Veneri, P., & Burgalassi, D. (2012). Questioning polycentric development and its effects: Issues of definition, measurement and outcomes. *European Planning Studies*, 20(6), 1017-1036. <https://doi.org/10.1080/09654313.2012.673566>
- Vermeulen, W., & van Ommeren, J. (2006). Housing supply and the interaction of regional population and employment (CPB Discussion Paper No. 65). CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis.

- Wang, F. (2015). *Quantitative methods and socio-economic applications in GIS* (2nd ed.). CRC Press.
- Wang, H., Zhao, P., & Yan, X. Y. (2023). Exploring the relationship between urban forms and CO₂ emissions in Chinese cities. *Journal of Urban Planning and Development*, 149(1), 1-12. <https://doi.org/10.1061/ASCEUP.1943-5444.0000805>
- Wang, J., Hu, M., & Xu, C. (2013). Industrial density and regional interaction: A spatial autocorrelation analysis of Chinese cities. *Regional Studies*, 47(4), 577-593. <https://doi.org/10.1080/00343404.2011.578705>
- Wang, S., Fang, C., Wang, Y., Huang, Y., & Ma, H. (2015). Quantifying the relationship between urban development intensity and carbon dioxide emissions using a panel data analysis. *Ecological Indicators*, 49, 121-131.
- Wang, Y., Han, R., Li, L., Kubota, J., Zhu, X., & Lu, G. (2016). Does urbanization lead to more carbon emission? Evidence from a panel of BRICS countries. *Applied Energy*, 168, 375-380. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.105>
- Wheeler, D., & Tiefelsdorf, M. (2005). Multicollinearity and correlation among local regression coefficients in geographically weighted regression. *Journal of Geographical Systems*, 7(2), 161-187. <https://doi.org/10.1007/s10109-005-0155-6>
- Williams, K., Burton, E., & Jenks, M. (Eds.). (2000). *Achieving sustainable urban form*. London, UK: E & FN Spon.
- Williams, K. (2005). Spatial planning, urban form and sustainable transport: An introduction. In K. Williams (Ed.), *Spatial planning, urban form and sustainable transport* (pp. 1-13). Aldershot, UK: Ashgate.
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Wu, C. (2013). *Spatiotemporal analysis of urban growth, sprawl and structure*, Curtin University. <https://espace.curtin.edu.au/handle/20.500.11937/45803>
- Yang, H. J., & Choi, M. J. (2011). Compact city and carbon emissions: An integrated approach of building, transport, and greenfield. *Journal of Korea Planning Association*, 46(3), 281-292.
- Yang, X., Zou, X., Li, M., & Wang, Z. (2024). The decarbonization effect of the urban polycentric structure: Empirical evidence from China. *Land*, 13(2), 173. <https://doi.org/10.3390/land13020173>
- Ye, J., Wei, F., Liu, X., & Li, J. (2022). Urban spatial structure and environmental efficiency: Empirical analysis from prefecture-level cities in China. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1058585>
- York, R., Rosa, E. A., & Dietz, T. (2003). STIRPAT, IPAT, and ImpACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 46(3), 351-365.
- Yu, J., De Jong, R., & Lee, L. (2008). Quasi-maximum likelihood estimators for spatial dynamic panel data with fixed effects when both n and T are large. *Journal of Econometrics*, 146(1), 118-134. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2008.08.001>
- Zhang, D., Wang, X., Li, Q., & Ma, C. (2024). Spatial spillover effect of polycentric spatial structure on urban carbon emission efficiency: Evidence from 279 cities in China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(12), 462. <https://doi.org/10.3390/ijgi13120462>
- Zhang, D., Wang, Z., Li, S., & Zhang, H. (2021). Impact of land urbanization on carbon emissions in urban agglomerations of the middle reaches of the Yangtze River. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1403. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041403>
- Zhang, X. Q. (2000). High-rise and high-density compact

- urban form: The development of Hong Kong. In M. Jenks & R. Burgess (Eds.), *Compact cities: Sustainable urban forms for developing countries* (pp. 209-220). London, UK: Spon Press.
- Zhang, X., Li, H., & Liu, Y. (2020). The impact of urban polycentricity on carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123456.
- Zhang, Y., & Li, X. (2022). Polycentric urban spatial structure identification based on multisource data: A case study of Chinese cities. *Sustainability*, 14(6), 3584. <https://doi.org/10.3390/su14063584>
- Zhao, P., & Lu, B. (2020). Exploring the relationship between urban forms and CO₂ emissions in 104 Chinese cities. *Journal of Urban Planning and Development*, 146(2), 04020006. <https://doi.org/10.1061/ASCEUP.1943-5444.0000584>
- Zhu, J., Niu, X., & Wang, Y. (2024). Polycentric urban spatial structure identification based on morphological and functional dimensions: Evidence from three Chinese cities. *Sustainability*, 16(6), 2584. <https://doi.org/10.3390/su16062584>