

STIRPAT 모형 기반 한국의 도시화 및 수송부문 탄소 배출의 관계 분석: 공간 도구변수 접근

김소희* · 최상원** · 김홍석***†

*서울대학교 농경제사회학부 지역정보학전공 박사수료, **부산대학교 생명산업융합연구원 박사후연구원,

***서울대학교 농경제사회학부 지역정보학전공 교수/농업생명과학연구원 겸무연구원/융합전공 지역·공간분석학 겸무교수

Urbanization and road transport carbon emissions: A spatial instrumental variable approach based on the STIRPAT model

Kim, Sohee* · Choi, Sangwon** and Kim, Brian H.S.***†

**Ph.D Candidate, Program in Regional Information Studies, Department of Agricultural Economics and Rural Development, Seoul National University, Seoul, Korea*

***Postdoctoral Fellow, Life and Industry Convergence Research Institute, Pusan National University, Miryang, Korea*

****Professor, Program in Regional Information Studies, Department of Agricultural Economics and Rural Development / Adjunct Researcher, Research Institute of Agriculture and Life Sciences / Adjunct Professor, Integrated Major in Regional Studies and Spatial Analytics, Seoul National University, Seoul, Korea*

ABSTRACT

Climate change mitigation has become a global priority, and the transport sector is a major source of carbon emissions. Although urbanization is often associated with increased energy consumption and environmental pressure, it may also reduce emissions by improving spatial efficiency and transport systems. However, empirical evidence regarding this relationship remains limited in South Korea. This study examines the relationship between urbanization and transport-sector carbon emissions across 225 Si-Gun-Gu districts in South Korea using cross-sectional data from 2019. Based on the STIRPAT framework, the analysis incorporates population size, the elderly population share, gross regional domestic product (GRDP) per capita, local income tax per capita, and the urbanization rate. To address spatial dependence and endogeneity, spatial instrumental-variable models are estimated using queen-contiguity and inverse-distance weight matrices. The share of parking area in 2009 is used as an instrument for the urbanization rate. The results reveal significant spatial autocorrelation in transport-sector carbon emissions and confirm that the spatial error model is more appropriate than the spatial lag and ordinary least squares models. Population size, GRDP per capita, and local income tax per capita are positively associated with emissions, whereas the elderly population share is negatively associated with them. The urbanization rate has a consistently significant negative effect across all model specifications. These findings suggest that urbanization helps reduce transport-sector carbon emissions in South Korea. This effect may be explained by shorter travel distances in compact urban areas, more efficient public transport, and shared infrastructure. The study provides empirical evidence that urbanization can support climate change mitigation and offers policy implications for sustainable urban planning.

Key words : Climate Change, Transportation Carbon Emission, Urbanization, Spatial Econometric Model, Stochastic Impact by Regression on Population, Affluence and Technology (STIRPAT)

†Corresponding author : briankim66@snu.ac.kr (Seoul National University,
1 Gwanangno, Gwanak-Gu, Seoul, 08826, Korea. Tel. +82-2-880-4740)

ORCID 김소희 0009-0004-3481-2733
최상원 0000-0002-0872-819X

김홍석 0000-0002-8929-2710

1. 서론

국제사회는 전 세계적으로 발생하는 기후변화에 의한 피해에 대응하기 위해 여러 협약 및 목표를 수립하고 있다. 기후변화는 자연적 또는 인위적 원인에 의해 발생할 수 있으나, 산업화와 개발 목적의 삼림 벌채로 인한 대기 중 온실가스 농도의 증가가 기후변화의 주요 원인으로 식별되고 있다. 이에 탄소 감축과 탄소 중립은 전 세계적으로 중요한 과제로 대두되고 있으며, 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 공동 사회 경제적 경로(Shared Socioeconomic Pathway, SSP) 및 대표 온실가스 농도 경로 시나리오(Representative Concentration Pathways, RCP)에 기반하여 기후변화의 피해를 경고하고 대응 조치를 권고하고 있다. 한국 또한 IPCC와 유엔기후변화협약(United Nation Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 당사국으로서, 기후변화에 대응하기 위한 적극적인 전략 수립 및 목표 설정과 같은 노력을 기울이고 있다.

기후변화에 대한 대응은 적응과 완화로 분류할 수 있으며, 완화는 보다 근본적인 대응을 의미한다. 적응은 현재 또는 향후 발생할 수 있는 기후변화로 인한 영향에 대응할 수 있는 생태적 및 사회적, 경제적 시스템을 조절하는 것을 의미한다. 이에 이상기후에 따른 농작물 피해, 침수, 폭염 등에 대응하기 위한 여러 인프라를 구축하는 것을 적응의 일환으로 볼 수 있다(UNFCCC, 2026). 이와 달리, 완화는 온실가스를 줄이거나 흡수원을 강화하기 위해 취하는 모든 조치를 의미하며, 산림보전 및 스마트 농업, 재생에너지 전환 및 에너지 효율 개선 등이 이에 포함될 수 있다(UNDP, 2024). 이러한 점은 적응과 완화가 상호 보완적인 관계에 있다는 점을 암시한다. 이와 더불어, SSP와 RCP 탄소 시나리오와 탄소 중립을 위한 국내·외적 노력은 근본적인 대응의 차원에서 탄소 저감을 통한 기후변화 완화의 필요성을 보여준다.

이와 관련하여, 한국 탄소 배출량 중 세 번째로 큰 비중을 차지하는 수송부문 탄소 배출량은 주요 저감 대상으로 논의되고 있다. 수송부문 탄소 배출은 도로교통, 항공, 해운, 철도 등의 영역에서 발생하며, 도로수송이 대부분을 차지하는 가운데 지속적인 증가 추세를 보이고 있다. 정부는 2030년까지 수송부문 탄소 배출량을 2018년 대비 약 37.8% 감축한다는 목표를 설정하고, 저공해 차량 보급 확대 및 노후 차량 규제와 같은 정책을 추진하고 있다. 이에 수송부문 탄소 배출량을 감축하기 위한 논의가 도시

계획과, 교통 인프라(Shin et al., 2025; Yang and Choi, 2011; Yun, 2023), 친환경차 보급 확대에 따른 교통세 개편과 탄소 가격 도입(Lim et al., 2022; Park et al., 2023), 압축적 도시 공간구조와 토지이용(Yun, 2023)의 관점에서 진행되고 있다. 기술 분야에서도 선박 탄소 포집, 운송, 저장, 활용 영역에서의 발전이 진행되고 있으며(Lee and Park, 2024), 자율주행 전기자동차의 도입에 따른 도로 탄소 배출량 감소가 확인되는 바와 같이 기술 도입의 실효성이 증명되고 있다(Lee et al., 2021).

한편, 도시 인구 유입에 따른 교통 수요 증가(Zhang et al., 2016), 무분별한 도시 스프롤과 이로 인한 통근거리 증가(Ding et al., 2017; Kakar and Prasad, 2020)에 따른 수송 탄소 배출량 증가는, 한국의 도시화율과 수송 탄소 배출에 대한 논의의 필요성을 조명한다. 한국은 급격한 산업화와 이촌향도 현상으로 인해 전 세계적으로 높은 수준의 도시화율을 기록하고 있는 국가임과 동시에(United Nations, 2019), 적극적으로 수송부문 탄소 저감을 달성할 의무가 있는 국가이다. 그러나 수송부문 탄소 배출 감축에 대한 논의는 기술 및 정책의 관점에서 주로 진행되고 있어, 한국의 도시화가 환경에 어떠한 영향을 미치고 있는지에 대한 논의는 상대적으로 부족한 것으로 보인다. 더불어, 한국의 도시화는 높은 수준으로 진전되어 있어(Lee and Kim, 2020), 국가 수준의 향후 도시화 증가율은 상대적으로 낮을 것으로 예상된다. 그러나 지역 불균형으로 인해 도시화율의 지역 격차가 고착화된 상황에서, 현시점의 도시화율과 수송 탄소 배출량에 대한 논의는 도시화율 격차가 수송 탄소 배출량에 어떠한 격차를 미치는지에 대한 결과를 제공할 것이다. 도시화율 격차가 누적된 지역 불균형 발전의 결과라는 점을 고려하면, 현시점의 도시화율 및 수송 탄소 배출량의 관계 분석은 지역 불균형 발전으로 인한 수송 탄소 배출의 불균형 형성이라는 결론을 도출할 수 있을 것으로 예상된다.

이에 본 연구에서는 횡단면 분석에 기반하여 한국의 도시화율과 수송부문 탄소 배출량의 관계를 살펴보고자 한다. 이를 통해 누적된 지역 불균형으로 인한 수송 탄소 배출 격차를 진단함과 동시에, 향후 수송 탄소 저감을 위한 방향성 제시에 기여하고자 한다. 본 연구의 결과는 인구 이동 및 감소, 초고령사회로 인해 지역 불균형이 지속될 것으로 예상되는 상황에서, 탄소 저감 정책 수립을 위한 유의미한 근거가 될 것으로 예상된다. 본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기후변화 완화 및 수송부문 탄소 저감에 대한 논의와 현황을 살펴본다. 3장에서는 한국의

수송분야 탄소 배출량 및 도시화율의 현황을 살펴보고 이를 통해 어떠한 정책적 논의를 도출할 수 있는지 보고자 한다. 4장에서는 분석자료 및 방법론을 서술하며, 5장에서는 분석 결과를 제시한다. 6장에서는 도시화와 수송부문 탄소 배출량의 관계에 대한 주요 논의점과 탄소 배출 저감을 위한 정책적 제언, 연구의 한계점을 서술하고, 향후 연구 방향에 대한 제언을 하고자 한다.

2. 기후변화 완화 및 수송부문 탄소 저감에 대한 논의

기후변화 완화에 관한 구체적인 논의는 1997년 교토 의정서의 채택으로 시작되었다. 1992년 기후변화에 관한 기본 협약(Framework Agreement on Climate Change 1992)에 온실가스 배출량을 줄이기 위한 선진국의 책임이 명시되었으나, 이는 구속력이 없다는 점에서 제한적이었다. 그러나 이후 1997년 교토 의정서는 온실가스 배출에 대한 주요 책임이 있는 선진국의 배출 감축을 위한 구체적인 목표에 구속력을 부여하여 기존 협약의 한계점을 극복하였다(Yun, 2002). 한국은 2002년에 교토 의정서를 비준했지만 부속서 I에 포함되지 않은 국가 지위를 유지하여, 감축 의무 이행 대신, 국가 통계를 작성 및 교육, 연구에 협력의 당사국이 되었다. 그러나 한국이 점차 선진국 대열에 합류함에 따라 적극적인 온실가스 감축의 필요성이 대두되어, 한국은 2016년 파리협약에 공식 당사국으로 가입하여 구체적인 감축목표를 설정하였다. 일부 선진국에만 구속되는 교토 의정서와 달리, 파리협약은 모든 당사국에 적용되는 포괄적인 협약이며 종료일을 명시하지 않은 특징이 존재한다. 이에 한국은 온실가스 감축을 위한 정부 간 기후변화에 관한 정부 간 패널 보고서에 참여하며 지속가능한 온실가스 감축에 기여하고 있다.

한편, 한국 정부 입장에서의 감축에 대한 노력과 더불어 국내 온실가스 저감에 대한 연구 또한 정책 및 기술 등 여러 분야에서 진행되고 있다. 정책의 경우 Kim (2009)은 지자체의 입장에서 탄소제로 도시를 위한 정책 연구를 진행하였으며, 공무원 및 전문가 설문을 통해 신재생에너지 설치 확대 및 녹지조성, 에너지절약과 녹색구매 촉진을 위한 소비자 운동이 우선시되어야 함을 도출하였다. 이와 더불어, Hwang et al. (2012)은 탄소 저감 정책의 일환인 탄소포인트제도의 효과를 시계열 공간분석을 통해 분석하여 제도의 실효성을 도출한 바 있다. 기술의 경우 Wee

et al. (2008)은 전력 및 산업 분야에서의 탄소 배출량 저감을 위한 탄소 포집 기술을, Ahn (2022)은 탄소중립의 관점에서 현행 친환경 선박 인증제도 개선 방안을 제시하였다. 이에 Park et al. (2023)은 탄소중립 기술이 에너지 및 산업, 수송 등에 적용됨에 따라 기대할 수 있는 탄소 저감 효과를 공간 단위에서 평가하기 위해, 탄소중립 기술 적용 시나리오 모형(Carbon-neutrality Assessment based on Technology Application Scenario, CATAS)을 활용하여 탄소 저감량을 수치적으로 도출한 바 있다. 이와 같이, 국가적으로 기후변화 완화를 위한 부문별 탄소 배출 저감 목표가 수립됨에 따라, 각 부문에 대한 저감 방안과 이를 평가하기 위한 연구가 진행되고 있다.

한국의 수송부문 탄소 저감과 관련한 연구는 주로 도시 계획 및 정책 측면에서 진행되었다. Kang et al. (2010)은 도시계획의 관점에서 저탄소 도시 조성을 위한 중요 요인을 선별하였으며, 녹색 교통 체계 구축 및 친환경 토지이용이 도시의 탄소 저감을 위한 효과적인 요소라는 점을 밝혔다. 또한 Yang and Choi (2011)는 교통 부문의 에너지와 건축부문의 에너지 소비량, 녹지에 의한 탄소 흡수량을 고려한, 압축적 도시 개발이 탄소 배출 저감에 기여할 수 있음을 논의하였다. Park et al. (2021)은 화석연료 사용으로 인해 수송부문 배출량의 대부분이 도로 배출량으로 구성되어있음을 언급하며, 탄소중립 교통체계를 달성하기 위해 친환경 교통으로의 이행이 필수적임을 강조하였다. 그러나 친환경 차량으로의 전환이 교통세수 감소를 견인함에 따라, 지속가능한 국가 재정과 교통시설 투자를 보조할 교통세 개편안을 제시하였다. 이와 더불어, Lim et al. (2022)은 시나리오 기반 일반균형모형을 이용하여 국가 2050 탄소중립 전략이 경제 및 에너지, 환경에 미치는 영향을 분석하였으며, 이를 통해 수송부문 탄소 저감을 위한 정책을 제시하였다. 해당 시나리오는 탄소 가격 및 친환경 차량 전환, 교통세 개편에 기반하였으며, 분석 결과는 수송부문 특화 정책에 차종 전환 및 세제 개편 등이 효과적임을 시사하였다. 한편, Yun (2023)은 보다 미시적인 관점에서 서울시를 기준으로 공간구조 특성과 수송부문 탄소 배출량의 관계를 분석하였으며, 배출량 저감을 위해 압축적 공간구조와 점진적 토지이용 변화를 반영한 정책 수립의 당위성을 언급하였다.

한편, 도시화와 수송 탄소 배출 간의 관계에 대한 국제적 논의는 단순한 인구 집중 현상을 넘어, 도시 공간구조와 생활양식, 그리고 인프라 체계의 상호작용을 중심으로 진행되어 왔다. 특히 도시로의 인구 유입은 교통 수요의

급증과 함께 이동 거리의 확대를 초래하여, 이주 과정에서 발생하는 추가적인 탄소 배출의 상당 부분이 수송 부문에서 기인하는 것으로 나타났다(Zhang et al., 2016). 이는 산업화로 인한 도시화와 높은 도시 밀도가 협소한 지역에서의 주거 및 연료에 대한 수요 증가로 인해 환경에 부정적인 영향을 미치는 점과 관련되어 있는 것으로 보인다(Parikh and Shukla, 1995; Sun et al., 2014; Wang and Li, 2021). 더 나아가, 도시의 물리적 확산 형태 역시 중요한 결정요인으로 지목되었다. 대중교통 체계와 토지이용 계획이 결합되지 않은 도시 스프롤은 주거지와 직장의 공간적 분리를 심화시키며, 결과적으로 통근 거리 증가와 자가용 이용 의존도를 높이는 것으로 나타났다(Ding et al., 2017; Kakar and Prasad, 2020). 이러한 구조적 특성이 화석연료 소비를 증가시키고 교통 부문의 탄소 배출을 가속하는 주요 요인으로 작용한 것이다. 그러나 도시화가 지역 내 인프라 발전으로 인해 에너지 효율성을 개선하여 탄소 배출량을 감소시킬 수 있다는 관점 또한 존재한다(Li and Lin, 2015). 이에 따라 도시 인구 규모와 밀도를 고려한 최적의 공간구조 설계(Shi et al., 2023)와 더불어, 대중교통 중심의 통합적 교통 정책 수립이 핵심적인 정책 과제로 제시되고 있다(Lyu et al., 2025). 이러한 맥락에서 최근 연구들은 도시화, 교통체계, 그리고 환경적 지속가능성 간의 관계를 다층적·공간적으로 분석할 필요성을 강조하고 있다.

이와 같이 기존의 연구들은 기후변화 완화의 일환으로써 수송부문 탄소 배출량 저감에 관한 시사점과 논의점을 도시계획 및 정책, 기술의 관점에서 도출한 바 있다. 그러나, 한국의 지역 격차가 고착화 및 지속된 상황임에도 불구하고 지역 간 도시화율과 수송부문 탄소 배출량에 대한 논의는 상대적으로 부족한 것으로 보인다. 중국의 경우 도시화율로 인한 수요 증가가 도로 및 항공 영역에서의 탄소 배출량 증가에 기여하는 것으로 나타났으나(Lv et al., 2019), 유럽의 경우 녹색도시 프로젝트(Green city project)와 같은 도시계획으로 인해 도시화율이 수송 탄소 배출 증가에 유의미한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(Amin et al., 2020). 그러나 해당 국가들과 한국의 맥락적 차이는 실증 분석에 기반하지 않은 상황에서 타 국가의 결과를 한국에 적용함에 한계가 있음을 시사한다. 또한, 도시화율과 수송 탄소 배출에 대한 연구는 모든 지역

의 변화를 동일하게 가정한 동태적 관점에서의 접근으로 이를 분석하였으므로, 지역별 격차에 따른 정책적 시사점을 제공하지 못하였다. 이러한 국가 간 맥락적 차이, 국가 내 지역 간 수송 인프라 개발의 격차는 한국의 도시화율과 수송 탄소 배출에 대한 논의의 필요성을 보여준다. 더불어, 도시화와 수송 탄소 배출 간의 관계가 도시 공간구조와 생활양식, 인프라 체계에 따라 이질적으로 나타났다는 것은, 도시화에 따라 구축된 수송인프라의 격차로 인해 수송 탄소 배출의 격차 또한 존재할 수 있음을 암시한다. 이에 본 연구에서는 ‘지역 간 도시화율의 격차는 수송 탄소 배출의 격차를 야기하는가?’라는 질문을 통해 한국의 지역 간 도시화율과 수송부문 탄소 배출의 관계를 분석하고 지속가능한 발전을 위한 정책적 시사점을 도출하고자 한다. 본 연구의 결과는 탄소중립 달성에 중앙정부와 지자체의 상-하향식 통합적 정책에 기여할 것으로 예상된다.

3. 한국의 수송부문 탄소 배출 및 도시화율

국가 단위에서 수송부문 탄소 배출은 전환 및 산업 부문에 이어 세 번째로 많은 배출량을 차지하고 있다. 도로 및 해운, 민간항공, 철도, 기타 수송¹⁾ 분야로 구분되는 수송부문 탄소 배출은 지속적으로 증가하고 있으며, 도로 부분에서의 탄소 배출량이 가장 많은 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다(Fig. 1). 현재 정부는 2050 탄소중립 달성을 위해 ‘국가 탄소중립·녹색성장계획’을 수립하여, 2030년까지 해당 부문의 탄소 배출량을 2018년 대비 약 37.8%를 감축한 6천 1백만 톤의 배출량을 목표로 설정하고 감축을 위한 정책을 시행 중이다. 대표적으로 전기차 및 수소차와 같은 저공해 차량 구입 지원, 노후 차량 규제 등의 정책이 시행 중이나, 현재 추세에서 이를 달성하기 위해서는 보다 적극적인 정책이 필요한 것으로 보인다.

한편, 한국의 도시화율은 꾸준히 증가하여 전국적으로 약 90% 이상의 인구가 도시지역에 거주하는 것을 알 수 있다(Table 1). 2005년을 기준으로 하면, 이미 산업화가 진행되어 도시화율 증가세는 크지 않으나 지속적인 증가세가 있는 것을 알 수 있다. 그러나 현재 낮은 합계출산율과 초고령사회로의 진입은, 도시화율의 증가가 도시 내 자연 증가가 아닌 사회적 증가 즉, 이동에 의존할 것임을

1) 기타수송은 터미널 및 유료주차장, 파이프라인 수송, 공항 내 지상 운송수단 등 다른 배출원으로 포함되지 않은 비도로 수송을 의미한다. 또한 산업계의 수송용 연료 소비는 산업계의 배출량으로 산정된다. 추가로 국제 수송의 경우(항공 및 해운) 국가 온실가스 통계에 포함되지 않는다(Ministry of Environment, 2022).

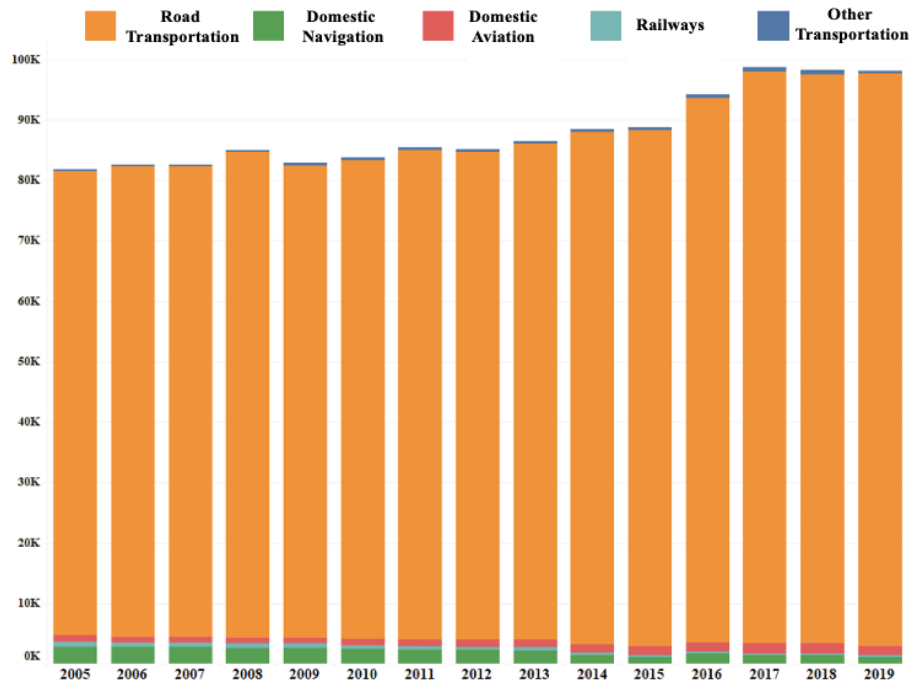


Fig. 1. Changes in carbon emissions from South Korea's transport sector (2005–2019, Unit: kt CO₂-eq)

Table 1. Changes in South Korea's urbanization rate (% , 2005–2020)

Year	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Urbanization Rate	89.06	89.29	89.42	89.33	89.51	89.63	90.08	90.19
Year	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Urbanization Rate	90.49	90.50	90.62	90.62	90.74	90.97	91.11	91.22

시사한다. 또한 지속적인 도시로의 인구 이동을 고려하면, 향후 지역 내 도시인구 수는 감소할 수 있으나 도시화율은 보다 증가할 것으로 보인다.

수송부문 탄소 배출량과 도시화율의 2019년 단년도 자료는 지역별 격차와 자료의 공간적 군집성을 보여준다 (Fig. 2). 수송부문 탄소는 수도권 또는 광역시 일부 지역에서 높은 배출량을 관찰할 수 있으나, 그 외의 지역에서는 대체로 낮은 배출량이 있는 것으로 보인다. 이와 반대로, 낮은 탄소 배출량을 가진 지역 또한 주변 지역과 더불어 관찰할 수 있는 것으로 보인다. 이를 통해 한국 수송부문 탄소 배출은 공간적 인접성을 가지고 있으며, 일부 지역의 배출량이 전체 배출량의 유의미한 비중을 차지하는 것을 알 수 있다. 도시화율은 수도권 및 광역시를 중심으로 뚜렷하게 높은 분포를 보여 수송부문 탄소 배출량과의 관계가 있는 것으로 보인다. 그러나 서울 일부 자치

구를 포함하여 도시화율이 높음에도 수송부문 탄소 배출량이 비교적 낮게 나타나는 지역들이 관찰된다. 이는 대중교통 인프라 확충이나 통행 거리 단축 등으로 인해 고밀도 도시화가 진행된 지역에서 수송부문 탄소 배출이 상대적으로 낮을 수 있음을 시사한다.

4. 연구방법

4.1. 자료의 범위 및 분석 대상

지역의 도시화율이 수송부문 탄소 저감에 어떠한 연관성이 존재하는지 확인하기 위해, 본 연구에서는 지역적 범위를 225개 시군구로 설정하였다. 2019년 기준 자치시의 구를 제외한 시군구 단위의 행정구역은 229개이나, 수송부문 탄소 배출의 공간적 의존성을 고려하고자 제주특별자치도(제주시, 서귀포시) 및 울릉도, 인천광역시 옹진

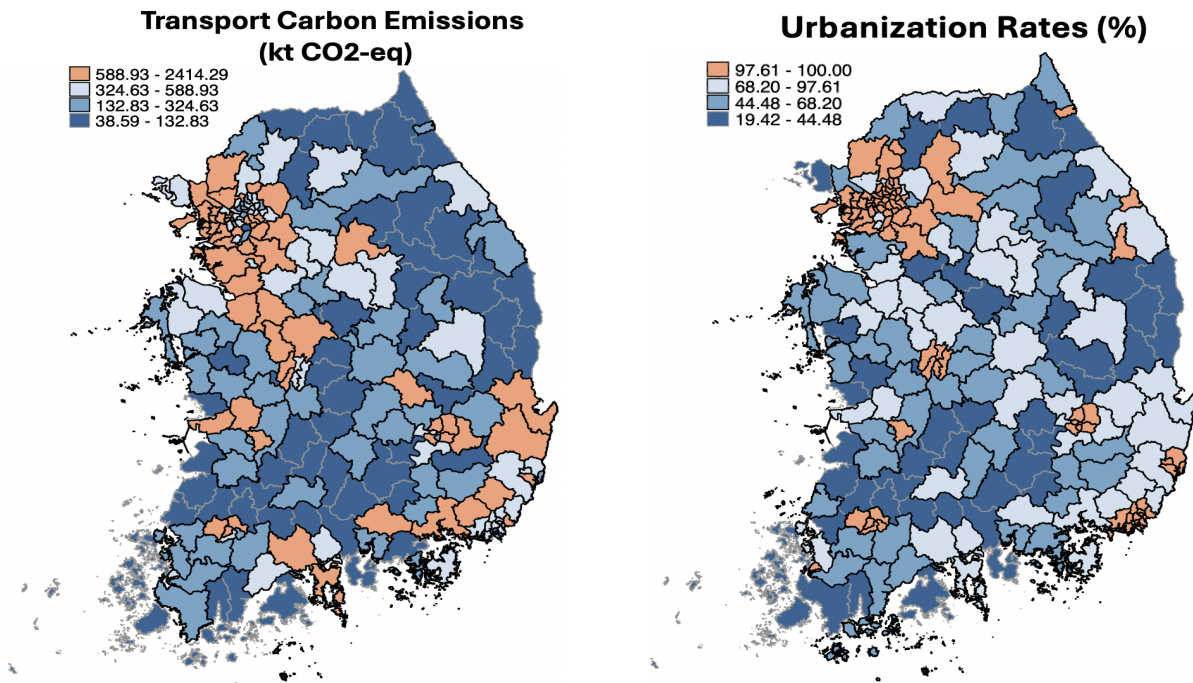


Fig. 2. Status of Carbon Emissions from the Transport Sector and Urbanization Rates in 2019 (Dokdo is excluded due to data unavailability. Jeju Special Self-Governing Province, Ongjin-gun (Incheon), and Ulleung-gun (Gyeongsangbuk-do) are also excluded to examine the distribution of potential spatial autocorrelation. For regional comparisons of transport carbon emissions and urbanization rates, the data classes in both maps are uniformly set to quartiles.)

Table 2. Description of variables

Variable		Description
Dependent variable	Transportation carbon emissions (kt CO ₂ -eq)	Vehicle Kilometers Travelled (VKT)-based emissions
Independent variable	Population	Total population of each district
	Share of older adults (%)	(Population aged 65 and over / Total population) × 100
	GRDP per capita (1,000,000 KRW)	GRDP (in 2015 constant prices) / Total population
	Local income tax per capita (1,000 KRW)	Local income tax / Total population
	Urbanization rates (%)	(Urban population / Total population) × 100
Instrument variable	Share of parking area (% , 2009)	(Parking area / Total area) × 100

군은 제외하였다. 변수 목록은 Table 2에 제시하였으며, 공간적 의존성 및 도구변수를 포함한 방법론은 ‘4.4 분석 방법’에서 설명하고자 한다.

종속변수인 수송부문 탄소 배출량은 Fig. 1에서 언급한 바와 같이 총 5개의 영역으로 구성되어있으나, 시군구 단위의 수송부문 탄소 배출량은 세부 항목별로 제공되지 않는다. 그러나 도로 수송이 수송부문 탄소 배출량의 95%

이상을 차지하며(Jang et al., 2021), 도로 수송량이 주로 도시인구의 수송 수요와 관련이 있다는 점을 고려하면 (Taniguchi and Thompson, 2015; Zhang et al., 2016), 인구이동과 토지이용으로 형성되는 도시화율이 현재의 통합된 수송부문 탄소 배출량을 설명할 수 있을 것으로 보인다.

또한, 본 연구에서는 수송부문 탄소 배출량을 산정함에

유류 소비량 기반 배출량 대신 VKT (Vehicle Kilometers Traveled) 기반 배출량을 활용한다. 도시화는 인구집중과 토지이용, 교통 활동의 변화를 통해 지역의 이동수요와 차량 주행거리에 영향을 미친다. 이와 달리 유류 소비량은 차량의 연비 개선, 연료 효율, 전기차 보급 등 기술적 요인이 혼재된 개념이다. 이에 본 연구에서는 실제 교통수요를 직접 반영하는 VKT 기반 수송부문 탄소 배출량을 사용한다.

4.2. 독립변수 선정 근거 및 설명

4.2.1. STochastic Impact by Regression on Population, Affluence and Technology (STIRPAT)

본 연구에서는 STochastic Impact by Regression on Population, Affluence and Technology (STIRPAT) 모델에 기반하여 변수를 선정하였다. 이는 Ehrlich and Holdren (1971)과 Commoner et al. (1971)의 논의를 통해 인위적인 환경영향(Impact)을 인구(Population) 및 경제적 풍요(Affluence), 기술(Technology)에 기반하여 설명하고자 개발된 모델인 IPAT의 확장된 모델이다(Eq. (1)).

$$I(\text{Impact}) = P(\text{Population}) \times A(\text{Affluence}) \times T(\text{Technology}) \quad (1)$$

IPAT 모델은 환경 변화의 요인을 명세화하여 간결히 분석할 수 있다는 장점이 존재한다. 그러나 이는 자체적으로 각 요인의 고정적인 비례성을 가정한다는 한계가 존재한다. 즉, 한 요인이 N배 증가하면 환경적 영향 또한 N배 증가한다는 것이다(York et al., 2003).

STIRPAT은 IPAT 모델의 한계를 극복한 모델로(Dietz and Rosa, 1994; Rosa and Dietz, 1998) 각 요인의 영향을 확률적 및 경험적으로 추정할 수 있는 모델이다(Eq. (2)). 이는 Eq. (3)과 같이 로그 형태로 변환되어 계량 모형을 통해 각 요인의 영향을 추정함에 사용된다.

$$I(\text{Impact}) = aP(\text{Population})^b \times A(\text{Affluence})^c \times T(\text{Technology})^d e \quad (2)$$

$$\text{Log}(I) = a + b(\text{Log}P) + c(\text{Log}A) + d(\text{Log}T) + e \quad (3)$$

해당 모델 내 요인 변수는 IPAT과 동일하다. 인구요인에는 연구 목적에 따라 전체 인구 또는 특정 연령 계층의

비율을 투입할 수 있다. 경제적 풍요의 경우 연구 대상에 따라 GRDP 또는 GDP를 P로 나누어 준 값을 투입한다. 마지막으로 기술 요인의 경우 일반적으로 I를 GRDP 또는 GDP로 나눈 값을 에너지 또는 탄소 집약도로 측정하여 투입하기도 하나, 이 또한 연구 목적에 따라 기술 발전으로 고려할 수 있는 요인을 투입할 수 있다. 본 연구에서는 해당 모델과 선행 연구에 기반하여 각 요소에 투입할 요인들을 선정하였으며, 이에 따른 수식은 Eq. (4)와 같다. 각 요인에 선정된 변수들에 대한 설명은 다음 절에서 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Log}(\text{Transportation carbon emission}) = & a + b * \text{Log}(\text{Population}) \\ & + c * \text{Log}(\text{Share of older adults}) + \\ & d * \text{Log}(\text{GRDP per capita or Local income tax per capita}) \\ & + e * \text{Log}(\text{Urbanization rate}) + k \end{aligned} \quad (4)$$

4.2.2. 인구 규모, 고령인구 비율

지역 및 국가 단위에서 인구가 증가하면 이에 따른 에너지 소비 증가로 인해 탄소 배출량이 증가한다(Shi, 2003). 그러나 인간의 생애주기에 따라 에너지 소비 행태가 변화하므로 이를 연령 계층에 따라 분석하고자 하는 시도가 있었으며(Zhang and Tan, 2016), 개별 연령 계층 비율이 탄소 배출량에 각기 다른 연관성이 있다는 것이 밝혀진 바 있다. 생산가능인구(15~64세)는 다른 연령 계층에 비해 많은 활동량 및 소비라는 특성으로 인해 지역 및 국가 단위에서 이들 비중의 증가는 탄소 배출량 증가와 연관성이 있다. 이와 달리 연소인구(0~14세), 고령인구(65세 이상) 인구는 상대적으로 적은 활동량과 일부 재화에 대한 수요가 감소하여 탄소 배출량 감소와 연관성이 있는 것으로 나타난다(Zagheni, 2011). 특히 초고령사회에 진입한 한국의 상황에서는 65세 이상 인구 계층의 증가가 Okada (2012)의 결과에서 나타난 바와 같이 교통 분야의 탄소 저감을 견인할 것으로 보인다. 본 연구는 점차 초고령 사회로 진입하는 현재 상황과 고령화의 지역별 격차를 반영하기 위해 인구요인을 지역별 고령인구 비율로 설정하였다.

4.2.3. 1인당 지역 내 총생산(GRDP) 및 1인당 지방소득세

STIRPAT 모델을 사용한 연구들은 일반적으로 지역의 경제적 풍요를 1인당 GRDP 또는 GDP로 측정한다. 지역의 경제력은 개발 정도를 측정하는 하나의 요인으로 작용

할 수 있으며, 개발이 진행됨에 따라 개인의 경제활동이 활발해져 환경에 대한 악영향이 증가할 수 있기 때문이다. 그러나 Lohwasser and Schaffer (2023)에서 밝혀진 바와 같이, 가계소득이 GRDP, GDP보다 실질적인 물질적 풍요의 기반이 되며, 소비 행태를 결정하는 핵심 요인이 되기도 한다. 이는 기업의 이윤 비중이 증가하면서 GRDP, GDP가 사람들의 소득 및 소비수준을 반영함에 한계가 있음에 기인한다. 수송부문 탄소 배출은 지역의 생산활동뿐만 아니라 주민의 이동 행태와 소비활동에 의해 영향받는다. 개인의 소득수준이 높을수록 자동차 보유, 통근 및 여가 목적의 이동, 소비활동 등 교통수요를 유발하는 활동이 증가할 가능성이 높으며, 이는 수송부문 탄소 배출로 이어질 수 있다. 반면, 1인당 GRDP는 지역 내 기업의 생산활동과 산업구조를 반영하는 지표로서 지역 주민의 실제 소비 능력과 이동행태를 충분히 설명하지 못할 가능성이 존재한다. 이에 본 연구에서는 1인당 GRDP를 투입한 모델, 1인당 지방소득세를 투입한 모델을 별도로 추정하고자 한다.

한편, 일부 연구에서는 일정 수준의 경제력 이상인 국가에서는 장·단기적으로 기술 발전과 환경에 대한 투자가 증가하여 환경이 개선된다는 환경 쿠즈네츠 곡선을 확인하기도 한다(Lau et al., 2014; Nasir and Rehman, 2011; Yao et al., 2019). 다만, 2019년의 한국은 이미 선진국에 진입하였다는 점, 본 연구가 횡단면 분석을 진행한다는 점을 고려하여 환경 쿠즈네츠 곡선 확인을 위한 제곱 항은 투입하지 않는다.

4.2.4. 도시화율 및 도구변수(2009년 주차장 면적 비율)

지역의 도시화율은 전체인구(도시지역+비도시지역) 대비 도시지역 인구를 의미한다. 본 연구에서는 도시화율을 측정함에 행정구역 기준(읍·동)이 아닌 용도지역 기준(주거지역·상업지역·공업지역·도시 녹지지역)을 적용하였다. 도시화는 지역의 발전을 측정하는 지표입과 동시에, 지역 내 농촌과 도시 분리 및 식량 생산자와 소비자의 공간적 분화, 토지 이용 현황을 의미하기 때문이다.

도시화는 경제성장과 더불어 에너지 소비와 탄소 배출을 촉진하는 현상으로 여겨진다(Jones, 1991). 특히 수송부문에서는 도시화에 따른 생산품 수송량 증가가 지역 내 탄소 배출 증가로 이어질 수 있다는 점에서 이러한 경향이 뚜렷하게 나타난다. 그럼에도 불구하고, 높은 도시화율은 거주민들의 이동에 필요한 에너지 사용 저감에 영향을 주기도 한다(Liddle, 2014). 이는 도시화 증가에 따른 대중

교통 인프라 발전과 더불어, 공공 인프라 효율 개선이 에너지 사용을 저감할 수 있음에 기인한다(Chen et al., 2008). 한편, 이를 국가 소득 수준에서 보면, 도시화율의 증가에 따른 탄소 저감 효과는 저소득 국가에서 발생하며, 중간 및 고소득 국가에서는 오히려 탄소 증가를 견인할 수 있다는 결과 또한 존재한다(Poumanyong and Kaneko, 2010). 이는 구성원들의 자원 집약적 생활 습관을 유지하기 위해 더 많은 인프라 에너지가 소비됨에 기인한다.

이러한 상반된 결과는 도시화와 수송 탄소 배출 간 관계가 단순한 상관관계를 넘어, 내생적 구조를 가질 가능성을 시사한다. 예를 들어, 소득 수준이 높거나 환경 인식이 높은 인구가 교통 인프라가 잘 갖춰진 고밀도 도시지역에 거주할 가능성이 있으며, 이는 도시화율이 탄소 배출에 미치는 효과를 과대 또는 과소 추정하게 만들 수 있다. 따라서 도시화율의 외생적 변동을 식별하기 위해 본 연구는 도구변수 접근법을 적용하고자 한다.

도구변수는 도시화율과 수송 수요의 관계에 기반하여 2009년의 주차장 면적 비율을 활용한다. 도시화율의 증가는 도시 내 물류 운송 수요와 이에 수반되는 주차수요의 증가를 견인한다(Taniguchi and Thompson, 2015). 더불어, 도시에 물류를 공급하기 위한 교외의 물류 시설은 지역 내 공간을 개편하며 도시의 확장에 기여한다(Heitz et al., 2017). 즉, 도시화율과 수송 수요 및 주차장은 순환적 관계에 있으며, 수송부문 탄소 배출에 영향을 미치는 것이다. 이러한 관계는 과거의 도시화율, 주차장 면적 비율, 수송부문 탄소 배출이 미래의 도시화율, 주차장 면적 비율, 수송부문 탄소 배출에 영향을 줄 수 있음을 의미한다. 또한, 미래의 도시화율은 과거 주차장 면적 비율의 결과이며(관련성), 과거 주차장 면적 비율은 미래의 도시화율을 매개로 수송부문 탄소 배출량에 영향을 미칠 수 있음을 암시한다(외생성). 이러한 논리는 동태적, 순환적 관계에 있는 요인들의 인과성에 대해 논의한 Helske and Tikka (2024)에 의해 뒷받침된다. 이에 본 연구에서는 위의 순환적 관계와 과거의 현상을 도구변수로 사용한 사례(Acemoglu et al., 2001; Nunn, 2008)에 기반하여, 과거(2009년) 주차장 면적 비율을 2019년 도시화율에 대한 도구변수로 사용하고자 한다. 또한, 상기 언급한 과거 주차장 면적 비율과 2019년의 도시화율의 이론적 관련성 및 외생성을 뒷받침하기 위한 보조적 분석 결과를 ‘5. 분석 결과’ 절에 제시하고자 한다.

Table 3. Descriptive statistics

Variable	Mean	Standard deviation	Min	Max	Coefficient of variation
Transportation carbon emissions (kt CO ₂ -eq)	447.223	422.268	38.590	2414.291	0.944
Population	227,327.5	222,482.8	16,993	119,4465	0.979
Share of older adults (%)	20.963	8.227	7.550	39.940	0.392
GRDP per capita (KRW)	37.961	35.008	9.590	419.030	0.922
Local income tax per capita (KRW)	289.291	539.960	62.046	6,589.243	1.866
Urbanization rates (%)	75.072	26.817	19.420	100	0.357
Share of parking area (% , 2009)	0.062	0.109	0.00002	1.113	1.776

Note. The discrepancy between the mean urbanization rate and the figures in Table 1 stems from the exclusion of specific administrative districts—namely Jeju Special Self-Governing Province, Ongjin-gun (Incheon) and Ulleung-gun (Gyeongsangbuk-do). Additionally, while the national urbanization rate is defined as the ratio of the total urban population to the total national population, the data presented here reflects the average of the urbanization rates calculated for each district.

4.3. 기초통계량

Table 3은 본 연구에서 사용된 주요 변수들의 기초통계량을 제시한다. 종속변수인 수송부문 탄소 배출량은 평균 447.223천 톤, 표준편차 422.268, 변동계수가 0.944로 나타났다. 이는 일부 지역에서 높은 수준의 배출이 존재함을 시사한다. 또한 최솟값(38.590)과 최댓값(2414.291) 간의 격차는 지역 간 수송부문 배출 구조의 불균형을 시사한다. 설명변수 중 인구는 평균 227,327.5명, 표준편차 222,482.8명으로 변동계수 0.979로 나타났다. 경제적 변수인 1인당 GRDP는 평균 37.961백만 원, 표준편차 35.008, 변동계수 0.922로 높은 분산을 보인다. 또한, 1인당 지방소득세의 경우 평균 289.291천 원, 표준편차 539.960, 변동계수 1.866을 기록하여 변수 중 가장 큰 변동성을 보인다.

반면, 고령인구 비율은 평균 20.963%, 표준편차 8.227, 변동계수 0.392로 비교적 낮은 변동성을 보인다. 도시화율은 최솟값 19.420에서 최댓값 100까지 분포하고 있어, 도시 지역과 농촌 지역이 공존하는 구조를 보인다. 토지이용 및 교통 기반 시설 변수인 주차장 면적 비율은 평균 0.062%, 표준편차 0.109, 변동계수 1.776으로 나타났다. 종합적으로, 본 기초통계량은 한국의 인구 규모, 경제 및 재정 수준, 공간 구조의 지역 간 높은 이질성을 보여준다.

4.4. 분석 방법

본 연구에서 분석하고자 하는 수송부문 탄소 배출량이 시군구별 공간적 의존성을 가질 수 있다는 점을 가정하여 공간계량모형을 사용하고자 한다. 지역의 수송부문 탄소 배출량은 인구 및 경제적 요인에 의존하며, 두 요인은 지

역의 발전도와 함께 군집화되는 특성이 있기 때문이다. 이러한 공간적 의존성을 고려하지 않은 결과는 제1종 오류를 범할 확률을 높일 수 있다. 또한 추정에 편의가 발생하며 추정량이 일치성을 띠지 않을 수 있다(Anselin, 1988). 공간계량모형은 공간가중행렬을 통해 이를 해소하여 보다 신뢰성을 확보한 결과를 제공한다는 장점이 있다.

공간가중행렬은 인접성, 역거리, 최근접 이웃 기반에 따라 분류 및 구축이 가능하다. 인접성 기반 공간가중행렬은 인접 방향에 따라 Rook (상하좌우방향), Bishop (대각방향), Queen (상하좌우 및 대각방향) 형태로 구분할 수 있다. 역거리 기반 공간가중행렬은 가까울수록 더 큰 가중치를 부여하며, 최근접 이웃 기반 공간가중행렬은 특정 이웃 지역에 대해서만 가중치를 반영한다.

종속변수의 공간적 의존성은 공간가중행렬에 기반하여 공간적 독립성을 귀무가설로 하는 Moran's I 검정을 통해 검정할 수 있다. Eq. (5)와 같이 일반 회귀분석 식을 가정할 때, Moran's I는 아래 Eq. (6)와 같이 표현할 수 있다 (Anselin, 1988; LeSage, 1999).

$$y = X\beta + u \quad (5)$$

$$I = \frac{n}{s} \left[\frac{(y - \bar{y})' W (y - \bar{y})}{(y - \bar{y})' (y - \bar{y})} \right] \quad (6)$$

* $\frac{n}{s}$ = The standardization term,

W = The spatial weights matrix,

n = The number of observation,

s = The sum of elements of W

이때, Moran's I의 점근적 분포는 표준정규분포에 수렴

하드로(Cliff and Ord, 1972), 아래 Eq. (7)을 활용하여 정규화된 통계량을 통해 검정을 시행할 수 있다.

$$Z_I = \frac{I - E(I)}{\sqrt{Var(I)}} \quad (7)$$

한편, 공간계량모형은 라그랑주 승수 검정을 통해 분류할 수 있다. 이는 공간가중행렬의 유의성에 따라 공간오차모형(Spatial Error Model, SEM) 및 공간시차모형(Spatial Lag Model, SLM)로 구분할 수 있다. 추정 결과에 따라 공간오차모형은 λ (공간오차계수)만이 유의할 경우, 공간시차모형은 ρ (공간시차계수)만이 유의할 경우로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 2019년 일일 평균 주행거리인 38.5 km를(Korean Statistical Information Service, 2026) 기준으로 한 역거리(Inverse distance) 공간가중행렬과, 탄소 배출량의 인접성을 고려한 퀸(Queen) 형태의 공간가중행렬을 구축하였으며, 표준화는 행방향으로 진행하였다. 이를 통해 차량의 주행과 수송부문 탄소 배출의 지역적 인접성을 모두 반영하여 보다 견고한 추정을 진행하고자 한다. 이후 구축된 공간가중행렬에 기반하여 공간적 의존성을 검정하고, 검정 결과에 따라 논의를 전개하고자 한다.

$$\begin{aligned} y &= \rho W y + X \beta + u \\ u &= \lambda W u + \epsilon, \epsilon \sim N(0, \sigma^2 I_n) \end{aligned} \quad (8)$$

한편, 본 연구의 핵심 설명변수인 도시화율은 지역의 경제 수준, 인구구성, 교통 인프라 등과 상호작용하여 결정되는 변수로, 수송부문 탄소 배출과의 관계에서 내생성 문제가 발생할 가능성이 존재한다. 특히, 교통 인프라가 잘 갖춰진 지역일수록 도시화가 진전될 가능성이 높으며, 동시에 해당 지역의 수송부문 탄소 배출 수준에도 영향을 미칠 수 있다. 이러한 양방향적 관계는 추정 계수의 편의를 유발할 수 있다.

Table 4. Spatial autocorrelation according to the spatial weight matrix

Spatial weight matrix	Moran's I (Chi-sq)
Queen	103.203***
Inverse distance (34.65 km)	85.403***
Inverse distance (38.5 km)	107.537***
Inverse distance (43.35 km)	117.106***

*p < 0.10, **p < 0.05, ***p < 0.01

이에 본 연구에서는 공간적 의존성과 함께 내생성을 동시에 고려하기 위하여 공간 IV(도구변수) 접근법을 적용한다. 공간계량모형 내에서 도구변수(2009년 주차장 비율)를 적용함으로써, 지역 간 상호작용과 내생성을 동시에 반영한 추정이 가능하다. 다만, 공간 IV 추정에서는 도구변수의 관련성 및 외생성을 직접적으로 검정하는 통계량이 제한적으로 제공되는 한계가 존재한다. 이에 따라 본 연구에서는 동일한 도구변수를 활용한 IV(2SLS) 모형을 별도로 추정하여 도구변수의 타당성을 보조적으로 점검하고자 한다.

5. 분석 결과

공간계량모형을 적용하기에 앞서, 2019년 한국 시군구 단위의 수송부문 탄소 배출량이 공간적 자기상관을 가지는지를 확인하기 위하여 Moran's I 검정을 실시하였다. 공간가중행렬은 상기 언급한 바와 같이 인접행렬(Queen)과 세 가지 역거리행렬(34.65 km, 38.5 km, 43.35 km)을 적용하여 결과의 강건성을 확보하고자 하였다.

Table 4에 제시된 바와 같이, 모든 공간가중행렬 설정에서 Moran's I 통계량은 1% 유의수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 이는 수송부문 탄소 배출량이 공간적으로 무작위 분포하지 않으며, 인접하거나 지리적으로 가까운 지역 간에 유사한 배출 수준을 보이는 공간적 군집 현상이 존재함을 의미한다. 이러한 결과는 전통적인 OLS 모형이 가정하는 독립성 가정을 위배할 가능성을 보여주며, 공간 의존성을 고려한 공간계량모형의 적용 필요성을 뒷받침한다.

Table 5와 Table 6은 각각 공간오차모형(SEM)과 공간시차모형(SLM)을 이용한 공간 IV 추정 결과를 제시한다. Table 5의 공간오차모형 추정 결과는, 모든 공간가중행렬 설정에서 공간오차계수(λ)가 1% 유의수준에서 통계적으로 유의함을 보여준다. 이는 인접 지역 간 관측되지 않은 특성이 공간적으로 상관되어 있음을 의미한다. 즉, 수송부문 탄소 배출은 지역 간 공간적 이질성을 공유하며, 이러한 공간적 상관관계를 고려하는 것이 중요함을 시사한다.

Table 5의 인구 규모는 모든 모형에서 수송부문 탄소 배출량과 양(+)의 관계를 갖는 것으로 나타났다. 이는 인구규모가 큰 지역일수록 수송부문 탄소 배출량이 높음을 의미한다. 반면 고령인구 비율은 수송부문 탄소 배출량과 일관된 음(-)의 관계를 보여, 고령인구 비율이 높은 지역일수록 수송부문 탄소 배출량이 상대적으로 낮은 것으로

Table 5. SEM IV estimation results

Variable	Queen		Inverse distance					
	SEM		SEM (34.65 km)		SEM (38.5 km)		SEM (43.35 km)	
Ln (Population)	0.944*** (0.054)	0.918*** (0.055)	0.932*** (0.053)	0.898*** (0.053)	0.940*** (0.053)	0.913*** (0.053)	0.944*** (0.053)	0.917*** (0.053)
Ln (Share of older adults)	-0.258** (0.124)	-0.334*** (0.123)	-0.294** (0.123)	-0.362*** (0.122)	-0.306** (0.122)	-0.378*** (0.122)	-0.302** (0.123)	-0.380*** (0.123)
Ln (GRDP per capita)	0.147*** (0.043)	-	0.139*** (0.042)	-	0.139*** (0.042)	-	0.139*** (0.042)	-
Ln (Local income tax per capita)	-	0.089*** (0.035)	-	0.075** (0.034)	-	0.077** (0.034)	-	0.076** (0.034)
Ln (Urbanization rates)	-0.479*** (0.179)	-0.562*** (0.187)	-0.469*** (0.170)	-0.510*** (0.178)	-0.495*** (0.172)	-0.558*** (0.178)	-0.503*** (0.174)	-0.576*** (0.177)
Intercept	-3.206*** (0.956)	-2.285** (0.913)	-2.967*** (0.951)	-2.104** (0.896)	-2.922*** (0.945)	-2.034** (0.901)	-2.935*** (0.954)	-2.003** (0.908)
Obs	225							
λ	0.253*** (0.060)	0.263*** (0.063)	0.361*** (0.075)	0.361*** (0.075)	0.441*** (0.091)	0.435*** (0.093)	0.463*** (0.097)	0.449*** (0.098)
Wald test of spatial terms	17.71***	17.41***	23.53***	23.12***	23.33***	22.03***	22.60***	20.96***
Pseudo R-sq	0.882	0.873	0.883	0.877	0.882	0.874	0.881	0.873
Wald Chi-sq	1,444.75	1,333.12***	1,498.76***	1,422.47***	1,410.56***	1,320.39***	1,044.44***	1,307.48***

Note. Standard errors are in parenthesis. *p < 0.10, **p < 0.05, ***p < 0.01

나타났다. 경제적 요인의 경우 1인당 GRDP가 높은 지역일수록 수송부문 탄소 배출량이 높아지는 경향을 보였으며, 1인당 지방소득세 또한 모든 모형에서 통계적으로 유의한 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 마지막으로 도시화율은 모든 모형에서 일관되게 통계적으로 유의한 음(-)의 영향을 보였으며, 이는 도시화율이 높은 지역일수록 수송부문 탄소 배출량이 낮음을 시사한다. 이는 Fig. 2에서 수도권 및 광역시를 중심으로 도시화율과 수송부문 탄소 배출이 함께 높게 나타나는 공간적 분포와는 다소 상반되는 결과이다. 그러나 Fig. 2는 변수의 공간적 분포를 나타내는 기술통계적 결과로, 인구 규모, 고령인구 비율, 경제 수준 등 다른 지역 특성을 통제하지 않은 상태의 단순한 공간적 패턴을 보여준다. 반면 공간 IV 모형은 이러한 요인들을 통제한 상태에서 도시화율의 독립적인 영향을 추정한 결과이다. 따라서 수도권과 광역시의 높은 탄소 배출은 도시화 자체의 효과라기보다 인구집중과 경제활동 규모 등의 영향이 함께 반영된 결과로 해석할 수 있으며, 이러한 요인을 통제한 이후에는 도시화율이 높은 지역일수록 수송부문 탄소 배출이 감소하는 것으로 나타났다.

한편, Table 6은 동일한 자료를 이용한 공간시차모형

(SLM)의 추정 결과를 제시한다. 설명변수의 계수 부호와 유의성은 공간오차모형 결과와 대체로 일치하는 것으로 보인다. 또한 공간시차모형의 설명력(Pseudo R^2)과 모형 유의성(Wald Chi-sq)이 공간오차보다 다소 높은 것으로 나타났다. 그러나 모든 공간가중행렬 설정에서 공간시차 계수(ρ)는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 확인되었다. 이는 종속변수의 직접적인 공간적 파급효과(spatial spillover)를 가정하는 공간시차 구조가 본 연구 자료에서는 통계적으로 지지되지 않음을 의미한다.

이러한 결과는 수송부문 탄소 배출의 공간 의존성이 종속변수의 직접적인 공간적 파급효과가 아닌 지역 간 공유되는 관측되지 않은 특성에 의해 형성될 가능성이 높음을 시사한다. 이에 공간오차계수와 공간시차계수의 결과와 더불어, 본 연구의 공간계량모형 활용 목적이 공간적 의존성 해소와 결과의 신뢰성 제고에 있다는 점은 공간오차모형이 도시화율과 수송부문 탄소 배출의 관계를 설명함에 보다 적절함을 보여준다.

Table 7은 공간오차모형 및 공간시차모형(Table 5, Table 6)에서 사용된 도구변수의 적절성 및 연관성을 보조적으로 점검하기 위해, 동일한 도구변수를 활용한 IV

Table 6. SLM IV estimation results

Variable	Queen		Inverse distance					
	SLM		SLM (34.65 km)		SLM (38.5 km)		SLM (43.35 km)	
Ln (Population)	0.912*** (0.050)	0.891*** (0.051)	0.927*** (0.052)	0.890*** (0.052)	0.924*** (0.051)	0.891*** (0.052)	0.928*** (0.051)	0.893*** (0.051)
Ln (Share of older adults)	-0.223* (0.114)	-0.326*** (0.114)	-0.235** (0.115)	-0.311*** (0.114)	-0.230** (0.114)	-0.314*** (0.114)	-0.240** (0.115)	-0.320*** (0.114)
Ln (GRDP per capita)	0.144*** (0.042)	-	0.143*** (0.042)	-	0.145*** (0.042)	-	0.144*** (0.042)	-
Ln (Local income tax per capita)	-	0.071** (0.034)	-	0.069** (0.034)	-	0.070** (0.034)	-	0.070** (0.034)
Ln (Urbanization rates)	-0.348** (0.156)	-0.457*** (0.165)	-0.406*** (0.154)	-0.437*** (0.164)	-0.376** (0.151)	-0.424*** (0.163)	-0.407*** (0.153)	-0.445*** (0.159)
Intercept	-3.351*** (0.887)	-2.207*** (0.838)	-3.211*** (0.900)	-2.260*** (0.842)	-3.212*** (0.895)	-2.193*** (0.844)	-3.129*** (0.906)	-2.148** (0.848)
Obs	225							
ρ	-0.023 (0.022)	-0.023 (0.023)	-0.028 (0.036)	-0.032 (0.037)	-0.048 (0.049)	-0.055 (0.051)	-0.042 (0.051)	-0.048 (0.053)
Wald test of spatial terms	1.12	0.97	0.60	0.73	0.95	1.17	0.68	0.83
Pseudo R-sq	0.889	0.881	0.886	0.881	0.888	0.882	0.886	0.881
Wald Chi-sq	1,797.92***	1,661.41***	1,752.58***	1,666.90***	1,768.28***	1,669.27***	1,751.49***	1,660.42***

Note. Standard errors are in parnthesis. *p < 0.10, **p < 0.05, ***p < 0.01

추정 결과를 제시한다. 본 연구는 공간적 내생성을 고려하여 공간 IV 기반의 추정을 수행하였다. 그러나 해당 추정에서는 도구변수의 관련성을 직접 검증할 수 있는 통계량이 명시적으로 제공되지 않는다는 한계가 존재한다. 이에 동일한 도구변수(2009년 주차장 비율)를 활용한 별도의 IV 추정을 통해 도구변수의 적절성을 보조적으로 확인하고자 하였다.

추정 결과, 주요 설명변수의 계수 부호와 통계적 유의성은 Table 5 및 Table 6의 결과와 대체로 일관되게 나타났다. 도구변수의 적절성을 검증한 결과 Kleibergen-Paap rk LM 통계량은 모두 통계적으로 유의하여 식별성이 확보된 것으로 나타났으며, Kleibergen-Paap rk Wald F 통계량은 Stock-Yogo의 10% 임계값(16.38)을 상회하여 약한 도구변수 문제가 없는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서 사용한 도구변수는 적절한 것으로 판단되며, 내생성을 고려한 이후에도 분석 결과의 강건성이 유지됨을 확인할 수 있다.

Table 8은 도구변수의 배제 조건을 보조적으로 확인한 결과를 제시한다. 앞서 공간모형 추정 결과에서 공간오차모형의 공간오차계수(λ)는 모든 공간가중행렬에서 통계

적으로 유의한 반면, 공간시차모형의 공간시차계수(ρ)는 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이는 수송부문 탄소 배출의 공간 의존성이 종속변수의 직접적인 공간적 파급효과보다는 지역 간 공유되는 관측되지 않은 특성에 의해 형성됨을 의미한다. 따라서 도구변수의 배제 조건을 확인하기 위한 보조 분석은 SEM을 기준으로 수행하였다.

구체적으로, 도구변수인 2009년 주차장 면적 비율만을 설명변수로 포함한 모형과, 도구변수와 수송부문 탄소 배출 간의 잠재적인 연결 경로로 고려되는 도시화율을 추가로 통제한 모형을 각각 추정하였다. 분석 결과, 도시화율을 포함하지 않은 모형에서는 도구변수가 수송부문 탄소 배출에 유의한 양(+)의 영향을 보였으나, 도시화율을 통제한 이후에는 모든 공간가중행렬에서 도구변수의 계수가 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다(외생성). 이는 도구변수가 수송부문 탄소 배출과 연관성을 가질 수 있으나, 도시화율을 통제한 이후에는 수송부문 탄소 배출에 직접적인 영향을 미친다는 증거는 확인되지 않았음을 의미한다. 이러한 결과를 통해, 본 연구는 2009년 주차장 면적 비율이 도구변수로서 외생성을 충족함을 보조적으로 확인하였다.

Table 7. Instrumental variable regression results

IV (2SLS)		
Variable	Coefficient	
Ln (Population)	0.948*** (0.078)	0.916*** (0.084)
Ln (Share of older adults)	-0.278* (0.153)	-0.356** (0.151)
Ln (GRDP per capita)	0.139** (0.058)	-
Ln (Local income tax per capita)	-	0.071* (0.043)
Ln (Urbanization rates)	-0.543** (0.262)	-0.594** (0.261)
Intercept	-2.902** (1.230)	-1.964* (1.140)
Obs	225	
F statistics	422.35***	424.36***
Kleibergen-Paap rk LM statistic (Underidentification test)	23.020***	25.312***
Kleibergen-Paap rk Wald F statistic (Weak identification test)	69.932	66.989
Stock-Yogo critical value (10%)	16.38	
IV-First stage		
Variable	Coefficient	
Ln (Share of parking area, 2009)	0.101*** (0.012)	0.101*** (0.012)

Note. Robust standard errors are in parenthesis. *p < 0.10, **p < 0.05, ***p < 0.01. All IV first-stage regressions include Ln (Population), Ln (Share of Older Adults), Ln (GRDP per Capita), and Ln (Local income tax per capita) as control variables.

6. 결론 및 논의

전 세계적으로 논의되는 기후변화 완화는 단순한 이행 사항이 아닌 각 국가의 의무 사항이 되고 있다. 기후변화는 미래 발생하는 사건이 아닌, 현재 진행형이며 더욱 가속화되어 자연과 인간 사회에 악영향을 미칠 것으로 보인다. 이에 본 연구에서는 기후변화 완화의 일환으로써 탄소 배출의 높은 비율을 차지하는 수송부문 탄소 배출과 도시화율의 관계를 분석하였다. 기존의 연구는 도시계획 및 정책, 기술의 관점에서 도시의 수송부문 탄소 저감을 위한 방안을 제시한 바 있다. 그러나 탄소 배출의 주체가 되는 인구의 밀집과 이에 기반한 기후변화 완화 정책 수립에 대한 논의는 부족한 것으로 보인다. 이에 본 연구에서는 고착화된 도시로의 인구 밀집 현상과 이에 따른 수송부문 탄

Table 8. Supplementary tests for the exclusion restriction of the instrumental variable

Queen (Obs: 225)		
Variable	Coefficient	
Ln (Share of parking area, 2009)	0.276*** (0.036)	0.063 (0.040)
Ln (Urbanization rates)	-	1.159*** (0.137)
λ	0.406*** (0.084)	0.413*** (0.084)
Wald test of spatial terms	23.39***	24.47***
Pseudo R-sq	0.356	0.504
Wald Chi-sq	59.49***	148.55***
34.65 km (Obs: 225)		
Variable	Coefficient	
Ln (Share of parking area, 2009)	0.295*** (0.035)	0.064 (0.041)
Ln (Urbanization rates)	-	1.163*** (0.138)
λ	0.340*** (0.094)	0.364*** (0.092)
Wald test of spatial terms	13.16***	15.66***
Pseudo R-sq	0.356	0.504
Wald Chi-sq	72.98***	163.05***
38.5 km (Obs: 225)		
Variable	Coefficient	
Ln (Share of parking area, 2009)	0.284*** (0.036)	0.049 (0.041)
Ln (Urbanization rates)	-	1.186*** (0.139)
λ	0.406*** (0.097)	0.445*** (0.094)
Wald test of spatial terms	17.40***	22.58***
Pseudo R-sq	0.356	0.502
Wald Chi-sq	63.41***	150.90***
43.35 km (Obs: 225)		
Variable	Coefficient	
Ln (Share of parking area, 2009)	0.285*** (0.036)	0.047 (0.041)
Ln (Urbanization rates)	-	1.200*** (0.139)
λ	0.407*** (0.107)	0.471*** (0.100)
Wald test of spatial terms	14.41***	22.12***
Pseudo R-sq	0.356	0.502
Wald Chi-sq	64.55***	151.80***

Note. Robust standard errors are in parenthesis. *p < 0.10, **p < 0.05, ***p < 0.01

소 배출량의 지역별 격차를 분석하여, 향후 지속가능한 발전을 위한 정책적 시사점을 도출하고자 하였다.

본 연구는 환경영향을 인구 및 경제, 기술적 수준으로 설명하는 이론적 모델인 STIRPAT에 기반하여 일부 지역을 제외한 225개 시군구의 2019년 데이터를 공간 IV모형으로 분석하였다. 인구는 지역 규모와 고령화를 반영하기 위해 인구 규모, 고령인구 비율을 투입하였으며, 경제적 요인은 1인당 GRDP와 1인당 지방소득세를 투입하였다. 기술요인은 도시화를 투입하였으며, 거주민의 특성을 반영하지 못함에 따라 발생할 수 있는 내생성을 통제하기 위해 2009년 주차장 면적 비율을 도구변수로 활용하였다. 결과 추정에 있어, 공간계량모형은 공간가중행렬에 따라 결과가 달라질 가능성이 존재하므로 강건한 결과를 도출하기 위해 이를 세분화하여 분석하였다. 결과적으로, 인접행렬(Queen)과 역거리기반 가중행렬을 활용할 경우 공간 오차모형이 적절한 모형임을 확인할 수 있었다. 또한, 도구변수의 관련성과 검정력을 확인한 결과 2009년 주차장 면적 비율이 적절한 도구변수인 것으로 나타났다.

최종적으로 총 4개의 모형에서 일관적인 결과를 도출하여 도시화는 수송 탄소 배출 저감에 긍정적인 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 이는 압축도시 형성(Hwang and Lee, 2016)에 따른 통행 거리 감소, 대중교통 인프라의 규모의 경제 실현, 자원 및 인프라 공유를 통한 긍정적 외부효과의 관점에서 이해할 수 있다(Liang et al., 2023; Liu et al., 2017). 도시화의 진전은 인구 밀도의 상승을 동반하며 도시 공간구조를 고밀도의 압축적 형태로 재편한다. 이러한 압축도시 구조는 주거지, 직장, 상업시설 등 주요 활동 공간 간의 물리적 거리를 단축시킨다. 이에 이동 거리의 축소는 자동차 의존도를 낮추는 동시에 도보 및 자전거와 같은 비동력 교통수단의 이용을 촉진하여, 결과적으로 화석연료 소비와 수송부문 탄소 배출을 줄이는 방향으로 작용한다. 이와 동시에, 도시화에 따른 인구 집적은 대중교통 시스템 구축 및 운영에 있어 규모의 경제를 가능하게 한다. 일정 수준 이상의 인구 밀집이 이루어질 경우, 지하철, 버스전용 차로와 같은 고효율 대중교통 인프라가 교통 서비스의 접근성과 운영 효율성을 향상시키는 방향으로 작용한다. 이러한 변화는 개인의 교통수단 선택 구조를 변화시켜 자가용 이용을 대체하는 대중교통 이용을 확대시키고, 그 결과 대규모 이용에 따른 탄소 배출 절감 효과를 유도한다. 더 나아가, 도시 내 인구 집중은 도로 및 교통시설, 공공 인프라의 공동 이용을 가능하게 함으로써 자원 활용의 효율성을 제고하는 긍정적 외부효과

를 창출한다. 분산된 공간 구조에 비해 동일한 인프라를 더 많은 인구가 공유함으로써 중복 투자와 비효율적 자원 사용이 감소하며, 이는 1인당 에너지 소비를 낮추는 방향으로 작용하는 것이다. 결과적으로 도시화는 단순한 인구 집중을 넘어 교통 및 에너지 시스템의 효율성을 개선하는 구조적 메커니즘을 통해 수송부문 탄소 배출을 저감시키는 것으로 해석할 수 있다.

본 연구의 한계는 다음과 같다. 우선 수송부문 탄소를 이루는 세부 영역을 구분하지 않고 분석하였다는 점이다. 수송부문 탄소는 도로, 해운, 민간항공, 철도, 기타의 5개 영역으로 구성된다. 각 세부 영역의 배출량은 지리적요인과 특수 목적에 의존한다. 그러나 본 연구에서는 이들을 통합하여 분석하여 도시화가 어느 영역에 구체적으로 연관이 있는지 밝히지 못하였다. 이는 자료 구득의 한계에 기인하며, 후속 연구에서는 지역의 기타 요인들과 세부 영역의 탄소 배출 사이의 관계를 밝혀 보다 구체적인 저감 방안을 도출해야 할 것이다. 다만, '4.1. 자료의 범위 및 분석 대상'에서 언급한 바와 같이, 수송부문 탄소 배출량의 대부분은 도로수송으로 이루어져 있다. 이에 본 연구의 결과를 통해 논의할 수 있는 압축적 개발과 효율적인 인프라 구축은 수송부문 탄소 배출량 저감에 기여할 수 있을 것으로 보인다. 이와 더불어, 단년도의 지역 간 관계에 집중하여 지역 내 시간의 흐름에 따른 관계를 간과하였다는 한계가 존재한다. 그러나 이는 전기차 및 수소차 보급 기간이 상대적으로 짧아, 시간에 따른 친환경 기술의 발전에 대한 효과를 충분히 반영하지 못할 것이라는 점에 기인한다. 향후 충분한 시점의 데이터가 구축된다면, 패널분석과 같은 방법을 통해 이러한 한계를 극복하고 지역 내의 영향을 추정하여 또 다른 정책적 시사점을 제공할 수 있을 것으로 보인다.

이러한 한계에도 불구하고, 본 연구의 결과는 인구와 경제, 기술을 통합하여 환경을 설명함에 있어 이론적 기여를 하였으며, 지속가능한 발전을 위한 정책적 시사점을 제공하였다는 점에 의의가 있다. 본 연구의 이론적 기여는 도시화 지표를 통해 인구 집적화의 관점에서 기후변화 완화로써의 수송부문 탄소 저감에 대해 논의하였다는 것이며, 정책적 기여는 도시 개발에 있어 압축적 개발 및 효율적인 교통체계가 필요함을 도출했다는 점이다. 개발과 환경이라는 두 요인의 조화가 중요한 현시점에서, 본 연구의 결과는 기후변화 완화와 함께 지속가능한 도시 성장을 달성함에 중요한 기초 자료가 될 것이다.

사사

이 논문은 2021년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 한국사회과학연구(NRF-2021S1A3A2A01087370) 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- Acemoglu D, Johnson S, Robinson JA. 2001. The colonial origins of comparative development: An empirical investigation. *Am Econ Rev* 91(5): 1369-1401. doi: 10.1257/aer.91.5.1369
- Ahn J. 2022. A study on improvement for greenship certification scheme to achieve net-zero (in Korean with English abstract). *J Soc Nav Archit Korea* 59(6): 372-384. doi: 10.3744/SNAK.2022.59.6.372
- Amin A, Altinoz B, Dogan E. 2020. Analyzing the determinants of carbon emissions from transportation in European countries: The role of renewable energy and urbanization. *Clean Technol Environ* 22(8): 1725. doi: 10.1007/s10098-020-01910-2
- Anselin L. 1988. Lagrange multiplier test diagnostics for spatial dependence and spatial heterogeneity. *Geogr Anal* 20(1): 1-17. doi: 10.1111/j.1538-4632.1988.tb00159.x
- Chen H, Jia B, Lau SSY. 2008. Sustainable urban form for Chinese compact cities: Challenges of a rapid urbanized economy. *Habitat Int* 32(1): 28-40. doi: 10.1016/j.habitatint.2007.06.005
- Cliff A, Ord K. 1972. Testing for spatial autocorrelation among regression residuals. *Geogr Anal* 4(3): 267-284. doi: 10.1111/j.1538-4632.1972.tb00475.x
- Commoner B, Corr M, Stamler PJ. 1971. The causes of pollution. *Environ Sci Policy Sustain Dev* 13(3): 2-19. doi: 10.1080/00139157.1971.9930577
- Dietz T, Rosa EA. 1994. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology. *Hum Ecol Rev* 1(2): 277-300.
- Ding Y, Li Y, Deng K, Tan H, Yuan M, Ni LM. 2017. Detecting and analyzing urban regions with high impact of weather change on transport. *IEEE Trans Big Data* 3(2): 126-139. doi: 10.1109/TBDATA.2016.2623320
- Ehrlich PR, Holdren JP. 1971. Impact of population growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive. *Science* 171(3977): 1212-1217.
- Heitz A, Dablanc L, Tavasszy LA. 2017. Logistics sprawl in monocentric and polycentric metropolitan areas: The cases of Paris, France, and the Randstad, the Netherlands. *Region* 4(1): 93-107. doi: 10.18335/region.v4i1.158
- Helske J, Tikka S. 2024. Estimating causal effects from panel data with dynamic multivariate panel models. *Adv Life Course Res* 60: 100617. doi: 10.1016/j.alcr.2024.100617
- Hwang HS, Joo YJ, Koh JH. 2012. Study on geostatistical method for an effectiveness analysis on carbon reduction policy focusing on the carbon point system (in Korean with English abstract). *J Korea Spat Inf Soc* 20(1): 71-80. doi: 10.12672/ksis.2012.20.1.071
- Hwang M, Lee E. 2016. The impact of urbanization on per capita CO₂ emissions (in Korean with English abstract). *J Environ Impact Assess* 25(5): 307-318. doi: 10.14249/eia.2016.25.5.307
- Jang M, Kwak M, Lee J. 2021. Decomposition analysis of greenhouse gas emissions and evaluation of reduction policies in transportation: 2018-2019 (in Korean with English abstract). *J Climate Change Res* 12(3): 271-279. doi: 10.15531/KSCCR.2021.12.3.271
- Jones D. 1991. How urbanization affects energy use in developing countries. *Energy Policy* 19: 621-630. doi: 10.1016/0301-4215(91)90094-5
- Kakar KA, Prasad CSRK. 2020. Impact of urban sprawl on travel demand for public transport, private transport and walking. *Transp Res Procedia* 48: 1881-1892. doi: 10.1016/j.trpro.2020.08.221
- Kang S, Jung J, Kwon TJ. 2010. Assessment of low-carbon city planning elements relative to urban types (in Korean with English abstract). *J Environ*

- Policy Adm 18(1): 27-52.
- Kim H. 2009. A study on the zero-emission city policies of local government in low-carbon society (in Korean with English abstract). *J Korean Reg Dev Assoc* 21(2): 145-162.
- Korean Statistical Information Service. 2026. Vehicle kilometer by city/province and vehicle type; [accessed 2026 Jan 20]. https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?sso=ok&returnurl=https%3A%2F%2Fkosis.kr%3A443%2FstatHtml%2FstatHtml.do%3Flist_id%3DDM2_20%26obj_var_id%3D%26seqNo%3D%26tblId%3DDDT_426001_N004%26vw_cd%3DDMT_ETITLE%26language%3Den%26orgId%3D426%26path%3D%252Feng%252FstatisticsList%252FstatisticsListIndex.do%26conn_path%3DDMT_ETITLE%26itm_id%3D%26lang_mode%3Den%26scrId%3D%26
- Lau LS, Choong CK, Eng YK. 2014. Investigation of the environmental Kuznets curve for carbon emissions in Malaysia: Do foreign direct investment and trade matter? *Energy Policy* 68: 490-497. doi: 10.1016/j.enpol.2014.01.002
- Lee HJ, Park J, Ko J. 2021. Estimation of carbon emissions reductions by the penetration rates of autonomous vehicles for urban road network (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Intell Transp Syst* 20(6): 162-176. doi: 10.12815/kits.2021.20.6.162
- Lee JE, Park CJ. 2024. Patent trends in carbon capture, utilization, and storage technology in shipping (in Korean with English abstract). *J Climate Change Res* 15(3): 343-353. doi: 10.15531/KSCCR.2024.15.3.343
- Lee Y, Kim DS. 2020. Internal migration in South Korea. In: *Internal migration in the countries of Asia: A cross-national comparison*. Cham: Springer International Publishing. p. 93-111.
- LeSage JP. 1999. *The theory and practice of spatial econometrics*. Toledo, OH: University of Toledo. <https://www.spatial-econometrics.com/html/sbook.pdf>
- Li K, Lin B. 2015. Impacts of urbanization and industrialization on energy consumption and CO2 emissions: Does the level of development matter? *Renew Sustain Energy Rev* 52: 1107-1122. doi: 10.1016/j.rser.2015.07.185
- Liang L, Huang C, Hu Z. 2023. Industrial structure optimization, population agglomeration, and carbon emissions—Empirical evidence from 30 provinces in China. *Front Environ Sci* 10: 1078319. doi: 10.3389/fenvs.2022.1078319
- Liddle B. 2014. Impact of population, age structure, and urbanization on carbon emissions and energy consumption: Evidence from macro-level cross-country analyses. *Popul Environ* 35: 286-304. doi: 10.1007/s11111-013-0198-4
- Lim H, Kim YG, Choi H, Shin DW, Yang Y, Choe YU. 2022. A study on policy directions of the transportation sector for 2050 net zero strategy. Sejong, Korea: Korea Environment Institute. Policy Report 2022-03. <https://kiss.kstudy.com/Detail/Ar?key=4002288>
- Liu Y, Gao C, Lu Y. 2017. The impact of urbanization on GHG emissions in China: The role of population density. *J Clean Prod* 157: 299-309. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.138
- Lohwasser J, Schaffer, A. 2023. The varying roles of the dimensions of affluence in air pollution: A regional STIRPAT analysis for Germany. *Environ Sci Pollut Res* 30(8): 19737-19748. doi: 10.1007/s11356-022-23519-2
- Lv Q, Liu H, Yang D, Liu H. 2019. Effects of urbanization on freight transport carbon emissions in China: Common characteristics and regional disparity. *J Clean Prod* 211: 481-489. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.182
- Lyu S, Huang Y, Sun T. 2025. Urban sprawl, public transportation efficiency and carbon emissions. *J Clean Prod* 489: 144652. doi: 10.1016/j.jclepro.2025.144652
- Ministry of Environment. 2022. National greenhouse gas inventory report of Korea. Cheongju, Korea. Policy Report 11-1480906-000002-10. <https://www.gir.go.kr/home/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=titleOrContent&searchVa>

- lue=%EC%9D%B8%EB%B2%A4%ED%86%A0%EB%A6%AC&menuId=72&boardId=57&boardMasterId=25&boardCategoryId=&pagerOffset=
- Nasir M, Rehman FU. 2011. Environmental Kuznets curve for carbon emissions in Pakistan: An empirical investigation. *Energy Policy* 39(3): 1857-1864. doi: 10.1016/j.enpol.2011.01.025
- Nunn N. 2008. The long-term effects of Africa's slave trades. *Q J Econ* 123(1): 139-176. doi: 10.1162/qjec.2008.123.1.139
- Okada A. 2012. Is an increased elderly population related to decreased CO₂ emissions from road transportation? *Energy Policy* 45: 286-292. doi: 10.1016/j.enpol.2012.02.033
- Parikh J, Shukla V. 1995. Urbanization, energy use and greenhouse effects in economic development: Results from a cross-national study of developing countries. *Glob Environ Change* 5(2): 87-103. doi: 10.1016/0959-3780(95)00015-G
- Park S, Choi Y, Lee M. 2023. A study on the carbon neutrality scenario model for technology application in units of space (in Korean with English abstract). *KSCE J Civ Environ Eng Res* 43(1): 63-69. doi: 10.12652/Ksce.2023.43.1.0063
- Park S, Park SW, Jain K. 2021. Fuel-tax reform for carbon neutral transport system (in Korean with English abstract). *Transp Technol Policy* 20(6): 24-30.
- Poumanyong P, Kaneko S. 2010. Does urbanization lead to less energy use and lower CO₂ emissions? A cross-country analysis. *Ecol Econ* 70(2): 434-444. doi: 10.1016/j.ecolecon.2010.09.029
- Rosa EA, Dietz T. 1998. Climate change and society: speculation, construction and scientific investigation. *Int Sociol* 13(4): 421-455. doi: 10.1177/026858098013004002
- Shi A. 2003. The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975-1996: Evidence from pooled cross-country data. *Ecol Econ* 44(1): 29-42. doi: 10.1016/S0921-8009(02)00223-9
- Shi K, Liu G, Cui Y, Wu Y. 2023. What urban spatial structure is more conducive to reducing carbon emissions? A conditional effect of population size. *Appl Geogr* 151: 102855. doi: 10.1016/j.apgeog.2022.102855
- Shin K, Lee JH, Lee JY, Lee CK, Kim BK. 2025. Effect of introducing hydrogen fuel cell trams in hydrogen pilot cities on carbon emission impact in the operation phase of the transport sector (in Korean with English abstract). *J Hydrogen New Energy* 36(6): 625-632. doi: 10.7316/JHNE.2025.36.6.625
- Sun C, Ouyang X, Cai H, Luo Z, Li A. 2014. Household pathway selection of energy consumption during urbanization process in China. *Energy Convers Manage* 84: 295-304. doi: 10.1016/j.enconman.2014.04.038
- Taniguchi E, Thompson R. 2015. *City logistics mapping the future*. FL: CRC Press.
- UNDP. 2024. What is climate change mitigation and why is it urgent?; [accessed 2026 Jan 25]. <https://climatepromise.undp.org/news-and-stories/what-climate-change-mitigation-and-why-it-urgent>
- UNFCCC. 2026. Adaptation and resilience; [accessed 2026 Jan 25]. <https://unfccc.int/topics/adaptation-and-resilience/the-big-picture/introduction>
- United Nations. 2019. World urbanization prospects the 2018 revision; [accessed 2026 June 30]. <https://population.un.org/wup/assets/Publications/WUP2018-Report.pdf>
- Wang Q, Li L. 2021. The effects of population aging, life expectancy, unemployment rate, population density, per capita GDP, urbanization on per capita carbon emissions. *Sustain Prod Consum* 28: 760-774. doi: 10.1016/j.spc.2021.06.029
- Wee JH, Kim JI, Song IS, Song BY, Choi KS. 2008. Reduction of carbon-dioxide emission applying carbon capture and storage technology to power generation and industry sectors in Korea (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Environ Eng* 30(9): 961-972.
- Yang HJ, Choi MJ. 2011. Compact city and carbon emissions: an integrated approach of building, transport, and greenfield (in Korean with English

- abstract). *J Korea Plann Assoc* 46(3): 281-292.
- Yao S, Zhang S, Zhang X. 2019. Renewable energy, carbon emission and economic growth: A revised environmental Kuznets curve perspective. *J Clean Prod* 235: 1338-1352. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.07.069
- York R, Rosa EA, Dietz T. 2003. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecol Econ* 46(3): 351-365. doi: 10.1016/S0921-8009(03)00188-5
- Yun J. 2023. A study on the effects of urban spatial structure characteristics by administrative district in Seoul on carbon emissions in the transport sector by applying urban block unit micro-trips calculation model. *J Korean Reg Dev Assoc* 35(1): 143-158. doi: 10.22885/KRDA.2023.35.1.143
- Yun SJ. 2002. Environmental inequality embedded in climate change and climate change policy (in Korean with English abstract). *ECO* 3: 8-42.
- Zagheni E. 2011. The leverage of demographic dynamics on carbon dioxide emissions: Does age structure matter? *Demography* 48(1): 371-399. doi: 10.1007/s13524-010-0004-1
- Zhang C, Cao X, Ramaswami A. 2016. A novel analysis of consumption-based carbon footprints in China: Unpacking the effects of urban settlement and rural-to-urban migration. *Glob Environ Change* 39: 285-293. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.06.003
- Zhang C, Tan Z. 2016. The relationships between population factors and China's carbon emissions: Does population aging matter? *Renew Sustain Energy Rev* 65: 1018-1025. doi: 10.1016/j.rser.2016.06.083