



# 야간 위성영상 기반 도시단위 탄소배출량 추정과 영향 요인 분석\*

## Estimating Carbon Emissions at Urban Scales by Nighttime Light Satellite Imagery and Analysis of Influencing Factors

문한솔\*\* · 염재원\*\*\* · 정주철\*\*\*\*

Mun, Han-Sol · Yeom, Jae-Weon · Jung, Ju-Chul

### Abstract

As recent climate problems continue, global carbon neutrality has been advanced to reduce the greenhouse gas emissions causing abnormal climate. By 2050, all cities must achieve carbon neutrality, but to move toward a carbon neutral city, it is essential to estimate the amount of carbon emissions per city and analyze the influencing factors. However, current methods of estimating carbon emissions encounter difficulties in city-level analyses. This study estimated carbon emissions using nighttime satellite images to address limitations of previous studies and current greenhouse gas emission calculation methods, and analyzed urban factors affecting carbon emissions using a spatial regression model. The results show that the carbon emissions of Korean cities are increasing over time, and their spatial distribution varies greatly by region. A spatial regression model of the influencing factors identified significant impact of energy consumption, industrial structure, land use, and transportation on carbon emissions. As a result of analysis, carbon emissions increase as energy consumption, productivity of the secondary industry, and the number of automobiles increase. In addition, the higher the compression of land use, the stronger the reduction of carbon emissions, and the higher the diversity of land use, the higher the carbon emissions. This study is meaningful in presenting a new method for sub-space unit estimates to remedy limitations of current carbon emission calculation methods. This carbon emission estimation method using night satellite images is expected to effectively provide basic data for land use planning and policy research to attain carbon-neutral cities.

**주제어** 탄소중립, 기후변화, 탄소배출량 추정, 야간위성영상, 도시계획

**Keywords** Carbon Neutrality, Climate Change, Carbon Emissions Estimate, Nighttime Light Satellite Imagery, Urban Planning

## 1. 서론

최근 기후 문제가 지속됨에 따라 이상기후의 원인인 온실가스 배출량을 감축하기 위한 전 지구적 탄소중립 실현이 요구되고 있

다. 특정 도시 또는 국가에서 배출되는 온실가스는 해당 지역에 서만 머물지 않고 전 지구에 영향을 미치므로, 기후 문제에는 공동의 책임이 요구되기 때문이다(김승도·나승혁, 2008). 우리나라를 포함한 세계 각국은 2016년부터 자발적으로 온실가스 감축 목

\* 본 연구는 환경부 「기후변화특성화대학원사업」의 지원으로 수행되었으며, 국토교통부의 스마트시티 혁신인재육성사업으로 지원되었습니다.

\*\* Ph.D. Student, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University (tkdfr6917@naver.com)

\*\*\* Research Fellow, Incheon Safety Research Center, The Incheon Institute (jaywo7@i.re.kr)

\*\*\*\* Professor, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University (Corresponding Author: jchung@pusan.ac.kr)



표를 수립하고 있다. 2018년 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)가 발표한 「지구온난화 1.5°C 특별보고서」에 따르면, 자연재난으로 인한 피해를 저감하기 위해서는 2050년까지 탄소 순 배출량이 0이 되는 탄소중립 사회로의 전환이 필요하다(IPCC, 2018). 탄소중립도시를 실현하기 위해서는 도시 단위 탄소배출량 추정과 탄소배출량에 영향을 미치는 도시 요인에 대한 분석이 선행되어야 한다.

그러나 현재(본 논문이 작성된 2023년 7월 기준)이며, 이하 동일) 탄소배출량 추정방법으로 도시 단위 분석을 수행하는 데는 몇 가지 어려움이 존재한다. 첫째, 우리나라 탄소배출량 추정방법은 생산 기반의 추정법으로서(조홍중·구효정, 2022), 전 세계 평균값인 IPCC 배출계수를 일부 확대·적용하여 발표하고 있다. IPCC 배출계수를 활용할 경우 지역적 특성을 반영한 탄소중립 정책 수립으로 이어지지 못할 수 있다. 둘째, 탄소중립을 달성하기 위해서는 지역적 차원의 감축 노력이 중요한데 현재 우리나라에서는 광역 단위의 배출량 데이터만 발표하고 있어, 도시 단위의 탄소배출량 분석이 어렵다. 마지막으로 도시 단위에서 탄소중립을 위한 토지이용계획을 수립하기 위해서는 탄소배출량의 시·공간적 분포 파악이 필수적이지만 기존의 자료로는 시·공간적 분포를 확인하기 어렵다는 한계가 존재한다.

지역에 따라 도시 형태, 산업구조, 에너지 사용량, 사회경제적 활동 특성 등이 달라지는 만큼 탄소배출의 구조와 강도는 공간적으로 달라질 수밖에 없다(Wang et al., 2022). 지역의 탄소배출량 추정을 위해서는 기존 추정법의 한계를 극복한 상세 단위 분석이 필요하고, 소비 기반의 탄소배출량도 고려할 수 있어야 한다. 야간 위성영상을 활용한 탄소배출량 추정법은 픽셀 단위의 상세 분석을 가능하게 해주며, 소비 기반의 추정에 한층 가까워질 수 있다. 이에 본 연구는 도시 단위의 탄소배출량을 추정하기 위해 야간 위성영상을 활용하였고, 데이터의 활용가능성을 검증한 뒤 탄소배출량에 영향을 미치는 도시 요인에 대해 논의하고자 한다.

## II. 선행연구 고찰

### 1. 국내·외 탄소배출량 추정 연구

도시 내 탄소배출의 공간적 분포 파악은 합리적인 탄소배출 저감정책을 수립하기 위한 중요한 전제조건이다. 현재 우리나라의 국가 배출량은 1996년 IPCC 가이드라인의 산정방법론에 근거하여 산업, 수송, 건물 등 부문별 연료소비량과 연료별 배출계수를 곱하여 산정하고 있다. 지자체 배출량은 2006년 IPCC 가이드라인을 기반으로, 배출계수와 활동도의 곱으로 추정된다. 여기서 활동도는 온실가스 배출량에 직접 영향을 미치는 연료 사용량, 전기 사용량, 폐기물 매립량 등 정량적 통계 자료를 통해 확보할 수 있다.

IPCC에서 탄소배출량 추정을 위한 표준방법론과 배출계수를 제공하고 있음에도 불구하고 연구자들은 여러 한계점을 근거로 다양한 방식의 추정방법을 활용하고 있다. 그러나 선행연구는 대부분 부문별 탄소배출량 추정에 초점을 맞추고 있다. 예를 들면, 산업별로 추정하거나(최한주·이기훈, 2006; 박유진 외, 2022), 도로 및 교통에너지와 승용차에서 발생하는 탄소배출량을 추정한다(고승욱 외, 2023; Chen et al., 2019). 또한 건축물에서 발생하는 탄소배출량을 추정하고(유선철 외, 2019; 이슬기·이승일, 2022), 에너지시스템모형을 개발하여 전환부문 배출량을 추정하였으며(장명진 외, 2022), 농업·축산·산림에서 발생하는 배출량을 추정하는 식이다(Lal, 2004; 최윤실 외, 2022; Zhang et al., 2003). 선행연구들은 탄소배출량을 현실적으로 추정하기 위해 다른 통계자료와 모형을 활용하였으나 통계자료의 한계로 특정 부문 배출량만 추정하고 있다는 한계가 존재한다(유한솔 외, 2020). 이러한 추정법은 국지적 차원에서 단기적인 배출량을 관리하는데 도움을 줄 수 있지만, 도시 단위 추정에 활용하기에는 어려움이 존재한다. 따라서 탄소중립도시를 위한 정책을 수립하기 위해서는 부문별 추정이 아닌 도시 차원에서의 종합적 추정이 필요하며, 이러한 내용을 고려한 보조적인 수단으로서의 방법론을 모색하여야 한다.

탄소배출량을 산정할 때는 Scope과 Tier의 개념을 조작하여 반영하여야 한다. 현재 통용되고 있는 국제적인 지침에서는 배출원을 배출 형태에 따라 크게 직접배출원(Scope 1), 간접배출원으로 구분하고 있으며, 간접배출원은 다시 Scope 2과 Scope 3으로 세분화한다. Scope 1의 직접배출은 배출원 내부의 에너지 연소 및 공정에서의 온실가스 배출로 정의된다. Scope 2의 간접배출은 일상적인 활동에 필요한 전력, 열, 수도 등을 사용함으로써 간접적으로 배출되는 것으로 정의한다. 또한 Scope 3의 간접배출은 그 외의 간접배출로, 원재료의 생산, 제품 사용 및 폐기 과정에서 배출되는 것으로 정의된다(김승도·나승혁, 2008). 다음으로 배출량 산정을 위해서는 Tier(산정등급)를 설정해야 하며, 이는 산정방법의 복잡성을 나타내는 수준을 뜻한다. 앞서 기술했듯이 배출량 추정에는 활동도의 통계자료와 배출계수가 필요한데, 자료 확보 수준과 배출계수를 결정하는 방법에 따라 적용되는 Tier가 결정된다. 일반적으로 Tier 1, 2, 3로 구분하고 연속측정의 경우에는 Tier 4까지 규정하기도 하며, Tier가 높아질수록 배출량 결과의 신뢰도와 정확도가 높다. 환경부 「온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침」에 따르면, Tier 1은 IPCC 기본배출계수를 활용하여 배출량을 산정하는 기본 방법이고, Tier 3으로 갈수록 더 높은 정확도를 갖는 활동자료와 시험 및 분석을 통해 개발한 배출계수를 적용하게 된다.

선행연구의 대부분은 IPCC 방식을 일부 반영하고 있으므로 탄소배출량의 공간적 분포를 반영하지 못하는 생산 기반 추정방법에 근거하고 있다(Zhang et al., 2015). 그러나 여기서 두 가지



한계점을 발견할 수 있다. 첫째, 토지이용에 따라 온실가스 배출 규모가 결정될 수 있는 만큼, 온실가스 인벤토리 구축 과정에서 공간 정보가 고려되어야 하며(오상학 외, 2011; Zhang et al., 2018; 이슬기·이승일, 2022) 이를 반영한 산정 방법이 필요하다. 둘째, 생산과 소비의 주체가 상이함에 따라 책임 및 관리의 주체가 달라질 수 있으므로 생산이 아닌 소비 기반 배출량을 고려할 필요가 있다(조홍중·구효정, 2022). 이때 소비 기반의 배출량이란, 재화를 생산하면서 발생하는 것이 아닌 최종 수요, 즉 재화 소비로 인해 발생하는 탄소배출량으로 정의할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 첫째, IPCC 배출계수를 적용하지 않고 새롭게 개발된 추정법으로써 Tier 2 또는 3의 수준을 적용하고, 둘째, 소비 기반의 배출량 추정을 위해 탄소배출량의 범위를 Scope 2로 한정하였다.

## 2. 야간 위성영상 활용 연구

국내·외 많은 학자들은 탄소배출량을 측정하기 위해 다양한 방법을 시도해왔다. 일반적으로 탄소배출량은 통계자료 기반 상향식 방법으로 추정되며, 이는 여러 통계자료에 배출계수나 원단위 등을 곱한 후 합계를 구하는 방식이다. 하지만 도시·지역 단위 통계자료의 구축이 어려우므로 대부분의 기존 연구는 국가 및 대도시를 기반으로 하고 있고 하위 공간 단위의 탄소배출 연구는 거의 이루어지지 못하고 있다. 인위적 요인에 의한 탄소배출량 감축의 중요성이 확대됨에 따라 도시 내 탄소배출량의 시·공간적 특성 및 변화 분석에 대한 요구가 증대되어 왔고, 상세 단위에서의 분석을 위해 야간 위성영상이 활용되기 시작했다(Yang et al., 2020). 야간 위성영상 데이터의 활용가능성은 Elvidge et al.(1997)에 의해 처음으로 관찰되었다. 야간 위성영상은 도시 및 차량에서 나오는 빛에 대해 높은 공간해상도로 감지할 수 있으며, 공간적으로 명시적인 데이터를 제공할 수 있다. 야간 위성영상 자료는 도시화, 인구밀도, 에너지 사용 등의 대리변수로 활용되어 인간의 사회경제적 활동을 보여준다(Yu et al., 2015; Luo et al., 2019).

현재 주로 사용되고 있는 야간 위성영상 데이터는 DMSP-OLS와 NPP-VIIRS 두 가지가 있다. 1970년대부터 시작된 미국의 국방기상위성사업(DMSP)은 기상전용위성으로, OLS(Operational Linescan System)는 주요 센서 중 하나이다. 위도  $-65 \sim 75^\circ$ , 경도  $-180 \sim 180^\circ$ 를 포괄하는 지역의 관측이 가능하므로 전 세계에 관한 자료를 생산할 수 있다. 이 센서는 야간 광전 증폭 기능을 사용하여 구름뿐만 아니라 빛, 불꽃, 낚시 등 및 기타 저조도 조명도 감지할 수 있으며, 도시와 마을에서 나오는 가시광 및 근적외선 방출을 감지할 수 있는 능력을 갖추고 있다. 해당 센서는 1992년부터 2013년까지의 안정화된 영상을 제공하여, 전 세계 지역의 정보를 제공하는 최초의 자료로 인정받고 있다. 하지만

불연속성과 과포화화 같은 문제점이 발견되기도 하였으며, 현재는 운영이 중단되었다. 이후 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)와 NASA(National Aeronautics and Space Administration)는 2011년 10월, NPP-VIIRS 위성을 발사하였고, 2012년부터 현재까지 다양한 영상을 제공하고 있다. 이 센서를 통해 수집되는 자료 중 하나인 DNB는 중심파장 약  $0.7\mu\text{m}$ 에 해당하는 빛에너지 강도를 저장한 밴드이며, DMSP-OLS와 같이 야간 조명에 관한 정보를 제공하고 있다(Wang et al., 2017). NPP-VIIRS는 DMSP-OLS에 비해 방사선 검출 범위가 넓고 시공간적으로 해상도가 높은 것이 장점이며 공간 분해능 향상, 채도 감소, 그리고 온보드 보정과 같은 점이 개선되었다(Elvidge et al., 2013).

야간 위성영상은 많은 분야의 선행연구에서 활용되어 왔으며, 활용 가능성에 대한 충분한 검증을 거쳐왔다. Huang et al.(2014)의 메타분석 결과에 따르면, DMSP-OLS는 불투수 경계 매핑, 인구통계학적 및 사회경제적 정보에 대한 매핑, 산불 피해지역 모니터링, 어선 탐지, 마지막으로 이산화탄소 매핑에 활용되고 있었다. DMSP-OLS를 기반으로 한 이산화탄소 배출량 모델링 결과의 타당성을 분석한 연구 결과에 따르면 야간조명 밝기와 이산화탄소 배출량 사이에 강한 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났기 때문에(Meng et al., 2014; Shi et al., 2016), 탄소배출량을 추정하기 위한 대리변수로서 야간 위성영상이 채택되기 시작했다(Raupach et al., 2010; Su et al., 2014). 그러나 연구자들은 DMSP-OLS 데이터의 시간적 범위 한계로 인해, 같은 조명 정보를 제공하는 NPP-VIIRS와 결합함으로써 보다 더 장기적인 데이터를 구성하기 시작하였다(Lv et al., 2020). 따라서 많은 연구자들은 NPP-VIIRS를 활용하여 탄소배출량을 추정하는 것을 의미있는 연구로 제시하고 있다(Yang et al., 2020; Ou et al., 2015).

야간 위성영상을 활용하면 도시화, 경제발전, 인구밀도, 에너지 소비 및 기타 인간 활동 등 여러 가치를 해석할 수 있다. 그리고 탄소배출은 인간 활동의 범위 및 강도와 밀접한 관련이 있다. 따라서 야간 위성영상과 탄소배출 간의 관계성에 관한 분석은 탄소배출의 시·공간적 분포 특성 및 현황을 파악하기 위해 필요한 연구이다. 또한 통상적으로 선행연구에서 탄소배출량을 측정하는 기준은 생산 기반의 탄소배출량이다(조홍중·구효정, 2022). 그러나 소비 기반의 탄소배출량에 대한 논의가 꾸준히 제시되면서 야간 위성영상은 그러한 측면에서 중요한 역할을 한다. 야간 위성영상은 에너지나 기타 인간 활동을 소비함으로써 발생하는 조명을 직관적으로 파악하기 때문이다. 따라서 본 연구는 야간 위성영상을 활용함으로써, 공간이 반영되지 않은 기존 추정법의 한계, 데이터 구축의 어려움, 그리고 생산 기반의 탄소배출량에 대한 고찰을 실시하고, 이러한 한계점을 극복하고자 했다는 점에서 차별점이 있다.



### 3. 탄소배출 영향 요인 연구

일반적으로 도시화, 경제, 에너지, 산업 및 기술은 모두 사회 발전과 함께 탄소 배출에 영향을 미칠 것이라고 예측한다(Zhang and Zhao, 2019). 도시화율이 커질수록 에너지를 많이 사용하므로 탄소를 많이 배출하게 된다는 것이 통상적인 이론이기 때문이고(진태영·김진수, 2017), 경제 발전이 에너지 소비를 견인하기도 하며(Ang, 2008; Chen et al., 2016), 화석 연료 에너지 소비는 곧 탄소배출에 직결되는 구조를 가지기 때문이다(Ang, 2007; Begum et al., 2015). 또한 산업화가 진행될수록 탄소배출이 증가한다고 밝히는 연구들이 있다(Rehman et al., 2021; Sarkodie et al., 2020). 하지만 도시화율이 인구의 밀집도를 나타내는 만큼, 인구가 밀집된 도시는 에너지를 더 효율적으로 활용하여 탄소배출량을 감소시킨다고 주장하기도 한다(Martinez-Zarzoso and Maruotti, 2011). 게다가 에너지 기술 수준의 발달은 에너지 절약으로 이어지기 때문에 탄소배출 감축에 도움을 주기도 한다고 밝혀지기도 했다(Dietz and Rosa, 1994). 지역의 경제발전은 기후변화에 대한 적응능력을 향상시킨다(Bowen et al., 2012). 특히 적응능력은 환경 관련 우수한 법·제도, 강력한 보건 및 환경보호 시스템에 긍정적 영향을 준다(Tol and Yohe, 2007). 이에 환경보호 예산 증액이 온실가스 배출 저감에 기여한다는 연구결과도 보고된 바 있다(정민선 외, 2015).

도시계획에서 오랜기간 동안 논의되고 있는 주제인 압축적 개발과 외연적 확산 형태가 탄소배출에 미치는 영향에 관한 연구도 수행되어 왔다. 압축적 개발을 지지하는 연구자들은 고밀도 개발은 탄소배출을 줄이는 데 효과적이라고 밝혔다(Gaigné et al., 2012; Ou et al., 2013). 그러나 이러한 개발은 도로 혼잡을 증가시켜 오히려 배출량을 증가시키며, 탄소세와 같은 비용 발생 등을 이유로 효율적이지 않다고 주장하기도 한다(O'Toole, 2009).

## III. 연구설계

### 1. 연구질문 및 가설 설정

본 연구는 '(1)탄소배출량을 도시단위로 추정할 수 있을 것인가? (2)어떤 요인이 탄소배출량에 영향을 미칠 것인가?'와 같은 질문으로부터 출발하였다. 탄소중립과 같은 기후변화 대응을 위해서는 공간적 측면이 고려되어야 하며, 도시 차원의 종합적인 탄소배출량을 산출하여 현황을 파악하는 것이 필요하다. 이에 다양한 분야에서 분석되고 있는 야간 위성영상의 활용가능성을 검증하여 탄소배출량을 추정하고자 하였다. 또한 도시의 기능은 많은 사회경제적 활동과 연결되어 있으므로 도시의 발전에 따른 다양한 특성은 탄소배출에 영향을 미친다. 기존의 선행연구에서는 주로 에너지, 경제, 산업, 토지이용, 교통, 그리고 환경 예산과 같

은 도시의 발전과 관련된 요소들이 탄소배출량에 영향을 미친다고 분석하고 있다. 그러나 대부분의 연구결과는 합치된 의견을 제시하고 있지는 않다. 따라서 선행연구의 문제점을 인식하고 탄소배출량을 추정한 후 영향 요인을 규명하기 위해 다음과 연구 가설을 설정하였다.

- 연구가설 1 : 야간 위성영상을 기반으로 도시단위의 탄소배출량을 추정하는 것이 가능할 것이다.
- 연구가설 2-1 : 에너지 소비, 경제능력, 산업구조, 토지이용, 교통 각 분야는 탄소배출량을 증가시키는 데 영향을 미칠 것이다.
- 연구가설 2-2 : 환경예산의 분배는 탄소배출량을 감소시키는 데 영향을 미칠 것이다.

## 2. 연구의 범위 및 분석자료

본 연구는 행정구역 경계의 변경 및 행정구역 신설 등에 따른 데이터 오류를 최소화하기 위해 세종특별자치시가 출범한 시점을 기준으로 설계하였다. 탄소배출량 추정값은 1km×1km의 공간해상도 단위로 생성하였고, 2013년~2019년을 시간적 범위로 설정하였다. 다음으로 공간회귀모형에 활용한 분석 단위는 전국 시·군(9개 특별광역시, 150개 시·군)을 대상으로 하였으며 이때, 도서지역인 제주도 제주시, 서귀포시, 경상북도 울릉군은 분석에서 제외하였다. 공간회귀모형을 구성할 때에는 모든 자료의 구득이 가능한 2019년을 시간적 범위로 설정하였다.

본 연구는 연구가설에 따라 선행연구를 바탕으로 종속변수에 영향을 미칠 것으로 예상되는 요인들을 선정하여 분석지표를 구성하였다. 선행연구 고찰 결과, 탄소배출에 영향을 미칠 것으로 예상되는 요인들은 에너지 소비, 경제능력, 산업구조, 토지이용, 교통, 환경예산으로 도출되었으며, 각 요인들을 설명할 수 있는 변수의 구성과 구득 경로는 <Table 1>과 같다. 이때, GRDP 대비 산업부가가치비율 변수는 탄소배출에 영향을 미칠 것이라고 판단되는 2차산업(제조업, 광업)을 대상으로 산출하였으며, 1인당 환경예산은 지자체 예산 중 대기, 환경보호, 자연과 관련된 비목만 추출하여 사용하였다. 국토정보지리원이 제공하는 토지이용압축도의 지표정의는 격자 내 토지이용(건물)의 밀도이다. 원시 데이터의 측정단위는 500m×500m이며, 측정 방법은 격자 내 건축물 면적 합÷격자면적(0.25km<sup>2</sup>)×100%로 계산된다. 또한 토지이용복합도는 격자 내 토지이용(건물용도)의 다양성 수준으로 정의한다. 마찬가지로 500m×500m 격자의 단위로 측정되며, 격자 내 건물용도 개수를 통해 산출된다. 두 데이터는 격자 단위로 구득할 수 있으므로, 데이터의 공간적 범위를 일치시키기 위해 ArcGIS의 공간통계를 활용하여 150개 시·군별로 평균값을 재산정하였다. 마지막으로 종속변수는 야간 위성영상 데이터의



Table 1. Variables

Large category	Detail category	Variables	Unit	Reference	
Dependent variable	Carbon emission	DN value of nighttime satellite image (CE)	DN	NOAA	
		Urban area ratio (URBAN)	%	KOSIS	+
	Landuse	Landuse compactness (LU_COMPACT)	%	National Geographic Information Institute	+
Landuse complex (LU_COMPLEX)		Numbers/unit	National Geographic Information Institute	+	
Independent variable	Energy consumption	Electrical energy (ELECT)	GWh	KEPCO	+
	Economic capacity	GRDP per capita (GRDP)	Million won/person	KOSIS	+
	Industrial structure	Value-added of industry compared to GRDP (INDUS)	Million won	KOSIS	+
	Transportation	Number of registered cars (VEHIC)	Numbers	KOSIS	+
	Environment budget	Environment budget per capita (ENVIR)	Million won	Ministry of the Interior and Safety	-

DN값을 활용한 추정값을 사용하였다. 본 연구에서 활용하는 변수들의 통계량을 파악하기 위해 기술통계 분석을 실시하였다 (Table 2). 종속변수인 탄소배출 추정값은 평균 5,446인 것으로 분석되었으며, 표준편차가 비교적 큰 것으로 나타나 지역별 격차가 큰 것으로 판단된다.

### 3. 분석방법

#### 1) 야간 위성영상 활용 탄소배출량 지도 구축

본 연구는 야간 위성영상을 활용하여 탄소배출량을 추정하였다. 야간 위성영상에서 감지되는 빛은 도시화, 경제발전, 인구밀도, 에너지 소비 및 기타 인간 활동을 설명할 수 있고, 탄소배출은 인간 활동과 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서 활용한 야간 위성영상 NPP-VIIRS는 NOAA와 NASA에 의해 발사된 것으로, 선행연구에 따르면 사회경제적 활동과 탄소배출량 매핑에 대한 잠재력을 가진다고 평가되고 있다(Wei et al., 2021). NPP-VIIRS 위성은 매일 오후 1시 30분과 오전 1시 30분에 적도부근을 통과하여 동일 지역을 관측하고 있으며(Miller et al., 2012), 2012년부터의 자료가 제공되고 있다. NPP-VIIRS 센서는 인공조명 시설물에서 방사된 빛 에너지 강도를 DNB(Day/Night Band)에 복사에너지 양으로 기록한다(김민호, 2020).

먼저 각 영상의 모든 픽셀(pixel)의 기술통계 결과를 기반으로 음수 값의 존재 여부를 조사했다. 야간 위성영상의 DN(Digital Number) 값은 빛 에너지 강도를 의미하므로 음수의 값을 가질 수 없기 때문이다(류창·김한수, 2022). 본 연구에서 사용한 데이터는 연간 위성영상이며, 월간 위성영상을 연간 위성영상으로 합성하는 과정에서 배경잡음 및 비정상 값과 불안정 화소 등이 이미 제거되었으므로 데이터 전처리를 위한 보정 과정은 따로 진행하

Table 2. Descriptive statistic

Variables	Mean	S.D	Max	Min
CE	5,446.46	7,800.88	60,652	565
URBAN	34.78	31.9	100	4
LU_COMPACT	10.48	18.36	112.53	0.56
LU_COMPLEX	3.72	1.29	8.57	1.91
ELECT	6,425.86	11,808.59	94,334.41	126.88
GRDP	36.55	16.45	103.83	16.42
INDUS	3,473,895.13	8,330,218.74	77,553,145	-1,702,240
VEHIC	147,451.64	324,106.38	3,124,157	5,809
ENVIR	88.15	63.85	313.63	14.68

지 않았다(Elvidge et al., 2021).

NPP-VIIRS 위성영상은 픽셀 기반의 래스터 데이터이므로, 본 연구의 목표에 맞게 격자(grid)화된 탄소배출량 지도를 구축하기 위해서는 폴리곤(polygon)으로 변환하는 작업이 필요하였다. 공간통계(Zonal statistics as Table)를 실시하여 1km×1km 공간해상도의 연도별 지도를 구축하였다. 이때 공간통계의 방법은 DN값의 평균으로 산출하였다.

야간 위성영상 데이터의 값은 인간의 생산 및 생활 활동과 관련된 인간 활동, 에너지 소비 및 탄소 배출 강도로 해석할 수 있지만(Zhang et al., 2017), 탄소배출량 추정값으로 활용할 수 있는지에 대해서는 검증 절차가 필요하다. 따라서 우리나라에서 현재 공식적인 추정값으로 사용하고 있는 국가 온실가스 인벤토리 데이터를 활용하여 상관분석을 실시하였다. 해당 인벤토리 데이터는 현재 시도 단위로만 공표되고 있으므로 연도별 지도 또한 시도



단위로 합산하여 재구성하였다. 본 연구에서는 공간분석과 상관 분석을 위해 ArcGIS 10.4와 SPSS Statistics 25 소프트웨어를 활용하였다. 다음으로 국가 온실가스 인벤토리 자료를 기준으로 야간 위성영상 기반 탄소배출량을 보정하여 보정 전후의 값을 비교하였다. 보정식을 도출하는 방법으로는 두 데이터 모두 횡단면자료(cross-sectional data)와 시계열자료(time-series data)를 결합한 패널자료로 구성되기 때문에 SAS를 활용해 패널회귀모형을 적용하였다. F-test를 통해 일원모형과 이원모형 중 오차항의 고정효과가 존재하는 모형을 파악하고, Hausman Test를 통해 고정효과모형과 확률효과모형 중 적합한 모형을 도출하였다(이희연·노승철, 2013).

## 2) 공간회귀모형

전국을 대상으로 탄소배출량을 추정할 후, GeoDa의 공간회귀 분석을 통해 탄소배출량에 영향을 미치는 도시 요인에 대해 논의하였다. 탄소배출은 기후의 한 영역으로써 완벽하게 고립되어 존재한다고 할 수 없고 분석에 이용되는 데이터도 집합적인 공간 단위이므로, 특정 위치에서 발생하는 이벤트는 인접 지역과 관계를 가진다고 할 수 있다. 절대적 위치나 상대적 위치를 가지고 있는 공간 데이터는 독특한 본질적 속성을 가지는데 이러한 특징을 가장 잘 나타내는 것은 Tobler(1970)의 지리학 제1법칙(the first law of geography)이다. ‘모든 것은 그 밖의 다른 모든 것과 관련되어 있지만, 서로 가까이 있는 것들은 멀리 있는 것들보다는 더 높은 관련성을 보인다’는 내용을 강조한다(이희연·노승철, 2013). 이러한 속성을 가지는 공간 데이터를 선형회귀모델에 적용하면 종속변수 또는 오차의 공간적 자기상관성이 발생할 수 있다. 공간적 자기상관성이 존재할 경우 선형회귀모델의 모수추정량이 편향되는 오류가 발생하는데, 공간회귀모형을 활용하면 이러한 오류를 보완할 수 있다(변필성, 2007; 백설·김홍순, 2023). 대표적 모형으로는 공간시차모형(Spatial Lag Model, SLM)과 공간오차모형(Spatial Error Model, SEM)이 있다.

먼저 공간시차모형(SLM)은 종속변수에 공간적 자기상관성이 존재할 경우에 사용되고, 공간오차모형(SEM)은 오차의 공간적 자기상관성이 발생할 경우 사용된다. 오차의 공간적 자기상관성은 현상이 발생하는 권역과 그 현상에 관한 데이터를 집계하는 구역이 불일치하거나, 공간적 자기상관이 발생하는 변수를 파악할 수 없어 회귀모델에 설명변수를 투입하지 못함으로 인해 나타날 수 있다(변필성, 2007). 두 모형의 식은 각각 (1), (2)와 같다.

$$y = \rho W y + \beta X + \epsilon \quad (1)$$

$$y = \beta X + \lambda W \epsilon + \mu \quad (2)$$

공간시차모형 식 (1)에서  $\rho$ 는 공간가중치 행렬의 계수,  $W$ 는 공간가중행렬로 대상지역 내 다수의 지점들이 서로 공간적으로

인접하고 있는가의 여부를 파악할 수 있도록 횡단표준화된 것이다(최열·이재송, 2014). 한편, 식 (2)의 공간오차모형에서  $\lambda$ 는 공간자기회귀계수,  $W\epsilon$ 는 오차의 공분산이 반영되어 변화된 오차항을 의미하며,  $\mu$ 은 IID(Independent and Identically Distributed) 오차이다(최열·이재송, 2014).

## IV. 연구결과

### 1. 지역별 탄소배출량 지도 구축

야간 위성영상 데이터를 탄소배출량 추정값으로 활용할 수 있는지 확인하기 위해 국가 온실가스 인벤토리 데이터와 상관분석을 실시하였다. 분석 결과, 1% 유의수준 내에서 0.505의 값이 도출되어 두 자료의 상관성은 높은 것으로 확인되었다. 더 세부적으로 확인하기 위해 연도별로 상관분석을 실시하였고, 2013년부터 2019년까지 차례로 5% 유의수준 내에서 0.438, 0.449, 0.515, 0.552, 0.536, 0.532, 0.530의 상관계수가 도출되었다. 다만 국가 온실가스 인벤토리 데이터는 미세먼지나 오존 등과 같이 실제로 측정된 값이 아닌 활동도와 배출계수들의 곱으로 산정된 추정 데이터임을 감안해야 한다. 따라서 지역별 탄소배출량을 분석하고 현황을 파악하기 위한 하나의 수단으로써, 야간 위성영상 데이터는 충분한 역할을 할 수 있을 것이라고 판단되었다.

다음으로 국가 온실가스 인벤토리 자료를 기준으로 보정을 실시하여 보정 전후의 값을 비교하였다. 앞서 인벤토리 자료와의 상관관계를 확인했지만, 보정 작업을 거치지 않은 그 자체로서는 다양한 지표들의 대리변수가 될 수 있는 우려가 있기 때문에 보정 전후 비교를 통해 한 번 더 검증해주는 절차가 필요했다. 야간 위성영상 기반 탄소배출량 추정값을 독립변수로, 인벤토리 자료의 탄소배출량을 종속변수로 설정하였다. F-test 결과, 일원(One-way)고정효과모형 및 이원(Two-way)고정효과모형 모두 통계적으로 유의하여 고정효과가 존재하는 것으로 판단되었다. Hausman 검정 결과로는 일원(One-way)확률효과모형에 확률 효과가 존재하는 것으로 판단되었다. 그중에서도 개체특성효과는 고정적이거나 시간특성효과는 고정적이지 않은 데이터의 특성으로 인해 일원(One-way)고정효과모델이 채택되었고, 최종적으로  $y = 0.202954x + 2074.624$ 의 보정식이 도출되었다. 보정 전후를 비교해본 결과, 지역 간에 상대적인 배출량 격차가 보정 전에 비해 줄어들기는 했으나 절대적인 현황에는 변화가 없는 것으로 나타나, 보정 전의 탄소배출량 지도를 통해 공간적인 분포 현황을 파악하고자 하였다.

이와 같은 전처리 작업을 거친 후, 본 연구에서 2013년부터 2021년까지 1km×1km 공간해상도의 탄소배출량 지도를 구축한 결과는 <Figure 1>과 같이 나타났다. 공간적 분포를 확인하기 위해 Arcmap의 Natural breaks 기법을 사용하여 7개 등급으로



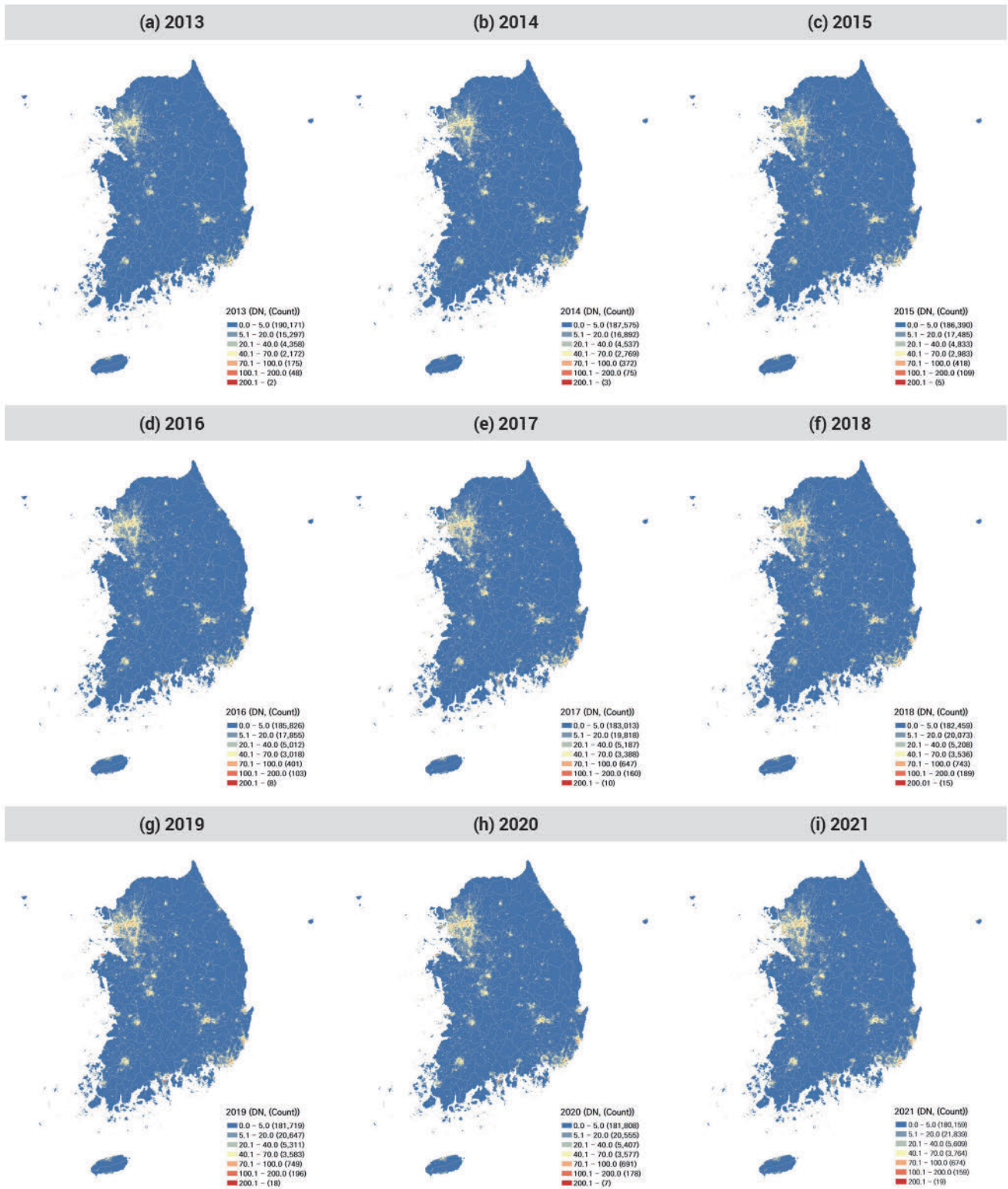


Figure 1. Carbon emission estimates by nighttime light satellite imagery

구분하고, 9개년 모두 동일한 기준에 따라 비교하기 위해 등급 분류기준을 적절하게 조정하였다. 격자의 색이 붉은색을 나타낼수록 탄소배출량이 많은 것으로 해석한다. 분석 결과, 서울특별시 를 포함한 수도권을 중심으로 탄소배출량이 집중화되어 있는 것으로 나타났고, 광역시 및 주변지역들에서 비교적 높은 수준인

것을 확인할 수 있다. 또한 2013년 대비 시간이 흐를수록 붉은색 을 나타내는 격자가 증가하고 있는 것을 확인할 수 있으므로 2013 년 이후 지속적으로 탄소배출량이 증가하고 있는 것으로 판단되 며, 수도권 주위로 증가하는 지역이 확산되고 있는 경향을 확인 할 수 있다.

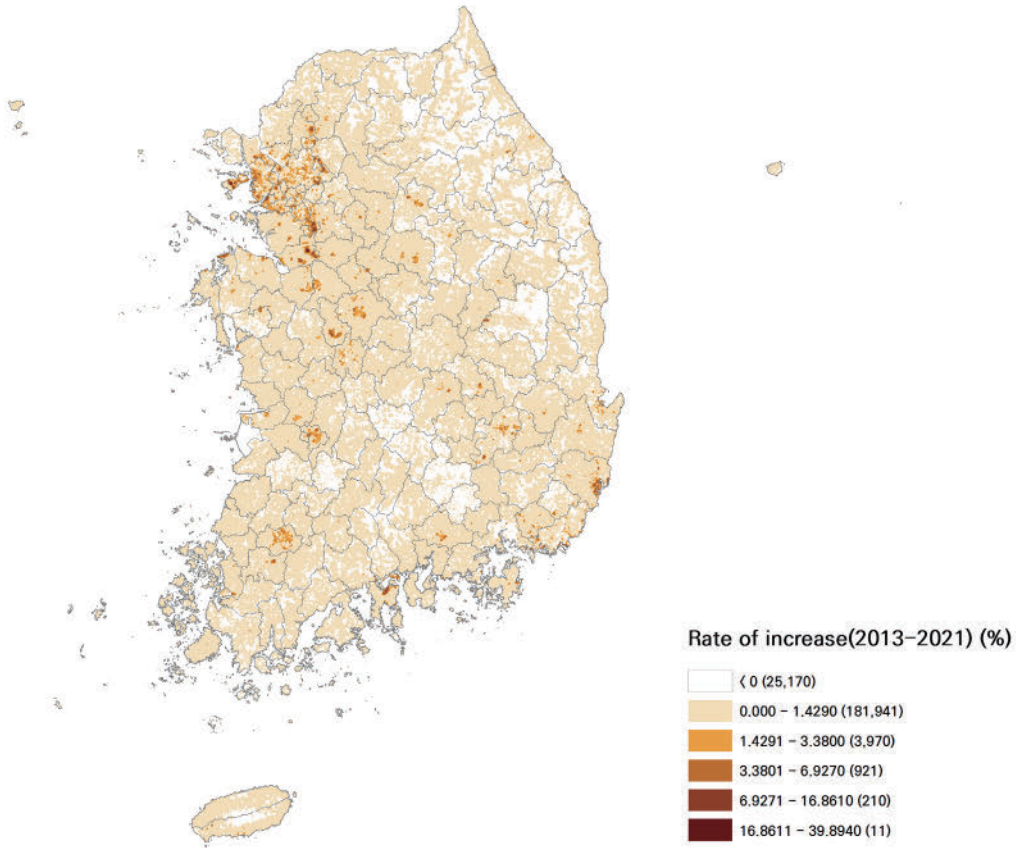


Figure 2. Rate of increase by pixels

다음으로 시간의 흐름에 따른 지역별 탄소배출량 변화를 살펴 보기 위해 픽셀별 증가율을 산출한 후 공간정보화했다(Figure 2). 유색 픽셀은 9년간 탄소배출량이 증가해온 지역이고 색이 진 할수록 증가율이 급격한 지역이다. 반면 흰색 픽셀은 9년간 탄소 배출량이 감소한 지역에 해당한다. 한반도 동쪽을 중심으로 흰색 픽셀이 많이 위치하고 있으나, 산지로 추정된다. 산지는 인위적 탄소배출이 적은 지역이다. 한편 유색 픽셀은 수도권 주변, 울산 광역시, 광주광역시, 여주시, 전주시 등에서 집중되어 나타났다. 탄소배출량이 급격하게 증가한 지역의 특성을 파악하기 위해 행정구역 경계와 중첩 분석을 수행했다. 수도권을 제외한 유색 픽셀은 대부분 공업단지인 것으로 나타나, 탄소 중립을 위해 산업 부문 배출량이 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

수도권 유색 픽셀을 분석해본 결과 화성 동탄신도시, 평택 고덕국제신도시, 양주신도시, 김포 한강신도시, 위례신도시, 남양주 다산신도시, 시흥 배곧신도시, 송도국제도시, 청라국제도시 등 제2기 수도권 신도시와 지자체에서 계획한 신도시를 중심으로 탄소배출량이 급격하게 증가한 것으로 나타났다. 정부에서는 여러 도시 문제를 해소하기 위해 외곽지역으로 신도시 개발사업을 확대하고 있으며, 이는 도시의 외연적 확산을 가속시키는 주요 원인이 되고 있다. 주택시장 안정과 양질의 주택공급을 실현할 수는 있지만, 신도시 개발사업 확장은 탄소중립 측면에서 외연적

확산 형태로 인한 탄소배출을 심화시킨다고 해석할 수 있다. 따라서 신도시 개발사업에 대해 더욱 신중한 논의가 필요한 시점이며, 무분별한 외곽지역의 신도시 개발은 지양하고 낙후된 원도심 활성화 및 재생을 지향해야 할 것으로 판단된다.

## 2. 공간회귀분석

본 절에서는 앞 절에서 비교했던 보정 전후 데이터 각각에 대해 공간회귀모형을 적용하여 탄소배출량에 영향을 미치는 요인을 논의하고자 한다. 공간회귀모형을 사용하기 위한 전제조건은 변수에 공간적 자기상관성이 존재하는 것이므로 Moran's I 검증을 통해 종속변수의 공간적 자기상관성을 탐색하였다. Moran's I 계수는 -1에서 1 사이의 값을 지니는데, 1에 가까울수록 인접한 공간 단위들이 전체 대상지에 걸쳐 유사한 값을 보이는 것으로 해석하며 양(+)의 공간적 자기상관성을 가지는 것으로 판단한다. 자기상관이 존재하지 않을 경우에는 0에 가까운 값이 관찰된다(염재원 외, 2020). 본 연구에서는 퀸 인접 정의(Queen Contiguity)를 활용하여 공간가중치 매트릭스를 구축하였으며(강승원 외, 2019), 이를 적용한 보정 전후 탄소배출량의 Moran's I 값은 동일하게 0.634로 높게 나타났다(Figure 3). 즉 한 지역에서 발생하는 탄소배출량은 인접한 지역에 크게 영향을 미치는 것으로 보



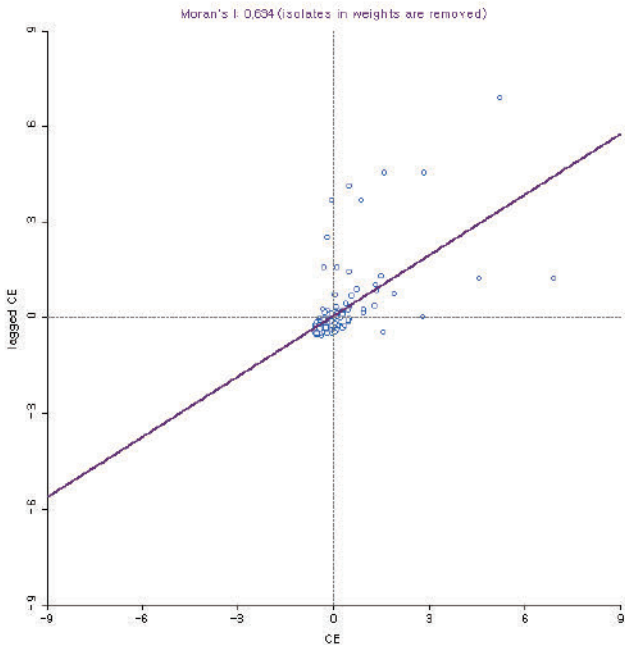


Figure 3. Moran's I analysis result

여진다. 따라서 본 연구는 공간적 자기상관성 문제로 인해 발생하는 편향된 결과를 방지하기 위해 공간회귀모형을 활용하는 것이 적합하다고 판단되었다.

다음으로 정규성 및 이분산성에 대해 4가지 테스트를 수행하였다(Table 3). Jarque-Bera 검정 결과, 모형의 오차항이 정규분포를 따르지 않는 것을 확인하였다. Breusch-Pagan, Koenker-Bassett, White 검정 결과로는 이분산성이 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 OLS 모형이 아닌 공간 모형을 사용해야 함을 의미한다. 또한 Condition Number를 통해 본 연구에 사용된 변수들의 다중공선성을 진단하였다. 일반적으로 Condition Number 값이 30보다 크면 다중공선성이 있다고 판단할 수 있는 바(이희연·노승철, 2013), 다중공선성에는 문제가 없음을 확인하였다.

공간회귀모형은 공간데이터가 가지는 공간의 영향을 통제하면서 회귀식을 추정하므로, 추정 결과에 대한 신뢰도를 높일 수 있다(정수영·전희정, 2019). 본 연구에서는 OLS 모형의 대안으로, 보다 적합한 모형을 선택하기 위해 상향식 접근에 따라 판단하였다. SLM 모형과 SEM 모형의 LM(Lagrange Multiplier) 검정 및 Robust LM 검정을 실시하였다(Table 3). 그 결과 두 모형 모두 통계적으로 유의한 결과가 도출되어, 통계량이 더 유의하게 나타난 SLM 모형이 더 우수한 모형으로 판단되었다.

공간회귀모형의 R<sup>2</sup>는 OLS 모형과 달리 최대 우도 추정법으로 산출되기 때문에, R<sup>2</sup>의 비교보다는 Log Likelihood, AIC와 SC 값을 기준으로 모형의 상대적 적합성을 검증하였다(오지운 외, 2023). 일반적으로 공간회귀모형의 Log Likelihood이 OLS일 때보다 증가하고, AIC와 SC가 감소하면 공간회귀모형의 설명력이

Table 3. Pre-test for analysis

Error type	Test	Value & prob (before)	Value & prob (after)
Multi-collinearity	Condition number	25.9837	25.9837
Normality	Jarque-Bera test	921.3264***	921.3264***
	Breusch-Pagan test	727.3890***	727.3890***
Heteroskedasticity	Koenker-Bassett test	106.0641***	106.0641***
	White test	152.7794***	152.7794***
	Moran's I (error)	-2.9457***	-2.9457***
Spatial autocorrelation	LM (lag)	22.5384***	21.4167***
	Robust LM (lag)	28.7919***	27.0668***
	LM (error)	9.7972***	9.7972***
	Robust LM (error)	16.0507***	15.4473***
	LM (SARMA)	38.5891***	36.8640***

\*\*\*p<0.01

향상되었다고 판단한다(최열·이재송, 2014). 본 연구는 보정 전 후 모두 Log Likelihood 값이 SLM에서 가장 크고, AIC, SC 값이 OLS, SEM, SLM 순으로 작아졌기 때문에 SLM을 최종 모형으로 채택하였다(Table 4, Table 5).

먼저 보정 전후의 공간회귀모형 적용 결과를 비교했을 때, 동일한 변수들에 대해 유의미한 결과를 확인할 수 있었으며 상이한 영향 관계는 나타나지 않았다. 다만 보정 후의 경우, 탄소배출량의 지역 간 격차가 감소했기 때문에 보정 후 결과의 회귀계수값이 대체적으로 줄어들었다. 따라서 탄소배출량과 특정 도시 요인 간의 영향 관계를 해석하는 데에는 전자의 데이터를 활용함에 무리가 없는 것으로 판단되어 보정 전의 결과를 바탕으로 다음과 같이 해석하였다. 분석결과를 살펴보면, 토지이용압축도와 토지이용복합도에서 유의미한 결과를 확인하였다. 토지이용압축도는 탄소배출과 음(-)의 영향 관계를 나타내는 것을 알 수 있고, 격자 내 토지이용(건물)의 밀도가 높아질수록 탄소배출량은 감소하는 구조로 설명된다. 도시계획에서 주로 언급되는 도시 모형인 압축도시의 가장 큰 특징은 고밀도 개발이며, 이는 도시 기반시설 및 여러 건물의 밀집 등 토지이용의 집약을 의미한다. 분석 결과는 컴팩트한 도시가 탄소중립도시에 도달하는 데 더욱 효과적인 것이라는 결론을 유추해낼 수 있다. 반면 토지이용복합도에서는 양(+)의 관계를 확인할 수 있었는데, 건물의 다양성 수준이 증가할수록 탄소배출량이 커지는 것으로 나타났다. 다만 본 연구에서 활용한 토지이용복합도 지표는 단위면적 내 건물용도의 다양성 수준을 의미하므로 압축도시의 '복합토지이용(mixed landuse)' 특성과는 다소 차이가 있다. 이는 혼합용도의 토지이용이 많다고 해석하기에는 무리가 있고, 경제발전과 도시계획이 급속도로 이



**Table 4.** OLS, SLM, SEM analysis results (before calibration)

		OLS		SLM		SEM	
		$\beta$	SE	$\beta$	SE	$\beta$	SE
Constant		-1367.42	918.756	<b>-1960.18**</b>	819.162	-1084.55	785.288
LandUse	URBAN	-4.6391	7.6612	-4.8019	6.7962	-1.7791	6.9300
	LU_COMPACT	<b>-80.8622***</b>	18.3820	<b>-106.37***</b>	16.8733	<b>-84.5315***</b>	16.3192
	LU_COMPLEX	<b>1154.10***</b>	265.424	<b>1227.40***</b>	235.579	<b>1087.56***</b>	225.037
Energy consumption	ELECT	<b>0.1739***</b>	0.0348	<b>0.1504***</b>	0.0310	<b>0.2167***</b>	0.0330
Economic capacity	GRDP	-7.2294	10.0856	-0.8515	8.9768	-12.9166	9.0099
Industrial structure	INDUS	<b>0.0001***</b>	0.00002	<b>0.00007**</b>	0.00002	<b>0.00009***</b>	0.00002
Transportation	VEHIC	<b>0.0168***</b>	0.0012	<b>0.0173***</b>	0.0010	<b>0.0160***</b>	0.0011
Environment budget	ENVIR	-1.4781	2.2472	-2.1829	1.9968	-1.6519	2.0568
Spatial effect	$\rho$ (Rho)			<b>0.1003***</b>	0.0174		
	$\lambda$ (Lambda)					<b>-0.2542**</b>	0.1071
Explanatory power of the model	R2	0.9603		0.9669		0.9629	
	Log likelihood	-1394.76		-1380.52		-1390.72	
	AIC	2807.53		2781.03		2799.45	
	SC	2835.15		2811.72		2827.07	
Condition number		25.983675					
Likelihood ratio				<b>28.4910***</b>		<b>8.0760***</b>	

\*p<0.1, \*\*p<0.05, \*\*\*p<0.01

**Table 5.** OLS, SLM, SEM analysis results (after calibration)

		OLS		SLM		SEM	
		$\beta$	SE	$\beta$	SE	$\beta$	SE
Constant		1791.1	918.756	<b>1506.69***</b>	173.572	<b>1854.51***</b>	159.377
LandUse	URBAN	-0.9415	1.5549	-1.0030	1.3885	-0.3611	1.4065
	LU_COMPACT	<b>-16.4113***</b>	3.7307	<b>-21.3834***</b>	3.4474	<b>-17.156***</b>	3.3121
	LU_COMPLEX	<b>234.229***</b>	53.8688	<b>251.537***</b>	48.1592	<b>220.725***</b>	45.6722
Energy consumption	ELECT	<b>0.0353***</b>	0.0071	<b>0.0309***</b>	0.0063	<b>0.0440***</b>	0.0067
Economic capacity	GRDP	1.4672	2.0469	-0.4798	1.8312	-2.6215	1.8286
Industrial structure	INDUS	<b>0.00002***</b>	0.000006	<b>0.00002***</b>	0.000005	<b>0.00002***</b>	0.000005
Transportation	VEHIC	<b>0.0034***</b>	0.0002	<b>0.0035***</b>	0.0002	<b>0.0033***</b>	0.0002
Environment budget	ENVIR	-0.3000	0.4561	-0.4630	0.4082	-0.3353	0.4174
Spatial effect	$\rho$ (Rho)			<b>0.0903***</b>	0.0163		
	$\lambda$ (Lambda)					<b>-0.2542**</b>	0.1071
Explanatory power of the model	R2	0.9603		0.9665		0.9629	
	Log likelihood	-1141.19		-1127.98		-1137.16	
	AIC	2300.39		2275.95		2292.31	
	SC	2328.01		2306.64		2319.93	
Condition number		25.983675					
Likelihood ratio				<b>26.4335***</b>		<b>8.0760***</b>	

\*p<0.1, \*\*p<0.05, \*\*\*p<0.01



루어짐에 따라 여러 용도의 건물들이 산재하여 입지하게 된 우리나라의 특성으로 해석할 수 있다. 그리하여 탄소중립도시 모형을 구상하기 위해서는 토지이용계획의 역할이 중요한 것으로 사료된다.

에너지와 탄소배출 간의 관계를 확인할 수 있는 전력소비량 변수는 세 모형 모두에서 양(+)의 계수를 나타내며, 탄소배출은 높은 에너지 소비와 관련이 있다는 선행연구의 결과와 일치한다(Waheed et al., 2019). 따라서 전력화 과정에서 신재생에너지로의 전환 또는 전력 생산 믹스 변화를 통해 탄소 저감을 꾀할 필요가 있다. 신재생에너지의 효율과 화석연료 연소로부터의 온실가스 발생을 고려하여, 발전 과정에서 석탄 및 석유 사용량을 최소화하고 천연에너지 발전량을 늘리면서 전력화를 높이는 사업의 추진이 지속적으로, 그리고 비중 있게 추진되어야 할 것으로 판단된다(진태영 외, 2020). 또한 GRDP 대비 산업부가가치 변수는 영향 정도가 다소 낮게 관찰되었지만, 모든 모형에서 유의미한 값이 도출되었으므로 이는 두 변수가 통계적으로 유의미한 관계에 있다는 것을 의미한다. 산업부가가치는 순생산액으로 해석하기도 하므로 부가가치 비율이 증가했다는 것은 2차산업의 생산성이 증가하고 있다는 것을 의미한다. 따라서 2차산업의 생산성 증대는 탄소배출량 증가에 유의미한 영향을 미치는 것으로 사료된다.

다음으로 교통 측면의 분석 결과에서는 자동차 등록대수가 증가할수록 탄소배출량에도 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 많은 환경문제를 야기하는 과도한 자동차 누적 등록대수와 교통혼잡 문제는 탄소중립도시를 위해 반드시 해결되어야 할 쟁점인 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서 사용한 변수는 전기차와 같은 친환경자동차가 포함된 집계량이므로 결과 자체를 화석연료의 영향이라고 보기는 어려운 한계가 있으나, 2022년 기준 국토교통부의 통계에 따르면 친환경자동차의 비중은 여전히 6.2%인 것으로 보고되어 이와 같이 해석하는 데에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

또한 본 연구에서는 공간적 자기상관성을 이유로 공간회귀모형을 사용하였으므로 공간적라그 변수의 해석이 필요하다. 이 변수가 유의미하게 나타나면 공간적 자기상관성이 탄소배출량 증가에 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다(Jun, 2017; 정수영·전희정, 2019). 따라서 어떠한 지역의 탄소배출량 증가는 인접지역의 탄소배출량 증가에 약 10% 정도 영향을 받는 것으로 분석되었다. 한편, 1인당 GRDP, 도시화율, 1인당 환경예산 변수들은 3개 모형 모두에서 유의미한 결과를 나타내지 않았으므로 관계성을 확인하지 못하였다.

## V. 결론 및 시사점

오늘날 도시는 급속도로 성장하며 기후변화 문제를 야기시키고, 심각해지는 기후변화 문제는 다시 도시에 일련의 노력을 요

구하고 있다. 기후변화 문제로 인해 전 세계가 위협받고 있는 현재, 세계 각국은 탄소중립 사회로의 전환을 선언하였다. 이러한 움직임을 따라 우리나라에서도 탄소중립 사회로의 대전환을 선포하고 이의 이행을 위한 법제도 정비 및 전략을 발표하였다. 탄소중립도시로 나아가기 위해서는 2050년까지 탄소 순 배출량이 0이 되는 도시를 계획해야 하며, 탄소배출량 저감을 위해서는 도시 단위의 탄소배출량 추정과 영향 요인에 대한 분석이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 선행연구 및 현행 온실가스 배출량 산정법에서 발견되는 한계점을 보완하여 야간 위성영상을 기반으로 탄소배출량을 추정하였으며, 탄소배출 감축을 위한 전략을 모색하기 위해 영향을 미치는 도시 요인을 분석하였다.

분석 결과, 우리나라 도시의 탄소배출량은 시간의 흐름에 따라 증가하고 있음을 보여준다. 탄소배출량의 공간적 분포는 지역별로 매우 다양하며, 지역별 격차가 큰 것으로 나타났다. 예를 들면, 수도권과 특별·광역시 주변 지역에 집중화되어 있는 현상을 확인할 수 있으며, 그 강도와 범위는 더 증대되고 확산되고 있다. 특히, 수도권의 신도시와 공업이 발달한 도시에서 탄소배출량이 급격하게 증가하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 다음으로 탄소배출량은 공간적 자기상관성을 보유하고 있는 바, 공간회귀모형을 활용하여 영향 요인에 대해 분석하였고, 토지이용, 에너지 소비, 산업구조, 교통 부문에서 유의미한 관계를 확인할 수 있었다. 토지이용의 압축도가 높아질수록 탄소배출량 감축에 긍정적인 영향을 주고, 토지이용의 다양성 수준이 증가할수록 탄소배출량이 커지는 것으로 분석되었다. 또한 에너지 소비가 증가할수록, 2차산업의 생산성이 증대될수록, 자동차가 증가할수록 탄소배출량은 증가한다.

이러한 결과를 통해 다음과 같은 시사점을 제시할 수 있다. 첫째, 컴팩트한 도시는 탄소중립도시의 실현에 더욱 효과적이므로 이를 고려한 토지이용계획이 필요하다. 이러한 결과는 오늘날 도시계획에서 강조하는 컴팩트한 도시에 대한 타당성을 뒷받침할 수 있는 근거가 될 것으로 판단된다. 특히 역스프롤 현상을 야기하는 수도권 신도시 개발사업은 더욱 신중하게 계획될 필요가 있다. 쾌적한 주거환경을 만들고자 했던 취지는 오히려 탄소배출로 인한 기후변화 문제를 심화시키고 있기 때문이다. 둘째, 에너지 효율화 기술의 촉진 및 신재생에너지 생태계로의 전환은 탄소배출을 줄이는 중요한 접근 방식이다. 따라서 발전 과정에서 석탄 및 석유 사용량을 최소화하고 천연에너지 발전량을 늘리면서 전력화를 높이는 방향으로 에너지 소비 메커니즘을 개선해야 할 것이다. 셋째, 산업화에 따른 생산성을 제한하는 것은 경제성장의 측면에서 올바른 방향이 아니므로 환경 규제를 통한 저공해 고부가가치 산업 시스템으로의 전환이 필요하다. 마지막으로, 자동차 누적 대수의 증가는 곧 탄소배출량에 직접적으로 영향을 미치므로 자동차를 줄이는 것은 필수불가결한 과제이다. 그러나 가구당 차량 수를 제한하거나 운행횟수 등을 유지시키는 등의 방식은 또



다른 문제를 야기할 수 있다. 이미 전 세계적으로 자동차로 인한 환경오염 문제의 심각성을 깨닫고 전기차와 같은 친환경자동차로의 전환을 추진하고 있다. 따라서 친환경자동차 산업의 성장을 촉진시키기 위한 법제도의 정착과 인센티브와 같은 제도의 확대가 필요하다.

한편, 본 연구에는 다음의 한계점이 있다. 먼저, 야간 위성영상은 앞서 언급했듯이 인구 분포, 도시화 지역 식별, 경제 활동, 에너지 소비 등 다양한 지표들을 대리할 수 있으므로, 연구자의 목적에 따라 다양한 해석을 이끌어낼 수 있다. 또한 이러한 맥락에서, 본 연구는 실제로 우리나라의 특정 도시가 타 도시에 비해 압도적으로 많은 탄소를 배출하고 있는 현실은 충분히 반영하지 못했다. 두 번째로, 시기별 데이터 및 전체 데이터를 대상으로 상관분석을 실시해본 결과 0.5 수준의 상관계수가 도출되었다. 이때, 두 자료 간에 유의미한 상관관계가 존재한다는 사실은 확인할 수 있으나 매우 높은 수준이라고 짐작하기에는 분명 무리가 있다. 다만, 국가 온실가스 인벤토리 데이터는 실제로 측정된 값이 아닌 추정된 데이터임을 감안한다면, 그리고 온실가스 인벤토리를 기준으로 보정한 데이터와의 비교를 통해 절대적인 공간적 현황 변화가 나타나지 않았음을 감안한다면, 보조 도구로서의 역할을 충분히 할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 한계점이 있음에도 불구하고 본 연구를 통해 야간 위성영상 데이터의 활용 가능성을 확인해본 결과 향후 탄소배출량 추정방법의 발전 가능성을 엿볼 수 있었음에 방법론적 의의가 있다. 본 연구에서 제시된 몇 가지 방법론적 한계점을 개선하여 야간 위성영상 기반 매핑방법의 다양한 시도가 진행된다면, 탄소배출량 추정의 정확도를 현저히 높일 수 있을 것으로 사료된다. 마지막으로 본 연구에서는 공간의 중요성을 인식하고 공간회귀모형을 통해 이와 같은 특성을 반영하기는 하였으나, 지역의 조건이나 배경에 따라 요인들의 영향 정도가 다를 수 있음은 반영하지 못하였다. 따라서 향후 공간적 이질성을 반영하고 특정 지역에서 특정 요인이 미치는 영향 정도를 세부적으로 도출한다면, 지역 특성을 고려한 정책 수립이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 소비 기반의 추정방법을 모색하고자 야간 위성영상을 활용하였으며, 이를 통해 공간적으로 분석하고 영향 요인을 규명한 것으로 의의가 있다. 기존의 탄소배출량 산정법에서 발견되는 여러 한계점을 보완하여 하위 공간 단위까지 추정할 수 있는 새로운 방식으로서 방법론적 의미가 있다. 본 연구 결과와 공표될 기초지자체 단위 온실가스 인벤토리와 비교·분석 연구를 수행하여 탄소배출의 책임 및 관리 주체를 명확히 할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 도시 단위의 탄소배출량 추정이 가능해짐에 따라, 탄소배출량에 영향을 미치는 요인을 검토하는 데 지역의 특성을 반영할 수 있다. 따라서 야간 위성영상 기반 탄소배출량 추정법은 탄소중립도시에 도달하기 위한 토지이용계획 및 정책연구에 효과적인 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

## 인용문헌 References

1. 강승원·이달별·정주철, 2019. “도시개발 패턴이 자연재해 피해에 미치는 영향: 경관지수를 이용하여”, 『환경정책』, 27(4): 189-210.  
Kang, S.W., Lee, D.B., and Jung, J.C., 2019. “The Impact of Urban Development Patterns on National Disaster Damages”, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 27(4): 189-210.
2. 고승욱·신학철·이승일, 2023. “API 기반 통근통행자료를 활용한 서울시 행정동별 승용차 탄소배출량 추정: 네트워크 특성과 공간구조정책 특성을 중심으로”, 『국토계획』, 58(1): 91-103.  
Go, S.W., Shin, H.C., and Lee, S.I., 2023. “Estimation of Passenger Private Car Carbon Emissions by Administrative District Using API-based Commuter Data”, *Journal of Korea Planning Association*, 58(1): 91-103.
3. 김민호, 2020. “야간 인공조명 강도와 토지피복을 이용한 남한의 광역시도 인구추정”, 『한국지도학회지』, 20(2): 13-24.  
Kim, M.H., 2022. “The Estimation of Population for Metropolitan Cities and Provinces in South Korea using Nighttime Lights Intensity and Land Use Land Cover”, *Journal of the Korean Cartographic Association*, 20(2): 13-24.
4. 김승도·나승혁, 2008. “온실가스 배출량 산정방법”, 『전자공학회지』, 35(11): 73-82.  
Kim, S.D. and Na, S.H., 2008. “How to Calculate Greenhouse Gas Emissions”, *The Magazine of the IEIE*, 35(11): 73-82.
5. 류창·김한수, 2022. “중국 도시화 과정을 해석하기 위한 NPP-VIIRS 연간 위성영상 보정 방법”, 『한국주거학회논문집』, 33(4): 15-22.  
Liu, C. and Kim, H.S., 2022. “NPP-VIIRS Annual Satellite Image Calibration Method for Interpret China’s Urbanization Process”, *Journal of the Korean Housing Association*, 33(4): 15-22.
6. 박유진·김준범·경대승·박홍석, 2022. “환경산업연관분석(EEIOA)을 이용한 경제 부문별 온실가스 배출량 특성분석”, 『대한환경공학회지』, 44(9): 308-335.  
Park, Y.J., Kim, J.B., Kyung, D.S., and Park, H.S., 2022. “Characterization of Greenhouse Gases Emissions by Economic Sectors Using Environmentally Extended Input-Output Analysis (EEIOA)”, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 44(9): 308-335.
7. 백설·김홍순, 2023. “공간모형의 활용을 통한 도시 특성과 도시범죄 위험도간의 영향관계 분석: 서울시 전체범죄 및 성폭력을 중심으로”, 『국토계획』, 58(1): 16-32.  
Baek, S. and Kim, H.S., 2023. “An Analysis of the Influence Relationship between Urban Characteristics and Urban Crime Risk through the Use of Spatial Models: A Focus on Overall Crime and Sexual Violence in Seoul”, *Journal of Korea Planning Association*, 58(1): 16-32.
8. 변필성, 2007. “공간계량경제모델링: 지리학의 제1법칙과 공간회귀모델”, 『국토』, 304: 111-119.  
Byun, P.S., 2007. “Spatial Measuring Economic Modelling: First Law of Geography and Spatial Regression Model”, *Planning and Policy*, 304: 111-119.



9. 염재원·강승원·정필성·정주철, 2020. “광역 단위 자연재해저감 종합계획의 공간적 범위에 관한 연구”, 『한국방재학회논문집』, 20(1): 61-70.  
Yeom, J.W., Kang, S.W., Jung, P.S., and Jung, J.C., 2020. “Spatial Scope of the Regional Hazard Mitigation Plan”, *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, 20(1): 61-70.
10. 오상학·김대욱·류지원·차재규·정응호, 2011. “지리정보시스템을 활용한 CO<sub>2</sub> 인벤토리 구축 방안에 관한 연구”, 『한국지리정보학회지』, 14(2): 40-52.  
Oh, S.H., Kim, D.W., Ryu, J.W., Cha, J.G., and Jung, E.H., 2011. “A Study for Construction of CO<sub>2</sub> Inventory Using GIS”, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 14(2): 40-52.
11. 오지운·성진·정주철, 2023. “문화기반시설의 지역 간 격차와 영향요인 분석”, 『국토계획』, 58(1): 5-15.  
Oh, J.W., Seong, J., and Jung, J.C., 2023. “Analysis on Regional Disparities and Influencing Factors in Cultural Infrastructure”, *Journal of Korea Planning Association*, 58(1): 5-15.
12. 유선철·신동빈·안종욱, 2019. “공간 빅데이터를 활용한 서울시 건물부문 온실가스 배출량 공간 분석 연구”, 『대한공간정보학회지』, 27(4): 11-19.  
Yu, S.C., Shin, D.B., and Ahn, J.W., 2019. “Study on Spatial Analysis of Greenhouse Gas Emissions in Building Sector Used by the Spatial Big Data in case of Seoul”, *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, 27(4): 11-19.
13. 유한술·김익기·이태훈·김지혜, 2020. “자동차 주행거리자료와 통행배정모형을 결합한 온실가스 배출량 추정 연구”, 『교통연구』, 27(3): 95-113.  
Yoo, H.S., Kim, I.K., Lee, T.H., and Kim, J.H., 2020. “Estimating Vehicle Emissions based on Traffic Assignment Analysis Combined with Vehicle Inspection Data on Vehicle Kilometers Traveled”, *Journal of Transport Research*, 27(3): 95-113.
14. 이슬기·이승일, 2022. “건축물 생애주기 내재탄소를 고려한 건물 부문 온실가스 배출량 산정 개선방안 연구”, 『한국기후변화학회지』, 13(5): 557-565.  
Lee, S.K. and Lee, S.I., 2022. “Improvement of Greenhouse Gas Emissions Calculation Considering the Life Cycle of Embodied Carbon of Buildings”, *Journal of Climate Change Research*, 13(5): 557-565.
15. 이희연·노승철, 2013. 『고급통계분석론』, 고양: 문우사.  
Lee, H.Y. and Noh, S.C., 2013. *Advanced Statistical Analysis*, Goyang: Munusa.
16. 장명진·이지운·이현진·안영환, 2022. “2050 탄소중립 시나리오에 따른 전환부문의 온실가스 배출량 및 배출원단위 경로 연구”, 『한국기후변화학회지』, 13(6): 843-858.  
Jang, M.J., Lee, J.Y., Lee, H.J., and Ahn, Y.H., 2022. “A Study on GHG Emission and Emission Intensity Pathways in the Power Sector of Korea by the 2050 Carbon Neutrality Scenarios”, *Journal of Climate Change Research*, 13(6): 843-858.
17. 정민선·조희선·변병설, 2015. “도시특성요소가 온실가스 배출에 미치는 영향-수도권 지역을 중심으로”, 『국토지리학회지』, 49(3): 297-306.  
Jung, M.S., Cho, H.S., and Byun, B.S., 2015. “Effects of Urban Characteristics on Green House Gas Emissions from Seoul Metropolitan Area”, *The Geographical Journal of Korea*, 49(3): 297-306.
18. 정수영·전희정, 2019. “빈집 증가의 공간적 자기상관성에 대한 탐색적 연구”, 『국토계획』, 54(7): 89-102.  
Jung, S.Y. and Jun, H.J., 2019. “Exploring Spatial Dependence in Vacant Housing Growth”, *Journal of Korea Planning Association*, 54(7): 89-102.
19. 조홍종·구효정, 2022. “생산기반 온실가스 배출량 vs 소비기반 온실가스 배출량”, 『자원환경경제연구』, 31(4): 597-617.  
Cho, H.C. and Koo, H.J., 2022. “Production-Based Greenhouse Gas Emissions and Consumption-Based Emissions”, *Environmental and Resource Economics Review*, 31(4): 597-617.
20. 진태영·김진수, 2017. “화석연료 사용량을 고려한 탄소배출량과 도시화율의 관계에 관한 연구”, 『환경정책』, 25(3): 47-70.  
Jin, T.Y. and Kim, J.S., 2017. “The Relationship between Carbon Emissions and Urbanization Considering Fossil Fuel Usage”, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 25(3): 47-70.
21. 진태영·최가영·이은미·이수경, 2020. “이산화탄소 배출량 분해 분석: 산업 및 에너지 소비구조를 중심으로”, 『환경정책』, 28(2): 153-182.  
Jin, T.Y., Choi, G.Y., Lee, E.M., and Lee, S.K., 2020. “A Decomposition Analysis of Domestic Carbon Dioxide Emissions Related to Industry Structure and Energy Mix in Korea”, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 28(2): 153-182.
22. 최열·이재승, 2014. “공간회귀모형을 이용한 산업 및 용도지역 특성과 환경 오염과의 상관관계 분석”, 『국토계획』, 49(1): 247-261.  
Choi, Y. and Lee, J.S., 2014. “Correlates between Industries and Zoning Characteristics and Environmental Pollution Employing Spatial Regression Model”, *Journal of Korea Planning Association*, 49(1): 247-261.
23. 최윤실·박건진·남재작, 2022. “대체단백질식품의 시장점유 시나리오별 축산부문 온실가스 배출량 추정”, 『한국기후변화학회지』, 13(3): 299-304.  
Choi, Y.S., Park, G.J., and Nam, J.J., 2022. “Effect of Alternative Protein Food Market Growth on Green House Gas Emissions in Livestock Sector”, *Journal of Climate Change Research*, 13(3): 299-304.
24. 최한주·이기훈, 2006. “환경 혼합 산업연관모형을 이용한 산업별 이산화탄소 배출량 추정과 변화 요인 분석”, 『자원환경경제연구』, 15(1): 27-50.  
Choi, H.J. and Lee, G.H., 2006. “An Estimation and Decomposition of CO<sub>2</sub> Emissions Change in Korea Industry, 1990~2000 Using a Hybrid Input-Output Model and Structural Decomposition Analysis”, *Environmental and Resource Economics Review*, 15(1): 27-50.
25. Ang, J.B., 2007. “CO<sub>2</sub> Emissions, Energy Consumption, and Output in France”, *Energy Policy*, 35(10): 4772-4778.
26. Ang, J.B., 2008. “Economic Development, Pollutant Emissions and Energy Consumption in Malaysia”, *Journal of Policy Modeling*, 30(2): 271-278.
27. Begum, R.A., Sohag, K., Abdullah, S.M.S., and Jaafar, M.,



2015. "CO2 Emissions, Energy Consumption, Economic and Population Growth in Malaysia", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41: 594-601.
28. Bowen, A., Cochrane, S., and Fankhauser, S., 2012. "Climate Change, Adaptation and Economic Growth", *Climatic Change*, 113: 95-106.
29. Chen, L., Xu, L., and Yang, Z., 2019. "Inequality of Industrial Carbon Emissions of the Urban Agglomeration and Its Peripheral Cities: A Case in the Pearl River Delta, China", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109: 438-447.
30. Chen, P.Y., Chen, S.T., Hsu, C.S., and Chen, C.C., 2016. "Modeling the Global Relationships among Economic Growth, Energy Consumption and CO2 Emissions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65: 420-431.
31. Dietz, T. and Rosa, E.A., 1994. "Rethinking the Environmental Impacts of Population, Affluence, and Technology", *Human Ecology Review*, 1(2): 277-300.
32. Elvidge, C.D., Baugh, K.E., Kihn, E.A., Kroehl, H.W., Davis, E.R., and Davis, C.W., 1997. "Relation between Satellite Observed Visible-near Infrared Emissions, Population, Economic Activity and Electric Power Consumption", *International Journal of Remote Sensing*, 18(6): 1373-1379.
33. Elvidge, C.D., Baugh, K.E., Zhizhin, M., and Hsu, F.C., 2013. "Why VIIRS Data Are Superior to DMSP for Mapping Nighttime Lights", *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 35: 62.
34. Elvidge, C.D., Zhizhin, M., Ghosh, T., Hsu, F.C., and Taneja, J., 2021. "Annual Time Series of Global VIIRS Nighttime Lights Derived from Monthly Averages: 2012 to 2019", *Remote Sensing*, 13(5): 922.
35. Gaigné, C., Riou, S., and Thisse, J.F., 2012. "Are Compact Cities Environmentally Friendly?", *Journal of Urban Economics*, 72(2-3): 123-136.
36. Huang, Q., Yang, X., Gao, B., Yang, Y., and Zhao, Y., 2014. "Application of DMSP/OLS Nighttime Light Images: A Meta-analysis and A Systematic Literature Review", *Remote Sensing*, 6(8): 6844-6866.
37. Jun, H.J., 2017. "The Spatial Dynamics of Neighborhood Change; Exploring Spatial Dependence in Neighborhood Housing Value Change", *Housing Studies*, 32(6): 717-741.
38. Lal, R., 2004. "Carbon Emission from Farm Operations", *Environment International*, 30(7): 981-990.
39. Luo, P., Zhang, X., Cheng, J., and Sun, Q., 2019. "Modeling Population Density Using A New Index Derived from Multi-sensor Image Data", *Remote Sensing*, 11(22): 2620.
40. Lv, Q., Liu, H., Wang, J., Liu, H., and Shang, Y., 2020. "Multi-scale Analysis on Spatiotemporal Dynamics of Energy Consumption CO2 Emissions in China: Utilizing the Integrated of DMSP-OLS and NPP-VIIRS Nighttime Light Datasets", *Science of the Total Environment*, 703: 134394.
41. Martínez-Zarzoso, I. and Maruotti, A., 2011. "The Impact of Urbanization on CO2 Emissions: Evidence from Developing Countries", *Ecological Economics*, 70(7): 1344-1353.
42. Meng, L., Graus, W., Worrell, E., and Huang, B., 2014. "Estimating CO2 (Carbon Dioxide) Emissions at Urban Scales by DMSP/OLS (Defense Meteorological Satellite Program's Operational Linescan System) Nighttime Light Imagery: Methodological Challenges and A Case Study for China", *Energy*, 71: 468-478.
43. Miller, S.D., Mills, S.P., Elvidge, C.D., Lindsey D.T., Lee, T.F., and Hawkins, J.D., 2012. "Suomi Satellite Brings to Light A Unique Frontier of Nighttime Environment Sensing Capabilities", *PNAS*, 109(39): 15706-15711.
44. O'Toole, R., 2009. "The Myth of the Compact City: Why Compact Development Is Not the Way to Reduce Carbon Dioxide Emissions", *Cato Policy Analysis Series*, 653.
45. Ou, J., Liu, X., Li, X., and Chen, Y., 2013. "Quantifying the Relationship between Urban Forms and Carbon Emissions Using Panel Data Analysis", *Landscape Ecology*, 28: 1889-1907.
46. Ou, J., Liu, X., Li, X., Li, M., and Li, W., 2015. "Evaluation of NPP-VIIRS Nighttime Light Data for Mapping Global Fossil Fuel Combustion CO2 Emissions: A Comparison with DMSP-OLS Nighttime Light Data", *PLoS One*, 10(9): e0138310.
47. Raupach, M.R., Rayner, P.J., and Paget, M., 2010. "Regional Variations in Spatial Structure of Nightlights, Population Density and Fossil-fuel CO2 Emissions", *Energy Policy*, 38(9): 4756-4764.
48. Rehman, A., Ma, H., and Ozturk, I., 2021. "Do Industrialization, Energy Importations, and Economic Progress Influence Carbon Emission in Pakistan", *Environmental Science and Pollution Research*, 28: 45840-45852.
49. Sarkodie, S.A., Owusu, P.A., and Leirvik, T., 2020. "Global Effect of Urban Sprawl, Industrialization, Trade and Economic Development on Carbon Dioxide Emissions", *Environmental Research Letters*, 15(3): 034049.
50. Shi, K., Chen, Y., Yu, B., Xu, T., Chen, Z., Liu, R., Li, L., and Wu, J., 2016. "Modeling Spatiotemporal CO2 (Carbon Dioxide) Emission Dynamics in China from DMSP-OLS Nighttime Stable Light Data Using Panel Data Analysis", *Applied Energy*, 168: 523-533.
51. Su, Y., Chen, X., Li, Y., Liao, J., Ye, Y., Zhang, H., Huang, N., and Kuang, Y., 2014. "China's 19-year City-level Carbon Emissions of Energy Consumptions, Driving Forces and Regionalized Mitigation Guidelines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35: 231-243.
52. Tobler, W., 1970. "A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region", *Economic Geography*, 46(2): 234-240.
53. Tol, R.S. and Yohe, G.W., 2007. "The Weakest Link Hypothesis for Adaptive Capacity: An Empirical Test", *Global Environmental Change*, 17(2): 218-227.
54. Waheed, R., Sarwar, S., and Wei, C., 2019. "The Survey of Economic Growth, Energy Consumption and Carbon Emission", *Energy Reports*, 5: 1103-1115.
55. Wang, X., Cai, Y., Liu, G., Zhang, M., Bai, Y., and Zhang, F., 2022. "Carbon Emission Accounting and Spatial Distribution



- of Industrial Entities in Beijing—Combining Nighttime Light Data and Urban Functional Areas”, *Ecological Informatics*, 70: 101759.
56. Wang, Z., Xiong, J., and Lei, N., 2017. “VIIRS Day/Night Band Radiometric Calibration Stability Using the Moon”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122: 5616-5624.
57. Wei, W., Zhang, X., Cao, X., Zhou, L., Xie, B., Zhou, J., and Li, C., 2021. “Spatiotemporal Dynamics of Energy-related CO2 Emissions in China Based on Nighttime Imagery and Land Use Data”, *Ecological Indicators*, 131: 108132.
58. Yang, D., Luan, W., Qiao, L., and Pratama, M., 2020. “Modeling and Spatio-temporal Analysis of City-level Carbon Emissions Based on Nighttime Light Satellite Imagery”, *Applied Energy*, 268: 114696.
59. Yu, B., Shi, K., Hu, Y., Huang, C., Chen, Z., and Wu, J., 2015. “Poverty Evaluation Using NPP-VIIRS Nighttime Light Composite Data at the County Level in China”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(3): 1217-1229.
60. Zhang, G., Ge, R., Lin, T., Ye, H., Li, X., and Huang, N., 2018. “Spatial Apportionment of Urban Greenhouse Gas Emission Inventory and Its Implications for Urban Planning: A Case Study of Xiamen, China”, *Ecological Indicators*, 85: 644-656.
61. Zhang, S. and Zhao, T., 2019. “Identifying Major Influencing Factors of CO2 Emissions in China: Regional Disparities Analysis Based on STIRPAT Model from 1996 to 2015”, *Atmospheric Environment*, 207: 136-147.
62. Zhang, X., Wu, J., Peng, J., and Cao, Q., 2017. “The Uncertainty of Nighttime Light Data in Estimating Carbon Dioxide Emissions in China: A Comparison between DMSP-OLS and NPP-VIIRS”, *Remote Sensing*, 9(8): 797.
63. Zhang, Y., Yang, Z., and Yu, X., 2015. “Urban Metabolism: A Review of Current Knowledge and Directions for Future Study”, *Environmental Science and Technology*, 49: 11247-11263.
64. Zhang, Y.H., Wooster, M.J., Tutubalina, O., and Perry, G.L.W., 2003. “Monthly Burned Area and Forest Fire Carbon Emission Estimates for the Russian Federation from SPOT VGT”, *Remote Sensing of Environment*, 87(1): 1-15.
65. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2018. “Global Warming of 1.5°C”, Accessed March 2, 2023. <https://www.ipcc.ch/sr15/>

Date Received	2023-04-04
Reviewed(1 <sup>st</sup> )	2023-07-11
Date Revised	2023-07-20
Reviewed(2 <sup>nd</sup> )	2023-08-11
Date Accepted	2023-08-11
Final Received	2023-08-14