

도시형태의 구조적 특성과 전력부문 온실가스 배출량의 관계 분석*

Analyzing the Relationship Between the Structural Characteristics of Urban Form and Greenhouse Gas Emissions from the Electricity Sector

허유경** · 강민규***

Hur, Yoo-Gyeong · Kang, Min-Gyu

Abstract

This study presents an empirical analysis of how urban characteristics affect greenhouse gas (GHG) emissions from energy consumption, based on aggregated emissions data from 225 cities and counties nationwide. A panel regression model was applied to identify the urban characteristics influencing GHG emissions.

The results indicate that greenhouse gas (GHG) emissions from the energy sector differ according to urban characteristics across all regions, metropolitan areas, and non-urban areas. In all regions, higher road density, greater fiscal independence, and fragmented urban terrain were associated with higher GHG emissions. Conversely, higher per capita local tax payments and more compact, agglomerated urban forms were linked to lower emissions. Metropolitan areas exhibited similar patterns, with road density, fiscal independence, and per capita local tax payments significantly affecting GHG emissions, consistent with the overall regional trends. In non-metropolitan areas, economic factors such as fiscal independence and per capita local tax payments also remained significant. In addition, urban form variables—including agglomeration, continuity, complexity, and diversity—played a crucial role across all regions, underscoring the importance of urban structure in shaping GHG emission patterns.

These findings highlight several key implications. First, the study identifies distinct determinants of GHG emissions across different urban categories. Second, land-use planning should emphasize compact urban development to more effectively mitigate emissions. The observed importance of urban form variables in all regions and non-urban areas aligns with previous research. Third, the efficient allocation and management of GHG mitigation budgets are essential to achieving the desired environmental outcomes.

주제어 온실가스 배출, 압축도시, 도시특성, 경관지표, 패널회귀분석

Keywords Greenhouse Gas Emissions, Compact City, Urban Characteristics, Landscape Matrics, Panel Regression Analysis

1. 서론

기후변화는 폭우, 폭염 등 겨울철 이상고온 및 한파, 폭설과 같은 극심한 이상기후 현상을 유발하며 이는 곧 재산 및 인명피해로

까지 이어진다. 기후변화로 인한 이상기후의 발생은 이미 전 세계적인 현상이고, 우리나라의 기후변화는 전 지구 평균 대비 더 빠른 온난화 속도로 인해 더욱 심각하다. IPCC(Intergovernmental Panels on Climate Change)는 5차 평가보고서에서 화석연료

* 이 논문은 주저자의 박사학위 논문의 일부 내용을 수정·보완 및 발전시켜 작성한 것임.

** Ph.D., Principal Researcher, Center for Policy Data and Survey, Korea Institute of Public Administration (First Author: ykhour21@kipa.re.kr)

*** Associate Professor, Department of Urban Administration, University of Seoul (Corresponding Author: mgkang23@uos.ac.kr)

의 연소에 의한 온실가스 배출 증가가 기후변화의 주요 원인을 밝혔다(IPCC, 2014).

이에 우리나라를 포함한 세계 각국은 온실가스 감축을 위한 다양한 노력을 기울여왔다. 전 세계적으로는 2015년 12월 파리협정에서 2100년까지 지구의 평균 기온 상승폭을 산업혁명 이전(1985~1900년 평균) 대비 2°C 이하로 유지하고, 나아가 1.5°C 이하로 제한하고자 하는 목표를 세웠다(송재민, 2021). 또한 IPCC는 2018년에 발표한 「지구온난화 1.5°C 특별보고서」에서 지구 평균 온도 상승을 1.5°C 이내로 억제하기 위해서는 전 지구적으로 2030년까지 온실가스 배출량을 2010년 대비 45% 이상 감축해야 하며, 2050년에는 탄소중립을 달성해야 한다고 제시했다(IPCC, 2018). 우리나라는 2020년 10월 '2050 탄소중립 선언'을 발표하였고, 영국, 프랑스, 캐나다, 중국, 일본, EU 등 세계 각국 역시 탄소중립 목표를 수립하였다(송재민, 2021). 그러나 최근 발표된 IPCC 6차 평가보고서에서는 기후변화의 속도가 예상보다 훨씬 빠르며, 2050년에 지구 온도가 2도만 증가하더라도 기후변화의 속도가 산업혁명 이전 대비 약 14배나 증가한다고 전망하였다(신동원, 2022; IPCC, 2021).

한편, 우리나라의 온실가스 배출량은 교토의정서에서 온실가스 감축 기준 연도로 설정한 1990년 2억 9,210만 tCO₂eq에서 2020년 6억 5,620만 tCO₂eq으로 125% 증가하였다. 같은 기간 동안 온실가스 배출량 증가율은 연평균 2.7%였다. 또한 우리나라는 2017년 기준, 세계에서는 11위, OECD 회원국 중에서는 5위의 온실가스 배출 국가로 온실가스 배출량이 상당히 많은 국가 중 하나이다(환경부 온실가스종합정보센터, 2023).

온실가스의 배출원은 에너지, 산업공정, 농업, 폐기물 등으로 구분되며, 이 중 전 세계적으로 주된 배출원은 에너지 부문이다. 우리나라의 경우, 온실가스 전체 배출량 중 에너지 부문이 전체의 87%를 차지하고 있다. 또한 1990년에서 2020년 사이에 우리나라의 에너지 부문 온실가스 배출량은 137%가량 증가하였다(환경부 온실가스종합정보센터, 2023). 에너지 부문 중 특히 전력의 경우, 기후변화로 인한 폭염뿐만 아니라 인공지능(AI) 산업의 발전에 동반된 데이터 센터, 대규모 반도체 클러스터, 전기차 보급, 전력 이용의 편리성, 비교적 낮은 수준의 전기요금 등으로 인해 그 소비가 급증하고 있는 실정이다(김해지, 2024; 조용성, 2017). 이러한 전력 소비 급증 추세는 앞으로도 계속되거나 더욱 심화될 것으로 전망된다(김해지, 2024). 이러한 점을 볼 때 에너지 소비 중 특히 전력 소비에 의한 온실가스 배출량을 저감하려는 정책적 노력 및 학술적 검토가 필요하다고 판단된다.

IPCC는 세계 온실가스 배출의 70% 이상이 도시에서 발생하고 있다고 발표하고 있다(동아현·강정은, 2020; IPCC, 2014; Muñiz and Dominguez, 2020; Shi et al., 2020). 도시는 많은 인구가 밀집되어 있고, 산업 및 소비활동, 에너지 사용 등이 집중된 공간이기 때문이다(송재민, 2021; Yi et al., 2021). 도시에서

의 온실가스 배출은 에너지, 교통, 건물 등에서 발생하며, 도시별 온실가스 배출 특성은 도시의 인구, 사회경제적, 공간 형태 및 인프라 특징 등에 따라 다양하다(송재민, 2021; IPCC, 2014). 이처럼 도시는 개발이 상당히 집중된 공간이므로 기후변화로 인해 발생하는 재해재난을 비롯한 부정적 영향의 피해 정도도 크다(동아현·강정은, 2020). 때문에 도시 단위에서의 에너지 소비에 의한 온실가스 감축을 위한 노력이 중요하며(Fang et al., 2015; Muñiz and Dominguez, 2020; Yi et al., 2021), 이를 위한 근거 자료로써 도시 단위의 부문별 온실가스 배출량 집계와 이에 영향을 미치는 도시특성에 관한 분석이 필요하다(문한솔 외, 2023).

그런데 기존의 국내 온실가스 배출량 자료는 국가 및 광역·시·도 단위에서만 집계해 공개하고 있어(환경부 온실가스종합정보센터, 2023), 도시 단위의 온실가스 배출량에 관한 분석이 어려웠다(문한솔 외, 2023). 최근 시범 산정으로 2016~2020년(5개년) 동안의 기초지자체인 시군구 단위의 부문별 온실가스 배출량 자료가 공개되었다. 이 자료를 활용한다면 도시 단위의 온실가스 배출량에 관한 분석이 가능해질 것으로 판단된다.

도시와 에너지 소비 및 그로 인한 온실가스 배출 간의 관계에 관해서는 기후변화의 맥락에서 교통 에너지 소비와 관계된 압축 도시 논의에서 시작하였다(Breheny, 1995; Cervero and Kockelman, 1997; Ewing and Cervero, 2010; Gordon and Richardson, 1989; Newman and Kenworthy, 1989). 이어 도시특성과 가정 부문(김종용·강승진, 2019; 임현진 외, 2013; Gu et al., 2013; Kim and Kim, 2013; Lee and Lee, 2014; Miao, 2017; Wilson, 2013) 등 다양한 에너지 소비 간의 관계, 도시특성과 전체 온실가스 배출 간의 관계(동아현·강정은, 2020; 문한솔 외, 2023; 양혜미·송재민, 2017; Falahatkar and Rezaei, 2020; Fang et al., 2015; Liu et al., 2014; Shi et al., 2020; Wang et al., 2016)를 다룬 연구들이 다수 진행되어 왔다.

국내의 시군구를 대상으로 한 도시특성과 온실가스 배출 간의 관계에 관한 연구들은 우선 인구규모, 토지이용, 교통, 사회경제적 요인 등을 표현하는 일반적인 통계 자료를 중심으로 연구를 진행하고 있었다. 반면 해외의 연구에서는 온실가스 배출과 관계가 있는 도시형태를 표현하는 정량적인 변수인 경관지표를 다수 활용하는 경향이 나타난다. 기존 국내 연구에서 주로 활용한 통계 자료 기반의 도시특성 변수만으로는 도시의 물리적, 공간적 특성과 온실가스 배출 간의 관계를 확인하기에는 한계가 있다. 그러므로 국내 시군구를 대상으로 한 연구에서도 경관지표 기반의 도시형태가 온실가스 배출에 미치는 메커니즘을 분석하여 보다 과학적·실증적인 정책적 함의를 도출할 필요가 있다. 국내의 연구들은 또한 자료의 한계로 인해 에너지 관련 공공기관 및 유관 연구기관에서 비교적 짧은 기간을 대상으로 자체 생산한 자료를 활용해 분석하고 있었다. 이에 따라 해외의 연구와 달리 국내에서는 횡단면 분석이 주로 수행되어 온실가스 배출에 관한 다년간의

동태적 패턴을 추정하기 어려웠다. 또한 대부분의 연구가 일부 광역시·도나 시군구 지역을 대상으로 한 전역적인 분석에 집중하고 있는데, 이는 세부적인 특성이 서로 다른 시군구 간의 차이를 확인하기 어렵게 하는 이유였다. 그 결과, 기초지자체인 시군구에 밀착된 온실가스 배출 저감 정책 추진을 위한 유의미한 학술적 근거 도출이 미흡했다. 따라서 전술한 기초지자체 단위의 부문별 온실가스 배출량 자료를 활용한, 보다 입체적이고 정교한 추론이 가능한 분석이 필요하다.

본 연구는 기초지자체인 시군구를 대상으로 집계된 온실가스 배출량 자료를 활용해 도시의 물리적·공간적 표현이라 할 수 있는 경관지표 기반의 도시형태 변수를 포함해 도시특성이 전력 소비에 의한 온실가스 배출에 미치는 영향을 실증적으로 분석하고자 한다. 또한 기초지자체 내에서 그 특성에 따라 세부적으로 분석 단위를 나누어 도시특성이 전력 소비에 의한 온실가스 배출에 미치는 영향을 보다 면밀하게 살펴본다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 각각의 도시특성에 맞는 에너지 소비 절감을 통한 온실가스 배출량 저감에 기여할 수 있는 정책적 시사점을 제시하는 것을 목적으로 한다.

II. 이론적 배경 및 선행연구 검토

1. 도시특성과 에너지 소비

도시는 교통 에너지를 비롯해 건물, 산업공정 등에서 다양한 에너지원이 소비되는 공간이다. 이러한 맥락에서 기후변화에 대응하는 지속가능한 도시공간구조에 관한 논의는 교통 에너지 소비에 초점을 맞춘 압축도시(Compact City) 논의로 시작(김리영·서원석, 2011; 김유진·변병설, 2012; Bibri et al., 2020; Chhetri et al., 2013)하였다. 이후 점차 그 외의 여러 에너지원을 고려한 연구로 확장되어 왔다. 여기서 압축도시란 도심지의 고밀개발과 혼합토지이용으로 직주근접을 실현하면서 녹지 공간을 확보하며, 대중교통수단과 보행을 강화하여 교통 에너지 소비 및 대기오염 발생을 저감하기 위해 고안된 도시계획 이론이다. 이론적으로 도시 내부의 밀도가 높아지면 각종 활동 역시 밀집되게 되므로 교통량은 감소하여 교통 에너지 효율은 높아지나 그 반대로 도시의 무분별한 확산은 교통 에너지 소비를 증가시키는 경향이 있는 것으로 나타난다(송기욱·남진, 2009; Chhetri et al., 2013; Lee and Lim, 2018). 따라서 압축도시는 환경 및 사회·경제적 측면에서도 바람직하고 지속가능하다는 점에서 지지받아 왔다(김리영·서원석, 2011). 이러한 논의에서 확장되어 점차 가정 혹은 가구 부문의 에너지 소비를 비롯한 총에너지 소비 및 이로 인한 온실가스 배출 등으로 그 연구 범위가 넓어지고 있다.

동시에 에너지 소비와 관련된 도시공간구조에 관한 논의 역시 압축도시 특성에서 발전해 보다 포괄적인 도시특성을 다루는 방

향으로 확대되고 있다. 도시특성(Urban Characteristics)은 인구 규모 및 분포, 각종 사회경제적 특성과 같은 비물리적인 특성과 함께 토지이용, 도시형태, 도시 공간에 배치된 건물, 도로 등과 같은 물리적인 특성까지 포함한다(김우식·윤동근, 2023). 선행연구들은 도시특성에 관해 대체로 도시를 구성하는 다양한 사회경제적 특성으로 바라보고 있다(동아현·강정은, 2020; 문한솔 외, 2023; 양해미·송재민, 2017). 그에 따라 인구, 환경, 정책, 경제, 교통 특성 등을 세부 특성으로 하여 관련 변수를 구축하고 연구에 활용하고 있었다. 세부적으로 각각의 에너지원, 여러 에너지원의 총합 및 에너지 소비로 인한 온실가스 배출에 영향을 미치는 도시특성 요소는 다양하게 나타났다(동아현·강정은, 2020). 따라서 관련된 선행연구들은 각 연구가 초점을 맞추는 에너지원에 영향을 미칠 것으로 예상되는 도시특성 변수를 도출해 분석에 활용하고 있다. 이러한 도시특성의 변화는 인간의 공간 활용 방식에 작용하며 나아가 도시환경, 도시에서의 에너지 소비 및 재해난에까지 영향을 미친다(장새움 외, 2021; 최영 외, 2007).

특히 공간적 도시계획과 관련된 요소(Fang et al., 2015)로 표현되는 도시형태(Urban Form)는 인간 활동의 공간적 구성, 패턴 및 배치로 정의할 수 있다(오규식 외, 2005; Ou et al., 2013; Shi et al., 2020; Wang et al., 2019). 여기에서 인간 활동의 공간적 구성, 패턴 및 배치란 토지이용의 공간 패턴, 밀도, 도로 및 각종 인프라의 공간 설계 등을 포함한다(Ou et al., 2013; Shi et al., 2020). 이러한 개념 정의를 통해 도시형태가 도시를 형성하는 공간적 표현이자 물리적·구조적 특성이라는 것을 알 수 있다. 다수의 선행연구에서는 이 도시형태가 에너지 소비 및 이산화탄소 등 온실가스 배출과 연관이 있다는 점에 주목해왔다(오규식 외, 2005; Fang et al., 2015; Ou et al., 2013; Shi et al., 2020). 도시의 개발, 발전에 따른 도시형태의 변화는 도시에서의 교통, 산업과 같은 활동을 변화시켜 결과적으로 에너지 소비, 이산화탄소 배출 등에 영향을 미치게 되기 때문이다(김우식·윤동근, 2023; Fang et al., 2015; Shi et al., 2020). 관련된 여러 연구에서는 도시형태를 정량화하는 데 널리 사용되어 온 경관지표(Landscape Metrics)를 주로 활용하고 있다(Hong et al., 2022).

경관지표는 경관 특성을 정량화하고, 생태학적 과정과 연결하는 경관생태학(Landscape Ecology)에서 주로 활용하는 도구이다(Hesselbarth et al., 2019). 경관지표는 패치(Patch), 클래스(Class) 및 경관(Landscape) 수준에서 존재하며(McGarigal, 2017), 패치 기반의 개별 토지피복(Land Cover) 클래스를 분석하는 데에 널리 사용되어 왔다(Hesselbarth et al., 2019). 이는 서로 다른 다양한 경관 간의 비교를 용이하게 해 주는 정량적인 자료이며 특히 토지이용 압력에 반응해 시간의 경과에 따라 경관이 어떻게 변하는지 등을 수치화할 수 있다(Hesselbarth et al., 2019). 경관지표는 해당 지역의 정보를 담고 있는 토지피복을 활

용해 도시형태의 크기, 흩어졌거나 연결된 정도, 압축도, 다양성 등 도시의 물리적인 분포에 대한 지표를 산출할 수 있다(김우식·윤동근, 2023). 도시형태와 에너지 소비 및 온실가스 배출 간의 관계를 분석하는 기존의 여러 연구에서는 도시형태의 응집성, 연속성, 복잡성, 다양성 등의 경관지표를 활용하고 있다(Ding et al., 2022; Fang et al., 2015; Falahatkar and Rezaei, 2020; Ou et al., 2013; Shi et al., 2020; Wang et al., 2019). 예컨대 응집성이나 연속성은 그 증가가 이산화탄소 배출 감소(-)로 이어지는 반면, 복잡성의 증가는 이산화탄소 배출 증가(+)에 영향을 미친다는 결과를 선행연구에서 확인할 수 있다(Fang et al., 2015; Falahatkar and Rezaei, 2020; Hong et al., 2022; Shi et al., 2020). 집중한 도시형태(응집성, 연속성 등으로 표현)를 가진 도시는 토지이용의 효율성을 높이고, 전력, 가스 등과 같은 에너지 소비를 줄여 탄소배출 감소로 이어질 수 있다(Wang et al., 2019). 한편, 복잡하고 불규칙한 도시형태는 도시 공간 패턴의 복잡성을 유발하고 이는 교통 체증 유발, 접근성 저하 등으로 이어져 통행에서의 탄소배출 증가에 영향을 미칠 수 있다(Falahatkar and Rezaei, 2020; Wang et al., 2019).

이러한 경관지표는 후술하는(2장 2절) 통행과 밀접하게 관련되어 에너지 및 온실가스 배출에 영향을 미치는 'D 변수(밀도, 토지이용 다양성, 연결성, 대중교통 접근성, 접근성)'를 일부 포함한다. 이러한 D 변수들은 도시공간 형태를 측정하는 지표로 널리 활용되어 왔다(송재민, 2021). 다만 D 변수들을 활용한 선행연구들은 대체로 토지피복 기반의 정량적 지표가 아닌, 주로 인구사회학적인 통계 자료를 분석에 활용하고 있다는 차이점이 있다. 통계 자료는 여러 장점에도 불구하고, 자료 구축에 시간이 걸리고 불완전할 수 있다는 한계가 있다(Shi et al., 2020). 반면에 경관지표는 과학적으로 도시형태를 나타낼 수 있으며 서로 다른 도시 경관 간의 차이를 수치적으로 표현할 수 있다(Shi et al., 2020). 이에 따라 여러 연구에서 다양한 경관지표를 활용해 도시 경관의 구성과 공간적 배치라고 할 수 있는 도시형태를 측정하고, 탄소배출과의 영향 관계를 검증해왔다(Ding et al., 2022; Shi et al., 2020). 경관지표라는 정량화된 정보로 표현되는 도시형태는 직간접적으로 탄소배출을 매개할 수 있어(Ding et al., 2022) 그와 관련된 적절하고 지속가능한 정책 결정에 있어 유용한 시사점을 제공할 수 있기 때문이다(Falahatkar and Rezaei, 2020). 예컨대 도시 패치의 무질서한 확산으로 인해 여러 도시 인프라 활용의 효율성이 낮아지고, 이는 탄소배출의 증가로 이어질 수 있다(Ding et al., 2022).

2. 도시특성과 온실가스 배출 연구

도시특성과 에너지 소비 및 온실가스 배출에 관한 연구는 국내외에서 다양하게 진행되어 왔다. 도시특성과 전체 에너지 소비

및 온실가스 배출에 관한 연구와 압축도시의 맥락에서 도시특성과 교통 에너지 소비 및 온실가스 배출에 관한 연구, 그리고 도시특성과 가정 에너지 소비 및 온실가스 배출에 관한 연구 등이 그것이다.

선행연구들은 대체로 도시형태, 도시공간구조 등이 온실가스 배출에 미치는 영향을 분석하고 있었다. 대부분의 연구에서 인구밀도(양혜미·송재민, 2017; Yi et al., 2021)를 비롯한 도시형태 측면에서 압축성(문한솔 외, 2023; 이동성·문태훈, 2017; Ou et al., 2013; Falahatkar and Rezaei, 2020), 연속성(Fang et al., 2015) 등의 변수와 온실가스 배출 간에 음(-)의 영향이 나타났다. 한편, 도시형태의 파편화 및 불규칙성이 증가하면 탄소배출량이 증가(+)할 수 있다는 결과 역시 나타났다(Ou et al., 2013). 녹지와 같은 도시환경적 요인의 경우, 온실가스 배출 감소에 긍정적인 영향(-)을 미쳤다(이동성·문태훈, 2017; 정민선 외, 2015). 반면, 지역의 경제력(동아현·강정은, 2020; 이동성·문태훈, 2017), 소득수준(양혜미·송재민, 2017)과 도로밀도(김동하 외, 2016; 동아현·강정은, 2020) 등 교통 인프라는 온실가스 배출에 양(+)의 영향을 미치고 있었다. 이러한 결과는 국내외를 막론하고 거의 대부분의 연구에서 일관적으로 나타났다.

그 외에 국내의 연구에서는 산업 및 교통 변수에 주목하여, 정민선 외(2015)의 연구에서 제조업의 고용밀도와 통행량이 탄소배출에 양(+)의 영향을 미친다는 점을 확인하였고, 이어 권수현 외(2016) 연구에서도 도로연장과 1인당 차량등록대수가 이산화탄소 배출량에 양(+)의 영향을 미친다는 점을 밝혔다. 김동하 외(2016)의 연구 역시 고용밀도가 이산화탄소 배출에 양(+)의 영향을 준다는 결과를 도출하였다. 또한 동아현·강정은(2020)과 문한솔 외(2023) 연구도 자동차등록대수가 많을수록 탄소배출량이 증가(+)한다는 점을 확인하였다.

한편, 도시특성과 교통 에너지 소비 및 온실가스 배출에 관한 연구는 압축도시의 맥락에서 먼저 도시의 무질서한 확산으로 인한 여러 문제를 겪은 서구 북미권에서 1990년대부터 다수 진행되면서 그 찬반 논쟁이 활발하게 이루어졌다. 우선 Newman and Kenworthy(1989)의 연구는 에너지 소비 측면에서 분산형 도시구조의 문제점을 지적하였고, 세계 여러 도시의 1인당 휘발유 소비량과 토지이용 간의 관계를 분석하였다. 그 결과, 인구밀도가 높은 도시에서 교통 에너지 소비가 감소(-)하므로 토지이용을 고밀화하고 대중교통 이용을 극대화하여 휘발유 사용량을 줄여야 한다고 주장하였다. Gordon and Richardson(1989)의 연구는 위 연구에 반박하면서 대중교통 개발이 오히려 도시의 분산을 가속화할 수 있다는 점에서 압축도시의 긍정적 측면에 의문을 표했다. 또한 Breheny(1995)는 다핵도시가 교통수단 선택에 있어서 개인차량보다 대중교통 이용에 유리한 형태일 수 있다며 압축도시가 교통 에너지 소비와 그로 인한 오염을 줄일 수 있다는 논의에 반박하였다. 한편, Cervero and Kockelman(1997)은 위 두

연구와 달리 밀도, 토지이용의 다양성, 보행자 지향의 설계가 통행시간을 줄인다는 점에서 압축도시의 장점을 지지하였다. Ewing and Cervero(2010)는 건조환경과 통행에 관한 실증연구들을 수집해 메타분석을 진행하였다. 도시의 밀도와 토지이용혼합, 대중교통 접근성 등으로 사람들의 활동을 변화시키면 대중교통 이용과 보행을 유발하여 교통 에너지 소비 저감에 기여할 수 있음을 밝혔다. 압축도시의 특징으로 밀도, 다양성, 도시 디자인, 접근성, 대중교통까지의 거리 등을 제시하였다. Stone et al.(2007)은 도시지역의 고밀개발이 자동차 이동 거리와 그로 인한 배출을 줄이는 데에 효과적이라는 점을 밝혀 압축도시의 중요성을 강조하였다.

도시특성과 교통 에너지 소비 및 온실가스 배출에 관한 압축도시 맥락에서의 위와 같은 논의는 저밀도로 개발된 서구의 도시를 대상으로 한 것이다. 고밀화가 보편적인 우리나라의 도시에서도 압축도시 개념이 적용가능한 것인지에 대한 의문을 바탕으로(김승남 외, 2009) 우리나라에서도 2000년대 후반부터 유사한 맥락의 연구가 다수 진행되어 왔다(김리영·서원석, 2011; 김정태·송재민, 2015; 김병석·문태훈, 2011; 김유진·변병설, 2012; 송기욱·남진, 2009). 국내의 관련된 연구를 종합하면, 압축도시 이론에서 제시하는 도시특성인 밀도(김정태·송재민, 2015; 김유진·변병설, 2012; Ewing and Cervero, 2010; Newman and Kenworthy, 1989; Stone et al., 2007), 혼합토지이용(김병석·문태훈, 2011; 김유진·변병설, 2012; 송기욱·남진, 2009; Ewing and Cervero, 2010), 대중교통 접근성(Ewing and Cervero, 2010) 등이 교통 에너지 소비에 음(-)의 영향을 미치는 것으로 나타났다.

마지막으로, 도시특성과 가정 에너지 소비 및 온실가스 배출 간의 관계에 관한 연구 역시 검토하였다. 관련 연구들에서 말하는 가정 에너지는 가정에서 주로 소비되는 전력, 가스 에너지로 도시의 온실가스 배출에 있어서 교통 부문과 함께 가정 에너지가 큰 비중을 차지한다는 점을 고려하고 있었다(강창덕, 2011; 노승철, 2014; 정민선 외, 2015). 가정의 전력 에너지 소비에는 개인 및 가구의 사회경제적 특성과 함께 이들이 속한 도시의 밀도, 경제적 특성, 도시형태 등이 직간접적인 영향을 미친다(노승철, 2014). 대체로 인구밀도가 전력 등 가정 에너지 소비를 감소(-)시키는 영향을 미쳤다(강창덕, 2011; Kim and Kim, 2013). 반면에 소득(Gu et al., 2013)이나 GRDP(노건기 외, 2016), 재정자립도(노승철, 2014)와 같은 경제적 부를 나타내는 변수는 가정 에너지 소비에 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 도시형태 측면에서 높은 응집성(압축적이고 집중적인 형태의 도시)은 토지이용의 효율성을 높이고 가정에서의 전력 에너지 소비 감소(-)로 이어진다는 연구 결과도 확인할 수 있다(Wang et al., 2019).

선행연구들을 종합하면, 첫째, 국내외 연구 모두 대체로 독립변수인 도시특성 변수로 인구 규모, 토지이용, 교통, 사회경제적

요인 등에 관한 일반적인 통계 자료를 활용하고 있다. 다만 해외 연구에서는 최근 들어 도시의 응집성, 연속성 등을 나타내는 경관지표를 도시형태에 관한 핵심 변수로 활용하는 경향이 나타난다. 둘째, 국내의 연구에서는 자료 활용가능 범위 내에서 전국 시군구를 대상으로 한 횡단면 분석이 대부분 수행되어 왔다. 해외 연구는 도시 단위를 대상으로 횡단면 분석, 패널분석 등 다양한 기법을 적용해 분석하고 있었다.

본 연구의 차별성으로는, 첫째, 온실가스 배출과 관련된 도시 특성 변수로 국내 선행연구에서는 아직 활용이 적은 토지피복 기반의 경관지표를 도시형태를 표현하는 핵심적인 독립변수로 활용한다는 점이다. 기존의 국내 연구에서 다수 활용한 밀도, 환경인프라, 교통 및 경제적 특성 등의 변수만으로는 도시의 물리적 분포 특성과 온실가스 배출 간의 관계는 파악하기 힘들었다. 이에 여러 해외 연구에서 온실가스 배출과 유의미한 관계가 있는 것으로 확인된 주요 경관지표를 도시에 관한 물리적·공간적 표현이라 할 수 있는 도시형태 변수로써 국내 도시를 대상으로 하여 분석한다는 점에서 차별성이 있다. 경관지표는 정량적인 자료이기에서 서로 다른 여러 경관을 상호 비교할 수 있다(Hesselbarth et al., 2019). 즉, 도시형태의 크기, 연결된 정도, 압축성 및 다양성과 같은 도시의 물리적인 분포에 대한 수치화된 지표라는 장점이 있다(김우식·윤동근, 2023). 동시에 전술한 변수들 역시 통제변수로 투입하여 온실가스 배출과의 관계를 종합적으로 검증한다. 둘째, 국내의 도시 단위인 시군구를 대상으로 도시특성과 온실가스 배출에 관해 해외와 달리 아직 국내에서는 거의 시도된 바 없는 패널회귀분석을 활용해 분석한다는 점에서 차별성이 있다. 패널회귀분석은 회귀분석과 시계열분석이 가지고 있는 한계점을 보완할 수 있으며, 두 분석보다 더 많은 정보를 제공하기 때문에 보다 정교한 모델 설정과 더 정확한 추론이 가능하다(이희연·노승철, 2013). 또한 동태적 패턴을 추정함에 있어 일반 시계열분석에 비해 더 짧은 시계열 자료를 이용해도 시계열 추정이 가능하다(이희연·노승철, 2013). 본 연구에서는 위와 같은 장점이 있는 패널회귀분석을 활용해 국내 도시를 대상으로 한 도시특성과 온실가스 배출 간의 인과관계를 면밀하게 추정한다는 점에서 차별성이 있다.

III. 연구 설계

1. 연구의 범위

우선 본 연구의 공간적 범위는 전국 시군구이다. 시군구는 우리나라의 행정구역 중 기초지자체로 도시 단위라고 할 수 있다. 도시는 인구 및 각종 산업 및 소비활동, 에너지 사용이 집중되어 있어 온실가스 배출 역시 상당하다. 이렇듯 도시 단위에서의 에너지 소비에 의한 온실가스 감축이 중요하다는 점을 감안하여 전

국 229개 시군구를 분석의 공간적 범위로 하였다. 다만 이 중 본토에서 멀리 떨어진 섬으로 구성된 4개의 도서지역(옹진군, 울릉군, 서귀포시, 제주시)을 분석 대상에서 제거하였다. 도서지역은 본토와는 매우 다른 특성을 가지고 있다는 점을 감안하였다(Jung et al, 2019). 이에 따라 최종적으로 총 225개 시군구를 분석 대상으로 확정하였다. 또한 같은 기초지자체인 시군구 내에서도 각각의 특성이 다르다는 점을 고려하여, 보다 세부적으로 분석 단위를 나누었다. 즉, 전체 시군구(225개), 대도시지역에 속한 구, 군(73개), 도시지역인 시(76개), 마지막으로 비도시지역인 군(76개)으로 구분해 분석을 진행한다. 여기서 대도시지역이란 특별시, 광역시를 말하고, 이 지역에는 기초지자체로 구와 군이 포함되어 있다. 그 외에 기초지자체 중 시는 일반적으로 도시화된 지역을 말하고, 군은 상대적으로 도시화가 덜 된 지역으로 논과 밭, 산지의 분포가 더 많은 지역을 뜻한다. 이렇게 나눈 지역들은 인구밀도, 토지이용, 경제적 특성, 교통 등 도시특성에 있어 서로 다른 특징을 보인다.

시간적 범위는 2018~2020년의 3개년이다. 본 연구에서 활용하는 자료의 구득 가능성을 감안하여 설정하였다. 즉, 종속변수로 활용하는 전국 기초지자체 단위의 부문별 온실가스 배출량 자료(2016~2020년)를 우선 고려하였다. 이어 온실가스 배출에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상되는 도시특성에 관한 독립변수 중 도시형태를 보여주는 경관지표를 산출할 수 있는 원자료인 토지피복(Land Cover) 자료의 구득 가능 기간을 감안하였다. 국내에서 전국 단위로 제작된 토지피복(세분류) 자료는 2018~2022년(매년 갱신)까지 공개되고 있다. 이와 같이 두 자료의 구득 가능 기간 및 겹치는 기간을 고려하여 2018~2020년의 3개년을 분석 범위로 설정하였고, 도시특성을 보여주는 다른 독립변수들 역시 같은 기간을 대상으로 구축하였다. 다만 분석 기간 중 2020년의 경우, 코로나19가 발발하여 확산된 시기라는 점이 우려되었다. 이에 대해서는 전술한 바와 같은 자료 확보의 문제와 함께 코로나19로 인한 다양한 사회경제적 영향은 발생한 해인 2020년보다는 그 이후부터 현저하게 나타났다는 점을 감안하였다.

2. 분석 방법

1) 변수 설정

본 연구에서 활용하는 종속변수는 '기초지자체 기준 지역 온실가스 배출량' 자료이다. 이는 환경부 온실가스종합정보센터에서 공개하는 온실가스 통계 자료 중 하나이다. 이 자료가 공개된 2022년 이전에는 국가 및 광역시·도 단위의 자료만 제작 및 공개하다가 2023년 시범적으로 산정해 공개하였다. 이 자료는 2016~2020년의 5개년 동안 시군구 단위로 구축하였으며 단위는 Gg CO₂eq이다. 직접배출량과 간접배출량을 각각 제공하는데, 직접배출량은 에너지, 산업공정, 농업, 폐기물 등의 부문별로 합

산한 총배출량과 순배출량 자료로 구성되어 있다. 간접배출량은 전력 소비, 열 사용, 폐기물 처리 등 각각의 항목에 따른 간접적인 배출량 자료이다. 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(탄소중립기본법)」의 제2조 제6호에 따르면 온실가스 배출은 '사람의 활동에 수반하여 발생하는 온실가스를 대기 중에 배출·방출 또는 누출시키는 직접배출'과 '다른 사람으로부터 공급된 전기 또는 열(연료 또는 전기를 열원으로 하는 것만 해당한다)을 사용함으로써 온실가스가 배출되도록 하는 간접배출'을 말한다. 이처럼 이 자료는 시군구별로 부문별 직접배출량과 간접배출량을 공개하고 있으므로 연구의 목적에 맞는 부문 혹은 총배출량 등을 적절히 취사선택하여 활용할 수 있다. 본 연구에서는 이 자료에서 활용할 수 있는 간접배출량 중 전력부문 온실가스 배출량을 추출하여 분석에 활용한다. 우리나라 온실가스 배출의 86% 이상을 에너지 부문이 차지하고 있다는 점(2021년 기준, 환경부 온실가스종합정보센터)과 간접배출량 중 전력부문 배출량 비중이 대부분이라는 점을 고려하였다. 원자료를 구체적으로 확인해 본 바, 시군구별로 다소의 차이가 있으나 절대다수의 시군구에서 전체 간접배출량(전력, 열, 폐기물) 중 전력 부문이 70~90%가량을 차지하고 있었다. 즉, 열 사용, 폐기물 처리에 의한 온실가스 배출량에 비해 전력 소비에 의한 간접적인 온실가스 배출량이 대부분을 차지하고 있어 이를 대표할 수 있으리라 판단하였다.

본 연구에서는 이론 및 선행연구를 종합적으로 검토하여 전력 부문 온실가스 배출에 영향을 미칠 것으로 예상되는 도시특성 변수들을 선정하였다(Table 1). 도시특성은 이론 논의에서 검토한 바와 같이 크게 비물리적인 특성(인구 규모를 비롯한 각종 사회경제적 특성)과 물리적 특성(토지이용, 도시의 크기, 형태 등)을 포함한다. 관련 선행연구들은 도시특성과 전력 부문 온실가스 배출과 관련하여 밀도, 녹지, 교통, 경제적 특성 및 도시형태 등을 공통적인 변수로 제시하고 있었다. 여기서 밀도, 녹지, 교통과 도시형태는 물리적 특성이며 그 이외에 경제 변수는 비물리적 특성을 말한다. 이를 참고하여 본 연구의 공간적 범위의 시군구 단위에서 자료가 구득 가능한지를 우선 고려하였다. 이러한 과정을 거쳐 우선 밀도 변수로는 인구밀도, 고용밀도를 채택하였고, 녹지 변수로는 도시공원면적을, 교통 변수로는 도로밀도를 채택하였다. 여러 선행연구에서 교통 변수로 자동차 등록 대수, 도로율, 도로밀도 등을 제시하고 있었다. 본 연구에서는 도로밀도가 높으면 교통이 활발하고 밀집한 지역일 가능성이 높다는 점과 도시의 물리적 배치를 표현하는 변수이면서 시군구 단위에서 구득할 수 있는 자료라는 점을 감안하여 도로밀도를 선정하였다. 여기서 인구밀도와 고용밀도는 각각 시군구의 단위면적당(km²) 인구수, 고용자 수로 산출하였고, 도로밀도는 시군구의 단위면적당(km²) 도로연장(km)으로 산출하였다. 경제적 특성 변수로는 재정자립도, 1인당 지방세 납부액, 1인당 GRDP를 활용한다. 관련 선행연구에서는 이들 변수 외에도 에너지다소비업종 사업체 수, 종사자

Table 1. Variable definitions

Categories	Variables	Definitions	
Dependent variables	Greenhouse gas emissions	GHG emissions at the municipal level Gg CO ₂ eq	
Density	Population density	Population/Total area (person/km ²)	
	Employment density	Total number of employers/Total area (person/km ²)	
Green area	Urban park area	Urban park area (m ²)	
Transportation	Road density	Road area/Total area (km/km ²)	
Economic characteristics	Financial independence	Own revenue/Municipality budget size × 100 (%)	
	Local taxes paid per capita	Local tax amount/Population × 100 (thousand KRW)	
	GRDP per capita	GRDP (million KRW)/Population × 100 (thousand KRW)	
		COHESION	
	Patch cohesion index (COHESION)	$= \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij}}{\sum_{j=1}^n p_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right] \left[1 - \frac{1}{\sqrt{A}} \right]^{-1} (100)$	Developed class
		(0 ≤ COHESION < 100) pij = perimeter of patch ij in terms of number of cell surfaces aij = area of patch ij in terms of number of cells	
	Aggregation index (AI)	$AI = \left(\frac{g_{ij}}{\max \rightarrow g_{ij}} \right) (100)$	Developed class
		(0 ≤ AI ≤ 100) gii = number of like adjacencies between pixels of patch type i max-gii = maximum number of like adjacencies between pixels of patch type i	
Urban form	Contiguity index (CONTIG)	$CONTIG = \frac{\left[\frac{\sum_{r=1}^z c_{ijr}}{a_{ij}} \right] - 1}{v - 1}$	Developed Class
		(0 ≤ CONTIG ≤ 1) cijr = contiguity value for pixel r in patch ij v = sum of the values in a 3-by-3 cell template aij = area of patch ij in terms of number of cells	
	Fractal dimension index (FRAC)	$FRAC = \frac{2 \ln(0.25 P_{ij})}{\ln a_{ij}}$	Developed Class
		(1 ≤ FRAC ≤ 2) pij = perimeter of patch ij aij = area of patch ij	
	Shannon's diversity index (SHDI)	$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i \ln P_i)$	All Classes
		(0 ≤ SHDI) Pi = proportion of the landscape occupied by patch type i	

수(동아현·강정은, 2020)나 사업체밀도, 고용밀도(김동하 외, 2016) 등도 경제적 특성 변수로 활용하고 있었다. 본 연구에서는 전술한 세 변수가 다수의 선행연구에서 공통적으로 활용하면서 유의하게 나타났고, 시군구의 정책적 역량까지 표현할 수 있다는

점을 감안하였다. 재정자립도는 자치단체 스스로 살림을 꾸릴 수 있는 능력을 나타내는 지표이며, 1인당 지방세 납부액과 1인당 GRDP는 각각 지방세액 및 GRDP를 해당 지역의 주민등록인구 수로 나눈 값이다.

도시형태를 나타내는 변수로는 응집지수, 집합지수, 연속성 지수, 복잡성 지수 및 다양성 지수를 최종적으로 선정하였다. 응집지수(Patch Cohesion Index: COHESION)는 도시 토지 패치의 물리적 연결성을 측정하는 지수로, 도시 패치가 그 분포에 있어 더 뭉쳐져 있을수록 그 값은 증가한다. 응집지수는 면적 가중 평균 둘레 대 면적 비율을 면적 가중 평균 패치 모양 지수로 나누어 값에 비례한다. 이와 유사하게 집합지수(Aggregation Index: AI)는 도시지역의 집합을 나타내는 지수이다. 각 패치 유형으로 구성된 지형의 비율을 고려하여 산출하므로 내부의 인접성을 보여준다. 집합지수는 면적 가중 평균 클래스 집계 지수로 계산한다. 이 두 지수 모두 도시의 응집성 정도와 관련되어 있다. 응집성을 나타낸다는 점에서 유사한 지수이며 산출 방식에서 약간의 차이가 있다. 이어 연속성 지수(Contiguity Index: CONTIG)는 도시 경관 셀의 공간적 연속성을 나타내는 지수로, 값이 높을수록 경관이 끊어지지 않고 이어져 있음을 보여준다. 복잡성 지수(Fractal Dimension Index: FRAC)는 도시 패치 모양의 복잡성 및 파편화 정도를 나타내는 지수이다. 마지막으로 다양성 지수(Shannon's Diversity Index: SHDI)는 도시 패치 유형의 다양성을 나타내는 지수로, 값이 클수록 해당 지역의 패치가 다양하게 구성되어 있음을 보여준다. 다양성 지수인 SHDI를 제외하고 모두 클래스(Class) 수준에서 계산하고, SHDI는 경관(Landscape) 수준에서 계산하였다.

모든 변수는 통계청 국가통계포털, 지방재정 365 등의 공식적인 출처에서 수집하여 활용하였다. 특히 도시형태 변수들을 구축하기 위해서 환경공간정보서비스에서 제공하는 전국 단위 세분류 토지피복 데이터를 활용하였다. 도시형태 변수인 경관지표는 래스터(Raster) 자료를 활용해 산출할 수 있다. 따라서 벡터 형태(Shp)의 자료로 제공하는 이 전국 토지피복 데이터를 ArcGIS Pro 프로그램을 활용해 래스터 자료로 변환 후 전처리를 진행하였다. 도시형태 변수의 생성과 구축에는 R 프로그램을 사용하였고, 경관지표 산출에 최적화된 패키지인 landscapemetrics(Hesselbarth et al., 2019)를 활용하였다.¹²⁾

2) 패널회귀분석

본 연구는 도시특성이 에너지 소비에 의한 온실가스 배출에 미치는 영향을 분석하기 위해 패널회귀분석을 진행한다. 패널회귀분석은 회귀분석과 시계열분석을 합쳐 특정 주제에 대한 횡단면 데이터를 시계열적으로 분석하는 기법을 말한다(이희연·노승철, 2013). 전국 시군구의 부문별 온실가스 배출량 자료에서 간접배출량 중 전력부문 배출량(2018~2020년: 3개년)을 종속변수로 한다. 도시특성을 보여주는 독립변수들 역시 같은 기간을 대상으로 구축하여 분석에 활용한다. 패널회귀모형의 추정을 위해 plm(Croissant and Millo, 2008) 패키지를 활용하였다.

3개년이라는 비교적 짧은 기간을 대상으로 분석하기에 비관측

시간 효과는 크게 나타나지 않는다고 판단(김우식·윤동근, 2023) 되므로 비관측 지역 효과만을 반영한 모형을 활용한다. 본 연구에서 사용하는 변수들은 모두 공간적인 분포가 균일하지 않기 때문에 고정효과모형(Fixed Effects Model)을 활용해 지역별 변화 요인을 통제한다. 패널모형은 오차항을 어떻게 규정하느냐에 따라 구분되는데, 각 특성을 고정된 상수항으로 가정할 경우에는 고정효과모형(Fixed Effects Model)을 사용하고, 무작위의 확률항으로 가정할 경우에는 확률효과모형(Random Effects Model)을 사용한다. 본 연구에서 활용하는 고정효과모형이 적합한지 판단하기 위해 하우스만 검정을 실시한다(김우식·윤동근, 2023; 이희연·노승철, 2013). 하우스만 검정에서의 귀무가설은 설명변수와 개체특성 효과 간에 서로 독립적이며 상관관계가 없다는 확률효과모형이다. 즉, 귀무가설이 기각되면 고정효과모형이 적합하므로 확률효과모형이 아닌 고정효과모형을 사용해야 한다.

패널회귀분석의 회귀식은 식 (1)과 같다.

$$y_{i,t} = \alpha + \beta x_{i,t} + \dots + \epsilon_{i,t} \quad (1)$$

IV. 연구 결과

1. 기초통계 분석

간접배출량 중 전력부문의 온실가스 배출량과 도시특성의 차이를 확인하기 위해 기초통계 분석을 진행하였다. 분석에 앞서 단위가 없는 경관지표와 몇몇 변수를 제외하고, 시계열 변수의 이분산성(Heteroscedasticity) 및 비정규성(Nonnormality)의 영향을 피하기 위해 종속변수를 포함해 일부 변수를 로그 형태로 변환하여 안정적으로 만들었다(Hao et al, 2018; Han et al, 2020; Wang et al, 2019). 패널회귀분석을 활용한 대부분의 선행 연구들(Hao et al, 2018; Han et al, 2020; Wang et al, 2019)이 로그 변환을 적용하고 있다는 점을 고려하였다.

위의 과정을 거친 후, 전체 시군구(225개), 대도시지역에 속한 구, 군(73개), 도시지역인 시(76개) 및 비도시지역인 군(76개)으로 구분해 기초통계를 각각 산출하였다(Table 2).

독립된 3개 이상의 집단 간의 차이가 있는지를 확인하는 비모수 검정 방법인 Kruskal-Wallis 검정 결과, 대도시지역, 도시지역 및 비도시지역의 간접배출량 중 전력부문 온실가스 배출량과 밀도, 녹지, 교통, 경제적 특성 및 도시형태 변수는 분석 단위별로 유의미한 차이(p<0.001)가 있는 것으로 나타났다. 즉, 각 분석 단위에서 간접배출량 중 전력부문 온실가스 배출량이 다를 가능성이 높다는 것을 말한다. 기초통계를 확인해봤을 때도 전력부문 온실가스 배출량이 도시지역, 대도시지역, 비도시지역 순으로 높게 나타났다. Shi et al.(2020)에 의하면 중소도시에 비해 대도시

Table 2. Descriptive statistics

Categories	Variables	Total (si-gun-gu)	Metropolitan region (gu-gun)	Medium and small city (si)	Rural county (gun)
		Mean (Std.Dev)	Mean (Std.Dev)	Mean (Std.Dev)	Mean (Std.Dev)
Dependent variables	Greenhouse gas emissions*	6.4433 (1.0532)	6.6301 (0.7224)	7.0983 (0.9942)	5.6089 (0.7999)
Density	Population density	3,906.184 (6,076.346)	10,112.753 (6,798.675)	1,762.031 (2,968.131)	88.7648 (98.6727)
	Employment density	3,246.104 (7,128.295)	8,801.044 (10,360.672)	1,102.390 (1,778.007)	54.1504 (53.3309)
Green area	Urban park area*	14.2538 (1.3247)	13.9280 (1.5777)	15.2171 (0.9024)	13.6035 (0.7391)
Transportation	Road density	3,802.392 (12,975.2)	8,536.609 (21,921.503)	2,393.622 (2,180.590)	663.8205 (333.2938)
Economic characteristics	Financial independence*	2.8399 (0.6025)	2.9667 (0.4402)	3.0731 (0.5795)	2.4850 (0.5992)
	Local taxes paid per capita*	6.1268 (0.5755)	5.6635 (0.5652)	6.4465 (0.4014)	6.2521 (0.4359)
	GRDP per capita*	8.0431 (0.5323)	7.9742 (0.7465)	8.0851 (0.4396)	8.0674 (0.3257)
Urban form	Patch cohesion index (COHESION)	98.5529 (1.9810)	99.7289 (0.4036)	99.3463 (0.4347)	96.6296 (2.3717)
	Aggregation index (AI)	70.0075 (16.2257)	87.8764 (6.4793)	70.2625 (9.8129)	52.5887 (5.6771)
	Contiguity index (CONTIG)	0.1619 (0.0183)	0.1731 (0.0223)	0.1637 (0.0121)	0.1493 (0.0093)
	Fractal dimension index (FRAC)	0.0802 (0.0043)	0.0796 (0.0060)	0.0798 (0.0030)	0.0812 (0.0028)
	Shannon's diversity index (SHDI)	1.2680 (0.2248)	1.2921 (0.1590)	1.3212 (0.2554)	1.1917 (0.2264)

Total (n=225, T=3, N=675)

Metropolitan district (n=73, T=3, N=219)

Urban district (n=76, T=3, N=228)

Rural district (n=76, T=3, N=228)

*Variables that are logarithmized to calculate descriptive statistics

가 좀 더 압축적이고, 높은 토지이용혼합 수준, 효율적인 대중교통 접근성 등을 이유로 온실가스 배출량이 적을 수 있다. Wang et al.(2019) 역시 압축적으로 개발된 도시지역이 분산된 형태를 가진 지역에 비해 토지이용 효율, 녹지 보존, 건물에서의 전력 소비 효율 등의 특성이 있어 온실가스 배출량 감소로 이어질 수 있다고 강조하였다. 이들이 말하는 압축적으로 개발된 대도시는 본 연구의 대도시지역(구, 군)으로 볼 수 있고, 중소도시는 도시지역인 시, 분산된 형태를 가진 지역은 비도시지역인 군으로 이해할 수 있다. 이러한 선행연구의 논리에 근거할 때, 압축적으로 개발된 대도시지역보다 상대적으로 개발 밀도가 낮은 도시지역에서 온실가스 배출량이 높게 나타난 것은 적절하다. 다만 비도시지역의 온실가스 배출량이 가장 낮게 나타난 것은 이들 지역이 대부분 논·밭, 산지의 비율이 높고, 인구 및 산업 등 배출원이 현저히 적기 때문으로 판단된다. 이러한 점을 종합할 때, 전술한 Krus-

kal-Wallis 검정 결과 및 기초통계에서 나타난 분석 단위별 온실가스 배출량의 차이는 적절한 결과라고 할 수 있겠다. 이를 바탕으로 각 분석 단위별로 도시특성 변수와 온실가스 배출량 사이의 차별화된 관계를 확인할 수 있으리라 보고, 전체 시군구와 함께 나머지 대도시지역, 도시지역, 비도시지역 각각에 대한 모델을 포함하여 분석하였다.

기초통계결과를 확인해보면, 대도시지역, 도시지역 및 비도시지역의 간접배출량 중 전력부문 온실가스 배출량에 영향을 미치는 도시특성 변수는 서로 다른 특성이 있는 것으로 나타났다. 우선 밀도 변수인 인구밀도, 고용밀도, 도로밀도는 대도시지역의 값이 가장 높고, 도시지역, 비도시지역 순으로 높게 나타났다. 실제로 인구와 산업이 밀집된 지역 순으로 밀도 변수 역시 높게 나타난 점을 확인할 수 있다. 특히 비도시지역의 인구밀도, 고용밀도 및 도로밀도는 모두 대도시지역, 도시지역에 비해 현저히 낮

은 수준이었다. 한편, 경제적 특성과 관련된 변수인 재정자립도의 경우, 도시지역이 가장 높고, 그다음으로 대도시지역, 비도시지역이 이어졌다. 그러나 1인당 지방세 납부액과 1인당 GRDP는 도시지역, 비도시지역이 비슷한 수준으로 높았고, 대도시지역이 가장 낮게 나타났다. 도시형태를 나타내는 변수인 경관지표 중 도시의 응집 혹은 집합을 보여주는 응집지수(COHESION)와 집합지수(AI)는 대도시지역이 가장 높게 나타났고, 도시 경관의 공간적 연속성을 보여주는 연속성 지수(CONTIG) 또한 대도시지역이 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 한편, 도시 패치의 파편화 정도를 나타내는 복잡성 지수(FRAC)의 경우, 비도시지역이 가장 높고, 그다음으로 도시지역, 대도시지역이 이어졌다. 마지막으로 도시 패치 유형의 다양성을 나타내는 SHDI는 도시지역에서 가장 높은 것으로 확인되었다.

2. 패널회귀분석 결과

기초통계량을 검토한 후, 도시특성이 온실가스 배출에 미치는 영향을 분석하기 위해 패널회귀모형을 추정하였다. 본 연구에서 활용하는 패널데이터는 누락변수나 결측값이 없는 균형패널데이터 형태이다. 분석 단위별로 도시특성 변수와 온실가스 배출량 사이의 서로 다른 관계를 확인하고자, 전체지역, 대도시지역, 도시지역 및 비도시지역 각각에 대한 분석 모델을 구축하여 검토하

였다(Table 3).

우선 하우스만 검정을 통해 고정효과모형과 확률효과모형에 대해 모형 선택의 적절성을 판단하였다. 하우스만 검정 시행 결과, 도시지역을 제외하고 귀무가설을 기각($p < 0.001$)하여 대립가설을 채택하였다. 즉, 고정효과모형과 확률효과모형이 유의미한 차이가 있으므로 고정효과모형이 더 적합한 것으로 나타났다. 도시지역의 경우, p 값이 0.7659로 나타나 귀무가설을 기각할 수가 없었다. 이는 두 모형 간에 유의미한 차이가 없으므로 확률효과모형을 사용하는 것이 적합하다는 것을 의미한다. 또한, 분석 전에 다중공선성을 검토하여 VIF 값이 5 이상이며 상관관계가 높은 변수들은 제거한 후, 최종적인 모형을 구축하여 구체적인 분석을 진행하였다. 우선 전체지역에서 고용밀도, 도시공원면적, 1인당 GRDP, 집합지수(AI)가 VIF 값이 5 이상이면 상관관계가 높다는 것을 확인하고 모형에서 제거하였다. 또한 모형 간의 비교를 용이하게 하기 위해 나머지 대도시지역, 도시지역, 비도시지역에서도 같은 변수를 제거해 분석하였다.

우선, 각 모델의 설명력을 보면 Within R^2 값이 각각 전체 지역(0.5599), 대도시지역(0.8235), 도시지역(0.5240), 비도시지역(0.5826)으로 나타나 대도시지역의 설명력이 가장 높았다. 또한 전체지역, 도시지역, 비도시지역 모두 50% 이상의 설명력을 보이고 있다.

전체지역을 대상으로 분석한 결과(Table 3), 밀도 변수 중 도로

Table 3. Estimation of fixed effect models, random effect model (Total, Metropolitan, Urban, Rural)

		Total		Metropolitan region		Medium and small city (Random effect model)		Rural county	
		Coefficient	p-value	Coefficient	p-value	Coefficient	p-value	Coefficient	p-value
Density	Population density	-0.00000	0.5214	0.0001***	0.000	-0.0000	0.3229	-0.0001	0.2994
Transportation	Road density	0.0001**	0.0013	0.00003*	0.0240	-0.00002	0.5616	0.0001	0.1944
Economic characteristics	Financial independence [†]	0.590**	0.000	0.399***	0.000	0.781***	0.000	0.330***	0.000
	Local taxes paid per capita [†]	-0.551***	0.000	-0.664***	0.000	-0.578***	0.000	-0.355***	0.000
Urban form	Patch cohesion index (COHESION)	-0.062*	0.0112	-0.167	0.0964	0.032	0.7334	-0.055*	0.0307
	Contiguity index (CONTIG)	-2.152	0.1224	0.676	0.5509	1.202	0.7333	-14.854***	0.0003
	Fractal dimension index (FRAC)	10.283*	0.0116	3.350	0.2510	-11.292	0.5015	59.877*	0.0282
	Shannon's diversity index (SHDI)	-0.325	0.4817	0.370	0.5399	-0.300	0.4325	-2.123**	0.0097
N		675		219		228		228	
Hausman Test (χ^2)		719.79***		35.58***		4.92		90.10***	
Within R^2		0.5599		0.8235		0.5240		0.5826	

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

[†]Variables that are logarithmized to calculate descriptive statistics

밀도가, 경제적 특성 변수인 재정자립도, 1인당 지방세 납부액이 유의한 것으로 나타났다. 또한 도시형태를 나타내는 경관지표 중 응집지수, 복잡성지수가 유의한 것을 확인할 수 있다. 도로밀도는 온실가스 배출량에 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타나 도로밀도가 높을수록 온실가스 배출이 증가한다는 것으로 분석되었다. 이는 다수의 선행연구에서 도로밀도 및 이와 유사한 교통 변수들(자동차등록 대수, 통행량, 도로연장, 도로면적 등)이 온실가스 배출에 양의 영향을 미치는 것으로 나타난 것을 재확인한 결과였다(권수현 외, 2016; 김동하 외, 2016; 동아현·강정은, 2020; 문한솔 외, 2023; 정민선 외, 2015). 경제적 특성 변수인 재정자립도는 온실가스 배출량에 양(+)의 영향을 미치는 것으로 확인된 반면, 1인당 지방세 납부액은 온실가스 배출량에 음(-)의 영향을 미치고 있었다. 즉, 재정자립도가 높을수록 온실가스 배출이 증가하고, 1인당 지방세 납부액이 많을수록 온실가스 배출이 감소한다는 결과였다. 재정자립도는 지방자치단체 스스로 살림을 꾸릴 수 있는 능력을 나타내는 지표로, 여러 선행연구에서 언급하는 지역의 경제력, 소득수준이 온실가스 배출에 양의 영향을 미친다는 결과와 비슷한 결과라 할 수 있겠다(노승철, 2014; 양혜미·송재민, 2017; 이동성·문태훈, 2017). 경관지표 중 응집지수는 온실가스 배출량에 음(-)의 영향을 미치며, 복잡성지수는 온실가스 배출량에 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 도시형태가 응집되어 있을수록 온실가스 배출이 감소하는 반면, 도시형태가 복잡하고 파편화되어 있을수록 온실가스 배출이 증가한다고 해석되는 결과이다. 도시의 압축적 개발 혹은 토지이용의 압축성과 관련된 응집지수는 대부분의 연구에서 온실가스 배출에 음의 영향을 미치는 것으로 나타나므로(문한솔 외, 2023; 이동성·문태훈, 2017; Falahatkar and Rezaei, 2020; Ou et al., 2013; Wang et al., 2019) 도시의 압축성이 온실가스 배출 저감에 긍정적이라는 기존 논의를 재확인할 수 있었다. 한편, 도시형태의 파편화, 불규칙성이 증가하면 온실가스 배출이 증가한다는 본 연구의 결과 역시 기존 연구들과 동일하였다(Fang et al., 2015; Ou et al., 2013).

이어, 대도시지역을 대상으로 분석한 결과(Table 3), 밀도 변수 중 인구밀도와 도로밀도가, 경제적 특성 변수인 재정자립도, 1인당 지방세 납부액이 유의한 것으로 나타났다. 반면, 도시형태 변수는 유의하지 않은 것으로 확인되었다. 인구밀도는 온실가스 배출량에 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났고, 도로밀도 역시 온실가스 배출량에 양(+)의 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 인구밀도의 경우, 전체지역, 비도시지역, 도시지역 모두 유의하지는 않게 나타났으나, 대도시지역의 결과와 반대로 음(-)의 영향을 미치는 것은 공통적이었다. 기존의 압축도시 논의에 따르면 도시 내부의 밀도가 높아지면 각종 활동도 밀집되고, 이에 따라 교통량이 감소하여 교통 에너지 효율이 높아져 온실가스 배출을 줄이는 영향을 미치게 된다(송기욱·남진, 2009; Chhetri et al.,

2013; Lee and Lim, 2018). 또한 인구밀도는 전력과 같은 가정 에너지 소비를 감소(-)시키는 것으로 나타나고 있었다(강창덕, 2011; Kim and Kim, 2013). 대도시지역 이외의 지역에서 인구 밀도가 약한 수준이나 음식의 영향을 미치는 것으로 나타난 것은 압축도시 이론의 논의를 조심스럽게 재확인한 결과라 할 수 있겠다. 반면 대도시지역은 특별시, 광역시에 속한 구, 군 지역으로 이들 지역은 이미 고밀로 개발되었다는 특성이 있다. 이러한 고밀의 도시공간은 혼잡성을 높이고, 각종 활동을 증가시켜 오염물질 및 온실가스 배출을 증가시킬 가능성 또한 존재하여 신중한 접근이 필요하다(김우식·윤동근, 2023; 허유경·강민규, 2022). 경제적 특성 변수인 재정자립도는 전체지역의 결과와 마찬가지로 온실가스 배출량에 양(+)의 영향을 미치는 것으로 확인된 반면, 1인당 지방세 납부액은 온실가스 배출량에 음(-)의 영향을 미치고 있었다.

비도시지역을 대상으로 분석한 결과(Table 3), 밀도 변수는 유의하지 않았고, 전체지역, 대도시지역과 마찬가지로 경제적 특성 변수인 재정자립도, 1인당 지방세 납부액이 유의한 것을 알 수 있었다. 도시형태 변수인 응집지수, 연속성지수, 복잡성지수 및 다양성지수는 모두 유의한 것으로 나타났다. 경제적 특성 변수인 재정자립도는 전체지역, 대도시지역의 결과와 마찬가지로 온실가스 배출량에 양(+)의 영향을 미치는 것으로 확인된 반면, 1인당 지방세 납부액은 온실가스 배출량에 음(-)의 영향을 미치고 있었다. 경관지표 중 응집지수는 온실가스 배출량에 음(-)의 영향을 미치며, 연속성지수 역시 온실가스 배출량에 음(-)의 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 도시형태가 응집되어 있을수록, 도시 경관이 끊어지지 않고 연결되어 있을수록 온실가스 배출이 감소하는 것으로 분석된다. 선행연구에서도 도시의 연속성이 증가하면 온실가스 배출이 감소한다는 결과였다(Fang et al., 2015). 반면 복잡성지수는 온실가스 배출량에 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 도시형태가 파편화되어 있을수록 온실가스 배출이 증가한다고 볼 수 있다. 기초통계분석에서 확인할 수 있는 바와 같이, 복잡성지수는 비도시지역이 가장 높고, 도시지역, 대도시지역이 그다음 순이었다. 비도시지역은 도시화 수준이 낮고, 논·밭 및 산지의 분포가 많은 군 지역으로 구성되어 있다. 이러한 지역에서는 대체로 도시의 형태가 복잡하며, 연결성이 떨어지고 파편화된 경관이 나타난다. 도시형태의 파편화, 불규칙성이 증가하면 온실가스 배출이 증가한다는 것은 여러 연구에서도 이미 확인된 바 있다(Fang et al., 2015; Ou et al., 2013). 한편, 다양성지수는 온실가스 배출량에 음(-)의 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 다양성지수는 도시 패치 유형의 다양성을 나타내는 지수로, 기존의 여러 선행연구에서는 도시형태가 다양할수록 온실가스 배출이 낮은 것(김병석·문태훈, 2011; 송기욱·남진, 2009)으로 나타났는데, 본 연구에서도 재확인할 수 있는 결과였다.

마지막으로 유일하게 확률효과모형이 적합한 것으로 나타난

도시지역의 분석 결과(Table 3), 전체지역을 포함한 다른 모든 지역과 마찬가지로 경제적 특성 변수인 재정자립도, 1인당 지방세 납부액이 유의하였다. 그 외의 변수들은 유의하지 않았다. 다른 지역의 결과와 동일하게 재정자립도는 온실가스 배출량에 양(+)의 영향을, 1인당 지방세 납부액은 온실가스 배출량에 음(-)의 영향을 미치고 있었다.

V. 결론 및 시사점

화석연료의 연소에 의한 온실가스 배출의 증가가 심각한 이상 기후 현상을 유발하는 기후변화의 원인으로 지목되고 있다. 이에 세계 각국은 온실가스 감축을 위한 여러 노력을 기울여 왔고, 특히 에너지 소비에 의한 온실가스 배출 저감의 필요성이 강조되고 있다. 이러한 온실가스 배출이 집중되는 공간인 도시는 기후변화로 인한 재해재난 등 부정적 영향의 피해 역시 크게 나타나는 공간이기도 하다. 때문에 도시 단위에서의 에너지 소비에 의한 온실가스 감축을 위한 노력이 중요하다. 또한 이를 위한 근거 자료인 도시 단위의 부문별 온실가스 배출량 집계와 이에 영향을 미치는 도시특성에 관한 분석이 필요하다.

이에 본 연구는 도시라 할 수 있는 기초지자체인 시군구를 대상으로 집계된 온실가스 배출량 자료를 활용해 도시특성이 에너지 소비에 의한 온실가스 배출에 미치는 영향을 실증적으로 분석하였다. 전국 225개 시군구를 대상으로 온실가스 배출에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상되는 도시특성을 패널회귀분석을 활용해 분석을 진행하였다. 특히 도시형태를 보여주는 경관지표인 응집지수, 집합지수, 연속성지수, 복잡성 지수, 다양성 지수를 핵심적인 변수로 활용하였다. 또한 같은 기초지자체인 시군구 내에서도 각각의 특성이 다르다는 점을 고려하여, 대도시지역, 도시지역, 비도시지역으로 나누어 전체지역과 함께 분석을 수행하였다.

분석 결과, 전력부문 온실가스 배출량은 전체지역, 대도시지역, 비도시지역의 도시특성에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. 전체지역의 경우, 도로밀도가 높고, 재정자립도가 높으며, 도시형태가 복잡하고 파편화되어 있을수록 온실가스 배출이 증가하는 것으로 분석되었다. 동시에 1인당 지방세 납부액이 많고, 도시형태가 응집되어 있을수록 온실가스 배출이 감소하는 것을 알 수 있었다. 대도시지역 역시 도로밀도, 재정자립도, 1인당 지방세 납부액에서 전체지역과 마찬가지로 유의하면서 같은 방향성을 보였다. 한편, 비도시지역에서는 다른 지역과 마찬가지로 경제적 특성 변수인 재정자립도, 1인당 지방세 납부액이 유의하였고, 도시형태를 나타내는 응집지수, 연속성지수, 복잡성지수 및 다양성 지수는 모든 지역에서 유일하게 모두 유의한 것으로 분석되었다.

이러한 결과를 통해 다음과 같은 시사점을 제시할 수 있다. 첫째, 도시 범주에 따른 온실가스 배출 영향 요인의 차이를 확인할

수 있었다. 도시의 범주에 따라 일부 변수의 유의성과 유의한 방향성이 다르게 나타났다. 예컨대 인구밀도의 경우, 대도시지역에서만 유일하게 유의한 양의 영향을 미쳤고, 전체지역 및 다른 지역에서는 유의하지는 않으나 약한 수준에서 일관되게 음의 영향을 보이고 있었다. 인구밀도의 결과를 보았을 때, 고밀의 대도시지역의 경우 각종 활동이 집중되어 있고 혼잡성이 높기에 온실가스 배출의 증가 가능성이 어느 정도 존재하여 조심스러운 접근이 필요하다(김유식·윤동근, 2023; 김유진·변병설, 2012; 허유경·강민규, 2022). 이러한 점을 볼 때, 도시의 범주에 따라 그 개발의 정도, 압축성에 있어 차이가 있고, 이는 도시특성으로 표현되는 변수들이 온실가스 배출에도 서로 다른 영향을 보일 수 있음을 시사한다. 이와 같은 결과는 온실가스 배출 저감 정책을 계획 및 추진함에 있어, 같은 기초지자체라 할지라도 일률적인 정책을 동일하게 적용하기에는 무리가 있다는 것을 시사한다. 즉, 도시 범주에 따라 서로 다른 인구밀도, 기반시설 확충 및 개발의 정도, 압축 개발 수준 등을 고려한 맞춤형 온실가스 배출 저감 정책을 입안하여 신중하게 추진해 나갈 필요성이 있다.

둘째, 도시의 압축성을 고려한 토지이용계획이 필요하다. 전체 지역, 비도시지역에서 확인할 수 있었던 유의한 도시형태 변수들은 기존 선행연구들의 결과와 마찬가지로의 결과를 보였다. 즉, 도시형태가 응집되어 있을수록, 연속되어 있을수록, 패치 구성이 다양할수록 온실가스 배출이 줄어드는 반면, 도시형태가 복잡하고 파편화되어 있을수록 온실가스 배출이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 기존의 압축도시 이론의 기본 논리들을 재확인하는 결과라 할 수 있다. 특히, 모든 도시형태 변수가 유의했던 비도시지역은 대도시지역, 도시지역에 비해 비교적 저밀의 도시형태를 가지고 있다. 현재는 다른 지역에 비해 개발이 덜 되어 있는 비도시지역은 장기적인 관점에서 신도시, 혁신도시, 신규 택지 개발 등 새로운 도시개발의 여지가 남아있는 지역이다. 그러므로 이러한 지역을 대상으로 도시개발을 추진할 경우, 계획에서부터 도시의 압축성을 높여 온실가스 배출 저감에 기여할 수 있는 방향으로 설계하여야 할 것이다.

셋째, 온실가스 배출 저감 정책 예산의 적절한 배분 및 효율적 운영을 추진해야 한다. 경제적 특성 변수 중 1인당 지방세 납부액은 전체지역을 포함해 모든 지역에서 유의하면서 온실가스 배출에 음의 영향을 미치고 있었다. 지방세는 지역적 특성을 갖는 지방자치단체의 수입으로, 지역사회의 경제적 부흥, 생활 환경 개선 등에 필요한 재원으로 활용된다. 그렇기에 지방세는 에너지 관련 정책 및 온실가스 배출 저감 정책 등에도 투입될 수 있다. 지방세수가 높은 지역³⁾에서는 에너지 및 온실가스 배출 저감 정책에 예산을 투입할 여력이 클 수 있고, 그에 따라 해당 지역의 온실가스 배출을 줄이는 데에 기여할 가능성이 높다. 동아현·강정은(2020)의 결과에서도 가정 및 교통 부문 에너지정책 세출액이 많을수록 에너지 사용량이 적은 것으로 나타났다. 이러한 점을 고려

했을 때, 각 시군구는 온실가스 배출 저감 정책에 쓸 수 있는 예산을 충분히 확보하여 관련 사업에 적절히 배분하여야 할 것이다. 또한 온실가스 배출 저감에 효과가 높은 사업, 보다 시급한 사업 등을 발굴하여 효율적으로 예산 운용을 하는 노력이 필요하다.

본 연구는 기존 연구에서 주로 활용되었던 밀도, 녹지, 교통 등 변수 이외에 도시형태를 나타내는 경관지표를 활용하여 온실가스 배출량과의 인과관계를 규명하였다. 또한 전국 시군구를 대상으로 하여, 그 특성에 따라 분석 단위를 나누고 도시특성에 따른 온실가스 배출의 영향을 구체적으로 검증했다는 점에서 의의가 있다. 우리나라를 대상으로 진행한 기존의 연구들은 자료의 한계로 인해 일부 대도시나 시군구를 대상으로 한 횡단면 분석이 주를 이루었다. 반면, 본 연구는 전국 시군구의 다년도 자료를 활용하였고, 그 특성에 따라 대도시지역, 도시지역, 비도시지역으로 구분해 지역에 따른 온실가스 배출 저감을 위한 차별화된 정책적 시사점을 제시할 수 있었다.

한편, 본 연구에는 다음의 한계점이 있다. 본 연구는 전국 시군구를 대상으로 구축된 온실가스 배출량 자료를 활용하였고, 그 중 특히 간접배출량 중 전력부문 온실가스 배출량에 주목해 분석을 진행하였다. 다만 온실가스 배출량 자료는 직접배출량, 간접배출량으로 구성되어 있고, 부문별로도 집계하여 총계를 산출하였으므로, 향후의 연구에서는 자료의 장점을 살린 종합적인 검토가 이루어져야 할 것이다. 그 외에도 본 연구에서 활용한 도시형태와 관련된 경관지표를 포함해 도시의 구조적인 특성을 나타낼 수 있는 추가적인 변수 검토 역시 후속 연구에서 보완될 필요가 있다. 앞으로 이와 같은 연구가 이루어진다면, 온실가스 배출 저감 정책과 관련하여 보다 입체적이고, 구체적인 대안을 제시할 수 있을 것이다.

주1. 본 연구에서 경관지표 산출에 활용한 서울시 양천구(예시)의 토지피복 이미지를 통해 토지피복 자료의 구조를 확인할 수 있다. 이미지에서 나타난 100~700은 토지피복 대분류 7개 항목을 뜻한다. 구체적으로는 시가지·건조지역(100), 농업지역(200), 산림지역(300), 초지(400), 습지(500), 나지(600), 수역(700)으로 구성되어 있다.



주2. 상세한 경관지표 산출 과정은 다음과 같다. 우선 벡터 형태(Shp)로 제공하는 전국 토지피복 데이터를 래스터 데이터(Raster)로 변환하였다(Polygon to Raster). 이렇게 변환된 래스터 파일의 토지피복 유형에 정수값을 할당하였다(Reclassify). 토지피복 유형은 대분류 7가지로 나누었다. 경관지표는 패치(Patch), 클래스(Class), 경관(Landscape) 수준에서 산출할 수 있고, 앞에서 정수값을 할당한 대분류 7가지는 클래스 수준에 해당한다. 이처럼 토지피복 유형에 정수값을 할당하는 이유는 7가지 유형 중 세부적으로 주거, 공업, 상업, 문화·체육·휴양지역, 교통지역, 공공시설지역 등을 포함하는 시가지·건조지역(Developed Class) 및 이 지역을 포함하는 전국 시군구 행정경계를 중심으로 경관지표를 산출하기 위함이다. 이어 전국 229개 시군구 행정경계에 맞춰 래스터 파일을 자르고(Extract by Mask), 이렇게 자른 래스터 파일을 추출하였다(Export Raster). 여기까지의 전처리 과정은 ArcGIS Pro를 통해 진행하였다. 이와 같이 추출한 파일을 토대로 R 프로그램을 통해 Landscapemetrics 패키지를 활용해 각 시군구별로 경관지표를 산출하였다.

주3. 본 연구에서 활용한 '1인당 지방세 납부액' 자료(2018~2020년)를 활용해 그 값에 따라 정렬하여 상위 20개 시군구를 확인해 본 바, 세종시, 제주시, 이천시, 과천시, 화성시, 평택시 등이 공통적으로 나타났다. 이들 지역은 새롭게 개발된 행정 중심지, 대규모 산업단지가 위치한 곳으로 이사 혹은 신규 아파트 취득 등으로 취득세를 포함한 지방세수가 높을 가능성이 큰 곳이다. 특히 화성시의 2023년 세출결산을 확인해 본 결과, 화성시의 최근 5년간 세출 규모에서 '환경' 부문의 지출 비중이 13%가량으로 사회복지(33%)에 이어 높았다. 이러한 점을 보았을 때, 기업 일자리가 많은 화성시는 지방세 세입 규모가 크고(화성시의 최근 5년간 세입의 연평균 증가율 3.8%가량), 그 중 온실가스 배출 저감 정책 등 환경 부문에 지출하는 규모도 비교적 크다는 것을 알 수 있다.

인용문헌 References

1. 강창덕, 2011. “공간계량모형에 의한 서울시 에너지 소비 분석과 정책과제: 전력과 도시가스 소비를 중심으로”, 『서울도시연구』, 12(4): 1-22.
Kang, C.D., 2011. “Analysis on Energy Consumption and Its Policy Implication in Seoul with Spatial Econometrics: Focusing on Electricity and Gas Consumption”, *Seoul Studies*, 12(4): 1-22.
2. 권수현·김승원·강준모, 2016. “도시구성요소가 기후변화에 미치는 영향: 수도권지역의 이산화탄소 배출량을 중심으로”, 『한국도시설계학회지 도시설계』, 17(1): 117-134.
Kwon, S.H., Kim, S.W., and Kang, J.M., 2016. “The Effects of Urban Characteristics on Climate Change: Focused on Emission of Carbon Dioxide in Seoul Metropolitan Area”, *Journal of The Urban Design Institute of Korea Urban Design*, 17(1): 117-134.
3. 김경태·송재민, 2015. “도시 공간 특성이 교통에너지 소비에 미치는 영향”, 『한국지역개발학회지』, 27(2): 117-137.
Kim, K.T. and Song, J.M., 2015. “The Impact of Urban Spatial Form on Energy Consumption in the Transportation Sector”, *Journal of The Korean Regional Development Association*, 27(2): 117-137.
4. 김동하·강기연·손소영, 2016. “공간가중회귀 모형을 이용한 서

- 울시 에너지 소비에 따른 이산화탄소 배출 분석”, 『대한산업공학 회지』, 42(2): 96-111.
- Kim, D.H., Kang, K.Y., and Sohn, S.Y., 2016. “Spatial Pattern Analysis of CO₂ Emission in Seoul Metropolitan City Based on a Geographically Weighted Regression”, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 42(2): 96-111.
5. 김리영·서원석, 2011. “압축도시 특성이 지역별 교통에너지 소비에 미치는 영향 분석: 수도권·비수도권간의 차이를 중심으로”, 『한국지역개발학회지』, 23(1): 33-53.
 - Kim, L.Y. and Seo, W.S., 2011. “The Impacts of Compact City Characteristics on Transportation Energy Consumptions at Regional Level: The Difference between Sudokwon and Non-Sudokwon Areas”, *Journal of The Korean Regional Development Association*, 23(1): 33-53.
 6. 김병석·문태훈, 2011. “압축도시의 토지이용 특성이 이산화탄소 배출에 미치는 영향”, 『환경정책』, 19(2): 101-115.
 - Kim, B.S. and Moon, T.H., 2011. “A Study on the Effects of Land Use Characteristics of Compact City on CO₂ Emission”, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 19(2): 101-115.
 7. 김승남·이경환·안건혁, 2009. “압축도시 공간구조 특성이 교통에너지 소비와 대기오염 농도에 미치는 영향”, 『국토계획』, 44(2): 231-246.
 - Kim, S.N., Lee, K.H., and Ahn, K.H., 2009. “The Effects of Compact City Characteristics on Transportation Energy Consumption and Air Quality”, *Journal of Korea Planning Association*, 44(2): 231-246.
 8. 김우식·윤동근, 2023. “압축도시특성이 초미세먼지 농도에 미치는 영향 분석”, 『국토계획』, 58(2): 116-130.
 - Kim, W.S. and Yoon, D.K., 2023. “Examining the Impacts of Urban Compactness on Fine Particulate Matter Concentration in Korea”, *Journal of Korea Planning Association*, 58(2): 116-130.
 9. 김유진·변병설, 2012. “압축도시의 토지이용특성이 도로부문 온실가스 배출량에 미치는 영향: 교통수단 부담률의 매개효과 검증 을 중심으로”, 『한국지역개발학회지』, 24(1): 121-156.
 - Kim, Y.J. and Byun, B.S., 2012. “An Effects of Land Use Characteristics of Compact City on Road GHGs: Focus on Mediating Effects of Modal Share Rate”, *Journal of The Korean Regional Development Association*, 24(1): 121-156.
 10. 김종용·강승진, 2019. “한국의 지역별 가정부문 전력소비 결정요인 분석”, 『전기학회논문지 P』, 68(2): 61-68.
 - Kim, J.Y. and Kang, S.J., 2019. “An Analysis of Residential Electricity Consumption Factor at the Regional in Korea”, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers: P*, 68(2): 61-68.
 11. 김해지, 2024. “IEA의 세계 전력시장 분석과 전망(2023~2026년)”, 『세계 에너지시장 인사이트』, 24(5): 1-10.
 - Kim, H.J., 2024. “IEA’s World Electricity Market Analysis and Outlook(2023-2026)”, *World Energy Market Insight*, 24(5): 1-10.
 12. 노건기·이중호·박중규, 2016. “한국의 경제성장, 전력소비, CO₂ 배출 간 인과관계 분석”, 『신·재생에너지』, 12(S1): 34-41.
 - Roh, K.K., Lee, J.H., and Park, J.G., 2016. “An Empirical Analysis of the Causal Relations between Economic Growth, Electricity Consumption, and Carbon Dioxide Emissions in Korea”, *New & Renewable Energy*, 12(S1): 34-41.
 13. 노승철, 2014. “가구 부문의 에너지 소비 및 이산화탄소 배출구조 분석을 통한 온실가스 감축 방안에 관한 연구”, 『국토연구』, 81: 157-183.
 - Noh, S.C., 2014. “Analysis of Energy Consumption and CO₂ Emissions Structure in Household Sector”, *The Korea Spatial Planning Review*, 81: 157-183.
 14. 동아현·강정은, 2020. “효율성 분석을 활용한 지자체 에너지 소비에 영향을 미치는 도시특성 분석”, 『국토계획』, 55(4): 131-145.
 - Dong, A.H. and Kang, J.E., 2020. “Analysis of the Urban Characteristics Affecting Local Energy Consumption Using Efficiency Analysis”, *Journal of Korea Planning Association*, 55(4): 131-145.
 15. 문한솔·염재원·정주철, 2023. “야간 위성영상 기반 도시단위 탄소배출량 추정과 영향 요인 분석”, 『국토계획』, 58(5): 151-165.
 - Mun, H.S., Yeom, J.W., and Jung, J.C., 2023. “Estimating Carbon Emissions at Urban Scales by Nighttime Light Satellite Imagery and Analysis of Influencing Factors”, *Journal of Korea Planning Association*, 58(5): 151-165.
 16. 송기욱·남진, 2009. “압축형 도시특성요소가 교통에너지 소비에 미치는 영향에 관한 실증분석”, 『국토계획』, 44(5): 193-206.
 - Song, K.W. and 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.
 17. 송재민, 2021. “도시형태가 통행행태에 미치는 영향 메타분석”, 『국토계획』, 56(7): 103-114.
 - Song, J.M., 2021. “The Impact of Urban Form on Travel in Korea: A Meta Analysis”, *Journal of Korea Planning Association*, 56(7): 103-114.
 18. 신동원, 2022. “기후위기와 탄소중립도시의 과제”, 『국토』, 18-25.
 - Shin, D.W., 2022. “The Climate Crisis and the Challenge of Net-zero Cities”, *Planning and Policy*, 18-25.
 19. 양혜미·송재민, 2017. “에너지 소비특성에 따른 도시 유형화 및 유형별 특성 분석”, 『한국지역개발학회지』, 29(3): 113-133.
 - Yang, H.M. and Song, J.M., 2017. “Typology of Energy Consumption Patterns in Cities and Analysis of Their Characteristics by Type”, *Journal of The Korean Regional Development Association*, 29(3): 113-133.
 20. 오규식·구자훈·조창제, 2005. “도시형태 구성요소가 지역별 대기오염에 미치는 영향: 서울시를 사례로”, 『국토계획』, 40(3): 159-170.
 - Oh, K.S., Koo, J.H., and Cho, C.J., 2005. “The Effects of Urban Spatial Elements on Local Air Pollution”, *Journal of Korea Planning Association*, 40(3): 159-170.
 21. 이동성·문태훈, 2017. “도시특성과 기후특성이 지역 에너지사용량에 미치는 영향에 관한 연구”, 『한국지역개발학회지』, 29(1): 1-21.
 - Lee, D.S. and Moon, T.H., 2017. “The Impacts of Urban and Climate Characteristics on Regional Energy Consumptions”, *Journal of The Korean Regional Development Association*, 29(1): 1-21.
 22. 이희연·노승철, 2013. 『고급통계분석론-이론과 실습』, 교양: 문우사.

- Lee, H.Y. and Noh, S.C., 2013. *Advanced Statistical Analysis-Theory and Practice*, Goyang: Moonwoosa.
25. 임현진·정수관·원두환, 2013. “지구온난화가 가정부문 에너지 소비량에 미치는 영향 분석: 전력수요를 중심으로”, 『에너지경제 연구』, 12(2): 33-58.
Lim, H.J., Jung, S.K., and Won, D.H., 2013. “An Analysis of the Impact of Global Warming on Residential Energy Consumption: Focused on the Case of Electricity Consumption”, *Korea Energy Economic Review*, 12(2): 33-58.
 24. 장새움·염재원·정주철, 2021. “도시형태가 자연재해 피해에 미치는 영향에 관한 연구: Spatial 2SLS를 이용하여”, 『국토계획』, 56(2): 208-217.
Jang, S.W., Yeom, J.W., and Jung, J.C., 2021. “The Impact of Urban form on Damage of Natural Disaster: Using Spatial 2SLS Analysis Model”, *Journal of Korea Planning Association*, 56(2): 208-217.
 25. 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.
 26. 조용성, 2017. “전력산업의 온실가스 배출요인 분석 및 감축 방안 연구”, 『한국기후변화학회지』, 8(4): 357-367.
Cho, Y.S., 2017. “Decomposition Analysis of CO₂ Emissions of the Electricity Generation Sector in Korea using a Logarithmic Mean Divisia Index Method”, *Journal of Climate Change Research*, 8(4): 357-367.
 27. 최열·문설희·임하경, 2007. “도시특성 요소가 대기오염에 미치는 영향에 관한 연구: 패널모형을 이용하여”, 『국토계획』, 42(3): 191-202.
Choi, Y., Moon, S.H., and Yim, H.K., 2007. “Assesing the Impact of the Factors of Urban Characteristics on Air Pollution Using Panel Model”, *Journal of Korea Planning Association*, 42(3): 191-202.
 28. 허유경·강민규, 2022. “도시공간구조와 기상요인이 계절별 고농도 미세먼지 발생에 미치는 영향에 관한 연구”, 『국토계획』, 57(1): 145-160.
Hur, Y.G. and Kang, M.G., 2022. “The Effects of Urban Spatial Structure and Meteorological Factors on the High Concentration of Fine Dust Pollution”, *Journal of Korea Planning Association*, 57(1): 145-160.
 29. Bibri, S.E., Krogstie, J., and Kärrholm, M., 2020. “Compact City Planning and Development: Emerging Practices and Strategies for Achieving the Goals of Sustainability”, *Developments in the Built Environment*, 4: 100021.
 30. Breheny, M., 1995. “The Compact City And Transport Energy Consumption”, *Transactions of the Institute of British Geographers*, 20(1): 81-101.
 31. Cervero, R. and Kockelman, K., 1997. “Travel Demand and the 3Ds: Density, Diversity, and Design”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(3): 199-219.
 32. Chhetri, P., Han, J.H., Chandra, S., and Corcoran, J., 2013. “Mapping Urban Residential Density Patterns: Compact City Model in Melbourne, Australia”, *City, Culture and Society*, 4(2): 77-85.
 33. Croissant, Y. and Millo, G., 2008. “Panel Data Econometrics in R: The Plm Package”, *Journal of Statistical Software*, 27(2): 1-43.
 34. Ding, G., Guo, J., Pueppke, S.G., Yi, J., Ou, M., Ou, W., and Tao, Y., 2022. “The Influence of Urban Form Compactness on CO₂ Emissions and Its Threshold Effect: Evidence from Cities in China”, *Journal of Environmental Management*, 322: 116032.
 35. Ewing, R. and Cervero, R., 2010. “Travel and the Built Environment: A Meta-analysis”, *Journal of the American Planning Association*, 76(3): 265-294.
 36. Fang, C., Wang, S., and Li, G., 2015. “Changing Urban Forms and Carbon Dioxide Emissions in China: A Case Study of 30 Provincial Capital Cities”, *Applied Energy*, 158: 519-531.
 37. Falahatkar, S. and Rezaei, F., 2020. “Towards Low Carbon Cities: Spatio-temporal Dynamics of Urban Form and Carbon Dioxide Emissions”, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18: 100317.
 38. Gordon, P. and Richardson, H.W., 1989. “Gasoline Consumption and Cities: A Reply”, *Journal of the American Planning Association*, 55(3): 342-346.
 39. Gu, Z.H., Sun, Q., and Wennersten, R., 2013. “Impact of Urban Residences on Energy Consumption and Carbon Emissions: An Investigation in Nanjing, China”, *Sustainable Cities and Society*, 7: 52-61.
 40. Hao, Y., Peng, H., Temulun, T., Liu, L.Q., Mao, J., Lu, Z.N., and Chen, H., 2018. “How Harmful Is Air Pollution to Economic Development? New Evidence from PM_{2.5} Concentrations of Chinese Cities”, *Journal of Cleaner Production*, 172: 743-757.
 41. Han, S., Sun, B., and Zhang, T., 2020. “Mono-and Polycentric Urban Spatial Structure and PM_{2.5} Concentrations: Regarding the Dependence on Population Density”, *Habitat International*, 104: 102257.
 42. Hesselbarth, M.H., Sciaini, M., With, K.A., Wiegand, K., and Nowosad, J., 2019. “Landscapeometrics: An Open-Source R Tool to Calculate Landscape Metrics”, *Ecography*, 42(10): 1648-1657.
 43. Hong, S., Hui, E.C.M., and Lin, Y., 2022. “Relationship between Urban Spatial Structure and Carbon Emissions: A Literature Review”, *Ecological Indicators*, 144: 109456.
 44. IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland: IPCC.
 45. IPCC, 2018. *Global Warming of 1.5°C: an IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

46. IPCC, 2021. "Summary for Policymakers", In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 3-32, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
47. Jung, M.C., Park, J., and Kim, S., 2019. "Spatial Relationships between Urban Structures and Air Pollution in Korea", *Sustainability*, 11(2): 476.
48. Kim, T. and Kim, H., 2013. "Analysis of the Effects of Intra-urban Spatial Structures on Carbon Footprint of Residents in Seoul, Korea", *Habitat International*, 38: 192-198.
49. Lee, S. and Lee, B., 2014. "The Influence of Urban Form on GHG Emissions in the US Household Sector", *Energy Policy*, 68: 534-549.
50. Lee, J.H. and Lim, S., 2018. "The Selection of Compact City Policy Instruments and Their Effects on Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions in the Transportation Sector: The Case of South Korea", *Sustainable Cities and Society*, 37: 116-124.
51. Liu, Y., Song, Y., and Song, X., 2014. "An Empirical Study on the Relationship between Urban Compactness and CO₂ Efficiency in China", *Habitat International*, 41: 92-98.
52. McGarigal, K., 2017. "Landscape Metrics for Categorical Map Patterns", Lecture Notes.
53. Miao, L., 2017. "Examining the Impact Factors of Urban Residential Energy Consumption and CO₂ Emissions in China—Evidence from City-level Data", *Ecological indicators*, 73: 29-37.
54. Muñoz, I. and Dominguez, A., 2020. "The Impact of Urban Form and Spatial Structure on per Capita Carbon Footprint in US Larger Metropolitan Areas", *Sustainability*, 12(1): 389.
55. Newman, P.W. and Kenworthy, J.R., 1989. "Gasoline Consumption and Cities", *Journal of the American Planning Association*, 55(1): 24-37.
56. 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.
57. Shi, K., Xu, T., Li, Y., Chen, Z., Gong, W., Wu, J., and Yu, B., 2020. "Effects of Urban Forms on CO₂ Emissions in China from a Multi-perspective Analysis", *Journal of Environmental Management*, 262: 110300.
58. Stone Jr, B., Mednick, A.C., Holloway, T., and Spak, S.N., 2007. "Is Compact Growth Good for Air Quality?", *Journal of the American Planning Association*, 73(4): 404-418.
59. Wang, S., Wang, J., Fang, C., and Li, S., 2019. "Estimating the Impacts of Urban Form on CO₂ Emission Efficiency in the Pearl River Delta, China", *Cities*, 85: 117-129.
60. Wang, Y., Chen, L., and Kubota, J., 2016. "The Relationship between Urbanization, Energy Use and Carbon Emissions: Evidence from a Panel of Association of Southeast Asian Nations (ASEAN) Countries", *Journal of Cleaner Production*, 112: 1368-1374.
61. Wilson, B., 2013. "Urban Form and Residential Electricity Consumption: Evidence from Illinois, USA", *Landscape and Urban Planning*, 115: 62-71.
62. Yi, Y., Wang, Y., Li, Y., and Qi, J., 2021. "Impact of Urban Density on Carbon Emissions in China", *Applied Economics*, 53(53): 6153-6165.
63. 환경부 온실가스종합정보센터, 2023, 12.10. 읽음. <https://www.gir.go.kr/>
Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea, Accessed December 10, 2023. <https://www.gir.go.kr/>

Date Received 2025-05-16
 Reviewed(1st) 2025-06-15
 Date Revised 2025-07-04
 Reviewed(2nd) 2025-07-30
 Date Accepted 2025-07-30
 Final Received 2025-09-26