

도시특성이 건축물의 탄소배출에 미치는 영향에 관한 연구: 서울시 424개 행정동에 대한 공간회귀분석의 적용

The Impact of Urban Characteristics on Carbon Emissions of Buildings in Seoul: Application of Spatial Regression Analysis

조항훈* · 김흥순**

Hang Hun Jo* · Heung Soon Kim**

Abstract

The aim of the study is to analyze urban characteristics that affect carbon emissions of buildings. The analysis was conducted at the level of 424 administrative districts in Seoul. The main variables used in the analysis were energy consumption and carbon emissions of buildings published in the Seoul Metropolitan Government's energy information platform 2021. It was found that carbon emissions per unit building were high in Jongno, Gangnam, Guro, and Mok-dong. A regression analysis using the spatial lag model (SLM) identifies that the variables that affect the carbon emissions of buildings were; commercial, educational, business and industrial facility variables as built environment factor; number of residents; traffic volume, number of bus routes and number of subway stations as transportation facilities factors; and environmental factors such as green area and river area.

Keywords: Urban Characteristics, Building Energy, Carbon Emission, Spatial Lag Model (SLM)

1. 서론

서울시 자료에 따르면 서울시에서 배출되는 온실가스의 91%는 에너지 사용에 의해 배출되며, 부문별 에너지 배출에 있어서는 건물의 에너지 사용에 따른 탄소배출량이 전체의 68.8%로 가장 높은 비중을 차지하는 것으로 나타났다(서울특별시, 2021). 이는 탄소배출을 줄이기 위해서는 건축물의 에너지 사용과 그에 따른 탄소배출 메커니즘에 대한 상세한 분석이 선행되어야 함을 시사한다. 더 나아가, 지속 가능한 저탄소 도시로 나아가기 위해서는 건물의 탄

소배출을 고려하는 것이 필수적인 요소 중 하나로 강조되고 있다(신완선 외, 2019).

이러한 배경에서 지금까지 건축물의 에너지 사용과 탄소배출의 원인을 파악하고 이를 경감하고자 하는 다수의 시도가 있었으나 분석자료와 방법에 있어서 일정한 한계가 있었던 것이 사실이다. 따라서 현상에 대한 보다 적실한 이해를 위해서는 건축물 차원을 넘어 도시적 차원에서 분석을 실시하고, 추정 데이터가 아닌 실제 사용 데이터를 활용하여 분석을 실시함으로써 분석결과의 신뢰성과 타당성을 제고할 필요성이 제기된다.

*한양대학교 도시공학과 박사수료(주저자: hh0228@hanyang.ac.kr)

**한양대학교 도시공학과 교수(교신저자: soon@hanyang.ac.kr)

본 연구의 목적은 도시의 어떠한 특성이 건축물의 에너지 배출과 탄소배출에 영향을 미치는지를 파악하는 것이다. 본 연구에서는 이를 통해 에너지 절감과 탄소배출 저감을 위한 정책적 시사점을 제시하고자 한다.

연구의 공간적 범위는 서울특별시 424개 행정동이며, 시간적 범위는 2021년이다. 데이터는 서울시 에너지정보 플랫폼에서 구득한 행정동별 건물의 전기 및 가스 에너지 사용량에 따른 탄소배출량이다. 본 연구에서는 2021년의 12개월 월별 자료를 합산하여 에너지 사용량과 탄소배출량을 산출하였다.

2. 선행연구 고찰

2.1 건물에너지 및 탄소배출 관련 선행연구

본 연구에서는 도시 내 건축물의 에너지 사용 및 탄소배출 관련 선행연구들을 검토하였다. 건물에너지의 사용은 직접적으로 탄소배출로 연결되므로 이들 연구들은 동일한 맥락의 연구로 볼 수 있다.

먼저 건물의 에너지 사용에 대한 영향요인을 분석한 연구로 김기중 외(2017), 조규민·손동욱(2019), 김기중·이창효(2019), 이수진 외(2019), 오희진(2020), 조항훈 외(2022), Jo and Kim(2022)의 연구를 검토하였다.

김기중 외(2017)는 2015년 서울시의 건물에너지 소비에 미친 영향요인의 소득격차별 차이를 분석하였다. 건물 요소와 도시계획 요소를 영향요인으로 고려하였으며, 도시계획 요소 중 수계율, 도로율, 고도, 건물 수, 주거지역 변수가 유의미한 영향을 미친 것으로 파악되었다. 김기중·이창효(2019)의 연구에서는 단위면적당 냉방에너지 소비량에 영향을 미치는 요인을 도출하기 위해 감마회귀분석을 실시하였다. 고려된 독립변수로는 건물의 물리적 특성과 주변환경 특성, 통제변수로 대기온도와 공시지가가 사용되었다. 분석 결과, 판매·업무시설의 에너지 소

비량이 가장 많았으며, 건물의 용도에 따라 에너지 소비 형태가 다르게 나타남을 확인하였다. 또한, 공원 및 수계와 같은 주변 환경요인이 유의미한 변수로 도출되었다.

이수진 외(2019)의 연구에서는 단위면적당 건물 에너지 소비량을 2개 수준으로 나누어 다층모형분석을 실시하였다. 1수준에서는 필지단위의 건물에 대하여 건물의 물리적 요인에 대한 분석을 실시하였으며, 2수준에서는 인구요인과 경제요인, 환경요인을 고려하여 분석을 실시하였다.

조규민·손동욱(2019)은 서울 시내 일부 공동주택을 대상으로 물리적, 사회적, 환경적 요소가 건물의 전기 에너지와 가스 에너지에 미치는 영향에 대해 공간회귀분석을 통해 확인하였다. 해당 연구는 여름철의 전기에너지, 겨울철의 가스 에너지만을 대상으로 분석을 실시했으며, 서울 시내 전체 주거건물이 아닌 300세대 이상 공동주거만을 대상으로 했다는 한계가 있다.

오희진(2020)의 연구에서는 400개의 상설표본가구 자료를 이용하여 여름철(6~8월)과 겨울철(12~2월)의 에너지 사용량에 미치는 영향요인을 도출하였다. 종속변수인 에너지 소비량을 열량으로 환산하여 종속변수로 설정하였으며, 사회적 요인과 물리적 요인을 독립변수로 고려하였다.

조항훈 외(2022)는 계절적 요인을 고려하여 건물 에너지에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 사용된 종속변수는 건물의 전기에너지 사용량이며, 3단계로 나누어 위계적 회귀분석을 실시하였다. 1단계에서는 물리·환경 요인, 2단계에서는 사회·경제 요인, 3단계에서는 계절적 요인인 지표온도와 계절더미 변수를 순차적으로 투입하여 분석을 실시하였다. 사용된 대부분의 변수가 유의미한 것으로 확인되었으며, 계절더미의 경우 모든 계절이 유의미하게 도출되어 계절적 영향이 있음을 확인하였다.

Jo and Kim(2022)은 서울시의 행정동을 대상으

로 건물의 전기 에너지 사용에 영향을 미치는 도시특성 요인을 도출하였다. 종속변수인 에너지 사용에 있어서 공간적 자기상관성이 있음을 확인하고, 이를 고려한 분석방법으로 다중스케일 지리가중회귀모형(Multiscale Geographically Weighted Regression, MGWR)을 적용하여 분석을 실시하였다. 독립변수로는 인구 및 가구 요인, 사회·경제적 요인, 건물특성 요인, 환경 요인이 사용되었다. 분석 결과 여름과 겨울철이 유의미한 요인으로 파악되었다.

건물의 에너지 사용에 대한 선행연구들은 공통적으로 물리적 요인에 따라 영향력이 달라지기 때문에 건물용도와 특성을 고려하는 것이 중요하다는 점과 환경 요인인 녹지면적, 수계면적, 대기온도, 계절성 등을 고려해야 한다는 시사점을 제시하고 있다.

탄소배출과 관련된 연구로는 김인현 외(2011), 장명준 외(2012), 정민선 외(2015), 고승욱 외(2023)를 검토하였다. 먼저, 김인현 외(2011)는 500m 격자단위로 구성된 이산화탄소 배출량에 영향을 미치는 도시공간 계획요소를 분석하였다. 분석 결과, 용적률이 가장 크게 영향을 미치는 변수로 확인되었으며, 다음으로 자동차 등록 대수의 영향이 큰 것으로 확인되었다. 상업·업무지역 면적은 유의미한 양의 영향력을 보이는 것으로 나타났으며, 주거지역 면적 변수는 유의미한 음의 변수로 파악되었다.

장명준 외(2012)는 도시규모를 구분하여 탄소배출량에 영향을 미치는 도시특성 요소를 확인하였다. 도시특성 요소로는 지역규모, 도시계획, 자연환경, 경제산업, 교통 특성이 독립변수로 사용되었다. 도시규모에 따라 탄소배출에 영향을 미치는 요인과 영향력이 다르게 나타남을 확인하였다. 특히 도로면적, 자동차 등록대수, 교통수준 등이 탄소배출을 유발하는 주요인으로 파악되었다. 또한, 도시공원의 경우 면적이 넓을수록 탄소배출에 저감효과가 있는 것으로 확인되었다.

정민선 외(2015)는 수도권 60개 시·구를 대상으로

로 탄소배출과 도시특성요소 간의 상관관계를 분석하였다. 상이한 행정구역 면적을 감안하여 단위면적당 탄소배출량을 적용하였으며, 가정, 교통, 상업, 산업 부문의 석유와 전기에너지 소비량을 독립변수로 사용하였다. 분석 결과, 녹지면적의 비율이 증가할수록 탄소배출이 감소하는 것을 확인하였으며, 가정 부문에서 배출되는 이산화탄소의 양이 교통, 상업, 산업부문보다 현저히 낮은 것을 확인하였다.

탄소배출 관련 선행연구들은 공통적으로 도시특성 요소 중 건물용도와 건물용도 혼합도가 영향을 미친다는 것을 확인하였으며, 공간구조에 따라 배출 정도가 달라질 수 있음을 확인하였다.

2.2 선행연구의 시사점 및 한계점

선행연구에 대한 검토를 통해 건축물의 에너지 사용 및 탄소배출과 관련하여 도시 내 사회경제적, 물리적, 환경적 요인을 종합적으로 고려해야 함을 확인하였다. 분석 결과 건물/토지이용 용도, 토지이용 복합도, 용적률 및 도로면적, 계절변수 등이 유의미한 변수로 확인되었다. 건축물 용도에서는 상업·업무의 경우 에너지 소비와 탄소 배출량이 많은 반면, 주거는 적은 것으로 나타났으며 공원은 탄소배출을 저감시키는 기능을 수행하는 것으로 나타났다.

선행연구들의 한계는 전수자료가 아닌 샘플 또는 공동주택 등 일부 데이터를 활용하거나(김기중 외, 2017; 김기중·이창효, 2019; 조규민·손동욱, 2019; 오희진, 2020), 실제 측정된 자료가 아닌 추정 자료, 즉 법정동 자료를 행정동이나 격자로 변환하거나 도시 전체 데이터를 환산하여 사용하는 경우들이 있었다(김인현 외, 2011; 장명준 외, 2012; 정민선 외, 2015; 오희진, 2020; 조호훈 외, 2022). 또한 데이터에 있어서도 에너지원 전체나 연중자료를 고려하지 않고 일부만을 이용하는 경우가 있었다(김기중 외, 2017; 김기중·이창효, 2019; 이수진 외, 2019; 조규민·손동욱, 2019).

본 연구에서는 선행연구의 시사점과 한계를 고려하여 서울시에서 제공하는 2021년 에너지 소비 자료를 통해 심층적인 분석을 실시하고자 한다. 기존 연구들 중 다수는 공간데이터를 활용했음에도 공간적 자기상관성을 고려하지 않았으며, 이에 따른 분석결과의 왜곡이 발생할 가능성이 있다. 이에 본 연구에서는 공간적 자기상관성을 고려한 공간통계 분석을 진행함으로써 신뢰할 수 있는 분석 결과를 도출하고자 한다. 또한, 앞선 연구들에서 주요하게 사용되었던 변수들을 종합하여 분석을 실시하기 때문에 포괄적인 시각에서 건물의 탄소배출을 해석할 수 있을 것으로 본다.

2.3 연구의 가설설정

앞서 살펴본 선행연구의 결과에 근거하여 주요 영향요인을 선정하였으며, 본 연구에서 확인하고자 하는 주요 요인을 고려하여 가설을 설정하였다. 건물의 탄소배출에 영향을 미치는 주요 요인에서는 건조 환경 요인, 인구요인, 환경요인을 주요 요인으로 선정하였다.

건물에서 발생하는 탄소배출의 특징은 건물의 용도에 따라 에너지 사용이 달라질 것으로 보인다. 즉, 건물 용도에 따라 탄소배출에 미치는 영향이 달라짐을 의미하며 각 용도별 영향력을 고려하여 상업, 교육, 업무, 공업시설이 양(+)¹⁾의 영향력을 미칠 것으로 가설을 설정하였다. 반면, 주거용도의 건물에 대해서는 사용되는 종속변수 및 대상에 따라 영향력이 다르게 나타난 것으로 확인되었다. 에너지 사용 및 배출량만을 본 연구에서 주거용도의 영향력이 양(+)²⁾의 영향력으로 도출된 연구가 있었으나 (김인현 외, 2011), 밀도 개념인 단위면적당 사용량

및 배출량을 고려한 연구에서는 주거용도의 영향력은 음(-)의 영향력을 미치는 것으로 나타났다(정재원 외, 2015; 김기중 외, 2017).

인구 요인 변수는 지역 내 인구에 따라 탄소배출에 양(+)³⁾의 영향력을 미치는 것으로 확인되었으며, 주요 변수 중 하나인 것으로 확인되었다. 이에 본 연구에서도 탄소배출에 양(+)⁴⁾의 영향을 미칠 것으로 설정하였다.

환경 요인의 녹지면적 비율과 하천면적 비율은 도시 내 탄소배출이 가능한 건물, 도로, 시설들의 비율을 줄여주고, 도시의 공기 순환 및 탄소 흡수 등 공간을 환기시키는 역할을 한다. 이에 본 연구에서는 녹지면적 비율과 하천면적 비율은 탄소배출에 대해 음(-)⁵⁾의 영향력을 미칠 것으로 설정하였다.

3. 분석의 틀

3.1 변수 선정 및 자료 구축

본 연구에서는 2021년 서울시 행정동별 에너지 사용량에 따른 탄소배출량을 종속변수로 하여 분석을 실시하였다. 본 연구에서의 분석단위는 행정동으로 각 행정동별 면적이 상이하기 때문에, 단위면적당 탄소배출량으로 변환하여 분석을 실시하였다.

먼저 데이터의 구축을 위해서 서울시내 개별 건물에서 사용되는 에너지 및 탄소배출량에 대한 자료를 서울시 에너지 플랫폼(現 서울시에너지정보¹⁾)을 통해 구축·구축하였다. 이를 통해 2021년 서울시의 월별, 행정동별 전기 및 가스 에너지 사용량²⁾과 이에 따른 탄소배출량을 구축하였다.

도시 내 탄소배출량에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위해 선행연구의 분석결과를 토대로 독립변수

1) 서울시 에너지 플랫폼은 서울시의 전기, 가스, 수도, 열(지역난방)에너지에 대한 사용량 및 온실가스 배출량 데이터를 제공하며, 이외에도 서울시 에너지 계획에 따른 목표 및 정보를 제공하고 있다.

2) 서울시의 경우 2021년 기준으로 건물에서 사용된 전체 탄소배출량 중 65.8%가 전기에너지에 의한 것이었으며, 32.3%가 가스 에너지에 의한 것으로 파악되어 전체 건물에너지 사용량 중 98.1%에 해당하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 전기에너지와 가스에너지만을 분석에 고려하고자 한다.

Table 1. Variables Employed by Previous Studies

Variables	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	This Study
Gross Floor Area		●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Building Use			●		●		●	●	●	●	●			●	●
LUM(BUM)														●	●
Building Height				●		●	●		●	●	●				
Age of Building		●	●		●	●	●	●	●	●					
Population	●	●	●			●		●	●	●		●			●
Personal Characteristics		●			●										
Household Characteristics	●	●	●	●	●	●		●	●	●					
Official Land Prices			●	●		●	●	●	●	●				●	●
Income		●								●			●		●
Trips			●								●	●	●		●
Road Area		●	●								●	●			●
Public Transit	●	●	●											●	●
Green Area			●	●		●	●	●	●	●	●	●	●		●
River Area			●	●		●	●	●	●	●	●	●			●
Temperature						●	●	●	●	●					●

a: Noh and Lee (2013), b: Noh (2014), c: Jung et al. (2015a), d: Cho and Sohn (2019), e: Oh (2020), f: Kim et al. (2018), g: Kim and Yi (2019), h: Lee et al. (2019), i: Jo et al. (2022), j: Jo and Kim (2022), k: Kim et al. (2011), l: Jang et al. (2012), m: Jung et al. (2015b), n: Go et al. (2023)

를 구성하였다. Table 1은 독립변수의 도출을 위해 검토된 선행연구들을 정리한 것이다. 본 연구에서는 선행연구 검토를 통해 건조환경 요인, 인구 요인, 경제 요인, 교통시설 요인, 환경 요인의 5개 요인으로 독립변수를 구성하였다.

먼저, 건조환경 요인에 해당되는 변수로서 건물의 물리적 특성인 용도별 연면적(또는 건축면적)을 고려할 수 있는데(노승철, 2014; 조규민·손동욱, 2019; 김기중 외, 2017; 이수진 외, 2019), 이들 변수는 대부분의 선행연구에서 유의미한 변수로 도출된 바 있다. 이와 함께 지역의 활성화 정도를 반영하기 위해 인구밀집지역 또는 상업시설 밀집지역의 변수를 고려하였다.

다음으로 인구요인으로서 상주인구(주민등록인구), 연령별 인구, 종사자 인구수, 가구수, 가구원 수

등 다양한 인구관련 변수들이 사용된 것을 확인하였다(노승철·이희연, 2013; 정재원 외, 2015; 김기중 외, 2017; 조항훈 외, 2022). 이전 연구에서는 생활인구 데이터를 확보하기 어려운 관계로 주민등록인구를 이용하였으나, 최근에 진행된 연구들에서는 주로 생활인구가 사용된 것을 확인하였다. 생활인구는 “서울시 공공데이터와 KT가 통신데이터를 이용하여 추계한 서울의 특정 지역, 특정 시점에 존재하는 모든 인구(서울특별시, 2023)”를 나타내는 데이터이며, 기존의 상주인구 뿐만 아니라 활동 중인 유동인구까지 모두 포함한 인구를 말하기 때문에 보다 정확한 인구의 영향요인을 고려하기 위해 생활인구를 사용하였다.

경제적 요인과 관련해서는 공시지가와 소득이 활용되었다(정재원 외, 2015; Jo and Kim, 2022). 앞선

연구들에서는 공시지가 및 소득이 높을수록 해당 지역에서의 에너지 사용량이 늘어난다는 결과가 제시되었다. 따라서 본 연구에서는 행정동별 공시지가와 행정동별 평균 소득금액을 고려하였다.

교통시설 요인에 있어서는 통행량, 도로면적, 대중교통이 고려되었다(정재원 외, 2015; 김인현 외, 2011; 장명준 외, 2012). 건물 에너지 사용에 따른 탄소배출만을 고려하는 본 연구에서는 통행에 따른 탄소배출은 고려하지 않으나 인간활동을 반영하는 변수로서 통행량을 고려하였다. 또한 도시구조를 반영하는 특성 변수로서 도로면적을 고려하였으며, 지역의 접근성 변수로서 대중교통과 관련된 버스정류장, 지하철역 수를 교통시설 요인으로 고려하였다.

환경 요인에서는 녹지면적, 하천면적, 기온과 같은 변수가 주로 사용되는 것을 확인하였다(정재원 외, 2015; 조규민·손동욱, 2019; Jo and Kim, 2022). 대기온도 및 표면온도는 인구 활동과 냉난방시설 이용에 영향을 미치는 변수로 고려된다. 따라서, 본 연구에서는 녹지면적 및 하천면적과 함께 난방 및 냉방, 그리고 옥외활동에 영향을 미치는 최저기온과 최고기온을 변수로 선정하였으며, 추가로 기상이변 현상으로 폭우 현상이 잦아지는 현실을 반영하여 최대 강우량을 변수로 선정하였다.

건조환경 요인 중 건물의 용도별 연면적에 해당하는 자료는 건축데이터 민간개방시스템에서 제공하는 2021년 건축물대장을 통해 구축하였다. 본 연구에서는 해당 변수 구축을 위해 주용도의 연면적을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 건물의 주용도는 주거, 상업, 교육, 업무, 공업 용도이다. 주거의 경우, 단독주택과 공동주택을 포함하는 모든 주거용도 건축물을 대상으로 하였으며, 상업용도에는 제1, 2종 근린생활시설과 판매시설을 포함하였다. 공업용도는 공장과 창고시설을 포괄하여 자료를 구축하였다. 본 연구에서는 단위면적당 탄소배출량에 대한 영향을 고려하기 때문에, 각 건물용도별 연면적을 행정

동의 면적으로 나눈 용도별 면적비율 자료로 최종 구축하였다. 각 용도별 건물면적을 산출한 후, 해당 용도들에 대한 혼합도에 따른 영향력을 고려하기 위해 건물용도혼합도(Index of Building Use Mix, BUM)를 변수로 추가하였다.

주요지역 면적 관련 자료는 서울열린데이터광장에서 제공하는 2021년 서울시 선정 '서울시 주요 50 장소' 자료를 토대로 구축하였다. 이 자료는 실시간 인구현황 및 한국관광공사의 자료를 바탕으로 서울시내 명소 50곳을 선정한 것이다. 해당 자료는 Q-GIS를 이용해 면적을 산출하여 구축하였으며, 행정동 면적 대비 비율로 최종 구축하였다.

인구요인에서는 서울열린데이터광장에서 제공하는 2021년 생활인구 자료를 구득하여 자료를 구축하였다. 본 연구에서는 2021년 1년치의 생활인구 데이터의 총합을 행정동 단위로 산출하여 구축한 후, 단위면적당 생활인구 수(명/m²)로 최종 산출하였다.

경제 요인에서는 소득과 공시지가에 대한 자료를 구득 및 구축하였다. 행정동별 소득자료는 서울특별시에서 운영하는 우리마을가게 상권분석서비스에서 제공하는 분기별 소득자료를 이용하였으며, 본 연구에서는 각 분위별 소득 값의 평균을 소득자료로 구축하였다. 공시지가 자료는 서울열린데이터광장에서 제공하는 개별공시지가자료를 통해 구축하였다. 서울시의 필지 단위의 토지에 대한 공시지가 자료로 제공되며, 본 연구에서는 면적보간을 통해 행정동의 평균 공시지가 가격으로 변환하여 자료를 구축하였다. 소득자료와 공시지가 자료는 지역에 따라 그 편차가 크기 때문에 자료의 정규성 확보를 위해 자연로그를 취한 값으로 변환하여 구축하였다.

교통시설 요인으로는 도로면적, 통행량, 버스노선 수, 지하철역 수에 대한 자료를 구득 및 구축하였다. 먼저, 도로면적의 경우, View T 3.0에서 제공하는 네비게이션 수치지도 Level 6에 해당하는 서울시의 세부도로망과 통행량을 바탕으로 도로면적을 산출하

Table 2. Definitions and Sources of Data Employed

	Variables	Definition(Unit)	Source	
Dependent	Carbon Emission of Buildings	Carbon emissions per unit area converted from electricity and gas energy consumption for each administrative district (tCO ₂ /m ²)	Seoul Energy Information Platform	
	Residential	Gross floor area of residential buildings (m ²) /administrative district area (m ²)	Private Open System of Building Data	
Built Environment	Commercial	Gross floor area of commercial buildings (m ²) /administrative district area(m ²)		
	Educational	Gross floor area of educational buildings (m ²) /administrative district area (m ²)		
	Business	gross floor area of office buildings (m ²) /administrative district area (m ²)		
	Manufacturing	Gross floor area of manufacturing buildings (m ²) /administrative district area (m ²)		
	BUM	$BUM = - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \times \ln (P_i))}{\ln (n)}$ n= no. of building Uses, Pi= i use area / total area		-
	Hot Place	Hot place area (m ²) /administrative district area (m ²)		
Independent Variables	Population	Living Population /administrative district area (person/m ²)	Open Data Platform of Seoul	
	Economies	Official Land Price		ln (official land price of an administrative district)
		Income	ln (average income of an administrative district)	Commercial District Analysis of Seoul
		Trip	Estimated no. of trips per an administrative district(10k trips)	Open Data Platform of Seoul
	Transportation Facilities	Road Area	Road area (m ²) /administrative district area (m ²)	View T 3.0
		Bus Route	Number of bus routes passing through an administrative district (no.)	Open Data Platform of Seoul
		Subway Station	Number of subways stations in an administrative district (no.)	
	Environm-ent	Green Area	Green area (m ²) /administrative district area (m ²)	Environmental Geographic Information Service
		River Area	Watershed area (m ²) /administrative district area (m ²)	
		Highest Temperature	Annual highest temperature by an administrative district (°C)	Open Portal of Climate Data
Lowest Temperature		Annual lowest temperature by an administrative district (°C)		
Maximum Rainfall		Monthly maximum rainfall (mm)		

였으며, 통행량 자료도 동일한 방법으로 구축하였다.

버스노선 수 자료는 서울열린데이터광장에서 제공하는 버스노선 별 정류장 정보를 통해 행정동별 노선 수 변수를 구축하였다. 지하철역 수는 서울열린데이터광장에서 제공하는 지하철 위치정보를 이용하여 자료를 구축하였다. 동일한 역명을 가진 환승역의 경우, 하나의 역이 아닌 노선의 수로 보정하여 산출하였다.

환경 요인으로는 녹지면적, 하천면적, 최고기온, 최저기온, 최대강우량 변수를 구득 및 구축하였다. 녹지면적과 하천면적은 환경공간정보서비스에서 제공하는 토지피복지도를 이용해 행정동별 녹지면적 및 하천면적으로 산출하였다. 다음으로 최고기온, 최저기온, 최대강우량에 대한 변수는 기상청에서 운영하는 기상자료개방포털의 방재기상관측(AWS) 자료를 제공받아 구축하였다. 서울시의 경우 서울시 내 주요 지역에 설치된 30개의 기상관측장비를 통해 자료를 관측·산출하고 있는데, 본 연구에서는 행정동 기준의 데이터가 필요하므로, 해당 설치 지점을 기준으로 GIS 보간법을 통해 데이터를 산출하였다. 본 연구에서는 해당 지점에서 멀어질수록 영향력이 낮아지는 IDW(Inverse Distance Weighting) 보간 방법을 사용하여 자료를 산출하였다.

최종적으로 건조환경 요인, 인구 요인, 경제 요인, 교통시설 요인, 환경 요인의 5개 요인에 대한 19개의 변수를 본 연구의 분석단위인 2021년 서울시 행정동에 맞는 데이터 셋으로 구축하였다. 각 변수의 정의 및 출처는 Table 2와 같다.

3.2 연구방법

3.2.1 공간적 자기상관성

공간적 자기상관성은 공간자료의 분석에 있어 인접한 위치의 관측치가 멀리 떨어진 위치의 관측치보다 유사한 값을 가지거나 특성을 보일 가능성이 높다는 것을 의미한다. 하지만 일반적인 OLS 모형에서

는 독립변수가 서로 독립적이며, 오차항의 값도 서로 독립적이라는 가정이 전제되는데, 이는 이러한 공간적 자기상관성과 일치하지 않는 가정이다. 따라서 공간적 자기상관성을 갖는 데이터에 대해 일반선형회귀모형을 사용할 경우, 모형의 설명력이 과대추정되고 모형의 추정계수 및 유의확률도 신뢰할 수 없게 되는 문제가 발생한다(이희연·노승철, 2012).

따라서 공간적 자기상관성을 고려하여 모형을 구축하려면 공간적 자기상관성을 검정하고 해결해야 한다. 공간자기상관성 검정에는 Moran's I 검정이 일반적으로 사용된다. Moran's I 값은 공간자료의 자기상관성 정도를 측정하는 통계량으로, -1에서 1 사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 강한 양의 공간적 자기상관성을 가지며, -1에 가까울수록 강한 음의 공간적 자기상관성을 가짐을 의미한다.

3.2.2 공간회귀모형

본 연구에서 사용하는 종속변수 및 독립변수는 모두 현실 공간에서 구축된 데이터로 실제 공간에서 작용하는 자료의 공간적 의존성과 이질성을 배제하기 어려운 특징이 있다. 따라서, 이러한 공간을 기반으로 한 자료를 사용할 경우, 종속변수의 관측치들이 서로 독립적이지 않을 뿐 아니라 오차항의 값도 서로 독립적이지 않을 수 있다. 이는 기존의 일반선형회귀모형의 가정에 위배되는 것으로, 이를 제어하기 위해 OLS가 아닌 공간모형의 적용이 필요하다(이희연·노승철, 2012).

이러한 공간모형으로는 공간 가중치 행렬을 기반으로 공간적 자기상관성을 통제하는 회귀모형인 공간회귀모형(Spatial Regression Model) 혹은 공간 자기회귀모형(Spatial Autoregressive Model)이 있으며, 종속변수의 시차(Lag)를 활용한 공간시차모형(Spatial Lag Model)과 오차항의 공간적 자기상관성을 고려한 공간오차모형(Spatial Error Model)이 있다.

공간시차모형은 종속변수의 공간적 자기상관성이 존재할 때, OLS 모형의 대안으로 사용할 수 있는 반면, OLS 모형의 오차항에서 공간적 자기상관성이 나타나는 경우에는 이에 대한 대안으로 공간오차모형을 사용할 수 있다. 적합한 회귀모형을 선택하기 위해서는 먼저 OLS 회귀모형의 결과를 통해 회귀모형의 적합성을 검증해야 한다. 모형의 적합성은 산출된 OLS 회귀모형의 오차항에 대해 정규성, 등분산성, 공간적 독립성이 나타나는지를 통해 확인할 수 있다. 오차항의 비정규성은 Jarque-Bera를 통해 검증하며, 이분산성에 대한 검증은 Breusch-Pagan과 Koenker-Bassett을 통해 확인할 수 있다. 해당 검증에서 비정규성과 이분산성이 존재한다면 이를 해결하기 위해 공간회귀모형을 선택하여야 한다.

어떤 공간회귀모형을 채택할지는 종속변수 및 오차항의 공간적 자기상관에 대한 가설검정 방법인 라그랑지 승수검정(Lagrange Multiplier Test, LM Test)을 통해 판단한다. LM 검정은 종속변수와 오차항에 공간적 자기상관이 존재하지 않는다는 귀무가설을 검정하는 방법으로, 그 값을 최대우도 추정(Maximum Likelihood Estimator)을 통해 산출한다. LM 검정 결과에서 LM-Lag, LM-Error 값의 결과에 따라 모형을 선택하게 되며, LM-Lag가 유의미하면 공간시차모형을, LM-Error가 유의미하게 나타나면 공간오차모형을 채택하게 된다. LM-Lag와 LM-Error가 모두 유의미할 경우, Robust LM-Lag와 Robust LM-Error 값의 검정을 통해 유의미한 모형을 최종적으로 선택하게 된다. 모형의 설명력은 R^2 값과 AIC, SC, 로그우도 등을 통해 파악할 수 있다. R^2 값이 증가할수록, AIC 값과 SC 값이 감소할수록, 로그우도 값이 증가할수록 모형의 설명력이 좋다고 할 수 있다.

4. 실증분석

4.1 기술통계분석

Table 3은 각 변수의 기초통계량을 정리한 것이다. 종속변수인 서울시 건축물의 탄소배출량은 평균 $0.059\text{tCO}_2/\text{m}^2$ 으로 나타났다. Fig. 1은 서울시 424개 행정동의 전기와 가스 에너지 사용에 따른 탄소배출량을 지도화한 것이다.

건조환경 요인으로 구축한 주거, 상업, 교육, 업무 용도에 따른 행정동 면적당 연면적 비율의 평균 값에 있어서는 주거(0.76)가 가장 크게 나타났고, 교육(0.05)이 가장 작게 나타났다. 건물용도복합도(BUM)의 평균값은 0.564였으며, 행정동 당 주요지역 면적 비율의 평균값은 0.27로 나타났다.

인구 요인의 행정동 면적당 생활 인구수의 평균값은 205명으로 나타났으며, 최대값(713명)과 최소값(16명)의 편차가 비교적 크게 나타났다. 경제 요인으로 사용된 소득과 공시지가 변수에 대해서는 모두 자연로그를 취한 값을 변수로 사용하였는데, 평균값은 각각 15.019와 15.214로 나타났다.

교통시설 요인에 있어서 통행량이 가장 많았던 행정동은 316.11(만trip)로 나타났으며, 가장 적은 행정동은 0.537(만trip)로 나타났다. 버스노선 수가 가장 적었던 행정동은 노선이 1개였으며, 가장 노선이 많은 행정동은 374개의 노선이 지나가는 것으로 나타났다. 버스노선 수의 행정동별 평균값은 79.856으로 나타났다. 환승역을 중복 계산한 지하철역 수의 경우 가장 많은 행정동이 7개로 나타났으며, 행정동별 지하철역의 평균 개수는 0.946으로 나타났다.

환경 요인은 녹지면적, 하천면적, 최고기온, 최저기온, 최대강우량을 변수로 사용하였다. 녹지면적과 하천면적 역시 행정동 면적 당 면적비율로 산출하였다. 평균값에 있어서, 녹지면적의 경우 0.25로 나타났으며, 하천 면적의 경우 0.13으로 나타났다. 최고기온의 평균은 37.08도였으며, 최저기온의 평

Table 3. Descriptive Statistics

		Variables(unit)	N	Mean	SD	Min	Max	VIF
Independent Variables	Dependent Variables	Carbon Emission of Buildings (tCO ₂ /m ²)	424	0.059	0.035	0.002	0.275	-
	Built Environment	Residential (m ² /m ²)	424	0.76	1.30	0.00	22.74	1.331
		Commercial (m ² /m ²)	424	0.17	0.14	0.00	0.94	2.706
		Educational (m ² /m ²)	424	0.05	0.06	0.00	0.52	1.141
		Business (m ² /m ²)	424	0.11	0.23	0.00	2.34	4.806
		Manufacturing (m ² /m ²)	424	0.13	0.28	0.00	2.34	3.871
		BUM (-)	424	0.56	0.17	0.09	0.96	1.852
		Hot Places (m ² /m ²)	424	0.27	0.58	0.00	4.01	1.396
	Population	Living Population (person/m ²)	424	204.93	95.48	15.57	712.70	2.976
	Economic	ln (Official Land Prices)(-)	424	15.02	0.27	14.62	15.75	2.125
		ln (Income)(-)	424	15.21	0.46	14.14	16.93	2.617
	Transportation	No. of Trips (10 k trips)	424	0.08	0.03	0.01	0.18	1.884
		Area of Roads (m ² /m ²)	424	31.82	41.81	0.54	316.11	1.987
		Bus Routes (number)	424	79.86	51.59	1.00	374.00	1.699
		Subway Stations (number)	424	0.95	1.17	0.00	7.00	1.481
		Green Area (m ² /m ²)	424	0.25	0.18	0.01	0.86	3.472
	Environment	River (m ² /m ²)	424	0.13	0.36	0.00	2.49	1.790
		Highest Temperature (°C)	424	37.08	0.56	34.73	38.53	2.126
		Lowest Temperature (°C)	424	-18.37	0.82	-22.76	-16.36	1.794
		Maximum Rainfall (mm)	424	221.21	18.46	173.31	271.23	1.328

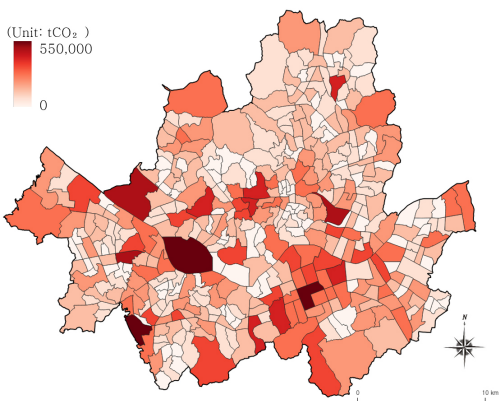


Fig. 1. Carbon Emissions by Building Energies

균은 -18.37도로 나타났다. 최대강우량의 평균값은 221.2mm였는데, 최댓값은 271.23mm, 최솟값은

173.31mm로 나타나서 서울시 내에서도 행정동에 따라 편차가 큰 것을 확인하였다.

추가적으로 해당 변수들에 대한 다중공선성 검정을 위해 OLS 분석을 실시하여, 분산팽창요인(VIF)을 확인하였다. 모든 변수에서 VIF값이 5 이하로 도출되어 다중공선성에 대한 문제는 없는 것으로 확인되었다.

4.2 공간 회귀분석

4.2.1 공간적 분포 및 공간적 자기상관성

본 분석을 실시하기에 앞서, 종속변수인 단위면적당 건물의 공간적 분포를 살펴보고 공간적 자기상관성 검정을 실시하였다. 본 연구에서는 GeoDa(ver.

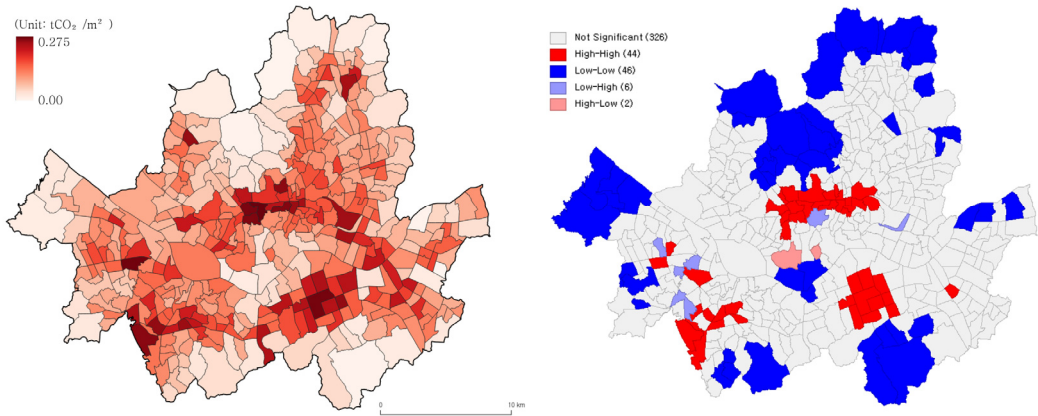


Fig. 2. Carbon Emission Distribution by Buildings (Left) and Its LISA (Right)

1.20.0.8)와 QGIS(ver.3.20.2), ArcGIS(ver. 10.1)를 이용하여 공간분석을 진행하였다. 전역적 공간자기상관성은 Global Moran's I를 통해 파악하였으며, 국지적 공간자기상관성은 Local Moran's I를 활용한 LISA(Local Indicators of Spatial Association) 분석을 통해 파악하였다.

건물의 단위면적당 탄소배출량의 공간적 분포를 살펴본 결과 종로와 강남 일대의 주도심 지역에서의 배출량이 높았으며, 구로와 목동 등 일부지역에서 높게 배출되는 행정동이 확인되었다(Fig. 2). 반면, 단순 탄소배출량이 많았던 여의도와 상암 일대의 경우 단위면적당 탄소배출량으로 전환하였을 때 상대적으로 수치가 낮아짐을 확인할 수 있었다. 공간적 자기상관성 검정을 위해 Moran's I를 확인한 결과, 0.364의 유의미한 양의 공간적 자기상관성이 나타났다. 이어서 국지적 자기상관성을 확인하기 위해 LISA분석을 실시하였다. 앞서 나타난 분포와 유사하게, 종로, 강남 일대에서 H-H(High-High)의 경향을 나타내는 지역이 도출되었으며, 구로와 신도림 일대의 공업, 상업지역 또한 H-H를 나타냈다. 이와 함께 행정동의 면적이 넓어 단위면적당 탄소배출량이 적은 서울 외곽주변의 행정동들에서 L-L(Low-Low) 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 2).

Table 4. LM Test Result by Carbon Emissions of Buildings

Test	Value
Moran's I (Error)	2.122**
LM (Lag)	5.1213**
Robust LM (Lag)	3.0204*
LM (Error)	2.1226
Robust LM (Error)	0.0217
Lagrange Multiplier (SARMA)	5.143**

*p<0.1, **p<0.05

4.2.2 건물의 탄소배출량에 대한 영향요인 분석

전술한 모형의 공간 자기상관성 문제를 해결하기 위해 공간가중행렬 모형인 공간시차모형(SLM)과 공간오차모형(SEM) 중 LM 검정을 통해 보다 타당한 모형을 선택하고자 LM 검정을 실시한 결과, SLM의 LM(Lagrange Multiplier)값과 Robust LM 값이 모두 유의미하게 나타난 반면, SEM의 LM값은 유의미하게 도출되지 않아 최종적으로 SLM을 적용하여 분석을 실시하였다. LM 검정의 결과는 Table 4와 같다.

OLS와 SLM 간의 설명력을 살펴보면, SLM의 R²가 0.734, AIC는 683.84, SC는 763.89로 모든 설명력 지표가 OLS보다 SLM이 우수한 것으로 나타났다

Table 5. Analysis of Urban Factors Affecting Buildings' Carbon Emissions

Variables	OLS	SLM		
		Std. β	B	
Spatial Effects	ρ (rho)	-	0.121	
	Intercept	0.0210	-0.001	0.0370
Built Environment	Residential	-0.0004	-0.010	-0.0003
	Commercial	0.0592***	0.204***	0.0572***
	Educational	0.0623***	0.114***	0.0588***
	Business	0.0273***	0.172***	0.0254***
	Manufacturing	0.0423***	0.327***	0.0411***
	BUM	-0.0094	-0.055	-0.0097
	Hot Spot	0.0001	0.033	0.0001
Population	Living Population	0.0001***	0.215***	0.0001***
Economies	Income	-0.0024	0.002	-0.0023
	Official Land Price	-0.0031	-0.047	-0.0044
Transportation Facilities	Road Area	-0.0084	-0.011	-0.0088
	No. of Trips	0.0029**	0.071**	0.0022**
	No. of Bus Routes	0.0000*	-0.065**	0.0000**
	No. of Subway Stations	0.0019**	0.056*	0.0019*
	Green Areas	0.0000*	-0.156***	-0.000002***
Environment	River Areas	0.0000**	-0.092***	-0.000004***
	Highest Temperature	0.0015	0.003	0.0015
	Lowest Temperature	-0.0003	-0.023	-0.0005
	Maximum Rainfall	0.0001*	0.043	0.0001
	R ²	0.728	0.734	
	AIC	686.90	683.84	
	SC	767.90	763.89	
	Log-Likelihood	-323.45	-320.1	
	Breusch-Pagan	175.79***	-	
	Koenker-Bassett	26.79	-	
	Jarque-Bera	2626.01***	-	

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

(Table 5). SLM을 기준으로 상업, 교육, 업무, 공업, 생활인구, 통행량, 지하철역 수가 유의미한 양의 결과를 나타냈으며, 버스노선 수, 녹지면적, 하천면적에서 유의미한 음의 결과가 나타나서 최대강우량을 제외하고는 OLS와 유사한 결과가 도출되었다.

세부적으로 살펴보면 건조환경 요인에서 상업, 교육, 업무, 공업 시설의 밀도가 높을수록 단위면적당 탄소배출량이 늘어나는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 앞서 설정한 본 연구의 가설과 부합하는 것으로 확인되었다. 서울시 에너지정보에서 제공되는 자

료에 따르면, 서울시 전체에서 가장 에너지를 많이 사용하는 업체는 서울대학교로 교육시설이 1위를 차지하였으며, 2위가 연구소, 3위가 업무시설 순으로 나타났다. 또한, 상위권에 포함된 건물의 대다수가 상업, 교육, 업무시설인 것으로 확인되어 분석결과의 타당성을 확인할 수 있다. 교육용도에 비해 공업용도의 표준화 계수가 높게 나타났는데, 이는 큰 규모의 대학교가 위치한 행정동의 면적이 다른 행정동에 비해 상대적으로 넓어서, 단순 탄소배출량은 많지만 단위면적당 탄소배출량은 상대적으로 적은 것에 기인하는 결과로 이해할 수 있다. 반면, 공업용 건축물의 경우 일부 행정동에 집중되어 있으며, 공장 및 창고를 유지·관리하기 위해 전기 및 가스 에너지를 지속적으로 사용하기 때문에 탄소배출에 큰 영향력을 미침을 확인할 수 있었다.

한편, 주거용 건물에서 많은 양의 건물에너지가 사용되고 있음에도 주거용도 변수는 유의미하지 않게 나타났다. 이러한 결과는 단위면적당 탄소배출량을 고려한 정재원 외(2015)와 김기중 외(2017)의 결과와도 동일하게 나타났다. 이는 건축물 중 주택의 비중이 높지만, 본 연구에서 사용된 변수가 단위면적을 고려한 밀도단위이기 때문에, 다른 용도에 비해 단위면적당 탄소배출량이 적은 주거용 건축물이 유의미하지 않게 나타난 것으로 보인다.

인구요인 변수인 생활인구 밀도는 유의미한 양의 영향력을 갖는 것으로 확인되었으며, 표준화계수에 있어서 공업시설 다음으로 큰 영향력을 갖는 것으로 파악되었다. 이는 본 연구에서 설정한 가설 중 인구요인의 가설을 채택하는 결과라고 할 수 있다. 또한, 장명준 외(2012), 조항훈 외(2022)에서도 서울시와 같은 대도시에서의 인구요인은 탄소배출에 큰 영향을 나타내는 것으로 확인되었으며, 상주인구가 아닌 생활인구를 사용하였기 때문에 해당 지역에 위치한 인구의 영향요인이 고려된 것으로 해석할 수 있다. 도시 내 건물에서 사용되는 에너지의 원인으로 인구

의 생활 및 경제활동에 따른 결과라고 해석할 수 있으며, 인구가 많은 행정동일수록 에너지 수요가 많아지기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 추정된다.

교통시설 요인에서 유의미하게 도출된 변수는 통행량과 버스노선 수, 지하철역 수로 확인되었다. 먼저, 통행량은 해당 행정동으로의 유입 및 유출, 이동과 관련된 변수로서 통행량이 많아질수록 많은 사람이 체류할 가능성이 높아진다. 따라서 통행량의 효과는 앞서 언급한 생활인구와 유사한 결과라고 할 수 있다. 다음으로 지하철 역에서도 유의미한 양의 영향력이 확인되었다. 일반적으로 지하철역이 많이 위치한 행정동의 경우, 상업, 업무 중심지인 경우가 많고, 이동에 대한 수요가 많은 행정동이라고 할 수 있으며, 역세권 주변의 건물들의 연면적이 크다는 특징이 확인되었다. 반면, 버스노선 수는 탄소배출량에 대해 음의 영향력을 나타내는 것으로 파악되었다. 버스정류장은 로컬 이동수단을 대표하는 교통시설로 지하철역과 달리 서울시에 전역적으로 위치하고 있기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것으로 보인다.

환경 요인에서는 녹지면적과 하천면적이 유의미한 음의 영향력을 갖는 것으로 나타났으며, 앞서 설정한 연구의 가설을 채택하는 것으로 나타났다. 녹지면적과 하천면적은 도시 내 건물면적의 비율을 감소시키며 여름철 온도를 낮춤으로써 냉방에 필요한 에너지 사용을 줄일 수 있다. 또한, 녹지와 물이 이산화탄소를 흡수하고 저장하는 기능을 수행하기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 해석할 수 있다.

결론적으로 건물의 탄소배출량에 영향을 미치는 변수는 건조환경요인의 상업, 교육, 업무, 공업시설 변수와 인구요인의 생활인구, 교통시설 요인의 통행량, 버스노선 수, 지하철역 수, 환경요인의 녹지면적과 하천면적으로 파악되었다. 이중 버스 노선수와 녹지 및 하천 면적을 제외하고는 모두 탄소배출량을 증대시키는 요인으로 파악되었다.

5. 결론

본 연구는 건축물에서 발생하는 탄소배출량에 영향을 미치는 도시특성 요인을 분석하였다. 2021년 서울시 에너지정보 플랫폼에서 구득한 건축물에서 사용된 에너지와 탄소배출량을 이용하여 424개 행정동 단위의 분석을 실시하였다. 종로와 강남, 구로와 목동 등지에서 단위 건물면적당 탄소배출량이 큰 것으로 나타났다. 공간시차모형(SLM)을 이용하여 회귀분석을 실시한 결과, 건물의 탄소배출량에 영향을 미치는 변수는 건조환경요인의 상업, 교육, 업무, 공업시설 변수와 인구요인의 생활인구, 교통시설 요인의 통행량, 버스노선 수, 지하철역 수, 환경요인의 녹지면적과 하천면적으로 파악되었다.

본 연구의 시사점은 다음과 같다. 첫째, 주도심 지역의 탄소배출량이 크므로 이들 지역에 대한 체계적인 관리가 필요하다. 둘째, 에너지 사용과 탄소배출의 주원인은 인간활동이므로, 에너지 효율적인 인간 활동이 이루어지도록 유도하고 지원할 필요가 있다. 이를 위해 팬데믹 시기에 활성화된 재택근무와 비대면 업무의 강화, 도심 주차요금 인상, 자전거 도로 확충, 스마트 모빌리티 이용의 권장 및 지원, 계절별 근무복장의 권장 등의 방안을 고려할 수 있다. 또한, 개인별로 효율적인 에너지사용을 실시할 수 있도록 주기적인 교육을 실시할 필요가 있다. 셋째, 에너지 소비가 큰 대학을 대상으로 한 에너지 효율화 방안이 마련되어야 한다. 장시간 에너지를 사용하는 학교 건물에 대해 전력효율이 우수한 조명을 사용하거나 건물의 냉난방 효율을 높일 수 있는 시설로의 교체를 권장한다. 넷째, 주거용 건물의 경우 에너지 사용량이 적게 나타났지만, 산업용 건물은 대용량의 에너지를 사용하는 경향이 있었다. 따라서, 이러한 대용량 에너지 사용을 관리하는 데 도움이 되는 스마트그리드와 같은 인프라 관리 시스템을 도입하여 전력소비를 통한 탄소배출을 집중적으로 관리할 필요

가 있다. 다섯째, 도시 내 녹지면적과 수계면적을 증대시킬 수 있는 방안이 모색되어야 한다. 이를 위해 개발(정비)사업 시행 시 공개공지와 소공원 조성에 대한 인센티브를 강화할 필요가 있으며, 에너지 소비를 저감시킬 수 있는 옥상 및 벽면녹화를 권장할 필요가 있다. 여섯째, 제로에너지 건축 기법을 적극적으로 활용할 필요가 있다. 태양광패널, 풍력터빈, 냉난방 단열 등 건물의 에너지 효율성 향상을 통해 건물의 탄소배출을 감소시킬 수 있다. 뿐만 아니라, 건축물 재활용 및 재생가능한 자원을 사용하기 때문에 탄소배출 이외에 환경적인 부분에서도 크게 효과를 볼 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구의 한계는 팬데믹으로 인해 실내활동이 많아지면서 건축물 에너지 사용이 증가했을 가능성이 있으나 이를 반영하지 못했다는 점과 지역별로 상이한 영향요인이 존재할 수 있는데, 이를 파악하기 위한 국지적인 분석을 수행하지 못했다는 점이다.

참고문헌

- 고승욱·신학철·이승일(2023), "API 기반 통근통행 자료를 활용한 서울시 행정동별 승용차 탄소배출량 추정: 네트워크 특성과 공간구조정책 특성을 중심으로", 「국토계획」, 58(1): 91~103.
- Go, S., H. Shin, and S. Lee (2023), "Estimation of Passenger Private Car Carbon Emissions by Administrative District Using API-based Commuter Data : Focusing on Network and Spatial Structure Policy Characteristics", *Journal of Korea Planning Association*, 58(1): 91~103. (in Korean)
- 김기중·김동준·이창효·이승일(2018), "도시공원의 규모와 형태별 주변지역의 지표온도·건물에너지소비저감 영향범위 분석 연구", 「한국지역개발학회지」, 30(2): 155~176.
- Kim, K., D. Kim, C. Yi, and S. Lee (2018), "An Analysis on Influence Range of Reducing the Surface Temperature and Building Energy Consumption by Urban Park Size and Shape", *Journal of The Korean Regional Development Association*, 30(2):

- 155~176. (in Korean)
3. 김기중·안영수·이승일(2017), “소득격차를 고려한 조건에서 건물과 도시계획 요소가 건물에너지 소비에 미치는 영향요인 분석: 서울시 8월 전기사용량을 중심으로”, 「국토계획」, 52(5): 253~267.
 4. 김기중·이창효(2019), “건물용도별 냉방에너지 소비량차이에 관한 연구”, 「서울도시연구」, 20(2): 91~103.
Kim, K. and C. Yi (2019), “A Study on the Difference of Cooling Energy Consumption by Building Use”, *Seoul Studies*, 20(2): 91~103. (in Korean)
 5. 김인현·오규식·정승현(2011), “도시패턴과 탄소배출량의 관계분석”, 「한국공간정보학회지」, 19(1): 61~72.
Kim, I., K. Oh, and Jung, S. (2011), “An Analysis of Relationship between Carbon Emission and Urban Spatial Patterns”, *Spatial Information Research*, 19(1): 61~72. (in Korean)
 6. 노승철(2014), “가구 부문의 에너지 소비 및 이산화탄소 배출구조 분석을 통한 온실가스 감축 방안에 관한 연구”, 「국토연구」, 81: 157~183.
Noh, S. (2014), “Analysis of Energy Consumption and CO₂ Emissions Structure in Household Sector”, *The Korea Spatial Planning Review*, 81: 157~183. (in Korean)
 7. 노승철·이희연(2013), “가구 부문의 에너지 소비량에 영향을 미치는 요인 분석”, 「국토계획」, 48(2): 295~312.
Noh, S. and H. Lee (2013), “An Analysis of the Factors Affecting the Energy Consumption of the Household in Korea”, *Journal of Korea Planning Association*, 48(2): 295~312. (in Korean)
 8. 서울특별시(2021), 「2050 서울시 기후행동계획」, 서울: 서울특별시.
 9. 신완선·최성호·박진철·송용우(2019), “스마트 저탄소도시를 위한 기초연구”, 「LHI 저널」, 12(1): 19~23.
 10. 오희진(2020), “계절별 가구 에너지 소비량 영향요인 분석: 서울시를 중심으로”, 「한국환경정책학회 학술대회논문집」, 97~98.
Oh, H. (2020), “Seasonal Determinants of Household Energy Consumption: the Case of Seoul, South Korea”, *Korea Environmental Policy and Administrations Society*, 97~98. (in Korean)
 11. 이수진·김기중·이승일(2019), “건물과 지역요인을 고려한 서울시 건물에너지 소비 실증분석”, 「국토계획」, 54(5): 129~138.
Lee, S., K. Kim, and S. Lee (2019), “An Empirical Analyzing of Seoul Building Energy Consumption Considering Building and Local Factors”, *Journal of Korea Planning Association*, 54(5): 129~138. (in Korean)
 12. 이희연·노승철(2012), 「고급체계분석론: 이론과 실습」, 서울: 문우사.
 13. 장명준·신예철·최형선·김태호(2012), “도시규모를 고려한 탄소배출량과 도시특성요소와의 관계 연구”, 「도시행정학보」, 25(4): 57~87.
Jang, M., Y. Shin, H. Choi, and T. Kim (2012), “The Analysis of Relationship Between Urban Size and CO₂ Emissions Considering Urban Characteristics”, *Journal of The Korean Urban Management Association*, 25(4): 57~87. (in Korean)
 14. 정민선·조희선·변병설(2015a), “도시특성요소가 온실가스 배출에 미치는 영향: 수도권 지역을 중심으로”, 「국토지리학회지」, 49(3): 297~306.
Jung, M., H. Cho, and B. Byun (2015a), “Effects of Urban Characteristics on Green House Gas Emissions from Seoul Metropolitan Area”, *The Geographical Journal of Korea*, 49(3): 297~306. (in Korean)
 15. 정재원·이창효·이승일(2015b), “서울시 행정동별 가구의 에너지 소비량에 영향을 미치는 요인의 통합적 분석”, 「국토계획」, 50(8): 75~94.
Jung, J., C. Yi, and S. Lee (2015b), “An Integrative Analysis of the Factors Affecting the Household Energy Consumption in Seoul”, *Journal of Korea Planning Association*, 50(8): 75~94. (in Korean)
 16. 조규민·손동욱(2019), “건축물 에너지 소비량에 영향을 미치는 건축물 특성 및 도시환경 요소 분석”, 「대한건축학회 학술발표대회 논문집」, 39(2): 292~295.
Cho, G. and D. Sohn (2019), “An Analysis of the Effects of Building characteristics and Urban Environmental Factors on Building Energy Consumption”, *Autumn Annual Conference of AIK*, 39(2): 292~295. (in Korean)
 17. 조항훈·오창호·박예진·신민경·안진영·김홍순(2022), “계절적 요인을 고려한 건물 전기에너지 사용에 영향을 미치는 요인 분석: 서울특별시를 대상으로”, 「국토지리학회지」, 56(2): 113~124.
Jo, H., C. O, Y. Park, M. Shin, J. Ahn, and H. Kim

- (2022), "Analyzing Determinants of the Electricity Consumption of Buildings Considering Seasonal Factors", *The Geographical Journal of Korea*, 56(2), 113~124. (in Korean)
18. Jo, H. and H. Kim (2022), "Analyzing Electricity Consumption Factors of Buildings in Seoul, Korea Using Mutiscale Geographically Weighted Regression", *Buildings*, 12(5): 678~696.
19. 서울특별시(2023), "서울생활인구", 2023.7.11. 읽음. <https://data.seoul.go.kr/dataVisual/seoul/seoulLivingPopulation.do>.

요약

본 연구는 건축물에서 발생하는 탄소배출량에 영향을 미치는 도시특성 요인을 분석하였다. 2021년 서울시 에너지정보 플랫폼에서 구득한 건축물에서 사용된 에너지와 탄소배출량을 이용하여 424개 행정동 단위의 분석을 실시하였다. 종로와 강남, 구로와 목동 등지에서 단위 건물면적당 탄소배출량이 큰 것으로 나타났다. 공간시차모형(SLM)을 이용하여 회귀분석을 실시한 결과, 건물의 탄소배출량에 영향을 미치는 변수는 건조환경요인의 상업, 교육, 업무, 공업시설 변수와 인구요인의 생활인구, 교통시설 요인의 통행량, 버스노선 수, 지하철역 수, 환경요인의 녹지면적과 하천면적으로 파악되었다.

주제어: 도시특성, 건물 에너지, 탄소배출량, 공간시차모형(SLM)
