

탄소공간지도의 발전방향 연구:

미국, 영국, 일본, 한국 탄소공간지도 사례를 바탕으로*

A Study of Development Direction of Carbon Spatial Map: Comparative Analysis from the United States, United Kingdom, Japan, and South Korea

김민서** · 정승현***

Minseo Kim · Seunghyun Jung

요약: 탄소중립 현황을 지도화한 미국, 영국, 일본 사례를 바탕으로 구축 배경, 법적 위상, 구축 항목, 운영 기관, 활용 분야에 대한 비교 분석하여 향후 국내 탄소공간지도 고도화를 위한 발전 방향과 시사점을 도출하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다. 첫째, 탄소공간지도의 활용도 제고와 운영의 지속성 확보를 위해서는 법제도적 기반이 필요하다. 특히, 일본과 한국은 탄소중립을 위한 법령과 정책을 토대로 지도를 구축 및 운영하고 있다. 둘째, 현재 구축된 지도들은 건물과 수송을 중심으로 구축되어 있어 활용도 제고를 위해서는 폐기물, 농업 등의 분야로 확대가 필요하다. 셋째, 탄소공간지도 구축 및 운영의 지속성을 위한 운영과 사업모델이 필요하다. NGO 파트너십에 의해 운영되는 미국은 자원 확보에 제약이 있어 시스템 갱신에 한계가 나타나고 있다. 넷째, 탄소공간지도의 성능 개발과 고도화는 단순히 탄소 배출 상황을 지도화하는 것뿐만 아니라 도시계획, 교육, 시민참여 등 다양한 분야에 적용할 필요가 있다.

핵심주제어: 온실가스, 탄소중립, 넷제로, 탄소중립도시, 탄소중립도시계획

Abstract: This study compared the construction background and items, legal status, operating institutions, and utilization fields of carbon spatial maps in the U.S., U.K., and Japan, which have been used to map carbon neutrality status. Key findings suggest that advancing domestic carbon spatial mapping requires clear legal targets, as seen in Japan and South Korea. To support carbon-neutral urban planning, these maps should include a comprehensive greenhouse gas (GHG) inventory, covering sectors such as waste and agriculture, beyond buildings and transportation. Additionally, sustaining these maps necessitates a government-led operational organization, as the U.S. model faces resource challenges with NGO partnerships. Lastly, to enhance the efficacy of carbon spatial mapping, applications should extend beyond emissions tracking to urban planning, education, and civic engagement.

Key Words: GHG, Net-Zero, Carbon-Neutral City, Carbon-Neutral Urban Planning

* 이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2023-00242291).

** 주저자, 한국건설기술연구원 박사후연구원

*** 교신저자, 한국건설기술연구원 연구위원

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

파리협정(2015)에서는 산업화 이전 대비 지구의 평균온도 상승을 1.5℃로 억제하는 것을 목표로 하고 있으며, 이에 따라 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 「지구온난화 1.5℃ 특별 보고서」를 승인하고 2050년까지 탄소중립 달성이라는 목표를 제시하였다. 유럽기후 재단과 독일연방정부의 후원으로 국제 기후변화 목표 및 정책을 평가하는 Climate Action Tracker의 조사 결과에 따르면, 2023년까지 세계 137개국이 탄소중립을 선언한 것으로 나타났다. 우리나라도 국제 사회의 이러한 노력에 발맞추어 2020년 10월 탄소중립을 선언하고, 12월 「2050 탄소중립 추진전략」을 발표하였다. 또한, 2021년 9월 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(약칭, 탄소중립기본법)」를 제정·공포하여 탄소중립을 실현하기 위한 법적 기반을 마련하는데 이르렀다.

탄소중립을 실현하는 데 있어서 도시의 중요성이 무엇보다 높게 인식되고 있다. UN에서 발간된 「전 세계 지속가능개발에 관한 보고서(United Nations, 2019)」에 따르면, 경제활동 및 에너지 소비에 따른 온실가스 배출은 주로 도시지역에서 집중적으로 발생하며 이는 전 세계 면적의 2%에 해당한다. 또한, 세계 주요 도시의 약 15%가 전체 온실가스 배출량의 52%를 차지하고 있다(Wei et al., 2021). 이와 관련하여, 도시공간에서의 탄소중립 대책을 위해 도시공간구조를 탄소중립에 유리한 형태로 조성하고 탄소중립 요소를 도시 계획에 반영하고자 하는 연구와 논의가 진행되기도 하였다(건축공간연구원, 2022; 건축공간연구원, 2023)

우리나라는 2021년 제정된 탄소중립기본법을 통해 지자체의 탄소중립 기본계획 수립 및 시행의 의무를 강화하는 등 지역주도의 탄소중립 추진을 본격화하고 있다. 그러나, 실제 지자체 차원에서 탄소중립도시계획을 수립하는데 필요한 온실가스 배출량과 흡수량과 같은 정보 구축이 미흡한 실정이었다. 이에 국토교통부에서는 2023년 6월 공간 단위 탄소배출과 흡수 정보를

지도화한 '탄소공간지도'¹⁾를 구축하고 일반에 공개하였다. 그러나 현 시스템은 아직 초기 단계로 향후 탄소중립도시계획 수립 지원을 위해서 주요 기능을 고도화하고 개선할 필요가 있으며, 정책활용도의 제고를 위한 구체적인 활용 방안도 마련되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 국내외의 유사 관련 사례를 비교·분석하여 향후 탄소공간지도의 발전 방향을 제시하였다.

2. 연구 방법 및 절차

본 연구의 사례 분석은 문헌 연구 중심으로 수행하였다. 선행연구에서 탄소중립도시와 탄소중립 도시계획 및 지원체계 관련 논의를 검토하였다. 그리고 이를 바탕으로 미국, 일본, 영국에서 실제 구축되어 운영 중인 공간 단위의 탄소 현황 지도를 비교·분석하였다. 분석 항목은 구축 배경, 법적 위상, 구축 항목, 운영 기관, 활용 분야로 구분하였으며, 사례별 비교를 통해 국내 '탄소공간지도' 고도화를 위한 시사점을 도출하였다.

II. 선행연구 검토

1. 탄소중립도시 개념

현재 세계 인구의 절반이 도시에 거주하고 있으며 2050년이 도래하기 전에 도시인구는 전체 약 70%로 증가할 전망이다(United Nations, 2014; Rydin et al., 2012). 기후변화에 관한 정부 간 협의체인 IPCC에서 발간한 기후변화에 관한 보고서에 따르면(IPCC, 2013), 에너지 사용과 관련된 대부분의 온실가스 배출은 화석연료가 연소할 때 발생하고, 인간 활동은 지난 150년간 대기 중 온실가스 증가의 거의 모든 원인이 되었다. 세계 에너지의 60~80%가 소비되고 전체 온실가스 배출량 70% 이상이 발생하는 도시는 기

1) 본 연구에서는 비교 대상 사례 시스템의 명칭을 국내에서 사용되는 용어인 '탄소공간지도'로 통칭함.

후 위기와 탄소²⁾배출에 크게 영향을 미치고는 것이다(GEA, 2012; IEA, 2012; Bettencourt et al., 2007; Nieuwenhuijsen, 2020).

탄소중립(carbon-neutral)에 대한 학술적 개념 정의가 아직 명확하지 확립되어 있지 않으나(Huovila et al., 2022), 일반적으로 인간 활동에 의한 대기 중 온실가스 농도를 감소시키고 흡수량을 증가시켜 순 배출량이 제로 '0' 가 되도록 하는 것을 말한다(United Nations, 2015).

탄소중립도시의 개념은 새로운 것이 아니다. 도시를 환경친화적으로 개선하고 사회적으로는 정의롭고 경제적으로는 경쟁력 있게 건설한다는 관점에서, 과거부터 지속된 도시 패러다임의 연속으로 보는 시각이 지배적이다(Breuste et al., 2020; Seto et al., 2021). 오늘날 탄소중립도시에 대한 담론은 전원도시 및 에코 시티와 같은 과거의 도시 모델뿐만 아니라 스마트시티, 저탄소 도시와 같은 현대의 개념과도 밀접하게 연결된다. 특히, 2000년대 온실가스 배출량 감축에 중점을 두고 추진된 저탄소 도시 개념은 현재의 탄소중립도시와 유사하다(송재민 외, 2022). 2021년 제정된 「탄소중립기본법」³⁾에서는 탄소중립도시를 '탄소중립 관련 계획 및 기술 등 적극 활용하여 탄소중립을 공간적으로 구현하는 도시'로 제시하고 있다. 이를 종합하면, 탄소중립도시의 일반적 개념은 화석에너지 의존도를 줄이고 에너지 소비를 최소화하여 경제·사회활동으로 배출되는 탄소와 산림 조성에 따른 흡수원을 통해 그 양을 상쇄시켜 제로화하는 도시로 정의된다(김정곤·최정은, 2011; 임희지 외, 2009; 왕광익, 2023).

-
- 2) 교토의정서(1997)에서 지정한 6대 온실가스는 '이산화탄소 CO₂, 메탄 CH₄, 이산화질소 N₂O, 수소불화탄소 HFCs, 과불화탄소 PFCs, 육불화황 SF₆' 임. 그러나 이산화탄소가 전체 온실가스의 80% 이상을 차지한다는 점, 온실가스 배출량 비교 시 이산화탄소 환산 양(CO₂e)을 사용한다는 점, 대기 중 온실가스 원소가 '탄소'라는 점을 바탕으로, 본 연구에서는 '탄소'를 온실가스를 통칭하는 개념으로 사용함
- 3) 제29조(탄소중립 도시의 지정 등) 국가와 지방자치단체는 탄소중립 관련 계획 및 기술 등을 적극 활용하여 탄소중립을 공간적으로 구현하는 도시(이하 "탄소중립도시"라 한다)를 조성하기 위한 정책을 수립·시행하여야 한다.

2. 탄소중립 도시계획

도시화는 인구이동, 토지이용 및 생활방식 변화 등을 포함하는 복잡한 사회·경제적 과정이다(Zhou et al., 2019). 따라서 총 탄소 배출량, 1인당 탄소 배출량, 도시의 탄소 배출 강도는 도시화와 밀접한 관련성을 갖는다(Yao et al., 2018). 이에 따라, 오늘날 전 세계 많은 도시들은 ‘low-carbon city’, ‘carbon-neutral city’, ‘zero carbon city’, ‘negative carbon city’ 등과 같은 도시 슬로건을 내세우며, 탄소중립 목표 달성을 위한 계획을 수립하는 등 도시 차원에서 기후 위기에 대응하고 있다. 탄소중립도시를 실천적 담론으로 이끌어내기 위하여 많은 연구에서는 도시의 사회·경제적 요인이 탄소배출에 미치는 영향을 분석하였고(김인현 외, 2011; 장명준, 2012; 조항훈 외, 2023; 박천보 외, 2015; 정민선 외, 2015; Cucchiella and Rotilio, 2021; 박준, 2014; Shamsapour et al., 2021; Hong et al., 2022), 기후 완화를 위한 도시 차원에서의 정책적 함의를 도출하였다(Kilkis, 2021; Nieuwenhuijsen, 2020; Wu et al., 2023).

김인현 외(2011)는 용적률과 자동차 등록 대수가 탄소 배출량에 가장 큰 영향을 미치는 도시계획적 변수임을 확인하였다. 장명준 외(2012)는 도시 규모에 따라 탄소배출의 영향과 그 정도가 상이함을 확인하였으며, 도로 면적, 자동차 등록 대수, 교통 수준이 도시의 주요 탄소 배출원임을 파악하였다. 조항훈 외(2023)는 도시 특성에 따른 건축물의 에너지 배출 및 탄소배출의 영향을 분석하고 정책적 시사점을 제시하였다. 박천보 외(2015)와 정민선 외(2015)는 도시의 탄소 흡수원으로서 도시 녹지와 탄소배출 감소의 관계를 분석하고, 이를 통해 탄소배출 저감형 도시계획 수립 방안을 제시하였다. Cucchiella and Rotilio(2021)는 도시 내부 공간 배치의 집중도를 설명하기 위해 도시의 압축도와 밀도를 사용하며, 압축도시가 저탄소 도시 건설의 중요한 접근 방식으로 간주될 수 있음을 강조하였다. 또한, 박준(2014)은 압축도시와 다핵도시의 특성에서 교통 에너지 소비와 탄소 배출의 관계를 이론적으로 설명하고, 이를 통해 도시계획적 함의를 도출하였다. Shamsapour et al.(2021)은 도시의 컴팩트한 대중교통 시스템이 1인당 탄소 배출량 감소에

기여하며, 특히 교통 부문의 1인당 탄소 배출량과 인구 밀도 사이에 음의 상관관계가 있음을 주목하였다. 이 외에도 Hong et al.(2022)은 도시 간의 강한 사회·경제적 유대와 상호작용이 생산성과 혁신성을 높여 에너지 및 탄소 저감의 효율성을 증진하는 데 기여한다고 강조하였다.

Kilkis(2021)은 기후 완화 노력을 가석하기 위해 도시 차원에서 재생에너지 시스템 통합을 강조하였으며, 지역난방 네트워크 도입, 공유 모빌리티 확대, 폐기물 관리 전략 등을 구체적인 활용 예시로 제시하였다. 또한, 도시의 탄소 배출량을 모니터링하고 검증하는 것이 중요함을 강조하였다. Nieuwenhuijsen (2020)은 도시의 공중보건을 개선하기 위한 수단으로서 탄소 중립의 중요성을 제시하였으며, 이를 위해 토지이용 변화, 대중교통 활성화를 통한 자동차 의존도 감소, 도시녹화, 시민 참여 및 협업 등을 통한 도시 및 교통 계획의 잠재력을 강조하였다. Wu et al.(2023)은 신도시의 탄소중립 목표를 달성하기 위해 건물 클러스터 간의 탄소 저감 시나리오를 제시하였다.

3. 탄소중립도시를 위한 정보제공과 계획지원시스템

해외 주요국에서는 온실가스 저감을 위한 도시계획 수립과 정책 의사결정을 지원하는 시스템을 구축하여 활용하고 있다. 미국 로렌스버클리 국립연구소에서는 도시 건축물 에너지 시뮬레이션을 위해 에너지 효율 측정 방법론을 제시하고 도시 차원의 에너지 사용과 탄소 배출 정보를 웹 기반 시스템으로 제공하고 있다(Sun et al., 2022). 그리고 미국에서 개발된 탄소중립을 위한 도시 계획 시나리오 기반 계획 지원도구인 'Envision Tomorrow(ET)'는 교통, 토지 이용, 공공건강, 도시 안전, 도시 성장, 주택 등 광범위한 분야의 의사결정 지원에 활용하고 있다(왕광익·노경식, 2010; 김근태, 2014). 또한, 토지이용 및 이동성 계획을 위한 소프트웨어인 'UrbanFootprint'는 미국 대부분의 지역을 대상으로 방대한 데이터에 기반하여 기후, 토지이용, 경제 및 사회적 조건을 시각화하고, 사회환경 지표를 평가하여 도시계획 결정에 따른 다양한 시나리오를 제공하는 등 지방정부의 정책 개발에 기여하고 있다. 런던시에서는 하천, 분수, 가로수, 편의시설 등 폭염 피난처를 공간 정보로 시각화하여 시민이 실

시간으로 사용할 수 있도록 장소 제안 및 공간 시스템을 구현하여 제공하고 있다(London Cool Spaces Summer, 2023). 일본은 도시구조와 교통정책 시행에 따른 이산화탄소 감축 효과를 진단 및 평가하는 공간 시뮬레이션을 개발하여 저탄소 마을 만들기 계획에 활용하고 있다(国道交通省, 2019). 최근에는 3차원 기반의 도시계획 운영 플랫폼인 플라토(PLATEAU)를 개발하여 도시계획 기초 조사 기반의 디지털 트윈을 구축하여 공개하고 있다(PLATEAU, 2023). 이러한 노력은 우리나라에서도 마찬가지로 진행되고 있다. 서울시는 2020년 GIS 기반으로 행정동별, 건물 유형별 에너지 소비 기반 정보 플랫폼인 '온실가스 모니터링 시스템 I·SEOUL·U'를 전국 최초로 구축하여 학술연구 및 서비스 개발에 활용하고 있으며(서울시 에너지정보, 2023), 광주시는 건축물, 교통, 공원 녹지 부문에 대한 도시탄소관리 평가체계인 '도시탄소관리 시스템 GUCMS'를 제공하고 있다(국제기후환경센터, 2022).

4. 시사점 도출

탄소중립도시에 대한 담론, 탄소중립도시 실현을 위한 방안, 탄소중립도시를 위한 정보제공과 계획 지원에 대한 선행연구 검토를 통해 다음과 같은 시사점을 도출할 수 있다.

첫째, 도시 자체를 탄소중립이 가능한 공간구조로 구축하고 도시환경을 탄소중립에 적합하도록 조성하기 위하여 도시공간 단위의 현황정보구축이 필요하다. 탄소중립기본법에 따르면, 탄소중립도시는 탄소중립 관련 기술과 계획을 공간적으로 구현하는 도시로 정의된다. 또한, 용적률, 교통량, 도시 규모 등 도시계획적 변수들이 탄소 배출량에 크게 영향을 미친다는 것을 선행연구를 통해 확인할 수 있다.

둘째, 탄소공간지도는 선행연구(Cucchiella and Rotilio, 2021; 박준, 2014; Shamsapour et al., 2021)에서 제시된 바와 같이 탄소중립도시계획 수립 등 탄소중립 전략에 따른 공간구조 개편에 적용할 수 있도록 검토되어야 한다. 선행연구들(김인현 외, 2011; 장명준, 2012; 조항훈 외, 2023; 박천보 외, 2015; 정민선 외, 2015; Cucchiella and Rotilio, 2021; 박준, 2014;

Shamsapour et al., 2021; Hong et al., 2022)은 도시 특성 및 공간구조에 따른 다양한 도시계획 요소가 탄소배출에 미치는 영향을 분석하고 탄소중립 목표를 달성하기 위한 도시계획적 전략을 제시하고 있다. 도시공간구조는 도시가 탄소중립에 영향을 미치는 가장 근본적인 요인으로 도시계획 차원에서의 전략 수립이 필수적으로 요구되기 때문이다.

셋째, 탄소공간지도는 정책 수립 과정에서 효과적으로 활용될 수 있는 계획 도구로서 검토되어야 한다. 탄소중립 전략에 따른 도시계획 수립과 의사결정을 지원하기 위하여, 공간 단위 계획 지원체계의 필요성이 대두되고 있다. 탄소중립 현황을 지도화한 탄소공간지도는 이러한 계획지원 의사결정체계 구축의 기초가 된다. 따라서, 탄소중립의 공간단위 구현에 초점을 맞춘 계획 지원체계 구축을 심층 분석할 필요가 있다.

III. 연구방법 및 과정

1. 비교대상 지도 사례 선정

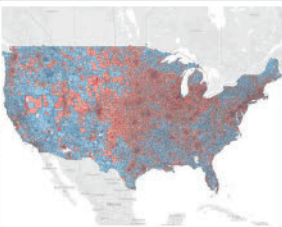
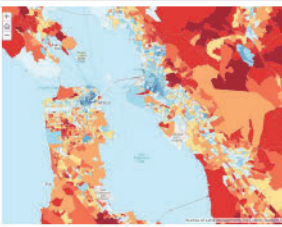
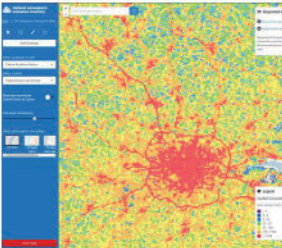

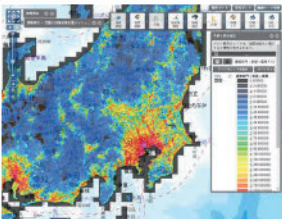
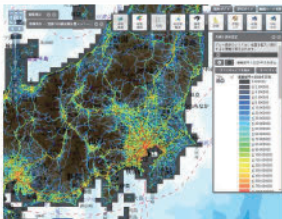
본 연구는 탄소중립 현황을 공간 단위로 지도화하고 있는 국내외 사례를 대상으로 비교 분석을 수행하였다. 본 연구에서 대상으로 선정한 사례는, 이산화탄소(CO₂)의 배출·흡수 현황을 전국 단위로 구축하고, 이용자가 원하는 통계정보 및 공간정보를 지도상에서 다양하게 펼쳐 볼 수 있도록 대화형 지도(interactive map) 시스템으로 제공되고 있는 사례로 선정하였다. 따라서, 본 연구에서는 미국 'CoolClimate Network', 영국 'UK Emission Interactive Map(CO₂ Interactive Map)', 일본 '전국 CO₂ 배출 추계량 격자지도', 한국 '탄소공간지도'를 연구의 대상으로 선정하여 분석하였다.

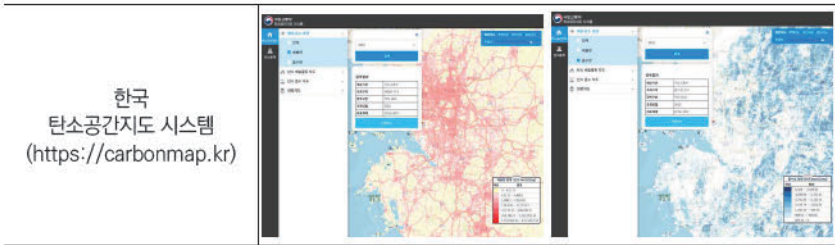
2. 비교항목 선정

본 연구에서는 탄소공간지도에 관한 국내외 구축 현황을 파악하기 위해

정부 차원에서 발행한 방법론 보고서, 연구논문, 공개된 정보시스템 접속을 통해 항목별로 분석하였다. 분석 내용의 체계성을 확보하기 위해 국내의 탄소공간지도 분석을 위한 비교 항목으로 구축 배경, 법적 위상, 구축 항목, 운영 기관, 활용 분야를 선정하였다. 구축 배경은 탄소공간지도를 구축하게 된 주요 목적과 주요 추진기관을 파악함으로써 시스템 구축에 대한 당위성을 파악하기 위함이며, 법적 위상은 지도 구축의 근거가 되는 법 제도의 확보 여부와 사례별 법적 위상, 법적 적용 분야 등을 확인하기 위해 설정하였다. 그리고 구축 항목은 온실가스 인벤토리의 반영 수준과 각 항목이 도시계획에서 활용할 수 있는 수준을 검토하기 위함이며, 운영 기관은 구축된 시스템의 지속성을 확보하고 있는지를 판단할 수 있는 항목이다. 마지막으로 활용 분야를 통해 도시계획 등 관련 분야와의 연계성과 확장성을 검토하기 위함이다.

〈표 1〉 국내외 탄소공간지도 연구대상

연구대상	지도 화면	
<p>미국 CoolClimate Network (CCN) (https://coolclimate.berkeley.edu/maps)</p>		
<p>영국 UK Emission Interactive Map & CO₂ Interactive Map (https://naei.beis.gov.uk)</p>		
<p>일본 전국 CO₂ 배출 추계량 격자지도 (https://www2.env.go.jp/eiadb/webgis/index.html)</p>		



IV. 항목별 검토결과

1. 구축 배경

2010년대에 들어 미국에서도 도시 차원에서 기후변화 대응의 필요성이 본격적으로 강조되었다(University of California, 2016). 미국 내의 각 주와 거대 자본시장이 온실가스 감축을 약속함에 따라, 지역 차원에서 온실가스 배출을 관리하기 위한 정보의 필요성이 대두되었다. 특히, 가정의 탄소발자국(Household Carbon Footprint, HCF)이 전체 탄소 배출량에 상당히 기여하고 있으며, 인구, 소득, 주거 등 사회·경제적 요인이 총 HCF에 영향을 미치는 것으로 파악되었다(Jones and Kammen, 2014). 도시 차원에서 기후변화 행동(Climate Action)을 취하기에 앞서, 탄소 배출량에 대한 정량적이고 시각적 데이터의 필요성을 인지하고 탄소발자국 기반의 고해상도 가정용 탄소공간지도를 구축하였다.

영국은 2008년 기후변화에 대한 정부의 기초를 뒷받침하는 핵심 법령이자 세계 최초의 기본법령인 「기후변화법 (Climate Change Act 2008)」을 제정하였다. 영국의 기후변화법 제정은 기후변화 대응에 있어 중요한 전환점이 되었다. 또한, 2019년 '2050 탄소중립 목표'를 상향 조정한 「기후변화법 개정안 (2019)」을 통과시킴으로써 G7 국가 중 최초로 '2050 탄소중립 목표'를 법제화하였다. 영국은 1990년부터 온실가스 인벤토리를 구축하면서 온실가스 배출량과 흡수량을 정량화하여 보고하는 체계를 갖추고 있다. 이러한 상황에서 영국은 온실가스를 포함한 다양한 오염물질이 유발되는 지역의

공간 인벤토리로서 2005년부터 매년 탄소공간지도를 구축하고 있다.

2023년 9월 29일 기준으로 일본에서는 '2050년까지 이산화탄소 배출의 실질적 제로'를 표명한 지자체가 총 991곳(도도부현 46곳, 시 338곳, 특별구 22곳, 정 317곳, 촌 48곳)에 이르렀다. 이는 2019년의 103곳(도도부현 19곳, 시 48곳, 특별구 26곳, 정 26곳, 촌 9곳) 대비 약 9.6배 증가한 수치이다(環境省, 2023). 이에 따라, 일본의 도시들은 「지구온난화 대책 계획」을 수립하고 「지방 공공 단체 실행 계획 책정 및 실시 매뉴얼」 또는 「저탄소 지역 만들기 실천 가이드북」 등을 기반으로 도도부현 및 시정촌 차원에서 저탄소 정책을 수립하고 있다. 일본 환경성은 제로카본시티 실현을 위한 도시 지역 고해상도 탄소 맵핑 수법을 개발하고, 2022년 기존의 지리정보 시스템상에 탄소공간지도를 탑재하였다.

한국은 2021년 10월 「탄소중립 시나리오」가 발표되고, 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(이하, 탄소중립기본법)」이 제정되면서 지자체의 탄소중립 의무가 강화되었다. 그러나 기존의 온실가스 통계는 배출원 중심으로 작성 및 보고되기 때문에, 지자체 차원에서 도시계획 수립에 활용 가능한 공간 단위의 온실가스 배출과 흡수량을 파악하기엔 한계가 있었다. 따라서 탄소중립도시계획과 공간정책 수립을 지원하기 위한 별도의 시스템 구축과 활용기반 마련의 필요성을 인식하고, 탄소중립 현황의 시각화를 기반으로 하는 도시·지역 분야의 탄소중립 정책지원 도구로서 2023년 6월 탄소공간지도를 일반에 공개하였다.

2. 법적위상

미국의 탄소중립 관련 법안은 2006년 「캘리포니아 지구온난화 해결법(California Global Warming Solutions Act)」 제정을 시작으로 주 정부들의 온실가스 저감 조치 도입이 본격화되었으며(국회입법조사처, 2009), 2008년 4월 부시 행정부에서 '2025년까지 온실가스 배출량 증가율 제로'의 목표를 처음 제시하였다(외교부, 2008). 그러나, 미국의 기후변화 및 탄소중립 관련 법안에서 탄소공간지도 구축에 관련한 사항은 명시되어 있지 않다.

영국의 탄소중립 실현에 대한 법적 위상은 기후변화 관련 모법인 기후변화법(2008)에서 찾을 수 있다. 이후 대기 환경 관련 영국의 대표적인 제도 및 정책은 2010년 발표된 대기질 표준 규정(The Air Quality Standard Regulation, 2010)과 2019년에 발표된 청정 대기 전략(The Clean Air Strategy, 2019)을 들 수 있다. 대기질 표준규정은 공중보건에 영향을 미치는 주요 대기오염물질에 대한 법적 구속력 있는 제한을 설정하고(DEFRA, 2010), 청정대기전략은 대기오염원에 대한 대응책 마련과 교통(운송), 농업, 산업 등의 분야의 조치를 강구하는 내용을 포함한다(DEFRA, 2019). 그러나, 영국의 기후변화, 대기질 표준 규정, 청정 대기 전략 등에서 탄소공간지도 구축에 관련한 사항은 명시되어 있지 않다.

일본은 2050 탄소중립 실현을 위해 2020년 「지구온난화 대책의 추진에 관한 법률(이하, 지구온난화 대책법)」 개정을 중심으로 폭넓은 정책분야에서 대응의 필요성을 언급하고 있다. 일본 탄소중립 기조에 토대가 되는 법령은 「지구온난화 대책법」으로, 도도부현 및 시정촌은 지역의 자연적·사회적 조건에 따라 탄소배출 삭감을 위해 종합적이고 체계적인 시책을 수립하고 시행하도록 규정하고 있다. 정부는 지구온난화대책의 종합적이고 계획적인 추진을 도모하기 위하여 지구온난화 대책에 관한 계획을 수립해야 하며, 탄소배출 삭감을 위한 조치와 배출량 및 흡수량에 관한 목표를 명시해야 한다(지구온난화 대책법 제22조의2). 또한, 일본의 각 지자체는 지구온난화 대책 계획을 고려하여 지역의 사회적 조건에 따라 「온실가스 종합계획」을 수립·시행하기 위해 노력해야 한다. 그러나, 도시계획법에서는 저탄소나 온난화와 같은 사항은 명시되어 있지 않고 있으며(2023년 6월 기준), 탄소중립은 ‘환경’의 한 요소로 고려되고 있다(Hideo, 2023).

우리나라의 탄소중립 관련 기본법령은 「탄소중립기본법」으로 국가 비전 및 국가전략 수립, 공공부문 온실가스 목표관리, 탄소중립 도시의 지정, 온실가스 종합정보 관리체의 구축을 명시하고 있다. 탄소중립도시계획 수립 측면에서 구체적 내용으로 20년 계획기간으로 하는 국가 탄소중립 녹색성장 기본계획과 10년 계획기간으로 하는 시·도 탄소중립 녹색성장 기본계획 및 시·

군·구 탄소중립 녹색성장 기본계획을 5년 단위로 수립·시행하도록 규정하고 있다. 2021년 개정된 도시·군기본계획 수립지침에서는 탄소중립 사회로의 이행 방향을 도시·군기본계획 총칙 및 부문별 계획 수립 원칙에 반영하고 탄소 배출·흡수 현황을 기초조사 사항에 추가하여 5년 단위의 탄소배출 감축 목표를 계획에 반영하도록 하고 있다. 또한, 부문별 계획을 수립할 때 탄소중립 계획요소를 반영하도록 되어있다. 그리고 2022년 제정된 「탄소중립기본법 시행령」에서는 탄소의 배출 및 흡수를 공간적으로 파악할 수 있는 탄소공간지도의 구축과 활용에 관한 내용이 명시되어 법적 근거를 확보하고 있다.

3. 구축항목

미국의 탄소공간지도는 미국 전역을 대상으로 행정구역 단위(Zip Code)별 소비기반 탄소발자국 구성요소에 대한 배출량을 지도화하였다. 'CoolClimae Maps'는 탄소 배출 항목을 부문별로 분류하지 않고 총합으로 산정하여 구현하였다. 가정의 탄소 배출은 전기, 천연가스 등 연료 유형에 따른 탄소 배출량으로 산정하였으며, 운송, 상업, 식품, 서비스에서의 탄소 배출량을 포함하여 전체 총합으로 지도를 구현하였다. 운송 부문은 차량 정보(연료 유형, 연료, 수명 주기, 제조 등)와 항공 여객, 대중교통의 직간접 배출을 포함한다(Jones and Kammen, 2014).

영국의 탄소공간지도는 국가 대기 배출 인벤토리(National Atmospheric Emissions Inventory, NAEI)에서 규정하고 있는 33개의 대기오염물질과 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O)에 대한 배출량 추정치를 지도로 구현하고 있다. 이산화탄소(CO₂)가 포함된 33개의 대기오염물질은 유엔유럽경제위원회(United Nations Economic Commission for Europe, UNECE)에서 분류하고 있는 11개 부문 항목에 따라 1km 격자로 구축하고 있으며, 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O) 배출량은 지자체별로 구현하고 있다.

〈표 2〉 NAEI에서 지도화로 구축하고 있는 대기오염물질

번호	오염물질	번호	오염물질
1	1,3-butadiene	16	Hydrohen chloride
2	Ammonia	17	Indeno[123-cd]pyrene
3	Arsenic	18	Lead
4	Benzene	19	Mercury
5	Benzo[a]pyrene	20	Methane
6	Benzo[k]fluoranthene	21	Nickel
7	Benzo[k]fluoranthene	22	Nitrogen Oxides(NOx)
8	Black Carbon	23	Nitrous oxide
9	Cadmium	24	Non-Methane Volatile Organic Compounds
10	Carbon dioxide (CO ₂)	25-28	Particulate Matter (PM ₁₀ PM _{2.5} PM ₁ & PM _{0.1})
11	Carbon monoxide	29	Polychlorinated biphenyls
12	Chromium	30	Selenium
13	Copper	31	Sulphur dioxide(SO ₂)
14	Dioxins	32	Vanadium
15	Hexachlorobenzene	33	Zinc

출처: Tsagatakis et al., 2023

〈표 3〉 UNECE에서 분류하고 있는 집계 부문

번호	항목	번호	항목
1	Combustion in energy production and transfer	7	Road transport
2	Combustion in commercial, institutions, residential and agricultural sectors	8	Other transport and machinery
3	Combustion in industry	9	Waste treatment and disposal
4	Production process	10	Agricultural, forests and land use change
5	Extraction / distribution of fossil fuels	11	Other sources and sinks

출처: Tsagatakis et al., 2023

일본은 이산화탄소 배출량 대부분이 도시의 사회경제활동에서 기인한다는 개념 아래, 건물과 교통 부문의 이산화탄소 배출량 추계를 1km 격자로 지도화 하였다. 구축 항목으로는 건물 분야의 '가정 부문', '업무 등 기타 부문', 교통 분야는 '운송 부문'으로 구성되었다. 건물 분야의 가정 부문 탄소 배출량은 건물유형에 따라 세대인수가 사용하는 유형별 소비연료를 월단위로 산

출하였다. 건물 분야의 업무 등 기타 부문 탄소 배출량은 업무시설에서 월단위 배출량을 산정하였는데, 이는 노동자수에 따른 지역의 업종별 월별 전력 사용량을 산출하였다. 교통 분야의 운송 부문 탄소 배출량은 도로구분과 차종별 속도 배출계수를 사용하여 월단위로 지도화 하였다.

〈표 4〉 일본 전국단위 CO₂ 배출 추계량 격자지도 작성 데이터

부문	특성 및 계수	데이터 출처
가정	건물종별 세대수	총무성: 국세조사
	월별·건물종별·세대인수구분별·연료종별 배출계수	환경성: 가정부문 CO ₂ 배출실태총계조사
업무 등 기타	업종구분별 노동자수	총무성·경제산업성: 경제센서스
	업종구분별·도도부현별 연간 CO ₂ 배출량	경제산업성 자원에너지청: 도도부현별 에너지 소비총계
	지역구분별·월별 전등전력수요실적	전기사업연합회: 전력수요실적
운송	도로구분별·차종별 연간교통량	국토교통성: 전국도로·노선교통정세조사
	도로구분별 길이	일본 디지털 도로지도 협회: 디지털도로지도
	월별·체재인구	G공간정보센터: 전국 인구유동 오픈데이터
	차종별 속도에 따른 배출계수	

출처: IGES, 2023

우리나라의 탄소공간지도는 건물 및 수송 부문에 대한 탄소 배출활동과 산림흡수 부문의 탄소 흡수성능으로 구성되어 있다. 건물부문은 전국 약 7.27백만동 건물에서 에너지(전기, 도시가스, 지역난방) 소비에 따른 탄소 배출량을 월단위로 산정하고, 수송부문은 차종별 등록 현황을 통해 시도별 연료 유형(휘발유, 경유, LPG, HEV)에 따른 차종-제어기술 데이터를 고속도로, 일반국도, 지방도, 주요도로를 포함하는 Level 5.5 교통망을 바탕으로 연단위로 산정하였다. 흡수원부문은 「온실가스배출권 거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」 제11조 및 제15조를 기반으로, 산림공간정보 서비스에서 제공하고 있는 임상도를 바탕으로 활엽수림, 침엽수림, 혼효림에 대한 산림면적, 산림구분, 수목높이 등의 데이터를 바탕으로 산정하였다. 흡수원 부문은 행정구역별로 구분하였고, 건물부문은 최대 100m, 수송부문은 1km 격자 지도로 구현하였다. IPCC 지침에 따르면 온실가스 인벤토리는 에너지, 산업

공정, 농업, 토지 이용, 토지 이용 변화 및 임업(LULUCF), 폐기물로 구분된다. 그러나 우리나라의 탄소공간지도에서 건물 및 수송 부문은 온실가스 인벤토리의 에너지 분류 중 연료 연소 부문에 해당한다. 따라서 폐기물 및 농업과 같은 지자체에서 관리 대상이 되는 항목을 포함하여 탄소공간지도의 유용성을 확보할 필요가 있다.

〈표 5〉 한국 탄소공간지도 활용 공공데이터

구분	데이터 명	데이터 수집범위	데이터 출처
경계	시도 행정경계	2022	국가공간정보포털
	시군구 행정경계	2022	국가공간정보포털
	법정동 경계	2022	국가공간정보포털
	용도구역	2022	국가공간정보포털
격자	격자데이터 (100m, 50m, 1km)	2022	국토지리정보원 국토정보플랫폼
에너지	전기 에너지 사용량	2013~2022	한국부동산원
	가스 에너지 사용량	2013~2022	한국부동산원
	지역난방 에너지 사용량	2013~2022	한국부동산원
산림	1:5000 임상도	2018~2022	산림청
수송	차종, 제어기술 데이터	2019~2022	한국교통연구원 운영 교통량
	연료 유형별 자동차 등록 현황	2019~2022	국토교통부
	전국 주요 도로망 level 5.5	2019~2022	국가교통정보센터
	전국 주요 도로망 level 6	2022	한국교통연구원

출처: 탄소공간지도 시스템(<https://www.carbonmap.kr>)

4. 운영기관

미국 탄소공간지도는 캘리포니아 버클리 대학의 CoolClimate Network (CCN)에 의해 운영된다. CCN은 기후변화에 대응하기 위해 대학, 정부, 기업 간 NGO 파트너십으로 구성된 종합 컨소시엄으로서 탄소발자국 완화를 주목적으로 연구, 소프트웨어 개발, 행동 프로그램 구현 등의 활동을 하고 있다.

영국의 탄소공간지도는 영국정부와 전문기관과의 파트너십을 통해 구축 및 운영되고 있다. 환경식품농촌부(Department of Environment, Food & Rural Affairs, DEFRA)에서는 이산화탄소를 포함한 대기질 인벤토리 작성을 담당하고 있으며, 에너지 안보 및 넷제로 부서(Department for Energy Security and Net Zero, DESNZ)는 온실가스 인벤토리 작성을 담당하고 있

다. 시스템 구축 및 운영 전문기관에서는 흡수원, 수송 등 각 부문별 팀을 구성하여 데이터 수집과 가공을 통해 지도로 구현하고 있다(NAEI, 2023).

일본의 탄소공간지도는 일본의 환경성에서 기존에 운영하고 있는 지리정보시스템플랫폼인 '환경 평가 데이터베이스(Environmental impact Access DAtabase System, EADAS)'에 탑재되어 있다. EADAS는 지역특성별 환경평가를 시행하기 위해 자연 및 사회 환경의 지리정보를 국가에서 운영 및 제공하는 종합 플랫폼이다.

한국의 국토교통부는 2022년 12월 탄소공간지도 시스템을 구축하고, 3개월 동안 시범운영을 거치면서 2023년 6월 30일 정식 오픈하였다. 국토교통부는 도시계획정보, 토지이용 등 여러 시스템으로 분산 운영되고 있는 국토이용정보를 통합 제공하는 '국토이용정보 통합플랫폼(Korea Land use Information Platform, KLIP)'의 단계적 운영을 추진하고 있다. 따라서, 탄소배출 및 흡수 현황을 지도화한 표준모델은 국토이용정보통합플랫폼의 도시계획 현황 정보와 연계하여 정책에 활용될 예정이다(국토교통부, 2022).

5. 활용분야

미국의 CCN은 지속 가능한 기후변화 대응을 주목적으로 다양한 프로그램을 추진하고 있다. 먼저, 소비기반의 탄소 배출량을 추정하여 지방정부의 탄소발자국 감축 정책을 지원하는 의사결정 도구인 'Interactive Policy Tool'를 개발하여 캘리포니아주에 한정하여 제공하고 있다. 또한, 일반 가정에서 구매하는 에너지, 식품, 상품, 서비스 및 운송에 대한 탄소발자국을 계산하는 'Household Calculator'를 개발 및 제공하고 있다. 그뿐만 아니라, 기후변화 행동 프로그램의 일환인 Cool Campus Challenge를 추진하여 캠퍼스와 지역에서의 지속 가능한 기후변화 대응 문화를 조성하고 있다. 그러나 각 프로그램은 탄소공간지도와 연계되어 사용되지 않고 개별로 제공되고 있으며, 'Interactive Policy Tool'는 현재 지역 내 온실가스 배출 감소 정책 간의 정보를 비교하는 목적으로만 사용되고 있다.

영국의 탄소공간지도는 33종의 대기오염물질의 배출 추정치를 지도화 하

여 제공한다. 따라서, 이 지도는 영국 정부 차원에서 매년 대기 관리 모니터링에 사용되고 있으며 국가 차원의 환경 및 에너지 등 다양한 정부 정책을 지원하는 근거자료로써 활용되고 있다. 또한, 격자로 도출되는 배출량을 집계하여 유럽 국가 간 대기 오염 대책 체결 조약인 '대기오염물질의 장거리 이동에 관한 협약(Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, CLRTAP)'에 국가 대기오염 현황을 보고하는 데 활용하고 있다. 구축된 격자 지도는 지방당국 수준에서 연료 사용에 의한 탄소 배출량 구축에 활용되고 있다.

일본의 「지구온난화 대책 추진법」에 따르면, 정부는 지구온난화 대책계획에 따라 「온실가스 저감 등을 위한 조치계획 (이하, 실행계획)」을 책정하고, 지자체는 정부 기조에 따라 단독 또는 공동으로 실행계획을 책정하도록 권고하고 있다. 실행계획에 포함되는 도시계획적 내용으로는, 도시 기능의 집약, 대중교통 편의 증진, 도시녹지 보전 등 온실가스 배출량 감축에 기여하는 정비 사항을 들 수 있다. 또한, 일본은 탄소공간지도를 개발하면서 동시에 도시의 탈탄소화 정책평가 수법을 연구개발하고 있어, 지자체 차원에서의 제로 카본시티계획(ゼロカーボンシティ計画) 수립과 정책평가의 활용을 기대하고 있다. 또한, 기업, 지자체, 대학 등이 연계되는 탄소중립계획과 재해 대책과의 범용성도 고려하고 있다.

우리나라는 2021년 개정된 도시·군기본계획 수립지침에 따라 지자체가 도시·군기본계획을 수립할 때 수행하는 기초 조사에 온실가스 배출 및 흡수 현황을 포함하도록 명시하고 있다. 이를 바탕으로 기본계획을 제시해야 하기 때문에, 지자체는 공간 구조, 교통 체계, 공원 녹지 등의 부문별 계획에 탄소중립 계획 요소를 반영해야 한다. 특히, 탄소중립 관련 도시 현황을 지도로 구축하여 공간구조 분석에 활용할 수 있다는 점에서 법적 기반을 갖춘 탄소 공간지도의 유용성이 있다.

〈표 6〉 항목별 비교

항목	미국	영국	일본	한국
구축 배경	<ul style="list-style-type: none"> - 캘리포니아 지구온난화 해결법(2008) 제정을 배경으로 온실가스 저감 조치 도입 본격화 - HCF이 전체 탄소배출량에 상당한 영향 확인 	<ul style="list-style-type: none"> - 기후변화법(2008) 제정을 배경으로 CO₂ 포함 대기오염 배출량 정량화 필요 - 2005년 전국단위 지도 구축 개시 	<ul style="list-style-type: none"> - COVID-19 기점으로 인간활동에 따른 온실가스 저감 노력 증가 - 지자체별 저탄소 지역만들기 정책 수립 권고 - 2022년 전국단위 지도 시스템 탑재 	<ul style="list-style-type: none"> - 탄소중립 시나리오(2021) 및 탄소중립기본법 제정으로 지자체 탄소중립 의무 강화 - 탄소중립 도시계획 수립에 활용 가능한 공간자료 구축 필요 - 2023년 전국단위 지도 오픈
법적 위상	<ul style="list-style-type: none"> - 직접적인 해당 근거 없음 	<ul style="list-style-type: none"> - 직접적인 해당 근거 없음 	<ul style="list-style-type: none"> - 직접적인 해당 근거 없음 	<ul style="list-style-type: none"> - 탄소중립기본법 - 도시·군기본계획 수립지침 - 도시개발업무지침
구축 항목	<ul style="list-style-type: none"> - 행정구역 단위 - 소비기반 총 배출 	<ul style="list-style-type: none"> - 1km 격자단위 33개 대기오염 물질 배출량 - 지자체별 행정구역 단위 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O) 배출량 	<ul style="list-style-type: none"> - 1km 격자단위 건물, 교통 분야에서 에너지 소비에 따른 CO₂ 배출량 - 건물: 가정 부문, 업무 등 기타 부문 - 교통: 운송 부문 	<ul style="list-style-type: none"> - 건물부문 최대 100m 격자단위, 수송부문 1km 격자단위 CO₂ 배출량 - 산림 분야에서의 CO₂ 흡수량
운영 기관	<ul style="list-style-type: none"> - 버클리대학 기반의 종합컨소시엄(CCN) 	<ul style="list-style-type: none"> - 영국정부(DEFRA, DESNZ)와 협업하는 전문기관 	<ul style="list-style-type: none"> - 일본 환경성 	<ul style="list-style-type: none"> - 국토교통부
활용 분야	<ul style="list-style-type: none"> - 도시계획 분야: 지역 정책간 정보 비교용으로만 활용 	<ul style="list-style-type: none"> - 환경 정책 분야: 대기관리 모니터링 - 국제협력: CLRTAP 보고 	<ul style="list-style-type: none"> - 환경계획 분야: 제로카본시티 실현을 위한 평가 	<ul style="list-style-type: none"> - 도시계획 분야: 탄소중립도시계획 수립

V. 시사점 및 결론

본 연구는 탄소중립 현황을 공간 단위 정보로 구축한 국내외 사례를 비교·분석하여 향후 탄소공간지도 구축을 위한 발전 방향을 제시하고자 하였다. 미국, 영국, 일본의 시스템 사례를 구축 배경, 법적 위상, 구축 항목, 운영 기관, 활용 분야로 구분하여 분석한 결과 국내 탄소공간지도 고도화를 위한 시사점을 다음과 같이 도출할 수 있었다.

첫째, 탄소공간지도의 활용도 제고와 운영상의 지속성 확보를 위해서는

법제도적 기반 마련이 필요하다. 미국, 영국, 일본, 한국 모두 도시 차원에서 기후변화에 대응하기 위한 노력의 일환으로 지도를 구축했다는 공통점을 가지고 있다. 특히, 일본과 한국의 경우, 각 정부의 탄소중립 선언과 함께 관련 법령의 제정과 개정을 통해 전국토를 대상으로 하는 탄소중립 실현을 위한 기초자료로서 지도를 구축했다는 점에서 유사성이 높다. 이러한 사례들은 비록 하향식 접근이지만, 지도 구축의 당위성을 확보할 수 있으며 지역 및 도시 차원에서 공공 계획 수립을 지원하는 데 기여할 수 있음을 시사한다. 명확한 법적 목표는 전국 단위로 일관된 기준과 방법론을 적용하여 데이터 수집 및 분석의 표준을 구축할 수 있는 근거가 되고 또한, 명확한 법적 목표 하에 구축된 탄소공간지도는 분석 결과에 대한 신뢰성을 높인다. 지방정부는 법적 요구사항에 따라 탄소 배출 및 흡수 현황을 모니터링하고 계획을 수립하게 된다. 반면, 법적 기반이 마련되지 않을 경우, 정책 변화에 따라 탄소공간지도 구축의 지속성을 보장하기 어렵다. 따라서, 탄소중립도시계획 수립을 위한 지도를 구축하고 이를 효과적으로 활용하기 위해서는 명확한 법적 목표가 필수적이다. 이는 일관성, 신뢰성, 책임성, 지속 가능성, 자원 배분의 효율성을 보장하여 정책 실행을 지원한다.

둘째, 탄소공간지도는 탄소중립도시계획 수립을 지원할 수 있는 인벤토리를 포괄해야 한다. 미국, 일본, 한국은 에너지 소비에 기반한 이산화탄소 배출에 중점을 두고 건물과 수송 부문을 지도화했다는 공통점이 있다. 특히 영국과 일본은 부문별 탄소 배출량을 구체적으로 구현함으로써 도시계획 수립에 활용 가능성을 시사하지만, 수송 부문에서 공간과 이동에 관한 도시계획의 특성을 반영하지 못하는 한계가 존재한다. 반면, 한국의 경우 건물 부문에서 전국 7.27백만 동 건물의 에너지 소비에 따른 탄소배출량을 최대 100m 격자 해상도로 구현하고, 수송 부문에서는 지역 간 네트워크를 파악할 수 있는 level 5.5 수준의 교통망을 바탕으로 연료 유형과 차종-제어기술 데이터를 통해 탄소 배출량을 산정하고 있다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체 지침(Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines, IPCC GL)에서는 온실가스 인벤토리를 에너지, 산업공정, 농업, 토지이용, 토지이용 변화

및 임업(LULUCF), 폐기물 분야로 구분하고 있다. 그러나, 분석된 사례들은 공통적으로 수송과 건물에서 사용하는 에너지의 탄소 배출 현황에 초점을 맞추고 있으며, 이는 IPCC 지침에서 구분하는 온실가스 인벤토리 분야 중 에너지 부문에 속한다. 탄소공간지도가 도시계획에 직접 적용되기 위해서는 폐기물 처리에 따른 탄소 배출량과 농업 활동에 따른 탄소 배출량 등 도시 및 지역 차원에서 포괄해야 하는 분야를 검토하고 구축해 나가는 것이 필요하다. 이는 탄소중립 목표 달성을 위한 도시계획의 정확성과 효과성을 높이는 데 필수적이다.

셋째, 탄소공간지도의 지속성을 확보하기 위해 운영모델 구축이 필요하다. 미국의 경우 탄소공간지도 구축에 대한 법적 지위가 명확하지 않으며, 대학 중심의 NGO 파트너십에 의해 구축·운영·관리되고 있어 지속 가능한 자원 확보에 어려움을 겪을 수 있다. 특히, 지방정부의 탄소 저감 정책을 지원하기 위해 개발된 시나리오 툴은 처음 구축된 이후 현재까지 갱신되지 않고 있어, 탄소중립계획 또는 도시정책 의사결정 지원체제로 활용되지 않고 정보 비교용으로만 이용되고 있다. 한편, 영국과 일본은 탄소공간지도 구축을 뒷받침하는 직접적인 법령 조문은 없으나, 정부 산하 기관 또는 정부와 파트너십을 통한 전문기관이 지도를 구축하고 국가 차원의 도메인에 탑재한다. 따라서, 지도의 갱신주기와 시스템 운영의 지속성이 확보된다. 그리고, 우리나라는 「탄소중립기본법」을 기반으로 온실가스 종합정보관리체 구축을 명시하고 있으며, 「탄소중립기본법 시행령」에 따라 탄소공간지도의 구축과 활용에 관한 내용을 명시하고 있다. 따라서, 탄소공간지도가 탄소중립도시계획 수립을 지원할 수 있는 도구로 활용되기 위해서는 장기적인 로드맵에 따른 자원 확보와 연계된 정부 주도형 운영 체계가 필요하며 이를 바탕으로 탄소공간지도가 지속적으로 운영되고 발전될 수 있어야 한다.

넷째, 탄소공간지도의 활용을 위한 확장성을 고려해야 한다. 즉, 도시계획 및 환경계획에만 국한하지 않고 다양한 분야로 활용성을 확대할 필요가 있다. 일본의 경우, 탄소공간지도는 도시 단위의 지구온난화 대책 수립을 지원하기 위해 구축되었으며, 이는 환경계획적 측면의 활용도가 강조된다. 반면,

한국은 도시·군기본계획 수립지침에 따라 지자체의 탄소중립기본계획 수립을 지원하기 위해 구축되었으며, 이는 도시계획적 측면의 활용도가 강조된다. 영국의 탄소공간지도는 대기오염물질의 현황을 파악하는 데 중점을 두고 있으며, 국가 대기오염 현황을 보고하는 환경계획적 측면에서 활용도가 강조된다. 미국 CCN 사례에서는, 탄소공간지도 구축 외에도 이를 기반으로 한 탄소중립 정책 시나리오 틀을 개발하여 일반 대중이 탄소 배출 관련 정책을 비교할 수 있도록 하고 있다. 또한, 대학 중심의 탄소중립 교육형 챌린지 프로그램을 통해 지역 중심의 대시민 인식 개선을 도모하고 있다. 따라서, 탄소공간지도의 성능 개발과 고도화를 추진할 때, 탄소중립 현황의 지도화뿐만 아니라 도시계획수립 지원, 교육 및 대시민 계몽 등 다양한 분야로 활용성을 확대할 수 있음을 고려하여야 한다.

본 연구에서의 결과는 국내외에서 구축 사례가 많지 않은 탄소 배출정보의 지도화 사례를 대상으로 검토되었고, 구축 목적과 활용도가 다른 특성으로 인해 사례 간 직접적인 비교를 하는 것에 일부 무리가 있을 수 있다. 그러나 기후변화의 주 원인이라 할 수 있는 도시공간의 변화를 모색하기 위한 방안으로 탄소공간지도의 구축과 발전방향을 도출하기 위해 계획 수립 관점에서 접근한 시도라는 점에서 의의가 있다. 본 연구에서 제시된 문제와 결과를 바탕으로 앞으로 탄소중립도시 구현을 위한 계획단계에서의 중요성이 더욱 강조될 필요가 있다.

■ 참고문헌 ■

- 건축공간연구원, 2022, 「탄소중립 2050 실현을 위한 생활권 단위 공간계획 모형 연구」, 세종: 건축공간연구원.
- 건축공간연구원, 2023, 「기후위기 대응력 강화를 위한 탄소중립도시 종합계획 수립 방안 연구」, 세종: 건축공간연구원.
- 국토연구원, 2021, 「도시, 미래를 준비하다」, 세종: 국토연구원.
- 국회입법조사처, 2009, 「미국의 기후변화·녹색성장 관련 입법 동향 분석-American Clean Energy and Security Act(ACESA)를 중심으로-」,

- 김근태, 2014, “도시 및 광역계획지원시스템의 구축과 활용”, 국토, pp.91-101.
- 김인현·오규식·정승현, 2011, 011, “도시패턴과 탄소배출량의 관계분석”, 『한국공간정보학회지』, 19(1), pp.61~72.
- 김정곤·최정은, 2011, “탄소 중립도시 조성을 위한 도시계획전략 연구”, 『한국도시설계학회지』, 12(2), pp.41-53.
- 박준, 2014, “도시구조와 탄소배출 간 관계에 대한 소고: 압축도시와 다핵도시 특성을 중심으로”, 『부동산학연구』, 20(1), pp.39-56.
- 박천보·최준성, 2015, “탄소배출 저감형 도시 그린필드의 조성 및 관리방안”, 『한국산학기술학회』, 16(1), pp.837-844.
- 송재민·이건원·김형규·정주철·안예현·조만석·문미라·정승현, “탄소중립 도시계획 추진 방향”, 『도시정보』, 478, pp.5-22.
- 왕광익, 2023, “송산그린시티 탄소중립도시 기본계획 추진방향 연구”, 한국환경정책학회 춘계학술대회, pp.26-27
- 외교부, 2008, “부시 대통령 기후변화 관련 미국의 중기 목표 발표”
- 임희지·손기민·김운수·염지선, 2009, “기성시가지 내 신도시 개발지역의 탄소중립도시 조성방향 연구”, 서울연구원 정책과제연구보고서, pp.1-142
- 장명준·신예철·최형선·김태호, 2012, “도시규모를 고려한 탄소배출량과 도시특성요소와의 관계 연구”, 『도시행적학보』, 25(4), pp.57-87
- 정민선·조희선·변병설, 2015, “도시특성요소가 온실가스 배출에 미치는 영향: 수도권 지역을 중심으로”, 『국토지리학회지』, 49(3), pp.297-306.
- 조항훈·김홍순, 2023, “도시특성이 건축물의 탄소배출에 미치는 영향에 관한 연구: 서울시 424개 행정동에 대한 공간회귀분석의 적용”, 『LHI Journal』, 14(3), pp.77-92.
- 한국건설기술연구원, 2023, 『탄소중립형 스마트도시 추진을 위한 탄소공간지도 구축방안 연구』, 세종: 국토교통부.
- Bettencourt, L. M., Lobo, J., Helbing, D., Kühnert, C., & West, G. B., 2007, “West Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities Proc”, Natl Acad. Sci. USA, 104(2007), pp.7301-7306.
- Breuste, J., Artmann M, Ioja C, Qureshi S, eds, 2020, “Making Green Cities: Concepts, Challenges and Practice”. Cham, Switz.: Springer.
- Cucchiella, F., and Rotilio, M., 2021, “Planning and prioritizing of energy retrofits for the cities of the future”, Cities, 116, 103272.
- Department for Environment Food & Rural Affairs, 2010, Air Quality Standards Regulations.
- Department for Environment Food & Rural Affairs, 2019, Clean Air Strategy.
- National Atmospheric Emissions Inventory, 2023, UK Spatial Emissions Methodology - a report the national atmospheric emission inventory 2021

- GEA, 2012, *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press, Cambridge, UK (2012), p. 1888
- Hideo, H., 2023, “カーボンニュートラルに対する都市計画・土地利用計画の寄与”, *環境法政策学会誌*, 26. pp.26-36.
- Hong, S., Hui, E. C. M., & Lin, Y., 2022, “Relationship between urban spatial structure and carbon emissions: A literature review”, *Ecological Indicators*, 144, 109456
- Huovila, A., Siikavirta, H., Rozado, C. A., Rökman, J., Tuominen, P., Paiho, S., & Ylén, P., 2022, “Carbon-neutral cities: Critical review of theory and practice”, *Journal of Cleaner Production*, 341.
- IEA, 2012, *World Energy Outlook 2012* International Energy Agency (IEA), Paris (2012), p. 700
- IGES, 2022, “令和3年度都市地域炭素マッピング調査等委託業務報告書”
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013, “The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp.1535.
- Jones, C., & Kammen, D. M., 2014, “Spatial Distribution of U.S. Household Carbon Footprints Reveals Suburbanization Undermines Greenhouse Gas Benefits of Urban Population Density”, *Environmental Science & Technology* 2014 48 (2), 895-902
- Kılıç, Ş., 2021, “Transition towards urban system integration and benchmarking of an urban area to accelerate mitigation towards net-zero targets”, *Energy*, 236
- Nieuwenhuijsen, M. J., 2020, “Urban and transport planning pathways to carbon neutral, liveable and healthy cities: A review of the current evidence”, *Environment international*, 140,
- Rydin, Y., Bleahu, A., Davies, M., Dávila, J. D., Friel, S., De Grandis, G., & Wilson, J., 2012, “Shaping cities for health: complexity and the planning of urban environments in the 21st century”, *Lancet*, 379(9831), p.2079-2108.
- Seto, K. C., Churkina, G., Hsu, A., Keller, M., Newman, P. W., Qin, B., & Ramaswami, A., 2021, “From Low-to Net-Zero Carbon Cities: The Next Global Agenda” *Annual Review of Environment and Resources*. 46. pp.377-415.
- Shamsapour, N., Hajinezhad, A., & Noorollahi, Y., 2021, “Developing a system dynamics approach for CNG vehicles for low-carbon urban transport: a case study”, *International journal of low-carbon technologies*, 16(2),

pp.577-591.

- Sun, K., Kusumah, P., Zhang, W., Wei, M., & Hong, T., 2022 “Exploring Decarbonization and Clean Energy Pathways for Disadvantaged Communities in California”, International COBEE Conference, Montreal, Canada
- Tsagatakis, I., Richardson, J., Evangelides, C., Pizzolato, M., Richmond, B.,Hows, S-M., Pearson, B., Passant, N., Pommier, M. & Otto, A., 2023, “UK Spatial Emissions Methodology”, National Atmospheric Emission Inventory 2021.
- United Nations, 2014, World Urbanization Prospects. The 2014 Revision, Highlights.
- United Nations, 2015, Paris Agreement 2015.
- United Nations, 2019, GLOBAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT REPORT.
- Wei, T., Wu, J., & Chen, S., 2021, “Keeping Track of Greenhouse Gas Emission Reduction Progress and Targets in 167 Cities Worldwide, *Frontiers in Sustainable Cities*, 3.
- Wu, Z., Zhao, Z., Gan, W., Zhou, S., Dong, W., & Wang, M., 2023, “Achieving Carbon Neutrality through Urban Planning and Design. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3).
- Yao, X., Kou, D., Shao, S., Li, X., Wang, W., & Zhang, C., 2018, “Can urbanization process and carbon emission abatement be harmoniou? New evidence from China”, *Environmental Impact Assessment Review*, 71, p.70-83.
- Zhou, C., Wang, S., & Wang, J., 2019, “Examining the influences of urbanization on carbon dioxide emissions in the Yangtze River Delta, China: Kuznets curve relationship”, *Science of The Total Environment*(675), p.472-482.
- 環境省, 2023, “地方公共団体における2050年二酸化炭素排出実質ゼロ表明の状況”
- 国道交通省, 2019, “二酸化炭素削減効果シミュレーション・ツール CO₂-Reduction Effect Simulation Tool : CREST”
- 서울시 에너지정보, 2023, <https://energyinfo.seoul.go.kr/main/main>
- 국토교통부 탄소공간지도 시스템, 2023, <https://www.carbonmap.kr/index.do>
- Climate Action Tracker, 2023, <https://www.visualcapitalist.com/sp/race-to-net-zero-carbon-neutral-goals-by-country/>
- CoolClimate Network (CCN), 2023, <https://coolclimate.berkeley.edu/maps>)
- EADAS, 2023, <https://www2.env.go.jp/eiadb/webgis/index.html>
- London Cool Spaces Summer, 2023, <https://apps.london.gov.uk/cool-spaces/>
- NAEI, 2023, <https://naei.beis.gov.uk/about/naei-team>
- PLATEAU, 2023, <https://www.mlit.go.jp/plateau/>
- University of California, 2016, <https://www.universityofcalifornia.edu/news/new-interactive-map-compares-carbon-footprints-bay-area-neighborhoods>

김민서: 일본 국립 치바대학교 환경원예학과에서 박사학위를 취득하고 현재 한국건설기술연구원 건축연구본부에 재직 중이다. 탄소중립도시계획, 도시재생, 온실가스저감 녹화기술 등에 관한 연구를 수행하고 있다(mskim@kict.re.kr).

정승현: 한양대학교에서 도시계획으로 박사학위를 취득하고 현재 한국건설기술연구원에 재직 중이다. 환경적으로 지속 가능하고 건전한 도시공간에 대한 관심을 바탕으로 탄소중립도시를 구현하기 위한 도시계획 방법론에 대한 연구를 수행하고 있다(shjung@kict.re.kr).

투 고 일: 2023년 11월 15일
심 사 일: 2023년 12월 21일
게재확정일: 2024년 04월 23일