

논문

텍스트마이닝을 이용한 탄소 배출 연구의 학술적 동향 및 지식 구조 분석

Analyzing Research Trends and Knowledge Structure in Carbon Emissions Research Using Text Mining

이권호^{1),2)}, 신성균^{3),*}, 김관철⁴⁾

¹⁾강릉원주대학교 대기환경과학과, ²⁾강릉원주대학교 복사-위성 연구소,
³⁾서울연구원 연구기획조정실, ⁴⁾차세대융합기술연구원 첨단환경감시센터

Kwon-Ho Lee^{1),2)}, Sung-Kyun Shin^{3),*}, Kwanchul Kim⁴⁾

¹⁾Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Republic of Korea

²⁾Research Institute for Radiation-Satellite, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Republic of Korea

³⁾Division of Research Planning & Coordination, The Seoul Institute, Seoul, Republic of Korea

⁴⁾Advanced Environmental Monitoring Center, Advanced Institute of Convergence Technology (AICT), Suwon, Republic of Korea

접수일 2025년 7월 25일
수정일 2025년 7월 30일
채택일 2025년 7월 31일

Received 25 July 2025
Revised 30 July 2025
Accepted 31 July 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)2-2144-2949
E-mail : skyun@si.re.kr

Abstract Understanding the trends in research on carbon emission related to climate change is essential to assess the current state of research, set the direction for effective research, and provide insights for policy formulation. This study conducted text mining and quantitative bibliometric analysis of carbon emission-related academic papers published by 2024 to analyze the quantitative changes in research, key research areas, key researchers and institutions, and changes in knowledge structure. The quantitative change in carbon emission research has increased at an average annual growth rate of 9.35% and 27.84% for both domestic and international publications, respectively. Especially since the Paris Agreement in 2015, there has been a sharp quantitative growth trend. This growth is primarily attributed to an increase in the number of papers from China and the United States. The main area of research has been focused on explaining the causal factors associated with carbon emissions, such as climate change and greenhouse gas emissions. The results from the articles have demonstrated the relevance of carbon information to stakeholders interested in climate change and environmental sustainability. In conclusion, this study analyzed the quantitative growth of carbon emissions research and changes in the knowledge structure through the analysis of academic journals. The results can be used as a basis for methodologies for various observational and analytical models for precise carbon emissions prediction and environmental performance improvement.

Key words: Carbon, Emission, Climate change, Bibliometric analysis, Text mining

1. 서론

산업화와 도시화로 인하여 전 세계적으로 탄소 배출량이 증가하고 있으며, 이는 지구온난화와 극단적인 기후 현상을 초래하고 있다(IPCC, 2021). 탄소 배출은 전 세계적으로 기후변화 및 지구온난화를 야기하는 핵심 원인으로, 인류의 지속 가능성 유지를 위한

가장 시급한 과제로 인식되고 있다(Jones *et al.*, 2023; Friedlingstein and Solomon, 2005). 이러한 상황에서 탄소 배출량을 정확히 측정하고 분석하는 것은 효과적인 정책 수립과 지속 가능한 탄소 관련 전략 육성에 필수적이다(Duren and Miller, 2012). 동아시아 지역은 주요 탄소 배출 지역으로서, 배출량의 규모가 지역 대기질 및 기후변화에 직접적으로 영향을 미침이 알려

져 있다(Lee and Kim, 2024; Lee and Shin, 2022; Lee and Kim, 2010). 따라서 탄소 배출 연구는 기후변화 영향 이해 및 예측, 정책 입안을 위한 데이터 제공, 기업 및 개인의 탄소발자국 저감 유도, 그리고 탄소 중립 및 지속 가능성 기술 개발 촉진 등 다양한 측면에서 그 중요성을 가진다(Deng *et al.*, 2025).

탄소 배출에 대한 연구는 대표적으로 기후변화 영향, 탄소발자국, 정책 및 규제, 기술혁신 등의 분야에서 매우 광범위하게 이루어졌다. 예를 들어, 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)) 보고서는 기후변화 영향에 대한 포괄적인 평가 결과를 제공하는 중요한 참고 자료이며, 탄소 배출량과 기상 이변 및 기온 상승과 같은 기후변화 영향 간의 상관 관계에 초점을 맞춘 연구 결과를 포함한다(IPCC, 2021). 탄소발자국의 개념을 자세히 논의하고 운송, 제조, 농업 등 다양한 부문의 탄소발자국을 분석한 연구(Ling *et al.*, 2024), 유럽 연합 배출권 거래제(EU ETS)와 같은 탄소 가격 책정 및 배출권 거래 제도와 배출량 감소에 미치는 영향에 관한 연구(Biancalani *et al.*, 2024), 그리고 탄소 포집 및 저장(Carbon Capture and Storage (CCS)) 기술의 발전은 탄소 배출을 줄일 수 있는 잠재력을 가지고 있음을 보고하였다(Kazlou *et al.*, 2024). 이러한 연구들의 핵심은 탄소 배출량에 대한 정확한 이해와 효과적인 관리를 위하여 기후변화의 원인을 규명하고, 감축 전략을 수립하며, 그 효과를 평가하는 데 필수적인 기반 지식을 제공하는 것이다. 따라서 탄소 배출량 연구의 학술 연구 동향을 체계적으로 분석하고, 관련된 지식 구조를 파악하는 것은 탄소 배출량 관련 연구의 방향 설정 및 효과적인 정책 제언에 매우 중요하다. 그러나 이러한 필요성에도 불구하고, 방대한 연구 자료와 다양한 방법론의 발전 과정 및 상호 관계, 그리고 전반적인 연구 흐름에 대하여 통합적으로 파악하는 것은 한계가 있다.

본 연구의 목적은 탄소 배출량 관련 연구의 학술적 동향과 지식 구조를 체계적으로 분석하기 위함이며, 이를 위해 텍스트마이닝(text mining)과 계량서지학

적 분석(Bibliometric Analysis) 기법을 활용하여 지난 수십 년간 축적된 학술 문헌 데이터를 분석하였다. 이를 통하여 탄소 배출량 연구 현황을 평가하고, 미래 연구 방향 설정 및 정책 수립에 필요한 학술 연구적 지식 구조 정보를 분석하였다. 이 연구의 구성은 다음과 같다. 2장 자료 및 방법 연구에서는 연구에 사용된 데이터 수집 과정과 분석을 위한 방법론을 상세히 설명한다. 3장에서는 연도별 출판 동향, 주요 저자 및 기관 분석, 키워드 분석 등 정량적 분석 결과를 제시한다. 4장에서는 네트워크 분석 및 클러스터링을 통해 탄소 배출량 연구의 지식 구조를 심층적으로 탐색한다. 마지막 5장에서는 본 연구의 결론을 도출하고, 연구의 한계점 및 향후 연구 방향을 제언하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 학술 데이터베이스 자료

탄소 배출 관련 학술 연구 동향을 종합적으로 분석하기 위하여 국내외 주요 학술 데이터베이스의 검색 자료를 사용하였다. 국내 학술 자료는 한국학술지인용색인(Korea Citation Index (KCI)), 국외 학술 자료는 Web of Science (WoS) 데이터베이스로부터 연구 논문 자료를 수집하였다. KCI는 한국연구재단에서 운영하는 국내 학술정보 데이터베이스(<https://www.kci.go.kr/>)이며, WoS는 Clarivate Analytics에서 제공하는 세계적인 학술 인용 데이터베이스(<https://mjl.clarivate.com/home>)로서, 엄격한 선정 기준을 통과한 고품질 학술지를 포함하므로 글로벌 연구 동향을 분석하는 데 적합한 것으로 알려져 있다(Tan *et al.*, 2024; Moreno-Guerrero *et al.*, 2020). 학술지 데이터 수집 기간은 KCI와 WoS 데이터베이스에서 검색된 관련 논문의 출판 연도가 2024년 12월 31일 이전 기간으로 설정하였으며, 관련된 연구 논문이 최초 출판된 날로부터 가장 최근에 출판된 논문 정보를 수집하였다.

KCI와 WoS 데이터베이스로부터 탄소 배출과 관련된 연구 논문을 효과적으로 수집하기 위해 다음과 같

은 검색 전략을 수립하였다. 첫 단계에서는 탄소 배출 관련 핵심 키워드를 선정하여 핵심 키워드 간의 불리언 연산자(Boolean operators)를 활용하여 검색의 정확성과 포괄성을 높였다. 여기에서 사용된 핵심 키워드는 ‘탄소 배출(carbon emission)’을 중심으로 설정하고 이와 관련된 키워드로는 ‘온실가스(greenhouse gas)’, ‘기후변화(climate change)’, ‘탄소 중립(carbon neutrality)’, ‘탄소 감축(carbon reduction)’, ‘탈탄소화(decarbonization)’, ‘탄소 포집(carbon capture)’과 같이 탄소 배출과 직접적으로 관련된 용어들을 선정하였다. KCI 데이터베이스에서 사용된 검색식은 식 (1)과 같으며, 주제어, 초록, 제목 필드를 대상으로 검색을 수행하였으며, 추가로 ‘논문’, ‘연구’, ‘분석’과 같은 일반적인 학술 용어를 추가하여 학술 논문만을 선별하였다.

$$TI:((탄소\ 배출)\ AND\ 온실가스\ OR\ 기후변화\ OR\ 탄소중립\ OR\ 탄소감축\ OR\ 탈탄소화\ OR\ 탄소포집))\ AND\ (논문\ OR\ 연구\ OR\ 분석) \quad (1)$$

검색식 (1)을 사용한 KCI 검색 결과는 총 56건의 논문이 검색되었다. 한편, WoS 검색식은 식 (2)와 같이 Topic (TS) 필드(제목, 초록, 키워드 포함)를 대상으로 검색을 수행하며, KCI와 유사한 형태의 단어를 포함하였다.

$$TS=((\text{"carbon emission"})\ AND\ (\text{"greenhouse gas"}\ OR\ \text{"climate change"}\ OR\ \text{"carbon neutral"}\ OR\ \text{"carbon reduction"}\ OR\ \text{"decarbonization"}\ OR\ \text{"carbon capture"})) \quad (2)$$

WOS 검색조건에서는 정규 연구 논문인 Article만을 선택하여 총 2,088개의 논문이 검색되었다. KCI와 WOS에서 수집된 모든 연구 논문 자료는 재검토 과정을 통해 중복 목록 제거 및 연구 주제와 무관한 문헌은 제외하여 최종 데이터 목록으로 가공하였다.

2.2 서지 분석 방법

일반적으로 계량 서지학적 분석 방법은 통계적 방

법을 사용하여 연구 대상의 개발 현황과 추세, 그리고 학문 구조와 발전 동향을 기술, 분석, 평가, 예측하는데 널리 사용되며(Wang and Feng, 2022), 특정 연구 분야의 연구 현황, 핫스팟, 미래 동향을 체계적이고 종합적으로 분석하는 정보 시각화 도구로 알려져 있다(Wang *et al.*, 2023). 이러한 방법론은 관심 연구 분야의 발전 현황을 객관적으로 매핑하는 데 도움이 되며, 관심 분야의 역사, 현재 상태, 미래 방향을 체계적으로 이해하고 성과를 평가할 수 있는 도구이다(Huang *et al.*, 2023).

KCI와 WoS에서 획득한 자료의 형식은 Research Information Systems (RIS) 포맷으로서, RIS 파일은 개별 논문에 대한 저자, 제목, 발행 연도, 초록, 키워드 등을 포함한다. 검색된 연구 논문 정보의 계량 서지학적 분석 및 시각화를 위하여 오픈 소스 언어인 Python 패키지(rispy, pandas, numpy, matplotlib, seaborn 등)와 전용 소프트웨어인 VOSviewer (version 1.6.20) (<https://www.vosviewer.com/>)를 사용하였다. Python 패키지는 데이터 입출력을 위하여 RIS 파일로부터 제목, 저자, 소속기관, 게재 년도, 학술지 이름, 초록, 키워드 등 필요한 메타데이터를 파싱된 데이터 구조에서 추출하였으며, 추출된 데이터를 기반으로 연도별 출판 동향, 특정 키워드의 사용 빈도 변화 등을 통계적으로 분석한 결과를 시각화하였다. 그리고 RIS 파일의 초록 필드 정보는 텍스트마이닝 기법을 적용하여 주요 키워드 추출 및 핵심 분야 네트워크 분석을 통한 시각화를 구현하였다. VOSviewer는 텍스트마이닝 기반의 네트워크 시각화 도구로서 키워드 동시 발생 네트워크, 공저자 네트워크, 공인용 네트워크 등을 구축하고 시각화하는 데 탁월한 것으로 알려져 있다(Bukar *et al.*, 2023). 이렇게 python 패키지와 VOSviewer를 사용하여 탄소 배출 관련 연구 분야 간의 관계, 핵심 주제, 그리고 지식 구조를 직관적으로 파악할 수 있다.

KCI와 WoS 데이터베이스에서 수집된 데이터를 이용하여 탄소 배출 관련 연구의 학술적 동향과 지식 구조를 파악하기 위해 학술적 동향 분석 분야 및 지식 구조 분석과 관련된 지표들을 분석하였다. 표 1은 각

Table 1. Key metrics and content by analysis area for the meta-bibliometric analysis of carbon emissions-related studies.

Analysis	Key indicator	Description
Academic trend analysis	Publication trends	Identify growth and maturity stages of research activity
	Key authors and institutions	Identify authors and research institutions that have published the most papers or have high citation counts
	Key countries	Analyze national publication contributions and citation impact
	Key journals	Identify key journals where carbon emission research is actively published
	Most cited articles	Identify core papers with the greatest academic impact and summarize their content
Knowledge structure analysis	Keyword co-occurrence network	Visualize relationships between research topics and key clusters
	Co-author network	Identify collaborative research relationships and patterns among researchers
	Co-citation network	Understand the intellectual base through shared citation relationships among papers
	Bibliographic coupling	Identify clusters by research topic and similar research groups
	Major topic bursts	Detect changes in research trends and emerging/disappearing topics
	Network centrality	Identify the influence of core elements (authors, keywords, etc.) within the network

지표에 대한 상세 설명을 나열하였으며, 먼저 학술적 동향 분석 부분에서는 연도별 출판 추세, 주요 저자, 주요 연구 기관, 주요 연구 국가, 주요 학술지 및 핵심 논문 식별을 통해 탄소 배출 연구 분야의 성장 과정과 특징에 관한 내용이 포함된다. 그리고 지식 구조 분석 부분에서는 키워드 동시 발생, 공저자 네트워크, 문헌 간 서지 결합, 주제 버스트, 그리고 네트워크 중심성 분석을 활용하여 연구 주제 간의 관계, 협력 패턴, 지적 기반, 그리고 새로운 트렌드를 설명할 수 있다. 이러한 다각적인 분석 방법은 탄소 배출 연구의 주요 연구 동향과 관련성을 이해하고, 미래의 연구 방향을 제시하는 데 필요한 참조자료를 제공할 수 있다(Wang and Feng, 2022).

3. 탄소 배출 연구의 학술적 동향 분석 결과

3.1 연도별 연구 현황

시간에 따른 탄소 배출 관련 연구 논문 수의 변화는

연구 분야의 발전 추세를 보여주는 중요한 지표이다(Udara Willhelm Abeydeera *et al.*, 2019). 그림 1은 KCI와 WoS 데이터베이스 검색 결과로부터 분석한 연도별 탄소 배출 관련 연구 논문의 게재 수의 변화를 나타낸다. KCI에서 검색된 국내 탄소 배출 연구 논문의 수(총 56건)는 WoS에서 검색된 해외 연구 논문 숫자(총 2,088건)에 비해 적은 수준이지만, 논문 게재 수는 모두 연도별로 증가한 것으로 나타났다. 보다 상세하게는, 국내의 탄소 배출 관련 연구 논문 수는 2006년부터 2021년까지 연간 4건 이하의 소규모로 발표되었으나, 2022년 이후 빠른 성장을 보여 2024년에는 10건으로 두 배 이상 증가하였다. 해외 연구 논문 수는 1998년부터 2008년까지 비교적 완만한 성장기(연간 논문 게재 수 10건 미만)를 거쳐, 2010년부터 2024년까지 급격한 지수적 성장세(연도(x)와 논문 수(y)에 관한 회귀식: $y = 4.9 \exp(x - 1998)$)를 보였다. 특히 2008년 8편이었던 논문 수는 2024년 593편으로 크게 증가하여 탄소 배출 관련 연구가 크게 증가하였음을 확인하였다.

국내와 해외에서 발간된 논문 수의 연평균 증감률

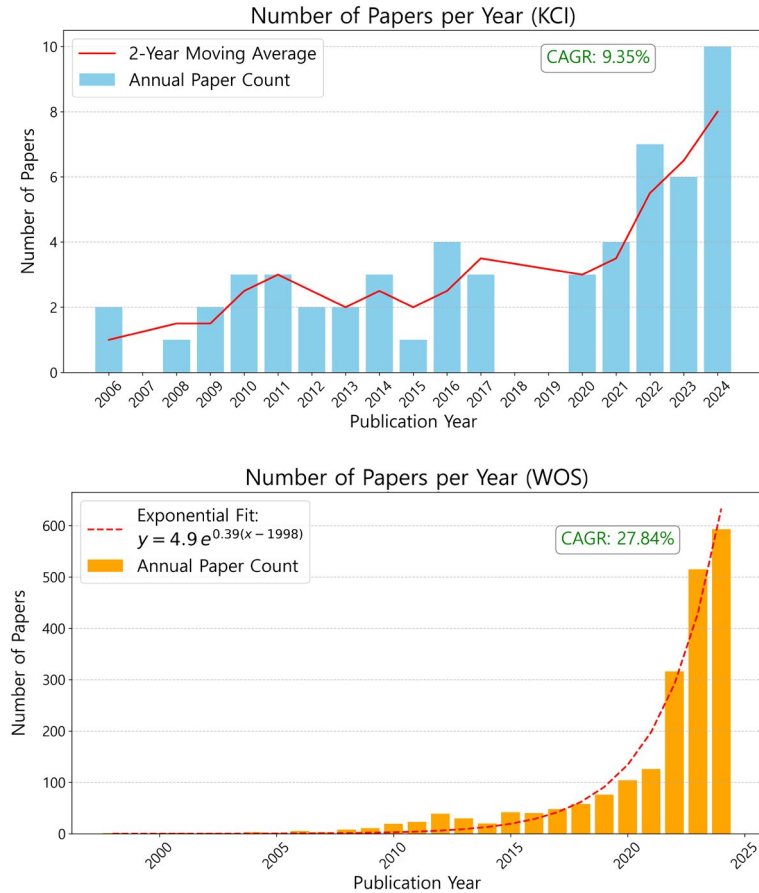


Fig. 1. Distribution of the number of carbon emissions related research papers published by 2024 retrieved from the Korea Citation Index (KCI, top panel) and Web of Science (WOS, bottom panel). Compound Annual Growth Rates (CAGR) are shown in green text.

은 각각 9.35%와 27.84%로 나타났다. 이는 2016년 이전에 체결된 중요한 국제 기후 정책 및 이니셔티브, 특히 2015년 제 21차 당사국총회(COP21, 파리)에서 채택된 2020년부터 모든 국가가 참여하는 신기후체제의 근간이 된 파리협정(Paris Agreement)과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 즉, 2016년 이후의 가파른 성장세는 역사상 최초의 보편적이고 법적 구속력을 가진 글로벌 기후 협정의 영향이 크게 작용한 것으로 해석된다. 이처럼 주요 국제 기후 이니셔티브의 발표는 탄소 배출 관련 연구의 증가와 밀접한 연관성을 가지며, 이 분야의 출판물 수는 기후변화 대응의 시급성이 지속되는 한 앞으로도 증가할 것으로 예상된다.

3.2 주요 연구 기관

탄소 배출 관련 연구 분야에서 학술적 영향력을 행사하는 핵심 주체인 연구 기관들을 파악하고, 이들의 연구 활동 특성을 이해하기 위하여 탄소 배출 관련 연구를 수행한 연구 기관을 분석하였다. 이를 위하여 KCI와 WoS의 검색 자료 중 저자가 소속된 기관명을 추출하여 탄소 배출 관련 연구에서 가장 많은 논문을 출판한 기관을 선별하였다. 이러한 연구 기관들은 탄소 배출 관련 분야에서 주도적으로 연구 성과를 생산하며, 탄소 배출 관련 분야의 발전을 주도하고 있는 것으로 간주할 수 있다.

그림 2는 KCI 검색 결과로부터 탄소 배출 관련 연구

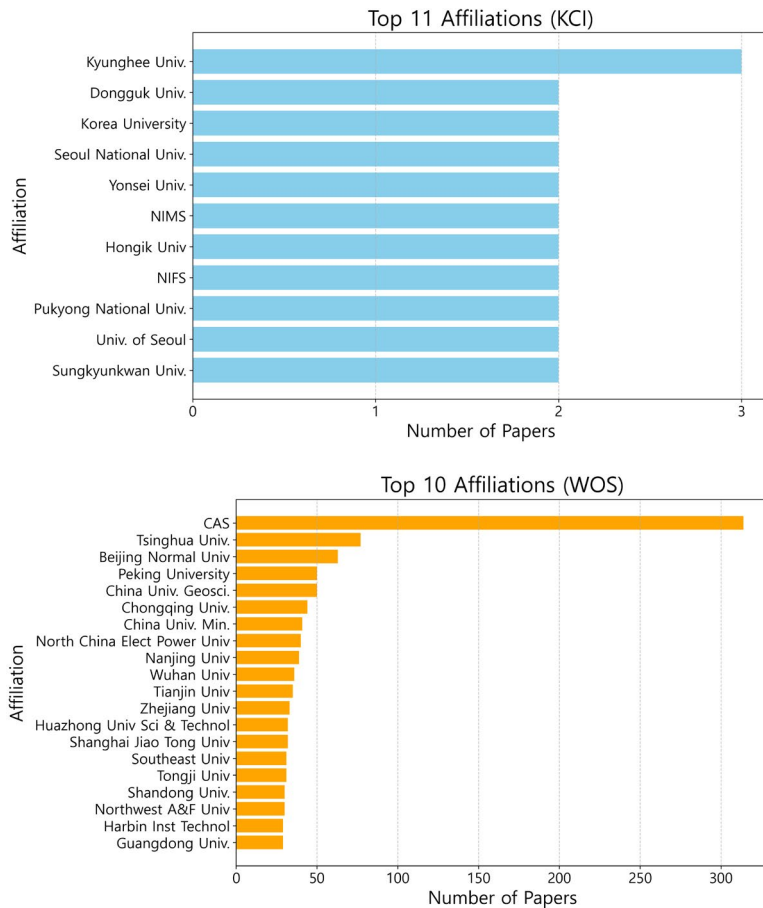


Fig. 2. Number of publications by research institution in carbon emission-related studies, retrieved from the Korea Citation Index (KCI) (top panel) and Web of Science (WoS) (bottom panel).

논문의 게재 수가 많은 순으로 정리된 연구 기관 목록이다. 2024년 12월까지 총 44개의 국내 연구 기관에서 탄소 배출 관련 연구 논문이 게재되었으며, 이 중 그림 2에서 언급된 상위 11개 기관이 전체의 약 41.07% (23건)를 차지하였다. 국내의 연구 기관별 연구 논문 게재 수는 경희대학교에서 3건으로 가장 많은 논문 수를 기록하였고, 동국대학교, 고려대학교, 서울대학교, 연세대학교, 국립기상과학원, 홍익대학교, 국립산림과학원, 부경대학교, 서울시립대학교, 성균관대학교에서 모두 2건씩을 게재한 것으로 나타났다. 이 결과로부터, 국내 연구는 상대적으로 다양한 연구 기관에서 이루어지고 있음을 알 수 있다.

WoS 검색 결과, 전 세계 탄소 배출 관련 상위 10개 연구 기관은 모두 중국의 연구 기관이었다. 이들 기관의 총 출판물 수는 1,066건(약 51.05%)이며, 특히 CAS가 314건(약 15.04%)을 출판하며 가장 많은 수를 기록하였다. 이는 중국의 많은 기관이 탄소 배출 연구 분야에 관심이 높으며, 수많은 연구 성과를 창출하고 있음을 나타낸다. 미국 연구 기관 중에서는 University of California System이 가장 많은 62건, Massachusetts Institute of Technology (MIT) 17건, Columbia University 16건, Cornell University 14건, University of Maryland 13건의 순이었다. 유럽과 영국에서 주요 연구 기관은 독일의 Helmholtz Association of German Res-

earch Centres, 영국의 University of London, EU의 유럽 European Commission's Joint Research Centre (JRC)가 분야 출판물 총수의 5.24%를 차지하였다.

3.3 주요 연구 국가

국가별 탄소 배출 연구 분야의 논문 게재 동향 분석 결과는 개별 국가의 탄소 배출 관련 연구 역량과 기후 변화 대응 노력에 대한 학술적 기여도를 이해하기 위한 정보를 제공한다. 지난 27년(1998~2024년)동안 탄소 배출 연구 분야에서 가장 많은 논문을 출판한 상위 10개국은 그림 3과 같다. 중국(China)은 총 1,284건의 연구 논문을 게재하여 압도적인 1위를 차지하며 탄소 배출 연구를 양적으로 선도하고 있음을 보여준다. 중국의 전체 논문 게재 수는 전체 WoS 검색 데이터(총 2,088건)에서 61.49%를 차지하는 수치이며, 미국(United States)의 논문 게재 수 132건(약 6.32%)과 비교해도 9배 이상 높다. 이러한 결과는 중국이 탄소 배출 연구 분야에 막대한 연구 역량을 집중하고 있음을 명확히 나타내고 있으며, 이는 국가 차원의 강력한 지원이나 대규모 연구 투자와 연관이 있는 것으로 해석될 수 있다. 그리고 인도(India)가 82건, 대한민국(South Korea)은 42건으로 아시아 국가 중 상위권에 위치하고 있다. 영국(United Kingdom) 41건, 호주

(Australia) 36건, 캐나다(Canada) 34건 등 주요 선진국들이 상위권을 유지하고 있으며, 브라질(Brazil) 31건, 일본(Japan) 18건, 러시아(Russia) 17건도 상위 10개국에 포함되었다.

논문의 학술적 영향력을 나타내는 국가별 게재 논문에 대한 총 인용 수 및 평균 인용 수 분석 결과는 그림 4와 같다. 이 결과는 1998년부터 2024년까지의 모든 논문의 인용 건수(45,774건) 중 개별 국가에 대한 논문 인용 수를 합산한 것이다. 중국은 총 1,284건의 게재 논문에 대하여 27,438건의 인용 수를 기록하며 출판 수와 마찬가지로 인용 수에서도 가장 높은 순위를 차지하였다. 이는 전체 인용 횟수 중 약 59.94%에 해당하는 수치이며, 중국이 탄소 배출 연구의 양적 생산성뿐만 아니라 질적인 학술적 영향력 측면에서도 선도적 역할을 담당하고 있음을 명확히 나타낸다. 그리고 미국과 인도의 인용 수는 각각 8,577건과 1,917건을 기록함으로써, 게재 논문 수에 이어 인용 수에서도 높은 영향력을 유지하고 있음을 확인하였다. 호주(1,854건)와 캐나다(1,753건)의 경우는 상대적으로 적은 수의 논문을 출판했음에도 불구하고 높은 인용 수 순위를 보이므로, 이들 국가의 연구는 질적 파급력이 높은 연구를 수행하였음을 시사한다. 영국(1,077건), 브라질(1,009건), 대한민국(800건), 프랑스(574건)와

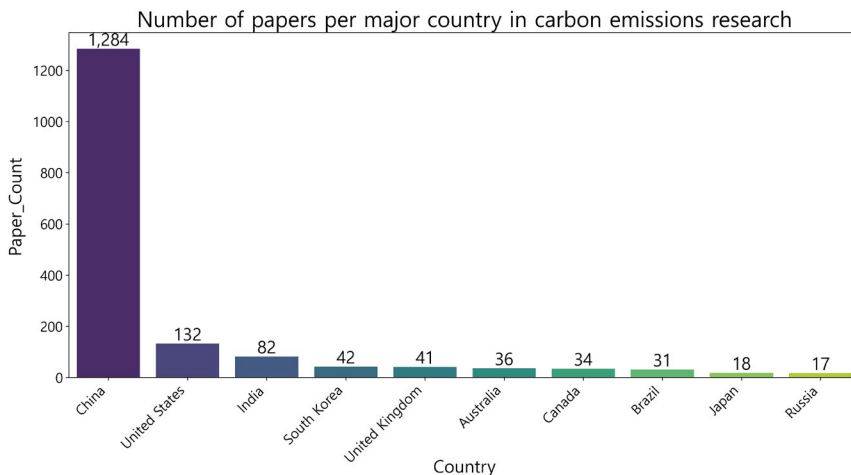


Fig. 3. Number of carbon emission-related research papers published by the top 10 contributing countries (1998~2024), based on data retrieved from the Web of Science (WoS) database.

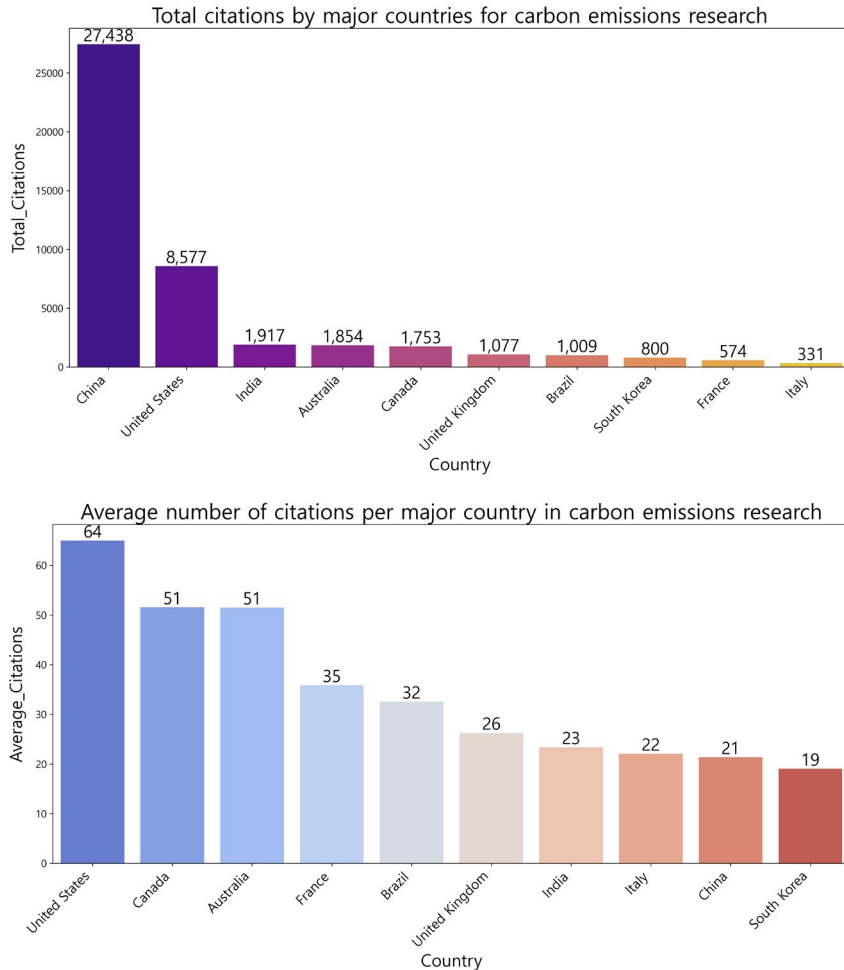


Fig. 4. (top) Total and (bottom) average citations of carbon emission-related research papers published by the top 10 contributing countries (1998~2024), based on data retrieved from the Web of Science (WoS) database.

이탈리아(331건)도 높은 인용 수를 기록했으며 탄소 배출 분야에서 상위권의 연구 역량을 나타냈다.

개별 논문에 대한 질적 우수성을 나타내는 논문 1편당 평균 인용 횟수는 미국이 논문 1편당 평균 64.98건의 인용 수를 기록하여 세계에서 가장 높은 수치를 나타냈으며, 이는 미국이 게재한 연구 논문의 질적 우수성과 파급력을 가지고 있음을 의미한다. 캐나다(51.56건)와 호주(51.50건), 프랑스(35.88건), 브라질(32.55건), 영국(26.27건), 인도(23.38건), 이탈리아(22.06건), 대한민국(19.05건)도 높은 평균 인용 수를

기록하였으며, 이들 국가들은 상대적으로 적은 논문 게재 수에도 불구하고 개별 논문의 영향력이 크다는 것을 알 수 있다. 흥미롭게도, 중국(China)은 평균 21.30건의 인용 수를 기록했으며, 이는 높은 논문 게재 수와 총 인용 수에 비해 논문당 평균 인용 수는 상대적으로 낮음으로써 양적 성장 대비 질적 우수성과 파급력은 다른 국가들에 비해 다소 낮음을 시사한다.

3.4 주요 학술지

학술지별 출판 생산성과 학술적 영향력을 평가하기

위하여 탄소 배출 관련 연구 논문이 주로 게재되는 학술지들은 분석하였다. 이를 통해 해당 연구 분야의 핵심 학술 플랫폼을 식별하고, 연구 성과가 주로 발표되는 채널의 특성을 이해하고자 하였다. WoS 데이터베이스에서 탄소 배출 연구 분야에서 지난 27년간 가장 많은 논문을 출판한 상위 10개 학술지는 표 2와 같다. “Journal of Cleaner Production”이 269건으로 해당 분야에서 가장 활발한 출판 플랫폼임을 입증하였다. 이는 이 학술지가 청정 생산 및 지속 가능성 관련 연구를 폭넓게 다루며 탄소 배출 연구의 핵심 허브 역할을 하고 있음을 시사한다. 그 뒤를 이어 “Environmental Science and Pollution Research” (125건), “Science of The Total Environment” (92건), “Journal of Environmental Management” (84건), “Frontiers in Environmental Science” (46건) 등 환경 과학 및 환경 관리 분야의 주요 학술지들이 높은 출판 수를 기록하며 탄소 배출 연구의 양적 성장을 주도하고 있음을 보여주었다. 그 외 “Buildings” (27건), “Heliyon” (24건), “Ecological Indicators” (23건), “Resources, Conservation and Recycling” (22건), “Environmental Research Letters” (22건) 등도 상위권에 포함되어, 해당 분야의 다양한 연구 주제를 포괄하는 학술지들이 활발하게 활동하고 있음을 알 수 있다.

논문의 학술적 영향력을 나타내는 총 인용 수 분석 결과는 “Journal of Cleaner Production”이 총 8,045건

의 인용 수를 기록하며 출판 수와 마찬가지로 가장 높은 인용수를 차지하였다. 이 학술지는 양적인 생산성 뿐만 아니라 질적인 학술적 영향력 측면에서도 탄소 배출 연구 분야의 핵심 학술지임을 명확히 보여준다. “Science of The Total Environment” (3,537건), “Journal of Environmental Management” (2,639건), “Nature” (2,067건), “Environmental Science and Pollution Research” (2,008건) 도 높은 총 인용 수를 기록하며 해당 분야의 중요한 연구 성과가 이들 학술지를 통해 확산되고 있음을 알 수 있다. 특히 주목할 점은 “Nature” (2,067건)가 출판 논문 수 상위 10개 목록에는 없었음에도 불구하고 총 인용 수에서 4위를 차지했다는 것이다. 이는 “Nature”와 같은 최상위 저널이 탄소 배출 관련된 소수의 연구 논문 수만 게재되더라도, 해당 논문들이 연구의 최신 동향을 제시하거나, 혁신적인 방법론을 제안하거나, 또는 학제 간 융합 연구의 시발점이 되었을 가능성이 높다. “Agriculture Ecosystems and Environment” (1,413건), “Building and Environment” (1,281건), “Nature Communications” (872건), “Geophysical Research Letters” (872건), “Resources Conservation and Recycling” (856건) 도 높은 총 인용 수를 기록하며 해당 분야의 중요한 학술지임을 입증했다.

논문 한 편당 평균적인 학술적 영향력을 나타내는 평균 인용 수 분석 결과는 “Nature”가 논문 1편당 평

Table 2. Top 10 journals in the WoS database that have published the most papers in carbon emissions research over the last 27 years. Impact factor (IF) has been acquired from the 2024 Journal Citation Reports (JCR). Cite score (CS) values are based on citation counts in a range of four years (e.g. 2021~2024) from the SCOPUS.

Journal	Paper count	Total citations	Average citations	IF	CS
Journal of Cleaner Production	269	8045	29.9	10	20.7
Environmental Science and Pollution Research	125	2008	16.1	5.8*	6.6
Science of The Total Environment	92	3537	38.4	8	16.4
Journal of Environmental Management	84	2639	31.4	8.4	14.4
Frontiers in Environmental Science	46	345	7.5	3.7	7
Buildings	27	311	11.5	3.1	4.4
Heliyon	24	260	10.8	3.6	4.1
Ecological Indicators	27	691	30.0	7.4	13.3
Resources, Conservation and Recycling	22	886	38.9	10.9	24.7
Environmental Research Letters	22	583	26.5	5.6	11.1

*year 2022

군 1,433건의 인용 수를 기록하며 연구의 질적 우수성 측면에서 가장 높은 결과를 나타내었다. 즉, Nature지에 게재된 탄소 배출 관련 연구가 전 세계 학계에 미치는 파급력이 매우 크다는 것을 의미한다. 다음으로, “Conservation Biology” (393건), “Proceedings of the IEEE” (376건), “Environmental Health Perspectives” (368건), “Freshwater Biology” (240건), “Molecular Ecology” (233건), “Cryosphere” (177건), “Elementa-Science of the Anthropocene” (151건), “Geophysical Research Letters” (145건), “Ecological Applications” (140건)가 특정 분야의 최상위 학술지들이 높은 평균 인용 수를 기록했다. 이들 학술지는 출판 논문 수는 상대적으로 적을 수 있지만 인용 횟수가 높은 값을 나타냄으로써, 개별 논문이 해당 분야 또는 광범위한 학계에 미치는 영향력이 매우 크다는 것을 시사한다. 그리고 “Geo-

physical Research Letters”는 총 인용 수(공동 8위)와 평균 인용 수(9위) 모두에서 10위권에 들며, 지구 과학 분야의 핵심 저널로서 탄소 연구에 중요한 기여를 하고 있음을 보여주었다.

3.5 주요 인용 논문 분석

최다 인용 논문은 해당 분야의 중요한 이론적, 방법론적 기반을 제공하거나 혁신적인 연구 결과를 제시하여 후속 연구에 지대한 영향을 미친다. 그리고 논문의 인용 횟수는 연구 분야에 대한 중요성과 연구자 자신의 지위를 모두 나타낼 수 있다. 탄소 배출 관련 연구 분야에서 가장 많이 인용된 상위 10편의 논문을 분석하여, 해당 분야의 학술적 지형을 형성하는 핵심 연구와 그 학술적 영향력을 평가하였다. 표 3은 2025년 7월 현재, WoS에서 인용된 상위 10개 논문에 대하여

Table 3. Most cited articles in WOS (top 10, April 10, 2023).

Title	Authors	Journal	Year	Citations
Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China	Liu <i>et al.</i>	Nature	2015	1436
Climate change mitigation: A spatial analysis of global land suitability for clean development mechanism afforestation and reforestation	Zomer <i>et al.</i>	Agriculture Ecosystem & Environment	2008	883
Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases	Arora <i>et al.</i>	Geophysical Research Letters	2011	751
Energy implications of future stabilization of atmospheric CO ₂ content	Hoffert <i>et al.</i>	Nature	1998	631
A preliminary assessment of the impact of COVID-19 on environment? A case study of China	Wang and Su	Science of The Total Environment	2020	586
The Dynamic Impact of Digital Economy on Carbon Emission Reduction: Evidence City-level Empirical Data in China	Li and Wang	Journal of Cleaner Production	2022	472
A synthesis of current knowledge on forests and carbon storage in the United States	McKinley <i>et al.</i>	Ecological Applications	2011	396
Biofuel Plantations on Forested Lands: Double Jeopardy for Biodiversity and Climate	Danielsen <i>et al.</i>	Conservation Biology	2009	393
Smart Operation of Smart Grid: Risk-Limiting Dispatch	Varaiya <i>et al.</i>	Proceedings of the IEEE	2011	376
Global Air Quality and Health Co-benefits of Mitigating Near-Term Climate Change through Methane and Black Carbon Emission Controls	Anenberg <i>et al.</i>	Environmental Health Perspectives	2012	368

인용 횟수 순으로 정렬하였다. 가장 높은 순위의 논문은 Nature지에 2015년에 게재된 논문 제목 “Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China”로 1,436회 인용되었다. 이 연구는 2000년부터 2013년까지의 중국 탄소 배출량이 기존에 일반적으로 받아들여지던 추정치보다 상당히 낮다는 것을 발견하였고, 2012년 이후 중국의 탄소 배출량 증가율이 둔화되었을 가능성을 시사했다(Liu *et al.*, 2015). 중국의 배출량 추정치가 낮아짐에 따라, 전 세계 탄소 예산(global carbon budget)의 재평가 필요성이 제기되었고, 정확한 배출량 추정을 위한 신뢰할 수 있는 데이터의 중요성과 국가별 통계 시스템의 투명성 확보의 필요성을 강조했다. 이 논문은 국가 탄소 배출량 추정 방법론 및 불확실성에 대한 수많은 후속 연구를 촉발하는 계기가 되었다. 2위 논문은 883회 인용된 “Climate change mitigation: A spatial analysis of global land suitability for clean development mechanism afforestation and reforestation” (Zomer *et al.*, 2008)이다. 이 연구는 기후변화 완화 전략으로서 산림 조성 및 재조림 프로젝트의 전 세계적 잠재력을 공간적으로 평가한 중요한 기여를 했다. 3위 논문은 751회 인용된 “Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases” (Arora *et al.*, 2011)에서는 IPCC 제5차 평가보고서(AR5)에서 사용된 시나리오를 충족시키기 위해 인류가 배출할 수 있는 누적 탄소 배출량의 상한선을 계산하였으며, 미래 기후 목표 달성을 위한 탄소 수지(carbon budget)를 제시하였다. 4위 논문은 Nature지에서 631회 인용된 “Energy implications of future stabilization of atmospheric CO₂ content”이다. 이 논문에서는 탄소 순환/에너지 모델을 활용하여 다양한 대기 CO₂ 배출 시나리오에서 전력량을 추정하였으며, 에너지 시스템 전반의 혁신을 통해 탄소 배출 없는 전력을 대규모로 생산할 수 있는 기술 개발과 도입이 필요하다는 점을 강조 하였다.

그리고, 지속적인 탄소 배출이 아닌 단기적 또는 복합적 특성에 관한 연구로서, 코로나19 팬데믹으로 인

한 중국의 사회적 봉쇄가 환경 시스템에 미치는 단기적 변화에 관한 연구(Wang and Su, 2020)와 중국 도지에서 디지털 기술이 환경 지속 가능성에 기여하는 영향에 관한 연구(Li and Wang, 2022), 미국 산림의 탄소 저장 능력에 따른 탄소 격리 전략 수립 연구(McKinley *et al.*, 2011), 지속 가능한 에너지 전환의 복잡성을 강조한 연구(Danielsen *et al.*, 2009), 스마트 그리드의 효율성과 탄소 배출(Varaiya *et al.*, 2011), 단기 기후변화 완화를 위한 탄소 배출 통제가 전 세계 대기 질 개선과 공중 보건 증진에 미치는 영향에 관한 연구(Anenberg *et al.*, 2012)가 수행되었다. 이러한 주요 연구 논문은 탄소 배출과 관련된 핵심 연구로 설정되어 관련 연구 또는 파생 연구를 위한 토대를 마련했다.

4. 탄소 배출 연구의 지식 네트워크 분석

4.1 키워드 동시 발생 네트워크

연구 논문에서 사용되는 핵심 단어인 키워드는 연구 관심사, 연구 분야, 연구 대상, 연구 방법 등을 대표하며 관련 분야의 연구 동향 및 논문들 간의 관련성을 밝히는 데 중요한 역할을 한다. 만일, 두 개 이상의 키워드가 연구 논문 내에서 동시에 사용되는 빈도를 분석한다면, 함께 자주 등장하는 키워드들은 해당 연구 분야 내에서 밀접하게 연관된 개념이나 주제를 형성하는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 분석 방법을 키워드 동시 발생 분석(Keyword Co-occurrence Analysis (KCA))이라고 하며, KCA는 서지정보학에서 일반적인 연구 방법이다(Khan and Wood, 2015).

WOS 데이터베이스에서 수집한 탄소 배출 관련 연구 논문들의 키워드 동시 발생 네트워크는 VOSviewer를 사용하여 분석하였다. 그림 5에서는 탄소 배출 관련 연구 분야 내 주요 주제와 이들 간의 상호 연관성을 시각적으로 파악하였다. 전체 논문에서 사용된 키워드 네트워크 분석 결과는 5개의 핵심 주제 영역을 대표하는 클러스터로 구성되어 있다. 이 그림에서 네트워크 내 노드의 크기는 해당 키워드의 출현 빈도를

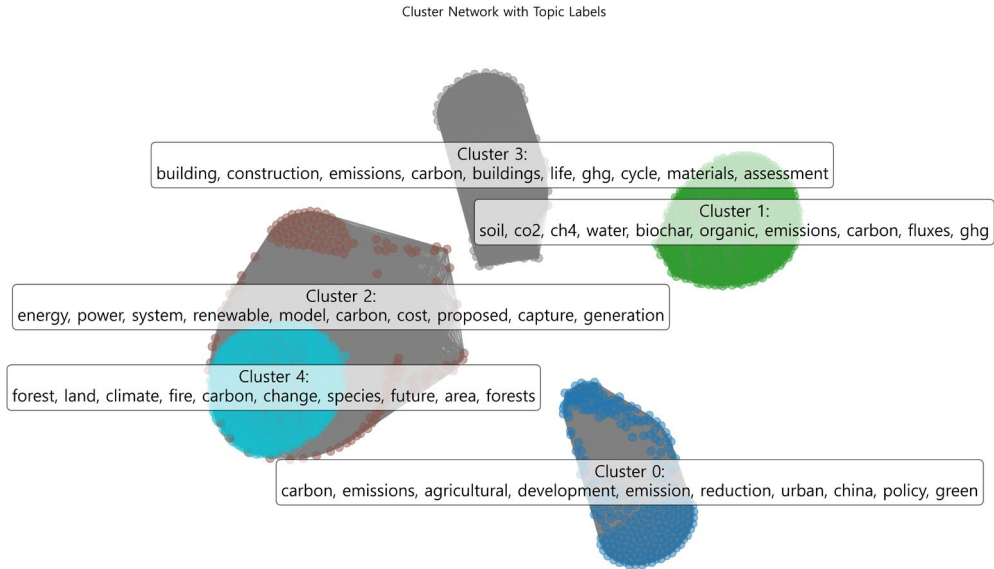


Fig. 7. Network visualization of research clusters based on abstract analysis of WOS publications.

플릭스와 바이오차(클러스터 1), 재생 에너지 시스템(클러스터 2), 건설 관련 탄소 평가(클러스터 3), 산림 생태 및 기후변화(클러스터 4)로 분류되었다.

표 4에는 네트워크 클러스터별 핵심 주제어와 연구 중점 분야, 그리고 잠재적 응용 분야에 대하여 정리하였으며, 각 클러스터별 특징에 대한 설명은 다음과 같다. 먼저, 첫 번째 클러스터(Cluster 0)는 carbon, emissions, agricultural, development, policy 등의 키워드가 중심을 이루며, 탄소 배출과 지속 가능한 개발, 특히 중국을 비롯한 국가들의 도시화 및 정책적 대응 전략에 대한 연구가 집중된 영역으로 나타났다. 이 클러스터는 특히 정책과 제도 중심의 환경관리 및 온실가스 저감 방안에 관한 논의가 중심이었다. 두 번째 클러스터(Cluster 1)는 soil, co2, ch4, biochar, fluxes 등 토양에서 발생하는 탄소 및 온실가스의 흐름과 관련된 키워드가 중심을 이루며, 토양을 기반으로 한 온실가스 배출 및 생물학적 탄소 순환 연구가 주를 이루었다. 바이오차(biochar)와 같은 농업기술의 적용도 이 클러스터의 핵심 주제 중 하나로 확인되었다. 세 번째 클러스터(Cluster 2)는 energy, renewable, system, capture, gener-

ation 등의 키워드를 중심으로, 재생에너지 기술, 에너지 시스템 설계 및 탄소 포집 기술에 관한 연구가 집중되었다. 이 클러스터는 기술적 해법을 통한 온실가스 저감을 주제로 하며, 특히 에너지 효율성과 기술경제성 평가가 중요한 부분을 차지하고 있다. 네 번째 클러스터(Cluster 3)는 building, construction, emissions, materials, assessment 등의 키워드가 중심으로, 건물 및 건축 자재의 생애주기평가를 포함한 환경 영향 분석 연구가 주를 이루었다. 건설 부문에서의 탄소 배출과 친환경 설계 전략 등이 이 클러스터의 주요 주제이다. 다섯 번째 클러스터(Cluster 4)는 forest, land, fire, climate, species 등의 키워드가 나타났으며, 산림 생태계와 기후변화의 상호작용, 산불, 생물다양성 감소 등의 주제를 다루는 연구로 구성되어 있다. 특히, Cluster 2와 Cluster 4는 관련성이 아주 높은 주제들로 상호 간의 공동 연구 및 교류가 활발히 발생하였음을 알 수 있다. 이러한 텍스트마이닝 결과를 통하여 탄소 배출과 관련된 연구의 다차원적 구조를 이해할 수 있으며, 미래의 학술동향 분석이나 연구 협업 네트워크 구축, 정책 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

Table 4. Characterization of research clusters in carbon emission related studies retrieved by text mining approach.

Cluster	Representative keywords	Thematic area	Research focus area	Potential application areas
0	Carbon, emission, agriculture, development, reduction, urban, China, policy, green	Urban and Agricultural Emission Policies	Carbon emissions due to agricultural and urban development; Policy trends in China.	Urban Planning, Agricultural Policy, Green Transition
1	Soil, CO ₂ , CH ₄ , water, biochar, organic, emission, carbon, flux, greenhouse gas	Soil Carbon and Greenhouse Gas Dynamics	Soil carbon cycling, organic amendments like biochar, and associated greenhouse gas emissions.	Carbon Sequestration, Sustainable Agriculture
2	Energy, power, system, renewable, model, carbon, cost, proposal, capture, generation	Renewable Energy Systems and Carbon Capture	Energy generation, renewable energy systems, carbon capture, and cost modeling.	Renewable Energy, CCS (Carbon Capture and Storage)
3	Building, construction, emission, carbon, living, greenhouse gas, cycle, material, assessment	Building Sector Emission Assessment	Carbon footprint assessment of building materials, construction life cycle, and life cycle assessment (LCA).	Green Building, Material Science, LCA
4	Forest, land, climate, fire, carbon, change, species, future, area, forestry	Forest Ecosystems and Climate Change	Forest carbon dynamics under environmental change, land use, climate impact, and biodiversity.	Climate Policy, Forest Management, Conservation

5. 요약 및 결론

본 연구는 탄소 배출 관련 연구의 학술적 동향 및 지식 구조 분석을 위하여 계량서지학적 분석과 텍스트 마이닝 기법을 활용한 분석을 수행하였다. 전 세계에서 출판된 탄소 배출 관련 연구논문 정보를 이용하여 연도별 추세, 국가/기관/학술지별 연구 동향, 키워드 동시 출현 분석, 그리고 네트워크 분석을 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 2024년 현재까지 탄소 배출 관련 연구 논문의 게재 수는 매년 증가하는 추세를 보였으며, 특히 2015년 파리 기후 협정 채택 이후 급격한 양적 성장 추세를 나타냈다. 이러한 결과는 국제적 기후 정책 및 이니셔티브가 탄소 배출 관련 연구 활동에 미치는 영향이 매우 큰 것을 시사한다.

둘째, 중국은 탄소 배출 연구의 양적 생산성 및 영향력 측면에서 전 세계적인 우위를 나타내고 있다. 2024년까지 전 세계에서 출판된 논문의 61.49%와 총 인용 수 59.94%가 중국 연구자들에 의하여 작성되었으며 이는 전 세계 최상위 수준이다. 반면에, 미국은 게재

논문 1편당 평균 인용 횟수가 64.98건으로 세계에서 가장 높은 질적 영향력 수치를 기록하였다. 그러나, 중국은 21.30건의 인용 수를 기록하여 양적 성장 대비 질적 우수성과 파급력이 다소 낮았다.

셋째, 탄소 배출 관련 연구를 수행하는 주요 연구 기관은 KCI 검색 결과에서 국내 44개 기관이 비교적 크게 연구에 참여하였다. WoS 검색 결과에서는 중국 과학원(CAS)과 같은 중국의 연구 기관들이 많은 출판 숫자를 기록하며 양적인 성장을 유도하고 있다. 이는 국가별 탄소 배출 관련 연구의 집중도 및 전략적 투자의 차이를 반영하는 것으로 재 해석할 수 있다.

넷째, 학술지 중 'Journal of Cleaner Production'은 논문 게재 수와 총 인용 수 모두에서 가장 높은 수치를 보였다. 이 외에도 환경 과학 및 관리 분야의 주요 학술지들이 탄소 배출 연구에 대한 핵심적인 학술 플랫폼 역할을 수행하고 있다. 특히, 'Nature'와 같은 최상위 학술지는 소수의 논문 게재에도 불구하고 매우 높은 인용 수를 기록하였다. 이러한 주요 학술지들은 탄소 배출 관련 분야의 최신 지식과 혁신적 연구 내용을 공유하기 위한 핵심적인 역할을 담당한다.

다섯째, 최다 인용 논문들의 핵심 연구 주제 및 연구 내용은 주로 중국의 탄소 배출량 재평가, 글로벌 탄소 예산, 기후변화 완화를 위한 산림 조성, 코로나19 팬데믹의 환경 영향, 디지털 기술의 탄소 배출 기여, 스마트 그리드, 산림 탄소 저장 전략 등을 포함하였다. 이 논문들은 파생 또는 후속 연구의 이론적, 방법론적 기반 지식을 제공하며 탄소 배출 분야의 지식 확장에 중요한 역할을 해왔다.

이상의 결과를 통하여 탄소 배출 연구 분야의 연구 동향 및 미래 연구 방향 설정에 중요한 기초 자료를 제공할 수 있다. 특정 국가, 기관, 학술지, 그리고 핵심 논문의 기여도를 파악함으로써 효율적인 협력 네트워크를 구축하며, 연구 성과를 효과적으로 확산시킬 전략을 수립할 수 있을 것이다. 그러나, 본 연구의 한계점으로는 KCI와 WoS 데이터베이스에서 사용된 검색 키워드 및 필터링 기준에 따라 결과가 달라질 수 있다는 점이다. 따라서, 보다 다양한 학술 데이터베이스(예: Scopus, PubMed, Google Scholar 등)를 추가적으로 활용하여 데이터의 다양성을 높일 수 있을 것이다. 부가적으로, 학술 연구 논문 외에 연구 보고서, 특허 문서 등 검색 대상의 범위를 확장함으로써 탄소 배출 관련 연구 동향 및 지식의 생산 및 활용 분야에 대한 다각적인 분석이 가능하게 할 것이다. 이러한 노력을 통해 탄소 배출 연구의 학술적 흐름과 지식 구조를 더욱 정교하게 파악하고, 실질적인 기후변화 대응 전략 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2025년 서울특별시의 재원으로 서울연구원 연구과제(2025-PR-01)의 일환으로 수행되었습니다.

References

Anenberg, S.C., Schwartz, J.D., Shindell, D.T., Amann, M., Faluvegi,

G.S., Klimont, Z., JanssensMaenhout, G., Pozzoli, L., Dingenen, R.V., Vignati, E., Emberson, L.D., Muller, N.Z., West, J.J., Williams, M.L., Demkine, V., Hicks, W.K., Kuylenstierna, J.C., Raes, F., Ramanathan, V. (2012) Global air quality and health co-benefits of mitigating near-term climate change through methane and black carbon emission controls, *Environmental Health Perspectives*, 120, 831-839. <https://doi.org/10.1289/ehp.11043>

Arora, V.K., Scinocca, J.F., Boer, G.J., Christian, J.R., Denman, K.L., Flato, G., Kharin, V.V., Lee, W., Merryfield, W.J. (2011) Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases, *Geophysical Research Letters*, 38. <https://doi.org/10.1029/2010GL046270>

Bao, X., Jin, Y. (2025) Insight into border carbon adjustment: a visual bibliometric analysis from 2009 to 2024, *Humanities and Social Sciences Communications*, 12, 1114. <https://doi.org/10.1057/s41599-025-05401-x>

Biancalani, F., Gnecco, G., Metulini, R., Riccaboni, M. (2024) The impact of the European Union emissions trading system on carbon dioxide emissions: a matrix completion analysis, *Scientific Reports*, 14, 19676. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70260-6>

Bukar, U.A., Sayeed, M.S., Razak, S.F., Yogarayan, S., Amodu, O.A., Mahmood, R.A. (2023) A method for analyzing text using VOSviewer, *MethodsX*, 11, 102339. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102339>

Danielsen, F., Beukema, H., Burgess, N.D., Parish, F., Brühl, C.A., Donald, P.F., Murdiyarto, D., Phalan, B., Reijnders, L., Struebig, M.J., Fitzherbert, E.B. (2009) Biofuel plantations on forested lands: double jeopardy for biodiversity and climate, *Conservation Biology*, 23(2), 348-358. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.01096.x>

Deng, Z., Zhu, B., Davis, S., Ciais, P., Guan, D., Gong, P., Liu, Z. (2025) Global carbon emissions and decarbonization in 2024, *Nature Reviews Earth & Environment*, 6, 231-233. <https://doi.org/10.1038/s43017-025-00658-x>

Duren, R.M., Miller, C.E. (2012) Measuring the carbon emissions of megacities, *Nature Climate Change*, 2, 560-562. <https://doi.org/10.1038/nclimate1629>

Friedlingstein, P., Solomon, S. (2005) Contributions of past and present human generations to committed warming caused by carbon dioxide, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(31), 10832-10836. <https://doi.org/10.1073/pnas.0504755102>

Hoffert, M.I., Caldeira, K., Jain, A.K., Haites, E.F., Harvey, L.D., Potter, S.D., Schlesinger, M.E., Schneider, S., Watts, R.,

- Wigley, T.L., Wuebbles, D.J. (1998) Energy implications of future stabilization of atmospheric CO₂ content, *Nature*, 395, 881-884. <https://doi.org/10.1038/27638>
- Huang, C., Ye, Y., Jin, Y., Liang, B. (2023) Research Progress, Hotspots, and Evolution of Nighttime Light Pollution: Analysis Based on WOS Database and Remote Sensing Data, *Remote Sensing*, 15(9), 2305. <https://doi.org/10.3390/rs15092305>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (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* [Masson-Delmotte, V. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 3-32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Jones, M.W., Peters, G.P., Gasser, T., Andrew, R.M., Schwingshackl, C., Gütschow, J., Houghton, R.A., Friedlingstein, P., Pongratz, J., Le Quéré, C. (2023) National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850, *Scientific Data*, 10, 155. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02041-1>
- Kazlou, T., Cherp, A., Jewell, J. (2024) Feasible deployment of carbon capture and storage and the requirements of climate targets, *Nature Climate Change*, 14, 1047- 1055. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02104-0>
- Khan, G.F., Wood, J. (2015) Information technology management domain: emerging themes and keyword analysis, *Scientometrics*, 105, 959-972. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1712-5>
- Kim, S., Gil, J. (2019) Research paper classification systems based on TF-IDF and LDA schemes, *Human-centric Computing and Information Sciences*, 9(30), 1-21. <https://doi.org/10.1186/s13673-019-0192-7>
- Lee, K., Kim, K. (2024). Monitoring and forecasting XCO₂ using OCO-2 satellite data and deep learning, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(5), 572-584, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.5.572>
- Lee, K.-H., Kim, Y.-J. (2010) Satellite remote sensing of Asian aerosols: A case study of clean, polluted, and Asian dust storm days, *Atmospheric Measurement Techniques*, 3, 1771-1784. <https://doi.org/10.5194/amt-3-1771-2010>
- Lee, K.-H., Shin, S.-K. (2022) Effect of reduced emissions from thermal power plants in China on local air quality improvement, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(2), 304-317, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.2.304>
- Li, Z., Wang, J. (2022) The dynamic impact of digital economy on carbon emission reduction: evidence city-level empirical data in China, *Journal of Cleaner Production*, 351, 131570. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131570>
- Ling, C., Tang, J., Zhao, P., Xu, L., Lu, Q., Yang, L., Huang, F., Lyu, W., Yang, J. (2024) Unraveling the relation between carbon emission and carbon footprint: A literature review and framework for sustainable transportation, *npj Sustainable Mobility and Transport*, 1, 13. <https://doi.org/10.1038/s44333-024-00013-5>
- Liu, Z., Guan, D., Wei, W., Davis, S.J., Ciais, P., Bai, J., Peng, S., Zhang, Q., Hubacek, K., Marland, G.H., Andres, R.J., Crawford-Brown, D., Lin, J., Zhao, H., Hong, C., Boden, T.A., Feng, K., Peters, G.P., Xi, F., Liu, J., Li, Y., Zhao, Y., Zeng, N., He, K. (2015) Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China, *Nature*, 524, 335-338. <https://doi.org/10.1038/nature14677>
- Mahmood, B., Sultan, N.A., Thanoon, K.H., Kadhim, D.S. (2021) Measuring scientific collaboration in co-authorship networks, *IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI)*, 10(4), 1103-1114. <https://doi.org/10.11591/ijai.v10.i4.pp1103-1114>
- McKinley, D.C., Ryan, M.G., Birdsey, R.A., Giardina, C.P., Harmon, M.E., Heath, L.S., Houghton, R.A., Jackson, R.B., Morrison, J.F., Murray, B.C., Patakl, D.E., Skog, K.E. (2011) A synthesis of current knowledge on forests and carbon storage in the United States, *Ecological Applications: Ecological Society of America*, 21(6), 1902-1924. <https://doi.org/10.1890/10-0697.1>
- Mehmood, K., Saifullah, Qiu, X., Mohsin Abrar, M. (2023) Unearthing research trends in emissions and sustainable development: Potential implications for future directions, *Gondwana Research*, 119, 227-245, <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.02.009>
- Moreno-Guerrero, A., Gómez-García, G., López-Belmonte, J., Rodríguez-Jiménez, C. (2020) Internet addiction in the Web of Science Database: A review of the literature with scientific mapping, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 2753. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082753>
- Radhakrishnan, S., Erbis, S., Isaacs, J.A., Kamarthi, S. (2017) Novel keyword co-occurrence network-based methods to foster systematic reviews of scientific literature, *PLoS One*, 12(3), e0172778. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172778>
- Tan, H., Mong, G.R., Wong, S.L., Wong, K.Y., Sheng, D.D., Nyakuma,

- B.B., Othman, M.H., Kek, H.Y., Razis, A.F., Wahab, N.H., Wahab, R.A., Lee, K.Q., Chiong, M., Lee, C.H. (2024) Airborne microplastic/nanoplastic research: a comprehensive Web of Science (WoS) data-driven bibliometric analysis, *Environmental Science and Pollution Research International*, 31, 109-126. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31228-7>
- Udara Wilhelm Abeydeera, L.H., Wadu Mesthrige, J., Samarasinghalage, T.I. (2019) Global research on carbon emissions: A scientometric review, *Sustainability*, 11(14), 3972. <https://doi.org/10.3390/su11143972>
- Varaiya, P.P., Wu, F.F., Bialek, J.W. (2011) Smart operation of smart grid: risk-limiting dispatch, *Proceedings of the IEEE*, 99(1), 40-57. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2080250>
- Wang, L., Xu, Y., Qin, T., Wu, M., Chen, Z., Zhang, Y., Liu, W., Xie, X. (2023) Global trends in the research and development of medical/pharmaceutical wastewater treatment over the half-century, *Chemosphere*, 331, 138775. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138775>
- Wang, Q., Su, M. (2020) A preliminary assessment of the impact of COVID-19 on environment - A case study of China, *Science of The Total Environment*, 728, 138915, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138915>
- Wang, X., Feng, X. (2022) Research on the relationships between discourse leading indicators and citations: perspectives from altmetrics indicators of international multidisciplinary academic journals, *Library Hi Tech*, 42, 1165-1190. <https://doi.org/10.1108/lht-09-2021-0296>
- Xu, X., Gou, X., Zhang, W., Zhao, Y., Xu, Z. (2023) A bibliometric analysis of carbon neutrality: Research hotspots and future directions. *Heliyon*, 9(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18763>
- Zomer, R.J., Trabucco, A., Bossio, D.A., Verchot, L.V. (2008) Climate change mitigation: a spatial analysis of global land suitability for Clean Development Mechanism afforestation and reforestation, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 126, 67-80. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.014>

Authors Information

- 이권호 (강릉원주대학교 복사위성연구소 대기환경과학과 교수)
(kwonho.lee@gmail.com)
- 신성균 (서울연구원 연구기획조정실 선임연구위원)
(skyun@si.re.kr)
- 김관철 (차세대융합기술연구원 첨단환경감시센터 책임연구위원)
(fehouse@snu.ac.kr)