

기후변화 분야의 국제 협력과 연구영향력에 관한 연구

서만덕

한국해양과학기술원 해양데이터·인프라본부 본부장

Research collaboration and its impact on the field of climate change

Seo, Man Deok

Senior Director, Marine Data & Infrastructure Department, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan, Korea

ABSTRACT

This study conducted network analysis of 43,393 climate change-related articles published in SCIE from 1984 to 2023 to analyze the structures of research collaborations and assess the impacts of these collaborations on the quality of research. The United States plays a central role in climate change research, with countries such as the United Kingdom, Germany, Australia, and China also making important contributions to the research collaboration network. Key hubs of institutional collaboration include the Chinese Academy of Sciences (CAS), the University of California, France's Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), the University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), and the Helmholtz Association, all of which display high network centrality. Institutional collaboration structures are characterized by a mix of global and national clusters, with global clusters dominated by institutions in Germany, the United Kingdom, Switzerland, Spain, and the United States, while national clusters are predominant in high productivity countries such as the United States, France, China, and Australia. Multinational and multi-institutional collaborations also outperformed single-country and single-institution research across all scales of research impact. In particular, multinational research collaborations show Category Normalized Citation Impact (CNCI) scores that are approximately 30% higher, while Journal Impact Factor (JIF) is around 35% higher than single-country research. Furthermore, increases in the number of collaborating countries and institutions tend to result in higher research impact. This finding suggests that the diversity of countries and institutions involved in a study contributes positively to the quality of the research.

Key words : Climate Change, Research Collaboration, Research Impact, Network Analysis, Bibliometric Analysis

1. 서론

1.1. 연구배경

기후변화는 지구 환경과 인류 생존을 위협하는 매우 시급한 문제이며, 이에 따른 기후위기와 해결 방안은 국제 사회의 주요 관심사로 부각되고 있다. 특히 인간활동으로 기인한 온실가스 배출 증가는 기후 온난화를 심화시키고 있으며, 기온 상승, 해수면 상승, 극단적 기후 현상 등을

초래함으로써 생태계 파괴뿐만 아니라 인간 사회의 생존 기반에도 광범위한 영향을 미치고 있다. 이에 따라 국제 사회는 기후변화 문제에 대응하기 위해 1992년 6월 기후 변화협약을 체결한 이후, 1997년 교토의정서(Kyoto Protocol)와 2015년 파리협정을 채택하였다. 이를 통해 온실가스 배출량을 줄이고 지구의 평균기온 상승폭을 2도 이하로 유지하는 것을 목표로 하고 있다(Kang, 2020). 특히 세계 각국은 탄소중립을 실현하기 위해 구조적 전환을 추진 중이다. 미국은 청정에너지 투자 확대와 탄소포집 및

†Corresponding author : mdseo@kiost.ac.kr (Korea Institute of Ocean Science & Technology, Haeyang-Ro 385, Yeongdo Gu, Busan, 49111, Korea. Tel. +82-51-664-3802)

ORCID 서만덕 0000-0002-0540-5440

저장(Carbon Capture and Storage, CCS) 기술 도입을 통해 온실가스 감축 목표를 강화하고 있으며(KEEI, 2021), 영국은 2008년 세계 최초로 기후변화법을 제정하여 2050 탄소 중립 목표를 법제화하고, 해상풍력, 차세대 원자력, 무공해 차량, 탄소포집·활용·저장(Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS) 등을 중점기술로 제시하고 있다(Lee and Lee, 2021). 한국 또한 2050년 탄소중립을 목표로 재생에너지의 비중 확대, 저탄소 전환, 친환경 기술 개발 및 보급을 포함한 다각적인 대응 전략을 수립 및 이행하고 있다(ROK, 2020).

기후변화는 단순히 수동적으로 대응할 문제가 아니라, 사회와 환경의 패러다임 전환을 요구하는 중대한 과제이다. 특히 기후변화 연구는 대기, 생태계, 환경, 경제, 사회 제도, 보건 등 다양한 분야와 밀접하게 연관되어 있어 단일 학문적 접근만으로는 해결하기 어려운 복합적 문제로 다학제적 접근이 필요하다(Lenhard et al., 2006; Schipper et al., 2021). 또한 기후변화 문제는 특정 국가나 기관만의 노력으로 해결할 수 없는 글로벌 이슈로 다양한 국가와 기관 간 협력적 연구를 통해 포괄적이고 효과적인 해결책을 도출하는 것이 필요하다. 이러한 협력의 대표적인 사례로 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change)가 있으며, 전 세계 과학자들의 협력을 통해 기후변화에 대한 종합적인 평가를 제공하며, 이를 바탕으로 국가 및 국제 차원의 정책 수립에 중요한 과학적 근거를 제시하여 왔다(Bolin, 2007; Hulme and Mahony, 2010). 이처럼 국제적 협력 모델은 기후변화와 같은 복잡한 글로벌 문제를 해결하는 데 필수적이다.

기후변화 연구는 학술적 중요성 뿐만 아니라 정책 수립과 기술 개발을 위한 핵심적인 기초자료로서 중요한 역할을 하고 있으며, 연구의 생산성과 영향력은 국가와 기관 간 협력 네트워크 구조와 밀접하게 관련될 가능성이 크다. 특히 연구협력은 단순히 연구 결과 생산을 넘어, 연구의 질적수준과 활용 가능성에도 영향을 미칠 수 있다. 이에 본 연구는 기후변화 연구에서 주요 주체인 국가와 기관들이 형성하고 있는 협력적 네트워크 구조를 계량적으로 분석하고, 이러한 협력 관계가 연구 영향력에 미치는 영향을 규명하는 것을 목표로 한다.

1.2. 선행연구

기후변화 연구와 관련된 계량정보학적 분석은 주로 연구주제와 연구생산성 중심으로 이루어져 왔다. Yoo et al.

(2019)은 한국기후변화학회지에 게재된 논문을 대상으로 텍스트 분석 및 LDA 주제 모델링 기법을 활용하여, 온실가스 배출, 완화 및 적응 등이 기후변화 연구의 핵심 주제임을 확인하였다. Fu and Waltman (2022)은 2001년부터 2018년까지 약 12만 편의 기후변화 관련 논문을 바탕으로 계량정보학적 분석을 수행하였고, 연구의 초점이 기후 시스템 이해에서 에너지의 효율적 사용, 법률 제정 등과 같은 기술 및 정책 개발로 이동하고 있으며, 선진국과 개발도상국 간 논문 생산성의 불균형이 여전히 존재한다고 밝힌 바 있다. Lindawati and Meiryani (2024)도 2006년부터 2022년까지 SCOPUS DB에 수록된 기후변화 관련 논문을 분석하여, 연구주제가 기후 시스템의 이해에서 기술 및 규제 개발로 이동하고 있으며, 특히 중국과 미국이 높은 논문 생산성을 보이고 있다고 밝혔다. Ouyang et al. (2022)은 1990년부터 2020년까지 기후변화와 건강 관련 연구를 계량적으로 분석하여, 선진국 연구자들을 중심으로 논문수가 급격히 증가하였으며, 기후변화 위험 평가와 적응, 지속 가능한 개발, 전염병, 기상이변, 대기오염 등의 주제 군집을 도출하였다. Baidya and Saha (2024)는 기후변화와 지속가능한 개발에 대해 연구주제, 연구국가 및 기관, 인용도 등을 분석하여, 중국과학원이 연구생산성에서 주도적인 역할을 하고 있고, 국가별로는 미국, 중국, 인도가 높은 연구생산성을 보이며 국가 간 피인용수의 격차가 크다는 점을 밝혔다. Sun et al. (2022)은 도시와 기후변화에 대한 연구에서 중국과 미국이 전체 논문 생산의 36%를 차지하며, 기후변화와 도시화의 영향, 도시 기후변화 적응이 주요 연구 주제임을 확인하였다.

국제 협력과 논문의 영향력 간의 관계를 분석한 연구도 다수 이루어졌다. Velez-Estevéz et al. (2022)은 도서관 및 정보학 분야의 논문을 대상으로 협력유형에 따른 연구영향력 차이를 분석하였으며, 국제 협력이 활발할수록 논문의 최대 인용수가 증가하고, 인용 수 상위 25%의 논문비율이 높아지는 경향을 확인하였다. 또한 국제 협력은 전통적인 주제분야 보다 최신 주제에서 활발히 이루어지는 것으로 나타났다. Ni and An (2018)은 2011년부터 2015년까지 Web of Science에 등재된 공중 보건, 환경, 직업 건강 분야의 논문을 분석하여, 국가 수와 인용 수 간에는 긍정적인 상관관계가 있음을 밝혔다. 이 밖에도 국제 협력이 논문의 피인용수와 영향력에 긍정적인 영향을 미치고 있음이 관련 연구에서 입증된 바 있다(Nguyen et al., 2017).

이처럼 기후변화와 관련된 선행연구들은 주로 연구주

제, 연구국가 및 연구생산성을 중심으로 연구동향을 분석하였다. 그러나 국가 및 기관 간 연구협력 관계와 강도를 구조적으로 분석하거나, 연구협력과 연구 영향력 간의 관계를 계량적으로 분석한 연구는 아직 수행되지 않았다.

2. 방법론

2.1. 자료수집 및 전처리

본 연구는 Web of Science 데이터베이스를 활용하여 1984년부터 2023년까지 SCIE 등재 학술지에 게재된 기후변화 관련 논문을 수집하였다. 단, 검색어는 “Climate change”로 설정하고, 검색 범위는 논문 제목(Title)으로 한정하였다. 이는 초록이나 키워드까지 포함할 경우 데이터가 과도하게 증가하고 불필요한 단어가 포함되어 자료의 명확성이 떨어질 수 있기 때문이다. 또한, 논문유형은 Article과 Review로 제한하였으며, 최종적으로 총 43,393 편의 논문을 분석대상으로 확정하였다.

또한 논문의 영향력과 질적수준을 평가하기 위해 InCites DB를 활용하여 논문영향력지수(Category Normalized Citation Impact; CNCI), 주제 내 인용비율(Percentile in Subject Area; PSA), 학술지영향력지수(Journal Impact Factor, JIF) 등의 질적지표를 수집하였다. 논문영향력지수(CNCI)는 논문별 평균 피인용 수를 동일한 논문유형, 학문분야, 출판연도를 기준으로 정규화한 값으로 1.0을 평균으로 하는 상대적 지수이다. 예를 들어, 논문영향력지수(CNCI)의 값이 1.2인 경우 해당 논문이 평균 대비 20% 이상 인용된 것을 의미한다. 주제 내 인용비율(PSA)은 해당논문의 피인용수를 바탕으로 동일주제, 동일연도에 출판된 논문들과의 상대적 순위에 따라 결정되는 백분위수로, 값이 높을수록 우수한 논문이다. 예를 들어 주제 내 인용비율이 99.5일 경우 피인용수가 상위 0.5% 이내에 속하는 것을 의미한다. 학술지영향력지수(JIF)는 학술지의 인용 영향력을 평가하는 지수이며, 특정 연도의 게재된 논문들이 일정 기간 동안 인용된 횟수를 기반으로 산출된 지표로, 그 값이 높을수록 우수한 학술지로 평가된다. 그러나 학술지영향력지수(JIF)가 높다고 하더라도 수록 논문의 영향력이 모두 우수하다고 단정할 수 없으므로, 논문의 질적수준을 평가할 때에는 논문영향력지수(CNCI), 주제 내 인용비율(PSA), 학술지영향력지수(JIF) 등의 다양한 지표를 종합적으로 활용할 필요가 있다.

다음으로 연구협력 관계 분석을 위해 각 논문의 공저자

정보에서 국가와 기관 데이터를 추출 후 정제하였다. 특히 동일 기관이 대소문자 표기, 약어 사용, 이음동의어 등으로 상이하게 표기된 경우 일관된 명칭으로 치환하였다. 또한, 각 논문별 저자 수, 기관 수, 국가 수를 산출하여 연구협력의 구조적 특성을 정량적으로 분석하였다.

2.2. 분석 방법

본 연구는 기후변화 연구의 국가 및 기관 간 연구협력의 구조적 특징을 살펴보고, 연구협력 강도에 따른 연구의 영향력 차이를 비교한 것으로 분석절차는 다음과 같다.

첫째, 기후변화에 대한 분석 대상 논문 43,393편의 기초 통계를 검토하였다. 연도별 논문 수를 분석하여 증감 추이를 파악하였으며, 연구협력의 양상을 확인하기 위해 논문당 국가 수와 기관 수의 평균을 산출하고 빈도분석을 실시하였다. 또한 논문의 영향력을 종합적으로 평가하기 위해 논문영향력지수(CNCI), 주제 내 인용비율(PSA), 학술지영향력지수(JIF) 등 다양한 질적지표를 분석하였다.

둘째, 국가 간 연구협력 관계를 분석하기 위해 국가별 논문 수를 비교하고, 연구협력 네트워크의 중심성을 분석하였다. 네트워크 중심성 분석에 사용되는 지표는 대표적으로 연결 중심성(degree centrality), 근접 중심성(closeness centrality), 매개 중심성(betweenness centrality) 등이다. 연결 중심성은 특정 노드가 다른 노드와 얼마나 많이 직접적으로 연결되어 있는지를 나타내는 지표이며(Kim, 2011), 직접적인 연결이 많을수록 네트워크 내에서 중요한 중심축 역할을 하는 경우가 많다. 근접 중심성은 네트워크에서 특정 노드가 다른 모든 노드들과 얼마나 가까운 지 측정하는 것으로, 노드 간 직접적인 연결 뿐 아니라 간접적으로 연결된 모든 노드와의 거리를 계산한다. 근접 중심성이 높은 노드는 네트워크 내의 다른 모든 노드들과 비교적 짧은 경로로 연결되어 있어, 정보나 자원 전달에서 중심 역할을 나타낸다(Son, 2002). 매개 중심성은 네트워크에서 특정 노드가 다른 노드들 간의 경로에서 얼마나 중요한 중개 역할을 하는지를 측정하는 지표이다(Son, 2002). 매개 중심성이 높은 노드는 네트워크에서 다른 노드들 간의 연결을 중개하거나 경로의 중간에 위치함으로써, 정보확산 과정에서 중요한 다리 역할을 할 수 있다. 네트워크 중심성 분석을 위해 동일 논문에 등장하는 국가와 기관들을 노드(node) 간 연결 구조로 구성하여 일원 모드 행렬로 생성하였고, R과 Gephi를 사용해 결과를 분석하고 시각화하였다. 기관 간 연구협력 네트워크도 동일한

방식으로 분석하였으며, Louvain 알고리즘(Blondel et al., 2008)을 활용한 군집 분석을 통해 유사한 연구집단을 식별하였다.

마지막으로, 연구협력과 연구 영향력 간 관계를 분석하였다. 연구자를 단일 국가 소속과 다국가 소속으로 구분하여 질적지표의 평균 차이를 독립표본 t-검정(Independent Samples t-test)을 통해 비교하였다. 또한, 공동연구에 참여한 국가 및 기관 수에 따른 질적수준의 차이를 비교하기 위해 일원배치 분산분석(One Way ANOVA)을 실시하였다. 단, 국가 및 기관 수가 6 이상인 경우 빈도가 급격히 감소하는 점을 고려하여, 분석의 통계적 신뢰성을 높이고 데이터 분포를 균형 있게 유지하기 위해 하나의 집단으로 그룹화하였다.

3. 분석결과

3.1. 기초분석

이 연구의 분석대상인 기후변화 관련 SCIE 논문은 총 43,393편이며, 기초분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

연도별 논문 수는 지속적으로 증가하고 있으며, 특히 2019년 이후 급격히 증가하는 추세를 보이고 있다(Fig. 1). 국가별로는 총 242개국에서 논문을 출판하였으며, 논문 1편당 국가 수는 평균 1.64개국이며 최대값은 32개 국가이다.

단일 국가에서 생산된 논문 수는 전체의 64.8%로 가장 많았고, 다음으로 2개국(22.1%), 3개국(7.3%) 등의 순으로 나타났다(Fig. 2(a)). 기관별로는 총 6,928개 기관이 논문을 출판하였으며 논문 1편당 기관 수는 평균 3.17개 기관이고 최대값은 100개 기관이다. 단일 기관이 출판한 논문 수는 전체의 27.7%로 가장 많았고, 다음으로 2개 기관(24.1%), 3개 기관(17.1%), 4개 기관(11.6%) 등의 순으로 나타났다(Table 1; Fig. 2(b)).

연구의 영향력은 저널영향력지수(JIF)가 평균 3.98, 논문영향력지수(CNCI)가 평균 1.68, 그리고 주제 내 인용비

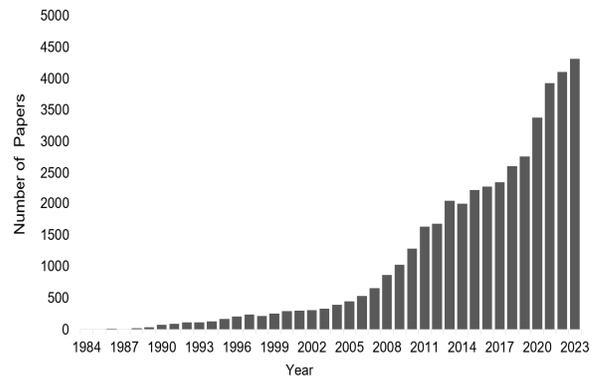


Fig. 1. Trend in the number of papers on climate change

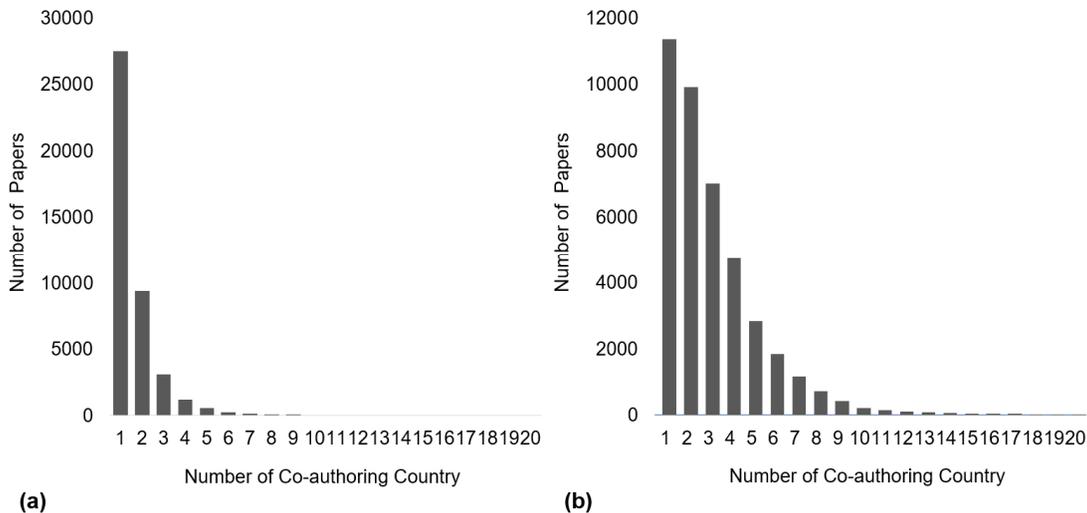


Fig. 2. (a) Distribution of papers by number of co-authoring countries, (b) Distribution of papers by number of co-authoring institutions

Table 1. Descriptive statistics on research collaboration and research impact on climate change

Research collaboration	Group	Total	Mean	SD	Min	Max
	Country	242	1.64	1.36	1	32
	Institution	6,928	3.17	3.05	1	100
Research impact (Mean)	Journal Impact Factor (JIF)		Category Normalized Citation Impact (CNCI)		Percentile in Subject Area (PSA)	
	3.98		1.68		62.7	

율(PSA)이 평균 62.7로 나타났다. 기후변화 관련 연구는 세계 평균보다 약 68% 이상 인용이 더 이루어지고 있다 (Table 1).

3.2. 국가 간 연구협력

기후변화 연구의 국가별 논문수는 미국이 12,057편으로 가장 많고, 다음으로 중국(6,409편), 영국(4,655편), 독일(3,696편), 호주(3,414편), 캐나다(3,359편), 프랑스(2,181편), 스페인(2,104편)의 순으로 나타났다(Table 2).

국가 간 연구협력 네트워크의 중심성 분석 결과, 연결 중심성(degree centrality)은 미국이 173개국과 공동 연구를 수행하여 가장 높은 수치를 나타낸다. 다음으로 영국(170개국), 독일(161개국), 호주(152개국), 스페인(145개국), 프랑스(144개국) 순으로 국제 공동연구를 수행하고 있다. 근접 중심성(closeness centrality)은 미국이 0.888로 가장 높게 나타나, 미국이 연구협력 네트워크의 중심에

위치하여 다른 국가들과 가장 빠르게 연결될 수 있다. 다음으로 영국(0.876), 독일(0.843), 호주(0.811), 스페인(0.789), 프랑스(0.786) 순으로 높게 나타나, 다른 국가들과 신속히 정보를 교류하고 협력할 수 있다. 매개 중심성(betweenness centrality)은 미국이 0.067로 가장 높은 수치를 나타내고, 미국이 여러 국가 간 연구협력의 중개자 역할을 수행하고 있다. 다음으로 독일(0.047), 영국(0.041), 호주(0.032), 프랑스(0.027), 중국(0.018), 캐나다(0.018) 순으로 높은 매개 중심성을 보이고 있다.

한국의 경우 논문 수는 805편으로 전체의 19위에 해당하며, 네트워크 중심성 분석 결과 연결중심성은 92개국으로 전체의 33위, 근접 중심성은 0.651로 전체의 33위, 매개 중심성은 0.004로 전체의 34위에 위치하고 있어 국가 간 연구협력에서 중심적인 역할을 수행하지 못하고 있다.

국가 간 연구협력 네트워크를 종합적으로 도식화한 것은 Fig. 3과 같다. 이 때 노드(node)는 국가이며 노드의 크

Table 2. Results of network analysis of international collaboration in research on climate change

Country	Total papers	Degree centrality	Closeness centrality	Betweenness centrality
USA	12,057	173	0.888	0.067
China	6,409	134	0.756	0.018
United Kingdom	4,655	170	0.876	0.041
Germany	3,696	161	0.843	0.047
Australia	3,414	152	0.811	0.032
Canada	3,359	138	0.767	0.018
France	2,181	144	0.786	0.027
Spain	2,104	145	0.789	0.017
Italy	1,884	139	0.770	0.015
India	1,678	109	0.690	0.004
Netherlands	1,660	139	0.770	0.016
Sweden	1,306	119	0.715	0.008
Switzerland	1,269	131	0.747	0.013
Japan	1,119	111	0.695	0.006
Brazil	1,086	119	0.715	0.007
Norway	936	108	0.688	0.006

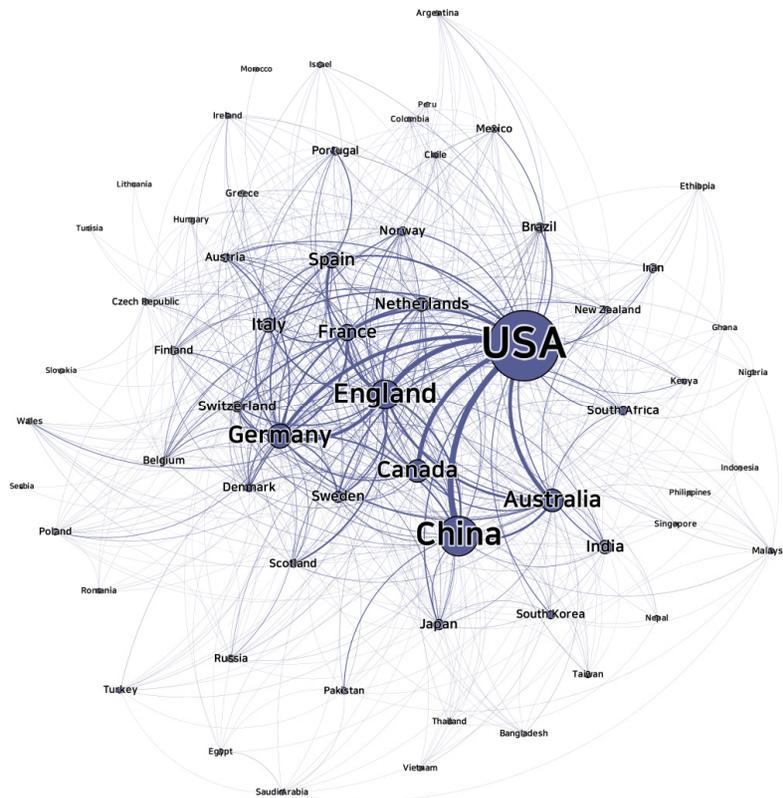


Fig. 3. Network map of international collaboration in research on climate change

기는 국가별 논문 수에 비례한다. 또한 노드 간 연결선(edge)의 굵기는 국가 간 공저 수에 비례한다. 국가 간 연구협력의 강도를 살펴보면, 미국과 중국의 공동연구 논문 수가 1,150편으로 가장 많고, 다음으로 미국과 영국(970 편), 미국과 캐나다(859편), 미국과 호주(686편), 미국과 독일(686편), 독일과 영국(653편) 등의 순으로 나타나 미국이 기후변화 연구협력의 중심에 위치하고 있음을 확인할 수 있다. 한국의 경우 미국과의 공동연구가 176편으로 가장 많았고, 다음으로 중국(71편), 일본(66편), 영국(42 편) 등의 순으로 많았다.

3.3. 기관 간 연구협력

기관별 논문 수는 중국과학원(Chinese Academy of Sciences, CAS)이 2,367편으로 가장 많고, 다음으로 캘리포니아대학교(University of California, UC; 1,414편), 프랑스 국립과학연구센터(Centre National de la Recherche Scientifique, CNRS; 1,244편), 중국과학원대학교(University of Chinese Academy of Sciences, UCAS; 820편), 미국 농무

부(United States Department of Agriculture, USDA; 785편), 독일 헬름홀츠협회(Helmholtz Association, 718편), 호주 연방산업과학연구회(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, CSIRO; 687편)의 순으로 나타났다 (Table 3).

기관 간 연구협력 네트워크 중심성 분석 결과, 연결 중심성(degree centrality)은 중국과학원이 1,550개 기관과 공동 연구를 수행하고 있어 기후변화의 연구 네트워크의 허브 역할을 수행하고 있다. 다음으로 캘리포니아대학교(1,413개 기관)와 독일 헬름홀츠협회(718개 기관)가 뒤를 잇고 있으며, 스페인 국립연구위원회(Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC; 612개 기관), 런던대학교(University of London; 616개 기관), 플로리다주립대학교시스템(State University System of Florida; 530개 기관)도 연구협력 네트워크에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 근접 중심성(closeness centrality)은 중국과학원이 0.547로 가장 높았고, 이는 중국과학원이 네트워크 내 다른 기관들과 평균적으로 가까운 위치에 있으며, 정보를 신속히 교류할 수 있음을 나타낸다. 다음으로 미국 농무부

Table 3. Results of network analysis of institutional collaboration in research on climate change

Institution	Total papers	Degree centrality	Closeness centrality	Betweenness centrality
Chinese Academy of Sciences (CAS, China)	2,367	1,550	0.547	0.076
University of California (UC, USA)	1,414	1,413	0.538	0.031
Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS, France)	1,244	1,479	0.544	0.037
University of Chinese Academy of Sciences (UCAS, China)	820	737	0.492	0.014
United States Department of Agriculture (USDA, USA)	802	785	0.501	0.010
Helmholtz Association (Germany)	718	1,131	0.525	0.021
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO, Australia)	687	760	0.503	0.010
U.S. Department of the Interior (US DOI, USA)	654	788	0.495	0.008
ETH Domain (Swiss)	616	898	0.509	0.009
University of London (UK)	616	1,072	0.519	0.017
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC, Spain)	612	1,119	0.524	0.025
U.S. Geological Survey (USGS, USA)	560	717	0.490	0.006
Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research (IGSNRR, China)	542	523	0.481	0.006
State University System of Florida (USA)	530	952	0.514	0.016
University of Washington (USA)	526	832	0.503	0.008

(0.538), 독일 헬름홀츠협회(0.525), 스페인 국립연구위원회(0.524) 순으로 나타났다. 매개 중심성(betweenness centrality) 또한 중국과학원이 0.076로 가장 높아, 기관 간 연구협력에서 중개자 역할을 수행하고 있다. 다음으로 미국 농무부(0.031), 스페인 국립연구위원회(0.025), 독일 헬름홀츠협회(0.021), 런던대학교(0.017) 순으로 매개 중심성이 높게 나타나, 다양한 연구기관들을 연결하고 협력을 촉진하는 데 기여하고 있다. 중국과학원은 논문 수, 연결 중심성, 근접 중심성, 매개 중심성에서 모두 높은 수치를 기록하며 글로벌 기후변화 연구의 중심적인 위치를 차지하고 있음을 확인할 수 있다.

기관 간 연구협력 네트워크를 종합적으로 도식화한 것은 Fig. 4와 같다. 여기서 노드(node)는 연구기관을 나타내며, 논문 수가 100편 이상인 기관만 노출하였다. 노드의 크기는 기관별 논문 수에 비례하며, 연결선(edge)의 굵기는 기관 간 공저 논문 수에 비례한다.

연구협력이 상대적으로 활발한 기관들에 대한 군집분석 결과, 총 6개의 핵심 그룹이 확인되었다. 이 중 독일 헬름홀츠협회, 런던대학교, 스위스연방공과대학교, 스페인 국립연구위원회, 플로리다주립대학교, 네덜란드 와게닝겐 대학교 등이 포함된 글로벌 군집이 전체 네트워크의 34.8%를 차지하며, 다양한 국가의 연구기관들이 속해 있다. 이들 기관들은 국제적으로 연구협력을 활발히 수행하며 네트워크에서 중요한 역할을 하고 있다. 다음으로, 캘

리포니아주립대학교, 미국 농무부, 재무부, 지질조사국, 워싱턴대학교 등 미국 내 연구기관들로 구성된 군집이 34.5%를 차지하고 있다. 다음으로 프랑스 국립과학연구센터, 프랑스 농업·식량·환경 국립연구소, 프랑스개발연구원, 파리-사클레대학교 등 프랑스 연구기관들로 구성된 군집과, 중국과학원, 중국과학원대학교, 북경대학교 등 중국 연구기관들로 구성된 군집은 각각 9.7%를 차지하고 있다. 또한, 호주의 주요 연구기관으로 구성된 군집이 6.4%, 캐나다의 연구기관 군집이 5.0%를 차지하고 있다. 이와 같이 기후변화 연구에서 다양한 국적의 기관들이 공동 연구를 적극적으로 수행하고 있으며, 동시에 미국, 프랑스, 호주, 중국 등 주요 국가들은 자국 내에서 기관 간 연구협력을 활발히 수행하고 있다.

3.4. 연구협력과 연구영향력

기후변화 연구에서 연구협력에 따른 연구영향력을 비교하였다. 먼저 연구가 단일 국가(국내 협력)에서만 수행된 경우와 다국가(국제 협력)에서 공동으로 수행된 경우로 구분하여 질적지표의 차이를 분석한 결과, 논문영향력 지수(CNCI)는 다국가 참여가 평균 1.96이며, 단일 국가 참여는 1.51로 나타났다. 이는 다국가 참여가 단일 국가보다 45% 이상 더 인용되었음을 의미한다. 학술지영향력 지수(JIF) 역시 다국가 참여가 평균 4.95로 단일 국가의 3.64를 상회하였고, 주제 내 인용비율(PSA)도 다국가 참

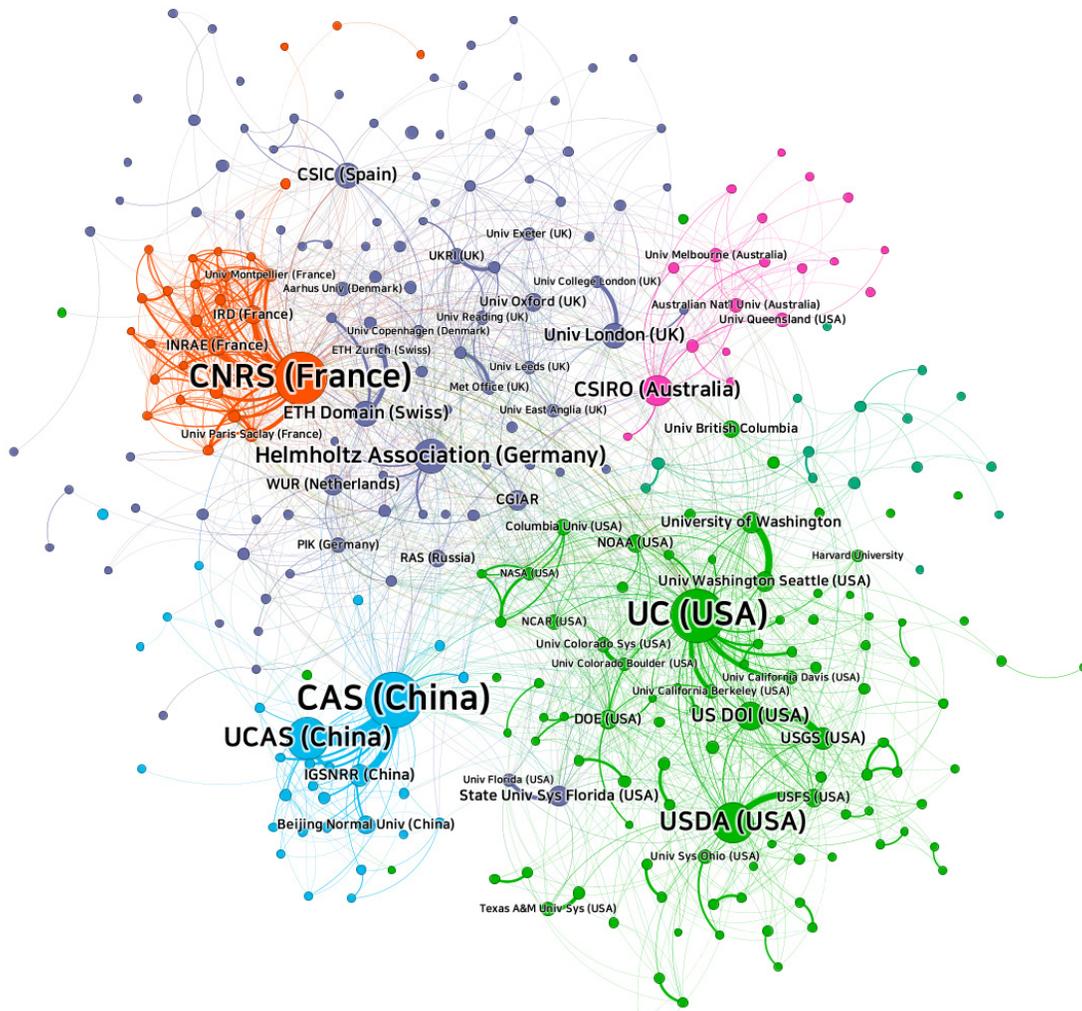


Fig. 4. Network map of institutional collaboration in research on climate change

여가 66.44로 단일 국가의 60.24보다 높았다. 이 때, 두 집단 간 질적지표의 평균차이는 모두 통계적으로 유의하였다(Table 4). 다국가 협력 연구는 모든 질적 지표에서 단일 국가 보다 더 우수하며 이는 연구 영향력이 더 크다는 것을 의미한다.

다국가 참여를 국가 수에 따라 세분화하여 분석하면, 단일 국가의 논문영향력지수(CNCI)의 평균은 1.51로 가장 낮았고, 참여 국가 수가 증가함에 따라 논문영향력지수(CNCI) 평균이 상승하는 경향을 나타낸다. 2개국 참여 연구의 논문영향력지수(CNCI)는 평균 1.66, 3개국 참여 연구는 2.05로 나타났고, 특히 6개국 이상 참여 연구는 4.95로 가장 높았다. 즉, 6개국 이상 참여한 연구는 단일 국가에서 수행된 연구보다 약 34% 이상의 인용률을 보이

고 있다. 학술지영향력지수(JIF)도 단일 국가가 평균 3.64로 가장 낮았고, 참여 국가 수가 증가할수록 학술지영향력지수(JIF)가 상승하는 경향을 나타낸다. 특히 6개국 이상이 참여한 논문의 학술지영향력지수(JIF)는 평균 9.40으로 매우 높았다. 이 때, 국가 수별 질적지표의 차이는 통계적으로 유의하였다(Table 5).

다음으로 단일 기관이 참여한 연구와 다수의 기관이 참여한 연구로 구분하여 연구의 질적지표의 차이를 분석한 결과, 논문영향력지수(CNCI)는 다기관 참여가 평균 1.80으로 단일 기관의 1.32보다 높았다. 학술지영향력지수(JIF)도 다기관 참여가 평균 4.36으로 단일 기관의 3.45보다 높았다. 주제 내 인용비율(PSA) 또한 다기관 참여가 64.05로 단일 기관 연구의 58.18 보다 높아, 여러 기관이

Table 4. Comparison of research impact between single-country and multinational collaborations in research on climate change

Impact indicator	Single-country research (N = 27,521)		Multinational research (N = 14,966)		T
	Mean	SD	Mean	SD	
Category Normalized Citation Impact (CNCI)	1.51	2.791	1.96	3.645	-13.407**
Journal Impact Factor (JIF)	3.64	5.014	4.95	6.009	-22.469**
Percentile in Subject Area (PSA)	60.24	29.011	66.44	27.895	-21.951**

*p < 0.05, **p < 0.01

Table 5. Comparison of research impact by number of collaborating countries in research on climate change

Number of collaborating countries	Number of cases	Category Normalized Citation Impact (CNCI)			Journal Impact Factor (JIF)		
		Mean	SD	F	Mean	SD	F
1	27,521	1.51	2.791	221.488**	3.64	5.014	266.592**
2	9,392	1.66	2.392		4.41	4.407	
3	3,093	2.05	3.383		5.08	5.153	
4	1,168	2.33	3.500		6.15	7.666	
5	547	2.88	4.916		6.78	7.779	
6 or more	766	4.95	10.174		9.40	14.476	

*p < 0.05, **p < 0.01

Table 6. Comparison of research impact between single-institution and multi-institutional research on climate change

구 분	Single-institution research (N = 11,370)		Multi-institutional research (N = 29,695)		T
	Mean	SD	Mean	SD	
Category Normalized Citation Impact (CNCI)	1.32	2.151	1.80	3.406	-13.407**
Journal Impact Factor (JIF)	3.45	3.565	4.36	5.944	-22.469**
Percentile in Subject Area (PSA)	58.18	29.096	64.05	28.485	-21.951**

*p < 0.05, **p < 0.01

Table 7. Comparison of research impact by number of collaborating institution in research on climate change

Number of collaborating institutions	Number of cases	Category Normalized Citation Impact (CNCI)			Journal Impact Factor (JIF)		
		Mean	SD	F	Mean	SD	F
1	11,370	1.32	2.151	174.066**	3.45	3.565	229.761**
2	9,916	1.52	2.887		3.66	3.832	
3	7,028	1.64	2.804		4.16	7.659	
4	4,744	1.81	2.974		4.35	4.981	
5	2,837	1.86	2.626		4.68	4.182	
6 or more	5,170	2.82	5.442		6.42	8.089	

*p < 0.05, **p < 0.01

공동연구를 수행한 연구가 더 활발하게 인용되고 있다. 이 때, 두 집단 간 질적지표의 평균차이는 모두 통계적으로 유의하였다(Table 6).

마지막으로 다기관 연구를 기관 수로 세분화하여 연구의 질적지표의 차이를 분석한 결과, 단일 기관의 논문영향력지수(CNCI) 평균은 1.32로 가장 낮게 나타났고, 기관 수가 증가함에 따라 논문영향력지수(CNCI) 평균이 점차 상승하고 있다. 2개 기관 참여 연구는 평균 1.52, 3개 기관은 1.64로 나타났고, 특히 6개 기관 이상이 참여한 연구는 2.82로 가장 높았다. 학술지영향력지수(JIF)도 단일 기관이 평균 3.45로 가장 낮았고, 기관 수가 증가할수록 학술지영향력지수(JIF)의 평균이 상승하는 경향을 나타낸다. 특히 6개 기관 이상이 참여한 연구의 학술지영향력지수(JIF) 평균은 6.42로 매우 높았다. 이 때, 기관 수별 집단에 따른 질적지표의 차이는 통계적으로 유의하였다(Table 7).

4. 결론 및 고찰

기후변화는 전 세계 환경과 인류의 지속 가능성을 위협하는 중대한 문제로, 온실가스 배출, 기온 상승, 해수면 상승, 극단적 기후 현상 등 다양한 도전에 직면해 있다. 이러한 당면과제를 해결하기 위해 국제적 협력의 필요성이 강조되고 있으며, 특히 국가 및 기관 간 공동연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구는 1984년부터 2023년까지 SCIE에 등재된 기후변화 관련 논문 43,393편을 대상으로 네트워크 분석을 수행하여, 연구협력의 구조와 주요 참여 주체를 분석하고 이러한 협력이 연구의 질적 수준에 미치는 영향을 평가하였다.

분석 결과, 미국은 기후변화 연구에서 중심적인 역할을 수행하며, 영국, 독일, 호주, 중국 등의 국가도 연구 협력 네트워크에서 중요한 기여를 하고 있다. 기관별로는 중국 과학원, 캘리포니아대학교, 프랑스 국립과학연구센터 등이 높은 연결 중심성을 나타내며 기후변화 연구의 허브 역할을 수행하고 있다. 기관의 연구협력 구조는 글로벌 군집과 자국 내 군집이 혼재된 양상이 관찰되었으며, 특히 글로벌 군집은 독일, 영국, 스위스, 스페인, 미국의 기관들이 주도적으로 형성하고 있는 반면, 자국 내 군집은 연구 생산성이 높은 국가들인 미국, 프랑스, 중국, 호주 등에서 두드러졌다.

또한 다국가 및 다기관 협력 논문의 경우 단일 국가 및 단일 기관에서 수행된 논문에 비해 모든 질적 지표에서

우수한 성과를 나타내고 있다. 다국가 협력 논문은 단일 국가 논문보다 논문영향력지수(CNCI)에서 약 30%, 학술지영향력지수(JIF)에서 약 35%, 주제 내 인용 비율(PSA)에서 약 10% 이상 높은 것으로 나타났다. 또한, 공동 연구에 참여하는 국가 및 기관의 수가 많을수록 연구의 영향력은 증가하였다. 이는 연구에 참여하는 국가 및 기관의 다양성이 연구의 질적 수준을 높이는 데 기여함을 시사한다. 특히, 다국가 협력은 기후변화와 같은 복합적인 문제를 해결하는 데 있어 학문적 성과를 증대시키는 중요한 요소로 평가된다.

기후변화 연구에서 주요 국가와 기관들은 각자의 정책과 협력 환경을 통해 연구 성과를 극대화하고 있다. 미국은 청정에너지 투자와 탄소포집 기술을 중심으로 연구를 확장하고 있으며(KEEL, 2021), 영국은 지속가능한 에너지 전환을 가속화하기 위해 기후변화법과 같은 법적 기반을 마련하고, 해들리 센터(Met Office Hadley Centre)와 같은 세계적인 연구기관을 통해 기후 시스템 분석과 예측에 앞장서고 있다. 중국은 자국 내 연구기관의 강력한 네트워크를 기반으로 기후변화 연구의 중심국으로 부상하고 있다.

반면, 한국은 연구 생산성과 연구 협력 네트워크 중심성에서 주요 국가들에 비해 상대적으로 낮은 순위를 기록하였다. 이는 한국이 국제적 연구 협력에서 중심적인 역할을 수행하지 못하고 있음을 나타내며, 이를 개선하기 위한 전략적 노력이 필요하다. 미국, 중국, 독일, 영국, 프랑스 등 주요 국가와의 협력을 확대하고 글로벌 연구 프로젝트에 보다 적극적으로 참여할 필요가 있다. 이를 위해 국제 연구 협력 지원을 위한 재정적 투자를 강화하고, 협력 플랫폼 구축을 통해 연구 네트워크의 활성화를 도모해야 한다. 나아가, 국가 간 협력을 넘어 주요 연구기관 간의 데이터와 자원을 공유하고, 정책적 방향성을 고려한 협력 연구를 활성화함으로써, 한국이 기후변화 연구에서 영향력을 더욱 확대할 수 있는 기회를 마련할 수 있을 것이다.

본 연구는 SCIE에 등재된 논문을 분석 대상으로 삼아 사회과학적 연구를 포함하지 못했다는 한계를 가진다. 따라서 향후 연구에서는 분석 대상을 SSCI 등재 논문으로 확대하여 기후변화와 관련된 사회과학적 및 정책적 연구를 포괄하는 종합적인 분석이 필요하다. 아울러, 연구 주제를 세분화하여 기후, 에너지, 생태, 보건 등 다양한 분야에서의 협력 양상과 그 효과를 심층적으로 탐구하는 것이 중요하다. 이러한 후속 연구는 기후변화 연구의 다차원적 발전 방향을 제시하고, 학문적 성과와 정책적 기여를 더욱 강화하는 데 중요한 기초 자료가 될 것이다.

Reference

- Baidya A, Saha AK. 2024. Exploring the research trends in climate change and sustainable development: A bibliometric study. *Clean Eng Technol* 18: 100720. doi: 10.1016/j.clet.2023.100720
- Blondel VD, Guillaume J, Lambiotte R, Lefebvre E. 2008. Fast unfolding of communities in large networks. *J Stat Mech-Theory E* 2008: P10008. doi: 10.1088/1742-5468/2008/10/P10008
- Bolin B. 2007. A history of the science and politics of climate change. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511721731
- Fu HZ, Waltman L. 2022. A large-scale bibliometric analysis of global climate change research between 2001 and 2018. *Clim Change* 170(3): 36. doi: 10.1007/s10584-022-03324-z
- Hulme M, Mahony M. 2010. Climate change: What do we know about the IPCC? *Prog Phys Geogr* 34(5): 705-718. doi: 10.1177/0309133310373719
- Kang MK. 2020. Study of China's laws related to climate change response after the Paris Agreement (in Korean with English abstract). *J China Area Stud* 7(2): 277-299. doi: 10.34243/JCAS.7.2.277
- KEEI (Korea Energy Economics Institute). 2021. The Biden administration: Climate change and energy policy implications and responses. *Energy Issue Brief*.
- Kim YH. 2011. Social network theory. Seoul: Parkyoungsa.
- Lee G, Lee M. 2021. Trends in carbon neutral technology policies of major countries. Seoul, Korea: Green Technology Center. *GTC Focus Vol. 2 No. 1*.
- Lenhard J, Lucking H, Schechheimer H. 2006. Expert knowledge, Mode-2 and scientific disciplines: Two contrasting views. *Sci Public Policy* 33(5): 341-350. doi: 10.3152/147154306781778876
- Lindawati ASL, Meiryani. 2024. A bibliometric analysis on the research trends of global climate change and future directions. *Cogent Bus Manag* 11(1): 2325112. doi: 10.1080/23311975.2024.2325112
- Nguyen TV, Ho-Le TP, Le, UV. 2017. International collaboration in scientific research in Vietnam: An analysis of patterns and impact. *Scientometrics* 110: 1035-1051. doi: 10.1007/s11192-016-2201-1
- Ni P, An X. 2018. Relationship between international collaboration papers and their citations from an economic perspective. *Scientometrics* 116: 863-877. doi: 10.1007/s11192-018-2784-9
- Ouyang H, Tang X, Zhang R. 2022. Research themes, trends and future priorities in the field of climate change and health: A review. *Atmosphere* 13(12): 2076. doi: 10.3390/atmos13122076
- ROK (The Government of the Republic of Korea). 2020. 2050 carbon neutral strategy of the Republic of Korea.
- Schipper ELF, Dubash NK, Mulugetta Y. 2021. Climate change research and the search for solutions: rethinking interdisciplinarity. *Clim Change* 168(3-4): 18. doi: 10.1007/s10584-021-03237-3
- Son DW. 2002. Social network analysis. Seoul: Kyungmoon.
- Sun Y-L, Zhang C-H, Lian Y-J, Zhao J-M. 2022. Exploring the global research trends of cities and climate change based on a bibliometric analysis. *Sustainability* 14(19): 12302. doi: 10.3390/su141912302
- Velez-Estevez A., García-Sánchez P, Moral-Munoz JA, Cobo MJ. 2022. Why do papers from international collaborations get more citations? A bibliometric analysis of library and information science papers. *Scientometrics* 127(12): 7517-7555. doi: 10.1007/s11192-022-04486-4
- Yoo JH, Jeon EC, Kim H. 2019. Study of research trends in climate change using text analysis -Focusing on Journal of Climate Change Research- (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 10(3): 161-172. doi: 10.15531/KSCCR.2019.10.3.161