

기후기술 연구의 구조적 전환: IPCC 영향 분석과 국가별 기술 특화도 및 잠재 토픽 모형 통합 연구

송영석* · 이천환**†

*국가녹색기술연구소 데이터정보센터 박사후연구원, **국가녹색기술연구소 데이터정보센터 선임연구원

Structural shifts in climate technology research: An integrated Revealed Comparative Advantage - Latent Dirichlet Allocation analysis of IPCC influence and national comparative advantages

Song, Youngseok* and Lee, Cheonhwan**†

*Post-Doctoral Researcher, Center of Data Information, National Institute of Green Technology, Seoul, Korea

**Senior Researcher, Center of Data Information, National Institute of Green Technology, Seoul, Korea

ABSTRACT

This study identifies global research trends in climate technology and analyzes structural characteristics of national research focus using an integrated framework combining topic modeling (LDA) and relative comparative advantage (RCA) indices. Climate change response requires coordinated international research efforts, yet systematic analysis of national portfolios alignment with global policy agendas is limited. By examining 440,000 papers published between 1990~2024 from Web of Science, we measure topic-specific specializations across six major countries-South Korea, US, China, Germany, UK, and Australia - comparing structural patterns of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - cited and non-cited literature. Our methodology employs RCA analysis for national comparative advantages, LDA topic modeling for thematic structures, and UMAP-based dimensionality reduction to detect structural transition points. The analysis reveals strong South Korean specialization in techno-centric fields like materials science, electrochemistry, and thermodynamics ($RCA > 2.0$) but weak representation in social sciences and governance ($RCA < 0.3$). Conversely, the US and UK demonstrate strong engagement in policy, public health, and social justice research, reflecting balanced portfolios. Using UMAP clustering, we identify distinct thematic trajectories and transition points (1991~1994, 2000~2001, 2005~2006), illustrating the increasing diversification of climate research, with IPCC reports driving topic shifts. These findings underscore Korea's need to strategically realign its portfolio by integrating social-technological approaches and enhancing engagement in internationally coordinated research domains.

Key words : Climate Change, Topic Modeling, Relative Comparative Advantage (RCA), Latent Dirichlet Allocation (LDA), UMAP Clustering, Strategic Mapping

1. 서론

최근 기후변화는 단순한 환경 이슈를 넘어 전 세계적인 경제, 사회, 안보 문제로 확장되며, 국제사회의 공동 대응

을 요구하는 핵심 과제로 부각 되고 있다(IPCC, 2023). 특히 2015년 체결된 파리협정(Paris Agreement)은 온실가스 감축뿐 아니라 기후변화에 대한 적응 능력의 제고를 각국의 공동 목표로 설정하였으며, 이를 달성하기 위해 각국은

†Corresponding author : shiney@nigt.re.kr (07328, 60, Yeouinaru-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul, Korea. Tel. +82-2-3393-3933) ORCID 송영석 0000-0002-2630-1958 이천환 0000-0002-1186-7457

자발적으로 설정한 국가결정기여(Nationally Determined Contributions, NDC)를 주기적으로 상향해야 하는 책임을 갖게 되었다(UNFCCC, n.d.). 이러한 배경에서 탄소중립 및 기후변화 적응의 실현 가능성은 궁극적으로 과학기술의 혁신과 이를 통한 사회적 전환 능력에 크게 의존하고 있다(IEA, 2021).

국제적으로 기후변화 대응 정책과 기술 전략의 방향성을 설정하는 데 있어 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 이하 IPCC)의 역할은 특히 중요하다. IPCC는 1988년 설립 이래 총 6차례의 종합 평가보고서를 발간하면서 기후변화 대응에 관한 전 지구적 논의의 과학적 근거를 제공하였고, 국제협약 및 각국 정책 형성에 큰 영향을 미쳐왔다(IPCC, 2023). 실제로 IPCC의 평가보고서는 1990년 UN 기후변화협약, 1997년 교토의정서, 2015년 파리협정 등 국제적 기후협약의 체결에 핵심적인 과학적 근거를 제공하였다(Pollitt et al., 2024). 그러나 IPCC 보고서가 실제 각국의 연구개발(R&D) 및 정책적 의사결정 과정에 어떻게 구체적으로 활용되고 있는지에 대한 심층적이고 정량적인 분석은 미흡한 상황이다.

Pollitt et al. (2024)은 IPCC 보고서가 정책 결정 과정에서 직접적이고 실질적인 행동지침을 제공하기보다 일반적인 기후정보 제공에 머물러 있어 그 활용성이 제한된다고 지적했다. 또한 Yu et al. (2023)는 국내의 경우 IPCC 제6차 평가보고서에서 제시된 일부 핵심 주제인 ‘리스크 평가’, ‘기후정의’, ‘이산화탄소 농도 전망’ 등과 관련된 연구가 상대적으로 부족함을 실증적으로 보여주었다. 이러한 결과는 IPCC의 과학적 권고가 국가별로 연구주제 선정과 연구 수행 과정에서 다르게 반영되고 있음을 시사하며, 정밀한 분석과 함께 정책적 보완이 필요하다는 점을 드러낸다.

특히 IPCC의 평가보고서는 기술개발 방향과 정책 실행을 위한 국제 기준 역할을 수행하지만, 실제 각국의 기술 혁신 활동에 얼마나 구체적으로 영향을 미치는지에 대한 실증 연구는 부족한 실정이다. 예컨대 Calel and Dechezleprêtre (2016)는 EU 배출권거래제(EU ETS)를 분석하여 탄소 가격정책이 저탄소 기술의 특허 출원을 실질적으로 촉진함을 실증하였으나, 이 연구는 IPCC 보고서의 영향력과 같은 글로벌 수준의 정책 영향력을 평가하지는 못하였다. 따라서 IPCC의 보고서가 기술개발과 연구 활동에 실질적으로 어떻게 영향을 미치는지 구조적으로 분석하고, 이에 대한 국가별 비교 연구가 시급히 요구된다.

한편, 한국은 경제규모 대비 온실가스 배출량이 높고 제조업 중심의 산업구조를 가진 국가로, 기후변화 대응에 있어 상대적으로 높은 도전에 직면해 있다(Ministry of Environment and Korea Meteorological Administration, 2020). 한국 정부는 2008년 저탄소 녹색성장 정책을 도입한 이후(Yoon, 2012), 2050년 탄소중립 목표 달성을 위한 기술개발 로드맵을 지속적으로 발표하고 있으며, 부처 간 협력을 통해 범부처적 기술개발을 추진하고 있다(Ministry of Science and ICT, 2024). 특히 한국 기후테크 산업 정책은 탄소중립 시대의 새로운 성장동력으로 주목받고 있으나(Kim and Kang, 2024), 이러한 기술개발 활동이 IPCC 평가보고서와 같은 글로벌 과학적 지침과 얼마나 정합적으로 연계되고 있는지에 대한 체계적인 검증은 이루어지지 않았다(Han et al., 2021).

또한, 관련 선행연구들은 기후기술의 개념 정의와 지속 가능성 축을 통한 기술 용어 체계 분석(Oh et al., 2021), 중소기업의 해외 진출을 위한 기후기술 지원 정책평가 및 개선 방향 도출(Kim et al., 2020) 등 기후기술에 대한 개념적 정리나 정책 실천 분석에 초점을 맞추고 있다. 반면, IPCC 보고서와 같은 국제적 평가 체계와 실제 국가 수준의 기술개발 활동 간의 연계성을 분석한 연구는 학술적으로나 정책적으로 미흡한 상태이다. 더욱이 한국 정부의 ‘기후기술개발 활동조사’와 같은 국가 공식 통계를 이용한 실증적이고 계량적인 연구는 극히 제한적이어서 학술적 공백이 존재한다.

본 연구는 이 같은 연구의 공백을 채우기 위하여 1990년부터 2024년까지 약 44만 편의 국제적 기후변화 관련 논문 데이터를 활용하여, IPCC 평가보고서가 국가별·분야별 기후기술 연구의 양적·질적 변화에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 한다. 이를 위해 상대적 특화도 분석(Revealed Comparative Advantage, RCA), 토픽모델링(Latent Dirichlet Allocation, LDA), 전환점 탐지(Uniform Manifold Approximation and Projection, UMAP) 등의 데이터 기반 기법을 활용하여 국가별, 기술 분야별 연구의 구조적 변화를 분석한다. 또한, 한국을 중심으로 주요 국가들의 기후기술 연구 동향을 비교함으로써 한국의 상대적 강점과 약점을 진단하고, 향후 국내 기후기술 정책 수립에 필요한 전략적 시사점을 도출하고자 한다.

본 연구는 국제적 정책 가이드라인과 국가적 실증 연구 간의 구조적 연계를 분석하고, 기후기술 개발을 위한 국내 R&D 전략의 효과성을 높이기 위한 정책적이고 학술

적인 기여를 하는 것을 목표로 하였다.

2. 이론적 배경 및 선행연구

2.1. IPCC 평가보고서의 과학적 역할과 정책 영향력

기후변화에 대한 국제적 대응은 과학적 합의에 기반한 정책 결정 과정과 긴밀히 연결되어 있다. 이 과정에서 정부 간 기후변화 협의체(IPCC)는 1988년 설립 이래 전 세계 기후변화 대응에 관한 가장 권위 있는 과학적 합의체로 자리매김해 왔다(IPCC, 2023). 특히 IPCC는 정기적으로 평가보고서(Assessment Report)를 발간하여 기후변화의 과학적 근거와 이에 대응하기 위한 기술, 정책 및 제도적 옵션을 명확히 제시함으로써 국제사회의 기후정책 방향성을 설정하는 핵심적 역할을 수행하고 있다(Pollitt et al., 2024).

최근 발간된 제6차 종합보고서(AR6)는 과거와 달리 기후변화 완화뿐만 아니라 적응과 지속가능발전 목표를 통합적으로 다루는 기술적 접근의 필요성을 강조하였다. 또한, 보고서는 기후기술 혁신을 시장과 제도적 프레임워크와 연계하여 시스템 차원에서 다루어야 하며, 각국이 자국의 기술적·경제적 여건을 고려하여 맞춤형 정책을 설계할 필요가 있음을 지적하였다(IPCC, 2023; Pollitt et al., 2024). 즉, IPCC 보고서는 단순히 기술의 과학적 가능성을 제시하는 것을 넘어, 기술의 확산과 제도화를 위한 전략적 가이드라인을 제공함으로써 국가별 정책 설계에 직접적으로 영향을 미치고 있다.

한국의 경우 IPCC 시나리오와 방법론을 직접 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. Cho et al. (2018)은 사용자 중심의 기후변화 시나리오 상세화 기법을 개발하여 한반도에 적용함으로써 IPCC 방법론의 국내 적용 가능성을 제시하였다. Kim et al. (2022)은 IPCC 6차 평가보고서의 SSP (Shared Socioeconomic Pathways) 시나리오를 활용한 1 km 고해상도 기후 전망을 개발하여 한국의 미래 기후변화 전망에 기여하였다. Lee et al. (2022)은 RCP (Representative Concentration Pathways)와 SSP 시나리오를 비교 분석하여 SSP 시나리오에서 더 높은 변동성을 보이며, 특히 해상지역이 육지보다 큰 변동성을 나타낸다고 분석하였다.

2.2. 기후기술 정책과 국가 R&D 체계

기후변화 대응을 위한 기술혁신은 국가 단위의 전 기후변화에 대한 국제적 대응과 과학적 합의에 기반한 정책 결정 과정이 긴밀히 연결되어 있다. 국제적으로 IEA

(2021) 및 UNFCCC 기술집행위원회(TEC, 2023)는 각국의 기후기술 혁신 전략이 기술개발, 제도화, 시장 확산을 포괄하는 전주기적 관점에서 설계되어야 한다고 권고하고 있다. 이와 같은 전략적 접근법은 기술개발의 초기 단계부터 실증과 상용화에 이르는 전체 주기에서 정책과 재정지원의 역할이 중요하다는 점을 강조한다.

한국은 2008년 저탄소 녹색성장 정책을 국가 패러다임으로 도입한 이후(Yoon, 2012), 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 기술혁신 전략을 수립하고 있다. Yoon (2012)은 당시 정부의 저탄소 녹색성장 정책을 한국판 생태근대화 전략으로 평가하며, 지속가능발전을 국가 패러다임으로 복원하고 저탄소 녹색성장을 하위전략으로 재조정해야 한다고 제안하였다. Jang (2010)은 저탄소녹색성장기본법의 입법과정을 분석하여 각계 입장과 쟁점사항을 상세히 다루며, 헌법, 지속가능발전법, 환경법과의 관계정립 문제와 행정위원회로의 전환 필요성을 제시하였다.

최근에는 글로벌 탄소중립 시대에 맞춘 정책전환이 이루어지고 있다. Lee et al. (2021)은 글로벌 탄소중립 시대의 그린뉴딜 정책이 교역에 미치는 영향을 분석하며, 환경정책이 산업정책, 통상정책과 연계된 상호작용을 고려해야 한다고 강조하였다. Kim and Kang (2024)는 탄소중립 시대 한국의 기후테크 산업 정책 현황과 과제를 분석하여 새로운 성장동력으로서의 기후테크 산업의 중요성을 제시하였다. 또한 Lee et al. (2011)은 물류 및 운송 부문이 국내 온실가스 배출량의 약 20%를 차지한다는 점을 지적하며, 친환경적 물류시스템 구축을 위한 녹색물류 정책의 시급성을 강조하였다.

한국정부는 탄소중립 달성에 필수적인 기술들을 선정하여 국가로드맵을 구축하고 있으며(Ministry of Science and ICT, 2021), 이 전략은 탄소중립 목표 달성을 위한 기술개발의 전주기적 관리를 목표로 한다. 특히, 기술유형, 대응영역, 자금출처 등을 구조적으로 분석하는 국가승인 통계인 ‘기후기술개발 활동조사’를 활용하고 있다(Green Technology Center, 2023). 해당 조사는 실제 기술개발 활동의 현황을 정기적으로 파악하여 기술정책 설계와 기술로드맵 정비에 활용되는 실질적인 데이터 기반을 제공한다. 이러한 국가통계는 정책수립과 성과 모니터링에서 근거 기반(evidence-based) 정책 설계에 필수적 자료로 활용될 수 있다(Green Technology Center, 2023).

2.3. 선행연구 분석

기후기술에 관한 기존 연구는 크게 기술 평가 및 경쟁력 분석, 정책 연계 분석, 방법론적 혁신과 구조적 변화 탐지로 구분할 수 있다.

2.3.1. 기술평가 및 경쟁력 분석

기술 평가 측면에서는 Oh et al. (2018)이 계층화 분석법(AHP)을 이용하여 기후기술 융·복합 사업모델의 평가 지표를 개발하고 가중치를 산정한 바 있으며, 한국환경연구원(Korea Environment Institute, 2020)은 혼합정수계획법을 활용하여 발전부문 온실가스 감축 잠재력을 정량화하고 비용효과성 기반의 기술 우선순위를 도출하였다. Blok et al. (2020) 글로벌 차원에서 부문별 감축 기술의 잠재력을 체계적으로 분석하여 기술별 우선순위를 제시하였다.

한국의 기술경쟁력 분석에서는 현시비교우위(RCA)방법론이 광범위하게 활용되고 있다. Kim (2023)의 연구는 정규화된 현시비교우위(RCA) 지수가 특정 상황에서는 전통적 RCA보다 높은 설명력을 지닌다는 것을 증명하였으며, 한국이 전통적 경쟁국(중국, 일본, 대만)과 신흥 경쟁국(베트남, 말레이시아)으로부터 이중 경쟁압박을 받고 있다고 분석했다. Kim (2018)은 EU 수출경쟁력 연구에서 한국-EU FTA 이후 자본집약적 수출구조의 특징을 보이며, 기술집약적 품목에서는 비교열위를 자본-노동 혼합 수출품목에서는 비교우위를 유지한다고 밝혔다.

기술무역과 관련하여 Back (2020)은 기술무역특화지수를 통해 한국이 대부분 산업에서 기술경쟁력이 취약하다는 점을 지적하며, 베트남-중국과의 관계에서 3-5개 산업에서만 경쟁력이 유의미하게 개선되었다고 분석하였다. Lee (2009)는 한국의 GDP대비 R&D 투자가 세계 최고 수준(41.5%)임에도 기술무역수지 적자가 지속되는 문제를 제기하며, 상용화된 기술의 수출지원 강화 필요성을 강조했다.

2.3.2. 정책 연계 분석

정책과 기술의 연계를 분석한 연구로는 Calel and Dechezleprêtre (2016)가 유럽의 배출권 거래제(EU ETS) 데이터를 활용하여 저탄소 특허의 증가를 실증적으로 입증한 바 있다. 이는 정책 수단이 기술 개발의 동기를 유발할 수 있음을 시사한다. 또한 Meckling et al. (2022)은 미국과 독일 등 주요국의 기후변화 및 청정에

너지 정책 사례를 통하여 국가가 정책목표를 달성하기 위해 이익집단과의 관계를 조직화 하는 것이 중요함을 설명하였다.

2.3.3. 방법론적 혁신과 구조적 변화 탐지

최근의 연구는 국가 간 기술 특화도 분석(RCA), 토픽 모델링(LDA), 구조적 전환 탐지(UMAP) 등 계량적 방법을 통해 기후기술 연구 구조를 분석하는 방향으로 확장되고 있다.

토픽모델링 분야에서 Park and Oh (2017)는 기록관리학 연구동향 분석에서 LDA와 HDP (Hierarchical Dirichlet Process) 비교분석을 수행하며, LDA가 고빈도 키워드의 영향을 받는 반면 HDP는 주제별 특화 키워드를 보여준다고 밝혔다. Woo and Lee (2020)는 ICT 국가연구개발사업 5,200개 프로젝트에 LDA를 적용하여 AI, 빅데이터, IoT가 주요 연구주제임을 확인하였다. 기후기술 분야에서는 An et al. (2020)이 토픽모델링을 활용하여 기후기술 감축 R&D 사업의 특허 개발 내용을 분석하는 연구를 수행하였다.

Yu et al. (2023)은 IPCC 보고서의 주요 키워드를 이용하여 국내 기후연구와 국제 의제의 불일치를 LDA 기반 토픽모델링으로 분석하였으며, Nikolaidou et al. (2024)은 UMAP을 통한 시각화를 통하여 정책 주제들의 공간적 분포와 관계를 설명하였다. 또한 Lee (1995)는 한국의 사례를 들어 RCA 기반의 기술구조 변화와 정책 전환을 분석하였다.

서비스업 경쟁력 분석에서 Seo et al. (2007)은 OECD 국가의 서비스업 경쟁력을 비교분석하며 한국에의 시사점을 제시하였고, 이는 제조업 중심에서 서비스업으로의 사업구조 전환과 관련된 중요한 통찰을 제공하였다.

2.4. 연구의 차별성

기존의 연구들이 기술 정의, 개별 기술 평가, 단일 분석 방법론 등에 초점을 맞추었다면, 본 연구는 다음과 같은 측면에서 차별성을 갖는다.

첫째, 본 연구는 약 44만 건의 국제 학술 논문 데이터를 바탕으로 국가 간 기술 특화도 변화(RCA), 주요 연구주제의 흐름(LDA), 구조적 전환점(UMAP)을 통합적으로 분석하여, IPCC 평가보고서 발간 시기와의 대응성을 정량적으로 규명하고자 한다. 이는 기존 연구들이 단일 방법론에 의존하거나 제한된 데이터를 활용한 것과 차별화되는

접근이다.

둘째, 본 연구는 한국을 중심으로 주요국(미국, 독일, 일본, 중국 등)과의 체계적 비교 분석을 통해 국가 기술정책과 국제 학술 연구구조 간의 정합성을 직접적으로 평가하며, 이는 향후 국가 정책 설계 및 기술혁신 전략의 근거로써 활용될 수 있다. 기존 연구들이 개별 국가 분석이나 정책 효과 분석에 그쳤다면, 본 연구는 국제 비교를 통한 상대적 위치 파악과 전략적 시사점 도출에 중점을 둔다.

셋째, 본 연구는 국제적인 비교를 통해 국가적 맥락에서 기술정책과 학술적 연구의 연계를 다차원적으로 평가하고, 향후 정책 및 연구의 방향성 설정에 실질적이고 체계적인 기여를 하고자 한다. 특히 IPCC 보고서라는 글로벌 과학적 가이드라인과 각국의 실제 연구 활동 간의 구조적 연계를 정량적으로 분석함으로써, 기존 연구의 한계를 극복하고자 한다.

3. 연구방법

본 연구는 기후기술 연구의 구조적 변화를 정량적으로 분석하기 위해, 1990년부터 2024년까지 Web of Science 데이터베이스에 게재된 약 44만 건의 논문을 활용하여 다음과 같은 흐름으로 진행하였다(Fig. 1). 먼저, 논문 교신 저자 소속 국가 정보와 WoS 주제 카테고리를 기준으로 데이터를 정제하고, 텍스트 전처리(불용어 제거 및 표제어

추출)를 수행한 후, IPCC 보고서 인용 여부에 따라 두 그룹으로 분류하였다. 이후 RCA (Revealed Comparative Advantage)를 활용하여 대한민국, 미국, 중국, 독일, 영국, 호주 등 주요 6개국의 연구 분야별 특화도를 측정하고, RCA 값이 1보다 크면 비교우위가 있는 것으로 해석하였다. 이와 더불어 LDA (Latent Dirichlet Allocation) 토픽 모델링을 적용하여 연도별 잠재적 주제 구조를 추출하고, UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection) 기반의 차원 축소 및 속도 분석을 통해 기후기술 연구의 주요 전환점을 정량적으로 식별하였다. 이러한 방법론을 통해 한국이 재료 과학, 전기화학 등 기술 중심 분야에서 강한 특화도를 보이는 반면, 사회과학 분야에서는 취약한 구조적 특성을 규명하고, 기후기술 연구의 주요 전환점들이 IPCC 보고서 발간 시기와 일치함을 입증하고자 하였다. 이처럼 본 연구는 다차원적이고 정량적인 분석 프레임워크를 제시함으로써 기후기술 연구 동향 분석의 방법론적 진전을 도모하며, 각 분석의 세부적인 결과 및 이에 따른 학술적, 정책적 시사점은 이어지는 본문의 각 절에서 상세하게 논의될 것이다.

3.1. 데이터 구성 및 전처리 기준

본 연구는 기후기술 연구의 구조적 특성을 세계적 관점에서 정량적으로 분석하고, 한국을 중심으로 비교하기 위

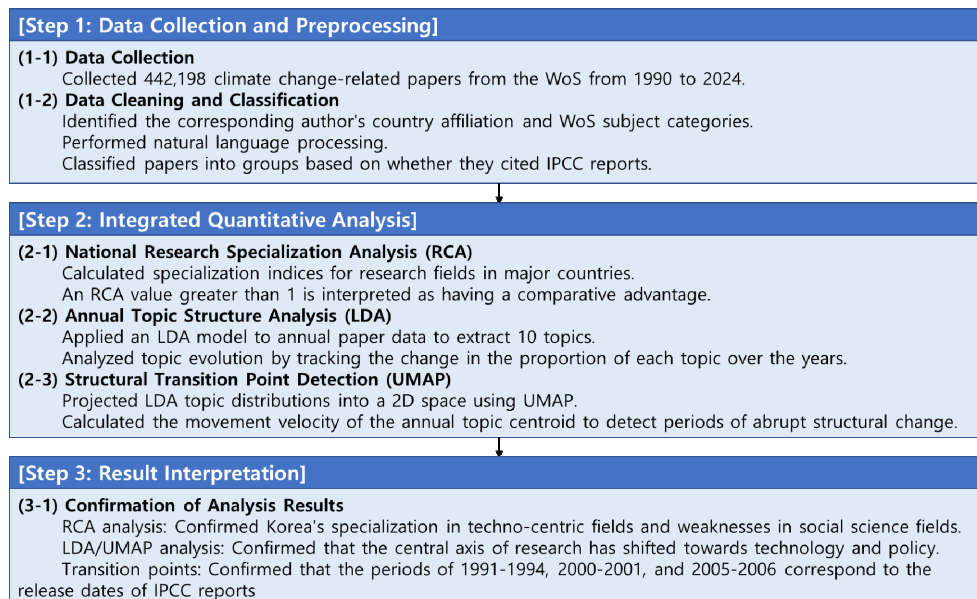


Fig. 1. Research flow diagram

해 Clarivate Analytics의 Web of Science (WoS) Core Collection 데이터를 활용하였다. 분석 대상으로는 1990년부터 2024년까지 발표된 문헌 중 “climate change”를 제목, 초록, 키워드 중 하나 이상에 포함한 논문 총 442,198건을 수집하였다.

이 데이터셋은 다음과 같은 전처리 기준을 바탕으로 정제되었다. 첫째, 교신저자의 소속 국가 정보가 명시된 문헌만을 분석 대상으로 설정하였다. 둘째, WoS에서 정의한 카테고리(WoS Subject Categories)를 기준으로 연구 분야를 식별하였으며, 중복 분야의 경우 모든 해당 항목을 보존한 채 다대다 확장을 적용하였다. 셋째, 문헌 내 추출된 메타데이터(제목, 키워드, 초록)는 주제 분석을 위한 입력으로 사용하기 위해 불용어 제거, 표제어 추출(lemmatization) 등 자연어처리 전처리 절차를 수행하였다.

이러한 데이터 구축은 대규모 문헌 분석에서 구조적 정확성과 통계적 신뢰성을 확보하기 위한 기반으로 기능하며, 연구 수행을 위한 정형적·비정형 정보의 통합 구조를 제공한다.

3.2. 분석기법

기후기술 연구의 특화도, 주제 구조, 전환점을 포괄적으로 진단하기 위해 본 연구는 세 가지 주요 기법을 결합하여 분석을 수행하였다: (1) 국가별 특화도 지표(RCA), (2) 토픽 추출 및 주제 전이 구조 분석(LDA), (3) 구조적 전환점 탐지(UMAP 및 속도 기반 기법). 각 분석 방법은 이론적 배경에 근거하여 적절한 통계적 해석력을 갖추도록 설계되었다.

3.2.1. 국가별 연구 집중도 분석: RCA (Revealed Comparative Advantage)

국가 간 연구분야 집중도를 비교하기 위해 무역경제학에서 널리 활용되는 RCA 지수를 문헌분석에 확장하여 적용하였다(Balassa, 1965). 본 지표는 특정 국가의 특정 분야 연구 비중이 전체 국가 평균에 비해 상대적으로 높은지를 측정한다. 계산식은 식 (1)과 같다.

$$RCA_{i,j} = \frac{(X_{i,j} / \sum_j X_{i,j})}{(\sum_i X_{i,j} / \sum_i \sum_j X_{i,j})} \quad (1)$$

여기서 $X_{i,j}$ 는 국가 i 가 분야 j 에서 발표한 논문 수이며, RCA값이 1보다 크면 비교우위를 가지는 것으로 해석

된다. 본 연구에서는 WoS 분야별 논문 수를 기준으로 각국의 RCA 지수를 연도별로 산출하였다.

3.2.2. 연도별 주제 구조 분석: LDA (Latent Dirichlet Allocation)

본 연구는 기후기술 분야의 연구 주제 및 그 구조적 변화를 심층적으로 분석하기 위해 잠재 디리클레 할당(Latent Dirichlet Allocation, 이하 LDA) 모델을 적용하였다(Blei et al., 2003). LDA는 베이지안 확률기반 주제모델로, 개별 문서를 다양한 잠재적 주제(topic)의 확률적 혼합으로 표현하며, 각 주제는 특유의 단어 확률분포로 정의된다. 이러한 방식으로 LDA는 방대한 텍스트 데이터에서 문서 간 공통된 의미 구조를 효과적으로 도출할 수 있다.

본 연구에서는 Web of Science 기반으로 구축된 연도별 문헌 데이터를 사용하여, 각 연도(1990~2024년)에 대해 독립적인 LDA 모델을 구축하였다. 특히 LDA 분석의 신뢰성과 해석가능성을 제고하기 위해 토픽 수(K) 최적화 과정을 체계적으로 수행하였다. 토픽 수의 설정은 모델의 품질을 나타내는 대표적인 정량지표인 Coherence와 Perplexity 점수를 동시에 고려하여 결정하였다. Coherence (NPMI)는 도출된 토픽의 주제 일관성과 인간의 직관적 이해 가능성을 나타내며, 높은 값일수록 주제 모델의 해석적 우수성을 의미한다. 반면, Perplexity는 모델의 예측적 성능을 나타내는 지표로 값이 낮을수록 모델의 일반화 성능이 우수함을 나타낸다.

토픽 수 최적화를 위해 전체 데이터셋 중 무작위로 추출한 30만 건(전체의 6.8%)의 논문 샘플을 대상으로, 토픽 수(K)의 범위를 5에서 20까지 변화시키면서 Coherence와 Perplexity를 계산하였다(Fig. 2). 분석 결과, Coherence 점수는 토픽 수가 10일 때 최대치를 기록하고 이후 완만한 감소를 보였으며, Perplexity 점수는 토픽 수가 증가할수록 지속적으로 감소하는 경향을 보였으나 K=10 이후부터는 감소 폭이 완만해졌다. 따라서 본 연구는 주제의 해석 가능성과 모델의 효율성 모두를 최적화하는 지점으로서 K=10을 선정하였다.

최종적으로 설정된 LDA 모델은 Python의 Gensim 라이브러리를 활용하여 각 연도별로 학습되었으며, 내부 반복(iterations)은 50회, 외부 학습 반복(passes)은 3회로 설정하여 모델의 충분한 수렴을 보장하였다.

Ejaz et al. (2023)은 2010년부터 2021년까지의 뉴스 기사에 LDA 기반 토픽 모델링을 적용하여 연도 간 토픽 비중 변화와 주제 진화를 분석하였으며, 각 토픽에 대해 상

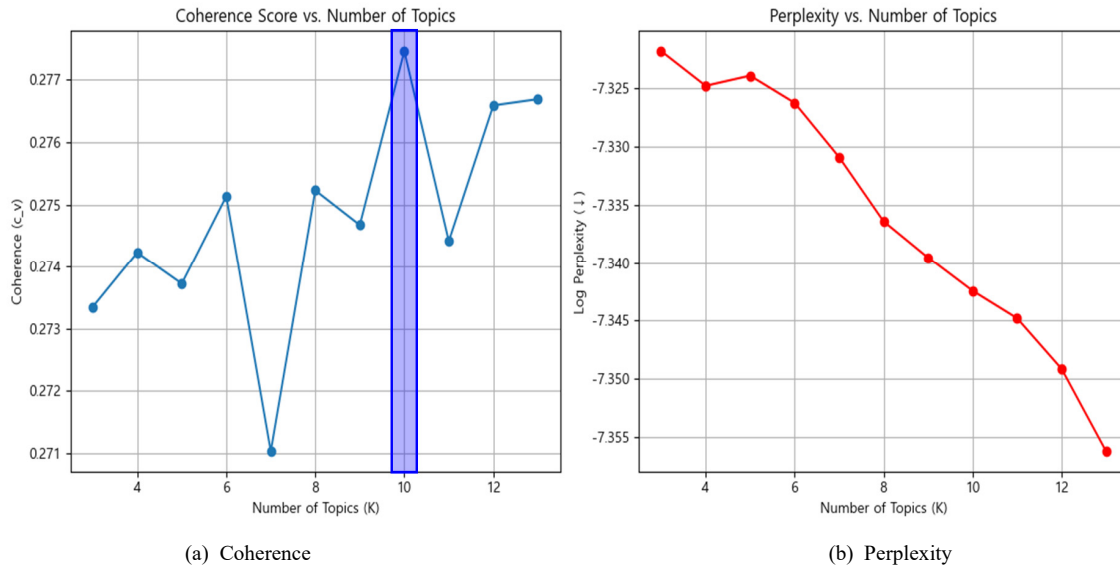


Fig. 2. Changes in Coherence and Perplexity scores according to the number of topics (K)

위 단어를 대표 키워드로 제시하여 의미를 해석하였다. 한편, Isoaho et al. (2021)은 정성적 정책 연구에서 토픽 모델링의 혼합방법 적용 가능성을 제시하며, 모델 출력 해석의 중요성과 키워드 기반 해석 절차에 대해 논의하였다.

따라서 본 연구에서도 Gensim 기반의 LDA 모델을 각 연도별로 학습하고, 토픽 해석을 위한 대표 키워드를 상위 단어 확률분포에서 추출하였으며, 토픽 비중 변화의 시계열 분석을 통해 구조적 변화를 탐색하는 방법론적 기반으로 활용하였다. 그리하여, 각 토픽에 대해서는 단어의 확률 분포 상위 30개 단어를 대표 키워드로 선정하여 토픽의 의미를 명확히 하였고, 연도 간 토픽 비중 변화는 시계열 분석을 통해 구조적 변화를 탐지하는 기반으로 사용하였다.

3.2.3. 전환점 탐지: UMAP 기반 구조 변화 및 속도 분석

본 연구는 도출된 LDA 토픽 분포를 기반으로 기후기술 연구의 주요 전환점(turning point)을 정량적으로 식별하고자 하였다. 이를 위해 고차원의 토픽 벡터를 효과적으로 시각화하고, 주제 구조의 급격한 변화를 탐지할 수 있는 UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection) 기법을 적용하였다(McInnes et al., 2018). UMAP은 데이터의 국지적 및 전역적 위상구조를 동시에 보존하며 고차원 데이터를 저차원 공간으로 효과적으로 임베딩하는 비선형 차원축소 기법이다.

구체적으로 본 연구에서는 LDA로부터 생성된 연도별 토픽 분포(10차원)를 PCA (Principal Component

Analysis)를 통해 사전적으로 50차원 이하로 축소하여 노이즈를 제거한 후, UMAP (n_neighbors=50, min_dist=0.3, random_state=42)을 통해 최종적으로 2차원으로 투영하였다. 각 연도의 주제구조 중심점(centroid)은 2차원 임베딩 공간에서 연도별 토픽 분포를 대표하는 점으로 계산하였으며, 이 중심점의 연도별 이동 속도(v)는 식 (2)로 정의하였다.

$$v_t = \| C_{t+1} - C_{t-1} \| \quad (2)$$

여기서, C_t 는 특정연도의 중심좌표를 나타내며, v_t 는 중심좌표의 연도 간 이동 크기를 의미한다. 본 연구에서는 이 속도 지표를 기반으로, 속도의 변화가 가장 현저히 나타나는 상위 3개 연도를 기후기술 연구의 주요 전환점으로 판단하였다. 이러한 전환점 탐지 접근은 단순한 단어 빈도 또는 토픽 빈도 기반의 분석 대비 구조적·비선형적 변화를 정량적으로 포착할 수 있다는 점에서 매우 효과적이며, 특히 주요 국제정책 이벤트(IPCC 평가보고서 발표, 파리협정 체결, NDC 갱신 등)와의 연계성을 분석하는 데 적합하다.

3.2.4. 시각화 및 통계 처리 절차

본 연구에서 사용된 모든 데이터 분석과 통계적 처리는 Python 3.10 환경에서 수행되었으며, 주요 사용된 라이브

러리로는 pandas, gensim, umap-learn, scikit-learn, matplotlib, seaborn 등이 있다. 텍스트 전처리 단계에서는 불용어(stopwords) 제거, 표제어 추출(lemmatization), 토큰화(tokenization)를 포함한 표준 자연어처리 기법을 적용하였다. 또한 최소 문서 출현 빈도(min_df ≥ 5) 필터링을 통해 노이즈 단어를 제거하였다.

시각화 단계에서는 연도별 RCA 히트맵, LDA 토픽 분포 및 키워드 클라우드, UMAP 임베딩 결과, 속도 기반 전환점 탐지 결과 등 주요 분석 결과를 직관적으로 이해할 수 있도록 다양한 시각 자료를 생성하였다. 특히, Coherence와 Perplexity 기반 토픽 수 결정 그래프는 모델의 정량적 신뢰성 확보를 위해 본문에 명시적으로 제시하였다(Fig. 2). 이러한 체계적이고 시각적으로 명확한 분석 절차는 연구의 투명성 및 재현 가능성을 보장하는 데 기여하였다.

4. 연구결과

4.1. 국가별 RCA 분석

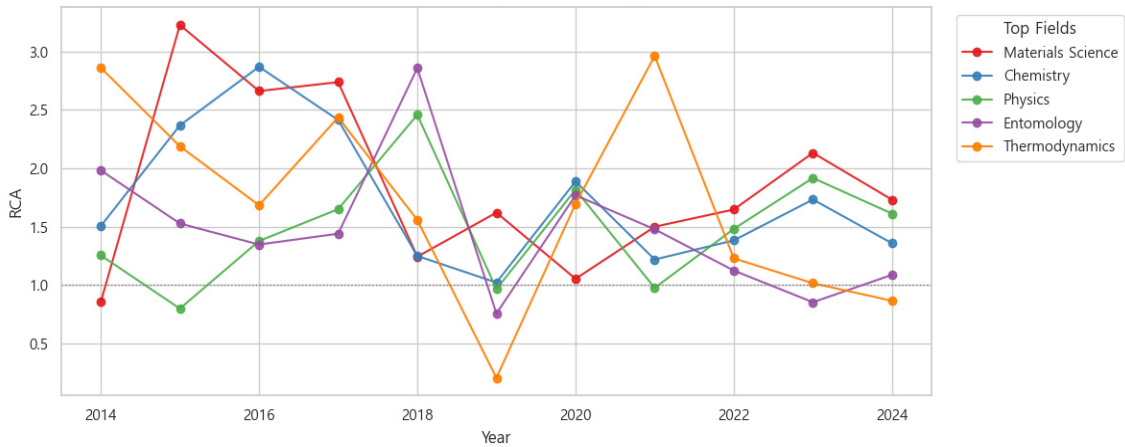
본 절에서는 1990년부터 2024년까지 Web of Science 데이터베이스에 기반하여, 기후기술 관련 연구 분야에서 주요 국가들의 연구 집중도 및 상대적 비교우위를 분석하였다. 국가는 대한민국과 논문 발간 상위 국가인 미국, 중국, 영국, 독일, 호주 등 5개국을 대상으로, 전 기간의 문헌 데이터를 활용해 각국의 연구 분야별 특화지수(RCA: Revealed Comparative Advantage)를 산출하였다. 분석 대상 연구 분야는 전 세계 기준 논문 수가 1,000건 이상인 주제로 제한하였으며, 각국의 기술·사회과학·자연과학 분야 간 특화 양상을 정량적으로 비교함으로써 국가별 연구 전략의 구조적 차이를 도출하였다.

대한민국은 기술집약형 분야에서 전통적으로 강한 특화도를 유지하고 있다. 전체 연도(1990~2024년) 데이터를 기준으로 보면, Materials Science (RCA=3.28), Chemistry (2.61), Physics (2.45), Entomology (2.19), Thermodynamics (2.11) 등이 상위를 차지하였다. 특히 전기화학, 고분자, 열역학 등은 수소경제-배터리 중심 기술정책의 결과로 해석된다. 반면, Evolutionary Biology (0.16), Geography (0.17), Sociology (0.19), Psychology (0.21), Anthropology (0.23) 등 사회·생태 관련 분야는 현저히 낮은 특화도를 보이며, 기술 중심 편향과 사회적 연구 기반의 미비함을 반영한다. 특히 Entomology (2.19)의 높은 RCA는 병해충, 생물 기반 환

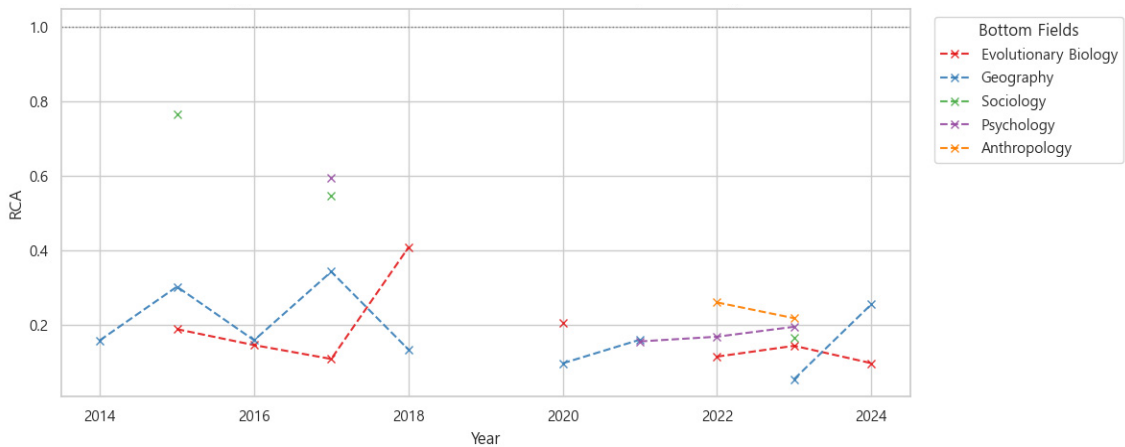
경기술과 같은 응용분야의 중요성이 확대되고 있음을 시사하며, 이는 식량안보 및 생물다양성 분야의 기후 리스크 대응과 연계된다. 그러나 사회과학 기반의 연구 저조는 기술 혁신과 정책적 실행 간의 괴리를 심화시킬 수 있으며, 복합 위기 대응을 위한 융합 연구 기반 확대가 시급하다. 최근 10년간(2014년 ~ 2024년) 그래프를 살펴보면(Fig. 3) 한국의 기후기술 연구가 기술집약형 분야에 구조적으로 편중되어 있으며, 사회과학 기반의 정책·제도 관련 연구는 상대적으로 미흡함을 시각적으로 확인할 수 있다. 특히 Fig. 3(b)의 하위 5개 분야에서는 2019년도에 논문이 단 한 편도 출판되지 않아 RCA 지수가 공백으로 나타났으며, Fig. 3(a)의 상위 5개 분야 역시 2019년에 비교적 RCA 값이 낮게 나타나는 등 전반적인 연구 활동이 일시적으로 위축되었던 경향이 확인된다. 이는 기술 중심의 편향이 사회과학 기반의 정책·제도 관련 연구의 상대적 미흡함과 함께 나타나고 있음을 명확히 보여준다.

미국은 Sociology (2.33), Anthropology (2.28), Communication (2.12), Psychology (1.95), Fisheries (1.84) 등 사회과학 및 지역사회 기반의 연구에서 높은 특화도를 보였다. 이는 미국이 기후정의(climate justice), 건강과 복지, 지역 적응 등에서 선도적 연구국가임을 보여준다. 반면, Thermodynamics (0.51), Agriculture (0.59), Materials Science (0.62) 등 기술 기반 응용분야에서는 상대적으로 낮은 RCA를 기록하고 있다. 상위 특화 분야 대부분이 인간 행동, 집단사회, 소통과 관련된 영역이라는 점에서, 미국의 기후 대응은 과학적 근거뿐 아니라 사회적 수용성과 정치적 정당성 확보를 중시하는 전략임을 보여준다. 이는 민주주의 기반의 정책 설계와 시민참여형 연구 생태계가 기후기술 전개에 결정적임을 시사한다.

중국은 Remote Sensing (2.20), Thermodynamics (1.37), Geology (1.33), Materials Science (1.30), Water Resources (1.24) 등 고도 기술 및 인프라 중심 분야에서 특화되어 있다. 이는 대규모 산업화 전략과 정부주도의 기술 상용화 정책이 반영된 결과다. 반면, Sociology (0.08), Anthropology (0.14), Area Studies (0.17), International Relations (0.20), Communication (0.21) 등은 매우 낮은 수치를 보여 사회 기반 연구의 전략적 취약성이 드러난다. 기술 기반 분야에서 높은 RCA를 보이는 동시에 사회과학 분야에서 극도로 낮은 수치를 기록한 것은, 기후기술 접근이 ‘산업화-감축 중심’에 치우쳐 있으며 사회적 전환 또는 지역 기반 적응 관점이 미약함을 반증한다. 향후 사회과학 및 인문 기반의 연구 강화 없이는 국제 협력 및 수용성 확보에서의 한계가



(a) Time series of Korea's top 5 RCA fields (2014~2024)



(b) Time series of Korea's bottom 5 RCA fields (2014~2024)

Fig. 3. Korea's top 5 and bottom 5 fields RCA graph (1990~2024)

예상된다.

영국은 Infectious Diseases (5.06), Oceanography (2.30), Development Studies (1.88), Computer Science (1.74), Evolutionary Biology (1.69) 등에서 두드러진 RCA를 보였다. 특히 감염병·해양·개발협력 등은 글로벌 대응과 제도적 기반 연구에 강점을 갖는 분야로 해석된다. 반면, Water Resources (0.35), Plant Sciences (0.67), Physical Geography (0.69) 등 자연과학 기반 응용 분야에서는 상대적으로 RCA가 낮았다. 이를 통해서, 영국은 제도적, 글로벌 이슈 기반 연구에서 두드러진 특화도를 보이며, 국제개발, 공공보건, 법제 기반 기후정책의 중심국으로서의 역할을 강화하고 있다는 점을 시사한다. 이는 영연방 국가와의 정책 연계성, 지속가능 개발 목표(SDGs) 기반 기후 외교

전략과도 깊이 연동되어 있다.

독일은 Paleontology (1.73), Psychology (1.61), Biophysics (1.35), Transportation (1.27), Physical Geography (1.26) 등 기초과학과 도시 인프라 관련 연구에서 고르게 특화되어 있다. 이는 기술 기반 응용보다는 정책과 인프라 연계성, 교육 기반 연구에 중점을 두는 독일의 R&D 정책을 보여준다. 반면, Fisheries (0.46), Area Studies (0.54), Veterinary Sciences (0.61), Thermodynamics (0.62) 등은 낮은 특화도를 보였다. 이를 통해서 독일은 단일 분야의 고도화보다는 복수 기초-응용 분야 간의 균형 있는 RCA 분포를 보여주며, 이는 지속가능한 인프라 기반 정책 개발과 연구·교육 간 연결성 강화에 중점을 둔 전략으로 해석된다. 도시·운송·심리 등 일상

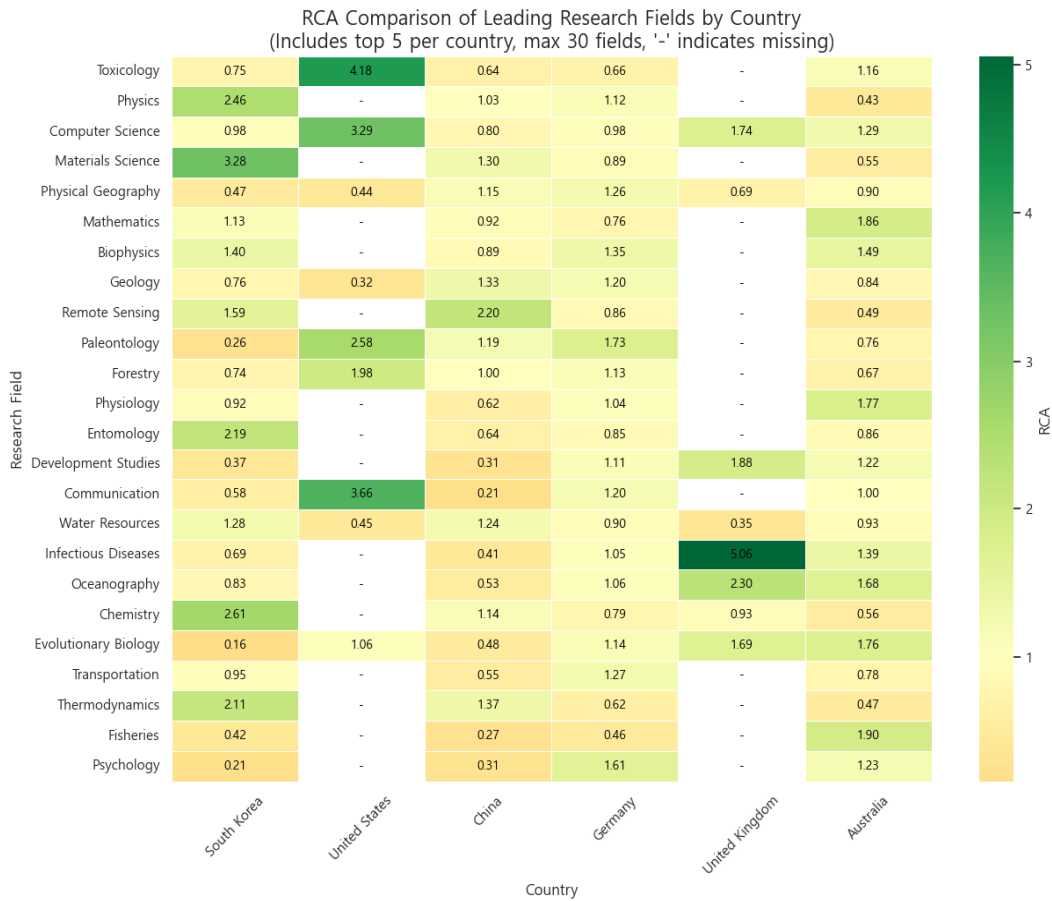


Fig. 4. RCA heatmap of major fields by country (South Korea, United States, China, Germany, United Kingdom, Australia)

기반의 문제 해결형 연구가 강점을 이루고 있다.

호주는 생태·자연 기반 기후 적응 분야에서 강한 연구 기반을 가지고 있다. Fisheries (1.90), Mathematics (1.86), Physiology (1.77), Evolutionary Biology (1.76), Oceanography (1.68) 등이 상위에 위치하였다. 이는 호주의 생물다양성, 해양 생태, 기후·건강 연계성 등에 초점을 맞춘 연구 전략과 일치한다. 반면, Physics (0.43), Thermodynamics (0.47), Remote Sensing (0.49) 등 기술 기반 분야는 낮은 RCA를 보여준다. 호주의 특화 분야는 자국 고유의 생물지리적 특성과 기후환경 리스크에 대응하는 전략적 선택을 반영하고 있으며, 이는 자연 기반 해법 (Nature-based Solutions) 중심의 기후적응 전략과 일관된다. 다만 기술기반 분야의 RCA가 낮다는 점은 글로벌 기술표준 경쟁에서의 한계로 이어질 수 있다. 기술중심국(한국, 중국)과 사회정책 중심국(미국, 영국) 간 연구 집중도의

구조적 차이를 시각화 함으로써, 각국의 기후기술 전략의 방향성과 연구 기반 차별성을 확인할 수 있다(Fig. 4).

이러한 분석 결과는 한국이 수소경제, 배터리, 전기화학 등 특정 기술군에 과도하게 편중된 구조를 지니고 있으며, 사회과학적 전환 연구나 제도 기반의 기후 적응 전략과 같은 분야에 필요한 학제 간 연구 기반이 상대적으로 미비함을 보여준다. 이는 한국이 기후기술 연구 생태계의 균형성을 확보하기 위해 사회, 법, 거버넌스 기반 분야에 대한 R&D 투자를 적극 확대해야 함을 시사하며, RCA 기반의 정량 분석은 기술 중심국(한국, 중국)과 사회전환 중심국(영국, 미국) 간의 전략적 구조 차이를 명확히 규명함으로써 향후 협력 가능성 및 전략적 보완이 필요한 분야를 식별할 수 있는 유효한 정책 설계 도구로 기능한다. 더불어 정기적인 RCA 기반 모니터링 체계를 구축함으로써 각국의 기후기술 전략과 실제 연구 기반 간의 정

릴 정도를 점검하고, 미래 투자 우선순위를 과학적으로 설정할 수 있는 평가 수단으로도 활용될 수 있다.

4.2. 연도별 주제 구조 분석: LDA 기반 토픽 진화 분석

본 연구는 기후기술 분야의 주제 진화를 정량적으로 분석하기 위해 잠재 디리클레 할당(Latent Dirichlet Allocation, LDA) 기법을 연도별로 적용하였다. 각 연도별 문헌 집합에 독립적으로 LDA 모델을 학습시킴으로써, 주제 분포의 연속성과 구조적 전이를 시간 축 상에서 비교할 수 있도록 설계하였다.

도출된 10개의 주요 토픽은 다음과 같이 분류된다 (Table 1).

토픽 비중의 시계열 변화는 각 시기별로 뚜렷한 구조적

전환을 보인다. 1990년대부터 2000년대 초반까지는 Topic 0 (생물다양성 및 생태계)과 Topic 4 (강수 패턴 및 극한기후)가 상대적으로 높은 비중을 차지하며, 생물종 보전 및 기후현상의 물리적 분석에 대한 기초 연구가 중심을 이루었다. 이후 2010년대부터는 Topic 2 (적응 및 완화 정책)와 Topic 3 (탄소 관리 및 에너지 전환)의 비중이 꾸준히 상승하였고, 이는 도시 기반 적응정책, 에너지전환 및 탄소중립 관련 연구의 확대를 의미한다. 특히 Topic 3은 2020년대에 들어서면서 전체 주제 중 가장 높은 비중(0.18 이상)을 기록하며 기술 기반 정책 담론이 연구의 중심축으로 부상하였음을 보여준다. 반면, Topic 1 (극한기후 및 기상재해 영향)과 Topic 8 (해양 취약성 및 거버넌스) 등은 장기적으로 비중이 감소하거나 정체되어 있으며, Topic 6 (공중보건 및 사회정의)은 일시적 증가를 보인 이

Table 1. LDA topic analysis summary

Topic No.	Topic title	Keywords
Topic 0	Biodiversity and Ecosystems	species, habitat, ecosystem, biodiversity, etc.
Topic 1	Impact of Extreme Weather and Climate Disasters	drought, snow, mortality, agriculture, etc.
Topic 2	Adaptation and Mitigation Policies	adaptation, mitigation, urban, policy, etc.
Topic 3	Carbon Management and Energy Transition	carbon, energy, sustainable, renewable, etc.
Topic 4	Precipitation Patterns and Extreme Climate	precipitation, extreme, greenhouse, methane, etc.
Topic 5	Warming and Climate Scenarios	warming, risk, assessment, scenario, etc.
Topic 6	Public Health and Social Justice	health, policy, disease, justice, exposure, etc.
Topic 7	Ocean and Polar Changes	ice, ocean, arctic, antarctic, etc.
Topic 8	Marine Vulnerability and Governance	sea, vulnerability, governance, resilience, etc.
Topic 9	Soil and Food Security	soil, forest, crop, food, security, etc.

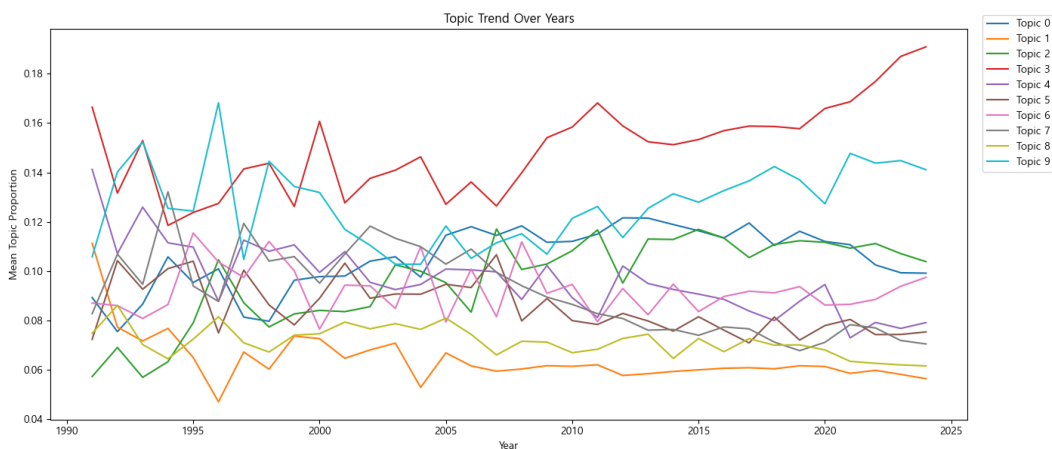


Fig. 5. Time series graph of topic proportion changes by year

후 하향세를 나타낸다. 전반적으로, 최근 기후 연구는 생물·생태 중심에서 기술·정책 중심으로 전환되었으며, 이는 탄소중립, 에너지정책, 지속가능성 전략이 학계에서도 핵심 아젠다로 자리 잡았음을 시사한다(Fig. 5).

IPCC 보고서에서 인용된 문헌과 그렇지 않은 일반 문헌 간의 주제 비중 차이를 비교한 결과, 양 그룹은 일부 공통 토픽에서 유사한 중요도를 공유하나, 특정 주제에 대해서는 명확한 집중도 차이를 보였다. IPCC 인용 문헌에서는 Topic 3 (탄소 관리 및 에너지 전환)과 Topic 4 (강수 패턴 및 극한기후), Topic 7 (해양 및 극지 변화)의 비중이 각각 0.14, 0.14, 0.12로 높게 나타났으며, 이는 IPCC의 과학적 평가에서 에너지 전환, 온실가스 변화, 극지방 및 해양의 기후 반응 메커니즘이 중심으로 다루어졌음을 시사한다. 반면 Non-IPCC 문헌에서는 Topic 3 (탄소 관리 및 에너지 전환, 0.17), Topic 9 (토양 및 식량안보, 0.14), Topic 0 (생물다양성 및 생태계, 0.11)의 비중이 상대적으로 높았으며, 이는 일반 문헌이 탄소중립과 기술정책 이슈 외에도 식량 시스템, 생태계 회복력 등 실천적·응용적 영역에 보다 많은 관심을 기울이고 있음을 보여준다.

또한 Topic 1 (극한기후 영향), Topic 6 (공중보건 및 사회정의) 등은 두 그룹 모두에서 낮은 비중(0.04~0.10)을 기록했으며, 이는 기후위기의 사회적 영향이나 건강 불평등 이슈에 대한 학계의 비중이 아직도 상대적으로 낮다는 구조적 한계를 드러낸다. 종합적으로 볼 때, IPCC는 기후과학의 기술적·물리 기반 접근에 집중하고 있으며,

Non-IPCC 연구는 현장 기반의 생물권, 식량안보, 지속가능성 담론에 더 강한 연결점을 보이고 있다. 이러한 분화는 과학적 평가와 사회적 실천 사이의 연결 고리를 확대할 필요성을 강조한다(Fig. 6).

본 분석을 통해 도출된 연도별 주제 비중의 이동은 기후기술 연구가 점차 기술혁신 중심에서 정책·정의·적응의 복합 의제로 확장되어 왔음을 시사한다. 특히 한국의 경우, 기술 기반 연구에 편중된 주제 구성은 국제기구가 요구하는 사회적 포용성, 적응 역량 강화, 정책 연결성 측면에서의 균형 부족을 드러낸다. 향후 기후기술 R&D 정책은 기술혁신뿐만 아니라 ‘기후 정의(climate justice)’, ‘취약계층 적응(adaptation for vulnerable groups)’, ‘사회적 수용성(social acceptance)’ 등의 다차원 주제 확장을 적극적으로 반영해야 할 것이다.

4.3. 전환점 탐지 결과: 주제 구조의 변화와 전이 연도

UMAP 기반의 구조 변화 분석을 통해 도출된 시각화 결과(Fig. 7)는 시계열적으로 연구 주제의 중심 좌표가 이동하는 패턴을 명확히 보여준다. PCA로 전처리된 후 UMAP으로 2차원 임베딩된 연도별 LDA 벡터를 기준으로 중심좌표의 이동 속도를 계산한 결과, 다음 세 구간에서 변화의 급격한 속도 증가가 관측되었다.

- 1991 ~ 1994년: 생물다양성과 위험 인식의 초기 주제가 급증
- 2000 ~ 2001년: 정책 담론과 적응 중심의 구조 전이
- 2005 ~ 2006년: 탄소중립, 기술혁신, 전환 중심으로 구조 급변

이는 각각 IPCC 제1차(1990), 제3차(2001), 제4차(2007) 보고서 발표 시점과 밀접하게 대응되는 것으로 보이며, 학술 담론에서의 정책 반응성을 실증적으로 보여주는 결과이다.

1990 ~ 2020년대의 연구 동향 변화 속도 분석 결과, 1992년, 2001년, 2006년은 명확한 구조적 전환점으로 도출되었으며, 이 시점들은 각각 제1차, 제3차, 제4차 IPCC 평가보고서 발표 직전 또는 직후의 시기와 정합한다. 특히 1992년은 기후변화협약(UNFCCC) 채택과 맞물려 가장 급격한 전환 속도를 기록했으며, 이는 학계가 기후문제의 제도적 전환을 주도적으로 반영했음을 시사한다. 2001년과 2006년의 변화 역시 에너지 전환, 적응정책, 온

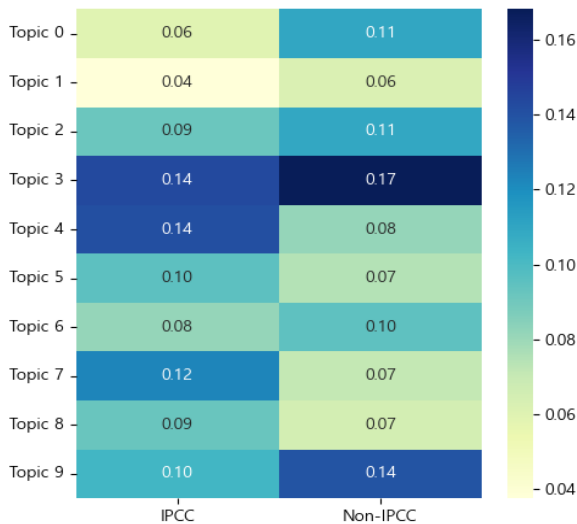


Fig. 6. Heatmap comparing average topic proportions between IPCC vs Non-IPCC literature

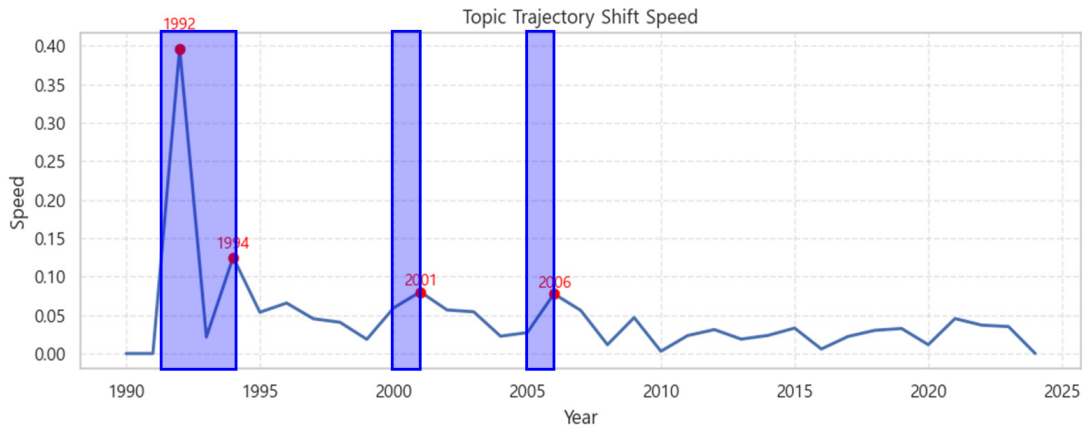


Fig. 7. Yearly structural centroid movement velocity curve graph and top 3 transition points

실가스 감축과 같은 주요 의제가 학술 담론으로 빠르게 흡수되었음을 보여준다.

이러한 결과는 국제 보고서와 학계 간의 주제 정렬 동학(dynamics of thematic alignment), 즉 글로벌 정책담론이 학계의 연구 주제의 방향을 결정짓고 동원하는 과정을 실증적으로 입증한다. 이러한 정렬 메커니즘은 특정 정책 의제(IPCC 보고서, 국제회의, 다자협약 등)가 과학적 연구의 키워드 구성, 문제 정의, 자원 분배에까지 영향을 미치는 일련의 구조적 흐름으로 해석될 수 있다. 특히 전환점 직후에는 정책 문서에 등장한 핵심 개념이 다수의 연구 주제로 빠르게 번역되며, 연구 집단 간 의제 통합력이 강화되는 경향이 나타난다.

또한, 이 시기에는 연구자들이 정책적 수요를 충족하기 위한 방향으로 연구 역량을 집중하게 되는데, 이러한 특성은 정책 드리븐 리서치(policy-driven research)의 전형적 형태로 볼 수 있다. 이는 학계가 자율적으로 주제를 설정하는 것이 아니라, 외부 정책 수요(정치, 국제기구, 정부 R&D 기획 등)에 따라 연구 주제가 재편되는 현상으로, 기후기술 분야에서 점점 더 일반화되고 있다. 이는 전략적 연구 집중이라는 긍정적 효과를 유도할 수 있으나, 장기적 관점에서는 학문적 다양성과 독립성을 저해할 우려도 함께 내포한다.

따라서 국내 기후기술 R&D 정책 수립 시, 글로벌 담론의 변곡 시점을 사전에 탐지하고 연구 자원의 전략적 재분배를 통해 선제적 대응형 연구 투자 구조를 마련할 필요가 있다. 특히 전환기에 출현한 주요 키워드와 연구 구성 요소는 향후 정책 모니터링 지표와 성과 평가의 핵심 기준으로 기능할 수 있으며, 이는 단순한 연구 주제 대응

을 넘어 정책 설계의 피드백 체계로 연계될 수 있는 중요한 기반이 된다.

4.4. IPCC 기반 정책 클러스터와 연도별 주제 궤적: UMAP 기반 다차원 분석

기후기술 분야에서 정책 중심 연구와 기술 중심 연구 간의 구조적 차이를 비교하기 위해 UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection) 기반의 다차원 축소 기법을 활용하여 전체 문헌의 토픽 분포를 분석하였다. 첫 번째 분석은 IPCC 인용 여부에 따른 주제 구조를 2차원 공간에 투영하여 시각화하였고, 두 번째 분석은 1990년부터 2024년까지의 연도별 토픽 중심 좌표 이동을 기반으로 주제 궤적의 진화를 추적하였다.

Fig. 8에서 확인할 수 있듯이, IPCC 인용 문헌(파란 점)과 Non-IPCC 문헌(주황 점)은 명확하게 분리된 클러스터를 형성하지 않고 서로 겹쳐져 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 두 집단 간에 뚜렷한 경계선이 나타나지 않는다. 특히, IPCC 인용 문헌(파란 점)은 전체 문헌의 중심부(UMAP-1과 UMAP-2 좌표가 0에 가까운 영역)에 주로 집중되어 있으며, 상대적으로 넓게 분포되어 있는 Non-IPCC 문헌(주황 점)에 둘러싸여 있는 형상을 보인다.

이러한 패턴은 IPCC 인용 문헌이 특정 주제 구조에 국한되지 않고, Non-IPCC 문헌이 다루는 다양한 주제들을 포괄적으로 포함하고 있음을 시사한다. 즉, IPCC 인용 문헌은 광범위한 연구 분야의 중심적인 토픽들을 다루고 있으며, 이는 IPCC가 다양한 학문 분야의 연구를 포용적으로 아우르고 있음을 나타내는 실증적 증거로 해석할 수 있다.

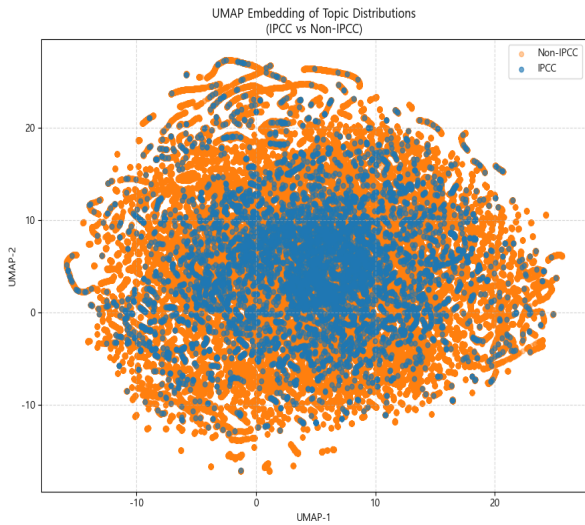


Fig. 8. UMAP embedding-based topic distribution of IPCC vs Non-IPCC literature

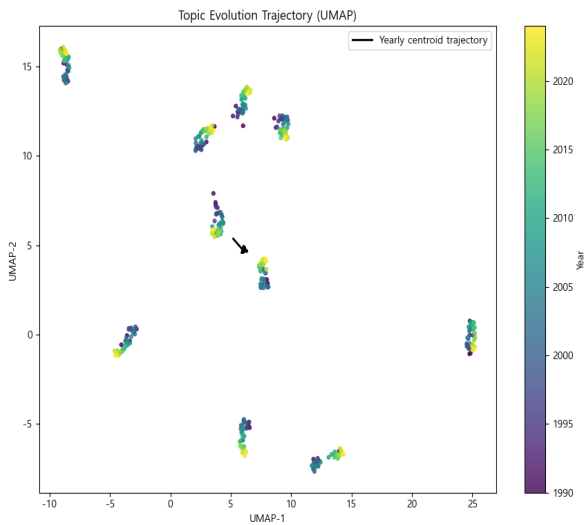


Fig. 9. UMAP-based yearly topic centroid movement trajectory (1990 ~ 2024)

Fig. 9에서는 연도별 주제 중심의 궤적이 연속된 선으로 나타나며, 시간 흐름에 따라 토픽 구조가 선형적 확산이 아닌 다핵적 분화 경로를 보임을 확인할 수 있다. 각 시점의 중심 좌표가 서로 다른 방향으로 이동하며 새로운 군집을 형성하고 있는데, 이는 기후기술 분야에서 특정 시점마다 새로운 이슈나 정책 방향성이 등장하며 주제 구조 자체가 재편되어 왔음을 보여준다. 특히 2001년, 2006년 등 주요 구조적 전환점에서 중심 궤적의 급격한 방향

변화가 관측되며, 이는 IPCC 평가보고서 발표 시기와 구조적으로 정렬됨을 시사한다.

이러한 결과는 다음의 중요한 시사점을 제공한다. 첫째, UMAP 기반 구조 비교는 IPCC 문헌이 정책 및 사회적 가치 중심 토픽에서 독자적 위치를 차지하고 있으며, 기술 기반 연구와 분리된 방향으로 발전해왔음을 시각적으로 입증한다. 둘째, 주제 궤적의 시계열 분석은 기후기술 연구가 특정한 정책 이벤트에 반응하여 집단적으로 이동하는 ‘주제 동역학’을 보여주며, 이는 정책 드리븐 리서치(policy-driven research)의 명확한 증거로 해석된다. 즉, 글로벌 정책 담론의 변화는 주제 중심 이동뿐 아니라 새로운 주제군의 생성, 기존 구조의 재편 등을 유도하며, 기후기술 지식 생태계의 진화 방향을 규정짓는다.

정책적 함의로는, 첫째로 한국을 포함한 아시아 국가들이 IPCC 중심의 정책 클러스터에 구조적으로 덜 포함되어 있다는 점에서, 정책 연계형 연구 기반과 사회적 전환 연구 역량의 확충이 절실하다는 사실이 부각된다. 둘째로, 기술 중심 접근만으로는 글로벌 정책 커뮤니티의 요구에 부합하기 어려우며, 사회과학·공공정책·거버넌스 영역과의 통합적 전략 설계가 기후기술 포트폴리오의 핵심 과제로 부상하고 있다.

5. 논의

본 연구는 기후기술 분야의 글로벌 연구 흐름과 정책 의제 간의 정합성을 확인하고, 한국의 연구 구조적 특성과 과제를 식별하는 데 목적을 두었다. 특히 IPCC 평가보고서의 영향력은 주요국 연구담론에 실질적인 변화를 유도해왔으며, 그 반영 수준은 국가별 제도적 맥락과 연구 생태계의 성숙도에 따라 상이하게 나타난다. 본 연구의 결과에서 도출된 전환 연도(1991~1994년, 2000~2001년, 2005~2006년)는 IPCC의 1차~4차 평가보고서 발표 및 파리협정 체결 등과 시기적으로 밀접하게 대응하며, 미국, 독일, 영국 등은 이 시점에 IPCC 주요 의제를 반영한 토픽 전이가 뚜렷하게 나타났다. 반면, 한국은 이러한 구조적 변화를 충분히 반영하지 못하고 기술개발 중심의 주제에 상대적으로 집중되어 있어 IPCC 담론과의 정책적 동기화 수준이 제한적인 것으로 해석된다.

RCA 분석에서도 이와 유사한 양상이 나타났다. 한국은 Material Science, Energy Engineering, Electrochemistry 등의 분야에서 RCA 1.0 이상의 비교우위를 나타낸 반면, Humanities, Urban Policy, Risk Governance, Environmental

Sociology 등 정책·제도·사회적 대응과 관련된 분야는 RCA 1.0 미만으로 분석되어 구조적 취약성이 뚜렷하게 드러났다. 이는 기후기술을 단순 기술이전이나 R&D 투자 문제로만 접근하는 국내 정책 틀의 한계를 반영하며, 기술 기반 접근의 성과에도 불구하고 정책 연계성과 사회과학 기반의 적응 전략이 결여된 구조적 불균형이 존재함을 시사한다. 따라서 한국의 기후기술 연구는 기술과 사회, 제도를 연계하는 융합형 연구 체계로의 전환이 필요하며, 이를 위해 Humanities·Social Science 기반의 R&D 트랙 확충, 사회과학계 연구자 중심의 기후정책 지원 프로그램 도입, 위험 거버넌스 및 지역 적응에 특화된 연구인력 양성 전략이 함께 마련되어야 한다.

한편, 본 연구에서 제안한 RCA, LDA, UMAP 기반의 정량 지표는 기존의 주관적 평가나 활동조사 통계가 가지는 한계를 보완하고, 실시간 정책 반응성과 연구구조 변화를 모니터링할 수 있는 새로운 정책 관리 틀로 활용될 수 있다. 예컨대, 본 연구에서 분석된 RCA 지수는 특정 분야의 투자 집중도 또는 전략적 취약성을 수치화할 수 있으며, LDA 기반 토픽 전이 분석은 주요 정책 의제에 대한 연구계의 반응성을 평가하는 데 유효하다. 특히 UMAP 기반 전환점 탐지 방법은 중장기 정책 시계 확보를 위한 구조 변화의 조기 진단 수단으로서 기능할 수 있다. 향후에는 이러한 정량 지표들을 국가 활동조사 통계, 기술로드맵, NDC 이행 모니터링 지표 등과 연계하여 기후기술 R&D 정책의 전략성과 기민성을 동시에 강화하는 데이터 기반 정책 관리 체계로 고도화할 필요가 있다.

6. 결론

본 연구는 Web of Science 데이터베이스 기반의 44만여 편의 기후기술 관련 논문을 대상으로, 국가별 상대 특화도(RCA), 주제 구조 분석(LDA), 전환점 탐지(UMAP+속도 기반 분석)를 연계한 정량적 통합 프레임워크를 제시하였다. RCA 분석을 통해 기술 중심의 공학·자연과학 분야에 편중된 한국의 기후기술 연구 구조를 확인하였으며, 사회과학·인문환경 분야의 상대적 약세를 정량적으로 도출하였다. 연도별로 독립적으로 구축한 LDA 토픽 모델은 1990년대부터 최근까지의 담론 흐름에서 주요 주제의 부상과 쇠퇴를 계량적으로 추적하였고, IPCC 보고서의 주제와의 정합성을 비교함으로써 국가별 정책 대응성과 전략적 정렬 정도를 분석하였다. 또한, UMAP을 활용한 토픽 구조 임베딩과 중심좌표 기반 속도 분석을 통해

1991~1994년, 2000~2001년, 2005~2007년의 전환점을 식별하고, 이들 시점이 IPCC 보고서 발간, 파리협정 논의 개시, 기술 중심 R&D 정책 전환 등과 맞물리는 구조적 변곡점임을 도출하였다. 이러한 분석들은 단순 빈도 기반 키워드 분석이나 정성적 사례 연구와 달리, 시계열성과 구조성을 동시에 고려한 기후기술 연구 동향 분석의 방법론적 진전을 제시한다는 점에서 학문적 의의가 있다.

정책적으로는 첫째, 국내 기후기술 연구 투자의 과학기술 중심 편중을 완화하고 사회과학 기반 융합 연구 생태계를 점진적으로 확충하는 방향으로 나아가는 것이 바람직하다고 결론내릴 수 있다. 구체적으로 현재 Materials Science, Chemistry, Physics 등 기술 분야에 집중된 R&D 구조에서 Humanities, Urban Policy, Risk Governance, Environmental Sociology 분야의 비중을 단계적으로 확대하고, 기후정의(climate justice), 취약계층 적응, 사회적 수용성 연구를 위한 새로운 연구 영역을 개척하는 것이 중요하다. 특히 제조업 중심의 국내 산업구조와 높은 탄소 집약도를 고려하여 산업전환 과정에서의 노동자 보호, 지역경제 영향 최소화 방안을 중점적으로 연구하는 것이 필요하다.

둘째, IPCC 평가보고서 발간 주기를 고려한 중장기 연구 기획 체계를 구축하는 것이 효과적일 것으로 예측할 수 있다. 본 연구에서 식별된 전환점(1991~1994년, 2000~2001년, 2005~2006년)과 같은 구조적 변화 양상을 참고하여, 차기 IPCC 보고서(AR7, 2028년 예정)를 대비한 선제적 연구 로드맵을 수립하고, 관련 부처 간 기후기술 연구 조정 체계를 통해 국제 담론과의 정합성을 높이는 연구 역량을 개발해 나갈 수 있을 것으로 기대해볼 수 있다.

셋째, 기후기술 연구의 국제협력 네트워크를 사회과학 영역으로 확장하는 전략이 필요하다. 특히 미국·영국과 같이 사회정책 연구에 강점을 가진 국가들과의 공동연구 및 연구자 교류 프로그램을 통해 기술·사회 통합형 연구 모델을 학습해 나가고, 중앙과 지방 간 기후기술 연구 네트워크를 구축하여 지역별 특화된 기후적응 연구를 활성화하는 것이 도움이 될 수 있을 것이다.

넷째, RCA-LDA 기반 지표 체계를 활용한 정책 모니터링 시스템을 도입하는 것이 적절하다. 이를 통해 국가 기후기술 특화도를 정기적으로 진단하고, 국제 동향 변화에 따른 연구 포트폴리오의 유연한 조정이 가능한 데이터 기반 정책 관리 체계를 구축하며, 정량적 성과 평가 체계를 마련하여 정책 효과성을 지속적으로 모니터링하는 것이 바람직할 것으로 판단할 수 있다.

마지막으로, 탄소중립 목표 달성을 위해 기술혁신과 사회적 전환을 연계하는 통합적 접근이 중요하다. 기존의 수소경제·배터리 중심 기술정책에 기후적응, 환경정의, 지역회복력 강화 등의 사회적 차원을 점진적으로 결합한 새로운 기후기술 접근 방식으로 전환해 나가되, 대기업의 기술개발 성과를 중소기업과 지역사회로 확산시키는 기술이전 체계와 시민사회, 노동조합, 지방정부가 참여하는 기후기술 거버넌스 체계를 구축하여 사회적 합의 기반의 정책 추진이 가능하도록 해야 할 것으로 판단할 수 있다.

학술적 측면에서 본 연구는 다층적 주제구조 분석의 정량적 틀을 기후기술 영역에 도입하고, 글로벌 논문 데이터를 기반으로 국가 간 구조 비교, 시계열 전환점 검출, 정책 적합성 분석을 통합적으로 수행함으로써 기존의 국지적, 분야 단위 분석의 한계를 보완하였다. 특히 LDA-UMAP 결합 방식은 기후기술 연구의 주제 지형도를 시각적이고 통계적으로 동시에 해석할 수 있는 융합적 접근으로서, 향후 과학기술정책 및 데이터 기반 정책평가 연구에 적용 가능한 모형을 제공한다.

그러나 본 연구는 다음과 같은 한계를 가진다. 첫째, Web of Science에 수록된 영어 논문에만 분석을 제한함으로써, 비영어권에서 생산되는 주요 연구결과나 지역 특화형 연구가 누락될 가능성이 존재한다. 둘째, LDA 모델 학습 시의 파라미터 설정(K 값, iteration 수 등)은 해석 가능성과 수렴 안정성에 따라 임의적으로 설정된 것이며, 이로 인해 주제 분류의 해석에 일정 부분 주관성이 개입될 수 있다. 셋째, 특히, 기술이전, 투자금액 등과 같은 비학술적 지표와의 연계가 이루어지지 않아 정책의 효과성이나 기술 확산의 실질적 결과까지는 분석하지 못하였다.

향후 연구에서는 기후기술의 세부 분야별 클러스터 분석과 LDA 결과의 외생적 적합성 검토를 포함하고, 특히 데이터 및 국가 간 기술이전 흐름을 연계하여 R&D 결과물의 기술적 확산 구조를 종합적으로 분석할 필요가 있다. 또한, 활동조사 기반 통계자료와 정량분석 프레임워크를 결합하여, 실증적 정책 성과 측정과 전략적 방향 수정이 가능한 정책 모니터링 체계 구축이 시급하다.

사사

본 연구는 국가녹색기술연구소에서 수행 중인 「F2530101」 기후기술 혁신지원을 위한 데이터 분석 및 활용 체계 연구」과제의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

- An S, Kim G, Lee J, Yeom S. 2020. A topic analysis on the patent developed by national climate technology R&D project. *J Intellectual Property* 15(3): 293-330. doi: 10.34122/jip.2020.09.15.3.293
- Baek EY. 2020. A study on the competitiveness of industries for the expansion of value-added trade in South Korea: Focusing on the technology trade specialization index (in Korean with English abstract). *e-Bus Stud* 21(4): 105-122. doi: 10.20462/TeBS.2020.08.21.4.105
- Balassa B. 1965. Trade liberalisation and "revealed" comparative advantage. *Manchester Sch* 33(2): 99-123. doi: 10.1111/j.1467-9957.1965.tb00050.x
- Blei DM, Ng AY, Jordan MI. 2003. Latent Dirichlet allocation. *J Mach Learn Res* 3: 993-1022.
- Blok K, Afanador A, Van Der Hoorn I, Berg T, Edelenbosch O, Van Vuuren D. 2020. Assessment of sectoral greenhouse gas emission reduction potentials for 2030. *Energies* 13(4): 943. doi: 10.3390/en13040943
- Calel R, Dechezleprêtre A. 2016. Environmental policy and directed technological change: Evidence from the European carbon market. *Rev Econ Stat* 98(1): 173-191. doi: 10.1162/REST_a_00470
- Cho JP, Jung IG, Cho WI, Hwang SW. 2018. User-centered climate change scenarios technique development and application of Korean Peninsula (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 9(1): 13-29. doi: 10.15531/KSCCR.2018.9.1.13
- Ejaz W, Ittefaq M, Jamil S. 2023. Politics triumphs: A topic modeling approach for analyzing news media coverage of climate change in Pakistan. *J Sci Commun* 22(1): A02. doi: 10.22323/2.22010202
- Green Technology Center. 2023. Climate technology development activity survey report (in Korean); [accessed 2024 Jan 15]. <https://nigt.re.kr/gtck/gtcPublication.do>
- Han S, Ahn S, Choi W. 2021. 2020 national survey and

- analysis report on climate technology R&D projects. Seoul, Korea: Green Technology Center.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2023. AR6 synthesis report: Climate change 2023; [accessed 2024 Jan 15]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- International Energy Agency. 2021. Net zero by 2050 - A roadmap for the global energy sector; [accessed 2024 Jan 15]. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- Isoaho K, Gritsenko D, Mäkelä E. 2021. Topic modeling and text analysis for qualitative policy research. *Policy Stud J* 49(3): 707-732. doi: 10.1111/psj.12343
- Jang W. 2010. Basic act on low carbon green growth and coping with climate change (in Korean with English abstract). *Korea Land Public Law Rev* 49: 223-244.
- Kim JR. 2018. Korea's export competitiveness to the EU through RCA-CAC analysis (in Korean with English abstract). *EU Stud* 50: 73-105. doi: 10.18109/jeus.2018..50.73
- Kim JS, Kang SH. 2024. Climate change and wildfire dynamics in South Korea: A systematic review of research and policy implications (in Korean with English abstract). *Environ Policy* 32(Special Issue 2): 77-103.
- Kim JW, Sang J, Kim MG, Byun YH, Kim DH, Kim TJ. 2022. Future climate projection in South Korea using the high-resolution SSP scenarios based on statistical downscaling (in Korean with English abstract). *Clim Res* 17(2): 89-106. doi: 10.14383/cr.2022.17.2.89
- Kim KM. 2023. An analysis of the competitiveness of Korea's major export items and industries using the normalized revealed comparative advantage index (in Korean with English abstract). *Int Commerce Inf Rev* 28(3): 29-51. doi: 10.23030/katis.2023.28.3.002
- Kim SH, Oh MJ, Lee SY, Yoon BU. 2020. Stablishment of overseas expansion support policy for green/climate technology SMEs: Integrated viewpoints of policy makers and beneficiaries (in Korean with English abstract). *J Korea Acad-Ind Cooperation Soc* 21(7): 201-211. doi: 10.5762/KAIS.2020.21.7.201
- Korea Environment Institute. 2020. Assessment of greenhouse gas reduction potential in the power sector using mixed integer programming (in Korean with English abstract). Sejong, Korea: Korea Environment Institute. Research Report.
- Lee CB, Kim JH, Kim MG. 2011. A study on green logistics policy for green growth with low carbon gas in Korea (in Korean with English abstract). *Digital Trade Rev* 9(1): 99-122. doi: 10.17255/etr.9.1.201102.99
- Lee J. 1995. Comparative advantage in manufacturing as a determinant of industrialization: The Korean case. *World Dev* 23(7): 1195-1214. doi: 10.1016/0305-750X(95)00039-F
- Lee JG, Kim JD, Moon JY, Eom JH, Kim JH, Seo JM. 2021. Green new deal for carbon-neutrality and trade policy in Korea. *Korea Institute for International Economic Policy*.
- Lee JI, Kim JY, Kim HG, Kim DY. 2022. Projected changes in wind speed over the Korean Peninsula in the 21st century based on climate change scenarios (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Urban Environ* 22(3): 141-151. doi: 10.33768/ksue.2022.22.3.141
- Lee JY. 2009. A study on export activation of Korea technology trade (in Korean with English abstract). *e-Bus Stud* 10(2): 3-27. doi: 10.15719/geba.10.2.200906.3
- McInnes L, Healy J, Saul N, Großberger L. 2018. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection. *J Open Source Software* 3(29): 861. doi: 10.21105/joss.00861
- Meckling J, Nahm J, van der Ven H. 2022. Strategic state capacity: How states counter opposition to climate policy. *Comp Political Stud* 55(3): 493-523. doi: 10.1177/00104140211024308
- Ministry of Environment, Korea Meteorological Administration. 2020. Korea climate change assessment report 2020: Scientific basis for climate change; [accessed 2024 Jan 15]. <https://www.climate.go.kr/>
- Ministry of Science and ICT. 2021. 2050 carbon neutral

- technology innovation strategy (in Korean); [accessed 2024 Jan 15]. <https://www.msit.go.kr/gtca>
- Ministry of Science and ICT. 2024. Completion of the cross-ministerial implementation roadmap for securing core carbon neutrality technologies; [accessed 2024 Jan 15]. <https://www.msit.go.kr/>
- Nikolaidou A, Kopsacheilis A, Gavanis N, Politis I. 2024. Assessing the EU climate and energy policy priorities for transport and mobility through the analysis of user-generated social media content based on text-mining techniques. *Sustainability* 16(10): 3932. doi: 10.3390/su16103932
- Oh C, Ahn S, Min K. 2021. Features and interrelation amongst technology terminologies related to climate change (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 12(4): 307-332. doi: 10.15531/KSCCR.2021.12.4.307
- Oh SJ, Sung M, Kim H. 2018. Development of indicators for assessment of technology integrated business models in climate change responses. *J Clim Change Res* 9(4): 435-443. doi: 10.15531/KSCCR.2018.9.4.435
- Park JH, Oh HJ. 2017. Comparison of topic modeling methods for analyzing research trends of archives management in Korea: Focused on LDA and HDP (in Korean with English abstract). *J Korean Lib Inf Sci Soc* 48(4): 235-258. doi: 10.16981/kliss.48.4.201712.235
- Pollitt H, Mercure JF, Salas P, Barker T, Scricciu S. 2024. The role of the IPCC in assessing actionable evidence for climate policymaking. *NPJ Clim Action* 3(1): 94. doi: 10.1038/s44168-023-00094-x
- Seo HJ, Lee YS, Heo JJ. 2007. A comparative analysis of competitiveness in services of OECD countries (in Korean with English abstract). *EU Stud* 12(1): 5-47.
- UNFCCC Technology Executive Committee. 2023. Technical examination process annual report; [accessed 2024 Jan 15]. <https://unfccc.int/ttclear>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. n.d. Nationally Determined Contributions (NDCs); [accessed: 2025 Aug 20]. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs>
- Woo CW, Lee JY. 2020. Investigation of research topic and trends of national ICT research-development using the LDA model (in Korean with English abstract). *J Korea Convergence Soc* 11(7): 9-18. doi: 10.15207/JKCS.2020.11.7.009
- Yoon KJ. 2012. Revisiting 'low carbon, green growth' policy: A critical review and prospects (in Korean with English abstract). *Korean Policy Stud Rev* 21(2): 33-60.
- Yu J, Lee S, Chun U. 2023. Analysis of domestic climate change research trends using topic modeling: Focusing on IPCC working groups keywords. *J Clim Change Res* 14(3): 327-336. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.3.327