

키워드 네트워크 분석을 통한 주요국 연료전지 분야 연구동향 분석

손범석¹ · 황한수² · 오상진^{1,†}

¹녹색기술센터, ²한국재료연구원 국가나노기술정책센터

Fuel Cell Research Trend Analysis for Major Countries by Keyword-Network Analysis

BUMSUK SON¹, HANSU HWANG², SANGJIN OH^{1,†}

¹Green Technology Center (GTC), 173 Toegye-ro, Jung-gu, Seoul 04554, Korea

²National Nanotechnology Policy Center (NNPC), Korea Institute of Materials Science (KIMS), 8 Gangnam-daero 41-gil, Seocho-gu, Seoul 06730, Korea

†Corresponding author :
rurouni628@gtck.re.kr

Received 19 January, 2022
Revised 15 February, 2022
Accepted 17 February, 2022

Abstract >> Due to continuous climate change, greenhouse gases in the atmosphere are gradually accumulating, and various extreme weather events occurring all over the world are a serious threat to human sustainability. Countries around the world are making efforts to convert energy sources from traditional fossil fuels to renewable energy. Hydrogen energy is a clean energy source that exists infinitely on Earth, and can be used in most areas that require energy, such as power generation, transportation, commerce, and household sectors. A fuel cell, a device that produces electric and thermal energy by using hydrogen energy, is a key field to respond to climate change, and major countries around the world are spurring the development of core fuel cell technology. In this paper, research trends in China, the United States, Germany, Japan, and Korea, which have the highest number of papers related to fuel cells, are analyzed through keyword network analysis.

Key words : Fuel cell(연료전지), Keyword analysis(키워드분석), Network analysis(네트워크 분석), Research trend(연구동향), Clustering(군집화)

1. 서론

근대 산업화 이후 인간 활동에 의해 꾸준히 배출된 이산화탄소(carbon dioxide, CO₂), 메탄(methane, CH₄) 등의 온실가스가 기후 변화의 동인으로 지목받고 있다. 특히 21세기 이후 20여 년 동안 지구 표면

기온의 상승폭이 19세기 중후반 대비 0.99°C가 상승했다는 intergovernmental panels on climate change (IPCC) 보고서의 내용은 파리협정(Paris Agreement)에 의거하여 지구 온도 상승폭을 1.5°C로 제한하고자 노력하는 국제사회에 경종을 울림과 동시에 기후 변화가 여전히 심화되고 있다는 것을 보여준다¹⁾. 그

럼에도 불구하고 각 국에서 탄소 순 배출량 '0'을 실현하고자 하는 '탄소중립' 선언을 하는 등 기후위기에 대처하기 위한 국제적 합의를 이끌어내는 노력이 이어지고 있으며, 우리나라도 2020년 12월에 「2050 탄소중립 추진전략」을 발표하면서 탄소중립에 기여할 수 있는 기술개발을 통한 기후위기 극복과 2050년 탄소중립 사회구현을 약속한 바 있다²⁾.

탄소중립을 이행하기 위해서 기술개발은 필수적이며, 다양한 기술적 해법 수단들과 이를 지원하기 위한 국가정책들이 수립되고 있으나 사회·경제적 과급력을 고려했을 때 혁신적인 방안으로 '수소경제(hydrogen economy)'가 부상하고 있다. 미국의 경제학자인 제레미 리프킨(Jeremy Rifkin)은 그의 저서를 통해 수소경제를 인간 문명을 재구성할 새로운 에너지 체계로 정의하고 있다³⁾. 수소경제를 구현하기 위해서는 에너지 운반체인 수소를 통해 전기화할 수 있는 연료전지 분야의 혁신기술이 충분히 성숙되고 산업으로의 조기 연계가 필요하다. 이를 위해 우리나라에서는 지난 2019년에 「수소경제 활성화 로드맵」을 수립하고 2040년까지 수소경제 전환을 목표로 설정하였다⁴⁾.

국내 수소경제 전환과 탄소중립 사회를 실현하기 위해 현재 우리나라가 보유하고 있는 연료전지 기술 수준과 연구 성과에 대해 분석하는 것은 중요한 작업이다. 특히, 논문과 특허 등의 학술성과 항목을 바탕으로 한 기술동향 분석 기법은 기술정책 분야에서 폭넓게 활용되고 있다. 한국과학기술기획평가원에서는 과학기술기본법에 의거하여 2년마다 과학기술분야 전체에 대해 전문가 델파이 조사와 논문·특허 경쟁력 분석 기반의 '기술수준평가'를 시행하고 있으며⁵⁾, 최근 정보통신기획평가원에서 수행한 'ICT기술 수준조사'에서도 전문가 평가와 정량기반의 논문특허 기술경쟁력 분석을 혼용하고 있다⁶⁾. 연료전지 기술 분야의 경우 Woo⁷⁾, Jang⁸⁾, Kim⁹⁾이 있다. Woo⁷⁾은 연료전지용 전해질 분리막의 특허 및 논문의 기술 경쟁력 평가를 통하여 국가별, 기관별, 기업별 발표 빈도수를 정리하였으며, Jang⁸⁾은 고체 수소연료전지 산업의 특허분석을 통한 미래 전망을 제시하였다⁸⁾.

Kim⁹⁾은 연료전지 특허 데이터베이스를 중심으로 주요국과의 기술경쟁력 지표를 도입하여 국내 연료전지 기술수준을 분석하였다.

상기 연구들은 국내 연료전지 분야 논문 또는 특허 동향과 관련한 정보 전달에 집중하고 있는 반면, 본 연구에서는 국내 연료전지 분야의 기술동향과 네트워크 분석을 병행하여 해당 분야의 연구트렌드를 객관적으로 조망하고 있다는 점에서 선행 연구와의 차별성을 가진다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서 연구방법론을 소개하고, 3장에서는 논문 분석을 통한 주요국과의 논문 생산과 관련한 기술경쟁력을 비교한 후, 키워드 네트워크 분석을 통해 현재 혹은 미래 유망할 것으로 예상되는 연료전지 연구개발 키워드를 도출한다. 마지막 4장에서는 결론 및 시사점을 도출한다.

2. 연구 방법

본 연구는 기후변화에 대응하기 위한 다양한 탄소중립기술 중 기후변화대응 및 탄소중립에 필수적인 기술로서 '연료전지' 분야에 대하여 지금까지의 연구개발 동향을 분석하고자 함에 목적이 있다.

연구 자료로서 2015년부터 2020년까지의 기간 동안 발생한 논문정보를 분석 대상으로 설정하였고, 해당 논문들의 기초자료 수집을 위하여 Web of Science의 데이터소스를 사용하였다. Web of Science의 데이터소스는 인문학 분야나 사회과학 분야 및 과학기술 분야 등에 관한 국내외 발생 논문의 서지 정보를 포함하고 있는 데이터베이스라고 할 수 있다. 관련 논문정보를 수집하기 위한 검색 범위는 논문 제목과 초록 그리고 키워드로 제한하여 검색을 시행하였으며 검색 식은 다음과 같다.

```
TS=((fuelcell* OR fuel-cell* OR fuel-battery* OR ((fuel*) near/1 (cell*))) near/2 (electrod* OR catalyst* OR catalyzer* OR cataly* OR promoter* OR electrolyt* OR membrane* OR reformer* OR stack* OR ((power*) near/1 [conver*]) OR power-conver* OR ((recover* OR recyl*) near/1 [heat* OR energy*]) OR ((fuel*) near/1 [processor* OR conver*])))
```

검색 식을 통해 ‘fuel cell (연료전지)’와 하위 핵심 부품을 구성하며 R&D의 주요 소재가 되는 ‘electrode (전극)’, ‘catalyst/catalyzer/promoter (촉매)’, ‘electrolyte (전해액)’, ‘reformer (개질기)’, ‘stack (스택)’ 등을 키워드로 하여, 논문을 검색 및 추출하였다.

또한 상기의 검색식으로 입력하여 해당 기간 동안 출판된 ‘연료전지(fuel cell)’ 관련 논문 정보를 수집하였고, 이후 논문 제목과 초록에 대한 검토를 통하여 기술개발(R&D) 관련 내용이 아닌 내용, 즉, 인식에 대한 설문조사나 단순 정책 동향 분석 등의 논문을 연구진이 제외한 결과, 총 9,094건의 논문이 최종적으로 추출되었다.

본 연구에서는 상기 추출된 연료전지 관련 9,094건의 논문을 기반으로 전체 연구동향 분석을 통해 전반적인 논문 증감 추이를 분석하고, 이어서 가장 많은 논문을 생산한 상위 5개국을 선정하였다.

마지막으로, 그렇게 하여 도출된 상위 5개국의 논문을 대상으로 VOSViewer를 활용한 키워드 네트워크 분석을 시행, 연료전지에 대한 주요국별 연구 핵심 트렌드를 도출하였고, 이를 바탕으로 시사점을 제시하였다.

3. 연구 결과

3.1 전체 연구동향 분석

도출된 논문 정보를 기반으로, 대상 기간(2015-2020년) 동안의 전체 논문 발간 추이를 분석하였다(Fig. 1). 분석 결과, 연료전지 분야의 전체 논문 추이는 2015년에 1,616건, 2016년에 1,681건, 2017년에 1,673건, 2018년에 1,751건, 2019년에 1,742건으로, 단기간으로는 미세한 등락이 변동되고 있으나 장기적인 기조로 보았을 때 완만한 증가세를 보이는 것으로 나타났다. 2020년이 630건으로 되어 있는 것은 해당 데이터의 수집이 2020년 하반기에 이루어진 것이기 때문이다.

다음으로는 연료전지 분야의 2015-2020년 기간 동안의 전체 논문 건수 중에서 가장 빈도가 높은 상

위 5개국을 선별하여 보았다. 그 결과, 가장 많은 건수를 보인 중국이 2,611건으로 1위, 미국이 1,087건으로 2위, 한국이 800건으로 3위, 일본이 564건으로 4위, 독일이 431건으로 5위를 각각 나타내었다. 그 외 국가로는 캐나다, 이란, 프랑스, 영국, 타이완, 이탈리아 등이 있었다(Table 1).

다음으로, 주요국별 연료전지 관련 논문의 발간 추이를 분석하였다(Table 2). 분석에 따르면 중국이 2015년 386건에서 2019년 591건으로, 연평균 11.2%의 증가율을 보이며 가장 많은 논문이 생산되고 있는 추이임을 알 수 있다.

반면 해당 기간 동안 총 논문 발간 건수로 각각 2위(1,087건), 3위(800건), 4위(564건)에 자리매김한 미국,

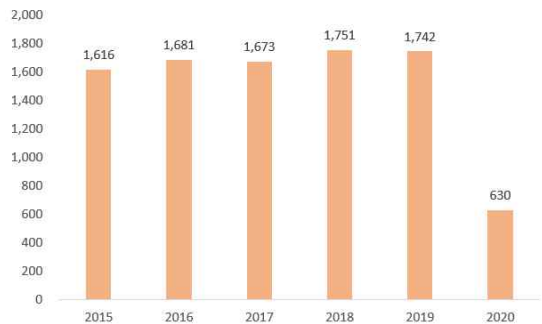


Fig. 1. Overall trends of publications in the fuel cell research (2015-2020)

Table 1. Top 5 countries in the number of publications in the fuel cell research (2015-2020)

Rank	Country	Number of publications (2015-2020)
1	China	2,611
2	USA	1,087
3	Korea	800
4	Japan	564
5	Germany	431
6	Canada	402
7	Iran	327
8	France	298
9	England	256
10	Taiwan	202

한국, 일본의 경우는 연평균 증가율(compound annual growth rate, CAGR)로서는 각각 -4.3%, -0.8%, -5.2%를 나타내어, 오히려 감소추세를 보이기도 하였다.

중국의 경우에는 특히, 국가발전개혁위원회(National Development and Reform Commission, NDRC)의 ‘2019년 국민경제 및 사회발전계획 추진현황 및 사회발전계획 및 2020년 계획 초안에 관한 보고서’에서 앞으로 수소산업 발전전략을 수립·발표할 것이라고 밝히는 한편¹⁰⁾, 2020년 11월에 발표한 ‘신에너지 자동차산업 발전계획(2021-2035년)’에서는 2035년까지 수소차를 상업화하고 수소연료 공급시스템을 확대할 것이라고 발표하는 등, 국내 수소산업 활성화와 탄소중립 달성을 위하여 다양한 노력을 펼치고 있으며¹¹⁾, 국내적으로 높은 수소 및 연료전지에 대한 관심이 연구 결과에 반영된 것으로 보인다¹²⁾.

미국은 에너지부(Department of Energy)가 중심이 되어 ‘H2@Scale’ 프로그램을 통해 수소경제 구축을 위한 산업 전주기에 걸쳐 R&D 지원을 시행하고 있으며, 일본은 신에너지산업기술 종합개발기구(New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)를 중심으로 연료전지의 기술개발 및 보급 확대를 통한 경제성의 확보에 박차를 가하고 있다.

독일의 경우는 EU의 유럽 ‘Green Deal’ 정책에 기반하여 국가수소전략을 발표(2020. 6), 수소&연료전지의 내수시장 개발과 산업경쟁력 제고를 추진하고 있으며¹³⁾, 우리나라도 수소경제 활성화 로드맵(2019)과 수소 기술개발 로드맵(2019)의 수립과 이행을 통

해 수소사회의 구축을 위해 정부 차원에서 연구개발 및 보급 확대에 힘쓰고 있다¹⁴⁾.

3.2 주요국별 연구 주제 분석

이전 장에서 언급된 연료전지 관련 논문 생산 상위 5개국(중국, 미국, 독일, 일본, 한국)을 대상으로, VOSViewer 프로그램을 활용한 키워드 동시출현(co-occurrence) 네트워크 분석을 시행하였다.

VOSViewer는 네덜란드 Leiden 대학의 Centre for Science and Technology Studies (CWTS)에서 개발한 오픈소스 소프트웨어로, 서지정보를 바탕으로 계량 서지적 동시출현 데이터의 분석과 이의 군집화, 시각화를 주요 목적으로 개발된 분석 도구(tool)라고 할 수 있다. 저자, 기관, 국가, 키워드, 용어 등의 데이터의 동시출현 정보를 등장 빈도와 유사성에 기반하여 네트워크 시각화와 분석을 처리할 수 있다.

학술지의 키워드란 저자들이 선정한 대표 핵심 주제 단어로써 연구 목적, 방법, 결과, 관점, 핵심 주제 등 해당 연구에 대한 포괄적인 정보를 내포하고 있다. 이러한 키워드는 일반적으로 해당 논문의 저자가 대표성 있는 키워드를 선정하도록 되어 있다. 하지만 저자들이 직접 선정한 저자 키워드(author keyword)는 과도한 포괄성을 갖거나 연구자의 주관적인 견해를 담고 있어 실질적인 내용을 전달하기에는 부족한 경우가 있다^{15,16)}.

이를 보완하기 위하여 Web of Science에서는 keywords plus라는 새로운 키워드를 추가로 제공하고

Table 2. Publication trends depending on publication year in fuel cell research of major countries

Country	2015	2016	2017	2018	2019	2020	All period	CAGR (2015-2019, %)
China	386	403	484	513	591	233	2,610	11.2
USA	231	196	185	228	194	53	1,087	-4.3
Korea	159	149	135	146	154	57	800	-0.8
Japan	119	126	96	100	96	27	564	-5.2
Germany	62	93	81	96	76	23	431	5.2
Total	957	967	981	1,083	1,111	393	5,492	3.8

있다. Keywords plus란 해당 논문의 참고(인용) 문헌들의 제목에서 사용빈도와 연관성이 높은 단어를 추출하는 알고리즘에 의해 형성된 단어 집단으로, 해당 논문의 내용과 연관성이 더 깊다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 저자 키워드 대신 keywords plus를 분석 대상으로 활용하여 각 나라별 연구 주제를 분석을 진행하였다.

본 연구가 연료전지 분야의 연구 트렌드를 분석하고자 하는 것에 목적이 있는 만큼, 연구논문을 통해 쌓인 지식을 키워드를 중심으로 네트워크 구조화하여 분석할 필요가 있다¹⁷⁾. Web of Science에서 제공하는 서지정보 중 ‘keywords plus’는 해당 데이터베이스 자체적으로 키워드를 추출하는 기능을 제공하기 때문에, 가장 객관적이고 가치중립적인 측면에서 네트워크 분석을 위한 키워드 추출에 적합하다고 볼 수 있다(Table 3).

키워드 네트워크 분석(keyword network analysis)이란, 특정 주제를 중심으로 한 자료의 집합으로부터 주제어(키워드)를 추출하고, 동시출현빈도를 계산하여 그 유사도를 계산하는 방법이다^{18,19)}.

네트워크 분석은 네트워크(network), 노드(node), 관계(dyad)의 세 가지 수준에서 분석이 주로 이루어지며²⁰⁾, 네트워크 레벨에서는 분석대상 자료의 네트워크 구조에 대한 전체적인 조감, 노드 레벨에서는 주제어 빈도 도출 등 개별 연구주제에 대한 분석, 관계 레벨에서는 중심성 지수의 산출이나 지식구조 군집화 등을 살펴볼 수 있다¹⁹⁾.

본 연구에서는 VOSViewer 프로그램을 활용하여, Web of Science에서 추출한 주요 5개국의 연료전지 관련 논문의 서지 정보(bibliographic data)를 국가별로 분석하였다.

분석 타입은 ‘동시출현빈도(co-occurrence)’로 설정하였고, 최소출현빈도는 5회로 설정하였다. 또한 키워드의 추출에 있어 보다 객관성을 기하기 위해, Web of Science에서 제공하는 ‘keyword plus’를 분석 단위(unit)로 설정하였다.

데이터의 전처리에 있어서는 본 연구논문의 주제 자체에 해당하는 ‘연료전지(fuel cell 혹은 fuel cells,

fuel-cell 등)’ 및 ‘a’, ‘the’ 등의 관사와 조사는 제외하였다.

3.2.1 중국

중국에서 2015-2020년 기간 동안 생산된 연료전지 관련 논문 2,611건의 서지 정보를 대상으로, 최소출현빈도 수 5회 이상으로 키워드 네트워크 분석을 시행한 결과, 757개의 키워드가 이를 충족하였으며, 각각의 클러스터(군집)에서, 각각 다음과 같은 키워드가 도출되었다.

Table 3는 각 클러스터 별로 출현빈도 수와 연결성이 가장 많은 키워드부터 나열한 것이고, Fig. 2는 추출된 키워드의 군집 및 연계성을 시각화한 것이다.

도출된 키워드를 종합해 보면, 군집 1에서는 연료전지 전반에 대한 동향을 나타내는 것으로서, 고분자 전해질연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)의 핵심 성능 파라미터인 내구성 확보를 위하여, 이온이나 전자와 같은 물질의 이송과 관련한 성능저하를 최소화시키는 것이 관건이라고 유추할 수 있다. 일반적으로는 이온이나 전자와 같은 물질의 이송이 빠를수록 부품의 성능저하가 발생한다. 이는 자동차 주행을 하면서 revolution per minute (RPM)을 높일수록 엔진은 더 빨리 마모가 되는 원리와 유사하다. 따라서 PEMFC의 경우, 향후의 연구개발 방향은 반응속도 등이 아니라, 내구성 확보에 있다는 것을 알 수 있다.

군집 2는 주로 촉매와 관련된 내용이라고 할 수 있는데, 촉매에서 백금량을 줄이고자 하는 연구가 위주임을 알 수 있으며, 구체적으로는 촉매를 나노입자화하여 반응영역(반응면적)을 넓히고자 하는 것이다. 결론적으로는 촉매의 입자 크기를 줄이면서 사용되는 백금의 양도 동시에 줄여 나가는 것이 관건이라고 볼 수 있다.

군집 3은 주로 전해질막에 대한 내용으로서, 전해질막이 높은 이온전도도를 보유할 수 있도록 안정성이 확보되어야 한다는 내용임을 유추할 수 있다.

군집 4는 촉매와 관련된 신소재의 연구개발 동향을 시사하는 것으로 보인다. 그래핀 소재는 촉매로서

의 성능을 가지고 있으나, 혼자만으로는 역할을 할 수 없는 특징이 있다. 다만, 이것을 산화물 상태로 전환할 경우 백금이 아니어도 촉매활성도를 띄게 되어 보다 높은 촉매성능을 발휘할 수가 있는데, 주로 철(iron)과의 합금 형태로 연구가 진행되는 경향임을 유추할 수 있다.

Table 3. Major keywords depending on the clusters in fuel cell-papers of China

Cluster No.	Keywords
Cluster1	Performance, pemfc, transport, degradation, durability
Cluster2	Nano-particles, platinum, alloy
Cluster3	Stability, conductivity, ionomer
Cluster4	Graphene, iron, active-sites

3.2.2 미국

미국에서 2015-2020년 기간 동안 생산된 연료전지 관련 논문 1,087건의 서지 정보를 대상으로, 최소 출현빈도 수 5회 이상으로 키워드 네트워크 분석을 시행한 결과, 390개의 키워드가 이를 충족하였으며, 각각의 클러스터(군집)에서 각각 다음과 같은 키워드가 도출되었다.

Table 4는 각 클러스터 별로 출현빈도 수와 연결성이 가장 많은 키워드부터 나열한 것이고, Fig. 3은 추출된 키워드의 군집 및 연계성을 시각화한 것이다.

미국의 경우, 군집 1의 키워드를 종합해 보면, 연료전지의 성능확보를 위하여 소재의 개발과 더불어 다양한 시뮬레이션/모델링 연구나 설계 연구가 많이 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다.

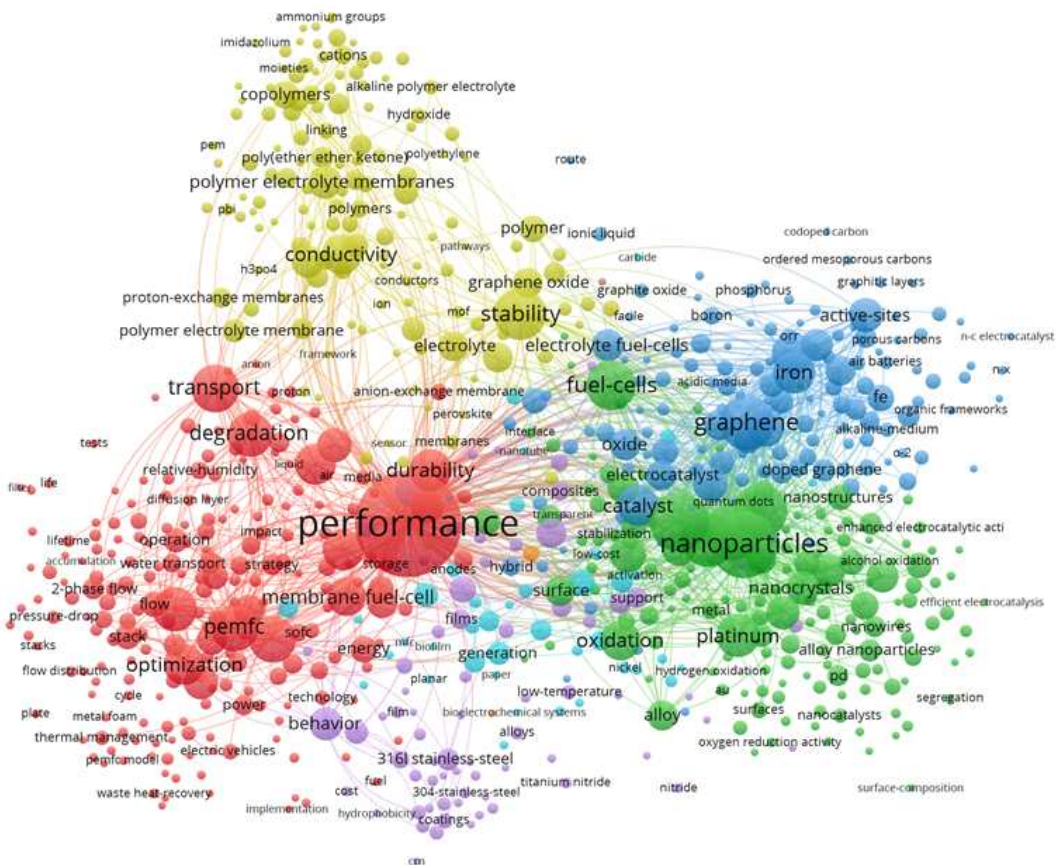


Fig. 2. Keyword co-occurrence network map in fuel cell-papers of China (visualized)

Table 5는 각 클러스터 별로 출현빈도 수와 연결성이 가장 많은 키워드부터 나열한 것이고, Fig. 4는 추출된 키워드의 군집 및 연계성을 시각화한 것이다.

일본의 경우, 군집 1에서는 고분자전해질 연료전지의 성능확보를 위해, 이송체(이온, 전자)이나 공기극에 대해 주로 연구한다는 내용임을 알 수 있었다.

군집 2에서는 공기극(cathode) 전극촉매의 안정성을 확보하는 것이 촉매 분야에서의 주요 연구개발목표를 유추할 수 있었고, 군집 3의 결과를 통해서 PEMFC의 촉매 개발과 관련하여 철(iron)을 적용하

는 연구 즉, 그래핀과 철의 합금을 통한 촉매성능 향상연구가 트렌드임을 유추할 수 있다.

군집 4에서는 온도 조건에 따른 양성자교환막의 전도도 영향 분석 연구를, 군집 5에서는 공기극 촉매의 내구성 확보 연구를 유추할 수 있다.

3.2.4 독일

독일에서 2015-2020년 기간 동안 생산된 연료전지 관련 논문 431건의 서지 정보를 대상으로, 최소 출현빈도 수 5회 이상으로 키워드 네트워크 분석을 시행한 결과, 143개의 키워드가 이를 충족하였으며, 각각의 클러스터(군집)에서 각각 다음과 같은 키워드가 도출되었다.

Table 6는 각 클러스터 별로 출현빈도 수와 연결성이 가장 많은 키워드부터 나열한 것이고, Fig. 5는 추출된 키워드의 군집 및 연계성을 시각화한 것이다. 독일의 경우, 군집 1에서는 이온, 전하 등의 물질 이송 능력을 높이기 위한 온도 환경 적용 연구가, 군집 2에서는 공기극의 전극촉매 안정성 확보 연구를, 군

Table 5. Major keywords depending on the clusters in fuel cell-papers of Japan

Cluster No.	Keywords
Cluster1	Performance, transport, cathode, pemfc
Cluster2	Electrocatalysis, oxygen reduction reaction, stability
Cluster3	Electrolyte fuel-cell (PEMFC), iron, catalysis
Cluster4	Proton exchange membranes, temperature, conductivity

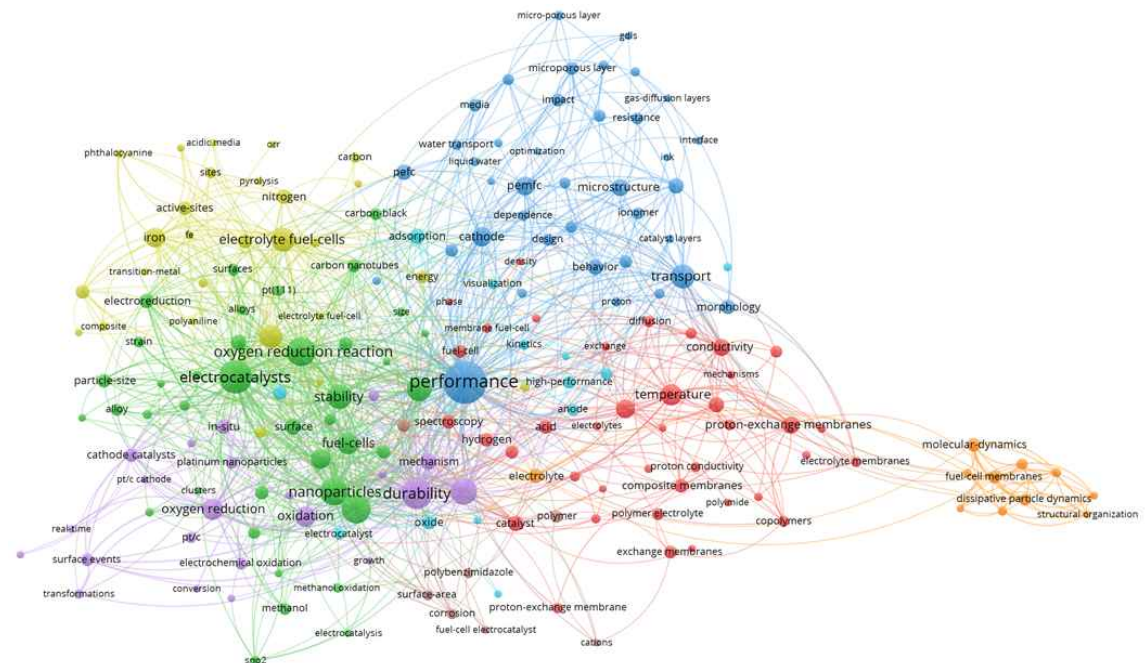


Fig. 4. Keyword co-occurrence network map in fuel cell-papers of Japan (visualized)

집 3에서는 나노입자 촉매의 성능저하 방지, 군집 4에서는 모델링을 통한 촉매나 연료전지 스택 등, 연료전지 전체 시스템의 성능 시뮬레이션 분석 수행 연구 트렌드를 알 수 있었다.

3.2.5 한국

한국에서 2015-2020년 기간 동안 생산된 연료전지 관련 논문 800건의 서지 정보를 대상으로, 최소 출현빈도 수 5회 이상으로 키워드 네트워크 분석을

Table 6. Major keywords depending on the clusters in fuel cell-papers of Germany

Cluster No.	Keywords
Cluster1	Performance, transport, temperature
Cluster2	Oxygen reduction reaction, electrocatalysis,
Cluster3	Degradation, nanoparticle, catalysis
Cluster4	Model, pemfc

시행한 결과, 261개의 키워드가 이를 충족하였으며, 각각의 클러스터(군집)에서 각각 다음과 같은 키워드가 도출되었다.

Table 7은 각 클러스터 별로 출현빈도 수와 연결성이 가장 많은 키워드부터 나열한 것이고, Fig. 6은 추출된 키워드의 군집 및 연계성을 시각화한 것이다.

우리나라의 경우, 군집 1에서는 고분자전해질 연료전지의 물질 이송능력을 통한 성능저하 방지 연구, 군집 2에서는 고분자전해질 연료전지의 전극촉매 나노입자화를 통한 성능 및 내구성 확보 연구의 경향을 추정할 수 있었다.

군집 3에서는 수소와 메탄올 등에 대한 산화반응 성능 확보를 유추해볼 수 있는데, 이는 다른 4개국과는 다소 차별화되는 연구경향임을 알 수 있었다.

마지막으로 군집 4에서는 고분자전해질막의 전도도 확보를 위해 합성막, 복합막을 사용하기 위한 연구가 진행 중임을 알 수 있었다.

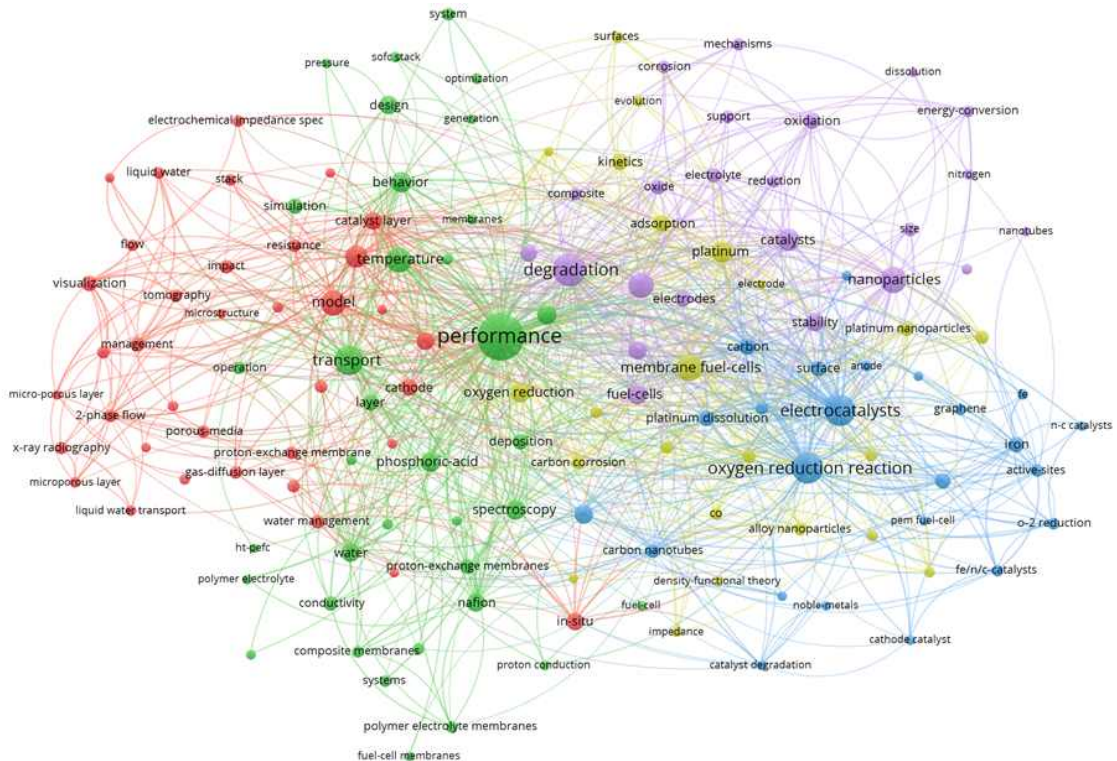


Fig. 5. Keyword co-occurrence network map in fuel cell-papers of Germany (visualized)

4. 결론 및 시사점

본 연구에서 Web of Science의 논문 데이터베이스를 이용해, 2015년부터 2020년까지의 연료전지(fuel

Table 7. Major keywords depending on the clusters in fuel cell-papers of Korea

Cluster No.	Keywords
Cluster1	Performance, pemfc, transport, degradation
Cluster2	Nanoparticles, electrolyte fuel-cell (PEMFC), electrocatalysis
Cluster3	Oxidation, methanol, hydrogen
Cluster4	Pemfc, conductivity, composite membranes

cell) 관련 논문 정보를 기반으로 주요국의 트렌드를 분석해 보았다.

관련 논문을 가장 많이 생산한 5개국이 대상이었으며(중국, 미국, 한국, 일본, 독일), VOSViewer 프로그램을 사용하여 도출한 네트워크 분석 결과, 각국의 주요 연료전지 연구개발 트렌드는 다음과 같이 종합 정리할 수 있다.

종합해 볼 때 5개국은 연료전지에 대한 연구에 있어서 주로 대상 연료전지의 종류가 PEMFC이며, 공통적으로 촉매와 전해질에 관한 연구개발에 집중하는 것으로 나타났다. 특히 촉매에 대한 연구가 주를 이루었는데, 촉매의 ‘나노입자화’는 대부분의 국가에서 나타난 공통적인 키워드였다(Table 8). 촉매의 반

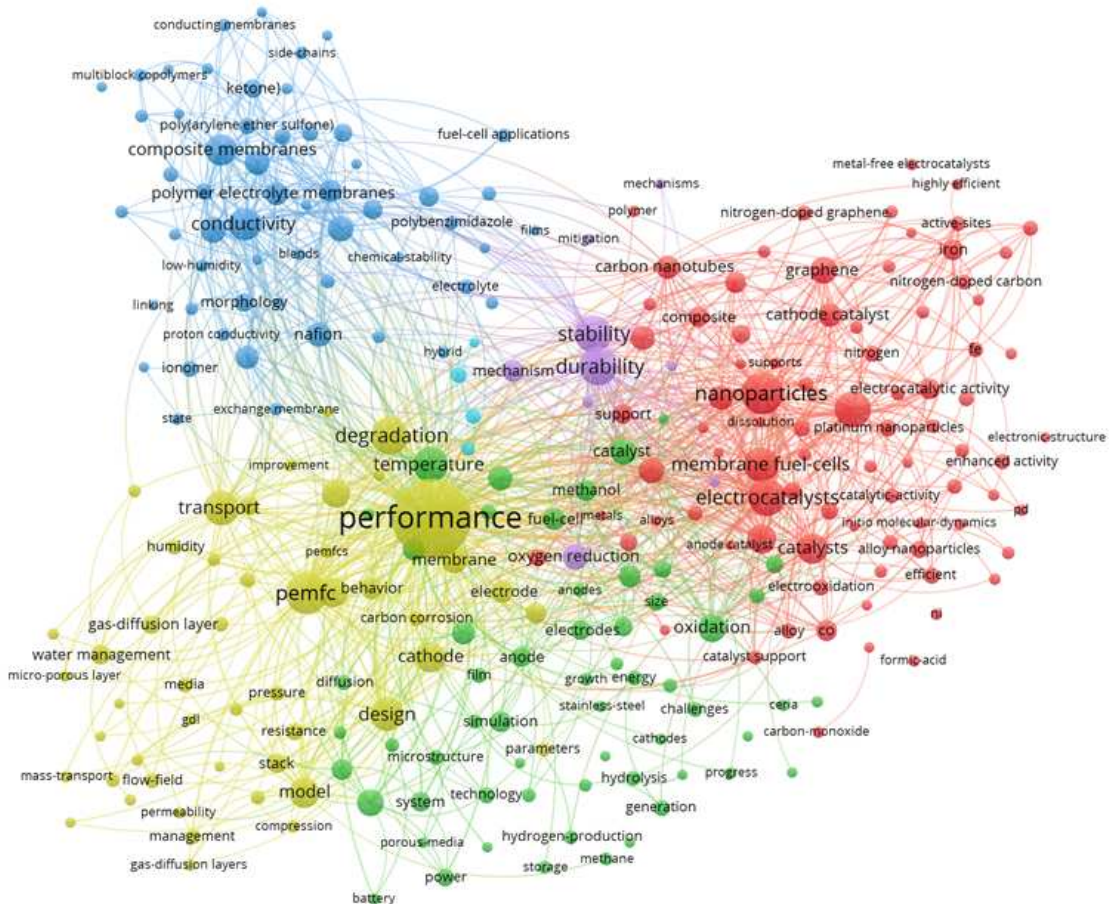


Fig. 6. Keyword co-occurrence network map in fuel cell-papers of Korea (visualized)

응면적이 클수록 에너지 반응 영역이 커지는데, 나노 기술을 통하여 그것을 구현하기 위한 연구이다. 동시에 지금까지 PEMFC에서 촉매의 주로 사용되어 오던 백금을, 나노입자화 기술을 통해 실제 투입량은 줄이고 반응면적은 넓혀 전체적인 에너지 반응 효율을 높이는 연구 또한 진행해 왔다. 백금이 높은 가격의 희귀 금속이고, 주로 남아프리카공화국에 전체 매장량의 90% 이상이 편중되어 있다는 사실을 감안하면 당연한 연구 방향성이라고 볼 수 있다. 그러나 지금까지 진행해 왔던 저백금화 등의 연구 결과, 촉매 소재로서 백금의 투입량을 줄이는 연구는 거의 한계에 다다른 것으로 보인다. 따라서 이제는 나노입자화를 통해 더욱 작게 만들어진 촉매의 내구성을 강화하는 방향으로 선회한 것이 추세로 보이며, 중국과 미국에서는 그래핀과 철의 합금, 탄소기반 소재의 활용 등, 백금을 근본적으로 대체할 신소재의 개발 연

구가 진행되고 있는 것을 알 수 있다.

한편, 막전극접합체(membrane electrolyte assembly, MEA)와 전해질 분야의 경우는 주로 전자 및 이온의 수송능력에 관한 연구가 주를 이루었다. 보다 높은 이온전도도 확보를 위하여 일본과 독일에서는 다양한 온도 조건을 만들어 연구를 진행하는 추세이고, 미국과 중국은 높은 이온전도도 확보와 동시에 이송 능력으로 인한 성능저하를 방지하는 연구도 주요 추진되고 있음을 알 수 있었다.

이와 관련하여 우리나라는 복합막(composite)을 적용하기 위한 연구 등, 기존의 나피온(Nafion) 소재를 대체할 새로운 소재에 대한 연구를 진행하고 있는 것으로 나타났다. 상기와 같은 결과들을 종합하여 다음과 같이 시사점을 제시한다.

우선, 우리나라가 추진 중인 ‘수소경제’의 확립을 위해서는 그 수소를 원료로 하여 발전 및 열을 얻을

Table 8. Whole summaries of extracted keywords in fuel cell research of major countries

Country	Research field	Keyword summary
China	MEA	Minimize performance degradation related to transport of ions and electrons in PEMFC and secure durability
	Catalyst	Expanding the energy reaction area through nanoparticleization. Low platinum. Alloy research. Research for graphene-iron alloy and increase of active area
	Membrane	Research to secure high ionic conductivity
U.S.A	Ordinary	Simulation study to improve fuel cell performance
	Catalyst	Use of carbon-based materials as catalyst materials (carbon nanotubes, graphene, etc.) Catalyst reduction of platinum and securing of nanoparticle durability
	Membrane	Research related to alleviation of electrolyte degradation
Japan	MEA	Material (ion, electron) transport study to secure the performance of PEMFC
	Catalyst	Study on securing stability and durability of cathode electrode catalyst Research on iron as part of catalyst development
	Electrolyte exchange membrane	Ion conductivity analysis study of proton exchange membrane according to temperature condition
Germany	Ordinary	Modeling and simulation research to improve fuel cell system performance
	Catalyst	Study on securing stability of cathode electrode catalyst Prevention of performance degradation through growth inhibition of nanoparticle catalysts
	Electrolyte	Study on the improvement of ion and charge transport performance according to temperature conditions
Korea	Ordinary	A study on preventing performance degradation related to ion and electron transport in PEMFC
	Catalyst	Securing performance and durability of nanoparticle electrocatalyst for PEMFC
	Electrode	Securing the oxidation reaction performance of hydrogen and methanol
	Membrane	Composite membrane application to secure the conductivity of the polymer electrolyte membrane

수 있는 연료전지에 대한 연구개발이 필수적이다. 그러나 우리나라는 연료전지 시스템의 제조 분야에서는 두각을 보이거나 전해질이나 촉매 등 핵심 분야에서는 대부분의 양을 선진국으로부터 들여와 쓰는 실정이다.

향후 수소경제의 구축을 원활하게 진행해 나가기 위해서는 촉매 및 전해질 분야에서 내구성 및 성능 저하 방지의 연구와 더불어 기존의 소재를 대체하기 위한 신소재의 개발이 관건이라고 볼 수 있겠다.

본 연구는 글로벌 에너지전환의 주요 기술 중 하나인 수소연료전지 기술을 대상으로 주요 5개국의 연구동향을 분석하였고, 그 결과 주로 연구개발이 이루어지는 연료전지의 종류와 핵심 분야(촉매와 전해질) 그리고 거시적인 연구개발 방향을 파악하였다는 점에서 의의가 있다.

그러나 본 연구의 아쉬운 점은, 주요 5개국을 대상으로 연료전지 전반에 대한 연구 트렌드를 분석함으로써 특정 분야를 보다 세밀하게 들여다보는 데 한계를 보였다는 점이다.

향후 이를 보완하기 위해 촉매 혹은 전해질과 같은 특정 분야 특정 주제를 대상으로, 연구개발이 진행되고 있는 신소재의 종류 및 연구방법론, 내구성을 강화하기 위한 구체적인 연구 등의 내용을 보다 정밀하게 분석하는 연구가 필요할 것으로 보인다.

References

1. IPCC, "Climate change 2021 the physical science basis: summary for policymakers", 2021. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
2. Joint ministries, "2050 carbon neutral", 2020.
3. J. Rifkin, "The hydrogen economy", Penguin Group, 2002.
4. Joint ministries, "Hydrogen economy activation road-map", 2019.
5. "2020 Evaluation of technology level", KISTEP.
6. "2019 ICT technology level examination and technology competitiveness analysis report", IITP.
7. C. H. Woo, "Current patents and papers research trend of fuel cell membrane", Membrane, Vol. 26, No. 6, 2016, pp. 407-420, doi: https://doi.org/10.14579/MEMBRANE_JOURNAL.2016.26.6.407.
8. T. J. Jang, "Study on trends and prospects of solid hydrogen fuel cell", Business Law, Vol. 26, No. 6, 2017, pp. 407-420.
9. M. S. Kim, "Study on industrial technology level of domestic new and renewable energy", Konkuk Univ, 2020.
10. NDRC, "The implementation status of the 2019 national economic and social development plan and the 2020 national economic and social development plan", 2019.
11. NDRC, "New energy vehicle industry development plan (2021-2035)", 2020.
12. "World energy market insight", KEEl, Vol. 21, No. 1, 2021, pp. 15-16.
13. BMWi, "Nationale Wasserstoffstrategi", 2020.
14. Joint ministries, "Hydrogen technology development road-map", 2019.
15. J. Li, M. H. Wang, and Y. S. Ho, "Trends in research on global climate change: a science citation index expanded-based analysis", Global and Planetary Change, Vol. 77, No. 1-2, 2011, pp. 13-20, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.02.005>.
16. H. Z. Fu, M. H. Wang, and Y. S. Ho, "Mapping of drinking water research: a bibliometric analysis of research output during 1992-2011", Science of the Total Environment, Vol. 443, 2013, pp. 757-765, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.061>.
17. Y. J. Kim and Y. M. Wang, "Mapping the knowledge on socio-nuclear studies in Korea through keyword network analysis", Technology Innovation Society, Vol. 20, No. 4, 2017, pp. 1507-1088. Retrieved from <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07319469>.
18. S. S. Lee, "Network analysis methodology", Nonhyeong.
19. E. M. Kim and C. G. Lee, "Research trends and knowledge structure of studies on science and technology policy", Technology Innovation Society, Vol. 21, No. 1, 2018, pp. 33-63. Retrieved from <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07412315>.
20. S.P. Borgatti, M. G. Everett, and J. C. Johnson, "Analysis social networks", Thousand Oaks, 2013.