

연구 논문 네트워크 분석을 이용한 수소 연구 동향

김혜경¹ · 최일영^{2†}

¹울산연구원, ²경희대학교 경영대학원

Exploration of Hydrogen Research Trends through Social Network Analysis

HYEA-KYEONG KIM¹, ILYOUNG CHOI^{2†}

¹Ulsan Reseach Institute, 6 Samsanjung-ro Nam-gu, Ulsan-44720, Korea

²Graduate School of Business Adminstration, Kyunghee University 26 Kyungheedaero, Dongdaemun-gu, Seoul 02447, Korea

†Corresponding author :
hkkim21c@gmail.com

Received 14 April, 2022

Revised 4 July, 2022

Accepted 28 July, 2022

Abstract >> This study analyzed keyword networks and Author's Affiliation networks of hydrogen-related papers published in Korea Citation Index (KCI) journals from 2016 to 2020. The study investigated co-occurrence patterns of institutions over time to examine collaboration trends of hydrogen scholars. The study also conducted frequency analysis of keyword networks to identify key topics and visualized keyword networks to explore topic trends. The result showed Collaborative research between institutions has not yet been extensively expanded. However, collaboration trends were much more pronounced with local universities. Keyword network analysis exhibited continuing diversification of topics in hydrogen research of Korea. In addition centrality analysis found hydrogen research mostly deals with multi-disciplinary and complex aspects like hydrogen production, transportation, and public policy.

Key words : Hydrogen research trend(수소분야 연구 동향), Social network Analysis (소셜네트워크 분석), Degree centrality(연결정도 중심성), Betweenness centrality(매개 중심성)

1. 서론

Post-2020 신기후체계가 출범함에 따라 국제사회는 화석연료를 대체할 수 있는 연료전지, 석탄액화·가스화, 수소에너지, 태양열, 태양광발전, 바이오매스, 풍력, 소수력, 지열, 해양에너지, 폐기물에너지 등의 신재생에너지에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히

수소에너지의 저탄소, 무한정 등의 특징과 연료전지 등 다양한 활용성으로 인해¹⁾, 미국은 2002년에 '2030 수소경제로의 이행을 위한 국가비전(National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy to 2030 and Beyond)을, 일본은 2014년에 수소·연료전지 전략 로드맵(Strategic Roadmap Hydrogen and Fuel Cells)을 수립하였다. 독일은 2020년 국가수소

전략(National Hydrogen Strategy)을, EU 집행위원회는 2020년 수소 전략(Hydrogen Strategy)을 발표하였다. 이처럼 세계 각국은 수소시장을 선점하기 위한 수소전략을 추진하고 있다. 한국 또한 수소경제를 신성장 동력으로 육성하기 위해 2019년 수소경제 활성화 로드맵을 발표하였다.

세계 수소시장 규모는 2019년 786.9백만 달러에서 2027년까지 연평균 14.2% 성장할 것으로 예상된다²⁾. 우리나라 또한 수소에너지 기술이 실험실 수준을 넘어 부생수소, 수소충전소, 수소자동차 등 상용화 단계로 발전하면서 수소시장이 점증적으로 커지고 있다.

이러한 수소 산업의 발전과 함께 수소 분야 연구는 양적 성장을 이루었고, 연구자들의 공동 연구는 점차 증가하는 추세이다. 과학기술의 고도화는 학문의 전문화, 분권화를 촉진할 뿐 아니라, 학제 간 융합과 연구자 간 연대를 활성화한다³⁾.

수소 분야 연구가 질적 성장 단계로 도약하기 위해서는 기술 고도화에 기반한 다양하고 전문적인 지식의 생산과 융복합, 인적네트워크의 활성화 등이 필요하다. 본 연구에서는 수소 분야 지식정보의 생산, 유통, 활용 체계의 고도화 모색에 앞서 수소 연구 동향을 객관적으로 파악하고자 한다. 이를 위해서는 우선 최근 수소 분야 연구 주제의 흐름과 연구자들의 연대 구조의 파악이 필요하다. 연구의 흐름과 구조를 파악하기 위해 널리 사용되는 기법 중 하나가 소셜 네트워크 분석이다^{4,5)}.

본 연구에서는 수소 분야 논문의 키워드와 저자의 소속기관 데이터를 활용하여 연구기관 네트워크와 키워드 네트워크를 구축한 후, 소셜 네트워크 분석을 실시하였다. 이를 통해 연구 주제와 공동 연구의 구조와 시계열적 흐름을 파악하고, 수소 분야 지식과 연구 활동의 선순환 구조를 강화하기 위한 시사점을 제시하였다.

2. 소셜 네트워크 분석

소셜 네트워크 분석은 노드(node) 간의 연결 관계를 계량적으로 분석하는 기법으로^{6,7)}, 마케팅⁸⁻¹⁰⁾, 관광^{11,12)}, 스포츠¹³⁾, 정치¹⁴⁾ 등 다양한 분야에서 활용되고 있다¹⁵⁻¹⁸⁾. 논문의 주제 및 대상을 대표하는 용어인 키워드는 “키워드 네트워크”의 노드(node)가 되고, 키워드 간의 관계는 링크(link)가 된다. 한편, 연구 이행과 논문 집필의 주체인 저자 소속기관은 “연구기관 네트워크”의 노드가 되고 기관 간의 관계는 네트워크의 링크가 된다. 이렇게 구성된 키워드 네트워크와 연구기관 네트워크는 소셜 네트워크 분석에서 검증된 각종 기법을 적용하여 분석되고 해석된다.

소셜 네트워크 분석에서 광범위하게 사용되는 대표적인 지표는 연결정도 중심성(degree centrality)과 매개 중심성(betweenness centrality)이다^{11,16,19)}. 연결정도 중심성은 특정 노드와 다른 노드들과 연결된 정도를 측정하는 지표로, 다음의 식(1)과 같이 계산된다.

$$C_D(i) = \sum_{j=1}^g x_{ij}, i \neq j \quad (1)$$

여기서, $C_D(i)$ 는 노드 i 의 연결정도 중심성, g 는 노드의 개수를 의미한다.

$\sum_{j=1}^g x_{ij}$ 는 노드 i 가 $(g-1)$ 개의 다른 노드와 갖는 연결의 개수이고, x_{ij} 는 0 또는 1이다.

본 연구에서 연결 중심성이 높다는 것은 단순한 발생 빈도를 넘어, 다양한 주제 및 주제들과 연계된 유기적 연구 활동을 내포한다.

매개 중심성은 한 노드가 담당하는 중재자 역할의 정도를 측정하는 지표로, 다음의 식(2)와 같이 계산된다.

$$C_B(i) = \sum_{j < k} \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}} \quad (2)$$

여기서, $C_B(i)$ 는 노드 i 의 매개 중심성이며, g_{jk} 는 두 노드 j 와 k 간의 최단 경로의 개수를 의미한다. 또한 $g_k(i)$ 는 두 노드 j 와 k 간의 최단경로 가운데 노드 i 를 포함하고 있는 경로의 개수를 의미한다. 따라서 연구기관 네트워크에서 연결정도 중심성은 특정 연구기관이 다른 연구기관과 공동 연구를 몇 번 수행하였는가를 나타내는 지표로, 연결정도 중심성이 높은 연구기관일수록 타 기관으로부터 지식을 흡수 또는 타 기관으로 지식 전달이 많다는 것을 의미한다. 연구기관 네트워크에서 매개 중심성은 특정 연구기관이 다른 연구기관 사이를 몇 번 매개하였는가를 나타내는 지표로, 매개 중심성이 높은 연구기관일수록 다른 연구기관들을 연결하는 브로커의 역할을 한다는 것을 의미한다.

또한, 키워드 네트워크에서 연결정도 중심성은 특정 키워드가 다른 키워드와 동시에 사용된 횟수를 나타내는 지표로, 연결정도 중심성이 높은 키워드일수록 연구자들의 관심이 많은 연구 주제라는 것을 의미한다. 키워드 네트워크에서 매개 중심성은 특정 키워드가 다른 키워드를 몇 번 매개하였는가를 나타내는 지표로, 매개 중심성이 높은 키워드일수록 다른 연구 주제를 연결하는 브로커 역할, 즉 다른 연구 주제와 통섭을 위한 연구 주제를 의미한다.

3. 연구 방법

본 연구의 목적은 논문 빅데이터로부터 저자의 소속기관과 키워드를 이용하여 수소 분야의 연구 흐름을 발견하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위한 연구 프로세스는 Fig. 1과 같이 4단계로 구성되어 있다. 첫 번째 단계는 논문을 수집하는 단계로, 한국학술지인용색인(Korean Citation Index, KCI)에서 2016년 1월 1일부터 2020년 12월 31일까지 5년 동안 수소를 포함하고 있는 논문을 수집하였다. 데이터 수집 기간은 국내외 수소산업 성장의 기점부터 주요국의 수소산업 육성 정책의 발표가 경쟁적으로 이어진 2020년까지로 한정하였다. 한국 정부는 2015년 12월 「수소차 보급 및 시장 활성화 계획」을 발표하고 2016년부

터 친환경 정책 차원에서의 수소차 보급정책을 시작하였다. 이후 2018년 8월 「혁신성장 전략투자 방향」을 통해 혁신성장 분야로 수소경제를 채택하였고 2019년 1월 수소경제 활성화 로드맵을 시작으로 수소경제 표준화 전략 로드맵(2019년 4월), 수소 기술개발 로드맵(2019년 10월), 수소안전관리 종합대책(2019년 12월) 등의 후속대책이 이어지면서 과학기술 혁신과 경제적 관점에서의 수소 분야 정책이 강화되고 있는 추세이다. 두 번째 단계는 논문 저자의 소속기관과 키워드를 전처리하는 단계로, 추출된 단어의 이음동의어, 약어, 띄어쓰기 등과 같은 클렌징 작업을 수행하였다. 세 번째 단계는 논문-소속기관 및 논문-키워드와 같은 이원모드(two-mode)의 사건 매트릭스(incidence matrix)를 소속기관-소속기관 및 키워드-키워드 형태의 일원모드(one-mode) 인접 매트릭스(adjacency matrix)로 변환한 후 소속기관 네트워크와 키워드 네트워크를 구축하였다.

마지막 단계는 수소 분야에 대한 연구의 흐름을 발견하기 위하여 빈도 분석, 연결정도 중심성 및 매개 중심성을 분석을 수행하였다.

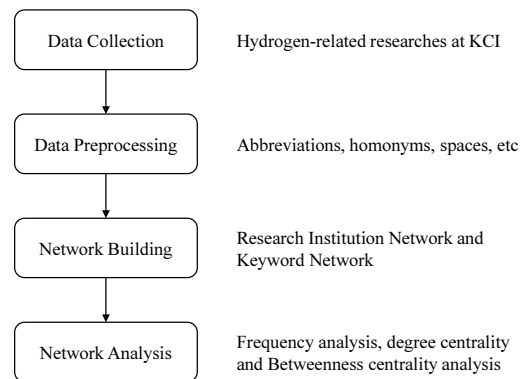


Fig. 1. Framework of the study

4. 분석 결과

4.1 네트워크 구성 데이터

본 연구에서는 128개 학술지에 게재된 482편의 논문이 분석되었다. KCI에 등재된 학술지를 대상으로 제목에 “수소”가 포함된 논문을 수집한 후, 수소 (hydrogen) 관련 영문 키워드가 논문에 포함되어 있지 않거나, 한우 수소(Korean bull)와 같이 연구범위를 벗어난 주제의 논문을 제거하여 분석 데이터를 구성하였다. 논문 게재 건수를 기준으로 상위 10개의

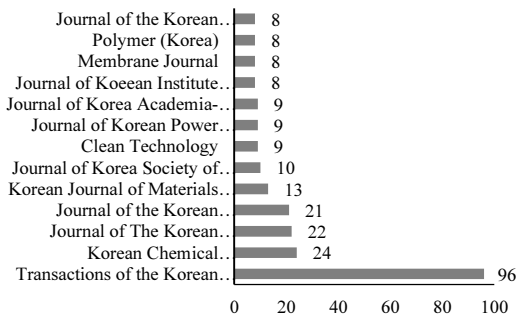
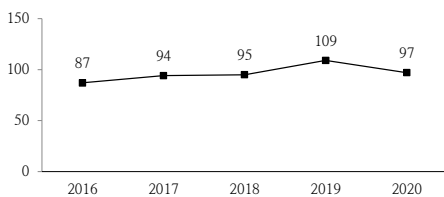
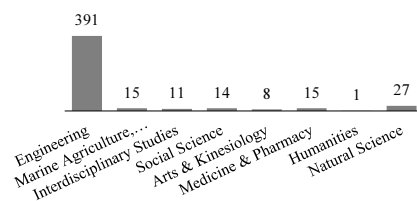


Fig. 2. Top 10 journals for hydrogen papers



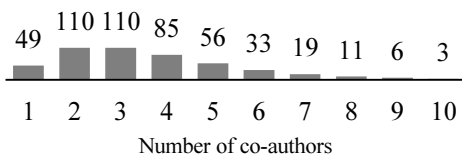
Number of papers

(a)



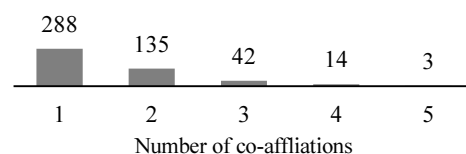
Number of papers by field of research

(b)



Number of co-authors

(c)



Number of co-affiliations

(d)

Fig. 3. The characteristic of analysis data

학술지를 살펴보면 Fig. 2와 같이 한국수소및신에너지학회논문집이 96편으로 압도적으로 높으며, 그 뒤를 이어 Korean Chemical Engineering Research 24편, 한국가스학회지 22편, 공업화학 21편, 한국재료학회지 13편, 한국폐기물자원순환학회지 10편, Clean Technology 9편, 한국분말야금학회지 9편, 한국산학기술학회논문지 9편, 대한금속 재료학회지 8편, 멤브레인 8편, 폴리머 8편, 한국추진공학학회지 8편으로, 2016년부터 5년간 한국수소및신에너지학회에서 대상 논문의 약 20%가 게재되었다.

분석 대상의 논문을 자세히 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 연도별 현황은 Fig. 3(a)와 같이 2016년 87편, 2017년 84편, 2018년 95편, 2019년 109편, 2020년 97편으로, 기간 중 연평균 100편 수준으로 게재되었다. 둘째, 분야별로 살펴보면 Fig. 3(b)와 같이, 공학 391편, 농수해양학 15편, 복합학 11편, 사회과학 14편, 예술체육학 8편, 의약학 15편, 인문학 1편, 자연과학 27편으로 공학분야의 논문이 81.1%를 차지한다. 즉, 분석 기간에 수소 관련 연구는 공학분야 기술개발을 중심으로 수행되었다. 셋째, 논문별 공동저자 수를 살펴보면 Fig. 3(c)와 같이, 1인 저자 논문 49편, 2인 저자 논문 110편, 3인 저자 논문 110편, 4인 저자 논문

문 85편, 5인 저자 논문 56편, 6인 저자 논문 33편, 7인 저자 논문 19편, 8인 저자 논문 11편, 9인 저자 논문 6편, 10인 저자 논문 3편이다. 이를 통해 소수 관련 논문은 5인 이하의 공저자가 약 85%를 차지하고 있음을 알 수 있다. 마지막으로, 논문별 공동 연구 기관 수를 살펴보면, Fig. 3(d)와 같이, 1개 기관이 288편, 2개 기관이 135편, 3개 기관이 42편, 4개 기관이 14편, 5개 기관이 3편을 공동 연구를 수행하였다. 이를 통해 논문의 약 50% 이상이 동일 기관에서 연구가 진행되고 있음을 알 수 있다.

4.2 빈도 분석

4.2.1 연구기관 네트워크 빈도 분석

수소 연구 주체의 시계열적 특징과 흐름을 파악하기 위하여 연차별 연구기관에 대한 빈도를 분석한 결과는 Fig. 4와 같다. 2016-2020년 기간 동안 245개 기관이 연구를 수행하였으며, 2016년 88개 기관에서 2018년 112개 기관까지 증가하였다가 이후 다소 감소한 상황이다.

2016년에는 88개의 연구기관이 수소 논문을 게재

하였고, 이 가운데 상위 5개 기관은 국립환경과학원(16번), 충남대학교(13번), 경상대학교(11번), 부산대학교(11번), 한국기계연구원(11번) 등이다. 2016년은 정부가 「미세먼지 관리 특별대책(2016. 6)」, 「제1차 기후변화 대응 기본계획(2016. 12)」 등을 통해 중장기 온실가스 감축 목표를 설정하고 이행계획을 공표한 시기로 수소 연구에 있어 공학적, 경제적 관점보다는 국가의 기후변화 대응과 적응 등 환경적 접근의 연구가 두드러진 시기로 파악된다.

2017년에는 90개의 연구기관이 수소 논문을 발표하였으며, 상위 5개 기관은 부산대학교(20번), 한국에너지기술연구원(18번), 부경대학교(14번), 서울과학기술대학교(14번), 한국해양대학교(13번)이다. 이 같이 2017년도에는 해양공간과 조선기자재산업 등 지리적·산업적으로 수소선박 분야에 장점이 있는 부산광역시 소재 대학을 중심으로 초기 수소선박기술 연구가 활발하게 이루어진 것으로 나타났다. 이들 연구는 현재 부산광역시의 수소연료전지 탑재 선박과 액화수소 운송선 축조 등 수소선박산업 육성정책으로 이어지고 있다.

2018년에는 분석 기간 중 최대인 112개의 연구기

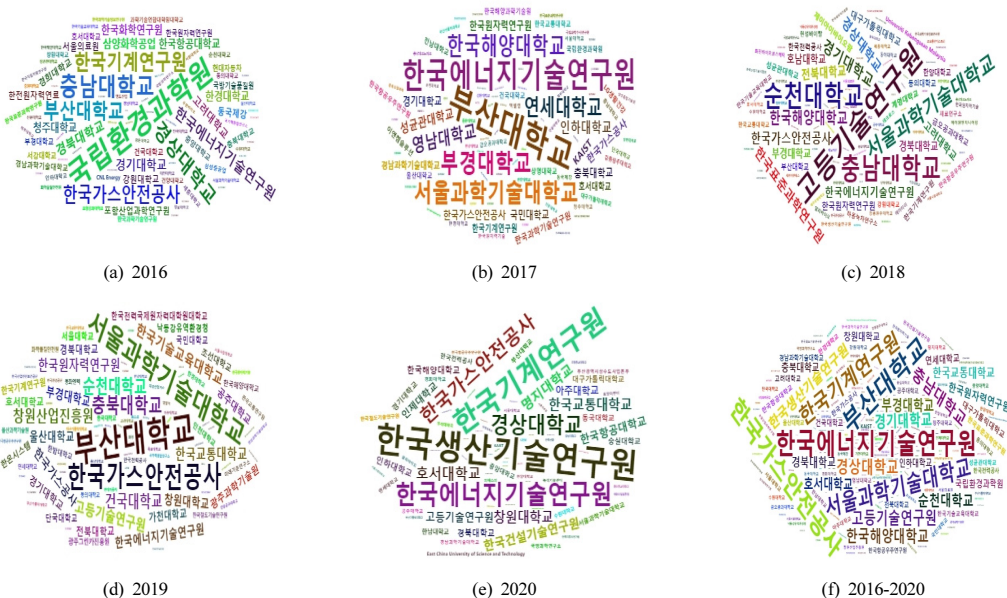


Fig. 4. Major research institutes related to hydrogen by year from 2016 to 2020

관이 수소 논문을 발표하였다. 상위 5개 기관은 고등기술연구원(20번), 순천대학교(18번), 충남대학교(18번), 서울과학기술대학교(14번), 경기대학교(10번)로 이 기간에는 대학의 에너지 및 연료전지 실험실을 중심으로 연구가 수행되었다. 연구의 내용을 살펴보면 이산화탄소를 발생하지 않는 수소생산 관련 연구를 비롯하여 수소차 및 연료전지 상용화를 위한 핵심소재 개발과 성능 개선을 위한 실증연구가 본격화되었다. 이 기간은 정부의 「제3차 에너지기본계획」과 「재생에너지 3020 이행계획(안)」 등의 발표 이후 에너지 전환정책 추진이 가시화된 시기로 수소에너지와 연료전지 등에 대한 관심이 기초 연구기관 뿐 아니라 산업기술의 연구개발과 선진기술의 도입 및 보급 등을 위한 실용적 연구가 모색된 시기로 해석된다.

2019년에는 96개의 연구기관이 수소 논문을 발표하였으며, 상위 5개 기관은 부산대학교(19번), 서울과학기술대학교(15번), 한국가스안전공사(15번), 충북대학교(11번), 순천대학교(10번)로 이전과 유사한 흐름으로 전개되었다. 다만, 2019년은 정부의 「수소경제 활성화 로드맵」이 발표되면서 국내 수소산업 육성이 본격화된 시기이다. 이를 반영하여 수소경제 진입을 위한 인프라 구축, 법제도 마련, 안전성 확

보 등에 관한 공공의 점검과 대책 마련 관련 연구가 촉발되었으며, 가스안전관리 전문기관인 한국가스안전공사가 주요 연구주체로 부상하였다.

이 같은 기조는 2020년에도 이어졌으며 해당 기초의 연구성과가 국책 연구기관을 중심으로 다수 발표되었다. 구체적으로는 77개의 연구기관이 수소 논문을 발표하였으며, 한국생산기술연구원(27번), 한국기계연구원(23번), 한국에너지기술연구원(20번), 경상대학교(17번), 한국가스안전공사(16번)이다.

수소산업은 아직까지 초기 단계로 한국도 본격적인 산업생태계를 갖추지 못하고 있어 수소 산업 역량 강화를 위한 핵심기술 개발과 안전성 확보 등이 요구되는 상황이다. 2016-2020년 기간 동안 245개 기관이 이와 관련된 다양한 연구를 수행하였으며, 상위 5개 기관은 한국에너지기술연구원(61번), 부산대학교(60번), 한국가스안전공사(56번), 서울과학기술대학교(50번), 한국기계연구원(49번)으로, 공공부문에서 정책 관련 연구가 활발히 이루어지고 있음을 알 수 있다. 내용적으로는 초기 환경적 관점의 연구를 넘어 수소경제의 안착을 위한 수소산업의 생태계 조성을 위한 공학적 연구의 확대 추세가 이어지고 있다.

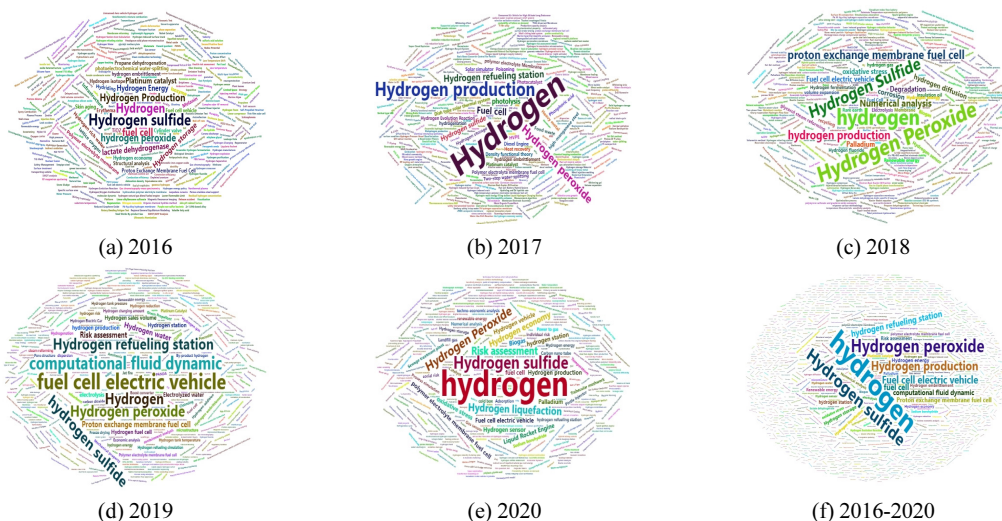


Fig. 5. Major key words related to hydrogen by year from 2016 to 2020

4.2.2 키워드 네트워크 빈도 분석

대상 논문의 키워드에 대한 빈도 분석 결과를 살펴보면 Fig. 5와 같다. 2016년에는 371개의 키워드가 사용되었으며, 상위 5개 키워드는 hydrogen sulfide (6번), hydrogen (5번), fuel cell (4번), hydrogen peroxide (4번), hydrogen production (4번)이다. 2017년에는 396개의 키워드가 사용되었으며, 상위 5개 키워드는 hydrogen (14번), hydrogen production (8번), hydrogen peroxide (5번), fuel cell (4번), hydrogen refueling station (4번)이다. 2018년에는 392개의 키워드가 사용되었으며, 상위 5개 키워드는 hydrogen (9번), hydrogen peroxide (9번), hydrogen sulfide (7번), hydrogen production (5번), proton exchange membrane fuel cell (5번)이다. 2019년에는 431개의 키워드가 사용되었으며, 상위 5개 키워드는 fuel cell electric vehicle (11번), computational fluid dynamic (9번), hydrogen (8번), hydrogen peroxide (8번), hydrogen refueling station (8번), hydrogen sulfide (8번)

이다. 2020년에는 392개의 키워드가 사용되었으며, 상위 5개 키워드는 hydrogen (16번), hydrogen sulfide (8번), hydrogen peroxide (6번), hydrogen liquefaction (5번), risk assessment (5번)이다. 마지막으로, 2016-2020년 기간 동안 2,325개의 키워드가 사용되었으며, 상위 5개 키워드는 hydrogen (52번), hydrogen peroxide (32번), hydrogen sulfide (32번), hydrogen production (23번), fuel cell electric vehicle (19번)이다. 이를 통해 수소 연구는 국내 정책과 마찬가지로 수소 자동차와 연료전지 두 축이라 할 수 있으며, 최근 연구는 수소에너지의 실질적 공급을 뒷받침할 수소생산 관련 연구를 비롯하여 수소차의 원활한 보급을 위한 수소충전소의 설치와 운영 경제성 관련 연구도 이어지고 있다.

4.3 중심성 분석

2016-2020년 기간 동안 수소 분야의 연구의 흐름을 파악하기 위하여 연구기관 네트워크 및 키워드 네트워크를 구축하여 분석하였다.

4.3.1 연구기관 네트워크의 중심성 분석

연구 주체 간의 연구의 흐름을 파악하기 위하여 연구기관 네트워크를 구축한 결과는 Fig. 6과 같다. 연구기관 네트워크는 총 43개의 컴포넌트(component; 연결고리가 끊이지 않는 노드들의 집합을 의미하며, 직·간접적으로 연결된 노드들은 하나의 컴포넌트로 해석함)로 구성되며, 가장 큰 메인 컴포넌트는 184개의 연구기관으로 구성되어 있다. 연결정도 중심성 및

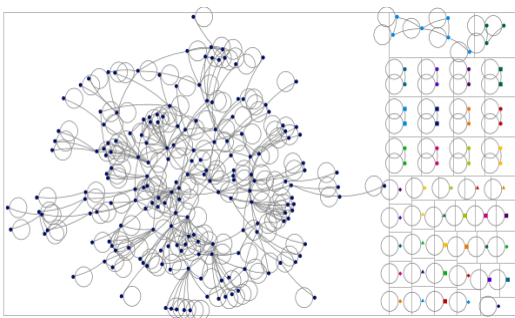


Fig. 6. The network structure of research Institutes

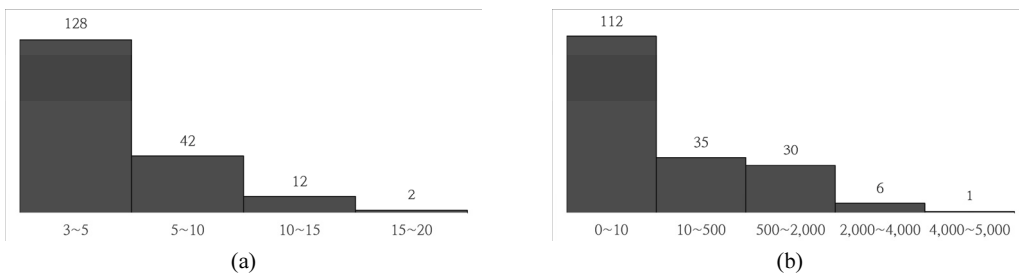


Fig. 7. The centrality of research institute network. (a) Degree centrality. (b) Betweenness centrality.

매개 중심성 분석을 수행한 결과는 Fig. 7과 같다.

연결 중심성은 네트워크 분석에서 노드의 중요성을 파악하기 위해 가장 많이 사용되는 중심성(centrality) 지표로 특정 노드에 연결된 네트워크 내 다른 노드의 수로 측정되며, 노드 간 상호작용의 정도를 설명하는 지표이다. 대상 논문의 분석 결과, 연결정도 중심성이 10 이상인 연구기관은 14개이며, 대다수의 연구기관은 연결정도 중심성이 5 이하이다.

매개 중심성은 하나의 노드가 다른 두 노드의 연결을 위해 중개자 역할의 수행 정도를 판단하는 지표로 특정 노드에 연결된 네트워크 내 다른 노드의 최단경로상에 위치하는 정도로 측정된다. 대상 논문의 분석 결과, 매개 중심성이 2,000 이상인 연구기관이 7개이며, 대다수 연구기관의 매개 중심성은 10 이하이다.

메인 컴포넌트의 연구기관 중 연결정도 중심성과 매개 중심성 상위 5개를 각각 살펴보면 Tables 1, 2와 같다. 연결정도 중심성은 특정 주체가 타 기관과의 공동 연구 수행 정도를 나타내는 지표로 부산대학교, 경상대학교, 한국해양대학교, 한국생산기술연구원, 호서대학교 순으로 공동 연구를 많이 수행하고 있음을 알 수 있다.

메인 컴포넌트의 연구기관 중 연결정도 중심성과

Table 1. Top 5 institutions with degree centrality

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Pusan National University | 19 |
| 2 | Gyeongsang National University | 17 |
| 3 | Korea Maritime & Ocean University | 14 |
| 4 | Korea Institute of Industrial Technology | 13 |
| 5 | Hoseo University | 13 |

Table 2. Top 5 institutions with betweenness centrality

| | | |
|---|---|---------|
| 1 | Pusan National University | 4,910.4 |
| 2 | Gyeongsang National University | 3,098.9 |
| 3 | Korea Institute of Industrial Technology | 3,014.5 |
| 4 | Korea Maritime & Ocean University | 2,590.0 |
| 5 | Pohang University of Science and Technology | 2,576.7 |

매개 중심성 상위 5개를 각각 살펴보면 Tables 1, 2와 같다.

연결정도 중심성은 특정 주체가 타 기관과의 공동 연구 수행 정도를 나타내는 지표로 부산대학교, 경상대학교, 한국해양대학교, 한국생산기술연구원, 호서대학교 순으로 공동 연구를 많이 수행하고 있음을 알 수 있다. 매개 중심성은 특정기관이 다른 기관들 간의 매개자 역할 수준을 나타내는 것으로, 네트워크 내의 정보흐름에 대한 통제 능력을 파악할 수 있는 지표이기도 하다. 한국의 수소 분야 연구에서 매개 중심성이 높은 연구기관은 부산대학교, 경상대학교, 한국생산기술연구원, 한국해양대학교, 포항공과대학교 등으로 이들이 주로 연구개발 활동의 매개자 역할을 수행하고 있는 것으로 파악되었다. 두 가지 중심성 분석을 통해 파악된 것은 첫째, 지역의 대학교가 수소 분야의 공동 연구의 주축이며 다양한 연구 주체들 간의 매개자 역할 또한 활발하게 수행하고 있다는 것이다. 둘째는, 수소산업 생태계 구현을 위한 다양한 응용 기술의 융복합 연구가 이루어지고 있으며, 정부 정책을 반영한 키워드 강도가 높아지는 추세를 보이고 있다.

연구기관 네트워크에서 연결정도 중심성과 매개 중심성의 상관성을 파악하기 위하여 사분면 산점도에서의 연구기관 분포를 살펴보았다. 사분면에서 가로축은 매개 중심성의 평균, 세로축은 연결정도 중심성의 평균으로 설정하였으며, 연구기관 네트워크의

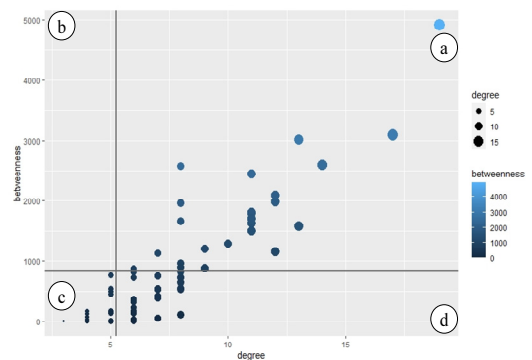


Fig. 8. Scatter-plot of the betweenness centrality versus degree for nodes of the research institute network

연결정도 중심성-매개 중심성 산점도는 Fig. 8과 같다.

(a)는 연결정도 중심성과 매개 중심성이 모두 높은 연구기관이 분포한 사분면이다. 경상대학교, 한국생산기술연구원, 부산대학교, 한국해양대학교, 한국에너지기술연구원 등 24개 기관이 포함되며, 이들은 수소 분야 연구활동에 있어 활발한 브로커의 역할을 수행하는 동시에 타 기관과의 공동 연구 또한 활발한 기관에 해당한다. 이들 기관은 수소 분야 지식창출은 물론, 수소 분야 연구를 다양한 주제와 주체로 확장하고 융합하는 데 큰 역할을 하는 것으로 볼 수 있다.

(b)는 연결정도 중심성은 낮으나 매개 중심성이 높은 연구기관이 분포한 사분면으로, 타 기관과의 공동 연구는 미진하지만 연구 소그룹 간 매개 역할이 활발한 기관이 포함된다. 그러나 본 연구의 범주에서는 공동 연구 없이 브로커 역할만 하는 기관은 없는 것으로 파악되었다.

(c)는 연결정도 중심성과 매개 중심성 모두 낮은 연구기관이 분포한 사분면으로, 타 기관과의 교류가 거의 없이 연구를 수행하는 기관을 의미한다. 한국전자기술연구원, 평화오일셀공업, 대구대학교, 우송대학교, 창원산업진흥원 등 128개 기관이 (c)에 포함된다.

마지막으로 (d)는 연결정도 중심성은 높으나, 매개 중심성이 낮은 연구기관이 분포한 사분면으로, 연구 소그룹을 형성하고 있는 타 기관들과의 교류는 거의 없이 특정 소그룹을 중심으로 공동 연구를 수행하는 기관들을 의미한다. (d)에 해당되는 기관은 한양대학교, 안동대학교, 한국전력공사, 강릉원주대학교, 동의대학교 등 32개이다.

한국의 수소 분야 연구기관 중 13%가 연구 소그룹을 매개하는 브로커 역할을 수행하면서 타 기관과의 공동 연구가 활발한 것으로 나타났으며, 약 70%의 연구기관이 타 기관과의 교류 없이 단독으로 연구를 수행하는 것으로 나타났다.

이를 통해 현재까지의 수소 분야 연구 활동은 연구주체의 관점에서 보면 분산적으로 이루어지는 경

향을 갖는 것을 알 수 있다.

그러나, (a) 사분면에 포함된 기관의 성격과 연구 내용을 종합적으로 고려하면 수소 분야 연구 활동은 수소에너지와 조선을 포함한 모빌리티 등의 주요 기술 분야들과 다양한 관련 기술들이 상호 연계되어 유기적 연구 활동이 이루어지는 네트워크 구조를 형성하고 있다.

4.3.2 키워드 중심성 분석

연구 주제의 동향을 파악하기 위하여 키워드 네트워크를 구축한 결과는 Fig. 9와 같다. 키워드 네트워크는 총 81개의 컴포넌트로 구성되며, 가장 큰 메인 컴포넌트는 1,165개의 키워드로 구성되어 있다. 연결정도 중심성 및 매개 중심성 분석을 수행한 결과는 Fig. 10과 같다. 연결정도 중심성이 50 이상인 키워드는 7개이며, 대다수의 키워드는 연결정도 중심성이 10 이하이다. 또한 매개 중심성이 30,000 이상인 키워드는 16개이며, 대다수 키워드의 매개 중심성은 5 이하이다.

메인 컴포넌트의 키워드 중 상위 5개의 중심성을 살펴보면 Tables 3, 4와 같다.

키워드 네트워크에서 연결정도 중심성이 높다는 것은 단순히 연구 빈도가 높다는 것을 넘어, 다양한 다른 키워드들과 연계되어 연구되는 빈도가 높다는 것을 의미하며, 실질적으로 가장 활발하게 연구되고 있는 주제라고 이해할 수 있다. 본 분석 결과에서는 hydrogen, hydrogen peroxide, hydrogen sulfide, hy-

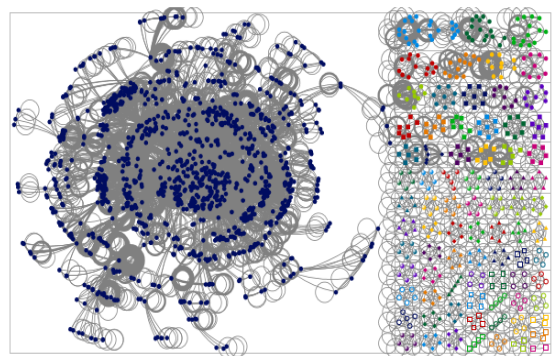


Fig. 9. The network structure of research keywords

hydrogen production, fuel cell electric vehicle 순으로 연결정도 중심성이 높은 것으로 나타났다. 이들 키워드는 수소에너지 생산, 연료전지 촉매, 수소전기차 등 다양한 개념과 연계되고 다종의 기술이 집약되는 기술을 반영한다.

매개 중심성이 높은 키워드는 hydrogen, hydrogen sulfide, hydrogen peroxide, hydrogen production, renewable energy 등으로 연결정도 중심성 지표값 순위와 유사하다. 이를 통해 해당 키워드가 다수의 연구에 동시에 등장할 뿐 아니라 다양한 주제와의 연계에도 기여하고 있음을 추론할 수 있다. 매개 중심성 상위 5위에만 나타난 키워드는 ‘renewable energy’로 국제사회의 기후변화 대응 활동 및 탄소중립 정책의 확산과 함께 ‘재생에너지’는 수소 분야 연구

에 있어 타 주제와의 연계 및 학제 간 연구에 크게 기여할 키워드로 해석된다.

연결정도 중심성과 매개 중심성을 연계한 분석을 위하여 Fig. 11과 같이 산점도를 통해 키워드를 사사분면으로 분류하였다. 여기서 가로축은 매개 중심성의 평균이며, 세로축은 연결정도 중심성의 평균이다. 따라서 (a)는 연결정도 중심성과 매개 중심성이 높은 키워드가 분포된 사분면으로, 이곳에 포함된 키워드는 인기 있는 연구 주제인 동시에 타 주제와의 매개 역할을 하는 키워드를 의미한다. Hydrogen, hydrogen peroxide, fuel cell electric vehicle, hydrogen production, hydrogen sulfide 등 46개 키워드를 포함한다. (b)는 연결정도 중심성은 낮으나 매개 중심성이 높은 키워드로, 타 연구 주제를 매개할 수 있는 주제

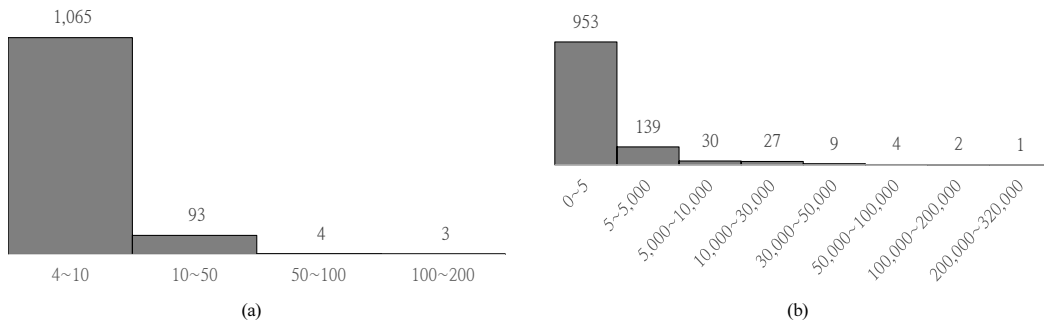


Fig. 10. The centrality of research keyword network. (a) Degree centrality. (b) Betweenness centrality.

Table 3. Top 5 keywords with degree centrality

| | | |
|---|----------------------------|-----|
| 1 | Hydrogen | 188 |
| 2 | Hydrogen peroxide | 113 |
| 3 | Hydrogen sulfide | 104 |
| 4 | Hydrogen production | 78 |
| 5 | Fuel cell electric vehicle | 73 |

Table 4. Top 5 keywords with betweenness centrality

| | | |
|---|---------------------|-----------|
| 1 | Hydrogen | 318,936.3 |
| 2 | Hydrogen sulfide | 142,202.4 |
| 3 | Hydrogen peroxide | 125,393.4 |
| 4 | Hydrogen production | 95,957.5 |
| 5 | Renewable energy | 76,055.2 |

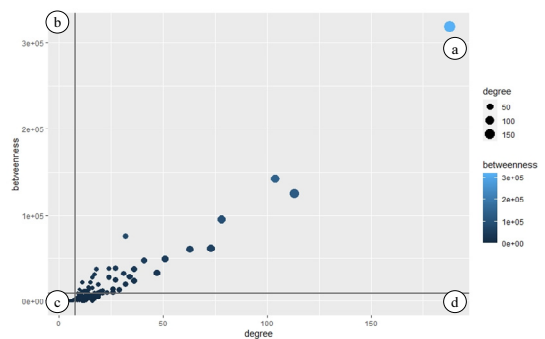


Fig. 11. Scatter-plot of the betweenness centrality versus degree for nodes of the research keyword network

이다. 연구기관 네트워크의 분석 결과와 마찬가지로 (b)에 해당되는 키워드는 없다. (c)는 연결정도 중심성 및 매개 중심성이 낮은 키워드로, 특정 분야에서만 한정하여 연구되는 주제를 의미한다. Explosive hazardous area, hydraulic pressure, SWOT/AHP analysis, microgrid, fuzzy logic 등 896개의 키워드가 (c)에 해당된다. 마지막으로 (d)는 연결정도 중심성이 높으나, 매개 중심성이 낮은 키워드로, 인기 있는 연구 주제를 의미한다. (d)에 해당되는 키워드는 jet fire, liquefied petroleum gas, polymer electrolyte membrane, hydrogen isotope dispersion 등 892개이다.

5. 결론

수소는 연구자에게 있어 매우 매력적인 분야이다. 이러한 수소 연구가 양적·질적 성장을 하기 위해서는 지식의 선순환 구조를 구축하는 것이 중요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 KCI로부터 2016-2020년 사이의 수소 관련 논문을 수집한 후, 연구기관 네트워크 및 키워드 네트워크를 구성하였다. 이를 활용하여 대표적인 네트워크 분석 기법인 중심성 분석을 통해 수소 분야의 연구 흐름을 파악하였다.

본 연구의 결과는 다음과 같다. 첫째, 수소 연구는 공학분야의 논문이 대다수를 차지하고 있다. 특히 한국수소및신에너지학회논문집의 저널에 많이 게재되었다. 둘째, 수소 연구는 2인 또는 3인의 공저자가 많지만, 저자가 소속된 기관은 단독기관이 약 50%를 차지하고 있다. 이를 통해 수소 연구는 연구기관 간 교류가 많지 않거나 공동 연구 결과물의 기관 간 공유가 제한적이라고 판단할 수 있다. 셋째, 수소 연구는 초기에는 대학교가 주도하였으며, 점차 연구원의 비중이 증가하는 추세이다. 또한 수소자동차 및 연료전지 등에 대한 연구가 증가하고 있다. 이를 통해 수소 연구는 원천기술에서 응용기술로 변화되고 있다고 판단할 수 있다. 넷째, 경상대학교, 한국생산기술연구원, 부산대학교, 한국해양대학교, 한국에너지기술연구원 등이 연결정도 중심성과 매개 중심성이 동시에 높은 브로커 기반 지식 생산자이다. 따라서 초

기 수소 연구를 진행하고자 하는 연구자 또는 기관은 이러한 브로커 기반 지식 생산자와의 공동 연구를 통해 수소 연구자 커뮤니티로의 진입이 수월할 것으로 판단된다. 마지막으로, fuel cell electric vehicle, hydrogen production, hydrogen peroxide, hydrogen sulfide, renewable energy 등의 키워드는 인기 있는 키워드일 뿐만 아니라 다른 주제와 통섭을 할 수 있는 키워드이다. 따라서 연구자들은 이러한 키워드를 중심으로 연구 주제로 탐색한다면, 융·복합 연구를 통해 성과를 이룰 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 본 연구는 다음과 같은 한계점이 있다. 첫째, 본 연구는 국내 논문을 중심으로 수소 연구의 흐름을 분석하여 글로벌 연구 동향을 파악하지 못한 한계가 있다. 따라서 향후 연구는 해외 학술 데이터 베이스를 포함하여 연구의 흐름을 파악할 필요가 있다. 둘째, 본 연구는 네트워크 분석을 위한 다양한 지표가 있음에도 불구하고 중심성 분석을 통해 연구 흐름을 분석한 한계가 있다. 향후 연구는 좀 더 세밀하게 분석하기 위해 구조적 등위성, 컴포넌트 분석 등을 수행할 필요가 있다. 마지막으로 내용에 수소 관련 논문이 있을 수 있음에도 불구하고 제목에 수소 단어가 포함된 논문만을 수집하여 분석한 한계점이 있기 때문에 향후에는 초록 및 키워드에 “수소” 단어가 포함된 논문으로 확장할 필요가 있다. 따라서 향후 후속 연구는 이러한 한계점을 고려한다면 의미 있는 연구가 될 것이라고 판단된다.

References

1. M. S. Hwang, J. H. Park, and Y. M. Kim, “Current status and development direction of the new and renewable energy industry”, Bank of Korea, 2008.
2. Grand View Research, “Green hydrogen market size, share & trends analysis report by technology”, Grand View Research, 2020. Retrieved from <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/green-hydrogen-market>.
3. H. S. cho, and Y. H. Kim, “Gendered collaboration network in science and technology professions”, Korean Journal of Sociology, Vol. 39, No. 6, 2005, pp. 119-158, UCI : G704-000205.2005.39.6.004.
4. S. M. Lim, H. J. Yoon, and D. Bang, “Research trend analysis

- in 『Korean Journal of General Education』 using semantic network analysis”, Korean Journal of General Education, Vol. 14, No. 1, 2020, pp. 11-32. Retrieved from <https://www.earticle.net/Article/A370529>.
5. I. Y. Choi and H. S. Lee, “Network analysis of research collaborations in “Korean Corporation Management Review””, Korean Corporation Management Review, Vol. 21, No. 4, 2014, pp. 103-123. Retrieved from <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artId=ART001906251>.
 6. H. K. Kim, Y. U. Ryu, Y. Cho, and J. K. Kim, “Customer-driven content recommendation over a network of customer s”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, Vol. 42, No. 1, 2012, pp. 48-56, doi: <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2011.2147306>.
 7. S. Wasserman and K. Faust, “Social network analysis”, Cambridge University Press, UK, 1994, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511815478>.
 8. H. K. Kim, H. Y. Oh, J. C. Gu, and J. K. Kim, “Commenders: a recommendation procedure for online book communities”, Electronic Commerce Research and Applications, Vol. 10, No. 5, 2011, pp. 501-509, doi: <https://doi.org/10.1016/j.elerap.2011.03.002>.
 9. I. Y. Choi and J. K. Kim, “Product network analysis to analyze the purchase behavior of customers”, Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society, Vol. 34, No. 4, 2009, pp. 57-72. Retrieved from <https://koreascience.kr/article/JAKO200908856857991.page>.
 10. H. K. Kim, J. K. Kim, and Q. Y. Chen, “A product network analysis for extending the market basket analysis,” Expert Systems with Applications, Vol. 39, No. 8, 2012, pp. 7403-7410, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.066>.
 11. J. Park and E. Jeong, “Service quality in tourism: a systematic literature review and keyword network analysis”, Sustainability, Vol. 11, No. 13, 2019, pp. 3665, doi: <https://doi.org/10.3390/su11133665>.
 12. J. S. Park, C. S. Kim, and K. Y. Kwahk, "Investigation of research trend in hotel domain using text mining and social network analysis", Journal of Tourism and Leisure Research, Vol. 28, No. 9, 2016, pp. 209-226. Retrieved from <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artId=ART002151534>.
 13. J. H. Lee, J. M. Lee, and Y. S. Jang, “Analysis of 2018 Pyeong-Chang Olympic keywords using social network big data analysis”, Korean Journal of Sport Management, Vol. 22, No. 6, 2017, pp. 73-89, doi: <https://doi.org/10.31308/KSSM.22.6.5>.
 14. J. H. Hong and H. J. Yun, “Presidential candidate’s speech based on network analysis : mainly on the visibility of the words and the connectivity between the words”, Journal of the Korea Contents Association, Vol. 14, No. 9, 2014, pp. 24-44, doi: <https://doi.org/10.5392/JKCA.2014.14.09.024>.
 15. I. Y. Choi and H. K. Kim, “A study on social issues for hydrogen industry using news big data”, Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 33, No. 2, 2022, pp. 121-129, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.2.121>.
 16. Y. J. Han and Y. Park, “Patent network analysis of interindustrial knowledge flows: the case of Korea between traditional and emerging industries”, World Patent Information, Vol. 28, No. 3, 2006, pp. 235-247, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2006.01.015>.
 17. O. K. Lim, “Keyword network analysis of domestic research articles for determining recent trends of hydrogen refueling stations”, Fire Science and Engineering, Vol. 35, No. 4, 2021, pp. 83-90, doi: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.0565d609>.
 18. P. Chung, H. Ahn, and K. Y. Kwahk, “Identification of core features and values of smartphone design using text mining and social network analysis”, The Korean Academic Association of Business Administration, Vol. 32, No. 1, 2019, pp. 27-47. Retrieved from <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artId=ART002436804>.
 19. J. Zheng, Z. Zhao, X. Zhang, D. Chen, and M. Huang, “International collaboration development in nanotechnology: a perspective of patent network analysis”, Scientometrics, Vol. 98, No. 1, 2014, pp. 683-702, doi: <https://doi.org/10.1007/s11192-013-1081-x>.