

특허 및 논문 게재 분석을 통한 연료전지용 전해질막의 연구동향

우 창 화[†]

경상대학교 산학협력단

(2016년 10월 31일 접수, 2016년 11월 22일 수정, 2016년 11월 22일 채택)

Current Patents and Papers Research Trend of Fuel Cell Membrane

Chang Hwa Woo[†]

Director of Planning Center, Gyeongsang National University Academy and Industry Collaboration, Jinju 52828, Korea

(Received October 31, 2016, Revised November 22, 2016, Accepted November 22, 2016)

요 약: 연료전지는 친환경적 에너지 발생원으로 미래의 에너지 부족 문제와 공해 문제를 한꺼번에 해결하기 위한 방법으로 최근 그 연구가 활발히 진행되고 있다. 연료전지는 별도의 발전 장치를 필요로 하지 않고, 수소와 산소의 반응에 의해 전기를 직접 생산하기 때문에 발전 효율이 높다. 연료전지 시스템에서의 핵심 기술은 고분자 분리막을 제조하는 것으로써 상용화된 나피온 전해질막은 제조 단가가 높고 고온에서 성능이 급감한다는 단점이 있다. 따라서 많은 학자들이 나피온 전해질 분리막을 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 총설에서는 연료전지용 전해질 분리막의 특허 및 논문의 기술 경쟁력 평가를 통하여 국가별, 기관별, 기업별 발표 빈도수를 정리하였으며, 고분자 전해질 연료전지, 직접 메탄올 연료전지, 그리고 알칼리 연료전지에 대한 평가를 진행하였다.

Abstract: The fuel cell technology as a green energy source has been actively studied to solve energy shortages and pollution problems. The generating efficiency of fuel cell is high because the electricity is directly produced by using hydrogen and oxygen and the additional power generator is not needed. The key technology is the manufacturing process of polymer electrolyte membranes for polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) system. The Nafion, perfluoro-based polymeric membrane is mainly used as a polymer electrolyte membrane. However, the Nafion is expensive and rapidly decreases the performance of Nafion at high temperature. So, many researchers are lively studying new alternative electrolyte membranes. In this review, through the technology competitiveness evaluation of patents and papers, the frequencies of presentation are filed by country, institution and company. In addition, polymer electrolyte membrane fuel cell, direct methanol fuel cell and alkaline fuel cell are also filed.

Keywords: fuel cell, membrane electrode assembly, polymer electrolyte membrane fuel cell, direct methanol fuel cell, alkaline fuel cell, patents

1. 서 론

연료전지는 전기, 전자, 통신뿐만 아니라 가전, 항공 우주 산업, 자동차 산업, 로봇 산업 등 고부가가치 산업에도 영역을 넓히고 있다(Fig. 1)[1]. 최근 휴대용 소형 장치에 대한 소비자의 수요가 크게 증가하고 있으며 그에 따른 긴 수명과 높은 에너지 밀도를 가진 에너지 공급장치를 원하고 있다.

연료전지의 구동방식은 화학에너지를 전기에너지로 변환하는 시스템으로써, 기존의 에너지 변환 방식의 문제점인 환경오염물질 배출, 에너지 생산 및 이송의 어려움, 제한된 사용분야 등 여러 단점들을 보완하는 시스템이다[1-3]. 급속한 산업 발달로 인한 에너지 부족현상이 점점 심화되고 있으며, 환경 또한 심각한 문제에 직면하고 있다[4]. 세계는 지금 새로운 대체 에너지를 찾기 위한 연구가 활발히 진행 중이며, 특히 연료전지

[†]Corresponding author(e-mail: woo@gnu.ac.kr, <http://orcid.org/0000-0002-1829-441X>)

Table 1. Overview of Fuel Cells

Type of fuel cell	Operating Temperature (°C)	Power range (kW)	Cell Efficiency (%)	Mobile ion
PEMFC	50~80	1-100	35-40	Hydrogen
DMFC	50~80	1-100	20-30	Methanol
AFC	60~90	1-100	45-70	Hydrogen
PAFC	160~220	10-1,000	50	Hydrogen
MCFC	600~700	0.1-10 MkW	55	Methane
SOFC	800~1,000	0.01-10 MkW	55-60	Hydro carbon

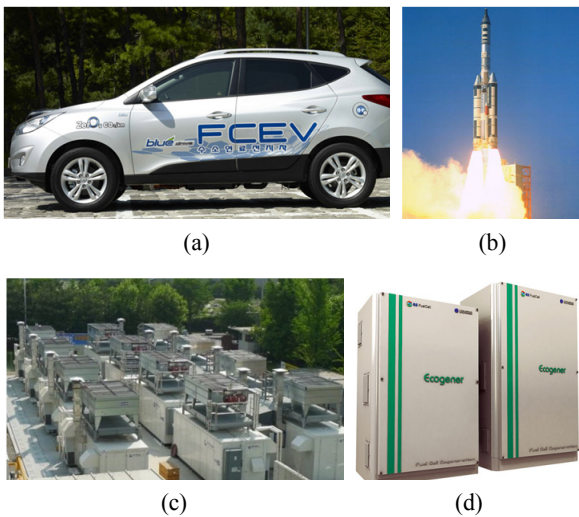


Fig. 1. Various applications of fuel cells. (a) fuel cell car (Hyundai automobile) (b) spaceship fuel cell (GS fuel cell) (c) industrial fuel cell plant (GS Power) (d) a home fuel cell (GS Caltex).

는 이러한 에너지 부족현상을 해결해주는 동시에 오염물질 배출이 없는 친환경적인 에너지원으로 그 관심이 점차 높아지고 있다[5,6].

연료전지는 전해질의 종류에 따라 운전온도가 결정되며, 일반적으로 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC), 알칼리 연료전지(alkaline fuel cell, AFC), 직접 메탄올 연료전지(direct methanol fuel cell, DMFC), 인산형 연료전지(phosphoric acid fuel cell, PAFC), 용융탄산염 연료전지(Molton Carbonate fuel cell, MCFC), 고체산화물 연료전지(Solid oxide fuel cell, SOFC)로 나뉘게 된다. Table 1에 연료전지의 분류에 대해 간략히 나타내었다[7].

수소를 연료로 사용하는 고분자 전해질 연료전지는 수소이온 교환 특성을 갖는 고분자 분리막을 전해질로 사용하며, 전류밀도가 크고 에너지 변환 효율이 높기

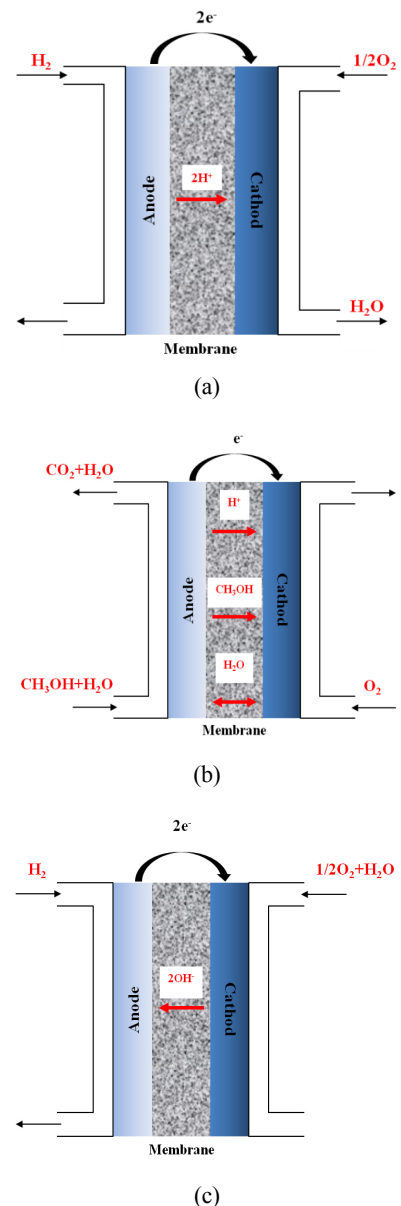


Fig. 2. Schematic diagrams of fuel cells. (a) PEMFC (b) DMFC (c) AFC.

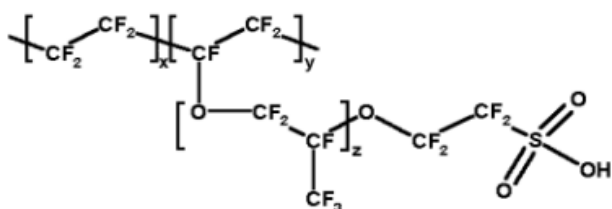
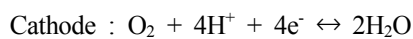
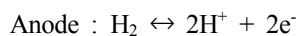


Fig. 3. Chemical structure of Nafion®.

때문에 소형화 장치뿐만 아니라 자동차나 발전소와 같이 규모가 큰 산업에도 적용이 되고 있다[8,9]. 고분자 전해질 연료전지의 기본구조는 Fig. 2 (a)에 나타난 바와 같이 고분자 전해질막을 중심으로 양쪽에 다공질의 연료극(anode)과 공기극(cathode)이 부착되어 있는 형태이며, 연료극에서는 연료인 수소의 전기적 산화가, 공기극에서는 산화제인 산소의 전기화학적 환원이 일어나 전기에너지가 발생된다. 이때 각 전극에서의 반응식은 다음과 같다[10-12].



현재까지 상업화된 고분자 전해질막은 Dupon사의 나피온(Nafion®)이 가장 많은 분야의 연료전지에 적용되고 있으며, 나피온은 소수성의 과불소계 주쇄와 친수성의 술폰산(SO₃H) 그룹을 동시에 가지고 있기 때문에 이온전도성과 열적 안정성이 우수하여 연료전지에서 우수한 성능을 나타내고 있다(Fig. 3)[13]. 하지만 과불소계 고분자의 낮은 가공성으로 인하여 제조 단가가 높게 형성되어 있으며, 수분과 연료의 투과도가 높기 때문에 연료가 공기극에서부터 나피온막을 통하여 연료극으로 이동하게 되어 양 극의 전위차가 감소하게 되고 따라서 연료전지의 전압이 감소하게 된다는 단점이 있다[14-16]. 또한 90°C 이상의 온도조건에서는 탈수현상으로 인하여 수소이온 전도도가 급감하게 되며 안정성 또한 크게 떨어지게 된다.

이에 따라 고가의 나피온 전해질막을 대체할 수 있는 고분자 전해질막을 개발하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 한 예로 Gore사에서 개발한 Gore-select® 전해질 막(Fig. 4)의 경우 porous한 PTFE 내에 이온전도성

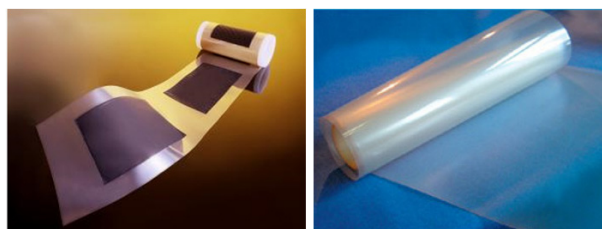
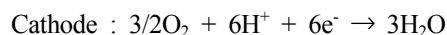


Fig. 4. Pictures of commercialized polymer electrolyte membranes. (a) Gore-select® (b) Nafion®.

이오노머를 함침시킨 형태로, PTFE의 우수한 기계적 물성을 가지며 나피온보다 10배 이상의 이온전도도를 나타내고 있다[17-23]. 또한 과불소계 고분자 전해질막이 아닌 폴리술폰(polysulfone, PSf)계, 폴리이서술폰(polyethersulfone, PES)계, 폴리이서케톤(polyetherketone, PEK)계, 폴리이서이서케톤(polyetheretherketone, PEEK)계, 폴리이미드(polyimide, PI)계, 폴리벤지이미다졸(polybenzimidazole, PBI)계 등 비불소계의 고분자에 술폰산기를 도입하는 형태의 전해질막이 새로이 개발되고 있다[24-34].

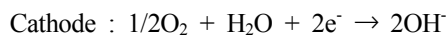
직접 메탄올 연료전지는 Fig. 2 (b)에 나타난 바와 같이 메탄올을 anode에 직접 공급하는 방식으로 구동된다. 리튬이온 전지보다 약 10배 이상 높은 전류밀도를 나타내며, 소형화된 장치에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[35,36]. 직접 메탄올에서 발생하는 전기에너지의 반응식은 다음과 같다.



수소를 연료로 사용하는 다른 연료전지의 구동방식은 수소가스의 개질을 위한 개질기가 별도로 필요하지만, 직접 메탄올 연료전지는 이러한 장치가 필요 없으며, 부산물이 이산화탄소와 물 이외에는 발생되지 않아 청정원료로 사용할 수 있는 장점이 있다[37]. 하지만, 고분자 전해질 연료전지에 비해 직접 메탄올 연료전지의 주된 문제점은 막-전극 접합체(membrane-electrode assembly, MEA)에 사용되는 나피온이 직접 메탄올 연료전지에는 적합하지 않다는 것이다. 연료인 메탄올이 양극에서 음극으로 전해질막을 투과하여 음극과 반응

을 하는 메탄올 크로스오버(methanol crossover) 현상이 발생한다. 이러한 현상은 음극의 전위가 감소하게 되며 연료전지의 성능을 떨어뜨리는 주요 원인으로 작용한다[38]. 따라서 직접 메탄올 연료전지의 연구방향은 메탄올 크로스오버 현상을 줄일 수 있는 고분자 전해질막으로 진행되고 있는 추세이며 많은 연구자들이 활발하게 연구를 진행 중이다[39].

알칼리 연료전지(Fig. 2 (c))는 수소와 산소를 연료로 반응시키는데 있어서 다른 연료전지에 비해서 산소의 높은 활성도를 보이고, 넓은 범위의 전기촉매를 사용할 수 있으며, 다양한 분야로의 개발 가능성이 높다. 알칼리 연료전지는 고분자 전해질막을 음이온화하여 고분자 전해질 연료전지나 직접 메탄올 연료전지의 촉매인 고가의 백금 촉매 대신 저가의 니켈이나 망간을 사용하여 연료전지 시스템의 가격을 낮춘 형태이다[40]. 전지 설계에 있어서, 전해질은 전지 내부에서 발생하는 열을 제거시키고, 증발에 의해서 수분을 제거시키기 위하여 순환된다. 수산화칼륨은 알칼리 수산화물에 의해서 높은 전도성을 가지기 때문에 좋은 전해질이 될 수 있다[41]. 다음 식은 알칼리 연료전지에서 발생하는 전기에 너지에 대한 반응식을 나타내었다.



알칼리 연료전지는 우주 산업용으로 개발되어 왔으며, 최근 현장 응용으로 개발되기 시작했다. 알칼리 연료전지의 가격상 경쟁력은 전극으로부터 나오는데, 알칼리 연료전지의 전극은 희귀금속을 사용하지 않고, 비교적 저렴한 금속을 사용할 수 있으며, 다공성 전극을 사용하지 않아도 된다는 것이다. Raney 니켈 분말을 음극에서 사용하고, 양극에서 은기본 분말 촉매를 사용하여 가격을 낮출 수 있다. 촉매의 근본적인 특성은 높은 전기 전도도와 기계적, 화학적, 전기화학적 안정성이다. 알칼리 연료전지의 전해질은 주로 냉각을 위하여 순환되며, 고분자 전해질 연료전지처럼 전해질은 고정된 담체층에 담지된다. 보다 저렴한 수산화나트륨의 사용이 고려되고 있으나, 수산화칼륨의 사용에 비하여 성능과 수명에 있어서 훨씬 낮은 특성을 가져 가격상의 이익이

낮다[42,43]. 알칼리 연료전지 개발의 초점은 크기를 줄이고, 무게와 가격을 낮추는데 있다. 에폭시수지, 폴리술폰과 ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) 등이 연구되고 있는 추세이다[44].

본 총설에서는 연료전지 분야 중 가장 활발히 연구되고 있는 분야인 고분자 전해질 연료전지와 직접 메탄올 연료전지, 그리고 알칼리 연료전지에 대한 국내외 특허 정보분석 및 논문 게재를 통하여 기술 흐름과 최근 기술 동향, 출원 국가 및 기술 분야별 등으로 세분화하여 분석하였으며, 정리된 그래프를 통하여 연료전지의 기술 개발 동향을 파악하고자 하였다.

2. 연료전지용 전해질 분리막에 대한 특허 및 논문 게재 분석

본 장에서는 연료전지 전해질 분리막에 대한 전체 특허 및 논문 게재에 대해 나타내었으며, 이에 대하여 최근 10년(2006~2015년)간 고분자 전해질 연료전지, 직접 메탄올 연료전지, 알칼리 연료전지 분야의 동향을 조사하였다. 특허의 분석을 위한 사용 데이터 베이스는 Wisdomain 특허 시스템을 이용하였으며, Wisdomain이란 특허검색 및 분석 솔루션으로 다양한 편의 기능 및 부가가치 데이터 베이스를 검색하여, 세계 주요국가 특허 검색을 빠르고 쉽게 검색할 수 있도록 만든 시스템이다. 특허 자료의 검색은 key word 검색과 boolean 검색 방법을 사용하였으며 이를 이용하여 소분류별, 국가별 특허 정보를 수집하고 유효특허를 대상으로 특허활동도, 특허집중도, 특허시장력, 특허영향력의 4개 항목을 분석/평가하였다. 이러한 용어는 다음과 같이 정의할 수 있다. 특허활동도(Patent Activity Index, PAI)란 특허청이 발행한 공개/등록 특허 공보수에 근거하여 절대적 특허출원 수로 정의한다. 특허집중도(Patent Intensity Index, PII)란 해당 국가가 다른 국가와 비교하여 상대적으로 어떠한 기술 분야에 기술혁신 활동을 집중하고 있는가에 대한 정보를 제공하는 것을 말한다. 특허시장력(Patent Market-power Index, PMI)이란 해당 국가에서 상업적인 이익 또는 기술경쟁 관계에 있을 때에만 해외 특허를 출원하므로 Family Patent 국가의 수가 많을 때에는 특허를 통한 시장성이 크다고 판단되어 이를 특허시장력의 지표로 사용하는 것을 말한다. 마지막으로 특허영향력(Patent Citation Index, PCI)이란 본

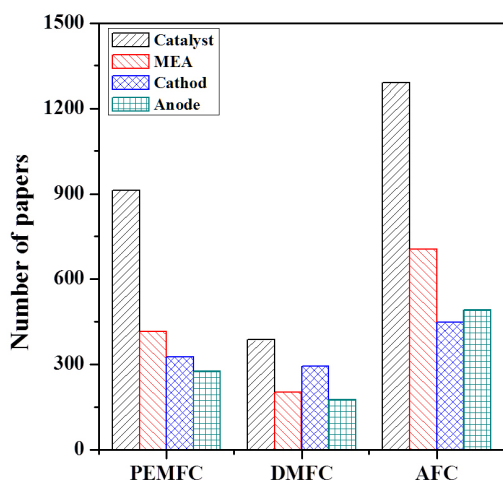


Fig. 5. Number of papers according to fuel cell configurations.

특허가 향후에 발생하는 특허에 얼마나 응용되고 있는가를 파악하는 지표로 특허의 영향력을 측정, 피인용 특허 정보가 있는 미국 특허를 대상으로 한다[45-48].

특허출원건수는 주요 개발 국가인 한국, 미국, 일본, 중국, 유럽(7개국) 및 전 세계 동향을 조사하였으며 각 나라별 주요 학교 또는 기업 10곳에 대한 자료를 나타내었다. 특허출원 건수로는 한국 3,822건, 미국 9,776건, 일본 7,149건, 중국 1,770건, 유럽(7개국) 8,046건이며 전 세계적으로는 14,811건(상위 10개 기업)으로 나타났다. 각 나라별 주요 기관으로는 한국 Samsung Electronics, ETRI, LG Electronic 순으로 출원건수가 조사되었으며, 미국 IBM, Microsoft, Qualcomm Inc., 일본 Panasonic Electronic works Corp., Honda Motor Corp., NEC Corp., 중국 Huawei Technologies Corp., ZTE Corp., China Iwncomm Corp., 유럽(7개국) Robert BOSCH Corp., Koninklijke Philips Electronics Corp., Siemens AG 순으로 조사되었다.

논문 게재는 고분자 전해질 연료전지 1,930건, 직접 메탄올 연료전지 1,061건, 알칼리 연료전지 2,935건으로 조사되었으며, Fig. 5는 연료전지의 구성별 논문 게재 건수를 나타내었다. 논문 기술 경쟁력 분석을 위해 사용된 데이터베이스는 Scopus 논문 검색 시스템이며, 이를 이용하여 소분류별, 국가별 논문 정보를 수집하고, 유효논문을 대상으로 논문활동도, 논문 영향력, 논문집중도 등의 3개 항목을 분석/평가하였다. 이러한 용어는 다음과 같이 정의할 수 있다. 논문활동도(Bibliometric Activity Index, BAI)란 절대적 논문 게재 건수로 해당

기술에 대한 해당국가를 전체 국가의 수로 나눈 값으로 나타낸다. 논문영향력(Bibliometric Citation Index, BCI)이란 해당 국가 논문의 질적 수준을 다른 국가와 상대적으로 비교할 수 있는 정보를 제공하는 지수로 정의한다. 마지막으로 논문집중도(Bibliometric Intensity Index, BII)란 상대적 논문 게재 건수로 해당 국가가 다른 국가와 비교하여 상대적으로 어떠한 기술 분야에 기술혁신 활동을 집중하고 있는가에 대한 정보를 제공하는 지수로 정의할 수 있다. 정보 분석에 참여한 주요 국가로는 중국, 미국, 한국, 일본, 프랑스, 독일, 영국, 대만, 이탈리아, 네덜란드이며, 고분자 전해질 연료전지, 직접 메탄올 연료전지, 알칼리 연료전지로 나누어 특허 출원 건수 및 논문 게재 건수에 대해 순차적으로 나타내었다.

2.1. 연료전지용 전해질 분리막의 특허 동향

연료전지용 분리막의 특허기술경쟁력은 한국(KR)이 가장 높고, 영국(GB, 2위), 네덜란드(NL, 3위), 미국(US, 4위), 일본(JP, 5위), 중국(CN, 6위), 독일(DE, 7위), 프랑스(FR, 8위), 이스라엘(IL, 9위), 스웨덴(SE, 10위), 이탈리아(IT, 11위), 대만(TW, 12위), 인도(IN, 13위), 남아프리카공화국(ZA, 14위)으로 조사되었으며, 한국은 특허활동도 4위, 특허집중도 1위, 특허시장력 12위, 특허영향력 5위로 전체기술수준은 1위로 평가되었다. 연료전지용 분리막 분야의 특허 출원 활동은 중국에 소재하는 기업들이 가장 활발한 것으로 평가되었으며 최근 10년간 특허 출원 상위 기업은 Dalian Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Science (중국, 83건), Sunrise Power Corp. (중국, 57건), Hyundai Motor Corp. (한국, 35건), Shanghai Jiao Tong University (중국, 27건), Wuhan University of Technology (중국, 24건)순으로 조사되었다. 또한 최근 10년간 특허 출원 활동이 급격하게 증가된 기업은 Johnson Matthey Fuel Cells Corp. (영국), South China University of Technology (중국)으로 나타났다. Table 2는 각 나라별 특허 활동도, 집중도, 시장력, 영향력에 대해 수치화하여 정리하였으며, Table 3과 Fig. 6은 각각 주요 기업의 특허 출원 순위 비교표 및 주요 국가 기업의 특허출원 건수를 나타내었다.

2.2. 연료전지용 전해질 분리막에 대한 논문 게재 분석

연료전지용 분리막의 논문기술경쟁력은 중국이 가장 높고, 미국(2위), 한국(3위), 일본(4위), 프랑스(5위), 독

Table 2. An Analysis Table about PAI, PII, PMI and PCI by Each Country

Index of evaluation	CN	DE	IL	IN	FR	GB	IT	JP	KR	NL	SE	TW	US	ZA
PAI	1.50	0.52	0.22	0.16	0.39	0.42	0.28	0.70	0.68	0.17	0.12	0.25	1.00	0.12
PII	2.27	2.27	2.27	0.91	2.13	3.35	0.92	2.34	9.22	3.21	1.07	0.57	2.27	0.27
PMI	0.52	1.14	1.18	1.19	1.21	1.31	1.20	1.13	0.84	1.31	1.51	0.67	1.00	1.13
PCI	0.44	0.67	0.31	0.00	0.46	1.32	0.00	0.64	0.69	1.19	0.00	0.98	1.00	0.00
Relative Level	44.9%	44.8%	38.7%	23.8%	41.0%	61.1%	25.4%	46.8%	100.0%	56.1%	28.8%	25.3%	51.3%	17.4%

ISO code : CN-China, DE-Germany, IL-Israel, IN-India, FR-France, GB-United Kingdom, IT-Italy, JP-Japan, KR-Korea, NL-Netherlands, SE-Sweden, TW-Taiwan, US-United States of America, ZA-Republic of South Africa.

Table 3. Changes of Major Company in Field of Fuel Cell (Global Rankings Covered in the 2006-2015 Patent Pending Reports)

2006-2010				2011-2015			
Company	Nation	Number	Ranking	Company	Nation	Number	Ranking
Sunrise Power Corp.	CN	40	1	Dalian Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Sciences	CN	47	▲ 1
Dalian Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Sciences	CN	36	2	Sunrise Power Corp.	CN	17	▼ 1
Hyundai Motor Corp.	KR	19	3	Hyundai Motor Corp.	KR	16	=
Acal Energy Corp.	US	17	4	Shanghai Jiao Tong University	CN	13	▲ 1
Shanghai Jiao Tong University	CN	14	5	Johnson Matthey Fuel cells Corp.	US	13	NEW
GM Global Technology Operations LLC	US	14	6	Wuhan University of Technology	CN	13	▲ 2
Samsung SDI Corp.	KR	13	7	South China University of Technology	CN	12	NEW
Wuhan University of Technology	CN	11	8	Mann+Hummel GMBH	DE	10	NEW
Solvay Solexis SPA	IT	11	9	Tsinghua University	CN	10	NEW
Jiangsu Xinyuan Power Corp.	CN	10	10	Nissan Motor Corp.	JP	10	NEW

ISO code : CN-China, KR-Korea, US-United States of America, IT-Italy, DE-Germany, JP-Japan.

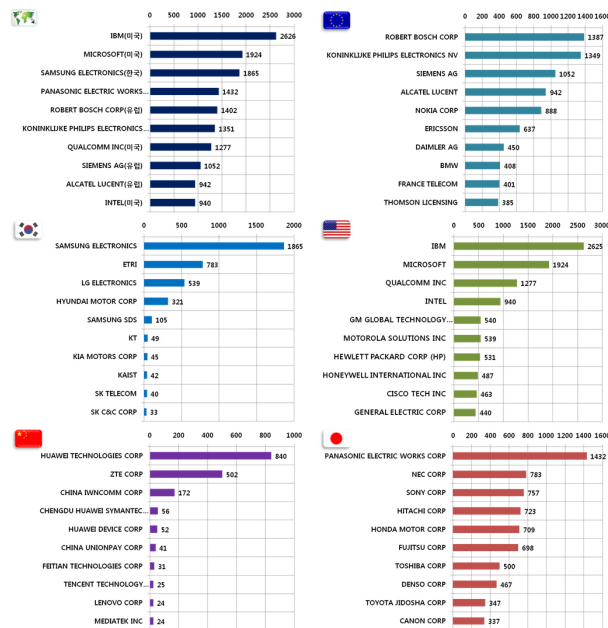


Fig. 6. Changes in the number of patent applications of the world.

일(6위), 영국(7위), 대만(8위), 이탈리아(9위), 네덜란드(10위) 등으로 조사되었으며, 이 중 한국은 논문 게재 활동 3위, 논문 영향력 3위, 논문집중도 2위로 전체 기술수준은 3위로 평가되었다(Table 4). 연료전지용 멤브레인 분야의 논문 게재활동은 중국에 소재하는 기관들이 가장 활발한 것으로 조사되었으며 최근 5년(2011~2015년)간 논문 게재 상위 기관은 Wuhan University (중국, 50건), Tongji University (중국, 39건), Seoul National University (한국, 33건), University of Toronto (캐나다, 32건), South China University of Technology (중국, 32건)순으로 나타났다. 또한 최근 5년간 논문 게재 활동이 급격하게 증가된 기관은 Tongji University (중국), University of Toronto (캐나다), South China University of Technology (중국), Konkuk University (한국), Hawaii National Energy Institute (미국)로 나타났다. Table 5은 최근 10년간 주요 학교 및 기업의 논문 게재 건수를 나타내었다.

Table 4. An Analysis Table about BAI, BII and BCI by Each Country

Index of evaluation	CN	DE	FI	FR	GB	IT	JP	KR	NL	SE	TW	US
BAI	0.23	0.10	0.04	0.11	0.08	0.07	0.13	0.16	0.04	0.04	0.09	0.20
BII	0.39	0.18	0.07	0.18	0.19	0.14	0.20	0.25	0.10	0.07	0.16	0.42
BCI	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
Relative Level	80.9%	69.7%	49.9%	74.0%	55.4%	69.3%	67.5%	100.0%	31.3%	45.6%	72.0%	95.9%

ISO code : CN-China, DE-Germany, FI-Finland, FR-France, GB-United Kingdom, IT-Italy, JP-Japan, KR-Korea, NL-Netherlands, SE-Sweden, TW-Taiwan, US-United States of America.

Table 5. Changes of Major University and Institution in Field of Fuel Cell (Global Rankings Covered in the 2006-2015 Papers Publishing Reports)

2006-2010				2011-2015			
University & Institution	Nation	Number	Ranking	University & Institution	Nation	Number	Ranking
Dalian Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Sciences	CN	41	1	Wuhan University	CN	50	▲ 2
University of South Carolina	US	31	2	Tongji University	CN	39	NEW
Wuhan University	CN	29	3	Seoul National University	KR	33	▲ 1
Seoul National University	KR	29	4	University of Toronto	CA	32	NEW
Korea Institute of Science and Technology (KIST)	KR	24	5	South China University of Technology	CN	32	NEW
Tokyo Institute of Technology	JP	23	6	Dalian Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Sciences	CN	30	▼ 5
University of Waterloo	CA	18	7	Konkuk University	KR	29	NEW
University de SÃO Paulo	BR	15	8	Hawaii National Energy Institute	US	26	NEW
University of Connecticut	US	15	9	Tokyo Institute of Technology	JP	24	▼ 3
University of Surrey	GB	15	10	Tianjin University	CN	23	NEW

ISO code : CN-China, US-United States of America, KR-Korea, JP-Japan, CA-Canada, BR-Brazil DE-Germany, GB-United Kingdom.

3. 고분자 전해질 연료전지의 특허 및 논문 게재 분석

3.1. 고분자 전해질 연료전지의 특허 동향

고분자 전해질 연료전지용 분리막의 특허기술경쟁력은 한국이 가장 높고, 네덜란드(2위), 중국(3위), 영국(4위), 미국(5위), 일본(6위), 프랑스(7위), 독일(8위), 스웨덴(9위), 인도(10위) 순으로 조사되었으며, 한국은 특허활동도 3위, 특허집중도 1위, 특허시장력 11위, 특허영향력 6위로 전체기술수준 1위로 평가되었다. 최근 10년간 특허 출원 활동이 급격하게 증가된 기업은 Dalian Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Science (중국, 75건), Sunrise Power Corp. (중국, 53건), Wuhan University of Technology (중국, 22건), Shanghai Jiao

Tong University (중국, 22건), Hyundai Motor Corp. (한국, 13건)순으로 조사되었다. 최근 10년간 특허 출원 활동이 급격하게 증가된 기업은 Johnson Matthey Fuel Cells Ltd. (영국), Southwest Jiaotong University (중국)으로 나타났다. Table 6은 고분자 전해질 연료전지에 대한 주요 기업의 특허 출원 순위 비교표를 나타내었다.

3.2. 고분자 전해질 연료전지의 논문 게재 분석

고분자전해질 연료전지용 분리막의 논문기술경쟁력은 한국이 가장 높고, 미국(2위), 중국(3위), 프랑스(4위), 대만(5위), 독일(6위), 이탈리아(7위), 일본(8위), 영국(9위), 핀란드(10위), 스웨덴(11위), 네덜란드(12위) 순으로 나타났다. 한국은 논문 게재 활동 2위, 논문 영향력 2위, 논문집중도 1위로 전체 기술 수준은 1위로 평가되었다.

Table 6. Changes of Major Company in Field of PEMFC (Global Rankings Covered in the 2006-2015 Patent Pending Reports)

2006-2010				Ranking	2011-2015			
Company	Nation	Number	Company		Nation	Number		
Sunrise Power Corp.	CN	40	1	Dalian Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Sciences	CN	44	▲ 1	
Dalian Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Sciences	CN	31	2	Sunrise Power Corp.	CN	13	▼ 1	
Shanghai Jiao Tong University	CN	12	3	Wuhan University of Technology	CN	12	▲ 2	
Hyundai Motor Corp.	KR	11	4	Johnson Matthey Fuel cells Ltd..	GB	11	NEW	
Wuhan University of Technology	CN	10	5	Shanghai Jiao Tong University	CN	10	▼ 2	
Jiangsu Xinyuan Power Corp.	CN	10	6	Southwest Jiaotong University	CN	9	NEW	
Relion Inc.	CN	10	7	South China University of Technology	CN	8	NEW	
Samsung SDI Corp.	KR	8	8	Harbin Institute of Technology	CN	8	▲ 2	
Tsinghua University	CN	6	9	Tongji University	CN	7	NEW	
Harbin Institute of Technology	CN	5	10	Commissariat a L'Energie Atomiqueet Aux Energies Alternatives	FR	7	NEW	

ISO code : CN-China, KR-Korea, DE-Germany, GB-United Kingdom, FR-France.

Table 7. Changes of Major University and Institution in Field of PEMFC (Global Rankings Covered in the 2006-2015 Papers Publishing Reports)

2006-2010				Ranking	2011-2015			
University & Institution	Nation	Number	University & Institution		Nation	Number		
Dalian Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Sciences	CN	32	1	Tongji University	CN	36	▲ 7	
University of South Carolina	US	29	2	Seoul National University	KR	29	▲ 1	
Seoul National University	KR	28	3	University of Toronto	CA	29	NEW	
Korea Institute of Science and Technology (KIST)	KR	24	4	Wuhan University	CN	27	▲ 1	
Wuhan University	CN	19	5	Hawaii National Energy Institute	US	25	NEW	
Tokyo Institute of Technology	JP	18	6	Konkuk University	KR	22	NEW	
University of Waterloo	CA	14	7	Yonsei University	KR	17	NEW	
Tongji University	CN	12	8	University of South Carolina	US	16	▼ 6	
Tianjin University	CN	11	9	Shanghai Jiao Tong University	CN	16	NEW	
Institute for Integrated Energy System	CA	10	10	Tokyo Institute of Technology	JP	16	▼ 4	

ISO code : CN-China, US-United States of America, KR-Korea, JP-Japan,CA-Canada.

고분자전해질 연료전지용 분리막 분야의 논문 게재 활동은 중국에 소재하는 기관들이 가장 활발한 것으로 평가되었으며, 최근 5년간 논문 게재 상위 기관은 Tongji University (중국, 36건), Seoul National University (한국, 29건), University of Toronto (캐나다, 28건), Hawaii National Energy Institute (미국, 25건), Wuhan

University of Technology (중국, 24건) 순으로 조사되었다. 또한 논문 게재 활동이 급격하게 증가된 기관은 University of Toronto (캐나다), Hawaii National Energy Institute (미국), Konkuk University (한국), Yonsei University (한국), Shanghai Jiao Tong University (중국)로 나타났다(Table 7).

Table 8. Changes of Major Company in Field of DMFC (Global Rankings Covered in the 2006-2015 Patent Pending Reports)

2006-2010				Ranking	2011-2015			
Company	Nation	Number	Company		Nation	Number		
Panasonic Corp.	JP	3	1	Nissan Motor Corp.	JP	44	NEW	
myFC AB	CN	2	2	Denso Corp.	JP	13	NEW	
Morita, Junji	JP	2	3	Toyota Jidosha Corp.	JP	12	▲ 2	
Sanyo Electric Corp.	JP	1	4	Olympus Corp.	JP	11	▲ 2	
Toyota Jidosha Corp.	JP	1	5					
Olympus Corp.	JP	1	6					

ISO code : JP-Japan, CN-China.

Table 9. Changes of Major University and Institution in Field of DMFC (Global Rankings Covered in the 2006-2015 Papers Publishing Reports)

2006-2010				Ranking	2011-2015			
University & Institution	Nation	Number	University & Institution		Nation	Number		
Institute of Developmental Biology	RU	5	1	Gwangju Institute of Science and Technology	KR	1	NEW	
The University of Tokyo	JP	2	2	University of Veterinary Medicine	DE	1	NEW	
McGill University	CA	2	3	The University of Tokyo	JP	1	▼ 1	
Drexel University	US	1	4	McGill University	CA	1	▼ 1	
Cinvestav Unidad Saltillo	MX	1	5	University of Warwick	GB	1	NEW	
Semmelweis University	HU	1	6	Semmelweis University	HU	1	=	
Harbin Institute of Technology	CN	1	7	Fuel Cell Energy Inc.	US	1	NEW	
University of Colorado	US	1	8	University of Colorado	US	1	=	
Hong Kong University of Science and Technology	HK	1	9	Princeton University	US	1	NEW	
Pfizer Research Technology Center	UY	1	10	University of North Carolina at Chapel Hill	US	1	NEW	

ISO code : RU-Russia, JP-Japan, CA-Canada, US-United States of America, MX-Mexico, HU-Hungary, CN-China, HK-Hong Kong, UY-Uruguay, KR-Korea, DE-Germany, GB-United Kingdom.

4. 직접 메탄올 연료전지의 특허 및 논문 게재 분석

4.1. 직접 메탄올 연료전지의 특허 동향

직접 메탄올 연료전지용 분리막의 특허기술경쟁력은 일본이 가장 높고, 스웨덴(2위) 순서로 나타났다. 한국은 특허활동도 3위, 특허집중도 1위, 특허시장력 11위, 특허영향력 6위로 전체기술수준은 1위로 평가되었다. 직접 메탄올 연료전지용 분리막 분야의 특허 출원 활동은 일본에 소재하는 기업들이 가장 활발한 것으로 평가되었으며, 최근 10년간 특허 출원 상위 기업은 Nissan Motor Corp. (일본, 10건), Panasonic Corp. (일본, 3건),

myFC AB (스웨덴, 2건), Morita Junji (일본, 2건), Toyota Jidosha Corp. (일본, 2건)순으로 조사되었다. 특허 출원 활동이 급격하게 증가된 기업은 Nissan Motor Corp. (일본), Denso Corp. (일본)으로 조사되었다(Table 8).

4.2. 직접 메탄올 연료전지의 논문 게재 분석

직접 메탄올 연료전지용 분리막의 논문기술경쟁력은 미국이 가장 높고, 프랑스(2위), 일본(3위), 영국(4위), 네덜란드(5위), 한국(6위), 중국(7위), 독일(8위) 순서로 나타났으며, 한국은 논문 게재 활동 5위, 논문 영향력 4위, 논문집중도 6위로 전체 기술수준은 6위로 조사되었다. 직접 메탄올 연료전지 분리막 분야의 논문 게재활

Table 10. Changes of Major Company in Field of AFC (Global Rankings Covered in the 2006-2015 Patent Pending Reports)

2006 - 2010				2011 - 2015			
Company	Nation	Number	Ranking	Company	Nation	Number	
Acal Energy Corp.	US	17	1	Acal Energy Corp.	US	7	=
Asahi Kasei Ematerials Corp.	JP	8	2	Cellera Inc.	US	6	NEW
LG Chem Corp.	KR	7	3	Momentive Performance Materials Inc.	US	6	NEW
Solvay Solexis SPA	IT	7	4	Tianjin Normal University	CN	5	NEW
Toyota Jidosha Corp.	JP	6	5	Asahi Kasei Ematerials Corp.	JP	4	▼ 3
Kuraray Corp.	JP	5	6	Donghua University	CN	4	NEW
Shandong Dongyue Shenzhou New Material Corp.	CN	5	7	Tianjin Polytechnic University	CN	3	NEW
Shandong Huaxiz Shenzhou NewMaterial Corp.	CN	5	8	Elbit System Land and C4I Corp.	IL	3	NEW
Dalian Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Sciences	CN	4	9	California Institute of Technology	US	3	NEW
Toyota Motor Corp.	JP	4	10	Dalian Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Sciences	CN	3	▼ 1

ISO code : US-United States of America, JP-Japan, KR-Korea, IT-Italy, CN-China, IL-Israel.

동은 러시아에 소재하는 기관들이 가장 활발한 것으로 평가되었으며 최근 5년간 논문 게재 상위 기관은 Institute of Developmental Biology (러시아, 3건), University of Veterinary Medicine (독일, 2건) 순으로 조사되었다. 또한 논문 게재 활동이 증가된 기관은 Gwangju Institute of Science and Technology (한국), University of Veterinary Medicine (독일), University of Warwick (영국), Princeton University (미국), University of North Carolina at Chapel Hill (미국)로 나타났다(Table 9).

5. 알칼리 연료전지의 특허 및 논문 게재 분석

5.1. 알칼리 연료전지의 특허 동향

알칼리(alkaline) 연료전지용 분리막의 특허기술경쟁력은 한국이 가장 높고, 영국(2위), 미국(3위), 이스라엘(4위), 일본(5위), 독일(6위), 프랑스(7위), 대만(8위), 중국(9위), 이탈리아(10위) 순으로 나타났으며, 한국은 특허활동도 5위, 특허집중도 1위, 특허시장력 10위, 특허영향력 4위로 전체기술수준은 1위로 평가되었다. 알칼리 연료전지용 분리막 분야의 특허 출원 활동은 미국에 소재하는 기업들이 가장 활발한 것으로 평가되었으며, 최근 10년간 특허 출원 상위 기업은 Acal Energy Ltd.

(미국, 7건), Celler Inc. (미국, 6건), Momentive Performance Materials Inc. (미국, 6건), Tianjin Normal University (중국, 5건), Asahi Kasei Ematerials Corp. (일본, 4건) 순으로 조사되었으며, 특히 특허 출원 활동이 급격하게 증가된 기업은 Celler Inc. (미국), Momentive Performance Materials Inc. (미국)으로 나타났다(Table 10).

5.2. 알칼리 연료전지의 논문 게재 분석

알칼리 연료전지용 분리막의 논문기술경쟁력은 중국이 가장 높고, 미국(2위), 영국(3위), 일본(4위), 네덜란드(5위), 독일(6위), 프랑스(7위), 대만(8위), 한국(9위), 스웨덴(10위)의 순서로 나타났으며, 한국은 논문 게재 활동 4위, 논문 영향력 6위, 논문집중도 12위로 전체기술수준은 9위로 평가되었다. 알칼리 연료전지용 분리막 분야의 논문 게재활동은 중국에 소재하는 기관들이 가장 활발한 것으로 평가되었으며, 최근 5년간 논문 게재 상위 기관은 Dalian Institute of Chemical Physics Academy of Science (중국, 23건), Xiamen University (중국, 20건), Wuhan University (중국, 20건), South China University of Technology (중국, 19건), Hong Kong University of Science and Technology (홍콩, 17건) 순으로 나타났다. 논문 게재 활동이 증가된 기관은

Table 11. Changes of Major University and Institution in Field of AFC (Global Rankings Covered in the 2006-2015 Papers Publishing Reports)

2006-2010				Ranking	2011-2015			
University & Institution	Nation	Number	University & Institution		Nation	Number		
University de SÃO Paulo	BR	14	1	Dalian Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Sciences	CN	23	▲ 1	
University of Surrey	GB	12	2	Xiamen University	CN	20	▲ 5	
Hong Kong University of Science and Technology	HK	10	3	Wuhan University	CN	20	▲ 3	
University of Connecticut	US	9	4	South China University of Technology	CN	19	NEW	
Mingchi University of Technology	CN	9	5	Hong Kong University of Science and Technology	HK	17	▼ 2	
Wuhan University	CN	9	6	University of Connecticut	US	14	▼ 2	
Xiamen University	CN	7	7	Donghua University	CN	14	NEW	
Dalian Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Sciences	CN	7	8	Tianjin University	CN	13	NEW	
University of Warsaw	PL	6	9	University of Science and Technology of China	CN	12	NEW	
Medical University of South Carolina	US	6	10	University de SÃO Paulo	BR	12	▼ 9	

ISO code : BR-Brazil, GB-United Kingdom, HK-Hong Kong, CN-China, PL-Poland, US-United States of America.

South China University of Technology (중국), Donghua University (중국), Tianjin University (중국), University of Science and Technology of China (중국)로 나타났다 (Table 11).

6. 결 론

최근 들어 에너지 고갈 및 환경 오염물질 배출 문제를 함께 해결할 수 있는 방안으로 연료전지가 많이 연구되고 있다. 연료전지의 장점으로는 발전 장치의 규모가 크지 않아도 되기 때문에 소규모로 여러 곳에 설치하여 송전 비용을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 전기 에너지를 생산 후 발생하는 부산물이 물 뿐이기 때문에 오염을 발생시키지 않는다. 이러한 장점들 때문에 연료전지는 휴대용 소형 장치에 독립 전원으로 개발되기 시작하였으며, 최근에는 대체 에너지원으로 사용하기 위한 대형 시스템이 개발되고 있다. 아직 상용화를 방해하는 문제점들이 있지만 세계 여러 나라의 우수한 연구원들이 연료전지의 단점을 극복하기 위해 노력하고 있다.

본 총설은 연료전지 전해질 분리막의 특허 및 논문의 기술 경쟁력 평가를 통하여 각 나라별 연료전지에 대한

연구 진행량을 관찰하고자 하였다. 최근 10년간 가장 급격하게 특허 출원량이 증가한 국가는 중국이며, 그 뒤로 미국, 한국, 일본, 캐나다와 같은 나라들이 비슷한 수준을 나타내었다. 한국은 전체 기술적 수준은 1위로 평가되었으며 특허활동도, 특허집중도 및 특허영향력은 상위권으로 조사되었지만, 특허시장력은 다소 낮은 하위권의 결과를 나타내었다. 특허 출원량이 증가한 기업으로는 영국의 Johnson Matthey Fuel Cells Ltd.와 중국의 South China University of Technology로 조사되었다. 논문 게재량 또한 특허 출원량과 비례하여 중국이 가장 급격한 증가를 보였으며 한국, 미국, 일본 등이 비슷한 수준을 나타내었다. 논문 게재량이 증가한 기관으로는 중국의 Tongji University, 캐나다의 University of Technology, 한국의 Konkuk University, 미국의 Hawaii National Energy Institute로 조사되었다.

3가지 종류의 연료전지에 대한 게재된 총 논문 건수는 5,926건으로 그중 고분자 전해질 연료전지 1,930건, 직접 메탄올 연료전지 1,061건, 알칼리 연료전지 2,935건으로 개발 역사가 오래된 알칼리 연료전지가 가장 많은 논문 게재량을 나타내었다. 연료전지의 개발 분야별 논문 게재 건수는 촉매 관련 2,589건, MEA 관련 1,324

건, 양극 관련 1,069건, 음극 관련 944건으로 조사되었다. 이를 연료전지 종류별로 구분을 하면 고분자 전해질 연료전지 중 촉매관련 912건, MEA 관련 415건, 양극 관련 327건, 음극 관련 276건이며, 직접 메탄올 연료전지 중 촉매 관련 387건, MEA 관련 204건, 양극 관련 294건, 음극 관련 176건으로 나타났다. 마지막으로 알칼리 연료전지 중 촉매 관련 1,290건, MEA 관련 705건, 양극 관련 448건, 음극 관련 492건으로 조사되었다.

이를 통하여 우리나라가 세계 최고 수준의 연료전지 기술력을 확보하고 있으며 기업뿐만 아니라 기관에서도 많은 연구가 진행되고 있다는 것을 알 수 있다. 우리나라의 경우 연료전지 시스템 기술개발, 실증 연구 등을 통하여 초기 산업기반 형성과 일부 부품에 대한 국산화 등 발전 가능성은 확인하였으나, 타 에너지원에 비하여 높은 가격, 수소 기반 사회가 도래하기 전까지 화석연료(LNG 등)를 사용해야 하는 한계, 짧은 내구성과 낮은 상용화 기술, 서플라이 체인 미형성 등이 산업화 지연 요인으로 작용하고 있다. 따라서 이를 해결하기 위한 방안으로는 원천기술확보(고온형 MEA), 타기술 융복합(태양광, 풍력, 태양열, 지열 등), 기술 고도화를 통한 기술내재화 뿐만 아니라 경제성 확보가 가능한 시스템 개발을 하여야 한다. 또한 온실가스 저감, 수도권 계통 안정도에 대한 사회적 요구 증대에 대응할 수 있는 도심형, 산업단지형 등 수요지에 적합한 친 시장형 제품을 개발하여야 할 것이다. 수소공급 기반기술 확보로 수소연료전지 자동차 신산업 선점 및 기후변화 대응 전략으로 활용이 필요하고, 중장기적으로 재생에너지 수소를 활용하는 방안이 마련된다면 연료전지의 응용분야는 점차 높아질 것이다.

감 사

본 연구는 특허 분석 기업 WINTIS Global (오종학 대표)의 자료분석을 통하여 수행되었습니다.

Reference

1. J. M. Bae, I. Honma, M. Murata, T. Yamamoto, M. Rikukawa, and N. Ogata, "Properties of selected sulfonated polymers as proton-conducting electrolytes for polymer electrolyte fuel cells", *Solid State Ionics*, **147**, 189 (2002).
2. V. Ramani, H. R. Kunz, and J. M. Fenton, "Investigation of Nafion/HPA composite membranes for high temperature/low relative humidity PEMFC operation", *J. Membr. Sci.*, **232**, 31 (2004).
3. D. Lu, W. Lu, C. Li, J. Liu, and J. Xu, "Proton conducting composite membranes derived from poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) doped with phosphosilicate gels", *Solid State Ionics*, **177**, 1111 (2006).
4. J. Stephens, "Fuel processing for fuel cell power systems", *Fuel cells Bulletins*, **12**, 6 (1996).
5. D. Y. Kim and J. T. Hwang, "Clean energy technology roadmap", pp. 22-68, KETEP, August (2016).
6. N. S. An, "Energy technology R&D warehouse: fuel cell", KETEP, October (2012).
7. J. Y. Park, J. K. Choi, K. J. Choi, T. S. Hwang, H. J. Kim, and Y. T. Hong, "Effects of mixed casting solvents on morphology and characteristics of sulfonated poly(aryl ether sulfone) membranes for DMFC applications", *Membr. J.*, **18**, 282 (2008).
8. O. Okada and K. Yokoyama, "Development of polymer electrolyte fuel cell cogeneration systems for residential applications", *Fuel Cell*, **1**, 72 (2008).
9. Q. Li, R. He, J. O. Jensen, and N. J. Bjerrum, "Approaches and recent development of polymer electrolyte membrane for fuel cells operating above 100°C", *Chem. Mater.*, **15**, 4896 (2003).
10. D. J. Kim and S. Y. Nam, "Research trend of organic/inorganic composite membrane for polymer electrolyte membrane fuel cell", *Membr. J.*, **22**, 155 (2012).
11. K. Sundmacher and K. Scott, "Direct methanol polymer electrolyte fuel cell: Analysis of charge and mass transfer in the vapour-liquid-solid system", *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 2927 (1999).
12. B. Pivovar, "2011 Alkaline membrane fuel cell workshop final report" (2012).
13. M. S. Shin, G. H. Oh, and J. S. Park, "Preparation and characterizations of ferroxane-nafion composite

- membranes for PEMFC”, *J. Membr. Sci.*, **26**, 135 (2016).
14. S. L. Chena, A. B. Bocarsly, and J. Benziger, “Nafion layered sulfonated polysulfone fuel cell membranes”, *J. Power Sources*, **152**, 27 (2005).
 15. S. L. Chen, L. Krishnan, S. Srinivasan, J. Benziger, and A. B. Bocarsly, “Ion exchange resin/polystyrene sulfonate composite membranes for PEM fuel cells”, *J. Membr. Sci.*, **243**, 327 (2004).
 16. J. Jeong, K. Yoon, J. K. Choi, Y. J. Kim, and Y. T. Hong, “Preparation and characterization of the H₃PO₄-doped sulfonated poly(arylether benzimidazole) membrane for polymer electrolyte membrane Fuel Cell”, *Membr. J.*, **16**, 276 (2006).
 17. M. C. Yoo, B. J. Chang, J. H. Kim, S. B. Lee, and Y. T. Lee, “Sulfonated perfluorocycobutyl biphenylene polymer electrolyte membranes for fuel cells”, *Membr. J.*, **15**, 355 (2005).
 18. K. M. Nouela and P. S. Fedkiwa, “Nafion[®]-based composite polymer electrolyte membranes”, *Electrochim. Acta.*, **43**, 2381 (1998).
 19. J. A. Kerres, “Development of ionomer membranes for fuel cells”, *J. Membr. Sci.*, **185**, 3 (2001).
 20. O. Savadogo, “Emerging membranes for electrochemical systems: Part II. High temperature composite membranes for polymer electrolyte fuel cell (PEFC) applications”, *J. Power Sources*, **127**, 135 (2004).
 21. M. A. Jeong, D. H. Yu, M. J. Kho, J. W. Rhim, H. S. Byun, M. S. Seo, and S. Y. Nam, “Preparation and characterization of PVdF microporous membrane with additive for recharge battery”, *Membr. J.*, **18**, 84 (2008).
 22. D. H. Yu, M. A. Jeong, J. W. Rhim, H. S. Byun, H. O. Too, J. M. Kim, M. S. Seo, and S. Y. Nam, “Preparation and characterization of PVdF-HFP microporous membranes for Li-ion rechargeable battery”, *Membr. J.*, **17**, 359 (2007).
 23. K. Ramya, G. Velayutham, C. K. Subramaniam, N. Rajalakshmi, and K. S. Dhathathreyan, “Effect of solvents on the characteristics of Nafion[®]/PTFE composite membranes for fuel cell applications”, *J. Power Sources*, **160**, 10 (2006).
 24. M. H. Chen, T. C. Chiao, and T. W. Tseng, “Preparation of sulfonated polysulfone/polysulfone and aminated polysulfone/polysulfone blend membranes”, *J. Appl. Polym. Sci.*, **61**, 1205 (1996).
 25. J. Kerres, W. Cui, R. Disson, and W. Neubrand, “Development and characterization of crosslinked ionomer membranes based upon sulfonated and sulfonated PSU Crosslinked PSU blend membranes by disproportionation of sulfinic acid groups”, *J. Membr. Sci.*, **139**, 211 (1998).
 26. C. Hasiotis, V. Deimede, and C. Kontoyannis, “New polymer electrolytes based on blends of sulfonated polysulfones with polybenzimidazole”, *Electrochim. Acta*, **46**, 2401 (2001).
 27. F. Lufrano, G. Squadrito, A. Patti, and E. P. Iacqua, “Sulfonated polysulfone as promising membranes for polymer electrolyte fuel cells”, *J. Appl. Polym. Sci.*, **77**, 1250 (2000).
 28. M. Rikukawa and K. Sanui, “Proton-conducting polymer electrolyte membranes based on hydrocarbon polymers”, *Prog. Polym. Sci.*, **25**, 1463 (2000).
 29. H. S. Shin, C. S. Lee, J. H. Jun, S. Y. Jung, J. W. Rhim, and S. Y. Nam, “Preparation and characterization of ion exchange membrane for direct methanol fuel cell (DMFC) using sulfonated polysulfone”, *Membr. J.*, **12**, 247 (2002).
 30. T. Kobayashi, M. Rikukawa, K. Sanui, and N. Ogata, “Proton-conducting polymers derived from poly(ether-etherketone) and poly(4-phenoxybenzoyl-1,4-phenylene)”, *Solid State Ionics*, **106**, 219 (1998).
 31. C. Genies, R. Merciera, B. Silliona, N. Corneth, G. Gebelb, and M. Pineric, “Soluble sulfonated naphthalenic polyimides as materials for proton exchange membranes”, *Polymer*, **42**, 359 (2001).
 32. K. D. Kreuer, “On the development of proton conducting polymer membranes for hydrogen and methanol fuel cells”, *J. Membr. Sci.*, **185**, 29 (2001).
 33. D. J. Jones and J. Rozière, “Recent advances in the functionalisation of polybenzimidazole and pol-

- yetherketone for fuel cell applications”, *J. Membr. Sci.*, **185**, 41 (2001).
34. M. K. Jung and S. Y. Nam, “Reviews on preparation and membrane applications of polybenzimidazole polymers”, *Membr. J.*, **26**, 253 (2016).
 35. B. K. Park, S. H. Kong, Y. J. Kim, and S. Y. Nam, “Organic/inorganic hybrid electrolytes for the application of direct methanol fuel cell (DMFC) - Preparation and properties of sulfonated SEBS (SSEBS)-clay hybrid membranes -”, *Membr. J.*, **15**, 165 (2005).
 36. S. W. Yoon and D. H. Kim, “Preparation and characterization of PVA/PAM electrolyte membranes containing silica compound for direct methanol fuel cell application”, *Polymer(Korea)*, **34**, 45 (2010).
 37. J. H. Sauk and G. Shul, “Effect of crossover on the performance of direct methanol fuel cell(DMFC)”, *Chem. Eng. J.*, **37**, 21 (1999).
 38. B. S. Lee, S. K. Jung, and J. W. Rhim, “Preparation and characterization of the impregnation to porous membranes with PVA/PSSA-MA for fuel cell applications”, *Membr. J.*, **35**, 296 (2011).
 39. Y. M. Lee and H. B. Park, “Development of membrane materials for direct methanol fuel cell”, *Membr. J.*, **10**, 103 (2000).
 40. V. I. Matryonin, A. T. Ovchinikov, and A. P. Tzedilkin, “Investigation of the operating parameters influence on H₂-O₂ alkaline fuel cell performance”, *Int. J. Hydrogen Energy*, **22**, 1047 (1997).
 41. B. Xing and O. Savadogo, “Hydrogen/oxygen polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) based on alkaline-doped polybenzimidazole (PBI)”, *Electrochem. Commun.*, **2**, 697 (2000).
 42. T. Burchardt, P. Guerec, E. Sanchez-Cortezon, Z. Karichev, and J. H. Miners, “Alkaline fuel cells: Contemporary advancement and limitations”, *Fuel Cells*, **81**, 2151 (2002).
 43. J. R. Varcoe and R. C. T. Slade, “Prospects for alkaline anion-exchange membranes in low temperature fuel cells”, *Fuel Cells*, **5**, 187 (2005).
 44. B. Y. S. Lin, D. W. Kirk, and S. J. Thorpe, “Performance of alkaline fuel cells: a possible future energy system”, *J. Power Sources*, **161**, 474 (2006).
 45. C. H. Woo, “Study on matrix module for predicting of emerging ICT technology”, master degree Dissertation, Univ. of Hoseo, asan, Chungcheongnam-do (2014).
 46. “Analysis of ICT technology competitiveness using quantitative information for 2015”, pp. 11-15, IITP, December (2015).
 47. “Development of core components and element technology for wearable smart device”, pp. 232-233, KISPEP, January (2016).
 48. S. Y. No, G. Y. Jang, M. J. Kim, and J. W. Lee, “2009 National R&D patent performance survey, analysis report”, pp. 109-110, KIPO, December (2009).