

국내 연료전지 분야 연구동향 분석: 전극, 전해질, 분리판, 스택, 시스템, BOP, 진단분석 분야

이영덕^{1,†} · 김재엽² · 유동진³ · 주현철⁴ · 김한상⁵

¹한국기계연구원 청정연료발전연구실, ²단국대학교 화학공학과, ³전북대학교 생명과학과, ⁴인하대학교 기계공학과, ⁵가천대학교 기계공학과

Review of Research Trend in Fuel Cell: Analysis on Fuel-Cell-Related Technologies in Electrode, Electrolyte, Separator Plate, Stack, System, Balance of Plant, and Diagnosis Areas

YOUNG DUK LEE^{1,†}, JAE-YUP KIM², DONG JIN YOO³, HYUNCHUL JU⁴, HANSANG KIM⁵

¹Department of Clean Fuel and Power Generation, Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

²Department of Chemical Engineering, Dankook University, 152 Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin 16890, Korea

³Department of Life Sciences and Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, Jeonbuk National University, 567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju 54896, Korea

⁴Department of Mechanical Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea

⁵Department of Mechanical Engineering, Gachon University, 1342 Seongnam-daero, Sujeong-gu, Seongnam 13120, Korea

†Corresponding author :
ydlee@kimm.re.kr

Received 8 December, 2020
Revised 23 December, 2020
Accepted 30 December, 2020

Abstract >> This paper reviews and summarizes the fuel-cell-related studies those have been recently published in major Korean Citation Index journals, aiming at analyzing the research trend in fuel cell technologies. Six major journals are selected for the literature survey; 57 papers are chosen for the detailed analysis through a screening examination on the total 1,040 papers published during between 2018 and 2020. Papers are classified into six technical categories, such as i) electrode, ii) electrolyte, iii) bipolar plate and stack, iv) fuel cell system, v) balance of plant, and vi) diagnosis-related studies, and summarized by the experts in the relevant area. Through this paper, we provide a comprehensive review on the recent trends and progress in fuel-cell-related research work in Korea.

Key words : Fuel cell(연료전지), Review(리뷰), Research trend(연구동향)

1. 서론

자원고갈, 온실가스 배출로 인한 기후변화, 다양한 환경오염 물질 배출 저감 등 당면한 에너지, 환경 문

제를 해결하기 위한 대안으로 수소에너지가 주목받고 있으며¹⁾, 세계 주요국에서도 수소의 생산, 이송, 저장 및 활용 기술의 전주기에 걸쳐 기술개발과 제품보급이 활발하게 진행되고 있다²⁾.

수소를 에너지원으로 활용하는 대표적인 기술로는 연료전지가 있는데, 연료전지 외에도 내연기관 엔진, 산업용 보일러, 수스터빈 등 다양한 분야에서 수소를 에너지원으로 활용하는 방안이 검토되고 있다³⁾.

연료전지는 연속적인 전기화학 반응을 통해 수소의 화학에너지를 전기에너지로 변환하는 장치를 일컫는데⁴⁾, 전해질의 종류에 따라 알칼라인 연료전지(alkaline fuel cell, AFC), 고분자전해질 연료전지(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC), 직접 메탄올 연료전지(direct methanol fuel cell, DMFC), 인산형 연료전지(phosphoric acid fuel cell, PAFC), 용융탄산염 연료전지(molten carbonate fuel cell, MCFC), 고체산화물 연료전지(solid oxide fuel cell, SOFC) 등으로 구분한다⁵⁾. 작동온도에 따라 저온형, 중온형, 고온형으로 구분하기도 하고, 설치환경에 따라 정지형(stationary), 이동형(mobile)으로 구분할 수도 있다⁶⁾.

연료전지는 전기화학 반응을 통해 전력을 직접 생산하므로 기존의 화석연료 기반의 열기관 발전시스템에 비하여 효율이 높고, 오염물질 배출량이 적어 친환경 발전이라 할 수 있다.

이러한 장점에 힘입어 가정용/건물용 열병합 발전⁷⁾, 중대형 발전소⁸⁾, 휴대용 전원⁹⁾, 연료전지 자동차¹⁰⁾, 건설 중장비¹¹⁾, 지게차¹²⁾, 선박용 보조전원 및 추진장치¹³⁾, 잠수함의 추진장치¹⁴⁾ 등 다양한 분야에서 보급이 확대되고 있다.

다양한 제품 보급과 기술 개발 수요의 증가로 인해 정부와 산업계가 지원하는 다양한 연구개발 과제가 진행되고 있으며¹⁵⁾, 과제의 결과물로 많은 학술논문이 출간되고 있다. 과거에는 주로 대학에서 학술논문을 출간하였으나, 최근 들어서는 출연연과 같은 연구기관이나 산업체에서의 학술논문 출간도 증가하고 있다. 이렇듯 학술논문은 최신의 연구개발 과제의 결과물로 도출되고 있기에 학술논문 분석을 통해 최신 연구동향과 향후 연구개발의 방향을 가늠해보는 것은 의미 있는 일이라 할 수 있다.

이러한 배경에서, 본 리뷰논문에서는 국내 주요등재지에 게재된 연료전지 분야 최신 논문을 검토/분석함으로써, 국내 연료전지 분야의 연구동향을 분석하였다.

2. 분석대상 및 기술분류

2.1. 분석대상 및 범위

본 분석에서는 한국학술지인용색인(Korean Citation Index, KCI) 등재지¹⁶⁾를 기준으로 연료전지 분야 연구 결과가 활발히 발표되는 논문집에 게재된 논문 중에서 2018년 1월부터 2020년 11월의 최근 3년간 출판된 논문을 대상으로 선정하였다.

대한기계학회논문집¹⁷⁾, 한국화학공학회논문집¹⁸⁾, 한국신재생에너지학회논문집¹⁹⁾, 한국수소및신에너지학회논문집²⁰⁾, 한국유체기계학회논문집²¹⁾, 한국전기화학학회논문집²²⁾에 최근 3년간 게재된 논문 총 1,040편을 전수 조사하여 연료전지 분야와 관련된 논문을 선정하였으며, 전극, 전해질, 분리판, 스택, 시스템, balance of plant (BOP) 및 진단분석의 기술분야로 나누어 총 57편을 선별하였다.

2.2. 기술 분류

앞절에서 언급한 바와 같이, 연료전지 논문의 기술 분야를 크게 전극, 전해질, 분리판, 스택, 시스템, BOP 및 진단분석 분야로 분류하여 분석을 수행하였다.

전극소재 및 특성분석 분야는 최근 3년간 16편의 논문이 출간되었고, 전해질 분리막 분야에서는 새로운 소재 개발, 첨가물의 영향, 분석방법론 등과 관련하여 10편의 논문이 출간되었다. 분리판의 유로설계와 스택단위의 성능평가 및 내구성 평가 등과 관련해서는 총 10편, 연료전지 시스템의 BOP 분야는 8편, 시스템 최적설계와 모델링 시뮬레이션 관련하여 11편의 논문이 출간되었다. 연료전지 고장진단, 열화 분석 등과 관련해서도 총 7편의 논문이 출간되었다.

총 57편의 논문 중 대학에서 34편, 출연연 등 연구기관에서 20편, 산업체에서 3편의 논문을 출간하였다.

3. 분석 결과

3.1. 연료전지 전극 소재 분야 연구동향

Lee 등²³⁾은 2차원 다상 격자 볼츠만 법을 이용하여 PEMFC 내의 가스 확산층에서 액상 수분 전달과 그 분포에 관한 수치적 연구를 수행하였다. 가스 확산층에서 액상 수분의 동적 거동에 영향을 주는 여러 가지 특성 중 습윤성이 미치는 영향을 분석하기 위하여 접촉각의 변화에 따른 전달 현상의 변화를 모사하였다. 그 결과, 접촉각이 90°보다 큰 소수성의 특성을 가질 때 상대적으로 높은 수분 전달 특성을 가져 가스 확산층 내에 낮은 수준의 액상 수분 포화도가 유지되는 것을 확인하였다. 특별히 소수성의 가스 확산층은 넓은 공극이 존재하여도 강한 모세관 압력으로 인해 액상 수분이 침투하지 못하는 모습을 확인하였다.

Kang 등²⁴⁾은 PEMFC에서의 전극 침수(electrode flooding) 현상에 대한 이해와 물 관리의 개선을 목표로 하여, 전극을 구성하는 소수성 다공 전달층 내부에서 물의 모세관 전달 과정을 연구하였다. 250 μm 두께의 기체 확산층 외부에 추가적으로 미세 확산층을 형성하는 경우(확장 두께) 최적 두께는 50 μm 로 비교적 작은 반면에 300 μm 두께의 기체 확산층 내부로 침투하면서 미세 확산층을 형성하는 경우(침투 두께) 최적 두께는 150 μm 로 비교적 두껍게 나타났다.

Yoo와 Oh²⁵⁾는 우주탐사용 직접 수소화붕소나트륨/과산화수소 연료전지의 환원극 촉매에 대해 연구하였다. Au, Ag, Ni 등의 전극 물질을 다중벽 탄소나노튜브(multiwalled carbon nanotubes, MWCNTs)에 담지하였는데, Ag/MWCNTs가 Ni/MWCNTs에 비해 우수한 활성을 나타내었다. Au/MWCNTs의 경우 상대적으로 우수한 반응 선택성을 나타내었다. Ag/MWCNTs는 특히, 높은 작동 온도에서도 우수한 활성과 반응 선택성을 나타내었다.

Jung 등²⁶⁾은 알코올계 촉매 슬러리를 활용한 바코팅으로 PTFE 전극을 형성시키고 이에 대한 특성

을 분석하였다. 알코올계 촉매 슬러리를 활용한 PTFE 전극은 0.2 A/cm²의 높은 성능을 보였는데, 이는 기존의 isopropanol (IPA)계 촉매를 활용한 결과와 비슷하다. 또한, 사용하는 용매의 종류에 따라 PTFE의 분포 및 크랙의 모양이 달라짐을 확인하였다.

Kim 등²⁷⁾은 Pt 나노입자 또는 bimetal이 탄소에 담지된 산소환원반응 촉매에 대해 연구하였다. 특별히, 고가의 Pt를 대체하기 위해 구리 등 3D 전이 금속의 활용에 대해 탐색하였다. 분석 결과, Pt₃-Cu₁/C 촉매가 기존의 상용 Pt/C 촉매에 비해 우수한 전기화학 성능을 나타내었다.

Jang 등²⁸⁾은 전극 촉매의 내구성 향상을 위한 지지체 특성을 평가 및 연구하였다. 결정성 및 표면적이 서로 다른 종류의 지지체인 low crystalline carbon, middle crystalline carbon, high crystalline carbon을 선정하고 다양한 분석을 진행하였다. 그 결과, 탄소계 지지체의 높은 흑연성은 고전위 환경에서 촉매의 내구성 향상에 뚜렷한 효과가 있음을 확인하였다. 특히, 지지체의 중량이 줄어들기 시작하는 타는점(on-set point)은 전극 촉매의 고전위 환경 내구성과 직접적인 연관성을 보였으며, 고내구성 지지체 선정을 위한 중요한 지표로 제시할 수 있음을 확인하였다.

Park 등²⁹⁾은 Pt/C 상용촉매를 사용하여 이오노머 함량을 달리해가며 초음파 스프레이 공정을 통해 수소극으로 제조하였다. 제조된 촉매층을 공기극 및 수소극에 각각 적용하였을 경우에 공기극에서는 최적 이오노머 함량이 I/C 기준으로 0.8인 반면에 수소극에서는 1.0으로 다른 최적값을 보여주었다. 특히, 동일한 공기극을 사용하였음에도 불구하고 수소극의 이오노머 함량 변화만으로도 셀 성능이 매우 크게 변화되었으며, 수소극 촉매층의 I/C를 0.6에서 1.0으로 증가하였을 경우에 0.6 V 기준으로 2배 이상의 셀 성능 향상이 관찰되었다. 전기화학 분석 결과, 수소극 촉매층의 이오노머 함량에 따른 친수성 변화가 막을 경계로 하는 수소극과 공기극 촉매층 사이의 물 흐름에 영향을 주며 이것이 막 저항 및 공기극 촉매층의 이온 전달 저항을 변화시키며 이것이 전체 셀 성능에 크게 영향을 주는 것으로 분석 되었다.

Kim 등³⁰⁾은 PEMFC용 고성능의 팔라듐 코어물질을 합성하고 성능 평가를 진행하였다. Pd (111)면에 대한 선택적 흡착능력이 높은 CO의 성질을 이용하여 팔라듐 나노입자를 합성하였다. 별도의 화학안정제 첨가 없이 나노입자의 형상제어가 가능하였으며, 단지 용매의 비율 및 온도 조절만을 통해서 탄소 지지체 위에 균일하게 분산된 형태(Pd_SP), 시트 형태 팔라듐(Pd_NS) 및 테트라헤드론 형태의 팔라듐(Pd_TH)을 합성할 수 있었다. 구조 분석 결과 형상 제어된 팔라듐 나노입자중 Pd_NS는 얇은 두께와 높은 ECSA를 보였으며 (111)면의 비율이 상대적으로 가장 높음을 확인하였다. 전기화학 성능 평가 결과 Pd_NS의 ORR 활성은 Pd_TH 및 Pd_SP 대비 약 2-3 배 정도로 월등히 높은 값이 측정되었으며, 이는 높은 비율로 존재하는 Pd (111)면이 ORR 활성 향상에 영향을 준 것으로 분석되었다.

Noh 등³¹⁾은 상용 소재 기반의 NiO-YSZ 연료극을 간단한 혼합 방법 및 일축가압 성형법과 담금코팅(dip coating) 공정을 사용하여 저비용 고효율의 세라믹 공정 기반의 고성능 단위전지를 제작하였다. Ni-YSZ 연료극에서 최적의 값으로 잘 알려진 40%의 기공률을 카본 블랙을 15 wt% 첨가하고 최종 소결온도를 1,350°C로 설정함으로써 얻을 수 있었다. 40%의 기공률을 갖는 Ni-YSZ 연료극, 20 μm 두께의 치밀한 YSZ 전해질, LSM-YSZ 공기극으로 구성된 단위전지는 800 °C에서 1.426 W/cm²의 우수한 성능을 얻을 수 있었다.

Kim 등³²⁾은 Pd의 산소환원반응 활성을 높이기 위해 Ir, Y 등을 폴리올 방법으로 합금시켰다. Y로부터 공급된 전자가 Pd의 d-electron을 채워서 Pd의 binding energy가 낮아지는 결과를 관찰하였다. 다양한 조성의 합금 촉매 중 Pd4IrY0.1/C가 가장 높은 산소환원반응 활성을 나타내었다. 이는 Y가 촉매활성을 증가시키기 위한 합금 소재로 유용하게 활용될 수 있음을 보여준다.

Ji 등³³⁾은 스퍼터링을 통하여 다공성 양극산화 알루미늄 기판에 증착되는 저온 SOFC용 니켈 박막의 기공 크기를 조절하였다. 양극산화 알루미늄 기판의

윗면에 증착된 니켈 하부전극층의 기공 크기는 상대적으로 높은 요철부 경사도로 인한 상대적으로 큰 그림자 효과의 영향으로 인하여, 아랫면에 증착된 하부 전극층의 기공 크기보다 약 1.7배 작았다. ~35 nm 크기의 기공을 가지는 양극산화 알루미늄 기판에 증착된 니켈 하부전극층은 기판의 요철부 상부에 제한되는 니켈 입자의 증착으로 인하여, ~80 nm 크기의 기공을 가지는 양극산화 알루미늄 기판에 증착된 니켈 하부전극층보다 약 2.6배 작은 기공 크기를 지님을 확인하였다.

Kwak 등³⁴⁾은 Sc가 치환된 La_{0.6}Sr_{0.4}FeO_{3- δ} (LSFSc)를 합성하고, 이를 고체산화물전지의 세라믹 연결재로 응용하기 위한 연구를 수행하였다. LSFSc가 10 mol% 이상 첨가됨에 따라 환원분위기에서의 안정성이 개선되는 모습이 관찰되었지만 Sc의 함량이 20 mol% 이상에서 공기분위기 전기전도도가 감소하고 장기안정성에 있어서도 10 mol%의 성능이 더 뛰어나기에 Sc의 함량을 10 mol%로 하여 합성한 소재가 가장 적합한 조성으로 확인되었다.

Lee 등³⁵⁾은 대용량 저온 Ni-Al 합금 분말 제조 공정을 개발하였다. AlCl₃를 activator로 활용하여 Ni과 Al의 용융점 보다 낮은 저온에서 합금이 합성되도록 유도하였다. Ni₃Al intermetallic과 Ni-Al solid-solution이 형성됨을 XRD pattern으로 확인하였다. 크립 저항성 테스트 결과, 기존 산화전극에 비해 Ni-Al 합금 전극이 더 향상된 특성을 나타내었다.

3.2. 연료전지 전해질 막 분야 연구동향

수소연료전지에서 고분자전해질막은 중요한 소재 중에 하나로 산화극과 환원극 사이에서 수소 이온의 전달체 역할을 하는 동시에 산소와 수소의 접촉을 막는 매우 중요한 역할을 한다. 고분자전해질막 중에서 대표적인 과불소화된 구조의 막으로써 나피온³⁶⁻³⁸⁾은 높은 이온전도도와 훌륭한 기계적/화학적 안정성, 높은 효율과 높은 에너지 밀도라는 장점을 가지고 있지만 매우 높은 가격과 고온(80°C 이상)/저가습 조건에서 성능저하, 불안정한 물리적 특성들로 인해 이

를 극복하기 위한 새로운 전략을 통한 고분자전해질 막의 개발이 활발히 이루어지고 있다.

Hwang 등³⁹⁾은 실제 스택이 운전되는 조건하에 저전류에서 고전류까지 다양한 조건에서 막 이온전도도의 거동을 분석하고자 하였으며, 평가샘플은 가스 확산층 및 막전극접합체(membrane electrode assembly, MEA)로 구성된 단위 셀을 기반으로 평가를 수행하였다. 그 결과 가습 30-70% 범위에서 전류변화에 따라 이온전도도 값의 차이를 나타내었으며, 저전류에서 고전류로 증가하면서 많은 양의 수분생성에 따른 역확산에 의해 막에 충분한 수분을 보급함으로써 이온전도도의 급격한 상승을 보였다.

Lee 등⁴⁰⁾은 간단한 방법에 의한 물 이동에 대해서 전기삼투계수, 물 확산계수와 같은 고분자 막의 물성을 측정하고 이들을 이용해 막을 통한 물의 이동량(water flux)과 이온전도도를 모델식에 대입하여 모사한 후 실험값과 비교하였다. 물 이동의 구동력은 전기삼투와 확산만을 본 1차원 정상상태 지배방정식을 매트랩을 통해 수치를 해석하였다. 144 μm 두께의 고분자전해질막의 전기삼투계수를 수소 펌핑셀에서 구한 결과 1.11을 얻어냈다. 물 확산계수를 상대습도의 함수로 나타냈고 물 확산에 대한 활성화 에너지는 2,889 $\text{kJ/mol}\cdot\text{K}$ 였다. 이들 계수를 적용해 모사한 물 이동량과 이온전도도 결과는 실험값과 일치되게 나타났다.

Lee 등⁴¹⁾은 확장형 polytetrafluoroethylene (e-PTFE) 지지체가 들어간 불소계 이오노머 막으로 국내·외에서 4종류를 구입해 같은 조건으로 MEA를 제조하여 PEMFC 셀에 체결 후 이의 특성들을 비교 실험한 결과를 아래와 같이 정리하였다. a) 다른 막에 비해 C-F 피크가 제일 큰 막이 C-F의 소수성에 의해 물 확산계수와 물의 이동량이 제일 작았다. b) 고분자 막의 이온전도도는 전체 막 두께뿐만 아니라 지지체 두께와 지지체 내에 이오노머의 충전 등에도 영향을 받는 것으로 나타났다. c) 수소투과도는 고분자 막의 두께에 반비례하였으며 수소투과도가 높으면 개회로 전압(open-circuit voltage, OCV)이 감소함을 확인하였다. d) short 저항이 작은 고분자 막은 OCV와 성능

이 모두 낮았다. e) 막의 이오노머 구조 차이에 의해 고온 압착(hot pressing)시 전극촉매의 전사량과 전극 활성면적의 차이를 발생시켰다. (f) 고분자 막의 두께가 두꺼운 막은 수소투과도가 낮아 OCV는 높지만 막 저항값이 높아 I-V 성능은 낮았다. (g) 국내·외 고분자 막의 초기 특성과 성능을 비교 검토한 결과, 국내 막과 상용제품인 국외 막을 비교해 뒤떨어지지 않는 고분자 막이 있어 국산화가 가능함을 확인하였다.

앞에서 소개하였듯이 가습조건에 따라 막의 치수 안정성, 낮은 수소이온 전도도, 및 기계적 내구성의 불안정한 문제점을 보이는 나피온을 대체하기 위하여 다공성 지지체에 과불소계 술폰산 이오노머(perfluorosulfonic acid, PFSA)를 함침시킨 형태의 강화 복합막이 해결책으로 제시되고 있다. Yook 등⁴²⁾은 연료전지용 불소계 전해질 강화복합막 코팅 공정에서 이오노머 분산용매에 따라 막 형성 및 물성 변화와 연료전지 성능에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 그 결과 dimethylformamide (DMF)를 용매로 활용한 강화복합막이 높은 공극률을 보였고, scanning transmission electron microscopy (STEM) 기능을 통해 확인한 이미지도 황산기가 고루 분포되어 있지 않은 것을 확인하였다. 이렇게 DMF로 만든 강화막은 많은 공극으로 인해서 기계적 물성이 달라지고 및 수소기체투과도가 높아지는 등 막 물성에 영향을 받은 것으로 파악되었다.

최근 KCI 등재지에 소개된 방향족 탄화수소계 고분자전해질막은 과불소계 구조의 전해질 막의 단점을 해결하기 위하여 대체 막으로써 다양하게 연구되고 있으며, 크게 랜덤공중합체 전해질 막, 블록공중합체 전해질 막, 유·무기 복합막, 혼성전해질 막, 가교막 등으로 나누어 볼 수 있다.

먼저 간단한 합성과정, 저렴한 가격, 활성/비활성 표면적 증가, 및 유연한 기계적 성질이라는 장점을 갖는 랜덤공중합체⁴³⁻⁴⁵⁾를 이용한 전해질 막의 개발로 Han과 Yoo⁴³⁾는 기존의 polybenzimidazole (PBI)이 가지고 있는 문제점인 낮은 용해도와 가공성을 개선하기 위하여 주사슬에 알킬기를 도입하였으며, 이로 인하여 낮아질 수 있는 물성과 양이온 전도도

를 개선하기 위하여 방향족아민을 단량체로 사용하여 PBI계 랜덤공중합체를 고안하여 합성하였다. 그 결과, 열적안정성 및 산화안정도는 기존에 알려진 poly[2,2-(*m*-phenylene)-5,5-benzimidazole](*m*-PBI)가 좀 더 우수한 반면, 문제가 되었던 용해도와 막의 유연성은 크게 개선된 것을 확인하였다.

Lee와 Yoo⁴⁴⁾는 두 개의 단위체로 친핵성 치환반응을 통하여 반응 단계와 단가를 줄임으로써 랜덤공중합체 합성을 진행하였으며, 음이온교환막에 연구를 통하여 새로운 연구를 보고하였다. 먼저, poly(arylene ether)(PAE) 랜덤공중합체에 높은 이온전도도 값을 나타내는 아민을 포함한 음이온교환막과 내열성 및 화학적 내구성이 좋다고 알려진 포스포늄을 도입한 음이온교환막을 각각 합성한 후, 이들의 물리화학적 특성 및 전기화학적 성능을 비교 연구하였다. 본 연구에서는 AFC용 고분자전해질막의 열적 안정성을 높이기 위하여 작용기로 인을 도입하여 고분자 전해질막을 개발하였다. 지금까지 도입해보지 않은 trimethylphosphite (TMP)를 도입함으로써 기존에 이미 많은 연구가 진행된 trimethylamine (TMA)와 비교해 전기화학적 특성 및 열적 안정성을 분석하였다. 결론적으로, 다른 작용기를 갖는 AFC용 고분자 막을 합성하여 열적 특성과 전기화학적 성능을 비교 분석한 결과, 열적 안정성은 TMP로 사차화된 QP-PAE가 좋은 결과를 나타냈고, 이온전도도는 TMA로 사차화된 QA-PAE가 더 우수한 특성을 나타냄을 확인하였다.

블록공중합체 전해질 막⁴⁵⁻⁴⁷⁾은 화학적으로 다른 특성을 갖는 두 종류 이상의 고분자가 공유결합과 같은 일차결합으로 연결된 것으로 소수성과 친수성 부분의 구별로 인한 이온채널 형성으로 전도도가 증가한다는 장점을 갖고 있어서 다양한 연구에 사용되고 있다. Han과 Yoo⁴⁵⁾는 가격 절감 및 내구성 향상을 위하여 다양한 방향족 탄화수소계 고분자 중에서 우수한 내구성과 유연함을 갖는 poly(arylene ether sulfone)(PAES)계 블록공중합체를 설계하였다. 또한, 단량체로 견고한 평면적인 구조를 가지는 나프탈렌을 이용하여 막의 치수안정성을 높여 내구성을 증가

시키고자 하였다. 결과적으로 합성한 sulfonated poly(aryl ether sulfone) (SPAES)막은 우수한 산화안정성, 열적 안정성 및 치수안정성을 보였으며, 26 mS/cm 적절한 이온전도도를 나타냈다.

또한, 고분자전해질막의 성능향상을 위한 또 하나의 방법은 앞에서 언급되었듯이 유/무기 복합막⁴⁸⁻⁵⁰⁾을 사용하는 것으로서 많은 연구에서는 유/무기 복합막의 효율적인 비용, 쉬운 합성, 이온전도도의 향상, 및 우수한 열적/기계적 특성으로 인해 연료전지 응용 분야에서 잠재력을 갖는다고 알려져 있다. Han과 Yoo⁴⁸⁾는 제조된 PBI 랜덤공중합체에 다공성 SiO₂ (5 wt%, 10 wt%, 15 wt%)를 도입시켜 새로운 다공성 SiO₂/PBI 복합막을 제조하였다. 결과적으로 화학적 안정성, 산 흡수율 및 팽창률도 다공성 SiO₂ 입자의 비율이 높을수록 높은 결과를 갖는 것으로 나타났으며, 무기습 상태에서 양이온 전도도는 15 wt%로 도입한 복합막의 양이온 전도도가 순수한 PBI막 (15 mS/cm)보다 160°C에서 19 mS/cm로 비교적 향상된 결과를 보였다.

최근, 막의 물리적인 보강, 물에 대한 용해도 및 산화방지 등의 응용분야를 위해 혼성전해질 막^{51,52)}에 대한 연구는 많이 이루어지고 있다. Park 등⁵¹⁾은 높은 열적안정성, 낮은 가스투과성, 가격이 저렴하고 다양한 구조를 만들 수 있다는 장점이 있는 방향족 탄화수소계 고분자를 이용하여 SPAES에 술폰화된 부분 불소계 고분자인 sulfonated poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene)를 혼합시킨 혼성전해질 막을 제조하였다. 준비된 막 중 부분 불소화된 SPAES/SPVdF-30 혼성 막은 좋은 산화안정성, 열적안정성 및 기계적 안정성을 나타냈으며, 90°C에서 최대 68.9 mS/cm에 적절한 전도도를 보여주었다.

이 외에도 고분자전해질막에 성능향상을 위한 대표적인 방법인 가교막^{53,54)}에 대한 연구로 Kim 등⁵³⁾은 막의 기계적 강도를 높이기 위하여 가교제를 첨가하였고 그 비율을 다르게 하여 가교결합된 sulfonated poly(ether ether ketone) (SPEEK)/cellulose 복합막 I, II, III을 제조하여, 그에 따른 다양한 특성 변화를 확인하였다. 먼저, 우수한 기계적 강도, 내열성, 전기화

학적 특성을 가지는 PEEK를 술폰화하여 SPEEK를 제조하였으며 이러한 성능을 더욱 향상하게 시키기 위하여 셀룰로오스를 술폰화하여 제조한 cellulose sulfate를 첨가한 후 가교결합을 진행하였다. 그 결과 cellulose sulfate가 도입된 복합막은 첨가제가 들어있지 않은 SPEEK 막보다 열적 안정성이 우수하였고, 함수율이 증가함에 따라 수소이온전도도 역시 비교적 높은 수치를 보였다. 또한 가교제의 함량에 따른 결과를 비교하였을 때, 가교제가 많이 첨가될수록 인장강도와 산화 안정성과 같은 내구성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

Oh⁵⁵⁾는 PEMFC 고분자 막의 내구성을 향상시키기 위해서 라디칼 제거제가 사용되고 있는데, 라디칼 제거제로서 해조류에서 추출한 후코이단(fucoidan)이 고분자 막의 전기화학적 열화를 방지하는지에 대해 Fenton 실험과 가속내구성 평가방법(OCV Holding) 실험을 통해 평가하였다. 후코이단은 항산화 효과가 있어 과산화수소와 산소라디칼로부터 고분자 막을 보호해 열화속도를 1/10로 감소시켰다. 후코이단이 라디칼 제거제로 사용되는 MnO₂보다 효과적임을 보여주었다. PEMFC셀에서 OCV Holding 실험한 결과, 후코이단이 고분자막의 수소투과도를 12% 감소시켰고, 성능은 라디칼 제거제가 없을 때보다 29.1% 감소시켜 PEMFC 셀에서도 라디칼 제거제의 역할을 함을 확인하였고, 후코이단 첨가가 산화극 보다 환원극에 더 효과적이라는 결과를 확인하였다.

3.3. 연료전지 분리판 및 스택분야 연구동향

Han 등⁵⁶⁾은 도심 주행과 고속도로 주행을 조합한 new european driving cycle (NEDC)을 기반으로 900 사이클 동안의 PEMFC 내구성 실험을 수행하였고, 이를 같은 시간 동안의 정전류 내구성 저하와 비교하였다. 특히, 300, 600, 900사이클을 수행하여 전압 강하율을 부하별로 분석하였다. 정전류 실험에 비해 NEDC 사이클에서의 전압 강하율은 훨씬 높게 나타났다. 결론적으로 실차 조건에서 내구성 저하는 NEDC 사이클에서 영향을 더 받는 것을 확인하였다.

Han 등⁵⁷⁾은 열 교환기를 이용하여 스택 발열과 수랭식 냉각을 모사할 수 있는 하드웨어 에뮬레이터를 제작하여 차량이 구동 환경에서 가변적인 인자들로 인해 변하는 PEMFC 스택 특성에 대해 이해하기 위한 연구를 진행하였다. 에뮬레이터를 검증하기 위해 hardware in the loop simulation (HILS) 방식을 이용하였다. HILS 시스템 구축을 위해서 호스트 PC와 타겟 PC 사이의 인터페이스 플랫폼을 생성하고 Veristand 통해 유저 인터페이스 모듈 내에서 입력을 변화시키고 각 물성값을 실시간으로 모니터링하고 저장할 수 있는 제어 환경을 확보하였다. 그 결과, 1.0 A/cm²의 전류 밀도에서는 스택 에뮬레이터의 정상 상태온도가 설정된 온도인 70°C에 수렴하는 것을 확인하였다.

Kim과 Kim⁵⁸⁾은 PEMFC 스택을 이용하여 수소 재순환 운전에서 재순환 유량, purge interval과 duration의 운전 조건이 성능에 미치는 영향성 분석을 위해 실험을 수행하였다. 그 결과 재순환 유량과 스택의 성능이 반비례하였다. 장기 운전에서 짧은 purge (0.1 s, 0.02 s)로 수소극 내부의 습도를 유지하고 연료 배출량을 최소화하여 95%의 높은 연료 효율을 얻을 수 있었다. 그러나 축적되는 물을 효과적으로 배출하지 못해 스택의 성능이 감소하였다. 반대로 interval 시간이 1 s의 경우 스택 초기 성능은 감소하나 purge 이후에는 회복되며 장기 운전에도 스택의 성능이 유지하면서 연료 효율 또한 94% 안정적인 운전이 구현됨을 확인하였다. 재순환 유량과 purge 조건을 최적화하여 스택을 효율적으로 운용하고 높은 이용 효율을 얻을 수 있음을 확인하였다.

Lee 등⁵⁹⁾은 연료전지 열 유동 해석 모델을 이용하여 캐소드 공기공급 채널 폭과 냉각채널 폭의 비율이 서로 다른 세 가지 형상의 캐소드 분리판 유로디자인에 적용하여 시뮬레이션을 통한 물 관리 성능을 비교분석 하였다. 본 연구로부터 공기공급 채널의 폭을 좁게 디자인 하는 것이 물이 외부로 배출되는 양을 줄일 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 건조한 상태에서 운전하는 공랭식 연료전지의 막 탈수현상을 억제할 수 있다는 사실을 입증하였다. 또한 과도한 양의 공기공급으로 인해 산소고갈문제가 크지 않을

것으로 예측하였지만 작동전류조건이 커질수록 산소 고갈 영향성이 커지기 때문에 작동전류가 캐소드 유로채널의 설계요소로 중요하게 고려되어야 한다는 사실을 해석적으로 입증하였다.

Lee와 Han⁶⁰⁾은 PEMFC 에폭시/탄소 복합재료의 기계적 강도와 전기전도도를 개선하기 위하여 에폭시 실란 표면처리 탄소섬유와 흑연 섬유를 도입하여 연구를 진행하였다. 페놀 노볼락 타입(phenol novolac-type epoxy), diglycidyl ether of bisphenol A타입 에폭시 수지 혼합물에 에폭시 실란 표면처리 탄소섬유를 도입하여 인장 시험, 3점 굽곡법 실시하였다. 또한 흑연 분말과 흑연 섬유를 도입하여 전기 전도도를 측정하였다. 그 결과 탄소 섬유 함량이 증가함에 따라 굽곡강도가 최대 1.46배 증가하고, 흑연 섬유 함량이 증가함에 따라 전기 전도도가 최대 4배가 증가함을 확인하였다.

Kim 등⁶¹⁾은 HT-PEMFC용 박판형 카본 분리판 형태를 설계하여 다양한 운전 조건에서 성능 검증 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 경제적이고, 몰드 가공이 용이한 변형 직선채널과 이중 매니폴드 구조를 사용하였다. 또한 원활한 가스 공급을 위해 중앙 매니폴드와 채널 입구 사이에 가스 분배 구조를 변형시켰다. 새롭게 제안한 분리판은 기존에 비해 얇고 좁은 유로를 가진다. 실험 결과, 리크 테스트에서 가스 외부 누출은 발견되지 않았으며 기존의 사형 채널 분리판과 비교하였을 때 적절한 수준의 차압이 형성됨을 확인하였다. 또한 과급률, 운전온도가 증가함에 따라 스택 성능이 높아지는 것을 확인하였다.

Ahn 등⁶²⁾은 high-temperature proton exchange membrane fuel cells (HT-PEMFC)의 채널 형상에 따른 일산화탄소 피독 현상 연구를 위해 3차원 비 등온 모델을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 사형 유로와 평행 유로의 성능비교 및 평행 유로 매니폴드의 높이에 따라서 HT-PEMFC 성능 변화를 연구하였다. 전류밀도가 0.5 A/cm^2 기준으로 평행 유로의 경우 매니폴드 최적설계를 통해서 유량 편차를 최소화하며 립 간격 및 채널의 최적설계를 통해 연료 고갈을 최소화 시켜 사형 유로와 비슷한 성능을 가질 수 있

음을 보였다. 또한 압력강하에서 평형 유로가 사형 유로에 비해 이점이 있기 때문에 HT-PEMFC에서 평행 유로의 사용이 유리하다는 점을 강조하였다.

Kim 등⁶³⁾은 COMSOL Multiphysics (COMSOL, Burlington, MA, USA)를 이용하여 MCFC 단위 전지를 모델링하고 셀 내부의 전기 화학 반응, 기체 유동, 열전달 모델을 모사하였다. 각 유동 타입(co-flow, counter-flow, cross-flow)에 따라서 면적을 100 cm^2 , 900 cm^2 , $2,500 \text{ cm}^2$ 로 달리하여 압력, 온도, 전류밀도의 분포를 확인하였다. 해석 결과 세 가지 유동 중 co-flow 유동 타입에서 가장 적은 열 응력이 발생하고 반응이 안정되어, 장수명 운전이 가능할 것이라는 것을 확인하였다.

Lee 등⁶⁴⁾은 100 cm^2 MCFC 단위전지를 기반으로 셀 프레임 높이에 따른 전지 내부 온도 차와 매니폴드 길이의 차에 따른 연료 분배에 대해 CFD 해석을 통해 분석하였다. 동일한 조건에서 셀 프레임 높이가 높아질수록 열전달이 크게 증가하며 셀 온도가 낮아지는 것을 확인하였다. 또한 가스 투입구의 경우 길이가 30 cm 일 때 가스 분배가 균일하게 발생하는 것을 확인하였고 짧은 경우 중심 부분으로 가스가 집중되는 것을 확인하였다. 두 가지 결과를 통해서 100 cm^2 의 단위 전지에 대해 가스 분배 영역 길이 30 mm , 셀 프레임 높이 60 mm 인 구조로 설계하는 것이 셀 온도 차와 연료 분배측면에서 효과적인 것을 확인하였다.

Lee 등⁶⁵⁾은 심층 신경망 기법을 이용하여 고체 산화물 연료전지 스택의 성능 예측하고, 정확도와 정밀도를 높였다. SOFC의 발생 열을 측정하여 기계 학습을 통해 정규화 과정을 진행하였고, Rectified linear unit 함수를 사용한 일차원 합성곱 신경망을 구현해 모델 예측의 정확도 검증에 활용하는 지도 학습을 수행하였다. 그 결과 내삽의 자료는 1% 미만, 외삽의 자료는 2% 미만의 오차라는 신뢰할만한 결과를 보였다. 이를 통해 자료 전처리와 일차원 합성곱 신경망으로 시간적, 금전적 비용을 줄일 수 있다는 사실을 입증하였다. 또한 기계 학습 자료가 다양할수록 예측 정확도와 정밀도를 높일 뿐만 아니라 물리적

현상 반영이 모델 성능에 미치는 영향 등을 정량적으로 분석하였다.

3.4. 연료전지 시스템 분야 연구동향

Oh 등⁶⁶⁾은 정치형 소형 열병합 발전용으로 사용되는 PEMFC의 MEA와 연료전지 자동차에 사용되는 PEMFC MEA에 순수수소를 연료로 공급할 경우의 특성을 비교분석하였다. 정치형의 경우에는 주로 개질가스를 연료로 사용하므로 차량에 비하여 CO 피독이 발생할 가능성이 높기 때문에 루테늄(ruthenium)을 소량 첨가하는데, 이 경우 순수 수소가 연료로 공급되는 경우를 가정하여, 상대습도, 전류밀도 등을 변경하며 성능을 실험적으로 분석하였다. 실험 결과, 일반적인 성능에서는 큰 차이를 나타내지 않았으나, 수소투과도에서는 차이를 보였으며, 이로 인해 내구성에서 차이를 보일 것으로 예상하였다.

Lee 등⁶⁷⁾은 건물용 연료전지 시스템의 복합배기구 조에 대한 안전성 평가 결과를 보고 하였다. 현행 법규상 여러 대의 연료전지 시스템이 한 장소에 이웃하여 설치되어도 배기구를 하나로 묶어서 배기하는 것(복합배기)에 대한 안전규정이 미비하여 배기구를 별도로 구비해야 한다. 여러 대의 연료전지 시스템 설치가 용이하도록 복합배기 설치 시 연료전지 시스템에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, 복합배기를 적용하여도 개별 연료전지 시스템에 미치는 영향은 미미하여 안전상 큰 문제가 없음을 확인하였다.

Kim 등⁶⁸⁾은 자동차용 PEMFC 시스템에 공기공급용 블로워가 1개 적용된 경우와 2개를 병렬로 설치한 경우 시스템 효율을 실험적으로 분석하였다. 1대의 블로워를 이용하여 공기를 저유량에서 고유량 조건까지 공급하는 경우, 블로워의 효율이 낮은 지점에서 운전하는 경우가 발생하므로 소형 블로워 2개를 설치하고 경우에 따라 1대를 정지시키는 방식을 적용하였다. 실험 결과, 연료전지 스택에 공급하는 공기의 이론양론비가 2인 경우에는 1대의 블로워를 사용하는 것이 유리하였고, 이론양론비가 3인 경우에는 블로워를 2대 설치하는 것이 더 유리함을 확인하였다.

Kim 등⁶⁹⁾은 PEMFC를 사용하는 자동차용 연료전지 시스템의 모델링 시뮬레이션을 수행하고, 주요 작동변수의 변경에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 상압형 연료전지 스택, 공기공급장치, 가습기, 펌프 등의 구성품 모델을 개발하고 이를 통합하여 시스템 모델을 구축하였다. 스택의 작동온도, 공기극 양론비, 공기극 압력, 공기극 상대습도 등을 변경하면서 시스템 효율에 미치는 영향을 검토하였으며, 공기극 압력의 변화가 미치는 영향이 가장 큼을 확인하였다.

Yang 등⁷⁰⁾은 전력계통과 연계되지 않고, 독립적으로 운전하는 연료전지-배터리 하이브리드 시스템을 제안하고, 실험과 시뮬레이션을 통해 에너지 관리기술을 개발한 결과를 보고하였다. 실험장치로는 1.2 kW 급 독립방식 가정용 연료전지-배터리 하이브리드 시스템을 구축하였으며, 가정의 전력부하에 따라 시스템이 안정적으로 동작하기 위한 제어방법을 개발하였다. 제어기법으로는 기계상태법(state machine control)과 퍼지제어법(fuzzy logic control)을 1차로 적용하였고, 두 제어방법의 장점을 조합한 하이브리드 제어방법을 제안하고 실험적으로 검증하였다. 하이브리드 제어법 적용 시 기존 방법에 비하여 4.7% 정도 에너지 절감효과가 있음을 보고하였다.

Kang 등⁷¹⁾은 PEMFC 스택이 무인기에 탑재되는 경우, 발생하는 진동이 PEMFC 스택에 미치는 영향을 분석하였다. 진동주파수를 90-140 Hz 사이에서 랜덤하게 변경하면서 1 G의 진동가속도로 진동을 인가하면서 일정시간 경과 후, 육안 검사(조립부풀림, 변형, 파손 등)와 성능시험(기밀, 전류-전압 특성, 주파수 반응분석 등)을 수행하였다. 220시간 실험을 통해 기밀성능과 성능이 미세하게 감소하는 것을 확인하였다. 전류-전압 성능은 0.01% 감소하였고, 내부저항도 0.01% 감소하는 결과를 도출하였으며, 장기간 실험이 필요함을 제안하였다.

Naseem 등⁷²⁾은 연료전지 시스템에서 발생하는 폐열을 효과적으로 이용하기 위한 방안으로 흡착식(adsorption) 냉방시스템과 연계하는 방안을 제안하였으며, 150°C 내외에서 작동하는 HT-PEMFC 시스템으로부터 열을 회수하여 75-80°C의 온수를 생산하

고, 온수의 열을 흡착식 냉방시스템에 공급하는 방식으로 시스템을 구성하였다. 실험 결과, 15-20% 정도 총괄효율이 개선됨을 확인하였다.

Ryu 등⁷³⁾은 연료전지 시스템의 폐열을 이용하여 추가적으로 전력을 생산하기 위한 방안의 하나로, 초임계 CO₂ 발전사이클(supercritical CO₂ power cycle)을 연계하는 시스템을 제안하고, 공정해석을 통해 효율을 분석하였다. 열원으로는 고온형 연료전지인 MCFC 배가스를 가정하였고, 재압축(recompression) 초임계 CO₂ 사이클과 연계되는 경우, 시스템 최적 구성방안을 제안하였다. 계산결과, 최적 터빈입구 압력은 200 bar로 선정되었고, 총 발전효율은 3-4% 향상되는 결과를 제시하였다.

Lee와 Jung⁷⁴⁾은 MCFC의 전기화학 성능 모델 개발의 일환으로 공기극과 연료극의 저항 모델링을 수행하였다. 문헌에서 제시된 수식과 100 cm² 면적의 MCFC 단위셀 실험 결과를 비교하여, 새로이 개발된 전극물질에 적용가능한 연료극과 공기극의 분극저항 모델을 개발하였다. 실험자료와 비교결과, 620도 이상의 온도에서 최대오차 2.57%를 나타내었다.

Giap 등⁷⁵⁾은 폐기물 스택과 연계한 양방향 SOFC 시스템에서 연료재순환을 위해 이젝터를 채용한 경우의 시스템 최적화 연구를 수행하였다. 연료전지 스택과 BOP 모델을 개발하여 시스템 전체 모델을 통합하였고, 설계점/탈설계점 운전에 대하여 다양한 성능인자를 분석하였다. 시스템을 최대한 단순화하기 위하여 열교환기 숫자를 줄인 경우 시스템 효율을 분석하였다.

In 등⁷⁶⁾은 건물용 연료전지와 연계한 제습냉방시스템을 제안하고 성능과 에너지 절감에 대한 분석을 수행하였다. 10 kW 급 SOFC 시스템에서 폐열을 이용하여 온수를 생산하였다가 제습냉방장치가 구동될 때 열을 공급하는 방식으로 시스템을 구성하였다. 연료전지는 24시간 구동, 제습냉방은 8시간 구동되는 것으로 가정하였다. 하이브리드 시스템 구성을 통해 총괄 에너지효율인 3-4% 향상됨을 보고하였는데, 앞서 Naseem 등⁷²⁾이 보고한 연구 결과와 유사한 값을 나타내었다.

3.5. 연료전지 시스템 BOP 분야 연구동향

Shin⁷⁷⁾은 수소전기차(연료전지 자동차)용 공기압축기의 열유동 해석 수행 결과를 보고하였다. 무급유 방식으로 공기를 공급하기 위해 공기압축기에 공기포일 베어링(air foil bearing)을 설치하게 되는데, 공기포일 베어링의 발열을 효과적으로 제거하는 것이 압축기의 안정적인 운전에 매우 중요하다. 전산유체(CFD) 해석을 통해, 10 rpm에서 회전하는 블로워 베어링을 해석하였고, 실험 결과 대비 10% 이내의 해석정확도를 확보하였다.

Kim 등⁷⁸⁾은 수소전기차(연료전지 자동차)용 EPDM 고무의 수소환경에서의 거동을 분석하였다. 수소가 공급되는 고압배관의 밀봉재로 사용되는 EPDM 고무는 고압의 수소환경에서 작동하기 때문에 이에 대한 안정성 확보가 중요하고, 고무에 충전된 카본블랙(carbon black) 충전재의 입자크기에 따라 특성이 달라지게 된다. 카본블랙의 입자크기를 변경하면서 수소노출시험, 부피변화시험, 재료물성변화 시험을 수행하여 EPDM 고무의 안정성을 평가하였다. 시험결과, 입자가 고온 카본블랙을 적용할 수록 물성의 변화가 작고 안정적임을 확인하였다.

Chae와 Yu⁷⁹⁾는 PEMFC 연료전지의 막 가습기로 개발되고 있는 원통 다관형과 평판형 물질교환기의 형태 중에서 원통 다관형 물질 교환기에 사용되는 중공사막 튜브 다발에 의한 수분 전달 특성을 실험적으로 측정하였으며, 해당 연구를 통해 물질 전달 특성에 대한 이해도를 높였다. 또한 기초 실험을 위한 장치를 구성하고 작동온도와 유량에서 막 외부의 습공기로부터 막 내부의 건공기로의 수분 수송에 관하여 실험을 진행하였다. 실험 결과, 작동유량 5 L/min 보다 10 L/min에서 약 6×10⁻⁴ g/s, 15 L/min에서는 약 10×10⁻⁴ g/s 수분 수송량의 증가를 보이는 등의 실험변수(중공사막 외부의 습공기, 습공기의 유동 및 투과 면적 등)와 수분 수송량의 상관관계를 보였다.

Won 등⁸⁰⁾은 가정용 연료전지 시스템에 공기를 공급하는 블로워 시스템을 대상으로 모델기반 고장검출 기술을 개발하였다. 3가지 부하조건(50, 75, 100%)에

서 6가지 부위의 고장을 모사하여 실험데이터를 확보하였고, 경험적 모델식을 결정하여 고장검출에 활용하였다.

Kim 등⁸¹⁾은 MCFC를 컴팩트하게 설계하기 위해 이젝터를 사용하여 재순환하는 시스템을 구현하였으며, 이 시스템을 완성하기 위해 핵심적인 역할을 하는 이젝터의 설계와 시험에 대해 고찰하였다. 125 kW MCFC 시스템(3,000시간 이상 운전, 65 MWh의 발전량)의 공정 조건을 설정하고 연료전지 연료극의 출구가스를 촉매연소기로 순환시키기 위한 이젝터를 설계하여 시험한 결과를 분석하였다. 본 연구에서는 연료전지의 스택출력(0-125 kW)이 올라가면 소요공기와 가스의 유량도 많아지므로 1차 유동과 이젝터 출구 압력이 비례하여 증가함을 보였다. 2차 유동압력은 1차 유동의 압력에 비해 일정한 수준으로 유지되고 1차 유동과 2차유동의 압력차가 커질수록 이젝터 흡입 챔버의 진공이 강화되며, 이젝터로 2차 유동이 지속적으로 유입됨을 본 연구를 통해 확인하였다.

Choi 등⁸²⁾은 고온 영역의 SOFC에서 개발된 적층 단열재의 다양한 조건에서의 성능 예측을 위한 모델을 개발하였고, 같은 조건에서의 실험을 통해 모델의 타당성을 증명하는 연구를 진행하였다. 연구는 200, 600, 900°C의 온도조건에서 진행되었고, 단열재의 종류는 단열재 구성(간격 유지재와 복사 차폐재의 유무)에 따라 총 4가지로 나뉘어서 진행하였다. 모든 조건에서 온도는 두께 방향에 따라 계단 형태로 감소하는 경향을 보여주었고, 고온 조건일수록 하락 온도의 폭이 큼을 확인하였다. 온도 분포를 통해서 간극 유지재와 복사 차폐재가 명확히 본연의 목적을 구현하고 있음을 확인하였다. 또한, 실험 결과와의 비교를 통해서 적층 단열재의 소재나 구성 변경에 따른 단열재의 성능을 예측 가능한 모델을 개발하였다.

Byun 등⁸³⁾은 고온 수전해 연료전지에 고온 스택을 공급하기 위한 인터페이스 장치의 열전달 해석을 수행하였다. 스택이 생산된 이후 스택으로 공급되는 동안, 연결배관에서 상당한 수준의 열손실이 발생한다. 격임부를 다양하게 설계하고, 단열 3중관을 가정하여 전산해석을 수행하였고, 온도감소와 압력손실을

정량화하였다.

Choi 등⁸⁴⁾은 인공위성의 다층박막 기술을 응용하여 고온에서 열전도도의 급격한 하락을 방지하는 SOFC의 고온용 적층 단열재를 개발하는 연구를 진행하였다. 금속 시편은 99.95% 순도의 철, 구리, 알루미늄을 사용하였고, 전도 감소재, 복사 차폐재와 간극 유지재(spacer)를 조합한 고온용 적층 단열재를 구성하여 온도에 따른 열전도 특성을 분석하였다. 그 결과, 동일소재로 구성된 전도 감소재만 사용한 일반 단열재는 고온에서 열전도도가 급격하게 저하되었지만, 개발된 단열재에서는 고온에서 열전도도 상승이 완화되어 상대적으로 단열성능을 유지하는 것을 확인하였다.

3.6. 연료전지 진단분석 분야 연구동향

Oh⁸⁵⁾는 anode와 cathode에 각각 수소와 질소를 공급하고, 수소 crossover에 의해 나타나는 전류 값을 측정하는 선형주사전압전류측정법(linear sweep voltammetry, LSV)으로 수소투과 전류밀도를 측정하여 PEMFC의 고분자막 열화정도를 평가하였다. 이 연구에서는 PEMFC 구동 및 가속 열화 시험 과정에서 미국 Department of Energy (DOE) 프로토콜과 일본 New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) 프로토콜, 두 프로토콜을 적용해 수소투과 전류밀도를 비교하였다. DOE 프로토콜 사용시 주사속도(scan rate) 변화가 수소투과 전류밀도에 영향을 주지만 NEDO 프로토콜에서는 주사속도가 수소투과전류밀도에 영향을 주지 않았다. 고분자막 가속/진조 15,000사이클 평가 결과, DOE 프로토콜은 막의 열화를 민감하게 측정하였으나 NEDO 프로토콜은 상대적으로 막의 열화가 덜 민감하게 나타나는 단점을 보인 결과를 얻었다.

Oh 등⁸⁶⁾은 (혹은 같은 연구팀은) PEMFC의 고분자막 전기화학적 내구성을 셀 밖에서 평가하는 방법으로 많이 이용되는 펜톤(Fenton) 반응에 영향을 주는 인자를 파악하는 연구를 수행하였다. 과산화수소 농도를 분석해 반응진행도를 측정하였는데, 펜톤반

응 속도는 철이온 농도에 많은 영향을 받았고, 펜톤 반응 후반으로 갈수록 라디칼 발생의 온도 의존도가 커짐을 확인하였다. 또한, 교반속도가 증가함에 따라 과산화수소 감소 속도가 증가하였는데, 교반속도 200 rpm, 80°C, Fe²⁺ 80 ppm 조건에서는 1시간동안에도 과산화수소 농도가 20% 이상 처음과 차이가 나므로 실제 고분자막 열화하기 위한 펜톤 실험에서는 과산화수소 용액교체를 자주 하는 것이 막열화 속도를 증가시킴을 확인하였다.

Oh 등⁸⁷⁾은 (혹은 같은 연구팀은) 정치용 PEMFC MEA의 내구평가는 일정전류 조건에서 전압 강하 속도를 1,000시간 이상 장시간 측정해야하는 문제점이 있어, 내구평가시간을 단축시키기 위해 차량용 MEA에 적용하고 있는 고분자막의 전기화학적 내구평가 프로토콜(open circuit voltage, OCV 유지법)을 정치용 MEA 내구 평가에 적용하려는 연구를 수행하였다. OCV, cathode 산소, 90°C, 상대습도 30% 조건에서 정치용과 차량용 MEA를 각각 168시간 가속 열화 실험 후에 I-V, LSV, cyclic voltammetry (CV), 임피던스, 불소이온유출속도 등을 측정해서 비교하였다. 열화 후 전해질막의 내구성을 나타내는 수소투과도, OCV 변화, 이온전도도, 불소유출량 등을 모두 검토하였을 때 정치용이 차량용보다 내구성이 더 좋음을 보였다. 그리고 전극열화도 정치용 MEA가 작아서 정치용 MEA가 고분자막과 전극 모두 차량용보다 내구성이 우수함을 차량용 내구 평가 프로토콜에 의해 짧은 시간에 평가할 수 있음을 보였다.

PEMFC의 고분자막 내구성을 평가하는 데 수소투과도 측정 방법으로 LSV가 주로 사용되는데, 연구자마다 LSV 측정 방법에 차이가 있어 연구 결과를 비교 평가하기 어렵다. 이 연구에서는 측정이 까다롭지만 기준이 될 수 있는 기체 크로마토그래프에 의한 수소투과도와 DOE와 NEDO의 LSV 프로토콜을 비교하여 LSV 측정방법의 정확성을 평가하고자 하였다. 온도와 상대습도를 변화시키며 수소투과도를 측정해 비교하였을 때, DOE의 LSV 프로토콜 기체 크로마토그래프 방법과 비교해 오차 범위 5% 이하의 정확성을 보였고, 외삽에 의해 수소투과전류밀도를

결정하는 NEDO LSV 프로토콜은 10% 이상의 오차를 보인 결과를 얻었다.

Lee 등⁸⁸⁾은 PEMFC 예지 진단 기술에 관한 리뷰 논문에서, 운영 및 유지보수 최적화에 의한 내구성과 신뢰성을 증대시키는 것이 PEMFC 상업화에 필수적이라는 점을 강조하면서, 다양한 문헌을 통해 1) 대표적인 열화 메커니즘을 분석, 2) 데이터 기반, 모델 기반 접근과 같은 고장 예진 방법의 기술을 정리, 3) PEMFC에 적용된 다양한 기술 분석을 수행하였다. 또한, 외부 환경과 운전조건을 포함하여 다양한 원인에 의한 열화와 열화가 가속화되어 손상을 일으키는 현상 등에 대해서는 정량적으로 더 많은 분석이 필요하다는 점 등을 지적하면서, 향후 PEMFC의 고장 예지 진단 기술 개발 방향 설정에 도움을 주자 하였다.

4. 결론 및 시사점

본 리뷰 논문에서는 국내 주요 등재지 최신희 발간 논문을 중심으로 연료전지 기술을 분석하여 최근 연구동향과 주요결과를 정리하였다.

전극과 전해질의 신소재, 신개념 제조방법, 분리판 설계, 스택 운전과 모델링, 신개념 시스템 제안 및 BOP 개발과 관련한 다양한 연구 결과를 확인하였다.

앞으로 정기적으로 논문자료를 분석하여 연구동향과 주요결과를 정리하는 것이 관련 연구자간의 정보공유에 유익하다 판단되며, 연료전지 분야 외에 다양한 수소에너지 분야에 대한 분석도 수행할 필요가 있다 판단된다.

References

1. IEA, "The future of hydrogen", IEA, 2019. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
2. I. Staffell, D. Scamman, A. V. Abad, P. Balcombe, P. E. Dodds, P. Ekins, N. Shahd, and K. R. Warda, "The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system", Energy Environ. Sci., Vol. 12, 2019, pp. 463-491, doi: <https://doi.org/10.1039/C8EE01157E>.
3. Hydrogen Council, "How hydrogen empowers the energy

- transition”, Hydrogen Council, 2017. Retrieved from <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/Hydrogen-Council-Vision-Document.pdf>.
4. A. L. Dicks and D. A. J. Rand, “Fuel cell systems explained”, 3rd ed, John Wiley & Sons Ltd., U.S., 2018.
 5. M. A. Abdelkareem, K. Elsaid, T. Wilberforce, M. Kamil, E. T. Sayed, and A. Olabi, “Environmental aspects of fuel cells: a review”, *Science of The Total Environment*, Vol. 752, 2021, pp. 141803, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141803>.
 6. C. Weyers and T. Bocklisch, “Simulation-based investigation of energy management concepts for fuel cell–battery–hybrid energy storage systems in mobile applications”, *Energy Procedia*, Vol. 155, 2018, pp. 295–308, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.048>.
 7. Y. Yang, H. Zhang, P. Yan, and K. Jermittiparsert, “Multi-objective optimization for efficient modeling and improvement of the high temperature PEM fuel cell based Micro-CHP system”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 11, 2020, pp. 6970–6981, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.189>.
 8. Y. S. Kim, Y. D. Lee, K. Y. Ahn, “System integration and proof-of-concept test results of SOFC–engine hybrid power generation system”, *Applied Energy*, Vol. 277, 2020, pp. 115542, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115542>.
 9. P. Agnolucci, “Economics and market prospects of portable fuel cells”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 17, 2007, pp. 4319–4328, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.03.042>.
 10. A. Veziroglu and R. Macario, “Fuel cell vehicles: state of the art with economic and environmental concerns”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 1, 2011, pp. 25–43, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.145>.
 11. T. Li, H. Liu, H. Wang, and Y. Yao, “Hierarchical predictive control-based economic energy management for fuel cell hybrid construction vehicles”, *Energy*, Vol. 198, 2020, pp. 117327, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117327>.
 12. E. Hosseinzadeh, M. Rokni, A. Rabbani, and H. H. Mortensen, “Thermal and water management of low temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell in fork-lift truck power system”, *Applied Energy*, Vol. 104, 2013, pp. 434–444, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.048>.
 13. V. T. Giap, Y. D. Lee, Y. S. Kim, K. Y. Ahn, D. H. Kim, and J. I. Lee, “System simulation and exergetic evaluation of hybrid propulsion system for crude oil tanker: a hybrid of solid-oxide fuel cell and gas engine”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 223, 2020, pp. 113265, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113265>.
 14. J. H. Cho, S. S. Yu, M. Y. Kim, S. G. Kang, Y. D. Lee, K. Y. Ahn, and H. J. Ji, “Dynamic modeling and simulation of hydrogen supply capacity from a metal hydride tank”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 21, 2013, pp. 8813–8828, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.142>.
 15. KETEP (www.ketep.re.kr)
 16. Korea Citation Index (<https://www.kci.go.kr/kciportal/aboutKci.kci>)
 17. Transactions of the KSME, B (<http://journal.ksme.or.kr/>)
 18. Korean Chemical Engineering Research (<https://www.kiche.or.kr/kcer/>)
 19. New & Renewable Energy (<http://journalksnre.com/>)
 20. Trans Korean Hydrogen New Energy Soc (<http://manuscript.hydrogen.or.kr/index.php>)
 21. The KSFM Journal of Fluid Machinery (<http://aoms.atit.co.kr>)
 22. J. Korean Electrochem. Soc. (<http://jkes.kecs.or.kr/>)
 23. S. H. Lee, J. H. Nam, C. J. Kim, and H. M. Kim, “Numerical analysis of liquid water transportation in GDL of a polymer electrolyte membrane fuel cell using lattice boltzmann method: I. Effect of wettability of GDL”, *Transactions of the KSME, B*, Vol. 43, No. 9, 2019, pp. 639–649, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2019.43.9.639>
 24. J. H. Kang, S. H. Lee, J. H. Nam, and H. M. Kim, “Pore network analysis of capillary water transport in porous transport layers of polymer electrolyte membrane fuel cells”, *Transactions of the KSME, B*, Vol. 44, No. 10, 2020, pp. 591–602, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2020.44.10.591>.
 25. S. S. Yoo and T. H. Oh, “Cathode catalyst of direct borohydride/hydrogen peroxide fuel cell for space exploration”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 31, No. 5, 2020, pp. 444–452, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.5.444>.
 26. H. S. Jung, D. H. Kim, C. H. Park, “Characterization of PTFE electrode made by bar-coating method using alcohol-based catalyst slurry”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 31, No. 3, 2020, pp. 276–283, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.3.276>.
 27. H. S. Kim, S. C. Ryu, Y. W. Lee, and T. H. Shin, “High electrochemical activity of Pt-Cu alloy support on carbon for oxygen reduction reaction”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 6, 2019, pp. 459–555, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.6.549>.
 28. J. Y. Jang, S. D. Yim, S. H. Park, N. G. Jung, and G. G. Park, “A study on characteristics of supports materials for durability improvement of electrocatalysts”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 6, 2019, pp. 531–539, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.6.531>.
 29. B. J. Park, S. Lee, S. Woo, S. H. Park, N. Jung, and S. D. Yim, “Effect of ionomer content on the anode catalyst layers of PEM fuel cells”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 6, 2019, pp. 523–530, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.6.523>
 30. K. H. Kim, J. D. Lee, H. J. Lee, S. H. Park, S. D. Yim, N. G. Jung, and G. G. Park, “Preparation of shape-controlled palladium nanoparticles for electrocatalysts and their performance evaluation for oxygen reduction reaction”, *Trans*

- Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 29, No. 5, 2018, pp. 450-457, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.5.450>.
31. J. H. Noh and J. H. Myung, "Optimization of anode and electrolyte microstructure for solid oxide fuel cells", Korean Chemical Engineering Research, Vol. 57, No. 4, 2019, pp. 525-530, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2019.57.4.525>.
 32. D. H. Kim, E. Lee, and C. Pak, "Comparison of the characteristics of Pd-Ir-Y ternary alloy catalyst particles and oxygen reduction activity according to yttrium contents", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 29, No. 3, 2018, pp. 260-266, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.3.260>.
 33. S. H. Ji, C. M. Jang, and W. C. Jung, "Control of the pore size of sputtered nickel thin films supported on an anodic aluminum oxide substrate", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 29, No. 5, 2018, pp. 434-441, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.5.434>.
 34. M. J. Kwak, H. J. Choi, T. W. Kim, D. W. Seo, S. K. Woo, and S. D. Kim, "Redox stability and electrochemical performances of $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Fe}_{1-x}\text{Sc}_{x}\text{O}_{3-\delta}$ for solid oxide cells interconnector", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 29, No. 3, 2018, pp. 274-279, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.3.274>.
 35. M. J. Lee, M. G. Kang, S. C. Jang, H. C. Ham, J. W. Ahn, S. W. Nam, S. P. Yoon, and J. H. Han, "Development of large-scale Ni-Al alloy fabrication process at low temperature", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 29, No. 1, 2018, pp. 64-70, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.1.64>.
 36. H. Zarrin, D. Higgins, Y. Jun, Z. Chen, and M. Fowler, "Functionalized graphene oxide nanocomposite membrane for low humidity and high temperature proton exchange membrane fuel cells", J. Phys. Chem. C, Vol. 115, No. 42, 2011, pp. 20774-20781, doi: <https://doi.org/10.1021/jp204610j>.
 37. M. Vinothkannan, R. Hariprasad, S. Ramakrishnan, A. R. Kim, and D. J. Yoo, "Potential bifunctional filler (CeO₂-ACNTs) for nafion matrix toward extended electrochemical power density and durability in proton-exchange membrane fuel cells operating at reduced relative humidity", ACS Sustainable Chem. Eng., Vol. 7, No. 15, 2019, pp. 12847-12857, doi: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b01757>.
 38. M. Vinothkannan, S. Ramakrishnan, A. R. Kim, H. K. Lee, and D. J. Yoo, "Ceria stabilized by titanium carbide as a sustainable filler in the nafion matrix improves the mechanical integrity, electrochemical durability, and hydrogen impermeability of proton-exchange membrane fuel cells: effects of the filler content", ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol. 12, No. 5, 2020, pp. 5704-5716, doi: <https://doi.org/10.1021/acsmi.9b18059>.
 39. B. C. Hwang, S. H. Oh, D. W. Lee, H. B. Chung, S. E. You, Y. M. Ku, I. C. Na, J. H. Lee, and K. P. Park, "Effect of current density on ion conductivity of membrane in proton exchange membrane", Korean Chem. Eng. Res., Vol. 56, No. 1, 2018, pp. 1-5, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2018.56.1.1>.
 40. D. W. Lee, B. C. Hwang, D. H. Lim, H. B. Chung, S. E. You, Y. M. Ku, and K. P. Park, "Transport of water through polymer membrane in proton exchange membrane fuel cells", Korean Chem. Eng. Res., Vol. 57, No. 3, 2019, pp. 338-343, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2019.57.3.338>.
 41. D. W. Lee, S. H. Oh, D. H. Lim, H. B. Chung, S. E. Yoo, Y. M. Ku, and K. P. Park, "Comparison of characteristics and performance of membrane in proton exchange membrane fuel cells", Korean Chem. Eng. Res., Vol. 58, No. 2, 2020, pp. 171-175, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2020.58.2.171>.
 42. S. H. Yook, K. R. Yoon, J. H. Choi, J. S. Lee, J. M. Kim, S. W. Lee, K. Y. Lee, and J. Y. Kim, "Effect of dispersion solvent on properties of fluorinated polymer reinforced composite membrane for fuel cell by solution coating method", Korean Chem. Eng. Res., Vol. 57, No. 3, 2019, pp. 413-419, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2019.57.3.413>.
 43. D. E. Han and D. J. Yoo, "Synthesis and characterization of polybenzimidazole random copolymers containing methylene chain for high temperature PEMFC", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 29, No. 6, 2018, pp. 578-586, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.6.578>.
 44. S. Y. Lee and D. J. Yoo, "Comparison of properties of two kinds of anion exchange membranes with different functional group for alkaline fuel cells", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 29, No. 5, 2018, pp. 458-465, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.5.458>.
 45. D. S. Han and D. J. Yoo, "Synthesis and properties of sulfonated poly(arylene ether sulfone) block copolymers with naphthalene moiety for polymer electrolyte fuel cells", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 29, No. 4, 2018, pp. 331-338, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.4.331>.
 46. A. R. Kim, M. Vinothkannan, C. J. Park, and D. J. Yoo, "Alleviating the mechanical and thermal degradations of highly sulfonated poly(ether ether ketone) blocks via copolymerization with hydrophobic unit for intermediate humidity fuel cells", Polymers, Vol. 10, No. 12, 2018, pp. 1346, doi: <https://doi.org/10.3390/polym10121346>.
 47. A. R. Kim, J. C. Gabunada, and D. J. Yoo, "Amelioration in physicochemical properties and single cell performance of sulfonated poly(ether ether ketone) block copolymer composite membrane using sulfonated carbon nanotubes for intermediate humidity fuel cells", Int. J. Energy Res., Vol. 43, No. 7, 2019, pp. 2974-2989, doi: <https://doi.org/10.1002/er.4494>.
 48. D. E. Han and D. J. Yoo, "Mesoporous SiO₂ mediated polybenzimidazole composite membranes for HT-PEMFC application", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 30, No. 2, 2019, pp. 128-135, doi: <https://doi.org/10.7316/>

- KHNES.2019.30.2.128.
49. K. H. Lee, J. Y. Chu, A. R. Kim, and D. J. Yoo “Effect of functionalized SiO₂ toward proton conductivity of composite membranes for PEMFC application”, *Int. J. Energy Res.*, Vol. 43, No. 10, 2019, pp. 5333-5345, doi: <https://doi.org/10.1002/er.4610>.
 50. R. Deng, W. Han, and K. L. Yeung, “Confined PFSA/MOF composite membranes in fuel cells for promoted water management and performance”, *Catalysis Today*, Vol. 331, 2019, pp. 12-17, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.05.016>.
 51. C. J. Park, A. R. Kim, and D. J. Yoo, “Preparation and Characterization of SPAES/SPVDF-co-HFP blending membranes for polymer electrolyte membrane fuel cells”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 3, 2019, pp. 227-236, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.3.227>.
 52. A. R. Kim, M. Vinothkannan, and D. J. Yoo, “Sulfonated fluorinated multi-block copolymer hybrid containing sulfonated(poly ether ether ketone) and graphene oxide: a ternary hybrid membrane architecture for electrolyte applications in proton exchange membrane fuel cells”, *J. Energy chem.*, Vol. 27 No. 4, 2018, pp. 1247-1260, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2018.02.020>.
 53. B. Y. Kim, M. J. Kim, Y. G. Yoon, S. B. Moon, and J. H. Chung, “Preparation and characterization of covalently cross-linked SPEEK/cellulose composite membranes with various cross linkage contents for water electrolysis”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 5, 2018, pp. 411-418, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.5.411>.
 54. P. Kulasekaran, B. M. Mahimaia, and P. Deivanayagam, “Novel cross-linked poly(vinyl alcohol)-based electrolyte membranes for fuel cell applications”, *RSC Adv.*, Vol. 10, 2020, pp. 26521-26527, doi: <https://doi.org/10.1039/D0RA04360E>.
 55. S. O. Oh, “Comparison of membrane degradation of PEMFC by fenton reaction and OCV holding”, *The Korean Institute of Chemical Engineers*, Vol. 57, No. 6, 2019, pp. 768~773, doi: <http://dx.doi.org/10.9713/kcer.2019.57.6.768>.
 56. J. S. Han, J. Y. Han, and S. S. Yu, “An experimental study of stack durability characteristic evaluation with vehicle load emulation cycle”, *Transactions of the KSME, B*, Vol. 42, No. 4, 2018, pp. 227-283, doi: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2018.42.4.277>.
 57. J. S. Han, J. Y. Han, and S. S. Yu, “Emulation of thermal energy generation of fuel cell stack via hardware in loop simulation”, *Transactions of the KSME, B*, Vol. 42, No. 11, 2018, pp. 735-744, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2018.42.11.735>.
 58. J. S. Kim and J. B. Kim, “Effect of hydrogen recirculation on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cell with dead ended mode”, *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 57, No. 4, 2018, pp. 531-538, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2019.57.4.531>.
 59. J. Lee, N. Lee, K. Lim, J. Choi, and H. Ju, “Numerical study on the cathode channel width ratio for improving performance of a passive air cooled PEMFC”, *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 23, No. 1, 2020, pp. 40-48, doi: <https://doi.org/10.5293/kfma.2020.23.1.040>.
 60. H. K. Lee and K. S. Han, “Effect of surface-modified carbon fiber on the mechanical properties of carbon/epoxy composite for bipolar plate of PEMFC”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 31, No. 1, 2020, pp. 49-56, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.1.49>.
 61. J. H. Kim, M. J. Kim, and J. S. Kim, “Flow field design and stack performance evaluation of the thin plate separator for high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 5, 2018, pp. 442-449, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.5.442>.
 62. S. H. Ahn, K. M. Oh, and H. C. Ju, “Numerical study on comparison of serpentine and parallel flow channel in high-temperature proton exchange membrane fuel cells”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 1, 2018, pp. 41-55, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.1.41>.
 63. D. W. Kim, H. Y. Kim, J. H. Choi, and C. W. Lee, “Study on the effects of the flow characteristics and size on the performance of molten carbonate fuel cells using CFD”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 2, 2019, pp. 147-154, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.2.147>.
 64. S. J. Lee, C. Y. Lee, and C. W. Lee, “Design of cell frame structure of unit cell for molten carbonate fuel cell using CFD analysis”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 1, 2018, pp. 56-63, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.1.56>.
 65. J. Y. Lee, I. T. Pineda, V. T. Giap, D. K. Lee, Y. S. Kim, K. Y. Ahn, and Y. D. Lee, “Performance prediction model of solid oxide fuel cell stack using deep neural network technique”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 31, No. 5, 2020, pp. 436-443, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.5.436>.
 66. S. Oh, M. Lee, H. Lee, W. Kim, J. W. Park, and K. Park, “Performance comparison between stationary PEMFC MEA and automobile MEA under pure hydrogen supply condition”, *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 56, No. 4, 2018, pp. 469-473, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2018.56.4.469>.
 67. E. K. Lee, J. W. Lee, J. S. Moon, S. H. Lee, and D. H. Shin, “An empirical evaluation of safety of the common vent structure for stationary fuel cell systems”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 6, 2018, pp. 596-605, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.6.596>.
 68. I. J. Kim, J. J. Lee, and H. S. Kim, “Study on the characteristics of low-pressure automotive polymer electrolyte membrane fuel cell system efficiency with blower configuration”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 2, 2018, pp.

- 181-189, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.2.181>.
69. H. S. Kim, B. G. Kang, and K. S. Won, "Modeling of PEM fuel cell system-sensitivity analysis of system efficiency with different main operating parameters of automotive fuel cell system", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 5, 2019, pp. 401-410, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.5.401>.
 70. S. R. Yang, J. Kim, M. Choi, and Y. B. Kim, "Energy management technology development for an independent fuel cell-battery hybrid system using for a household", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 2, 2019, pp. 155-162, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.2.155>.
 71. J. Y. Kang, G. W. Oh, M. W. Kim, J. W. Lee, and S. K. Lee, "A evaluation on the effect of vibration for the application of PEMFC stack to unmanned aircraft", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 6, 2018, pp. 587-595, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.6.587>.
 72. M. Naseem, C. M. Kim, and S. Y. Lee, "A study on the efficiency enhancement of the HT-PEMFC having fuel processing system by connecting adsorption chilling system", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 5, 2019, pp. 411-417, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.5.411>.
 73. J. Y. Ryu, S. H. Park, M. K. Yoon, D. R. Lim, C. S. Yeom, and H. S. Park, "Sensitivity analysis of MCFC-supercritical CO₂ brayton combined cycle for design optimiz", *Transactions of the KSME, B*, Vol. 43, No. 1, 2019, pp. 63-67, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2019.43.1.063>.
 74. C. W. Lee and J. Y. Jung, "Modelling of the resistance model for anode and cathode for molten carbonate fuel cells", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 3, 2018, pp. 267-273, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.3.267>.
 75. V. T. Giap, Y. D. Lee, Y. S. Kim, T. Q. Quach, and K. Y. Ahn, "Optimal design of rsofc system coupled with waste steam using ejector for fuel recirculation", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 4, 2019, pp. 303-311, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.4.303>.
 76. J. H. In, Y. Lee, S. Kang, and S. Park, "Analysis of performance and energy saving of a SOFC-based hybrid desiccant cooling system", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 2, 2019, pp. 136-146, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.2.136>.
 77. H. J. Shin, "CFD analysis of an air compressor for a hydrogen electric car", *Transactions of the KSME, B*, Vol. 42, No. 12, 2018, pp. 853-859, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2018.42.12.853>.
 78. K. J. Kim, H. R. Jeon, Y. I. Kang, W. Kim, J. Yeom, S. J. Choi, and M. Cho, "Influence of filler particle size on behaviour of EPDM rubber for fuel cell vehicle application under high-pressure hydrogen environment", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 31, No. 5, 2020, pp. 453-458, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.5.453>.
 79. J. M. Chae and S. S. Yu, "Moisture permeation characteristics of hollow fiber membrane tube for humidification according to input conditions of wet steam", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 6, 2018, pp. 620-626, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.6.620>.
 80. J. Y. Won, M. J. Kim, W. Y. Lee, Y. Y. Choi, J. S. Hong, and H. Y. Oh, "Model-based fault detection method for the air supply system of a residential PEM fuel cell", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 6, 2019, pp. 556-566, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.6.556>.
 81. B. J. Kim, S. M. Park, and O. S. Song, "The Ejector design and test for 125 kW class molten carbonate fuel cell system", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 2, 2018, pp. 139-147, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.2.139>.
 82. J. K. Choi, S. S. Hwang, and G. H. Chou, "An analysis using numerical model of composite multi-layer insulation for SOFC", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 6, 2019, pp. 540-548, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.6.540>.
 83. H. S. Byun, D. Han, S. Park, C. Cho, and Y. Baek, "A CFD analysis on heat transfer of high temperature steam through interface with superheater and SOEC for hydrogen production", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 31, No. 2, 2020, pp. 169-176, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.2.169>.
 84. J. G. Choi, S. S. Hwang, and G. H. Cho, "Development of multiple layers insulation for SOFC", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 4, 2018, pp. 386-392, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.4.386>.
 85. S. O. Oh, "Comparison of hydrogen crossover current density by analysis method of linear sweep voltammetry (LSV) in proton exchange membrane fuel cells", *The Korean Institute of Chemical Engineers*, Vol. 56, No. 2, 2018, pp. 151~155, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2018.56.2.151>.
 86. S. Oh, J. Kim, D. Lee, and K. Park, "Variation of hydrogen peroxide concentration during fenton reaction for test the membrane durability of PEMFC", *The Korean Institute of Chemical Engineers*, Vol. 56, No. 3, 2018, pp. 315-319, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2018.56.3.315>.
 87. S. Oh, M. Lee, J. Yun, H. Lee, W. Kim, I. C. Na, and K. Park, "Durability evaluation of stationary PEMFC MEA by OCV holding method", *The Korean Institute of Chemical Engineers*, Vol. 57, No. 3, 2019, pp. 344-350, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2019.57.3.344>.
 88. W. Y. Lee, M. Kim, H. Oh, Y. J. Sohn, and S. G. Kim, "A review on prognostics of polymer electrolyte fuel cells", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 4, 2018, pp. 339-356, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.4.339>.