

선박용 연료전지 성능 예측 방법에 관한 고찰

박은주¹ · 이진광^{2†}

¹경기과학기술대학교 전기공학과, ²경상국립대학교 기계융합공학과

A Review on Performance Prediction of Marine Fuel Cells

EUNJOO PARK¹, JINKWANG LEE^{2†}

¹Department of Electronic Engineering, Gyeonggi University of Science and Technology, 269 Gyeongggiwagidae-ro, Siheung 15073, Korea

²Department of Mechanical Convergence Engineering, Gyeongsang National University, 54 Charyong-ro 48beon-gil, Uichang-gu, Changwon 51391, Korea

[†]Corresponding author :
jklee1@gnu.ac.kr

Received 6 August, 2024
Revised 18 August, 2024
Accepted 23 August, 2024

Abstract >> Sustainable shipping depends on eco-friendly energy solutions. This paper reviews methods for predicting marine fuel cell performance, including empirical approaches, physical modeling, data-driven techniques, and hybrid methods. Accurate prediction models tailored to the marine environment's unique conditions are crucial for operational efficiency. By evaluating the strengths and weaknesses of each method, this study provides a comprehensive analysis of effective strategies for forecasting polymer electrolyte membrane fuel cell and solid oxide fuel cell performance in marine applications. These insights contribute to the advancement of eco-friendly shipping technologies and enhance fuel cell performance in challenging marine environments.

Key words : Marine fuel cell(선박용 연료전지), Solid oxide fuel cell(고체산화물 연료전지), Performance prediction(성능 예측), Data-driven prediction(데이터 기반 예측), Physical modeling(물리적 모델링), Hybrid approach(하이브리드 접근법)

1. 서론

지속 가능한 해운 산업을 위해서는 친환경에너지 해결책이 필수적이다. 현재 주요 에너지원인 석유 및 석탄 등의 화석연료는 매장량이 한정되어 있고 환경 오염을 초래하기 때문에 현재와 미래의 에너지원은 수소에너지와 연료전지 등이 포함된 신에너지와 우

리가 흔히 알고 있는 풍력, 조력, 수력 등 재생에너지로 점점 변화하고 있는 추세이다¹⁾.

수소 연료전지는 높은 에너지 효율성과 무공해 특성으로 인하여 대안 중 하나로 주목받고 있다. 수소를 연료로 사용하는 연료전지는 물만을 배출하여 해양 환경 보호와 대기질 개선에 기여할 수 있다. 따라서 수소 연료전지 선박의 도입은 환경적, 경제적 측

면에서 매우 중요하다²⁾.

최근 몇 년간 수소 연료전지 기술은 급격히 발전해 왔으며 특히 해양 산업에서도 다양한 연구와 실증 프로젝트가 진행되고 있다. 일본의 슈퍼 에코십 프로젝트와 노르웨이의 하이드로젠 퓨얼 셀 페리 등 여러 국가에서 수소 연료전지 선박의 상용화를 위한 시도가 이어지고 있다³⁾. 이러한 프로젝트들은 수소 연료전지가 상용화 단계에 접어들었음을 의미하며 그 기술적 가능성을 실질적으로 보여주고 있다. 그러나 연료전지의 성능, 안정성, 경제성을 향상시키기 위한 연구는 여전히 필요하다⁴⁾.

선박용 연료전지의 수명은 선박 운영의 경제성과 안정성에 큰 영향을 미친다. 연료전지의 수명이 짧으면 잦은 교체와 유지 보수가 필요하게 되어 운영비용이 증가할 뿐 아니라 연료전지 시스템의 신뢰성에도 부정적인 영향을 미친다. 따라서 연료전지의 수명을 정확히 예측하고 이를 기반으로 한 유지 보수 계획을 세우는 것이 매우 중요하며 이는 선박 운영의 효율성을 높이고 장기적으로 경제적 이점을 제공할 수 있다⁵⁾.

현재까지 다양한 성능 예측 모델이 개발되었지만 선박용 연료전지의 특수한 운영 환경을 고려한 연구는 부족한 실정이다.

선박은 높은 습도, 염분, 진동 등 다른 운송 수단과는 다른 운영 조건을 가지고 있어 이러한 환경적 요인을 반영한 성능 예측 기술의 개발이 필요하다⁶⁾. 또한 다양한 운영 데이터를 기반으로 한 실시간 모니터링과 예측 시스템의 구축을 통하여 선박용 연료전지의 성능 예측을 정확히 평가하고 예방적 유지보수가 가능하게 된다면 보다 안정적이고 효율적인 친환경 선박 운용이 가능할 것으로 생각된다⁷⁾.

본 논문에서는 선박용 연료전지 성능 예측 기술의 중요성을 강조하고 이를 위한 효과적인 방법론을 제시하고자 한다. 경험적 방법, 물리적 모델링 방법, 데이터 기반 방법, 하이브리드 접근법의 각각의 특징을 소개하고 다양한 문헌들을 바탕으로 선박용 연료전지 성능 예측 기술을 제안하고 신뢰성과 경제성을 높이고자 한다. 본 연구의 선박용 연료전지만의 성능

예측 방법론을 토대로 향후 다양한 선박용 연료전지의 연구에 적용함에 따라 성능을 정확히 평가하고 효율적인 운영을 기대할 수 있을 것으로 생각된다⁸⁾.

2. 연료전지 성능 예측 기술

연료전지의 성능 예측 기술은 성능평가를 통해 연료전지의 현재 상태를 파악하고 그 효율성과 안정성을 측정하는 과정이며 이를 통해 얻은 데이터는 예지 진단 모델을 구축하는 데 중요한 역할을 한다. 연료전지 성능 예측 기술의 핵심 요소는 다음과 같다.

1) 자료 수집과 분석

성능평가는 다양한 운전 조건에서 연료전지의 전압, 전력, 온도, 가스 조성, 전극 습도 등 여러 변수를 평가한다. 이러한 데이터는 연료전지의 작동 상태와 효율을 평가하는 데 사용되며 solid oxide fuel cell (SOFC) 셀과 스택에 관한 연구에서 개질, H₂S 함량, 마이크로가스 조성, 작동 온도 등의 변수가 성능에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

2) 모델 구축

성능평가 데이터를 바탕으로 회귀 분석, 시계열 분석과 같은 통계적 기법을 사용하여 연료전지의 성능 예측 모델을 구축한다. 회귀 분석은 특정 운전 조건에서의 성능 데이터를 기반으로 연료전지의 성능을 예측하고 H₂S 함량과 같은 특정 변수가 연료전지의 성능 저하에 미치는 영향을 분석하여 그 결과를 반영하여 성능을 예측한다. 또한 시계열 분석은 시간에 따른 성능 변화를 분석하여 미래의 성능 저하 패턴을 예측하는 데 사용된다. 이는 연료전지의 작동 온도와 전극 습도 변화와 같은 변수의 시간적 패턴을 파악하는 데 유용하게 사용할 수 있다.

3) 예측 정확도 향상

성능평가 데이터를 지속해서 수집하고 분석함으로써 성능 예측 기술의 정확도를 향상할 수 있으며 실제 운용 데이터를 기반으로 한 경험적 방법은 높은 신뢰성을 갖게 된다. 그리고 과거의 성능 데이터와 비교 분석하여 연료전지의 성능 저하 원인과 패턴을 파악하면 더욱 정확한 성능 예측이 가능해진다.

4) 실제 적용 및 한계 분석

성능평가를 통해 얻은 데이터를 기반으로 성능 예측하고 이를 바탕으로 유지 보수 계획을 효율적으로 수립함으로써 운영비용 절감과 안정적인 시스템 운영을 기대할 수 있다. 그러나 성능평가 데이터의 품질과 양에 따라 예측 정확도가 크게 달라질 수 있으며 새로운 운용 조건이나 변화된 환경에서는 예측 모델의 일반화에 한계가 있을 수 있다.

연료전지의 성능평가와 예지 진단 기술은 서로 보완적인 관계에 있다. 성능평가는 예지 진단을 위한 정확한 데이터를 제공하며 예지 진단은 성능평가 데이터를 기반으로 모델을 구축하여 미래의 성능 저하와 수명, 고장 등을 예측한다. 그래서 이 두 가지를 모두 포함한 연료전지의 성능 예측 기술을 통해 연료전지 시스템의 효율적 운영과 유지 보수가 가능하며 데이터의 지속적 수집과 분석을 통해 예측 정확도를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 성능평가와 예지 진단 기술을 합친 종합적인 관점에서 선박에 맞춘 성능 예측 기술을 분류하고 적용한 연구를 분

석하였다.

2.1 연료전지 성능 예측 방법론

연료전지 시스템의 성능 예측은 일반적으로 모델링 분석과 실험적 분석, 성능 예측으로 방법론을 구분할 수 있다(Fig. 1). 이러한 구분은 각 방법론의 특성을 반영하고 성능 예측의 주요 접근 방식을 보여주고 있다.

본 논문에서는 이러한 방법론을 더욱 세분화하여 연료전지 성능 예측 방법을 다음과 같이 분류하였다. 이 분류는 예측 모델을 개발할 때 사용되는 데이터 유형과 분석 기법에 따라 성능 예측에 접근하는 방식을 설명하기 위한 것이다.

1) 경험적 방법(empirical methods): 과거의 실제 운용 데이터를 기반으로 한 통계적 분석 방법으로 성능평가와 예지 진단 모델 모두에 적용할 수 있으며 특히 실무 환경에서 수집된 데이터를 바탕으로 높은 신뢰성을 갖춘 예측 가능하다.

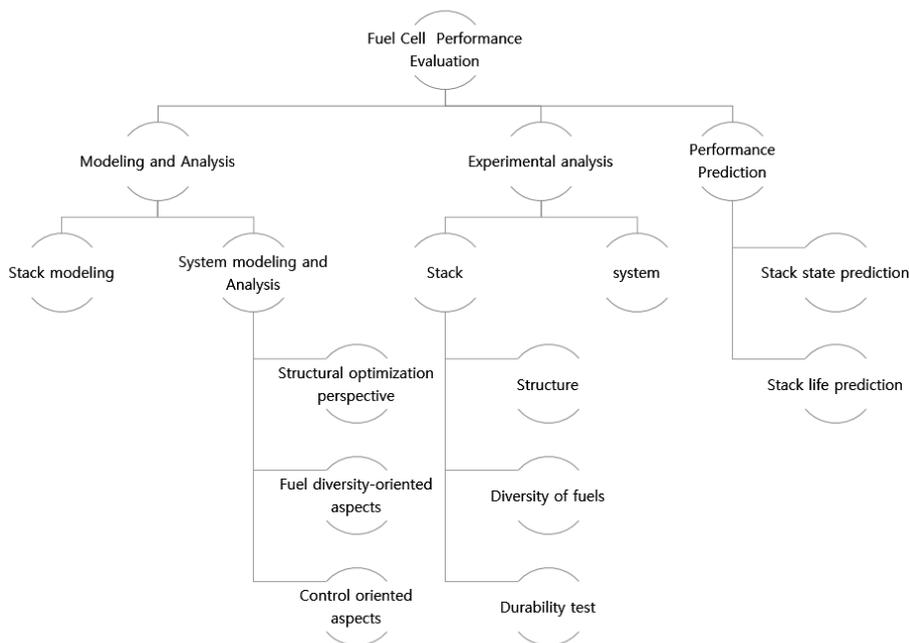


Fig. 1. Performance prediction methods for SOFC fuel cell systems¹⁴⁾

2) 물리적 모델링 방법(physical modeling methods): 연료전지의 물리적, 화학적 특성을 반영한 이론적 모델링 방법으로 주로 성능평가에 적용되며 해양 환경의 다양한 변수를 고려한 정교한 모델링을 통해 높은 정확도의 예측이 가능하다.

3) 데이터 기반 방법(data-driven methods): 대량의 데이터와 기계학습 알고리즘을 사용한 예측 방법으로 성능평가와 예지 진단 모델 모두에 적용할 수 있으며 실시간 데이터 분석과 동적 예측에 유리하다.

4) 하이브리드 접근법(hybrid approaches): 경험적 방법, 물리적 모델링, 데이터 기반 방법을 통합하여 예측하는 방법으로 다양한 방법론의 장점을 결합하여 성능평가와 예지 진단 모델 모두에서 예측 정확도를 극대화할 수 있다.

2.2.1 경험적 방법(empirical methods)

연료전지 시스템의 성능 예측에서 경험적 방법은 중요한 역할을 한다. 이 방법은 과거의 실제 운용 데이터를 바탕으로 통계적 모델을 구축하여 성능을 예측하는 방식을 의미한다. 주로 회귀 분석과 시계열 분석 등을 통해 연료전지의 수명과 성능 저하를 예측하는 데 활용된다. 경험적 방법의 주요 특징은 데이터 중심 접근법으로 실제 운용 데이터를 기반으로 하기 때문에 데이터의 질과 양에 크게 의존한다. 비

교적 간단한 통계적 기법을 사용하여 쉽게 구현할 수 있으며 과거 데이터를 통해 미래를 예측하기 때문에 같은 조건에서 높은 정확도를 보인다.

Table 1에서 보는 바와 같이 SOFC 셀과 스택에 관한 연구에서는 다양한 변수들이 SOFC 성능에 미치는 영향을 분석하고 있다. 예를 들어 개질, H₂S 함량, 마이크로가스 조성, 연료전지 작동 전류 및 온도, 전극 습도, 탄소, 연료 혼합물, 가스 온도 등의 변수를 측정하여 SOFC 성능에 대한 예측을 수행한다. 이러한 연구 자료는 연료전지의 성능평가뿐만 아니라 잔여 수명 예측에도 중요한 기초 자료로 사용될 수 있다.

경험적 방법론은 성능평가와 예지 진단 모델 모두에 적용될 수 있다. 예를 들어 회귀 분석을 통해 개질과 H₂S 함량이 SOFC 성능에 미치는 영향을 모델링하고 특정 운전 조건에서의 성능을 예측할 수 있다. 또한 시계열 분석을 통해 마이크로가스 조성 및 작동 온도 변화에 따른 성능 저하 패턴을 분석하고 이를 기반으로 미래의 성능 저하를 예측하는 모델을 만들 수 있다.

경험적 방법의 장점으로는 실제 데이터를 기반으로 예측하기 때문에 높은 신뢰성을 제공하며 복잡한 모델링 작업이 필요 없어 비용 효율성이 뛰어나다는 점이 있다. 그러나 이 방법은 데이터의 품질과 양에

Table 1. Research status of empirical methods

Research objective	Measurement variables	Ref
Research on the impact of internal reforming and H ₂ S concentration on SOFC performance	Power, voltage, gas supply adjustment, specific cell voltage and temperature, cell resistance	15)
Research on the impact of changes in biogas composition, fuel cell operation voltage, and temperature on SOFC performance	Biogas composition, power, operating temperature, current density	16)
Research on the impact of internal reforming on the performance of SOFC stack	Stack voltage, stack power, anode and cathode temperature, anode gas composition	17)
Research on the impact of using biogas as fuel on carbon deposition on SOFC performance	Fuel utilization, operating temperature, power density, current density	18)
Analysis of the impact of various fuel mixtures generated from construction materials on SOFC performance	Concentration of CO, H ₂ , CO ₂ , and CH ₄ , operating temperature, current density, stack voltage, power efficiency	19)
Research on the impact of using pure hydrogen and reformed gas as fuel on SOFC performance and efficiency at different temperatures	Fuel power and voltage, electrical output power, efficiency, operating temperature	20)

따라 예측 정확도가 크게 달라질 수 있으며 새로운 운용 조건이나 변화된 환경에서는 예측 모델의 일반화에 한계가 있을 수 있다. 즉 경험적 방법은 실제 선박 운용 데이터를 활용하여 높은 신뢰성의 예지 진단을 가능하게 하지만 데이터 의존성이 높고 새로운 환경에서는 한계가 있을 수 있다.

2.2.2 물리적 모델링 방법(physical modeling methods)

물리적 모델링 방법은 연료전지의 화학적, 물리적 특성을 수학적 모델로 표현하여 수명을 예측하는 방식이다. 이 방법은 주로 성능평가에 적용되며 해양 환경에서의 다양한 운전 조건과 환경 변수를 반영할 수 있어 선박 운용에 적합한 예측 기술이다.

물리적 모델링 방법의 주요 특징은 이론적 기반 접근법으로 연료전지 내부의 반응 메커니즘과 열역학적 특성을 반영하여 모델을 구축한다는 점이다. 이는 연료전지의 다양한 변수를 포함하여 정교한 모델링이 필요하며 다양한 운전 조건과 환경 변수를 반영할 수 있다. 이 방법의 장점으로는 연료전지의 근본적인 작동 원리를 반영하므로 높은 정확도의 예측이 가능하다는 점이 있다. 또한 새로운 운전 조건이나 환경 변화에도 적용할 수 있어 다양한 조건에서 성능평가 및 예측을 할 수 있다. 그러나 이 방법은 모델링 작업이 복잡하고 많은 계산이 필요하며 물리적, 화학적 지식이 요구되어 모델 구축에 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다.

Table 2에서 보는 바와 같이 H₂S 함량이 SOFC 성능에 미치는 영향을 분석한 연구, SOFC 스택의 결

함 진단을 위한 데이터 기반 모델 개발, 탄소 침착이 SOFC 스택 성능에 미치는 영향을 분석한 연구 등이 이루어졌다. 이러한 연구들은 SOFC 성능평가와 예지 진단 기술에 중요한 기초 자료를 제공할 수 있고 다양한 운전 조건과 환경 변수를 반영할 수 있는 모델을 구축할 수 있어 선박용 연료전지에 관한 다양한 연구를 진행하기에 적합하다.

물리적 모델링 방법은 연료전지의 근본적인 특성을 반영하여 높은 정확도로 예측할 수 있게 하지만 복잡성과 전문 지식 요구 등의 단점이 있어 선박용 연료전지에 적용 시 이를 효과적으로 활용하기 위해서는 다양한 운전 환경과 선박만의 특징들을 반영하는 연구가 필요하다.

2.2.3 데이터 기반 방법(data-driven methods)

데이터 기반 방법은 기계학습 및 빅데이터 분석 기술을 활용하여 대량의 데이터를 처리하고 연료전지의 수명을 예측하는 방식이다. 이 방법은 주로 성능평가와 예지 진단 모델 모두에 적용될 수 있으며 해양 환경에서의 다양한 운영 조건을 반영하기 위하여 데이터 마이닝, 인공지능 알고리즘 등을 사용하여 연료전지의 성능을 예측할 수 있다.

데이터 기반 방법의 주요 특징은 대량의 데이터를 활용하여 패턴을 발견하고 예측 모델을 구축하는 데 있다. 다양한 기계학습 알고리즘을 적용하여 예측 정확도를 높일 수 있으며 실시간 데이터 분석을 통해 동적 예측도 가능하다.

Table 3의 연구들은 데이터 기반 접근법을 통해 연료전지 시스템의 성능을 최적화하고 안정성을 확

Table 2. Research status of physical modeling methods

Research objective	Measurement variables	Ref
Research on the impact of H ₂ S concentration on the performance of a single SOFC cell	Output power, feed gas composition, output current, and voltage	21)
Development of a data-driven model for fault diagnosis in SOFC stacks	Stack current, stack voltage, cathode output, temperature, anode output temperature, cathode output, and gas composition	22)
Research on the impact of carbon deposition on SOFC stack performance	Hydrogen production rate, operating temperature, power density, and current density	23)

보하는 데 중점을 두고 있다. 또한 데이터 기반 방법을 사용한 연구들은 실시간 자료 수집과 분석을 통해 최적의 작동 조건과 제어 전략을 도출하여 연료전지 시스템의 효율성과 신뢰성을 높이는 결과를 도출할 수 있다. 이러한 연구들은 데이터 활용이 연료전지 기술의 발전과 운영 최적화에 얼마나 중요한지를 보여주며 향후 연구와 개발에서 데이터 기반 접근법의 필요성을 강조하고 있다.

이 방법의 장점으로는 높은 예측 정확도를 제공한다는 점이 있다. 대량의 데이터를 분석함으로써 높은 예측 정확도를 얻을 수 있으며 새로운 데이터가 추가될 때마다 모델을 업데이트하여 적응성을 유지할 수 있다. 그러나 이 방법은 고품질의 대량 데이터가 필요하며 자료 수집과 관리가 어려울 수 있다. 따라서 해양 환경에서의 선박용 연료전지에 대한 다량의 데이터 확보가 중요하다.

2.2.4 하이브리드 접근법(hybrid approaches)

하이브리드 접근법은 경험적 방법, 물리적 모델링, 데이터 기반 방법을 통합하여 각 방법의 장점을 취합한 예측 방식이다. 이 방법은 성능평가와 예지 진단 모델 모두에 적용할 수 있으며 선박이 해양 환경에서 다양한 운전 조건에 노출되기 때문에 복합적인 접근을 통해 예측 정확도를 높이는 것이 필수적이다.

하이브리드 접근법의 주요 특징은 통합적 접근으로 여러 방법론을 결합하여 더 정교한 예측 모델을 구축하는 것이다. 이는 높은 유연성을 제공하여 다양

한 운전 조건과 데이터를 모두 반영할 수 있으며 새로운 데이터를 반영하고 모델을 지속해서 개선할 수 있는 적응성을 가지고 있다.

현재 연료전지 성능 예측에 대한 하이브리드 접근법 연구는 활발히 진행되고 있다. 연구자들은 경험적 방법, 물리적 모델링, 데이터 기반 방법의 장점을 결합하여 더욱 정확한 예측 모델을 개발하고 있다. 예를 들어 경험적 데이터를 물리적 모델에 반영하거나 데이터 기반 분석을 통해 얻은 패턴을 물리적 모델에 적용하는 방식의 연구가 진행되고 있다. 또한 기계학습 알고리즘을 사용하여 물리적 모델의 파라미터를 최적화하고 예측 정확도를 높이는 연구도 이루어지고 있다.

하이브리드 접근법의 장점으로는 종합적인 예측이 가능하다는 점이 있다. 다양한 방법론의 장점을 결합하여 예측 정확도를 극대화할 수 있으며 여러 데이터 소스와 모델을 사용하여 예측의 신뢰성을 높일 수 있다. 그러나 이 방법은 모델 구축과 데이터 통합이 복잡하며 많은 양의 데이터 처리 문제가 있고 다양한 방법론에 대한 깊은 이해와 통합 기술이 필요하다.

Table 4에서 보는 바와 같이 SOFC 스택의 장기 안정성을 확보하기 위해서는 하이브리드 접근법을 통해 다양한 측정 데이터를 종합적으로 활용하여 단순한 단일 변수 분석보다 더 정교한 관리 시스템을 개발하는 것이 필요하다. 이는 연료전지의 실용적 적용과 상용화를 위한 중요한 단계로 향후 연구와 개

Table 3. Research status of data-driven methods

Research objective	Measurement variables	Ref
Derivation of optimal operating conditions for a single SOFC cell	Output current, feed gas composition, output voltage	24)
Development of control strategies to ensure thermal stability of SOFC stacks	Stack current, stack voltage, cathode outlet temperature, and anode outlet temperature	25)

Table 4. Research status of hybrid approaches

Research objective	Measurement variables	Ref
Development of a stack management system to ensure long-term stability of SOFC stacks	Hydrogen production rate, operating temperature, power density, and current density	26)

발 방향에 있어 하이브리드 접근법이 매우 필요한 이유이다.

하이브리드 접근법은 위의 연구 이외에도 다양한 접근법을 결합하여 더 정확하고 신뢰성 있는 예측을 가능하게 한다. 예를 들어 경험적-물리적 모델은 경험적 데이터를 물리적 모델에 반영하여 예측 정확도를 높이는 방법이며 데이터 기반-물리적 모델은 데이터 기반 분석을 통해 얻은 패턴을 물리적 모델에 적용하여 수명을 예측하는 방법이다. 기계학습-물리적 모델은 기계학습 알고리즘을 사용하여 물리적 모델의 파라미터를 최적화하고 예측 정확도를 높이는 방법이다.

하이브리드 접근법은 다양한 방법론의 장점을 결합하여 더 정확하고 신뢰성 있는 예측을 가능하게 하며 선박용 연료전지의 효율성과 신뢰성을 높이고 복잡한 운영 조건에서도 효과적으로 적용할 수 있다.

3. 선박용 연료전지 성능 예측 기술

선박용 연료전지 성능 예측 기술은 기존의 연료전지 성능 예측 방법론을 단순히 더욱 구체적으로 분류하는 것에서 나아가 다른 범주에서 접근하여 이해할 필요가 있다. 이는 선박이라는 특수한 운영 환경을 고려할 때 더욱 적절한 성능 예측을 가능하게 한다. 선박의 고유한 운영 조건, 예를 들어 해양 환경에서의 장기 운항, 다양한 연료의 품질, 부하의 변화 등을 반영하여 성능 예측 기술을 설계하는 것은 매우 중요하다.

이러한 필요성에 따라 선박용 연료전지 성능 예측 기술은 두 가지 주요 범주로 나누어 생각할 수 있다. 첫 번째는 선박용 연료전지 자체의 성능 예측이며 두 번째는 선박에 적용된 연료전지 시스템의 성능 예측이다. 이 두 가지 범주는 다른 목적을 가진다.

첫 번째 범주는 연료전지 자체의 내구성, 성능 저하, 효율성 등을 예측하는 데 중점을 두며 이는 주로 연료전지의 소재 특성, 전기화학적 반응, 열 관리 등을 기반으로 한다. 이는 연료전지의 수명과 효율성을 최적화하기 위한 기술적 접근을 포함한다.

두 번째 범주는 연료전지가 통합된 선박 시스템 전체의 성능을 예측하는 것으로 연료전지의 성능이 선박의 전체 운용 효율, 에너지 관리, 안전성에 어떻게 관여하는지를 평가하는 데 초점을 맞춘다. 이 범주는 선박의 에너지 요구 사항, 시스템 간 상호작용, 운항 시나리오와 같은 복잡한 변수를 고려해야 한다.

이와 같은 두 가지 범주로의 분류는 단순히 연료전지 성능 예측 방법론을 세분화하는 것이 아니라 선박이라는 특수 환경에서의 연료전지 운용을 더욱 효과적으로 예측하고 관리하기 위한 전략을 제공한다. 따라서 선박용 연료전지 성능 예측 기술은 이러한 이중적 접근을 통해 더 넓고 정교한 예측 능력을 개발할 수 있으며 이를 통해 선박 운용의 효율성과 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

기존의 선박용 연료전지 성능 예측 기술은 크게 성능평가 영역과 예지 진단 영역으로 구분해서 이해할 수 있다. Table 5에 정리한 성능평가 영역은 선박용 연료전지 성능평가 기술의 주요 특징을 설명하고 있다. 선박용 연료전지는 해상 환경에서의 운용을 위하여 성능, 내구성, 환경 적응성, 안전성, 진동 및 충격 저항성, 시스템 통합성 등 다양한 항목에 대해 종합적으로 평가할 필요가 있다. 이는 연료전지가 다양한 해상 운용 조건을 견딜 수 있는지 확인하기 위함이다.

이러한 선박용 연료전지 시스템의 다양한 평가 항목은 해상 환경에서 신뢰성 있고 효율적으로 운용하기 위해서는 필수적이다. 이를 통해 연료전지의 실질적인 적용 가능성을 높이고 해상 운용에서의 안전성과 효율성을 극대화할 수 있다.

Table 6에 제시된 바와 같이 연구 목적에 따라 다양한 측정 변수를 활용하여 성능평가가 이루어지며 이러한 데이터는 연료전지 시스템을 선박에 최적화하는 데 응용된다. 또한 수소 연료전지 선박에서 연료전지를 시스템적인 관점으로 접근하여 분석한 Table 7에서는 다양한 성능평가 기술이 제시되고 있다.

Table 8에서는 선박용 연료전지의 성능 예측 연구의 전반적인 현황을 종합적으로 보여준다. Table 8에서 보는 것과 같이 선박용 연료전지 성능 예측 연구

에서는 하이브리드 접근법이 중요한 역할을 하고 있으며 이 방법은 기존의 한 가지 방법만을 사용한 것 보다는 더 높은 정확도를 제공하는 것으로 평가된다. 하이브리드 접근법은 성능평가 예지 진단 기술에 적용되며 연료전지 시스템이 해상에서의 다양한 운용 조건을 효과적으로 견딜 수 있도록 돕는다. 이러한 연구들은 연료전지의 열화와 고장 예측, 연료 소비 패턴 분석 등을 포함하여 연료전지 시스템의 안정성

과 효율성을 극대화하고 유지 보수 일정을 최적화하는 데 중점을 두고 있다.

3.1 연료전지별 성능 예측 기술 특징

연료전지의 특성에 맞게 성능 예측 기술이 다르게 적용되어야 하지만 선박이라는 특수한 환경으로 인하여 다음과 같은 해양 환경의 영향은 공통으로 고

Table 5. Comparison of performance evaluation methods for marine and general fuel cells

	Fuel cell performance evaluation	Performance evaluation of marine fuel cells
Power output and efficiency	Rated Power, power density, and efficiency (40-60%) evaluation	Evaluation of power output and efficiency under various operating conditions (e.g., response to changes in power demand during acceleration, deceleration, and cruising)
Durability and lifetime	Evaluation of performance degradation rate during specific cycles (e.g., operating modes)	Evaluation of degradation rate and durability during long-term maritime operation, including resistance to seawater and salinity
Environmental robustness	Performance evaluation under variations in temperature and humidity	Performance evaluation under harsh maritime conditions such as high humidity, salinity, vibration, and shock
Safety	Conduct standard safety tests (overheating, overcurrent, leakage, etc.)	Additional maritime safety tests (e.g., safety under submersion, saltwater exposure, emergency response capabilities)
Vibration and shock resistance	Standard vibration and shock testing	Evaluation of resistance to continuous vibration and shock in maritime environments

Table 6. Research status of marine fuel cell performance evaluation

Research objective	Measurement variables	Advantages	Applications	Ref
Dynamic analysis of PEM fuel cell systems	Voltage, current, temperature	Fast response time and high prediction accuracy	Performance optimization for small-scale marine applications	27)
Dynamic model validation of marine molten carbonate fuel cells (MCFC)	Voltage, current, temperature	Providing high accuracy under real operating conditions	Design and optimization of power systems for marine applications	28)
Development of a thermal management model for marine SOFC systems	Voltage, current, temperature	Providing high-precision prediction and resistance to external disturbances	Performance optimization of marine SOFC systems	29)
Design and performance validation of a PEM fuel cell module for small vessel applications	Voltage, current, fuel consumption	Providing high dynamic response and efficiency	Performance optimization for small-scale marine applications	30)
Dynamic analysis and experimental validation of fuel cell systems	Voltage, current, temperature	Providing high consistency with experimental data	Performance validation of marine fuel cell systems	31)

려되어야 한다⁹⁾.

1) 염분과 습도: 해양 환경의 높은 염분과 습도는 연료전지의 전해질 막과 전극에 침투하여 부식과 성능 저하를 일으킬 수 있다. 적절한 습도 유지는 전해질 막의 수분 관리를 통해 성능을 유지하는 데 필수

적이다.

2) 온도 변동: 해양 환경에서는 기온이 급변할 수 있으며 이는 연료전지의 열 관리 시스템에 부담을 줄 수 있다. 따라서 온도 변동을 반영한 예측 모델이 필요하다.

Table 7. Research status of marine fuel cell system for performance evaluation

Research objective	Measurement variables	Advantages	Applications	Ref
Investigation of hybrid fuel cell systems through voyage simulation	Voltage, current, fuel consumption	System performance optimization through voyage simulation	Performance optimization in marine fuel cell systems	32)
System-level approach for estimating maximum load steps	Voltage, current, load step	Predictable maximum load-handling capacity of the system	Optimization of load-handling capacity in marine systems	33)
Integration of SOFC with internal combustion engine	Voltage, current, temperature, efficiency	Efficiency enhancement through system integration	Improvement of fuel efficiency in marine applications	34)
Thermodynamic analysis of an integrated SOFC and gas turbine system	Voltage, current, temperature, efficiency	Providing high-efficiency energy conversion	Design and optimization of power systems in marine applications	35)
Thermodynamic analysis of a gas turbine and SOFC integrated system	Voltage, current, temperature, efficiency	High-efficiency energy conversion	Design and optimization of electrical power systems in marine applications	36)
Stability analysis of fuel cell-based systems	Voltage, current, system stability indicators	Enhancement of system stability and reliability	Improving the safety and reliability of marine Fuel cell systems	37)

Table 8. Research status of marine fuel cell performance prediction

Research objective	Measurement variables	Advantages	Applications	Ref
Performance characterization and optimization of marine SOFCs	Voltage, current, and fuel-to-air volume ratio	High-accuracy prediction of voltage/current characteristics	Performance characterization and optimization of marine SOFCs	38)
Degradation and failure prediction in PEM fuel cells	Voltage, current, and fault occurrence timing	Effective for early fault detection and life extension	Useful for degradation modeling in PEM fuel cells and SOFCs	10)
Fault detection and remaining useful life prediction in PEM fuel cells	Voltage, current, and fault occurrence timing	Provides high accuracy in fault detection and lifetime prediction	Applicable to both PEM fuel cells and SOFCs	39)
Analysis and prediction of fuel consumption patterns for bulk carriers	Fuel consumption rate and operating conditions	Offers enhanced accuracy compared to traditional methods	Applicable to marine SOFC systems for bulk carrier fuel consumption modeling	40)
Modeling degradation processes and performance prediction in PEM fuel cells	Voltage, current, and degradation state	Provides high accuracy in performance prediction and maintenance scheduling	Degradation analysis of PEM fuel cells and SOFCs	41)

3) 연속 운전: 선박은 장시간 연속 운전을 요구하므로 연속 운전 시 전해질 막과 전극의 손상을 고려하여야 한다.

4) 부하 변동: 부하가 급격히 변동할 때 연료전지의 응답 특성과 이에 따른 열화 패턴을 분석하여 예측 모델에 반영하여야 한다.

선박용 연료전지 성능 예측 모델에서는 해양 환경에서의 운용 조건, 염분과 습도, 온도 변동 등의 요소가 중요한 고려 사항으로 반영된다. 비록 polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC)과 SOFC의 성능 예측 방법론은 본질적으로 유사하지만 각 연료전지의 특성에 따라 모델링 과정에서 고려하여야 할 세부 요소들이 다르다. 따라서 PEMFC와 SOFC 각각의 고유한 특성을 반영하여 차별화된 성능 예측 모델을 개발하는 것이 필수적이다.

3.1.1 선박용 PEMFC 성능 예측 모델

선박용 PEMFC는 해양 환경에서 높은 에너지 효율성과 친환경적 특성으로 주목받고 있다.

1) 화학적 열화 모델¹⁰⁾

PEMFC의 화학적 열화는 전해질 막의 화학적 구조 변화와 관련이 있으며 운영 조건(온도, 습도 등)과 화학 반응 속도를 기반으로 성능을 예측하는 모델에 사용된다.

2) 촉매 열화 모델¹⁰⁾

촉매 손실과 중독 과정을 정량화하여 예측하는 모델이다. 촉매 입자의 크기 변화, 표면적 감소, 불순물 흡착 등을 고려하여 촉매 성능 저하를 예측한다.

3) 수분 관리 모델

PEMFC의 수분 상태를 모니터링하고 예측하는 모델이다. 수분 균형, 막 저항, 수분 이동 속도 등을 분석하여 연료전지의 성능 변화를 예측한다.

3.1.2 선박용 SOFC 성능 예측 모델

선박용 SOFC는 높은 효율성과 다양한 연료 사용 가능성으로 인해 주목받고 있다. 특히 SOFC는 고온에서 작동하므로 성능 예측이 특히 중요하다.

1) 열화 모델

고온 작동 환경에서 소재 열화를 중점적으로 분석하여 SOFC의 수명을 예측하는 모델을 개발하였다. 촉매의 용출, 전해질의 화학적 분해, 기체 확산층의 구조 변화를 모델링하여 최적의 운전 조건을 도출할 수 있다^{11,12)}.

2) 운전 조건 모델

SOFC의 고온 작동 특성으로 인해 열 관리가 매우 중요하다. 따라서 온도 변화와 열 사이클링에 따른 기계적 스트레스를 반영한 예지 진단 모델을 개발하여 연속적인 열 사이클이 SOFC 구성 요소에 미치는 영향을 분석하고 열 스트레스로 인한 열화와 수명 저하를 예측하여야 한다¹³⁾.

3) 연료 유연성 모델

다양한 연료 사용 가능성으로 인해 사용되는 연료의 종류와 품질이 SOFC의 수명에 미치는 영향을 고려하여야 한다. 천연가스, 메탄올 등 다양한 연료의 순도와 불순물이 성능과 수명에 미치는 영향을 평가하고 각 연료의 전환 효율과 열화 속도를 반영한 예지 진단 모델을 개발하여야 한다¹³⁾.

4) 연속 운전과 부하 변동 모델

SOFC의 연속 운전과 부하 변동을 반영한 성능 예측 모델을 통해 실제 운영 조건을 반영한 정확한 예지 진단이 가능하다. 장시간 운전 시 전해질과 전극의 열화 패턴을 분석하고 부하 변동 시의 응답 특성과 열화 과정을 모델링하여 수명을 예측한다.

3.1.3 선박용 PEMFC와 SOFC 성능 예측 차이

PEMFC와 SOFC의 성능 예측 방식에는 각 연료전지의 특성에 따른 차이점이 존재한다.

1) 작동 온도 및 환경 차이

PEMFC는 비교적 저온에서 작동하며 이에 따라 화학적 열화, 촉매 열화, 수분 관리가 성능에 미치는 영향이 크다. 특히 저온 환경에서는 수소 이온 교환막의 안정성 및 촉매의 활성 유지가 성능 저하를 방지하는 핵심 요소로 작용한다. 반면 SOFC는 고온에서 작동하며 이러한 고온 환경은 열화와 열적 스트레스의 주요 원인이 된다. SOFC는 고온으로 인한 연료전지의 내구성 문제와 함께 다양한 연료 사용으로

인한 성능 변동성도 중요한 고려 사항이다.

2) 모델링 초점

PEMFC 성능 예측 모델은 주로 저온 환경에서 발생할 수 있는 화학적 변질, 촉매 열화 그리고 수분 관리를 중심으로 설계된다. 이와 달리 SOFC의 성능 예측 모델은 고온에서 발생하는 열적 열화, 연료 유연성, 장시간 운전 시 내구성 변화 등을 중점적으로 다룬다. SOFC의 경우 고온 환경에서의 전기화학적 반응이 모델링의 핵심이 되며 다양한 연료 종류와 그에 따른 작동 조건의 변화를 정밀하게 반영하여야 한다.

3) 연료 유연성

SOFC는 수소뿐만 아니라 천연가스, 메탄올 등 다양한 연료를 사용할 수 있어 연료의 품질과 순도에 따른 성능 예측이 매우 중요하다. 이러한 연료의 다양성은 성능 예측 모델의 복잡성을 증가시키며 각 연료의 특성을 반영한 정밀한 모델링이 요구된다. 반면 PEMFC는 주로 수소를 사용하는데 초점을 맞추고 있으며 수분 관리와 촉매 상태의 변화에 따른 성능 예측이 모델링의 주요한 요소가 된다.

이와 같은 차이점은 PEMFC와 SOFC의 작동 원리, 환경적 요구 사항, 연료 특성에 따라 성능 예측 모델이 각기 다르게 설계되어야 함을 의미한다. 따라서 각 연료전지의 특성을 반영한 정교한 모델링을 통해 더 정확하고 신뢰성 있는 성능 예측이 가능하다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 선박용 연료전지의 성능 예측에 관한 다양한 방법론을 검토하고 해양 환경의 특수성을 반영한 성능 예측 기술 개발의 필요성을 강조하였다. 해양 환경에서는 염분, 습도, 온도 변동 등의 요소가 연료전지의 성능과 내구성에 중대한 영향을 미치기 때문에 이러한 조건들을 고려한 성능 예측 모델링이 필수적이다. 특히 PEMFC와 SOFC의 성능 예측 기술은 본질적으로 유사하나 각 연료전지의 특성에 따라 모델링 과정에서 고려하여야 할 세부 요소들이 다를 수 있다.

PEMFC는 저온에서 작동하며 화학적 열화, 촉매 열화, 수분 관리가 성능에 중요한 변수로 작용한다. 반면 SOFC는 고온에서 작동하여 열적 스트레스와 다양한 연료 사용에 따른 성능 변화가 주요 고려 요소로 작용한다. 이러한 차이점을 반영하여 각 연료전지의 특성에 맞는 차별화된 성능 예측 모델을 개발하는 것이 중요하며 이를 통해 연료전지 시스템의 효율성과 신뢰성 향상을 기대할 수 있다.

이를 바탕으로 선박용 연료전지의 성능 예측을 보다 정밀하고 신뢰성 있게 발전시키기 위한 다음과 같은 구체적인 연구 방향을 제안한다.

첫째, 해상 환경을 고려한 동적 모델링 개발이 필요하다. 선박은 다양한 해상 조건에서 운항하므로 변화하는 환경에 대한 연료전지 성능의 반응을 정확하게 예측할 수 있는 동적 모델링이 필수적이다. 염분, 습도, 온도 변화, 진동 등 해양 환경에서의 주요 변수를 반영한 동적 모델을 개발하고 실시간 자료 수집 및 분석을 통해 연료전지의 성능 변화를 지속적으로 업데이트하고 예측할 수 있는 시스템을 설계하여야 한다.

둘째, 성능 저하 요인별 모델 적용 및 분석이 필요하다. 연료전지의 성능 저하를 초래하는 주요 요인들을 각각의 모델로 세분화하여 적용함으로써 더 정밀한 성능 예측이 가능해질 것이다. 예를 들어 PEMFC의 경우 화학적 열화, 촉매 열화, 수분 관리를 별도의 모델로 구축하고 SOFC의 경우 고온으로 인한 열화, 연료 다양성에 따른 성능 변화, 장기 운전에서의 내구성 저하 등을 각각 모델링하여 분석할 필요가 있다.

셋째, 하이브리드 방법의 통합적 접근이 필요하다. 경험적 방법, 물리적 모델링, 데이터 기반 접근법 등을 통합한 하이브리드 모델은 각 방법론의 장점을 결합하여 더 높은 정확도의 성능 예측을 가능하게 한다. 이 접근법은 새로운 운전 조건이나 환경 변화에도 적용할 수 있는 유연성을 제공하며 다양한 방법론을 통합하여 연료전지 시스템의 실질적인 적용 가능성을 높일 수 있다.

마지막으로 모델 검증 및 실증 실험이 필요하다. 개발된 모델의 정확성과 신뢰성을 확보하기 위해서

는 실제 해상 환경에서의 실증 실험이 필수적이다. 다양한 해상 조건에서 수집된 실험 데이터를 통해 모델의 예측 결과를 검증하고 필요시 모델을 개선하여 실제 운용에서의 신뢰성을 확보할 수 있다. 이 과정에서 비정상적인 상황에 대한 예측 및 대응 방안도 함께 연구되어야 한다.

이와 같은 연구 방향을 통해 선박용 연료전지의 성능 예측 모델은 더욱 정밀하고 신뢰성 있게 발전할 수 있다. 그리고 이러한 연구는 궁극적으로 연료전지 시스템의 해상 적용 가능성을 높이며 선박 운용의 효율성과 안전성을 극대화하는 데 기여할 것으로 기대된다.

References

1. S. A. Korkmaz, K. E. Erginer, O. Yuksel, O. Konur, and C. O. Colpan, "Environmental and economic analyses of fuel cell and battery-based hybrid systems utilized as auxiliary power units on a chemical tanker vessel", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, No. 60, 2023, pp. 23279-23295, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.320>.
2. Z. Fu, L. Lu, C. Zhang, Q. Xu, X. Zhang, Z. Gao, and J. Li, "Fuel cell and hydrogen in maritime application: a review on aspects of technology, cost and regulations", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 57, 2023, pp. 103181, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103181>.
3. E. Vanem, C. B. Salucci, A. Bakdi, and Ø. Å. Alnes, "Data-driven state of health modelling-a review of state of the art and reflections on applications for maritime battery systems", *Journal of Energy Storage*, Vol. 43, 2021, pp. 103158, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103158>.
4. L. Vichard, A. Ravey, P. Venet, F. Harel, S. Pelissier, and D. Hissel, "A method to estimate battery SOH indicators based on vehicle operating data only", *Energy*, Vol. 225, 2021, pp. 120235, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120235>.
5. T. Oji, Y. Zhou, S. Ci, F. Kang, X. Chen, and X. Liu, "Data-driven methods for battery SOH estimation: survey and a critical analysis", *IEEE Access*, Vol. 9, 2021, pp. 126903-126916, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3111927>.
6. D. Hissel and M. C. Pera, "Diagnostic & health management of fuel cell systems: issues and solutions", *Annual Reviews in Control*, Vol. 42, 2016, pp. 201-211, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.09.005>.
7. P. Wang, H. Liu, J. Chen, X. Qin, W. Lehnert, Z. Shao, and R. Li, "A novel degradation model of proton exchange membrane fuel cells for state of health estimation and prognostics", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 61, 2021, pp. 31353-31361, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.004>.
8. S. L. Chavan and D. B. Talange, "Modeling and performance evaluation of PEM fuel cell by controlling its input parameters", *Energy*, Vol. 138, 2017, pp. 437-445, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.070>.
9. L. Kistner, A. Bensmann, and R. Hanke-Rauschenbach, "Optimal design of power gradient limited solid oxide fuel cell systems with hybrid storage support for ship applications", *Energy Conversion and Management*, Vol. 243, 2021, pp. 114396, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114396>.
10. M. Jouin, R. Gouriveau, D. Hissel, M. C. Péra, and N. Zerhouni, "Joint particle filters prognostics for proton exchange membrane fuel cell power prediction at constant current solicitation", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 65, No. 1, 2015, pp. 336-349, doi: <https://doi.org/10.1109/TR.2015.2454499>.
11. R. M. Ormerod, "Solid oxide fuel cells", *Chemical Society Reviews*, Vol. 32, No. 1, 2003, pp. 17-28, doi: <https://doi.org/10.1039/B105764M>.
12. J. Peng, D. Zhao, Y. Xu, X. Wu, and X. Li, "Comprehensive analysis of solid oxide fuel cell performance degradation mechanism, prediction, and optimization studies", *Energies*, Vol. 16, No. 2, 2023, pp. 788, doi: <https://doi.org/10.3390/en16020788>.
13. L. Cui, H. Huo, G. Xie, J. Xu, X. Kuang, and Z. Dong, "Long-term degradation trend prediction and remaining useful life estimation for solid oxide fuel cells", *Sustainability*, Vol. 14, No. 15, 2022, pp. 9069, doi: <https://doi.org/10.3390/su14159069>.
14. J. Peng, J. Huang, X. Wu, Y. Xu, H. Chen, and X. Li, "Solid oxide fuel cell (SOFC) performance evaluation, fault diagnosis and health control: a review", *Journal of Power Sources*, Vol. 505, 2021, pp. 230058, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230058>.
15. J. Kupecki, K. Motylinski, and J. Milewski, "Dynamic analysis of direct internal reforming in a SOFC stack with electrolyte-supported cells using a quasi-1D model", *Applied Energy*, Vol. 227, 2018, pp. 198-205, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.122>.
16. P. Fragiaco, O. Corigliano, G. De Lorenzo, and F. A. Mirandola, "Experimental activity on a 100-W IT-SOFC test bench fed by simulated syngas", *Journal of Energy Engineering*, Vol. 144, No. 2, 2018, pp. 04018006, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000526](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000526).
17. D. Papurello and A. Lanzini, "SOFC single cells fed by biogas: experimental tests with trace contaminants", *Waste Ma-*

- nagement, Vol. 72, 2018, pp. 306-312, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.030>.
18. J. Kupecki, D. Papurello, A. Lanzini, Y. Naumovich, K. Motylinski, M. Blesznowski, and M. Santarelli, "Numerical model of planar anode supported solid oxide fuel cell fed with fuel containing H₂S operated in direct internal reforming mode (DIR-SOFC)", *Applied Energy*, Vol. 230, 2018, pp. 1573-1584, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.092>.
 19. O. Corigliano, G. Florio, and P. Fragiaco, "A numerical simulation model of high temperature fuel cells fed by biogas", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 34, No. 2, 2011, pp. 101-110, doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2011.584116>.
 20. L. Barelli, G. Bidini, G. Cinti, F. Gallorini, and M. Pöniz, "SOFC stack coupled with dry reforming", *Applied Energy*, Vol. 192, 2017, pp. 498-507, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.167>.
 21. G. De Lorenzo and P. Fragiaco, "Electrical and thermal analysis of an intermediate temperature IIR-SOFC system fed by biogas", *Energy Science & Engineering*, Vol. 6, No. 2, 2018, pp. 60-72, doi: <https://doi.org/10.1002/ese3.187>.
 22. S. Dharma, H. C. Ong, H. H. Masjuki, A. H. Sebayang, and A. S. Silitonga, "An overview of engine durability and compatibility using biodiesel-bioethanol-diesel blends in compression-ignition engines", *Energy Conversion and Management*, Vol. 128, 2016, pp. 66-81, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.072>.
 23. H. Wu, J. Xiao, X. Zeng, X. Li, J. Yang, Y. Zou, S. Liu, P. Dong, Y. Zhang, and J. Liu, "A high performance direct carbon solid oxide fuel cell - a green pathway for brown coal utilization", *Applied Energy*, Vol. 248, 2019, pp. 679-687, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.104>.
 24. D. Yan, C. Zhang, L. Liang, K. Li, L. Jia, J. Pu, L. Jian, X. Li, and T. Zhang, "Degradation analysis and durability improvement for SOFC 1-cell stack", *Applied Energy*, Vol. 175, 2016, pp. 414-420, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.094>.
 25. J. Xiao, X. Zeng, M. Li, P. Dong, H. Wu, M. Xu, Y. Lin, J. Liu, Y. Xie, and Y. Zhang, "Effect of pre-calcined ceramic powders at different temperatures on Ni-YSZ anode-supported SOFC cell/stack by low pressure injection molding", *Ceramics International*, Vol. 45, No. 16, 2019, pp. 20066-20072, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.270>.
 26. D. Yan, L. Liang, J. Yang, T. Zhang, J. Pu, B. Chi, and J. Li, "PP performance degradation and analysis of 10-cell anode-supported SOFC stack with external manifold structure", *Energy*, Vol. 125, 2017, pp. 663-670, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.107>.
 27. K. M. Bagherabadi, S. Skjong, and E. Pedersen, "Dynamic modelling of PEM fuel cell system for simulation and sizing of marine power systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 40, 2022, pp. 17699-17712, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.247>.
 28. E. Ovrum and G. Dimopoulos, "A validated dynamic model of the first marine molten carbonate fuel cell", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 35, 2012, pp. 15-28, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.09.023>.
 29. Y. Cheng, D. Liu, L. Zhang, and X. Feng, "Modeling and simulation analysis of solid oxide fuel cell system for marine equipment", In: 2018 Chinese Automation Congress (CAC); 2018 Nov 30-Dec 2; Xi'an (CN): IEEE, c2018, pp. 347-351, doi: <https://doi.org/10.1109/CAC.2018.8623226>.
 30. N. Benyahia, N. Benamrouche, and T. Rekioua, "Modeling, design and simulation of fuel cell modules for small marine applications", In: 2012 XXth International Conference on Electrical Machines IEEE; 2012 Sep 2-5; Marseille (FR): IEEE, c2012, pp. 1989-1995, doi: <https://doi.org/10.1109/ICELMach.2012.6350154>.
 31. N. Shakeri, M. Zadeh, and J. Bruinsma, "Dynamic modeling and validation of a fuel cell-based hybrid power system for zero-emission marine propulsion: an equivalent circuit model approach", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, Vol. 5, No. 3, 2023, pp. 1065-1079, doi: <https://doi.org/10.1109/JESTIE.2023.3288475>.
 32. A. Bassam, "Use of voyage simulation to investigate hybrid fuel cell systems for marine propulsion [doctoral dissertation]", Southampton: University of Southampton, 2017.
 33. A. Haxhiu, R. Chan, S. Kanerva, and J. Kyyrä, "A system level approach to estimate maximum load steps that can be applied on a fuel cell powered marine DC system", *Energy Reports*, Vol. 7, 2021, pp. 888-895, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.044>.
 34. H. Sapra, J. Stam, J. Reurings, L. van Biert, W. van Sluijs, P. de Vos, K. Visser, A. P. Vellayani, and H. Hopman "Integration of solid oxide fuel cell and internal combustion engine for maritime applications", *Applied Energy*, Vol. 281, 2021, pp. 115854, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115854>.
 35. Y. M. A. Welaya, M. Mosleh, and N. R. Ammar, "Thermodynamic analysis of a combined gas turbine power plant with a solid oxide fuel cell for marine applications", *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 5, No. 4, 2013, pp. 529-545, doi: <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0151>.
 36. N. Shakeri, W. Chen, M. Zadeh, A. Abdelhakim, A. J. Sørensen, and K. Tai, "Modeling and stability analysis of fuel cell-based marine hybrid power systems", *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 2023 (epub ahead of print), doi: <https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3325579>.

37. J. Zuo, H. Lv, D. Zhou, Q. Xue, L. Jin, W. Zhou, D. Yang, and C. Zhang, "Deep learning based prognostic framework towards proton exchange membrane fuel cell for automotive application", *Applied Energy*, Vol. 281, 2021, pp. 115937, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115937>.
38. J. Zhong, H. Xiao, A. Chen, S. Lai, J. Lu, Y. Nie, and H. Yin, "Neural network-based modeling of solid oxide fuel cells for marine applications", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2703, 2024, pp. 012009, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2703/1/012009>.
39. M. Jouin, R. Gouriveau, D. Hissel, M. C. Péra, and N. Zerhouni, "Prognostics of PEM fuel cell in a particle filtering framework", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 1, 2014, pp. 481-494, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.054>.
40. T. A. Tran, "Comparative analysis on the fuel consumption prediction model for bulk carriers from ship launching to current states based on sea trial data and machine learning technique", *Journal of Ocean Engineering and Science*, Vol. 6, No. 4, 2021, pp. 317-339, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oes.2021.02.005>.
41. E. Östling, "Model on degradation of PEM fuel cells in marine applications [Master's thesis]", Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2021.