Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 37, No. 5, 2026, pp. 504~512
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.5.504

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

축적 운전시험 데이터 기반 5 kW 연료전지시스템의 성능 및 셀 전압 건전성 평가

박용선[1†] · 장한수[1] · 전의식[2] · 이상혁[2] · 박현아[2] · 박준영[3]

[1]한국공학대학교 인공지능기술사업화연구소, [2](주)케이퓨얼셀, [3]한국공학대학교 S/W대학

Performance and Cell-Voltage Health Evaluation of a 5 kW Fuel Cell System Using Accumulated Operating Test Data

YONGSUN PARK[1†], HANSOO CHANG[1], YEI SIK JEON[2], SANG-HYUK LEE[2], HYEON-AH PARK[2], JOONYEONG PARK[3]

[1]Artificial Intelligence Commercialization Research Center, Tech University of Korea, 65 Emtibeuibuk-ro, Siheung 15119, Korea
[2]K-FUELCELL, ICT Valley AKV1, 58-1, Giheung-ro, Giheung-gu, Gyeonggi-do, 16976, Korea
[3]College of SW, Tech University of Korea, 237 Sangidaehak-ro, Siheung 15073, Korea

[†]Corresponding author :
korea19jnb@tukorea.ac.kr

Received 10 September, 2026
Revised 17 September, 2026
Accepted 17 September, 2026

© The Korean Hydrogen and New Energy Society

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits non-commercial use, sharing, adaptation, distribution, and reproduction in any medium or format, provided the original work is properly cited.

Abstract >> This study presents a data-driven evaluation of a 5 kW proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system operated with city gas reformate, focusing on performance comparison and cell-voltage health using accumulated operating test data. The operating data were automatically processed to extract stabilized constant-current segments at the system operating point, enabling consistent comparison among individual tests. The average cell voltage obtained from each test was compared with Beginning of Life (BOL) and End of Life (EOL) reference values to evaluate the relative performance level of the tested stack. Cell-level voltage analysis revealed localized low-voltage behavior and increased deviation under abnormal conditions. A physical threshold-based diagnostic method using minimum cell voltage, cell deviation, and system error signals distinguished normal and abnormal operating states. These results demonstrate that the proposed data-driven approach can effectively evaluate stack performance and cell-voltage health while detecting abnormal operating conditions. The accumulated operating data and diagnostic results can also provide a basis for further development of the analysis system. Future work will incorporate artificial intelligence (AI) to identify early abnormal patterns and predict potential faults before system failure, enabling preventive diagnosis and timely maintenance.

Key words : Accumulated operating test data(축적 운전시험 데이터), Proton Exchange Membrane Fuel Cell(고분자전해질 연료전지), Cell voltage health(셀 전압 건전성), Performance evaluation(성능 평가), Physical fault detection(물리적 이상 검출)

2026 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

1. 서 론

탄소중립과 기후변화 대응을 위한 에너지 전환이 전 세계적으로 가속화되면서 자동차 산업에서는 기존 내연기관 중심에서 하이브리드 자동차, 전기자동차 및 수소연료전지자동차 등 친환경 자동차로의 전환이 빠르게 진행되고 있다[1]. 이러한 에너지 전환은 수송 부문뿐만 아니라 건물 및 발전 부문으로 확대되고 있으며, 최근 AI 및 데이터센터 확산에 따른 전력 수요 증가와 함께 안정적인 분산전원의 중요성이 더욱 커지고 있다[2,3]. 특히 고분자전해질 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 높은 발전효율과 안정적인 전력생산 특성을 가지고 있어 건물 단위의 분산전원으로 활용 가능성이 높다.

건물용 PEMFC 시스템은 장시간 운전되는 특성으로 인해 초기 성능뿐만 아니라 운전시간 증가에 따른 성능 변화와 시스템 건전성을 지속적으로 평가하는 것이 중요하다. 실제 운전에서는 촉매 및 전극의 열화, 가스 공급조건, 수분 및 열 관리 상태 등의 변화에 의해 스택 성능이 변화할 수 있다[4]. 또한 일부 단위 셀에서 저전압이나 전압 불균일이 발생하더라도 스택 평균전압은 정상 범위에 존재할 수 있으므로, 평균 성능만으로 시스템의 건전성을 판단하는 데에는 한계가 있다.

본 연구의 대상인 도시가스 개질기 연계형 5 kW급 PEMFC 시스템은 선행연구[5]에서 순수 수소와 약 75% 개질 수소 조건에 따른 I-V 특성 및 셀 전압분포를 비교하여 기본적인 성능과 운전 안정성을 평가하였다. 그러나 실제 시스템의 성능 및 건전성을 평가하기 위해서는 특정 운전조건에서의 성능시험뿐만 아니라 여러 운전시험에서 축적된 데이터를 동일한 조건에서 비교·분석하는 것이 필요하다.

기존 PEMFC 상태진단 연구에서는 모델 기반 진단, 운전데이터의 통계적 분석 및 기계학습을 이용한 고장 검출과 분류가 수행되어 왔다[6-8]. 이러한 연구들은 특정 고장상태의 식별이나 진단 정확도 향상에 주로 초점을 두고 있다. 반면 본 연구는 새로운 고장 분류모델을 제안하는 것이 아니라, 실제 건물용 PEMFC 시스템에서 서로 다른 시점과 운전시간에 축적된 다수의 운전시험 데이터를 동일한 운전조건에서 일관되게 비교·평가하기 위한 데이터 처리 및 건전성 평가 절차를 구축하는 데 목적이 있다. 이를 위해 목표 운전조건에 도달한 이후의 정전류 구간을 자동으로 식별하고 과도응답을 제외한 안정화 구간을 분석대상으로 선정하였다. 또한 별도의 고장 분류 모델을 적용하지 않고, 개별 셀의 절대 전압, 전체 셀 평균전압 대비 편차 및 시스템 오류정보에 기초한 명시적인 물리적 판정기준을 적용하여 동일한 분석 구간에서 스택 성능과 셀 수준의 건전성을 함께 평가하였다. 따라서 본 연구에서는 실제 5 kW급 건물용 PEMFC 시스템에서 여러 시점에 축적된 다수의 운전시험 데이터를 자동으로 처리하고 대표 운전점에서의 정전류 안정화 구간을 추출하여 운전시험별 평균 셀 전압의 성능 특성을 비교하였다. 또한 BOL (Beginning of Life)과 EOL (End of Life)을 성능평가의 기준으로 활용하여 각 시험 당시 스택의 상대적인 성능 수준을 평가하고, 전체 셀의 전압분포를 분석하여 평균전압만으로 확인하기 어려운 저전압 셀 및 셀 간 전압 불균일을 검출하였다. 특히 개별 셀의 저전압 기준, 전체 셀 평균전압 대비 전압편차 기준 및 시스템 오류 신호를 이용한 물리적 임계값 기반 진단방법을 적용하여 정상 및 비정상 운전상태를 구분하였다.

이를 통해 별도의 인공지능 모델을 사용하지 않고 축적된 운전시험 데이터를 기반으로 PEMFC 시스템의 운전시험별 성능 특성과 셀 전압 건전성을 동시에 평가하고, 향후 보다 고도화된 상태진단 및 예지진단 기술 개발을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 실 험

2.1 Fuel Cell System

Fig. 1은 본 연구에 사용된 5 kW급 건물용 PEMFC 시스템의 주요 구성과 에너지 및 신호 흐름을 나타낸다. 시스템은 도시가스를 개질하여 수소가 포함된

연료를 생산하는 개질기(Reformer)와 연료공급계(Fuel Processing System), 전기화학반응을 통해 전력을 생산하는 PEM 스택(PEM Stack), 공기공급계(Air Processing System), 열관리계(Thermal Management System), 전력변환시스템(Power Conditioning System, PCS), 그리고 셀 전압 계측 및 데이터 수집 장치로 구성된다. 도시가스(Natural Gas)는 개질기에 공급되어 수소가 포함된 개질가스(Reformate Gas)로 전환되며, 연료공급계를 통해 PEM 스택으로 공급된다. 또한 외부 공기(Air)는 공기공급계를 통해 스택에 공급되어 전기화학반응에 필요한 산소를 제공한다.

PEM 스택에서 생산된 직류전력은 PCS를 통해 건물 또는 전력계통(Building/Grid)에 공급 가능한 전력으로 변환된다. 스택의 운전 온도는 열관리계를 통해 제어된다. 또한 스택의 개별 셀 전압은 Cell Voltage Monitoring 장치를 통해 계측되며, 계측된 신호는 데이터 수집장치(Data Acquisition, DAQ)를 거쳐 PC에 저장된다. 본 연구에서는 이렇게 축적된 운전 및 셀 전압 데이터를 이용하여 PEMFC 시스템의 성능과 셀 전압 건전성을 분석하였다.

2.2 데이터 분석 및 진단 시스템

Fig. 2는 Fig. 1에 제시된 5 kW급 건물용 PEMFC 시스템의 축적 운전시험 데이터를 처리하고 성능 및 셀 전압 건전성을 평가하기 위해 개발한 데이터 분석 프로그램의 전체 구조를 나타낸다. 프로그램은 데이터 입력 및 초기화(Data Ingestion & Init), 데이터 처리 및 핵심 진단(Data Pipeline & Core Diagnosis), 그리고 결과 저장 및 출력(Output & Persistence)의 3단계로 구성하였다.

첫 번째 단계에서는 실제 PEMFC 시스템에서 취득되어 CSV 형식으로 저장된 운전데이터를 불러오고 결측값을 처리한 후, BOL 및 EOL 기준값을 설정한다. 또한 셀 전압 등의 진단에 사용되는 임계값은 설정을 통해 변경할 수 있도록 구성하여 운전조건 및 분석기준의 변화에 대응할 수 있도록 하였다.

두 번째 단계에서는 입력된 운전데이터로부터 분석 대상 구간을 자동으로 선정하고 성능 및 건전성 진단을 수행한다. 특히 서로 다른 운전일자의 데이터를 동일한 조건에서 비교하기 위해 시스템의 대표 운전점에 해당하는 정전류 운전구간(Constant Current Section)을 식별하고, 안정화된 구간을 기준으로 성능지표를 산출한다. 이후 물리적 임계값 기반 진단을 통해 개별 셀 전압, 셀 간 전압편차 및 시스템 운전 정보를 분석하고 평균 셀 전압 등의 주요 성능지표

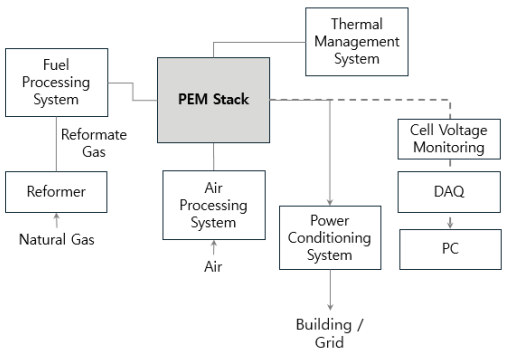


Fig. 1. System configuration of the PEMFC system for building applications

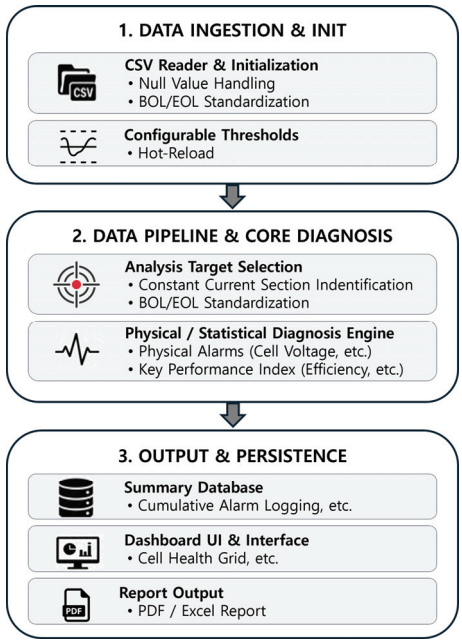


Fig. 2. Overall architecture of the data-driven analysis and diagnostic system using accumulated operating test data

(Key Performance Index)를 계산한다.

마지막 단계에서는 분석 결과를 데이터베이스에 누적 저장하여 운전시험별 성능 특성 및 이상이력을 관리한다. 저장된 결과는 Dashboard UI (User Interface)를 통해 운전시험별 평균 셀 전압 비교, 개별 셀의 전압분포 및 비정상 상태 등을 시각적으로 확인할 수 있도록 하였으며, 분석 결과는 PDF 및 Excel 형식의 보고서로 출력할 수 있도록 구성하였다. 따라서 Fig. 1의 실제 PEMFC 시스템에서 생성되는 운전 데이터가 Fig. 2의 데이터 처리 및 진단과정을 거쳐 지속적으로 축적·분석됨으로써 시스템의 운전시험별 성능 특성과 개별 셀의 건전성을 통합적으로 평가할 수 있도록 하였다.

2.3 운전 데이터 분석 방법

본 연구에서는 서로 다른 운전일자에서 축적된 운전시험 데이터를 동일한 조건에서 비교하기 위해 데이터 전처리 및 분석구간 선정 절차를 적용하였다. 운전데이터에는 기동 및 약 10분의 Ramp-up 과정(운전 시작 후 목표 전류/출력까지 도달하는 과정)에서 발생하는 과도상태와 목표 운전조건 도달 이후의 정상상태 데이터가 함께 포함되어 있으므로, Ramp-up 구간을 분석대상에서 제외하였다. 이후 시스템의 목표 전류에 도달한 후 형성되는 정전류 운전구간(Constant Current Section)을 자동으로 식별하여 운전시험별 성능 및 셀 전압 건전성 평가의 기준구간으로 선정하였다.

정전류 운전구간은 시스템 전류가 목표 전류 ±0.2 A 범위에서 최소 30초 이상 연속적으로 유지되는 구간으로 정의하였다. 또한 목표 전류에 도달한 직후의 과도응답 영향을 배제하기 위하여 정전류 구간 시작 후 300초의 안정화 시간을 제외하고, 이후 설정된 분석구간의 데이터를 이용하여 주요 성능값을 산출하였다. 이를 통해 서로 다른 운전일자의 데이터를 동일한 운전조건에서 비교할 수 있도록 하였다.

선정된 정전류 안정화 구간에서는 스택 전압, 평균 셀 전압 및 개별 셀 전압을 분석하였다. 특히 전체 셀의 평균 전압을 이용하여 운전시험별 성능 특성을 비교하고, 선행연구에서 확보한 BOL 및 EOL 성능 기준과 비교하여 현재 운전상태의 상대적인 성능 수준을 평가하였다. 성능 비교는 시스템의 대표 운전점에 해당하는 목표 전류밀도를 기준으로 수행하였다.

셀 전압 건전성 평가는 전체 셀의 전압분포를 기반으로 수행하였다. 각 시점에서 전체 셀의 평균전압을 산출하고 개별 셀 전압과 평균전압의 차이를 계산하여 셀 간 전압 불균일성을 평가하였다. 또한 최저 및 최대 셀 전압을 분석하여 평균 셀 전압만으로는 확인하기 어려운 국부적인 비정상 셀 전압 분포를 검출하였다.

운전상태의 정상 및 비정상 판정에는 최저 셀 전압, 셀 전압편차 및 시스템 오류 신호를 이용한 물리적 임계값 기반 진단방법을 적용하였다. 개별 셀 전압이 0.600 V 이하이거나 전체 셀 평균전압과의 절대편차가 0.250 V를 초과하는 경우 비정상 상태로 판단하였다. 이러한 임계값은 발전용 연료전지의 장기 내구성과 안정적인 운전을 위해 제작사가 수행한 운전 및 내구시험 결과를 바탕으로 설정한 시스템 운용 기준이다. 또한 시스템 제어기에서 발생하는 오류 신호를 함께 분석하여 시스템 수준의 비정상 운전상태도 판별하였다.

Fig. 3은 축적 운전시험 데이터에서 Ramp-up 구간을 제외하고 정전류 안정화 구간을 선정하여 성능 및 셀 전압 건전성을 분석하는 절차를 나타낸다.

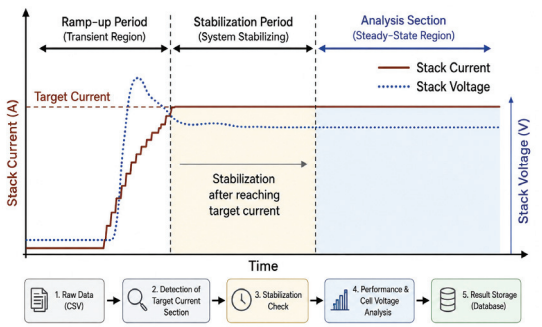


Fig. 3. Analysis region selection from PEMFC operating data

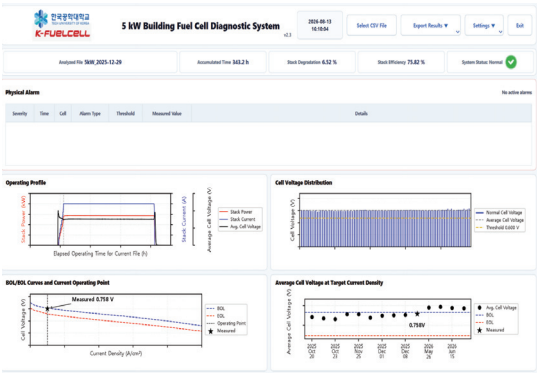


Fig. 4. Overall dashboard of the developed PEMFC data analysis system

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 2025년 10월부터 2026년 6월까지 수행된 총 14회의 운전시험에서 취득한 데이터를 분석에 활용하였다. 각 시험의 운전시간은 최소 4시간에서 최대 48시간으로 구성되었으며, 전체 343시간의 운전데이터를 이용하여 운전시험별 성능 특성과 셀 전압 건전성을 분석하였다. 또한 일부 운전시험에서는 인위적인 이상 조건을 부여하여, 개발된 분석 시스템이 실제 운전데이터에서 비정상 상태를 검출할 수 있는지를 함께 확인하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 구축한 데이터 분석 시스템에 실제 운전시험 데이터를 적용한 결과 화면을 나타낸다. 분석 결과는 운전 프로파일, 셀 전압 분포, BOL/EOL 기준 성능, 운전시험별 평균 셀 전압 비교 및 물리적 이상 검출 결과로 구성되며, 각 분석 결과를 통합적으로 확인할 수 있도록 구성하였다.

3.1 시간에 따른 출력 · 전류 · 전압의 운전 프로파일

Fig. 5는 운전시험에서 취득된 대표적인 연료전지 시스템의 운전 프로파일을 나타낸다. 시스템 기동 후 출력 증가에 따라 스택 전류가 단계적으로 상승하여 목표 전류에 도달하였으며, 이후 정전류 운전구간에서는 일정한 운전상태가 유지되는 것을 확인하였다. 평균 셀 전압은 전류 증가에 따라 변화하였으며, 목

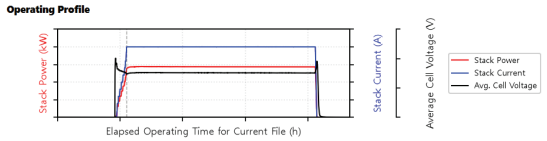


Fig. 5. Representative time-series operating profile of the PEMFC system

표 전류 도달 이후에는 초기 과도응답을 거쳐 점차 안정화되는 특성을 나타내었다.

Fig. 5의 운전 프로파일을 통해 기동 및 Ramp-up 구간과 정전류 안정화 구간이 명확히 구분되는 것을 확인하였다. 이에 따라 과도상태의 영향을 배제하고 안정화된 운전조건의 데이터를 후속 분석에 적용하였다.

3.2 운전시험별 성능 특성 및 BOL/EOL 기준 비교

본 연구에서는 각 운전시험의 운전시간과 스택 조건이 서로 다르기 때문에 전체 운전데이터의 평균값을 직접 비교하지 않고, Fig. 3에서 제시한 분석방법에 따라 목표 전류 도달 후 안정화된 정전류 운전구간을 동일하게 선정하였다. 이후 각 운전시험에서 목표 전류밀도 조건에 해당하는 평균 셀 전압을 산출하여 시험별 성능 특성을 비교하였다.

먼저 Fig. 6은 선택된 운전시험 데이터에서의 평균 셀 전압을 BOL 및 EOL 기준 성능과 비교한 결과를 나타낸다. 측정값은 BOL과 EOL 기준 사이에서 위치하며, 이를 통해 해당 시험 시점의 스택 성능 수준을 상대적으로 판단할 수 있다. 이러한 비교방법은 서로 다른 운전시험 결과를 동일한 기준에서 평가할 수 있다는 점에서 유용하다.

Fig. 7은 각 운전시험에서 산출된 평균 셀 전압을

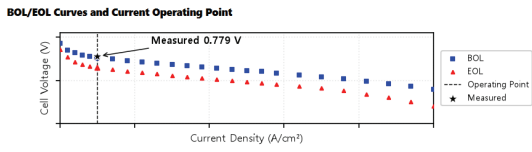


Fig. 6. Comparison of the measured average cell voltage with BOL and EOL reference curves at the target current density

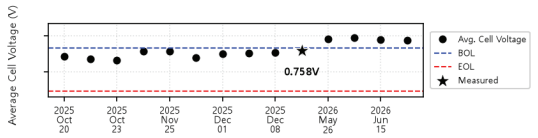


Fig. 7. Comparison of average cell voltage among individual operating tests at the target current density

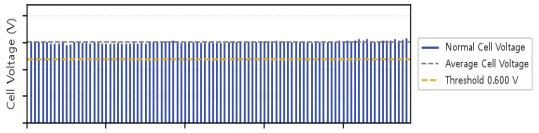


Fig. 8. Cell voltage distribution at the target current condition

시험일자별로 나타낸 것이다. 시험별 평균 셀 전압에는 일정한 차이가 나타났으며, 이는 시험에 사용된 스택의 상태와 운전조건 등의 차이가 반영된 결과로 판단된다. 따라서 Fig. 7의 결과는 동일 스택의 시간 경과에 따른 열화 추세를 의미하는 것이 아니라, 서로 다른 운전시험에서 동일한 기준 운전조건을 적용하였을 때 나타나는 성능 수준의 차이를 비교한 결과이다. 그래프에서 원형 기호(●)는 각 운전시험의 목표 전류밀도 조건에서 산출된 평균 셀 전압을 나타내며, 별표(★)는 현재 선택된 운전시험의 평균 셀 전압을 나타낸다. 각 운전시험의 평균 셀 전압을 BOL 및 EOL 기준선과 비교함으로써 시험 당시 스택의 상대적인 성능 수준을 평가하였다.

3.3 셀 전압 분포 및 건전성 평가

연료전지 스택의 전체적인 성능뿐만 아니라 개별 셀의 건전성을 평가하기 위하여 목표 전류 도달 후 안정화된 정전류 운전구간에서 셀별 전압 분포를 분석하였다. 동일한 운전조건에서도 개별 셀의 전압은 서로 차이를 나타낼 수 있으므로, 전체 셀의 평균 전압과 각 셀 전압의 편차를 이용하여 셀 간 전압 균일성을 평가하였다.

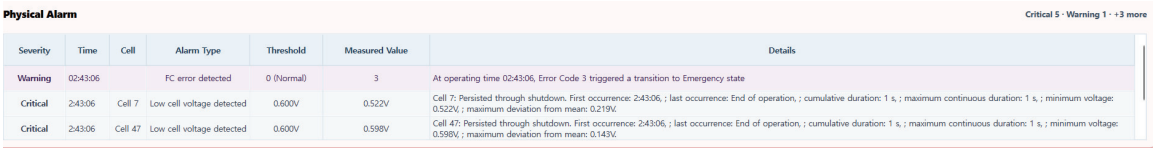
Fig. 8은 대표 운전시험에서 측정된 개별 셀 전압의 분포를 나타낸다. 각 막대는 개별 셀의 전압을 나타내며, 전체 셀의 평균 전압과 저전압 판정을 위한 Threshold를 함께 표시하였다. 정상 운전의 경우 대부분의 셀이 평균 전압을 중심으로 유사한 범위에 분포하였으며, 이를 통해 스택 내 셀 간 전압 균일성과 개별 셀의 건전성을 확인할 수 있었다.

또한 특정 셀의 전압이 설정된 Threshold 이하로 감소하거나 전체 셀 평균으로부터 상대적으로 큰 편차를 나타내는 경우에는 비정상 셀로 판정하였다. 이러한 셀 전압 분포 분석은 평균 셀 전압만으로는 확인하기 어려운 개별 셀의 비정상 상태를 검출하는 데 활용하였다.

3.4 비정상 운전상태 및 이상 셀 검출

PEMFC 시스템의 안정적인 운전을 위해서는 스택의 성능뿐만 아니라 개별 셀과 주변 보조기기의 운전상태를 함께 감시할 필요가 있다. PEMFC 시스템에서 발생하는 이상은 스택 내부의 전기화학적 상태뿐만 아니라 반응가스 공급, 수분 관리 및 주변장치의 운전상태 등 다양한 요인에 의해 발생할 수 있으며, 이러한 비정상 상태의 조기 검출은 시스템의 신뢰성과 내구성 확보를 위해 중요하다[6]. 최근 PEMFC의 상태진단 연구에서도 시스템 및 셀 수준에서 발생하는 다양한 비정상 상태를 운전데이터를 이용하여 검출하고 분류하기 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다[7,8].

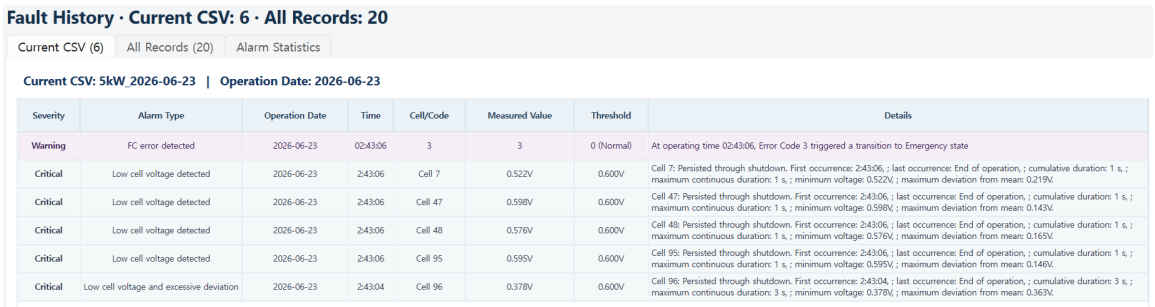
본 연구에서는 개발된 분석 시스템의 비정상 상태 검출 성능을 확인하기 위하여 일부 운전시험에 인위적인 이상 조건을 부여하였다. 이상 조건은 크게 시스템 운전조건 이상과 개별 셀 이상으로 구분하였다. 시스템 측 이상 조건의 경우 스택 외부의 운전조건을 의도적으로 변화시켜 비정상 상태를 유도하였으며, 이때 연료전지시스템에서 발생한 FC ERR 정보를 Physical Alarm에 기록하도록 하였다. 반면 셀 측 이상 조건에서는 특정 셀에 인위적인 셀 빠짐 조건을 부여하여 개별 셀 전압의 변화가 분석 시스템에서 정상적으로 검출되는지를 확인하였다.



Physical Alarm — Critical 5 · Warning 1 · +3 more

Severity	Time	Cell	Alarm Type	Threshold	Measured Value	Details
Warning	02:43:06		FC error detected	0 (Normal)	3	At operating time 02:43:06, Error Code 3 triggered a transition to Emergency state
Critical	2:43:06	Cell 7	Low cell voltage detected	0.600V	0.522V	Cell 7: Persisted through shutdown. First occurrence: 2:43:06, ; last occurrence: End of operation, ; cumulative duration: 1 s, ; maximum continuous duration: 1 s, ; minimum voltage: 0.522V, ; maximum deviation from mean: 0.219V.
Critical	2:43:06	Cell 47	Low cell voltage detected	0.600V	0.598V	Cell 47: Persisted through shutdown. First occurrence: 2:43:06, ; last occurrence: End of operation, ; cumulative duration: 1 s, ; maximum continuous duration: 1 s, ; minimum voltage: 0.598V, ; maximum deviation from mean: 0.143V.

Fig. 9. Overall dashboard under artificially induced abnormal operating conditions



Fault History · Current CSV: 6 · All Records: 20

Current CSV (6) | All Records (20) | Alarm Statistics

Current CSV: 5kW_2026-06-23 | Operation Date: 2026-06-23

Severity	Alarm Type	Operation Date	Time	Cell/Code	Measured Value	Threshold	Details
Warning	FC error detected	2026-06-23	02:43:06	3	3	0 (Normal)	At operating time 02:43:06, Error Code 3 triggered a transition to Emergency state
Critical	Low cell voltage detected	2026-06-23	2:43:06	Cell 7	0.522V	0.600V	Cell 7: Persisted through shutdown. First occurrence: 2:43:06, ; last occurrence: End of operation, ; cumulative duration: 1 s, ; maximum continuous duration: 1 s, ; minimum voltage: 0.522V, ; maximum deviation from mean: 0.219V.
Critical	Low cell voltage detected	2026-06-23	2:43:06	Cell 47	0.598V	0.600V	Cell 47: Persisted through shutdown. First occurrence: 2:43:06, ; last occurrence: End of operation, ; cumulative duration: 1 s, ; maximum continuous duration: 1 s, ; minimum voltage: 0.598V, ; maximum deviation from mean: 0.143V.
Critical	Low cell voltage detected	2026-06-23	2:43:06	Cell 48	0.576V	0.600V	Cell 48: Persisted through shutdown. First occurrence: 2:43:06, ; last occurrence: End of operation, ; cumulative duration: 1 s, ; maximum continuous duration: 1 s, ; minimum voltage: 0.576V, ; maximum deviation from mean: 0.165V.
Critical	Low cell voltage detected	2026-06-23	2:43:06	Cell 95	0.595V	0.600V	Cell 95: Persisted through shutdown. First occurrence: 2:43:06, ; last occurrence: End of operation, ; cumulative duration: 1 s, ; maximum continuous duration: 1 s, ; minimum voltage: 0.595V, ; maximum deviation from mean: 0.146V.
Critical	Low cell voltage and excessive deviation	2026-06-23	2:43:04	Cell 96	0.378V	0.600V	Cell 96: Persisted through shutdown. First occurrence: 2:43:04, ; last occurrence: End of operation, ; cumulative duration: 3 s, ; maximum continuous duration: 3 s, ; minimum voltage: 0.378V, ; maximum deviation from mean: 0.363V.

Fig. 10. Detailed Physical Alarm results for abnormal operating conditions

Fig. 9는 인위적인 이상 조건이 포함된 운전시험 데이터를 분석 시스템에 적용한 전체 화면을 나타낸다. 정상 운전데이터를 적용한 Fig. 4와 달리 비정상 상태가 발생한 경우 Physical Alarm 영역에 해당 이상정보가 표시되었으며, 이를 통해 시스템 운전 중 발생한 비정상 상태와 셀 전압 이상을 통합적으로 확인할 수 있었다.

특히 스택 외부의 운전조건에 의해 시스템 이상이 발생한 경우에는 FC ERR가 Physical Alarm에 기록되었다. 이러한 시스템 이상정보는 앞의 3.1~3.3에서 다룬 출력·전류·전압 특성, 성능기준 및 셀 전압 분포와는 별도로 연료전지시스템 자체에서 발생한 비정상 상태를 확인하기 위한 정보로 활용하였다. PEMFC 시스템에서는 공기 및 연료 공급계통, 수분관리, 열 관리 및 기타 보조기기의 이상이 전체 시스템의 운전상태에 영향을 미칠 수 있으므로 시스템 수준의 이상정보를 함께 감시하는 것이 필요하다[6,7].

Fig. 10은 Fig. 9의 Physical Alarm을 선택하여 확인한 비정상 상태의 상세 분석 결과를 나타낸다. 상세 화면에서는 이상 발생 종류와 발생 시점 및 관련 운전정보를 확인할 수 있도록 하였으며, 이를 통해 다수의 운전시험 데이터에서 발생한 이상 이력을 추적할 수 있도록 구성하였다.

한편, 개별 셀의 건전성은 시스템 수준의 이상정보와 별도로 평가할 필요가 있다. PEMFC 스택에서는 반응가스의 불균일한 공급, flooding 및 dry-out과 같은 수분 불균형, 국부적인 반응조건의 차이 등에 의해 셀 간 전압 불균일이 발생할 수 있으며, 이러한 현상은 특정 셀의 전압 저하로 나타날 수 있다[5-7]. 특히 flooding은 반응물 전달을 방해할 수 있으며, dry-out은 막의 이온전도 특성에 영향을 줄 수 있는 것으로 보고되고 있다[9]. 또한 반응가스 공급 부족에 따른 starvation도 개별 셀의 국부적인 성능 저하와 연관될 수 있다[10].

본 연구에서는 이러한 실제 고장원인을 직접 재현하여 원인을 규명하는 것을 목적으로 하지 않고, 인위적으로 셀 빠짐 조건을 부여하여 셀 전압 이상에 대한 검출 가능성을 검증하였다. Fig. 11은 셀 빠짐 조건을 부여한 경우의 개별 셀 전압 분포를 나타낸다. 정상상태의 셀 전압 분포를 나타낸 Fig. 8과 비교하면, 셀 빠짐이 발생한 셀은 전체 셀의 평균적인 전압 분포에서 벗어나 상대적으로 큰 전압 편차를 나타냈으며, 설정된 판정 기준에 따라 이상 셀로 검출되었다. 최근 연구에서도 셀 간 전압 비균일성은

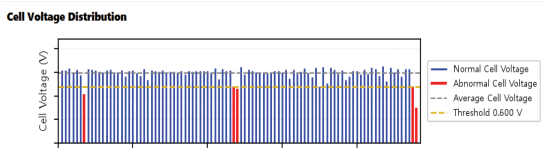


Fig. 11. Cell voltage distribution under an artificially induced cell abnormality

PEMFC 스택의 상태 및 건전성을 평가할 수 있는 중요한 정보로 활용되고 있다[11].

따라서 본 연구에서 구축한 분석 시스템은 FC ERR를 이용한 시스템 수준의 비정상 상태와 개별 셀 전압을 이용한 셀 수준의 비정상 상태를 구분하여 기록하고 확인할 수 있었다. 특히 정상 셀 전압 분포와 인위적인 셀 빠짐 조건에서의 전압 분포를 비교함으로써, 평균 셀 전압만으로는 확인하기 어려운 개별 셀의 비정상 상태를 식별할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 운전데이터에 기반한 Physical Alarm 분석이 PEMFC 시스템의 운전상태 및 셀 건전성을 동시에 평가하기 위한 진단방법으로 활용될 가능성을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 건물용 5 kW급 PEMFC 시스템에서 축적된 운전시험 데이터를 활용하여 시스템의 성능 및 개별 셀 건전성을 평가하는 데이터 기반 분석 방법을 제안하였다. 목표 전류 도달 후 안정화된 정전류 운전구간을 선정하고, 출력, 전류, 평균 셀 전압 및 개별 셀 전압을 분석하였다.

운전시험별 성능은 목표 전류밀도에서의 평균 셀 전압과 BOL/EOL 기준 성능을 비교하여 상대적인 성능 수준을 평가하였다. 또한 개별 셀 전압 분포와 평균 전압으로부터의 편차를 분석하여 셀 간 전압 균일성과 셀 건전성을 평가하였다.

일부 운전시험에는 인위적인 이상 조건을 부여하여 이상 검출 가능성을 검증하였다. 시스템 측 이상은 FC ERR를 통해 Physical Alarm에 기록되었으며, 셀 빠짐 조건에서는 해당 셀의 전압 저하와 전압 편차를 검출하였다. 이를 통해 시스템 수준과 개별 셀 수준의 비정상 상태를 구분하여 검출할 수 있음을 확인하였다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 구축한 데이터 기반 분석방법은 운전시험별 성능 특성, BOL/EOL 기준 대비 상대적인 성능 수준, 개별 셀의 전압 분포 및 건전성, 시스템 및 셀 수준의 비정상 상태를 통합적으로 평가하는 데 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

향후에는 다양한 정상 및 이상 조건에서의 운전데이터를 지속적으로 축적하고, 이를 기반으로 인공지능(AI)을 적용한 사전 이상 예지 분석기법을 개발하고자 한다. 이를 통해 현재의 기준값 기반 이상 검출에서 나아가 셀 및 시스템에서 발생하는 미세한 이상징후와 운전패턴의 변화를 사전에 인지하고, 실제 고장이 발생하기 전에 문제를 예측하여 필요한 점검 및 대응조치를 수행할 수 있는 예지진단 및 대응 프로세스를 구축하고자 한다.

후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구이다(IITP-2026–RS-2020-II 201741).

References

1. J. Ahn, C. Kim, and W. Choi, “Life cycle greenhouse gas emissions of passenger cars in South Korea: focusing on the Hyundai KONA and NEXO”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 4, 2025, pp. 440-447, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.4.440.
2. S. Ham, T. Kang, W. Y. Lee, and M. Kim, “Energy saving effect of CCHP system using high temperature polymer electrolyte fuel cell for data centers”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 187-195, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.187.
3. J. H. Kim, S. M. Kim, and K. W. Jun, “Analysis of the demonstration-scale operational performance of a fuel cell waste-heat utilization project for heat supply to a public swimming pool”, Journal of Hydrogen and New

Energy, Vol. 37, No. 3, 2026, pp. 272-281, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.3.272.

4. E. Wallnöfer-Ogris, F. Poimer, R. Köll, M. G. Macherhammer, and A. Trattner, “Main degradation mechanisms of polymer electrolyte membrane fuel cell stacks: mechanisms, influencing factors, consequences, and mitigation strategies”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 50, 2024, pp. 1159-1182, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.215.
5. Y. Park, Y. S. Jeon, S. H. Lee, J. K. Ahn, and H. A. Park, “An investigation on I-V characteristics and cell voltage distribution according to fuel supply conditions (pure H_2 vs. 75% H_2) in a reformer-integrated PEMFC system for buildings”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 37, No. 4, 2026, pp. 307-313, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.4.307.
6. D. Hissel and M. C. Péra, “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. A. Benmouna, M. Becherif, D. Depernet, F. Gustin, H. S. Ramadan, and S. Fukuhara, “Fault diagnosis methods for proton exchange membrane fuel cell system”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, No. 2, 2017, pp. 1534-1543, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.181.
8. Z. Li, R. Outbib, S. Giurgea, D. Hissel, S. Jemei, A. Giraud, and S. Rosini, “Online implementation of SVM based fault diagnosis strategy for PEMFC systems”, Applied Energy, Vol. 164, 2016, pp. 284-293, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.060.
9. K. Kim, J. Kim, H. Choi, O. Kwon, Y. Jang, S. Ryu, H. Lee, K. Shim, T. Park, and S. W. Cha, “Pre-diagnosis of flooding and drying in proton exchange membrane fuel cells by bagging ensemble deep learning models using long short-term memory and convolutional neural networks”, Energy, Vol. 266, 2023, pp. 126441, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126441.
10. M. Gerard, J. P. Poirot-Crouvezier, D. Hissel, and M. C. Péra, “Oxygen starvation analysis during air feeding faults in PEMFC”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 22, 2010, pp. 12295-12307, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.028.
11. H. Lei, C. Deng, Y. Si, Z. Liu, and S. Yang, “Quantitative assessment of voltage nonuniformity in 20 cell PEMFC stack for degradation mapping and health monitoring”, Applied Energy, Vol. 402, 2026, pp. 127007, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.127007.