

건설장비용 PEMFC 스택 열화 가속 스트레스 시험 방법 개발

손봉관 · 황준필[†] · 오주영 · 류호영 · 이승현 · 김희수[‡]

한국건설기계연구원 친환경동력연구실

Development of Accelerated Stress Test of PEMFC Stack Degradation for Construction Equipment

BONGKWAN SON, JUNPHIL HWANG[†], JUUYOUNG OH, HOYOUNG RYU, SEUNGHYEON LEE, HEE SU KIM[‡]

Green Energy R&D Division, Korea Construction Equipment Technology Institute (KOCETI), 36 Sandan-ro, Gunsan-si, Jeonbuk-do 54004, Korea

[†]Corresponding author :
junphil88@koceti.re.kr
hskim@koceti.re.kr

Received 24 December, 2025
Revised 30 December, 2025
Accepted 5 January, 2026

Abstract >> Polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) are promising power sources for environmentally benign mobility; however, their deployment in off-road construction equipment remains limited due to highly dynamic load profiles. In this study, a dynamic-load-based accelerated degradation test protocol was developed and applied to a five-cell PEMFC stack for 300 h. The test results revealed an overall performance decline, with durability at the stack level largely governed by localized degradation in the worst-performing cell. These findings underscore the necessity of stack-level, cell-resolved degradation analysis to enhance the durability of PEMFC systems under operating conditions representative of construction equipment.

Key words : PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Construction Equipment(건설장비), Stack Durability(스택 내구성), Accelerated Stress Test(가속 스트레스 시험), Dynamic Load Operation(동적 부하 운전)

1. 서론

전 세계적으로 강화되는 배출 규제와 탄소중립 정책에 따라 기존 내연기관 기반 동력 시스템은 점차 사용에 제약을 받고 있으며, 이에 따라 수송 및 산업 전반에서 친환경 동력원으로서의 전환이 필수적인 과제로 대두되고 있다¹⁻³⁾. 특히 온실가스 및 대기오염

물질 저감을 동시에 달성할 수 있는 수소 에너지 기반 기술은 차세대 에너지 시스템의 핵심 요소로 주목받고 있다. 이러한 흐름 속에서 고분자전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 높은 에너지 변환 효율과 무공해 운전 특성을 바탕으로 친환경 모빌리티 분야에서 가장 유망한 대안 기술 중 하나로 평가되고 있으며^{4,7)}, 현재 승용차를

중심으로 상용화 및 실증이 빠르게 진행되고 있다⁸⁾.

한편, 오프로드 건설장비는 차량용 모빌리티에 비해 단위 장비당 출력 요구가 크고, 장시간 고부하 운전이 빈번하여 전체 배출량 측면에서 환경에 미치는 영향이 매우 크다^{9,10)}. 이에 따라 건설장비 분야에서 친환경 동력 시스템 도입의 필요성이 지속적으로 제기되고 있다. 그러나 건설장비는 작업 특성상 급격한 부하 변동, 반복적인 가·감속, 정지와 재가동이 빈번하게 발생하는 동적 운전 환경에 노출된다¹¹⁾. 이러한 운전 조건은 상대적으로 일정한 부하 조건을 가정한 차량용 PEMFC 운전 환경과 근본적인 차이를 가지며, 연료전지 시스템의 성능 저하 및 내구성 확보 측면에서 새로운 기술적 과제를 야기한다.

특히 동적 부하 조건에서는 순간적인 전류 요구 증가에 따라 연료 및 산소 공급 불균형이 발생할 가능성이 높으며, 이는 전압 변동, 출력 저하 및 열화 가속으로 이어질 수 있다¹²⁻¹⁶⁾. 이러한 현상은 연료전지 시스템의 장기 신뢰성 확보에 직접적인 영향을 미치므로, 건설장비용 PEMFC 적용을 위해서는 실제 운전 조건을 반영한 열화 거동 분석과 내구성 평가가 필수적으로 요구된다. 따라서 건설장비 특유의 운전 패턴을 모사할 수 있는 시험 프로토콜 개발과 이를 기반으로 한 체계적인 열화 분석이 중요하다.

기존 선행 연구에서는 건설장비 또는 고부하 운전 조건을 고려한 연료전지 열화 특성 분석이 주로 단전지(single cell) 수준에서 수행되어 왔다¹⁴⁾. 이러한 단전지 시험은 막-전극접합체(MEA)의 기본적인 성능 특성 및 촉매층 열화 메커니즘을 이해하는 데 유용하지만, 실제 연료전지 스택 운전 시 발생하는 가스 유동 불균일, 압력 손실, 셀 간 상호작용과 같은 스택 고유의 특성을 충분히 반영하기에는 한계가 있다. 또한 건설장비와 같이 부하 변동이 큰 운전 조건을 적용한 PEMFC 스택 수준의 내구성 시험 및 열화 분석 사례는 아직 매우 제한적인 실정이다.

이에 본 연구에서는 건설장비의 실제 운전 특성을 반영한 동적 부하 기반 PEMFC 스택 열화 가속 시험 모드를 개발하고, 이를 적용한 장시간 내구성 시험을 통해 스택 전체 및 셀별 전압 거동 변화를 분석하였

다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 동적 부하 조건 하에서 PEMFC 스택의 열화 특성을 이해하는 데 기초적인 자료를 제공하며, 향후 건설장비용 연료전지 시스템의 내구성 평가 기법 확립 및 설계 개선을 위한 중요한 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

2.1 연료전지 실험 준비

본 연구에서는 활성면적 143 cm²의 MEA를 적용한 5셀 연료전지 스택을 사용하였다. MEA는 상용 CCM (Coated Catalyst Membrane)으로 구성되었으며, Anode 및 Cathode 촉매층에는 백금(Pt) 촉매가 적용되었다. 해당 MEA의 성능은 개방전압(OCV)에서 0.975 V, 전류밀도 0.4 A/cm²에서 0.789 V, 0.8 A/cm²에서 0.732 V, 1.0 A/cm²에서 0.706 V, 1.6 A/cm²에서 0.611 V로 나타났다. 스택은 3.5 N·m의 토크로 체결되었으며, 연료전지 성능 평가에는 피엔 피에너지텍(주)의 1 kW급 연료전지 평가장치를 사용하였다. 가스 유량 제어의 정밀도는 최대 유량 대비 ±1% 이내이다. 연료전지 시험 조건 및 스택 사양은 Table 1에 나타내었다.

2.2 열화 가속 시험 모드

본 연구에서는 Fig. 1에 제시된 네 가지 모드를 결합하여 연료전지 스택의 내구성 시험을 수행하였다.

Table 1. Fuel cell test conditions and stack specifications

Parameters	Value
Number of cells	5 EA
Active area	143 cm ²
An/Ca Line Temperature	70°C
An/Ca Line Humidity	80%
Coolant Temperature	65°C
Stoichiometry ratio	1.5 (H ₂) / 2.5 (Air)

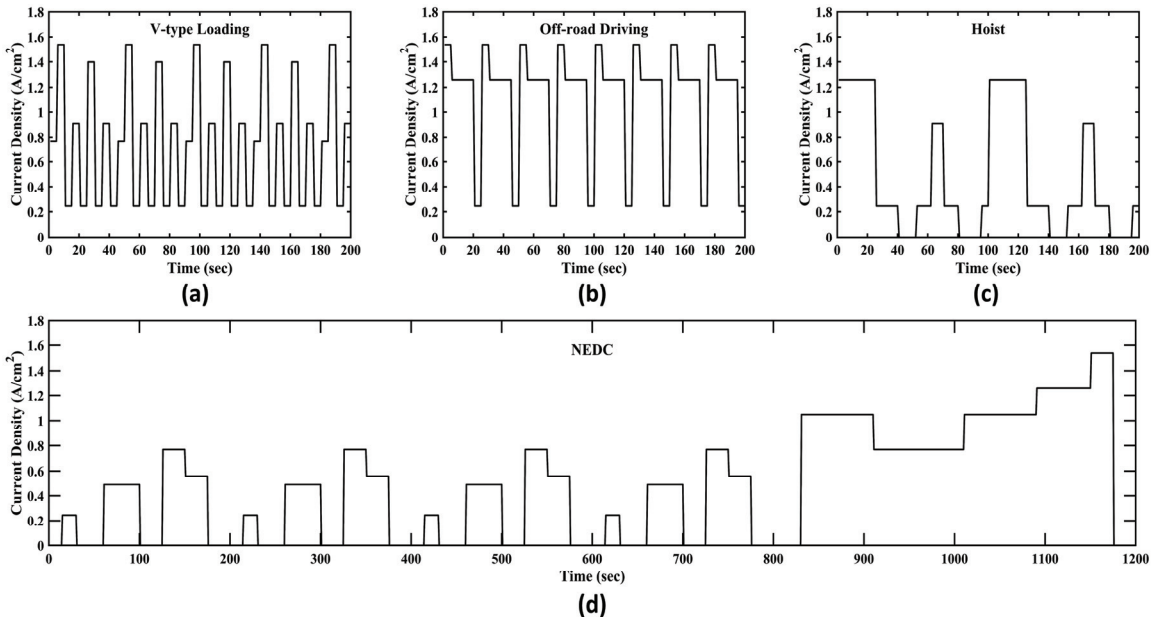


Fig. 1. Degradation test mode (a) V-type Loading, (b) Off-road Driving, (c) Hoist, (d) NEDC

Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)의 경우, 본 연구의 선행 연구¹⁴⁾에서 개발된 오프로드 건설장비용 내구성 테스트 프로토콜이다. Fig. 1(a)는 실제 트랙로더를 일본 휠 로더 표준 시험법인 JCMAS H022^{17,18)} V형 적재 시험법을 참고하여 차량 시험을 진행하여 개발된 모드이며, Fig. 1(b)는 동일 차량을 대상으로 오프로드 주행 시험을 기반으로 도출된 모드이다. Fig. 1(c)는 건설 장비인 크레인의 부하 특성¹⁹⁾에 고려하여 엔진 출력 데이터를 연료전지 입력 전류 밀도로 변환한 모드이며, Fig. 1(d)는 국제 표준 프로토콜인 NEDC (New European Driving Cycle)를 기반으로 부하 특성에 따른 엔진 출력 데이터를 입력 전류 밀도로 변환한 모드이다²⁰⁾. 이 네 가지 모드를 결합된 프로토콜은 다음과 같이 개발되었다.

“1.32 h of V-type loading → 1.32 h of Off-road driving → 2.33 h of NEDC → 2.64 h of Hoist”

내구성 테스트는 위의 과정을 반복하여 진행되었으며, 총 300시간의 내구성 테스트가 진행되었다.

3. 결 과

3.1 시계열 데이터 분석

연료전지 스택 내구성 시험 동안 측정된 전압 및 출력 시계열 데이터는 Fig. 2에 나타내었다. 전압은 전체 연료전지 스택을 대상으로 측정하였으며, 출력은 연료전지 성능 평가 시스템의 전기 로더 입력값을 기반으로 계산하였다. Fig. 2를 통해 동일 전류 밀도 조건에서 시간 경과에 따라 전압 및 출력이 점진적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있으며, 정적 MEA 성능 평가 결과에 비해 상대적으로 낮은 출력 전압이 나타났다.

Fig. 3은 각 셀의 출력 시계열 그래프를 나타낸다. 가스 공급 라인과 상대적으로 가까운 1~3번 셀에 비해, 더 먼 위치에 있는 4번 및 5번 셀에서 출력 전압 감소가 더욱 크게 나타남에 따라 출력이 감소함을 볼 수 있다. 이는 가스 공급 과정에서 1~3번 셀 대비 4번 및 5번 셀에서 가스 유동에 따른 압력 손실²¹⁻²³⁾이 더 크게 발생한 결과로 판단된다.

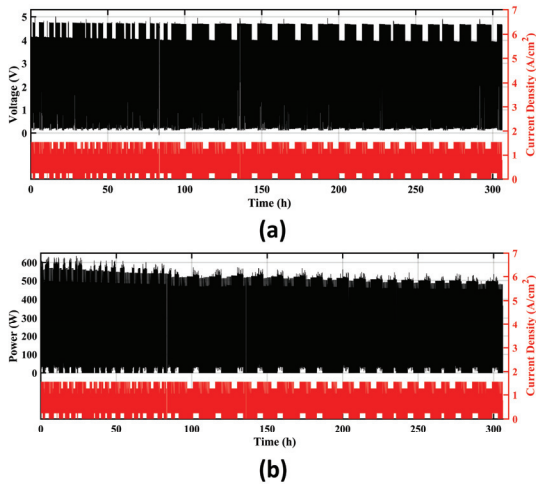


Fig. 2. Time series graph (a) Voltage, (b) Power

3.2 내구시험 전·후 데이터 분석

Fig. 4는 초기 상태와 300 h 내구시험 이후 시험 모드 별 출력 전압 그래프를 나타낸 것이다. 전체 시계열 데이터를 통해 확인한 바와 같이, 내구시험 전·후를 비교하면 모든 시험에서 출력 전압이 전반적으로 감소하는 경향이 나타났다. 또한, 출력 전압이 순간적으로 감소한 후 다시 회복되는 현상이 일부 구간에서 관찰되었으며, 이는 순간적으로 높은 가스 유량을 요구하는 과도(Transient) 운전 조건에서 주로 발생하였다. 이러한 현상은 낮은 전류 밀도에서 높은 전류 밀도로 급격히 전환되는 과정에서 연료 및 산소 공급이 일시적으로 충분이 이루어지지 못한 데 기인한 것으로 판단된다.

또한 Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)에 나타난 바와 같이, 300 h 내구시험 이후에는 시험 초기 대비 동일 전류 밀도 조건에서 출력 전압의 순간적 감소 및 회복 현상이 보다 빈번하게 관찰되었다. 이는 장시간 내구시험 과정에서 반복된 전기화학 반응에 의해 촉매 활성 저하 및 전극 구조 열화가 누적되면서, 반응 속도 및 물질 전달 특성이 초기 상태 대비 저하되었기 때문으로 해석될 수 있다⁴⁾. 특히, 이러한 열화는 MEA 내부에서의 연료 및 산소 확산 속도 저하로 이어져, 과도 운전 조건에서 요구되는 급격한 가스 유량 변

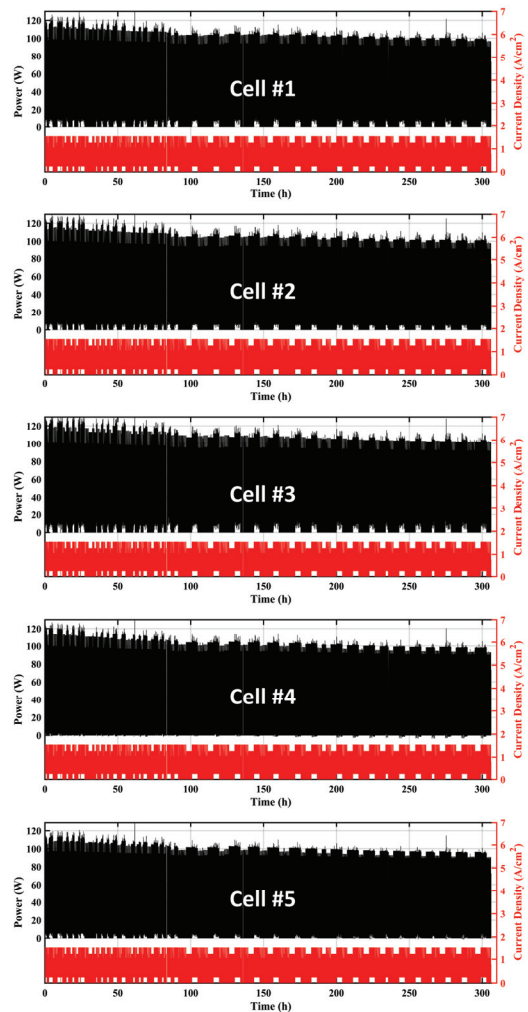


Fig. 3. Power time series graph for five cells

동에 즉각적으로 대응하지 못하는 한계로 작용한 것으로 판단된다. 그 결과, 과도 구간에서 일시적인 반응 불균형이 발생하며 출력 전압이 순간적으로 감소한 후, 가스 공급 및 반응 조건이 회복됨에 따라 전압이 다시 회복되는 현상이 반복적으로 나타난 것으로 보인다.

높은 전류 밀도 사용과 동적 부하 변동이 큰 V-type loading 모드에 대해, 시험 초기 상태와 300 h 내구시험 이후의 셀별 출력 특성 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 1번과 4번셀에 대해 열화 시험 초기의 전압-전류 결과를, Fig. 5(b)는 1번과 4

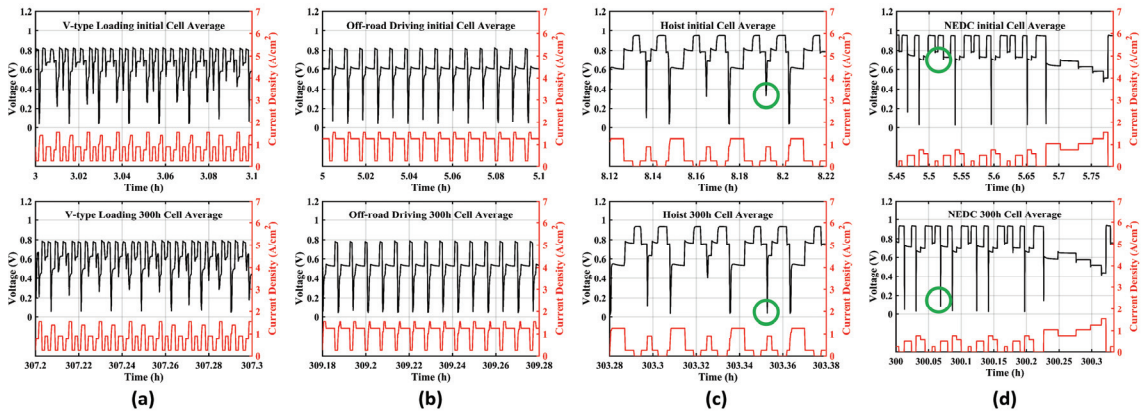


Fig. 4. Data before and after degradation test by test mode

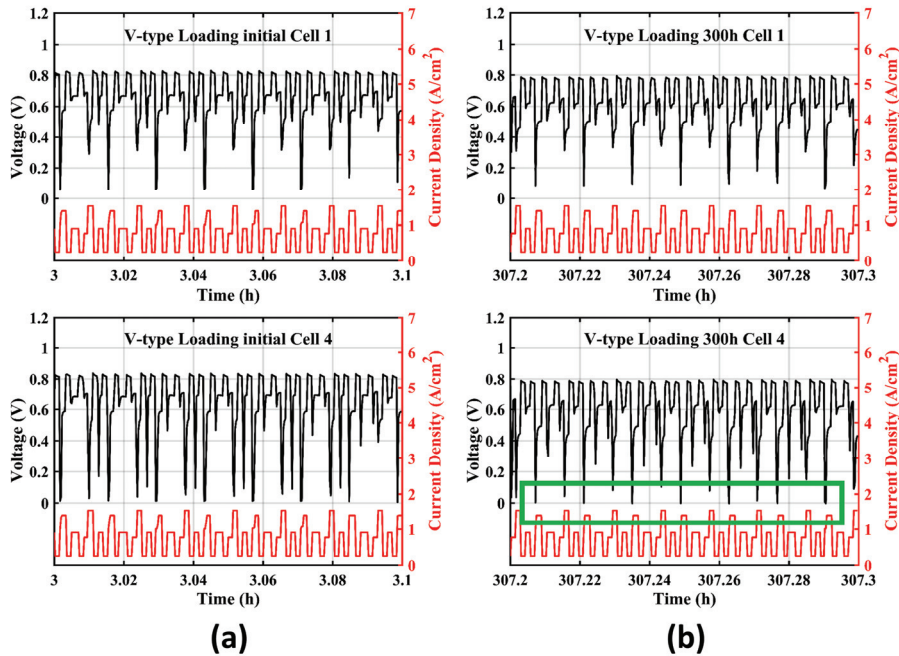


Fig. 5. Data before and after V-type loading mode degradation test for cells 1 and 4

변셀에 대해 300 h 내구시험 이후의 전압-전류에 대한 결과를 각각 나타낸다. 앞선 시계열 데이터 분석에서 언급한 바와 같이, 가스 유동에 따른 압력 손실로 인해 가스 공급 라인으로부터 먼 4번 셀에서는 상대적으로 큰 압력 손실이 발생하였으며, 이러한 조건은 동적 부하 변동에 따른 급격한 전류 요구 증가 시 연료 공급 한계를 더욱 가중시키는 요인으로 작용하

였다. 그 결과, 300 h 내구시험 이후 Fig. 5(b)에 표시된 구간에서는 단순한 순간적 전압 강하를 넘어 출력 전압이 음의 값으로 전환되는 역전압 현상이 관찰되었다. 이러한 역전압 현상은 급격한 전류 요구 증가에 비해 연료 공급이 일시적으로 충분치 이루어지지 못하는 연료 고갈(Fuel starvation) 조건에서 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이 경우 정상적인 수

소 산화 반응 대신 물 전기분해, 탄소 지지체의 부식 (carbon corrosion), 백금 촉매의 산화 등이 유도되어 MEA 촉매층 열화를 가속시키는 것으로 보고되고 있다^{12,13}). 따라서 본 연구에서 관찰된 역전압 현상은 동적 부하 조건 하에서 가스 유동에 따른 압력 손실과 누적된 MEA 열화가 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

3.3 내구 시험 전·후 열화 성능 분석

Fig. 6은 초기상태와 300 h 내구시험 이후의 I-V (Polarization) 곡선 및 출력 특성을 나타내며, Table 2에는 각 셀에 대해 각 전류 밀도별 전압 강하율을 정리하였다. 전반적으로 300 h 내구시험 이후에는 출력 전압 및 출력이 감소하는 경향을 보였으며, 특히 고전류 밀도 영역에서 전압 강하율이 더욱 크게 나타났다.

또한, 4번 셀의 경우, 고전류 영역으로 갈수록 타 셀들에 비해 높은 전압 강하를 나타냈다. 이는 연료 전지 스택 내 열화 거동이 셀 위치에 따라 선형적으로 변화하는 것이 아니라, 특정 셀에서 국부적으로 집중될 수 있음을 시사한다. 특히, 고전류 대역은 상대적으로 연료공급이 중요해지는 mass transport dominant regime으로써, 이 구간에서의 열화가 4번 셀에서 더 심각했다는 것은 4번 셀의 연료공급 불균형과 이에 따른 연료 고갈, 탄소 지지체 부식 및 촉매 열화가 심화되었다는 것을 의미한다. 이처럼 연료 전지 스택의 주요 열화 메커니즘은 스택 전체에서 균일하게 발생하지 않으며, 가장 불리한 운전 조건에 노출된 특정 셀, 즉 worst cell에서 우선적으로 집중 발생하는 것으로 보고되고 있다^{15,16}). 본 연구에서는 가스 유동에 따른 압력 손실과 동적 부하 조건이 복합적으로 작용하면서 4번 셀이 과도 운전 조건에서 상대적으로 연료 고갈 및 역전압 조건에 먼저 도달하였고, 이로 인해 해당 셀에서 비가역적인 열화가 집중적으로 진행된 것으로 판단된다. 이러한 결과는 연료전지 스택에서 열화가 평균적인 거동이 아닌, worst cell에서 국부적으로 지배된다는 선행 연구 결

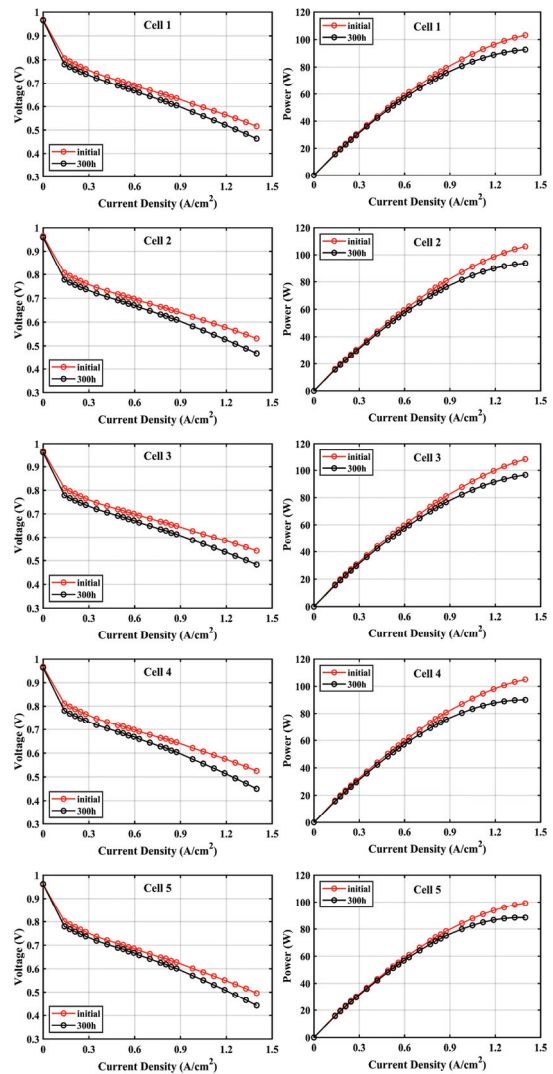


Fig. 6. IV and output graphs before and after degradation test

Table 2. Voltage drop rate per cell depending on current density

Current Density (A/cm ²)	Cell #1	Cell #2	Cell #3	Cell #4	Cell #5
0	0.22%	0.58%	0.66%	0.45%	0%
0.28	2.75%	3.32%	3.58%	3.63%	2.46%
0.56	3.19%	3.77%	4.04%	4.36%	2.68%
0.84	4.61%	5.27%	5.32%	6.12%	4.04%
1.12	6.93%	7.91%	7.52%	9.41%	6.64%
1.4	10.17%	11.81%	10.72%	14.26%	10.80%

과와 정합되는 경향을 보인다. 또한, 본 실험을 통해 건설기계와 같은 극단적인 동적 부하를 요구하는 상황에서는 향후 대형 스택에서의 셀간 성능 편차, worst 셀에서의 열화 집중 문제가 심각해질 것을 의미하며, 이에 따른 연료 및 산소 공급의 안정화, 유동 특성 개선 등의 조치가 필요할 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 건설장비의 실제 운용 특성을 반영하여 고전류 사용과 동적 부하 변동이 빈번한 연료전지 스택 열화 가속 시험 모드를 개발하고, 5셀 PEMFC 스택을 대상으로 300 h 내구시험을 수행하여 스택 및 셀 단위 열화 거동을 분석하였다. 이를 통해 정적 내구시험으로는 확인하기 어려운 과도 운전 조건에서의 성능 저하 및 셀 간 열화 편차 특성을 규명하였다.

- 1) 건설장비 운행 특성을 반영한 동적 부하 기반 내구시험 결과, 시험 시간이 증가함에 따라 연료전지 스택의 출력 전압 및 출력이 전반적으로 감소하는 경향이 나타났으며, 특히 고전류 밀도 영역에서 성능 저하가 두드러졌다.
- 2) 시험 모드 전·후 비교 결과, 과도 운전 조건에서 순간적인 출력 전압 감소 및 회복 현상이 반복적으로 관찰되었으며, 이는 급격한 전류 요구 증가에 비해 연료 및 산소 공급 응답이 지연되는 현상과 밀접한 관련이 있음을 확인하였다.
- 3) 장시간 내구시험 이후에는 촉매 활성 저하 및 전극 구조 열화 누적으로 인해 전기화학 반응 속도 및 물질 전달 특성이 저하되었으며, 이로 인해 과도 운전 조건에서의 전압 변동 빈도가 시험 초기 대비 증가하는 경향을 보였다.
- 4) 셀별 성능 분석 결과, 스택 내 열화 거동은 셀 위치에 따라 선형적으로 증가하지 않았으며, 특정 셀에서 전압 강하율이 국부적으로 크게 나타나는 worst cell 거동이 확인되었다. 특히 4번 셀은 동적 부하 조건에서 연료 고갈 및 역전압 조건에 먼저 도달하여 비가역적인 열화가

집중적으로 진행된 것으로 판단된다.

- 5) 본 연구 결과는 건설장비와 같이 동적 부하 변동이 큰 운용 환경에서 연료전지 스택의 내구성과 신뢰성 확보를 위해 셀 단위 열화 평가의 중요성을 제시하며, 향후 연료전지 단독 운전의 한계를 보완하기 위해, 스택 단위의 transient 운전 상황에서의 유동특성 개선, 연료 및 산소공급 안정화, 그 외 하이브리드 전력 시스템의 도입 등 다양한 추가 기술 개발이 필요하다는 것을 보여준다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20223030030030).

References

1. D. E. Grineva, R. M. Mensharapov, N. A. Ivanova, D. D. Spasov, M. V. Sinyakov, A. Sh. Aliyev, and V. N. Fateev, "Hydrogen-supported decarbonization of automotive industry: from ICE through hybrids to FC vehicles", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 192, No. 26, 2025, pp. 152238, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.152238>.
2. Y. D. Lee, J. Y. Kim, D. J. Woo, H. Ju, and H. Kim, "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", *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 530-545, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.530>.
3. Y. Wang, Y. Pang, H. Xu, A. Martinez, and K. S. Chen, "PEM fuel cell and electrolysis cell technologies and hydrogen infrastructure development - a review", *Energy & Environmental Science*, Vol. 15, No. 6, 2022, pp. 2288-2328, doi: <https://doi.org/10.1039/D2EE00790H>.
4. H. Sethia and A. Priyam, "Review on hydrogen fuel cells as an alternative fuel", *Next Energy*, Vol. 9, 2025, pp. 100460, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100460>.
5. B. Seo, S. Oh, and H. K. Suh, "Analysis of differential pressure performance and uniformity index according to flow field design and inlet flow rate in PEMFC", *Journal of Hydrogen*

- and New Energy, Vol. 35, No. 6, 2024, pp. 763-773, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.6.763>.
6. J. Kim, J. Lee, I. Kang, and H. Ju, "Development and research of thermal management equipment for efficiency enhancement of PEMFC systems", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 2, 2024, pp. 205-215, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.2.205>.
 7. J. Kim, B. Son, H. S. Kim, and K. Jang, "Development of a 1.6-kW range extender based on the hydrogen proton exchange membrane fuel cells stack for 1 ton class automated guided vehicles", *Journal of Power Sources*, Vol. 646, 2025, pp. 237180, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.237180>.
 8. A. N. Mancino, C. Menale, F. Vellucci, M. Pasquali, and R. Bubbico, "PEM fuel cell applications in road transport", *Energies*, Vol. 16, No. 17, 2023, pp. 6129, doi: <https://doi.org/10.3390/en16176129>.
 9. Transport and Environment, "Reducing emissions from non-road mobile machinery", 2024, Retrieved from <https://www.transportenvironment.org>.
 10. T. Cao, T. D. Durbin, R. L. Russell, D. R. Cocker, G. Scora, H. Maldonado, and K. C. Johnson, "Evaluations of in-use emission factors from off-road construction equipment", *Atmospheric Environment*, Vol. 147, 2016, pp. 234-245, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.042>.
 11. F. Un-Noor, G. Wu, H. Perugu, S. Collier, S. Yoon, M. Barth, and K. Boriboonsomsin, "Off-road construction and agricultural equipment electrification: review, challenges, and opportunities", *Vehicles*, Vol. 4, No. 3, 2022, pp. 780-807, doi: <https://doi.org/10.3390/vehicles4030044>.
 12. D. Liang, Q. Shen, M. Hou, Z. Shao, and B. Yi, "Study of the cell reversal process of large area proton exchange membrane fuel cells under fuel starvation", *Journal of Power Sources*, Vol. 194, No. 2, 2009, pp. 847-853, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.06.059>.
 13. C. Qin, J. Wang, D. Yang, B. Li, and C. Zhang, "Proton exchange membrane fuel cell reversal: a review", *Catalysts*, Vol. 6, No. 12, 2016, pp. 197, doi: <https://doi.org/10.3390/catal6120197>.
 14. J. Oh, H. Ryu, J. Hwang, K. Kim, S. Park, S. Lee, and H. S. Kim, "Experimental study on degradation of proton exchange membrane fuel cells for eco-friendly heavy equipment", *Journal of Power Sources*, Vol. 625, 2025, pp. 235677, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235677>.
 15. C. Shen, S. Xu, and Y. Gao, "Analysis of fuel cell stack performance attenuation and individual cell voltage uniformity based on the durability cycle condition", *Polymers*, Vol. 13, No. 8, 2021, pp. 1199, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13081199>.
 16. X. Yu, C. Zhang, M. Fan, B. Deng, C. Huang, J. Xu, D. Liu, and S. Jiang, "Experimental study of dynamic performance of defective cell within a PEMFC stack", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 13, 2022, pp. 8480-8491, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.159>.
 17. Japan Construction Mechanization Association, "Earth-moving machinery - test methods for energy consumption - wheeled loaders", *JCMAS Standard H 022*, 2015, Retrieved from https://jcmanet.or.jp/iso_jis_jcmas/jcmas-ichiran/.
 18. H. Ryu, W. Yoon, S. Lee, J. Hwang, J. Oh, J. Park, and H. S. Kim, "A study on power distribution strategy between fuel cell and battery for 50 kW construction equipment using 1D simulation", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 6, 2024, pp. 706-714, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.6.706>.
 19. P. J. Corral-Vega, P. García-Triviño, and L. M. Fernández-Ramírez, "Design, modelling, control and techno-economic evaluation of a fuel cell/supercapacitors powered container crane", *Energy*, Vol. 186, 2019, pp. 115863, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115863>.
 20. I. Bloom, J. K. Basco, L. K. Walker, T. Malkow, G. De Marco, A. Saturnio, and G. Tsotridis, "Fuel cell testing protocols: an international perspective", Publications Office of the European Union, 2013, doi: <https://doi.org/10.2790/86676>.
 21. C. H. Chen, S. P. Jung, and S. C. Yen, "Flow distribution in the manifold of PEM fuel cell stack", *Journal of Power Sources*, Vol. 173, No. 1, 2007, pp. 249-263, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.05.007>.
 22. J. H. Koh, H. K. Seo, C. G. Lee, Y. S. Yoo, and H. C. Lim, "Pressure and flow distribution in internal gas manifolds of a fuel-cell stack", *Journal of Power Sources*, Vol. 115, No. 1, 2003, pp. 54-65, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00615-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00615-8).
 23. M. Rahimi-Esbo, A. R. Sangtabi, and E. Alizadeh, "Manifold design in a PEM fuel cell stack to improve flow distribution uniformity", *Sustainability*, Vol. 14, No. 23, 2022, pp. 15702, doi: <https://doi.org/10.3390/su142315702>.