Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 5, 2025, pp.494~503
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.5.494

JHNE
pISSN 1738-7264 · eISSN 2288-7407

수소연료전지의 항공기 적용을 위한 기울임에 따른 출력 안정성 평가

김의태[1,2] · 이수민[1,3] · 최윤영[1] · 임인섭[1] · 손영준[1,4] · 유상석[2†] · 오환영[1,4†]

[1]한국에너지기술연구원 수소연료전지연구실, [2]충남대학교 기계공학과, [3]한양대학교 융합기계공학과, [4]과학기술연합대학원대학교 수소에너지공학

Evaluation of Voltage Stability of PEMFCs under Tilting Conditions for Aviation

EUITAE KIM[1,2], SU-MIN LEE[1,3], YOON-YOUNG CHOI[1], IN SEOP LIM[1], YOUNG-JUN SOHN[1,4], SANGSEOK YU[2†], HWANYEONG OH[1,4†]

[1]Hydrogen Fuel Cell Laboratory, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Korea
[2]Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea
[3]Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea
[4]Hydrogen Energy Engineering, University of Science and Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

[†]Corresponding author :
hyoh@kier.re.kr
sangseok@cnu.ac.kr

Received 10 September, 2025
Revised 29 September, 2025
Accepted 1 October, 2025

Abstract >> The Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) is a promising technology for aviation due to its high efficiency and zero emissions. However, aviation tilting affects water management and thus, voltage stability. This study evaluates the voltage stability of a PEMFC unit cell under static 45° X- and Y-axis tilts. We monitored voltage and inlet pressures, quantifying voltage stability using the Central Quartile Variation (CQV). At high current densities (1.6 A/cm²), tilting that hinders water drainage significantly decreases voltage stability. Conversely, tilting that facilitates drainage improves voltage stability. At lower current densities (1.2 A/cm²), the effect of tilting is minor. Cathode inlet pressure analysis confirmed that voltage fluctuations are closely linked to water accumulation, while anode analysis showed that some water buildup can improve membrane hydration, enhancing performance. These findings are crucial for developing robust fuel cell systems for Aviation, with future work focusing on dynamic tilting conditions and stack-level optimization.

Key words : Polymer electrolyte membrane fuel cell(고분자전해질 연료전지), Voltage stability(출력 안정성), Central quartile variation(중앙사분위 변동계수), Flooding(침수), Tilting effect(기울임 효과), Inlet pressure analysis(전단 압력 분석)

Nomenclature

- -XL : X축 기준 왼쪽 기울임 자세
- -XR : X축 기준 오른쪽 기울임 자세
- -YL : Y축 기준 왼쪽 기울임 자세
- -YR : Y축 기준 오른쪽 기울임 자세
- -HZ : 수평 자세

1. 서 론

지구 온난화의 심화로 인해 전 세계적으로 모빌리티 분야의 온실가스 배출에 대한 규제가 강화되고 있다. 특히 항공기는 여객・화물 수송 시 단위 거리당 이산화탄소 배출량이 다른 운송수단에 비해 매우 높고, 장거리 비행에서 발생하는 온실가스는 대기 상층에 직접 배출되어 기후 변화에 미치는 영향이 더욱 크다[1]. 이러한 특성으로 인해 항공은 대표적인 고탄소 배출 산업으로 분류되고 있으며, 이를 대체할 수 있는 친환경 에너지원 도입이 요구되고 있다.

고분자전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 운전 중 이산화탄소를 포함한 온실가스 배출이 거의 없고, 수소와 산소의 전기화학적 반응을 통해 전기를 생산하기 때문에 높은 에너지 효율을 달성할 수 있다. 또한 에너지 밀도가 높고 부하 변동에 대한 응답 속도가 빠르며, 저온 구동 특성 덕분에 항공기와 같은 가혹한 운항 환경에도 적용 가능성이 크다. 이러한 장점으로 인해 PEMFC는 항공 분야의 차세대 추진 에너지원으로 주목받고 있다[2].

그러나 항공기에 PEMFC를 적용하기 위해서는 고도 변화에 따른 감압, 진동, 기울임 등 특수한 운항 환경에서도 안정적인 출력 특성이 확보되어야 한다. 본 연구에서 수행한 정적 기울임 평가는 항공기의 이륙・착륙 과정이나 비행 중 특정 자세가 유지되는 상황을 단순화하여 모사한 것으로, 이러한 조건에서 출력 변동성을 정량적으로 평가함으로써 실제 운항 중 연료전지가 자세 변화에도 안정적으로 전력을 공급할 수 있는지를 검증하는 의미를 갖는다. 기울임 조건은 중력 방향이 연료전지 내 물의 거동에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 수분 축적(flooding) 및 이에 따른 출력 불안정성과 밀접한 관련이 있을 것으로 예상된다.

PEMFC 단위 셀은 분리판, 집전판, 가스켓, 가스 확산층(Gas Diffusion Layer, GDL), 그리고 막 전극 집합체(Membrane Electrode Assembly, MEA)로 구성되며, 공기극에서 생성된 물은 촉매층의 삼상계면, GDL 기공, 유로를 따라 배출된다. 그러나 생성된 물이 원활히 제거되지 않을 경우 Flooding이 발생하고, 이는 물질 전달 저항을 증가시켜 출력의 불안정성과 전반적인 성능 저하를 초래한다. 특히 기울어진 자세에서는 중력의 영향과 유로 구조에 따른 Flooding 발생 위치나 축적 양상이 달라질 수 있다.

기울임 조건에서의 PEMFC 성능에 대한 연구는 기존에도 일부 보고된 바 있다. El-Emam 등[3]은 PEMFC 단일 셀을 대상으로 스택의 기울임 및 진동 조건을 적용하여 성능을 평가하였으며, 특정 자세에서 수분 배출이 촉진되거나 탈수가 심화되는 등 전류밀도 및 전력밀도의 차이가 발생함을 확인하였다. 또한 Choi 등[4]은 무인기용 연료전지 시스템을 대상으로 X, Y, Z 축에 대한 동적 기울임 및 가속도 조건을 적용하여 시험을 수행하였으며, 단위 전지 수준에서는 출력 저하나 누설과 같은 이상 현상이 발생하지 않음을 보고하였다. 아울러 Chen과 Wu[5]는 PEMFC 단일 셀을 상・하 방향으로 배치하여 가습 및 무가습 조건에서 성능을 비교하였으며, 셀 자세에 따른 성능 차이가 생성수의 중력 의존적 거동에서 기인함을 확인하였다.

한편, flooding 현상과 출력 성능 저하의 상관성에 대해서는 다양한 방법론적 접근이 시도된 바 있다. 예를 들어, Ahn 등[6]은 공기극 출구 압력 변화를 통해 PEMFC 내 수분 축적 및 배출 거동을 간접적으로 관찰하였으며, flooding이 전압 불안정성을 유발함을 실험적으로 입증하였다.

본 연구에서는 이러한 선행 연구를 확장하여, PEMFC 단위 셀을 대상으로 X, Y축 방향의 정적 기울임 평가를 수행하였다. 특히 연료극과 공기극의 전단 압력을 동시에 측정함으로써, 기울임 조건에서의 수분 배출 특성과 출력 불안정성 간의 연관성을 보다 직접적으로 규명하고자 하였다.

2. 실 험

2.1 실험 장비

기울임 평가는 SciTech Korea 사의 연료전지 성능

평가용 스테이션과 자체 제작한 기울임 모사 장치를 활용하여 수행하였다. 실험에는 VINAtech의 고분자 전해질 연료전지(PEMFC) MEA와 자체 제작한 분리판을 사용하였으며, 셀 구성 및 관련 사진은 Figs. 1–4와 Table 1에 제시하였다.

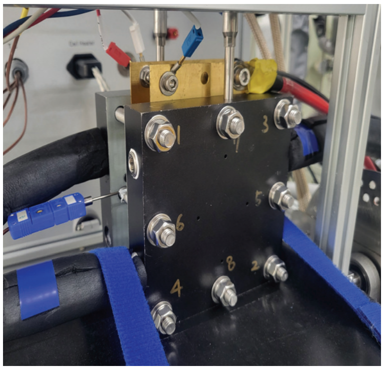


Fig. 1. Front view of the PEMFC unit cell (cathode side)

Table 1. Specifications of PEMFC unit cell with defined cathode outlet location

Item	Specification
active area	5 cm*5 cm (25 cm²)
separator plate type	serpentine flow field
MEA (Model No.)	VINAtech (VFP-A4025-G00)
cathode outlet	bottom left of visible face in Fig. 3

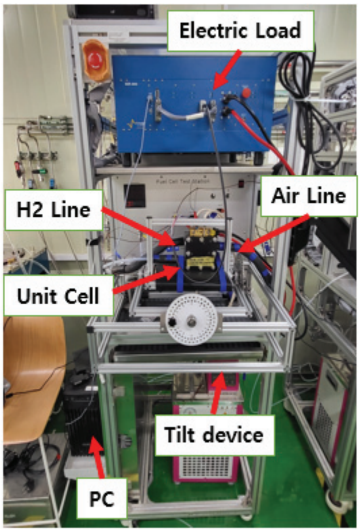


Fig. 2. Experiment setup for PEMFC tilting test

해당 셀은 가장 일반적으로 사용되는 4 channel Serpentine 형상의 유로를 적용하였으며, 전·후단의 차압에 의해 기체 유동이 강화되어 내부 수분의 배출이 비교적 원활하도록 설계되었다. 그러나 Serpentine 유로의 특성상 코너 구간에서는 여전히 수분 배출이 어려운 영역이 형성될 수 있으며, 이러한 국부적 정체 현상은 셀의 기울임 조건에서 중력의 영향을 받아 더욱 심화될 가능성이 있다.

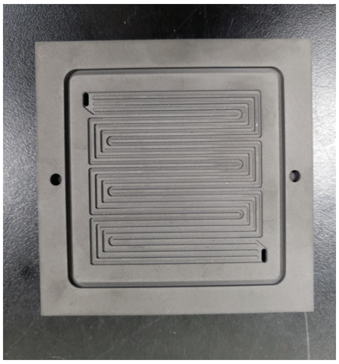


Fig. 3. Flow field pattern of bipolar plate used in the experiment (serpentine type)

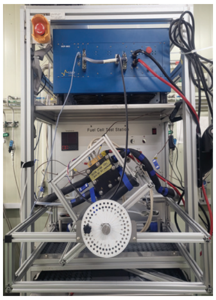
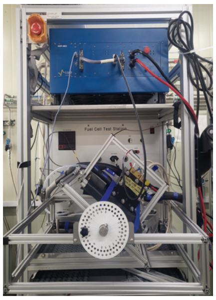
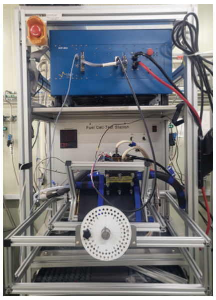
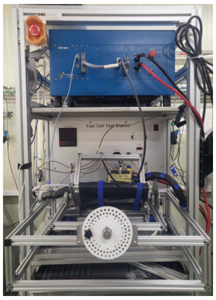
angle / axis	Left 45°	Right 45°
X		
Y		

Fig. 4. Experiment setup for PEMFC tilting test under fixed tilt angles of 45° in the X- and Y-axis directions

Table 2. Operating condition of tilting test

Parameter	Value	
hydrogen stoichiometry	1.5	
oxygen stoichiometry	2.0	
hydrogen relative humidity (%)	80	
oxygen relative humidity (%)	80	
cell temperature (°C)	65	
tilting angle (°)	45	
constant current operating current (A)	30 (1.2 A/cm²)	40 (1.6 A/cm²)
time (min)	30	10

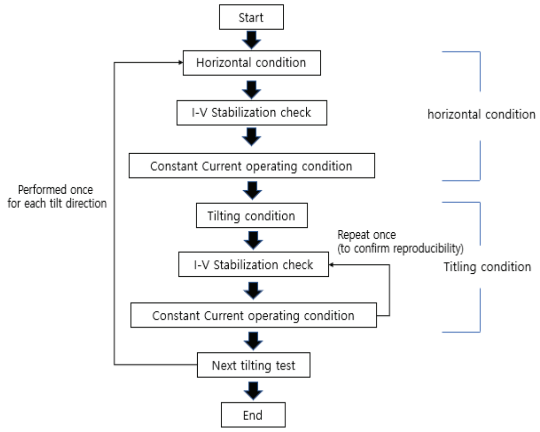


Fig. 5. Experimental procedure for evaluating voltage stability under tilting conditions

2.2 실험 조건

본 실험은 항공기 적용을 고려한 연료전지의 출력 안정성 평가를 목적으로 수행되었으며, Table 2에 제시된 고전류, 고가습 및 기울임 조건은 실제 항공 운항 중 셀 내부에 Flooding 발생 가능성이 높은 조건으로 설정하였다. 이는 일반적인 운항 조건을 모사하기보다는, 수분 축적에 따른 출력 저하 경향을 명확히 파악하고, 자세 변화에 따른 성능 민감도를 worst-case 관점에서 비교·분석하기 위함이다.

정전류 운전은 KGS-AH373[7] 이동형 연료전지 제조의 시설·기술·검사 규정을 참고하여 30분간 유지하였다. 단, 40 A 조건에서는 초기에는 30분 정전류 조건으로 반복 실험을 수행하였으나, 고전류로 인해 생성된 수분이 효과적으로 배출되지 못하면서 Flooding 현상이 누적되어, 실험 중 출력 전압이 급격히 저하되는 현상이 관찰되었다. 이에 따라, 40 A 조건의 정전류 유지 시간을 10분으로 설정하여 평가를 진행하였다.

2.3 실험 과정

전체 실험 절차는 Fig. 5에 도시하였다. 자세 변화 조건에서의 출력 안정성을 정량적으로 평가하기 위해, 모든 조건에 대해 일관된 실험 방식을 적용하였다.

먼저, 각 기울임 실험에 앞서 수평 자세에서의 정전류 운전을 통해 출력 재현성을 사전 확인하였으며, 이를 바탕으로 셀 상태의 안정화 여부 및 직전 기울임 조건의 반응물과 생성물의 잔류 영향 가능성을 판단하였다. 이후, 동일한 유량 조건 하에 sweep 방식의 IV 측정을 반복 수행하여 각 조건에 대한 초기 상태를 안정화하고 출력 특성의 재현성을 확보하였다. 기울임 조건에서는 ① IV 안정화 → ② 정전류 운전의 절차를 2회 반복(총 4단계)하여, 출력 경향성과 재현성을 평가하였다.

또한, 자세 변화에 따른 수분 축적의 영향을 최소화하기 위해 하루에 두 가지 자세 조건만 평가하였으며, 다음날 실험을 진행하는 경우에는 실험 종료 및 시작할 때 동일한 가습 및 건조 프로토콜을 적용하여 수행하였다.

2.4 불안정성 평가 방법

자세 변화 조건에서 발생할 수 있는 연료전지 출력의 변동성을 정량적으로 분석하기 위해, 본 연구에서는 전압 기반의 출력 안정성 지표로 중앙사분위 변동계수(CQV, Central Quartile Variation)를 도입하였다.

$$CQV(\%) = \frac{Q_3 - Q_1}{Q_3 + Q_1} \times 100\,(\%)$$

CQV는 표준 편차, 변동계수(CV)와 비교하여 이상치에 대한 민감도가 낮으며, 중심 구간의 분산을 중심으로 출력의 일관성을 평가할 수 있다는 장점이 있다. 특히 유로 내 배수 현상에 의해 순간적인 출력 이상치가 발생할 수 있는 PEMFC 운전 환경에서 적절한 안정성 평가 지표로 활용 가능하다.

CQV는 전체 데이터 중 중앙값을 기준으로 하위 25%에서 상위 25%까지의 구간(Q1~Q3)에 포함되는 전압의 분산도를 기반으로 하며, 값이 클수록 해당 구간 내에서 출력의 불안정성이 크다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 Flooding 해소 직후 등 일시적 이상 전압이 포함된 전체 데이터를 사용하되, 해당 이상치의 영향을 최소화하고, 전반적인 출력 안정성 경향성을 비교하기 위해 CQV 지표를 주요 분석 도구로 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 자세 조건에 따른 수분 배출 경로 및 출력 거동 예측

연료전지 셀의 기울임은 내부 수분 배출 경로와 출력 특성에 영향을 주며, 그중에서도 공기극 측 수분 거동이 훨씬 더 민감하게 나타난다. 실제로 여러 연구에서 공기극에서의 Flooding이 연료극보다 심각하게 발생함이 보고된 바 있으며[8,9], 이는 공기극의 물질 전달 저항과 출력 성능 저하에 보다 직접적인 상관관계를 갖는다는 것을 의미한다. 이를 바탕으로 Fig. 6과 Fig. 7에 제시된 기울임 방향별 셀 구조 및 예상 수분 분포를 참고하면, 중력 방향, 셀 구조, 수분 정착 위치에 따라 공기 극 측에서는 다음과 같은 수분 배출 및 출력 거동이 예측될 수 있다.

-XL 자세: 공기극 유로 출구가 아래를 향하는 자세로, 중력에 의해 출구 부 배수가 용이하다. 이에 따라 유로 내 수분 축적이 억제되어 비교적 안정적인 출력이 기대된다.

-XR 자세: 공기극 유로 출구가 위를 향하는 자세로, 중력이 출구 부 수분 배출을 방해한다. 이로 인해 유로 내 수분 정체가 발생하여 출력 저하 및 불안정성이 유발될 가능성이 높다.

-YL 자세: 공기극 전극층에서 생성된 수분이 GDL과 유로를 거쳐 배출되는 과정에서 중력 방향이 이를 도와주는 자세이다. 따라서 전극층까지의 산소 전달 저해가 최소화되어 출력 특성이 안정적으로 유지될 것으로 예상된다.

-YR 자세: 공기극 전극층에서 생성된 수분이 GDL과 유로를 거쳐 배출되는 과정에서 중력 방향이 이를 방해하는 자세이다. 결과적으로 산소 전달 저해가 심화되어 출력 저하와 불안정성이 유발될 가능성이 높다.

이러한 경향은 물 생성량이 많은 고부하 조건에서 더욱 뚜렷하게 나타날 것으로 예상되며, 자세 변화에 따른 성능 민감도 분석에 중요한 기준으로 작용할 수 있다.

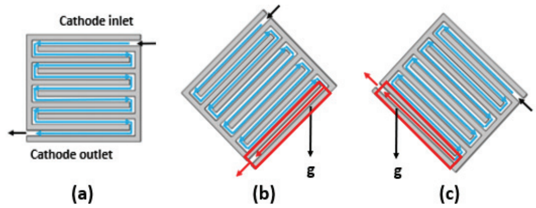


Fig. 6. Schematic view of the cathode separator flow channel showing expected water accumulation under tilting conditions (a) horizontal condition, (b) tilting condition: XL, (c) tilting condition: XR

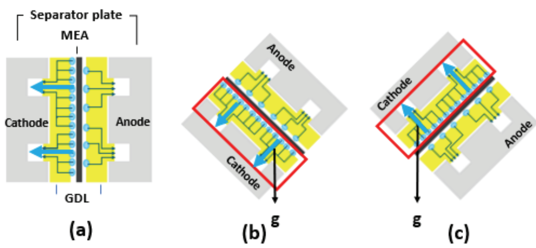


Fig. 7. Cross-sectional schematic of a unit PEMFC cell under different tilting conditions (a) horizontal condition, (b) tilting condition: YL, (c) tilting condition: YR

3.2 기울임 실험 결과

기울임 조건별 출력 안정성 분석은 40 A-X축, 40 A-Y축, 30 A-X축, 30 A-Y축 순으로 각각 다른 날에 수행하였다. 비교를 위한 데이터 선정은 각 실험일에서 가장 먼저 수행한 실험 데이터를 기준으로 하였으며, 비정상적인 이상치가 포함된 케이스는 비교 대상에서 제외하였다.

우선 40 A 조건에서의 실험분석 결과이다. Fig. 8(a)–(c)는 40 A에서의 X축 기울임 조건, Fig. 9(a)–(c)는 Y축 기울임 조건의 정전류 운전 결과를 나타내며, 각 자세별 전압 및 전단 압력 변화를 시각화하였다. Table 3과 Table 4에는 이에 대한 CQV, 표준편차, 평균 전압을 정리하였다.

분석 결과, XR 자세에서 수평 대비 출력 전압은 10 mV 감소 CQV는 0.0956%p 증가하였으며, YR 자세는 전압이 1 mV 감소, CQV는 0.018%p 증가하였다. 반면, XL 자세는 수평 대비 전압은 유지되고 CQV는 0.0583%p 감소하였으며, YL 자세는 전압이 1 mV 증가, CQV는 0.0454%p 감소하였다. 이러한 결과는 앞서 3.1에서 예측한 자세별 출력 거동과 마찬가지로 XR 및 YR에서 배수 어려움으로 인한 출력 저하와 불안정성이 증가하였지만, XL 및 YL에서는 배수 용이성으로 인한 출력 불안정성 개선이 나타났음을 의미한다.

한편, 표준 편차 계산 결과와 출력 전압 곡선을 비교하면, 이상치의 존재 여부에 따라 값이 크게 변동하여 자세별 불안정성을 일반화하여 비교하기에는 제한이 있음을 확인하였다.

다음으로 30 A 실험 결과이다. Fig. 10(a)–(c) 및 Fig. 11(a)–(c)는 각각 X축 및 Y축 방향 기울임 조건에서의 30A 정전류 운전 결과이며, Table 5 및 Table 6은 초기 100∼600초 구간의 전압 데이터를 바탕으로 계산된 각 자세 조건의 CQV, 표준 편차, 평균 전압을 정리한 것이다. 여기서, 두 전류 조건 간의 출력 안정성 차이를 정량적으로 비교할 수 있도록 30 A 조건에 대해서도 동일한 구간에서의 데이터를 계산하였다.

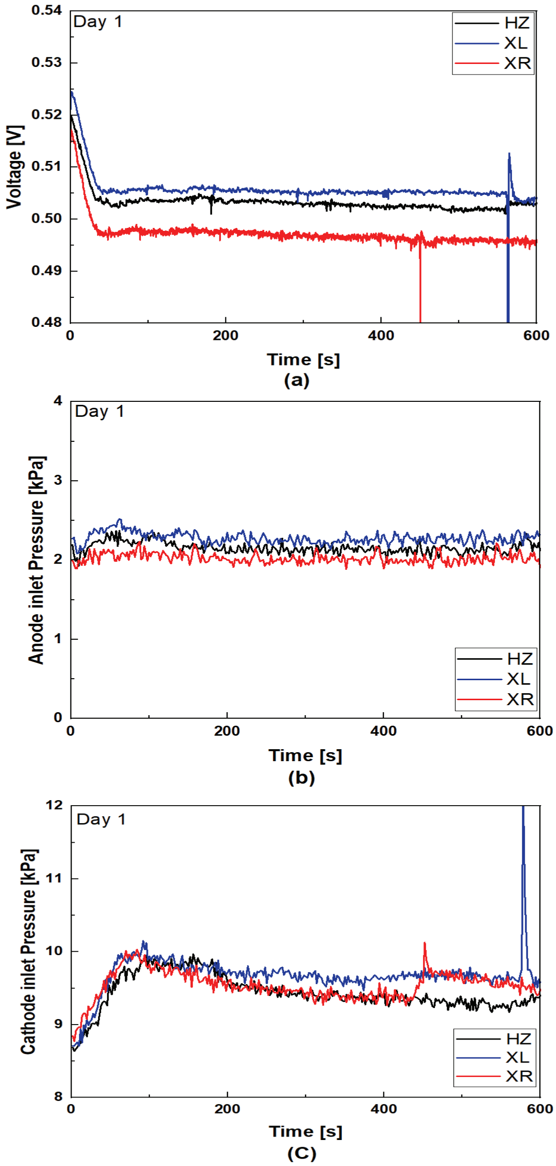


Fig. 8. Comparison of cell performance and gas pressures under constant current operation (40 A) between horizontal and 45° rotation along the X-axis: (a) Cell voltage, (b) Anode inlet pressure, and (c) Cathode inlet pressure

Table 3. Voltage stability metrics (CQV, standard deviation, average voltage) under 40 A constant current operation in X-axis tilting conditions (Day 1)

Test condition	HZ_Day1	XL_Day1	XR_Day1
CQV [%]	0.0995	0.0412	0.1951
standard deviation [mV]	0.69	6.75	1.32
average voltage [mV]	503	503	493

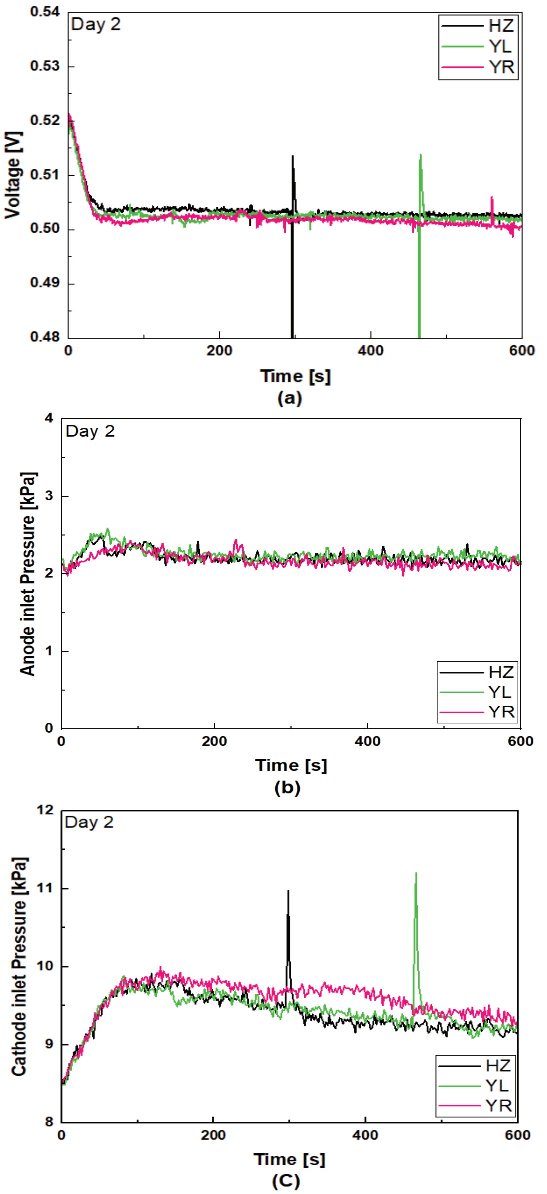


Fig. 9. Comparison of cell performance and gas pressures under constant current operation (40 A) between horizontal and 45° rotation along the Y-axis: (a) cell voltage, (b) anode inlet pressure, and (c) cathode inlet pressure

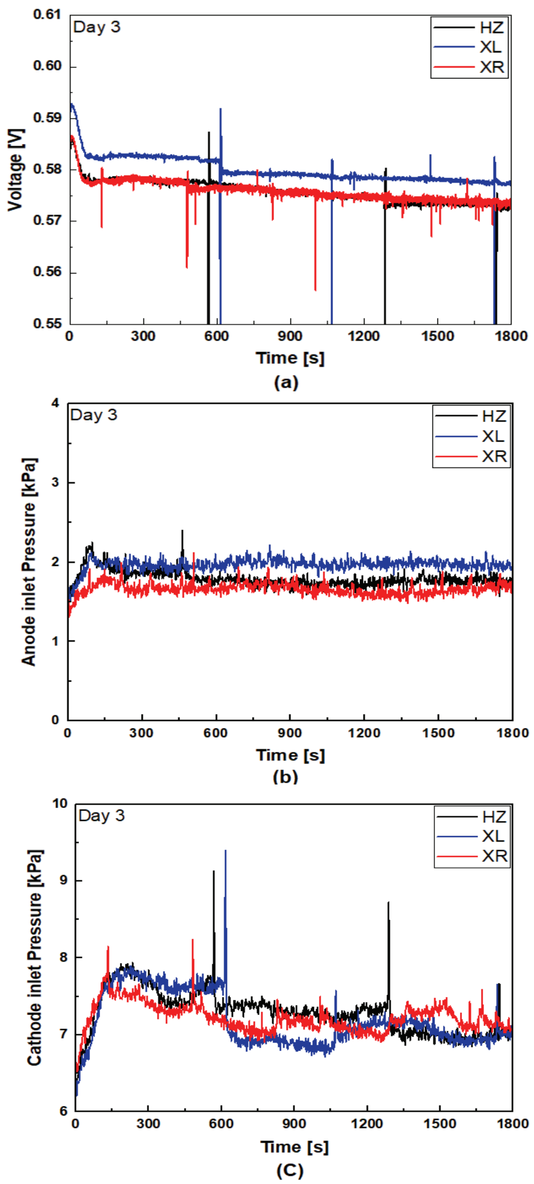


Fig. 10. Comparison of cell performance and gas pressures under constant current operation (30 A) between horizontal and 45° rotation along the X-axis: (a) cell voltage, (b) anode inlet pressure, and (c) cathode inlet pressure

Table 4. Voltage stability metrics (CQV, standard deviation, average voltage) under 40 A constant current operation in Y-axis tilting conditions (Day 2)

Test condition	HZ_Day2	YL_Day2	YR_Day2
CQV [%]	0.0776	0.0322	0.0956
standard deviation [mV]	4.72	0.4	0.69
average voltage [mV]	503	504	502

Table 5. Voltage stability metrics (CQV, standard deviation, average voltage) under 30 A constant current operation in X-axis tilting conditions (Day 3)

Test condition	HZ_Day3	XL_Day3	XR_Day3
CQV [%]	0.0597	0.0391	0.0814
standard deviation [mV]	2.52	0.37	0.95
average voltage [mV]	578	582	578

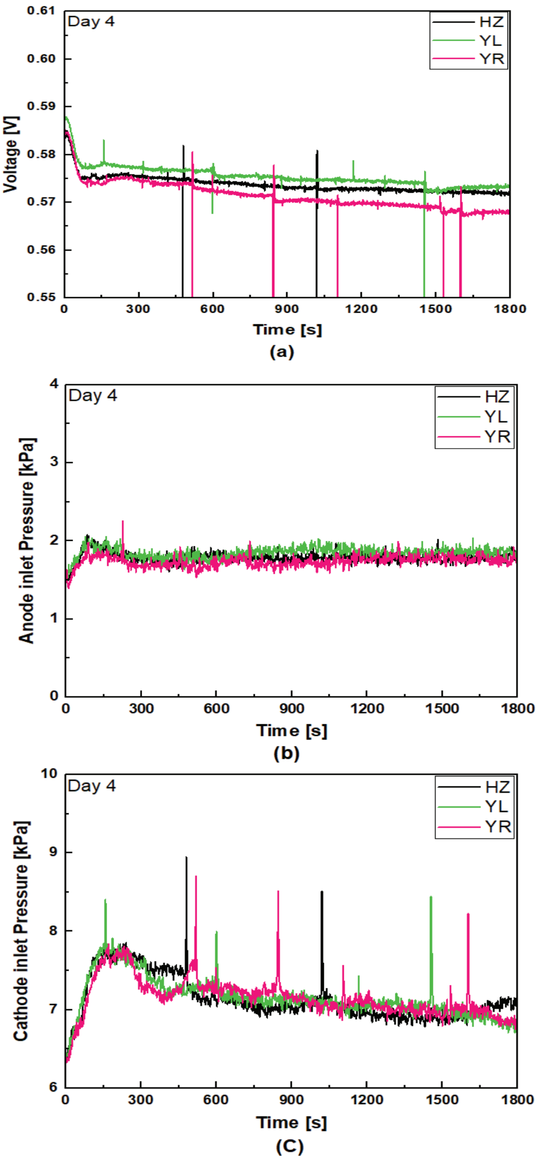


Fig. 11. Comparison of cell performance and gas pressures under constant current operation (30 A) between horizontal and 45° rotation along the X-axis: (a) cell voltage, (b) anode inlet pressure, and (c) cathode inlet pressure

Table 6. Voltage stability metrics (CQV, standard deviation, average voltage) under 30 A constant current operation in X-axis tilting conditions (Day 4)

Test condition	HZ_Day4	YL_Day4	YR_Day4
CQV [%]	0.0614	0.0683	0.0787
standard deviation [mV]	2.18	0.66	1.92
average voltage [mV]	575	577	574

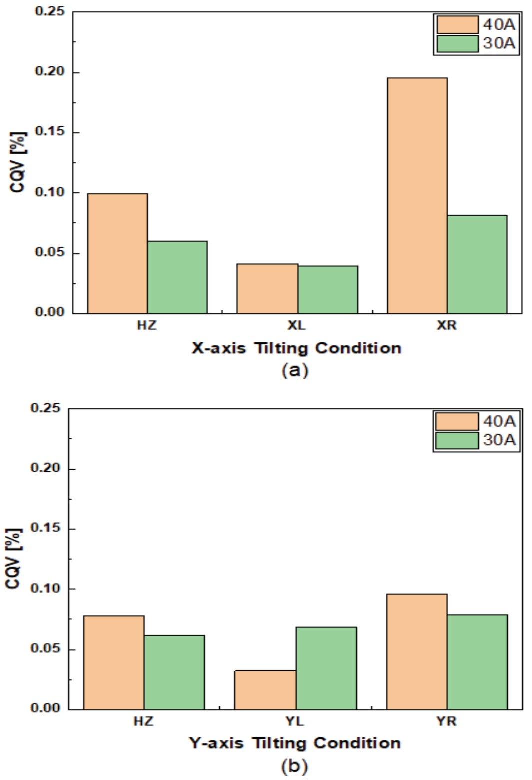


Fig. 12. Comparison of Voltage stability (CQV) at different loads and tilting conditions (a) X-axis rotation; (b) Y-axis rotation

분석 결과, XR 자세는 수평 조건과 유사한 전압을 보였으나, CQV가 0.0217%p 증가하였고, YR 자세는 1 mV 전압 감소와 CQV는 0.0173%p 증가했다. 반면 XL 자세에서는 전압 4 mV 증가, 증가, CQV 0.0208%p 감소를 보였고, YL 자세도 전압 2 mV 증가, CQV는 0.0069%p 증가했다.

전반적으로 30 A 조건은 40 A에 비해 CQV 증가폭이 작고 전압 감소도 미미하여, 자세 변화에 따른 출력 안정성 저하가 상대적으로 적게 나타났다. 이는 고부하 조건인 40 A에서 공기극 촉매층에서 생성되는 수분량이 더 많아짐에 따라 유로, GDL, 전극층으로 전달되는 물질 흐름의 균일성과 전달 효율이 저하된 것으로 해석할 수 있다.

마지막으로, Fig. 12는 Table 3–6의 CQV 수치 비교를 시각화한 그래프로, 기울임 자세와 부하별 CQV를 단일 그림 내에서 대비하도록 구성하였다. 각 평

가 일자에서 HZ 대비 XR 및 YR의 CQV가 일관되게 더 높게 나타났으며, 특히 40 A에서 증가 폭이 확대되는 경향을 확인하였다.

3.3 전압 및 연료극/ 공기극 전단 압력 분석 결과

본 연구에서는 측정 시간이 더 긴 30 A 조건의 실험 결과를 기준으로 전압과 전단 압력 데이터를 분석하였다. 관련 결과는 Fig. 10–11의 (a)–(c)와 분리판 유로 형상 및 단위 셀 단면(Fig. 6-7)을 참고하였다.

분석 결과, 공기극 전단 압력과 출력 전압의 이상치가 동일 시점에 발생함을 알 수 있다. 이는 유로 내 수분 응축 및 배출에 따라 공기 공급 통로가 일시적으로 막혔다 열리면서 압력 변동이 나타나고 순간적인 산소 농도 변화에 따른 전압 성능 변화로 해석된다. 또한, X축 회전에 따른 공기극 전단 압력에서는 기울임 조건에 따라 유로 구조에서 예상되는 수분 배출 거동과 유사한 파형이 나타났다. XL 자세에서는 수분이 출구에 도달하기 전까지 지속적으로 축적되다가 강력한 배출과 함께 전단 압력이 급격히 하락하였으며, 이 시점 이후 출력 전압도 전반적으로 저하되었다. 반면 XR 자세에서는 수분이 유로 내에서 축적과 부분 배출을 반복하는 패턴이 나타났고, 이에 따라 출력 전압에서도 상대적으로 큰 변동성이 동반되었다. 종합하면, 공기극 전단 압력 이상치와 전압 변동성은 모두 배수 거동과 밀접한 연관성을 가지며, X축의 기울임 방향에 따라 배수 패턴이 달라진다는 점을 시각적으로 확인할 수 있었다.

한편, Y축 회전은 촉매층, GDL, 유로 전반의 수분 거동에 영향을 주는 조건이지만, 공기극 전단 압력은 주로 유로 내 수분 배출에 민감하게 반응하기 때문에 기울임 자세에 따른 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다.

또한, 연료극 전단 압력은 XL 조건에서만 유독 높게 나타났으며, 이에 대응하여 출력 전압도 수평 조건보다 눈에 띄게 향상되었다. 이는 본 실험에 사용된 단위 셀의 유로가 대칭 구조를 이루고 있다는 점에서 설명할 수 있다. XL 조건에서는 공기극 측의 수분 배출은 원활하지만, 연료극 측은 오히려 수분 배출이 어려운 구조적 특성을 가진다. 이로 인해 XL 조건에서만 상대적으로 높은 연료극 전단 압력이 관찰된 것으로 보인다. 더 나아가, 막 내 수분 전달 메커니즘 측면에서 연료극에서 공기극으로 이동하는 전기삼투 견인력이 역확산보다 우세하게 작용하기 때문에 연료극은 구조적으로 공기극보다 건조해지기 쉽다. 따라서 XL 조건에서 연료극의 수분 정체는 건조하기 쉬운 연료극 이오노머에 일종의 가습 효과를 제공하여 이온 전도성을 향상시켰으며, 그 결과 전반적인 출력이 개선된 것으로 해석된다.

4. 결 론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 기울임 조건에서의 출력 불안정성은 수분 배출 특성과 밀접하게 연관됨을 확인하였으며, 유로 전단 압력이 내부 수분 축적을 간접적으로 추정할 수 있는 지표로 활용될 수 있음을 확인하였다. 또한, CQV를 도입하여 이상치의 영향을 최소화하면서 전압 변동성을 정량적으로 비교할 수 있음을 제시하였다.
2) 실험 결과, 40 A 조건에서 XR 및 YR 자세에서 배수 어려움으로 유도된 출력 저하와 불안정성 증가가 명확히 나타났으며, 30 A 조건에서는 이러한 현상이 완화되어 CQV 변동성이 40 A 대비 평균 약 70% 감소하는 것으로 확인되었다.
3) 모든 조건에서 수평 대비 출력 전압 감소 폭은 10 mV 미만으로, 단위 셀 기준에서는 자세 변화에 따른 출력 안정성 저하가 예상보다 적게 발생하였다.
4) 그러나, 실제 상용화 스택에서는 매니폴드 면적이 넓고 수분의 유동 경로가 더욱 복잡하여, Flooding에 따른 성능 저하가 본 연구보다 더 뚜렷하게 나타날 가능성이 있다. 따라서 향후에는 스택 단위의 기울임 실험을 추가하여, 본

연구에서 제시한 예측을 보다 상용 스케일에서 검증할 계획이다.

후 기

본 연구는 2025년도 국토교통부의 재원 및 국토교통과학기술진흥원의 지원(No. RS-2023-00243094)으로 수행되었다.

References

1. D. S. Lee, D. W. Fahey, P. M. Forster, P. J. Newton, R. C. Wit, L. L. Lim, B. Owen, and R. Sausen, "Aviation and global climate change in the 21st century", Atmospheric Environment, Vol. 43, No. 22-23, 2009, pp. 3520-3537, doi: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024.
2. Y. Wang, K. S. Chen, J. Mishler, S. C. Cho, and X. C. Adroher, "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: technology, applications, and needs on fundamental research", Applied Energy, Vol. 88, No. 4, 2011, pp. 981-1007, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.030.
3. S. H. El-Emam, A. A. Mousa, and M. M. Awad, "Effects of stack orientation and vibration on the performance of PEM fuel cell", International Journal of Energy Research, Vol. 39, No. 1, 2015, pp. 75-83, doi: https://doi.org/10.1002/er.3217.
4. J. U. Choi, J. W. Lim, S. J. Choi, and J. W. Lee, "The tilt effect on electrochemical performances and safety parameter of a fuel cell system applied to unmanned aerial vehicles", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 32, No. 2, 2021, pp. 93-99, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.2.93.
5. S. Chen and Y. Wu, "Gravity effect on water discharged in PEM fuel cell cathode", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 7, 2010, pp. 2888-2893, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.111.
6. D. K. Ahn, S. H. Han, K. K. Kim, and Y. D. Choi, "Experimental analysis for variation of pressure difference on flooding in PEM fuel cell at cathode channel outlet", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 20, No. 5, 2009, pp. 390-396, Retrieved from https://koreascience.kr/article/JAKO200908856859393.page.
7. Korea Gas Safety Corporation, "Facility, technical, inspection code for manufacture of portable fuel cells applied to unmanned aerial vehicle", KGS Code AH373, Korea Gas Safety Corporation, Korea, 2025, pp. 18-48, Retrieved from https://cyber.kgs.or.kr/kgscode.Index.do.
8. M. Ji and Z. Wei, "A review of water management in polymer electrolyte membrane fuel cells", Energies, Vol. 2, No. 4, 2009, pp. 1057-1106, doi: https://doi.org/10.3390/en20401057.
9. H. Chen, R. Zhang, Z. Xia, Q. Weng, T. Zhang, and P. Pei, "Experimental investigation on PEM fuel cell flooding mitigation under heavy loading condition," Applied Energy, Vol. 349, 2023, pp. 121632, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121632.