

개질기 연계형 건물용 PEMFC 시스템에서 연료 공급 조건(Pure H₂ vs. 75% H₂)에 따른 I-V 특성 및 셀 전압 분포 연구

박용선^{1†} · 전의식² · 이상혁² · 안준걸² · 박현아²

¹한국공학대학교 인공지능기술사업화연구소, ²(주)케이퓨얼셀

An Investigation on I-V Characteristics and Cell Voltage Distribution According to Fuel Supply Conditions (Pure H₂ vs. 75% H₂) in a Reformer-Integrated PEMFC System for Buildings

YONGSUN PARK^{1†}, YEI SIK JEON², SANG-HYUK LEE², JUN KEOL AHN², HYEON-AH PARK²

¹Artificial Intelligence Commercialization Research Center, Tech University of Korea, 65 Emtibeuibuk-ro, Siheung 15119, Korea

²K-FUELCELL, ICT Valley AKV1, 58-1, Giheung-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 16976, Korea

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

Received 7 July, 2026
Revised 14 July, 2026
Accepted 15 July, 2026

Abstract >> This study evaluates a reforming system-integrated Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) system using city gas, where the 75% hydrogen concentration significantly impacts stack performance. This reduced concentration can trigger mass transport limitations and increased cell voltage deviation. We conducted a comparative analysis of I-V characteristics and cell voltage distribution under pure H₂ and 75% H₂ conditions. Our findings reveal that the system maintains voltage deviations within safe operating limits during Open Circuit Voltage (OCV) and steady-state phases, despite increased resistance. These results validate the optimal design of our system, establishing a framework for future durability assessment and performance optimization in building-scale fuel cell applications.

Key words : Reforming system-integrated PEMFC(개질시스템 통합형 고분자 전해질 연료전지), Hydrogen concentration(수소 농도), Voltage Deviation(전압 편차), I-V Characteristics(I-V 특성)

1. 서 론

탄소 중립과 AI 및 데이터센터 확산에 따른 전력 수요 급증으로, 다양한 연료전지시스템이 발전용으로 검토되고 있으며¹⁾ 그중에서도 안정적인 건물 단

위 분산 전원으로는 도시가스 개질기 연계형 고분자 전해질 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)가 주목받고 있다.

개질기를 거쳐 공급되는 가스는 순수 수소와 달리 CO₂ 등의 기체가 포함되어 수소 농도가 약 70~75%

수준으로 낮아진다. 이러한 저농도 수소 공급은 스택 내부에서 물질 전달 저항(Mass Transport Limitation)을 가중시킬 뿐만 아니라, 단위 셀 간 전압 불균일(Cell Voltage Mismatch)을 유발하여 시스템의 성능 저하 및 내구성 결함을 초래할 위험이 있다. 따라서 데이터센터와 같은 핵심 시설에 적용되는 건물용 연료전지 시스템은 개질 수소를 사용하는 실제 운전 환경에서도 시스템의 출력 특성과 셀 전압 분포의 안정성을 정량적으로 평가하고 제어하는 기술이 무엇보다 중요하다.

본 연구에서는 개질기가 통합된 건물용 PEMFC 시스템을 구축하고, 순수 수소와 75% 수소 농도 조건에서의 I-V 특성 및 단위 셀 전압 분포를 비교 분석하였다.

특히, 실제 건물용 운전 환경을 모사하여 개방 회로 전압(Open Circuit Voltage, OCV), 출력 상승(Ramp-up), 그리고 정전류 부하 구간에서의 모든 셀 전압 데이터를 확보하고, 물질 전달 저항에 따른 셀 전압 편차(Cell Voltage Deviation)가 허용 안전 범위 내에서 관리되는지 검증하였다.

본 연구 결과를 통해 도출된 데이터는 개질기 연계형 PEMFC 시스템의 최적 설계 및 안정적인 운전 로직을 확립하는 데 기여할 것이며, 향후 건물용 연료전지의 상용화를 위한 기초 자료로 활용될 것이다.

2. 실험

2.1 건물 발전용 5 kW급 Fuel Cell System

Fig. 1은 현재 K-FUELCELL에서 시판 중인 건물용 연료전지시스템의 형상 및 제원이다. 시판되는 연료전지시스템 내의 구성은 Fig. 2와 같다.

본 시스템의 운전 시 발생하는 일산화탄소(CO)의 제거 및 성능 저하 방지 기술에 관한 연구는 기존 문헌에서 상세히 다루고 있으며^{2,4)} 본 연구의 개질시스템의 구성과 개질시스템 안에서의 수소 생산 공정 흐름은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에 제시된 공정에 따라 생성된 개질가스

Product name	KOGEN (K-SN-5)
Fuel	Natural Gas (NG) / Pure Hydrogen
Power	380V (3-phase)
Size	690 x 1,300 x 1,500 (mm)
Efficiency	36.9% electrical efficiency / 95.9%+ overall efficiency
Operating Hours	Within 60 minutes
Applications	Buildings, homes, hot springs, and other facilities that can be supplied with city gas

Fig. 1. 5 kW fuel cell system for building applications

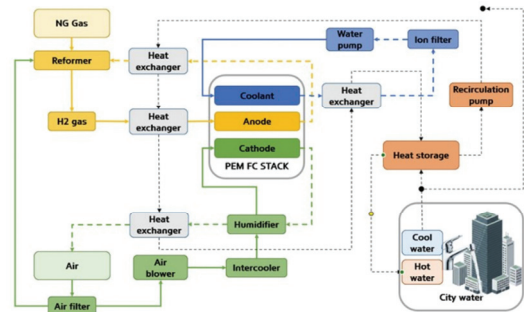


Fig. 2. Internal configuration of the 5 kW fuel cell system for building applications

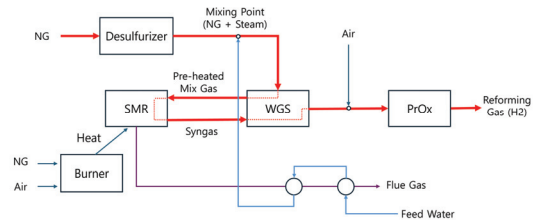


Fig. 3. Process flow diagram of the SMR (Steam Methane Reforming) - WGS (Water Gas Shift) - Prox (Preferential Oxidation of CO) hydrogen production system

(reforming gas)의 수소 농도는 약 75%로 확인되었으며^{2,5)}, 일산화탄소(CO) 농도는 5 ppm 미만으로 측정되었다⁶⁾. 또한 생성된 수소의 저위발열량(Low Heating Value, LHV)을 기준으로 산출한 에너지와 천연가스 및 보조동력의 입력 에너지를 이용하여 식 (1)을 적용한 결과, 수소 생산 효율은 약 80%로 계산되었다²⁾.

$$\eta = \left(\frac{\text{Energy}_{\text{H}_2, \text{out}}}{\text{Energy}_{\text{NG}, \text{in}} + \text{Energy}_{\text{Auxiliary}, \text{in}}} \right) \times 100 [\%] \quad (1)$$

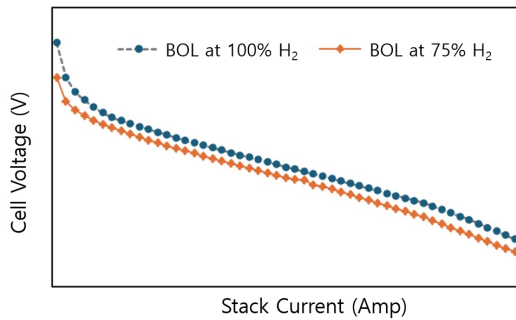


Fig. 4. Stack performance curves at 100% H₂ and at 75% H₂

Fig. 4는 본 연구 대상 스택에 대해 연료 조성 및 열화 상태에 따른 성능 변화를 비교한 것이다. 100% 순수 수소 사용 시의 Beginning of Life (BOL) 성능 곡선과 개질 시스템에서 공급된 75% 수소 사용 시의 BOL 성능곡선을 함께 제시하였다.

Fig. 4에서 확인할 수 있듯이, 수소 100%와 75% 조건에서의 BOL 성능 차이는 주로 가스 분압 감소에 따른 Nernst 전위 하락, 물질 전달 손실 증가, 그리고 희석 효과로 인한 활성화 및 내부 저항 상승에 기인한다⁷⁻¹⁰⁾.

수소 농도가 75%로 낮아지면 애노드 공급가스 내에 질소와 같은 비활성 기체가 증가하여 수소의 분압이 감소하고, 이에 따라 열역학적 개방전압(Nernst potential)이 낮아져 무부하 전압부터 성능 저하가 나타난다.

또한 저농도 조건에서는 수소의 유효 확산계수가 감소하여 Beginning of Life (GDL) 및 촉매층으로의 전달이 지연되고, 반응 생성물인 수증기가 역확산하며 수소 공급을 방해함으로써 농도 손실(concentration loss)이 증가한다.

더불어 수소 희석은 촉매 표면에서의 반응 가스 농도를 감소시켜 활성화 손실을 증가시키며, 전극 내부 반응 분포의 비균일성을 초래하여 내부 저항(ohmic resistance) 또한 상대적으로 증가시키는 것으로 해석된다.

이와 같은 이유로 Fig. 4에서 확인되듯이, 수소 농도가 100%에서 75%로 감소할 경우 스택 성능은 전

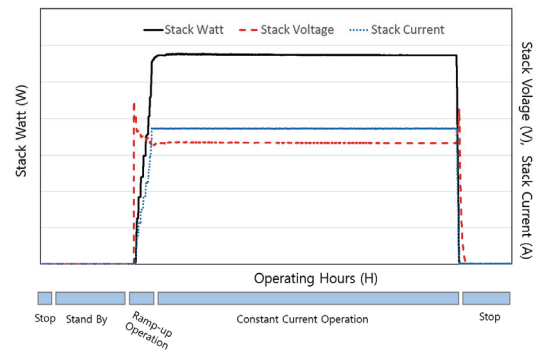


Fig. 5. Variation of stack power, voltage, and current with operation time

반적으로 약 4~9% 하락하였다. 이는 기존 연구⁵⁾에서 보고된 약 7% 성능 저하와도 어느 정도 일치하는 경향을 보인다.

본 연구에서 사용된 건물용 5 kW급 연료전지 시스템은 정지 상태에서 75% 수소 농도로 운전 조건에 도달하기까지 여러 단계를 거친다. 이러한 과정을 Fig. 5에 정리하였다. 시스템 운전은 먼저 0 kW에서 목표 출력까지 상승하는 Ramp-up 단계를 거친 뒤, 목표 출력에 도달하면 설정된 전류를 유지하며 운전하는 정상 운전 단계로 이어진다. 각 단계에서 시간 경과에 따른 스택 출력, 전압, 전류의 변화 특성은 Fig. 5에 제시된 그래프와 같다.

Fig. 1의 제원에서 확인되듯이, 시스템 가동을 위한 준비 시간은 약 60분 정도 소요된다. 이후 Ramp-up 운전이 시작되면 목표 출력에 도달하기까지 약 10분의 시간이 소요된다. 이때의 소요시간은 시스템의 내외부 상태의 온도 등의 환경으로 변동이 될 수 있다. 출력이 0 kW에서 서서히 증가하는 초기 구간에서는 스택 내부 온도와 전기화학 반응 조건이 점진적으로 안정화됨에 따라 셀 전압이 비교적 빠르게 상승하는 특성을 나타낸다. 또한 기동 초기에는 공급가스 조성의 변화, 전해질막의 수화(membrane hydration), 그리고 전극 활성화가 동시에 진행되는 과도 안정화 과정이 발생한다. 이 과정에서 운전 조건 및 제어 특성에 따라 전압이 정상 상태에 도달하기 전에 목표값을 일시적으로 초과하는 오버슈트(voltage overshoot) 현상이 나타날

수 있다. 이러한 전압 오버슈트는 연료전지 스택의 전기화학 반응과 내부 상태가 정상 상태에 이르기 전 발생하는 과도 응답(transient response)의 일종으로, PEM 연료전지의 기동 과정에서 일반적으로 관찰되는 특성으로 알려져 있다^{11,12}. 본 연구에서 나타난 전압 오버슈트는 설계 허용범위 내에서 발생한 것으로, 이로 인한 스택 열화는 관찰되지 않았다.

반면 전류는 동일한 기간 동안 상대적으로 완만하고 안정적인 증가 추세를 보인다. 이는 시스템 제어 로직이 기동 단계에서 전류 상승률을 제한하여 스택에 과도한 부하가 걸리지 않도록 설계되어 있기 때문이다. 따라서 전류는 약 10분에 걸쳐 점진적으로 증가하며, 스택 내부 온도·습도·가스 분포가 정상 상태에 가까워질수록 전류 상승 속도도 점차 안정화된다.

목표 전류에 도달한 이후 시스템은 정전류 운전 구간에 진입하게 되며, 이 단계에서는 전류가 일정하게 유지되도록 제어된다. 전류가 안정적으로 유지됨에 따라 스택 출력 또한 일정 수준에서 안정적으로 유지되며, 이는 스택이 정상 운전 조건에 도달했음을 의미한다. 정상 운전 구간에서는 전압 역시 큰 변동 없이 유지되며, 이는 기동 과정에서 나타났던 과도 현상이 모두 해소되고 전기화학 반응이 정상 상태에 도달했음을 보여준다. 이러한 운전 특성은 연료전지 시스템의 기동-과도-정상 상태 전환 과정에서 나타나는 전형적인 동특성을 잘 반영한다.

Fig. 6의 (a)와 (b)는 각각 Ramp-up 구간과 정전류 운전 구간 중에서 셀 간 전압 편차가 가장 크게 나타난 시점을 선정하여, 해당 시점의 전체 셀 전압 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 운전 전 구간에서 각 셀의 전압은 수소 75%의 농도 조건에서도 안정적으로 유지되고 있으며, 셀 간 전압 차이 또한 시스템에서 허용하는 범위 내에 있었다.

Fig. 6의 (b)를 보다 상세히 분석한 결과는 Fig. 7에 제시하였다. 정전류 운전구간에서의 평균 셀 전압의 그림에서 붉은 점선으로 표현했다. 셀 간 전압 차이(ΔV_{cell})는 식 (2)에 따라 평균 셀 전압($V_{average}$)과 해당 셀 전압(V_{cell})의 차이로 정의되며, 본 연구에서는 해당 셀 전압(V_{cell})에 최대 셀 전압(V_{max})이나 최

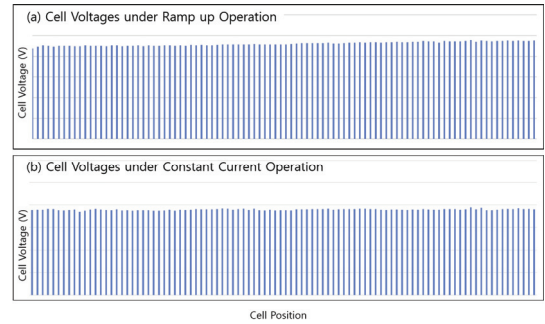


Fig. 6. Cell voltage profiles at 75% hydrogen concentration during (a) Ramp-up and (b) Constant current operation in a fuel cell stack

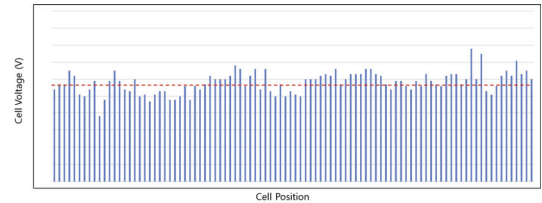


Fig. 7. Magnified cell-to-cell voltage differences by reducing the Y-axis scale of Fig. 6(b)

소 셀 전압(V_{min})의 값으로 계산하여도 셀 간 전압 차이(ΔV_{cell})가 0.02 V를 넘지 않아 설계 요구 조건을 충족함을 의미한다.

$$\Delta V_{cell} = V_{average} - V_{cell} \quad (2)$$

$$V_{dev} (\%) = \left(\frac{\Delta V_{cell}}{V_{average}} \right) \times 100 \quad (3)$$

셀 편차(Voltage Deviation, V_{dev})는 식 (3)에 따라 계산할 수 있으며, Fig. 6(b)에서 확인된 셀 편차는 2.5%로 기존 국내 연구에서 보고된 2.3%와 유사한 수준을 보인다¹³. 기존 연구는 75% 수소와 25% 질소 혼합 조건에서 수행된 반면, 본 연구는 개질 시스템을 통해 공급된 75% 수소 조건임을 고려할 때, 개질 시스템 기반 스택에서도 셀 편차가 비교적 안정적으로 유지됨을 확인할 수 있다.

연료전지 애노드에서의 CO 피독(carbon monoxide poisoning)은 백금(Pt) 촉매의 활성점이 CO에 의해

점유되면서 수소 산화 반응이 저해되는 대표적 성능 저하 요인으로 알려져 있다¹⁴⁾. 일반적으로 백금 촉매 표면에서는 수소 분자(H₂)가 흡착 후 수소 이온(H⁺)과 전자(e⁻)로 분리되는 산화 반응이 원활히 진행된다. 그러나 CO가 존재할 경우 CO 분자는 수소보다 훨씬 강한 흡착력을 가지고 있어 촉매 활성점을 우선적으로 점유하게 된다. 이로 인해 수소가 반응 표면에 접근하지 못하고, 결과적으로 촉매의 유효 활성면적이 급격히 감소한다. 이러한 표면 피독 현상은 스택 전압 강하 및 전체 출력 저하로 이어지며, CO 농도가 높거나 노출 시간이 길수록 성능 저하는 더욱 뚜렷하게 나타난다.

하지만 본 연구에서 사용된 발전용 연료전지 시스템에서는 상기와 같은 CO 피독 메커니즘이 이론적으로 존재함에도 불구하고, 실제 운전 조건에서는 성능 저하가 거의 관찰되지 않았다. 본 연구의 개질 시스템에서 발생하는 CO 농도는 극히 미량(5 ppm 이하 수준)에 불과하여, Fig. 5에서와 같이 24시간 이상의 수신회 시간 정도의 장시간 운전에서는 스택 전압 및 출력 특성의 유의미한 감소가 나타나지 않았다. 또한 Fig. 6(b)와 Fig. 7과 같이 셀간 전압 차이도 허용 기준치 이상 발생하지도 않았다. 이는 발전용 연료전지 시스템이 미량 CO에 대해 상대적으로 높은 내성을 갖고 있으며, 개질기 설계·운전 조건, 촉매 조성, 가스 정제 공정 등이 CO 피독 영향을 효과적으로 억제하고 있음을 시사한다. 따라서 본 연구 결과는 실제 건물용 연료전지 운전 환경에서 CO로 인한 성능 저하가 이론적으로 제기된 우려만큼 크지 않음을 보여준다. 다만 건물 발전용 연료전지의 경우 수년 이상의 장기 운전 신뢰성을 확보해야 하므로, 이를 충족하기 위한 지속적인 기술 개발과 성능 안정화 연구가 향후 필수적이다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 건물발전용 5 kW급 PEMFC 시스템을 대상으로 순수 수소(100%)와 개질 수소(75%) 조건에서의 스택 성능, 기동 특성, 셀 전압 분포 안정

성을 비교·평가하였다. 이를 통해 실제 건물용 운전 환경에서 개질기 연계형 연료전지 시스템의 적용 가능성과 운전 안정성을 검증하고자 하였다.

3.1 수소 농도 변화에 따른 스택 성능 비교

수소 농도가 100%에서 75%로 감소하면 분압 저하로 인해 OCV가 낮아지고, 비활성 기체 증가로 물질 전달 저항과 농도 손실이 커지며, 촉매 표면 반응 가스 농도 감소로 활성화 내부 저항이 증가한다. 이로 인해 I-V 성능이 전반적으로 저하되었다. 그러나 실제 개질 시스템 기반 운전에서는 이러한 성능 저하는 설계 허용 범위 내에서 안정적으로 관리되었다.

3.2 기동 및 Ramp-up 구간 동특성 분석

시스템은 약 60분의 준비 후 10분 내 목표 출력에 도달하였다. 기동 초기에는 가스 조성 변화와 전극 활성화로 전압 오버슈트가 나타났으나 곧 안정화되었고, 전류는 제어 로직에 의해 완만하게 증가하였다. 목표 전류 도달 후에는 전압·출력이 일정하게 유지되며 정상 운전 상태가 확보되었다. 이는 개질 수소 기반 운전에서도 기동·과도·정상 상태 전환이 안정적으로 이루어짐을 보여준다.

3.3 셀 간 전압 분포 및 편차 분석

75% 수소 조건에서도 셀 간 전압 차이는 최대 0.02 V 이하로 유지되었고, 셀 편차는 약 2.5%로 기존에 비슷한 연구에서 보고된 값과 유사하였다. 이는 실제 개질가스를 사용한 조건에서도 스택 반응 균일성이 확보됨을 의미한다. 물질 전달 저항 증가에도 불구하고 셀 전압 불균일은 제어 로직과 스택 설계에 의해 효과적으로 억제되었다.

3.4 CO 피독 영향 평가

개질가스 내 CO 농도는 5 ppm 이하로 매우 낮아

Pt 촉매 피독이 이론적으로 가능함에도 실제 장시간 운전에서는 전압·출력 저하가 관찰되지 않았다. 셀 간 전압 차이도 증가하지 않았으며, 이는 가스 정제 공정과 촉매 설계가 CO 영향을 충분히 억제하고 있음을 보여준다. 따라서 발전용 연료전지 시스템은 미량 CO에 대해 높은 내성을 갖고 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 건물용 5 kW급 PEMFC 시스템을 대상으로 순수 수소와 개질 수소(75%) 조건에서의 운전 특성을 비교하였다. 수소 농도 감소로 인해 개방전압과 I-V 성능은 분압 저하 및 물질 전달 저항 증가로 일정 수준 감소하였으나, 전체 성능은 설계 허용 범위 내에서 안정적으로 유지되었다. 기동 과정에서는 전압 오버슈트가 일시적으로 나타났으나 제어 로직에 의해 빠르게 안정화되었고, Ramp-up 이후 정상 운전 구간에서는 전압·전류·출력이 모두 일정하게 유지되었다.

셀 전압 분포 분석 결과, 75% 수소 조건에서도 셀 간 전압 차이는 최대 0.02 V 이하로 유지되었으며 셀 편차는 약 2.5%로 기존 발표된 값과 유사하였다. 이는 개질 수소 기반 실제 운전에서도 스택 반응 균일성이 확보됨을 의미한다. 또한 개질가스 내 CO 농도가 5 ppm 이하로 매우 낮아 장시간 운전에서도 CO 피독에 따른 성능 저하는 관찰되지 않았다.

종합적으로, 본 연구에 사용된 개질기 연계형 PEMFC 시스템은 저농도 수소 공급 환경에서도 출력 안정성, 셀 전압 균일성, CO 내성 측면에서 충분한 운전 신뢰성을 확보하고 있으며, 건물용 및 데이터센터용 분산 전원으로 적용 가능성이 높음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-지역지능화학신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구이다(IITP-2026-RS-2020-II2 01741).

References

1. D. Lee, T. P. Israel, Y. Bae, Y. Kim, K. Ahn, and S. Lee, "Analysis of leveled cost of electricity for type of stationary fuel cells", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 33, No. 6, 2022, pp. 643-659, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.6.643>.
2. Korea Institute of Energy Research (KIER), "Development of core technologies for hydrogen fuel cells III", Report No. KIER-B12404, Korea Institute of Energy Research, Daejeon, Korea, 2011, pp. 218, 243, 245, Retrieved from <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201400001702>.
3. D. G. Kang, D. K. Shin, S. Kim, and M. S. Kim, "Experimental study on the performance improvement of polymer electrolyte membrane fuel cell with dual air supply", Renewable Energy, Vol. 141, 2019, pp. 669-677, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.029>.
4. S. H. Park, C. M. Kim, S. H. Son, S. J. Jang, J. D. Kim, W. K. Bang, and S. Y. Lee, "Research of high efficiency integrated reforming system using separated reforming system", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 29, No. 1, 2018, pp. 11-18, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.1.11>.
5. S. Park, Y. S. Choi, J. S. Hwang, and K. S. Lee, "Operating characteristics on coupling of fuel-cell system with natural gas reformer", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers P, Vol. 58, No. 4, 2009, pp. 639-643, Retrieved from <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART001392591>.
6. K. Y. Chung and S. H. Kim, "Optimization of fuel processing unit of fuel cell system using Six-Sigma technique", Journal of Digital Convergence, Vol. 10, No. 2, 2012, pp. 225-229, doi: <https://doi.org/10.14400/JDPM.2012.10.2.225>.
7. R. Kumar and K. A. Subramanian, "Analysis of activation, ohmic, and concentration losses in hydrogen-fuelled PEM fuel cell", Advances in Energy Research, Vol. 8, No. 4, 2022, pp. 253-264, doi: <https://doi.org/10.12989/eri.2022.8.4.253>.
8. Q. Gao, H. Zhang, and J. Wang, "Calculation and analysis of hydrogen fuel cell performance under multiphysics conditions", Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 1180, 2024, Chapter 6, pp. 49-57, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-97-1420-9_6.
9. J. Lyu, V. Kudiyarov, and A. Lider, "Corrections of voltage loss in hydrogen-oxygen fuel cells", Batteries, Vol. 6, No. 1, 2020, pp. 9, doi: <https://doi.org/10.3390/batteries6010009>.
10. L. Xu, L. Xu, Y. Shao, X. Zhang, Z. Hu, J. Li, and M.

- Ouyang, "Effects of hydrogen dilution on performance and in-plane uniformity of large-scale PEM fuel cell with low anode catalyst loading", *Applied Energy*, Vol. 379, 2025, pp. 124992, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124992>.
11. F. Jia, L. Guo, and H. Liu, "A study on current overshoot during start-ups and optimal start-up strategy of proton exchange membrane fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 24, 2015, pp. 7754-7761, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.051>.
12. Q. Shen, M. Hou, D. Liang, Z. Zhou, X. Li, Z. Shao, and B. Yi, "Study on the processes of start-up and shutdown in proton exchange membrane fuel cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 189, No. 2, 2009, pp. 1114-1119, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.12.075>.
13. J. D. Kim, J. W. Lee, and D. R. Park, "Characteristics of 5kW class proton-exchange-membrane fuel cell (PEMFC) stack according to the long-term operation", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 11, No. 3, 2007, pp. 40-43, Retrieved from <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART001093374>.
14. W. M. Yan, H. S. Chu, M. X. Lu, F. B. Weng, G. B. Jung, and C. Y. Lee, "Degradation of proton exchange membrane fuel cells due to CO and CO₂ poisoning", *Journal of Power Sources*, Vol. 188, No. 1, 2009, pp. 141-147, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.11.107>.