

PEM 수전해 시스템의 연속 내구성 평가 및 동특성 시뮬레이션에 관한 연구

서영민 · 구태형 · 노현우 · 하동우 · 고락길[†]

한국전기연구원 전기모빌리티연구단 수소전기연구팀

Study on Continuous Durability Evaluation and Dynamic Simulation for PEM Water Electrolysis System

YOUNG MIN SEO, TAE HYUNG KOO, HYUN WOO NOH, DONG WOO HA, ROCK KIL KO[†]

Hydrogen Electric Research Team, Electric Mobility Research Division, Korea Electrotechnology Research Institute, 12 Jeongiui-gil, Seongsan-gu, Changwon 51543, Korea

[†]Corresponding author :
rkko@keri.re.kr

Received 26 August, 2024
Revised 5 September, 2024
Accepted 11 October, 2024

Abstract >> This study performed a continuous durability evaluation experiments on the proton exchange membrane (PEM) water electrolysis system. The dynamic characteristics of the system caused by the durability reduction was analyzed. A stack deterioration experiment was conducted by measuring the voltage change under a constant current conditions at the operating temperature. The water electrolysis stack durability data for long-term operation obtained through this study showed that performance decreased by about 18% during about 1,500 hours of operation. As a results, the durability of the stack rapidly decreased, and the power consumption of the stack increased on the dynamic simulation for PEM water electrolysis system.

Key words : Proton exchange membrane(양성자 교환 막막), Electrolysis(전기 분해), Durability(내구성), Stack(스택), Dynamic simulation(동특성 시뮬레이션)

1. 서론

화석 연료의 의존도가 높은 현대 사회에서 화석 연료의 고갈과 환경 오염으로 인한 막대한 피해로 인해 이를 대체할 수 있는 신재생 에너지 자원이 매력적인 해결책이 되고 있다. 이에 따라 풍력, 수력, 지열, 태양광 및 수소 등의 에너지 자원이 점차 미래 에너지 시장을 장악할 것으로 예상된다^{1,2)}. 최근 이러한 신에너지 자원 중 가장 유망한 에너지 저장 방식

은 수소를 기반으로 하는 것이다. 그러나 수소의 95% 이상이 화석 연료에서 생산되며 천연가스 개질을 통해 1 kg의 수소를 생산하는데 약 10 kg의 이산화탄소를 배출한다. 이상 기온과 기후 재난의 원인인 이산화탄소를 줄이고 탄소 중립을 달성하기 위하여 다양한 방식의 수소 생산에 대한 연구가 진행되고 있다. 이 중 신재생 에너지로 그린수소를 생산하는 방식인 수전해 기술이 친환경 생산 목표를 달성하기 위한 핵심 기술로 활용되고 있다^{3,4)}.

수전해 기술은 알카라인 방식(alkaline electrolysis), 고체 산화물 방식(solid oxide electrolysis), 음이온 교환막 방식(anion exchange membrane electrolysis), 양성자 교환 막막 방식(proton exchange membrane [PEM] electrolysis) 등의 네 가지 기술 범주로 구분할 수 있다. 다양한 전기 분해 방식 중 양성자 교환 막막 기술(PEM 수전해)은 소형 설계가 가능하고 높은 전류 밀도 및 효율, 빠른 응답 및 낮은 작동 온도 등과 같은 여러 장점을 가지고 있다⁵⁻⁹⁾. 특히 PEM 수전해 기술은 재생 에너지에 대한 유연성이 매우 높아 시스템 차원에서 활발히 연구가 진행되고 있다¹⁰⁻¹³⁾.

재생 에너지를 활용하여 수소를 생산할 경우 불안정한 전력 부하로 인하여 수전해 시스템 성능이 빠르게 나빠지는 문제가 발생한다. 이러한 부하 변동은 스택의 발열량 변화와 밀접한 관련이 있으며 운전 조건이 변화하여 스택의 적절한 운전 조건을 유지하게 된다. 이러한 환경에서 스택의 적절한 작동 조건을 유지하는 것이 시스템의 성능, 효율성 및 내구성에 큰 영향을 미친다^{14,15)}. 전기화학 반응은 온도가 증가함에 따라 가속화되고 전지 내부의 촉매 화학 반응이 향상되기 때문에 전압이 낮아지게 된다. 그러나 스택 온도가 임계점을 초과하면 시간이 지남에 따라 막이 얇아져 전압 강하가 발생하게 된다. 작동 온도보다 낮은 온도는 시스템의 효율과 발전에 부정적인 영향을 미친다. PEM 수전해의 상용화를 위해서는 막전극 접합체의 안정성, 운전 조건, 재료, 경제성 및 기타 기술적 장애물 등 극복하여야 할 중요한 문제들이 있으며 이러한 문제를 극복하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다¹⁶⁻²¹⁾.

Aubras 등²²⁾은 PEM 수전해의 상태를 식별하기 위하여 신호 기반 결함 진단 기술을 설계하고 검증하였다. 제안된 결함 진단 접근 방식을 통해 전압 및 양극 유량과 같은 다양한 작동 조건에서 PEM 수전해 셀에서 다양한 종류의 전류 신호를 기록하였다. Yigit와 Selamet²³⁾은 PEM 전기 분해 기반 수소 발생기 시스템 모델을 개발하여 시뮬레이션을 수행하였다. 다양한 조건에서 셀 및 스택 동작을 검사하였으며 스택의 손실이 더 높은 전류 밀도에서 다른 구성 요소의

손실에 영향을 미침을 보고하였다.

Oh 등²⁴⁾은 고분자 전해질 연료전지 전극 합체의 내구 평가 시간을 단축시키기 위하여 차량용 전극 합체에 적용하고 있는 고분자 막의 전기화학적 내구 평가 프로토콜을 정치용 전극 합체 내구 평가에 적용하였다. 열화 후 전해질 막의 내구성을 나타내는 수소 투과도, open-circuit voltage 변화, 이온전도도, 불소 유출량 등을 모두 검토하였을 때 정치용이 차량용보다 내구성이 더 좋음을 보였다. Koo 등²⁵⁾은 PEM 수전해 시스템의 신뢰성 향상을 위해 시스템 고장 진단 기법을 제시하였다. 시스템의 성능을 예측하고 동적 특성을 분석하기 위해 다양한 조건에서 검증된 PEM 수전해 스택 및 시스템 모델을 개발하였다. 또한 시스템을 제어하는 신호를 받아 실시간으로 실험 설정 및 시뮬레이션 모델을 운영하고 이를 바탕으로 시스템의 고장을 진단하였다.

PEM 수전해는 polymer electrolyte membrane fuel cell과 유사하게 귀금속 촉매와 고분자 전해질을 이용하여 물을 전기 분해하여 산소와 수소를 발생시킨다. 수전해의 성능 향상에 대해 많은 연구개발이 진행되었으나 스택 내구성에 관한 연구는 아직 초기 단계라고 할 수 있다. 특히 귀금속 촉매는 고가이기 때문에 내구성에 대한 장시간 연속 평가가 거의 수행된 바 없다. 이러한 이유로 본 연구는 PEM 수전해 스택 연속 내구 평가 실험을 수행하여 수전해 작동 시간에 따른 내구 열화율에 대한 데이터를 확보하고 수전해 내구 감소에 의한 시스템의 동특성 분석을 수행하였다.

2. PEM 수전해 시스템

본 연구에서는 보유한 스택의 정격 운전 온도 조건에서 일정 전류 조건으로 구동하면서 스택의 전압 변화를 측정하여 스택의 열화 실험을 진행하였다. Fig. 1은 본 연구에서 고려한 수전해 스택 성능 장치의 구성을 보여준다. 평가 장치는 크게 제어 시스템, 초순수 저장조, 순환 펌프로 구성된다. 보유하고 있는 수전해 장비는 수전해 unit cell 평가용으로 제작

된 장비로 스택의 평가를 위한 장비의 업그레이드가 필요하였다. 스택에 공급되는 물의 온도를 제어하기 위한 버퍼 히터는 스택의 용량에 맞춰 제작되었으며 스택의 상태를 측정하기 위한 온도 센서를 추가하였다.

평가에 사용된 스택은 활성화 면적 50 cm^2 , 총 4장의 셀로 구성되어 있다. 작동 온도는 최대 45°C 까지 사용할 수 있으며 최대 인가 전류는 40 A이다. 본 연구에서 사용한 스택의 재원은 Table 1에 자세히 명시되어 있다. 스택의 성능 평가는 스택에 공급되는 초순수의 유량은 $200/\text{ccm}$ 이며 스택의 온도 및 초순수성을 유지하기 위해 히터 및 초순수 필터를 거쳐 스택에 공급되었다. 스택에 전류가 인가되기 전 스택 전체의 온도를 일정하게 45°C 로 유지하기 위하여 스택 평가 전 약 30분 동안 출구 온도를 45°C 로 유지하였다. 이후 스택에 인가되는 전류를 0 A에서 40 A까지 단계적으로 증가시키며 평가하였다. 평가 장치 내부의 초순수 저장조의 초순수성을 유지시키기 위하여 평가 기간 중 낮에는 초순수 생산 장치를 가동하고 그 외의 시간은 내부 순환 기능을 통해 스택에서 배출되는 물을 다시 저장조로 복귀시켜 사용하였다.

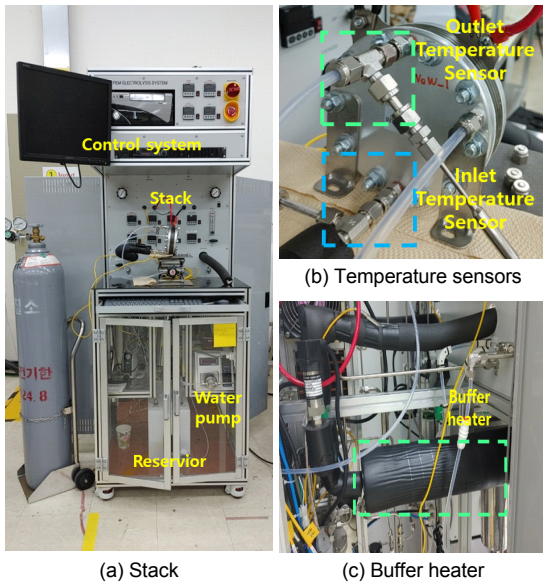


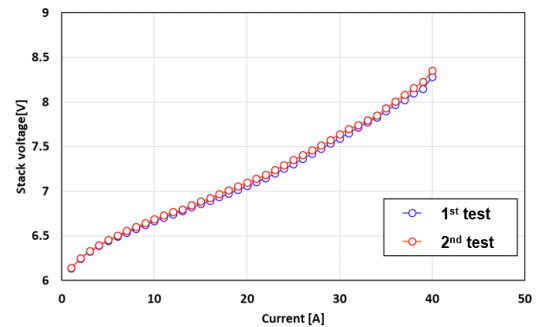
Fig. 1. PEM water electrolysis stack evaluation device

3. PEM 수전해 장기 내구 평가 실험

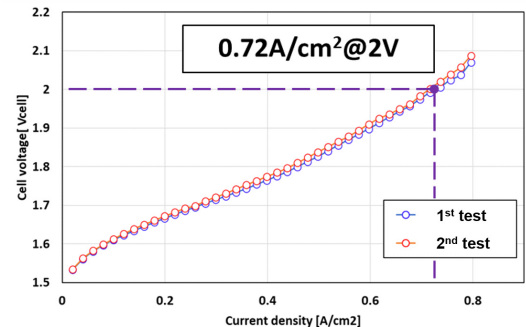
Fig. 2는 수전해 스택 장기 내구 평가 전 수전해 스택의 성능 그래프를 나타낸다. 제조사에서 제공해 준 최적의 성능은 스택에 40 A의 전류를 공급할 때 8 V이다. 하지만 두 차례의 실제 성능 평가에서는 평균 8.3 V의 성능을 보여주며 약 3.5%의 오차를 보였다. 스택의 성능은 제조사에 따라 면적, 스택 적층 수

Table 1. Stack information

Parameters	Value	Unit
Electrical power	320	W
Cell number	4	-
Active area	50.24	cm^2
Stack current range	0-40	A
Operating temperature range	5-45	$^\circ\text{C}$
Operating pressure range	0-10	barg
Water consumption	60	cc/hr



(a) Current - stack voltage



(b) Current density - cell voltage

Fig. 2. Performance of PEM water electrolysis stack

등 다양하게 제작되기 때문에 스택의 성능을 비교하기 위해 일반적으로 셀 전압-전류 밀도의 관계로 스택의 성능을 표기한다. 스택의 성능 평가 결과를 정규화하였을 때 해당 스택의 성능은 두 차례의 실제 성능 평가에서 2 V 기준으로 평균 0.72 A/cm²의 성능을 보여주고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 PEM 수전해 성능 평가 후 장기 내구 평가를 수행하였다. 장기 내구 평가는 수전해 스택의 시간에 따른 전압의 감소율을 측정하는 것을 목적으로 하였다. 본 연구에서는 평가 시 발생하는 다양한 이슈로 인해서 평가가 강제로 종료되는 시점을 기준으로 1차, 2차, 3차 그리고 4차 평가로 구분하였다. 내구 평가는 스택 평가 시에 공급되는 유량 및 출구 온도가 같은 조건에서 스택에 정전류 40 A를 공급하여 스택을 운전하였다.

Fig. 3은 1차 수전해 스택 내구 평가 결과를 보여준다. 1차 내구 평가는 총 965시간의 연속 실험으로 수행되었다. 연속 운전 간에 balance of plant의 오작동으로 인해 스택에 영향을 주는 이벤트가 발생하였다. 시작 전압은 약 7.95 V에서 시작하였으며 스택의 전압이 지속해서 감소하여 평가 후 약 340시간 후 7.686 V까지 감소하였다. 평가 350시간 경과 후 펌프의 일시적인 제어 오류로 인하여 초순수의 공급이 중단되었으며 그 결과 스택의 비가역적인 손상과 스택의 운전 전압이 7.686 V에서 7.755 V로 급격히 상승하였다. 580시간 경과 후 원인 불명의 스택 전압 상승으로 인해 스택의 운전 전압이 8.163 V까지 급격히 상승하였으며 다시 안정화 과정을 거쳐 8.029 V

까지 회복하였다. 이후 메인 전원 공급 장치의 차단으로 인해 실험실이 정전되었으며 평가도 함께 종료되었다. 1차 평가는 제조사에서 제공된 정격 조건보다 성능이 좋게 운전이 되었으며 정전 사고 전까지 운전 데이터를 고려하여 볼 때 약 8.0 V의 결과는 정상적인 것으로 판단되었다.

Fig. 4는 2차 수전해 스택 내구 평가 결과를 보여준다. 1차 수전해 내구 평가의 최종 결과 스택의 전압이 약 8.0 V로 종료되었으며 스택의 성능을 판단하기 위해 1차 수전해 내구 평가와 같이 초기 운전 절차에 따라 스택을 구동하였다. 최고 운전 전류인 40 A까지 3시간 20분(약 200분)이 소요되었다. 스택 공급 전류 40 A 기준으로 스택의 운전 전압은 7.6 V로 정상적으로 판단되어 2차 수전해 내구 평가 실험을 진행하였다.

2차 수전해 내구 평가는 총 392시간의 연속 실험으로 수행되었다. 스택 초기 작동 절차 후 스택의 전압은 7.79 V로 시작하여 최종 전압은 8.236 V로 관찰되었다. 평가는 392시간 전까지 별다른 이슈가 없었다. 하지만 2차 평가 392시간 경과 후 실험 장치 내 물을 배출하는 플로팅 센서의 오작동으로 인해 정상적으로 물이 배출되지 않았으며 결과적으로 최종 수위 감지 센터가 작동하며 펌프의 작동이 중단되었다. 물의 공급의 중단되면서 스택의 전압이 15 V까지 급격히 증가하였고 긴급 차단 시스템에 의해 평가는 종료되었다.

Fig. 5는 3차 수전해 내구 평가의 결과를 보여준다. 3차 수전해 내구 평가는 총 122시간 동안 진행되

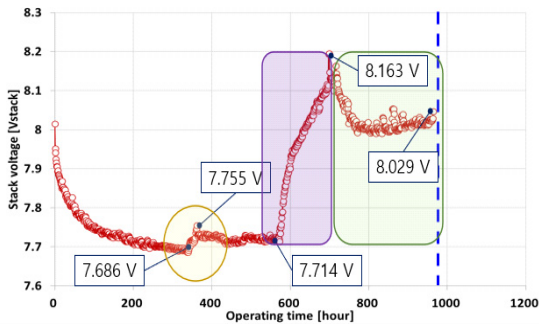


Fig. 3. First durability test for PEM water electrolysis stack

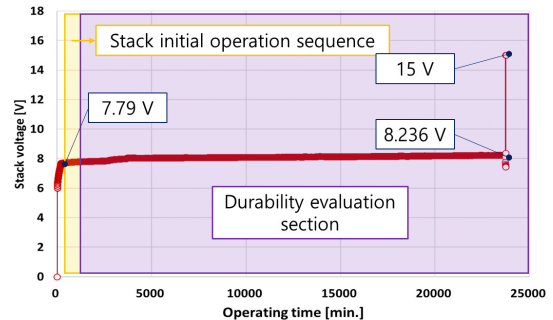


Fig. 4. Second durability test for PEM water electrolysis stack

었다. 2차에서 플로팅 센서의 오류로 인해 강제로 평가가 중단된 후 1, 2차와 같이 초기 시동 절차에 따라 스택의 최고 운전 조건까지 전류가 증가하였다. 시동 절차 후 스택의 전압은 7.984 V이며 8.154 V까지 선형적으로 증가하였다. 하지만 평가 시작 후 약 98시간(5,900분) 경과 후 스택의 전압이 급격하게 증가하기 시작하였다. 일반적으로는 장비 내 초순수의 전기전도도를 나타내는 지표인 지멘스(Siemens)가 0.3-0.5 μS 정도 유지되어야 하지만 급격한 전압 상승과 함께 장비 내 순환수의 순도는 약 2.8 μS 로 수전해에 연료로 공급하는 물의 순수도가 적합하지 않아 실험을 중단하였다.

Fig. 6은 4차 수전해 내구 평가 실험을 보여준다. 내부 순환수의 이온전도도를 기준치에 적합하게 유지하기 위하여 내부 물의 퍼징 작업을 진행하였다. 내부 순환수의 초기 이온전도도를 0.3 μS 로 유지시킨 후 전 차수와 같이 초기 시동 절차 후 스택의 평

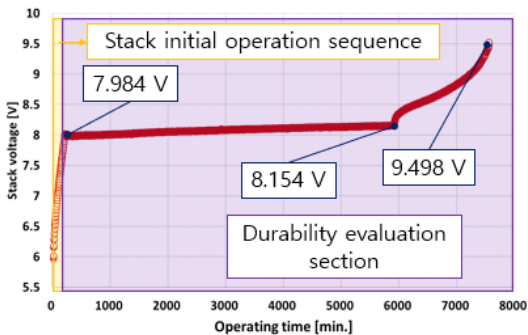


Fig. 5. Third durability test for PEM water electrolysis stack

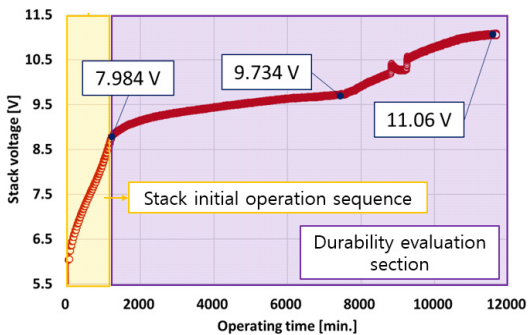


Fig. 6. Fourth durability test for PEM water electrolysis stack

가를 진행하였다. 스택의 전압은 7.984 V에서 빠르게 9.734 V로 증가 후 최종적으로 11.060 V까지 증가하였고 스택의 열화로 인해 발생하는 발열량을 장비의 냉각 용량을 넘어 스택의 온도를 측정할 수 없어 평가를 종료하였다.

Fig. 7은 1차에서 4차까지 PEM 수전해 스택 내구 평가를 종합해서 기록한 것이다. 총 수전해 내구 평가 시간은 1,565시간이다. 보유한 수전해 스택의 초기 성능은 7.859 V로 초기 내구 평가 구간 동안 스택의 성능이 좋아졌다. 하지만 다양한 이벤트로 인하여 스택에 공급되는 유량이 중단되는 상황이 발생하면서 스택에 비가역적인 손상이 발생한 것으로 추정된다. 이후 3차 수전해 성능 평가 초반부까지는 수전해 스택 성능의 내구 감소율을 특정할 만한 결과를 보이지 않았다. 하지만 3차 수전해 평가 후반부부터 급격한 수전해의 열화가 발생하면서 스택의 운전 전압이 증가하기 시작하였다. 본 연구를 통해 확보된 장기 운전에 대한 수전해 스택 내구 데이터는 아래와 같다. 결과적으로 약 1,500시간 운전 동안 약 18%의 성능이 감소함을 알 수 있었다. 이를 정리하면 다음과 같다.

- 스택 온도: 45°C
- 운전 전류: 40 A (보유 스택 최대 전류)
- 초기 성능: 7.859 V (스택 효율, 62.6%)
- 최종 성능: 11.046 V (스택 효율, 44.5%)

PEM 수전해 연료전지 스택의 내구성 향상을 위하여 다양한 전략이 적용될 수 있다. 내구성이 높은 촉

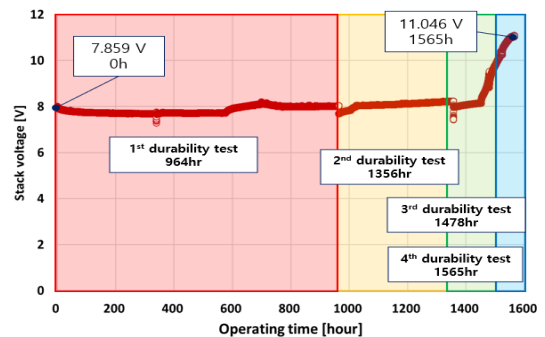


Fig. 7. Long-term durability test for PEM water electrolysis stack

매 사용 및 촉매 안정화를 통해 전극의 성능 저하를 최소화할 수 있으며 내화학적 및 기계적 강도가 강화된 전해질 막을 도입하여 막의 손상을 줄일 수 있다. 또한 가스 확산층의 물 관리 최적화와 내구성 높은 소재 사용, 운전 조건의 최적화를 통해 스택의 균일한 성능을 유지할 수 있다. 더불어 고급 진단 및 자동 제어 시스템을 통한 상태 모니터링과 효율적인 열 관리를 통해 장기적인 내구성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4. PEM 수전해 동특성 시뮬레이션

Fig. 8은 PEM 수전해 동특성 시뮬레이션 모델을 나타낸다. 본 연구에서는 PEM 수전해 스택 내구 평가 결과를 수전해 동특성 시뮬레이션 모델에 적용하였다. 시뮬레이션 모델은 저온 항온 순환 수조, 초순수 저장조, 워터 트랩, 열교환기, 정량 펌프, PEM 수전해 스택, 직류 파워 서플라이 등으로 구성된다.

저온 항온 순환 수조는 냉각 시스템으로 이용되며 초순수 저장조는 초순수 저장용 레저버로써 초기에는 3 kW급 히터를 이용해 스택의 공급 온도를 제어한다. 워터 트랩은 생산 가스 내 수분을 제거하기 위한 장비이며 정량 펌프는 수전해를 위한 초순수 공급용 펌프로 0-5 V로 제어된다. 열교환기는 스택 배출수 냉각용과 생산 가스 습기 제거용이 있으며 위치에 따라 저온 항온 순환 수조의 물과 스택 배출수나 생산 가스 사이의 열을 교환하는 역할을 한다. 직류 파워 서플라이는 범용으로 사용되며 1.2 kW 내

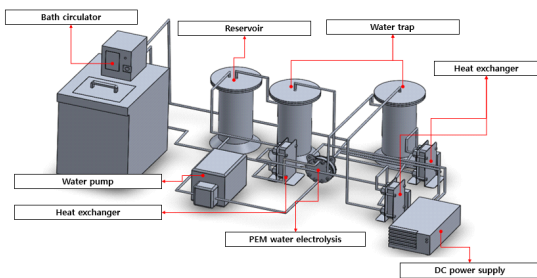
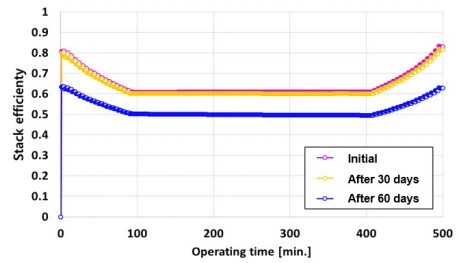
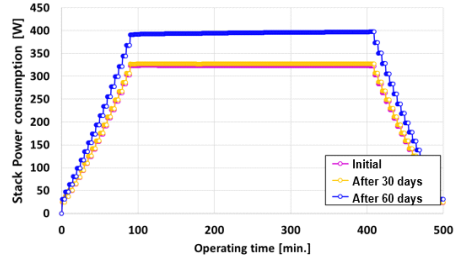


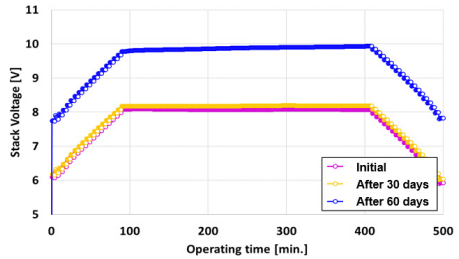
Fig. 8. Schematic of dynamic simulation model of PEM water electrolysis



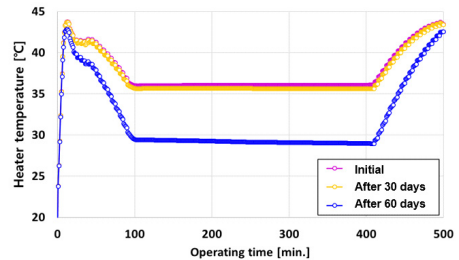
(a) Stack efficiency



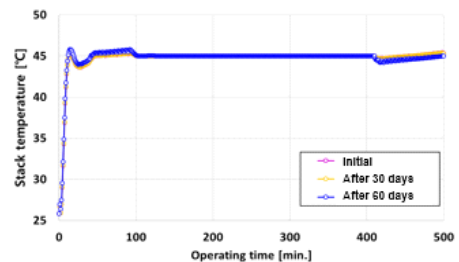
(b) Power consumption



(c) Stack voltage



(d) Stack inlet temperature



(e) Stack outlet temperature

Fig. 9. Simulation results for durability reduction of stack

에서 가변 전압으로 공급 가능하다.

PEM 수전해 스택은 50 cm^2 , 4 cells로 구성되며 스택 온도 조절을 위한 별도의 냉각 채널은 없다고 가정하였다. 본 연구에서는 스택의 위치가 레저버보다 물리적으로 아래에 위치하여 시스템을 구성하는 중력식 물 공급 및 가스 배출을 타깃으로 개발된 스택을 사용하였다.

Fig. 9는 수전해 스택 내구성을 고려한 동특성 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 수전해에 공급되는 전력은 태양광에서 발생하는 신재생 에너지를 가정하였고 오전에는 약 6시간 정도의 가동 시간을 가지는 것으로 가정하였다. 초기 구동부터 약 30일까지는 초기와 같은 정상적인 거동의 특성을 보여준다. 하지만 60일이 경과 후에는 스택의 급격한 내구 감소가 발생하여 스택의 소모 전력이 매우 증가하였다. 또한 스택의 열화에 따라 수전해 스택의 발열량도 증가하여 스택 온도를 유지시켜 주는 히터의 필요성이 급격하게 떨어져 스택의 입구 온도가 감소하는 것을 볼 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 PEM 수전해 스택 연속 내구 평가 실험을 수행하여 수전해 작동 시간에 따른 내구 열화에 대한 데이터를 확보하고 수전해 내구 감소에 의한 시스템의 동특성 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 보유한 스택의 정격 운전 온도 조건에서 일정 전류 조건으로 구동하면서 스택의 전압 변화를 측정하여 스택의 열화 실험을 진행하였고 PEM 수전해 성능 평가 후 장기 내구 평가를 수행하였다. 본 연구를 통해 확보된 장기 운전에 대한 수전해 스택 내구 데이터는 약 1,500시간 운전 동안 약 18%의 성능이 감소함을 알 수 있었다. 또한 본 연구에서는 PEM 수전해 스택 내구 평가 결과를 수전해 동특성 시뮬레이션 모델에 적용하였다. 초기 구동부터 약 30일까지는 정상적인 초기와 같은 거동의 특성을 보여주지만 약 60일 경과 후에는 스택의 급격한 내구 감소가 발생하여 스택의 소모 전력이 증가함을 알 수 있었다.

본 연구는 PEM 수전해 시스템의 스택 장기 내구성 평가를 위한 실험을 수행하였으나 몇 가지 한계점이 존재한다. 먼저 실험이 특정 운전 조건에서만 수행되어 다양한 운전 환경에서의 내구성 변화에 대한 분석이 부족하다. 실제 운영 환경에서는 온도, 전류 밀도, 수분 공급 조건 등이 달라질 수 있기 때문에 이러한 다양한 조건에서의 내구성 평가가 추가적으로 필요하다. 또한 스택 성능 저하의 구체적인 원인을 규명하기 위한 심층적인 물질 분석이 필요하다. 촉매층의 분해, 전해질 막의 열화 등 구체적인 열화 메커니즘을 규명하기 위한 노력이 요구된다. 마지막으로 1,500시간의 상대적으로 짧은 시간 동안 내구성을 평가하였다. 더 장기적인 평가를 통해 실제 상용화 가능성을 높이기 위한 내구성 데이터를 확보하는 것이 필요하다. 향후 연구에서는 다양한 운전 조건하에서의 장기 내구성 평가를 수행하고 스택 내 성능 저하의 구체적인 원인을 분석하는 물질 특성화 연구를 병행할 계획이다. 이를 통해 PEM 수전해 시스템의 장기적인 안정성과 효율성을 높이는 데 기여하고자 한다.

후 기

이 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본 사업임(No. 24A01070). 이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(24A02148).

References

1. S. A. Grigoriev, V. I. Porembsky, and V. N. Fateev, "Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, No. 2, 2006, pp. 171-175, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.04.038>.
2. F. Marangio, M. Santarelli, and M. Cali, "Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 3, 2009, pp. 1143-1158, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.083>.

3. S. Oh, J. Kim, D. Lee, and K. Park, "Variation of hydrogen peroxide concentration during fenton reaction for test the membrane durability of PEMFC", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 56, No. 3, 2018, pp. 315-319, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2018.56.3.315>.
4. S. S. Kumar and V. Himabindu, "Hydrogen production by PEM water electrolysis - a review", *Materials Science for Energy Technologies*, Vol. 2, No. 3, 2019, pp. 442-454, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>.
5. P. Medina and M. Santarelli, "Analysis of water transport in a high pressure PEM electrolyzer", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 11, 2010, pp. 5173-5186, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.130>.
6. J. Park, C. H. Kim, H. S. Cho, S. K. Kim, and W. C. Cho, "Techno-economic analysis of green hydrogen production system based on renewable energy sources", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 4, 2020, pp. 337-344, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.4.337>.
7. S. Kwon, B. Jin, C. Lee, S. Eom, and G. Choi, "Ventilation performance study on hydrogen leakage characteristics of container packaged water electrolysis production system", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 3, 2024, pp. 324-335, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.3.324>.
8. H. Ito, T. Maeda, A. Nakano, and H. Takenaka, "Properties of Nafion membranes under PEM water electrolysis conditions", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 17, 2011, pp. 10527-10540, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.127>.
9. M. Chandesris, V. Médeau, N. Guillet, S. Chelghoum, D. Thoby, and F. Fouda-Onana, "Membrane degradation in PEM water electrolyzer: numerical modeling and experimental evidence of the influence of temperature and current density", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 3, 2015, pp. 1353-1366, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.111>.
10. S. Jeong, N. H. Choi, C. Moon, S. Moon, and H. Lim, "Economic feasibility analysis for P2G using PEM water electrolysis", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 28, No. 3, 2017, pp. 231-237, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.3.231>.
11. N. Choi, D. Yoon, C. Han, J. Lee, M. Song, H. Jung, Y. Choi and S. Moon, "Development of PEMWE MEA & system for discrete regenerative fuel cell", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 27, No. 4, 2016, pp. 335-340, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2016.27.4.335>.
12. T. Koo, R. Ko, H. Noh, Y. Seo, D. Ha, D. Hyun, and J. Han, "Development of a fault diagnosis model for PEM water electrolysis system based on simulation", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 5, 2023, pp. 478-489, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.5.478>.
13. J. Baek and S. H. Kim, "Current status of water electrolysis technology and large-scale demonstration projects in Korea and overseas", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 14-26, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.14>.
14. G. S. Ogumerem and E. N. Pistikopoulos, "Parametric optimization and control for a smart proton exchange membrane water electrolysis (PEMWE) system", *Journal of Process Control*, Vol. 91, 2020, pp. 37-49, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2020.05.002>.
15. H. Oh, W. Y. Lee, J. Won, M. Kim, Y. Y. Choi, and S. B. Han, "Residual-based fault diagnosis for thermal management systems of proton exchange membrane fuel cells", *Applied Energy*, Vol. 277, 2020, pp. 115568, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115568>.
16. H. Kim, H. Guo and S. Kim, "A study on active ion transport technology to improve water electrolysis system performance", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 132-140, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.132>.
17. O. Prakash, S. Sood, M. Boukerdja, B. Ould-Bouamama, J. Y. Dieulot, A. L. Gehin, and M. Bressel, "A model-based prognosis approach to proton exchange membrane water electrolysis system", In: 2021 European Control Conference; 2021 Jun 29-Jul 2; Delft, Netherlands. New York (NY): IEEE; c2021, pp. 2133-2138, doi: <https://doi.org/10.23919/ECC54610.2021.9654858>.
18. W. Y. Lee, M. Kim, H. Oh, Y. J. Sohn, and S. G. Kim, "A review on prognostics of polymer electrolyte fuel cells", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 29, No. 4, 2018, pp. 339-356, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.4.339>.
19. Y. D. Lee, J. Y. Kim, D. J. Yoo, 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", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 530-545, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.530>.
20. D. H. Kim, H. S. Jung, and C. Park, "Resistance analysis by distribution of relaxation time according to gas diffusion layers and binder amounts for cathode of high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cell", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 3, 2023, pp. 283-291, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.3.283>.
21. W. Y. Lee, G. G. Park, Y. J. Sohn, S. G. Kim, and M. Kim, "Fault detection and diagnosis methods for polymer electrolyte fuel cell system", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 28, No. 3, 2017, pp. 252-272, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.3.252>.
22. F. Aubras, C. Damour, M. Benne, S. Boulevard, M. Bessafi, B. Grondin-Perez, A. J. J. Kadjo, and J. Deseure, "A non-intrusive signal-based fault diagnosis method for proton exchange membrane water electrolyzer using empirical mode

- decomposition”, *Energies*, Vol. 14, No. 15, 2021, pp. 4458, doi: <https://doi.org/10.3390/en14154458>.
23. T. Yigit and O. F. Selamet, “Mathematical modeling and dynamic Simulink simulation of high-pressure PEM electrolyzer system”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 32, 2016, pp. 13901-13914, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.022>.
24. S. H. Oh, M. Lee, J. Yun, H. Lee, W. Kim, I. C. Na, and K. Park, “Durability evaluation of stationary PEMFC MEA by OCV holding method”, *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 57, No. 3, 2019, pp. 344-350, doi: <https://doi.org/10.9713/kcer.2019.57.3.344>.
25. T. Koo, R. Ko, D. Ha, and J. Han, “Development of model-based PEM water electrolysis HILS (hardware-in-the-loop simulation) system for state evaluation and fault detection”, *Energies*, Vol. 16, No. 8, 2023, pp. 3379, doi: <https://doi.org/10.3390/en16083379>.