Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 5, 2025, pp. 535~541
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.5.535

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

직접 암모니아 주입형 가압 고체산화물 연료전지 시스템 운전 전략

신우찬[1,2] · 이동근[2] · 박진영[2] · 김영상[1,2] · 이선엽[3] · 배용균[2†]

[1]과학기술연합대학원대학교 융합시스템전공, [2]한국기계연구원 무탄소발전연구실, [3]한국기계연구원 친환경모빌리티연구실

Operation Strategy of Pressurized Solid Oxide Fuel Cell System Fueled by Ammonia

WOOCHAN SHIN[1,2], DONGKEUN LEE[2], JINYOUNG PARK[2], YOUNGSANG KIM[1,2], SUNYOUP LEE[3], YONGGYUN BAE[2†]

[1]Department of Mechanical Engineering, University of Science and Technology, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea
[2]Department of Carbon-free Power Generation, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea
[3]Department of Eco-friendly Mobility Power, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

†Corresponding author :
ygbae@kimm.re.kr

Received 30 September, 2025
Revised 14 October, 2025
Accepted 15 October, 2025

Abstract >> This study models a pressurized ammonia-fueled solid oxide fuel cell (SOFC) system for co-production of electricity and hydrogen. A steady-state model was built in Ebsilon®. Raising pressure from 2 to 10 bar increased SOFC power by 8.2% but sharply raised blower demand, lowering net electrical efficiency, while hydrogen efficiency rose from 29.9% to 40.1%. Adding a expander recovered work from the hot cathode exhaust, boosting electrical efficiency by 5–7%p and raising combined efficiency to 68.9% at 6–7 bar. Because storage and compression benefits were not included, actual high-pressure gains are expected to be larger, providing guidance for pressurized ammonia-SOFC system design.

Key words : Ammonia(암모니아), SOFC(고체산화물 연료전지), Pressurized operation (가압 운전), SOFC system(SOFC 시스템), Efficiency(효율)

1. 서 론

고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)는 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환하는 고효율·친환경 발전 장치이다. 600℃ 이상의 고온 영역에서 작동하여 비가역 손실이 작고, 배열 온도가 높아 2차 활용이 용이하다[1]. 또한 SOFC는 천연가스, 수소, 메탄올 등 다양한 연료를 사용할 수 있으며, 암모니아의 경우 별도의 개질기 없이도 사용 가능하여 최근 주목받고 있다. 암모니아는 25℃에서 10 bar 내외의 조건만으로 액체 상태 유지가 가능해 저장·운송이 용이하다. 또한 높은 체적 에너지 밀도를 보유하고 전 세계적으로 구축된 생산·유통 인프라를 활용할 수 있어 무탄소 에너지 운반체로 부각시킨다[2].

이러한 특성으로 암모니아 직접 연료 SOFC 시스템에 대한 연구가 최근 활발히 진행되었다. 스택 측면에서는 질화 방지를 위한 대책, 시스템 측면에서는 작동 조건에 따른 효율 최적화의 관점에서 연구가 진행되었으며 유럽·일본에서는 이미 실증 사업이 진행 중이다[3-6].

한편 가압 운전은 SOFC 스택과 시스템 모두에서 성능 향상을 가져오는 주요 수단으로 알려져 있다. 압력 상승은 반응물 분압을 증가시켜 Nernst 전위를 높이고 농도 과전압을 줄여 동일 전압에서 더 높은 전류밀도를 허용한다[7]. 이러한 이점을 살려 스택을 고압에서 운전하는 연구들이 보고되었으며, 실제 실험과 수치해석 모두에서 전력밀도 및 효율 향상 효과가 확인되었다[8,9].

그러나 기존 연구들은 주로 수소·천연가스 등 비교적 단순한 연료를 대상으로 하거나, 암모니아를 연료로 하더라도 상압 운전 조건에 국한된 사례가 대부분이다. 특히 암모니아의 경우 Off-gas가 수소가 포함되므로 전력 효율뿐만 아니라 수소 생산 관점까지 함께 고려할 필요가 있다. 이러한 상황에서는 압력, 연료 이용률, 스택 온도 등 주요 변수가 전력 효율과 수소 생산량에 미치는 영향을 통합적으로 파악하기 어렵다. 따라서 암모니아 연료와 가압 운전을 결합한 SOFC 시스템의 성능을 정량적으로 규명하고, 전력 생산과 수소 회수 간의 최적 운전 지침을 제시하는 연구가 요구된다. 본 연구에서는 상용 공정해석 프로그램인 EBISLON Professional을 사용하여 정상상태 에너지 시스템 모델을 구현하고, 이를 통해 암모니아 기반 가압형 SOFC 시스템의 특성을 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 스택 및 시스템

2.1.1 스택 모델

본 연구에서는 가압형 암모니아 SOFC 스택의 실험 데이터가 부족하기 때문에, 독일항공우주센터(DLR)의 가압형 H_2-N_2 스택 데이터를 활용하여 1차적으로 모델을 보정하고, 이후 자체 보유하고 있는 상압 암모니아 실험 데이터를 이용하여 교차 검증을 수행하였다. SOFC의 전기화학적 거동을 나타내기 위해 전압은 가역 전위와 여러 과전압의 합으로 표현하였다.

$$U = U_{rev} - U_{act} - U_{\Omega} - U_{con} \tag{1}$$

여기서 U_{rev}는 Nernst 전위, U_{act}, U_{Ω}, U_{con}은 각각 활성화·오믹·농도 과전압을 의미한다.

$$U_{rev} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{RT}{2F}\ln\frac{y_{H_2}\sqrt{P_A y_{O_2}}}{y_{H_2O}} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} U_{act} &= \frac{2RT}{nF}\sinh^{-1}\left(\frac{j}{2j_0}\right) \\ n &= 2(anode), 4(cathode) \end{aligned} \tag{3}$$

$$U_{\Omega} = \frac{jd_e}{\sigma_0} e^{E_a/RT} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} U_{con} &= \frac{RT}{4F}\ln\left(\frac{y_{O_2}}{y_{O_2,tpb}}\right) \\ &+ \frac{RT}{2F}\ln\left(\frac{y_{H_2} y_{H_2O,tpb}}{y_{H_2,tpb} y_{H_2O}}\right) \end{aligned} \tag{5}$$

위 지배 방정식을 토대로 자체 개발한 SOFC 스택 모델을 시스템 해석에 적용하였다.

Fig. 1은 스택 모델의 데이터 피팅 및 검증 결과를 나타낸다. 모델은 다양한 온도(700~800°C)와 압력(1.35~8 bar) 조건에서 실험 데이터를 정밀하게 재현하였으며 이를 통해 모델이 가압 조건에서의 암모니아 반응을 모사함을 검증하였다.

적용한 SOFC 스택 모델의 기준 운전 조건을 Table 1에 정리하였다. 연료는 암모니아(NH_3)를 사용하였으며, 연료 이용률은 0.6으로 설정하였다. 스택의 운전 온도는 750°C, 출구-입구의 온도 차는 80°C로 하였으며 전류밀도는 3,000 A·m^{-2}를 기준으로

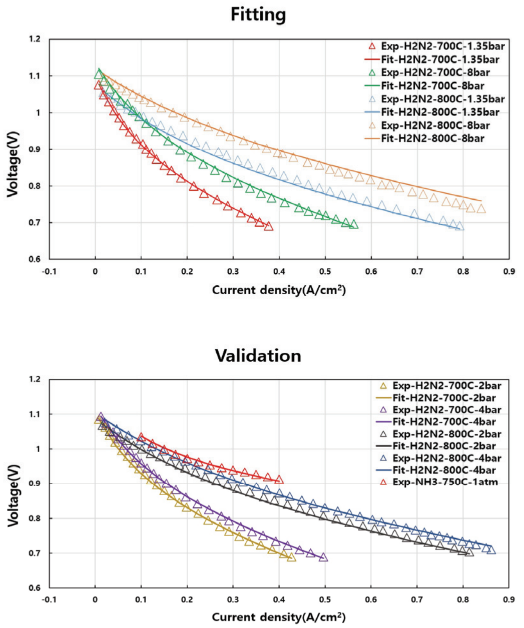
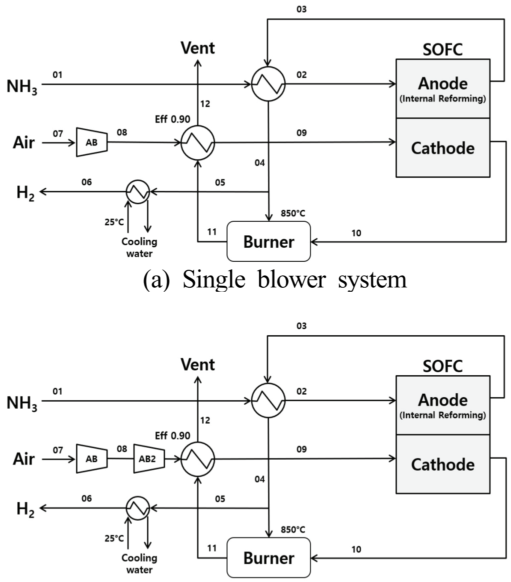


Fig. 1. Experimental validation and parameter fitting of the SOFC stack model



(a) Single blower system

(b) Multi blower system

Fig. 2. System layout of the pressurized ammonia SOFC

Table 1. Operating parameters of the SOFC stack

Parameter		Unit
Gas composition	NH_3	-
Fuel utilization	0.6	-
Stack temperature	750	℃
Stack outlet-inlet temp.	80	℃
Current density	3000	$A{\cdot}m^{-2}$
Anode pressure drop	30	mbar
Cathode pressure drop	30	mbar
Active area	84	cm^2

하였다. 애노드와 캐소드의 압력손실은 각각 30 mbar로 동일하게 적용하였고, 단위 전지의 유효 면적은 84 cm^2로 설정하였다.

2.1.2 시스템 구성

모델링한 가압형 암모니아-SOFC 시스템은 Fig. 2에 나타내었다.

공기 공급부를 스택 운전압력(2~10 bar)까지 압축하도록 설계하였기 때문에 단일 블로워 단계에서 과부하를 방지하고 실제 블로워 설계를 반영하기 위해 단계별 압축비를 3.2 이하로 제한하였고 그 이상인 구간은 다단 압축 방식(Multi blower)을 적용하였다. 또한 캐소드 오프가스의 일부와 애노드 오프가스의 일정 비율은 연소기(Burner)로 보내어 캐소드 입구 공기 예열에 필요한 열을 공급하도록 설계하였다.

연료 공급부는 고압 저장탱크로부터 공급된 암모니아를 애노드 오프가스 열교환기를 통해 예열하여 스택으로 공급함으로써, 스택 내부에서의 분해반응과 열관리를 지원하도록 설정하였다. 또한 각각의 열교환기의 효과도(Effectiveness)는 실제 상용 설계 수준을 고려하여 최대 0.9로 제한하고 모델에 적용함으로써 과도한 열교환 성능을 가정하지 않도록 하였다.

후단 처리부에서는 가압된 애노드 오프가스를 냉각수를 이용해 온도를 조절하여 수소 분리장치(PSA 또는 멤브레인)의 유입조건[10]을 만족시키도록 설정하였다.

Table 2에는 각 BOP들의 수치를 나타내었다. 블로워와 펌프는 각각 80%의 등엔트로피 효율과 96%의 기계적 효율을 적용하였으며, 앞서 언급한 대로 단계별 압축비를 3.2 이하로 제한하였다. 열교환기

Table 2. Operating parameters of the SOFC system

Parameter		Unit
Operating pressure	2-10	bar
Blower isentropic eff.	80	%
Blower mechanical eff.	96	%
Compressor pressure ratio	< 3.2	-
Pump isentropic eff.	80	%
Pump mechanical eff.	96	%
DC/AC inverter eff.	92	%
Heat exchanger ΔP	20	mbar
Burner temperature	850	℃

압력 손실은 양측 모두 20 mbar, 연소기 출구 온도는 850℃, 인버터의 경우 92%의 효율로 모델링하였다.

2.2 성능 지표

모든 성능지표는 정상상태에서의 연료 저위발열량(LHV)을 기준으로 산정하였다. 암모니아와 수소의 저위발열량은 각각 18.6 MJ·kg^{-1}, 120 MJ·kg^{-1}를 적용하였다. 순 전력(E)은 블로워나 펌프 등의 모든 소모동력과 인버터의 효율을 고려한 AC 전력을 의미한다.

화학적 에너지 유량은 다음과 같이 정의하였다.

$$\Phi_{NH_3} = \dot{m}_{NH_3} LHV_{NH_3} \tag{6}$$

$$\Phi_{H_2} = \dot{m}_{H_2} LHV_{H_2} \tag{7}$$

여기서 $\dot{m}_{NH_3}$는 공급되는 암모니아 질량유량, $\dot{m}_{H_2}$는 전기 화학반응 이후 분리된 수소의 질량유량을 나타낸다.

전기효율과 수소 생산효율은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_e = \frac{E}{\Phi_{NH_3}} \tag{8}$$

$$\eta_{H_2} = \frac{\Phi_{H_2}}{\Phi_{NH_3}} \tag{9}$$

이때 전력과 수소를 함께 고려한 총 효율은 다음과 같다.

$$\eta_{total} = \frac{E + \Phi_{H_2}}{\Phi_{NH_3}} \tag{10}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 압력 변화에 따른 시스템 효율 변화

스택 압력의 변화가 시스템에 미치는 영향을 평가하기 위하여 연료 이용률, 스택온도, 출구-입구 온도차, 전류밀도 등 다른 조건을 고정한 상태에서 압력을 2 bar에서 10 bar 범위로 변화시키며 해석을 수행하였다. 압력이 2 bar에서 10 bar로 증가함에 따라 SOFC 전력은 12.26 kW에서 13.26 kW로 약 8.2% 상승하였으며, 고압으로 갈수록 증가 폭이 점차 줄어드는 경향을 보였다(Fig. 3). 이러한 경향은 Nernst 전위의 로그 압력 의존성과 고압에서 농도 분극이 부분적으로 완화되는 효과를 반영한 결과로 해석된다.

반면, 캐소드 측 공기 블로워 동력은 압력이 상승할수록 급격히 증가하였다. 2 bar에서 10 bar로 상승 시 블로워 요구 동력은 2.86 kW에서 7.30 kW로 약 4.44 kW 증가하였으며(Fig. 4), 이는 스택 전력 증가분(+1.00 kW)을 크게 상회한다. 즉 압축부하만 고려할 경우 순전기 효율은 압력 상승과 함께 오히려 감소하는 경향을 나타내며(Fig. 5), 압력 상승에 따른 블로워 요구 동력 고려의 중요성을 보여준다.

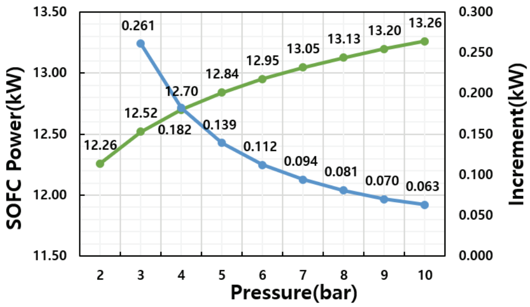


Fig. 3. SOFC stack power at elevated pressure

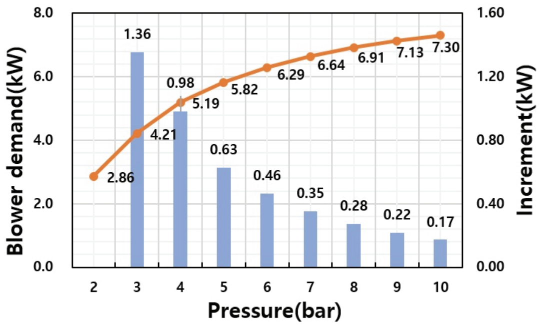


Fig. 4. SOFC system blower demand at elevated pressure

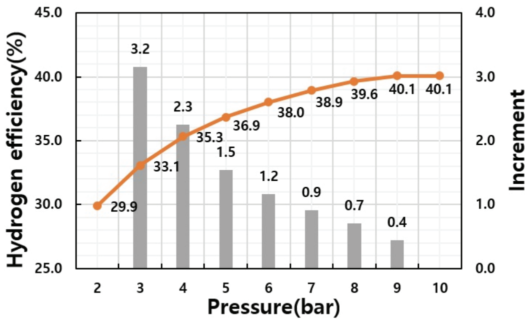


Fig. 6. Hydrogen efficiency at elevated pressure

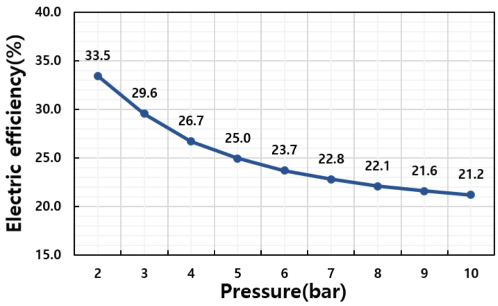


Fig. 5. Electric efficiency at elevated pressure

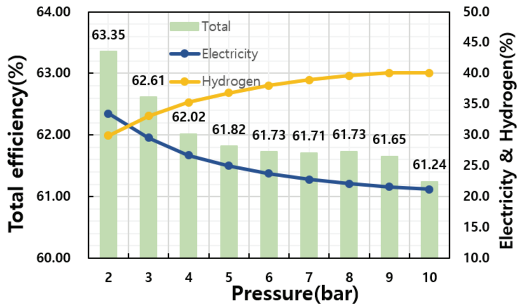


Fig. 7. Effect of stack pressure on electrical, hydrogen, and total efficiency

수소 생산 측면에서는 가압의 이점이 뚜렷하게 나타났다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이, 분리·배출되는 수소의 LHV 기준 효율은 압력이 2 bar에서 29.9%였던 것이 10 bar에서 40.1%까지 상승하여 약 10%p 향상되었다. 특히 2 bar에서 3 bar까지 +3.2%p, 3 bar에서 4 bar까지 +2.3%p와 같이 초기 압력 상승 구간에서 효율 증가 폭이 크고, 8 bar에서 9 bar까지는 +0.4%p로 점차 완만해지는 경향을 보였다. 이때 사용된 수소 효율은 암모니아의 화학적 전환율을 기반으로 하며, 전극 반응성이나 전압 손실 등 전기화학적 요인은 직접 포함하지 않는다. 다만 압력 상승으로 반응기체 분압과 Nernst 전위가 증가해 전기화학 반응이 촉진되면서 Φ_{H_2}가 증가하였고, 이에 따라 η_{H_2}가 간접적으로 향상된 것으로 해석된다. 한편 $NH_3 \leftrightarrow 0.5N_2 + 1.5H_2$ 반응은 열역학적으로 고압에서 불리하지만, SOFC의 작동온도인 고온 조건에서는 평형적 제약이 거의 사라져 암모니아의 분해가 거의 완결된 상태로 존재한다. Ristig 등의 열역학 해석 결과에 따르면[11], 40 bar에서 700°C일 때 암모니아의 평형 몰분율은 10^{-3} 이하로 감소하여 거의 전량이 수소로 전환되는 것으로 나타난다. 따라서 본 연구에서 관찰된 효율 증가는 평형 이동 효과보다는 압력 상승에 따른 전기화학적 촉진 효과에 주로 기인한 것으로 판단된다.

추가적으로, 이 값들은 실제 분리된 수소의 저장 압축 과정에서의 고압 운전 이점(PSA 전단 압축 블로워 제거 등)을 포함하지 않은 것으로, 실제 수소 저장 시의 압축부하 감소 효과까지 고려하면 고압 운전의 장점은 이보다 더 커질 것으로 예상된다.

전력과 수소를 LHV 기준으로 함께 고려할 때, Fig. 7과 같이 압력 상승에 따른 성능 변화를 확인할 수 있다. 우선 총 효율(녹색 막대)은 2 bar에서 63.35%였던 것이 3 bar에서 62.61%로 떨어진 뒤 압력이 올라갈수록 점진적으로 감소하여 10 bar에서 61.24%로 나타났다. 결과적으로 압력 상승은 전기 효율을

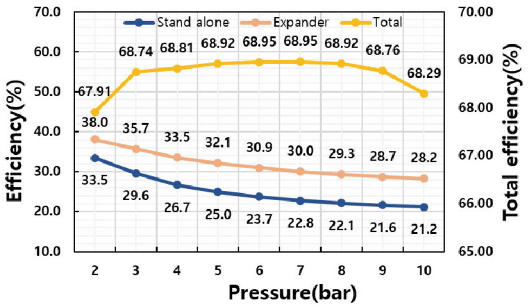


Fig. 8. Comparison of Stand-Alone and expander system efficiency under elevated pressure

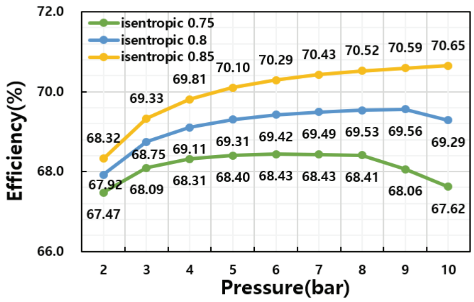


Fig. 9. Effect of blower isentropic efficiency on overall system performance at various pressures

일정 부분 희생시키면서도 수소 생산 효율을 높이는 경향을 보이며, 총합 효율은 압력이 올라갈수록 완만히 감소하는 경향을 보였다. 이는 오프가스를 고려하지 않은 효율로 후단 가스의 활용까지 포함하면 압력 증가에 따른 시스템 효율은 달라질 수 있다.

Fig. 8은 이러한 조건에서 팽창기를 적용했을 때와 적용하지 않았을 때의 최종 효율 차이를 보여준다. 기본(파란 선) 시스템의 전기 효율 대비 팽창기(주황 선)를 적용했을 때의 전기 효율은 전 구간에서 5~7%p 높게 유지되며, 팽창기를 적용한 총합 효율은 6~7 bar 부근에서 최대값(68.9%)에 도달한 뒤 10 bar에서도 높은 수준(68.3%)을 유지한다. 위에 사용된 팽창기는 등엔트로피 효율 60%와 기계 효율 95%를 가정하였으며, 캐소드 측 고온·고압 배기가스를 팽창기에 통과시켜 기계적 일을 회수함으로써 블로워에서 발생하는 부하를 상쇄해 전기 효율 저하를 완화하는 효과를 확인할 수 있었다.

또한 블로워 성능의 핵심 지표인 등엔트로피 효율에 따른 결과 민감도를 확인하기 위해 이를 0.75, 0.8, 0.85로 변화시키며 시스템 효율을 확인하였다(Fig. 9). 압력에 따른 효율의 전반적 경향은 세 경우 모두 유사하게 나타났으나, 블로워 효율이 높을수록 효율 향상의 폭이 커지고, 효율이 최대에 도달하는 압력 구간이 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어 등엔트로피 효율이 0.75인 조건에서는 5 bar부근에서 효율이 포화되는 반면, 0.85 조건에서는 7~8 bar까지 효율 상승이 지속되어 이후 완만한 포화 구간에 도달한다. 이는 블로워 성능이 실제 시스템 내 압력 의존적 부하 특성과 밀접하게 연계되어 있음을 의미하며, 블로워의 등엔트로피 효율에 따라 최적 운전 압력이 달라질 수 있음을 시사한다. 따라서 시스템 설계 및 최적화 시에는 실제 운전 조건별 블로워 성능 변화를 반영하는 접근이 필요하다.

본 연구에서 제시된 수소 효율은 후단 저장·압축 시스템에서 기대되는 이점(고압 수소 공급에 따른 PSA 전단 블로워 제거 등)을 포함하지 않고, 스택 내부의 암모니아 분해반응과 유입 압력 상승에 따른 회수율 개선, 애노드 오프가스 조성 변화 등 공정 자체 효과만을 반영한 값이다. 따라서 실제 시스템에서는 후단 고압 가스 활용과 저장·압축까지 고려할 경우 압력 증가에 따른 순효율이 지금보다 더 크게 개선될 수 있으며, 전력과 수소 동시생산 성능을 향상시키는 고압 운전에 대한 잠재적 이점이 더욱 부각될 것으로 예상된다.

4. 결 론

1) 본 연구에서는 상용 공정해석 프로그램(Ebsilon)을 이용하여 가압형 암모니아 SOFC 시스템을 모델링하고 스택 및 보조기기의 실제 설계·운전 조건을 반영하여 성능을 해석하였다.
2) 해석 결과, 압력이 2 bar에서 10 bar로 증가함에 따라 스택 전력은 약 8.2% 상승하였으나 공기 블로워 요구 동력이 2.86 kW에서 7.30 kW로 크게 증가하여 압축부하만 고려할 경우 순전기 효율이 감소하는 경향을 보였다. 반면 수소

생산 효율(LHV 기준)은 29.9%에서 40.1%까지 상승하여 고압 조건에서 수소 지향적 성능이 보다 두드러졌다. 이에 따라 전력과 수소를 함께 고려한 총효율은 2 bar에서 63.35%였던 것이 10 bar에서 61.24%로 완만히 감소하였다.

3) 캐소드 측 고온·고압 배기가스를 스크롤 팽창기에 통과시켜 기계적 일을 회수할 경우, 모든 압력 구간에서 전기 효율이 약 5~7%p 향상되고 총합 효율은 6~7 bar 부근에서 최대 68.9%까지 도달하는 등 기생 부하를 상쇄하는 효과를 확인하였다.

4) 추가적으로, 블로워의 등엔트로피 효율 변화(0.75~0.85)에 대한 민감도 분석 결과, 압력에 따른 효율 경향은 유사하나 최적 효율 구간이 블로워 성능에 따라 달라짐을 확인하였다. 이는 실제 시스템 설계 시 운전 조건별 블로워 성능 특성을 반영한 최적화 접근이 필요함을 시사한다.

5) 이러한 결과는 향후 가압형 암모니아 SOFC 시스템의 최적 설계·제어 전략 수립과 경제성·안정성 평가에 유용한 기초자료로 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 기관 기본사업(project ID: NK254D)의 지원을 받아 수행된 결과입니다. 또한, 본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (RS-2025-02220932).

References

1. J. Y. Park, T. Q. Quach, J. S. Kim, Y. G. Bae, D. K. Lee, Y. S. Kim, S. Y. Lee, and Y. Kim, "Ammonia-fueled solid oxide fuel cell recirculation systems for power generation", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 40-47, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.40.
2. D. Y. Kim, T. H. Kim, D. K. Lee, Y. S. Kim, K. Y. Ahn, Y. G. Bae, J. Y. Park, and Y. Kim, "Study on electrochemical hydrogen separation of hydrogen and nitrogen mixture gas", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 149-154, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.149.
3. Y. Wang, S. Zhao, Z. Guo, Q. Fu, Q. Du, M. Ni, and K. Jiao, "Cross-scale transient analysis and optimization of electrode morphology evolution in direct-ammonia solid oxide fuel cells", Energy Conversion and Management, Vol. 318, 2024, pp. 118864, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118864.
4. B. Sun, Y. Xu, Y. Liu, Y. Ya, X. Cheng, Y. Quan, H. Ding, and J. Xie, "Numerical design and evaluation of ammonia fueled solid oxide fuel cell (SOFC) power systems with different integration architecture: efficiency, power density and thermal safety", Energy Conversion and Management, Vol. 298, 2023, pp. 117804, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117804.
5. P. A. Duong, B. Ryu, J. Jung, and H. Kang, "Thermal evaluation of a novel integrated system based on solid oxide fuel cells and combined heat and power production using ammonia as fuel", Applied Sciences, Vol. 12, No. 4, 2022, pp. 6287, doi: https://doi.org/10.3390/app12126287.
6. K. Selvam, Y. Komatsu, A. Sciazko, S. Kaneko, and N. Shikazono, "Thermodynamic analysis of 100% system fuel utilization solid oxide fuel cell (SOFC) system fueled with ammonia", Energy Conversion and Management, Vol. 249, 2021, pp. 114839, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114839.
7. S. H. Jensen, C. Graves, M. Chen, J. B. Hansen, and X. Sun, "Characterization of a planar solid oxide cell stack operated at elevated pressure", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 163, No. 14, 2016, pp. F1596-F1604, doi: https://doi.org/10.1149/2.1171614jes.
8. M. Tomberg, M. P. Heddrich, M. Metten, S. A. Ansar, and K. A. Friedrich, "Operation of a solid oxide fuel cell reactor with multiple stacks in a pressured system with fuel gas recirculation", Energy Technology, Vol. 10, No. 4, 2022, pp. 2101075, doi: https://doi.org/10.1002/ente.202101075.
9. S. H. Jensen, X. Sun, S. D. Ebbesen, and M. Chen, "Pressurized operation of a planar solid oxide cell stack", Fuel Cells, Vol. 16, No. 2, 2016, pp. 205-218, doi: https://doi.org/10.1002/fuce.201500180.
10. H. J. K. Shabbani, M. R. Othman, S. K. Al-Janabi, A. R. Barron, and Z. Helwani, "H_2 purification employing pressure swing adsorption process: parametric and bibliometric review", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 50, No. Part A, 2024, pp. 674-699, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.069.
11. S. Ristig, M. Poschmann, J. Folke, O. Gómez-Cápiro, Z. Chen, N. Sanchez-Bastardo, R. Schlögl, S. Heumann, and H. Ruland, "Ammonia decomposition in the process chain for a renewable hydrogen supply", Chemie Ingenieur Technik, Vol. 94, No. 10, 2022, pp. 1413-1425, doi: https://doi.org/10.1002/cite.202200003.