

에너지 보존 기반 저위발열량 운전을 통한 연료전지 시스템 순 효율 최적화

박규형 · 양권우 · 박준범 · 양준호 · 엄석기[†]

한양대학교 기계공학부

Net Efficiency Optimization of a Fuel Cell System Through Energy Conservation-Based Lower Heating Value Operation

KYUHYUNG PARK, KWONWOO YANG, JUNBEOM PARK, JUNHO YANG, SUKKEE UM[†]

Division of Mechanical Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

[†]Corresponding author :
sukkeeum@hanyang.ac.kr

Received 28 July, 2026
Revised 13 August, 2026
Accepted 13 August, 2026

Abstract >> Physics-based, reduced-order fuel cell system models are developed to optimize net efficiency through energy-conservation-based heating-value prediction. The stack model predicts cell voltage, gross power, and outlet water state, while the auxiliary models calculate parasitic power. The heating value is determined from an energy conservation analysis. The numerical models are validated against published experimental data and show good agreement, with relative errors of 1.9% and 4.7% for the estimated stack and system power, respectively. Results show that the proposed lower heating value (LHV) strategy maintains saturated outlet gas without liquid-water formation. In contrast, the baseline strategy with fixed inlet humidity induces liquid-water formation above 0.6 A/cm² and increases both the heating-value input and cooling demand. Therefore, the proposed strategy achieves higher net system efficiency in the high-current-density region. Furthermore, a quasi-steady analysis using a representative vehicular load profile predicts a maximum net efficiency improvement of 9.3%. These results provide a physical basis for energy-efficient LHV operation of vehicular fuel cell systems.

Key words : Fuel cell system(연료전지 시스템), Lower heating value(저위발열량), Net efficiency(순 효율), Energy optimization(에너지 최적화), Energy conservation-based(에너지 보존 기반)

1. 서 론

고분자 전해질막 연료전지 시스템은 수소의 화학 에너지를 전기에너지로 직접 변환하므로 높은 효율

과 친환경성을 갖는다. 그러나, 실제 시스템의 효율은 연료전지 스택의 발전 성능뿐 아니라 공기압축기와 냉각수 펌프 등 보조기기(balance-of-plant, BOP)의 기생전력에 의해 결정된다. Fig. 1과 같이 차량용

연료전지 시스템은 수소 공급계와 공기 공급계 및 열관리계가 상호 연계된 복합 시스템으로 구성된다. 특히, 공기압축기와 냉각수 펌프는 스택의 반응물 공급과 운전온도 유지를 담당하지만 시스템 순 출력을 감소시킨다. 따라서 시스템 순 효율을 향상시키기 위해서는 스택의 전기화학 및 열적 거동과 BOP의 에너지 소비를 함께 예측할 수 있는 물리 기반 모델이 필요하다^{1,2)}.

기존 연구들은 연료전지 스택과 BOP를 결합한 시스템 모델을 통해 운전조건에 따른 출력과 효율을 분석해 왔다³⁾. 그러나 상당수 연구는 실험 기반 성능 맵을 적용⁴⁾하므로 운전조건에 따른 에너지 손실을 물리적으로 설명하는 데 한계가 있다. 또한, 연료전지 효율은 일반적으로 수소의 저위발열량(lower heating value, LHV) 또는 고위발열량(higher heating value, HHV)을 기준으로 계산된다. 이 과정에서 실제 출구에서 발생하는 수증기와 액체 물의 비율을 고려하지 않고 LHV 또는 HHV를 고정된 값으로 적용하는 경우⁵⁾가 많다. 따라서, 생성수의 상변화에 따른 잠열과 실제 냉각 요구량이 효율 평가에 충분히 반영되지 않는 한계가 있다.

본 연구에서는 연료전지 스택, 공기압축기 및 냉

각수 펌프의 물리 기반 차수축소모델(reduced-order model, ROM)을 개발하고 에너지 보존 관계를 이용하여 실제 운전 발열량을 계산하였다. 또한, 출구에서 액체 물이 발생하지 않고 상대습도 100%를 유지하는 저위발열량(LHV) 운전조건을 도출하였다. 제안된 운전전략과 입구 상대습도를 고정하는 기존 운전전략을 비교하여 스택 출력, BOP 기생전력 및 시스템 순 효율의 변화를 분석하였다. 이를 통해 생성수의 열역학적 상태를 고려한 저위발열량 운전이 연료전지 시스템의 순 효율 최적화에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 모델 개발

Fig. 2는 연료전지 스택 ROM에서 시스템 순 효율 계산까지의 연구 절차를 나타낸다. 먼저, LHV 운전조건에서 스택 내부의 열 및 물질전달을 해석하고 채널 출구의 액체 물 발생량을 예측하였다. 이후, 에너지 보존 기반 발열량과 셀 전압을 계산하였다. 스택 모델은 공기압축기와 냉각수 펌프 모델에 연계되며, 각 BOP의 기생전력을 반영하여 연료전지 시스템 순 효율을 산정하였다.

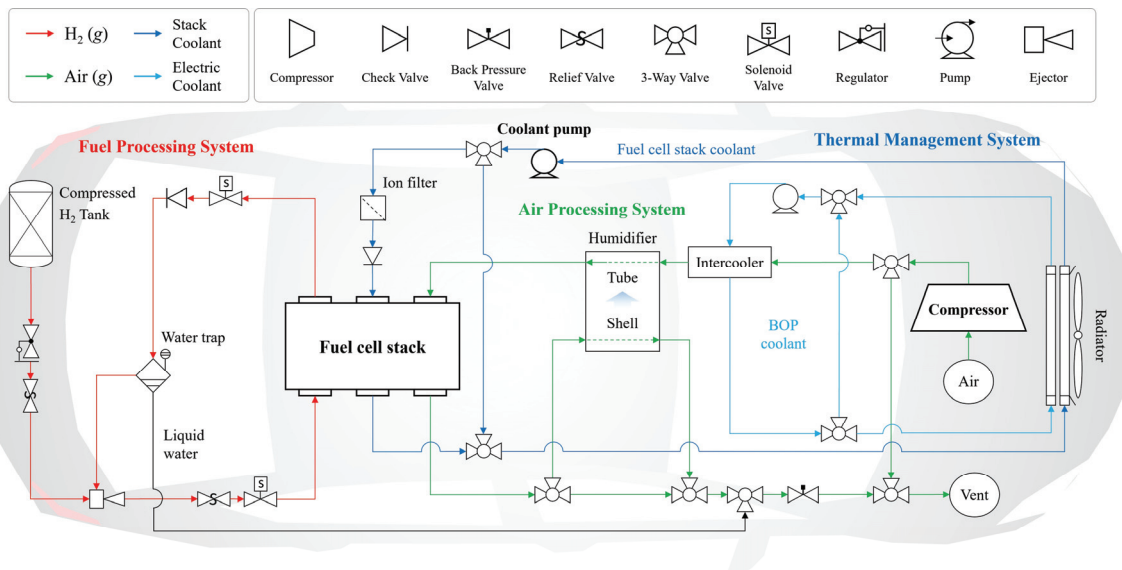


Fig. 1. Fuel cell system piping and instrumentation diagram for vehicular application

Fig. 3은 수소 공급계, 공기 공급계 및 열관리계로 구성된 연료전지 시스템의 주요 구성요소를 나타낸다. 본 연구에서는 시스템의 에너지 획득과 손실에 직접적인 영향을 미치는 연료전지 스택, 공기압축기, 및 냉각수 펌프를 주요 모델링 대상으로 선정하였다. 연료전지 스택은 수소의 화학에너지를 전기에너지로 변환하며, 공기압축기와 냉각수 펌프는 각각 반응 공기 공급과 스택 열관리를 위해 전력을 소비한다. 각 BOP 효율 및 변수에 대한 정보는 Table 1에 기술하였다.

2.1 연료전지 스택

연료전지 스택 ROM에는 다음과 같은 가정을 적용하였다.

- 연료전지 스택은 정상상태로 운전된다.
- 스택 내부의 전달현상은 채널 길이 방향과 막 전극접합체 두께 방향을 고려한 준 2차원으로 표현된다.
- 일정한 전류밀도 조건에서 전기화학 반응에 따른 물 및 열 생성물은 채널 길이 방향으로 균일하다.
- 스택 외부로의 열손실은 무시하며 발생한 열은

Table 1. Reference parameters of fuel cell system modeling

Parameter	Value	Unit
Fuel cell number	370 ⁽⁸⁾	-
Fuel cell active area	237 ⁽⁸⁾	cm ²
Coolant channel inlet temperature	338	K
Coolant temperature difference	10	K
Anode stoichiometry ratio	1.5	-
Cathode stoichiometry ratio	2.0	-
Compressor rotational speed	100,000 ⁽⁶⁾	rpm
Coolant pump efficiency	0.55 ⁽⁶⁾	-

애노드, 캐소드 및 냉각수 채널로 모두 전달된다.

- 제안된 LHV 운전조건에서는 채널出口的 생성수가 액체상 없이 모두 수증기로 배출되며 출구 상대습도는 100%에 도달한다.
- 차량 부하 프로파일은 각 시점의 요구 출력에 대응하는 정상상태 해를 연속적으로 계산하는 준정상상태 방식으로 해석한다.

본 연료전지 스택은 채널 길이 방향의 열 및 물질 전달과 막 전극 접합체 두께 방향의 전달현상을 고려하는 준 2차원 ROM으로 구성하였다. 주어진 전류밀도에서 반응물 소비량과 생성수 발생량을 계산하고, 막 수분함량과 채널出口的 액체 포화도를 예측하였다. 셀 전압은 다음과 같이 계산하였다¹⁾.

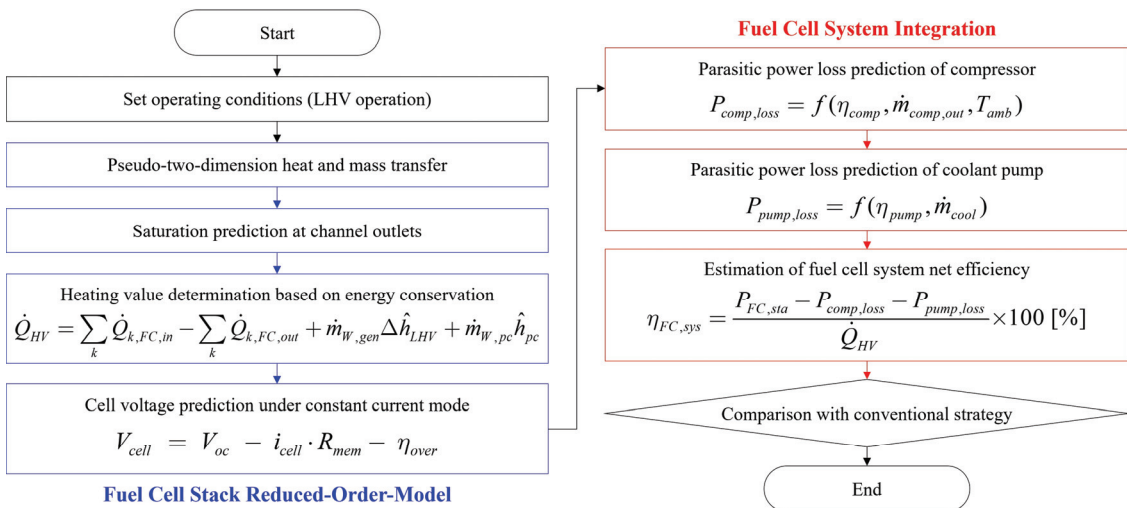


Fig. 2. Research flow chart from fuel cell stack reduced-order-model to fuel cell system integration

$$V_{cell} = V_{oc} - i_{cell} \cdot R_{mem} - \eta_{over} \quad (1)$$

여기서 V_{cell} 는 셀전압, V_{oc} 는 개회로전압, R_{mem} 은 막 저항이다. η_{over} 는 캐소드 과전압을 의미한다. 애노드의 전기화학 반응속도는 캐소드보다 충분히 빠르다고 가정하여 애노드 과전압은 무시하였다.

막 저항은 막 두께 방향의 국부 이온저항을 적분하여 계산하였다¹⁾.

$$R_{mem} = \int_0^{t_{mem}} \frac{dx}{\sigma_{ion}(\lambda)} \quad (2)$$

$$\sigma_{ion} = (0.5139\lambda - 0.326) \cdot \exp\left[1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (3)$$

여기서 t_{mem} 은 막 두께, λ 는 막 수분함량이다. 막 수분함량이 증가하면 이온전도도 σ_{ion} 가 증가하므로 옴 손실이 감소한다. 캐소드 과전압은 산소 농도와 액체 물 발생에 따른 반응면적 감소를 고려하여 다

음과 같이 계산하였다¹⁾.

$$\eta_{over} = \frac{RT}{0.5F} \cdot \ln\left(\frac{i_{cell}}{i_0 p_c} \cdot \frac{1 - y_{liq}}{y_{O_2}}\right) \quad (4)$$

여기서 i_0 는 교환전류밀도, p_c 는 캐소드 압력이다. y_{O_2} 와 y_{liq} 는 각각 반응면의 산소 물분율과 액체 물 분분율이다. 최종 스택 총 출력은 다음 식으로 계산하였다.

$$P_{FC,sta} = i_{cell} A_{rx} V_{cell} N_{cell} \quad (5)$$

여기서 A_{rx} 는 단위 셀의 활성면적, N_{cell} 은 스택의 셀 개수이다.

2.2 공기 압축기

공기압축기는 외부 공기를 스택 요구 압력까지 압축하여 캐소드에 공급한다. 압축기 출구 유량은 캐소드 산소 요구량을 만족하도록 결정하였다. 압축기 기

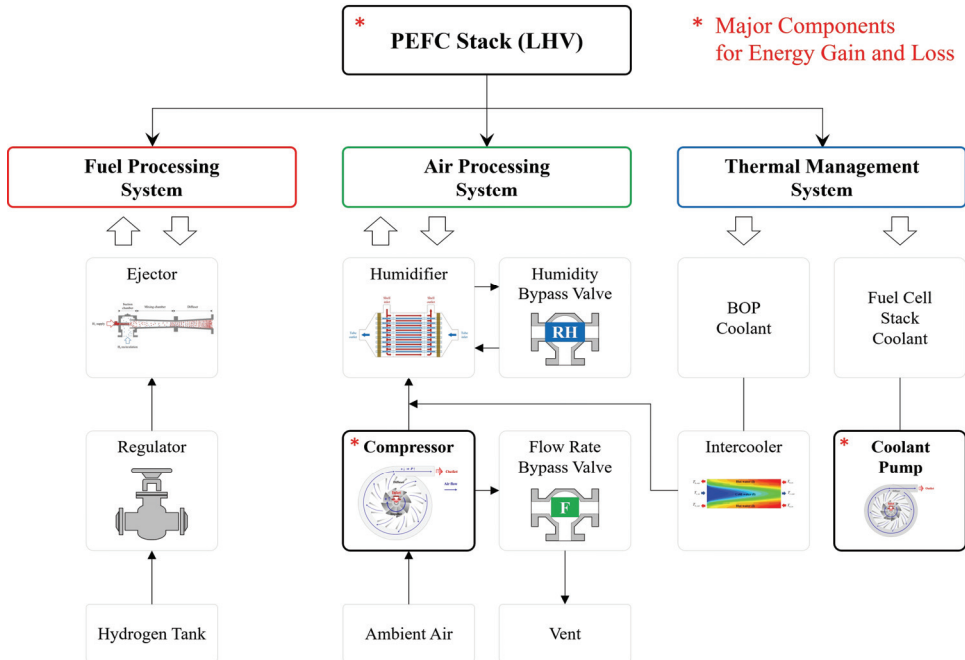


Fig. 3. Major components for energy gain and loss with schematics of fuel cell system heat and mass transfer

생전력은 등엔트로피 압축 관계를 이용하여 다음과 같이 계산하였다⁶⁾.

$$P_{comp,loss} = \frac{\dot{m}_{comp} c_p T_{comp,in}}{\eta_{comp}} \left[\left(\frac{P_{comp,out}}{P_{comp,in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (6)$$

여기서 $\dot{m}_{comp}$ 는 압축기 공기 질량유량, c_p 와 γ 는 공기의 정압비열과 비열비이다. $T_{comp,in}$ 은 압축기 입구온도, η_{comp} 는 등엔트로피 효율로 압축기 공기의 질량유량과 임펠러 회전속도에 관한 식을 이용하여 계산된다⁶⁾. 압력비와 공기유량이 증가하면 압축기 기생전력이 증가한다. 반면, 압축효율이 증가하면 동일한 공기 공급조건에서 요구동력이 감소한다.

2.3 냉각수 펌프

냉각수 펌프는 스택에서 발생한 열을 제거하기 위해 냉각수를 순환시킨다. 요구 냉각수 질량유량은 스택에서 냉각수로 전달되는 열량과 설정된 냉각수 온도차를 이용하여 계산하였다⁶⁾.

$$\dot{Q}_{cool} = \dot{m}_{cool} c_{p,cool} \Delta T_{cool} \quad (7)$$

여기서 $\dot{Q}_{cool}$ 은 냉각수로 전달되는 열량이며, ΔT_{cool} 은 냉각수 입구와 출구의 온도차이다. 냉각수 펌프 기생전력은 냉각 채널의 마찰 압력손실을 고려하여 다음과 같이 계산하였다⁶⁾.

$$P_{pump,loss} = \frac{\dot{m}_{cool}}{\rho_{cool} \eta_{pump}} \left(\frac{64}{Re_{cool}} \cdot \frac{\rho_{cool} v_{cool}^2}{2} \cdot \frac{L_{ch}}{d_h} \right) \quad (8)$$

여기서 ρ_{cool} 은 냉각수 밀도, η_{pump} 는 펌프 효율, Re_{cool} , v_{cool} , L_{ch} , d_h 는 각각 냉각수 레이놀즈수와 유속 및 채널 길이와 수력직경이다. 전류밀도가 증가하면 스택 발열량이 증가하므로 설정된 냉각수 온도차를 유지하기 위한 유량과 펌프 기생전력이 함께 증

가한다.

2.4 에너지 보존 기반 발열량

기존 연료전지 시스템 효율 계산에서는 수소의 LHV 또는 HHV를 고정된 에너지 입력값으로 적용한다. 그러나, 실제 발열량은 출구 생성수의 상에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 연료전지 입·출구의 엔탈피 유량과 생성수의 상변화를 고려하여 총 발열량을 다음과 같이 계산하였다⁶⁾.

$$\dot{Q}_{HV} = \sum_k \Delta \dot{Q}_{k,FC} + \dot{m}_{W,gen} \Delta \hat{h}_{LHV} + \dot{m}_{W,pc} \hat{h}_{pc} \quad (9)$$

$$\Delta \dot{Q}_{k,FC} = \dot{Q}_{k,FC,in} - \dot{Q}_{k,FC,out} \quad (10)$$

여기서 k 는 애노드와 캐소드의 반응물 및 생성물 성분을 의미한다. 첫 번째 항은 연료전지 입·출구 유체의 에너지 흐름 차이를 나타낸다. 두 번째 항은 수증기 상태의 생성수 형성에 따른 LHV 기준의 화학에너지이다. 세 번째 항은 생성수의 응결에 따른 잠열을 나타낸다. $\dot{m}_{W,pc}$ 는 상변화에 의해 발생한 액체 물 유량이며, $\hat{h}_{pc}$ 는 물의 상변화 잠열이다.

상변화에 의해 발생하는 액체 물 유량은 기존 상분리 물 전달 모델을 이용하여 산정하였다^{6,7)}. 먼저 전기화학 반응으로 생성된 물을 물 전달계수에 따라 애노드와 캐소드 채널에 분배하고, 각 채널의 온도에 대응하는 포화 수증기 농도를 계산하였다. 이후 채널 내 전체 수분 농도가 포화농도를 초과하는 조건에서 상분리 관계식을 채널 출구에 적용하여 액체 포화도를 예측하였다. 예측된 애노드와 캐소드 출구의 액체 포화도로부터 각 채널의 액체 물 질량유량을 산정한 후 이를 합산하여 $\dot{m}_{W,pc}$ 를 계산하였다. 출구에서 액체 물이 발생하지 않으면 $\dot{m}_{W,pc} = 0$ 이므로 발열량은 LHV 기준과 일치한다. 반면, 출구에서 생성수가 응축되면 잠열 항이 증가하며 발열량은 LHV에서 HHV 방향으로 증가한다. 따라서 출구 상대습도 100%를 유지하면서 액체 물이 발생하지 않는 조건을 본 연

구의 LHV 운전으로 정의하였다.

계산된 발열량은 전압 단위로 변환하여 셀 전압과 직접 비교할 수 있다⁷⁾.

$$V_{HV} = \frac{\dot{Q}_{HV}}{i_{cell} A_{rx} N_{cell}} \quad (11)$$

여기서 V_{HV} 는 발열량 등가전압이다. 최종 연료전지 시스템 순 효율은 스택 총 출력에서 압축기와 냉각수 펌프의 기생전력을 차감하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\eta_{FC,sys} = \frac{P_{FC,sta} - P_{comp,loss} - P_{pump,loss}}{\dot{Q}_{HV}} \times 100 [\%] \quad (12)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 모델 검증

Fig. 4는 개발된 모델의 연료전지 스택 총 출력과 시스템 순 출력을 실험 결과⁸⁾와 비교한 것이다. 전류밀도가 증가함에 따라 연료전지 스택 총 출력($P_{FC,sta}$)과 시스템 순 출력($P_{FC,sys}$)이 모두 증가하였다. 모델은 전체 전류밀도 범위에서 실험 결과의 증가 경향과 출력 수준을 예측하였다. 특히 스택 총 출력뿐만 아니라 BOP 기생전력을 차감한 시스템 순

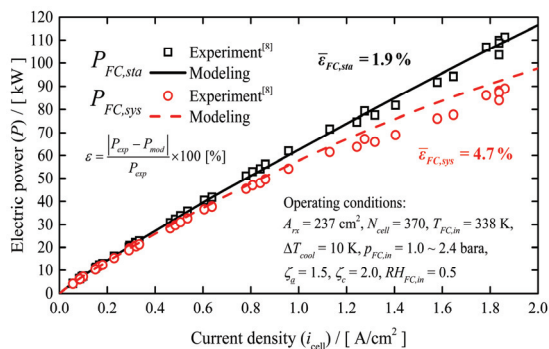


Fig. 4. Experimental validation of the predicted gross fuel cell stack power and net system power

출력도 실험 결과와 평균 상대 오차가 각각 1.9%, 4.7%로 유사한 경향을 나타냈다. 각각 고전류밀도 영역에서 일부 편차가 나타났으나 모델은 차량용 연료전지 시스템의 출력 특성을 전반적으로 재현하였다. 따라서 개발된 물리 기반 ROM은 운전전략에 따른 스택 출력과 BOP 소비전력 및 시스템 효율을 비교하는 데 적용할 수 있다.

3.2 저위발열량 에너지 효율 특성

Fig. 5는 입구 상대습도를 50%로 고정한 기존 전략과 출구 상대습도를 100%로 유지한 제안 전략의 V_{HV} 와 V_{cell} 을 비교한 것이다. 기존 전략에서는 $i_{cell} = 0.6 \text{ A/cm}^2$ 까지 액체 물이 발생하지 않으므로 V_{HV} 가 LHV 경계와 일치하였다. 그러나 $i_{cell} > 0.6 \text{ A/cm}^2$ 에서는 생성수의 증가로 액체 물이 발생하였다. 이에 따라 응축 잠열이 총 발열량에 포함되면서 V_{HV} 가 LHV 경계에서 HHV 경계 방향으로 증가하였다. 반면 제안 전략은 출구를 액체 물이 발생하기 직전의 포화 수증기 상태로 유지하므로 전체 전류밀도 범위에서 V_{HV} 가 LHV 경계와 일치하였다. 두 전략의 V_{cell} 은 저전류밀도 영역에서 거의 동일하였다. 액체 물이 발생한 이후에는 기존 전략의 셀 전압이 제안 전략보다 다소 높게 나타났다. 기존 전략에서 형성된 액체 물은 막 수분함량을 증가시키며 수소 이온전도도를 향상시킨다. 따라서 막의 옴 저항이 감소하고 기존 전략의 셀 전압이 상대적으로 높게 나타났다.

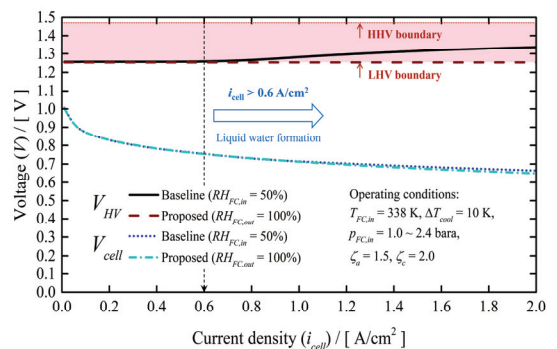


Fig. 5. Comparison of heating value equivalent voltage and cell voltage between the baseline strategy and the proposed strategy

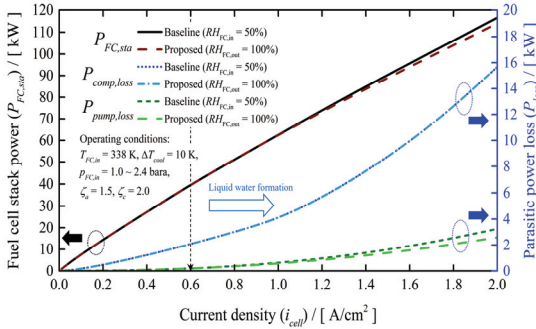


Fig. 6. Comparison of gross fuel cell stack power, compressor parasitic power, and coolant pump parasitic power between the baseline and proposed strategies

이 결과는 제안 전략이 액체 물 형성을 방지하는 과정에서 스택 발전성능이 소폭 감소할 수 있음을 보여준다. 그러나 시스템 효율은 스택 출력뿐만 아니라 실제 발열량과 BOP 기생전력을 함께 고려하여 평가해야 한다.

Fig. 6은 두 운전전략의 스택 총 출력과 공기압축기 및 냉각수 펌프의 기생전력을 비교한 것이다. $i_{cell} = 0.6 \text{ A/cm}^2$ 이하에서는 두 전략의 스택 출력이 거의 동일하였다. 액체 물이 발생한 이후에는 막 수화 증가로 기존 전략의 $P_{FC,sta}$ 이 제안 전략보다 소폭 높게 나타났다. $P_{comp,loss}$ 은 두 전략에서 거의 동일하였다. 두 전략에 동일한 전류밀도, 운전 압력, 그리고 당량비를 적용하였으므로 압축기 운전조건이 동일하기 때문이다. 공기압축기와 냉각수 펌프의 기생전력은 전류밀도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하였다. 특히 공기압축기는 전체 BOP 소비전력에서 가장 큰 비중을 차지한다. 기존 전략의 $P_{pump,loss}$ 은 액체 물이 발생한 이후 제안 전략보다 높게 나타났다. 생성수의 응축에 따른 잠열이 냉각 요구량을 증가시키므로 설정된 냉각수 온도차를 유지하기 위해 더 많은 냉각수 유량이 요구되기 때문이다. 따라서 LHV 운전은 스택 총 출력이 소폭 감소하지만 액체 물 형성에 따른 추가 냉각부하와 냉각수 펌프 기생전력을 줄일 수 있다.

Fig. 7은 두 운전전략의 $\eta_{FC,sta}$ 과 $\eta_{FC,sys}$ 을 비교한 것이다. 모든 효율은 전류밀도가 증가함에 따라 감소하였다. 이는 전류밀도가 증가하면 막의 옴 손실과

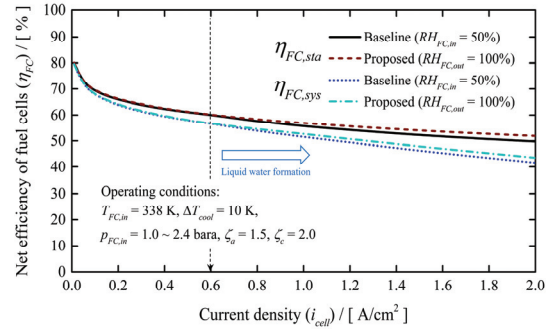


Fig. 7. Comparison of fuel cell stack efficiency and net system efficiency between the baseline and proposed strategies

캐소드 과전압이 증가하여 셀 전압이 감소하며, 압축기와 냉각수 펌프의 기생전력도 증가하기 때문이다. 액체 물이 발생하지 않는 $i_{cell} < 0.6 \text{ A/cm}^2$ 영역에서는 두 전략의 효율 차이가 크지 않았다. 그러나 액체 물이 발생한 이후에는 제안 전략의 스택 효율과 시스템 순 효율이 기존 전략보다 높게 나타났으며, 전류밀도가 증가할수록 효율 차이가 확대되었다. 이는 제안 전략의 스택 총 출력은 기존 전략보다 소폭 낮지만 발열량의 분모가 LHV 경계로 유지되기 때문이다. 또한, 응축 잠열에 따른 냉각 요구량과 펌프 기생전력이 감소한다. 따라서 제안 전략의 발열량 및 기생전력 감소 효과가 스택 출력 감소보다 크게 작용하였다. 해당 결과는 연료전지 시스템의 효율 최적화에서 스택 출력의 단독 증가보다 생성수의 열역학적 상태와 BOP 에너지 소비를 함께 고려하는 접근이 중요함을 보여준다.

3.3 주행 부하 기반 시스템 효율 개선

Fig. 8은 대표적인 600초 차량 부하 프로파일⁸⁾에 연료전지 스택 모델을 적용한 결과를 나타낸다. 스택 요구출력은 주행 부하에 따라 시간별로 변화하였으며 최대 요구출력은 약 112 kW로 나타났다. 각 시간의 스택 출력에 대응하는 정상상태 운전 점을 이용하여 기존 전략과 제안 전략의 시스템 순 효율 차이 ($\Delta\eta_{FC,sys}$)를 계산하였다. 저출력 운전영역에서는 생성수 발생량과 액체 물 형성이 제한적이므로 두 전

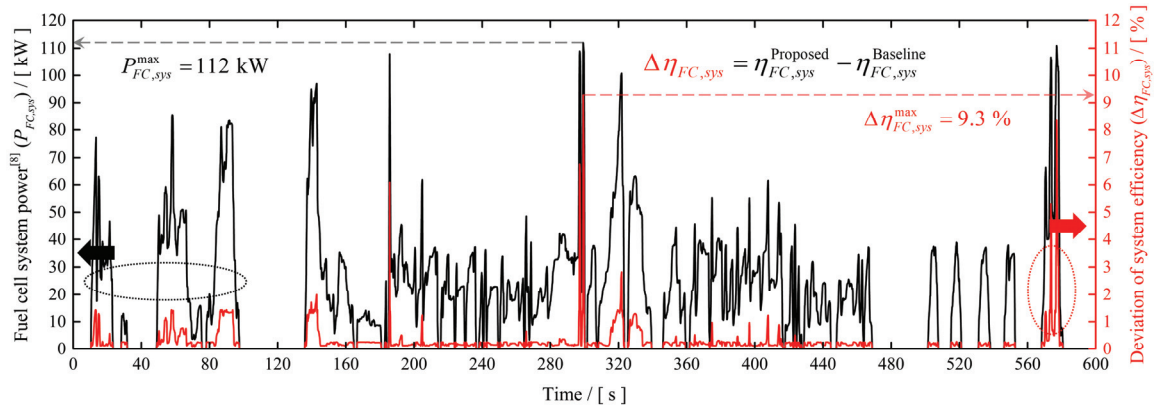


Fig. 8. Quasi-steady prediction of net system efficiency improvement under a representative vehicular load profile

략의 효율 차이가 작게 나타났다. 반면 출력이 증가하면 생성수의 응축과 냉각부하가 증가하므로 제안 전략의 효율 개선 효과가 확대되었다. 특히 급격한 고출력 요구가 발생하는 구간에서는 최대 9.3%의 차이를 보였다. 따라서 LHV 운전은 액체 물 발생 가능성이 높은 고부하 운전영역에서 더욱 효과적인 것으로 판단된다.

4. 결론

- 1) 개발된 물리 기반 ROM은 전류밀도에 따른 스택 총 출력과 시스템 순 출력의 실험적 변화 경향을 적절하게 재현하였다. 따라서 운전전략에 따른 연료전지 시스템의 에너지 획득과 손실을 정량적으로 비교할 수 있는 모델 타당성을 확보하였다.
- 2) 입구 상대습도를 50%로 고정한 기존 전략에서는 약 $i_{cell} = 0.6 \text{ A/cm}^2$ 이상에서 액체 물이 발생하였다. 이에 따라 응축 잠열이 총 발열량에 포함되면서 발열량 등가전압이 LHV 경계에서 HHV 경계 방향으로 증가하였다. 반면 출구 상대습도 100%와 액체 물 미발생 조건을 만족하는 제안 전략은 전체 전류밀도 범위에서 LHV와 일치하는 발열량 기준을 유지하였다.
- 3) 액체 물 발생 이후 기존 전략은 막 수분함량 증가에 따른 이온전도도 향상으로 제안 전략보다

높은 스택 총 출력을 나타냈다. 그러나 생성수 응축에 따른 잠열은 냉각 요구량과 냉각수 펌프 기생전력을 증가시켰다. 공기압축기 기생전력은 두 전략에서 유사하였으며, 제안 전략은 발열량과 냉각수 펌프 소비전력의 감소를 통해 기존 전략보다 높은 스택 효율과 시스템 순 효율을 나타냈다.

- 4) 주행 부하 프로파일을 이용한 준정상상태 분석에서 제안 전략의 효율 개선 효과는 액체 물 발생 가능성이 높은 고부하 영역에서 크게 나타났다. 최대 시스템 순 효율 향상은 약 9.3%로 예측되었다. 따라서 에너지 보존 기반 저위발열량 운전은 차량용 연료전지 시스템의 고출력 영역에서 에너지 손실을 줄일 수 있는 효과적인 운전전략으로 판단된다.

종합하면 연료전지 시스템 효율 최적화를 위해서는 스택 출력의 증가뿐만 아니라 출구 생성수의 상상태와 응축 잠열 및 BOP 기생전력을 함께 고려해야 한다. 다만 본 연구는 정상상태 기반의 ROM을 사용하였으므로 급격한 부하 변화에 따른 액체 물 축적과 막 수화 지연 및 BOP 응답지연을 직접적으로 해석하는 데 한계가 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 고정된 LHV 또는 HHV를 적용하던 기존 방식에서 벗어나 실제 출구 상태에 기반한 발열량과 시스템 효율을 일관된 에너지 보존 관계로 평가하였

다. 따라서 개발된 모델은 동적 제어기 구현 이전 단계에서 고효율 운전목표 지도를 생성하고 공기 공급계 및 열관리계의 BOP 사양과 운전전략을 설계하기 위한 기초 자료로 활용할 수 있다.

후 기

본 연구는 신재생에너지핵심기술사업인 민군 공동 활용을 위한 정격 100 kW급 이동형 수소연료 발전기 및 확장식 수소 공급장치 개발(2480001343)과 제와 물 흐름 제어를 통한 PEMFC 성능 및 내구성 2배 이상 향상을 위한 혁신 기술 개발(2480001139) 과제와 200 kW 이상급 선박용 연료전지 파워팩 개발(2480001145) 과제의 일환으로 수행되었다.

References

1. T. E. Springer, T. A. Zawodzinski, and S. Gottesfeld, "Polymer electrolyte fuel cell model", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 138, No. 8, 1991, pp. 2334-2342, doi: <https://doi.org/10.1149/1.2085971>.
2. S. Um, C. Y. Wang, and K. S. Chen, "Computational fluid dynamics modeling of proton exchange membrane fuel cells", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 147, No. 12, 2000, pp. 4485-4493, doi: <https://doi.org/10.1149/1.1394090>.
3. K. Park, J. Oh, S. Park, J. Joo, K. Yang, J. Park, and S. Um, "Thermodynamic approach to optimal water management for fuel cell electric vehicles", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 36, No. 1, 2025, pp. 18-30, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.1.18>.
4. T. Bui, J. Y. Park, D. Lee, Y. Bae, Y. Kim, and S. M. Lee, "Fuel cell-based tri-generation system operating strategy for horticulture", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 6, 2024, pp. 690-696, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.6.690>.
5. J. Sery and P. Leduc, "Fuel cell behavior and energy balance on board a Hyundai Nexa", *International Journal of Engine Research*, Vol. 23, No. 5, 2022, pp. 709-720, doi: <https://doi.org/10.1177/14680874211059046>.
6. K. Park, S. Park, W. Sohn, and S. Um, "Prognostic humidification management for energy-optimal vehicular fuel cell systems under lower heating value conditions", *Energy Conversion and Management*, Vol. 367, 2026, pp. 121894, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2026.121894>.
7. S. Park, J. Oh, K. Lee, and S. Um, "Effects of water evaporation and condensation on the operating heating value and system efficiency of polymer electrolyte membrane fuel cells: temperature-dependent phase separation modeling", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 516, 2025, pp. 163864, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.163864>.
8. H. Lohse-Busch, M. Duoba, K. Stutenberg, S. Iliev, M. Kern, B. Richards, M. Christenson, and A. Loisel-Lapointe, "Technology assessment of a fuel cell vehicle: 2017 Toyota Mirai", Report No. ANL/ESD-18/12, Argonne National Laboratory, USA, 2018, pp. 1-81, doi: <https://doi.org/10.2172/1463251>.