

# 퍼지 제어를 이용한 수소 상용차 전력 분배 시뮬레이션

한재수<sup>1</sup> · 김영현<sup>1</sup> · 우종빈<sup>1</sup> · 유상석<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 일반대학원 기계공학과, <sup>2</sup>충남대학교 기계공학부

## Commercial Hydrogen Vehicle Power Distribution Simulation Using Fuzzy Control

JAESU HAN<sup>1</sup>, YOUNGHYEON KIM<sup>1</sup>, JONGBIN WOO<sup>1</sup>, SANGSEOK YU<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University Graduate School, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University College of Engineering, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

†Corresponding author :  
sangseok@cnu.ac.kr

Received 4 July, 2023  
Revised 17 August, 2023  
Accepted 29 August, 2023

**Abstract >>** There is no clear standard for estimating the power distribution of fuel cells and batteries to meet the required power in hydrogen electric vehicles. In this study, a hydrogen electric vehicle simulation model equipped with a vehicle electric component model including a fuel cell system was built, and a power distribution strategy between fuel cells and batteries was established. The power distribution model was operated through two control strategies using step control and fuzzy control, and each control strategy was evaluated through data derived from the simulation. As a result of evaluation through the behavior data of state of charge, fuel cell current and balance of plant, fuzzy control was evaluated as a proper strategy in terms of control stability and durability.

**Key words :** Power distribution(전력 분배), Control strategy(제어 전략), Hydrogen electric vehicle(수소전기차), Fuel cell system(연료전지 시스템), Fuzzy control(퍼지 제어)

### Nomenclature

$A$ : 면적 ( $cm^2$ )

$A_i$ : 열전달 접촉 면적 ( $cm^2$ )

$a$ : 음파 속도 ( $m/s$ )

$C_p$ : 냉각수 정압 비열 ( $kJ/kg \cdot K$ )

$D_f$ : 수력 직경 ( $m$ )

$f$ : 마찰 계수 (–)

$\Delta h$ : 이상적 엔탈피 ( $J/kg$ )

$\Delta h_i$ : 임펠러 및 디퓨저 입사 손실 ( $J/kg$ )

$\Delta h_f$ : 마찰 손실 ( $J/kg$ )

$h$ : 열전달 계수 ( $J/m^2 \cdot s \cdot K$ )

$h_c$ : 냉각수 측 열전달 계수 ( $J/m^2 \cdot s \cdot K$ )

$h_o$ : 공기 측 열전달 계수 ( $J/m^2 \cdot s \cdot K$ )

$J$ :	관성 모멘트 ( $kg \cdot m^2$ )
$k_t$ :	열전도율 ( $W/m \cdot K$ )
$L_c$ :	덕트 길이 ( $m$ )
$L_f$ :	채널 길이 ( $m$ )
$\dot{m}$ :	질량 유량 ( $m/s$ )
$\dot{m}_{th}$ :	스로틀 질량 유량 ( $m/s$ )
$P_r$ :	입출구 압력비 (-)
$P_2$ :	출구 압력 ( $Pa$ )
$T_{cool,out}$ :	스택 출구 온도 ( $K$ )
$T_{stack}$ :	스택 온도 ( $K$ )
$T_{cool}$ :	냉각수 온도 ( $K$ )
$T_1$ :	입구 온도 ( $K$ )
$T_2$ :	출구 온도 ( $K$ )
$t_c$ :	라디에이터 두께 ( $m$ )
$U$ :	총 열전달 계수 ( $W/m^2 \cdot K$ )
$V_p$ :	매니폴드 부피 ( $m^3$ )
$W_{tip}$ :	접선 팁 속도 ( $m/s$ )
$W_i$ :	입사 속도 ( $m/s$ )
$W_f$ :	플래넘 속도 ( $m/s$ )
$K$ :	비열비 (-)
$\sigma$ :	슬립 계수 (-)
$\eta_c$ :	압축기 효율 (-)
$\tau_{mt}$ :	모터 토크 ( $N \cdot m$ )
$\tau_e$ :	부하 토크 ( $N \cdot m$ )
$\omega$ :	모터 속도 ( $rad/s$ )

## 1. 서론

고분자전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)는 높은 효율과 환경 친화적인 특성뿐 아니라 타 발전 시스템 대비 시간과 장소에 제약이 없는 안정성으로 인해 다양한 전력 산업군에서 각광받고 있다<sup>1,2)</sup>. 낮은 작동 온도 특성은 시동/정지 사이클이 잦은 모빌리티 분야에서 매우 유리한 작동 조건이기 때문에 차량 산업에서 PEMFC에 대한 연구가 다양한 방향으로 이루어지고 있다<sup>3,4)</sup>. 차량 산업 내 선두 기업에서는 수소 모빌리티를 유망한 미래 차량으로 선정하여 연구개발을 진행하고 있

으며, 최근에는 내연기관 차량과 대등한 수준의 성능을 보이는 수소 차량이 양산되었다는 결과도 보고되고 있다<sup>5)</sup>.

하지만 수소 모빌리티에 대한 연구를 어렵게 만드는 몇 가지 문제가 존재한다. 그중 수소 모빌리티의 양산 역사가 길지 않다는 점은 연구를 더디게 하는 대표적인 문제점이다<sup>6)</sup>. 다양한 운행 조건에서 운전된 누적 데이터가 풍부한 내연기관 차량과는 달리, 수소 모빌리티는 짧은 역사와 비례하여 성능, 내구성, 타 부품과의 인터페이스 등 주요한 데이터가 부족한 실정이다. 따라서 수소 모빌리티의 실제적인 구조, 제어 시스템 등 세부 시스템은 대표적인 모델 플랫폼이나 시뮬레이션 체계가 명확히 정의되어 있지 않다. 또한 고품가된 데이터의 가치로 인해 수소 모빌리티 시스템 전반에 대한 기밀성이 높기 때문에 문헌에서도 시스템 전반에 대한 자세한 접근이 용이하지 않다<sup>7)</sup>.

이로 인해 파생되는 문제 중 대표적인 것으로 필요 전력에 대한 연료전지와 배터리의 전력 분배 문제를 들 수 있다. 차량 동력원으로서 배터리만을 이용하는 전기차의 경우 이미 생산된 전력을 충전하여 구동에 이용하는 방식이기 때문에 차량 효율을 산정할 때 전력 생산 효율을 고려 대상에서 제외할 수 있다. 하지만 수소 모빌리티의 경우 배터리에 충전하는 전력을 차량 내에서 직접 생산하여 이용하는 방식이기 때문에 차량 효율을 산정할 때 전력 생산 효율이 필연적으로 고려되어야 한다<sup>8)</sup>.

연료전지와 배터리 사이의 전력 분배 문제는 차량 수준의 성능에 복합적으로 영향을 미칠 것으로 예상된다. 차량 수준에서는 전체적인 효율 향상을 위하여 배터리 state of charge (SOC)가 고효율인 구간에서 운전하여야 때문에, 배터리 SOC 관리를 위한 잉여전력을 생산할 필요가 있다. 뿐만 아니라 연료전지의 고전압 영역에서는 내구성 저하가 빠르게 발생하는 것으로 알려져 있기 때문에 적절한 전압 관리를 위해서는 저전류 회피 운전에 대한 필요성도 고려하여야 한다. 이처럼 차량 수준의 관리에는 연료전지 수준의 관리보다 고차원적이고 복잡한 관리 전략 수립

이 필요하다.

수소 모빌리티를 차량 수준에서 연구한 다양한 연구들은 이미 존재한다. Jahromi와 Heidary<sup>9)</sup>는 시동/정지, 공회전, 정전위 운전, 부하 변동, 고전류 운전 등을 결합하고, 일정 주행 사이클 동안 운전된 수소 모빌리티의 수명을 계산하였다. Pei와 Chen<sup>10)</sup>은 부하 사이클을 차량용 연료전지의 수명에 영향을 미치는 주요 요인 중 하나로 정의하고, 응축수 제거, 운전 온도 상승, 파라미터 최적화 등 수명을 연장할 수 있는 방안을 검토하였다. Yue 등<sup>11)</sup>은 수소 모빌리티 내 구성 예측에 입자 필터링 방법을 적용하고, 이를 기반으로 한 수명 관리 전략을 통해 연료전지 내구성을 효과적으로 개선한 연구를 보고하였다.

상기 연구들은 스택 수준의 연구에서 나아가 차량 수준의 연구를 통해 더 복잡하고 현실적인 시뮬레이션 기법과 그에 따른 통찰을 제공하고 있다. 하지만 연료전지와 배터리 간의 전력 분배 관점에서 접근하고 있지 않으며, 따라서 차량 전장품의 제어 시스템에 대한 내용이 기술되어 있지 않다. 제어 시스템은 차량 시스템 효율과 내구성에 중요한 영향을 미치는 요소 중 하나이다<sup>12,13)</sup>. 배터리 SOC는 연료전지로부터 전력을 공급받아 충/방전이 이루어지며, 높은 효율로 운전이 이루어지기 위해서는 SOC를 높은 효율 구간에서 관리하는 제어 전략을 수립하는 것이 중요하다<sup>14,15)</sup>. 연료전지의 충전과 방전에 대한 기준점 설정은 타깃으로 하는 SOC 구간에 대한 설계로 생각할 수 있다. 가장 직관적인 연료전지 전류 제어 방식은 SOC의 일정 기준을 통과한 직후에 연료전지 전류가 빠르게 변동하는 스텝 형태의 제어 방식이다. 하지만 이 방식의 경우 기준으로 설정한 SOC를 사이에 두고 연료전지에서 스텝 형태의 급격한 변동이 지속되는 헛팅 현상이 발생할 수 있다. 따라서 저전류와 고전류 사이에서의 경계선 사이에서 부드러운 전이가 발생할 수 있는 제어 기법에 대한 연구는 연료전지 내구성과 성능 향상을 위하여 매우 중요하다. 본 연구에서는 연료전지 시스템과 배터리를 탑재한 수소 모빌리티의 시뮬레이션 모델을 구축하고, 퍼지 제어를 이용한 전력 분배 전략을 수립하였다. 대

형 차량 모델 1종을 타깃 차량으로 선정하고 이에 따라 실험적으로 검증된 기존의 연구로부터 연료전지, 배터리 및 모터 모델의 사양을 설계하였다<sup>16)</sup>. 인버터 내 direct current (DC)-DC 컨버터를 이용하여 인버터 입력 전압이 모터 정격 전압을 추종하도록 설계하였다. 그리고 모터 구동과 잉여전력이 고려된 필요 전력을 제어변수로 사용하여 연료전지와 배터리 간에 분배되는 전력량을 결정하도록 에너지 관리 시스템(energy management system, EMS)을 구축하였는데, 연료전지 후단에 연결된 DC-DC 컨버터의 듀티비를 제어하여 연료전지의 출력량을 결정하기 위하여 EMS가 작동되도록 설계되었다. 상기 기술한 바와 같이 전류 제어량 사이의 부드러운 전이를 위하여 퍼지 제어를 설계하였으며, 이를 전력 변환 제어 로직에 적용하고, 결과를 조사하였다.

## 2. 수소 상용차 모델

본 연구에서는 Table 1과 같은 사양을 기준으로 차량 모델을 설계하였다. 연료전지나 배터리와 같은 전력 공급 모델, 컨버터, 인버터와 같은 전력 변환 모델, 구동 모터 모델을 제작 및 통합하여 본 시뮬레이션에 이용하였다.

### 2.1 전력 공급 모델

수소차 전력 생산 모델은 주요 발전을 담당하는

Table 1. Specification of vehicle model

	Target model	Heavy-duty vehicle
Fuel cell	Number of cells	828
	Active area	380 cm <sup>2</sup>
	Operating temperature	70 °C
Battery	Open circuit voltage	750 V
	Capacity	4.875 kWh
Motor & vehicle	Motor	Induction AC motor
	Reduction ratio	4.875
	Vehicle mass	19,000 kg

연료전지 시스템과 스택으로부터 생산된 전력을 저장하고 보조 전원을 공급하는 배터리로 구성된다. 연료전지 시스템은 운전 중 충분한 양의 전류를 공급할 수 있는 능력을 갖춘 전류원으로 작동한다. 하지만 생산하고자 하는 전력에 따라 전압이 계속 변동하기 때문에 연료전지만으로는 안정적인 전력망을 유지하기 어렵다. 반면 배터리는 양 끝단의 10-15% 이내의 범위의 SOC에서 일반적으로 나타나는 비선형 영역을 제외하면 거의 일정한 전압이 형성되어 우수한 전압원으로 작동할 수 있다. 본 연구에서는 연료전지 및 배터리 플랜트 모델에 관한 문헌들과 연구실 내 기존의 연구를 참고하여 Fig. 1과 같이 연료전지 시스템 및 배터리 모델을 구축하였다<sup>17-22)</sup>.

연료전지 시스템은 크게 스택에 수소와 공기를 공급하는 가스 공급 모델, 스택 플랜트 모델, 냉각 시스템 모델로 구성된다. 가스 공급 모델의 경우 수소와 공기의 유량을 전류밀도 입력과 화학 양론비 등 다양한 파라미터를 고려한 계산으로 제어하여 스택에 공급하도록 하였다. 이러한 작동을 위한 압축기 및 구동 모터 모델, 플레넘 및 밸브 모델을 구성하였다<sup>23)</sup>. 구동 모터의 경우 전류밀도에 따른 DC 모터 토크 방정식을 이용하였으며, 밸브 변동에 따른 차압을 이용하여 압축기 유량이 산정되도록 하였다.

$$\Delta h = \sigma W_{tip}^2 \tag{1}$$

$$\Delta h_i = \frac{W_i^2}{2} \tag{2}$$

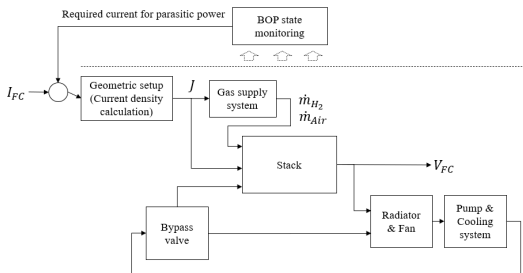


Fig. 1. Diagram of fuel cell system model

$$\Delta h_f = f \frac{L_f}{D_f} \frac{W_f^2}{2} \tag{3}$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} (\tau_{mt} - \tau_e) \tag{4}$$

$$\ddot{m} = \frac{A_c}{L_c} (P_2 - P_p) \tag{5}$$

$$\dot{P}_p = \frac{a^2}{V_p} (\dot{m} - \dot{m}_{th}) \tag{6}$$

$$P_r = \left( 1 + \frac{\eta_c \Delta h}{T_1 c_p} \right)^{\frac{K-1}{K}} \tag{7}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{T_1}{\eta_c} \left( \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right) \tag{8}$$

스택 플랜트 모델의 경우 Nernst 전압 방정식을 통해 계산된 이론적 최대 전압과 활성화 손실, 저항 손실, 물질 전달 손실 등의 요인으로 도출되는 과전압을 고려하여 구축되었다. 스택 모델에는 전기화학 반응으로 인한 손실을 시뮬레이션하기 위한 전기화학 반응 모델, 멤브레인의 전기 저항 변화를 시뮬레이션하기 위한 수분 투과 모델, 반응열의 열 관리를 위한 열전달 모델이 포함되어 있다.

$$V_{cell} = E_{Nern} - V_{loss} = E_{Nern} - (V_{act} + V_{ohm} + V_{con}) \tag{9}$$

$$E_{Nern} = 1.229 - 8.521 \cdot 10^{-4} (T_{cell} - T_{atm}) + 4.3085 \cdot 10^{-5} T_{cell} \left( \ln \left( \frac{p_{H_2}}{p_{atm}} \right) + 0.5 \ln \left( \frac{p_{O_2}}{p_{atm}} \right) \right) \tag{10}$$

$$V_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(c_{O_2}) + \xi_4 T \ln(i) \tag{11}$$

$$\lambda_i = \begin{cases} 0.043 + 17.81 a_i - 39.85 a_i^2 + 36.0 a_i^3 \\ 14 + 1.4 (a_i - 1) \end{cases} \tag{12}$$

$$\dot{m}_w = M_w \left[ n_d \frac{i}{F} - D_w \frac{(e_{v,ca} - c_{v,an})}{t_{mem}} \right] \tag{13}$$

냉각 시스템은 외부에서 타겟 온도를 설정하고 실제 온도차에 따라 시스템이 작동하도록 하였다. 스택

온도가 타겟 설정 온도를 초과하면 냉각수 펌프가 작동하며, 펌프 작동 시 냉각수를 저장하는 레저버 온도를 기준 온도로 유지하기 위하여 라디에이터와 팬이 작동되도록 하였다. 세부 부품으로는 냉각수를 순환하도록 제어하는 펌프, 흡수한 열을 차량 외부로 배출하는 라디에이터와 팬을 설계하였다. 열 관리를 위해 열전달 모델을 설계하였으며, 이에 따라 냉각수 유량을 제어하였다. 냉각수 펌프의 총 유량은 바이패스 밸브의 개도에 따라 스택과 라디에이터 쪽으로 나누어 유입되며, 스택 출구로부터 취득한 열을 방열하는 라디에이터 모델이 설계되었다.

$$Q = m C_p \Delta T \quad (14)$$

$$\dot{Q} = h A \Delta T \quad (15)$$

$$T_{cool,out} = T_{stack} + (T_{stack} - T_{cool}) \exp\left(\frac{-hA}{m C_p}\right) \quad (16)$$

$$q = UA(T_{out} - T_{in}) \quad (17)$$

$$U = \left(\frac{1}{h_c} + \frac{t_c}{k_t} + \frac{A_t}{\eta_o h_o A_o}\right)^{-1} \quad (18)$$

$$\Delta P_{fan} = A_1 Q^2 + A_2 Q \left(\frac{N}{2100}\right) + A_3 \left(\frac{N}{2100}\right)^2 \quad (19)$$

$$\Delta P_{pump} = 99.74 \left(\frac{N}{3500}\right)^2 - 0.0002983 Q^2 \quad (20)$$

$$P_{pump} = \frac{P_{pump} Q}{\eta_{pump}} \quad (21)$$

$$P_{fan} = \frac{\dot{m}_{air} c_{p,air} T_{amb} \left((p_{fan}/p_{amb})^{r-1/r} - 1\right)}{\eta_{fan}} \quad (22)$$

연료전지 스택으로부터 전력이 공급되도록 설계되었지만, 모터 부하의 경우 연료전지 전력만으로는 차량 가속 시 요구되는 전력을 감당하기 어렵다. 배터리는 저부하 구간에서 연료전지의 잉여전력을 저장해 두었다가 고부하 구간에서 보조 동력을 공급함으로써 차량 내 전장 시스템의 안정적 운영에 중추적인 역할을 담당하고 있다.

배터리 모델은 초기 설정된 전력 저장량에서 배터리의 충/방전 전류를 누적하여 전력 잔여량을 계산하도록 하였다. 이를 배터리 고유의 전력 용량으로 나누어 SOC 변화를 계산하고, 리튬 이온 전지 모델의 RC 등가회로 모델을 통해 배터리 전류 및 전압을 산정하였다<sup>21)</sup>.

$$SOC = SOC_{init} + \frac{\int I_{Bat}}{Q_{cap}} \times 100(\%) \quad (23)$$

$$I_{Bat} = I_{Conv} - I_{Req} \quad (24)$$

## 2.2 전력 변환 모델

연료전지는 출력 요구량에 의해 제어되는 EMS의 전류 지령을 입력받아 그에 따른 전압이 출력된다. 상기 기술한 바와 같이 연료전지 전압은 전류량에 따라 지속적으로 변동하기 때문에, 인버터 단으로 출력을 전달하는 전력 버스를 구성하기 위해서는 연료전지 전압을 인버터 입력 전압과 동일한 전압으로 승/강압하는 전력 변환 장치가 필요하다. 본 연구에서는 DC-DC 컨버터를 이용하여 연료전지 전압을 배터리 모델의 전압과 동일하게 변환하고, 배터리 전압이 인버터에 입력되면 인버터에서 정격 전압에 따라 이차적인 승/강압을 수행하는 모델을 구성하였다.

DC-DC 컨버터는 반도체 소자의 on/off 비율(듀티비)과 콘덴서 및 인덕터와 같은 수동 소자의 응답에 따라 전압 승/강압의 비율이 결정된다. 이때 컨버터의 정상 상태 특성뿐 아니라 과도 상태 특성까지 정확히 반영하기 위해서는 반도체 소자의 스위칭 모델과 수동 소자의 회로 모델이 포함되어야 한다. 하지만 스위칭 모델의 경우 최소 kHz 단위부터 MHz 단위의 샘플링 주파수로 모델링이 수행되어야 하는데, 컨버터의 과도 상태 응답을 모니터링하기 위하여 1 kHz로 구축된 본 모델을 수정하는 것은 시간 및 계산량 대비 효용성이 매우 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 컨버터의 정상 상태 모델을 구성하여 본 모델에 반영하였다.

$$V_{Conv} = \frac{V_{FC}}{1 - Duty} \quad (25)$$

$$I_{Conv} = (1 - Duty)I_{FC} \quad (26)$$

인버터는 컨버터로부터 DC 전력을 입력받아 3상 alternating current (AC) 전력 형태로 변환하며 모터로 변환된 전력을 전달한다. 인버터 또한 컨버터와 마찬가지로 반도체 스위칭을 이용하기 때문에 EMS에서 모터 요구 전압의 크기와 주파수 지령에 따른 AC 신호를 사인파 형태로 전달하도록 구성하였다.

$$V_{Inv} = \begin{cases} V_m \cos \theta \\ V_m \cos \left( \theta - \frac{2}{3} \pi \right) \\ V_m \cos \left( \theta + \frac{2}{3} \pi \right) \end{cases} \quad at \theta = \int \omega_e dt \quad (27)$$

### 2.3 구동 모터 모델

본 연구에서는 유도 전동기를 이용하여 수소 모빌리티의 구동력을 모사할 수 있도록 하였다. DC 모터의 경우 AC 모터에 비해 제어가 단순하지만 구조가 복잡하고, 초기 비용이 높으며, 낮은 내구성과 그로 인한 높은 유지 비용 때문에 차량용 모터로 널리 선호되지 않는다. AC 모터 중 하나인 permanent magnet synchronous motor (PMSM)가 가장 널리 이용되고 있지만 높은 비용과 공급망 불안정성의 위험이 있는 희토류 재질의 영구자석을 사용하기 때문에 최근 차량용 모터로서 PMSM의 의존도를 줄이려는 동향이 관찰된다. 따라서 본 연구에서는 유도 전동기를 수소 모빌리티 구동 모터로 선정하고 구동력을 모사하는 모델을 구축하였다.

일반적으로 유도 전동기를 모델링하는 경우 변압기 형태의 등가회로 모델로 표현한 해석적 모델이 주로 이용되는 것으로 알려져 있다. 그러나 상기 모델은 모터가 정상 상태에 도달한 경우에만 유효하며, 모터의 과도 상태를 모사하기에 불충분한 모델로 평가된다. 따라서 본 연구에서는 동적 환경에서 유도 전동기의 거동을 관찰하기 위하여 DQ 변환으로 알

려져 있는 Park and Clarke 변환을 이용하였다. 이는 서로 직교하는 자속분과 토크분 성분의 전기적 성분을 각각 d축과 q축으로 정의하고, 축을 회전자계의 속도와 같이 회전하여 단순하고 직관적인 해석을 수행하는 기법이다. DQ 변환의 지배 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{ds} = (R_s + L_s p)I_{ds} - \omega_s L_s I_{qs} + L_m p I_{dr} - \omega_e L_m I_{qr} \quad (28)$$

$$V_{qs} = \omega_e L_s I_{ds} - (R_s + L_s p)I_{qs} + \omega_e L_m I_{dr} - L_m p I_{qr} \quad (29)$$

$$V_{dr} = L_m p I_{ds} - (\omega_e - \omega_r) L_m I_{qs} + (R_r + L_r p)I_{dr} - (\omega_e - \omega_r) L_r I_{qr} \quad (30)$$

$$V_{qr} = (\omega_e - \omega_r) L_m I_{ds} - L_m p I_{qs} + (\omega_e - \omega_r) L_r I_{dr} - (R_r + L_r p)I_{qr} \quad (31)$$

$$p = \frac{d}{dt} \quad (32)$$

### 3. 에너지 관리 시스템

수소 모빌리티에서는 최초 전력 생산이 연료전지에서 이루어지며, 해당 전력은 모터에서 요구하는 전력에 대응하거나 배터리에 저장되는 형태로 소모된다. 이때 모터 대응 전력으로 소모되거나 배터리에 저장되는 양과 비율을 결정하는 것은 차후 연료전지의 전력량을 결정함으로써 연료전지 내구성 향상에 효율적인 운영 관리를 수행하거나 배터리의 적정 SOC를 유지하여 전체 효율적인 구간에서 운전할 수 있는 것을 결정짓는 것인 만큼 효율적인 차량 관리에 중요한 작업이다. 따라서 차량 관리 차원에서 안정적인 전력 분배 전략을 수립하고, 차량 부품 데이터 취득 및 분석을 통해 이를 평가하고자 하였다.

이를 위해서는 신뢰성 있는 전력 버스 시스템 구축이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 컨버터 듀티비를 조절하여 연료전지와 배터리의 양을 조절하는 EMS 모델을 구성하였다. EMS 모델 내 제어 전략부에서는 차량 데이터를 종합하고 수립된 전략에 따른 연료전지의 레퍼런스 전류를 결정한다. 또한 PI 제어를 통해 실제 연료전지 전류

가 레퍼런스 전류를 추종하도록 듀티비 조절이 이루어지게 하였다.

연료전지 전류를 결정하는 제어 전략이 적절히 설계되지 않았을 경우 연료전지를 비롯한 많은 차량 부품들의 탈설계점 운전 및 비효율 운전을 야기할 수 있다. 실제 상용 차량에 탑재되어 있는 제어 로직은 SOC, 차량 속도 등 많은 파라미터를 변수로 제어될 것으로 생각되지만, 정량적인 접근에 한계가 있다. 따라서 임의의 로직을 설정하여 제어의 적절성을 평가하고 수정하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 SOC에 따른 연료전지 전류를 스텝 형태로 제어할 경우의 문제점을 지적하고, 이에 따른 대응 전략으로서 퍼지 제어를 이용한 연료전지 전류 제어 전략을 설계하였다. Fig. 3과 같이 스텝 형태의 제어는 제어기 구조가 복잡하지 않아 단순한 설계가 가능하며 거동 형태가 직관적이기 때문에 데이터에 대한 분석이 용이하다는 장점이 있다. 하지만 차량 시스템에

적용했을 경우 저전류와 고전류 지령이 짧은 주기로 반복되는 헌팅 현상이 발생하여 연료전지 내구성에 치명적인 문제가 생길 위험이 있다.

본 연구는 퍼지 제어를 설계하여 스텝 형태 제어의 문제점을 보완하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 SOC 상태에 따라 연료전지 전류가 변동하는 전략의 취지는 유지하였으나 퍼지 제어의 특성을 이용하여 변동 형태를 매끄럽게 제어될 수 있도록 하였다. 또한 모터 각속도가 모터 요구 전력에 직간접적인 영향을 미친다는 사실에 착안하여 연료전지 제어에 영향을 미치는 요인으로 모터 각속도가 고려될 수 있도록 하였다. SOC와 각속도 및 제어 변수인 연료전지 전류는 very low, low, medium, high, very high의 5개 영역의 정규화 함수로 퍼지화된다. Normalized weight는 각 변수의 상태가 5개 영역 중 한 영역에 소속하는 정도를 나타내며, Fig. 4에서 나타난 것처럼 각 변수는 5개 영역 중 2개 이하의 영역에 소속된다. Table 2와 같이 설계된 퍼지 규칙에 따라 디퍼지화가 수행되며, 2개 영역에 소속된 경우 무게중심법을 이용하여 중간값을 갖도록 제어하였다. 즉, 한 상태에서 다른 상태로 변동되는 중복 영역에서는 normalized weight를 고려하여 소속 정도에 따른 부드러운 변동이 발생하도록 하였으며, 해당 제어를 이용한 시뮬레이션을 수행하고 차량 부품 데이터에 대한 분석을 수행하였다.

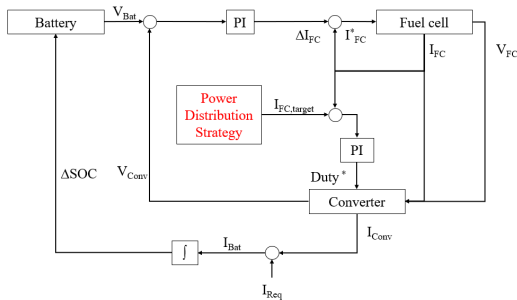


Fig. 2. Converter control based EMS model

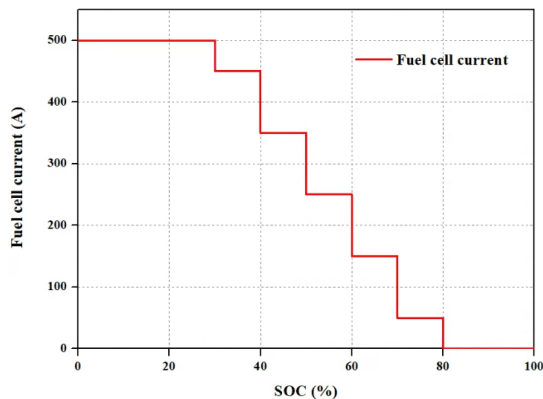


Fig. 3. Fuel cell current controller using step control

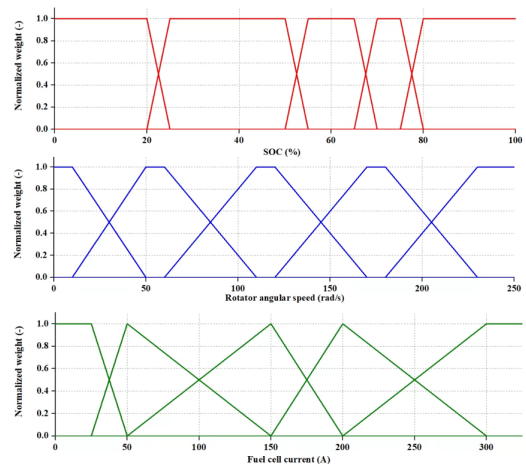


Fig. 4. Fuel cell current controller using fuzzy control

### 4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 Fig. 5와 같이 World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC) 속도 사이클을 속도 프로파일로 채택하여 모델에 적용하였다. WHVC 사이클은 도심지와 교외 지역, 고속도로의 주행을 결합하여 시동/정지 및 정속 주행, 저속 및 고속 주행에서의 특성을 모두 관찰하는 것이 가능하다. 특히 저속과 고속 주행 영역이 적절한 시간 비율로 조합되어 있어 본 연구에서 SOC와 속도에 따른 연료전지 변화를 관찰하는 목적에 적합하다.

Fig. 6은 스텝 제어기에 의해 제어되는 SOC 및 연료전지 전류 거동 및 그에 따른 연료전지 전압과 전력을 나타낸다. SOC는 WHVC 사이클 전 영역에서 약 50-80% 사이의 값을 유지하였다. 저속 주행에서는 SOC의 주 영역이 60-80% 사이에서 유지되고, 고속 영역에서는 모터의 요구 전력이 크기 때문에 SOC는 전체적으로 하락하는 거동이 관찰되었다. WHVC

사이클은 일부 시간 영역을 제외하면 대부분의 시간 영역에서 모터의 요구 전력이 지속적으로 변동하기 때문에 SOC가 50%와 80% 사이의 영역에서 오르내리며 유지되는 거동을 보여주었다. 하지만 저속 영역이나 고속 영역이 지속되는 200-400초 사이와 1,500-1,800초 사이 시간 영역에서는 50%와 80%의 경계선에서 헌팅 현상이 관찰되었다. 오버슛과 언더슛이 크지 않기 때문에 전체 스케일에서는 관찰이 쉽지 않으나, 이를 확대하면 50% 또는 80% SOC 값을 사이에 두고 진동을 반복하는 현상이 관찰되었다. 이에 대하여 연료전지 전류 거동을 관찰한 결과, 헌팅 현상이 발생하는 영역에서 연료전지 전류 또한 지속적으로 진동하는 현상을 관찰할 수 있다. 200-400초 사이의 영역에서는 0 A와 50 A 사이를 상승 및 하강하려는 압력이 비교적 크지 않기 때문에 전류 변화가 심하지

Table 2. Fuzzy rule based on SOC and rotor velocity

		Angular speed				
		VL	L	M	H	VH
SOC	VL	H	H	H	H	VH
	L	M	M	M	H	H
	M	M	M	M	M	M
	H	L	L	M	M	M
	VH	VL	L	L	L	L

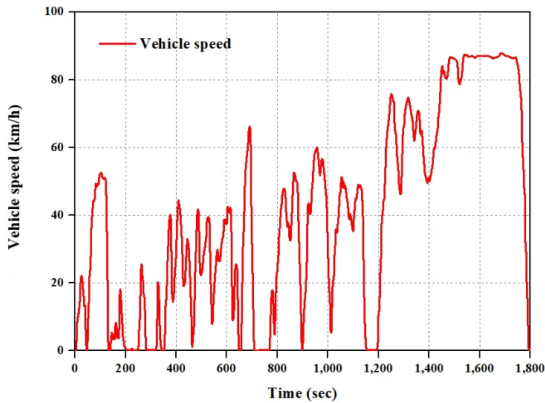
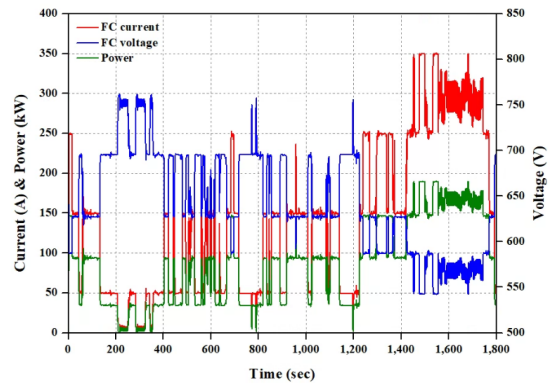
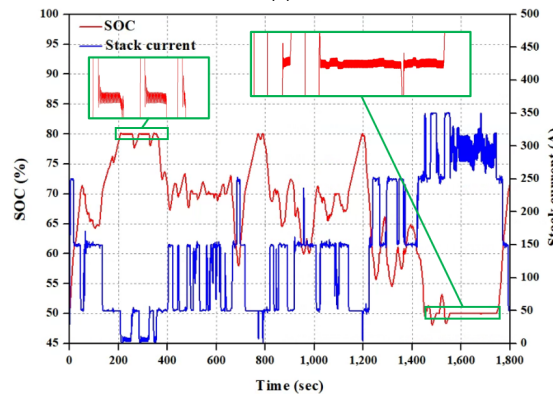


Fig. 5. WHVC velocity profile



(a)



(b)

Fig. 6. Electric behavior of fuel cell and SOC by step control. (a) Fuel cell, (b) SOC



않고 비교적 미세한 형태의 진동이 관찰되었다. 하지만 1,500-1,800초 사이에서는 250 A와 350 A 사이의 상방 및 하방 압력이 크기 때문에 상당히 큰 진동이 관찰되었다. 이 시간 영역에서 발생하는 헤팅 현상에 대한 결과 이외에도 다른 시간 영역에서 SOC에 따른 연료전지 전류가 짧은 시간에 매우 큰 폭으로 변동하는 현상이 관찰되었는데, 이는 일반적으로 연료전지 내구성에 매우 취약한 운전으로 평가된다.

Fig. 7(a)는 연료전지 전류의 진동이 연료전지 시스템 balance of plant (BOP)에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 압축기, 냉각수 펌프, 팬의 구동 전력을 나타낸 것이다. 약 1,500-1,800초의 헤팅 현상이 나타나는 영역에서 압축기 구동 전력이 22-25 kW 사이에서 급격하게 변동하는 것이 관찰되었다. 이러한 변동은 매우 짧은 주기에서 반복되는데, 이는 압축기의 유량과 압력에 큰 변동을 주어 서지 현상을 초래할 수 있고 장기간 지속될 경우 연료전지 공기 공급 시스템의 내구성에 치명적인 결과를 가져올 수 있다. 전류 변화로 인해 이차적으로 변화하는 스택 온도는 전류 변화의 빠른 주파수 변화를 추종하기에는 비교적 높은 시정 수를 가지고 있다. 이는 비교적 큰 열용량을 가지고 있는 냉각수 펌프 내 냉각수 유량에 가시적인 변화를 줄 만큼의 온도 변화는 발생하지 않았음을 나타내며, 따라서 냉각수 펌프에는 큰 변동이 발생하지 않았다. 반면에 라디에이터 팬의 경우에는 스택의 작은 온도 변화에도 민감하게 작동하여 진동하는 현상이 관찰되었다. 하지만 구동 전력의 변화 폭이 크지 않으며 압축기와 같이 복잡한 구조로 이루어져 있지 않은 팬의 특성상 내구성에 미치는 영향은 제한적인 것으로 생각된다. 종합적인 BOP 거동을 관찰하였을 때 큰 폭의 변동이 지속되는 상황은 스택과 압축기, 팬 등 BOP에 불안정성을 유발하고 전기적, 기계적 비효율성을 야기할 우려가 있다.

Fig. 7(a)에서는 연료전지 OCV에 가까운 저전류 구간에서 펌프의 소모 전력이 높으며, 400초 직후의 상대적으로 고전류 구간에서 펌프 전력이 낮아지는 현상이 관찰되었다. Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)는 각각 스택 및 레저버의 온도와 바이패스 밸브의 개도와 스택

냉각수 유량 및 라디에이터 유량을 나타낸다. 200-400초 구간의 영출력 상황에서는 전체적으로 펌프 유량이 작고 그마저도 대부분이 스택보다는 라디에이터 쪽으로 흘러가도록 제어된다. 영출력에서 약 50 A의 전류가 스템으로 변동되는 시점에서는 스택 냉각수 유량이 거의 없는 상황에서 갑작스러운 전류 상승으로 인해 온도가 급격하게 증가한다. 70°C의 스택 온

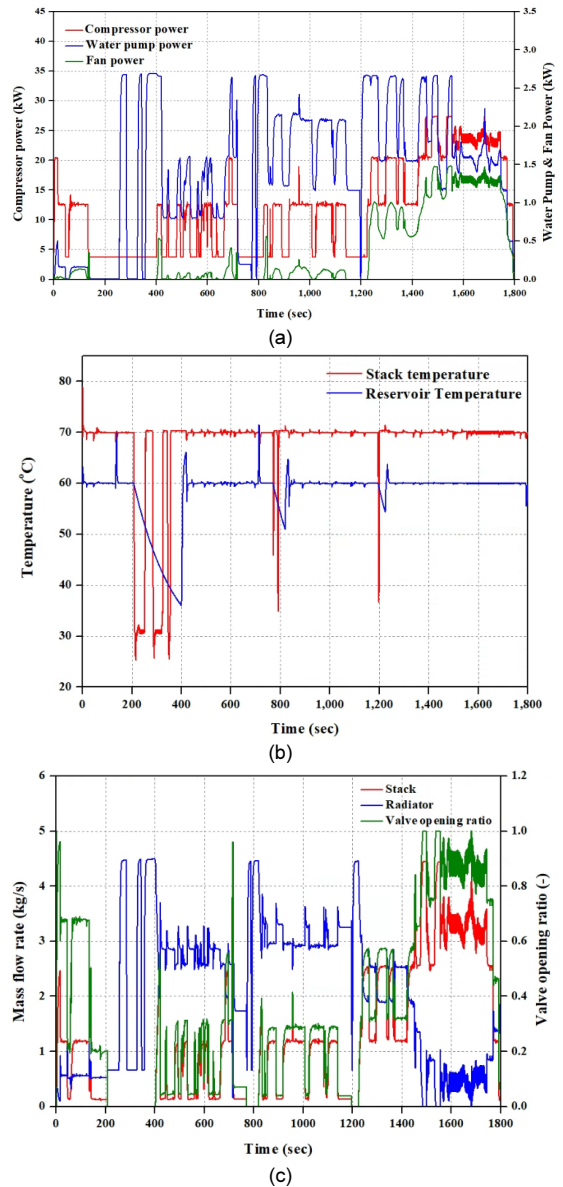


Fig. 7. Behavior of BOP by step control. (a) Power, (b) temperature, and (c) cooling water

도를 유지하기 위하여 냉각수 펌프와 밸브 개도가 제어되는데, 밸브의 경우 스택 쪽으로는 거의 닫혀있는 수준이며 펌프 유량보다 둔감하게 작동하기 때문에 펌프의 유량을 높이는 방향으로 제어된다. 즉 펌프의 순간적인 유량을 높여 온도를 유지하지만, 실제 스택으로 들어가는 냉각수의 절대적인 양은 많지 않고 대부분의 펌프 유량은 라디에이터 쪽으로 유입된다. 이러한 해석은 레저버 온도가 램 에어의 영향으로 지속적으로 하강하는 현상이 관찰된 것으로 설명된다. 400초 이후 전류가 한 스텝 더 커지고 펌프 유량만으로는 더 이상 온도를 유지할 수 없게 되었을 때 밸브가 작동되어 스택으로 유입되는 냉각수의 절대적 양이 커지게 되는데, 개도의 증가로 인해 스택으로 유입되는 냉각수 유량이 과도하게 증가하여 냉각수 펌프는 다시 유량을 줄이는 방향으로 작동된다. 1,400-1,800초 구간에서 냉각수 펌프의 전력은 진동

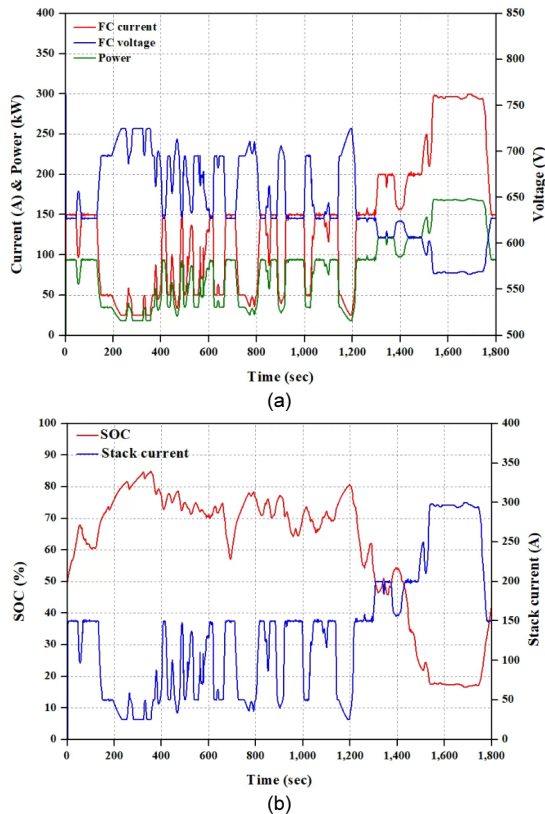


Fig. 8. SOC and fuel cell current operated by fuzzy control

을 보이지 않는 형태이지만, 실제 스택으로 유입되는 냉각수 유량의 경우에는 심하게 진동하는 현상이 관찰되었다.

Fig. 8은 퍼지 제어기에 의해 제어되는 SOC 및 연료전지 전류 거동 및 그에 따른 연료전지 전압과 전력을 나타낸다. SOC는 저속 주행에서는 약 40% 이

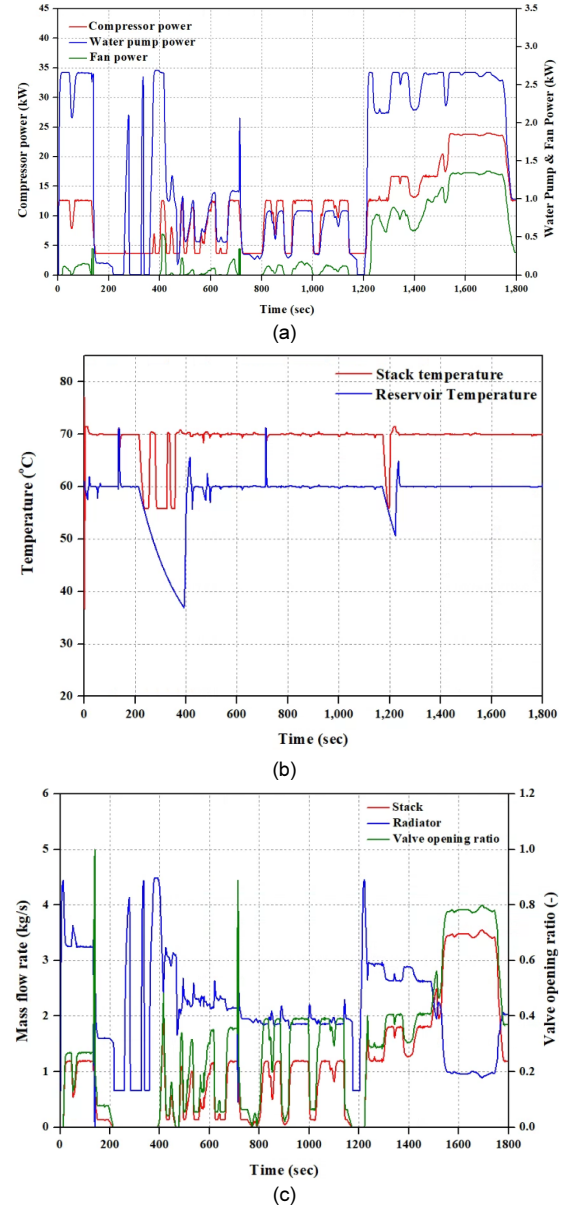


Fig. 9. Behavior of BOP by fuzzy control. (a) Power, (b) temperature, (c) cooling water

상으로, 고속 주행에서는 40% 미만으로 유지되었다. 그러나 전류의 급격한 변동을 비용으로 SOC가 일정 경계 이상 또는 이하로 강인하게 유지되었던 스텝 제어와는 달리, SOC에 대해서 특정 경계층을 유지하는 제어는 이루어지지 않았다. SOC 범위에 따라 연료전지 전류의 범위가 변화되는 추세는 스텝 제어기와 유사하게 작동하였다. 전류 변동 구간에서도 급격한 변동을 보이는 스텝 제어와는 달리 비교적 완만한 형태로 천이하는 거동을 보였으며, 차량 속도가 큰 고출력 구간에서는 연료전지 전류가 증가하여 SOC의 급격한 변동을 완화하였다. SOC의 변동이 줄어드는 것은 연료전지 전류의 변동이 완화되는 것으로 피드백되어 시스템 전반적으로 안정적인 제어가 가능함을 나타낸다.

Fig. 9는 Fig. 7에서 나타난 스텝 제어에서의 BOP 거동에 비해 퍼지 제어에서 BOP가 상대적으로 안정적으로 거동함을 나타낸다. 특히 압축기의 거동은 펄스 형태의 급격한 진동이 사라진 형태로 BOP 거동 중 가장 두드러진 성능 개선을 보여주었다. 200-400 초 사이의 저전력의 연료전지 영역에서는 밸브 개도로 인해 스택 쪽으로 냉각수가 거의 유입되지 않으며, 따라서 냉각수 펌프의 과도한 작동이 관측된다. 하지만 스텝 제어에 비해 상대적으로 변동이 심하지 않으며, 진동하는 현상 또한 발생하지 않았다.

## 5. 결론

본 연구에서는 연료전지 시스템 모델을 비롯한 수소 모빌리티 내 전장 시스템을 구성 및 통합하여 수소 모빌리티 시뮬레이션을 수행하였다. 구축된 수소 모빌리티 모델 내 연료전지와 배터리 사이의 전력량을 분배하기 위하여 스텝 제어와 퍼지 제어의 2가지 제어 전략을 수립하고 거동을 분석하였다.

1) 스텝 제어기는 SOC를 특정 경계에서 강인하게 제어되도록 하는 특성을 가지고 있으나, 이는 SOC 입력에 대해 연료전지 전류가 심하게 진동하는 현상 현상을 유발하기 쉽다.

2) 연료전지 전류의 진동은 연료전지 시스템 내

BOP의 거동에 심각한 스트레스를 야기할 수 있으며, 특히 공기 압축기의 경우 압력과 유량의 심한 변동에 의해 이차적인 서지 현상이 발생할 수 있다.

3) 퍼지 제어의 경우 SOC에 강인한 제어가 이루어지지 않지만, 연료전지 전류 거동이 부드러운 천이 형태로 이루어지며 이를 통해 BOP를 안정적으로 운영하는 것이 가능하다.

4) 모터 각속도의 고출력 상태에서는 연료전지가 일정 부분을 감당하여 SOC의 급격한 변동을 방지하며, 연료전지 전류의 안정적인 전류 변화로 피드백된다.

5) 본 연구에서 수립한 2가지 제어 전략 중 퍼지 제어가 수소 모빌리티 시스템의 내구성과 효율에 유리한 제어 전략으로 생각된다.

## 후 기

이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2022R1A4A1030333) 및 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20203010030010).

## References

1. A. Farsi and M. A. Rosen, "PEM fuel cell-assisted lithium ion battery electric vehicle integrated with an air-based thermal management system", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 84, 2022, pp.35810-35824, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.153>.
2. X. Chen, S. Long, L. He, C. Wang, F. Chai, X. Kong, Z. Wan, X. Song, and Z. Tu, "Performance evaluation on thermodynamics-economy-environment of PEMFC vehicle power system under dynamic condition", *Energy Conversion and Management*, Vol. 269, 2022, pp. 116082, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116082>.
3. L. Ren, S. Zhou, and X. Ou, "Life-cycle energy consumption and greenhouse-gas emissions of hydrogen supply chains for fuel-cell vehicles in China", *Energy*, Vol. 209, 2020, pp. 11-8482, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118482>.
4. S. Xiong, Q. Song, B. Guo, E. Zhao, and Z. Wu, "Research and development of on-board hydrogen-producing fuel cell vehicles", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45,

- No. 35, 2020, pp. 17844-17857, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.236>.
5. Q. Xun, N. Murgovski, and Y. Liu, "Joint component sizing and energy management for fuel cell hybrid electric trucks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 71, No. 5, 2022, pp. 4863-4878, doi: <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3154146>.
  6. Y. Wang, S. J. Moura, S. G. Advani, and A. K. Prasad, "Optimization of powerplant component size on board a fuel cell/battery hybrid bus for fuel economy and system durability", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 33, 2019, pp. 18283-18292, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.160>.
  7. M. İnci, M. Büyük, M. H. Demir, and G. İlbey, "A review and research on fuel cell electric vehicles: topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 137, 2021, pp. 110648, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110648>.
  8. K. Song, X. Wang, F. Li, M. Sorrentino, and B. Zheng, "Pontryagin's minimum principle-based real-time energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicle considering both fuel economy and power source durability", *Energy*, Vol. 205, 2020, pp. 118064, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118064>.
  9. M. M. Jahromi and H. Heidary, "Durability and economics investigations on triple stack configuration and its power management strategy for fuel cell vehicles", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 7, 2021, pp. 5740-5755, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.103>.
  10. P. Pei and H. Chen, "Main factors affecting the lifetime of proton exchange membrane fuel cells in vehicle applications: a review", *Applied Energy*, Vol. 125, 2014, pp. 60-75, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.048>.
  11. M. Yue, Z. Al Masry, S. Jemei, and N. Zerhouni, "An online prognostics-based health management strategy for fuel cell hybrid electric vehicles", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 24, 2021, pp. 13206-13218, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.095>.
  12. Y. Yan, Z. Xu, F. Han, Z. Wang, and Z. Ni, "Energy control of providing cryo-compressed hydrogen for the heavy-duty trucks driving", *Energy*, Vol. 242, 2022, pp. 122817, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122817>.
  13. M. de las Nieves Camacho, D. Jurburg, and M. Tanco, "Hydrogen fuel cell heavy-duty trucks: review of main research topics", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 68, 2022, pp. 29505-29525, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.271>.
  14. Y. Ma, C. Li, and S. Wang, "Multi-objective energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicle based on stochastic model predictive control", *ISA Transactions*, Vol. 131, 2022, pp. 178-196, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.04.045>.
  15. S. Yang, J. Kim, M. Choi, and Y. B. Kim, "Energy management technology development for an independent fuel cell-battery hybrid system using for a household", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 30, No. 2, 2019, pp. 155-162, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.2.155>.
  16. Y. Kim, J. Han, and S. Yu, "Establishment of energy management strategy of 50 kW PEMFC hybrid system", *Energy Reports*, Vol. 9, 2023, pp. 2745-2756, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.096>.
  17. J. Han, J. Han, and S. Yu, "Investigation of FCVs durability under driving cycles using a model-based approach", *Journal of Energy Storage*, Vol. 27, 2020, pp. 101169, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101169>.
  18. Woo, Y. Kim, and S. Yu, "Performance of fuel cell system for medium duty truck by cooling system configuration", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 32, No. 4, 2021, pp. 236-244, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.4.236>.
  19. J. C. Amphlett, R. M. Baumert, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge, and T. J. Harris, "Performance modeling of the ballard mark IV solid polymer electrolyte fuel cell: I. mechanistic model development", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 142, No. 1, 1995, pp. 1-8, doi: <https://doi.org/10.1149/1.2043866>.
  20. K. Sankar and A. K. Jana, "Nonlinear multivariable sliding mode control of a reversible PEM fuel cell integrated system", *Energy Conversion and Management*, Vol. 171, 2018, pp. 541-565, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.079>.
  21. M. Jung, J. Jeon, and S. Park, "Development of impedance-based equivalent circuit model to predict current-voltage behavior for 48 V MHEV NMC battery", *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 29, No. 4, 2020, pp. 337-348, doi: <https://doi.org/10.7467/KSAE.2021.29.4.337>.
  22. C. Lee, Y. Kim, and S. Yu, "Prediction of membrane water content characteristics through dynamic nonlinear model", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 32, No. 6, 2021, pp. 497-505, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.6.497>.
  23. H. N. Vu, D. T. L. Tri, H. L. Nguyen, Y. Kim, and S. Yu, "Multifunctional bypass valve for water management and surge protection in a proton-exchange membrane fuel cell supply-air system", *Energy*, Vol. 278, 2023, pp. 127696, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127696>.