

수치해석을 활용한 수소전기버스 파워트레인 모델링 연구

김정철¹⁾ · 안진한¹⁾ · 차준표²⁾ · 최민기³⁾

한국에너지공단 자동차연비센터¹⁾ · 한국교통대학교 자동차공학과²⁾ · 한양사이버대학교 기계자동차공학부³⁾

Research on Powertrain Modeling of Hydrogen Electric Buses Using Numerical Analysis

Jung Chul Kim¹⁾ · Jin Han An¹⁾ · Junepyo Cha²⁾ · Mingi Choi³⁾

¹⁾Vehicle Energy Efficiency Center, Korea Energy Agency, 15 Shincheoksandan3-ro, Deoksan-eup, Jincheon-gun, Chungbuk 27850, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Korea National University of Transportation, Chunbuk 27469, Korea

³⁾School of Mechanical and Automotive Engineering, Hanyang Cyber University, Seoul 04763, Korea

(Received 2 June 2023 / Revised 20 July 2023 / Accepted 7 August 2023)

Abstract : This paper focuses on the powertrain modeling of hydrogen electric buses based on a numerical analysis. The powertrain, which consists of an electric motor, inverter, battery, and hydrogen fuel cell, is one of the key elements of a hydrogen electric bus. Accordingly, the efficient design and operation of the powertrain have a significant impact on the performance and cost-effectiveness of hydrogen electric buses. Therefore, accurately modeling and analyzing the powertrain of hydrogen electric buses is essential in performance evaluation and optimization under actual operating conditions. The objective of this study is to understand and analyze the operation and performance of the hydrogen electric bus powertrain through modeling and simulation. This will enable the derivation of efficient operating strategies and optimal powertrain configurations, leading to the improvement and widespread adoption of hydrogen electric buses.

Key words : Hydrogen electric buses(수소전기버스), Numerical analysis(수치해석), Powertrain modeling(파워트레인 모델링), Fuel cell(연료전지), Energy efficiency(에너지효율)

1. 서론

전 세계적인 고유가로 인한 수송부문의 에너지 안정성과 환경문제에 대한 우려가 증가하고 있으며, 이에 따라 대중교통 시스템에서 친환경이고 지속 가능한 대체 에너지 솔루션에 대한 수요가 증가하고 있다. 전동화된 교통 수단은 이러한 요구에 대한 효과적인 대안으로 인정받고 있으며, 특히 수소전기버스는 급속한 인기를 얻고 있다. 수소전기버스는 수소를 동력원으로 활용하여 연료전지를 통해 전기에너지를 생성하고, 전기모터를 이용하여 구동한다. 이러한 시스템은 유해 배출물이 전혀 없고 전기차와 비교하여 더 높은 에너지 효율성을 제공하며, 긴 주행거리와 짧은 충전 시간을 가질 수 있는 등의 장점을 가지고 있다.

또한, 국내 수소전기버스의 에너지소비효율 측정은 실외에서 72.96 km/h의 속도로 약 20 km를 정속주행하여 측정하고 있다. 실외 측정은 기온, 풍향, 풍속 등의 외기 영향이 존재하여 측정 결과의 신뢰도 제고를 위해 실내 측정 시험방법 개발이 필요한 상황이다.

이에 많은 연구자들이 연료전지에 대하여 폭넓은 연구를 진행하고 있다.¹⁻³⁾ 특히 수소전지자동차 분야에서 Na와 Hong⁴⁾은 차량 시뮬레이션 툴인 IPG사의 Carmaker에서 연료전지차량을 시뮬레이션하기 위한 연료전지 파워트레인 모델링을 제시하였다. 이는 연료전지 차량의 수소 이용률을 예측할 뿐만 아니라, 차량의 동적 성능 분석, 적절한 전력분배제어 등에 대한 연구를 Carmaker가 사용하여 보다 효율적으로 수행할 수 있게

*Corresponding author, E-mail: mgchoi@hycu.ac.kr

[†]This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

하기 위한 모델링으로 평가된다. 황영하⁵⁾는 Attention 기반의 LSTM을 적용한 연료전지버스의 실시간 에너지 분배 전략 개선에 관한 연구를 수행하였다. 기존 수소연료전지 버스에서 갖고 있던 출력 효율로 인한 문제를 울트라-커패시터를 이용하여 해결하고, 실시간 에너지 관리 전략으로 적용하기 어려웠던 동적 계획법을 Attention기반의 LSTM 실시간 제어를 통해 학습하여 동적 계획법을 통해 계산된 결과의 특성을 우회 적용하였다. 윤상현 등⁶⁾은 수소전기트럭 적용을 위한 볼텍스 튜브 에너지 분리 실험적 연구를 진행하였다. 연료전지 모사 장치와 볼텍스 튜브를 서로 통합하여 수소 전기 트럭의 냉각시스템을 구축하여 성능을 분석하여 발표하였다. 이와 같이 연료전지를 이용하는 수소전기자동차 분야에서도 폭넓은 연구가 진행되고 있다.

수소전기버스의 핵심 요소 중 하나는 파워트레인이며, 이는 전기모터, 인버터, 배터리, 수소 연료전지 등으로 구성된다. 파워트레인의 효율적인 설계와 운영은 수소전기버스의 성능과 경제성에 중요한 영향을 미치기 때문에 수소전기버스의 파워트레인을 정확하게 모델링하고 분석하는 것은 실제 운영 조건에서의 성능 평가와 최적화를 위해 필수적이다. 현재까지 대부분의 경우 소형전기자동차를 대상으로 연구를 수행하여 아직까지는 대형차량인 수소전기버스를 대상으로 연구가 미비한 상황이다.

본 연구의 목적은 수소전기버스 파워트레인의 모델링과 시뮬레이션을 통해 시스템의 동작 및 성능을 이해하고 분석하여, 에너지소비효율 실내 측정방법 개발에 필요한 효율적인 운영 전략과 최적 파워트레인 구성을 도출하는 것이다. 보다 정확한 수소전기버스 에너지소비효율 측정방법을 통해 차량 성능 개선과 보급에 기여할 것으로 기대된다.

2. 수치해석

본 연구는 수소전기버스 에너지소비효율의 실내 측

정방법 개발을 위하여 사이클 전반에 대한 시뮬레이션 모델을 활용하여 프로세스를 효율화 시키고자 한다. 이에 AVL社의 CRUISE M 프로그램을 활용하여 수소전기버스의 파워트레인 해석을 위한 1D 시스템 해석모델을 개발을 수행하였다. 1D 시스템 해석모델은 수소전기버스 배터리, 연료전지 등의 사양 및 파워트레인 아키텍처에 따른 각 요소별 에너지 흐름의 비중과 에너지 흐름의 제어 Logic을 연구를 통해 에너지소비효율과 동력성능 예측에 활용 가능하다. 또한, 정속주행(72.96 km/h), K-WHVC, WHVC 세 가지 주행시험모드에 대하여 주행시험모드에 따른 에너지소비효율 흐름 및 변화량 분석도 수행하였다. 해석에 사용된 수소전기버스의 주요 제원정보는 Table 1과 같다.

2.1 수소전기버스 1D 해석 모델링

수소전기버스 1D 해석 모델링은 Fig. 1과 같이 구성하였다. 해석모델은 기계적 영역, 전기적 영역, 제어로직으로 구성된다. 기계적 영역은 휠, 브레이크, 종감속기어, 차동기어, 차량으로 구성되고 전기적 영역은 전력소비자, DC-DC 컨버터, 전동기, 배터리, 연료전지로 구성된다. 그리고 제어로직은 회생제동, 차량 출력에 따른 전력 공급으로 구성된다.

기계적 영역에서 휠은 차량과 도로를 연결하는 부품으로 관성모멘트, 마찰계수, 타이어 반경 등의 정보를 입력한다. 브레이크는 각 휠의 제동 특성을 시뮬레이션 하는데 활용되며 제동 토크는 제동 치수와 입력 제동 압력을 고려하여 계산된다. 종감속기어는 일정한 효율 또는 속도에 따른 토크 손실을 고려하여 고정 비율의 기어 스텝으로 모델링 하였다. 차동기어는 분할 계수를 정의하여 모델링 하였다. 차량은 차체 치수 및 중량과 같은 일반적인 데이터를 입력하며 출력은 차량 중량과 주행 저항이다. 이 때 차량 중량은 공차 중량에서 탑승객 수에 따라 가산되어 계산된다. 차량 주행저항 계산수식은 (1)과 같다.

Table 1 Vehicle specifications

Curb weight	12,770 kg	
FCEV system capacity	180 kW	
FCEV system output	160 kW	
Motor power	180 kW	
Battery capacity	78.4 kW	
Hydrogen capacity	33.99 kg	
Rolling resistance	f0	841.37 N
	f1	2.016 N · h/km
	f2	0.139 N · h ² /km ²

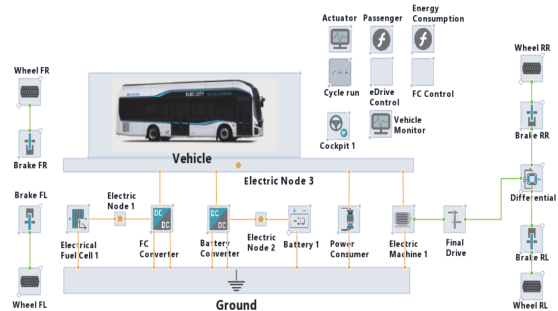


Fig. 1 Powertrain modeling for hydrogen electric bus

$$F_{V,res} = \frac{m_{act}}{m_{ref}} \cdot c_A + \frac{m_{act}}{m_{ref}} \cdot c_B \cdot v_V + \frac{c_W \cdot A}{c_{W,ref} \cdot A_{ref}} \cdot c_C \cdot v_V^2 \quad (1)$$

- $F_{V,res}$: Resistance force
- m_{act} : Actual Mass
- m_{ref} : Reference Mass
- c_A : Constant part of vehicle resistance function
- c_B : Linear part of vehicle resistance function
- c_C : Square part of vehicle resistance function
- c_W : Drag coefficient of the vehicle
- $c_{W,ref}$: Drag coefficient of the reference vehicle
- A : Frontal area of the vehicle
- A_{ref} : Frontal area of the reference vehicle

전기적 영역에서 전력 소비자는 모터, 배터리와 연료 전지 외에 소비하는 전기저항을 나타낸다. 전력 소비자는 실제 전압을 고려하여 전류와 함께 소비 전력을 네트워크에 적용한다. 따라서 직렬로 연결된 두 개 이상의 전력 소비자는 구성할 수 없다. DC-DC 컨버터는 전력 컨버터의 동작 모델이다. 부하 측에 부과되는 전압이나 전류를 조절한다. 또한 입력 전력, 출력 전력 및 전력 손실의 균형을 유지하기 위해 공급 측에서 부하 측으로 요구되는 전력을 끌어온다. 컨버터는 공급 측과 부하 측 사이의 양방향 전력 흐름을 지원할 수 있다. 예를 들어, 전동기의 DC-DC 컨버터와 양쪽에 연결된 배터리가 포함된 모델에서 모터로 작동하면 전력이 배터리에서 모

터로 변환기를 통해 흐른다. 한편, 회생 제동 시 전동기가 제너레이터로 동작하면 모터에서 배터리로 반대 방향으로 동력이 전달된다. 전동기는 맵 데이터 기반 모델이고 부하 신호에 따라 모터 혹은 제너레이터로 사용된다. 전동기의 입력은 최대 출력 토크 곡선과 파워 손실 맵으로 출력은 최대 출력 토크 값과 부하 신호에 비례한 토크, 이에 따른 파워 손실을 계산한다. Fig. 2는 본 모델에 사용한 모터 전부하 토크 곡선이고 Fig. 3은 본 모델에 사용한 파워 손실 맵이다.

배터리 모델은 셀 거동을 등가 전기 회로를 기반으로 하며 특정 충전 상태 및 온도에서 전류에 대한 전압 응답을 예측할 수 있다. 또한 전기 모델 외에도 열 모델이 모델에 포함되어 배터리의 과도 열 거동을 예측한다. 그리고 여러 배터리 요소를 전기 핀을 통해 연결하여 배터리 모듈 또는 배터리 팩 역할을 하는 전기 네트워크를 구성할 수 있다. 배터리 모델에서 입력 값은 셀 개수, 용량, Open Circuit Voltage(OCV), Ohmic Resistance 곡선이며, 출력 값은 사이클 동안 방전한 전류를 적분하여 State of Charge(SOC)를 추정한다. 입력 OCV를 음의 법칙 저항 값에 감소하여 셀 전압을 계산하는데 이 때 식 (2)의 셀 전압과 용량에 따른 셀 개수에 따라 파워와 에너지를 계산한다. 연료전지는 고분자 전해질막 연료전지(PEMFC)를 모델링 하였다. 전극, 전해질, 양극 촉매층, 음극 촉매층 및 가스 확산층을 포함하는 막 전극 집합체로 구성하고 분극 곡선에서 파생된 분석 전기 화학 방정식을 기반으로 한다. 연료전지의 전압, 전력, 전력 손실, 효율 등의 전기적 특성과 총 소모 산소량, 소모 수 소량 등의 기체 특성을 평가할 수 있다. 연료전지 부품에서는 연료전지 외에 간단한 압축기 모델을 활성화하여 연료전지 시스템 운전 효율에 큰 영향을 미치는 압축기의 소비전력을 고려하였다.

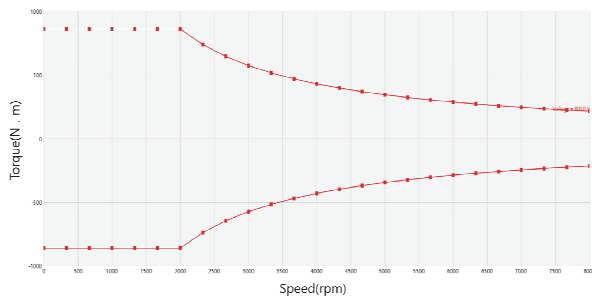


Fig. 2 Motor torque curve

$$U_{Cell} = U_{OCV} - I_{Cell} \cdot R_{Ohmic} - \sum_{k=1}^n \frac{Q_k}{C_k} \quad (2)$$

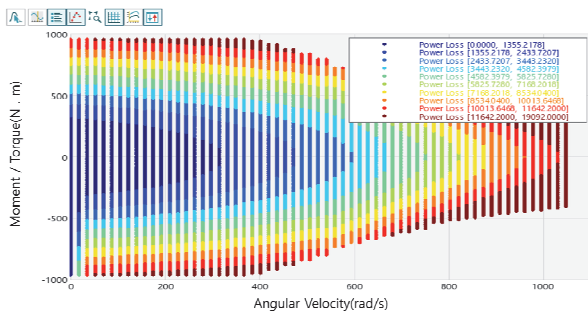
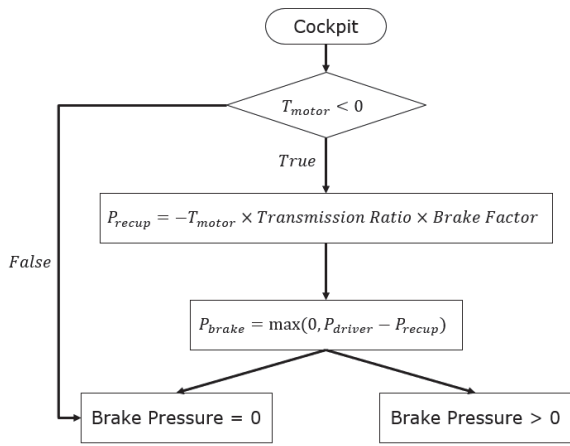


Fig. 3 Efficiency map for motor power

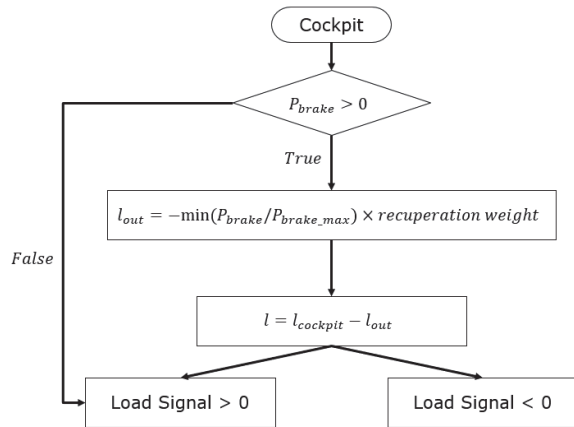
- U_{Cell} : Cell voltage
- U_{OCV} : Open circuit voltage
- I_{Cell} : Cell current
- R_{Ohmic} : Ohmic resistance
- Q_k : Charge of the capacitor with in the RC element
- C_k : Capacitance of the capacitor with in the RC element

제어로직 영역에서 회생제동은 차량 감속 시 브레이크 압력을 출력, 가속 시 전동기의 부하 신호를 출력하고 회생 제동을 실행하는 로직이다. 브레이크 압력의 경우, 페달에 의해 생성된 압력과 제너레이터 토크에 따른 압력 차로 구성되며 양의 값을 가진다. 페달에 의해 생

성된 압력은 감속 페달 뻤에 의해 정의되고 제너레이터 토크에 따른 압력은 브레이크에 입력된 파라미터에 따라 브레이크 계수를 계산 후 제너레이터 토크 값과 기어 비 브레이크 계수를 곱한 값이다. 전동기 부하 신호는 페달에 의해 생성된 부하와 브레이크 압력에 의해 생성된 부하 신호의 합으로 가속 시 양의 값, 감속 시 음의 값을 가진다. 페달에 의해 생성된 부하 신호는 입력 뻤에 따라 부하 신호를 계산하고 브레이크 압력에 의해 계산된 부하는 최대 압력과 브레이크 압력의 비와 브레이크 계수, 차량 속도에 따른 회생 제동 계수의 곱으로 계산



(a) Control logic for brake pressure



T_{motor} : Motor torque
 P_{recup} : Recuperation pressure
 P_{brake} : Brake pressure
 P_{brake_max} : Max brake pressure
 P_{driver} : Driver pressure
 $l_{cockpit}$: Load signal during traction
 l_{out} : Load signal during recuperation
 l : global load signal

(b) Control logic for motor load

Fig. 4 Control logic for regenerative braking system

된다. 가속 시 페달에 의해 생성된 부하 신호를 고려하고 감속 시 페달에 의해 생성된 신호와 브레이크 압력에 의해 생성된 신호의 합으로 부하 신호를 계산한다. 전동기는 부하 신호 값이 양일 경우 모터, 음일 경우 제너레이터로 작동한다. Fig. 4는 브레이크 압력 제어 로직과 모터 부하 제어 로직을 도식화한 것이다. 전력공급은 배터리와 연료전지의 동작을 조절하는 제어 로직이다. 차량 속도, 감속, 가속 페달에 따라 정지, 감속과 가속을 판단한다. 정지 시 전력은 흐르지 않고, 감속 시 회생 제동이 실행되며 연료전지 전류는 흐르지 않고 배터리 충전만 진행된다. 가속 시 차량 요구 출력에 따라 배터리와 연료전지 조건에 따라 작동한다.

Fig. 5는 전력분배 제어로직을 도식화한 것이다. 충전 모드는 SOC 값에 따른 배터리 충전을 의미하며 SOC 하한값 이하 시 작동한다. 충전량은 회생 제동량과 연료전지와 모터의 전류 차에 따른 출력이다. 충전 모드는 SOC 상한 값까지 작동하며, 상한 값 도달 시 충전 모드는 종료된다. 배터리 모드는 배터리가 차량의 주 공급원이며 차량 요구 출력이 5 kW 이하 시 작동한다. 연료전지 모드는 연료전지가 차량의 주 공급원이며 차량 요구 출력이 5 kW 이상 100 kW 이하 시 작동한다. 연료전지는 회생 제동 시 휴지 상태이다. 하이브리드 모드는 차량 요구 출력이 100 kW 시 작동하며 연료전지가 주공급원, 배터리가 보조공급원이다.

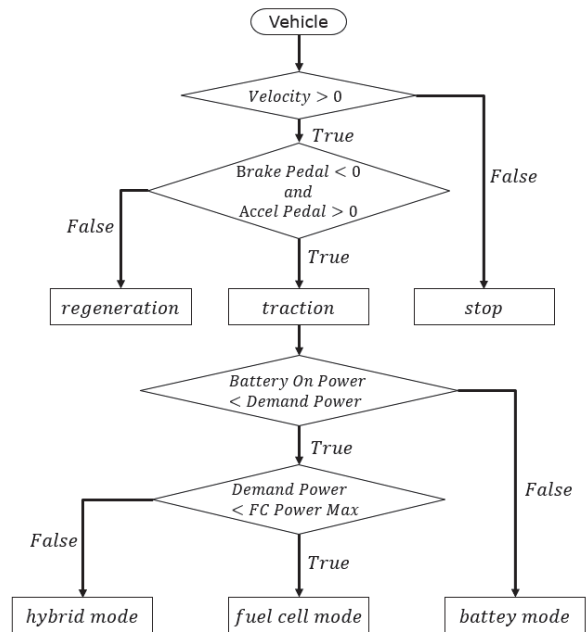


Fig. 5 Control logic for power distribution

2.2 수치해석 조건

본 연구는 세 가지 주행모드(K-WHVC, WHVC, 정속주행)에서 시뮬레이션을 수행하였고 Fig. 6과 같다. 정속주행모드의 속도는 72.96 km/h이고 각 주행 모드에서 SOC 상태 10%, 30%, 50%, 70%, 90%에 따라 에너지

소비효율값(km/kg)을 확인하였다. 시뮬레이션 속도 제어 모델은 Closed loop 모델이며 사이클 값을 타겟으로 하였다. 차량 컴포넌트의 차속을 피드백 받아 PI제어를 통해 가속 혹은 감속 페달 출력값을 사이클 속도 값으로 추종한다.

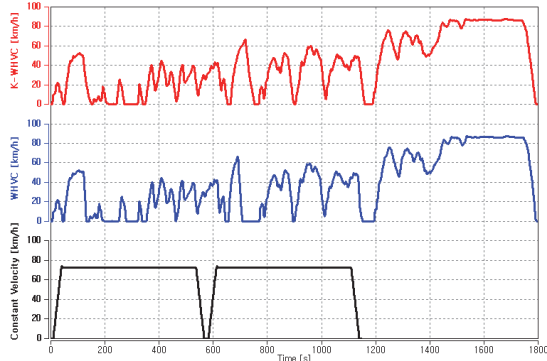


Fig. 6 Input test cycles

3. 결과 및 고찰

Figs. 7~9는 각각 K-WHVC, WHVC, 정속주행모드의 수소전기버스 에너지소비효율 해석결과를 나타낸 것이다. 그리고 세 가지 결과를 Table 2에 정량적 수치로 정리하여 나타내었다. 차량 순간 에너지소비효율값은 작동 모드에 따라 차이가 났다. K-WHVC와 WHVC 주행 모드에서 차속 0 km/h 일 때 순간 에너지소비효율이 0 값을 보이고, 배터리 모드 일 때와 감속 시 회생 제동으로 인해 연료전지가 휴지할 동안 순간 에너지소비효율값이 급격히 상승한다. 차량 누적 에너지소비효율 또한 주행모드에 따라 결과값 차이를 보였다. SOC값이 70%

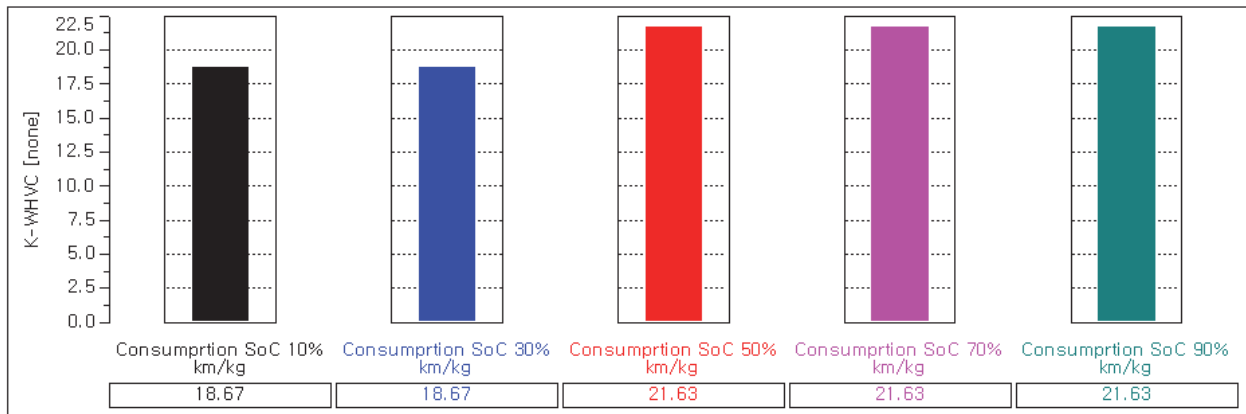


Fig. 7 Fuel efficiency of K-WHVC test mode according to SOC

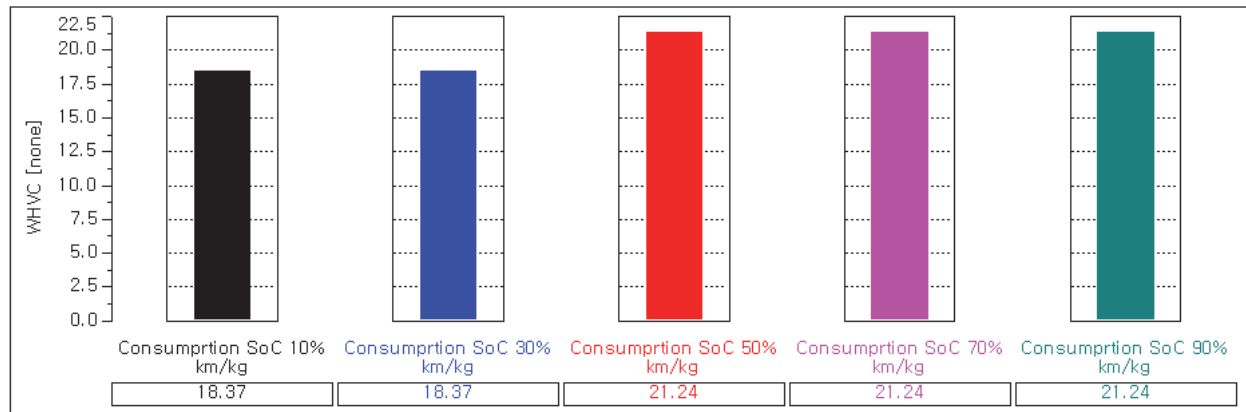


Fig. 8 Fuel efficiency of WHVC test mode according to SOC

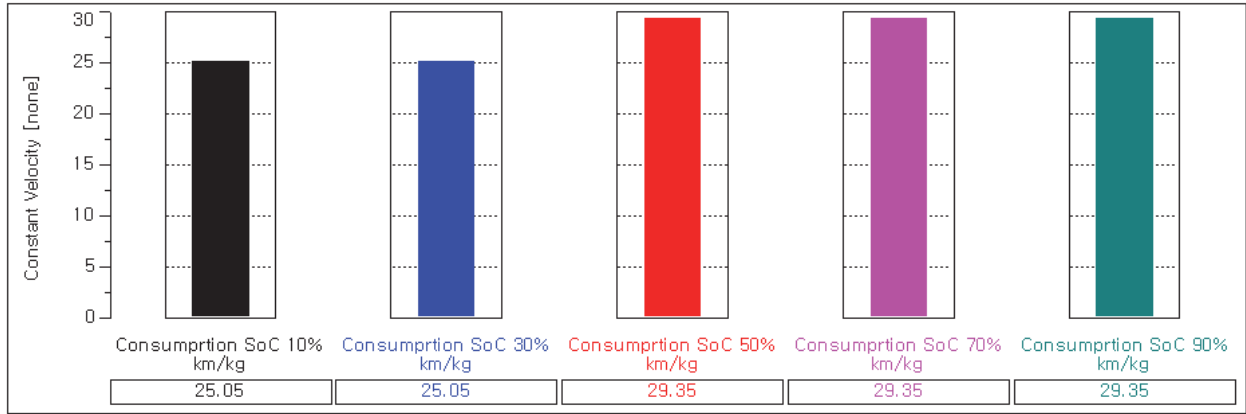


Fig. 9 Fuel efficiency of constant speed test mode according to SOC

Table 2 Results of fuel efficiency by test mode according to SOC

	K-WHVC (km/kg)	WHVC (km/kg)	Constant velocity (km/kg)
SOC 10 %	18.67	18.37	25.05
SOC 30 %	18.67	18.37	25.05
SOC 50 %	21.63	21.24	29.35
SOC 70 %	21.63	21.24	29.35
SOC 90 %	21.63	21.24	29.35

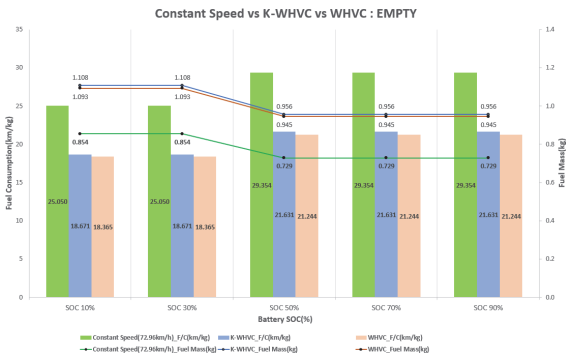


Fig. 10 Fuel efficiency results by test mode for empty load

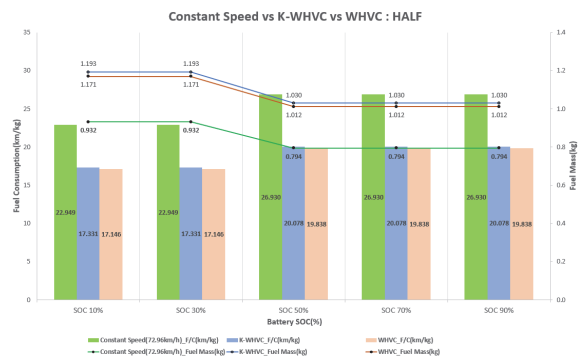


Fig. 11 Fuel efficiency results by test mode for half load

일 때 K-WHVC 사이클의 경우 최종 누적 에너지소비효율은 21.63 km/kg, WHVC는 21.24 km/kg이다. 차량 에너지소모 측면에서 K-WHVC가 WHVC보다 적은 에너지를 소모한다. 정속 주행의 경우 시뮬레이션 종료 시간에 따라 누적되며 1150초 주행 시 결과 값은 29.35 km/kg다. 배터리는 40 % 이하로 떨어질 시 충전모드로 전환되며 연료전지로부터 충전된다. 배터리 충전 모드 정의는 유저가 임의로 설정이 가능하다. 배터리 SOC가 10 %, 30 % 일 때는 충전모드로 인해 에너지소비효율이 더 나빠지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10, Fig. 11은 차량 중량별 에너지소비효율을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 10은 수소전기버스의 공차중량 조건의 모드별 시뮬레이션 결과이고, Fig. 11은 수소전기버스의 반적중량 조건의 모드별 시뮬레이션 결과이다. 시험모드는 정속주행모드, K-WHVC, WHVC 세 가지 주행모드를 각각 비교하였다. 배터리가 40 % 이하로 떨어질 시 충전모드로 전환되기 때문에 공차중량일 때와 반적중량일 때 SOC 30 %, 50 % 에너지소비 효율 결과와 두 값의 차이를 나타내었다. 배터리 SOC에 따른 에너지소비효율 결과, 공차중량 기준 최대 4.304

km/kg, 반적중량 기준 최대 3.981 km/kg 차이를 나타내었다. 배터리 SOC 30-50 % 조건에서 정속주행모드의 에너지소비효율 편차가 가장 크게 나타났으며, 이는 정속주행으로 인해 타 모드 대비 에너지소비효율이 높으며 이에 따른 편차도 큰 것으로 판단된다. 반적중량과 공차중량의 에너지소비효율 편차 결과, 반적이 낮았으며, SOC 30 % 일 때(배터리 충전모드 적용 시) 편차가 SOC 50 % 일 때 보다 작았다.

종합적으로 본 연구에서 개발된 수소전기버스 에너지소비효율 및 동력성능 예측을 위한 1D 수치해석 모델이 적절한 결과를 예측하는 것으로 판단할 수 있다. 이를 활용하여 향후 수소전기버스 파워트레인의 요소별 에너지 흐름의 비중, 에너지 흐름 제어 로직 연구, 차량 에너지소비효율 및 동력성능 예측, 실내 측정방법 개선 연구 등에 다양하게 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한 본 시뮬레이션 결과는 실제 차량으로부터의 Input Data를 적용하지 못하고 예측된 결과로써, 실제 차량의 정확한 Input Data 적용 시 높은 유사성을 가질 것으로 예상되어 활용범위가 클 것으로 기대된다. 후속 연구로 실제 차량의 차대동력계 시험결과를 바탕으로 수치해석 모델 결과의 정확성 검증과 함께 모델 보완이 필요할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구는 수소전기버스 파워트레인의 모델링과 시뮬레이션을 통해 시스템의 동작 및 성능을 이해하고 분석하였다. 그 결과는 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 1) 본 연구는 세 가지 주행모드(K-WHVC, WHVC, 정속주행)에서 시뮬레이션을 수행하였고 각 주행 모드에서 SOC 상태 10 %, 30 %, 50 %, 70 %, 90 %에 따라 에너지소비효율값을 확인하였다.
- 2) 차량 순간 에너지소비효율값은 작동 모드에 따라 차이가 났다. K-WHVC와 WHVC 주행모드에서 차속 0 km/h 일 때 순간 에너지소비효율 가 0 값을 보이고, 배터리 모드 일 때와 감속 시 회생 제동으로 인해 연료전지가 휴지할 동안 순간 에너지소비효율값이 급격히 상승한다.
- 3) 차량 누적 에너지소비효율은 주행모드에 따라 결과값 차이를 보였다. 배터리는 40 % 이하로 떨어질 시 충전모드로 전환되며 연료전지로부터 충전된다. 배터리 SOC가 10 %, 30 %일 때는 충전모드로 인해 에너지소비효율이 더 나빠지는 것을 확인할 수 있다.
- 4) 배터리 SOC에 따른 에너지소비효율 결과, 공차중량 기준 최대 4.304 km/kg, 반적중량 기준 최대 3.981 km/kg 차이를 나타내었다. 배터리 SOC 30-50 % 조건에서 정속주행모드의 에너지소비효율 편차가 가장 크게 나타났으며, 이는 정속주행으로 인해 타 모드 대비 에너지소비효율이 높으며 이에 따른 편차도 큰 것으로 판단된다. 반적중량과 공차중량의 에너지소비효율 편차 결과, 반적이 낮았으며, SOC 30 % 일 때(배터리 충전모드 적용 시) 편차가 작았다.
- 5) 본 연구에서 개발된 수소전기버스 에너지소비효율 및 동력성능 예측을 위한 1D 수치해석 모델이 적절한 결과를 예측하는 것으로 판단할 수 있다. 이를 활용하여 향후 수소전기버스 파워트레인의 요소별 에너지 흐름의 비중, 에너지 흐름 제어 로직 연구, 차량 에너지소비효율 및 동력성능 예측, 실내 측정방법 개선 연구 등에 다양하게 활용 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(20223030030010)과 한국연구재단(No.RS-2022-00165861)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- 1) H. Ju, G. Kim and J. Park, "A Study on the Vibratory Characteristics of the Stack in Fuel Cell Vehicle at Driving Condition," Transactions of KSAE, Vol.18, No.5, pp.50-55, 2010.
- 2) J. Yoon and S. Min, "Fuel Cell System Operating Conditions to Minimize Hydrogen Fuel Cell Consumption in Vehicle Applications," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.2490-2495, 2022.
- 3) J. Woo and S. Yu, "Analysis of Dynamic Characteristics of AMESIM-based 20kW Class Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack," p.2482, 2022.
- 4) N. W. Na and D. Hong, "Fuel Cell Powertrain Modeling Using Carmaker," Korean Society for Precision Engineering Conference Proceedings, p.213, 2021.
- 5) Y. H. Hwang, Attention-based LSTM Real-time Energy Management Strategy of Fuel Cell Electric Bus, M. S. Thesis, Myonji University, Seoul, 2022.
- 6) S. Yun, J. Yun, S. Im and J. Han, "Experimental Study on Vortex Tube Energy Separation for Fuel Cell Electric Truck," Transactions of KSAE, Vol.30, No.3, pp.223-230, 2022.