

연료전지 트럭의 운전 부하 패턴에 따른 고분자 연료전지 스택의 동특성 시뮬레이션

손나민¹ · 무자히드 나심² · 김의연¹ · 이영덕^{1,2†}

¹한국에너지공과대학교 에너지공학부, ²한국에너지공과대학교 수소에너지연구소

Dynamic Simulation of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack under Various Operating Pattern of Fuel Cell Powered Heavy Duty Truck

NAMIN SON¹, MUJAHID NASEEM², UIYEON KIM¹, YOUNG DUK LEE^{1,2†}

¹Department of Energy Engineering, Korea Institute of Energy Technology, 21 Kentech-gil, Naju 58330, Korea

²Institute for Hydrogen Energy, Korea Institute of Energy Technology, 21 Kentech-gil, Naju 58330, Korea

[†]Corresponding author :
ydlee@kentech.ac.kr

Received 31 October, 2023
Revised 6 March, 2024
Accepted 4 April, 2024

Abstract >> In this study, a dynamic simulation model of a heavy-duty truck, equipped with a fuel cell power-train, has been developed and the dynamic behavior of the fuel cell stack has been investigated using. Output change simulations were performed according to several drive cycle load change of a fuel cell truck. Mathworks' Simulink and Simscape program were used to develop the model. The model is comprised of fuel cell power train, power converter system and truck vehicle part. The vehicle runs at targeted speed of the truck, which is set as the load of the system. The dynamic behavior of the fuel cell stack according to the weight difference were analyzed, and based on this, the dynamic characteristics of the fuel cell output power and battery state with simple load was analyzed.

Key words : Hydrogen(수소), Fuel cell(연료전지), Dynamic modeling(동적 모델링), Fuel cell truck(연료전지 트럭), Load variation(부하 변동)

1. 서론

날로 심각해지는 지구온난화와 이로 인해 초래되는 기후 위기는 이제 인류의 생존을 위협하는 수준까지 도달하고 있다. 다양한 분야에서 에너지 사용을 저감하고 온실가스 배출을 억제할 필요성에는 이견이 없지만 어느 나라도 아직까지 만족할 만한 수준

의 온실가스 배출 저감에는 도달하지 못하고 있다¹⁾. 이러한 심각한 상황을 반영하듯 최근 개최된 유엔 산하 기후변화협약 당사국 총회²⁾에서는 2030년까지 인류가 기후 시스템에 간섭할 수 있는 온도 상승 한계점을 1.5°C라고 표현하였다³⁾.

지구온난화와 기후 변화는 이산화탄소를 비롯한 온실가스 배출로부터 기인한다. 많은 국가들이 이를

저감하기 위한 다양한 정책을 도입하고 있고 산업 전반의 다양한 섹터(sector)에서 각자 가장 효율적인 이산화탄소 배출 저감 대책을 수립하고 있다⁴⁾.

이산화탄소의 배출 섹터는 발전(에너지), 수송, 산업, 건물 등 다양하게 구분되는데 이 중 수송 분야도 상당한 부분을 차지하고 있다. 수송 분야는 타 분야와 달리 배출원이 분산되어 있고 이동하기 때문에 배출량 저감이 상대적으로 어렵다. 수송 분야에 대한 국가별 통계는 서로 다르지만 대략 27% 정도의 이산화탄소가 수송 분야에서 배출되고 있다⁵⁾. 우리나라와 일본의 경우 각각 15.9%와 18.3%, 미국의 경우 29.9%의 이산화탄소 배출이 도로 기반 수송 섹터에서 발생하고 있다²⁾. 따라서 도로 운송 부분에서 이산화탄소 배출을 줄이는 것은 온실가스 저감과 기후 변화 대응을 위해 상당히 중요하고 시급한 과제라 할 수 있다. 2030 국가 온실가스 감축목표(nationality determined contributions)에 따르면 2018년 정부는 국내 수송 부분의 온실가스 감축목표를 28.1%로 설정하였고, 2021년에는 이를 37.8%로 상향 조정하였다⁶⁾.

도로 운송 부분의 이산화탄소 배출원은 일반 승용차량도 있지만 트럭도 있다. 화물을 운반하는 트럭은 단위 차량당 배출량이 크고 운송 거리가 길기 때문에 많은 이산화탄소를 배출한다. 또한 승용차량의 경우 하이브리드차, 전기차, 수소차 등 다양한 저감 방안이 존재하지만 대형 트럭에서는 전기 파워트레인을 사용하는 것이 제한적이다. 트럭의 경우 장거리 운전이 많고 무거운 화물 운송에 따라 고출력 운전이 필요하기 때문에 연료전지 기반의 수소 전기 트럭이 일반 배터리가 장착된 형태보다 더 적합한 것으로 평가되고 있다⁷⁾. 연료전지 기반의 수소 전기 트럭은 연료전지 시스템이 기본 전력을 생산하며 배터리에 저장된 에너지로 순간적인 최대 출력을 공급한다⁸⁾. 도로 운송용 연료전지 차량에는 주로 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)를 탑재한 연료전지 파워트레인이 사용된다⁹⁾. 우리나라 현대자동차(Seoul, Korea)에서는 엑시언트 모델에 연료전지 파워트레인을 장착하여 수소 전기 트럭을 제조하고 있으며 내수 시장과 유럽 시장을

대상으로 판매를 진행하고 있다¹⁰⁾.

연료전지 차량의 보급이 확대되면서 승용차량에 대한 동적 모델 개발과 차량 연계 시뮬레이션 연구는 활발하게 진행되었으나¹¹⁻¹⁵⁾ 연료전지 탑재 수소 전기 트럭에 대한 연구는 상대적으로 많이 진행되지 않았다. 본 논문에서는 PEMFC 스택을 탑재한 대형 트럭의 동적 시뮬레이션 모델을 개발하고 차량 모델과 연계하여 트럭의 운전 부하를 반영하여 연료전지 스택의 동적 거동을 모사하는 연구를 진행하였다. 그리고 개발된 시뮬레이션 모델을 기반으로 출력 부하 변동에 따른 연료전지 스택의 온도와 캐소드에서 배출되는 공기의 온도와 습도 변화를 예측하여 연료전지 스택의 운전 안정성을 확인하고자 하였다. 모델 개발을 위하여 Mathworks (Natick, MA, USA)의 Simulink와 Simscape 프로그램을 사용하였고, 연료전지 스택과 구동 장치(power train)를 모사하였다.

연료전지 트럭의 가속 페달이 시스템의 부하로 입력되면 해당 속도로 차량이 운행되도록 모터 및 동력 부가 제어되는 방식으로 모델을 구성하였다. 기본적인 부하 변동 패턴에 따른 연료전지 스택의 동적 거동을 분석하였으며 이를 바탕으로 대형 트럭의 운행 모드를 부하 입력으로 적용하여 가속 페달 입력에 따른 연료전지 및 배터리의 동적 특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1. 연료전지 시스템 모델링

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 연료전지 파워트레인을 사용하는 트럭 시스템을 Mathworks의 Simulink 및 Simscape 프로그램을 사용하여 모델링하고¹⁶⁾ 연료전지의 출력 및 배터리의 동적 거동을 분석하였다.

Fig. 1에 도시된 것처럼 연료전지 트럭의 모델은 크게 세 부분으로 구성하였는데, 연료전지 구동 장치 부분, 연료전지 에너지 관리 부분(energy management system, EMS), 트럭의 차체 동력 변환 부분으로 나누었다.

연료전지 부분은 전기화학 모델을 기반으로 출력 전류에 따라 출력 전압이 계산되도록 하였으며 전기 화학 반응에 따른 질량 보존과 전기화학 성능에 영향을 끼치는 물성치 값이 자동으로 계산되도록 하였다. 연료전지 부분은 Simulink 프로그램을 사용하여 입력되는 수소 및 공기의 유량을 제어하였다. 연료전지 스택의 연료극(anode)으로는 수소 기체가 공급되며 산화제인 산소는 산소극(cathode)으로 들어가는 공기를 통해 공급한다.

연료전지 전기화학 모델에서는 식 (1)과 같이 열역학적 평형 전압(V_{Nernst})에서 분극 저항(η_{act}), 옴 저항(η_{ohm}), 물질 전달 저항(η_{con})을 빼는 방식으로 운전 전압을 계산하였다.

$$V_{cell} = V_{nernst} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{con} \quad (1)$$

열역학적 평형 전압(V_{Nernst})은 식 (2)를 이용하여 계산하였다. 식 (2)에서 p_{H_2} , p_{O_2} , p_{H_2O} 는 각각 수소, 산소, 수증기의 분압을 나타낸다.

$$V_{nernst} = -\frac{\Delta G}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{p_{H_2}(p_{O_2})^{1/2}}{p_{H_2O}}\right) \quad (2)$$

연료전지 운전 전압 계산을 위한 분극 저항(η_{act}), 옴 저항(η_{ohm}), 물질 전달 저항(η_{con})은 식 (3)-(5)를 이용하여 계산하였다. 이때 식 (4)의 i_0 는 교환 전류 밀도(exchange current density)를 나타내며, 식 (5)의 i_L 은 최대 운전 전류밀도(limiting current density)를 나타낸다.

$$\eta_{ohm} = i_{op} R_{ohm} \quad (3)$$

$$\eta_{act} = \frac{RT}{2\alpha F} \ln\left(\frac{i_{op}}{i_0}\right) \quad (4)$$

$$\eta_{con} = \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{1 - i_{op}}{i_L}\right) \quad (5)$$

연료전지 모델에 사용된 주요 변수는 Table 1에 정리하여 나타내었다.

2.2. 연료전지 트럭 차량 모델

차량 모델의 파워 컨버터(power converter) 부분은 배터리와 컨버터 시스템으로 구성되어 있으며, 연료 전지에서 발생한 전기에너지가 배터리에 저장되고 저장된 에너지는 필요시 모터로 이동해 전기에너지를 운동에너지로 변환하도록 설계하였다.

모터에서 생산된 축 동력은 기어와 타이어로 전달

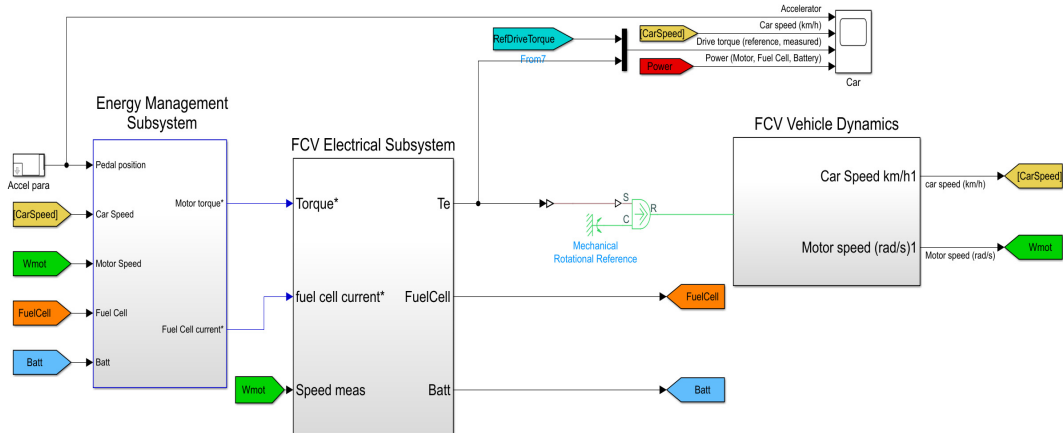


Fig. 1. Overall system of modeled FCEV truck system including energy management, fuel cell electrical, and vehicle dynamics calculating subsystems

되며 타이어는 차량의 무게, 도로와의 마찰 및 공기 저항을 고려하여 차량의 속도를 예측하도록 모델이 구성되어 있다. 모델 구성으로는 Simscape 프로그램을 이용하였는데, Simscape 프로그램은 라이브러리 및 블록 연결 시 자동으로 식을 구성해 주는 특징이 있다. 따라서 필요한 물리적 모델 구성 시 라이브러리를 연결하면 그에 맞는 식을 자동으로 생성한다. Simscape 프로그램의 ‘vehicle body’ 라이브러리를 이용하여 차체를 표현하였으며 차체에 타이어 역할을 하는 ‘tire’ 라이브러리를 연결하여 차체 및 타이어를 나타내었다. 또한 차량의 바퀴에 마찰 및 관성을 고려하는 ‘torsional spring-damper’ 및 ‘inertia’ 라이브러리를 추가하였다. 차량과 관련된 세부 사양은 Table 2에 정리하여 나타내었다.

2.3. 시스템 구동 패턴 입력 및 분석 방법

트럭 모델의 운전 분석을 위해 트럭의 가속 페달

Table 1. Parameters used in equations

ΔG	237.14 kJ/mol	α	0.5
F	96,485	i_{op}	stack operating current, A
R	8.314	i_0	1.23 A
T	operating temperature, K	i_L	1.4 A

Table 2. Parameters used in vehicle modeling¹⁸⁾

Vehicle weight (kg)		
Gross vehicle weight (GVW)		27,500
	front/rear	8,000/11,500/8,000
Gross combination weight (GCW)		42,000
Power train		
Fuel cell system	Maximum stack power	180 kW
High voltage battery		Lithium-ion battery
		630 V
		72 kW
Motor	Net power /torque	350 kW / 2,237 N·m

을 -1부터 1까지로 표현하여 입력값으로 설정하였다. 가속 페달을 최대로 밟았을 때를 1, 가속 페달을 밟지 않은 상태(브레이크 상태)를 -1로 정해 이를 입력값으로 넣었으며 입력값이 1일 때는 모터가 최대한으로 작동되도록 하였다.

시스템 입력값으로는 Fig. 2에 표시된 것과 같이 임의로 가속 페달의 입력값을 나타낸 accelerator load를 사용하였다. 간단한 load profile을 Fig. 2와 같이 임의로 생성하여 트럭의 운전 속도에 따른 연료전지의 출력 변동 및 배터리의 state of charge (SoC) 변화를 살펴보았다. 또한 공차 중량일 때의 경우와 화물을 포함하였을 때의 최대 무게인 차량 총중량(gross combination weight, GCW)일 때 연료전지 및 배터리, 트럭 거동의 결과값을 비교하였다.

3. 계산 결과 및 분석

3.1. 단순 가속 페달 시나리오 분석

차량과 연료전지, 배터리의 동적 거동을 알아보기 위해 단순한 가속 페달 부하를 설정하여 차량의 공차 중량일 때와 GCW일 때의 출력 결과값을 비교하였다.

3.1.1. 공차 중량을 적용한 경우

Fig. 3에서는 임의로 생성한 가상의 simple load profile을 적용했을 때 트럭의 속도 변화를 나타내고 있다. 그래프는 시뮬레이션 결과로 표현된 트럭의 속도이다. 시뮬레이션 설계 시 브레이크를 빼고 지면과

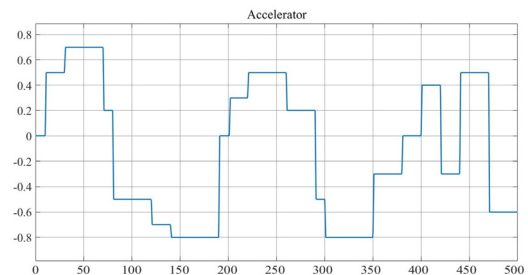


Fig. 2. Input accelerator load profile of the system

트럭 타이어의 마찰로만 감속하도록 설계되었기 때문에 가속 페달 입력값이 음수의 영역일 때 속도가 일정하게 감속하는 현상이 나타난다. 0초에서 70초, 200초에서 280초에 나타난 속도 결과값처럼 가속 시에는 모터 토크의 한계로 인해 한번에 급격하게 가속하기보다는 약간 천천히 가속하는 모습을 보인다. 모델링 결과값으로는 트럭이 가속하면서 최대 100 km/h에 가까운 속도까지 주행이 가능한 모습을 보인다.

Fig. 4의 그래프는 가속 페달의 simple load에 따라 변화하는 모터와 연료전지, 배터리의 출력을 나타낸다. 모터의 경우 주행 시작 시 0에서부터 시작해서 가속 페달이 양수일 때 급격히 상승하는 양상을 보인다. 가속 페달이 음수일 경우 브레이크가 없기 때문에 모터의 출력이 음수로 떨어지는 양상을 보인다. 연료전지의 경우 출력이 음수로 떨어지지 않기 때문에 0 이상의 값에서 출력이 나오는 모습을 보인다. 가속 페달이 음수일 때의 경우 생산된 전기에너지는 배터리에 저장되며, 이에 따라 Fig. 5와 같이 배터리

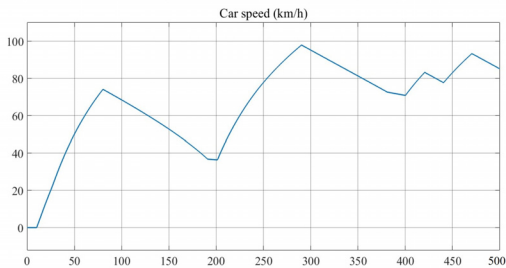


Fig. 3. Curb weight vehicle speed with accelerator load profile input

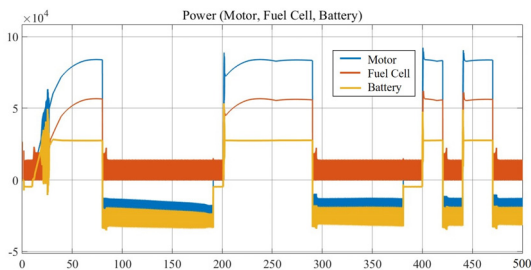


Fig. 4. Output power of motor, fuel cell, and battery at curb weight vehicle

의 SoC가 변화하는 모습을 보인다.

Fig. 5에서는 차량의 주행 상태에 따라 SoC가 변하는 것을 확인할 수 있다. 차량의 가속 페달을 밟지 않았을 경우 SoC가 상승하는 결과를 볼 수 있으며 가속 페달을 최대로 밟았을 때 SoC가 가장 많이 하락하는 모습을 보인다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 연료전지와 배터리의 전류와 전압 변화를 나타낸다. Fig. 6 입력된 부하 변화에 따른 출력 전류량을 나타낸다. 가속 페달 부하가 양수로 입력될 경우 전류 및 전압값이 증가하는 모습

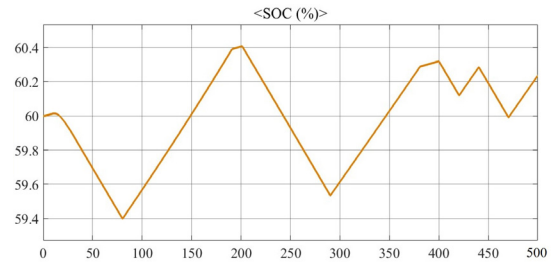


Fig. 5. Output state of charge of curb weight vehicle

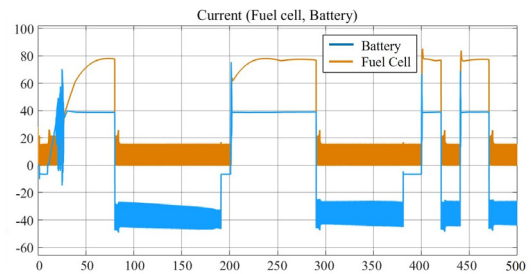


Fig. 6. Output current of fuel cell and battery at curb weight vehicle

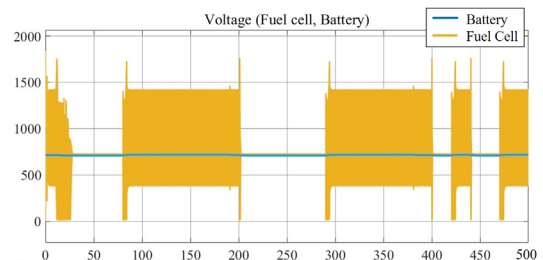


Fig. 7. Output voltage of fuel cell and battery at curb weight vehicle

을 보이며 가속 페달 부하가 음수일 경우 연료전지의 전류는 0에 가깝게, 배터리의 경우 전류가 음수로 나타나는 모습을 보인다. 이는 배터리에서 생산된 전류가 음수라는 뜻이며 연료전지에서 생산된 전기에너지로 인해 배터리가 충전된다는 것과 같은 의미이다.

Fig. 7은 주행 시 연료전지와 배터리의 전압 변화를 나타낸다. 전압 변화의 경우 배터리의 출력 전압은 630 V로 일정하지만 연료전지의 경우 가속 페달 부하 상태에 따라 변화하는 양상을 보인다. 가속 페달 부하가 양수일 경우 연료전지의 출력 전압은 배터리와 마찬가지로 630 V이지만 가속 페달 부하가 음수로 입력될 경우 연료전지의 전압은 매우 심하게 변하는 모습을 보이며 1,500 V 가까이 전압이 증가하는 모습이 나타난다.

3.1.2. GCW 무게를 적용한 경우

연료전지 트럭의 거동에 대해 더 자세히 알아보기 위해 GCW 시 차량의 운행 및 연료전지 스택과 배터리의 특성 변화를 살펴보았다. 차량의 GCW는 엑시언트 FCEV 트럭의 6×2 Cargo 모델(Hyundai, Seoul, Korea)의 최대 GCW인 42톤으로 설정하였다¹⁷⁾.

Fig. 8에서는 3.1.1과 동일한 가속 페달 부하를 적용했을 때 트럭의 속도 변화를 나타내고 있다. 그래프는 Fig. 3과 마찬가지로 시뮬레이션 결과로 표현된 트럭의 속도이다. 동일한 가속 페달 운전 부하를 적용하였기 때문에 3.1.1에서 언급되었던 0초에서 70초, 200초에서 280초에 나타난 속도 결과값처럼 가속 시에는 모터 토크의 한계로 인해 한 번에 급격하게 가속하기보다는 약간 천천히 가속하는 모습을 보

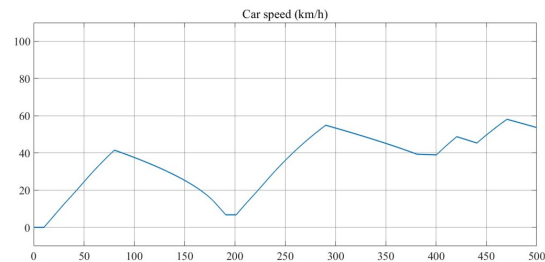


Fig. 8. Gross combination weight vehicle speed with accelerator load profile input

인다. 차량의 무게로 인해 공차 중량일 때와 다르게 가속이 빠르게 되지 않는 모습을 보이며 최대 속도가 60 km/h까지밖에 올라가지 않는 모습이 나타난다.

Fig. 9의 그래프는 Fig. 4와 마찬가지로 가속 페달의 입력 부하에 따라 변화하는 모터와 연료전지, 배터리의 출력을 나타낸다. 모터의 경우 주행 시작 시 0에서 시작해서 가속 페달이 양수일 때 상승하는 양상을 보인다. 공차 중량에서의 결과와 다르게 GCW의 경우 모터와 연료전지, 배터리 세 부분 모두 출력이 완만하게 상승하는 경향이 나타난다.

Fig. 10은 배터리 SoC를 나타내는데, 공차 중량의 경우와는 다르게 배터리의 SoC의 최대 충전 비율이 0.2% 정도 상승한 것을 볼 수 있다. 이는 속도 변화가 크지 않기 때문에 400-500초 구간에 필요한 에너지의 양이 적어 충전량이 상대적으로 많아지기 때문으로 보인다.

Fig. 11과 Fig. 12는 각각 연료전지와 배터리의 전류와 전압 변화를 나타낸다. Fig. 11은 입력 부하 변화에 따른 출력 전류량을 나타낸다. 앞서 언급된 것

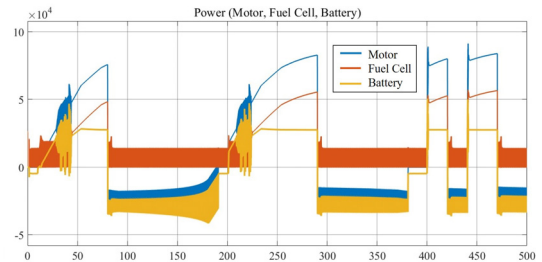


Fig. 9. Output power of motor, fuel cell, and battery at gross combination weight vehicle

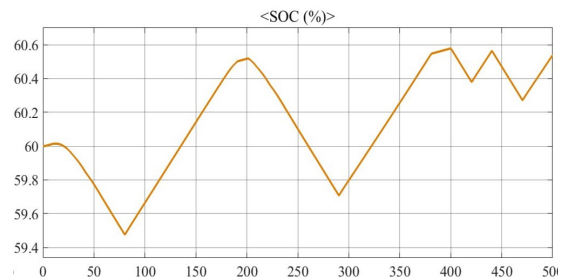


Fig. 10. Output state of charge of gross combination weight vehicle

과 같이 가속 페달 부하 값이 양수로 입력될 경우 전류 및 전압 값이 증가하는 모습을 보이는데, 공차 중량일 때와 비교했을 때 배터리 및 연료전지의 출력이 상당히 느리게 증가하는 모습을 보인다.

Fig. 12는 주행 시 연료전지와 배터리의 전압 변화를 나타낸다. 전압 변화는 공차 중량일 때의 결과와 비슷하게 나타나는데, 연료전지 출력 전압의 경우 전압이 낮게 나오는 부분이 더 많이 나타나는 경향을 보인다.

3.2. 분석 결과 요약

Simulink 및 Simscape를 사용하여 모델링한 연료전지 트럭은 임의로 제작한 단순 가속 페달 부하를 적용하여 공차 중량 및 GCW의 경우에 대한 출력 결과를 분석하였다. 공차 중량의 경우 가속 페달 변화 시 배터리와 연료전지, 모터의 출력값이 빠르게 변화하는 모습을 보인다. 연료전지의 경우 속도 변화 시 급격한 voltage 변화가 나타나는 거동을 보였으며 배

터리는 linear한 모습으로 충/방전되는 모습을 보였다.

GCW의 경우 가속 페달 변화 시 배터리와 연료전지, 모터의 출력값이 공차 중량과 다르게 보다 완만하게 변화하는 모습을 보인다. 연료전지의 경우 속도 변화 시 급격한 voltage 변화가 나타나는 거동을 보였으며, 공차 중량과 다르게 전압 강하가 더 길게 일어나는 결과를 보인다. 배터리는 일정한 비율로 충/방전되는 모습을 보이며, GCW의 경우 공차 중량의 경우보다 속도 변화가 느리기 때문에 배터리 SoC 쇠뭍값이 증가하는 결과가 나타난다.

4. 결론

본 연구에서는 연료전지 기반의 구동 장치를 사용하는 대형 트럭을 모델링하였다. 대형 트럭의 경우 중량이 큰 차량을 움직이는 것이기 때문에 일반 승용차와는 다르게 페달 작동 시 가속 및 감속이 빠르게 되지 않는 특성이 있다. 본 연구에서는 연료전지 트럭 모델에 임의의 운전 부하를 반영하여 공차 중량 및 GCW 시의 배터리와 연료전지의 출력 거동을 분석하였다.

트럭 거동의 경우 차량의 중량에 따라 출력 속도가 입력 부하 속도에 추종하는 정도에 차이가 발생하였으며 고중량으로 운행하는 경우 급가속 시 차량 속도가 느리게 증가하는 결과가 나타났다. 연료전지 출력값의 경우 차량 중량이 작을수록 차량 속도 변화가 수월하기 때문에 더 급격한 전압 변화가 나타난다. 따라서 차량 중량에 따른 차량 속도 변화는 향후 차량 운전 시 연료전지 스택의 degradation에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 연구비 지원으로 수행되었습니다(과제 번호: 20213030020280, 20210501010010, 20224000000320, 00234707).

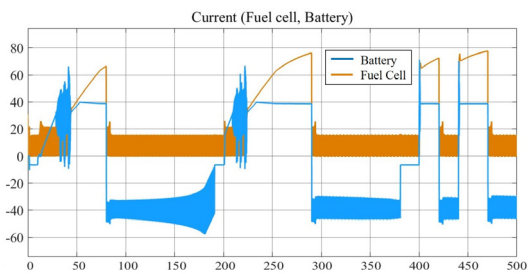


Fig. 11. Output current of fuel cell and battery at gross combination weight vehicle

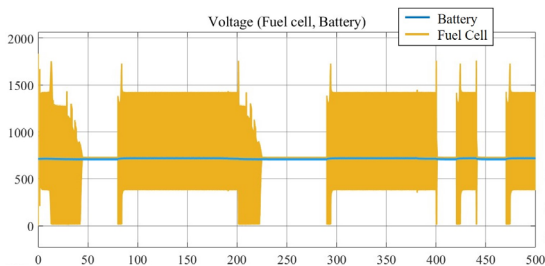


Fig. 12. Output voltage of fuel cell and battery at gross combination weight vehicle

References

1. International Energy Agency (IEA), "CO₂ emissions in 2022", IEA, 2023. Retrieved from: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>.
2. L. Atwoli, G. E. Erhabor, A. A. Gbakima, A. Haileamlak, J. M. K. Ntumba, J. Kigera, L. Laybourn-Langton, R. Mash, J. Muhia, F. M. Mulaudzi, D. Ofori-Adjei, F. Okonofua, A. Rashidian, M. El-Adawy, S. Sidibé, A. Snouber, J. Tumwine, M. S. Yassien, P. Yonga, L. Zakhama, and C. Zielinski, "COP27 Climate Change Conference: urgent action needed for Africa and the world", *The Lancet Oncology*, Vol. 23, No. 12, 2022, pp. 1486-1488, doi: [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(22\)00645-3](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(22)00645-3).
3. E. Crosser, "COP27 in a warming world beset by multiple crises", *Emancipations: A Journal of Critical Social Analysis*, Vol. 2, No. 1, 2023, pp. 7. Retrieved from: <https://scholarsjunction.msstate.edu/emancipations/vol2/iss1/7>.
4. C. Kim, G. Kim, and H. Kim, "Analysis of domestic and foreign policy and technology trends for hydrogen industry development", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 122-131, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.122>.
5. S. Aminzadegan, M. Shahriari, F. Mehranfar, and B. Abramović, "Factors affecting the emission of pollutants in different types of transportation: a literature review", *Energy Reports*, Vol. 8, 2022, pp. 2508-2529, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.161>.
6. Related Ministries Jointly, "2030 nationally determined contribution (NDC) upward plans", Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth, 2021. Retrieved from: https://www.2050cnc.go.kr/flexer/view/BOARD_ATTACH?storageNo=174.
7. R. K. Ahluwalia, X. Wang, A. G. Star, and D. D. Papadias, "Performance and cost of fuel cells for off-road heavy-duty vehicles", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 20, 2022, pp. 10990-11006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.144>.
8. J. Bernard, S. Delprat, F. N. Buchi, and T. M. Guerra, "Fuel-cell hybrid powertrain: toward minimization of hydrogen consumption", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 58, No. 7, 2009, pp. 3168-3176, doi: <https://doi.org/10.1109/TVT.2009.2014684>.
9. J. 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>.
10. S. Park, "Hyundai Mobis group, supplies Nexo hydrogen fuel cells to European truck manufacturers", *Kyunghyang Shinmun*, 2022. Retrieved from <https://www.khan.co.kr/economy/auto/article/202212121551001>.
11. C. Gong, L. Xing, C. Liang, and Z. Tu, "Modeling and dynamic characteristic simulation of air-cooled proton exchange membrane fuel cell stack for unmanned aerial vehicle", *Renewable Energy*, Vol. 188, 2022, pp. 1094-1104, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.104>.
12. P. Ahmadi and A. Khoshnevisan, "Dynamic simulation and lifecycle assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles considering various hydrogen production methods", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 62, 2022, pp. 26758-26769, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.215>.
13. M. A. Biberici and M. B. Celik, "Dynamic modeling and simulation of a PEM fuel cell (PEMFC) during an automotive vehicle's driving cycle", *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 10, No. 3, 2020, pp. 5796-5802, doi: <https://doi.org/10.48084/etasr.3352>.
14. A. Khalatbarisoltani, L. Boulon, and X. Hu, "Integrating model predictive control with federated reinforcement learning for decentralized energy management of fuel cell vehicles", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 24, No. 12, 2023, pp. 13639-13653, doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3303991>.
15. X. Tang, Y. Zhang, and S. Xu, "Experimental study of PEM fuel cell temperature characteristic and corresponding automated optimal temperature calibration model", *Energy*, Vol. 283, 2023, pp. 128456, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128456>.
16. P. Mercier, "Fuel cell vehicle (FCV) power train", MathWorks, 2024. Retrieved from <https://kr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33309-fuel-cell-vehicle-fcv-power-train>.
17. D. Yoo, H. Kim, S. Oh, and K. P. Park, "Durability evaluation of air-cooled proton exchange membrane fuel cells stacks by repeated start-up/shut-down", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 32, No. 5, 2021, pp. 315-323, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.5.315>.
18. Hyundai, "Xcient fuel cell truck" Hyundai, 2022. Retrieved from: <https://ecv.hyundai.com/global/en/products/xcient-fuel-cell-truck-fcev/>.