

1D 시뮬레이션을 활용한 50 kW급 건설기계용 연료전지 및 배터리 전력 분배 전략에 관한 연구

류호영¹ · 윤원준² · 이승현^{1†} · 황준필¹ · 오주영¹ · 박정수³ · 김희수^{1†}

¹건설기계부품연구원 친환경동력연구실, ²조선대학교 대학원 기계공학과, ³조선대학교 기계공학과

A Study on Power Distribution Strategy between Fuel Cell and Battery for 50 kW Construction Equipment Using 1D Simulation

HOYOUNG RYU¹, WONJUN YOON², SEUNGHYEON LEE^{1†}, JUNPHIL HWANG¹, JUYOUNG OH¹, JUNGSOO PARK³, HEE SU KIM^{1†}

¹Green Energy R&D Division, Korea Construction Equipment Technology Institute, 36 Sandan-ro, Gunsan 54004, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Chosun University Graduate School, 146 Chosundae-gil, Dong-gu, Gwangju 61452, Korea

³Department of Mechanical Engineering, Chosun University, 146 Chosundae-gil, Dong-gu, Gwangju 61452, Korea

[†]Corresponding author :
mechlee@koceti.re.kr
hskim@koceti.re.kr

Received 11 November, 2024

Revised 19 November, 2024

Accepted 13 December, 2024

Abstract >> Construction equipment generates extreme load variation, and since there are few test methods to evaluate vehicles. Therefore, research on fuel cell and battery power distribution takes much time and cost. In this study, a fuel cell system model for construction equipment was constructed using a 1D simulation tool, and six power distribution strategies between fuel cell and battery were established using load data obtained through actual vehicle tests. As a result of evaluating hydrogen consumption and state of charge data according to each control strategy, it was evaluated that the strategy of assistant to load variation using a battery at the rated power of 30 kW of the fuel cell was appropriate.

Key words : Construction equipment(건설기계), Load variation(부하 변동), 1D simulation(1D 시뮬레이션) Fuel cell system(연료전지 시스템), Power distribution(전력 분배), Control strategy(제어 전략)

Nomenclature

$\Delta\bar{g}_f$: 깃스 자유에너지.

F : 패러데이 상수.

I_{OC} : 전압원에 의한 순간 전류(A).

V_{act} : 활성화 손실 전압(V).

V_{mt} : 물질 전달 손실 전압(V).

V_{ohm} : 저항 손실 전압(V).

V_{Nernst} : 이론적 OCV 전압(V).

V_{delOC} : OCV 내부 손실 전압(V).

1. 서론

급격한 기후 변화로 인하여 전 세계적으로 탄소중립이 중요한 화두에 오르면서 기존의 화력 발전과 내연기관을 대체할 수 있는 친환경 기술이 주목받고 있다. 국내에서는 2021년 10월 정부의 2050년 탄소중립 시나리오¹⁾가 발표되면서 발전소, 모빌리티 및 건설 산업²⁾ 등 다양한 분야에서 성공적인 탄소중립을 위한 전략을 추진하고 있다. 많은 연구기관에서 친환경 기술 개발에 도전하고 있으며 그중 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)를 활용한 연구가 다방면으로 이루어지고 있다^{3,4)}. PEMFC는 다른 종류의 연료전지 대비 빠른 응답성과 저온에서 시동 및 작동이 원활한 특징을 가지고 있어 모빌리티 동력원으로 활용하기에 용이하다. 따라서 자동차 산업에서는 PEMFC와 고전압 배터리의 하이브리드화를 통해 안정적인 전력 공급과 운행 시간 및 내구성 향상 등을 이루면서 많은 연구 및 개발, 양산화가 진행된 상태이다⁵⁻⁷⁾.

한편 건설기계는 등록대수 대비 자동차보다 많은 오염물질을 배출하여 국내외적으로 대기오염에 대한 원인으로 지속적으로 제기되었으며^{8,9)} 점차 강화되는 환경 규제에 대응하기 위하여 건설기계 동력원을 친환경 기술로 대체하는 연구의 비중이 증가하고 있다¹⁰⁻¹²⁾. 하지만 연료전지 기반 건설기계 연구 및 개발을 어렵게 만드는 여러 요인이 존재한다. 건설기계는 일반적으로 부하 수준이 높다. 그리고 복잡한 움직임과 작업 환경 및 토양 조건에 의하여 급격하고 무분별한 부하 변동이 발생한다. 이러한 부하 변동은 연료전지 막전극 접합체(membrane electrode assembly, MEA)의 성능 저하를 초래할 수 있다^{13,14)}. 이를 보완하기 위한 대표적인 연구 중 하나는 부하 변동에 따른 연료전지 및 배터리 간의 적절한 전력 분배 전략을 수립하는 것이다^{15,16)}. 전력 분배 전략에 의해 연료전지의 부담을 배터리로 완화시켜 주고 작업 중 부하가 낮아져 연료전지의 잉여 전력이 발생하면 이를 배터리에 충전함으로써 연료전지와 배터리의 수명 및 성능을 확보할 수 있다. 그러나 건설기계는 종

류에 따라 다양한 작동 방식과 부하 특성을 가지고 있으며 일부 종류는 마땅한 성능 시험 규정이 정의되어 있지 않다. 이로 인하여 건설기계 분야에서 연료전지 및 배터리 전력 분배 전략을 연구하는데 많은 시간과 비용이 소비된다.

본 연구에서는 GT-SUITE (Gamma Technologies, Westmont, IL, USA)를 사용하여 건설기계 전력 분배 해석용으로 연료전지 스택 및 고전압 배터리, direct current (DC)-DC 컨버터, 모터로 구성된 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 연료전지 모델은 내부 실험을 통해 얻은 단전지 사양 및 분극곡선(polarization curve) 데이터를 활용하여 구축 및 검증은 수행한 후 50 kW급 스택으로 확장시켰으며 배터리 모델은 Kim 등¹⁷⁾의 논문을 참고하여 설계하였다. 그리고 연료전지 및 배터리 전력 분배 해석에 필요한 실제 건설기계 요구 출력을 얻고자 50 kW급 디젤엔진이 장착된 트랙로더의 차량 시험을 진행하였으며 시험 방법은 일본의 표준 시험법(Japan Construction Mechanization Association standard, JCMAS) H022의 V형 적재 시험법을 활용하였다¹⁸⁾. 이를 통해 취득한 부하 프로파일을 모델에 적용하여 전력 분배 해석을 수행하였고 수집된 출력값과 수소 소비량, state of charge (SOC)를 비교 분석하여 적절한 전력 분배 전략을 도출하고자 한다.

2. 시스템 구성

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 연료전지 하이브리드 시스템을 모델링하였다. 이 모델은 연료전지 스택과 배터리, DC-DC 컨버터, 인버터가 내장된 구동 모터, 에너지 관리 시스템(energy management system, EMS)으로 구성된다. DC-DC 컨버터는 연료전지와 배터리 간의 전압을 조절하고 인버터는 DC-DC 컨버터로부터 받은 전력을 구동 모터로 공급하는 역할을 한다. 구동 모터에 부하 사이클을 입력하면 작동에 필요한 출력을 EMS에 송신하며 EMS는 설정된 알고리즘을 통해 연료전지 및 배터리 간의 전력 분배를 결정한다.

2.1 연료전지 모델

내부 실험을 통해 PEMFC 단전지 분극곡선 데이터를 취득하였으며 실험에 사용한 분리판(bipolar plate), 국내 상용품 MEA, 화학양론비(stoichiometry ratio) 등의 사양을 적용해 단전지를 모델링하였다. 연료전지 셀 전압은 Nernst 방정식을 통해 계산된 개회로 전압(open circuit voltage, OCV)의 이론적 전압(식 [1])과 활성화 손실 전압(V_{act}), 물질 전달 손실 전압(V_{mt}), 저항 손실 전압(V_{ohm}), OCV 내부 손실 전압(V_{delOC})을 고려하여 식 (2)와 같이 계산된다¹⁹⁻²¹⁾.

$$V_{Nernst} = \frac{-\Delta \bar{g}_f}{2F} = \frac{(\bar{g}_f)_{H_2O} - (\bar{g}_f)_{H_2} - (\bar{g}_f)_{O_2}}{2F} \quad (1)$$

$$V_{cell} = V_{Nernst} - V_{act} - V_{mt} - V_{ohm} - V_{delOC} \quad (2)$$

모델링한 단전지를 검증하고자 실제 단전지 분극 시험 결과값과 시뮬레이션 통해 얻은 결과값을 비교하였으며 이를 Fig. 2에 나타내었다. 실험값과 모델값의 오차율은 약 1.59%로 확인되었으며 원인은 모델 수식에서 일부 고려되지 못한 전압 손실, 반응물 농도 변화, 실제 gas diffusion layer 및 멤브레인과 모

델의 일부 사양 차이에 의해 발생한 것으로 판단된다.

이후 단전지 모델을 구동 모터 요구 출력에 대응할 수 있는 스택 크기로 확장시켰으며 자세한 사양은 Table 1에 나타내었고 스택 모델로 다시 해석한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)를 보면 1 cell의 경우 최대 227.8 W, Fig. 3(b)를 보면 221 cells의 경우 최대 50.34 kW까지 출력을 낼 수 있다.

2.2 배터리 모델

배터리 모델은 Thevenin 등가회로 모델을 활용하였으며²²⁾ 배터리 SOC 및 온도에 따른 OCV와 내부

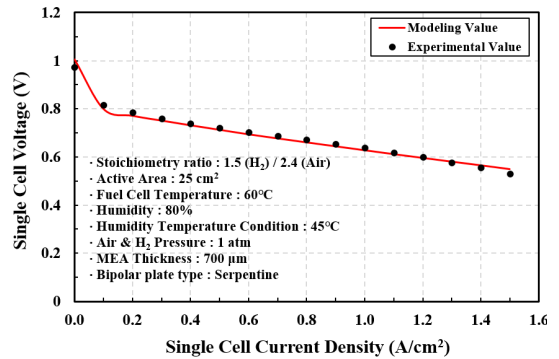


Fig. 2. Polarization curves of experimental and model

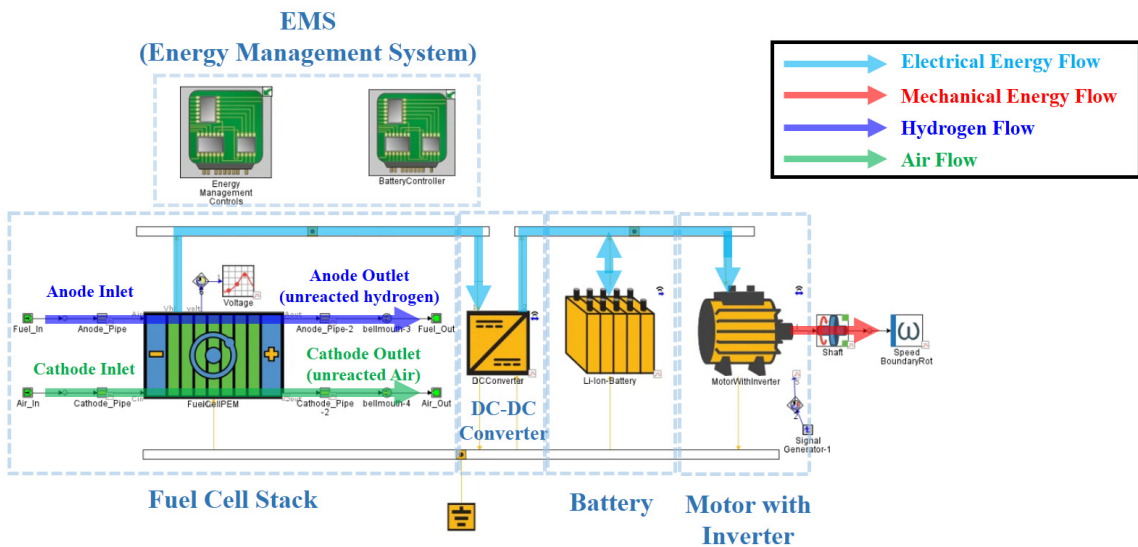


Fig. 1. Schematic diagram of fuel cell system model

저항의 3축 map 데이터를 입력하여 충·방전에 대한 전압 및 전류를 설정하였다. 시간에 따른 배터리 SOC 계산은 식 (3)-(5)에 의하여 계산된다.

$$Cap(t) = Cap_{Init} - \int_0^t I_{OC} dt \quad (3)$$

$$Cap_{Init} = SOC_{Init} \times Cap_{Max} \quad (4)$$

$$SOC = \frac{Cap(t)}{Cap_{Max}} \quad (5)$$

Table 1. Specifications of stack model

Parameter	Value
Active area	280 cm ²
Number of cells	221 EA
GDL thickness	300 μm
Membrane thickness	100 μm
Stoichiometry ratio	1.5 (H ₂)/2.4 (Air)

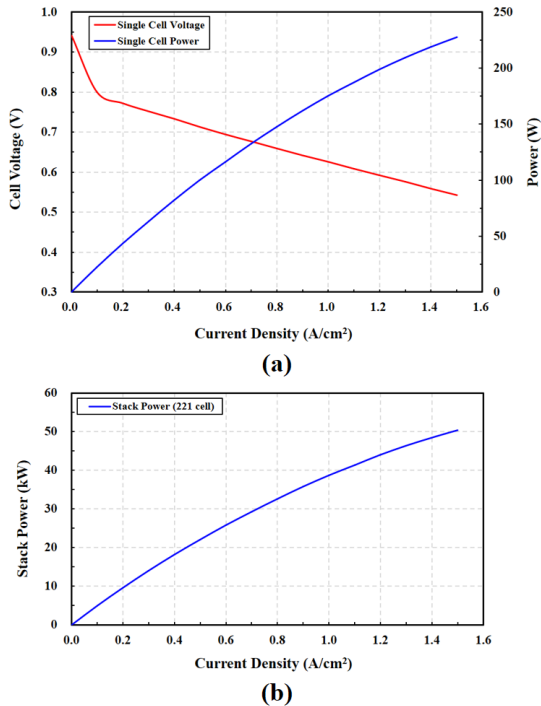


Fig. 3. Simulation results of PEMFC stack model. (a) Single cell of polarization curve and power. (b) Stack power

배터리의 용량이 클수록 연료전지의 부담을 줄일 수 있으나 실제 차량에서는 배터리 무게를 고려하여야 하므로 적절한 용량을 선정하여야 한다. Kim 등¹⁷⁾은 공항 물류차 부하 사이클을 활용한 50 kW급 연료전지 하이브리드 시스템을 모델링하여 배터리 용량 및 전력 분배 전략에 대한 연구를 수행하였으며 이 연구 내용을 참고하여 배터리 용량을 40 kWh로 설정하였다. 배터리 모델에 대한 사양 및 조건은 Table 2에 나타내었다.

2.3 구동 모터 및 전력 변환 모델

본 연구에서 전력 변환 장치와 모터는 map 기반 모델을 활용해 설계하였으며 map 기반 모델은 최소 매개변수만 입력하거나 설정된 map 데이터를 기반으로 작동하기 때문에 불필요한 데이터를 줄이면서 해석 결과를 얻을 수 있다. 전력 변환 장치와 모터 효율의 경우 제조사 및 설계에 따라 성능이 다르기 때문에 각 98%로 가정하였으며 75 kW급 출력의 map data를 활용하여 모터 사양을 선정하였다(Table 3).

Table 2. Specifications and conditions of lithium ion battery cell model

Parameter	Value
Battery cell voltage	3.31 V
Battery cell capacity	1.1 Ah
Battery temperature	313 K
Battery initial SOC	60%

Table 3. Specifications of motor and power conversion models

Parameters		Value
Motor	Maximum power	75 kW (2,000 rpm at 360 N·m)
	Efficiency	98%
Inverter efficiency		98%
DC-DC converter efficiency		98%

3. 전력 분배 전략

전력 분배 해석에 필요한 실제 건설기계의 출력을 얻기 위하여 건설기계 실차를 활용한 차량 시험을 진행하였다. 시험을 진행하는 동안 엔진과의 controller area network 통신을 수행하여 부하 데이터를 취득하였고 이를 분석하여 연료전지 내구성을 고려한 전력 분배 전략을 수립하였다.

3.1 건설기계 부하 특성 분석

차량 시험에 사용한 건설기계는 엔진식 T76 콤팩트 트랙로더(Doosan Bobcat, Bundang, Korea)이며 자세한 사양은 Table 4에 나타내었다. 휠 바퀴 타입의 스키드로더와 궤도 바퀴 타입의 트랙로더는 굴착, 주행, 지면 고르기 등 다양한 작업을 수행할 수 있다. 하지만 작업 성능, 연료 소비량, 배출가스 등에 관한 표준 시험법이 규정되어 있지 않아 부하 데이터를 취득하는 데 어려움이 있다. 본 연구에서는 일본 휠로더 표준 시험법인 JCMAS H022¹⁸⁾ V형 적재 시험법을 참고하여 트랙로더 차량 시험을 진행하였으며 시험 절차는 Fig. 4에 나타내었다. 시험은 ① 스타트 지점에서 시작, ② 토사 더미 돌진 및 tilt 동작을 통

한 토사 굴착, ③ 후진 및 덤프 장소 방향으로 회전, ④ lift 동작을 통한 bucket 상승 및 덤프 장소 이동, ⑤ 덤프 및 제자리 복귀까지의 작업 절차를 하나의 사이클로 정의하며 총 세 차례의 사이클 작업을 진행한 후에 연료 소비량을 산출한다.

차량 시험을 통해 취득한 엔진 부하 데이터를 Fig. 5(a)에 나타내었으며 각 작업 구간별로 부하 특성을 확인할 수 있다. 특히 ②와 ④ 작업 구간에서 급격한 변동 부하가 발생하는 것을 확인할 수 있으며 이러한 특성을 반영하여 전력 분배 해석을 위한 부하 프로파일을 도출하여 Fig. 5(b)에 나타내었다. 부하 변동이 큰 ②와 ④ 작업 구간에서는 최대 요구 출력값을 적용하고 상대적으로 부하 변동이 적은 ①, ③, ⑤ 작업 구간에서는 최댓값과 최솟값 사이의 중간 요구 출력값을 적용하였으며 JCMAS H022 V형 적재 시험법에 따라 총 세 차례 사이클을 수행하도록 모델에 적용하였다.

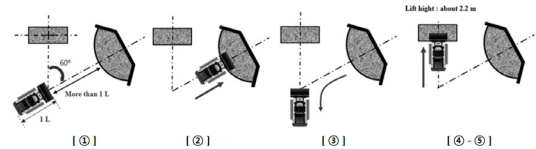


Fig. 4. Test procedure of V-type loading cycle¹⁴⁾

Table 4. Details of target construction equipment

Loader performance	Rated operating capacity	1,315 kg
	Operating weight	4,649 kg
	Tipping load	3,937 kg
	Break force - lift	3,087 kg
	Break force - tilt	2,850 kg
	Travel speed	0-10.9 km/h
Engine	Make/displacement	Bobcat/2.4 L engine (tier 4)
	Fuel type	Diesel
	Rated torque	280 N·m at 1,800 rpm
	Rated power	55.2 kW at 2,600 rpm

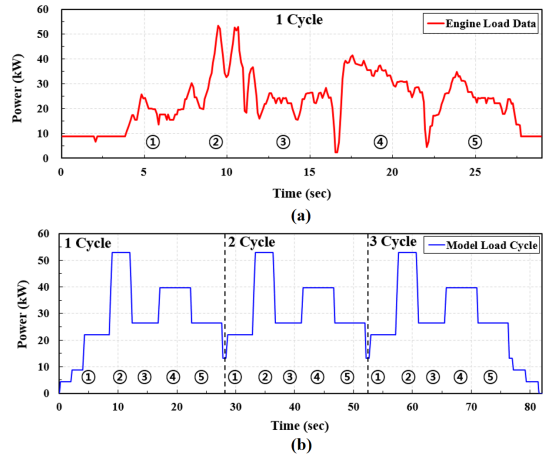


Fig. 5. V-type loading data. (a) Engine data. (b) V-type loading profile for model

3.2 전력 분배 전략 수립

PEMFC를 건설기계 동력원으로 적용하는 데 많은 어려움이 발생하며 앞서 확인한 JCMAS H022 V형 적재 시험처럼 건설기계의 급격한 부하 변동은 셀 전류의 급격한 변화로 인한 수분 함유량 변동, 촉매 층에 공기 및 수소 연료 공급 불안정, 촉매 Pt 입자 용해 및 성장을 야기하여 MEA 성능을 저하시킬 수 있는 주요 원인으로 보고되고 있다^{13,14)}. 이러한 문제에 대응하기 위해서는 연료전지를 적정 효율 구간에서 정격 출력으로 작동시키고 출력이 부족하거나 잉여 전력이 발생하면 이를 배터리로 충·방전시키는 것이 가장 이상적이다.

따라서 본 연구에서는 연료전지 효율 및 정격 출력에 따른 전력 분배 전략을 수립하여 EMS에 적용하였고 각 전략에 대한 내용은 Table 5에 정리하였

Table 5. Power distribution strategy by cases

Number of case	Operation method
Case 1	Fuel cell operates according to power demand, and battery operates above 40 kW
Case 2	Fuel cell operates at 20 kW rated power
Case 3	Fuel cell operates at 25 kW rated power
Case 4	Fuel cell operates at 30 kW rated power
Case 5	Fuel cell operates at 35 kW rated power
Case 6	Fuel cell operates at 40 kW rated power

다. 첫 번째 전력 분배 전략의 경우(case 1) 연료전지는 요구 출력에 맞춰 작동하며 요구 출력이 40 kW 이상이 되면 배터리가 보조 동력원으로 작동하는 기본 전략을 구축하였다. 두 번째(case 2)부터 여섯 번째(case 6)까지 전략 분배 전략의 경우 연료전지를 정격 출력으로 작동시키며 출력이 부족하거나 잉여 전력이 발생하면 배터리가 충·방전되도록 전략을 구축하였다. 이를 통해 각각의 전력 분배에 따른 연료전지의 수소 소비량과 배터리의 SOC 잔여량 결과를 분석하여 가장 적합한 전략을 도출하고자 한다.

4. 결과 및 고찰

6가지의 전력 분배 전략에 대한 시뮬레이션을 수행하여 연료전지 및 배터리의 출력 그래프를 Fig. 6에, 연료전지의 출력에 따른 에너지 효율 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. Case 1에서는 연료전지가 모터 요구 출력에 맞춰 작동 중에 고부하 사이클 구간으로 진입하여 40 kW 이상의 출력이 요구되면 EMS 제어를 통해 연료전지는 40 kW에서 유지됨과 동시에 부족한 출력분을 배터리로 충당하여 작동하게 된다. 이때 연료전지는 저부하 구간에서 60%대 효율, 약 40 kW 부하 구간에서 50%대 효율로 작동하는 것을 Fig. 7을 통해 확인할 수 있다. 이는 잉여 전력이 발생하지 않기 때문에 출력 및 연비 측면에서 효율적인 작동이라 볼 수 있다. 하지만 case 1 전략으로는 장시간

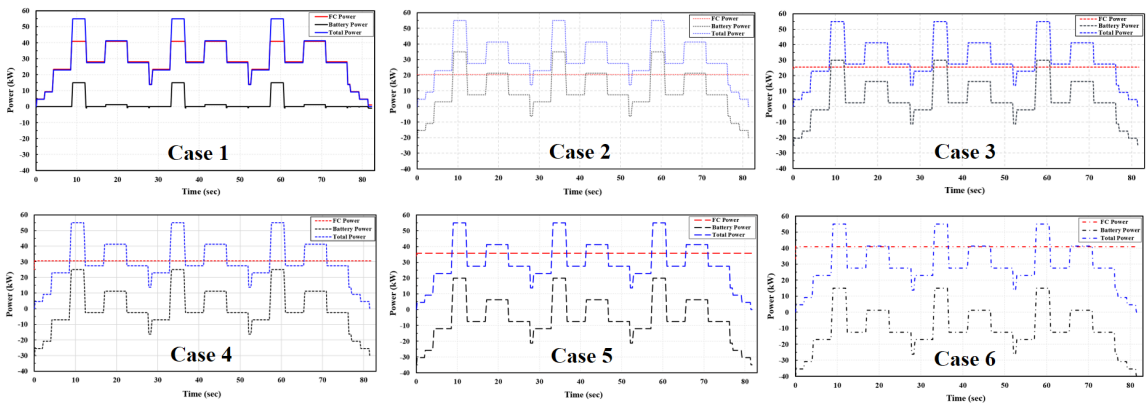


Fig. 6. Fuel cell stack and battery power with six different power distributions

가동 시 부하 변동에 의하여 연료전지 내구성이 떨어질 우려가 있고 잉여 전력을 통한 배터리 충전 과정이 없기 때문에 SOC를 유지할 수 없는 문제가 발생한다.

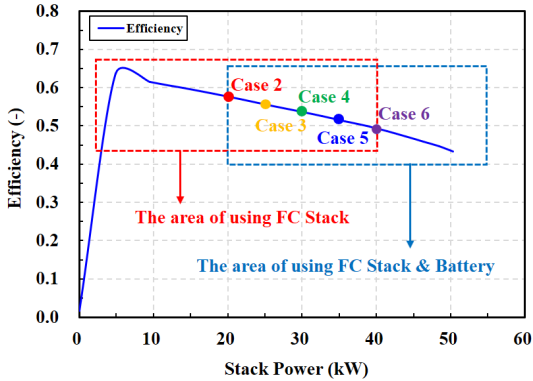


Fig. 7. Fuel cell hybrid system of operation strategy according to fuel cell efficiency

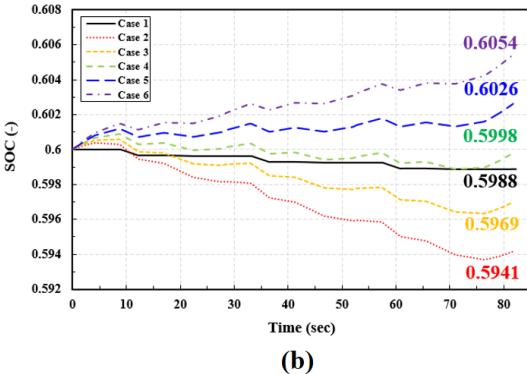
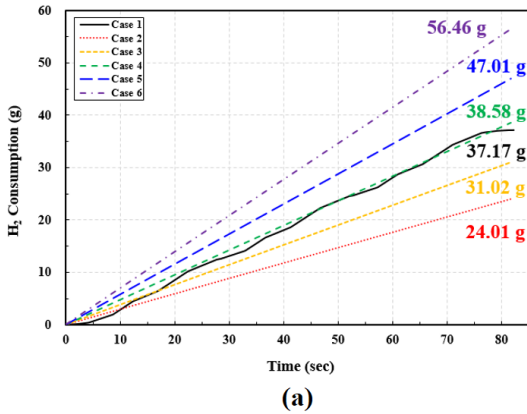


Fig. 8. Simulation results of six different power distributions. (a) Hydrogen consumption. (b) Battery SOC

Case 2부터 case 6까지는 연료전지 정격 출력 전략으로 인해 요구 출력에 따라 배터리가 충·방전되는 거동을 Fig. 6을 통해 확인할 수 있으며 이러한 전력 분배 전략은 부하 변동으로 인한 연료전지 내구성 저하를 예방할 수 있다. 하지만 Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 case 2에서는 연료전지가 20 kW 정격 출력 및 57.7%의 효율로 작동되며 case 3은 25 kW 및 55.6%, case 4는 30 kW 및 53.6%, case 5는 35 kW 및 51.6%, case 6은 40 kW 및 49.2% 효율로 작동되기 때문에 각 전략별 수소 소비량과 잉여 전력에 따른 배터리 충전량 차이가 발생한다. 이를 비교 분석하기 위해 전력 분배 case별 수소 소비량 결과 그래프를 Fig. 8(a), 배터리 SOC 결과 그래프를 Fig. 8(b)에 나타내었다. Case 2와 case 3은 연료전지의 높은 효율과 낮은 정격 출력 작동으로 인해 수소 소비량이 적게 계산되었으나 잉여 전력 발생이 적어 초기 SOC에서 상당히 떨어진 결과를 확인하였다. Case 5와 case 6은 상대적으로 높은 정격 출력 작동으로 인하여 수소 소비량이 많게 측정되었으며 그에 따라 잉여 전력 발생분이 많아 SOC가 상승한 결과를 확인하였다. Case 4의 경우 수소 소비량은 38.58 g이 계산되었는데 이는 각 case 중 case 1의 수소 소비량과 가장 근접한 것으로 나타났다. 또한 SOC는 59.98%로 초기 SOC에서 크게 떨어지지 않는 모습을 확인

Table 6. Hydrogen consumption and SOC over time for each case

Number of case	Hydrogen consumption (kg)		SOC (%)	
	1 hour	8 hours	1 hour	8 hours
Case 1	1.631	13.054	54.73	17.85
Case 2	1.054	8.432	34.09	Over discharge
Case 3	1.361	10.894	46.39	Over discharge
Case 4	1.693	13.550	59.12	52.97
Case 5	2.063	16.510	71.41	Over charge
Case 6	2.478	19.829	83.70	Over charge

하였다.

추가로 case별 V형 적재 시물레이션 결과값을 근거로 1시간 및 8시간 연속 동작하였을 때의 수소 소비량과 SOC 값을 산출하여 Table 6에 나타내었다. Case 2와 case 3은 배터리 충전량이 부족하여 배터리가 과방전되는 결과를 확인하였으며 반대로 case 5와 case 6은 배터리가 과충전되는 결과를 확인하였다. Case 4의 경우 수소 소비량은 case 1과 큰 차이가 없었으며 배터리는 초기 SOC에서 크게 떨어지지 않았다. 본 연구를 통해 수립된 전력 분배 case 가운데 연료전지의 내구성과 경제적인 측면을 고려하였을 때 case 4 전력 분배 전략이 가장 적합하다.

하지만 본 모델에는 연료전지 balance of plant (BOP) 시스템과 배터리 열관리 시스템에 필요한 전력이 구현되어 있지 않으며 실제 전력 변환 장치와 모터의 효율 및 손실 등을 감안하여 case 4와 case 5 사이의 전력 분배 전략도 고려해야 할 필요가 있다. 또한 V형 적재 시험 이외에 다양한 건설기계의 시험 및 시물레이션을 진행할 필요가 있다. 향후 후속 연구로 연료전지용 BOP 모델 개발 및 굴착기 및 지게차 등 다양한 종류의 건설기계 시험과 시물레이션을 수행할 예정이며 보완된 모델은 연료전지 기반 건설기계의 전력 분배 수립에 도움이 될 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 건설기계용 연료전지 시스템의 전력 분배 해석을 위하여 GT-SUITE 시물레이션 툴을 사용하여 모델 설계 및 검증은 수행하였으며 JCMAS H022 V형 적재 시험을 통해 얻은 50 kW급 엔진식 T76 트랙로더의 부하 특성을 분석하고 모델에 적용해 전력 분배 해석을 진행하였다.

1) 50 kW급 트랙로더의 부하 특성을 분석하여 일부 작업 구간에서 급격한 부하 변동이 발생함을 확인하였다. 이는 MEA의 성능을 저하시키는 문제가 발생시킨다.

2) 연료전지 정격 출력 전력 분배 전략을 수립하

였으며 도출한 V형 적재 프로파일에 적용하여 6가지 전력 분배 case에 대한 시물레이션을 수행하였고 각 case별 수소 소비량과 SOC를 비교 분석하였다.

3) 연료전지의 내구성과 효율, 배터리 충전을 고려했을 때 case 4 연료전지 30 kW 정격 출력 전략이 가장 적합함을 확인하였다.

4) 향후 BOP 모델을 추가하거나 타 종 건설기계 부하 사이클을 도출하는 등 다양한 시물레이션을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20223030030030).

References

- 2050 Carbon Neutrality and Green Growth Commission, "Data on the policy of 2050 carbon neutrality scenario", 2050 Carbon Neutrality and Green Growth Commission, 2021. Retrieved from <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=101&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=15>.
- H. I. Lee, "A study on carbon reduction strategies in the construction industry", Construction Economy Research Institute of Korea, 2022. Retrieved from <https://cerik.re.kr/report/research/detail/2666>.
- C. H. Kim, T. D. Kim, S. J. Son, G. S. Jung, and S. Y. Lee, "A study on power distribution strategy according to the load characteristics for electric tractor based on hydrogen fuel cell", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 73, No. 3, 2024, pp. 559-566, doi: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2024.73.3.559>.
- H. Son, J. Han, and S. Yu, "Development of a multi-physics model of polymer electrolyte membrane fuel cell using Aspen Custom Modeler", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 32, No. 6, 2021, pp. 489-496, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.6.489>.
- J. Han, Y. Kim, J. Woo, and S. Yu, "Commercial hydrogen vehicle power distribution simulation using fuzzy control", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 4, 2023, pp. 369-380, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.4.369>.

6. D. Lee, B. Kim, and S. Lee, "Load variation removal and stack durability experiments to improve lifetime of fuel cell stack for hydrogen electric vehicles", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 4, 2024, pp. 370-376, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.4.370>.
7. 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. 118482, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118482>.
8. Ministry of Environment, C. Shin, Korean Federation for Environmental Movement, Green Transport Movement, "Data book on the discussion of automobile fine dust reduction for the spread of eco-friendly transportation culture", National Assembly Library, 2018. Retrieved from https://ampos.nanet.go.kr:7443/materialSeminarDetail.do?control_no=PAMP1000056519.
9. California Air Resources Board, "Overview of amendments to the in-use off-road diesel-fueled fleets regulation", California Air Resources Board, 2023. Retrieved from <https://ww2.arb.ca.gov/resources/fact-sheets/overview-amendments-use-road-diesel-fueled-fleets-regulation>.
10. W. J. Jin, "Eco-friendly construction equipment technology trends using electric power systems", *The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 36, No. 2, 2022, pp. 8-13. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11063128>.
11. J. Kim, S. Han, and J. Bae, "Hydrogen Combustion engine technology for construction-industrial machinery", *Journal of Drive and Control*, Vol. 20, No. 4, pp. 151-154. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11615534>.
12. J. K. Sung, "[Serial planning] hydrogen fuel cell forklift nearing commercialization", *Monthly H₂ Economy*, Vol. 83, No. 7, 2024, pp. 76-83. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11847570>.
13. P. Ren, P. Pei, Y. Li, Z. Wu, D. Chen, and S. Huang, "Degradation mechanisms of proton exchange membrane fuel cell under typical automotive operating conditions", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 80, 2020, pp. 100859, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100859>.
14. J. Oh, H. Ryu, J. Hwang, K. Kim, S. Park, S. Lee, and H. S. Kim, "Experimental study on degradation of proton exchange membrane fuel cells for eco-friendly heavy equipment", *Journal of Power Sources*, Vol. 625, 2025, pp. 235677, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235677>.
15. K. Song, F. Li, X. Hu, L. He, W. Niu, S. Lu, and T. Zhang, "Multi-mode energy management strategy for fuel cell electric vehicles based on driving pattern identification using learning vector quantization neural network algorithm", *Journal of Power Sources*, Vol. 389, 2018, pp. 230-239, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.024>.
16. Y. Liu, J. Li, Z. Chen, D. Qin, and Y. Zhang, "Research on a multi-objective hierarchical prediction energy management strategy for range extended fuel cell vehicles", *Journal of Power Sources*, Vol. 429, 2019, pp. 55-66, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.04.118>.
17. 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.egyr.2023.01.096>.
18. Japan Construction Mechanization Association, "Earth-moving machinery: test methods for energy consumption - wheeled loaders", *Japan Construction Mechanization Association*, 2015, Retrieved from https://jcmanet.or.jp/iso_jis_jcmas/jcmas-ichiran/.
19. D. Murschenhofer, D. Kuzdas, S. Braun, and S. Jakubek, "A real-time capable quasi-2D proton exchange membrane fuel cell model", *Energy Conversion and Management*, Vol. 162, 2018, pp. 159-175, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.028>.
20. R. L. Edwards and A. Demuren, "Interface model of PEM fuel cell membrane steady-state behavior", *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, Vol. 10, 2019, pp. 85-106, doi: <https://doi.org/10.1007/s40095-018-0288-2>.
21. 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>.
22. D. H. Johnson, "Origins of the equivalent circuit concept: the voltage-source equivalent", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, No. 4, 2003, pp. 636-640, doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2003.811716>.