Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 748~758
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.748

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

자율주행 농업기계용 연료전지-배터리 하이브리드 전원 시스템 특성 분석

권예림[1,2] · 조구영[1] · 유승진[3] · 이상호[2†]

[1]단국대학교 기계공학과, [2]한국기계연구원 친환경모빌리티연구실, [3]한국기계연구원 산업기계DX연구실

Fuel Cell–Battery Hybrid Power System for Autonomous Agricultural Vehicles

YERIM KWON[1,2], GUYOUNG CHO[1], SEUNGJIN YU[3], SANGHO LEE[2†]

[1]Department of Mechanical Engineering, Dankook University, 152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 16890, Korea
[2]Department of Eco-friendly Mobility Power, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea
[3]Department of Industrial Machinery DX, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

†Corresponding author :
Sangho86@kimm.re.kr

Received 20 October, 2025
Revised 23 November, 2025
Accepted 26 November, 2025

Abstract >> The agricultural sector faces labor shortages due to an aging population and growing demands for carbon neutrality. In response, autonomous agricultural machinery powered by eco-friendly, long-duration energy systems is needed. Hydrogen fuel cells are an alternative. However, their slow response to load changes limits their standalone use. A battery is used as a supplementary power source. This study presents a hybrid power system composed of a PEMFC (Polymer electrolyte membrane fuel cell), a lithium-polymer battery, and a DC-DC converter. Experiments were conducted under varying fuel cell capacities, converter current allowances, and load profiles. 1 kW fuel cell system powered by a 1 kW fuel cell, operated for approximately one hour. In contrast, 2 kW fuel cell system, ran for eight hours. Increasing the converter's current allowance reduced SOC drop from 45.2% to 4.9%, maintaining a stable charge-discharge ratio.

Key words : Fuel cell(연료전지), Battery(배터리), Hybrid system(하이브리드 시스템), autonomous monitoring agricultural vehicle(자율주행 모니터링 차량)

1. 서 론

현대 농업은 고령화, 노동력 감소 그리고 기후 위기 등의 문제가 있다. 2023 농림어업 총조사에 따르면 국내 농가 수는 100만 가구 이하로 감소하였다. 그리고 농촌인구는 200만 명 미만으로 줄어들었으며, 전체 농업 종사자 중 65세 이상 고령인구가 차지하는 비율은 지속적으로 증가하고 있다[1,2].

한편, 농업 부문의 온실가스 배출량은 연간 약 2,100만 톤으로 국가 전체 온실가스 배출량의 약

2.9%를 차지한다. 이러한 문제에 대응하여 농림축산식품부는 “2050 농식품 탄소중립 추진 전략”을 수립하고, 농기계 동력원을 기존 내연기관에서 친환경-무탄소 전원 시스템으로 전환하는 것을 중장기 정책목표로 설정하였다[1].

고령화로 인한 노동력 감소 완화를 위해 국내와 국외에서도 농업기계의 자율주행 기술을 도입하고 있다. 국내에서는 정부 주도의 스마트팜 개발 및 보급 확대 정책과 함께 스마트 농작업에 자율주행 기반의 농업용 로봇 기술이 적용되고 있다. 농촌진흥청, 기업, 대학 등의 다양한 주체들이 방제, 생육 관리 및 수확 등을 위한 자율작업 로봇을 개발하고 있으며, 일부 시스템은 현장 실증과 상용화 단계에 진입한 사례도 보고되고 있다[3-8]. 국외에서는 파종 전 땅을 개간하는 green bot 그리고 sedney-대학에서는 파종 및 제초 작업을 할 수 있는 DI-wheel로봇을 개발했다[9].

온실가스 배출 및 탄소중립문제를 해결하기 위해서는 연료전지와 배터리가 농업기계의 동력원으로 고려되고 있다[10]. 배터리는 중량 에너지 밀도가 연료전지보다 낮고 충전에 오랜시간이 걸리는 문제가 있다. 반면, 모빌리티용으로 주로 사용되는 고분자 막 전해질 연료전지의 경우 부하 변화에 대한 실시간 응답이 어렵고 출력지연 등의 문제가 발생할 수 있다[11,12]. 이를 보완하기 위해 배터리를 결합하여 배터리가 순간적인 전력을 보조함으로써 시스템 전체의 응답성을 개선하고 배터리 단독 작동 시 문제가 되는 운전 시간 또한 개선할 수 있다.

선행연구에서는 PEMFC와 리튬이온 배터리로 구성된 하이브리드시스템을 차량에 적용하여 배터리로 109.7 km 주행했던 거리를, 연료전지를 주전원으로 하여 420 km 주행이 가능하게 하였다. Hwang과 Chang[14]의 연구에서는 소형 전기차량에 적용할 수 있는 PEMFC 리튬이온 배터리 기반 하이브리드시스템을 만들고 실제 도로 주행에서 가능성을 평가하였다. 연료전지는 일정한 출력 범위에서 작동하고 배터리를, 순간전력을 보조하고 연료전지의 잉여전력은 배터리에 충전되는 등의 거동을 보였다[13]. González 등[15]은 passive 형 연료전지 배터리 하이브리드시스템에서 연료전지를 range extender로 사용하여 작동시간을 2시간에 7시간으로 연장했다.

또한 UGV (Unmanned Ground Vehicle)나 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)에서도 연료전지 하이브리드시스템을 사용하여 배터리 단독 전원의 단점인 짧은 작동 시간을 개선하는 연구도 진행되었다[16,17]. 이러한 장시간 운전 문제는 농업 분야에서도 동일하게 나타난다. 농업 작업 특성상 하루 종일 또는 수십 시간 동안 연속적으로 작동해야 하는 경우가 있다. 하지만, 배터리는 긴 충전 시간으로 연속 운전이 어렵다. 따라서, Martini 등[18]은 연료전지와 배터리로 하이브리드시스템을 구성하여 작동시켰다.

선행 연구에서는 스택 용량, DC-DC 컨버터의 허용 전류, 부하 프로파일 변화 등 주요 변수에 따른 시스템 운전 특성과 연료전지–배터리 간 충-방전 균형 변화를 실험적으로 비교한 연구가 부족하다. 또한, 변동성이 큰 실제 작업 환경을 모사한 변동 부하 조건에서의 시스템 평가 역시 미비한 실정이다.

이에 본 연구에서는 농작물 모니터링용 자율주행 플랫폼의 동력 시스템을 실제로 제작하고, 실제 변동 부하 조건에서 연료전지 용량 및 컨버터 허용 전류와 같은 변수가 장시간 연속 작동 특성에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다.

2. 실 험

Fig. 1은 연료전지-배터리 하이브리드시스템이 동력원으로 작동되는 자율주행 플랫폼 사진이다. 해당 자율주행 플랫폼의 동력 시스템 요구사양은 Table 1과 같다. 주행 조건은 정격 출력이 약 820 W 최대 출력이 약 2,028 W이고 매니퓰레이터 동작, 센서 및 병해충감지기 등 작업전력을 합산하면 정격 출력이 약 1,220 W, 최대 출력이 2,428 W 요구된다.

2.1 Fuel cell-battery hybrid system

실험은 Fig. 2와 같이 연료전지, DC-DC 컨버터, 로더, Li-polymer 배터리로 구성되고 Fig. 3은 실제 구

Fig. 1. Autonomous monitoring agricultural platform

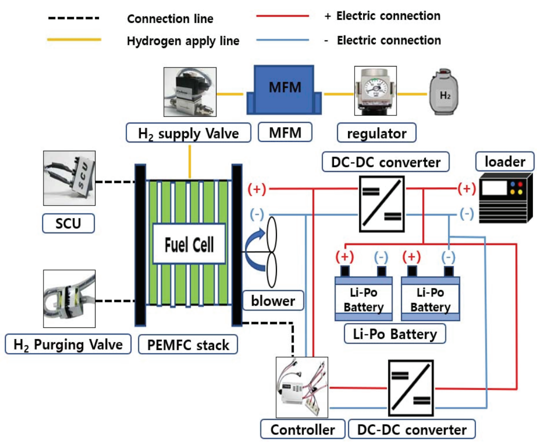


Fig. 2. Schematic of the fuel cell battery hybrid system

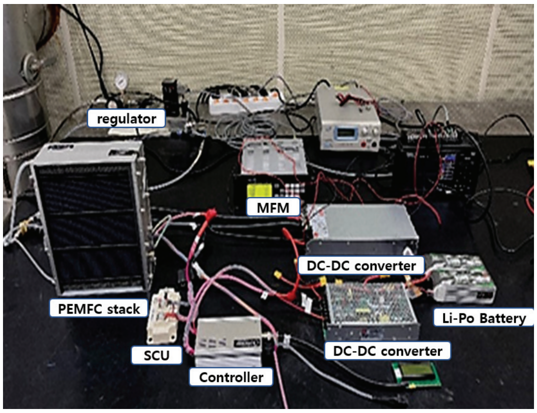


Fig. 3. Photo of the fuel cell-battery hybrid system

Table 1. Power train system requirements

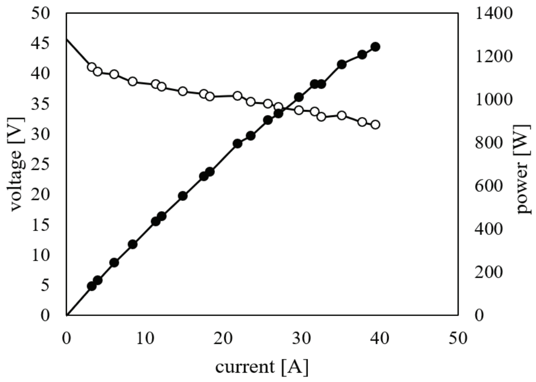
Category	Power	Note
Driving	Rated 820W	- Flat driving : torque 30 Nm - Driving speed : 3 km/h
	Peak 2028W	- Inclined driving(20% slope) acceleration : torque 73 Nm - Driving speed : 3 km/h
Manipulator	100W	- Standby power
Pest detector	100W	-
Sensor	200W	- Sensor and controller power consumption

성된 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 사진이다. 경량 소형화된 시스템을 구성하기 위해 공랭식 고분자 막 전해질 연료전지를 사용했다. Blower, purging valve, supply valve는 PEMFC stack 뒤에 있으며 loader는 테이블 밑에 위치하였다.

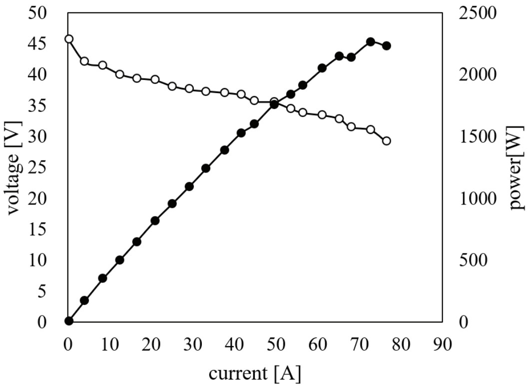
2.1.1 Fuel cell

정격 용량이 1 kW (H-1000, Horizon, Singapore)와 2 kW (H-2000, Horizon, Singapore)인 두 종류의 고분자 전해질막 연료전지(PEMFC) 스택으로 실험을 수행하였다. 두 스택 모두 48개의 셀로 구성되며, 개방전압은 약 46 V이다. 정격 전압·전류는 1 kW급의 경우 28.8 V @ 35 A, 2 kW급의 경우 28.8 V @ 70 A이며, 모두 open cathode 방식으로 블로워를 통해 외기를 공급받는다. 수소는 순도 99.999%(Special gas, Republic of Korea)의 고순도 가스를 사용하였으며, 수소 공급 압력은 제조사의 권장 사양에 따라 다르게 설정하였다. 1 kW급 스택에는 약 0.50–0.55 bar, 2 kW급 스택에는 약 1 bar로 설정하였다. 공급되는 수소 유량은 mass flow meter (5851E, Brooks Instrument, USA)를 통해 측정하였다.

가습은 Short Circuit Unit (SCU)을 순간적으로 동작시켜 과전류를 유도함으로써 스택 내부에서 수분 생성을 유도하는 방식으로 수행하였으며, 모든 운전 및 제어는 연료전지 컨트롤러에서 관리하였다. 전류는 전류 프루브(A622, Tektronix, USA)로 측정하였고, 데이터 로거(GL840, Graphtec, Japan)를 통해 기록하였다. Fig. 4(a)는 1 kW급 스택의 I–V–P 특성을



(a)



(b)

Fig. 4. I-V-P Curve (a) 1 kW Stack, (b) 2 kW Stack

나타낸다. 31 V, 39.5 A에서 약 1,240 W의 출력을 나타냈다. Fig. 4(b)에서는 2 kW급 스택의 결과를 제시하였으며, 29 V, 76.5 A에서 약 2,228 W를 나타냈다.

2.1.2 Battery

본 연구에서는 연료전지와 리튬폴리머 배터리를 결합하여 하이브리드 전원 시스템을 구성하였다. 사용된 리튬폴리머 배터리는 경량 구조와 높은 방전 성능을 갖추고 있기 때문에, 부하 변화에 대한 응답이 상대적으로 느린 연료전지를 보완하는 보조 전력원으로 적용하였다. 배터리 용량은 연료전지 출력을 제외한 상태에서 요구되는 최대 부하 조건을 만족하도록 설정하였으며, 모터의 정격 전압과 동일한 전압을 사용하도록 설계하였다.

본 연구에서는 리튬폴리머 배터리(GS5000-6S75, Ace, China) 두 개를 직렬로 연결하여 사용하였다. 각 배터리 팩은 정격 용량 5000 mAh, 6S1P 구조이며, 최대 방전율은 75 C이다. 리튬폴리머 셀은 3.3 V 미만에서 내부 손상 위험이 증가하므로, 시스템 전체 전압이 40 V에 도달하면 배터리 보호를 위해 실험을 종료하였다.

2.1.3 Converter

DC-DC 컨버터(AP-D100A2000W, iToolBro, China)를 적용하여 연료전지의 전압을 전기 모터와 배터리의 작동 전압인 50.4 V로 변환하였다. DC-DC 컨버터의 출력 전압과 전류는 가변 저항으로 연료전지 출력을 조절하였다.

2.2 작동 프로파일

실험에서는 모터를 대체하여 로더로 연료전지 하이브리드 시스템의 성능을 평가하였다. 로더(PEL-5008C-150-800, GW Instek, Taiwan)의 작동범위는 150 V, 800 A, 8 kW이며 연료전지의 동적 부하 및 정적 부하 조건에서의 성능을 평가하였다. Fig. 5는 선행연구에서 제시된 프로파일을 참고하여 본 연구의 요구조건을 반영한 프로파일이다[15]. 본 연구에서는 출력 프로파일을 1.0 kW, 1.1 kW, 1.3 kW로 구분하여 적용하였다. 기준이 된 정격 출력은 정속 주행과 기저 소비 전력을 포함한 약 1,220 W이며, 이를

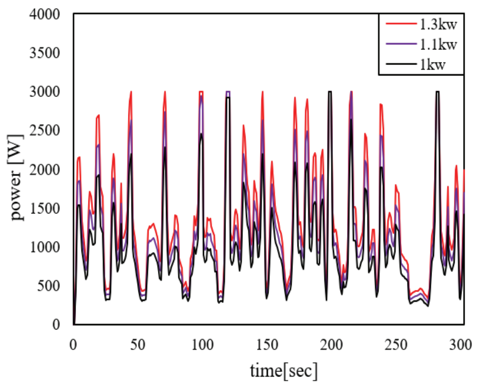


Fig. 5. Load profiles for transient tests

중심으로 부하 조건을 단계적으로 변화시켰다. 이 중 1.0 kW 조건은 정격보다 낮은 부하 상황이며, 1.1 kW는 정격과 유사한 상황, 1.3 kW는 정격 대비 높은 부하를 가정한 조건이다.

2.3 실험 방법

실험은 상온에서 수행하였고, 연료전지의 정적 부하 및 동적 부하 특성을 평가하였다. I–V 곡선은 정전류로 측정하였으며, 1 kW 스택은 2 A 단위, 2 kW 스택은 4 A 단위로 상승한 후 각 전류 구간에서 5분간 데이터를 수집하였다. 1 kW 연료전지 시스템과 2 kW 연료전지 시스템의 출력 특성은 연료전지–컨버터–배터리를 직렬로 연결한 상태에서 로더가 연료전지 용량을 초과하는 부하를 인가하여 연료전지와 배터리의 전력 분담 거동을 분석하였다. 이후, 선행연구에서 제시된 주행 프로파일을 본 연구의 시스템 스케일에 맞게 변환하여 적용하였다.

해당 주행 프로파일에서 연속 운전이 가능한 하이브리드 시스템을 구성하기 위해 1 kW 연료전지 스택과 2 kW 연료전지 스택으로 시스템을 제작하였으며, 평균 출력이 1 kW인 부하 프로파일을 기준으로 실험을 진행하였다.

다음은 허용 전류를 조절하여 연료전지 용량을 변화시키고, 평균 부하 출력을 다르게 하여 시스템 반응을 평가하였다. 컨버터 허용 전류 조건 22 A, 24 A, 26 A의 경우, 평균 출력 1.1 kW의 동일한 프로파일 조건에서 연료전지의 출력 범위를 변화시켰다. 이 실험에서 평균 부하 1.1 kW 조건에서 컨버터 전류 제한에 따른 연료전지와 배터리의 운전 특성 변화 및 연속 운전 가능성을 분석하였다.

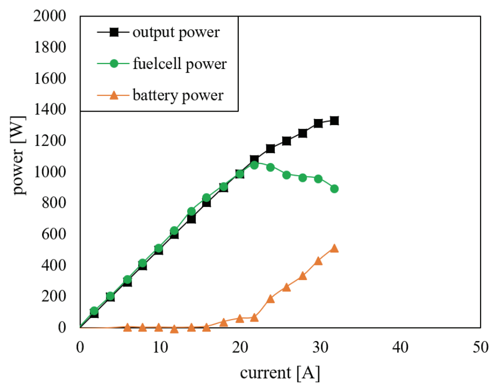
다음 실험에서는 컨버터 허용 전류를 26 A로 고정한 상태에서 작동프로파일 평균 부하가 각각 1 kW, 1.1 kW, 1.3 kW인 것으로 작동시켰다. 이를 통해 출력이 연료전지 한계 범위를 초과하는 구간에서 배터리의 보조 역할을 평가하였다.

각 실험에서는 프로파일 운전 중 배터리 전압, SOC 변화, 연료전지–배터리 간 충·방전 비율 및 운전 점유율을 분석하였다. 배터리 전압 변화는 실시간으로 기록하였으며, 전류 데이터는 전류 적산법을 이용하여 SOC를 계산하였다.

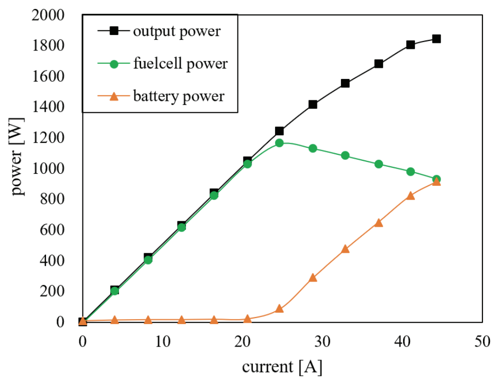
3. 결과 및 고찰

3.1 연료전지 용량에 따른 연속 운전 특성 분석

Fig. 6은 연료전지에 배터리를 연결한 구성에서 1 kW 및 2 kW 스택을 적용한 연료전지 시스템의 부하 조건에 따른 작동 특성을 나타낸다. 1 kW 스택은 약 1,000 W까지, 2 kW 스택은 약 1,150 W까지 연료전지 출력이 사용되었으며, 두 시스템 모두 부하가 연료전지의 공급 범위를 초과하는 구간에서는 배터리가 부족 전력을 보조하였다.



(a)



(b)

Fig. 6. Output characteristics (a) 1 kW stack, (b) 2 kW stack

본 시스템은 별도의 출력 제어 알고리즘 없이 DC-DC 컨버터에서 연료전지가 공급할 수 있는 허용 전류를 설정하여, 이 범위 내에서만 연료전지가 전력을 공급하고, 이를 초과하는 부하 전력은 동일 출력단의 배터리가 담당하도록 구성하였다. Fig. 6에서 전체 출력이 증가함에도 연료전지 출력이 감소하는 구간은, 부하가 증가함에 따라 배터리가 상대적으로 낮은 저항으로 인해 더 많은 전력을 부담하는 경향이 나타나는 것으로 보인다.

실험결과, 1 kW 스택을 적용한 시스템은 출력이 200 W(@4 A) 이상일 때 40%의 효율을 유지하였으며, 2 kW 스택을 적용하면 출력이 1,000 W(@20 A) 이하 구간에서 40% 이상의 효율을 유지하였다.

Fig. 7은 평균 출력 1 kW 프로파일에서 연속 운전에 따른 배터리 전압 변화를 나타낸다. 1 kW 연료전지 스택을 사용하면 약 1시간 작동 후 배터리 전압이 40 V 이하로 감소하여 실험을 종료하였다. 반면 2 kW 연료전지 스택은 약 8시간 동안 배터리 전압 강하 없이 연속 운전이 가능하였다. 1 kW 스택을 적용한 연료전지 시스템은 컨버터를 거친 출력이 945 W였으며, 2 kW 연료전지 스택을 적용하면 컨버터 출력이 1,022 W로 나타났다. 평균 작동 프로파일의 출력이 1 kW이므로 1 kW 스택을 적용하면 연료전지 출력이 부족하여 배터리 전압이 감소하였다.

Fig. 8은 1 kW 스택과 2 kW 스택을 적용한 연료전지 시스템의 SOC 감소율을 나타낸다. 한 시간 작동 후 1 kW 스택과 2 kW 스택을 적용한 하이브리드 시스템의 SOC는 각각 35.8%와 10.8% 감소하였다.

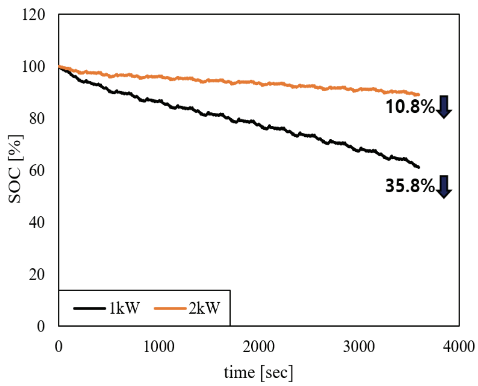


Fig. 8. SOC reduction rate at 1 kW profile with 1 kW and 2 kW stacks

Fig. 9는 작동 1시간 기준 충·방전 및 연료전지 작동 비율을 나타낸다. 1 kW 스택을 적용하면 연료전지 작동 비율이 71.7%, 배터리 방전은 17.4%, 충전은 10.8%로 방전률이 더 컸다. 반면 2 kW 스택이 적용된 시스템은 연료전지 작동 비율이 71.6%, 충전률 13.4%, 방전률 14.9%로 상대적으로 충·방전 비율이 균형을 이루며 작동하였다.

1 kW 연료전지 스택을 적용하면 컨버터 후단의 평균 출력이 약 945 W로, 부하 프로파일의 평균 요구 전력에 미치지 못해 연속 운전이 어려웠다. 이로 인해 배터리의 방전량이 충전량보다 많아 충-방전 불균형이 발생하였으며, 이러한 불균형은 시스템의

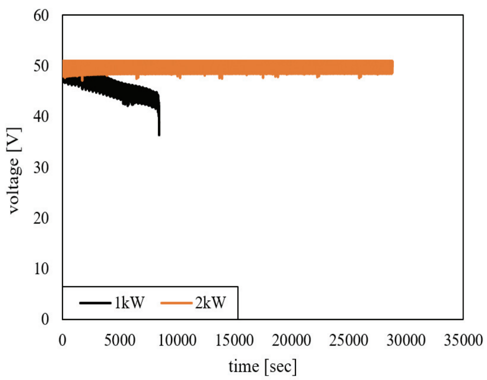


Fig. 7. Battery voltage at 1 kW profile with 1 kW and 2 kW stacks

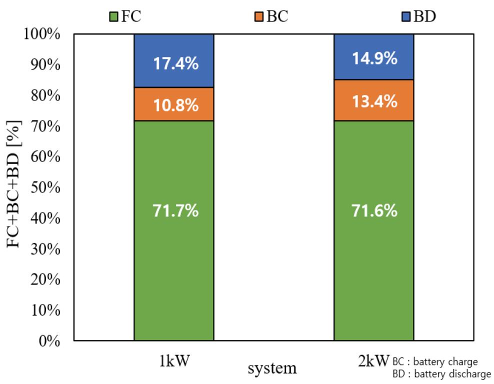


Fig. 9. Battery charge-discharge and fuel cell ratio at 1 kW profile with 1 kW and 2 kW stacks

전체 작동 시간 단축으로 이어졌다.

반면, 2 kW 연료전지 스택을 적용한 시스템은 컨버터 후단의 평균 출력이 약 1,022 W로 부하 프로파일의 평균 요구 전력과 유사하여 전반적으로 안정적인 작동이 가능하였다. 다만 부하가 순간적으로 상승하는 구간에서는 연료전지의 응답이 이를 즉시 따라가지 못해 배터리의 방전이 발생하였으며, 이후 부하가 감소한 구간에서 연료전지가 배터리를 충전하였으나 방전된 용량을 완전히 회복하지는 못한 것으로 보인다. 이러한 부하 변동의 누적 영향으로 방전량이 충전량보다 약간 높게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 연속 운전이 가능한 시스템을 구현하기 위해서는 배터리의 충-방전 균형 유지가 중요하다.

3.2 컨버터 허용 전류 변화에 따른 운전특성

Fig. 10은 컨버터 허용 전류 조건 22 A, 24 A, 26 A에서 운전 중 배터리 전압 변화를 나타낸 그래프이다. 허용 전류를 22 A로 설정한 경우, 연료전지 출력은 979 W로 프로파일 평균 출력(1.1 kW)에 미달하였으며 약 1시간 작동 후 배터리 전압이 감소하며 운전이 종료되었다. 반면, 허용 전류를 24 A, 26 A로 증가시킨 경우 연료전지 출력은 각각 1,106 W, 1,211 W로 프로파일 요구치를 충족하거나 초과하였으며, 운전 중 배터리 전압의 감소는 관찰되지 않았다.

Fig. 11은 1시간 운전 시점에서의 SOC 변화를 비교한 그래프이다. 허용 전류 22 A 조건의 경우 2시간도 작동하지 못하고 SOC가 초기 대비 45.2% 감소하였으나, 24 A와 26 A 조건에서는 각각 15.5%와 4.9% 감소에 그쳤다.

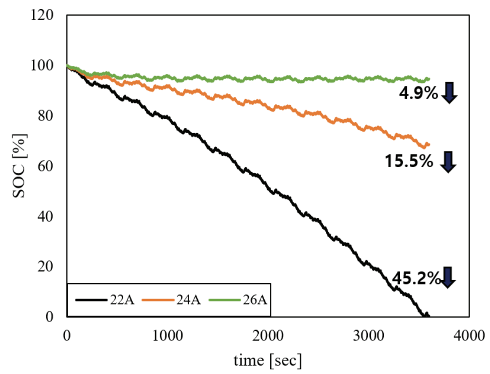


Fig. 11. SOC reduction rate at 1.1 kW profile with 22 A, 24 A and 26 A of current limits

Fig. 12는 운전 중 충·방전 비율을 나타낸 그래프이다. 컨버터 허용 전류 증가에 따라 연료전지–배터리 시스템의 충·방전 비율에도 뚜렷한 변화가 나타났다. 허용 전류 22 A 조건에서는 충전 비율이 10.9%, 방전 비율이 23.4%로 방전이 충전보다 2배 이상 높았다. 허용 전류 24 A 조건에서는 충전 14.5%, 방전 18.5%로 차이가 줄었으며, 허용 전류 26 A 조건에서는 충전 14.6%, 방전 15.3%로 두 비율이 가장 유사하게 나타났다. 이러한 결과는 컨버터 허용 전류가 증가할수록 연료전지의 충전 기여도가 확대되고 배터리의 방전 부담이 완화되는 경향을 보여준다.

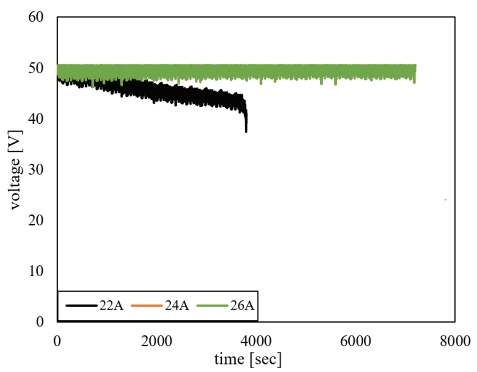


Fig. 10. Battery voltage at 1.1kW profile with 22 A, 24 A and 26 A of current limits

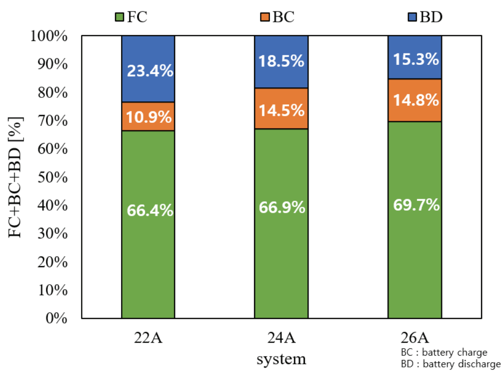
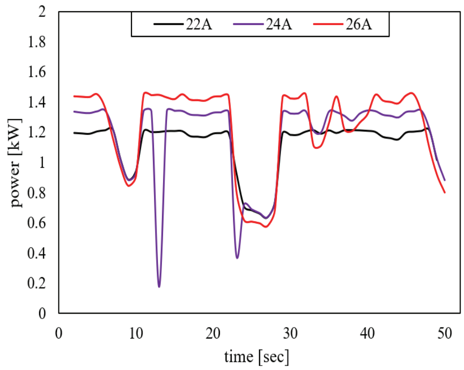
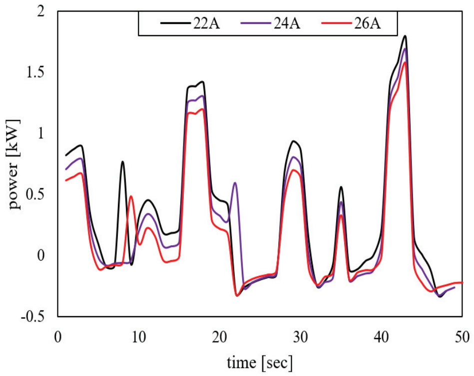


Fig. 12. Battery charge–discharge and fuel cell ratio at 1.1 kW profile with 22 A, 24 A and 26 A of current limits



(a) Fuel cell



(b) battery

Fig. 13. Voltage behavior at 1.1 kW profile with 22 A, 24 A and 26 A of current limits, (a) Fuel cell, (b) Battery

1.1 kW 프로파일 조건에서 연료전지와 배터리의 운전 특성을 종합적으로 분석한 결과, Fig. 13(a)의 0–10초 구간 연료전지 출력에서는 컨버터 허용 전류를 높게 설정할수록 출력이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. Fig. 13(b)의 배터리 출력 그래프에서는 허용 전류가 낮을수록 부족한 출력을 보완하기 위해 배터리 전력 사용 비중이 커지는 양상이 나타났다.

3.3 작동 프로파일 부하 증가에 따른 운전 특성 분석

Fig. 14는 작동 프로파일의 평균 부하가 1.0 kW, 1.1 kW, 1.3 kW인 조건에서 운전 중 배터리 전압 변화를 나타낸 그래프이다. 1.0 kW 조건은 컨버터 후단 출력이 1,025 W로 충분하여 운전 중 전압 저하가 발생하지 않았다. 1.1 kW 조건에서는 연료전지 출력이 1,211 W로 요구 출력을 안정적으로 공급하였으며 전압 변동 없이 운전이 유지되었다. 반면 1.3 kW 조건은 연료전지 출력이 1,286 W로 요구 출력에 미치지 못하여 운전 중 전압이 점차 감소하는 경향이 나타났다.

Fig. 15는 1시간 운전 시점에서의 SOC 변화를 나타낸다. 전압 저하가 관찰되지 않았던 1.0 kW 조건과 1.1 kW 조건은 SOC가 각각 2.72%, 4.99% 감소에 그쳤다. 반면, 출력이 부족했던 1.3 kW 조건은 SOC가 14.6%로 크게 감소하였다.

Fig. 16은 컨버터 전류 제한을 26 A로 고정한 상태에서 평균 부하 변화에 따른 연료전지–배터리 시

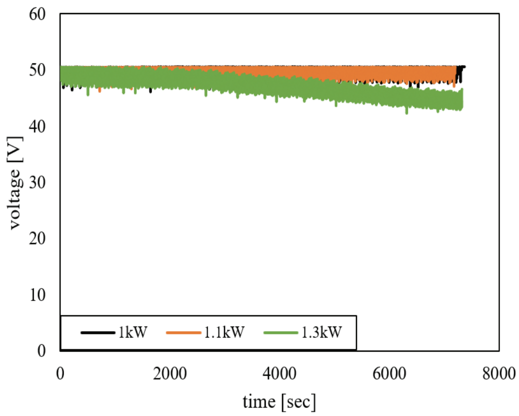


Fig. 14. Battery voltage at 1.0,1.1,and 1.3 kW profiles with 26 A of current limit

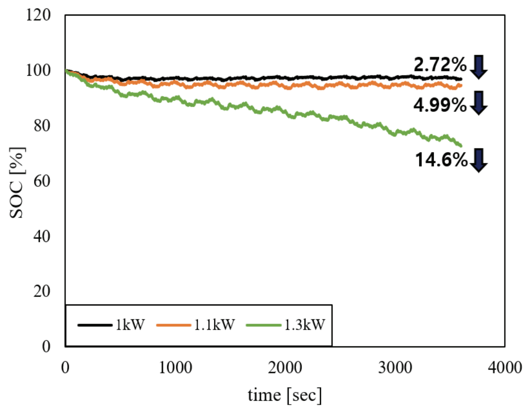


Fig. 15. SOC reduction rate at 1.0, 1.1, and 1.3 kW Profiles

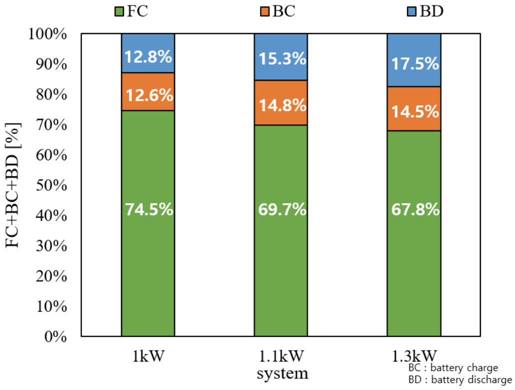


Fig. 16. Battery charge–discharge and fuel cell power ratio at 1.0, 1.1, and 1.3 kW profiles with 26 A of current limit

스템의 충·방전 비율을 나타낸다. 1.0 kW 조건은 방전과 충전 비율이 각각 12.8%, 12.6%로 거의 동일하였으며, 1.1 kW 조건은 충전 15.3%, 방전 14.8%로 큰 차이가 없었다. 그러나 1.3 kW 조건은 방전 17.5%, 충전 14.5%로 상대적으로 차이가 확대되는 경향을 보였다. 또한 시스템 출력이 평균 부하 출력보다 작을 경우 방전 비율이 증가하는 양상이 확인되었다.

Fig. 17(a)는 로더로 구동되는 부하 프로파일을, Fig. 17(b)와 Fig. 17(c)는 각각 연료전지와 배터리의 출력 변화를 나타낸다. 10–20초 구간의 1.0 kW 조건에서는 연료전지만으로 부하를 감당할 수 있어 배터리의 보조 전력 비중이 낮았다. 반면, 30–40초 구간의 1.3 kW 조건에서는 순간적으로 큰 전력이 요구될 때 배터리가 출력을 보조하는 양상이 관찰되었다. 동시에 연료전지가 로더 요구 전력을 초과해 동작하며 배터리를 충전하는 구간도 확인되었다. 이러한 결과는 연료전지 용량이 제한된 상황에서 부하 변화에 따라 연료전지와 배터리의 출력 분담 양상이 달라짐을 보여준다.

본 실험은 연료전지 출력이 고정된 상태에서 평균 부하 출력을 변화시키며 시스템 반응을 평가한 것이다. 1.0 kW 조건과 1.1 kW 조건에서는 연료전지가 부하를 충분히 감당하여 전압과 SOC가 안정적으로 유지되었다. 그러나 1.3 kW 조건에서는 출력 부족으로 인해 배터리 의존도가 높아지고, 전압 저하와 SOC 감소가 크게 나타났다. 또한 순간 부하 변화 구간에서는 연료전지가 최대 출력으로 동작하거나 출력이 부족한 경우 배터리가 보조하는 양상이 확인되었다. 이를 종합하면, 부하가 증가할수록 시스템 안

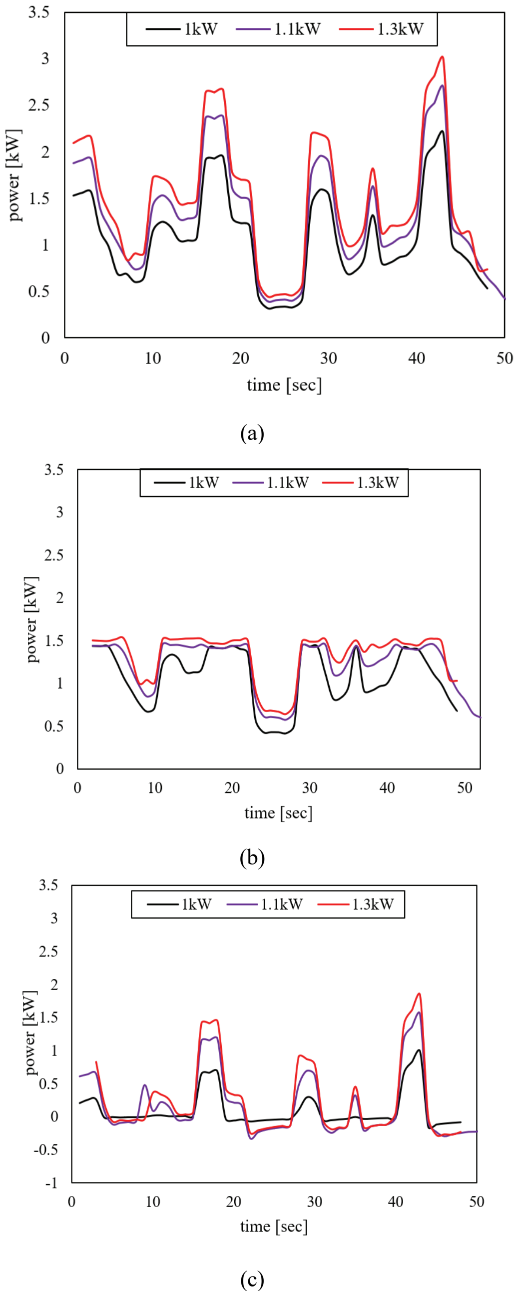


Fig. 17. Voltage behavior at 1.0, 1.1, and 1.3 kW profiles, (a) Loader, (b) Fuel cell, (c) Battery

정성이 저하되며, 연속 운전을 위해서는 부하 수준에 적합한 연료전지 용량 선정이 필수적임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 고분자막 전해질 연료전지를 주 전원으로, 리튬폴리머 배터리를 보조 전원으로 구성한 하이브리드 전원 시스템을 설계하였다. 설계된 시스템의 운전 특성을 분석하여 연속 운전 가능성을 검토하였으며, 연료전지 출력 용량, 컨버터 허용 전류, 작동 부하 조건이 시스템의 안정적 운전에 미치는 영향을 평가함으로써 과수원 모니터링용 자율주행 농업기계에 적합한 설계 방안을 제시하였다.

1) 연료전지 용량에 따른 운전특성

1 kW 프로파일에서 1 kW 연료전지 스택은 약 1시간 내 운전이 중단되었고, SOC는 35.8% 감소하였으며 충·방전 비율도 각각 10.8% 와 17.4%로 불균형했다. 반면 2 kW 연료전지 스택은 8시간 이상 연속 운전이 가능하였으며, SOC 감소율은 10.8%, 충·방전 비율은 13.3%/14.9%로 균형을 이루어 장시간 안정적인 운전이 가능하였다.

2) 컨버터 허용 전류 변화에 따른 운전특성

1.1 kW 프로파일에서 컨버터 허용 전류를 22 A에서 26 A로 증가시키자, 연료전지 출력이 979 W에서 1,211 W로 향상되었고 SOC 감소율은 45.2%에서 4.9%로 개선되었다. 충·방전 비율도 균형 상태로 전환되며 전압 저하 없이 연속적인 운전이 가능하였다.

3) 작동 프로파일 부하 증가에 따른 운전특성

1.1 kW 부하 조건에서는 연료전지 출력이 1,211 W로 부하를 초과하여 SOC 저하가 거의 없었고 전압도 안정적이었다. 그러나 1.3 kW 부하 조건에서는 연료전지 출력이 1,286 W로 부족하여 1시간 후 SOC가 14.6% 감소하고 전압이 하락하였다.

본 연구에서는 농업 분야 적용을 목표로 한 연료전지–배터리 하이브리드 시스템을 설계·제작하고, 세 가지 변수를 조합하여 실험을 수행하였다. 그 결과, 연료전지와 배터리의 작동 비율이 균형을 이룰수록 연속 운전 가능성이 높아졌으며, 이를 위해서는 작동 조건에 적합한 연료전지 용량 선정이 중요한 것으로 나타났다.

후 기

This work was supported by the National Research Council of Science & Technology (NST) grant by the Korea government (MSIT) (CRC23041-400). This study was also supported financially by the Korea Institute of Machinery and Materials through Institutional Project (Grant number NK254D).

References

1. Republic of Korea, "2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea", United Nations Framework Convention on Climate Change, Republic of Korea, 2020, Retrieved from https://unfccc.int/documents/267683.
2. Statistics Korea, "Results of the 2023 Agriculture, Forestry, and Fisheries Census", Statistics Korea, Republic of Korea, 2024, Retrieved from http://kostat.go.kr/board.es?mid=a10301080010&bid=226&act=view&list_no=430470.
3. Rural Development Administration, "Rural Development Administration launches the 'Open-field Smart Agriculture Pilot District' project", Korea Policy Briefing, Republic of Korea, Jan. 16, 2024, Retrieved from https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156634421.
4. Rural Development Administration, "Integrated management technology for agri-robots drives their adoption", Korea Policy Briefing, Republic of Korea, Apr. 23, 2025, Retrieved from https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156685959.
5. Rural Development Administration, "Smart greenhouse unmanned pest control robot", Korea Policy Briefing, Republic of Korea, Oct. 26, 2022, Retrieved from https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156526192.
6. S. J. Kim, "Seongbu Industry Develops 'Autonomous Speed Sprayer' to Lead Smart Agriculture", The Dong-a Ilbo, Republic of Korea, Oct. 31, 2024, Retrieved from https://www.donga.com

/news/Economy/article/all/20241030/130323853/1.
7. Doosan Mobility Innovation, "Development of agricultural solutions using hydrogen drones", Doosan Mobility Innovation, Republic of Korea, Dec. 22, 2020, Retrieved from https://www.doosanmobility.com/kr/about-us/news-events/news/21000156.
8. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, "2025 Agricultural Mechanization Implementation Plan", MAFRA, Republic of Korea, 2025, Retrieved from http://www.mafra.go.kr/home/5108/subview.do?enc=Zm5jdDF8QEB8JTJGYmJzJTJGaG9tZSUyRjc5MSUyRjU3MzA2MSUyRmFydGNsVmlldy5kbyUzRg%3D%3D.
9. L. F. P. Oliveira, A. P. Moreira, and M. F. Silva, "Advances in agriculture robotics: a state-of-the-art review and challenges ahead", Robotics, Vol. 10, No. 2, 2021, pp. 52, doi: https://doi.org/10.3390/robotics10020052.
10. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "The 2nd National Comprehensive Plan for Science and Technology R&D in Land, Infrastructure and Transport", National Science and Technology Council, Republic of Korea, 2023, Retrieved from https://hrstpolicy.re.kr/kistep/kr/policy/policyPlanKorDetail.html?board_seq=54157&board_class=BOARD01&rootId=2003000&menuId=2003102.
11. R. O'Hayre, F. B. Prinz, W. Colella, and S. Cha, "Fuel Cell Fundamentals", 2nd ed., Wiley, USA, 2005.
12. Y. R. Kwon, H. J. Yoo, B. G. Kang, K. W. Hong, S. K. Kwon, S. H. Lee, and G. Y. Cho, "Evaluation of electrochemical performance of PEMFCs with decontamination devices at marine environments", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 42, No. 1, 2025, pp. 57–63, doi: https://doi.org/10.7736/JKSPE.024.109.
13. H. Fathabadi, "Combining a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack with a Li-ion battery to supply the power needs of a hybrid electric vehicle", Renewable Energy, Vol. 130, 2019, pp. 714-724, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.104.
14. J. J. Hwang and W. R. Chang, "Characteristic study on fuel cell/battery hybrid power system on a light electric vehicle", Journal of Power Sources, Vol. 207, 2012, pp. 111-119, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.008.
15. E. L. Gonzalez, J. S. Cuesta, F. J. V. Fernandez, F. I. Llerena, M. A. R. Carlini, C. Bordons, E. Hernandez, and A. Elfes, "Experimental evaluation of a passive fuel cell/battery hybrid power system for an unmanned ground vehicle", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 44, No. 25, 2019, pp. 12772-12782, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.107.
16. M. Dudek, M. Zarzycki, A. Razniak, and M. Rosol, "Applying a 2 kW Polymer Membrane Fuel-Cell Stack Hybrid Power Sources for Unmanned Ground Vehicle", Energies, Vol. 16, No. 22, 2023, pp. 7531, doi: https://doi.org/10.3390/en16227531.
17. D. Çalışır, S. Ekici, A. Midilli, and T. H. Karakoc, "Benchmarking environmental impacts of power groups used in a designed UAV: Hybrid hydrogen fuel cell system versus lithium-polymer battery drive system", Energy, Vol. 262, 2023, pp. 125543, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125543.
18. V. Martini, F. Mocera, and A. Somà, "Numerical investigation of a fuel cell-powered agricultural tractor", Energies, Vol. 15, No. 23, 2022, pp. 8818, doi: https://doi.org/10.3390/en15238818.