

# 단일 스택 연료전지 전력 기술을 적용한 초전도 코일 충전에 관한 연구

서영민 · 노현우 · 구태형 · 하동우 · 고락길<sup>†</sup>

한국전기연구원 전기모빌리티연구단 수소전기연구팀

## Study on Superconducting Coil Charging Using Single-stack Fuel Cell Power Technology

YOUNG MIN SEO, HYUN WOO NOH, TAE HYUNG KOO, DONG WOO HA, ROCK KIL KO<sup>†</sup>

Hydrogen Electric Research Team, Electric Mobility Research Division, Korea Electrotechnology Research Institute, 12 Jeongui-gil, Seongsan-gu, Changwon 51543, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
rkko@keri.re.kr

Received 12 July, 2024  
Revised 22 July, 2024  
Accepted 25 July, 2024

**Abstract >>** In this study, a fuel cell with a single stack of 100 cm<sup>2</sup> was manufactured and a superconducting coil driving experiment was conducted. Fuel cell activation and performance evaluation were performed, and a method of applying current to a superconducting coil using a fuel cell was considered by controlling the flow rate of gas supplied to the fuel cell. A scenario was created using a specific program to change the amount of gas supplied to the fuel cell over time. As a result of analyzing the voltage and magnetic field of the superconducting coil according to the applied current, it was confirmed that the performance of fuel cell was almost the same with that of power supply.

**Key words :** Fuel cell(연료 전지), Power technology(전력 기술), Superconducting coil(초전도 코일), Current charging(전류 충전), Single-stack(단일 스택)

## 1. 서론

임계온도 이하에서 저항이 0이 되는 초전도의 특성상 초전도 선재는 기존 구리선 대비 높은 전류를 통전할 수 있다. 일반적인 선재에 사용되는 전원의 경우, 고전압 및 저전류가 대부분이다. 그렇기 때문에 대부분의 파워 서플라이는 고전압 및 저전류 형태로 제작된다. 반대로 초전도 선재 사용 시 대전류를 통전할 수 있는 파워 서플라이가 필요하며 초전도를 전용으로 하는 전원 장치는 저전압 및 대전류

의 특수한 파워 서플라이를 사용한다<sup>1-3)</sup>.

고분자 이온 교환막 연료전지(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)의 경우 친환경 재료인 수소를 사용하여 전기를 생산한다. 막 전극 집합체(membrane electrode assembly, MEA) 1장으로 구성된 unit cell의 경우 일반적으로 0.4-0.8 V의 구동 전압을 갖는다. 전류는 MEA 면적에 의해 결정되며 1 cm<sup>2</sup>당 1.0 A 정도의 성능을 보인다. 일반적으로 PEMFC가 사용되는 곳은 고전압을 필요로 하며 그렇기에 MEA를 접합은 스택을 필요로 한다. 하지만 초전도의 경우

MEA 1장으로 제작된 unit cell의 구동 전압으로도 충분히 작동이 가능하다<sup>4,5)</sup>.

많은 연구자들에 의하여 연료전지 시스템 동특성 모델 및 내구성 향상을 위한 성능 분석에 관한 다양한 연구들이 진행되었다<sup>6-11)</sup>. 수송 차량이나 운송 선박 등에 활용되고 있는 연료전지는 운전 부하에 따른 변동이 크고 전기화학 반응에 의한 발열이 발생하므로 적절한 열 관리가 필수적이다. 일반적으로 전압을 높이기 위하여 연료전지의 스택을 여러 장 적층하게 되는데 초전도 기기는 전기 저항이 0인 초전도체의 특성 때문에 많은 적층이 요구되지 않는다. 따라서 높은 전압이 요구되지 않아 연료전지 스택의 적층 개수를 훨씬 적게 가져갈 수 있어 비용 절감에 기여할 수 있다. 이러한 이유로 초전도 코일의 가능성에 관한 다양한 연구들도 진행되고 있다<sup>12-17)</sup>.

Nakayama 등<sup>12)</sup>은 비스코 테이프로 감은 코일을 액체수소에 담근 후 안정성을 연구하고 액체헬륨으로 냉각한 코일과 안정성 결과를 비교하였다. 액체수소로 냉각한 코일은 액체헬륨으로 냉각한 코일보다 안정성 마진이 더 높은 것을 알 수 있다. Sander 등<sup>13)</sup>은 수소 액화 부분, 액화수소 탱크 및 이봉화 마그네슘 기반 초전도 마그넷 에너지 저장 장치 및 액화수소 수조로 냉각되는 연료전지를 포함하는 소형 에너지 저장 장치를 제안하였다. 이를 통해 장기적인 에너지 균형과 단기적인 전력 품질 및 주파수 제어 측면에서 가변 재생 에너지원의 대규모 그리드 통합에 기여할 수 있음을 보였다.

Hamajima 등<sup>14)</sup>은 초전도 마그넷 저장 장치와 연료전지 액화수소 전해조로 구성된 액체수소 충전소에 설치되어 이를 냉각시키는 시스템을 제안하였다. 재생 에너지의 효율적인 사용을 위하여 초전도 마그넷 에너지 저장 장치를 활용한 개선된 전력 컨디셔닝 시스템을 개발하였다. Murata 등<sup>15)</sup>은 고체 산화물 연료전지의 저온에서의 작동을 위한  $\text{Nd}_2\text{NiO}_4$  벌크를 제작하였다. 서로 다른 방향의  $\text{Nd}_2\text{NiO}_4$  음극을 장착한 단일 셀의 성능 테스트를 기반으로 우수한 성능을 제공하는 음극층의 이상적인 상황이 제안되었다.

Collins와 McLarty<sup>16)</sup>는 7 kWh/kg 이상의 에너지 저장 밀도를 달성하기 위해 액체수소 연료와 초전도 모터를 활용하는 연료전지 가스터빈 하이브리드 배열을 소개하였다. 차세대 가스터빈 기술과 경쟁하기 위해서는 새로운 연료전지 설계가 필요하며 항공기에 큰 동력을 공급할 수 있음을 언급하였다. Linares 등<sup>17)</sup>은 초전도 코일에 전력을 공급하기 위해 저전압 레벨과 전류원 작동 모드를 모두 활용하는 PEMFC의 혁신적인 애플리케이션을 제시하였다. 가스 공급 조건의 영향을 고려할 수 있는 이 모델은 액체헬륨으로 냉각된 초전도 코일을 공급하여 확보한 실험 결과와 비교 및 분석되었다.

초전도 코일은 극저온의 온도를 유지한 상태에서 통상 저전압 고전류의 전력으로 구동되는 것이 일반적이다. 또한 연료전지는 수소를 이용하여 발전하는 것을 특징으로 하고 단위 스택을 기준으로 저전압에 고전류를 생성할 수 있는 저가형을 선택하더라도 초전도 코일의 전력 공급용으로 적합하다는 독특한 특징이 있다. 그러나 연료전지 전력 기술을 활용한 초전도 코일 충전에 관한 연구는 여전히 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 100 cm<sup>2</sup>의 단일 스택을 가지는 연료전지를 제작하여 초전도 코일 구동 실험을 진행하였다. 그리고 연료전지 활성화 및 성능평가를 수행하고 연료전지를 사용하여 초전도 코일에 전류를 인가하는 방법에 대해 고찰하였다. 최종적으로 기존 전원 장치인 파워 서플라이와 연료전지를 사용한 초전도 코일 충전 결과를 비교하여 그 가능성에 대해 분석하였다.

## 2. 연료전지 활성화 및 성능평가

Fig. 1은 본 연구에서 성능평가 진행을 위하여 연결된 연료전지를 보여준다. 50 A 이상의 전류를 초전도 코일에 인가하기 위해서는 실험에 사용되는 연료전지 MEA의 크기를 어느 정도 확보하여야 한다. 일반적으로 MEA 면적에 따라 전류는 비례하여 상승하게 된다. 단일 스택을 활용한 초전도 코일의 충전을 위해 100 cm<sup>2</sup> 면적의 MEA를 포함하는 단위 전

지를 제작하여 초전도 코일 구동 실험을 진행하였다.

본 연구의 실험에 사용된 100 cm<sup>2</sup> 사이즈의 단위 전지는 (주)씨엔엘에너지(Seoul, Korea) 제품을 사용하였다. 먼저 제작된 단위 전지는 연료전지 평가 장비를 통해 활성화를 거쳐 정상적인 성능이 나오는지 성능평가를 진행하였다. 성능평가 진행을 위해 단위 전지를 연료전지 특성 평가 장비에 연결하였다. 연료전지 성능평가 조건은 제조사인 (주)씨엔엘에너지의 평가 조건을 참고하였다. 다만 질량유량계(mass flow control, MFC) 용량 부족으로 인해 기존인 수소 2.1 LPM, 공기 6.3 LPM 조건보다 약간 작은 조건의 가스를 공급하였다. 또한 특성 평가를 위해 사용하는 전기 로터의 사양이 최대 100 A까지만 사용 가능하였다. 공급되는 유량 외에 가습 온도 및 연료전지 온도 등 기타 사항은 모두 동일한 조건을 사용하였다. 자세한 성능평가 조건은 Table 1에 명시되어 있다.

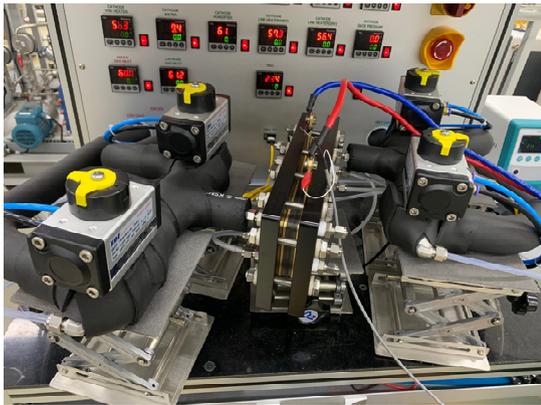


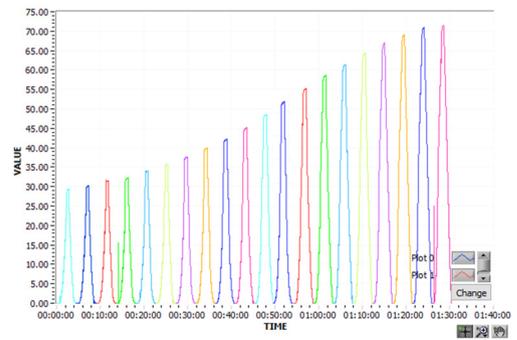
Fig. 1. PEM water electrolysis stack evaluation device

Table 1. Performance evaluation conditions for 100 cm<sup>2</sup> fuel cell

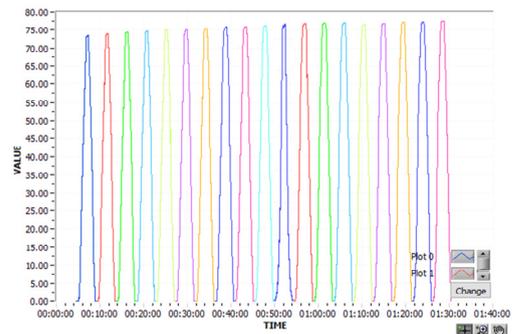
Evaluation condition	Value
Cell temperature [°C]	60
Water heater (anode, cathode) [°C]	65
Line & humidity heater (anode, cathode) [°C]	63
Humidity (anode, cathode) [%]	100
Pressure [atm]	1
Flow rate (anode, H <sub>2</sub> ) [LPM]	2
Flow rate (cathode, air) [LPM]	5

Fig. 2는 단위 전지의 활성화 결과를 보여준다. 연료전지 활성화는 연료전지가 최적의 성능을 발휘하도록 하기 위한 일련의 과정 또는 조치들을 의미한다. 이는 연료전지가 처음 사용되기 전 장기적인 성능 유지를 위해 필요한 여러 단계와 기술들을 포함한다. 본 연구에서는 단위 전지를 연료전지 특성 평가 장비에 연결 후 설정한 성능평가 조건을 진행하기 전 활성화를 진행하였다. 1차 활성화(0-20th) 진행 시 활성화 횟수가 증가할수록 전압이 증가하였다. 초기 20회 활성화를 진행하였음에도 불구하고 완벽히 활성화가 이루어지지 않았음을 확인할 수 있다. 이후 추가 20회의 2차 활성화 (21th-40th)를 진행하였다. 2차 활성화의 경우 1차 활성화와 달리 활성화 횟수가 증가할수록 일정 횟수 이후 거의 동일한 전압이 측정됨을 알 수 있다. 총 40회의 활성화를 거쳐 최종적으로 100 cm<sup>2</sup>의 단위 전지를 활성화할 수 있었다.

Fig. 3은 단위 전지의 성능평가 결과를 보여준다. 전류 대비 전압(채운 기호) 및 전력 측정(빈 기호) 결



(a) 0-20th



(b) 21th-40th

Fig. 2. Activation of stack for unit cell

과와 전류 밀도로 환산한 결과를 나타낸다. 본 연구에서는 총 40차례의 활성화 진행 후 최종적으로 단위 전지의 성능평가를 진행하였다. 제조사로부터 받은 성능평가 조건인 개방회로 전압, 전류, 전류 밀도 및 전력은 각각 0.96 V, 95 A (@ 0.6 V), 0.95 A/cm<sup>2</sup> 및 57 W이다. 본 연구에서 측정한 단위 전지의 성능은 기존 성능보다 낮은 유량을 주입하여 스펙 대비 낮은 50 A (@ 0.6 V), 0.5 A/cm<sup>2</sup>의 성능을 보였다. 하지만 초전도 코일 충전에는 큰 지장이 없는 성능으로 판단되어 초전도 코일 구동 시험을 진행하였다.

### 3. 연료전지-초전도 코일 구동 실험

Fig. 4는 본 연구에서 구축한 연료전지 기반 초전도 코일 구동 실험 장비를 보여준다. 100 cm<sup>2</sup> 단위 전지를 사용하여 초전도 코일을 구동하기 위해 회로를

구성하였다. 회로를 구성하는 대표 장비로는 100 cm<sup>2</sup> 단위 전지에 연료를 공급하기 위한 연료전지 특성 평가 장비와 초전도 코일 충전 시 발생하는 신호를 수집하기 위한 data acquisition (DAQ) 장비 등이 있다. 본 연구에서는 100cm<sup>2</sup> 단위 전지의 구동 온도를 유지하기 위해 항온 수조를 사용하였다. 또한 초전도 코일에 인가하는 전류를 측정하기 위해 션트를 추가하였으며 연료전지의 구동 전압을 0.5 V 정도로 유지하기 위해 다이오드를 회로에 추가하였다. 초전도 코일에 인가하는 전류, 전류 인가에 따라 초전도 코일에서 발생하는 자장의 세기 등은 DAQ 장치로 제작된 LabVIEW 프로그램(National Instruments, Austin, TX, USA)을 통해 모니터링이 가능하도록 설정하였다.

연료전지를 사용하여 초전도 코일에 인가하는 전류를 제어하는 방법은 크게 2가지가 있다. 첫 번째 방법은 연료전지 내에 공급되는 가스의 유량을 제어하는 방법이다. 두 번째 방법은 연료전지에 공급하는 가스량은 고정하고 가변 저항을 통해 연료전지의 구동 전압을 변경해 가면서 초전도 코일에 인가되는 전류를 제어하는 방법이다.

Fig. 5는 연료전지를 통해 초전도 코일에 전류를 인가하는 방법의 원리를 보여준다. 첫 번째 방법은 연료전지에 공급하는 수소 및 산소량에 따라서 연료전지의 특성 곡선이 변하게 된다. 이러한 이유로 가스의 유량을 증가시키면 초전도 코일에 충전되는 전

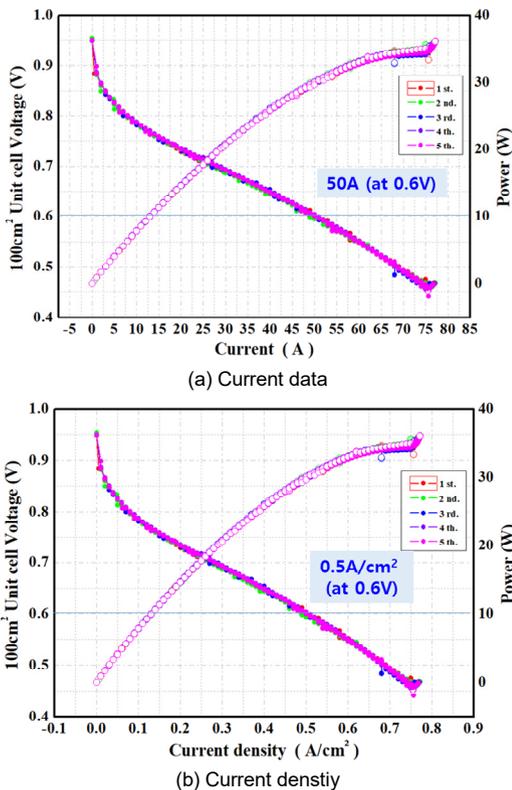


Fig. 3. Performance evaluation of stack for unit cell

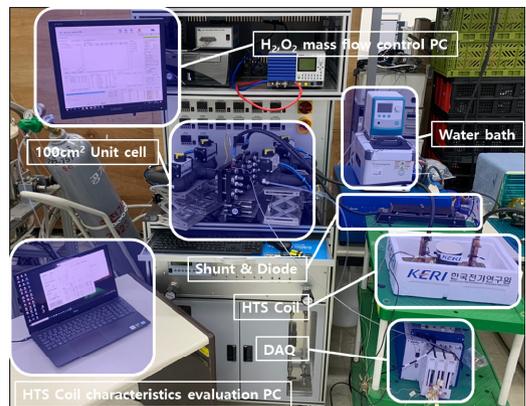


Fig. 4. Equipment for driving superconducting coil using unit cell

류량이 증가하게 된다. 이때 다이오드의 저항체를 활용하여 연료전지 구동 전압을 조절할 수 있는데 저항체가 없는 경우 연료전지 특성상 0.1 V의 저전압 구간에서 운전된다. 따라서 연료전지가 0.5-0.6 V 구간에서 안정적으로 운전될 수 있도록 다이오드를 설정하는 것이 중요하다.

두 번째 방법은 회로에 걸리는 총저항의 크기에 따라 연료전지가 구동하는 전압 영역이 바뀌게 된다. 연료전지가 최대의 성능을 낼 수 있는 가스가 공급될 때 가변 저항을 사용하여 연료전지의 구동 전압을 변경하면 초전도 코일에 인가되는 전류를 상승시킬 수 있다. 본 연구에서는 가변 저항을 사용하여 100 cm<sup>2</sup>의 단위 전지의 구동 전압을 조절할 때 고전류 구간에서 심한 발열 문제가 발생하였다. 이러한 이유로 단위 전지를 이용하여 초전도 코일을 구동하는 본 연구에서는 연료전지에 공급되는 가스의 유량을 제어하는 첫 번째 방법으로 실험을 수행하였다. 다이오드를 사용하여 연료전지의 구동 전압을 설정할 수 있고 구동 전압을 설정 후 연료전지에 공급하

는 가스의 유량을 증가시키면 동일 구동 전압에서 높은 전류를 생산할 수 있다. 이러한 방법으로 연료전지에 공급하는 가스량을 조절하여 초전도 코일의 전류를 단계적으로 상승시켰다.

본 연구에서는 연료전지에 공급되는 가스량을 시간에 따라 변경하기 위해 별도의 프로그램을 사용하여 시나리오를 작성하였다. 가스량 공급 시나리오를 변경하며 단위 전지에 인가되는 가스량을 조절하였다. 연료전지에 공급되는 가스의 종류는 수소와 공기 2가지이며 2가지 변수를 제어하지 않고 공기의 유량만을 제어하였다. 수소 가스의 유량은 2 LPM으로 고정하고 시간별 주입되는 공기량을 조절하면서 실험을 진행하였다.

초기 실험의 경우 다음과 같은 유량 공급 시나리오를 적용하였다.

- H<sub>2</sub>: 2.0 LPM 고정(MFC 최대 용량)
- Air: 0.0-5.0 LPM (10초씩 증가율 변동)  
(초기, -0.1 LPM; 중기, -0.2 LPM; 후기, 0.5 LPM)

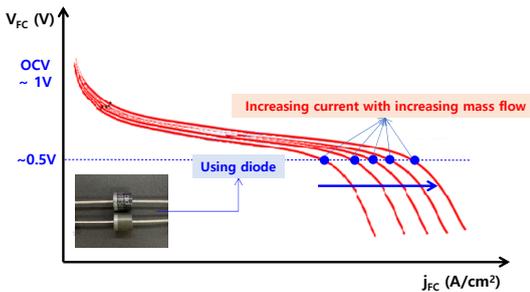
Fig. 6은 위의 유량 시나리오 적용에 따른 연료전지에 공급되는 유량 결과와 초전도 코일에 인가되는 전류량 및 자기 선속 밀도 등을 보여준다. 위와 같은 시나리오 적용 시 초전 코일에 인가되는 전류는 최대 60 A까지 인가됨을 확인할 수 있다. 이때 구동 전압은 연료전지의 안정적 구동 영역인 0.5 V임을 확인할 수 있다.

첫 번째 실험 결과 60 A까지 안정적으로 전류가 인가됨을 확인하였지만 전류가 선형적으로 증가하지 않고 포물선 형태로 증가함을 확인하였다. 전류를 정확하게 제어하기 위해서는 선형적인 전류 상승 조건을 적용해야 한다. 이러한 점을 고려하여 연료전지에 공급되는 유량 시나리오를 여러 차례 수정하였다.

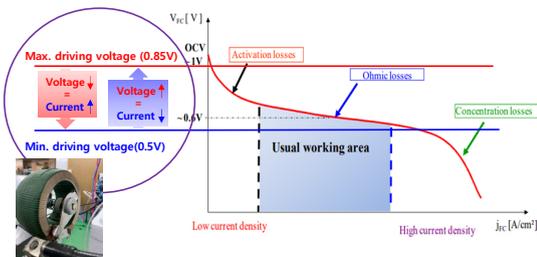
첫 번째 실험의 경우 다음과 같은 유량 공급 시나리오를 적용하였다.

- H<sub>2</sub>: 2.0 LPM 고정(MFC 최대 용량)
- Air: 0.0-5.0 LPM (초기 20초, 후기 10초)  
(초기, -0.1 LPM; 중기, -0.2 LPM; 후기, 0.5 LPM)

Fig. 7은 최종적으로 결정한 위의 유량 시나리오 적용 시 연료전지에 공급되는 유량 결과와 초전도



(a) Effect of mass flow rate



(b) Effect of variable resistor

Fig. 5. Superconducting coil operation test method using fuel cell

코일에 인가되는 전류량과 자기 선속 밀도 등을 보여준다. 유량 시나리오의 개선에 따라 상대적으로 선형적인 전류가 공급됨을 확인할 수 있었다. 따라서 연료전지에 공급되는 유량의 변동률이나 시간 간격에 따라 초전도 코일에 선형적인 전류 충전의 구현 가능성을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 기존 전원 장치인 파워 서플라이와 100 cm<sup>2</sup> 단위 전지의 유량 제어를 통한 초전도 코일 충전 결과를 나타낸다. 동일한 초전도 코일을 사용하여 파워 서플라이로 충전한 결과와 100 cm<sup>2</sup> 단위 전지를 사용하여 충전한 결과를 비교하였다. 최종 유량 공급 시나리오에 따른 실험 결과는 Table 2에 명시되어 있다. 최종 유량 공급 시나리오를 적용하여 초전도 코일 구동 시 일반적으로 사용하는 초전도 코일용 전원 장치와 동일한 성능을 보임을 확인하였다. 특히 10 A에서 60 A까지의 구간에서 인가된 전류에 따른 초전도 코일의 전압은 0에 가까운 값을 보이며 자기

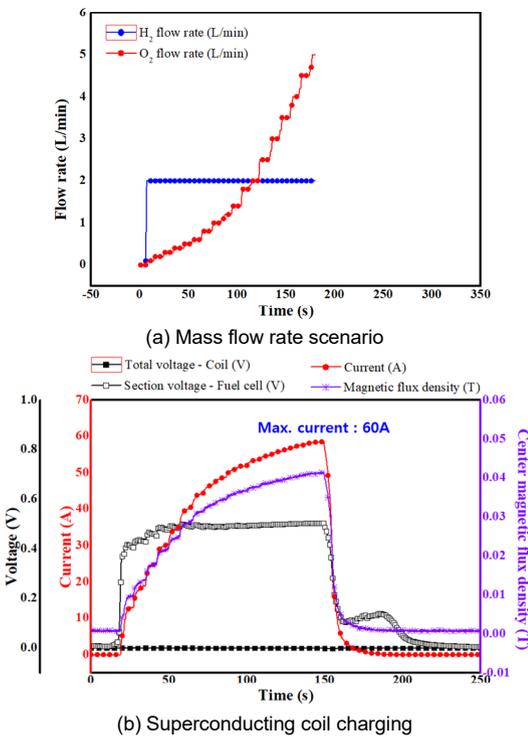
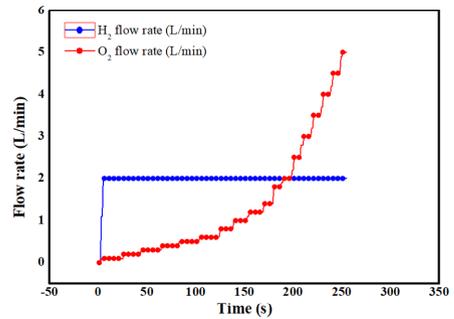
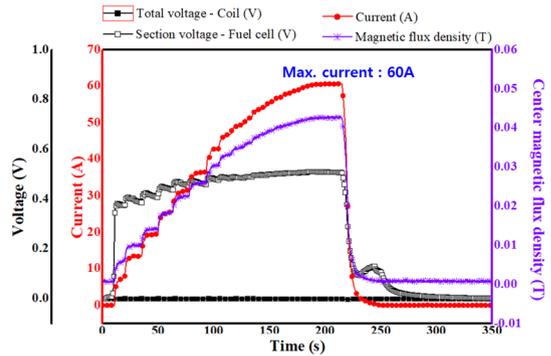


Fig. 6. 1st experimental results for charging superconducting coil

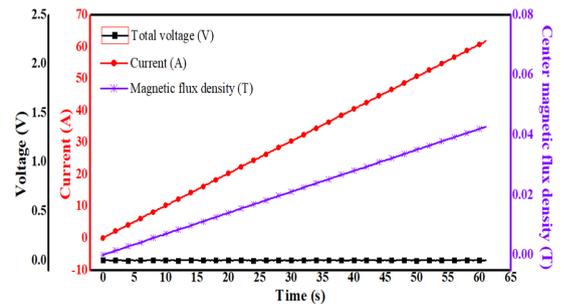


(a) Mass flow rate scenario

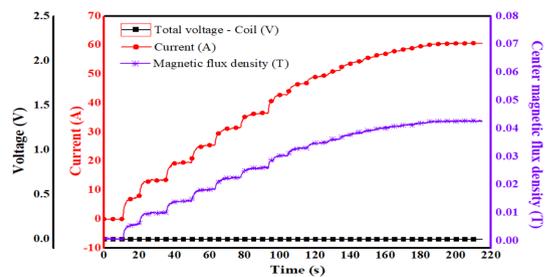


(b) Superconducting coil charging

Fig. 7. Final experimental results for charging superconducting coil



(a) Power supply



(b) 100 cm<sup>2</sup> unit cell

Fig. 8. Comparison of experimental results between power supply and 100 cm<sup>2</sup> unit cell

장을 분석한 결과 오차 범위 내에서 거의 동일한 성능을 보이는 것을 확인하였다. 따라서 연료전지 전력 기술을 통해 초전도 코일 충전이 가능하며 공급되는 유량 시나리오에 따라 파워 서플라이와 동일한 성능을 구현할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 향후 연료전지를 전원으로 초전도 코일에 인가되는 전류량을 증가시킬 수 있는 다양한 연구를 수행할 예정이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 100 cm<sup>2</sup>의 단일 스택을 가지는 연료전지를 제작하여 초전도 코일 구동 실험을 진행하였다. 이를 통해 연료전지 활성화 및 성능평가를 수행하였으며 초전도 코일에 전류를 인가하는 방법에 대해 고찰하였다. 본 연구에서 측정한 단위 전지의 성능은 기존 성능보다 낮은 유량을 주입하여 스펙 대비 낮은 50 A (@ 0.6 V), 0.5 A/cm<sup>2</sup>의 성능을 보였다. 하지만 초전도 코일의 충전에는 큰 지장이 없는 성능으로 판단되어 초전도 코일 구동 시험을 진행하였다. 본 연구에서는 가변 저항을 사용하여 100 cm<sup>2</sup>의 단위 전지의 구동 전압을 조절할 시 고전류 구간에서 심한 발열 문제가 발생하였다. 이러한 이유로 단위 전지를 이용하여 초전도 코일을 구동하는 본 연구에서는 연료전지에 공급되는 가스의 유량을 제어하는 방법으로 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 연료전지에 공급되는 가스량을 시간에 따라 변경하

기 위해 별도의 프로그램을 사용하여 시나리오를 작성하였다. 최종적으로 기존 전원 장치인 파워 서플라이와 연료전지를 사용한 초전도 코일 충전 결과를 비교하여 그 가능성에 대해 분석하였다. 인가된 전류에 따른 초전도 코일의 전압 및 자장을 분석한 결과 오차 범위 내에서 거의 동일한 성능을 보이는 것을 확인하였다.

#### 후 기

이 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본 사업임(No. 24A01070). 이 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(24A02089, 액체수소 운송을 위한 3,000 kg 용량 탱크 트레일러 개발 및 실증).

#### References

1. 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>.
2. P. G. Papageorgiou, K. O. Oureilidis, and G. C. Christoforidis, "A systematic review of hybrid superconducting magnetic/battery energy storage systems: applications, control strategies, benefits, limitations and future prospects", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 183, 2023, pp. 113436, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113436>.
3. E. L. Molina-Ibáñez, E. Rosales-Asensio, C. Pérez-Molina, F. M. Pérez, and A. Colmenar-Santos, "Analysis on the electric vehicle with a hybrid storage system and the use of Superconducting magnetic energy storage (SMES)", *Energy Reports*, Vol. 7, Suppl. 5, 2021, pp. 854-873, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.055>.
4. M. S. Esmaili and M. Mehrpooya, "Modeling and exergy analysis of an integrated cryogenic refrigeration system and superconducting magnetic energy storage", *Journal of Energy Storage*, Vol. 73, Pt. B, 2023, pp. 109033, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109033>.

**Table 2.** Comparison between power supply and fuel cell

Current [A]	Voltage [V]		Magnetic flux density [T]		Error [%]
	Power supply	Fuel cell	Power supply	Fuel cell	
10	1.0186E-4	1.03E-05	0.0072	0.0074	2.78
20	5.93E-04	3.17E-04	0.0141	0.0144	2.13
30	5.74E-04	4.48E-04	0.0212	0.0216	1.89
40	6.03E-04	5.09E-04	0.0282	0.0282	0.00
50	4.53E-04	3.57E-04	0.0352	0.0354	0.57
60	5.42E-04	4.53E-04	0.0421	0.0422	0.24

5. W. Li, T. Yang, G. Li, J. Lu, and Y. Xin, "Experimental study of a novel superconducting energy conversion/storage device", *Energy Conversion and Management*, Vol. 243, 2021, pp. 114350, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114350>.
6. J. Woo, Y. Kim, and S. Yu, "Analysis of dynamic characteristics of 20 kW hydrogen fuel cell system based on AMESet", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 5, 2023, pp. 465-477, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.5.465>.
7. D. Hyun, S. Hong, and J. Han "Model development for analysis of the system dynamic characteristics for fuel cell-battery based unmanned aerial vehicles", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 5, 2023, pp. 490-496, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.5.490>.
8. D. Jung, J. Yoon, and H. Song, "Experimental and numerical study on flow characteristics of a common exhaust system for multiple SOFCs", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 657-666, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.657>.
9. B. N. Lee, A. Kodir, H. Jee, D. Shin, and B. Bae, "Preparation and characterization of the polymeric antioxidant for improving the chemical durability of polymer electrolyte membranes", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 32, No. 5, 2021, pp. 308-314, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.5.308>.
10. 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>.
11. N. Son, M. Naseem, U. Kim, and Y. D. Lee, "Dynamic simulation of proton exchange membrane fuel cell stack under various operating pattern of fuel cell powered heavy duty truck", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 2, 2024, pp. 121-128, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.2.121>.
12. T. Nakayama, T. Yagai, M. Tsuda, and T. Hamajima, "Stability analysis of high temperature superconducting coil in liquid hydrogen", *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 463-465, 2007, pp. 1285-1288, doi: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2007.04.299>.
13. M. Sander, R. Gehring, H. Neumann, and T. Jordan, "LIQ-HYSMES storage unit - hybrid energy storage concept combining liquefied hydrogen with superconducting magnetic energy storage", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 19, 2012, pp. 14300-14306, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.019>.
14. T. Hamajima, M. Tsuda, D. Miyagi, H. Amata, T. Iwasaki, K. Son, N. Atomura, T. Shintomi, Y. Makida, T. Takao, K. Munakata, and M. Kajiwara, "Advanced superconducting power conditioning system with SMES for effective use of renewable energy", *Physics Procedia*, Vol. 27, 2012, pp. 396-399, doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.494>.
15. A. Murata, T. Uchikoshi, and M. Matsuda, "Fabrication and characterization of oriented Nd<sub>2</sub>NiO<sub>4</sub> bulk and cathode for low-temperature operating solid oxide fuel cell", *Journal of Power Sources*, Vol. 293, 2015, pp. 95-100, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.05.045>.
16. J. M. Collins and D. McLarty, "All-electric commercial aviation with solid oxide fuel cell-gas turbine-battery hybrids", *Applied Energy*, Vol. 265, 2020, pp. 114787, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114787>.
17. R. Linares, S. Raël, K. Berger, M. Hinaje, and J. Lévêque, "PEM single fuel cell as a dedicated power source for high-inductive superconducting coils", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 11, 2018, pp. 5913-5921, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.09.013>.