

3셀 스택의 성능 균일성 향상을 위한 연료전지 전력 기반 초전도 코일 충전에 관한 연구

서영민 · 노현우 · 구태형 · 하동우 · 고락길[†]

한국전기연구원 전기모빌리티연구단 수소전기연구팀

Study on Superconducting Coil Charging Based on Fuel Cell Power for Improving Performance Uniformity of 3-cell Stack

YOUNG MIN SEO, HYUN WOO NOH, TAE HYUNG KOO, DONG WOO HA, ROCK KIL KO[†]

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

[†]Corresponding author :
rkko@keri.re.kr

Received 12 July, 2024
Revised 25 July, 2024
Accepted 1 August, 2024

Abstract >> In this study, 3-cell stack fuel cell power technology was developed for charging superconducting coil. It was found that the performance of the fuel cell stack increased depending on the number of activation. In addition, the flow rates of hydrogen and air supplied to 3-cell stack was adjusted because of a large difference in membrane electrode assembly (MEA) characteristics depending on its location. As a result, it was confirmed that it was possible to apply current to the superconducting coil from about 15 to 33 A by changing the variable resistance, and it was confirmed that the voltage difference between fuel cell cells could be overcome through sufficient control of fuel supply.

Key words : Fuel cell(연료전지), Superconducting coil(초전도 코일), Current charging (전류 충전), 3-cell stack(3셀 스택), Performance uniformity(성능 균일성)

1. 서론

연료전지(fuel cell)는 산화 환원 반응을 통해 연료의 화학 에너지를 전기 에너지로 변환할 수 있는 에너지 변환기이다. 단위 전지의 전압은 일반적으로 개방 회로에서 1 V에 가깝고 공칭 발전 조건에서는 0.6 V 정도이다. 연료전지는 본질적으로 저전압 소스이므로 대부분의 실제 응용 분야에서 전자 변환기로 전력 관리를 수행하여 특히 전압을 일반적인 응용 수

준으로 올릴 수 있다. 그런데 초전도 코일은 매우 낮은 전압과 높은 직류 전류 공급이 필요하고 전원의 전류 리플이 낮아야 하는 특성 때문에 연료전지를 직접 직류 전원으로 적용할 수 있다. 또한 전원이 공급되지 않거나 움직이는 상황과 같은 전류 공급이 곤란한 환경에서도 연료전지가 자체 발전의 기능과 정밀 전원의 기능을 모두 할 수 있다는 장점이 있다¹⁻³⁾.

실제로 저전압과 수소 유량을 통해 전류를 제어할 수 있는 연료전지의 가능성을 이용하는데 특히

초전도 코일은 고분자 전해질 막 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)의 느린 동력 특성보다 잘 어울린다. 초전도 코일 및 선재에서의 손실은 가변 전류에 대해서도 발생하므로 가능한 한 가장 느린 변동을 갖는 것이 좋다. 대전류 통전이 필요한 초전도 코일의 경우 단위 전지의 활성 영역을 늘리거나 필요한 전류에 도달하기에 충분한 수의 단위 전지를 병렬로 연결하여 연료전지 전류를 늘릴 수도 있다. 전류 증가 속도를 높이면 PEMFC를 직렬로 추가 배치하여 수행할 수도 있다^{4,7)}.

최근 연료전지 스택 및 시스템 등의 효율 향상을 위한 다양한 연구들이 수행되고 있다⁸⁻¹¹⁾. Li 등¹²⁾은 다양한 작동 모드에서 고온 양성자 교환막 연료전지 스택의 성능 변화를 조사하였다. 스택 성능은 수소를 사용하여 지속적으로 작동한 후에 안정적이었지만 스택의 양극에 전식 개질유를 공급하면 스택 성능이 크게 감소함을 보였다. Tao 등¹³⁾은 연료전지 스택의 1차원 수치 모델을 구축하여 반응 가스, 전하 전달, 열전달 및 물의 상변화 전이 과정을 연구하였다. 수치 모델을 기반으로 부하 전류 및 초기 막 수분 함량을 최적화 변수로 사용하여 다양한 온도에서 콜드 스타트 시간을 최적화하였다.

Ferreira 등¹⁴⁾은 무인 항공기용으로 설계된 양성자 교환막 연료전지 스택을 다루었으며 성능과 작동 조건에 대한 영향을 조사하였다. 공기의 팬 속도 조절은 주로 스택 온도 제어를 목표로 해야 하며 지속 시간과 빈도가 높을수록 스택 성능이 향상됨을 보였다. Tao 등¹⁵⁾은 콜드 스타트 과정에서 수냉식 PEMFC 스택 시스템의 새로운 제어 중심 모델링 방법론을 제시하였다. 해당 모델을 활용하여 스택 전체의 전압 및 온도 변화를 예측할 수 있으며 연료전지 스택의 정지 상태와 과도 상태를 잘 포착할 수 있음을 검증하였다.

Xie 등¹⁶⁾은 고유한 선박 연료 효율을 향상시키기 위해 해양 하중 특성, 가변 수항 계획 및 다양한 연료전지 시스템 아키텍처 등과 같은 에너지 관리 시스템을 제시하였다. 해상 환경과 연료전지 기능을 최적으로 활용하여 부하 변화에 대응함으로써 전력 분할

결정을 동적으로 조정할 수 있도록 하였다. Cao 등¹⁷⁾은 양성자 교환막 연료전지의 콜드 스타트를 위해 상변화 물질과 액체 냉각을 결합한 저온 열관리 시스템을 도입하였다. 셋다운 후 상변화 과정에서 방출된 열은 냉각수 펌프를 통해 스택으로 전달되어 스택 온도를 최소 시동 임계값 이상으로 유지하였다. 스택 내의 온도 변화는 다양한 환경 조건, 재료 특성 및 냉각수 펌프 제어 매개변수에 따라 평가되었다.

주로 초전도 코일을 공급하기 위해 특정 전자 전원 공급 장치가 사용되며 대부분 부피가 크거나 에너지 수급이 낮다. 이러한 전자 공급 장치의 단점은 산업용 그리드에 고조파 잡음이 발생한다는 것이다. 따라서 공칭 수준까지 전류를 증가시키는 것은 신중하게 이루어져야 한다. 이러한 전자 공급 장치와 달리 매우 낮은 전압에서 작동하는 연료전지는 자율적이며 생성된 전류를 바탕으로 지속적인 작동이 보장된다. 또한 전류를 증가시키기 위해 단일 셀을 병렬로 연결하거나 원하는 전류 레벨에 해당하는 활성 영역을 가진 단일 셀을 사용하여 전기화학 발생기의 활성 영역을 향상시키지만 하면 된다. 따라서 본 연구에서는 초전도 코일 충전을 위한 3셀 스택 연료전지 전력 기술 개발에 초점을 맞추고 있다. 이를 위하여 연료전지 및 초전도 코일 구동을 위한 회로를 구성하고 연료전지 특성 평가 장치를 구축하였다. 또한 연료전지의 활성화에 따른 3셀 스택의 성능을 분석하였으며 공급되는 유량의 최적화를 통해 연료전지 성능 균일성을 개선하였다.

2. 연료전지 및 초전도 구동 실험

Fig. 1은 본 연구에서는 연료전지 및 초전도 구동 실험을 위한 장비를 보여 준다. 3셀 스택 연료전지를 사용하여 초전도 코일을 구동하기 위해서는 스택을 연료전지 평가 장비에 연결 후 가스 주입 시 발생하는 전류를 초전도 코일에 인가하기 위하여 회로를 구성해야 한다. 그림에서 보는 것과 같이 회로를 구성하는 주요 장비는 스택에 가스를 공급하고 정상 작동을 하게 하기 위한 연료전지 평가 장비와 항온

수조로 구성되어 있으며 초전도 코일의 자기장, 전류, 스택의 전압, 온도 등을 측정하기 위한 데이터 수집 장치 역시 포함되어 있다. 주요 장비의 구성 방식 및 역할은 아래와 같다.

1. 연료전지 평가 장비: H₂ 가스 및 air 공급, 가스 온도 제어, 셀 전압 측정
2. 항온 수조: 스택 온도 유지
3. 데이터 수집 장비: 초전도 코일 자기장 및 전류 측정, 스택 전압 측정, 온도 측정
4. 초전도 코일 구동 장치: 가변저항, 선트, 초전도 코일 등으로 구성

Fig. 2는 연료전지 특성 평가 장비와 연결된 25 cm² 수냉식 3셀 스택을 나타낸다. 3셀 스택에서 발생한 전류를 초전도 코일에 인가하기 위해 전류 도입선을 연결하였으며 스택의 구동 온도를 맞추주기 위해 항

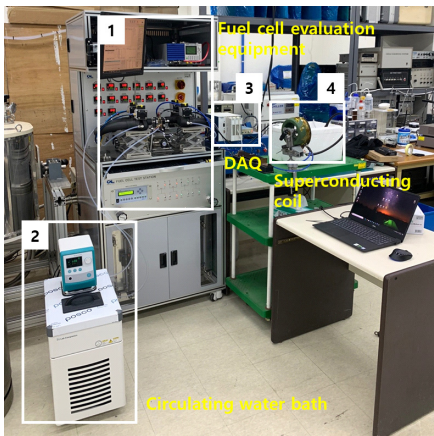


Fig. 1. Fuel cell and superconducting coil driving experiment

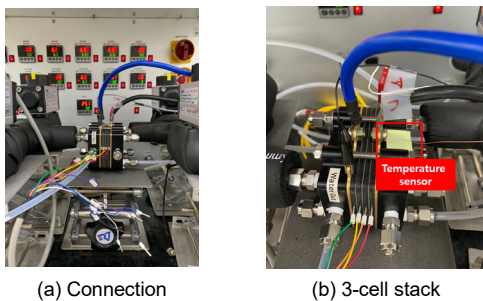


Fig. 2. 3-cell stack connected to fuel cell characterization equipment

온 수조와 수관을 연결하였다. 연료전지는 수소 및 산소 가스 공급을 위한 가스 라인을 연결하였으며 셀 전압 측정 장치를 연결하였다. 연료전지의 온도를 측정하기 위하여 온도 센서를 부착하여 데이터 수집 장비와 연결하였다.

본 연구에서는 초전도 코일의 자기장, 전류, 스택의 전압, 온도 등을 측정하기 위해 데이터 수집 장치를 사용하였다. 채널은 CH00에서 CH07까지로 총 8개로 이루어져 있으며 각 슬롯에서는 순서대로 초전도 코일의 전압, 전류, 자기장, 각종 위치의 온도 및 스택의 전압 등을 측정하였다. 셀 간 전압 측정은 8셀까지 동시 측정이 가능한 전압 측정 장치를 전압 센서로 연결하여 수행하였다. 전압 측정 장치 연결 후 CNL 프로그램(CNL Energy, Seoul, Korea)으로 셀 간 전압 데이터를 확보하였다.

Fig. 3은 초전도 코일과 가변저항의 모습을 보여 준다. 자기장을 측정하기 위한 홀 센서는 코일 중앙과 연결되어 있으며 초전도 코일 표면에 온도 센서를 연결하였고 전류 및 전압에 대한 각종 연결을 수행하였다. 가변저항은 분압기라고 하여 샤프트나 손잡이를 회전시키거나 이동시켜 회로의 전압을 저항 값에 따라 분압 비율로 가변된 전압을 얻도록 하는 기능의 전자소자이다. 즉 회로에서 저항을 임의로 바꿀 수 있는 저항기를 말한다. 장비 운용 중 사용자에게 의해 조작되는 형태와 장비 내부에서 생산 또는 교정 중 조정되는 반고정 저항 등의 형태가 있다. 본 연구에서 제작한 가변저항은 3개의 단자를 사용하며 중앙축을 회전시키는 방법을 고려하였다. 가변저항

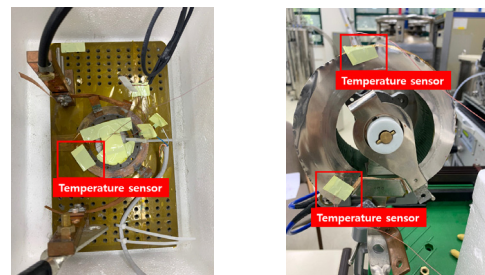


Fig. 3. Superconducting coil and variable resistor

에 온도 센서를 연결하였으며 가변저항의 저항은 임의로 결정한 후 저항을 조절하여 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연료전지 3셀 스택 활성화

기본적으로 단위 전지 및 스택이 제작되면 활성화 단계를 거쳐 셀의 성능을 최대로 만들어줘야 한다. 활성화 방법으로는 크게 전류의 양을 제어하는 방법과 전압을 제어하는 방법의 두 가지가 있다. 두 가지 활성화 방법 모두 동일한 활성화 결과를 보인다. 활성화 진행에 따라 더 이상 성능에 변화가 없을 시 활성화가 이루어졌다고 판단한다.

Fig. 4는 본 연구에서 고려한 25 cm² 수냉식 3셀 스택의 활성화 결과를 보여준다. 일반적으로 단위 전지 및 스택을 활성화하는 데 소요되는 시간은 단위 전지 및 스택의 상태 및 실내 온도 및 습도 등 주위 환경에 의해 크게 달라진다. 일반적으로 10회 이상 활성화 단계를 거치며 성능의 차이가 생기지 않

을 때까지 활성화를 진행하게 된다. 활성화 횟수에 따라 연료전지 스택의 성능이 증가하며 단위 전지로 환산하였을 경우에도 성능이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 5는 활성화 횟수에 따른 스택의 성능을 자세히 보여 준다. Fig. 5와 같이 활성화 횟수에 따라 연료전지 스택의 성능이 증가함을 알 수 있다. 초기 1회 활성화 시 3셀 스택의 성능은 1.8 V에서 약 0.9 A/cm² 이지만 활성화가 모두 이루어진 10회 활성화 시에는 1.05 A/cm² 이상의 성능을 보였다. 기존 스택의 성능인 1.136 A/cm²에 미치지 못하는 이유는 연료전지에 주입되는 가스 유량의 주입 방식이나 가변저항의 존재로 인해 오차가 약간 발생하였기 때문이다. 그러나 10회 이상의 활성화 단계를 거치며 기존 성능에 비해 약 92% 이상의 성능을 보였음을 확인하였다. 상세 결과는 Table 1에서 확인할 수 있다.

스택의 경우 단위 전지와 다르게 층 간 전압을 확인하는 것이 중요하다. 단위 전지의 경우 막 전극 접합체(membrane electrode assembly, MEA)가 1장만 들어가기 때문에 연료전지 자체의 성능이 MEA 성능이라 볼 수 있다. 하지만 3셀 스택의 경우 3장의

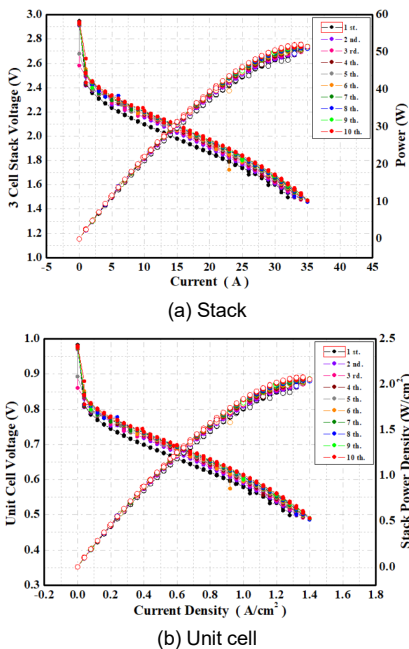


Fig. 4. Stack activation before superconducting coil charging

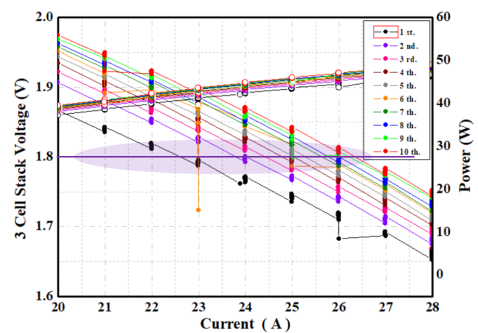


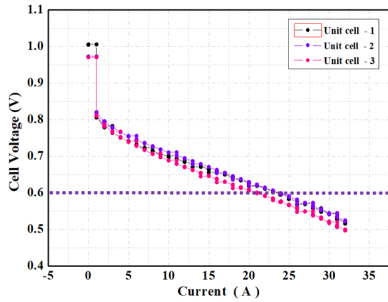
Fig. 5. Stack performance depending on activation stage

Table 1. Results for 3-cell stack activation

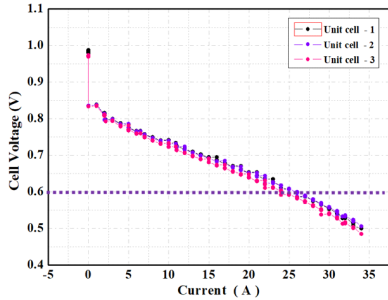
Stage number	OCV (V)	Current (@ 1.8 V) (A)	Current density (@ 1.8 V) (A/cm ²)
Stack	2.89	28.4	1.136
1	2.94	22.6	0.904
5	2.93	25.35	1.014
10	2.94	26.35	1.054

MEA가 들어가기 때문에 연료전지의 성능은 3장의 MEA 성능의 합으로 볼 수 있다. 각각의 MEA 성능은 모두 다르며 어떠한 성능을 보이는지 확인하는 것은 매우 중요하다.

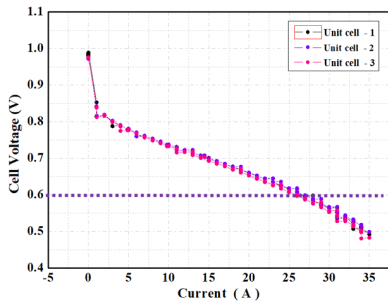
Fig. 6은 활성화 단계에 따른 3셀 스택 내부 MEA의 위치별 성능을 보여 준다. Unit cell-1의 경우 캐소드(cathode) 방향 MEA를 의미하며 unit cell-2의 경우는 3장의 MEA의 가운데를 의미한다. 마지막 unit cell-3의 경우 애노드(anode) 방향 MEA를 의미한다. Cell 간 특성 평가 결과 활성화 1회에는 unit cell-3 MEA의 성능이 저하됨을 확인하였지만 활성화가 모



(a) 1 step



(b) 5 steps



(c) 10 steps

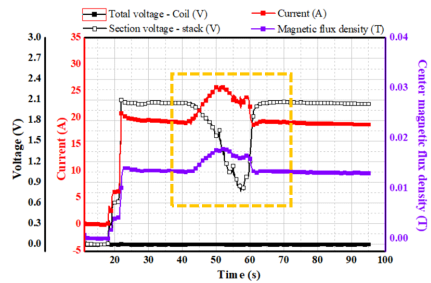
Fig. 6. MEA performance depending on activation stage

두 이루어진 10회 시점에는 3장의 MEA 모두 거의 동일한 성능을 내는 것을 확인할 수 있다.

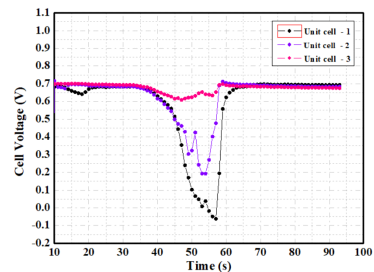
3.2 3셀 스택 및 초전도 코일 구동 실험

연료전지 셀 스택을 활용하여 초전도 코일을 구동할 때 주의해야 할 점은 3장의 MEA 성능이 동일하게 나오는지 확인하는 것이다. 단위 전지를 활용하여 초전도 코일을 구동할 경우 MEA가 1장이기 때문에 특성 차이가 존재하지 않는다. 하지만 3장의 MEA를 사용하는 3셀 스택의 경우 MEA마다 공급되는 가스의 유량이 달라 서로 다른 특성을 보이므로 유량 조절을 통해 3장의 MEA에서 동일 성능이 나오도록 해야 한다.

Fig. 7은 3셀 스택 내부 MEA 성능 차이를 보여준다. 초전도 코일의 충전에 대한 구동은 전류 및 자기 선속 밀도 등으로 확인하였다. 이때 공급되는 수소 및 공기의 유량은 각각 0.4 LPM 및 1.25 LPM이다. 3셀 스택 연료전지를 활용하여 초전도 코일을 충전시켰을 때 정상적으로 초전도 코일이 구동되는 것으로 보였다. 그러나 초기 전류값이 높고 가변저항의



(a) Voltage, current & magnetic flux density



(b) Cell voltage

Fig. 7. Difference in MEA performance inside 3-cell stack

납땀부 등에서 발열이 심하게 나타났다. 또한 가변저항의 저항을 조절하여 스택의 운전 전압을 조절할 때 셀마다 동일하게 움직이지 않고 큰 차이를 보였다. 연료전지를 제어하기 위해서는 3개의 셀이 동일하게 움직여야 한다. 따라서 실제 스택 내부 MEA는 위치에 따라 큰 특성 차이가 나타나며 유량이 낮아 연료가 셀마다 균등히 분배되지 않아 발생하는 문제일 가능성이 존재하는 것으로 판단하였다.

3셀 스택을 사용할 경우 초전도 코일을 구동할 때 위와 같은 문제는 저전류 구간보다 고전류 구간에서 더욱 분명히 나타난다. 언급한 바와 같이 연료전지는 공급되는 유량에 따라 유량이 부족할 경우 저전류 구간에서 농도 손실이 크게 발생하게 된다. 3셀 스택 제작 시 anode 방향에 위치하는 MEA의 경우에는 충분한 수소 가스 공급이 가능하다. 반면 cathode 방향에 위치하는 MEA의 경우 공기의 공급은 원활하지만 수소 가스의 공급이 부족하여 수소 가스 공급에 의한 농도 손실이 크게 발생하게 된다.

Fig. 8은 3셀 스택의 MEA 위치에 따른 농도 손실을 보여준다. Unit cell-1은 cathode 방향에 위치하기 때문에 공기의 공급은 충분하지만 수소 가스의 공급이 부족하다. Unit cell-2는 중간에 위치하기 때문에 anode 방향에서 수소 가스 공급이 충분할 뿐만 아니라 cathode 방향에서 공기의 공급도 충분하므로 농도 손실이 적음을 확인할 수 있다. Unit cell-3의 경우 anode 방향에 위치하기 때문에 수소 가스의 공급은 충분하지만 공기의 공급이 부족함을 확인할 수 있다. Unit cell-1과 3을 비교할 경우 unit cell-3의 농도 손실이 더 크다는 것을 확인할 수 있는데 이는 수소 가스 공급에 비해 상대적으로 공기의 공급이 부족하다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 3셀 스택 내 3장의 MEA가 모두 농도 손실 없이 동일한 성능을 내기 위해 공급되는 수소와 공기의 유량을 조절하며 실험을 진행하였다.

Fig. 9는 수소 1.6 LPM 및 공기 5.0 LPM 주입 후 가변저항을 통해 초전도 코일에 인가되는 전류를 조절하는 실험 결과를 보여준다. 이는 성능 평가 시 사용했던 조건과 동일하다. 위의 조건으로 연료전지를

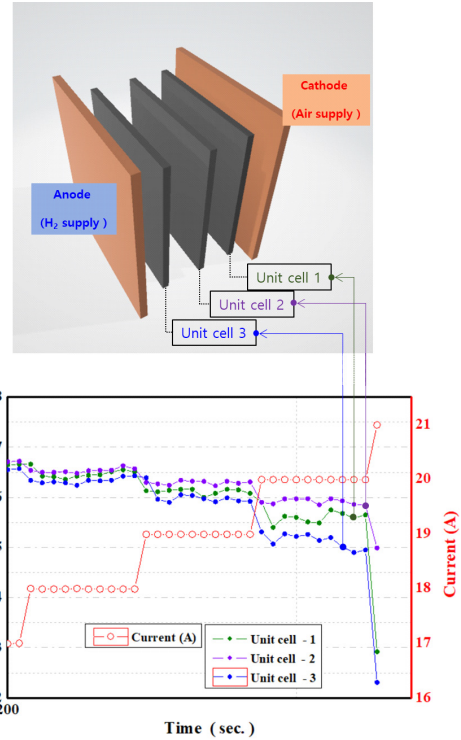
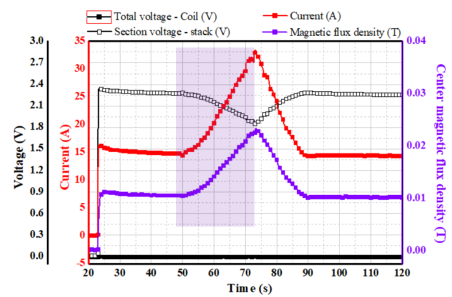
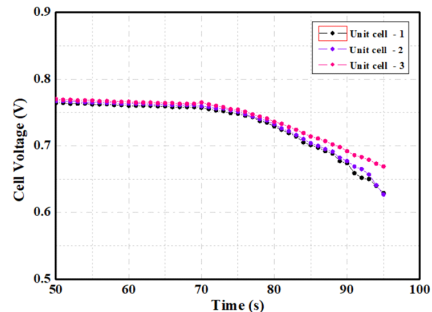


Fig. 8. Concentration loss depending on 3-cell stack MEA location



(a) Voltage, current & magnetic flux density



(b) Cell voltage

Fig. 9. Superconducting coil driving and concentration loss (H₂ : 1.6 LPM, Air: 5.0 LPM)

구동하고 가변저항을 통해 초전도 코일에 인가되는 전류를 조절하였다. 실험 결과 가변저항의 저항값을 변경하여 15 A에서 33 A까지 초전도 코일에 전류를 인가할 수 있었다. 3셀 스택 사용 시 구동 전압이 3 V 미만으로 가변저항을 통해 초전도 코일에 인가되는 전류를 쉽게 제어할 수 있었다. 실험 결과 중 셀 전압 그래프를 보면 저전류 구간에서는 3장의 MEA가 동일한 성능을 보이지만 고전류 구간에서 약간의 성능 차이가 발생함을 확인할 수 있다. Unit cell-1의 전압이 가장 많다는 것은 unit cell-1 위치에서 연료 손실이 가장 크다는 것이다. Unit cell-1의 MEA의 위치는 공기를 공급해 주는 cathode 방향이며 이는 수소 공급 대비 산소의 공급량이 부족하다는 것을 보여준다.

Fig. 10은 3셀 스택의 MEA가 동일 성능을 보이는 유량 공급 후 실험한 결과를 보여준다. 선행 실험을 통해 수소의 유량을 1.6 L/min으로 하고 공기의 유량을 5.0 L/min으로 설정 시 수소 대비 공기의 유량이

부족하다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이를 참고하여 유량을 변경해 가며 실험을 추가적으로 진행하였고 최종적으로 3셀 스택의 MEA가 동일한 성능을 보이는 유량을 확인할 수 있었다. 3셀 스택의 MEA가 동일한 성능을 보이기 위해 공급해 준 수소의 유량은 1.0 LPM이었으며 공기의 유량은 5.0 LPM이었다. 따라서 본 연구에서 구축한 초전도 코일 구동을 위한 연료전지 전원 기술을 통해 가변저항의 변경에 따라 약 15 A에서 33 A까지 초전도 코일에 전류 인가가 가능함을 확인하였으며 충분한 연료 공급의 조절을 통해 연료전지의 셀 간의 전압차 발생을 극복할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 초전도 코일 충전을 위한 3셀 스택 연료전지 전력 기술 개발에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 연료전지 및 초전도 코일 구동을 위한 회로를 구성하고 연료전지 특성 평가 장치를 구축하였다. 또한 연료전지의 활성화에 따른 3셀 스택의 성능을 분석하였으며 공급되는 유량의 최적화를 통해 연료전지 성능을 개선하였다.

기본적으로 단위 전지 및 스택이 제작되면 활성화 단계를 거쳐 셀의 성능을 최대로 만들어줘야 한다. 활성화 횟수에 따라 연료전지 스택의 성능이 증가함을 알 수 있었다. 3셀 스택 연료전지를 활용하여 초전도 코일을 충전하였을 때 정상적으로 초전도 코일이 구동되는 것으로 보였다. 그러나 가변저항의 저항을 조절하여 스택의 운전 전압을 조절할 때 셀마다 큰 차이를 보였다. 실제 스택 내부 MEA는 위치에 따라 큰 특성 차이가 나타나며 유량이 낮아 연료가 셀마다 균등히 분배되지 않았기 때문이다.

본 연구에서는 3셀 스택 내 3장의 MEA가 모두 농도 손실 없이 동일한 성능을 내기 위해 공급되는 수소와 공기의 유량을 조절하며 실험을 추가적으로 진행하였다. 결과적으로 가변저항의 변경에 따라 약 15 A에서 33 A까지 초전도 코일에 전류 인가가 가능함을 확인하였으며 충분한 연료 공급의 조절을 통해 연료

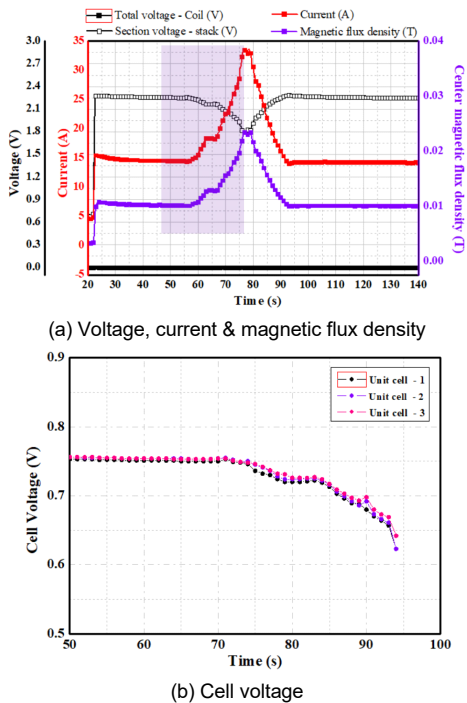


Fig. 10. Superconducting coil driving and concentration loss (H₂: 1.0LPM, Air: 5.0 LPM)

전지의 셀 간 전압 차 발생을 극복할 수 있음을 확인하였다.

후 기

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

References

1. M. Hinaje, K. Berger, J. L  v  que, and B. Davat, "Superconducting coil fed by PEM fuel cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 16, 2013, pp. 6773-6779, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.151>.
2. Z. Abdin, C. J. Webb, and E. M. Gray, "PEM fuel cell model and simulation in Matlab-Simulink based on physical parameters", *Energy*, Vol. 116, Pt. 1, 2016, pp. 1131-1144, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.033>.
3. P. Mukherjee and V. V. Rao, "Design and development of high temperature superconducting magnetic energy storage for power applications - a review", *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 563, 2019, pp. 67-73, doi: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2019.05.001>.
4. W. Q. Tao, C. H. Min, X. L. Liu, Y. L. He, B. H. Yin, and W. Jiang, "Parameter sensitivity examination and discussion of PEM fuel cell simulation model validation: part I. Current status of modeling research and model development", *Journal of Power Sources*, Vol. 160, No. 1, 2006, pp. 359-373, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.01.078>.
5. R. Linares, K. Berger, M. Hinaje, and B. Davat, "Management of a proton exchange membrane fuel cell system to feed a superconducting coil", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 26, No. 3, 2016, pp. 1-4, doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2535156>.
6. R. Linares, S. Ra  l, K. Berger, M. Hinaje, and J. L  v  que, "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>.
7. P. H. A. N  vrega, "A review of physics-based low-temperature proton-exchange membrane fuel cell models for system-level water and thermal management studies", *Journal of Power Sources*, Vol. 558, 2023, pp. 232585, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232585>.
8. T. Kim, J. Choi, I. Cho, and J. Lee, "A study on the development of safety standard through the risk assessment for fuel cell system applied to UAV", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 56-65, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.56>.
9. J. Y. Park, T. Bui, S. Park, D. Lee, Y. Bae, Y. Kim, and S. M. Lee, "Fuel cell-based cogeneration system for greenhouse cooling and heating", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 667-672, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.667>.
10. 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>.
11. T. Kang, S. Ham, H. Oh, Y. Y. Choi, and M. Kim, "Power distribution optimization of multi-stack fuel cell systems for improving the efficiency of residential fuel cell", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 4, 2023, pp. 358-368, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.4.358>.
12. N. Li, S. L. Sahlin, M. Zhou, V. Liso, and S. S. Araya, "Effects of operation modes on high temperature PEM fuel cell stack degradation", *Next Energy*, Vol. 3, 2024, pp. 100118, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100118>.
13. J. Tao, Y. Zhang, X. Wei, S. Jiang, and H. Dai, "Optimization of fast cold start strategy for PEM fuel cell stack", *Applied Energy*, Vol. 362, 2024, pp. 123018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123018>.
14. R. B. Ferreira, D. F. M. Santos, A. M. F. R. Pinto, and D. S. Falc  o, "Development and testing of a PEM fuel cell stack envisioning unmanned aerial vehicles applications", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 51, Pt. D, 2024, pp. 1345-1353, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.090>.
15. J. Tao, X. Wei, X. Wang, S. Jiang, and H. Dai, "Control-oriented cold start modelling and experimental validation of PEM fuel cell stack system", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 50, Pt. C, 2024, pp. 450-469, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.240>.
16. P. Xie, H. Asgharian, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, S. S. Araya, and V. Liso, "A two-layer energy management system for a hybrid electrical passenger ship with multi-PEM fuel cell stack", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 50, Pt. B, 2024, pp. 1005-1019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.297>.

17. Q. Cao, H. Min, H. Zhao, W. Sun, Y. Yu, Z. Zhang, and J. Jiang, “A novel thermal management for PEM fuel cell stack combining phase change materials with liquid cooling under low temperature condition”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 238, 2024, pp. 121949, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121949>.