

# 해외출장 결과보고서

기간 : 2022년 1월 13일 ~ 1월 19일 (7일간 출장결과 요약)

작성자 : 한국과학기술연구원, 수소·연료전지연구센터  
윤 0 0

# 목 차

## I . SOFC

1. 구 버전 LAS (Large Area Stack) 스택
2. LAS 스택 성능
3. CSA (Compact Stack Architecture) 스택

## II . SOEC

1. LAS 스택 SOEC
2. CSA 스택 SOEC 성능 및 효율
3. CSA 스택 SOEC 수명

## III . MCFC

1. MCFC 성능 및 효율
2. MCFC 수명
3. MCFC 적용 분야

## IV . MCFC vs. SOFC

1. 성능 및 효율 비교
2. 수명 비교

## V . Bloom Energy SOFC

1. 사양
2. 문제점

## I. SOFC

### 1. LAS (Large Area Stack: 이하 LAS) 스택

- 550cm<sup>2</sup> 사각형 셀을 장착한 SOFC 스택 모듈을 개발.
- 기준 스택 모듈 크기는 120단 적층 스택으로 16kW
- 100kW 는 120단 스택 모듈 2개가 위/아래로 구성된 기본 스택모듈 1 set (32 kW)가 4개로 정사각형 배열된 구성이며, 200kW는 이 100 kW 모듈 2개가 연결 (120단 기본 스택 모듈 총 16개로 구성)된 구성임 (아래 그림 1 참조).



그림 1. 120단 LAS 스택 모듈

※출처: 2020 Annual Merit Review

### 2. LAS 스택 성능

- 80단 스택에 대한 장기운전 결과 13000시간 운전 후에도 [0.8V@0.29A/cm<sup>2</sup>](#) 성능 유지.
- 일반적인 SOFC는 초기 열화율이 크고 장기운전 중에 선형적으로 수렴하는 경향을 보이지만 LAS 셀은 전반적으로 선형적인 성능저하율 보임.
- LAS 스택 장착 시스템의 경우, 2017년 400kW 설치 운전되었음.

### 3. CSA (Compact Stack Architecture: 이하 CSA) 스택

- 현재 CSA 스택 모듈 크기는 45단(short), 150단(middle), 350단(long)으로 구분되어 있으나, 스택 기본 모듈 크기는 350단 적응 스택임(아래 그림 2 참조)



그림 2 . CSA 슛, 미들, 그리고 롱 슛택 그림

※출처: 20<sup>th</sup> Annual Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Project Review Meeting (2019)

- CSA 슛택은 구 버전인 LAS 슛택과 유사한 성능 및 효율을 보임.

## II. SOEC

### 1. LAS 스택 SOEC

- SOFC 보다 많은 SOEC 운전 진행.

### 2. CSA 스택 SOEC 성능 및 효율

- SOEC 운전은 SOFC와 달리 흡열반응의 운전이므로 운전 온도인 약 700°C로 자열운전을 하기 위해서는 많은 전류를 가하여 발생하는 주열열로 스택 온도 유지를 하거나 혹은 외부에서 열원을 공급하여 스택온도를 유지해야 함.
- 높은 전류밀도 하에서의 운전은 스택의 성능 열화를 가속시킬 가능성이 큼.
- 22년 말경 CSA 스택이 장착된 250kW SOEC 시스템이 INL에서 운전될 예정임.

### 3. CSA 스택 SOEC 수명

- 현재 CSA 350단 기본 모듈 스택에 대한 장기 운전 진행 중임.

## III. MCFC

### 1. MCFC 성능 및 효율

- SureSource 3000의 발전효율 평균 45%이며, 향후 SureSource 4000부터 발전효율 평균 57%로 개선 가능.
- 발전효율을 개선하기 위하여 cascading 방식 혹은 아래와 같은 ORC 적용 활용(그림 3 참조).

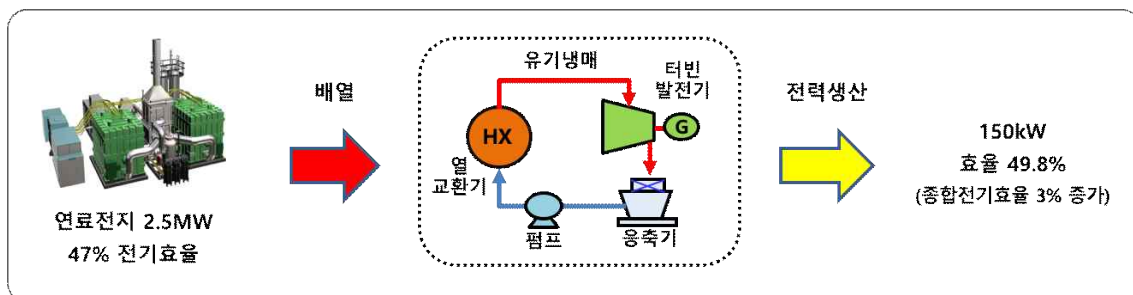


그림 3. 고온 배출가스(350°C 이상)를 ORC(Organic Rankine Cycle)에 연계 추가 발전

### 2. MCFC 수명

- SureSource 3000의 수명은 현재 4만시간에서 7만시간으로 확장되었음.
- 그러나 궁극적으로 7만시간 스택 역시 운전 중 전해질 소모로 스택 성능이 저하될 수 있으므로 궁극적으로 전해질 소모에 의한 성능저하를 방지하기 위해서는 MCFC 운전 중 전해질 in-situ 주입 공정(KIST 보유 기술, USP 10,777,834 B2) 개발이 필요함.

### 3. MCFC 적용 분야

- 발전 시장 분야에서는 효율이 높은 SOFC와 경쟁이 예상되므로 SOFC 제품이 발전시장에 진입한다면 MCFC 제품은 발전시장 참여 규모가 줄어들게 될 것임.
- MCFC 기술 역시 강력한 틈새시장으로 CCS 시장에 대응 가능하다는 장점을 갖고 있음
- MCFC CCS 기술의 원리는 산단에서 배출하는 5~15%의 CO<sub>2</sub>를 공기극으로 보내 발전하면서 연료극 쪽에 CO<sub>2</sub>를 약 70% 이상 농축하도록 하여 이산화탄소를 농축 저장하는 방법임. 현재 FCE 사는 Exxon Mobil과 공동 연구 중이며, 향후 석탄화력 발전을 대상으로한 실증 예정임.

## IV. MCFC vs. SOFC

### 1. 성능 및 효율 비교

- MCFC 작동온도는 650°C 이며, SOFC는 700°C~800°C임. 작동온도가 높을수록 성능 및 효율은 증가하지만 성능저하속도(열화속도)는 빨라지는 단점이 있음.
- MCFC 셀은 스택 평균 0.1W/cm<sup>2</sup> 의 성능을 보이는 반면 SOFC는 스택 평균 0.3W/cm<sup>2</sup>를 보임. 또한 SOFC는 박막 기술을 적용하여 한 셀 두께를 수백  $\mu\text{m}$  미만으로 제조 가능하지만 MCFC는 단위 셀 두께가 천  $\mu\text{m}$  수준으로 약 10배 가까이 두꺼워 단위 부피 당 출력밀도가 낮음.
- MCFC는 액체전해질을 사용하는 만큼 장기운전 시 부식/증발 등에 의한 전해질 소모 때문에 스택 수명이 제한되어 있으나 SOFC는 고체 전해질로 전해질 소모 문제는 재료적으로 발생할 수 없음. 단, SOFC는 고온 운전으로 전해질/전극 간 계면화합물 생성에 의해 전기 성능이 감소하는 문제점과 고온 기체 밀봉에 취약한 점이 장기 안정성을 낮추는 요인임.
- 현재 MCFC 시스템은 천연가스를 연료로 사용하며 순 수소를 연료로 사용하는 것은 불가능함. 반면 SOFC는 천연가스 연료뿐만 아니라 순 수소를 연료로 사용하는 것이 가능함.

### 2. 수명 비교

- 현재 MCFC는 내부개질형으로 스택 내 전기화학반응에 의한 발열을 흡수하여 스택 내 온도를 균일하게 유지하는 방법 사용. 이에 비하여 SOFC는 셀 크기가 MCFC 셀 대비 매우 작아 단전지 및 스택 내부 열구배를 크게 고려할 필요 없음. 이보다는 SOFC 셀의 균열 및 불완전한 기체 밀봉 의한 부분 적인 “hot spot” 형성으로 장기 안정성이 떨어지는 것이 문제임.
- MCFC가 SOFC 대비 비교 우위에 있는 점은 고온 기체밀봉 기술임. MCFC는 다공성 매트릭스 내에 액체 전해질이 함침되어 있어 반응기체들을 고온 밀봉하여 상호간 차단할 수 있음. 이에 비하여 SOFC는 모든 구성요소가 고체로 고온 기체밀봉 때 밀봉을 위한 면압 때문에 셀이 깨지는 문제점과 고온 기체밀봉을 위한 적합한 소재 개발이 어려운 문제점 있음. 일반적으로 SOFC 기체밀봉 소재로 질석류의 소재를 사용하여 압축 밀봉(compressive sealing, 기체 누설 심함)하거나 혹은 유리(glass) 소재를 이용한 유리 밀봉(glass sealing, 열사이클에 취약함)을 실시함.

## V. Bloom Energy SOFC

### 1. 사양

- BE 사 SOFC 제품은 두꺼운 전해질 사용(100~250 $\mu$ m)으로 고가의 Scandium 희토류 금속을 첨가물로 사용해야하고 또한 높은 작동온도 ( $\geq 800^{\circ}\text{C}$ )를 요구함. 높은 작동온도는 다시 Cr 함량이 높은 고가의 고온용 내열합금을 사용해야 하므로 연결재(분리판) 가격이 매우 높은 구조임.
- BE 사 제품은 셀 소재뿐만 아니라 연결재(분리판) 소재 가격을 낮추는 것이 거의 불가능함.

### 2. 문제점

- BE 사 제품은 열병합 발전 불가함. 천연가스 개질 및  $800^{\circ}\text{C}$  스택의 온도를 유지하기위해 고온 배열이 대부분 사용되어 열병합 발전 안 됨. 열병합 발전을 위해서는 발전효율을 희생해야하는 시스템 구조임.
- BE 사 제품은 고온 작동으로 Cr 공기극 피독 문제가 더 심각함. 그러나 현재 Co-Mn 산화물 코팅으로 공기극 내 Cr 증착 문제는 거의 해결된 상태임.
- 고온 실링 소재의 열주기 안정성 확보 필요함.
- 1만시간 이상의 오픈된 장기 운전 데이터 필요함.