

05 | SOCs(SOFC·SOEC) 산업·기술 동향 및 시사점¹⁾

1 SOCs 의미와 산업 동향

□ SOCs 개념과 시장 분화의 의미

- SOC(Solid Oxide Cell)는 고온에서 작동하는 고체산화물 기반 전기화학 기술로서 발전용 연료전지(SOFC)와 수전해(SOEC)에 공통적으로 활용되는 기술 플랫폼
 - 발전용 연료전지(SOFC)와 수전해(SOEC)는 셀, 스택, 세라믹 등 핵심 제조 공정과 부품 체계를 상당한 부분을 공유
 - 이에 따라 하나의 기술 개발 성과가 전력 발전과 수소 생산 분야에 동시에 활용될 수 있으며, 이와 함께 공급망, 품질관리, 생산기반도 동시에 성장이 가능
- 최근에는 셀, 스택, 세라믹 공정 등 공통 제조 기반보다 전력 시장과 수소 시장의 요구가 더 커지면서 시장 구조가 분화되는 추세
 - 전력 시장은 발전기의 안정적 운영이 핵심임으로 고가동률, 장기 내구성, 고장 감소, 유지보수 편의성 등이 주요 경쟁 요소
 - 반면 수소 시장은 수소 생산 비용 절감이 핵심으로 전력 사용량(kWh/kgH₂), 열 활용, 수처리, 정제 등 전체 플랜트 효율과 경제성이 중요 요소
 - 즉 동일한 SOC 기술 기반이라도 전력형은 “안정적 운영”, 수소형은 “경제적 수소 생산” 중심으로 산업 구조가 이원화되는 상황
- 글로벌 SOC 산업은 미국·EU·일본을 중심으로 발전·수전해 양 시장에서 상용화 단계 진입이 가속되고 있으며 시장별 정책·실증 전략의 차별화가 국가 경쟁력의 분기점으로 부상
 - 미국은 IRA 수소 인센티브와 DOE H2Hubs를 통한 SOEC 실증·확산이 가속되고 EU는 Net-Zero Industry Act·CertifHy 등으로 청정수소 시장 제도와 SOFC 분산전원 보급을 병행
 - 일본은 GI Fund·NEDO 주도로 SOFC 발전 실증 확대와 SOEC 대형화 R&D를 강화하는 반면 한국은 양 시장 모두 후발 추격 단계로 시장별 KPI·실증 체계의 조기 정립이 시급

〈표〉 SOCs 공통 핵심 기술, 성과 지표 및 시장 확산 조건

항목	공통 기반	SOFC 전력	SOEC 수소
기술 범위	셀·스택 제조, 세라믹 공정, 인터커넥트, 실링	전력 생산 시스템	수소 생산 플랜트
성과 지표	작동 온도, 열효율, 전류 밀도, 열사이클 내구성	발전 효율, 종합 효율, 스택 수명	전해 효율, 수소 순도, 가압 운전
기술적 확산 조건	소재 국산화, 밀봉 기술, 스택 스케일업, 시스템 통합	연료 유연성, 부하 추종	열원 확보, 재생 전력 간헐성 대응
경제적 확산 조건	스택 단가 하락, 내구성 향상	발전 단가, REC등 정책	수소 단가, 전력 요금

※ 출처 : U.S. DOE/NETL Solid Oxide Fuel Cell Program, IEA Global Hydrogen Review, Clean Hydrogen Partnership SRIA 2021-2027 자료들을 저자가 분석 정리

1) 한국에너지기술연구원 송락현 책임연구원(rhsong@kier.re.kr)

본고는 저자의 개인적인 견해이며 국토교통부와 KAIA의 공식적인 의견은 아닙니다.

□ SOFC 동향 : 효율 중심에서 운영 KPI 중심으로 전환

- SOFC는 효율 경쟁을 넘어 운영 KPI 경쟁으로 재편 중이며 성능이 좋아도 이용률과 정비성이 확보되지 않으면 상용 시장에서 확산이 제한되는 구조로 이동
 - 운영 KPI가 핵심으로 부상한 배경은, 상용화 단계에서 설비의 경제성이 정격 효율보다 가동률, 고장 정지 시간, 정비 난이도, 열사이클 내구 등 운영 관점 지표에 의해 결정되는 비중 증가
 - 정격 효율 중심의 평가 체계는 이용률·정비성·열사이클 내구성·연료 품질 변화 등 운전 리스크를 후 순위로 밀 수 있어 운영 리스크의 의도적 포함이 필요
- SOFC에서 운영 KPI 중심 경쟁은 정격 효율을 넘어 이용률·정비성·내구를 함께 만족시키도록 제품 설계와 실증 전략을 동시에 바꾸는 압력으로 작동
 - 제품 설계는 단순 성능 향상에서 벗어나, 운전 범위 확장, 고장 모드 감소, 정비 절차 단순화, 부품 교체 용이성 등 운영 품질 설계로 확장되는 추세
 - 실증 전략은 단일 조건 장시간 운전뿐 아니라, 부하추종, 기동정지 반복, 열사이클 조건에서의 성능 유지와 고장 복구 프로세스까지 포함하는 형태로 발전

〈표〉 SOFC 운영 KPI 정의 및 보고 항목

KPI	정의	중요성	권장 보고 항목
이용률	연간 실제 가동 비율	전력 설비는 가동률이 수익성을 지배	월별 이용률, 정비 시간, 고장정지 시간
정비성	정비 난이도 및 MTTR	이용률과 직결, 운영 인력 비용에 영향	MTTR, 정비 빈도, 교체 부품 리스트
운영 안정성	이상 상황 대응 및 고장 모드	현장 리스크 비용을 좌우	고장 모드 분류, 복구 절차, 재발 방지
장기 내구	열화율과 수명	성능 보증과 교체 비용에 직결	열화율, 수명 예측, 가속시험 결과
부하추종·기동정지	동적 운전 내구	계통 및 수요 변동 대응 핵심	램프율, 사이클 수, 열사이클 후 성능

※ 출처 : U.S. DOE/NETL 및 SOFC 실증 자료를 바탕으로 저자 정리 분석

□ SOEC 동향 : 플랜트 통합 최적화와 동적 운전 내구 중심으로 이동

- SOEC는 수소 생산에 소비되는 전력량 kWh/kgH₂ 중심으로 개발이 수렴하고 있어 경쟁은 셀·스택을 넘어 플랜트 패키지 최적화로 이동
 - 수처리, 증기 공급, 열 통합, 전력 변환, 정제까지 포함한 패키지 단위로 경제성을 확보할 필요가 있으며 이 구성요소가 프로젝트별로 달라질수록 표준 패키지 설계와 인터페이스 정의의 중요성 증대
 - 재생에너지 연계·계통 변동성 대응으로 동적 운전 내구성이 실증 평가의 중심으로 이동하며 경쟁 축이 스택 단위 성능에서 시스템 통합·제어 로직으로 전환
- SOEC는 인프라형 기술의 성격이 강해 설치·시공·안전·인허가를 포함하는 패키지화가 기술 확산의 전제 조건으로 강화
 - 수소는 안전 규제와 인허가 요구가 강하게 작동하므로 기술 성능과 별개로 허가 가능성과 운영 안전이 프로젝트 성패를 좌우

- 따라서 R&D 기획도 셀·스택 성능 고도화와 병행해, 플랜트 인터페이스 표준, 안전 체크리스트, 인허가 대응 가이드 같은 비 기술 요소를 산출물로 패키징하는 접근이 필요

〈표〉 SOEC 플랜트 패키지 구성과 최적화 포인트

구성요소	역할	설계 쟁점	경제성 연결 포인트
수처리	급수 품질·용량 확보	수질 기준, 운영 안정	가동률·스택 수명·정비 비용
증기 공급	반응 조건 형성	온도·압력·과열도	전력 소모·열화율
열 통합	전력 절감	열교환 네트워크	kWh/kgH ₂ 저감
전력 변환	전력 품질·효율	정류 효율·보호 로직	효율·고장 리스크
정제·압축	제품 사양 충족	순도·압력·건조	OPEX·안전
안전·인허가	규제 충족	방폭·누출·환기	승인 기간·프로젝트 리스크

※ 출처 : IEA, IRENA 및 DOE H₂A 자료를 바탕으로 저자 분석 정리

□ 글로벌 경쟁 축 : 실증 데이터와 제조 스케일업

- SOC 글로벌 경쟁은 정격 효율 등 성능 지표 경쟁을 넘어 장기 실증 데이터 축적·양산 제조 스케일업·공급망 경쟁으로 빠르게 전환되는 추세
 - 유럽·미국은 그린수소 정책·탈탄소 수요로 SOC 실증·제조 투자를 확대 중이며, 중국은 실증·양산 병렬 추진으로 비용·공급망·속도에서 영향력을 강화
 - 한국은 보급·운영 측면에서 선도 사례를 보유하고 있으나 양산 스케일업과 공급망 결속 측면에서 글로벌 선도국과의 격차가 여전히 큰 상황
 - 결과적으로 현장 실증 데이터 축적과 양산 수율·검사·추적성 체계가 SOC 산업의 기술 혁신 속도를 좌우하는 핵심 경쟁 구조로 강화
- 이 전환은 SOC 산업이 연구 개발 단계 성능 경쟁을 넘어 EPC·발주 관점에서 발주 가능한 설계·조달·시공 체계 확보 경쟁으로 이동함을 의미
 - 동일 조건의 실증 데이터 축적이 공급망·EPC 관점에서 요구 성능을 명확히 하며 표준 패키지 확산과 발주 가능한 사업 모델로 연결
 - EPC 발주처는 가격뿐 아니라 운영 KPI 보장, 가용성 데이터, 정비 체계 등 운영 단계 리스크를 체계적으로 평가해 사업자를 선정하는 추세
 - 이에 따라 표준화된 패키지·체크리스트와 설계 가이드 기반의 통합 엔지니어링 역량이 사업화 단계의 핵심 경쟁력으로 빠르게 부상하고 있는 상황

〈표〉 실증·제조 스케일업 체크리스트

항목	핵심 조건	필요 데이터	산출물 예시
실증 데이터	안정 운전	운전 및 고장 로그	운영 리포트, KPI 대시보드
제조 수율	양산 편차 관리	불량률, 검사 결과	QC 기준서, 공정 관리표
추적성	문제 원인 추적	로트, 공정 이력	추적성 체계, 이력 DB
표준 패키지	반복 가능한 설계	인터페이스 정의	설계 가이드, 체크리스트
비용 모델	제조 원가	CAPEX, OPEX	원가 구조표, 민감도 분석

※ 출처 : U.S. DOE/NETL Solid Oxide Fuel Cell Program, IEA Global Hydrogen Review, Clean Hydrogen Partnership SRIA 2021-2027 자료들을 저자가 분석 정리

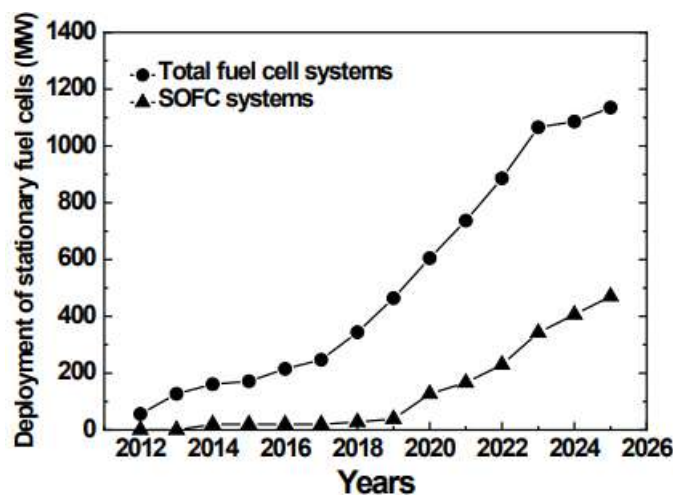
2 SOC 관련 국내 기업 및 보급 동향

□ 국내 SOC 기업 전략의 전형적 확장 경로

- 국내 SOC 기업 전략은 소형 상용 제품에서 출발해 중형 시스템 이후 MW급 플랜트로 확장하는 전형적 경로를 따르는 중
 - 소형 가정, 빌딩용 제품 상용화로 인증 및 운영 경험을 축적하고, 수십에서 수백 kW급 시스템으로 확장한 뒤 대형 프로젝트에 진입하는 흐름이 관찰
 - SOFC에서 축적한 셀·스택 제조 기반과 운영 데이터·검사 체계를 활용해 그린수소 시장 진입을 위한 SOEC 확장으로 연결하려는 흐름이 강화되는 추세
 - 제품 인증과 조달 이력 확보가 운영 데이터 축적과 중형 확장으로 연결되고 이 기반이 SOEC 확장으로 전이되는 구조 형성

□ 보급 기반의 산업적 의미

- 보급 기반은 소형 상용 제품에서 출발해 중형 시스템과 MW급 플랜트로 확장하는 전형적 스케일업 경로를 따르고 있음
 - 2025년 기준 국내 고정형 연료전지 누적 약 1,130MW 설치·운영 중이며 그 중 SOFC 보급량은 약 470MW 수준으로 언급
 - 누적 확대는 설치·시공·인허가·운영·정비 데이터가 축적되는 기반이 되며 운영 성과 중심의 사업 모델 고도화로 연결
 - 따라서 국내 경쟁력은 보급 그 자체보다 보급 과정에서 축적된 운영 정비 데이터를 운영 KPI 중심으로 구조화하고 표준화된 보고 형태로 전환하는 능력에서 결정될 가능성 증가



[그림] 국내 고정형 연료전지 설치·운영(누적) 추이 (전력거래소 데이터, SK 에코플랜트 자료를 활용하여 저자가 작성)

※ 출처 : 전력거래소(KPX) 전력통계정보시스템(EPsis), (<https://epsis.kpx.or.kr>)
 SK에코플랜트 공식 홈페이지, (<https://www.skecoplant.com>)

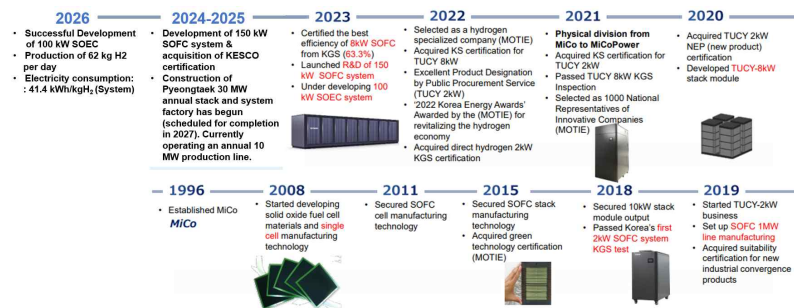
□ 주요 기업 동향

- 국내외 주요 SOFC 기업은 단계적으로 제품 인증·시스템 확장·제조 역량 확보를 병행하면서 글로벌 시장 점유 확대를 추진하는 방향으로 전개
 - 소형 상용 제품의 인증과 조달 이력 확보, 중형 시스템 확장, 대형 프로젝트 대응을 위한 제조 역량 확보가 동시에 추진되는 구도
 - 미국 블루에너지·FuelCell Energy, 영국 세레스파워, 일본 아이신·교세라 등 글로벌 기업이 SOFC 양산·시장 확장을 선도

※ 출처 : 저자 분석자료(한국에너지기술연구원)

□ MiCoPower

- 미코파워는 2kW·8kW 인증·조달 이력 기반 중형 확장 중이며 150kW SOFC·100kW SOEC 개발과 10MW/year 제조 역량을 보유
 - 2kW·8kW 등 소형 상용 제품의 인증·조달 이력은 운영 레퍼런스와 신뢰성 확보의 출발점이 되어 중·대형 시스템 시장 진입의 발판으로 작용
 - 150kW SOFC·100kW SOEC 개발 병행은 SOFC 제조 기반의 SOEC 전이를 보여주는 국내 확장 흐름의 대표 사례로 평가
 - 2025년 7월 150kW SOFC TUCY-Q150이 국내 최초로 KESCO 제품검사를 통과(전기효율 59.5%) 하며 SOFC 국산화의 분기점을 형성



[그림] 미코파워사의 SOFC 개발 이력



[그림] 미코파워의 150kW SOFC 시스템 (25kW 모듈 6개로 구성)

※ 출처 : 미코파워 홈페이지, (<https://www.micopower.com>)
저자 분석 자료(한국에너지기술연구원)

□ 두산퓨얼셀

- 두산퓨얼셀은 Ceres Power 협력 기반 300kW SOFC 시스템을 추진하며 금속 지지체형 10kW 시스템과 5kW 단위 스택 기술 확보 및 효율 65% LHV 수준 도달
 - 금속 지지체형 소형 시스템과 단위 스택 기술 확보는 대용량 시스템 제품화 과정에서 스택 모듈화와 시스템 용량을 확장하려는 전략으로 해석
 - 해외 기업과의 협력 기반 시스템 확장은 자체 R&D 부담을 분산하면서 핵심 기술 확보와 발주 가능 라인업 확장을 동시에 달성하려는 전략으로 해석
 - '23년 개발 완료 → '24년 실증 검증 → '25년 양산·상용화로 이어지는 단계적 로드맵은 라이선스 확보 후 점진적 시장 진입을 통해 기술·사업 리스크를 동시에 관리하려는 전략으로 해석

● 300 kW SOFC System in cooperation with CERES - Metal-Supported



- 1st** • Korean Model : Stationary SOFC System
- Reliability** • Long Lifespan by Mid-Temp. Operation
- Plan**
 - '23. 2H Development Completed
 - '24. 1H Verification Completed
 - '25. Mass Production / Commercialized

● 10 kW SOFC System



● 5kW 단위 스택: 금속지지체형

- 연료: 메탄 개질
- 400 X 306 X 106 mm
- 정격출력: 5.75kW
- 효율: 65% (LHV)



[그림] 두산퓨얼셀 사의 SOFC 시스템

※ 출처 : 두산퓨얼셀 홈페이지, (<https://www.doosanfuelcell.com>)
저자 분석 자료(한국에너지기술연구원)

□ HD하이드로젠(HD한국해양조선)

- HD한국조선해양은 2024년 HD하이드로젠 설립 Convion 인수·Elcogen 투자를 통해 해외 SOFC·SOEC 기술·제조 기반을 결합
 - 협력 기반 시스템 확장은 해외 핵심 SOFC 스택·시스템 기술의 자체 R&D 부담을 분산하면서 발주 가능 라인업 확장을 동시에 달성하려는 전략으로 해석
 - Elcogen의 셀·스택 기술과 Convion의 시스템 기술 내재화를 통해 셀-스택-시스템 일관 제품화와 스택 모듈화 기반 대용량화를 동시에 추진
 - 국내 발전용은 HD하이드로젠이 직접 담당하고 Convion이 핵심 기술 개발과 유럽 사업을 추진하는 투트랙 전략으로 글로벌 SOC 시장 진입을 가속화

※ 출처 : HD하이드로젠 홈페이지, (<https://hdhydrogen.com>)
저자 분석 자료(한국에너지기술연구원)

□ 삼성(삼성 E&A, 삼성전기, 삼성물산)

- 삼성E&A는 그린수소·암모니아 프로젝트에서 SOEC를 유력 후보로 두고 셀·스택·시스템 핵심 기술 개발과 10MW급 태양광-저온 수전해 실증을 병행 추진
 - KIST와 협력한 160kW SOEC HotBox 실증은 수소 법 제정 후 삼성 그룹 내 첫 고온 수전해 사례로 시스템 레벨 성능·운전 데이터 확보를 목적
 - 태양광 연계 저온 수전해 실증과 알카리 수전해 강자인 노르웨이 Nel 협력은 향후 SOEC 통합 플랜트 구축의 실증 데이터로 활용 가능하며 수전해 EPC 사업의 기반 확보 단계

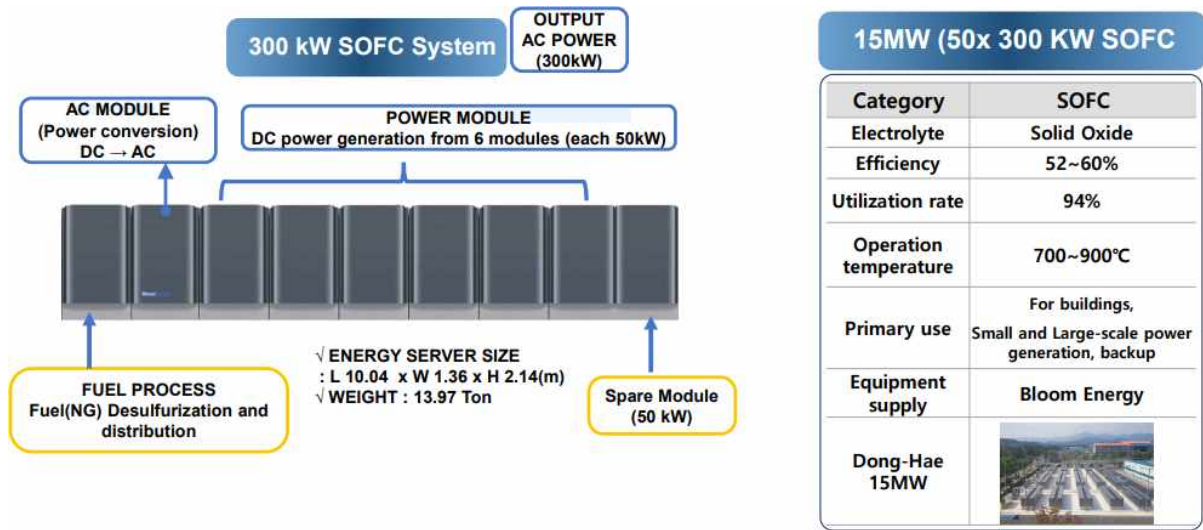


[그림] 삼성의 10MW 태양광 기반 수전해 실증 계획

※ 출처 : 삼성물산 홈페이지, (<https://news.samsungcnt.com>)
 저자 분석 자료(한국에너지기술연구원)

□ 동해시 15MW급 보급 운영의 의미

- 국내 단일 수십 MW급 대용량 SOFC 플랜트 설치·운영은 SOFC 운영 KPI 도출과 대규모 분산 전원 타당성 검증을 동시에 목표하는 SOFC 실용화 사업 단계
 - 동해 15MW급 SOFC 운영 사례는 모듈 병렬 구성 기반 대형 플랜트형으로 확장 가능성을 입증하는 국내 첫 대용량 분산 전원 보급 사례로 평가
 - 효율 52~60%, 이용률 약 94%, 운전 온도 700~900°C 수준의 운영 지표가 제시되며, 고온 폐열 활용 기반 열병합 운전 가능성을 동시에 실증
 - 보급 기반을 활용해 효율·이용률·정비성 등 운영 지표를 기준으로 실증과 표준화 시험 평가 체계를 연계할 필요성이 제기되는 단계로 평가됨



[그림] 동해 15 MW SOFC 플랜트 사례

※ 출처 : 블룸에너지 홈페이지, (<https://www.bloomenergy.com>)
동서발전 자료를 기반으로 저자가 분석 요약(한국에너지기술연구원)

□ 국내 밸류체인 역할 분화

- 주요 5개 SOC 기업 외 기타 기업과 기관은 셀·소재·부품·시스템 밸류체인의 각 영역에서 전문 역할이 점진적으로 분화되는 단계로 진입
- SOEC 시스템 개발, 소형 SOFC 상용화, 스택 제작, 소재 부품, 분말 양산, 전해질 플레이트 공급 등으로 역할이 세분화되는 흐름
- 연구소·대학은 스택·시스템 해석 기술과 소재 기반 핵심 연구를 중심으로 산업 기반을 보완하는 역할을 수행하며 R&D 생태계의 한 축을 형성
- 이 단계에서 소재 부품 및 인터페이스 표준화, 품질 검사, 추적성, 운영 표준 체계를 선점한 밸류체인이 대용량 MW급 확산의 속도를 좌우할 가능성 증가

〈표〉 국내 주요 기업 전략과 확장 포인트 요약

구분	제시 스케일 또는 지표	확장 방향 요약
MiCoPower	2 kW, 8 kW 인증, 8kW 효율 63.3%, 150kW SOFC 개발, 100kW SOEC개발, SOFC 약 10MW/year 제조 역량	자체 기술, 소형 인증 기반 중대형 확장, SOEC로 전이
두산퓨얼셀	Ceres Power 협력 금속지지형 300kW SOFC, 10kW 시스템, 5kW 단위 스택, 효율 65% LHV	해외 협력 기반 시스템 라인업 확대
HD하이드로젠 (HD한국조선해양)	Convion 인수, Elcogen 투자, 파일럿 규모 셀 스택 공장 구축 추진	해외 기술 결합, 제조 내재화
삼성	150kW SOEC 시험(Elcogen 스택), 셀, 스택 자체 개발 중	프로젝트 연계 대형 실증
동해 15 MW 플랜트 사례	블룸에너지 시스템: 효율 52~60%, 이용률 94%, 운전 온도 700~900°C	MW급 운영 KPI 제시 사례

③ SOC 관련 국외 기업 동향

□ 국외 SOC 산업 전개 구도

- 국외 SOC 산업은 SOEC 대형화와 플랜트형 패키지 경쟁이 강화되는 한편 SOFC는 분산 전원 상용 라인업과 하이브리드 고효율화가 병행되는 구도로 전개
 - 미국은 블루에너지를 중심으로 컨테이너형 SOFC 시스템과 통합 패키지 기반 데이터센터·필수 시설용 실증 적용성을 강화하는 방향으로 전개
 - 유럽은 영국·이탈리아·핀란드 등을 중심으로 SOEC MW급 모듈과 기가급 셀·스택 제조 투자로 글로벌 스케일업을 선도하는 흐름
 - 일본은 아이신·교세라·후지 전기 등을 중심으로 가정·건물용 소형 SOFC 보급 기반을 바탕으로 신뢰성 중심의 상용 생태계를 유지하는 특징
 - 중국은 국가 정책 기반 연구기관·실증·기업 양산 병행 추진을 통해 SOFC·SOEC 라인업 확장 속도와 규모를 빠르게 높이는 흐름

□ 미국 및 글로벌 시스템 기업 동향

- 미국 및 글로벌 시스템 기업은 SOFC/SOEC를 표준 컨테이너형 패키지로 제품화하여 발전·수소 생산용 MW급 중대형 실증을 확대하는 단계로 진입
 - 단일 스택 성능보다 시스템 패키지의 설치·운전 용이성, 모듈화, 성능 보증을 위한 장기 운전 데이터 제시가 핵심 경쟁 요소로 부상하는 단계
 - SOFC 중심의 패키지화가 진행되면서 SOEC로 기술 개발이 병행 전환되고 있으며 또한 시스템 단위의 성능·경제성 경쟁이 병행되는 흐름이 강화되고 있음

※ 출처 : 저자 분석 자료(한국에너지기술연구원)

○ Bloom Energy

- 미국 블루에너지는 SOFC·SOEC 글로벌 최고 선도 기업으로 AI 데이터센터 전력 수요 급증과 탄소 중립 흐름에 맞춰 기술 고도화·시장 확장을 가속화하는 단계
- 천연가스·바이오가스·수소 등 다 연료 활용을 통해 분산 발전 시장을 선도하며 60% 이상의 높은 발전효율로 시장 경쟁력을 확보
- 고효율 고온 작동 SOFC의 장점을 살려 발전 연료전지 세계시장을 선점하고 경쟁사 대비 차별적 기술 우위를 점하는 단계
- 2021년 INL 실증 이후 고효율 청정수소 생산 SOEC 시스템을 단계적 상용화하며 저온 PEM·알칼라인 방식 대비 25% 이상 높은 효율을 입증
- INL 100kW 시스템(수소 1kg당 37.7kWh, 88.5% LHV) 효율 검증 후 NASA Ames 4MW 실증으로 모듈로 확장성을 입증한 단계
- 2025~2026년 AI 데이터센터 전력 급증으로 블루에너지 SOFC가 즉각적 전력 대안으로 부상하며 주가가 1년 새 10배 이상 급등하는 흐름

- 글로벌 파트너십 SK에코플랜트(국내 합작), 오라클(2.8GW 계약), 브룩필드(\$5B) 등과 협력해 글로벌 SOFC·수소 시장 확장을 가속화하는 단계



[그림] Bloom Energy사 300kW SOFC 시스템



[그림] Bloom Energy사의 모듈당 150kW급 SOEC 시스템

※ 출처 : 블룸에너지 홈페이지, (<https://www.bloomenergy.com>)

○ Fuel Cell Energy

- 미국 FuelCell Energy는 INL 협력 기반 250kW SOEC 컨테이너형 시스템을 개발해 원자력에너지 연계 청정수소 생산 실증 운전에 성공한 단계
- 셀 기술로는 연료극 지지체 기반 디스크형 원반 셀을 개발하여 컴팩트한 스택 기술을 확보했으며 이는 스택 내 균일한 온도 분포를 얻기 위한 설계
- SOFC 스택은 동일 셀·분리판으로 350셀 적층 된 스택을 개발해 실증 완료. 기본 단위 스택 7kW로 SOFC·SOEC 대용량화를 추진하는 단계
- 350kW급 SOFC 시스템의 경우 7kW급 기본 스택을 50개 직병렬로 연결해 제조하며 모듈식 확장을 통한 대용량화 가능성을 입증



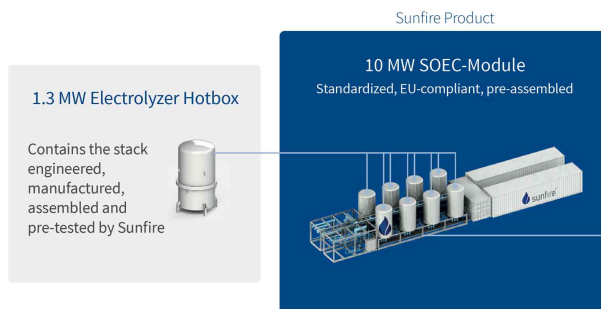
[그림] Fuel Cell Energy 사의 250 kW SOEC 시스템

※ 출처 : Fuel Cell Energy 홈페이지, (<https://www.fuelcellenergy.com>)

NETL/DOE(2022.10), 23rd Annual Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Project Review Meeting

□ 유럽 동향

- 유럽은 TOPSOE, Sunfire, Ceres Power, SolydEra, Elcogen 등을 중심으로 SOEC 대형화·제조 투자 확대가 두드러지며 모듈 표준화와 부하추종 성능이 핵심 경쟁 축으로 부상
 - 단위 스택 성능보다 MW급 모듈 개발, 부하 변동 대응, 대량 양산화 전략이 시장 경쟁의 일반 기준으로 자리 잡는 흐름이 강화되는 단계
 - 특히 SOEC 모듈의 0~100% 부하 범위 대응, 분 단위 부하 변동 등 운전 유연성 지표가 재생에너지 연계 실증·운영의 핵심 지표로 부상
- Sunfire (독일)
 - 2021년 225kW급 2세대 SOEC 모듈 개발 성공: 60개 스택·1,800셀(스택 당 30셀) 구조의 전해질 자립 막식 셀 스택을 핵심 기술로 확보
 - 2024~2025년 12개 모듈로 구성된 2.6MW 시스템을 개발해 850°C에서 시간당 60kg 그린수소 생산 84~89% LHV 효율을 달성
 - 대용량 시스템은 1.3MW 기본 모듈 8개로 10MW SOEC를 구성하며 100MW 이상 확장을 전제로 50~100% 부하 변동 및 분당 10% 램프 특성 보유
 - 대형 모듈 확장성과 동특성 제시는 재생에너지 연계와 계통 변동성 대응을 전면에 둔 전개 방식이며 그린수소 산업의 표준 기준으로 자리 잡는 흐름



[그림] Sunfire사의 1.3MW 및 10MW(1.3MW x 8)

Hydrogen Production

Nameplate capacity	291 kg/h
Flexibility	50-100% and 10%/min
Hydrogen purity after drying	99.9% before cleaning ²⁾

Electrical Efficiency

AC-power	10.9 MW
Specific consumption	37.5 kWh/kg

Hardware

Net module footprint	24 m ² /MW
----------------------	-----------------------

Feed Gas

Steam consumption	10.4 kg/kg H ₂
Condition	>3 bar(g) · >150 °C

[그림] Sunfire 사의 10MW 사양

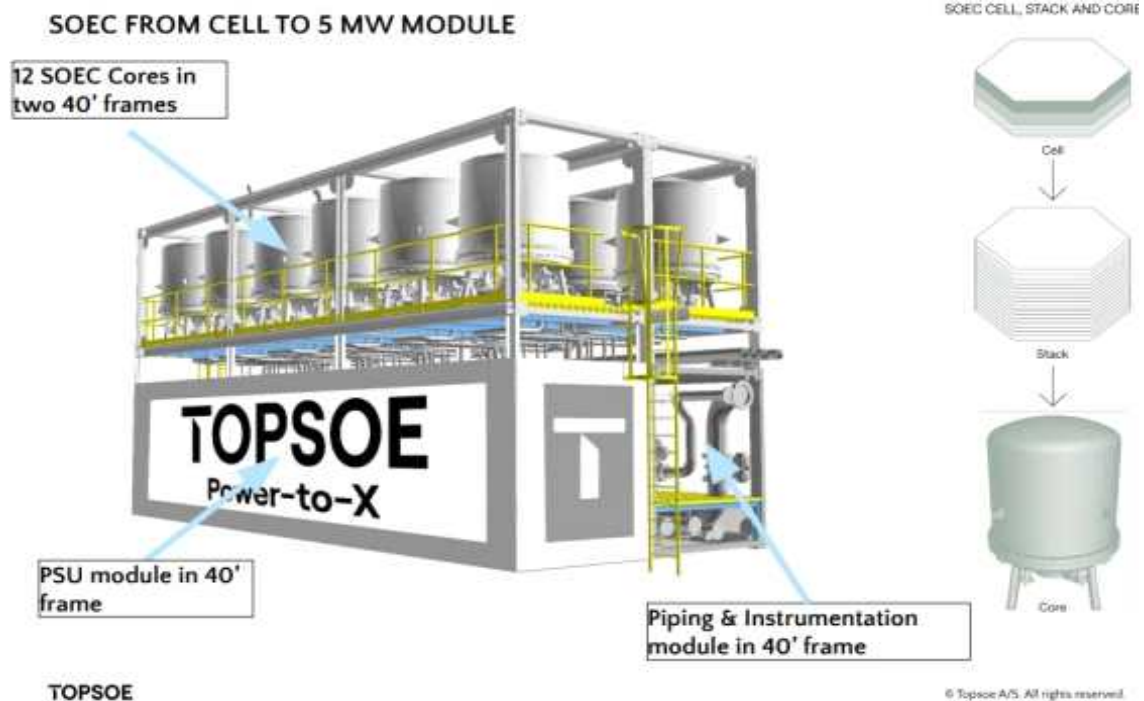
※ 출처 : Sunfire 홈페이지, (<https://sunfire.de>)

- TOPSOE (덴마크)
 - 350kW SOEC 코어는 12개 스택(스택 당 29.2kW)으로 구성되며 93% 효율·36kWh/kgH₂·부하 0~100% 3분 내 응답성을 달성
 - 제조 용량은 2025년 덴마크 Herning에 가동 시작한 연 500MW급 SOEC 공장(향후 5GW 확장)으로 유럽 최대 공장 건설을 완료한 단계

- 350kW급 코어를 기반으로 5MW 모듈화·연 500MW 공장 가동·미국 버지니아 기가팩토리 추진까지 이어지며 SOEC 스케일업을 빠른 시간내 추진함



[그림] TOPSOE사의 SOEC 셀(분리판), 스택, core 개발 전략



[그림] TOPSOE 사의 350 kW SOEC 스택 모듈(one core) 및 MW 구성 (12개 코어로 구성)

※ 출처 : TOPSOE 홈페이지, (<https://www.topsoe.com>)

○ Ceres Power (영국)

- 금속 지지체 셀 및 스택 기술에서 가장 앞선 기업으로 작동 온도 550°C 수준의 저온 작동을 통한 시스템 안정성·내구성을 확보
- 1kW·5kW급 SteelCell 스택을 기본 단위로 모듈식 직병렬 확장이 가능하며 분산 발전부터 대용량 시스템까지 폭넓은 적용성을 확보한 구조
- 유럽의 SOFC 대형화·제조 투자 확대·모듈 표준화 흐름과 함께 기술 라이선싱 기반 스택 확산을 병행하여 글로벌 보급을 이끄는 대표 기업

- Ceres Power의 셀·스택 기술은 자산 경량 라이선싱 모델을 통해 두산·Weichai·Bosch 등 글로벌 5대 전략 파트너로 확산되는 구조
- 국내에서는 두산퓨얼셀이 Ceres Power 라이선스 기반 SOFC 시스템을 개발하고 2025년 7월 연 50MW급 양산 공장 건설을 추진
- 중국 Weichai·일본 Denso·독일 Bosch 등이 Ceres Power의 SteelCell 라이선스로 권역별 SOFC 사업화를 추진. 다만 2025년 Bosch는 사업추진을 중단.



[그림] Ceres power 사 SOFC/SOEC 셀 및 스택 기술 라이선싱

※ 출처 : Ceres Power 홈페이지, (<https://www.ceres.tech>)
저자 분석자료(한국에너지기술연구원)

○ SolydEra (이탈리아)

- 10kW SOFC 및 30kW SOEC를 병행하는 제품 전략을 추진하며 다양한 연료 적응성과 스팀 전환율을 타깃으로 기술 개발과 양산화를 추진
- 소형 SOFC 라인업을 유지하면서 SOEC로 확장하는 방식은 시장 다변화와 실증 유연성을 동시에 확보하려는 단계적 사업 확장 전략으로 해석
- 연료극 지지체 셀(ASC) 기반 평판형 스택과 시스템 통합 기술을 핵심 기술로 개발 중이며 양산화 단계에서 유럽 탑티어 SOC 스택 제조 시설을 운영



[그림] SolydEra 사의 10 kW SOFC/30 kW SOEC 스택

※ 출처 : SolydEra 홈페이지, (<https://www.solydera.com>)

○ Convion (핀란드)

- SOFC와 SOEC 시스템을 모두 제품 형태로 개발·실증해 온 핀란드 시스템 전문 기업으로 2024년 한국 HD하이드로젠이 약 1,067억 원에 인수
- 60kW SOFC는 전기효율 60% LHV(총 효율 84%), 250kW SOEC는 스팀 200~250°C 조건에서 38.8kWh/kgH₂ 효율을 제시



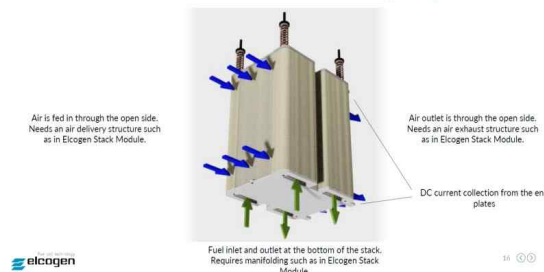
[그림] CONVION 사의 SOFC/SOEC 시스템

※ 출처 : Convion 홈페이지, (<https://convion.fi>)
저자 분석 자료(한국에너지기술연구원)

○ Elcogen (에스토니아)

- 에스토니아 탈린 본사 소재의 Elcogen은 유럽 내 연료극 지지체 셀(ASC) 및 스택 분야에서 가장 앞선 기술력을 보유한 핵심 부품 제조 기업으로 평가
- elcoStack E3000 기반 SOFC·SOEC 스택을 공급하며 모듈식 통합으로 MW급 시스템 확장을 지원하는 핵심 셀·스택 공급망 기업

BASIC PRINCIPLE OF ELCOSTACK E3000 (3KW)

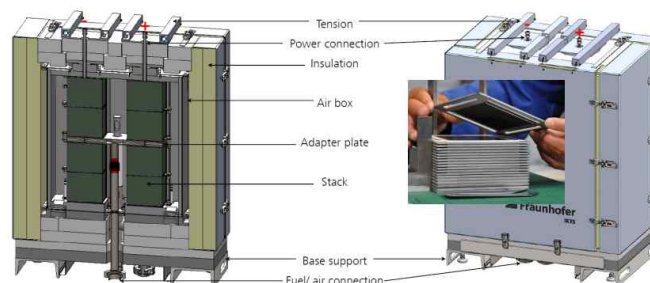


[그림] Elcogen 사의 스택(외부 매니폴드, Coflow)

※ 출처 : Elcogen 홈페이지, (<https://elcogen.com>)

○ Thyssenkrupp nucera (독일)

- 8kW급 SOFC 스택기술 보유와 함께 전해질 지지체 셀 스택·자동 적층 등 제조 공정 역량을 축으로 스택 양산 기반을 강화하고 있음
- 독일 Fraunhofer IKTS와 전략적 파트너십을 통해 CFY 합금 인터커넥터 기반 전해질 자립 막식 SOEC 셀·스택 기술을 라이선스 형태로 이전

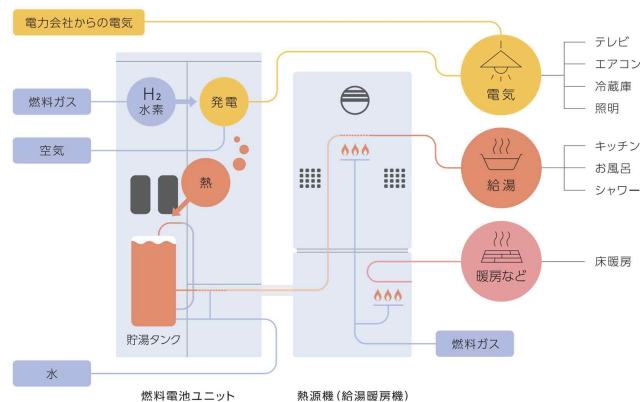


[그림] Thyssenkrupp nucera 사의 스택(외부매니폴드, Coflow)

※ 출처 : Thyssenkrupp nucera 공식 홈페이지, (<https://www.thyssenkrupp-nucera.com/>)

□ 일본 동향

- 일본은 가정·건물용 소형 SOFC 보급 기반이 강하며 장기 신뢰성과 사용자 경험을 중심으로 상용 생태계가 안정적으로 유지되는 특징
 - 가정용·소형 시장 기반의 누적 보급과 운영 경험이 쌓이면서 단기 고성능보다 안정 운전·유지관리 경험이 시장 확산의 핵심 자산으로 작동하는 구조
- Kyocera 및 Aisin
 - 교세라(셀·스택)·아이신(시스템) 협력으로 700W급 ENE-FARM Type S 가정용 SOFC를 누적 30만 대 이상 보급한 일본 대표 협업 사례
 - ENE-FARM Type S 700W급 고효율·고내구성 셀·스택을 양산하며 발전효율 46.5%·총 효율 90% LHV의 세계 최고 수준 성능을 달성한 사례
 - 가정용 SOFC 시스템은 2025년 기준 평균 120만엔(실 구매가 평균 100만엔)수준에 보급되며 정부 보조금을 통해 시장가를 낮추어 시장 확산을 촉진
 - 스케일업을 통해 700W급 스택 4개를 탑재한 3kW급 업무용·소규모 상업용 SOFC 시스템(발전효율 52%)을 개발·판매하며 연료전지 사업 매출 영역을 확장



[그림] 일본 교세라-아이신 700W급 가정용 SOFC 시스템

※ 출처 : AISIN ENE-FARM type S 공식 홈페이지, (<https://www.aisin.com/jp/product/energy/cogene/enefarm/lp/campaign/#about>)



[그림] Kyocera/Aisin 사의 SOFC 시스템 및 평판형 셀(좌)



[그림] Tokyo gas/Miura 사의 5 kW급 SOFC 시스템(중앙)



[그림] Denso 사의 SOEC 시스템(우)

※ 출처 : Kyocera 공식 홈페이지, (<https://global.kyocera.com/prdct/ecd/sofc/>)

Miura 공식 홈페이지, (<https://www.miuraz.co.jp/about/en/>)

DENSO(2023.05), Solid Oxide Fuel Cells, Which May Play a Key Role in Cutting CO2 Emissions — DENSO's efforts to address two issues to improve the environmental performance

○ Denso

- 2024년 8월 영국 Ceres Power와 금속 지지체 SteelCell 기반 SOEC 셀 스택 제조 라이선스 계약을 체결하고 양산화 단계로 진입
- 자사 공장 실증 (2023년~) 덴소 히로세 공장에서 SOEC 시스템 시범사업을 시작하여 실제 산업 현장에서의 운전 데이터 확보 및 고온 운전 조건을 검증
- 화력발전소 연계 실증 (2024년 8월~) JERA와 공동으로 JERA 신나고야 화력발전소에서 200kW급 SOEC 시스템을 이용해 수소 생산 실증 개시
- 일본 내 화력발전소에서 SOEC 기술을 실증하는 일본 내 최초의 사례이며 향후 200kW급에서 메가와트(MW) 규모로 스케일업을 계획



[그림] Denso사의 200 kW급 SOEC 시스템. 수증기 재순환 이젝터 사용이 특징

※ 출처 : DENSO(2025.09), JERA and DENSO Begin Japan's First Demonstration of SOEC Hydrogen Production at a JERA Thermal Power Station

○ MHPS

- 400kW SOEC 시스템 효율 90% HHV, 스택 모듈 효율 3.5 kWh/Nm³ 로, 누적 운전 15,000h를 달성하였으며 MW급 확장을 추진
- SOFC 측면에서도 250kW급 가압 SOFC-가스터빈 하이브리드시스템에서 발전효율 55% 이상과 종합 효율 73% 이상을 제시하며 고효율 시스템을 검증
- SOEC는 대형화와 누적 운전 시간 데이터 제시가 핵심이고 SOFC는 하이브리드 시스템을 통해 효율 상한을 높이는 노력이 병행되는 구도



[그림] MHPS 사의 250 kW 급 SOFC-MT 하이브리드/ 400 kW SOEC 시스템

※ 출처 : MHI(2024.04), MHI Begins Operation of SOEC Test Module the Next-Generation High-Efficiency Hydrogen Production Technology at Takasago Hydrogen Park -- The Path to Higher Output and Greater Capacity

□ 중국 동향

- 중국은 국가 정책 기반 연구기관 R&D·실증과 기업 제품화·양산이 동시에 전개되며 다양한 스케일의 SOFC·SOEC 라인업을 빠르게 확장하는 흐름
 - 실증과 양산을 동시에 추진하며 kW급 가정·소형 제품부터 수백 kW급 발전·산업용 시스템까지 SOC 라인업을 빠르게 확대하고 있음
 - 국가 연구기관의 실증 결과가 기업 제품화로 이어지고 에너지 기업 주도의 대형 실증 확대가 병행되는 양상이 정부 정책과 함께 나타나는 구조
- SINAP
 - 2023년 200kW SOEC 실증과 후속 100kW 가역 SOC 실증을 통해 효율 지표·가역 운전 가능성을 제시한 중국 SOC 분야 대표 연구기관



[그림] 중국과학원 응용물리연구소 (SINAP, CAS)

※ 출처 : SINAP(2023.03), A successful start of 200-kW SOEC system developed by SINAP

- BPEC(칭다오프로톤파워테크놀로지)
 - 20kW SOEC 및 5kW SOFC 시스템과 함께 다양한 셀 사이즈 라인업을 제시하며 SOFC·SOEC 제품군을 동시에 확장 중인 중국 SOC 기업



[그림] 칭다오프로톤파워테크놀로지(BPEC) 사의 SOFC/SOEC 스택 및 시스템

※ 출처 : BPEC(2026.02), 模块化撬装式SOEC电解水制氢系统

- Sinopec
 - 100kW SOEC 실증을 추진하며 에너지 기업 주도의 실증 확대 흐름을 보여주며 특히 태양광 발전 등 재생에너지 연계 그린수소 생산을 목적으로 SOEC 사업 전개

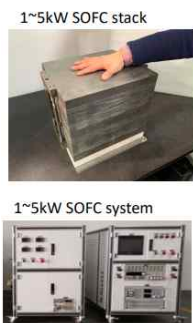


[그림] Sinopec 100 kW SOEC

※ 출처 : FuelCellChina(2024.03), Sinopec's Hundred-Kilowatt-Level SOEC Hydrogen Production Project Commences Construction

○ SOFCMAN, Weichai Power, CCTC

- 셀, 스택, 시스템 핵심 기술 개발 및 양산화를 추진하며 셀, 스택, 시스템을 판매 중이며, kW에서 수백 kW급 SOFC 실증을 병행하며 상용 라인업을 확대
- 다수 기업이 1~5kW급 가정·소형 제품군부터 25~300kW급 발전·산업용 시스템과 제조 인프라 투자까지 병렬로 추진하는 흐름이 가속화되고 있음



[그림] SOFCMAN 사의 SOFC 스택 및 시스템



[그림] Weichai Power 사의 100kW, 25kW SOFC 시스템



[그림] CCTC 사의 셀, 스택, 300kW SOFC 시스템 (50kW/스택모듈)

※ 출처 : SOFCMAN 공식 홈페이지, (<https://www.sofcman.com/>)
Weichai 공식 홈페이지, (<https://weichai.com.vn/>)
CCTC 공식 홈페이지, (https://www.cctc.cc/newsDetail_en.html?id=98)

〈표〉 국가별 핵심 포인트 비교

구분	미국	유럽	일본	중국
주요 방향	모듈형 SOFC, SOEC 패키지, 중대형 실증 확대	MW급 모듈, 제조 투자 확대, 부하추종 성능 경쟁	소형 SOFC 보급, 신뢰성 중심 상용 생태계, SOEC 검증	연구기관 실증과 기업 제품화 병행, 라인업 고속 확장
대표 사례	Bloom Energy 300kW~수MW, FuelCell Energy 250 kW SOEC,	Sunfire 1~10 MW, Topsoe 350 kW 코어 및 5 MW 모듈	Kyocera Aisin, Tokyo Gas Miura, Denso 200kW SOEC, MHPS 400 kW SOEC 15000 h 운전	SINAP 200 kW SOEC, BPEC 20 kW , Sinopec 100 kW, CCTC 300kW SOFC(스택모듈 50kW)
핵심 KPI	모듈 검증, 누적 운전 데이터, AI 데이터센터 시장 급속 확대	동특성, 모듈화, 제조 확장	장기 신뢰성, 운영 경험	확장 속도, 스케일 다변화

4 SOC 시험·평가 체계의 영향과 한계

□ 시험·평가 체계의 역할

- SOC 분야의 시험·평가 체계는 단순 성능 비교 도구를 넘어 기술개발의 목표 함수와 산업 표준화 방향을 정의하는 기준점으로 작동하는 핵심 인프라
 - 공통 지표와 절차가 정리되면 개발 목표가 수렴하고 성능·비용·내구성의 상대적 위치가 가시화되어 실증 확대와 투자 의사결정을 동시에 촉진하는 구조
 - 결과가 공개·누적될수록 효율·kWh/kgH₂·열화율·이용률 등 KPI 개선 경쟁이 강화되어 기술 성숙을 가속하는 데이터 기반 선순환이 형성
 - 동일 조건의 데이터 축적은 공급망·EPC 관점에서 요구 성능을 명확히 정의해 표준 패키지 설계와 보급 확산을 동시에 가능케 하는 기반으로 작용

□ 지표 중심 최적화의 한계

- 지표 중심 최적화는 현장 성능을 완전히 대체할 수 없으므로 평가 체계는 의도적으로 현장 리스크를 포함하도록 설계
 - 시험 조건이 특정 값으로 고정되면 해당 지표에만 최적화된 설계가 강화되어 실제 운전 환경에서 발생할 수 있는 리스크가 과소 평가될 위험 예상
 - SOFC는 정적 효율 중심 평가가 강화될수록 이용률, 정비성, 기동정지, 열사이클 내구, 연료 품질 변화 등 운영 KPI가 후 순위로 밀릴 위험 존재
 - SOEC는 kWh/kgH₂ 중심 평가가 강화될수록 부하추종, 기동정지, 열충격 내구, 수처리·증기 품질 변화 민감도가 충분히 반영되지 않을 위험 존재
 - 경계조건이 다르면 같은 시스템도 효율과 kWh/kgH₂가 달라져 결과 비교가 왜곡되므로 LHV 또는 HHV 기준 경계조건의 표준화 필요

〈표〉 시험·평가 프레임과 경계조건 체크리스트

구분	필수 경계조건	필요성	보고 항목
효율	LHV 또는 HHV 기준	지표 비교 왜곡 방지	기준, 계산식, 보정
SOEC 전력소모	kWh/kgH ₂ 산정 범위	플랜트 비교 가능	BOP 포함 여부(스택 레벨과 시스템 레벨 분리)
운전 조건	온도, 압력, 스팀 조건	성능·열화 민감	조건 표준 서술
동특성	부하추종, 기동정지 조건	현장 리스크 반영	램프율, 사이클 수

※ 출처 : DOE H₂A, IEA 자료를 바탕으로 저자 정리

5 시사점 및 미래 방향

□ 시사점 1 : 실증과 제도가 동시에 진행되는 국면으로 전환

- SOFC와 SOEC는 글로벌 경쟁이 가속화되고 있으며 일부 기업은 상용 시장에 진입해 실증, 제조, 사업모델 검증이 동시에 진행되는 국면으로 전환
 - 유럽·미국·중국 기업들은 실증과 제조 확대를 병렬로 추진 중이며 현장 데이터와 양산 수율이 혁신 속도를 좌우하는 구조가 강화
 - 한국은 보급·운영 측면에서 선도 사례를 보유하고 있으나 기술개발 지속성, 제조 스케일업, 공급망 결속 측면에서의 격차 축소가 시급히 필요
 - 최근 SOFC는 미국을 중심으로 AI 데이터 센터의 전력 수요가 급증함에 따라 실제 설치·운전 및 시장 확대 속도가 빠르게 가속화

□ 시사점 2 : SOEC는 플랜트 패키지 최적화 경쟁으로 이동

- SOEC는 글로벌 경쟁이 가속화되고 있으며 일부 기업은 상용 시장에 진입해 실증과 제조와 사업모델 검증이 동시에 진행되는 국면으로 전환
 - SOEC는 수처리, 증기 공급, 열 통합, 전력 변환, 정제까지 포함한 패키지 경제성 확보가 필요하며 발주 단계 통합 설계 역량이 핵심 경쟁력으로 작용할 가능성 증가

□ 시사점 3 : SOFC는 운영 KPI 기반 사업모델 정교화가 핵심

- SOFC 또한 글로벌 경쟁이 가속화되고 있으며, SOEC보다 빨리 시장에 진입되어 있으며, 선도 기업은 상용 시장 진입 가속화, 후발 기업은 실증과 제조와 사업모델 검증이 동시에 진행되는 국면으로 전환
 - 효율, 이용률, 정비성, 운영 안정성이 성과를 좌우하는 방향으로 재편되고 있어 이를 계약 KPI로 전환할 데이터 체계와 표준화 필요

□ 시사점 4 : 표준 패키지와 체크리스트가 확산의 속도를 결정

- SOFC와 SOEC는 글로벌 경쟁이 가속화되고 있으며 상용 시장 진입을 가속하기 위해서는 실증과 제조와 사업모델 검증이 동시에 진행되기 때문에 표준 패키지와 체크리스트 수립이 필수
 - 효율 개선 기준, kWh/kgH₂ 산정 방식, 경계조건 정의, 이용률, 모듈 인터페이스, 설치·시공·안전 인허가 요건을 가이드·체크리스트로 패키징 필요

〈표〉 R&D 과제 패키지 제안

패키지	목표	핵심 KPI	주요 산출물
운영 KPI 표준	SOFC 운영 KPI 계약화	이용률, MTTR, 열화율	KPI 정의서, 운영 로그 표준, 리포트 양식
SOEC 패키지 최적화	kWh/kgH ₂ 절감	전력소모, 가동률	열통합 설계 가이드, BOP 구성 표준
동특성 내구	변동 운전 대응	램프, 사이클 내구	동특성 시험 프로토콜
표준 패키지	반복 확산 가능한 설계	인터페이스 준수	모듈 인터페이스, 체크리스트
인허가·안전	프로젝트 리스크 저감	승인 기간, 사고율	인허가 가이드, 안전 체크리스트

※ 출처 : DOE H₂A, IEA, 각기업자료를 바탕으로 저자 분석 정리