

# 고체산화물 수전해 기술의 안전성 및 신뢰성 확보를 위한 기술 기준 제안 연구

한신탉<sup>1</sup> · 박종범<sup>2</sup> · 이상미<sup>2</sup> · 공병찬<sup>2</sup> · 송희원<sup>2</sup> · 박계준<sup>2</sup> · 김용규<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>인천대학교 안전공학과, <sup>2</sup>(주)미래기준연구소, <sup>3</sup>아주대학교 환경공학과

## A Study on the Development of Technical Standards to Ensure the Safety and Reliability of Solid Oxide Electrolysis Cell Technology

SHINTAK HAN<sup>1</sup>, JONGBEOM PARK<sup>2</sup>, SANGMI LEE<sup>2</sup>, BYUNGCHAN KONG<sup>2</sup>, HEEWON SONG<sup>2</sup>, GYEJUN PARK<sup>2</sup>, YONGGYU KIM<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>Department of Safety Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea

<sup>2</sup>Mirae EHS-code Research Institute, 43 Iljik-ro, Gwangmyeong 14353, Korea

<sup>3</sup>Department of Environmental Engineering, Ajou University, 206 World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon 16499, Korea

†Corresponding author :  
kimyg@meri.co.kr

Received 30 June, 2025

Revised 22 July, 2025

Accepted 5 August, 2025

**Abstract >>** Solid oxide electrolysis cell (SOEC) technology is attracting attention as a next-generation technology capable of producing hydrogen with high efficiency through electrolysis reaction at high temperature. However, securing the safety and reliability of the facility is emerging as a key task due to high temperature operating conditions, thermal properties of ceramic materials, and simultaneous generation of hydrogen and oxygen. Currently, the international technical standards for SOEC are insufficient and depend on the method of referring to the existing water electrolysis facility or fuel cell standards. This study summarizes the characteristics and major risk factors of SOEC technology, compares and analyzes international technical standards (ISO, IEC, UL, NFPA, EIGA) and domestic standards (KS, KGS code) to propose the development direction of standards to ensure safety and reliability specialized in SOEC technology. This study can be used as basic data for establishing a regulatory system and standardization strategy necessary for SOEC demonstration and commercialization in the future.

**Key words :** Solid oxide electrolysis cell(고체산화물 수전해 설비), Electrolysis (수전해 설비), Technical standard(기술 기준), UL2264, KGS AH271

## 1. 서론

화석 연료를 대체하기 위한 지속 가능한 친환경

에너지로의 전환이 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 수소는 대표적인 청정 에너지원으로 탄소중립 실현을 위한 주요 에너지원으로 대두되고 있으며<sup>1)</sup> 특

히 신재생 에너지와 연계한 수전해 기반 그린수소 생산 기술은 환경 오염을 최소화하고 지구상에 풍부히 존재하는 물을 원료로 활용하기 때문에 무탄소 에너지망 구축의 핵심 기술로 평가받고 있다. 수전해 기술은 사용 전해질 및 작동 방식에 따라 알칼라인 수전해(alkaline electrolysis, ALK), 양이온 교환막 수전해(proton exchange membrane, PEM), 음이온 교환막 수전해(anion exchange membrane, AEM) 및 고체산화물 수전해(solid oxide, SO)로 구분된다<sup>2)</sup>. 이 중 SO는 다른 수전해 기술 대비 전력 소모량이 낮고 열 에너지 활용 가능성이 많아 차세대 수전해 기술로 평가되고 있으며 이러한 특징 때문에 고온의 폐열과 증기가 필연적으로 발생하는 원자력 발전소와 연계하는 방안이 검토된다<sup>3)</sup>.

SO는 통상적으로 700-850°C에 달하는 높은 온도에서 작동되는 세라믹 기반 전해 시스템을 활용하기 때문에 ALK, PEM 및 AEM과 같은 일반 저온 수전해 기술과는 작동 원리, 시스템 구성 등에 차이가 있고 운전 중에 발생할 수 있는 위험 요인 또한 상이하다. 그러나 현행 국내외 수전해 기술 관련 표준 및 기술 기준은 대부분 저온 수전해 기술을 중심으로 운영되고 있으며 SO 기술의 운전 특성이 고려되어 있지 않다. 이러한 기술 기준 공백 현상으로 인하여 SO 기술의 안전성, 신뢰성 및 건전성을 확보하는 데 어

려움이 발생하고 기술적, 제도적 불확실성에 의하여 기술 발전과 성장에도 한계가 있다.

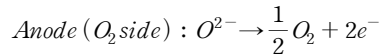
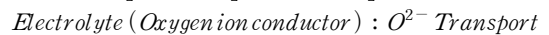
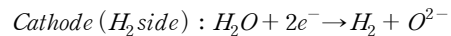
본 연구는 SO 기술의 표준 및 기술 기준 부재에 따른 문제점을 조사하고 SO 기술의 운전 특성과 이와 연관된 위험 요소를 분석함으로써 SO 기술에 특화된 기준 항목 제안 및 정책 개발 방향을 Fig. 1과 같이 제시하고자 한다. 이를 위하여 국내외의 대표적인 수전해 기술 관련 표준 및 기술 기준을 조사하여 적용 기술, 운전 조건, 안전 장치, 시험 항목 등을 세분화하여 비교 및 분석하였고 SO 기술에 대해 직접적으로 규정하고 있는지 여부를 검토하였다.

## 2. 고체산화물 수전해 설비 기술 개요

### 2.1 고체산화물 수전해 설비 작동 원리 및 구성

#### 2.1.1 고체산화물 수전해 설비 작동 원리

SO 기술은 고체산화물 연료전지(solid oxide fuel cell)의 전기화학적 반응을 역반응으로 활용하는 기술로 전기 에너지 및 열에너지를 고온 상태에서 스택(stack)에 투입하여 물을 전기분해하고 수소를 생산하는 기술이다<sup>4)</sup>.



SO는 Ytria-stabilized zirconia와 같은 고체산화물 전해질을 활용하여 산소 이온을 이동시키며 통상적으로 700-850°C의 고온 조건에서 운전하여 전기분해 반응 효율을 극대화시킨다. 전기분해 시 고온의 조건을 유지함으로써 전해 반응 시 열역학적 자유 에너지를 감소시킬 수 있고 전기분해에 필요한 에너지를 줄일 수 있다. 이는 곧 SO 기술의 장점인 낮은 전력 소모량으로 이어진다<sup>5,6)</sup>.

SO의 주요 특징 중 한 가지는 낮은 운전 압력이다. 주요 수전해 기술 중에서도 운전 압력이 가장 낮으며 현재 국내외에서 실증, 운영 중인 SO는 상압에

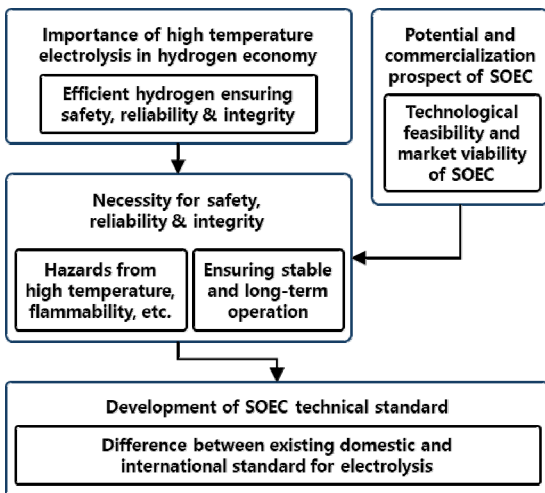


Fig. 1. Necessity of developing technical standards for SOEC

가까운 압력으로 운전되고 있다. 이러한 운전 특성에 의하여 수소가 시스템 외부로 누출되더라도 빠르게 공기와 희석됨으로써 폭발 위험 장소를 형성할 가능성이 낮고, 형성되더라도 위험 거리가 짧다는 장점이 있으나<sup>7)</sup> 정제 장치의 운전 효율 확보 등을 위하여 압축기를 추가로 설치해야 한다는 단점 역시 존재한다.

2.1.2 고체산화물 수전해 설비 구성

고체산화물 수전해 설비(solid oxide electrolysis cell, SOEC)는 일반적으로 스택, 고온 스팀 공급부, 공기 공급부, 정제 장치 등으로 구성된다. Fig. 2는 일반적인 SOEC에 대한 구성도이다<sup>8,9)</sup>.

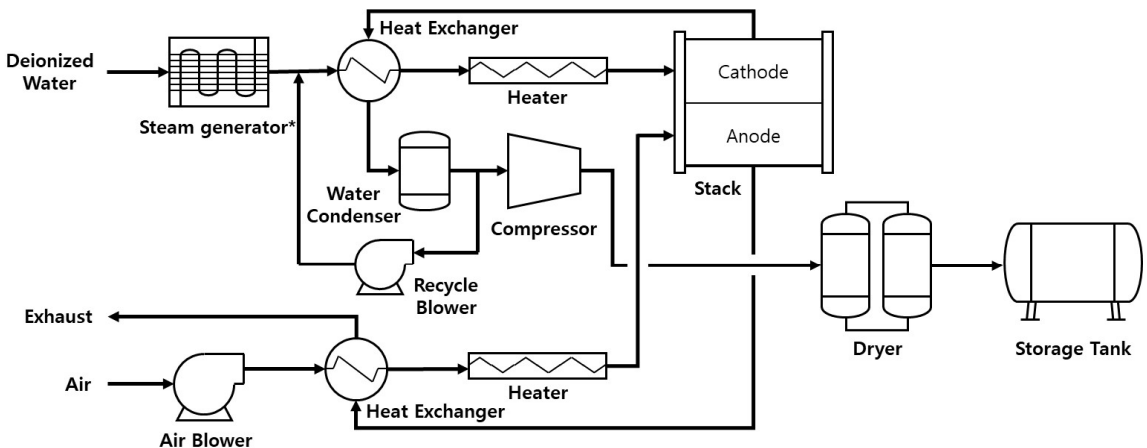
고온 스팀 공급부는 유틸리티 시스템으로부터 공급받은 공급수를 증기로 변환시키는 증기 발생기, 증기를 운전 조건에 맞게 승온시키는 열교환기 및 히터 등으로 구성되어 있다. 이때 시험용 설비에서는 공급수를 증기로 변환하는 증기 발생기를 수전해 설비의 일부로 설치하여 운용하는 것이 일반적이다. 하지만 상업용 설비에서는 유틸리티 시스템으로부터 직접 증기를 공급받도록 설계하는 경우 증기 발생기를 생략 가능하다. 공기 공급부는 외기로부터 공기를 공급하기 위한 공기 블로어와 수소 측과 마찬가지로 공기를 운전 조건에 맞게 승온시키는 열교환기 및 히터 등으로 구성한다. 공정 효율을 일정하게 유지하

고 세라믹 재질 스택의 열화를 방지하기 위해서는 증기 및 공기를 운전 조건에 맞는 온도로 승온시키는 공정이 반드시 필요하다. 정제 장치를 산소 제거 설비 및 수분 제거 설비로 구성하는 ALK, PEM 및 AEM 수전해와 달리 SOEC의 정제 장치는 건조기로만 구성하는 것이 일반적이다. 이는 SO 기술의 특성상 수소 측에 산소가 포함될 가능성이 매우 낮고 혹여나 수소 측에 미량의 산소가 포함되더라도 설비가 수소의 자동 발화 온도인 585℃<sup>10)</sup>보다 높은 온도에서 운전되기 때문에 수소 내 산소가 즉시 반응하여 제거되기 때문이다.

2.2 SOEC의 기술적 특성과 위험 요인

SOEC는 고온에서 작동하기 때문에 스택을 비롯한 고온부에 작업자 및 주변 설비 보호 등을 위한 목적으로 단열재를 설치하는 것이 일반적이다. 따라서 단열재가 손상되거나 설비, 배관 등에 부착된 단열재가 탈락할 경우 화상, 열 충격 등의 위험이 발생할 가능성이 있다. 또한 단열 성능의 저하로 인한 온도 불균형에 의해 시스템의 주 기기인 스택이 손상되고 균열이 발생할 시 수소 누출이 발생할 수도 있다.

스택 구조체 내에서 미량의 수소와 산소가 혼합되더라도 고온의 조건에서 즉시 반응하기 때문에 화재,



Note : The illustrated system is a typical testbed configuration. In commercial applications, the steam generator may be excluded or integrated into external utility systems depending on plant-scale integration and operational setup.

Fig. 2. Schematic diagram of typical SOEC system<sup>6,8,9)</sup>

폭발 가능성은 낮다. 그러나 스택에 균열이 발생하여 지속적으로 수소와 산소가 연소 반응을 일으킬 시 스택의 온도가 설계치를 초과할 수 있으며 이는 영구적이고 심각한 시스템 손상과 대형 화재, 폭발로 이어질 수 있다. 또한 스택 외부로 누출된 수소가 대기 중의 공기와 혼합하는 경우에도 큰 화재, 폭발 사고가 발생할 가능성이 있다.

이러한 SO 기술의 특성을 고려할 때 ALK, PEM 및 AEM 보다 엄격한 온도 제어가 필요하며 고온 조건을 고려한 이상 상태 대응 방안 마련이 필요하다.

### 3. 국내외 기술 기준 조사 분석

#### 3.1 국내외 표준 및 기술 기준 운영 현황

##### 3.1.1 국내 표준 및 기술 기준

수전해 설비와 함께 대표적인 수소 제조 설비에 해당하는 수소 추출 설비의 산업 표준인 “연료 처리 기술 사용 수소 발생기 제1부: 안전(ISO 16110-1)”이 2021년 3월 23일에 제정되어 운영 중인 것과 달리 수전해 설비에 대한 국가 산업 표준은 현재 제정되어 있지 않다<sup>11)</sup>.

2025년 5월 27일에 시행된 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」에서는 물을 전기분해하여 수소를 제조하는 설비를 수전해 설비로 정의하고 있으며 SOEC 역시 관계 법령에 따라 수전해 설비에 해당된다. 동 법에서는 수전해 설비에 대한 상세 기준을 정하여 운영하도록 규정하고 있으며 수전해 설비를 제조하려는 자는 상세 기술 기준인 “수전해 설비 제조의 시설·기술·검사 기준(KGS AH271)”에 따라야 한다. 다만 KGS AH271의 적용 범위에는 산성 및 염기성 수용액을 이용하는 수전해 설비, AEM 전해질을 이용하는 수전해 설비, PEM 전해질을 이용하는 수전해 설비만 명시되어 있으므로 SOEC에 대한 상세 기술 기준은 전무한 상황이다<sup>12)</sup>.

##### 3.1.2 국외 표준 및 기술 기준

수전해 설비의 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위하

여 국제적으로 다양한 수전해 설비에 대한 표준 및 기술 기준이 제정되어 운영 중에 있다. 본 연구에서는 SOEC의 적용성을 판단하기 위하여 대표적인 네 가지의 기준을 조사 및 분석하였으며 주요 내용은 Table 1과 같다.

국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO)에서 제정하여 운영 중인 “Hydrogen generators using water electrolysis - Industrial, commercial, and residential applications (ISO 22734)”는 가장 대표적인 수전해 설비 표준이다. 이 표준에서는 전기분해를 기반으로 한 수소 발생 장치, 즉 수전해 설비의 설계, 운전, 시험 등을 종합적으로 다루고 있으며 누출 감지기 및 전기 성능과 같은 일반적 안전 요구 사항을 규정하고 있다. 다만 적용 범위에 SOEC를 포함하고 있지 않다<sup>13)</sup>.

미국의 Underwriters Laboratories (UL)는 “Outline of investigation for water electrolysis type hydrogen generators (UL2264A)”를 제정하여 공표하였으며 기준의 목차 및 전반적인 규정은 ISO 22734를 준용하였으나 적용 범위에 SOEC를 포함하는 것이 특징이다. 이는 SOEC에 대해 구체적으로 명시한 유일한 기준에 해당하며 고온 조건을 고려한 단열재, 과열 방지 장치 등이 규정되어 있다. 다만 전체적인 내용은 ISO 22734와 동일하고 일부 규정에 한해서만 SOEC에 대한 내용이 추가되어 있다는 한계가 존재한다<sup>14)</sup>.

ISO에서는 수전해 설비뿐만 아니라 수소 취급 시스템 전반에 걸친 안전 기준을 제정하였다. “Basic considerations for the safety of hydrogen systems (ISO/TR 15916)”는 수소를 취급하는 시스템의 안전에 관한 기본 요구 조건을 제공하고 있으며 수소의 물리화학적 특성과 누출 시 대응 방안, 화재 및 폭발 방지 대책 등을 개괄적으로 규정하고 있다. 다만 수소 취급 시스템 전반에 걸친 안전 기준이므로 SO를 포함한 수전해 설비에 대한 구체적인 내용은 없으며 상세한 시험, 검사 기준 등도 제시하고 있지 않다<sup>15)</sup>.

국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission, IEC)는 연료전지에 대한 기준인 IEC 62282 시리즈를 제정하였으며 이 중 “Fuel cell tech-

Table 1. Technical standards comparison matrix<sup>12-14)</sup>

Criteria	KGS AH271	ISO 22734	UL2264A	IEC 61882
Applicable systems	Water electrolysis hydrogen generators (not including SOEC)	Water electrolysis hydrogen generators (not including SOEC)	Water electrolysis hydrogen generators (including SOEC)	Fuel cell modules operating in reverse (SOEC use assumed)
Operating conditions	Temperature and pressure conditions not explicitly specified	Ambient temperature operation, low-pressure typical	High temperature operation (up to 800°C) and steam supply specification	Test conditions aligned with SOFC module reverse operation
Installation and material requirements	Requirements on installation space, material compatibility	Thermal insulation materials per ISO 1182, construction integrity	Thermal insulation material certified to ISO 1182 or UL 94	No installation requirements specified
Safety devices and protection systems	Pressure relief valves, leak detection systems, shut-off valves	Hydrogen sensor, shutdown logic, exhaust mechanisms		Focus on testing, not safety systems
Main test items	Leak & pressure, insulation performance, power outage and electromagnetic compatibility tests	Leak & pressure, electric, performance, protection against the spread of fire and stability tests		Performance test procedures for electrolyzer mode
Electrical safety requirements	Grounding, insulation, protection against electric shock	Insulation resistance, protection class requirements		Not specified
Leakage and ventilation requirements	Ventilation and leak sensor mandatory in enclosed installation spaces	Requirements on enclosure ventilation and leak sensor		Not specified
Hydrogen purity	Specified(according to high-press gas law, etc)	Specified (according to ISO 14687)		Not applicable
Explicit mention of SOEC	Not mentioned	Not mentioned	Explicitly stated in scope	Mentioned as reverse mode of SOFC

nologies - part 8-101: energy storage systems using fuel cell modules in reverse mode - test procedures for the performance of solid oxide single cells and stacks, including reversible operation (IEC 62282-8-101)”은 고체산화물 연료전지의 셀 및 스택을 역방식(reverse mode) 상태에서 성능을 시험할 수 있도록 관련 절차 등을 규정하고 있다. SOEC가 고체산화물 연료전지의 역반응을 활용한 기술이므로 셀 및 스택에 대한 시험 규정을 수립할 시 참고 가능하다. 다만 셀 및 스택 외 고체산화물 수전해 시스템을 구성하는 설비와

시스템 전반에 대해서는 기준을 제시하고 있지 않으므로 수전해 설비 전체에 대한 기준으로 준용하기에는 한계가 있다<sup>16)</sup>.

네 가지 주요 기준 외에도 수소 기술과 안전에 대해 규정하는 “Hydrogen technologies code (NFPA2)”, “Guideline for small scale hydrogen production (EIGA Doc 246/23)” 등이 있으나 SOEC를 비롯한 수전해 기술에 대해 구체적인 기준을 제시하고 있지 않음을 확인할 수 있었다<sup>17,18)</sup>.

**Table 2.** Comparison of characteristics by the types of electrolysis<sup>6,19,20)</sup>

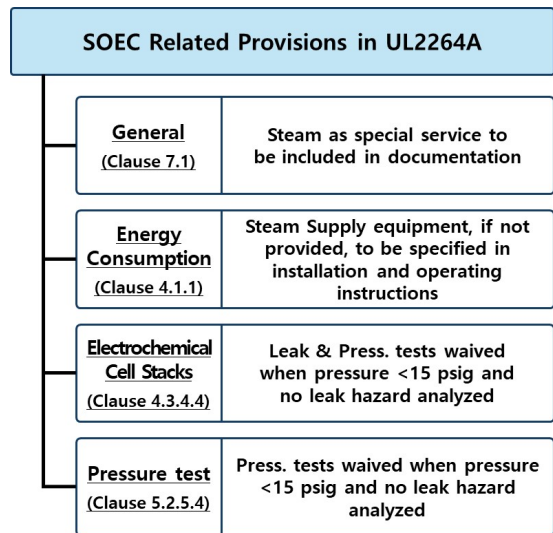
Category	SOEC	ALK	PEM	AEM
Operating temperature (°C)	500-900	60-95	50-80	40-80
Operating pressure (bar)	0-2	1-30	<80	<35
Electrolyte	Solid oxide ceramic-zirconia or ceria based	Liquid KOH (25-40%)	Solid polymer exchange membrane (Nafion)	Liquid-solid hybrid (KOH or NaHCO <sub>3</sub> /anion exchange membrane)
Stack DC energy consumption (kWh/kg H <sub>2</sub> )	34	47-66	47-66	51.5-66.0
Stack lifetime (full load hours)	20,000-50,000	60,000-100,000	50,000-90,000	5,000-40,000
Degradation (%/1,000 hours)	0.55-1.00	0.13	0.25	0.4
Stack complexity	High (thermal insulation, sealing required)	Low	Moderate	Low
Safety concerns	High temperature, thermal stress	KOH leakage and corrosivity	High pressure H <sub>2</sub> , catalyst durability	KOH leakage and corrosivity
Technology maturity	Pilot/demonstration Stage	Commercialized	Commercialized	Demonstration stage

**3.1.3 현행 표준 및 기술 기준의 한계**

현행 수전해 설비에 대한 표준 및 기술 기준의 내용은 저온 수전해인 ALK, PEM 및 AEM 기술을 전제로 구성되어 있으며 이러한 수전해 방식들은 통상적으로 80°C 미만에서 운전되기 때문에 안전 요구 조건 역시 저온 조건을 기반으로 제정되어 있다. 반면에 SOEC는 고온의 증기 공급, 고온 조건에서의 세라믹 스택 운전, 열 충격 위험성, 수소 및 산소 연소 시 스택의 과다 온도 상승 등의 안전 문제가 발생할 수 있으므로 SO 기술에 초점을 맞춘 적절한 기술 기준 개발이 필요하다. Table 2는 수전해 방식별 주요 특징 및 차이점을 비교 분석한 결과이며 다른 수전해 방식 대비 SOEC의 차별성을 보여준다<sup>19,20)</sup>.

**3.2 UL2264A 내 SOEC 기준 분석**

SOEC에 대한 전반적인 안전 요구 사항을 다루고 있지는 않지만 현행 기술 기준 중 유일하게 SOEC에 대해 규정하고 있는 UL2264A의 내용을 구체적으로



**Fig. 3.** SOEC-specific provisions in UL2264A<sup>14)</sup>

정리하였고 그 결과를 도식화하면 Fig. 3과 같다. 동일 기준에서는 SOEC를 고온의 조건에서 물을 전기 분해하여 수소를 생산하는 수소 발생기로 정의하고 있으며 운전 온도를 750-800°C로 명시하고 있다<sup>14)</sup>.

SOEC는 공급받은 초순수를 전기분해 반응의 원료로 직접 활용하는 다른 수전해 방식과 달리 초순수 또는 적정 수질의 공급수를 고온의 증기 형태로 변환하여 사용한다. 따라서 증기 발생기에 대한 별도의 기술 기준이 필요하며 동 기준에서도 증기 발생기에 대해 간략히 명시하고 있다. 다만 증기 발생기의 설계, 제작 및 운전 시 참고할 수 있는 구체적인 내용을 제공하고 있지는 않았으며 증기 발생기가 수전해 설비와 별도의 조립체로 설치되는 경우 제조자가 설비의 구체적인 사항을 설치 및 운전 매뉴얼에 명시하여 운영자에게 제공하도록만 규정하였다<sup>14)</sup>.

수전해 설비의 주요 검사 항목 중 하나인 내압 및 기밀 시험에 대해서는 SOEC의 특성을 고려한 구체적인 규정이 존재하였다. 이를 보면 SOEC의 운전 압력이 15 psig 미만이고 셀 스택에서 누출이 발생하더라도 위험이 없다고 평가되는 경우에는 셀 스택에 대한 내압 및 기밀 시험을 면제할 수 있다는 규정을 확인할 수 있다. 이는 SO의 구조 및 운전 조건을 고려할 시 운전 압력이 매우 낮기 때문에 누출의 위험성이 상대적으로 낮아 다른 수전해 방식 대비 안전성이 확보되고 세라믹 기반의 스택 사용에 따른 높은 구조적 강도와 밀폐성 때문인 것으로 파악된다. 다만 누출에 따른 위험성 평가 결과에 따라 안전이 확보됨을 사전에 입증해야 한다는 전제 조건이 있으므로 누출된 가스의 농도 및 체류 가능성, 설치 환경에서의 환기 상황, 주변 점화원 유무 및 설치 위치, 스택 및 주변 설비의 내화 성능 등을 종합적으로 고려하여야 할 것이다<sup>14)</sup>.

## 4. 안전성 및 신뢰성 확보 요소 도출

### 4.1 고온 셀 스택 설계 및 재료 특성

SOEC의 핵심 기기인 셀 스택은 고체산화물 전해질 및 금속산화물 전극으로 구성된다. 셀 스택이 750-800℃의 고온 조건에서 운전되므로 내열 성능과 열 충격을 대비한 저항성 확보가 필요할 것으로 판단된다. 특히 셀 스택의 재료가 세라믹인 점을 고려

하여 운전 온도가 반복적으로 증가 및 감소하는 온도 변동 상황(temperature swing condition) 시 급격한 열팽창에 의한 물리적 손상을 입지 않도록 안전성 확보 방안이 필요하다. 또한 셀 스택을 적층하는 과정에서 발생하는 접합면의 기계적 특성을 확보하는 방안 역시 검토가 필요하다. 마지막으로 스택으로부터 발생하는 높은 온도가 주변 배관, 전선 등을 손상시키는 것을 방지하기 위한 적절한 단열재 설치가 규정되어야 하며 단열재의 성능뿐만 아니라 단열재를 고정 및 부착하는 방안과 수명 기간 동안 건전성을 유지하기 위한 관리 방안도 검토되어야 한다.

### 4.2 수소 및 산소 혼입에 의한 연소 가능성

SOEC의 통상적인 운전 온도가 수소의 자동 발화 온도를 월등히 상회하므로 수소 내 미량의 산소가 포함되더라도 시스템의 건전성을 손상시킬 수준은 아닐 것으로 판단된다. 다만 스택 파손 또는 균열 발생 시 과량의 산소가 수소에 혼입되는 경우에는 누출 발생 지점에서 연소 반응이 장시간 지속될 수 있으며 이로 인한 스택의 온도 상승은 설계 시 고려한 단열재의 성능을 초과할 가능성이 있다. 연소 반응으로 인하여 스택의 추가적인 손상이 발생할 수 있으며 단열재 외부의 온도가 상승하게 되어 주변 배관, 전선 등 역시 손상될 수 있다. 따라서 스택의 비이상적인 온도 상승을 상시 모니터링함으로써 스택 파손 또는 균열로 인하여 내부에서 국부적으로 발생할 수 있는 연소 반응을 확인할 수 있는 안전 대책 마련이 필요하다. 또한 스택 주변의 배관, 전선 및 외함 등이 고온의 운전 조건에서도 안전성과 건전성을 확보할 수 있도록 내화 성능 도입을 검토할 필요가 있다.

### 4.3 비상 운전 정지 시나리오 수립 및 대응 방안 마련

수전해 설비에 대한 가스 기술 기준인 KGS AH271에서는 스택의 공급 전압 이상, 온도의 비이상적 상승, 수소 중 산소/산소 중 수소 농도 초과 등의 수전해 설비 비상 운전 정지 시나리오를 규정하고 있다<sup>14)</sup>.

SOEC 역시 동 기술 기준에서 규정하는 대부분의 비상 운전 정지 시나리오를 준용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 고온 조건에서 운전된다는 점과 원료로 증기를 사용한다는 점을 고려하여 공급되는 증기의 유량, 압력 및 온도가 설계 범위를 벗어나거나 스택에서 온도 구배가 발생하는 경우와 같은 SOEC의 비상 운전 상황에서 발생할 수 있는 비상 운전 정지 시나리오를 수립해야 할 것이다. 또한 anode 측에 공급되는 공기의 유량이 끊기거나 저하될 때 스택의 열화로 인한 손상이 발생할 수 있으므로 공기 블로어 고장 등에 따른 스택 보호 대책도 마련되어야 할 것으로 판단된다.

#### 4.4 SOEC 특성을 고려한 기준 정합화

SOEC는 스택으로부터 토출되는 수소의 압력이 상압에 가깝다. 또한 일부 SOEC는 개방형 양극(open anode) 구조이므로 스택으로부터 생성되는 산소를 배관 등을 통해 별도로 포집하지 않고 외기로 직접 방출하는 방식을 취하고 있다. 이러한 SOEC의 운전 조건 및 구조적 특성을 고려한 기준 정합화가 필요하다. UL2264A에서 규정하고 있는 바와 같이 운전 압력이 1 barg 미만에 해당하는 SOEC의 경우 위험성 평가를 통해 안전 성능을 확보할 시 내압 및 기밀 시험을 면제하는 규정의 신설이 이에 해당될 것이다. 또한 개방형 양극 구조인 경우에는 스택으로부터 생성된 산소가 스택의 표면에서 산발적으로 방출되어 대기 중으로 직접 확산되므로 산소 중 수소의 농도를 모니터링하기 위한 감지기 설치가 어렵다는 점을 감안하여 수소 검지 장치 면제 조항을 고려할 수 있을 것으로 보인다. SOEC의 온도 조건상 산소 내에 수소 또는 수소 내에 산소가 혼입되더라도 그 즉시 반응하여 제거된다는 점 역시 검지 장치 설치 의무를 탄력적으로 운영할 수 있는 사유가 될 것이다.

### 5. 가스 기술 기준 제안 및 개발 방향

SOEC의 설비 구성, 구조적 특성 및 고온 운전 조

건 등을 고려한다면 ALK, PEM 및 AEM과 같은 저온 수전해 설비 기술 기준을 그대로 준용할 시 설비의 안전성 및 건전성 저하가 발생할 수 있다. 따라서 기존의 수전해 설비 표준 및 기술 기준을 준용하되 SOEC에 특화된 전용 규정 개발이 필요하다. 이는 SOEC 특유의 고온 운전 조건과 구조적 특성이 저온 수전해 설비와 다를 수 있음을 근거로 한다.

본 연구에서는 SOEC에 특화된 6개 범주, 18개 세부 기술 기준 항목을 Table 3과 같이 제안한다.

국내의 경우 수전해 설비에 대한 가스 기술 기준인 KGS AH271이 제정되어 운영 중이므로 기존 기술 기준에 고온 운전 조건, 상압에 가까운 저압 운전 조건, 단열 성능 및 고체산화물 운전 특성을 고려한 비상 운전 정지 시나리오를 신설하는 방안을 제안한다. 다만 기존의 저온 수전해 설비 규정과의 형평성

Table 3. Proposed technical criteria framework for SOEC systems

Category	Detailed Items
1. System configuration & operating conditions	① Specification of applicable systems (SOEC) ② Operating temperature and pressure range ③ Requirements for steam and air supply systems
2. Stack design & material requirements	④ Requirements for ceramic electrolyte ⑤ Thermal insulation performance ⑥ Mechanical strength and thermal shock resistance
3. Safety design requirements	⑦ Gas separation structure ⑧ Leak prevention ⑨ Overheat protection design ⑩ Emergency shutdown systems
4. Testing & verification procedures	⑪ Temperature deviation tests ⑫ Leak/pressure tests ⑬ Abnormal operation condition tests ⑭ Heat resistance tests
5. Installation & operation guidelines	⑮ Steam supply equipment requirements ⑯ Commissioning procedures ⑰ Maintenance intervals and methods
6. Monitoring systems	⑱ Specification of essential sensors such as temperature sensors, hydrogen detectors, pressure and flow meters

을 고려함과 동시에 SOEC에 특화된 내용을 추가하여야 하므로 특례 기준 또는 부록 형태로 규정을 신설한다면 ALK, PEM 및 AEM 수전해 설비 내용을 변경하지 않고 기존 규정과의 충돌 없이 SOEC의 특성을 고려한 독립적이고 차별화된 기술 기준을 수립할 수 있다.

또한 UL2264A를 제외하면 국제적으로도 SOEC에 특화된 표준 및 기술 기준이 제정되어 있지 않으므로 국내 독자 기준을 마련함과 동시에 국제 표준과의 정합성 확보를 위한 글로벌 표준화 작업이 필요하다. 국제 표준인 ISO 22734의 적용 범위에 SOEC가 포함될 수 있도록 수소 기술에 대한 기술위원회인 ISO/TC 197과 연계한 표준화 대응 전략 구축이 필요하다. UL2264A를 제외한 다수의 국내외 표준 및 기술 기준이 SOEC에 관한 명확한 구조적, 운전 조건을 다루지 않음을 고려할 때 국내 기술 기준 제정 과정에서 도출된 세부 항목은 국제 표준 개정 논의의 실효성 있는 참고 자료로 활용될 수 있다. 이는 국내 기준 체계의 고도화뿐 아니라 ISO/TC 197 등 국제 기술위원회에 대한 대응 논리로 기능할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 SOEC의 특징을 검토하고 구조적 특성, 운전 조건 등을 고려한 국내외 표준 및 기술 기준 현황의 조사 및 분석을 수행하였다. 분석 결과 ALK, PEM 및 AEM과 같은 저온 수전해 설비에 대한 표준 및 기술 기준은 제정되어 활발히 운영되고 있었으나 고온으로 운전되는 SOEC에 대한 기준은 구체적이지 않음이 확인되었다. 또한 기존의 수전해 설비 규정을 SOEC의 설계, 제조 및 검사 시 그대로 활용하기에는 SO 기술의 특성이 반영되어 있지 않아 안전 공백이 발생할 우려가 있음도 확인할 수 있었다. 이번 연구를 통해 KGS AH271, ISO 22734, UL2264A 및 IEC 61882 등의 수전해 설비 관련 기준 내용을 참고하여 SOEC의 구조 및 운전 특성을 고려한 기준 요소를 도출하였다. 특히 SOEC에 대해 유일하게 규정하고 있는 UL2264A조차도 기술의 특

성을 모두 포괄하기에는 한계가 있음을 확인할 수 있었고 이에 조사 및 분석된 기술 요건을 바탕으로 SOEC의 안전성 및 신뢰성을 확보할 수 있는 기술 기준의 개발 방향을 제시하였다.

SOEC에 대한 기준 개발을 통해 고온 운전, 증기 활용 등의 SO 기술 특유의 위험 요인이 반영된 기술 기준을 확보할 시 시스템의 열화 및 이상 조건에 기인한 누출, 화재, 폭발 등의 사고 발생 가능성을 체계적으로 관리할 수 있는 기술적 기반을 마련할 수 있다. 그리고 상업적 운전 단계를 목전에 두고 있는 SO 기술의 장기적인 운전 안정성과 품질 신뢰성 향상에 따른 수전해 시장에서의 영향력도 확대할 수 있다. 또한 국내의 독자적인 SOEC 기술 기준 마련은 국내 수전해 제조사의 경쟁력 확보와 글로벌 수전해 시장 진출 기반 확대에 활용될 수 있다. 다만 SOEC의 상세 구조와 운전 기술은 제조사의 중요한 보안 자료로 취급되는 만큼 이번 연구 과정에서 제안한 기술 기준 내용의 유효성 및 실현 가능성을 직접 검증하는 것이 불가한 점이 본 연구의 한계로 남는다. 따라서 향후 연구에서는 SOEC의 상세 설계 내용과 실제 운전 데이터를 토대로 현행 기준의 불합리한 부분을 검토할 필요가 있으며 관련 제조사의 전문가 자문 등을 통해 도출한 기준 내용의 적정성을 검증할 필요가 있다.

기준 개발 로드맵을 수립하고 산학연 협의체 구성을 통해 속도감 있는 기준화 추진이 필요하며 이를 통해 SOEC의 안전성 및 신뢰성을 확보함으로써 탄소중립 실현과 무탄소 에너지망 구축의 기반 마련을 위한 기술적 요건 확보가 가능할 것이다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20223030040050)입니다.

## References

1. Y. Cheon, "Review of global carbon neutral strategies and technologies", *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 59, No. 1, 2022, pp. 99-112, doi: <https://doi.org/10.32390/ksmer.2022.59.1.099>.
2. J. Park, "Trends in clean hydrogen production technology", *Korean Industrial Chemistry News*, Vol. 28, No. 2, 2025, pp. 14-28. Retrieved from <https://kiss.kstudy.com/Detail/Ar?key=4167514>.
3. D. J. Yoon and J. H. Koh, "A study on thermodynamic efficiency for HTSE hydrogen and synthesis gas production system using nuclear plant", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 20, No. 5, 2009, pp. 416-423. Retrieved from <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artId=ART001387104>.
4. S. I. Kang, J. Kim, J. Park, and D. Cho, "Predicting initial construction costs of electrolysis hydrogen production plants for building sustainable energy systems", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 3, 2024, pp. 257-268, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.3.257>.
5. J. Wei, T. Osipova, J. Malzbender, and M. Krüger, "Mechanical characterization of SOFC/SOEC cells", *Ceramics International*, Vol. 44, No. 10, 2018, pp. 11094-11100, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.103>.
6. International Renewable Energy Agency (IRENA), "Green hydrogen cost reduction: scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal", IRENA, 2020. Retrieved from <https://www.irena.org/Publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>.
7. International Electrotechnical Commission (IEC), "IEC 60079-10-1: explosive atmospheres - Part 10-1: classification of areas - explosive gas atmospheres", IEC, 2020. Retrieved from <https://webstore.iec.ch/en/publication/63327>.
8. Y. S. Kim, Y. D. Lee, K. Y. Ahn, D. K. Lee, S. M. Lee, and E. J. Choi, "Operation characteristics according to steam temperature and effectiveness of external steam-related SOEC system", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 596-604, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.596>.
9. T. Bui, Y. S. Kim, D. K. Lee, K. Y. Ahn, Y. Bae, and S. M. Lee, "Economic analysis and comparison between low-power and high-power SOEC systems", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 33, No. 6, 2022, pp. 707-714, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.6.707>.
10. National Aeronautics and Space Administration (NASA), "Safety standard for hydrogen and hydrogen systems: guidelines for hydrogen system design, materials selection, operations, storage and transportation", NASA, 1997. Retrieved from <https://ntrs.nasa.gov/citations/19970033338>.
11. International Organization for Standardization, "ISO 16110-1: hydrogen generators using fuel processing technologies - part 1: safety", Korean Standards Service Network, 2007. Retrieved from <https://www.kssn.net/for/fordetail.do?itemNo=F011010041045>.
12. Korea Gas Safety Corporation (KGS), "Facility/technical/inspection code for manufacture of water electrolysis hydrogen generator (KGS AH271)", KGS, 2025. Retrieved from [https://cyber.kgs.or.kr/kgscode.codeSearch.view.ex.do?onEngYn=F&pblcRlmCd=&pblcMdclCd=&pblcCd=AH271\\_250616&stDayY=2008&stDayM=01&etDayY=2025&etDayM=06](https://cyber.kgs.or.kr/kgscode.codeSearch.view.ex.do?onEngYn=F&pblcRlmCd=&pblcMdclCd=&pblcCd=AH271_250616&stDayY=2008&stDayM=01&etDayY=2025&etDayM=06).
13. International Organization for Standardization (ISO), "Hydrogen generators using water electrolysis - industrial, commercial, and residential applications (ISO 22734)", ISO, 2019. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/69212.html>.
14. Underwriters Laboratories (UL), "Outline of investigation for water electrolysis type hydrogen generators (UL 2264A)", UL, 2021. Retrieved from <https://www.shopulstandards.com/ProductDetail.aspx?UniqueKey=40988>.
15. International Organization for Standardization (ISO), "Basic considerations for the safety of hydrogen systems (ISO/TR 15916)", ISO, 2015. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/56546.html>.
16. International Electrotechnical Commission (IEC), "Fuel cell technologies - part 8-101: energy storage systems using fuel cell modules in reverse mode - test procedures for the performance of solid oxide single cells and stacks, including reversible operation (IEC 62282-8-101)", IEC, 2020. Retrieved from <https://webstore.iec.ch/en/publication/33278>.
17. National Fire Protection Association (NFPA), "NFPA 2: hydrogen technologies code", NFPA, 2023. Retrieved from <https://www.nfpa.org/product/nfpa-2-code/p0002code>.
18. European Industrial Gases Association (EIGA), "DOC 246/23 - guideline for small scale hydrogen production", EIGA, 2020. Retrieved from [https://www.eiga.eu/publications/?\\_sft\\_ct\\_doc\\_cats=document&\\_sf\\_s=246/23](https://www.eiga.eu/publications/?_sft_ct_doc_cats=document&_sf_s=246/23).
19. Clean Air Task Force (CATF), "Solid oxide electrolysis: a technology status assessment", CATF, 2023. Retrieved from <https://www.catf.us/resource/solid-oxide-electrolysis-technology-status-assessment/>.
20. F. van Berkel, H. van 't Noordende, and M. Stodolny, "Next level solid oxide electrolysis", Institute for Sustainable Process Technology, 2023. Retrieved from <https://ispt.eu/publications/next-level-solid-oxide-electrolysis/>.