

## 건물용 고체산화물연료전지 스택 안전성능평가 연구

박태성 · 이은경<sup>†</sup> · 이승국

한국가스안전공사 가스안전연구원

(2018년 11월 19일 접수, 2018년 12월 10일 수정, 2018년 12월 12일 채택)

### Study on safety performance evaluation of stationary SOFC stack

Tae Seong Park · Eun Kyung Lee<sup>†</sup> · Seung Kuk Lee

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

(Received 19 November 2018, Revised 10 December 2018, Accepted 12 December 2018)

#### 요 약

SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) stack 안전성능 평가항목 및 평가절차 도출을 위하여 국내외 연료전지 관련 규격들을 분석하였으며, 분석을 통해 도출된 시험항목으로 SOFC stack 안전성능 시험을 실시하였다. 시험에 사용된 SOFC stack은 (주)미코社에서 제작된 음극 지지형 2 cell stack(활성면적: 110.25 cm<sup>2</sup>/cell)이고, 평가장치는 자체 제작한 SOFC stack 안전성능 평가 장치를 사용하였다. 기밀성능 시험, 전류전압특성 시험, 정격출력 시험 및 부하변동 시험을 실시하였으며, 그 결과 해당 stack의 최대출력은 65.6 W(1.41 V, 46.5 A, 422 mA/cm<sup>2</sup>), 정격출력은 62.3 W(1.57 V, 40 A, 363 mA/cm<sup>2</sup>)로 나타났으며 가스누출이 없음을 확인하였다. 또한, 부하변동에 대하여 2초 이내에 안정적으로 출력이 유지되는 것을 확인하였다. 이때 운전 온도 750℃에서 최대부하(40 A) 및 최소부하(8 A)에서의 출력은 각 62 W와 16 W로 측정되었다. 본 연구를 통하여 고체산화물연료전지의 보급화와 안전한 사용 환경을 제공하는데 기여하고자 한다.

**주요어 :** 고체산화물연료전지, 연료전지, 스택, 신재생에너지, 안전성평가

**Abstract -** The code and standards related to fuel cells were analyzed to derive the SOFC(Solid Oxide Fuel Cell) stack safety performance evaluation items and evaluation method. Safety performance evaluation of the SOFC stack was tested by quoting derived test items. The stack used in the test is an anode-supported type 2 Cell stack (Active surface area : 220cm) manufactured by MICO Inc, and SOFC stack safety performance evaluation system used for the test is self-manufactured. We conducted a leakage test, current voltage characteristic test, rated output test, and power response characteristics test. In the safety performance evaluation test, the stack showed no gas leakage, the maximum output and rated output was recorded to 65.6 W(1.41 V, 46.5 A, 422 mA/cm<sup>2</sup>), 62.3 W(1.57 V, 40 A, 363 mA/cm<sup>2</sup>). In the power response characteristics test verified that the output is kept stable within two seconds. At the maximum load (40 A) and the minimum load (8 A), the output was recorded 62 W and 16W in 750℃. This study will contribute to the universalization and to provide much safe environment of operating the solid oxide fuel cell system.

**Key words :** Solid oxide fuel cell, Fuel cell, Stack, New & Renewable energy, Safety evaluation

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-43-750-1474 E-mail : ekleee0123@kgs.or.kr

## 1. 서론

전통적인 에너지원인 석유, 석탄 등 화석 에너지 사용의 지속적인 증가로 지구 온난화와 미세먼지 등의 환경 문제가 발생되고 있으며, 석유 등 주요 에너지원은 특정 지역적으로 편중되어 있어 국가 부존자원 중 천연자원이 거의 없는 국내 환경에는 더욱 심각한 에너지 위기를 초래 할 수 있다. 화석 에너지 사용으로 발생하는 여러 문제점 중 지구 온난화와 같은 글로벌 환경 이슈가 발생함에 따라 각국 정부는 리우 환경 협약부터 교토의정서 채택, 그리고 최근 파리 기후협약 등 환경 문제 해결을 위한 노력을 지속하고 있으며, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>와 같은 환경오염 물질을 배출하지 않는 신재생에너지에 대한 관심이 부각되고 있다<sup>1)</sup>. 국내의 경우 국제 사회의 이러한 흐름과 더불어 2016년에 발표된 「에너지 신산업 확산 및 규제개혁 종합대책」과 「신재생에너지 보급 활성화 대책」을 통해 정부는 신재생에너지 분야에 대한 규제 완화와 투자확대, 신재생에너지 의무할당제도(RPS)의 의무 비율 상향 등 신에너지 분야의 발전과 보급확화를 독려하고 있다. 최근 정부의 탈 화석에너지, 탈 원전 기조가 강해짐에 따라 신재생에너지 분야와 관련된 시장이 빠르게 성장하고, 관련 기술도 빠르게 진보 할 것으로 예상된다<sup>2,3)</sup>.

**Table 1.** Comparing installation area of solar, wind and fuel cells

	Installation area
Fuel cell	179 m <sup>2</sup> /MW
Solar	19,800 m <sup>2</sup> /MW
Wind	39,600 m <sup>2</sup> /MW

연료전지는 신재생에너지 분야의 한 축이 될 것으로 기대되며, 다가올 미래 수소경제 시대의 중심축을 담당할 것으로 예측된다. 연료전지는 지열, 태양광, 풍력 등과 같은 신재생에너지원들에 비해 많은 장점이 있다. 첫째로, 사용 연료인 수소는 탄화수소 개질, 수전해 방식 등의 다양한 방법으로 생산이 가능하며, 수전해 방식의 경우 에너지원의 지역적 편중이 없다. 둘째, 생산된 수소를 공간과 시간의 제약 없이 연속적으로 공급받을 수 있어 다른 신재생에너지원들에 비하여 매우 뛰어난 에너지 연속성을 가진다<sup>3)</sup>. 셋째, Table 1에 나타난 것처럼, 다른 신재생에너지원에 비하여 매우 작은 설치 면적이 요구되기 때문에 대도시 중심의 국내 환경에 비교적 공간의 제약 없이 보급과 설치하는 것이 가능하다<sup>4)</sup>. 이러한 장점과 범용성 덕분에 연료전지 시장은 2010년 이후 매년 약 30%대의 성장률을 나타내고 있다<sup>5)</sup>.

연료전지는 운전온도에 따라 저온형연료전지와 고온형연료전지로 분류가 되며, 대표적인 저온형 연료전지는 Table 2에 표시된 바와 같이 PEMFC (고분자전해질연료전지, Polymer electrolyte fuel cell), PAFC (인산형연료전지, Phosphoric acid fuel cell)가 있으며, PEMFC의 경우 약 50~100℃의 운전온도를 가지며, 발전출력은 수 kW급이다. PAFC의 경우 150~250℃의 작동온도를 가지며, 수십에서 수백 kW급의 발전출력을 가진다. 고온형 연료전지는 대표적으로 MCFC (용융탄산염연료전지, Molten carbonate fuel cell), SOFC (고체산화물연료전지, Solid oxide fuel cell)가 있다. MCFC의 경우에는 약 650℃의 온도에서 운전되며, 발전출력은 수백 kW에서 수십 MW급이며, SOFC는 연료전지들 가운데 가장 높은 700~1000℃의 온도에서 작동하며, 수십 kW에서 수 MW급의 발전출력을 가진다. 이 중 가장 높은 운전온도를 가지는 SOFC는 다른 연료전지들과 비교하여 발전 효율이 높으며, 높은 운전온도를 바탕으로 다른 발전원과의 연계가 용이하므로 가스 터

**Table 2.** Types of fuel cells according to operating temperature

Fuel cell	Low-temperature type		High-temperature type	
	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Operating Temp.	50~100℃	150~250℃	650℃	700~1000℃
Efficiency	35%	40%	47~60%	55~70%
Power output.	Few kW	Few hundred kW	Dozens of MW	Few MW

빈과 연계한 복합 CHP(열병합발전, Combined heat and power) 형태의 발전이 가능하다<sup>6-12)</sup>. 또한, 높은 운전온도 덕분에 외부의 개질기 없이 천연 가스 등 탄화수소계열의 연료를 SOFC 내부에서 개질하여 연료로 사용 하는 것이 가능해 연료 선택의 폭이 넓다는 장점을 가지고 있다. 이러한 SOFC의 장점들을 이용하기 위하여 해당 분야의 기술개발과 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 SOFC는 운전온도가 매우 높기 때문에 고온에 적합한 성능을 갖는 재료의 개발이 요구된다. 먼저 SOFC 시스템의 핵심 부품인 stack은 여러 부품들 중 가장 고온에 노출되고, 세라믹 재료로 제작되어 있어 열응력과 온도변화에 민감하기 때문에 열 통합과 단열이 잘 되어야 하며, 주로 밀봉 역할을 하는 글라스 페이스트 또한 고온에서 붕괴되지 않고 점탄성을 유지하여야한다<sup>9)</sup>. 이러한 이유로 stack을 설계할 때 재료의 선정이 까다롭고 내구성, 안전성능에 문제점을 가지고 있어 장치 설계 시 보다 높은 기술력이 요구된다. 따라서 SOFC의 보급과 안전한 사용 환경을 제공하기 위해서는 SOFC 시스템의 핵심 부품인 stack에 대한 안전성능과 위험성 분석에 대한 연구가 필연적으로 선행되어야 하며, 해당 분야에 대한 관심이 필요한 실정이다<sup>13)</sup>.

본 연구에서는 신재생에너지의 한 축을 담당하고 있는 SOFC의 핵심 부품인 stack의 안전성능 프로토

콜 개발을 위하여, 국내·외 SOFC 성능 및 안전기준을 분석하였으며, 도출된 평가항목과 평가방법을 바탕으로 SOFC stack에 대한 기본적인 성능평가를 진행하였다.

## 2. SOFC stack 안전성능 프로토콜 개발

SOFC stack 안전성능평가 장치 시작품을 통한 SOFC stack의 안전성능 프로토콜 개발을 위하여 국내·외 연료전지 시스템 안전성능 평가항목 관련 규격을 분석하였다. Table 3은 SOFC 연료전지 시스템 및 stack의 안전성능 평가 관련 국내·외 기준을 나타낸 것이며, 전반적으로 IEC (International electrotechnical commission) 규격과 일본의 JIS C (Japanese industrial standards committee)의 규격이 관련 표준을 선도하고 있으며, 국내에는 IEC 대응 규격인 KS IEC 인증기준과 한국가스안전공사의 KGS AB934 검사기준이 있다.

### 2-1. SOFC stack 안전성능 평가항목 분석

SOFC stack의 평가항목 및 평가방법의 도출을 위하여 IEC 및 JIS C 기관의 PEMFC 관련 규격과 SOFC 관련 규격을 분석하였다. PEMFC 관련 규격으로 “IEC 62282-7-1: Single cell test method for polymer electrolyte fuel sells” 및 “JIS C 8831: Safe-

**Table 3.** The list of solid oxide fuel cell codes and standards

Nation	Code and Standards		비고
International	IEC 62282-7-2	Test methods - Single cell and stack performance tests for solid oxide fuel cells	stack
	IEC 62282-3-100	Stationary fuel cell power systems - Safety	System
U.S	ASME PCT-50	Fuel cell power systems performance	System
Japan	JIS C 8841	Small solid oxide fuel cell power systems	System
	JIS C 8842	Single cell and stack - Performance test methods for solid oxide fuel cell	stack
Korea	KGS AB 934	Facility/Technical/Inspection code for manufacture of gas fuel cells	System
	KS C IEC TS 62282-7-2	Test methods - Single cell and stack performance tests for solid oxide fuel cells	stack
E.U	EN IEC 62282-7-2	Test methods - Single cell and stack performance tests for solid oxide fuel cells	stack
Canada	CAN/CSA-C22.2 No.62282-2	Fuel cell technologies - Part 2-7 : Fuel cell modules	System

ty evaluation test for stationary polymer electrolyte fuel cell stack” 등 2가지 규격의 안전성능 평가항목을 비교 하였으며, SOFC 관련 규격으로 “IEC 62282-7-2: Test methods - Single cell and stack performance tests for solid oxide fuel cells” 및 “JIS C 8842: Single cell and stack - Performance test methods for solid oxide fuel cell” 등 2가지 규격을 비교 하였다. 관련 규격들의 평가항목을 비교한 결과, “IEC 62282-7-1”, “IEC 62282-7-2”, “JIS C 8842”에서는 전류-전압특성 시험, 부하변동 시험, 연료 이용률, 정격출력 시험, 운전압력 및 온도와 연계한 시험항목들이 공통적으로 명시되어 있고, “JIS C 8831”에서는 냉각부족/냉각억제, 결빙/용해 주기와 같은 시험항목을 확인하였다. 이외에도 “IEC 62282-3-100: Fuel cell technologies - part 3-100: Stationary fuel cell systems - Safety”, “JIS C 8841-2: Small solid oxide fuel cell power system - Part 2: General safety codes and safety testing methods” 및 IEA (국제에너지기구, (International energy agency))의 “EF Nr. 192852 Recommended practices for SOFC products and systems evaluation (고체산화물연료전지 제품 및 시스템 평가를 위한 권장 지침)”을 참고하여 분석하였다.

## 2-2. SOFC stack 안전성능

SOFC stack 성능 및 안전성능 관련 국내·외 규격을 분석을 통해 13가지 평가항목을 도출 하였다. 도출된 13가지의 항목들이 SOFC stack 안전성능에 주는 영향에 대해 분석하여 시험항목을 3가지 stage로 분류하였다. stage-1의 시험항목은 SOFC stack의 정격출력시험, 전압전류시험 및 기밀성능시험 등 기본 성능평가항목이며, stage-2는 부하변동시험, 과부하시험 및 열주기시험 등 SOFC 시스템 및 stack의 운전조건에 관한 안전성능 항목으로 분석된 시험항목이다. stage-3는 열충격시험, 운전상태 및 외부상태에 의한 긴급정지시험 및 단락시험 등 SOFC 시스템 및 stack의 안전성능에 직접적인 영향을 미

치는 시험항목으로 분류하여 구성하였다. Table 4에 stage별로 나누어진 13가지의 항목을 정리 하여 나타내었다.

Table 5에 stage-1 시험항목에 대하여 규격별 시험 조건을 나타낸 것이다. “KGS AB934”, “JIS C 8841”, “JIS C 8842”에 따르면 stage-1의 정격출력 시험은 열적 평형상태 도달(안정화 시간 30 min 이상) 후 3시간 이상 운전하여 측정 하도록, 전압-전류 시험은 정격 개회로 조건에서 안정화 (30 min 이상) 후 전류 또는 전압값을 일정 속도로 편향시켜 측정하도록 명시되어 있다. SOFC stack 기밀성능시험의 경우 “KGS AB934”, “JIS C 8841”, “JIS C 8842”에는 stack에 대한 기밀시험이 명시되어 있지 않으며, “CAN/CSA-C22.2 No.62282-2”에 제조사 지정값 이하로 감소하지 않거나 감소할 경우 초기값의 10% 이하 범위를 유지하고, 사용압력은 제조사 지정값 또는 최대운전 압력으로 설정하도록 명시되어 있다<sup>13-22)</sup>.

Stage-2의 부하변동 특성시험의 경우 “JIS C 8841”, “JIS C 8842” 규격에 의하면 제조사에서 표시한 값으로 시험조건을 설정하여 정격운전 조건에서 30분간 안정화하고, 정격운전 및 부분부하 운전을 각 1시간씩 3회 이상 반복하여 실시하도록 규정하고 있다. “EN.Nr 192852 (IEA)”에는 정격운전조건에서 8시간 이상 안정화를 진행하고 부분부하를 정격운전부하 값의 20%로 설정하고, 정격운전 시간과 부분 부하운전시간은 각 16시간 이상, 7회 이상 반복하도록 권장하고 있다. 과부하 시험은 “EN.Nr 192852 (IEA)”에 정격부하의 200%로 100시간을 권장하며, 이때의 전지 전압을 기록하도록 하고 있으나, “CAN/CSA-C22.2 No.62282-2”에서는 시험조건을 제조사의 지시값으로 하고 stack의 파손, 변형 및 누출 등의 물리적 손상을 확인하도록 하고 있다. 열주기 시험은 “JIS C 8841”, “JIS C 8842”와 “IEC 62282-7-2”에는 안정화 조건, 시험조건, 열주기 최소온도 등에 대하여 제조사의 표시값을 따르도록 하고 있으며, “EN.Nr 192852 (IEA)”에서도 안정화 시간 등은 제조사의 표시값으로

Table 4. SOFC stack test items by stage

Stage	Test items
1	Rated output , I-V characteristics, Leak
2	Power response characteristics, Overload, Thermal cycle
3	Thermal shock, Short circuit, Differential/Internal pressure. Shutdown parameters (Voltage, Pressure, Temp., Fuel/Air cut)

**Table 5.** Test operation condition by stage-1

Leak test				
Code & Standard	JIS C 8841, JIS C 8842.		KGS AB934	CAN/CSA-C 22.2 No. 62282-2
Temp.	20±5℃		20±5℃	-
Pressure	N2 4.2 kPa or 1.1 Times the operating pressure		LNG-4.2 kPa, LPG-4.95kPa, ETC-1.1 Times the operating pressure	Maximum operating pressure
Leak check	Choice of test methods, Pressure drop, Detector, Leak flow or bubble check		< 70 ml/hr	< 5 ml/min, < Indication value (Pressure drop < 10%)
Rated output test				
Code & Standard	JIS C 8841, JIS C 8842.	IEC-62282 -7-2	KGS AB934	CAN/CSA-C 22.2 No. 62282-2
Stabilization Time	30 min	-	> 30 min	-
Condition	Rated operating condition			
Interval	> 3 hr	-	3 hr	-
Measurement items	Electrical outout	Electrical outout	Electrical Outout (Indication value < ±10%)	Electrical outout
I-V test				
Code & Standard	JIS C 8841, JIS C 8842.		IEC-62282-7-2	
Stabilization Time	30 min		-	
Condition	Rated operating condition (OCV (Open circuit voltage))			
Measurement Items	Current, Voltage, (Average value)			

하되, 열주기 최소온도는 100℃ 이하로 하고 10회 이상 반복하도록 권장하고 있다. Table 6에 Stage-2의 시험항목별 시험조건에 대하여 나타내었다<sup>13-22)</sup>.

Stage-3의 내압시험은 “JIS C 8831” 과 “CAN/CSA-C22.2 No.62282-2”에서는 내압시험의 테스트 압력은 운전압력의 1.3배로 설정하도록 규정되어 있고, 테스트는 1분 이상 가압을 진행한 후 상압으로 낮추어 측정한다. 이때 “JIS C 8831”에서는 파손,

변형 등 물리적 손상을 확인하며, “CAN/CSA-C22.2 No.62282-2”에서는 안전장치의 작동 여부를 확인하도록 하고 있다. “IEC 62282-3-100”에서는 시험압력을 작동압력의 3배로 규정하고 1분 이상 가압하여 10분 이상 압력을 유지하도록 명시하고 있다. 차압 시험은 내압시험과 시험방법이 유사하며, 평가항목은 기밀시험과 비슷하게 명시되어 있다. 단락시험은 “JIS C 8831”의 경우 테스트 조건은 제조업자의

**Table 6.** Test operation condition by stage-2

Power response characteristics test			
Code & Standard	JIS C 8841, JIS C 8842.		EN.Nr 192852 (IEA)
Stabilization Condition	30 min		> 8 hr
	Rated operating condition		
Target load	Indication value $\pm$ 2%		-
Full load	1 hr (Indication value )		16 hr (Recommend value)
Min load	1 hr (Indication value )		16 hr (Recommend value) load (20%)
Interval	3 Time		7 Time (Recommend value)
Overload Test			
Code & Standard	CAN/CSA-C 22.2 No. 62282-2		EN.Nr 192852 (IEA)
Full load	Manufacturer indication value		Load 200%
Operating time	Manufacturer indication value		100 hr (Recommend value)
Check items	Rupture, Transform, etc.		Cell voltage
Thermal cycle test			
Code & Standard	JIS C 8841, JIS C 8842.	IEC-62282-7-2	EN.Nr 192852 (IEA)
Stabilization condition	Manufacturer indication value		
Operating condition	Manufacturer Indication value		Cathode: N <sub>2</sub> based H <sub>2</sub> , Anode: Rated condition
Min temp.			< 100°C (Recommend value)
Interval			10 Time (Recommend value)

지시값을 따르도록 하고 있으며, “CAN/CSA-C22.2 No.62282-2”에서는 정격운전조건에서 시험을 진행하도록 되어있으며, 두 규격 모두 안전장치의 작동 여부를 확인 하도록 되어있다. 해당 내용은 Table 7에 나타내었다<sup>13-22)</sup>. Stage-3의 긴급정지 시험은 전압, 압력, 온도 등 위험요소에 대한 시험과 연료 및 산소 가스의 차단에 의한 시험으로 나누어진다. 먼저 위험항목들로 인한 정지 시험은 “IEC 62282-3-100”, “CAN/CSA-C22.2 No.62282-2”, “KGS AB934” 및 “JIS C 8841”, “JIS C 8842”의 규격에서 특정 위험 환경조건에서 시스템의 안전장치 작동 여부를 확인 하도록 하고 있으며, “IEC 62282-3-100”, “CAN/CSA-

C22.2 No.62282-2”에서는 46개의 위험항목을 명시 하고 있다. 또한, “KGS AB934”와 “JIS C 8841”, “JIS C 8842”는 각각 13가지의 와 14가지의 항목을 규정하고 있다. 연료 및 산화가스의 차단으로 인한 긴급정지 시험은 “CAN/CSA-C22.2 No.62282-2”에서 정격운전 상태에서 연료 및 산화가스를 차단하여 안전장치가 작동하는지 여부를 확인 하도록 명시되어 있고, “JIS C 8831”에서는 테스트 조건을 제조사의 표시값에 따라 진행하도록 하고 있다. 또한 “CAN/CSA-C22.2 No.62282-2”와 같이 안전장치의 작동 여부를 확인하도록 하고 있으며, 관련 내용은 Table 8에 나타내었다<sup>13-22)</sup>.

**Table 7.** Test operation condition by stage-3-1

Internal pressure test			
Code & Standard	IEC-62282-3-100	JIS C 8831	CAN/CSA-C 22.2 No. 62282-2
Test pressure	3 Times the operating pressure	1.3 Times the operating pressure	
Test condition	Pressurize for more than 1 minute and keeping that pressure 10 minute more	Pressurize for more than 1 minute and then descend to normal pressure.	
Test gas	Operating gas, Dry-Air, Inert gas		
Check items	Rupture, Transform, etc (Physical damage)		Safety device operation
Differential pressure test			
Code & Standard	JIS C 8831	CAN/CSA-C 22.2 No. 62282-2	
Test pressure	1.3 Times the operating differential pressure.		
Test condition	Pressurize for more than 1 minute and then descend to normal pressure.		
Test gas	Operating gas, Dry-Air, Inert gas		
Check items	Leak flow rate < 10% in Indication value.	Rupture, Transform, etc (Physical damage) Leak flow rate < 10% in Indication value.	
Short circuit test			
Code & Standard	JIS C 8831	CAN/CSA-C 22.2 No. 62282-2	
Test condition	Manufacturer indication condition	Rated operating condition	
Check items	Safety device operation		

### 3. 실험

#### 3-1. 시험장치

SOFC 스택 안전성능 평가시험에 사용된 시험장치는 본 연구를 통해 설계 및 제작된 SOFC stack 안전성능평가 장치 시작품을 사용 하였으며, 해당 장치는 도출된 평가항목에 대한 시험이 가능하도록 제작되었다. 시험장치는 시스템 전반을 제어하는 제어부와 공급가스 예열기, SOFC stack이 설치되는 퍼니스로 구성 되어 있다. 제어부에서는 퍼니스의 온도, stack의 전기부하, 공급가스의 유량과 온도, 습도, 공급배관의 가스압력을 조절할 수 있도록 구성되어 있으며, 긴급상황 발생 시 운전자에게 발생

이슈를 즉각적으로 알리는 알람 시스템과 문자 발송 시스템을 갖추고 있다. 공급가스 예열기는 공급가스를 고온의 운전온도로 공급할 수 있도록 되어 있으며, 최대 공급가능 온도는 1000℃이다. 퍼니스부는 실제 시험에 사용하는 SOFC stack을 실장하는 부분으로 온도에 민감하고 고온에서 운전되는 SOFC의 특성을 고려하여 승온 및 감온 속도를 1℃/min의 속도로 제어 가능하도록 구성되어 있다. 또한, SOFC stack에서 생성된 수분이 배출가스의 흐름을 방해하지 않도록 수분제어 트랩과 고온의 배출가스를 안전하게 배출하기 위한 소규모 열교환기도 구성되어 있다. Fig. 1은 본 연구에 사용한 SOFC stack 평가장치의 모습을 나타낸 것이다. Fig. 2는 평가장치의 P&ID를 나타낸 것이다.

**Table 8.** Test operation condition by stage-3-2

Shutdown parameters test (Voltage, Pressure, Temp.)				
Code & Standard	IEC-62282-3-100	CAN/CSA-C22.2 No 62282-2	KGS AB934	JIS C 8841, JIS C 8842
Stabilization condition,	-	-	-	30 min < Rated Operating Condition
Shutdown parameters	46 Categories		13 Categories	14 Categories
	Including mechanical, Electrical and environmental hazard Parameters			
Check items	Safety device operation (system)			
Shutdown parameters test(Fuel/Air Cut)				
Code & Standard	JIS C 8831		CAN/CSA-C22.2 No 62282-2	
Stabilization condition	Manufacturer indication value		Rated operating condition	
Test gas	Fuel Gas: H <sub>2</sub> or Manufacturer indication gas, Oxidizing gas: Mixed gas (8 : 2, O <sub>2</sub> : N <sub>2</sub> )		Fuel gas, Oxidizing gas	
Check items	Safety device operation (system)			

**3-2. SOFC stack**

시험에 사용된 SOFC stack은 국내 SOFC stack 및 시스템 제조사인 (주)미코社에서 제작한 12 cm X 12 cm 크기의 반응면적 약 110 cm<sup>2</sup>, 정격출력 30 W/cell, 전력밀도 270 mW/cm<sup>2</sup>, 연료이용율 65%의 음극 지지체형 cell 2개를 적층한 평판형 SOFC stack이다. Fig. 3은 실제 시험에 사용된 SOFC stack의 사진이다.

**3-3. 시험항목 및 시험방법**

SOFC stack 성능 및 안전성능과 관련하여 도출된 시험항목 중 기밀, 정격출력, 전압-전류특성, 부하변동에 대하여 시험을 진행하였으며, 시험에 필요한 SOFC stack의 기본적인 운전조건을 Table 9에 나타내었다.

**3-3-1. 기밀시험**

기밀시험은 질소가스(99.9999%)를 이용하여 진행하였다. 시험방법은 Table 5에 나타난 국내·외 규격에 압력변화, 가스검출기, 누출검지약제, 누출량 측정 등 다양한 방법이 명시되어 있으며, 본 시험에서는 “CAN/CSA-C22.2 No.62282-2”에 명시된 것과 같이 누출검지약제를 통한 배관의 기밀 확인과, stack 전단과 후단의 압력을 측정하는 방식을 사용하여 실험을 진행하였다. 시험장치에 stack을 연



**Fig. 1.** SOFC stack safety performance evaluation system

결하고 stack 후단의 밸브를 차단한 다음, 기밀시험용 질소가스로 SOFC 시스템 운전조건 최대 압력조건 상한 값인 20 kPa까지 가압한 상태에서 질소가스가 흐르는 배관의 가스누출을 먼저 확인하고 폐지를 1분간 실시했다. 1분 동안 폐지 후 stack 후단의 밸브를 차단하여 목표 압력까지 가압하고 가압이 완료되면 질소가스 공급 배관의 밸브를 차단하여 30분 동안 stack 전단과 후단의 압력을 모니터링하여 압력의 변화를 측정하였다.

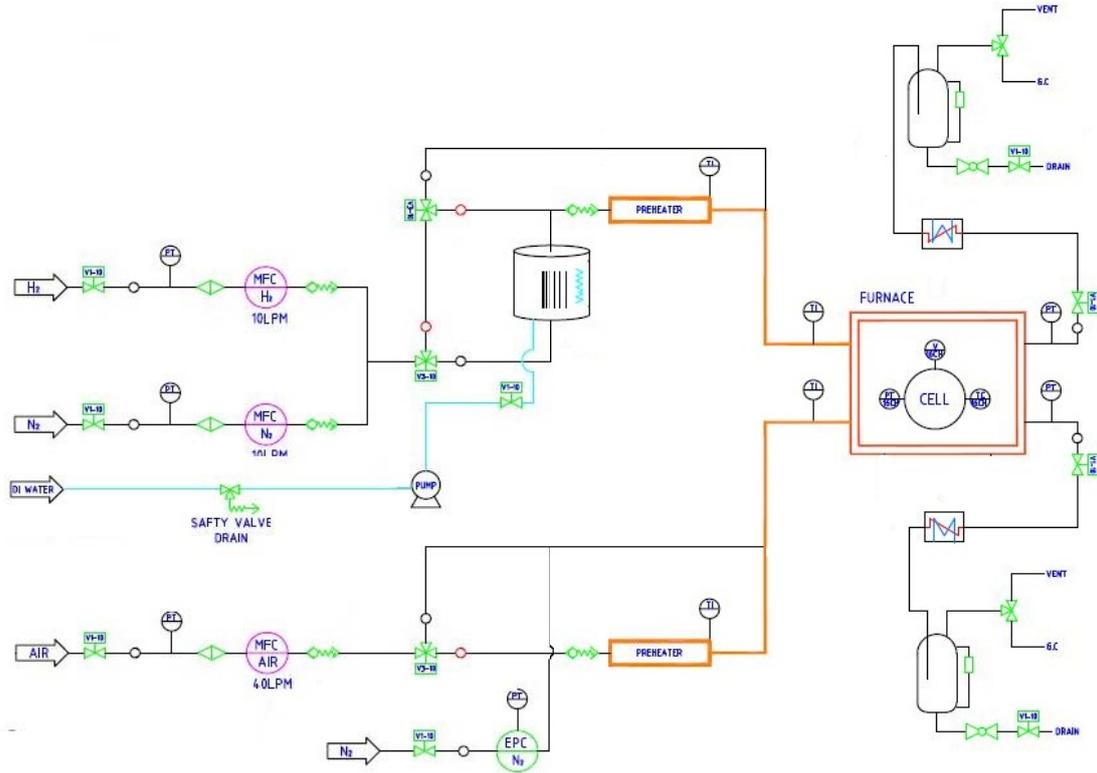


Fig. 2. SOFC stack safety performance evaluation system P&ID flowchart



Fig. 3. SOFC 2 cell stack

**3-3-2. 전압-전류 특성시험**

전압-전류 특성시험은 연료전지의 이상 유무와 stack의 성능평가를 위한 기초적인 시험으로, SOFC stack을 정격운전 조건의 개방회로전압(OCV, Open circuit voltage)상태로 열평형을 이루도록 1시간 동안 일정한 공급가스 유량과 온도 조건을 유지한 상태에서 0.05 A/Sec의 전류 소인(掃引) 속도로 상승하여 만곡점에 도달하면 시험이 정지되도록 하였다. 해당 실험은 다른 실험에 의한 성능변화가 발생하기 이전의 성능을 측정하기 위하여 초기 상태의 연료전지를 측정하였다.

**3-3-3. 정격출력시험**

정격출력시험은 연료전지가 정상적인 운전조건에서의 적절한 성능을 나타내는지 확인하는 시험으로, SOFC stack을 정격출력 조건의 OCV 상태로 열평형을 이루도록 1시간동안 유량과 온도 유지한 후 공급가스를 Wet상태로 전환하고 전류값을 0.05 A/Sec의 전류소인속도로 40 A까지 상승시켜 실험을 실시하였다.

**3-3-4. 부하변동시험**

부하변동시험은 정격운전 상태와 부분부하 상태를 설정하여 반복함으로써 stack의 이상 유무를 확인하는 시험이다. “JIS C 8841”, “IEC 62282-3-1”, “IEC 62282-3-2” 에 따르면 정격조건 OCV 상태에서 30분 이상 열평형 상태에 도달하도록 안정화 운전을 시행한 뒤에 정격부하 운전 1시간 이상, 부분부하 운전 1시간 이상을 3회 이상 반복하도록 하고 있다. 이때 최소부하를 제조업자의 지정 상태로 운전하도록 하고 있으며, 부하변동이 시작된 시점을 기점으로 목표부하에 도달하여 목표출력의 ±2% 범위에서 안정된 시점을 기록하도록 한다. 본 연구에서는 운전시간과 정격운전 조건, 반복 횟수를 “JIS C 8841”, “IEC 62282-3-1”, “IEC 62282-3-2”의 규격에 따라 시행하였으며, 최소부하는 정격출력의 20%로

**Table 9.** Operation condition of SOFC stack

	Heating	Rated operating	Cooling
Furnace Temp.	R.T to 750℃	750℃(±1℃)	750℃ to R.T
Heating & Cooling rate	>1℃/min	-	>1℃/min
Gas flow rate	H2: 0.4 LPM /cell, O2: 1.6 LPM/cell, N2: 0.4 LPM/cell		
	Dry	Wet	Dry
Humidifier	28℃ (3% H <sub>2</sub> O)		
Load	Open circuit voltage	40 A	Open circuit voltage

선택하여 시험을 진행하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4-1. 기밀시험

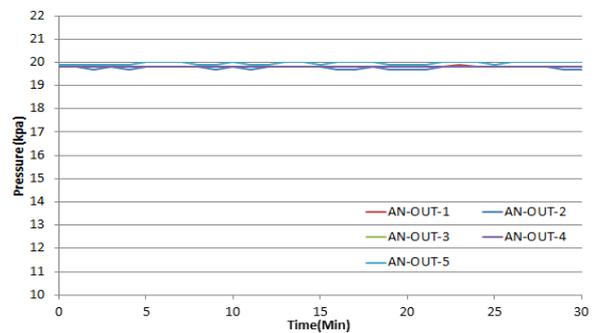
Fig. 4는 상온에서 실험 초기의 SOFC stack에 대한 기밀시험을 수행한 결과로 압력의 변화를 나타낸 그래프이다. 총 5회 반복된 실험에서 Anode 측의 압력 변화를 30분 동안 확인한 결과 5회 모두 압력의 강하가 일어나지 않았으며, 5회 평균 압력변동은 0.1 kPa로 나타났다. Cathode 측도 압력 강하는 발생하지 않았다. 기밀시험결과 뚜렷한 압력강하는 발생하지 않았으며, “CAN/CSA-C22.2 No.62282-2” 규격에 명시된 제조사 표시값의 10%에 해당하는 2 kPa를 초과하지 않아 압력강하 조건을 만족하는 것을 확인하였다.

#### 4-2. 전압-전류 특성시험

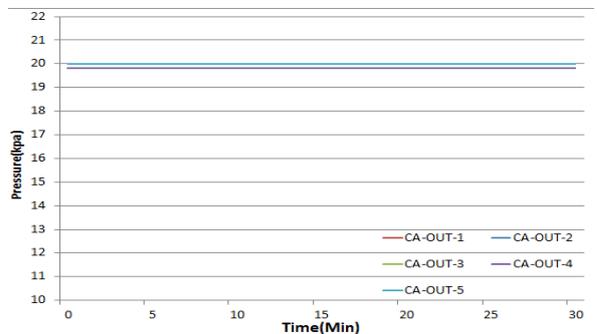
Fig. 5는 전압-전류 특성시험의 결과를 나타낸 그래프로 정격운전조건에서 전류를 0.05 A/Sec의 속도로 증가시키면서 만곡점까지 측정된 결과이다. 이때 발생한 stack의 최대 출력은 65.6 W이며, 이때 전압 1.41 V, 전류 46.5 A, 전류밀도 422 mA/cm<sup>2</sup>을 기록하였다. 또한 정격조건인 40 A에서 전압, 출력, 전류밀도는 각각 전압 1.57 V, 출력 62.3 W, 전류밀도 363 mA/cm<sup>2</sup>을 기록하였다.

#### 4-3. 정격출력시험

Fig. 6은 정격출력시험의 결과를 나타낸 그래프이며, 정격부하 40 A조건에서 3시간씩 5회 측정된 결과, 평균전압은 1차부터 5차 시험까지 1.57 V를 유지하며 안정적인 경향을 나타냈고, 평균출력은 62.7 W로 측정되었다. 이는 “KGS AB934”의 검사기준에 표시된 전기출력의 평균값이 제조사 표시값



(a) Anode



(b) Cathode

**Fig. 4.** Leak test for SOFC 2 cell stack

의 ±10% 이내 범위를 만족하는 것으로 제조사 지정 값인 64 W에는 미치지 못하였으나 지시값 대비 약 2%의 차이로 검사기준에 적합한 출력을 나타냈다.

#### 4-4. 부하변동시험

부하변동 시험은 정격부하 5시간 이후 부분부하에서 3시간 그리고 다시 정격부하 운전 5시간 운전을 1회로 하여 총 3회 반복하여 수행하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 부하변동시험에서 정격

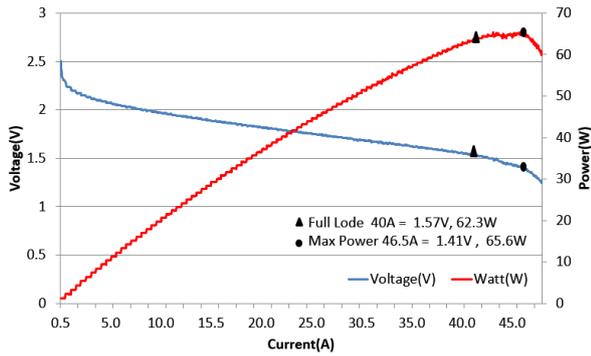


Fig. 5. I-V test for SOFC 2 cell stack

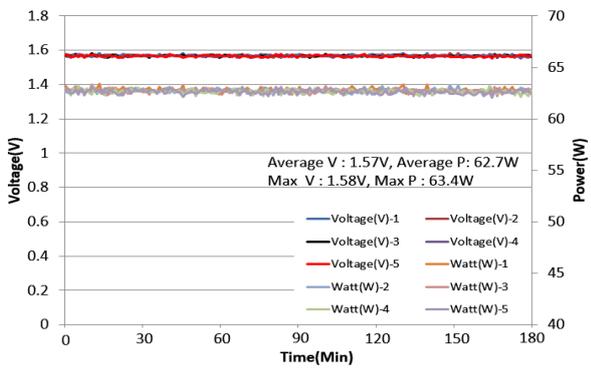


Fig. 6. Rated output test for SOFC 2 cell stack

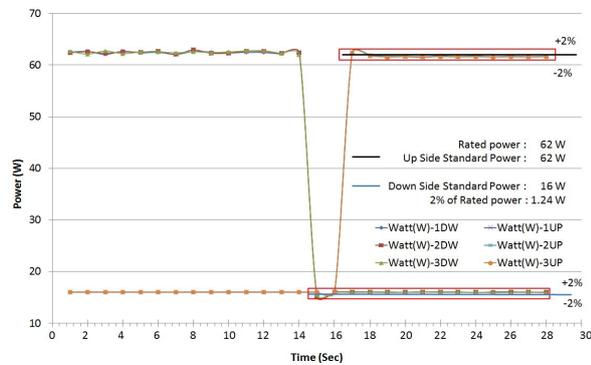


Fig. 7. Power response characteristics test for SOFC 2 cell stack

부하인 40 A에서는 평균출력이 62.4 W로 측정되었으며, 평균전압은 1.56 V를 나타내었다. 20% 부분 부하인 8 A에서는 평균출력이 16 W로 측정되었으며, 평균전압은 2.02 V를 나타내었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 SOFC stack 성능 및 안전성능과

관련한 국내·외 규격을 분석을 통해 SOFC stack의 성능과 안전에 관한 평가항목과 평가방법을 도출하였다. 도출된 평가항목과 평가방법들 중 기밀, 전압 전류특성, 정격출력, 부하변동시험에 대한 시험을 수행하였으며, 시험에는 SOFC stack 안전성능 평가장비를 사용하였다.

1) SOFC stack에 대한 기밀시험을 진행하였으며, 기밀시험은 초기에 상온에서 5회 측정 하였다. 측정 결과 Cathode 측은 압력강하가 발생하지 않았으며, Anode 측에서는 1 kPa의 압력 강하가 발생하였으나, 제조사 표시값 20 kPa 대비 0.5%의 압력 강하이며, 제조사의 표시값 대비 10%이내 범위에 속하는 것으로 “CAN/CSA-C22.2 No.62282-2”규격에 만족하는 기밀성능을 나타내었다. 기밀시험과 관련하여 고온의 운전상태에서 가스의 공급량과 배출가스의 유량차를 이용하는 방법, 상온에서 누출가스의 유량을 측정하는 방법 등 다양한 시험이 가능하도록 평가장치의 개선이 필요할 것으로 사료된다.

2) 전압-전류 특성시험은 stack의 성능을 측정하는 중요한 시험 중 하나이다. 본 실험에서는 초기 stack의 성능은 최대출력이 65.6 W으로 이때 전압 1.41 V, 전류 46.5 A, 전류밀도 422 mA/cm<sup>2</sup>로 측정되었다. 또한 정격 조건인 40 A에서 1.57 V, 출력 62.3 W, 전류밀도 363 에 안정된 값을 나타내는 것을 확인하였다. 또한, 부분부하 및 정격부하 상태에서 출력값이 안정적인 것을 확인하였다.

본 연구에서 수행된 SOFC stack에 대한 시험은 SOFC stack 안전성능평가 장치 개선과 향후 진행될 시험에 대한 기초 자료로 사용될 것이다. 향후 Stage-2의 과부하시험, 열주기 시험은 셀 제조사와의 협의를 통해 시험 조건을 설정하고 안전규격에 적합한지를 판단하기 위하여 실시될 예정이며, Stage-3의 내압 및 차압 시험은 규격에 적합한 조건과 시험방법을 따라 진행을 할 것이다. 이와 관련하여 밀봉재의 특성 및 stack의 기밀성능 특성에 대한 안전기준을 정립하고자 한다. 긴급정지시험 및 단락시험에 대해 정지 파라미터의 설정과 시험 방법에 대하여 stack 제조사와 긴밀한 협의를 통하여 진행하고자 한다. SOFC stack 안전성능에 관한 연구는 향후 건물용 SOFC의 안전한 사용 환경을 제공하고 보급 활성화에 기여할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(2016303003185)

## References

1. M. H. Kim., "Analysis on the technology R&D of the fuel cell systems for power generation in ships", *Journal of the Korean society of marine engineering*, vol. 31, No. 8, 2007, pp. 924-931.
2. Yamamoto, O., "Solid oxide fuel cells: fundamental aspects and prospects", *Electrochem. Acta.*, 45, 2000, pp. 2423 - 2435.
3. T. S. Park, T. H. Nam, D. K. Lee, S. K. Lee, J. S. Moon., "A study on selection of safety performance evaluation procedures of solid oxide fuel cell", *Journal of the Korean institute of gas conference in autumn of 2017*, pp. 113.
4. S. K. LEE, D. K. Lee, T. H. Nam, E. K. Lee, J. W. Lee, J. S. Moon., "Analysis of evaluation Item and risk factor for solid oxide fuel cell stack", *Journal of the Korean society for marine environment and energy conference in spring of 2017*, pp. 21.
5. "A study on the survey of fuel cell supply status and activation plan final report", report of Korea energy agency, 2013, pp. 11.
6. D. W. Choi., "The development of domestic hydrogen industry through comparison with foreign countries", *Energy focus 2017 spring*, Korea energy economics institute, 2017, pp.74-90.
7. Snijker, F., Wilde, A., de Mullens, S., and Luyten, J., "Aqueous tape casting of yttria stabilized zirconia using natural product binder", *J. Eur. Ceram. Soc.*, 24, 2004, pp. 1107 - 1110.
8. Ye. G. Ju, F. Lin, C. Gopalan, S. Pal. U. and Seccombe, D., "Single step co-firing technique for SOFC fabrication", *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, Vol. 264, 2005, pp. 33 - 40.
9. Meng Ni, Tim S. Zhao., "Solid oxide fuel cells: from materials to system modeling", *Royal society of chemistry*, 2013.
10. Bove, R, Ubertini, S., "Modeling solid oxide fuel cells: methods, procedures and techniques", Springer, 2008.
11. "New and renewable energy white paper" Ministry of trade, industry and energy and Korea energy agency, 2016.
12. S. B. Son, S. H. Oh, S. Y. Choi, G. H. Kim, H. S. Song., "Preparation and characterization of sealing glass for solid oxide fuel cell", *Journal of the Korean ceramic society* Vol. 38, No. 2, 2001. pp. 158-165.
13. T. S. Park, T. H. Nam, D. K. Lee, S. K. Lee., "A Study of deduction of evaluation items for design of SOFC stack safety performance evaluation system", *Journal of the Korean institute of gas*, Vol. 21, No. 6, 2017, pp. 81-87.
14. IEC6228-7-1 "Fuel cell technologies - Part 7-1: test methods - single cell performance tests for polymer electrolyte fuel cells (PEFC)", International
15. JIS C 8831 "Safety evaluation test for stationary polymer electrolyte fuel cell stack", Japan
16. IEC6228-7-2 "Fuel cell technologies - Part 7-2: test methods - single cell and stack performance tests for solid oxide fuel cells (SOFC)", International
17. JIS C 8842 "Single cell and stack - performance test methods for solid oxide fuel cell (SOFC)", Japan
18. KGS AB 934 "Facility/Technical/Inspection code for manufacture of gas fuel cells" Korea
19. IEC6228-3-100 "Fuel cell technologies - part 3-100: stationary fuel cell power systems - safety", International
20. JIS C 8841-2 "Small solid oxide fuel cell power systems - part 2: general safety codes and safety testing methods", Japan
21. CAN/CSA-C22.2 No.62282-2:7 "Fuel cell technologies - part 2 fuel cell module", Canada.
22. EF Nr. 192852 "Recommended practices for SOFC products & systems evaluation", International energy agency