

## 5 Nm<sup>3</sup>/hr급 알카라인 수전해 시스템 안전기준 분석 및 안전성능 평가에 관한 연구

김지혜 · 이은경 · 김민우 · 오건우 · †이정운 · 김우섭\*

한국가스안전공사 가스안전연구원, \*(주)수소에너지  
(2018년 10월 20일 접수, 2018년 12월 10일 수정, 2018년 12월 11일 채택)

### A Study on the Analysis of Safety Standard and Evaluation of Safety Performance for the 5 Nm<sup>3</sup>/hr Class Alkaline Water Electrolysis System

Ji-Hye Kim · Eun-Kyung Lee · Min-Woo Kim

Gun-Woo Oh · †Jung-Woon Lee · Woo-Seop Kim\*

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation  
SUSOENERGEN, INC. \*

(Received October 20, 2018; Revised December 10, 2018; Accepted December 11, 2018)

#### 요 약

풍력에너지는 낮에 비해 야간에 많은 잉여전력을 발생시키기 때문에 야간에 생산되는 전력은 버려지고 있는데, 이 문제를 해결하기 위해 풍력 등 재생에너지를 연계한 수전해 하이브리드 시스템 개발이 활발히 이루어지고 있다. 본 연구에서는 하이브리드 시스템 안전성 향상을 위해 국내·외 수전해 시스템 기준의 평가항목을 분석하였고, 평가 항목을 토대로 수전해 시스템의 안전성능 시험항목을 도출하였다. 5 Nm<sup>3</sup>/hr급 수전해 시스템의 안전성능 평가를 위하여 시험항목 중 효율측정시험, 수소발생압력시험, 수소 순도시험을 평가하였다. 그 결과 수소발생량은 5.10 Nm<sup>3</sup>/hr, 스택효율은 4.97 kWh/Nm<sup>3</sup>로 산출되었고, 이때 발생한 수소의 순도는 99.993%로 국제기준 ISO 14687, SAE J2719에 명시된 순도보다 높은 순도의 수소를 생산하였음을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과는 향후 수전해 시스템의 구축과 안전성능을 평가에 도움이 될 것이라고 기대한다.

**Abstract** - The wind energy produced at night is being discarded because of the excess power generated at night compared to daytime. To solve this problem, In this study, we analyzed the evaluation contents for evaluation of domestic and overseas water electrolysis systems and drew contents for safety performance contents test of the water electrolysis system based on the evaluation contents. The test contents produced the efficiency measurement test, the hydrogen generated pressure test, and the hydrogen purity test. And the safety performance evaluation of the alkaline water electrolysis system of 5 Nm<sup>3</sup>/hr was performed based on the results. As a result, the hydrogen generation was calculated as 5.10 Nm<sup>3</sup>/hr and the stack efficiency was 4.97 kWh/Nm<sup>3</sup>. The purity of the hydrogen generated was 99.993% and it was confirmed that it produced high purity hydrogen. I think will help us assess and build safety performance of water electrolysis systems in the future.

**Key words** : new renewable energy, wind energy, hydrogen, water electrolysis, performance evaluation, safety

†Corresponding author:wooni@kgs.or.kr

Copyright © 2018 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

1992년에 온실가스감축을 위해 처음으로 기후변화 협약인 UNFCCC (United Nation Framework Convention on Climate Change)이 채택되었고, 1997년도에는 교토의정서가 채택되었다. 최근 2015년도에 파리에서 개최된 제21차 기후변화당사국총회에서 파리협정이 채택되었는데, 파리기후변화협정은 기존의 교토의정서를 대체하는 신기후체제로 2020년 이후부터 적용되어 규정될 예정이다[1]. 우리나라의 경우, 2014년도에 산업통상자원부에서는 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」을 제정하였고, 신에너지 및 재생에너지 산업의 활성화를 통하여 에너지원을 다양화하고, 에너지의 안정적인 공급, 에너지 구조의 환경친화적 전환 및 온실가스 배출의 감소를 추진함으로써 환경의 보전, 국가경제의 건전하고 지속적인 발전과 국민복지의 증진에 이바지하는 목적을 갖는다. 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」제 2조에 따르면 신재생에너지는 신에너지와 재생에너지를 합쳐 부르는 말로, 신에너지는 새로운 에너지를 전환하는 기술을 뜻하며 그에 따른 에너지로는 3개의 분야로 나누어 석탄을 가스화/액화시킨 에너지, 수소에너지, 연료전지로 구분하고, 재생에너지는 고갈되지 않는 에너지 자원을 뜻하며 8개의 분야로 나누어 그에 따른 에너지로 태양열, 지열, 풍력, 수력, 바이오매스 등으로 구분한다[2]. 화석연료 사용 급증으로 인한 기후변화와 미세먼지 등 환경오염 문제가 대두됨에 따라 신재생에너지는 화석연료를 대체하는 에너지원으로 떠오르고 있다.

Table 1은 국내·외 신재생에너지 출력안정에 활용될 ESS 시장전망을 나타낸 것으로 2020년에는 국내·외 시장규모가 2016년 대비 약 10배 성장할 것으로 예측하고 있다. 신재생에너지는 기상상태에 따라 발전량이 불규칙하고, 주로 야간에 생산되는 전력은 다 사용하지 못해 잉여전력이 발생하게 된다. 최근 국내에서는 이러한 잉여전력을 저장하여 재사용까지 하는 시스템의 기술개발에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 야간에 발생하는 잉여전력을 저장하고 전력소모가 많은 주간에 저장된 전력을 다시 사용하는 시스템으로 배터리 에너지 저장 시스템 (Battery Energy Storage System, B-ESS)이 많이 사용되고 있지만 B-ESS는 고가의 설비비용과 넓은 설치면적, 낮은 효율, 수명이 짧다는 단점을 가지고 있다. 이를 보완하고자 수전해 시스템을 이용하여 재생에너지의 잉여전력을 수소로 저장하는 에너지 완충 기능을 갖춘 수소 에너지 저장 시스템(Hydrogen

Energy Storage System, H-ESS) 기술도 실증연구를 통하여 개발되고 있다[3]. 이 시스템은 배터리와 수전해를 결합한 기술로 시스템의 수명을 증가시킬 수 있고, ESS를 통해 신재생에너지의 장점을 갖는다. 유럽을 중심으로 미국, 호주 등 국외에서도 에너지 지속성을 향상시킬 수 있는 재생에너지 연계 수전해 하이브리드 시스템에 대한 다양한 실증이 진행 중에 있다. 국내의 경우, 친환경에너지자립섬 조성사업에 재생에너지 연계 수전해 하이브리드 시스템을 적용시킨 연구가 진행 중에 있다[4].

최근 재생에너지-수전해-연료전지 연계 하이브리드 시스템이 각광받고 있는데, 수소는 전기에너지로 전환이 쉽고, 저장 및 수송 매체로 활용도가 높은 친환경적인 에너지로 수전해 뿐만 아니라 화석연료나 정유·제철 공장, 바이오매스 원료의 개질 등을 통해 생산이 가능하다[5].

수전해 방식은 순수한 물을 전기분해하여 수소를 제조하는 방식으로 대표적인 수전해 방식으로는 알카라인 수전해법 (Alkaline Water Electrolysis, AWE), 고분자 전해질 수전해법 (Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolysis, PEMWE), 고체산화물 수전해법 (Solid Oxide Water Electrolysis, SOWE)이 있다[6-15]. 알카라인 수전해법은 알카라인 전해질을 사용하여 수전해를 하는 방법으로 100℃ 이하의 운전조건을 갖는다. 고분자 전해질 수전해법의 경우, 고체 고분자 전해질 막을 이용하여 100℃ 이하에서 운전한다. 고체산화물 수전해법의 경우, 산소이온 또는 수소이온의 전도성을 갖는 산화물 막을 이용하는 방법으로 700~900℃의 높은 온도 조건에서 운전한다. 본 연구에서는 여러 수전해법 중 낮은 온도에서 운전하며 기술의 성숙도 및 경제성 측면에서 가장 안정적인 기술로 평가되는 알카라인 수전해 시스템을 이용하여 풍력에너지 잉여전력을 이용한 수전해-연료전지-하이브리드 시스템을 실증하고자 한다.

본 연구에서는 재생에너지 연계 수전해-하이브리드 시스템에서 수전해 시스템을 중심으로 안전성능 평가기술을 개발하고 개발된 평가기술을 기반으로

**Table 1.** ESS market forecast for renewable energy[4]

	2016'	2017'	2018'
Domestic	160 MW	560 MW	1,350 MW
Outside	554 MW	1,926 MW	5,979 MW

5 Nm<sup>3</sup>/hr급 알카라인 수전해 시스템의 안전성능을 평가하였다.

## II. 수전해 시스템 안전성능 평가기술 개발

### 2.1. 국내·외 수전해 시스템 안전기준 분석

수전해 시스템 안전성능 평가기술 개발을 위하여 Table 2와 같이 해외 국가별 수소 발생기 관련 기준을 비교하였다. 수소 발생기의 안전과 관련된 국제 규격으로는 ISO 16110-1 (Hydrogen Generators Using Fuel Processing Technologies: Part 1-Safety)과 산업 및 상업용 수전해 시스템에 적용 가능한 ISO 22734-1 (Hydrogen Generators Using Water Electrolysis Process Part 1: Industrial and Commercial Applications), 주택용 수전해 시스템에 적용 가능한 ISO 22734-2 (Hydrogen Generators Using Water Electrolysis Process Part 2: Residential), ISO T/R 15916 (Basic Considerations for the Safety of Hydrogen Systems) 등이 있다[16-19]. 중국은 수소 생산과 관련된 GB/T 19774 (Specification of Water Electrolyte System for Producing Hydrogen)[20], 산소-수소 발생기와 관련된 20083232 - T - 469 (Water Electrolyte Oxygen - Hydrogen Generator) 등의 기준이 있다. 또한 미국의 경우, 수소발생기 중 전기 분해에 대한 기준인 UL 2264A (Gaseous Hydrogen Generation Application Electrolyzer Technology), 수소발생기 중 물의 반응 기준인 UL 2264B (Gaseous Hydrogen Generation Application - Water Reaction), 수소발생기 중 연료 공정 기술에 대한 기준 UL 2264C (Gaseous Hydrogen Generation Application-Fuel Processing Technology) 등이 있다. 국내의 경우 수소발생기에 대한 규정은 없고 국제 기준인 ISO T/R 15916와 이를 토대로 작성한 국내 기준인 KS B ISO 15916은 수소 시스템의 안전을 위한 기본적인 고려 사항에 관한 규정 등이 있다. ISO 22734-1의 경우 상업 및 산업 시설에 적합한 수전해 시스템에 관련된 규정으로 평가항목으로는 운전 조건, 기계 장비의 재료 및 부품 조건, 전기 설비, 배선 및 환기 시스템, 제어 시스템, 이온 수송 매체 등에 대한 항목으로 구성되어 있다. 수전해 시스템 성능평가 항목으로는 전기 시험, 압력 시험, 누출 시험, 희석 시험, 환경 시험, 성능 시험 등으로 구성되어있다. ISO 22734-1, ISO 22734-2 기준의 시험 항목들은 Table 3에 나타내었다.

ISO T/R 15916에 의하면 수소시스템의 구성요소는 주요 부분과 보조 부분으로 분류되는데, 주요 구성요소로는 저장 용기, 유량 제어기, 압력 방출

**Table 2.** Overseas standard for safety of hydrogen generator

Nation	Code No.	Code Name
International	ISO 16110-1	Hydrogen Generators Using Fuel Processing Technologies : Part 1-Safety
	ISO 22734-1	Hydrogen Generators Using Water Electrolysis Process Part 1: Industrial and Commercial Applications
	ISO 22734-2	Hydrogen Generators Using Water Electrolysis Process Part 2: Residential
	ISO T/R 15916	Basic Considerations for the Safety of Hydrogen Systems
China	GB/T 19774	Specification of Water Electrolysis System for Producing Hydrogen
	2008232-T-469	Water Electrolyte Oxygen-Hydrogen Generator
USA	UL 2264A	Gaseous Hydrogen Generation Application Electrolyzer Technology
	UL 2264B	Gaseous Hydrogen Generation Application Water Reaction
	UL 2264C	Gaseous Hydrogen Generation

시스템, 배관, 접합과 밀폐 구성품 등이 있으며, 보조 구성 요소로는 촉매 변환기, 냉각기, 열교환기 등이 있다. 저장 용기와 관련해서는 용기의 설계, 기능 및 부속품은 고압가스 용기 또는 초저온 액체 용기의 사용 조건이 반영된 것을 사용해야 하며, 배관과 밀폐와 관련하여 일반적으로 사용되는 재료로는 강철을 사용하며, 수소 누출이 방지되어야 할 부분은 용접 연결이 필요하다. 또한 주기적인 개폐가 요구되는 부분은 침투나 누수로 인한 연소 화합물이 발생할 우려가 있으므로 수소 가스 검지기 또는 화염 감지 시스템이 필요하다. 유량제어와 관련해서는 일반적으로 밸브, 체크밸브, 압력 조절기가 사용되며, 수동 작동 또는 전기 및 공압을 이용한 원격 작동을 하여야 한다. 체크밸브는 역류하는 유동의 방지에 사용되고, 압력 조절기는 시스템 내부 유체의 압력을 조절

하기 위한 목적으로 이용된다. 압력 방출 시스템은 수소를 저장하는 용기와 배관에서 과압을 방지하기 위해 갖추어져야 한다. 수소감지기는 수소가 축적 될 지점을 예측하여 그 지점의 상단과 통풍구의 흡입구에 위치해야 된다고 명시되어 있다.

수전해 시스템과 관련하여 미국, 유럽, 일본 등의 국가에서는 수소 품질 및 안전, 수소 발생기 등에 대한 기준개발을 통해 시스템의 안전관리가 수행되고 있지만, 수전해 시스템의 종류에 따라 표준화 되어 있지 않다. 국내의 경우 수전해 시스템과 관련된

안전기준이 전무하여 수전해 시스템 종류에 따른 국내외 안전기준의 표준화 연구가 필요하다.

### 2.2. 수전해 시스템에서 발생하는 수소순도 기준 분석

수전해 시스템에서 발생하는 수소의 순도와 관련된 국제 기준인 ISO 14687 (Hydrogen Fuel Quality - Product Specification)은 설비, 차량 또는 기타 연료 충전 설비에 적용하기 위해 제조, 공급되는 수소 제품의 동일성을 보장하고자 수소 연료 품질특성을 규정하며 수소 연료 충전설비에 적용되는 기준이다. 이 기준에 따르면 수소의 순도분석 시험은 열전도도 분석 장치를 사용하여 분석하고 수소의 순도는 Table 4에 따라 등급이 나뉜다. Type I의 A등급은 수송용 내연 기관 연료전지, 주거용/상업용 설비에 적용되고, Type I의 B등급은 발전 또는 열 에너지원으로 사용하기 위한 산업용 연료로 사용된다. Type I의 C등급은 비행기나 우주선 지표에 지원하는 시스템에 적용된다. Type II은 비행기나 우주선 내장 추진기 및 지상 차량에 적용되며, Type III은 비행기 및 우주선 내장 추진기에만 적용되어 사용 된다[21].

SAE J2719 (Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicles) 기준은 상업용 PEM 연료전지 차량에 대한 수소연료 품질을 나타내고 있으며, 수소 품질의 규격은 99.97% 이상의 순도를 가져야한다고 명시되어 있다. 수소의 순도는 연료 시스템에서 오염, 막힘 및 침식을 방지하기 위한 중요한 요소이며, 두 기준의 수소순도는 Table 4에 각각 나타내었다[22].

**Table 3.** Test contents of standard ISO 22734-1, ISO 22734-2

Content	Industrial and a Commercial	Residential
Electrical tests	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Continuity of the protective bonding circuit test</li> <li>- Voltage test</li> <li>- Functional tests</li> <li>- Mains supply</li> <li>- Touch current and protective conductor current</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Continuity of the protective bonding circuit test</li> <li>- Strength of the electrical insulation</li> <li>- Functional tests</li> <li>- Mains supply</li> <li>- Touch current and protective conductor current</li> <li>- Capacitor discharge</li> <li>- Cord anchorage pull force and torque tests</li> </ul>
Pressure tests	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Liquid containing parts</li> <li>- Gas containing parts</li> <li>- Cell stacks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Liquid containing parts</li> <li>- Gas and gas/liquid mixture containing parts</li> <li>- Cell stacks</li> </ul>
Leakage test	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Leakage test</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Normal leakage test</li> <li>- Bubble test</li> </ul>
Dilution tests	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Air flow test</li> <li>- Air pressure test</li> <li>- Dilution test</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Air flow test</li> <li>- Air pressure test</li> <li>- Dilution test</li> </ul>
Temperature test	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperature test</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperature test</li> </ul>
Environmental tests	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ingress protection</li> <li>- Water test</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ingress protection</li> <li>- Water test</li> </ul>
Performance tests	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hydrogen and oxygen production rate test</li> <li>- Hydrogen and oxygen quality test</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hydrogen production rate test</li> <li>- Hydrogen quality test</li> </ul>

**Table 4.** Grade by hydrogen purity[21-22]

Characteristics (Assay)[21]	Type I			Type II	Type III
	Grade A	Grade B	Grade C		
Hydrogen Purity (Minimum mole Fraction%)	98.0	99.90	99.995	99.995	99.995
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type I : Gaseous Hydrogen</li> <li>• Type II : Liquid Hydrogen</li> <li>• Type III : Slush Hydrogen</li> </ul>					
Chemical Formula[22]			Limits		
Hydrogen			> 99.97%		

**2.3. 수전해 시스템 안전성능 시험항목(안) 도출**

수전해 시스템 정상동작에서의 안전성능 시험 항목(안)을 도출하기 위해 수전해 시스템의 안전기준 및 발생하는 수소 순도의 기준 분석을 하였다. 효율 측정 시험항목의 경우, 시스템 효율 향상을 위한 가장 중요한 평가항목으로 ISO 14687-2 부록 C.2에 따르면 공정의 효율을 결정하는 중요한 요소는 고순도의 수소가 유입될 때라고 명시되어 있고, ISO 22734-2의 10.1.11.2 수소 순도 시험항목과 ISO 14687의 수소 순도 등급을 바탕으로 순도 시험항목을 도출하였다. 또한, 수소가 생산할 때 발생하는 압력은 ISO 159165의 gas와 액체 수소 사용에 대한 안전성 항목으로 수소가 발생하는 시스템의 압력은 위험성 순위로 규정되어져 있다. 발생하는 압력이 높아지게 되면 수소가 누출되어 위험을 발생시키므로 성능 평가항목으로 수소 발생 압력 시험 항목을 도출하였다. 그 외에 DI Water 수질 측정 시험, 배열회수 열효율 측정 시험항목을 도출하였다.

기준을 토대로 도출된 효율 측정 시험, 수소 발생 압력 시험, 순도 시험 항목의 각 내용은 다음과 같다. 먼저, 효율 측정 시험은 시스템의 효율을 측정하는 항목으로 투입되는 전력, 생성되는 수소 기체의 양을 측정하는 시험이다. 수소 발생 압력 시험은 시스템의 효율 측정하는 평가항목으로 수소 기

체의 발생 압력을 측정하기 위한 시험이며, 순도 시험은 시스템의 효율 측정과 안전성을 유지하기 위한 평가항목으로 생성되는 기체의 순도를 측정하는 시험이다. DI Water 수질 측정 시험은 시스템 구동에 사용되는 DI Water의 수질을 측정하는 시험이고, 배열회수 열효율 측정 시험은 순환되는 냉각수의 열효율을 측정하는 항목이다. Table 5에 수전해 시스템 정상동작 시 안전성능의 시험 항목을 나타내었다.

**III. 실험**

**3.1. 5 Nm<sup>3</sup>/hr급 알카라인 수전해 시스템 시작품 제작**

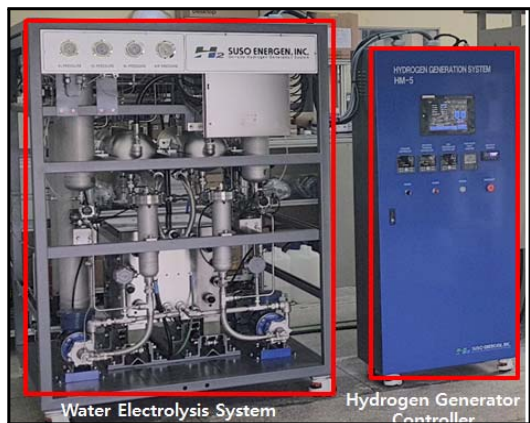
5 Nm<sup>3</sup>/hr 급 알카라인 수전해 시스템 시작품은 (주)수소에너젠에서 제작한 시스템으로 Power Supply의 전압은 380-480VAC를 공급하며, 수소발생기에서 발생하는 수소의 순도는 필터를 거쳐 99.999%의 순도를 갖는 수소를 생산하는 시스템으로 30% KOH 전해질을 사용한다. 시스템의 자세한 사양은 Table 6에 나타내었다. Fig 1은 (주)수소에너젠에서 제작한 시작품을, Fig 2는 수전해 시스템의 P&ID를 나타내었다.

**3.2. 수전해 시스템 안전성능 평가 실험**

본 연구에서는 알카라인 수전해 시스템을 수전해 안전성능 평가 장치로 성능 실증실험을 수행하였으며, 평가 장치 시작품은 전력 검출부, 수소검출부, 온도/압력/유량/순도 검출부, 연결장치 및 지그부, 제어부(DAQ/PC 프로그래밍)의 5개의 장치부로 구성되어 있다.

**Table 5.** Safety performance test category during normal operation

Category	Content	Necessity
Efficiency Measurement Test	Measurement the input power and the amount of produced hydrogen gas	Measure system efficiency
Hydrogen Generated Pressure Test	Measurement the generated pressure of the hydrogen gas	Measure system efficiency
Purity Test	Measurement the purity of the generated gas	Measure system efficiency and the maintenance os safety
DI Water Quality Measurement Test	Measurement of the DI water quality used for system operation	Reliability of the system and maintaining the durability
Thermal Efficiency Measurement Test	Measurement of thermal efficiency of circulating coolant	Economic evaluation of system



**Fig. 1.** Picture of alkaline water electrolysis system.

**Table 6.** Specification for 5 Nm<sup>3</sup>/hr class water electrolysis system

Specifications		
Hydrogen Production	Max. flow rate(Nm <sup>3</sup> /hr)	10
	Delivery pressure	3-10 bar
	Purity after purifier	99.999%
Oxygen Production	Max. flow rate(Nm <sup>3</sup> /hr)	5
	Delivery pressure	2.8-9.8 bar
	Purity before purifier	99.8%
Power Supply	Voltage	380-480 VAC
Electrolyte	Type	30% KOH
Purge Gas	Type	N <sub>2</sub>

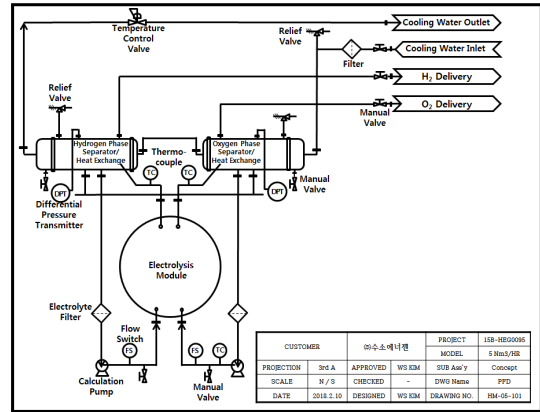
알카라인 수전해 시스템 안전성능 평가를 위한 실험 조건은 30% KOH의 전해질을 사용하였으며, Line Pressure은 5 bar, Line Temperature은 30℃, 전해조의 온도는 60℃로 1시간 동안 측정하였다. 실험은 1차, 2차로 나누어 수행하였다. Table 5에 도출한 시험 항목을 토대로 효율 측정 시험, 수소 발생 압력 시험, 순도 시험 등을 진행하였다. 실험 방법으로는 수전해 시스템을 30분간 안정화 시킨 후, 수전해 시스템의 수소 토출부를 수전해 평가 장치와 연결하여 수소발생량을 측정하였다[23].

수전해 효율 측정 시험 항목의 경우 Mass Flow를 측정하여 발생된 수소용량을 Nm<sup>3</sup>/hr로 산출하였다. 수전해 시스템의 효율 측정은 다음과 같은 방법으로 진행하였다. 전력 검출부에서 Power Supply와 Control Panel에 공급되는 전력량을 1분 단위로 측정하였고, 이때의 유량과 적산유량값을 확인하였다. 유량값에 온도와 압력을 보정하여 수전해 시스템의 성능과 효율을 정밀하게 산출하였다. 또한 시스템을 거쳐서 토출되는 수소 발생량 측정을 통해 수전해 시스템 효율 값을 식 (1)에 따라 산출하였다[24].

$$\text{수전해시스템 효율(\%)} = \frac{\text{수소발생량}}{\text{투입전력량}} \times 100 \quad (1)$$

수전해 스택 효율(kWh/Nm<sup>3</sup>)은 앞서 산출한 수소발생량과 Power Supply에서 전압과 전류를 측정함으로써 소요전력(P=VI)을 수전해 용량(수소발생량)으로 나누어 산출하였다.

마지막으로 수소순도 측정의 경우, 수전해 시스템



**Fig. 2.** P&ID of alkaline water electrolysis system.

이 정격의 전력조건에서 안전 상태에 도달하게 되면 시스템 후단의 수소 토출부에서 발생하는 수소를 샘플링하여 성분을 분석하였다. 분석한 불순물의 농도를 역추적하여 수소의 순도를 확인하였다. H<sub>2</sub>O의 농도는 CRDS (Cavity Ring-Down Spectroscopy, Tiger Optics, PRISMATIC2)를 이용하여 분석하였고, O<sub>2</sub>의 농도는 Trace Oxygen Analyzer (Teledyne Analytical Instruments, Motel 3000TA-EU)를 사용하여 분석하였다.

Sulfurous Sulfur의 농도는 GC (Gas Chromatography, Scion Instrument)를 사용하고, 분석기기로 PFPD (Pulsed Flame Photometric Detector)과 TD (Thermal Desorption, Markes)를 사용하였다.

## IV. 결과 및 고찰

### 4.1. 5 Nm<sup>3</sup>/hr급 알카라인 수전해 효율 시험

알카라인 수전해 시스템의 효율 측정 시험은 1분 단위로 측정하였으며, Cold Start 2회로 시험을 진행하였다. 1시간 동안 발생한 적산 유량을 측정하였고, 2차 시험을 진행하였을 때, 수전해 효율을 정밀하게 측정할 필요가 있어 온압을 보정하였다. 온도와 압력 보정의 경우, 수소 가스가 유량계 전단에서 노즐밸브에 의해 압력이 조절되어 유량계로 흘러 들어가고 유량계 후단에서 대기압으로 방출되기 때문에 압력항은 계산식에서 상쇄되고, 온도항은 샤를의 법칙을 이용하여 보정하였다. 식 (2)는 온압 보정된 적산유량을 계산하는 식으로 적산 유량 값을 대입하여 값을 계산하였다. 그 결과, 1차 수전해 효율은 5.09 Nm<sup>3</sup>/hr로 측정되었고, 2차 수전해 효율은 5.02 Nm<sup>3</sup>/hr로 측정 되었다.

5 Nm<sup>3</sup>/hr급 알카라인 수전해 시스템 안전기준 분석 및 안전성능 평가에 관한 연구

$$\text{온압보정 적산유량} = \text{적산유량} \times \frac{273.15 K}{273.15 K + \text{측정온도}^\circ\text{C}} \quad (2)$$

수전해 시스템에서 스택의 전력 효율은 식 (3)에 대입하여 산출하였다. 효율을 정밀하게 측정하기 위해 알카라인 수전해 효율 실험과 마찬가지로 압력항은 계산식에서 상쇄되고, 온도항은 샤를의 법칙을 이용하여 보정하였다. 온도와 압력을 보정하는 식 (4)에 따라 스택 효율과 위에서 계산한 온압 보정된 적산 유량 값을 대입하여 온압 보정된 수전해 스택 전력 효율을 측정하였다. 1차 시험결과 수소발생량은 5.09 Nm<sup>3</sup>/hr, Power Supply에서 측정된 전압과 전류는 평균 117.41 V, 209.515 A였으나, 전력의 피크가 미세하게나마 발생된 점을 감안하여

단순 평균치가 아닌 분당 소요 전력을 적분하여 산출하였다. 소요 전력은 24188.2 Wh (24.19 kWh)로 측정되었고, 따라서 스택 효율은 24.19 kWh/5.09 Nm<sup>3</sup> = 4.75 kWh/Nm<sup>3</sup>으로 측정되었다. Table 7에 1차 시험 데이터를 나타내었다. 2차 시험 결과는 온압 보정을 하여 산출하였고, 수소발생량이 5.10 Nm<sup>3</sup>/hr, 전압과 전류는 평균 117.2 V, 212.94 A로 소요 전력은 24965.32 Wh (24.97 kWh)로 산출되었다. 따라서 스택 효율은 24.97 kWh/5.10 Nm<sup>3</sup> = 4.97 kWh/Nm<sup>3</sup>의 결과를 확인하였다. 2차 시험 데이터는 Table 8에 나타내었다.

$$\text{스택효율}(kWh/Nm^3) = \frac{(\bar{A} \times \bar{V}/1000)}{\text{적산유량값}} \quad (3)$$

**Table 7.** Data of efficiency assessment of hydrogen quality and water electrolysis stack (1st test)

Efficiency Assessment of Hydrogen Quality and Water Electrolysis Stack					
Measurement Time	Voltage (V)	Electric Current (A)	Flow Rate (LPM)	Electric Power (W)	Stack Efficiency (kWh/Nm <sup>3</sup> )
15:00	117.3	210.3	85	24668.19	4.8406
15:05	117.2	209.6	85	24565.12	4.8158
15:10	117.1	209.2	85	24497.32	4.7956
15:15	117.0	208.2	85	24359.40	4.8314
15:21	117.7	209.8	84	24693.46	4.8456
15:25	117.1	208.5	85	24415.35	4.7910
15:30	117.1	208.6	85	24427.06	4.7933
15:35	117.3	209.2	85	24539.16	4.8153
15:40	117.8	210.7	85	24820.46	4.8705
15:45	117.6	208.9	85	24566.64	4.8207
15:50	117.6	209.7	85	24660.72	4.8392
15:55	117.7	210.8	85	24811.16	4.8687
16:00	117.5	208.6	85	24510.50	4.8097
average	117.41	209.515	-	24188.238	4.8152

**Table 8.** Data of efficiency assessment of hydrogen quality and water electrolysis stack (2nd test)

Efficiency Assessment of Hydrogen Quality and Water Electrolysis Stack					
Measurement Time	Voltage (V)	Electric Current (A)	Flow Rate (LPM)	Electric Power (W)	Stack Efficiency (kWh/Nm <sup>3</sup> )
14:41	116.60	210.90	85	-	-
14:45	116.90	215.50	85	25191.95	5.0138
14:50	116.90	214.50	85	25075.05	4.9906
14:55	117.10	214.20	85	25082.82	4.9921
15:00	117.20	212.30	84	24881.56	4.9521
15:05	117.60	217.00	85	25519.20	5.0790
15:10	117.60	216.00	85	25401.60	5.0556
15:15	117.60	217.00	85	25519.20	5.0790
15:20	117.30	212.60	85	24937.98	4.9633
15:25	117.10	207.70	85	24321.67	4.8406
15:30	117.80	217.20	85	25586.16	5.0923
15:35	117.00	210.00	85	24570.00	4.8901
15:40	116.80	203.70	85	23792.16	4.7352
average	117.41	209.515	-	24188.238	4.8152

**Table 11.** List of electrolyser suppliers in outside[25]

Company	Country	Tech.	Capacity (Nm <sup>3</sup> /hr)	H <sub>2</sub> Output Pressure (barg)	H <sub>2</sub> Purity	Electricity Consumption (kWh/kg)
ELT Electrolyse Technik	Germany	Alkaline	330	Atmospheric	99.85	51
Erredue s.r.l	Italy	Alkaline	170	30	99.5	59.5
H2 Nitidor	Italy	Alkaline	200	30	99.9	52.3
Idoenergy	Italy	Alkaline	80	5	99.5	52.4
IHT Industrie Haute Technologie	Switzerland	Alkaline	760	31	N/A	51.2
NEL Hydrogen	Norway	Alkaline	485	Atmospheric	> 99.8	50
McpHy	Germany	Alkaline	60	10	> 99.3	57.8
Teledyne Energy Systems	Germany	Alkaline	56	10	99.9998	N/A
Wasserelektrolyse Hydrotechnik	Germany	Alkaline	225	Atmospheric	99.9	58.7

$$\text{온압보정 스택효율} = \frac{(\bar{A} \times \bar{V})/1000}{\text{온압보정 적산유량}} \quad (4)$$

**4.2. 발생한 수소순도 측정 시험**

수소순도를 분석하는 방법은 일정시간동안 수소 용기에 충전과 방출을 10회 반복한 후, 7 bar까지 수소가스를 주입하고 다시 3회 반복하여 수소가스를 방출하였다. 반복적인 주입과 방출 후, 7 bar의 압력으로 생성된 수소를 채취한다. 채취한 수소의 순도는 불순물의 농도를 측정하여 역추적 한 값으로 순도를 확인하였다. 그 결과 수소의 순도는 99.993%로 높은 순도의 수소를 확인할 수 있었고, 수소에 포함된 불순물의 농도는 Table 9에 나타내었다. 일반적인 수전해 시스템에서 발생하는 수소의 불순물로는 수분, 산소, CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> 등이 있다. 발생 원인은 대기에 존재하는 불순물들이 DI Water에 포함되어 시스템을 통해 생산되는 수소 중에 존재하거나 배관부위를 통하여 미량의 불순물이 유입된다. 본 연구에서 분석한 불순물은 수분, 산소, 전유향으로, 그 중 수분은 Dryer에서 건조되지 않아 측정된 것으로 판단되며, 산소는 수전해 스택의 산

**Table 9.** Results of analysis of hydrogen

content	Result (Purity)
H <sub>2</sub>	99.993 (%mol/mol)
H <sub>2</sub> O	3.48 (μmol/mol)
O <sub>2</sub>	1.00 (μmol/mol)
Total Sulfur Compounds	0.0002 (μmol/mol)

**Table 10.** Efficiency measurement results

Content	Goal	Performance	
		1st	2nd
Water Electrolysis Capacity (Nm <sup>3</sup> /hr)	5	5.09	5.02
Water Electrolysis Stack Power Capacity (kWh/Nm <sup>3</sup> )	5.0	4.75	4.97
Hydrogen Quality			99.993%



소 극에서 Crossover가 발생하여 수소 중에 산소가 포함된 것으로 판단된다. 또한 전유황은 DI Water로부터 유입되는 것으로 판단된다. 수소에 포함되는 불순물의 농도 국내기준은 “고압가스의 품질기준과 품질검사방법 등에 관한 고시” 및 국제기준 ISO 14687-2 (Hydrogen Fuel - Product Specification - Part 2 : Proton Exchange Membrane(PEM) Fuel Cell Applications for Road Vehicles)에 따르면 수소의 순도는 99.97% 이상, 수분은 5  $\mu\text{mol}/\text{mol}$  이하, 산소 농도는 5  $\mu\text{mol}/\text{mol}$  이하로 명시되어 있다. 또한 전유황의 경우 0.004  $\mu\text{mol}/\text{mol}$  이하, 일산화탄소는 0.2  $\mu\text{mol}/\text{mol}$  이하, 이산화탄소의 경우 2  $\mu\text{mol}/\text{mol}$  로, 질소는 100  $\mu\text{mol}/\text{mol}$  이하로 나타나있다[25,26]. Table 9와 같이 본 5 Nm<sup>3</sup>/hr급 알카라인 수전해 시스템에서 발생한 수소 순도는 99.993%로 기준에 명시된 99.97% 이상의 순도를 갖는 것을 확인하였고, 불순물 중 수분의 농도는 3.48  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 로 기준에 따르면 5  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 이하에 적합함을 확인하였다. 산소 농도의 경우 1  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 로 기준에 명시된 5  $\mu\text{mol}/\text{mol}$  이하로 분석되었고, 전유황의 농도는 0.0002  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 로 기준에서 명시된 농도인 0.004  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 보다 낮음을 확인하여 수전해 시스템의 발생 물질은 기준에 모두 적합함을 확인하였다. 수소 중 불순물은 수분과 산소, 전유황 그 외 불순물인 탄화수소, 헬륨, 질소, 아르곤, 이산화탄소, 일산화탄소, 포름알데히드, 암모니아 등 불순물의 농도는 미량으로 거의 분석되지 않았다. 본 연구에서 측정된 농도 값은 고압가스의 “품질기준과 품질검사방법 등에 관한 고시”와 ISO 14687-2 기준에 충족함을 확인할 수 있었고, 수전해 시스템의 성능이 좋은 것으로 판단된다. 측정된 알카라인 수전해 효율과 스택 효율, 발생된 수소의 순도 값은 Table 10에 나타내었다.

수전해 시스템에서 발생하는 수소는 순도가 가장 중요하여 국외에서는 다양한 용량의 수전해 시스템을 생산하여 고순도의 수소를 생산하고 있다. 이탈리아의 H2 Nitidor社에서는 200 Nm<sup>3</sup>/hr 용량의 알카라인 수전해 시스템의 수소의 순도는 99.9%를 나타낸다. 또한 Idoenergy社는 80 Nm<sup>3</sup>/hr 급의 알카라인 수전해 시스템을 보유하고, 수소는 99.5%의 순도를 갖는다. 독일의 ELT Electrolyse Technik社에서는 300 Nm<sup>3</sup>/hr 용량의 알카라인 수전해 시스템을 보유하고 있고, 발생하는 수소의 순도는 99.85%를 나타내고 있다. Teledyne Energy Systems社의 경우 56 Nm<sup>3</sup>/hr 용량의 알카라인 수전해 시스템을 보유하고 있으며, 수소의 순도는 99.9998%로 고순도의 수소를 생산한다[27]. 각 나라마다 생

산되고 있는 수소 효율과 순도는 Table 11에 나타내었다. 독일, 이탈리아에서 수전해 시스템을 통해 생산하는 수소의 순도는 99.85~99.9% 정도로 국제 기준 ISO 14687, SAE J2719에 명시된 순도를 만족한다. 본 연구의 수행을 통해 생산된 수소의 경우, 해외 기준에 명시된 수소 순도와 비교하였을 때 매우 높은 수소의 순도를 나타내었다. 이를 통해 해외 수소시장에 대한 경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 판단된다.

## V. 결론

본 연구에서는 수전해 시스템에서의 안전성능 기준 분석을 통하여 평가항목(안)을 도출하였고, 실증 실험을 통해 수전해 시스템의 효율과 발생된 수소의 순도를 측정하였다.

1) 미국, 중국을 비롯한 국외의 수전해 시스템 안전기준을 분석하였고, 수소 압력, 수소의 누출, 시스템 안정성 시험, 환기 시스템, 환경 등의 내용이 공통적으로 포함되어 있음을 확인하였다.

2) 분석한 기준들을 토대로 수전해 시스템의 안전성능 시험항목(안)을 도출하였다. 도출한 항목으로는 효율 측정 시험, 수소 발생 압력 시험, 순도 시험, DI Water 수질 측정 시험, 배열회수 열효율 측정 시험 항목으로 도출하였고, 그 중 효율 측정 시험, 수소 발생 압력 시험, 순도 시험을 수행하였다.

3) 수전해 시스템의 안전성능 시험항목(안)을 따라 1차, 2차로 시험을 진행하였고, 1차 시험 결과로 수전해 시스템의 효율은 5.09 Nm<sup>3</sup>/hr로 측정되었고, 스택의 전력 효율은 4.75 kWh/Nm<sup>3</sup>로 나타내었다. 2차 시험 결과, 수전해 시스템의 효율은 온압을 보정하여 5.02 Nm<sup>3</sup>/hr로 측정되었고, 스택의 전력 효율은 4.97 kWh/Nm<sup>3</sup>로 나타내었다. 이때 발생한 수소의 순도는 99.993%로 고순도의 수소가 발생됨을 확인 하였다.

4) 5 Nm<sup>3</sup>/hr에서 발생된 수소의 순도는 99.993%로 국내기준 “고압가스의 품질기준과 품질검사 방법 등에 관한 고시”와 국제기준 ISO 14687-2에 명시된 수소 순도 기준인 99.97%보다 높은 순도로 고순도의 수소를 생산하였음을 확인할 수 있었다. 또한 수소 외의 불순물의 대한 농도는 명시된 기준보다 낮은 농도로 분석되어 수전해 시스템의 성능이 좋을 것이라 판단된다.

시스템에서 안전성능을 측정 시 고려사항으로는 용량에 따른 적정 압력과 온도, 시스템의 주기적인

점점, 수전해 시스템에서 발생하는 수소 순도가 있다. 수소 순도의 경우, 시스템의 안전성 및 성능에 영향을 끼칠 수 있으므로 수소에 포함되는 불순물의 농도를 낮춰야 한다. 특히 수소발생부의 산소 농도 및 산소 발생부의 수소 농도는 수전해 시스템 안전성을 평가하는데 가장 중요한 요소라 판단된다. 본 연구 결과를 토대로 수전해 시스템 안전성의 확보 방안을 확인하고, 수전해 관련 기준을 표준화하여 수전해 시스템의 안전성과 성능을 향상시킬 수 있을 것이라 기대한다.

### 감사의 글

이 논문은 2018년도 정부 (산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 20173010140890)

### REFERENCES

- [1] Kim, K. H., "Adoption of Paris Agreement and Korea's Countermeasures", Korea Energy Economics Institute, 211, 22-27, (2016)
- [2] New Energy and Renewable Energy Development, Use and Supply Promotion Law, Ministry of Trade, Industry and Energy, (2014)
- [3] Status of Energy Storage Systems(ESS), Industrial Bank of Korea Technology Issue, 78-105, (2014)
- [4] Lee, S. H., "Recent Global Issues and Implications of Renewable Energy", Industrial Bank of Korea Technology Issue, 72-93, (2016)
- [5] Lee, S. H., "The Role of Hydrogen Energy for Renewable Energy 3020", Industrial Bank of Korea Technology Issue, 749, 55-69, (2018)
- [6] Woo, S. K., You, J. H., and Moon, S. B., "Technology of High-Efficiency Water Electrolysis", News & Information for Chemical Engineers, 27(4), 429-433, (2009)
- [7] Diogo M. F. Santos and Cesar A. C. Sequeira, "Hydrogen Production by Alkaline Water Electrolysis", Quim. Nova, 36(8), 1176-1193, (2013)
- [8] Janusz Kotowicz, Michal Jurczyk, "Analysis of Hydrogen Production in Alkaline Electrolyzers", Journal of Power Technologies, 96(3), 149-156, (2016)
- [9] Manabe. A., Hashimoto. T., Kashiwase. M., "Study of Alkaline Water Electrolysis", ECS Transactions, 41(31), 1-7, (2012)
- [10] Alfredo Ursua, Luis M. Gandia, "Hydrogen Production from Water Electrolysis : Current Status and Future Trends", Proceedings of the IEEE, 100(2), 410-426, (2012)
- [11] Schmidt. O., Gambhir. A., Staffell. I., "Future Cost and Performance of Water Electrolysis : An Expert Elicitation Study", International Journal of Hydrogen Energy, 42, 30470-30492, (2017)
- [12] Frano Barbir, "PEM Electrolysis for Production of Hydrogen from Renewable Energy Sources", Solar Energy, 78, 661-669, (2005)
- [13] Jun Chi, Hongmei Yu, "Water Electrolysis based on Renewable Energy for Hydrogen Production", Chinese Journal of Catalysis, 39, 390-394, (2018)
- [14] Qingshan Li, Yifeng Zheng, Wanbing Guan, "Achieving High-Efficiency Hydrogen Production Using Planar Solid-Oxide Electrolysis Stacks", International Journal of Hydrogen Energy, 39, 10833-10842, (2014)
- [15] Jan Pawel Stempien, Qiang Sun, Siew Hwa Chan, "Solid Oxide Electrolyzer Cell Modeling: A Review", Journal of Power Technologies, 93, (4), 216-246, (2013)
- [16] ISO 16110-1 : Hydrogen Generators Using Fuel Processing Technologies - Part 1 :Safety, International Organization for Standardization, (2007)
- [17] ISO 22734-1 : Hydrogen Generators Using Water Electrolysis Process-Part 1 :Industrial and commercial, International Organization for Standardization, (2008)
- [18] ISO 22734-2 : Hydrogen Generators Using Water Electrolysis Process - Part2 : Residential Applications, International Organization for Standardization, (2011)
- [19] ISO T/R 15916 : Basic Considerations for the Safety of Hydrogen Systems, International Organization for Standardization, (2015)
- [20] GB/T 19774 : Specification of Water Electrolyte System for Producing Hydrogen, Chinese Standard, (2005)
- [21] ISO 14687 : Hydrogen Fuel Quality - Product Specification, International Organization for Standardization, (1999)
- [22] SAE J2719 : Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicle, Society of Automotive Engineers, (2011)

- [23] Park, S. A., Lee, E. K., and Lee, J. W., "A Study on Performance Characteristic and Safety of Alkaline Water Electrolysis System", Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, 28(6), 601-609, (2017)
- [24] Lee, T. H., "Overview and Prospect of the Water Electrolysis Device Technology", Journal of the Electric World, 14-17, (2015)
- [25] "고압가스의 품질기준과 품질검사방법 등에 관한 고시", 산업통상자원부고시, 제2016-12호
- [26] ISO 14687-2 : *Hydrogen Fuel - Product Specification - Part 2: Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell Applications for Road Vehicles*, International Organization for Standardization, (2012)
- [27] Study on Development of Water Electrolysis in the EU-Final Report, E4tech Sàrl with Element Energy Ltd for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, (2014)