

수전해 수소충전소 부품별 유해위험요인 분석

서두현 · †이광원* · 김태훈**

피에스피, *호서대학교 안전소방학부, **호서대학교 수소에너지안전기술공학과
(2019년 11월 28일 접수, 2019년 12월 19일 수정, 2019년 12월 20일 채택)

A Study on the Analysis of Hazardous Risk Factors for Component in Hydrogen Station with Water Electrolysis Device

Doo-Hyoun Seo · †Kwang-Won Rhie* · Tae-Hun Kim**

PSP : Process Safety Partner, Asan-si, Korea

*Division of Safety and fire Protection, Hoseo University, Asan-si, Korea

**Dept. of Hydrogen Energy Safety Technology Engineering, Hoseo University, Asan-si, Korea

(Received September 23, 2019; Revised December 14, 2019; Accepted December 15, 2019)

요 약

제조식 수소충전소에서 생산되는 수소가스는 일반적으로 석탄연료의 개질 및 부생가스 등을 활용하지만 순수 물을 활용한 수전해 기술의 경우 청정한 기술로 각광 받고 있다. 전기에너지를 이용하여 순수한 물로부터 수소를 생산하는 기술 중에는 향후 가격 및 성능 경쟁에서 우수한 PEM(Polymer Electrolyte Membrane electrolysis)을 이용한 개발이 주로 이루어지고 있다.

이에 본 연구에서는 국내 수소충전소 중 개발단계에 있는 PEM 수전해 수소충전소에 대해 잠재된 유해위험요소를 확인하여 안전한 수소생산 및 수소충전소의 활성화를 도모하고자 한다. 유해위험요소를 도출하기 위해서는 수전해 수소충전소의 설비 및 장치의 안전성이 우선 확보되어야 하기에 FMEA(Failure Mode & Effect Analysis)를 수행함으로써 수전해 및 수소충전소의 설비에서의 유해위험요인을 분석하였다.

Abstract - In order to invigoration the hydrogen economy, production of hydrogen needed for hydrogen charging stations and hydrogen fuel cells is needed. Generally, it is reforming used to coal fuel or natural gas. Other technologies include water electrolysis using pure water. Among these water electrolysis technologies, development is mainly carried out using PEM(Polymer Electrolyte Membrane electrolysis). In this study, the company aims to identify potential harmful hazards to PEM electrolysis hydrogen stations in the development stage among hydrogen charging stations. In order to find the hazardous factors in the facilities of the electrolysis and hydrogen charging stations, we were analyzed by Failure Mode & Effect Analysis(FMEA).

Key words : hydrogen station, risk assessment, fmea, pem, electrolysis, hazardous risk factor

1. 서 론

현재 전 세계에서 추진 중인 수소 경제사회를 이루고 활성화하기 위해서는 수소충전소 및 수소 연

료전지에 필요한, 수소 생산에 대한 기술이 요구될 것이다. 특히, 제조식 수소충전소의 경우 석탄연료의 개질 및 부생가스 등을 활용하지만 순수 물을 활용한 수전해 기술이 주목되기도 한다.^{[1],[2]}

전기에너지를 이용하여 순수한 물로부터 수소를 생산하는 기술로 크게 알칼라인 수전해, 고체고분자전해질(PEM: Polymer Electrolyte Membrane) 수

†Corresponding author:kwrhie@hoseo.edu
Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

전해, 그리고 고체산화물을 이용한 고온수증기 전해기술로 구분된다.

알칼라인 수전해 기술은 전해질로써 알칼리 수용액(KOH 등)을 이용하는 방법으로 수소와 산소를 분리하기 위하여 별도의 분리막을 사용하며 100°C 이하의 운전조건을 갖는 것이 특징이다.

고체고분자전해질(PEM) 수전해 기술은 전해질과 분리막인 고체고분자전해질 (PEM)막을 이용하는 기술로 고분자막의 안정성에 따라 200°C 이하의 운전조건을 갖는 것을 특징으로 하고 있다.

또한 고체산화물을 이용한 고온수증기 전해기술은 전해질과 분리막으로써 수소 또는 산소이온 전도성을 갖는 산화물 막을 이용하는 기술로 700 ~ 900°C의 고온 운전조건을 갖는 것이 특징이다.

이러한 수전해 기술 중 알칼라인 전해는 가격이 저렴한 반면, 저전류밀도에서 운전되기 때문에, 향후 가격 및 성능 경쟁에서 PEM보다 불리하게 될 전망으로 주로 PEM을 이용한 개발이 이루어지고 있다.^{[4],[5]}

이에 본 연구에서는 국내 수소충전소 중 개발단계에 있는 PEM 수전해 수소충전소에 대해 잠재된 유해위험요소를 확인하여 안전한 수소생산 및 수소충전소의 활성화를 도모하고자 한다. 유해위험요소를 도출하기 위해서는 수전해 수소충전소의 설비 및 장치의 안전성이 우선 확보되어야 하기에 FMEA(Failure Mode & Effect Analysis)를 수행함으로써 수전해 및 수소충전소의 설비에서의 유해위험요인을 분석하였다.

II. 평가 대상의 이론적 배경

2.1 PEM 수전해장치의 원리와 특징

고분자 전해질 막 수전해법은 Figure 1에 나타난 것과 같이, 수소 이온을 선택적으로 투과하는 이온교환막으로 약 0.1mm 정도의 두께를 갖고 불소계 이온교환막을 사용하고 이를 백금족 촉매 전극, 다공성 집전체, 주 전극으로 덮어 누른 구조로 되어 있다. 양극측의 집전체로 순수한 물이 공급되기 때문에 알칼리 수전해법에서와 같은 재료부식 문제가 없다.

Figure 1와 같이 산화전극(Anode)에서 반응 (1)과 같이 물이 IrO_2 와 같은 귀금속산화물 촉매에 의해 산화되어 산소를 발생시킨다. 이때 생성된 수소이온은 양이온 교환막을 통해 환원전극(Cathode)으로 이동하여 백금촉매에 의해 환원되어 반응식 (2)와 같이 수소가스를 발생시킨다.

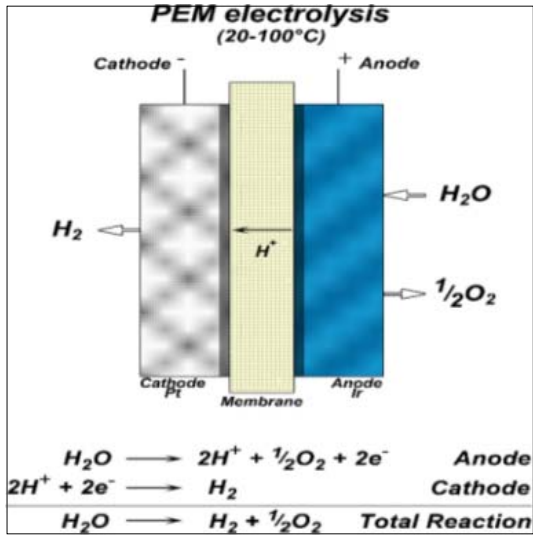
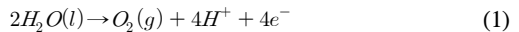


Fig. 1. The principle of Polymer Electrolyte Membrane electrolysis (Wikipedia).

산화전극(Anode) :



환원전극(Cathode)



PEM 수전해 장치는 일반적으로 산화전극에만 물을 공급해주며 공급되는 물의 양은 단위전지 또는 스택에서 최대 전압과 전류밀도를 이용하여 최대 발열량을 계산하고 이를 충분히 냉각시킬 수 있는 물을 공급해준다. 환원전극에는 산화전극에서 수소이온 1개가 넘어올 때 2~3개 정도의 물 분자가 함께 넘어오게 된다. 이때 수소와 산소의 투과도가 매우 낮기 때문에 순도가 높은 수소를 얻을 수 있다. 환원전극으로 넘어온 물은 기액분리를 통해 되며, 다시 산소분리 탱크로 공급하여 준다.^[4]

고분자전해질 수전해는 이와 같이 전류밀도가 높기 때문에 스택이 컴팩트하고 시스템이 비교적 간단하기 때문에 조작이 간단한 장점을 가지고 있다. 또한 전해질염을 사용하지 않기 때문에 수소의 순도를 높이기 쉽고 설계에 따라 고압운전이 가능한 시스템이다. 이러한 장점들로 인해 대용량 수전해에 적합하며, 특히 자동차용 수소충전소에 적합한 기술이다.

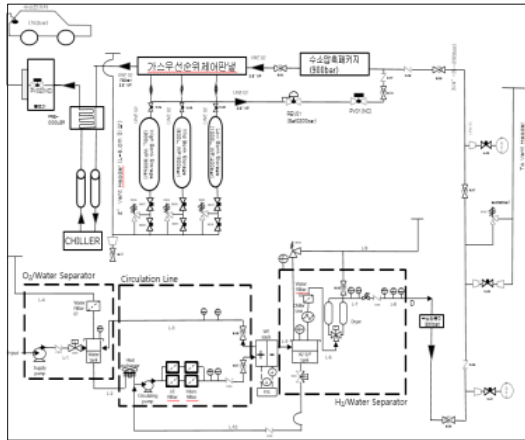


Fig. 2. The P&ID of Hydrogen Station with PEM electrolysis

2.2 PEM 수전해 제조식 수소충전소

Figure 2는 본 연구의 대상이 되는 PEM 수전해 제조식 수소충전소로서, 설계 및 시공 중인 점을 고려해야하며 공개 가능한 범위 내의 P&ID를 기초로 재구성한 P&ID이다. 간략한 공정의 흐름은 다음과 같다.

상온 상압 물이 Input에서 Supply pump에 공급된다. Water tank에 공급된 잔류 공기는 Water Filter를 거쳐서 방출되고 Water Filter에 걸러진 물은 Water tank에 다시 들어가게 된다. Water tank에 있는 물은 Heat exchanger에서 상온으로 온도조절 후 Circulating pump를 통해 이온교환 필터 및 미세 먼지 필터를 거쳐 순수물로 정제된다. 이후 Water Electrolysis stack에서 PEM전기분해를 통해 수소를 생산하고 H₂ Separator tank에 저장된다. H₂ Separator tank에서 기액분리된 수소가스를 Dryer에서 건조시켜 건가스(dry gas)를 생성한다. 이후 고순도의 건가스 수소를 압축기로 보내고 200bar의 압력으로 수소충전소 공정으로 이송시킨다.

이후 수소충전소 공정에서 상온으로 3단 왕복 압축을 통해 900bar로 압축시켜 가스우선순위 제어 패널(priority panel)에서 압력에 따라 고, 중, 저(900bar, 500bar, 400bar)로 storage tank에 저장한다. 충전 공정(Dispenser charging)에서는 수소차의 차종 및 연료전지 등에 따라 순차적 충전이 이루어진다.

III. 평가 대상 분석 및 FMEA 수행

3.1 평가 대상의 부품별 기능 List

평가 대상으로 선정된 충전소는 PEM 수전해 장

Table 1. The list of components and their function

NO	component	function
1	Ball valve	Manual valve to control the opening and closing of fluid Used for start and end of process, maintenance
2	Needle valve	Flow control valve
3	Check valve	Prevent backflow of fluid hydrogen/water
4	Regulator valve	Regulate the flow of fluid Keep a constant flow
5	Solenoid valve	Automatic valve actuated according to signal
6	Water Filter	Remove impurities from water with physically and chemically
7	I/E Filter	Ion Exchange filter Use of insoluble synthetic resin with ions
8	Micro Filter	Remove impurities from water with very fine filtration Ceramic material filter
9	Supply pump	Water supply pump Input of water
10	Circulating pump	Device for water circulation Purification and recovery of water
11	Level indicator & sensor	Check the storage level of the water Alarm by detecting low and high water levels
12	Temperature indicator & sensor	Device to detect the temperature of the process Alarm by detecting high temperature and stop to process
13	Pressure indicator & transducer	Device to detect the pressure of the process Alarm by detecting high pressure and stop to process
14	Gas detector	Detect external leakage of hydrogen gas Installed on top of main part
15	Voltmeter	Measure the voltage of the power supply in the electrolytic device Measure the DC and AC in digital form
16	Ammeter	Measure the current flowing of the circuit elements in the electrolytic device
17	Pre cooler	Cooling water supply Prevents temperature rise in the process
18	High pressure storage tank	Tank for storing high pressure hydrogen Types are divided into 900bar, 500bar, 400bar
19	Water tank	Tank to store feed water Storage capacity of 200L
20	Heat exchanger	Heat supply device to maintain smooth supply and process temperature when supplying water
21	Power supply	Device that supplies the main power of water electrolysis device Supply electricity to 220V three phase
22	Dispenser	Device for charging hydrogen in vehicles and fuel cells Automatically shut off and control when the temperature inside the vehicle rises

치를 포함한 수소충전소로서, 공정 내에 포함되어 있는 설비 및 장치를 기능별로 부품을 구분하여 세분화하였으며, 같은 기능을 하는 부품의 경우 하나의 그룹으로 편성하여 분석을 수행하였다. 평가의

Table 2. The criteria of assessment by RPN

Severity		
Catastrophic	5	<ul style="list-style-type: none"> ✓Loss and inoperative of process function ✓Catastrophic damage to environment and human body
Critical	4	<ul style="list-style-type: none"> ✓Stop of process function ✓Serious damage and disabled to human body
Marginal	3	<ul style="list-style-type: none"> ✓Stop of some processes function ✓Causing injury to the surrounding environment and the human body
usually	2	<ul style="list-style-type: none"> ✓Malfunction of Some Processes function ✓Minor injury to environment and human body
Minor	1	<ul style="list-style-type: none"> ✓Does not effect process ✓Does not effect the environment or the human body
Occurrence		
often	5	✓Once in a period of about 6 months
some-times	4	✓Once in a period of about 1 year
usually	3	✓Once in a period of about 1 to 5 years
rarely	2	✓Once in a period of about 5 to 10 years
very low	1	✓Once in a period of about more than 10 years
Detection		
Undetectable	5	<ul style="list-style-type: none"> ✓Failure mode and errors are never detected ✓It is impossible to detect
Difficult	4	<ul style="list-style-type: none"> ✓Failure mode and errors are rarely detected ✓Detectable by professional certification inspection
Generally	3	<ul style="list-style-type: none"> ✓Failure mode and errors are often detected ✓Detectable through precise diagnosis
Easy	2	<ul style="list-style-type: none"> ✓Failure mode and errors are easy detected ✓Detectable by general inspection
Definite	1	<ul style="list-style-type: none"> ✓Failure mode and errors are definite detected ✓Visually detectable

대상은 총 22종 153개의 부품이 선정되었으며, 대상 주요 부품의 List는 다음 Table 1과 같다.

3.2 평가의 기준(RPN 기준)

FMEA를 수행하여 각 부품별 위험요소를 파악하였으며 각각의 고장형태에 따른 위험요소별로 위험우선순위(RPN : Risk Priority Number)를 산정할 수 있다. 이를 위해 위험요소 시나리오별로 심각도, 발생도, 검출도를 평가함으로써 중요 위험요소 및 중요부품 등을 나열하였다. 이를 통해 부품의 점검 및 교체 시기를 결정하거나 주요 관리 포인트 등을 예측하는 데 활용 할 수 있다.

심각도, 발생도, 검출도를 통해 계산되어지는 위험성의 정도는 다음의 수식으로 산출되어진다.^[9]

$$RPN = Severity \times Occurrence \times Detectability$$

본 연구에서는 심각도, 발생도, 검출도에 대해 5점법을 사용하여 평점을 산정하였으며 다음 Table 2와 같이 평가의 기준을 정하였다.

3.3 FMEA 수행 및 결과

평가는 설계담당자 및 시공업체, 가스안전공사 전문가 등으로 팀을 구성하여 수전해장치를 포함한 수소충전소의 설비를 부품별로 세분화하여 FMEA를 수행하였다. 각각의 세부부품별로 발생가능한 고장형태 및 위험요소를 파악하였으며 고장형태별 발생원인과 시스템에 미칠 수 있는 영향에 대해 검토하였다. 이에 필요한 안전대책 및 조치사항을 강구하였다. FMEA 수행 시트의 예시는 다음 Table 3과 같다.

평가 수행 결과 총 504개의 고장 및 위험요소 시나리오를 도출하였으며, 각 시나리오별 RPN의 분포는 다음 Table 4와 같이 나타났다.

평가 결과의 위험우선순위 결정은 팀을 구성원의 판단 및 선행평가 등을 참조하여 산정하였으며 총 504개의 고장 및 위험 시나리오에서 대부분의 RPN은 1~29점 이하로 나타나고 있어 고장의 위험이 상대적으로 낮은 것으로 볼 수 있다.

하지만 RPN이 40 이상으로 나타난 시나리오의 경우 지속적인 분석과 관리가 필요할 것이다.

이에 RPN이 40 이상으로 도출된 주된 고장형태 및 사고시나리오를 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 주공급 라인의 Check Valve(CV04, CV05, CV06, CV07)
 - 체크밸브의 손상 및 수리 및 교체 후 역방향

Table 3. The sample sheet of FMEA

부품명 BV 06, 07, 08, 09, 10		FMEA		Page : 27 of 92		FMEA 최초작성일 : 2018년 06. 15.				
공정 기능 and 요구 사항	잠재적 고장형태	고장의 잠재적 영향	심각도 S	고장의 잠재적 원인/Mechanism	발생도 O	현 설계 관리	검출도 D	위험 우선 순위	권고조치 사항	
H2 라인에서 작업자가 직접 조작할 수 있는 수동 보수용 밸브 (BV06,07,08,09,10은 공정시 항상 열려있고 보수시에 닫는 밸브)	열림 실패	공정 운행 중지	4	이물질 끼임, 퇴적	2	✓ 덮개 설치 ✓ 육안검사 ✓ 모니터링 실시 ✓ 가스 검지기 설치 ✓ PG01,02 설치 (BV06,07)	2	16	✓ 정기점검 실시 ✓ 예비부품 구비 및 교체 ✓ 설치 작업자 안전교육 실시 ✓ 인중 제품 사용 ✓ 작업 전 점검실시 ✓ 밸브 개폐 표시할 것 ✓ PG설치(BV 08)	
				밸브의 부식	1			8		
				작업자 작업방법, 작업순서 미준수	4			32		
				밸브 손잡이 공회전	2			16		
				제품 불량사용	3			24		
				밸브 개폐 표시오류	2			16		
	막힘	공정 운행 중지	4	이물질 끼임, 퇴적	2		✓ PG01,02 설치 (BV06,07)	3	24	✓ 정기점검 실시 ✓ 예비부품 구비 및 교체 ✓ PG설치(BV 08)
				밸브 노화	1				12	
				제품 불량품사용	3				36	
				이물질 끼임, 퇴적	2				30	
		밸브 연결부 파열 수소 외부 누출	5	이물질 끼임, 퇴적	2			15		
				밸브 노화	1			15		
				제품 불량품사용	3			45		
				제품 불량품사용	3			45		

Table 4. The summary of FMEA results (RPN by failure mode)

PRN	Amount
1~9	156
10~19	223
20~29	68
31~39	52
40	5
Total	504

설치시 수소가 원활히 공급되지 않고 배관 막힘 현상을 야기시켜 수소의 누출 및 폭발의 가능성이 보임(공정의 흐름 파악 및 체크밸브 설치시 주의)

- 수소공급 라인의 ball valve(BV06, BV07, BV08, BV09, BV10)
 - 불 밸브의 특성상 수소가스가 밸브내부에 체류하거나 밸브 금속 접촉부가 이격되어 수소 누출 가능성이 있으며, 특히 불량품 및 미규

격품을 사용할 경우 수소의 외부누출 가능성이 높음 (규격품 사용 및 지속적인 외부누출 감시 필요)

- 수소 고압저장탱크(580bar, 990bar)
 - 탱크의 허용응력 설계 미흡 및 노후화로 인해 탱크가 고압을 견디지 못하고 파손되어 수소가 대량으로 누출될 경우 증기운 폭발을 일으킬 가능성이 있음(지속적인 안전점검 및 강도 확인 필요)

또한 RPN이 낮게 산정되었더라도 심각도가 5점으로 도출되는 시나리오의 경우에는 발생빈도가 낮은 경우로써 주요 위험에서 고려되지 않을 수 있지만 한 번 발생만으로도 피해의 규모가 상당히 클 것으로 예상되기에 별도로 관리를 해야한다. 특히 심각도가 5점인 경우의 시나리오는 밸브 및 연결부 등의 수소 누출 및 화재·폭발의 경우로써 수소충전소에서 수소 누출은 매우 높은 고압의 분출과 수소의 폭발연소범위(4~75 vol%)의 특징에 의해 폭발을 동반한 대규모 폭발이 발생할 가능성이 있다. 물론 철저한 관리와 점검 등의 사고 예방활동 및 안전장치의 강화를 통해서 사고의 발생 빈도를

확연히 낮춘다면 안전한 수소충전소 운영이 가능할 것으로 사료된다.

국제공동연구사업(20178520040490)에 의하여 연구되었음에 감사드립니다.

IV. 결론

본 연구에서는 PEM 수전해 제조식 수소충전소의 고장 및 위험요소를 파악하고자 FMEA를 활용하여 고장 및 위험 시나리오를 도출하였다.

이에 총 22종 153개의 부품으로 세분화하여 각각의 고장 형태 및 영향을 분석하였으며 총 504개의 위험우선순위 시나리오를 도출하였다.

RPN이 높게 도출된 시나리오의 경우 아무래도 수전해 장치에서의 위험보다는 고압(580bar 또는 990bar)로 운전되어야 하는 수소 저장 및 충전부 쪽이 이슈가 되었다. 특히 수소의 누출의 경우 즉시 점화 및 폭발 등의 사건이 우려될 수 있기 때문에 수소 누출을 방지하기 위한 대책 등이 필요하며 작업자의 경우 타 충전소보다도 엄격한 교육 및 훈련이 필요할 것으로 사료된다.

또한, 수전해 장치의 경우 전력을 사용함에 따라 수소 누출 시 점화원으로 작용할 수 있으며 수전해 장치의 분리막 파손으로 인한 폭발이 발생할 가능성이 있으므로 철저한 점검과 교체를 주기적으로 시행해야 할 것으로 판단된다.

특히 RPN이 낮게 산정되었다 하더라도 심각도가 높은 수준인 고장형태의 경우 단 한 번의 발생이 돌이킬 수 없는 사고로 이어질 수 있기 때문에 안전의식 및 준수의 사항이 더욱 더 강조 되어야 할 것이다.

향후 피해영향 분석 및 발생빈도 평가 등을 통한 안전장치 및 사고저감 장치에 대한 고려가 필요할 것이며 개인적/사회적 위험도를 고려한 입지판단 및 운영이 검토되어 안전성이 확보된다면 수소경제사회의 활성화에 이바지 할 것으로 사료된다.

감사의 글

감사의 글: 이 논문은 에너지기술평가원 에너지

REFERENCES

- [1] Future Strategy Team, *Proposals and Trends of Hydrogen Fuel Cell Vehicle (FCEV)*, Korea petroleum Association, (2018)
- [2] Ministry of Environment, *Subsidy guidelines for the supply of hydrogen fuel cell vehicles and charging station installation business*, Ministry of Environment, (2017)
- [3] Ministry of Trade, Industry and Energy, *Exceptional standards on the standards for the fuel, mixed and packed automobile charging stations*, Ministry of Trade, Industry and Energy, (2016)
- [4] HyPPO, *A California Road Map*, CaFCP, p.3~4, (2014)
- [5] Hata Yoichilo, *Tatami station that produces hydrogen from water*, Smart Japan, (2014)
- [6] Korea Gas Safety Corporation, *2016 Gas Accident Yearbook*, (2016)
- [7] Lee, S. H. and Yun, K. B., *A consideration of Hydrogen Station Safety Issues*, The Korean Society Of Automotive Engineers, (2007)
- [8] Lee, T. H., "Technical overview and outlook of water electrolysis device", *Journal of Electrical World Monthly Magazine*, 14-15, (2015)
- [9] Oh, D. S., *A Study of the Status and Safety Assessment of Domestic and Foreign Hydrogen Station*, Hoseo University, (2008)
- [10] Kim, T. H., *Failure Mod And Effect Analysis*, Hoseo university, (2009)
- [11] Kang, B. W. and Kim, T. Y., Lee, T. H., "Analysis of Costs for a Hydrogen Refueling Station in Korea", *Korean Hydrogen and New Energy Society*, 27(3) 256-263, (2016)