



재생에너지 기반 알칼라인 수전해설비의 안전작업절차 방안 연구

서두현 · †김태훈* · 이광원** · 홍성철* · 김현기***

피에스피, *호서대학교 안전공학과 교수, **호서대학교 일반대학원 안전공학과 교수,

***호서대학교 일반대학원 안전공학과 박사과정

(2023년 11월 2일 접수, 2024년 1월 18일 수정, 2024년 1월 19일 채택)

A Study on the Safety Job Procedures for Alkaline Water Electrolysis Facilities Based on Renewable Energy

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

Seong-Chul Hong* · Hyun-Gi Kim**

PSP, Process Safety Partner, 140-9 Wolbong 4-ro, Seobuk-gu, Cheonan 31171, Korea

*Dept. of Safety Engineering, Hoseo University, 12 Hoseodae-gil, Dongnam-gu, Cheonan, Korea

**Dept. of Safety Engineering, Hoseo University Graduate School, 20 Hoseo-ro 79beon-gil,

Baebang-eup, Asan, Korea

(Received November 2, 2023; Revised January 18, 2024; Accepted January 19, 2024)

요약

청정수소 중심의 수소산업 육성 계획에 따라 수전해 설비에 대한 기술개발 및 실증운전이 활발하게 이루어지고 있다. 새로 개발되고 있는 수소 사용시설 및 용품에 대해서는 위험성평가 수행을 통하여 잠재위험요인을 확인하고 안전성을 확보하고 있다. 그러나 일반적으로 대부분 산업사고는 설비의 운전 또는 사용 중에 작업자의 실수 또는 잘못된 작업 관행 등에 의해 발생한다. 특히 작업자가 직접 조작하는 운전작업, 분해 또는 해체를 하는 유지보수작업, 설비점검 시에 사고의 발생 가능성이 크다. 이러한 이유로 실증운전을 위해 개발되는 설비에 대한 주요 작업에 대하여 올바른 작업 방법을 검토하여 작업절차서를 수립하여야 한다.

이에 본 연구에서는 수전해 설비 운영에서의 주요 작업에 대해 작업안전분석(JSA: Job Safety Analysis)를 수행하여 안전한 작업 방법 및 필요한 조치사항을 도출하였다.

Abstract - In accordance with the clean hydrogen-centered hydrogen industry development plan, technology development and demonstration operation of water electrolysis devices are being actively carried out.

Risk assessments are performed on newly developed hydrogen-using facilities and supplies to identify potential hazard factors. However, in general, most industrial accidents are caused by operator's human error or incorrect work practices. Additionally, the possibility of accidents occurring during operation control, maintenance, and inspection increases. For this reason, for equipment developed for demonstration operation, the correct work methods for the main jobs of operator must be reviewed and work procedures must be prepared.

Accordingly, in this study, we conducted a job safety analysis (JSA) on major jobs in the operation of water electrolysis facilities to study safe work methods and necessary measures.

Key words : risk assessment, job safety analysis, alkaline water electrolysis, work procedures, electrolyte

†Corresponding author:emtxx@hoseo.edu

Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

지난 2023년 5월 산업통상자원부는 「수소 안전관리 로드맵 2.0 (2023.5.9.)」를 발표하였으며, 청정수소 생태계 조성을 위한 선제적 안전기준 개발 등 청정수소 중심의 수소산업 육성을 선언하였다. 이에 수전해 및 암모니아 분해 등 다양한 청정수소 생산설비에 대한 개발 및 안전기준을 마련을 목표로 수소 경제사회의 안전관리를 추진 중이다. [1][2]

이처럼 국내에서도 수소산업의 육성 전략을 위한 청정수소 생태계 조성 방안 등에 심혈을 기울이고 있으며, 2021년 11월 ‘청정수소 경제 선도국가(first mover)’로의 도약을 목표로 첫 법정계획인 「제1차 수소경제 이행 기본계획」을 발표하고 대규모 수전해 실증 및 상용화를 통해 그린수소는 2030년 25만 톤, 2050년에는 300만 톤까지 국내에서 생산·공급을 예정하고 있다. 이와 더불어 국내 자본과 기술을 활용하여 해외로부터 청정수소를 직접 생산 및 도입하여 2050년 국내 자급률 60%를 목표로 제시하고 있다. [3]

수전해 설비는 물을 전기 분해함으로써 수소를 생산하는 설비로 청정수소 또는 그린수소로 지칭하고 있으나, 전기분해에 소모되는 전기 생산 및 공급의 형태에 따라 많은 이슈가 발생하고 있다. 이에 태양, 풍력 에너지 등 재생에너지 기반 수전해 장치의 다양한 개발이 이루어지고 있으며, 이에 대한 기술개발 및 실증운동을 포함한 시범운영이 이루어지고 있다. 이에 대해 수전해 설비에서 발생 가능한 위험요인을 토대로 위험성평가 등 수행이 이루어지고 있고, 설계 및 운영에 관한 위험요인 관리를 통해 수전해 설비 자체의 결함은 어느 정도 안전성을 확보하여 기술개발이 진행되고 있다.

하지만, 실제 사고의 위험은 기계, 장치, 설비 등에서 발생하는 원인보다 이를 운영, 유지, 관리하는 인적 인 부분에서 사고의 원인 발생이 높게 나타나고 있으며, 인적오류에 대한 추가적 분석이 필요하다.

이에 본 연구에서는 선행연구인 HAZOP 분석[4]을 통한 설계 및 운영에 관해 분석한 사례 이외에 설비의 설치, 초기 시운전, 정상가동, 비상상황 등 인적으로 운전 및 관리해야 하는 작업에 대한 위험요인을 파악하여 안전한 실증운전이 가능하도록 안전운전 방법에 관한 연구를 수행하였다.

II. 대상 설비와 작업안전분석(JSA)

2.1. 작업안전분석(JSA) 개요

작업안전분석(JSA: Job Safety Analysis)는 특정한 작업을 주요단계(Steps)로 구분하여 각 단계별로 유해

위험요인(Hazard)과 잠재적인 사고(Accident)를 파악하고 이를 제거, 최소화 또는 예방하기 위한 대책을 개발하기 위해 작업을 연구하는 방법을 말한다. 특히 산업현장의 산업사고 및 재해 발생의 주된 원인이 인적 오류를 차지하고 있으며, 이러한 사고요인의 90% 이상을 도출하는 데 매우 효과적인 위험성평가 방법의 하나로 알려져 있다. 특히 위험한 작업에 대해 가장 안전한 작업 방법을 결정하는 데에 효과적이며, 잠재적 위험요인뿐 아니라 안전하지 못한 작업 관행에 대해서도 식별할 수 있다. [5] 이러한 이유로 현재 「산업안전보건법」상 공정안전관리(PSM) 제도에서도 적극적으로 활용하고 있는 방법이다. 특히 「공정안전보고서의 제출·심사·확인 및 이행상태평가 등에 관한 규정」 제27조(공정위험성 평가서의 작성 등) 제6항에서는 ‘사업주는 공정위험성평가 외의 화학설비 등의 설치, 개·보수, 촉매 등의 교체 등 각종 작업에 관한 위험성평가를 수행하기 위하여 고용노동부 고시 「사업장 위험성평가에 관한 지침」에 따라 작업안전분석 기법 등을 활용하여 위험성평가 실시 규정을 별도로 마련하여야 한다.’라고 명시하고 있다. 또한, 안전작업 허가서 발행 및 표준작업절차서(SOP: Standard Operating Procedure) 작성 시 JSA를 활용할 것을 적극적으로 권장하고 있다.

이처럼 공정안전관리제도에서는 화학 설비에 관한 작업 활동 중 발생하는 위험요인을 평가하고 관리해야 함을 매우 강조하고 있다. 하지만 가스 관련 법규상에서는 아직 인적오류에 대한 위험성평가 수행에 대해서 시행이 미진한 실정이다.

이에 본 연구에서는 현재 시공·설치 및 실증운동을 위해 개발 중인 가스 관련 설비의 안전운전작업절차를 확인하고자 개발 중인 수전해 설비에 관해 작업안전분석(JSA)를 적용하고 안전한 실증운동을 위한 안전한 작업 및 운전 방법을 도출하고자 한다.

2.2. 평가 대상 설비

대상 설비는 알칼라인 수전해 설비로 전해액으로 KOH를 순환하여 전해조에서 물을 수소와 산소로 전기분해하는 장치이다. 이때, 사용되는 전기에너지는 태양광 또는 풍력을 이용한 재생에너지를 활용하며 별도의 ESS(Energy Storage System) 없이 바로 장치에 연결되기에 부하변동 발생 시에도 안정적으로 수소를 생산함을 목표로 하고 있다. 또한, 새로 개발된 분리막 및 수소, 산소 감지 센서, 수소누출 감지 테이프 등을 활용한 설비이다.

이에 본 연구에서 개발 중인 장치의 개념도는 다음 Figure 1과 같다.

이 중 JSA의 대상은 알칼라인 수전해 설비의 설치 후

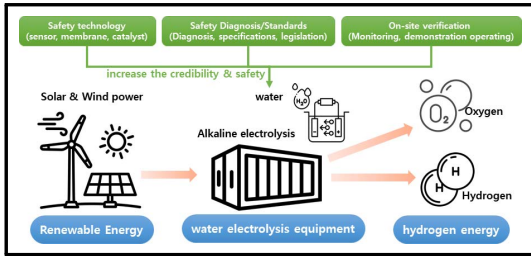


Fig. 1. The conceptual diagram of water electrolysis equipment under development.

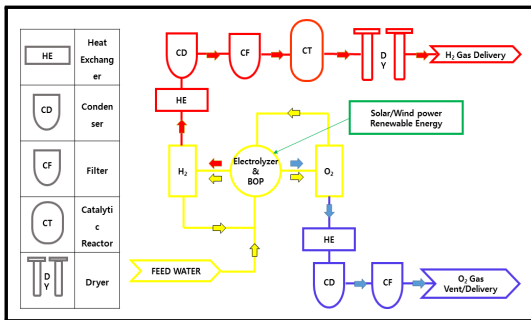


Fig. 2. The process flow diagram of alkaline water electrolysis under development.

점검 및 시운전 작업 등이며, 공정흐름도(PFD)는 다음 Figure 2와 같다. 공정을 간략히 살펴보면 순수 (Pure water)를 공급하고 전해조에서 재생에너지의 전력을 이용하여 전기분해가 이루어지며, 전해액의 순환을 통해 전기분해 효율을 높인다. 생성된 수소는 콘덴서와 필터, 촉매반응, 드라이어를 통해 수분을 제거하여 99.9995%의 고순도 수소로 제조된다. 전기분해를 통해 생성된 산소는 대기 중으로 방출 또는 포집하여 활용할 수 있다. 일반적인 알칼라인 수전해 설비의 공정과 유사하나 여기에는 기술개발의 목표에 따라 새로 개발된 분리막 기술, 센싱 기술, 전해액 순환 기술, 누출감지 기술 등이 포함되어 있다.

자세한 공정의 구성 및 수전해 설비 설계에 대한 위험성평가는 HAZOP을 통하여 이미 수행되었으며[4], 현재에는 개선권고사항을 모두 조치 이행하고 실증 부지에 설치하였다.

현 시점에서 실증부지 현장에 수전해 설비를 설치 및 운영하는 과정 중에 발생할 수 있는 사고 예방이 필요한 상황이며, 이러한 사고의 주된 요인으로 작용하는 작업자의 조작 실수 및 위험인지 실패로 인한 사고 등에 대한 대책 마련이 필수적이다. 이를 위해 현행법

상으로 「고압가스안전관리법」에 따라 운전 매뉴얼 및 안전관리규정 등을 제출하고, 이를 활용하여 안전관리를 수행하도록 하고 있다.

그러나 세부적인 작업절차상에서 발생하는 인적 오류를 확인하고 안전한 작업방법으로 작업 수행함이 현실적으로 필요한 부분이므로 JSA를 활용하여 위험요인을 확인하고 대책을 마련하여 안전운전매뉴얼을 개발하는 것이 필요할 것이다.

이에 본 연구에서는 에너지기술개발사업의 일환으로 새롭게 개발 및 실증 운영을 위해 개발된 재생에너지를 활용한 수전해 설비 공정의 안전한 운전 및 비상상황 대응을 위한 절차에 대해 JSA를 활용하여 안전한 작업방법에 대한 연구를 수행하였다.

2.3. 작업안전성분석(JSA) 수행

JSA는 설비의 설계를 고려하고 현장의 설치 상황, 운전조건 및 운전작업을 직접 수행하는 현장 상황을 고려해야 하므로 JSA 수행에는 대상 설비의 설계자, 운전자, 유지보수자, 위험성평가 전문가를 포함하여 평가팀을 구성하였으며, 현장방문 및 설비 확인, 도면을 검토하여 난상토론 방식으로 진행하였다.

평가에 적용한 대상 작업은 설비의 완성검사 후 초기 세팅, 플러싱 작업, 압력시험, 전해액(KOH) 충전, 최초 시운전, 정상운전 및 재가동, 전해액 누출 등 비상상황 발생 등 7가지 작업에 대해 위험요인을 분석해보았다. 각 주요 운전 및 작업의 목록과 설명은 다음 Table 1과 같다.

평가에서 위험등급의 산정은 다음 Table 2와 Table 3과 같으며, 수전해 설비의 실증운영 기간 내에 발생할 가능성과 설비 운영 중의 피해 정도를 고려하여 선정하였다. 이는 정량적 분석이 아닌 각 작업 방법에 대한 현 위험 정도를 상대적으로 나열한 값이다. 이는 현재 마련된 안전조치에 의한 것으로 안전장치의 정상 작동, 개인 보호구 착용 등이 안전하게 이루어지고 있다는 가정하에 산정하였다.

주요 작업의 선정은 가장 사고가 잦을 것으로 예상되는 최초 운전 단계와 유지보수 후 설비의 재가동, 유해화학물질인 전해액(KOH)의 보충 및 누출 등으로 판단되며 이러한 상황에서 사고 발생을 최소화 할 수 있는 세부적인 작업절차를 검토하고, 안전한 작업 방법 및 대책을 마련하였다. 이에 최초 설치 후 각 유닛 별로 정상작동이 가능한지 확인하기 위한 작업을 초기 세팅 점검 작업이 필요하고, 설비 내 이물질의 배출 및 설비 내부를 가동이 가능한 상태로 만들어야 한다. 이때, 필터의 분리 및 재조립이 반복되는 과정이 있어 안전한 작업절차가 필요하다. 또한, 기밀시험 등을 통해

Table 1. The main job of water electrolysis facility demonstration operation.

No.	Job name	Explanation
#1	Preparing for initial operation of equipment (장비의 초기 상태 확인)	<ul style="list-style-type: none"> After completion of installation, check the operating status of each unit of the water electrolysis facility and confirm that normal operation is possible.
#2	Flushing inside the equipment (내부 플러싱 작업)	<ul style="list-style-type: none"> Cleaning of residual gases (air, moisture, etc) and foreign substances(dust, etc) inside BOP and piping.
#3	Pressure & leak test (initial installation) (압력 기밀시험) (최초 설치 시)	<ul style="list-style-type: none"> Testing the airtightness of the BOP and piping, etc. and checking for leaks.
#4	Electrolyte(KOH) filling (전해액(KOH) 충전)	<ul style="list-style-type: none"> Charging the electrolyte, checking the operation status of the circulation pump, and additionally replenishing the electrolyte. (KOH, the electrolyte, is a hazardous chemical and caution must be taken against leakage and human exposure.)
#5	Trial operation/start-up (최초 시 운전)	<ul style="list-style-type: none"> Inspection of normal operation of equipment, such as confirmation of hydrogen production and purification status through current supply and electrolyzer start-up.
#6	Normal operation/restart (정상운전/재가동)	<ul style="list-style-type: none"> Hydrogen production through normal operation or restart procedure after safety stop.
#7	Emergency stop (in case of electrolyte (KOH) leakage) (비상정지) (전해액(KOH) 누출시)	<ul style="list-style-type: none"> Emergency response such as emergency stop & neutralization in case of electrolyte leak, and inspection after maintenance.

누출 검사 수행 시에도 누출 여부에 따른 조치가 필요하다. 특히 전해액으로 사용되는 KOH의 경우 인체 독성을 지닌 유해화학물질로 최초 설비에 충전하는 절차가 인적으로 행해지기 때문에 매우 주의를 요하는 작업이 될 것이며, KOH의 누출시 올바른 조치 요령 및 대응, 대피가 이루어져야 한다. 이러한 점을 판단하여

Table 2. The criteria for likelihood and severity of scenarios.

likelihood	Explanation		
5 (often)	Occurs more than once during 1 month of work		
4 (sometimes)	Occurs more than once during 3 months of work		
3 (rarely)	Occurs more than once during 6 months of work		
2 (almost)	Occurs more than once per year of work		
1 (doesn't exist)	Occurs less than once per year of work		
Severity	Human	Property loss	Process stop
5 (catastrophic)	2 or more deaths	Over 1 billion won	30 days or more
4 (critical)	1 death, multiple injuries possible	100 million ~ less than 1 billion won	7 to 30 days
3 (normal)	No deaths, less than 1 injured	10 million won ~ less than 100 million won	Less than 7 days
2 (Minor)	No injuries	Less than 10 million won	Less than 1 day
1 (ignore)	Safety design	Improve drivability	No lost days

Table 3. The criteria for risk matrix and risk level criteria.

Risk Matrix					
Severity likelihood	5	4	3	2	1
5	5	5	4	3	2
4	5	4	3	3	2
3	4	3	3	2	1
2	3	3	2	2	1
1	2	2	1	1	1
Risk	Explanation				
5	unacceptable risk	Stop work immediately	Dangerous work not permitted (stop work immediately)		
4	grave danger	Emergency temporary safety measures	Conditional acceptance of hazardous work (carry out risk reduction activities)		
3	significant risk	Safety measures during maintenance period			
2	minor risk	periodic training	Accept risky work (possible to continue working as is)		
1	negligible risk	Maintain current safety measures			

Table 4. The sample sheet of Job safety analysis for water electrolysis facility operation - KOH filling.

No.	STEPS	HAZARD	CONTROLS	Risk			
				L	S	R	
1.	Transportation and preparation of KOH filling hose & pump	Worker injury and environmental pollution due to residual KOH leakage	• Closing both ends of the hose with end caps	3	2	2	
		Injuries to the worker's feet and damage to the pump due to dropping the pump	• Wear safety shoes	2	3	2	
			• Use transport box	2	3	2	
2.	Connecting hose & pump between KOH drum and injection valve	KOH splashes out when opening the KOH drum cap	• Wear protective gloves, safety glasses, protective clothing, and a gas mask.	3	2	2	
		Hose missing from drum	• Provide drum hose fixing stopper	3	2	2	
		:					
		pump misconnection : KOH backflow and external leakage or Injuries caused by environmental pollution and worker contact with KOH	• Pump In/Out direction indication	3	2	2	
		KOH leaks due to hose connection in the wrong order.	• Connection order: Connect the pump inlet hose -> Connect the pump outlet -> Connect the equipment -> Connect the drum hose.	2	2	2	
			• Reflected in work procedures	2	2	2	
		Connect hose to another inlet	• Indication to KOH injection port	3	2	2	
:							
4.	Operation of KOH filling pump and filling of KOH	Unexpected accidents may occur if the operator leaves while the filling pump is in operation.	• Have an operator monitor the equipment next to it until KOH injection is complete.	3	2	2	
		:					
		Over filling of KOH due to pump stop failure	• Use of a reversible pump	4	1	2	
			• Review pump type and installation location	4	1	2	
• Charge at a location where the level gauge can be checked	4		1	2			
:							
10.	KOH Drum Hose & Pump Disconnection	When disconnecting the hose, KOH leaks in the hose.	• Wear protective gloves, safety glasses, protective clothing, and gas mask.	2	3	2	
			• Review of valve installation at the end of the hose equipment	2	3	2	
			• Be furnished with adsorption cloth and prevent the spread of leaks.	2	3	2	
:							

각 작업별로 유해위험요인을 도출하고 이를 해결하기 위한 대책 또는 올바른 작업 방법에 관하여 연구를 수행하였다.

다음의 Table 4는 작업안전분석(JSA) 수행 내용 중 평가 시트의 주된 사항의 샘플이다.

2.4. 평가 수행 결과

대상 공정의 실증운영에 대한 주요 작업에 대해 JSA 수행 결과 127개의 주요 작업단계(Steps)에 대해 검토하였으며, 이에 각 주요 작업에 필요한 보호장구,

작업순서, 작업 방법, 그 밖의 필요한 조치사항들에 대해 검토하였다. 평가 수행 결과의 요약은 다음 Table 5와 Figure 3과 같다.

주요 유해위험요인으로는 전기설비로 인한 감전, 스파크, 운전정지, KOH 누출 등이 나타났으며, 주요 작업별 주된 위험요인은 다음 Table 6과 같다.

JSA 수행을 통해 도출된 주된 안전 작업에 대한 표준 대책으로는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 전해액(KOH) 누출 사고에 대비한 화학보호복, 방독마스크, 보호장갑 착용 등 개인 보호장구 착용할 것.
- (2) 수동밸브 OPEN/CLOSE 상태 체크리스트 작성하는 등 안전작업절차서 수립하고 이를 준수할 것.
- (3) 협소한 작업공간으로 인한 작업자 근골격계 질환이 우려되므로 충분한 작업공간 확보 및 주기적으로 스트레칭을 할 것.
- (4) 전해액(KOH) 충전 호스 내의 잔여 KOH가 누출될 수 있으므로 호스의 양단을 앤드캡 등으로 막아 둘 것.
- (5) 수동밸브 닫힘 실패로 전해액 역류가 가능한 구조이므로 밸브 개폐 상태를 작업자 교차 확인하고 임의조작이 안 되도록 조치를 할 것.
- (6) 비상상황별로 작업자는 초기 조치사항 확인 및 비상정지 절차수립을 하고, 유지보수 방안을 마련할 것.
- (7) 설비의 분해 또는 접촉이 필요한 유지보수 및 점검 중에는 전력을 차단하고, PLC 패널에 “점검 중 조작금지” 표지를 부착할 것

Table 5. The summary of JSA results.

No.	Risk					Total
	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	
#1	1	6	0	0	0	7
#2	6	15	0	0	0	21
#3	5	11	0	0	0	16
#4	9	24	0	0	0	33
#5	1	15	0	0	0	16
#6	2	14	0	0	0	16
#7	2	16	0	0	0	18
Total	26	101	0	0	0	127

위 사항들은 안전관리규정 또는 안전작업절차서에 반영하여 실증운영에 적용하여야 할 것이다.

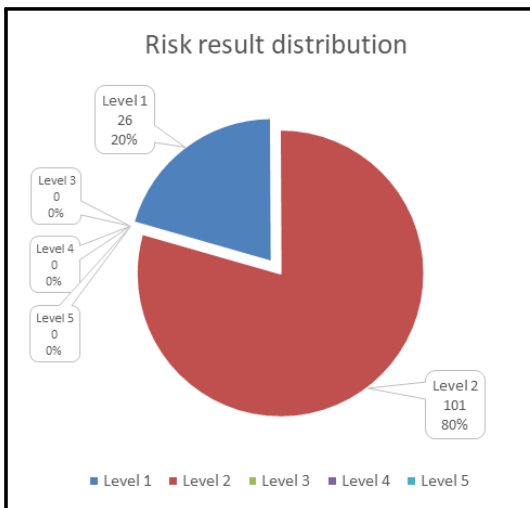


Fig. 3. The distribution of risk result.

III. 결론

본 연구에서는 수전해 설비의 실증운영 시 수행되는 주된 작업에 대해 작업안전분석(JSA)를 수행함으로써 현장에서 발생할 수 있는 인적오류 및 사고를 예방하기 위한 올바른 작업 방법을 검토하였다. 이에 7 가지 주요작업별로 127개의 작업단계(Steps)에 대하여 올바른 작업 방법은 확인해 보았다. 특히, 알칼라인 수전해 설비의 특성에 따른 전해액의 누출 상황과 전기에 의한 피해에 대해 집중적으로 작업자의 행동요령을 연구하였으며, 이를 통해 안전작업절차 및 비상대응 방안 마련에 안전성 확보 및 기초자료로 활용될 수 있다.

일반적으로 산업사고의 원인의 대부분을 차지하는 것이 인적오류라는 점에서 작업절차의 마련 및 안전교육, 주기적 점검이 강조되고 있는 현시점에서 공정

Table 6. The Summary of major hazard factors and controls for each Job list.

No.	Hazard	Controls
#1	Worker electric shock	<ul style="list-style-type: none"> • Check the Power Shutoff Device • Check the checklist
	Nitrogen/hydrogen leak	<ul style="list-style-type: none"> • Check the open/close status of the manual valve • Worker training
	KOH leak	<ul style="list-style-type: none"> • Wear protective clothing and gas mask
#2	Injuries to the worker's feet due to dropping the filter housing	<ul style="list-style-type: none"> • Wear safety shoes • Do not use slippery cotton gloves
	Hand injury caused by tools when tightening clamps	<ul style="list-style-type: none"> • Wear protective gloves
	Contact with waste liquid when processing waste liquid	<ul style="list-style-type: none"> • Wear protective clothing and gas mask
#3	Injuries caused by worker contact with KOH	<ul style="list-style-type: none"> • Wear protective clothing and gas mask • Worker cross-checking to leakage
	Stack damage when supplying pressure over 7 bar	<ul style="list-style-type: none"> • Cross-check pressure gauge and pressure sensor
	Workers' musculoskeletal disorders and collisions due to narrow work space	<ul style="list-style-type: none"> • Wear a hard hat and safety shoes • Maintaining proper posture or stretching regularly
#4	KOH splashes out when opening the KOH drum cap	<ul style="list-style-type: none"> • Wear protective gloves, safety glasses, protective clothing, and gas mask.
	Hand injury when tightening operator clamps	<ul style="list-style-type: none"> • Wear protective gloves
	KOH leaks due to hose connection in the wrong order.	<ul style="list-style-type: none"> • Connection order: Connect the pump inlet hose -> Connect the pump outlet -> Connect the equipment -> Connect the drum hose. • Reflected in work procedures
	Workers are confused about the injection port	<ul style="list-style-type: none"> • Indication to KOH injection port
	Over filling of KOH due to pump stop failure	<ul style="list-style-type: none"> • Use of a reversible pump • Review pump type and installation location • Charge at a location where the level gauge can be checked
	When disconnecting the hose, KOH leaks in the hose.	<ul style="list-style-type: none"> • Wear protective gloves, safety glasses, protective clothing, and a gas mask. • Review of valve installation at the end of the hose equipment • Be furnished with adsorption cloth and prevent the spread of leaks.
#5	Electrical shock to workers when working with live wires	<ul style="list-style-type: none"> • Confirm power cut and sign 'No operation during work' on PLC panel • Wear insulated gloves
	Risk of fire and explosion due to hydrogen/oxygen mixing when producing hydrogen due to poor nitrogen purge.	<ul style="list-style-type: none"> • Design the control logic so that the next step is impossible when the oxygen sensor exceeds 30ppm.
	Accidents due to arbitrary operation by workers	<ul style="list-style-type: none"> • Do not manual operation • Worker training • Set the control logic to require a password to be entered when switching to manual mode.
#6	Failure to respond when an accident occurs due to worker departure	<ul style="list-style-type: none"> • Two-person team shift monitoring
	Injuries caused by worker contact with KOH during sampling operations	<ul style="list-style-type: none"> • Check to KOH level/concentration/leakage • Wear protective gloves, safety glasses, protective clothing, and gas mask.
#7	KOH leak worker contact	<ul style="list-style-type: none"> • Evacuate the site and contact the 119 after an emergency stop • Establishment of emergency response manual • Establishment of equipment emergency stop logic
	Environmental damage due to external leakage of KOH	<ul style="list-style-type: none"> • Wear protective clothing, safety glasses, and a gas mask. • Neutralize and prevent leakage of KOH leaked outside the container • Ensure a safe distance when neutralizing. • Be furnished with adsorption cloth and prevent the spread of leaks.
	KOH leaks into the environment when cleaning hoses	<ul style="list-style-type: none"> • Review of hose cleaning methods or review of how to completely empty the inside of the hose

및 설비의 설계, 운영에 대한 위험성평가 뿐만 아니라 주요 위험 작업에 대한 작업안전분석의 수행이 필요할 것으로 사료된다.

향후, 본 연구의 결과를 바탕으로 설비 운영에 따른 안전관리 매뉴얼 및 안전관리규정을 마련하고자 한다. 이처럼 실증운전 및 상용제품, 설비에 대한 안전성을 확보하기 위한 안전 작업 절차에 관한 안전운전 문화가 확립되기를 바란다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 에너지기술개발사업(재생에너지 기반 암칼라인 수전해 장치 고안전성 확보를 위한 핵심기술 개발 및 실증, 20203030040030)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

[1] Ministry of Trade, Industry and Energy, Energy

Safety Division, "Hydrogen Safety Management Roadmap 2.0", MOITE, (2023.)

[2] Ministry of Trade, Industry and Energy, "Clean hydrogen is produced safely.", news data, (2023)

[3] Kim, J. W., and Lee, T. H., "A Study on Technological and Institutional Improvement of Electrolyser for the Economics of Clean Hydrogen Production", *Korea Energy Economics Institute*, 2-3, (2022.02.)

[4] Kim, H. K., Seo, D. Y., Kim, T. H. Rhie, K. W., Lee, D. M., & Shin, D. B., "A Study on Hazard of Renewable Energy based Alkaline Water Electrolysis Equipment". *Journal of Hydrogen and New Energy*, 33(1), 55-60, (2022)

[5] Yoon, I. k., and Oh, S. K., Choi, S. M., Son, H. S., Seo, J. M., "Development of hazard inventory system for effective job safety analysis", *The Korean Institute of Gas Academic conference papers*, 73-76, (2010)