

알칼라인 수전해 설비에 내재된 위험요소가 사고에 미치는 영향

김재경 · 정해관 · 이지원 · 김태현 · 김동연 · 유철희[†]

한국가스안전공사 에너지안전실중연구센터

Impact of Risk Factors Inherent in Alkaline Water Electrolysis on Accidents

JAEGYEONG KIM, HAEGWAN JEONG, JI-WON LEE, TAEHEON KIM, DONGYEON KIM, CHEOL-HEE YU[†]

Energy Safety Empirical Research Center, Korea Gas Safety Corporation, 1467-51 Songhakjucheon-ro, Jucheon-myeon, Yeongwol 26203, Korea

[†]Corresponding author :
gusari@kgs.or.kr

Received 4 October, 2024
Revised 15 October, 2024
Accepted 16 October, 2024

Abstract >> To achieve carbon neutrality, many countries and companies around the world have adopted hydrogen energy as a key energy source for the future. Major countries such as Europe, China, the United States, and Japan are already conducting large-scale empirical research and commercialization to secure hydrogen production technology, a core technology of the hydrogen industry. Our government is pursuing large-scale R&D projects with related companies to secure water electrolysis technology, a core technology for the hydrogen industry. At present, for the development of domestic water electrolysis technology, it is important to increase the size of production facilities and ensure safety. In this study, we seek to discover the risk factors inherent in alkaline water electrolysis equipment and analyze the extent of damage that will occur in the event of an accident due to these risk factors. Therefore, we would like to raise awareness of the importance of ensuring the safety of water electrolysis equipment.

Key words : Alkaline electrolysis(알칼라인 수전해), Risk factor(위험요소), Explosion damage range(폭발 피해 범위), Fault tree analysis(결함수 분석법), Risk assessment program(위험성 평가 프로그램)

1. 서론

탄소중립을 달성하기 위해 전 세계 많은 국가와 기업들은 수소에너지를 미래 핵심에너지로 고려하고 있다. 유럽, 중국, 미국, 일본 등 주요 국가들은 이미 수소산업의 핵심 기술인 수전해 기술을 확보하기 위

해 대규모 실증 연구 및 상용화를 진행하고 있다. 중국은 그린수소를 대량으로 생산하기 위한 기지를 구축하고 있는데 신재생에너지 발전 설비 용량을 확대하고 발전된 전력을 수소에너지로 변환하기 위한 신재생에너지-수전해 설비의 연계에 관한 연구를 급속도로 진행하고 있다. 우리나라 또한 국내 수소 생산

량을 늘리기 위해 여러 가지 방안들을 모색하고 있다. 제주특별자치도 행원리 그린수소 생산 단지에서는 2 MW급 알칼라인 수전해 시스템이 가동 중에 있으며 충청남도 태안군에서는 50 kW급 알칼라인 수전해 설비의 실증을 마쳤다. 또한 우리 정부는 수소 산업의 핵심 기반 기술인 수전해 기술을 확보하기 위하여 관련 기업들과 대규모 R&D 사업을 추진하고 있다. 현재 시점에서 국내 수전해 기술의 발전을 위해서는 생산 설비의 대면적화 및 안전성 확보가 중요하다.

따라서 본 연구에서는 알칼라인 수전해 설비에 내재된 위험요소를 발굴하고 해당 위험요소들로 인한 사고 발생 시 초래될 피해 범위에 대해 분석하고자 한다. 그리고 이로 인하여 수전해 설비의 안전성 확보의 중요성을 알리고자 한다.

2. 알칼라인 수전해 설비 개요

2.1 알칼라인 수전해 설비 구성요소

알칼라인 수전해 설비(alkaline water electrolysis)는 크게 스택(stack)과 balance of plants (BOP)로 구성되어 있다. 스택은 여러 개의 단위 셀(cell)을 직렬로 연결한 부품으로 물의 전기분해가 이루어지는 수전해 설비의 핵심 부품이다. 셀은 전극(음극, 양극), 분리막과 전해액으로 구성되어 있다. 이때 분리막은

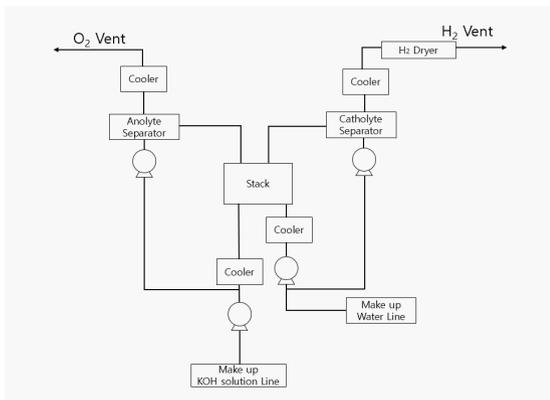


Fig. 1. Design of an alkaline water electrolysis

기공이 있는 다공성 격막(diaphragm)으로 이루어져 있으며 수소를 생산하는 음극(cathode)과 산소를 생산하는 양극(anode) 사이에 위치한다. 분리막은 전해액과 함께 사용되며 전해액은 분리막 기공을 통해 이동하면서 이온을 전달하게 된다.

BOP는 스택을 제외한 모든 장치를 지칭하는데 취급 물질로 나누어 보면 물, 전해액 공급부, 불활성가스 퍼지라인, 수소 취급부, 산소 취급부, 전력 공급부로 구분할 수 있다¹⁾. 부품을 보면 배관, 가스홀더, 밸브, 펌프, 압축기, 기액분리기, 냉각기, 산소 제거 설비, 수분 제거 설비, 안전장치, 전기장치, 외함 등으로 구성되어 있다. 이를 대략적으로 도식화하면 Fig. 1과 같다.

2.2 수전해(water electrolysis) 작동원리

수전해(water electrolysis)는 물을 전기분해하여 수소를 생산하는 것이다. 이때 전기분해(electrolysis)란 외부에서 알맞은 전압으로 전류를 가하여 전해질이 물질의 화학 변화를 일으키는 현상이다. 즉 산화-환원반응을 이용하여 외부에서 가해진 전기에너지를 화학에너지로 바꾸어 물질을 분해하는 것을 전기분해라고 한다²⁾. 수전해 설비의 전기분해반응은 스택 내의 여러 셀에서 진행되는데 전기분해가 진행되고 있는 스택 내부를 도식화하면 Fig. 2와 같다³⁾.

셀에 알맞은 전압으로 전류를 가하면 전해액은 물이 전기분해하는 구조로 변환시킨다. 음극(cathode)에서 물은 분해되어 수소와 수산화이온이 생성된다. 이때 생성된 수소는 음극(cathode) 측 기액분리기로

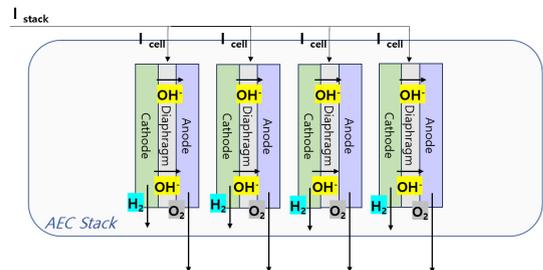
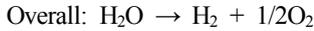
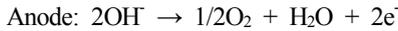
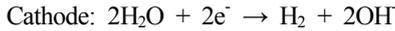


Fig. 2. Design of an Alkaline water electrolysis stack

이동하게 되고 수산화이온은 분리막을 통과하여 양극(anode)에서 산소를 생성한다. 그리고 생성된 산소는 양극(anode) 측 기액분리기로 이동한다. 이 과정을 화학반응식으로 표현하면 다음과 같다.



전기분해반응으로 최종적으로 1 mol의 물은 1 mol의 수소와 1/2 mol의 산소로 분해된다. 25°C, 1기압에서 1 mol의 수소와 1/2 mol의 산소는 1 mol의 물에 비해 깃스자유에너지 ΔG 가 237.3 kJ/mol 높다. 또한 물을 분해하는데 필요한 엔탈피 ΔH 는 285.8 kJ/mol이다⁴⁾. 이를 기전력과 깃스자유에너지와의 관계식 (1)에 적용하면 다음과 같다.

$$V_{cell} = \Delta G / zF \dots (1)$$

(V_{cell} : 셀의 필요전압, z : 전자수,
 F : 패러데이 상수)

이론적으로 물의 전기분해를 위해 필요한 최소 인가 전압은 1.23 V이다. 또한 물이 분해되는데 필요한 엔탈피 ΔH 는 285.8 kJ/mol이므로 외부에서 열공급이 없다면 같은 관계식 (1)에 의해 최소 인가 전압은 1.48 V가 된다. 최소 인가 전압은 이론적인 값으로 실제 수전해 설비에서는 전압을 인가하는 도체에 전기적 부하, 이온의 확산에 반한 전해질의 부하, 전해질의 농도 불평형, 전극의 활성화에너지 등으로 과전압이 필요하게 된다. 따라서 실제 100°C 이하에서 운전하는 알칼라인 수전해 설비의 경우 셀당 인가 전압은 1.8-2.4 V가 된다⁴⁾.

2.3 전압과 가스 순도와와의 관계

패러데이의 법칙(Faraday's law)에 의거하여 전기분해 과정으로 생성되는 수소의 양은 전기량에 비례한다.

Brauns와 Turek⁵⁾은 알칼라인 수전해 설비 내 스택의 압력과 전력에 따른 가스 순도에 대해 연구하였는데 압력 1 bar 기준으로 전류밀도 0.1 A/cm²일 때의 가스 순도보다 전류밀도 0.6 A/cm²일 때의 가스 순도가 높다고 주장하였다(Fig. 3).

즉 전류밀도가 증가함에 따라 양극 내 가스 불순물이 낮아진다. 따라서 알칼라인 수전해 설비 내에 일정하고 알맞은 전압을 가하는 것은 가스 순도를 높이는 데 매우 중요하다.

2.4 수소가스 순도의 중요성

수소는 가연성 가스이다. 따라서 산소, 공기 등의 지연성 가스와 혼합되어 점화를 가하면 연소될 수 있다. 점화에너지란 가연물을 연소하기 위해 가하는 활성화에너지를 말하는데 수소의 최소 점화에너지(minimum ignition energy)는 약 0.011 mJ⁶⁾이다. 이는 메탄의 최소 점화에너지 약 0.28 mJ 및 프로판의 최소 점화에너지 약 0.25 mJ과 비교하였을 때 작아서 작은 화염 및 정전기에도 쉽게 연소될 수 있다.

연소란 빛과 열의 발생을 수반하는 급격한 산화반응을 지칭한다. 연소 시 방출되는 에너지가 일정하지 않고 급속도로 진행되는 반응일 경우 이를 폭발반응이라고 한다.

Schroeder와 Holtappels⁷⁾는 수소-공기 및 수소-산소 혼합물의 폭발 특성에 대해 연구하였다. 해당 연구 자료(Table 1)에 따르면 압력이 0.1 MPa일 경우 수소의 공기 중 폭발 범위는 3.8-95.4 mol%였으며

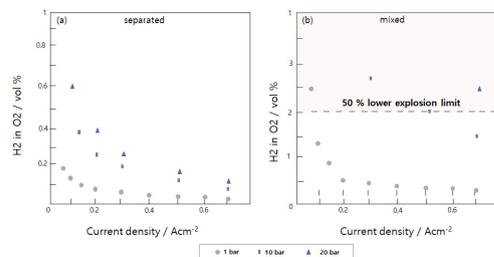


Fig. 3. Anodic gas impurity (H_2 in O_2) in relation to the current density at different pressure levels for separated and mixed electrolyte cycles, at a temperature of 60°C⁵⁾

압력이 1 MPa일 경우 수소의 공기 중 폭발 범위는 4.8-94.6 mol%였다. 프로판의 공기 중 폭발 범위 2.1-9.5 mol%와 부탄의 공기 중 폭발 범위 1.8-8.4 mol%와 비교하였을 때 수소의 폭발 범위는 매우 넓다.

수소는 최소 점화에너지가 작고 폭발 범위가 넓다. 따라서 폭발 사고를 예방하기 위해서는 수소를 취급하는 설비 내의 가스 순도는 매우 중요하다.

3. 알칼라인 수전해 설비 위험요소 도출

3.1 연구 대상

연구 대상은 Fig. 4에서 제시한 수전해 설비의 설계를 반영하였다. 본 연구의 연구 대상인 수전해 설비는 1 MPa 이하의 압력으로 운전되며 음극 부분

Table 1. Influence of the initial pressure on the explosion limits of hydrogen-air mixtures, measured at room temperature⁶⁾

Initial pressure in MPa	Lower explosion limit in mol%H ₂	Upper explosion limit in mol%H ₂
0.1	3.8	95.4
0.5	4.4	95.0
1.0	4.8	94.6
2.0	5.2	94.6
5.0	5.3	95.0
10.0	5.7	95.3
15.0	5.3	95.5
20.0	5.7	95.5

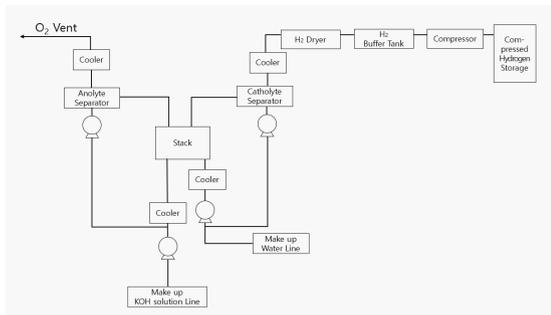


Fig. 4. Design of research subject

기액분리기 후단에 압축기와 고압수소 저장탱크를 연결하였다.

이때 고압수소 저장탱크란 상온에서 1 MPa 이상의 압축 수소가스를 저장하는 설비이다. 수전해 설비와 연결한 고압수소 저장탱크의 사양은 Table 2와 같이 설정하였다. 아울러 고압수소 저장탱크는 실외에 설치된 것으로 가정하였다.

또한 수전해 설비 내에 흐르는 전해액은 20-30% 농도의 KOH 용액을 사용하였으며 수전해 설비의 설계 온도는 60-90℃, 설계 압력은 대기압으로 가정하였다.

3.2 위험요소 도출 방법

본 논문에서는 수전해 설비의 위험요소를 분석하기 위하여 fault tree analysis (FTA) 기법을 활용하였다. FTA 기법이란 특정한 사고나 사고의 결과인 정상 사상(top event)을 결정하고 그에 대해 가능한 원인을 파악하는 top-down 방식의 연역적 분석 방식을 말한다⁸⁾.

수전해 설비에서 발생할 수 있는 사고의 유형은 누출, 화재, 폭발 등이 있다. 본 논문에서는 수전해 설비에서 발생할 수 있는 사고 중 가장 중대한 사고라 판단되는 고압수소 저장탱크 폭발 사고를 정상 사상(top event)으로 선정하였다. FTA 기법은 정상 사상(top event)이 결정되면 논리게이트(AND, OR) 조합에 의해 중간 사상(intermediate event) 및 기본

Table 2. Compressed hydrogen storage tank specifications

Category	Specification
Chemical name	Hydrogen
Design pressure	1.2 MPa
Design temperature	0-50℃
Tank volume	40,000 L (85%)
Mass of empty vessel	147 kg
Tank height	6 m
Tank diameter	2 m
Tank thickness	11 mm

사상(basic event)과 함께 트리 구조로 연결한다. 이때 중간 사상(intermediate event)이란 여러 가지 요인들의 동시 발생으로 이루어진 복합 원인을 말하며 기본 사상(basic event)은 더 이상 분석할 필요가 없는 단일 원인을 말한다.

3.3 위험요소 도출 결과

정상 사상인 고압수소 저장탱크의 폭발이 발생할 수 있는 중간 사상(intermediate event)은 물리적 폭발의 원인인 ‘탱크 내부의 압력 상승’과 화학적 폭발의 원인인 ‘탱크 내 혼합가스의 점화’로 구분하였다.

3.3.1 탱크 내부의 압력 상승 원인

탱크 내부의 압력을 상승시키는 원인은 1) 저장탱크 외부에서의 열 가해짐, 2) 냉각기의 이상반응, 3) 압축기의 이상반응으로 도출하였다.

3.3.2 탱크 내 혼합가스의 점화 원인

고압수소 저장탱크 폭발을 야기하는 ‘저장탱크 내

혼합가스의 점화’는 하위 사상인 ‘저장탱크 내 혼합가스 투입’과 ‘점화원의 발생’이 동시에 발생하였을 때 초래된다. 따라서 중간 사상인 ‘저장탱크 내 혼합가스의 점화’를 예방하기 위해서는 탱크 내에 혼합가스가 투입되지 않도록 예방하거나 점화원이 발생하지 않도록 방지하여야 한다.

그러나 수소의 최소 점화에너지(minimum ignition energy)는 약 0.011 mJ로 발생에너지가 작은 점화원의 존재로도 혼합가스는 쉽게 점화될 수 있다. 따라서 저장탱크 내 혼합가스가 형성되지 않도록 수전해 설비를 설계하고 관리하는 것이 효과적일 것이다.

‘저장탱크 내 혼합가스의 점화’의 하위 사상이자 중간 사상인 ‘저장탱크 내 혼합가스의 투입’은 ‘혼합가스의 형성’과 ‘수소 정제 장치의 성능 저하’가 동시에 발생하였을 때 초래된다.

또한 하위 중간 사상인 ‘혼합가스의 형성’은 스택에서 음극(cathode) 측에 산소가 투과되거나 대기 중의 공기와 혼합되었을 때 발생하는 것으로 도출하였다.

스택 내 음극(cathode) 측에 산소가 투입되는 원인

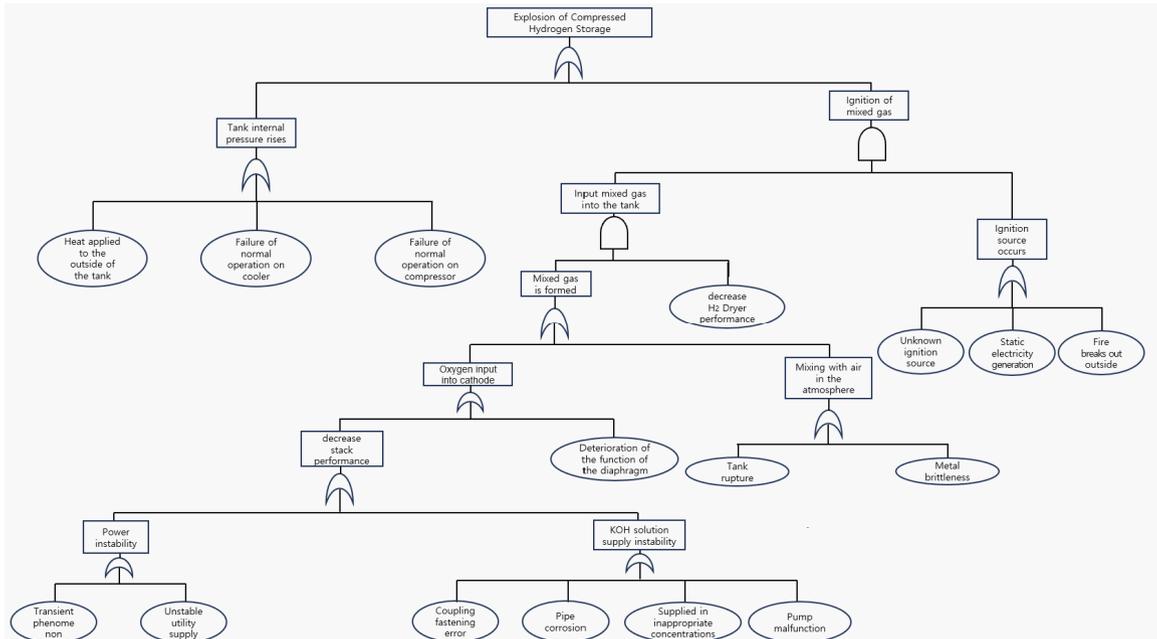


Fig. 5. Fault tree diagram

은 스택의 성능 저하와 분리막의 기능 저하로 구분하였다. 스택 내부에 분리막이 존재하지만 스택 내부품 및 취급 용액의 이상으로 특수한 역할을 할 수 없는 경우와 분리막 자체가 지닌 능력이 저하되는 것을 분류하기 위해 ‘스택의 성능 저하’와 ‘분리막의 기능 저하’로 구분하였다. 스택의 성능을 저하시키는 위험요소는 Fig. 5에서 나열한 사상들과 같다.

4. 폭발 사고에 따른 피해 범위 분석

4.1 피해 범위 분석 방법

앞서 FTA 기법에서 설정한 정상 사상은 ‘고압수소 저장탱크의 폭발’이다. 고압수소 저장탱크에서 발생할 수 있는 폭발의 유형은 ‘압력 상승으로 인한 물리적 폭발’과 ‘혼합가스의 점화로 인한 화학적 폭발’이 있다.

본 연구에서는 ‘압력 상승으로 인한 물리적 폭발’과 ‘혼합가스의 점화로 인한 화학적 폭발’에 대하여 피해 범위를 분석하였다. 이때 본 논문에서 지칭하는 피해 범위란 탱크로부터 거리에 따른 건축물의 파손 정도, 사람의 상해 정도 및 치사량을 뜻한다. 피해 범위를 예측하기 위하여 전문적인 정량적인 위험성 평가 프로그램(quantitative risk assessment tool program)인 EFFECTS (Techever, Goseong, Korea)를 활용하였다. 또한 폭발 과압 및 복사열에 의한 피해 영향을 판단하기 위하여 Clancey⁹⁾가 제시한 damage estimate for common structures based on overpressure와 KOSHA GUIDE P-102-2021 지침¹⁰⁾을 참고하였다.

4.2 조건 설정

본 연구에서는 최악의 사고 시나리오인 폭발 발생 지점으로부터 끝점의 거리가 가장 먼 사고에 대해 피해 범위를 분석하고자 하였다. 한국산업안전보건공단의 KOSHA GUIDE P-107 지침¹⁰⁾에서는 최악의 사고 시나리오를 선정할 때 필요한 사항을 제시하고 있다. 해당 지침에서는 최악의 사고 시나리오의 경우

대기 온도 40℃, 대기압 1 bar, 습도 50%로 설정하도록 지정하고 있다. 따라서 본 연구의 사고 시나리오의 조건도 대기 온도 40℃, 대기압 1 bar, 습도 50%로 설정하였다.

또한 발생 위치는 한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터 내 부지로 설정하였다. 이때 지표면은 평탄한 지형으로 설정 위치인 한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터 내 부지의 주변 건물, 나무 등의 장애물은 입력값에 반영하지 않았다.

탱크의 폭발 발생 시 탱크 파편의 수는 many equal pieces (four pieces)로 가정하였다.

4.3 피해 범위 분석 결과

4.3.1 내부 압력 상승으로 인한 폭발에 따른 피해 범위

EFFECTS 프로그램에서 계산된 폭발 과압 결과에 따르면 내부 압력 상승으로 인하여 고압수소 저장탱크가 폭발할 경우 거리에 따른 폭발 과압은 Table 3과 같다.

계산된 폭압을 Clancey⁹⁾가 제시한 damage estimate for common structures based on overpressure와 KOSHA GUIDE P-102-2021 지침¹⁰⁾의 ‘폭발 과압 영향 판단표’에 적용하여 피해 범위를 분석하였다. 분석 결과 폭압으로 인해 저장탱크로부터 반경 8 m 이내(overpressure, 70 kPa)에 있는 건축물들은 대부분 전파될 수 있으며 반경 52 m 이내(overpressure, 3.5 kPa)

Table 3. Explosion overpressure depending on distance by increased pressure inside the high-pressure hydrogen tank

Distance from point of occurrence (m)	Overpressure	
	(kPa)	(psi)
8	70	10
10	50	7
12	35	5
14	20	3
29	7	1.0
52	3.5	0.5
148	1.0	0.15
464	0.3	0.04

에 있는 건물의 유리창은 부서지며 일부 창틀이 파손될 수 있다. 또한 반경 464 m 이내(overpressure, 0.3 kPa)에 있는 주민들은 큰 소음 발생으로 인해 폭발이 발생하였음을 인지할 수 있는데 반경 29 m 이내(overpressure, 7 kPa)에 있을 경우 폭발로 인해 넘어지는 등 다칠 위험이 위험이 존재한다(Fig. 6).

Fig. 7은 거리에 따른 폭발 과압을 시각적으로 나타낸 그래프인데 x축은 distance, y축은 overpressure를 의미한다. 거리 20 m (overpressure, 12 kPa)부터 발생 지점으로 가까워질수록 급격하게 폭발이 증가한다.

EFFECTS 프로그램을 활용하여 폭발로 인한 치사량과 저장탱크의 파편의 최대로 날아가는 거리에 대해 도출하였다.

Fig. 8에서 작은 원으로 표시한 영역은 폭발로 인한 99%의 사람이 치사할 수 있는 영역이다. 사람이 발생 지점으로부터 반경 14 m 이내에 있는 경우 치사



Fig. 6. Top view of a explosion overpressure caused by increased pressure inside the high-pressure hydrogen tank

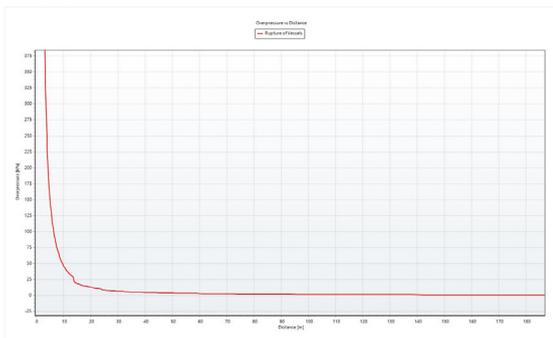


Fig. 7. Graph of explosion overpressure depending on distance

량은 99%였다. 즉 폭발 발생 시 저장탱크로부터 반경 14 m에 있는 근로자와 주민들 100명 중 99명이 폭발로 사망까지 이르는 큰 인명 피해를 입을 수 있다.

또한 Fig. 8에서 큰 원으로 표시한 영역은 저장탱크의 파편이 최대로 날아갈 수 있는 영역을 표시한 것이다. EFFECTS 프로그램 도출 결과에 따르면 공중량 146 kg인 저장탱크가 4조각의 파편으로 비산된다고 가정할 때 저장탱크의 파편은 폭발 발생 지점으로부터 반경 최대 24 m까지 비산할 수 있다.

4.3.2 혼합가스의 점화로 인한 폭발에 따른 피해 범위

혼합가스의 점화로 인한 폭발은 가연성 가스인 수소와 산소, 공기 등의 지연성 가스가 혼합된 상태에서 점화되었을 때 발생하는 급격한 연소반응을 말한다. 수소가 지연성 가스와 혼합되어 연소하는 경우 빛과 143 kJ/g의 연소열이 함께 발생한다.

따라서 혼합가스의 점화로 인한 폭발 시 폭발(blast)로 인한 피해와 화구(fireball)에 의한 피해를 동시에 입게 된다.

4.3.2.1 폭발(explosion overpressure)으로 인한 피해

EFFECTS 프로그램을 통한 폭발의 계산 결과 ‘혼합가스의 점화로 인한 폭발 시 폭발 값’은 ‘내부 압력 상승으로 인한 폭발 시 폭발 값’과 일치하였다 (Table 4).

따라서 혼합가스의 점화로 인한 폭발 발생 시 발



Fig. 8. Lethality range and maximum fragment range caused by explosion overpressure

생할 수 있는 건축물의 손상 정도 및 근로자, 주민들에게 끼칠 수 있는 피해 정도는 4.3.1에서 도출한 피해 범위와 동일할 것으로 예상된다.

4.3.2.2 복사열(radiant heat)로 인한 피해

탱크 내 혼합가스의 점화로 인하여 폭발이 발생할 경우 발생 지점으로부터 반경 5 m 이내에는 약 25 kW/m²의 복사열이 발생한다(Table 5). 이는 KOSHA GUIDE P-102-2021 지침에 표기된 복사열의 영향 표에 따라 복사열에 오랫동안 노출될 경우 목재가 발화될 수 있는 정도(heat radiation, 25 kW/m²)이다.

또한 발생 지점으로부터 반경 19 m 이내에서는 약 9.3 kW/m²의 복사열이 발생하는데(Table 5, Fig. 9) 사람이 해당 복사열에 노출될 경우 8초 후에는 심한 고통을 느끼며 20초 후에는 2도 화상을 입을 수 있다.

Table 4. Explosion overpressure depending on distance by explosion due to ignition of mixed gas

Distance from point of occurrence (m)	Overpressure	
	(kPa)	(psi)
8	70	10
10	50	7
12	35	5
14	20	3
29	7	1.0
52	3.5	0.5
148	1.0	0.15
464	0.3	0.04

Table 5. Heat radiation depending on distance

Distance from point of occurrence (m)	Heat radiation (kW/m ²)
0.5	28.2
5	24.9
15	12.6
19	9.3
32	4.1
52	1.6

그러나 화구(fireball)의 윤곽은 0초부터 1.6초 동안 발생 지점으로부터 반경 20 m까지 확대된 다음 1.6초 이후 소멸된다(Fig. 10). 즉 복사열에 노출되는 시간은 약 1.6초이다. 따라서 반경 5 m 이내에 있는 건물 및 목재는 약 1.6초 동안 25 kW/m² 정도의 복사열에 노출되기 때문에 발화될 가능성은 희박하다. 또한 폭발 발생 지점으로부터 19 m 이내에 있는 근로자 및 주민들은 복사열에 노출되는 시간이 짧기 때문에 복사열(heat radiation, 9.3 kW/m²)로 인한 심한 고통 및 2도 이상의 화상을 입을 확률은 현저히 낮을 것으로 예상된다.

Fig. 10은 시간에 따른 화구의 지름을 시각적으로 나타낸 그래프이며 여기서 x축은 time, y축은 diameter of the fireball이다. Fig. 10에 따르면 화구는 1.6초 이후 소멸된다. 화구가 발생하는 시간은 1.6초이다. 따라서 복사열로 인한 빛과 열은 순간적으로 발생하



Fig. 9. Top view of a heat radiation caused by ignition of mixed gas

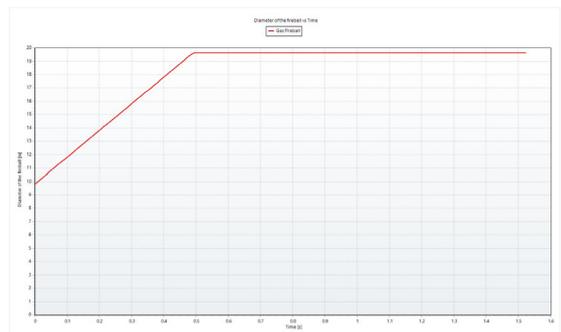


Fig. 10. Graph of diameter of the fireball on time

지만 그로 인한 인적 및 물적 피해를 입을 가능성은 낮을 것으로 예상된다.

5. 결론

본 논문에서는 수전해 설비의 구성요소 및 작동원리에 대해 기술하였다. 또한 수전해 설비와 연결된 고압수소 저장탱크의 폭발 사고를 초래할 수 있는 내재된 위험요인에 대하여 FTA 기법을 활용하여 분석하였고 EFFECTS 프로그램을 활용하여 고압수소 저장탱크 폭발에 따른 피해 범위를 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론이 도출되었다.

1) 고압수소 저장탱크 내 혼합가스의 점화로 인한 폭발을 예방하기 위해서는 동시 발생 조건인 저장탱크 내 혼합가스 투입과 점화원 발생 중 하나의 조건이 발생하지 않도록 방지하여야 한다.

2) ‘저장탱크 내 혼합가스의 투입’은 음극 쪽 냉각기 전단에서의 ‘혼합가스 형성’과 ‘수소 정제 장치의 성능 저하’를 동시에 만족할 때 발생한다.

3) 폭발의 영향으로 발생 지점으로부터 반경 464 m 이내에 있는 근로자와 주민들은 폭발이 발생하였음을 인지할 수 있으며 반경 29 m 이내에 있을 경우 넘어지는 등 다칠 위험이 존재한다. 또한 근로자와 주민들이 반경 14 m 이내에 있을 경우 100명 중 99명이 사망까지 이르는 큰 인명 피해를 입을 수 있다.

4) 탱크 내 혼합가스의 폭발 발생 시 복사열로 인한 물적 및 인적 피해는 적을 것으로 예상된다.

본 연구는 수전해 설비의 안전성 확보의 중요성을 알리기 위하여 알칼라인 수전해 설비에 내재된 위험요인과 폭발 사고로 인한 피해 범위를 도출하였다. 이 자료는 대면적 알칼라인 수전해 설비의 안전성을 확보하는 데 기여할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 2024년 정부(산업통상자원부)의 재원으로

로 한국에너지 기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구임(과제번호: RS-2023-00234654).

References

1. H. K. Kim, D. H. Seo, K. W. Rhie, T. H. Kim, and S. C. Hong, "Research on safety measures for design and operation of alkaline water electrolysis facility", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 28, No. 2, 2024, pp. 17-23, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2024.28.2.17>.
2. E. Kim, B. Kim, J. Seo, and Y. Kim, "General chemistry experiment", BooksHill, Korea, 1999, pp. 131.
3. L. Jin, R. N. Nakashima, H. L. Frandsen, and G. Comodi, "Alkaline electrolysis for green hydrogen production: techno-economic analysis of temperature influence and control", *Proceedings Of ECOS 2023*, 2023, pp. 908-919, doi: <https://doi.org/10.52202/069564-0082>.
4. J. H. Jung, "Safety analysis and evaluation of alkaline water electrolyzers coupled with the renewable energy sources [Master's thesis]", Seoul: Seoul National University of Science & Technology, 2023.
5. J. Brauns and T. Turek, "Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: a review", *Processes*, Vol. 8, No. 2, 2020, pp. 248, doi: <https://doi.org/10.3390/pr8020248>.
6. D. J. Jang, S. Y. Kim, and M. C. Lee, "Property based quantitative risk assessment of hydrogen compared with methane, ethane, propane and butane", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B*, Vol. 46, No. 2, pp. 103-114, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2022.46.2.103>.
7. V. Schroeder and K. Holtappels, "Explosion characteristics of hydrogen-air and hydrogen-oxygen mixtures at elevated pressures", ICHS, 2005. Retrieved from <https://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/120001.pdf>.
8. T. Kim, J. Choi, I. Cho, and J. Lee, "A study on the development of safety standard through the risk assessment for fuel cell system applied to UAV", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 56-65, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.56>.
9. V. J. Clancey, "Diagnostic features of explosion damage", In: 6th International Meeting on Forensic Sciences; 1972 Sep 20-26; Edinburgh, Scotland.
10. Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), "Technical guidelines on accident damage prediction techniques", KOSHA, 2021, pp. 12-14. Retrieved from <https://www.kosha.or.kr/kosha/data/guidanceP.do>.