

발전소 및 수전해 시스템의 수소 폭발 사고 사례 기반 위험성 평가 및 개선 방안 연구

전민재 · 장대진 · 이민철[†]

인천대학교 안전공학과

A Study on the Risk Assessment and Improvement Methods Based on Hydrogen Explosion Accidents of a Power Plant and Water Electrolysis System

MIN JAE JEON, DAE JIN JANG, MIN CHUL LEE[†]

Department of Safety Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea

[†]Corresponding author :
LMC@inu.ac.kr

Received 31 January, 2024
Revised 14 February, 2024
Accepted 19 February, 2024

Abstract >> This study addresses the escalating issue of worldwide hydrogen gas accidents, which has seen a significant increase in occurrences. To comprehensively evaluate the risks associated with hydrogen, a two approach was employed in this study. Firstly, a qualitative risk assessment was conducted using the bow-tie method. Secondly, a quantitative consequence analysis was carried out utilizing the areal locations of hazardous atmospheres (ALOHA) model. The study applied this method to two incidents, the hydrogen explosion accident occurred at the Muskingum River power plant in Ohio, USA, 2007 and the hydrogen storage tank explosion accident occurred at the K Technopark water electrolysis system in Korea, 2019. The results of the risk assessments revealed critical issues such as deterioration of gas pipe, human errors in incident response and the omission of important gas cleaning facility. By analyzing the cause of accidents and assessing risks quantitatively, the effective accident response plans are proposed and the effectiveness is evaluated by comparing the effective distance obtained by ALOHA simulation. Notably, the implementation of these measures led to a significant 54.5% reduction in the risk degree of potential explosions compared to the existing risk levels.

Key words : Hydrogen accident(수소 사고), Bow-tie risk assessment(나비넥타이 위험성 평가), Areal locations of hazardous atmospheres(대기의 위치별 위험성 평가), Risk assessment(위험성 평가)

1. 서론

1.1 연구 배경

정부는 2019년 수소경제 발전을 위해 「수소경제 활성화 로드맵」¹⁾, 「수소 안전관리 종합대책」²⁾을 발표하였다. 이로 인해 최근 수소연료를 이용한 자동차³⁻⁷⁾, 항공기 등의 도입률이 증가함에 따라 수소의 사용량 또한 증가하는 추세이다⁸⁻¹²⁾. 국내 수소 사용량이 증가함과 동시에 수소가스 사고 또한 증가하고 있다. 한국가스공사에서 발표한 수소가스 사고 현황(Fig. 1)을 보면 2016년 이전 연간 평균 1건의 수소가스 사고가 발생한 것과 대조적으로 2016년 이후 3배 가까이 사고가 발생한 것을 확인할 수 있다. 이처럼 수소가스 사고 발생 빈도는 점점 증가하는 추세이며 국내외적으로 수소연료에 대한 안전성 확보와 연구가 필요한 실정이다.

수소는 지구상에서 가장 가벼운 자연계 원소이며 대기 중에 방출 시 확산이 빠른 속도로 진행되어 폭발 분위기를 형성하기 어렵기 때문에 명시된 위험성이 낮다. 그러나 수소의 가연 범위는 약 4-75% 이내로 대기 중에서 쉽게 폭발 분위기를 형성할 수 있기 때문에 연료로 사용되는 다른 원소들에 비해 비교적 위험성이 높다¹³⁾. 이렇듯 수소연료는 양면적인 수소의 특성을 고려하여 일반 가스보다 더욱 조심히 취

급되어야 하며 연료 누출, 폭발 등의 사고를 예방하기 위해 수소연료 이용 설비에 대한 사전 점검이 철저히 이루어져야 한다.

Fig. 2는 한국가스안전공사에서 발표한 2013-2022년 이내 수소가스의 사고 유형을 나타낸다. 공정 중 누출(leakage during process)은 정상적인 공정 중 수소가스가 누출된 사고를 의미하며, 연결부 노화(deterioration of the piping connections)는 플랜지, 연결 배관 등 취약 부분의 부식 또는 손상을 인지하지 못한 채 공정이 진행되었을 때 누출된 경우를 의미한다. 외부 충격(external impact)은 가스 저장탱크 이송 중 외부 충격, 도로 굴착 작업 중 배관 손상 등 외부 충격으로 수소가스가 외부로 누출된 경우이다.

Fig. 2의 그래프를 통해 공정상 누출, 연결부 노화가 전체 수소가스 사고의 약 85%를 차지하는 것을 확인하였다. 그러나 공정 중 누출 사고는 작업 전 안전 점검으로 대비할 수 있으며 연결부 노화는 설비의 정기 점검과 수시 점검으로 대비할 수 있기에 수소가스 사고의 대부분은 안전관리 부족이 큰 원인인 것을 확인할 수 있다. 종래 수소 설비에 대한 안전관리는 직접적인 점검 방식을 사용하였으나, 최근에는 위험성 평가를 통한 수소 설비의 안전관리 등이 활발하게 연구되고 있다.

이전에 수행되었던 연구들을 보면 Lee 등¹⁴⁾, Park

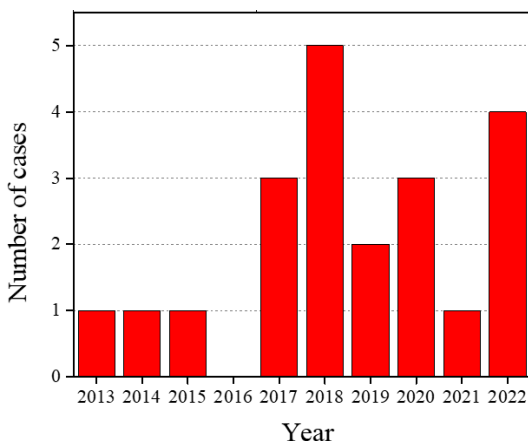


Fig. 1. Current status of hydrogen accidents in Korea

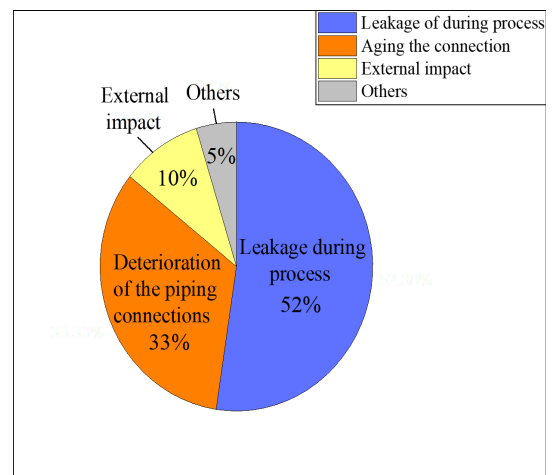


Fig. 2. Statistical data of hydrogen accident by accident type

등¹⁵⁾은 수소충전소를 대상으로 hydrogen risk assessment models (HyRAM; Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA) 위험성 평가 프로그램을 적용하여 수소의 정량적 위험성 평가를 시행하였고, Kang 등¹⁶⁾은 패키지형 수소충전소를 대상으로 process hazard analysis tool (PHASt; DNV-GL, Høvik, Norway)와 safe type indicator (SafeTi; DNV-GL) 프로그램을 이용하여 위험성 평가를 시행하였다. Jeong 등¹⁷⁾, Park과 Lee¹⁸⁾는 정량적 위험성 평가 프로그램 중 하나인 areal locations of hazardous atmospheres (ALPHA) 위험성 평가 프로그램을 적용하여 실시하였고, Tae 등¹⁹⁾은 bow-tie 정성적 위험성 평가 기법을 통해 제조 공정에서 발생 가능한 사고에 대한 위험성 평가를 진행하였다. 이외의 방법으로는 event tree analysis (ETA)²⁰⁾, fault tree analysis (FTA)²¹⁾, hazard and operability study (HAZOP)²²⁾를 사용하여 수소의 정량적인 위험성을 확인할 수 있다. 그러나 종래 연구되었던 수소의 위험성 평가는 평가 대상이 수소충전소에 집약되어 있거나 수소 자체의 물성치에 대한 분석이 주로 이루어졌으며, 실제 사고 사례에 대하여 위험성을 분석한 연구는 아직 부족하다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 실제 수소가스 사고에 대한 위험성 평가를 시행하였으며, 대안의 시나리오를 가정하여 위험도를 분석하였다. 연구 결과를 통해 수소가스를 사용하는 발전소, 연구시설 및 사업체에서 사고를 예방 및 완화할 수 있는 개선 방안을 도출, 제시하고자 한다.

1.2 사고 대상지 선정

본 연구는 수소충전소 사고에 국한하는 것이 아닌 머스킹엄 발전소(Muskingum river power plant) 수소 폭발 사고(이하 머스킹엄 발전소 수소 폭발 사고)와 K 테크노파크 수전해 시스템 수소 저장탱크 폭발 사고(이하 K 테크노파크 수소 폭발 사고)의 두 가지 사고 사례의 위험성을 평가하여 수소 설비 사고 위험성 평가의 적정성을 높이고자 한다. 머스킹엄 발전소 수소 폭발 사고의 경우 국내 발전소의 수소 폭발 사

례가 존재하지 않아 해외 수소가스 사고 사례를 선정하였다. K 테크노파크 수소 폭발 사고의 경우 국내 수소 폭발 사고 중 가장 큰 규모의 피해를 일으킨 사고로 사망자 2명, 부상자 8명을 포함한 대형 피해를 야기하였다.

본 연구에서는 상기한 두 개의 사고 사례를 선정하여 bow-tie, ALOHA 위험성 평가 기법을 이용한 위험성 평가를 실시하였으며 각각의 평가 결과를 도시하였다.

2. 본 론

2.1 Bow-tie 위험성 평가 기법

1970년대 ICI사의 David Gill은 기존에 위험성을 확인하는 방법이었던 원인 및 결과도(cause and consequence diagram)의 가시성과 적정성을 향상시켰고, 이를 원인과 결과가 분석된 그림의 형태가 나비넥타이와 닮았다고 하여 bow-tie diagram이라고 명명하였다²³⁾. Bow-tie 위험성 평가 기법은 현재 대책, 추가 대책, 위험도 산정 등 다른 위험성 평가 기법과 유사하나 위험성 평가의 결과를 나비넥타이 형태로 도시하여 원인과 사고 간 안전장치의 관계, 사고 원인과 결과 간 안전장치의 관계를 표현할 수 있다는 장점이 있다. Bow-tie 위험성 평가는 각 안전장치의 책임자, 방호 유형, 유효성, 심각성을 나타낼 수 있으며 안전장치 작동, 안전장치 간의 상호 영향성을 인명, 재산, 환경, 명성 분야를 나누어 정성적으로 표현할 수 있다. 그러나 사고의 인과관계가 순환 구조를 갖거나 동일한 안전장치가 중복되어 나타날 경우 안전장치의 성능을 과대평가하게 되고 실제보다 많은 수의 안전장치가 구비되어 있는 것으로 착각할 수 있다는 문제점이 있다. 또한 정성적 위험성 평가의 특성 상 정량적인 위험성을 수치화하여 확인할 수 없다는 한계가 존재한다²⁴⁾.

2.2 ALOHA 위험성 평가 기법

ALOHA는 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)이 개발하고 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)과 공동으로 활용하고 있는 사고 예측 프로그램이다²⁵⁾. ALOHA는 기상 조건, 공정 운전 조건, 취급 물질 등을 입력하면 물질의 과압, 독성, 가연 범위의 영향 범위 및 위험 단계를 구분하여 나타낼 수 있으며²⁶⁾ 피해 영향 범위 시뮬레이션 결과를 실제 지도에 첨부하여 나타낼 수 있어 손쉽게 영향 범위를 가늠할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서 활용되는 bow-tie 위험성 평가 기법은 정성적 위험성 평가 기법으로 정량적인 수치 확인이 어렵기 때문에 ALOHA 위험성 평가를 추가로 도입하여 위험성 평가의 적절성을 제고하였다.

3. 사고 개요

3.1 사고 원인 분석

머스킹엄 발전소 수소 폭발 사고는 2007년 미국 오하이오주 머스킹엄 발전소에서 발생한 수소 폭발 사고이다. 머스킹엄 발전소 수소 폭발 사고는 파열판의 조기 고장, 부적절한 환기 배관, 차양막으로 인한 수소가스 체류 등 다양한 위험 요소가 순차적으로 기인하여 대형 폭발 사고로 이어졌다²⁷⁾. 또한 동일한 유형의 아차사고가 상기 폭발 사고 이전에 발생하였으나 개선하지 않았기에 위와 같은 대형 사고를 예방하지 못하였다.

한편 K 테크노파크 수소 폭발 사고는 2019년 대한민국 K 테크노파크에서 수전해 수소 저장탱크가 폭발한 사고이며, 사고의 큰 원인은 부적절한 설계에서 기인하였다. K 테크노파크는 안전장치에 해당하는 수전해 산소 정제기, 정전기 제거기 등을 임의로 제거한 채로 운영하였으며 설비 운영 중 수소 저장탱크 내 산소 농도가 3% 이상이라는 경고가 울렸으나 공정을 계속하여 운영한 것이 사고를 초래한 것으로

밝혀졌다²⁸⁾. 발생한 사고로 인해 사망자 2명, 부상자 8명 및 설비의 소손 등으로 인한 상당한 금전적인 피해가 발생하였다. 본 연구에서는 전체적인 사고 개요를 bow-tie 선도를 이용하여 분석하였으며 ALOHA 프로그램을 통해 정량적인 피해 영향 범위를 확인하였다.

3.2 수소 폭발 사고 시나리오 조건

Table 1은 머스킹엄 발전소 수소 tube trailer의 규격 및 설계 압력, 운용 압력, 저장 용량을 도시하였다. 사고 조사를 통해 가스 누출 당시 고압으로 인해 20초 만에 17.7 kg의 수소가 전량 누출된 것으로 확인되었다. 추가적으로 Table 1에 머스킹엄 발전소 수소 tube trailer에 대한 규격과 사용 압력을 기재하였다. 사고 당시 사진을 통해 tube trailer의 제품명을 확인하여 상세 규격을 기재하였다. 또한 사고 발생 당시의 기상 조건을 도시하였으며 사고 당일 기상청 세계 날씨 열람표를 참고하여 작성하였다.

Table 2에는 K 테크노파크 수소 저장탱크에 대한 규격과 사용 압력을 기재하였다. K 테크노파크 수소 폭발 사고의 경우 탱크가 파손되어 길이에 대한 정확한 정보가 존재하지 않기 때문에 사고 현장 사진

Table 1. Scenario condition of H₂ tube trailer in Muskingum power plant

Hydrogen tube trailer (Muskingum)	
Design pressure of H ₂ tube [barg]	182
Operating pressure of H ₂ tube [barg]	172
Height of H ₂ tube [m]	12.19
Diameter of H ₂ tube [m]	0.55
Internal volume of H ₂ tube [L]	2,300
Storage mass of H ₂ tube [kg]	17.7
Weather condition (Muskingum)	
Wind velocity [m/s]	12.67
Wind direction	NNE
Air temperature [°C]	2.8
Relative humidity [%]	88
Air stability class	D

내 저장탱크의 모습과 국내 30,000-40,000 L급 가스 저장탱크의 사양을 참고하여 높이와 지름 비율을 3:1로 가정하였다. 또한 K 테크노파크 사고의 날씨 조건은 사고 발생 당시 대한민국 기상청의 날씨 정보

를 이용하여 시나리오에 적용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 머스킹엄 발전소 수소 폭발 사고 분석

머스킹엄 발전소 수소 폭발 사고의 위험 요인과 사고 발생 원인과 결과를 기반으로 bow-tie 선도를 Fig. 3(a)에 도시하였다. 원인 및 결과의 각 안전장치 요소들은 각 안전장치 요소의 중요도와 영향도가 증가할수록 우측에 배치하였으며, 영향도 비교를 통해 원인 3가지 중 가장 개선 효과가 높은 환경으로 부적절한 환기 시설(improper ventilation)을 선정하였다. 평가 대상이었던 머스킹엄 발전소는 기존 발전소 환기 구조와 다르게 차양막이 존재하는 밀폐형 환기 구조였으며, 이러한 구조로 인해 해당 사고와 같이 환기 배관이 파손될 경우 대체 환기 수단이 없어 환기시설 내부와 차양막 하단에 수소가스가 체류하게 되고, 체류한 수소가스는 집회원에 의해 쉽게 폭발하는 결과를 초래하게 된다. 부적절한 환기 시설을 예

Table 2. Accident scenario conditions of a hydrogen storage tank in K Technopark

Hydrogen storage tank (K technopark)	
Design pressure of H ₂ tank [barg]	12
Operating pressure of H ₂ tank [barg]	6
Height to diameter [-]	3
Height of H ₂ tank [m]	7.71
Diameter of H ₂ tank [m]	2.57
Internal volume of H ₂ tank [L]	40,000
Storage mass of H ₂ tank [kg]	15.1
Weather condition (K technopark)	
Wind velocity [m/s]	5.00
Wind direction	NNE
Air temperature [°C]	23.1
Relative humidity [%]	29
Stability class	D

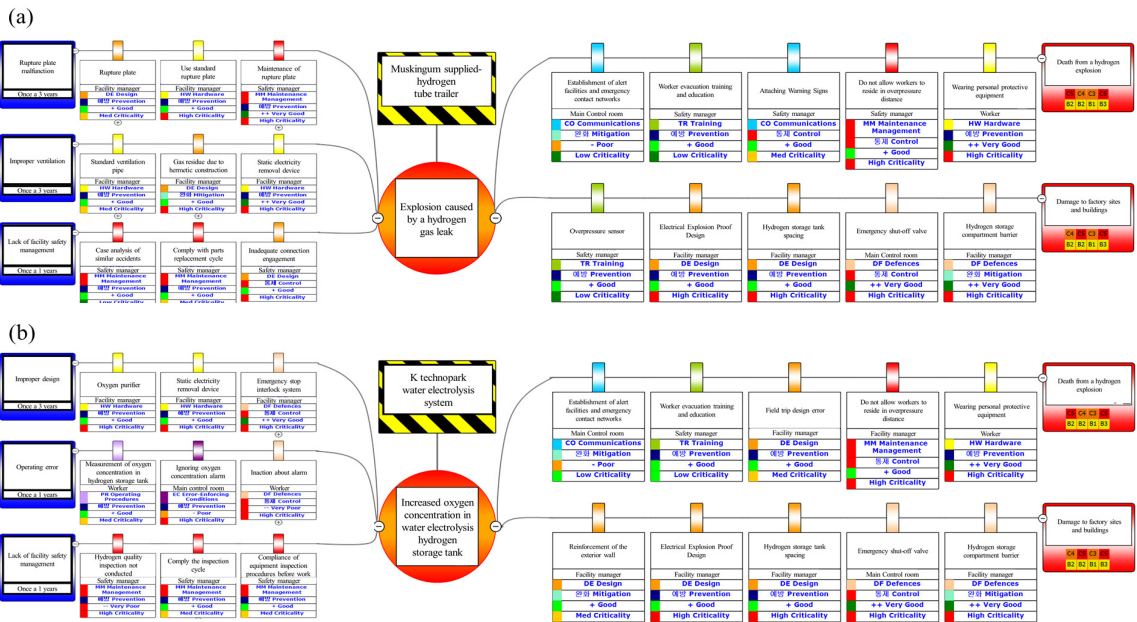


Fig. 3. Bow-tie diagram for (a) the Muskingum river power plant accident and (b) the K Technopark accident

방하기 위해서는 정격 환기 배관(standard ventilation pipe)을 사용하여야 하며, 밀폐형 구조물로 인한 가스가 잔류(gas residue due to hermetic construction)하는 경우를 제거하여야 한다. 마지막으로 정전기 제거 장치(static electricity removal device)를 구비하여 정전기로 인한 점화 가능성을 최소화하여야 한다.

결과 중 완화 안전장치 도입 시 개선 효과가 가장 큰 부분은 공장 부지 및 인근 건물 파손(damage to factory sites and buildings)이다. 사고 완화 요소 중 긴급 차단 밸브(emergency shut-off valve)가 사고 당시에 구비되었을 경우 수소가스 누출 시 튜브 트레일러의 수소가스 누출량이 감소될 것이며 수소가스 폭발로 인한 피해 영향 범위도 줄어들 것으로 예상하였다. 추가적으로 설비 내 수소 저장실 방호벽을 축조하였다면 인명 피해와 건물 파손의 규모를 줄일 수 있었으며, 과압과 비산물의 피해 범위도 줄어들었을 것이다.

본 연구에서는 bow-tie 위험성 평가를 통해 원인 별 예상 발생 주기, 원인 발생 예방 안전장치의 효과성 등을 고려한 사고 원인의 중요도 순서를 도출하였는데, 순서는 1) 과거 발생한 사고 사례 분석의 부재(lack of facility safety management), 2) 파열판 고장(rupture plate malfunction), 3) 부적절한 환기 시설(improper ventilation) 순이다. Fig. 4에는 수소가스 누출 시 시간과 누출량의 관계를 표현한 그래프이며,

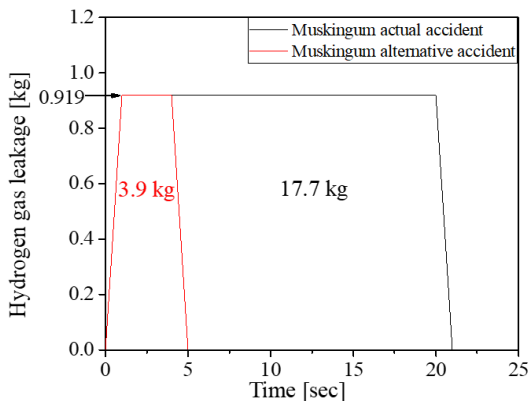


Fig. 4. Time series mass of hydrogen leakage at Muskingum river power plant

그래프를 계산하기 위한 시나리오는 초기 누출 시 초당 최대 누출량에 도달하는 시간을 0.5초로 가정하였고 초당 최대 누출량에서 누출량이 0에 도달하는 시간을 1초로 가정하였다. 대안의 시나리오는 다른 기후 조건은 동일하되 긴급 차단 밸브 작동으로 총 누출 시간이 20초에서 5초로 감소된 시나리오를 사용하였다.

상기 언급한 피해 영향 범위를 실제 시나리오(Fig. 5[a])와 긴급 차단 밸브가 구비된 대안의 시나리오(Fig. 5[b])를 도입하여 ALOHA 위험성 평가를 통해 수소가스 폭발 시 과압 피해 영향 범위를 나타내었다. 긴급 차단 밸브라는 안전장치가 구비되어 있는 경우 Fig. 4와 같이 수소가스 누출량이 17.7 kg에서 3.9 kg으로 감소된 것으로 가정하였다. 피해 영향 범위 기준은 최악 및 대안의 시나리오 선정에 관한 기

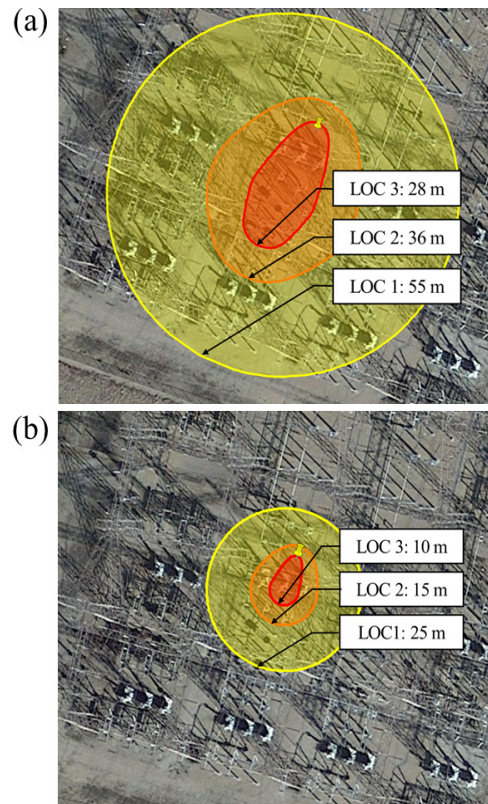


Fig. 5. Effective distance of overpressure risk factor for (a) the worst and (b) alternative scenarios of the Muskingum power plant accident

술 지침(KOSHA Guide P-107)²⁹⁾, NOAA 기준에 의거하여 우려 수준(level of concern, LOC) 3단계로 나누었다. 과압 LOC 3, 2, 1의 경우 각각 70, 21, 7 kPa이며 70 kPa의 경우 건물 전체가 파괴될 수 있는 압력, 21 kPa의 경우 지지대가 없는 철골 건축물, 유류 저장탱크 파손 및 신체 부상 가능성이 있는 압력, 7 kPa의 경우 건물의 부분 파손이 우려되는 압력에 해당한다. 건물 파손과 신체 부상이 우려되는 LOC 2 기준으로 비교하였을 경우, 사고 시나리오 대비 대안의 시나리오 과압 피해 영향 범위는 36 m에서 15 m로 약 54.5% 감소한다는 결과를 도출하였다.

4.2 K 테크노파크 수소 폭발 사고 분석

Fig. 3(b)와 같이 K 테크노파크 수소 폭발 사고의 위험 요인과 사고 발생 원인을 bow-tie 선도로 나타내었다. 평가 결과 사고 원인 중 가장 영향성이 높은 것은 부적절한 설계(improper design)로, 공정 운영상 문제점이 존재하였으며, 안전장치가 구비된 허가 설계 도면에서 설계자가 안전장치를 임의로 제거한 채 설비를 운영하였다는 점이 사고를 유발한 근본적인 원인으로 확인된다. Bow-tie 위험성 평가에서 완화 안전장치 도입 시 개선 효과가 가장 컸던 것은 수소 폭발로 인한 사망(death from hydrogen explosion)이다. 그리고 완화 효과가 가장 큰 안전장치는 과압 거리 내 작업자 상주 금지(do not allow workers to reside in overpressure distance), 수소 저장탱크 방호벽(hydrogen storage compartment barrier)의 두 가지였다.

상기 동일한 bow-tie 위험성 평가를 통해 사고 분석 시 사고 원인들의 중요도는 1) 공정상 오류(operating error), 2) 안전관리 부재(lack of facility safety management), 3) 부적절한 설계(improper design) 순으로 도시하였다.

본 연구에서는 K 테크노파크 수소 폭발 사고의 경우 저장탱크 내부의 폭발이었고 누출량 감소를 통한 폭발 자체의 규모를 감축시킬 수 없다고 판단하였기 때문에 폭발 피해 영향 범위를 완화할 수 있는 요소들이 효과적이라고 판단하였다. K 테크노파크 수소

폭발 사고의 특수한 환경으로 인해 머스킹업 수소 폭발 사고와 달리 대안의 시나리오를 작성하지 않고 사고 시나리오의 결과만을 Fig. 6에 제시하였다.

5. 결론

본 연구에서는 수소의 생산, 저장, 이용이 확대됨에 따라 더 빈번하게 발생하는 수소가스 사고를 면밀히 분석 및 예방하고자 실제 발생한 2개의 수소 폭발 사고 사례를 선정하여 사고 개요를 구성하였고, bow-tie, ALOHA 위험성 평가 기법을 이용하여 원인과 결과를 분석하였으며, 개선 대책을 수립하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) Bow-tie 위험성 평가에서는 안전장치를 유효성 4단계(very poor, poor, good, very good)로 구분하며 very good에 근접할수록 예방 대책의 사고 예방 효과가 큰 것으로 판단할 수 있다. 또한 심각성은 3단계(low critical, medium critical, high critical)로 구분되며 high critical에 근접할수록 해당 완화 요소의 미구비에 따른 사고의 피해 규모가 커질 수 있다. 두 사고 사례를 분석한 결과, 머스킹업 발전소 수소 폭발 사고의 경우 과거 발생한 사고 사례 분석의 부재, 파열판 고장, 부적절한 환기 시설 순으로 영향성이 크다고 판단하였으며, K 테크노파크 수소 폭발 사고의 경우는 공정상 오류, 안전관리 부재, 부적절한 설계

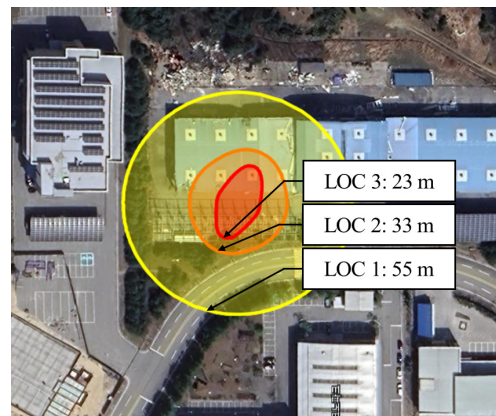


Fig. 6. Effective distance of overpressure risk factor for the worst scenarios of the K Technopark accident

순으로 판단하였다. 사고 위험성 평가를 통해 조사된 두 사고 모두 대규모의 사고임에도 불구하고 작업 전 설비 점검, 상시 점검 등으로 사고를 예방할 수 있었던 것으로 분석되었다.

2) 머스킹업 수소 폭발 사고, K 테크노파크 수소 폭발 사고 모두 LOC 2 기준 30 m를 넘는 피해 영향 범위를 보이며 인명 피해와 재산상의 손실을 초래하였다. 2종의 위험성 평가 결과를 통해 머스킹업 수소 폭발 사고의 경우 긴급 차단 밸브 도입을 통해 사고 범위가 54.5% 감소된 것을 확인하였으며, K 테크노파크 수소 폭발 사고의 경우 수소 저장탱크 저장실 방호벽 설치를 통해 사고 발생 후 폭발에 이은 추가적인 피해에 대한 감소책을 마련할 필요가 있었다.

3) 머스킹업 수소 폭발 사고, K 테크노파크 수소 폭발 사고의 두 사례 모두 안전성을 배제한 공정 설계 및 부품으로 가지고 시스템을 운영하면서 발생한 인재(人災)였으며 큰 피해를 발생시켰다. 따라서 사업체 내 올바른 점검 미이행과 미흡한 유지보수로 인해 발생된 사고라는 결론을 얻을 수 있었다. 이에 인적 오류 예방 및 안전 의식 제고를 위한 관리적 조치, 교육적 조치, 장치적 조치를 강화하는 방법이 추천된다.

현재 「고압가스 안전관리법 시행규칙」 별표 19에 의거하여 매년 1회 사업체 정기 점검이 이루어져야 한다. 그러나 연구된 사고 사례와 같이 사업체 내부에서 올바른 점검과 유지보수가 되지 않는 경우를 대비해 초기 설비 시공 시 국가전문기관의 안전 점검과 검사가 필요하며, 추가적으로 정기 점검의 주기를 단축하여 사업체 시설 점검이 철저하게 이루어질 수 있도록 제도 마련이 필요하다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(연구 번호: 00236869, 300 MW급(H급) 가스 터빈 50% 수소혼소 변환 기술개발 및 실증).

References

1. Ministry of Trade, Industry and Energy, "Hydrogen economy revitalization roadmap", Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019. Retrieved from <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCLf724eb567/210222/view>.
2. Ministry of Trade, Industry and Energy, "Comprehensive measures for hydrogen safety management", Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019. Retrieved from <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCLf724eb567/210274/view>.
3. J. S. Lim, H. W. Lee, Y. S. Hong, K. B. Lee, G. J. Yong, and H. B. Kwon, "Development on fuel economy test method for hydrogen fuel cell vehicles", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 21, No. 3, 2010, pp. 207-213. Retrieved from <https://koreascience.kr/article/JAKO201030853092578.page>.
4. Y. Hames, K. Kaya, E. Baltacioglu, and A. Turksoy, "Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 23, 2018, pp. 10810-10821, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.150>.
5. A. Veziroglu and R. Macario, "Fuel cell vehicles: state of the art with economic and environmental concerns", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 1, 2011, pp. 25-43, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.145>.
6. Y. Manoharan, S. E. Hosseini, B. Butler, H. Alzahrani, B. T. F. Senior, T. Ashuri, and J. Krohn, "Hydrogen fuel cell vehicles; current status and future prospect", *Applied Sciences*, Vol. 9, No. 11, 2019, pp. 2296, doi: <https://doi.org/10.3390/app9112296>.
7. H. T. Hwang and A. Varma, "Hydrogen storage for fuel cell vehicles", *Current Opinion in Chemical Engineering*, Vol. 5, 2014, pp. 42-48, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2014.04.004>.
8. G. Romeo, F. Borello, G. Correa, and E. Cestino, "ENFICA-FC: design of transport aircraft powered by fuel cell & flight test of zero emission 2-seater aircraft powered by fuel cells fueled by hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 1, 2013, pp. 469-479, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.064>.
9. T. H. Bradley, B. A. Moffitt, D. N. Mavris, and D. E. Parekh, "Development and experimental characterization of a fuel cell powered aircraft", *Journal of Power Sources*, Vol. 171, No. 2, 2007, pp. 793-801, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.06.215>.
10. İ. Yılmaz, M. İlbaş, M. Taştan, and C. Tarhan, "Investigation of hydrogen usage in aviation industry", *Energy Conversion and Management*, Vol. 63, 2012, pp. 63-69, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.12.032>.

11. M. Y. El-Sharkh, M. Tanrioven, A. Rahman, and M. S. Alam, "Impact of hydrogen production on optimal economic operation of a grid-parallel PEM fuel cell power plant", *Journal of Power Sources*, Vol. 153, No. 1, 2006, pp. 136-144, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.03.187>.
12. N. E. Park and H. W. Kim, "Analysis of R&D investment for hydrogen and fuel cell", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 21, No. 2, 2010, pp. 143-148. Retrieved from <https://koreascience.kr/article/JAKO201027463260138.page>.
13. 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, 2022, pp. 103-114, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2022.46.2.103>.
14. J. Y. Lee, J. Lee, and H. Song, "A study on the analysis of risk factors for hydrogen fuel stations based on quantitative risk assessment", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 24, No. 6, 2020, pp. 70-76, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2020.24.6.70>.
15. B. Park, Y. Kim, and I. J. Hwang, "Risk assessment of explosion accidents in hydrogen fuel-cell rooms using experimental investigations and computational fluid dynamics simulations", *Fire*, Vol. 6, No. 10, 2023, pp. 390, doi: <https://doi.org/10.3390/fire6100390>.
16. S. Kang, Y. Huh, and J. Moon, "A study on safety improvement for packaged hydrogen refueling station by risk assessment", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 28, No. 6, 2017, pp. 635-641. Retrieved from <https://kiss.kstudy.com/Detail/Ar?key=3570324>.
17. S. Y. Jeong, H. K. Park, and M. C. Lee, "Accident impact assessment using the ALOHA program for the application of hydrogen and ammonia as fuels of a combined cycle power plant", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B*, Vol. 47, No. 12, 2023, pp. 647-661, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2023.47.12.647>.
18. H. Park and M. Lee, "Consequence analysis on the leakage accident of hydrogen fuel in a combined cycle power plant: based on the effect of regional environmental features", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 698-711, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.698>.
19. C. H. Tae, H. S. Lee, C. H. Byun, J. M. Yang, C. Park, and J. W. Ko, "A study on risk analysis of manufacturing process using the bow-tie method", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 17, No. 3, 2013, pp. 33-38, doi: <http://dx.doi.org/10.7842/kigas.2013.17.3.33>.
20. B. D. Ehrhart, D. M. Brooks, A. B. Muna, and C. B. LaFleur, "Risk assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles in tunnels", *Fire Technology*, Vol. 56, 2019, pp. 891-912, doi: <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00910-z>.
21. D. H. Seong, K. W. Rhie, T. H. Kim, D. S. Oh, Y. D. Oh, D. H. Seo, Y. G. Kim, and E. J. Kim, "Quantitative safety assessment for hydrogen station", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 27, No. 3, 2012, pp. 111-116, doi: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2012.27.3.111>.
22. D. H. Kim, S. M. Lee, C. H. Joe, S. K. Kang, and Y. S. Huh, "A study on the quantitative risk assessment of mobile hydrogen refueling station", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 605-613, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.605>.
23. Y. S. Byun, "A study on safety improvement for mobile hydrogen refueling station by HAZOP analysis", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 32, No. 5, 2021, pp. 299-307, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.5.299>.
24. S. H. Kim, "A review of HAZID/bowtie methodology and its improvement", *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 59, No. 3, 2022, pp. 164-172, doi: <https://doi.org/10.3744/STAK.2022.59.3.164>.
25. H. S. Lee, T. H. Lee, K. S. Park, and J. G. Kim, "A study on the evaluation of effects of chemical accident toxicity using CARIS & ALOHA", *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, Vol. 20, No. 1, 2019, pp. 8-15, doi: <https://doi.org/10.26511/JKSET.20.1.2>.
26. H. S. Kim and B. H. Jeon, "Analysis of impact zone of quantitative risk assessment based on accident scenarios by meteorological factors", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 39, No. 12, 2017, pp. 685-688, doi: <https://doi.org/10.4491/KSEE.2017.39.12.685>.
27. WHA International, "Case study: power plant hydrogen explosion", WHA International, 2022. Retrieved from <https://wha-international.com/case-study-power-plant-hydrogen-explosion/>.
28. Korea Gas Safety Corporation (KGS), "Facility/technical/inspection code for manufacture of water electrolysis facility (KGS AH271 2022)", KGS Code, 2022. Retrieved from https://cyber.kgs.or.kr/kgscode.eng.codeSearch.view.ex.do?pubFldCd=03&publCd=AH271_221104&stDayY=2008&stDayM=01&rtDayY=2024&rtDayM=02.
29. Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), "Technical guidelines for the identification of worst-case scenarios and alternative paths (P-107-2020)", KOSHA, 2020. Retrieved from <https://kosha.or.kr/kosha/data/guidanceP.do>.