



액화수소충전소에 대한 LOPA 위험성 평가 적용 방법론

이충현 · 이광원* · 서두현** · 이동민*** · †김태훈****

호서대학교 안전행정공학과 석사과정, *호서대학교 안전보건학과 교수, **PSP

호서대학교 안전공학과 석사과정, *호서대학교 안전공학과 교수

(2023년 11월 17일 접수, 2024년 8월 6일 수정, 2024년 9월 14일 채택)

Methodology for Applying LOPA Risk Assessment to Liquefied Hydrogen Stations

Chung-Hyun Lee · Kwang-Won Rhie* · Doo-Hyun Seo**

Dong-Min Lee*** · †Tae-hun Kim****

Department of Safety Public Administration, Hoseo University,

*Department of Safety and Health, Hoseo University, **PSP,

***Department of Safety Engineering, Hoseo University

(Received November 17, 2023; Revised August 6, 2024; Accepted September 14, 2024)

요약

액화수소는 저장 효율성 면에서 장점이 있지만 온도 유지 실패 시 800배의 부피 팽창의 위험성이 존재한다. 기체 수소 충전소는 다양한 위험성 평가를 수행하고 있지만, 액화수소충전소는 아직 구축 및 개발된 적이 없다. 액화수소충전소의 유해 위험요인을 도출하고 위험성을 제어하기 위해 LOPA 기법을 적용하여 액화수소충전소의 고안전성을 확보하고자 한다. 본 연구에서는 액화수소충전소의 누출 및 폭발에 대한 고안전성을 확보하고 안전장치 및 방호장치의 효율성을 분석하기 위해 HAZOP 기법을 적용하여 시나리오를 도출하고 LOPA 기법을 적용하였다. 또한 기존의 화학 공정에서 사용되던 LOPA 기법을 액화수소충전소에 적용 가능성을 고찰하고 문제점을 도출하였다.

Abstract - Liquefied hydrogen has advantages in terms of storage efficiency, but there is a risk of volume expansion of 800 times if it fails to maintain temperature. Gaseous hydrogen charging stations are undergoing various risk assessments, but liquefied hydrogen charging stations have not yet been built and developed. In order to derive harmful risk factors of liquefied hydrogen charging stations and control risks, we aim to secure high safety of liquefied hydrogen charging stations by applying the LOPA technique. In this study, the HAZOP technique was applied to derive a scenario and the LOPA technique was applied to ensure high safety against leakage and explosion of a liquefied hydrogen charging station and to analyze the effectiveness of safety and protective devices. In addition, the feasibility of applying the LOPA technique used in existing chemical processes to liquefied hydrogen charging stations was examined and problems were identified.

Key words : liquid hydrogen, hydrogen safety system, LOPA, risk assessment

1. 서론

전 세계적으로 문제가 되는 온실가스로 인한 지구

온난화 문제를 해결하기 위하여 2016년에 파리협정 협약을 맺었다. 우리 정부는 2019년에 “수소 경제 활성화 로드맵”을 시작으로 현재 국내 상업용 수소충전소는 2023년 3월 기준 227기가 구축이 완료되어 운행에 들어가고 있고 앞으로도 수소충전소는 증가할 거라 예상된다¹⁾.

†Corresponding author:emtxx@hoseo.edu

Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

현재 국내에 설치된 수소충전소 대부분이 인구 밀집 지역이 아닌 곳에 설치되어 있다. 수소충전소에 대한 고압가스 안전관리법상 정의하는 허용 불가 영역에 속하진 않지만, 추후 설계 혹은 설치 예정된 수소충전소가 도심지에 설치가 되거나, 유동 인구로 인한 위험도가 상승할 수도 있다²⁾.

액화수소의 끓는점은 약 -253°C 로 아주 낮으며 온도 유지를 실패 등에 의하여 액화수소 기화 시 800배의 부피 팽창으로 인한 위험도가 증가한다는 단점을 가지고 있다³⁾. 이러한 위험성이 높은 액화수소를 제어하기 위해 안전장치 및 방호장치 등의 고안전성이 요구된다.

본 연구에서는 액화수소의 위험성으로 인한 고안전성이 요구되기 때문에 기존 수소충전소의 위험성 평가 외에 LOPA를 적용하여 고안전성을 확보하고자 한다. 하지만 LOPA는 석유화학공정에 적합하게 개발되어 있으므로 액화수소 충전소에 대한 적용 가능성을 고찰하고 문제점을 도출하고자 한다.

II. 이론적 배경

2.1. 위험성평가 개요

위험성 평가는 사업장 내 유해·위험 요인을 찾아내어 해당 유해·요인으로 인해 발생 가능한 사고 또는 질병의 발생 가능성과 그 심각성을 감소시키고자 하는 일련의 활동을 말한다. 기본적인 위험성 평가 흐름은 Fig. 1과 같이 사전 준비, 위험요인도출, 위험도 계산, 개선 권고 및 실행 순으로 진행된다. 위험성 평가는 사전에 위험요인을 도출하고 안전대책을 수립하는 정성적 위험성 평가(Qualitative risk assessment)와 위험요인별로 사고가 발생할 확률과 사고의 피해의 강도를 정량적으로 수치화하여 허용범위를 벗어난 위험에 대한 대책을 마련하는 정량적 위험성 평가(Quantitative risk assessment)로 나누어진다. 정성적 위험성 평가는 PHA, Checklist, What-if, 상대위험순위, HAZOP, FMECA 등이 있으며 정량적 위험성 평가는 4M기법, FTA, ETA, CCA 등이 있다⁴⁾.

2.2 방호계층분석 기법 (LOPA)

방호계층분석 (LOPA, Layer of protection analysis) 기법은 원하지 않는 사고의 빈도나 강도를 감소시키는 독립 방호계층(IPL, Independent protection layer)의 효용성을 평가하는 도구로 즉, 위험성 평가를 통해 해당 공정의 방호계층이 적절한가를 확인할 수 있다.

단, 방호계층분석에 사용되는 확률 데이터는 실제 확률값이 아니므로 반정량적 방법론이다. LOPA는 주로 위험과 운전분석 (HAZOP, Hazard and oper-

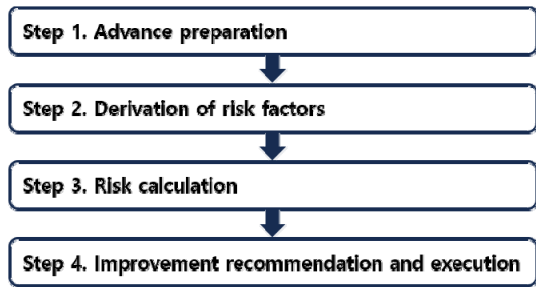


Fig. 1. Risk assessment flow chart

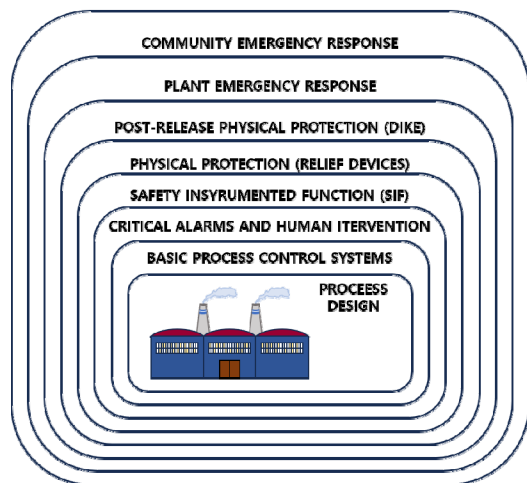


Fig. 2. Layers of defense against a possible accident.

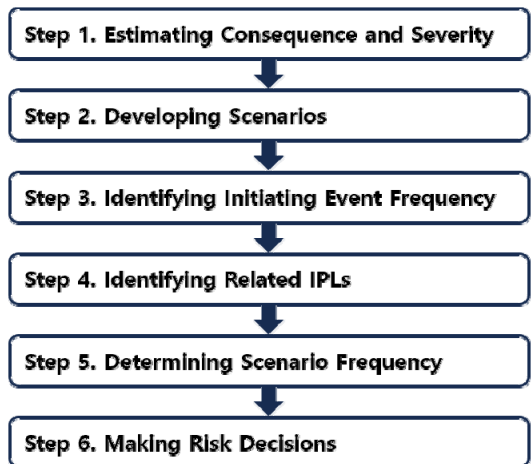


Fig. 3. LOPA Risk assessment flow chart

ability study), What-if, Checklist 등과 같은 정성적 위험성 평가기법에서 시나리오를 도출하여 사용하며 도출된 시나리오에 IPL의 적합성을 판단하여 최상의 방법으로 설계하기 위해 사용된다⁵⁾.

Fig. 2는 사고 시나리오에 대한 방어 계층을 그림으로 나타낸 것이며 프로세스의 설계와 심각도에 따라 하나 이상의 보호 계층을 사용하여 사고로부터 예방해야 한다⁶⁾.

Fig. 3과 같이 LOPA 기법의 진행 순서는 선행으로 진행된 정성적 위험성 평가의 시나리오 결과 및 심각도를 추정하고 LOPA를 적용할 시나리오를 선정한다. 다음으로 시나리오의 개시사건(Initiating Event)의 빈도와 관련된 IPL을 식별한다. 이후 개시사건과 IPL의 데이터를 확보하여 시나리오의 위험성을 산정하

고 위험성을 결정한다. 이때 위험성 산정은 수식(1)과 같다⁷⁾.

$$f_i^C = f_i^I \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} \quad (1)$$

f_i^C = 사고 시나리오의 대한 사고 발생확률
 f_i^I = 사고 시나리오의 개시사건의 발생확률
 PFD_{ij} = 독립 방호계층들의 고장확률

개시사건의 빈도와 강도는 CCPS(Center for Chemical Process Safety)의 Layer of Protection Analysis Simplified process risk assessment와 안전보건공단의 KOSHA GUIDE에서 제공되는 자료를 참고하여 작성하였으며 본 연구에서 활용된 빈도 등급은 Table 1, 강도 등급은 Table 2로 나타내었다.

안전계장기능(SIF, Safety Instrumented Function)은 상태 제어기능으로 Safety Interlocks 및 Safety Critical alarms의 종류로써 하나 이상의 안전계장기능을 수행하는 Sensors, Logic solvers 및 Final elements의 조합을 안전 계장 시스템(SIS, Safety Instrumented System)이라 한다. 이때 안전계장기능이 정상적으로 수행되는 안전 계장 시스템의 확률을 안전무결수준(SIL, Safety Integrity Level)등급으로 Table 3과 같이 적용할 수 있다⁸⁾.

Table 1. Frequency classification

Frequency		
5	1	Occurs more than once a year
4	10 ⁻¹	Occurs more than once every 1 to 5 years
3	10 ⁻²	Occurs more than once every 5 to 10 years
2	10 ⁻³	Occurs more than once every 10 to 30 years
1	10 ⁻⁴	Occurrence rarer than once in 30 years

Table 2. Severity classification

Severity		
5	10 ⁻⁵	Death or injury 2 or more
4	10 ⁻⁴	Injury 1 or more
3	10 ⁻³	2 or more minor injuries
2	10 ⁻²	1 or less minor injuries
1	10 ⁻¹	safety design

Table 3. PFD value by SIL

SIL Safety integrity Level	PFD Probability of failure at average operating demand
1	≥ 10 ⁻² ~ 10 ⁻¹
2	≥ 10 ⁻³ ~ 10 ⁻²
3	≥ 10 ⁻⁴ ~ 10 ⁻³
4	≥ 10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻⁴

III. 위험성 평가

3.1 분석 대상

본 연구에서 LOPA의 적용성을 검토하기 위해서 분석 대상은 액화수소충전소에 적용하였다. 선행연구로 HAZOP 결과를 바탕으로 분석 시나리오를 도출하였다. Fig. 4는 본 연구에서 평가된 액화수소충전소를 node 별로 나눈 것이다. node 1은 액화수소 충전부로 탱크로리에서부터 액화수소 저장 탱크로 액화수소를 저장하는 공정이다. node 2는 액화수소 압축부로

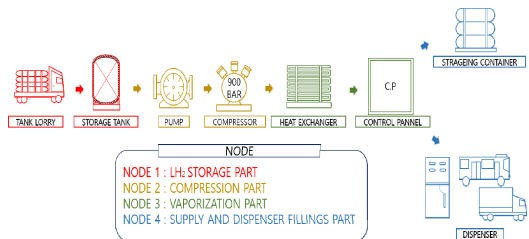


Fig. 4. Process drawing of liquefied hydrogen filling station

Table 4. Types of initiating events in CCPS[9]

NO.	Description of initiating event	IEF (per year)	Applicability
1	BPCS control loop failure	10-1	O
2	Spurious operation of SCAI (Safety Controls, Alarms and Interlocks)	1 to 10-1	O
3	Human error during a routine task that is performed once per week or more often	1	O
4	Human error during a task that is performed between once per month and once per week	10-1	X
5	Human error during a non-routine task that is performed less than once per month	10-2	X
6	Pressure regulator failure	10-1	O
7	Screw conveyor failure	1 to 10-1	X
8	Screw Conveyor Overheating of Materials	10-1	X
9	Pump, compressor, fan, or blower failure	10-1	O
10	Single circuit loss of power	10-1	O
11	Single check valve failure	10-1	O
12	Failure of double check valves in series	10-2	O
13	Pump seal leak	1	O
14	Complete primary pump seal failure	10-1	O
15	Hose failure, leak and rupture	Leak:10-1 Rupture:10-2	O
16	Premature opening of spring-loaded relief valve	10-2	O
17	Atmospheric tank: catastrophic failure	10-5	X
18	Atmospheric tank: continuous 10mm diameter leak	10-4	X
19	Pressure vessel: catastrophic failure	10-5	O
20	Aboveground piping: full breach failure (pipe size ≤ 150mm, 6in)	10-6/m	O
21	Aboveground piping in typical service: full breach failure (pipe size > 150mm, 6in)	10-7/m	O
22	Aboveground piping: leak (pipe size ≤ 150 mm, 6 in)	10-5/m	O
23	Aboveground piping: leak (pipe size > 150mm, 6in)	10-6/m	O

액화수소 저장 탱크에서 펌프를 거쳐 고압 압축기로 900bar로 압축 후 열교환기까지의 공정이다. node 3은 열교환기에서 900bar의 액화수소 온도를 -14℃ 까지

승온 후 판넬까지의 공정이다. node 4는 판넬에서 고압 저장 용기에 저장하거나 바로 디스펜서를 통해 차량을 충전하는 공정이다.

Table 5. Types of IPL in CCPS^[9]

NO.	Description of IPL	PFD	Applicability
1	Deflagration arrester at the end of pipe	0.01	X
2	Deflagration arrester in-line	0.1 to 0.01	X
3	In-line stable detonation arrester	0.1 to 0.01	X
4	Unstable (overdriven) detonation arrester installed in-line	0.1 to 0.01	X
5	Overflow line with no impediment to flow	0.001	X
6	Overflow line containing a passive fluid or with a rupture disk	0.01	X
7	Line containing a fluid with the potential to freeze	0.1	X
8	Dikes, berms, and bunds	0.01	X
9	Drainage to dikes, berms, and bunds with remote impoundment	0.01	X
10	Permanent mechanical stop that limits travel	0.01	O
11	Fire-resistant insulation and cladding on vessel	0.01	X
12	Safety control loop	0.1	O
13	Safety interlock	0.1	O
14	SISloop	SIL 1 : 0.1 SIL 2 : 0.01 SIL 3 : 0.001	O
15	Spring-operated pressure relief valve	0.01	O
16	Dual spring-operated pressure relief valves	0.001	O
17	Pilot-operated pressure relief valve	0.01 to 0.001	X
18	Gas balance/adjustable set pressure surge relief valve	0.1 to 0.01	X
19	Buckling pin relief valve	0.1 to 0.01	X
20	Buckling pin isolation valve (BPIV)	0.1 to 0.01	X
21	Rupture disk	0.1 to 0.01	O
22	Spring-operated pressure relief valve with rupture disk	0.1 to 0.01	X
23	Conservation vacuum and/or pressure relief vent	0.1 to 0.01	X
24	Vacuum breaker	0.1 to 0.01	X
25	Frangible roof on flat-bottom tank	0.1 to 0.01	X
26	Explosion isolation valve	0.1	O
27	Explosion panels on process equipment	0.01	X
28	Vent panels on enclosures	0.01	X
29	Excess flow valve	0.1 to 0.01	X
30	Restrictive flow orifice	0.01	O
31	Pipeline surge dampening vessel	0.01	O
32	Check valve	0.1	O
33	Pressure reducing regulator	0.1	O
34	Continuous pilot	0.1	X
35	Captive key/lock system	0.01	O
36	Multiple mechanical pump seal system with seal failure detection and response	0.1	O
37	Continuous ventilation without automated performance monitoring	0.1	O
38	Continuous ventilation with automated performance monitoring	0.01	O
39	Emergency ventilation initiated by safety controls, alarms, and interlocks	0.1	O
40	Mechanically activated emergency shutdown/isolation device	0.1	O
41	Mechanical overspeed trip on a turbine	0.1	O
42	Automatic fire suppression system (within process equipment)	0.1	X
43	Automatic fire suppression system for local application	0.1	X
44	Automatic fire suppression system for a room	0.1	X
45	Automatic explosion suppression system for process equipment	0.1	O
46	Human response to an abnormal condition	0.1	O
47	Human response to an abnormal condition with multiple indicators and/or sensors, and the operator has > 24 hours to accomplish the required response action	0.01	X
48	An adjustable movement-limiting device that is intended to prevent operation of a device or movement of an object beyond a defined limit	0.1	O
49	Personal protective equipment	0.1	O

Table 6. Sample sheet to LOPA

NO.	Description	Causes	Management level	Initial accident frequency	layer of protection			Mitigated incident frequency	Additional required criteria	
					BPCS, etc.	Mitigation measures	IPL			
node 1										
1-1	LH2 tank explosion	Vacuum Break/insulation Break	10 ⁻⁵	10 ⁻²			R.D. 10 ⁻¹	PSV 10 ⁻²	10 ⁻⁵	-
		Overpressure formation due to external fires	10 ⁻⁵	10 ⁻²	firewall	fire detector	R.D.	PSV	10 ⁻⁷	-
					10 ⁻¹	10 ⁻¹	10 ⁻¹	10 ⁻²		
		Liquefied hydrogen overcharging	10 ⁻⁵	10 ⁻¹	SIS LOOP			TRY COCK	10 ⁻³	10 ⁻²
10 ⁻¹						10 ⁻¹				
External shocks such as car crashes	10 ⁻⁵	10 ⁻²			Access restriction	collision avoidance stand	10 ⁻⁵	-		
					10 ⁻¹	10 ⁻¹				
1-2	Massive leaks during loading/unloading of the tank lorry	Departure due to coupler fastening failure	10 ⁻⁴	10 ⁻²	SIS LOOP	fire detector			10 ⁻⁴	-
		Hose separation due to tank lorry misfire	10 ⁻⁴	10 ⁻²		fire detector	chock		10 ⁻⁴	-
node 2										
2-1	Massive leak due to rupture of high-pressure pump	Massive leak due to pump room damage	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	BPCS	SIS LOOP	firewall		10 ⁻⁸	-
					10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻¹			
2-2	Massive hydrogen leak due to LH2 pipe rupture	LH2 piping vacuum break/insulation break due to external damage etc.	10 ⁻⁵	10 ⁻²	SIS LOOP	Check vacuum level	firewall		10 ⁻⁶	-
					10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁻¹			
node 3										
3-1	Massive leak due to pipe rupture	Formation of pump high pressure due to clogging of the discharge side during operation	10 ⁻⁴	10 ⁻²	SIS LOOP			PSV	10 ⁻⁶	-
node 4										
4-1	Storage tank explosion/fire	Overpressure formation due to external fires	10 ⁻⁵	10 ⁻²	firewall	BPCS		PSV	10 ⁻⁶	-
		Deterioration due to use beyond the life cycle of the storage tank	10 ⁻⁵	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁻¹		10 ⁻²		
					BPCS	regular inspection	life evaluation		10 ⁻⁵	-
Design/connection fail	10 ⁻⁵	10 ⁻³				daily, weekly inspection	10 ⁻⁴	10 ⁻¹		
4-2	Container damage due to high-temperature forming of vehicle container	Overfill due to malfunction of dispenser FCV (BPCS defect)	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	JS2601 Protocol control logic				10 ⁻⁵	-
					10 ⁻¹					

3.2 개시사건과 IPL 분석

LOPA 기법의 선행연구로 액화수소충전소의 HAZOP 기법 결과를 분석하였다. 위험 등급이 3등급 이상 시나리오는 3개가 도출되었으며 주로 수소누출, 화재 및 폭발, 배관 파열이 선정되었다.

LOPA 기법을 수소충전소에 적용하기 위해 기존에 CCPS에서 제시하는 개시사건 및 IPL 중에서 수소충전소에 사용할 수 있는 항목을 분류하였다. Table 4는 개시사건의 종류로 총 23개 중 17개가 수소충전소에 사용할 수 있는 항목이었으며 주로 제어계통의 고장, 안전장치의 고장, 배관의 파열 등을 수소충전소에 적용할 수 있었다. 수소충전소에 사용하지 않는 Screw conveyor와 Atmospheric tank 등에 대한 항목은 적용할 수 없었다.

Table 5는 IPL의 종류로 총 49개 중 22개의 항목이 수소충전소에 사용할 수 있었다. 수소충전소에서는 사용하지 않는 폭연방지장치, 방류덕, 과류 밸브 등에 대한 IPL은 적용이 불가능했다.

기존에 석유 화학 공장에서 사용하던 개시사건과 IPL을 수소충전소에 적용하기 불가하여 CCPS에서의 예시와 비슷 조건인 개시사건과 IEF값을 적용하였으며 적용할 수 있는 22개의 IPL 이외의 화학 공정에서 사용하지 않지만, 수소충전소에 적용할 수 있는 IPL로 단열재, 일일점검, 정기 점검, 취성 관리/정비, 프로토콜 컨트롤 로직, TRY COCK 등을 가이드 라인에 참고하고 적절한 PFD를 적용하여 위험성 평가를 진행하였다.

3.3 LOPA 적용

Table 6은 LOPA 적용 Sample sheet이며 node 1은 액화수소 충전부로 LH₂ 저장 탱크 폭발과 탱크로리 입/출하 시 수소 대량 누출 시나리오가 도출되었다. LH₂ 저장 탱크가 폭발이 발생할 수 있는 원인으로는 진공·단열 파괴 또는 외력에 의한 내부 온도 상승 등을 볼 수 있고 이에 대한 상세한 원인은 Table 6과 같다. 이러한 다양한 원인에 대해 적용할 수 있는 방호장치는 SIS Loop, 파열판, 안전밸브, 방호벽, 화재감지기, TRY COCK, 접근금지조치, 충돌방지대와 고임목 등이 있다.

node 2는 액화수소 압축부에서 도출된 시나리오는 고압 압축 펌프와 LH₂ 배관 파열로 인한 대량 누출이 있었다. 고압 압축 펌프 파열로 인한 대량 누출에 원인으로는 펌프실 손상으로 인한 대량 누출이 도출되었으며 이에 대한 상세한 원인은 Table 6과 같다. 설치된 방호장치의 종류는 BPCS, SIS Loop, 방호벽, 주기적 진공도 점검이 있었다.

node 3는 기화부로 배관 파열로 인한 누출 시나리

오가 도출되었다. 원인으로는 운전 중 토출 측 막힘으로 펌프에 고압 형성이 도출되었으며 설치된 방호장치의 종류는 SIS Loop, 안전밸브가 있었다.

node 4는 기체 수소 공급 및 디스펜서 충전부에서 도출된 시나리오는 압력용기 폭발 및 누출로 인한 화재, 차량 용기의 고온 형성으로 인한 용기 손상이 있었다. 압력용기 폭발에 대한 원인으로는 외부 화재 발생으로 과압 형성, 압력용기 수명 초과 사용으로 인한 노후화, 설계·조립 결함이 도출되었다. 압력용기 누출로 인한 화재에 대한 원인으로는 설계·조립 결함이 도출되었고 차량 용기 고온 형성으로 용기 손상에 대한 원인으로 디스펜서의 BPCS 오작동으로 인한 과유량 충전이 도출되었으며, 이에 대한 상세한 원인은 Table 6과 같다. 설치된 방호장치의 종류는 BPCS, SIS Loop, 방호벽, 정기 점검, 일일/주간점검, 수명관리, JS2601 프로토콜, 안전밸브가 있었다.

3.4 결과

총 4개의 node로 나누어 HAZOP을 진행하고, 평가 대상에 대하여 총 107개의 유해·위험요인 시나리오가 파악되었으며, 도출된 개선 권고사항으로는 총 40개의 사항이 도출되었다. 1등급은 73개, 2등급은 34개이며 위험 등급이 낮더라도 IPL의 효용성을 분석하기 위해 사고 발생 시 심각한 시나리오 총 8개의 시나리오를 도출하여 방호계층분석을 하였다. 8개의 시나리오가 발생할 수 있는 원인은 총 19개였으며, 안전 계장 기능 무결 수준 미달 항목이 총 4개가 확인되어 추가적인 IPL을 권고하였다.

미달 항목으로는 node 1에서 1개의 미달 수준이 있었으며 액화수소 과충전의 필요수준은 10⁻²이므로 Level Transmitter를 2중 3 구조로 설치하며 추가로 Level Transmitter 설치할 것을 권고하였다.

node 2와 3에서는 미달 수준이 없었으므로 추가적인 권고사항은 없었다.

node 4에서 1개의 미달 수준이 있었으며 설계·조립 결함으로 인한 압력용기 누출의 필요수준은 10⁻¹이므로 TE 감지 후 차단할 수 있는 시스템 강구를 권고하였다.

IV. 결론

본 연구는 정성적 위험성 평가를 통한 액화수소충전소의 사고가 발생한다면 인명피해 또는 규모가 큰 시나리오를 선정하여 LOPA 위험성 평가 기법 적용 및 평가하는 방법에 관해 연구하였다. 기존 LOPA 기법은 수소충전소가 아닌 석유 화학 공장 등과 같은 복잡한 시스템에 적용됐으나, 액화수소충전소의 시스템

과 상이하여 적용에 있어 다음과 같은 어려움이 발생하였다.

첫 번째로 액화수소충전소는 석유 화학 공장과 달리 복잡한 구조가 아닌 특성이기 때문에 기존에 사용하는 개시사건과 IPL을 그대로 정확한 적용이 어려움이 있었다.

두 번째로 IPL의 종류가 다르고 사고 빈도 완화율 데이터가 부족하였다. 수소충전소에서 사용되는 완화 장치 즉, 단열재, 일일 점검, 정기 점검, 취성 관리/정비, 프로토콜 컨트롤 로직, TRY COCK 등의 수소충전소의 안전을 데이터가 부족하여 추후 모니터링을 통한 데이터 수집이 필요하다.

세 번째로 수소충전소는 제어시스템이 복잡하지 않은 구조이기 때문에 제어시스템에 적용할 IPL이 별로 없다는 문제점이 존재하여 이에 맞는 IPL 정의가 필요하다고 판단된다.

네 번째로 수소충전소는 운전원이 상시 상주하면서 운전하기 때문에 이상 발생 시 제어시스템을 운전원이 제어할 수 있어 완화 요인으로 적용할 수 있었다.

다섯 번째로 CCPS에서 제시하고 있는 개시사건은 수소충전소의 특성에 맞지 않아 적용 가능한 개시사건은 적었으나, 액화수소의 위험성과 충전소로서 차량의 출입이 잦은 특성 등을 반영할 수 있는 개시사건의 정의가 필요하다.

이러한 이유로 향후 수소충전소에 LOPA를 적용하기 위해서는 기존방식에서 탈피한 수소충전소 시스템에 맞는 IPL의 정의와 사고 빈도 완화율 도출이 필요하다고 사료 된다.

감사의 말

본 연구는 한국에너지기술평가원 액화수소 충전 핵심부품 및 시설 안전 기술개발 사업 (202201650002)에 의하여 연구되었음에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] 수소경제종합정보포털
- [2] Seo, D.H., Kim, T.H., Rhie, K.W., "A Study on the Calculation and Application of the Risk in the Hydrogen Stations", 24(5), 1-9, (2020)
- [3] 유승훈, "Hazard analysis on package type hydrogen station", *호서대학교 대학원 학위논문*, (2018)
- [4] 송지태, 이준원, *중대재해처벌법, PSM에 기반한 위험성평가 및 분석기법*, 성안당, KOREA, (2023)
- [5] 방호계층분석(LOPA) 기법에 관한 기술 지침, P-113-2012, KOSHA GUIDE
- [6] Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment, 2001, CCPS
- [7] 정수민, "Application of layer of protection analysis(LOPA) for chemical plants", *광운대학교 대학원 학위논문*, (2022)
- [8] Lee, I.J., Kim, R.H., "Safety Enhancement of LPG Terminal by LOPA & SIF Method", *Korean Chem. Eng. Res.*, 53(4), 431-439, (2015)
- [9] Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis, CCPS, (2015)