

## 고정식 수소충전소에서의 Dispenser Module 내 구역별 위험성 평가

임상진\* · 김민기\*\* · 김수\*\*\* · 이윤호\*\*\*\*†

\* 목포해양대학교 기관시스템공학과 대학원 석사과정, \*\* 대성파워텍 과장,

\*\*\* 목포해양대학교 기관시스템공학과 대학원 박사과정, \*\*\*\* 목포해양대학교 해양경찰학부 교수

Risk Assessment of Stationary Hydrogen Refueling Station  
by Section in Dispenser Module

SangJin Lim\* · MinGi Kim\*\* · Su Kim\*\*\* · YoonHo Lee\*\*\*\*†

\* Master's course, Department of Marine System Engineering, Graduate School of Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

\*\* Manager, Daesung Powertec Co.,Ltd, Haman 52059, Korea

\*\*\* Doctor's course, Department of Marine System Engineering, Graduate School of Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

\*\*\*\* Division of Coast Guard, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

**요약** : 신재생에너지로서 수소에 대한 수요가 증가하고 있으나 기존의 화석 연료와 달리 수소는 연료 공급을 위한 전용 충전소가 필요하며, 이러한 인프라 확보를 위해서 수소충전소의 위험성 평가가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 정성적 위험성평가와 정량적 위험성 평가로 구분하여 수소충전소에 대한 위험성평가를 수행하였다. 정성적 평가는 Hazard and Operability Analysis(HAZOP) 기법을 사용하여 Dispenser Module을 두 개의 Node로 평가하였으며, Criticality Estimation Matrix에 따라 Filter의 막힘으로 인한 사고와 고압 사고의 위험도가 High Level로 평가되었다. 정량적 위험성 평가는 Hydrogen Korea Risk Assessment Module(Hy-KoRAM)을 사용하여 화재의 형상과 피해영향범위를 나타냈고, 개인적 위험도와 사회적 위험도에 대한 평가를 수행하였다. 개인적 위험도는 수소충전소로부터 약 100m 떨어진 공공 시설 부근까지 추가적인 안전조치가 고려되는 As Low As Reasonably Practicable(ALARP) 구간의 위험도를 보였고, 사회적 위험도 역시 약 10명의 사망자가 발생할 사고빈도가 1E-04/year로 도출되며 ALARP 구간 내에 나타났다. 정성적·정량적 위험성 평가 결과, 공정 단계의 추가적인 안전 조치와 수소충전소 부근의 제한구역 설정을 통하여 안전성 향상 방안을 제시하였다.

**핵심용어** : 수소충전소, 위험성평가, 누출사고 발생빈도, 사고피해영향, 위험성 평가프로그램

**Abstract** : Demand for hydrogen as a renewable energy resource is increasing. However, unlike conventional fossil fuels, hydrogen requires a dedicated refueling station for fuel supply. A risk assessment of hydrogen refueling stations must be undertaken to secure the infrastructure. Therefore, in this study, a risk assessment for hydrogen refueling stations was conducted through both qualitative and quantitative risk assessments. For the qualitative evaluation, the hydrogen dispenser module was evaluated as two nodes using the hazard and operability (HAZOP) analysis. The risk due to filter clogging and high-pressure accidents was evaluated to be high according to the criticality estimation matrix. For the quantitative risk assessment, the Hydrogen Korea Risk Assessment Module (Hy-KoRAM) was used to indicate the shape of the fire and the range of damage impact, and to evaluate the individual and social risks. The individual risk level was determined of to be as low as reasonably practicable (ALARP). Additional safety measures proposed include placing the hydrogen refueling station about 100m away from public facilities. The social risk level was derived as 1E-04/year, with a frequency of approximately 10 deaths, falling within the ALARP range. As a result of the qualitative and quantitative risk assessments, additional safety measures for the process and a safety improvement plan are proposed through the establishment of a restricted area near the hydrogen refueling station.

**Key Words** : Hydrogen refueling station, Risk assessment, Leak frequency, Consequence, Hy-KoRAM

\* First Author : wa805@mmu.ac.kr

† Corresponding Author : yhlee@mmu.ac.kr, 061-240-7209

## 1. 서론

최근 환경문제가 대두됨에 따라 이산화탄소 배출 규제에 대한 논의가 활발히 이루어지고 있으며, International Energy Agency(IEA)는 2050년까지 이산화탄소 배출량을 net zero로 제한하는 보고서를 발표하였다(IEA, 2021).

이에 따라, 무탄소 신재생에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 그중 수소는 여러 산업에 실 적용 되는 물질로 각광받고 있으며, 자동차, 드론, 선박 등 다양한 분야의 상용화에 박차를 가하고 있다. 수소의 상용화를 위해 기반 시설을 갖추는 것이 중요하며, 이를 위해 국토교통부는 개발제한구역에 차량용 수소충전소 설치를 확대하기 위해 『개발제한구역법』을 개정하는 등의 노력을 기울이고 있다. 하지만 수소는 『고압가스 안전관리법』상 부탄, 프로판 등과 같이 가연성가스로 규정되며 화재의 위험을 갖는 한계가 남아있다(High Pressure Gas Safety Control Act, 2021).

수소와 관련된 사고 사례로, 2019년 5월 강릉지역의 과학산업단지 벤처공장에 설치된 수소탱크 3기가 폭발하였으며 이로 인해 시설을 견학 중이던 2명이 사망하고 6명이 중경상을 입은 사고가 있었다(KBS news, 2019a).

수소충전소 관련 사례로는, 2019년 6월 노르웨이 산드비카에 위치한 수소충전소 화재 사례가 있다. 해당 사고는 고압 저장용기 플러그 조립 불량에 의한 누출을 원인으로 발생한 폭발사고이며, 폭발로 인해 2명의 부상자를 낳았고 소방 당국은 주변 500m를 봉쇄하였다(KBS news, 2019b). 이렇듯 최근까지 수소에 의한 사고가 발생하고 있기 때문에 관련 대처방안에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

관련 연구로서, Gu et al.(2020)은 Fire Dynamics Simulator(FDS)를 사용하여 터널 안에서 수소 Jet 화재 발생 시, 온도와 농도에 따른 위험도에 관한 연구를 수행하였다. Hussein et al.(2020)은 주차장 안에서 차량으로부터 수소가 누출되는 경우의 영향에 대해 ANSYS Fluent를 활용하였다. 또한, Kang and Kim(2020)은 Hy-KoRAM의 기능을 통해 수소충전소의 피해범위와 그 영향에 대한 분석을 수행하여, 격벽 등의 방호 조치를 권장하였다.

이와 같이 다양한 프로그램을 사용하여 수소 누출로 인한 피해영향과 그 대안을 제시하기 위한 연구가 수행되어 왔지만, 아직까지 국내 수소 누출, 화재, 폭발 등에 대한 연구는 부족한 것이 실정이다. 따라서 본 연구에서는 공개된 수소충전소 P&ID를 토대로 Node를 설정하여 위험 요소에 대한 정성적 평가를 수행한 후, 국내에서 국제공동연구를 통해 개발한 위험성평가 프로그램인 Hydrogen Korea Risk Assessment Module(Hy-KoRAM)을 활용하여 수소충전소의 정량적 위험성 평가를 수행하였다.

## 2. 연구방법

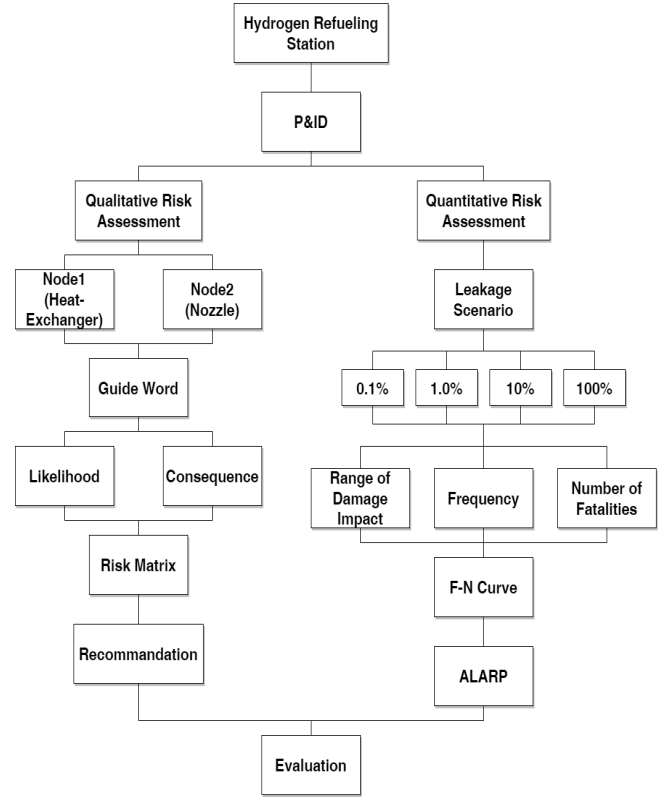


Fig. 1. Methodology for risk assessment.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 수소충전소의 P&ID 중 Heat-Exchanger와 Nozzle 부분으로 Node를 지정하고 각 정성적 위험성 평가를 수행하여 위험이 되는 요소를 선정한 뒤, Likelihood와 Consequence 정보를 취합하여 Risk Matrix를 결정하였다. 선정한 Node의 전체 정보를 Hy-KoRAM에 적용하여 정량적 위험성 평가를 수행하였다. 각 시나리오별 피해영향 범위와 Jet 화재의 형상을 도출하고 ALARP 의사결정기법을 활용하여 사고빈도 수와 사망자 수에 따른 수소충전소의 안전 허용구간과 수용구간, 허용불가구간을 제시하였다.

### 2.1 수소충전소 장비 구성

정성적 평가를 수행하기 위하여 D 회사의 자료를 참고하였으며, 해당 수소충전소의 시스템은 Nozzle 동결방지를 위한 설비가 설치되어있고, 과압을 방지하기 위하여 Safety Valve가 1개 설치되어 있다. 그리고 Chiller에서 공급된 유체와 열교환을 거쳐 수소가 공급되며, 각 부에 온도와 압력을 측정할 수 있는 Transmitter, Indicator, Gauge가 설치되어 있다.

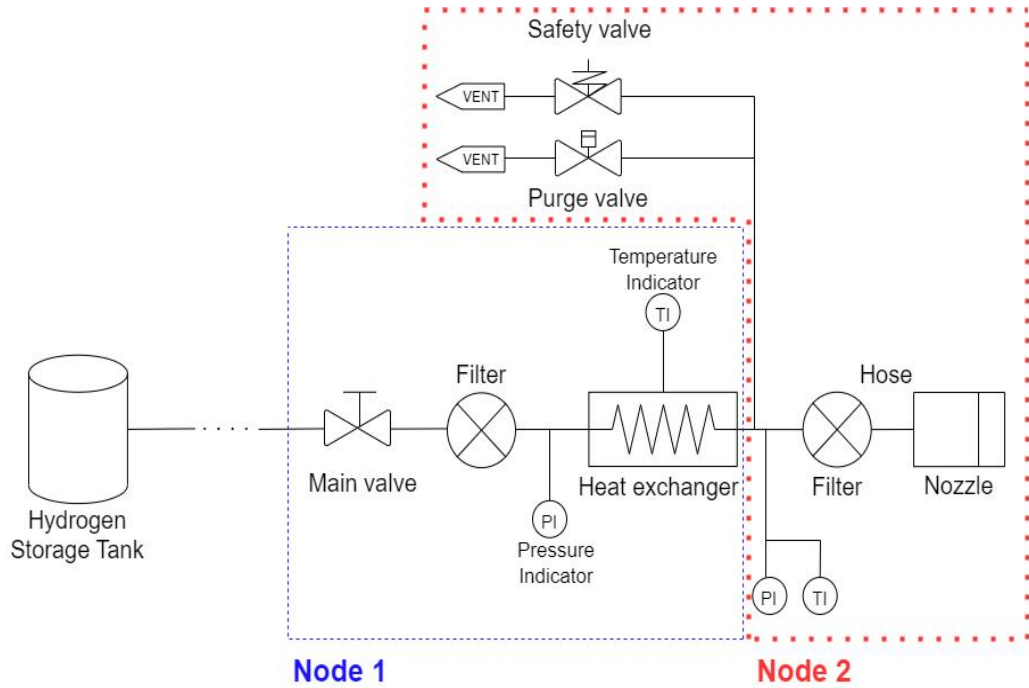


Fig. 2. Dispenser module of hydrogen refueling station.

2.2 위험성 평가 기준

2.2.1 정성적 위험성평가 기준

정성적 위험성 평가는 평가자들의 의견으로 공정 위험도가 결정되는 평가 방법이기 때문에 Worksheet와 위험도의 기준을 명확히 하는 것이 중요하다. Table 1과 Table 2는 Worksheet의 위험도 평가 기준으로, 산업체에서 사고가 일어날 가능성에 대한 기준과 사고 발생 시 작업자 혹은 일반인의 부상 및 사망의 심각성에 대한 기준을 나타낸다.

Table 3은 사고의 빈도와 심각성을 비교하여 최종적으로 위험도를 판단할 수 있는 기준이다. L단계는 허용 가능한 정도의 위험성을 나타내는 Low Level을 의미하며, M단계는 잠재된 위험을 고려해야 할 수용 가능한 정도의 Medium Level

위험도를 나타내고, H단계는 허용불가의 매우 위험한 수준의 위험성인 High Level을 의미한다(ISO 17776, 2016).

Table 1. Classification & grade of likelihood

Grade	Likelihood
1	Occur several times per year per station
2	Occurs several times per year per operator
3	Has been experienced by most operators
4	Some accidents have occurred in the industry
5	Never heard of in the industry
6	Failure is not expected

Table 2. Classification & grade of severity

Grade	Severity
1	Single or minor injuries ( $10^{-2}$ )
2	Multiple or severe injuries ( $10^{-1}$ )
3	Single fatality or multiple severe injuries ( $10^0$ )
4	Multiple fatalities ( $10^1$ )

Table 3. Criticality estimation matrix

Section	Severity			
	1	2	3	4
Likelihood 1	L	L	M	M
2	L	M	M	M
3	M	M	M	H
4	M	M	H	H
5	M	H	H	H
6	H	H	H	H

※ L: Low Level Risk, M: Medium Level Risk, H: High Level Risk

2.2.2 정량적 위험성 평가 기준

Dispenser Module 공정 안에 위험 가능성이 있는 요소를 수치적으로 표현하고 이를 정량적으로 평가하기 위하여 Hy-KoRAM을 사용하였다. Table 4는 평가를 위한 가정조건으로, 수소충전소 수소공급라인 P&ID의 구성요소를 나타내었다.

$$V = I^{(4/3)} \times t \tag{1}$$

$$Y = -38.48 + 2.56 \times \ln(V) \tag{2}$$

$$P_{fatal} = F(Y | \mu = 5, \sigma = 1) = \Phi(Y - 5) \tag{3}$$

여기서,

$t$ : Exposure time (s)

$V$ : Thermal dose unit (-)

$I$ : The heat flux intensity ( $W/m^2$ )

$Y$ : Fatality probability (%)

$\mu$ : Mean (-)

$\sigma$ : Standard deviation (-)

$\Phi$ : The standard normal cumulative distribution function (-)

사망 가능성은 프로빗 모델의 종류에 따라 다르게 도출되어질 수 있으므로 본 연구에서는 『사고피해영향 평가에 관한 기술지침』에 따라 아이젠버그(Eisenberg) 계산식을 식(1)~식(3)과 같이 사용하였다(KOSHA, 2012a). 노출시간과 복사열을 통하여 식(1)과 식(2)를 구한 뒤, 평균값이 5, 표준편차가 1인 표준정규누적분포함수를 통해 사망률을 도출해낼 수 있다(SAND2022-16425, 2022).

Table 4. Simulation parameters

Variable		Value	Unit
Valve		15	pcs
Hose		2	pcs
Filter		3	pcs
Heat-exchanger		2	pcs
Pipe	Out-diameter	9.5	mm
	In-diameter	5.2	mm
Tank	Temperature	40	Celsius
	Pressure	870	bar
Ambient Temperature		20	Celsius
Ambient Pressure		1	bar

$$PLL = \sum_n (f_n \times c_n) \tag{4}$$

$$FAR = \frac{PLL \times 10^8}{Exposedhours} \tag{5}$$

$$AIR = H \times FAR \times 10^{-8} \tag{6}$$

여기서,

$f_n$ : Frequency of the accident scenario  $n$  (/year)

$c_n$ : The expected number of fatalities for accident scenario  $n$  (-)

$H$ : The annual number of hours the individual spends in the facility (hour)

공정의 위험도를 나타내기 위하여 식(4)~식(6)과 같이 Potential Loss of Life(PLL), Fatal Accident Rate(FAR), Average Individual Risk(AIR)을 사용하였다(SAND2022-16425, 2022). 이를 통하여, 공정의 위험도를 도출할 수 있으며,  $c_n$ 은 사망확률과 구간별 작업자, 일반인 수의 곱으로 해당 인구수는 Table 5와 같이 가정하였다.

또한, 정량적 위험성평가를 위한 시나리오로서 미국 국립 샌디아 연구소에서 제시한 파공부 크기별 시나리오를 채택하였다(SAND2009-0874, 2009). 파공부는 가장 작은 Small Size부터 파이프 직경 크기의 Rupture Size를 기준으로 삼았으며, Table 6과 같이 Small Size는 파이프 직경의 0.1%인 2.925E-005 m, Rupture Size는 파이프 직경 100%인 9.250E-004 m로 가정하였다.

Table 5. Population distribution

Sites	Category	Population
Hydrogen refueling station	Operator	6
Government office	Public	100
Sports center	Public	100

Table 6. Hole size criteria of scenario

Scenario	Hole size	
	Small leak	0.1 %
Large leak	1 %	9.250E-005 (m)
Medium leak	10 %	2.925E-004 (m)
Rupture leak	100 %	9.250E-004 (m)

### 3. 정성적 위험성 평가

화학 공정에 대한 정성적 위험성 평가는 사고예상질문분석(What-if), Failure Mode and Effect Analysis(FMEA), Preliminary Hazard Analysis(PHA) 그리고 Hazard and Operability Analysis (HAZOP) 기법이 주로 사용되고 있다. 본 연구에서는 정성적 위험성 평가 중 가장 널리 사용되며, 화학 공정 중 발생 가능한 위험성을 설계 도면상에서 체계적으로 분석하는 정성적 평가 기법인 HAZOP을 선정하였고, 공정의 위험요소를 도출하기 위해 다음과 같은 절차(You and Kim, 2018)를 수행하였다.

- 1) 대상 공정에 대한 도면(P&ID) 확보 및 분석
- 2) 공정별 Node 및 가이드워드(Guide Word) 선정
- 3) 원인(Cause) 규명 및 결과(Consequence) 예측
- 4) 사고의 강도(Severity) 및 빈도(Likelihood) 평가
- 5) 위험등급 결정(Risk) 및 권고사항(Recommendation) 제시

공정 도면을 분석하고 평가하기 위하여 Dispenser Module 을 Table 7과 같이 두 개의 Node로 나누었다. Node 1은 Main

Supply Line인 Heat-Exchanger를 거치는 공정과 이를 Vent 시키는 공정과정을 의미하며, Valve 8개, Filter 1개, Heat-Exchanger 2개로 이루어져 있고, Pneumatic Valve의 Control 계통은 질소를 사용하고 있다. Node 2는 수소충전의 최 말단 공정으로, Nozzle 2개, Hose 2개, Filter 2개, Valve 5개로 구성되는 Main Supply Line과 Vent Line의 공정이다.

Table 8은 각 시나리오별 파공부 크기와 연간 사고 빈도수를 나타내며 국립 샌디아 연구소의 빈도수 자료에 Heat-Exchanger는 사고이력이 존재하지 않아 ∞로 표시하였다. 이러한 자료를 토대로 정성적 위험성 평가를 수행한 결과는 Table 9와 같이 나타났다.

Table 7. Definition of HAZOP study node for evaluation equipments

Node No.	Description
Node 1	Heat-exchanger
	Venting line
Node 2	Supply line
	Venting line

Table 8. Leakage scenario and leak frequency data

Component	Amount	Scenario	Leak size(m)	Leak frequency(/year)
Valve	15	Small leak	2.925E-002	8.787
		Medium leak	9.250E-002	8.161
		Large leak	2.925E-001	3.707
		Rupture leak	9.250E-001	7.223
Filter	3	Small leak	2.925E-002	1.524
		Medium leak	9.250E-002	1.452
		Large leak	2.925E-001	1.382
		Rupture leak	9.250E-001	1.316
Hose	2	Small leak	2.925E-002	4.064
		Medium leak	9.250E-002	3.297
		Large leak	2.925E-001	3.014
		Rupture leak	9.250E-001	1.233
Heat-exchanger	2	Small leak	2.925E-002	∞
		Medium leak	9.250E-002	∞
		Large leak	2.925E-001	∞
		Rupture leak	9.250E-001	∞

※ ∞는 사고이력이 없음을 표시함.

고정식 수소충전소에서의 Dispenser Module 내 구역별 위험성 평가

Table 9. Worksheet for HAZOP study of the hydrogen refueling station

Node	Guide word	Cause	Consequence	Existing control	L	S	R	Action required (Recommendation)
Node 1	No Flow (feeding line)	Clogged filter	1) Leakage 2) Fire 3) Heat-exchanger tube damage 4) Drop feed rate of nozzle	PT, PI, PG	6	1	*H	1) Install another filter in parallel and flow meter 2) Set flow failure alarm
		Clogged heat-exchanger tube			3	1	M	1) Install flow meter 2) Set flow failure alarm
	No Flow (venting line)	Damaged valve (vent)			3	1	M	1) Install flow meter 2) Set flow failure alarm
		Leaked pipe			1	4	M	1) Install gas & fire detector 2) Install flow meter 3) Set flow failure alarm
	Less Flow	Clogged filter			1) Leakage 2) Fire 3) Explosion 4) Heat-exchanger tube damage	PT, PI, PG	6	1
		Leaked pipe	1	4			M	1) Install gas & fire detector 2) Install flow meter 3) Set flow failure alarm
	More Flow	Damaged valve (vent)	3	3			M	1) Install 2nd glove valve 2) Add manual mode for pneumatic 3) Install flow meter 4) Set flow failure alarm
	More Temp	Insulation fault of heat exchanger	1) Phase change 2) Leakage 3) Fire	TC, TI	1	1	L	None
		Insulation fault of pipe			1	1	L	None
	More Press	Damaged valve (vent)	1) Leakage 2) Fire 3) Explosion 4) Heat-exchanger tube damage	PT, PI, PG, Safety valve	3	4	*H	1) Install another safety valve in parallel
		Increased temperature chilling water			3	4	*H	1) Conduct visual inspection 2) Install by-pass line for heat-exchanger
		Clogged heat-exchanger tube			3	4	*H	1) Install by-pass line for heat-exchanger
		Installed reverses (vent, check valve)			3	4	*H	1) Install another safety valve in parallel
		Control system fault			3	4	*H	1) Install another safety valve in parallel 2) Set control failure alarm

※ Pressure Transmitter (PT), Pressure Indicator (PI), Pressure Gauge (PG)  
Temperature Control (TC), Temperature Indicator (TI)

Node	Guide word	Cause	Consequence	Existing control	L	S	R	Action required (Recommendation)
Node 2	No Flow (feeding line)	Damaged valve (nozzle inlet)	1) Leakage 2) Fire 3) Drop feed rate of nozzle	PT, PI, PG	3	1	M	1) Add manual mode for valve 2) Install flow meter 3) Set flow failure alarm
		leaked hose			4	4	*H	1) Install gas & fire detector 2) Install flow meter 3) Set flow failure alarm
	No Flow (purging line)	Damaged valve (purge)			3	1	M	1) Install flow meter 2) Set flow failure alarm
		Leaked pipe			4	1	M	1) Install gas & fire detector 2) Install flow meter 3) Set flow failure alarm
	Less Flow	Damaged valve (nozzle inlet)	1) Leakage 2) Fire 3) Drop feed rate of nozzle	PT, PI, PG	3	1	M	1) Install flow meter 2) Set flow failure alarm
		Clogged filter			6	1	*H	1) Install flow meter 2) Set flow failure alarm
		Leaked hose			4	4	*H	1) Install gas & fire detector 2) Install flow meter 3) Set flow failure alarm
	More Flow	Damaged valve (vent)	1) Leakage 2) Fire 3) Explosion 4) Over charging		3	4	*H	1) Set pump shut off 2) Set flow failure alarm 3) Install flow meter
	More Temperature	Insulation fault of hose	1) Phase change 2) Leakage 3) Fire	TC, TI	1	1	L	None
		Insulation fault of pipe			1	1	L	None
	Less Temperature	Damaged valve (purge)	1) Leakage 2) Fire 3) Freezing	TC, TI	3	2	M	1) Install TI on nozzle
	More Press	Damaged valve (nozzle inlet)	1) Leakage 2) Fire 3) Explosion 4) Nozzle damage	PT, PI, PG, Safety valve	3	4	*H	1) Install another safety valve in parallel
		Damaged valve (vent)			3	4	*H	1) Install another safety valve in parallel
		Damaged valve (purge)			3	4	*H	1) Install another safety valve in parallel
Clogged filter		6			4	*H	1) Install another safety valve in parallel	

## 고정식 수소충전소에서의 Dispenser Module 내 구역별 위험성 평가

Table 9는 정성적 위험성 평가 결과의 일부로서, Node 1과 Node 2에서 도출된 공통적인 고위험 요소는 Filter와 압력에 대한 사고위험이었다. Filter는 위험도가 낮더라도 산업 현장에서 막힘 사고가 잦은 장비로서, Likelihood 6단계로 적용되어 Filter가 막힌 경우 모든 Guide word에서 High Level의 위험도로 평가되었다. 또한, 높은 압력을 유발하는 사고는 Node 1과 Node 2에서 모두 높은 위험도로 평가되었는데, Valve 손상과 같이 원인에 대한 발생 가능성이 중간단계 위험도인 3으로 측정되더라도 고압에 의한 사고는 심각한 인명·재산 피해를 주는 사고일 가능성이 높기 때문에 High Level 위험도로 평가되었다.

Node 1의 특징은 Heat-Exchanger가 설치되어 있는 것으로, 열교환기의 Tube가 막히는 경우 발생할 수 있는 사고를 염두 할 수 있으나, 완전히 막혀 고압이 되는 경우를 제외하고 열교환기의 효율이 떨어질 뿐 안전상에 큰 영향을 주지 않아 위험도가 Medium Level으로 측정되었다.

반면에, Node 2의 Hose는 작업자와 일반인에게 노출되어 있는 설비이며 설비 특성상 누설할 가능성이 높아 High Level 위험도도를 평가되어 추가적인 대비책이 필요할 것으로 보인다.

High Level 위험도의 원인에 대한 대비책으로서 Flow meter를 설치하여 공정 내 유체의 흐름을 확인하고 Filter가 막히는 경우를 대비하여 병렬로 Filter를 추가 설치해야 할 것으로 평가되었다. 또한, P&ID상 Pressure Safety Valve가 1개 설치되어 Valve의 손상을 대비하여 추가 설치가 필요할 것으로 보이며, 작업자 및 일반인의 안전 확보를 위하여 Hose의 주변에 Gas & Fire Detector를 설치할 것을 제시하였다.

## 4. 정량적 위험성 평가

### 4.1 피해영향 평가

Fig. 3과 Fig. 4와 같이 피해 범위의 산출 시, 수소충전소는 개방된 공간에서 운영되는 것을 고려, 증기운 형성 가능성이 적다고 판단되어 범위 산출에 반영하지 않았으며, Fig. 5와 Fig. 6의 정량적 위험성 평가에서 고려하여 수행하였다(Kang and Lee, 2022). 가장 사고의 빈도수가 높았던 파이프 크기의 0.1% 파공을 가정한 Small Leakage 시나리오의 피해 영향 범위를 살펴보면, Jet 화재의 화염 길이는 약 3.5m로 나타났다. 또한, 『화학공장의 피해최소화대책 수립에 관한 기술지침』에 따른 근로자에게 상해를 미칠 수 있는 범위인  $4 \text{ W/m}^2$ 의 피해영향 범위는 약 4m로 예측되었다(KOSHA, 2012b).

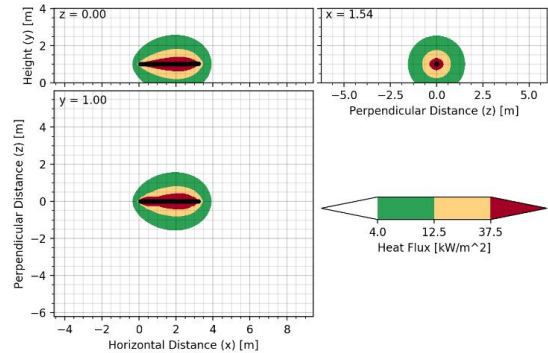


Fig. 3. Radiant heat distribution of jet flame for 0.1% leak hole.

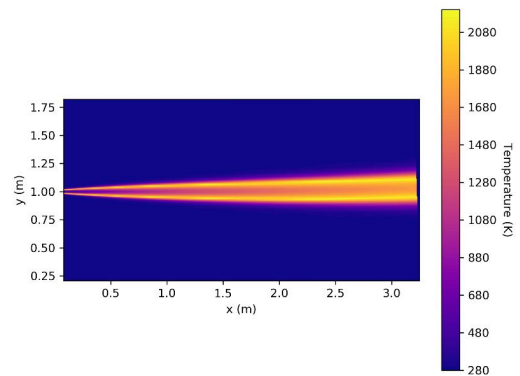


Fig. 4. Jet flame for 0.1% leak hole.

- 1)  $4 \text{ W/m}^2$  : 근로자에게 상해를 줄 수 있는 범위
- 2)  $12.5 \text{ kW/m}^2$  : 2차 화재를 유발할 수 있는 범위
- 3)  $37.5 \text{ kW/m}^2$  : 시설물의 전파를 유발할 수 있는 범위

### 4.2 위험도 평가

정량적으로 위험도를 평가하기 위하여, Table 10과 같이 개인적 위험도는  $1.0 \times 10^{-4}/\text{year} \sim 1.0 \times 10^{-6}/\text{year}$ 의 ALARP 구간을 설정하였고, 사회적 위험도는 F-N 선도에서 빈도수가  $1.0 \times 10^{-2}/\text{year} \sim 1.0 \times 10^{-4}/\text{year}$ 이면서 사망자 수는  $10^3 \sim 10^6$ 을 보이는 범위에 대하여 ALARP 구간으로 정의하였다(Kang and Lee, 2022).

Fig. 5에서 개인적 위험도가 높은  $1.0 \times 10^{-4}/\text{year}$  이상으로 나타나는 Orange Zone은 수소충전소로부터 약 100m 떨어진 주민체육시설 및 공공기관 부근까지 영향을 미치는 것으로도 출되었다. 또한, 사회적 위험도는 Fig. 6. F-N곡선의 ALARP 구간까지 위험도를 나타내며 추가적인 안전장치의 필요성을 보였다. 따라서 위험도 완화를 위하여 HAZOP에서 제시한 안전장치의 추가와 주민체육시설 및 공공기관과 수소충전소 사이의 충분한 제한구역을 확보하여 인명피해를 미연에 방지할 필요가 있다.





Fig. 5. The contours of individual risk.

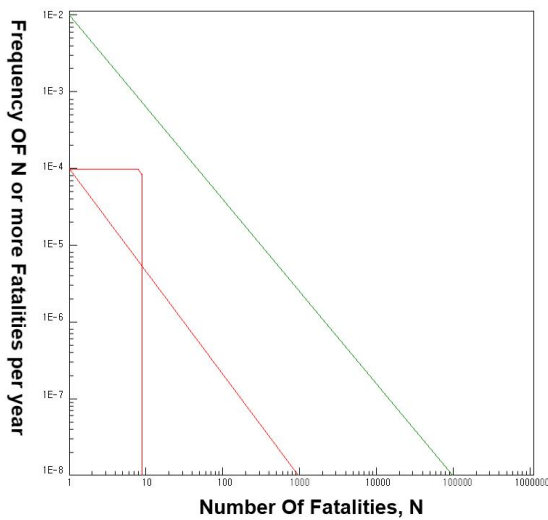


Fig. 6. Societal risk F-N curve.

Table 10. ALARP criteria for quantitative risk assessment

Risk	Criteria	
Individual Risk	$1.0 \times 10^{-4}/\text{year} \sim 1.0 \times 10^{-6}/\text{year}$	
Societal Risk	F	$1.0 \times 10^{-2}/\text{year} \sim 1.0 \times 10^{-4}/\text{year}$
	N	$10^3 \sim 10^6$

## 5. 결론

본 연구에서는 수소충전소의 Dispenser Module에 대한 정성적·정량적 위험성평가를 수행하였다. 정성적 평가는 HAZOP기법을 통해 평가하였고, 정량적 평가는 Hy-KoRAM을 사용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 정성적 평가를 위하여 P&ID를 두 개의 Node로 선정하였다. 공통적인 문제는 Filter가 막혀 발생할 수 있는 대

비책이 필요할 것으로 평가되어 병렬로 Filter를 추가하고 Flow Meter 설치하여 지속적인 모니터링과 사고대비가 가능하도록 방안을 제시하였다. 또한, 고압에 의한 사고 대비 안전장치로 Safety Valve 추가 설치를 제안하였다. Node 1의 Heat-Exchanger는 사고 빈도수가 낮아 사고의 위험도는 Low Level 평가되었고, Node 2의 Hose는 사고빈도가 높을 것으로 사료되어 Detector 설치를 통하여 미세 누설에 대한 감지 및 모니터링을 제안하였다.

- 2) 정량적 평가를 통하여 Dispenser Module의 개인적 위험도와 사회적 위험도를 도출하였다. 수소충전소 주변의 주민체육시설과 공공기관 부근까지 개인적 위험도가  $1.0 \times 10^{-4}/\text{year}$  이상으로 높게 나타났기 때문에 작업공간과 일반인의 활동공간을 구분할 수 있는 제한구역의 확보를 제시하였다. 또한, 사회적 위험도가 F-N 곡선을 통하여 약 10명의 사망자가 발생할 빈도수가  $1E-04$ 로 ALARP 구간인 수용가능영역에 위치하는 것으로 나타나 HAZOP 및 개인적 위험도 평가에서 제시한 추가 안전장치가 필요한 것을 확인할 수 있었다.

본 연구 결과는 수소충전소의 공정 설계 단계에서 위험성을 평가하기 위한 방안 마련에 활용할 수 있을 것으로 판단되며, 추 후 자동차, 선박 등 다양한 산업분야의 수소 상용화를 위한 위험성평가 및 정책 수립 등에 연구 자료로서 사용될 것으로 기대된다.

## References

- [1] Gu, X., J. Zhang, Y. Pan, Y. Ni, C. Ma, W. Zhou, and Y. Wang(2020), Hazard analysis on tunnel hydrogen jet fire based on CFD simulation of temperature field and concentration field, The Journal of Safety Science, Vol. 122, 104532.
- [2] High Pressure Gas Safety Control Act(2021), <https://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?efYd=20211216&lsiSeq=232897#0000>
- [3] Hussein, H., S. Brennan, and V. Molkov(2020), Dispersion of hydrogen release in a naturally ventilated covered car park, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 45, pp. 23882-23897.
- [4] International Energy Agency(IEA)(2021), Net Zero by 2050.
- [5] International Organization for Standardization(2016), International Standard ISO 17776, petroleum and natural gas industries - Major accident hazard management during the design of new installations.

- [6] Kang, S. K. and H. L. Kim(2020), Analysis of Damage Range and Impact of On-Site Hydrogen Fueling Station Using Quantitative Risk Assessment Program (Hy-KoRAM), The Journal of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 31, No. 5, pp. 459-466.
- [7] Kang, S. G. and D. H. Lee(2022), Risk Assessment for Performance Evaluation System of Hydrogen Refueling Station, The Journal of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 33, No. 3, pp. 232-239.
- [8] KBS news(2019a), <https://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=4221248&ref=A>.
- [9] KBS news(2019b), <https://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=4208465&ref=A>.
- [10] KOSHA(2012a), Technical Guidelines for the Assessment of Accidental Damage (P-88-2012).
- [11] KOSHA(2012b), Technical Guidelines for the Establishment of Measures to Minimize Damage in Chemical Plants (P-88-2012).
- [12] Ministry of land(2021), [http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m\\_71/dtl.jsp?id=95085506](http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?id=95085506).
- [13] Ministry of Trade and Industry and Energy(2022), High Pressure Gas Safety Management Law.
- [14] Sandia Energy(2009), Analyses to Support Development of Risk Informed Separation Distances for Hydrogen Codes and Standards (SAND2009-0874).
- [15] Sandia Energy(2022), Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) Version 5.0 Technical Reference Manua (SAND2022-16425).
- [16] You, C. H. and J. Y. Kim(2018), HAZOP Study for Risk Assessment and Safety Improvement Strategies of CO<sub>2</sub> Separation Process, The Korean Institute of Chemical Engineers, Vol. 56, No. 3, pp. 335-342.

---

Received : 2023. 01. 31.

Revised : 2023. 02. 20.

Accepted : 2023. 02. 24.