

# EFFECTS & RISKCURVES를 통한 수소 제품 검사 및 시험 시설 위험성 평가

김진서<sup>1</sup> · 김양균<sup>2†</sup> · 정승호<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>아주대학교 대학원 환경공학과, <sup>2</sup>한국건설기술연구원 화재안전연구소, <sup>3</sup>아주대학교 환경안전공학과

## Risk Assessment of Hydrogen Product Inspection and Testing Facility Using EFFECTS & RISKCURVES

JINSEO KIM<sup>1</sup>, YANGKYUN KIM<sup>2†</sup>, SEUNGHO JUNG<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Ajou University Graduate School, 206 World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon 16499, Korea

<sup>2</sup>Department of Fire Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 64 Mado-ro 182beon-gil, Mado-myeon, Hwaseong 18544, Korea

<sup>3</sup>Department of Environmental Safety Engineering, Ajou University, 206 World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon 16499, Korea

†Corresponding author :

yangkyunkim@kict.re.kr  
processafety@ajou.ac.kr

Received 7 November, 2024

Revised 2 December, 2024

Accepted 17 December, 2024

**Abstract >>** Hydrogen is expanding in use as a measure to reduce greenhouse gas emissions. However, due to the inherent risks of hydrogen, ensuring safety is essential. To address this, Korea is working to establish a testing infrastructure for hydrogen facilities. In this study, a risk assessment was conducted on a hydrogen product inspection-testing facility. Potential leak scenarios are derived and frequency and consequence analysis are performed for each scenario. Additionally, individual and societal risks were evaluated with and without the implementation of an independent protection layer.

**Key words :** Hydrogen(수소), Hydrogen product inspection and testing facility(수소 제품 검사 및 시험 시설), Risk assessment(위험성 평가), Probit analysis(프로빗 분석법), Probit analysis(개인적, 사회적 위험도), Independent protection layer(독립 방호 계층)

## 1. 서론

전 세계적으로 기후 변화에 대한 대응으로 온실가스 감축을 위해 노력하고 있는 가운데 우리나라 역시 2030년까지 2018년 대비 온실가스 40% 감축을 중장기 감축 목표로 설정하였다. ‘탄소중립·녹색성

장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획’에 따르면 부분별 감축 대책 중 하나로 수소를 제시하고 있으며 수소 발전 및 모빌리티의 활용을 확대하고 수소 도시 등 지역별 생태계 확장하는 등을 목표로 하고 있다<sup>1)</sup>. 하지만 수소는 4-75%의 넓은 연소 범위를 지니고 공기보다 밀도가 낮아 누출 시 빠르게 확산하기

때문에 화재 및 폭발의 위험성이 크다<sup>2)</sup>. 그 예시로 국내에선 2019년 강원테크노파크에서 수전해 수소 탱크가 폭발하여 2명이 사망하는 사고가 발생하기도 하였으며 국외에서는 2019년 노르웨이 오슬로 인근의 수소충전소에서 폭발이 발생하여 2명이 부상을 입는 사고가 발생하였다<sup>3,4)</sup>.

이러한 수소의 위험성으로 인하여 국내에서는 ‘수소 안전관리 로드맵 2.0’을 통해 다양한 수소 관련 안전관리 목표를 제시하고 있으며 이 중 하나로 수소 제품과 설비 검사 및 시험 인프라를 구축하고 있다. 또한 수소 취급 시설의 위험성을 분석하는 많은 연구가 이루어졌다<sup>5)</sup>.

Jeon 등<sup>6)</sup>은 PHAST와 HyRAM 프로그램을 사용하여 수소충전소의 사고 영향 평가를 수행하고 이를 바탕으로 사회적 위험도를 평가하였다. Kwak 등<sup>7)</sup>은 SAFETI 프로그램을 사용하여 수소충전소의 개인적 위험도와 사회적 위험도를 평가하고 차단밸브를 설치하여 위험도를 효과적으로 줄일 수 있는 방안을 제시하였다. Park 등<sup>8)</sup>은 RISKCURVE 프로그램을 사용하여 수소충전소에서의 제트 화재로 인한 개인적 위험과 사회적 위험을 평가하고 독립 보호 계층을 적용한 위험도 저감 방안을 제시하였다.

또한 Shin 등<sup>9)</sup>은 부생가스 기반 수소 정제 시설의 구성 요소를 분석하고 위험 요인을 조사하여 정량적 위험성 평가를 수행하였으며 Shin 등<sup>10)</sup>은 수소 생산을 위한 수증기 개질 공정에 대한 위험성 평가를 위험과 운전 분석 기법을 사용하여 수행하였다.

이처럼 다양한 위험성 평가 프로그램을 사용하여 다양한 수소 취급 시설의 위험성 평가가 이루어지고 있는 데 반하여 수소 설비 시험 평가에 대한 위험성 평가는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 위험성 평가 프로그램인 EFFECTS v12 및 RISKCURVE v12 (Gexcon AS, Bergen, Norway)를 사용하여 수소 제품 검사 및 시험 시설을 대상으로 위험성 평가를 수행하고 위험도 저감 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 방법론

### 2.1 사고 빈도 분석

사건 수 분석(event tree analysis, ETA)은 초기 사건에 의해 발생하는 잠재적인 사고 결과를 정량적으로 평가하는 기법으로 사고 시나리오 및 발생 빈도 도출에 적용 가능하다<sup>11)</sup>. 수소 누출에 따른 일반적인 ETA를 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같으며 수소가 스 누출 시 즉시 점화하면 제트 화재(jet fire), 지연 점화하면 증기운 폭발(vapor cloud explosion, VCE)이 발생한다<sup>12)</sup>.

### 2.2 사고 영향 분석

#### 2.2.1 제트 화재

제트 화재는 수소가 고압으로 누출 시 주위의 점화원에 의해 착화되어 발생할 수 있다. 본 연구에선 Chamberlain 모델을 이용하여 식 (1)과 같이 제트 화염의 표면 복사열 강도( $E_s$ )를 구하였다<sup>13)</sup>. 이때  $F_s$ 는 식 (2)를 통해 천연가스 화염으로부터 실험적으로 구해진 값이다.

$$E_s = \frac{F_s Q \Delta H_c \times 10^{-3}}{A} \tag{1}$$

$$F_s = (0.21 e^{-0.00323u_j} + 0.11) f(MW) \tag{2}$$

$$f(MW) = \begin{cases} 1 & MW < 21 \\ (MW/21)^{1/2} & 21 < MW < 60 \\ 1.69 & 60 < MW \end{cases} \tag{3}$$

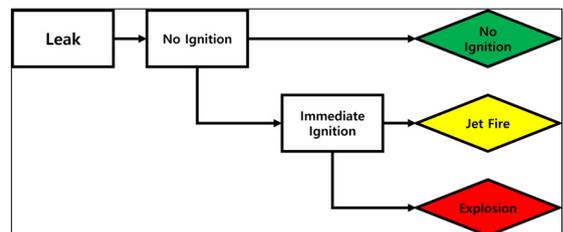


Fig. 1. Event sequence diagram from hydrogen leakage

$E_s$ : surface emissive power (kW/m<sup>2</sup>)  
 $F_s$ : fraction of heat radiated  
 $Q$ : mass discharge(kg/s)  
 $\Delta H_c$ : heat combustion (J/kg)  
 $A$ : flame surface area (m<sup>2</sup>)  
 $u_j$ : initial jet velocity (m/s)  
 $MW$ : molecular weight (kg/kmol)

$$r' = r / (E/p_a)^{1/3} \tag{4}$$

$$P_s = P'_s \times p_a \tag{5}$$

$r'$ : scaled distance

$r$ : distance from facility of explosion (m)

$E$ : combustion energy of explosion (MJ)

$p_a$ : atmospheric pressure (kPa)

$P_s$ : peak side on overpressure (kPa)

$P'_s$ : scaled peak side on overpressure

### 2.2.2 증기운 폭발

증기운 폭발은 수소가 누출되어 가연성의 증기운을 이루었을 때 주위의 점화원에 의해 폭발하는 현상을 말한다. 본 연구에선 다중 에너지(multi-energy) 모델을 이용하여 거리에 따른 폭발 과압을 식 (4), (5)와 같이 계산하였다<sup>14)</sup>. 해당 모델은 폭발 중심으로부터의 거리( $r$ )와 폭발 에너지( $E$ )를 통해 환산 거리( $r'$ )를 계산하고 1-10으로 표현된 폭발 강도 그래프를 이용하여 환산 과압( $P'_s$ )을 도출하여 해당 거리에서의 폭발 과압( $P_s$ )을 추정할 수 있다(Fig. 2).

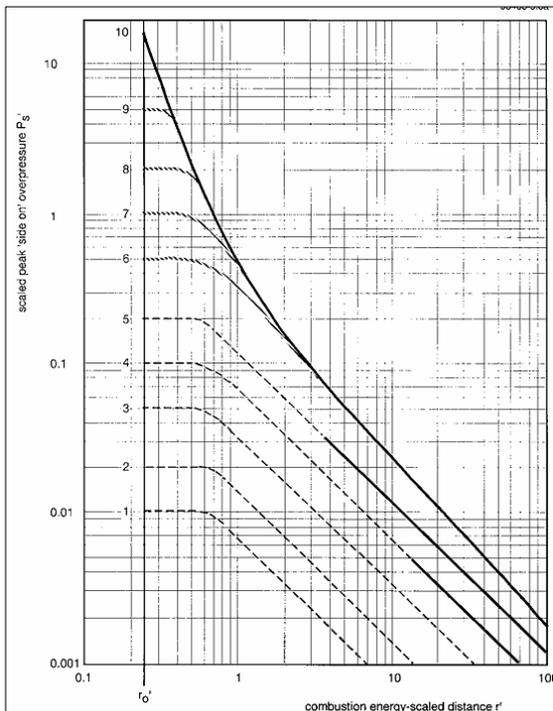


Fig. 2. Multi-energy blast chart

### 2.2.3 프로빗(probit) 분석법

프로빗 분석은 복사열, 독성물질, 과압에 대한 인간의 반응에 관련된 용량-반응 관계를 평가하는 방법이다<sup>15)</sup>. 본 연구에서는 KOSHA GUIDE에서 제시하는 사망 프로빗 계산식을 사용하였다<sup>16)</sup>. 화재에 의한 사망 프로빗 계산식은 식 (6)과 같이 복사열 강도( $Q$ ), 노출 시간( $t$ )의 관계식으로 표현된다. 최대 노출 시간은 네덜란드의 위험성 평가 가이드라인인 ‘Purple Book’에서 제시하는 20초로 설정하였다. 해당 시간은 사람들이 화재로부터 안전한 장소로 대피가능한 시간을 의미한다<sup>17)</sup>. 폭발 과압에 따른 폐출혈에 의한 사망 프로빗 계산식은 피크 과압( $P_s$ )에 대한 식인 식 (7)로 표현된다. 계산된 프로빗 값은 식 (8)을 통해 백분율로 환산된다.

$$Pr = -36.38 + 2.56 \ln(tQ^{4/3}) \tag{6}$$

$$Pr = -77.1 + 6.91 \ln(P_s) \tag{7}$$

$$P = 50 \left[ 1 + \frac{Pr - 5}{|Pr - 5|} \operatorname{erf} \left( \frac{|Pr - 5|}{\sqrt{2}} \right) \right] \tag{8}$$

Pr: probit value

$Q$ : heat radiation (W/m<sup>2</sup>)

$t$ : exposure time (s)

$P_s$ : peak overpressure (N/m<sup>2</sup>)

$P$ : percentage

$\operatorname{erf}$ : error function

### 2.3 위험도 분석

위험도(risk)는 사고의 빈도와 그 결과의 조합으로

사고 발생 확률과 사망자 수 또는 재정적 손실 등 특정 단위로 표현되는 사고 피해 영향을 곱하여 정량적으로 표현된다<sup>18)</sup>. 일반적으로 시설의 위험도 추정을 위하여 사고 빈도와 결과 데이터를 결합하여 개인적 위험도(individual risk, IR)와 사회적 위험도(societal risk, SR)를 계산한다<sup>19)</sup>.

개인적 위험도란 위험 요소 주변에 있는 개인이 겪을 수 있는 위험도이다. 개인적 위험도는 다음과 같이 식 (9), (10)으로 계산되며 각 지점에서의 총 개인적 위험도는 위험 요소와 관련된 모든 사고 결과의 해당 지점에서의 개인적 위험도를 합한 것이다.

$$IR_{x,y} = \sum_{i=1}^n IR_{x,y,i} \tag{9}$$

$$IR_{x,y,i} = f_i p_{f,i} \tag{10}$$

$IR_{x,y}$ : total individual risk of fatality at geographical location x, y

$IR_{x,y,i}$ : individual risk of fatality at geographical location x, y from incident outcome case I

$n$ : total number of incident outcome cases considered in the analysis

$f_i$ : frequency of incident outcome case I from frequency analysis

$p_{f,i}$ : probability that incident outcome case I will result in a fatality at location x, y from the consequence and effect models

사회적 위험도란 집단에 대한 위험을 측정하는 지표로 주로 다수의 사상자가 발생할 사건의 빈도 분포 그래프인 F-N 곡선으로 표현되며 식 (11)과 같이 계산할 수 있다.

$$N_i = \sum_{x,y} P_{x,y} p_{f,i} \tag{11}$$

$N_i$ : the number of fatalities resulting from incident outcome case I

$P_{x,y}$ : the number of people at location x, y

개인적 위험도와 사회적 위험도는 동일한 사고 빈

도와 결과의 조합을 다르게 표현한 것으로 두 방법 모두 위험 완화 조치를 평가하거나 시설의 수용 가능성을 판단하는 데 중요한 역할을 한다.

### 2.4 방호 계층 분석 기법

방호 계층 분석 기법(layer of protection analysis, LOPA)은 위험도를 빈도와 잠재적 결과의 심각성의 함수로 정의하는, 간단하고 보수적인 규칙을 사용하는 위험성 평가 방법론이다<sup>20)</sup>. LOPA는 식 (12)와 같이 개시 사건(initiating event, IE)의 빈도, 결과의 심각도, 독립 방호 계층(independent protection layers, IPLs)의 요구 시 고장 확률(probability of failure on demand, PFD)의 곱으로 표현된다<sup>21)</sup>.

$$f_i^C = f_i^I \times PFD_{i1} \times PFD_{i2} \times \dots \times PFD_{ij} \tag{12}$$

$f_i^C$ : frequency of the consequence C for IE I

$f_i^I$ : IE frequency for IE I

$PFD_{ij}$ : PFD of the jth IPL that protects against consequence C for IE I

또한 안전 관련 시스템의 평균 PFD는 식 (13)과 같이 위험한 미검출 고장률( $\lambda_{du}$ )과 작동 시험 주기(manual test interval, TI)의 식으로 계산 가능하다<sup>22)</sup>.

$$PFD_{avg} = \frac{\lambda_{du} \times TI}{2} \tag{13}$$

$\lambda_{du}$ : dangerous undetected failure rate

TI: test interval

## 3. 시나리오 선정

### 3.1 위험성 평가 대상 개요

본 연구에서는 국내 수소 제품 검사 및 시험 시설 중 한 곳을 대상으로 위험성 평가를 수행하였다. 시설 주변에는 운동장, 강의실 및 사무실이 위치하여 있다(Fig. 3). 주변 인구수는 Table 1과 같으며 건물 내

사무실이나 기업 수 등 자체적인 조사 데이터와 토지 이용 패턴에 따른 인구수 데이터를 사용하여 산출하였다<sup>23)</sup>. 운동장의 경우 그 사용 형태가 일정하지 않아 인구수를 특정하기 어려워 토지 이용 패턴에 따른 대표적인 면적당 인구수를 사용하였다.

또한 대상지의 기상 조건은 Table 2와 같으며 가장 근접한 기상 관측소의 데이터를 집계하고 그 평균으로 선정하였다<sup>24)</sup>.

### 3.2 위험성 평가 대상 공정 개요

해당 시설에서 수행하는 시험은 크게 고압가스 기자재 실증 시험과 초고압 수소가스 반복 가압 누출

시험으로 나뉜다. 고압가스 기자재 실증 시험의 경우 튜브 트레이일러를 통해 공급된 수소가 압축기를 통해 가압된 후 고압용기에 저장되어 체임버 내 시험에 사용된다. 시험이 종료되면 잔여 수소는 회수 탱크로 회수되고 압축기를 통해 다시 가압되어 추후 시험에 다시 사용된다. 이때 1차 압축기 후단의 수소는 초고압 수소가스 반복 가압 누출 시험으로 보내져 압축 설비인 부스터를 통해 가압된 후 완충 탱크를 거쳐 체임버 내 시험에 사용된다. 시험들은 고압의 수소를 다루기 때문에 압축기를 통한 가압 과정이 수반된다. 또한 각 시험은 장소가 구분되어 수행되며 시설은 사무 공간, 고압 질소 시험실 및 2개의 수소 시험 공간으로 나누어져 있다(Fig. 4).



Fig. 3. Surroundings of inspection-testing facility

Table 1. Population data near by inspection-testing facility

Time	Number of people			
	Facility	Office (A, B, C)	Lecture room (I, II)	Play ground
Day	10	100	200	23.75/ha
Night	0	1	38	4.75/ha

Table 2. Weather condition of target site

Parameter	Wind speed (m/s)	Atmospheric stability	Humidity (%)	Temperature (°C)
Value	3.2	D	63	16

### 3.3 검토 구간 및 누출 시나리오 선정

본 연구에서는 각 시험의 위험성을 평가하기 위하여 시험 시 설비의 내부 압력에 따라 검토 구간(node)을 선정하였다. 각 시험의 공정 흐름도(process flow diagram) 및 선정된 검토 구간은 Fig. 5와 같다.

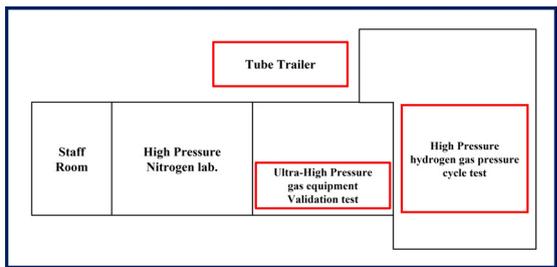


Fig. 4. Layout of inspection-testing facility

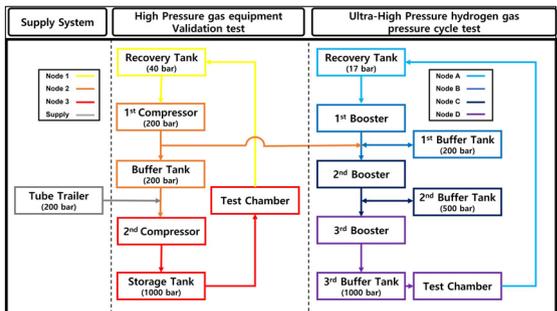


Fig. 5. Process flow diagram of each test carried in facility

각 검토 구간에 포함된 설비 및 사양은 해당 시설에 기기를 공급한 기업의 자료 및 시설에서 제공받은 데이터를 통해 확보하였다(Table 3)<sup>25)</sup>.

검토 구간별 누출 시나리오는 미국 Department of Energy (DOE)의 지원을 받아 Sandia National Laboratories (SNL)에서 발표한 보고서를 기반으로 각 검토 구간별 누출공 크기를 배관 직경의 100%, 10%, 1%, 0.1%로 나누고 각각의 시나리오를 파열 (rupture), 대규모(large), 중규모(medium), 소규모(small) 누출로 선정하였다<sup>26)</sup>. 누출 시나리오에 따른 누출률은 EFFECTS 프로그램을 사용하여 도출하였으며 그 예시는 Table 4와 같다.

### 4. 위험성 평가 결과

#### 4.1 사고 빈도 분석

본 연구에서는 수소 누출 시의 ETA를 기반으로 각 검토 구간별 사고 빈도를 분석하였다. 초기 사건

Table 3. Detailed specification of each node

Node	Facility	Capacity (L)	Pressure (barg)	Pipe (inch)
Hydrogen supply system				
Supply	Tube trailer	22,600	200	3/8
High pressure gas equipment validation test				
Node 1	Recovery tank	2,000	40	9/16
Node 2	1st compressor	1,210	200	3/8
	Buffer tank			
Node 3	2nd compressor	2,300	1,000	3/8
	Storage tank			
Ultra-high pressure hydrogen gas pressure cycle test				
Node A	Recovery tank	1,000	17	3/8
Node B	1st booster	96	200	3/8
	1st buffer tank			
Node C	2nd booster	96	500	1/4
	2nd buffer tank			
Node D	3rd booster	96	1,000	1/4
	3rd buffer tank			

에 해당하는 누출 빈도는 SNL 보고서를 통해 산출하였다. 또한 누출률에 대한 점화 확률은 미국 The National Fire Protection Association (NFPA)에서 제시하는 값을 사용하였다(Table 5)<sup>27)</sup>.

ETA를 통해 도출한 수소 공급 검토 구간의 사고 시나리오 빈도는 Fig. 6과 같다. 이와 같은 방식으로 검사 및 시험 시설 전체 검토 구간에서의 사고 시나리오의 빈도를 도출하였으며 ‘supply’, ‘node 3’, ‘node D’ 검토 구간의 제트 화재 및 증기운 폭발의 빈도를 Table 6에 나타내었다. 분석 결과 즉시 점화 확률이 지연 점화 확률보다 높기 때문에 모든 시나리오에서 제트 화재의 빈도가 더 높게 나타났다.

#### 4.2 사고 영향 분석

누출 시나리오를 기반으로 EFFECTS 프로그램을

Table 4. Leak scenario for each node

Node	Scenario	Leak diameter (mm)	Release rate (kg/s)
Supply	Rupture	9.53	0.764
	Large	3.01	0.082
	Medium	0.95	0.0085
	Small	0.30	0.00085
Node 3	Rupture	9.53	3.17
	Large	3.01	0.32
	Medium	0.95	0.034
Node D	Small	0.30	0.0035
	Rupture	6.35	1.41
	Large	2.00	0.14
	Medium	0.64	0.014
	Small	0.20	0.0015

Table 5. Hydrogen ignition probabilities

Release rate (kg/s)	Ignition probability	
	Immediate	Delayed
<0.125	0.008	0.004
0.125-6.25	0.053	0.027
>6.25	0.23	0.12

사용하여 거리에 따른 복사열 및 폭발 과압 수치를 계산하고 프로빗 분석법을 통해 거리에 따른 사망 확률을 도출하였다. 대표적인 검토 구간의 치사율

Supply				
Initiating event	Ignition	Ignition time	Accident type	Frequency (/yr)
Rupture 1.80E-04	No		No Ignition	1.66E-04
	Yes	Immediate 0.053	Jet Fire	9.54E-06
		Delayed 0.027	VCE	4.86E-06

Fig. 6. Supply system accident frequency using ETA

Table 6. Accident frequency of supply, node 3, node D

Node	Scenario	Leak frequency (/yr)	Ignition probability	Accident	
				Type	Frequency (/yr)
Supply	Rupture	1.80E-04	0.053	Jet fire	9.5E-06
			0.027	VCE	4.9E-06
	Large	3.21E-04	0.008	Jet fire	2.6E-06
			0.004	VCE	1.3E-06
	Medium	4.14E-04	0.008	Jet fire	3.3E-06
			0.004	VCE	1.7E-06
	Small	1.07E-03	0.008	Jet fire	8.7E-06
			0.004	VCE	4.3E-06
Node 3	Rupture	2.66E-05	0.053	Jet fire	1.4E-06
			0.027	VCE	7.2E-07
	Large	7.17E-05	0.053	Jet fire	3.8E-06
			0.027	VCE	1.9E-06
	Medium	1.08E-03	0.008	Jet fire	8.6E-06
			0.004	VCE	4.3E-06
	Small	3.35E-03	0.008	Jet fire	2.7E-05
			0.004	VCE	1.3E-05
Node D	Rupture	3.50E-05	0.053	Jet fire	1.9E-06
			0.027	VCE	9.5E-07
	Large	1.05E-04	0.053	Jet fire	5.6E-06
			0.027	VCE	2.8E-06
	Medium	2.08E-03	0.008	Jet fire	1.7E-05
			0.004	VCE	8.3E-06
	Small	6.16E-03	0.008	Jet fire	4.9E-05
			0.004	VCE	2.5E-05

(lethality) 99%, 50%, 1%에 해당하는 거리를 도출하였으며 공급 시스템 및 각 시험에서 운전 압력이 높은 ‘node 3’, ‘node D’ 중 누출률이 가장 높은 과열 누출 시나리오를 대표로 삼았다. 제트 화재에서 발생하는 복사열에 의한 영향은 Table 7, Fig. 7에, 증기운 폭발에서 발생하는 폭발 과압에 의한 영향은 Table 8, Fig. 8에 나타내었다.

사고 영향 분석 결과 복사열에 의한 사망 확률 범위 모두 ‘supply’, ‘node D’, node 3’ 순으로 높아지며 폭발 과압에 의한 사망 확률 범위 역시 같은 경향을 보인다. 다만 증기운 폭발의 경우 폭발 강도가 가장 높을 때를 고려하여 가연성 증기운 안에 폭발 범위 내의 수소 질량이 최대일 때 폭발이 발생한다고

Table 7. Max lethality distance derived from heat flux

Node	Scenario	Heat flux	
		Lethality (%)	Maximum distance (m)
Supply	Rupture	99	23.7
		50	25.5
		1	27.7
Node 3	Rupture	99	44.9
		50	48.2
		1	52.3
Node D	Rupture	99	30.9
		50	33.4
		1	36.3

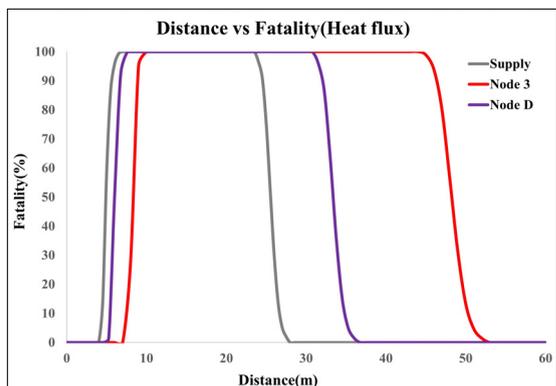


Fig. 7. Lethality distance derived from heat flux

가정하였기 때문에 시나리오마다 폭발 지점이 상이하다. 이를 고려하였을 때 99% 사망 확률에 이르는 범위는 ‘supply’, ‘node 3’은 각각 29.6 m, 48.8 m로 증기운 폭발, ‘node D’는 30.9 m로 제트 화재에 의한 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

### 4.3. 위험도 분석

사고 빈도 및 영향 분석 결과를 토대로 RISKCURVES 프로그램을 사용하여 검사 및 시험 시설의 위험도를 분석하였다. 기존 시설에서 수소 누출로 인하여 발생 가능한 모든 사고에 의한 개인적 위험도는 Fig. 9와 같다. 개인적 위험도 등고선 분석 결과 개인적 위험

의 수용 가능한 수준인  $10^{-6}/\text{yr}$ 의 등고선 내에 사무실 및 운동장의 일부가 걸쳐있음을 알 수 있다<sup>28)</sup>.

사회적 위험도는 Fig. 10과 같다. F-N 곡선은 위험도 식별을 위하여 무시 가능한 선(negligible line, NL)과 용납할 수 없는 선(intolerable line, IL)을 표시한다. F-N 곡선이 NL 아래에 위치할 경우 ‘수용 가능’, NL과 IL 사이에 위치할 경우 ‘합리적으로 수용 가능한 최소 위험(as low as reasonably practicable, ALARP)’, IL 위에 위치할 경우 ‘수용 불가’로 여겨진다<sup>29)</sup>. 본 연구에서는 네덜란드의 사회적 위험도 식별 기준을 사용하여 시설의 위험도를 파악하였다<sup>30)</sup>.

Table 8. Max lethality distance derived from overpressure

Node	Scenario	Overpressure		
		Explosion point (m)	Lethality (%)	Maximum distance (m)
Supply	Rupture	26	99	3.6
			50	4.2
			1	5.0
Node 3		42	99	6.8
			50	7.9
			1	9.2
Node D	13	99	3.8	
		50	4.4	
		1	5.1	

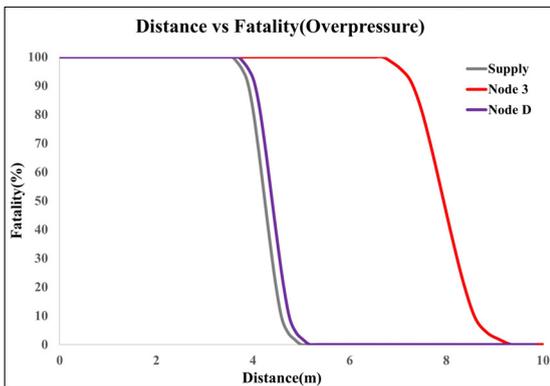


Fig. 8. Lethality distance derived from overpressure

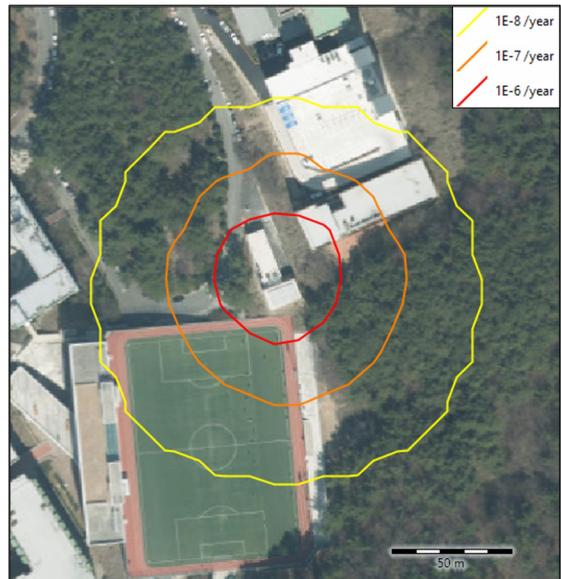


Fig. 9. IR contour of inspection-testing facility

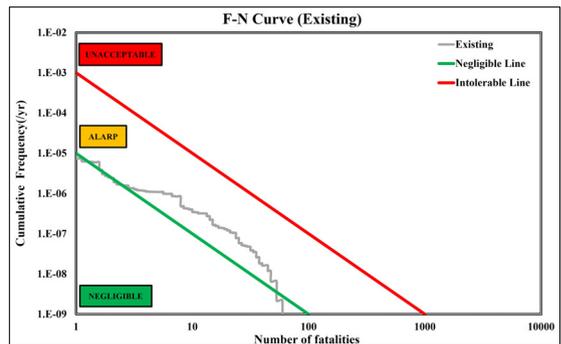


Fig. 10. F-N curve of inspection-testing facility

F-N 곡선 분석 결과 기존 시설의 곡선은 ALARP 영역에 위치하여 있다. 즉 해당 시설은 위험 감소로 얻는 개선에 비해 투자 비용이 현저히 불균형할 경우 조치를 취하지 않아도 되지만 완전한 수용을 위하여 추가적인 조치가 필요한 것으로 판단된다<sup>31)</sup>.

또한 기존 시설의 F-N 곡선 기반 연간 예상 사망자 수에 기여하는 누출 시나리오의 순위는 Table 9와 같다<sup>32)</sup>. 분석 결과 모든 검토 구간에서 파열 및 대규모 누출 시나리오만이 사망자 수에 관여되어 있다. 또한 공급 구간의 파열 누출 시나리오가 44.9%로 기여도가 제일 높았으며 node 3의 파열 누출, 대규모 누출 시나리오, node D의 파열 누출, 대규모 누출 시나리오 순으로 기여도가 높았다.

#### 4.4. IPL 적용

현재 검사 및 시험 시설에는 IPL로써 압력 방출 시스템, 가스 감지기 등이 설치되어 있다. 본 연구에서는 기존 시설에 설치되어 있지 않은 비상 정지(emergency shutdown, ESD) 시스템을 IPL로써 적용하였다. ESD 시스템은 주로 특정 공정의 매개변수

를 모니터링하고 작동 범위를 벗어날 경우 빠르게 안전한 상태로 되돌리는 시스템으로 일반적인 공정 제어기와 독립적으로 작동한다<sup>33)</sup>. ESD 시스템에 사용되는 programmable logic controllers (PLC)의 경우 대표적으로 0.32 failures/yr의 고장률( $\lambda$ )을 보인다<sup>34)</sup>. 이를 기반으로 TI를 1년으로 가정하였을 때 ESD 시스템의 PFD는 0.16으로 계산되었다.

또한 시설 전체에 IPL을 적용하는 것은 위험도 개선 대비 투자 비용이 합리적이지 않기 때문에 이전 누출 시나리오 중 기여도가 높은 검토 구간을 도출하고 해당 구간에 IPL을 적용하였다. 기여도가 높은 ‘supply’, ‘node 3’, ‘node D’에 ESD 시스템을 적용한 개인적 위험도는 Fig. 11과 같다. 개인적 위험도 등고선 분석 결과  $10^{-6}/yr$ 의 등고선 내에 검사 및 시험 시설만이 위치하여 있다.

사회적 위험도는 Fig. 12와 같으며 IPL 유무에 따른 3개 검토 구간의 연간 예상 사망자 수는 Table 10과 같다.

IPL 적용 시 예상 사망자 수가 ‘supply’ 파열, ‘node 3’ 파열, 대규모, ‘node D’ 파열 대규모 누출 시나리오에서 약 6배 감소하며 ‘node 3’ 대규모 누출 시나리오에선 약 20배 감소하였다. 또한 IPL을 적용한 시

Table 9. Societal risk ranking for accident scenario

Rank	Node	Scenario	Contribution (%)	Value
1	Supply	Rupture	44.9	1.09E-05
2	Node 3	Rupture	23.1	5.59E-06
3	Node 3	Large	7.08	1.72E-06
4	Node D	Rupture	6.18	1.50E-06
5	Node D	Large	4.15	1.01E-06
6	Node 2	Rupture	3.01	7.28E-07
7	Node C	Rupture	2.99	7.25E-07
8	Supply	Large	2.77	6.72E-07
9	Node B	Rupture	2.75	6.67E-07
10	Node 1	Rupture	2.12	5.15E-07
11	Node C	Large	0.371	9.00E-08
12	Node B	Large	0.317	7.68E-08
13	Node 2	Large	0.203	4.93E-08
14	Node A	Rupture	0.0601	1.46E-08



Fig. 11. IR contour of facility with mitigation

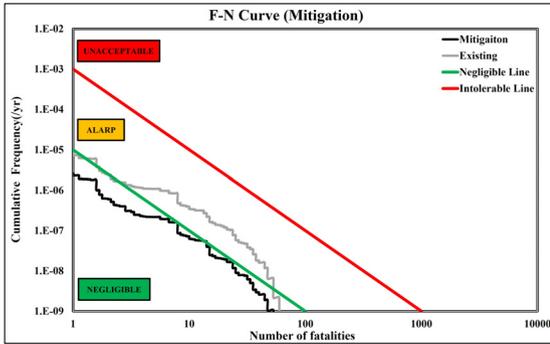


Fig. 12. F-N curve of facility with mitigation

Table 10. Expected fatality value for each node

Node	Scenario	Value without mitigation	Value with mitigation
Supply	Rupture	1.09E-05	1.74E-06
Node 3	Rupture	5.59E-06	8.91E-07
Node D	Rupture	1.50E-06	2.38E-07
Node D	Large	1.01E-06	1.60E-07
Supply	Large	6.72E-07	1.08E-07
Node 3	Large	1.72E-06	9.00E-08

설의 곡선은 NL 밑부분에 위치하여 수용 가능 영역에 위치되어 있다. 즉 ‘supply’, ‘node 3’, ‘node D’ 구간에 ESD 시스템을 도입하면 안전 기준을 충족하는 수준으로 위험 감소 조치가 이루어졌음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 수소 제품 검사 및 시험 시설을 대상으로 발생 가능한 누출 시나리오를 도출하고 각 시나리오에 따른 빈도 및 영향 평가를 수행하여 이를 기반으로 도출된 개인적, 사회적 위험도를 분석하였으며 IPL을 통한 위험도 저감 조치 방안을 제시하였다. 이를 요약하면 다음과 같다.

1) SNL 보고서의 수소 누출 빈도와 NFPA에서 제시하는 점화 확률을 기반으로 ETA를 수행하여 각 누출 시나리오에 따른 사고 빈도를 도출하였으며 모든 시나리오에서 제트 화재 발생 빈도가 증기 폭발에 비해 높게 형성되었다.

2) 대표적인 누출 시나리오에 대한 사고 영향 범위를 EFFECTS 프로그램을 사용해 계산하고 프роб 분석법을 통해 사망 확률에 이르는 범위를 도출한 결과 99%의 사망에 이르는 범위는 ‘supply’, ‘node D’, ‘node 3’ 검토 구간 순으로 높아지며 ‘supply’, ‘node 3’은 증기 폭발, ‘node D’는 제트 화재의 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

3) 사고 빈도 및 영향 분석 결과를 토대로 RISK-CURVES 프로그램을 사용해 개인적, 사회적 위험도를 분석한 결과 개인적 위험도 등고선 중  $10^{-6}/\text{yr}$  범위에 운동장 및 사무실 일부분이 위치하여 있고 F-N 곡선은 ALARP 영역에 위치하여 위험 감소 조치가 필요할 것으로 판단되었다.

4) 이전에 도출한 F-N 곡선 기반 연간 예상 사망자 수에 기여하는 누출 시나리오 기여도 순위를 파악하고 기여도가 높은 3개의 검토 구간에 IPL로써 ESD 시스템을 적용하여 개인적, 사회적 위험도를 분석한 결과 개인적 위험도 등고선 중  $10^{-6}/\text{yr}$  범위에 시설만이 위치하고 F-N 곡선은 NL 아래에 위치하여 기준에 적합한 위험 감소 조치가 이루어졌다고 판단되었다.

본 연구에서는 국내의 대표 수소 제품 검사 및 시험 시설에 대하여 위험성 평가를 수행하였으며 시설에 대한 위험 저감 조치로 ESD 시스템을 도입하였다. 대표 시설의 더 높은 위험도 저감을 위해서 선정된 3개의 검토 구간 외의 구간에 추가 ESD 시스템 적용을 고려할 수 있으며 시설 주변의 사고 영향이 높은 곳에 대해 대화 조치, 방호벽 설치 등 추가 IPL을 적용하여 위험도 저감이 가능할 것으로 사료된다.

다만 위험성 평가 시 연평균 풍속 조건을 사용하였으며 시설의 운영 정보가 반영되지 않았다. 추후 바람장미와 시설의 가동률 등을 고려한 위험성 평가를 수행할 경우 실제 시설의 위험도를 보다 명확히 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 빈도 평가에 사용된 SNL의 누출 빈도 데이터는 수소 시스템을 포함한 다양한 산업 설비의 누출 빈도를 기반으로 산출된 것으로 실제 누출 빈도와 차이가 있을 가능성이 있다. 향후 구축된 국내 수소 시설을 대상으로

자체적인 누출 빈도 데이터를 구축할 수 있다면 보다 신뢰성 높은 위험성 평가가 가능할 것이다.

현재 국내에서는 수소 제품 검사 및 시험 시설 인프라 구축을 목표로 하고 있기 때문에 연구 결과를 기반으로 유사 시설의 위험도를 파악하고 고압으로 운전되는 구간에 ESD 시스템 등 추가 위험 저감 조치를 적용한다면 증설되는 수소 제품 검사 및 시험 시설에 대하여 높은 안전성 확보가 가능할 것이다.

또한 본 연구를 통해 진행한 위험성 평가는 수소 제품 검사 및 시험 시설이라는 특정 인프라를 대상으로 진행되었으나 평가 대상 내 수소 고압 설비의 운전 압력 범위(1.7-100 MPa)가 넓기 때문에 일반 고압 수소 설비를 다루는 시설에도 충분히 활용 가능할 것이다. 다만 저압(1.0 MPa 이하)을 다루는 수소연료 사용 시설의 경우 사고 시나리오 구성을 위한 압력 범위가 본 연구와 달라 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 후 기

이 논문은 행정안전부의 지원을 받아 수행된 연구임(사업명: 사회복합재난 대응기술 개발사업, 과제명: Risk Contour 기반 수소 기반시설의 재난 대응 플랫폼 개발, 과제번호: 20018517).

## References

1. Relative Ministries, "National Strategy for Carbon Neutrality and Green Growth and the 1st National Basic Plan", 2050 Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth, 2023. Retrieved from <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=2&boardNo=1469&menuLevel=2&menuNo=16>.
2. J. Kim, Y. Kim, B. Park, U. Yoon, and C. Kang, "The effect of natural ventilation through roof vents following hydrogen leaks in confined spaces", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 50, Pt. A, 2024, pp. 1395-1405, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.048>.
3. M. J. Jeon, D. J. Jang, and M. C. Lee, "A study on the risk assessment and improvement methods based on hydrogen explosion accidents of a power plant and water electrolysis system", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 66-74, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.66>.
4. U. Yoon, B. Park, Y. Kim, S. Kang, and O. Lim, "Assessment of thermal protection performance of firefighting garments for hydrogen jet fire", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 3, 2024, pp. 310-317, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.3.310>.
5. Ministry of Trade, Industry and Energy, "Hydrgen safety management roadmap 2.0", Ministry of Trade, Industry and Energy, 2023. Retrieved from <https://nsp.nanet.go.kr/plan/main/detail.do?nationalPlanControlNo=PLAN0000037896>.
6. B. Jeon, S. Kim, Y. S. Yoon, and S. Jung, "Quantitative risk assessment of hydrogen refueling station in Cheonan City of South Korea", *Energies*, Vol. 16, No. 20, 2023, pp. 7138, doi: <https://doi.org/10.3390/en16207138>.
7. H. Kwak, M. Kim, M. Min, B. Park, and S. Jung, "Assessing the quantitative risk of urban hydrogen refueling station in Seoul, South Korea, using SAFETI model", *Energies*, Vol. 17, No. 4, 2024, pp. 867, doi: <https://doi.org/10.3390/en17040867>.
8. B. Park, Y. Kim 1, K. Lee, S. Paik, and C. Kang, "Risk assessment method combining independent protection layers (IPL) of layer of protection analysis (LOPA) and RISKCURVES software: case study of hydrogen refueling stations in urban areas", *Energies*, Vol. 14, No. 13, 2021, pp. 4043, doi: <https://doi.org/10.3390/en14134043>.
9. H. G. Shin, M. J. Kim, J. W. Jeong, S. J. Ha, and J. H. Choi, "A study on quantitative risk assessment of off-gas based hydrogen purification facilities", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 27, No. 4, 2023, pp. 110-115, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2023.27.4.110>.
10. D. Shin, D. Seo, T. Kim, K. Rhie, D. Lee, H. Kim, and S. Hong, "Qualitative risk assessment of hydrogen compression reforming process", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 33, No. 1, 2022, pp. 61-66, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.1.61>.
11. Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), "Technical guideline for event tree analysis (P-87-2021)", KOSHA, 2021. Retrieved from <https://www.kosha.or.kr/kosha/info/koshaguideCheck.do>.
12. B. Ehrhart, E. Hecht, and B. Schroeder, "Hydrogen plus other alternative fuels risk assessment models (HyRAM+) version 5.1 technical reference manual", Sandia National Laboratories, 2023, pp. 19-38, doi: <https://doi.org/10.2172/2369637>.
13. J. Cook, Z. Bahrami, and R. J. Whitehouse, "A comprehensive program for calculation of flame radiation levels", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 3, No. 1, 1990, pp. 150-155, doi: [https://doi.org/10.1016/0950-4230\(90\)85039-C](https://doi.org/10.1016/0950-4230(90)85039-C).
14. The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research

- (TNO), "Methods for the calculation of physical effects: due to releases of hazardous materials (liquids and gases)", TNO, Netherlands, 2004.
15. M. Zhang and J. Jiang, "An improved probit method for assessment of domino effect to chemical process equipment caused by overpressure", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 158, No. 2-3, 2008, pp. 280-286, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.076>.
  16. Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), "Technical guideline for accident damage impact assessment (P-88-2023)", KOSHA, 2023. Retrieved from <https://www.kosha.or.kr/kosha/info/koshaguideCheck.do>.
  17. Committee for the Prevention of Disasters, "Guidelines for quantitative risk assessment: purple book", The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research, Netherlands, 1999.
  18. N. J. Duijm, "Acceptance criteria in Denmark and the EU", Danish Ministry of the Environment, Denmark, 2009.
  19. Center for Chemical Process Safety, "Guidelines for chemical process quantitative risk analysis", 2nd ed, American Institute of Chemical Engineers, USA, 2010, doi: <https://doi.org/10.1002/9780470935422>.
  20. R. J. Willey, "Layer of protection analysis", *Procedia Engineering*, Vol. 84, 2014, pp. 12-22, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.405>.
  21. American Institute of Chemical Engineers Center for Chemical Process Safety, "Layer of protection analysis: simplified process risk assessment", Center for Chemical Process Safety, USA, 2001.
  22. P. Gruhn and H. L. Cheddie, "Safety instrumented systems: design, analysis, and justification", 2nd ed, The Instrumentation, Systems, and Automation Society, USA, 2005.
  23. The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research (TNO), "Methods for the determination of possible damage: to people and objects resulting from release of hazardous materials (CPR 16E)", TNO, Netherlands, 1992.
  24. Korea Meteorological Administration (KMA), "Meteorological data", KMA, 2024. Retrieved from <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>.
  25. Korea Institute for Advancement of Technology, "Shared-use equipment", iTube, 2024. Retrieved from <https://www.itube.or.kr/aplct/equipSrch/sharingList.do>.
  26. J. L. LaChance, W. G. Houf, L. Fluor, and B. Middleton, "Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards", Sandia National Laboratories, 2009, doi: <https://doi.org/10.2172/983689>.
  27. National Fire Protection Association (NFPA), "NFPA 2: hydrogen technologies code", NFPA, USA, 2020.
  28. T. Suzuki, K. Shiota, Y. Izato, M. Komori, K. Sato, Y. Takai, T. Ninomiya, and A. Miyake, "Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 11, 2021, pp. 8329-8343, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.035>.
  29. P. K. Marhavidis and D. E. Koulouriotis, "A combined usage of stochastic and quantitative risk assessment methods in the worksites: application on an electric power provider", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 97, No. 1, 2012, pp. 36-46, doi: <https://doi.org/10.1016/j.res.2011.09.006>.
  30. H. Pasman and G. Remiers, "Past, present and future of quantitative risk assessment (QRA) and the incentive it obtained from land-use planning (LUP)", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 28, 2014, pp. 2-9, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlpi.2013.03.004>.
  31. P. K. Marhavidis and D. E. Koulouriotis, "Risk-acceptance criteria in occupational health and safety risk-assessment - the state-of-the-art through a systematic literature review", *Safety*, Vol. 7, No. 4, 2021, pp. 77, doi: <https://doi.org/10.3390/safety7040077>.
  32. Gexcon, "RISKCURVES: X suite product from Gexcon", Gexcon, 2023. Retrieved from <https://www.gexcon.com/software/riskcurves/>.
  33. G. Dragffy, "The design of a highly reliable safety critical emergency shutdown system", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 61, No. 3, 1998, pp. 215-227, doi: [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(98\)00012-X](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(98)00012-X).
  34. S. Mannan, "Lees' loss prevention in the process industries: hazard identification assessment and control", 4th ed, Vol. 2, Elsevier, Netherlands, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-24104-3>.