

대형 수소 액화 플랜트의 정량적 위험도 평가에 관한 연구

도규형^{1†} · 한용식¹ · 김명배¹ · 김태훈¹ · 최병일¹

¹한국기계연구원 환경·에너지기계연구본부

Study on a Quantitative Risk Assessment of a Large-scale Hydrogen Liquefaction Plant

KYU HYUNG DO^{1†}, YONG-SHIK HAN¹, MYUNG-BAE KIM¹, TAEHOON KIM¹, BYUNG-IL CHOI¹

¹Environmental and Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials,
156 Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-343, Korea

Abstract >> In the present study, the frequency of the undesired accident was estimated for a quantitative risk assessment of a large-scale hydrogen liquefaction plant. As a representative example, the hydrogen liquefaction plant located in Ingolstadt, Germany was chosen. From the analysis of the liquefaction process and operating conditions, it was found that a LH₂ storage tank was one of the most dangerous facilities. Based on the accident scenarios, frequencies of possible accidents were quantitatively evaluated by using both fault tree analysis and event tree analysis. The overall expected frequency of the loss containment of hydrogen from the LH₂ storage tank was 6.83×10^{-1} times/yr (once per 1.5 years). It showed that only 0.1% of the hydrogen release from the LH₂ storage tank occurred instantaneously. Also, the incident outcome frequencies were calculated by multiplying the expected frequencies with the conditional probabilities resulting from the event tree diagram for hydrogen release. The results showed that most of the incident outcomes were dominated by fire, which was 71.8% of the entire accident outcome. The rest of the accident (about 27.7%) might have no effect to the population.

Key words : Quantitative risk assessment(정량적 위험도 평가), Hydrogen release(수소 누출), Fault tree analysis(고장수목 분석), Event tree analysis(사건수목 분석), Accident outcome frequency(사고 빈도)

Nomenclature

λ_{50} : median value of failure frequency, times/hr

F : frequency

P : probability

Q : unavailability

s : variance

λ : mean failure frequency, times/hr

1. 서론

해양플랜트, 정유, LNG, LPG 등의 에너지 플랜트에서는 다양한 종류의 인화성, 발화성, 폭발성, 반응성 등을 가지는 화학물질을 원료, 중간재, 용제, 반제품 및 생산품의 형태로 사용, 취급, 저장하고 있다. 이러한 에너지 플랜트에 사용되는 물질들은 그 보유량이 방대할 뿐만 아니라 고온/고압의 기체 혹은 증

[†]Corresponding author : kyudo@kimm.re.kr

[접수일 : 2014.10.16 수정일 : 2014.11.17 게재확정일 : 2014.12.31]

Copyright © 2014 KHNES

기 상태로 존재하거나 상변화를 일으키는 공정시스템으로 구성되어 있기 때문에, 사고위험이 항상 존재하게 된다. 에너지 플랜트 공정의 사고 위험요소는 플랜 설계의 시작단계부터 수명이 다해 철거될 때까지 일련의 과정에서 상존하고 있으며, 우리나라와 같이 가용 국토가 좁고 인구밀도가 높은 경우, 사고 발생 시 대형 재난사고로 이어져 경제적, 사회적, 환경적 문제를 초래하게 된다. 따라서 안전관점에서 플랜트 설계의 핵심은 이러한 위험도를 낮추는데 있으며, 기계설비의 안전설계를 통해 이루어질 수 있다.

또한, 최근 들어 저공해 대체에너지로써 수소에너지에 대한 요구가 증대하고 있어 수소의 생산, 이용, 저장 시에 발생하는 사고 위험에 대응하기 위한 안전/신뢰성 기술개발이 요구되고 있으며, 이를 위해 플랜트의 공정, 기기배치, 운영 중에 발생 가능한 모든 위험성(Hazards)을 평가, 정량화하여 설계의 적합성을 분석하는 것이 반드시 필요하다. 위험도(Risk)는 식(1)과 같이 위험성의 정량화된 척도로 정의되며, 위험성의 잠재적인 크기와 위험성이 발생할 사고 빈도의 곱으로 표현할 수 있다¹⁾.

$$Risk = Consequence \times Frequency \quad (1)$$

본 연구에서는 정량적 위험도 평가(Quantitative Risk Assessment)를 위해, 현재 운전 중인 대형 수소 액화 플랜트를 대상으로 위험성이 발생할 사고 빈도를 정량적으로 예측하는데 초점을 맞추어 진행하였다. 이를 위해, 공정분석을 수행하여 사고 발생 시 위험도가 가장 큰 시스템을 선택하고, 사고 시나리오를 결정하고자 한다. 또한, 결정된 사고 시나리오를 바탕으로 Fault Tree Analysis(FTA) 및 Event Tree Analysis(ETA)를 수행하여 수소 누출 빈도 및 사고 유형별 발생 빈도를 정량적으로 예측하고자 한다.

2. 위험도 평가 대상 선정

2.1 수소 액화 플랜트 공정분석

본 연구에서는 대상 플랜트로 Fig. 1에 나타난 것과 같이 독일의 Vonburg-Ingolstadt-Refinery(RVI)에 위치한 수소 액화 플랜트를 선정하였다²⁾.

Ingolstadt 수소 액화 플랜트의 생산용량은 4.4ton LH₂/day로 독일에 설치된 수소 액화 플랜트 중 최대 규모이다. 선정된 수소 액화 플랜트는 압축기 유닛, PSA(Pressure Swing Adsorption) 정제기, 액화기, 그리고 진공단열 액화 수소 저장탱크로 구성된다. RVI Refinery에서 공급되는 약 86%의 수소 농도를 가지는 합성 가스를 20bar 까지 압축하고 PSA 정제기를 이용하여 불순물 농도를 4ppm 이하로 정제한다. 기체수소의 순도를 높이기 위하여 저온 흡착을 이용하여 LN₂ 온도에서 불순물 농도를 1ppm 이하로 정제한다. Fig. 2는 Ingolstadt 수소 액화 플랜트의 공정 흐름도(Process Flow Diagram)를 나타내고 있다. 액화 공정은 Claude 사이클로 설계되었으며, 기체수소 공급 유량은 180kg/hr 이다. 온도 범위에 따라 100,000l 용량의 저장탱크에서 공급되는 액체질소를 이용하여 300K에서 80K로 냉각시키고, 팽창 터빈을 통하여 80K에서 30K로 냉각시키며, 마지막으로 Joule Thomson 밸브를 사용하여 30K에서 21K로 냉각시킨다. Normal Hydrogen(Ortho/Para Contents: 75%/25%)은 Fe(OH)₃ 촉매를 적용한 2개의 등온 변환기 및 2개의 단열 변환기를 사용하여 안정화된 Para

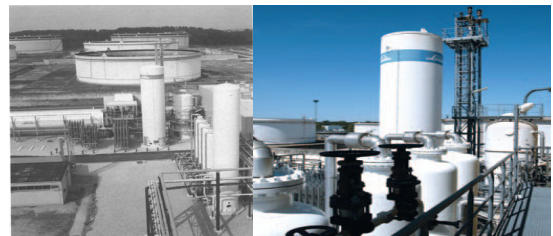


Fig. 1 Hydrogen liquefaction plant in Ingolstadt, Germany²⁾

Hydrogen으로 전환하였다. 모든 극저온 장치는 진공과 다층 단열재(Multi Layer Insulation)를 사용한 단일 콜드 박스로 단열하였다. 최종적으로 95%이상의 Para Hydrogen을 함유한 액체수소가 1.3bar의 압력

으로 LH₂ 저장탱크로 이송된다. 수소 액화 공정을 통해 얻어진 액화수소는 -253°C의 온도와 1.3bar의 압력으로 유지된 270,000l 용량의 진공 단열된 저장 탱크에 저장된다. 공정분석으로부터, 수소 액화 공정 설비 중에서 액체수소 저장 탱크가 가장 많은 공정 유체를 포함하기 때문에, 누출 등에 의한 사고가 발생할 경우 위험도가 가장 큰 시스템임을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 액화수소 저장 탱크를 대상으로 정량적 위험도 평가를 수행하였다.

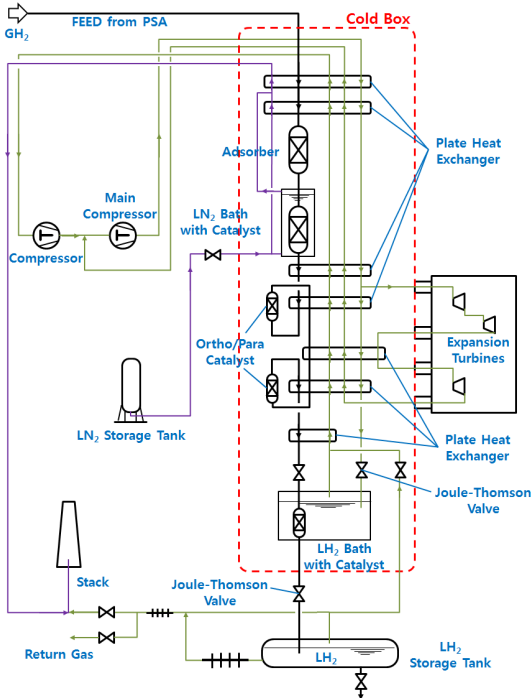


Fig. 2 Process flow diagram for the H₂ liquefaction plant

2.2 액체수소 저장 탱크의 System Description

액체수소 저장 탱크는 수평방향 실린더 형태로 위치하며, 압력 생성 회로(Pressure Building Circuits), 배관망 등으로 구성된다. 액화수소 저장 탱크의 P&I 다이어그램은 Fig. 3과 같다³⁾. 저장 탱크 내의 액체수소 높이를 연속적으로 측정하기 위한 Level Indicator (LI), Level Switch(LSHL), Trip Switch(LSH)가 설치되어 있고, 작업자가 수동으로 작동할 수 있는 두 개의 독립적인 차단 밸브(V-1, V-3)를 가진다. LI는 신호 표시기로서 신호는 제어룸으로 전달된다. LSHL은 경고등과 LSH에 연결되어 있어서 플랜트의 메인

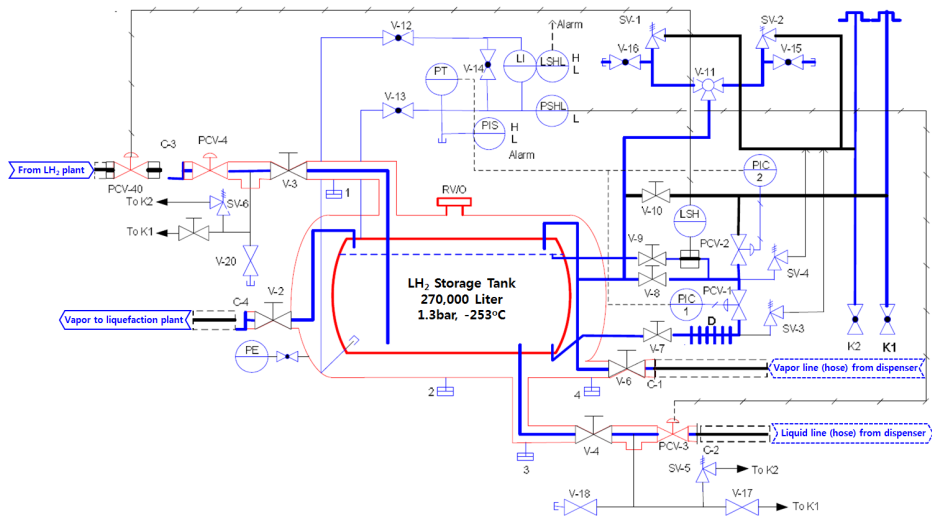


Fig. 3 P&I diagram of a LH₂ storage tank³⁾

Table 1 Dimension and capacity of the LH₂ storage tank

Component	Dimension	Capacity
LH ₂ Tank	Horizontal Cryogenic Tank	270,000 Liter
Liquid Lines	Diameter of 101.6mm (4in)	180 kg/hr
Vapor Lines	Diameter of 101.6mm (4in)	180 kg/hr

밸브(PCV-40)를 잠그는 역할을 한다. 액체수소는 원격조정밸브(V-5)를 통해 LH₂ 트레일러로 배출된다.

저장 탱크 내부의 압력은 코일(Ambient Evaporator, D)과 Pressure Regulator(PCV-1)로 구성된 압력 생성 회로로 일정하게 유지된다. 압력 생성 회로는 탱크 바닥의 액체수소를 증발시켜 기상으로 탱크 상단으로 보내진다. 회로의 작동은 PCV-1로 제어되고 탱크 압력을 기준으로 PIC-1에 의해 조절되고 Pressure Transmitter(PT)를 이용하여 신호를 전달한다. 압력 생성 회로는 탱크 내부의 압력이 PCV-1의 설정값보다 낮아질 때 작동하게 된다. 과압으로부터 탱크를 보호하기 위하여 압력 안전밸브(SV-1, SV-2)가 설치되어 있으며, 두 개의 안전밸브 중 한 개는 0.143MPa의 상대압력에서 교환이 가능하도록 작동된다. PCV-2는 Secondary Pressure Relief Device로 사용되며 탱크 압력이 큰 경우에 밸브가 개방되는 것을 제외하고 PCV-1과 작동 메커니즘이 유사하다. PIS와 PSHL의 압력 스위치들은 탱크의 압력이 과도하게 낮아지는 것을 방지하기 위하여 설치되며, 탱크 압력이 매우 낮을 때 PSHL는 PCV-3가 닫히도록 작동하게 된다. Table 1은 액체수소 저장소의 탱크 및 배관에 대한 주요 용량 및 형상치수를 나타내고 있다.

3. 정량적 위험도 평가

3.1 사고 시나리오 작성

액체수소 저장 탱크의 위험성은 주로 저장 탱크 또는 배관망 누출에 의해 발생할 수 있다. 특히, 대부분의 수소가 저장 탱크에 존재하기 때문에 사고가

Table 2 Accident scenario list for the LH₂ storage tank

Scenario	Undesired Events		Diameter		Discharge data	
	Type	Phase	Pipe	Hole	Flow rate (kg/s or kg)	Duration (sec)
A	Tank rupture	Liquid	-	-	16248	Inst.
B	Tank leak	Liquid	-	12.7	15.34	1059
C	Relief valve	Vapor	101.6	101.6	1.204	3600
D	Rupture disc	Vapor	101.6	101.6	1.204	3600

발생할 경우, 피해 범위 역시 가장 클 것으로 예상할 수 있다. 누출의 원인은 크게 부식, 침식 등 수소가 재료자체를 손상시켜 저장 탱크 및 배관망을 파손시키는 경우와 액체수소의 급격한 온도 상승 등으로 과압이 발생하여 파손되는 경우, 그리고 안전장치 오작동에 의해 누출되는 경우 등이 있다.

본 연구에서는 누출 원인을 크게 저장 탱크의 파손, 저장 탱크 손상에 의한 누출, Rupture Disc, Relief Valve와 같은 안전장치의 파손 및 오작동에 의한 누출, 배관망 손상에 의한 누출로 분류하였다. 누출량은 누출되는 수소의 상(Phase), 구멍의 크기, 누출 지속시간 등에 결정되며, Table 2와 같다. Table 2에 나타난 것과 같이 저장탱크가 부분 파손될 경우 (Scenario B), 누출 유량은 식(2)로부터 계산할 수 있으며, 누출 지속시간은 탱크에 존재하는 수소량을 누출 유량으로 나누어 계산하였다. 안전장치에서 누출이 발생하는 경우, 누출 발생 후 1시간 내에 보수가 가능하다고 가정하여 누출 지속시간을 계산하였다.

$$\dot{Q} = \rho C_D A \sqrt{\frac{2(p_s - p_0)}{\rho} + 2gh} \quad (2)$$

3.2 Fault Tree Analysis

앞 절에서 작성된 사고 시나리오를 바탕으로 사고

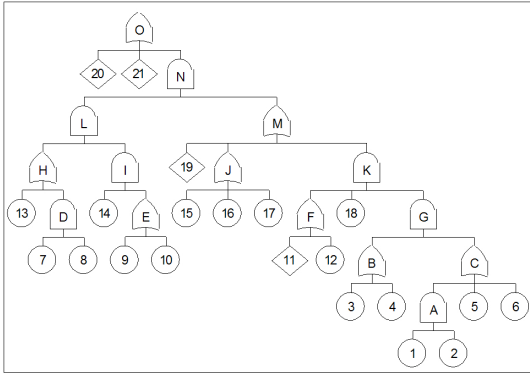


Fig. 4 Fault tree diagram for the instantaneous release

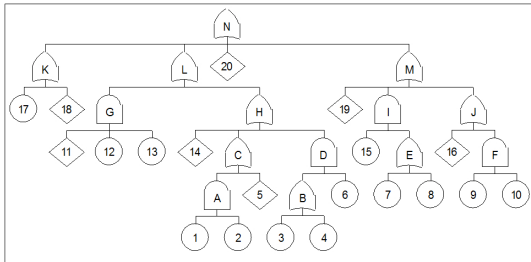


Fig. 5 Fault tree diagram for the continuous release in liquid phase

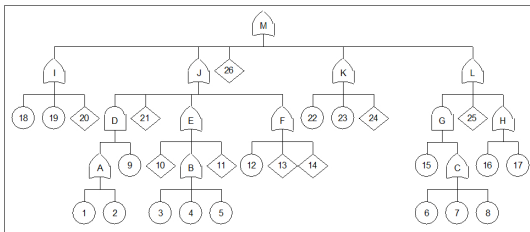


Fig. 6 Fault tree diagram for the continuous release in vapor phase

빈도를 예측하기 위하여, FTA(Fault Tree Analysis)와 ETA(Event Tree Analysis)의 두 가지 기법을 적용하였다. 본 연구에서는 순간/연속 누출 여부, 누출되는 수소의 상에 따라 액체수소의 순간 누출 및 연속 누출, 그리고 기체수소의 연속누출로 나누어 Fig. 3의 P&I Diagram 분석결과를 바탕으로 Fault Tree Diagram을 작성하였으며, Figs. 4-6과 같다. Fault Tree Diagram은 Top Event의 발생 확률을 계산하기

위하여 요소부품 또는 액션에 대한 Basic Event와 이들을 연결하는 논리회로로 구성된다. Basic Event에 해당되는 고장빈도의 경우, 실제 적용된 설비 또는 부품에 대한 데이터를 사용해야 하지만, 대부분의 경우에 고장빈도에 대한 데이터들이 제한적이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 이미 알려진 플랜트용 부품 또는 설비에 대한 Generic Failure Rate Data를 적용하였다^{4,12)}.

또한 각 Basic Event에 대한 고장빈도는 확률적 분포(Lognormal Distribution)를 가지지만, 해석의 단순화를 위해 일정한 값으로 가정하였다. 대표값은 평균값으로 가정하였고 평균값 계산을 위해 다음의 식을 사용하였다.

$$\lambda = \lambda_{50} \exp\left(\frac{s^2}{2}\right) \quad (3)$$

$$K_{95} = \exp(1.6449s) \quad (4)$$

여기서, s 와 λ_{50} 는 Natural Logarithm의 Variance와 Median값을 각각 의미한다. 각 사고 시나리오에 대한 고장빈도는 Top Event가 일어날 수 있는 가장 간단한 Basic Event의 조합으로 정의되는 Minimum Cut Set에 대한 사고빈도의 합으로 계산할 수 있다¹³⁾. Table 3-5는 각각 수소의 순간 누출, 액체수소의 연속 누출, 그리고 기체수소의 연속 누출이 발생할 경우에 대한 Basic Event List 및 각 Event 별 고장빈도에 대한 결과를 나타내고 있다.

순간 누출이 발생하는 경우는 액체수소 저장 탱크의 과압에 의한 파손, 수소 취성 등에 의한 저장 탱크의 파손, 그리고 지진 등의 외부 충격에 의한 저장 탱크의 파손으로 구분할 수 있으며, 각각의 고장빈도는 7.18×10^{-4} times/yr, 2.37×10^{-7} times/yr, 2.54×10^{-8} times/yr로 각각 계산되었다(Table 6 참조). 연속 누출의 경우에는 각 상별로 액체수소가 누출될 경우와 기체수소

Table 3 Probability and frequency estimations of basic events for the instantaneous release

Basic Event No.	Comp. symbol	Event/Failure mode	F/P	λ_{50} (/hr)	K_{95}	Ref.
1	PCV-4	Remote operated (isolation) valve fails stuck open	F	1.80E-5	2.2	pneu. shutoff valve [4]
2	V-3	Hand operated (isolation) valve fails stuck open	F	8.40E-8	6.0	manual valve [5]
3	LI	Level indicator fails to display true level	F	7.70E-7	5.6	[6]
4	-	Operator fails to act at level L1	P	1.00E-3	2.0	[4, 7]
5	-	Operator fails to act at level L2	P	1.00E-3	2.0	[4, 7]
6	LSHL	Level switch of high level fails to actuate (low)	F	2.80E-5	13.8	[5]
7	SV-1	Spring loaded pressure safety valve fails blockage	F	1.10E-6	8.4	[4]
8	SV-2	Spring loaded pressure safety valve fails blockage	F	1.10E-6	8.4	[4]
9	PCV-2	Control valve fails stuck close	F	6.10E-7	8.4	[8]
10	PIC-2	Pressure controller fails to operate	F	1.10E-5	14.9	[5]
11	PCV-40	Plant valve fails to close (emergency shutdown valve)	F	4.40E-6	2.8	ESD valve [6]
12	LSH	Very high level switch fails to actuate (low)	F	2.80E-5	15.1	[5]
13	V-11	Tree-way valve fails blockage	F	3.30E-6	4.7	[9]
14	SV-4	Spring loaded pressure safety valve fails blockage	F	1.10E-6	8.4	[4]
15	PCV-1	Control valve fails stuck open	F	2.50E-7	27.7	[8]
16	PIC-1	Pressure controller fails to operate	F	1.10E-5	14.9	[5]
17	PT	Pressure transmitter fails to obtain signal	F	5.80E-7	32.0	[8]
18	-	Filling take place	F	8.70E-3	5.0	76 times/yr
19	-	Loss of vacuum in the annular space	F	1.40E-8	2.9	Guess estimate
20	-	External events (e.g. Earthquake)	F	1.10E-12	10.0	[10]
21	-	Spontaneous events (e.g. H ₂ embrittlement)	F	1.00E-11	10.0	[10]
A	-	Shutoff valves fail stuck open				
B	-	Operator fails to respond to LI				
C	-	Operator fails to respond to HL alarm				
D	-	Safety valves fail blockage				
E	-	PCV-2 fails to open				
F	-	Automatic shutoff valve(PCV-40) fails to close				
G	-	Manual shutoff valve fail to close				
H	-	Primary PRDs fail blockage				
I	-	Secondary PRDs fail blockage				
J	-	Pressure Building Circuit overheating				
K	-	Tank overfilling				
L	-	Pressure Relief Devices fail blockage				
M	-	Tank overpressure				
N	-	Tank Rupture by overpressure				
O	-	Instantaneous Release of LH ₂ Tank				

Table 4 Probability and frequency estimations of basic events for the continuous release in liquid phase

Basic Event No.	Comp. symbol	Event/Failure mode	F/P	λ_{50} (/hr)	K_{95}	Ref.
1	-	Liquid thermal expansion	F	1.10E-7	10.0	Guess estimate
2	SV-5	Safety valve(SV-5) fails blockage	F	1.10E-6	8.4	[4]
3	PCV-3	PCV-3 fails stuck open	F	1.80E-5	2.2	pneu. shutoff valve
4	-	Operator fails to act	P	0.001	2.0	[4, 7]
5	V-4	V-4 leaks to environment	F	1.10E-6	13.8	[8]
6	C-2	Connector (C-2) fails to connect	F	1.50E-7	14.9	[5]
7	PCV-4	PCV-4 fails stuck open	F	1.80E-5	2.2	[4]
8	-	Operator fails to act	P	0.001	2.0	[4, 7]
9	-	Liquid thermal expansion	F	1.10E-7	10.0	Guess estimate
10	SV-6	SV-6 fails blockage	F	1.10E-6	8.4	[4]
11	-	Dispenser pump fails to stop	P	3.80E-5	10.0	[10]
12	-	Mechanical impacts (e.g. cranes)	F	1.10E-11	10.0	[10]
13	-	Withdrawal takes place	F	2.30E-2	10.0	200 times/yr
14	PCV-3	PCV-3 leaks to environment	F	1.00E-7	10.0	[4]
15	C-3	Connector(C-3) fails to connect	F	1.50E-7	14.9	[5]
16	V-3	V-3 leaks to environment	F	1.10E-6	13.8	[8]
17	-	Mechanical defect (Weld rupture)	F	3.00E-10	31.6	[10]
18	V-7	V-7 leaks to environment	F	1.10E-6	13.8	[8]
19	PCV-4	PCV-4 leaks to environment	F	3.80E-7	5.5	[4]
20	-	Leakage from inner tank (refrigerated, double wall)	F	2.30E-9	10.0	[10]
A	-	Pipe rupture due to overpressure				
B	-	Remote operated valve(PCV-3) fails to close				
C	-	Release at upstream line of PCV-3				
D	-	Release at downstream line of PCV-3				
E	-	Remote operated valve(PCV-4) fails open				
F	-	Pipe rupture due to overpressure				
G	-	Release during withdrawal to truck				
H	-	Inlet pipings of the dispenser leak/rupture				
I	-	Release at upstream line of PCV-4				
J	-	Release at downstream line of PCV-4				
K	-	Release at Pressure Building Coil (D) inlet lines				
L	-	Release at withdrawal circuit				
M	-	Release at filling circuits				
N	-	Continuous Release of H ₂ in Liquid Phase				

Table 5 Probability and frequency estimations of basic events for the continuous release in vapor phase

Basic Event No.	Comp. symbol	Event/Failure mode	F/P	λ_{50} (/hr)	K_{95}	Ref.
1	SV-1	SV-1 fails open prematurely	F	4.00E-7	3.9	PSV-conventional [8]
2	SV-2	SV-2 fails open prematurely	F	4.00E-7	3.9	[8]
3	PIC-2	Pressure controller(PIC-2) fails to operate	F	1.10E-5	14.9	[5]
4	PCV-2	Control valve(PCV-2) fails stuck open	F	2.50E-7	27.7	process control valve [8]
5	PT	Pressure transmitter(PT) fails to obtain signal	F	5.90E-7	2.4	[11]
6	PIC-1	Pressure controller(PIC-1) fails to operate	F	1.10E-5	14.9	[5]
7	PT	Pressure transmitter(PT) fails to obtain signal	F	5.90E-7	2.4	[11]
8	PCV-1	Control valve(PCV-1) fails stuck open	F	2.50E-7	27.7	[8]
9	V-11	Three-way valve(V-11) is directed to one SV	P	0.5	2.0	
10	SV-4	Pressure safety valve(SV-4) fails open prematurely	F	4.00E-7	3.9	[8]
11	PCV-2	PVC-2 leaks to environment	F	4.40E-7	5.5	[8]
12	-	Mechanical impacts	F	1.10E-11	10.0	[10]
13	V-8	V-8 leaks to environment	F	1.10E-6	13.8	[8]
14	V-10	V-10 internal leakage	F	7.30E-8	11.5	[8]
15	-	Downstream line of PCV-1 ruptures	F	6.90E-9	15.0	[5]
16	-	Upstream line of PCV-1 ruptures	F	6.90E-9	15.0	[5]
17	D	Pressure Building Coil(D) ruptures	F	9.70E-10	2.5	[10, 12]
18	C-1	Connector(C-1) fails to connect	F	1.50E-7	14.9	[5]
19	-	Mechanical impacts	F	1.10E-11	10.0	[10]
20	V-6	V-6 leaks to environment	F	1.10E-6	13.8	[8]
21	V-11	Three-way valve(V-11) leaks to environment	F	1.10E-6	13.8	[8]
22	C-4	Connector(C-4) fails to connect	F	1.50E-7	14.9	[5]
23	-	Mechanical impact	F	1.10E-11	10.0	[10]
24	V-2	V-2 leaks to environment	F	1.10E-6	13.8	[8]
25	PCV-1	PCV-1 leaks to environment	F	4.40E-7	5.5	[8]
26	-	Release at instrumentation system	F	1.00E-9	10.0	Guess estimate
A	-	Pressure safety valves fail open prematurely				
B	-	PCV-2 fails open prematurely				
C	-	PCV-1 fails to close				
D	-	Primary Pressure Relief Devices open prematurely				
E	-	Secondary Pressure Relief Devices open prematurely				
F	-	Gas or Vent lines rupture				
G	-	Release at downstream lines of PCV-1				
H	-	Release at upstream lines of PCV-1				
I	-	Release at return vapor from dispenser				
J	-	Release at venting circuits				
K	-	Release at return vapor line to the plant				
L	-	Release at Pressure Building Circuits				
M	-	Continuous Release of H ₂ in Vapor Phase				

Table 6 Expected frequency for the instantaneous release

Case No.	Undesired events	Expected Frequency (/yr)
1	Tank rupture by overpressure	7.18×10^{-4}
2	Spontaneous events	2.37×10^{-7}
3	External events	2.54×10^{-8}
Instantaneous Release		7.18×10^{-4}

Table 7 Expected frequency for the continuous release in liquid phase

Case No.	Undesired events	Expected Frequency (/yr)
1	Release at PBC inlet lines	3.44×10^{-2}
2	Release at withdrawal circuit	3.86×10^{-2}
3	Leakage from inner tank	5.34×10^{-5}
4	Release at filling circuits	4.19×10^{-2}
Continuous Release of H ₂ in Liquid Phase		1.15×10^{-1}

Table 8 Expected frequency for the continuous release in vapor phase

Case No.	Undesired events	Expected Frequency (/yr)
1	Release at return vapor from dispenser	3.95×10^{-2}
2	Release at venting circuit	4.81×10^{-1}
3	Release at instrumentation system	2.37×10^{-5}
4	Release at return vapor line to the plant	3.95×10^{-2}
5	Release at Pressure Building Circuits	7.01×10^{-3}
Continuous Release of H ₂ in Vapor Phase		5.67×10^{-1}

가 누출될 경우로 구분하여 고장빈도를 예측하였다. Table 7의 결과와 같이, 액체수소의 연속누출이 발생할 경우는 압력 생성 회로에서의 누출, 액체수소의 충전 및 회수 시의 누출, 저장 탱크 내부에서의 누설로 크게 분류할 수 있으며, 고장빈도는 3.44×10^{-2} times/yr, 4.19×10^{-2} times/yr, 3.86×10^{-2} times/yr, 5.34×10^{-5} times/yr로 예측되었다. 기체수소의 연속누출이 발생할 경우는 Table 8에 나타난 것과 같이 누출빈도는 5.67×10^{-1} times/yr로 계산되었다.

Table 6-8에 나타난 해석결과로부터 수소 누출 사고빈도는 6.83×10^{-1} times/yr로 약 1.5년에 1회 정도가 발생하며, 기체수소 누출이 전체 누출 사고의 83.1%

Table 9 Conditional probability of hydrogen release

Event	Instantaneous	Continuous
Release type	0.001	0.999
Immediate ignition	0.90	0.50
Formation of pool	0.40	0.20
Pool ignition	0.80	0.80
Cloud denser than air	0.20	0.20
Delayed ignition	0.09	0.45
Explosion	0.20	0.20

를 차지함을 알 수 있다. 또한, 순간 누출이 발생하는 빈도는 전체 누출 사고의 0.1%에 불과함을 알 수 있다.

3.3 Event Tree Analysis

FTA로부터 예측된 수소 누출에 대한 Top Event의 사고빈도를 이용하여 확산, 화재, 폭발 등의 사고 유형과 그에 따른 발생 확률을 정량적으로 예측하기 위하여 ETA(Event Tree Analysis)를 수행하였다. 사고 유형은 누출 방식, 점화 시기, 누출된 수소의 상 등에 따라 결정된다. 점화 시기, Vapor Cloud 및 Pool 형성여부, 화재 및 폭발 발생확률 등은 참고문헌에서 제시한 값을 적용하여 결정하였으며¹⁴⁻¹⁶⁾, Table 9와 같다. Fig. 7은 Event Tree Diagram을 나타내고 있으며, 누출 방식, 점화 시기, 풀의 형성여부 등에 따라 사고 유형이 결정된다. Fig. 7의 Event Tree Diagram과 Table 9의 결과를 조합하게 되면 사고 유형에 따른 Conditional Probability를 계산할 수 있다. 최종적으로 FTA로부터 얻은 결과와 Fig. 7에 나타난 Conditional Probability를 이용하면, 사고 유형별 발생 빈도를 계산할 수 있다.

Table 10은 사고 유형별 발생 빈도를 예측한 결과를 나타낸 표이다. 액체수소 저장 탱크에서 수소가 누출되어 발생할 수 있는 화재 또는 폭발 사고 중에서 Jet Fire 형태의 화재가 3.41×10^{-1} times/yr로 빈도가 가장 높았으며, Pool Fire, Flash Fire순으로 나타

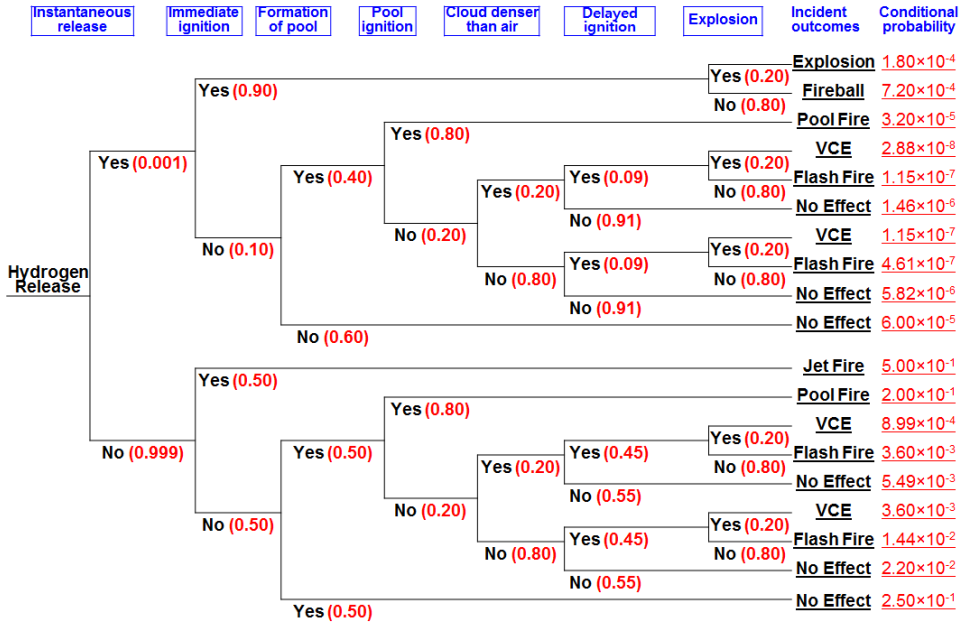


Fig. 7 Event tree diagram for hydrogen release

Table 10 Accident outcome frequencies

Accident outcomes	Conditional probability	Frequency (times/yr)
Explosion	1.80×10^{-4}	1.23×10^{-4}
VCE	4.50×10^{-3}	3.07×10^{-3}
Fireball	7.20×10^{-4}	4.92×10^{-4}
Pool fire	2.00×10^{-1}	1.36×10^{-1}
Flash fire	1.80×10^{-2}	1.23×10^{-2}
Jet fire	5.00×10^{-1}	3.41×10^{-1}
No effect	2.77×10^{-1}	1.89×10^{-1}
Overall	1.00	6.83×10^{-1}

났다. 사고 유형별로 화재에 의한 사고는 전체 사고의 71.8%의 비중을 차지하였고, 실제 수소가 누출되더라도 대기 중으로 확산되어 실제 사고에 영향을 주지 않는 경우가 27.7%로 계산 되었다. 또한, 상대적으로 피해 규모가 클 것으로 예측되는 VCE(Vapor Cloud Explosion) 등의 폭발 사고는 전체 사고의 약 0.5%인 3.69×10^{-3} times/yr로 사고 빈도가 매우 낮은 것으로 예측되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 정량적 위험도 평가를 위해 현재 운전 중인 대형 수소 액화 플랜트를 대상으로 위험성이 발생할 사고 빈도를 정량적으로 계산하였다. 이를 위해 공정분석을 수행하였으며, 수소 액화 공정설비 중에서 가장 많은 공정유체를 포함하고 있는 액화수소 저장 탱크를 대상 설비로 선정하였다. 액화수소 저장탱크의 시스템 분석을 통해 사고 시나리오를 작성하였으며, FTA와 ETA의 두 가지 기법을 적용하여 수소 누출 빈도 및 사고 유형별 발생 빈도를 정량적으로 예측하였다.

수소 누출 사고 빈도는 6.83×10^{-1} times/yr로 약 1.5년에 1회 정도가 발생하고, 기체수소 누출이 전체 누출 사고의 83.1%를 차지하며, 순간 누출이 발생하는 빈도는 전체 누출 사고의 0.1%에 불과함을 해석결과로부터 확인하였다. 또한, 사고 유형별로 화재에 의한 사고는 전체 사고의 71.8%의 비중을 차지하였고, 상대적으로 피해 규모가 클 것으로 예측되는 폭발

사고는 전체 사고의 약 0.5%인 3.69×10^{-3} times/yr로 사고 빈도가 매우 낮은 것으로 예측되었다.

후 기

이 논문은 2014년도 미래창조과학부재원으로 신기술융합형성장동력사업의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2014048846)

References

1. Khan, F. I., Abbasi, S. A., "Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 11, 1998, p. 261-277.
2. Gross, R., Otto, W. and Wanner, M., "Liquid hydrogen for Europe - the Linde plant at Ingolstadt," *Report on Science and Technology*, Linde AG, 54, 1994, pp. 37-43.
3. Linde AG, Tank Installations for the Supply of Liquefied Gases, [http://www.linde-gas.com/international/web/lg/com/likelgcom30.nsf/repositorybyalias/8772_6_20tank_20installations/\\$file/8772_6_Tank_Installations.pdf](http://www.linde-gas.com/international/web/lg/com/likelgcom30.nsf/repositorybyalias/8772_6_20tank_20installations/$file/8772_6_Tank_Installations.pdf).
4. Hauptmanns, U., "Reliability data," Otto-von-Guerucke-University Magdeburg, Germany.
5. AIChE/CCPS, "Guidelines for process equipment reliability data with data tables," American Institute of Chemical Engineers (AIChE), New York, 1989.
6. T-book, "Reliability data of components in Nordic nuclear power plants," 3rd Edition, the ATV Office, Vattenfall Support Grafiska, Sweden, 1992.
7. NUREG/CR-1278, "Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications," 1980.
8. OREDA 2002, "Offshore reliability data, 4th Edition, OREDA Participants," Det Norske Veritas (DNV), Hovik, Norway, 2002.
9. GRS, "Ueutsche Risikostudie kernkraftwerke (Phase B)," *Gesellschaft fur Reaktorsicherheit*, Verlag TUV Rheinland, Koln, Germany, 1990.
10. Lees, F. P., Mannan, S., "Loss prevention in the process industries," Vol. 2, 3rd Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
11. Committee for the Prevention of Disasters, "Methods for the determining and processing probabilities," CPR 12E ("Red book"), 2nd Edition, the Hague, the Netherlands, 1997.
12. Roos, A. J., "Guidelines for quantitative risk assessment," CRE 18E ("Purple book"), Voorburg, the Netherlands, 1999.
13. Contini, S., "A new hybrid method for fault tree analysis," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 49, 1995, p. 13-21.
14. Bain, A. "Sourcebook for hydrogen applications," Edited by Tapan K. Bose, TISEC, Canada, 1998.
15. Cadwallader, C. J., and Herring, J. S., "Safety issues with hydrogen as a vehicle fuel," Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, U.S.A, 1999.
16. IAEA, "Hydrogen as an energy carrier and its production by nuclear power," *International Atomic Energy Agency*, IAEA-TECDOC-1085, IAEA, Austria, 1999.