

## FRA(Fire Risk Assessment)기법을 이용한 화학공장의 Fire Protection에 관한 연구

한승훈 · 류병태 · 태찬호 · 채충근 · †고재욱

광운대학교 화학공학과

(2016년 1월 20일 접수, 2016년 9월 5일 수정, 2016년 9월 14일 채택)

### A Study on Fire Protection of Chemical Plants Using FRA (Fire Risk Assessment) Method

Seung-Hoon Han · Byung-Tae Yoo · Chan-Ho Tae · Chung Keun Chae · †Jae Wook Ko

Dept. of Chemical Engineering, Kwang-Woon University, 20, Kwangwoon-ro, Nowon-gu,  
Seoul 139-701, Korea

(Received January 20, 2016; Revised September 5, 2016; Accepted September 14, 2016)

#### 요약

현대 화학플랜트 및 석유·가스 산업 시설은 다양한 잠재위험으로 인하여 위험물질의 누출 및 화재가 빈번히 발생하고 있다. 그 중 특히 화재는 직접적인 화염의 접촉 또는 복사열로 인하여 인명피해는 물론 건물, 설비에 대한 피해 발생으로 domino effect가 발생하여 2차, 3차 피해까지도 발생하기도 한다. 따라서 본 연구에서는 발생가능한 화재를 파악하여 사고피해영향과 빈도를 낮추어 화재 위험성을 관리하는 FRA(Fire Risk Assessment)기법의 절차를 제시하였으며, 사고피해영향으로 화염의 직접적인 접촉과 복사열로 인한 주요건물(제어실, 창고, 변전소)의 물리적 특성이 변형되는 시간을 고려하였다. 사례연구를 통하여 수행한 FRA기법으로 국내의 화학공장의 위험성을 경감시킬 수 있었으며, Protection 설정을 통한 사고의 빈도와 피해영향의 감소를 정량적으로 파악할 수 있었다.

**Abstract** - Chemical plants and oil gas refinery facilities are intrinsically vulnerable to industrial hazards, such as explosion or fire. Especially, the fire is extremely dangerous to facility structures and plant personnel because of direct flame, radiant heat and smoke. In addition, it has the ripple effect of destroying infra-structures and polluting the environment. In an effort to tackle these potential industrial risks, the procedure of FRA techniques in chemical plants were investigated. The main focus was put on the time variation of physical properties of the main building, i.e. control rooms, warehouses and electrical substations, from a direct flame contact and radiant heat. The deformation of a building due to fire was monitored and modeled with respect to time variable. A variety of case studies, domestic and abroad, was tested in the model to verify the FRA procedure. The developed model was proven to be highly effective to reduce the possible risks at chemical plants. An accurate accident frequency prediction and damage quantification was made by the developed model.

**Key words** : title, abstract, key words, introduction, heading

---

†Corresponding author:jwko@kw.ac.kr

Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

한국의 화학산업은 2009년 7,440천 톤으로 전 세계 화학시장 점유율 세계 5위에서 2013년 8,350천 톤으로 성장하여 일본을 제치고 세계 4위를 차지하였으며, 석유제품 한국 수출 1위, LNG선 상반기 발주액 세계 1위 등 화학 강국으로 한걸음 더 발돋움하였다. 우리나라 제조업 총 생산의 16.7%를 차지하고 있으며, 그에 따라 화학물질은 제조업 분야에서 필수적인 요소이고, 국가 경제에 있어서도 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 국내 화학 시장 규모에 따라 화학공장 및 석유·가스 산업시설에서는 제품 생산 및 고급화, 규격화 등으로 공정 및 설비가 더욱 복잡해지고 세분화됨으로써 대규모의 잠재 위험성이 증가되고 있다.[15][16][17]

현장에서 발생하는 화재의 형태로는 Pool fire, Jet fire, Fireball, Flash fire가 존재하며, 이 중에서도 고압상태의 설비장치에서 누출되어 발생하는 Jet fire는 화염의 직접적인 접촉과 강한 복사열로 인해 사람과 건물에 큰 피해를 끼칠 수 있다. 또한 연속적으로 장치(파이프라인, 탱크, 각종 공정설비) 등에 피해를 끼쳐 사고의 크기가 확대되는 Domino effect가 발생될 위험도 크다. 특히 작업자가 상주하는 건물인 제어실(Control building), 창고(Warehouse), 변전소(Substation) 등은 설비로부터 비교적 가까운 거리에 위치하며, 화재로 인한 건물 구조변형 및 인명피해가 발생 할 수 있다.[1][9][11][12]

대표적인 화학사고의 사례로는 1992년 9월 21일 영국에서 발생한 Jet fire사고가 있다. Hickson & Welch사는 Seveso 지침과 CIMAH 등의 안전관리 제도를 따르고 있었지만 플랜트 내에 존재하는 Vessel에서 Jet fire가 발생하여 50m 거리의 control building을 강타하여 건물 내에 존재하는 5명 전원이 사망하였다. 플랜트 설계 이후 단 한번의 Vessel 청소하지 않아 Vessel하부에 34cm 높이의 슬러지가 존재하였으며, 이 슬러지에서 생긴 가연성 가스가 Vessel을 가득 채운 뒤 Rupture로 인하여 고압으로 가스가 분출 되어 점화원에 의하여 Jet fire가 형성된 사고이다. 본 사고를 통하여 서면상의 안전관리 제도만으로는 화재발생가능지역에 대한 분석이 어려우며, 실질적인 화재관리가 미흡하므로 플랜트내의 화재 발생가능 지역에 대하여 정성적 위험성평가와 화재 발생 빈도 및 피해영향을 분석하는 정량적인 위험성 평가를 수행하여 빈도와 피해영향을 경감시키는 기법인 FRA(Fire Risk Assessment)가 필요하다는 것을 알 수 있다.[1]

## II. 이론

### 2.1 FRA

FRA기법은 NFPA 551 및 API 752 Code에 기재되어 있으며, 본 연구에서는 기존 FRA기법에 QRA 기법 및 구조의 변형에 대한 Failure time을 접목시켰다.[4][8]

FRA기법은 화재 발생 확률과 피해영향을 고려한 잠재 시나리오를 분석하여 사업장에서의 사고의 위험을 평가하는 기법이다. 본 연구에서 수행한 FRA 기법의 수행 절차는 Fig.1과 같다.

#### (1) Identification of Potential Fire Hazard

첫 번째 단계에서는 정성적 위험성 평가를 통하여 플랜트 내의 화재 발생 가능 지역을 판별하고, 화재 발생 시나리오를 도출하는 과정이다.[3]

#### (2) Quantitative Risk Analysis

정량적 위험성평가 단계에서는 도출된 화재발생 시나리오의 사고발생 빈도(Frequency)와 사고발생 시 피해영향(Consequence)을 분석하는 단계이다.[2]

Frequency는 시나리오의 사고 발생 빈도를 계산하는 과정으로 isolation section내의 설비의 종류 및 개수를 분석하여 각 설비마다의 Failure 확률을 고

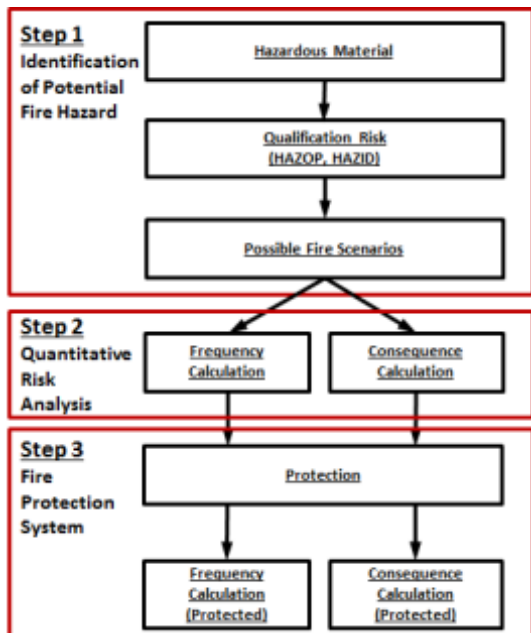


Fig. 1. FRA Procedure.

려하는 Part Count 방식으로 진행된다. 누출 이후 점화원을 통한 점화 확률도 고려하며 누출공의 크기별 분석도 필요하다.

Consequence의 목적으로는 사고 발생 시, 사고로 인하여 건물이 피해를 받는 정도를 파악하고 화재로 인하여 건물이 피해를 받아 구조가 변형되는 시간을 측정한다. Consequence가 높게 계산 될 경우, 사고로 인한 피해가 커지는 것을 나타내며, 피해를 줄이기 위한 추가적인 경감 조치가 필요하다.

**(3) Fire Protection System**

가스 누출 발생 시 Gas Detector를 통하여 가스의 누출을 감지할 수 있으며, Deluge system 혹은 valve 차단 등을 통하여 화재로 발전되는 것은 차단 할 수 있다. 또한 화재 발생 시 Heat Detector 혹은 Flame Detector를 통한 화재 발생 여부를 판단할 수 있으며, Fire water system을 통한 화재피해를 저감시킬 수 있다. API 2001, 2218과 NFPA 221 코드에 자세하게 제시되어 있으며, 안전보건공단(KOSHA) 가이드 P-25-2012지침에 따라 설치를 하였다.[14]

**2.2 Failure Time**

Failure Time은 설비 또는 건물이 화재로부터 화염의 직접적인 접촉 혹은 복사열로 인하여 구조물의 물리적인 특성이 변하여 휨, 뒤틀림 현상이 발생하는 시간을 뜻한다. 변형되는 구조물은 다음과 같다.[18]

- Steel structural members, pipes, risers
- Firewalls
- Concrete structural members

**(1) Effects of Fires on Steel**

Steel이 화재로부터 열을 받게 되면 아주 조금 팽창하고, 강도와 전체적인 내구력이 감소한다. 300℃ 까지 인장강도는 조금 증가하며 항복강도는 500℃에서 50%감소한다. Failure time은 steel의 하중과 특성에 영향을 받으며 일반적으로 550℃ 부근에서 휨 또는 뒤틀림 현상이 발생한다.

**(2) Calculation of Failure Time**

Failure time의 계산은 전도, 대류, 복사에 의해 발생하는 열 손실과 steel이 변성이 발생하는 온도, 열용량을 고려하며 식 2.13과 같다.

$$t_f = \frac{T_f - T_a}{qK - q_o} C_p \cdot M/S \tag{1}$$

- $t_f$  = Failure time(sec)
- $T_f$  = failure 온도 (K)
- $T_a$  = 주변온도 (K)
- $q$  = 화염으로부터 열플럭스 밀도 ( $kW/m^2$ )
- $q_o$  = 열플럭스 산출량 ( $kW/m^2$ )
- $K$  = 열 노출상수 (0.2 ~ 1.0)
- $C_p$  = steel의 열용량 ( $kJ/kgK$ )
- $M/S$  = 구조물의 표면면적당 질량 ( $kg/m^2$ )

구조물이 긴 경우(jacket legs, large pipes, thick plates) 표면 면적당 질량이 커지므로 긴 failure time을 가진다. 면적당 질량은 식 (2), (3)을 통하여 계산할 수 있다. 식 (2)는 plate 형태의 구조물에 사용되며 식 (3)은 pipe 혹은 jacket 형태의 구조물일 경우 사용한다.

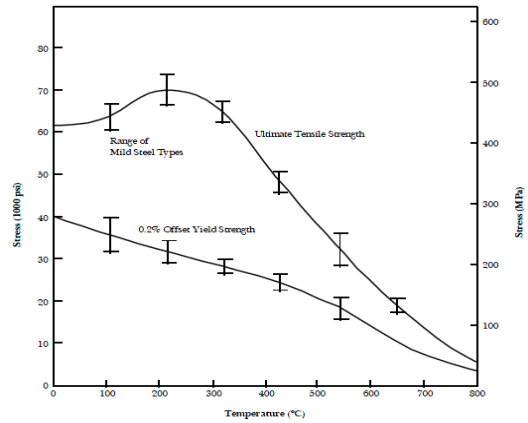


Fig. 2. Strength of the steel according to the temperature.

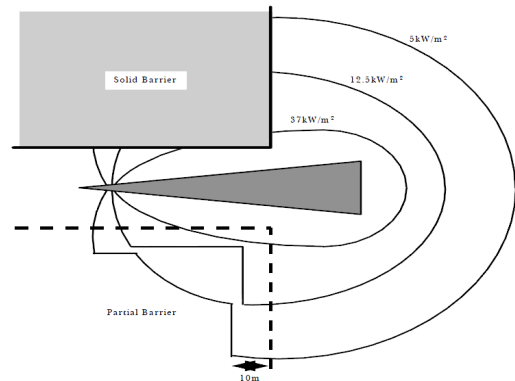


Fig. 3. Influence an obstacle on the thermal radiation.

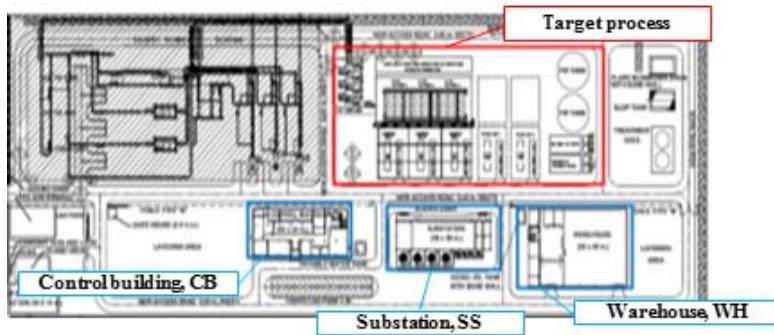


Fig. 4. Target process and the main building.

$$M/S = \rho t_p / 2 \quad (2)$$

$$M/S = \rho t_w \quad (3)$$

### III. 사례연구

본 사례 연구는 태국의 한 화학플랜트를 대상으로 화재 발생시, 플랜트 내의 주요 건물에 대한 정량적인 위험성평가를 실시하였다.

플랜트 내에 건물로는 제어실(Control building, CB), 변압실(Substation, SS), 창고(Warehouse, WH), 경비실(Guard house, GH)이 존재하며, 그 중 대상 공정으로부터 거리가 가깝고 사람이 상주하여 화재 위험이 높은 건물은 제어실, 변압실, 창고이다. 따라서 본 연구에서 화재에 대한 피해영향을 분석하는 건물은 제어실, 변압실, 창고 총 3개의 건물이며, Fig. 4은 플랜트 내의 해당 공정 및 건물을 나타내고 있다.

#### 3.1 Identification of Potential Fire Hazard

플랜트 내의 화재를 일으킬 수 있는 주요 위험물질로는 Methane, N-heptane, N-octane으로 분석되었으며 Table 1에서는 각 물질의 특성을 기재하였다.

본 연구에서는 정성적 위험성평가 기법인 HAZOP (Hazard & Operability study)과 HAZID(Hazard Identification)를 통하여 공정내의 잠재위험을 파악하였다. 정성적 위험성평가의 수월한 분석을 위하여 공정을 총 4개의 Isolation Section으로 구분하였다. 각 Section은 SDVs(Shut Down Valves)가 단렸을 때 고립이 되는 구간을 기준으로 나누었으며, Table 2에 Section 별 boundaries를 나타내었다.

#### 3.2 Quantitative Risk Analysis

대상플랜트의 대상공정에서의 사고피해영향 분석하였다. 누출공의 크기와 누출모델은 CCPS기준을

Table 1. Characteristics of hazardous materials

Chemical	Flammable Limit (%)	Autoignition Temp. (°C)	Hazard
Methane	5~15	537	Highly Flammable gas
Condensate (N-heptane)	1.1~7	222	Highly Flammable liquid
Diesel (N-Octane)	0.96~6.5	220	Highly Flammable liquid

Table 2. Boundaries of each Section

IS. No.	Scenario Description	Boundaries	Hazard
1	Inlet Filter Separator (S-101A/B/C) inlet	SDV-101 SDV-102A/B/C	Jet fire
2	Inlet Filter Separator (S-101A/B/C) discharge	SDV-102A/B/C SDV-108A/B/C SDV-103A/B/C SDV-104A/B/C	Jet fire
3	Compressor (C-101A/B/C) discharge	SDV-104A/B/C SDV-105A/B/C	Jet fire
4	Outlet header	SDV-105A/B/C SDV-106	Jet fire

사용하였으며, Table 3과 같이 5mm, 25mm, 100mm, FBR(Full Bore Rupture) 총 4가지 크기를 고려하였다. 누출모델은 물질이 Vessel, Pipeline으로부터 외부로 누출이 발생 할 경우 물질의 누출속도를 분석

**Table 3.** The size of the leak based on CCPS Guidelines

Release Scenario	Hole Size (mm)	Comment
Small	5	Representative of a generic small leak from vessels/pipeworks
Medium	25	Representative of a generic medium leak from vessels/pipeworks
Large	100	Representative of a generic large leak from vessels/pipeworks
Rupture	Full Bore	Representative of a generic catastrophic leak from vessels/pipeworks

**Table 4.** Wind speed and atmospheric stability

Stability Class	Wind Speed (m/s)	Typical Conditions
D	5	Day or night, overcast, moderate wind. In neutral stability conditions
F	1.5	Early morning or night clear or foggy, very low wind speed. Typical worst case dispersion conditions during evening time for ground level passive/dense gas clouds.

하였다. Table 4는 본 연구에서 사용된 바람속도 및 대기안정도를 나타낸 것이다.

### 3.2.1 Consequence Analysis

Table 5는 Section별 공정상태와 누출공 크기별 누출속도를 나타낸 것이다.

각 Isolation Section에서 발생하는 Jet fire에 의하여 화염의 직접적인 접촉 혹은 복사열에 의하여 CB, SS, WH를 구성하는 구조물이 변형되는 시간을 분석하였다. Rupture지점과 대상건물과의 거리를 측정하였으며 화염의 수직 또는 수평누출로 인하여 발생하는 화염의 길이를 PHAST 소프트웨어를 통하여 대상 건물이 화염의 범위 내에 존재하는지의 여부를 분석하였으며, Fig.5와 6의 결과를 도출하였다. Table 6은 누출공의 크기별 Jet fire의 복사열을 나타낸 것이며, Table 7은 Section별 Jet fire 발생시 주요 건물의 변형이 나타나는데 걸리는 시간을 나타낸 표이다.

**Table 5.** Process and releases conditions of each section

IS. No.	Line size (")	Temp. (°C)	Press. (barg)	Inventory (m <sup>3</sup> )	Hole size (mm)	Flow Rate (kg/s)
1	30	25	35.3	91	5	0.109
					25	2.74
					100	43.84
					FBR	145.79
2	30	25	35.2	402	5	0.109
					25	2.73
					100	43.71
					FBR	72.9
3	20	120	90	152	5	0.236
					25	5.90
					100	94.33
					FBR	72.9
4	36	50	89.5	164	5	0.27
					25	6.76
					100	108.20
					FBR	145.79

### 3.2.2 Frequency Analysis

대상플랜트의 대상공정에서의 화재 발생 빈도 측정은 각 Isolation Section내에 leak/Rupture가 발생할 수 있는 설비의 개수를 분석하여 각 설비마다의 Release Frequency data를 이용하는 Part Count 방식을 사용하였다. 공정을 구성하는 설비들은 다음과 같으며, 공정상 존재하는 설비의 수는 Table 8에 나타내었다.

- Inlet header and filter separators
- Compressor trains each comprising of compressor package, gas cooler and related piping
- Compressor outlet manifold
- Station piping and valves
- Flare and blow down system
- Fire fighting system
- Utilities
- Oily water system
- Drainage system

**Table 6.** Result data of the jet fire

IS. No.	Hole Size (mm)	Release Rate (kg/s)	Weather Condition	Flame Surface Emissive Power (kW/m <sup>2</sup> )	Flame Length (m)	Max Distance (m) at 5kW/m <sup>2</sup>	Max Distance (m) at 12.5kW/m <sup>2</sup>	Max Distance (m) at 37.5kW/m <sup>2</sup>
1	5	0.11	5/D	44.14	4.7	NR	NR	NR
			1.5F	45.09	4.7	4	NR	NR
	25	2.87	5/D	162.55	20.6	28	24	20
			1.5F	168.95	19.5	28	23	19
	100	49.97	5/D	248.92	66	106	87	69
			1.5F	254.54	62	105	84	65
FBR	145.8	5/D	298.92	100.4	176	141	109	
		1.5F	292.96	95.2	176	136	104	
2	5	0.11	5/D	44.07	4.7	NR	NR	NR
			1.5F	45.02	4.7	4	NR	NR
	25	2.87	5/D	162.43	20.6	28	24	20
			1.5F	168.83	19.5	28	23	19
	100	45.83	5/D	248.82	65.9	106	87	69
			1.5F	254.44	61.9	105	84	65
FBR	72.9	5/D	267.42	78.1	130	106	82	
		1.5F	269.83	73.6	129	102	78	
3	5	0.25	5/D	66.54	6.6	7	NR	NR
			1.5F	67.17	6.6	7	NR	NR
	25	6.18	5/D	191.25	29	41	35	29
			1.5F	199.24	27.3	41	34	27
	100	72.9	5/D	267.42	78.1	130	106	82
			1.5F	269.83	73.6	129	102	78
FBR	72.9	5/D	267.42	78.1	130	106	82	
		1.5F	269.83	73.6	129	102	78	
4	5	0.29	5/D	71.09	7.1	8	NR	NR
			1.5F	71.91	7	8	NR	NR
	25	7.12	5/D	195.76	30.8	44	38	31
			1.5F	203.93	29	44	36	29
	100	113.84	5/D	287.42	94.8	158	127	98
			1.5F	284.98	86.8	158	123	94
FBR	145.8	5/D	298.92	100.4	176	141	109	
		1.5F	292.96	95.2	176	136	104	

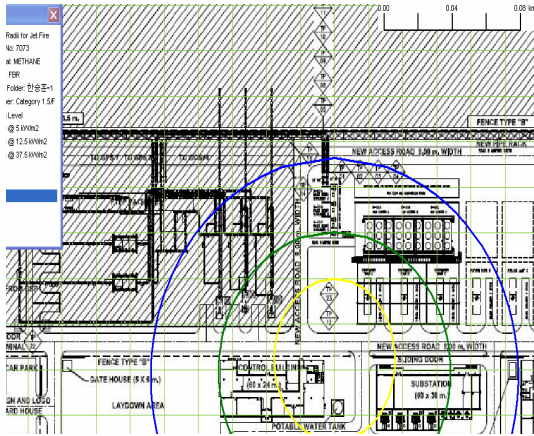


Fig. 5. Radiation effects range due to the jet fire that occurs in IS-2

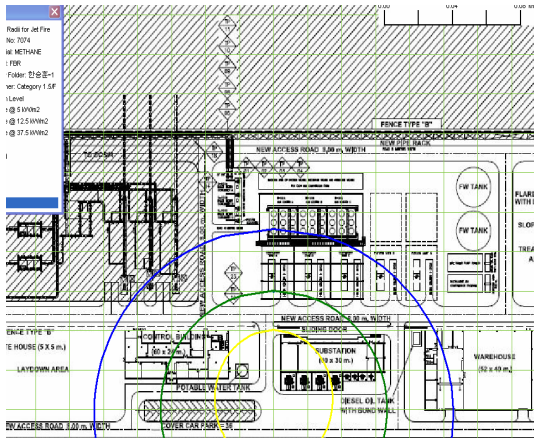


Fig. 6. Radiation effects range due to the jet fire that occurs in IS-4

설비의 release frequency data는 OGP(Oil & Gas Producers)의 process release frequencies를 이용하였다. Table 9는 OGP에서 제안하는 leak frequency data를 나타내었으며, 누출발생 가능 설비에 대한 기준은 안전보건공단(KOSHA) 가이드를 참고하였다. 선택된 설비의 수를 기준으로 Part Count방식을 통하여 각 Isolation Section에서의 release Frequency를 계산을 하였다. 누출공의 크기를 구분하여 계산하였으며, 계산된 결과는 Table 10에 나타내었다.[19] 설비에서의 Leak/Rupture를 통해 물질이 외부로 누출 시 누출원 주변에 점화원이 존재한다면 점화가 발생하며, 점화가 발생할 수 있는 점화 확률은 Loss

Table 7. Failure time of each building scenarios

IS. No.	Distance (m)			Failure Time (s)		
	CB	SS	WH	CB	SS	WH
1	75	95	140	1690	-	-
2	55	65	120	120	199	1690
3	35	29	50	58	58	94
4	55	50	60	112	1495	72

Table 8. The number of existing facilities for each section

IS. No.	Manual Valve(**)			Actuated Valve(**)		
	D ≤ 3	3 < D < 11	11 < D	D ≤ 3	3 < D < 11	11 < D
1	5	2	1	1	1	3
2	25	2	4	10	2	4
3	4	2	-	2	4	4
4	7	2	4	-	2	3
IS. No.	Flanges(**)			Piping(**)		
	D ≤ 3	3 < D < 11	11 < D	D ≤ 3	3 < D < 11	11 < D
1	12	6	8	-	-	40
2	70	8	16	-	-	75
3	12	12	8	-	-	75
4	14	8	14	-	-	50
IS. No.	Small bore	Filter	FinFan Cooler	Vessel	Pump	Compressor
1	12	-	-	-	-	-
2	17	3	-	-	-	-
3	66	-	3	-	-	3
4	11	-	-	-	-	-

Prevention 데이터를 이용하였다. 이 자료는 누출속도에 따른 점화확률을 구분해놓았으며, 물질의 상(Phase)에 따라 다른 값을 가지며 Table 11에 나타내었다. [15] 최종적으로 Jet fire가 발생될 확률 Table 12에 나타내었다.



**Table 9.** Release frequency data for each facilities from OGP

Component	Size	Small	Medium	Large	FBR
		5	25	100	
Manual valve	D<=3"	6.70E-05	2.10E-05	0.00E+00	0.00E+00
	3<D<11"	1.00E-04	1.80E-05	1.10E-05	0.00E+00
	D>11"	1.27E-04	2.30E-05	6.30E-06	7.80E-06
Actuated valve	D<=3"	6.00E-04	1.10E-04	0.00E+00	0.00E+00
	3<D<11"	5.10E-04	6.60E-05	3.30E-05	0.00E+00
	D>11"	4.70E-04	6.00E-05	1.30E-05	1.80E-05
Flanges	D<=3"	6.20E-05	1.50E-05	0.00E+00	0.00E+00
	3<D<11"	9.10E-05	1.10E-05	8.50E-06	0.00E+00
	D>11"	1.35E-04	1.60E-05	3.20E-06	7.00E-06
Piping	D<=3"	1.28E-04	2.70E-05	0.00E+00	0.00E+00
	3<D<11"	5.80E-05	7.40E-06	7.60E-06	0.00E+00
	D>11"	5.30E-05	6.70E-06	1.40E-06	5.90E-06
Small bore	5.00E-04	6.50E-05	0.00E+00	0.00E+00	
Filter	3.00E-03	5.20E-04	1.40E-04	1.20E-04	
Fin fan coolers	1.49E-03	2.40E-04	6.00E-05	4.90E-05	
Compressor Centrifugal	9.30E-03	1.00E-03	1.90E-04	1.10E-04	
Compressor Reciprocating	6.20E-02	6.70E-03	1.30E-03	7.30E-04	

**Table 12.** Jet fire resulting data of each leak size

IS. No.	Hole Size (mm)	Release Rate (kg/s)	Weather Condition	Flame Surface Emissive Power (kW/m <sup>2</sup> )	Flame Length(m)	Max Distance (m) at 5kW/m <sup>2</sup>	Max Distance (m) at 12.5kW/m <sup>2</sup>	Max Distance (m) at 37.5kW/m <sup>2</sup>
1	FBR	145.8	5/D	298.92	100.4	176	141	109
			1.5F	292.96	95.2	176	136	104
2	FBR	72.9	5/D	267.42	78.1	130	106	82
			1.5F	269.83	73.6	129	102	78
3	FBR	72.9	5/D	267.42	78.1	130	106	82
			1.5F	269.83	73.6	129	102	78
4	FBR	145.8	5/D	298.92	100.4	176	141	109
			1.5F	292.96	95.2	176	136	104

### 3.3 Fire Protection System

본 사례 연구에서 다른 Fire Protection은 Gas Detector, Flame Detector, Heat Detector, fire barrier wall이다. Gas Detector를 통하여 가스 누출 발생 시 화재 발생을 방지할 수 있으며, Flame & Heat Detector를 통하여 화재 발생 이후 빠른 화재 진압을 통하여 사고피해영향을 줄일 수 있다.[5]

Detector는 Gas Detector, Heat Detector, Flame Detector를 설정하였다. Gas Detector는 Point Type, Open Path Type, Ultrasonic의 세 가지 타입을 사용

**Table 10.** Frequency data of each section

IS. No.	5mm	25mm	100mm	FBR	Total
1	1.37E-02	1.94E-03	2.33E-04	3.54E-04	1.62E-02
2	4.00E-02	6.69E-03	8.09E-04	1.02E-03	4.85E-02
3	7.78E-02	9.80E-03	1.19E-03	1.05E-03	8.99E-02
4	1.52E-02	2.16E-03	3.35E-04	4.78E-04	1.82E-02

**Table 11.** Ignition probability of Loss Prevention

Leak (kg/s)	Probability of ignition	
	Gas	Liquid
Minor(<1)	0.01	0.01
Major(1~50)	0.07	0.03
Massive(>50)	0.3	0.08



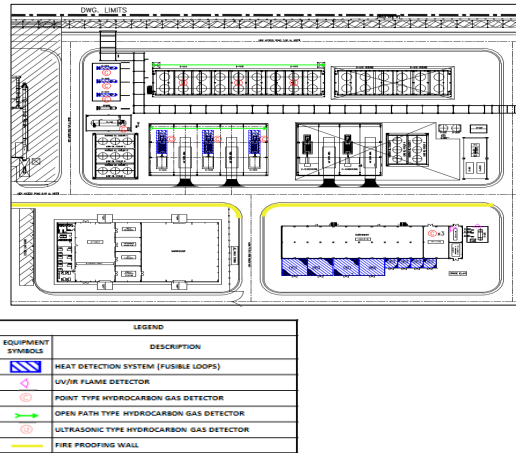


Fig. 7. Fire protection setting.

Table 13. Frequency of releases and jet fire event

IS. No.	Hole Size(mm)	Release Rate(kg/s)	Release Frequency	Jet Fire Frequency
1	5	0.11	1.37E-02	2.60E-04
	25	2.87	1.94E-03	2.62E-04
	100	49.97	2.33E-04	3.15E-05
	FBR	145.80	3.54E-04	1.81E-04
2	5	0.11	4.00E-02	7.60E-04
	25	2.87	6.69E-03	9.04E-04
	100	45.83	8.09E-04	1.09E-04
	FBR	72.90	1.02E-03	5.20E-04
3	5	0.25	7.78E-02	1.48E-03
	25	6.18	9.80E-03	1.32E-03
	100	72.90	1.19E-03	6.07E-04
	FBR	72.90	1.05E-03	5.36E-04
4	5	0.29	1.52E-02	2.89E-04
	25	7.12	2.16E-03	2.92E-04
	100	113.84	3.35E-04	1.71E-04
	FBR	145.80	4.78E-04	2.44E-04

Table 15. Reduced due to the Fire Protection and Consequence Frequency data

IS. No.	Hole Size (mm)	Jet Fire Frequency		Consequence (Failure time)					
		non-protection	protection	Non-protection			protection		
				CB	SS	WH	CB	SS	WH
1	FBR	1.81E-04	2.38E-07	1690	-	-	-	-	-
2	FBR	5.20E-04	6.87E-07	120	199	1690	-	-	3073
3	FBR	5.36E-04	7.07E-07	58	58	94	-	1857	1709
4	FBR	2.44E-04	3.22E-07	112	1495	72	2600	1778	1778

한다. Heat Detector는 열에 잘 녹는 물질을 사용하는 fusible loops를 이용하였으며, Flame Detector는 UV/IR 타입을 사용하였다.

Fig. 7은 플랜트에 설치한 Detector와 fire barrier wall을 나타낸 그림이다. Fire Protection 설치로 건물에 미치는 Jet fire의 영향이 얼마나 감소하였는지 알아보았다. Jet fire의 피해영향을 감소시키기 위한 Protection 설비는 fire barrier wall을 사용하였다. [6][7][10]

각 Isolation의 Leak/Rupture Point로부터 Jet fire가 발생할 경우, 건물의 구조물이 변형되는 시간이 감소하여 최저시간 58(s)는 1857(s)로 늘어났다.

Fire Protection 중 Detector의 설치가 Frequency에

Table 14. Jet fire and release occurrence after fire protection

IS. No.	Hole Size(mm)	Release Rate(kg/s)	Release Frequency	Jet Fire Frequency
1	5	0.11	1.37E-02	1.04E-08
	25	2.87	1.94E-03	8.12E-08
	100	49.97	2.33E-04	9.76E-09
	FBR	145.80	3.54E-04	2.38E-07
2	5	0.11	4.00E-02	3.04E-08
	25	2.87	6.69E-03	2.80E-07
	100	45.83	8.09E-04	3.39E-08
	FBR	72.90	1.02E-03	6.87E-07
3	5	0.25	7.78E-02	5.91E-08
	25	6.18	9.80E-03	4.10E-07
	100	72.90	1.19E-03	8.01E-07
	FBR	72.90	1.05E-03	7.07E-07
4	5	0.29	1.52E-02	1.16E-08
	25	7.12	2.16E-03	9.05E-08
	100	113.84	3.35E-04	2.26E-07
	FBR	145.80	4.78E-04	3.22E-07

어떤 영향을 주었는지 파악하였다. ETA(Event Tree Analysis)를 통하여 빈도 값이 어떻게 변하였는지 파악하였으며, 안전보건공단(KOSHA) 가이드를 통해 분석을 진행하였다. [13]

#### IV. 결론

본 연구에서는 화학플랜트를 대상으로 FRA(Fire Risk Assessment)기법을 적용하여 사고의 발생 빈도와 피해영향을 파악하였다. 사고피해영향으로는 화염원에 직접적으로 접촉하거나 화염원에서 발생된 복사열로 인한 피해로 주요건물의 물리적 특성이 변형되는 시간을 파악하였으며, 도출된 빈도와 사고 피해영향이 Fire protection 설정을 통하여 경감되는 정도를 정량적으로 파악할 수 있었다.

또한, 사례연구를 통하여 천연가스 압축·이송 플랜트에 대하여 FRA를 수행하였으며, HAZOP과 HAZID를 통하여 사고시나리오를 도출하고, 화재 발생빈도와 사고피해영향을 파악한 후, Fire protection 설비를 설정하여 감소되는 빈도와 사고피해영향을 분석하였다. 이 후, Fire protection 설비(gas detector, flame detector, fire barrier wall) 설정으로 감소되는 빈도와 사고피해영향을 분석할 수 있었다.

빈도의 경우, protection 설정 전  $1.48e-04$ 의 빈도 값을 나타낸 시나리오가 protection 설정을 통하여  $5.91e-08$ 로 낮아지는 것을 파악할 수 있었으며, 사고 피해영향의 경우, 주요건물 중 하나인 Control room 이 Jet fire를 통하여 구조물의 물리적 특성이 변하는 시간이 112초에서 2600초로 늘어난 것을 파악할 수 있었다.

결론적으로 FRA를 통해 화학공장의 위험물질이 누출 시, 화재로 발전할 수 있는 확률과 화재 이후의 Jet fire로 인한 주요 건물의 피해를 경감시킬 수 있었다. 본 연구의 결과는 국내뿐만 아닌 해외 신규 설치 화학플랜트에 적용되어 활용 할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2014년도 지식경제부 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No. 20132010500030)

#### REFERENCES

[1] AIChE/CCPS, Guidelines for Evaluation Process Plant Buildings for External Explosion, Fires

and Toxic Releases(2nd), WILEY, (2012)  
 [2] AIChE/CCPS, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis(2nd), AIChE, (2000)  
 [3] AIChE/CCPS, "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures(3rd)", WILEY, (2008)  
 [4] American Petroleum Institute(API), Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Buildings (RP 752), (2003)  
 [5] American Petroleum Institute(API), Fire Protection in Refineries (RP 2001), (2011)  
 [6] American Petroleum Institute(API), Fireproofing Practices in Petroleum and Petrochemical Processing Plants (RP 2218), (1999)  
 [7] Health and Safety Executive(HSE), The Selection and Use of Flammable Gas Detectors, UK, (2012)  
 [8] David Yung, Principles of Fire Risk Assessment in Buildings, WILEY, (2008)  
 [9] Casal, J., "Jet Fires: a "Minor" Fire Hazard?", *Chemical Engineering Transactions*, 26, 13-20, (2012)  
 [10] General Monitors, Fundamentals of Combustible Gas Detection, (2010)  
 [11] Singapore Civil Defence Force, "Fire, Ambulance and Enforcement Statistics", (2013)  
 [12] Ko, J. S., "Study on Probabilistic Analysis for Fire · Explosion Accidents of LPG Vaporizer with Jet Fire", *Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, 26(4), 31-41, (2012)  
 [13] Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), KOSHA GUIDE(P-87-2012), (2012)  
 [14] Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), KOSHA GUIDE(P-25-2012), (2012)  
 [15] Ju, H. S., *A study on the Improvement of Environmental Impact Assessment of Industrial Complexes Based on Risk Assessment of Chemical Leakage Accidents*, Korea Environment Institute, (2013)  
 [16] e-Country Indicators, Petrochemical Industry Trends Statistics, Statistics Korea, (2016)  
 [17] Ministry of Environment, 3rd Hazardous Chemicals Management Plan, (2010)  
 [18] John Spouge, *A Guide To Quantitative Risk Assessment for Offshore Installations*, DNV Technica, (1999)  
 [19] Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), KOSHA GUIDE(P-82-2012), (2012)