

# 제 4류 위험물 취급소 및 LPG 충전소의 화재·폭발 피해영향분석

이수경, 이창욱, 유상빈  
서울산업대학교 안전공학과

## Consequence Analysis of the Fire & Explosion on the Flammable Liquid Handling Facility and LPG Station

Su-Kyung Lee, Chang-Wook Lee and Sang-Bin Yoo

*Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743,  
Korea*

### 1. 서론

20세기에 들어와 세계적인 정유산업과 석유화학산업의 눈부신 발전에 부응하여 우리나라에서도 1960년에 국내최초의 정유공장인 대한석유공사가 미국의 Fluor社와 합작으로 울산에 건립된 후 약 40여년의 세월동안 국내의 정유산업, 석유화학산업, 가스산업분야도 괄목할만한 발전과 성장을 이루었다고 할 수 있다. 그러나 그 과정을 살펴보면 1960년대와 1970년대의 고도성장기에는 성장위주의 국가경제 운영으로 석유류나 가스류 위험물의 취급에 따른 재해나 위험성을 간과해 왔던 것이 사실이다.

본 연구를 위해서 경기도 부천시 ○○○소재의 위험물 판매취급소인 XX상사를 표준모델로 선정하였다. 제한성으로서의 취급하는 약제위험물이 10여종이되나 그중 인화점, 연소범위 등으로보아 위험도가 가장 큰 아세톤, 톨루엔, 크실렌을 선정하여 Spill되는 것으로 제한하였으며, 취급하는 각종 위험물의 독성 영향에 대해서는 본 연구에서 제외시켰다. 또한 선정된 시나리오나 발생재해에 대한 발생확률에 대한 자료수립의 어려움으로 발생빈도에 대한 분석은 본 연구에서 제외되었으며 선정된 시나리오에 따른 발생재해의 강도(Consequence)분석을 포함하였다. 또한 피해정도를 정량적으로 계산하고 지역적·사회적 위험성을 평가하여 누출·폭발시의 인명피해 및 주변환경에 미치는 영향의 심각성을 다루었다. 본 위험성 평가에는 PHAST 모델과 SUPER CHEM 모델을 이용하여 석유류 위험물과 LPG 의 누출·확산범위를 예측하고 화재시 발생될 수 있는 복사열에 의한 피해영향, 폭발피해영향 등을 평가하여 위험성에 대한 인식을 고취시키고 재해의 사전방지를 위한 대책수립에 기여하고자 하였다.

### 2. 시나리오에 따른 결과분석

#### (1) 시나리오 1.

##### 1) Super-Chem Model 결과분석

××상사에서 제 4류 위험물 이동탱크로부터 지하 저장탱크로 100mm 혹은 50mm 호스로 unloading 할 경우로서 주로 심야에 작업이 이루어지므로 근무자의 부주의로 연결구의 체결 상태가 불량하여 일시에 이동탱크 전량의 액체 위험물이 spill되어 취급소내의 부지내 콘크리트 바닥위에서 Pool을 형성하여 직경이 점점 커지면서 어느 순간 정전기 스파크 또는 원인 미상의 점화원에 의해 점화되어 Pool Fire가 되며 Flash Fire 형태로 전파되거나 또는 바람의 영향이나 주변의 영향으로 연소속도 증가에 따른 UVCE의 발생을 상상할 수 있다. Superchem을 이용하여 지하저장탱크에 물질을 Unloading 할 경우 순간누출과 지연 점화에 관한 Toluene, Xylene, Acetone의 결과는 다음과 같다.

Table. 2-1. Xylene Release and Radiation Heat for wind speeds

Hole Size	Radiation Heat	Wind Speed		
		1.5m/s	3.0m/s	5.0m/s
50mm	4	38.93	62.82	72.41
	12.5	17.54	28.77	34.84
	37.5	-	-	-
Maximum Pool diameter		24.14	24.03	23.92
100mm	4	73.16	95.35	114.5
	12.5	39.15	45.66	54.8
	37.5	-	-	-
Maximum Pool diameter		61.73	60.38	59.87

Table. 2-2. Toluene Release and Radiation Heat for wind speeds

Hole Size	Radiation Heat	Wind Speed		
		1.5m/s	3.0m/s	5.0m/s
50mm	4	51.15	59.79	84.06
	12.5	23.16	25.86	46.75
	37.5			
Pool diameter		23.15	23.46	23.47
100mm	4	90.18	107.9	138.3
	12.5	41.23	52.36	75.3
	37.5			34.28
Pool diameter		46.36	46.18	46.07

Table. 2-3. Acetone Release and Radiation Heat for wind speeds

Hole Size	Radiation Heat	Wind Speed		
		1.5m/s	3.0m/s	5.0m/s
50mm	4	71.64	76.45	75.54
	12.5	28.09	30.02	49.64
	37.5	12.69	14.68	24.57
Pool diameter		18.34	18.26	18.11
100mm	4	96.32		128.5
	12.5	48.13		85.14
	37.5	23.14		40.93
Pool diameter		36.7		36.29

2) PHAST Model 결과 분석

PHAST 모델을 이용하여 지하저장탱크에 물질을 Unloading 할 경우의 누출과 점화에 관한 Toluene, Xylene, Acetone의 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

Table. 2-4. Xylene Release and Radiation Heat for wind speeds

Hole Size	Radiation Heat	Wind Speed		
		1.5m/s	3.0m/s	5.0m/s
50mm	4	34.89	48.86	56.06
	12.5	18.26	19.34	20.08
	37.5	-	-	-
Maximum Pool diameter		28.12	28.03	27.96
100mm	4	52.78	67.2	76.87
	12.5	26.81	28.21	28.78
	37.5	-	-	-
Maximum Pool diameter		44.86	44.73	44.62

Table. 2-5. Toluene Release and Radiation Heat for wind speeds

Hole Size	Radiation Heat	Wind Speed		
		1.5m/s	3.0m/s	5.0m/s
50mm	4	29.34	40.26	43.56
	12.5	13.14	19.49	23.46
	37.5	3.53	3.42	4.16
Pool diameter		14.63	14.52	14.41
100mm	4	66.46	80.59	96.64
	12.5	35.28	35.56	37.67
	37.5	-	-	-
Pool diameter		56.61	56.23	55.93

Table. 2-6. Acetone Release and Radiation Heat for wind speeds

Hole Size	Radiation Heat	Wind Speed		
		1.5m/s	3.0m/s	5.0m/s
50mm	4	72.30	74.81	70.91
	12.5	40.87	49.59	49.50
	37.5	21.84	31.30	35.19
Pool diameter		15.82	15.39	15.09
100mm	4	143.90	154.50	145.80
	12.5	83.60	95.64	98.51
	37.5	46.71	61.28	68.51
Pool diameter		39.73	39.15	38.68

대상 도면 위에 Toluene, Xylene 및 Acetone의 확산 정도를 나타내면 Fig. 2-1 ~ Fig. 2-3과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 Acetone의 복사열이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 100mm hole의 누출에 대하여 Xylene은 12.5kw/m<sup>2</sup>에 해당하는 거리가 28.78m

에 이른다. 그리고, Toluene은  $12.5\text{kw/m}^2$ 에 대하여 37.67m 이르며 Acetone의 경우는  $37.5\text{kw/m}^2$ 에 이르는 거리가 68.51m로 나타났다.

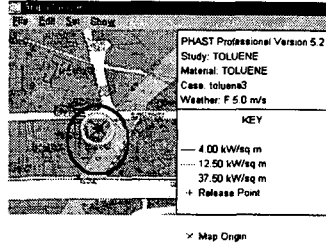


Fig. 2-1. Radiation effect of Toluene, wind speed 5.0m/s, hole size 100mm

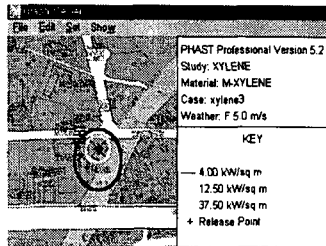


Fig. 2-2. Radiation effect of Toluene, wind speed 5.0m/s, hole size 100mm

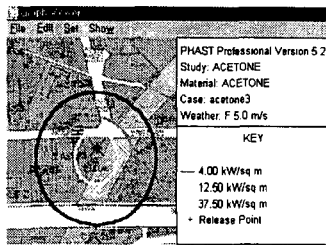


Fig. 2-3. Radiation effect of Acetone, wind speed 5.0m/s, hole size 100mm

(2) 시나리오 2.

XX상사 맞은 편의 LPG 충전소에서 부친 LPG 충전소 사고와 같이 LPG 이동탱크로부터 LPG를 이송 중 LPG가 누설되는 경우로, 연결부 또는 구멍에서 분출되며 가스 상태가 되어 Jet Fire 형태가 되거나 누설 가스가 증기운을 형성하여 어떤 원인 미상의 점화원에 의해 증기운 폭발(UVCE)을 일으키고 이에 대한 복사열의 영향으로 LPG 이동탱크에서

BLEVE 현상을 일으켜 폭발되고 Fire Ball을 형성하며 이로부터 복사열 영향으로 맞은편 XX상사의 액체 위험물 저장소에서 입하 또는 출하 중인 이동탱크나 캔 저장실이 폭발을 일으키는 경우를 상상할 수 있다. LPG 충전소에서 BLEVE로 인한 Fireball에 대한 계산을 Super-Chem을 이용하여 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

Table. 2-7. Fireball Calculation

Model Output	Data
초기 체적(m <sup>3</sup> )	4277
초기 밀도(kg/m <sup>3</sup> )	2.338
초기 직경(m)	20.14
최대 직경(m)	125.2
최대 높이(m)	206.2
지속시간(s)	11.28

LPG 충전소에서 폭발 사고가 일어난다면 첫 번째로 피해를 입게 되는 변수는 Fireball에 의한 피해일 것이다. Super-Chem에서 계산한 Fireball의 직경은 최대 125m에 이르고 있으며 Fireball 높이가 206m에 이르며, 지속시간은 11.28초로 나타났다. Super-Chem Model 결과 최대 과압은 5.066E+05Pa이고, 이 때 영향거리는 1.95m에 이른다. 또한 건물을 완전 파괴시킬 수 있을 정도의 과압은 약 69628Pa정도가 되며, 여기에 이르는 거리는 약 17m에 정도가 된다 또한 건물에 손상을 줄 수 있는 15114Pa 정도에 해당하는 거리는 약 39m로 계산되었다. 이 영향거리는 LPG충전소에서 사고가 발생할 경우 XX상사의 건물에 손상을 줄 수 있는 거리이다. 또한, 유리 파열압력인 1091Pa에 해당하는 거리는 반경 390m로 계산되었다.

1) PHAST Model 결과분석

PHAST Model을 이용한 LPG 충전소의 BLEVE에 의한 Fire Ball의 과압 평가 및 복사열 평가는 다음과 같다.

Table. 2-8. Assessment of Fire Ball and Radiation

복사열(kw/m <sup>2</sup> )	영향거리(m)	Overpressure(bar)	영향거리(m)
4	418.80	0.0207	810.20
12.5	243.40	0.1379	209.80
37.5	137.10	0.2068	162.30

Super-Chem Model과 같은 조건하에서 실행하였지만 결과는 약간 더 크게 나타났다. 이것은 PHAST와 Super-Chem이 사용하는 식이 약간 상이하기 때문이다. PHAST는 건물손상 압력인 0.2068bar에 대한 영향거리가 162.30m에 이르는 것으로 나타났다. 또한, 복

사열 정도를 표현하였는데  $37.5\text{kw/m}^2$ 는 설비에 손상을 줄 수 있을 정도의 열류가 137m 까지 이르고 있음을 알 수 있으며 이는 XX상사의 건물에 충분히 영향을 줄 수 있을 정도의 열량이다.

또한, PHAST Model 특성상 Graphic 나타내면 다음과 같다. 아래 그림과 같이 LPG 충전소에서 화재·폭발이 일어날 경우 0.21bar의 폭발압과  $37.5\text{kw/m}^2$ 의 복사열이 XX상사를 덮고 있음을 알 수 있다.

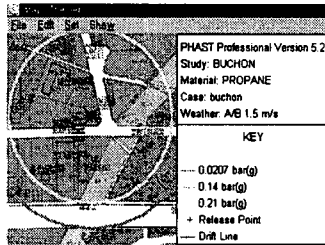


Fig. 2-4. Effect distance by LPG Overpressure

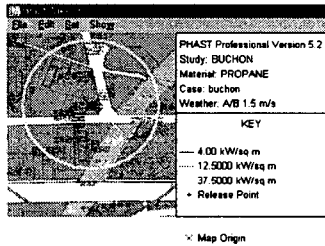


Fig. 2-5. Radiation Heat of Fireball

### 3. 피해영향 분석

#### 3.1 Contours(지도)에 의한 표현

각각의 위험노출을 Risk Contours로 표시하여 나타낼 수 있으며 PHAST MODEL에 의한 Out put으로 각각의 시나리오에 대한 피해영향범위가 Contour로 표시되는 결과를 볼 수 있다. 각 시나리오별 Contour에 의한 Out put을 대상으로 선정한 XX상사와 그 맞은 편 LPG 충전소를 기점으로 하여 그 지역 Map에 다시 나타내면 전체적인 피해영향범위를 발생확률에 따라 나타낼 수 있다.

XX상사와 LPG 충전소가 서로의 영향으로 연이어 화재·폭발사고로 연결되는 경우 피해영향의 상승효과로서, 다음과 같이 Map에 나타난 지역에 따라 복사열 및 과압효과를 나타낼 수 있다.

#### 1) 복사열효과

A지역 : XX상사로부터의 복사열,  $37.5\text{KW/m}^2$  이상

○○충전소로부터의 복사열,  $37.5\text{KW/m}^2$  이상

$$\text{전체복사열} \geq 75\text{KW/m}^2$$

B지역 : XX상사로부터의 복사열,  $12.5\text{KW/m}^2$  이상  
 ○○충전소로부터의 복사열,  $37.5\text{KW/m}^2$  이상  
 $75\text{KW/m}^2 \geq \text{전체복사열} \geq 75\text{KW/m}^2$

C지역 : XX상사로부터의 복사열,  $12.5\text{KW/m}^2$  이상  
 ○○충전소로부터의 복사열,  $12.5\text{KW/m}^2$  이상  
 $50\text{KW/m}^2 \geq \text{전체복사열} \geq 25\text{KW/m}^2$

D지역 : XX상사로부터의 복사열,  $4\text{KW/m}^2$  이상  
 ○○충전소로부터의 복사열,  $37.5\text{KW/m}^2$  이상  
 $50\text{KW/m}^2 \geq \text{전체복사열} \geq 41.5\text{KW/m}^2$

## 2) 과압효과

- ① 0.2068bar(3 psig)의 영향거리 : 폭심에서 162.3m : 철제건물의 완전파괴 XX상사의 모든 건물이 영향거리내에 위치
- ② 0.1379bar(2 psig)의 영향거리 : 폭심거리 209.8m : 벽이나 지붕의 부분적 파괴XX상사를 벗어난 인접지역

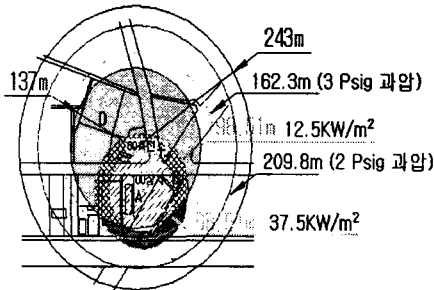


Fig. 2-6. A contour depiction the distance from each of the facility in the study

## 5. 결 론

1. Acetone의 경우 설비에 손상을 줄 수 있는  $37.5\text{kw/m}^2$ 에 해당하는 거리는 PHAST 모델의 경우 68.51m에 이르렀으며, Super-Chem 모델의 경우는 40.93m에 이르렀다. 이것은 인근 주변의 건물에도 심각한 손상을 입힐 수 있는 열량이다. 반면, Toluene, Xylene의 경우 건물에 큰 손상을 입힐 수 있을 정도의 열량은 발생하지 않는 것으로

계산되었다.

2. PHAST와 Super-Chem의 분석결과 아세톤에 의해 발생한 복사열이 가장 큰 영향을 미쳤다. 아세톤은 톨루엔보다 1.2~1.4배 정도 더 큰 결과를 보였으며, 크실렌에 비해서 1.04~1.8배 가량 복사열 영향거리가 크다. 또한, PHAST의 결과 아세톤이 크실렌보다 1.2배~2.2배까지 더 큰 영향거리를 나타냈으며 톨루엔보다 1.6배~2.46배까지 더 큰 복사열 영향거리를 보이고 있다.
3. LPG 충전소에 대한 위험성 평가 결과 Fireball 지름은 125.2m에 이르며 Fireball의 높이는 206.2m에 이른다. 또한, 그 지속시간은 11.28초로 계산되었다. 또한 37.5KW/m<sup>2</sup> 복사열류에 의한 피해영향거리가 137m까지 이르며 25KW/m<sup>2</sup> 복사열류의 영향거리는 243.4m로 나타났다.
4. Probit 분석 결과 제 4류 위험물 충전소에서의 화재에 의한 영향으로는 100% 사망을 나타내는 거리가 Acetone 68.5m, Toluene 4.16m이며 Xylene의 경우 30초간의 노출에 100% 사망할 거리가 나타나지 않았으며, 2도 화상과 1도 화상의 경우도 Acetone의 영향거리가 가장 높았다. LPG 충전소에 대해서는 폭발에 의한 폭발 영향의 Probit 분석 결과로 폐출혈로 인한 사망이 100% 확률이 7.8m 거리에 해당되며 고막 파열의 경우 100% 확률이 9.7m 거리에서 나타남을 알 수 있었다.
5. XX상사와 LPG 충전소의 상호 영향에 의한 동시화재·폭발에 따른 피해영향의 상승효과를 Contour로 나타내본 결과 복사열 효과가 가장 큰 곳인 75KW/m<sup>2</sup> 이상지역에 XX상사 전체가 포함되며 그 주변으로 차례로 50KW/m<sup>2</sup>, 41.5KW/m<sup>2</sup>, 25KW/m<sup>2</sup> 의 영향지역을 볼 수 있다. 복사열류가 가장 큰 A지역의 경우 피해손상정도는 공정장치나 건물의 충분한 손상을 초래하며 노출표면의 화재발생과 철 구조물의 붕괴 또는 파괴가 초래된다.

#### 참 고 문 헌

1. Joe Varela, "Hazardous Materials Handbook for Emergency Responders", Van Nostrand Reinhold(1996)
2. CCPS, "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash Fire, and BLEVE" AIChE, New York(1994)
3. "Super-Chem<sup>TM</sup> Professional Edition Ver. 3.0 User Guide", Arthur D. Little, Inc.(1997)
4. "PHAST Professional Ver. 5.1 Manual", DNV Technica Inc.(1998)
5. 이영순: 월간화학기술, Vol.1, No. 4, pp 68~72(1997)
6. Damiel A, Crowl/Joseph F. Louvar, "Chemical Process Safety: Fundamentals with Application" Prentice-Hall(1990)
7. Frank P. Lees, M.I.Ang, "Safety Cases", Butterworth & Co. Ltd.(1989)
8. CCPS, "Chemical Process Quantitative Risk Analysis", AIChE, New York(1989)
9. NFPA, "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering" Second Edition(1995)