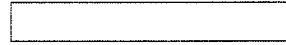




명지대학교 산업공학과



프로판 저장시설에서 정량적 위험성평가를
이용한 설계 알고리즘에 관한 연구

(A Study on Engineering Design Algorithm Using QRA
(Quantitative Risk Assessment) in Propane Storage Facilities)

2007. 4. 28(토)

발 표 자: 차 순 철(명지대학교 산업공학과 박사과정)

지도교수: 강 경 식(명지대학교 산업공학과)

1

Content

1. | 서론

- 1-1. | 연구배경과 문제제기
- 1-2. | 연구목적
- 1-3. | 연구방법 및 범위

2. | 이론적 고찰

- 2-1. | Blast Effect
- 2-2. | Fragment Effect
- 2-3. | Radiation Effect
- 2-4. | Effect Modeling

3. | 정량적위험성평가

- 3-1. | 사고시나리오 설정
- 3-2. | Blast Effect 평가
- 3-3. | Fragment Effect 평가
- 3-4. | Radiation Effect 평가

4. | 결과 및 고찰

5. | 결론



명지대학교
산업공학과

2

1. 서론

■ 연구배경 및 문제제기 (1)

- 경제가 성장함에 따라 산업시설은 고도의 기술 집약적인 장치산업으로 대형화되고 더욱 복잡한 양상을 보이고 있음. 이러한 산업의 발달은 인류에게 상당한 편리함을 주는 반면에 여러 가지 새로운 형태의 위험을 유발시킴.
- 이 중에 화학산업은 여러 종류의 유해하고 위험성이 큰 화학물질을 취급 및 저장하고 있을 뿐만 아니라 이들은 보유량이 많고 시스템이 복잡하여 화재, 폭발, 그리고 독성물질의 누출 등과 동일한 중대산업사고(major industrial accident)의 발생 가능성이 매우 큼.
- 화학산업 중에서 가스관련 산업은 급성장하였을 뿐만 아니라 급속한 경제발전과 더불어 가스의 편리성, 저공해성, 열효율성 등으로 가스 사용량이 증가하여 현재 중요한 에너지원으로 자리잡고 있음.
- 또한 가스산업에서의 사고는 일반사고에 비해서 발생빈도는 비례 매우 낮으나, 단 한번의 사고에 의해서도 인적·물적으로 엄청난 피해를 일으키는 등 사고의 강도가 매우 높아 일반적으로 거대위험(catastrophic risk) 또는 집적위험(accumulation risk)으로 분류됨.

1. 서론

■ 연구배경 및 문제제기 (2)

- 2001년부터 2005년까지 가스산업에서 발생한 사고를 「가스사고연감」 자료를 이용하여 분석한 결과, 가스사고는 총 584건이었으며, 이 중에서 LPG의 경우 75%, 도시가스의 경우 16.6%, 고압가스의 경우 8.4%를 차지하고 있음.
- 이와 같이 LPG의 사고는 가장 사고발생빈도가 높은 것으로 분석되므로 이에 대한 대책수립 마련이 시급한 실정임.

1. 서론

■ 연구배경 및 문제제기 (3)

- 정량적 위험성평가(Quantitative Risk Assessment) 방법 중에서 사고피해예측분석(Consequence Analysis, CA)은 가상의 사고 시나리오를 설정한 후, 사고의 가능성과 사고의 결과를 산출하여 위험도를 평가함. 이 때 사고의 결과는 특성물질의 농도, 복사열, 폭발 과압 등으로 나타나며, 누출원 모델(source model), 화재 모델, 폭발 모델, 영향 모델 등이 개발되어 사용되고 있음.
- 특히, 가스산업시설은 설계단계에서 설비 등에 대한 안전사항이 상당히 고려되어 있어 사고의 발생빈도는 다른 업종에 비하여 낮고, 특히 이격 거리에 대하여는 엄격하게 기준이나 규칙에 명시되어 있음.
- 현재 상당수의 압축 액화된 가스탱크는 공업지역에 설치되어 있음. 이러한 상당수의 저장설비는 휘발유, 등유와 동일한 탄화수소 연료를 저장하고 있는 다른 저장설비와 이웃하고 있음.

1. 서론

■ 연구배경 및 문제제기 (4)

- 압축 액화가스의 저장설비와 장치에 대한 위치를 규정한 기준과 규칙은 외부화재에 탱크의 노출에 대한 잠재적인 역 영향을 나타내고 있음. 대부분의 기준과 규칙은 상호 탱크간의 최소 거리, 공정에서 가장 가까운 탱크와 공정 배관의 최소 거리를 엄격하게 요구하고 있음.
- 특히, the National Fire Protection Association (NFPA) 58[1]인 「Liquefied Petroleum Gas (LPG) Code」에서 탱크부터 배관과 가장 근접한 공정 경계까지 물용량으로 500~2000 gal은 7.6m (25 ft), 2001~30,000 gal 은 15.2m (50 ft), 30,001~70,000 gal은 22.9m (75 ft)를 요구하고 있음. 이와 동일한 이격거리(separation distance)는 60년 동안 NFPA 58 Code에 명시되어 있음. 이러한 거리는 불명확한 과학적인 근거(이론적 또는 실험적)로 설정되었음.

1. 서론

■ 연구목적

- 앞에서 언급한 바와 같이 이격 거리가 불명확한 과학적 근거로 설정되었으므로 기준에서의 명시된 거리가 외부화재에 노출된 프로판(LPG) 저장탱크의 안전을 충분히 확보할 수 있는지가 하나의 과제임.
- 프로판(LPG) 탱크 벽의 실패에 의한 사고결과는 BLEVE를 야기시켜 파국적인(catastrophic) 결과를 초래할 수 있음. 따라서 명시된 이격 거리가 안전 수준을 확보할 수 있는 것이 대단히 중요함.
- 일반적으로 대형화재는 특히 도시지역에서는 10분 혹은 5분 이하의 매우 짧은 시간에 비상대응 서비스(소방서 등)에 의해 조치됨.
- 본 연구의 목적은 60년 동안 지속되어온 프로판(LPG) 기준에 명시된 이격거리 관련, 이론적으로 제시된 모델인 BLEVE와 Fireball에 대하여 사고 시나리오를 설정하여 과압, 비산물, 그리고 복사열의 영향을 평가함.

1. 서론

■ 연구방법 및 범위

- 본 연구에서는 프로판이 저장되어 있는 프로판(LPG) 저장설비를 대상으로 가장 사고의 영향이 큰 BLEVE와 fireball에 대하여 과압과 비산물의 영향, 그리고 복사열을 표와 동일 한 이격거리에 따라 평가하였음.
- 이때, 이격거리 범위 내의 용량들을 세분하여 시나리오를 설정하여 그 변화를 고찰 하였으며, 이 이격 거리의 적정성을 평가하였음. 적용된 정량적 위험성은 CCPS (The Center for Chemical Process Center)에서 제안한 절차 및 모델을 채택하여 사용하였 음.

Volume (m ³) Propane (kg)	Mass (kg) Propane (kg)	Volume (m ³) Propane (kg)	Pressure (bar)
1000	1000	1000	10
2000	2000	2000	10
3000	3000	3000	10
4000	4000	4000	10
5000	5000	5000	10
6000	6000	6000	10
7000	7000	7000	10
8000	8000	8000	10
9000	9000	9000	10
10000	10000	10000	10
12000	12000	12000	10
14000	14000	14000	10
16000	16000	16000	10
18000	18000	18000	10
20000	20000	20000	10

Volume (m ³) Propane (kg)	Mass (kg) Propane (kg)	Volume (m ³) Propane (kg)	Pressure (bar)
1000	1000	1000	10
2000	2000	2000	10
3000	3000	3000	10
4000	4000	4000	10
5000	5000	5000	10
6000	6000	6000	10
7000	7000	7000	10
8000	8000	8000	10
9000	9000	9000	10
10000	10000	10000	10
12000	12000	12000	10
14000	14000	14000	10
16000	16000	16000	10
18000	18000	18000	10
20000	20000	20000	10

2. 이론적 고찰

- 과열된 액체 또는 액화된 가스가 함유되어 있는 압력용기에서는 외부화재 등과 동일한 원인에 의해서 BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)가 발생함.
- BLEVE는 대기로 압축되고 과열된 많은 양의 액체가 순간적으로 방출되는 것으로서, 주된 원인은 충격, 부식, 제조의 결함, 내부 과열 등이며, 압력 방출밸브(relief valve)의 설정압력이 높게 설정되어 있어 기능적으로 내부의 급격한 내부압력 상승에 대처하지 못하였을 때 발생함.
- 이와 같은 실패는 과열된 액체가 플래쉬(flash) 되고, 일반적으로 이것의 부피는 200배 이상 증가함. 이 것은 압력파와 파편이 발생하기에 충분하고 만약 누출된 액체가 가연성이라면 fireball이 생성됨.
- 용기의 감압에 의한 가연성 물질의 급속한 방출 때문에 fireball은 가열된 가스의 부력으로 인하여 매우 느리게 상승함. 이러한 BLEVE와 비산물 모뎀은 경험적인 관계식으로 나타낼 수 있음.

2. 이론적 고찰

- BLEVE의 특별한 형태는 LPG와 같은 가연성 물질을 포함함. 대표적인 사고는 San Carlos, Spain(July 11, 1978), Crescent City, Illinois(June 21, 1970)와 Mexico City, Mexico (November 19, 1984)에서 발생하였음.
- BLEVE 평가의 첫 번째 단계는 모든 BLEVE 사건에 적용되는 것으로서 압력과 파편 결정을 해야 함. 다음으로 가연성 물질의 fireball의 열적 강도를 예측하여야 함.

2. 이론적 고찰

■ Blast Effect

- BLEVE의 폭발의 압력효과는 일반적으로 작지만 가까운 거리에서는 중요함. 이런 효과는 인접한 용기의 domino 효과 예측에 대해서 우선적으로 고려됨. BLEVE의 폭발 영향은 TNT 당량의 에너지가 누출되는 결과가 예측됨.
- 팽창이 등온적이고 이상기체 법칙이 적용된다고 가정한다면, 다음 식과 같음 (Brown, 1985).

$$W = \left(1.39 \times 10^{-6} \frac{\text{lbmol lbTNT}}{\text{ft}^3 \text{BTU}} \right) V \left(\frac{P_1}{P_0} \right) R_g T_0 \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

- TNT 당량모델(TNT equivalency model)이다. 이 모델은 폭발 효율 및 TNT와 가연성 원료사이의 당량의 가정을 기초로 하며 다음 식과 같음.

$$W = \frac{\eta M E_c}{E_{TNT}} \quad Z = \frac{R}{W^{1/3}}$$



2. 이론적 고찰

■ Fragment Effect

- 많은 사상과 domino 손상 효과가 파편에 의해서 발생되므로 파편효과의 예측은 중요함.
- Holden과 Reeves(1985)의 연구를 기초로 다음과 같이 파편의 수와 파편 범위를 나타냈음.

$$\begin{aligned} \text{Number of fragment} &= -3.77 + 0.0096[\text{Vessel capacity}(\text{m}^3)] \\ \text{Range of validity: } &700\text{--}2500 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

- Kinney 와 Graham(1985)은 폭탄 폭발로부터 안전한 거리를 다음과 같이 제안하였음.

$$\bar{R} = \frac{\rho_0 C_D A_D r}{M_f}$$

$$\bar{u} = \frac{\rho_0 C_D A_D u^2}{M_f g}$$



2. 이론적 고찰

■ Radiation Effect

- 질량에 BLEVE 직경과 지속시간의 관계는 다음과 같음.

$$\begin{aligned} \text{Maximum fireball diameter (m)} D_{max} &= 5.8M^{1/3} \\ \text{Fireball combustion duration (s)} t_{BLEVE} &= 0.45M^{1/3} \quad M < 30,000 \text{ kg} \\ &= 2.6M^{1/6} \quad M > 30,000 \text{ kg} \\ \text{Center height of fireball (m)} H_{BLEVE} &= 0.75D_{max} \\ \text{Initial ground level hemisphere diameter (m)} d_{h,0} &= 1.3D_{max} \end{aligned}$$

- 복사열 플럭스의 관계식은 다음과 같음.

$$\begin{aligned} \text{TNO} \quad E_r &= \tau_c EF_{21} \\ \text{AIChE} \quad E_r &= \frac{2.2\tau_c RH_c M^{2/3}}{4\pi X_c^2} \end{aligned}$$

2. 이론적 고찰

■ Effect Model

- 폭발영향(Explosion Effects)

- 장치나 구조물의 손상은 떨어져 나가는 표면에 대해 작용하는 압력차에 의해서 생성되는 힘에 기인함.
- Clancey (1972)의 장치나 구조물의 피해 정도에 대해 다음 표와 같이 제시함.

Overpressure (psi)	Expected Damage
0.03	Occasional breaking of large windows already under stress
0.04	Low noise (145 dB); sonic boom, glass failure
0.1	Breaking of small windows under strain
0.15	Typical pressure for glass breakage
0.3	Some damage to house ceiling; 10% window glass breakage
0.4	Limited minor structural damage
0.5-1	Windows usually shattered; some window frame damage
0.7	Minor damage to house structure
1	Partial demolition of houses made uninhabitable
1-2	Corrugated metal panels / kennings fall, followed by buckling; bowing wood panels; firetrucks fall; people blown in
1.5	Steel frame of clad building slightly distorted
2	Partial collapse of walls and roofs of houses
2-3	Non-reinforced concrete or masonry block walls shattered
3	Lower limit of serious structural damage
3.5	50% destruction of housing brickwork
4	Steel frame building distorted and pulled away from foundations
3-4	Frameless steel panel building demolished; rupture of oil storage tanks
4	Cladding of light industrial buildings ruptured
5	Wooden utility poles snapped
3-7	Nearly complete destruction of houses
7	Loaded brick masonry structures
7-8	8-12 in. thick non-reinforced brick masonry fail by spalling or flexure
8	Loaded brick masonry demolished
10	Probable total building destruction; heavy machinery tools (7000 lb) moved and badly damaged

2. 이론적 고찰

■ Effect Model

- 열복사 영향(Thermal Radiation Effects)

- 장치나 구조물에 대한 열복사의 영향은 가연성 여부 또는 노출 지속시간과 크기에 의 존함. 정상하중 하에서 철구조물은 온도 500~600 °C 상승할 때 급격히 약해짐.
- World Bank (1988)에서는 대형화재의 관찰에 의해 구조물 등의 피해 정도를 다음과 같은 표로 제시하였음.

Radiation intensity (kW/m ²)	Observed effect
37.5	Sufficient to cause damage to process equipment
25	Minimum energy required to ignite wood at indefinitely long exposures (nonpiloted)
12.5	Minimum energy required for piloted ignition of wood, melting of plastic tubing
9.5	Pain threshold reached after 8 sec; second degree burns after 20 sec
4	Sufficient to cause pain to personnel if unable to reach cover within 20 sec, however blistering of the skin (second degree burns) is likely; 0% lethality
1.6	Will cause no discomfort for long exposure

3. 정량적위험성평가 (사고시나리오 설정)

■ Operation Condition

- Substance: Propane
- Heat of combustion: 46350 kJ/kg
- Temperature of Storage: 298 K
- Pressure of Storage: 820 kPa
- Water partial pressure in air: 2810 kPa
- Vessel failure pressure: 2514 kPa
- Tank Steel:
 - Density: 8030 kg/m³
 - Specific heat: 502.3 J/kg K
 - Thickness: 1.905 cm

Scenario	Capacity (m ³)	Separation distance (m)	Scenario	Capacity (m ³)	Separation distance (m)
1	0.5	3.0	21	265.2	30.0
2	0.6	3.0	22	284.1	30.0
3	1.1	3.0	23	303.1	30.0
4	1.5	3.0	24	322.0	30.0
5	1.9	3.0	25	341.0	30.0
6	1.9	7.6	26	341.0	38.0
7	3.3	7.6	27	369.4	38.0
8	4.7	7.6	28	397.8	38.0
9	6.2	7.6	29	426.2	38.0
10	7.6	7.6	30	454.6	38.0
11	7.6	15.0	31	454.6	61.0
12	34.1	15.0	32	530.4	61.0
13	60.6	15.0	33	606.2	61.0
14	87.1	15.0	34	681.9	61.0
15	113.7	15.0	35	757.7	61.0
16	113.7	23.0	36	757.7	91.0
17	151.5	23.0	37	1515.4	91.0
18	189.4	23.0	38	2273.2	91.0
19	227.3	23.0	39	3030.9	91.0
20	265.2	23.0	40	3788.6	91.0

■ Scenario

- Variation of separation distance by NFPA 58
- Variation of capacity by NFPA 58

4. 결과 및 고찰

■ 폭발 영향 (1)

- 동일한 이격거리에서의 용량변화는 용량이 커질수록 보다 큰 과압이 형성됨.
- 용량변화에 따른 이격거리 변화는 이격거리가 7.6 m에서 형성되는 과압이 전체 용량 변화에서 가장 작은 과압을 형성하였음. 이는 일반적으로 과압이 거리에 따라 급격히 감소하는 경향이 반영된 것으로 거리의 변화가 가장 큰 3 m에서 7.6 m로 변화와, 7.6 m 내의 용량변화는 약 1.9 m³에서 7.6 m³로 변화폭이 작은 것이 반영된 것으로 판단됨.
- Propane의 저장용량에서의 액체의 비율이 높을 수록 과압이 낮음을 알 수 있음. 이는 폭발의 경우 이론적으로 증기가 차지하고 있는 용량이 고려되기 때문임.
- 본질적으로 구분된 NFPA의 기준에서 본질점을 비교해 본 결과, 이격거리 3.5 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 과압이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 구조물의 손상 가능성은 100~74%로 대단히 높게 나타났음. 또한 이격거리 7.6 m의 경우 propane의 액체의 비율이 높을 수록 과압이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 구조물의 손상 가능성은 15~0%로 대단히 낮게 나타났음. 특히 propane 90%에서는 구조물의 손상이 없는 것으로 나타났음을 알 수 있음.



4. 결과 및 고찰

■ 폭발 영향 (2)

- 이격거리 7.6 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 과압이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 구조물의 손상 가능성은 83~9%로 대단히 높게 나타났음. 또한 이격거리 15 m의 경우 propane의 액체의 비율이 높을 수록 과압이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 구조물의 손상 가능성은 3~0%로 대단히 낮게 나타났음. 특히 propane 70%, 80%, 90%에서는 구조물의 손상이 없는 것으로 나타났음을 알 수 있음.
- 이격거리 15 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 과압이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 구조물의 손상 가능성은 98~34%로 대단히 높게 나타났음. 또한 이격거리 23 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 과압이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 구조물의 손상 가능성은 53~1.8%로 대단히 낮게 나타났음.
- 이격거리 23 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 과압이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 구조물의 손상 가능성은 91~15%로 대단히 높게 나타났음. 또한 이격거리 30 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 과압이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 구조물의 손상 가능성은 54~2%로 대단히 낮게 나타났음.



4. 결과 및 고찰

■ 폭발 영향 (2)

- 이격거리 7.6 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 과압이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 구조물의 손상 가능성은 83~9%로 대단히 높게 나타났음. 또한이격거리 15 m의 경우 propane의 액체의 비율이 높을 수록 과압이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 구조물의 손상 가능성은 3~0%로 대단히 낮게 나타났음. 특히 propane 70%, 80%, 90%에서는 구조물의 손상이 없는 것으로 나타났음을 알 수 있음.
- 이격거리 15 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 과압이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 구조물의 손상 가능성은 98~34%로 대단히 높게 나타났음. 또한이격거리 23 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 과압이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 구조물의 손상 가능성은 53~1.8%로 대단히 낮게 나타났음.
- 이격거리 23 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 과압이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 구조물의 손상 가능성은 91~15%로 대단히 높게 나타났음. 또한이격거리 30 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 과압이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 구조물의 손상 가능성은 54~2%로 대단히 낮게 나타났음.



4. 결과 및 고찰

■ 비산물 영향

- 비산물은 용량이 454.6 m³부터 형성되기 시작함을 알 수 있음. 또한 비산물의 영향은 경형식에 의해서 산출되었기 때문에 용량변화에 따른 영향이 고려 되지 않았음. 따라서 이와 같은 결과는 비산물을 형성할 수 있는 최대값을 산정하는 것으로 판단됨.
- 이격거리 38 m에서의 시나리오의 경우에는 시나리오 30에서 비산물이 1개 발생하며 이 비산물은 최대 782.7 m까지 비산되는 것으로 평가됨.
- 이격거리 61 m는 전체 시나리오에서 비산물을 형성하며, 비산물은 1~4개, 최대 비산 거리는 697.0~782.7 m로 평가되며, 비산물의 갯수가 많아지면 비산거리는 에너지의 감소로 낮아짐을 알 수 있음.
- 이격거리 91 m의 전체 시나리오에서 비산물을 형성하며, 비산물은 4~33개, 최대 비산 거리는 612.8~697.0 m로 평가됨.



4. 결과 및 고찰

■ 복사열 영향 (1)

- 동일한 이격거리에서의 용량변화는 용량이 커질 수록 큰 복사열이 형성됨.
- 전체 범위에서 모델특성상, AIChE 모델의 값이 2.2~13.7배 정도 TNO 모델의 값보다 높음. 특히 TNO의 경우 fireball의 형상을 고려함.
- AIChE 모델의 경우 이격거리가 증가함에 따라 복사열을 감소하는 경향을 보이고 있으나, 본 연구에서는 TNO 모델의 경우 이격거리가 증가함에 따라 복사열이 증가하는 경향을 보이고 있음. 이는 이격거리가 짧은 경우 용량도 작을 뿐만 아니라 fireball이 높게 상승하여 오히려 가까운 이격거리에 미치는 직접적인 거리가 길어지기 때문에 이와 같이 평가된 것으로 판단됨.
- 이와 같이 fireball의 형상을 고려하는 TNO 모델이 더욱 합리적인 모델로 판단됨.

4. 결과 및 고찰

■ 복사열 영향 (2)

- 분절적으로 구분된 NFPA의 기준에서 분절점을 비교해 본 결과, 이격거리 3.5 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내며, 전체적으로 7.30~9.00 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨. 또한 이격거리 7.6 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 17.65~21.32 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨.
- 이격거리 7.6 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내며, 전체적으로 11.03~13.51 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨. 또한 이격거리 15.0 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 20.47~24.39 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨.
- 이격거리 15.0 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내며, 전체적으로 8.66~10.09 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨. 또한 이격거리 23.0 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 13.03~15.05 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨.

4. 결과 및 고찰

■ 복사열 영향 (3)

- 이격거리 23.0 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내며, 전체적으로 11.19~12.45 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨. 또한 이격거리 30.0 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 14.40~15.93 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨.
- 이격거리 30.0 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내며, 전체적으로 13.78~15.27 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨. 또한 이격거리 38.0 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 17.17~18.89 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨.
- 이격거리 15.0 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내며, 전체적으로 8.66~10.09 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨. 또한 이격거리 23.0 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 13.03~15.05 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨.



4. 결과 및 고찰

■ 복사열 영향 (4)

- 이격거리 23.0 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내며, 전체적으로 11.19~12.45 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨. 또한 이격거리 30.0 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 14.40~15.93 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨.
- 이격거리 30.0 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내며, 전체적으로 13.78~15.27 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨. 또한 이격거리 38.0 m의 경우, propane의 액체의 비율이 높을 수록 복사열이 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 17.17~18.89 kW/m²로 철 구조물에 영향을 주는 것으로 평가됨.



5. 결론

- 본 연구의 목적은 60년 동안 지속되어온 NAPA 프로판(LPG) 기준에 명시된 이격거리를 이론적으로 제시된 모델인 BLEVE와 Fireball에 대하여 과압, 비산물, 그리고 복사열의 영향을 시나리오를 설정하여 평가함.
- 과압의 경우 동일한 이격거리에서의 용량변화는 용량이 커질 수록 큰 과압이 형성됨.
- NFPA 기준의 이격거리 분절점에서 과압의 영향은 대단히 강하게 나타남을 알 수 있으며, 특히 이격거리가 가까울 수록 그 영향은 더욱 커짐을 알 수 있음.
- 비산물의 영향은 용량이 454.6 m³부터 형성되기 시작하여 최대 33개까지 발생할 수 있으며, 비산물의 최대거리는 약 782.7 m로 전체 이격거리는 비산물의 영향을 받는 것으로 평가할 수 있음.
- NFPA 기준의 이격거리 분절점에서 복사열의 영향은 대단히 강하게 나타남을 알 수 있으며, 특히 AIChE 모델와 TNO 모델을 비교해본 결과, fireball의 형상인자를 고려하는 TNO 모델보다 AIChE 모델이 약 2.2~13.7배 과예측됨을 알 수 있음.

5. 결론

- 본 연구에서 평가한 과압, 비산물, 복사열의 평가결과를 종합한 결과, NFPA 기준의 이격거리에서는 본 연구 시나리오 전 범위에서 프로판(LPG) 저장시설의 안전에 영향을 미치는 것으로 판단됨. 따라서, NFPA 기준 검토뿐만 아니라 현재 이와 동일한 기준에 의하여 설치되어 있는 시설물의 안전대책을 재검토하여야 할 것으로 판단함.
- 본 연구의 결과를 바탕으로 하여 적정 이격거리의 산정과 같은 배관설계 뿐만 아니라, 이격거리 불만족 시의 방호벽이나 Water Spray 설치와 같은 소방설계, 그리고 긴급방출밸브 설치와 같은 공정설계 향상을 기하고자 함.



명지대학교 산업공학과

감 사 합 니 다.