

가연성 액체 위험물 저장소에 대한 성능위주의 화재안전설계

심재광 · 강계명* · 하동명** · 이수경***

한국가스안전공사 · *서울산업대학교 재료공학과 · **세명대학교 산업안전공학과,
***서울산업대학교 안전공학과

1. 서론

최근 들어, 국내외에서는 화재안전 분야에서 성능기준이라는 개념이 중요한 토의 주제가 되고 있으며, 성능기준 화재안전 설계 기법을 적용한 건물들이 주요 선진국에서 들어서고 있다. 따라서, 기존 법률 기준으로 적용하기 어려운 새로운 건물이 들어서고 있으며, 이에 대한 화재안전의 중요성으로 말미암아 건축기술자, 화재안전 기술자와 건물에 대한 이해 관계자들사이의 기술적, 법적인 이해 관계아래 건물의 미관을 살리며, 인명 및 재산의 보호를 동시에 만족시킬 수 있는 기술적 기준을 마련하고자 나타난 것이 성능기준화재안전에 기초한 설계기법이다.[1]

1.1 연구방법 및 범위

본 논문에서는 먼저 좀 더 자세하게 대상 지역을 설명하고, 소방 설비 목적이 무엇인지 서술하였다. 그 후에 몇 개의 가상 화재 시나리오를 적었으며, 성능에 기초한 접근을 돕기 위해 예식을 제시하였다. 결론은 대상 공간에 대한 화재안전 설계에 대한 제안을 적음으로써 마무리 하였다.

1.2 배경

대상 산업시설은 총 매출 액이 연간 40억원의 접착제 제조회사이다. 이 회사는 여러 종류의 접착제를 생산하는데, 이는 본드에서 순간 접착제까지의 적용 범위를 갖는다. 시설 내에서 많은 다른 종류의 공정이 수행되는데, 상당량의 톨루엔, 아세톤, MEK와 기타 가연성 액체가 이용된다. 대상 지역은 저장실과 인화성 및 가연성 액체와 위험 폐기물 용기의 수집 저장 지역이다.

옥내 저장시설의 제원은 길이 19.8m × 폭 10m 높이 5.2m이며 면적은 198m²이며 1층으로 되어있다. 또한 지면에서 처마까지의 높이는 5.2m이며 내부 벽은 시멘트 블록으로 쌓여져있고 서까래의 재질은 철골조, 기둥은 철골로 되어있으며 지붕은 스텔트로 되어있다. 또한 보는 철골조이며 반자는 없다. 바닥의 재료는 철근콘크리트로 되어있으며 지면과의 높이는 0.2m이다. 정문에는 자동 감종방화문에 설치되어 있으며 자동폐

쇄장치가 부착되어 있다. 또한 측면의 문은 갑종 방화문이 설치되어 있어 인접 공정 지역으로 통하며 인화성 액체를 이송하였다.

주로 55갤론 들이 철제 드럼에 있는 MEK, 톨루엔, 아크릴 본드와 위험 폐기물의 단기 저장실로 저장실이 이용되며, 한 줄에 최대 약 30개의 55갤론 드럼을 저장할 수 있다. 대상 시설물에 대한 그림은 Fig. 1과 같다.

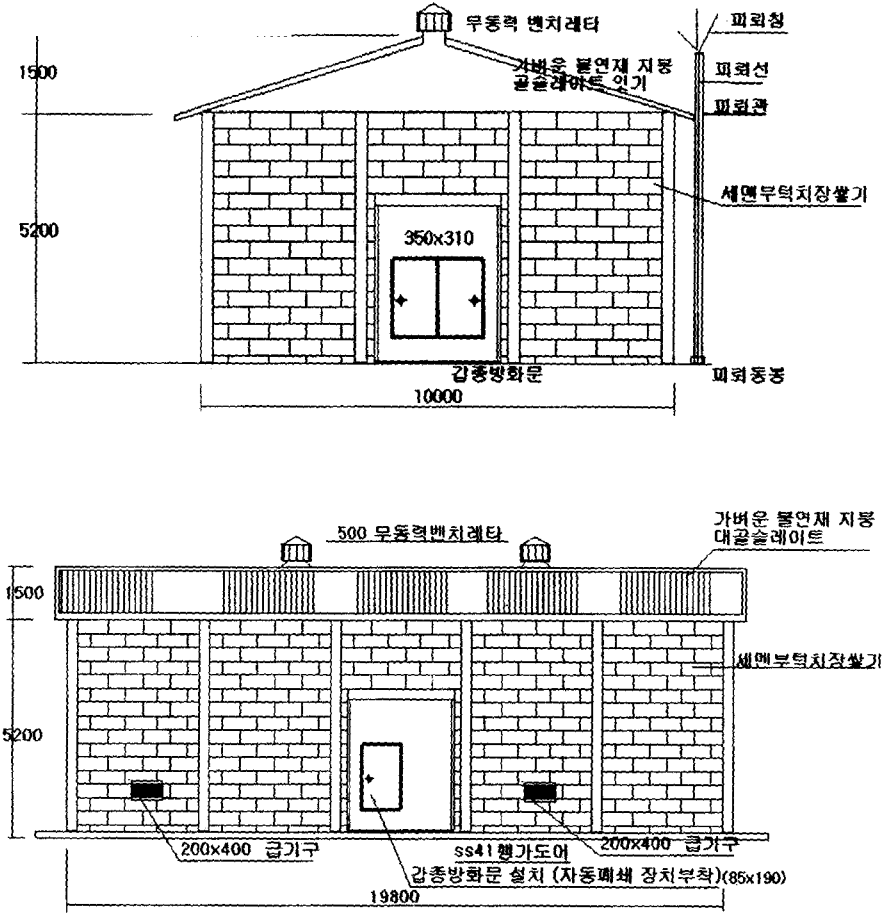


Fig. 1. Layout of flammable liquid storage room

2. 화재위험 분석

2.1 화재 시나리오

1. 드럼 이동중 엎어져 저장실 바닥에 액체가 흐른다. 원인 미상의 점화원에 의해 점화되어 실내에 화재가 발생한다.
2. 지게차가 드럼을 치거나 파손시켜 저장실 바닥으로 액체가 흐른다.

2.2 누출 시간[2]

보통 사용하는 200 l 드럼은 높이 0.85m 구경 0.55m이며, 본 논문에서 가정한 배출 시나리오는 밑바닥에서 5cm 부근에 5×5(cm²)의 구멍을 가정하였다.

저장 물질이 톨루엔일 경우 톨루엔이 드럼에서 배출되는 시간은 다음 식을 이용하여 구할 수 있다. 액위가 누출지점까지 낮아지는데 걸리는 시간은 다음과 같다.

$$t_e = \frac{1}{C_{0g}} \left(\frac{A_t}{A} \right) \sqrt{2gh_L} = \frac{1}{9.8 \times 0.61} \left(0.55^2 \frac{\pi/4}{0.05^2} \right) \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.8} = 62 \text{sec}$$

2.3 풀 화재의 연소속도[3]

톨루엔의 물질 특성은 다음과 같다.

Heat of Combustion(ΔH_c) : $405.5 \times 10^5 \text{J/kg}$

Latent heat of vaporization(ΔH_v) : $3.6 \times 10^5 \text{J/kg}$

Specific heat(C_p) : 157.3J/mol K

ambient Temperature : 25°C

Boiling point : $383.78 \text{K}(111^\circ\text{C})$

주위 온도보다 비등점이 높은 액체의 연소속도는 TNO(1971)에 의해 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$m = \frac{10^{-3} \Delta H_c}{C_p(T_b - T_a) + \Delta H_v} = \frac{1 \times 10^{-3} \times 405.5 \times 10^5}{\frac{157.3}{92.14} \times (383 - 298) + 3.6 \times 10^5} = 0.1126 \text{kg/m}^2\text{s}$$

2.4 풀 화재 지름

누출된 액체가 점화될 때 풀 화재가 전개되는데, 풀 화재의 지름은 누출 형태, 누출양(누출속도), 연소속도에 따라 좌우된다.

연속적인 누출의 경우에 액체는 전체 연소속도가 누출 속도와 같아질 때까지 확산되고 연소지역은 증가한다. 이 경우, 풀 화재의 지름은 다음 식과 같이 제시된다.

$$D_{eq} = 2 \left[\dot{V}_L / \pi \dot{y} \right]^{1/2}$$

평형지름은 다음 식에 제시된 시간 동안 도달하게 된다.

$$t_{eq} = 0.564 \frac{D_{eq}}{[g' \dot{y} D_{eq}]^{1/3}}$$

위 식에 의해 계산한 결과 누출 후 25초까지 풀 직경은 급격하게 증가하여 5.4m에 도달하고 이 시간 이후로 완만하게 증가하여 전체 방출 시간 60초에서는 8.63m의 최대 풀 직경이 형성되었다.

2.5 풀 화재의 화염높이

Thomas(1963)는 실험에 의해 난류 화염 확산 화염의 높이에 대한 상호관계를 다음과

같은 식으로 전개하였다.

$$H = 42D \left(\frac{m}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0.61}$$

이 계산식에 의해 계산한 결과 화재가 발생하여 처음 형성된 화염의 높이는(폴지름에 따른 화염의 높이를 계산하면) 7.8m 이며 시간에 따라 화염의 길이가 증가한다. 또한 화염 형성 후 최대 높이는 60초에 22.1m에 도달하여 이 높이는 계속적으로 유지될 것이다. 이는 저장소의 층고 높이인 5.1m를 훨씬 초과하는 것으로 이미 폴 화재가 발생할 당시 화염은 저장소의 천장에 충분한 열량을 방출시킬 것으로 예상된다.

2.6 열 방출율

누출면적이 충분히 크다고 가정할 경우 톨루엔의 열방출율은 다음과 같이 계산될 수 있다. 이 열 방출율은 실제로 방출되지 않는 것이며 저장실의 공기 공급율에 의해 제한될 것이다.

$$Q = m'' \cdot \Delta H_c = 4.57 \text{ Mw/m}^2$$

이것은 최대 폴지름 8.63m에 해당하는 34.7 m^2 의 면적에 대해 267MW의 열 방출율을 가능케한다. 그러나 배기와 공기 공급에 의해 지배 받으므로 FPE Tool의 배기제한 공식을 따르면[4]

$$Q_L = 1500 A_o \sqrt{h_o}$$

$$= 1500 \times (5.48 \sqrt{3.13} + 1.61 \sqrt{1.9}) = 17871 \text{ Kw}$$

그러므로 저장실에서 얻을 수 있는 최대 에너지 방출율은 17.8 MW로 추정된다.

2.7 탄화수소 화재에 노출된 200ℓ 드럼

저장실 내에 보관중인 철제 55갤론 드럼은 잠재적으로 탄화 수소 화재에 노출되며, 이 때 드럼이 언제 파손되는가를 개략적으로 알 수 있게 설계된다. 가장 단순한 추론은 급속한 압력 증가가 드럼을 파손시키는 때인 비점에 도달될 때까지 균일하게 가열되는 드럼에 있는 액체를 고려하는 것이다. 가능성 있는 이상 현상은 보통 바닥 이음매에서 나타나며, 드럼이 치솟을 수 있는 결과를 초래한다. 미국 해안 경비대는 율활유에 대해 55갤론 드럼의 파손 시험을 수행했는데, 이 때 약 2분 동안 드럼 파손이 관찰되었다.

2.8 스프링클러 시스템

현재 국내 소방법에서는 1000 m^2 미만의 옥내저장시설에 대한 소방시설에 대해 언급은 없는 것으로 조사되었다. 그러나 NFPA의 경우 Class I B등급의 액체에 대하여 다음과 같은 방호사항을 권고하고 있다. NFPA 30의 제안된 표 4-8.4는 Class I B 인화성 액체에 대하여, 55갤론 급속 드럼을 팔레트 위에 저장하는 것을 허용한다.(그러나, 단지 Relieving style의 용기가 사용되는 곳에서만 한정됨.) 12.2 l/min/m^2 의 밀도 설계치 및 278.7 m^2 의 설계 면적을 갖는 천정의 표준 대응 스프링클러를 이용한 foam-water 소방시설이 추천된다. 제안된 NFPA 30의 권고 사항을 이용한 대체 방안은 최대 5갤론

용량의 금속 용기에 Class I B 인화성 액체를 저장하고, 표4-2.2를 따르는 물 분무 시스템으로 저장실을 방호하는 것이다. 이것은 가장 제한적인 Class I B의 5갤론 용기나 Class III B의 55갤론 드럼에 대해 표준 이상의 orifice와 10.2 l/min/m²의 밀도 설계치 및 139.4m²의 설계 면적을 갖는 표준 대응 천정 스프링클러를 사용하도록 한다.

2.9 철제 구조물의 내화처리

비보호 철제 I-빔이 저장실 천정을 가로지른다. 각 빔은 천장을 가로지르고 있으며 천장을 지지하고 있다.

- 철의 밀도 : 7,850 kg/m³
- 단면적 : 0.0092 m²
- 철제의 가열주변 길이 : 1520mm
- $\frac{M_s}{L} = \rho \cdot A_c = 7,850 \times 0.0092 = 72.2 \text{ kg/m}$

비보호된 철제 단면의 내화성(R(min))에 대하여 Metric 단위로 환산한 실험식에서 Lie[6]는 다음과 같이 제시하였다.

$$R = 74.9 \left(\frac{W}{D} \right)^{0.7} = 74.9 \left(\frac{72.2 \text{ kg/m}}{1520 \text{ mm}} \right)^{0.7} = 8.8 \text{ min}$$

그러므로 빔의 파손 시간이 상대적으로 짧아, 내화 처리가 추가되어야 한다는 것이 개선되어야 할 사항이다.

2.10 Fire Protection Recommendations

이 분석이 보여주는 바는, 인화성 액체와 위험 폐기물 저장에 있어서 인접 지역으로 화재 확산과 함께 심각한 화재의 발생 가능성이 잠재되어 있다는 것이다. 또한, 방호 시스템이 갖추어져 있지 않은 상황에서 어떤 화재도 통제 할 수 없다는 것을 보여주고 있다. 가장 좋은 대안은 다음과 같다.

- ① 화재 발생의 경우 화재가 차단된 방안에 머무르도록 하고, 주요 구조적 손상을 유발시키지 않고 인접 지역으로 확산되는 것을 막는다.
 - ② 주변에 인화성 액체의 저장과 분배를 최소화하여 점화원을 줄인다. 특별한 개선 사항은 다음과 같다. 벽과 I-beam 접합부위, 모든 출구 주위의 내화성을 향상시키기 위해, 승인된 2시간 범위의 화재 차단 시스템을 이용한다. 이러한 조치를 통해 화재가 저장실 내에 머무르도록 하고, 공정 지역으로 확산되는 것을 막는다.
- 철이 구조적 임계 온도에 도달하지 않도록 2점의 16mm 석고보드나 2시간의 내화성을 부여하거나 이와 동등의 물질을 이용하여 철제 빔에 방화 시설을 추가한다. 저인화점 액체의 저장을 최소화하고, 저장하더라도 200 l 가 아닌 소용량의 저장 탱크에 저장하도록 유도한다. 초기에, 드럼에 냉각수를 공급함으로써 드럼 파손 가능성을 줄이기 위해 통상 74°C 짜리 head를 갖는 스프링클러를 설치한다.

3. 결론

이상과 같이 가연성 액체 저장실에 대한 성능기준 화재안전 위험성 분석에 대하여 화재 역학적 및 공학적 표현식을 사용한 예를 제시했다. 그 결과 성능기준 화재안전 위험성 분석에 대한 모델을 이용하여 가연성 액체 저장실에 대한 모델을 제시하였다. 이러한 수계산을 통한 계산 이외에 이를 검증하기 위해서는 공인된 시뮬레이션 모델을 이용하여 계산을 수행하는 것이 보다 정확할 것이다. 현재 주요 선진국에서는 성능기준 화재안전 코드를 사용 중이거나 개발에 박차를 가하고 있는 실정이며, 국내에서도 이의 도입을 추진하고 있다. 이를 위해서는 선진국의 경제적이고 효율적인 기술 도입이 시급하며 국내 실정에 맞는 기술 개발이 이루어져야 할 것이며, 공인된 시뮬레이션 모델을 제시하여 기술력의 확보 및 검증이 이루어져야 할 것이다.

Nomenclature

h_0	height of ventilation opening(m)
m	mass of fuel(kg)
y	fuel regression rate(mm/s)
A_0	area of ventilation opening(m ²)
A_c	cross-section area(m ²)
D	diameter of pool fire(m) or heated perimeter of steel(mm)
M	mass(kg)
L	length(m)
R	fire resistance time(min)
V	volume(m ³)
W	steel mass per unit length(kg/m)
ΔH_c	heat of combustion(kJ/kg)
ρ	density(kg/m ³)
\dot{Q}	heat release rate(kw/m ²)

참고문헌

- [1] SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection Analysis and Design of Buildings, NFPA, Quincy, MA, 2000
- [2] Robert H. Perry, Don W. Green, "Perry's Chemical Engineers' Handbook", 1997, seventh edition
- [3] NFPA 30, Flammable and Combustible Liquids Code. NFPA, Quincy, MA, 1993 edition
- [4] H.E. Nelson, FPETOOL-Fire Protection Tools for Hazard Estimation. NISTIR 4380, NIST(1990)
- [5] K.S. Mudan, "Thermal Radiation Hazards from Hydrocarbon Pool Fires", Progress in Energy and Combustion, Vol. 10(1984)
- [6] T.T Lie, "Structural Fire Protection", American Society of Civil Engineers, New York(1992)