

가연성 액체 위험물 저장소의 성능기준 화재안전 분석의 적용사례에 관한 연구

유상빈, 이수경, 김종훈, 윤종모, 하동명*, 황상우**
서울산업대학교 안전공학과, 세명대학교 산업안전공학과*, 한국소방안전협회**

A Study on the Application Case Study of Performance-Based Fire Safety Analysis for Flammable Liquid Hazard Storage

Sang-Bin Yoo, Su-Kyung Lee, Dong-Myeong Ha*, Sang-Woo Hwang**
Dept. of Safety Eng., Seoul National Univ. of Technology, Seoul 139-743 Korea
Dept. of Industrial Safety Eng., Semyung Univ., Jecheon 390-711, Korea*
Korea Fire Safety Association, Seoul 150-038, Korea**

1. 서론

최근 들어, 국내외에서는 화재 안전 분야에서 성능기준이라는 개념이 중요한 토의 주제가 되고 있으며, 성능기준 화재 안전 설계 기법을 적용한 건물들이 주요 선진국에서 들어서고 있다. 이는 현행 법률 기준으로 적용하기 어려운 새로운 건물이 들어서고 있으며, 이에 대한 화재안전의 중요성으로 말미암아 건축기술자, 화재안전기술자와 건물에 대한 이해 관계자들 사이의 기술적, 법적인 이해 관계아래 건물의 미관을 살리며, 인명 및 재산의 보존을 동시에 살릴 수 있는 기술적 기준을 마련하고자 나타난 것이 성능기준화재안전에 기초한 설계기법이다.

본 논문에서는 가연성 액체 저장실에 대한 성능기준 화재안전 위험성 분석에 대하여 화재 역학적 및 공학적 표현식을 사용한 예를 제시하였다. 또한, 저장소에 대한 성능기준 화재안전에 대한 기본적 프레임을 제시하고 이에 대한 언급을 하였다.

2. 성능기준 화재안전 분석 모델

성능기준 화재 안전 분석 모델을 실시하기 위한 공정을 Fig. 1과 같이 간략하게 나타냈다.

2.1 Defining Project Scope

건물의 사용용도 및 설계 목적, 프로젝트 팀의 구성, 적용가능한 법령 및 규칙을 조사하는 것을 포함한다.[1] 우선, 본 분석의 건물에 대한 개요를 살펴보면 다음과 같다.

본 대상으로 인천에 위치한 H상사를 선택하였다. 이 대상물은 인화성 위험물을 저장, 판매하는 인화성 위험물 옥내 저장소이다. H상사 전면에는 LPG 충전소가 위치해 있고 인근에 공업단지, 산업주유소 및 주택가가 위치해 있다. 대상건물의 부지면적은 1,162.5m²이고 저장 취급하는 물질은 아세톤, n-헥산, MEK 등이다. 본 논문은 위험물 저장소를 대상으로 선정하였다.

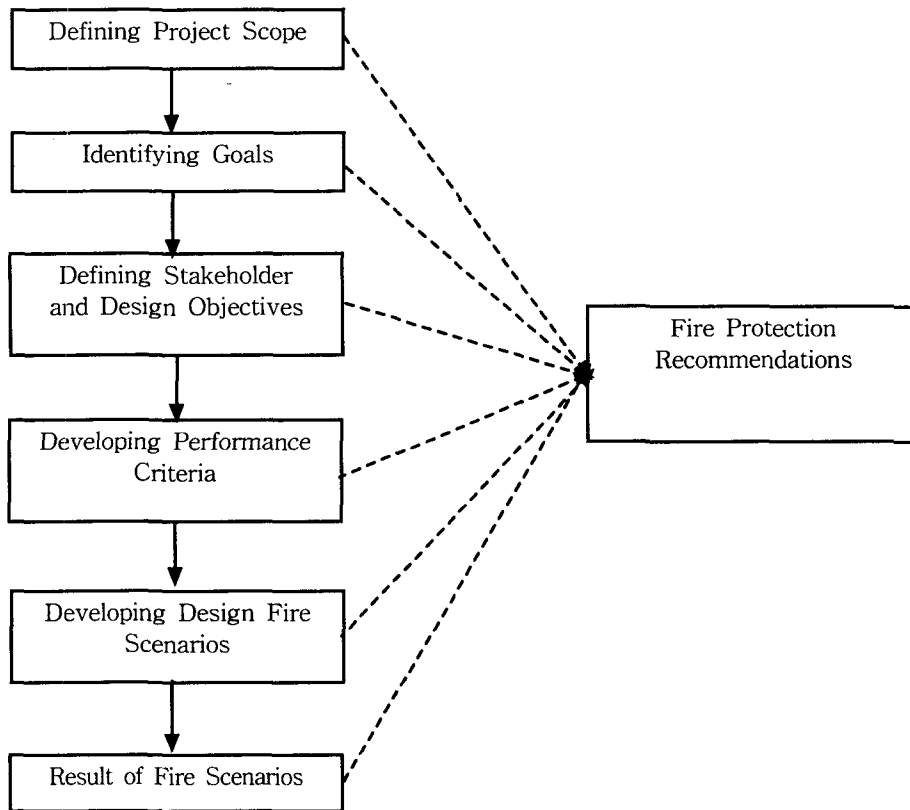


Fig. 1. Steps in the Performance-Based Fire Safety Analysis

대상건물은 13.4m(W)×8.1m(D)×1m(H)인 시멘트 모르타르의 기반 위에 11m(W)×5.4m(D)×4.3m(H)의 저장소가 세워져 있다. 상부는 골슬레이트 구조가 L형 철골 구조(구조용강(構造用鋼))으로 구성, L-76×76×6.4에 지지되어 있다. 이 저장소는 5개의 구역으로 세분화, 구획화되어 있고 각각의 면적은 2.2m(W)×5.4m(D)이다. 각 실은 시멘트 모르타르로 마감된 벽으로 구획화되어 있으나 상부는 각 실이 모두 통하여 있다. 또한 각 실은 철제 (0.9m×2.0m×2개)의 갑종 방화문을 설치하였으며 반대편에 망입유리(THK7)로 된 창이 (0.9m×0.9m×2개)이 지면으로부터 1.3m 위치에 설치되어 있다.

2.2 Identifying Goals

소방안전설계의 의도아래 설치되어야 한다. 모든 이해관계자들(설계가, 건축가, 오퍼, 감리 등)이 토론하고 확인해야 한다. 적용 가능한 법령 의도에 맞추어 설계하도록 해야 한다. 위험물 취급 저장소이므로

- 화재 노출로 인한 드럼의 파손 방지
- 저장소로 화재를 구획화시켜 옆 건물로의 화재 확산방지
- 건물의 붕괴 방지

2.3 Defining Objectives

화재안전을 달성하는데 필요한 기술기준을 정의하도록 한다. 이를 위해 제안된 접근법과 이해 관계자들의 광범위한 토론(의견교환)이 필요하며, 모든 이해 관계자들이 이해할 수 있어야 한다.

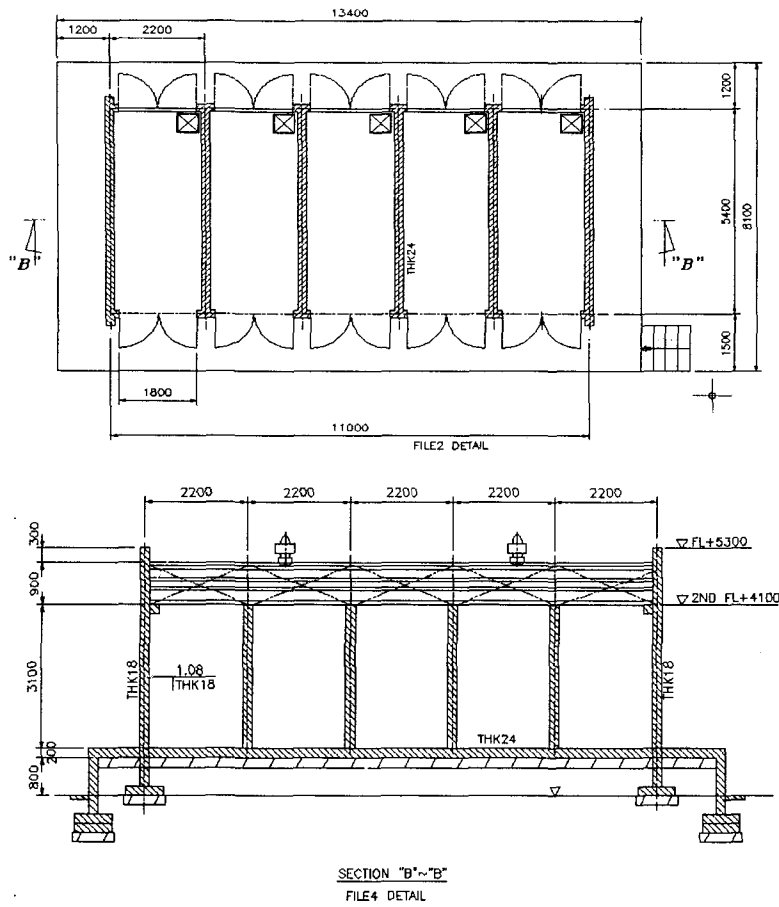


Fig. 2. Layout of flammable liquid storage room

2.4 Developing Performance Criteria[2],[3]

항 목	국내 소방법	성능기준 화재설계	NFPA
콘크리트조 (저장창고내 벽· 기둥 및 바닥)	내화구조로 시공	가열되는 180분 후에 콘크리트조의 1,100℃에서 30~50mm깊이의 파손방지	내부벽의 2시간 내화규정
상부철제구조물 (저장창고의 지붕)	가벼운 금속판 또는 불연재료 로 시공	5.5분 후에 구조물이 붕괴되지 않는 구조로 설계	천장 구조물의 2시간 내화 규정
방지막	2cm높이로 시공	1.8cm높이 이상으로 설계	문지방 설치
스프링클러	해당사항없음	낮은 Rating의 스프링클러 설치	표준 이상의 orifice와 12.2l/min/m ² 의 밀도설계치 및 278.7m ² 의 설계면적 foam-water 스프링클러 시설

2.5 Developing Fire Scenarios

1) 화재 시나리오

1. 드럼을 이동중 떨어져 저장실 바닥에 액체가 흐른다. 아세톤과 같은 저 인화점 액체를 트럭의 배기관 또는 다른 점화원에 의해 쉽게 점화될 수 있다.
2. 유증기의 점화원에 의한 폭발을 고려 할 수 있다.

2) 시나리오 분석

(1) 연속 누출

물질을 n-hexane으로 가정한다. 물질의 누출은 11.88m² 바닥 전체를 덮는다는 가정하에 열방출의 최대 잠재 비율을 추정할 수 있다. 이 열 방출률은 실제로 방출되지는 않을 것이나, 저장실에 공기 공급률에 의해 제한될 것이다.

물성은 다음과 같다.

$$\text{연소열 } \Delta H_c = 43.8 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{단위면적당 질량 손실률 } m'' = 70 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}$$

A : 누출 면적이 충분히 크다고 할 경우 단위 면적당 열 방출률을 계산하면

$$Q = m'' \cdot \Delta H_c = 3,066 \text{ kw/m}^2$$

이것은 10m²의 면적에 대해 31 MW의 열 방출률을 가능케 한다. 그러나 배기와 공기 공급 저장에 의해 지배 받으므로 FPE Tool의 배기제한 공식을 따르면[4]

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

$$= 1500 \times (1.62\sqrt{0.9} + 3.78\sqrt{2.1}) = 10500 \text{ Kw}$$

그러므로 저장실에서 얻을 수 있는 최대 에너지 방출율은 10.5 MW로 추정된다.

(2) 순간누출

200ℓ 드럼 용기 하나가 순간적으로 엎어졌다고 가정하면, 시간=0에서 점화된다. 퇴화율, y는 단위 면적 당 질량 손실율과 액체 밀도로부터 다음과 결정된다.

퇴화율 y는

$$y = \frac{m''}{\rho} \frac{0.070 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}}{660 \text{ kg/m}^3} = 0.106 \text{ mm/s}$$

Mudan[5]은 순간 누출에 대한 최대 누출 직경 Dmax에 대해 다음과 같은 식을 제안했는데, 여기서 VL은 누출된 부피이다 (0.2m³)

$$D_{\max} = 2 \left[\frac{V_L^3}{y^2} \right]^{\frac{1}{8}} = 14.34 \text{ m}$$

위에서 계산한 단위 면적당 열 방출률 이용하여 최대열 방출률을 계산하면

$$Q = 3066 \text{ Kw/m}^2 \times \frac{\pi (14.34)^2}{4} = 495.2 \text{ MW}$$

n-헥산 한 드럼이 배기 조절 상태(10.5 MW)에 도달하도록 연소하는 데에 충분한 양 이상의 연료를 함유하고 있음을 보여줄 수 있다. 저장실 내의 어떠한 화재에 대해서도 벽 상부에 위치한 방호 시설이 되지 않은 출구를 통해, 건물 외부까지 고려할 만한 양의 연소와 화염이 전달될 것이다.

(3) 탄화수소 화재에 노출된 200ℓ 드럼

저장실 내에 철제 55갤론 드럼은 잠재적으로 탄화 수소 화재에 노출되며, 이때 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 경비는 윤활유에 대해 55갤론 드럼의 파손 시험을 수행했는데, 이 때 약 2분 동안 드럼 파손이 관찰되었다.

(4) 스프링클러 시스템

현재 국내 소방법에서 이 부분에 대한 언급은 없는 것으로 조사되었다. 그러나 NFPA의 경우 Class I B등급의 액체에 대하여 다음과 같은 방호사항을 권고하고 있다. 제안된 표 4-8.4는 Class I B 인화성 액체에 대하여, 55갤론 금속 드럼을 팔레트 위에 저장하는 것을 허용한다.(그러나, 단지 Relieving style의 용기가 사용되는 곳에서만 한정됨.) 표준 이상의 orifice와 12.2 l/min/m²의 밀도 설계치 및 278.7m²의 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 방지하는 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.

(5) 철제 구조물의 내화처리

H상사의 상부지붕 구조물은 구조용강(構造用鋼)으로 구성되어 있고 L76×76×6.4 이다. 이러한 구조용강은 지붕을 구성하고 있고 지붕은 골슬레이트로 되어있다. 철제 구조물은 바닥에서 3.1m 떨어진 위치에 위치해 있다. 철의 물성은 다음과 같다.

철의 밀도 : 7,850 kg/m³

단면적 : 0.000929 m²

철제의 가열주변 : 304mm

$$\frac{M_s}{L} = \rho \cdot A_c = 7,850 \times 0.000929 = 7.29 \text{ kg/m}$$

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

$$R = 74.9 \left(\frac{W}{D} \right)^{0.7} = 74.9 \left(\frac{7.29 \text{ kg/m}}{304 \text{ mm}} \right)^{0.7} = 5.5 \text{ min}$$

그러므로 빔의 파손 시간은 상대적으로 짧고, 내화 처리가 추가되어야 한다는 것이 개선되어야 할 사항이다.

2.6 Fire Protection Recommendations

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

화재 발생의 경우 화재가 차단된 방안에 머무르도록 하고, 주요 구조적 손상을 유발시키지 않고 인접 지역으로 확산되는 것을 막는다. 주변에 인화성 액체의 저장과 분배를 최소화하여 점화원을 줄인다. 특별한 개선 사항은 다음과 같다. 벽과 이음매, 모든 출구 주위의 내화성을 향상시키는데, 승인된 2시간 범위의 화재 차단 시스템을 이용한다. 이를 통해 화재가 저장실 내에 머무르도록 하고, 공정 지역으로 확산되는 것을 막는다.

철이 구조적 임계 온도에 도달하지 않도록 2점의 16mm 석고보드나 2시간의 내화

성을 제공하는 이와 동등의 물질을 이용하여 철제 빔에 방화 시설을 추가한다. 저인화점 액체의 저장을 최소화하고 또한 저장하더라도 200 l가 아닌 소용량의 저장 탱크에 저장하도록 유도한다. 초기에, 드럼에 냉각수를 공급함으로써 드럼 파손 가능성을 줄이기 위해 통상 74℃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 옳을 것이다. 현재 주요 선진국에서는 성능기준 화재안전 코드를 사용 중이거나 개발에 박차를 가하고 있는 실정이며, 국내에서도 이의 도입을 추진하고 있다. 이를 위해서는 선진국의 경제적이고 효율적인 기술의 도입이 시급하며 국내 실정에 맞는 기술 개발이 이루어져야 할 것이며, 공인된 시뮬레이션 모델을 제시하여 기술력의 확보 및 확인이 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. 최재홍, "소방기술기준에 관한 규칙", 한국소방안전협회(1999).
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).