

LPG 저장 시설에 대한 정량적 위험성 평가

서재민* · 이정우* · 김윤화* · 백종배** · 고재욱*

광운대학교 공과대학 화학공학과*

충주산업대학교 공과대학 안전공학과**

Quantitative Risk Assessment for LPG Storage Facility

Jae-Min Seo* · Jeung-Woo Lee* · Yun-Hwa Kim* · Jong-Bea Back** · Jae-Wook Ko*

Dept. of Chemical Eng. Kwangwoon Univ.*

Dept. of Safety Eng. Chung-ju National Univ.**

서론

오늘날 가스 연료는 가장 대중적이고 편리한 연료로써 거의 모든 국민의 생활 연료로 자리잡고 있다. 지난 1970년대 중반이후 매년 18%이상의 소비신장을 이루면서 작년 말로 가스를 사용하는 가정이 1천 2백만 가구를 상회함으로써 가스 보급률이 1993년 말 기준 94.8%에 이르고 있다. 그리고 중전의 취사용, 택시용 등의 이용도가 한정돼 있던 가스가 최근에는 가스보일러, 냉방용, 산업용, 자동차용 등 각 분야에서 다양한 형태로 사용되고 있으며, 국민생활과 산업활동에 없어서는 안될 가장 중요한 역할을 하고 있는 것이 사실이다. 이로 인해 근래에 들어서는 도심 깊숙이 까지 위치하고 있는 LPG 저장·충전시설, 도시가스 배관망 등의 시설은 더욱 증가할 전망이다.

LPG는 모든 국민의 가장 대중적이고 편리한 생활연료로 자리잡고 있을 뿐만 아니라 산업활동에 없어서는 안될 중요한 역할을 하고 있다. 이에 따라 소비의 증가와 보급에 따른 제반문제를 원활히 하기 위하여 가스 생산시설은 물론 저장 시설의 증설을 요구하고 있다. 그러나 도시지역에 위치한 위해시설 특히 가스에 너지 관련 시설은 최근에 이르러 가스 사고로 인한 막대한 재산 및 인명피해를 동반하는 등 지역주민에 위험한 대상으로 등장했다. 그러나 사용상의 편리성과 청정성의 이유만으로 양적인 팽창은 가져왔으나, 그에 따른 적절한 안전 대처 방안은 마련되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 LPG 저장·충전 시설 주변에 주거·활동하는 주민이나 근로자는 항상 위험한 환경 아래에서 생활하고 있다고 할 수 있다. 또한 저장 및 운반특성상 고압상태의 액체나 기체를 다루고 있어 사고 발생시 대규모로 확대될 잠재위험이 매우 많다. 일례로 1982년 아현동 도시가스 정압기에서 누출된 가스의 폭발로 5명이 사망하였고 8명이 중경상을 입었으며, 1994년 같은 기지에서 가스폭발로 사망·실종 15명, 부상 65명 등 약 12억원의 재산피해액을 발생시켰다.

따라서 본 연구에서는 화학공장의 안전성 평가에 필요한 여러 정성적 및 정량적 기법을 연구·검토하여 LPG 누출로 인한 화재·폭발 사고의 위험성(Risk)을 평가하고자 하였다. HAZOP Study를 통해 LPG 저장시설의 잠재위험 확인 및 잠재위험과 관련되는 사건의 진행 순서를 확인·평가하고, FTA 방법과 ETA 방법을 사용하여 사고 빈도를 산정하고자 하였다. 또한 누출모델(source model)과 영향 모델(effect model)을 사용하여 인명 피해 및 피해 거리 등 사고결과(consequence)를 산정하고, 사고 결과 분석과 빈도 분석 결과를 종합하여 LPG 저장·충전 시설 주변지역의 개인적 위험성을 평가하고자 하였다. 그리고 본 연구 결과를 LPG 저장·충전 시설의 안전대책 수립, 주변지역의 안전거리 확보 및 방

재계획 등에 기본자료로 활용하고자 한다.

이 론

LPG 누출에 의한 화재·폭발 위험성을 평가하기 위한 총괄적인 절차는 그림 1과 같다.

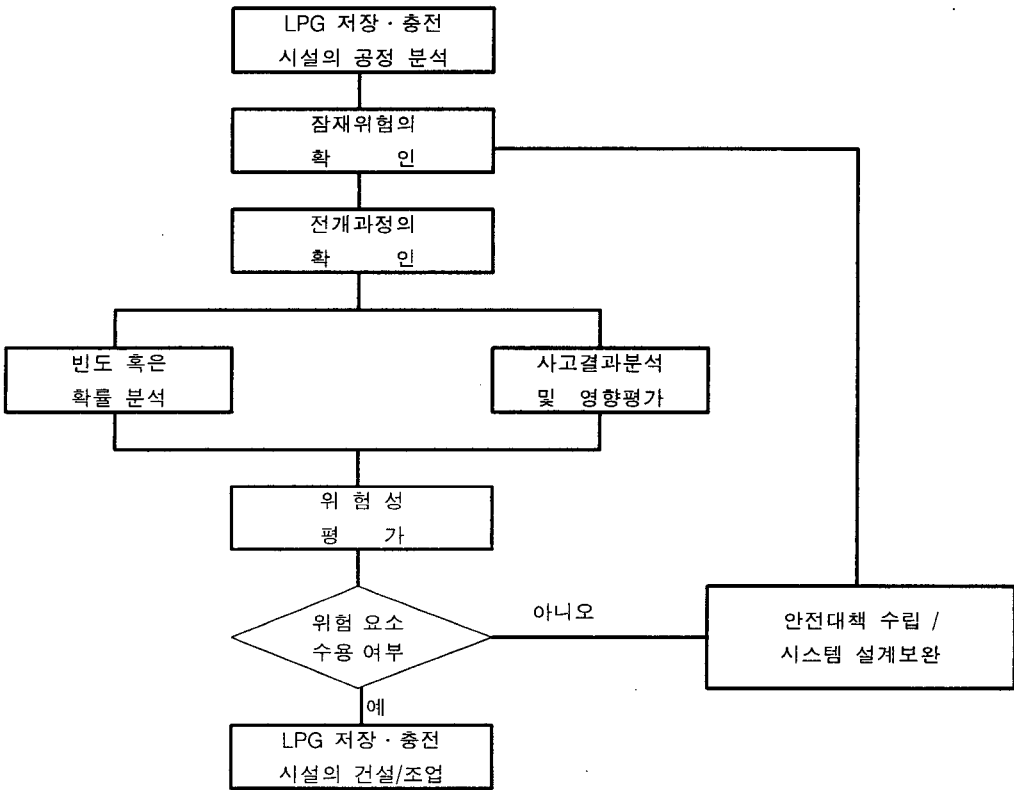


Fig 1. 잠재위험 확인과 위험성 평가 과정

LPG 저장·충전 시설의 위험성을 평가하기 위한 첫 번째 단계는 저장·충전 시설이 가지고 있는 잠재위험물(hazards)을 파악하는 단계로부터 시작한다. 본 연구에서는 HAZOP Study를 이용하여 LPG 저장·충전 시설의 잠재위험을 확인·평가하고, 확인된 잠재위험을 야기할 수 있는 시스템상의 손실(failure)이나 조업자의 오류(error)에 대한 평가는 FTA(Fault Tree Analysis)와 ETA(Event Tree Analysis)를 이용하였고 이를 바탕으로 사고 발생 빈도를 산정하였다. 그리고 파이프 라인의 파열(rupture) 직경에 따른 LPG 누출량을 계산하고 영향(effect)모델과 TNT 당량을 이용한 피해 거리 산출 방법을 이용하여 LPG 저장·충전 시설의 사고결과(consequence)를 산정하였다.

사고 발생 빈도 산정 방법과 사고결과 산정 방법에 대한 설명은 다음과 같다.

빈도(Frequency) 산정

HAZOP Study를 통해 찾아낸 공정의 잠재위험이 사고로 전이될 수 있는 사고 발생 빈도를 산정하는 대표적인 정량적 위험성 평가방법은 다음과 같이 FTA와 ETA가 있다.

이상 트리 분석(Fault Tree Analysis) 방법은 항공우주 산업에서 시작해 원자력 발전소의 잠재위험(hazard)과 위험성(risk)을 정성화·정량화하기 위해 사용되어오던 것이 오늘날 화학공장에 도입되어 대부분의 관련산업시설에서 위험성을 평가하는데 사용되고 있고, 사고 발생이 가능한 잠재위험을 확인하는 연역적인 분석 방법으로 정상사상(top event)에서 시작하여 사고를 일으킬 수 있는 다양한 시나리오에 top - down 방식으로 접근하는 방법이다. 결과는 정성적으로 표현되고 minimal cut set 방법을 이용하게 되면 보다 효과적으로 손실경로를 파악할 수 있으며 사상의 발생확률 또는 빈도가 산정된다면 정량적 평가를 통하여 정상사상의 사고 발생 확률 또는 빈도를 산정할 수 있다.

사건 트리 분석(Event Tree Analysis) 방법은 공정이나 시스템에서 다양한 사고가 발생했을 경우의 안전장치의 작동여부에 따른 사고의 진행유무를 순차적으로 검토해서 위험성 평가를 하는 대표적인 정량적 위험성 평가기법이며, 원인으로부터 사고의 결과를 추론해 가는 귀납적 방법이기 때문에 사고의 발생경로를 시간순으로 알 수 있으며 사고에 따른 가능한 결과나 사고의 이전, 이후의 사고들을 예측할 수 있다. 또한, 믿을만한 수치적 자료가 있다면 일련의 사고에 대한 사고 발생 확률을 논리적으로 쉽게 구할 수 있다.

사고결과(consequence) 산정

LPG 누출사고에 의한 피해 범위(effect zone) 및 인명 피해 규모를 산정하기 위해서는 다음과 같은 모델이 사용된다.

- 누출 모델(source model)
- 영향 모델(effect model)

누출 모델 단계는 LPG 누출이 발생할 경우 LPG의 시간당 누출량, 총 누출량을 계산하는 단계이며, 영향 모델 단계는 앞 단계에서 구한 누출량을 이용하여 LPG 누출에 의한 피해거리(effect distance)와 대피 시간(evacuation time)에 따른 피해 정도(effect model)를 산정하는 단계이다. Fig 1에서 제시한 위험성 평가 과정에서 보듯이 빈도 분석에서 얻어진 사고 발생 확률과 결합하여 개인적 위험성(individual risk)과 사회적 위험성(societal risk)을 산출하는 데 있어서 자료를 제공하게 된다.

화학공장에서 발생하는 대부분의 중대재해는 가연성 또는 독성 물질 등의 누출에 의한 사고로부터 발생한다. 이러한 누출 사고의 원인으로는 저장탱크나 공정장치의 균열이나 파열, 파이프 라인의 부식에 의한 파열, 그리고 밸브의 마모에 의한 누출 등 다양한 경로를 통하여 발생할 수 있다.

본 연구에서는 공정장치의 hole을 통한 액체상 방출과 증기상 방출만을 고려하여 LPG의 시간당 누출량(Qm)을 계산하였다. 다음식들은 액체상 방출과 증기상 방출에 관계되는 식이다.

$$Q_m(liq) = \rho \bar{u}A = \sqrt{2\rho g_c P_g}$$

$$Q_m(gas) = C_d \frac{AP}{a_0} \phi$$

영향 모델(source model)은 화재, 폭발, 독성 물질에 따라 여러 형태가 있으며 또한 폭발과 관련된 영향 모델도 다양하다. 본 연구에서는 가스 폭발에 관련된 영향 모델 중 가장 간단하고 잘 알려진 TNT 당량을 이용한 모델을 사용하였다.

많은 양의 휘발성, 가연성 물질이 공기 중으로 유출되면 증기구름(vapor cloud)이 형성되어 확산된다. 이러한 증기구름이 LFL(Lower Flammable Limit)과 UFL(Upper Flammable Limit)값 사이로 희석되어 점화된다면, UVCE(Unconfined Vapor Cloud Explosion) 또는 flash fire가 발생한다. 이러한 형태의 폭발에서 그 폭발을 정량화할 수 있는 식으로서는 UVCE 모델 중 가장 일반적인 것이 다음의 TNT 당량(W) 환산식이다.

$$W = \frac{\eta M E_C}{E_{c, TNT}}$$

폭발 피해거리 계산은 Prohibit function에 의한 과압력과 환산거리(scale distance)와의 관계를 나타낸 표를 이용하여 실제영향거리를 계산하게 된다. 다음 식은 실제 영향 거리를 나타낸 관계식이다.

$$R_G = Z_G W^{1/3}$$

폭발로 인한 과압력은 짧은 순간에 사람이나 구조물에 심각한 피해를 유발시킬 수 있다. 이러한 과압력 영향은 화재와 마찬가지로 다음식에 나타낸 Probit function으로부터 구할 수 있다.

$$P_r = a + b \ln c$$

위험성 평가(Risk Assessment)

위험 시설 주변지역의 위험성은 사고결과 분석과 빈도 분석에서 얻은 산출 수치를 종합하여 평가한다. 평가 방법으로는 개인적 위험성과 사회적 위험성을 일반적으로 사용하고 있으며, 사회적 위험성은 개인적 위험성과 위험 시설 주변지역의 인구분포를 고려하여 산정한다.

개인적 위험성이란 사고 발생으로 인하여 위험원 근처에 있는 사람에게 미치는 영향을 말하며, 각각의 사고결과(consequence) 분석과 사고 발생 확률(probability) 분석을 통해 얻은 자료를 이용하여 개인에게 미치는 사고 발생 확률이 같은 지점을 연결하여 등위험도 곡선(isorisk contour) 형태로 표현하게 된다. 사고결과는 앞에서 제시한 probit function 모델을 이용하여 사고로 인한 치사율 100%에 해당하는 거리(distance)로 표현하며, 사고 발생 확률은 앞에서 제시한 FTA나 ETA 방법등을 이용하여 사고의 발생 확률을 계산하게 된다.

계산 과정은 가장 큰 피해 거리와 그에 따른 빈도(IRC₁ = f₁)를 도면상에 도식한 후 다음으로 큰 피해 거리(사고 빈도, f₂)를 갖는 경우의 개인적 위험성의 빈도(IRC₂)는 누적분 형태로 계산하게 되며, 이러한 계산절차는 모든 위험이 산정될 때 까지 계속 반복하여 수행한다.

개인적 위험성 산정에 사용되는 일반식은 다음과 같다.

$$IRC_i = f_i + IRC_{i-1}$$

사례 검토 (Case Study)

본 사례 검토에서는 LPG 저장·충전시설에 대한 사고 빈도 분석과 사고 결과 분석을 하고, 이를 종합하여 개인적 위험성을 산정하여 LPG 저장 시설내 근로자 및 주변지역에 거주하는 주민에게 미칠 수 있는 위험성을 평가하고자 하였다.

사례 검토 대상공정을 선정하기 위하여 대형 LPG 충전 업소인 인천광역시 소재 ○○ LPG 충전 업체와 경기도 안산시 소재 ○○ LPG 충전 업체를 탐방·조사 하였으며, 얻은 자료 및 공정도면을 토대로 연구과정을 수행하였다.

사례 검토 대상공정은 탱크 로리(tank lorry)로부터 받은 LPG를 지하 저장탱크에 저장한 후, 가정용 실린더 용기와 산업용 소형 저장탱크, 그리고 부탄을 사용하는 차량에 충전을 하는 사업장이다.

- 대상 공정 : LPG 충전 공정
- 저장 물질 : LPG (propane, butane)
- 저장 압력 : 7 ~ 8 atm
- 저장 온도 : 5 ~ 30 °C

Study를 용이하게 하기 위하여 study node를 A, B, C 세가지 형태를 고려하였으며, 본 논문은 세가지 study node에 대한 결과 중에서 node A에 대한 결과를 토대로 작성하였다.

- Study node A : 저장 탱크 ~ 회전식 자동 실린더 충전기
- Study node B : 저장 탱크 ~ 고정식 실린더 충전기
- Study node C : 저장 탱크 ~ 차량 충전용 dispenser

결 론

본 연구는 LPG 저장·충전 시설에 존재하는 잠재위험을 우선적으로 파악하고, 잠재위험이 사고로 전개되어 저장·충전 시설 주변에 미치는 위험성을 정성적·정량적 평가 방법으로 접근하여 보았다. 그리고 연구·검토한 결과를 국내 LPG 저장·충전 시설에 적용하여 본 연구의 타당성 및 응용성을 검증하여 보았다. 이로부터 얻은 결론은 다음 몇 가지로 요약할 수 있다.

- 1) HAZOP Study 결과 LPG 누출 사고를 야기할 수 있는 잠재위험으로는 파이프 라인 파열에 의한 누출 사고와 외부 열원에 의한 저장 탱크의 파열, 적재/적하 작업시 조업자 실수에 의한 사고 등이 파악되었으며, 초기 설계 단계에서의 오류(error)도 무시할 수 없는 사고 발생 원인으로 밝혀졌다.
- 2) FTA 방법을 이용한 빈도 분석 결과 LPG 누출 사고가 발생할 빈도(frequency)은 약 $5.4 \times 10^2/\text{yr}$ 정도로 나타났으며, ETA 결과 LPG 누출 사고가 UVCE 형태의 폭발사고로 발전될 수 있는 빈도는 약 $2.19 \times 10^2/\text{yr}$ 정도로 나타났다.
- 3) LPG 누출에 의한 사고결과 분석 결과 약 10 톤이 UVCE 형태로 폭발하였

을 경우 100 % 치사 거리는 약 34 m 정도로 나타났으며, 100~200 톤 규모의 LPG가 UVCE 형태로 폭발할 경우 그 피해 정도는 약 70~90 m 정도일 것으로 판단된다.

- 4) LPG 저장 시설의 주변 지역에 대한 개인적 위험성 평가에서는 100 % 치사율 기준으로 시설 중심으로부터 44 m 에서는 사고 발생 빈도가 $2.19 \times 10^{-3}/\text{yr}$ 이고, 65 m 에서는 사고 발생 빈도가 $1.95 \times 10^{-2}/\text{yr}$ 로 산출되었다.
- 5) 본 연구 결과는 LPG 저장·충전 시설의 안전 대책 수립, 주변지역의 안전 거리 확보 및 방재계획 등에 기본 자료로 활용될 것으로 사료된다.

본 연구는 한국과학재단의 핵심전문연구(961-1109-056-2)지원에 의하여 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Center for Chemical Process Safety, "Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", AIChE-CCPs, New York, 1989
2. "Major Hazard Control ; A Practice Manual", ILO, Genova, 1990.
3. Sol W. Malasky, "System Safety : Technology and Application", Garland STPM Press, New York, 1982
4. Ralph King, "Safety in the Process Industries", Butterworth-Heinemann Ltd, London, 1990
5. Crowl, D. A. and J. F. Louvar, "Chemical Process Safety : Fundamentals with Application", Prentice-Hall, New Jersey, pp22-155, 1990
6. Less, F. P., "Loss Prevention in the Process Industries". AIChE-CCPs, New York, 1989
7. AIChE-CCPs, "Guideline for Hazard Evaluation Procedures", AIChE-CCPs, New York, 1989
8. UNEP, WHO, IAEA, and UNIDO, "Procedural Guide for Intergrated Health and Environmental Risk Assessment and Safety Management in Large Industrial Areas", UN, Genova