

# 고압가스배관의 제트화재 예측모델에 관한 사례연구

## A Case Study of Jet Fire Estimation Model on the High Pressurized Pipeline of Natural Gas

이상곤\*, 김동성, 황철승, 조원철\*\*, 이태식\*\*\*

Lee Sang Gon, Kim Dong Sung, Hwang Cheol Seung, Cho won cheol, Lee Tae shik

### Abstract

Due to the benefit of QRA( Qunantitative Risk Analysis) method, we can evaluate the risk , and it helps us to make our safe. We also depend to some of correlation equations to assess the jet fire at high pressurized transmission line. However, we can evaluate the risk within limitations.

After comparing the current model to investigation report of natural gas transmission line accident at EL-Paso in U.S. , this study concludes that more research and study are required because currently developed model cannot expect factors of the fire risk such as flame configuration.

**key words** : Jet Fire, High Pressurized Transmission, Risk Analysis, Natural Gas.

### 1. 서 론

최근 정량적 위험성평가에 의한 위험관리 기법이 도입되면서 위험을 과학적이고 정량적으로 평가/관리하게 됨으로써, 안전을 확보할 수 있는 기틀이 마련되고 있다. 이 중에서 고압이송배관과 같은 시설의 제트화재영향을 평가하기 위해 사용되는 수단은 경험식에 의한 모델에 의존한다. 모델의 적용에 있어서의 한계 범위 내에서는 비교적 정확한 수치를 산출할 수 있으나, 이러한 한계를 벗어날 경우 그 정확도는 신뢰할 수 없게 된다.

본 연구에서 미국 엘파소 천연가스 수송배관에서의 사고사례와 현재 개발되어 있는 모델의 결과를 비교하여 그 결과에 있어서 차이를 분석한 결과 화염형상을 결정짓는 인자의 예측에 있어서 현재의 모델로는 부정확하게 예측되므로 향후 이 부분에 대한 추가적인 연구수행으로 개선이 시급하게 요구되는 것으로 판단되었다.

### 2. 연구범위 및 방법

제트화재와 사고사례와의 비교분석을 위하여 이론적 배경에 대한 고찰과 사고사례현장에서의 피해영향거리에 대한 조사내용 분석, 사고설비의 운전조건 및 주변 환경에 대한 모델의 적용과 피해범위를 예측한다. 예측된 피해범위는 사고사례 분석내용과 비교하여 그 정확도를 판별한다. 이후 오차가 발생하는 원인을 추적하여 파악함으로써 정확한 예측을 위한 개선방향을 제시한다.

### 3. 이론적 고찰

현재까지 제트화재의 연구는 화원을 Point Source로 간주하여 예측하는 방법과 화염면을 Cylinder형상으로 간주하여 방사되는 복사열을 계산하는 두 가지 접근방식이 있다. 전자의 경우 화염의 형상과 관측자와의 상관관계는 무

\* 연세대학교 공학대학원 방재안전관리전공 석사과정

\*\* 정희원, 방재학회 부회장, 연세대학교 교수, 방재안전관리전공 지도교수

\*\*\* 연세대학교 겸임교수, 방재안전관리전공 지도교수

시되기 때문에 피해의 크기가 과도하게 계산되는 단점이 있는 반면 계산방법이 간단하고 보수적인 결과치를 주기 때문에 설계 시 많이 활용하고 있는 방법이다. 후자의 경우 관측자 입장에서의 화염형상을 고려하여 화염면에서 방사되는 복사열을 거리에 따라 계산하는 방법이므로 전자에 비하여 실제 실험치와 잘 일치하는 결과를 산출할 수 있는 방법이다.<sup>1</sup>

Point Source 방법은 API 521에 제시된 방법과 Considine과 Grint(1984)에 의한 방법, Mudan과 Croce의 방법으로 세 가지 정도가 사용되고 있다. API 521에서 제시된 방법은 화학공정에 고려되는 Flare System의 설계 시 반영되는 것으로서 원형노즐을 통해 분출되는 화염을 계산할 경우 사용한다. 이 방법은 총연소에너지량에서 복사열이 차지하는 비율과 이에 따른 거리에 의해 계산하는 방법이다. 이 방법의 단점은 화염의 길이를 산출하여 방사되는 열량을 계산치 아니하므로 실제 피해영향보다 과도한 결과를 가져오게 되는 단점이 있다.

Considine과 Grint(1984)에 의한 방법은 매우 간단한 방법으로써 LPG 제트화재의 피해영향거리를 지수상관관계를 통해 단순화 시킨 방법이다. 이 방법은 누출유량에 따른 화염을 길이를 산출하고, 길이의 1/4을 화염의 반경으로 가정한 후, 치명도 50%에 해당하는 위험거리를 산출하는 방법이다. 이 방법은 화염의 반경이 길이의 1/4로 가정하고 있으며, LPG에 대해서 제한적으로 사용할 수 있다.

Mudan과 Craven의 방법은 위 두 가지 방법과는 달리 더욱 상세한 분석을 가능하게 해주는 방법이다. Point Source방법으로써 본 연구에서는 Mudan과 Craven의 방법을 이용하여 피해영향거리를 산출한다.

화염면의 형상을 Cylinder형상으로 보는 모델은 Solid Flame Model이라고도 하는데, 관측자의 위치에 따라 화염의 형상은 달라질 수 있으며, 이러한 요소로 인하여 피해거리가 달라진다는 개념이다.

다음 식(1)은 제트화재로부터 방사되는 복사열을 산출하기 위한 공식<sup>1</sup>이다.

$$\dot{q} = \tau_a Q_r F_p = \tau_a \eta \dot{m} \Delta H_c F_p \quad \text{----- (1)}$$

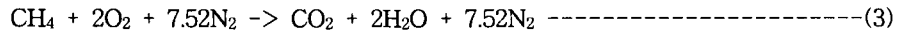
- $\dot{q}$  : 화염에서 관찰거리까지의 복사열(kW/m<sup>2</sup>)
- $\tau_a$  : 대기전달계수(무차원계수)
- $Q_r$  : 화염 복사열량(kW/m<sup>2</sup>)
- $F_p$  : 형상계수
- $\eta$  : 복사열분율
- $\dot{m}$  : 분출유량(kg/s)
- $\Delta H_c$  : 단위연소에너지량(kJ/kg)

다음 공식(2)는 고속분출 시 생성되는 난류효과를 고려하였을 때의 화염길이와 직경비를 산출하기 위한 공식<sup>2</sup>이다.

$$\frac{L}{d_j} = \frac{5.3}{C_T} \left\{ \frac{T_F}{\alpha_T T_j} \left[ C_T + (1 - C_T) \frac{M_a}{M_f} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{----- (2)}$$

- $L$  : 화염의 길이(m)
- $d_j$  : 분출구의 직경(m)
- $\alpha_T$  : 연료공기 화학정량적 반응을 위한 생성물과 반응물의 몰비(완전 연소 : 1)
- $C_T$  : 화학정량적 물분율(0.095)
- $M_a, M_f$  : 공기와 연료의 분자량(공기 : 29, 메탄 : 16)
- $T_F, T_j$  : 화염온도와 누출되는 가스의 온도.(메탄의 화염온도: 2200K, 외기온도:298K)

메탄의 연소 시 연소반응식은 다음과 같다.



그러므로,  $C_T = 1/(1+2+7.52) = 0.095$ 가 된다.

다음 공식(3)은 화염의 직경을 산출하기 위한 수식이다.

$$D_c/d_j = \sec\theta + L/d_j \sin\theta \sec^2\theta \text{ -----(4)}$$

- $D_c$  : 화염의 길이(m)
- $\theta$  : 분출각
- $L/d_j$  : 화염길이/직경비

Hanwthrone et al의 실험결과에 의하면 분출각도는 약 3도~ 8도의 값을 가진다.

화염의 복사에너지( $Q_r$ )는 연소되는 물질에 따라 그 값을 달리하며, 최근 실험 결과에 의하면 LNG의 경우  $287\text{kW/m}^2$ 의 복사에너지를 방출한다.

관찰자의 위치에 따라 불꽃의 형상은 그 모양을 달리하며, 제트화재의 경우 어느 위치에서든 지 관찰자가 바라보는 불꽃의 형상은 원기둥의 모습을 띄고 있는 것으로 판단하였다. 따라서 다음 그림과 같이 산출되는 형상계수를 적용하였다.

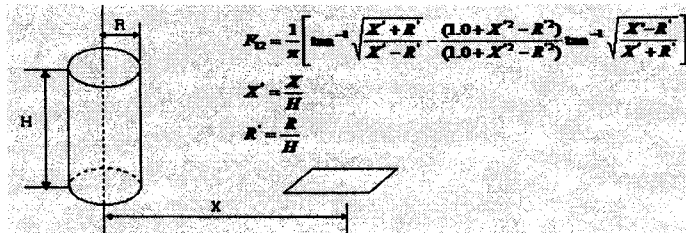


그림 1. 형상계수의 적용

#### 4. 사고사례 분석 및 모델링 결과의 비교

본 연구에서 비교할 사고사례는 미국 뉴멕시코주 Carlsbad 인근지역에서의 천연가스 사고<sup>4</sup>를 다룬다. 이 사고는 기존 연구결과로 예측할 수 있는 범위를 벗어나는 사고로써, 그 결과가 매우 심각한 수준에 도달하는 경우이기 때문이다.

##### 4.1 사고개요

2000년 8월 19일 토요일 오전 5시 26분에 발생하였다. 설비의 직경은 30인치, 운전압력은 약  $47.5\text{kg/cm}^2$ 이다. 이 사고로 55분여 동안 가스가 점화되어 화염이 분출하였고, 주위에서 캠핑을 즐기던 12명의 사람이 사망하였으며 약 백만불의 재산손실이 발생하였다.

##### 4.2 사고분석

다음 그림 2는 사고지역의 현장 설비배치 및 지역설명도와 그림3은 사고당시 화염높이 및 폭을 나타내고 있다.

본 사고의 사고조사보고서에 의하면, Rupture Site로부터 서스펜션 브리지까지의 거리는 71m or 87m인 것으로 나타났다. 또한 서스펜션 브릿지와 서비스다리와의 거리는 21m인 점을 감안하면 다리와 캠핑지역간 거리는 약 25m에서 30m안팎일 것으로 추정된다. 또한 사고조사 보고서에 의하면 사고지점과 캠핑지역간 거리는 200m이다.

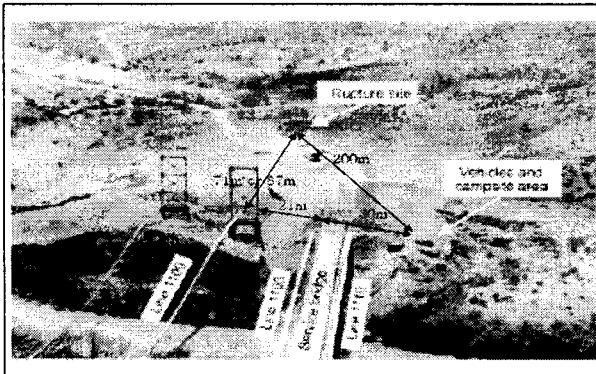


그림 2.현장 설비배치 및 지역설명도

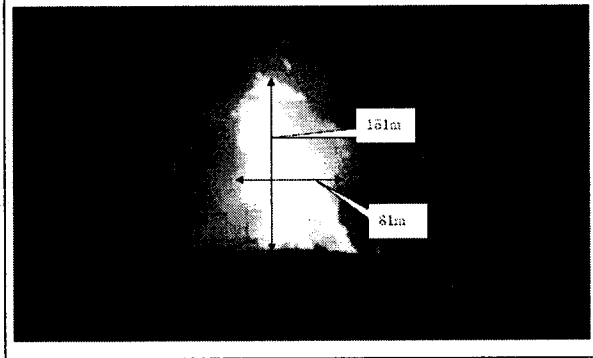


그림 3.사고당시 화염높이 및 폭<사진판독결과>

제트화재영향으로 인하여 사고지점으로부터 약100미터 지점에서 캠핑자동차가 완전 연소되고 주변의 초목이 모두 그을린 점을 볼 때 사고지점에서의 복사열은  $12.5\text{kW/m}^2$  이상이었음을 알 수 있다. 따라서 모델링을 통해서 풀이낼 기준은 200m지점에 대해  $12.5\text{kW/m}^2$  이상의 복사열미 미칠 영향에 대해 분석한다. 또한 사고조사보고서에 의하면 화염의 형상은 그림2와 같다. 이 결과는 조사보고서에서 제시된 대로 폭 81m에 높이 151m의 화염을 형성한 것으로 추정된다.

14.7m 길이의 배관 부분이 파단되어 분리됨으로써 가스가 수평으로 분출되고, 주변의 흙을 파헤침으로써 웅덩이를 형성하였다. 형성된 웅덩이에 부딪힌 화염은 그림2와 같이 매우 큰 직경의 화염을 형성하였다.

#### 4.3 사고사례와 제트화재모델링 결과 비교

다음 표1은 사고사례와 모델링예측 결과를 비교하여 나타낸다.

표 1.사고사례와 모델링예측 결과비교

구 분	사고사례	사고영향모델링	
		현장조사치 <sup>a</sup>	계산치 <sup>b</sup>
화염 직경(m)	81	81	18.7
화염 높이(m)	151	151	126.5
화원에서의 복사열량( $\text{kW/m}^2$ )	-	287	287
거리에 따른 습도계수 (상대습도50%)	-	0.6462	0.6462
형상계수	-	0.07602	0.0157
캠핑지역에서의 복사열량 ( $\text{kW/m}^2$ )	12.5이상	14.1	2.91

a : 형상계수 산출을 위해 현장조사 결과데이터의 적용

b : 형상계수 산출을 위해 공식(2), (4) 적용

표1에서 예측된 결과에 의하면, 사고사례에 의한 현장조사 결과와 일치하는 것은 현장조사치의 화염직경과 높이를 적용하는 것이 대략적으로 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 계산치에 의한 결과는 사고사례에 의한 현장조사 결과와 일치하지 아니하였다. 그 이유는 형상계수의 적용에 있어서 가장 중요한 요소인자인 화염의 직경과 높이가 일치하지 아니함으로써 최종결과가 다르게 나오게 된다.

반면에 현장조사치의 화염직경과 화염높이를 적용한 경우에 있어서는 현장조사결과와 일치하는 것으로 나타났다. 이는 화염직경과 높이를 결정짓는 인자의 문제가 결과 예측에 있어서 매우 중요한 요인으로 작용하는 것을 알 수 있다.

현재 수평누출에 의한 화염의 분출각을 예측할 수 있는 모델이 개발되어 있지 않고, 교차로 혼합되어 누출되는 경우에 대한 모델이 개발되어 있지 않음으로써, 이러한 경우에 대한 모델의 적용 및 예측은 현재 연구로써는 불가능한 것으로 판단된다.

## 5. 결론

정량적인 위험성평가의 수단으로 사용되는 제트화재에 의한 사고영향평가모델에 있어서 기존의 연구로써 적용할 수 없는 한계를 사고사례와의 비교를 통해 살펴보았다. 향후 고압가스배관의 제트화재 영향평가 시 이러한 점을 염두에 두고 모델을 적용하여야 할 것으로 판단된다. 최악의 시나리오를 근거로 최대피해 반경을 산정할 경우 수직 화염보다는 수평화염에 의한 피해거리가 더욱 크게 나타나는 점을 감안해볼 때, 이러한 영향은 필수적으로 평가되어야 할 것으로 판단되는 바, 교차로 혼합되어 누출되는 경우에 있어서 화염형상을 결정짓는 요인을 개선하기 위한 추가적인 연구가 시급히 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. CCPS, Guideline for Risk Analysis<sup>2nd</sup> Edition Chapter 2, Mudan and Croce(1988)
2. SFPE, Handbook 2<sup>nd</sup> Edition Chapter 3 , Mudan, 223page.
3. SFPE, Handbook 2<sup>nd</sup> Edition Chapter 3, Table 3-11.9.
4. NTSB, PAR-03/01, Natural Gas Pipeline Rupture and Fire Near Carlsbad, New Mexico, August 19,2000.