

## Fireball로 인한 Thermal flux 예측에 관한 연구

김 인 태 · 김 인 원\* · 송 희 열\*  
방재시험연구원, \*건국대학교  
(2000년 8월 16일 접수, 2000년 9월 27일 채택)

### A Study on the Thermal Flux Estimation of Fireball

In-Tae Kim · In-Won Kim\* · Hee-Oeul Song\*  
*Fire Insurers Laboratories of Korea*  
*\*Dept. of Chemical Eng, Konkuk University*  
(Received 16 August 2000 ; Accepted 27 September 2000)

#### 요 약

Fireball로 인한 위험성 및 피해를 평가하기 위한 프로그램, FIRESTOR를 개발하여 Fireball로 인한 Thermal flux를 예측하였고, FIRESTOR 프로그램을 부천가스 충전소 사고를 모델로 하여, BLEVE ESTIMATOR와 상용프로그램인 Dupont 사의 SAFER와 비교 분석 하였다.

용기압력이 일정시 Propane과 Butane의 경우 Thermal flux는 거리변화에 따라 지수함수로 감소하였다. 거리변화에 따른 Thermal flux변화를 BLEVE ESTIMATOR, SAFER, FIRESTOR로 상호 비교한 결과 본 연구에서 연구개발한 FIRESTOR 프로그램은 SAFER와 ESTIMATOR의 중간값으로 Dupont사의 상용프로그램인 SAFER에 근접하는 경향을 보이고 있어 우수한 프로그램으로 판단된다.

**Abstract** - In order to evaluate the risk assessment of Fireball, a program, FIRESTOR, was developed. With this program, thermal fluxes due to the fireball of propane and n-butane were predicted to analyze the damage of Puchen gas explosion accident and thermal fluxes compared with the BLEVE ESTIMATOR, and commercial program SAFER Dupont Co.

Thermal fluxes with variation of distance from the explosion source by BLEVE ESTIMATOR, SAFER and FIRESTOR was made a comparative analysis each other for the constant pressure of propane and n-butane. The values calculated by FIRESTOR were between those by BLEVE ESTIMATOR and SAFER. Consequently FIRESTOR is proved to be an good program to analyze the damage of Fireball.

**Key words** : Fireball, Thermal flux

#### 1. 서 론

최근 대규모 석유화학공장의 화재 및 폭발 사고의 발생 빈도와 피해규모가 증가하는 추세를 보이고 있어, 기업경영에 위험요인으로 작

용하고 있다. 따라서 안전한 경영을 위하여 잠재적 위험을 정확히 파악하고 분석하여 효율적인 대책을 수립하는 것이 필요하다.

도출된 위험에 대한 대책수립을 위하여 과거의 경험을 이용할 수 있으나 사업장 전체를 평가하기에 자료가 부족하고, 과거 사례와 일

치하지 않아 보편적으로 사용할 수 없는 단점이 있다. 따라서 사고 시나리오에 따라 정형화된 모델을 사용하여 위험을 평가하는 방법이 사용되고 있다. 화재안전 분야와 관련한 상용 프로그램이 있으나 가격이 비싸고, 잠재위험을 정확하게 평가하기 어렵다는 단점이 있다. 최근의 상용 프로그램은 화재 및 폭발위험평가 외에 위험물질의 누출을 같이 평가할 수 있는 대형 프로그램이 주를 이루고 있다. 국내에서 이용되고 있는 것으로는 Radian Co.의 CHARM, Dupont Co.의 SAFER, DnV Technica의 PHAST 와 SAFETI, AD Little의 SUPERCHEMS 등이 있다. 한편, 사고형태, 사고물질, 사고장소에 따라 개별적으로 위험을 평가하는 CLOUD, ENGULF, SMOKE 등의 소형 프로그램이 있다.

본 연구에서는 Fireball에 대한 위험을 쉽게 평가하기 위한 전용 프로그램 FIRESTOR를 구축하였고, 이의 신뢰성을 확보하기 위하여 부천가스 충전소 사고사례를 모델로 하여 기존 상용 프로그램과 비교분석 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. Fireball에 대한 영향평가

BLEVE 이후 Fireball에서 발생하는 복사열은 Fig.1 과 같이 설정 될 수 있다. Fireball의 중심에서 대상물까지의 거리 X는 지면에서부터 Fireball 중심까지의 높이 H<sub>fb</sub>와 Fireball 중심에서 대상물까지의 수평거리 X<sub>g</sub>로부터 구할 수 있다.

Pietersen[1]과 Pitblado[2]는 Fireball의 최대 지름, 연소지속시간, 중심높이, 초기지름을 식 (1)~식(4)에 의하여 계산하였다.

$$D_{max} = 6.48 M^{0.325} \quad (1)$$

$$t_{fb} = 0.825 M^{0.26} \quad (2)$$

$$H_{fb} = 0.75 D_{max} \quad (3)$$

$$D_{ini} = 1.3 D_{max} \quad (4)$$

Roberts[3]는 탄화수소계 물질에 대하여 식 (5)를 제시하였고, Jaggerse 등[4]은 물질량에 따른 연소지속시간을 식(6), (7)에 의하여 구하였다.

$$D_{max} = 5.8 M^{1/3} \quad (5)$$

$$t_{fb} = 0.45 M^{1/3} \quad M < 30,000kg \quad (6)$$

$$t_{fb} = 2.6 M^{1/6} \quad M > 30,000kg \quad (7)$$

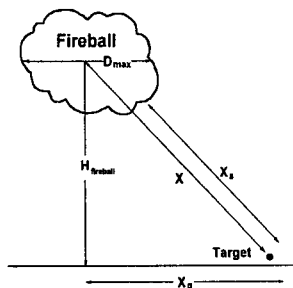


Fig .1. Radiation received by a target.

Thermal flux는 Solid model을 사용하여 다음 식으로 구할 수 있다[5].

$$I_{th} = \tau F E \quad (8)$$

대기투과도,  $\tau$ 는 복사량이 대기 중에서 흡수 산란 시 복사량에 영향을 미치는 주요 인자로, 대기중 수증기 분압과 열원에서 대상물까지의 거리에 영향을 받는다.

TNO[6]는 투과도를  $10^4 < P_{wv} X_s < 10^5$  N/m' 범위에서 식(9)에 의해 구하였다.

$$\tau = 1.389 - 0.135 \log(P_{wv} X_s) \quad (9)$$

본 연구에서는 1989년 Bagster와 Pitblado가 상식식을 보완한 다음 식을 사용하였다.

$$\tau = 2.02(P_{PW} X_s)^{-0.09} \quad (10)$$

Roberts와 Hymes[7]은 전체 연소열의 복사

분율에 근거한 표면 열류량을 식(11)에 의해 예측하였다.

$$E = \frac{\beta M H_c}{\pi D_{max}^2 t_{fb}} \quad (11)$$

복사열에 대한 대상물이 받는 열량은 복사원의 형태에 따라 구형 복사원(Spherical radiator), 수직 실린더형 복사원(Vertical cylindrical radiator), 수직 평판형 복사원(Vertical flat radiator)으로 구분할 수 있다.

Fireball은 구형 복사원으로 Fireball의 최대 지름과 Fireball의 중심에서 대상물까지의 거리로부터 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

$$F = \frac{D_{max}^2}{4X^2} \quad (12)$$

## 2.2. 복사열의 영향

복사열로 인한 피해는 사고 발생시 목적물이 받는 복사량과 노출 시간에 영향을 받는다. 미국의 연방비상관리국(Federal Emergency Management Agency, FEMA)은 노출시간에 따른 복사열의 강도를 통증을 느끼는 것과 2도 화상을 입는 것으로 구분하여 발표하였다.

Eisenberg 등[8]은 핵무기로 인한 복사열 강도로부터 화상과의 관계를 구하여 노출시간에 따른 사망률을 구한 바 있다. F. Lee 등[8]은 Fireball로 인한 3도화상의 예측모델을 제시하였다. 산업체에서 경험적으로 사용해왔던 복사열의 한계값을 Table 1에 나타내었다.

Tsao와 Perry[9], TNO[5]는 화재피폭시 무보호 상태에서 복사열에 의한 1도, 2도, 3도 화상을 다음 식 (13), (14), (15)에 의하여 예측하였다.

$$Pr = -39.83 + 3.0186 \ln(t I_{th}^{4/3}) \quad (13)$$

$$Pr = -43.17 + 3.0186 \ln(t I_{th}^{4/3}) \quad (14)$$

$$Pr = -36.36 + 2.56 \ln(t I_{th}^{4/3}) \quad (15)$$

Table 2. Some limits for thermal radiation.

Design and assessment guidance : Mecklenburgh (1985)	
Thermal radiation intensity (kW/m <sup>2</sup> )	Limit
14	Intensity which normal buildings should be designed to withstand
10-12	Intensity at which vegetation ignites
6	Intensity tolerable to escaping personnel
3	Intensity tolerable in infrequent emergency situations of up to 30 minutes duration
1.5	Intensity safe for stationery personnel and members of the public
Assessment guidance : Dinunno (1982)	
Thermal radiation intensity (kW/m <sup>2</sup> )	Limit
30	Spontaneous ignition of wood
15	Piloted ignition of wood
20	Ignition of No. 2 fuel oil in 40 seconds
10	Ignition of No. 2 fuel oil in 120 seconds
18-20	Cable insulation degrades
12	Plastic melts
9-37.5	Equipment damage

## 3. 피해결과 분석

### 3.1. Thermal flux 예측

FIRESTOR 프로그램을 개발하여 Fireball로 인한 피해 결과를 분석하였다. Fireball의 중심에서 대상물까지의 거리, 온도, 습도 및 연소물질의 질량 등을 입력하면 복사열량이 계산되며 복사열로 인한 인명피해를 예측할 수 있다.

프로그램 처리 과정 및 실행 초기화면을 Fig.2와 Fig.3에 각각 나타내었다. 상기 FIRESTOR 프로그램을 BLEVE ESTIMATOR 프로그램[10], 미국 Dupont사의 SAFER 프로그램과 비교하여 피해결과를 분석하였다.

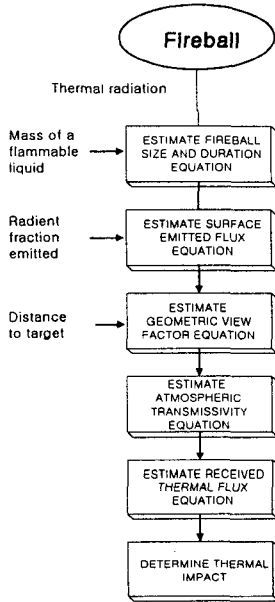


Fig. 2. Logic diagram for calculation on the thermal intensity of fireball.

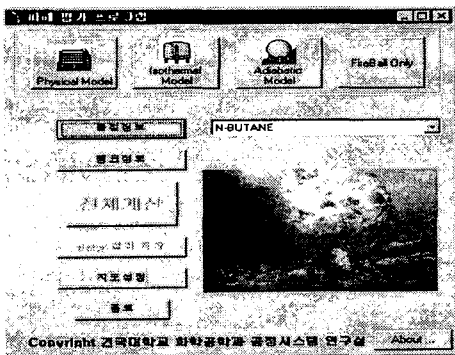


Fig. 3. Initial screen of the program.

### 3.2. 사고사례 분석

사고사례는 1998년 9월 11일 경기도 부천시에 위치한 LPG 충전소 사고를 모델로 하였으며, 사고분석에서는 Propane 및 Butane의 용량

을 변수로 하여 BLEVE 이후 발생하는 Fireball에 대한 위험을 평가하였다.

사고는 지하탱크 저장소에 Propane 및 Butane 가스를 충전하던 중 가스가 누출되어 발생하였으며, 몇 초 후 Fireball이 발생하여 70여명 이상의 사상자와 막대한 재산 손실을 초래하였다.

사고당시 Fireball의 모습을 공중에서 촬영한 사진을 Fig.4에 나타내었는데, 탱크로리 폭발 후 화염이 상승하면서 버섯모양의 화구를 형성하였다.



Fig. 4. An aerial photograph of fireball.

용기 압력 18 Kg/cm<sup>2</sup>에서 Propane과 Butane의 무게를 달리하였을 때, 폭발원으로부터 거리에 따른 Thermal flux를 SAFER에 의해 구하여 Fig.5, Fig.6에 각각 나타내었다. 그림에서 사고지점으로부터 거리가 멀어질수록 Thermal flux는 지수함수로 감소하였고, Propane과 Butane의 무게가 클수록 Thermal flux가 증가하였다.

Propane과 Butane의 용기압력이 18 Kg/cm<sup>2</sup>일 때 거리에 따른 Thermal flux 변화를 BLEVE ESTIMATOR, SAFER, FIRESTOR로 구한 값을 상호 비교하여 Fig.7과 Fig.8에 각각 나타내었다. Propane과 Butane의 경우 BLEVE ESTIMATOR로 구한 Thermal flux가 SAFER의 값보다 낮았는데, 이는 본 연구에서 사용한 Solid model의 변수에 기인한 것으로 사료된다. 즉, 복사열의 대기 투과도와 View factor가 발화원에 가까운 경우 SAFER의 값이 크게 나타났는데, 관심거리 30 m에서 SAFER의 경우 0.99인 반면, BLEVE ESTIMATOR의 경우 3 배정도 낮게 나타났다.

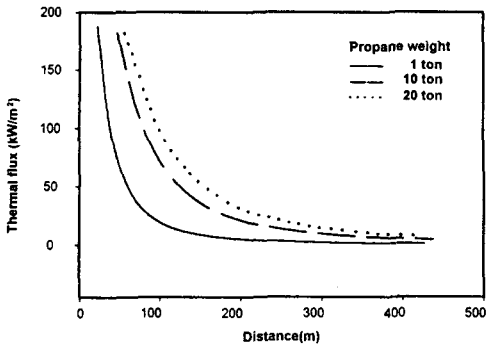


Fig. 5. Thermal flux versus distance for different propane weights at 18 Kg/cm<sup>2</sup> by SAFER.

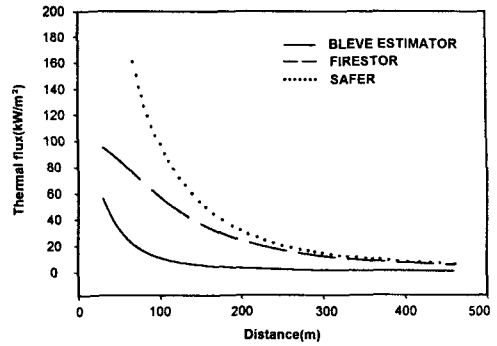


Fig. 7. Comparison of BLEVE ESTIMATOR, SAFER and FIRESTOR results of thermal flux variation for 18 Kg/cm<sup>2</sup> of propane.

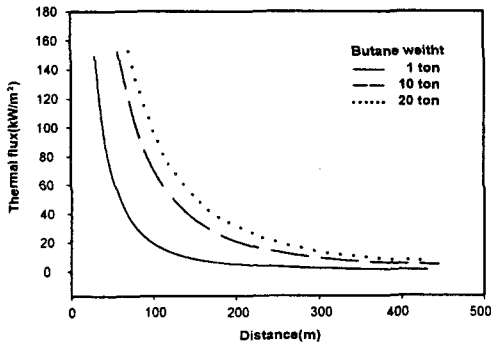


Fig. 6. Thermal flux versus distance for different butane weights at 18 Kg/cm<sup>2</sup> by SAFER.

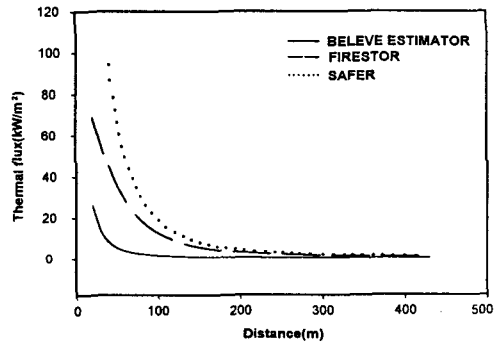


Fig. 8. Comparison of BLEVE ESTIMATOR, SAFER and FIRESTOR results of thermal flux variation for 18 Kg/cm<sup>2</sup> of butane.

FIRESTOR는 SAFER와 BLEVE ESTIMATOR의 중간 값으로 나타났고, Dupont사의 상용프로그램인 SAFER에 근접한 경향을 보이고 있어 우수한 프로그램으로 판단된다. Fig.9는 사용자가 판단하기 쉽도록 사고지점을 중심으로 하여 원주방향으로 거리에 따른 Thermal flux를 나타낸 것으로, 발화원으로부터 거리가 멀수록 Thermal flux는 감소하였다. 그림에서 9,460 W/m<sup>2</sup>는 20초 동안 노출시 2도 화상을 입을 수 있는 경우이며, 4,730 W/m<sup>2</sup>는 수분 내에 대피하지 않으면 화상을 입을 수 있는 경우이고, 1,580 W/m<sup>2</sup>는 피해가 거의 없는 노출 허용치이다.

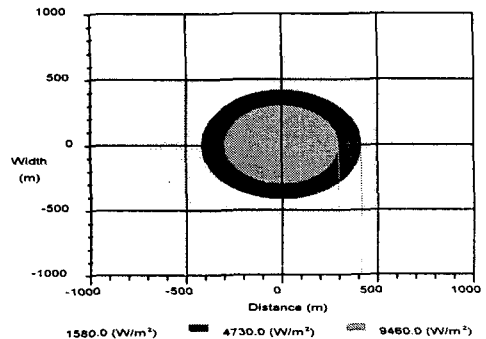


Fig. 9. Thermal flux versus distance with circumferential direction.

#### 4. 결 론

Fireball로 인한 Thermal flux를 예측하기 위하여 본 연구에서 개발한 FIRESTOR 프로그램을 BLEVE ESTIMATOR와 상용 프로그램인 SAFER와 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용기압력이 일정할 때, Propane과 Butane의 경우, Thermal flux는 거리변화에 따라 지수함수로 감소하는 경향을 보였으며, Propane, n- Butane의 무게가 클수록 Thermal flux는 큰 값을 나타내었다.
2. 용기압력이 일정시, 거리에 따른 Thermal flux 변화를 FIRESTOR SAFER, BLEVE ESTIMATOR로 비교한 결과, SAFER의 값이 가장 높게 나타났다. 이는 발화원에 근접시 복사열의 대기 투과도와 View factor의 값이 SAFER의 경우가 BLEVE ESTIMATOR보다 큰데 기인한 것으로 사료된다.
3. 본 연구에서 개발한 FIRESTOR 프로그램은 SAFER와 ESTIMATOR의 중간 값으로, Dupont사의 상용프로그램인 SAFER에 근접하는 경향을 보이고 있어 우수한 프로그램으로 판단된다.

#### 기 호 설 명

$D_{ini}$	: Initial diameter, (m)
$D_{max}$	: Maximum diameter, (m)
$E$	: Surface emitted flux, ( $W/m^2$ )
$F$	: Geometric view factor, flame surface to target, (-)
$H_C$	: Net heat of combustion, (KJ/kg)
$H_{fb}$	: Height from the target to fireball center, (m)
$I_{th}$	: Thermal radiation received at distance x, ( $W/m^2$ )
$M$	: Initial mass of the flammable liquid, (kg)
$P_{pw}$	: Water vapor partial pressure, ( $N/m^2$ )
$P_r$	: Probit, (-)
$P_{wv}$	: Water vapor partial pressure ( $1.013 \times 10^5 N/m^2$ )

$t$	: Duration time of the fireball, (m)
$t_{fb}$	: Distance from the flame center to target, (m)
$X$	: Distance from sphere center to target, (m)
$X_s$	: Distance from sphere surface to target, (m)
$\beta$	: Fraction of heat radiated, 0.25~0.4, (-)
$\gamma$	: Ratio of specific heats for air, $\approx 1.4$ (-)
$\tau$	: Atmospheric transmissivity, (-)

#### 참 고 문 헌

1. Pietersen, C. M. "Analysis of the LPG incident in San Juan Ixhuatepec, Mexico City, 19 November 1984," Report 85-0222, TNO Division of Technology for Society (1985).
2. Pitblado, R. M., "Consequence Models for BLEVE Incidents", Major Industrial Hazards Project, NSW 2006, University of Sydney (1986).
3. Roberts, A. F., "Thermal Radiation Hazards from Release of LPG Fires from Pressurized Storage", Fire Safety J., 4, 197-212 (1982).
4. Jaggerse, H. C., O. P., Franklin, D. R., Wad, and F. G., Ropper, "Factors Controlling Burning Time for Non-Mixed Clouds of Fuel Gas", I. Chem. Eng., Sym., Ser. No. 97 (1986).
5. Netherlands Organization of Applied Scientific Research (TNO), "Methods for the Determination of Possible Damage to People and Objects Resulting from Releases of Hazardous Materials(Green Book)", TNO, Hague (1992).
6. Netherlands Organization of Applied Scientific Research (TNO), "Methods for the Calculation of Physical Effects(Yellow book)", 3rd ed., TNO (1997).
7. Hymes, J., "The Physiological and Pathological Effects of Thermal

- Radiation", SRD R 275, U. K., Atomic Energy Authority (1983).
8. Frank P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries", Butterworth & Co., Ltd (1995).
  9. Tsao, C. K., W. W., Perry, "Modification to the Vulnerability Models : A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills", US Coast Guard, AD / A-075231, NTIS Report No. CG-D-38-79 (1979).
  10. In-Tae Kim, In-Won Kim, Hee-Oeul Song, "BLEVE로 인한 과압 예측에 관한 연구", KIGAS, Vol 4(1), 69-76 (2000).