

## 화학공장에서의 BTX누출에 의한 화재·폭발 영향 평가

박기창·김병직

송실대학교 환경·화학공학과

(2000년 4월 4일 접수, 2000년 6월 23일 채택)

## An Evaluation of the Fire and Explosion Effect by BTX released in a Chemical Plant

Ki-Chang Park and Byung-Jick Kim

*Dept. of Chemical Environmental Engineering, Soongsil University, Korea*

*(Received 4 April 2000 ; Accepted 23 June 2000)*

### 요 약

화학공장에서 발생가능한 사고 피해범위의 예측은 주변 건축물이나 공장간 위치설정 및 배치(layout) 또는 안전장치의 배치 등에 기본자료로 활용될 수 있다. 또한, 사고 후의 결과를 예측할 수 있기 때문에 사고발생에 대한 최적의 비상조치계획을 수립할 수 있어 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 BTX(Benzene, Toluene, Xylene) 누출에 의한 화재 및 폭발의 영향을 평가하고자 하였다. 영향평가의 모사를 위해 Visual basic 언어를 사용한 프로그램을 개발하였다. 기상조건을 고려하여 실제 사고사례에 적용성을 높였다. 화재의 경우에는 pool fire로 인한 피해를 예측할 수 있도록 하였고, 폭발의 경우에는 UVCE(Unconfined Vapor Cloud Explosion)로 인한 손실을 예측할 수 있도록 하였다. 화재는 화염에서 나오는 복사열을 피해 정도를 예측하는 기준으로 사용하였고, 폭발은 과압을 기준으로 하였다. 각각의 결과를 이용해 probit 분석을 할 수 있도록 하였다. 폭발모델의 경우, 누출된 벤젠에 대하여 사고점으로부터 20 m 이내 지점은 심각한 구조적 손상을 보였으며, 60 m 이상의 지점에서는 경미한 피해가 추정됨을 알 수 있었다. 화재모델의 경우, 누출되어 방유제에 고여있는 벤젠에 대하여 복사열로 인한 직접적인 피해는 여름보다는 겨울에 크며, 내륙에 위치한 도시일수록 큰 경향을 보이는 것으로 추정할 수 있었다. 복사열로 인한 피해가 90%일 때 40m 이상에서는 직접적인 영향이 없는 것으로 추정할 수 있었다.

**Abstract** - Accident analysis are useful in the design stage of chemical plants and their surrounding structures. Also, analysis results are required for safety management of existing plants. In this paper, the fire and explosion effect by BTX released was evaluated. The computer program was prepared for accident analysis and adopted for evaluating the magnitude of fire (pool fire) and explosion (UVCE) effect. The thermal radiation was used as a measure of fire magnitude and the overpressure as a measure of explosion magnitude. And probit analysis was made for each case. As a case study, benzene tank model was used. The simulation results of explosion of benzene showed that the damage within 20 meters from the accident spot was severe and the damage beyond 60 meters was negligible. The simulation results of fire of benzene

showed that the damage in summer is bigger than that in winter. And the damage of city located inland seems to be bigger than that of city in seaside. And thermal radiation effects was negligible beyond 40 meters-distance from the accident spot.

**Key words** : fire and explosion, BTX, pool fire, UVCE,

## 1. 서 론

화학공장에서는 반응성이 크고, 가연성이며, 독성인 여러 가지 종류의 화학물질을 원료, 중간체, 첨가제, 용제 및 제품의 형태로 사용·취급·저장하고 있으며, 고온·고압의 공정장치에서 이들 위험 물질을 다루게 된다. 이러한 경우 이들 위험 물질이 누출되어 화재나 폭발을 일으킬 수 있다. 최근 들어 사고의 적절한 피해산정 및 합리적 대책 마련의 필요성이 인식되어 공정에 잠재하고 있는 위험성을 정량화하는 작업에 관심이 증가하고 있다. 이러한 위험의 정량화가 필요한 이유는 정량 분석을 통해 얻은 결과를 근거로 발생 가능한 손실을 예측할 수 있고 이를 통해 사고가 발생했을 경우를 대비한 적절한 대비책을 세워 그 손실규모를 최소화 할 수 있기 때문이다. 미국, 일본, 그리고 유럽의 경우 이러한 피해를 미연에 방지하기 위하여 다양한 정량적 위험성 평가 프로그램 개발을 시도하고 있으며, 이미 상용화된 프로그램도 상당수 있다. 특히 DVN Technica에서 개발된 PHAST와 SAFETI, Du Pont사의 SAFER 같은 프로그램은 상당히 비싼 가격으로 국내에 도입되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이러한 정량분석을 용이하게 하기 위한 응용프로그램을 개발하였다. 화재, 폭발 및 독성물질 누출의 위험성이 높은 BTX (Benzene, Toluene, Xylene)로 인한 화학공장의 사고 중 환경인자가 변화하는 경우, 화재와 폭발로 인한 피해 범위 및 피해정도를 예측할 수 있는 프로그램을 작성하고 결과를 분석하였다.

## II. 프로그램(software) 개발

사고의 정량분석을 위한 프로그램은 Microsoft Visual Basic 6.0과 Microsoft Excel 2000을 사용하여 작성하였다. 프로그램은 저장 물질의 물성 및 누출원 모델, 대기 환경을 입

력하는 부분과 증발모델 부분, 그리고 화재·폭발을 다루는 부분으로 구성하였다. 먼저 저장물질의 물성과 대기환경에 관련된 data를 입력하고 누출량을 구할 누출 모델에 대한 정보를 입력하여 누출량을 구한다. 누출량을 알고 있어 사고 모델식에 직접 입력할 경우에는 직접입력을 선택하고 사고의 종류(화재·폭발)를 선택한다. 누출 모델은 저장 물질과 저장 상태에 따라 액체 상압 저장, 액체 가압 저장, 기체 저장의 경우로 나누었다. 각각의 경우에 해당하는 data들을 textbox에 입력하도록 하였다. 누출 모델에서 구한 누출 속도와 누출 시간을 이용하여 누출량을 추산하도록 하였다. 증발모델의 경우 pool의 면적과 대기환경에 의해 증발량을 추산할 수 있도록 하였다. 화재의 경우 Pool Fire의 피해를 예측할 수 있도록 하였는데, 액면화재의 열플럭스 추정의 접근방법으로는 연소속도를 계산한 후에 상당액면 직경과 화염의 길이를 추정하고, 화염의 기울기와 표면방사열 플럭스, 액면화재의 중심과 대상물 사이의 투과성 기하학적 인자를 계산한 후에 대상표표물에서 열플럭스를 추정한다. 그리고, 화재의 종류와 결과의 종류(복사열, Probit)를 결정하고, 각각에 필요한 data를 입력하면 그에 해당하는 결과를 출력하도록 하였다. 폭발의 경우는 UVCE의 피해를 예측할 수 있도록 프로그램을 작성하였다. UVCE는 TNT 당량 모델을 사용하여, 필요한 자료값을 입력하면 해당하는 과압이나 손실의 종류 및 손실 가능성에 해당하는 거리를 출력할 수 있도록 하였다.

### 2.1. 비등점 이하의 액체 증발모델링 (1), (2), (4), (7), (8), (11), (13)

저장탱크가 Figure 1.에 나타나 있다. 유체의 액위보다  $h_L$ 만큼 하부에 구멍이 발생했다고 하면 이 구멍을 통한 액체의 흐름은 기계적 에너지 수지식에 의하여 표현되며, 비압축성으로 가정한다.

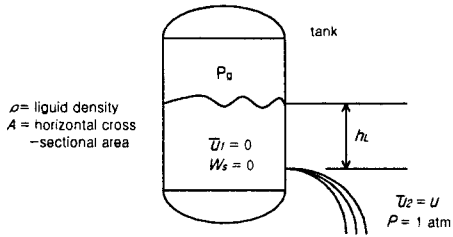


Fig. 1. Release hole of orifice type in tank.

대기압 하에서 비등점 이하인 액체에서의 증발속도는 열전도에 의한 열전달에는 의존하지 않는 것으로 본다. 반면에 증발속도는 질량 전달에 더욱 의존한다. Cremer와 Warner(1982)에 따르면, Pasquill은 증기 확산 계수  $D$ 는 각 물질의 특성값을 사용하고 풍속은 표준높이인 10 m에서 측정된 값을 사용하였고, 대기는 난류이며, 물질 전달 속도는 낮으며, 액체 온도는 증발 공정 동안에는 대기 온도와 같고 일정하며, 액체는 단일물질이며, 고인 액체의 면적은 일정하다고 가정하였다.

주위온도보다 높은 끓는점을 가진 액체의 누출의 경우, pool이 지면 위에 형성되면서 증기압, pool의 면적 그리고 대기조건에 의하여 일정한 속도로 서서히 증발된다. 서서히 증발되는 pool의 경우에 대해서 대부분의 방출모델들은 pool에서부터 대기로의 물질전달에 의하여 증발이 제한되었다고 가정하였다. 단일성분에 대한 증발속도는 이상기체상태, 충분히 잘 혼합된 액상, 정상상태에서 Fleischer(1980)가 다음과 같이 정의하였다.

$$\dot{M} = \frac{k_g A_p D_s M_s W}{R^* T_i} \quad (1)$$

물질전달계수  $k_g$ 를 계산하기 위하여 여기서는 평형판에서의 증류 또는 난류에 근거한 표준 화학공학적 실험관계식을 사용하였다. Fleischer(1980)는 표준 평형판의 물질전달계수는 pool의 직경에 근거하여 Reynolds 수가 320,000에서 증류와 난류의 전이현상이 일어나는 것으로 가정하고 계산하였다.

$$N_{Sh} = 0.664 N_{Sc}^{1/3} N_{Re}^{1/2} \quad N_{Re} < 320,000 \quad (2)$$

$$N_{Sh} = 0.037 N_{Sc}^{1/3} [N_{Re}^{0.8} - 15200] \quad N_{Re} > 320,000 \quad (3)$$

$$N_{Sh} = \frac{k_g d_p}{D} = f(N_{Sc}, N_{Re}) \quad (4)$$

물질전달계수  $k_g$ 를 계산하기 위한 다른 한 가지 방법은 Sutton(1953)의 연구에 근거한 서서히 증발하는 pool에 대하여 기상학적인 접근법이 있다.

$$k_g = 0.00482 N_{Sc}^{0.67} U^{0.78} d_p^{-0.11} \quad (5)$$

## 2.2. 액면화재 모델링(Pool Fire Modeling)

[4],[5],[6],[9],[10],[12],[13],[15]

액면화재로 인한 열복사(Thermal Radiation)은 화재가 발생한 가까운 지역에 있는 대상물과 사람에게 피해나 손실을 주는 잠재위험성(Potential)을 추정하는데 사용한다. 액면화재에서 발생하는 Thermal Radiation을 계산하는데는 Point Source Method와 Solid Flame Method, 그리고 Volume Emitter Method 등을 주로 사용한다. 이 중 Point Source Method는 열이 중앙의 수직축에서만 방사된다는 가정하에 유도한 모델이고 Solid Flame Method는 실제 불꽃의 형태를 고려한 모델이며 열원들의 농도와 온도를 고려한 모델이 Volume Emitter Method이다. 하지만 모델 적용의 어려움 때문에 주로 Point Source Method가 주로 사용되며 본 연구에서도 Point Source Method를 사용하여 액면화재를 모델링하였다.

액면화재는 다음과 같은 수직실린더로 설명할 수 있다.

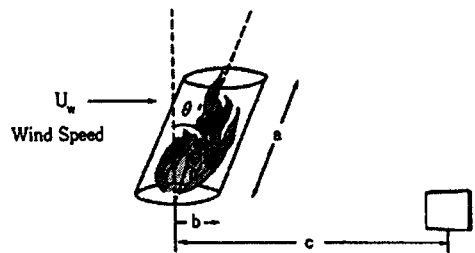


Fig. 2. Geometric view factor for a vertical cylindrical pool fire.<sup>[5]</sup>

액면화재의 경우 TNO(1979)에서는 열복사 추정에 다음과 같은 모델식을 사용할 것을 제안하였다.

$$I_{Thermal} = \tau FE \quad (6)$$

액면화재 모델의 가정과 제한사항은 다음과 같다.

- ① 초기에 지상 위의 액면화재에 적용한다.
- ② 산소공급을 방해하는 큰 격벽(방화벽)이 없다고 가정한다.
- ③ 액면의 표면적이 일정하다고 가정한다.
- ④ 액면화재가 잘 진행된다고 가정한다.
- ⑤ 완전 연소된다고 가정한다.
- ⑥ 공기 중의 CO<sub>2</sub>와 먼지로 인한 투과성의 감소를 무시한다.

TNO(1979)는 표면방출 플럭스 E의 계산을 위해 다음 식을 제안하였다.

$$E = \frac{\beta \dot{m} H_c (\pi b^2)}{2\pi b a + \pi b^2} \quad (7)$$

연소속도는 액면화재가 일어날 동안 액면에서 물질이 증발되어지는 속도이다. 증발속도는 전도와 대류 열전달로부터 증발과 내부의 복사 열전달(화염으로부터)로부터의 증발의 두 가지 원인에 의존한다.

연소속도( $\dot{m}$ )의 계산에 TNO(1979)는 지상 위의 누출(spill)의 경우 다음과 같은 식을 사용하였다. 주위온도( $T_a$ )이상의 비점( $T_b$ )을 가진 액체의 경우는 식 (8)를, 주위온도( $T_a$ )이하의 비점( $T_b$ )을 가진 액체의 경우는 식 (9)을 사용하였다.

$$\dot{m} = \frac{0.001 H_c}{C_p (T_b - T_a) + \Delta H_v} \quad (8)$$

$$\dot{m} = \frac{0.001 H_c}{\Delta H_v} \quad (9)$$

주위온도 이상의 표준 비점을 가진 탄화수소 누출의 경우(ex : 가솔린) 물표면 위의 누출에 대한 연소속도는 식 (8)으로 추정할 수 있다. 주위온도 이하의 표준 비점을 가진 물질

에 관련된 물표면 위의 누출의 경우(LNG 혹은 LPG)에는 상당한 열전달이 물표면과 물질의 액면사이에서 일어난다. 대규모 실험에서 물 위의 LNG 누출의 경우 연소속도는 지상 위의 누출의 경우보다 전형적으로 3배의 연소속도를 가진다. LPG의 경우는 지상 위의 누출 경우보다 2배의 연소속도를 가진다.

CPQRA(1989)에서는 화염길이( $a$ )에 대해 Thomas(1963)의 상관관계식을 사용할 것을 제안하였다.

$$a = 84b \left[ \frac{\dot{m}}{\rho_{air}(2gb)^{0.5}} \right]^{0.61} \quad (10)$$

SFPE/NFPA(1988)에서는 화염의 기울어짐을 고려하여 화염길이에 대해 Thomas(1963)의 다음 상관관계식을 제시하였다.

$$a = 110b \left[ \frac{\dot{m}}{\rho_{air}(2gb)^{0.5}} \right]^{0.61} U^{*-0.21} \quad (11)$$

$$U^* = \frac{U_w}{\left[ \frac{2g\dot{m}b}{\rho_v} \right]^{1/3}} \quad \text{for } U_w \geq \left[ \frac{2g\dot{m}b}{\rho_v} \right]^{1/3} \quad (12)$$

$$U^* = 1 \quad \text{for } U_w < \left[ \frac{2g\dot{m}b}{\rho_v} \right]^{1/3} \quad (13)$$

미국가스협회(AGA, 1974)에서는 화염기울기를 측정하기 위해 다음의 상관관계식을 제시하였다.

$$\cos \theta = 1 \quad \text{for } U_w \leq 1 \quad (14)$$

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{U^*}} \quad \text{for } U_w > 1 \quad (15)$$

여기서,  $U^*$  : 식 (15)에서 1.6 m 높이에서 풍속을 사용하여 계산된 차원이 없는 풍속(-) 액면화재의 경우 전체 복사열의 비율( $\beta$ )은 TNO(1979)에서는 탄화수소 액면화재의 경우  $\beta=0.35$ 의 보존값(어림값) 사용을 제안하였고, 탄화수소의 전체복사열의 비율은 이 값을 가정하여 사용해도 무방하다. 기하학적인 인자는 화염에 대하여 노출된 물체의 위치와 방향, 화

염모양의 영향을 고려하였다. 원추형의 기하학적 인자는 TNO(1979)에서는 수직 원통형으로 모델화된 액면화재의 경우 기하학적 인자를 추정하기 위한 방법을 다음과 같이 제공하였다.

화염의 기울기가 없을 때, 지표면에서 수직 표면의 경우 수직면 인자  $F_V$ 는 다음에 의해 주어졌다.

$$F_V = \frac{1}{\pi Y} \tan^{-1} \left( \frac{X}{(Y^2 - 1)^{0.5}} \right) + \frac{X}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2Y)}{Y(AB)^{0.5}} \tan^{-1} \left[ \left( \frac{(Y-1)A}{(Y+1)B} \right)^{0.5} \right] \right\} - \frac{1}{Y} \tan^{-1} \left[ \left( \frac{(Y-1)}{(Y+1)} \right)^{0.5} \right] \quad (16)$$

$$\begin{aligned} X &= a/b, (-) \\ Y &= c/b, (-) \\ A &= (1+Y)^2 + X^2 \\ B &= (1-Y)^2 + X^2 \end{aligned}$$

\* The results of the  $\tan^{-1}$  operations are in radians, not degrees.

화염의 기울기가 없을 때, 지표면에서 수평면의 경우 수평면 인자  $F_h$ 는 다음 식에 의해서 주어졌다.

$$F_h = \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left[ \left( \frac{X+1}{Y-1} \right)^{0.5} \right] - \frac{X^2 + (Y+1)(Y-1)}{(BA)^{0.5}} \tan^{-1} \left[ \left( \frac{A(Y-1)}{B(Y+1)} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad (17)$$

\* The results of the  $\tan^{-1}$  operations are in radians, not degrees.

화염이 기울어졌을 때의 수직면 인자를 Mudan(1987)은 화염기울기를 고려하여 수직면 인자  $F_V$ 의 경우 다음 표현식으로 나타내었다.

$$F_V = \frac{X \cos \theta}{Y X \sin \theta} \frac{X^2 + (Y+1)^2 - 2Y(1+X \sin \theta)}{\pi \sqrt{AB}} \times \tan^{-1} \left[ \left( \frac{A(Y-1)}{B(Y+1)} \right)^{0.5} \right] + \frac{\cos \theta}{\pi \sqrt{C}} \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{XY - (Y^2 - 1) \sin \theta}{\sqrt{Y^2 - 1} \sqrt{C}} \right] \right\} + \tan^{-1} \left[ \frac{(Y^2 - 1)^{0.5} \sin \theta}{\sqrt{C}} \right] - \frac{X \cos \theta}{\pi (Y X \sin \theta)} \tan^{-1} \left( \frac{Y-1}{Y+1} \right)^{0.5} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} A' &= X^2 + (Y+1)^2 - 2X(Y+1) \sin \theta \\ B' &= X^2 + (Y-1)^2 - 2X(Y-1) \sin \theta \\ C' &= 1 + (Y^2 - 1) \cos^2 \theta \end{aligned}$$

\* The results of the  $\tan^{-1}$  operations are in radians, not degrees.

화염이 기울기가 있을 때, Mudan(1987)은 화염기울기를 고려하여 수평면인자  $F_h$ 의 경우 다음 표현식으로 나타내었다.

$$F_h = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left[ \left( \frac{Y+1}{Y-1} \right)^{0.5} \right] - \frac{X^2 + (Y+1)^2 - 2Y(Y+1 + XY \sin \theta)}{\pi \sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[ \left( \frac{A(Y-1)}{B(Y+1)} \right)^{0.5} \right] + \frac{\sin \theta}{\pi \sqrt{C}} \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{XY - (Y^2 - 1) \sin \theta}{\sqrt{Y^2 - 1} \sqrt{C}} \right] \right\} + \tan^{-1} \left[ \frac{(Y^2 - 1)^{0.5} \sin \theta}{\sqrt{C}} \right] \quad (19)$$

\* The results of the  $\tan^{-1}$  operations are in radians, not degrees.

또한 최대 기하학적 인자는 다음 식으로 주어졌다.

$$F = (F_V^2 + F_h^2)^{0.5} \quad (20)$$

투과성은 노출된 물체와 화재 사이에 대기에 의해서 흡수되거나 반사되지 않는 복사열이 얼마인가를 측정하는 것이다. 투과율의 크기는 노출된 물체와 화재 사이에 공기 중 수증기의 양에 의존한다. 투과율은 물의 포화증기압( $P_w$ ), 상대습도(Relative Humidity)와 화재의 중심에서부터 대상물까지의 거리  $X$ 의 곱으로 구할 수 있는데, 또한 CPQRA(1989)에 따르면, 대기 중의 투과율( $\tau$ )은 다음 식에 의하여 추정할 수 있다.

$$\tau = 2.02 (P_{PW} R H X_S)^{-0.09} \quad (21)$$

### 2.3. 개방계 증기운 폭발(UVCE, Unconfined Vapor Cloud Explosion) [4],[6],[13],[14],[15]

액화 가스, 휘발성 가열 액체나 고압가스를 다루는 공정 장치의 한 부분이 파손되면 그 부분으로 내부 물질이 누출된다. 누출된 물질은

증기구름을 형성한다. 이 물질이 가연성 물질이고, 농도가 LEL(Lower Explosive Limit)이하로 희석되기 전에 착화가 되면 여러 조건에 따라서 화재가 일어나거나 UVCE가 발생한다.

화재가 UVCE로 전이되는 요인들 중 지금까지 알려진 것들은 다음과 같다.

- 가연성 물질의 누출량
- 방해물(confinement/obstacle)의 존재 여부
- 연소 속도

UVCE는 폭굉(detonation)보다는 폭연(deflagrations)이 주를 이루며, 대부분의 경우 최대 과압은 15 psi를 넘지 않는 것으로 알려져 있다. UVCE의 영향을 예측하는 모델 중 주로 사용하는 모델에는 TNT모델과 TNO모델이 있다. TNT모델은 가연성 물질에 상응하는 연소열을 가진 TNT의 양을 이용하여 환산 거리를 구한 뒤 이를 이용하여 과압과 해당 거리와의 관계를 구하는 모델이다. 이 모델의 가정 및 사용상 제한점은 다음과 같다.

- 폭발원은 점으로 나타낼 수 있다.
- 거리에 따른 과압의 감소는 TNT와 비슷하다고 가정한다.
- 폭발원과 가까운 위치에서 과압은 높게 예측된다.
- 증기운의 흐름은 고려하지 않는다.
- 지형, 건물, 장애물의 영향은 고려하지 않는다.

TNT 상당량을 구하는 방법은 다음과 같다.

$$W = \frac{\eta M H_c}{H_{c, TNT}} \quad (22)$$

폭발로 인한 폭굉과의 에너지는 증기운을 형성한 물질에서 이론적으로 구한 연소열의 일부분에 해당된다. 분진이나 가스의 폭발은 충격파나 압력파에 의해서 발화원으로부터 반응면을 이동하게 된다. 가연성 물질의 반응이 끝난 후에도 압력파는 그 운동을 계속한다. 폭굉과는 압력파와 계속되는 바람으로 구성되어 있다. 대부분의 피해를 일으키는 것은 폭굉파이다. 폭굉에 의한 피해를 정확히 추정하려면 피크과압(Peak Overpressure)을 적절히 이용하여 얻을 수 있다. TNT와 같은 폭발성

물질을 가지고 폭굉파의 특성을 실험한 것은 잘 알려져 있고, 폭굉파의 특성은 일반적으로 환산거리 Z의 함수로 표시되어 있다. 즉, 과압은 TNT의 상당 질량과 폭발기점으로부터의 거리를 이용하여 추산할 수 있다.

실험적으로 유도된 환산법칙(Scaling Law)은

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (23)$$

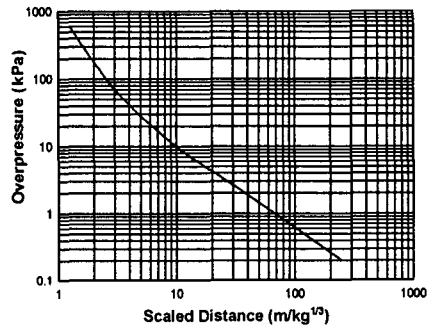


Fig. 3. Overpressure vs. scaled distance.<sup>[1]</sup>

#### 2.4. 영향평가모델 <sup>[4],[5],[15]</sup>

Probit model은 사고의 피해를 예측하는데 사용되는 모델이다. 해당 사고에 대한 확률 변수(Probit)를 이용하여 사고로 인해 피해를 입을 수 있는 백분율을 구하게 된다. Probit을 구하는 식은 다음과 같은 형태를 띈다.

$$Y = K_1 + K_2 \ln V \quad (24)$$

여기서 Y는 Probit, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>는 피해의 종류에 따른 상수, V는 피해의 원인변수를 말한다.

Tsao와 Perry(1979) 및 TNO(1979)에서는 액면화재의 노출로 인한 사람에 대한 영향을 추정하기 위해 Probit(Probability Unit)모델을 제시하였다.

① 1도 화상의 경우 :

$$Probit = -39.83 + 3.0186 \ln(tI_{Thermal}^{4/3})$$

② 2도 화상의 경우 :

$$Probit = -43.14 + 3.0186 \ln(tl^{4/3}_{Thermal})$$

③ 화재 사망의 경우 :

$$Probit = -36.38 + 2.56 \ln(tl^{4/3}_{Thermal})$$

폭발의 경우는 Eisenberg가 핵폭발 자료에 근거하여 다음의 Probit식을 제안하였다.

① 폐출혈로 인한 사망 :

$$Probit = -77.1 + 6.91 \ln P$$

② 고막 파열 :  $Probit = -15.6 + 1.93 \ln P$

③ 구조물 손상 :  $Probit = -23.8 + 2.92 \ln P$

④ 유리파손 :  $Probit = -18.1 + 2.79 \ln P$

### III. 사례 연구

직경 7.62 m, 높이 7.62 m의 수직 원통형 탱크가 벤젠을 저장하기 위해서 사용된다. 탱크는 폭발을 방지하기 위하여 게이지압력 1 기압으로 조절되는 일정한 압력의 질소로 채워져 있다. 탱크의 액체의 수위는 6.8 m이다. 지게차를 잘못 운전함으로 인하여 지면에서 높이 1.52 m에 1 in.의 구멍이 탱크에 생긴 후, 직경 22 m, 두께 0.9 m의 pool이 방유제 안에서 형성되었을 때, 본 연구에서 개발한 프로그램을 사용하여 증발·화재·폭발시의 영향을 분석하였다. 서울과 6대 광역도시, 그리고 공업단지가 위치한 여천과 구미의 1999년 1년 간의 풍속·주위온도, 습도를 조사하여 서울, 대전, 대구, 여천의 4개 도시의 8월과 1월의 기상인자를 고려하였다. 선정이유는 8월의 경우 1년 중 가장 고온다습하며, 1월은 1년 중 가장 저온건조하기 때문이다. 그리고 풍속과 주위온도, 습도 등의 기상인자를 고려하여 모사하였다.

연구에 이용된 서울, 대전, 대구, 여천 4개 도시의 기상인자 data는 Table 1.에 실었다.

Figure 4.은 증발속도와 온도와의 관계를 나타낸 그래프이다. 증발속도는 물질전달계수의 계산이 중요하다는 것을 설명하고 있다. Sherwood 수에 포함되어 있는 Reynolds 수의 풍속과 속도식의 온도에 따라 온도, 풍속이 증가할수록 증발속도는 증가함을 알 수 있다.

Figure 5.은 풍속의 증가에 따른 거리와 과압과의 관계를 나타낸 그래프이다. 과압은 거리에 따라 TNT의 폭발량과 유사하게 감소하며 풍속에 의해 증기 발생량이 증가하며, 유동

범위의 확산으로 과압이 증가함을 알 수 있고 방유제 주변의 유류저장탱크나 철골 구조물들의 변형이 발생할 수 있으며, 독성물질 누출이나 화재보다 피해상황이 크다는 것을 추정할 수 있다.

Figure 6.은 8월의 4개 도시의 거리와 복사열에 관한 그래프이다. 서울과 여천의 10 m에서의 복사열이 약 17~21%의 차이를 보이며, 주위온도와 주위온도에 따른 포화수증기압과 상대습도, 풍속에 의해 상시효과가 있는 것으로 보인다.

Figure 7.은 1월의 4개 도시의 거리와 복사열에 관한 그래프이다. 대전과 여천의 10 m에서의 복사열이 약 21~27%의 차이가 있으며, 8월의 그래프와 비교할 경우 복사열로 인한 피해는 여름보다는 겨울에 크며 내륙에 위치한 도시일수록 큰 경향을 보였다.

Figure 8.은 8월, 서울의 경우의 Probit 분석을 한 그래프이다. 90%의 1도화상 거리는 약 25 m지점이고, 2도화상 거리는 약 21 m지점임을 알 수 있다.

Figure 9.은 UVCE의 경우에 건물손상에 관한 Probit 분석을 한 그래프이다. 풍속이 증가함에 따라 건물손상의 확률이 커지며, 탱크 주변의 40 m에서 50 m 지점에서 건물이 손상의 확률은 60% 정도이다.

Table 1. Meteorological data for developed simulation program(Monthly meteorological summary by Korea Meteorological Administration)

	Seoul		Taejon		Taegu		Yechon	
	Aug.	Jan.	Aug.	Jan.	Aug.	Jan.	Aug.	Jan.
Temperature (°C)	26.0	0.8	25.6	-0.3	25.5	1.6	25.0	3.5
Windspeed (m/s)	1.2	2.6	1.9	1.4	2.7	3.0	3.7	5.0
Relative Humidity (%)	74	58	82	63	76	53	83	58

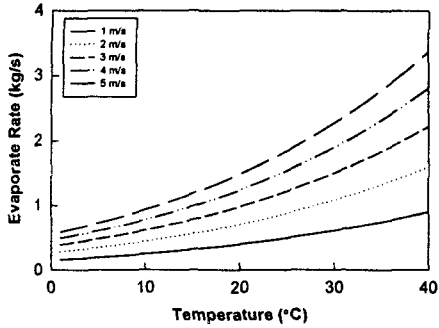


Fig. 4. Temperature vs. evaporate rate.

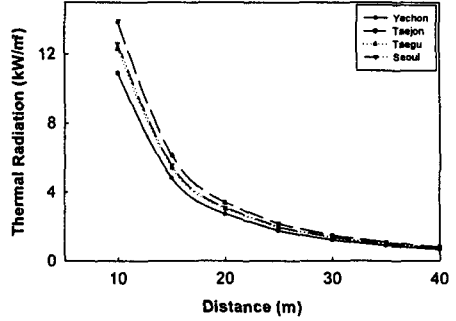


Fig. 7. Distance vs. thermal radiation for winter (January).

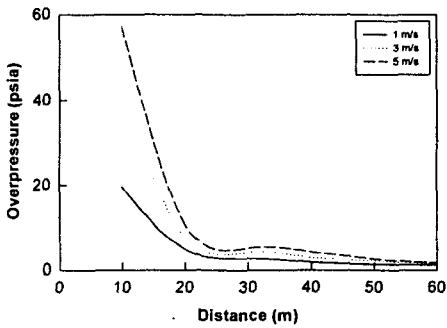


Fig. 5. Distance vs. overpressure with three different windspeed.

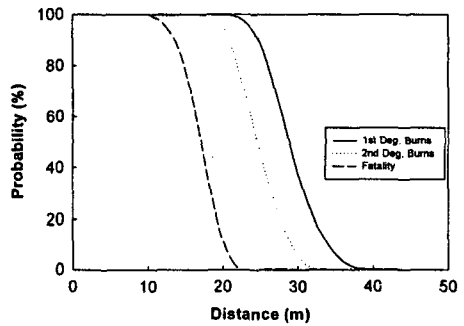


Fig. 8. Probit analysis in Seoul.  
(Month : August, exposure time : 3 min.)

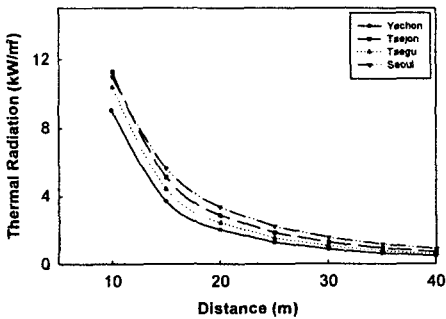


Fig. 6. Distance vs. thermal radiation for summer (August).

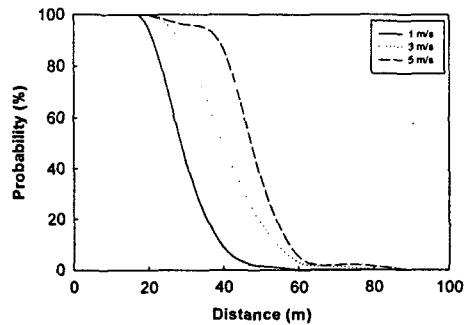


Fig. 9. Probit analysis with three different windspeed.  
(Building damages)



#### IV. 결 과

본 연구에서는 경제적, 시간적 이유로 정량적 위험성 평가를 수행하기 어려운 작업현장에서 화재(Pool fire)·폭발(UVCE) 사고에 의한 피해예측을 용이하게 수행·분석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 증발모델의 사례연구의 경우, 온도의 증가와 풍속의 증가에 의해 증발속도는 증가하는 경향을 보였다.

(2) 폭발모델의 사례연구의 경우, 탱크에서 누출되어 증발된 벤젠에 대해 방유제의 거리보다 적은 20 m 이내에서는 심각한 구조적 손상을 보이며, 방유제의 거리보다 큰 60 m 이상에서는 경미한 피해가 추정된다.

(3) 화재모델의 사례연구의 경우, 탱크에서 누출된 후 방유제에 고여있는 벤젠에 대해 복사열로 인한 직접적인 피해는 여름보다는 겨울에 크며 내륙에 위치한 도시일수록 큰 경향을 보였고, 복사열로 인한 화상피해가 90%일 때 방유제의 거리보다 큰 40 m 이상에서는 직접적인 영향이 없는 것으로 보였다.

(4) 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 석유화학 공정 내에서 취급하는 가연성물질인 BTX의 취급형태와 용량을 기준으로 쉽게 pool fire와 UVCE에 의한 사고피해 영향을 예측할 수 있으며, 짧은 시간과 투자로 공정내의 위험성을 순위화하여 체계적인 방재 대책을 수립할 수 있다.

#### 사 용 기 호

- $\dot{M}$  : 대기로의 증발방출속도 (kg/s)
- $k_g$  : 물질전달상수 (m/s)
- $A_p$  : 유효 pool의 면적 (m<sup>2</sup>)
- $p_s$  : 온도 T에서의 물질의 증기압 (N/m<sup>2</sup>)
- $M.W$  : 분자량 (kg/kgmol)
- $R^*$  : 기체상수 (8.31 J/molK)
- $T_i$  : 기-액 계면에서의 온도(K)
- $N_{sh}$  : Sherwood 수
- $d_p$  : 유효 pool의 직경 (m)
- $D$  : 물질의 확산계수 (m<sup>2</sup>/s)
- $N_{Sc}$  : Schmidt 수 (=동점도/물질의 확산계수)
- $N_{Re}$  : Reynolds 수
- $U$  : 10 m 높이에서 풍속(m/s)

- $I_{Thermal}$  : 거리 x에서 받는 열복사(W/m<sup>2</sup>)
- $\tau$  : 대기 중의 투과율(Transmissivity, -)
- $F$  : 기하학적 인자(-)
- $E$  : 표면방출 플럭스(W/m<sup>2</sup>)
- $\beta$  : 전체복사열의 분율(-)
- $\dot{m}$  : 액 표면 위에서 연소속도(kg/m<sup>2</sup>·s)
- $H_c$  : 액체의 순 연소열(J/kg)
- $b$  : 액면반경(m)
- $a$  : 화염길이(m)
- $C_p$  : 액면을 형성하는 액체의 비열(J/kg·K)
- $\Delta H_v$  : 액체의 증발잠열(J/kg)
- $T_a$  : 주위온도(K)
- $T_b$  : 액체의 비점(K)
- $\rho_{air}$  : 공기의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- $g$  : 중력가속도, 9.81(m/s<sup>2</sup>)
- $U^*$  : 차원이 없는(Nondimensional) 풍속(-)
- $U_W$  : 1.6 m 높이에서 풍속(m/s)
- $\rho_v$  : 정상 비점온도에서 액면증기의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- $F_V$  : 수직면 인자(-)
- $F_h$  : 수평면 인자(-)
- $P_{PW}$  : 수증기의 분압(N/m<sup>2</sup>)
- $RH$  : 상대습도(-)
- $X_s$  : 화염표면에서부터 대상물까지의 거리(m)
- $W$  : TNT의 상당질량 (lb<sub>m</sub>)
- $\eta$  : 경험적 폭발 효율, (0.01~0.2)
- $M$  : 누출된 가연성 물질의 질량 (Btu)
- $H_c$  : 가연성 물질의 순연소열 (Btu/lb<sub>m</sub>)
- $H_{c,TNT}$  : TNT의 연소열 (2000Btu/lb<sub>m</sub>)
- $Z$  : 환산거리(m/kg<sup>1/3</sup>)
- $R$  : 폭발물로부터의 반경(m)
- $t$  : 노출시간(s)
- $P$  : 최대 과압(N/m<sup>2</sup>)

#### 참 고 문 헌

1. Crowl, D.A., Louvar, J.F., *Chemical Process Safety Fundamentals with Application*, Prentice-Hall, New-Jersey, 1990.
2. Center For Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical

- Engineers, *Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models*, AIChE-CCPS, New York, 1996.
3. American Institute of Chemical Engineers, *Dows Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide*, 7th ed., AIChE, New York, 1994.
  4. 유철진, 주종대, 조지훈, "화학공정 위험성 평가Ⅲ", 한국산업안전공단, (1998).
  5. 김구회, "화재, 폭발 및 독극물 누출 재해의 강도산정 방법에 관한 비교 연구", 석사학위논문, 광운대학교, 1993.
  6. 배성진, "화학공장의 화재·폭발의 정량적 영향 평가에 관한 연구", 석사학위논문, 숭실대학교, 1998.
  7. 이근원, "탄화수소 누출로 인한 위험분석 평가 방법론 연구", 한국산업안전학회지, 13(2) 1998.6
  8. Cussler, E.L., *Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems*, 2nd ed., Cambridge University Press, London, 1997.
  9. McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P. *Unit Operation of Chemical Engineering*, 5th ed., McGraw-Hill, 1993.
  10. Himmelblau, D.M., *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th ed., Prentice-Hall, New-Jersey, 1996.
  11. Perry, R.H., Green, D., *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 6th ed., McGraw-Hill, 1984.
  12. 백종배, "화학공정에서의 정량적 위험성 평가를 위한 기반구조 구축에 관한 연구", 석사학위논문, 광운대학교, (1996).
  13. 김윤화, 김형석, 신동일, 김인원, 고재욱, "위험성 평가 프로그램 PML-Chem", 한국산업안전학회지, 14(2), (1999).
  14. 함병호, 손민일, 김태욱, 조지훈, 이영순, "증기운 폭발의 위험성 평가를 위한 전문가 시스템의 구축", 한국산업안전학회지, 10(2), (1995).
  15. 이경덕, 신창섭, "LPG 누출시 피해거리 및 폭발영향에 관한 연구", 한국산업안전학회지, 14(2), (1999).