

연구보고서

화학연 95-4-13

# 폭발의 영향범위 산정 모델에 관한 연구

1995. 12. 31.



한국산업안전공단  
KOREA INDUSTRIAL SAFETY CORPORATION

산업안전연구원  
INDUSTRIAL SAFETY RESEARCH INSTITUTE

# 목 차

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第 1 章 서 론 .....         | 1  |
| 第 2 章 폭발의 정의와 분류 .....  | 3  |
| 1. 내부현상에 의한 분류 .....    | 3  |
| 2. 반응속도에 의한 분류 .....    | 5  |
| 3. 물질의 상태에 의한 분류 .....  | 5  |
| 第 3 章 폭발의 특성과 영향 .....  | 9  |
| 1. 폭발파의 특성 .....        | 9  |
| 2. 피해인자 .....           | 14 |
| 第 4 章 폭발 모델별 특성 .....   | 23 |
| 1. 물리적 폭발 .....         | 23 |
| 2. BLEVE .....          | 25 |
| 3. 증기운 폭발 .....         | 26 |
| 第 5 章 폭발의 영향 .....      | 31 |
| 1. Probit 분석법 .....     | 31 |
| 2. 사람의 상해 정도 .....      | 32 |
| 3. 장치나 구조물의 피해 정도 ..... | 43 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 4. 폭발의 예방과 완화조치 .....   | 48 |
| 第 6 章 영향 범위 산정 .....    | 50 |
| 1. 폭발모델별 산정 절차 .....    | 50 |
| 2. 증기운 폭발모델의 산정절차 ..... | 54 |
| 결    론 .....            | 62 |
| □ 참 고 문 헌 .....         | 64 |

# 제 1 장 서 론

## 1. 연구목적

산업의 고도화와 복잡성으로 인하여 대형사고의 발생위험이 날로 높아지고 있다. 특히 화학공장은 가연성, 인화성, 폭발성 및 독성물질 등을 대량으로 취급·제조함으로, 사고가 발생하게 되면 사업장 내부의 근로자뿐만 아니라 인근 주민과 환경에까지 영향을 미치며, 화학공업의 특성상 그 파급효과도 매우 크다. 국제노동기구(ILO)에서는 이와 같은 형태의 사고를 중대산업사고라 정의하고 '93년 6월에 회원국들이 사고를 예방하기 위하여 시행해야될 사항들을 규정한 "중대산업사고예방"협약(제174호)을 제정하였다.

이 제도에서는 중대산업사고를 야기할 가능성이 큰 주요 위험설비를 보유하고 있는 사업장에서는 이 설비들에 대하여 위험성평가를 실시하여 적절한 비상조치계획을 수립하도록 규정하고 있다.

이를 계기로 국내에서도 중대산업사고예방제도가 법제화되어 공정안전관리기법이 도입되었다. 공정안전관리제도에서는 중요위험공정에 대하여 사고결과의 영향분석을 실시하도록 하고있으나 현재 국내 사업장에서의 사고영향 평가의 실행은 미미한 실정이다. 이는 사고영향평가에 대한 모델이 복잡·난해하고 사업장에 적용하기가 힘들기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 사고영향평가중 폭발로 인한 영향평가를 위하여 폭발유형별 평가방법을 조사·분석하고 폭발의 영향범위산정모델을 제시하여 사업장에서 사고영향평가를 실시할 수 있도록 하고자 하였다.

## 2. 연구기간

1995. 1. 1. ~ 1995. 12. 31

## 3. 연구내용

사고결과의 영향평가는 유해·위험물이 누출되었을 때 화재·폭발 및 독성에 대한 영향을 평가하고 그 피해범위를 산정할 수 있다.

사고결과의 영향평가는 화재, 폭발 및 독성으로 나눌수 있으나 본 연구에서는 폭발로 인한 영향범위를 산정하는 기법을 연구하고자 하였다.

폭발을 특성별로 분류하고 폭발형태별 특성을 다루었으며, 폭발이 발생하였을 때 피해를 주는 인자인 과압, 폭풍파, 비산물의 특징 및 계산방법 및 절차를 제시하였다. 또한 폭발이 사람, 장치나 구조물에 미치는 영향 산출에 대한 방법을 제시하고 폭발영향범위산정방법에 대하여 연구하였다.

## 제 2 장 폭발의 정의와 분류

폭발은 고압가스용기의 급작스런 파열이나 가연성물질의 연소와 같은 급격한 화학반응 등에서 나타나는 물리적 현상을 말하는 것으로서 기체의 급격한 팽창으로 인하여 압력파나 충격파를 생성한다. 이때 폭발로 인한 충격파와 비산물 등이 사람이나 구조물에 손상을 입힐 수 있는 위험성을 지니고 있다. 폭발은 일반적으로 화재보다 위험성이 더 크지만, 화재는 도미노 현상을 일으킬 수 있는 잠재성이 있으므로 이를 고려하여야 한다.

폭발의 분류는 폭발이 일어나는 내부현상에 따라 물리적 폭발(physical explosion)과 화학적폭발(chemical explosion)로 분류하고, 반응속도에 따라 폭연(deflagration)과 폭굉(detonation)으로, 물질의 상태에 따라 가스, 분진, 미스트, 고체, 증기폭발로 분류하기도 한다.

### 1. 내부현상에 따른 분류

#### 가. 물리적 폭발

물리적 폭발은 압축가스가 담기 용기가 파열되어 에너지가 방출되고 이로 인하여 충격파가 생기고 파편들이 날리는 물리적 현상으로부터 생긴다. 용기의 파열은 부식, 침식, 화학반응 등에 의한 용기 두께의 감소에 의해서, 또는 안전장치 등의 결함에 의해서, 또는 과열이나 균열이 발생할 결함을 가진 물질이나 부식성 균열과 같은 특수한 화학작용 등에 의한 용기 강도의 감소 등으로 인하여 일어날 수 있다.

용기내의 상태에 따라 충격파를 생성하는 에너지가 달라진다. 용기에 가스만 들

어있는 경우에는 가스의 팽창이 충격파를 생성하는 에너지가 되고, 액체가 들어있는 경우에는 액체의 온도가 끓는점보다 낮으면 가스의 팽창과 액체의 이탈이, 액체의 온도가 끓는점보다 높으면 가스와 액체의 플래시 증발이 혼합되어 팽창하는 것이 충격파를 생성하는 에너지가 된다.

물리적 폭발의 특수한 경우인 BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)는 과열액체나 액화가스를 함유한 압력용기의 파열로 일어난다. 일반적인 원인은 용기주변의 화재에 의한 것이다. 용기 외부에 열이나 화염이 가해지면 액체의 온도가 상승하면서 증발이 일어나 용기내부의 압력이 급격히 증가하게 된다. 이때 증기만 존재하는 부분에 열이 가해진다면 이 부분의 온도가 급격히 증가하여 구조적 강도를 잃게 되고 통상 200배 이상의 부피팽창으로 인한 압력을 견디지 못하여 폭발이 일어나게 된다. BLEVE는 통상 순간적으로 구형화염(fireball)이 이루어지면서 폭발이 발생하므로 구형화염의 크기를 추정하는 것이 중요하다. 잘 알려진 형태의 BLEVE로 LPG용기 폭발을 들 수 있다.

#### 나. 화학적 폭발

화학적 폭발은 급격한 화학반응으로 인한 폭발로서 반응형태는 균일반응(uniform reaction)과 전파반응(propagating reaction)으로 분류할 수 있다.

균일반응은 반응에 참여하는 물질의 양이 비교적 균일한 반응으로서 가스상을 생성하는 일반적인 화학반응이다. 초기에는 균일한 화학반응이 밀폐된 조건하에서 설비가 반응열을 제거하는데 부적절하면 열폭발이 일어나는 시점을 가속시킬 수 있다. 밀폐용기의 강도와 반응에 따라 가속공정이 일어나는 동안 용기가 파열하여 내용물이 배출되거나, 용기내에서 전파반응이 개시되기에 충분한 반응을 오랫동안 유지한다.

전파반응은 대부분 반응물질내의 특정한 지점에서 화학반응이 시작되는 것이고

미반응물질을 향해 전파된다. 정상상태에서 전파반응이 계속되기 위해 에너지가 반응영역에서 미반응물질로 도달해야 한다. 전파반응은 반응영역에서 미반응물질로 전달되는 에너지의 전달메카니즘에 따라 폭연과 폭굉으로 분류할 수 있다.

## 2. 반응속도에 의한 분류

폭발은 반응속도에 따라 폭연과 폭굉으로 구분할 수 있다.

폭연은 가연성 혼합기체가 상대적으로 서서히 연소되는 것을 의미한다. 폭연은 열과 물질전달같은 일반적인 전달과정을 통하여 반응영역에서 미반응 물질로 에너지가 전달되는 전파반응이다.

폭굉은 반응영역에서 미반응 물질로 전달된 에너지가 반응충격파를 형성하는 전파반응이다. 폭발범위내의 어떤 농도상태에서 반응속도가 급격히 증대하여 음속을 초과하게 되면 폭굉이라 한다. 이 과정에서 음속의 4~8배(1,000m/sec~2,700m/sec) 정도의 고속충격파가 형성된다. 폭굉은 가연성 증기와 공기가 혼합하는 경우에 넓은 공간에서는 발생하기 힘들지만 길이가 긴 배관 등에서 발생하기 쉽다.

폭연과 폭굉의 전파방향에 따른 압력분포를 [그림 2-1]에 나타내었다.

## 3. 물질의 상태에 의한 분류

### 가. 가스폭발

가스폭발은 화학공장에서 일반적으로 일어나는 폭발형태로서 폭발재해의 대부분을 차지한다. 가스폭발은 메탄, 수소, 아세틸렌, 프로판 등의 가연성가스나 가솔린, 알코올 등의 인화성액체 증기가 공기중의 산소와 산화반응을 일으켜 발생한다. 즉, 폭발은 공기와의 혼합상태인 기상부분 용적이 크고 밀폐공간상태에 있을때 착화원

#### 다. 미스트폭발

가연성 액체가 공기중에 누출되어 가스-공기상태로 부유혼합물이 되어 폭발성 혼합물을 생성할때, 이 혼합물에 점화원이 있으면 액적이 증기화하여 공기와 균일하게 혼합되어 발화하여 폭발하는 것이 미스트폭발이다.

미스트폭발은 비점·인화점이 높은 기계유, 윤활유 등에서 자주 발생되고 있다. 고압공기 배관내의 박막상에 고비점 유류가 부착되면 여기에 격렬한 폭발이 전파되고 기름이 미립자 상태에서 유막폭굉(film detonation)으로 발전되어 배관이 크게 파손되는 큰 재해를 발생시킬 수도 있다.

#### 라. 고체폭발

산업용화약, 무기용화약, 유기과산화물, 유기발포제 등 자체내에 산소를 갖고 있는 물질이 공기중에 존재할 때 분자내에서 급속한 산화반응이 발생하여 폭굉을 일으키는 경우가 고체폭발이다.

이때 기체상태 혼합물보다 세밀한 조성을 가지고 있어 물질의 단위체적당 발열량이 비교적 크고 발열속도가 빠르기 때문에 폭발의 위력도 대단히 큰 경우가 많다. 또한 단독물질로 있지 않고 산화제, 환원제가 접촉·혼합되어 있는 경우에도 동일한 폭발반응이 일어날 수 있다.

#### 마. 증기폭발

증기폭발은 액체의 급속한 기화현상으로 인한 체적팽창에 의하여 고압이 생성되어 폭굉을 일으키는 현상이다. 이것은 화학반응에 의한 것이 아닌 물리적 현상에 의한 것이다. 이 급속한 액체의 기화에는 고압포화액의 급속한 기화와 액체의 가열 등이 있다.

### **(1) 고압포화액의 급속기화**

보일러와 같이 고압의 포화수를 저장하고 있는 용기에 파손 등의 원인으로 동체의 일부분이 열리면 용기내압이 급속히 하락하게 되고 이때 일부의 액체가 급격히 기화하게 되는데 액체가 큰 힘으로 비산하여 기화함으로써 증기압이 급상승하고 또한 액체가 용기벽에 충돌하면서 발생하는 힘에 의하여 용기가 파괴되면서 액체가 분출되는 동시에 내부압력이 급격히 떨어지게 된다.

### **(2) 액체의 급속가열**

물 또는 물을 함유한 액체에 고온용융금속, 용융염 등이 대량으로 유입되는 경우에 밀폐된 상태에서 물의 급격한 증발과 밀폐로 인한 고압이 발생하여 폭발현상이 발생하는 경우이다.

### **(3) 극저온 액화가스의 수면유출**

LPG는 메탄, 에탄, 프로판 등의 탄화수소가스와 혼합된 저온액화가스인데 이것이 상온의 물에 유출시 급격히 기화되면서 증기폭발이 발생할 수 있다.

LPG는 물에 용해되어 파열액의 상태에서 급속하게 기화한다. 이 경우에 액화가스와 물의 온도차가 크면 증기폭발의 발생이 쉬우며, 또한 LPG도 메탄만으로는 폭발이 일어나기 어렵지만 에탄, 프로판이 소량 혼합되어 있으면 폭발이 일어나기 쉽다.

## 제 3 장 폭발의 특성과 영향

### 1. 폭풍파의 특성

#### 가. 과압(overpressure)

충격파가 대기압보다 높은 압력영역에서 생기는 순압(게이지압)으로 정압 또는 측면(side-on)압 이라고도 한다. 충격파에 의한 결과는 목표물 위에 나타나는 압력이다.

#### 나. 음압(underpressure)

충격파가 대기압보다 낮은 영역에서 생기는 순압(진공압)을 말한다.

#### 다. 피크과압(peak overpressure)

충격파가 대기압보다 높은 압력영역중 최대값을 나타내는 게이지압이다.

#### 라. 동압(dynamic pressure)

팽창하는 가스가 고체대상물에 부딪칠때 자신이 갖고있는 운동에너지에 의하여 생성되는 압력을 말한다. 동압은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$P_d = \frac{1}{2} \frac{\rho u^2}{g_c} \dots\dots\dots (3-1)$$

$$\rho = \left[ \frac{2\gamma P_a + (\gamma + 1)P_s}{2\gamma P_a + (\gamma - 1)P_s} \right] \rho_a \dots\dots\dots (3-2)$$

여기서,  $P_d$  = 동압,  $\text{lb}_f/\text{ft}^2$

$P_s$  = 충격면 뒷면의 피크과압,  $\text{lb}_f/\text{ft}^2$

$P_a$  = 충격파 전방의 대기압력,  $\text{lb}_f/\text{ft}^2$

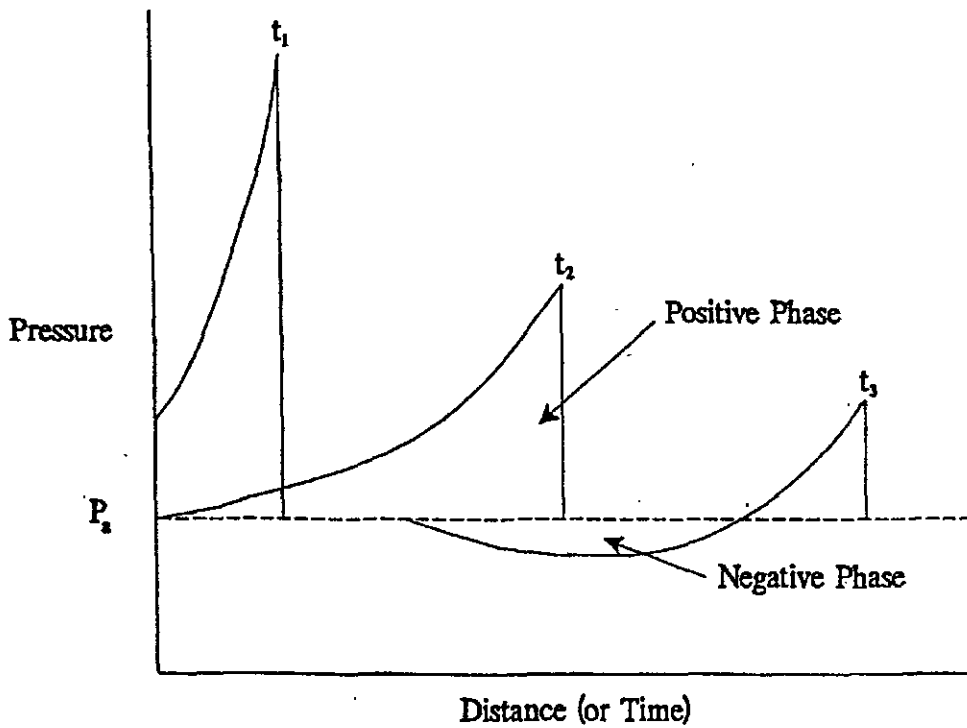
$\rho$  = 충격파 뒷면의 공기밀도,  $\text{lb}_m/\text{ft}^3$

$\rho_a$  = 충격파 전방의 대기밀도,  $\text{lb}_m/\text{ft}^3$

$u$  = 충격면 뒤의 피크풍속(particle velocity),  $\text{ft}/\text{sec}$

$\gamma$  = 공기의 비열비  $\approx 1.4$

$g_c$  = 중력환산계수,  $32.2 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}/\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2$



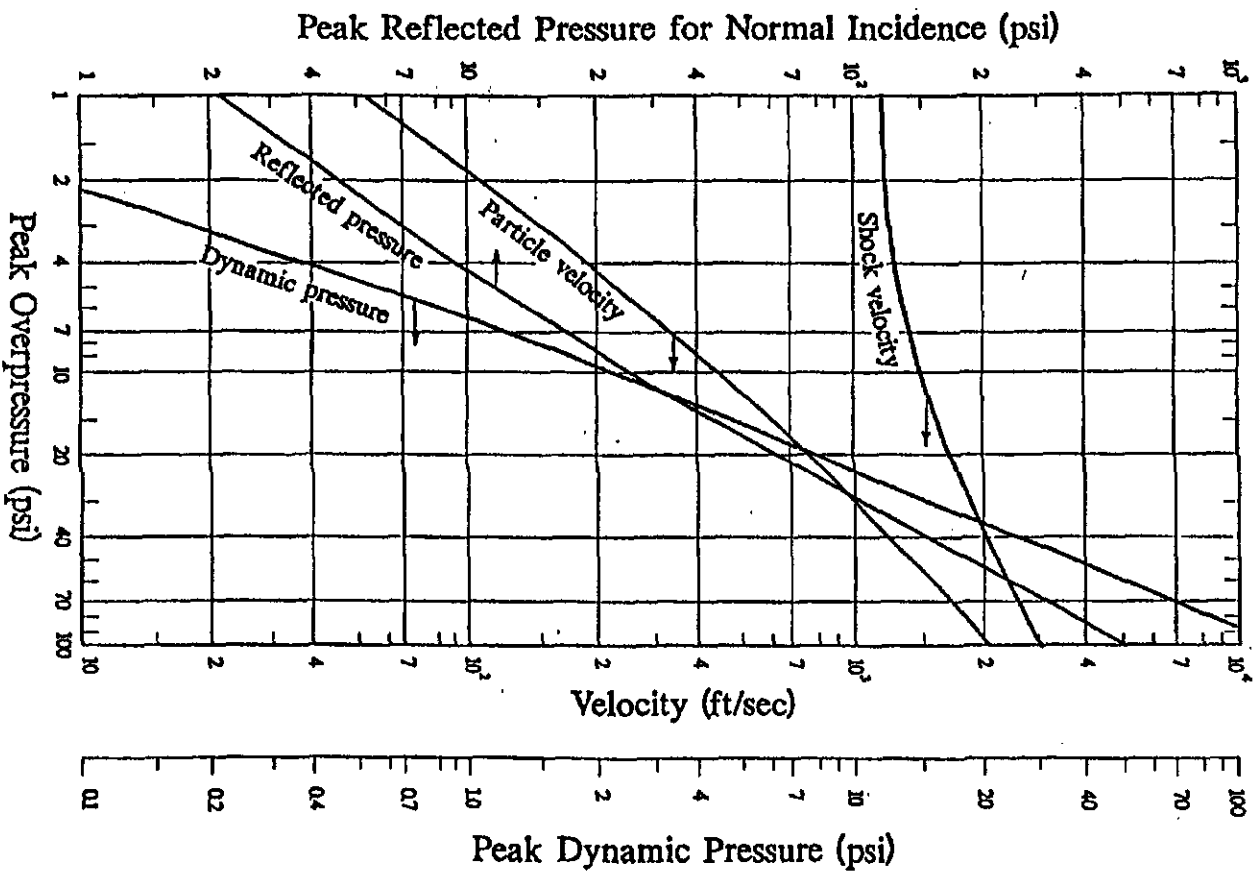
[그림 3-1] 충격파의 강도대 거리 관계

마. 반사압(reflected pressure)

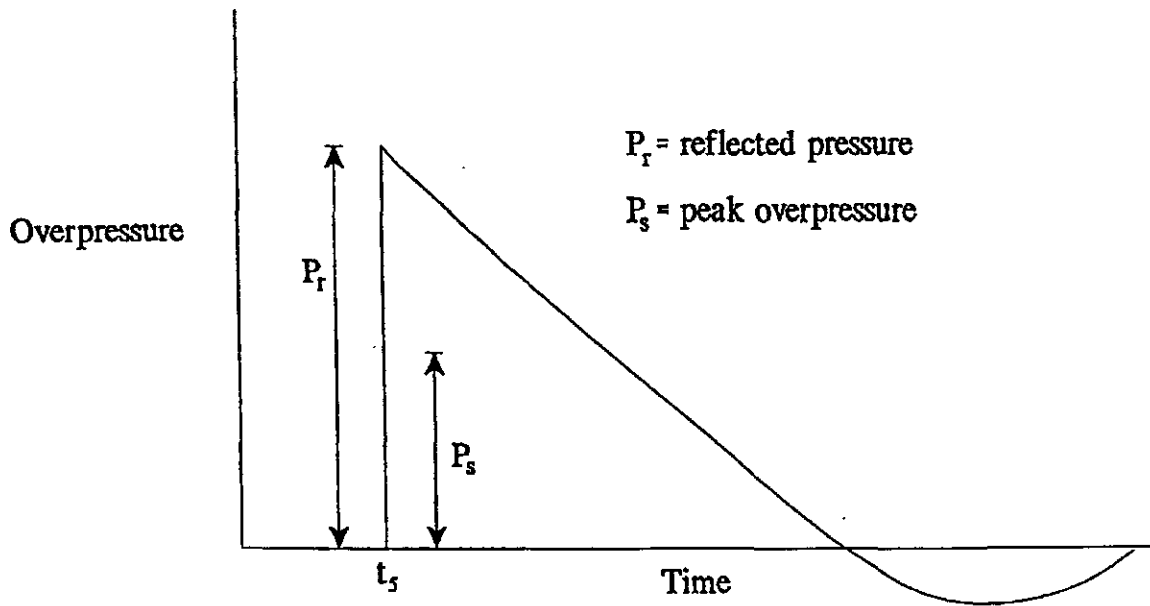
실제적으로 물체에 영향을 미치는 압력을 나타낸다. 폭풍파가 평형표면 전면위

를 직각방향으로 때렸을 때, 반사압  $P_r$ 은 다음과 같다.

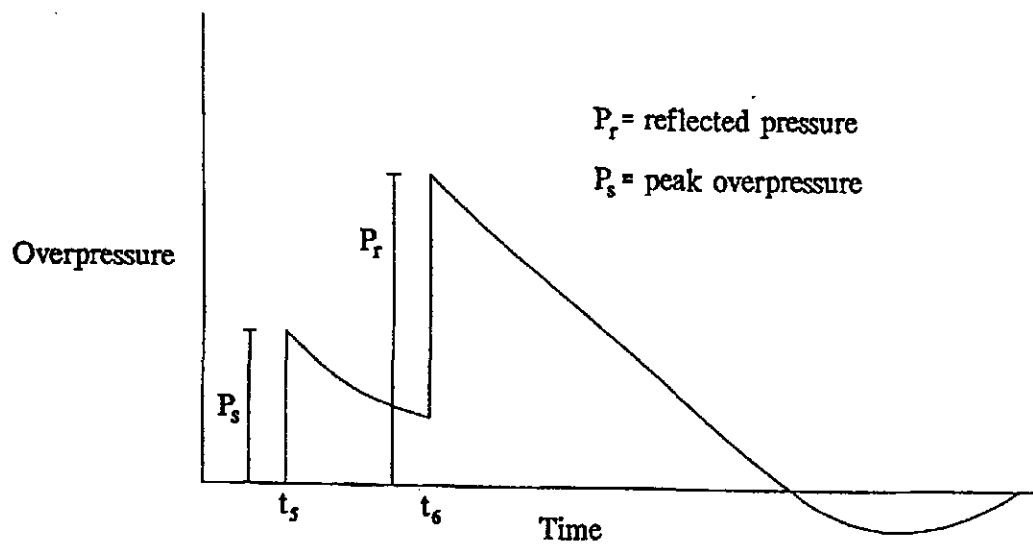
$$P_r = 2P_s + (\gamma + 1)P_d \quad \dots\dots\dots (3-3)$$



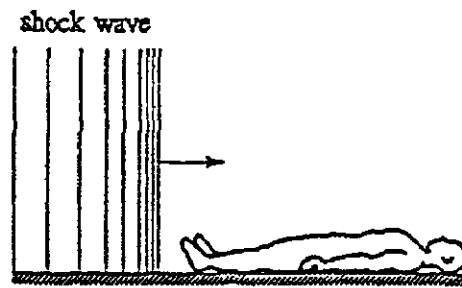
[그림 3-2] 폭풍파의 특성압파의 상관관계



[그림 3-3] 규칙적인 반사영역내에 위치한 표면위의 점 A에서의 시간에 따른 과압의 변화

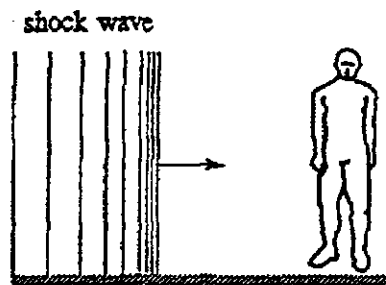


[그림 3-4] 규칙적인 반사영역내에 위치한 표면위의 점 B에서의 시간에 따른 과압의 변화



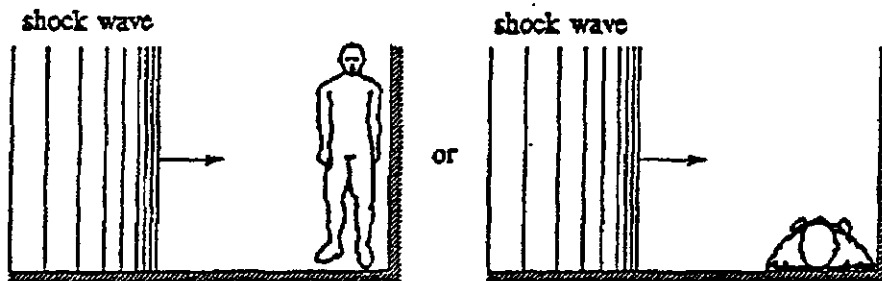
$$P = P_s$$

$$\left[ \begin{array}{c} \text{actual pressure exerted} \\ \text{on the body} \end{array} \right] = \left[ \text{peak overpressure} \right]$$



$$P = P_s + P_d$$

$$\left[ \begin{array}{c} \text{actual pressure exerted} \\ \text{on the body} \end{array} \right] = \left[ \text{peak overpressure} + \right. \\ \left. \text{dynamic pressure} \right]$$



$$P = P_r$$

$$\left[ \begin{array}{c} \text{actual pressure exerted} \\ \text{on the body} \end{array} \right] = \left[ \text{reflected pressure} \right]$$

[그림 3-5] 각 방향에 따른 신체에 미치는 실제 압력

바. 양압부의 사고충격량(positive incident impulse)

양압부에서 충격파가 지속되는 동안에 누적되는 과압의 적분을 말하며, 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$I_s = \int_{t_0}^{t_p} P(t) dt \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

여기서,  $I_s$  = 양압부의 사고충격량, psia · msec

$P(t)$  = 주어진 위치에서 시간의 함수로서의 과압, psia

$t_0$  = 주어진 위치까지 충격파가 도달하는시간, msec

$t_p$  = 양압부에서 충격파가 끝나는 시간, msec

## 2. 피해인자

### 가. 과압에 의한 피해

분진이나 가스의 폭발은 충격파나 압력파에 의해서 반응면이 점화원에서 미반응 물질로 이동하게 된다. 가연성물질의 반응이 끝난후에도 압력파는 그 운동을 계속한다. 폭풍파는 압력파와 계속되는 바람으로 구성되어 있는데, 폭발로 인한 피해의 대부분은 폭풍파에 의하여 일어난다.

폭풍에 의한 피해를 정확히 추정하려면 피크과압을 적절히 이용하여 얻을 수 있다. TNT와 같은 폭발성물질을 가지고 폭풍파의 특성을 실험한 것은 잘 알려져 있다. 폭풍파의 특성은 일반적으로 환산거리  $Z$ 의 함수로 표시한다. 즉, 과압은 TNT의 상당질량과 폭발중심에서 고려하는 지점까지의 거리를 이용하여 추산할 수 있다.

실험적으로 유도된 환산법칙(scaling law)은 다음 식과 같다.

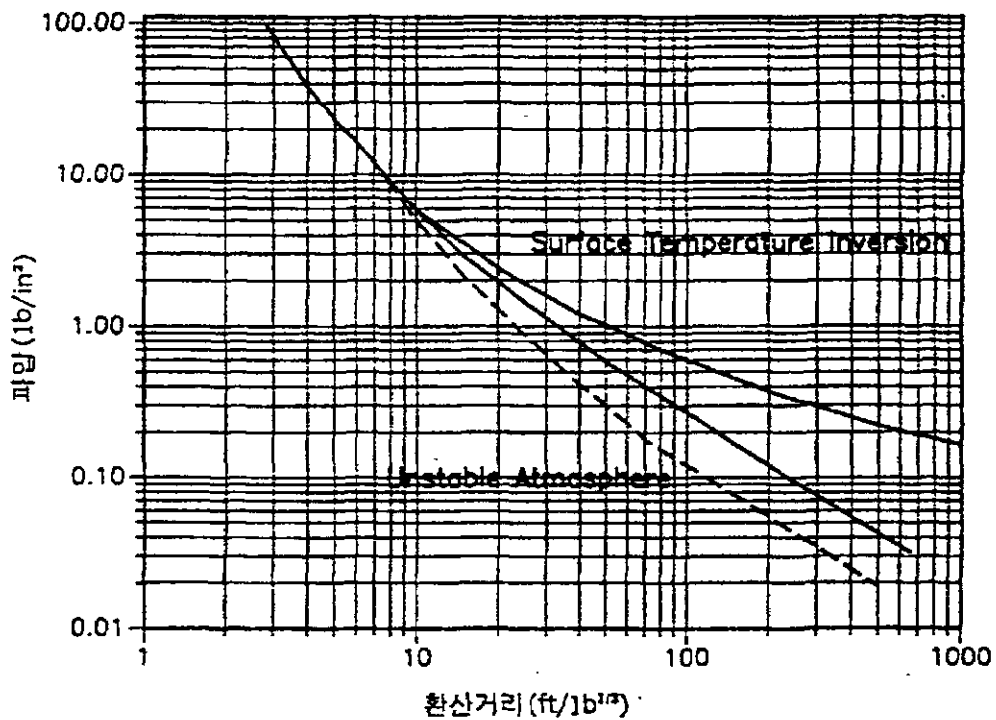
$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \dots\dots\dots (3-5)$$

여기서,  $Z$  = 환산거리,  $m/kg^{1/3}$

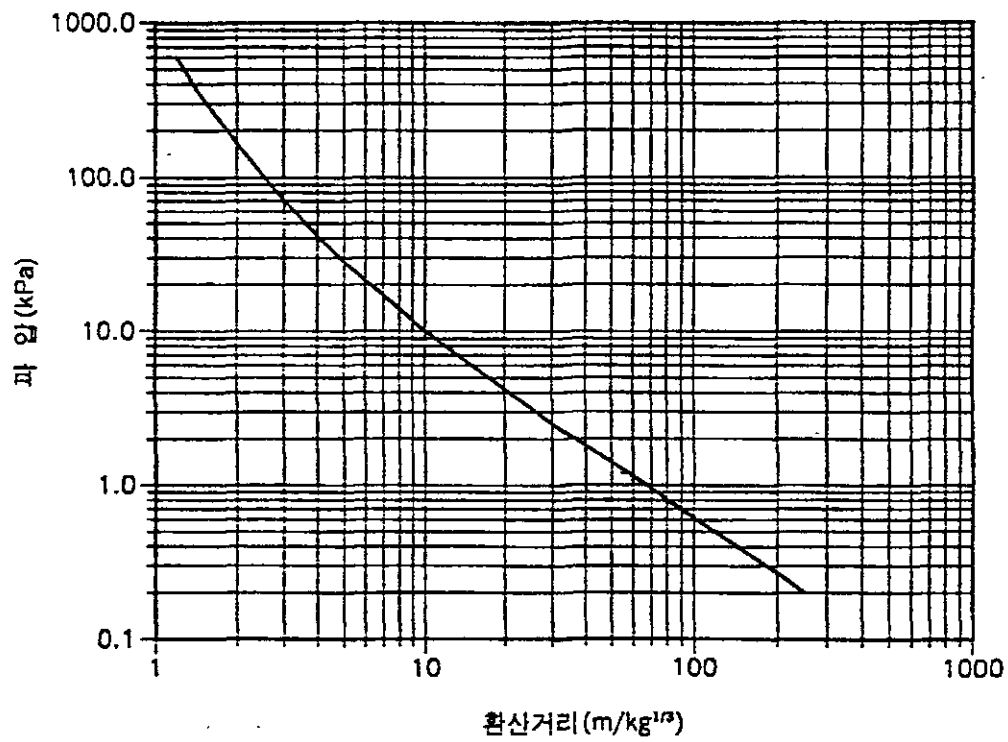
$R$  = 폭발중심으로부터의 반경,  $m$

$W$  = TNT 상당질량,  $kg$

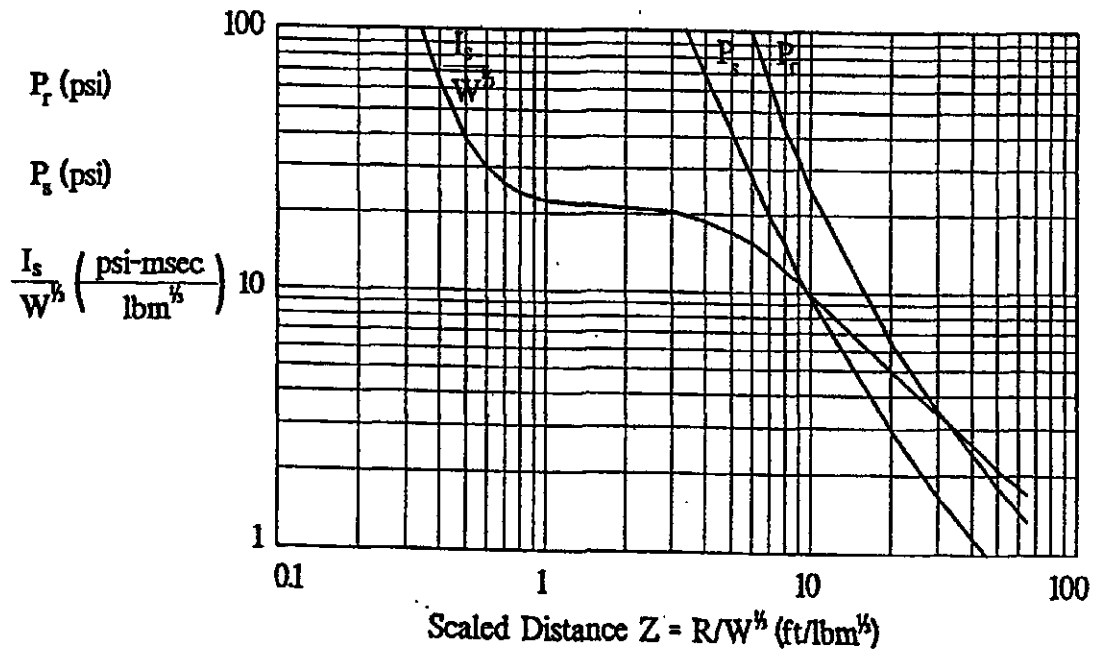
[그림 3-6]과 [그림 3-7]을 이용하여 환산거리,  $Z$ 에 따른 과압을 결정할 수 있다.



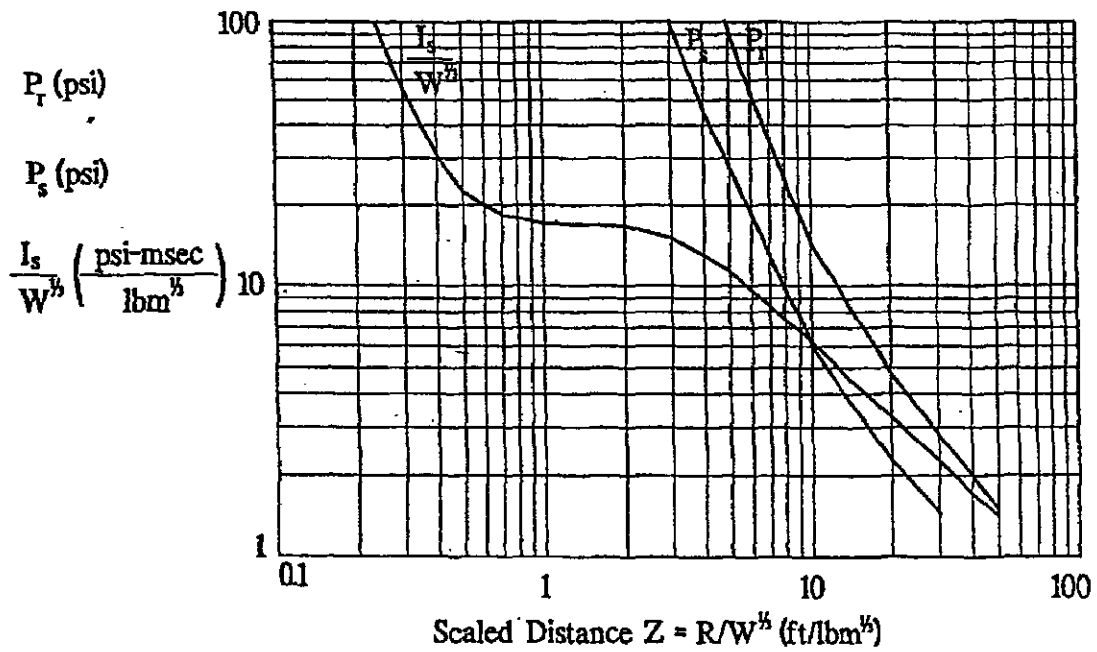
[그림 3-6] 환산거리와 과압과의 관계(영국공학단위계)



[그림 3-7] 환산거리와 과압과의 관계(SI 단위계)



[그림 3-8] 해면에서 반구형의 TNT표면폭발의 경우 충격파의 매개변수



[그림 3-9] 해면에서 자유공기중 구형 TNT폭발의 경우 충격파의 매개변수

폭풍에 의해 예측되는 손상은 <표 3-1>에 나타내었다. 표에 나타난 것처럼 작은 과압으로도 심각한 손상을 받을 수 있다.

<표 3-1> 과압으로 인한 손상

| 파 압(psi) | 손 상                   |
|----------|-----------------------|
| 0.03     | 창유리 일부 파손             |
| 0.04     | 큰소음                   |
| 0.15     | 유리파열압력                |
| 0.3      | 심각한 손상이 발생할 확률 95%    |
| 0.5~1    | 크고 작은 창 부서짐           |
| 0.7      | 가옥 조금 파괴              |
| 1.0      | 가옥 부분 파괴              |
| 1.3      | 클래드빌딩 강철프레임 휨         |
| 2~3      | 비강화 콘크리트 벽 부서짐        |
| 2.3      | 심각한 구조적 손상의 하한계       |
| 3        | 강철 프레임 빌딩 휨           |
| 3~4      | 유류저장탱크 파열             |
| 5        | 목재유틸리티 poles snapped  |
| 5~7      | 가옥전부 파괴               |
| 7        | 짐 실은 화물차 전복           |
| 9        | 짐 실은 화물차 전부 파괴        |
| 10       | 빌딩의 전부 파괴             |
| 300      | Crater Lip 한계(분화구 생성) |

#### 나. 비산물에 의한 피해

비산물은 압력용기 폭발, BLEVE 등이 발생하였을 때 생성될 수 있으며 충격파나 압력에 의하여 폭발한 지점의 근처에 있는 물체가 파열하여 생길 수도 있다.

밀폐된 용기나 구조물 안에서 일어나는 폭발은 용기나 구조물을 파괴시키면 넓

은 지역에 작은 파편들을 비산시킨다. 이러한 파편이나 비산물은 사람에게 큰 상해를 입히고 구조물이나 공정장치에 손상을 입힌다. 개방계 폭발에서도 폭발파의 충격과 구조물에서의 변형에 의해 비산물이 발생할 수 있다.

플랜트의 한 부분에서 국지적인 폭발이 일어나도 비산물이 발생하면 플랜트 전체에 파편이 퍼지게 되고, 이 파편이 저장탱크, 공정장치, 파이프라인 등에 충돌하게 되면 2차적인 화재나 폭발을 일으킬 수 있다.

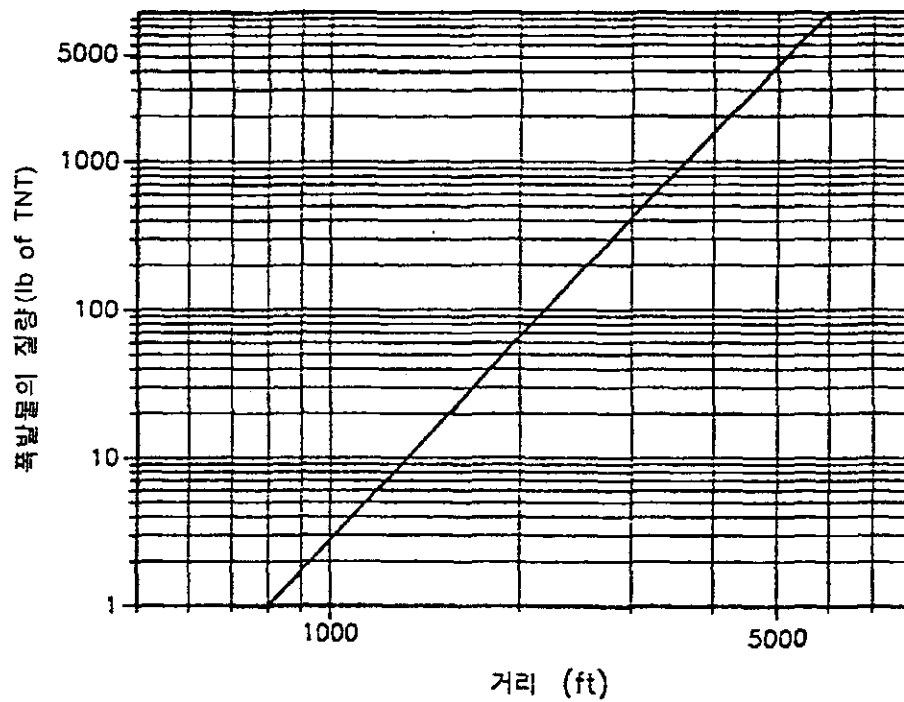
폭발에 따른 비산물에 의한 손상은 범위가 매우 넓어서 물체가 폭발지점에서 3~4km까지 날아간 예도 있다. 압력용기가 파열된 경우에는 생성된 총에너지의 약 20%가 용기를 파열시키는데 사용되고, 나머지는 파편이 생기게 하는 운동에너지로 쓰여진다. 비산물 발생에 의하여 생길 수 있는 위험을 추정하기 위하여 비산물의 수, 비산물의 초기속도, 비산물이 날아간 거리를 분석한다.

Clancy는 폭발물의 질량과 파편이 날아가는 최대 수직거리와의 관계를 도출하였는데 이를 [그림 3-10]에 나타내었다. 이 관계식은 제해조사시 파편이 발견된 거리까지 발사되는데 필요한 에너지를 계산하는데 유용하다. 이 관계를 SI단위계로 나타내면 다음과 같다.

$$L = 294 W^{0.236} \dots\dots\dots (3-6)$$

여기서, L = 폭발에 의한 비산물의 최대거리, m

W = TNT 상당질량, kg



[그림 3-10] 파편의 수평 최대비산거리

한편, Moor(1967)는 비산물의 초기속도  $V_m$ (ft/sec)을 추정하기 위하여 다음식을 제시하였다.

$$V_m = 2.05 \left[ \frac{P_v D_f^3}{W_f} \right]^{0.5} \dots\dots\dots (3-7)$$

여기서,  $P_v$  = 용기의 파열압력, psig

$D_f$  = 비산물의 직경, in

$W_f$  = 비산물의 무게, lb<sub>f</sub>

Baker(1983)는 작고 단단한 형태의 비산물이 날아갈 수 있는 최대거리를 추정할 수 있는 곡선을 [그림 3-11]과 같이 제시하였다. 여기서 x축과 y축의 식에 사용된 기호는 다음과 같다.

$\rho_a$  = 공기의 밀도,  $lb_m/ft^3$

$C_D$  = 마찰계수(drag coefficient),

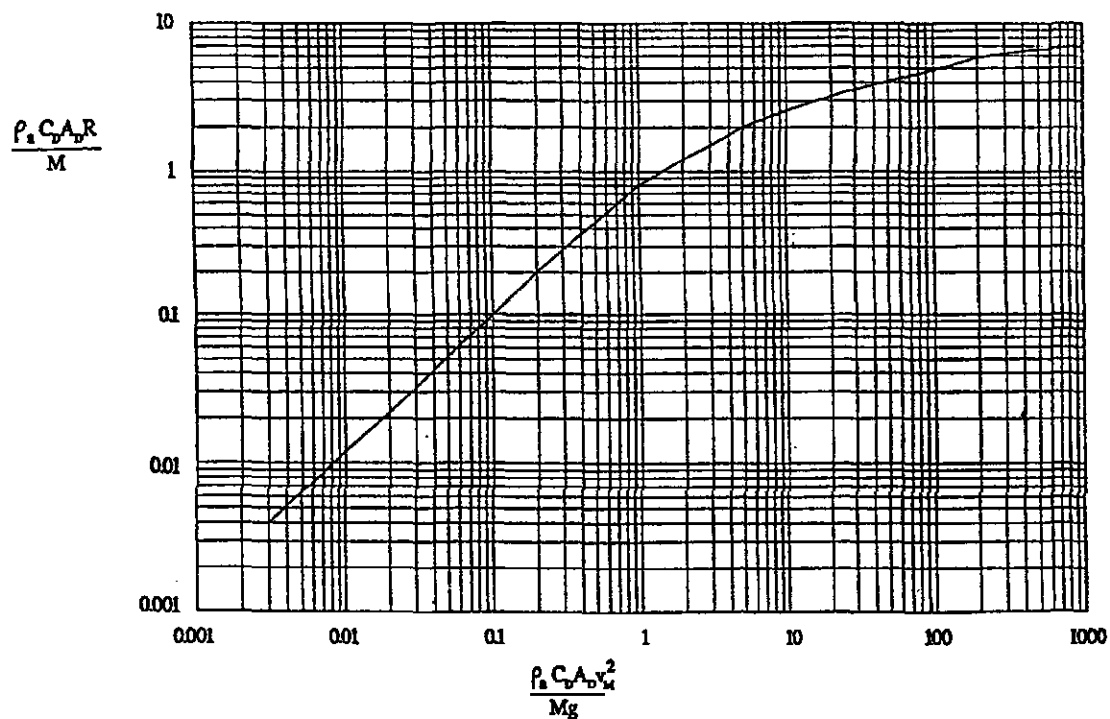
$A_D$  = 비산물의 노출지역,  $ft^2$

$R$  = 비산물 분포의 최대범위,  $ft$

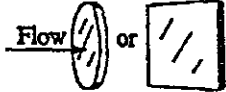
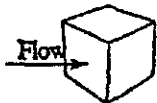
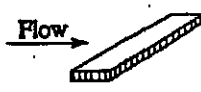
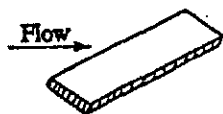
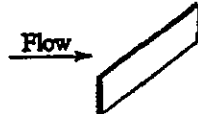
$M$  = 비산물의 질량,  $lb_m$

$V_m$  = 비산물의 속도,  $ft/sec$

$g$  = 중력가속도,  $ft/sec^2$



[그림 3-11] 비산물의 환산범위 대 환산힘

| SHAPE                                          | SKETCH                                                                              | $C_D$ |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Right circular cylinder<br>(long rod), side-on |    | 1.20  |
| Sphere                                         |    | 0.47  |
| Rod, end-on                                    |    | 0.82  |
| Disk, face-on                                  |    | 1.17  |
| Cube, face-on                                  |   | 1.05  |
| Cube, edge-on                                  |  | 0.80  |
| Long rectangular member, face-on               |  | 2.05  |
| Long rectangular member, edge-on               |  | 1.55  |
| Narrow strip, face-on                          |  | 1.98  |

[그림 3-12] 여러 모양별 마찰계수( $C_D$ )

## 제 4 장 폭발 모델별 특성

### 1. 물리적 폭발

#### 가. 모델식

전형적인 폭발모델링은 상해나 피해의 영향을 평가하기 위해 사람이나 구조물에 대해 영향을 미치는 폭발 과압을 평가하는 것이다. 용기폭발의 분석은 용기의 가속도에 대한 정량평가가 필요하다. 용기의 압력이 느리게 증가하는 경우는 물리적 폭발모델이 적용되고, 빠르게 증가하는 경우는 화학적 반응모델을 사용한다.

물리적 폭발모델링은 Baker 등이 가스가 가득찬 용기의 파열에 관계되는 과압을 산출하는 방법을 연구하였는데, 이상기체로 취급하고 등온팽창한다는 가정하에서 산출할 수 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$W = 1.4 \times 10^{-6} V \left( \frac{P_1}{P_0} \right) \left( \frac{T_2}{T_1} \right) R T_1 \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \dots\dots\dots (4-1)$$

여기서,  $W$  = TNT의 상당질량, lb<sub>m</sub>

$V$  = 압축된 가스의 부피, ft<sup>3</sup>

$P_1$  = 압축된 가스의 초기압력, psia

$P_2$  = 팽창된 가스의 최종압력, psia

$P_0$  = 표준상태의 압력, 14.7 psia

$T_1$  = 압축된 가스의 온도, 492 °R

$T_0$  = 표준상태의 온도, °R

$R = \text{기체상수, Btu/lbmole } ^\circ R$

$1.4 \times 10^{-6} = \text{환산인자(TNT 1 lb}_m=2,000\text{Btu)}$

#### 나. 물리적 폭발모델의 가정과 제한사항

- ① 가스가 이상기체로 거동한다.
- ② 가스의 팽창이 등온이다.
- ③ 가압속도가 용기벽의 완화시간에 비교하여 느릴 때만 적용한다.
- ④ 폭발원은 한 점으로 나타낼 수 있다.
- ⑤ 거리에 따른 과압의 감쇄경향이 TNT의 폭발물과 비슷하다.
- ⑥ 과압이 보존성이 있다고 추정한다.
- ⑦ 지형, 건축물이나 장애물의 영향을 고려하지 않았다.

#### 다. 화학반응 모델

용기의 빠른 가압으로 인한 화학반응의 경우, TNT상당량은 용기에서 일어나는 화학반응의 반응열을 이용하여 추정한다. 반응물이 생성물로 전환되고, 최대압력은 배출이 되기전에 일어난다.

화학적 폭발에너지를 계산하기 위해서는 반응물과 생성물에 대한 Helmholtz 자유에너지 등의 열역학적 특성치를 이용하여 추산할 수 있으며, TNT 상당량으로 환산하여 구할 수 있다. TNT 상당량을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\text{TNT 상당량(lb}_m) = \frac{\Delta H_c \times W_c}{2,000(\text{Btu/lb}_m) \text{ TNT}} \dots\dots\dots (4-2)$$

여기서,  $\Delta H_c = \text{폭발성 물질의 연소열(발열량), Btu/lb}_m$

$W_c = \text{폭발에 참여한 물질의 양, lb}_m$

## 2. BLEVE

BLEVE 모델을 이용하여 사람이나 구조물에 대한 폭발과압을 추정하는 방법은 세가지가 있다. 첫번째는 과열액체의 플래싱은 무시하고 증기공간에서의 가스 팽창이 과압이 생성되는 주요 원인이라고 가정하고 물리적 폭발의 경우처럼 등온팽창모델을 사용하는 방법이다.

두번째는 과열액체의 플래시 영향이 크다고 가정하고 등온팽창모델을 이용하는 방법으로서 다음 식과 같다.

$$W = 5 \times 10^{-4} n_v R T_1 \ln \frac{P_1}{P_2} \dots\dots\dots (4-3)$$

여기서,  $W$  = TNT의 상당질량, lb<sub>m</sub>

$n_v$  = 플래시되는 증기의 몰수, lbmole

$R$  = 기체상수, Btu/lbmole °R

$T_1$  = 과열액체의 초기 온도, °R

$P_1$  = 과열액체의 초기압력, psia

$P_2$  = 팽창된 증기의 최종압력, psia

$5 \times 10^{-4}$  = 환산인자(TNT 1 lb<sub>m</sub>=2,000Btu)

세번째 방법은 단일팽창으로 가정하고 TNT 상당질량으로 추정한다. TNT 상당질량 계산은 다음과 같이 한다.

$$W = \frac{-\Delta U}{H_{c_{TNT}}} \dots\dots\dots (4-4)$$

$$\Delta U = m_{l,f}u_{l,f} + m_{v,f}u_{v,f} - m_{l,i}u_{l,i} - m_{v,i}u_{v,i}$$

$$m_{l,f} = (1-f)m_{l,i}$$

$$m_{v,f} = fm_{l,i} + m_{v,i}$$

여기서, W = TNT의 상당질량, lb<sub>m</sub>

$\Delta U$  = 용기 내용물의 내부에너지의 변화, Btu

$H_{c_{TNT}}$  = TNT의 연소열, 2,000 Btu/lb<sub>m</sub>

$m_{l,f}$  = 플래시공정 다음에 존재하는 액체의 질량, lb<sub>m</sub>

$u_{l,f}$  = 플래시공정 다음의 액체의 내부에너지, Btu/lb<sub>m</sub>

$m_{v,f}$  = 플래시공정 다음에 존재하는 증기의 질량, lb<sub>m</sub>

$u_{v,f}$  = 플래시공정 다음의 증기의 내부에너지, Btu/lb<sub>m</sub>

$m_{l,i}$  = 플래시공정 이전에 존재하는 액체의 질량, lb<sub>m</sub>

$u_{l,i}$  = 플래시공정 이전의 액체의 내부에너지, Btu/lb<sub>m</sub>

$m_{v,i}$  = 플래시공정 이전에 존재하는 증기의 질량, lb<sub>m</sub>

$u_{v,i}$  = 플래시공정 이전의 액체의 내부에너지, Btu/lb<sub>m</sub>

f = 증기로 플래시되는 액체의 분율, -

### 3. 증기운 폭발 모델

#### 가. TNT 등가 모델(TNT Equivalency Model)

##### (1) 모델식

TNT 등가 모델은 상대연소열에 근거한 가연성 물질의 양에 상응하는 TNT의

양으로 나타낸다. TNT 상당질량을 구하는 방법은 Decker(1974), Baker 등(1983), Lees(1980) 등 여러 연구자 들이 다루었으며 <식 4-5>와 같다. 이 식에서 구한 TNT 상당질량을 이용하여 폭풍파 곡선으로부터 과압을 추정하여 사람이나 구조 물에 대한 영향을 추정한다.

$$W = \frac{\eta M H_c}{H_{c_{TNT}}} \dots\dots\dots ( 4-5 )$$

여기서,  $W$  = TNT 상당질량, kg

$\eta$  = 경험적 폭발효율, 0.01~0.2, -

$M$  = 누출된 가연성 물질의 질량, kg

$H_c$  = 가연성 물질의 순연소열, kJ/kg

$H_{c_{TNT}}$  = TNT의 연소열, 4680 kJ/kg

## (2) 모델의 가정과 제한사항

- ① 폭발원은 점으로 나타낼 수 있다.
- ② 거리에 따른 과압의 감쇄경향은 TNT와 비슷하다고 가정한다.
- ③ 폭발원 가까운 위치에서 과압이 높게 예측된다.
- ④ 증기운의 흐름방향(drift)을 고려하지 않았다.
- ⑤ 지형, 건물, 장애물 등의 영향을 고려하지 않았다.

## (3) TNT 등가 모델의 계산절차

- ① 가연성 증기의 질량을 계산한다.
- ② 가연성 물질에 대한 순연소열,  $H_c$ 를 결정한다.
- ③ 폭발효율인자,  $\eta$ 의 적절한 값을 결정한다.

④ TNT 상당질량을 계산한다.

⑤ 대상물의 거리에서 과압이나 충격량을 추정하기 위하여 적절한 충격파 곡선을 사용한다.

#### (4) 가연성 증기의 질량 추정

증기운에서 가연성 증기의 질량은 누출속도, 가스운의 대기분산, 점화시간의 함수이다. 누출된지 몇분 이내에 점화되는 증기운의 빠른 점화인 경우는 가연성 질량을 점화이전에 누출된 증기의 전체량으로 간주할 수 있다.

누출이 시작되어 수분 이상이 경과한 후에 증기운이 점화되는 경우에는 분산모델을 이용하여 산출할 수 있다. 가연성 증기의 UFL과 LFL에 일치하는 증기운 범위로부터 가연성 증기의 질량을 구하는 방법이 있고, 분산모델을 이용하여 LFL까지의 바람 방향 거리를 결정하여 수평기류시간 동안 누출된 양을 기준으로 구하는 방법이 있다. 이 두 경우는 분산 모델을 이용하여야 하며 이때 폭발효율인자,  $\eta$ 는 1로 가정하여 산출한다.

#### 나. TNO 상관관계 모델

##### (1) 모델 개요

TNO 상관관계 모델은 실제적인 증기운 폭발에 근거를 두고 있다. 이 모델은 여러 형태의 손상에 대한 거리로 주어지며 그 식은 다음과 같다.

$$R(S) = C(S)[\eta E]^{1/3} \dots\dots\dots (4-6)$$

여기서,  $R(S)$  = 손상(S)의 특정한 형태에 따른 반경, m

$C(S)$  = 손상(S)의 특정한 형태에 따른 경험적 상수,  $m/J^{1/3}$

$\eta$  = 경험적 폭발효율(지수),  $\sim 0.1$ , -

$E$  = 증기운의 가연성 부분에 관련된 전체 에너지, J

<표 4-1> 폭발성 증기와 가스의 효율인자

| Substances with Yield Factors of $\eta = 0.03$ |                      |
|------------------------------------------------|----------------------|
| Acetaldehyde                                   | 3-Methyl-Buene-1     |
| Acetone                                        | Methyl-Butyl-Ketone  |
| Acrylonitrile                                  | Methyl Chloride      |
| Amyl Alcohol                                   | Methyl-Ethyl-Ketone  |
| Benzene                                        | Methyl Formate       |
| 1,3-Butadiene                                  | Methyl Mercaptan     |
| Butene-1                                       | Methyl-Propyl-Ketone |
| Carbon Monoxide                                | Monochlorobenzene    |
| Cyanogen                                       | n-Amyl Acetate       |
| 1,1-Dichloroethane                             | Naphthalene          |
| 1,2-Dichloroethane                             | n-Butane             |
| Dimethyl Ether                                 | n-Butyl Acetate      |
| Dimethyl Sulphide                              | n-Decane             |
| Ethane                                         | n-Heptane            |
| Ethanol                                        | n-Hexane             |
| Ethyl Acetate                                  | n-Pentane            |
| Ethylamine                                     | n-Propanol           |
| Ethyl Benzene                                  | n-Propyl Acetate     |
| Ethyl Chloride                                 | o-Dichlorobenzene    |
| Ethyl Cyclohexane                              | p-Cymene             |
| Ethyl Formate                                  | Petroleum Ether      |
| Ethyl Propionate                               | Phthalic Anhydride   |
| Furfural Alcohol                               | Propane              |
| Hydrocyanic Acid                               | Propionaldehyde      |
| Hydrogen                                       | Propylene            |
| Hydrogen Sulphide                              | Propylene Dichloride |
| iso-Butyl Alcohol                              | p-Xylene             |
| Isobutylene                                    | Styrene              |
| iso-Octane                                     | Tetrafluoroethylene  |
| iso-Propyl Alcohol                             | Toluene              |
| Methalamine                                    | Vinyl Acetate        |
| Methane                                        | Vinyl Chloride       |
| Methanol                                       | Vinylidene Chloride  |
| Methyl Acetate                                 | Water Gas            |

| Substances with Yield Factors of $\eta = 0.19$ |                    |
|------------------------------------------------|--------------------|
| Acetylene                                      | Isopropyl Nitrate  |
| Ethylene Oxide                                 | Methyl Acetylene   |
| Ethyl Nitrate                                  | Nitomethane        |
| Hydrazine                                      | Vinyl Acetylene    |
| Substances with Yield Factors of $\eta = 0.06$ |                    |
| Acrolein                                       | Ethylene           |
| Carbon Disulphide                              | Ethyl Nitrate      |
| Cyclohexane                                    | Methyl-Vinyl-Ether |
| di-Ethyl Ether                                 | Propylene Oxide    |
| di-Vinyl Ether                                 |                    |

손상(S)의 형태에 따른 경험적 상수값을 <표 4-2>에 나타내었다.

<표 4-2> 손상의 형태에 따른 경험적 상수값

| $\dot{C}(S)$ 의 값, $m/J^{1/3}$ | 손상의 형태                     |
|-------------------------------|----------------------------|
| 0.03                          | 건물이나 공정장치의 심각한 손상          |
| 0.06                          | 거주지의 정면손상과 건물의 수리할 수 없는 손상 |
| 0.15                          | 상처를 줄 수 있는 유리파손            |
| 0.40                          | 유리파손(판의 10% 정도)            |

## (2) TNO 상관관계 모델의 가정과 제한사항

- ① 폭발 전체 에너지의 값(E)이  $5 \times 10^9 \leq E \leq 5 \times 10^{12}$  J인 경우에 적용한다.
- ② 중간(medium) 정도의 폭발위력을 갖는 가연성 물질에 적용한다.
- ③ 증기운 폭발에 대한 보존성 있는 결과를 제공한다.
- ④ 증기운의 흐름방향을 고려하지 않았다.
- ⑤ 지형, 건물, 장애물의 영향을 고려하지 않았다.

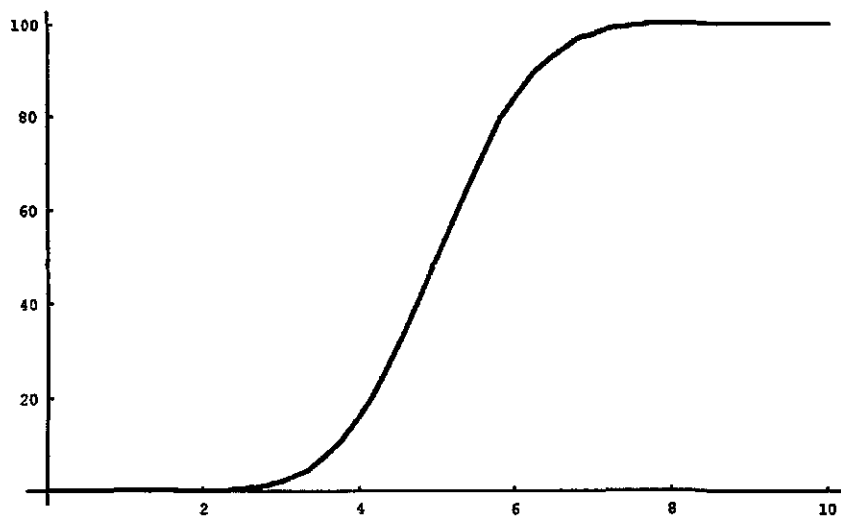
## 제 5 장 폭발의 영향

### 1. Probit 분석법

사람은 과압이나 열복사(thermal radiation)를 포함한 직접적인 폭풍영향 및 폭발물에 의해 상해를 입을 수 있다. 이와 같은 피해의 정도를 Probit(Probability Unit) 분석을 이용하여 추정할 수 있다. 확률, P와 변화량, Y와의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad \dots\dots\dots (5-1)$$

이 식은 확률변수와 확률과의 관계를 나타낸것으로서 도표와 표로 나타내면 [그림 5-1] 및 <표 5-1>과 같다.



[그림 5-1] 확률단위와 백분율과의 관계

< 표 5-1 > 백분율로부터 확률단위로의 환산

| %  | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0  | -    | 2.67 | 2.95 | 3.12 | 3.25 | 3.36 | 3.45 | 3.52 | 3.59 | 3.66 |
| 10 | 3.72 | 3.77 | 3.82 | 3.87 | 3.92 | 3.96 | 4.01 | 4.05 | 4.08 | 4.12 |
| 20 | 4.16 | 4.19 | 4.23 | 4.26 | 4.29 | 4.33 | 4.36 | 4.39 | 4.42 | 4.45 |
| 30 | 4.48 | 4.50 | 4.53 | 4.56 | 4.59 | 4.61 | 4.64 | 4.67 | 4.69 | 4.72 |
| 40 | 4.75 | 4.77 | 4.80 | 4.82 | 4.85 | 4.87 | 4.90 | 4.92 | 4.95 | 4.97 |
| 50 | 5.00 | 5.03 | 5.05 | 5.08 | 5.10 | 5.13 | 5.15 | 5.18 | 5.20 | 5.23 |
| 60 | 5.25 | 5.28 | 5.31 | 5.33 | 5.36 | 5.39 | 5.41 | 5.44 | 5.47 | 5.50 |
| 70 | 5.52 | 5.55 | 5.58 | 5.61 | 5.64 | 5.67 | 5.71 | 5.74 | 5.77 | 5.81 |
| 80 | 5.84 | 5.88 | 5.92 | 5.95 | 5.99 | 6.04 | 6.08 | 6.13 | 6.18 | 6.23 |
| 90 | 6.28 | 6.34 | 6.41 | 6.48 | 6.55 | 6.64 | 6.75 | 6.88 | 7.05 | 7.33 |
| %  | 0.0  | 0.1  | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  |
| 99 | 7.33 | 7.37 | 7.41 | 7.46 | 7.51 | 7.58 | 7.65 | 7.65 | 7.88 | 8.09 |

\*D.

J.Finney, Probit Analysis, 1971, p. 25 Reprinted by Permission of Cambridge University Press.

## 2. 사람의 상해 정도

건물내의 사람은 비산물 등에 의해 직접적인 폭풍영향을 받고 폭발과압의 영향을 받기 쉽다. 또한 건물 구조물의 붕괴로 인한 간접적인 폭풍영향을 받기 쉽다. Lees(1980)는 직접적인 것과 간접적인 폭풍영향에 의한 상해정도를 <표 5-2>와 같이 나타내었다.

<표 5-2 > 폭발과압의 영향

| 과 압*, psi  | 영 향                                        |
|------------|--------------------------------------------|
| 1          | 사람이 넘어짐                                    |
| 1 ~ 8      | 유리파편이나 다른 비산물로 인한 피부의 찰과상의 경미하거나 심각한 부상 범위 |
| 2.4 ~ 12.2 | 노출된 사람의 1~90% 고막파열 범위                      |
| 15.5 ~ 29  | 과압으로 인해 노출된 사람의 1~99% 사망율의 범위              |

\* 폭풍과 충격파에 의한 대기압 이상의 피크과압이다.

#### 가. 직접적인 폭풍 영향

Eisenberg(1975) 등은 핵폭발 자료에 근거하여 직접적인 폭풍영향으로 인한 사람의 상해정도에 대한 Probit 모델을 다음과 같이 제시하였다.

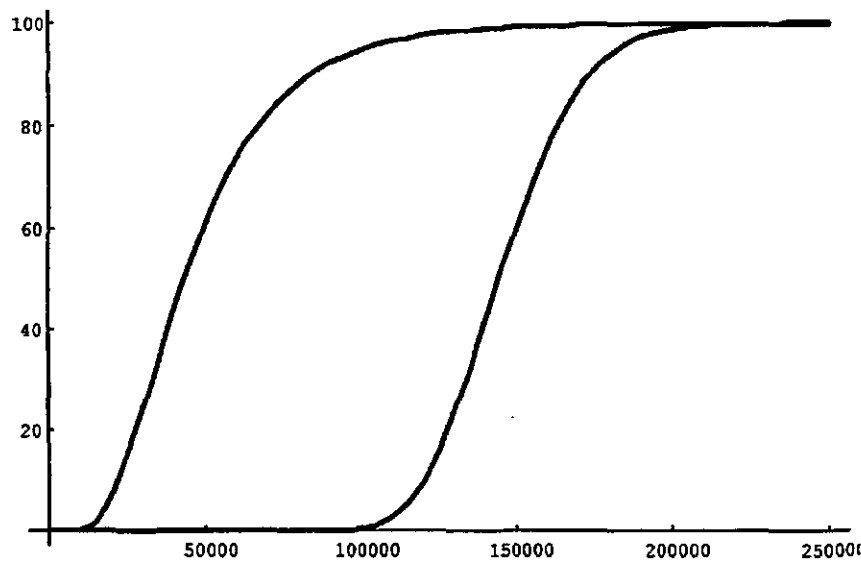
##### ① 폐출혈로 인한 사망의 경우

$$\text{Probit} = -77.1 + 6.91 \ln P_s \quad \dots\dots\dots (5-2)$$

##### ② 고막파열의 경우

$$\text{Probit} = -15.6 + 1.93 \ln P_s \quad \dots\dots\dots (5-3)$$

여기서  $P_s$  = 피크과압(N/m<sup>2</sup>)이다.



[그림 5-2] 폭발영향에 의한 사람의 상해 정도(Eisenberg)

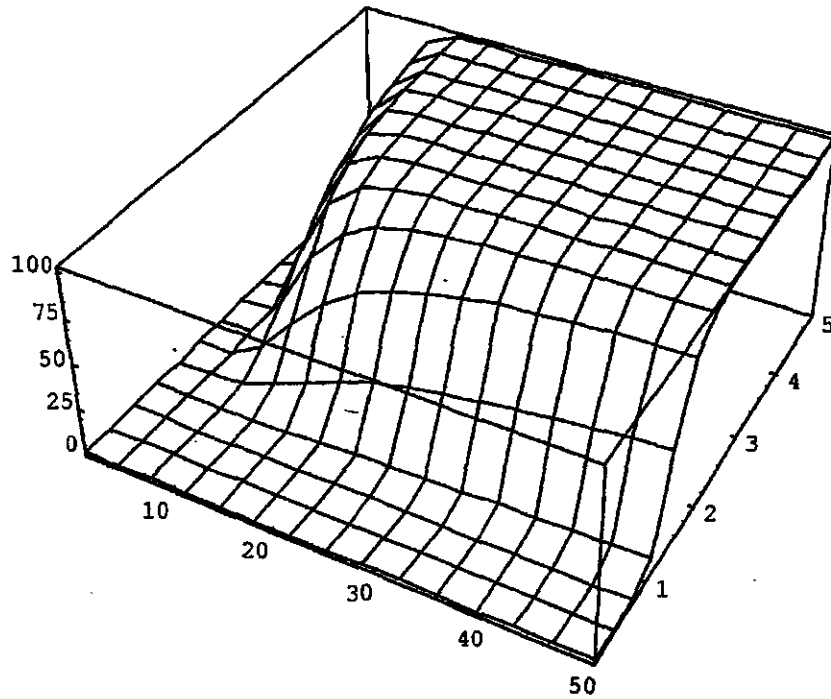
폭발의 영향으로 인한 고막파열은  $100000 \text{ N/m}^2$  에서 100%이고, 폐출혈로 인하여 사망할 확률은 100000 에서 시작하여  $200000 \text{ N/m}^2$  이상에서 100%가 된다.

TNO(1992)는 직접적인 폭풍영향에 의해 사람의 상해정도를 나타내는 Probit 모델을 다음과 같이 인체에 미치는 실제 압력과 사고 충격량을 기준으로 나타내었다.

① 폐손상으로 인한 사망의 경우

$$\text{Probit} = 5.0 - 5.74 \ln \left( \frac{4.2}{\bar{P}} + \frac{1.3}{\bar{I}} \right) \dots\dots\dots (5-4)$$

폭발에 따른 폐손상은  $\bar{I}$ 의 값에 크게 의존한다.  $\bar{I}$ 가 3이상일 경우에는  $\bar{P}$ 가 10 근처일때 사망확률이 급격히 상승하여 10이상이면 사망확률이 100%가 된다.



[그림 5-3] 폭발영향에 의한 폐손상 사망 정도(TNO)

$\bar{I}$ 가 1과 3사이인 경우에는 사망확률이  $\bar{P}$ 값에 의존하고,  $\bar{I}$ 가 1이하이면 거의 상해를 받지 않는다.

② 고막파열의 경우

$$\text{Probit} = -12.6 + 1.524 \ln P_s \quad \dots\dots\dots (5-5)$$

여기서,  $\bar{P} = \frac{P}{P_a}$

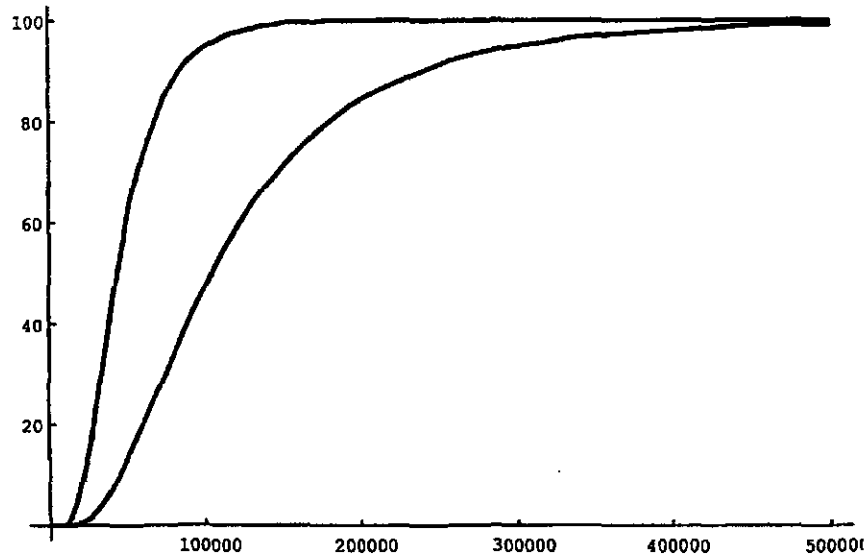
$$\bar{I} = \frac{I_s}{P_a^{1/2} m_b^{1/3}}$$

$P$  = 인체에 미치는 실제압력(사람의 위치에 의존),  $\text{N/m}^2$

$P_a$  = 대기압,  $1.013 \times 10^5$ ,  $N/m^2$

$I_s$  = 양압부의 사고 충격량,  $N \cdot sec/m^2$

$m_b$  = 인체의 질량, kg



[그림 5-4] 폭발영향에 의한 고막파열에 대한 Eisenberg 와  
TNO 모델 비교

폭발의 영향으로 인한 고막 파열의 경우 같은 과압에서 Eisenberg의 Probit 식으로 구한 상해 백분율이 더 크다. Eisenberg가 제시한 식의 경우 과압이  $100000 N/m^2$  이상이 되면 100% 손상을 받으며, TNO가 제시한 식의 경우엔  $100000 N/m^2$  에서는 약 50%가 손상을 받고,  $400000 N/m^2$  이상이 되어야 100% 손상을 받는 것으로 나타났다.

## 나. 간접적인 폭풍영향

Eisenberg(1975) 등은 핵폭발 자료에 근거하여 간접적인 폭풍영향으로 인한 사람의 피해의 경우 다음의 Probit 모델을 제시하였다.

### ① 충격으로 인한 사망의 경우

$$\text{Probit} = -46.1 + 4.82 \ln I_s \quad \dots\dots\dots (5-6)$$

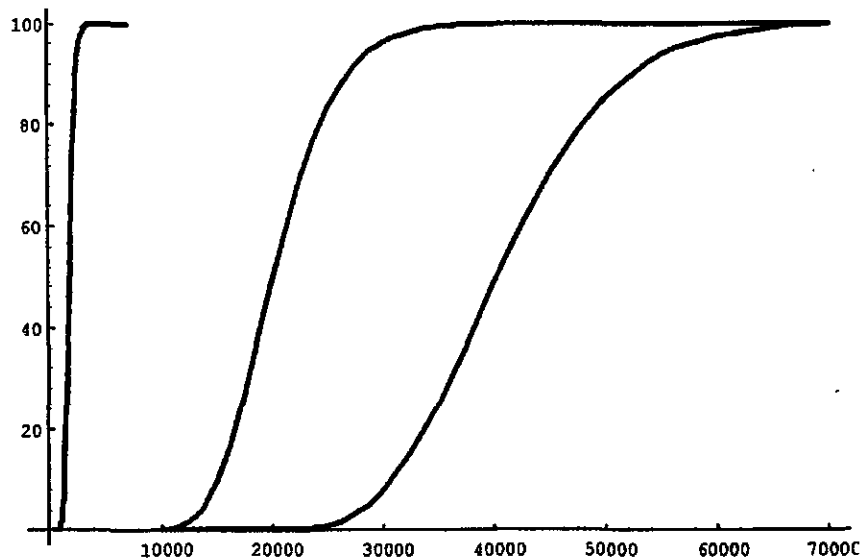
### ② 충격으로 인한 부상의 경우

$$\text{Probit} = -39.1 + 4.45 \ln I_s \quad \dots\dots\dots (5-7)$$

### ③ 작은 파편의 비산으로 인한 부상의 경우

$$\text{Probit} = -27.1 + 4.26 \ln I_s \quad \dots\dots\dots (5-8)$$

여기서  $I_s = \text{Impulse}(\text{N}\cdot\text{sec}/\text{m}^2)$ 이다.



[그림 5-5] 간접 폭풍영향에 의한 사람의 피해정도(Eisenberg)

[그림 5-5]에서 과압의 변화에 대한 사람의 피해정도를 보면 작은 파편의 비산으로 인하여 부상당할 확률은  $I_s$ 가 3000 이상이면 100%가 되고, 충격으로 인하여 부상당할 확률은  $I_s$ 값이 10000에서 시작하여 30000이 되면 100%가 된다. 사망의 경우엔  $I_s$ 가 증가함에 따라 서서히 증가하다가 30000이상이 되면 급격히 증가하여 60000이상이 되면 100%가 된다.

TNO(1992)에서는 간접적인 폭풍영향( $P_s < 4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ )에 의해 사람이 사망할 경우 Probit 모델을 과압과 사고 충격량을 기준으로하여 다음과 같이 제시하였다.

#### ① 머리 충격의 경우

$$\text{Probit} = 5.0 - 8.49 \ln \left( \frac{2.43 \times 10^3}{P_s} + \frac{4 \times 10^8}{P_s I_s} \right) \dots\dots\dots (5-9)$$

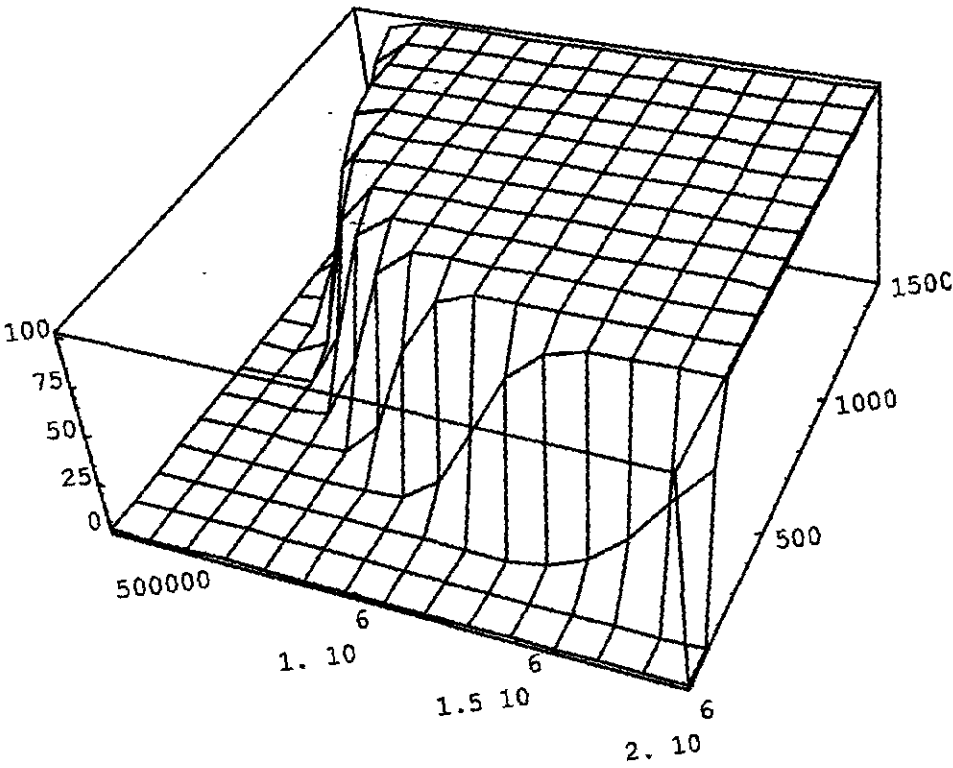
[그림 5-6]은 과압과 충격량의 변화에 따른 사망백분율을 <식 5-9>을 이용하여 나타낸 것이다. 여기서  $I_s$ 가 500이하일 때는  $P_s$ 가 증가할수록 사망백분율이 높아지는 것으로 나타났으며,  $P_s$ 가 500000 정도 일때는  $I_s$  보다는  $P_s$ 값에 의존하나 그 범위는 매우 좁으며 전체적인 사망백분율은  $I_s$ 에 크게 의존한다.

#### ② 몸 전체 충격인 경우

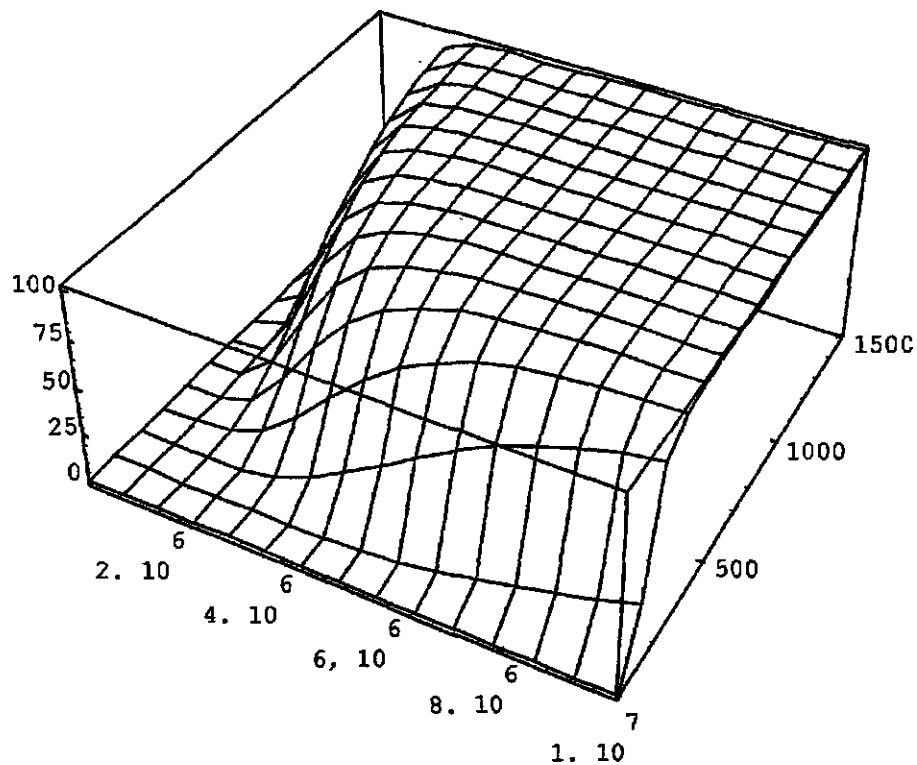
$$\text{Probit} = 5.0 - 2.44 \ln \left( \frac{7.38 \times 10^3}{P_s} + \frac{1.3 \times 10^9}{P_s I_s} \right) \dots\dots\dots (5-10)$$

[그림 5-7]은 간접 폭풍 영향이 몸 전체에 미칠 때의  $I_s$ 와  $P_s$ 의 변화에 따른 사망할 확률을 나타낸 도표이다.  $I_s$ 가 500이하일 때는  $P_s$ 가 증가할수록 사망할 확률이 높아진다.  $P_s$ 가 2000000 근처일때는  $P_s$ 값에 좌우되지만 그 범위는 매우 좁고

전체적으로  $I_0$  값에 크게 좌우된다.



[그림 5-6] 간접적인 폭풍 영향으로 머리 충격의 경우 사망할  
백분율(TNO)

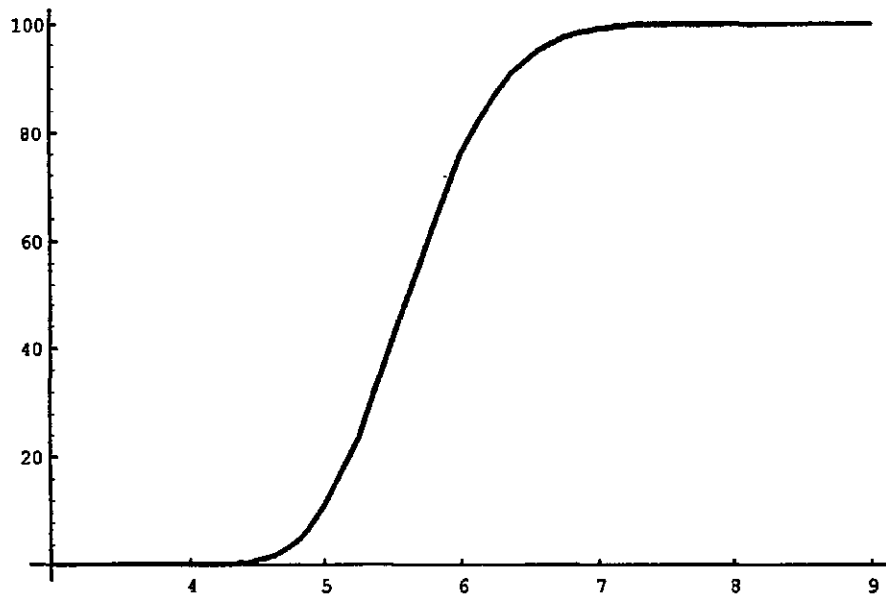


[그림 5-7] 간접적인 폭풍 영향으로 몸전체 충격으로 인한 사망 백분율(TNO)

TNO(1979)는 보통 100J의 운동에너지를 가진 비산물이 사망을 야기시킬 수도 있다고 보고했다. 또한 TNO(1992)에서는 비산하는 파편의 속도( $V_0$ )와 질량(m)으로 인해 사람이 사망할 경우의 Probit 모델을 다음과 같이 제시하였다.

①  $m > 4.5 \text{ kg}$  인 경우

$$\text{Probit} = -13.19 + 10.54 \ln V_0 \dots\dots\dots (5-11)$$

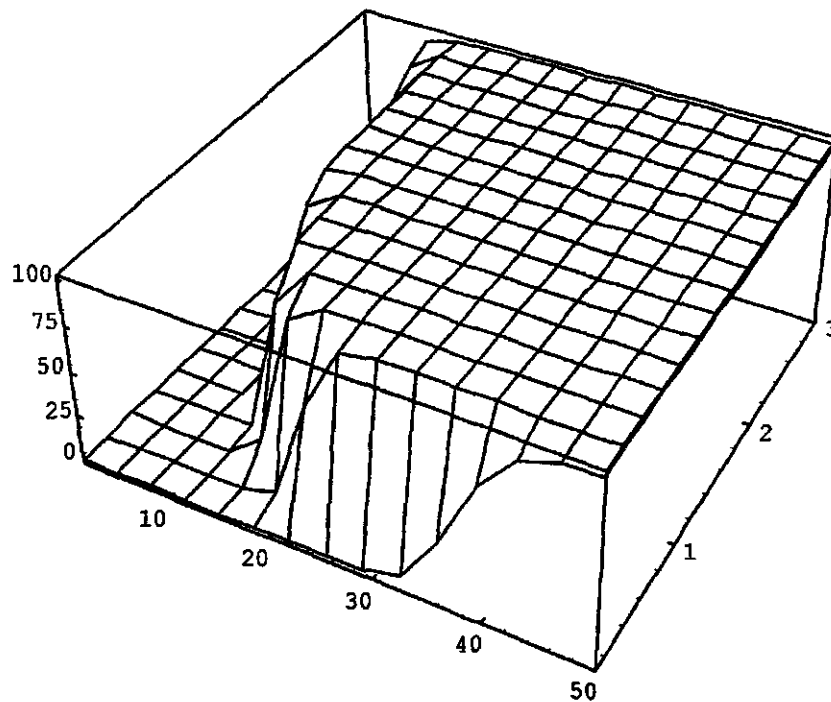


[그림 5-8] 비산물로 인하여 사망할 백분율  
( $m > 4.5\text{kg}$  인경우, TNO)

파편의 속도가 4이상이면 증가하기 시작하여 7이상이면 사망할 확률이 100%가 된다.

②  $0.1 < m \leq 4.5 \text{ kg}$ 인 경우

$$\text{Probit} = -17.56 + 5.3 \ln\left(\frac{1}{2} m V_o^2\right) \dots\dots\dots (5-12)$$

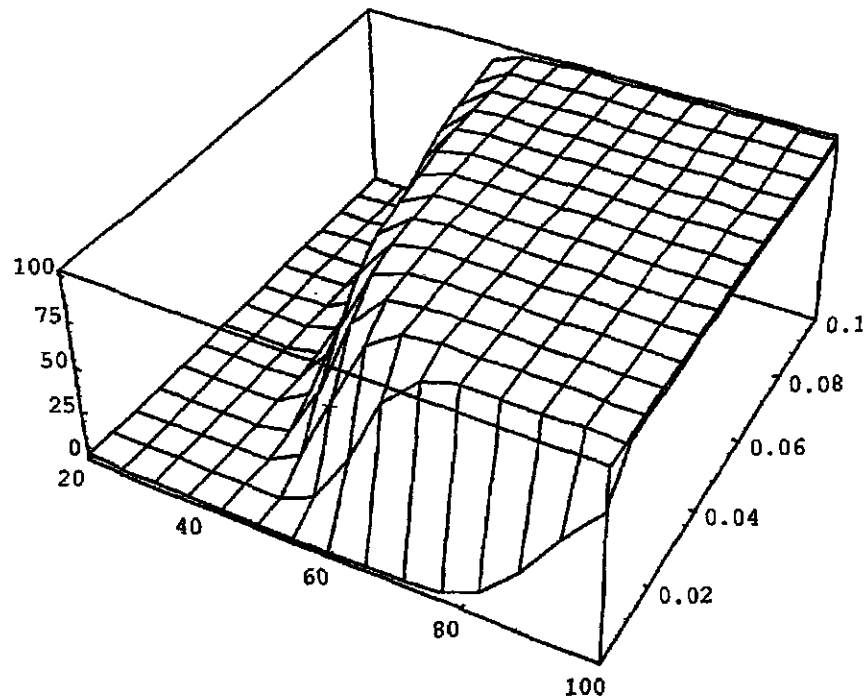


[그림 5-9] 비산물로 인하여사망할백분율  
( $0.1 < m \leq 4.5\text{kg}$ 인경우, TNO)

파편의 속도와 파편의 질량에 따라 확률이 변화하는데 전체적으로 파편의 질량에 크게 좌우된다. 파편의 속도가 10이하일 때는 질량 변화의 영향이 적다.

③  $0.001 \leq m \leq 0.1 \text{ kg}$ 인 경우

$$\text{Probit} = -29.15 + 2.1 \ln(m V_o^{5.115}) \dots\dots\dots (5-13)$$



[그림 5-10] 비산물로 인하여 사망할 백분율  
( $0.001 \leq m \leq 0.1\text{kg}$ 인 경우, TNO)

파편의 속도가 40정도일때는 질량변화의 영향이 적고, 파편의 질량이 0.02 이하이면 파편의 속도가 증가할 수록 사망할 확률이 높아진다. 파편이 질량이 크면 작은 속도에도 사망할 확률이 매우 높다.

### 3. 장치나 구조물의 피해정도

장치나 구조물의 손상은 떨어져 나가는 파편에 대해 작용하는 압력차에 의해서 생성되는 힘에 기인한다. 과압의 지속시간은 구조물에 대한 영향을 결정하는데 중요하다. 만일 폭풍지속기간이 특정 구조물의 응답시간보다 짧다면 장치나 구조물은 더 높은 과압에 견딜 수도 있다.

Clancey(1972)는 폭발영향의 경우 장치나 구조물의 피해정도에 대해 <표 5-2>와 같이 제시하였다.

< 표 5-2 > 폭발과압의 피해정도

| 과압*, psi | 예 측 손 상                                                                                                                  |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0.03     | Occasional breaking of large windows already under stress                                                                |
| 0.04     | Loud noise(143 dB) ; sonic boom glass failure                                                                            |
| 0.1      | Breakage of small windows under strain                                                                                   |
| 0.15     | Typical pressure for glass breakage                                                                                      |
| 0.3      | Some damage to house ceilings ; 10% window glass breakage                                                                |
| 0.4      | Limited minor structural damage                                                                                          |
| 0.5~1    | Windows usually shattered ; some window frame damage                                                                     |
| 0.7      | Minor damage to house structures                                                                                         |
| 1        | Partial demolition of houses, made unihabitable                                                                          |
| 1~2      | Courrugated metal panels / fastenings fail, followed by buckling ; housing wood panels fastenings fail ; panels blown in |
| 1.3      | Steel frame of clad building slightly distorted                                                                          |
| 2        | Partial collapse of walls and roofs of houses                                                                            |
| 2~3      | Non-reinforced concrete or cinder block walls shattered                                                                  |
| 2.3      | Lower limit of serious structural damage                                                                                 |
| 2.5      | 50% destruction of housing brickwork                                                                                     |
| 3        | Steel frame building distorted and pulled away from foundations                                                          |
| 3~4      | Frameless steel panel building demolished ; rupture of oil storage tanks                                                 |
| 4        | cladding of light industrial building ruptured                                                                           |
| 5        | Wooden utility poles snapped                                                                                             |
| 5~7      | Nearly complete destruction of houses                                                                                    |
| 7        | Loaded train wagons overturned                                                                                           |
| 7~8      | 8-12 in. thick non-reinforced brick panels fail by sharing or flexure                                                    |
| 9        | Loaded train boxcars demolished                                                                                          |
| 10       | Probable total building destruction ; haevy machinery tools(7000 lb)moved and badly damaged                              |

These are peak pressures formed in excess of normal atmosperic pressure by blast and shock waves

폭발의 장치나 구조물에 대한 영향에 대하여 여러 연구자들이 Probit 모델에 대해 연구하였다. Eisenberg(1975) 등은 핵폭발의 자료에 근거하여 구조물의 손상에 대한 Probit 모델을 다음과 같이 제시하였다.

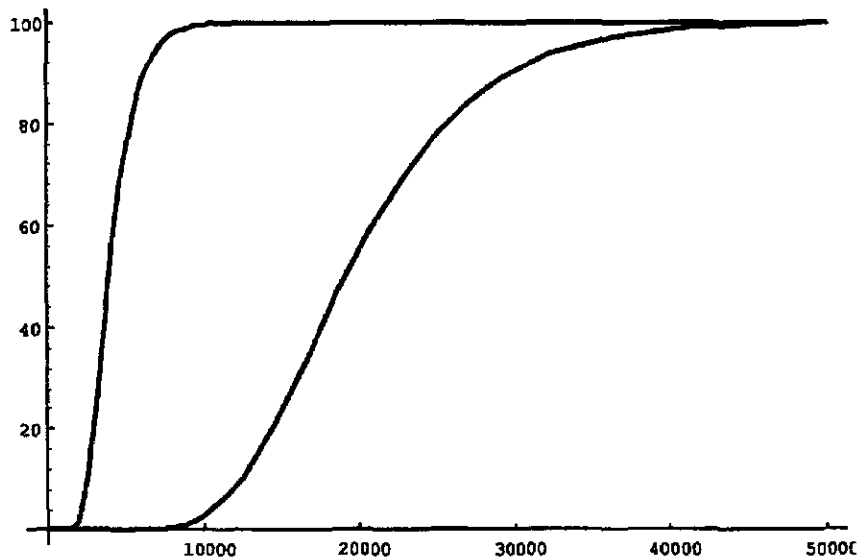
① 구조물 손상의 경우

$$\text{Probit} = -23.8 + 2.92 \ln P_s \quad \dots\dots\dots (5-14)$$

② 유리파손의 경우

$$\text{Probit} = -18.1 + 2.79 \ln P_s \quad \dots\dots\dots (5-15)$$

여기서  $P_s = \text{피크과압(N/m}^2\text{)}$ 이다.



[그림 5-11] 구조물에 미치는 폭발의 영향(Eisenberg)

유리 파손할 확률은  $P_s$ 가 2000일때부터 증가하기 시작하여 9000이상이 되면 100%가 된다. 구조물이 손상될 확률은  $P_s$ 가 10000이 되면 증가하기 시작하여 40000이상이 되면 100%가 된다.

TNO(1992)에서는 높이 4층 이하의 아파트 형태의 건축물에서 구조물의 피해정도에 대한 Probit 모델식을 다음과 같이 제시하였다.

① 약간의 손상인 경우

$$\text{Probit} = 5.0 - 0.26 \ln \left[ \left( \frac{4,600}{P_s} \right)^{3.9} + \left( \frac{110}{I_s} \right)^{5.0} \right] \dots\dots\dots (5-16)$$

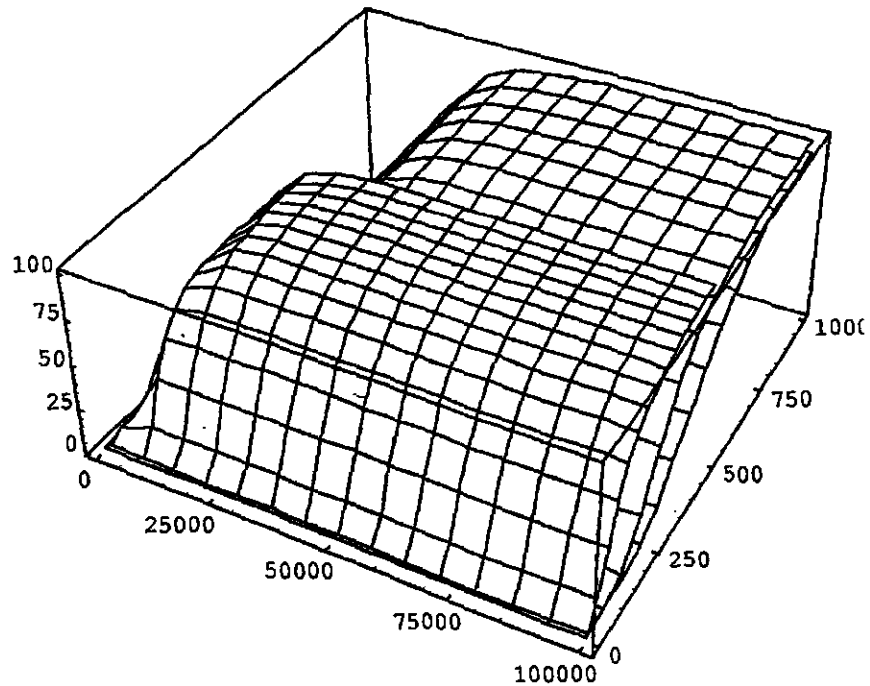
② 중대한 구조물 손상인 경우

$$\text{Probit} = 5.0 - 0.26 \ln \left[ \left( \frac{17,500}{P_s} \right)^{8.4} + \left( \frac{290}{I_s} \right)^{9.3} \right] \dots\dots\dots (5-17)$$

③ 건물붕괴의 경우

$$\text{Probit} = 5.0 - 0.22 \ln \left[ \left( \frac{40,000}{P_s} \right)^{7.4} + \left( \frac{460}{I_s} \right)^{11.3} \right] \dots\dots\dots (5-18)$$

$P_s$ 가 약간의 손상인 경우는 1000정도 일때 중대한 구조물 손상을 20000정도 일때  $I_s$ 보다  $P_s$ 의 증가에 따라 손상 확률이 높아진다. 건물 붕괴의 경우는  $I_s$ 가 400이상이면  $P_s$ 가 20000일때 증가하기 시작하여 100000이상이면 80% 이상이 된다. 전체적으로  $I_s$ 의 크기에 좌우된다.



[그림 5-12] 구조물에 미치는 폭발의 영향(TNO)

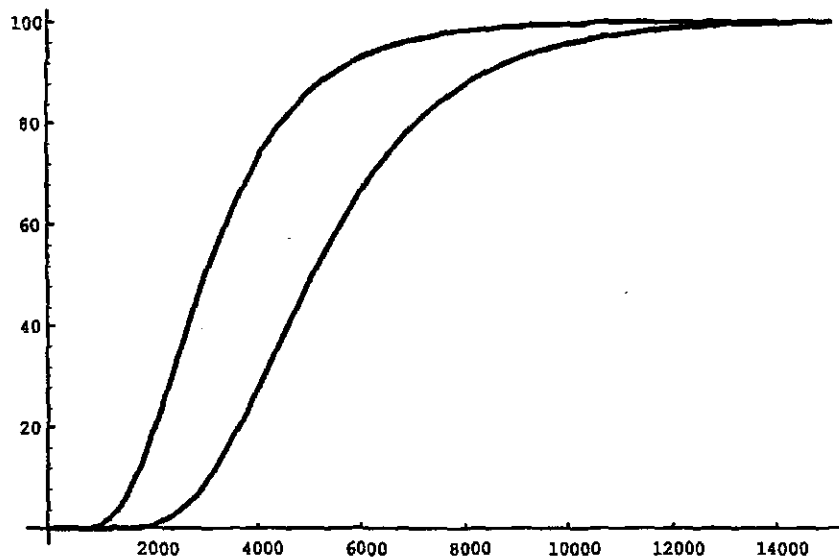
또한 건물에서 창문 유리 파손에 대해서는 다음과 같은 Probit 모델을 제시하였다.

① 낡은 건물(17년 이상된 건물)의 경우

$$\text{Probit} = -11.97 + 2.12 \ln P_s \quad \dots\dots\dots (5-19)$$

② 새 건물(17년 이하된 건물)의 경우

$$\text{Probit} = -16.58 + 2.53 \ln P_s \quad \dots\dots\dots (5-20)$$



[그림 5-13] 건물에서 창문유리 파손에 미치는  
폭발의영향(TNO)

낡은 건물이 새건물보다 파손될 확률이 조금 높다. 낡은 건물은  $P_s$ 가 8000이상이면 100%가 되고 새건물인 경우는 11000이상이면 창문유리가 파손할 확률이 100%가 된다.

#### 4. 폭발의 예방과 완화조치

##### 가. 폭발예방조치

- ① 점화원 관리
- ② 공정장치의 유지보수와 적절한 방폭구분
- ③ 화기작업절차와 훈련된 인력
- ④ 가연성 증기농도의 적절한 관리

## 나. 영향의 예방조치

- ① 적당한 교육, 훈련과 적절한 비상조치 계획
- ② 개인보호장비의 사용
- ③ 경보시스템 구축
- ④ 대피계획
- ⑤ 대피처 시설
- ⑥ 현장과 외부관련기관과의 의사소통을 위한 공동체제
- ⑦ 공동피난계획

## 제 6 장 영향 범위 산정

사고 발생시에 미치는 영향을 산출하기 위해서는 먼저 고려하고자 하는 설비나 공정의 주요 위험요인을 정성적 위험성 평가를 실시하여 파악하여야 한다. 파악한 위험요인을 화재, 폭발, 독성 누출등으로 나누어 각각에 대하여 가장 큰 위험요인을 선정하여 그 영향을 평가하고 그에 대한 대책을 세우는 것이 좋다. 주요 위험요인이 폭발일 때는 우선 공장이나 설비 등을 고려하여 폭발의 형태를 결정하고 4장과 5장의 모델식을 바탕으로 사고 발생시 미치는 영향 범위를 선정할 수 있다.

### 1. 폭발모델별 산정 절차

#### 가. 물리적 폭발 모델

(1) 압축된 가스의 부피와 압력을 산출한다.

(2) 충격파에 의한 영향을 산출한다.

① 저장된 물질의 에너지와 같은 에너지를 갖는 TNT 상당량을 산출한다.

② TNT 환산 곡선을 이용하여 특정 과압에서의 환산거리를 결정한다.

③ 환산거리를 실제 거리로 변환한다.

④ 물리적 폭발의 영향권을 결정한다.

(3) 비산물에 의한 영향을 산출한다.

① 비산 파편수를 추정한다.

② 초기 파편 속도를 산출한다.

③ 그림을 이용하여 파편의 최대 영역을 산출한다.

- ④ 주변 지역에 미치는 비산물의 충격을 평가한다.
- (4) 고려하고자 하는 손상의 형태를 정하고 그 값을 기준으로 과압을 결정한 후에 영향이 미치는 거리를 계산한다.
- (5) 손상 형태별로 등량선을 그려 영향범위를 결정한다.

#### 나. BLEVE 모델

- (1) 용기내 물질의 부피와 압력을 추정한다.
- (2) 충격파에 의한 영향을 산출한다.
  - ① 저장된 물질의 에너지와 같은 에너지를 갖는 TNT 상당량을 다음중 한 방법으로 산출한다.
    - ㉠ 가스의 팽창이 주요 원인이면 물리적 폭발과 같은 방법으로 산출한다.
    - ㉡ 과열 액체의 플래시가 영향이 클 경우엔 이를 고려한 등온팽창모델로 산출한다.
    - ㉢ 단열팽창으로 가정하여 산출한다.
  - ② TNT 환산 곡선을 이용하여 특정 과압에서의 환산거리를 결정한다.
  - ③ 환산거리를 실제 거리로 나타낸다.
  - ④ 폭발의 영향권을 결정한다.
- (3) 비산물에 의한 영향을 산출한다.
  - ① 비산 파편수를 추정한다.
  - ② 초기 파편 속도를 산출한다.
  - ③ 그림을 이용하여 파편의 최대 영역을 산출한다.
  - ④ 주변 지역에 미치는 비산물의 충격을 평가한다.
- (4) 열복사에 의한 영향을 산출한다.
  - ① 화구(fireball)의 최대 직경을 산출한다.

- ② 화구의 존재기간을 산출한다.
  - ③ 화구의 중심 높이를 산출한다.
  - ④ 표면 방출 플럭스를 산출한다.
  - ⑤ 특정거리에서의 기하학적 관측인자를 계산한다.
  - ⑥ 특정거리에서의 대기투과도를 산출한다.
  - ⑦ 특정거리에서의 열플럭스를 산출한다.
- (5) 고려하고자 하는 손상의 형태를 정하고 그 값을 기준으로 파압, 열플럭스 등을 결정한 후에 영향이 미치는 거리를 계산한다.
- (6) 손상 형태별로 등량선을 그려 영향범위를 결정한다.

#### 다. 증기운 폭발 모델

##### (1) TNT 상당량 모델

(가) 가연성 증기의 누출된 질량을 산출한다.

- 1) 누출된지 몇 분 이내에 점화되는 경우
  - ① 점화될 때까지 누출된 증기의 전체량을 폭발에 관련된 질량으로 본다.
  - ② 폭발효율인자,  $\eta$  값은 표를 이용하여 결정한다.
- 2) 누출되고 수분 이상이 경과된 후에 점화되는 경우(I)
  - ① 분산모델을 적용한다.
  - ② UFL과 LFL 내에 있는 증기운의 범위를 정한다.
  - ③ UFL과 LFL 범위 내의 증기운 부피를 산출한다.
  - ④ UFL과 LFL 범위 내의 가연성 증기의 평균밀도와 부피를 곱하여 가연성 증기의 질량을 산출한다.
  - ⑤ 폭발효율인자,  $\eta$ 는 1로 가정한다.

3) 누출되고 수분 이상이 경과된 후에 점화되는 경우(II)

- ① 분산모델을 적용한다.
- ② 누출지점에서 농도가 LFL이 되는 지점까지의 거리,  $X_{LFL}$ 을 산출한다.
- ③  $X_{LFL}$ 을 풍속으로 나누어  $X_{LFL}$ 까지의 걸리는 바람의 수평기류시간(wind advection time)을 산출한다.
- ④ 누출속도를 이용하여 수평기류시간동안 방출된 가연성 증기의 양을 산출한다.
- ⑤ 가연성 증기의 양은 다음중 작은 양을 취한다.
  - ㉠ 누출시간동안 누출된 가연성 증기의 전체 양
  - ㉡ 수평기류시간동안 누출된 가연성 증기의 양
- ⑥ 폭발효율인자,  $\eta$ 는 1로 가정한다.

(나) 가연성 증기에 대한 순연소열,  $H_c$ 를 결정한다.

(다) TNT 상당질량을 산출한다.

(라) 고려하고자 하는 손상의 형태를 정하고 그 값을 기준으로 과압을 결정한다.

(마) TNT 환산곡선을 이용하여 특정 과압에서의 환산거리를 결정한다.

(바) 환산거리를 실제 거리로 변환한다.

(사) 손상 형태별로 등량선을 그려 영향범위를 결정한다.

(2) TNO 상관관계 모델

- ① 분산모델을 적용한다.
- ② UFL과 LFL 내에 있는 증기운의 범위를 정한다.
- ③ UFL과 LFL의 범위에 있는 가연성 증기의 질량,  $M_f$ 를 산출한다.
- ④ 가연성 물질의 순연소열( $H_c$ )을 결정한다.
- ⑤ 폭발의 전체 에너지( $M_f \times H_c$ )를 산출한다.

⑥ R(S)식을 이용하여 고려하고자 하는 손상의 형태에 따라 영향이 미치는 거리를 계산한다.

⑦ 손상 형태별로 등량선을 그려 영향범위를 결정한다.

## 2. 증기운 폭발 모델의 산정절차

Xylene이 지상에서 파이프를 통하여 누출되는 경우에 폭발의 영향 범위를 산출하면 다음과 같다.

가. 가연성 증기의 누출량 산출

(1) 폭발효율인자를 이용한 TNT 상당량 모델 적용

누출되는 양을 결정하기 위하여 Fanning 마찰계수와 마하수를 계산하여 누출 질량 유속을 구한다.

① Fanning 마찰계수(friction factor)

$$f_p = \left[ -4 \log \left( \frac{1}{3.7} \times \frac{\varepsilon}{D} \right) \right]^{-2}$$

$$= \left[ -4 \log \left( \frac{1}{3.7} \times \frac{1.5 \times 10^{-4}}{1.667} \right) \right]^{-2} = 0.00298$$

② 마하수(Mach number)

$$\frac{r+1}{2} \ln \left[ \frac{2+(r-1)Ma^2}{(r+1)Ma^2} \right] - \left( \frac{1}{Ma^2} - 1 \right) + r \left( 4f_p \frac{L_p}{D} \right) = 0$$

$$\frac{1.4+1}{2} \ln \left[ 2 + (1.4-1) \frac{Ma^2}{(1.4+1)} Ma^2 \right] - \left( \frac{1}{Ma^2} - 1 \right) + 1.4 \left( 4 \times 0.0029 \times \frac{70}{0.508} \right) = 0$$

시행오차법을 이용하여  $Ma$ 를 구한다.

$$Ma = 0.4457$$

### ③ 누출 질량유속

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= A Ma P_s \sqrt{\frac{\gamma g_c M. W.}{RT_s}} \\ &= 0.0127 \times 0.4457 \times 571829 \sqrt{\frac{14 \times 106.17}{8314 \times 494}} \\ &= 19.4 \text{ kg/sec} \end{aligned}$$

폭발효율인자를 이용할 경우엔 일시에 누출한다고 가정하여 누출된 전체 양을 폭발에 관여하는 양으로 계산하므로 5분, 10분 누출로 나누어 계산하면 다음과 같다.

#### ① 5분 누출시 누출량, $M_1$

$$M_1 = 19.4 \text{ [kg/s]} \times 300 \text{ [s]} = 5820 \text{ [kg]}$$

#### ② 10분 누출시 누출량, $M_2$

$$M_2 = 19.4 \text{ [kg/s]} \times 600 \text{ [s]} = 11640 \text{ [kg]}$$

### (2) 분산 모델을 이용한 경우

분산모델을 적용하는 것은 본 보고서의 범주를 벗어나므로 주어진 조건하에서

공기보다 무거운 물질이고 지상에서 누출하는 경우에 적용하는 Britter & McQuaid 모델을 이용하고, 지상 10m 높이에서의 바람속도가 5m/sec라 가정하고 산출한 결과를 나타내어 비교하고자 한다.

① 5분 누출시

$$x_{LFL} = 421 \text{ [m]}$$

$$t_{advecton} = \frac{x_{LFL}}{\text{풍속}} = \frac{421}{5} = 84.2 \text{ [sec]}$$

따라서 수평기류시간동안 누출된 양은 다음과 같다.

$$19.4 \text{ [kg/sec]} \times 84.2 \text{ [s]} = 1633 \text{ [kg]}$$

누출시간동안 누출된 전체양(5280kg)보다 작으므로 이 양을 폭발에 관여하는 양으로 본다.

② 10분 누출시에도 연속누출이고 수평기류시간이 5분보다 짧으므로 농도가 LFL이 되는 거리는 5분 누출시와 같다. 따라서 10분 누출시에 수평기류시간동안 누출된 양은 1633kg이다.

(3) TNO 상관관계 모델

2)항의 경우와 같은 방법으로 농도가 UFL, LFL되는 거리를 구하면

$$x_{UFL} = 103\text{m} , x_{LFL} = 421 \text{ [m]}$$

각각에 해당하는 이동시간을 구하면

$$t_{UFL} = \frac{2 \times 103}{5} = 41.2 \text{ [sec]}$$

$$t_{LFL} = \frac{2 \times 421}{5} = 168.4 \text{ [sec]}$$

따라서 UFL 과 LFL 사이의 누출량은

$$19.4 \text{ [kg/sec]} \times (168.4 - 41.2) \text{ [sec]} \approx 2468 \text{ [kg]}$$

나. 가연성 증기의 순연소열,  $H_c$

$$H_c = 43274.9 \text{ [kJ/kg]}$$

다. TNT 상당량의 산출

(1)  $\eta$  이용

① 5분 누출시

$$W_1 = \frac{\eta M H_c}{H_{CTNT}} = 0.03 \times 5820 \times \frac{43374.9}{4680} = 1615 \text{ [kg]}$$

② 10분 누출시

$$W_2 = \frac{\eta M H_c}{H_{CTNT}} = 0.03 \times 11640 \times \frac{43374.9}{4680} = 3229 \text{ [kg]}$$

(2) 분산모델 이용

$$W = 1 \times 1633 \times \frac{43274.9}{4680} = 15100 \text{ [kg]}$$

(3) TNO 상관관계 모델

$$\begin{aligned} E &= M_f \times H_c = 2468 \times 43274.9 = 1.068 \times 10^8 \text{ [kJ]} \\ &= 1.068 \times 10^{11} \text{ [J]} \end{aligned}$$

라. 손상의 형태에 따른 영향이 미치는 거리 산출

각각의 모델에 적용할 수 있는 손상의 형태를 정하여 영향이 미치는 거리를 산출하면 다음과 같다.

(1) 폭발환산인자 이용

① 가옥의 거의 완전한 파괴( $P_s \approx 6 \text{ psi} = \frac{101.325}{14.7} \times 6 = 41.4 \text{ kPa}$ )

환산거리와 과압과의 관계를 나타낸 [그림 3-7]에서  $Z = 15$  이다.

<식 3-5>에서 5분 누출후 점화시 :  $R = ZW^{1/3} = 15 \times (1615)^{1/3} = 176 \text{ [m]}$

10분 누출후 점화시 :  $R = 15 \times (3229)^{1/3} = 222 \text{ [m]}$

② 구조물의 심각한 손상( $P_s = 2.3 \approx 15.9 \text{ kPa}$ )

환산거리와 과압과의 관계를 나타낸 [그림 3-7]에서  $Z = 31$  이다.

<식 3-5>에서 5분 누출후 점화시 :  $R = 31 \times (1615)^{1/3} = 364 \text{ [m]}$

10분 누출후 점화시 :  $R = 31 \times (3229)^{1/3} = 459 \text{ [m]}$

③ 유리 완파( $P_s \approx 0.7 \approx 4.8 \text{ kPa}$ )

환산거리와 과압과의 관계를 나타낸 [그림 3-7]에서  $Z = 90$  이다.

<식 3-5>에서 5분 누출후 점화시 :  $R = 90 \times (1615)^{1/3} = 1056 \text{ [m]}$

10분 누출후 점화시 :  $R = 90 \times (3229)^{1/3} = 1332 \text{ [m]}$

④ 유리 약 10% 파손( $P_s = 0.3 \approx 2.1 \text{ kPa}$ )

환산거리와 과압과의 관계를 나타낸 [그림 3-7]에서  $Z = 185$  이다.

<식 3-5>에서 5분 누출후 점화시 :  $R = 185 \times (1615)^{1/3} = 2171 \text{ [m]}$

10분 누출후 점화시 :  $R = 185 \times (3229)^{1/3} = 2738 \text{ [m]}$

## (2) 분산모델 이용

① 가옥의 거의 완전한 파괴( $P_s \approx 6 \text{ psi} = \frac{101.325}{14.7} \times 6 = 41.4 \text{ kPa}$ )

환산거리와 과압과의 관계를 나타낸 [그림 3-7]에서  $Z = 15$  이다.

<식 3-5>에서  $R = ZW^{1/3} = 15 \times (15100)^{1/3} = 371 \text{ [m]}$

② 구조물의 심각한 손상( $P_s = 2.3 \approx 15.9 \text{ kPa}$ )

환산거리와 과압과의 관계를 나타낸 [그림 3-7]에서  $Z = 31$  이다.

<식 3-5>에서  $R = 31 \times (15100)^{1/3} = 766 \text{ [m]}$

③ 유리 완파( $P_s \approx 0.7 \approx 4.8 \text{ kPa}$ )

환산거리와 과압과의 관계를 나타낸 [그림 3-7]에서  $Z = 90$  이다.

<식 3-5>에서  $R = 90 \times (15100)^{1/3} = 2225 \text{ [m]}$

④ 유리 약 10% 파손( $P_s = 0.3 \approx 2.1 \text{ kPa}$ )

환산거리와 과압과의 관계를 나타낸 [그림 3-7]에서  $Z = 185$  이다.

<식 3-5>에서  $R = 185 \times (15100)^{1/3} = 4573 \text{ [m]}$

## (3) TNO 상관관계 모델

① 건물이나 공정장치의 심각한 손상(  $CS = 0.03$  )

$$\begin{aligned} R(s) &= (CS) [ \eta E ]^{1/3} \\ &= (0.03) [ (0.1)(1.068 \times 10^{11}) ]^{1/3} \\ &= 66 \text{ [m]} \end{aligned}$$

② 거주지의 정면손실과 건물의 수리할 수 없는 손상(  $CS = 0.06$  )

$$\begin{aligned} R(s) &= (0.06) [ (0.1)(1.068 \times 10^{11}) ]^{1/3} \\ &= 132 \text{ [m]} \end{aligned}$$

③ 상처를 줄 수 있는 유리파손( CS=0.15 )

$$R(s) = (0.15) [ (0.1)(1.068 \times 10^{11}) ]^{1/3}$$

$$= 330 \text{ [m]}$$

④ 유리파손(판의 10%정도) ( CS=0.40 )

$$R(s) = (0.40) [ (0.1)(1.068 \times 10^{11}) ]^{1/3}$$

$$= 881 \text{ [m]}$$

<표 6-1> 적용모델에 대한 손상형태별 영향 범위

| 손상형태<br>적용모델      |       | 가옥의 완파 | 구조물의<br>심각한 손상 | 유리완파  | 유리파손(10%) |
|-------------------|-------|--------|----------------|-------|-----------|
| η 적용              | 5분누출  | 176m   | 364m           | 1056m | 2171m     |
|                   | 10분누출 | 222m   | 459m           | 1332m | 2738m     |
| 분산모델 적용           |       | 371m   | 766m           | 2225m | 4573m     |
| TNO 상관관계<br>모델 적용 |       | 66m    | 132m           | 330m  | 881m      |

TNO 상관관계 모델이 폭발이 미치는 영향 범위가 가장 작게 나타났고 분산 모델을 적용하여 바람의 수평기류시간을 이용하여 산출한 값이 가장 크게 나타났다. 연속 누출에서 분산모델을 적용하면 폭발 영향 범위가 시간에 관계없으나 η를 적용하여 산출할 경우 누출시간이 길수록 영향범위가 넓어졌다.

#### 마. 손상형태별 등량선 도시 및 영향 평가

가~라에서 구한 결과를 바탕으로 지도에 손상 형태가 같은 위치를 연결하여 선으로 표시한다. 여러 손상 형태별로 영향 범위를 구하여 표시하면 등량선을 도시할 수 있다. 지도에 표시한 등량선을 바탕으로 주변의 설비, 공정 및 인근 지역에 대한 영향 정도를 평가하고 2차적으로 미치는 결과에 대비할 수 있는 대책을 수립하고, 또한 이를 바탕으로 비상 사태시의 행동절차 및 피해 완화 대책을 수립한다.

## 결 론

사업장 내에서 정성적 위험성 평가로 확인된 위험 중에서 위험성이 크거나 중요한 지역에 대해서는 사고시의 피해 예측을 정량화 함으로써 설비의 교체나 변경 여부 등에 관한 결정을 내릴 수 있으며, 비상 조치 계획의 기초 자료로서 활용할 수 있다. 또한 공정 안전 관리 제도중 공정 위험성 평가서에서 주요 위험원이 있는 공정에 대해서는 사고시의 피해 정도 및 범위를 산정하고 피해 최소화 대책을 수립하도록 하고 있다.

본 연구에서는 사고결과 영향 평가 중 폭발로 인한 영향 범위의 산정에 대하여 연구하고 폭발로 인한 과압과 비산물 등의 피해인자를 분석하여 사업장에서 활용할 수 있도록 하였는데 그 결과는 다음과 같다.

1. 폭발의 영향인자는 폭풍파에 의한 과압과 비산물이다.
2. 전체 공정 물질의 전부에 대하여 실시하는 것이 아니라 주요 위험물질에 대하여만 실시한다.
3. 제시된 모델로 평가시 제한 사항이 많고, 실제보다 크게 평가되는 경향이 있지만 사고 발생시 미칠 수 있는 영향의 최대치로 보고 이에 대한 주변의 대비책, 사고완화대책, 비상계획을 수립하는 것이 좋다. 사후 조치를 검토하는 것이 좋다.
4. 영향 평가는 상해나 손상 정도를 기준으로 하여 표시하거나, 영향 인자 값을 기준으로 하여 표시하는데 나중의 평가를 위해서 거리별 대표적 피해 정도를 표시하는 것이 좋다.
5. 증기운 폭발 모델은 분산 모델을 적용시켜야 좀 더 정확한 결과를 기대할

수 있으나 분산 모델 자체가 방대하여 추후의 연구를 필요로 한다.

6. 계산에 필요한 데이터를 사업장에서 수집하기가 어렵고 경우별로 적절한 데이터를 선정하고 적절한 기법을 선택하는 것도 전문가의 도움을 필요로 한다. 따라서 사업장에서 널리 활용되기 위해서는 컴퓨터 프로그램의 개발이 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. Baker, W. E. et al., "Explosion Hazards and Evaluation", Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1983
2. CCPS, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", AIChE, 1989
3. Cote, A. E. and Linville, J. L., "Fire Protection Handbook", 7th edition NFPA, 1991
4. Crowl, D. A. and Louvar, J. F., "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications", Prentice Hall, Inc., 1990
5. Crowley, W. K., "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions", Technical Manual No.5-1300(TM5-1300), U.S.Army, Department of the Army, the Navy, and the Air Force, U.S Government Printing office, Washington, D.C., June, 1969
6. Eisenberg, N. A., Lynch, C. J. and Breeding, R. J., "Vulnerability Model-A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills", CG-D-136-75 (NTIS ADA-015-245), Prepared by Enviro Control, Inc., for the U. S. Coast Guard, Office of Research and Development, June 1975
7. Federal Emergency Management Agency, "Handbook of Chemical Hazard Analysis Procedures", FEMA, Washington, D.C. 20472

8. Finney, D. J., "Probit Analysis", Third Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1971
9. Glasstone, S. G., "The Effects of Nuclear Weapons(2nd Edition)", U.S.Atomic Energy Commission, 1962
10. Grelecki, C., "Consequence Assessment of Flammable Releases", Safety Analysis and Risk Assessment for Chemical Process Industry Practitioners-Course 3: Consequence Assessment and Mitigation, Sponsored by the American Institute of Chemical Engineers, 1992
11. Houweling, I. J. and Trense, I. R. W., Methods for the Calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Material (TNO Yellow Book) Chapter 9 : Caonsequences of the Rupture of Vessels, The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research (TNO), Rijswijk, the Netherlands, 1979
12. Lees, F. P., "Loss Prevention in the Process Industries", Volumes 1 and 2, Butterworths-Heinemann Ltd., 1991
13. Lenoir, E. M. and Davenport, J. A. of Industrial Risk Insurers, "A Survey of Vapor Cloud Explosions-Second Update", Paper 74d Presented at the 26th Annual Loss Prevention Symposium in New Orleans, Louisiana, March 29-April 2, 1992
14. Mancini, R. A., "Workshop on Unconfined Vapor Cloud Explosions" , Plant Operations Progress, American Institute of Chemical Engineers, Vol. 11, No.1, pp.27-32, January 1992

15. Merx, W. P. M., Methods for the Determination of Possible Damage to People and Objects Resulting, from Releases of Hazardous Materials (TNO Green book) Chapter 3 : The Consequences of Explosion Effects on Humans, CPR 16E (ISBN 90-5307-052-4), The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research(TNO), The Hague, 1992
16. Moore, C. V., "The Design of Barricades for Hazardous Pressure Systems" , Nuclear Engineering and Design, Volume 5, pp.81~97, 1967
17. Process safety Institute, "Hazard Evaluation (Consequence Analysis Methods)", JBF Associates, Inc., 1993
18. Sax, N. I. and Lewis, R. J., Jr., "Dangerous Properties of Industrial Materials Seventh Edition", 3 Volumes, Published by Van Nostrand Reinhold, 1989
19. Stephens, M. M., Minimizing Damage to Refineries from Nuclear Attack, Natural and Other Disasters: A Handbook Reviewing Potential Hazards That Could Affect Petroleum Refinery Operations in Times of War and Peace, Prepared for the Office of Civil Defense, Industrial Participation, Department of the Army, by the Office of Oil and Gas, the Department of the Interior, February 1970
20. Tsao, C. K., and Perry, W.W., "Modifications to the Vulnerability model-A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills", Enviro Control, Inc., 1979

21. Van den Bosch, C. J. H. et al., "Methods for the Determination of Possible Damage to People and Objects, Resulting from Releases of Hazardous Materials(TNO Green Book)", CPR 16E(ISBN 90-5307-052-4), The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research(TNO), The Hague, 1992
21. Van Wingerden, J. M. et al., "Vapor Cloud Explosion Blast Prediction, Plant/Operation Progress", Vol.8, No.4, 1989
22. Wiekema, B. J., "Methods for the Calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Material(TNO Yellow Book) Chapter 8 : Vapor Cloud Explosions", TNO, Rijswijk, the Netherlands, 1979
23. 김 구희외, "화재 및 폭발재해의 강도 산정에 관한 비교연구", 한국산업안전학회지, 제8권 2호, 1993(6)
24. 김 흥외, "방폭공학", 동화기술, 1994
25. 이 영순외, "화공안전공학", 대명사, 1994

## 폭발의 영향범위 산정 모델에 관한 연구

연구보고서 (화학연 95-4-13)

---

발 행 일 : 1995. 12. 31

발 행 인 : 원 장 이 한 훈

연구수행자 : 선임연구원 조 지 훈

발 행 처 : 한국산업안전공단

산업 안전 연구원

화 학 연 구 실

주 소 : 인천직할시 북구 구산동 34-4

전 화 : 032) 502-0031 ~ 2, 510-0844 ~ 7

---