



# 사고영향평가(Consequence Analysis) 기법을 이용한 화학공정위험성평가에 관한 소고

## A View of Chemical Process Hazard Evaluation Using Consequence Analysis

우리 인간이 원시시대로 돌아가기를 원하지 않는 한 화학공정(chemical process)의 위험요소(hazard)를 완전히 제거할 수는 없으며 다만 이를 감소시킬 수 있을 뿐이다. 즉, 우리 인간을 위협하는 화학공정의 위험요소(hazard)는 화학플랜트에서 펌프나 발전기가 작동하는 시점으로부터 태동하는 것이 아니라, 엔지니어가 연필, 계산기와 컴퓨터를 가지고 수행하는 화학플랜트의 설계로부터 시작하여 구매, 제작, 시공, 시운전, 정상 운전, 이상운전 및 공장폐쇄에 이르는 일련의 과정에 위험요소가 상존하고 있다.



車 淳 哲\*  
Char, Soon Chul

### 1. 서론

정유 및 석유화학플랜트는 대규모 장치산업으로서 원료의 공급체계가 일원화되어야 하는 특성상 여러 플랜트가 집단으로 설치되어 콤플렉스를 형성하고 있다. 기술의 발전에 따라 다양한 종류의 위험물질의 취급 및 화재·폭발·누출 등 반응성이 높은 물질과 독성물질의 사용량이 늘어남에 따라 정밀한 화학장치와 복잡한 설비를 설치하고 운영하며 또한 고온·고압의 조건하에서 이들을 운전하고 있다.

이와 관련하여 막대한 피해를 줄 수 있는 여러 가지 사고와 환경을 오염시킬 수 있는 위험요소를 제거하거나 제어하며 또한 피해의 최소화를 가져올 수 있도록 공정위험요소를 확인하고 평가하며 이를 정량화 하는 공정위험성평가의 중요성이 최근에 더욱 부각되고 있다.

최근 해외프로젝트에서 발주처로부터 계약자가 수행토록 요구받고 있는 가장 선진화된 공정위험성평가 기법인 Consequence Analysis를 소개하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 Consequence Analysis의 개요

화학플랜트의 사고를 방지하기 위하여 가장 먼저 해야 할 일은 공정 중에 존재하는 위험을 모두 찾아내어 이를 확인(identification)하고 분석(analysis)하는 것이다.

화재·폭발·누출과 같은 대형사고를 예방하기 위해서는 위험을 찾아내어 그 위험이 얼마나 자주 발생할 수 있는가를 평가하는 것도 중요하지만 사고가 발생했을 때 어느 범위에 어떤 영향(손실)을 줄 수 있는가를 평가하는 것도 매우 중요하다.

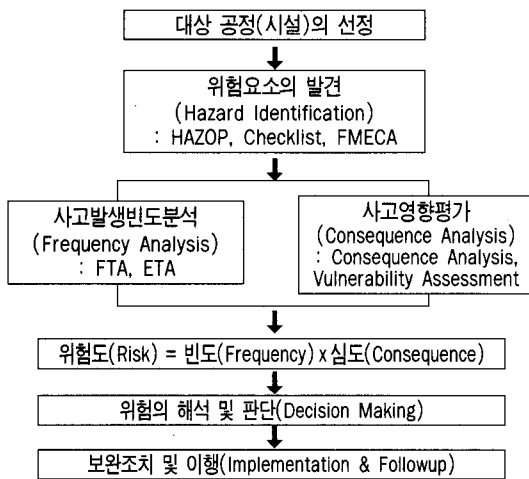
Consequence Analysis란 화재·폭발·누출과 같은 사고가 발생했을 때 인명이나 재산상의 손실 또는 업무중단 등으로 인한 손실비용 등에 영향을 주는 원치 않는 결과를 분석, 추산하는 것을 말한다.

#### 2.2 위험분석의 이해

\*화공안전·화학공장설계·소방설비·가스기술사, SK건설(주) 플랜트엔지니어링본부 부장, 경기도재난합동조사단조사위원.

위험(risk)은 사고의 빈도(frequency)와 결과(consequence)의 곱으로 정의한다.

사고의 빈도는 연간 발생할 확률(fr./year)로, 결과는 사망자수(number of fatality)이며 위험의 단위는 무차원이다. <그림 1>은 정량적인 위험평가의 흐름도를 나타내고 있다.



<그림 1> 정량적 위험평가 흐름도

### 2.3 사고영향평가 과정의 계통

위험물 누출로 인한 사고영향평가의 과정은 전체 위험분석 과정 중에서 정성적인 위험평가방법인 HAZOP, Checklist, FMECA 등의 방법으로 발견된 위험에 대해 인명 및 재산피해의 정도를 산정한다.

사고형태 및 피해규모는 취급물질의 종류, 공정조건, 보호장치시설, 사고대책 숙련도, 주변지형 및 기상조건에 따라 다양하며 다음과 같은 평가과정을 <그림 2>로 설명할 수 있다.

### 2.4 위험물 누출

유체별 누출속도 : 위험물이 누출되었을 때의

상태에 따른 유출량은 다음 시나리오로 분류될 수 있다.

- Continuous Liquid Release
- Continuous Gas Release
- Two Phase Release
- Flashing Liquid
- Liquid Pool Evaporation

위와 같은 누출 형태별로 특징을 요약하면 다음과 같다.

#### 2.4.1 Continuous Liquid Release

이 시나리오는 액상의 위험물을 저장하고 있는 용기에 구멍이 뚫어져 위험물이 계속적으로 누출되는 경우이다. 이때 액체 위험물의 누출되는 속도는 용기내부의 압력과 액면의 높이 그리고 뚫어진 구멍의 크기에 비례할 것이다. 따라서 다음과 같은 베르누이방정식에서 누출속도를 계산할 수 있다.

$$Q = CdA\rho_L \left[ 2 \left( \frac{P_t - P_a}{\rho_L} + gh \right) \right]^{0.5} \quad \dots (2.4-1)$$

여기서,

Q = 액체누출속도(Kg/sec)

Cd = 누출계수(Discharge Coefficient)

$\rho_L$  = 액체의 비중 (Kg/m<sup>3</sup>)

A = 뚫어진 구멍의 면적 (m<sup>2</sup>)

Pt = 용기내부압력 (N/m<sup>2</sup>)

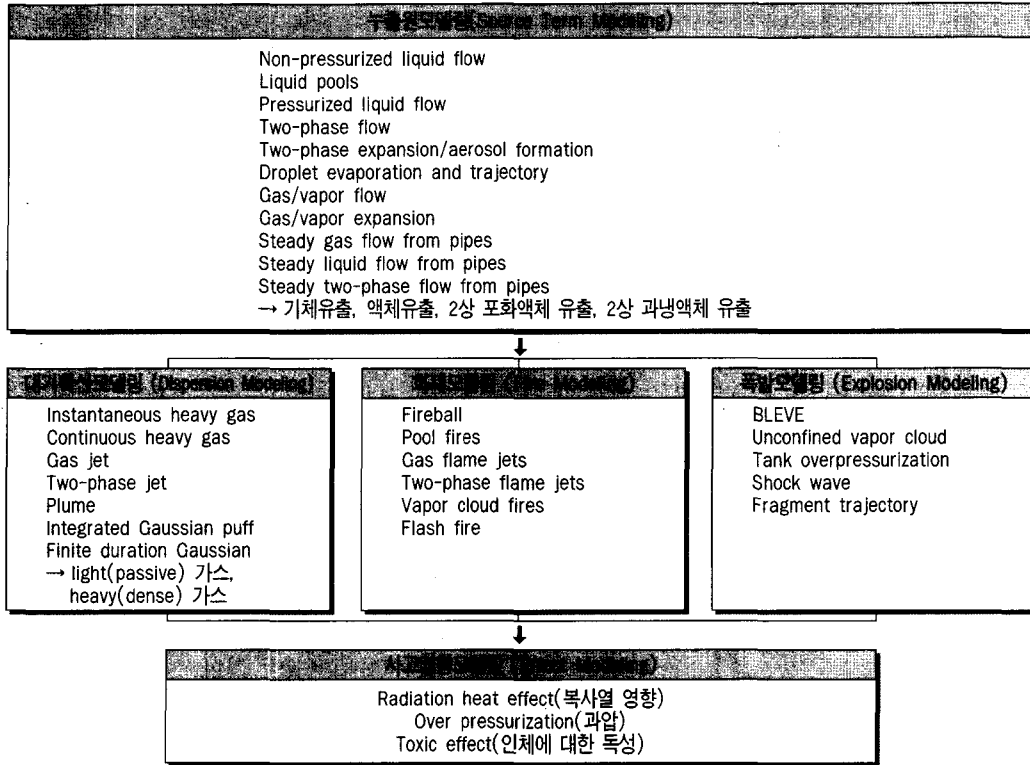
Pa = 외부 대기압 (N/m<sup>2</sup>)

g = 중력가속도 (9.8m/sec<sup>2</sup>)

h = 액면의 높이(m)

#### 2.4.2 Continuous Gas Release

이 시나리오는 압력용기나 압력배관 내부에 있는 가스가 계속적으로 누출되는 경우인데 대체적으로 제트(Jet) 형태로 분출된다. 분출될 때의 최대속도는 음속(speed of sound)까지 이르는데 내



〈그림 2〉사고영향평가 과정 흐름도

부압력이 외부압력의 2배 이상이 되면 음속으로 분출될 수 있다. 즉, 용기 내부압력이 2Kg/cm<sup>2</sup>g 이상이면 음속으로 Jet 형태의 누출이 될 수 있다는 뜻이다. 누출되는 가스의 누출속도(Kg/sec)는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$Q = \frac{CdAP\gamma\left[\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}\right]^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{\gamma RT}{M}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

for sonic flows ..... (2.4-2)

여기서,

- P : 유체 운전압력
- M : 가스의 분자량
- $\gamma$  :  $C_p/C_v$  ( $C_p$  : 정압비열,  $C_v$  : 정적비열)
- R : 가스상수
- T : 가스의 저장온도

### 2.4.3 Two Phase Release

유체가 순수한 가스나 액체가 아니고 증기와 액체의 혼합물인 경우가 있다. 이 경우는 액체와 기체가 혼합되어 누출되는데 two phase 관계식을 이용하여 계산한다. Two phase에 있어서의 유체의 이동특성은 매우 복잡하고 실제로 계산을 하기 위해서는 유체별로 많은 실험 데이터를 준비하여야 하기 때문에 상용 computer program 을 이용해서 계산한다.

### 2.4.4 Flashing Liquid

이 시나리오의 액체가 누출되자마자 즉시 액체의 일부 또는 전부가 증기로 변하여 확산되는 경우인데 이때 증발되는 과정을 단열(adiabatic) 상태로 가정하여 증발되는 양을 계산할 수 있다.

$$\text{즉, } F_v = C_p / h_{fg} (T - T_b) \dots\dots\dots (2.4-3)$$

여기서,

$F_v$  = 유출된 액체 중 기화된 증기분율

$h_{fg}$  = 액체의 증발잠열 (J/kg)

$T$  = 액체의 초기 온도 (K)

$T_b$  = 액체의 비점 (K)

### 2.4.5 Liquid Pool Evaporation

휘발성이 약한 액체가 dike 내로 방출되었을 때에는 즉각적으로 증기로 변하는 것이 아니고, 서서히 증발하게 된다. 따라서 누출된 액체 비점이 대기온도 보다 높을 경우에는 액체가 고이게 되며 조금씩 증발 확산하게 된다. 초기 기화 과정은 주로 대지에서 전달되는 열전달에 의해서 이루어진다. 대기로부터 전달되는 heat flux는

$$Q_G = \frac{k_s(T_g - T)}{(\pi \alpha_{st})^{0.5}} \dots\dots\dots (2.4-4)$$

여기서,

$q_G$  = 대지에서 전달되는 heat flux (W/m<sup>2</sup>)

$k_s$  = 대지의 열전도도 (W/m/°C)

$T_g$  = 액체풀의 온도 (°C)

$\alpha_s$  = 대지의 열확산도 (m<sup>2</sup>/°C)

$t$  = 누출시간 (s)

## 2.5 대기확산모델링(Dispersion Modeling)

방출 및 증발의 형태가 변하는 것에 따라 확산의 상황도 변하는 것을 고려해야 하는데 방출한 물질이 큰 운동에너지를 가지는 경우와 그렇지 않은 경우와는 방출에 차이가 생긴다. 확산의 기본 개념은 세 가지 단계로 설명되고 있다.

첫 단계는 위험물질이 누출되는 순간에서의 확산의 모형은 위험물을 저장하고 있는 용기내부의 압력에 의해 좌우되는 단계인 것이다. 즉 위험물이 누출되는 순간은 기후의 영향이나 지형에 좌우되

지 않고 용기내부의 힘, 즉 기계적인 힘에 의하여 확산 형태가 순간적이긴 하지만 좌우된다는 것이다. 그래서 첫 확산의 단계를 기계적 난류(Mechanical Turbulence) 현상이라 부르기도 한다.

두 번째 단계는 기계적 난류 단계를 지나면서 위험물의 증기는 공기와 접촉하게 되는데 이때는 증기와 공기와의 비중 차이에 의하여 서로 희석되면서 확산이 진행된다.

마지막 단계로서는 누출된(또는 발생된) 증기가 거의 대기조건 (특히 풍향과 풍속)에 의존하여 확산되는 과정이 된다. 즉 어느 정도 확산이 이루어지면 증기확산 형태는 풍속, 풍향에 전적으로 영향을 받으면서 확산된다는 것이다. 소위 대기난류에 의한 확산(Dispersion by atmospheric turbulence)이라 부른다.

확산 모델로서 널리 알려진 Gaussian Model은 마지막 확산 단계인 대기의 영향을 받는 조건에서 어떻게 증기가 확산되어 나가는 것인가를 제시하고 있다.

어떤 형태의 확산이든지 여러 가지 확산모델로부터 산출된 결과는 확산거리별로 위험물질의 농도가 표시될 수 있도록 도식화되어야 할 것이다. 다음은 누출형태별 확산모형의 특징을 요약해 보고자 한다.

### 2.5.1 Jet Release Dispersion

이 모형은 앞에서 언급한 바와 같이 내부의 압력이 높아서 누출되는 속도가 강하게 되면 분출기둥을 형성하는 경우를 말한다. 또는 휘발성이 강하여 누출되자마자 증기로 급격히 변화하는 경우에도 해당되는데 이와 같은 제트형 누출은 장시간 동안 증기의 비중이나 대기조건의 영향을 덜 받고 소위 기계적 힘에 의해 확산이 어느 정도 이루어 질 것이다. 따라서 이 경우에는 1단계인 Mechanical Turbulence에 비중을 두어 초기



의 확산과정을 규명하여야 할 것이다.

### 2.5.2 Heavy Gas Dispersion

이 모형은 2단계 확산과정인 비중의 차이에 의해 확산되는 과정을 중요시해야 하는 경우인데 즉, 2단계 확산모형을 고려해야 하는 경우이다. 누출되는 증기 또는 가스의 비중이 무거울 경우에는 확산형태가 반드시 대기의 영향에만 좌우되는 것이 아니라 비중차이에 의해 확산의 힘이 발생한다는 것이다.

### 2.5.3 Dispersion by Atmospheric Turbulence

Heavy Gas Dispersion의 과정에서 어느 시점이 되면 공기가 증기운 속으로 침투하게 되므로 비중차에 의한 확산은 약화될 것이고 따라서 대기난류(atmospheric turbulence)가 확산을 지배하게 된다.

일단 이 단계에 들어가게 되면 Gaussian Model (정확히는 Gaussian puff or plume model)에 맞추어 증기운이 확산된다고 제시하고 있다.

이 Gaussian Model의 기본개념은 증기운이 바람이 부는 방향으로 움직이면서 Box Model에 맞추어 확인된다는 점이다.

## 2.6 화재모델링(Fire Modeling)

### 2.6.1 Pool Fire Modeling

인화성 물질 저장탱크에 화재가 발생하면 탱크 화재가 되며, 사고로 인해 인화성 물질이 유출되어 방유제에 고여 점화하면 방유제화재로 된다. 이와 같이 액면(Pool) 상태에서의 화재를 총칭해서 액면화재(Pool Fire)라고 한다. 한편 같은 가연성 액체인 압축 및 액화가스는 용기로부터 액체로 방출되면, 액 자체가 과잉으로 가지고 있던 에너지와 주위로 모든 액체가 한꺼번에 증발하지 않고 일부는 액체로 남은 채 서서히 증발한다.

지면에서부터 열을 받아서 급격히 기화하지만 이것이 화재로 된 경우도 액면화재이다. Pool Fire는 인화성 액체가 저장탱크나 파이프라인에서 누출되었을 때, 액면상(Liquid Pool)을 형성하며, 액체의 일부가 증발되어 증발된 가연성 액체의 농도가 LFL 이상에서 점화원을 만나면 액면화재가 일어날 수 있다.

#### (1) Pool Fire 모델식

Pool Fire의 경우 TNO(1979)에서의 열복사 추정에 다음과 같은 모델식을 사용할 것을 제안하였다.

$$I_{th} = \tau FE \dots\dots\dots (2.6-1)$$

여기서,

$I_{th}$  = 거리 x에서 받는 열복사 [ $W/m^2$ ]

$\tau$  = 대기의 투과성(Transmissivity) [-]

F = 기하학적 인자 [-]

E = 표면방출 플럭스 [ $W/m^2$ ]

#### (2) 표면방출 플럭스(E)와 연소속도(m)

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

$$E = \frac{\beta \dot{m} H_c (\pi b^2)}{2\pi b a + \pi b^2} \dots\dots\dots (2.6-2)$$

여기서,

$\beta$  = 전체복사열의 분율 [-]

$\dot{m}$  = 연소속도 [ $Kg/m^2 \cdot sec$ ]

$H_c$  = 액체의 순열소열 [ $J/kg$ ]

b = 액면반경 [m]

a = 화염길이 [m]

연소속도는 액면화재가 일어날 동안 액면에서 물질이 증발되어지는 속도이다.

### 2.6.2 Jet Fire Modeling

가연성 압축 또는 액화된 가스가 저장탱크나 파이프라인에서 사고로 깨어졌거나 구멍이 나서 누출되었다면 구멍을 통해 방출된 물질이 주위의 공기

와 혼합되어 Gas Jet를 형성하고 이러한 가연성물질이 점화원과 만나면 상당한 길이의 Jet Fire (Touch Fire라고도 부름)가 발생 할 것이다. Jet Fire는 사람이나 재산상의 열복사의 위험을 가진다. 특히 가까이에서 자동차나 탱크의 외면에 부딪친다면 더욱 위험하다. 이 경우 화염의 열은 연속적으로 외벽을 약하게 하면서 노출된 자동차나 탱크에 압력을 증가시킨다. 이것은 결국 탱크에 BLEVE를 일으키거나 격렬한 파열을 일으키게 한다.

(1) API Jet Fire Model

(가) Jet Fire 모델식

API RP-521에서 수직적인 방향의 Jet Fire로부터 열복사를 계산하기 위하여 Brzustowski와 Sommers(1973)에 의한 접근방법을 사용하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$I_{th} = \frac{\tau\beta Q_{th}}{4\pi D^2} \dots\dots\dots (2.6-3)$$

여기서,

$I_{th}$  = 열복사 [kW/m<sup>2</sup>]

$\tau$  = 투과성 [-]

$Q_{th}$  = 전체 방출열 [kW]

$\beta$  = 복사된 열의 분율 [-]

D = 화염 중심에서부터 대상물까지의 거리 [m]

Jet Fire에 의한 전체방출열은 다음 식으로 주어졌다.

$$Q_{th} = QH_c \dots\dots\dots (2.6-4)$$

여기서,

Q = Jet 물질의 누출속도 [kg/sec]

H<sub>c</sub> = 누출된 물질의 순연소열 [kJ/kg]

2.6.3 Fireball Modeling

Fireball은 외부에서 화재가 발생하여 휘발성물질이 들어있는 탱크의 내용물이 가열될 때 일어난다. 다시 말하면 비점 이상의 온도에서 액체인 상태로 들어있는 용기가 파열될 때 일어난다. 가

연성의 과열액체나 증기혼합물이 공기중으로 누출되면서 점화되어 원형과 비슷한 화염이 형성되는 것으로 흔히, 비등액체팽창증기폭발(BLEVE, Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) 현상을 동반한다.

(1) Fireball 모델식

CPQRA(1989)에서의 Fireball의 경우 대상물에서 받는 복사열 I<sub>th</sub>는 다음과 같은 식으로 제안하였다.

$$I_{th} = \tau FE \dots\dots\dots (2.6-5)$$

여기서,

$I_{th}$  = 흑체(Black Body) 목표물에 받는 복사열 [kW/m<sup>2</sup>]

E = 표면방출 플럭스 [kW/m<sup>2</sup>]

$\tau$  = 투과성(Transmissivity)

F = 기하학적 인자(Geometric View Factor)

(2) Fireball Parameter

대상물에 받는 복사열을 구하기 위해 Fireball Parameter를 이용하는데 Fireball Parameter는 가연성 액체의 질량과 Fireball 직경에 관계되는 누승법칙의 상관관계에 의해 주어졌다.

$$D_{max} = 6.48M^{0.325} \dots\dots\dots (2.6-6)$$

$$t_{fireball} = 0.825M^{0.26} \dots\dots\dots (2.6-7)$$

$$H_{fireball} = 0.75D_{max} \dots\dots\dots (2.6-8)$$

여기서,

M = 인화성 액체의 초기질량 [kg]

D<sub>max</sub> = Peak Fireball 직경 [m]

t<sub>fireball</sub> = Fireball 지속시간 [sec]

H<sub>fireball</sub> = Fireball의 중심까지 높이 [m]

2.7 폭발모델링(Explosion Modeling)

2.7.1 용기폭발모델링

(Vessel Explosion Modeling)

(1) 모델링의 개요



전형적인 폭발모델링은 상해나 피해의 영향을 평가하기 위해 사람이나 구조물에 대해 위험을 주는 폭발 과압을 평가하는 것이다. 용기폭발의 분석은 용기의 가압속도의 정량평가가 필요하다. 용기의 가압을 느리게 하는 경우는 물리적 폭발 모델이 적용되고, 빠르게 가압하는 경우는 화학적 반응모델을 사용한다.

물리적 폭발모델링은 가스가 가득찬 용기의 파열에 관계되는 에너지는 가스의 등온팽창의 가정 하에서 추산할 수 있으며 그 식은 다음과 같이 주어졌다.

$$W = 1.4 \times 10^{-6} V \left( \frac{P_1}{P_0} \right) \left( \frac{T_0}{T_1} \right) R T_0 \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \dots \quad (2.7-1)$$

여기서,

W = TNT의 상당질량 [lbm]

V = 압축된 가스의 부피 [ft<sup>3</sup>]

P<sub>1</sub> = 압축된 가스의 초기압력 [psia]

P<sub>2</sub> = 압축된 가스의 최종압력 [psia]

T<sub>1</sub> = 압축된 가스의 온도 [°R]

T<sub>0</sub> = 표준상태의 온도 [°R]

R = 기체상수 (= 1.987) [Btu/lb · mole °R]

1.4 × 10<sup>-6</sup> = 환산인자 (2.8 × 10<sup>-3</sup> lb · mole/ft<sup>3</sup>과 1lbm의 TNT = 2,000Btu로 가정)

## (2) 화학반응 모델

용기의 빠른 가압으로 인한 화학반응의 경우, TNT상당량은 용기에서 일어나는 화학반응의 반응열에 의해 추정된다. 반응물이 생성물로 전환되고, 최대압력은 배출이 되기 전에 일어난다.

화학적 폭발에너지를 계산하기 위해서는 반응물과 생성물에 대한 Helmholtz 자유에너지 등의 열역학적 특성치를 이용하여 추산할 수 있고, TNT 당량으로 환산하여 구할 수 있다. TNT 당량환산에 의해 구하는 식은 다음과 같다.

$$\text{TNT 당량(lbm)} = \frac{\Delta H_c \times W_c}{2,000 \text{ Btu/lbm TNT}} \dots (2.7-2)$$

여기서,

ΔH<sub>c</sub> = 폭발성 물질의 연소열(발열량) [Btu/lbm]

W<sub>c</sub> = 폭발에 참여한 물질의 양 [lbm]

## 2.7.2 BLEVE Modeling

BLEVE Modeling을 이용하여 사람이나 구조물에 폭발과압을 추정하는 방법은 세 가지가 있다. 하나는 증기공간에 가스의 팽창이 주로 생기는 과압이 확실하다(과열액체의 플래싱은 무시)라고 가정하고 식(2.7-2)의 물리적 폭발의 경우 등온팽창모델을 사용한다.

두 번째는 과열액체의 플래싱이 생기는 과압이 확실하다는 가정 하에서 등온팽창모델을 사용한다. 그 모델식은 다음과 같다.

$$W = 5 \times 10^{-4} n_v R T_0 \ln \frac{P_1}{P_2} \dots (2.7-3)$$

여기서,

n<sub>v</sub> = 플래싱 되는 증기의 몰수 [lb · mol]

5 × 10<sup>-4</sup> = 환산인자 [TNT 1lbm = 2,000Btu]

세 번째 방법은 단일팽창으로 가정하고 TNT의 상당질량(W)을 가지고 추정한다.

## 2.7.3 증기운폭발모델링

(Vapor Cloud Explosion Modeling)

### (1) TNT 등가모델(TNT Equivalency Model)

#### (가) 모델식의 개요

TNT 등가모델은 상대연소열에 근거한 TNT의 상당량에 대한 가연성 물질의 양에 관계된다. TNT의 상당질량을 구하는 방법은 다음과 같다. 이식에서 구한 TNT의 상당질량을 이용하여 폭발과 곡선으로부터 과압을 추정하여 인명이나 구조물에 대한 영향을 추정한다.

$$W = \frac{\eta M H_c}{H_{cTNT}} \dots (2.7-4)$$

여기서,

η = 경험적 폭발효율(Yield), 0.01~0.2 [-]

M = 누출된 가연성 물질의 질량 [lbm]  
 H<sub>c</sub> = 가연성 물질의 순연소열 [Btu/lbm]  
 H<sub>c,TNT</sub> = TNT의 연소열, 2,000 [Btu/lbm]

## 2.8 사고영향모델링(Effect Modeling)

### 2.8.1 열복사 영향

#### (Thermal Radiation Effects)

열복사로 인한 사람의 상해정도는 노출된 시간과 사고의 열플럭스에 의존하며, 열복사로 인한 사람의 상해정도와 장치나 구조물의 손상에 대한 자료와 분석방법을 간단히 소개하고자 한다.

#### (1) 사람의 상해정도

FEMA는 고통한계와 2도 화상의 경우 다음 데이터를 제시하였다. 화상은 고통한계에 도달하면 상대적으로 단번에 빨리 일어난다.

또한 Tsao와 Perry(1979) 및 TNO(1992)에서는 액면화재와 플래쉬화재의 노출로 인한 사람에 대한 영향을 추정하기 위해 Probit (Probability Unit) 모델을 제시하였다.

<표 2> 복사열 강도와 상해정도

Thermal Radiation Intensity		Time-to-Pain Threshold* (sec)	Time for Second-Degree Burns(sec)
(Btu/hr/ft <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )		
300	1	115	663
600	2	45	187
1000	3	27	92
1300	4	18	57
1600	5	13	40
1900	6	11	30
2500	8	7	20
3200	10	5	14
3800	12	4	11

\* 화상은 고통한계에 도달하면 상대적으로 단번에 빨리 일어난다.

### 2.8.2 폭발 영향(Explosion Effects)

#### (1) 사람의 상해 정도

건물의 사람은 비산물 등에 의해 직접적인 폭발 영향을 받고 폭발 과압영향을 받기 쉽다. 또한 건물 구조물의 붕괴로 인한 간접적인 폭발영향을 받기

쉽다. Lees(1980)는 직접적인 것과 간접적인 폭발 영향에 대해 상해정도를 <표 3>과 같이 제시하였다.

Eisenberg(1975) 등은 핵폭발자료에 근거하여 직접적인 폭발영향으로 인한 사람의 상해정도에 대한 Probit 모델을 다음과 같이 제시하였다.

#### ① 폐출혈로 인한 사람의 경우

$$\text{Probit} = -77.1 + 6.91 \ln P_s \dots\dots\dots (2.8-1)$$

#### ② 고막파열의 경우

$$\text{Probit} = -15.6 + 1.93 \ln P_s \dots\dots\dots (2.8-2)$$

여기서 P<sub>s</sub> = 피크과압 [N/m<sup>2</sup>] 이다.

한편 TNO(1992)도 직접적인 폭발영향에 의해 사람의 상해정도를 나타내는 Probit 모델을 제시하였다.

### 2.8.3 독성영향(Toxic Effects)

#### (1) 사람의 피해

독성학의 기본적 원리는 유해성이 없는 물질이 없다는 것이고 단지 사용하는 물질이 유해성이 없도록 하는 방법이다. 독성물질의 노출로 인한 사람의 피해범위는 노출시간과 농도에 의존한다. 독성물질은 흡입, 섭취, 흡수 혹은 주사를 통해 몸으로 들어올 수 있다. 독성의 영향은 몸체의 독성을 제거하는 신체의 능력이나 독성물질이 활성화되지 않아 흡입속도를 초과할 때 나타난다.

독성물질에 대한 폭로는 급성이나 만성으로 분류된다. 급성폭로는 짧은 시간 내에 한번, 짧은 시간(Short-term) 폭로나 바람이 불지 않아 일어나는 심각한 폭로에 기인한다. 만성폭로는 장기간동안 복합노출로 인해 일어난다. 독성물질은 그들의 영향에 근거하여 다음과 같이 분류된다.

- ① 자극(Irritants)
- ② 단순질식(Simple Asphyxiants)
- ③ 화학적 질식(Chemical Asphyxiants)
- ④ 마취(Anesthetics) 혹은 혼수(Narcotics)





〈표 3〉 폭발과압의 영향

과압(psi)	피 해 영 향
0.03	Large glass windows which already under strain broken
0.04	Loud noise. Sonic boom glass failure
0.15	Typical pressure for glass failure
0.3	95% probability of no serious damage
0.5-1	Large and small windows usually shattered
0.7	Minor damage to house structures
1	Partial demolition of houses, made uninhabitable
1.3	Steel frame of clad building slightly distorted
2-3	Non-reinforced concrete or cinder walls shattered
2.3	Lower limit of serious structural damage
3	Steel frame building distorted and pulled from foundation
3-4	Rupture of oil storage tanks
5	Wooden utility poles snapped
5-7	Nearly complete destruction of houses
7	Loaded train wagons overturned
9	Loaded train boxcars completely demolished
10	Probable total destruction of buildings
300	Limit of crater lip

\* V. J. Clancey, "Diagnostic Features of Explosion Damage", Sixth Int. Mtg. of Forensic Sciences, Edinburgh(1972)

- ⑤ 민감성(Sensitizers)
- ⑥ 발암인자(Carcinogen)
- ⑦ 체내 독성(Systemic Poison)
- ⑧ 돌연변이원성(Mutagens)
- ⑨ 기형발생물질(Teratogenic Materials)

### 3. 결론

위험설비를 저장·취급·운전·이송·폐기하는 중에 잠재적인 위험요소를 찾아서 위험이 얼마나 자주 발생할 수 있고 위험이 발생한다면 그 피해가 얼마나 클 것인가를 평가하여 이를 토대로 한 근원적인 공정안전설계, 안전운전, 사고시 피해극소화대책을 수립하여 위험을 제거하거나 통제하여야 한다. 이들 위험설비에 의한 화재·폭발·누출사고는 일단 발생하면 인적·설비적인 피해가 매우 크기 때문이다.

한편, 우리 나라에서도 1996년 1월1일부터 화학공정위험성평가를 수행하여 정부에 제출, 심사에 통과해야만이 화학플랜트의 신규건설이나 개보수, 증설을 할 수 있으며 점차 정량적인 위험성평가의 수행이 요구되고 있다. 또한 해외플랜트 프로젝트

의 경우에는 이미 1990년대 초반부터 정성적 및 정량적인 공정위험성 평가가 주요 엔지니어링 성과품의 하나로서 발주처에 제출하여 상세설계 및 시공, 운전 시에 공정위험성평가로부터 도출된 조치사항을 반영토록 요구받고 있고 프로젝트 요구사항은 더욱 심도 있게 점증하고 있는 추세이다.

상당수의 이용자들이 소프트웨어를 이용할 때 필요한 데이터를 어떻게 입력하고 분석하는가를 정확히 이해하지 못한 채 활용하는 사례가 종종 있으므로, Consequence Analysis를 수행하기 위하여는 화공열역학·이동현상이론·방화공학·방폭공학·대기공학 등의 이론과 함께 공정설계, 화학플랜트 시운전의 실무경험을 바탕으로 하여, 소프트웨어 프로그램의 활용 시에 그 모델이나 이론식의 의미를 충분히 숙지하여 실제 사고 시나리오 상황에 근접하도록 적용하므로써 화학플랜트의 설계성·운전성·보수성을 향상시켜 궁극적으로 우리 인간의 삶을 쾌적하고도 안전하게 영위하여야 할 것이다.

(원고 접수일 1998. 7. 23)

### 참고문헌

1. Center for Chemical Process Safety, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, American Institute of Chemical Engineers, New York, 1987
2. 조지훈, 주종대, 화학공정위험성평가II, 한국산업안전공단, 1991
3. A. D. Little, Consequence Analysis Using SuperChems, ADL Inc., 1995
4. Flank P. Lees, Loss Prevention in the Process Industry, Butterworths, Boston, 1989
5. JBF and PSI, Consequence Assessment and Mitigation, American Institute of Chemical Engineers, New York, 1995
6. D.A. Crowl and J.F. Louvar, Chemical Process Safety : Fundamentals with Applications, Prentice Hall, 1990