

화재사고 결과 분석

- 위험물 화재사고 영향평가를 중심으로 -

이 영 순 / 서울산업대 교수, 공학박사

수도권 00시 민가가 밀집되어 있는 지역으로부터 약 4km정도 떨어진 곳에 가솔린, 등유, 경유 등을 저장하는 저유소를 설치하려하자 시민들이 크게 반대하여 공사가 지연된 일이 있었다. 시민들의 반대 이유는 이 저유소에서 화재가 발생하면 시내가 불바다가 되어 인적, 경제적 피해가 막대할 것이기 때문이라는 것이다. 저유소 건립을 추진하는 쪽에서 그렇지 않다고 아무리 설명을 해도 시민들은 이해가 되지 않았다. 저유소에서 화재가 발생하여도 시민에게 아무런 영향이 없음을 입증하지 않고는 해결될 수 없는 사항이었다. 전문가들이 그 저유소에 화재가 발생했다고 가정하고 과학적인 방법으로 화재가 주위에 주는 화재영향평가를 실시하여 주민에 피해가 없음을 입증해내자 주민들은 이를 이해하고 저유소 건립을 동의하기에 이르렀다.

최근 과학기술 및 산업의 발달로 인하여 위험물(가스 포함)의 이용이 점점 커지고 있다. 그리하여 위험물에 의한 사고도 증가하고 있다. 위험물 사고 중 가장 심각한 것은 화재 사고이다. 건물 등의 실내 화재의 경우는 화재영향평가가 적절하게 이루어져 화재 예방 및 화재가 발생했을 때 취해야 할 피해극소화에 관한 대책을 세워 실시하고 있다. 그러나 위험물로 인한 화재에 대한 영향평가는 적절하게 이루어지고 있지 못하고 있다.

위험물에 의한 화재를 예방하고 피해를 극소화하기 위한 근원적인 대책을 수립하기 위해서는 과학적이고 합리적인 영향평가가 선행되어야 한다.

최근 위험물 화재영향평가에 많이 사용하는 사고 결과 분석기법에 대하여 알아본다.

1. 사고 결과 분석이란 무엇인가.

사고를 방지하기 위하여 가장 먼저 행해져야 할 일은 공정 중에 존재하는 위험을 모두 찾아내어 이를 평가하는 것이다. 위험이 확인되지 않은 상황에서는 그 위험을 제거하고 통제하는 적절한 대책을 세울 수 없기 때문이다.

위험을 찾아서 평가하기 위해서는 위험을 찾는 방법이 있어야 하고, 찾아낸 위험은 얼마나 자주 발생하며 위험이 발생되었을 때 얼마나 큰 손실을 줄 수 있는가를 평가해내는 기법이 있어야 한다.

위험을 찾아내는 기법으로는 구조적이고 구체적인 일감을 제시할 수 있고, 위험을 찾지 않고는 넘어갈 수 없도록 하는 요소가 있고, 경쟁적으로 위험을 찾게 하는 요소 등 세가지 기능을 가진 Hazop Study기법과 같은 정성적 평가방법이 있고, 얼마나 위험이 자주 발생할 수 있는가를 측정하기 위한 FTA, ETA와 같은 정량적인 기법이 있다.

화재와 같은 대형 사고를 예방하기 위해서는 위험을 찾아내어 그 위험이 얼마나 자주 발생할 수 있는가를 평가하는 것도 중요하지만 사고가 발생할 때 어느 범위에 어떤 영향(손실)을 줄 수 있는가를 평가(이를 사고결과평가라 한다)하는 것도 중요하다.

사고결과평가란 화재나 폭발과 같은 사고가 발생했을 때 인명이나 재산상의 손실, 또는 업무중단 등으로 인한 손실 비용 등 안전보전에 영향을 주는 원치 않는 결과를 추산하는 것을 말한다.

위험물질이 들어있는 탱크내에서 화재사고가 발생하였을 때 그 결과 주위에 미치는 영향은 두가

지의 요인에 의하여 평가된다. 첫 번째 평가요인은 예견되는 위험한 사고가 발생했을 때 대상으로 하는 설비 (또는 인명)에 어떤 세기의 위험 분위기가 도달하느냐 하는 것이고, 두 번째 요인으로는 도달된 세기의 위험강도가 인체 또는 설비에 어떤 정도의 피해(손상)을 주느냐 하는 것이다.

사고결과평가는 사고의 종류와 형태, 사고시의 환경조건, 비상시를 대비한 손실감소 대책 등이 어떠한가에 따라 아주 크게 달라진다.

인화성 물질에 의하여 화재를 발생했을 경우 주위에 미치는 영향의 크기는 화재가 탱크내에서 발생하였느냐 아니면 다이크내로 유출되어 발생하였느냐에 따라 크게 다를 것이다. LPG나 암모니아와 같은 압축성 액체의 화재도 이들 위험물질이 용기나 배관의 작은 홀을 통하여 가스가 새어 나오면서 불이 붙은 것과 완전히 누출 되어 증발한 후에 점화된 경우와는 화재의 양상이나 주위에 미치는 영향이 아주 다를 것이다. 그리고 화재가 발생했을 때 기온, 습도, 지형적 조건도 화재가 미치는 결과에 영향을 준다. 또한 화재예방 및 화재시 피해극소화를 위한 대책이 어떠한가에 따라 달라진다. 위험물 이송배관이 파열되었다고 할 때 위험물을 공급하는 쪽에 위험물의 공급을 자동으로 차단할 수 있는 밸브를 설치하였다면 화재에 참여할 수 있는 위험물의 양은 배관에 잠겨져 있는 것에 국한될 것이다. 이와 같이 어떤 근원적인 안전조치를 실시하였는가에 따라 피해와 규모는 아주 달라진다.

2. 화재 모델링

가. 사고 시나리오

화재사고결과를 정밀하게 평가하기 위해서는 화재발생 시나리오를 명확하게 작성하여야 한다. 사고 시나리오는 그 공정에 있을 수 있는 모든 사고의 경우를 상정하는 것을 말한다. 이를테면 “저장 탱크에 사고로 인한 0.1m 크기의 구멍(hole)이 생성되어 유류가 누출되었고 누출시작후 상당기간 화재가 발생하였다”와 같이 그 공정에서 있을 수

있는 모든 사고의 가능성을 가정하여 구체적으로 표현하는 것을 일컫는다. 이때 주의할 것은 화재에 관여하는 누출량 등은 가장 최악의 경우를 상정하는 것이 좋다. 그러나 파이프라인이 파열되어 화재가 발생했다고 가정할 때 화재 검지기가 감지된 후 즉시 연료 공급쪽을 차단하는 자동차단 valve 시스템과 같이 신뢰성이 있는 설비를 설치한 경우에 있어서는 사고시 화재에 참여하는 물질의 양은 차단밸브이후 파이프라인 안에 있는 질량을 중심으로 시나리오를 작성하여야 할 것이다.

나. 화재 모델링

화재가 발생했을 때 얼마나 큰 에너지를 방출하고 방출된 에너지가 피해를 입힐 대상물질 또는 인체에 얼마나 크게 전달되느냐를 계산하려면 화재를 몇 가지 유형으로 나누어 모델화 하는 것이 좋다.

인화성 액체나 가스가 방출 또는 누출될 때 발생할 수 있는 화재의 형태는 보통 액면화재(Pool Fire), 제트화재(Jet Fire), 플래쉬 화재(Flash Fire)로 나눌 수 있다.

(1) 액면화재(Pool fire) 모델링

인화성 액체나 가스화재가 발생할 때에 주위에 인적, 재산상의 손실을 주는 가장 큰 요인은 화재시 발생하는 방출열(Thermal radiation)이다. 따라서 화재시의 방출열을 정량적으로 계산할 수 있으면 인화성 물질 및 가스를 저장·취급·사용하는 탱크 또는 공정설비의 안전대책을 수립하는데 크게 도움을 줄 것이다.

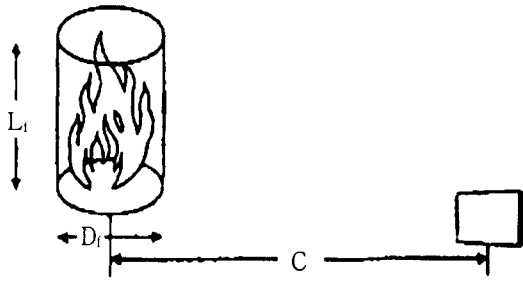
방출열이 주변의 대상물에 복사되어 전달되는 열플럭스 계산하는데는 보통 두가지 방법이 활용된다. Point Source Radiation Model(PSRM)과 Solid Flame Radiation Model(SFRM)이 그것이다.

이 두 모델의 차이는 화재시 내는 열원, 즉 화염을 어떻게 기술하느냐 하는 것이다. 앞의 모델은 화재의 열원이 하나의 점원으로 간주하는데 비해 뒤의 모델은 열원을 실린더와 같은 원주로 가정하고 있다.

Point Source Radiation 모델은 화재로부터 일정한 거리에 있는 인체에 주는 위험을 측정하는데 많이 사용되고 Solid Flame Radiation Model은 위험물 저장탱크, 위험물 공정설비화재의 영향평가에 잘 이용된다.

(가) 액체풀로부터의 열방출 계산

SFRM모델에 의하면 Pool Fire의 화염은 다음과 같은 수직 실린더로 가정한다.



L_f : flame length
 D_f : flame diameter
 C : distance from the flame center to the object

[그림 1] 풀 화재 모델

그림 1에서와 같이 화재가 발생했을 때 화염은 복사열을 방출하는데 이 열은 화재 중심으로부터 상당한 거리에 있는 인체 또는 시설물 등에 영향을 미치게 된다.

TNO 등은 임의의 거리에서 받는 복사열을 예측하는데 다음과 같은 식을 이용할 것을 제안하였다.

$$I_{th} = \tau FE$$

여기서 I_{th} = 거리 X에서 받는 복사열[W/m²]
 τ = 대기 투과도(Transmissivity)
 F = 기하학적 인자
 E = 표면방출열[W/m²]이다

① 표면 방출열의 계산

복사열의 강도 (I_{th})를 계산하기 위해서는 τ , F , E 를 알아야 하나 이중에서 가장 중요한 요인은 표면 방출열이다.

표면 방출열을 계산하는 방법으로는 Stefan and Boltzman Enuation 등 여러 가지가 있는데 TNO는 다음과 같은 식을 제시하였다.

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

여기서 E = 표면방출열[W/m²]
 m = 연소 속도 (km/m².sec)
 β = 복사분율
 H_c = 액체의 순연소열[J/Kg]
 b = 액면반경[m]
 a = 화염길이[m]

② 연소속도 계산

연소속도는 액면화재가 진행되는 동안 액면에서 가연성 물질이 증발되는 속도이다. 증발 속도는 화재시 발생하는 화염으로부터의 전도와 대류 및 복사에 의한 열에 의하여 결정된다.

주위 온도보다 비등점이 높은 액체의 연소속도는 다음식에 의하여 결정된다.

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

여기서 m = 연소속도, $\frac{Kg}{m^2 \text{ sec}}$
 C_t = Pool을 형성하는 액체의 비열, $\frac{J}{KgK}$
 H_c = 유출 물질의 연소열, J/kg
 ΔH_v = 액체의 증발 잠열, J/kg
 T_a = 대기온도, K
 T_b = 액체의 비등점, K 이다.

③ 화염높이 산정

화염의 높이는 다음 식으로 계산한다.

$$H = 84b \frac{M}{[pa(2gb)^{\frac{1}{2}}]^{0.61}}$$

여기서 b = Pool 반경 m

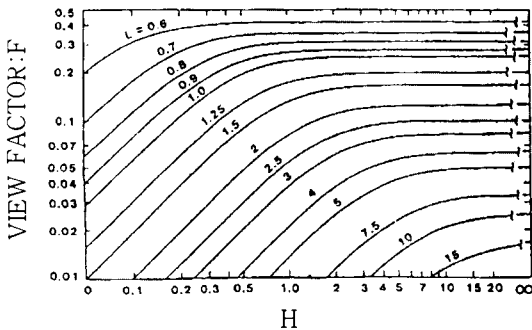
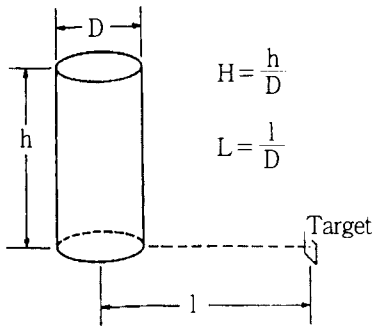
ρ_a = 공기밀도, kg/m^3
 g = 중력가속도, 9.81m/s^2

위의 방법으로 계산한 표면방출열 E는 화재 원 인물질의 종류, 액체 pool의 크기 등에 의하여 차이가 나나 탄화수소의 경우에는 보통 $E = 120\text{--}220\text{kw/m}^2$ 정도이다. 단, 풀의 직경이 아주 큰 경우에는 불완전 연소 등에 의하여 60kw/m^2 를 넘지 못하는 경우가 많다.

(나) 기하학적 인자 (형상계수) 산정

기하학적인 인자는 화염에 노출된 물체의 위치와 방향, 화염 모양의 영향을 고려한 인자를 말한다. 바람이 없을 때 화재시 화염은 수직형 실린더와 같다고 가정하면 기하학적 인자(형상계수)는 화염의 높이와 화염으로부터 대상물질이 떨어진 거리와 관계한다. 이 때의 형상계수는 그림 2에 의하여 구할 수 있다.

화염 실린더의 직경은 화재가 발생하고 있는 액



[그림 2] 수직 실린더형 화염에서 화염 높이와 대상물까지의 거리에 대한 형상계수 관계

체연료의 표면적으로 구할 수 있으나 화염의 높이는 단일식으로 바로 구할 수 없다. 화재가 실외나 실내냐에 따라 다르고 연료의 표면적이 원형이나 사각형이냐에 따라서 차이가 나기 때문이다.

바람이 불 경우에는 화염의 상태가 수직 실린더 형태가 아니고 경사진 모양일 것이다. 이런 때에는 바람속도를 고려하여 경사(tilt) 각도를 결정하여야 할 것이다.

(다) 열의 대기 투과도

대기 투과도를 계산하는 방법은 TNO법과 SFPE법이 있다.

TNO 방법에 의하면 대기 투과도는 화재와 노출된 대상물사이에서 대기에 의해 얼마나 많은 양의 복사열이 흡수 및 반사되지 않는가의 척도이다. 대기투과도 계수의 크기는 화재와 노출된 대상사이에 존재하는 공기중 수분량에 따라 결정된다.

대기 투과도는 포화수증기압 P_w , 상대습도 RH와 화재 가장자리에서 물체까지의 거리 X를 곱한 값으로 TNO에서 제시한 그림에 대입하여 계산할 수 있다. 대기투과도는 다음 식을 이용하여서도 구할 수 있다.

$$r = 2.02(P_{pw} \cdot X)^{-0.09}$$

여기서 P_{pw} = 수증기 분압, $P_w \times RH (\text{N/m}^2)$

X = 화염표면으로부터 대상체까지 거리, m이다.

SFPE방법에 의한 대기 투과도(r)는 다음 식에 의하여 계산된다

$$a_w = \epsilon_w(T_A / T_s)^{0.45}$$

$$a_c = \epsilon_c(T_o / T_s)^{0.65}$$

$$\gamma = 1 - a_w - a_c$$

여기서 T_s = Source Surface Temperature, K

T_A = Ambient Temperature, K

ϵ_w = Water Vapor Emissivity

ϵ_c = Carbon Dioxide Emissivity 이다.

(2) 제트화재 모델

제트화재 현상을 특성화하기 위한 모델은 여러 가지가 제시되어 있으나, 일반적으로 사용되는 모델은 미국석유화학협회(American Petrochemical Institute)에서 제시한 API RP - 521 모델이다. 이 모델을 적용하는데 필요한 가정은 다음과 같다.

- 누출속도는 일정하며, 지표면과 수직 방향이다.
- 누출되는 연소물질은 완전연소다.
- 대기중의 CO₂에 의한 열전도도의 감소는 고려하지 않는다.
- 불꽃으로 인한 열전달속도의 변화는 고려하지 않는다.

제트 화재에 의한 수직방향으로 발산되는 복사열, $I_{th}(KW/m^2)$ 는 1973년 Brzustowski 및 Sommers에 의해 아래 식과 같이 산출되었다.

$$I_{th} = \frac{\tau\beta Q_{th}}{4\pi D_{jetfire}^2}$$

여기서 Q_{th} 는 제트 화재에 의한 총 방출열(Emitted Thermal Radiation, kW), $D_{jetfire}$ 는 불꽃 중심으로부터 관심지점까지의 거리 m이고, 제트화재 불꽃에 의해 발산되는 열의 대기 투과도(Atmospheric Transmissivity), $\tau = 2.02(P_{pw} \cdot X_s)^{-0.09}$ 와 같다.

윗식에서 P_{pw} 는 수증기의 분압(Partial Pressure of Water Vapor), X_s 는 불꽃 표면으로부터 관심지점까지의 거리를 직선으로 나타낸 것이다. 또한 위에서 제트화재에 의해 야기되는 복사열의 분율 β 는 1989년 미국 화학공학회부설 화학공정안전센터(CCPS)에서 발간한 CPQRA 방법에서 수소가스(Hydrogen Gas)는 0.15, 메탄(Methane)은 0.2, 그리고 기타 탄화수소가스에 대하여 0.3의 값을 제안하고 있으나 API 모델에서는 일반적으로 1987년 Cook 등의 출구속도(Exit Velocity)를 이용하여 실험적인 방법에 의해 제안된 식을 사용하여 산출한다.

$$\beta = 0.321 - 0.000418\nu$$

여기서 ν 는 누출물질의 출구속도이다. 또한 불꽃의 길이(Flame Length), L(m)은 $L = (X_2^2 + Y_1^2)^{1/2}$ 로 나타낸다.

여기서는 제트화재에 의해 야기 되는 불꽃 끝점(Flame Tip)의 좌표를 나타내는 것으로 1976년 Brzustowski에 의해 제시되어 미국연방화재협회(NFPA) 기준에 규정된 절차에 따라 산출할 수 있다.

(3) 플래쉬화재 모델

휘발성을 갖는 많은 양의 가연성 물질이 대기중에 갑자기 누출되면 이 증기는 증기운을 형성하고 분산된다. 이 증기운이 연소하한(LFL)이하로 희석되기 전에 점화가 일어나면 플래쉬화재가 발생하게 된다.

지금까지 보고된 자료에 의하면 일반적으로 작은 양의 증기가 누출되는 경우에 거대한 과압이 생성되지 않고 플래쉬화재를 일으키며, 이와 같은 플래쉬화재는 초기에 모든 방향으로 급격히 팽창되고 초기연소 후에는 부력으로 인하여 상방향으로 팽창이 일어난다.

1975년 Eisenberg등은 Stefan-Boltzman식을 이용하여 복사열을 기준으로 한 모델을 제시하였는데 열플럭스의 산출 식은 다음과 같다.

$$I = \left[\frac{10^4 \times \exp(\text{Pr} + 14.9) / 2.56}{t} \right]^{3/4}$$

여기서 I = 복사열강도, W/m²

t = 폭로시간, s

Pr = Probit

상기식에서 열 플럭스를 산출하기 위해서는 변수로 화염의 온도가 필요하기 때문에 비현실적이다. 따라서 보다 단순한 접근방법은 피해범위가 어떤 지역내로 제한되어 있다고 가정하고 적절한 분산모델을 사용하여 LFL의 1/2거리 또는 LFL거리를 산출하는 방법이다. 이를 위해서는 다음과 같은 몇가지 가정이 필요하다. 즉 연소시간은 짧고 연소과정은 강열하지 않으며, 증기운의 열팽창은 부력으로 인하여 수직적으로 일어난다는 것이다. 그러나

이러한 가정은 실제현상과 차이를 나타내지만 계산과정을 단순화 할 수 있다. 따라서 이와 유사한 모델들은 분산모델로부터 얻을 수 있는 증기운의 크기만을 요구하기 때문에 흔히 사용된다.

3. 복사열의 영향

복사열에 의한 인체 및 구조물에 미치는 영향은 목표물에 수신되는 열강도(Heat flux) 및 노출 시간에 의존한다.

[표 1] 복사열이 인체에 고통을 주거나 2도 화상을 주는 열강도

Thermal Radiation Intensity		Time-to-Pain Threshold (sec)	Time for Second-Degree Burns(sec)
(Btu/hr/ft ²)	(Kw/m ²)		
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

FEMA는 복사열이 인체에 고통을 주거나 2도 화상을 입힐 수 있는 복사열의 강도는 표-1과 같고, 열플럭스 노출과 관련한 신체적 영향은 Perry(1970), TNO에 의하면 다음 식과 같다.

- 1도 화상시 : $Pr = -39.83 + 3.01861n_c(tI_{th})^{4/3}$
- 2도 화상시 : $Pr = -43.13 + 3.01861n_c(tI_{th})^{4/3}$
- 3도 화상시 : $Pr = -36.38 + 2.561n_c(tI_{th})^{4/3}$

여기서 t = 복사열의 폭로시간, s

I_{th} = 복사열의 강도, w/m² 이다.

또한 복사열은 구조물에도 영향을 미치는데 강

구조물인 경우에는 500-600℃에서 급격히 붕괴될 수 있으며 구조물이 직접 화염에 의하여 가열될 때에는 더욱 심하여 진다. World Bank 및 TNO는 복사열로 입힌 손상 정도는 각각 표 2와 표 3과 같음을 나타내었다.

[표 2] 복사열이 구조물에 미치는 영향 (The World Bank : 1988)

Thermal Radiation Intensity		Type of Damage
(Btu/hr/ft ²)	(Kw/m ²)	
11,890	37.5	Sufficient to Cause Damage to Process Equipment
7930	25.0	Minimum Energy Required to Ignite Wood at Indefinitely Long Exposures without a Flame
3960	12.5	Minimum Energy Required to Ignite Wood with a Flame or Cause Melting of Plastic Tubing

[표 3] 복사열이 구조물에 미치는 영향(TNO:1992)

Material	Critical Radiation Intensity(Kw/m ²)	
	Damage Level 1	Damage Level 2
Steel	100	25
Wood	15	2
Syntheticmaterials	15	2
Glass	4	-

4. 맺는말

인화성 액체나 가연성 가스를 사용하는 설비를 저장·취급·사용하는 설비 중에 잠재하고 있는 위험을 찾아서 위험이 얼마나 자주 발생할 수 있고 위험이 발생한다면 피해가 얼마나 클 것인가를 평가하여 이를 토대로 근원적인 안전한 설비 설계, 안전운전, 사고시 피해 극소화 대책을 수립하여 위

험을 제거하거나 통제하여야 한다. 이들 설비에 의한 화재사고는 일단 발생하면 인적·경제적인 피해가 아주 크기 때문이다.


화재 위험을 찾아내기는 쉬우나 화재시 그 피해 규모를 예측하는 것은 쉽지 않다. 다행히 화재결과를 예측 할 수 있는 이론식이 많이 제안되었고 이를 기초로 하여 위험물 취급공정에 대한 화재 사고 결과 평가를 위한 Software가 외국의 여러 회사에서 제작 판매되어 많이 활용되고 있다.

그러나 많은 이용자들은 활용하고 있는 Software가 어떤 계산 방법을 적용하여 어떻게 제작되었는지 확실히 알지 못할뿐만 아니라 이 Software를 이용할 때 필요한 데이터를 어떻게 넣어 주어야 하는가를 정확하게 이해하지 못한채 활용하는 사례가 있는 것으로 판단된다.

위와 같은 Software를 활용하여 위험물 또는 위험물을 취급하는 공정에 대하여 화재 영향평가를 실시하기 위해서는 화재 및 열전달이론, 그리고 평가 기법에 관한 지식이 필요하다.

위에서 지면관계상 화재사고영향평가에 관한 상세한 내용은 소개하지 못하였다. 보다 상세한 정보와 방법을 소개할 수 있는 기회가 있기를 바라고 이 분야에 보다 많은 연구가 국내에서도 이루어져 활용될 수 있기를 바란다.

참고문헌

1. Vanderberg A.C and H.G., TNO Prins Maurits LAB., "Current Reasearch at TNO on Vapor Cloud Explosion Modeling", TNO Prins Maurits Laboratory Netherlands, 1994.
2. Crowl D.A and Louvar J.F., "Chemical Process Safety of ALChE, New York, 1985.
3. Lees F.P., Loss Prevention in the Process Industries, "Bofferworths Heinemann Ltd, vol. 1, London & Boston, 1991.
4. Lueng, J.C. "A Generalized Correlation for One Component Homogeneous Equilibrium Flashing Choked Flow(AIChE)", Journal, Vol. 32, No.10, pp1743-1745, 1986.
5. Crowl D.A and Louvar J.F., "Chemical Process Safety Fundamentals with Application", Printic E-Hall., New York, pp127, 1990.
6. API(American petroloun Institute) Guide for "Pressure-Reliveing and Depressurmg System Recommended Practie", 521. 3rd, API, Washington D.C, Vol, 1990.
7. EPA(Environmental Protection Agency) "User's Guide for RVD 2.0-A Relief Valve Discharge Screeing Model" EPA-450/4-88-204 EPA, Jan, 1989. 

불법 사람 따로 없다 너도 조심 나도 조심