

폭발성 물질의 폭발에 따른 폭발압력 평가

윤용균^{1)*}

Evaluation of Blast Pressure Generated by an Explosion of Explosive Material

Yong-Kyun Yoon

Abstract Explosions of vapor cloud formed due to the leakage from installations with flammable fuels have often occurred in Korea and foreign countries. In this study, TNT equivalency method and Multi-Energy method for vapor cloud explosion blast modelling are described and demonstrated in a case study. As TNT equivalency method is simple and direct, it has been widely used for modelling a vapor cloud explosion blast. But TNT equivalency method found to be difficult to select a proper correlation between the amount of combustion energy produced from the vapor cloud explosion and the equivalent amount of TNT to model its blast effects. Multi-Energy method assumes that the strength of vapor cloud explosion blast depends on the layout of the space where the vapor cloud is spreading. Strictly speaking, the explosive potential of a vapor cloud is dependent upon the density of the obstructed regions. In this study, Flixborough accident are analyzed as a case study to assess the applicability of TNT equivalency method and Multi-Energy method. TNT equivalency method and Multi-Energy method found to be applicable if coefficient of TNT equivalency and coefficient of strength of explosion blast are selected properly.

Key words Vapor cloud explosion, TNT equivalency method, Multi-Energy method, Coefficient of TNT equivalency, Coefficient of strength of explosion blast

초 록 인화성 물질을 보유하고 있는 시설물에서 인화성 물질이 유출되어 형성된 증기운의 폭발이 국내외 해외에서 자주 발생하고 있다. 본 연구에서는 증기운 폭발에 따른 폭풍 효과를 모사하기 위해서 TNT 등가법과 다중에너지법을 적용하였다. TNT 등가법은 단순하고 직접적인 적용이 가능하기 때문에 증기운 폭발을 해석하기 위해서 지금까지 널리 사용되고 있다. 그러나 TNT 등가법은 증기운 폭발로부터 발생하는 연소에너지와 이를 TNT 등가량으로 환산하는데 필요한 적절한 상관관계를 선택하는 것이 어렵다는 근본적인 단점을 가지고 있다. 다중에너지법에서는 증기운 폭발의 강도가 증기운이 확산되는 지역에서의 확산 경로의 레이아웃에 따라 달라진다고 가정한다. 즉 증기운의 잠재적 폭발력은 혼잡지역의 혼잡정도에 따라 달라진다. 본 연구에서는 TNT 등가법과 다중에너지법의 적용성을 평가하기 위해서 Flixborough 폭발사고를 사례연구로 분석하였다. 분석 결과 TNT 등가계수와 폭발강도계수를 현장상황에 맞게 적절히 선택하는 경우 TNT 등가법과 다중에너지법은 증기운 폭발 사고를 분석하는데 적합할 것으로 예상된다.

핵심어 증기운 폭발, TNT 등가법, 다중에너지법, TNT 등가계수, 폭발강도계수

1) 세명대학교 소방방재학과 교수

* 교신저자 yoon63@semyung.ac.kr

접수일 : 2018년 12월 14일

심사 완료일 : 2018년 12월 19일

게재 승인일 : 2018년 12월 24일

1. 서론

폭발성 물질의 폭발 거동은 그 물질이 고체, 액체, 기체(분체 포함) 중에서 어떤 상으로 존재하느냐와 열용량, 증기압, 연소열 등과 같은 물리적 특성 및 반응도 등에 따라 달라진다. 화학적 폭발은 화학반응에 의해 발생하는데, 일반적인 인화물이나 가연물이 산화반응을 일으키는 연소반응과 화약류 등에 의한 분해반응 등이 여기에 속한다. 증기운 폭발(vapor cloud explosion)이나 화약류의 폭발과 같이 반응 매질을 통해 공간적으로 반응이 전파하는 화학반응을 전파 반응(propagating reaction)이라 하는데 여기에는 폭연(deflagration)과 폭굉(detonation)이 있다. 폭연과 폭굉을 단순하게 정의하면 점화가 된 후 연소영역에서의 화염의 전파 속도가 폭발성 물질 내에서의 음속보다 크면 폭굉이고 아음속이면 폭연이라 할 수 있다(Eckhoff, 2016).

증기운은 용기에 저장된 가스나 액체 인화물 또는 액화가스가 대기 중으로 유출되면서 공기와 섞여 예혼합(premixed)된 후 형성된다. 증기운이 형성된 후 바로 점화가 되는 경우에는 순간 화재(flash fire)가 발생하는 경우도 있으나 점화가 지체되는 경우 증기운 폭발이 일어날 수 있다. 증기운 화재가 발생하는 경우 점화 순간 폭굉 반응이 발생하는 경우도 있지만 보통은 단순한 연소반응에서 시작하여 폭연 또는 폭굉으로 진행되는 경우가 일반적이다.

국내에서도 증기운 폭발 사고가 자주 발생하고 있으며 인적·물적 피해가 컸던 폭발 사고로는 1994년에 발생한 아현동 도시가스 폭발 사고, 1995년에 발생한 대구 지하철 폭발 사고, 1998년에 발생한 부천 LPG 충전소 화재 폭발 사고 등을 들 수 있다.

증기운이 폭발하는 경우 충격파나 압력파를 발생하여 주변 건물이나 인체에 피해를 끼치기 때문에 폭원으로부터의 거리에 따른 과압(overpressure)의 크기를 평가하는 것이 필요하다. 증기운 폭발을 해석하기 위한 모델에는 두 종류가 있다. 첫 번째는 폭발에 사용된 증기운의 질량을 등가의 에너지를 방출하는 고성능 폭약, 특히 TNT의 질량으로 바꾸어 거리에 따른 과압의 변화를 평가하는 방법으로 TNT 등가법(TNT equivalency method)이 대표적이다. 두 번째는 주요 증기운 폭발 사고를 분석한 결과 증기운 폭발이

고성능 폭약의 폭발과는 압력파의 변화 양상이 다르다는 점을 고려하여 제안된 것으로 연료/공기 혼합기 폭발 모델로 불리며, 이중에서도 다중에너지법(Multi-Energy method)이 널리 사용되고 있다. TNT 등가법을 통해서는 거리에 따른 과압의 크기만을 얻을 수 있는 반면에 다중에너지법의 경우에는 거리에 따른 과압의 크기뿐만 아니라 양압력 지속시간 및 압력파의 파형에 대한 정보를 얻을 수 있다(CPR, 2005).

본 연구에서는 1974년에 영국 Flixborough에는 있는 Nypon 화학회사에서 발생한 증기운 폭발 사고에 TNT 등가법과 다중에너지법을 적용하여 분석을 실시하였다. 폭발 현장의 피해상황을 통해 추정된 과압의 크기와 두 방법에 의해 제시된 과압의 크기를 비교하여 두 방법의 타당성을 검토하였다.

2. 증기운 폭발 과정

용기 내에 저장된 고압가스나 액화가스가 사고로 누출되어 공기와 혼합된 후 형성된 증기운의 농도가 연소한계에 들고 주변에 있는 점화원에 의해 점화가 되면 다음의 과정을 거쳐 폭굉에 이르게 된다(Assael and Kakosimos, 2010).

- 1 단계 : 연소가스의 팽창에 의해 유발된 과압의 크기에 비례하는 속도로 화염이 전파한다. 이때 화염 전파 속도는 5~30m/s 정도이고, 발생한 과압은 매우 작다.

- 2 단계 : 화염 자체의 불안정성과 대규모 난류 와동으로 인해 팽창 연소가스의 전면면에 있는 화염면이 주름이 잡히듯이 변형되면서 화염면의 표면적이 증가하고 이로 인해 미연소 증기운과 접하는 면적이 증가하면서 연소속도가 증가하고 결국 화염 전파 속도가 증가하게 된다. 2 단계에서 단순 연소에서 폭연으로 연소반응이 전환되며 화염 전파 속도는 30~500m/s, 발생한 과압의 크기는 0.2~0.3kPa 정도가 된다.

- 3 단계 : 화염 전파 경로 상에 장애물이 존재하는 경우 팽창가스의 유동은 난류가 되면서 연소가스와 미연소 증기운이 접하는 지점에서 연소가스와 미연소 증기운이 혼재하는 연소영역이 발생하고 이로 인해 화염면의 표면적이 더욱 증가하면서 연소속도가 더 높아진다. 이때 화염 전파 속도는 500~1,000m/s,

발생한 과압의 크기는 100kPa에 달한다.

- 4 단계 : 화염 전파 속도가 계속 커지면서 난류 연소영역의 전면에 있는 미연소 증기운과 연소가스가 혼합되고 이로 인해 연소영역이 압축을 받고 온도가 증가한다. 연소영역의 온도가 자동발화온도 이상으로 되면 충격파가 발생하면서 연소반응이 폭연에서 폭굉으로 전환된다. 이때 화염 전파 속도는 2,200m/s에 달하고, 발생한 과압의 크기는 2MPa에 이른다.

모든 증기운이 폭굉 연소과정을 거치지지는 않으며 대부분은 단순 연소가 발생하는 경우가 많다. 폭연이나 폭굉이 발생하기 위해서는 증기운의 일부가 점화하면서 발생한 연소가스의 팽창 유동이 장애물을 만나면서 층류에서 난류로 바뀌는 과정이 필요하다. 장애물이 조밀하게 많을수록 팽창 유동의 난류 유동이 가속화되어 폭굉이 발생할 확률이 높아진다(Van den Berg, 1985).

폭굉이 발생하는 경우 폭원으로부터 이격된 특정 지점에 도달한 충격파는 순간적으로 최대 과압을 보이고 시간에 따라 과압의 크기가 감쇠하면서 음의 압력을 나타낸 후 대기압 상태로 접어든다. 폭굉에서는 양의 과압 영역에서의 충격량(impulse)의 크기는 음의 과압 영역에서의 충격량의 크기보다 매우 크다. 폭연에 의해 발생한 압력파의 변화 양상을 보면 특정 지점에 도달한 후 어느 정도 시간이 지난 후 최대 과압에 도달하고 그 이후에 음의 과압 상태를 보이면서 대기압으로 바뀐다. 폭연에서는 양의 과압 영역에서의 충격량과 음의 과압 영역에서의 충격량이 비슷하다는 특징이 있다(Sochet, 2010).

3. 폭발 모델

3.1 TNT 등가법

TNT는 군용 폭약의 표준으로 사용되어 왔기 때문에 TNT의 폭발에 따른 파괴 작용이 미치는 영향에 대한 연구가 오랫동안 이루어져 왔다. 따라서 다양한 종류의 폭발성 물질이 폭발했을 때 발생하는 과압의 크기를 결정하기 위해서 폭발성 물질의 질량을 폭발성 물질의 연소에너지와 등가의 폭발 에너지를 발생하는 TNT 등가 질량으로 전환하는 것은 TNT 폭발과 관련된 축적된 자료를 이용할 수 있다는 장점이 있다. TNT 등가법을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$W_{\text{TNT}} = \alpha_e \times \frac{W_f \times E_{\text{mf}}}{E_{\text{mTNT}}} = \alpha_m \times W_f \quad (1)$$

여기서 α_e : 에너지를 기준으로 한 TNT 등가계수, α_m : 질량을 기준으로 한 TNT 등가계수, E_{mf} : 폭발성 물질의 연소열(J/kg), E_{mTNT} : TNT의 폭발열(J/kg), W_f : 폭발성 물질의 질량(kg), W_{TNT} : TNT 등가질량(kg).

TNT 등가계수 중 에너지를 기준으로 한 TNT 등가계수를 일반적으로 많이 사용한다. 증기운 폭발에 TNT 등가법을 적용하여 해석하는 경우 가장 큰 문제는 TNT 등가계수를 얼마로 결정하느냐이다. α_e 가 보통 1~10%로 알려져 있지만, 주요 증기운 폭발 사고를 통계적으로 분석한 결과 평균 $\alpha_e = 4\%$ 가 분석 대상 폭발 사고의 대부분에 적합한 것으로 나타났고, 상한은 $\alpha_e = 10\%$ 로 분석되었다(Van den Berg and Lannoy, 1993).

(1)식에 따라 결정된 TNT 등가질량이 폭발하는 경우 발생하는 최대 과압의 크기를 결정하기 위해서는 Fig 1 과 같은 과압-환산거리 그래프를 이용하는 방법이 있다. 환산거리(scaled distance)는 (2)식에 의해 계산된다.

$$Z = \frac{x}{\sqrt[3]{W_{\text{TNT}}}} \quad (2)$$

여기서 Z : 환산거리(m/kg^{1/3}), x : 폭원 중심으로부터 이격된 거리(m).

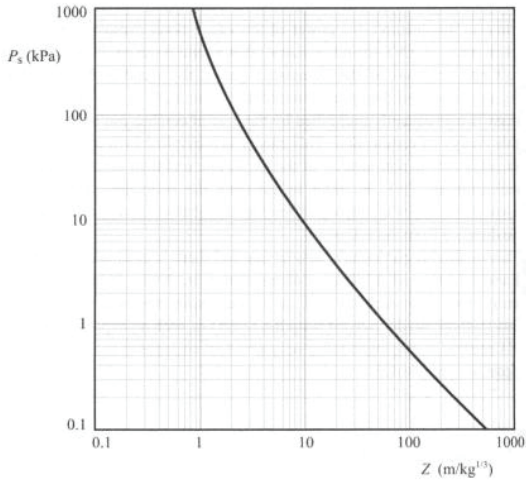


Fig. 1. Peak overpressure vs. scaled distance(After Assael and Kakosimos, 2010)

거리에 따른 과압을 결정하는 또 다른 방법은 경험식을 이용하는 것이다. 경험식에는 다음과 같은 식들이 있다(권상기, 2017; 윤용균, 2016; Karlos and Solomons, 2013; Assael and Kakosimos, 2010).

- 윤용균식 ; $P_s = (1.86 \times 10^3)Z^{-1.67}$ (3)

- Kinney식 ;

$$P_s = \frac{80,800 \times \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5}\right)^2\right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.32}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.35}\right)^2}} \quad (4)$$

- Mills식 ; $P_s = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z}$ (5)

상기 식들의 계산 결과는 모두 kPa 단위로 나타난다.

TNT 폭발에 따른 폭풍파는 높은 압력과 짧은 양 압력 지속시간을 갖는 충격파를 동반하지만 증기운 폭발은 상대적으로 낮은 압력과 긴 양압력 지속시간을 갖는 압력파를 발생시키기 때문에 TNT 등가법을 증기운 폭발 분석에 적용하는 것은 무리가 있다. 그러나 실제 증기운 폭발 사고에 기반을 둔 TNT 등가계수를 선택하여 해석을 실시하는 경우 어느 정도의 타당성 있는 결과를 제시하며, 대단히 단순하고 실질적인 해석방법이라는 점을 고려하면 TNT 등가법을 증기운 폭발의 1차적인 해석 수단으로 사용하는 것은

적절하다고 할 수 있다.

3.2 다중에너지법

TNT 등가법의 경우 증기운 전체가 폭발하는 것을 가정하는 것에 비해서 다중에너지법에서는 증기운 전체가 폭발하는 것이 아니고 부분적으로 구속된 지역이나 시설물 등이 밀집되어 있는 혼잡지역에 분포하는 증기운의 일부만 폭발을 한다고 가정한다. 또한 증기운이 퍼져있는 영역 내에 혼잡지역이 여러 개 있고 각 혼잡지역들이 서로 간에 어느 정도 이격된 경우에는 각 혼잡지역에서 개별적인 폭발이 연쇄적으로 발생하는 것으로 생각한다. 혼잡지역 외에 비혼잡지역에 퍼져있는 증기운은 폭발이 아니고 단순히 연소만 발생한다. 혼잡지역은 장비, 벽체, 건축물 등의 장애물이 밀집되어 있는 구역을 말하고, 비혼잡지역은 장애물이 없는 구역을 말한다(Van den Berg, 1985; Van den Berg and Lannoy, 1993).

폭원으로부터 일정 거리 이격된 지점에서의 최대 과압은 Fig. 2에 주어진 환산과압-환산거리 그래프를 통해서 결정할 수 있다. Fig. 2의 종축과 횡축에 표시된 P_s' (환산과압)와 r' (환산거리)은 다음 식과 같이 표시된다(Assael and Kakosimos, 2010).

$$P_s' = \frac{P_s}{P_a} \quad (6)$$

여기서 P_s : 과압(MPa), P_a : 대기압(0.1MPa).

$$r' = x \left(\frac{E}{P_a}\right)^{-1/3} \quad (7)$$

x : 폭원으로부터의 거리(m), E : 폭발에서 발생한 총에너지(MJ).

Fig. 2에서 내부 종축에 표시된 1~10의 숫자는 폭발강도계수(Coefficient of strength of explosion blast)를 나타내며, 숫자가 커질수록 강력한 위력의 폭발이 발생한다는 것을 뜻한다. 혼잡지역의 혼잡도가 증가하면 폭발강도계수도 증가한다. TNT 등가법을 적용할 때 TNT 등가계수를 적절하게 선정하는 것이 어렵듯이 다중에너지법에서는 혼잡지역의 혼잡도에 따른

적당한 폭발강도계수를 선택하는 것이 가장 어려운 문제로 대두된다. 폭원에서 가까운 근거리에서는 폭풍이 발생함으로 폭풍에 따른 폭풍효과를 보수적으로 평가하기 위해서는 폭발강도계수를 10으로 하는 것이 적당하고, 폭원에서 먼 원거리에서의 폭풍효과는 폭발강도계수를 6이상으로 가정하는 것이 적절한 것으로 알려져 있다(Van den Berg and Lannoy, 1993; CPR, 2005).

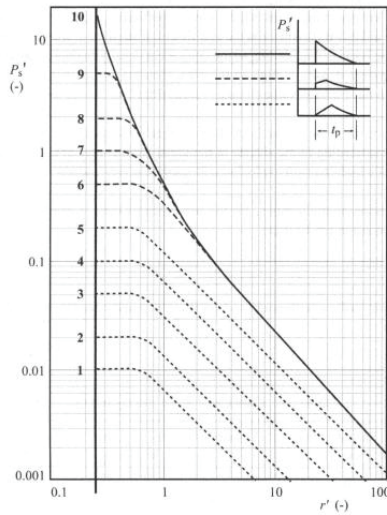


Fig. 2. Multi-Energy method blast chart: scaled overpressure as a function of scaled distance(After Assael and Kakosimos, 2010)

Fig. 2의 우측 상부에 있는 3개의 그래프는 압력파의 양의 지속시간(t_p)에 따른 압력파의 변화양상을 보여준다. 실선은 폭풍을 나타내고, 파선은 강력한 폭연, 점선은 낮은 강도의 폭연을 나타낸다. 각 폭발강도계수 값에 해당하는 곡선이 실선, 파선, 점선으로 나타난 것도 상기와 같은 의미를 갖는다.

폭발강도계수가 10과 3인 경우에는 다음 식을 사용하여 과압을 계산할 수 있다(Assael and Kakosimos, 2010).

$$P_s = 100 \times 10^{(-b \cdot \log_{10} r' - c)} \quad (\text{kPa}) \quad (8)$$

여기서 b, c : 상수이고, Table 1에 표시되어 있다.

Table 1. Coefficients b and c (After Assael and Kakosimos, 2010)

Coefficient of strength of explosion blast	Range of r'	b	c
10	$0.15 < r' < 1.0$	2.3721	0.3372
	$1.0 \leq r' \leq 2.5$	1.5236	0.3372
	$r' > 2.5$	1.1188	0.5120
3	$r' \leq 0.6$	0	1.3010
	$r' > 0.6$	0.9621	1.5145

TNT 등가법에서는 등가 계산된 TNT가 폭풍하는 것으로 가정하기 때문에 폭발 강도가 각기 다른 증기운 폭발을 모사하기에는 한계가 있다. 특히 폭연에 해당되는 비교적 낮은 폭발 강도를 갖는 증기운 폭발을 TNT 등가법으로 분석하는 것은 적절치가 않다. 다중에너지법은 폭발강도계수를 적절하게 선택하여 폭풍부터 폭연까지 모사할 수 있기 때문에 증기운 폭발에는 적응성이 있다고 할 수 있다.

4. 폭발 모델의 적용 및 분석

4.1 사례 개요

본 연구에서는 TNT 등가법과 다중에너지법의 적용성과 타당성을 평가하기 위해서 영국 Filxborough에 있는 Nypro 화학공장에서 발생한 증기운 폭발 사고를 사례 분석하였다. 폭발 사고로 인해 28명의 사망자와 76명의 부상자가 발생하였다.

Nypro 화학공장은 나일론 제조 원료인 카프로락탐(caprolactam)을 생산하는 회사이며, 카프로락탐 제조 공정 중에 씨클로헥산(cyclohexane)을 씨클로헥사논(cyclohexanone)으로 접촉 산화시키는 공정이 존재한다. 6개의 반응용기 중의 한 개에서 균열이 발견되어 임시적 용도의 바이패스 관을 설치하였는데, 바이패스 관을 적절하게 설계하지 못함으로 인해 가동이 시작된 후 바이패스 관의 파손이 발생하면서 150℃, 10기압의 씨클로헥산 40톤이 대기 중으로 누출되었다.

화학공장 및 주변 지역의 피해상황을 토대로 증기운 폭발에 따른 과압의 크기가 어느 정도였던가를 추정할 결과가 Table 2에 나타나있다(Assael and Kakosimos, 2010).

Table 2. Overpressure assumed at each location separated from blast source

Location	Distance from blast source (m)	Overpressure assumed (kPa)
A (Offices)	120	50
B (Restaurant)	130	40
C (Communications)	220	25
D (Storage tanks)	290	18

4.2 TNT 등가법의 적용

피해상황을 통해 유출된 40톤의 씨클로hex산 중 70%인 28톤이 증기운을 형성한 것으로 가정한다. 또한 씨클로hex산과 공기는 화학양론적으로 혼합되어 있고, 증기운의 온도는 씨클로hex산의 비등점(80.3℃)보다 약간 높았던 것으로 가정한다. 씨클로hex산의 연소열(ΔH_c)은 43,850kJ/kg 이다. 또한 80.3℃, 대기압에서 씨클로hex산의 밀도(ρ)는 3kg/m³이다.

TNT 등가계수인 α_e 가 4%와 10% 일 때의 TNT 등가량을 (1)식을 이용하여 계산하면 다음과 같다.

- $\alpha_e = 0.04$ (4%),

$$W_{TNT} = 0.04 \times \frac{28,000 \times 43,850}{4,650} = 10,562\text{kg}$$

- $\alpha_e = 0.1$ (10%),

$$W_{TNT} = 0.1 \times \frac{28,000 \times 43,850}{4,650} = 26,404\text{kg}$$

여기서 TNT의 폭발열은 계산방법에 따라 달라지지만 대략 4,100~4,650kJ/kg 범위를 갖는 것으로 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 TNT의 폭발열을 4,650kJ/kg으로 선택하였다(CPR, 2005; Karlos and

Solomos, 2013).

Fig. 3에는 (3), (4), (5)식을 적용하여 구한 환산거리에 따른 과압의 변화양상이 나타나 있다. 그림을 보면 환산거리가 3 이하인 지점에서는 환산거리가 증가함에 따라 과압이 급격하게 감소하는 것으로 나타나지만, 환산거리가 3 이상이 되는 경우에는 과압의 감소 정도가 완만해진다. 특히 환산거리가 20 이상인 원거리 지역에서는 인용된 3 개의 식으로부터 계산된 과압의 크기는 거의 같은 것으로 나타났다.

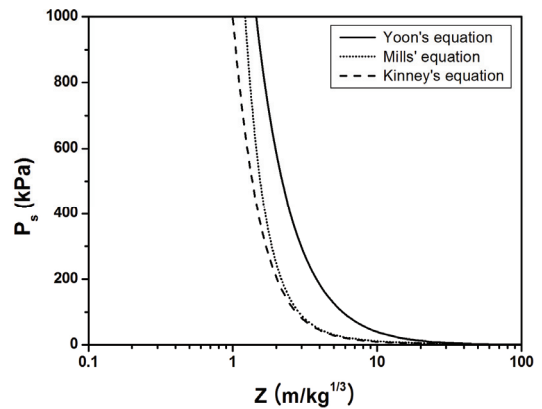


Fig. 3. Overpressure vs. scaled distance(TNT equivalency method).

Fig. 4에는 α_e 가 각각 4%, 10% 일 때 폭원으로부터 거리에 따른 과압의 크기가 주어졌다. 그림을 보면 Fig. 3과 유사한 과압의 변화양상을 보이는 것을 알 수 있다. Table 3에는 α_e 가 각각 4%, 10% 일 때의 거리에 따른 과압의 크기가 나타나 있다. Table 2에 주어진 추정 과압과 비교를 하면 윤용균식은 과대평가를, Mills식과 Kinney식은 과소평가를 한다는 것

Table 3. Overpressure calculated by the empirical equations at $\alpha_e = 4\%$, 10%

Distance (m)	Overpressure (kPa)					
	$\alpha_e = 4\%$			$\alpha_e = 10\%$		
	Yoon	Mills	Kinney	Yoon	Mills	Kinney
120	108.9	26.8	24.6	181.4	46.9	43.6
130	95.3	23.5	21.4	158.7	40.1	37.2
220	39.6	11.4	9.8	65.9	16.9	15.1
290	25.0	8.3	6.9	41.6	11.8	10.2

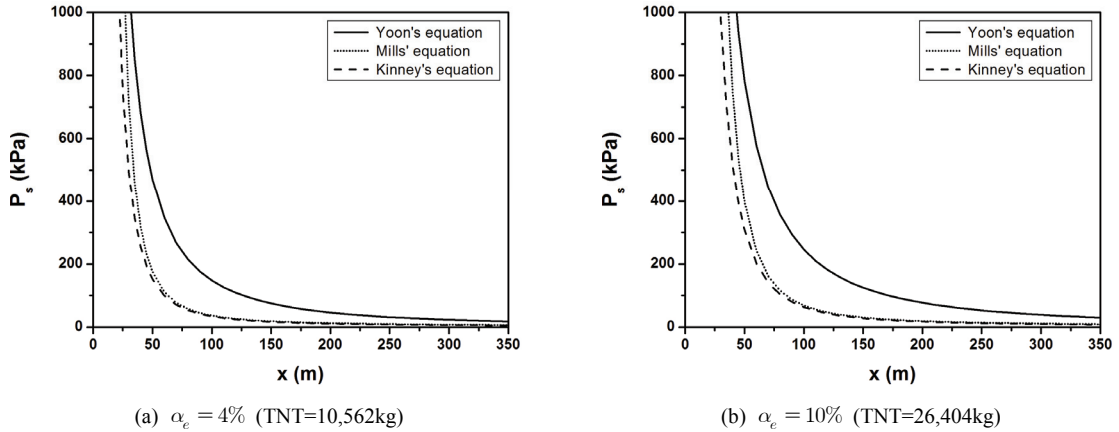


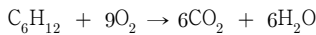
Fig. 4. Overpressure vs. distance(TNT equivalency method).

을 알 수 있다. 종합적으로 평가를 하면 $\alpha_e = 10\%$ 를 적용한 Mills식의 결과가 추정 과압과 가장 근사한 것으로 나타났다.

4.3 다중에너지법의 적용

TNT 등가법에서 사용한 기본적인 자료를 다중에너지법에서도 적용하였다. 증기운을 이루는 씨클로hex산의 부피는 유출량을 씨클로hex산의 밀도로 나누면 되기 때문에 $28,000/3 = 9,333\text{m}^3$ 이 된다.

씨클로hex산의 화학양론적 연소반응은 다음과 같다.



상기 연소반응에 따르면 씨클로hex산 1몰에 산소 9몰이 반응하므로 씨클로hex산 : 산소 비는 1:9가 되며, 공기 중의 산소의 부피 농도는 21% 정도이기 때문에 씨클로hex산 : 공기 비는 1:43이 된다. 따라서 씨클로hex산과 공기가 화학양론적으로 혼합된 증기운의 총 부피는 $9,333 \times 43 = 401,319\text{m}^3$ 이 된다.

Nypro 화학공장 배치도를 통해서 평가된 시설물이 설치된 지역의 총 체적은 $177,700\text{m}^3$ 로 나타났지만, 총 체적에서 시설물이 차지하는 비중이 50% 이기 때문에 시설물 사이 공간을 통해 증기운이 유동할 수 있는 체적은 $88,850\text{m}^3$ 이 된다(Assael and Kakosimos, 2010). 증기운의 총 부피 $401,319\text{m}^3$ 중 $88,850\text{m}^3$ 만이 혼합정도가 아주 높은 구역에 존재함으로 $88,850\text{m}^3$

의 증기운에 대해서는 폭발강도계수를 10으로 하고, 나머지 $312,469\text{m}^3$ 의 증기운은 비혼잡지역에 존재하기 때문에 폭발강도계수를 3으로 해도 될 것으로 생각된다.

혼잡지역에 존재하는 $88,850\text{m}^3$ 의 증기운에 포함된 씨클로hex산의 부피($V_{\text{cyclohexane}}$)는 $2,066\text{m}^3$ 임으로 총 폭발열은 다음과 같이 계산된다.

$$E = V_{\text{cyclohexane}} \times \Delta H_c \times \rho = 2,066 \times 43,850 \times 3 = 271.8\text{GJ}$$

(7), (8)식에 대입하여 계산한 폭원으로부터 거리에 따른 과압의 변화거동이 Fig. 5에 표시되어 있다. Fig. 5(a), (b)는 각기 폭발강도계수가 각기 3, 10 일 때를 나타낸다. 폭원으로부터의 거리가 각기 120, 130, 220, 290m에서의 과압의 크기는 폭발강도계수가 10인 경우 각기 65.8, 54.4, 23.0, 15.1kPa로, 폭발강도계수가 3인 경우에는 각기 3.5, 3.3, 2.0, 1.5kPa로 나타났다. 폭발강도계수가 3인 경우에는 아주 약한 폭연상태의 폭발반응이 진행되었음을 알 수 있다. Table 4에는 TNT 등가법에 적용된 경험식 중 추정 과압 값과 가장 근사한 값을 나타낸 Mills식에 의한 결과($\alpha_e=10\%$)와 폭발강도계수를 10으로 한 다중에너지법에 의한 결과가 표시되어 있다. Table 4를 보면 폭원으로부터 130m 이내의 근거리에서는 TNT 등가법이 추정값과 근사한 것으로 나타나고, 130m 이상의 원거리에서는 다중에너지법이 추정값에 가까운 것으로 나타났다.

TNT 등가계수와 폭발강도계수를 현장 상황에 맞게 적절히 선택하는 경우 두 방법을 통해 얻어진 결

Table 4. Overpressure assumed and calculated.

Location	Distance (m)	Overpressure (kPa)		
		Assumed	TNT equivalency method (Mills' equation)	Multi-Energy method
A	120	50	46.9	65.8
B	130	40	40.1	54.4
C	220	25	16.9	23.0
D	290	18	11.8	15.1

과는 타당성이 있을 것으로 생각된다.

5. 결론

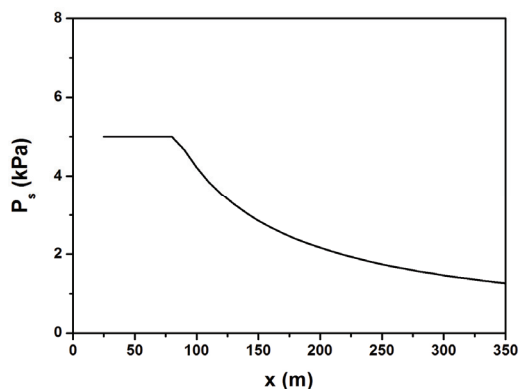
액체나 기체 인화물이 유출되면서 발생하는 증기운 폭발이 국내·외에서 자주 일어나고 있다. 증기운 폭발에 의해 발생하는 과압이 인체와 구조물에 미치는 영향을 평가하고, 폭발에 견딜 수 있는 방폭 구조물을 설계하기 위해서는 폭발현상을 적절히 모델화하는 작업이 필요하다.

본 연구에서는 영국 Filxborough에 있는 Nypro 화학공장에서 발생한 증기운 폭발 사고를 분석하기 위하여 TNT 등가법과 다중에너지법을 적용하였다. TNT 등가법을 통해 얻어진 TNT 등가질량을 Yoon 식, Mills 식, Kinney 식에 적용하여 구한 거리에 따른 과압과 현장 피해상황을 토대로 추정된 과압을 비교한 결과 Yoon 식은 과압을 과대평가하는 것으로,

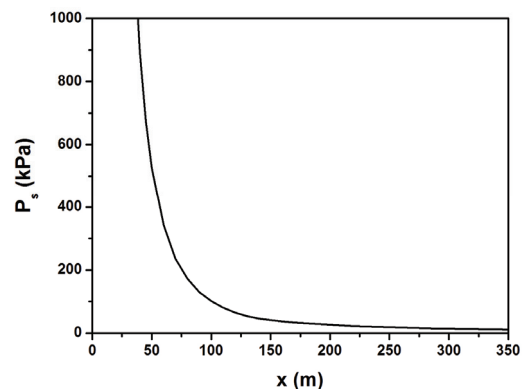
Mills 식과 Kinney 식은 과소평가하는 것으로 나타났다. 3 개의 경험식 중에서 Mills 식이 추정 과압에 가장 근사한 값을 제공하는 것으로 분석되었다. TNT 등가질량을 구할 때 일반적으로 TNT 등가계수의 상한으로 알려진 10%를 적용하였으나 실제 사례와 부합한 결과를 얻기 위해서는 TNT 등가계수를 10% 이상으로 선정하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

TNT 등가법의 경우 폭굉 반응이 일어나는 것을 가정하지만 일반적으로는 증기운 폭발에서는 폭연 반응이 자주 일어나기 때문에 폭연과 폭굉 반응을 고려하는 다중에너지법이 증기운 폭발 해석에 더 유리하다고 할 수 있다. 폭발강도계수를 10으로 하여 해석한 결과 거리가 130m 이내인 경우에는 추정 과압보다 큰 값을 나타내고, 거리가 130m 이상인 원거리지역에서는 추정 과압보다 작은 값을 나타냈다.

TNT 등가계수와 폭발강도계수를 현장 상황에 맞게 선택하는 것이 어렵기는 하지만 이들 두 계수를 적절하게 선정을 하는 경우 TNT 등가법과 다중에너지



(a) Coefficient of strength of explosion blast = 3



(b) Coefficient of strength of explosion blast = 10

Fig. 5. Overpressure vs. distance(Multi-Energy method).

지법을 이용하여 증기운 폭발을 타당성 있게 해석할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구입니다. 연구비를 지원해준 학교에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 권상기, 2017, 폭발파에 의한 폭발압력곡선 경험식에 관한 연구, 화약·발파(대한화약발파공학회지), Vol. 35, No. 1, pp. 1-17.
2. 윤용균, 2016, 폭발에 따른 최대과압 및 충격량 평가, 화약·발파(대한화약발파공학회지), Vol. 34, No. 4, pp. 28-34.
3. Assael, M.J. and K.E. Kakosimos, 2010, Fires, explosions, and toxic gas dispersions, CRC Press, pp. 149-206.
4. CPR, 2005, Methods for the calculation of physical effects, CPR 14E, Chap. 5, pp. 5.1-5.81.
5. Eckhoff, R.K., 2016, Explosion Hazards in the Process Industries, Elsevier Inc., pp. 23-30, 421-432.
6. Karlos, V. and G. Solomos, 2013, Calculation of blast loads for application to structural components, JRC Technical Reports, pp. 4-23.
7. Sochet, I., 2010, Blast effects of external explosions, 8th Int. Sympo. on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, pp. 1-32.
8. Van den Berg, A.C., 1985, The Multi-Energy method; A framework for vapour cloud explosion blast prediction, J. of Hazardous Materials, No. 12, pp. 1-10.
9. Van den Berg, A.C. and A. Lannoy, 1993, Methods for vapour cloud explosion blast modelling, J. of Hazardous Materials, No. 34, pp. 151-171.



윤용균

세명대학교 소방방재학과 교수

Tel: 043-649-1318

E-mail: yoon63@semyung.ac.kr