

ORIGINAL ARTICLE

증기운 폭발이 인체에 미치는 영향에 대한 확률론적 평가

윤용균^{1*}, 주은혜²

¹세명대학교 소방방재학과 교수, ²강동대학교 소방안전과 교수

Probabilistic Assessment of the Effects of Vapor Cloud Explosion on a Human Body

Yong-Kyun Yoon^{1*} and Eun-Hye Ju²

¹Professor, Department of Fire and Disaster Protection, Semyung University

²Professor, Department of Firefighter Administration, Gangdong University

*Corresponding author: yoong63@semyung.ac.kr

Received: February 9, 2021

Revised: February 15, 2021

Accepted: February 16, 2021

ABSTRACT

In this study, authors analyzed the vapor cloud explosion induced by propane leak at the PEMIX Terminal, which is the propane storage facility outside of Mexico City. TNT equivalence mass for the leaked 4750 kg propane was estimated to be 9398 kg. Blast parameters such as peak overpressure, positive phase duration, and impact at 40-400 (m) away from the center of the explosion were calculated by applying TNT Equivalency Method and Multi-Energy Method. The probability of damage due to lung damage, eardrum rupture, head impact, and whole-body displacement impact by applying the probit function obtained using blast parameters was evaluated. The peak overpressure obtained using Multi-Energy Method was found to be greater than the peak overpressure obtained by applying the TNT Equivalency Method at all distances considered, but it was evaluated that there was no significant difference from the points above 200 m. The peak overpressure obtained by Multi-Energy Method was computed to assess the extent of damage to the structure, and it was shown that structures within 100 m of the explosion center would collapse completely, and that the glasses of the structures 400 m away would be almost broken. The probability of death due to lung damage was shown to vary depending on a human body's position located in the propagating direction of shock wave, and if there is a reflecting surface in the immediate surroundings of a human body, the probability of death was estimated to be the greatest. The impact of shock wave on lung damage, eardrum rupture, head impact, and whole-body displacement impact was evaluated and found to affect whole-body impact < lung damage < eardrum rupture < head impact in order.

Keywords: Vapor cloud explosion, TNT Equivalency Method, Multi-Energy Method, Probit function, Probability of damage

초록

본 연구에서는 멕시코시티 외곽에 있는 프로판 저장기지인 PEMIX 터미널에서 발생한 프로판 누출에 따른 증기운 폭발을 분석하였다. 누출된 4750 kg의 프로판에 대한 TNT 등가량은 9398 kg으로 평가되었다. 폭원으로부터 40~400 (m) 떨어진 지점에서의 최대과압, 양의 압력 지속시간, 충격량과 같은 폭발 변수를 TNT 등가법과 다중에너지법을 적용하여 구하였다. 폭발 변수들을 이용하여 구한 프로비트 함수를



적용하여 폐 손상, 고막 파열, 머리 충격, 전신 전위 충격으로 인한 손상 확률을 평가하였다. 고려한 모든 거리에서 다중에너지법을 이용하여 구한 최대과압이 TNT 등가법을 적용하여 구한 최대과압보다 큰 것으로 나타났으나, 200 m 이후 지점부터는 큰 차이가 없는 것으로 평가되었다. 다중에너지법에 의해 구해진 최대과압을 적용하여 구조물 손상 범위를 평가한 결과 폭원으로부터 100 m 이내에 있는 구조물의 경우 완전히 붕괴될 것으로 예측되고, 400 m 떨어진 구조물의 유리창도 거의 파손될 것으로 추정되었다. 폐 손상에 의한 사망 확률은 충격파 진행방향으로 위치하고 있는 인체의 자세에 따라 달라지는 것으로 나타났으며, 인체 주변에 반사면이 있는 경우 사망 확률이 가장 큰 것으로 평가되었다. 충격파가 폐 손상, 고막 파열, 머리 충격, 전신 전위 충격에 미치는 영향을 평가한 결과 전신 전위 충격 < 폐 손상 < 고막 파열 < 머리 충격 순으로 영향을 미치는 것으로 나타났다.

핵심어: 증기운 폭발, TNT 등가법, 다중에너지법, 프로빗 함수, 손상 확률

1. 서론

터널 및 사면 굴착, 갱내 및 노천채굴 등의 작업을 수행하기 위해 발파공을 천공한 후 전색발파를 실시하는 경우 발파진동이 주변 환경에 미치는 주요 요인이 되지만, 지표면에서 무전색으로 폭약이 폭발하거나 증기운 폭발(vapor cloud explosion)이 발생하는 경우 폭풍파(blast wave)에 의한 압력 상승이 구조물이나 인체에 영향을 미치게 된다.

증기운은 화학공장, 액화 가스 저장소, 주유소 등에서 누출된 가연성 가스나 가연성 액체의 증발에 의한 증기가 공기와 섞이면서 형성된다. 연료/공기 혼합기인 증기운이 폭발하면서 대기압보다 큰 과압(overpressure)이 발생하는 경우를 증기운 폭발이라 한다. 증기운 폭발의 종류에는 폭연(deflagration)과 폭굉(detonation)이 있다. 폭연은 미연소된 연료/공기 혼합기 내에서의 화염 전파속도가 음속보다 낮은 경우를 말하며, 폭연에 의해 발생한 최대과압(peak overpressure)은 연소속도에 따라 달라진다. 폭굉은 연소생성물이 급격하게 팽창하면서 발생한 충격파가 전파하면서 연소반응을 지속시키고 화염 전파속도가 초음속인 경우를 말하며, 폭연인 경우보다 큰 최대과압을 발생시킨다(Mercx and van den Berg, 2005, AICE, 2010).

증기운 폭발에 의해 발생한 폭풍파는 대기압보다 큰 과압을 가지고 있기 때문에 진행방향에 존재하는 구조물이나 인체에 영향을 미치게 된다. 폭발이 인체에 미치는 영향을 분류하면 직접적 영향과 간접적 영향으로 구분할 수 있다. 직접적 영향은 1차적 영향으로 폭발에 따른 압력 상승이 인체의 민감한 장기인 폐나 고막에 손상을 유발하는 것을 의미한다. 간접적 영향은 2차적 영향과 3차적 영향으로 분류할 수 있다. 2차적 영향은 폭발에 의해 발생한 구조물의 파편이나 폭원 부근에 존재하던 물체들이 폭풍파에 의해 비산하면서 인체에 손상이 발생하는 것을 뜻한다. 3차적 영향은 인체가 폭풍파에 의해 전위(displacement)되면서 구조물 등에 부딪쳐 발생하는 손상을 말한다(Mercx, 1992, Assael and Kakosimos, 2010).

폭발이 인체에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 폭원으로부터 거리에 따른 최대과압의 크기를 계산해야 한다. 최대과압을 평가하는데 자주 사용되는 것이 TNT 등가법(TNT Equivalency Method)과 다중에너지법(Multi-Energy Method)이다. TNT 등가법은 TNT 이외의 폭약에 대한 폭발 특성을 평가하는데 일반적으로 사용되는 방법으로서 증기운 폭발을 해석하는데도 관행적으로 사용되고 있다. 다중에너지법은 증기운 폭발이 폭약 폭발과는 다르다는 점에 착안하여 제안된 방법으로 증기운이 확산된 영역에 존재하는 여러 구조물에 의한 밀폐 및 혼잡 정도에 따라 폭발 정도를 고려할 수 있다는 특징을 가지고 있다.

본 연구에서는 멕시코 수도인 멕시코시티 외곽에 위치한 프로판 저장기지인 PEMIX 터미널에서 1984년에 발생한 폭발 사고를 분석 대상으로 하였다. TNT 등가법과 다중에너지법을 적용하여 최대과압, 양의 압력 지속시간(positive phase duration), 충격량(impulse)과 같은 폭발 변수들을 계산하고 이 변수들을 이용하여 폐 손상, 고막 파열, 머리 충격, 전신 전위 충격에 의한 손상 확률을 평가하였다.

2. 폭발 특성 및 폭발 모델

2.1 폭발 특성

폭약이나 증기운에 의한 폭발이 발생하는 경우 급격한 압력상승이 발생하면서 압력상승은 폭원으로부터 폭풍파의 형태로 진행된다. 폭발물이 보유한 화학에너지의 전부가 연소 생성물의 팽창에 따른 폭풍파의 생성에 소비되지는 않는다. 폭약과 증기운 폭발의 경우 각기 화학에너지의 1/3과 40% 정도가 팽창과 같은 기계적에너지로 전환되어 폭풍파가 형성된다(Karlos and Solomos, 2013, Mercx and van den Berg, 2005). 폭풍파의 형상은 폭발의 규모와 폭원으로부터의 거리에 따라 달라진다. 순간적으로 최대 과압에 도달하는 폭풍파를 충격파(shock wave)라 하고, 충격파와는 다르게 최대과압에 도달하는데 일정 시간이 소요되는 폭풍파를 압력파(pressure wave)라 한다. Fig. 1에는 실제 충격파와 압력파의 형상이 표시되어 있다. 그림에서 P_s 는 최대과압, P_a 는 대기압, t_p 는 양의 압력의 지속시간을 나타낸다. Fig. 1(a)에서 보듯이 폭약이나 매우 강력한 증기운 폭발에서 발생하는 충격파의 경우 아주 빠른 시간 내에 최대과압에 도달했다가 지수적으로 감소를 하고 대기압보다 작은 음의 압력을 나타낸 후 대기압으로 돌아간다. 지수적으로 감소하는 양의 압력구간을 묘사하는 식으로는 Friedlander식이 가장 널리 사용된다(Karlos and Solomos, 2013). Fig. 1(b)에 주어진 압력파의 경우 최대과압에 도달하는데 어느 정도의 시간이 소요됨을 알 수 있으며 증기운 폭발에서는 일반적으로 압력파가 발생한다. 인체나 구조물에 영향을 미치는 주요 폭발 인자들은 양의 최대과압, 양의 충격량, 양의 압력 지속시간이다. 양의 압력 단계에서의 충격파와 압력파의 형상은 삼각형이기 때문에 충격파와 압력파의 형상을 삼각파형으로 단순화한 그림이 Fig. 2에 표시되어 있다.

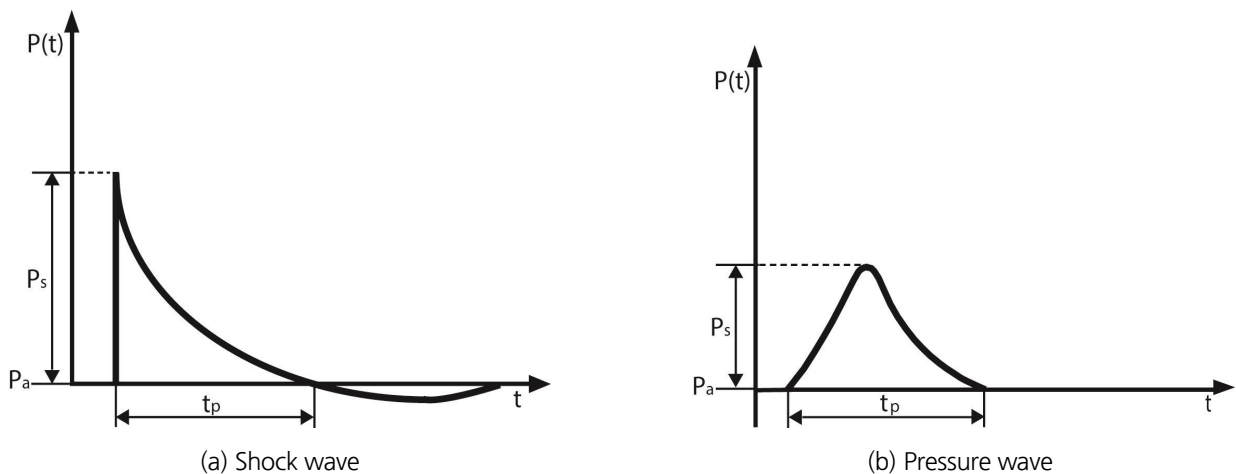


Fig. 1. Variations of overpressure with time of blasting wave

충격량(i_s)은 Fig. 1에 주어진 충격파와 압력파 파형에서 양의 압력 구간의 면적에 해당하기 때문에 식(1)과 같이 양의 압력 지속 시간에 따른 압력의 변화를 적분하면 얻을 수 있다(Assael and Kakosimos, 2010).

$$i_s = \int_{t_p} P_s(t) dt \quad (1)$$

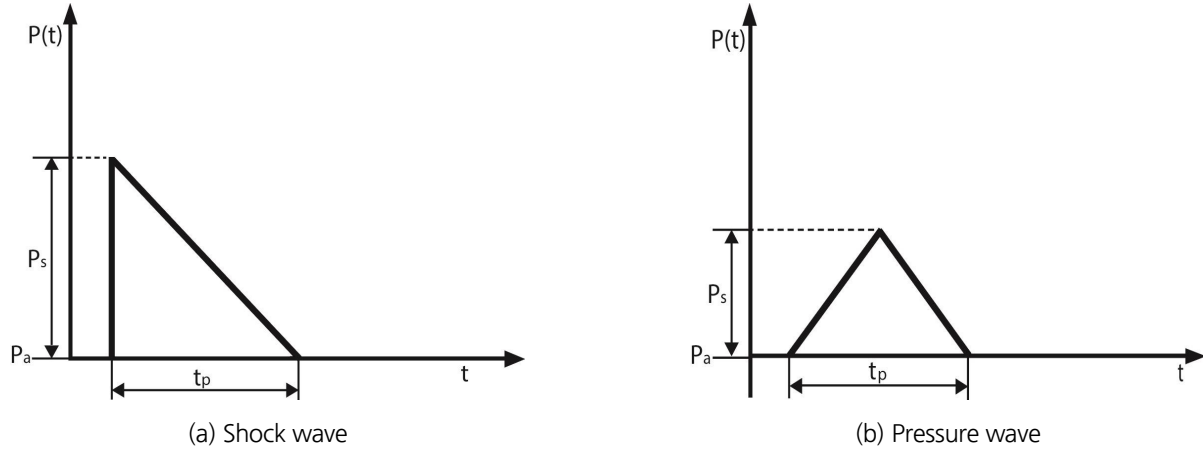


Fig. 2. Simplified overpressure-time relationships

Fig. 2와 같이 파형을 삼각형으로 단순화시킨 경우 충격량은 식 (2)와 같이 구해진다.

$$i_s = \frac{1}{2} \times P_s \times t_p \quad (2)$$

2.2 폭발 모델

폭발에 의해 발생한 폭발파는 압력 상승을 동반하면서 폭발 원주위로 진행하며 폭발원으로부터 거리가 멀어질수록 최대과압의 크기는 감소한다. 폭약이나 증기운 폭발에 의한 폭발파의 전파 특성을 분석하기 위한 모델로는 크게 두 가지를 들 수 있다.

첫 번째 폭발 모델은 폭약이나 증기운의 폭발에너지를 특정 고폭약의 등가량으로 전환하는 방법으로 일반적으로 사용되는 고폭약은 TNT다. TNT를 이용한 등가법을 TNT 등가법이라 한다. 주어진 폭약을 TNT 등가량으로 나타내기 위해서는 식 (3)을 사용한다(Karlos and Solomos, 2013).

$$M_e = \left(\frac{E_{\text{exp}}^d}{E_{\text{TNT}}^d} \right) M_{\text{exp}} \quad (3)$$

여기서, M_e : TNT 등가량(kg), E_{exp}^d : 폭약의 폭발에너지(J/kg), E_{TNT}^d : TNT의 폭발에너지(J/kg), M_{exp} : 폭약의 질량(kg) 이다. 식 (3)을 사용하여 TNT 등가량을 구한 후 거리에 따른 최대과압의 크기를 구하는 경험식으로는 Kinney식, Mills식, Kingery-Bulmash 식 등이 사용된다(Karlos and Solomos, 2013). 가장 널리 사용되는 Kingery-Bulmash 식을 이용하면 최대과압뿐만 아니라 충격량과 양의 압력 지속시간 등과 같은 폭발파의 여러 특성 변수를 계산할 수 있다. Kingery-Bulmash 다항식을 이용하여 군용 폭약에 대한 최대과압 및 충격량 등가량 계수를 구한 것이 Table 1에 표시되어 있다(UN SaferGuard, 2015). Table 1을 보면 Composition C4 폭약이 비교된 폭약 중 가장 큰 위력을 보인다는 것을 알 수 있다.

증기운 폭발인 경우 식 (3)을 수정한 식 (4)와 같은 TNT 등가량 식을 적용한다(Assael and Kakosimos, 2010).

$$M_e = f_e \left(\frac{E_{FG}}{E_{TNT}^d} \right) M_{FG} \quad (4)$$

여기서, f_e : 등가계수(equivalency factor) 또는 수율계수(yield factor), E_{FG} : 가연성 가스의 연소에너지(J/kg), M_{FG} : 가연성 가스의 질량(kg)이다. 증기운 폭발 해석에 TNT 등가법을 적용하는 경우 선택한 등가계수의 값에 따라 계산된 TNT 등가량의 차이가 발생한다. 연구자와 연구기관에 따라 다르기는 하지만 등가계수는 대략적으로 2~20(%)의 값을 갖는 것으로 알려져 있다(Mercx and van den Berg, 2005). TNT 등가법은 간단하기 때문에 사용의 편이성이 있지만 증기운 폭발에 적용하는 경우 폭발 근처에서는 최대과압을 과대평가하고, 원거리에서는 과소평가하는 경향이 있다(AICE, 2010).

Table 1. TNT equivalence mass factors for representative military explosives

Name of explosives	TNT equivalence mass factors	
	Peak overpressure	Impulse
TNT	1.0	1.0
Amatol	0.99	0.98
Composition C4	1.37	1.19
Cyclotol 60/40 (RDX/TNT)	1.14	1.09
HMX	1.02	1.03
Octol 75/25 (HMX/TNT)	1.06	1.06
PETN	1.27	1.11
RDX	1.14	1.09
Tetryl	1.07	1.05

두 번째 폭발 모델은 연료/공기 혼합기 장약 모델로 대표적인 것이 다중에너지법이다. 일반적으로 폭약은 폭발속도가 대단히 빨라 폭약의 어느 위치에서 폭발이 시작되더라도 폭약 전체에 걸쳐 폭발이 발생하기 때문에 TNT 이외의 폭약에 TNT 등가법을 적용하여도 매우 우수한 결과를 얻을 수 있다. 그러나, 증기운 폭발의 경우 증기운 확산 장소가 야외라 할지라도 밀폐 또는 개방되었는지의 여부에 따라 폭발의 정도가 달라지고, 증기운이 확산된 지역 내에 설치된 건물이나 시설물 등과 같은 장애물의 밀집도에 따라 난류화염 확산 정도가 달라져 단순 화재로부터 폭발까지의 여러 연소 형태가 나타날 수 있다.

다중에너지법은 증기운이 퍼져있는 장소의 밀폐 정도와 장애물의 밀집도에 따라 폭발 정도가 달라짐을 고려할 수 있는 방법이다. 폭발 정도를 고려하는 수단으로 1~10까지의 숫자로 표시되는 폭발강도계수(coefficient of strength explosion blast)를 도입하여 숫자가 커질수록 폭발의 위력이 강함을 나타낼 수 있다(van den Berg, 1985). 증기운 폭발을 평가하기 위해서는 TNT 등가법보다 다중에너지법이 효과적이지만 폭발 상태에 맞는 적절한 폭발강도계수를 선택하기 위한 표준적인 지침이 없다는 것이 다중에너지법의 단점이라 할 수 있다.

다중에너지법을 적용하여 최대과압을 평가하기 위해서는 무차원 최대과압-환산거리 그래프에서 적절한 폭발강도계수 그래프를 선택하여 최대과압을 구해야 하지만(van den Berg, 1985), 폭발강도계수가 10인 경우에는 무차원 최대과압-환산거리 그래프 대신 다음 식 (5), (6)을 사용하여 최대과압을 구할 수도 있다(Assael and Kakosimos, 2010).

$$P_s = 100 \times 10^{(-b \cdot \log_{10} r' - c)} \text{ (kPa)} \quad (5)$$

$$r' = r \left(\frac{E}{P_a} \right)^{1/3} \quad (6)$$

여기서, r' : 환산거리($0.25 < r' < 1.0$ 인 경우 $b=2.3721$, $c=0.3372$, $1.0 \leq r' \leq 2.5$ 인 경우 $b=1.5236$, $c=0.3372$, $r' > 2.5$ 인 경우 $b=1.1188$, $c=0.5120$), r : 폭발원으로부터의 거리(m), E : 폭발 에너지(MJ), P_a : 대기압(0.1 MPa)이다.

양의 압력 지속시간(t_p)은 다음 식을 통해 계산한다.

$$t_p = \frac{t_p'}{C_s} \left(\frac{E}{P_a} \right)^{1/3} \quad (7)$$

여기서, t_p' : 환산양의 압력 지속시간, C_s : 음속(340 m/s)이다. 식 (7)을 이용하여 t_p 를 구하기 위해서는 먼저 t_p' 를 결정해야 하는데 Fig. 3에는 폭발강도계수가 10인 경우의 t_p' - r' 그래프가 표시되어 있다.

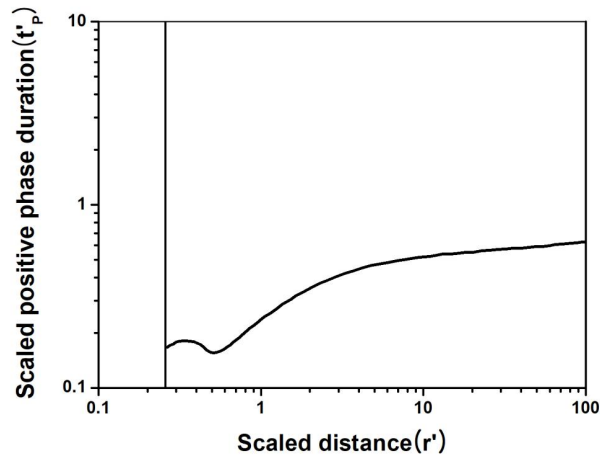


Fig. 3. Scaled positive phase duration vs scaled distance (After Yoon, 2019)

3. 폭발이 인체에 미치는 영향을 평가하기 위한 확률함수

폭발에 의해 발생한 대기압보다 큰 압력이 짧은 시간 내 인체에 작용하는 경우 폐나 고막과 같이 공기와 직접적으로 접촉하는 인체 기관은 손상을 받을 수 있다. 또한 폭발파에 의해 사람이 날려 딱딱한 물체에 부딪치는 경우 머리나 전신에 상당한 충격을 받을 수 있으며, 폭발원에서 발생하거나 폭발파에 의해 주변 물체에서 발생한 파편이 사람을 타격하는 경우에도 부상을 입을 수도 있다.

본 연구에서는 폭발에 의해 발생한 최대과압과 충격량이 인체에 작용하여 사망이나 부상을 일으킬 수 있는 확률을 계산하기 위하여 식 (8)과 같은 프로빗 함수를 적용하였다(Mercx and van den Berg, 2005, Assael and Kakosimos, 2010, Yoon, 2019). 식 (8)

을 이용하여 구한 값에 100을 곱하면 부상이나 사망이 발생할 수 있는 확률을 백분율로 구할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Pr - 5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (8)$$

여기서, P : 폭발로 인한 부상이나 사망이 발생할 수 있는 확률, Pr : 프로빗 함수, erf : 에러함수로 $x \geq 0$ 이고 $\operatorname{error} < 5 \times 10^{-4}$ 인 경우 $\operatorname{erf}(x) = 1 - (1 + 0.278393x + 0.230389x^2 + 0.000972x^3 + 0.078108x^4)^{-4}$ 로 나타난다. 에러함수는 $\operatorname{erf}(-x) = -\operatorname{erf}(x)$ 의 관계가 성립한다.

프로빗 함수는 다음 식과 같이 표시된다.

$$Pr = c_1 + c_2 \ln S \quad (9)$$

여기서, S : 최대과압이 미치는 영향의 종류에 따라 달라지는 변수, c_1, c_2 : S 에 따라 달라지는 계수이다.

폐 손상, 고막 파열, 머리 충격, 전신 전위 충격에 대한 프로빗 함수가 다음과 같이 표시된다(Mercx and van den Berg, 2005, Assael and Kakosimos, 2010).

① 폐 손상

충격파에 의해 폐 내, 외부의 압력차가 급격하게 발생하면 흉곽이 내부로 밀리면서 폐 손상이 발생한다. 폐 손상에 따른 사망 확률을 계산하기 위한 프로빗 함수는 식 (10)과 같다.

$$Pr = 5.0 - 5.74(\ln S) \quad (10)$$

$$S = \frac{4.2}{P} + \frac{1.3}{\bar{i}} \quad (11)$$

식 (11)에서 \bar{P} 와 \bar{i} 는 각기 환산과압(scaled overpressure)과 환산충격량(scaled impulse)으로 다음과 같이 표시된다.

$$\bar{P} = \frac{P'}{P_a} \quad (12)$$

$$\bar{i} = \frac{i_s}{\sqrt[3]{m} \sqrt{P_a}} = \left(\frac{1}{\sqrt[3]{m} \sqrt{P_a}} \right) \times \left(\frac{1}{2} P' t_p \right) \quad (13)$$

여기서, P' : 인체에 가해지는 초과압(Pa), P_a : 대기압(Pa), m : 충격파에 영향을 받는 사람의 질량(kg)으로 본 연구에서는 성인 남성의 표준적인 몸무게라 생각되는 75 kg을 적용하였다.

초과압은 충격파의 진행 방향에 위치하고 있는 사람의 자세에 따라 달라진다(Fig. 4 참조). Fig. 4(a)와 같이 사람이 충격파의 진

행방향으로 길게 누워있어 충격파가 아무 방해받지 않고 통과하는 경우 인체에 작용하는 총과압은 최대과압과 같다.

$$P' = P_s \quad (14)$$

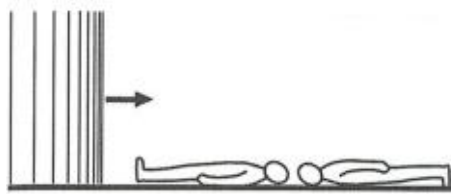
Fig. 4(b)와 같이 사람이 서있는 경우 충격파 후방에서 충격파 진행방향으로 움직이는 폭풍에 의한 동압력(Q)이 추가로 작용한다.

$$P' = P_s + Q = P_s + \frac{5P_s^2}{2P_s + 14P_a} \quad (15)$$

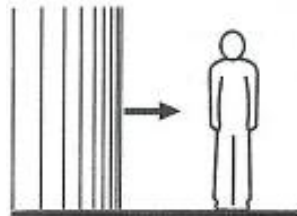
Fig. 4(c)와 같이 임의의 자세로 있는 사람 인근에 충격파가 반사되는 벽면이 있는 경우 총과압은 반사압력(P_r)과 같다.

$$P' = P_r = \frac{8P_s^2 + 14P_s \cdot P_a}{P_s + 7P_a} \quad (16)$$

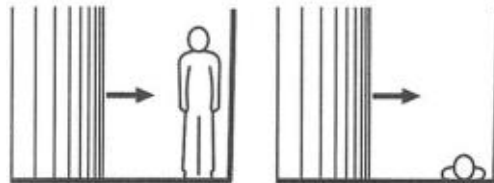
여기서, P_a 는 대기압으로 100 kPa로 가정한다.



(a) A case in which there is no obstruction of shock wave due to the human body



(b) A case in which shock wave flows around the human body



(c) A case in which shock wave is reflected against a surface in the immediate surroundings of a human body

Fig. 4. Position of the human body in relation to a propagating direction of shock wave (After Assael and Kakosimos, 2010)

② 고막 파열

충격파에 의한 고막 파열 확률을 평가하기 위한 프로빗 함수는 최대과압의 함수로 표시된다.

$$Pr = -12.6 + 1.524(\ln P_s) \quad (17)$$

③ 머리 충격

머리 충격에 따른 사망 확률을 평가하기 위한 프로빗 함수는 다음과 같이 표시된다.

$$Pr = 5.0 - 8.49(\ln S) \quad (18)$$

$$S = \frac{2.43 \times 10^3}{P_s} + \frac{4 \times 10^8}{P_s \cdot i_s} \quad (19)$$

④ 전신 전위 충격

충격파에 의해 사람이 날려 딱딱한 물체에 부딪치는 경우 발생할 수 있는 사망 확률을 계산하기 위한 프로빗 함수는 다음과 같이 표시된다.

$$Pr = 5.0 - 2.44(\ln S) \quad (20)$$

$$S = \frac{7.38 \times 10^3}{P_s} + \frac{1.3 \times 10^8}{P_s \cdot i_s} \quad (21)$$

4. 폭풍파에 의한 인체의 손상 확률

4.1 분석 사례

본 연구에서는 폭발에 따른 부상 및 사망 확률을 평가하는데 사용된 프로빗 함수의 적용성을 평가하기 위하여 1984년에 멕시코 시티 외곽에 있는 액화 프로판 저장 기지인 PEMIX 터미널에서 발생한 증기운 폭발 사고를 분석하였다. 사건 발생 후 조사된 자료에 의하면 저장된 16000 m³의 액화 프로판 중에서 4750 kg이 누출되었고, 폭발로 인해 550명의 사망자와 6400명의 부상자가 발생한 것으로 나타났다(Assael and Kakosimos, 2010).

다중에너지법을 적용하기 위해서는 증기운 폭발에서 발생한 총 연소열을 평가하는 것이 필요하다. 누출된 액화 프로판이 증발하면서 공기와 혼합된 프로판-공기 혼합기의 온도가 15°C라 가정하면 이 온도에서 프로판의 밀도(ρ)는 1.86 kg/m³이다. 누출된 프로판의 질량을 밀도로 나누면 부피(V)는 $\frac{4750 \text{ kg}}{1.86 \text{ kg/m}^3} \approx 2554 \text{ m}^3$ 이 된다. 프로판의 유효연소열(ΔH_c)은 46000 kJ/kg이기 때문에 폭발에 따른 총 연소열(E)은 다음과 같이 구해진다.

$$E = V \times \rho \times \Delta H_c = 2554 \times 1.86 \times 46000 = 218520 \text{ MJ}$$

4.2 폭발 변수 평가

프로빗 함수 값을 계산하기 위해서는 폭원으로부터 거리에 따른 최대과압과 충격량을 알아야 한다. 본 연구에서는 TNT 등가법과 다중에너지법을 적용하여 거리에 따른 최대과압과 충격량을 평가하였다.

TNT 등가법을 적용하기 위해서는 식 (4)을 이용하여 누출된 4750 kg의 프로판과 등가인 TNT의 질량을 계산해야 한다. 다중에너지법의 폭발강도계수가 10일 때의 최대과압과 등가계수가 20% 일 때의 최대과압이 근사한 것으로 알려져 있기 때문에 여기서는 TNT 등가법에 적용할 등가계수를 20%로 선정하였다(Mercx and van den Berg, 2005). TNT의 폭발열은 일정하지 않고 계산방법에 따라 달라지지만 본 연구에서는 4650 kJ/kg로 하였다(Yoon, 2018). 식 (4)을 사용하여 TNT 등가량을 구하면 다음과 같다.

$$M_e = f_e \left(\frac{E_{FG}}{E_{TNT}^d} \right) M_{FG} = 0.2 \times \left(\frac{46000}{4650} \right) \times 4750 \approx 9398 \text{ kg}$$

상기에서 기술한 TNT 등가법과 다중에너지법을 적용하여 폭원으로부터 거리에 따른 최대과압의 변화를 구한 결과가 Fig. 5에 표시되어 있다. 최대과압은 폭원으로부터 100 m 이격된 지점까지는 거리에 따라 급속하게 감소하고 그 이후부터는 완만하게 감소하는 것을 알 수 있다. 전 거리에 걸쳐 다중에너지법에 의해 구해진 최대과압의 크기가 TNT 등가법에 의해 계산된 최대과압보다 큰 것으로 나타났지만 200 m 이후 지점부터는 거의 유사한 것으로 나타났다. 폭원으로부터 200 m 떨어진 지점에 있는 구조물의 파괴 양상을 통해 추정된 최대과압은 30 kPa을 상회하는 것으로 조사되었고, 이 지점에서 다중에너지법과 TNT 등가법에 의해 평가된 최대과압은 각기 23.8, 16(kPa)으로 나타나 다중에너지법에 의해 계산된 결과가 실제 상황에 조금 더 부합함을 알 수 있다.

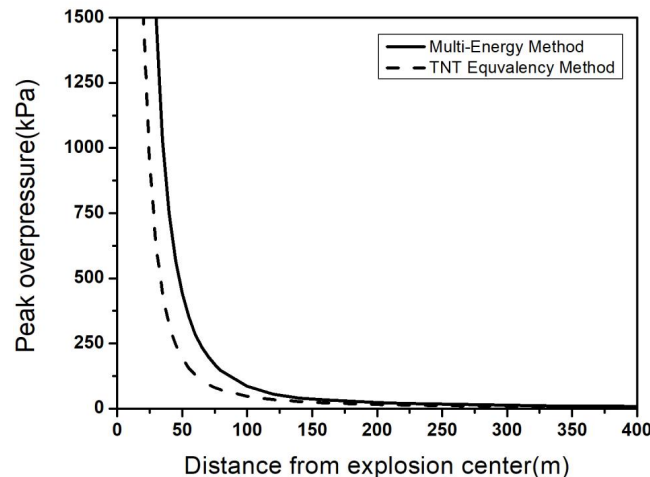


Fig. 5. Variations of peak overpressure with distance

다중에너지법에 의해 계산된 최대과압을 토대로 하여 구조물 손상 범위를 평가하면 폭원으로부터 100 m 지점 내에 있는 구조물은 전파 할 것으로 예측되고, 400 m 지점에서도 유리창이 거의 전부 파손될 것으로 추정된다(Table 2 참조).

Table 2. Damage levels with peak overpressure (After Assael and Kakosimos, 2010)

Damage levels	P_s (kPa)
Glass Panes	
Fracture 5%	0.7 – 1
Fracture 50%	1.4 – 3
Fracture 90%	3 – 6
Buildings	
Movement of tiles	3 – 5
Destruction of doors and window frames	6 – 9
Destruction of wall construction 50-70%	35 – 80
Near total demolition	80 – 260

Table 3에는 TNT 등가법과 다중에너지법을 적용하여 구한 최대과압, 충격량, 양의 압력 지속시간이 표시되어 있다. TNT 등가법의 경우 UN SaferGuard에서 제공하는 Kingery-Bulmash 다항식 수식틀을 사용하여 폭발 변수 값을 구했으며, 다중에너지법의 경우에는 식 (5), (6), (7)과 Fig. 3을 이용하여 폭발 변수 값을 계산하였다. 최대과압 및 양의 압력 지속시간은 다중에너지법이 TNT 등가법보다 큰 것으로 나타났기 때문에 충격량도 다중에너지법의 경우가 TNT 등가법의 경우보다 큰 것으로 계산되었다.

Table 3. Variations of blasting parameters with a distance from explosion center

Distance (m)	Blasting parameters					
	Peak overpressure (kPa)		Impulse (kPa·ms)		Positive phase duration (ms)	
	TNT Equivalency Method	Multi-Energy Method	TNT Equivalency Method	Multi-Energy Method	TNT Equivalency Method	Multi-Energy Method
40	321.01	750.22	2986.95	25397.89	42.83	67.71
80	71.98	144.92	1595.15	4654.31	70.2	64.23
120	34.68	55.39	1113.73	2397.22	83.83	86.56
160	22.03	33.44	852.86	1754.08	92.37	104.92
200	15.95	23.80	689.21	1412.48	99.29	118.70
240	12.44	18.03	577.95	1175.51	105.32	130.42
280	10.17	14.25	497.86	989.29	110.65	138.82
320	8.58	11.63	437.58	852.01	115.38	146.52
360	7.4	9.82	390.52	752.02	119.59	153.12
400	6.49	8.73	352.7	682.90	123.35	156.45

4.3 손상 확률 평가

충격파가 폐 손상에 미치는 영향은 충격파 진행방향으로 위치하고 있는 인체의 자세에 따라 달라진다. Table 4에는 Fig. 4(a)와 같이 누워 있는 경우(lying position), Fig. 4(b)와 같이 서있어서 충격파가 인체 주변으로 유동하는 경우(standing position), Fig. 4(c)와 같이 인체 주변에 반사면이 있는 경우(with reflecting surface)에 대한 사망 확률이 표시되어 있다. 확률이 0.001% 보다 작은 경우에는 0으로 표시하였다.

TNT 등가법의 경우 폭원으로부터 40 m 이내에 사람이 누워있는 경우에는 사망 확률이 0.55%로 사망 확률이 거의 없다고 볼 수 있지만, 서있거나 반사면이 있는 경우에는 사망 확률이 각기 78.06, 100 (%)로 사망 확률이 매우 높아진다. 반사압력을 구하는 식 (16)에 따르면 입사 최대과압이 아주 큰 경우(즉, $P_s \rightarrow \infty$ 인 경우)에는 반사압력이 입사 최대과압의 8배가 되고, 입사 최대과압이 아주 작은 경우(즉, $P_s \rightarrow 0$ 인 경우)에는 2배가 되는 것으로 나타난다. 따라서 입사 최대과압이 클수록 반사압력이 증가하여 사망 확률이 높아짐을 알 수 있다.

다중에너지법을 통해 구한 입사 최대과압은 TNT 등가법에서 구한 입사 최대과압보다 크기 때문에 폐 손상에 따른 사망 확률도 더 높을 것으로 예측할 수 있다. 표를 보면 40 m 이내 지점에서는 자세에 상관없이 거의 사망하는 것으로 평가된다.

Table 4. Probability of lung damage at each distance

Distance (m)	Probability of damage (%)					
	TNT Equivalency Method			Multi-Energy Method		
	Lying position	Standing position	With reflecting surface	Lying position	Standing position	With reflecting surface
40	0.55	78.06	100	99.60	100	100
80	0	0	0	0	0.001	32.96
120	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0
240	0	0	0	0	0	0
280	0	0	0	0	0	0
320	0	0	0	0	0	0
360	0	0	0	0	0	0
400	0	0	0	0	0	0

Table 5와 6에는 각기 TNT 등가법과 다중에너지법으로 구한 폐 손상, 고막 파열, 머리 충격, 전신 전위 충격에 따른 손상 확률이 표시되어 있다. 폐 손상의 경우에는 사망 확률이 가장 높은 충격파 진행방향에 반사면이 있는 경우를 선택하였다. Table 5에 따르면 폭원으로부터 40 m 지점에서는 충격파에 의한 폐 손상이나 머리 충격에 의해 사망할 확률이 100% 이고, 고막 파열 확률도 매우 높다. 머리 충격과 전신 전위 충격의 차이는 머리 충격의 경우 충격파에 의해 몸이 날려서 딱딱한 물체에 머리가 부딪치는 것을 말하고, 전신 전위 충격은 머리 이외의 부분이 부딪치는 경우를 뜻하기 때문에 전신 전위 충격에 따른 사망 확률은 낮을 수밖에 없다. 다중에너지법을 적용하여 구한 손상 확률이 표시된 Table 6을 보면 40 m 지점에서는 어느 경우나 사망 확률이 100%이고, 80 m 지점에서도 머리 충격에 의한 사망 확률이 100%에 가까운 것을 알 수 있다. 80 m 지점에서 폐 손상, 머리 충격, 전신 전위 충격에 의한 사망 확률을 비교해 보면 머리 충격에 의한 사망 확률이 가장 높고, 폐 손상과 전신 전위 충격에 의한 사망 확률은 높지 않다는 것을 알 수 있다. 이것은 불의의 폭발 사고를 당하는 경우 사망 확률을 낮추기 위해서는 머리를 보호하는 것이 필수적이라는 것을 뜻한다.

Table 5. Probability of damage at each distance as a function of damage levels (TNT Equivalency Method)

Distance (m)	Probability of damage (%)			
	Lung damage	Eardrum rupture	Head impact	Whole-body displacement impact
40	100	95.76	100	21.67
80	0	28.92	0	0
120	0	4.76	0	0
160	0	0.92	0	0
200	0	0.24	0	0
240	0	0.082	0	0
280	0	0.033	0	0
320	0	0.016	0	0
360	0	0.008	0	0
400	0	0.005	0	0

Table 6. Probability of damage at each distance as a function of damage levels (Multi-Energy Method)

Distance (m)	Probability of damage (%)			
	Lung damage	Eardrum rupture	Head impact	Whole-body displacement impact
40	100	99.85	100	100
80	32.96	69.55	99.99	4.79
120	0	17.02	0	0
160	0	4.23	0	0
200	0	1.25	0	0
240	0	0.41	0	0
280	0	0.15	0	0
320	0	0.061	0	0
360	0	0.029	0	0
400	0	0.017	0	0

5. 결론

본 연구에서는 멕시코의 멕시코시티 외곽에 있는 프로판 저장기지인 PEMIX 터미널에서 발생한 프로판 누출에 따른 증기운 폭발을 분석하였다. 저장기지에서 누출된 4750 kg의 프로판에 대한 TNT 등가량은 9398 kg으로 평가되었다. TNT 등가법과 다중에너지법을 적용하여 폭발원으로부터 거리에 따른 최대과압, 양의 압력 지속시간, 충격량을 구한 후 프로빗 함수를 적용하여 폐 손상, 고막 파열, 머리 충격, 전신 전위 충격에 따른 손상 확률을 평가하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 폭원으로부터 40~400 (m) 이격된 범위에서 다중에너지법과 TNT 등가법을 적용하여 최대과압을 구한 결과 각기 750.22~8.73 (kPa), 321.01~6.49 (kPa)로 계산되어 전 범위에 걸쳐 다중에너지법에 의한 최대과압이 TNT 등가법에 의한 최대과압보다 큰 것으로 나타났지만 200 m 이후 지점부터는 유사한 것으로 평가되었다.
- 2) 다중에너지법에 의해 구해진 최대과압을 적용하여 구조물 손상 범위를 평가한 결과 폭원으로부터 100 m 이내에 있는 구조물의 경우 완전히 붕괴될 것으로 예측되고, 400 m 이격된 구조물의 유리창도 거의 파손될 것으로 추정되었다.
- 3) 폐 손상에 의한 사망 확률은 충격파 진행방향으로 위치하고 있는 인체의 자세에 따라 달라지는 것으로 나타났다. 다중에너지법을 적용한 결과 40 m 떨어진 지점에서는 모든 인체의 자세에서 사망 확률이 100%에 가까운 것으로 나타났고, 120 m 이후 지점에서는 사망 확률이 0%인 것으로 나타났다. TNT 등가법을 적용한 경우에는 40 m 지점에서의 사망 확률이 인체 주변에 반사면이 있는 경우 100%, 서있는 자세에서는 78.06%, 누워있는 자세에서는 0.55%인 것으로 나타났고, 80 m 이후 지점에서 모든 자세에서 사망 확률이 0%로 평가되었다.
- 4) TNT 등가법을 적용하여 40 m 떨어진 지점에서 구한 머리 충격에 의한 사망 확률은 100%이고, 고막 파열 확률도 95.76%인 것으로 나타났다. 또한 같은 거리에서 다중에너지법을 적용하여 계산한 머리 충격과 전신 전위 충격에 의한 사망 확률은 100%인 것으로 나타났고, 고막 파열도 거의 100%에 가까운 것으로 평가되었다.
- 5) 다중에너지법을 적용하여 80 m 지점에서 구한 폐 손상, 고막 파열, 머리 충격, 전신 전위 충격에 의한 손상 확률을 비교한 결과 폭풍파의 영향이 전신 전위 충격 < 폐 손상 < 고막 파열 < 머리 충격 순으로 영향을 미치는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2020학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구입니다. 연구비를 지원해준 학교에 감사를 드립니다.

REFERENCES

- AICE, 2010, Guidelines for vapor cloud explosion, pressure vessel burst, BLEVE and flash fire hazards, Wiley, 4-240.
- Assael, M.J. and Kakosimos, K.E., 2010, Fires, explosions, and toxic gas dispersions; Effects calculation and risk analysis, CRC Press, 149-206.
- Karlos, V. and Solomos, G., 2013, Calculation of blast loads for application to structural components, EU, 2-33.
- Mercx, W.P.M., 1992, The consequences of explosion effects on humans, Ch. 3 of CPR 16E, Committee for the Prevention of Disasters, 3.1-3.44.
- Mercx, W.P.M. and van den Berg, A.C., 2005, Vapour cloud explosions, Ch. 5 of CPR 14E, Committee for the Prevention of Disasters, 5.1-5.81.
- UN SaferGuard, 2015, International Ammunition Technical Guideline(IATG); Formulae for ammunition management, UN, 18p.
- van den Berg, A.C., 1985, The Multi-Energy Method; A framework for vapor cloud explosion blast prediction, J. of Hazardous Materials, 12, 1-10.
- Yoon, Y.K., 2018, Evaluation of blast pressure generated by an explosion of explosive material, Explosive & Blasting, 36.4, 26-34.
- Yoon, Y.K., 2019, Effects of explosion on structures, Explosive & Blasting, 37.4, 10-16.