

증기운 폭발 예측 모델의 적용성 평가

윤용균¹⁾*

Assessment of the Applicability of Vapor Cloud Explosion Prediction Models

Yong-Kyun Yoon

Abstract This study evaluates the applicability of the TNT Equivalency Method, Multi-Energy Method, and Baker-Strehlow-Tang (BST) Method, which are blast prediction models used to determine the overpressure of blast wave generated from vapor cloud explosion. It is assumed that the propane leaked from a propane storage container with a capacity of 2000 kg installed in an area where studio houses and shopping centers are concentrated causes a vapor cloud explosion. The equivalent mass of TNT calculated by applying the TNT Equivalency Method is found to be 4061 kg. Change of overpressure with the distance obtained by the TNT Equivalency Method, Multi-Energy Method, and BST Method is rapid and the magnitude of overpressure obtained by the TNT Equivalency Method and BST method is generally similar within 100 m from explosion center. As a result of comparing the overpressure observed in the actual vapor cloud explosion case with the overpressure obtained by applying the TNT Equivalent Method, Multi-Energy Method, and BST Method, the BST Method is found to be the best fit. As a result of comparing the overpressure with the distance obtained by each explosion prediction model with the damage criteria for structure, it is estimated that the structure located within 90 m from explosion center would suffer a damage more than partial destruction, and glass panes of the structure separated by 600 m would be fractured.

Key words Vapor cloud explosion, Overpressure, TNT Equivalency Method, Multi-Energy Method, Baker-Strehlow-Tang(BST) Method

초 록 본 연구에서는 증기운 폭발 시 발생하는 폭풍파의 과압을 결정하는데 사용되는 폭발 예측 모델인 TNT등가법, 다중에너지법, Baker-Strehlow-Tang(BST)법의 적용성을 평가하였다. 원룸 주택과 상가가 밀집한 지역 내에 설치된 2000 kg 용량의 프로판 저장 용기에서 누출된 프로판이 증기운 폭발을 일으키는 것을 가정하였다. TNT등가법을 적용하여 계산한 2000 kg의 프로판과 등가인 TNT의 질량은 4061 kg인 것으로 나타났다. TNT등가법, 다중에너지법, BST법으로 구한 거리에 따른 과압의 변화 양상에 따르면 폭원으로부터 100 m 이내 지점에서는 과압의 감소가 급격하고, 대체적으로 TNT등가법과 BST법으로 구한 과압의 크기가 유사한 것으로 나타났다. 실제 증기운 폭발 사례에서 관찰된 과압과 TNT등가법, 다중에너지법, BST법을 적용하여 구한 과압을 비교한 결과 BST법이 가장 잘 맞는 것으로 나타났다. 각 폭발 예측 모델로 구한 거리에 따른 과압을 구조물 손상 기준과 비교한 결과 폭원으로부터 90 m 이내에 위치하는 구조물은 반파 이상의 피해를 볼 것으로 평가되었고, 600 m 이격된 구조물도 유리창이 파손되는 피해가 있을 것으로 예측되었다.

핵심어 증기운 폭발, 과압, TNT등가법, 다중에너지법, Baker-Strehlow-Tang(BST)법

1) 세명대학교 소방방재학과 교수

* 교신저자 yoon63@semyung.ac.kr

접 수 일 : 2022년 9월 12일

심사완료 : 2022년 9월 19일

게재승인 : 2022년 9월 21일

1. 서론

탱크에 저장된 기체 또는 액화 인화성 물질이 누출되는 경우 공기와 혼합되면서 증기운(Vapor cloud)이 형성된다. 증기운의 일부 또는 전체의 농도가 연소범위(Flammability limits)에 들고 곧바로 스파크나 화염 등의 점화에너지가 가해지는 경우 섬광화재(Flash fire)가 발생한다. 그러나, 여러 원인에 의해 5~10분 정도 점화가 지체되는 경우 증기운 폭발(Vapor cloud explosion)이 발생할 수 있다(Assael and Kakosimos, 2010). 증기운이 형성되었다고 무조건 폭발이 발생하는 것은 아니며 증기운 형성 지역에 존재하는 여러 형태의 구조물로 인해 증기운 흐름이 제한되거나 혼잡한 경우에 폭발의 가능성이 높아진다. 수송 파이프와 저장 또는 처리 탱크로 복잡하게 얽혀있는 화학공장이나 석유화학공장에서 기체 또는 액화 인화물이 누출되어 증기운이 형성된 후 폭발이 발생하는 것도 혼잡밀도가 높기 때문이다.

증기운 폭발은 대부분 폭연(Deflagration)으로 끝나지만 혼잡밀도가 아주 높은 지역에서 폭발이 발생하는 경우 폭연으로 시작해서 폭굉(Detonation)으로 전이되는 경우가 발생한다. 폭발과 관련된 변수로는 폭풍파(Blast wave)의 과압(Overpressure), 충격량(Impulse), 양의 과압 지속시간, 폭풍파의 속도, 폭풍파의 도착 시간 등을 생각할 수 있지만 구조물에 손상을 입히고 사람과 동물들에 피해를 주는 주요한 폭발 변수로는 과압과 충격량을 들 수 있다. 따라서, 폭발에 의해 발생한 폭풍파가 주변 구조물에 미치는 영향을 평가하고, 구조물을 안전하게 설계하기 위해서는 폭원으로부터 거리에 따른 과압의 크기를 아는 것이 필요하다. 충격량은 양의 과압 파형을 작용한 시간에 따라 적분하여 구할 수 있다(윤용균, 2019). 유리창과 같이 작고 취성이 큰 구조물의 경우에는 폭발 하중에 급속하게 반응하기 때문에 폭풍파의 최대 과압이 주요한 파괴 기준이 되나, 규모가 큰 구조물의 경우에는 폭발 하중에 느리게 반응을 하기 때문에 충격량이 중요 변수가 된다(Sochet, 2017)

증기운 폭발에 따른 폭발 변수를 예측하는데 3가지 방법이 주로 쓰이는데 TNT등가법(TNT Equivalency Method), 도해법, 수치해석법이 있다. TNT등가법은 TNT 이외의 화약이나 증기운이 폭발하는 경우 발생

하는 연소열의 총합과 같은 폭굉열을 발생하는 등가의 TNT 질량을 평가한 다음 TNT 폭발 도표를 이용하여 폭원으로부터 거리에 따른 폭풍 하중을 구하는 방법이다. TNT등가법은 절차가 단순하고 TNT에 대한 실험 자료가 많기 때문에 TNT 이외의 화약에 적용할 때는 신뢰성 높은 결과를 제시한다. 그러나, 폭발속도가 아주 빠른 화약과 다르게 증기운 폭발은 상대적으로 느리게 반응이 진행되는 관계로 연소열뿐만 아니라 연소속도가 폭풍압에 영향을 크게 미친다. 따라서, TNT등가법을 증기운 폭발에 적용하기에는 실제 증기운 폭발 사례 및 실험 결과와 차이와 있는 것으로 나타나지만 평가 절차가 단순하고 쉽기 때문에 폭풍압 평가를 위한 1차적인 평가방법으로 사용된다. 도해법으로는 다중에너지법(Multi-Energy Method)과 Baker-Strehlow-Tang(BST)법이 자주 사용된다. 두 방법 다 증기운이 퍼져있는 지역이 얼마나 차단되어 있는지와 여러 구조물이 얼마나 혼잡하게 설치되어 있는지를 고려하여 폭발 강도를 결정하고 폭발 강도에 적합한 도표를 제시한다(AICE, 2010). 본 연구에서는 원룸 건물과 상가 건물이 밀집한 지역에 설치된 2000 kg 용량의 프로판 저장 용기가 파손되어 액화 프로판이 누출되면서 증기운 폭발을 했을 경우를 가정한 후 TNT등가법, 다중에너지법, BST법을 적용하여 거리에 따른 폭풍압을 계산한 후 폭발 예측 모델의 적합성을 평가하였다.

2. 폭발 예측 모델의 종류

2.1 TNT등가법

TNT등가법은 TNT를 제외한 화약이나 인화성 가스 또는 액화 가스 등의 폭발성 물질이 폭발하는 경우 발생하는 연소열의 총합과 TNT의 폭굉열 총합이 등가가 되는 TNT의 질량을 계산하는 방법으로 TNT 등가 질량을 (1)식을 이용하여 구할 수 있다(AICE, 2010; Karlos and Solomos, 2013; Assael and Kakosimos, 2010)

$$M_{TNT} = \alpha_c \frac{\Delta H_f \cdot M_g}{\Delta H_{TNT}} \quad (1)$$

여기서, M_{TNT} : TNT 등가 질량(kg), α_c : TNT

등가 계수(TNT equivalency factor), ΔH_f : 폭발성 물질의 연소열(MJ/kg), ΔH_{TNT} : TNT의 폭발열(MJ/kg), M_g : 폭발성 물질의 질량(kg) 이다.

TNT 등가 계수의 경우 폭발성 물질이 화약인 경우 1이 되며, 인화성 기체나 액화 가스인 경우 1보다 작은 값을 갖게 된다. TNT 등가 계수는 화학에너지인 연소열이 기계적에너지인 폭발로 얼마나 전환되는 가를 나타내는 변환계수로 생각할 수 있다. 화학양론적으로 혼합된 탄화수소-공기 혼합기가 폭발하는 경우 연소열이 폭발에너지로 전환될 수 있는 이론적 최대치는 40% 이지만 증기운 폭발의 경우 누출된 증기운이 모두 폭발하는 것은 아니기 때문에 TNT 등가 계수는 40% 보다 상당히 작아질 것으로 예상할 수 있다. 주요한 증기운 폭발사고로부터 추정된 TNT 등가 계수는 1~20(%)인 것으로 알려져 있다(AICE, 2010; Karlos and Solomos, 2013).

TNT 등가 질량을 알면 폭원으로부터 환산거리(Scaled distance)에 따른 과압을 평가할 수 있다. 환산 거리는 Hopkinson-Cranz 삼승근 축척법칙으로 알려져 있으며 (2)식을 이용하여 구한다(Sochet, 2017).

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (2)$$

여기서, Z : 환산거리($m/kg^{-1/3}$), R : 폭원으로부터의 거리(m), W : 폭발성 물질의 질량(kg) 이다. 폭발성 물질의 질량과 폭원으로부터의 거리가 달라져도 환산거리가 같으면 과압과 충격파 속도는 변화가 없다.

환산거리에 따른 최대과압을 평가하는 방법에는 경험식을 사용하는 것과 도표를 이용하는 방법이 있다. 경험식으로는 Kinney식, Brode식, Mills식, Kingery-Bulmash식 등이 있으며, 이 중에서 대표적인 것은 Kinney식과 Kingery-Bulmash식이 있다. Kingery-Bulmash식은 환산거리가 40 이내인 경우에 적합하고, Kinney식은 환산거리가 500까지인 경우에도 적용할 수 있다(Karlos and Solomos, 2013; UN SaferGuard, 2021). 양의 압력 단계에서 환산거리에 따른 과압의 변화가 Fig. 1에 표시되어 있다. 그림에서 P_s 는 폭원으로부터 임의 거리에 이격된 지점에 입사되는 과압을, Z 는 환산거리를 나타낸다. Fig. 1은 기존의 문헌에 나와 있는 TNT

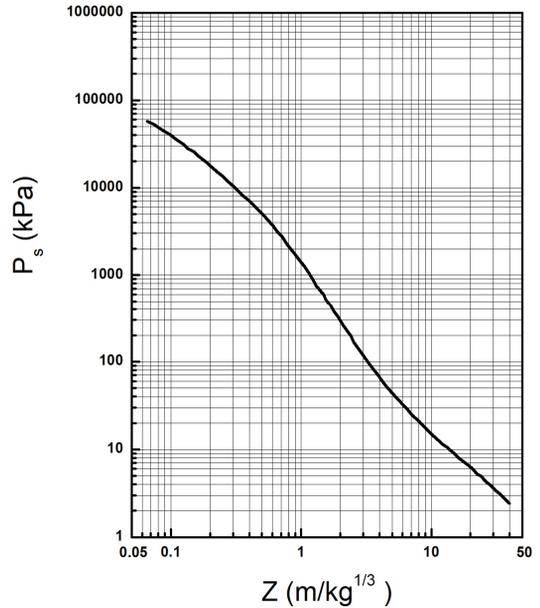


Fig. 1. Scaled distance vs. overpressure of shock wave of TNT charges from surface bursts(After Karlos and Solomos, 2013).

의 지표 폭발에 따른 여러 폭발특성(과압, 반사과압, 입사충격량, 반사충격량, 충격파 도달시간, 양의 압력 유지시간, 충격파 속도, 충격파 파장)의 변화를 나타내는 그래프 중에서 과압 부분만을 디지털화 하여 표시한 것이다(Karlos and Solomos, 2013). Fig. 1을 통해 임의의 환산거리에서의 과압을 평가할 수 있다.

2.2 다중에너지법

화약과 같이 폭발 시간이 매우 짧은 폭발성 물질이 폭발하는 경우 폭발에너지만으로 폭발 특성을 나타낼 수 있기 때문에 Fig. 1과 같이 환산거리에 따른 과압 관계가 단일 그래프로 표시될 수 있다. 그러나, 증기운 폭발인 경우 폭발에너지뿐만 아니라 연소에 따른 에너지 방출속도를 고려해야 하기 때문에 환산거리에 따른 과압 관계가 폭발 강도에 따라 여러 개의 그래프로 표시되게 된다(AICE, 2010). 따라서, 증기운 폭발이 폭발인 경우 TNT등가법을 적용해도 유사한 결과를 얻을 수 있지만 폭연인 경우에는 폭발 강도를 고려할 수 있는 다중에너지법이나 BST법을 적용하는 것이 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

TNT등가법에서는 폭원을 단일 폭원으로 가정하지

만 다중에너지법에서는 여러 개의 부폭원이 존재할 수 있다고 가정한다. 누출된 폭발성 물질이 어떠한 장애물도 존재하지 않고 구속되지 않은 야외에서 증기운을 형성하여 발화하는 경우 폭발이 아니고 연소 속도가 매우 빠른 섬광화재가 발생한다. 증기운이 폭발하기 위해서는 증기운이 퍼져있는 지역이 건축물이나 장비 등으로 인해 완전히 혼잡하거나 부분적으로 혼잡하여야 한다. 만일 증기운 내에 혼잡영역이 여러 개 존재하면 각 영역에서 폭발이 발생하게 된다. 혼잡밀도가 높을수록 강력한 폭발이 발생하고 증기운 내 혼잡하지 않는 구역에서는 섬광화재가 발생하게 된다(van den Berg, 1985; AICE, 2010; Assael and Kakosimos, 2010).

Fig. 2에는 증기운 폭발의 강도에 따라 거리에 따른 과압을 평가할 수 있는 그래프가 표시되어 있다. Fig. 2는 van den Berg(1985)가 제시한 것을 디지털화 하여 새롭게 그린 것이다. 그림에서 P'_s 와 r' 은 (3), (4)식을 통해 구한다.

$$P'_s = \frac{P_s}{P_a} \tag{3}$$

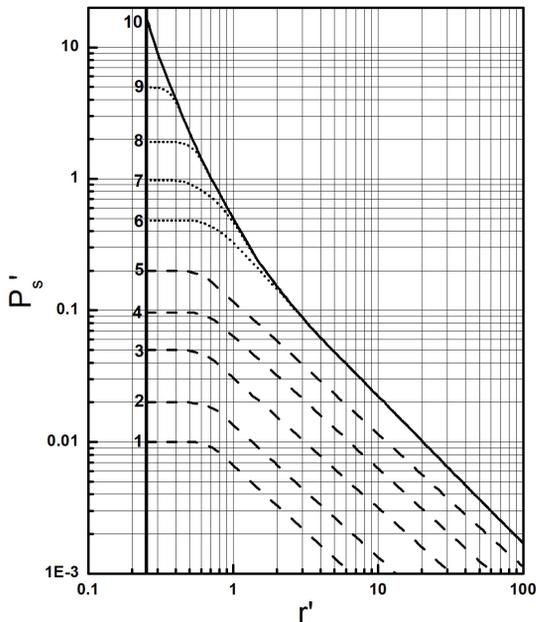


Fig. 2. Scaled distance vs. scaled overpressure with the coefficients of strength of the explosion blast (After van den Berg, 1985).

여기서, P'_s : 환산과압, P_s : 과압(MPa), P_a : 대기압(MPa) 이다.

$$r' = x \left(\frac{E}{P_a} \right)^{-1/3} \tag{4}$$

여기서, r' : 환산거리, x : 폭원으로부터의 거리 (m), E : 폭발로 생성된 총 연소에너지(MJ) 이다. 그림 안에서 각 그래프 옆에 표시된 1~10 사이의 숫자는 폭발강도계수(Coefficient of strength of the explosion blast)를 나타내며 10의 경우 폭발 강도가 가장 크고, 1은 폭발 강도가 가장 낮은 것을 뜻한다. 따라서, 폭발강도계수 10은 폭굉을, 1~5는 폭연을, 6~9는 폭굉과 폭연의 중간 정도의 폭발을 나타낸다.

Fig. 3에는 폭발강도계수에 따른 폭굉파의 파형이 표시되어 있다. 그림에서 P_s 는 과압, t 는 시간을 나타낸다. Fig. 3(a)과 같이 폭발강도계수가 10인 경우 충격파가 발생하고, Fig. 3(b)와 같이 폭발강도계수가 6~9인 경우에는 폭발파의 형태가 충격파와 압력파의 형태를 띠고, Fig. 3(c)와 같이 폭발강도계수가 1~5인 경우 압력파의 형태가 나타난다. 각 폭발강도계수를 나타내는 그래프를 얻기 위해서 van den Berg(1985)은 화학양론적으로 혼합된 탄화수소-공기 혼합기가 폭발

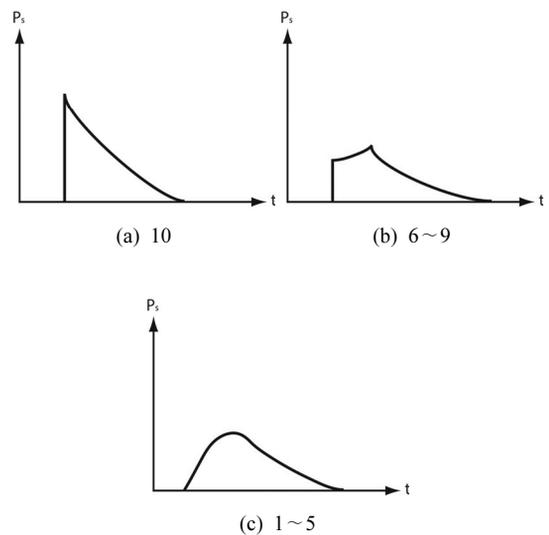


Fig. 3. Shape of blast wave with coefficient of strength of the explosion blast.

하여 폭발파가 반구상으로 전파하고 화염 전파 속도는 일정한 것으로 가정하여 수치해석을 실시하였다.

해석하고자 하는 증기운 폭발의 강도를 추정할 다음에 그 강도에 맞는 폭발강도계수를 선정한 후 그 폭발강도계수를 나타내는 그래프에서 임의의 환산거리에서의 환산과압을 읽어 과압을 평가할 수 있다. 폭발강도계수가 10과 3인 경우에는 다음과 같은 회귀식을 사용하여 임의 거리에서의 과압을 계산할 수도 있다(Assael and Kakosimos, 2010).

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

여기서, b, c : 상수로 Table 1에 표시되어 있다.

2.3 Baker–Strehlow–Tang(BST)법

BST법은 다중에너지법과 유사하게 혼합하고 구획된 부분 내에 퍼져있는 증기운만 폭발을 일으킨다고 가정한다. 화염이 장애물로 인해 혼합한 지역을 전파하는 경우 난류 에디가 발생하면서 화염 전면이 주름짐으로 인해 표면적이 증가하고 이로 인해 연소속도가 증가하면서 화염 전파 속도가 증가하여 최대 과압이 증가한다. BST법에서 폭발 폭풍의 강도를 선택하는데 요구되는 변수는 화염 전파 속도이다. 화염 전파 속도에 영향을 미치는 요인으로는 화염전선(Flame front)의 전파 방식, 연료의 반응도, 장애물 밀도(Density of obstacles) 이다(AICE, 2010; Assael and Kakosimos, 2010).

화염전선의 전파 방식은 1차원, 2차원, 3차원이 있다. 1차원 화염 전파는 실린더 내에서의와 같이 한 방향으로만 화염 전파가 발생하는 것을 뜻하며 보통 폭

굉전이(Deflagration to Detonation Transition, DDT)가 발생한다. 2차원 화염 전파는 강체 천장과 바닥 사이에서 발생하는 전파를 말한다. 3차원 화염 전파는 3차원으로 화염이 전파하는 것을 말한다. 연료 반응도는 연료가 증기운 폭발을 하는 경우 증기운 내에서 화염 전파 속도가 가속되는 경향을 나타내는 변수로써 반응도가 높을수록 화염 전파 속도와 과압이 증가한다. 연료의 연소속도가 0.40 m/s 이하인 경우 저반응도, 0.40~0.75 (m/s) 인 경우 중반응도, 0.75 m/s 이상인 경우 고반응도라 한다. 저반응도에 속하는 가스로는 메탄, 일산화탄소가 있고 고반응도에 속하는 가스로는 수소, 아세틸렌, 에틸렌, 에틸렌옥사이드, 프로필렌옥사이드 등이 있다. 나머지 가스들은 중반응도에 속한다. 장애물 밀도는 정의하기가 가장 어려운 변수로 장애물로 인한 지표면 차단비가 10% 이하면 낮음, 10~40 (%) 이면 중간, 40% 이상이면 높음이라고 할 수 있다(Baker et al., 1998; Tang & Baker, 1999; Assael and Kakosimos, 2010; Sari, 2011). Table 2에는 마하수(Mach number)로 표시된 화염 전파 속도가 표시되어 있다. 표에서 숫자는 마하수를 나타내며, DDT는 폭굉전이로 마하수는 5.2이다. 화염전선의 전파 방식에서 2.5D는 천장이 높은 곳에서 공기보다 무거운 가스가 누출되어 상방향으로 화염 전파가 일정 시간 동안 가능한 경우를 나타낸다. Fig. 4에는 화

Table 2. Baker-Strehlow-Tang method flame speed correlations (After Baker et al., 1998; Pierorazio et al., 2005)

Flame expansion	Fuel reactivity	Obstacle density		
		High	Medium	Low
1D	High	DDT	DDT	DDT
	Medium	2.27	1.77	1.03
	Low	2.27	1.03	0.294
2D	High	DDT	DDT	0.59
	Medium	1.6	0.66	0.47
	Low	0.66	0.47	0.079
2.5D	High	DDT	DDT	0.47
	Medium	1.0	0.55	0.29
	Low	0.50	0.35	0.053
3D	High	DDT	DDT	0.36
	Medium	0.50	0.44	0.11
	Low	0.34	0.23	0.026

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' < 1.2	2.3721	0.3372
	1.0 ≤ r' ≤ 2.5	1.5236	0.3372
	r' > 2.5	1.1188	0.5120
3	r' ≤ 0.6	0	1.3010
	r' > 0.6	0.9621	1.5145

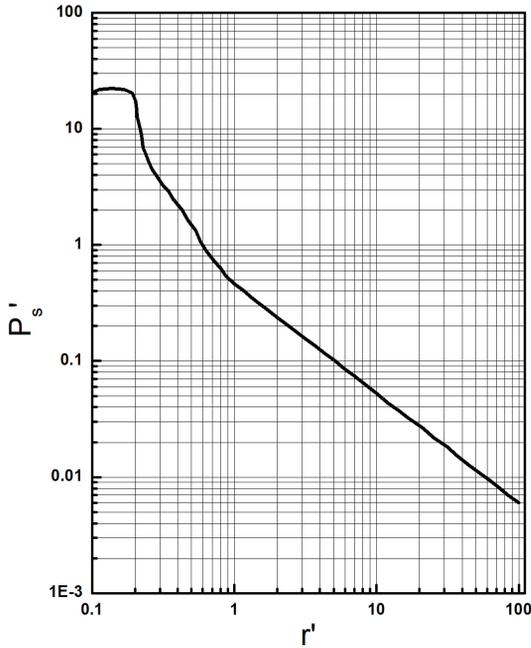


Fig. 4. Scaled distance vs. scaled overpressure with Mach number : 5.2(After Assael and Kakosimos, 2010)

염 전파 속도가 마하수 5.2인 경우의 환산거리에 따른 환산과압의 변화가 표시되어 있는데, Assael and Kakosimos(2010)이 제시한 도표 중 마하수 5.2에 해당하는 그래프만을 디지털이징하여 표시한 것이다. 그림에 있는 P'_s 와 r' 은 다중에너지지법에서 사용된 것과 동일하다.

3. 폭발 예측 모델의 평가

3.1 Kinney식과 Kingery-Bulmash식의 비교

상기에서 기술한 것과 같이 TNT등가법에서는 환산거리에 따른 과압의 변화를 평가하는데 Kinney식과 Kingery-Bulmash식이 자주 사용된다. 두 식은 다음과 같이 표시된다.

① Kinney식(Karlos and Solomos, 2013)

$$P_s = \frac{80,800 \times \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048} \right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.32} \right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.35} \right)^2}} \quad (6)$$

여기서, P_s : 과압(kPa), Z : 환산거리($m/kg^{1/3}$) 이다.

② Kingery-Bulmash식(UN SaferGuard, 2021)

$$P_s = C_0 + C_1 U + C_2 U^2 + \dots + C_n U^n \quad (7)$$

$$U = K_0 + K_1 T$$

여기서, P_s : 상용로그로 표시된 과압(bar), C_0, C_1, \dots, C_n : 상수, K_0, K_1 : 상수, T : 상용로그로 표시된 폭원으로부터의 거리(m)이다.

Kinney식과 Kingery-Bulmash식을 적용하여 구한 환산거리에 따른 과압의 변화가 Fig. 5에 표시되어 있다. Kinney식은 공중 폭발과 같이 폭풍파가 구형으로 전파되는 것을 대상으로 한 것이고, Kingery-Bulmash식은 지표면 폭발에서 반구형으로 폭풍파로 전파되는 것을 나타낸 것이다. 환산거리가 0.1~40의 범위에서 Kingery-Bulmash식에 의한 과압이 Kinney식에 의해 구해진 과압보다 크다는 것을 알 수 있다. Table 3에는 환산거리 1, 5, 10, 20, 40에서 Kingery-Bulmash식과 Kinney식에 의해 계산된 과압이 표시되어 있다. 각 환산거리에서 Kingery-Bulmash식에 의해 계산된

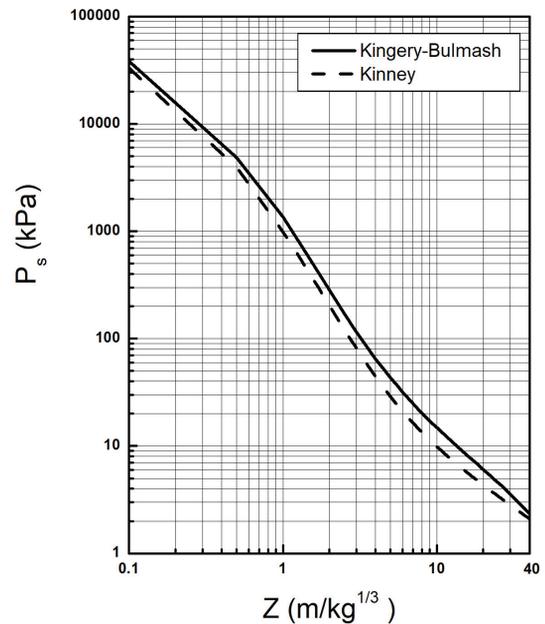


Fig. 5. Scaled distance vs. overpressure as a function of Kingery-Bulmash equation and Kinney equation.

Table 3. Overpressure as a function of scaled distance

Scaled distance ($m/kg^{1/3}$)	Overpressure (kPa)	
	Kingery-Bulmash Eq.	Kinney Eq.
1	1356.7	995.6
5	43.2	28.9
10	14.8	9.9
20	6.1	4.3
40	2.4	2.1

과압이 Kinney식에 의해 구해진 과압보다 각기 1.36, 1.49, 1.49, 1.42, 1.1 배 큰 것으로 나타난다. 본 연구에서는 증기운 폭발을 지표면 폭발로 가정하여 Kingery-Bulmash식을 적용하여 거리에 따른 과압을 평가하였다.

3.2 적용성 평가

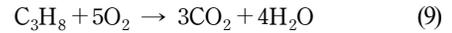
필로티 주차장이 있는 원룸 주택과 상가가 밀집한 지역의 상가 빌딩 외벽 근처에 2000 kg 용량의 프로판 저장 탱크가 설치되어 있고, 외부 요인으로 인해 탱크 외벽이 파열되면서 액화 프로판이 누출된 후 증기운을 형성하였다고 가정한다. 프로판이 누출된 지역이 혼합지역이고 각 건물의 외벽이 증기운 유동의 차단벽 역할을 하기 때문에 증기운이 폭발하는 경우 폭굉이 발생될 것으로 예측된다. 따라서, 다중에너지법에서 폭발강도계수를 10으로 선택하였다. 프로판은 반응도가 중에 속하기 때문에 혼합밀도가 높고 3차원으로 폭발하는 경우에 Table 2에 따르면 화염 전파 속도는 마하 0.50가 되지만 상용 프로판의 경우 연소 속도가 0.86 m/s가 되어 반응도가 높은 것으로 나타나기 때문에 BST법에서 화염 전파 속도를 마하 5.2로 채택하였다.

TNT등가법을 적용하기 위해서는 TNT 폭굉열, 프로판 연소열, TNT 등가 계수를 알아야 한다. TNT 폭굉열은 일정하지 않고 계산하는 방법에 따라 변하지만 수정K-W룰(Modified Kistiakowsky-Wilson rule)을 적용하여 구한 4.56 MJ/kg을 채택하였다(Sochet, 2017). 프로판의 연소열은 46.3 MJ/kg을 적용하였다(윤용균, 2015). British Gas는 혼합지역에서 증기운 폭발이 일어나는 경우 TNT 등가 계수를 20%로 제안하였고(AICE, 2010), 본 연구에서는 증기운 폭발이

폭굉으로 전이된다는 가정을 하였기 때문에 TNT 등가 계수를 20%로 결정하였다. 상기의 값들을 (1)식에 대입하면 TNT 등가 질량을 (8)식과 같이 구할 수 있다.

$$M_{TNT} = \alpha_e \frac{\Delta H_f \cdot M_p}{\Delta H_{TNT}} = 0.2 \times \frac{46.3 \times 2000}{4.56} \approx 4061 \text{ kg} \quad (8)$$

다중에너지법과 BST법을 적용하기 위해서는 증기운의 부피를 먼저 구해야 한다. 15°C, 1기압 하에서 프로판의 밀도는 1.86 kg/m³이기 때문에 프로판의 부피는 $\frac{2000}{1.86} \approx 1075 \text{ m}^3$ 이 된다. 증기운의 부피를 구하기 위해서는 (9)식과 같은 프로판(C₃H₈)의 연소 반응식을 이용한다.



(9)식에 따르면 몰수로 나타낸 프로판과 산소의 반응비는 1:5이고, 공기 중에는 21%의 산소가 포함되어 있기 때문에 프로판과 공기의 반응비는 1:24가 된다. 따라서, 프로판과 공기가 혼합된 증기운의 부피는 1075 × 24 = 25800 m³이 된다. 증기운의 총연소열(E)과 증기운의 반경(R)은 다음과 같이 계산된다.

$$E = M_p \times \Delta H_c = 2000 \times 46.3 = 92600 \text{ MJ} \quad (10)$$

$$R = \left(\frac{3V}{2\pi} \right)^{1/3} = \left(\frac{3 \times 25800}{2\pi} \right)^{1/3} \approx 23 \text{ m} \quad (11)$$

여기서, M_p : 프로판의 질량(kg), ΔH_c : 프로판의 연소열(MJ/kg), V : 증기운의 부피(m³) 이다.

Fig. 6에는 TNT등가법, 다중에너지법, BST법으로 구한 폭원으로부터 거리에 따른 과압의 변화가 표시되어 있다. TNT등가법의 경우 UN SaferGuard가 제시한 틀킷을 사용하여 과압을 구했다. 다중에너지법의 경우에는 (5)식을 적용하여 과압을 구했으며, BST법에서는 Fig. 4를 이용하여 과압을 평가하였다. TNT 등가법의 경우 증기운의 중심에서 폭굉이 발생한다고 가정하기 때문에 폭발 중심 근처에서의 과압을 구하는 것이 가능하지만, 다중에너지법과 BST법은 증기운 전체가 폭원으로 작용하기 때문에 증기운 반경 가장

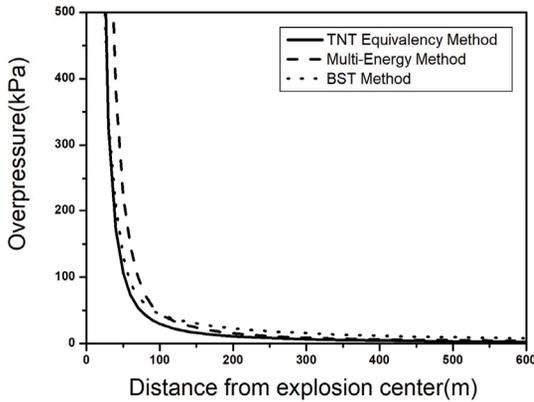


Fig. 6. Variations of overpressure with distance from explosion center.

자리부터 과압을 평가할 수 있다. 그림을 보면 폭원 중심과 폭원으로부터 100 m 이내 사이 지점에서 과압의 크기가 급속하게 감소하고, TNT등가법과 BST법에 의한 결과가 유사하다는 것을 알 수 있다. 폭원으로부터 100 m 이상 이격된 지점에서는 TNT등가법과 다중에너지법의 결과가 유사한 반면에 BST법에 의한 결과는 더 큰 것으로 나타난다.

실제 증기운 폭발에서 파괴된 구조물의 손상 상태에서부터 추정된 과압의 크기와 TNT등가법, 다중에너지법, BST법으로 예측한 과압의 크기를 비교하기 위해서 1984년에 멕시코 PEMEX LPG 터미널에서 발생한 프로판 증기운 폭발 사고를 적용하였다. 프로판 4750 kg이 누출된 후 증기운 폭발이 발생한 사고에서 폭원으로부터 200 m 떨어진 지점에서 육안으로 관찰된 구조물 파괴 상태는 30 kPa의 과압이 작용했을 때 발생하는 피해와 유사한 것으로 나타났다(Assael and Kakosimos, 2010). 환산거리가 동일한 경우에는 과압이 같다는 점을 활용하기 위해서 200 m 지점에서의 r' 을 구하면 다음과 같다.

$$r' = x \left(\frac{E}{P_a} \right)^{(-1/3)} = 200 \times \left(\frac{4750 \times 46.3}{0.1} \right)^{(-1/3)} \approx 1.54 \quad (12)$$

본 연구에서 상정한 사례에서 $r' = 1.54$ 에 해당하는 거리는 150 m이며 이 지점에서 다중에너지법과 BST법을 적용하여 구한 과압은 각기 23.9, 30.7 (kPa)로 나타났다. 다중에너지법에 의한 계산 결과는 관측

결과보다 작은 것으로 평가되었지만 BST법을 적용한 결과는 관측 결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 폭원으로부터 150 m 이격된 지점에서의 과압을 TNT 등가법을 적용하여 구하면 16.1 kPa로 나타난다. 다중 에너지법과 BST법과 같은 도해법이 TNT등가법에 비해서는 증기운 폭발에 따른 과압 평가에 더 적절하다는 것을 알 수 있으며, 3개의 폭발 예측 모델 중에서도 BST법이 관찰 결과와 가장 적합한 결과를 제시하는 것으로 나타났다.

폭발 예측 모델로부터 구한 과압이 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위해서 폭원으로부터 임의 지점에서 계산된 과압이 Table 4에 표시되어 있다. Table 5에는 과압의 크기에 따른 구조물의 손상 기준이 표

Table 4. Overpressure with distance from explosion center

Distance from explosion center (m)	P_s (kPa)		
	TNT Equivalency Method	Multi-Energy Method	BST method
23	603	1414	580
50	106	224	131
90	35	44	49
230	9	12	20
320	6	8	15
600	2.6	4	8.1

Table 5. Damages to structures(After Assael and Kakosimos, 2010)

Description of damage		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
Pillars	Destruction	80~260
Large trees	Destruction	50~100
Railway cars	Derailment limit	80~190

시되어 있다. 3 종류의 폭발 예측 모델을 이용한 계산 결과에 따르면 폭원으로부터 50 m 이내에 있는 구조물은 거의 전파될 것으로 예측된다. 또한 90 m 이내에 위치하는 구조물의 경우에도 반파 이상의 피해를 볼 것으로 예측되고, 심지어 600 m 떨어진 구조물에 있는 창문 유리도 전파할 것으로 추정된다.

4. 결론

본 연구에서는 인화성 기체나 액화 기체가 누출되어 증기운 폭발이 발생하는 경우 폭굉 폭발을 가정하여 거리에 따른 과압의 변화를 평가하기 위해서 TNT 등가법, 다중에너지법, BST법을 적용하였다. 사례 분석을 위해 원룸과 상가가 밀집되어 있는 지역에서 2000 kg 용량의 프로판 저장 탱크가 파손되면서 누출된 프로판이 증기운 폭발을 하는 것을 가정하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) TNT등가법으로 계산한 증기운 폭발 연소에너지와 등가인 TNT의 질량은 4061 kg인 것으로 나타났다.
- 2) TNT등가법, 다중에너지법, BST법으로 구한 거리에 따른 과압의 변화 양상에 따르면 폭원으로부터 100 m 이내에서 과압의 크기가 급속하게 감소하고, 대체적으로 TNT등가법과 BST법으로 구한 과압의 크기가 유사한 것으로 나타났다. 그러나, 100 m 이상 이격된 지점에서는 TNT등가법과 다중에너지법의 결과가 유사한 반면에 BST법에 의한 결과는 더 큰 것으로 나타났다.
- 3) 실제 증기운 폭발 사례에서 관찰된 과압과 TNT 등가법, 다중에너지법, BST법을 적용하여 구한 과압을 비교한 결과 BST법이 가장 적합한 것으로 나타났고, TNT등가법으로 구한 과압은 실제 관찰된 과압의 반 정도인 것으로 평가되었다.
- 4) TNT등가법, 다중에너지법, BST법으로 구한 거리에 따른 과압을 구조물 손상 기준과 비교한 결과 폭원으로부터 90 m 이내에 위치하는 구조물은 반파 이상의 피해를 볼 것으로 평가되었고, 600 m 이격된 구조물에 있는 창문 유리도 전파하는 것으로 나타났다. 그러나, 거리에 따

른 과압의 크기가 예측 모델에 따라 다르기 때문에 구조물에 미치는 피해도 달라질 것으로 추정된다.

감사의 글

이 논문은 2021학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구입니다. 연구비를 지원해주신 학교에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 윤용균, 2015, 화재공학개론(역서), 화수목, pp. 96-99.
2. 윤용균, 2019, 폭발이 구조물에 미치는 영향, 화약·발파(대한화약발파공학회지), Vol. 37, No. 4, pp. 10-16.
3. AICE, 2010, Guidelines for vapor cloud explosion, pressure vessel burst, BLEVE and flash fire hazards, Wiley, pp. 97-240.
4. Assael, M.J. and K.E. Kakosimos, 2010, Fires, explosions, and toxic gas dispersions; Effects calculation and risk analysis, CRC Press, pp. 149-206.
5. Baker, Q.A., C.M. Doolittle, G.A. Fitzgerald, and M.J. Tang, 1998, Recent developments in the Baker-Strehlow VCE analysis methodology, Process Safety Progress, Vol. 17, No. 4, pp. 297-301.
6. Karlos, V. and G. Solomos, 2013, Calculation of blast loads for application to structural components, EU, pp. 1-23.
7. Pierorazio, A.J., J.K. Thomas, Q.A. Baker, and D.E. Ketchum, 2005, An update to the Baker-Strehlow-Tang vapor cloud explosion prediction methodology flame speed table, Process Safety Progress, Vol. 24, No. 1, pp. 59-65.
8. Sari, A., 2011, Comparison of TNO Multienergy and Baker-Strehlow-Tang models, Process Safety Progress, Vol. 30, No. 1, pp. 23-26.
9. Sochet, I., 2017, Blast effects, Springer, pp. 1-15, 121-140.
10. Tang, M.J. and Q.A. Baker, 1999, Process Safety Progress, Vol. 18, No. 4, pp. 235-240.
11. UN SaferGuard, 2021, International Ammunition Technical Guideline(IATG); Formulae for ammunition management, UN, pp. 4-25.
12. van den Berg, A.C., 1985, The Multi-Energy Method; A framework for vapor cloud explosion blast prediction, J. of Hazardous Materials, Vol. 12, pp. 1-10.



윤용균

세명대학교 소방방재학과 교수

Tel: 043)649-1318

E-mail: yoon63@semyung.ac.kr