화약·발파(대한화약발파공학회지)
제34권 제4호, 2016년 12월, pp. 28~34

EXPLOSIVES & BLASTING, Vol. 34, No. 4, 2016, pp. 28-34
Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering

폭발에 따른 최대과압 및 충격량 평가

윤용균[1)*]

Evaluation of Peak Overpressure and Impulse Induced by Explosion

Yong-Kyun Yoon

Abstract Empirical model, phenomenological model, and CFD model have been used to evaluate the blast effects produced by explosion of explosives, flammable gas and liquid or dust. TNT equivalence method which is one of empirical models has been widely used as it is simple. In this study, new peak overpressure-scaled distance and scaled impulse-scaled distance equations are induced through fitting data from the curves given by TNT equivalence method. If the TNT equivalent mass is calculated, it is possible to estimate the peak overpressure and impulse using the regression equations. Differences of peak overpressure with yield factor which is a component of TNT equivalence method are found to be great in near-by distances from explosion source where the increase in overpressure is very steep, but the differences are getting smaller as the distances increase.

Key words TNT equivalence method, Peak overpressure, Impulse, Scaled distance

초 록 화약류, 인화성 액체와 가스 또는 먼지 등의 폭발에 의해 유발된 폭발효과를 평가하는데 경험적모델, 현상학적모델 및 전산유체역학모델이 사용된다. 경험적모델의 한 종류인 TNT등가법은 사용이 매우 단순하기 때문에 현재까지도 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 TNT 폭발 실험으로부터 얻어진 최대과압-환산거리 곡선과 환산충격량-환산거리 곡선을 피팅하여 새로운 회귀식을 유도하였다. 폭발성 물질의 TNT 등가질량만 알면 본 연구에서 유도한 회귀식을 이용하여 거리에 따른 최대과압과 충격량을 평가하는 것이 가능하다. TNT등가법의 한 성분인 수율계수의 크기를 달리하여 최대과압을 구한 결과 압력의 증가가 급격히 나타나는 폭원으로부터 근접한 거리에서는 수율계수에 따라 최대과압의 차가 크게 발생하는 반면에 거리가 증가함에 따라 그 차이는 감소하는 것으로 나타났다.

핵심어 TNT등가법, 최대과압, 충격량, 환산거리

1. 서 론

매년 국내·외에서 다양한 원인으로 인한 폭발사고가 발생하고 있다. 화약을 포함한 폭발성 고체화합물의 폭발, 액화압축가스와 액체인화물의 증발에 따른 증기운(vapor cloud) 폭발, 먼지 폭발 등이 대표적인 폭발사고로 생각할 수 있다. 군내에서 발생하는 폭약류 폭발사고를 제외하면 국내 폭발사고의 대부분은 가정, 상업건물, 가스저장소, 유류취급소, 화학공장 등에서 인화성가스 또는 인화성액체가 누출되면서 발생하는 증기운 폭발이다. 증기운 폭발이란 저장용기에서 누출된 액화인화성가스 또는 인화성액체가 증발하여 주변공기와 혼합되면서 가연성혼합기 구름을 형성하고, 이 증기운의 농도가 폭발한계에 도달하면 점화원에 의한 에너지 공급으로 인해 폭발하는 현상이다(Assael and Kakosimos, 2010; Eckhoff, 2016). 대표적인 국내 폭발사고로는 28명이 숨진 우암상가아파트 붕괴사고(1993년 발생), 12명의 사망자를 낸 아현동 도시가스 폭발사고(1994년 발생), 101명의 최악의 사망자를 낸 대구도시가스 폭발사고(1995년 발생), 6명의 사망자가 발생한 인천 부평

[1)] 세명대학교 소방방재학과 교수
* 교신저자 : yoon63@semyung.ac.kr
접수일 : 2016년 12월 23일
심사 완료일 : 2016년 12월 26일
게재 승인일 : 2016년 12월 27일

구 LP가스 폭발사고 등을 들 수 있다(소방방재청, 2011). 화약류 폭발의 대표적인 사고로는 1977년에 다이나마이트, 초안폭약, 초산암모니아, 뇌관을 적재한 화물열차가 이리역에서 폭발하여 59명의 사망자를 낸 이리역 폭발사고가 있다(http://navercast.naver.com). 외국의 경우에도 국내와 유사한 폭발사고가 발생하고 있으나, 테러리스트에 의한 폭탄 공격에 따른 폭발사건이 발생하고 있다는 점이 국내와는 다르다. 대표적인 폭발 사고로는 296명이 사망한 미국 London School 가스폭발사고(1937년 발생), 28명이 사망한 영국 Nypro 화학공장 폭발사고(1974년 발생), 31명이 사망한 프랑스 AZF 비료공장 폭발사고(2001년 발생), 15명이 사망한 미국 Texas city 정유공장 폭발사고(2005년 발생), 15명이 사망한 미국 West 비료공장 폭발사고(2013년 발생), 173명이 사망한 중국 텐진항 폭발사고(2015년 발생) 등을 들 수 있다. 테러리스트에 의한 폭탄 공격은 세계 각지의 분쟁지역에서 빈번하게 발생하고 있지만 6명이 사망한 미국 World Trade Center 폭탄 공격(1993년 발생), 168명이 사망한 미국 Oklahoma city 연방정부청사 폭탄 공격(1995년 발생)이 대표적이다(Lea, 2002; Lobato et al., 2009; Lenoble and Durand, 2011; http://en.wikipedia.org).

폭발이 발생하는 경우 에너지 방출에 따른 직접적인 타격에 의해 사상자가 발생하기도 하지만 폭발파의 압력에 의한 구조물의 파괴에 의해서도 많은 사상자가 발생한다. 폭발이란 고체 폭발성 물질, 먼지 및 가스 등이 급속한 화학반응을 통해 고온의 가스와 고열을 방출하는 현상으로 정의할 수 있다. 폭발은 폭굉과 폭연으로 구분할 수 있다. 폭굉의 경우 폭발에 의해 생성된 고온의 가스가 팽창하면서 파의 형태로 전파해가고, 폭발원 주변의 공기가 팽창하면서 공기 분자들이 쌓이면 충격파가 발생한다. 폭굉이 발생하는 경우 폭발파는 초음속으로 전파해 가고, 폭연인 경우에는 아음속으로 전파해 간다(Lea, 2002; Karlos and Solomos, 2013; Eckhoff, 2016).

국내 폭발 사고의 경우 화약류과 관련된 폭발사고를 제외하면 대부분 증기운 폭발이라고 할 수 있다. 증기운 폭발을 모사하는 방법으로는 경험적모델(empirical model), 현상학적모델(phenomenological model) 및 전산유체역학모델(CFD model)이 사용된다. 경험적 모델은 실험 결과로부터 얻어진 상관관계를 이용하여 폭발을 해석하는 방법으로써 대표적으로 TNT등가법(TNT equivalence method), 다중에너지(Multi-energy method), Baker-Strehlow법 등이 자주 사용된다. 현상학적모델은 폭발과 관련된 핵심적인 물리법칙을 이용하는 단순화된 물리적모델이며 SCOPE (Shell Code for Over-pressure Prediction in gas Explosion) 모델과 Cliche (Confined Linked Chamber Explosion)모델이 있다(Lea, 2002). 전산유체역학모델은 폭발과 관련된 미분방정식을 수치적으로 푸는 방법으로써 유한요소법, 유한차분법, 유한체적법이 많이 이용된다. 상기 방법들 중 TNT 등가법은 주어진 폭발물의 폭발효과와 동일한 폭발효과를 나타내는 TNT의 질량을 평가하는 방법으로써 압력-거리곡선을 이용하여 특정 지점에서의 폭발에 따른 최대과압(peak overpressure)을 얻어낼 수 있다(Formby and Wharton, 1996).

폭발이 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 폭발파에 의한 최대과압을 평가하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 폭발에 따른 최대과압 및 충격량(impulse)을 평가하기 위해서 TNT등가법을 적용하였다. 기존 문헌에 발표된 TNT 폭발에 따른 최대과압-환산거리 곡선과 환산충격량-환산거리 곡선을 피팅하여 회귀식을 구한 후 폭발에 따른 최대과압을 구하기 위해서 가장 많이 사용되는 Kingery-Bulmash 다항식(UNODA, 2015)을 통해 얻어진 결과와 비교하였다.

2. 폭발파의 특성

폭원으로부터 임의의 거리만큼 이격된 지점에서 측정된 이상적인 폭발파의 압력-시간 이력곡선이 Fig. 1에 나타나 있다. 그림에서 P_0는 대기압, P_{s+}는 양의 압력구간에서의 최대과압, P_{s-}는 음의 압력구간에서의 최대과압, i_+는 양의 충격량, i_-는 음의 충격량, t_0는 충격파 도착시간, t_+는 양의 압력구간의 지속시간, t_-는 음의 압력구간의 지속시간을 나타낸다. 폭발 지점의 초기 압력은 대기압과 같은 P_0를

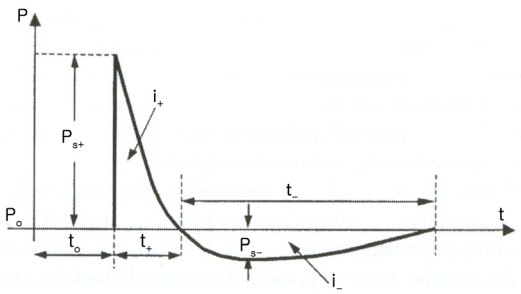


Fig. 1. Pressure profile of idealized blast wave(After Eckhoff, 2016).

유지하다 폭굉에 따른 폭발파가 t_o 시간에 측정 지점까지 도달하면 순간적으로 압력이 최댓값인 P_{s+}까지 상승한다. 압력은 시간이 경과함에 따라 지수적으로 감소하다 $t_o + t_+$의 시간이 경과하면 대기압의 크기까지 감소한다. $t_o + t_+ < t < t_o + t_+ + t_-$ 구간에서는 압력이 부압을 나타내며, 음의 압력구간 지속시간이 양의 압력구간의 지속시간보다 더 크게 나타난다(Eckhoff, 2016).

압력은 지수적으로 감소하기 때문에 이를 표현하기 위한 여러 식이 다음과 같이 제안되었으며 이중에서 Friedlander 식이 가장 많이 사용된다. 주어진 식들은 모두 양의 압력구간만을 나타낸다(Chock, 1999; Karlos and Solomos, 2013).

Flynn식:

$$P(t) = P_o + P_{s+}\left(1 - \frac{t}{t_+}\right) \tag{1}$$

Ethridge식

$$P(t) = P_o + P_{s+} \cdot e^{-ct} \tag{2}$$

riedlander식

$$P(t) = P_o + P_{s+}\left(1 - \frac{t}{t_+}\right)e^{-b\frac{t}{t_+}} \tag{3}$$

여기서 b,c : 감쇠지수이다.

충격량은 압력-시간 곡선을 적분하여 얻을 수 있으며, 압력-시간 곡선과 시간축이 이루는 부분의 면적을 나타낸다. Friedlander식을 적분하여 양의 충격량을 구하면 다음 식과 같이 표시된다(Karlos and Solomos, 2013).

$$i_+ = \int_{t_o}^{t_o+t_+} P(t)dt = \frac{P_{s+} \cdot t_+}{b^2}\left(b - 1 + e^{-b}\right) \tag{4}$$

3. TNT등가법

TNT등가법은 폭발성 물질의 폭굉에 따른 효과를 평가하는데 자주 사용되는 방법이다. 이 방법을 사용하면 폭발성 물질의 폭발 효과와 동일한 효과를 발생하는 TNT의 질량을 구할 수 있다. TNT 등가질량을 구하는 식은 다음과 같다.

$$W_{TNT} = \eta\left(\frac{\Delta H_c}{\Delta H_{TNT}}\right)W_G \tag{5}$$

여기서 W_G : 폭발성 물질의 질량, W_{TNT} : 폭발성 물질의 폭발효과와 동일한 효과를 발생시키는 TNT의 등가질량, ΔH_c : 폭발성 물질의 연소열, ΔH_{TNT} : TNT의 연소열, η : 수율계수(yield factor)로써 충격파로 방출된 에너지의 분율을 나타낸다. η는 보통 0.01 ~ 0.1의 값을 갖는다(Lobato et al., 2009; Assael and Kakosimos, 2010).

폭발성 물질의 질량과 폭원으로부터 측정 지점까지의 거리는 변하기 때문에 동일한 기준에서의 최대과압을 평가하기 위해서는 환산법칙(scaling law)을 도입할 필요가 있다. 가장 많이 사용되는 Hopkinson-Cranz 환산거리 식은 (6)식과 같다.

$$Z = \frac{x}{\sqrt[3]{W_{TNT}}} \tag{6}$$

여기서 Z : 환산거리, x : 폭원으로부터 측정 지점까지의 거리이다. 폭발성 물질의 질량과 폭원으로부터 측정지점까지의 거리가 변하여도 환산거리가 동일한 경우에는 같은 폭발효과를 나타낸다(Chock, 1999; Lobato et al., 2009; Assael and Kakosimos, 2010; Karlos and Solomos, 2013).

폭발성 물질의 TNT 등가질량과 환산거리가 구해지면 TNT 폭발실험으로부터 얻어진 압력-환산거리 곡선으로부터 최대과압의 크기를 구할 수 있다.

4. 특성곡선식

Fig. 2에는 TNT의 폭발에 따른 최대과압과 환산충격량을 환산거리에 따라 표시한 자료가 나타나 있다. 최대과압과 환산충격량은 반구형의 TNT 장약을 지표에서 폭발시켜 얻은 것이다(Alonso et al., 2006). 폭원으로부터의 거리와 폭발에 사용된 TNT 등가질량을 이용하여 환산거리를 구하면 Fig. 2(a), (b)로부터 최대과압과 환산충격량을 구할 수 있다.

환산거리에 따른 최대과압과 환산충격량에 대한 회귀식을 얻기 위해서 디지타이저 프로그램을 이용하여 Fig. 2에 그려진 곡선 상의 데이터를 추출한 후 멱함수로 회귀시킨 결

과가 Fig. 3에 표시되어 있다. 피팅으로부터 얻은 최대과압-환산거리 회귀식과 환산충격량-환산거리 회귀식은 각각 (7), (8)식과 같다.

$$P_s = (1.86 \times 10^6) Z^{-1.67} (\mathrm{Pa}) \quad (7)$$

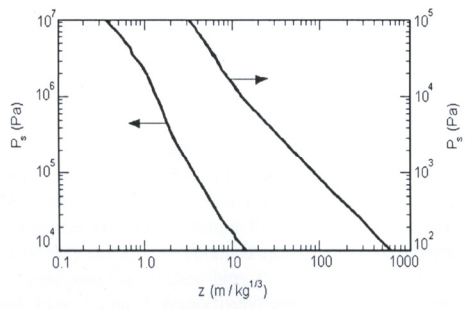
$$i_{TNT} = 185 Z^{-0.88} (\mathrm{Pa \cdot s/kg^{1/3}}) \quad (8)$$

여기서 P_s : 최대과압, Z : 환산거리, i_{TNT} : 환산충격량으로 충격량을 구하기 위해서는 i_{TNT}에 $\sqrt[3]{W_{TNT}}$을 곱해야 한다. TNT 등가질량을 (5)식으로부터 구하고, (6)식을 통해 환산거리를 계산한 후 (7), (8)식을 이용하면 특정 지점에서의 최대과압과 환산충격량을 구할 수 있다.

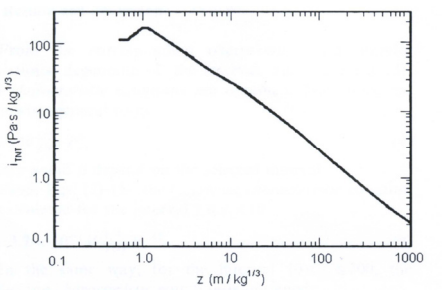
(7) 식을 (8) 식에 대입한 후 $\sqrt[3]{W_{TNT}}$을 곱하면 다음과 같이 충격량을 구할 수 있는 식이 유도된다.

$$i = (9.2 \times 10^{-2}) \times P_s^{0.53} \times \sqrt[3]{W_{TNT}} (\mathrm{Pa \cdot s}) \quad (9)$$

예로써 1984년에 발생하여 550명이 사망한 멕시코 PEMEX LPG 터미널 폭발사고를 분석하였다. 이송 파이프의 파열에 따라 누출된 LPG 양은 4760 kg으로 평가되었다. TNT 등가질량을 구하는데 필요한 프로판과 TNT의 연소열은 각기 46010, 4760 (kJ/kg) 로 하였다. η를 0.01, 0.05, 0.1로 가정한 후 (5)식을 이용하여 구한 TNT 등가질량은 각기 459, 2296, 4591 (kg) 이다. Fig. 4에는 (7)식을 이용하여 구한 거리에 따른 최대과압의 변화가 나타나 있다. 그림을 보면 폭원에서 근접한 지역에서는 수율계수에 따라 최대과압의 변화도 크게 나타나지만 거리가 멀어지면 수율계수가 미치는 영향이 감소함을 알 수 있다. 구조물의 파괴수준으로부터 유추한 폭원으로부터 200 m 이격된 지점에서의 최대과압은 30 kPa로 보고되었다(Assael and Kakosimos, 2010). 본 연구에서 얻어진 최대과압-환산거리 식을 이용하여 200 m 떨어진 지점에서 구한 최대과압은 $\eta = 0.01, 0.05, 0.1$인 경우에 각기 8.1, 19.8, 29.2 (kPa)로 계산되었으며, η를 0.1로 하는 경우 실제 추정된 최대과압과 거의 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 5에는 TNT 등가질량을 4591 kg 로 가정한 후 폭원으로부터의 거리에 따라

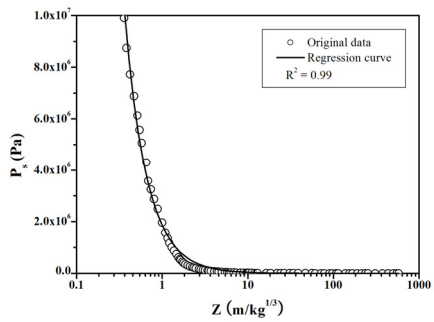


(a) Peak overpressure vs. scaled distance

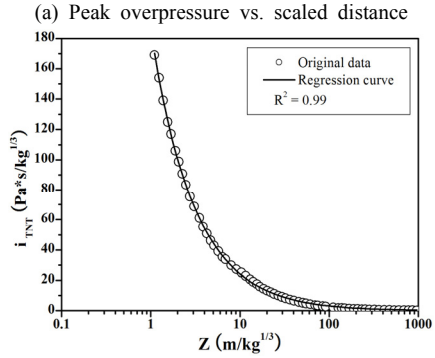


(b) Scaled impulse vs. scaled distance

Fig. 2. Variations of maximum overpressure and scaled impulse as a function of scaled distance from explosion source(After Alonso et al., 2006).



(a) Peak overpressure vs. scaled distance



(b) Scaled impulse vs. scaled distance

Fig. 3. Regression curves fitted for curves of Fig. 2.

최대과압과 충격량을 (7), (9)식을 이용하여 도시한 그림이 나타나 있다. 그림에서와 같이 (7), (9)식을 이용하는 경우 TNT 등가질량을 계산하면 최대과압과 충격량을 동시에 계산할 수 있다. 최대과압을 평가할 때 가장 많이 사용되는 Kingery-Bulmash 다항식을 이용하여 구한 결과와 본 연구에서 얻어진 회귀식((7)식)을 이용한 결과를 비교하기 위하여 TNT 질량을 1000 kg으로 가정한 후 거리에 따라 최대과압을 구한 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. Kingery-Bulmash 다항식을 이용한 최대과압의 평가는 UN에서 제공하는 계산틀을 이용하였다(http//:www.un.org).

그림을 보면 전 거리에 걸쳐 회귀식을 이용하여 구한 최대과압이 Kingery-Bulmash 다항식을 이용하여 구한 최대과압보다 큰 것으로 나타났다. 25 m 지점에서 회귀식을 이용하여 구한 최대과압이 Kingery-Bulmash 다항식을 이용하여 구한 최대과압보다 2.35배 큰 것으로 계산되었지만, 200 m 지점에서는 1.78배 큰 것으로 나타나 폭원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 양식으로부터 계산된 결과의 차이가 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 7에는 충격량을 구한 결과가 표시되어 있다. 최대과압과는 다르게 충격량의 경우에는 Kingery-Bulmash 다항식을 이용하여 구한 값이 회귀식((9)식)을 이용하여 계산한 값보다 큰 것으로 나타났다. 25 m 지점에서 Kingery-Bulmash 다항식을 이용하여 구한 충격량은 회귀식을 이용하여 구한 값보다 1.31배 큰 것으로 계산되었으며, 200 m 지점에서는 1.18배 큰 것으로 나타났다. 충격량은 최대과압의 곡선을 적분하는 것이기 때문에 최대과압이 크다면 충격량도 더 크게 나와야 되는 것이 일반적이다. 회귀식을 이용한 최대과압이 Kingery-Bulmash 다항식을 이용하여 구한 최대과압보다 큼에도 불구하고 충격량은 오히려 더 작은 것으로 나타났다. 이는 Kingery-Bulmash 다항식도 기존에 발표된 TNT 폭발 실험자료를 고차다항식으로 회귀시켜 구한 것이기 때문에 참고한 원 자료가 서로 다름으로 인해서 발생한 것으로 생각된다.

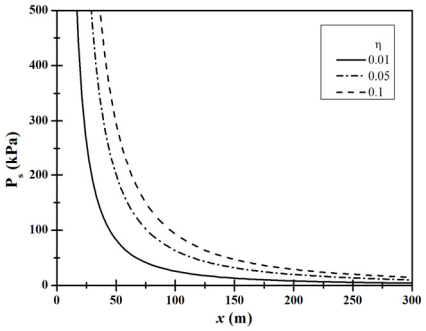


Fig. 4. Variation of peak overpressure with the distance from explosion source.

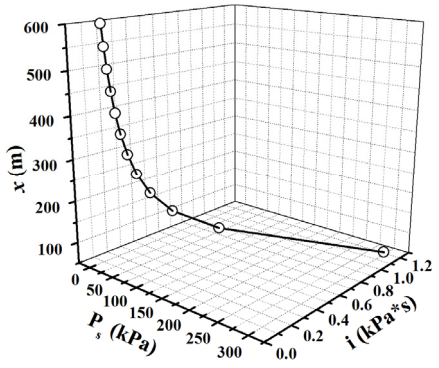


Fig. 5. Peak overpressure vs. impulse vs. distance from explosion source.

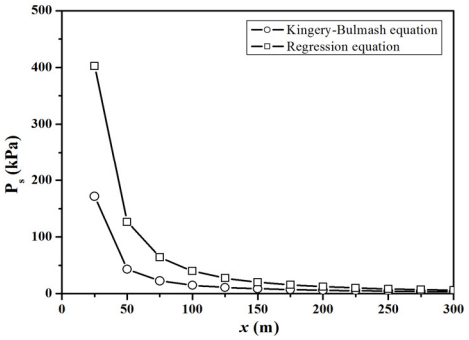


Fig. 6. Peak overpressure vs. distance from explosion source.

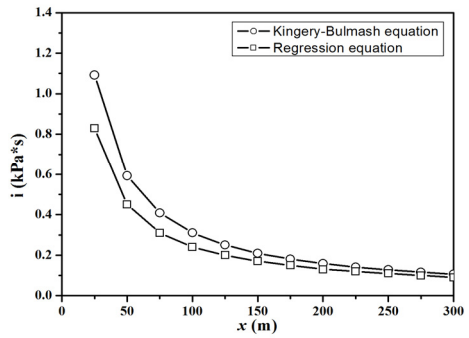


Fig. 7. Impulse vs. distance from explosion source.

5. 결 론

고체 폭발성 물질, 먼지 및 가스 등의 폭발에 따른 최대과압과 충격량을 평가하기 위해서 TNT등가법을 적용하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 폭발성 물질의 TNT 등가질량을 계산하면 거리에 따른 최대과압과 충격량을 손쉽게 평가할 수 있도록 기존에 발표된 TNT 폭발에 따른 최대과압-환산거리 곡선과 환산충격량-환산거리 곡선을 피팅하여 회귀식을 구하였다.
   - 최대과압-환산거리 회귀식 :
   $P_s = (1.86 \times 10^6) Z^{-1.67}$ (Pa)
   - 환산충격량-환산거리 회귀식 :
   $i_{TNT} = 185 Z^{-0.88}$ (Pa · s/kg$^{1/3}$)

2) TNT 등가질량만 계산하면 특정 거리에서의 최대과압과 충격량을 나타낼 수 있는 최대과압-충격량-거리 특성곡선 회귀식을 구하였다.
   - 최대과압-충격량-거리 특성곡선 회귀식 :
   $i = (9.2 \times 10^{-2}) \times P_s^{0.53} \times \sqrt[3]{W_{TNT}}$ (Pa · s)

3) 수율계수(η)를 0.01, 0.05, 0.1로 달리하여 TNT 등가질량을 구한 후 최대과압-환산거리 회귀식을 이용하여 최대과압의 변화를 계산한 결과 폭원에서 근접한 지역에서는 수율계수에 따라 최대과압의 변화도 크게 나타나지만 거리가 멀어지면 수율계수가 미치는 영향이 감소하는 것으로 나타났다.

4) 본 연구에서 얻어진 회귀식과 Kingery-Bulmash 다항식을 이용하여 최대과압과 충격량을 구한 결과 최대과압의 경우에는 회귀식으로부터 구한 값이 더 큰 것으로 나타났으나, 충격량의 경우에는 Kingery-Bulmash 다항식을 이용하여 구한 값이 더 큰 것으로 평가되었다.

감사의 글

이 논문은 2016학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구입니다. 연구비를 지원해주신 학교에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 소방방재청, 2011, 소방방재 주요통계 및 자료, 소방방재청, 294p.
2. Alonso, F.D., E.G. Ferradas, J.F.S. Perez, A.M. Aznar, J.R. Gimeno and J.M. Alonso, 2006, Characteristic overpressure-impulse-distance curves for the detonation of explosives, pyrotechnics or unstable substances, J. of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 19, pp. 724-728.
3. Assael, M.J. and K.E. Kakosimos, 2010, Fires, explosions, and toxic gas dispersions, CRC Press, 333p.
4. Chock, J.M.K., 1999, Review of methods for calculating pressure profiles of explosive air blast and its sample application, Thesis of Master Degree, Virginia Polytechnic Institute and State University, 126p.
5. Eckhoff, R.K., 2016, Explosion Hazards in the Process Industries, Elsevier Inc., 559p.
6. Formby, S.A. and R.K. Wharton, 1996, Blast characteristics and TNT equivalence values for some commercial explosives detonated at round level, J. of Hazardous Materials, Vol. 50, pp. 183-198.
7. http://en.wikipedia.org, New London School Explosion.
8. http://navercast.naver.com, 77년 이리 화약열차 폭발사고 취재기; 다이나마이트에 촛불을?
9. http//:www.un.org, Kingery-Bulmash Blast Parameter Calculator.
10. Karlos, V. and G. Solomos, 2013, Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components, JRC Technical Reports, 50p.
11. Lea, C.J., 2002, A review of the state-of-the-art in gas explosion modelling, Health & Safety Laboratory, 82p.
12. Lenoble, C. and C. Durand, 2011, Introduction of frequency in France following the AZF accident, J. of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 24, pp. 227-236.
13. Lobato, J., J.F. Rodriguez, C. Jimenez, J. Llanos, A. Nieto-Marquez and A.M. Inarejos, 2009, Consequence analysis of an explosion by simple models: Texas refinery gasoline explosion case, AFINIDAD, Vol. 66, No. 543, pp. 372-379.
14. UNODA, 2015, Formulae for ammunition management, IATG 01.80:2015[E], 19p.

윤 용 균
세명대학교 소방방재학과 교수

Tel: 043-649-1318
E-mai : yoon63@semyung.ac.kr