비이상적 폭발현상을 보이는 둔감화약의 반응속도식 보정 연구

Study of reaction rate for nonideal detonation behavior of an insensitive explosive

박정수[1],이재민[1], 윤성기[2]

1) 국방과학연구소 기술-3부, 대전 305-600
2) 한국과학기술원 기계공학과, 대전 305-701

교신 저자: 박정수, e-mail pjs@add.re.kr

요약

최근에 탄두/탄약 무기체계에 많이 적용되고 있는 둔감화약은 반응속도가 느리고 충격파에서 폭발파로의 전이가 서서히 일어나기 때문에 반응속도가 폭발현상 전반에 미치는 영향이 증가하게 되고 그 결과 반응속도를 무시하고 정립된 Chapman-Jouguet 이론으로는 폭발현상을 정확히 기술할 수 없다. 이에 본 연구에서는 둔감화약의 비이상적 폭발현상을 잘 표현할 수 있는 반응속도식을 폭발역학(Detonation shock Dynamics)이론과 직경별 폭속 및 폭발파면 궤적 측정 시험을 통하여 보정하였다. 보정된 반응속도식은 둔감화약의 폭발현상을 잘 묘사하고 있으며 향후 컴퓨터 시뮬레이션 기술과 결합하여 둔감화약이 충전된 탄두/탄약의 성능 및 취약성 해석에 많은 적용이 기대된다.

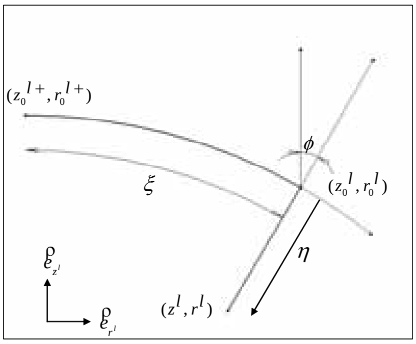
1. 서 론

화약은 폭발특성에 따라 이상적인 화약(ideal explosives)과 비이상적인 화약(nonideal explosives)로 분류할 수 있다. 이상적인 화약의 폭발반응은 매우 빠르게 진행되므로 폭발반응이 순간적으로 일어난다고 가정한 Chapman-Jouget(CJ) 폭발이론에 의하여 잘 기술할 수 있다. 이와 반대로 비이상적인 화약은 폭발반응속도가 비교적 느리기 때문에 반응속도가 폭발현상 전반에 미치는 영향이 증가하게 되고 그 결과 반응속도를 무시하여 정립된 CJ 이론으로는 폭발현상을 정확히 기술할 수 없다. 비이상적인 화약으로는 대부분의 둔감화약(insensitive explosives)을 들 수 있으며 현재 탄두/탄약 무기체계에 많이 적용되고 있는 둔감화약의 폭발특성을 이해하기 위해서는 반응속도식에 대한 정보를 얻는 것이 선결 과제라 할 수 있다.

본 연구의 목적인 비이상적 폭발특성을 보이는 둔감화약의 반응속도식을 얻기 위해서 Lee[1]가 제안한 반응속도식 보정방법을 사용하였다. 이 논문에서 폭발실험의 결과가 질량, 운동량, 에너지 보존법칙, 상태방정식 그리고 반응속도식으로 이루어지는 방정식들의 주어진 조건에서의 해(solution) 라는 점에 착안하여 화약의 직경과 폭속사이의 관계(diameter effect)와 폭발파면의 궤적(detonation front locus)등의 실험적인 결과와 폭발역학(Detonation Shock Dynamics)이론을 이용하여 반응속도식을 보정하였다.

2. 폭발역학(Detonation Shock Dynamics)이론

폭발역학 이론에서는 그림 1과 같이 폭발파면까지의 수직거리 η와 폭발파면 상의 호의 길이(arclength) ξ에 의한 고유좌표계로 유체역학 방정식들을 간략하게 표현된다. 즉 중심축과 폭발파면에 수직한 방향 간의 각을 φ로 정의하면 폭발파면 상의 한 점의 좌표 (z_0^1, r_0^1)는 식(1)과 같이 주어진다.



$$r_0^1 = r_0^{1+} + \int_0^{\xi} \cos\varphi d\xi$$
$$z_0^1 = z_0^{1+} + \int_0^{\xi} \sin\varphi d\xi \tag{1}$$

그림 1. 고유좌표계(Intrinsic coordiante system)

반응대역의 길이가 폭발파면의 곡률반경보다 매우 작을 때, 폭발파면에 수직한 방향의 폭발속도 D_n은 충격파면의 곡률 κ의 함수로 주어지는 것을 알 수 있다.

$$D_n = D_n(\kappa) \quad \text{또는} \ \kappa = \kappa(D_n) \tag{2}$$

여기에서 폭발파면의 곡률 κ는 식(3)과 같이 주곡률들의 합(sum of principal curvatures)으로 정의되며, 폭발이 정상일 때에는 식(7)의 관계식이 성립한다.

$$\kappa = \varphi,\xi + \frac{(\delta-1)\sin\varphi}{r_0^1} \tag{3}$$

$$D_n = D_0 \cos\varphi \tag{4}$$

여기에서 D_0는 주어진 직경에서의 정상상태 폭발속도이다. 식(2)와 (4)에서 $\kappa = \kappa(D_0 \cos\varphi)$이므로, 이를 식(5)에 대입하면 다음과 같은 관계식을 얻게 된다.

$$\varphi,\xi + \frac{(\delta-1)\sin\varphi}{r_0^1} = \kappa(D_0 \cos\varphi) \tag{5}$$

식(5)는 폭발파면을 따라 각도 φ와 호 길이 ξ 사이의 1차 상미분 방정식으로서 $\kappa(D_n)$이 주어지면 각도 φ와 호 길이 ξ 사이의 관계를 구할 수 있고 또한 이 결과를 식(1)에 대입하면 폭발파면의 궤적을 얻을 수 있다. 역으로 폭발파면의 궤적을 실험적으로 측정하면 $\kappa(D_n)$을 구할 수 있다. 식(3)으로부터 원통형에 대하여 $d\xi = d\varphi/(\kappa - \sin\varphi/\ r_0^1)$의 식을 얻을 수 있고 기준점을 원통형의 중심축과 폭발파면의 교점으로 놓으면 식(6)을 얻게 된다.

$$r_0^1 = \int_0^{\varphi_e} \frac{\cos\varphi}{\kappa(D_n) - \dfrac{\sin\varphi}{r_0^1}} d\varphi \tag{6}$$

식(6)은 정상상태 폭발속도 D_0와 화약반경 r_e^1의 관계, 즉 직경효과를 정의한다. 그러므로 $\kappa(D_n)$이 주어지면, 폭속과 화약 반경과의 관계를 식(6)로부터 얻을 수 있다. 역으로 실험적으로 측정한 직경효과가 주어지면 식 (6)으로부터 $\kappa(D_n)$을 구할 수 있다는 것을 의미한다.

$\kappa(D_n)$ 또는 $D_n(\kappa)$ 함수가 결정되면 고유좌표계로 변환된 유체역학 방정식들로부터 반응대역내의 유체의 흐름을 구할 수 있다. 식 (1)을 사용하여 정지좌표계의 공간변수인 z^1과 r^1을 고유좌표계의 공간좌표인 η와 ξ로 변환하면 고유좌표계에서의 유체역학 방정식들을(질량, 에너지, 운동량, 종평형, 상태방정식, 반응속도식)얻을 수 있다[1]. 여기서 유체역학 방정식들을 종합하면 반응대역 내에서의 u_η와 λ의 관계를 정의하는 주방정식(master equation)을 얻을 수 있으며, 이 주방정식은 폭발파면의 굴곡이 심하지 않은 경우에는 근사적으로 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{[C^2-(D_n-u_\eta)^2]}{(D_n-u_\eta)}(D_n-y_\eta)_{,\lambda}+\frac{E_{,\lambda}}{\rho E_{,p}}=-\frac{\kappa C^2 u_\eta}{R} \qquad (7)$$

1차 상미분 방정식인 식(7)은 $\kappa(D_n)$이 실험적으로 결정되고 상태방정식과 반응속도식이 주어지면 식 (7)을 적분하여 반응대역 내에서의 u_η와 λ의 관계를 구할 수 있고 그 관계를 유체역학 방정식에 대입하면 압력, 밀도 등의 반응대역 내의 상태를 구할 수 있다.

3. 측정 시험

가. 둔감화약 TX-1의 폭속 및 폭발파면 궤적 측정 시험

반응속도식을 보정하기 위하여 시험에 사용한 화약은 알루미늄이 함유된 밀도 1.76g/cc를 갖는 cast PBX이다. TX-1 화약에 대하여 직경 25㎜ ~ 100㎜ 크기의 원통형상에 대한 폭속측정 시험을 수행하였다. 또한 폭발파면 측정시험은 ф30㎜, ф40㎜, ф50㎜, ф60㎜, ф80㎜, ф100㎜의 원통형상에 대항 수행되었는데 정상상태 조건을 충족시키기 위하여 직경대 길이 비를 1:10으로 설정하였다.

4. 반응속도식 보정

실험적으로 $D_n(\kappa)$ 함수가 결정되고 상태방정식이 주어지면 고유치 폭발특성을 이용하여 식(7)로부터 반응속도식을 보정할 수 있다.

가. HOM 상태방정식

반응속도식 보정을 위하여 사용된 HOM 상태방정식은 고체상태의 반응하지 않은 화약과 기체상태의 반응생성물이 이상적으로 혼합되고(ideal mixture), 두 상(phase) 사이에 압력과 온도가 평형을 이루고 있다고 가정하에 반응하지 않은 화약의 거동은 충격유고니오를 기준선으로 하는 Mie-Gruneisen 상태방정식에 의해 기술하며, 반응생성물(기체상태)의 거동은 CJ점을 통과하는 등엔트로피 곡선(isentrope)을 기준선으로 하는 β 상태방정식에 의하여 기술하고 있다.

나. $D_n(\kappa)$ 함수 결정

$D_n(\kappa)$ 함수는 Levenberg-Maquart algorithm에 의한 비선형 최소자승 끼워맞춤법으로 식(8)과 같은 merit function을 최소화 시킴으로서 결정하였다.

$$\Lambda = W\sum_{i=1}^{L}\sum_{j=1}^{M}\left[\frac{z^i_{exp}(j)-z^i_{calc}(j)}{d^i}\right]^2+\sum_{k=1}^{N}[D_{exp}-D_{calc}]^2 \qquad (8)$$

식(8)의 merit function을 최소화 하여 구한 $D_n(\kappa)$은 식(9) 형태의 함수로 결정하였다.

$$\frac{D_n}{D_{CJ}}=1-\alpha_1 k^{1/\nu}+\alpha_2 k \exp[\theta k(D_{CJ}-D_n)] \qquad (9)$$

여기서 D_{CJ}=7.2458, α_1=0.6525, ν=1.9734, α_2=0.063, θ=5.8811

$D_n(\kappa)$ 함수 선정의 타당성을 검증하기 위하여 $D_n(\kappa)$를 이용하여 직경효과 곡선과 폭발파면의 궤적을 구하여 실험값과 비교하였다. 그림 2는 직경효과 곡선을 나타내고 있으며 점들은 폭속측정으로부터 얻은 실험값이며 실선은 $D_n(\kappa)$를 이용하여 계산된 값이다. 그림에서 알 수 있듯이 실험값들과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 3은 $D_n(\kappa)$함수를 이용하여 계산된 폭발파면의 궤적을 실험값과 비교한 것으로 계측된 Φ30㎜,, Φ60㎜, Φ80㎜의 폭발파면 궤적과 계산된 값이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 직경효과 곡선과, 폭발파면 궤적 계산을 통하여 본 연구에서 구한 $D_n(\kappa)$ 함수는 반응속도 보정에 적합한 함수 형태인 것을 확인할 수 있다.

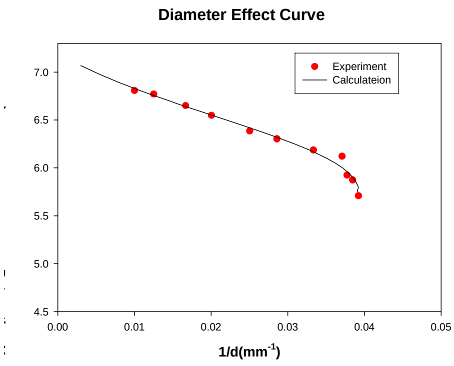


그림 2. 직경효과 곡선 비교

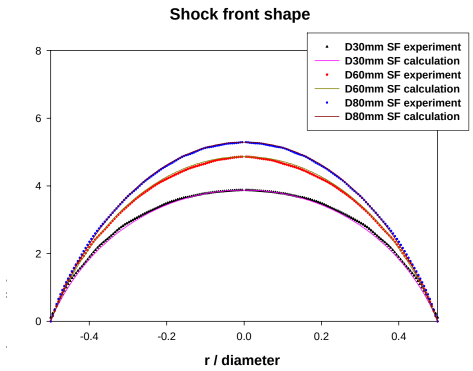


그림 3. 폭발파면 궤적 비교

다. 반응속도식 보정

TX-1 화약의 결정된 HOM 상태방정식과 $D_n(\kappa)$ 함수, 그리고 식 (7)을 사용하여 앞장에서 기술한 방법에 의하여 반응속도식을 결정하였다. 이와 같이 결정된 반응속도식을 식(10)에 나타내었다.

$$\frac{d\lambda}{dt} = k(1-\lambda)^{\nu}\exp(-\theta\rho^{\tau_1}/P^{\tau_2}) \qquad (10)$$

$k = 1.4781, \quad \nu = 2.15, \quad \theta = 0.0082, \quad \tau_1 = 2.2506, \quad \tau_2 = 1.1917$

반응속도식을 살펴보면 오른쪽 항에서 $(1-\lambda)$의 지수값이 높은 것을 알 수 있다. 이것은 반응속도식의 상태의존도가 낮고, 상당량의 폭발반응에너지가 음속점 이후에서 방출할 것임을 의미한다. 그 결과, 화약의 폭밥압력과 폭발속도는 낮지만, 공기중 폭풍효과나 수중에서의 기포에너지는 상대적으로 증대할 것임을 알 수 있다.

5. 결 론

비이상적인 폭발특성을 갖은 둔감화약 TX-1에 대한 반응속도식을 보정하였다. 반응속도식을 보정하기 위하여 TX-1의 직경별 폭속과 폭발파면 궤적을 측정하였으며 이를 폭발역학 이론에 적용하여 반응속도식을 보정할 수 있었다. 반응속도식 보정에 필수적인 $D_n(\kappa)$ 함수를 결정하였고 HOM 상태방정식으로부터 둔감화약 TX-1의 반응하지 않은 고체상태와 반응생성물에 상태를 결정할 수 있었다. 본 연구를 통하여 보정된 반응속도식은 둔감화약인 TX-1의 비이상적인 폭발특성을 예측하는데 타당한 것으로 판단되며 향후 무요소법이나 유한요소법 같은 전산해석 기법과 결합하여 TX-1의 성능 및 취약성 해석에 적용할 예정이다.

참고문헌

1. Lee, J., "Detonation shock dynamics of composite energetic materials," Ph. D Dissertation , New Mexico Tech., 1990
2. Bdzil, J. B. and Stewart, D. S., "Modeling two-dimensional detonation with detonation shock dynamics," *Physics. Fliud*, A1. 3, 1989, pp. 1261-1267.
3. Bdzil, J. B.. Fickett, W. and Stewart, D. S., "Detonation shock dynamics: A new approaching to modeling multi-dimensional detonation waves," *Proc. of the Ninth International Symposium on Detonation*, pp 730-742, portland U.S.A, Aug 1989.