

외부 충격에 의한 손상을 고려한 화약과 추진제의 폭발모델 개발

김보훈* · 여재익**

Development of Explosion Model of Energetic Materials Considering Shock to Detonation Transition and Damage by External Impact

Bohoon Kim*, Jai-ick Yoh**

ABSTRACT

A pressure-based BOIK model considering Shock to Detonation Transition(SDT) and damage due to external fragment or bullet stimuli impact on energetic materials and analytical approach for determination of free parameters are proposed. The rate of product mass fraction(λ) consists of ignition term that represents the initiation due to shock compression and growth term that describes propagation of detonation wave and strain term representing the morphological deformation induced by external impact.

Key Words : Energetic Materials, Shock to Detonation Transition, External Impact

고에너지 물질(energetic materials)은 화학적 엔탈피를 열적 엔탈피로 짧은 시간동안 변환시키는 과정에서 엄청난 에너지를 발생시키는 역할을 하기 때문에 일반적으로 연소 반응 속도가 매우 빠르다. 충격파를 수반하는 폭굉 천이 현상인 SDT(Shock to Detonation Transition, $\sim 10^{-5}$ sec) 현상은 순간적으로 높은 압력과 고온 환경을 형성하면서 압축 및 열점생성, 그리고 폭발과의 발달과 관련된 고에너지 물질의 연소 특성들을 복합적으로 발생시킨다.

고에너지 물질의 기폭 여부에 대한 판단은 점화(ignition)와 밀접한 연관성을 갖는데, 강한 압력을 수반하는 파동 형태의 충격이 고에너지 물질에 가해졌을 때 과연 점화가 발생할 것인지 여부를 예측하는 방법은 I&G 모델(Ignition & Growth model)에 대한 선행연구[1]를 통해 탐구한바 있다. 앞선 연구에서 제시한 SNU I&G 모델은 미 에너지부 연구소(LLNL)에서 개발한 I&G 모델[2]보다 간략화 된 형태로 직관적이며 효용성 측면에서 장점이 있다. 또한 반응속도식을 구성하고 있는 미정의 상수들을 이론적으로 결정할 수 있도록 하여 특정 화약에 대해 반응특성을 효율적으로 정의할 수 있도록 하였다는 점에서 매우 효과적이라고 할 수 있다. 물리적 측면에서 SNU I&G 모델은 폭발과의 성장으로 인한 폭굉으로의 천이 현상뿐만 아니라 압축으로

인한 열점의 발생 및 그에 의한 영향을 고려하기 때문에 기존의 JWLL++ 모델[3]로는 해석할 수 없었던 점화 메커니즘에 대한 이해와 기폭 여부 판단이 가능하다. 즉, 화약의 폭발 현상 해석 시 LLNL I&G 모델이나 JWLL++ 모델 보다 더욱 다양하고 광범위한 영역에 대해 적용할 수 있는 기반을 마련했다고 볼 수 있다.

다만, SNU I&G 모델은 파동 형태의 충격파가 고에너지 물질에 전달되는 특수한 상황을 가정하여 모델링한 것이기 때문에 외부 파편과의 충돌이나 총탄에 의한 고의적 피격에 대한 상황에는 적용하기 어렵다. 외부 충격은 고체 형태의 고에너지 물질에 손상을 입혀 소성적 변형을 일으키며 이러한 변형이 반응속도에 영향을 미칠 수 있다. 즉, 기계적 충돌이 고에너지 물질에 가해졌을 때 충전된 물질을 뚫고 들어가면서 손상을 입히고, 마찰이나 압축 등의 이유로 점화가 일어난 뒤, 화염이 전파 되면서 고온고압의 가스가 발생하기 때문에 결국 구조물 전반을 손상시키는 폭발로 이어진다. 따라서 고에너지 물질이 외부 충격에 직간접적인 피해를 입었을 때 반응 특성을 모델링 하는 것은 SNU I&G 모델보다 발전된 형태라고 할 수 있다.

본 연구에서는 충격파에 의한 영향과 그에 따른 화염의 발달을 고려하면서 동시에 외부로부터의 파편 및 총탄 충격에 의한 고에너지 물질의 물리화학적 영향을 고려하는 BOIK(Bullet Operated Ignition Kinetics)이라는 새로운 형태의 연소 모델을 개발하고자 한다.

* 서울대학교 기계항공공학부 항공우주신기술연구소

† 연락처, jjyoh@snu.ac.kr

TEL : (02)880-9334 FAX : (02)-887-2662

우주 발사체나 무기체계에 외부 파편 및 총탄 충격이 가해지면, 추진기관의 점화 연소나 탄두부의 기폭 현상으로 이어질 수 있다. 이는 충돌체가 고에너지 물질을 변형 또는 파괴하면서 에너지를 가해 연소를 야기하기 때문이다.

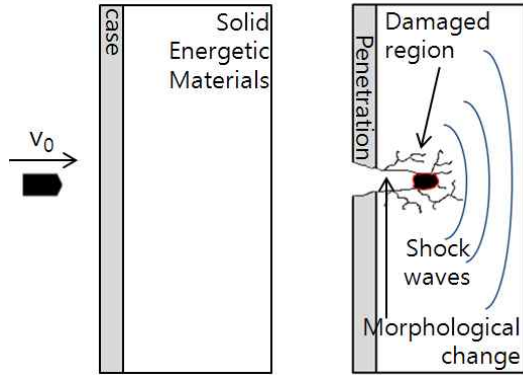


Fig. 1 Schematic diagram of a bullet or fragment impact response scenario.

Figure 1은 외부 파편 및 총탄 충격에 의해 내부가 변형된 고에너지 물질의 시나리오를 도식화한 것이다. 다양한 에너지 변환 및 교환 현상들이 복합적으로 내재되어 있는 외부 파편 및 총탄 충격에 대한 고에너지 물질의 반응을 해석하기 위해서는 새로운 형태의 연소 모델이 필요하다. 이에 본 연구에서는 BOIK(Bullet Operated Ignition Kinetics)이라고 이름 붙여진 총탄이 고려된 점화 및 연소 반응모델을 제안한다. BOIK 모델은 SNU I&G 모델[1]과 변형항(strain term)을 통합한 것으로, 다음의 Eq. 1로 표현된다.

$$\frac{d\lambda}{dt} = \left[\left(\frac{S}{V} \right) v_f + I \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^a + GP^b \right] (1 - F) \quad (1)$$

Equation 1은 변형항과 점화항, 그리고 폭발과 성장항의 합으로 구성되어 있다. 변형항은 형태적 변화 즉, 손상에 대한 영향을 나타내는 면적대체적비(surface to volume ratio)와 연소압력에 따른 화염 속도(flame speed), 그리고 연료소모량(fuel depletion)의 곱으로 나타낸다. 여기서 면적대체적비(S/V)는 Eq. 2로 계산된다.

$$\left(\frac{S}{V} \right) = A \{ \dot{\epsilon} \} (\epsilon_p - \epsilon_0) = B(\epsilon_p - \epsilon_0) \quad (2)$$

ϵ_p 는 총변형(total strain)을 의미하고, ϵ_0 는 손상 임계값(damage threshold)으로, $(\epsilon_p - \epsilon_0)$ 는 변형 한계를 넘은 유효 최대 변형을 의미한다. ϵ_0 는 물질에 따른 고유값이며, ϵ_p 는 다음과 같다.

$$\epsilon_p = \ln \left(\frac{l_0}{l_f} \right) \quad (4)$$

l_f 와 l_0 는 각각 총탄 및 파편의 최종 길이(final length)와 초기 길이(initial length)를 의미한다. 또한 A 는 변형특성속도(pre-inversed strain velocity factor)를 의미하며, $\{ \dot{\epsilon} \}$ 는 총탄 파편에 의한 고에너지 물질의 변형률(strain rate)이다. 변형특성속도 A 와 변형률 $\{ \dot{\epsilon} \}$ 의 곱인 B 는 변형 특성길이(pre-inversed damage length)를 의미하며, 물질의 단단한 정도 또는 무른 정도를 나타내는 파라미터이다. 파편이나 총탄이 고에너지 물질에 충돌했을 때 보다 깊숙이 파고 들어갈수록 면적은 증가되고 부피는 감소하기 때문에 이는 면적대체적비의 증가로 이어지고, 무른 물질일수록 그 값은 더욱 커진다. 이러한 의미에서 변형특성길이와 면적대체적비는 충돌에 의한 변형의 물리적 특성을 효과적으로 대변하는 매개변수라고 할 수 있다.

고에너지 물질은 기본적으로 강성(strength)을 가지고 있기 때문에 외부의 영향에 대해 응력과 변형의 영향을 받는다. 이러한 특성을 갖는 고에너지 물질의 연소 모델은 편차응력(deviatoric stress)에 대한 영향을 포함한 BOIK 모델이 적합하다. BOIK 모델은 물질의 탄소성(elsto-plastic)이나 점소성(visco-plastic) 변형을 모사하기 위한 변형항을 포함하는 형태의 I&G 모델이라고 할 수 있다.

최초에 변형을 통해 점화가 시작되고 뒤따라 충격파가 고에너지 물질 내로 전파되면서 열점을 형성하고, 화염이 발달함에 따라 연소 또는 폭발로 이어지는 일련의 연소 과정(combustion process)은 변형항과 점화항, 그리고 폭발과 성장항으로 구성된 BOIK 모델의 물리적 특성이라고 할 수 있다.

Table 1 ANFO-K1 explosive parameters

Ignition constant I	4.2466e9 s ⁻¹
Density sensitivity a	4.0
Growth constant G	7.084e-8 s ⁻¹ Pa ^{-b}
Pressure sensitivity b	1.38
Inverse strain length B	80 m ⁻¹
Damage threshold ϵ_0	0.2
Total strain ϵ_p	0.2, 1, 5, 10
Detonation velocity v_f	5865 m/s
CJ pressure	0.1017e11 Pa
CJ density	1.33672 g/cm ³
Initial density	1.16 g/cm ³

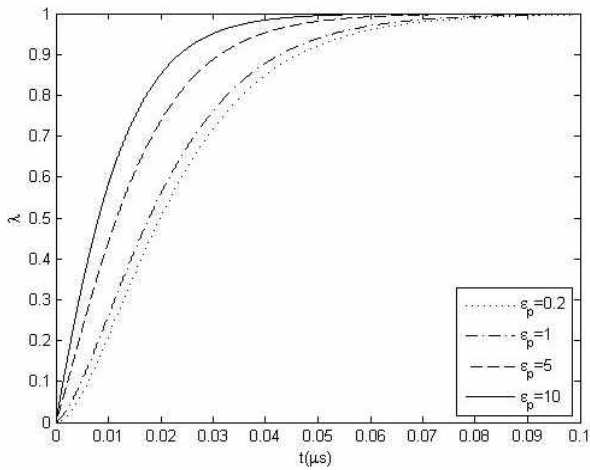


Fig. 2 STime trace of ANFO-K1 burned mass fraction using BOIK model.

Table 1은 ANFO-K1 화약에 대한 알려진 B , ϵ_0 , v_f 의 값 및 SNU I&G 모델의 미정상수들과 총변형 ϵ_p 를 임의로 변화시켰을 때 BOIK 모델을 도출하기 위해 사용한 값들을 나타낸 것이고, Fig. 2는 ANFO-K1의 상수값들을 사용하여 BOIK 모델의 질량분율을 시간에 따라 나타낸 것이다.

여기서 총변형 ϵ_p 을 0.2, 1, 5, 10으로 총 네 가지 경우에 대해 그래프를 도출하였다. 총변형이 증가할수록 외부 파편이나 총탄이 갖는 모멘텀 에너지가 크기 때문에 점화 및 화염발달에 더 많은 영향을 미친다. Fig. 2에서 나타난 것과 같이 총변형의 값이 가장 큰 $\epsilon_p=10$ 으로 갈수록 시간에 대한 질량분율의 기울기가 증가하고, 이는 반응물(reactant)이 생성물(product)로 더 빠른 시간 안에 변환됨을 의미한다. 총변형과 손상 임계값이 동일한 $\epsilon_p=0.2$ 의 경우에는 변형항에 대한 영향이 전체 ANFO-K1 화약의 반응속도에 영향을 미치지 않으므로, 결국 SNU I&G 모델의 결과와 같다. 즉, 유효 최대 변형이 0인 경우에는 외부 파편에 의한 충돌이 구조적 손상을 일으키지 않지만, 고에너지 물질 내에 충격파를 전달하여 이로 인한 점화가 발생함을 알 수 있다.

압력기반의 반응속도식인 BOIK 모델은 공극 붕괴로 인한 열점의 생성으로 인해 점화가 발생하는 모델과 충격파를 동반하는 폭굉으로의 천이를 의미하는 폭발과 성장항, 그리고 외부 파편 및 총탄 충격에 의한 손상을 고려하는 변형항의 합으로 구성되어 있다. BOIK 모델은 우주 발사체나 무기체계에 외부 파편 및 총탄 충격이 가해지는 시나리오를 토대로, 충돌, 변형, 파괴 등의 현상이 고에너지 물질의 연소 반응에 미치는 영향을 모델링한 것이다. 외부 충돌에 의한 변형, 충격에 의한 점화, 화염의 폭굉으로의 천이와 같이 매우 다양한 에너지 변환 및 교환 현상들이 복합적으로 내재되어 있는 고에너지 물질의 반응을 해석하기 위해서는 본 연구에서 제안한 BOIK 연소 모델이 적합하다고 사료된다. BOIK 모델은 반응 속도에 대하여 파괴 및 변형이 어떤 역할을 하는지 새로운 통찰을 제공한다는 점에서 중요한 의의가 있다.

후 기

본 연구는 고압충격 폭발현상 해석기법 특화연구실의 HH-5과제와 ADD 위탁과제의 지원을 받아 수행된 것이며, 지원에 대하여 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 김보훈, 여재익, “고에너지 물질의 연소반응 해석을 위한 반응속도식 개발 및 정의에 관한 연구,” 한국추진공학회지, 제16권, 제5호, 2012, pp.47-57.
- [2] E. L. Lee, and C. M. Tarver,, “Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives,” Physics of Fluids, Vol. 23, No. 12, 1980, pp.2362-2372.
- [3] P. C. Souers, S. Anderson, J. Mercer, E. McGuire, and P. Vitello, “JWL++: A simple reactive flow code package for detonation,” Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 25, No. 2, 2000, pp.54-58.