

마찰 하중에 의한 HMX, RDX, AP기반 고에너지물질의 발화특성모델링 연구

곽민철* · 유지창** · 여재익***

Friction-induced ignition and initiation modeling of HMX, RDX and AP based energetic materials

Mincheol Gwak* · Jichang Yoo** · Jai-ick Yoh***

ABSTRACT

The heat released during the external frictional motion is a factor responsible for initiating energetic materials under all types of mechanical stimuli including impact, drop, or penetration. We model the friction-induced ignition of HMX, RDX and AP/HTPB propellant using the BAM friction apparatus and one-dimensional time-to-explosion apparatus whose results are used to validate the friction ignition mechanism and the deflagration kinetics of energetic materials, respectively. The ignition times for each energetic sample due to friction are presented.

초 록

충격과 관통 같은 에너지의 소실은 열을 발생시키며 이를 통하여 기계적 변화와 더불어 열적 변화를 유발하게 된다. 고에너지 물질의 경우 이런 마찰에 의해 발생하는 열이 점화 원인이 될 수 있다. 그래서 본 연구에는 BAM 마찰 실험을 통하여 획득된 HMX, RDX 그리고 AP를 기반으로 한 추진제의 마찰 점화 실험 자료를 바탕으로 하여 마찰에 의한 고에너지 물질의 점화를 모델링한다.

Key Words: Ignition(점화), Friction(마찰), HMX, RDX, AP/HTPB 추진제

1. 서 론

일반적으로 물질의 마멸에 관련된 문제를 해결하는데 있어서 두 물체 사이에서의 마찰은 문제 해결의 핵심적인 역할을 한다. 두 물체 간의

상대적인 운동에 의하여 물체 사이에서 발생하는 마찰 에너지는 마찰 물체의 변형과 더불어 열을 발생시키게 된다. 이 마찰 에너지는 물체에 가해지는 수직 항력, 상대 속도 그리고 두 물체 사이의 마찰 계수에 의하여 결정된다. 본 연구에서는 마찰에 의한 물체의 변형 보다는 마찰열의 발생으로 인한 온도 증가에 중점을 두고 있다. 이 물체 사이의 접촉면에서 마찰열에 의한 온도 증가는 시편 즉 마찰 물질의 열팽창과 더불어

* 서울대학교 기계항공공학부

** 국방과학연구소

*** 서울대학교 기계항공공학부

연락처, E-mail: jjyoh@snu.ac.kr

화학적 산화와 같은 물리 현상을 유발하게 된다. 이러한 현상에 대한 연구는 과거 Jaeger[1]와 Archard[2]의 연구에서 다루어지고 있다. 이들의 연구 대부분은 두 물체 사이의 마찰에 발생하는 에너지가 열에너지로의 변환에 의해 상승될 수 있는 Flash temperature와 Bulk temperature에 대하여 논의하고 있다.

마찰에너지의 전환에 관련된 이론을 바탕으로 고에너지 물질의 점화 모델로서 Amosov 등 [3]이 있는데 이는 접촉면에서의 압력과 상대 속도의 함수로 Heat flux의 양이 결정된다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 하여 접촉면에서의 온도 상승으로 인한 고에너지 물질의 열분해와 점화 반응을 연구한다.

실험적으로 규명된 RDX, HMX 그리고 AP를 기반으로 한 추진제의 다단계 화학 반응을 이용하여 마찰 점화 테스트를 하기 전에 테스트 결과를 예측해 본다. 이는 BAM friction test를 통하여 획득된 1초 이내에 점화될 수 있는 하중을 근거로 하여 thermo-friction coefficient를 구하고 이를 바탕으로 하여 하중에 변화를 주면서 점화 시간을 예측한다. 여기서의 상대 속도는 BAM 실험의 시편 이동 속도에 해당하는 7cm/s로 고정시킨다. 그리고 고에너지 물질의 점화 현상을 가지는 열분해 과정은 One-dimensional time to explosion (ODTX) test를 통하여 잘 알려진 식을 사용하였다.

본 연구에서는 고에너지 물질 중 RDX, HMX 그리고 AP를 기반으로 한 추진제에 대하여 논의해 본다.

2. 본 론

2.1 마찰 테스트

마찰에 의한 점화 모델에 필요한 첫 번째 모델은 마찰 모델링이다. 이를 설명하기에 앞서 실제로 고에너지 물질의 마찰 실험의 일종인 BAM friction 장치(Julius Peters)를 이용한 마찰 실험에 대한 간략한 개념도는 아래의 Fig. 1과 같다.

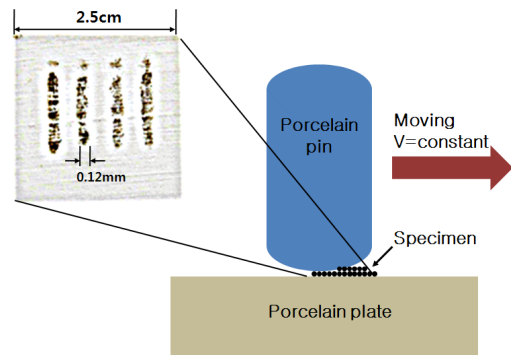


Fig. 1 Schematic of a BAM friction tester

그리고 이 장치를 통하여 우리는 측정된 고에너지 물질이 7cm/s라는 일정한 속도로 움직일 경우 1초 이내에 점화 될 수 있는 최대 하중을 알 수 있다. 아래의 Table. 1은 국방 과학 연구소와 미 LANL [4]에서 측정된 RDX와 HMX 그리고 AP를 기반으로 한 추진제의 값을 정리한 것이다.

Table 1. Ignition load

Sample	Ignition load (kg)
RDX	16.5
HMX	13.6
AP/HTPB	11

고에너지 물질의 점화 시간은 고정된 속도에 대하여 하중의 변화로부터 구할 수 있다. 또한 고에너지 물질의 점화 체계를 이해하기 위해서 고에너지 물질의 화학반응식이 필요하다. 이는 다음 장에 확인할 수 있는 ODTX를 통하여 확보하였다.

2.2 ODTX 테스트

마찰 하중이 작용하는 고에너지 물질의 열학적 반응을 묘사하기 위하여 필요한 첫 번째 모델은 고에너지 물질의 열분해 반응에 적합한 모델이다. 본 연구에서는 ODTX 테스트에 의하여 모델을 만들었는데 이는 특정한 온도에서의 반응에 대하여 실험적으로 반응식을 보여준다.

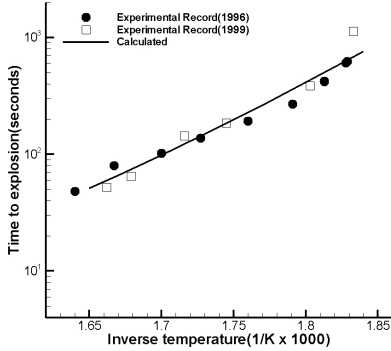


Fig. 2 ODTX fitting result for 88% AP 11% HTPB composite explosive

고에너지 물질의 빠른 반응 속도를 가지는 단순한 1차 발열 반응과는 달리 고체에서 고체로 그리고 고체에서 기체로 변화하는 상변화 그리고 기체에서 최종 생성 기체로의 반응이 복합적으로 결합되어 흡열 과정과 발열 과정이 동시에 일어나게 되는 다단계 화학 반응 과정을 거치게 된다. Yoh 등[5, 6]의 연구로부터 HMX와 RDX의 폭연 실험 데이터에 이론적인 화학반응을 맞춘 것을 사용하였다. 예를 들어 위의 Fig. 2는 AP를 기반으로 한 추진제인 AP/HTPB 복합체의 실험 데이터에 이론적인 화학반응을 맞춘 것이다. 보는 바와 같이 일반적으로 선형적인 관계를 가지고 ODTX 측정 데이터 정량적인 정확성을 가진다.

2.3 마찰열 발생에 대한 이론적 설명

두 물체가 접촉한 상태에서 상대적인 운동에 의하여 발생되는 마찰에 의해서 유도된 열은 아래의 식(1)과 같이 간단히 적을 수 있다.

$$q = \frac{\mu F v}{A_n} \times J = \bar{\mu} P_n v \quad (1)$$

여기서 μ 는 마찰계수, F 는 수직방향 힘, A_n 은 접촉 면적, v 는 접촉한 면의 상대 속도 그리고 J 는 기계적 인자를 열적 인자로 변환시킬 때 쓰인 상수로써 일반적으로 0.9를 가진다.

여기서 q 는 각각의 접촉 물질로 분리되는데 분리되는 비율을 K_ε 이라고 할 경우 이 값은 아래의 식(2)와 같다. 고에너지 물질이 다른 물질과 마찰하여 열이 발생한다고 하였을 경우 하첨자 1, 2는 각각 고에너지 물질과 다른 물질을 뜻하며 마찰열의 분리되는 정도는 열전도율, 열용량 그리고 밀도에 의하여 결정된다.

$$\frac{q_1}{q_2} = \sqrt{\frac{k_1 c_1 \rho_1}{k_2 c_2 \rho_2}} = K_\varepsilon \quad (2)$$

2.4 마찰에 의한 접화의 지배 방정식

본 연구에서 다루는 물리적 현상은 접촉면에서 마찰에 의해 발생하는 열, 전도에 의하여 고에너지 물질로의 열 이동 그리고 온도 상승에 따른 다단계 화학반응 발생이다.

모델링은 크게 2개의 식으로 구성되어있는데 이는 에너지 방정식과 화학종 방정식이다. 에너지 방정식은 아래의 식(3)과 같이 표현된다.

$$\rho_i c_{p,i} \frac{\partial T}{\partial t} = k_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \sum_{i=1}^N r_i q_i \quad (3)$$

그리고 화학종 방정식은 고에너지 물질에 따라 크게 차이가 있다. RDX의 경우는 3단계 화학반응으로 구성하여 해석하였고[5] HMX의 경우는 4단계 화학반응식으로 구성하여 해석하였다.[6]

한 예로 HMX의 경우를 살펴보면, 4단계 화학반응식은 아래의 식(4)~(7)과 같이 구성되어 있다.

$$A \rightarrow B, \quad r_1 = Z_1 \exp(-E_1 / RT) \rho_A \quad (4)$$

$$B \rightarrow C, \quad r_2 = Z_2 \exp(-E_2 / RT) \rho_B \quad (5)$$

$$C \rightarrow D, \quad r_3 = Z_3 \exp(-E_3 / RT) \rho_C \quad (6)$$

$$D \rightarrow E, \quad r_4 = Z_4 \exp(-E_4 / RT) \rho_D^2 \quad (7)$$

여기서 A와 B는 고체 화학종이고 C는 중간매개체로서의 고체이며 마지막으로 D, E가 최종 생성 기체들이 된다. 위의 화학식에 의하여 결정되는 화학종 방정식은 아래의 식(8)과 같다.

$$\rho_1 \frac{\partial Y_E}{\partial t} = -r_1, \quad \rho_1 \frac{\partial Y_F}{\partial t} = r_1 - r_2, \quad \rho_1 \frac{\partial Y_G}{\partial t} = r_2 - r_3, \\ \rho_1 \frac{\partial Y_H}{\partial t} = r_3 - r_4, \quad \rho_1 \frac{\partial Y_I}{\partial t} = r_4 \quad (8)$$

마지막으로 두 물체가 접하는 부분에서의 경계 조건을 살펴보면 아래의 식(9)와 식(10)으로 구분하여 계산을 수행하였는데 식(9)는 마찰에 의하여 발생된 열유량이 열확산에 의해서만 전달된다는 것을 의미하고 식(10)의 경우는 상대 속도에 의한 접촉면에서의 대류 냉각을 포함하고 있다.

$$x = 0, \quad -k_1 \frac{\partial T}{\partial x} = q_1 \quad (9)$$

$$x = 0, \quad -k_1 \frac{\partial T}{\partial x} + h(T - T_0) = q_1 \quad (10)$$

여기서 h 는 대류열전달 계수로 본 연구에서는 29.8을 사용하였으며 T_0 는 초기 온도로서 300K을 사용하였다.

3. 마찰에 의한 점화 모델링

고에너지 물질과 마찰 물질의 물리 화학적인 특성을 앞서 설명한 지배 방정식에 적용하여 해석해야 한다. 여기서 초기 상태의 고에너지 물질 및 BAM 실험에서 베이스로 사용되는 Porcelain(석면)의 열역학적 물성치를 살펴보면 아래의 Table 2와 같다. 이 이외에도 여러가지 물성치들이 필요하지만 이에 대한 설명은 Yoh 등[6, 8]과 Hegab 등[7]에서 확인 할 수 있다.

Table 2. Thermal material properties at 300K

	Density (kg/m ³)	Heat capacity (J/kgK)	Thermal conductivity (W/mk)
석면	2400	897	2.06
RDX	1820	1260	0.26
HMX	1865	1190	0.456
AP /HTPB	1826.4	1260	0.389

본 연구에서는 앞서 언급한 수치적 계산 시간 간격을 0.0001초를 기본으로 하였다. BAM 실험에서 얻은 실험값을 근거로 계산을 수행하여 일정한 속도를 가지는 마찰이 가해질 경우 RDX와 HMX 그리고 AP/HTPB 추진제의 하중 변화에 따른 점화 시간 변화를 예측한다. 예측한 값은 아래의 Fig. 3~5에서 각각의 점화 시간 변화를 보여주고 있다. 이는 선상을 기준으로 하여 우측의 시간에서 폭발이 발생할 수 있는 반면 좌측에 대해서는 폭발이 발생되지 않음을 의미한다. 그리고 여기서 실선은 앞서 언급한 경계조건에서 대류에 의한 열손실이 있는 것을 보여주고 점선은 그렇지 않은 상태를 보여준다. 이는 현상적으로 보았을 때 적은 하중으로 가할 경우 마찰열이 발생하지 않아 점화가 일어나지 않는다는 것을 보여주고 있다.

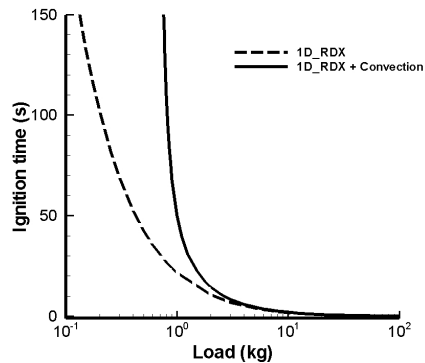


Fig. 3 Ignition time by change of load of RDX

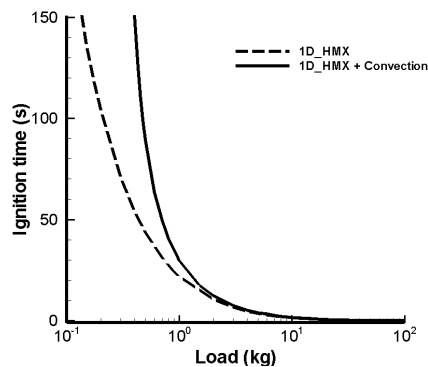


Fig. 4 Ignition time by change of load of HMX

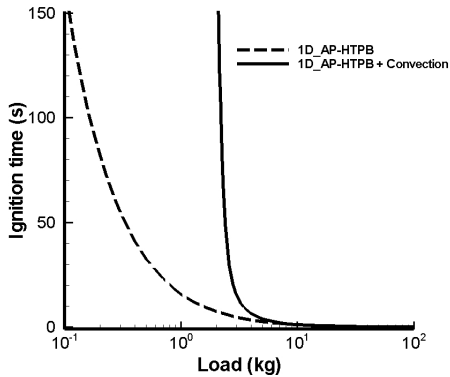


Fig. 5 Ignition time by change of load of AP/HTPB composite

4. 결 과

마찰에 의한 점화에 대한 실험적 결과를 바탕으로 아직까지 실험되지 않은 점화시기를 예측함으로써 추후 이루어질 실험과의 비교할 수 있는 자료를 획득할 수 있었고 이를 통하여 고에너지 물질을 취급함에 있어서 마찰과 관련된 안전성을 확보할 수 있는 자료를 제공한다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 핵심 기술 위탁 연구에 지원을 받아 수행된 것이며, 지원에 대하여 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. C. Jaeger, 1942 "Moving sources of heat

and the temperature at sliding contacts." Proc. R. Soc, N.S.W, Vol. 76, pp. 203-224

2. J. F. Archard, 1958-1959 "The temperature of rubbing surfaces." Wear, Vol. 2, pp. 438-455
3. A. P. Amosov, S. A. Bostandzhiyan, V. P. Volodin, A. N. Gryadunov and S. M. Muratov 1978 Ignition of a solid explosive by dry friction. Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 14, pp. 644-648
4. H. H. Cady 1992 "Evaluation of Ferrocyanide / Nitrate Explosive Hazard." Los Alamos National Laboratory Report
5. J. J. Yoh, M. A. McClelland, J. L. Maienschein, J. F. Wardell and C. M. Tarver 2005 "Simulating thermal explosion of cyclotrimethylenetrinitramine-based explosives: Model comparison with experiment." Journal of Applied Physics 97
6. J. J. Yoh and K. H. Kim 2008 "Shock compression of condensed matter using Eulerian multimaterial method: Applications to multidimensional shocks, deflagration, detonation and laser ablation," Journal of Applied Physics 103: 113507
7. A. Hegab, T. L. Jackson, J. Buckmaster and D. S. Stewart, "Nonsteady burning of periodic sandwich propellants with complete coupling between the solid and gas phases" Combustion and Flame 125: 1055-1070, 2001
8. M. C. Gwak, T. Y Jung and J. J. Yoh, "Friction induced ignition and initiation modeling of energetic materials," journal of Applied Physics, 2008, submitted