

격벽착화기 내 충격 전달에 관한 연구

김보훈* · 김민성* · 여재익*†

A Study on Shock Transmission of Pyrotechnic Initiator

Bohoon Kim*, Minsung Kim*, Jai-ick Yoh*†

ABSTRACT

A pyrotechnic system that consists of donor/acceptor pair separated by a gap relies on shock attenuation characteristics of the gap material and shock sensitivity of the donor and acceptor charges. We apply a level-set based multimaterial hydrocode with reactive flow models for pentolite donor and heavily aluminized RDX as acceptor charge. The complex shock interaction, critical gap thickness, acoustic impedance, and go/no-go characteristics of the pyrotechnic system are quantitatively investigated.

Key Words : Pyrotechnic initiator, Shock attenuation, Acoustic impedance

격벽을 사이에 두고 여폭약(donor)과 수폭약(acceptor)으로 충전된 파이로 착화기는 격벽의 압력 감쇠 현상과 고에너지 물질의 충격 점화 민감도 특성을 지닌다. 격벽착화기는 항공우주 분야에서 널리 사용되고 있지만, 고에너지 물질의 폭발 및 격벽 물질 내부에서의 압력 감쇠에 대한 정확한 모사가 어렵기 때문에 수치해석적 연구가 이루어지지 않은 실정이다. 본 연구에서는 Fig. 1의 격벽착화기를 단순화한 여폭약(pentolite)-격벽(PMMA)-수폭약(Al-RDX)이 일렬로 배열된 gap test를 구성하고 오일러리안 기반의 다중물질 하이드로 코드를 사용하여 충격 전달에 의한 점화 현상을 해석하였다. 화약-격벽 간 상호작용 및 임계 두께, 음향 임피던스를 분석하여 격벽착화기의 점화 특성을 정량화하였다.

여폭약과 감쇠기는 gap test 표준물질로 각각 1.560 g/cc의 pentolite와 1.182 g/cc의 PMMA가 사용된다. Pentolite는 PETN(Pentaerythritol tetranitrate, $C_5H_8N_4O_{12}$, R.E 계수 1.66)과 TNT(Trinitrotoluene, $C_7H_5N_3O_6$, R.E 계수 1.00)이 1:1 비율로 섞인 민감 화약이다. 조성이 복잡하지 않고 소량 점화에도 폭발 전이가 빨라 공급부 폭약으로 적합하다. 수용부에는 테스트 화약이 충전되는데, 여기서는 열폭압 RDX 화약(50% RDX, 35% Al, 15% HTPB)을 사용한다. RDX(Cyclotrimethylene-trinitramine, $C_3H_6N_6O_6$, R.E 계수 1.60)의 산소평형 값은 -21%로 TNT(-74%) 보다 효과적이나 PETN(-10%) 보다는 낮아 그 중간 정도에 해당한다. 산소평

형 값이 0에 가까울수록 연소효율과 에너지 생성량이 높은 것은 산소와 가연물이 양론비에 정확히 일치하기 때문이다. 열폭압 RDX 화약의 SDT 반응 특성과 하이드로다이나믹 해석 모델에 대해서는 선행연구[1]를 참조하길 바란다.

수치해석은 LSGT(Large-scale Gap Test) 시험[2]에서 도출된 PMMA의 임계 두께 근방에서 1 mm 간격으로 gap 두께를 조절하는 방식으로 전산모사하였다. 의미 있는 gap 두께는 25 mm와 26 mm이다. 전산모사에서 고에너지 물질의 점화 및 폭발과 전파에 대한 판단은 반응진행변수(reaction progress variable) λ 로 판단할 수 있다. λ 는 아래의 반응속도식으로 계산되며, 화학반응에 따른 압력 증가는 JWL 상태방정식으로 모사하였다.

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)\mu^a + G(1-\lambda)p^b, \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (1)$$

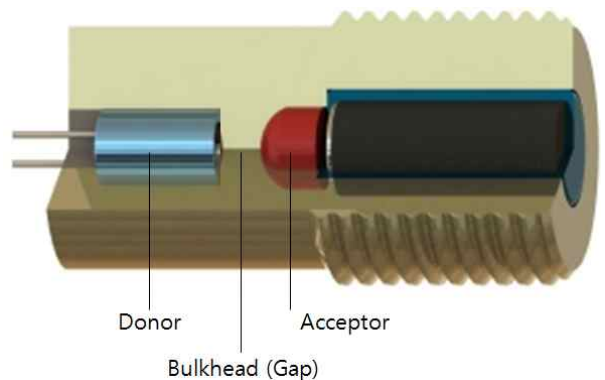


Fig. 1 Schematic diagram of TBI(Through Bulkhead Initiator) as a pyrotechnic device.

* 서울대학교 기계항공공학부, IAAT

† 연락처, jjyoh@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1507 FAX : (02)-882-1507

반응 전(unreacted) 및 반응 후(reacted) 상태 방정식은 여폭약[3]과 수폭약[4]에 각각에 대하여 다음의 방정식이 적용되었다.

$$P_{reacted}(\text{donor, acceptor}) = Ae^{-R_1(\rho_0/\rho)} + Be^{-R_2(\rho_0/\rho)} + C(\rho_0/\rho)^{-(1+\omega)} \quad (2)$$

$$P_{unreacted}(\text{donor}) = A(\rho/\rho_0 - 1)^1 + B(\rho/\rho_0 - 1)^2 + C(\rho/\rho_0 - 1)^3 \quad (3)$$

$$P_{unreacted}(\text{acceptor}) = P_H + \Gamma\rho(e - e_H) \quad (4)$$

한편, PMMA의 변형은 Mie-Gruneisen 상태 방정식[5]을 사용하여 압축과 팽창에 대한 모사를 정밀하게 예측할 수 있도록 구성하였다.

$$P_{PMMA(\text{solid})} = \Gamma_0 E + \begin{cases} \frac{\rho_0 C_0^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\Gamma_0}{2} \right) \mu \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} \right]^2} & \text{if } \mu > 0 \\ C_0^2 \rho_0 \mu & \text{if } \mu < 0 \end{cases} \quad (5)$$

이 때 고체 PMMA의 변형에 의한 항복 응력 (yield stress) σ_Y 은 다음의 Johnson-Cook 모델 [6]을 사용하여 계산하였다.

$$\sigma_Y = (A + B(\epsilon^p)^n) (1 + C \ln \epsilon^p) \left(1 - \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right) \quad (6)$$

LSGT 중심선을 따라 도출된 25 mm 및 26 mm gap 두께에서의 압력 분포의 발달을 Fig. 2에 나타내었다. Pentolite에서 발생한 초기 압력과 PMMA 충격 감쇠는 두 경우 모두 동일하나, 임계 압력의 도달 차이에 따라 수폭약의 반응 개시의 양상이 달라진다. 이때 여폭약 최대 생성 압력은 약 31 GPa이고, PMMA를 통과한 이후 열폭약 RDX를 기폭시키는 최소 임계 압력은 약 5.9 GPa로 계산되었다. Fig. 3은 경계면과 gap 물질 사이에서의 압력선도와 음향 임피던스를 나타낸 것이다. Gap test는 밀도가 다른 화약-격벽-화약의 배열로 이루어져 있으므로, 기본적인 충격과 전달은 좌에서 우로 전파된다고 볼 수 있으나, 실제로는 두 물질 간 경계면에서 임피던스 차이로 인해 반사파와 투과파가 생성된다.

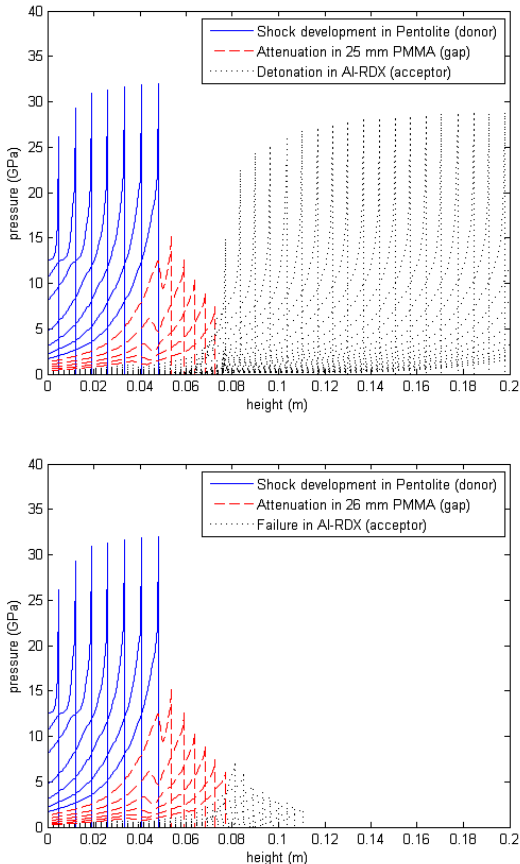


Fig. 2 Time Trace of Consecutive Pressure Profiles of LSGT Simulation with 25 mm and 26 mm Gap

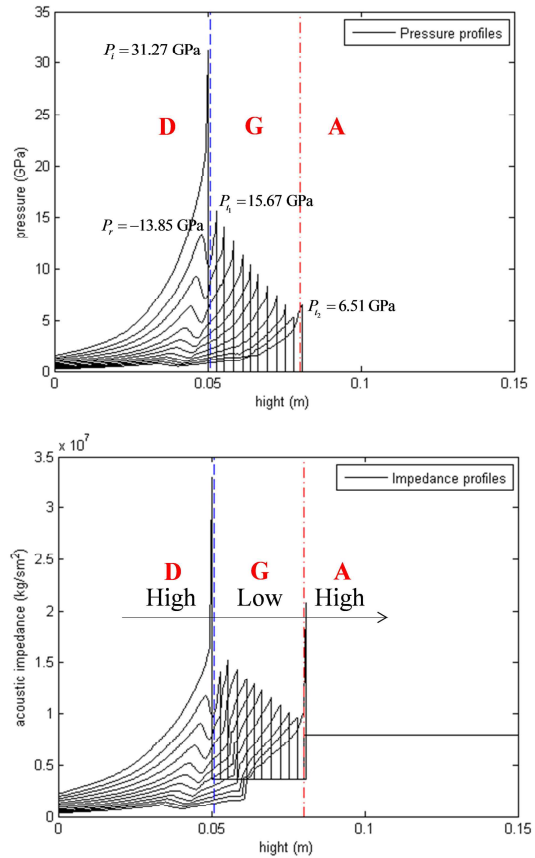


Fig. 3 Pressure and Acoustic Impedance of LSGT Simulation (Donor-Gap-Acceptor)

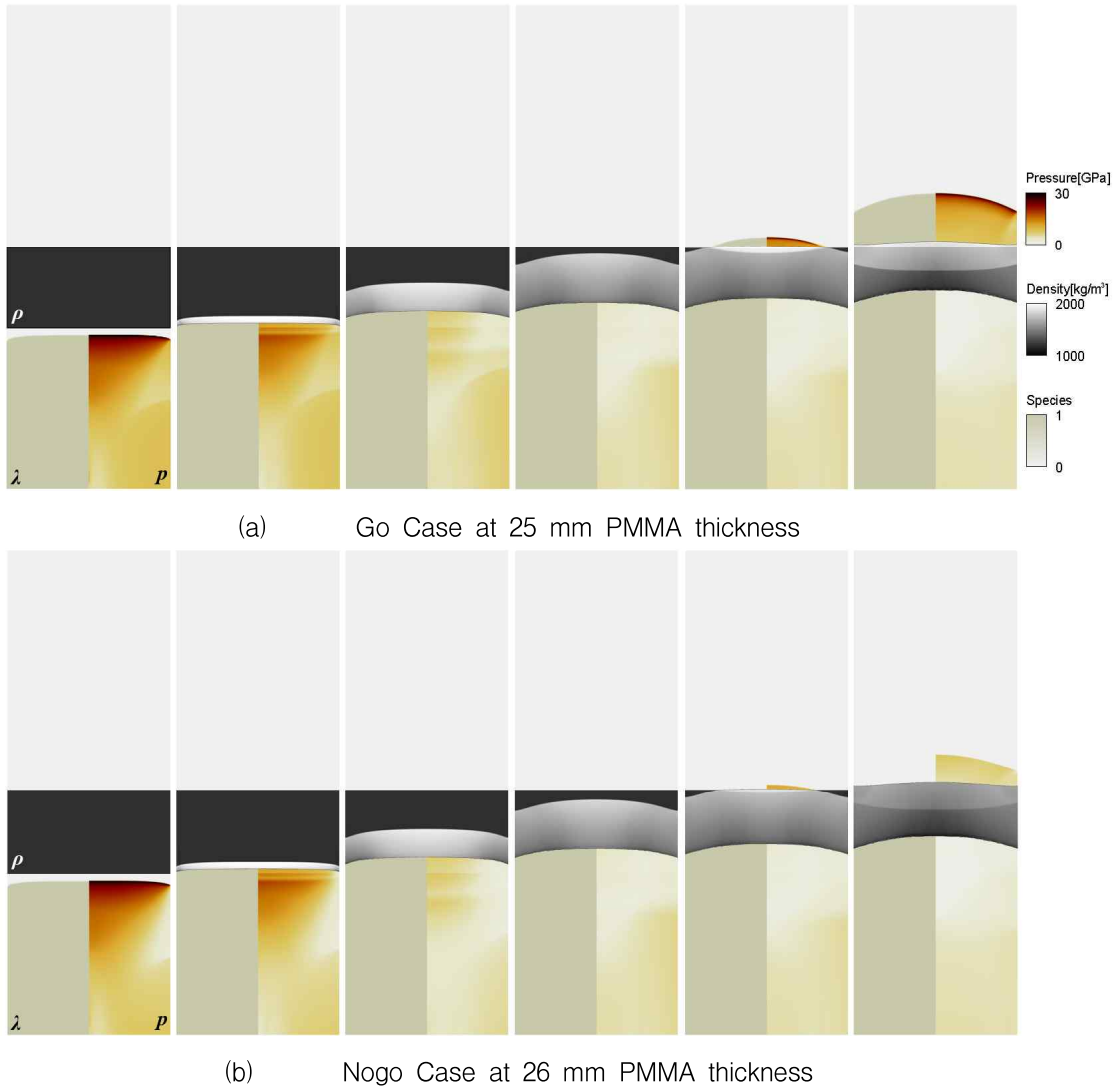


Fig. 4 Shown Reaction Progress and Pressure for Donor (bottom)/Acceptor (top), Density for PMMA (middle).
 (a) 25 mm Gap and (b) 26 mm Gap at Times $t=7, 8, 10, 12, 13,$ and $15 \mu s$

그래프에 따르면, 임피던스가 높은 물질(여폭약)-낮은 물질(Gap)-높은 물질(수폭약)의 순으로 압력파가 전달됨을 알 수 있는데, pentolite와 gap 간 경계면에서 31 GPa의 입력 압력 (incident pressure)이 16 GPa의 투과파 (transmitted wave)와 14 GPa의 반사파 (reflected wave)로 나뉘어 양방향으로 진행하는 것을 볼 수 있다. 감쇠기를 통과한 이후 두 번째 경계면(gap-수폭약)을 만나게 되는데, 이때 임피던스가 높은 물질에 투과파가 흡수되면서 열폭압 RDX를 통과한다.

Fig. 4는 pentolite 여폭약으로부터 25 mm 및 26 mm 두께의 PMMA 감쇠기를 통과하여 전달된 충격파가 수폭약에 도달했을 때의 순폭 현상을 시간에 따라 나타낸 것이다. PMMA에는 밀도를 나타내었고, 고에너지 물질의 좌측은 반응 변수, 우측은 압력을 의미한다. 결과를 살펴보면,

Gap 두께 25 mm에서 열폭압 RDX가 전달 압력으로 인해 기폭되었으나, 26 mm인 경우에는 기폭 임계값보다 낮은 압력이 시험화약에 도달하면서 폭발 음성반응이 나타났다. 즉, 감쇠기 두께에 따른 전달 압력의 차이가 본 현상의 근본 원인이라고 할 수 있다. 이러한 결과를 토대로 열폭압 RDX 화약의 반응 개시를 위한 PMMA 임계 두께(critical thickness)의 정보를 획득할 수 있으며, 이 때 수폭약에 전달된 압력이 최소 기폭 임계값(initiating threshold pressure)이 된다.

격벽착화기는 화약-격벽-화약의 구조를 갖는 착화기의 일종으로 gap test와 구조적으로 동일하다. 본 연구에서는 pentolite 작약과 열폭압 RDX 화약의 화학반응을 모델링하고 오일러리안

기반의 다중물질 하이드로 코드를 사용하여 gap test의 충격 전달 현상을 전산모사하였다. 화약-격벽 간 상호작용에 의한 압력과 전달 및 임계 두께, 그리고 음향 임피던스를 분석하여 열폭압 RDX의 점화 특성을 정량화하였다. 본 연구결과는 향후 실제 파이로장치를 고려한 해석에 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 ‘유도탄용 고성능 PMD 기술’ 사업의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] B. Kim, J. Park, K. Lee and J.J. Yoh, "A reactive flow model for heavily aluminized cyclotrimethylene-trinitramine", *Journal of Applied Physics*, Vol. 116, No. 2, 2014, pp. 1-9.
- [2] B. Kim, J. Park, J. Lee and J.J. Yoh, "A detailed numerical calibration of shock pressure in the gap test configuration for characterizing non-ideal energetic materials", 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA 2015-3706, 2015, pp. 1-12.
- [3] D. Jr. Piacesi, "Numerical Hydordynamic Calculations of the Flow of the Detonation Products form a Point-initiated Explosive Cylinder", NOLTR-66-150, 1967, pp. 1-27.
- [4] J.E. Guilkey, T.B. Harman and B.Banerjee, "An Eulerian-Lagrangian Approach for Simulating Explosions of Energetic Devices," *Computers and Structures*, Vol. 85, 2007, pp. 660-674.
- [5] D.J. Steinberg, "Equation of State and Strength Properties of Selected Materials", Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-MA-106439, 1996, pp.1-7.
- [6] G.R. Johnson and W.H. Cook, "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, No. 1, 1985, pp. 31-48.