

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2016.20.5.019>

파이로테크닉 착화기의 충격과 전달에 의한 폭굉 반응 해석

김보훈^a · 강원규^b · 장승교^c · 여재익^{a,*}

Hydrodynamic Analysis on Shock-induced Detonation in Pyrotechnic Initiator

Bohoon Kim^a · Wonkyu Kang^b · Seung-gyo Jang^c · Jai-ick Yoh^{a,*}

^aDepartment of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea

^bEnergetic Material & Pyrotechnics Department, Hanwha Corporation R&D Institute, Daejeon, Korea

^cAgency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: jjyoh@snu.ac.kr

ABSTRACT

We presented a hydrodynamic modeling necessary to accurately reproduce shock-induced detonation of pyrotechnic initiator. The methodology for such numerical prediction of shock propagation is quite straight forward if the models are properly implemented and solved in a well-formulated shock physics code. A series of SSGT(Small Scale Gap Test) and detailed hydrodynamic simulation are conducted to quantify the shock sensitivity of an acceptor that contains 97.5% RDX. A TBI(Through Bulkhead Initiator) system, consisting of a train configuration of Donor(HNS+HMX) - Bulkhead(STS) - Acceptor(RDX), were investigated to further validate the interaction between energetic and non-reactive materials for predicting the detonating response for successful operation of such small pyro device.

초 록

파이로테크닉 착화기의 충격과 전달에 의한 폭굉 반응을 해석하기 위하여 고폭약의 폭압 발달 및 비 반응 물질의 압력 감쇠 현상을 연동하여 모사할 수 있는 하이드로다이나믹 솔버를 구성하였다. 본 연구에서는 소량의 시약으로 기폭 판단이 가능한 SSGT의 시험 및 전산모사를 수행하여 97.5% RDX로 구성된 수폭약의 충격에 대한 점화 민감도를 정량화하였다. 파이로테크닉 착화기를 형상화 한 여폭약(HNS+HMX) - 격벽(STS) - 수폭약(RDX)으로 구성된 TBI 화약 트레인을 고려하여 충격과 전달을 해석함으로써 반응 및 비반응 물질 간 상호작용에 의한 임계 격벽 두께 및 기폭 압력 간의 관계를 규명하고, 소형 파이로 착화기의 작동특성을 검증하였다.

Key Words: Pyrotechnic Initiator(파이로테크닉 착화기), Shock-induced Detonation(충격 점화), SSGT(소규모 틸시험), TBI(격벽 착화 모듈), Critical Thickness(임계 두께)

Received 23 May 2016 / Revised 21 July 2016 / Accepted 27 July 2016
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Nomenclature

a : compression sensitivity
 b : pressure sensitivity
 e : internal energy ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$)
 G : Growth constant ($\text{s}^{-1}\text{Mbar}^{-b}$)
 I : Ignition constant (s^{-1})
 p : pressure (GPa)
 p_i : threshold initiating pressure (GPa)
 S_{ij} : stress tensor (GPa)
 t_c : critical gap thickness (mm)
 u_i : velocity vector (m/s)
 ε : effective plastic strain
 λ : burned mass fraction
 μ : compression
 ρ : density (kg/m^3)
 σ_Y : Johnson-Cook yield stress (GPa)
 v : relative specific volume
 ϕ : level-set function

1. 서 론

PMD(Pyrotechnic Mechanical Device)는 로켓의 단, 페어링, 발사대 분리 등과 점화계열 착화, 에어백 구동과 같이 기계항공 분야에서 다양한 용도로 사용되는 파이로테크닉 착화기(Pyrotechnic Initiator)로, 여폭약(donor)과 수폭약(acceptor)이 격벽(bulkhead)을 사이에 두고 양쪽에 충전된 구조를 갖는다. 따라서 여폭약으로부터 발생한 충격파가 격벽을 통과하고 수폭약에 점화를 야기하여 격벽착화기(TBI, Through Bulkhead Initiator)로서의 역할을 제대로 수행하는지 여부를 검증하는 것이 PMD 설계의 핵심이라고 할 수 있다. 격벽의 두께에 따라 수폭약에 전달되는 수폭 압력이 달라지기 때문에 TBI 화약 트레이인에 배열된 일련의 고에너지 물질들의 충격-폭굉 천이 현상(SDT, Shock-to-Detonation Transition)을 정밀하게 예측하기 위한 성능해석 모델링이 중요하며, 충격과 전달에 의한 파이로착화기 내 고폭약의 폭굉 반응을 정량화하기 위하여 점화 민감도와 수폭 압력 간의 관계를 규명할 필요가 있다.

한편, Gap test는 화약의 민감도를 측정하기 위한 실험으로 공급부 폭약과 비반응 감쇠기(gap), 그리고 수용부 폭약이 일렬로 배열되는 화약 트레이인의 일종이다. 공급부 폭약의 기폭으로 발생한 충격파가 감쇠기를 통과하고 이후 수폭약에 도달했을 때 수폭 여부를 판단하는 것이다. 감쇠기 두께를 조절하면서 수폭약이 50% 확률로 수폭 하거나 또는 반응하지 않는 임계 두께(critical thickness)를 찾음으로써 수용부 폭약의 민감도(shock sensitivity)를 판단한다. 이와 같은 방법으로 격납 시 안전 확보 및 무기체계의 적용을 위하여 gap test를 수행함으로써 대상화약의 민감도를 정량화한다. Gap test와 관련된 선행연구를 살펴보면, Price 등[1]이 Pentolite 여폭약과 PMMA gap 물질로 구성된 LSGT 시험에서 Composition B(60% RDX, 40% TNT)나 TNT와 같은 개량 화약의 임계 압력을 규명하였고, 이후 Wall 등[2]과 Bourne 등[3]이 gap test 실험에서 감쇠기를 지난 직후의 충격 압력을 측정하여 감쇠기 두께 별 압력 감소 패턴에 대한 정보를 제공한 바 있다. 그러나 LSGT 시험에 기반한 결과는 수 마이크로초($\sim\mu\text{s}$) 내에 종료되는 충격과 전달 과정을 현상별로 정밀하게 살펴볼 수 없는 측면이 있고, 기폭 여부를 통해 민감도를 유추한다는 한계가 있다. 이를 보완하고자 LSGT를 수치해석적으로 분석한 선행연구[4]에서는 하이드로다이나믹 해석을 통하여 알루미늄이 다량 함유된 50% RDX 화약의 점화 민감도를 예측하였다. 여폭약으로는 PETN과 TNT가 50:50 비율로 구성된 직경 50.8 mm의 pentolite를 사용하였는데, 기폭되었을 때 약 30 GPa의 압력파를 형성하여 gap을 통과하는 것으로 나타났다. 충격과 압력이 감쇠함에 따라 수폭약의 Go/No-go 반응을 해석함으로써 점화 민감도를 판단하였고, 이를 LSGT 실험 결과와 비교하여 검증하였다. 이 연구에서 사용된 오일러리안 기반의 하이드로다이나믹(hydrodynamics) 솔버는 고에너지 물질의 화학반응 및 비반응 물질의 응력 모델링을 함께 고려하기 때문에 FSI(Fluid-Structure Interaction) 해석에 적합한 것으로 확인되었다.

SSGT(Small Scale Gap Test)는 LSGT(Large Scale Gap Test)에 비해 직경 ~5 mm로 축소시켜 약 1/10배 스케일에서 소량의 시료로 시험할 수 있다. SSGT에 사용되는 고폭약의 충격 압력이 공간상에서 흩어지지 않고 gap 물질을 지나 수용부 폭약에 최대한 도달할 수 있도록 황동(brass) 재질의 두꺼운(두께 ~10 mm) 구속 외피를 감싸 충전하여 시험한다. 즉, LSGT는 비구속(unconfined)이나, SSGT는 구속 반응 스틱(confined rate stick)을 사용한다는 차이가 있다. 이에 따라, 고폭약의 폭굉 해석과 더불어, gap에서의 충격 압력 감쇠(attenuation) 및 동 재질 외피의 변형(deformation) 등 반응 물질과 비반응 물질 간 복합적인 상호작용을 고려할 때 수용부 폭약의 충격 민감도를 보다 정밀하게 판단할 수 있다. SSGT를 이용한 화약 민감도에 대한 연구는 NOL(Naval Ordnance Laboratory)과 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory) 등에서 주로 수행되어 왔다. NOL의 Price 등[5]은 SSGT와 LSGT의 측정 결과를 비교하여 임계 점화 압력(initiating threshold pressure)을 상호 교정할 수 있도록 하였고, LLNL의 Souers 등[6]은 다양한 고에너지 물질에 대하여 flyer 충돌과 gap test로부터 도출된 점화 임계 압력을 종합하여 경향을 분석하였다. 그러나 고압 폭발 실험은 많은 비용이 소요되며 위험성이 높기 때문에 수치해석적 방법론에 대한 요구가 지속적으로 증대되어 왔으며, 실험에서는 측정하기 어려운 충격과 생성 및 전달 과정에 대한 내부 유동 현상을 규명하는데 해석 기반의 연구가 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 97.5% RDX(CH-6)의 충격에 의한 점화 민감도를 판단하기 위하여 pure RDX(donor) - PMMA(gap) - 97.5% RDX(acceptor)로 구성된 SSGT 시험 및 전산해석을 수행하였다. 고에너지 물질은 황동으로 구속되어 있으며, 외경 $\Phi 25.4 \pm 0.254$ mm, 내경 $\Phi 5.11 \pm 0.25$ mm이다. 시험을 통해 도출된 Go/No-go 반응 여부를 해석 결과와 비교하여 검증함으로써 대상화약의 임계 점화 압력을 도출하였다.

Gap test로부터 97.5% RDX에 대한 열화학적 반응 메커니즘이 규명되면, PMD의 작동 신뢰성을 확보하기 위한 화약 트레인 간 충격 전달에 따른 기폭 여부를 해석할 수 있다. 최종적으로 HNS+HMX(공급부 폭약) - STS(격벽) - 97.5% RDX(수용부 폭약)으로 구성된 TBI 화약 트레인을 통과하는 충격과 전달을 해석하여 임계 격벽 두께를 확인함으로써 파이로 착화기의 작동특성을 검증하고자 하였다.

2. 해석 기법

2.1 대상화약

여폭약과 감쇠기는 SSGT 표준물질로 각각 1.57 g/cc의 pure RDX(Cyclotrimethylene trinitramine, $C_3H_6N_6O_6$, R.E 계수 1.60)와 1.182 g/cc의 PMMA(Polymethyl Methacrylate, $(C_5O_2H_8)_n$)가 사용된다.

여폭약으로 사용되는 RDX는 단일조성의 고에너지 물질이기 때문에 제조가 복잡하지 않고, 성능예측이 용이하며, 소량 점화에도 폭굉 천이가 빨라 공급부 폭약으로 적합하다.

RDX의 산소평형 값은 HMX(-21%, $C_4H_8N_8O_8$)와 같은 -21%로 TNT(-74%, $C_7H_5N_3O_6$)보다 낮으나 PETN(-10%, $C_5H_8N_4O_{12}$) 보다는 높아 그 중간 정도에 해당한다. 산소평형 값이 0에 가까울수록 연소효율과 에너지 생성량이 높은 것은 산소와 가연물이 양론비(stoichiometry)에 정확히 일치하기 때문인데, 일반적으로 고폭약의 경우에는 화학반응시 열량을 많이 발생시키기 위한 목적으로 분자 내 탄소 함량을 높여 구성한다.

Table 1. C-J conditions for 97.5% RDX.

CJ condition	CJ value
Initial density (kg/m^3)	1640
CJ density (kg/m^3)	2215
CJ pressure (GPa)	26.55
CJ temperature (K)	3574
CJ shock velocity (m/s)	7899

수폭약으로는 97.5% RDX와 2.5%의 바인더 (binder) 첨가물(1.5% calcium stearate, 0.5% polyisobutylene, and 0.5% graphite)로 구성된 CH-6가 사용되었다. 초기밀도 1.64 g/cc의 CH-6의 C-J 지점(Chapman-Jouguet condition)에서의 상태량은 Table 1과 같다. CH-6는 C-J 압력 26.55 GPa에서 약 7900 m/s의 빠른 충격파속을 내기 때문에 gap을 통과하는 부스터 화약으로 주로 사용된다.

2.2 지배방정식

본 연구에서는 고폭약의 초음속 화염 전파를 다루기 때문에 Euler 방정식을 기본으로 하며, 상태방정식 및 화학반응속도식을 아우르는 구성방정식(constitutive relations)이 고려된다. 원통좌표계에서의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{E}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial z} = \bar{S}(\bar{U}) \quad (1)$$

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_r \\ \rho u_z \\ \rho E \end{bmatrix}, \quad \bar{E} = \begin{bmatrix} \rho u_r \\ \rho u_r^2 + p \\ \rho u_r u_z \\ u_r(\rho E + p) \end{bmatrix}, \quad \bar{F} = \begin{bmatrix} \rho u_z \\ \rho u_z u_r \\ \rho u_z^2 + p \\ u_z(\rho E + p) \end{bmatrix}$$

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} -\frac{\rho u_r}{r} \varphi \\ \frac{s_{rr} - s_{\theta\theta} - \rho u_r^2}{r} \varphi + \eta \left(\frac{\partial s_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial s_{zz}}{\partial z} \right) \\ \frac{s_{rz} - \rho u_r u_z}{r} \varphi + \eta \left(\frac{\partial s_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial s_{zz}}{\partial z} \right) \\ \frac{u_r s_{rr} + u_z s_{zz} - u_r(\rho E + p)}{r} \varphi + \eta \left(\frac{\partial(u_r s_{rr} + u_z s_{zz})}{\partial r} + \frac{\partial(u_r s_{rz} + u_z s_{zz})}{\partial z} \right) \end{bmatrix}$$

비반응 물질의 고체 변형을 정밀하게 모사하기 위하여 아래의 편차 응력(deviatoric stress)을 고려하였다.

$$\dot{s}_{ij} = \dot{s}_{ij,tr} + \dot{s}_{ij,cor} = \Omega_{ik} s_{kj} - s_{ik} \Omega_{kj} + 2G(\bar{D}_{ij} - D_{ij}^p) \quad (2)$$

$$\dot{s}_{ij,tr} = \Omega_{ik} s_{kj} - s_{ik} \Omega_{kj} + 2G\bar{D}_{ij} \quad (3)$$

$$\dot{s}_{ij,cor} = -H : D_{ij}^p = -2GAN_{ij,tr} \quad (4)$$

여기서 각 연산자는 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{D}_{ij} = D_{ij} - \frac{1}{3} D_{kk} \delta_{ij}, \quad D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

2.3 구성방정식

대상화약인 97.5% RDX의 구성관계식으로 KYP (Kim-Yoh-Park) 폭발 모델과 등엔트로피 C-항 형태의 JWL(Jones-Wilkins-Lee) 상태방정식이 사용되었다. KYP 모델의 질량분율 방정식[7]은 점화 개시(ignition) 및 폭발과 전파(growth)에 관계된 식들의 합으로 구성되어 있다. 각각에 대한 식은 다음과 같다.

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)\mu^a + G(1-\lambda)p^b, \quad \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (6)$$

$$P_{reacted}(\text{donor, acceptor}) = A e^{-R_1(\rho_0/\rho)} + B e^{-R_2(\rho_0/\rho)} + C(\rho_0/\rho)^{-(1+\omega)} \quad (7)$$

여폭약의 경우 격벽과 수폭약에 유입되는 침투 압력(incident pressure)을 생성하는 역할로 반응 후(reacted) 상태방정식으로 압력 증강을 계산한다. 반응 전(unreacted) 상태방정식은 수폭약에 대하여 아래의 방정식[8]이 적용되었다.

$$P_{unreacted}(\text{acceptor}) = A \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1} \right) e^{\left(\frac{-R_1}{\eta} \right)} + B \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2} \right) e^{\left(\frac{-R_2}{\eta} \right)} + \omega\rho E \quad (8)$$

반응 전(unreacted)과 반응 후(reacted) 상태의 압력 및 내부에너지, 체적비는 연소질량분율(λ)과 연료소모량($1-\lambda$)의 비로 계산할 수 있다.

$$p_{total} = (1-\lambda)p_{unreacted} + \lambda p_{reacted} \quad (9)$$

$$e_{total} = (1-\lambda)e_{unreacted} + \lambda e_{reacted} \quad (10)$$

$$v_{total} = (1-\lambda)v_{unreacted} + \lambda v_{reacted} \quad (11)$$

여기서 $\nu = \rho_0/\rho$ 이고, 현재 밀도(ρ)와 초기 밀도(ρ_0)의 비로써 상대 비체적(relative specific volume)을 의미한다. e 는 내부 에너지(internal energy)이며 $A, B, C, R_1, R_2, \omega$ 는 상대방정식을 구성하는 모델 파라미터(EOS model parameter)이며, 각 물질에 대한 값은 Table 2에 나타나 있다.

한편, 비반응 물질 PMMA, STS, BRASS의 변형은 Mie-Gruneisen 상태방정식을 사용하여 압축과 팽창에 대한 모사를 정밀하게 예측할 수 있도록 구성하였다.

$$P_{solid}(PMMA, STS, BRASS) = \gamma_0 E + \begin{cases} \rho_0 C_0^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu \right] \\ [1 - (S_0 - 1)\mu]^2 \end{cases} \text{ if } \mu > 0 \quad (12)$$

$$\rho_0 C_0^2 \mu \quad \text{if } \mu < 0$$

이 때 고체 변형에 의한 항복 응력(yield stress) σ_Y 은 다음의 Johnson-Cook 모델[9-11]을 사용하여 계산하였다.

$$\sigma_Y = (A + B(\varepsilon^p)^n) \left(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^p \right) \left(1 - \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right) \quad (13)$$

여기서 ε^p 는 유효 소성 변형(effective plastic strain)을 의미하고, $\dot{\varepsilon}^p$ 는 유효 소성 변형률을 나타낸다. 또한 T_m 은 대상 재료의 용융 온도(melting temperature)를 의미하며, T_0 는 상온이다. A, B, C, n 은 해당 모델을 구성하는 비활성 물질에 따른 모델 파라미터이다. 각 물질에 대한 모델 파라미터는 Table 3과 같다.

JWL 상태방정식은 대단히 짧은 시간($\sim 1 \mu\text{s}$) 내에 고압(10~50 GPa)의 충격파($\sim 8 \text{ km/s}$)를 수반하는 고에너지 물질의 폭굉을 물리화학적으로 모사할 수 있는 모델이며, 비반응 물질에 대해서는 충격파로 인한 불연속면에서의 랭킨-위그니오(Rankine-Hugoniot) 관계로부터 유도된 Mie-Gruneisen 상태방정식이 압력 변화를 예측하는데 적합하다. 한편, 반응 및 비반응 물질은 입자 속도에 의해 경계면을 효과적으로 추적할 수 있는 레벨셋 기법(level-set method)을 사용하여 구분하였는데, 자세한 수치기법에 대한 설명은 선행연구[12]를 참조하길 바란다.

Table 2. Modeling constants for HNS, HMX, RDX(pure) and CH-6(97.5% RDX).

	Model parameter	HNS	HMX	RDX	CH-6
Reactant	ρ_0 (kg/m ³)	1430	1700	1570	1640
	A (GPa)	-	952200	-	77810
	B (GPa)	-	-5.944	-	-5.031
	R_1	-	14.1	-	11.3
	R_2	-	1.41	-	1.13
	ω (J/g-K)	-	0.887	-	0.894
	Product	A (GPa)	250.05	333.88	313.11
B (GPa)		4.00	5.92	4.97	5.69
C (GPa)		1.00	1.35	1.46	1.36
R_1		4.14	3.63	3.71	3.61
R_2		1.05	1.02	0.99	1.01
ω (J/g-K)		0.32	0.37	0.36	0.36
Chemical kinetics		I (s ⁻¹)	-	44x106	-
	a	-	4.0	-	4.0
	G (s ⁻¹ Mbar ^{-b})	-	850x106	-	380x106
	b	-	2.0	-	1.1
	p_i (GPa)	5.27	1.19	1.0	1.0

24 모델상수

Table 2와 3은 각각 고에너지 물질의 모델 상수 및 비반응 물질에 대한 물성을 나타낸 것이다. 반응속도식에 사용되는 KYP 모델 상수는 비구속 반응 스틱 시험을 통해 도출한 크기효과(size effect)를 하이드로다이나믹 해석 결과와 비교함으로써 검증[7]하였으며, JWL 상태방정식에 적용된 상수들은 랭킨-위고니오 기반의 열화학 코드[13]를 사용하여 계산한 값을 사용하였다.

3. 해석 결과

3.1 SSGT

SSGT는 충격에 대한 화약의 민감도를 측정하는 시험으로 50% 확률로 폭발 반응이 일어나는 감쇠기 두께를 검출하는 것이다.

Table 3. Material properties for PMMA, STS and BRASS[9-11].

	PMMA	STS	BRASS
Mechanical constant			
Initial density (kg/m ³)	1182	7900	8450
Young's modulus (GPa)	0.42	200	100
Shear modulus (GPa)	2.32	77	40
Thermal constant			
Heat capacity (J/kg·K)	1466	423	380
Room temperature (K)	300	300	300
Melt temperature (K)	330.3	1683	1200
Mie-Gruneisen EOS			
C_0 (m/s)	2180	4570	3726
S_0	1.41	1.49	1.434
Gruneisen coefficient	0.85	1.93	2.04
Strength model			
Yield stress (GPa)	0.42	0.34	0.25
Johnson-Cook model			
A (GPa)	0.76	0.79	0.08
B (GPa)	0.07	0.51	0.50
C	0.0	0.014	0.29
n	1.0	0.26	0.61

Gap 두께는 임계 압력으로 환산할 수 있으며, 시험 물질을 기폭 시키기 위한 최소 압력과 일치한다. Fig. 1은 SSGT 시험 및 전산해석의 시료와 구조도이다. SSGT 화약 트레인은 여폭약 pure RDX - 감쇠기 PMMA - 수폭약 97.5% RDX 순으로 배열된다. 반응 물질들은 황동(brass)으로 구속된다.

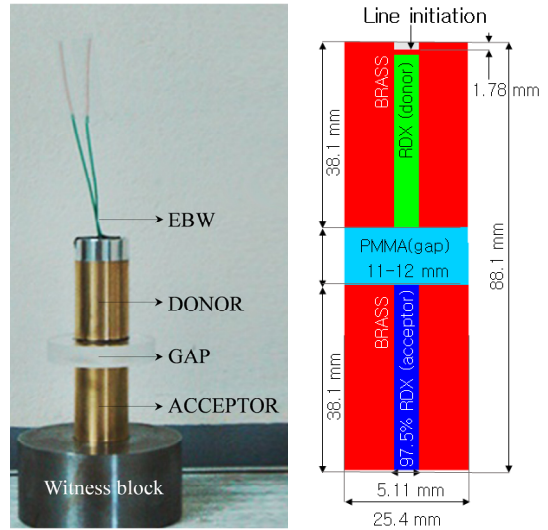


Fig. 1 Schematic diagram of SSGT configuration.

Table 4. SSGT experimental result.

Acceptor	Exp. num.	Gap thickness (mm)	Go/No-go
CH-6 (97.5% RDX)	1	11.85	No-go
	2	9.84	Go
	3	10.71	Go
	4	11.34	Go
	5	11.40	Go
	6	11.56	No-go
	7	11.37	Go
	8	11.45	No-go
	9	11.41	Go
	10	11.44	No-go
	11	11.40	Go
	12	11.43	Go
	13	11.44	Go
	14	11.46	Go
	15	11.51	Go

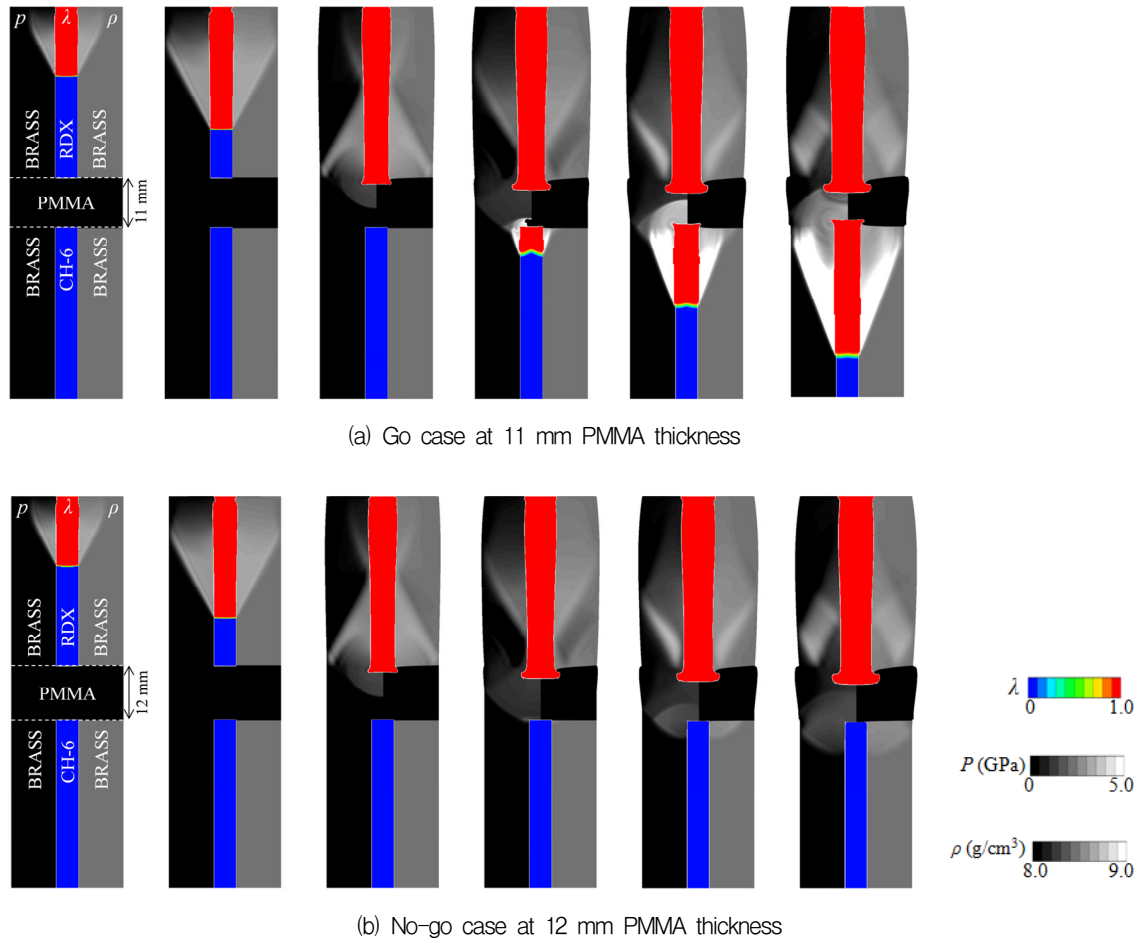


Fig. 2 Shown reaction progress for donor (top) / acceptor (bottom), pressure and density for non-reactive materials, namely PMMA (middle) also BRASS (both sides). (a) 11 mm gap and (b) 12 mm gap at times $t = 2.0, 3.5, 7.0, 9.0, 10.0,$ and $11.0 \mu\text{s}$.

고폭약의 초기 밀도가 균질하도록 전용 유공 압 프레스를 사용하여 구속 막대에 충전하며, 여폭약 뒷면에 뇌관 역할을 하는 폭결전선(EBW, exploding-bridgewire detonator)을 연결하여 기폭 한다. 감쇠기 두께는 양성반응과 음성반응을 번갈아 관찰하면서 줄여나갈 수 있는데, 시행 횟수가 누적될수록 양성/음성 반응을 보이는 gap 두께의 범위가 차츰 좁혀진다. 총 15번의 시험으로 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 두께까지 정밀하게 측정하였다. 수용부 폭약 아래단에 연강(mild steel) 재질의 증거판(witness plate)을 설치하여 기폭 여부에 따라 파손되도록 하여 Go/No-go 판단을 용이하게

하였다. 97.5% RDX의 폭발 양성반응 및 음성반응을 교차로 확인하며 점차 gap 두께를 줄여나가며 측정된 SSGT Go/No-go 시험 결과는 Table 4와 같다. PMMA gap 두께가 11.51 mm와 11.56 mm 사이에서 양성 및 음성반응이 교차로 나타났으며, 이보다 얇은 두께에서 양성반응이, 두꺼운 두께에서 음성반응이 관찰되었음을 알 수 있었다. 따라서 97.5% RDX 화약의 반응 개시를 위한 PMMA 임계 두께는 약 11.5 mm 부근의 전후임을 규정하였으며, 이 때 수용부에 전달된 충격 압력이 최소 기폭 임계값이라고 할 수 있다.

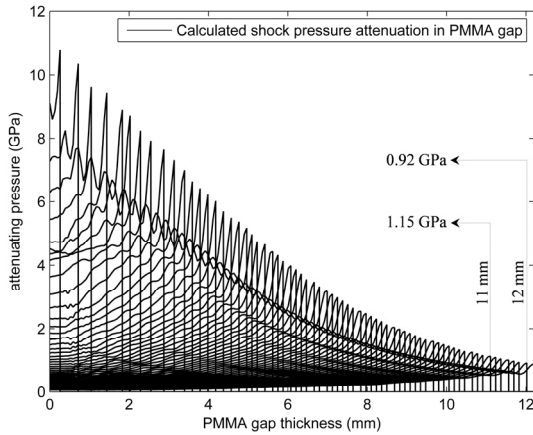


Fig. 3 Time trace of attenuating pressure profiles through PMMA gap of SSGT simulation.

Table 5. SSGT results for 97.5% RDX[5, 6].

	Threshold pressure (GPa)	50% gap thickness (mm)
NOL SSGT (1966)	-	11.96
NOL LSGT (1966)	0.92	-
LLNL SSGT (2007)	1.05	-
Present SSGT-exp.	-	11.51-11.56
Present SSGT-simul.	0.918-1.15 (1.026)	11.0-12.0 (11.5)

Fig. 2는 11 mm 및 12 mm 두께의 PMMA 감쇠기를 통과한 충격파가 수폭약(97.5% RDX)에 도달했을 때 Go/No-go 기폭 반응을 전산 해석한 것이다. 고에너지 물질은 반응 진행 변수(reaction progress variable)를 0(반응 전)부터 1(반응 후)까지 표시하여 화학반응 여부를 구분할 수 있도록 하였고, 비반응 물질인 PMMA와 BRASS는 충격파의 전파 방향으로서의 중심선 양쪽에 각각 압력(왼쪽)과 밀도(오른쪽)를 나타내어 투과 및 반사파의 생성을 관찰하도록 하였다. 반응 초기인 2.0 μ s부터 수폭약의 연소가 거의 종료되는 11.0 μ s까지 6개의 단면을 나타내었다.

폭굉파가 진행하면서 반응 가스에 의한 폭압이 양방향에 가해져 BRASS의 형태가 불룩하게

변하게 되나, 폭굉파의 진행에는 영향을 미치지 않는다. 계산결과, 기폭이 시작된 후 RDX의 폭굉파면이 PMMA까지 도달하는 시간은 약 5.0 μ s로 평균속도는 7600 m/s에 이르며, 8.0 μ s에 PMMA를 완전 통과하면서 수폭약에 도달하였다. 특히, 7.0 μ s와 9.0 μ s에서의 폭굉파와 비반응 물질 간 상호작용이 나타남을 볼 수 있다. RDX의 폭굉파면이 PMMA의 윗면에 도달하였을 때 첫 번째 반사(reflection)와 투과(transmission)가 관찰되는데 반사파는 위쪽 방향으로 되돌아 진행하며, 투과파는 PMMA 내부로 유입된다. 이 때 반사된 만큼의 에너지 손실이 압력 강하로 나타나며, 비반응 물질을 통과하면서 압력 감쇠가 일어나 충격파의 최대 압력은 지속적으로 감소하게 된다. 충격파면이 PMMA 아랫면에 도달할 때 두 번째 반사와 투과가 일어나며, 수폭약에 전달된 최종 투과파가 기폭을 일으키는 원인이 된다. PMMA와 BRASS는 압력이 가해짐에 따라 형상이 변형되며 서로 다른 매질을 통과하는 파동에 의해 다양한 형태의 증첩과 굴절이 일어난다.

PMMA gap 두께 11 mm에서는 수폭약 97.5% RDX가 전달된 압력으로 인해 동조폭발하였으나, 12 mm인 경우에는 기폭 임계값보다 낮은 압력이 시험화약에 도달하면서 폭발 음성반응이 나타났다. 즉, 감쇠기 두께에 의한 전달 압력의 차이가 기폭 반응을 다르게 함을 확인하였다.

PMMA를 통과하는 충격파의 시간에 따른 압력 감쇠를 Fig. 3에 나타내었다. Gap 두께 11 mm와 12 mm에 해당하는 지점에서의 최종 감쇠 압력은 각각 1.15 GPa와 0.918 GPa로 계산되었다. Table 5는 NOL과 LLNL의 gap test 시험으로 도출된 임계 점화 압력 및 50% gap 두께를 비교한 것이다. 본 연구에서 고려한 SSGT의 gap 두께 11 mm와 12 mm 사이에서 약 1 GPa 전후로 97.5% RDX의 점화 임계 압력이 도출되었는데, 이는 참조된 값들과 일치하는 값으로 고에너지 물질에 충격 점화를 유도할 때 필요한 최소 압력의 기준이 된다. 즉, SSGT 시험 및 전산해석을 통해 도출한 97.5% RDX의 기폭 임계 압력은 약 1 GPa로 정량화 할 수 있다.

3.2 TBI

격벽착화기(TBI, Through Bulkhead Initiator)는 격벽을 두고 여폭약과 수폭약이 양쪽에 충전된 구조를 갖는다. 따라서 여폭약에서 발생한 폭발이 격벽을 통과하여 수폭약을 점화시키고 파이로테크닉의 점화로 이어지는 연쇄적 폭발이다.

파이로 착화기의 모식도는 Fig. 4와 같다. 공급부 폭약(detonator)은 초기 밀도 1.43 g/cc의 HNS(hexanitrostilbene, $C_{14}H_6N_6O_{12}$, R.E 계수 1.05)와 초기 밀도 1.70 g/cc의 HMX(cyclotetramethylene-tetranitramine, $C_4H_8N_8O_8$, R.E 계수 1.70) 기반 화합물(95% HMX, 5% VITON A)이 적층되어있는 구조로 HNS의 밀면 중심부에 0.2 mm × 0.2 mm의 flyer 충돌을 가해 기폭시킨다. 수용부 폭약은 CH-6(97.5% RDX)로 충전하였다. 격벽은 STS(stainless steel 304, 함량 : C-0.08%, Cr-18%, Ni-8%) 재질의 내식-내열용 불수강이다. STS는 비자성에 가공성이 우수하고 저온에서 강도가 유지되며 열처리에 의해 경화되지 않는다는 장점이 있다.

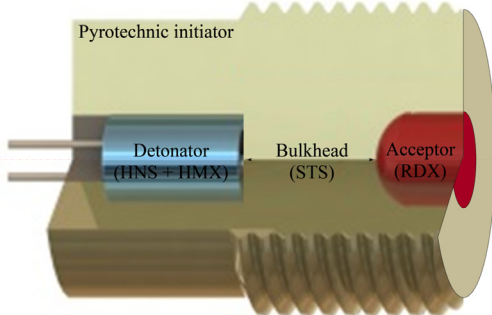


Fig. 4 Schematic diagram of TBI system for a pyrotechnic device.

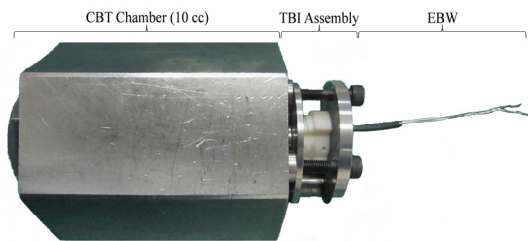


Fig. 5 Assembly specimen of closed bomb test.

한편, Fig. 5의 CBT(Closed Bomb Test)는 10 cc 부피를 갖는 밀폐형 챔버로 TBI가 기폭 되었을 때 발생하는 연소가스의 정압을 측정함으로써 Go/No-go 동작 여부를 확인하는 시험이다. TBI가 CBT 챔버에 결합될 수 있도록 나사산 형태의 스크루(screw)로 가공하여 체결한다. SSGT에서 수행하였던 것과 동일한 방식으로 수용부 폭약의 기폭 임계 조건을 찾기 위해 0.1 mm 단위로 격벽의 두께를 늘려가며 반복시험을 수행하였다. Go/No-go 반응이 동시에 관찰되는 지점에서는 수량을 늘려 10~16조까지 시험하였다.

Table 6은 TBI 격벽 두께에 따른 CBT 기폭 시험 결과를 정리한 것이다. Go/No-go 판단은 챔버 중앙에 압력센서를 삽입하여 연소반응이 일어나 압력이 증가가 관찰되는 경우 Go 반응, 점화가 일어나지 않아 연소에 의한 압력이 증가하지 않을 때 No-go로 판단하였다.

Table 6. TBI-CBT experimental result.

Bulkhead thickness	Go/No-go
3.2 mm	Go(3)
3.4 mm	Go(3)
3.6 mm	Go(3)
3.8 mm	Go(13)/No-go(3)
3.9 mm	Go(2)/No-go(8)
4.0 mm	No-go(16)
5.0 mm	No-go(3)

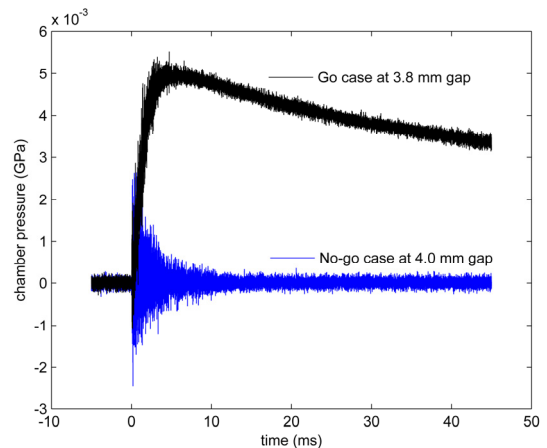


Fig. 6 Pressure histories for Go/No-go cases.

Go 반응을 보이는 격벽 두께 3.7 mm까지는 3 조씩 반복시험 하였고, Go/No-go 경향을 보이는 3.8 mm 부터 4.0 mm 사이에서 결과의 신뢰도를 확보하고자 순을 늘려 시험하였다. 3.8 mm 에서 총 16조 시험하였는데, 3번 미전달 되었고, 3.9 mm에서는 10조 중 8번 미전달 되었다. 4.0 mm부터는 모든 샘플에서 No-go 반응을 보였다.

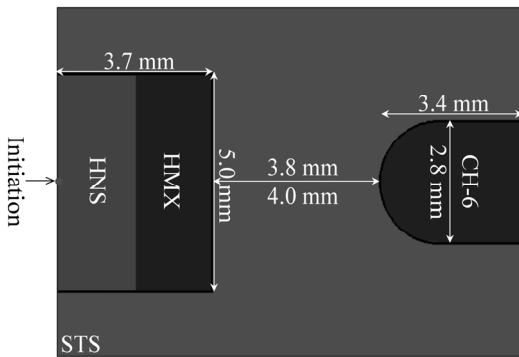


Fig. 7 Computational domain for TBI calculation.

Fig. 6은 격벽 두께 3.8 mm와 4.0 mm에서 시간에 따른 CBT 챔버 압력 선도를 나타낸 것이다. Go 반응의 경우 연소가스 분출로 인한 압력 증가가 관찰되는데 10 cc 챔버의 최대 압력이 5 ms에서 약 5 MPa까지 상승하였다. No-go의 경우에는 초기 압력을 유지한 채 기폭에 의한 진동이 관찰된다. 따라서 격벽 두께 3.8 mm~4.0 mm 사이에서 TBI의 작동 임계 지점이 있음을 알 수 있다.

TBI 기폭 시험 결과를 전산해석과 비교분석하고 검증하기 위하여 Fig. 7과 같이 실제 TBI 구조와 동일한 도메인을 구성하였다. TBI의 기폭은 고속의 flyer 충돌에 의해 발생하나 전산해석에서는 flyer가 충돌하였음을 가정하고, 0.2 mm에 해당하는 점화원을 고려하는 방식으로 기폭을 모사하였다. HNS는 기폭제(priming) 역할을 하며, HMX는 폭굉파를 생성하는 전폭약(booster)이다. 격벽은 충격파의 압력을 감쇠시키는 역할을 한다.

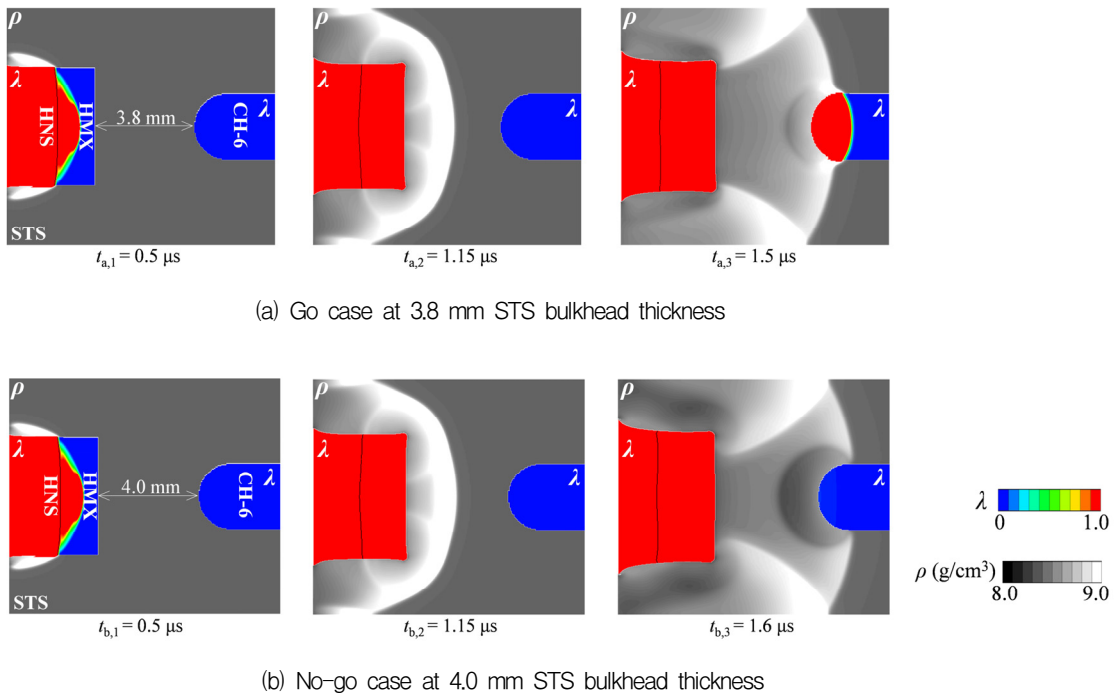


Fig. 8 Simulated results for Go and No-go events in a pyrotechnic device : (a) Go case at 3.8 mm bulkhead, (b) No-go case at 4.0 mm bulkhead.

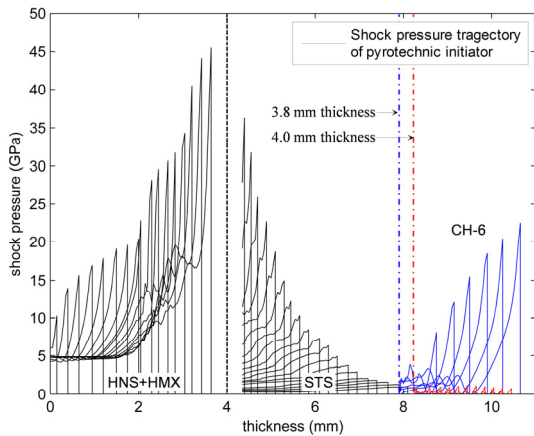


Fig. 9 Shock pressure trajectory in Detonator - Bulkhead - Acceptor of pyrotechnic initiator.

격벽 두께에 따른 TBI 시스템의 폭굉 해석 결과는 Fig. 8과 같다. 고에너지 물질에는 반응 진행 변수를 나타내 폭굉파의 전달로 인한 화학반응 개시 여부를 확인할 수 있게 하였고, 비반응 물질인 STS는 밀도 컨투어를 통해 고체 물질의 압축(compression)과 물질 내 전파되는 저밀도파(rarefaction wave)의 중첩 등을 살펴보고자 하였다. 본 해석에서는 3.8 mm와 4.0 mm의 격벽의 두께를 고려하였다. TBI의 CBT 시험결과 3.9 mm 전후로 보다 짧은 격벽 두께에서는 Go 반응을 관찰하였고, 그보다 두꺼운 경우 No-go 반응을 확인하였다. 따라서 3.9 mm는 파이로 착화기가 정상 작동하는 임계 지점의 최댓값이라 할 수 있다.

하이드로다이나믹 해석 결과, 공급부 폭약인 HNS와 HMX가 기폭부터 폭굉으로 천이되는데 약 1 μ s 소요되고, 충격파면이 1.15 μ s에서 STS의 중간 지점을 통과하며, 약 1.3 μ s에서 수폭약에 도달하는 것으로 계산되었다. TBI 시스템의 작동은 총 2 μ s 안에 종료된다. 따라서 TBI 내에서 폭굉파의 평균 전파 속도는 약 6000 m/s이다. 수폭약에 폭굉파가 도달 하였을 때 CH-6를 기폭시킬 수 있는 충분한 압력이 가해진 경우 Go (3.8 mm)반응, 그렇지 않은 경우 No-go (4.0 mm)반응이 나타남을 볼 수 있다. 이러한 결과는 SSGT 시험과 유사한 형태의 반응이라고 할 수

있다. 격벽의 두께가 두꺼워짐에 따라 압력 감소가 더 많이 일어나는데 원인이 있다.

Fig. 9는 TBI 중심선상의 시간에 따른 압력 선도를 나타낸 것이다. 초기 여폭약의 폭굉 압력이 약 45 GPa로 발달하며, 이후 STS 격벽을 통과함에 따라 침투 압력은 점차 감소한다. 수폭약은 1 GPa 전후에서 기폭되거나 되지 않는다. 따라서 충격파가 STS를 통과해 전달되는 과정에서 발생하는 에너지 손실과 고에너지 물질 간의 상호작용이 TBI 시스템의 작동 메커니즘을 관장하는 중요한 물리적 특성이라 할 수 있다. 즉, 파이로 장치 설계에서 격벽 두께가 임계점을 결정하는 인자가 될 수 있으며, 고에너지 물질의 폭굉 압력 및 점화 임계 압력(critical initiating pressure)이 고려되어야 할 것이다.

4. 결 론

충격에 의한 파이로 착화기 내 폭굉 반응을 해석하기 위하여 폭압 발달 및 충격 압력 감소 현상을 모사할 수 있는 하이드로다이나믹 솔버를 구성하고 대상화약인 CH-6(97.5% RDX)의 충격파 전달에 의한 기폭 반응 여부를 예측하였다.

SSGT는 동관에 충전된 소량의 시약을 사용하여 화약의 점화 여부를 관찰할 수 있는 규격 시험으로 본 연구에서는 여폭약(pure RDX) - Gap(PMMA) - 수폭약(CH-6)로 구성된 화약 트레인에서의 gap 두께에 따른 CH-6의 점화 민감도를 정량화 하였다. SSGT에 대한 하이드로다이나믹 해석에서는 폭약의 폭굉 발달 및 비반응 물질 내의 압력 감소를 정밀하게 모사하기 위하여 충격파면과 C-J 상태 사이의 화학반응영역(~ 0.5 mm) 보다 매우 조밀한 격자계($h = 0.05$ mm)를 구성함으로써 PMMA 두께 11 mm와 12 mm 사이에서 대상화약의 점화 임계 압력을 약 1 GPa 전후로 도출하였다.

TBI는 공급부 폭약(HNS+HMX) - 격벽(STS) - 수용부 폭약(CH-6)으로 구성된 화약 트레인으로 gap test와 구조적으로 동일하다. TBI를 10 cc 챔버에 연결하여 기폭 시험을 수행하였다. CBT

시험과 전산해석을 통해 TBI의 임계 격벽 두께를 정량화하고 착화기의 작동특성을 검증하였다.

본 연구에서는 화약-격벽-화약을 통과하는 충격과 전달과 물질 간 상호작용이 SSGT 및 TBI 시스템을 동작시키는 주요 메커니즘임을 규명하고, 여폭약의 폭굉 침투 압력 생성과 비반응 물질의 충격 압력 감쇠, 수폭약의 임계 점화 압력 등의 열-물리(thermo-physical) 작용을 종합적으로 해석하였다. 특히, 저밀도파 및 투과·반사파의 거동은 반응 및 비반응 물질의 차이로 발생하며, 전파된 압력파들은 구조물의 형태를 변형 시키고 동시에 파이로테크닉 시스템의 작동에 결정하는 주요 인자임을 확인하였다.

후 기

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

References

- Price, D., Clairmont, A.R. and Erkman, J.O., "The NOL Large Scale Gap Test. III. Compilation of Unclassified Data and Supplementary Information for Interpretation of Results," AD-780429, 1974.
- Wall, C. and Franson, M., "Validation of a Pressed Pentolite Donor for the Large Scale Gap Test at DSTO," DSTO-TN-1172, AR-015-586, 2013.
- Bourne, N.K., Cooper, G.A., Burley, S.J., Fung, V. and Hollands, R., "Re-Calibration of the UK Large Scale Gap Test," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 30, No. 3, pp. 196-198, 2005.
- Kim, B., Park, J. and Yoh, J.J., "Analysis on shock attenuation in gap test configuration for characterizing energetic materials," *Journal of Applied Physics*, Vol. 119, 145902, 2016.
- Price, D. and Liddiard, T.P., "The Small Scale Gap Test: Calibration and Comparison with the Large Scale Gap Test," NOLTR 66-87, 1966.
- Souers, P.C. and Vitello, P., "Initiation Pressure Thresholds from Three Sources," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 32, pp. 288-295, 2007.
- Kim, B., Park, J., Lee, K. and Yoh, J.J., "A reactive flow model for heavily aluminized cyclotrimethylene-trinitramine," *Journal of Applied Physics*, Vol. 116, 023512, 2014.
- Lee, E.L., Hornig, H.C. and Kury, J.W., "Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products," UCRL-50422, TID-4500, 1968.
- Steinberg, D.J., "Equation of State and Strength Properties of Selected Materials," UCRL-MA-106439, 1996.
- Marsh, S.P., "LASL Shock Hugoniot Data," University of California, Berkeley, 1980.
- Peroni, L., Scapin, M., Fichera, C. and Giglio, M., "Mechanical properties at high strain-rate of lead core and brass jacket of a NATO 7.62 mm ball bullet," *10th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, EPJ Web of Conferences*, Vol. 26, 04010, 2012.
- Kim, B., Kang, W., Jang, S., Park, J. and Yoh, J.J., "A Study on Shock-induced Detonation in Gap Test," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 2, pp. 75-85, 2016.
- Fried, L.E., Howard, W.M. and Souers, P.C., "Cheetah 2.0 User's Manual," UCRL-MA-117541 Rev. 5, 1998.