

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2016.20.2.075>

충격 전달에 의한 Gap Test의 폭굉 반응 해석

김보훈^a · 강원규^b · 장승교^c · 박정수^c · 여재익^{a,*}

A Study on Shock-induced Detonation in Gap Test

Bohoon Kim^a · Wonkyu Kang^b · Seung-gyo Jang^c · Jungsu Park^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

^cThe 4th R&D Institute - 2nd Directorate, Agency for Defense Development, Korea

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

ABSTRACT

A pyrotechnic system consisting 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. Despite of its common use, numerical study of such pyrotechnic train configuration is seldom reported because proper modeling of the full process requires precise capturing of the shock wave attenuation in the gap prior to triggering a full detonation of high explosive and accurate description of the high strain rate dynamics of the explosively loaded inert confinements. We apply a Eulerian 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 gap test are quantitatively investigated.

초 록

감쇠기를 사이에 두고 여폭약과 수폭약으로 충전된 파이로 착화기는 격벽의 압력 감쇠 현상과 고에너지 물질의 충격 점화 특성을 갖는다. 고폭약의 폭굉 반응 및 비반응 물질 통과에의 폭압 감쇠와 더불어 격벽의 형상 변화를 모사하기 위해서는 충격 전달에 의한 gap test의 폭굉 모델링이 필요하다. 본 연구에서는 오일러리안 레벨셋 기법이 적용된 다중물질 하이드로 코드를 사용하여 pentolite 작약과 열폭약 RDX의 폭발 반응 및 PMMA gap을 통과하는 충격과 전달을 해석함으로써 화약-격벽간 상호작용 및 임계 두께, 음향 임피던스, go/no-go 기폭 점화에 대한 특성을 정량화하였다.

Key Words: Gap Test, Pyrotechnic Initiator(파이로 착화기), Shock Attenuation(충격 감쇠), Critical Gap Thickness(임계 격벽 두께), Acoustic Impedance(음향 임피던스)

Received 1 December 2015 / Revised 7 March 2016 / Accepted 14 March 2016

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2015년도 추계학술대회(2015. 11. 25-27,

경주 현대호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

Nomenclature

a : compression sensitivity

b : pressure sensitivity
 e : internal energy
 G : Growth constant
 I : Ignition constant
 p : pressure
 p_i : threshold initiating pressure
 S_{ij} : stress tensor
 t_c : critical gap thickness
 u_i : velocity vector
 ϵ : effective plastic strain
 λ : burned mass fraction
 μ : compression
 ρ : density
 σ_Y : Johnson-Cook yield stress
 v : relative specific volume
 ϕ : level-set function

1. 서 론

격벽착화기(Through Bulkhead Initiator)는 여폭약(donor)과 수폭약(acceptor)이 격벽(bulkhead)을 두고 양쪽에 충전된 파이로테크닉 착화기(Pyrotechnic Initiator)의 일종이다.

여폭약으로부터 발생한 충격파가 격벽을 통과하여 수폭약에 점화를 야기함으로써 착화기의 역할을 제대로 수행하는지 여부를 검증하는 것이 격벽착화기 설계의 핵심이다. 따라서 격벽의 두께에 따라 순폭 압력이 달라지기 때문에 화약 트레인에 배열된 일련의 고에너지 물질들의 SDT(Shock-to-Detonation Transition) 현상을 정밀하게 예측하기 위한 성능해석 모델링이 중요하다.

한편, gap test는 화약의 민감도를 측정하기 위한 실험으로 TBI와 구조적으로 동일하다. 공급부 폭약과 비반응 감쇠기(attenuator), 그리고 수용부 폭약이 일렬로 배열된다. 여폭약의 기폭으로 발생한 충격파가 감쇠기를 통과하고 이후 수폭약에 도달했을 때 순폭 여부를 판단한다. 감쇠기 두께를 조절하면서 수폭약이 50% 확률로 동조폭발 하거나 또는 반응하지 않는 임계 두께

(critical thickness)를 찾음으로써 수용부 폭약의 민감도를 판단한다. 따라서 gap test를 전산해석하는 것은 격벽착화기 설계에서 격벽 두께와 점화 임계 압력에 대한 관계를 분석하는 것이다.

Kimura 등[1]은 다양한 산화제 조성을 갖는 고체 추진제의 gap test를 시험 평가하여 산소평형(oxygen balance)에 따른 임계 두께 및 임계 압력(critical initiating pressure)에 대한 정보를 제공하였고, Kubota 등[2]은 고속영상카메라를 사용하여 고폭약의 임계 두께 근방에서 발생하는 SDT 현상을 가시화 하였다. Wall 등[3]은 gap test 실험에서 감쇠기를 지난 직후의 충격 압력을 측정하여 감쇠기 두께 별 압력 감소 패턴에 대한 정보를 제공한 바 있다. 국내 연구를 살펴보면, 국방과학연구소에서 주로 gap test에 대한 연구를 수행하였는데 장승교 등[4]은 VISAR(Velocity interferometer system for any reflector)를 이용하여 격벽 착화 모듈의 수폭약 충전면에서 자유 표면 속도를 계측함으로써 작동 신뢰도를 예측하였으며, 이진성 등[5]은 Autodyn과 LS-Dyna의 상용 하이드로코드를 활용하여 Comp-B 및 PBX 9404 화약의 gap test에 대한 수치해석적 연구를 수행한 바 있다. 이진욱 등[6]은 AN(Ammonium Nitrate) 계열 화약을 대상으로 한 gap test에서 in-house 하이드로코드를 활용한 전산모사를 통해 화염 전파 특성 및 음향임피던스에 대한 분석을 보고한 바 있다.

본 연구에서는 pentolite 작약(50% PETN, 50% TNT)과 열폭압 RDX 화약(50% RDX, 35% Al, 15% HTPB)의 화학반응을 모델링하고 오일러리안 기반의 레벨셋 기법(level-set method)이 적용된 다중물질 하이드로 코드를 구성하여 격벽착화기를 형상화 한 gap test에서의 점화 현상을 전산모사 하였다. Gap 물질로는 PMMA(Polymethyl methacrylate)가 사용되었으며, 비반응 물질에 대한 상태방정식 및 응력 모델을 적용하였다. 화약 트레인(train)에 충전된 고에너지 물질의 폭굉 반응과 격벽을 통과하는 충격파 전달 및 임피던스 특성을 해석함으로써 화약의 기폭점화에 대한 특성을 정량화하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 지배방정식

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 폭굉 천이가 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 효과적이거나 PETN(-10%) 보다는 낮아 그 중간 정도에 해당한다. 산소평형 값이 0에 가까울수록 연소효율과 에너지 생성량이 높은 것은 산소와 가연물이 양론비에 정확히 일치하기 때문이다. 열폭압 RDX 화약의 SDT 반응 특성에 대해서는 선행연구[7]를 참조하길 바란다.

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.

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

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

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

PMMA 감쇠기의 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.

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

2.2 구성방정식

Pentolite와 열폭압 RDX의 구성관계식으로 KYP (Kim-Yoh-Park) 폭발 모델과 등엔트로피 C-항 형태의 JW(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.

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

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

반응 전(unreacted) 상태방정식은 여폭약과 수폭약에 각각에 대하여 다음의 방정식[8]이 적용되었다.

$$P_{unreacted}(\text{donor}) = A(\rho/\rho_0 - 1)^1 + B(\rho/\rho_0 - 1)^2 + C(\rho/\rho_0 - 1)^3 \quad (8)$$

$$P_{unreacted}(\text{acceptor}) = P_H + \Gamma\rho(e - e_H) \quad (9)$$

반응 전(unreacted)과 반응 후(reacted) 상태의

압력 및 내부에너지, 체적비는 아래와 같이 연소 질량분율(λ)과 연료소모량($1-\lambda$)의 비로 최종압력을 계산할 수 있다.

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

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

$$v_{total} = (1-\lambda)v_{unreacted} + \lambda v_{reacted} \quad (12)$$

여기서 $v = \rho_0/\rho$ 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)이다.

한편, PMMA의 변형은 Mie-Gruneisen 상대방정식을 사용하여 압축과 팽창에 대한 모사를 정밀하게 예측할 수 있도록 구성하였다.

$$p_{PMMA(solid)} = \Gamma_0 E + \begin{cases} \rho_0 C_0^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\Gamma_0}{2} \right) \mu \right] \\ \left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} \right]^2 & \text{if } \mu > 0 \\ C_0^2 \rho_0 \mu & \text{if } \mu < 0 \end{cases} \quad (13)$$

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

$$\sigma_Y = \left(A + B(\epsilon^p)^n \right) \left(1 + C \ln \dot{\epsilon}^p \right) \left(1 - \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right) \quad (14)$$

여기서 ϵ^p 는 유효 소성 변형(effective plastic strain)을 의미하고, $\dot{\epsilon}^p$ 는 유효 소성 변형률(effective plastic strain rate)을 나타낸다. 또한 T_m 은 대상 재질의 용융 온도(melting temperature)를 의미하며, T_0 는 상온(room temperature)이다. A, B, C, n 은 해당 모델을 구성하는 비활성 물질에 따른 모델 파라미터이다.

23 수치기법

다중물질 간 경계면을 추적하기 위해서 다음과 같은 레벨셋 기법을 적용하였다. 레벨셋 기법은 물질 입자의 속도에 의해 시간에 따라 변하는 경계면을 오일러리안 기반 도메인에서 효과적으로 추적할 수 있도록 한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_r \frac{\partial \phi}{\partial r} + u_z \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

거리함수 ϕ 가 0이 되는 지점이 경계면으로, $\phi < 0$ 일 때 물질의 안쪽 영역을, $\phi > 0$ 일 때 바깥쪽 영역을 나타낸다. Eq. 15는 공간상으로 5차 WENO 기법으로 적분되며, 시간상 3차 정확도의 룬게-쿠타(Runge-Kutta)법으로 적분되었다.

레벨셋 기법은 거리함수를 추적하는 과정에서 구배가 급격하게 발생하는 지점의 경계면 왜곡(distortion)이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 아래와 같은 주기적 초기화가 필요하다.

$$\phi + S(\phi)(|\nabla \phi| - 1) = 0 \quad (16)$$

$$S = \frac{\phi}{\sqrt{\phi^2 + (1 - |\nabla \phi|)^2 d^2}} \quad (17)$$

여기서 d 는 격자 크기를 의미한다.

다중물질 간 경계면을 기준으로 수직인 방향의 속도와 응력이 연속적으로 분포하고, 전단 방향과 접선 방향의 응력은 불연속적이므로 다음과 같은 경계조건을 만족한다.

$$v_n^{solid} = v_n^{fluid}, \quad \sigma_{nn}^{solid} = 0, \quad \sigma_{nn}^{solid} = -P^{fluid} \quad (18)$$

24 모델상수

Table 1과 2는 각각 PMMA에 대한 물성 및 고에너지 물질의 모델 상수들을 나타낸 것이다. 반응속도식에 사용되는 KYP 모델 상수는 비구속 반응 스틱 시험(unconfined rate stick test)을 통해 도출한 크기효과(size effect)를 하이드로다이나믹 해석 결과와 비교함으로써 검증[7]하였으

며, JWL 상태방정식에 적용된 상수들은 실린더 팽창 시험(cylinder expansion test)과 랭킨-위고니오(Rankine-Hugoniot) 기반의 열화학 코드[10]를 사용하여 이론적으로 계산된 값을 사용한 것이다.

Table 1. Material properties for PMMA[9].

Mechanical constant	
Initial density (kg/m ³)	1182
Young's modulus (GPa)	0.42
Shear modulus (GPa)	2.32
Thermal constant	
Specific heat capacity (J/kg·K)	1466
Room temperature (K)	300
Melt temperature (K)	330.3
Mie-Gruneisen EOS	
C_0 (m/s)	2180
S_0	1.410
Gruneisen coefficient	0.85
Strength model	
Constant yield stress (GPa)	0.42

Table 2. Modeling constants for pentolite and heavily aluminized RDX.

	Model parameter	Pentolite	Al-RDX
Reactant	ρ_0 (kg/m ³)	1560	1780
	A (GPa)	12.82	-
	B (GPa)	0	-
	C (GPa)	119.3	-
	C_0 (mm/ μ s)	-	2.60
	S	-	1.86
	Γ	-	0.99
Product	A (GPa)	507.91	2633.31
	B (GPa)	6.62	8.59
	C (GPa)	1.27	1.09
	R_1	4.62	6.68
	R_2	1.02	1.11
	w (J/g·K)	0.33	0.09
Chemical kinetics	I (s ⁻¹)	1.4x10 ⁸	3.2x10 ⁸
	a	4.0	4.0
	G (s ⁻¹ Mbar ^{-b})	3.3x10 ⁸	3.5x10 ⁷
	b	1.3	0.7
	p_i (GPa)	1.2	5.9

3. 해석 결과

3.1 Donor-Cap의 충격 감쇠

여폭약의 폭발로 인한 충격파 생성 및 감쇠기의 압력 감쇠에 대한 모델링이 정밀하게 구성되었는지 검증하기 위하여 pentolite와 PMMA로 구성된 형상에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 1은 화약 트레인 중심선에서 시간에 따라 분포하는 압력의 전파를 나타낸 것이다.

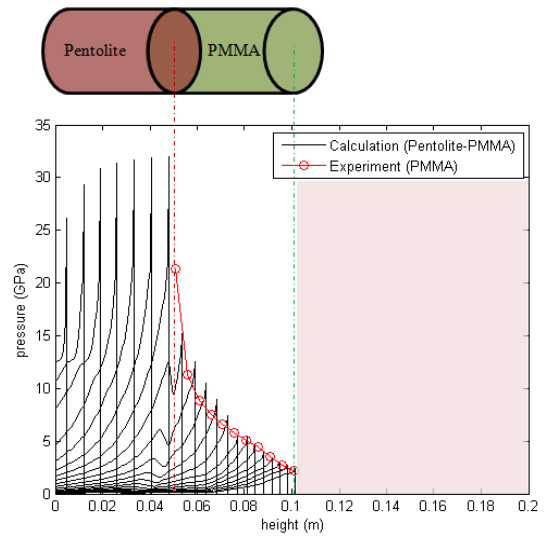


Fig. 1 Calculated shock pressure attenuation in pentolite (donor) – PMMA (gap).

Table 3. Comparison of shock attenuation.

Height (m)	$p_{\text{calculation}}$ (GPa)	$p_{\text{experiment}}$ (GPa)
0.0535	13.71	12.79
0.0590	11.33	10.69
0.0635	9.483	8.939
0.0685	8.028	7.474
0.0730	6.641	6.477
0.0810	4.824	4.864
0.0845	4.121	4.215
0.0880	3.552	3.786
0.0915	3.113	3.281
0.0950	2.762	2.947
0.0980	2.463	2.647
0.1015	2.144	2.293
Error %	5.3	

여폭약에서 생성되는 폭굉파의 최대 압력이 약 31 GPa에 이르고 이후 PMMA를 통과하면서 충격 압력이 점차 감소하게 되는데, 이러한 양상은 LSGT(Large-scale Gap Test) 시험 결과[3]와 유사한 것으로 나타났다. Table 3은 시험과 수치 해석을 통해 도출된 gap 두께에 따른 감쇠 압력을 정량적으로 비교한 것이다. 비교된 gap 두께에서 평균적으로 5% 정도의 차이를 보이며, 충격과 압력의 감쇠 경향이 잘 일치함을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 구성한 하이드로다이나믹 해석 코드가 시험값을 정밀하게 예측할 수 있음을 의미한다고 사료된다.

3.2 Gap-Acceptor의 상호 작용

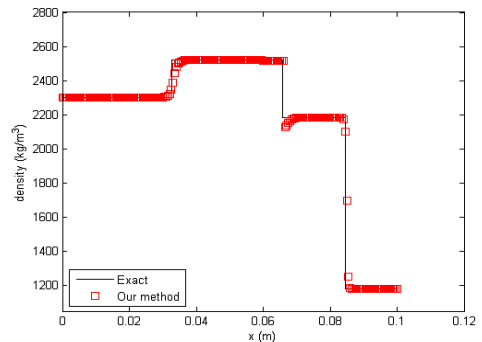
충격파가 수폭약과 감쇠기 간 경계면을 통과하면서 발생하는 파동 간 상호작용을 알아보기 위하여 Table 4의 상태량을 고려한 리만 문제(Riemann problem)를 해석하였다. 열폭약 RDX와 PMMA를 전체 0.1 m 길이 도메인에 각각 절반씩 고려하여 초기 경계면을 $x = 0.05$ m에 위치시켰다. Fig. 2는 0.5 mm 크기의 격자를 사용한 계산에서 6 μ s 일 때의 해석 결과(밀도, 속도, 압력)를 이론값과 비교한 것이다. 수폭약의 연소로 인한 압력과 속도 성분이 우측 방향으로의 충격과 전달을 야기하면서 경계면의 위치를 $x = 0.065$ m로 이동시켰다. 경계면을 기준으로 양옆에 두 개의 불연속면이 존재하는데, 이는 각각 반사파와 충격파를 의미한다. 경계면에 반사된 압력파가 좌측방향으로 전파되고, 경계면을 통과한 충격파가 PMMA의 압력과 밀도를 상승시키면서 우측으로 진행한다. 경계면 근방에서 밀도의 미세한 오차가 나타나기도 하지만, 다중 물질 간 상호작용으로 인해 발생하는 압력과 전파를 효과적으로 해석할 수 있음을 확인하였다.

3.3 PMMA gap의 충격 감쇠

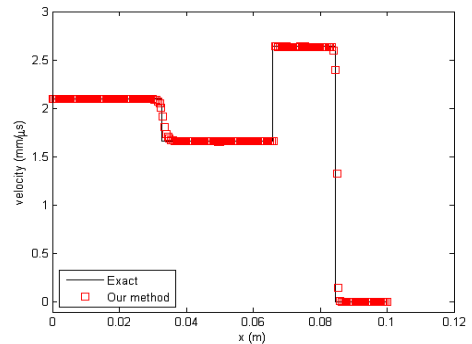
Gap 물질을 통과하는 충격파의 감쇠 현상을 LSGT 시험[11,12]과 비교하기 위하여 지름 5.08 cm의 PMMA 디스크를 고려하였다. PMMA 입자 속도를 격자의 조밀한 정도에 따라 비교하였으며, 시험 데이터와 함께 Fig. 3에 나타내었다.

Table 4. Initial parameters for a Riemann problem.

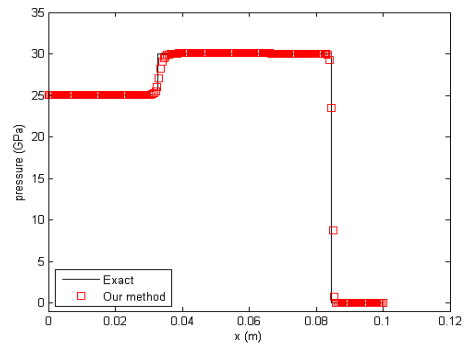
Working mediums	PMMA	Al-RDX
Density (kg/m^3)	1182	2300
Pressure (GPa)	0	25
Velocity ($\text{mm}/\mu\text{s}$)	0	2.1
Yield stress (GPa)	0.42	none
Shear modulus (GPa)	2.32	none



(a) density



(b) velocity



(c) pressure

Fig. 2 Calculated result for Gap-Acceptor configuration at 6 μ s: (a) density, (b) velocity, and (c) pressure.

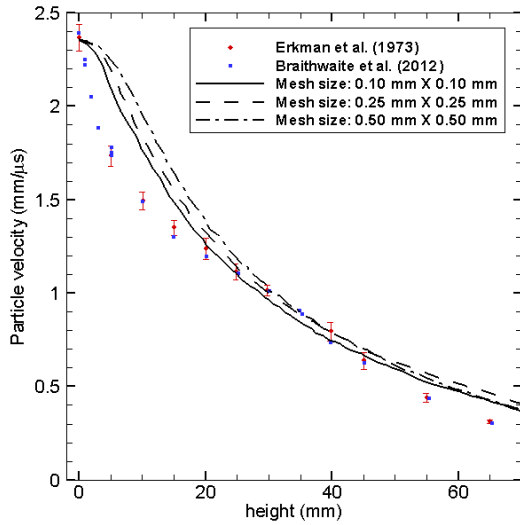


Fig. 3 Mesh refinement test via particle velocity.

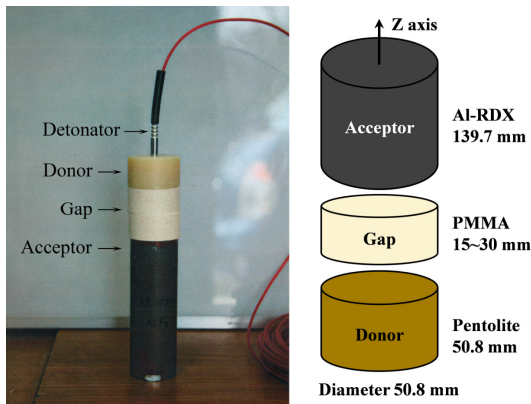


Fig. 4 Gap test configuration.

Table 5. LSGT experimental result.

PMMA gap thickness	Go/No go
24.480 mm	Go
24.734 mm	Go
24.988 mm	Go
25.242 mm	Go
25.496 mm	Go
25.750 mm	Go/No go
26.004 mm	No go
26.258 mm	No go
26.512 mm	No go
26.766 mm	No go
27.020 mm	No go

전산해석 결과가 시험에서 측정된 충격 감쇠 패턴을 잘 예측하고 있으며, 격자 크기에 따라 결과가 크게 차이나지 않는 것을 확인하였다. 이후의 모든 계산에 대해 0.1 mm × 0.1 mm의 조밀한 격자계를 사용하여 해석을 수행하였다.

3.4 Pentolite-PMMA-Aluminized RDX의 LSGT 시험

전산해석 결과를 검증하고 비교분석하기 위하여 Fig. 4와 같이 구성한 LSGT 시험을 수행하였다. LSGT 시험은 수폭약의 폭발반응이 50% 확률로 발생하는 감쇠기 두께를 결정하는 것으로 충격 압력에 대한 기폭 감도를 판단할 수 있다. 감쇠기 두께는 양성반응과 음성반응을 번갈아 관찰하면서 줄여나갈 수 있는데, 카드 한 장의 두께(0.254 mm)까지 고려하여 정밀하게 측정한다. 본 실험에서는 전기신호로 초기 밀도 1.56 g/cc의 pentolite를 기폭시키고 PMMA 두께를 조절하면서 하단에 위치한 1.78 g/cc의 열폭약 RDX가 반응하는지 여부를 측정하였다. 이때, 수용부 폭약 아랫단에 연강(mild steel) 재질의 9.5 mm 두께를 갖는 증거판(witness plate)을 위치시켜 기폭 여부에 따라 파손되도록 하여 Go/No-go 판단을 용이하게 하였다.

시험에 사용된 시료의 직경은 50.8 mm이며, 여폭약의 높이는 직경과 같고, 수폭약의 높이는 폭발과의 충분한 성장이 가능하도록 139.7 mm의 길이를 고려하였다. Gap 두께는 0.254 mm의 PMMA 디스크를 적층하는 방식으로 조절하였으며, 하나의 gap 두께에서 총 세 번의 시험을 수행하여 수폭약의 Go/No-go 반응을 판단하였다.

열폭약 RDX의 폭발 양성반응 및 음성반응이 교차로 나타나는 지점 근방에서의 LSGT Go/No-go 시험 결과는 Table 5와 같다. PMMA gap 두께가 25.75 mm 일 때 양성반응과 음성반응이 교차로 나타났으며, 이보다 얇은 두께에서 양성반응이, 두꺼운 두께에서 음성반응이 관찰되었다. 따라서 열폭약 RDX 화약의 반응 개시를 위한 PMMA 임계 두께(critical thickness)는 25.75 mm 임을 알 수 있으며, 이 때 수폭약에 전달된 압력이 최소 기폭 임계값(initiating threshold pressure)이라고 할 수 있다.

3.5 Pentolite-PMMA-Aluminized RDX의 LSGT 해석

수치해석에서는 시험에서 도출된 PMMA의 임계 두께 근방에서 1 mm 간격으로 gap 두께를 조절하는 방식으로 Fig. 4와 같이 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 반응 물질의 연소질량분율로 0부터 1까지의 값을 갖는데, 0일 때(반응 개시) 반응물(reactant)을, 1일 때(반응 완료) 생성물(product)을 의미한다. λ 는 Eq. 6의 반응속도식을 통해 계산된다.

Fig. 5는 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 반응변수, 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.

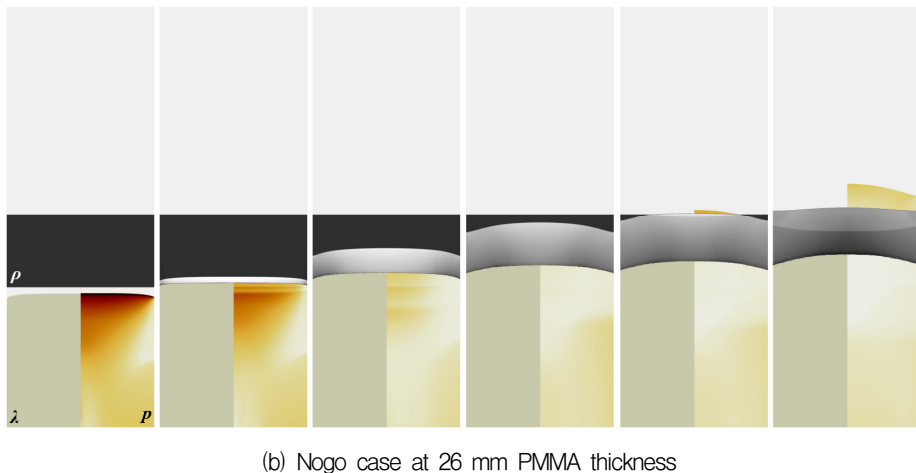
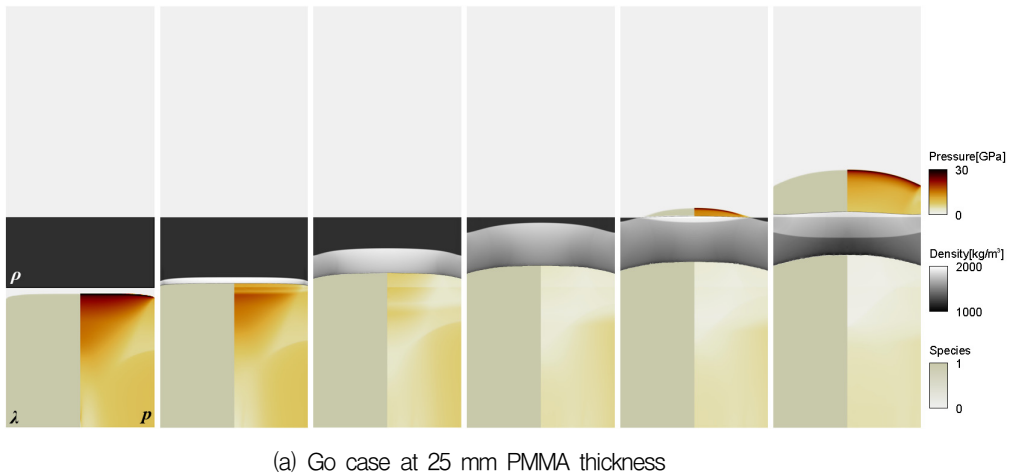


Fig. 5 Shown reaction progress and pressure for Donor (bottom)/Acceptor (top), density for PMMA (middle).
(a) 25 mm gap and (b) 26 mm gap at times $t=7, 8, 10, 12, 13,$ and $15 \mu s$.

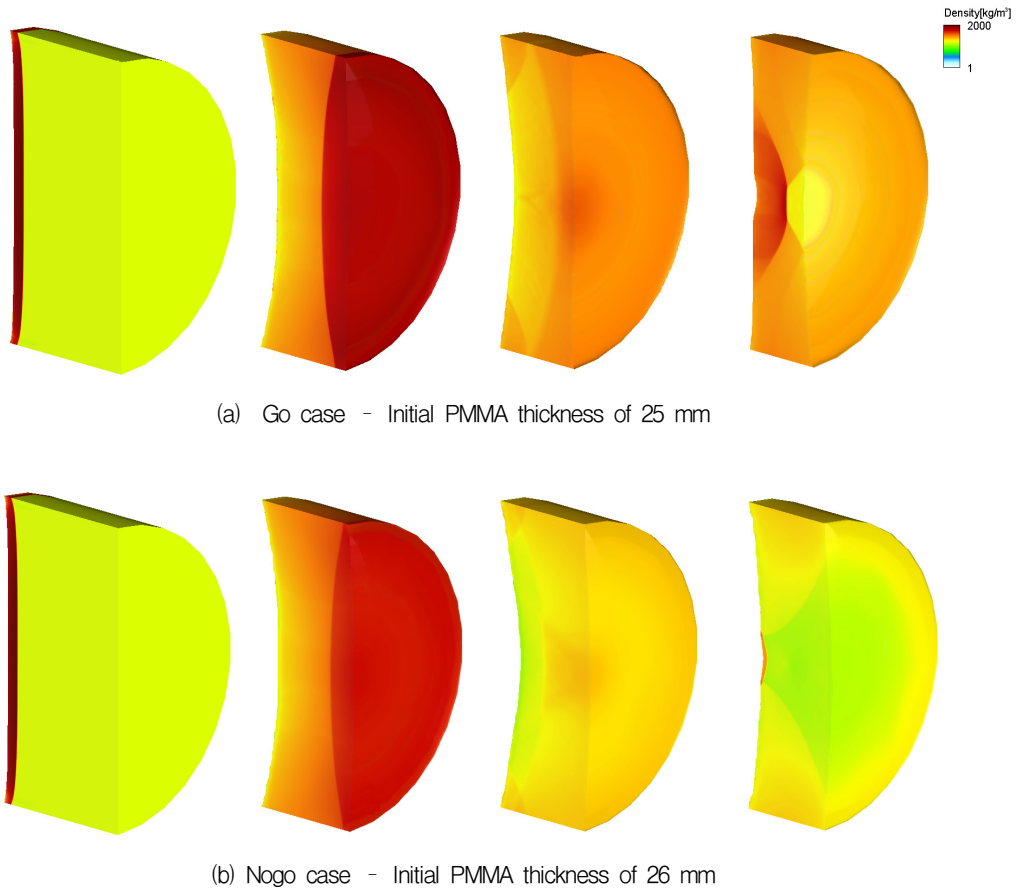


Fig. 6 Shape evolution of PMMA during shock attenuation: (a) Initial PMMA thickness of 25 mm and (b) Initial PMMA thickness of 26 mm at times 8, 14, 20, and 26 μ s.

충격파가 gap 물질을 통과하는 동안 발생하는 PMMA의 형상 변화 또한 화학반응 개시 여부에 따라 달라진다. Fig. 6은 gap 두께 25 mm와 26 mm에서의 PMMA 디스크의 형상을 밀도 컨투어에 따라 나타낸 것이다. 열폭압 RDX의 양성반응이 나타난 25 mm 두께(a)의 경우, 여폭약과 수폭약에 의한 양방향 압축이 복합적으로 일어나 밀도구배가 26 mm 두께(b)의 경우와 비교하였을 때 더욱 극심하게 나타나고 있다. 이로 인해 계산시간 $t = 26 \mu$ s에서 최종 변화된 gap 형상의 찌그러진 정도가 다르게 나타났는데, No-go의 경우 한 방향 압축만 발생하므로 위로 볼록하고, Go의 경우 양방향 압축에 의해 중심부가 움푹 들어간 형태로 변형됨을 볼 수 있다.

LSGT 중심선을 따라 도출된 25 mm 및 26 mm gap 두께에서의 압력 분포의 발달을 Fig. 7에 나타내었다. Pentolite에서 발생한 초기 압력과 PMMA 충격 감쇠는 두 경우 모두 동일하나, 임계 압력의 도달 차이에 따라 수폭약의 반응 개시의 양상이 달라진다. 따라서 열폭압 RDX의 반응 개시 압력이 감쇠기를 통과한 이후 gap 두께 25 mm와 26 mm 사이에서 존재함을 예측할 수 있다. 이는 LSGT 시험에서 25.75 mm로 도출된 임계 압력과 일치하는 결과이다.

이때 여폭약 최대 생성 압력은 약 31 GPa이고, PMMA를 통과한 이후 열폭압 RDX를 기폭시키는 최소 임계 압력은 약 5.9 GPa로 계산되었다.

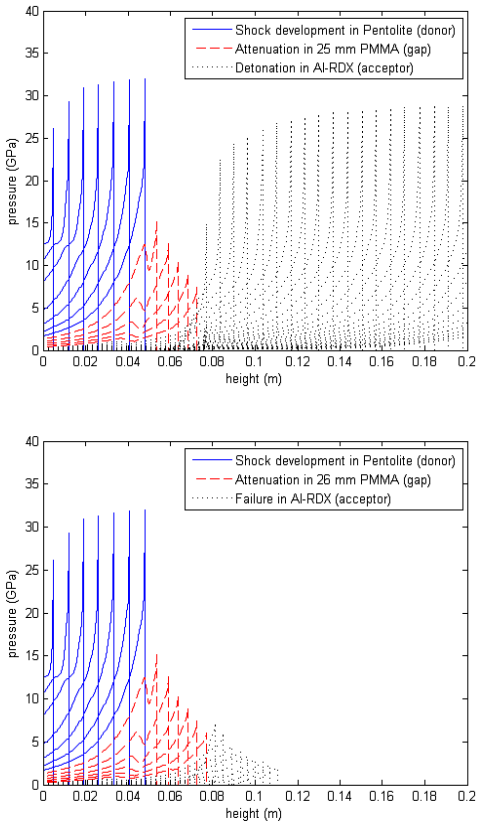


Fig. 7 Time trace of consecutive pressure profiles of LSGT simulation with 25 mm and 26 mm gap.

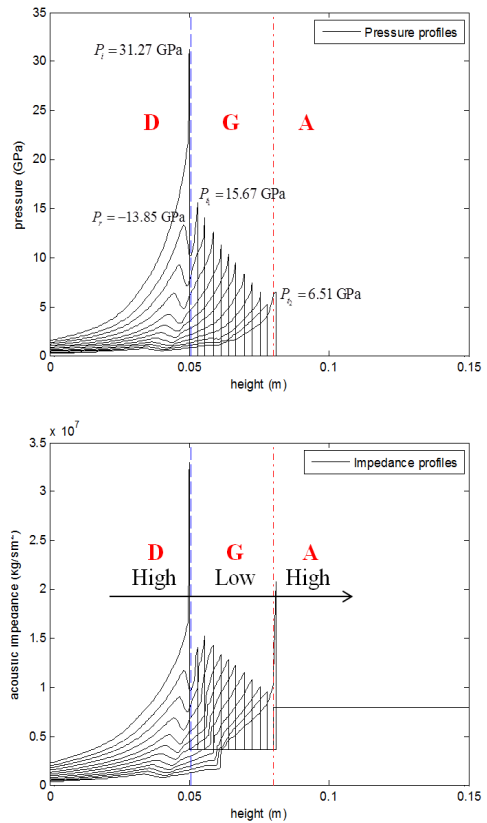


Fig. 9 Pressure and acoustic impedance of LSGT simulation (Donor, Gap, Acceptor).

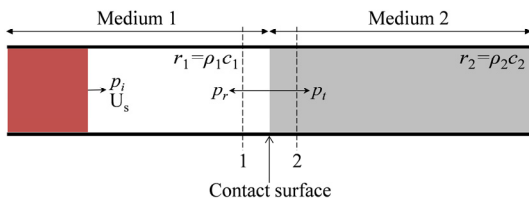


Fig. 8 Jump in the acoustic impedances.

음향 임피던스는 밀도(ρ)와 음속(c)의 곱으로, 음파가 다중물질 내부에서 전파될 때 경계면에서 반사(reflection)와 투과(transmission)의 정도를 나타내는 상태량이다. 음파가 낮은 임피던스 특성을 갖는 물질에서 높은 물질로 전달될 때 투과가 용이하며, 반대의 경우 반사된다. Fig. 8은 두 물질간 경계면을 통과하는 충격파의 전파와 음향 임피던스 차이를 나타낸 그림이다.

Gap test는 밀도가 다른 화약-감쇠기-화약의 배열로 이루어져 있으므로, 기본적인 충격파 전달은 여폭약-Gap-수폭약의 과정으로 볼 수 있으나, 실제로는 두 물질 간 경계면에서 임피던스 차이로 인해 반사와 투과가 생성된다. Fig. 9는 경계면과 gap 물질 사이에서의 압력선도와 음향 임피던스를 나타낸 것이다. 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 투과파와 14 GPa의 반사파로 나뉘어 양 방향으로 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.

4. 결 론

격벽착화기는 화약-격벽-화약의 구조를 갖는 착화기의 일종으로 gap test와 구조적으로 동일하다. 본 연구에서는 pentolite 작약과 열폭압 RDX 화약의 화학반응을 모델링하고 오일러리안 기반의 레벨셋 기법이 적용된 다중물질 하이드로 코드를 사용하여 gap test의 점화 현상을 전산모사하였다. 또한 LSGT 시험을 수행하여 도출된 열폭압 RDX의 임계 두께를 도출하고 이를 수치해석 결과와 비교하여 검증하였다. 화약-격벽간 상호작용에 의한 압력과 전달 및 임계 두께, 그리고 음향 임피던스를 분석하여 열폭압 RDX의 점화 특성을 정량화하였다. 본 연구결과는 향후 실제 파이로 장치를 고려한 해석에 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 '유도탄용 고성능 PMD 기술' 사업의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원 및 문화체육관광부, 한국콘텐츠진흥원의 2015년도 문화기술 연구개발 지원사업으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Kimura, E. and Oyumi, Y., "Sensitivity of Solid Rocket Propellants for Card Gap Test," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 24, No. 2, pp. 90-94, 1999.
- Kubota, S., Ogata, Y., Wada, Y., Katoh, K., Saburi, T., Yoshida, M. and Nagayama, K., "Observation of Shock Initiation Process in Gap Test," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 845, pp. 1085-1088, 2006.
- Wall, C. and Franson, M., "Validation of a Pressed Pentolite Donor for the Large Scale Gap Test at DSTO," DSTO TN-1172, 2013.
- Jang, S.G. and Baek, S.H., "Studies on Through-Bulkhead Initiation Module using VISAR," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 14, No. 4, pp. 16-24, 2010.
- Lee, J.S., Park, J.S. and Lee, Y.S., "Study on the Computational Simulation of Large Scale Gap Test," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 14, No. 5, pp. 932-940, 2011.
- Lee, J.W. and Yoh, J.I., "Study of Supersonic Flame Acceleration within AN-based High Explosive Containing Various Gap Materials," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 4, pp. 32-42, 2013.
- 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, pp. 1-9, 2014.
- Piacesi, D.Jr., "Numerical Hydrodynamic Calculations of the Flow of the Detonation Products from a Point-initiated Explosive Cylinder," NOL NOLTR-66-150, 1967.
- Steinberg, D.J., "Equation of State and Strength Properties of Selected Materials," LLNL UCRL-MA-106439, 1996.
- Fried, L.E., Howard, W.M. and Souers, P.C., "Cheetah 2.0 User's Manual," LLNL UCRL-MA-117541 Rev. 5, 1998.
- Erkman, J.O., Edwards, D.J., Clairmont, A.R. and Price, D., "Calibration of the NOL Large Scale Gap Test; Hugoniot Data for Polymethyl Methacrylate," NOL NOLTR-73-15, 1973.
- Braithwaite, C.H., Pachman, J., Majzlik, J. and Williamson, D.M., "Recalibration of the Large Scale Gap-Test to a Stress Scale," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 37, No. 5, pp. 614-620, 2012.