파이로테크닉 장치의 고폭 폭발성능 정밀 하이드로다이나믹 해석

김보훈 · 여재익

A Full Scale Hydrodynamic Simulation of High Explosion Performance for Pyrotechnic Device

Bohoon Kim · Jai-ick Yoh[†]

ABSTRACT

A full scale hydrodynamic simulation that requires an accurate reproduction of shock-induced detonation was conducted for design of an energetic component system. A detailed hydrodynamic analysis SW was developed to validate the reactive flow model for predicting the shock propagation in a train configuration and to quantify the shock sensitivity of the energetic materials. The pyrotechnic device is composed of four main components, namely a donor unit (HNS+HMX), a bulkhead (STS), an acceptor explosive (RDX), and a propellant (BPN) for gas generation. The pressurized gases generated from the burning propellant were purged into a 10 cc release chamber for study of the inherent oscillatory flow induced by the interferences between shock and rarefaction waves. The pressure fluctuations measured from experiment and calculation were investigated to further validate the peculiar peak at specific characteristic frequency ($\omega_c = 8.3 \text{ kHz}$). In this paper, a step-by-step numerical description of detonation of high explosive components, deflagration of propellant component, and deformation of metal component is given in order to facilitate the proper implementation of the outlined formulation into a shock physics code for a full scale hydrodynamic simulation of the energetic component system.

Key words: Hydrodynamics, Pyrotechnics, Shock-induced initiation, Closed bomb test

요 약

고에너지 구성 요소 시스템의 설계를 위하여 고폭화약의 폭발 반응을 엄밀하게 모사할 수 있는 실제 규모의 하이드로다이 나믹 해석을 수행하였다. 폭발성능 정밀 해석 SW는 고에너지 물질의 충격 민감도를 정량화하기 위한 반응 유동 모델을 검증 하고 일련의 화약 트레인을 통과하는 충격파 전달을 예측하기 위해 개발되었다. 파이로테크닉 장치는 여폭약(HNS+HMX), 격벽(STS), 수폭약(RDX), 파이로테크닉 추진제(BPN)로 구성된다. 추진제 연소로 인하여 생성된 고압의 연소 가스는 충격 파와 저밀도파 간 간섭에 의해 유도된 고유의 진동 유동 특성을 파악하기 위하여 10 cc 밀폐형 챔버에 유입된다. 특정 주파수 (a, = 8.3 kHz)에서의 피크 특성을 검증하기 위하여 실험 및 계산으로 측정된 압력 진동을 비교하였다. 본 연구에서는 고폭화약의 폭발반응과 추진제의 폭연반응, 비-반응 금속의 변형에 관하여 단계별 수치해석 기법들을 충격 물리 해석 SW로 구현함으로써 고에너지 물질 시스템에 대한 대규모 하이드로다이나믹 시뮬레이션을 용이하게 하였다. 개발된 고폭화약 폭발 성능 정밀 해석 SW를 고에너지 구성 요소 시스템의 파이로테크닉 연소 반응 M&S에 적용하여 실험 결과와 비교함으로써 검증하였다.

주요어: 하이드로다이나믹 해석, 파이로테크닉 장치, 충격점화, 밀폐챔버시험

* 본 연구는 한국연구재단의 학문후속세대양성 리서치펠 로우(NRF-2017R1A6A3A11031277) 사업과 방위사업청 및 국방과학연구소, (주)한화의 지원으로 수행되었습니다.

Received: 25 April 2018, Revised: 22 November 2018, Accepted: 16 January 2019

* Corresponding Author: Jai-ick Yoh

E-mail: jjyoh@snu.ac.kr

Mechanical and Aerospace Engineering, SNU

1. 서론

파이로테크닉 장치는 로켓의 단, 페어링, 발사대 분 리 등과 점화계열 착화, 에어백 구동과 같이 기계항공 분야에서 다양한 용도로 사용되는 고에너지 구성 요소 시스템으로, 여폭약(donor)과 수폭약(acceptor)이 격벽 (bulkhead)을 사이에 두고 양쪽에 충전된 구조를 갖는다. 따라서 여폭약으로부터 발생한 충격파가 일정 두께의 격 벽을 통과하고 수폭약에 점화를 야기하여 제대로 순폭하 는지 검증하는 것이 파이로테크닉 장치 설계의 핵심이라 고 할 수 있다^[1,2]. 격벽의 두께에 따라 수폭약에 전달되 는 순폭 압력이 달라지기 때문에 화약 트레인에 배열된 일련의 고에너지 물질들의 충격-폭광 천이 현상(SDT, Shock-to-Detonation Transition)을 정밀하게 예측하기 위한 성능해석 모델링이 중요하며, 충격파 전달에 의한 파이로 착화기 내 고폭약의 폭광 반응을 정량화하기 위 하여 점화 민감도와 순폭 압력 간의 관계를 규명할 필요 가 있다.

화약의 점화 민감도를 측정하기 위한 실험으로 여폭약 과 비-반응 감쇠기(격벽), 수폭약을 일렬로 배열한 Gap test^[3-6]가 수행되어 왔다. 감쇠기 두께를 조절하면서 수폭 약이 폭발하는 임계두께를 찾음으로써 점화 민감도를 판 단하는 방식이다. 이 실험은 구성이 간단하고 직관적이기 때문에 1/100 mm 수준의 상당히 정밀한 두께 오차까지 측정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 실험의 복잡성을 최소화하기 위해 여폭약과 수폭약을 다중 적재하지 않고 단일 화약만으로 공급부와 수용부 폭약을 구성하기 때문 에 화약 트레인과 같이 여러 종류의 화약이 연속적으로 배열된 복잡한 시스템을 검증하기에는 한계가 있다. 또한 Gap test의 표준 여폭약으로 사용되는 Pentolite와 표준 감쇠기인 PMMA는 실제 파이로테크닉 장치와 같은 첨 단 항공우주 부품에 단독으로 사용되는 물질이 아니기 때문에 새로운 재료의 폭발 및 감쇠 물성에 대해 규명할 수 있는 고폭 폭발성능 정밀 하이드로다이나믹 방법론이 필요하다고 생각된다.

한편, CBT(Closed Bomb Test)는 10 cc 체적의 밀폐 형 챔버 내부에 BPN 연소로 인한 고온 고압의 가스 압력 을 측정하는 시험이다^[7]. 파이로테크닉 착화기와 같이 HNS+HMX/STS/RDX/BPN로 이어지는 일련의 다중 적층 구조체 내부에서 발생하는 폭압과 이를 통과하는 충격파의 거동을 시험적으로 측정하기란 쉽지 않다. 따라서 CBT 시 험은 여폭약과 수폭약이 STS 재질의 격벽에 밀폐되어 있 는 파이로테크닉 착화기 화약 트레인에서 불폭/완폭 여부 와 성능 만족도를 평가하는데 용이하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 파이로테크닉 착화기의 CBT 챔버 연 소 유동을 해석하기 위하여 고폭약의 반응 및 비반응 물 질의 압력 감쇠 현상을 연동하여 모사할 수 있는 하이드 로다이나믹 해석을 수행하였다. 비행편 충돌에 의한 여 폭약의 점화 반응을 비행속도에 따라 검증하고, 여폭약 (HNS+HMX)/격벽(STS)/수폭약(RDX)/파이로추진제 (BPN)로 구성된 화약 트레인의 기폭으로 발생하는 연소 유동이 10 cc 체적의 밀폐형 챔버 내부로 유입되었을 때 의 압력을 측정함으로써 충격파와 저밀도파의 상호작용 에 의한 진동 유동의 물리적 특성을 규명하고자 하였다. 반응 유동장의 폭압과 반응파의 전파를 근거로 시간 특 성을 갖고 나타나는 압력 요동(fluctuation)을 검증하고 특정 진동수로 떨리는 챔버 연소 유동의 주파수 특성을 분석하였다.

2. 해석 기법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 고폭약의 초음속 화염 전파를 다루기 때문에 Euler 방정식을 기본으로 하며, 상태방정식 및 화 학반응속도식의 구성방정식(constitutive relations)이 고 려된다. 원통 좌표계에서의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial r} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial z} = \vec{S} \left(\vec{U} \right) \tag{1}$$

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

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} -\frac{\rho u_r}{r} \varphi \\ \frac{\eta (s_r - s_{00}) - \rho u_r^2}{r} \varphi + \eta \left(\frac{\partial s_r}{\partial r} + \frac{\partial s_r}{\partial z} \right) \\ \frac{\eta s_r - \rho u_r u_z}{r} \varphi + \eta \left(\frac{\partial s_r}{\partial r} + \frac{\partial s_r}{\partial z} \right) \\ \frac{\eta (u_r s_r + u_z s_r) - u_r (\rho E + p)}{r} \varphi + \eta \left(\frac{\partial (u_r s_r + u_z s_r)}{\partial r} + \frac{\partial (u_r s_r + u_z s_r)}{\partial z} \right)$$

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

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

$$\dot{s}_{ii\ tr} = \Omega_{ik} s_{ki} - s_{ik} \Omega_{ki} + 2G\bar{D}_{ii} \tag{3}$$

$$\dot{s}_{ii,cor} = -H : D_{ii}^p = -2G\Lambda N_{ii,tr} \tag{4}$$

여기서 각 연산자는 다음과 같이 계산된다.

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

2.2 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^[8]은 점화 개시(ignition) 및 폭발 파 전파(growth)에 관계된 식들의 합으로 구성되어 있다. 각각에 대한 식은 다음과 같다.

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

 $p_{reacted (donor, acceptor)} =$

$$Ae^{-R_1(\rho_0/\rho)} + Be^{-R_2(\rho_0/\rho)} + C(\rho_0/\rho)^{-(1+\omega)}$$
 (7)

여폭약의 경우 격벽과 수폭약에 유입되는 첨두 압력 (incident pressure)을 생성하는 역할로 반응 후(reacted) 상태방정식으로 압력 증강을 계산한다. 반응 전(unreacted) 상태방정식은 수폭약에 대하여 아래의 방정식^[9]이 적용 되었다.

$$p_{unreacted(acceptor)} = A \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_{s}} \right) e^{\left(-\frac{R_{t}}{\eta} \right)} + B \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_{s}} \right) e^{\left(-\frac{R_{s}}{\eta} \right)} + \omega \rho E \quad (8)$$

JWL 상태방정식은 대단히 짧은 시간(~1 µs)내에 고 압(10~50 GPa)의 충격파(~8 km/s)를 수반하는 고에너 지 물질의 폭광을 물리화학적으로 모사할 수 있는 모델 이며, 비반응 물질에 대해서는 충격파로 인한 불연속면에 서의 랭킨-위고니오(Rankine-Hugoniot) 관계로부터 유 도된 Mie-Gruneisen 상태방정식이 압력 변화를 예측하 는데 적합하다.

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

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

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

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

여기서 $\nu = \rho_0/\rho$ 이고, 현재 밀도(ρ)와 초기 밀도(ρ_0) 의 비로써 상대 비체적을 의미한다. e는 내부 에너지이며 $A, B, C, R_1, R_2, \omega$ 는 상대방정식을 구성하는 모델 파 라미터이다. 각 물질에 대한 값은 Table 1에 나타나 있다. 비반응 물질 STS의 변형은 Mie-Gruneisen 상태방정

식^[10]을 사용하여 압축과 팽창에 대한 모사를 정밀하게 예

Table 1. Modeling constants for HNS, HMX, RDX(pure) and CH-6(97.5% RDX)

	Model parameter	HNS	HMX	RDX	CH-6
Reactant	$\rho_0 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1430	1700	1570	1640
	A (GPa)	33180	952200	-	77810
	B (GPa)	-2.5154	-5.944	-	-5.031
	R_1	11.5	14.1	-	11.3
	R_2	1.15	1.41	-	1.13
	ω (J/g-K)	0.568	0.887	-	0.894
D. L.	A (GPa)	536.25	333.88	313.11	311.19
	B (GPa)	27.02	5.92	4.97	5.69
	C (GPa)	1.00	1.35	1.46	1.36
Product	R_1	5.4	3.63	3.71	3.61
	R_2	1.8	1.02	0.99	1.01
	ω (J/g-K)	0.45	0.37	0.36	0.36
	I (s ⁻¹)	1.4x10 ⁶	44x10 ⁶	-	58x10 ⁶
Chaminal himstina	а	4.0	4.0	-	4.0
Chemical kinetics	G (s ⁻¹ Mbar ^{-b})	185×10^6	$850x10^6$	-	$380x10^6$
	b	3.0	2.0	-	1.1

측할 수 있도록 구성하였다.

$$\begin{split} p_{\text{non-reactive}} &= \\ \Gamma_{0}e_{0} + \begin{cases} \rho_{0}c_{0}^{2}\mu \left[1 + \left(1 - \frac{\Gamma_{0}}{2}\right)\mu\right] / \left[1 - (s_{0} - 1)\mu\right]^{2} & \text{if } \mu > 0 \\ c_{0}^{2}\rho_{0}\mu & \text{if } \mu < 0 \end{cases} \end{split}$$
 (12)

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

$$\sigma_{\gamma}\left(\varepsilon_{p}, \dot{\varepsilon}_{p}, T\right) = \left[A_{0} + B_{0}\left(\varepsilon_{p}\right)^{n}\right] \left[1 + C_{0} \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{p}}{\dot{\varepsilon}_{p0}}\right)\right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{0}}{T_{m} - T_{0}}\right)^{m}\right]$$
(13)

여기서 $\dot{\varepsilon}_p$ 는 유효 소성 변형(effective plastic strain)을 의미하고, ε_{n0} 는 유효 소성 변형률을 나타낸다. 또한 T_m 은 대상 재질의 용용 온도(melting temperature)를 의미 하며, T_0 는 상온이다. A_0 , B_0 , C_0 , m은 해당 모델을 구 성하는 비활성 물질에 따른 모델 파라미터이다. STS에 대한 모델 파라미터^[12,13]는 Table 2와 같다. 자세한 수치 기법에 대한 설명은 선행연구[14]를 참조하길 바란다.

Table 2. Material properties for STS[12,13].

Property	STS
Mechanical constant	
Initial density (kg/m ³)	7900
Young's modulus (GPa)	200
Shear modulus (GPa)	77
Thermal constant	
Heat capacity (J/kg·K)	423
Room temperature (K)	300
Melt temperature (K)	1683
Mie-Gruneisen EOS	
C_0 (m/s)	4570
S_0	1.49
Gruneisen coefficient	1.93
Strength model	
Yield stress (GPa)	0.34
Johnson-Cook model	
A_0 (GPa)	0.79
B_0 (GPa)	0.51
C_0	0.014
m	0.26

3. 해석 결과

3.1 비행편 충돌

파이로테크닉 장치는 기계적 비행편 충돌로 인한 연쇄 적 점화로 구동된다. Fig. 1은 파이로테크닉 장치의 점화 계열^[15]의 구조를 나타낸 것이다. 수 km/s 속도의 비행편 충돌로 인하여 전폭약인 HNS가 기폭되고 적충된 HMX 가 순폭되면서 생성된 고압의 폭굉파가 STS 재질의 격벽 을 통과하여 이후 연속적으로 충전되어 있는 화약-추진 제 트레인의 점화를 돕는다. 따라서 다단의 착화장치를 구동하는 첫 번째 시퀀스로 비행편 충돌에 의한 전폭약 의 기폭 반응을 해석하는 것은 올바른 파이로테크닉 장 치 설계를 위하여 반드시 필요하다. 본 해석에서는 100 μm 두께 Kapton 비행편이 초기밀도 1.43 g/cc의 HNS에 충돌하는 경우 기폭 반응을 관찰하였다. 비행편 속도는 1500, 2000, 2500, 3000 m/s의 총 네 가지 경우에 대하 여 수치해석을 수행하였으며, HNS의 화학적 모델링은 Table 1의 데이터를 사용하였다.

Figure 2는 비행편 충돌에 의한 전폭약 기폭 반응을 해석한 결과이다. 왼편에 비행편 속도 2000 m/s, 오른편 에 2500 m/s인 경우를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 µs에 대하여 나 타내었다. 각각의 그림은 좌우 절반씩 화학종과 압력을 표시하였다. 약 0.5 µs에서 비행편이 HNS에 충돌하여 점 화가 시작된 모습을 볼 수 있다. 이후 위에 적충된 HMX 에 순폭을 야기하고 폭발파가 STS 내부를 통과하고 수용 부 폭약인 RDX에 도달하여 최종적으로 화약 트레인의 연쇄 폭발하였음을 알 수 있다.

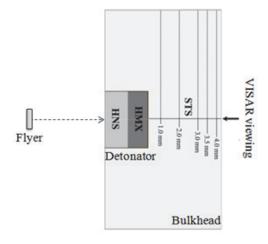


Fig. 1. Operating sequence on flyer impact initiation of an exploding foil initiator

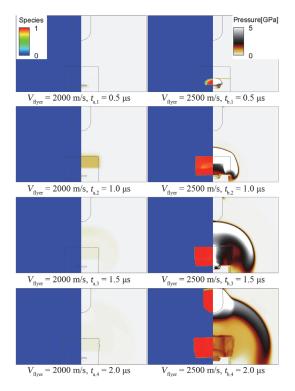


Fig. 2. Calculation results for flyer velocity at 2.0 and 2.5 km/s on HNS detonator

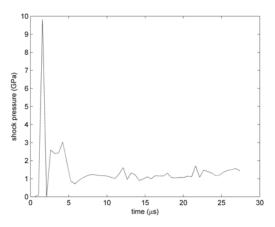


Fig. 3. Impact pressure profile

비행편의 속도가 충분히 빠른 경우($V_{flyer} = 2.5 \text{ km/s}$) 에 HNS의 기폭 반응을 관찰할 수 있다. 이때 측정된 최 대 충돌압은 Fig. 3에서와 같이 약 10 GPa로 측정되었다. HNS의 기폭 압력은 shock duration에 따라 달라지겠으 나 HNS의 충돌 점화를 위해서는 약 2.5 km/s의 속도에 서 10 GPa의 압력이 필요함을 알 수 있다.

3.2 자유표면 속도

VISAR(Velocity Interferometer System for Any Reflector)[16]는 레이저 빔과 광간섭계를 결합한 장치로 충격파가 전달되는 매질의 경계면에서 자유표면 속도 (free surface velocity)를 측정하는데 사용된다. 자유표면 에서의 임피던스 매칭에 의해 입자속도(particle velocity) 는 자유표면 속도의 1/2에 해당하며, Shock-Hugoniot 관 계에 의한 충격파속 및 폭압은 다음의 식과 같다.

$$u_f = 2u_p \tag{14}$$

$$u_s = c_0 + s u_p \tag{15}$$

$$p = \rho_0 (cu_p + su_p^2) \tag{16}$$

즉, VISAR를 사용하여 격벽 끝단에서의 자유표면 속 도를 측정하는 것은 입자속도와 충격파속을 도출하는 정 보를 획득하는 것이고, 이는 입자속도와 폭압간의 관계를 도출할 수 있음을 의미한다.

HNS와 HMX가 적층되어 있는 기폭제와 STS 격벽간 의 연동해석을 통해 폭압 생성 및 압력파 감쇠 현상을 정 밀하게 모사하였다. VISAR로 측정한 시험 데이터와의 정량적인 비교를 위하여 격벽 끝단에서의 입자속도를 계 측하였다.

격벽 두께에 따른 자유표면 속도를 측정하기 위해서 Fig. 1에 표시된 것과 같이 1.0 mm, 2.0 mm, 3.0 mm, 4.0 mm 두께의 STS 격벽착화장치를 고려하였다. VISAR 는 충격파가 전파되는 방향을 마주봄으로써 격벽의 끝단 의 경계면의 표면속도를 측정할 수 있다. 광섬유와 렌즈 를 이용한 프로브로 시편에 레이저 빛을 집속시키고 반 사된 빛을 VISAR 간섭계에 입사시키는 방식으로 계측이 이루어진다. 사용된 레이저 파장은 532 nm이다.

격벽 두께에 따른 VISAR 시험 데이터 및 하이드로다 이나믹 수치해석으로 도출된 자유표면 속도는 Fig. 4와 같다. 격벽의 두께가 두꺼워질수록 자유표면 속도의 최대 값이 점차 감소하게 되며 이는 충격파가 비반응 물질 내 부를 통과하면서 발생하는 압력의 감쇠에 기인한다. 그림 을 살펴보면, 약 0.8 µs에서 충격파가 도달하였음을 첫 번째 peak을 통해 알 수 있다. 이후 약 1.1 µs에서 두 번 째 peak을 만들고 3 mm와 4 mm를 지나는 파는 각각 약 1.35 µs와 1.5 µs부근에서 peak을 만들면서 점차 감소하 거나 수렴하는 패턴을 보인다. 시간에 따라 관찰된 peak 들은 실험과 수치해석에서 동시에 관찰되는 현상으로 그 원인은 연속적으로 유입된 충격파의 전달에 의한 것으로 생각된다. HNS와 HMX로 구성된 기폭부의 연속된 두

차례의 폭발이 파가 도달하는 초기 시점에서 관측이 되 고, 세 번째 peak은 기폭부의 급격한 파쇄 또는 변형에 의한 밀도파 전파에 따른 것으로 보인다.

고려된 격벽 두께에서의 전산해석 밀도장을 Fig. 5에 나타내었다. 3.5 mm와 4.0 mm를 지나는 지점에서의 유 체-고체간 연동 현상을 살펴보면, 기폭부와 STS간 인터 페이스의 가운데 지점에서 국부적인 변형이 발생하는 것 을 볼 수 있다. 폭약부와 격벽간 경계면이 점차 변형되는 가운데 약 2 us 전후의 시간대에서 앞선 1차 충격파를 뒤 따르는 2차 압력파를 볼 수 있다. 이는 HNS와 HMX의 기폭으로 고압의 연소유동이 STS의 표면을 강하게 압축 시키면서 동시에 상하좌우로 퍼져나갔던 압력파가 가운 데 지점에 중첩되면서 발생한 결과로 보여진다. 변형이 전반적으로 이루어지고 있는 와중에 강한 압축이 국부적 으로 발생하는 지점에서의 형상 변화가 또 다른 압축파 의 전파를 생성하였다. HNS와 HMX의 기폭으로 고압의 연소유동이 STS의 표면을 강하게 압축시키면서 동시에 상하좌우로 퍼져나갔던 압력파가 가운데 지점에 중첩되 면서 약간의 돌출부를 형성하는 과정을 나타낸다. 이러한 현상은 전체적인 변형이 진행되는 1.0 mm와 2.0 mm에 서 관찰되지 않았다. 다만, 변형이 전반적으로 이루어지 고 있는 외중에 강한 압축이 국부적으로 발생하는 지점

에서의 형상 변화가 또 다른 압축파의 전파를 생성하였 고 몇 차례의 peak 시그널을 관측할 수 있었다. 실제 시 험에서는 VISAR 장비의 민감성과 폭발 후 진동 및 빔 얼라이먼트 문제로 인해 계측에 어려움이 증대되겠으나, 복잡한 형태로 전파되는 연속된 충격파로 인한 파쇄 현 상이 격벽착화기 내부에서 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 자유표면 속도와 폭압 감쇠 패턴을 실험값과 정량 적으로 비교한 결과 자유표면 속도의 도달 시간과 크기 가 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다.

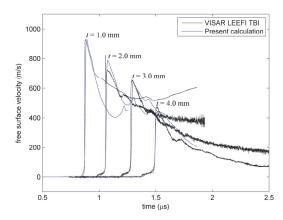


Fig. 4. Free surface velocity profiles

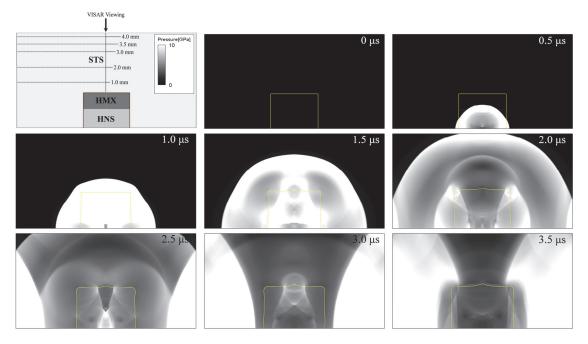


Fig. 5. Schematic of pyrotechinc bulkhead initiator and timed images of calculated pressure contour at $t = 0 - 3.5 \,\mu s$ with pressure range 0 - 10 GPa

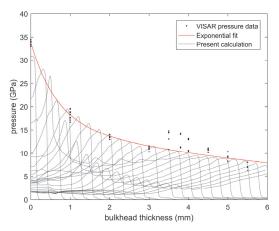


Fig. 6. Time trace of shock attenuating pressure along STS bulkhead (dot: experimental data, dotted line: calculation data, red line: fitted data)

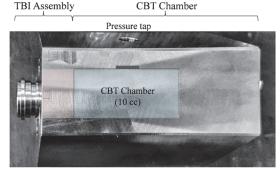
VISAR로 측정한 자유표면 속도를 Eq. (14)-(16)을 통 해 압력 데이터로 변환할 수 있다. 격벽 두께별 압력 데 이터와 수치해석으로 도출된 시간에 따른 압력의 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 제작 편차 및 계측오차 등을 감안하 여 각 두께별로 4~5조에 해당하는 시료를 사용하여 시험 하였음에도 불구하고 그림에서 나타난 것과 같이 각 두 께에서 큰 오차 없이 밀집된 데이터를 획득할 수 있었다.

$$p_{fit} = a \exp(bt) + c \exp(dt) \tag{17}$$

초기에 입력되는 압력은 약 35 GPa로 HMX의 폭발압 에 해당한다. STS 두께가 증가함에 따라 감쇠가 나타나 고 이를 지수함수로 fitting하면 Eq. (17)과 같다. 여기서 a = 17.52, b = -1.527, c = 16.27, d = -0.1196의 값을 갖는다. 이 함수로 STS 격벽을 통과한 압력파가 수용부 폭약을 기폭시킬 수 있는 임계격벽의 두께를 결정해야 하는 파이로테크닉 장치 설계에 활용될 수 있다.

3.3 Closed Bomb Test

CBT는 10 cc 체적의 밀폐형 챔버 내부에 BPN 연소 로 인한 고온 고압의 가스 압력을 측정하는 시험이다. 파 이로테크닉 착화기와 같이 일련의 다중 적층 구조체 내 부에서 발생하는 폭압과 이를 통과하는 충격파의 거동을 시험적으로 측정하기란 쉽지 않다. 따라서 CBT 시험은 여폭약과 수폭약이 STS 재질의 격벽에 밀폐되어 있는 파 이로테크닉 착화기 화약 트레인에서 불폭/완폭 여부와 성 능 만족도를 평가하는데 용이하다고 할 수 있다.



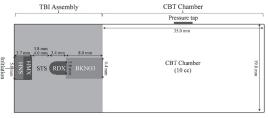


Fig. 7. Test specimen (upper) and computational domain (lower) for closed chamber test

Figure 7은 CBT에 파이로테크닉 착화기가 결합된 시 편과 시험 환경을 도식화한 그림이다. 파이로테크닉 장치 가 CBT 챔버에 결합될 수 있도록 나사산 형태의 스크류 (screw)를 가공하여 체결한다. 챔버의 중앙 벽면에 압력 센서를 위치시켜 연소 가스의 정압을 측정하였다. 압력센서 는 PCB piezotronics사의 모델 #102B를 사용하였는데 ICP 모델 484b 센서 신호 제어기(sensor signal conditioner) 와 연결하여 DAQ로 전압 신호를 수신하였다.

수용부 폭약의 기폭 임계 조건을 찾기 위해 0.1 mm 단위로 STS 격벽의 두께를 늘려가며 반복시험을 수행하 였다. Go/No-go 반응이 동시에 관찰되는 지점에서는 수 량을 늘려 10~16조까지 시험하였다.

Table 3은 격벽 두께에 따른 CBT 기폭 시험 결과를 정리한 것이다. Go/No-go 판단은 챔버 중앙에 압력센서 를 삽입하여 연소반응이 일어나 압력이 증가가 관찰되는 경우 Go 반응, 점화가 일어나지 않아 연소에 의한 압력 이 증가하지 않을 때 No-go로 판단하였다. Go 반응을 보 이는 격벽 두께 3.7 mm까지는 3조씩 반복시험 하였고, Go/No-go 경향을 보이는 3.8 mm 부터 4.0 mm 사이에 서 결과의 신뢰도를 확보하고자 순을 늘려 시험하였다. 3.8 mm에서 총 16조 시험하였는데, 3번 미전달 되었고, 3.9 mm에서는 10조 중 8번 미전달 되었다. 4.0 mm부터 는 모든 샘플에서 No-go 반응을 보였다.

Table 3. CBT Experimental Result

Bulkhead thickness	Go/No-go(trial)
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)

Figure 8은 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 압력은 약 5~6 MPa까지 상승하였다. No-go의 경우에는 초기 압력을 유지한 채 기폭에 의한 진동이 관찰된다. 따라서 격벽 두께 3.8 mm~4.0 mm 사 이에서 작동 임계 지점이 있음을 알 수 있다.

CBT-Go 시험의 초기 반응을 자세히 관찰하기 위해 표본 추출 비율을 20 GSa/s로 2000 µs까지 매우 정밀하 게 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. Raw data와 함께 저역 필터(low pass filter)된 압력 선도를 함께 표기하였다. 차 단 주파수(cut off frequency) $\omega_n = 300 \text{ kHz과 } \omega_n = 100$ kHz를 적용하였을 때 미세하게 떨리는 압력 섭동은 제거 되고 크게 울렁거리는 CBT 챔버 내부 유동을 후류에서 명확하게 관찰할 수 있다. 저역 필터는 다음의 Eq. (18)을 통해 필터링 하였고, 여기서 7는 필터링 시간 상수(filter time constnat)로 차단 주파수 ω_n 의 역수이다. s와 K는 각 각 라플라스 변화 변수(Laplace transform variable), 통 과 대역폭의 게인값(gain in the passband)이다.

$$\frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{Y}{X} = \frac{K}{\tau s + 1}$$
 (18)

결과를 살펴보면, 기폭 시작점부터 약 100 us부터 압 력이 상승하는 것으로 보아 BPN의 연소 가스가 CBT 챔 버 내부로 유입되면서 유동이 발생함을 알 수 있다. 500 us 이후부터는 크게 울렁거리는 유동을 관찰할 수 있는데 CBT 내부 공간에서 진동하는 폭발파(reacting wave)들 의 전파에 따른 것으로 생각된다. 시간에 따른 압력 신호 를 주파수 영역으로 변환한 FFT 결과는 Fig. 10과 같다. 관찰된 진동수는 약 ω_c = 8.3 kHz로 나타났다. 이 주파수 특성은 CBT 챔버 내부에서 바운싱하는 진동 유동의 시 간 특성에 기인하는 것으로 사료된다.

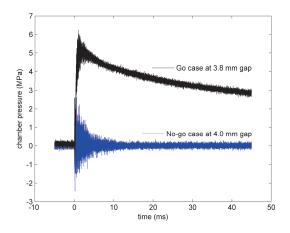


Fig. 8. Pressure histories for Go/No-go cases

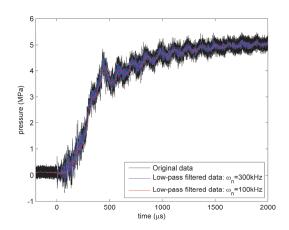


Fig. 9. Raw and filtered pressure profiles

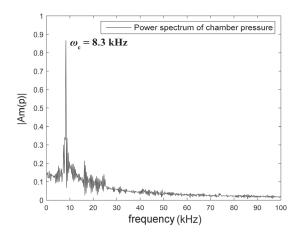


Fig. 10. Power spectral densities of closed chamber test data



Fig. 11. Timed images of pressure at (a) 3.8 mm, and (b) 4.0 mm bulkhead of explosive train

Figure 11은 격벽 두께에 따른 화약 결합체의 기폭 반 응음 하이드로다이나믹 해석으로 도출한 결과이다. 여폭 약(HNS+HMX)/격벽(STS)/수폭약(RDX)으로 이어지는 화약의 순차반응은 고폭약의 폭발로 인해 생성되는 폭굉 파의 진행에 의해 발생한다. 높은 압력의 반응파가 수폭 약에 도달하였을 때 화학반응이 개시되고 화학반응에 의 해 발생한 열에너지가 폭굉파의 진행을 돕는다. 충격파가 비-반응 물질인 STS를 통과할 때 고체 물질의 압축으로 밀도를 높이면서 에너지를 소모하므로 첨두압력이 점차 낮아지는데, 수폭약을 점화시킬 수 있는 최소 압력을 가 진 반응파가 도달하는 경우 Go 반응을 관찰할 수 있고, 그렇지 않은 경우 No-go 반응이 나타난다. 이는 수폭약 의 점화 민감도와 STS의 압력감쇠에 의한 결과이다.

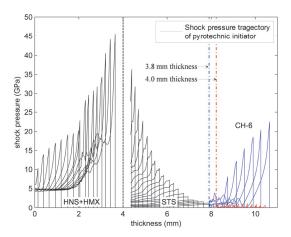


Fig. 12. Shock pressure trajectory in Detonator - Bulkhead -Acceptor of pyrotechnic initiator

본 해석에서는 STS 격벽 두께 3.8 mm와 4.0 mm를 고려하였다. 이는 CBT 시험에서 3.9 mm 전후로 양성 및 음성 반응을 관찰한 결과를 반영한 것이다.

하이드로다이나믹 해석에서 각 파트별 기폭 반응 시간 을 살펴보면, 공급부 폭약 중 기폭제인 HNS의 충격파면 의 HMX 최초 도달 시간은 0.35 µs, HNS가 모두 연소되 는데 걸리는 시간은 0.6 µs이며, 전폭약 HMX의 충격파 면의 STS 최조 도달 시간은 0.7 µs, 전약량 연소 시간은 0.8 µs이다. 이후 STS를 통과하는 압력파는 2.7 µs에서 수폭약 RDX에 도달한다. 이 때 수폭약을 기폭 시킬 수 있는 충분한 압력이 가해진 경우 Go (3.8 mm)반응, 그렇 지 않은 경우 No-go (4.0 mm)반응이 나타났다. 이러한 결과는 격벽의 두께가 두꺼워짐에 따라 압력 감쇠가 더 많이 일어나는데 원인이 있다. 화약 결합체의 중심선상의 시간에 따른 압력 선도를 Fig. 12에 나타내었다. 초기 여 폭약의 폭굉 압력이 약 45 GPa로 발달하며, 이후 STS 격 벽을 통과할 때 35 GPa로 투과된 첨두 압력은 점차 감소 한다. 수폭약은 약 2 GPa 전후에서 기폭되거나 되지 않 는다. 따라서 충격파가 STS를 통과하는 과정에서 발생하는 에너지 손실과 고에너지 물질의 점화 임계 압력(critical initiating pressure)이 파이로테크닉 장치의 작동 메커니 즘을 결정하는 중요한 요소라고 할 수 있다. 즉, 파이로 장치 설계에서 격벽 두께가 임계점을 결정하는 인자가 될 수 있으며, 고에너지 물질의 폭굉 압력 및 점화 임계 압력이 고려되어야 할 것이다. 이러한 결과는 여폭약의 폭굉 첨두 압력 생성과 비반응 물질의 충격 압력 감쇠, 수폭약의 임계 점화 압력 등의 열-물리(thermo-physical) 작용을 종합적으로 해석하였다고 볼 수 있다.

한편, 파이로테크닉 장치의 추진제로 사용되는 BPN은 고체로켓의 점화기나 테르밋(thermite), 가스 발생기(gas generator)등에 널리 사용되는 보론(B, Boron)과 질살칼 륨(KNO3, Potassium nitrate)의 합성물질이다. BPN의 연소반응은 폭연(deflagration)에 해당하며, 반응속도식 과 후퇴율은 각각 다음과 같다.

$$\dot{w} = \frac{d\lambda}{dt} = \rho_0 Z \lambda \exp(-E_a/(\bar{R}T)) \tag{19}$$

$$\dot{r} = \frac{dl}{dt} = \sqrt{\left(\frac{Z \cdot e^{-E_a/(\bar{R}T)} \cdot k \cdot \bar{R}T_f^2}{c_p \cdot E_a \cdot (T_f - T_0)}\right) / \rho_0}$$
 (20)

Table 4. Nominal Arrhenius law and JWL EOS parameters for BPN

Value	
1300	
9.16×10^{9}	
1.80×10^{5}	
3.20×10^{-3}	
2.87	
2.07	
2.07	
116.58	
116.58	
116.58 -0.097	

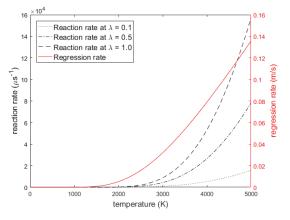


Fig. 13. Reaction and regression rates of BPN based on the Arrhenius temperature dependence

Table 4는 BPN의 구성방정식 파라미터를 정리한 것 이다. Hobin Lee^[17]의 연구에 의하면 BPN의 열적 반응 에 대하여 Arrhenius 반응속도식을 사용하여 모사할 수 있으며, 관련 파라미터들은 화학반응에 의한 열량을 측정 하는 DSC(differential scanning calorimetry) 분석^[18]을 통해 정량화하였다. 온도에 따른 BPN의 반응속도와 후 퇴율은 Fig. 13과 같다. 약 2000 K 이상의 온도에서부터 의미있는 반응을 보이기 시작하였고, 생성분율의 값이 높 아질수록 점차 반응속도가 빨라지는 형태로 나타났다. 온 도가 상승할수록 반응속도와 후퇴율이 지수함수를 따라 빨라지는 것을 알 수 있다.

Figure 14는 여폭약(HNS+HMX)/격벽(STS)/수폭약 (RDX)/파이로추진제(BPN)로 구성된 화약 트레인의 기 폭으로 발생하는 연소 유동이 10 cc 체적의 밀폐형 챔버 내부로 유입되었을 때의 전산모사 결과이다. 격벽 두께 3.8 mm를 고려하여 RDX와 BPN의 순폭을 유도하였다. 아래쪽에 압력장을 나타내었고 저밀도파(rarefaction wave) 를 관찰하기 위하여 위쪽에 동일 시간의 슐리렌 선도 (schlieren shadowgraph)를 나타내었다. 폭광반응을 하는 고폭약 영역에서의 폭굉파속(~수천 m/s)과 BPN의 폭연 반응(~수백 m/s)에 의한 반응파 속도는 충격파속과 입자 속도의 차이로 약 10배 이상의 차이를 보인다. 따라서 화 약 트레인 각 파트별 반응양상을 잘 관찰할 수 있도록 의 미있는 시간 간격을 선정하여 그림을 출력하였다.

여폭약(HNS+HMX)/격벽(STS)/수폭약(RDX)으로 구 성된 화약 트레인은 30 µs 전후로 반응이 완료되며 연속 된 파이로추진제(BPN)를 기폭시킨다. 이후 충전된 파이 로추진제가 반응하는데 약 20 µs 정도 소요되며 CBT 챔 버 내부로 연소가스가 유입되는 50 µs부터 내부유동을 관찰할 수 있다. BPN의 연소가스가 10 cc의 챔버로 유입 될 때 챔버 내부를 가압시키며 다양한 형태의 저밀도파 와 반사파들의 중첩이 후류에서 관찰된다. 시간에 따른 압력장을 보면, 길이방향으로 크게 울렁거리는 유동이 약 120 us마다 챔버 내부에서 바운싱하는 모습을 볼 수 있 는데 이는 CBT 실험에서 측정한 압력섭동에 대한 FFT 분석 결과 관측된 $\omega_c = 8.3 \text{ kHz}$ 와 시간 특성이 일치하는 결과이다. 또한 챔버 유입 초기에 좌우 측면 방향으로 퍼 져나가는 모션이 벽면에 반사되면서 저밀도파를 형성하 여 압력장의 섭동을 야기하는 것을 볼 수 있는데, 다양한 형태의 파동 중첩이 연소장에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서는 더욱 심도 있는 분석이 필요할 것으로 생각된다.

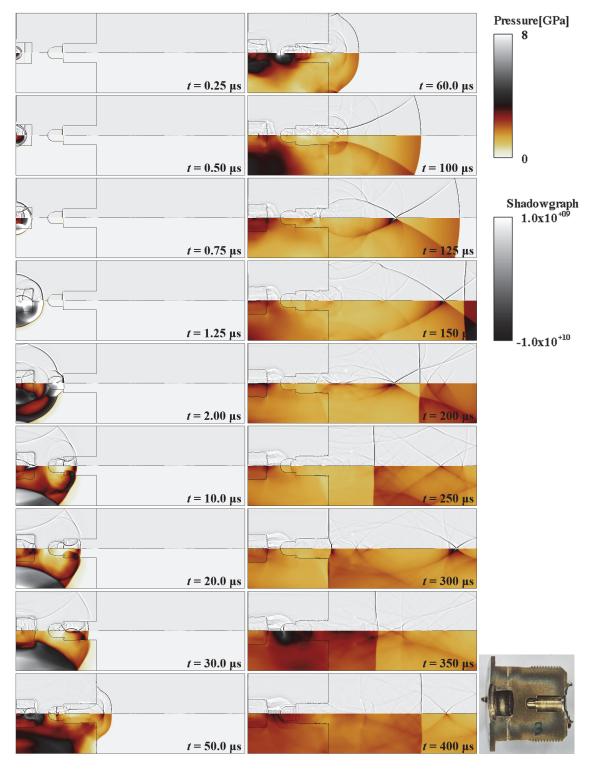


Fig. 14. Shown schlieren (top) and pressure (bottom) evolution in time for entire pyrotechnics-chamber assembly that shows a detonator (HNS+HMX), bulkhead (STS), acceptor (RDX), and gas-generating propellant (BPN)

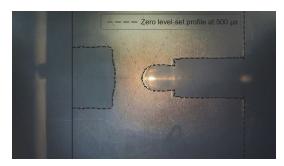


Fig. 15. Shape comparison of pyrotechnic device between calculation and experiment

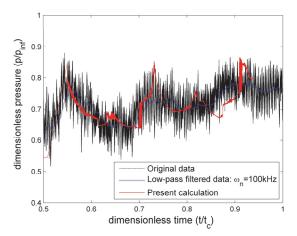


Fig. 16. Comparison of pressure signal inside the chamber between calculation and experiment

Figure 15는 실제 파이로테크닉 장치의 작동 후 샘플 의 단면과 계산으로 예측된 STS 격벽의 변형을 정성적으 로 비교한 것이다. HNS와 HMX의 기폭으로 인하여 Fig. 5에서 관찰된 것과 같이 STS 형상이 양 옆으로 벌어지고 충격파 전파의 영향으로 위로 볼록하게 부풀어 오른 모 습이다. RDX 수폭약과 BPN 추진제가 만나는 부분에서 는 각진 모서리 부분이 안쪽으로 파고들며 찌그러진 형 상이 되었는데 이는 RDX의 기폭에 의하여 초기 높은 압 력과 이후 낮은 압력의 차이에 기인한다. BPN가 연소되 면서 후단부에서 약간의 팽창이 관찰되었다.

Figure 16은 챔버 중앙부분에서 측정된 압력 선도와 계산으로 도출된 시간에 따른 압력 데이터를 비교한 것 이다. 압력 선도의 파장이 두 주기동안 실험에서 측정된 간격과 계산의 간격이 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이는 챔버 내 진동 유동이 갖는 특정 시간 스케일과 관련 이 있으며 앞서 도출된 주파수 특성을 의미한다.

4. 결론

파이로테크닉 착화기의 CBT 챔버 연소 유동을 해석 하기 위하여 폭압 발달 및 충격 압력 감쇠 현상을 모사할 수 있는 하이드로다이나믹 솔버를 구성하고 대상 화약의 충격파 전달에 의한 기폭 반응 여부를 예측하였다.

화약 트레인을 10 cc 챔버에 연결하여 CBT 기폭 시험 을 수행하였다. CBT 시험과 전산해석을 통해 임계 격벽 두께를 정량화하고 착화기의 작동특성을 검증하였다. 화 약-격벽-화약을 통과하는 충격파 전달과 물질 간 상호작 용이 파이로착화기 시스템을 동작시키는 주요 메커니즘 임을 규명하였으며, 여폭약의 폭광 첨두 압력 생성과 비 반응 물질의 충격 압력 감쇠, 수폭약의 임계 점화 압력 등의 열-물리(thermo-physical) 작용을 종합적으로 해석 하였다. 또한 파이로추진제로 사용된 BPN의 연소반응을 고려한 해석을 수행하여 챔버 내부로 유입된 연소 가스 가 저밀도파의 거동과 함께 압력의 울렁이는 섭동을 야 기하는 주요 인자임을 확인하였다.

STS 격벽 두께에 대한 임계치를 실험적으로 규명하고 이를 고폭 폭발성능 정밀 하이드로다이나믹 해석 SW 해 석 결과와 비교 분석함으로써 검증하였다. 특히 고온고압 환경하의 매우 짧은 시간 스케일(~µs)로 인하여 실험에서 미처 관찰하지 못한 물리현상을 수치해석적 방법으로 가 시화 하였다는 점에서 현상을 이해하는데 용의하게 하였 다. 본 연구결과는 첨단 파이로테크닉 설계를 위한 응용 연구로써 다중 적재된 고폭약의 연쇄적 폭발에 대한 물 리적 이해와 작동 특성을 검증한 데에 의의가 있다고 사 료된다. 다만, 풀 스케일의 시스템 전체를 계산 영역으로 고려하였음에도 주기적 진동유동을 관찰하기 위하여 더 욱 긴 계산 시간의 필요성이 있으며, 단일 단계 화학반응 식이 아닌 다중 반응속도 모델링을 도입한다면 더욱 정 밀한 결과를 도출할 수 있을 것으로 생각된다.

약 어

SW: Software

HNS: Hexanitrostilbene (C₁₄H₆N₆O₁₂)

HMX: Cyclotetramethylene-tetranitramin (C₄H₈N₈O₈)

STS: Stainless steel

RDX: Cyclotrimethylene-trinitramine (C₃H₆N₆O₆)

BPN: Boron - potassium nitrate (BKNO₃)

M&S: Modeling and Simulation SDT: Shock-to-Detonation Transition PMMA: Polymethyl-methacrylate (C₅O₂H₈)

CBT: Closed Bomb Test

KYP: Kim-Yoh-Park detonation model

JWL: Jones-Wilkins-Lee EOS

EOS: Equation of State

VISAR: Velocity Interferometer System for Any Reflector

FFT: Fast Fourier Transform

DSC: Differential Scanning Calorimetry

References

- 1. Kim, B., Kim, M. and Yoh, J.J., "Shock to detonation transition analysis using experiments and models," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 36, pp. 2699-2707, 2017.
- 2. Jang, S., Lee, H. and Oh, J., "Performance modeling of a pyrotechnically actuated pin puller," International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Vol. 15, No. 1, pp. 102-111, 2014.
- 3. 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.
- 4. 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.
- 5. 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.
- 6. 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.
- 7. Kim, B., Jang, S. and Yoh, J.J., "A full-scale hydrodynamic simulation of energetic compoenet system," Computers and Fluids, Vol. 156, pp. 368-383, 2017.
- 8. Kim, B., Park, J., Lee, K. and Yoh, J.J., "A reactive flow model for heavily aluminized cyclotrimethylenetrinitramine," Journal of Applied Physics, Vol. 116,

- 023512, 2014.
- 9. Lee, E.L., Hornig, H.C. and Kury, J.W., "Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products," UCRL-50422, TID-4500, 1968.
- 10. Steinberg, D.J., "Equation of State and Strength Properties of Selected Materials," UCRL-MA-106439, 1996.
- 11. Johnson, G and Cook, W., "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, No. 1, pp. 31-48, 1985.
- 12. Harvey, W., "Attenuation of Shock Waves in Copper and Stainless Steel," LA-10753-T, UC-34, 1986.
- 13. Segletes, S. and Walters, W., "On Theories of the Gruneisen Parameter," ARL-TR-1303, MD-21005-5066, 1997.
- 14. Kim, K. and Yoh, J.J., "A particle level-set based Eulerian method for multi-material detonation simulation of high explosive and metal confinements," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 34, pp. 2025 - 2033, 2103.
- 15. Kim, B., Yu, H. and Yoh, J.J., "Ignition sensitivity study of an energetic train configuration using experiments and simulation," Journal of Applied Physics, Vol. 123, 225901, 2018.
- 16. Yu, H., Kim, B., Jang, S., Kim, K. and Yoh, J.J., "Performance characterization of a miniaturized exploding foil initiator via modified VISAR interferometer and shock wave analysis," Journal of Applied Physics, Vol. 121, 215901, 2017.
- 17. Lee, H., "Ignition delay investigation in a pyrotechnic cartridge with loosely - packed propellant grains," In: 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE joint propulsion con ference & exhibit. AIAA 2009-5191; pp. 1-11, 2009.
- 18. Yoh, J., Kim, Y., Kim, B., Kim, M., Lee, K., Park, J., Yang, S. and Park, H., "Characterization of aluminized RDX for chemical propulsion," International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Vol. 16, No. 3, pp. 418-424, 2015.



김 보 훈 (bhkim@snu.ac.kr)

건국대학교 항공우주공학과 학사

2011 건국대학교 항공우주공학과 석사

2017 서울대학교 기계항공공학부 박사

2018~ California Institute of Technology, Aerospace Engineering, Post-doc.

관심분야: Physico-Chemical Hydrodynamics, Condensed Phase Energetics, Shock Dynamics



여 재 익 (jjyoh@snu.ac.kr)

1992 University of California, Berkeley, Mechanical Engineering, B.S.

1995 University of California, Los Angeles, Mechanical Engineering, M.S.

2001 University of Illinois, Urbana-Champaign, Theoretical & Applied Mechanics, Ph.D.

2005~ 서울대학교 기계항공공학부 교수

관심분야 : Highenergy Thermo-Fluid Engineering, Lasers in Bio + Plasma Spectroscopy