

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2016.20.3.063>

볼타입 분리볼트 분리 메커니즘의 수치해석 및 간략화 모델링

황대현^a · 이주호^a · 한재홍^{a,*} · 이용조^b · 김동진^c

Numerical Analysis and Simplified Mathematical Modeling of Separation Mechanism for the Ball-type Separation Bolt

Dae-Hyun Hwang^a · Juho Lee^a · Jae-Hung Han^{a,*} · Yeungjo Lee^b · Dongjin Kim^c

^aSchool of Mechanical and Aerospace Engineering, KAIST, Korea

^bThe 4th R&D Institute - 1st Directorate, Agency for Defense Development, Korea

^cEnergetic Materials & Pyrotechnics Department, Hanwha Corporation R&D Institute, Korea

*Corresponding author. E-mail: jaehunghan@kaist.ac.kr

ABSTRACT

The pyrotechnic separation devices are widely used in space systems and guided weapons during the launching and operations, however, they generate intensive pyroshock and fragments that can cause critical damages or the malfunction of electric devices onboard. There have been proposed many types of alternative devices to avoid pyro-induced problems since 1960's. A ball-type separation bolt is the one of alternative Pyrotechnic Mechanical Devices (PMD). In this study, the detail separation behavior of the ball-type separation bolt is analyzed using ANSYS AUTODYN. A simplified one-dimensional mathematical model, consisting of a combustion model and 5-stages of differential equation of motions, is also established to effectively describe the entire separation process.

초 록

파이로테크닉 분리장치는 우주시스템과 유도무기의 발사 혹은 임무 중에 다양하게 활용되나, 큰 파이로 충격과 파편을 발생시켜 구조와 전자장비에 치명적인 손상을 야기할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 1960년대부터 다양한 대체 작동기에 대한 연구와 개발이 수행되어왔다. 본 연구에서는 Pyrotechnic Mechanical Device (PMD) 중 하나인 볼 타입 분리볼트에 대해 ANSYS AUTODYN을 사용한 동적 분리거동 해석을 수행하였다. 그 결과를 바탕으로 5단계의 분리단계 모델링을 수행하였으며, 연소모델과 1-D로 단순화된 부품의 상호작용에 대한 연립방정식으로 구성된 수학적 모델을 설립하였다.

Key Words: Separation Bolt(분리 볼트), Pyrotechnic Separation Device(파이로 분리 장치), Behavior Analysis(거동 해석), ANSYS AUTODYN, Mathematical Model(수학적 모델)

Received 1 December 2015 / Revised 4 May 2016 / Accepted 9 May 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.]

1. 서 론

파이로테크닉 분리장치는 높은 에너지밀도, 짧

은 작동시간, 높은 신뢰성을 갖는 특성 때문에 우주발사체 시스템과 각종 유도무기의 발사 순간의 지지대 분리 혹은 발사 도중 단분리 및 작동기로서 널리 활용된다. 그 중 하나로 파이로 분리장치는 큰 하중에도 견디도록 설계되어야 하며 분리 실패 시 전 임무의 실패로 이어지기 때문에 분리안전계수를 높도록 설계하고 폭발의 특성상 큰 파이로 충격과 파편이 발생하여 구조나 전자장비에 손상을 야기할 수 있다[1,2].

이러한 문제를 해결하기 위해 60년대부터 다양한 Actuator를 활용한 저충격 분리장치들이 개발되어 왔으며 국내에서는 고폭약을 사용하지 않고 Initiator에서 발생하는 압력만으로 기계적 메커니즘을 동반한 분리가 이루어지도록 설계된 Pyrotechnic Mechanical Device (PMD)가 개발되어 사용되고 있다. 파이로테크닉을 적용한 분리장치는 작동시 밀폐상태이며 분리시간이 1 ms 내외로 매우 짧아 개발과정에서 설계된 분리장치의 내부 메커니즘을 확인하기 어려운 문제가 있다. 또한 각 부품의 물성치 뿐 아니라 화약량, 마찰계수, O-ring 등 많은 변수의 영향에 따라 분리거동의 변화를 살펴보기 위해 수많은 설계 변경, 제작과 실험과정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이응조 등[3]이 개발한 볼 타입 분리볼트에 대해 상용 Explicit 수치해석 소프트웨어인 ANSYS사의 AUTODYN v15.0.7을 활용하여 내부 부품의 동적 분리거동을 확인하고, 파악된 분리거동을 1-D로 단순화시킨 수학적 모델링을 통해 앞으로 개발 될 PMD방식 분리장치의 개발 환경을 마련하였다. Lee, J. 등[4,5]은 Hydrocodes 기반 수치 해석을 통해 Ridge-cut Explosive bolt의 분리 메커니즘을 파악하고 다양한 설계형상의 변화에 대한 연구를 수행한 바 있다. PMD 분리장치의 단순화 모델링에 대해 Gonthier, K. A. 등[6]은 NASA Standard initiator (NSI)를 사용한 Pyrotechnically Actuated Pin Puller에 대한 수학적 모델링을 수행하였다. Han, D. H. 등[7]은 파이로 Pin Puller에 대한 해석적 모델을 제시하여 연소실 압력과 핀 거동의 예측하고 실험 데이터와 비교, 검증하였다. 또한 해석 코드를 응용하여 연소 파라미터의 변화에 따른 압력

및 핀 거동에 대한 민감도를 계산하였다. Jang, S.-G. 등[8]은 0-D gas dynamics와 분리 저항력에 대한 실험결과를 적용하여 Pin Puller의 해석적 모델을 제시하고 분리시 발생 에너지와 분리에 필요한 에너지의 비교를 통해 분리 안전율을 계산하였으며 다양한 화약량에 대한 실험결과와의 비교를 통해 검증하였다.

2. 볼 타입 분리 볼트

볼 타입 분리볼트는 총 7개의 부품으로 구성되며 Fig. 1 과 같은 형태로 배치된다. 하우징의 우측 표면을 고정하게 되고 볼트가 인장력을 받을 때 3개의 볼이 볼트의 구멍과 하우징 사이에서 하중을 전달하며 고정한다. 착화기에 전기신호가 입력되어 내부 장약이 연소되면서 순간적으로 고압 Gas가 방출되고, 그 압력이 피스톤을 밀어내어 전단핀을 끊고 볼의 구속이 해제된다. 볼의 구속 해제 이후 피스톤 내부로 들어가게 되어 볼트가 인장력에 의해 빠져나가는 메커니즘으로 분리된다. 실험 결과 분리시간은 0.35~0.45 ms이고 순간 최대압력은 착화 직후 3500~4500 psi사이로 형성된다[3].

3. 동적 분리 거동 해석

3.1 해석 과정 및 설정

볼 타입 분리볼트의 동적 거동 해석은 AUTODYN으로 수행되었다.

해석에 앞서, 볼트에 걸리는 698kgf의 pre load에 대한 정적해석을 수행한 후 explicit setup에서 정적해석결과를 import하고 피스톤 후면에 실험결과와의 압력 history를 입력한다.

Lee, Y. 등[3]은 볼타입 분리볼트에 대해 2번의 동적분리 실험을 수행하였고, 실험에서 로드 셀을 활용하여 bolt axial load를 측정하고 pick-up hole을 통해 연소압력을 측정하였다. 본 연구에서는 가장 높은 압력값 4622 psi를 보이는 Fig. 2의 결과를 기준으로 모델링 및 해석을 수

행하였다. 모든 구성 부품 사이의 마찰계수는 0.1로 가정하였으며, 분리시간이 0.5 ms 이내임을 고려하여 해석구간은 착화순간을 기준으로 1 ms까지 수행되었다. Fig. 3과 같이 mesh는 explicit 해석에 적합하도록 생성하였으며, 볼 타입 분리볼트에 적용된 재료의 물성치는 Table 1과 같다.

3.2 해석 결과

Fig. 4는 분리과정의 주요 시점을 순차적으로 나타낸 것이다. 착화이후 0.06 ms에 하우징 측면의 hole에 끼워 맞춤으로 조립된 Al-7075-T6 전단핀이 끊어지며 피스톤이 이동하기 시작한다. 전단핀의 물성치는 전단강도 331 MPa를 적용하였다[9]. 피스톤이 앞으로 이동하면서 약 3 mm 이동시 볼과의 접촉이 떨어져 볼의 구속이 해제된다. 피스톤 가운데의 공간으로 3개의 볼이 떨어지고 이 과정에서 동시에 볼트가 인장력에 의해 당겨진다.

0.39 ms에 피스톤과 볼트의 충돌이 발생하며 비탄성 충돌을 통해 피스톤은 급격히 감속되고 동시에 볼트는 급가속된다. 하우징이 접촉을 유

Table 1. Material properties used in ball-type separation bolt.

	Housing, Piston	Bolt	Ball
Material	SUS420	SUS630	Super alloy 90WC-10Co
Density (kg/m ³)	7750	7780	14500
Elasticity (GPa)	183.87	183.37	620
Yield Stress(MPa)	1765	1334	-
Tensile stress (MPa)	1804	1412	-
Compressive ultimate stress	-	-	5170

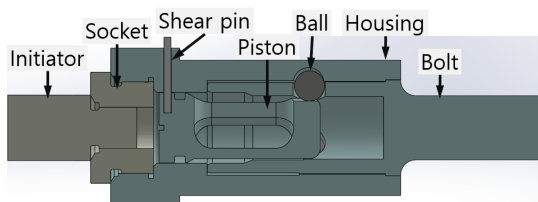


Fig. 1 Section view of Ball type separation bolt.

지한다고 가정하면 볼의 중심점이 하우징 내부 홈의 선단을 지나는 순간 기하학적으로 하우징에 대해 축 방향 하중을 전달하지 못하므로 이 순간을 분리시점으로 정의하면 0.44 ms에 분리가 완료됨을 확인하였다.

4. 수학적 모델링

4.1 분리 단계 모델링

AUTODYN 해석결과를 바탕으로 분리과정을 단순화 및 모델링하기 위한 구간을 Fig. 5와 같이 설정하였다. Stage 1은 착화 직후부터 전단핀이 끊어지기 전 연소 챔버 내부 압력이 상승하는 단계이다. Stage 2는 전단핀이 끊어지고 난후 피스톤이 이동을 시작하여 3 mm 진행하는 순간까지이며 이때 볼과의 접촉이 분리된다.

Stage 3은 볼의 구속이 해제된 직후 피스톤 내부로 이동하는 단계이며 볼의 이동과 동시에 볼트도 이동을 시작하므로 피스톤이 볼트로 접근

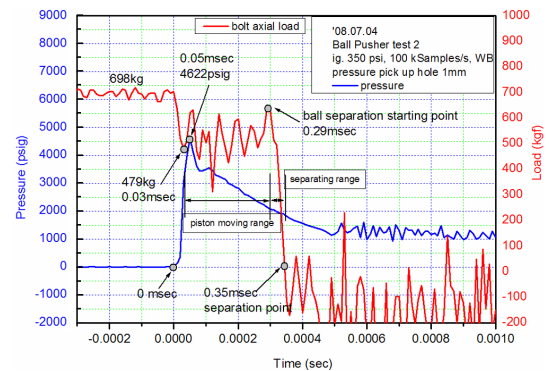


Fig. 2 Results of dynamic separation test [3].

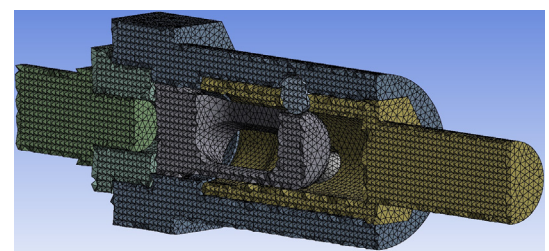


Fig. 3 Mesh configuration for Explicit Analysis.

하여 충돌하는 순간까지이다. Stage 4는 충돌 직후 피스톤과 볼트가 운동량을 교환하고 볼트가 계속 진행하면서 볼의 중심이 하우징 내부 홈의 선단을 지나는 시점까지로서 이때를 분리순간으로 정의한다. 마지막으로 Stage 5는 분리 이후 피스톤, 볼트 그리고 볼이 모두 가속되는 구간이다.

4.2 착화기 연소 모델

Zirconium-Potassium Perchlorate(ZPP)를 주장

약으로 사용하는 착화기 PC-300의 연소 압력 모델링을 위해 가장 널리 사용되는 Saint Robert-Vieille law를 활용하였다. 따라서 ZPP particle의 연소와 생성되는 gas의 질량유량을 표현하는 관계식은 아래 Eq. 1~Eq. 3과 같다[6].

$$\dot{m}_{gen} = \eta_g \rho_{zpp} A_b r_b \quad (1)$$

$$\frac{dc}{dt} = r_b = aP^n \quad (2)$$

$$A_b = 4\pi N(R_{zpp} - e)^2 \quad (3)$$

\dot{m}_{gen} 은 ZPP 입자가 연소되면서 생성되는 gas 질량유량을 의미하며 총 입자 넓이 A_b 표면의

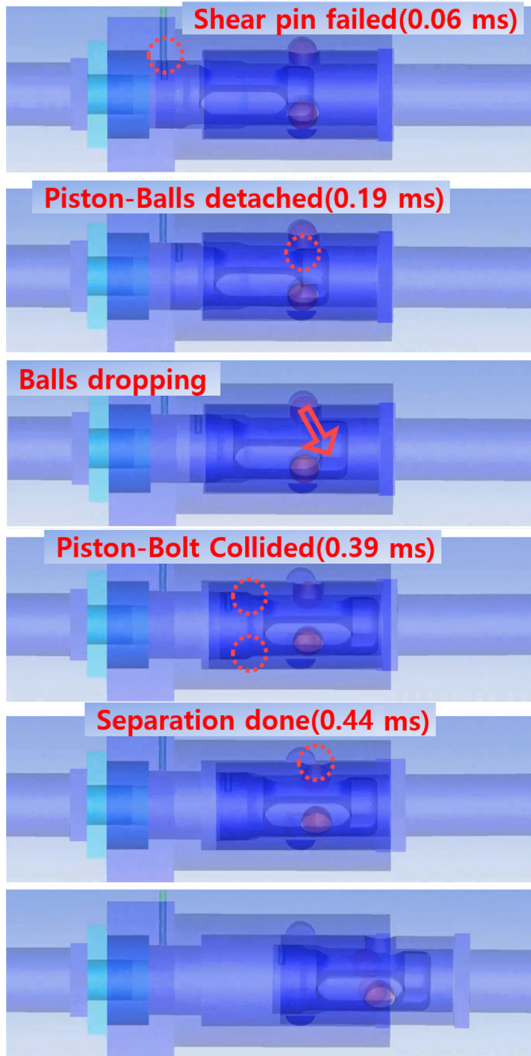


Fig. 4 The separation procedure of ball type separation bolt (AUTODYN analysis results).



Fig. 5 Stage modeling of separation behavior based on AUTODYN analysis results.

burn rate r_b , ZPP 입자의 밀도 ρ_{zpp} , 그리고 생성물 중 gas의 비율을 뜻하는 η_g 의 곱으로 표현된다. 여기서 e 는 ZPP 입자의 표면에서부터 연소가 진행되면서 줄어든 반지름을 의미하고, Saint Robert-Vieille law에 따라 burn rate r_b 는 비례상수 a 와 압력 P 의 n 승으로 나타난다.

연소반응에 따른 연소챔버 내부 기체에 관한 관계식은 다음과 같다[8]. 실제 연소속도는 0.3 ms 이내에 종료되어 열전도와 대류, 복사 손실은 무시할 수 있다. 따라서 Eq. 5, Eq. 7에서 $\dot{Q}_{loss} \approx 0$ 으로 가정하였다. 그리고 m_p, x_p, v_p 는 각각 피스톤의 질량, 위치와 속도를, m_{bt}, x_{bt}, v_{bt} 는 볼트의 질량, 위치와 속도를 의미한다.

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \dot{m}_{gen} \quad (4)$$

$$\frac{d(\rho V c_p T)}{dt} = \eta_p \dot{m}_{gen} c_p T_f - P A_p v_p - \dot{Q}_{loss} \quad (5)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\dot{m}_{gen} - \rho \dot{V}}{V} \quad (6)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\eta_p \dot{m}_{gen} R \gamma T_f - (\gamma - 1)(P A_p v_p + \dot{Q}_{loss}) - P \dot{V}}{V} \quad (7)$$

$$\dot{V} = A_b v_b + A_p v_p \quad (8)$$

ρ 와 V 는 각각 연소챔버 내부 밀도와 부피를 의미한다. 연소 챔버 내부 질량 변화는 연소 생성물에서 발생하는 gas의 질량과 같으므로 Eq. 4와 같이 나타낼 수 있다. 연소 챔버 내부의 에너지평형 관계식은 Eq. 5와 같으며, 이상기체방정식을 연립하여 Eq. 4와 Eq. 5를 다시 정리하면 Eq. 6, Eq. 7과 같다. 내부 부피의 변화율은 피스톤의 단면적과 피스톤의 진행속도의 곱으로 표현되는 부피변화율 $A_p v_p$ 과 ZPP 입자의 표면 A_b 가 r_b 의 속도로 타들어가며 그만큼 증가하는 부피변화율 $A_b r_b$ 의 합과 같으므로 Eq. 8과 같이 표현할 수 있다.

4.3 분리 메커니즘 운동방정식

운동방정식은 각 부품에 가해지는 힘과 저항력 그리고 각 부품 사이의 접촉 상호작용을 고려하여 AUTODYN 해석결과로부터 구분된 stage별로 각각 다른 운동방정식으로 구성된다. 우선 착화 직후인 stage 1에서는 Eq. 9, Eq. 10과 같이 피스톤과 볼트의 속도와 가속도는 구속상태에 있으므로 0이며 피스톤에 작용하는 압력 힘이 전단핀의 강도에 도달하는 순간에 계산이 종료되어 stage 2로 이어서 계산한다. 아래의 Eq. 11에서 전단핀은 Al-7075-T6를 사용하므로 전단강도 ($\tau_y = 331$ MPa)[9]와 핀의 단면적 A_{pin} 으로부터 분리에 저항하는 전단강도 $F_{sh} = 509.5$ N으로 정의하였다.

$$\dot{v}_p = 0, \quad \dot{x}_p = 0 \quad (9)$$

$$\dot{v}_{bt} = 0, \quad \dot{x}_{bt} = 0 \quad (10)$$

$$A_p P < F_{sh} (= \tau_y A_{pin}) \quad (11)$$

Stage 2에서는 전단핀이 끊어지고 피스톤이 움직이기 시작하나 볼트와 볼은 아직 구속된 상태이다. 따라서 아래의 Eq. 12~Eq. 15와 같이 나타낼 수 있다. Eq. 12에서 가속도는 피스톤의 진행방향 압력힘($F_p = A_p P$)에서 O-ring 마찰력과 볼의 접촉 마찰력을 차감하여 계산하였다. O-ring 마찰력 $F_{f,or}$ 은 Eq. 14와 같이 압력에 대한 함수로 주어진다[10]. Eq. 15에 주어진 볼 마찰력 $F_{f,ba}$ 은 정적 구조 해석 결과를 바탕으로 얻어진 볼과 피스톤 사이의 수직하중에 마찰계수를 곱한 상수 값으로 입력하였다.

$$\dot{v}_p = \frac{F_p - F_{f,or} - F_{f,ba}}{m_p}, \quad \dot{x}_p = v_p \quad (12)$$

$$\dot{v}_{bt} = 0, \quad \dot{x}_{bt} = 0 \quad (13)$$

$$F_{f,or} = 0.0026 P^{0.556} + 22.184 \quad (14)$$

$$F_{f,ba} = 837 N \quad (15)$$

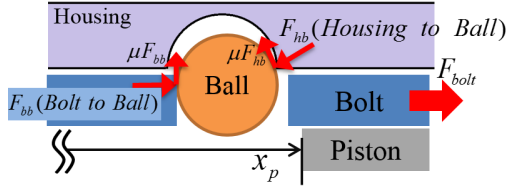


Fig. 6 Configuration of the ball separation.

stage 3은 볼이 분리되는 과정으로, 이때 피스톤의 거동은 Eq. 16과 같으며 짧은 충돌시간 동안 정의되는 충돌력 F_{imp} 를 받는다. AUTODYN 동적 거동 해석 결과로부터 볼의 분리 거동은 볼트와 붙어서 이동하므로 볼트의 속도, 가속도를 볼의 거동으로 설명할 수 있다. Eq. 17은 Fig. 6에 나타난 볼의 분리거동을 단순화하여 볼과 접촉하는 볼트의 가속도와 속도를 모사한다. 볼트는 분리 과정에서 볼트에 작용하는 압력힘 $A_{bt}P$, 볼트에 걸린 인장력 F_{pre} 그리고 피스톤으로부터 받는 충돌력 F_{imp} 를 받게 된다. 볼은 하우징과 볼트와 접촉을 항상 유지한다고 가정하였을 때 볼트의 가속에 대응하는 질량은 Eq. 17에서 가속도의 분모 항과 같이 볼트의 질량과 3개 볼의 질량 $3m_{ba}$ 의 기하관계를 적용한 등가 질량의 합으로 근사할 수 있다.

$$\dot{v}_p = \frac{F_p - F_{f,or} - F_{imp}}{m_p}, \quad \dot{x}_p = v_p \quad (16)$$

$$\dot{v}_{bt} = \frac{A_{bt}P + F_{pre} + F_{imp}}{m_{bt} + \frac{3m_{ba}}{\sin\theta[\sin\theta - \mu(1 + \cos\theta)]}}, \quad \dot{x}_{bt} = v_{bt} \quad (17)$$

볼의 분리이후 분리력에 저항하는 힘은 모두 사라지며 피스톤과 볼트 그리고 3개의 볼은 압력의 힘을 받아 가속된다. 따라서 stage 5는 Eq. 18, 19와 같이 간단한 식으로 모사할 수 있다.

$$\dot{v}_p = \frac{F_p}{m_p}, \quad \dot{x}_p = v_p \quad (18)$$

$$\dot{v}_{bt} = \frac{A_{bt}P + F_{pre}}{m_{bt}}, \quad \dot{x}_{bt} = v_{bt} \quad (19)$$

Table 2. Parameters for analytical model [8].

Parameter	Value
a (burning rate constant)	0.741 in/s
n (burning rate exponent)	0.182 in/s/psi ⁿ
η_g (fraction of gases in product)	0.43
η_p (non-ideal gas correction factor)	0.68
γ (specific heat ratio)	1.1038
T_f (gas temperature)	4810 K
R_{zpp} (ZPP grain radius)	24 μm
ρ_{zpp} (ZPP grain density)	2440 kg/m^3

본 모델의 연소모델에 사용된 Parameter를 Table 2에 표기하였다.

4.4 해석 결과

각 stage별로 정의된 운동방정식과 연소 모델로 구성된 연립 미분방정식에 대한 해석 결과는 다음과 같다. Fig. 7에서 볼트의 진행거리에 대해서 AUTODYN 해석 결과와 수학적 모델이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8의 경우 AUTODYN 해석 결과에서 0.2 ms까지 진동하는 거동은 해석에 적용한 geometry에 존재하는 초기 유격으로 인해 볼트에 걸리는 인장력이 가해져 발생한다. Fig. 9와 Fig. 10에서 피스톤의 거동은 해석 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 피스톤과 볼트의 거동에 대해 해석과 수학적 모델이 0.6 ms에서 차이를 보이는 것은, 해석에서는 피스톤, 볼트 그리고 초경합금 볼이 분리이후 가속되는 도중에 피스톤의 속도보다 볼트의 가속이 큰 상태이므로 피스톤 내부에서 볼과의 상호작용으로 2차 충돌이 발생하기 때문이다. 이 현상은 분리 완료 이후 거동이므로 수학적 모델에서는 고려하지 않았다.

Fig. 11의 압력 history는 Fig. 2의 실험결과와 비교하여 압력 감소율이 실험보다 빠르며 최대 압력은 높은 값을 얻었다. 이는 다양한 부피, 압력 그리고 화약량 등 여러 변수에 대해 연소 변

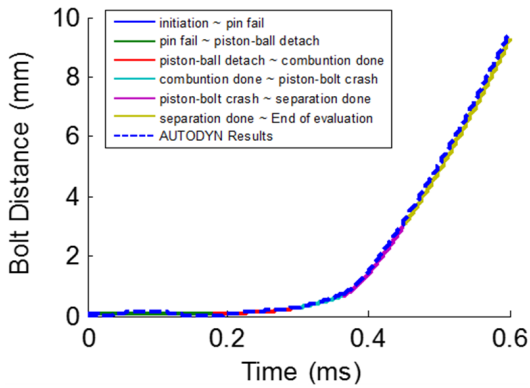


Fig. 7 Bolt distance history result of mathematical model analysis.

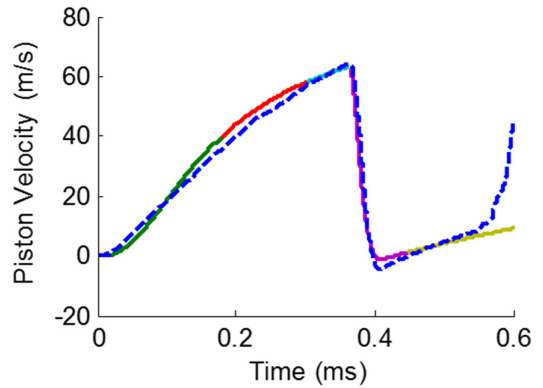


Fig. 10 Piston velocity history result of mathematical model analysis.

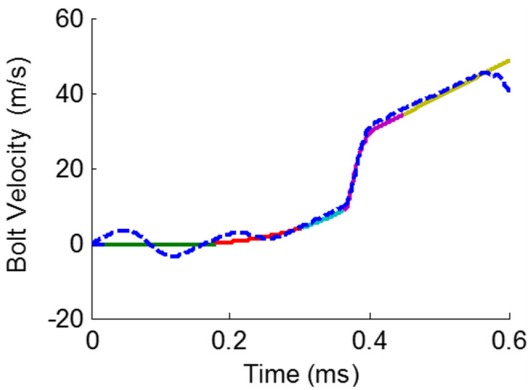


Fig. 8 Bolt Velocity history result of mathematical model analysis.

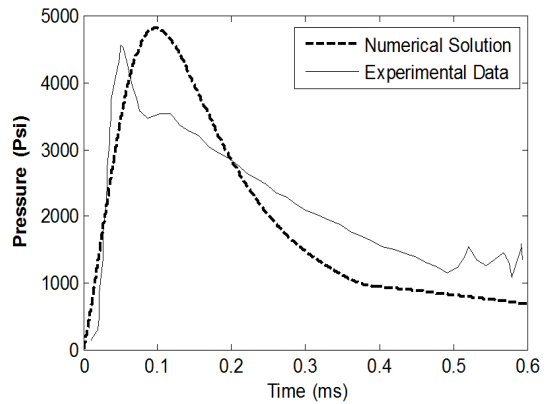


Fig. 11 Pressure history result of mathematical model analysis.

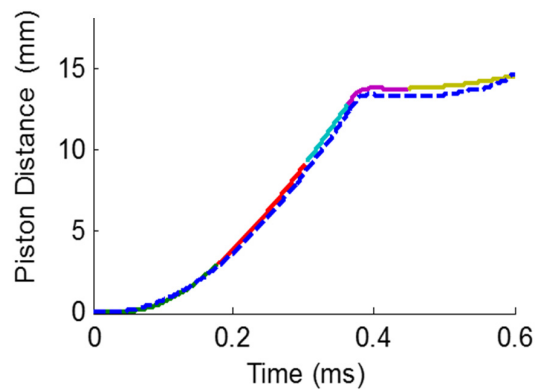


Fig. 9 Piston distance history result of mathematical model analysis.

수가 달라질 수 있는 점을 고려하지 않았기 때

문으로 생각된다. 실제 연소 시 고려해야 하는 연소 물성치의 압력에 대한 변화, 착화기 내부 공간의 기타 충전재의 고려 등 ZPP 연소의 변수에 대한 추가적인 연구가 진행되면 보다 정확한 압력 예측이 가능할 것이다.

5. 결 론

파이로테크닉 기반의 분리장치는 고 신뢰성과 높은 분리안전률을 갖지만 실험적으로 작동 메커니즘을 확인하기 어렵다는 한계가 있다. 본 연구에서는 저충격 파이로 분리장치 중 하나인 볼타입 분리볼트에 대한 실험 결과를 바탕으로

AUTODYN 기반의 수치 해석을 통해 세부적인 동적 분리거동을 확인하였다. 해석과 실험 결과의 분리시간을 비교하여 거동 해석을 검증하였다. 해석으로 확인된 동적 분리거동을 바탕으로 전체 분리 거동을 5개의 stage로 구분하고, 착화기에 대한 연소모델과 각 stage에 대한 운동방정식으로 구성된 1-D 단순화 수학적 모델을 수립함으로써 설계 단계에서 여러 변수의 변화에 대해 분리 거동을 예측 할 수 있는 환경을 마련하였다. 수학적 모델의 해석 결과를 AUTODYN의 동적 거동 해석 결과의 피스톤과 볼트 거동과 비교하여 유사함을 확인하였다.

후 기

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

References

1. Piersol, A. G. and Paez, T. L., *Harris' Shock and Vibration Handbook*, 6th ed., McGraw-Hill., N.Y., pp. 28.1-28.19 2010.
2. Brauer, K. O., *Handbook of Pyrotechnics*, Chemical Publishing C.O., U.S.A., pp. 81-117, 1974.
3. Lee, Y., Koo, S., Chang, H. B. and Lee, B.E., "A Study of Separation Mechanism in Ball Type Separated Bolt," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 62-67, 2011.
4. Lee, J., Han, J.H., Lee, Y. and Lee, H., "Separation characteristics study of ridge-cut explosive bolts," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 39, pp. 153-168, 2014.
5. Lee, J., Han, J.H., Lee, Y. and Lee, H., "A Parametric Study of Ridge-cut Explosive Bolts using Hydrocodes," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 16, No. 1, pp. 50-63, 2015.
6. Gonthier, K. A. and Powers, J. M., "Formulation, Predictions, and Sensitivity Analysis of a Pyrotechnically Actuated Pin Puller Model," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 10, No. 4, pp. 501-507, 1994.
7. Han, D. H., Sung, H.G., Jang, S.G. and Lee, H.N., "An Analytical Model and Sensitivity Analysis of Pyrotechnically Actuated Device," *Proceeding of the 2013 Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, Jeju island, Korea, pp. 322-327, 2013.
8. Jang, S.G., Lee, H.N. and Oh, J.Y., "Performance Modeling of a Pyrotechnically Actuated Pin Puller", *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 102-111, 2014.
9. ASM International Handbook Committee, *ASM Handbook Volume 02: Properties & Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 10th ed., ASM International., 1990
10. *Parker O-Ring Handbook*, 2001 ed., Parker Hannifin Corporation., C.L.V., 2001.