

강내탄도 내 차압 감소를 위한 추진제 위치 연구

장진성* · 성형건* · 노태성**† · 최동환***

Study on the Propellant Position for the Decrease of the Differential Pressure in the Interior Ballistics of a Gun Propulsion System

Jin-Sung Jang* · Hyung-Gun Sung* · Tae-Seong Roh**† · Dong-Whan Choi***

ABSTRACT

The position effect of the solid propellant in the combustion chamber on the decrease of the differential pressure has been investigated using the IBcode. Generally the metallic cartridge or CCC (combustible cartridge case) are used to load the propellant of the gun propulsion system. The position of the cartridge(propellant) is, therefore, a major factor for the interior ballistics in case the combustion chamber is larger than the cartridge. In this study, three different positions in the empty space of the chamber have been considered. As results, the case of the propellant located in the region near the base and breech has shown that the negative differential pressure and the difference between the breech pressure and the base pressure are much higher than those of the case of the propellant located in the center of the chamber. The case of the propellant in the center of the chamber is, therefore, more profitable to improve the performance of the interior ballistics.

초 록

IBcode를 사용하여 강내 차압감소를 위한 추진제 위치 연구를 수행하였다. 보통 화포의 추진제는 금속재질의 탄피나 소진탄피에 장전된다. 따라서 약실이 탄피보다 크다면 탄피(추진제)의 위치가 강내탄도 성능의 주요 인자가 된다. 본 연구에서는 약실 내 빈 공간이 발생하였을 경우를 고려하여 연구를 수행하였다. 약실 내 추진제 위치를 3가지로 변형하여 연구를 수행하였고, 추진제가 포미(Breech)나 탄저(Base)에 위치하였을 경우 마이너스 차압이 발생하였으며 포미 압력과 탄저 압력의 차가 추진제를 약실 가운데에 위치하였을 경우에 비해 증가함을 확인했다. 따라서 약실 가운데에 추진제를 위치시키는 것이 강내탄도 성능 향상에 유리하다는 결론을 내릴 수 있었다.

Key Words: Interior Ballistics(강내탄도), Propellant Position(추진제 위치), NDP(Negative Differential Pressure)(마이너스 차압)

접수일 2011. 4. 28, 수정완료일 2011. 12. 30, 게재확정일 2012. 1. 6

* 정희원, 인하대학교 대학원 항공우주공학과

** 종신회원, 인하대학교 항공우주공학과

*** 정희원, 인하대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: tsroh@inha.ac.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2011년도 춘계학술대회(2011. 4. 28-29, 현대로템(주) 기술연구소) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

탄약의 설계, 새로운 화포 추진제의 개발, 또는 화포나 포신의 설계를 위해서는 체계 특성상 실험적 연구가 필요하다. 그러나 추진제나 화포

의 특성상 실험에 의한 연구에 한계가 있으므로 전산해석을 통한 다차원 다상 유동의 강내탄도 (Interior Ballistics) 연구가 병행되고 있다[1].

대구경 화포의 경우 과립형 추진제 입자를 금속재질의 탄피나 연소가 되는 소진탄피에 채워 화포의 약실에 장전시킨다[2]. 하지만 실제로 화포를 운영할 시, 때때로 탄피의 크기보다 약실의 크기가 큰 경우가 발생하며 이 경우에는 약실 내 탄피(추진제)의 위치가 강내탄도의 성능에 영향을 미치는 주요인자가 된다. 기존의 무차원 해석 코드는 약실 내 추진제의 위치에 대한 묘사가 불가능 하며, 장진성 등이 1차원 해석 코드를 이용하여 추진제 위치에 따른 강내탄도 성능해석을 수행한 바가 있으나 강내 차압 감소 방안을 제시하지는 못하였다[3]. 이에 본 연구에서는 약실 내 추진제의 위치를 변경해 가며 강내탄도 성능해석을 수행하였으며, 강내탄도 내 차압을 감소시켜 강내탄도 성능향상에 적합한 약실 내 추진제 위치를 제시하였다.

2. 강 내 탄 도

강내탄도는 화포의 약실 내에서 추진제가 점화제에 의해 연소되고 생성된 연소가스의 압력에 의해 탄자가 가속되어 포구를 이탈하는 일련의 과정으로, Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다[4].

2.1 강내탄도 지배방정식

강내탄도의 추진제 연소현상은 기상-고상의 이상유동으로 추진제 연소가스는 기상, 추진제는 고상으로 구분된다. 이상유동을 해석하기 위해 기상은 Eulerian 좌표계를 이용하고 고상은

Lagrangian 좌표계를 이용하는 Eulerian - Lagrangian 접근법을 사용하였다[4].

기상의 지배방정식은 기상이 차지하는 부피를 고려하기 위해 전체 부피에서 기상이 차지하는 비율인 기공률 α 를 도입한다. 강내탄도의 경우 Euler 방정식에 기공률을 도입한 지배방정식을 사용하며, 1차원 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식은 다음과 같다[1].

$$\frac{\partial(\alpha\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha\rho u)}{\partial x} = \dot{m} + \dot{m}_{ig} \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\alpha\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha\rho uu)}{\partial x} = -\alpha \frac{\partial p}{\partial x} + \dot{m}u_p \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\alpha E)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u E)}{\partial x} = -\frac{\partial\alpha pu}{\partial x} - fu_p + \dot{m}_{ig}e_{ig} + \dot{m}\left(e_p + \frac{p}{\rho_p} + \frac{u^2}{2}\right) - E_{loss} \tag{3}$$

여기서 $E = \rho(e + u^2/2)$ 이고, 아래첨자 p 는 고상인 추진제, ig 는 점화제를 의미한다. f 는 고상과 기상에 의해 발생하는 항력이며, E_{loss} 는 강내탄도의 에너지 전달 및 손실이다.

고상의 지배방정식은 기상과 고상에서 발생하는 항력에 의해 계산되며 이를 위해 관내 고체 입자에 의한 압력 손실을 측정하여 얻은 실험식인 Ergun의 압력 손실 식을 사용한다. 이 식을 추진제의 가속도식으로 정리하면 Eq. 4와 같다 [5].

$$\frac{Du_p}{Dt_p} = \frac{1}{\rho_p} \left\{ 150 \frac{\mu_f(1-\alpha)}{\alpha d_p^2} + 1.75 \frac{\rho_f |u_f - u_p|}{d_p} \right\} \times (u_f - u_p) \tag{4}$$

여기서 u_f 는 유동의 속도, u_p 는 추진제의 속도를 의미하며 ρ_p 및 d_p 는 각각 고체추진제의 밀도 및 반지름을 의미한다.

3. 전 산 해 석

3.1 유동장 전산해석 기법

강내탄도 내의 유동장의 속도는 정지 상태에

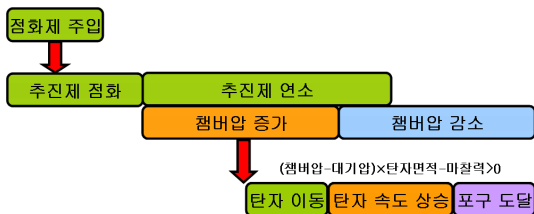


Fig. 1 Diagram of Interior Ballistics

서부터 최대 수 천 m/s 까지 증가하므로 이를 해석하기 위해 모든 속도 영역을 해석할 수 있는 압축성 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked) 알고리즘을 사용하여 1차원 강내탄도 해석 코드인 IBcode를 개발하였으며 본 연구를 위해 수정하였다. 또한 공간 이산화를 위해 3차 정확도와 TVD 특성을 가진 SMART 기법[6]을 사용하여 수렴 안정성을 높였다. 해석 평면에서 탄자는 왼쪽에서 오른쪽으로 이동한다고 가정하였으므로, 포미에 해당하는 왼쪽의 경계조건은 벽면조건을 사용하였으며 탄자의 이동에 의한 이동경계면은 탄자의 이동에 따라 새롭게 격자를 생성하는 기법인 Ghost Cell Extrapolation 기법[7]을 사용하여 계산하였다.

해석 코드의 검증에 위해 기존의 연구에서 주로 사용되는 무차원 강내탄도 해석 코드인

IBHVG2를 이용하였다[8].

Figure 2는 동일한 초기조건에 대한 각 해석 코드의 강내 평균압력이며 해석 결과 2% 이내의 오차를 보이는 것을 확인하였다. 또한 추가적으로 추진제 질량 및 형상에 따라 검증을 수행하였으며 검증결과 최대 2.5% 이내의 오차를 보임을 확인하였으므로 IBcode에 대한 신뢰성이 확보되었다고 판단하였다. 자세한 검증 자료는 본 논문에 표시하지 않았으며 대신 참고문헌을 표시하였다[4].

3.2 약실 내 추진제 위치 모델링

Figure 3에서 나타나듯이 기존 연구에서는 약실 내에 추진제가 포미(Breech)에서 탄저(Base)까지 균일하게 분포되어있다고 가정하였으나 실제로 화포를 운용할 시에는 때때로 약실의 크기와 탄피(추진제)의 크기가 동일하지 않은 경우가 발생한다. 이 경우 약실에 탄피(추진제)를 위치시킬 수 있는 방법은 다음과 같이 3가지로 나눌 수 있다. Fig. 3의 해석 Case 1과 같이 추진제를 포미(Breech) 쪽에 위치시켜 탄저(Base) 쪽에 빈 공간을 생성시키는 경우와 반대로 해석 Case 3과 같이 추진제를 탄저 쪽에 위치시켜 포미 쪽에 빈 공간을 생성시키는 경우, 마지막으로 해석 Case 2와 같이 추진제를 약실 가운데 위치시켜 포미와 탄저 쪽 양쪽에 빈 공간을 생성시키는 방법이다. 이에 본 연구에서는 언급한 3가지의 경우에 대한 강내탄도 성능해석 및 차압비교 연구를 수행하였다. 빈 공간의 크기는 전체 약실크기의 30%의 크기로 동일하며 추진제가 약실 가운데 위치하였을 경우에는 포미와 탄저 쪽에 각 전체 약실크기의 15% 크기의 빈 공간을 생성하였다. 빈 공간의 크기에 따른 강내탄도 성능해석은 본 연구의 주목적이 아니므로 성능해석을 수행하지는 않았으나 대신 참고문헌을 표시하였다 [3].

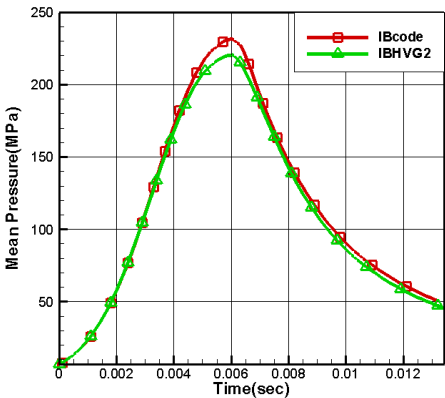


Fig. 2 Mean Pressure of IBcode & IBHVG2

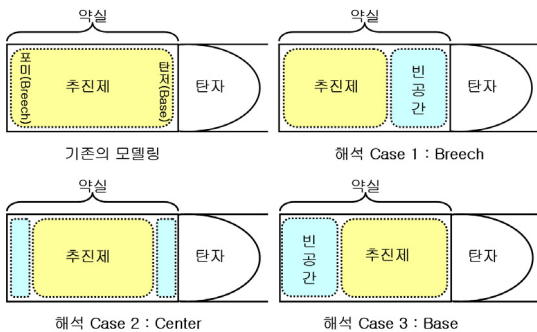


Fig. 3 Analysis Cases

3.3 해석 초기조건

해석에 사용된 초기조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Initial Condition of Analysis

| | |
|-----------------------|--|
| 탄자 질량 | 30 (kg) |
| 추진제 질량 | 8.85 (kg) |
| 추진제 밀도 | 1569.45 (kg/m ³) |
| 추진제 Impetus | 911665.4 (J/kg) |
| 점화제 질량 | 0.099 (kg) |
| 점화제 Impetus | 912121.8 (J/kg) |
| 약실 체적 | 0.0188 (m ³) |
| 연소속도 지수상수(β) | 0.71 |
| 연소속도 상수(α_p) | 1.33858e-7 (Pa) ⁻ⁿ (m/s) |
| 연소가스 분자량 | 22.0 (kg/kmol) |
| 비열비 | 1.259 |
| 화염온도 | 2417 (K) |
| 포신길이 | 5 (m) |

4. 해석 결과

Figure 4는 해석 Case 별 시간에 따른 강내 평균압력이다. Case 1(Brech)의 압력의 상승이 Case 2(Center) 나 Case 3(Base)에 비해 약간 빠른 것을 제외하곤 최대 압력 및 압력 상승률이 거의 유사함을 확인할 수 있는데 이는 약실 내 동일한 양의 추진제가 사용됐었고 약실 및 탄자의 이동에 의해 확장된 강내 전체의 압력에 대해 평균을 구했기 때문이다.

하지만 강내 평균압력이 아닌 포미 압력의 경우에는 해석 Case에 따라 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 약실 내 빈 공간에 의해서 생성되는 압력과의 이동 때문이다. Case 1의 경우 추진제가 포미 쪽에 국부적으로 몰려있기 때문에 압력상승 또한 포미 쪽부터 국부적으로 발생하게 된다. 따라서 상승된 압력에 의해 압력파가 발생하고 이 압력파가 약실 내 빈공간인 탄저 쪽으로 이동을 하게 된다. 이로 인해 강내 압력이 선형적으로 상승되지 못하고 Fig. 5에 나타나듯이 압력 진동이 발생하게 된다. Case 3의 경우도 마찬가지로 이유로 압력진동이 발생하였으며 압력진동의 위상차가 Case 1과 반대인 것을 확

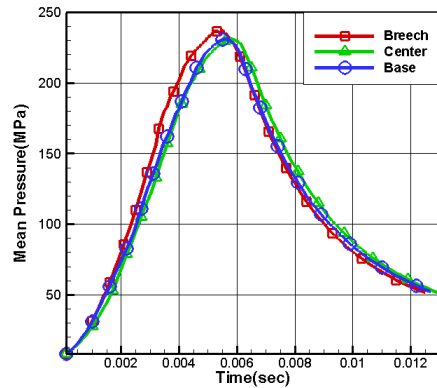


Fig. 4 Mean Pressure of Each Case

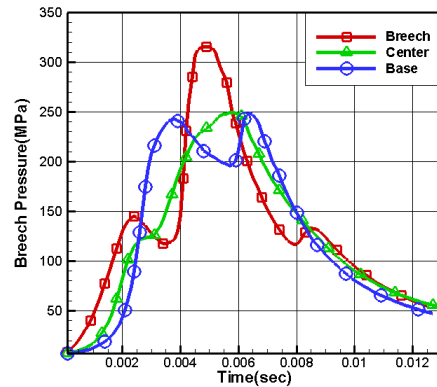


Fig. 5 Brech Pressure of Each Case

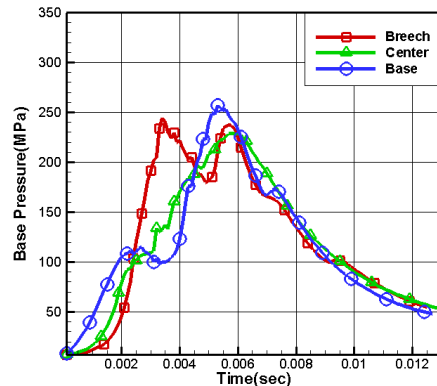


Fig. 6 Base Pressure of Each Case

인할 수 있는데 이는 초기에 추진제의 위치가 서로 반대여서 압력파가 서로 반대의 방향으로 진행되기 때문이다. Case 2의 경우에는 추진제가

약실 가운데에 위치하였기 때문에 압력상승 또한 약실 중심에서부터 발생한다. 마찬가지로 국부적인 압력상승에 의해 압력파가 발생되고 전파되지만 Case 1, 3과는 달리 압력파가 포미, 탄저 양쪽으로 동일하게 전파되고 포미와 탄저에서 반사된 압력파가 서로 상쇄된다. 이로 인해 Case 2에서는 압력진동이 Case 1, 3에 비해 감소한 것을 확인할 수 있다.

Figure 6은 Case 별 시간에 따른 탄저 압력으로, 포미 압력의 경우와 마찬가지로 Case 1, 3의 압력진동이 Case 2의 압력진동에 비해 증가함을 확인할 수 있으며 이는 앞서 포미 압력에서 언급한 이유에서이다.

Figure 7-9는 탄자의 이동에 따른 해석 Case 별 거리-시간 평면의 약실 및 포신을 포함한 강내 전체의 압력 분포곡선이다. x-축인 거리는 탄자의 이동거리를 의미하며 0 이하의 부분은 약실을 의미한다. Case 1 및 3의 경우, 강내 압력의 국부적인 상승과 이로 인해 발생한 압력파가 Case 1의 경우에는 탄저 쪽으로, Case 3의 경우에는 포미 쪽으로 각각 전파되는 것을 확인할 수 있으며 강내 압력진동이 발생하는 것 또한 확인할 수 있다. 하지만 Case 2의 경우에는 압력상승이 약실 중심에서 발생하여 압력파가 포미, 탄저 양쪽으로 균일하게 전파된 후 서로 상쇄되어 강내 압력진동이 발생하지 않고 선형적인 압력분포를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 Fig. 5-6을 통해서도 확인할 수 있는 결과이다.

Figure 10은 Case 별 시간에 따른 강내 차압(Differential Pressure)으로 이는 포미 압력과 탄저 압력의 차를 의미한다. 일반적으로 강내 차압 변동의 폭이 크거나 마이너스(-) 값을 가질 경우 화포의 내구성 및 성능에 부정적인 영향을 끼칠 가능성이 높아진다고 알려져 있다. 따라서 화포의 안전성 향상 및 성능 향상을 위해서는 차압의 변동을 줄이는 연구가 필요하다.

Figure 10에 나타나듯이 Case 1, 3의 경우, 강내 압력 진동에 의해 탄저 압력이 포미 압력보다 커지면서 마이너스 차압이 발생하는 것뿐만 아니라 차압 변동의 폭이 Case 2에 비해 상당히

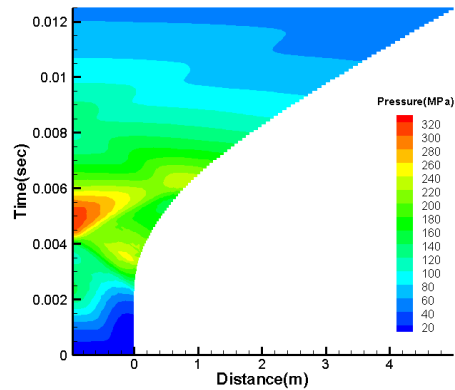


Fig. 7 Pressure Contour of Case 1(Breech)

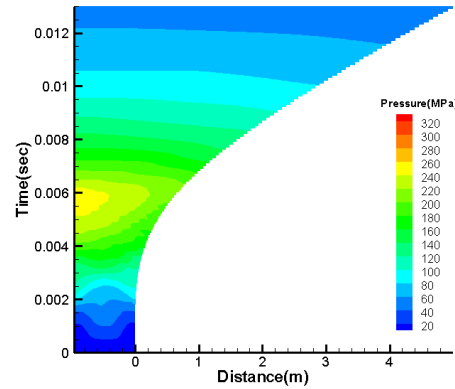


Fig. 8 Pressure Contour of Case 2(Center)

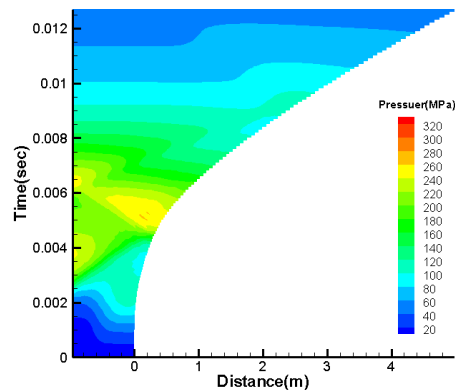


Fig. 9 Pressure Contour of Case 3(Base)

증가함을 확인할 수 있다. 강내 차압에 영향을 미치는 요소에는 약실 내 점화제 주입 위치[9]나 추진제의 연소율[10] 등의 여러 가지 요인이 있

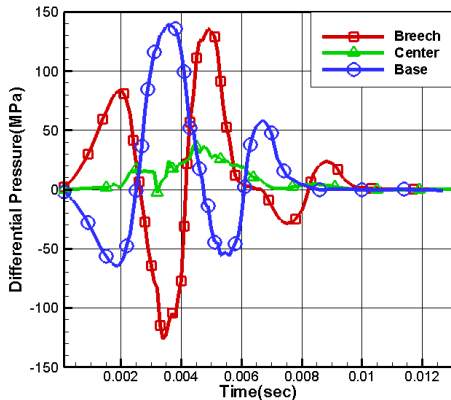


Fig. 10 Differential Pressure of Each Case

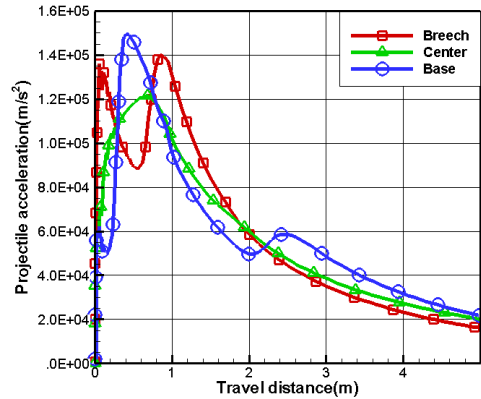


Fig. 11 Projectile Acceleration of Each Case

으나 본 연구에서는 약실 내 추진제의 위치만을 고려하였다. 따라서 본 연구에서 가정한 조건하에서는 약실에 탄피(추진제)를 장전할 시 포미 쪽이나 탄저 쪽에 위치시키는 것이 아니라 양쪽에 균일하게 빈 공간을 두고 위치시키는 것이 화포의 안전성 및 성능 향상에 유리하다는 결론을 내릴 수 있다.

활공탄과 같은 최신의 탄자들은 기존의 탄자와는 달리 비거리 증가나 정밀 타격을 위해 핀과 같은 제어장치가 장착된다. 따라서 화포에서 탄자가 발사될 시 탄자에 작용하는 가속도, 즉 탄자에 작용하는 힘이 탄자에 장착된 제어장치의 허용 용력보다 크게 작용하거나 혹은, 작용하는 힘의 변동이 증가하면 탄자의 안전성에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 높다.

Figure 11은 탄자 이동거리에 따른 탄자의 가속도이다. 탄자의 가속도는 탄자의 후단 압력 즉, 탄저 압력에 직접적인 영향을 받으므로 Case 1, 3과 같이 탄저 압력에 진동이 발생하게 되면 Fig. 11에 나타나듯이 탄자에 작용하는 가속도에도 진동이 발생한다. 하지만 Case 2의 경우 탄저 압력이 선형적 이므로 다른 Case에 비해 낮은 탄자 가속도와 선형적인 가속도 변화를 나타내고 있다. 따라서 탄자의 안전성 측면에서도 강내 차압의 경우와 같이 약실 내 추진제를 장전할 시 포미, 탄저 양쪽에 균일하게 빈 공간을 두고 위치시키는 것이 화포의 성능 향상에 유리하다는 결론을 다시 한 번 내릴 수 있다.

5. 결 론

강내탄도 내 차압 감소를 위한 약실 내 추진제 위치에 대한 전산해석을 수행하였다. 약실 내 빈 공간이 발생할 경우, 강내 압력의 국부적인 상승으로 인한 압력파가 생성되며 약실 내 빈 공간 쪽으로 전파가 됨을 확인했다. 압력파의 전파에 의해 강내 압력진동이 발생하나 추진제의 위치를 약실 가운데에 위치시켜 압력파의 전파를 탄저와 포미 쪽 양쪽으로 분산시켜 서로 상쇄시키는 경우에는 압력 진동이 감소함을 확인했다. 강내 차압의 경우, 추진제를 약실 가운데 위치시켜 압력진동을 감소시킨 결과 마이너스 차압이 거의 나타나지 않은 뿐만 아니라 추진제를 탄저 쪽이나 포미 쪽에 위치시킨 경우에 비해 낮은 차압 변화를 확인했다. 따라서 약실에 추진제를 장전할 시 탄저, 포미 양쪽에 균일하게 빈 공간을 두고 위치시키는 것이 화포의 안전성 및 성능 향상에 유리하다는 결론을 내릴 수 있었다. 또한 탄자의 안전성 측면에서도 추진제를 약실 가운데 위치시키는 것이 유리하다는 결론을 다시 한 번 내릴 수 있었다. 하지만 이는 점화제의 주입위치 및 추진제의 연소율 등의 다양한 발사 조건을 고려하지 않고 동일한 조건에서 추진제의 위치만을 고려한 연구 결과이므로 화포의 성능향상을 위해서는 다양한 조건에 대한 전산해석 및 실험을 통한 추가적인 성능해석이

필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소 지원에 의한 연구결과입니다. 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Paul S. Gough, "Initial Development of Core Module of Next Generation Interior Ballistic Model NGEN," ARL-CR-234, 1995
2. Ludwig Stiefel, Gun Propulsion Technology, AIAA, 1988
3. 장진성, 성형건, 이상복, 노태성, "약실 내 추진제 위치에 따른 강내탄도 성능해석," 한국전산유체공학회지, 제15권, 제4호, 2010, pp.17-24
4. 성형건, 장진성, 이상복, 최동환, 노태성, 장영재, "Eulerian-Lagrangian 접근법과 SMART scheme을 이용한 강내탄도 전산해석 코드 개발," 한국국사과학기술학회지, 제13권, 제3호, 2010, pp.349-357
5. Ergun, S., "Fluid Flow Through Packed Columns," Chem Eng Prog, Vol. 48, No. 2, 1952, pp.89-94
6. Gaskell, P. H. and Lua, A. K. C., "Curvature-Compensated Convective Transport : SMART, A New Boundedness Preserving Transport Algorithm," Interational Journal for Numirical Methods in Fluids, Vol. 8, 1988, pp.617-641
7. Chertock A. and Kurganov A., "A Simple Eulerian Finite-volume Method for Compressible Fluids in Domains with Moving Boundaries," Common Math Sci., Vol. 6 No. 3, 2008, pp.531-556
8. Ronald, D. A. and Kurt D. F., "IBHVG2-A User's Guide," Technical Report, BRL-TR-2829, 1987
9. 장진성, 성형건, 이상복, 노태성, 최동환, "점화제 주입에 따른 강내탄도 성능해석," 한국군사과학기술학회지, 제14권, 제1호, 2011, pp.22-29
10. 장진성, 성형건, 노태성, 최동환, "추진제 형상 및 배열에 따른 강내탄도 성능해석," 국방과학연구소 창설40주년 기념 종합학술대회, 2010, pp.351-354