

1차원 수치 해석을 통한 강내탄도 성능해석

Performance Analysis of Interior Ballistics using 1-D Numerical Method

장진성* 성형건* 노태성* 최동환*

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

Abstract

Performance analysis of the interior ballistics has been conducted using the 1-D numerical code called IBcode according to the various conditions such as length of ignition-gas injector, amount of ignition-gas, mass of projectile, and drag force of projectile. In case of the length of ignition-gas injector, the 25~100 % of the full-injector length has been considered as well as the mass & mass flow of the ignition-gas. The mass of the projectile 5~70 kg and its drag force of 0~69 MPa have been also considered. Variables such as breech & base pressure, negative differential pressure and muzzle velocity for the performance analysis have been sorted, too. Firing conditions for the optimal performance have been investigated through these variables.

Keywords : Interior Ballistics(강내탄도), Ignition-gas Injection(점화제 주입), Projectile Mass(탄자 질량), Projectile Drag (탄자 마찰력), Differential Pressure(차압)

1. 서론

새로운 추진제의 개발, 또는 화포나 포신의 설계를 위해서는 강내탄도(Interior Ballistics) 해석 기술이 필요하다. 그러나 추진제나 화포의 특성상 실험에 의한 강내탄도 연구에는 한계가 있으므로 전산해석을 통한 연구가 필요하다^[1~3].

이에 성형건 등은 Eulerian-Lagrangian 좌표계와 SMART scheme을 이용하여 1-D 이상유동 강내탄도 해석코드인 IBcode를 개발하였으며, 무차원 강내탄도 해석코드인 IBHVG2와의 결과비교를 통해 신뢰성을 검

증하였다^[4].

강내탄도 성능해석의 주요 변수로는 최대 Breech & Base 압력, 최대 마이너스 차압, Muzzle Velocity 등이 있으며, 점화제 주입 및 탄자 무게 등의 초기 조건에 따라 다양하게 변화함으로 최적의 강내탄도 성능을 위해서는 다양한 초기 조건에 대하여 성능해석이 수행되어야 한다. 하지만 실험을 통한 성능해석은 비용 및 시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 안전상으로 문제가 발생할 가능성이 높다. 이에 장진성 등은 IBcode를 이용하여 점화제 주입에 따른 강내탄도 성능해석을 수행하였으나 점화제 주입구의 길이에 따른 성능해석만을 수행하였으며 그 외의 초기 조건에 대한 성능해석은 이루어 지지 않았다^[5]. 따라서 본 연구에서는 AGARD gun의 초기 조건 및 H. Miura^[6] 등의 연구를 참고하여 점화제 주입구의 길이 변화 및 점화제 주입 조건에 따

† 2012년 1월 20일 접수~2012년 4월 20일 게재승인

* 인하대학교(Inha University) 항공우주공학과

책임저자 : 노태성(tsroh@inha.ac.kr)

른 성능해석을 수행하였으며, 다양한 탄자 무게 및 마찰력에 대해서도 성능해석을 수행하였다. 각 조건에 대하여 시간에 따른 강내 압력 및 차압, 탄자 속도 등을 그래프를 통해 나타내었으며, 최대 Breech 압력, 최대 마이너스 차압 및 Muzzle Velocity 등의 강내탄도 성능해석 변수를 정리하였고 이를 통해 최적의 강내탄도 성능을 위한 발사 조건을 고찰하였다.

2. 강내탄도

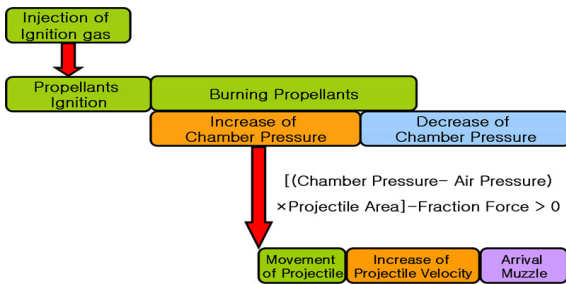


Fig. 1. Diagram of interior ballistics

강내탄도는 화포의 약실 내에서 추진제가 점화제에 의해 연소되고 생성된 연소가스의 압력에 의해 탄자가 가속되어 포구를 이탈하는 일련의 과정으로, Fig. 1과 같이 나타낼 수 있으며 다음과 같이 구체적으로 나눌 수 있다⁷⁾.

1. 점화제에 의한 추진제 점화
2. 추진제 연소에 의한 약실 압력 증가
3. 약실 압력에 의한 추진제 이동
4. 약실 압력에 의한 탄자 이동
5. 탄자의 포구 탈출

이와 같이 강내탄도 현상은 물리적으로 기상(Gas Phase)과 고상(Solid Phase)의 이상유동(Two Phase Flow)으로 복합적인 현상에 대한 해석을 위해서는 다차원-다상 유동을 해석할 수 있는 전산해석 코드가 필요하다.

가. 강내탄도의 지배방정식

강내탄도의 추진제 연소현상은 기상-고상의 이상유동으로 추진제 연소가스는 기상, 추진제는 고상으로 구분된다^{1)~3)}. 이상유동을 해석하기 위해 기상은 Eulerian 좌표계를 이용하고 고상은 Lagrangian 좌표계를 이용

하는 Eulerian-Lagrangian 접근법을 사용하였다.

이상유동을 해석하기 위해서는 기상의 지배방정식에 고상이 차지하는 부피를 고려해야 하며 이를 위해 전체부피에서 고상이 차지하는 비율을 나타내는 기공률 α 를 도입하였다. 강내탄도의 경우 Euler 방정식에 기공률을 도입한 지배방정식을 사용하며, 1차원 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식은 다음과 같다^{1)~3)}.

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

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

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

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 교체추진제에 의한 압력 손실을 측정하여 얻은 실험식인 Ergun의 압력 손실 식을 사용한다. 이 식을 추진제의 가속도식으로 정리하면 식 (4)와 같다⁸⁾.

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

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

나. 강내탄도의 구성방정식

추진제 연소율은 압력의 함수로 표현되며 식 (5)와 같이 표현된다. P 는 압력, α_p 는 추진제의 초기온도 상수, β 는 추진제 고유 특성이다⁹⁾.

$$\dot{r} = \alpha_p P^\beta \quad (5)$$

다. 강내탄도의 에너지 전달 및 손실

추진제가 갖고 있는 에너지는 탄자의 운동에너지, 탄자의 회전 운동에너지, 주퇴부의 운동에너지, 연소 가스의 유출에너지, 고체추진제와 연소가스의 거시적 운동에너지, 탄자의 마찰 손실에너지, 포신을 통한 열 손실에너지, 탄자 항력에 의한 손실에너지 등에 이용된다^[10]. 본 연구에서는 추진제의 에너지의 전달 및 손실의 주요 요소인 탄자의 운동에너지와 탄자의 마찰 손실에너지에 대해서만 고려하였다.

탄자의 운동에너지는 식 (8)과 같다^[10].

$$E_{proj} = \frac{1}{2} m_p V_{proj}^2 \quad (8)$$

일반적으로 마찰력은 탄자의 위치에 따라 다르므로 위치에 따른 마찰 저항 압력을 사용하여 식 (9)와 같이 탄자의 마찰 손실에너지를 계산한다^[10].

$$E_{frics} = Area \times \int P_{res(x)} dx \quad (9)$$

3. 수치해석기법

강내탄도 내의 유동장의 속도는 정지 상태에서부터 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 해석코드를 개발하였다. 또한 공간 이산화화를 위해 3차 정확도와 TVD 특성을 가진 SMART 기법^[11]을 사용하여 수렴 안정성을 높였으며, 탄자의 이동에 의해 생성되는 이동경계면은 Ghost Cell Extrapolation 기법^[12]을 사용하여 계산하였다.

개발된 1차원 강내탄도 해석코드는 우선 Shock Tube 문제를 통한 유동장 해석 및 공간 이산화 기법에 대한 검증은 완료하였으며, 프리 피스톤 문제를 통해 Ghost Cell Extrapolation 기법에 대한 검증은 완료하였다. 이와 같이 유동장 해석코드에 대한 검증을 완료한 후, 국내의 기존연구에서 주로 쓰이는 강내탄도 해석코드인 IBHVG2와의 해석결과 비교를 통해 최종적으로 1차원 강내탄도 해석코드의 신뢰성 검증은 완료하였다. 이에 대한 결과는 본 논문에 표시하지 않으며 대신 참고문헌을 표시하였다^[4].

4. 해석결과

가. 해석 기본 모델 및 초기조건

강내탄도 성능해석을 위해 Fig. 2와 같은 화포를 가정하였다. 점화제 주입구는 전체 약실 길이의 50 %의 길이(381 mm)를 가지며, 10 msec 동안 0.2268 kg의 점화제가 주입된다고 가정하였다. 즉, 점화제 주입구 단위길이 당 점화제 주입유량은 0.0593 kg/s/mm이 된다. 그 외 초기조건은 Table 1과 같으며 추진제 형상 Data는 Table 2와 같다.

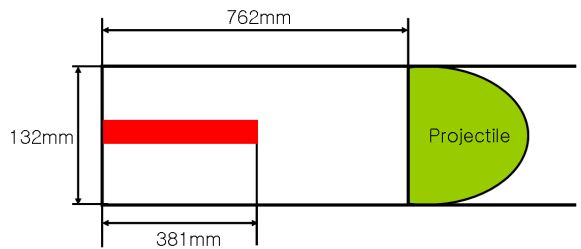


Fig. 2. Diagram of basic model

Table 1. Initial condition of analysis

Projectile Mass	45 (kg)
Propellant Mass	9.5255 (kg)
Propellant Density	1578 (kg/m ³)
Propellant Impetus	1009000 (J/kg)
Ignition-gas Mass	0.2268 (kg)
Ignition-gas Impetus	392600 (J/kg)
Chamber Volume	0.010427 (m ³)
Burning Rate Exponent (β)	0.9
Burning Rate Coefficient (α_p)	3.120563e-9 (Pa) ⁻ⁿ (m/s)
Combustion Gas Molecular Weight	21.3 (kg/kmol)
Specific Heat Ratio	1.27
Flame Temperature	2585 (K)
Barrel Length	4.13 (m)
Projectile Drag	13.8 MPa

Table 2. Propellant configuration data

Propellant Geometry	Cylindrical 7-hole
Length (mm)	25.4
External Diameter (mm)	11.43
Internal Diameter (mm)	1.143
Web (mm)	2.00

다양한 조건에 대한 강내탄도 성능해석을 수행하기 위해서 Fig. 2와 Table 1~2의 초기조건을 가지는 화포를 기본 모델로 설정한 후 해석하고자 하는 각 조건을 변경해 가며 성능해석을 수행하였다.

나. 점화제 주입구 길이에 따른 성능해석

점화제 주입구 길이에 따른 성능해석을 수행하였다. 점화제 주입구 길이를 전체 약실 길이의 100 %(762 mm), 70 %(533.4 mm), 50 %(381 mm), 25 %(190.5 mm)로 변경해가며 성능해석을 수행하였으며, 점화제 주입구 단위길이 당 점화제 주입유량 및 기타 초기조건은 해석 기본 모델과 동일하다.

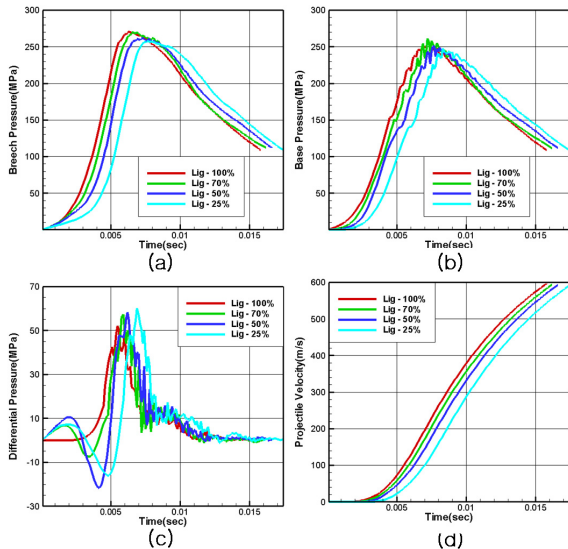


Fig. 3. The time histories of (a) Breach pressure, (b) Base pressure, (c) Differential pressure, (d) Projectile velocity for the length of ignition-gas injector

Table 3. Performances for the length of ignition-gas injector

	Maximum Breach Pressure (MPa)	Minimum Differential Pressure (MPa)	Muzzle Velocity (m/s)
100 % (762 mm)	270.2	0	597
70 % (533.4 mm)	269.6	-7.2	593.8
50 % (381 mm)	261.8	-21.6	593.1
25 % (190.5 mm)	257.5	-16.2	590.6

점화제 주입구 길이에 따른 강내탄도 성능해석의 결과는 Fig. 3과 같으며 강내탄도 성능변수를 Table 3에 정리하였다. 점화제 주입구 길이가 약실 길이의 100 %일 때 즉, 점화제가 약실 전체 영역에서 주입될 경우 최대 Breach 압력 도달시간이 약 6.29e-3 sec로 가장 빨랐으며 점화제 주입구 길이가 줄어들수록 압력 상승에 걸리는 시간이 증가하여 점화제 주입구 길이가 약실 길이의 25 % 일 경우 최대 Breach 압력 도달 시간이 약 7.69e-3 sec로 가장 오래 걸렸다. 이는 점화제 단위 길이 당 점화제 주입 유량이 0.0593 kg/s/mm로 동일함으로 점화제 주입구 길이가 길어질수록 같은 시간에 많은 양의 점화제가 주입되어 압력상승을 가속시키기 때문이다. 추진제의 연소율은 압력에 비례하여 증가함으로 빠른 압력상승은 연소율을 증가시키게 되고 증가된 연소율은 다시 압력상승을 가속시킨다. 이로 인해 점화제 주입구 길이가 길어질수록 최대 Breach 및 Base 압력이 증가하였으며, Base 압력이 증가함에 따라 Muzzle Velocity 또한 증가하였다.

Fig. 4는 점화제 주입구 길이에 따른 최대 마이너스 차압이다. 일반적으로 마이너스 차압은 화포의 성능에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 안전적인 화포의 운용 및 성능향상을 위해서는 마이너스 차압의 감소방안을 연구해야한다.

본 연구에서 점화제 주입구 길이에 따른 차압을 해석한 결과 100 % 주입 시 마이너스 차압이 형성되지 않았으나 점화제 주입구 길이가 짧아질수록 마이너스 차압이 증가하다 50 % 주입 시 최대 마이너스 차압 (-21.6 MPa)을 나타내었으며 25 % 주입 시 마이너스 차압이 감소함(-16.2 MPa)을 확인하였다.

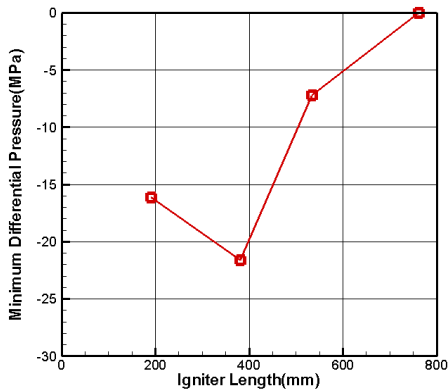


Fig. 4. Minimum differential pressure for the length of ignition-gas injector

마이너스 차압의 발생원인은 약실 내 국부적인 압력 상승에 의한 압력파의 생성 및 전파에 의한 압력진동이다. 따라서 Fig. 5에서 나타나듯이 100 % 주입 시에는 약실 전체에 걸쳐 압력이 균일하게 상승하여 마이너스 차압이 발생하지 않았으나 점화제 주입구 길이가 약실보다 짧은 경우에는 점화제가 주입되는 위치부터 압력이 상승하게 되어 약실 내 국부적인 압력상승이 발생한다. 이로 인해 압력파가 생성되었고 압력파가 전파되면서 강내 압력진동을 발생시켜 Breach 압력과 Base 압력이 역전되어 마이너스 차압이 발생하였다. 다만 그 정도는 약실 내 최대-최소 압력차에 의해 생성되는 압력파의 세기에 따라 달라졌으며 Table 4에서 나타나듯이 50 % 주입 시 약실 내 최대-최소 압력차가 가장 큰 차이를 나타내었으며 이로 인해 최대 마이너스 차압이 발생하였다.

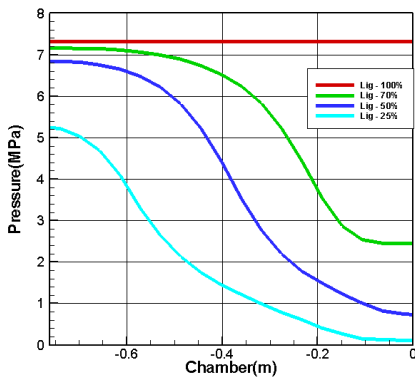


Fig. 5. Chamber pressure for the length of ignition-gas injector at t = 1 ms

Table 4. Maximum-Minimum Pressure Difference for the length of ignition-gas injector at t = 1 ms

	100 %	75 %	50 %	25 %
Maximum-Minimum Pressure Difference	0 MPa	4.66 MPa	6.09 MPa	5.12 MPa

점화제 주입구 길이에 따른 성능해석을 수행한 결과 단위 길이 당 점화제 주입 유량이 동일한 경우 점화제 주입구 길이를 약실 전체에 걸쳐 위치시키는 것이 높은 Muzzle Velocity와 낮은 마이너스 차압을 발생시키므로 화포의 성능향상에 유리하다는 결론을 내릴 수 있다.

다. 점화제 주입시간에 따른 성능해석

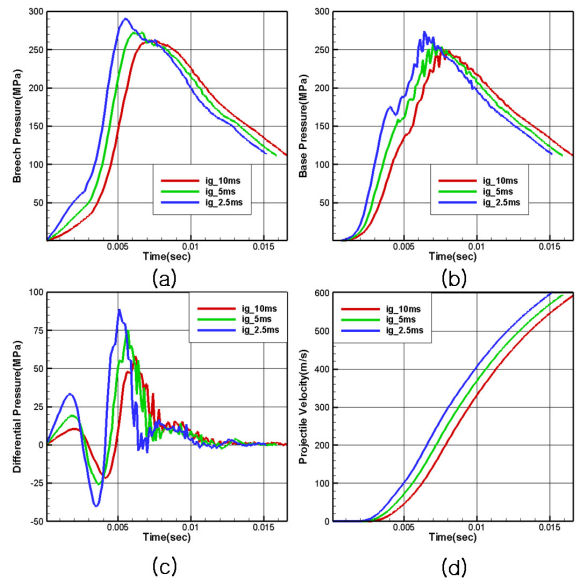


Fig. 6. The time histories of (a) Breach pressure, (b) Base pressure, (c) Differential pressure, (d) Projectile velocity for the time of ignition-gas injection

점화제 주입시간이 강내탄도 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 점화제 주입시간, 즉 점화제 주입 유량에 따른 성능해석을 수행하였다. 점화제 주입구의 길이를 전체 약실 길이의 50%(381 mm)로 고정한 상태

에서 점화제 주입시간을 기존의 10 msec에서 5 msec, 2.5 msec으로 감소시켜가며 성능해석을 수행하였으며 이는 점화제 주입유량을 0.0593 kg/s/mm에서 0.1186 kg/s/mm, 0.2372 kg/s/mm으로 증가시켰음을 의미한다. 그 외 조건은 해석 기본 모델과 동일하다.

Table 5. Performances for the time of ignition-gas injection

	Maximum Breech Pressure(MPa)	Minimum Differential Pressure(MPa)	Muzzle Velocity (m/s)
10 msec	261.8	-21.6	593.1
5 msec	271.9	-25.6	595.6
2.5 msec	290.2	-40.4	602.2

점화제 주입시간에 따른 성능해석의 결과는 Fig. 6 과 같으며 점화제 주입시간에 따른 강내탄도 성능변 수는 Table 5에 정리하였다. 해석결과 점화제 주입 유 량이 증가할수록 Breech 및 Base 압력이 증가함을 확 인할 수 있으며 Muzzle Velocity 또한 증가하지만 주 입 유량이 증가함에 따라 마이너스 차압 또한 증가함 을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 7에서 나타나듯이 점화 제 주입시간이 감소할수록 즉, 점화제 주입 유량이 증 가할수록 강내 압력상승이 가속된 결과라 판단된다.

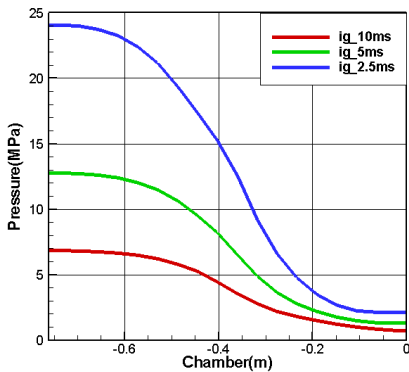


Fig. 7. Chamber pressure for the time of ignition-gas injector at t = 1 ms

점화제 주입 시간에 따른 성능해석을 수행한 결과 점화제 주입 유량을 증가시킬수록 빠른 압력상승으로 인해 높은 Muzzle Velocity를 얻을 수 있으나 Breech

압력 및 마이너스 차압의 증가로 인하여 화포의 안전 성이 감소할 가능성이 높아짐을 확인하였다.

추가적인 점화제 주입 조건에 따른 강내탄도 성능 해석을 수행하기 위해 다음과 같이 3가지 Case에 대 하여 성능해석을 수행하였다.

Case 1 : 점화제 질량 - 0.2268 kg
 점화제 주입 유량 - 0.0593 kg/s/mm
 - 0.1186 kg/s/mm
 - 0.2372 kg/s/mm

Case 2 : 점화제 주입 유량 - 0.0593 kg/s/mm
 점화제 질량 - 0.1134 kg
 - 0.2268 kg
 - 0.3402 kg

Case 3 : 점화제 질량, 주입유량
 - 0.1134 kg, 0.0297 kg/s/mm
 - 0.2268 kg, 0.0593 kg/s/mm
 - 0.3402 kg, 0.1186 kg/s/mm

Case 1은 점화제 주입 유량에 대한 영향을 확인해 보기 위해 점화제 주입량을 고정시키고 주입 유량을 변경해 가며 성능해석을 수행한 Case로 즉, 점화제 주 입시간에 따른 성능해석과 동일하다. Case 2는 점화제 주입량에 대한 영향을 알아보기 위한 Case로 점화제 주입 유량을 고정시키고 주입량을 변경해 가며 성능 해석을 수행하였다. Case 3은 점화제 주입 유량 및 주 입량의 복합적인 영향을 확인해보기 위해 점화제 유 량 및 주입량을 변경해 가며 성능해석을 수행한 Case 이다.

Fig. 8은 각 Case에 대한 최대 마이너스 차압이다. 해석 결과 주입 유량이 동일할 경우 주입량에 따른 마 이너스 차압의 변화가 거의 없으나, 주입량이 동일하 고 주입 유량을 증가시킬수록 최대 마이너스 차압이 증가함을 확인할 수 있다. 이를 통해 마이너스 차압은 점화제 주입량 보다는 점화제 주입유량에 더욱 큰 영 향을 받는다고 판단할 수 있다.

점화제 주입유량에 따른 성능해석을 수행한 결과 마 이너스 차압은 점화제 주입유량에 따른 약실 내 압력 상승 기울기에 따라 증가함을 확인하였으므로 화포의 안전성 향상을 위해서는 점화제 주입유량을 감소시켜 야 한다는 결론을 내릴 수 있다. 하지만 약실 내 압력

상승 기울기가 감소하면 Muzzle Velocity가 감소하여 탄자의 사거리가 감소하는 등 화포의 성능 또한 감소함으로 최적의 점화제 주입유량을 계산하기 위해서는 추가적인 조건에 대한 성능해석이 수행되어야 한다고 판단된다.

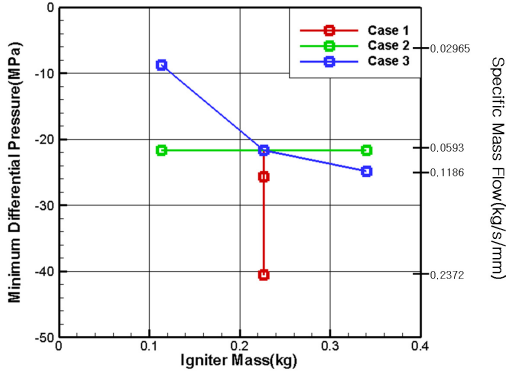


Fig. 8. Minimum differential pressure for the Case

라. 탄자 무게에 따른 성능해석

탄자 무게가 강내탄도 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 탄자무게를 5 kg, 20 kg, 45 kg, 70 kg으로 변경해 가며 성능해석을 수행하였다. 그 외 조건은 해석 기본 모델과 동일하다.

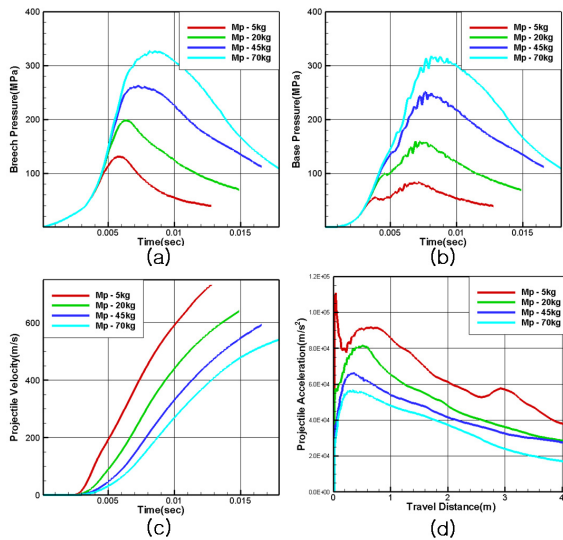


Fig. 9. The time histories of (a) Breech pressure, (b) Base pressure, (c) Projectile velocity, (d) Projectile acceleration for the projectile mass

Table 6. Performances for the projectile mass

	Maximum Breech Pressure (MPa)	Muzzle Velocity (m/s)	Projectile Kinetic Energy (MJ)
5 kg	130.9	732.5	2.68
20 kg	198.3	640.1	8.19
45 kg	261.8	593.1	15.83
70 kg	326.6	540.8	20.47

Fig. 9는 탄자무게에 따른 성능해석 결과이며 Table 6은 탄자무게에 따른 강내탄도 성능변수들이다. 탄자무게가 증가될수록 Breech 및 Base 압력이 증가함을 확인할 수 있다. 하지만 Muzzle Velocity의 경우에는 탄자가 가벼울수록 증가하였으나 탄자 무게와 탄자 속도에 의한 탄자에너지의 경우 탄자 무게가 증가할수록 증가하였다. 해석 결과 탄자 무게가 증가할수록 Breech 압력이 증가하고 Muzzle Velocity가 감소하여 화포의 안전성 및 성능을 감소시키지만 탄자운동에너지는 증가한다.

마. 탄자 마찰력에 따른 성능해석

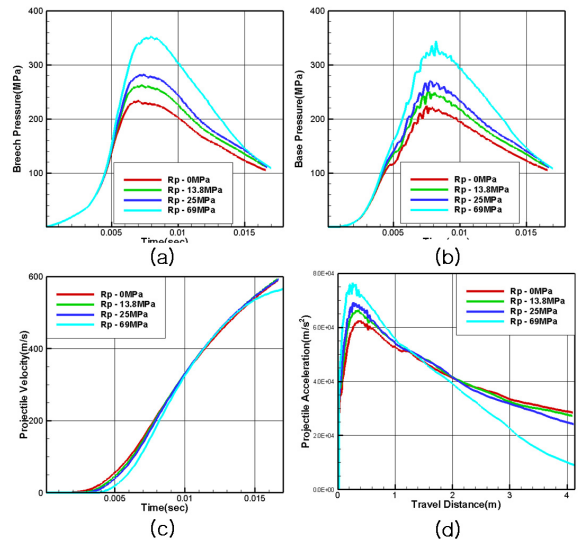


Fig. 10. The time histories of (a) Breech pressure, (b) Base pressure, (c) Projectile pressure, (d) Projectile acceleration for the projectile drag

Table 7. Performances for the projectile drag

	Maximum Breach Pressure (MPa)	Muzzle Velocity (m/s)	Maximum Projectile Acceleration (m/s ²)
0 MPa	233.4	588.6	6.2e4
13.8 MPa	261.8	593.1	6.6e4
25 MPa	281.4	592	6.9e4
69 MPa	352.3	565.1	7.6e4

탄자 마찰력이 강내탄도 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 탄자 마찰력을 0 MPa, 13.8 MPa, 25 MPa, 69 MPa로 변경해 가며 성능해석을 수행하였다. 그 외 조건은 기본 해석 조건과 같다.

Fig. 10은 탄자 마찰력에 따른 성능해석 결과이며 Table 7은 탄자 마찰력에 따른 성능변수들이다. Breach 및 Base 압력의 경우 탄자 마찰력과 비례하여 증가하였으나 강내 압력에 직접적으로 영향을 받는 Muzzle Velocity의 경우, 탄자 마찰력과 비례하여 증가하지 않았으며 최대 Breach 압력의 경우 마찰력에 따른 압력의 변동 폭이 33.7 %인 것에 반해 Muzzle Velocity의 경우에는 4.7 %, 최대탄자가속도의 경우에는 18.4 %에 그치는 것을 확인할 수 있다. 이는 높은 마찰력이 높은 Breach 및 Base 압력을 생성하지만 Muzzle Velocity에 미치는 영향이 낮음을 의미한다. 또한 마찰력이 전혀 없을 경우 낮은 Breach 및 Base 압력에 의해 Muzzle Velocity가 감소하였다. 따라서 화포의 성능향상을 위해서는 포신의 허용응력 내에서 일정한 탄자 마찰력을 유지하는 것이 유리하다고 판단된다.

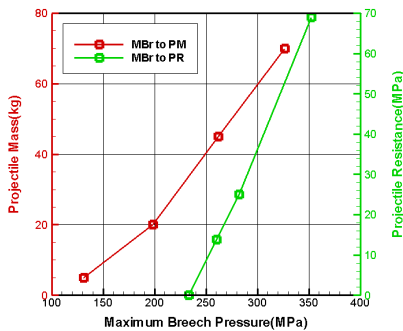


Fig. 11. Maximum breach pressure for the projectile mass & drag

Fig. 11은 탄자 무게 및 마찰력에 따른 최대 Breach 압력이다. 탄자의 무게가 증가할수록, 탄자의 마찰력이 증가할수록 최대 Breach 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Breach 압력의 증가는 화포의 안전성에 부정적인 영향을 미치지만 Breach 압력이 포신의 허용응력보다 낮은 상태에서는 탄자 무게가 증가할수록 탄자 운동에너지가 증가하며 탄자 마찰력이 적당한 값을 가질 때 높은 Muzzle Velocity를 가질 수 있음을 확인했다.

5. 결론

다양한 초기조건에 대한 강내탄도 성능해석을 수행하였다. 점화제 주입구 길이에 따른 성능해석을 수행한 결과 점화제 주입구의 길이가 약실의 길이보다 짧을 경우 약실 내 국부적인 압력상승으로 인하여 압력 파가 생성되고 이로 인해 마이너스 차압이 발생함을 확인하였다. Muzzle velocity의 증가 및 마이너스 차압의 감소를 위해서는 약실 내 압력상승이 빠르고 균일하게 유지돼야 함으로 점화제 주입구 길이를 증가시키는 것이 화포의 성능 및 안전성 향상에 유리하다는 결론을 내릴 수 있었다. 점화제 주입시간 즉, 점화제 주입 유량에 따른 성능해석을 수행한 결과 마이너스 차압은 점화제 주입량보다는 주입 유량에 따른 압력상승률에 민감함을 확인하였으며 주입 유량이 증가할수록 빠른 압력상승으로 인하여 마이너스차압이 증가하지만 Muzzle Velocity 또한 증가함을 확인했다. 따라서 최적의 점화제 주입 유량을 계산하기 위해서는 추가적인 조건에 대한 연구가 필요하다고 판단된다. 탄자 무게 및 마찰력에 따른 성능해석을 수행한 결과 탄자 무게가 증가할수록 Breach 압력이 증가하였으며 Muzzle Velocity는 감소하였다. 하지만 탄자의 운동에너지의 경우 탄자의 무게가 증가할수록 증가함을 확인하였고 탄자 마찰력이 증가할수록 Breach 압력은 최대 33.7%의 변동 폭을 보이는데 반해 Muzzle Velocity나 탄자가속도의 경우 보다 낮은 변동 폭을 보임을 확인했으며 적당한 마찰력에 의해 Muzzle Velocity가 증가함을 확인했다. 이는 화포의 포신의 허용응력 이내에서는 탄자의 무게 및 마찰력이 적당한 값을 가질 때 화포의 성능이 향상됨을 의미한다.

본 연구에서 수행한 성능해석은 본 연구에서 가정한 조건 하에서의 결과이므로 최적의 발사 조건을 위

해서는 추가적으로 추진제 형상, 약실 체적, 추진제 Impetus 등의 다양한 조건에 따른 성능해석 연구가 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소 지원에 의한 연구결과입니다. 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Paul S. Gough, "Initial Development of Core Module of Next Generation Interior Ballistic Model NGEN", ARL-CR-234, 1995.
- [2] Michal J. Nusca and Albert W. Horst, "Progress in Modeling Ignition in a Solid Propellant Charge for Telescoped Ammunition", ARL-TR-3673, 2006.
- [3] Albert W. Horst and Michael J. Nusca, "The Charge Designer's Workbench : A Range of Interior Ballistic Modeling Tools", ART-TR-3796, 2006.
- [4] 성형건, 외 5인, "Eulerian-Lagrangian 접근법과 SMART scheme을 이용한 강내탄도 전산해석 코드 개발", 한국군사과학기술학회지, 제13권 제3호, pp. 349~357, 2010.
- [5] 장진성, 외 4인, "점화제 주입에 따른 강내탄도 성능해석", 한국군사과학기술학회지, 제14권 제1호, pp. 22~29, 2011.
- [6] Hiroaki Miura and Akiko Matsuo, "Numerical Simulation of Solid Propellant Combustion in a Gun Chamber", 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA2006-4955, 2006.
- [7] J. S. Jang, H. G. Sung, S. Y. Yoo, T. S. Roh and D. W. Choi, "Numerical Study on Properties of Interior Ballistics According to Solid Propellant Position in Chamber", ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, AJK-12005, 2011.
- [8] Ergun S., "Fluid Flow Through Packed Columns", Chem Eng Prog, Vol. 48, No. 2, pp. 89~94, 1952.
- [9] 성형건, 외 4인, "강내탄도의 전산해석 기초 기법의 연구", 한국추진공학회 논문집, 제12권 제6호, pp. 12~20, 2008.
- [10] Ronald D. Anderson and Kurt D. Fickie, "IBHVG2 - A User's Guide", BRL-TR-2829, 1987.
- [11] Gaskell, P. H. and Lau, A. K. C., "Curvature-Compensated Convective Transport : SMART, A New Boundedness Preserving Transport Algorithm", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 8, pp. 617~641, 1988.
- [12] 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, pp. 531~556, 2008.