

## 점화제 주입에 따른 강내탄도 성능해석

### Study on Properties of Interior Ballistics According to Ignition-Gas Injections

장진성\*                      성형건\*                      이상복\*                      노태성\*\*                      최동환\*\*  
 Jin-Sung Jang              Hyung-Gun Sung              Sang-Bok Lee              Tae-Seong Roh              Dong-Whan Choi

#### Abstract

Using the numerical code for the interior ballistics, the performance of the interior ballistics with the characteristic of the ignition-gas injections has been investigated. The ignition gas has been assumed to be injected into the chamber with 3 cases. As the results of analysis, when the ignition-gas has been injected into all chamber area, the pressure distributions of the chamber of the interior ballistics have been uniform and the differential pressure has been stable. The ignition-gas has been injected into the partial area of the chamber, however, the pressure distributions and the differential pressure have been unstable. The case using the longer ignition injector, therefore, seems to be more suitable to improve the stability of the interior ballistics.

Keywords : Interior Ballistics(강내탄도), Ignition-gas Injection(점화제 주입), Differential Pressure(차압), Multiphase(다상), Porosity(기공률)

#### 1. 서론

화포의 대구성 및 성능 개선, 탄약의 설계, 새로운 화포 추진제의 개발 등을 위해서는 강내탄도(Interior Ballistics) 해석 기술이 필수적으로 요구된다. 수 msec 동안 내부 압력의 변동이 수천기압에 달하는 강내탄도의 특성상 실험을 통한 연구·개발에는 한계가 있으므로 전산해석을 통한 강내탄도 성능 연구·개발이 동반된다<sup>[1]</sup>. 특히, 점화제 주입 위치에 따라 강내 압력이

국부적으로 상승하여 압력파가 생성되고 이로 인해 Breech와 Base의 차압 변동이 심해지며, 차압이 마이너스(-) 값이 나타나는 현상이 발생하면, 약실 내 압력진동이 증폭되어 포신에 허용 응력 이상의 힘이 가해져서 포신에 금이 가거나 포신이 깨지는 등 화포의 성능 및 대구성에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 높아지는 것으로 알려져 있다<sup>[2]</sup>. 따라서 안정적인 화포의 운용을 위해서는 강내 차압의 변동 감소 연구가 필요하다.

이에 장진성 등은 Eulerian-Lagrangian 좌표계와 SMART scheme을 이용하여 1차원 강내탄도 해석코드를 이용하여 점화제 주입에 따른 강내탄도 성능해석을 수행하였으나, 불형 추진제를 사용하는 소구경 화포에 한하여 연구를 수행하였고 대구경 화포로의 확장은 이루어 지지 않았다<sup>[3]</sup>. 따라서 본 연구에서는 장

† 2010년 11월 1일 접수~2011년 1월 20일 게재승인

\* 인하대학교 항공우주공학과(Inha University)

\*\* 인하대학교 기계공학부(Inha University)

책임저자 : 노태성(tsroh@inha.ac.kr)

진성 등에 의해 개발된 강내탄도 해석코드를 확장하여 대구경 화포에 대해서 실제 화포에서 주로 쓰이는 7공형 추진제를 사용하여 점화제 주입에 따른 강내탄도 성능해석을 수행하였고 그 결과 강내 차압의 변동 감소를 통해 화포의 안정성을 향상시킬 수 있는 점화제 주입 방법을 제시하였다.

## 2. 강내탄도

화포의 약실부분은 Fig. 1과 같이 약실, 추진제 입자, 점화제 주입구 그리고 탄자로 구성되어 있다. 강내탄도는 화포의 약실 내에서 추진제가 점화제에 의해 연소되고 생성된 연소가스의 압력에 의해 탄자가 가속되어 포구를 이탈하는 일련의 과정으로, Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다<sup>[4]</sup>.

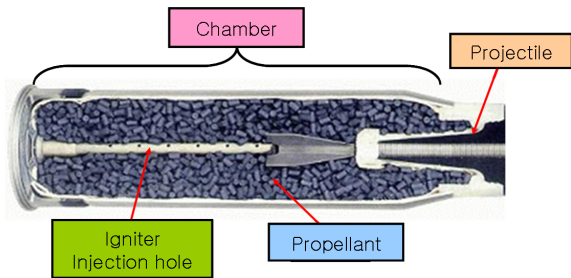


Fig. 1. Cross section of interior ballistics

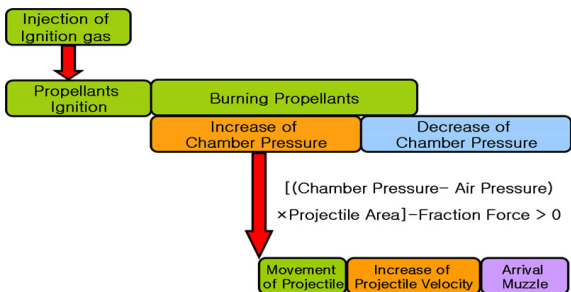


Fig. 2. Diagram of interior ballistics

### 가. 강내탄도의 지배방정식

강내탄도의 추진제 점화 및 연소현상은 다상유동이다. 추진제 연소가스는 연속상(기상)이며 추진제는 분산상(고상)으로 구분된다<sup>[4]</sup>. 다상유동을 해석하기 위해 연속상은 Eulerian 좌표계를 이용하고 분산상은 Lagrangian 좌표계를 이용하는 Eulerian-Lagrangian 접

근법을 사용하였다.

연속상의 지배방정식은 분산상이 차지하는 부피를 고려하기 위해 기공률  $\alpha$ 를 도입한다. 강내탄도의 경우 Euler 방정식에 기공률을 도입한 지배방정식을 사용하며, 1차원 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식은 다음과 같다<sup>[1]</sup>.

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

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

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

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

분산상의 지배방정식은 분산상과 연속상에서 발생하는 항력에 의해 계산되며 일반적으로 Ergun의 압력 손실식을 사용한다. 이 식을 추진제의 가속도식으로 정리하면 식 (4)와 같다.

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

### 나. 강내탄도의 구성방정식

추진제 연소는 연소율과 형상 함수에 의해 계산된다. 연소율은 압력의 함수로 표현되며 식 (5)와 같이 표현된다.  $P$ 는 압력,  $\alpha_p$ 는 추진제의 초기온도 상수,  $\beta$ 는 추진제 고유 특성이다<sup>[4]</sup>.

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

7공형 추진제형상의 기공률( $\alpha$ ) 및 표면적( $A_s$ )은 식 (6)~(7)과 같이 계산된다.

$$\alpha = 1 - \frac{n(\pi L(r_p^3 - Mr_p^3))}{A\Delta x} \quad (6)$$

$$A_s = 2\pi L(r_p + Nr_p) + \pi(r_p^2 - Nr_p^2) \quad (7)$$

여기서  $n$ 은 미소제어체적 내에 동일한 크기를 가진 추진제 입자 개수이며  $N$ 은 추진제 내부의 Perforation 개수이다. 즉 7공형 추진제의 경우  $N=7$  이다.  $r_p$ 은 추진제 외경의 반지름,  $r_p'$ 은 추진제 내경의 반지름이다.

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<sup>[5]</sup>. 이 중 추진제의 에너지의 전달 및 손실의 주요 요소는 탄자의 운동에너지, 탄자의 마찰 손실에너지, 포신을 통한 열 손실에너지이다.

탄자의 운동에너지는 식 (8)과 같다<sup>[5]</sup>.

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

일반적으로 마찰력은 탄자의 위치에 따라 다르므로 위치에 따른 마찰 저항 압력을 사용하여 식 (9)와 같이 탄자의 마찰 손실에너지를 계산한다<sup>[5]</sup>.

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

포신을 통한 열 손실에너지는 식 (10)과 같이 계산한다<sup>[5]</sup>.

$$E_{heat} = \int \dot{Q} dt \quad (\dot{Q} = A_w h [T_{mean} - T_w]) \quad (10)$$

여기서  $A_w$ 는 포신의 표면적,  $h$ 는 열전달 계수,  $T_{mean}$ 은 강내 평균 온도이고  $T_w$ 는 포신의 온도이다.

3. 수치해석기법

강내탄도 내의 유동장의 속도는 정지 상태에서부터 최대 수 천 m/s 까지 증가하므로 이를 위해 모든 속도 영역을 해석할 수 있는 압축성 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked) 알고리즘과 공간

이산화는 3차 정확도와 TVD 특성을 가진 SMART (Sharp and Monotonic Algorithm for Realistic Transport) scheme을 적용하여 수렴 안정성을 높인 1차원 CFD 코드를 사용하였다<sup>[6]</sup>. 탄자의 이동에 의해 생성되는 이동 경계면은 Ghost Cell Extrapolation 기법을 사용하여 계산하였다.

가. 추진제 형상

다공형 추진제의 경우, Fig. 3에서 나타나듯이 추진제 내부의 Perforation이 연소되면서 Sliver가 생성된다. 7공형 추진제의 경우, Sliver의 생성 및 개수에 따라 다음의 3단계로 추진제 연소 면적을 계산한다.

Step 1) No Sliver

Step 2) 6 Small and 6 Large Slivers

Step 3) 6 Small Slivers

각 단계 별 연소 면적에 대한 식은 Stats, J가 사용한 표면적 계산식을 사용하였다<sup>[7]</sup>.

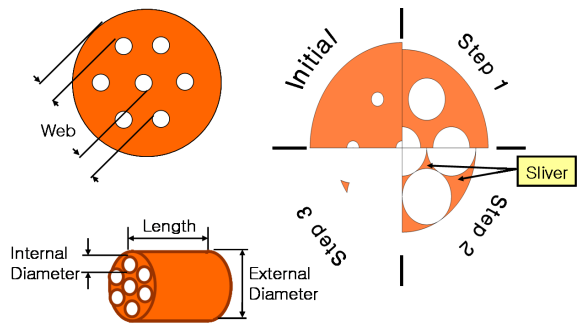


Fig. 3. 7-perforated propellant configuration & burning step

나. 점화제 주입 특성

강내탄도에서 화포의 성능 및 내구성에 영향을 주는 핵심 요소로 점화제 주입 특성이 있으며, 본 연구에서는 점화제 주입구의 최대위치 변화에 따른 강내탄도의 성능 해석을 수행하였다. Fig. 4는 점화제 주입구의 최대위치를 나타내며 점화제 주입구의 최대 위치는 Brech(포미)에서부터 Base(탄저)까지 각각 전체 약실 길이의 100%, 50%, 10%에 위치하도록 하였다. 점화제는 점화제 주입구 전체에서 주입되며 약 0.099kg의 점화제가 주입된다고 가정하였다. 같은 양의 점화제를 주입구 전체에서 0.99kg/msec의 동일한 유량으로 주입시켰다고 가정하였으므로 점화구의 길이가 짧을수록 점화제가 주입되는 시간이 증가한다.

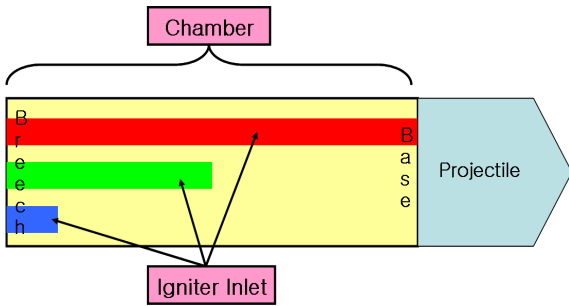


Fig. 4. Diagram of ignition gas injection

다. 해석 초기조건

Table 1. Propellant configuration data

Length (mm)	9
External Diameter (mm)	4.1
Internal Diameter (mm)	0.3
Web(mm)	0.8

Table 2. Initial value of analysis

Projectile Mass	30 (kg)
Propellant Mass	8.85 (kg)
Propellant Density	1569.45 (kg/m <sup>3</sup> )
Propellant Impetus	911665.4 (J/kg)
Ignition-gas Mass	0.099 (kg)
Ignition-gas Impetus	912121.8 (J/kg)
Chamber Volume	0.0188 (m <sup>3</sup> )
Caliber	155 (mm)
Burning Rate Exponent( $\beta$ )	0.71
Burning Rate Coefficient( $\alpha_p$ )	1.33858e-7 (Pa) <sup>-n</sup> (m/s)
Combustion Gas Molecular Weight	22.0 (kg/kmol)
Specific Heat Ratio	1.259
Flame Temperature	2417 (K)
Barrel Length	5 (m)

해석에 사용된 7공형 추진제의 형상 Data는 Table 1과 같다. 또한 추진제 내부의 Perforation 사이의 거리를 뜻하는 Web size는 일정하다고 가정하였다. 해석 초기조건은 Table 2와 같다.

4. 해석결과

Fig. 5는 점화제가 주입되기 시작하여 약 0.049msec의 시간이 경과했을 때의 약실 내 압력분포이다. 점화제 주입구가 약실 전체에 위치한 경우 약실 내에 위치한 추진제가 동시에 연소가 되면서 약실 전체에서 압력이 균일하게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 점화제 주입구가 부분적으로 위치했을 경우 점화제가 주입되는 부분부터 추진제의 연소가 진행되며 이로 인해 약실 내 압력이 국부적으로 상승하는 것을 확인할 수 있다.

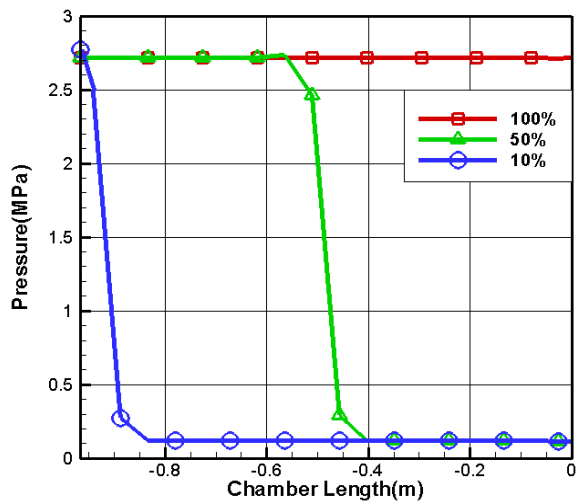


Fig. 5. Initial pressure distribution

Fig. 6은 점화제 주입구가 약실 전체 길이의 100%일 때의 시간에 따른 Breach와 Base압력이다. 점화제가 약실 전체에 주입되기 때문에 Fig. 5에서 나타나듯이 약실 전체에서 압력이 균일하게 상승하였고 이로 인해 탄자가 이동을 시작하는 0.99msec 까지 Breach와 Base 압력의 차이가 발생하지 않는다. 하지만 탄자가 이동을 시작하면 내부 체적이 증가하면서 Base 압력이 감소하면서 Breach 압력에 비해 낮아짐을 확인할 수 있고 추진제의 연소가 종료된 후 강내 유동이 안정화

되면서 Breech와 Base 압력이 같아짐 또한 확인할 수 있다.

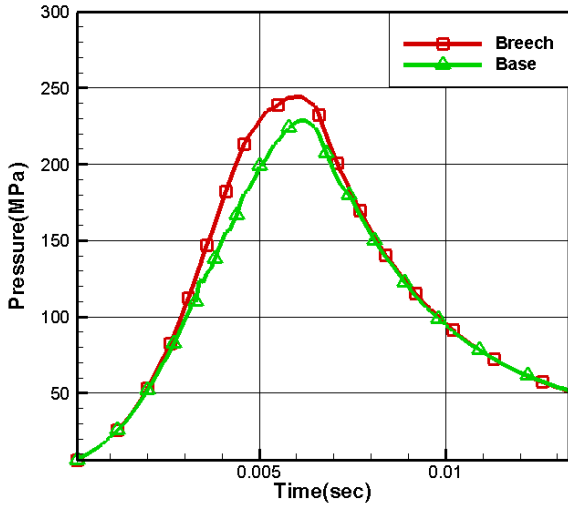


Fig. 6. Breech and base pressure of 100% injection case as a function of time

Fig. 7은 점화제 주입구 길이가 약실 전체 길이의 100%일 때의 거리(m)-시간(sec) 평면의 강내 압력 Contour이다. 연소 초기에 압력이 균일하게 상승함으로 약실 내에서 압력파의 생성 및 전파가 발생하지 않았고 이로 인해 강내 압력 진동이 발생하지 않음을 확인할 수 있으며 이는 Fig. 6에서도 확인이 가능하다.

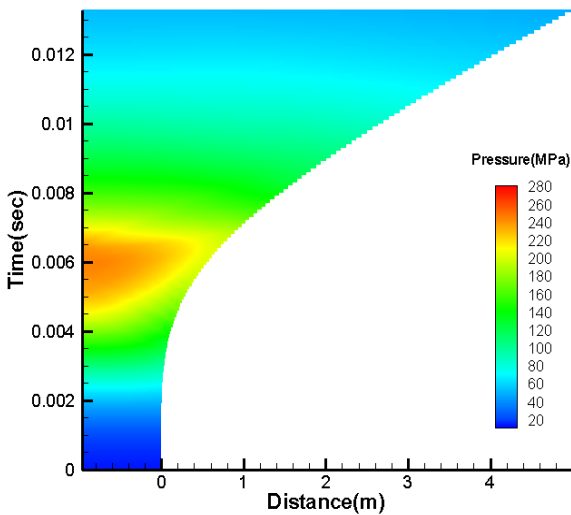


Fig. 7. Pressure contour of 100% injection case

Fig. 8은 점화제 주입구 길이가 약실 전체 길이의 100%일 때의 시간에 따른 Breech와 Base의 차압이다. Fig. 6에서 나타나듯이 Breech와 Base 압력의 역전이 일어나지 않았기 때문에 차압이 마이너스(-) 값을 가지지 않음을 확인할 수 있다. 차압의 변동 폭은 약 34 MPa이며 강내 최대 압력에 약 14% 정도의 변동 폭을 보였다.

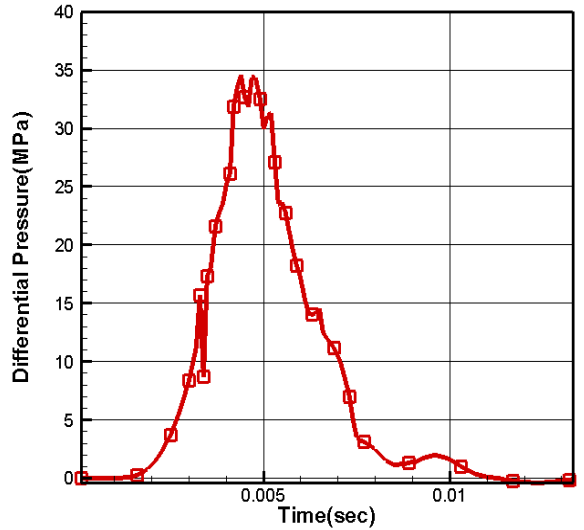


Fig. 8. Differential Pressure of 100% Injection Case As a Function of Time

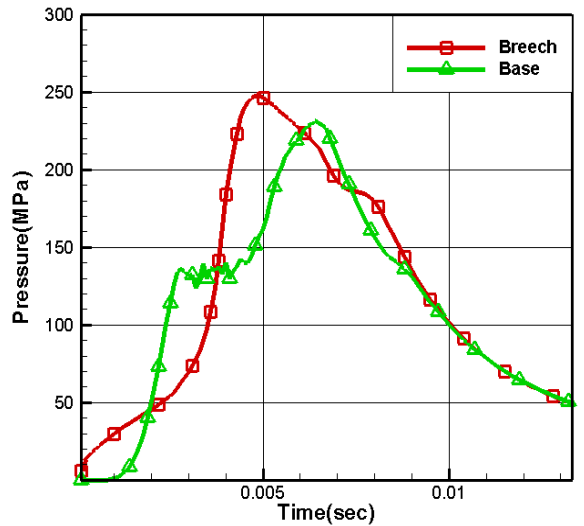


Fig. 9. Breech and base pressure of 50% injection case as a function of time

Fig. 9는 점화제 주입구 길이가 약실 전체 길이의 50%일 때의 시간에 따른 Breech와 Base 압력이다. 점화제가 약실 전체에 걸쳐 주입되는 Fig. 5에서 나타나듯이 점화가스에 의해 강내 압력이 국부적으로 상승하면서 압력파가 생성되었다. 생성된 압력파는 Breech에서 Base 방향으로 전파되며 Base의 탄자와 부딪친 후 Base 압력을 급격하게 상승시킨다. 또한, 높아진 Base 압력은 압력의 함수인 추진제의 연소율을 높여 Base 부근의 추진제 연소를 가속시켜 급격한 압력상승을 유도하기 때문에 Base의 압력이 Breech의 압력보다 높아진다. 상승된 Base 압력이 다시 상대적으로 압력이 낮은 Breech 방향으로 전파되어 Breech 압력을 상승시키고 Breech 부근의 추진제 연소를 가속시켜 Breech의 급격한 압력 상승을 유도하여 강내 압력진동을 발생시킨다.

Fig. 10은 점화제 주입구 길이가 약실 전체 길이의 50%일 때의 거리(m)-시간(sec) 평면의 강내 압력 Contour이다. Fig. 7과 달리 약실 내 압력이 균일하게 상승하지 않고 Breech 쪽부터 국부적으로 상승하는 것을 확인할 수 있으면 이로 인해 강내 압력파가 생성되어 Base 쪽으로 전파되는 것도 확인할 수 있다. 또한 압력파의 전파로 인해 압력진동을 확인할 수 있다.

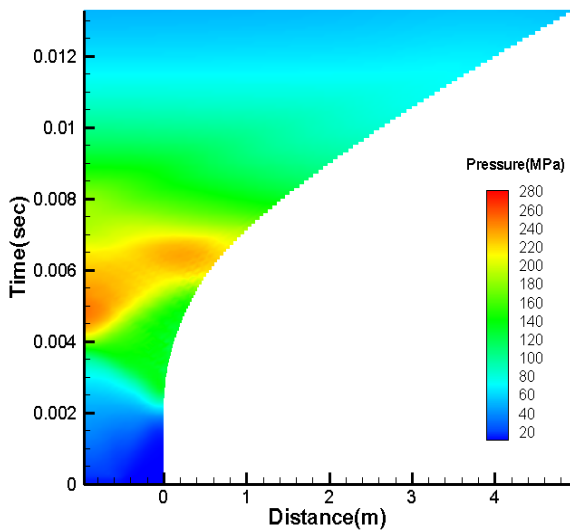


Fig. 10. Pressure contour of 50% injection case

Fig. 11은 점화제 주입구 길이가 약실 전체 길이의 50%일 때의 시간에 따른 Breech와 Base의 차압이다. Fig. 9에서 나타나듯이 Breech와 Base의 압력진동에 의

해 압력 역전이 나타났고 차압의 변동 또한 증가하였다. 압력 역전에 의해 마이너스(-) 차압이 약 -80MPa이고, 차압의 변동 폭은 최대 180MPa이며 강내 최대 압력에 약 72% 정도의 변동 폭을 보였다.

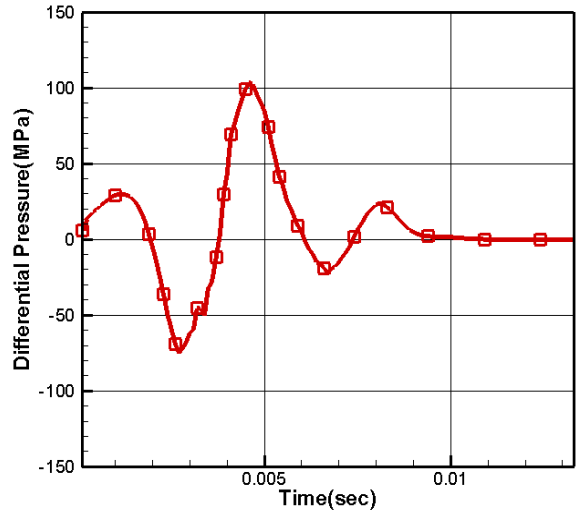


Fig. 11. Differential Pressure of 50% Injection Case As a Function of Time

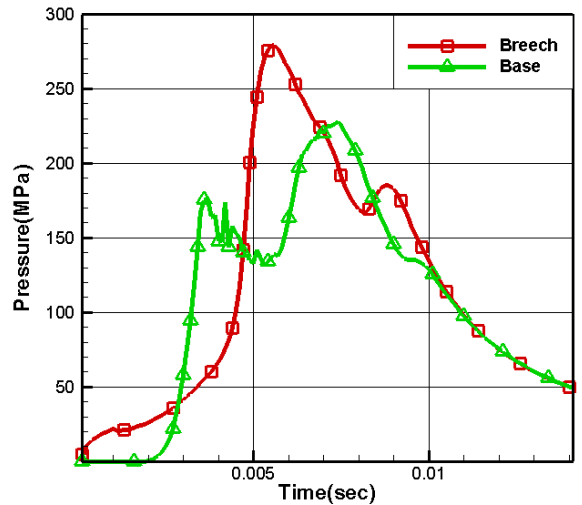


Fig. 12. Breech and base pressure of 10% injection case as a function of time

Fig. 12는 점화제 주입구 길이가 약실 전체 길이의 10%일 때의 시간에 따른 Breech와 Base 압력이다. 점화제의 국부적인 주입에 따른 강내 압력의 국부적인

상승으로 인해 압력진동이 발생하였고 진동 폭은 점화제 주입구 길이가 50% 일 때에 비해 크게 증가하였으며 Base 압력이 상승할 때까지의 시간이 증가하였다. 이는 Fig. 5에서 나타나듯이 가장 좁은 구역을 통해 점화제가 주입되어 연소 초기 압력 상승이 Breech 부근에만 집중되었기 때문이다.

Fig. 13은 점화제 주입구 길이가 약실 전체 길이의 10%일 때의 거리(m)-시간(sec) 평면의 강내 압력 Contour이다. Fig. 10과 같이 약실 내 압력이 균일하게 상승하지 않고 Breech 쪽부터 국부적으로 상승하는 것을 확인할 수 있으며 이로 인해 강내 압력파가 생성되어 Base 쪽으로 전파되는 것도 확인할 수 있다. 다만 압력파의 전파로 인한 압력진동이 Fig. 10에 비해 크게 증가함을 확인할 수 있는데 이는 점화제 주입에 의한 압력 상승이 Breech 쪽에 집중되었기 때문이다.

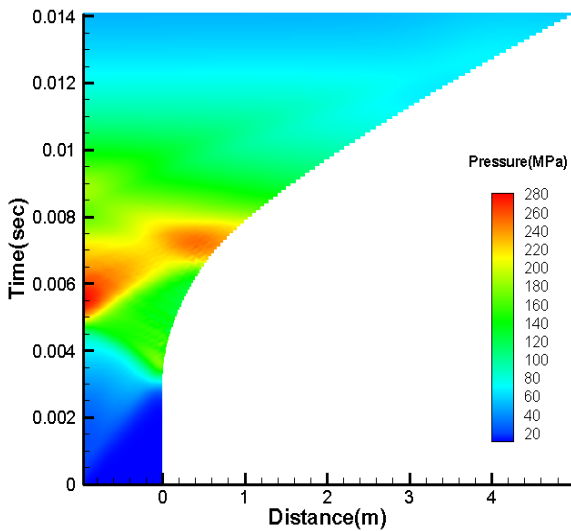


Fig. 13. Pressure contour of 10% injection case

Fig. 14는 점화제 주입구 길이가 약실 전체 길이의 10%일 때의 시간에 따른 Breech와 Base의 차압이다. Breech와 Base 압력진동에 의해 압력 역전이 나타났고 차압의 변동 폭 또한 증가하였다. 압력 역전에 의한 마이너스(-) 차압이 -130MPa이고, 차압의 변동 폭은 최대 260MPa이며 강내 최대 압력에 약 92% 정도의 변동 폭을 나타내어 해석 Case 중 가장 큰 변동 폭을 보였다.

Fig. 15는 각 해석 Case 별 시간에 따른 점화제 주입구 길이에 따른 Breech와 Base의 차압으로 점화제 주

입구 길이가 짧을수록 차압의 변동 폭이 커지는 것을 확인할 수 있다. 강내 차압이 마이너스(-) 값을 가지거나 변동 폭이 클 경우 화포의 성능 및 내구성에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 높아지므로 점화제 주입구 전체 영역에서 동일한 양의 점화제를 주입하는 경우, 점화제 주입구 길이를 최대한 약실 전체에 위치시켜 점화제가 약실 전체에 균일하게 주입될수록 화포의 안정성이 증대된다는 것을 확인했다.

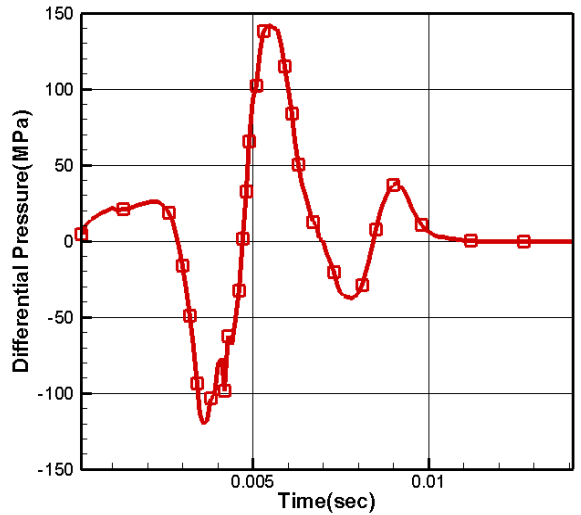


Fig. 14. Differential Pressure of 10% Injection Case As a Function of Time

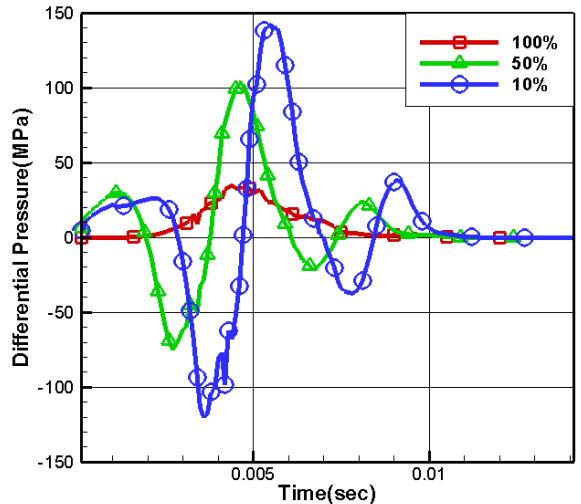


Fig. 15. Differential Pressure of Each Cases As a Function of Time

## 5. 결론

7공형 추진제를 이용하여 약실 내 점화제 주입구 길이를 전체 약실 길이의 100%, 50%, 10%로 나누어 점화제 주입 특성에 따른 강내탄도 성능해석을 수행하였다. 점화제가 약실 전체에 걸쳐 균일하게 주입되는 경우 강내 압력이 균일하게 상승하여 강내 압력파가 생성되지 않아 압력진동이 발생하지 않았다. 하지만, 점화제가 약실 일부분에서 주입되는 경우에는 강내 압력이 국부적으로 상승하여서 압력파가 생성되고 이로 인해 압력진동 및 Breach와 Base 압력의 역전에 의해 마이너스(-) 차압이 발생하였다. 강내 차압이 마이너스(-) 값을 가지거나 변동의 폭이 증가하는 경우 화포의 성능 및 내구성에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 높아진다. 따라서 본 연구에서 가정한 점화제 주입 조건하에서는 점화제 주입구의 위치를 최대한 약실 전체에 분포시켜 점화제를 균일하게 주입시키는 것이 화포의 안정성 향상에 유리하다는 결론을 내릴 수 있었다. 추후에 다양한 점화제 주입 조건에 따른 강내 차압의 변동을 감소시키는 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] Ludwig Stiefel, Gun Propulsion Technology, America Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., pp. 75 ~100, 1988.
- [3] 장진성, 외 6인, "수치해석 기법에 따른 강내탄도 전산해석 코드의 안정성 향상 연구", 지상무기학회 학술대회, 2009.
- [4] 성형건, 외 4인, "강내탄도의 전산해석 기초 기법의 연구", 한국추진공학회 논문집, pp. 12~20, 2008.
- [5] RONANL D. A and KURT D. F, "IBHVG2-A User's Guide", BRL-TR-2829, 1987.
- [6] 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.
- [7] Stats, J., "Form-Function for Multi Component Propellant Charges Including Inhibited Grains and Sliver Burn", MRL-TN-371, 1975.