

약실 내 추진제 위치에 따른 강내탄도 성능해석

장진성¹, 성형건¹, 이상복¹, 노태성²

STUDY ON PROPERTIES OF INTERIOR BALLISTICS ACCORDING TO SOLID PROPELLANT POSITION IN CHAMBER

J.S. Jang,¹ H.G. Sung,¹ S.B. Lee¹ and T.S. Roh^{*2}

Using the numerical code for the interior ballistics, the performance of the interior ballistics with the characteristics according to the position of the solid propellant in chamber has been investigated. In existing research, propellants have been evenly distributed in the chamber. In this study, however, several cases of the existence of empty space in the chamber at which the propellants are not evenly distributed are considered. The 7-perforated propellant configuration has been used in this research. The results have shown the change of performance of the interior ballistics according to solid propellant positions in the chamber.

Key Words : 강내탄도(Interior Ballistics), 고체추진제(Solid Propellant), 다상유동(Multi Phase Flow), 연소(Combustion)

1. 서 론

탄약의 설계, 새로운 화포 추진제의 개발, 또는 화포나 포신의 설계를 위해서는 실험적 연구가 필요하다. 그러나 추진제나 화포의 특성상 실험에 의한 연구에 한계가 있으므로 다차원 다상 유동의 강내탄도(interior ballistics) 전산해석이 필요하다[1].

장진성[2] 등은 오일러-라그랑주 좌표계와 SMART 기법을 이용하여 1차원 강내탄도 해석을 수행하였으나, 추진제가 약실 내에 고르게 분포되어 있는 경우만 고려하였으며 불형, 실린더형, 단공형의 고체추진제 형상에만 국한하는 한계를 보였다. 하지만 실제로 사용되는 화포에서는 약실 내에 추진제가 고르게 분포되지 않는 경우가 발생할 수 있으며 주로 사용되는 고체추진제 형상은 7공형, 19공형 등이다. 현재까지 약실 내 추진제 위치에 따른 강내탄도 성능 변화에 대하여 실험을 제외한 선행연구가 국내에서 진행된 바가 없으며 기존의 무

차원 해석코드로는 약실 내 추진제 위치에 대한 묘사가 불가능하다. 이에 본 연구에서는 장진성 등에 의해 개선된 1차원 강내탄도 해석코드를 이용하여 실제 화포에 많이 쓰이는 7공형 고체추진제 형상을 사용하여 약실 내에 추진제가 균일하게 분포되어 있는 경우와 그렇지 않은 경우를 고려하여 연구를 수행하였고, 약실 내 추진제의 위치에 따른 강내탄도 성능 변화 특성을 연구하였다.

2. 강내탄도

2.1 강내탄도

Fig. 1은 실제 사용되는 화포의 약실부분의 단면도로 약실, 추진제, 점화제 주입구 그리고 탄자로 구성되어 있다.

강내탄도는 화포의 약실 내에서 고체추진제가 점화가스에 의해 연소되고 생성된 연소가스의 압력에 의해 탄자가 가속되어 포구를 이탈하는 일련의 과정으로, Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다[3]. 먼저, 점화제가 약실에 주입되어 주위의 고체추진제를 점화 및 연소시키면 고체추진제가 연소하면서 발생한 연소가스는 고체추진제 사이를 흐르면서 다른 고체추진제를 점화 및 연소시키고 고체추진제를 이동시킨다. 고체추진제의 연소에 의해 약실의 압력이 증가하며 이로 인해 탄자가 이동을 시작하며 최종적으로 탄자가 포구를 빠져나가는 것으로

접수일: 2010년 6월 12일, 수정일: 2010년 11월 23일,

계재확정일: 2010년 11월 26일.

1 정회원, 인하대학교 대학원 항공우주공학과

2 인하대학교 항공우주공학과

* Corresponding author, E-mail: tsroh@inha.ac.kr

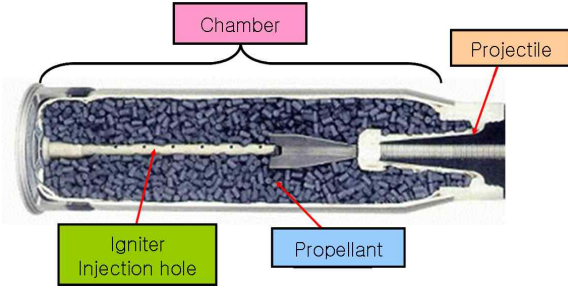


Fig. 1 Cross section of interior ballistics

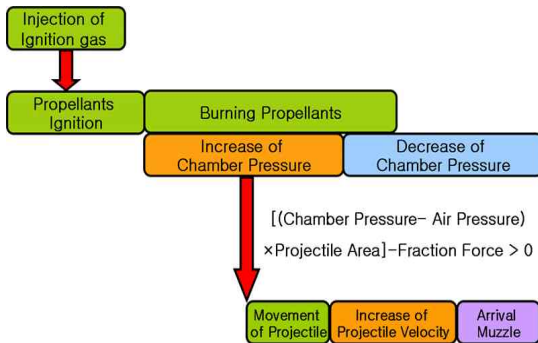


Fig. 2 Diagram of interior ballistics

해석을 종료한다.

2.1.1 강내탄도 지배방정식

강내탄도의 고체추진제 점화 및 연소현상은 다상유동이다. 다상유동의 강내탄도는 고체추진제 연소가스의 연속상과 고체추진제, 액적, 고체입자, 추진제의 분해물, 액체연료의 분무 등의 분산상으로 구분된다[1]. 대부분의 강내탄도 해석 코드의 경우 분산상으로는 고체추진제만을 고려하므로 본 연구에서도 분산상으로는 고체추진제만을 고려하였다. 연속상은 오일러 좌표계를 사용하고 분산상은 라그랑주 좌표계를 사용한다[3].

연속상인 기상의 지배방정식은 고상이 차지하는 부피를 고려하기 위해 기공률(α)을 도입한다. 오일러 방정식에 기공률을 도입한 1차원 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식은 식 (1-3) 과 같다[1].

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

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

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

여기서 $E = \rho(e + u^2/2)$ 이고, 아래첨자 p 는 고상인 고체추진제, ig 는 점화제를 의미한다. f 는 고상과 기상에 의해 발생하는 항력이다. 에너지방정식의 열전달률 q_p 는 고체추진제의 연소와 이동을 해석하는데 핵심 변수가 아니므로 고려하지 않는 것으로 한다.

분산상의 지배방정식은 연속상과 분산상에서 발생하는 항력식이며 이를 위해 관내 고체입자에 의한 압력 손실을 측정하여 얻은 실험식인 어건(Ergun)의 압력 손실 식을 사용한다[4]. 이는 식 (4) 와 같으며 분산상인 고체추진제의 가속도 식으로 사용한다.

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

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

2.1.2 강내탄도 구성방정식

추진제 연소는 연소율과 형상 함수에 의해 계산된다. 연소율은 압력의 함수로 표현되며 식 (5) 와 같이 표현된다. P 는 압력, α_p 는 추진제의 초기온도 상수, β 는 추진제 고유 특성이다[5].

$$\dot{r} = \alpha_p P^\beta \tag{5}$$

다공형 추진제의 형상함수인 기공률(α) 및 표면적(A_s)은 식 (6-7) 과 같이 계산된다[6].

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

$$A_s = 2\pi L(r_p + Nr_p') + \pi(r_p^2 - Nr_p'^2) \tag{7}$$

여기서 n 은 미소제어체적 내에 동일한 크기를 가진 추진제 입자 개수이며 N 은 추진제 내부의 perforation 개수이다. r_p 는 추진제 외경의 반지름, r_p' 은 추진제 내경의 반지름이다.

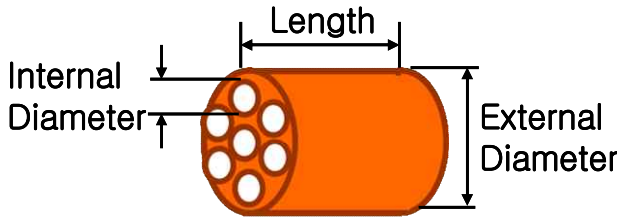


Fig. 3 7-Perforated propellant configuration

3. 수치해석

3.1 유동장 수치해석 기법

강내탄도 내의 유동장의 속도는 정지 상태에서부터 최대 수 천 m/s까지 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 이산화 위해 3차 정확도와 TVD 특성을 가진 SMART 기법[7]을 사용하여 수렴 안정성을 높였으며, 탄자의 이동에 의해 생성되는 이동경계면은 ghost cell extrapolation 기법[8]을 사용하여 계산하였다.

개발된 1차원 강내탄도 해석코드는 우선 shock tube 문제를 통한 유동장 해석 및 공간 이산화 기법에 대한 검증을 완료하였으며, 프리 피스톤 문제를 통해 ghost cell extrapolation 기법에 대한 검증을 완료하였다. 이와 같이 유동장 해석코드에 대한 검증을 완료한 후, 기존 국내에서 주로 쓰이는 강내탄도 해석코드인 IBHVG2와의 해석결과 비교를 통해 최종적으로 1차원 강내탄도 해석코드의 신뢰성 검증을 완료하였다. 이에 대한 결과는 본 논문에 표시하지 않으며 대신 참고문헌을 표시하였다[9].

3.2 7공형 추진제 형상 함수

본 연구에 사용된 추진제는 7공형 추진제 형상이며 Fig. 3과 같이 모습이며 형상 data는 Table 1과 같다.

다공형 추진제의 경우 연소가 진행되면서 Sliver 면적이 생성된다. Sliver 면적이란 Fig. 4에서 나타나듯이 추진제 바깥쪽에서부터 연소가 진행되고, 동시에 추진제 안쪽의 구멍에서 연소가 진행되다가 서로 만나서 생성되는 면적을 의미한다. 7공형 추진제의 경우 Slive의 생성 및 개수에 따라 3단계로 나누어 추진제 연소 면적을 계산한다.

Table 1 7-Perforated propellant configuration data

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

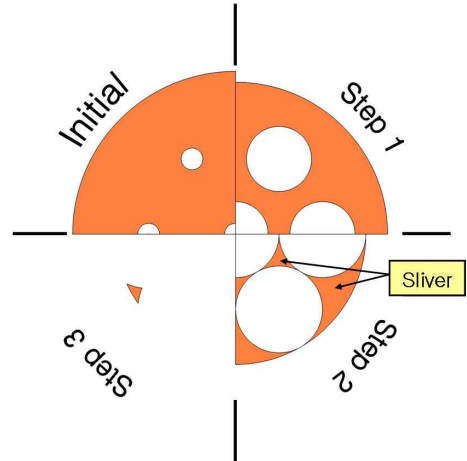


Fig. 4 7-Perforated propellant configuration combustion step

Step 1) No sliver

Sliver 면적이 생성되기 전 단계로 추진제 바깥쪽과 안쪽에서 동시에 연소가 진행된다. 연소가 진행됨에 따라 추진제 바깥쪽 지름은 점점 줄어들며, 반대로 안쪽 구멍의 지름은 늘어난다.

Step 2) 6 small and 6 large slivers

연소가 진행됨에 따라 추진제 바깥쪽 면과 안쪽의 면이 만나면서 추진제 안쪽에 6개의 작은 sliver와 바깥쪽에 6개의 큰 sliver가 생성된다.

Step 3) 6 small slivers

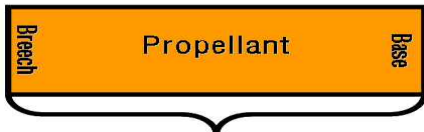
추진제 안쪽에 생성되었던 small sliver가 완전히 연소되어 없어진 후, 바깥쪽의 large sliver가 줄어들어 6개의 작은 sliver만 존재한다.

각 단계 별 연소 면적에 대한 식은 본 논문에 표시하지 않았으며 대신 참고문헌을 표시하였다[6].

3.3 약실 내 추진제 위치

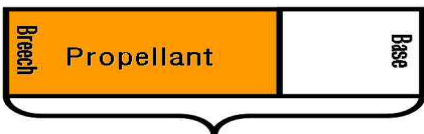
기존 연구에서는 Fig. 5와 같이 약실 내에 추진제가 균일하게 분포되어있다고 가정하였으나 실제로는 중력의 영향이나 화포의 이동 등에 의해 추진제가 약실 내에서 이동을 하면서 Fig. 6,7과 같이 약실 내에 추진제가 균일하게 분포되어 있지 않고 포미(breech) 혹은 탄저(base) 쪽으로 국부적으로 분포하는 경우가 발생 할 수도 있다. 이에 본 연구에서는 약실 내 추진제의 분포를 조절해 가며 추진제 위치에 따른 강내탄도 성능해석 연구를 수행하였다.

전체 기공률 0.8, 0.7의 두 경우에 대해 연구를 수행하였으며 각각 약실 내 추진제 위치를 Table 2와 같이 5 case로 조절하였으며 각 case에는 같은 양의 추진제를 사용하였다. 먼저 약실 전체에 추진제가 균일하게 분포되어 있는 경우, 전체



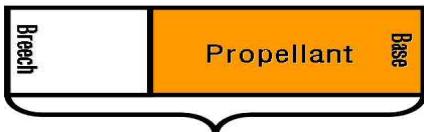
Chamber

Fig. 5 Propellant position in chamber 1



Chamber

Fig. 6 Propellant position in chamber 2



Chamber

Fig. 7 Propellant position in chamber 3

약실 길이의 70 %에 걸쳐서 추진제를 포미 쪽과 탄저 쪽에 국부적으로 분포시킨 경우, 마찬가지로 전체 약실 길이의 50%에 걸쳐서 추진제를 포미 쪽과 탄저 쪽에 국부적으로 분포시킨 경우로 나누어 약실 내 추진제의 위치를 조절하였다. 사용된 추진제의 양이 같으므로 약실 내 추진제가 분포되어 있는 공간이 짧을수록 단위체적당 추진제의 개수가 늘어난다.

3.4 해석 초기 조건

약실 내 추진제 위치에 따른 강내탄도 성능해석에 사용된

Table 2 Propellant position in chamber

Case Name	Chamber	
Pro10_Air0	Propellant	
Pro7_Air3	Propellant	Air
Air3_Pro7	Air	Propellant
Pro5_Air5	Propellant	Air
Air5_Pro5	Air	Propellant

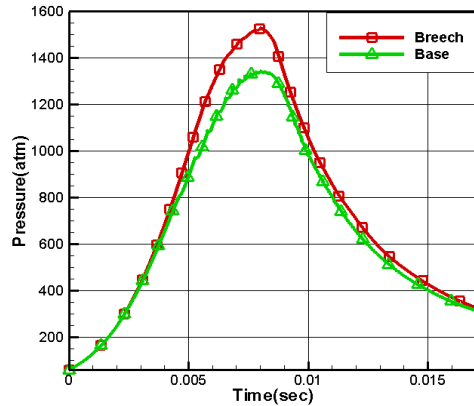


Fig. 8 Propellant 100 % case pressure

초기 조건은 Table 3과 같고 점화제는 따로 주입되지 않으며 추진제가 분포하는 영역에 걸쳐 미리 뿌려져 있다고 가정하였다.

4. 해석결과

4.1 기공률 0.8 Case

Fig. 8은 전체 기공률이 0.8이며 약실 내 추진제가 균일하게 분포하였을 때의 강내 압력 그래프이다. 결과에 따르면 강내 압력파의 이동이나 이로 인한 압력진동이 관찰되지 않는다. 이는 약실 내 추진제가 동시에 연소되면서 압력파의 이동이 발생하지 않기 때문이다.

Fig. 9는 전체 약실 길이의 70 %에 걸쳐 추진제가 포미 쪽과 탄저 쪽에 분포했을 때의 포미 압력을 나타낸 그래프이다. 추진제의 연소가 진행되면서 포미 압력이 증가하는데 Fig. 8과 같이 선형적으로 포미 압력이 증가하는 것이 아니라 포미 압력에 진동이 발생하여 압력의 증가율이 변하는 것을 확인할 수 있다. 이는 약실 내 빈 공간에 의해서 생성되는 압력파의 이동 때문이다. 또한 Pro7_Air3 case와 Air3_Pro7 case의 압

Table 3 Initial value of test model

Projectile Mass		30 (kg)
Propellant Mass	Porosity 0.8	5.92 (kg)
	Porosity 0.7	8.85 (kg)
Propellant Density		1569.45 (Kg/m3)
Propellant Energy		4425320 (J/kg)
Chamber Volume		0.0188 (m3)
Gun Barrel Length		5 (m)

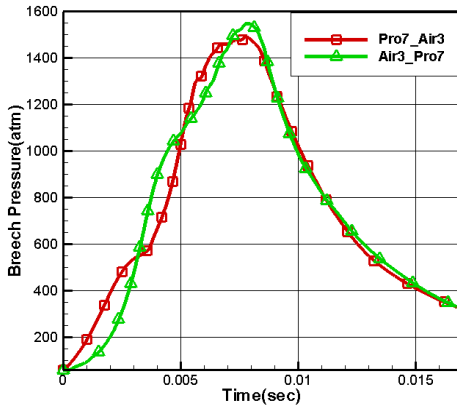


Fig. 9 Propellant 70 % case breech pressure

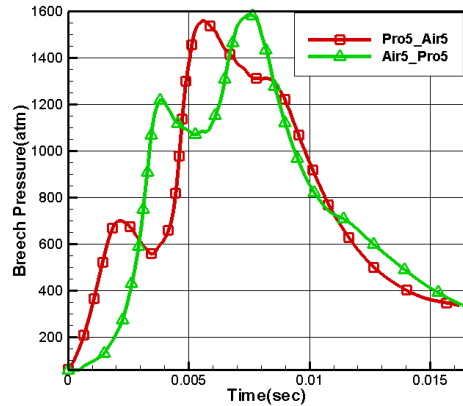


Fig. 11 Propellant 50 % case breech pressure

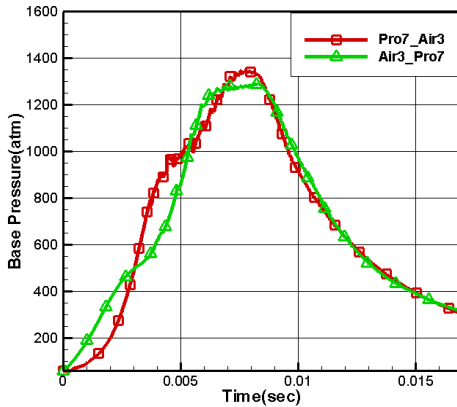


Fig. 10 Propellant 70 % case base pressure

력의 위상차가 서로 반대인 것을 확인할 수 있는데 이는 약실 내 빈 공간이 서로 반대로 위치하기 때문이다. Pro7_Air3 case의 경우에는 연소가 진행됨에 따라 압력파가 탄저 쪽으로 전파된 후 탄자에 부딪쳐 돌아오지만 Air3_Pro7 case의 경우에는 압력파가 포미 쪽으로 향한 후 포미에 부딪쳐 돌아오게 된다.

Fig. 10은 전체 약실 길이의 70%에 걸쳐 추진제가 포미 쪽과 탄저 쪽에 분포했을 때의 탄저 압력을 나타낸 그래프이다. Fig. 9의 포미 압력과 마찬가지로 압력의 진동이 나타나는 것을 확인할 수 있으며 위상차가 서로 반대인 것을 확인할 수 있는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 약실 내 빈 공간의 위치가 서로 반대이기 때문이다.

Fig. 11은 전체 약실 길이의 50%에 걸쳐 추진제가 포미 쪽과 탄저 쪽에 분포했을 때의 포미 압력을 나타낸 그래프이

다. 전체 약실 길이의 70%에 걸쳐 추진제가 분포했을 때와 마찬가지로 약실 내 빈 공간에 의해 압력파가 생성되어 포미 압력에 진동이 발생함을 확인할 수 있으며 그 위상차가 서로 반대인 것 또한 확인할 수 있다. 하지만 그 진동의 진폭이 Fig. 9,10에 비해 증가하였는데 이는 단위 체적 당 추진제의 양이 증가했기 때문이다. 추진제의 연소특성상 단위 체적 내에 더 많은 양의 추진제를 사용할 경우 추진제의 연소가 빠르게 진행되어 약실 내 압력이 빠르게 증가하며, 또 이렇게 증가된 압력에 의해 다시 추진제의 연소율이 높아지게 된다. 따라서 생성되는 압력파의 크기와 전파속도가 전체 약실 길이의 70%에 걸쳐 추진제를 분포시켰을 때 보다 증가하였고 이로 인해 포미 압력의 진폭이 증가된 것이다. Fig. 12는 전체 약실 길이의 50%에 걸쳐 추진제가 포미 쪽과 탄저 쪽에 분포했을 때의 탄저 압력을 나타낸 그래프이다. Fig. 11의 결과와 마찬가지로 탄저 압력의 진동발생 및 위상차가 반대인 것을 확인하였다. 하지만 추진제가 포미 쪽에 위치한 경우 0.004 sec 쯤에 탄저 압력에 미세한 진동이 발생하는 것을 확인했는데 이는 포미 쪽에서 상승된 압력이 탄저 쪽으로 이동을 하면서 압력파가 전달이 되기 때문이다. 이 전달된 압력파가 탄자와 부딪친 후 반사 될 때 미세한 압력진동이 발생하면서 Fig. 12와 같은 결과가 나타났다고 판단이 된다.

또한 이러한 미세 압력진동이 포미 쪽에는 나타나지 않았는데 이는 추진제가 탄저 쪽에 위치하였을 경우에 발생하는 압력파가 추진제가 포미 쪽에 위치하였을 경우보다 약하기 때문이다. 추진제가 탄저 쪽에 위치하였을 경우에 보다 약한 압력파가 생성되는 이유는 탄저 쪽의 압력이 먼저 상승하면서 탄자가 추진제가 포미 쪽에 위치한 경우보다 이른 시간에 이동을 하게 되어 강내 평균압력을 낮추기 때문이다.

Table 4는 기공률 0.8 case 결과를 정리한 것이다. 해석결과

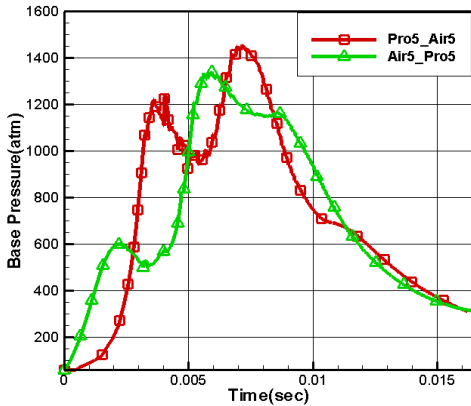


Fig. 12 Propellant 50 % case base pressure

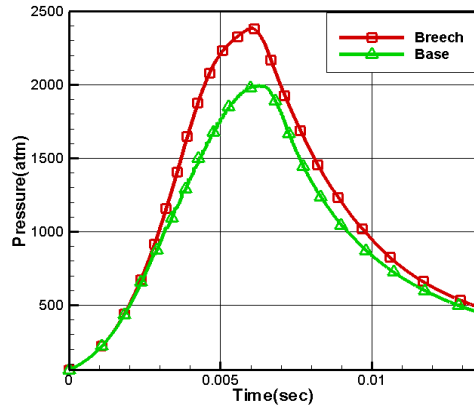


Fig. 13 Propellant 100 % case pressure

탄자가 포구를 빠져나갈 때의 속도인 Muzzle Velocity는 추진제를 전체 약실 길이의 50 %에 걸쳐 포미 쪽에 분포시켰을 때 가장 빨랐으나 다른 case에 비해 큰 차이를 나타내는 정도는 아니었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 단위 체적 내에 추진제의 개수가 많은 상태에서 연소가 진행되면서 생성된 높은 탄저 압력에 의한 결과이다. 하지만 이 과정에서 탄저 쪽에 미세한 압력진동 현상이 발견되었는데 이러한 강내 압력진동은 포신에 국부적으로 압력을 가할 수 있다.

만일 포신의 허용응력을 증가하는 압력이 국부적으로 가해진다면 포신에 금이 가거나 포가 깨지는 등의 결과가 발생할 가능성이 높아질 것으로 판단된다.

4.2 기공률 0.7 Case

Fig. 13은 전체 기공률이 0.7이며 약실 내 추진제가 균일하게 분포하였을 때의 강내 압력 그래프이다. Fig. 8의 결과와 마찬가지로 약실 내 추진제가 전 영역에 걸쳐 동시에 연소되면서 압력파의 생성 및 이동이 발생하지 않기 때문에 압력파의 이동에 의한 압력진동이 나타나지 않는다. 하지만 낮은 기공률 즉, 추진제의 양이 증가하였기 때문에 기공률 0.8 case

에 비해 강내 압력이 증가한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 14는 전체 약실 길이의 70 %에 걸쳐 추진제가 포미 쪽과 탄저 쪽에 위치했을 때의 포미 압력을 나타낸 그래프이다. 기공률 0.8 case와 마찬가지로 압력파의 이동에 의한 압력진동이 나타났다. 이는 앞서 언급한바와 같은 이유이며, 낮은 기공률로 인해 Fig. 9에서 발생한 압력진동보다 그 폭이 증가하였다. 추진제가 포미 쪽에 위치한 경우의 압력이 탄저 쪽에 위치한 경우의 압력보다 더 높은 이유는 Fig. 12에서 설명한 것과 같이 강내 압력이 포미 쪽부터 증가하여서 탄저 쪽으로 향하게 되어 강내 압력이 높아진 상태에서 압력파가 탄자와 충돌하기 때문이다. 이러한 결과가 기공률 0.8 case에서 크게 나타나지 않는 이유는 초기 기공률이 높아서 즉, 사용되는 추진제의 양이 적기 때문에 압력파가 추진제의 연소에 영향을 미칠 시간에는 이미 대부분의 추진제가 연소를 완료된 상태에서 강내 압력이 비교적 안정했기 때문이라 판단된다.

Fig. 15는 전체 약실 길이의 70 %에 걸쳐 추진제가 포미 쪽과 탄저 쪽에 위치했을 때의 탄저 압력을 나타낸 그래프이다. Fig. 14와 마찬가지로 탄저 압력의 진동이 발생하며 위상차가 반대로 나타났다. 또한 Fig. 12에서처럼 0.0035 sec 부근에 미세한 압력진동이 추진제가 포미 쪽에 위치한 경우의 탄저 압력에 나타났는데 이는 앞에서 언급한 이유에서 이다.

Fig. 16은 전체 약실 길이의 50 %에 걸쳐 추진제가 포미 쪽과 탄저 쪽에 위치했을 때의 포미 압력을 나타낸 그래프이다. 마찬가지로 포미 압력의 진동발생 및 위상차가 반대의 것을 확인할 수 있다. 하지만 그 진동의 진폭이 Fig. 14,15에 비해 커졌는데 이는 단위체적 당 더 많은 양의 추진제를 사용했기 때문이다. 압력진동의 진폭이 본 연구에서 고려된 case 중 가장 컸는데 이를 통해 약실 내 초기 기공률이 낮을수록, 또한 단위 체적 내에 많은 양의 추진제를 사용할수록 압력진

Table 4 Results of porosity 0.8 case

Case Name	Muzzle Velocity (m/s)	Escape Time of Projectile (e-2 sec)
Pro10_Air0	588	1.70
Pro7_Air3	589	1.68
Air3_Pro7	585	1.69
Pro5_Air5	592	1.62
Air5_Pro5	580	1.64

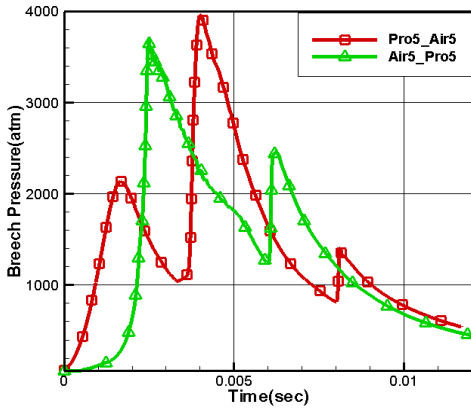


Fig. 16 Propellant 50 % case breech pressure

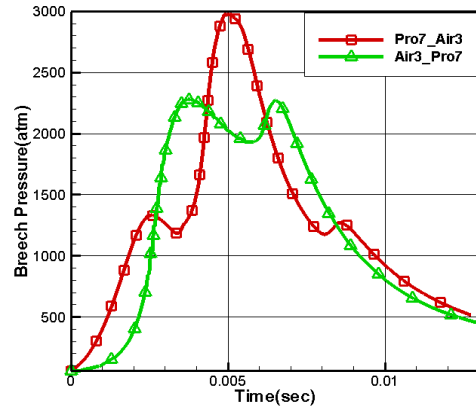


Fig. 14 Propellant 70 % case breech pressure

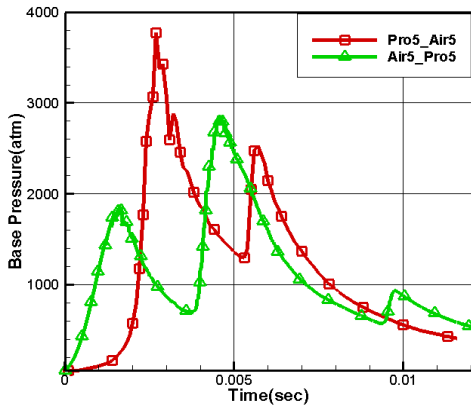


Fig. 17 Propellant 50 % case base pressure

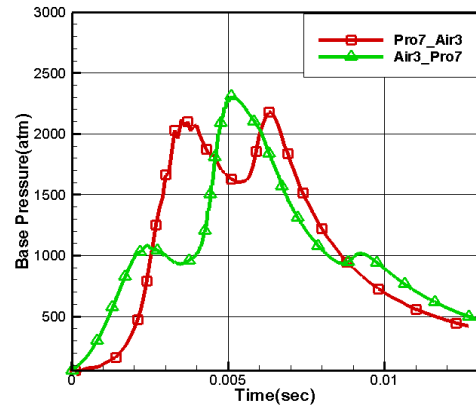


Fig. 15 Propellant 70 % case base pressure

동이 증가한다는 결론을 내릴 수 있었다.

Fig. 17은 전체 약실 길이의 50 %에 걸쳐 추진제가 포미 쪽과 탄저 쪽에 위치했을 때의 탄저 압력을 나타낸 그래프이다. Fig. 16과 마찬가지로 탄저 압력의 진동이 발생하였으며 위상차가 반대로 나타났다. 마찬가지로 추진제가 포미 쪽에 위치한 경우의 탄저 압력에 미세 진동이 나타났는데 그 진동 폭 또한 본 연구에서 고려된 case 중 가장 컸다. 이를 통해 초기 기공률이 낮을수록 강내 압력진동이 심해진다는 결론을 다시 한 번 확인하였다.

Table 5는 기공률 0.7 case 결과를 정리한 것이다. 해석결과 Table 4의 결과에 비해 Muzzle Velocity의 증가 및 탄자 탈출 시간의 감소를 확인하였는데 이는 해석에 사용된 추진제의 양이 증가함에 따라 강내 압력 또한 증가했기 때문이다.

하지만 결과의 경향성은 기공률과 상관없이 유사하게 나타

남을 확인했다. Table 4와 마찬가지로 Muzzle Velocity는 추진제를 전체 약실 길이의 50 %에 걸쳐 포미 쪽에 분포시킨 경우에 가장 빠르게 나타났으며 다른 Case 에 비하여 약 4 % 정도의 증가를 나타냈으나 강내 압력진동 역시 최대치를 나타냈으며 다른 case 에 비하여 약 30 % 이상의 최대 탄저 압

Table 5 Results of porosity 0.7 case

Case Name	Muzzle Velocity (m/s)	Escape Time of Projectile (e-2 sec)
Pro10_Air0	744	1.35
Pro7_Air3	755	1.27
Air3_Pro7	749	1.30
Pro5_Air5	775	1.17
Air5_Pro5	748	1.20

력을 나타냈다. 화포를 운용할 시 단위 체적 내에 많은 양의 추진제를 사용한다면 더 높은 성능을 나타낼 수 있으나 압력진동에 의해 포신에 국부적으로 높은 압력이 가해진다면 앞서 언급했던 상황이 발생하여 화포에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 높아질 것으로 판단된다는 결론을 다시 한 번 확인하였다.

5. 결 론

약실 내 추진제 위치에 따른 강내탄도 전산해석을 수행하였다. 약실 내 추진제가 고르게 분포하지 않고 빈 공간이 존재할 경우 추진제의 연소가 진행됨에 따라 압력파를 생성하여 강내 압력진동이 생성됨을 확인하였다. 또한 이러한 압력진동은 약실 내 빈 공간의 위치에 따라서 즉, 압력파가 전달되는 방향에 따라서 압력진동의 위상차가 서로 반대로 나타났다. 이러한 강내 압력진동은 초기 기공률이 낮을수록, 단위 체적 내에 많은 양의 추진제를 사용할수록 높아졌다. 전체 약실 길이의 50 %에 걸쳐 추진제를 분포시켰을 경우 즉, 단위 체적 내에 많은 양의 추진제를 사용할 경우 높은 Muzzle Velocity를 얻을 수 있었으나 강내 압력진동 및 최대 압력 또한 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 압력진동은 화포의 성능에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 높으므로 안정적인 화포 운용을 위해서는 강내 압력진동을 감소시키는 방안의 연구가 필요하며 이를 위해서는 점화제 주입 특성 및 기타 여러 가지 추가연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소 지원에 의한 연구 결과입니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 1995, Paul, S.G., "Initial Development of Core Module of Next Generation Interior Ballistic Model NGEN," *ARL-CR-234*.
- [2] 2009, 장진성, "고체추진제 형상에 따른 강내탄도의 특성 연구," *한국추진공학회 2009년도 추계학술대회 논문집*, pp.159-162.
- [3] 2008, 성형건, "강내탄도의 전산해석 기초 기법의 연구," *한국추진공학회 논문집*, 제12권, 제6호, pp.12-20.
- [4] 1952, Ergun, S., "Fluid Flow Through Packed Columns," *Chem Eng Prog*, Vol.48, No.2, pp.89-94.
- [5] 2009, 성형건, "고체추진제 이동을 고려한 강내탄도의 수치 해석," *한국전산유체공학학회 2009년도 춘계학술대회 논문집*, pp.310-314.
- [6] 1975, Stats, J., "Form-function for Multi-Component Propellant Charges Including Inhibited Grains and Sliver Burn," *MRL-TN-371*.
- [7] 2008, Chertock, A. and Kurganov, A., "A simple Eulerian finite-volume method for compressible fluids in domains with moving boundaries," *Commun Math Sci.*, Vol.6, No.3, pp.531-556.
- [8] 1988, 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.
- [9] 2010, 성형건, "Eulerian-Lagrangian 접근법과 SMART scheme을 이용한 강내탄도 전산해석 코드 개발," *한국군사과학기술학회지*, 제13권, 제3호, pp.349-357.