

포강 내 압력을 고려한 효율적 포신 설계

김의빈¹⁾ · 김규빈¹⁾ · 박은교¹⁾ · 오석환¹⁾ · 노태성¹⁾ · 조진연^{*1)}

¹⁾ 인하대학교 항공우주공학과

Efficient Design of Gun-Tube Considering Inner Pressure of Bore

Eubin Kim¹⁾ · Gyubin Kim¹⁾ · Eun Gyo Park¹⁾ · Seok-Hwan Oh¹⁾ · Tae-Seong Roh¹⁾ · Jin Yeon Cho^{*1)}

¹⁾ Department of Aerospace Engineering, Inha University, Korea

(Received 22 May 2023 / Revised 20 November 2023 / Accepted 22 November 2023)

Abstract

Artillery gun tube experiences very high pressure according to the blast of propellant charge. Therefore, it is essential to guarantee the structural safety of the gun tube. On the other hand, weight reduction of gun tube is also a crucial design factor since the agility of artillery vehicle directly leads to its survivability. In this line of thought, this work proposed an efficient design procedure which utilizes the convex combination of breech pressure and projectile base pressure time histories. Its efficiency is verified by comparing with other procedures. Other procedures utilize different computed max pressure rather than the convex combination design pressure. Additionally, a transient analysis is carried out considering the projectile movement and the corresponding pressure distribution through the newly developed ABAQUS user-subroutine. The analysis confirms the structural safety of the lightweight gun tube designed by the proposed method.

Key Words : Gun-tube(포신), Interior Ballistics(강내탄도), Pressure-Distance Curve(압력-거리선도), Design Pressure(설계 압력), ABAQUS User-Subroutine(ABAQUS 사용자 서브루틴)

1. 서론

화포(火砲)는 인간이 순수 힘으로 사용했던 돌, 칼과 같은 무기에 획기적인 변화를 가져왔다. 중국이 발명한 흑색화약을 시작으로 다양한 화포 무기가 발명되었으며 우리나라는 고려 말 최무선의 화약 제조 성

공을 필두로 조선시대 세종대왕 때는 화포의 표준화 및 규격화를 실시하는 등 화포의 제작과 운용에 관련된 기술이 발전되었다^[1]. 이렇듯 화포는 과거부터 개발되어 다양하게 운용되어 왔으며 현대에 들어서는 지상군에 투입되는 직사포, 곡사포, 박격포 등 다양한 방식으로 운용되고 있다.

화포는 다양한 탄약을 활용하여 적은 비용으로도 상대방에게 큰 피해를 줄 수 있을 뿐만 아니라 첨단 기술의 적용으로 효과적인 무기체계로 인식된다^[2].

* Corresponding author, E-mail: cgy@inha.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

화포는 그 형태와 운용환경에 따라 다양하게 분류되지만 포신 내부에서 탄약이 발사되는 원리와 과정은 동일하다. 기본적으로 포신 내부에 포미부터 추진제, 탄약의 순서로 위치되고 추진제의 연소 폭발로 인해 발생된 압력과 팽창 가스에 의해 탄약을 포구 방향으로 전진시켜 발사하는 과정을 거치게 된다.

포탄이 포신 내부에서 발사되는 과정 중 장약의 폭발로 인한 압력은 포강 내부에 큰 하중을 가하게 된다. 포강 내부에 가해지는 하중은 반복되는 포 발사 시에 포신에 피로를 증가시키게 되며, 더 나아가 포신 일부의 소성변형으로 인하여 포신의 영구 변형까지 유발할 수 있다. 이러한 현상은 포 발사 시 불안정한 환경을 유발하며 사격 정확도를 저하시키는 원인이 된다³⁾. 이에 포신의 구조적 안전성을 보장하기 위해서는 포강 내 압력을 견딜 수 있도록 포신을 설계해야 한다.

적절한 두께를 갖는 포신은 포강 내 압력분포를 활용하여 산출된 설계압력(Design Pressure)을 기준으로 설계할 수 있다. 또한 이렇게 만들어진 설계안의 타당성은 설계된 포신에 포 발사 시 발생하는 압력분포를 추가하여 그 구조적 안전성을 검증함으로써 입증될 수 있다.

이에 본 연구에서는 포강 내 압력 하 구조적 건전성을 보장할 수 있는 설계압력을 산출하는 방안을 제안하고 이를 이용하여 Fig. 1에 도시한 절차에 따라 포신 설계를 수행하고 포 발사 모사 구조해석을 통해 안전성을 검증한다.

먼저 2절에서 포의 구성품에 대해 소개한다. 그리고 3절에서는 강내탄도 전산해석 방법론 및 그 정확성에 대해 설명한 후 이를 이용해 탄의 이동에 따른 포강 내 압력 분포를 정밀하게 계산하였다. 이렇게 강내탄도 전산해석으로 계산된 압력분포를 활용하여 포강 내 약실 압력, 포탄 하부 압력, 포탄의 이동에 따른 포강 내 최대 압력 그리고 포탄의 시간에 따른 이동 거리를 확보한다.

4절에서는 이렇게 확보한 데이터와 함께 기존 설계 절차를 기반으로 다양한 설계압력을 산출하고, 이들 간의 비교 연구를 통해 기존 연구 대비 더욱 현실적이고 효율적인 볼록조합(Convex Combination) 설계압력 구성 방법을 제안하도록 한다.

5절에서는 앞서 구성한 다양한 설계압력을 활용하여 각각에 해당되는 포신을 설계하고, 각 설계 압력에 따른 포신 설계안의 두께 및 무게 비교를 수행한다. 이

를 통해 본 연구에서 새롭게 제시한 볼록조합(Convex Combination) 설계압력을 이용하여 설계한 포신이 가장 이상적인 설계안(각 지점의 최대 압력을 설계압력으로 이용한 경우의 설계안)과 매우 유사함을 확인하도록 한다.

최종적으로 5.3절에서 ABAQUS User-subroutine을 개발하고 강내탄도 전산해석을 통해 계산된 포강 내 압력분포 변화를 추가하여 포 발사 모사 구조해석을 수행하였으며, 이를 통해 설계된 포신의 안전성과 타당성을 검증하였다.

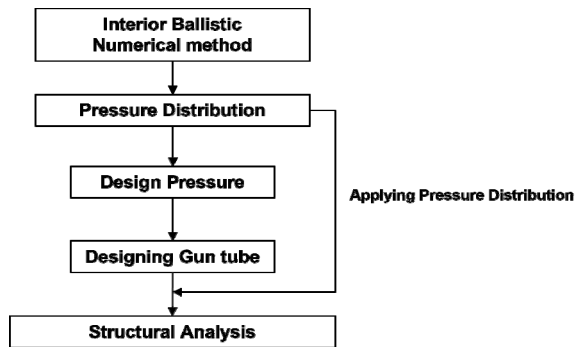


Fig. 1. Procedure of designing gun tube

2. 화기의 구성

포신 설계를 위해 포신의 구조적 특징 및 각각 부품의 역할을 판단하여 포신 설계에 참고하였으며 포신의 구조적 특징 및 부품은 Fig. 2에 도시하였다.

먼저 포신은 포탄이 직접적으로 통과하는 포열(Gun-barrel)과 장약 연소 및 폭발이 이루어지는 포미장치(Breech Mechanism) 등으로 구성된다. 이때 포열의 빈 공간을 포강(Bore)이라 정의한다. 추가적으로 발사 시 발생하는 가스를 열이나 뒤로 배출시키는 제퇴기(Muzzle Brake), 가스가 차내로 들어오지 못하게 하는 제연기(Bore Evacuator), 포 발사 시 발생하는 열에 의한 포열의 변형을 최소화하는 차열관(Thermal shroud) 등 부수장치까지 포함한다. 주퇴복좌기(Recoil System)는 사격 시 차체 및 포탑에 작용하는 사격 충격력을 감소시키는 장치이다²⁾.

이에 본 연구에서는 포신 설계의 단순화를 위해 포강 내 탄의 이동함에 따라 발생하는 압력이 직접적으로 작용하는 포열만을 고려하여 설계에 반영하였다.

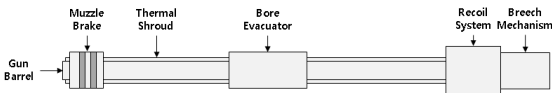


Fig. 2. Composition of cannon^[2]

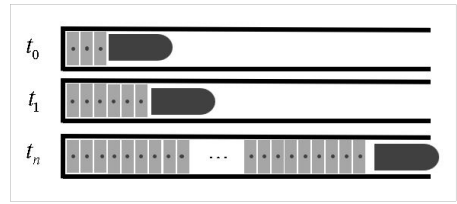


Fig. 3. Ghost cell extrapolation

3. 포강 내 압력

3.1 강내탄도 전산해석

강내탄도란 매우 짧은 시간 동안에 장약이 연소되며 그 연소가스가 이동함에 따라 포탄이 가속되는 일련의 과정을 일컫는다. 이때 포강 내부는 고온 고압의 환경이 되며 이러한 환경으로 인해 약실 압력과 포탄 하부압력을 제외한 대부분의 포강 내 유동 상태를 시험을 통해 얻기에는 한계가 존재한다. 그러므로 본 연구에서는 시험데이터 대신 검증된 강내탄도 전산해석 기법을 통해 포강 내 전체 압력분포를 계산하고 이를 기반으로 효율적인 포신 설계 절차를 제안하였다.

강내탄도 수치해석기법으로는 모든 속도 영역에 대해 해석 가능한 압축성 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked) 알고리즘을 활용하였다. 통상적으로 SIMPLE 알고리즘의 경우 압축성 효과가 발생하는 고속유동해석에는 적합하지 않지만, 본 연구에서는 이를 보완하여 압축성 효과를 적절히 반영할 수 있는 수정된 SIMPLE 알고리즘을 강내탄도 해석코드에 활용하였다^[4,5]. 또한 SMART(Sharp and Monotonic Algorithm for Realistic Transport) scheme을 사용하여 3차 정확성과 TVD 특성을 통해 공간 이산화의 수렴 안정성을 향상시켰다. 마지막으로 Fig. 3처럼 Ghost Cell Extrapolation 기법으로 탄자의 이동에 의해 생성되는 이동경계면을 계산하였다^[6,7]. 이렇게 구성된 강내탄도 전산해석 과정은 실제 화포 시험과의 비교 연구를 통해 검증된 바 있다^[8].

추진제는 케이스, 장약, 점화제 3종을 동일한 약실 위치에 배치하였다. 또한 장약의 성능은 포를 운용하는 온도 조건에 따라 달라지며, 이로 인해 포구속도도 영향을 받게 된다. 그러므로 강내탄도 전산해석 시 이러한 온도의 영향이 잘 반영되는지 여부를 확인하기 위해 저온/상온/고온 운용온도 조건에 대한 전산해석을 수행하였으며, 실제 시험과 비교하였다.

전산해석의 포구속도는 실험치를 기준으로 백분율로 나타내었으며 이를 Table 1에 도시하였다. 비교 결과 상당히 높은 정확성을 확인할 수 있다.

Table 1. Projectile exit velocity

데이터	방식	고온 (63 °C)	상온 (21 °C)	저온 (-54 °C)
포구 속도	시험	100 %	100 %	100 %
	해석	101.15 %	100.1 %	101.5 %

3.2 포강 내 압력 분포

강내탄도 해석을 통해 얻은 압력 분포는 Figs. 4~7과 같다. 먼저 Fig. 4는 포강 내 길이 방향 위치 x 와 시간 t 에 따른 압력 $p(x,t)$ 을 포강 내 최대 압력 값으로 정규화한 그래프이며 포탄이 시간에 따라 길이 방향으로 이동하면서 포탄 하부 쪽의 포강 내에 압력이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 5는 포탄의 길이 방향 위치 x 에 대한 최대 압력 그래프이며 이는 포탄이 이동함에 따라 포강 내 각 지점에 발생하는 최대 압력 값을 확인할 수 있는 그래프이다. 이때 길이는 포신의 길이이며 각각의 위치를 포신의 길이로 정규화 하였다.

Fig. 6은 시간에 따른 포강 내 최대 압력 분포를 나타내는 그래프를 나타낸다. Fig. 5와 다르게 포강 내 위치에 대한 최대 압력 값이 아닌 포탄이 이동하는 각각의 시간에 대한 최대 압력 값을 나타낸다. 이때 시간은 포탄이 포신을 탈출하는 시간을 기준으로 정규화하였다.

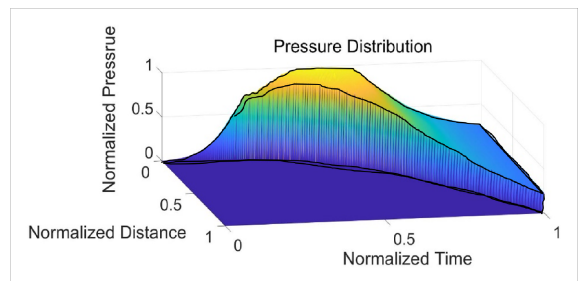


Fig. 4. Pressure-time-distance graph

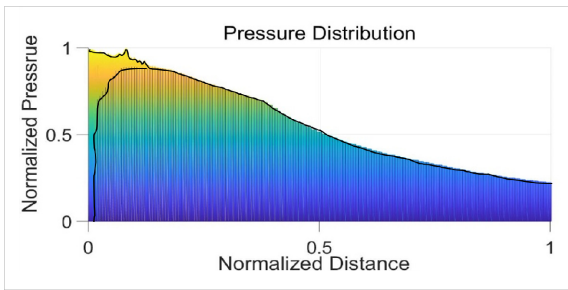


Fig. 5. Pressure-distance graph

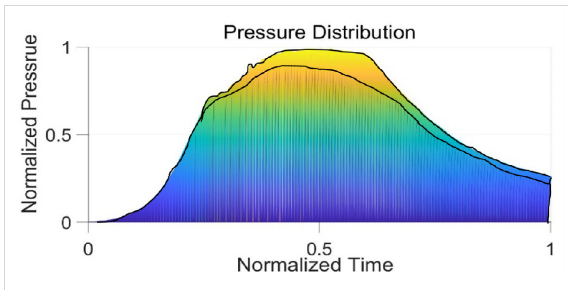


Fig. 6. Pressure-time graph

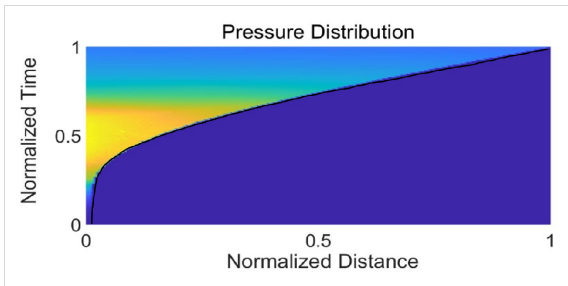


Fig. 7. Distance-time graph

마지막으로 Fig. 7은 Fig. 4를 위에서 내려다 본 모습으로서, 이동된 포탄의 위치와 이때 해당되는 시간을 나타내며, 이 위치를 전후로 압력분포는 Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 불연속성을 갖게 된다.

4. 포신 설계압력

포신의 두께를 산출하기 위해 사용되는 설계압력은 포강 내 위치에 따라 작용하는 압력이 다르기 때문에 설계압력 또한 위치에 따라 다르게 산출하게 된다. 설계압력은 다음과 같은 포 발사 환경과 상황을 고려하

여 산출된다.

먼저 포 발사 시 포강 내 각 지점에 작용하리라 예측되는 최대 압력을 CMP(Computed Maximum Pressure)라 정의한다. 그리고 CMP에 포의 다양한 임무반경과 포신의 피로도를 고려하여 2400 psi(16.5 MPa)를 더한 압력을 RMP(Rated Maximum Pressure)로 정의하며^[9,10], 이렇게 산출한 RMP에 포탄의 연속적인 발사와 다양한 온도에 견딜 수 있도록 115 %를 곱하여 산출한 압력을 PIMP(Permissible Individual Maximum Pressure)라 정의한다. PIMP는 포탄의 개별 발사 시 파손 없이 견뎌야 하는 허용 최대압력으로서, 최종적으로 포신의 소성 변형을 방지하기 위해 PIMP에 추가적인 안전계수를 곱하며 이때 안전계수는 대개 100~105 % 정도로 사용된다. 최종적으로 안전계수가 곱해진 압력인 설계압력(Design Pressure)을 산출하게 된다^[9,10].

선행연구^[9,10]에서는 다음 절에 설명한 바와 같이 탄의 움직임에 따른 시간-거리 환산을 통해 주로 시간에 따른 약실 압력을 해당 위치의 CMP로 활용하고 있으나, 본 연구에서는 기존의 약실 압력보다 더 실제적인 CMP 모델을 적용하여 연구를 진행하였다.

4.1 약실 압력을 활용한 설계압력

기존 문헌^[9,10]에서는 Fig. 8처럼 시간을 해당 시점의 포탄 위치로 환산하고, 그 시간의 약실 압력을 그 시점 포탄 위치에서의 CMP로 활용하고 있다. 그리고 약실 압력이 증가하는 동안에는 약실위치 x_0 부터 최대약실 압력이 작용하는 지점 x_{max} 사이의 압력도 계속 증가하므로, x_0 부터 x_{max} 사이의 예측 최대 압력 CMP를 최대약실압력 $P_{B,max}$ 와 동일하다고 가정한다. 그리고 설계압력은 이 CMP를 기반으로 산출하게 된다. 이러한 압력을 앞선 강내탄도 수치기법으로 산출된 압력 분포를 활용하여 구성하면 Fig. 9와 같이 구성할 수 있다.

이때 Fig. 9의 그래프로부터 약실압력을 CMP로 이용할 경우, 예측 최대압력 CMP가 포강 내 각 지점에 작용하는 최대 압력(Fig. 8의 Max Pressure)에 비해 많이 커질 수 있음을 알 수 있으며, 이로 인해 설계압력도 과대 반영될 수 있음을 짐작할 수 있다. Fig. 10에는 약실 압력을 CMP로 이용하여 계산된 RMP, PIMP 그리고 설계압력을 도시하였다. 이때 안전계수는 100 %를 적용하였다. 또한, 발사 시 겪게 되는 포강 내 최대 압력 값(CMP의 최대값에 해당)을 이용하여 설계압력을 정규화하고 이를 통해 각 설계압력의 상대적 크기를 비교할 수 있게 하였다.

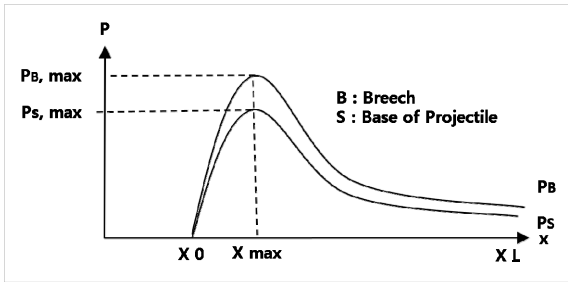


Fig. 8. Pressure-distance curve by reference^[10]

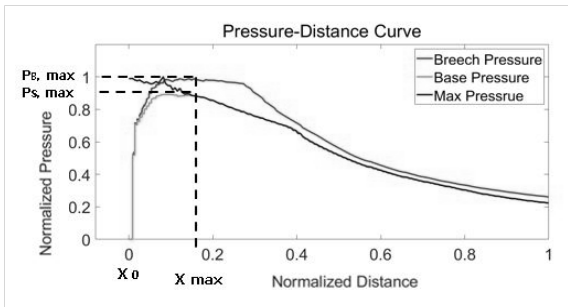


Fig. 9. Pressure-distance curve by interior ballistics analysis

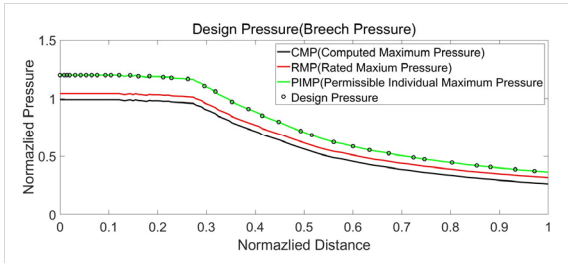


Fig. 10. Design pressure(breech pressure)

4.2 최대 압력을 활용한 설계압력

강내탄도 수치해석을 통해 얻은 최대압력을 CMP로 활용하여 도기한 설계압력 산출 그래프는 Fig. 11과 같다. 앞서와 동일하게 안전계수는 100 %로 적용하였다. 마찬가지로 최대 압력 값을 기준으로 정규화하였다.

Fig. 11을 살펴보면 포미 가까운 부분에서의 최대 압력이 길이 방향에 대해 단조 감소하지 않고 진동하는 현상이 발생한다. 추진제는 포탄이 움직이는 시점에 대부분 연소하는데, 이러한 압력의 진동은 추진제 점화 후 발생하는 유동장 압력과의 복잡한 간섭현상

에 의해 발생하는 결과로서, 최대 압력이 생성되는 지점도 이러한 현상의 지배를 받게 된다.

해당 설계압력을 포신 설계 시 활용한다면 포미 쪽에서 매우 불균일한 포신 두께를 갖게 된다. 이에 포미 쪽에서 일정한 두께를 갖는 포신 설계를 위해 약 실위치부터 압력이 튀는 현상이 나타나는 지점 사이에는 CMP가 동일하다고 가정하였다. 이를 나타내면 Fig. 12와 같다.

CMP의 정의가 포장 내 각 지점에 작용하리라 예측되는 최대 압력임을 고려할 때, 정밀 강내탄도 수치해석을 통해 얻은 최대 압력(혹은 만약 가능하다면 모든 지점에서 실제 측정을 하여 얻은 최대 압력)이야말로 CMP의 정의에 가장 부합하는 압력이라 할 수 있다.

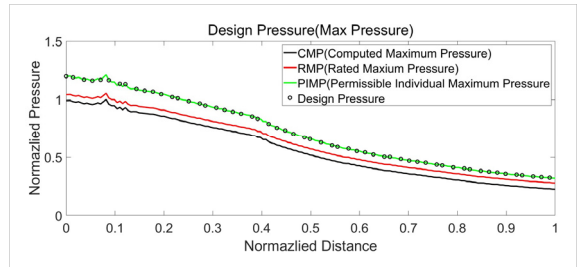


Fig. 11. Design pressure(max pressure)

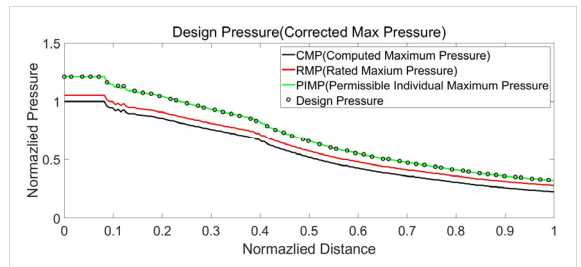


Fig. 12. Design pressure(corrected max pressure)

4.3 포탄 하부 압력을 활용한 설계압력

포탄의 이동에 따른 포탄 하부 압력을 CMP로 활용하고 약실 위치 x_0 부터 포탄 하부 압력의 작용지점 x_{max} 사이에 동일한 CMP가 작용한다고 가정하여 산출한 설계압력은 Fig. 13과 같다. 이때 안전계수는 100 %로 적용하였다. 마찬가지로 최대압력 값을 기준으로 정규화 하였다.

포탄 하부 압력은 Fig. 13과 같이 약실 쪽에서 최대

압력보다 작게 예측되고 포구로 갈수록 유사하게 예측되지만, 불확실성을 반영한 최종적인 설계압력은 최대압력을 상회하는 값을 나타낸다. 하지만 약실 쪽의 포미 부분에서 불확실성을 충분히 반영하지 못했을 가능성이 있으므로 포탄하부압력을 CMP로 활용함에 있어서는 추가적인 고려가 필요하다.

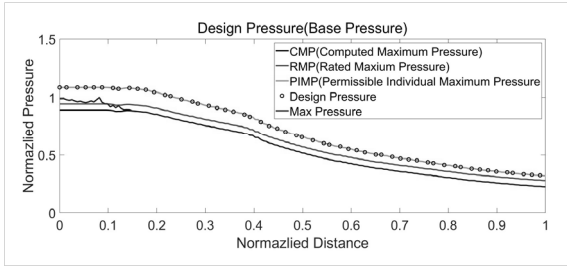


Fig. 13. Design pressure(base pressure)

4.4 강내탄도 압력 방정식을 활용한 설계압력

Fig. 14와 같이 포탄이 1차원 운동을 하는 경우 측정된 포탄 하부 압력 P_B 와 포탄 하부 압력 P_S 의 정보와 사용되는 장약의 무게 c 와 포탄의 무게 w 를 알고 있다면 포탄의 이동에 따른 포강 내 압력을 산출할 수 있는 방정식을 구성할 수 있다^[10].

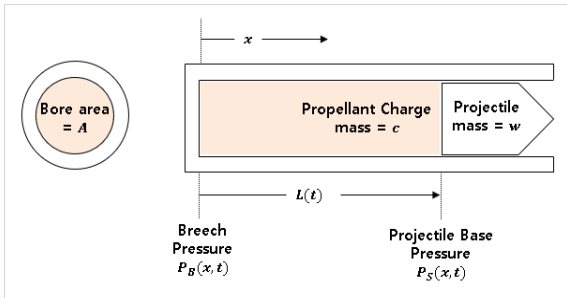


Fig. 14. Motion of projectile in gun-tube

먼저 포탄이 1차원 운동을 하는 경우 포강 내 연소가스 밀도 $\rho(x,t)$ 가 약실과 포탄 하부 사이 ($0 \leq x \leq L$)에서 일정하다고 가정한다. 이때 연소가스 밀도는 약실과 포탄 하부 사이의 공간에서 일정함을 의미하며 시간에 따라서는 변할 수 있음을 말한다. 따라서 특정 시각의 포강 내 공간에서는 밀도가 균일하지만, 포탄이 이동하는 시간에 따라 포강 내 연소가스의 밀도는 변화하게 된다. 그렇기에 밀도는 시간 t 만의 함

수로 표현될 수 있으며 $(\partial\rho/\partial x) = 0$ 이 성립한다. 이러한 가정을 이용하면 질량보존 법칙과 선형 운동량 보존 법칙은 다음과 같이 간략하게 표현될 수 있다^[10].

$$0 = \frac{d\rho(t)}{dt} + \rho(t) \frac{\partial V_x(x,t)}{\partial x} \tag{1}$$

$$\rho(t) \frac{dV_x(x,t)}{dt} = - \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} \tag{2}$$

여기서 V_x 는 x 방향으로의 속도, p 는 압력을 의미한다. 연소가스의 밀도 $\rho(t)$ 가 장약의 무게 c 를 부피로 나눈 $c/(AL(t))$ 라는 점을 이용하면 질량보존식은 다음과 같이 변환될 수 있다^[10].

$$\frac{1}{L(t)} \frac{dL(t)}{dt} = \frac{\partial V_x(x,t)}{\partial x} \tag{3}$$

그리고 식 (3)을 약실부터 특정 위치까지 적분한 후 약실에서 속도 $V_x(0,t)$ 가 0이라는 사실을 적용하고, 포탄 속도가 $V_p(t) = dL(t)/dt$ 라는 점을 이용하면 식 (4)와 같이 연소가스 속도가 약실부터 포탄하부까지 선형적으로 변함을 알 수 있다^[10].

$$V_x(x,t) = \frac{V_p(t)}{L(t)} x \quad (0 \leq x \leq L) \tag{4}$$

또한 식 (4)와 함께 $V_x(x,t)$ 를 x 와 t 로 편미분한 식, 그리고 밀도 $\rho(t) = c/(AL(t))$ 를 선형 운동량보존식에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다^[10].

$$\frac{c\ddot{L}(t)}{AL^2(t)} x = - \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} \tag{5}$$

그리고 식 (5)를 x 에 대하여 적분하면 다음과 같이 거리에 따라 압력이 2차 함수적으로 변화함을 알 수 있다^[10].

$$p(x,t) = - \frac{c\ddot{L}(t)}{AL^2(t)} \frac{x^2}{2} + p(0,t) \tag{6}$$

또한 포탄하부압력 $P_S(t)$ 는 $p(L,t)$ 와 같고 약실압력

은 $p(0,t)$ 와 같기 때문에, $x=L$ 을 대입하면 $P_S(t)$ 와 $P_B(t)$ 사이에는 아래와 같은 관계가 성립함을 알 수 있다^[10].

$$P_S(t) = -\frac{c}{2A}\ddot{L}(t) + P_B(t) \quad (7)$$

한편 포탄의 운동방정식을 간략히 $w\ddot{L} = AP_S$ 라 가정하고, 이를 위 식에 적용하면 포탄하부압력과 약실압력 사이에는 다음 관계가 성립함을 알 수 있다^[10].

$$P_B(t) = \left(1 + \frac{c}{2w}\right)P_S(t) \quad (8)$$

그리고 $\ddot{L} = AP_S/w$ 를 식 (6)에 대입한 후 식 (8)을 이용하여 포탄하부압력 $P_S(t)$ 혹은 약실압력 $P_B(t)$ 로 간추려서 나타내면 최종적으로 다음과 같은 압력 분포를 얻을 수 있다^[10].

$$p_{a,B}(x,t) = P_B(t) \left[1 - \left(\frac{c}{2w+c}\right) \frac{x^2}{L(t)^2}\right] \quad (9)$$

$$p_{a,S}(x,t) = P_S(t) \left[1 + \frac{c}{2w} \left(1 - \frac{x^2}{L(t)^2}\right)\right] \quad (10)$$

최종적인 위 식을 유도하는데 사용된 가정이 정확하다면 포탄 하부 압력 혹은 약실 압력 어느 것을 사용하더라도 동일한 압력을 얻게 된다. 하지만 실제와 가정이 다를 경우 압력 분포 또한 다를 수 있으므로, 각각의 경우를 식 (9), (10)으로 표현하였다.

압력 분포를 구성하기 위해 적절한 추진제 무게와 포탄의 무게를 적용하고 강내탄도 수치해석을 통해 얻은 Fig. 15에 시간에 대한 최대압력으로 정규화하여 도시된 포탄 하부 압력, 약실 압력을 적용했다. 이때 시간은 장약의 연소로 인해 압력이 발생하는 시점부터 포탄이 탈출하는 시간을 기준으로 정규화하였다. 최종적으로 Fig. 16의 포탄의 운동을 적용한다면 Fig. 17과 Fig. 18에 도시한 바와 같은 두 가지 시공간 압력 분포를 얻을 수 있다. 이때 포탄의 위치는 포신의 길이를 기준으로 각각의 위치를 정규화하여 도시하였다.

산출한 약실 압력을 활용한 압력분포 $P_{a,B}(x,t)$ 와

포탄 하부 압력을 활용한 압력분포 $P_{a,S}(x,t)$ 를 CMP로 선정하고 이를 통해 산출한 설계압력은 각각 Fig. 19, 20과 같다. 이때도 앞서와 마찬가지로 100 % 안전계수를 사용하였으며 최대압력 값을 기준으로 정규화하였다.

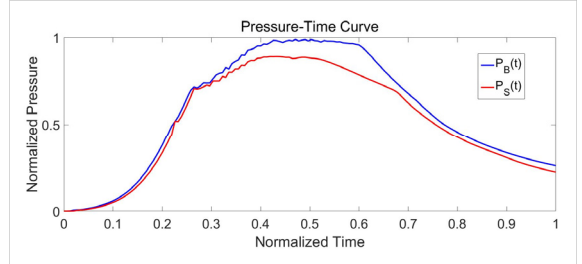


Fig. 15. Pressure-time curve

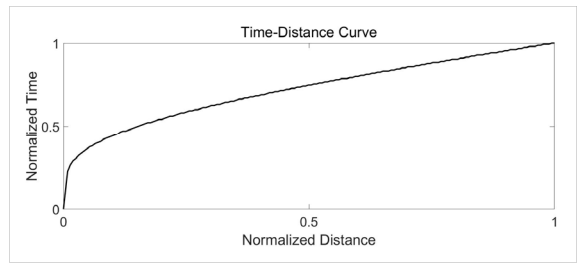


Fig. 16. Time-distance curve

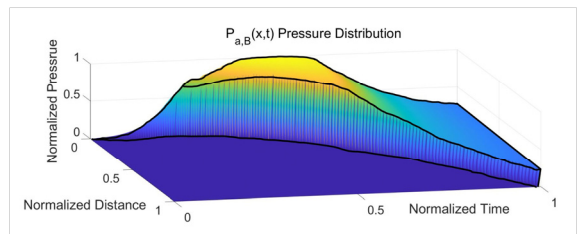


Fig. 17. Pressure distribution($P_{a,B}(x,t)$)

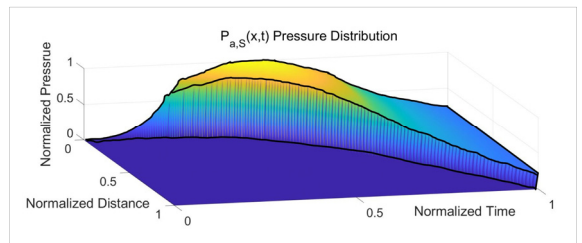


Fig. 18. Pressure distribution($P_{a,S}(x,t)$)

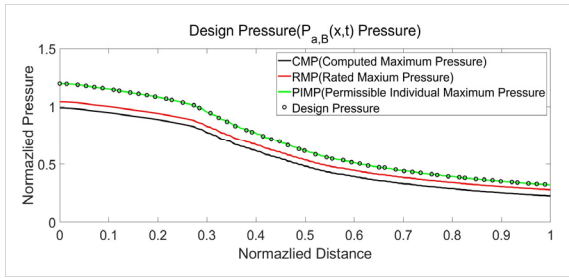


Fig. 19. Design pressure($P_{a,B}(x,t)$)

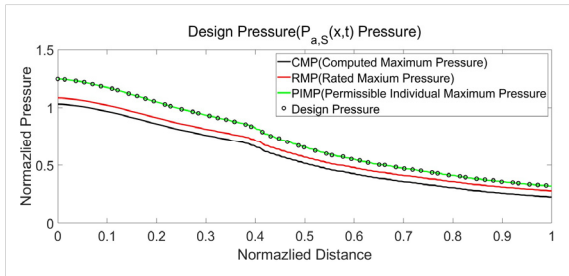


Fig. 20. Design pressure($P_{a,S}(x,t)$)

4.5 볼록 조합을 활용한 설계압력

앞에서 구성한 약실 압력과 포탄 하부 압력을 활용하여 산출한 두 가지의 압력분포를 특정 위치에서의 전산해석의 압력분포와 비교한다면 Fig. 21처럼 약실 쪽에서는 $P_{a,B}(x,t)$ 압력 분포와 일치하며 포탄 하부에서는 $P_{a,S}(x,t)$ 압력 분포와 일치하게 된다.

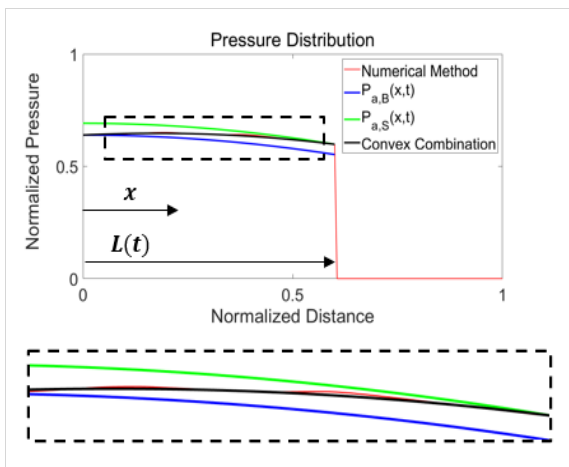


Fig. 21. Comparison of pressure distribution by distance

모든 시간에 대해 약실 압력과 포탄 하부 압력을 만족시키면서, 전산해석 압력 분포 개형을 일정 부분 고려할 수 있도록 다음과 같이 볼록 조합(Convex combination)을 이용하여 압력분포식을 새로 구성하였다. 이때 $P_{a,B}(x,t)$ 와 $P_{a,S}(x,t)$ 는 2차식 형태이므로 볼록 조합은 3차식 형태가 된다.

$$P_{convex} = \left(1 - \frac{x}{L(t)}\right) P_{a,B}(x,t) + \frac{x}{L(t)} P_{a,S}(x,t) \quad (11)$$

식 (11)을 활용하여 구성한 볼록 조합은 Fig. 21에 도시된 바와 같이 전산해석 압력 분포와 유사한 개형을 나타낼 수 있는 형태임을 확인할 수 있다. 이는 실제 포강 내 압력 측정 시, 시간에 따른 약실 압력 $P_B(t)$ 와 포탄 하부 압력 $P_S(x,t)$ 을 측정한다면^[11,12] 식 (9~11)을 이용하여 포탄의 이동에 따른 포강 내 각 지점의 압력을 구할 수 있다는 장점을 갖는다.

볼록 조합을 통해 산출한 압력 분포는 Fig. 22와 같다. 산출한 압력 분포를 활용하여 설계압력을 적용해보면 Fig. 23과 같다. 마찬가지로 안전계수는 100 %를 활용하였으며, 최대 압력 값을 기준으로 정규화 하였다.

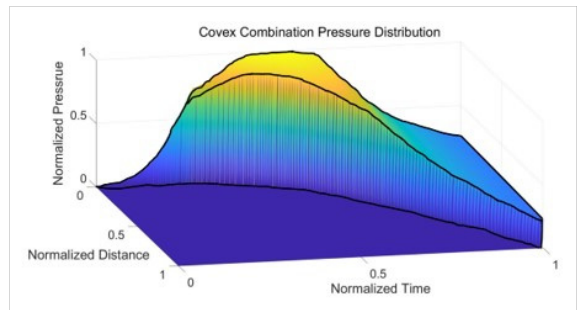


Fig. 22. Pressure distribution(convex combination)

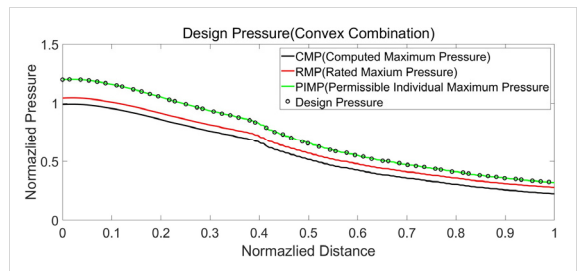


Fig. 23. Design pressure(convex combination)

5. 포신 설계 및 검증

앞서 산출한 포신 설계압력을 가지고 포신의 두께를 산출하는 절차를 구성하였다.

포신의 두께는 설계압력과 포신 재질의 항복강도 그리고 초기 설정한 포신의 내경을 통해 구할 수 있다. 이때 포신 설계 시 내경은 강선 고려 없이 강선을 판 홈까지의 직경으로 설정하였다.

5.1 포강 내 압력에 따른 두께 산출 관계식

포강 내 압력에 따른 두께 산출 관계식은 다음과 같이 유도된다.

외경 b 와 내경 a 를 갖는 원통형 실린더 내부에 압력 p_i 가 작용한다면 특정 반경 r 에서의 반경 방향 응력과 횡 방향 응력은 다음과 같이 유도될 수 있다^[13].

$$\sigma_{rr} = \frac{p_i}{(b^2/r^2) - 1} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (12)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p_i}{(b^2/a^2) - 1} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (13)$$

이때의 von-Mises Stress는 다음과 같이 정의된다^[13].

$$\sigma_{eq} = \frac{p_i}{(b^2/a^2) - 1} \sqrt{1 + 3 \left(\frac{b^4}{r^4} \right)} \quad (14)$$

특정 반경(r)이 내경(a)과 동일하다면 그때의 응력의 크기는 최대가 되며 아래와 같이 표현될 수 있다^[13].

$$\begin{aligned} \sigma_{eq}^{\max} &= \frac{p_i}{(b^2/a^2) - 1} \sqrt{1 + 3 \left(\frac{b^4}{a^4} \right)} \\ &= p_i \frac{\sqrt{1 + 3W^4}}{W^2 - 1} \leq \sigma_Y \end{aligned} \quad (15)$$

위에서 W 는 내경과 외경의 비를 의미하며, 압력에 의한 파손을 방지하기 위해 최대 von-Mises Stress σ_{eq}^{\max} 는 항복강도 σ_Y 보다 작게 유지되어야 한다.

최종적으로 얻은 식 (15)를 포신의 두께비(W)에 대하여 나타내면 특정 지점의 포강 내 작용하는 압력을 이용하여 포신의 두께를 산출할 수 있는 관계식을 도출할 수 있다^[13].

$$W = \left(\frac{1 + 2 \frac{p_i}{\sigma_Y} \sqrt{1 - 3 \left(\frac{p_i}{\sigma_Y} \right)^2}}{1 - 3 \left(\frac{p_i}{\sigma_Y} \right)^2} \right)^{1/2} \quad (16)$$

5.2 설계압력별 두께 산출 및 포신 설계

구성한 설계압력을 이용하여 포신 두께를 산출하고 그 결과를 Fig. 24에 도시하였다. 설계압력별 두께를 강내탄도 전산해석을 통해 얻은 최대 압력을 이용하여 산출된 포신 두께와 비교했다. 도시한 순서는 (a)~(e) 순서대로 약실 압력, 포탄 하부 압력, $P_{a,B}(x,t)$, $P_{a,S}(x,t)$ 압력분포 그리고 볼록 조합 압력 분포를 활용하여 설계한 포신의 두께이다. 이를 통해 각각의 포신 두께가 최대 압력 대비 어느 정도의 안전성을 나타내는지 확인할 수 있다.

최대 압력을 활용한 포신 두께는 앞서 언급한 것처럼 포미부분에서의 압력 진동으로 인해 포미 부분이 불균일한 두께로 설계되는 것을 방지하기 위해 Fig. 12와 같이 포미 부분 CMP를 균일하게 보정한 후, 이를 기반으로 산출하였다. 이때 포신은 앞서 언급했듯이 Fig. 2에서 포열을 제외한 다른 부분은 고려하지 않았다.

최종적으로 식 (16)에 의해서 두께를 산출하고 이를 Table 2에 나타내었다. 이때 안전계수는 100 %를 적용하였으며, 더 안전한 설계를 위해서는 더 높은 안전계수를 도입할 수 있다.

결과로부터 기존 최대압력을 CMP로 활용하는 경우와 비교할 때, Fig. 24(a)에 도시한 약실 압력을 기준으로 설계한 포신은 약실 근처에서 포신 두께가 상대적으로 두껍게 산출되기에 가장 무거운 포신을 나타냈다. 또한 Fig. 24(b)에 도시한 포탄 하부 압력 기준 설계안은 약실 쪽에서의 포신 두께가 얇게 산출되기에 가장 낮은 무게를 나타냈다. 하지만 약실 쪽의 압력을 낮게 산출하였으므로, 약실부분에 구조적 취약성이 발생할 수 있다.

Fig. 24의 (c)에 도시한 $P_{a,B}(x,t)$ 압력분포를 활용하여 설계한 포신의 두께는 최대 압력을 활용한 포신의 두께와 비슷한 분포를 나타내나 중간부분에 다소 차이가 발생하며, Fig. 24의 (d)의 $P_{a,S}(x,t)$ 압력 분포를 활용한 포신의 두께는 최대 압력 활용 포신의 두께와 유사하다. 마지막으로 Fig. 24의 (e)에 도시한 볼록 조합을 활용하여 산출한 포신의 두께 분

포는 약실 쪽에서의 약간의 차이를 제외하고는 최대 압력 활용 포신의 두께 분포와 가장 유사한 결과를 나타낸다.

이러한 점과 Table 2의 결과를 고려할 때 $P_{a,B}$ 압력과 $P_{a,S}$ 압력의 블록 조합으로 산출된 압력을 활용할 경우 최대 압력을 활용한 설계안에 가장 가까운 설계안을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 특히 블록조합 압력의 경우 실제 시험을 통해 약실압력과 포탄하부압력 데이터만을 획득하였을 경우에도 매우 유용하게 활용할 수 있다는 아주 큰 장점을 가지고 있다.

Table 2. Weight of gun-tube

Model No.	설계압력	안전계수 (%)	무게 (%)
1	약실 압력	100	112.9
2	최대 압력	100	100
3	포탄 하부 압력	100	95.8
4	$P_{a,B}$	100	98.2
5	$P_{a,S}$	100	100.6
6	Convex Combination	100	100.2

5.3 사용자 서브루틴을 활용한 포 발사 환경 구성

포탄의 발사 시 발생하는 압력을 포신에 가하는 환경을 구축하기 위해 ABAQUS User-Subroutine의 하나인 VDLOAD를 구성하였다^[14]. VDLOAD를 활용하여 포탄이 포신 내부를 이동하는 시간에 따라 포강 내 압력 분포가 달라지는 환경을 구현하였다. 이는 Fig. 25에 도시한 것처럼 포탄이 특정 시간에 있을 때의 포강 내 압력 분포를 추출하여 나타내면, 포탄이 포신 내부를 이동함에 따라 포강 내 길이 방향으로 가해지는 압력분포가 달라지는 현상을 확인할 수 있다.

해석에 사용된 포신과 포탄 모델을 Fig. 26에 도시하였으며 이때 포탄은 단순 실린더 현상으로 가정하였다.

VDLOAD는 포탄 하부 압력에 의해 포탄이 포구 방향으로 이동하면서 발생하는 포미 쪽에서의 거리와 그때의 시간에 따라 해당 위치에서의 압력이 부가되도록 구성했다.

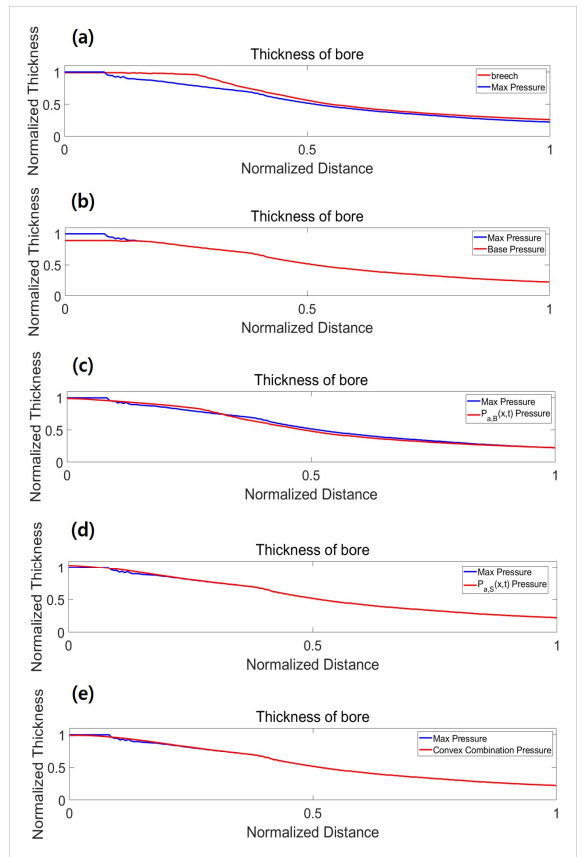


Fig. 24. Comparison of gun-tube thickness along the distance

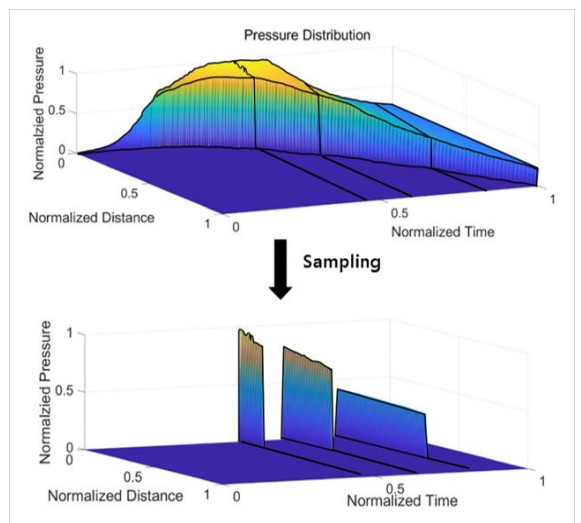


Fig. 25. Pressure distribution

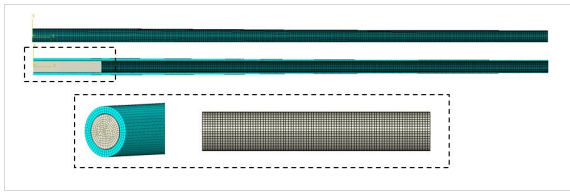


Fig. 26. Analysis modeling

5.4 설계한 포신의 안전성 검증

포탄이 이동함에 따라 포신에 추가되는 압력으로 인하여 발생하는 von-Mises 응력 분포가 포신 설계 시 적용했던 항복강도를 초과하여 소성 변형이 발생하는 지 여부에 따라 안전성을 판단하였다. 또한 포신 내부면의 반경방향 변위를 확인함으로써 포탄의 이동에 따른 압력분포가 포신에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하였다.

검증할 포신 모델은 약실 압력 포신 모델과 본 논문에서 새롭게 적용한 강내탄도 해석을 통해 얻은 보정 최대 압력 포신 모델 그리고 이와 가장 유사한 볼록 조합 압력 포신 모델을 활용했다.



Fig. 27. Inner surface of gun-tube

또한 Fig. 27에 도시한 바와 같이, 포신 내부의 안쪽 면을 기준으로 포탄의 이동에 따른 포신의 길이 방향에 대한 반경 방향 변위와 von-Mises 응력을 측정하였다.

Fig. 28, 30, 32에 도시한 포신 내부면의 반경 방향 변위는 설계된 포신의 내경을 기준으로 정규화하여 내경 대비 얼마나 변형이 발생하는지를 비교하였다.

해석 결과 탄이 포강 내에서 움직이고 있는 경우 (Position 1~3) 반경 방향 변위는 대부분 양의 값을 갖는다는 사실을 알 수 있으며, 이는 포신이 압력으로 인해 반경방향으로 벌어지고 있음을 의미한다. 한편 탄이 포구를 탈출하는 시점에는 포미 부분이 반경방향으로 진동하며 반경이 줄어드는 현상도 관찰되었다 (Position 4). 또한 탄이 이동함에 따라 발생하는 압력 분포에 의해 탄 위치를 경계로 급격한 변위가 발생함을 확인할 수 있다.

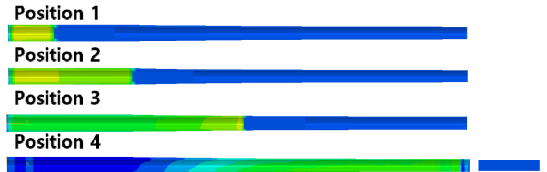
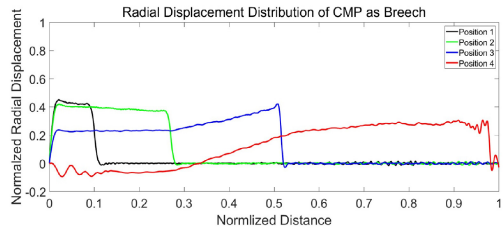


Fig. 28. Radial displacement (using the breech pressure as CMP)

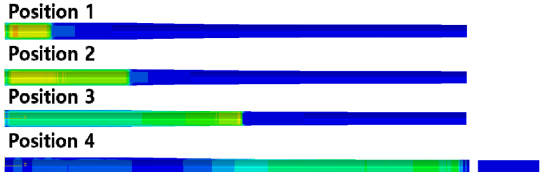
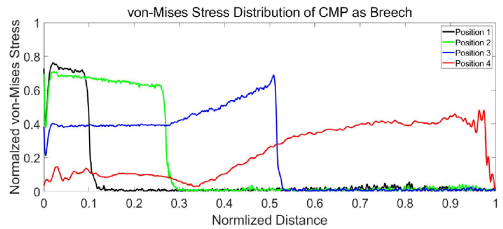


Fig. 29. von-mises stress (using the breech pressure as CMP)

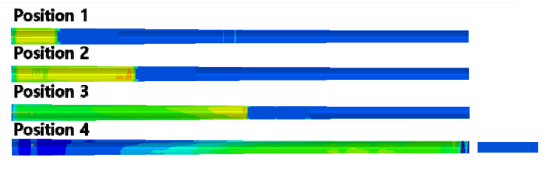
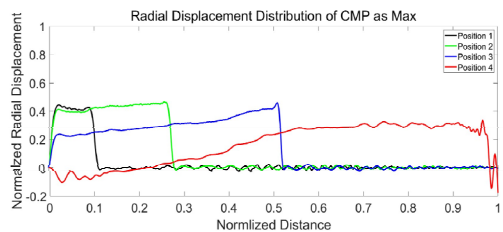


Fig. 30. Radial displacement (using the max pressure as CMP)

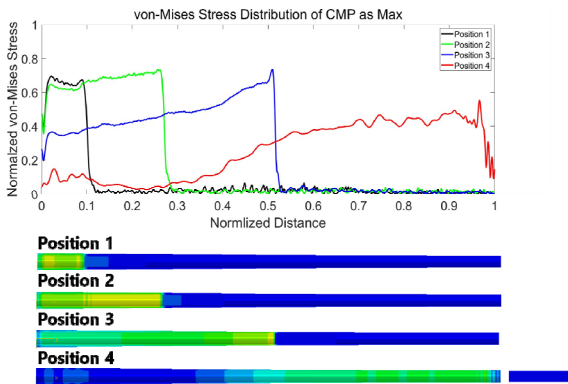


Fig. 31. von-mises stress(using the max pressure as CMP)

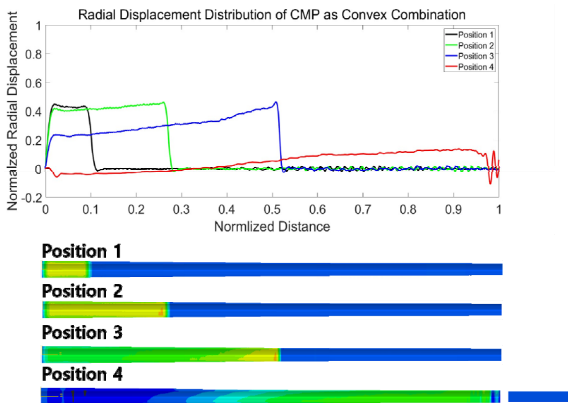


Fig. 32. Radial displacement(using the convex combination pressure as CMP)

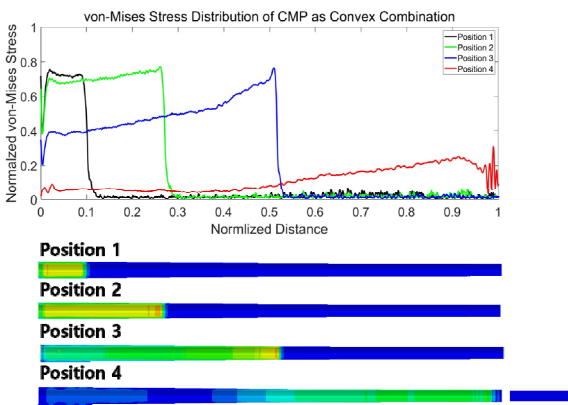


Fig. 33. von-mises stress(using the convex combination pressure as CMP)

포신 내부면 길이 방향 von-Mises 응력 분포는 포신 재질의 항복강도를 기준으로 정규화하여 항복강도 대비 얼마나 응력이 발생하는지를 고찰하였다.

Fig. 29, 31, 33의 해석 결과를 통해 알 수 있는 바와 같이 모든 경우에 대해 최대 Von-Mises 응력이 항복강도의 80 % 수준을 넘지 못하고 있음을 확인할 수 있으며, 이를 통해 모든 경우 포신에 소성변형이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 화포 시스템의 안정성을 담보하고 이동성을 향상시키기 위한 목적으로, 포신의 구조적 건전성을 보장함과 동시에 이를 경량화할 수 있는 개선된 포신 설계 절차에 대한 연구를 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 개선된 포신 설계 절차를 구성하기 위해 식 (11)과 같은 새로운 블록조합 압력분포를 제안하고 이를 계산최대압력(CMP)으로 도입하였다.
- 2) 새로운 블록조합 압력분포를 이용할 경우 주어진 최대 압력분포(각 지점에서 강내탄도 전산해석에 의해 얻어지는 압력의 최대값)를 이용하여 얻어지는 설계안과 매우 유사한 포신 설계안을 얻을 수 있음을 확인하였다.
- 3) 새로운 블록조합 압력분포를 이용할 경우 약실압력 대비 12 % 이상의 경량화 효과를 거둘 수 있음을 확인하였다.
- 4) 포탄의 움직임에 따라 변화하는 압력분포를 부가하기 위해 ABAQUS 사용자 서브루틴을 개발하였다. 그리고 새로 제안된 절차에 의해 설계된 포신의 포 발사 구조해석에 이를 적용하였다.
- 5) 포 발사 구조해석 결과, 최대 von Mises 응력이 항복강도 대비 80 % 이하 수준으로서 포 발사 시 포신에 소성 변형이 발생하지 않음을 확인하였다.
- 6) 제안된 블록조합 압력분포를 구성하기 위해서는 약실압력과 포탄하부압력만이 필요하다. 그러므로 실제 시험을 통해 측정되는 약실압력과 포탄하부압력 데이터만으로도 실제 작용하는 최대압력과 매우 유사한 압력을 산출할 수 있을 것으로 사료되며, 이를 토대로 매우 신뢰성 높은 경량 설계가 가능할 것으로 기대된다.

추후 포탄이 포신 내부를 통과할 때 포탄과 포신 사이의 마찰로 인해 에너지 소산이 발생하므로 이러한 영향에 대해 연구할 필요가 있으며, 포신 전방으로의 압력 누기와 발사 중 포신의 변형을 최소화하는 연구도 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] H. W. Lim, W. H. Choi, "Restoration of Joseon's Mortar Used During the Japanese Invasion of Korea in 1595," *Journal of the Korea Contents Association*, Vol. 20, No. 7, pp. 56-65, 2020.
- [2] S. K. Hong, "Gun Technology-Practical Base," *BON DESIGN*, Daejeon, pp. 8-139, 2012.
- [3] D. U. Kim, J. Y. Lee, Y. C. Kang, "A Study on the Expansive Deformation of Rifle Barrel and Gun Barrel," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 3, No. 2, pp. 7-14, 2000.
- [4] H. S. Ahn, C. H. Sohn, S. Y. Moon, "Numerical Calculations of Compressible Flows using a SIMPLE Algorithm," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 1-8, 2000.
- [5] J. S. Jang, H. G. Sung, T. S. Roh, D. W. Choi, "Performance Analysis of Interior Ballistics using 1-D Numerical Method," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 5, No. 3, pp. 241-249, 2012.
- [6] H. G. Sung, J. S. Jang, S. B. Lee, D. W. Choi, T. S. Roh and Y. J. Jang, "Development of Code for Numerical Analysis of Interior Ballistics using Eulerian-Lagrangian Approach and SMART scheme," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 13, No. 3, pp. 349-357, 2010.
- [7] S. H. Oh, D. W. Kan, H. J. Lee, E. M. Kim and T. S. Roh, "Study on the Performance Characteristics of Interior Ballistics with Configurations and Arrangement of Solid Propellant Grain," *Journal of Propulsion and Energy*, Vol. 2, No. 1, pp. 14-22, 2021.
- [8] H. G. Sung, T. S. Roh, "Application of Eulerian-Lagrangian Approach to Gas-Solid Flows in Interior Ballistics," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 80, No. 3, 031407, 2013.
- [9] US Army Materiel Command., *Research and Development of Materiel, "Engineering Design Handbook, Gun Series, Gun Tubes,"* US Army Materiel Command, Washington DC, pp. 4-76, 1964.
- [10] D. E. Carlucci, S. S. Jacobson, "Ballistics: theory and design of guns and ammunition," CRC Press, New York, pp. 3-166, 2007.
- [11] S. K. Lee, S. D. Kim, G. Y. Lee, "A Study on the Calculation of Muzzle Velocity Through the Gun Barrel Pressure Measurement," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 12, No. 5, pp. 60-66, 2008.
- [12] Kayser, Lyle D., John D. Kuzan, and David N. Vazquez, "Ground Testing for Base-Burn Projectile Systems," *US Army Ballistic Research Laboratory*, Maryland, pp. 1-31, 1988.
- [13] S. P. Timoshenko, J. N. Goodier, "Theory of Elasticity 3e.," McGraw-Hill, New York, pp. 65-71, 1970.
- [14] Abaqus, 2020, *Abaqus Documentation*, Dassault Systems Simulia Corp., Providence, RI, USA.