

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2015.19.5.071>

## 형상 변수를 사용한 다공형 추진제 성능 해석 및 설계 연구

오석환<sup>a</sup> · 장진성<sup>a</sup> · 박민수<sup>a</sup> · 노태성<sup>b,\*</sup>

### Study of Multi Perforated Propellant Performance Analysis and Design using Configuration Variables

Seok-Hwan Oh<sup>a</sup> · Jin-sung Jang<sup>a</sup> · Min-Su Park<sup>a</sup> · Tae-Seong Roh<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup>Aerospace Engineering, Inha University, Korea

<sup>b</sup>Faculty of Aerospace Engineering, Inha University, Korea

\*Corresponding author. E-mail: [tsroh@inha.ac.kr](mailto:tsroh@inha.ac.kr)

#### ABSTRACT

Internal ballistics is a phenomenon happened in tens of milliseconds during the gun firing. The configuration variables of the solid propellant are important factors which have influences on the performance of the gun system. In this study, the performance analysis of the 7-perforated propellant has been conducted using the numerical program for the interior ballistics. The effect of the configuration variables on the gun system performance has been analyzed. The propellant design has been conducted for the satisfaction of the performance requirements. As results, the relationship between the configuration variables and the performance has been obtained and the basic design concept of the multi-perforated propellant has been provided.

#### 초 록

강내탄도는 화포 사용 과정에서 밀리초 단위의 매우 짧은 시간 동안 발생하는 현상이다. 고체 추진제는 다공형 형상을 하고 있으며, 이 추진제의 형상 변수에 의해 화포의 성능을 결정된다. 이에 본 연구에서는 강내탄도 전산해석 프로그램을 사용하여 형상 변수에 의한 화포의 성능 해석을 수행 하였다. 추진제 형상 변수가 화포 성능에 미치는 영향을 분석 하였으며, 목표 화포 성능을 만족하는 다공형 추진제 형상 설계를 수행 하였다. 이를 통해 추진제 형상 변수와 화포 성능의 상관관계를 정리하였으며, 고체 추진제 형상 설계의 기초적인 자료를 제시하였다.

Key Words: Interior Ballistic(강내탄도), 7-perforated Propellant(7공형 추진제), Web Size(웹 크기), Configuration Variables(형상 변수)

Received 23 July 2015 / Revised 8 September 2015 / Accepted 14 September 2015  
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers  
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

#### 1. 서 론

강내탄도는 화포 운용 과정에서 고체 추진제

의 화학 에너지가 발사체의 운동 에너지로 변환되는 과정이다. 고체 추진제는 연소 과정에서 고온, 고압 상태가 되며, 발사체가 포구를 통과할 때까지 매우 짧은 시간이 소요된다. 따라서 실험을 통한 강내탄도 연구는 시간 및 비용 등의 한계가 존재하므로 전산해석을 통한 연구가 필요하다[1].

화포 성능은 고체 추진제 형상의 영향을 받는다. 다공형 추진제의 경우 형상 변수를 Fig. 1과 같이 가지고 있으며, 기존의 연구에서는 내부 반지름과 외부 반지름의 변화가 화포 성능에 미치는 영향을 연구 하였다[2]. 하지만 Inner Web과 Outer Web의 비율에 따라 추진제 연소 형상이 다르기 때문에 Web 비율이 화포 성능에 미치는 영향을 연구할 필요가 있다.

추진제 형상 변수의 변화가 화포 성능에 미치는 영향을 연구함으로써 형상 변수가 화포 성능에 미치는 경향성을 파악할 수 있다. 이를 통해 요구 성능을 달성하기 위한 형상 변수 수정 방향을 제시할 수 있으나, 요구를 만족할 때 까지 재설계 및 성능 해석을 반복하여 수행해야 한다.

이에 본 연구에서는 Web 비율에 따른 성능 해석을 통해 형상 변수가 성능에 미치는 영향을 분석하여 효율적인 Web 설계 연구를 수행 하였으며, 추진제 형상 변수와 화포 성능 사이의 관계를 분석하여 목표 성능을 만족하는 추진제 형상 설계 방안을 제시하였다.

## 2. 강내탄도 전산해석

### 2.1 강내탄도

강내탄도는 화포 약실 내부의 고체 추진제가 점화가스에 의해 점화 및 연소되고, 생성된 연소 가스에 의해 약실 압력이 증가하여 발사체가 포구까지 가속 및 사출되는 일련의 과정이다[1]. 전체적인 진행 과정은 Fig. 2와 같으며, 추진제 점화부터 발사체 사출까지의 과정이 msec 단위의 매우 짧은 시간동안 발생한다. 고체 추진제의 고에너지를 짧은 시간동안 운용하기 때문에 약실 내부의 압력 등 화포의 성능을 측정하는데

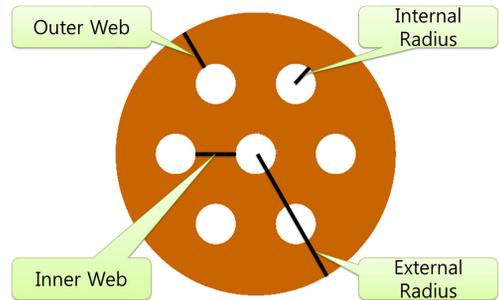


Fig. 1 7-perforated propellant configuration variables.

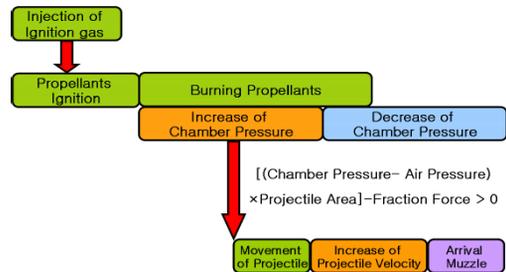


Fig. 2 Diagram of interior ballistics.

어려움이 있으며, 폭발 등의 위험성이 크기 때문에 실험을 통한 연구는 한계가 존재한다. 따라서 실험보다 안전하고 비용이 저렴한 전산해석을 통한 연구가 선행 되어야 한다.

### 2.2 강내탄도 지배방정식

강내탄도는 고체 추진제 점화 및 연소를 포함한 이상유동(two-phase flow)이다. 본 연구에서는 다분산상을 해석할 수 있는 Eulerian-Lagrangian 접근법을 사용한 강내탄도 전산해석 프로그램을 사용 하였다. 연속상인 기상의 지배방정식은 고체 추진제(고상)를 고려하기 위해 기상이 차지하는 부피를 의미하는 기공률( $\alpha$ )을 도입한 Baer&Nunziato의 지배방정식을 사용한다[2]. 분산상인 고상의 지배방정식은 입자의 움직임에 주된 영향을 주는 계면 마찰력(interphase drag)만을 고려하였다. 계면 마찰력 모델로 Ergun 식을 Eq. 1과 같이 사용하였다[3].

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

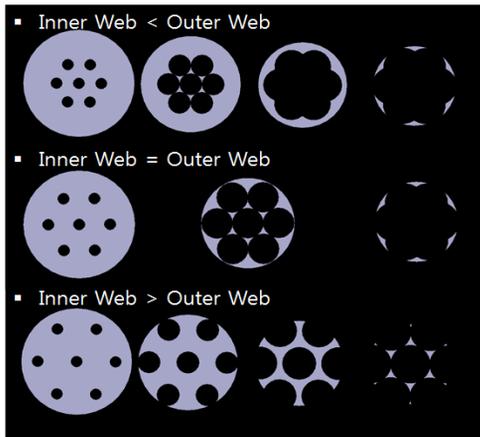


Fig. 3 Bunning step of 7 perf propellant.

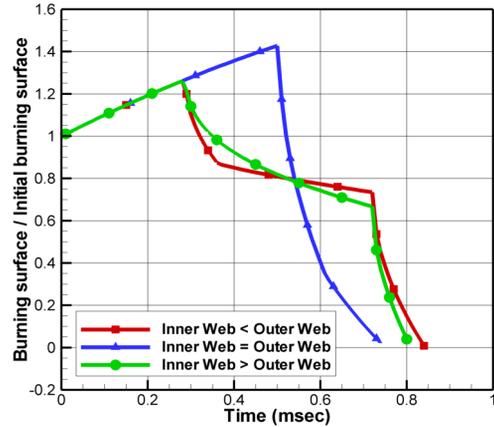


Fig. 4 Burning surface (Burning rate fixed).

2.3 수치해석기법

약실 내부의 고온 고압 유동장을 해석하기 위해 SHUS 기법의 성능 향상 버전인 LSHUS (Low - dissipation Simple High - resolution Upwind Scheme) 기법을 사용하여 축대칭 2차원 강내탄도 해석 코드를 사용하였다. LSHUS 기법은 비점성 플럭스항을 계산하는데 있어 AUSM 기법이 사용하는 질량 플럭스 대신에 Roe의 질량 플럭스로 대체하여 Roe 기법의 정확성과 AUSM의 강건성을 유지하는 기법이다 [4]. 탄자의 이동에 의해 생성되는 이동 경계면은 Ghost Cell Extrapolation 기법을 사용하여 계산하였다[5].

2.4 7공형 추진제 연소 형상 해석

연소에 따른 7공형 추진제의 형상은 Fig. 3과 같이 변화한다. 연소가 진행될수록 Web 길이가 줄어들어 0이 되는 순간 Sliver가 생성된다. Inner Web과 Outer Web의 크기가 같은 경우 6개의 작은 Sliver와 6개의 큰 Sliver가 생성되지만, Web 비율이 다를 경우 Sliver 생성 시기 및 형상의 차이가 발생한다. 연소 형상 변화에 의해 연소 표면적 또한 Fig. 4와 같이 다르게 나타나며, 이는 화포 성능에도 영향을 미치게 된다.

추진제 형상은 Web 비율에 따라 다른 형상을 나타내기 때문에 연소 표면적 또한 다르게 계산해야 한다. 본 연구에서는 Stals. J의 표면적 계

Table 1. Initial condition.

Chamber Length (m)	0.762
Chamber Height (m)	0.066
Gun Length (m)	4.138
Gun Diameter (m)	0.132
Bullet Mass (kg)	45
Friction (Pa)	13.8e6
Length (m)	0.0254
Propellant Porosity	0.42
Propellant Gamma	1.27
Combustion Rate Constant Pa <sup>-1</sup> (m/s)	3.12e-9
Combustion index (m/s)	0.9
Propellant Density (kg/m <sup>3</sup> )	1578.0
Combustion Temperature (k)	2585

산식 사용하여 연소 표면적을 계산하였다[6].

2.5 해석조건

추진제 형상에 따른 성능해석을 수행하기 위해 AGARD gun 에서 사용한 추진제 초기 조건을 Table 1과 같이 사용하였다[7].

3. 비대칭 Web 성능 해석 연구

외부 반지름 11.43 mm, 내부 반지름 1.143 mm인 추진제의 Web 비율에 따른 성능 해석을

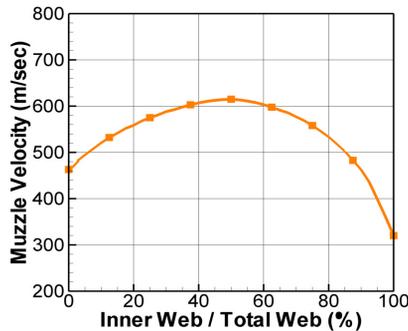


Fig. 5 Muzzle velocity.

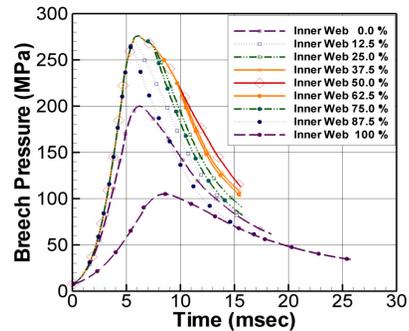


Fig. 7 Pressure profile.

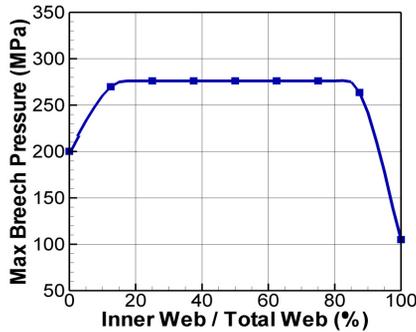


Fig. 6 Maximum breach pressure.

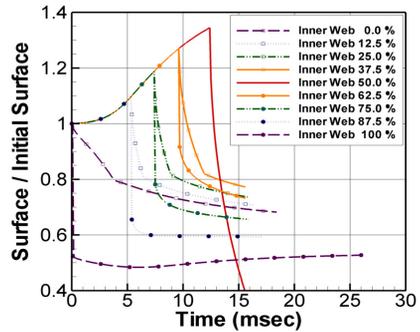


Fig. 8 Burning surface profile.

수행하였다. Inner Web 비율을 0%부터 100%까지 12.5% 간격으로 설정하였으며, 결과 분석을 위해 포구 속도, 약실 최대 압력과 시간에 따른 약실 압력, 연소 표면적의 변화를 Fig. 5-8과 같이 나타내었다.

해석 결과를 분석하면, Inner Web과 Outer Web의 차이가 적을수록 포구 속도가 빠른 것을 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 약실 압력은 탄자가 이동하는 시점에서 감소하며, Fig. 6와 같이 최대 압력이 동일한 구간이 발생한다. 고체 추진제는 약실 최대 압력이 작고 포구 속도가 높게 설계 되어야 하며, 해석 결과 Web 비율이 동일한 경우 최적의 성능임을 확인하였다. Web 비율에 의한 성능 차이의 원인을 분석하기 위해 Fig. 7, 8과 같이 압력 및 연소 표면적 선도를 나타내었다. Web 비율 차이가 많을수록 연소 표면적이 감소하는 지점이 빠르게 나타나며, 약실 압력 하

강 지점 또한 빠르게 발생하는 결과를 확인 하였다. 해석 결과를 정리하면, Inner Web과 Outer Web의 크기가 동일하게 설계 하였을 경우 가장 효율적인 성능을 나타냄을 확인하였다.

#### 4. 추진제 형상 설계 연구

지금까지의 연구를 통해 7공형 고체 추진제의 형상 변수가 성능에 미치는 영향을 파악하였다. 하지만 경향성에 관한 연구에 국한되어 있어 목표 화포 성능을 달성하기 위한 추진제 형상 설계를 수행하는데 어려움이 있다. 설계자는 자신이 설계한 형상의 성능을 강내탄도 전산해석을 통해 계산한 후에 파악할 수 있으며, 목표를 달성하기 위해 형상 변수 재설계와 화포 성능 해석을 Fig. 9와 같이 반복 하여야 한다. 이에 본

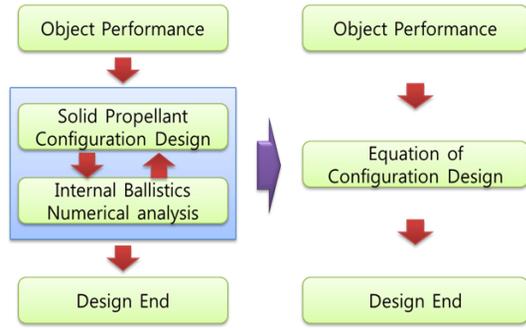


Fig. 9 Configuration design process.

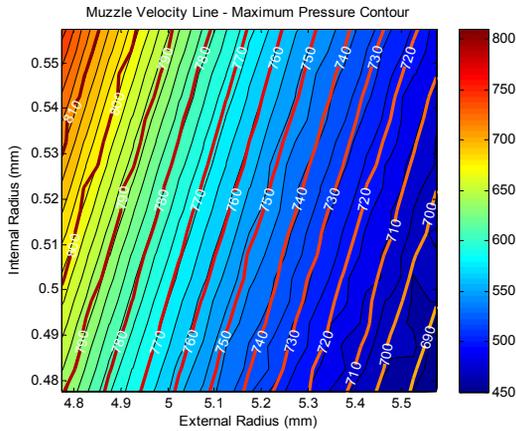


Fig. 10 Comparison of muzzle velocity and maximum breach pressure.

연구에서는 형상 변수와 성능 간의 관계를 분석하고, 관계식을 도출하여 용이하게 형상 변수를 설계하는 연구를 수행하였다.

형상 변수와 화포 성능과의 관계를 분석하기 위해 외부 반지름 4.775~5.525 mm, 내부 반지름 0.4775~0.5525 mm 범위를 각각 17등분하여 성능 해석을 수행하였다.

Fig. 10은 외부 반지름과 내부 반지름에 따른 포구 속도 및 약실 최대 압력을 나타낸 그림이다. 해석 결과를 분석하면, 내부 반지름이 클수록, 외부 반지름이 작아질수록 포구 속도 및 약실 최대 압력이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 포구 속도를 분석하면 동일한 포구 속도를 이은 선이 직선 형태로 나타나며, 각 포구 속도가 유사한 기울기를 가지고 있음을 확인할 수

있다. 약실 최대 압력 또한 기울기의 차이가 있지만 직선 형태임을 확인할 수 있다. 따라서 위와 같은 관계를 형상 변수의 방정식으로 나타낸다면 추가적인 재설계 과정 없이 7공형 고체 추진제 형상 설계를 수행할 수 있다.

고체 추진제 형상 설계 방정식을 구하기 위해 해석 결과를 사용하여 외부 반지름과 내부 반지름의 방정식을 Eq. 2, 3과 같이 나타내었다.

$$r = A_v R + (B_v X_v^2 + C_v X_v + D_v)$$

$$A_v = 3.482 \times 10^{-1}, B_v = 1.975 \times 10^{-4}$$

$$C_v = 2.377 \times 10^{-2}, D_v = -1.418$$

$$X_v = (v - 700) / 10$$
(2)

$$r = A_p R + (B_p X_p^2 + C_p X_p + D_p)$$

$$A_p = 3.252 \times 10^{-1}, B_p = -3.029 \times 10^{-3}$$

$$C_p = 5.734 \times 10^{-2}, D_p = -1.264$$

$$X_p = (p - 450) / 40$$
(3)

여기서 r은 내부 반지름(mm), R은 외부 반지름(mm), v는 목표 포구 속도(m/sec), p는 목표 약실 최대 압력(MPa)이다. 그리고 Eq. 2는 목표 포구 속도가 존재할 때, Eq. 3은 목표 약실 최대 압력이 존재할 때 외부 반지름에 따른 내부 반지름을 계산하는 식이다. 두 식을 연립하면 Eq. 4를 구할 수 있다.

$$R = \frac{[(B_v X_v^2 + C_v X_v + D_v) - (B_p X_p^2 + C_p X_p + D_p)]}{(A_p - A_v)}$$
(4)

목표 포구 속도와 약실 최대 압력이 제시될 경우, Eq. 4를 통해 외부 반지름을 계산하고, Eq. 2 또는 Eq. 3에 적용하여 내부 반지름 및 고체 추진제 형상을 설계할 수 있다.

본 연구에서 개발한 방정식을 검증하기 위해 목표 포구 속도 및 약실 최대 압력을 설정하여 설계 방정식을 통해 외부 및 내부 반지름을 계산하고, 계산된 형상 변수를 강내탄도 전산해석 프로그램에 적용하여 성능을 해석하였다. 이를 통해 목표 성능과 설계 추진제 성능을 비교 하여 오차를 계산 하였다.

Table 2. Objective performance and design results.

	Objective		Design Results	
	V (m/sec)	P (MPa)	R (mm)	r (mm)
1	720	465	5.4770	0.5374
2	730	480	5.2799	0.4936
3	740	500	5.3011	0.5261
4	750	520	5.2393	0.5301
5	760	540	5.0944	0.5056
6	770	565	5.0855	0.5287
7	780	590	4.9566	0.5107

Table 3. Performance of sample propellant using simulation code.

	V (m/sec)	P (MPa)	Error V(%)	Error P(%)
1	721.54	464.22	-0.21	0.17
2	731.45	477.45	-0.20	0.53
3	741.48	502.37	-0.20	-0.47
4	751.43	519.14	-0.19	0.17
5	761.76	539.66	-0.23	0.06
6	771.42	564.67	-0.18	0.06
7	782.02	590.33	-0.25	-0.06

Table 2는 목표 화포 성능과 설계 방정식을 통해 계산된 형상 변수이며, Table 3은 강내탄도 전산해석 프로그램을 통해 계산한 성능 해석 결과이다. 분석 결과, 설계 방정식을 사용하여 목표 화포 성능에 매우 근접한 추진제 형상을 설계 할 수 있음을 확인하였다.

## 5. 결 론

다공형 고체 추진제의 형상 변수가 화포 성능에 미치는 영향을 분석하고, 요구 성능을 만족하는 추진제 형상 설계 방안을 연구하였다. 다공형 고체 추진제 형상 변수 중 기존 연구에서 연구하지 않은 변수의 영향을 해석하였으며, Web 크

기가 동일하게 설계 할 경우 가장 뛰어난 성능임을 입증하는 근거를 제시하였다. 이를 통해 다공형 고체 추진제 형상 변수 각각이 성능에 미치는 경향을 파악하였다. 또한 추진제 형상 변수와 화포 성능의 관계식이 존재함을 확인 하였으며, 요구 조건을 만족하는 추진제 형상 설계에 활용할 수 있음을 증명하였다.

본 연구를 통해 다공형 고체 추진제 형상 설계에 필요한 기초적인 개념을 제공하였으며, 요구 성능을 구현하기 위한 형상 변수 설계 방안을 제시하였다.

## References

1. Sung, H.G., Pack, S., Hong, G.C., Roh, T.S. and Choi, D.W., "Study on Fundamental Technique for Numerical Analysis of Interior Ballistics," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 12, No. 6, pp. 12-20, 2008.
2. Oh, S.H., Jang, J.S., Sung, H.G., Roh, T.S. and Choi, D.W., "Chamber Pressure and Muzzle Velocity According to Web Size of Multi Perforated Propellant," *KSAS Spring Conference*, Jeongseon, Korea, pp. 921-924, April 2012.
3. Ergun, S., 1952, "Fluid Flow Through Packed Columns," *Chemical engineering progress*, Vol. 48, No. 2, pp. 89-94, 1952.
4. Eiji S., "A Compressible CFD Method for Flow with Sound from Very Low Mach Number to Supersonic," *6th International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics and Applications*, Milano, Italy, pp. 1-15, July 2008.
5. 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, 2008.

- 
6. Stals, J., "Form-function for Multi Component Propellant Charges Including Inhibited Grains and Sliver Burn," MRL-TN-371, 1975.
  7. Jang, J.S., Oh, S.H. and Roh, T.S., "Comparison of the Characteristics of Granular Propellant Movement in Interior Ballistics based on the Interphase Drag Model," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, Issue 11, pp. 4547-4553, 2014.