

점화제 주입에 따른 강내탄도 수치해석

성형건* · 장진성* · 김인주* · 최동환** · 노태성**

Numerical Analysis of Interior Ballistics for Ignition Injection

Hyung-Gun Sung* · Jin-Sung Jang* · In-Joo Kim* · Dong-Whan Choi** · Tae-Seong Roh**

ABSTRACT

Using the numerical code for the interior ballistics, the performance of the interior ballistics with the characteristic of the ignition injection has been investigated. When the maximum position of ignition injection is near the base, the pressure distribution at the chamber of the interior ballistics was uniform and the final projectile velocity is increased.

초 록

강내탄도 전산 해석 코드를 사용하여 점화제 주입 특성에 따른 강내탄도의 성능을 연구하였다. 점화제 주입 최대위치가 Base에 가까울수록 균일한 압력 분포가 나타났고 탄자의 탈출 속도도 증가하였다.

Key Words: Interior Ballistics(강내탄도), Ignition Injection(점화제 주입), Multiphase(다상), Porosity(기공률)

1. 서 론

화포의 성능을 향상시키는 요소로는 탄약의 설계, 새로운 화포 추진제의 개발, 또는 점화제의 주입 특성 변화 등이 있다. 이 중 탄자의 속도 균일성과 정확성에 밀접한 영향을 주는 것이 점화제의 주입 특성으로 알려져 있다. 미국의 경우, 화포의 성능 향상에 관한 다양한 요소에 따

른 강내탄도의 특성 연구를 강내탄도 전산해석 프로그램인 NGEN을 통해 수치적으로 수행하였다[1-3].

국내의 경우는 조한창 등이 Eulerian-Eulerian 좌표계를 이용한 1차원 강내탄도 해석 코드를 개발하였으나, 수치적 해석을 수행할 수 있는 고체추진제의 크기에 제한이 있다[4]. 최근에, 성형건 등이 Eulerian-Lagrangian 좌표계를 이용한 1차원 강내탄도 해석 코드 개발하였으나, 강내탄도의 설계 인자에 따른 강내탄도 특성에 관한 연구는 수행되지 않았다[5, 6]. 이에, 본 연구에

* 인하대학원 항공우주공학과

** 인하대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: tsroh@inha.ac.kr

서는 점화제 주입 특성이 강내탄도의 성능에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다.

2. 강 내 탄 도

2.1 강내탄도의 물리적 현상

강내탄도는 화포의 약실 내에서 고체추진제가 점화가스에 의해 연소되고 생성된 연소가스의 압력에 의해 탄자가 가속되어 포구를 이탈하는 일련의 과정이다. Fig. 1과 같이 크게 고체 추진제 점화 및 연소하는 과정(Process 1)과 일정 압력에 도달한 이후 탄자가 이동하는 과정(Process 2)으로 나누어 구분될 수 있다[5].

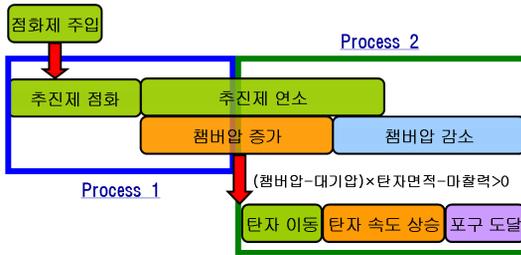


Fig. 1 Diagram of Simplified Interior Ballistics

2.2 강내탄도의 지배 방정식 및 구성 방정식

강내탄도의 고체추진제 점화 및 연소현상은 다상유동이다. 연속상은 Eulerian 좌표계를 사용하고 분산상은 Lagrangian 좌표계를 사용한다 [7].

연속상인 기상의 지배방정식은 고상이 차지하는 부피를 고려하기 위해 기공률을 도입하며 지배방정식은 식 (1)-(3)과 같다[1, 6].

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

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

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

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

분산상인 고상의 운동방정식(속도 방정식)은 식 (4)와 같다[1,5].

$$\rho_p(1-\alpha) \frac{Du_p}{Dt_p} = -(1-\alpha)\nabla p - \nabla \sigma + f \quad (4)$$

σ 는 고체입자간의 응력(intergranular stress)이다. 고체추진제의 이동에서 고상과 기상에서 발생하는 항력이 주요한 요소이므로 고체입자간의 응력은 고려하지 않았다[6].

고상과 기상에서 발생하는 항력은 Ergun의 압력 손실을 사용하며 이를 고상인 고체추진제의 가속도식으로 사용하였다[6].

고체추진제 연소는 형상 함수와 연소율에 의해 계산되며, 본 연구에서는 불형의 고체추진제를 선정하였다. 연소율은 주요 연구 변수가 아니므로 정상상태 연소율을 사용하였고, 상태방정식은 이상상태방정식을 사용하였다.

3. 수치 해석

3.1 유동장 수치해석 기법

강내탄도 내의 유동장의 속도는 정지 상태에서 부터 최대 몇 천 m/s 까지 증가하므로 이를 위해 모든 속도 영역을 해석할 수 있는 압축성 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 1차원 CFD 코드를 작성하였고 공간 이산화는 3차 정확도를 가진 QUICK Scheme을 사용하였다. Leonard가 제안한 QUICK Scheme의 수렴 불안정성 때문에 Hayase에 의해 재배열한 QUICK Scheme을 사용하여 수렴 안정성을 높였다[6].

탄자의 이동에 의해 발생하는 이동 경계면을 해석하는 수치해석 기법은 고정 좌표계를 이용하는 Eulerian coordinate method를 사용하였다.

이동경계면의 위치는 강체인 탄자의 운동방정식으로 정확히 계산할 수 있으므로 Ghost cell extrapolation method를 CFD 코드에 적용하였다 [5].

3.2 점화제 주입 특성에 따른 강내탄도 해석

강내탄도에서 탄자의 속도와 약실 내의 압력에 큰 영향을 주는 핵심 요소가 점화제 주입 특성이다. 본 연구에서는 균일한 간격의 가진 점화제 주입 최대위치 변화에 따른 강내탄도의 성능 특성을 비교하였다. Fig. 2는 점화제 주입 최대 위치를 나타내며 점화제 주입 최대 위치는 포미(Breech)에서부터 탄자 후단(Base)까지 각각 90%, 70%, 50% 위치하도록 하였고, 점화제 주입구는 각각 6개로 하였다. 초기 조건은 Table. 1과 같다.



Fig. 2 Position of the ignition injection (90%, 70%, 50%)

Table. 1 Initial Condition

탄자 질량	9.712.e-3 (kg)
기공률	0.7026
약실 면적	0.4745e-4 m ²
약실 길이	0.1524 m
고체추진제 반지름	0.41275e-3 m

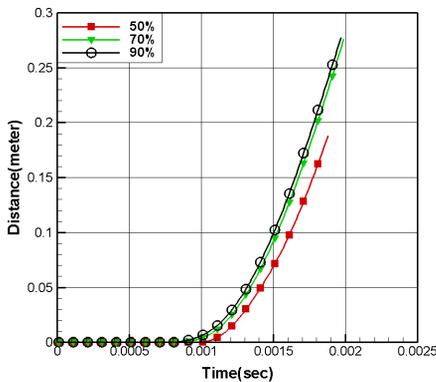


Fig. 3 Distance of Projectile as A Function of Time

Figure 3, 4는 시간에 따른 탄자의 위치와 속도를 나타낸다. 점화제 주입 최대 위치가 50%인 경우 수치 계산 중간에 중단된 것으로 그 원인은 압력 진동이 심각하여 수렴에 문제가 발생하였기 때문이다. 70%, 90%의 경우는 수렴 문제가 발생하지 않았으며 유사한 특성을 나타내었다.

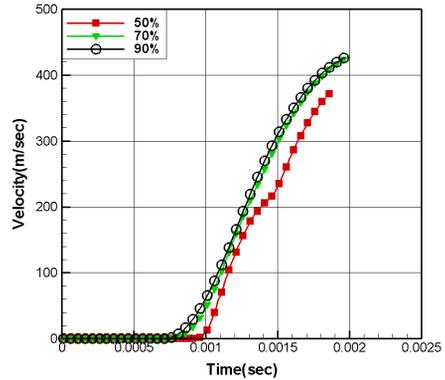


Fig. 4 Velocity of Projectile as A Function of Time

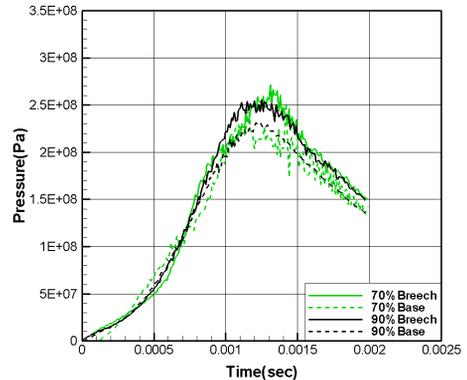


Fig. 5 Pressure at The Interior Ballistics as A Function of Time(90%, 70%)

Figure 5는 시간에 따른 포미와 탄자 후단의 압력이다. 일반적으로 포미와 탄자 후단의 압력 차이가 균일한 간격으로 유지하는 것이 바람직한 강내탄도 설계라고 알려져 있으며, 점화제 최대 위치가 90% 경우가 더 균일한 특성을 가진

다. Fig. 6은 점화제 최대 위치가 50%인 경우의 시간에 따른 포미와 탄자 후단 압력이다. Fig. 6을 보면 포미와 탄자 후단의 압력차이가 많은 진동을 나타내고 있으며 이러한 경우 포신에 큰 충격을 주며 심지어 포신의 깨짐 현상을 초래할 수 있다고 알려져 있다. 따라서 점화제는 약실 내의 넓은 영역에서 주입되는 것이 강내탄도의 성능을 최대한 이끌어 내며 포신의 안정성을 확보할 수 있다고 하겠다.

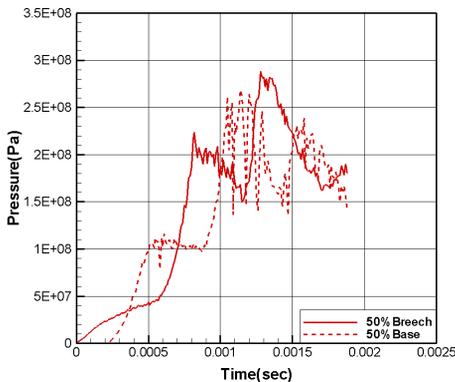


Fig. 6 Pressure at The Interior Ballistics as A Function of Time(50%)

또한 Fig. 5, 6을 보면 점화제 주입 최대 위치가 50%의 경우에는 심각한 압력 진동으로 인해 수렴성이 낮아져 수치 해석이 중간에 중단되었다. 미국의 NGEN의 경우 이러한 경우에도 수치 해석을 완벽히 수행하였다. 강내탄도 설계 및 성능 해석 프로그램이 이러한 경우를 수치 해석하는 경우는 미미하지만, 이에 대한 전산 해석 기법의 강건성을 강화시키는 연구가 필요할 것이다. 또한 Fig. 5, 6을 보면 포미 압력과 탄자 후단의 각각의 압력이 연속적인 변화가 아닌 진동을 현상을 나타내고 있는데, 이것이 추진제의 이동에 의한 현상인지 수치적 진동에 의해 발생하는 것인지는 실험 결과와 비교 연구가 필요하다.

4. 결 론

강내탄도 전산해석 프로그램을 통해 점화제

주입 특성에 따른 탄자의 성능 및 약실 내 압력 분포를 예측하였다. 균일한 간격을 가진 점화제 주입구의 최대 위치가 탄자 후단에 가까울수록 약실 내의 압력 분포가 균일하고 탄자의 탈출 속도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 차후에 실험 결과와 비교 연구를 통해 불연속적으로 변화하는 압력의 원인을 분석하고 연구 결과의 신뢰성을 확보하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소 지원에 의한 연구결과입니다. 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Paul S. Gough, "Initial Development of Core Module of Next Generation Interior Ballistic Model NGEN," ARL-CR-234, 1995
2. Michael J. Nusca and Albert W. Horst, "Progress in Modeling Ignition in a Solid Propellant Charge for Telescoped Ammunition," ARL-TR-3796, 2006
3. Albert W. Horst, Michael J. Nusca, "The Charge Designer's Workbench: A Range of Interior Ballistic Modeling Tools," ARL-TR-3796, 2006
4. 조한창, 윤재건, 신현동, 김종욱, "이동경계면을 갖는 연소실내에서의 입자상의 고체연료 연소장 예측," 대한 기계학회 논문집, 제16권, 제12호, 1992, pp.2385-2394
5. 성형건, 박술, 홍기철, 노태성, 최동환, "강내탄도의 전산해석 기초 기법의 연구", 한국추진공학회 논문집, 제12권 제6호, 2008, pp.12-20
6. 성형건, 장진성, 최동환, 노태성, "고체추진제 이동을 고려한 강내탄도의 수치 해석", 한국전산유체공학회 춘계학술대회 논문집, 2009, pp.310-314