



고체추진제 이동을 고려한 강내탄도의 수치 해석

성형건,⁴ 장진성,¹ 최동환,² 노태성²

NUMERICAL ANALYSIS OF INTERIOR BALLISTICS WITH MOVING SOLID PROPELLANTS

H.G. Sung,⁴ J.S. Jang,¹ D.W. Choi² and T.S. Roh²

A numerical code for the interior ballistics has been investigated. The method of the ghost cell extrapolation has been used for the moving boundary with the projectile movement. The porosity effect and the Ergun's Equation have been used in the numerical calculation for the grain combustion. The calculation results of the numerical code have been compared and verified through those of the lumped parameter method. Computerization techniques of the numerical analysis for the interior ballistics have been developed.

Key Words : 강내탄도(Interior Ballistics), 기공률(Porosity), 이동 경계면(Moving Boundary), 고체추진제(Solid Propellants)

1. 서 론

탄약의 설계, 새로운 화포 추진제의 개발, 또는 화포나 포신의 설계 등을 위해서 강내탄도(Interior Ballistics) 해석 기술이 필수적으로 요구된다[1-5]. 특히, 정밀 연소제어가 요구되는 전열화학추진, 고에너지 신물질 추진제 개발 등의 연구를 수행하기 위해서는 다차원 다상 유동을 해석하는 강내탄도 정밀 해석 코드가 필요하다[1-3]. 하지만, 국외에서 개발된 강내탄도 해석 코드는 국가적인 차원에서 중요 기술로 분류되어 이를 도입하기 어려운 실정이다.

미국의 경우 1970년대 초부터 ARL(Army Research Laboratory)의 주도하에 강내탄도 해석 코드 개발 연구를 시작하여 1차원 이상 유동을 해석하는 XKTC를 거쳐 현재는 다차원 다상 유동을 해석할 수 있는 강내탄도 해석 코드인 NGEN의 개발을 완료하였다.

국내의 경우 조한창 등은 연소가스와 추진제를 Eulerian 좌표계의 지배 방정식을 이용하여 1차원 이상 유동의 강내탄도 해석 코드 개발에 관한 연구를 수행하였으나 다차원으로 확장하는 연구 개발은 수행되지 않았다 또한, 불형의 고체 추진제만을 적용한다는 한계가 있다[5]. 국내의 화포 개발이 지

속적으로 진행되고 있어 다차원 다상 유동을 해석하는 강내탄도 전산 해석 코드가 필요한 시점이다.

강내탄도에 사용되는 고체추진제는 과립형으로 되어있고 종류로는 불형(구형), 판형, 봉형, 단공관형, 다공관형, 장미형 등이 있다[6]. Gough 등은 Eulerian-Lagrangian 좌표계를 이용하여 불형, 봉형, 단공관형, 다공관형 고체추진제까지 해석할 수 있는 강내탄도 해석 코드를 개발하였으나, 국내에서는 다양한 형태를 고체추진제를 고려할 수 있는 Eulerian-Lagrangian 좌표계를 이용한 강내탄도 해석 코드 개발은 수행되지 않았다.

본 연구에서는 다양한 형태의 과립형 고체추진제의 이동을 수치적으로 모사할 수 있는 Eulerian-Lagrangian 좌표계를 이용한 1차원 강내탄도 해석 코드를 개발하였고 무차원 모델인 Lumped Parameter Model과 비교하여 신뢰성을 검증하였다.

2. 강내탄도

2.1 강내탄도의 물리적 현상

강내탄도는 화포의 약실 내에서 고체 추진제가 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.

1 학생회원, 인하대학교 대학원 항공우주공학과

2 정회원, 인하대학교 기계공학과 항공우주공학과

* Corresponding author, E-mail: seaoffall@korea.com

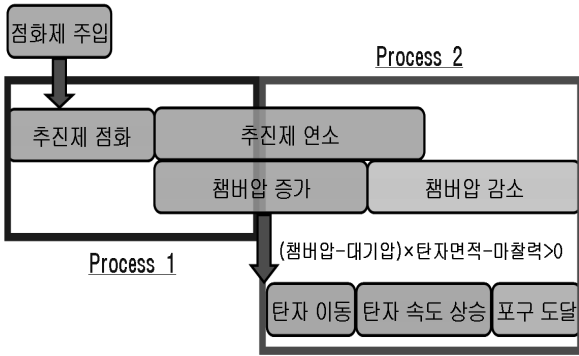


Fig. 1 Diagram of simplified interior ballistics

먼저, 고체추진제 점화와 연소 과정에서 일어나는 세부적인 현상은 다음과 같이 복잡하다. 점화제가 약실에 주입되어 주위의 고체추진제를 점화 및 연소시킨다. 고체추진제가 연소하면서 발생한 연소가스는 고체추진제 사이를 흐르면서 다른 고체추진제를 점화 및 연소시키고 고체추진제를 이동시킨다.

탄자가 이동하는 과정에서 일어나는 물리 현상은 탄자의 전단과 후단의 압력차에 따라 탄자가 이동되는 것이다. 탄자의 이동은 탄자의 운동방정식을 통해 계산된다. 그리고 탄자가 이동하면서 강내탄도의 제어체적이 증가된다. 이에 따라 격자를 변형시키거나 생성하게 되며, 탄자 이동에 따른 이동 경계면의 대한 물리량을 계산하는 모델이 필요하게 된다.

2.2 강내탄도의 지배 방정식

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 분산상으로 고체추진제만을 고려하였다. 연속상은 Eulerian 좌표계를 사용하고 분산상은 Lagrangian 좌표계를 사용한다[7].

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

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

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

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

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

분산상인 고상의 운동방정식(속도 방정식)은 식 (4)와 같다 [1,7].

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

σ 는 고체입자간의 응력(intergranular stress)이다. 조한창 등에 의하면 고체입자간이 응력은 연구자에 따라 그 사용이 다양하다고 하였고 본 연구에서의 고체추진제의 이동에서 고상과 기상에서 발생하는 항력이 주요한 요소이므로 고체입자간의 응력은 고려하지 않았다[5].

2.3 강내탄도의 구성 방정식

고상과 기상에서 발생하는 항력은 Ergun의 압력 손실을 사용하며 이를 고상인 고체추진제의 가속도식으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{Du_p}{Dt_p} = \frac{1}{\rho_p} \left\{ 150 \frac{\mu_f(1-\alpha)}{\alpha d_p^2} + 1.75 \frac{\rho_f |u_f - u_p|}{d_p} \right\} \\ \times (u_f - u_p) \end{aligned} \tag{5}$$

고체추진제 연소는 형상 함수와 연소율에 의해 계산된다. 다양한 과립형 고체추진제 중 불형을 선정하였고 형상 함수 S_p 와 고체추진제 연소가스의 질유량 \dot{m} 은 식 (6,7)과 같다.

$$S_p = 4\pi r^2 \tag{6}$$

$$\dot{m} = n\rho_p S_p r_b \tag{7}$$

본 연구에서는 연소율이 주요 연구 변수가 아니므로 간단한 정상상태 연소율을 사용하였다[7]. 상태방정식은 이상상태



Fig. 2 30 mm GAU-8

방정식을 사용하였다. 불형에 관한 기공률과 고체추진제 비표면적은 식 (8,9)와 같다.

$$\alpha = 1 - \frac{n \left(\frac{4}{3} \pi r_p^3 \right)}{A \Delta x} \quad (8)$$

$$A_s = \frac{n 4 \pi r_p^2}{A \Delta x} \quad (9)$$

여기서 n 은 미소제어체적 내에 동일한 반지름을 가진 고체추진제 입자 개수이다

3. 수치해석

3.1 유동장 수치 해석 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 Scheme은 수렴안정성이 좋지 않기 때문에 Hayase에 의해 재배열한 QUICK Scheme을 사용하여 수렴 안정성을 높였다[7].

3.2 이동 경계면 해석 기법

탄자의 이동에 의해 발생하는 이동 경계면을 해석하는 수치해석 기법들은 좌표계에 따라 크게 Eulerian coordinate method와 Non-Eulerian coordinate method로 나누어진다.

고정 좌표계를 이용하는 Eulerian coordinate method는 탄자가 이동함에 따라 격자를 추가시키므로 위치에 따른 물리량 계산에 있어서 더 정확한 예측이 가능하다는 장점이 있다 이러한 이유로 포신의 설계와 정밀 연소제어 등에 관한 연구를 수행에는 있어서는 Eulerian coordinate method가 적합하다. 그

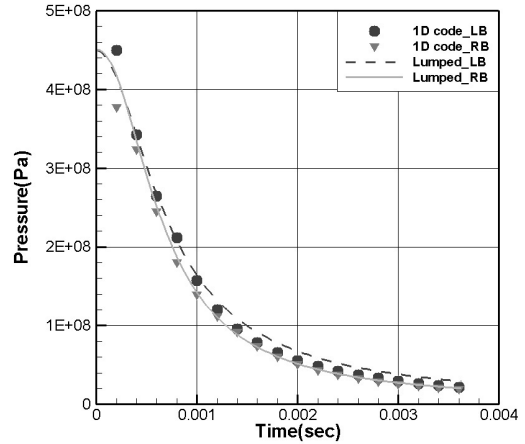


Fig. 3 Pressure distribution as a function of time for both boundaries

러나 계산량에 있어서는 비효율적이다 Eulerian coordinate method에는 경계면을 추적하는 방법과 경계면이 포함된 격자의 물리량을 계산하는 방법에 따라 여러 가지 방법으로 나뉜다. 강내탄도의 경우, 이동경계면의 위치는 강체인 탄자의 운동방정식으로 정확히 계산할 수 있으므로 VOF(Volume of Fluid) 기법이나 Level Set 기법 대신 Ghost cell extrapolation method를 CFD 코드에 적용하였다

3.3 탄자 이동에 관한 수치 해석

탄자의 이동에 의해 발생하는 이동 경계면 해석을 적용하여 작성한 전산해석 코드를 검증하기위해 30 mm GAU-8의 강내탄도의 최대 압력을 초기조건으로 하여 Lumped Parameter Method으로 해석한 결과와 비교하였다.

Fig. 3은 강내탄도의 약실 내 압력에 의해 탄자가 이동하는데 이를 시간에 따른 경계면의 압력 변화를 나타낸다 LB(Left Boundary)는 고정 경계면이고 RB(Right Boundary)는 이동 경계면이다. Lumped Parameter Method의 결과와 비교하면 RB에서는 거의 유사한 압력 분포를 나타내고 있으나 LB에서는 시간에 따라 다른 압력 변화 양상을 보인다 초기에는 1차원 전산 해석의 압력이 높으나 약 0.5 msec가 지난 후에는 Lumped Parameter Method의 해석이 높은 압력을 나타내고 있다. 이는 1차원 유동 해석에는 탄자가 이동함에 따라 압력이 전파되어 고정 경계면에 도달하는 시간 차이와 고정 경계면에 압력이 반사되는 것을 수학적으로 모사하지 못하였기 때문이다.

Fig. 4는 시간에 따른 탄자의 속도와 거리를 나타내는 것으로 유사한 경향성을 나타내고 있고 3.6 msec에서는 36.7 m/s의 속도 차이가 났다. 탄자의 속도와 거리가 유사한 경향

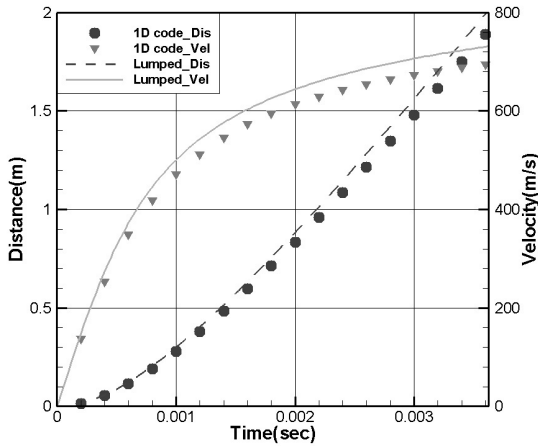


Fig. 4 Distance & velocity of projectile as a function of time

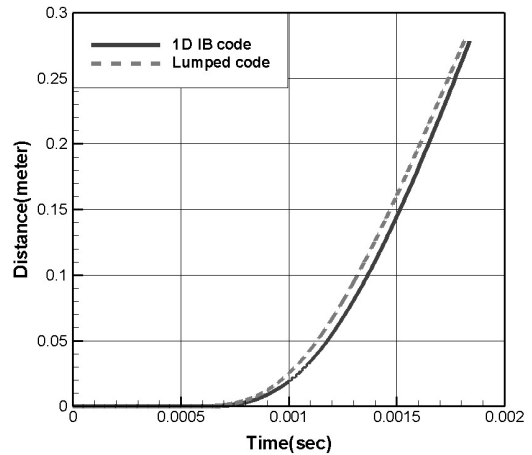


Fig. 5 Distance of projectile as a function of time

성을 나타내는 것은 탄자의 속도와 거리를 계산할 때는 RB의 압력을 사용하기 때문이다.

Fig. 3,4의 결과를 종합하여 전체적으로 보면 1차원 전산 해석 결과와 Lumped Parameter Model의 결과가 유사한 경향성과 유사한 값을 나타내고 있으므로 1차원 전산 해석 코드의 신뢰성을 확보하였다고 할 수 있다

3.4 강내탄도 전산 해석

탄자의 이동에 따른 이동 경계면 해석 코드에 고체추진제의 연소와 이동을 해석하는 수치기법을 추가하여 1차원 강내탄도 전산 해석 코드를 완성하였다. 1차원 강내탄도 전산 해석 코드를 검증하기 위해 강내탄도 개발에 사용되는 Lumped Parameter Method 기반의 코드 결과와 비교하였다. Lumped Parameter Method와 비교 검증하기 위해 점화제가 모두 분사되었을 때의 약실 내 평균압력을 계산하여 사용하였고 초기 조건은 Table 1과 같다.

Fig. 5,6은 시간에 따른 탄자의 이동거리와 속도이고 Fig. 7은 시간에 따른 탄자후단(Base) 압력이다. 이동거리의 경우

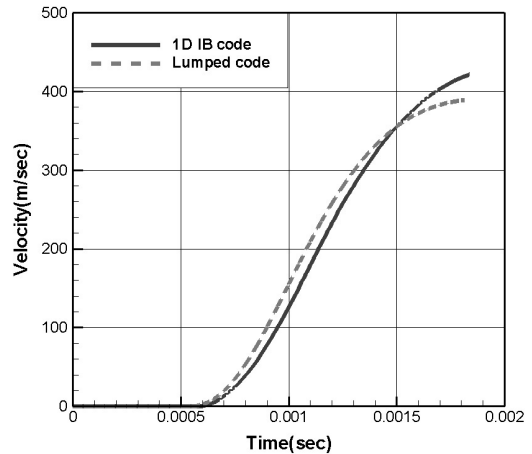


Fig. 6 Velocity of projectile as a function of time

는 유사한 결과 값을 나타냈으나 속도의 경우는 유사한 경향성은 가지나 최종 속도에서 차이가 증가하였다. 탄자의 최초 이동시간은 0.545 msec(Lumped)와 0.570 msec(1D)로 거의 유사하였다. 또한 탄자의 포구 탈출속도는 389.0 m/s(Lumped)와 421.5 m/s(1D)로 나타났다. 이동 경계면의 검증에서 보다 더 큰 속도 차이를 보이는 것은 약실 내의 고체추진제 연소가스가 탄자 이동에 따른 Base 압력 저하를 일정부분 상쇄시키기 때문으로 여겨진다. 이는 Fig. 7의 결과를 보면 1차원 해석의 Base 압력이 최고점 도달 이후부터 계속 Lumped Parameter Model의 결과보다 높게 나타나는 것에서도 확인할 수 있다. 종합적으로 보았을 때는 1차원 강내탄도 전산해석 코드의 해석 결과는 Lumped Parameter Model의 결과와 유사하게 나타났으며 이러한 결과를 바탕으로 수치 해석 코드의 신뢰성이 확보되었음을 의미한다.

Table 1 Initial condition of verification model

탄자 질량	9.712.e-3 (kg)
초기 밀도	13.426 kg/m ³
초기 압력	1.317e+7 Pa
기공률	0.7026
약실 면적	0.4745e-4 m ²
약실 길이	0.1524 m
고체추진제 반지름	0.41275e-3 m

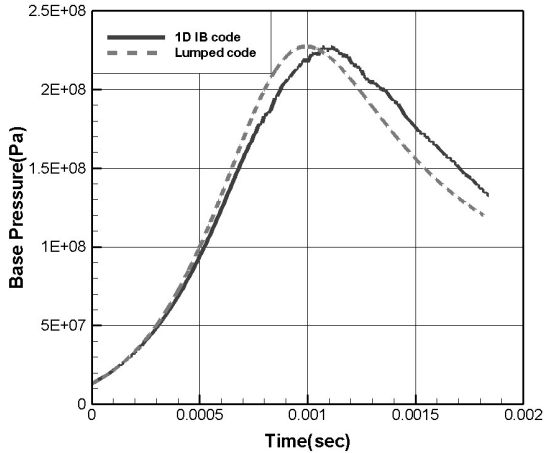


Fig. 7 Pressure of projectile base as a function of time

5. 결 론

고체추진제 이동을 고려한 1차원 강내탄도 전산 해석 코드를 개발하였다. 탄자 이동 현상인 이동경계면의 경우에는 Ghost Cell Extrapolation 기법을 사용하였고 고체추진제의 이동 및 연소는 기공률과 Ergun식을 통해 고체추진제의 연소와 압력저하를 수치적으로 모사할 수 있었다 개발한 코드를 검증하기 위해 Lumped Parameter Method 결과와 비교하여 신뢰성을 확보하였다.

본 연구를 통해 1차원 강내탄도 전산해석 코드 개발 기술을 확보하였고, 이를 통해 약실 내부의 압력 변화에 관한 자세히 예측할 수 있게 되었다. 또한, 점화제의 분포 위치나 고체추진제의 형상 재설계를 통한 화포의 성능 향상 연구에도

적용할 수 있을 것이다. 차후에, 실제 실험 결과와 비교 검증을 통해 정확성을 확인하여 할 필요가 있다.

후 기

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

참고문헌

- [1] 1995, Gough, Paul S., "Initial Development of Core Module of Next Generation Interior Ballistic Model NGEN," ARL-CR-234.
- [2] 2006, Nusca, Michael J. and Horst, Albert W., "Progress in Modeling Ignition in a Solid Propellant Charge for Telescoped Ammunition," ARL-TR-3673.
- [3] 2006, Horst, Albert W. and Nusca, Michael J., "The Charge Designer's Workbench: A Range of Interior Ballistic Modeling Tools," ARL-TR-3796.
- [4] 1976, Heiney, Otto K. and West, Robert J., "Interior Ballistics, Muzzle Flash and Gas Gradients of Aircraft Cannon," AFATL-TR-76-34.
- [5] 1992, 조한창, 외3인, "이동경계면을 갖는 연소실내에서의 입자상의 고체연료 연소장 예측" 대한기계학회 논문집, 제16권, 제12호, pp.2385-2394.
- [6] 1994, 이흥주, 총과 탄도학, 청문각.
- [7] 2008, 성형건, 외4인, "강내탄도의 전산해석 기초 기법의 연구," 한국추진공학회 논문집, 제12권, 제6호, pp.12-20.