

研究論文

강내탄도 전산해석 코드 개발과 항력 모델에 따른 이상유동 분석

성형건* · 장진성* · 유승령** · 노태성***†

Development of Numerical Code for Interior Ballistics and Analysis of Two-phase Flow according to Drag Models

Hyung-Gun Sung* · Jin-Sung Jang* · Seung-Young Yoo** · Tae-Seong Roh***†

ABSTRACT

In order to simulate the ignition-gas injection in the interior ballistics, a two-dimensional analytic code for two-phase flows has been developed. The Eulerian-Lagrangian approach and the low-dissipation simple high-resolution upwind scheme(LSHUS) have been adopted in the numerical code for the propellant combustion of the gun propelling charges. The ghost-cell extrapolation method has been used for the moving boundary in the chamber with the projectile movement. The calculation results of the developed code have been compared and verified through those of the dimensionless IBHVG2 code and the previous one-dimensional code. In comparison with the two-phase flows according to the drag models, the numerical analysis of the muzzle velocity has been affected by the drag model.

초 록

점화제 주입 특성을 모사할 수 있는 2차원 이상유동의 강내탄도 해석코드 개발하였다. 장약인 추진제의 연소 해석을 위해 Eulerian-Lagrangian 접근법과 LSHUS 기법을 적용하였다. 탄자의 이동에 따른 이동경계면의 해석을 위해 Ghost Cell Extrapolation method를 사용하였다. 개발된 2차원 강내탄도 해석코드는 무차원 강내탄도 해석 코드인 IBHVG2와 기존에 개발된 1차원 강내탄도 해석코드와 비교·검증하였다. 항력식에 따른 이상유동의 비교에서 항력식이 탄자탈출속도의 수치적 해석에 영향을 주는 것을 확인하였다.

Key Words: Interior Ballistics(강내탄도), Two-phase Flow(이상유동), Drag Model(항력식)

접수일 2011. 8. 5, 수정완료일 2011. 10. 7, 게재확정일 2011. 10. 13

* 정회원, 인하대학교 대학원 항공우주공학과

** 학생회원, 인하대학교 대학원 항공우주공학과

*** 종신회원, 인하대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: tsroh@inha.ac.kr

1. 서 론

탄약의 설계, 새로운 화포 추진제의 개발, 또
는 화포나 포신의 설계를 위해서는 강내탄도

(Interior Ballistics)에서 일어나는 물리 현상에 대한 연구가 필요하다. 강내탄도는 수십 msec 동안에 장약의 연소 및 이동, 고온·고압의 연소 가스에 의한 탄자의 가속이 일어나는 일련의 과정으로 실험 연구에는 계측 장비의 한계와 안전성 문제로 인한 제약이 있다. 이에 미국, 프랑스, 일본, 호주 등에서는 다차원 다상 유동을 해석하는 강내탄도 코드를 개발해 왔다. 미국은 1970년대 초부터 ARL(Army Research Laboratory)의 주도하에서 강내탄도 전산해석 코드의 개발 연구를 진행하였으며 다차원 다상 유동을 해석할 수 있는 강내탄도 해석 코드인 NGEN의 개발하였다[1]. 일본은 21세기에 들어 Keio 대학을 중심으로 활발한 연구가 진행 중에 있다. SHUS(Simple High-resolution Upwind Scheme) 기법과 중첩격자(Chimera)를 사용하여 2차원 이상의 강내탄도 해석 코드를 개발하였고, 이를 이용하여 추진제 및 점화 기구 등에 따른 강내탄도 특성 연구를 수행하였다[2]. 호주는 R.J. Gollan 등에 의해 AUSMDV 기법과 Cut-Cell 기법을 사용하여 축대칭 2차원의 강내탄도 해석 코드를 개발하였고, 이를 이용해 AGARD gun 문제에 대해 XKTC, CTA1, FHIBS 코드의 해석 결과와 비교 연구를 수행하였다[3].

국내는 조한창 등이 Eulerian-Eulerian 접근법을 이용한 1차원 강내탄도 해석 코드를 개발하였으나, 소구경 화포의 해석에만 적용가능하다는 한계가 있다[4]. 최근 들어 인하대학교에서 다분산 시스템을 해석할 수 있는 Eulerian-Lagrangian 접근법과 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked) 알고리즘을 이용한 1차원 이상(Two Phase)유동의 강내탄도 해석코드를 개발하였고, 이를 이용하여 추진제와 점화계 특성에 따른 강내탄도의 성능 특성에 관한 연구를 수행하였다[5-7]. 압력기반인 SIMPLE 알고리즘은 점화 가스 주입에 의한 충격파를 해석하는데 있어 정확성이 떨어지는 단점이 있고, 점화가스에 의한 포신의 압력 분포를 분석하는데 있어 한계가 존재한다.

이에 본 연구에서는 점화기구의 주입특성을 정확히 모사하기 위해 밀도 기반의 알고리즘을

사용한 2차원 이상유동의 강내탄도 전산해석 코드를 개발하였고, 국과연이 보유한 IBHVG2의 해석 결과, 1차원 강내탄도 해석 결과와 비교하여 신뢰성을 검증하였다[8]. 또한, 이상유동인 강내탄도를 해석하기 위해 필요한 항력식이 이상유동 해석에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 강 내 탄 도

2.1 강내탄도

강내탄도는 Fig. 1과 같이 화포의 약실 내에서 고체추진제가 점화가스에 의해 점화 및 연소되고, 생성된 연소가스의 압력에 의해 탄자가 가속되어 포구를 이탈하는 일련의 과정이다[1-5].

2.2 강내탄도 지배방정식

강내탄도의 약실 내 고체추진제 점화 및 연소 현상은 다상유동 또는 이상유동에 포함된다. 이상유동의 강내탄도는 고체추진제 연소가스의 연속상과 고체추진제, 고체추진제의 분해물 등의 분산상으로 구분된다[1]. 대부분의 강내탄도 해석 코드에서 고체추진제만을 분산상으로 고려하므로 본 연구에서도 분산상으로 고체추진제만을 고려하였다.

점화 초기에 점화가스가 약실에 국부적으로 주입되며 이로 인해 고체추진제의 크기가 불균일하게 되어 단분산 이상유동에서 다분산 이상유동이 된다. 기존의 강내탄도 코드는 계산의 효율을 위해 단분산 이상유동에 적합한 Eulerian-Eulerian 접근법을 많이 사용하였다[2-4]. 이 점

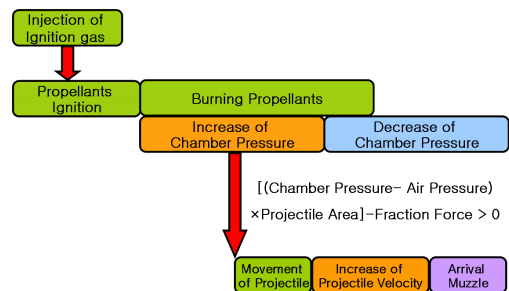


Fig. 1 Diagram of simplified interior ballistics

근법은 고체추진제가 연소 및 이동하는 경우 개별 격자에서 입자 평균을 다시 계산해야 하며 이로 인해 해석의 정확성이 떨어지는 문제가 발생할 수 있다[9]. Hoft 등은 이러한 문제점을 해결하기 위해 다분산 이상유동에는 Eulerian-Lagrangian 접근법을 사용하도록 권고하였고, 이에 본 연구에서는 이 기법을 사용하였다.[6, 9].

강내탄도에서 연속상인 기상의 지배방정식은 고체추진제(고상)를 고려하기 위해 기상이 차지하는 부피를 의미하는 기공률(α)을 Euler 방정식에 도입하여 사용한다. Gough가 사용한 강내탄도의 이상유동 지배방정식은 Baer 등에 의해 에너지 방정식의 문제점이 밝혀져 이후에 개발된 강내탄도 해석코드는 Baer&Nunziato가 사용한 지배방정식을 사용하였으며 다음과 같다[10].

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha\rho uv)}{\partial y} \\ = -\alpha \frac{\partial p}{\partial x} + \dot{m}u_p - f_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha\rho vv)}{\partial y} \\ = -\alpha \frac{\partial p}{\partial y} + \dot{m}v_p - f_y \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha E)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u(E+p))}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha v(E+p))}{\partial y} = \\ -f_x u_p - f_y v_p + \dot{m} \left(e_p + \frac{p}{\rho_p} + \frac{u_p^2 + v_p^2}{2} \right) + \dot{m}_{ig} e_{ig} \end{aligned} \quad (4)$$

열전달은 무차원 코드인 IBHVG2와 비교를 위해 고려하지 않는 것으로 한다.

분산상의 지배방정식은 고체추진제에 의한 항력으로 계산하며, 이를 위해 관내 고체입자에 의한 압력 손실을 측정된 실험식인 Ergun식을 사용하였다[5, 6]. 최근에 Reddy 등의 연구에서 레이놀즈수 1000 이상에서는 Ergun식에 많은 오차가 있는 것으로 나타났다[11]. 이에 본 연구에서는 Patankar 등이 미립자 유동해석에 사용한 항

Table 1. Drag models for two phase flow

Ergun (Model A)
$D_p = \frac{1}{\rho_p} \left\{ 150 \frac{\mu_f(1-\alpha)}{\alpha d_p^2} + 1.75 \frac{\rho_f u_f - u_p }{d_p} \right\}$
Gibilaro (Model B)
$D_p = C_d \frac{3}{4} \frac{\rho_f u_f - u_p }{\rho_p d_p}$
$C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \alpha^{-1.8} \text{ for } Re < 1000$
$= 0.44 \alpha^{-1.8} \text{ for } Re \geq 1000$

력식을 추가하여 이상유동의 해석에 미치는 영향을 비교하고자 한다.[12]. 이 식은 Gibilaro 등의 항력식에 Gidaspow의 항력계수를 이용하였다. 분산상인 고체추진제의 가속도는 Eq. 5와 같고, 사용한 항력식은 Table 1에 정리하였다.

$$\frac{Du_p}{Dt} = D_p \times (u_f - u_p) \quad (5)$$

2.3 강내탄도 구성방정식

Eulerian-Lagrangian 접근법에서 각 상의 지배방정식을 계산하기 위해서는 다른 상의 물리량을 필요로 한다. 이를 위해 PSIC(Particle Source in Cell) 모델을 사용하여 각 상의 계산에 필요한 물리량을 계산하였다[6].

고체추진제 연소는 연소율과 형상함수에 의해 계산하며 Eq. 6과 같다. 연소율은 압력의 함수로 표현되는 Saint Robert's Law를 이용하였고 Eq. 7과 같이 표현된다[1-8].

$$\dot{m} = \rho_p N S_p \dot{r} \quad (6)$$

$$\dot{r} = \alpha_p P^\beta \quad (7)$$

3. 수치 해석

3.1 가스상 수치해석 기법

강내탄도 내의 유동장의 속도는 정지 상태에

서부터 최대 수 천 m/s 까지 증가하므로 이를 해석하기 위해서는 모든 속도 영역을 해석할 수 있는 전산해석 코드가 필요하다. 이에 본 연구에서는 Keio 대학에서 강내탄도에 사용한 AUSM 계열의 SHUS (Simple High-resolution Upwind Scheme) 기법보다 저음속 영역에서 더 안정화된 LSHUS (Low-dissipation Simple High-resolution Upwind Scheme) 기법을 사용하여 2차원 코드를 개발하였다[2]. LSHUS 기법은 비점성 플럭스 항을 계산하는데 있어 AUSM 기법이 사용하는 질량 플럭스 대신에 Roe의 질량 플럭스로 대체하여 Roe 기법의 정확성과 AUSM의 강건성을 유지하는 기법이다[13]. 공간차분법으로 MUSCL과 Minmod 제한자를 사용하였고 시간차분법은 비정상상태 강내탄도를 해석하므로 외제적기법을 사용하였다.

3.2 이동경계면 해석

강내탄도는 탄자의 이동에 의해 약실의 공간의 증가하므로 시간에 따라 수치해석 영역의 변화를 수반한다. 이에 탄자의 이동에 따른 이동경계면을 해석하는 수치해석 기법이 필요하다. 이동경계면을 해석하는 방법은 좌표계의 이동 여부에 따라 구분된다. 강내탄도의 이동경계면은 강제인 탄자 운동에 의해 결정되기 때문에 고정 좌표계를 이용하는 기법을 주로 사용하였다. 일본의 Keio 대학 연구팀에서는 중첩격자를 사용하였고, 호주 연구팀은 Cut cell method를 사용하였다. 본 연구에서는 탄자의 단면 형상이 평면이고 계산량을 감소시키기 위해 Cut cell method와 유사한 Ghost cell extrapolation method를 사용하였다[3, 14].

4. 해석 결과

4.1 코드 검증

개발된 2차원 강내탄도 해석 코드는 강내탄도의 성능해석에 가장 많이 사용되는 무차원 IBHVG2 코드와 기존에 개발된 1차원 강내탄도 전산해석 코드의 결과와 비교 검증하였다. 1차원 강내탄도 전산해석 코드는 압력 기반의 SIMPLE 알고리즘과 공간차분법으로 SMART scheme을 사용하였고 이동경계면 해석기법은 2차원 코드와 동일한 기법을 사용하였다[6]. Lumped parameter model을 사용한 IBHVG2와 비교 검증을 위해 점화가스는 강내탄도의 약실 내에 모든 영역에 균일하게 분사된 상태를 초기 조건으로 하였고, 점화가스 물성치는 추진제 연소가스와 동일하게 하였다. 포신의 열전달과 탄자 회전 운동에너지도 동일하게 고려하지 않았다.

Table 2. Initial value of test model

Projectile mass	30 (kg)
Friction force	17236893 (Pa)
Propellant density	1569.45 (Kg/m ³)
Impetus	911665.4 (J/kg)
Chamber area	0.019478 (m ²)
Chamber length	0.9675 (m)
Exponent in burning rate(n)	0.71
Coefficient in burning rate(a)	1.33858e-7 (Pa) ⁻ⁿ (m/s)
Molecular weight of propellant	22.0 (kg/kmol)
Specific heat ratio	1.2593
Adiabatic temperature	2417 (K)

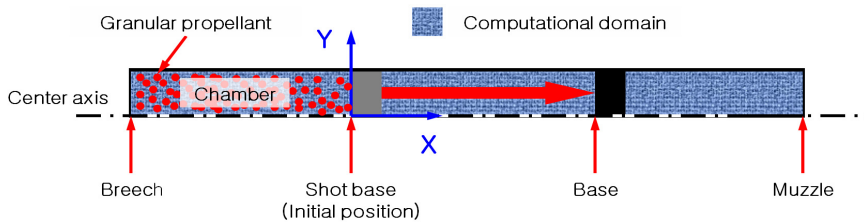


Fig. 2 Schematic diagram of calculation model for interior ballistics

강내탄도 해석 모델의 형상은 Fig. 2와 같고, 초기 조건은 Table 2와 같다. 장약의 추진제 형상은 불형을 선정하여 사용하였다. 다상유동을 해석하기 위해서는 격자가 많은 수의 입자를 포함하고 있어야 하므로 초기 약실의 격자는 50×5개로 구성하였다. 각 격자당 등간격으로 x방향 5개, y 방향 5개로 총 25개의 추진제 입자 그룹(Parcel)을 배치하였고 총 6250개의 추진제 입자 그룹을 계산하였다. 1차원 코드에서도 초기 격자는 50개로 하였고, 각 격자당 추진제 입자 그룹은 각 격자당 등간격으로 x방향 5개로 배치하였다. 포구까지 탄자의 이동 거리는 5 m로 하였다.

Figure 3, 4는 기공률 0.6, 불형 추진제 직경 4.1 mm 경우에 대한 해석결과로 약실 중심축에서 시

간에 따른 압력과 기공률이다. 탄자가 이동하기 전에는 균일한 압력 상승이 보이며 탄자가 이동하면서 압력파가 생성되는 것이 나타났다. 기공률 분포에서도 탄자의 이동에 의해 발생한 내부 유동에 따라 추진제가 이동하는 것이 나타났다.

Figure 5, 6은 2차원 해석 코드를 검증하기 위해 시간에 따른 포미(Breech)와 탄저(Base)의 압력을 비교하였다. 개발된 2차원 강내탄도 해석 코드는 기존의 1차원 강내탄도 해석 코드와 압력 변화가 거의 일치하는 것으로 나타났다. IBHVG2의 결과와는 차이가 나타났으나 이는 IBHVG2가 사용한 이론적인 압력 분포 모델인 Lagrange Approximation 때문이다[8]. Fig. 7은 탄자의 속도 변화로 최종 탈출 속도는 IBHVG2에서 706.2 m/s, 1차원 코드는 713.7 m/s, 2차원 코드는 710.8 m/s으로 거의 유사하였다.

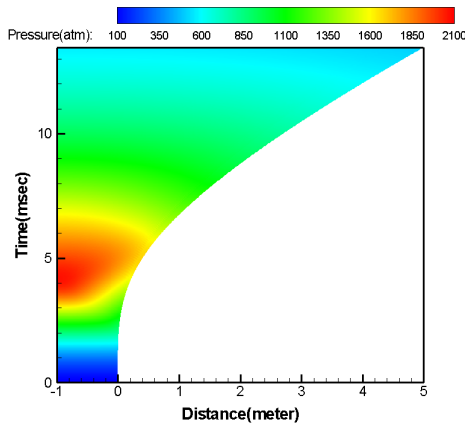


Fig. 3 The x-t diagram of pressure

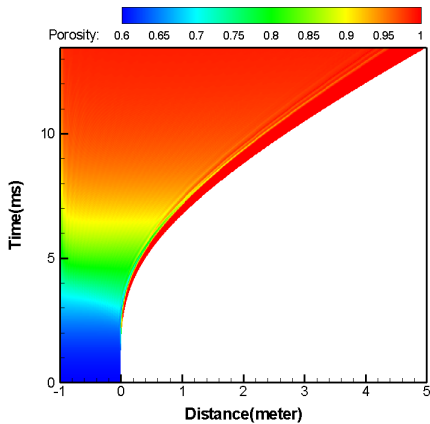


Fig. 4 The x-t diagram of porosity

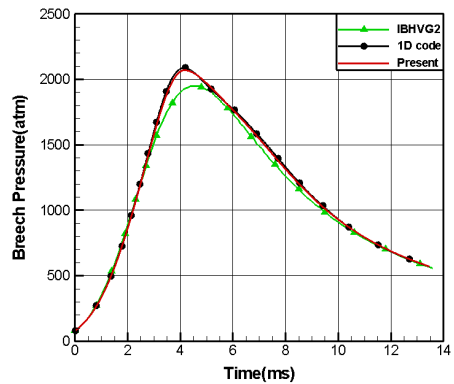


Fig. 5 Time history of breech pressure

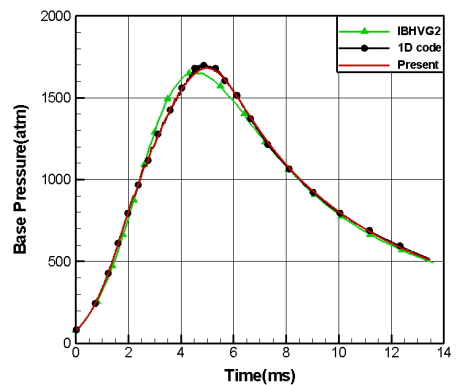


Fig. 6 Time history of base pressure

Table 3. Calculated results of performances by varying the porosity and the size of the ball diameter

Case		Maximum Pressure (atm)	Muzzle Velocity (m/s)	Muzzle Time (ms)
Porosity 0.7	IBHVG2	1350	586.8	16.6
	1D code	1380	591.6	16.4
	Present	1380	589.2	16.4
Porosity 0.6	IBHVG2	1950	706.2	13.6
	1D code	2090	713.7	13.4
	Present	2070	710.8	13.5
Porosity 0.5	IBHVG2	2680	810.9	11.6
	1D code	3070	823.6	11.4
	Present	3010	817.4	11.4

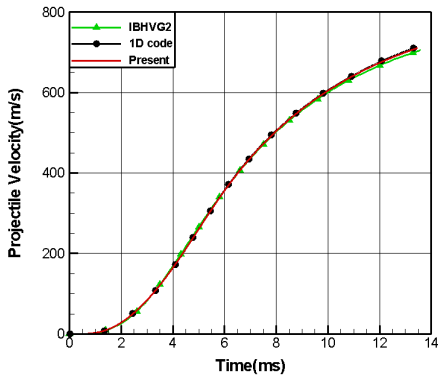


Fig. 7 Time history of projectile velocity

개발된 2차원 강내탄도 전산해석 코드의 정확성을 확인하기 위해 3가지 기공률 조건에서 비교하였다[6]. Table 3은 기공률 변화에 따른 강내탄도의 해석결과 비교이다. 약실 내 최대 압력은 2차원 강내탄도 해석 결과와 1차원 해석 결과가 유사하였다. 그러나 무차원 식을 사용하는 IBHVG2와는 확연한 차이가 나타났고 이는 IBHVG2가 압력분포를 이론적인 Lagrange Approximation을 사용해 계산하였기 때문이다.

강내탄도의 주요 성능 인자는 탄자탈출속도이다. IBHVG2 코드는 화포 실험 결과와 유사하게 탄자탈출속도를 예측하는 것으로 알려져 있어 이를 기준으로 비교하였다. 개발된 2차원 코드는 1% 이내의 차이로 나타났고, 1차원 코드는 2% 이내의 차이가 나타났다. 강내탄도의 주요 성능 인자인 탄자탈출속도의 차이의 원인 중 하나가

고체추진제 연소율에 사용하는 압력에 기인한 것으로 볼 수 있다. 이에 IBHVG2와 동일하게 연소율에 평균 압력을 사용하여 2차원 강내탄도 전산해석을 수행하였고 Table 4와 같다. 고체추진제 연소율 계산에 평균 압력을 사용한 경우의 탄자탈출속도는 IBHVG2와의 비교에서 속도차가 감소하는 것으로 나타났다.

해외에서 강내탄도 코드의 신뢰성 평가는 IBHVG2와의 탄자탈출속도 비교를 통해 수행하였으며, 탄자탈출속도 차이가 1% 내외로 계산되면 신뢰할 수 있는 것으로 평가하였다. 개발된 2차원 강내탄도 해석 코드의 결과는 1% 이내의 차이를 보임에 따라 신뢰할 수 있는 결과를 계산하는 것으로 볼 수 있다. 탄자탈출시간은 3가

Table 4. Velocity difference according to pressure models for burning rate

Case		Difference between IBHVG2
Porosity 0.7	Each pressure	2.4 m/s (0.41%)
	Mean Pressure	1.3 m/s (0.22%)
Porosity 0.6	Each pressure	4.6 m/s (0.65%)
	Mean Pressure	3.0 m/s (0.43%)
Porosity 0.5	Each pressure	6.5 m/s (0.80%)
	Mean Pressure	4.9 m/s (0.60%)

지 해석 코드 모두 유사하였다. 위의 비교 검증 결과들을 종합해 볼 때, 개발된 2차원 강내탄도 해석 코드는 신뢰성이 확보되었다고 판단된다.

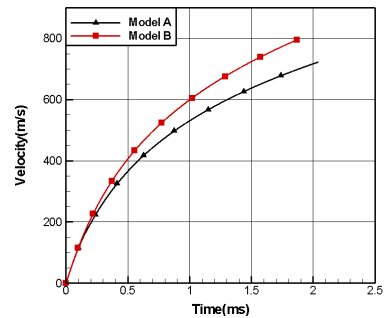
4.2 항력 모델에 따른 이상유동 해석

고체와 유체(기체 또는 액체)의 이상유동에 관한 수치적 연구는 석탄가스화 분야와 화포 분야에서 많이 수행되어 왔다. 고체와 유체의 이상유동에 관한 수치적 연구는 크게 좌표계에 따라 Eulerian-Eulerian 접근법과 Eulerian-Lagrangian 접근법으로 구분된다. 이 두 방법은 유체와 고체 입자를 연계하기 위해서 Gas-solid drag closure를 사용한다[9]. 이 때 사용하는 방정식이 실험을 통해 얻어진 항력식이며 Ergun식(Model A)을 대표적으로 사용하고 있다. Ergun식은 레이놀즈수 1000 이상에서 오차가 있어, Gibilaro 등의 항력식과 Gidaspow의 항력계수를 사용한 모델(Model B)을 추가하여 항력식에 따른 이상유동의 특성을 비교하였다. 해석 조건은 3가지로 탄자 마찰력이 없는 조건에서 비연소 반응(Non-combustion case) 경우, 연소 반응(Combustion case) 경우와 강내탄도와 동일하게 탄자마찰력과 연소 반응이 있는(Interior ballistics case) 경우에 대해 비교연구를 수행하였다. 탄자 마찰력이 없는 경우는 Table 2와 동일한 조건에서 기공률 0.7, 탄자질량 0.1 kg, 탄자 마찰력 0, 포신 길이 1.0 m로 하여 계산하였다. 탄자 마찰력이 있는 경우는 강내탄도 해석 조건인 Table 2와 모두 동일하며 기공률 0.7, 포신 길이 5.0 m로 하여 해석하였다.

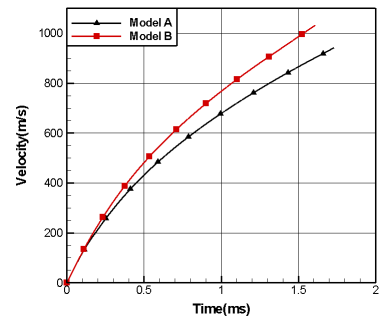
Figure 8은 항력식에 따른 탄자속도이다. 탄자 마찰력이 없는 조건에서는 연소 반응 여부에 상관없이 시간에 따라 탄자속도의 차이가 증가하였고 고레이놀즈 수에서 항력을 과다하게 계산하는 것으로 알려진 Ergun 식(Model A)을 사용한 경우의 탄자속도가 상대적으로 작았다. 탄자 마찰력이 있는 경우는 항력식에 영향을 받지 않고 거의 동일한 결과가 나타났다. 이는 탄자 마찰력에 의해 탄자가 포구에 도달하는 시간이 상대적으로 길어져 고상의 가속에 사용된 항력에너지의 대부분이 고상의 연소에 의해 생성된 연

소가스의 운동에너지로 변환되어 유동장의 생성 항에 다시 포함되기 때문으로 사료된다.

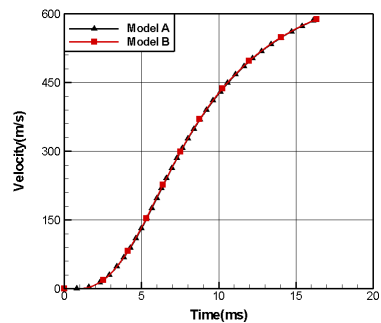
Table 5는 항력식에 따른 탄자탈출속도이며 탄자의 마찰력이 없는 경우에는 연소 여부에 상관없이 항력식에 따라 탄자탈출속도가 10% 내외로 차이가 크게 나타났다. 반면에 탄자 마찰력이 있는 경우에는 항력식에 따른 차이가 거의 나타나지 않았다.



(a) Non-combustion case



(b) Combustion case



(c) Interior ballistics case

Fig. 8 Projectile velocity according to drag models

Table 5. Muzzle velocity according to drag model at two phase flow

Case	Model A	Model B
Non-combustion	723 m/s	798 m/s
Combustion	942 m/s	1032 m/s
Interior ballistics	589.2 m/s	589.4 m/s

위의 결과에 따르면, 연소에 의해 입자의 가속에 사용된 항력에너지가 유동장에 운동에너지로 회수되는 경우인 강내탄도 성능해석에서는 항력식이 정확성에 영향을 주는 요소가 아님을 확인하였다. 반대로 탄자 마찰력이 없는 경우에는 항력식의 영향이 크게 나타났다. 따라서 강내탄도에서 점화기구의 형상에 따른 초기 내부 유동에 관한 연구를 수행하는 경우는 항력에너지가 유동장의 운동에너지로 전환이 지연되거나 고체추진제가 Packed bed화로 인해 전환되지 않는 경우가 발생할 수 있으므로 여러 항력식에 따른 비교 연구도 필요할 것이라 사료된다. 또한, 고밀도 비활성 금속탄(DIME, Dense Inert Metal Explosive)에서 철이나 텅스텐 같은 비활성 금속의 비산을 해석하는 경우에도 항력식의 정확성이 전체 해석의 정확성에 영향을 줄 수 있으므로 해석 레이놀즈 수 영역에서 정확도가 높은 항력식을 사용해야 할 것이다.

5. 결 론

점화제 주입 특성을 모사할 수 있는 2차원 이상유동의 강내탄도 해석코드를 개발하였다. 강내탄도 전산해석 코드는 다분산상을 해석할 수 있는 Eulerian-Lagrangian 접근법과 각 상의 물리적 정보 교환을 위해 PSIC 모델을 사용하였다. 모든 속도 영역에서 해석 가능하도록 밀도기반의 LSHUS기법을 적용하였고 탄자의 이동에 따른 이동경계면 해석을 위해 Ghost Cell Extrapolation method를 사용하였다. IBHVG2 코드와 기존에 개발된 1차원 강내탄도 해석코드

와 비교·검증하여 신뢰성을 확보하였다. 고체추진제의 연소율에 사용하는 압력이 탄자탈출속도의 비교에서 영향을 주는 요소임 확인하였다.

또한, 항력식이 이상유동 해석에 미치는 영향을 조사하였다. 실제 강내탄도와 동일한 조건에 관한 해석에서는 항력식이 탄자탈출속도에 영향을 미치지 않는 사실을 확인하였다. 그러나 마찰력이 없고 탄자의 질량이 작은 경우에는 항력식이 이상유동 해석에 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 비활성 입자를 포함하는 이상유동이나 점화기구에 따른 강내탄도의 초기 점화에 관한 연구에서는 항력식이 연구의 정확성에 영향을 주는 인자임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소 지원에 의한 연구결과입니다. 지원에 감사드립니다.

Nomenclature

- α : porosity
- D_p : exchange coefficient of drag factor
- f : drag force at each cell
- d : propellant diameter
- μ : viscosity coefficient
- \dot{m} : mass of the combustion gas
- α_p : coefficient in burning rate
- β : exponent in burning rate
- P : pressure
- f : interphase drag
- N : grain number density
- \dot{r} : burning rate
- S_p : propellant surface
- C_d : drag coefficient

Subscript

- p : particle or propellant
- f : gas or fluid
- ig : igniter

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. Hiroaki Miura and Akiko Matsuo, "Numerical Simulation of Projectile Accelerator using Solid Propellant," 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2006-1439, 2006
3. R. J. Gollan etc, "Development of Casbar : a Two-phase Flow Code for the Interior Ballistics Problem," 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, 2007, pp.295-302
4. 조한창, 윤재건, 신현동, 김종욱, "이동경계면을 갖는 연소실내에서의 입자상의 고체연료 연소장 예측," 대한 기계학회 논문집, 제16권, 제12호, 1992, pp.2385-2394
5. 성형건의 4인, "강내탄도 전산해석 기초 기법의 연구," 한국추진공학회지, 제12권, 제6호, 2008, pp.12-20
6. 성형건의 5인, "Eulerian-Lagrangian 접근법과 SMART scheme을 이용한 강내탄도 전산해석 코드 개발," 한국군사과학기술학회지, 제13권, 제3호, 2010, pp.349-357
7. 장진성의 4인, "점화제 주입에 따른 강내탄도 성능해석," 한국군사과학기술학회지, 제14권, 제1호, 2011, pp.22-29
8. Ronald, D. A. and Kurt D. F., "IBHVG2-A User's Guide," Technical Report, BRL-TR-2829, 1987
9. M.A. van der Hoef et. al. Numerical Simulation of Dense Gas-Solid Fluidized Beds : A Multiscale Modeling Strategy, Annu. Rev. Fluid Mech. Vol. 40, 2008, pp.47-70
10. Baer, M. R. and Nunziato, J. W., "A two-phase mixture theory for the deflagration to detonation transition in reactive granular materials," International Journal of Multiphase Flow, Vol. 12, No. 6, 1986, pp.861-889
11. Rupesh K. Reddy et al, "CFD modeling of pressure drop and drag coefficient in fixed and expanded beds," Chemical engineering research and design, Vol. 86, 2008, pp.444-453
12. Patankar, N. A. and Joseph, D. D., "Modeling and numerical simulation of particulate flows by the eulerian-lagrangian approach," International Journal of Multiphase Flow, Vol. 27, 2001, pp.1659-1684
13. Eiji Shima, "A Compressible CFD Method for Flow with Sound from Very Low Mach Number to Supersonic," 6th International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics and Applications, 2008
14. 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, 2008, pp.531-556