

강내탄도의 성능 영향 요소 분석

성형건* · 유승령* · 최동환* · 노태성*

Analysis of Elements Influencing on Performance of Interior Ballistics

Hyung-Gun Sung* · Seung-Young Yoo* · Dong-Whan Choi* · Tae-Seong Roh*

ABSTRACT

The analysis of the performance and the internal flow according to various numerical models used for the interior ballistics has been conducted. The internal flow has been mainly affected by the drag model. As results, oscillations of the pressure differences between the breech and the shot base has been reduced with a deceased drag of the propellant. The major performance of the interior ballistics has no relation to the models using Nusselt number for heat transfer coefficient. The negative pressure difference without the heat transfer of the propellant has not been shown.

초 록

강내탄도의 다양한 해석 모델에 따른 성능 및 내부 유동을 분석하였다. 항력 모델은 초기 내부 유동 특성에 큰 영향을 미치며 고체추진제의 항력이 작을수록 차압의 진동을 감소시키는 것으로 나타났다. Nusselt 수 모델은 강내탄도의 주요 성능에 영향을 미치지 않으며 고체추진제의 열전달이 없는 경우에는 역압력이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

Key Words: Interior Ballistics(강내탄도), Two-phase Flow(이상유동), Gas-Solid Flow(기체-고체 유동), Interphase Drag, Intergranular Stress

1. 서 론

탄약의 설계, 새로운 화포 추진제의 개발, 또는 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 개발하였고 이를 사용하여 다양한 연구를 수행하였다[1-8].

* 인하대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: tsroh@inha.ac.kr

강내탄도 현상은 크게 고체-기체(gas-solid)의 이상유동, 장약인 고체추진제의 연소, 탄자의 이동으로 구분할 수 있다. 고체-기체의 이상유동에서는 고체의 항력(interphase drag)과 고체간의 충돌(intergranular stress)에 관한 해석 모델링이 필요하고 고체추진제의 연소에서는 열전달에 의한 점화와 연소율 모델이 필요하다. 탄자의 이동은 제어체적의 증가에 따른 이동경계면 해석 모델을 사용한다. 이들 중 고체의 항력, 고체간의 충돌, 추진제의 열전달에 관한 다양한 식이 석탄 가스화나 입자 비산 연구 등에서 개발되어 사용되어 왔다[9-11].

Miura 등은 고체의 항력과 고체추진제의 열전달에 관한 모델의 사용 여부에 따라 강내탄도 특성에 미치는 영향을 분석하였고, 강내탄도 성능에 가장 크게 미치는 요소로 고체의 항력이라는 사실을 발견하였다[2, 5, 7]. 그러나 개별 현상에 대한 다양한 식의 개발되어 있지만, 이들에 대한 비교 연구는 거의 수행되지 않았다. 이에 본 연구에서, 이들 모델이 강내탄도에 미치는 영향을 비교 조사하였다.

2. 강내탄도

2.1 강내탄도

강내탄도는 화포의 약실 내(Fig. 1)에서 고체추진제가 점화가스에 의해 점화 및 연소되고, 생성된 연소가스의 압력에 의해 탄자가 가속되어 포구를 이탈하는 일련의 과정이다[1-8, 12].

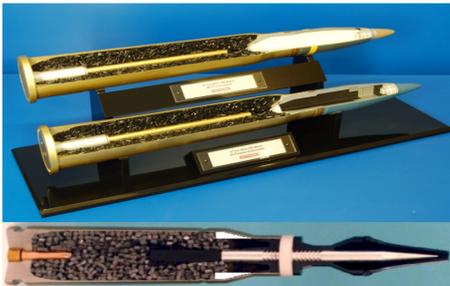


Fig. 1 Section of Interior ballistics

2.2 강내탄도 지배방정식

강내탄도의 약실 내 고체추진제 연소와 이동 현상은 기체-고체의 이상유동에 포함된다. 다분산 이상유동을 해석할 수 있는 Eulerian-Lagrangian 접근법을 사용하여 기체-고체 유동을 해석하였다 [12, 13].

강내탄도에서 연속상인 기상의 지배방정식은 고체추진제(고상)를 고려하기 위해 기상이 차지하는 부피를 의미하는 기공률(α)을 Euler 방정식에 도입한 식을 사용한다. 본 연구에서는 Baer&Nunziato가 사용한 지배방정식을 이용하였으며 다음과 같다[14].

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho u \vec{u}) \\ = -\alpha\nabla p + \dot{m}\vec{u}_p - \vec{f} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha E)}{\partial t} + \nabla \cdot \{ \alpha(e+p)\vec{u} \} = \\ -\vec{f} \cdot \vec{u}_p + \dot{m} \left(e_p + \frac{p}{\rho_p} + \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{u}_p}{2} \right) + \dot{m}_{ig} e_{ig} - q_p \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\alpha\rho Y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho Y\vec{u}) = \dot{m}_Y \quad (4)$$

2.3 강내탄도 구성방정식

분산상의 지배방정식은 고체추진제에 의한 항력(interphase drag)과 고체상 간의 충돌인 intergranular를 통해 계산되며 Eq. 5와 같다. Intergranular stress는 Gough 등이 개발한 식을 사용하였다[1-3]. 항력은 관내 고체입자에 의한 압력 손실을 측정할 실험식을 사용한다. 이에 관한 실험식은 다양한 모델이 개발되어 사용되고 있어 Table 1과 같은 모델을 사용하여 강내탄도에 미치는 영향을 비교 연구하였다[9-11]. Model D-N의 경우 기체의 항력으로 인하여 에너지 손실은 고려하나 고체추진제는 고정층(Fixed Bed)이라 가정하였다.

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

Table 1. Drag models of two phase flow[9-11]

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

고체추진제는 열전달에 의해 점화 온도까지 도달하였을 때 점화하고, 고체추진제 연소는 연소율과 형상함수에 의해 계산되며 Eq. 6과 같다. 연소율은 압력의 함수로 표현되는 Saint Robert's Law를 이용하였고 Eq. 7과 같이 표현된다[1-8, 12].

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

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

고체추진제의 열전달은 Eq. 8-13을 통해 계산된다. 여기서 고체추진제의 표면온도인 T_p 가 점화 온도에 도달할 때까지는 점화되지 않는 것으로 하였다[1-3, 5, 7].

$$q_p = n_p S_p q \quad (8)$$

$$q = h_t (T_g - T_p) \quad (9)$$

$$Nu_p = \frac{h_t D_p}{k_f} \quad (10)$$

$$Pr = \frac{4\gamma}{9\gamma - 5} \quad (11)$$

$$T_p = T_{po} - \frac{2}{3} \frac{h_t H}{k_p^2} \quad (12)$$

$$+ \left[\left(T_{po} - \frac{2}{3} \frac{h_t H}{k_p^2} \right)^2 + \frac{4}{3} \frac{h_t T_g H}{k_p^2} - T_{po}^2 \right]$$

$$\frac{dH}{dt} = \alpha_p q \quad (13)$$

고체추진제의 열전달에 사용되는 열전달 계수는 Nusselt 수로 계산되며 다양한 모델이 사용되고 있다. Table 2와 같은 모델을 사용하여 강내탄도에 미치는 영향을 비교하였다[8, 15]. Model Nu-A는 NGEN에서 사용된 Nusselt 수가 정지 유체에서 2가 되도록 수정한 것이다[1-3, 8]. Model Nu-N은 고체추진제가 열전달을 받지 않고 바로 점화되는 것으로 가정한 것이다.

Table 2. Nusselt number correlation of heat transfer

Model Nu-A (Porterie)
$Nu = 2 + 0.4 Re_p^{2/3} Pr^{1/3}$
Model Nu-B (Ranz and Marshall)
$Nu = 2 + 1.8 Re_p^{1/2} Pr^{1/3}$
Model Nu-N (Non-heat transfer)
Without heat transfer

Eulerian-Lagrangian 접근법에서 각 상의 지배 방정식을 계산하기 위해서는 다른 상의 물리량을 필요로 한다. 이를 위해 PSIC(Particle Source in Cell) 모델을 사용하여 각 상의 계산에 필요한 물리량을 계산하였다[12]. Lumped parameter model에 오리피스 이론식을 결합한 점화기 해석 모델을 사용하여 점화기를 모사하였다[16].

24 수치 해석 기법

강내탄도 내의 유동장의 속도는 정지 상태에서 서부터 최대 수 천 m/s 까지 증가하므로 이를 해석하기 위해서는 모든 속도 영역을 해석할 수 있는 전산해석 기법이 필요하다. 이에 본 연구에서는 LSHUS (Low-dissipation Simple High-resolution Upwind Scheme) 기법을 사용하였다[17]. 공간차

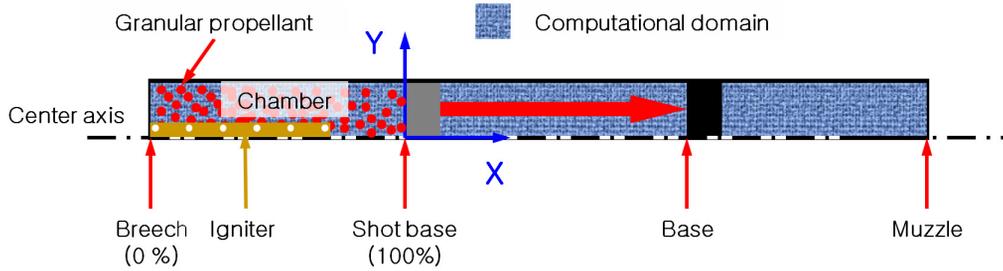


Fig. 2 Schematic diagram of calculation model for interior ballistics

분법으로 MUSCL과 Minmod 제한자를 사용하였고 시간차분법은 비정상상태 강내탄도를 해석하므로 외재적기법을 사용하였다.

강내탄도는 탄자의 이동에 의해 약실의 공간의 증가되므로 시간에 따라 수치해석 영역이 변화한다. 이에 탄자의 이동에 따른 이동경계면을 해석하는 수치해석 기법이 필요하다. 탄자의 단면 형상이 평면이므로 계산량을 감소시킬 수 있고 Cut cell method와 유사한 Ghost cell extrapolation method를 사용하였다[12, 18].

3. 해석 결과

3.1 해석 조건

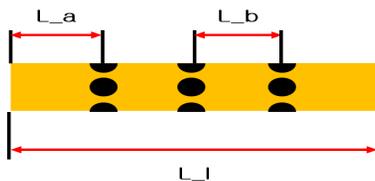


Fig. 3 Igniter dimension

축대칭 2차원으로 해석을 수행하였고, 상태방정식은 이상기체 상태방정식을 사용하였다. 강내탄도 해석 모델의 형상은 Fig. 2와 같고, 초기 조건은 Table 3과 같다. 점화제 형상은 Fig. 3과 같이 동일 위치에 4개의 점화제 주입구가 있는 것을 사용하였고 점화제 초기 조건은 Table 4와 같다. 장약인 고체추진제는 불형으로 직경이 4.1 mm이고 점화제 형상 또한 불형으로 반경이

1.707 mm이다. 점화제 주입구(side hole) 형상은 Table 5와 같다.

Table 3. Initial conditions of interior ballistics

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)

Table 4. Characteristics of igniter[4, 6]

Igniter mass	0.065 (kg)
Side hole diameter	5.5 (mm)
Igniter density	1763 (Kg/m ³)
Igniter impetus	456758.4(J/kg)
Igniter diameter	0.014 (m)
Igniter length(L_I)	0.502 (m)
Igniter exponent in burning rate(n)	0.164
Igniter coefficient in burning rate(a)	0.0026 (Pa) ⁻ⁿ (m/s)
Molecular weight of igniter	22.0 (kg/kmol)
Igniter specific heat ratio	1.15
Igniter adiabatic temperature	1942 (K)

Table 5. Igniter conditions

Side hole number	1	2	3
Position from breech (L_a)	10%	18%	26%
Side hole number	4	5	6
Position from breech (L_a)	34%	42%	50%

다상유동을 해석하기 위해서는 하나의 격자가 많은 수의 입자를 포함하고 있어야 하므로 초기 약실의 격자는 50×6 개로 구성하였다. 각 격자당 등간격으로 x방향 5개, y 방향 5개로 총 25개의 추진제 입자 그룹(Parcel)을 배치하였고 총 7000 개의 추진제 입자 그룹을 계산하였다. 포구까지 탄자의 이동 거리는 5 m이고, 강내탄도의 초기 기공률은 0.6이다.

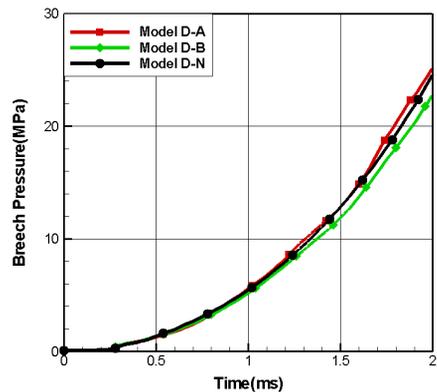
3.2 항력식에 따른 비교

장약인 고체추진제의 이동과 가스상의 압력손실에 사용되는 항력식이 강내탄도에 미치는 영향을 비교하였다. 초기 조건은 Table 3, 4와 같으며 Nusselt 수는 Table 2의 Model Nu-A를 사용하였다. Fig. 4는 항력 모델에 따른 초기 시간의 포미(Breech)와 탄저(Base) 압력이다. 포미 압력의 경우 유사한 경향성을 가지나 탄저 압력에서는 확연히 차이가 나타났다. 이는 압력 손실에 의해 점화가스가 탄저에 도달하는데 시간 지연이 일어나기 때문이다. 따라서 고체추진제의 점화 특성을 정확히 파악하기 위해서는 항력을 정확히 예측하는 모델이 필요하다는 사실을 알 수 있었다. Fig. 5는 내부 유동장이 고체추진제에 전달한 운동에너지 양을 계산한 것이다. 이를 통해 Model D-B가 Model D-A 보다 유동장의 압력 손실과 항력이 작은 것을 알 수 있었다. Model D-N은 고체추진제가 움직이는 않는 고정층이므로 운동에너지 전달이 없는 것으로 나타나 것이다.

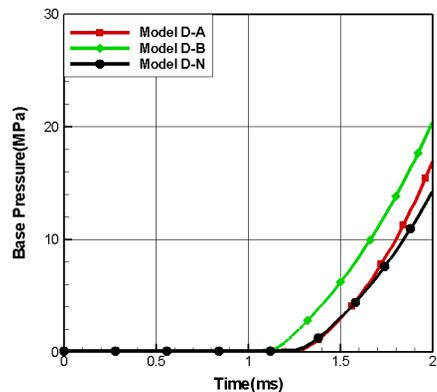
Figure 6은 포미와 초기 탄저에서의 압력차(차압)이고, 초기에 발생하는 역압력(NDP, Negative Differential Pressure)은 화포의 안전성을 평가하

는 요소로 사용되고 있다. 고체추진제가 이동하지는 않는 경우(Model D-N)에는 역압력 구배가 발생하지 않아 포신의 안전성에 문제를 발생시킬 수 있는 압력파는 생기지 않는 것으로 판단할 수 있으나, Fig. 7의 포미 압력을 보면 가장 크게 상승하는 것으로 나타나 포신의 안정성에 부정적인 영향을 주는 것으로 판단된다. 항력을 작게 계산하는 Model D-B의 경우, 압력차의 크기가 상대적으로 작았고 포미 압력도 작았다. 이러한 점을 볼 때 고체추진제의 형상 항력을 최소화 되도록 설계할수록 점화기에 의한 발생한 압력 진동을 감소시킬 수 있을 것이라 사료된다.

강내탄도의 주요 성능 인자인 약실 최대 압력, 탄자탈출속도, 탄자탈출시간을 Table 6에서 비교



a) Breech pressure at barrel surface



b) Base pressure at barrel surface

Fig. 4 Pressure according to drag models

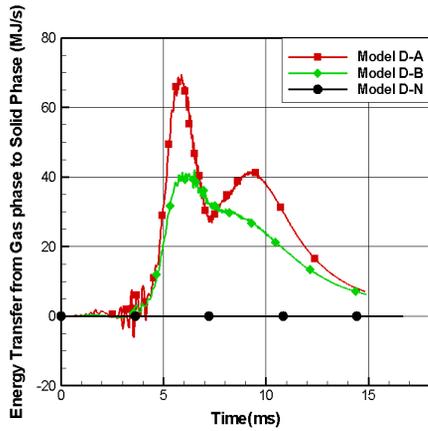


Fig. 5 Energy transfer from flow to propellant

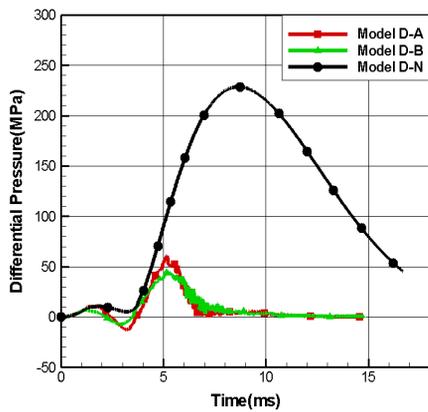


Fig. 6 Pressure difference from breach to shot base using drag models

Table 6. Calculated results of performances by varying the drag models

Case	Maximum Pressure (MPa)	Muzzle Velocity (m/s)	Muzzle Time (ms)
Model D-A	218	711	14.8
Model D-B	213	710	14.8
Model D-N	349	656	16.7

하였다. 항력을 통해 고체추진제가 움직이는 경우에는 항력에 상관없이 거의 유사한 성능을 예측하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 8과 같이 항력에 의해 가속된 고체추진제의 운동에너지가 연소로 인해 유동장의 에너지로 다시 흡수되기 때문이다. 반면에, 항력을 통한 압력 손실만 있고 고체추진제가 움직이는 않는 Model D-N의 경우는 3 가지 성능 모두에서 상당한 차이가 나타났으며 탄자탈출속도는 감소하였다. 이들 해석 결과로부터 화포의 안전성을 향상시키기 위해서는 고체추진제의 이동은 필요하나 항력은 최소화되어야 한다는 사실을 알 수 있었다.

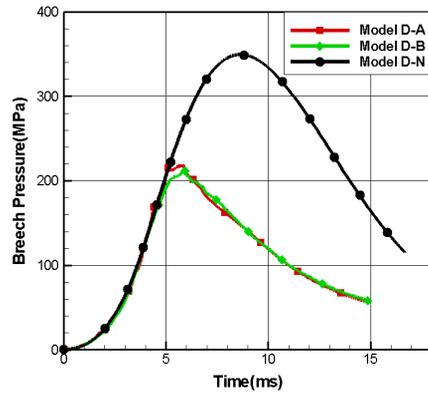


Fig. 7 Time history of breach pressure

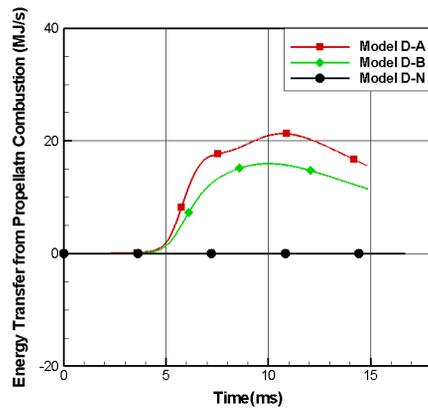
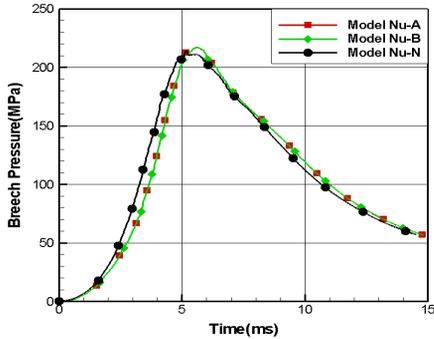


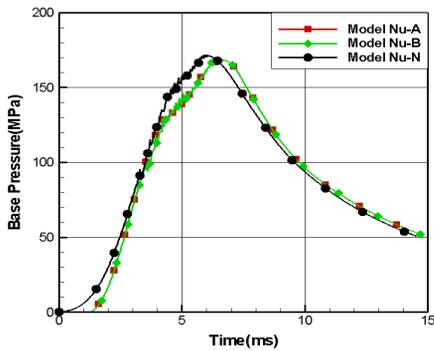
Fig. 8 Kinetic energy of combustion gases

3.3 Nusselt 수에 따른 비교

고체추진제의 열전달이 강내탄도에 미치는 영향을 Fig. 9, 10에서 비교하였다. 초기조건은



a) Breech pressure at barrel surface



b) Base pressure at barrel surface

Fig. 9 Pressure according to heat transfer models

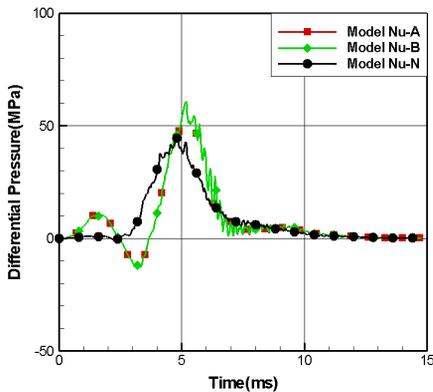


Fig. 10 Pressure difference from breech to shot base according to heat transfer models

Table 3, 4와 같으며, 항력식은 Ergun식을 사용한 Model D-A와 같다. Nusselt 수 계산 모델은 강내탄도의 성능에 영향을 주지 않은 것으로 나타났다. 그러나 열전달을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에는 포미 압력, 탄저 압력, 차압에서 차이가 나타났다. 고체추진제가 열전달을 고려하지 않고 바로 연소하는 경우에는 차압에서 역압력이 나타나지 않았고 최대 압력차도 작게 예측되었다. 이러한 점을 볼 때 열전달에 의한 고체추진제의 점화 지연 현상이 나타나지 않도록 하는 것이 화포의 안전성을 향상시키는 요소라는 사실을 알 수 있었다.

열전달 모델에 따른 강내탄도의 주요 성능 인자를 Table 7에서 비교하였다. 열전달은 강내탄도의 주요 성능인 탄자탈출속도, 탄자탈출시간, 약실 내 최대 압력에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

Table 7. Calculated results of performances by varying the heat transfer models

Case	Maximum Pressure (MPa)	Muzzle Velocity (m/s)	Muzzle Time (ms)
Model Nu-A	218	711	14.8
Model Nu-B	218	711	14.8
Model Nu-N	214	714	14.4

4. 결 론

강내탄도 해석에 사용되는 여러 수학 모델에 따른 강내탄도의 성능 및 내부 유동을 분석하였다. 항력 모델의 경우 모델에 따라 초기의 내부 유동 특성에 차이가 나타났으며 고체추진제의 항력을 작게 예측할수록 점화기에 의한 차압과 역압력을 감소시켰다. Nusselt 수 모델들은 내부 유동장과 성능에 영향을 주지 않는 것으로 나타났고 열전달 고려 여부는 차압의 특성에만 영향을 주는 것으로 나타났다.

이를 통해 화포의 안전성을 향상시키기 위해서는 고체추진제의 항력과 열전달에 의한 점화 지연을 최소화 시켜야 한다는 결론을 얻었다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소 지원에 의한 연구결과입니다. 지원에 감사드립니다.

Nomenclature

	: 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
	: 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
q_p	: heat transfer in propellant
h_t	: heat transfer coefficient
R	: Gas constant
k_p	: Propellant thermal conductivity
α_p	: Propellant thermal diffusivity
a_1	: Intergranular wave speed

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. Dejan Mickovic and Slobodan Jaramaz "Igniter Function: Experimental and Theoretical Studies," Propellant, Explosives, Pyrotechnics, 2009, pp.254-259
5. H. Miura, A. Mastuo, Y. Nakamura, "Multi-dimensional Simulation on Ignition Stage of Granular Solid Propellant Varying Primer Configuration," Advancements in Energetic Materials and Chemical Propulsion, Begell House Inc., 2008, pp.507-522
6. Slobodan Jaramaz, Dejan Mickovic and Predrag Elek, "Two-phase flows in gun barrel: Theoretical and experimental studies," International Journal of Multiphase Flow, 2011, pp.475-487
7. H. Miura, A. Mastuo, Y. Nakamura, "Three-Dimensional Simulation of Pressure Fluctuation in Granular Solid Propellant Chamber within an Ignition Stage," Propellant, Explosives, Pyrotechnics, 2011, pp.259-267
8. J. Nussbaum, P. Helluy, J. M. Herard and B. Baschung, "Multi-Dimensional Two-Phase Flow Modeling Applied to Interior Ballistics," Journal of Applied Mechanics, Vol 78/051015, 2011

9. 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
10. J. Lundberg and B. . Halvorsen, "A review of some existing darg models describing the interaction between phases in a bubbling fluidized bed," *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2(5), 2010, pp.1047-1051
11. K. Papadikis, S. Gu, A. Fivga, and A. B. Bridgwater, "Numerical Comparison of the Drag Models of Granular Flows Applied to the Fast Pyrolysis Biomass," *Energy&Fuels*, Vol. 24, 2010, pp.2133-2145
12. 성형건의 외 5인, "Eulerian-Lagrangian 접근법과 SMART scheme을 이용한 강내탄도 전산 해석 코드 개발," *한국군사과학기술학회지*, 제13권, 제3호, 2010, pp.349-357
13. 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
14. 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
15. C. Boulnois, C. Strozzi, A. Bouchama and P. Gillard, "A numerical tool for evaluating solid propellants ignition models," 26th International Symposium Ballistics, 2011
16. 성형건 등 외 3인, "강내탄도의 점화기 해석 모델 개발 및 초기 점화 연구," 제 37회 한국추진공학회 추계학술대회, 2011
17. 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
18. 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