

# Eulerian-Lagrangian 접근법과 SMART scheme을 이용한 강내탄도 전산해석 코드 개발

Development of Code for Numerical Analysis of Interior Ballistics  
using Eulerian-Lagrangian Approach and SMART scheme

|                |               |                |                |
|----------------|---------------|----------------|----------------|
| 성형건*           | 장진성*          | 이상복*           | 최동환*           |
| Hyung-Gun Sung | Jin-Sung Jang | Sang-Bok Lee   | Dong-Whan Choi |
|                | 노태성*          | 장영재**          |                |
|                | Tae-Seong Roh | Young-Jae Jang |                |

In this paper, a numerical code for the interior ballistics has been investigated. The Eulerian-Lagrangian approach and the SMART scheme have been used in the numerical code for the grain combustion. The translational kinetic energy of the projectile and work done against barrel friction have been considered only. The ghost cell extrapolation method has been used for the chamber change with the projectile movement. The calculation results of the numerical code have been compared and verified through those of IBHVG2 code.

Keywords : Interior Ballistics(강내탄도), Porosity(기공률), Moving Boundary(이동경계면), 고체추진제(Solid Propellant)

## 1. 서론

탄약의 설계, 새로운 화포 추진제의 개발, 또는 화포나 포신의 설계 등을 위해서는 강내탄도(Interior Ballistics) 해석 기술이 필수적으로 요구된다. 특히, 점화제 주입 특성에 따라 강내탄도의 약실 내에 심각한 압력파가 생성되어 포신의 심각한 결함을 발생시킬 수 있어 이를 예측할 수 있는 다상유동의 강내탄도 전산 해석 코드가 필요하다. 강내탄도 해석 코드는 국가적

인 차원에서 중요 기술로 분류되어 다차원 다상 유동을 해석하는 강내탄도 해석 코드를 도입하기 어려운 실정이며, 국내의 경우는 대부분 무차원의 Lumped parameter model을 기반으로 한 IBHVG2 코드를 이용하는 실정이다<sup>1~3)</sup>.

미국의 경우 1970년대 초부터 ARL(Army Research Laboratory)의 주도하에 강내탄도 전산 해석 코드의 개발 연구가 진행되어 왔다. 무차원의 Lumped parameter model을 기반으로 한 IBHVG2 코드 개발을 시작하여 1차원 이상 유동을 해석하는 XKTC를 거쳐 현재는 다차원 다상 유동을 해석할 수 있는 강내탄도 해석 코드인 NGEN의 개발을 완료하였다<sup>1~3)</sup>.

국내의 경우 조한창 등은 Eulerian-Eulerian 접근법을 이용한 1차원 이상유동의 강내탄도 해석 연구를 수행

† 2010년 1월 20일 접수~2010년 5월 13일 게재승인

\* 인하대학교(Inha University)

\*\* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 노태성(tsroh@inha.ac.kr)

하였으나, 다차원으로 확장하는 연구 개발은 수행되지 않았다<sup>[4]</sup>. 또한, 강내탄도에 사용되는 과립형 고체추진제 그레이의 종류는 불형(구형), 판형, 봉형, 단공판형, 다공판형, 장미형 등이 있는데, Eulerian-Eulerian 접근법의 한계성 때문에 입자가 작은 불형 타입의 고체추진제만이 적용되었다. Gough 등은 Eulerian-Lagrangian 접근법을 이용하여 XKTC와 NGEN 코드에서 다양한 형상의 고체추진제를 고려할 수 있도록 하였다<sup>[1]</sup>. 최근에 새로운 고에너지 신물질 추진제 개발 연구에 맞추어 강내탄도 전산 해석 코드의 필요성이 요구되어 성형건 등이 Eulerian-Lagrangian 접근법을 이용한 강내탄도 해석 코드 개발을 수행하였으나, 탄자 마찰력에 의한 에너지 손실 등은 고려하지 않았다<sup>[5]</sup>. 또한 점화제 주입 특성에 따른 연구에서는 심각한 압력파가 발생하는 경우 수렴 불안정이 나타났었다.

이에 본 연구에서는 공간차분법에 TVD 제한자인 SMART(Sharp and Monotonic Algorithm for Realistic Transport) scheme를 이용하여 수치 안정성을 확보하고 탄자 마찰력에 의한 에너지 손실을 고려하는 강내탄도 전산해석 코드를 개발하였고, 국내외에서 가장 많이 사용되고 있는 IBHVG2 코드의 결과와 비교하여 신뢰성을 확보하였다.

## 2. 강내탄도

강내탄도는 화포의 약실 내에서 고체추진제가 점화가스에 의해 연소되고 이 때 생성된 연소가스의 압력에 의해 탄자가 가속되어 포구를 이탈하는 일련의 과정이다. 강내탄도는 Fig. 1과 같이 고체추진제의 점화 및 연소 과정(Process 1)과 일정 압력에 도달한 이후 탄자가 이동하는 과정(Process 2)으로 구분할 수 있다.

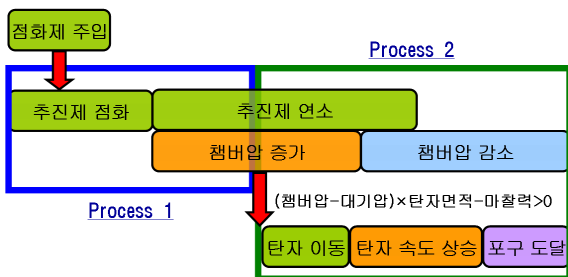


Fig. 1. Diagram of simplified interior ballistics

먼저, 고체추진제 점화 및 연소 과정은 점화제가 연소하여 발생한 가스가 주입되어 주위의 고체추진제 입자를 점화시키고 이 때 발생한 연소가스와 함께 고체추진제 입자 사이를 흐르면서 미연소된 고체추진제 입자들을 점화, 연소시킨다. 또한 점화제와 생성된 연소가스에 의해 생성된 유동이 고체추진제 입자를 이동시킨다.

탄자가 이동하는 물리 현상은 탄자의 전단과 후단의 압력차가 탄자 마찰력을 극복하면서 이동하는 것으로 탄자의 이동은 탄자 운동방정식을 통해 계산된다. 그리고 탄자 이동에 의해 강내탄도의 제어체적이 증가하게 되며 이에 따라 격자를 생성하고 이동경계면에 대한 물리량을 계산하는 수학적 모델이 필요하다.

### 가. 강내탄도의 지배방정식

강내탄도의 고체추진제 점화 및 연소현상은 다상유동이다. 고체추진제 연소가스는 연속상이며 고체추진제, 고체입자, 추진제의 분해물 등은 분산상으로 구분된다. 대부분의 화포추진제는 고체추진제가 사용되므로 본 연구에서도 분산상으로는 고체추진제만을 고려하였다. 다상 유동을 해석하기 위해 연속상(기상)은 Eulerian 좌표계를 이용하고 분산상(고상)은 Lagrangian 좌표계를 이용하는 Eulerian-Lagrangian 접근법을 사용하였다.

연속상인 기상의 지배방정식은 고상이 차지하는 부피를 고려하기 위해 기공률을 도입한다. 강내탄도의 경우 Euler 방정식에 기공률을 도입한 지배방정식을 사용하며, 1차원 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식은 다음과 같다<sup>[1]</sup>.

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

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

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

여기서  $E = \rho(e + u^2/2)$  이고, 아래첨자 p는 고상인

고체추진제,  $ig$ 는 점화제를 의미한다.  $f$ 는 고상과 기상에 의해 발생하는 항력이다. 에너지방정식의 열전달률  $q_p$ 는 고체추진제의 연소와 이동을 해석하는데 핵심 변수가 아니므로 고려하지 않는 것으로 한다.

분산상인 고상의 운동방정식(속도방정식)은 다음과 같다<sup>[1]</sup>.

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

$\sigma$ 는 고체입자간의 응력(intergranular stress)이다. 조한창 등에 의하면 고체입자 간의 응력은 연구자에 따라 그 사용이 다양하다고 하였으나 본 연구에서의 고체추진제의 이동에서 고상과 기상에서 발생하는 항력이 주요한 요소이므로 고체입자 간의 응력은 고려하지 않았다.

#### 나. 강내탄도의 구성방정식

고체추진제와 연소가스에서 발생하는 항력은 Ergun의 압력 손실식을 사용하여 고체추진제의 가속도식으로 나타냈고 다음과 같다<sup>[1,4,5]</sup>.

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

고체추진제 연소는 형상 함수와 연소율에 의해 계산된다. 다양한 과립형 고체추진제 중 불형을 선정하였고 형상 함수  $S_p$ 와 고체추진제 연소가스의 질유량  $\dot{m}$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$S_p = 4\pi r^2 \quad (6)$$

$$\dot{m} = n\rho_p S_p r_b \quad (7)$$

여기서  $r$ 은 불형추진제의 반지름이고,  $r_b$ 는 추진제의 선형연소속도이다. 본 연구에서는 IBHVG2의 결과와 비교하기 위해 일반적으로 고체추진제 연소모델에 사용되는 연소율( $r_b = aP^n$ )을 사용하였고, 상태방정식은 이상기체 상태방정식을 사용하였다. 불형에 관한

기공률은 다음과 같다.

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

여기서  $n$ 은 미소제어체적 내에 동일한 반지름을 가진 고체추진제 입자 수이고,  $\Delta x$ 는 격자 간격이다.

#### 다. 강내탄도의 에너지 전달 및 손실

고체추진제가 갖고 있는 에너지는 탄자의 운동에너지, 탄자의 회전 운동에너지, 주퇴부의 운동에너지, 연소가스의 유출에너지, 고체추진제와 연소가스간의 에너지, 탄자의 마찰 손실에너지, 포신을 통한 열 손실에너지, 탄자 항력에 의한 손실에너지 등에 이용된다<sup>[6]</sup>. 이 중 고체추진제의 에너지의 전달 및 손실의 주요 요소는 탄자의 운동에너지, 탄자의 마찰 손실에너지, 포신을 통한 열 손실에너지가 있다. 본 연구에서 탄자의 운동에너지와 마찰 손실에너지만을 고려하였고, 고체추진제와 연소가스 간의 에너지는 강내탄도의 지배방정식을 통해 계산된다. 탄자의 운동에너지는 다음과 같다<sup>[6]</sup>.

$$E_{proj} = \frac{1}{2} m_p V_{proj}^2 \quad (9)$$

IBHVG2에서는 탄자의 마찰 손실에너지를 마찰 저항 압력을 통해 계산한다. 일반적으로 마찰력은 탄자의 위치에 따라 다르므로 위치에 따른 마찰 저항 압력을 사용하여 아래와 같은 탄자의 마찰 손실에너지를 계산한다<sup>[6]</sup>.

$$E_{frics} = Area \times \int P_{res(x)} dx \quad (10)$$

#### 라. 탄자 운동방정식

탄자의 이동 및 속도는 식 (11)의 탄자에 관한 힘의 평형방정식을 사용하여 탄자의 가속도를 계산한다.

$$m_{proj} a_{proj} = (P_{base} - P_{atm}) \times Area - F_{frics} \quad (11)$$

여기서 계산된 가속도는 상미분방정식인 탄자의 위치방정식과 속도방정식에 적용하여 계산한다.

### 3. 수치해석기법

강내탄도 내의 유동장의 속도는 정지 상태에서부터 최대 수 천 m/s까지 증가하므로 이를 위해 모든 속도 영역을 해석할 수 있는 압축성 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked) 알고리즘을 사용하여 1차원 CFD 코드를 개발하였고, 공간 이산화는 3차 정확도와 TVD 특성을 가진 SMART scheme을 사용하여 수렴 안정성을 높였다<sup>[7]</sup>. 탄자의 이동에 의해 생성되는 이동경계면은 Ghost Cell Extrapolation 기법을 사용하여 계산하였다<sup>[5]</sup>.

#### 가. SMART scheme

3차 정확도를 가진 공간 이산화 기법인 QUICK(Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics) scheme은 불연속적인 압력장, 충격파 등의 급격한 변화에 대한 수치 진동이 점차 증대되어 발산할 수 있는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 TVD 특성을 가진 SMART scheme을 적용한다. SMART scheme은 Leonard의 NVF(Normalized Variable Formulation)개념을 활용한 정규화 변수로 차분법을 선택하여 사용한다. NVF 개념을 활용하여 국소변수를 다음과 같은 정규화 변수로 나타낼 수 있다<sup>[7]</sup>.

$$\hat{\Phi}_k = \frac{\Phi_k - \Phi_{i-2}}{\Phi_i - \Phi_{i-2}} \quad (k = i-2, i-3/2, \dots, i) \quad (12)$$

SMART scheme은 정규화 변수를 통해 차분법이 선택되며 다음과 같다.

$$\hat{\Phi}_{i-1/2} = \begin{cases} \hat{\Phi}_{i-1} & \text{if } \hat{\Phi}_{i-1} \notin [0, 1] \\ 3\hat{\Phi}_{i-1} & \text{if } \hat{\Phi}_{i-1} \in [0, 1/6] \\ 1 & \text{if } \hat{\Phi}_{i-1} \in (5/6, 1] \\ \frac{3}{8}(2\hat{\Phi}_{i-1} + 1) & \text{if } \hat{\Phi}_{i-1} \in [1/6, 5/6] \end{cases} \quad (13)$$

여기서 정규화 변수가 1/6 보다 크고 5/6보다 작은 경우 3차 정확도를 가진 QUICK과 동일한 정확성을 가지고, 0보다 작거나 1보다 크면 1차 정확도를 Upwind scheme이 사용된다.

강내탄도의 약실 내에서는 점화gas와 고체추진제의 연소에 의해 급격한 압력 변화가 발생할 수 있어 Shock tube 문제를 풀어 강내탄도 전산해석 코드의 수

치안정성 및 신뢰성을 검증하였다. 검증에 사용된 초기조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Initial value of shock tube problem

| $\rho_L$ | $u_L$ | $P_L$ | $\rho_R$ | $u_R$ | $P_R$ |
|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| 1.0      | 0.0   | 1.0   | 0.125    | 0.0   | 0.1   |

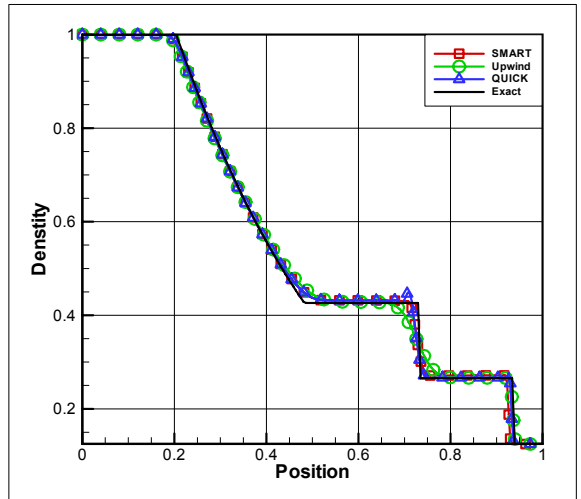


Fig. 2. Numerical result of shock tube problem(Density)

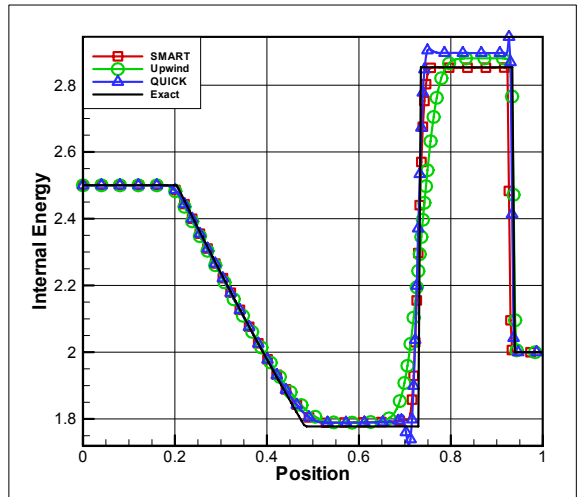


Fig. 3. Numerical result of shock tube problem(Internal energy)

Fig. 2와 Fig. 3은 Shock tube 해석 결과로 비교한 기법 중 SMART scheme이 Dissipation 오차와 Dispersion

오차가 가장 적게 나타났으며 엄밀해에 가장 근접함을 확인할 수 있다.

나. Ghost Cell Extrapolation 기법

강내탄도의 이동경계면은 강제인 탄자 운동에 의해 결정되기 때문에 경계면 추적을 탄자 운동방정식으로 정확히 계산할 수 있다. 또한 과립형 고체추진제를 포함하고 있어 Non-Eulerian coordinate를 사용하여 격자를 이동하는 기법 보다는 고정좌표계인 Eulerian coordinate를 사용하여 격자를 추가시키는 Ghost Cell Extrapolation 기법을 사용하여 이동경계면을 해석하는 것이 효율적이다<sup>5)</sup>.

Table 2. Initial value of free piston problem

|           |                          |
|-----------|--------------------------|
| 초기 압력     | 1.0e+5 (Pa)              |
| 초기 밀도     | 1.0 (kg/m <sup>3</sup> ) |
| 초기 온도     | 348.5 (K)                |
| 피스톤 질량    | 0.001 (kg)               |
| 도관 직경     | 0.01 (m)                 |
| 피스톤 앞면 압력 | 0.0 (Pa)                 |
| 도관 초기 길이  | 4.0 (m)                  |

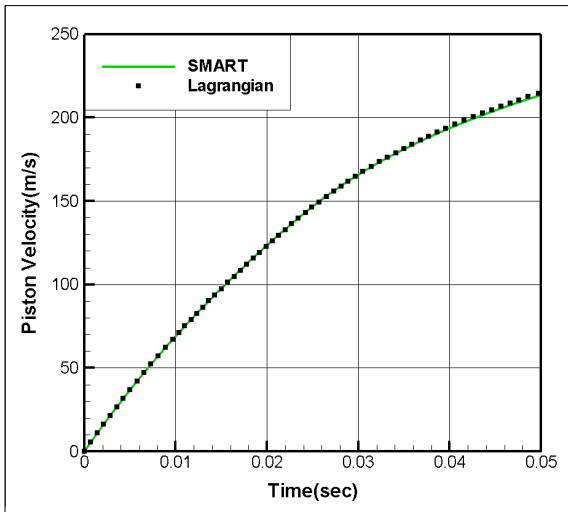


Fig. 4. Piston velocity as a function of time

Eulerian-Lagrangian 접근법과 SMART scheme을 사용한 강내탄도 전산해석 코드의 이동경계면 해석을 검증

하기 위해 자유 피스톤 운동 문제를 Lagrangian 기법으로 해석한 결과와 비교하였고 초기 조건은 Table 2와 같다.

Fig. 4에서 보면 격자를 이동시키면서 이동경계면을 해석하는 Lagrangian 기법으로 해석한 결과와 정성적으로나 정량적으로 일치하였고, 이를 통해 전산해석 코드의 신뢰성을 확보하였다.

4. 강내탄도 전산해석 코드 검증

강내탄도의 성능해석에 가장 많이 사용되는 IBHVG2 코드의 결과와 비교하여 Eulerian-Lagrangian 접근법과 SMART scheme을 사용한 강내탄도 전산해석 코드를 검증하였다. Lumped parameter model을 사용한 IBHVG2와 비교 검증을 위해 초기에 점화가스는 강내탄도 약실 내에 모든 영역에 균일하게 분사되어 있다고 가정하였고, 점화가스 물성치는 추진제 연소가스와 동일하게 하였다. 동일한 조건에서 비교 검증하기 위해 IBHVG2의 계산에 사용된 모든 조건 변수는 개발된 강내탄도 전산해석 코드에 사용된 모든 조건 변수와 동일하게 하였고 포신의 열전달과 탄자 회전운동에너지 등도 동일하게 고려하지 않았다. 개발된 강내탄도 전산해석 코드의 신뢰성을 확보하기 위해 1) 기공률 변화와 2) 동일한 기공률에서 지름 변화에 따른 비교 검증을 수행하였다. 비교 조건을 제외한 초기 조건은 Table 3과 같다.

Table 3. Initial value of test model

|               |                                     |
|---------------|-------------------------------------|
| 탄자 질량         | 30 (kg)                             |
| 마찰력           | 17232142 (Pa)                       |
| 추진제 밀도        | 1569.45 (kg/m <sup>3</sup> )        |
| Impetus       | 911665.4 (J/kg)                     |
| 약실 면적         | 0.019478 (m <sup>2</sup> )          |
| 약실 길이         | 0.9675 (m)                          |
| 연소속도 지수 상수(n) | 0.71                                |
| 연소속도 상수(a)    | 1.33858e-7 (Pa) <sup>-n</sup> (m/s) |
| 연소가스 분자량      | 22.0 (kg/kmol)                      |
| 비열비           | 1.2593                              |
| 화염 온도         | 2417 (K)                            |

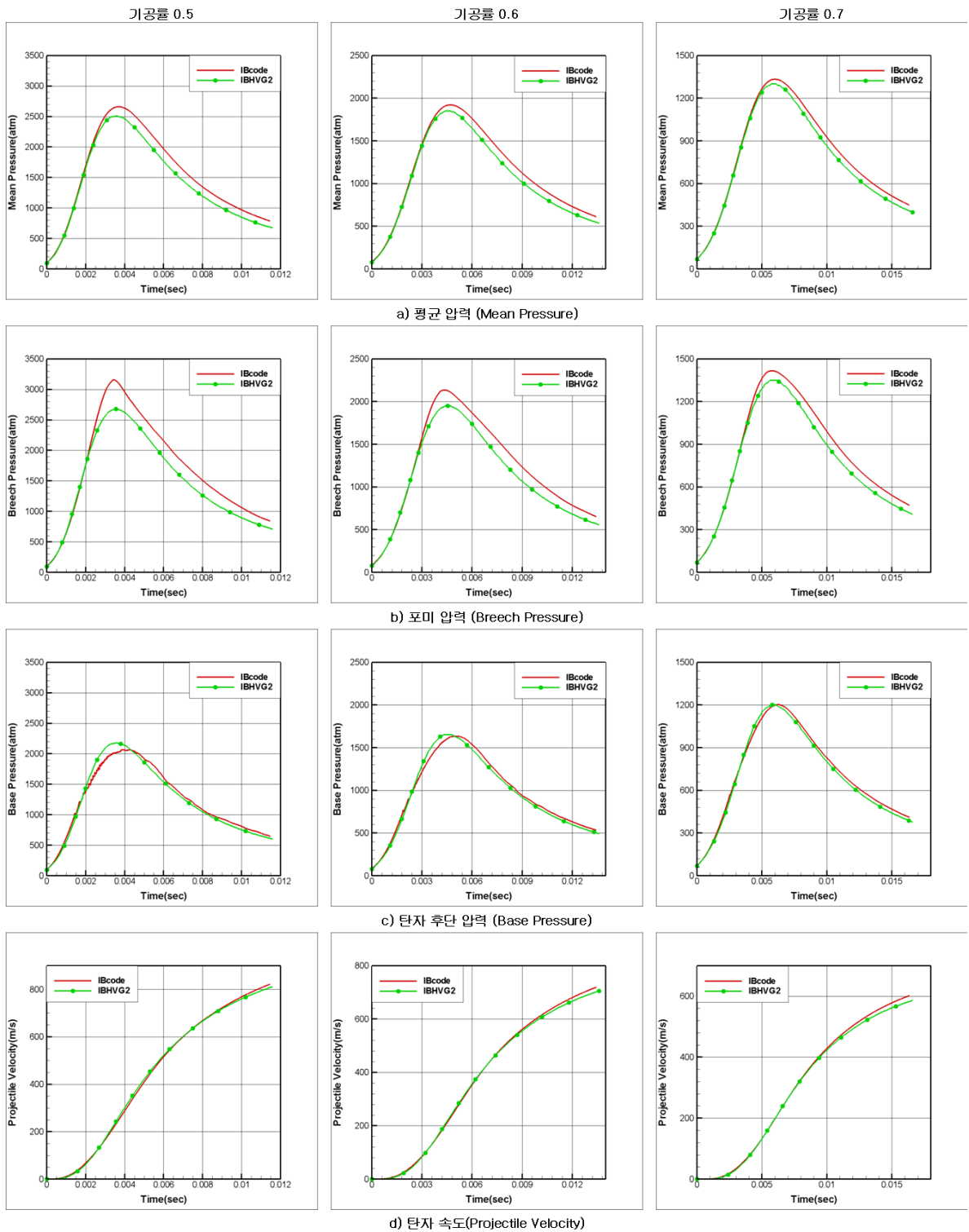


Fig. 5. Numerical analysis of interior ballistics according to porosity

Fig. 5는 기공률 변화에 따른 강내탄도 약실 내의 압력 분포와 탄자 속도이다. 탄자가 가속되어 약 100 m/s 이내의 속도에 도달하기 전을 보면 탄자후단(Base) 압력, 평균(Mean) 압력, 포미(Breech) 압력이 IBHVG2의 해석 결과와 거의 일치하였다. 이를 통해 약실 내에 모든 영역에 균일하게 분사된 점화제의 의해 고체 추진제가 연소되는 현상을 IBHVG2 코드와 동일하게 수치적으로 구현함을 확인할 수 있다. 그러나 탄자 속도가 약 100m/s 이상에서는 개발된 코드의 해석 결과와 차이가 나타났다. 탄자후단의 압력을 보면 기공률이 증가함에 따라 최대 압력이 IBHVG2의 결과보다 낮았으며, 최대 압력에 도달하는 시간도 지연되었다. 하지만, 평균 압력과 포미 압력은 기공률이 증가함에 따라 IBHVG2에서 계산된 최대 압력보다 증가하였다. 이는 IBHVG2의 경우 탄자 이동에 따른 약실 변화를 고려한 평균압력으로 고체추진제의 연소율을 계산하였으나, 개발된 코드의 경우 각 격자의 압력을 사용하였기 때문이다.

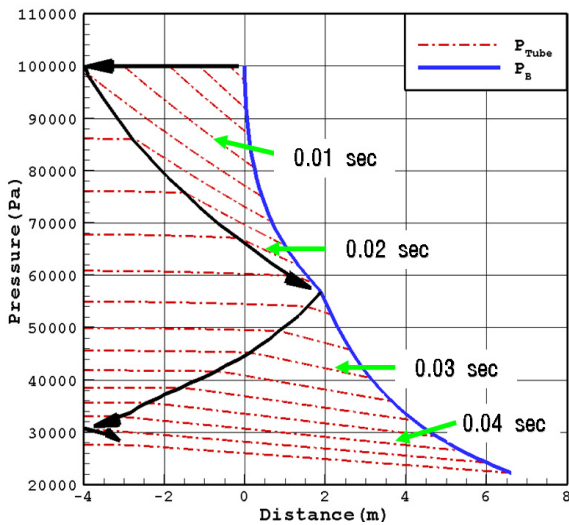


Fig. 6. Pressure as a function of time for expansion wave in tube

이를 세부적으로 분석하면 개발된 코드 결과는 탄자 후단에서부터 포미까지 압력전파 속도에 따라 약실 내의 압력이 변화한다. 이는 강내탄도와 유사하게 탄자 이동에 따른 압력전파 현상이 나타나는 자유 피스톤 운동의 내부 압력( $P_{Tube}$ )을 나타낸 Fig. 6에서도 확인된다. Fig. 6은 이동경계면의 해석 검증에 사용된

자유 피스톤 운동 문제의 내부 압력을 시간에 따라 표시 한 것으로, 탄자 이동에 따른 압력전파 현상을 화살표 실선은 표시하였고  $P_b$ 는 피스톤의 후단 압력이다. 또한, 고체추진제는 탄자 이동에 의한 내부 유동보다 상대적으로 천천히 가속된다. 즉, IBHVG2에서 고체추진제의 연소율 계산에 사용되는 평균 압력은 탄자이동에 의한 압력저하 효과를 과대하게 계산하게 되며, 이로 인해 개발된 코드의 포미 압력과 평균 압력이 IBHVG2의 결과 보다 높게 계산되며 탄자의 포구 탈출 속도 차이에도 기인하였다. 그러나, 강내탄도 이 주요 성능인 탄자 속도에서는 IBHVG2의 해석 결과와 유사한 경향성을 나타내고 정성적으로 기공률 0.7에서 2.5% 최대 오차를 보였다.

Fig. 7은 동일한 기공률 0.832에서 고체추진제의 지름 변화에 따른 강내탄도 약실 내의 압력 분포와 탄자 속도이다. 지름 변화 따른 IBHVG2의 해석 결과와 유사한 경향성을 나타내고 있으며, 정량적 차이는 앞에서 언급된 탄자 이동에 따른 압력 저하를 과대하게 평가하는 IBHVG2의 평균 압력 때문이다.

다양한 조건에 대한 Lumped parameter model에 기반한 한 IBHVG2의 해석 결과와의 비교를 종합해 보면 개발된 강내탄도 전산해석 코드의 신뢰성이 확보되었다고 판단된다.

## 5. 결론

공간차분법에 TVD 제한자인 SMART scheme를 이용하여 수치 안정성을 확보하고 탄자 마찰력에 의한 에너지 손실을 고려하는 Eulerian-Lagrangian 기반의 강내탄도 전산해석 코드를 개발하였다. 국내외에서 가장 많이 사용되고 있는 IBHVG2 코드로 기공률 변화와 동일 기공률일 때 고체추진제 지름 변화에 따른 결과와 비교하여 개발한 강내탄도 전산해석 코드의 신뢰성을 확보하였다. 본 연구를 통해 강내탄도의 성능 해석, 탄약의 설계, 점화제 분사 기구 설계 등에 관한 연구를 수행할 수 있는 기반을 마련하였다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소 지원에 의한 연구결과입니다. 지원에 감사드립니다.

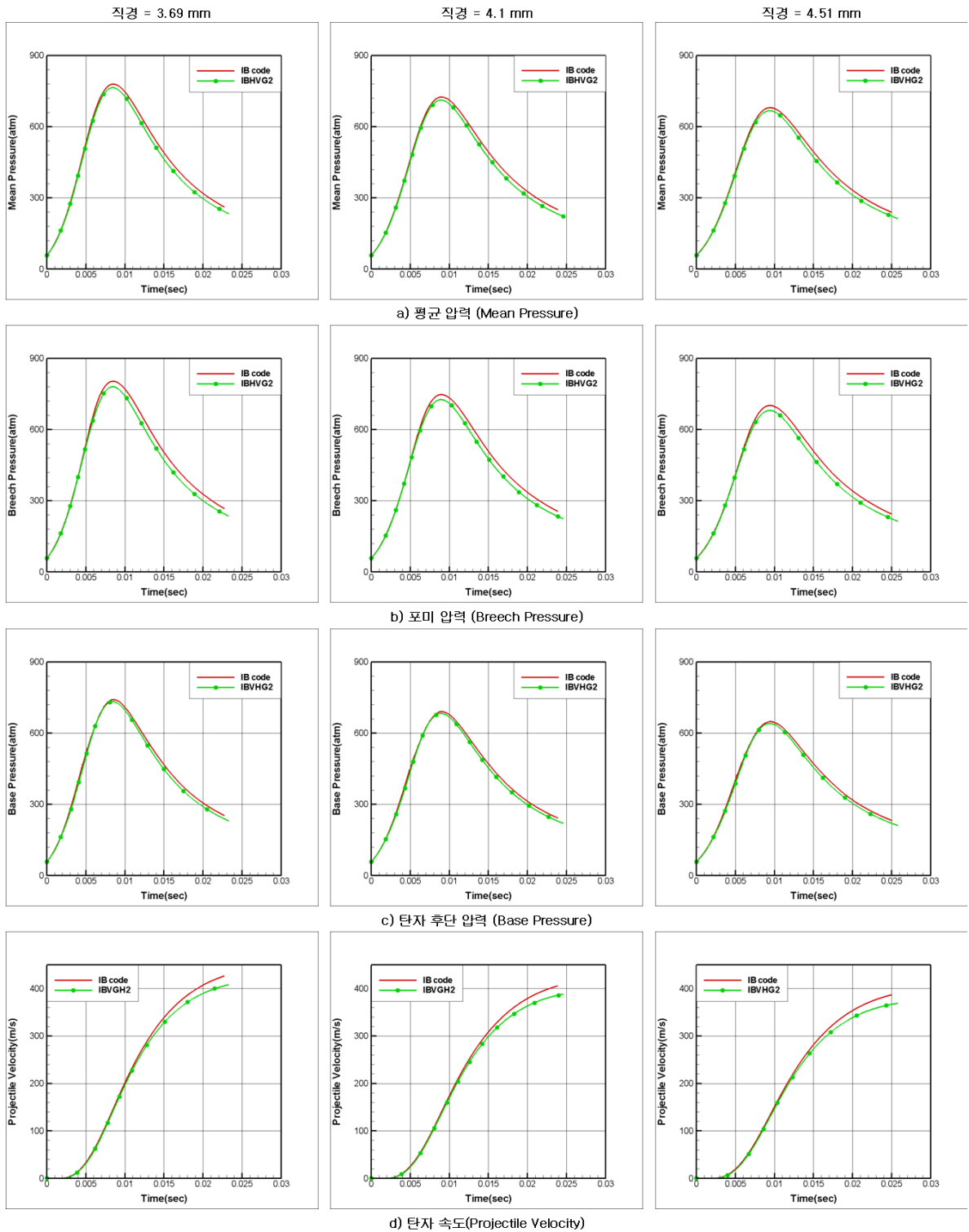


Fig. 7. Numerical analysis of interior ballistics according to diameter at same porosity



## Reference

- [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-3673, 2006.
- [3] Albert W. Horst and Michael J. Nusca, "The Charge Designer's Workbench : A Range of Interior Ballistic Modeling Tools", ARL-TR-3796, 2006.
- [4] H. C. Cho, J. K. Yun, H. D. Shin and C. U. Kim, "Prediction of Combustion Field in Granular Propellant with Moving Boundary", KSME, Vol. 16, No. 12, pp. 2385~2394, 1992.
- [5] H. G. Sung, J. S. Jang, D. W. Choi and T. S. Roh, "Numerical Analysis of Interior Ballistics with Moving Solid Propellants", KSCFE, Spring Conference, pp. 310~314, 2009.
- [6] Ronald D. Anderson and Kurt D. Fickie, "IBHVG2-A User's Guide", BRL-TR-2829, 1987.
- [7] Gaskell, P. H. and Lau, A. K. C., "Curvature-Compensated Convective Transport : Smart, a New Boundedness Preserving Transport Algorithm", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 8, pp. 617~641, 1988.