

강내탄도의 전산해석 기초 기법의 연구

성형건* · 박솔* · 홍기철* · 노태성** · 최동환***

Study on Fundamental Technique for Numerical Analysis of Interior Ballistics

Hyung-Gun Sung* · Sol Park* · Gi-Cheol Hong*
· Tae-Seong Roh** · Dong-Whan Choi***

ABSTRACT

The efficient plan and numerical methods for development of the interior ballistics code have been investigated. The schemes of the numerical code for the moving boundary with the projectile movement have been compared and verified through the free piston motion problem. The combustion of solid propellants and the pressure gradient in the chamber by the porosity effect have been predicted based on the numerical calculation of the initial combustion of the interior ballistics. Computerization techniques of the fundamental schemes and plans for development of the numerical analysis code for the interior ballistics have been obtained.

초 록

강내탄도 전산해석 코드 개발을 위한 효율적인 방안과 수치 기법에 관해 연구하였다. 탄자이동에 의한 이동경계면에 대한 수치 해석 기법은 자유 피스톤 운동 문제를 통해서 비교 검증하였다. 강내탄도의 초기 연소를 수치적으로 계산하여 고체추진제의 연소와 기공률 효과에 의한 압력구배를 예측할 수 있었다. 본 연구를 통해서 강내탄도 전산 해석 코드 개발에 관한 방안과 기초 기법에 대한 전산화 기술을 확보하였다.

Key Words: Interior Ballistics(강내탄도), SIMPLER Algorithm(SIMPLER알고리즘), QUICK Scheme(QUICK 기법), Porosity(기공률), Moving Boundary(이동경계면), Solid Propellant(고체추진제)

1. 서 론

† 2008년 1월 24일 접수 ~ 2008년 10월 7일 심사완료

* 학생회원, 인하대학원 항공공학과

** 종신회원, 인하대학교 항공우주공학과

*** 정회원, 인하대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: seaoffall@korea.com

탄약의 설계, 새로운 화포 추진제의 개발, 또는 화포나 포신의 설계 등을 위해서 강내탄도(Interior Ballistics) 해석 기술이 필수적으로 요

구된다[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 NGEN을 개발을 완료하였다. 이를 통해 고체 추진제의 점화, 화염전파, 관내 연소, 다상 유동 역학, 전열화학추진, 그리고 탄두와 추진제간의 상호작용에 관한 연구를 수행하고 있다[1-3, 5].

국내의 경우 조한창 등은 연소가스와 추진제를 Eulerian 좌표계의 지배 방정식을 이용하여 1차원 이상유동의 강내탄도 해석 코드 개발에 관한 연구를 수행하였으나, 다차원으로 확장하는 연구 개발은 수행되지 않았다. 또한, 불형의 고체 추진제만을 적용한다는 한계가 있다[5]. 국내의 화포 개발이 지속적으로 진행되고 있어 다차원 다상 유동을 해석하는 강내탄도 전산 해석 코드가 필요한 시점이다.

본 연구에서는 다차원 다상 유동의 강내탄도 전산 해석 코드 개발을 목적으로 강내탄도의 물리 현상을 분석 및 분류하여 효율적인 개발 방안을 모색하였다. 또한 일반적인 추진시스템과 구분되는 강내탄도의 주요한 물리 현상을 해석하는데 필요한 수치 기법에 대한 조사와 비교 연구를 수행하였다.

2. 강내탄도 및 해석 방안

강내탄도는 화포의 약실 내에서 고체 추진제가 점화가스에 의해 연소하고 생성된 연소가스의 압력에 의해 탄자가 가속되어 포구를 이탈하는 일련의 과정이다. Fig. 1과 같이 크게 고체 추진제 점화 및 연소하는 과정(Process 1)과 일

정 압력이 도달한 이후 탄자가 이동하는 과정(Process 2)으로 구분된다.

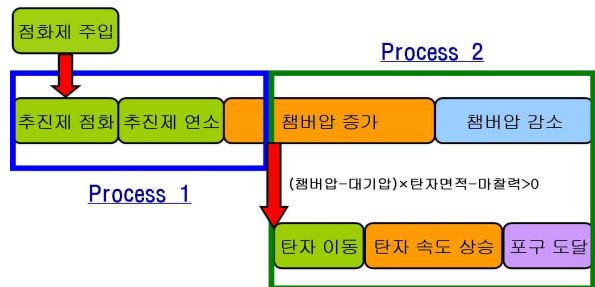


Fig. 1 Diagram of Simplified Interior Ballistics

먼저, 고체추진제 점화와 연소 과정에서 일어나는 세부적인 현상은 다음과 같이 복잡하다. 점화제가 약실에 주입되어 주위의 고체추진제를 점화 및 연소시킨다. 고체추진제가 연소하면서 발생한 연소 가스는 고체추진제 사이를 흐르면서 다른 고체추진제를 점화 및 연소시키고 고체추진제를 이동시킨다. 이와 같은 다상유동을 수학적으로 모델링하여 지배방정식으로 나타내면, 유동장의 지배방정식에는 기공률(Porosity)을 도입하고 고상인 고체추진제의 지배방정식이 추가된다.

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

강내탄도 해석 코드 개발은 앞에서 언급한 주요 현상을 모두 고려해야 한다. 따라서 효율적인 코드 개발을 수행하기 위해서 Fig. 1에서 나타난 두 가지 과정으로 구분하였고, 이에 따라 연구를 진행하고 있다.

각 과정에 필요한 수치해석 기법 조사 및 비교 연구를 수행하는데 있어서 전산유체해석(CFD) 코드가 필요하다. 강내탄도 내의 유동장의 속도는 정지 상태에서부터 최대 몇 천 m/s

까지 증가하므로 이를 위해 모든 속도 영역을 해석할 수 있는 Karki의 압축성 SIMPLER 알고리즘을 사용하여 1차원 CFD 코드를 개발하였고 공간 이산화는 3차 정확도를 가진 QUICK Scheme을 사용하였다[6-9]. Leonard가 제안한 QUICK Scheme은 수렴안정성이 좋지 않기 때문에 Hayase에 의해 재배열한 QUICK Scheme을 사용하여 수렴 안정성을 높였다[8].

3. 이동경계면

3.1 이동경계면의 수치해석 기법

탄자의 이동에 의해 발생하는 이동경계면을 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. 그러나 계산량에 있어서는 비효율적이다.

이동 좌표계를 이용하는 Non-Eulerian coordinate method는 탄자의 이동에 따라 격자가 이동하므로 계산량에 있어서는 더 효율적이다. 이러한 이유로 고체추진제가 모두 연소한 후의 탄자의 속도, 탄자의 탈출 시간 등 강내탄도의 주요 성능을 예측할 때는 Non-Eulerian coordinate method가 적합하다. 그러나 고체추진제의 이동 속도와 유동의 속도를 고려한 수정 방정식이 필요하다라는 단점이 있다.

그러나 연구의 특징에 따라 다른 수치 기법을 사용하기 위해서는 해석 결과가 정량적으로 동일해야 하므로 이에 관한 비교 연구가 필요하다.

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 선정하였다. Non-Eulerian coordinate method에는 유체의 속도와 격자계의 속도가 같은 Lagrangian method를 선정하였다. 각 기법을 적용한 1차원 CFD 코드를 개발하였고 이를 통해 이동경계면의 수치 기법들을 비교하였다.

3.2 Ghost-Cell Extrapolation 기법

Ghost Cell Extrapolation 기법은 탄자의 이동에 따라 이동경계면이 Fig. 2와 같이 격자의 경계면에 위치하지 못하는 경우 N-1 격자의 오른쪽 경계면의 물리량을 외삽(Extrapolation)하여 계산하는 방법이다[10].

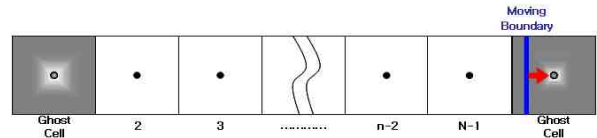


Fig. 2 Free piston model in tube

이동경계면이 위치한 Ghost Cell의 값은 N-1 번째 격자의 물리량과 Solid Wall의 속도를 통해 계산하며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho_{gh} &= \rho_{n-1} \\ u_{gh} &= 2V_p - u_{n-1} \\ p_{gh} &= p_{n-1} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 V_p 는 탄자의 이동 속도이다. N-1번째 격자의 오른쪽 경계면 물리량은 다음의 순서에 따라 보정된다. 먼저, u_{gh} 를 통해서 경계면의 값 ρ^*, u^*, p^* 를 각각 구하며 다음과 같다.

$$\bullet u_{gh} > u_{n-1} \text{ 일 때}$$

$$\begin{aligned} \rho^* &= \rho_{n-1} \left(\frac{p^*}{p_{n-1}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \\ u^* &= V_p \\ p^* &= p_{n-1} \left(1 - \frac{(\gamma-1)(V_p - u_{n-1})}{2c_{n-1}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

• $u_{gh} < u_{n-1}$ 일 때

$$\begin{aligned} \rho^* &= \rho_{n-1} \frac{(\gamma-1)p_{n-1} + (\gamma+1)p^*}{(\gamma+1)p_{n-1} + (\gamma-1)p^*} \\ u^* &= V_p \\ p^* &= p_{n-1} + \frac{(\gamma-1)\rho_{n-1}(V_p - u_{n-1})^2}{4} \\ &\quad \times \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{4c_{n-1}}{(\gamma+1)(V_p - u_{n-1})} \right)^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $c \equiv \sqrt{\gamma p / \rho}$ 으로 음속을 말한다.

최종적으로 음속 조건에 따라 경계면의 값을 결정하게 된다.

• $u^* - c^* < 0$ 일 때

$$\rho_{n-\frac{1}{2}} = \rho^*, u_{n-\frac{1}{2}} = u^*, p_{n-\frac{1}{2}} = p^* \quad (4)$$

• $u^* - c^* > 0$ 일 때

$$\begin{aligned} \rho_{n-\frac{1}{2}} &= \rho_{n-1} \\ u_{n-\frac{1}{2}} &= u_{n-1} \\ p_{n-\frac{1}{2}} &= p_{n-1} \end{aligned} \quad (5)$$

탄자는 V_p 의 속도로 이동을 하기 때문에 시간이 지남에 따라 Ghost Cell이 Real Cell로 변하게 되는데, 이 때 Real Cell의 값은 ρ^*, u^*, p^* 의 값을 사용하게 된다.

3.3 Lagrangian 기법

Lagrangian 방법은 격자의 제어 체적을 하나의 가스 덩어리 상태로 고려하는 것으로 격자 경계면의 속도를 유동 속도와 동일하게 하므로 미소 제어 체적간의 질량 변화가 없다[11]. 이로 인해 지배 방정식은 상미분 방정식 형태가 되며 각 지배방정식은 다음과 같다. 질량 보존 방정식은 격자 경계면의 위치 방정식으로 변환되고 Eq. 6과 같다. 운동량 방정식은 Eq. 7이고 에너

지 방정식은 Eq. 8과 같다.

$$\frac{dx_{j \pm \frac{1}{2}}}{dt} = u_{j \pm \frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} m_j \bar{u}_j &= P_{j-\frac{1}{2}} A_{j-\frac{1}{2}} - P_{j+\frac{1}{2}} A_{j+\frac{1}{2}} \\ &\quad + \bar{P}_j \left\{ A_{j-\frac{1}{2}} + A_{j+\frac{1}{2}} \right\} - \bar{F}_{wall} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} m_j \bar{E}_j &= P_{j-\frac{1}{2}} A_{j-\frac{1}{2}} u_{j-\frac{1}{2}} \\ &\quad - P_{j+\frac{1}{2}} A_{j+\frac{1}{2}} u_{j+\frac{1}{2}} + \bar{q}_j \end{aligned} \quad (8)$$

\bar{F}_{wall} 은 점성에 의한 벽면에서 생기는 마찰력이고, \bar{q}_j 는 벽면에서의 열전달률이다.

Lagrangian 기법은 기존의 CFD 코드를 수정 변경하여 사용할 수 없기 때문에 전용 CFD 코드를 개발하였다. 내부 유동과 경계면의 밀도, 압력, 속도, 온도는 Approximate Riemann Solver와 Minmod 제한자를 사용하여 계산하였고, 시간 적분은 Predicted-Corrected Scheme을 사용하여 계산하였다.

3.4 탄자의 운동방정식

탄자에 관한 힘의 평형방정식은 다음과 같으며, 이를 통해 탄자의 가속도를 계산한다.

$$m_p a_p = (P_f - P_a) A_p - F_{fr} - F_{drag} \quad (9)$$

여기에서 m_p 은 탄자의 질량, a_p 는 탄자의 가속도, P_f 는 대기압으로 탄자 전면의 작용하는 압력, P_a 는 추진제 연소가스의 압력으로 탄자 후면의 압력, A_p 는 탄자의 단면적, F_{fr} 는 탄자의 마찰력, F_{drag} 는 탄자의 항력이다. 탄자의 속도와 위치는 아래와 같은 상미분 방정식이다.

$$a_p = \frac{dV_p}{dt} \quad (10)$$

$$V_p = \frac{dX_p}{dt} \quad (11)$$

X_p 는 탄자의 위치이다.

3.5 자유 피스톤 운동 문제

Figure 3과 같은 자유 피스톤 운동 문제를 통해 이동경계면의 수치 기법들을 비교하였고 Infinite - Length Reservoir Constant - Diameter Tube의 이론해를 통해 검증하였다[12].

기존에 밀도 기반의 검증된 CFD 코드에 Ghost Cell Extrapolation 을 적용한 해석 결과와 비교를 통해 SIMPLER 알고리즘 기반의 CFD 코드를 검증하였다. 기존에 검증된 CFD 코드는 Godunov scheme과 Lax-Wendroff scheme을 각각 사용하였다.



Fig. 3 Free Piston Motion Problem

Table 1. Initial Value of Test model

초기 압력	1.0e+5 (Pa)
초기 밀도	1.0 (kg/m ³)
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)

Table 1은 검증모델의 초기 조건이며, 벽면은 단열조건을 적용하였다. 피스톤에 작용하는 힘은 압력차에 의한 힘만 고려하였고, 피스톤과 벽면의 마찰력은 고려하지 않았다. 열전달은 검증모델에서 주요 변수가 아니며 엄밀해와 비교하기 위해서 고려하지 않았다. EOS는 이상기체 상태 방정식을 사용하였다.

초기 격자수는 샘플 테스트를 통해 결정을 하였다. 초기 격자수는 1000개로 하였고, SIMPLER Algorithm을 적용한 코드의 경우 예외적으로 500개의 격자를 사용하였다.

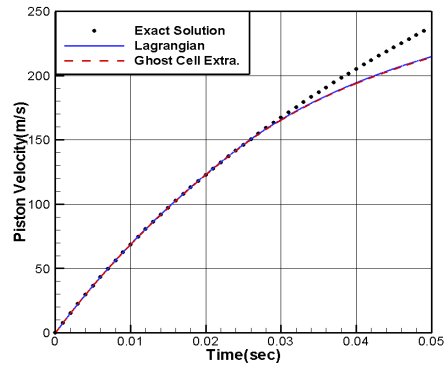


Fig. 4 Velocity as a function of Time for the piston in tube

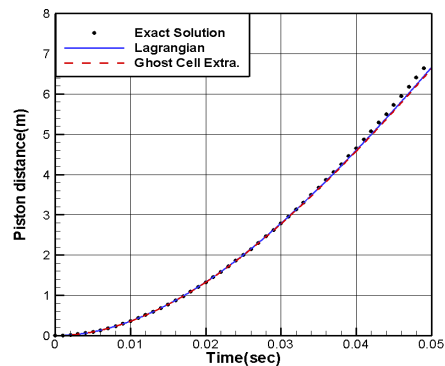


Fig. 5 Distance as a function of time for the piston in tube

Figure 4, 5는 Lagrangian 기법과, Ghost Cell Extrapolation 기법을 적용한 수치해와 이론해를 비교한 그림이다. Fig. 4, 5를 보면 0.024 sec까지는 동일하였지만, 이후부터는 이론해와 차이가 났다. 이는 이론해의 왼쪽 경계조건이 무한 공간으로 이루어져 있어 압력파가 반사되지 못했기 때문이다. 0.024 sec는 실제 벽면이 있었을 경우 반사파가 피스톤에 처음으로 도달하는데 걸리는 시간을 나타낸다.

Figure 6은 시간의 변화에 따른 도관의 양끝에서의 압력변화이다. 범례에서 Lag는 Lagrangian 기법의 결과이고, GCE1, GCE2, CGE3는 번호에 따라 각각 SIMPLER 알고리즘, Lax-Wendroff scheme 그리고 Godunov scheme의 CFD 코드에

Ghost Cell Extrapolation 기법이 적용한 결과이다. 아래첨자인 RB와 LB는 오른쪽 경계면의 값과 왼쪽 경계를 나타낸다. Fig. 6을 보면 Lagrangian 기법의 수치해와 Ghost Cell Extrapolation 기법의 수치해를 비교했을 때 정성적으로나 정량적으로 일치하는 것을 확인할 수가 있다.

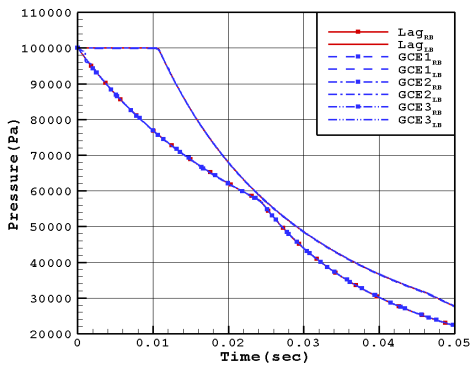


Fig. 6 Pressure as a function of time for both ends in tube

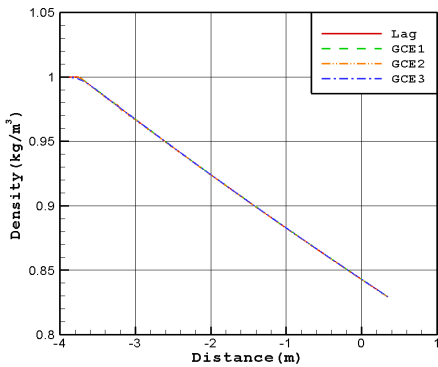


Fig. 7 Distribution of density in tube at 0.01sec

Figure 7은 0.01 sec 일 때의 내부의 밀도 분포이다. 이동 경계면 해석 기법에 따른 수치해가 거의 동일함을 확인하였다. 이를 통해 이동경계면 해석 기법의 정확도에 있어서 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었고, 해석 연구의 특징에 따라 적합한 이동경계면 해석 기법을 선정할 수 있는 근거를 확보하였다. 또한, 기존에 개발된

CFD 코드와 SIMPLER 알고리즘을 적용한 CFD 코드를 사용한 결과가 동일하였고 이를 통해 개발된 CFD 코드가 검증됨을 확인할 수 있었다.

4. 고체추진제

4.1 고체추진제의 연소

강내탄도 내의 연소 현상은 고체추진제가 과립형으로 구성되어 있어 수치적으로 해석하는 것은 복잡하다. 이로 인해 일반적으로 과립형 고체추진제의 연소 해석은 연소율 실험식을 사용하여 수치적으로 계산한다. 유동장의 지배방정식은 다음과 같으며 각 식의 생성항은 Table 2와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = S_c \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_m \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho h_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u h_0) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial p}{\partial t} + S_e \end{aligned} \tag{14}$$

Table 2. Source term of analysis of combustion

S_c	$A_s \rho_b \dot{r}_b + \dot{m}_{ign}$
S_m	$-\left[\frac{\partial P}{\partial x} \right]_{porosity}$
S_e	$A_s \rho_b \dot{r}_b h_p + \dot{m}_{ign} h_{ign}$

A_s 는 기상에 고체추진제의 입자가 노출된 표면적을 거리 단위로 나타낸 것이며, h_p 는 추진제의 연소에 의해 생성되는 에너지, 그리고 $-\left[\frac{\partial P}{\partial x} \right]_{porosity}$ 는 기공률에 의해서 생기는 압

력구배이다.

강내탄도의 연소는 과립형 고체추진제 사이 공간으로 연소가스와 점화가스 유체가 흐르고 이로 인해 연소율이 증가하는 침식연소이다. 본 연구는 강내탄도 내에 고체추진제의 연소 현상에 대한 해석 코드 개발 방안을 모색하는 것이고 연소율 실험식은 변경이 용이하기 때문에 일반적인 연소율 실험식을 사용하였다. 일반적인 연소율 실험식을 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{r} = a_p P^n \quad (15)$$

\dot{r} 는 추진제의 연소율이며, a_p 는 추진제의 초기온도 상수, P 는 압력, n 은 추진제의 압력 지수이다.

과립형 고체추진제에 의해서 생기는 기공률에 의해 유동장에 압력구배가 나타나는데 이는 Ergun 식을 통해 모사되며 다음과 같다[13].

$$\frac{\Delta P}{L} = - \frac{150\mu(1-\chi)^2}{\chi^3 D_p^2} - \frac{1.75\rho(1-\chi)v^2}{\chi^3 D_p} \quad (16)$$

L 은 격자길이, μ 는 점성계수, D_p 는 추진제 입자의 평균 직경, χ 는 기공률, v 는 superficial velocity로서 체적유량을 해석 격자의 단면적으로 나눈 값이다. 기공률 χ 는 압력저하를 결정하는 주요 인자로서 강내탄도에서는 비선형적 분포하게 되며 이를 계산하기 위해서는 조밀한 격자를 요구한다. 본 연구에서는 과립형 고체추진제의 압력저하를 수치적으로 모사하는 것이므로 성근 격자에서 계산하였고 비선형적 분포에 대한 해석 방안은 추후 연구가 필요하다.

4.2 초기 연소 해석

Figure 8은 강내탄도의 초기 연소에 관한 수치 해석에 사용된 1차원 격자 형상이다. 격자는 20개, 격자의 길이는 0.15 m, 면적은 4.7E-5 m²이다. 점화가스는 빗금 친 영역에 0.06 kg/s로 0.18 msec까지 균일하게 주입된다.

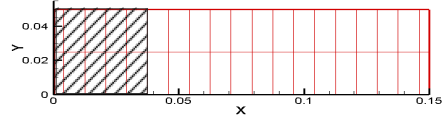


Fig. 8 Analysis grid of initial combustion

Table 3. Initial condition of initial combustion

입구 속도	0 m/s
출구 속도	0 m/s
초기 가스 밀도	1.205 kg/m ³
초기 가스 온도	273 K
초기 가스 압력	0.94E5 Pa
가스의 점성계수	1.59E-2 kg/m sec
가스의 열전도계수	2.263E-2 W/m ² K
초기 기공률	0.4056
추진제 밀도	1600 kg/m ³
추진제 온도 상수	3.409E-8 m/s Pa
추진제 압력 지수(n)	0.868
추진제 점화 온도	550 K
추진제 연소 에너지	4.62E6 J/kg
점화제 연소 에너지	3.56E6 J/kg
추진제 반지름	4.1275E-4 m
기체상수 R	286.9 J/kg K

과립형 고체추진제의 연소 및 압력저하를 모사하기 위해 고체추진제는 유동장에 의해 움직이지 않는다고 가정하였다. 고체 추진제의 기공률은 유동장 지배방정식에 포함되지 않으며 질량 생성항과 에너지 생성항에만 적용하여 계산하였다. 고체추진제는 내부유동장의 온도가 점화점 이상인 경우만 연소 해석을 수행하였다. Table 3은 강내탄도 초기 연소 해석에 대한 초기 조건이다.

Figure 9, 10은 초기 연소 해석 결과이다. Fig. 9를 보면 기공률에 의한 압력저하가 급격하게 나타났고, Fig. 10에서는 고체추진제의 연소에 의해 기공률도 급격하게 증가하였다. 특히, 점화가스가 주입되는 격자에서 상승이 매우 크게 나타

나는데 이는 고체추진제의 이동과 유동장의 지배방정식에 기공률을 고려하지 않았기 때문이다. 이를 통해 기공률과 Ergun 식을 통해 과립형 고체추진제의 연소와 압력저하를 수치적으로 모사할 수 있는 방안을 마련하였다.

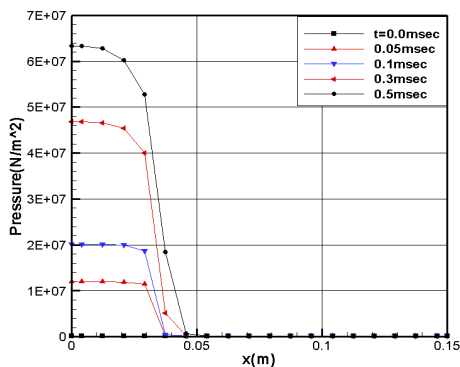


Fig. 9 Distribution of pressure of initial combustion analysis

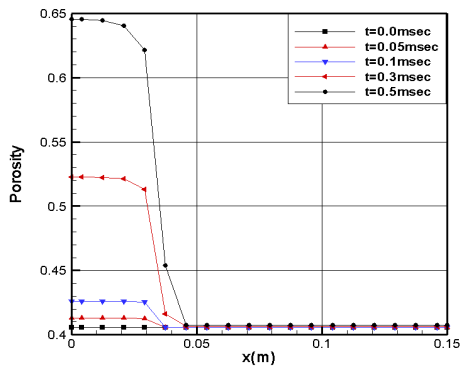


Fig. 10 Distribution of porosity of initial combustion analysis

5. 결 론

강내탄도 전산 해석 코드의 개발에 필요한 개발 방안과 수치 기법에 관해 연구하였다. 효율적인 강내탄도 전산 해석 코드 개발을 위한 방안으로 고체추진제 점화 및 연소 현상 과정과 탄자 이동 현상으로 구분하여 해석하는 것을 제안하였다. 탄자 이동 현상인 이동경계면의 경우에는 Ghost Cell Extrapolation 기법과 Lagrangian 기법의 비교를 통해 두 기법의 정확도가 동일함

을 확인하였고 이를 통해 해석 조건에 따라 수치 기법을 선정하여 사용할 수 있는 근거를 확보하였다. 고체추진제의 점화 및 연소 현상에서는 기공률과 Ergun 식을 통해 과립형 고체추진제의 연소와 압력저하를 수치적으로 모사할 수 있었다. 그러나 고체추진제의 이동과 유동장의 지배방정식에 기공률을 고려하지 않아 차후에 이에 대한 연구가 수행되어야 한다.

본 연구를 통해 강내탄도 전산 해석 코드의 개발 방안과 수치 해석 기법에 대한 전산화 기술을 확보하였고, 이를 바탕으로 1차원 다상유동의 강내탄도 전산 해석 코드 개발과 다차원 다상유동의 강내탄도 전산 해석 코드 개발을 수행할 예정이다.

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, Albert W. Horst, "Progress in Modeling Ignition in a Solid Propellant Charge for Telescoped Ammunition," ARL-TR-3673, 2005
3. Albert W. Horst, Michael J. Nusca, "The Charge Designer's Workbench: A Range of Interior Ballistic Modeling Tools," ARL-TR-3796, 2006
4. Otto K. Heiney, Robert J. West, "Interior Ballistics, Muzzle Flash and Gas Gradients of Aircraft Cannon," AFATL-TR-76-34, 1976
5. 조한창, 윤재건, 신현동, 김종욱, "이동경계면을 갖는 연소실내에서의 입자상의 고체연료 연소장 예측," 대한 기계학회 논문집, 제16

- 권, 제12호, 1992, pp.2385-2394
6. S.V. Patankar : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill Book Company, 1980
 7. K. C. Karki and S. V. Patankar :Pressure Based Calculation Procedure for Viscous Flows at All Speeds in Arbitrary Configurations, AIAA, Vol.27, No. 9, 1989, pp.1167-1174
 8. H. K. Versteeg, W. Malalasekera : An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method, Longman, 1995
 9. F. Moukalled, M. Darwish, " A Unified Formulation of The Segregated Class of Algorithms for Fluid Flow At All Speed", Numerical Heat Transfer, Part B No.37, 2000, pp.103-139
 10. A. Chertock, A. Kurganov :A Simple Eulerian Finite-Volume Method for Compressible Fluids in Domains with Moving Boundaries, submitted to Communications in Mathematical Sciences, 2007
 11. P. A. Jacobs, "Shock Tube Modeling With L1d," The University of Queensland Report 13/98, 1998
 12. R. E. Berggren, R. M. Reynolds, 'The Light-Gas-Gun Model Launcher', NASA-Ames Research Center, 1965
 13. Batchelor G. K. , "An Introduction to Fluid Dynamics", Cambridge University Press, Cambridge, 1967