

HLLC를 사용한 내탄도 해석 코드 개발

양성민* · 차승원* · 이강규* · 노태성†

Development of Internal Ballistics Analysis Code using HLLC

Sungmin Yang* · Seung-Won Cha* · Kang-Kyu Lee* · Tae-Seong Roh*†

ABSTRACT

In order to calculate the performance of the solid rocket motor, the internal ballistics analysis code using HLLC scheme has been developed. The result of applying the analysis code to the actual motor shape has been compared with the experimental results and it is confirmed that the performance of the solid rocket motor has been well calculated.

초 록

고체 로켓의 성능은 고체 로켓 모터의 내탄도 해석으로 계산한다. 본 논문에서는 HLLC Scheme을 사용한 내탄도 해석 코드를 개발하였다. 해석 코드를 적용한 결과 고체 로켓 모터의 성능을 잘 계산하였음을 확인하였다.

Key Words: Solid Rocket Motor(고체 로켓 모터), HLLC Scheme(HLLC 기법), Internal Ballistics Analysis(내탄도 해석)

1. 서 론

고체 로켓 모터의 성능을 계산하기 위해서는 그레인 Burn-back 해석과 내탄도 해석이 필요하다. 내탄도 해석은 그레인 Burn-back 해석을 통해 산출된 Burning surface, Chamber volume, Port line 등을 입력 값으로 사용하여 고체 로켓 모터의 내부 유동을 계산한다.

기존 연구에서는 MacCormack Scheme을 적용

한 내탄도 해석을 수행하였으나, 내부 유로가 복잡한 경우 불안정한 결과가 계산되는 등의 문제가 있었다[1].

이에 본 논문에서는 HLLC Scheme을 사용한 1차원 내탄도 해석 코드를 개발하였다. Riemann problem을 해석하여 MacCormack Scheme보다 안정함을 확인하였고, 실제 고체 로켓 모터 성능 해석에 적용하였다.

* 인하대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: tsroh@inha.ac.kr

2. HLLC Scheme

2.1 지배 방정식

HLLC(Harten-Lax-van Leer-Contact) Scheme은 Approximate Riemann solver의 한 종류이며, Toro에 의해 발표 되었다. HLLC Scheme은 기존의 HLL(Harten-Lax-van Leer) Scheme에서 발생하는 중간파 문제를 보완 하였다[2]. 그리고 불규칙한 형상에서의 Oscillation을 효과적으로 감소시키고, 기존의 다른 1st order 기법에 비해 보다 정확한 해석을 수행하는 것으로 알려져 있다[3].

준 1차원 덕트 흐름에 대한 비 점성 오일러 방정식은 유한 체적 법을 사용하여 Eq. 1과 같이 이산화 된다. Fig. 1은 지배 방정식의 계산 셀을 보여준다[4].

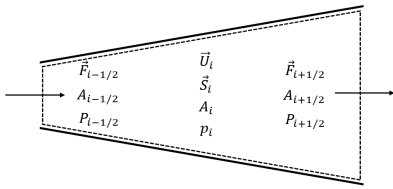


Fig. 1 A control volume for an i th computational cell.

$$\frac{\partial \vec{U}_i}{\partial t} + \frac{\vec{F}_{i+1/2}A_{i+1/2} - \vec{F}_{i-1/2}A_{i-1/2}}{V_i} = \frac{\vec{S}_i}{A_i} \quad (1)$$

$A_{i\pm 1/2}$ 는 Cross-sectional area, V_i 는 Cell volume이다. \vec{U} , \vec{F} 는 각각 Conserved variables와 Flux vector이며, Eq. 2와 같다.

$$\vec{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ E \end{bmatrix}, \quad \vec{F} = \begin{bmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ u(E+p) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 ρ , u , p , E 는 각각 Density, Velocity, Pressure, Total energy이다. \vec{S}_i 는 Source term이며 Eq. 3과 같다.

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} \rho_p L_p \dot{r} \\ p \frac{\partial A}{\partial x} \\ \rho_p L_p \dot{r} (h_f + \frac{1}{2} V_f^2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

ρ_p , L_p , \dot{r} , h_f , V_f 는 각각 Propellant density, Burning perimeter, Burning rate, Propellant enthalpy, Injection velocity이다.

Riemann problem을 통해 HLLC Scheme 코드의 성능을 확인하였다. Fig. 2는 해석 결과이다. 결과를 분석하면, 기존의 MacCormack Scheme은 진동 현상이 관측 되었으나, HLLC Scheme은 효과적으로 해석하였다.

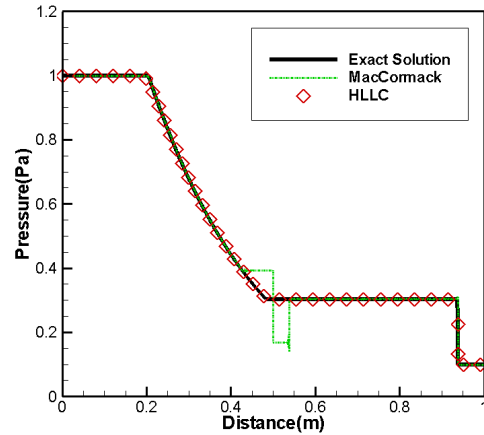


Fig. 2 Comparison of the Riemann problem.

3. 해석 결과

3.1 해석 모델

HLLC Scheme 내탄도 해석 코드를 사용하여 고체 로켓 모터 성능을 해석하였다. 해석 대상은 NAWC Motor No.13이고, 그레이인 Burn-back 해석은 3차원 Level set method를 사용하였다[5,6].

3.2 해석 결과

Fig. 3은 성능 해석 결과와 실험 데이터의 압

력 선도를 비교한 그래프이다. 해석 결과를 분석하면, 성능 해석 결과가 실험 데이터와 유사한 결과를 계산하였음을 확인할 수 있다.

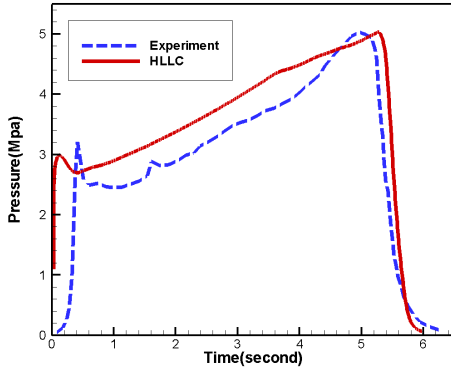


Fig. 3 Pressure profile

4. 결 론

HLLC Scheme을 사용한 준 1차원 내탄도 해석 프로그램을 개발하였다. Riemann solver와 비교하여 성능을 확인하였고, 실제 모터 형상을 적용하여 결과를 비교하였다. 성능 해석 결과 실제와 유사한 계산 결과를 도출하였다. 차후 연구에서는 복잡한 내부 유로를 가지는 고체 로켓 모터의 성능 해석 및 다차원 유동 해석으로 확장하고 연구를 수행할 계획이다.

참 고 문 헌

1. 오석환, 차승원, 김용찬, 박민수, 노태성, “3차원 추진제 형상을 고려한 고체 로켓 모터 1차원 해석 연구,” KSPE Fall Conference, pp. 198-201, 2015.
2. 김용찬, 박민수, 오석환, 장진성, 장승교, 양희원, 노태성, “PMD 장치 유로 형상을 고려한 내부 유동 해석,” KSPE Spring Conference, pp. 388-391, 2016.
3. 정우창, 이진우, 조용식, “도시지역을 관통하는 홍수파의 특성에 관한 수치적 연구 (1) : 수치모형의 개발 및 검증,” 한국방재학회논문집, 제9권 6호, pp. 89-97, 2009.
4. Laurence, Stuart J., “Quasi-one-dimensional Modeling of an Adiabatic-Compression Preheated Ludwig Tube,” Theses and Dissertations from UMD, 2015.
5. Cavallini, Enrico, et al., “Internal Ballistics Simulation of NAWC Tactical Motors with SPINBALL Model,” 46th AIAA / ASME / ASE / ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, pp. 7163, 2010.
6. 손지현, 장진성, 오석환, 노태성, “Level Set Method를 이용한 그레이인 Burn-back 연구,” KSPE Spring Conference, pp. 419-422. 2014.