

추진 노즐에서 발생하는 비정상 충격파-경계층의 간섭현상의 피동제어

이종성* · 김희동**

A Passive Control of the Unsteady Shock-Boundary Layer Interaction in Propulsion Nozzle

Jongsung Lee* · Heuydong Kim**

ABSTRACT

In the present work, a computational study was conducted to investigate characteristic of lateral force on the flow fields inside the propulsion nozzle with step. The unsteady, compressible, axisymmetric, Navier-Stocks equations with SST $k-\omega$ turbulence model are solved using a fully implicit finite volume scheme. In order to simulate the shut-down process of the engine, NPR is varied from 100.0 to 10.0. It is observed that the separation point and Mach-disk strongly depend on the variation of NPR, and adjusting the step lead to significantly different characteristics in the lateral forces.

초 록

본 연구에서는, step을 적용한 추력 노즐 내부 유동장의 횡력 특성을 조사하기 위하여 수치해석적 연구를 수행하였다. 비정상, 축대칭, 압축성 N-S 방정식을 유한 체적법으로 이산화 하였으며, SST $k-\omega$ 난류모델을 적용하였다. 엔진 정지과정을 모사하기 위하여, NPR은 100~10로 변화시켜 계산 하였다. 본 연구의 결과로 박리점 및 마하디스크 위치는 구동 압력비에 크게 의존하며, 또한 step의 적용이 횡력 특성에 지대한 영향을 미칠 수 있음을 알았다.

Key Words: Overexpansion Flow(과팽창 유동), FSS(자유 충격파 박리), RSS(제한 충격파 박리), Side-Force(횡력), Shock Wave(충격파), Rocket Nozzle(로켓 노즐)

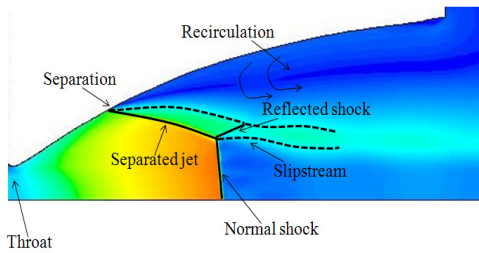
1. 서 론

일반적으로 고 추력을 발생시키기 위하여 노즐의 목과 출구의 면적 팽창비를 크게 하여 설계한 로켓 노즐은[1], 저고도 과팽창상태에서 엔진 구동시에 1차원 비점성 이론에 의해 예측되지 않는 초음속 유동 박리, 재 부착이나 큰 진폭의 격렬한 압력진동을 포함한 충격파 경계층 간섭 현상(Shock wave and boundary layer

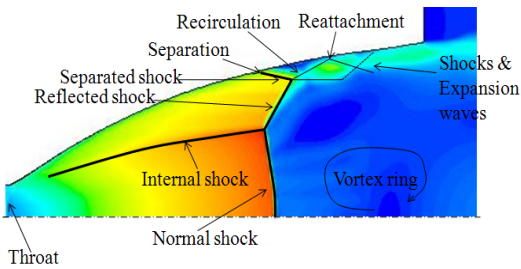
* 안동대학교 기계공학과 대학원

** 안동대학교 기계공학부

교신저자, E-mail: kimhd@andong.ac.kr



(a) FSS (Free Shock Separation)



(b) RSS (Restricted Shock Separation)

Fig. 1 Separation patterns in an overexpanded TOC nozzle [2]

interaction) 등 매우 불안정하고 비정상적인 현상들이 발생된다고 보고되고 있다.

종래의 연구 결과[2]에 의하면, 추력 노즐에서 발생하는 간섭 유동장은 Fig. 1과 같이 크게 FSS (Free Shock Separation)와 RSS (Restricted Shock Separation), 두 가지 패턴으로 구분되는데, 로켓 엔진의 구동과정에서 이러한 FSS, RSS 유동으로 인해 예기치 않은 큰 횡력 (Lateral force)을 수반한다고 알려져 있다.

현재까지 이러한 비정상 압력비 변화를 고려한, 간섭 유동장의 천이 위치, 횡력 발생 메커니즘[2-3]등의 연구 결과는 비교적 상세하게 보고되고 있다. 하지만 노즐 유로내에 Cavity나 Step을 적용한 피동제어법을 적용한 횡력 특성 조사는 많이 수행되지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 선행된 실험 연구에서 RSS로 천이하는 노즐의 어느 위치에 Step을 적용하여, 엔진 정지과정을 모사하였을 때, 횡력 변동 특성에 어떠한 영향을 미치는지 상세히 조사하기 위하여, 2차원 축대칭 비정상 수치계산을 수행하였다.

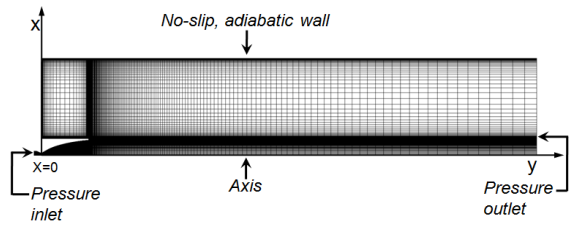


Fig. 2 Computational domain

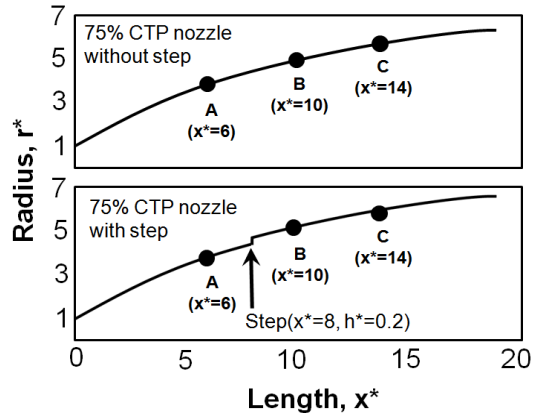


Fig. 3 Nozzle contours and location of pressure measurement. (Normalized by radius of throat=5.0mm)

2. 수치해석 방법

상용코드인 Fluent Ver. 6.3을 사용하여, 2차원, 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법으로 이산화 하였으며, Coupled implicit 방법으로, AUSM-DV와 2nd order up-wind scheme을 적용하여 Convective term 을 계산하였다. Menter가 제안한 SST K- ω Two-equation[4] 난류 모델을 적용하였다. 선행 연구[5]에서 이미 실험결과를 잘 예측한바 있어 진술한 바와 동일한 방법을 적용하여 비정상 수치 계산하였다.

Figure 2는 계산에 사용된 정렬 격자계를 나타낸다. 경계층이 발달하는 벽면부분, 유동이 초크하는 목(Throat)부분, 그리고 노즐 출구 부분에 격자를 집중 시켰으며, 총 격자수는 약 67,000개를 적용하였다. 경계 조건으로는, 모든 벽면은

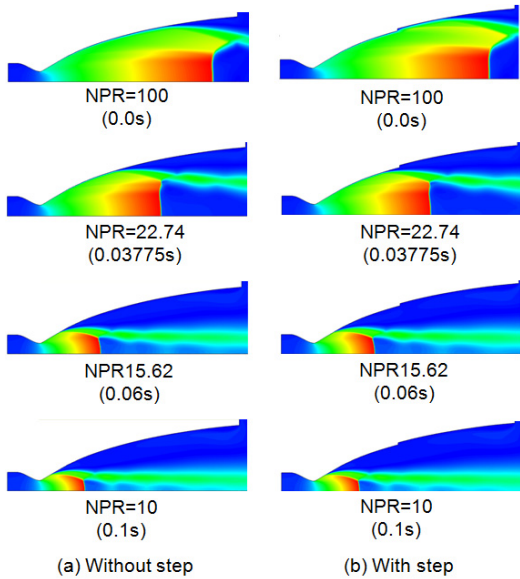


Fig. 4 Mach number contours during shut-down process

Adiabatic, No-slip 조건, 노즐 입구는 Pressure inlet 조건, 노즐 출구의 계산 경계는 Pressure outlet 조건으로 각각 적용하였다. 수치계산은 입구 전압(P_0)은 $100kPa$ 로 고정하였으며, 출구 배압(P_a)은 $1kPa \sim 10kPa$ 로 변화시켜, 즉 $NPR=100 \sim 10$ 으로 변화하는 엔진정지과정을 모사 하였다. 또 전온도(T_0)는 $290K$ 로 일정하게 유지하였다. Time step은 2.0×10^{-6} 으로 0.1 초 동안 전체 비정상 과정을 계산하였다. 작동기체는 이상기체로 가정한 공기로 설정하였다.

Figure 3은 본 연구에 사용된 Step을 적용하지 않은 노즐과 적용한 노즐의 Contour 형태를 나타낸다. 노즐 목의 반경(Throat=5.0mm)로 무차원 하하여 나타내었으며, 참고문헌에서 엔진 정지과정시 FSS에서 RSS로 천이가 예상되는 노즐벽면 위치에 step을 적용하였다. 그리고 엔진 정지 모사과정중 압력탭 (A, B, C)에서 비정상 압력변동값을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 4에는 엔진 정지과정에서의 step을 적

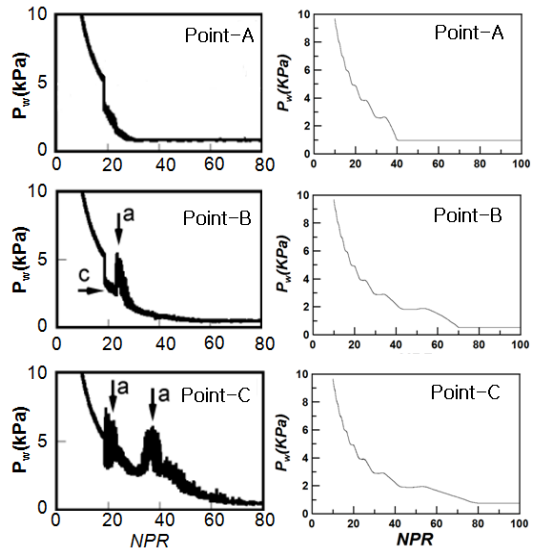


Fig. 5 Wall pressure versus NPR without step (Left : Measurement [6], Right : CFD)

용한 경우와 적용하지 않은 경우의 노즐내부 마하수분포를 나타낸 결과이다. 문헌[6]에서의 실험에서 Step을 적용하지 않은 경우, $NPR=26.6$ 에서 FSS에서 RSS로 천이하는 구간이 나타났으나, 본 수치계산에서는 RSS가 나타나지 않았으며, 압력비가 감소함에 따라 박리점과 마하디스크가 노즐의 하류에서 상류로 이동하였다. Step을 적용한 경우에도 RSS가 발생하지 않았으며, 동일하게 박리점과 마하디스크가 노즐의 하류에서 상류로 이동함을 보인다.

Figure 5에는 Fig. 3에서의 A, B, C 각각의 압력탭에서 압력비 변화에 따른 압력 변동값을 나타낸다. 실험결과에서는 NPR이 감소함에 따라 단조롭게 압력이 증가함을 보이다가, 몇몇 피크값이 나타나는데 이는 RSS에서 FSS로 혹은 그 역으로 천이하는 구간에 나타나는 횡력 발생 구간이다. 하지만 본 연구에서는 RSS가 나타나지 않았으므로 특정한 압력 피크값이 발생하지 않았으며 압력비가 감소함에 따라 단조롭게 압력이 증가함을 알 수 있다.

Figure 6에는 step을 적용한 경우의 A, B, C 각각의 압력탭에서 압력 변동 결과이다. 동일하게 RSS구간이 발생하지 않았기 때문에, 특정한 압

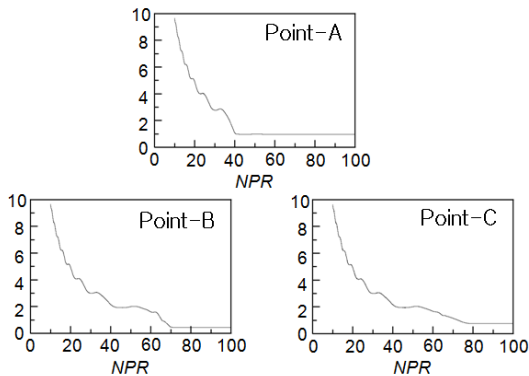


Fig. 6 Wall pressure versus NPR with step

력 피크값이 나타나지 않은 것을 알 수 있다.

결론적으로 실험에서와 다르게 RSS가 발생을 억제하였을 경우, 항력 저감효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 RSS로 천이하는 노즐 벽면 위치에 step을 적용하여, 엔진 정지과정을 모사하였을 때, 항력 변동 특성에 어떠한 영향을 미치는지 상세히 조사하기 위하여, 2차원 축대칭 비정상 수치계산을 수행하였다.

1. step을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우 모두 압력비 변동에 따라 박리점 및 마하디스크의 위치가 노즐의 하류에서 상류로 이동함.
2. FSS에서 RSS로 혹은 그 역으로 천이하는 구간에서 항력이 발생하지만, RSS 패턴을 억제시키는 경우 항력이 크게 감소함.
3. 피동제어 법의 일종인 Step을 추력 노즐에 적용하는 경우, 항력 저감효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 사업인 국제협력사업(과제번호:F01-2009-000-10040-0)의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Rao, G.V.R., "Exhaust Nozzle Contours for Optimum Thrust," AIAA Journal of Jet Propulsion, Vol. 28, June, 1958, pp.377-383.
2. Lee, J.S., Kim, Lijo, V. and Kim, H.D., "A Study on the Transitional Shock Separation Patterns in an Over-Expanded Nozzle," Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 14, No. 3, 2010, pp. 9-15.
3. Nave, L.H. and Coffey, G.A., "Sea Levels Side Loads in High-Area-Ratio Rocket Engines," AIAA Paper 73-1284, 1973.
4. Menter, F. R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, 1994, pp.1598-1605.
5. Lee, J.S., Kim, H.D., "Experimental Computational Studies of FSS-RSS Phenomena in an Over-Expanded Nozzle." Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 8, No. 3, 2010, pp. 56-62.
6. Yonezawa, K., Watanabe, Y., Morimoto, T., Tsujimoto, Y. and Yokota, K., "A suppression Method of Restricted Shock Separation in Overexpanded Rocket Nozzle," AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2006