

압력비 변화과정이 과팽창 노즐에서 발생하는 비정상 횡력 특성에 미치는 영향

이종성* · 김희동**

The Effect of Transient Nozzle Pressure Ratio on the Characteristics of Unsteady Side Forces in an Over-Expanded Nozzle

Jongsung Lee* · Heuydong Kim**

ABSTRACT

In the present work, a numerical study is conducted to investigate the effect of the transient nozzle pressure ratio (NPR) on the flow fields inside the nozzle. 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 start-up and shut-down processes of the engine, NPR is varied from 2.0 to 10.0. It is observed that the interaction patterns and the hysteresis phenomenon strongly depend on the time variation of NPR, leading to significantly different characteristics in the lateral forces.

초 록

본 연구에서는 비정상 노즐 구동 압력비 변화가 유동장의 천이형태 및 횡력 특성에 어떠한 영향을 미치는지 조사하기 위하여 수치해석적 연구를 수행하였다. 비정상, 축대칭, 압축성 N-S 방정식을 유한 체적법으로 이산화 하였으며, SST $k-\omega$ 난류모델을 적용하였다. 엔진 정지 및 시동과정을 모사하기 위하여, NPR은 2~10의 범위에서 계산 하였다. 본 연구의 결과로 박리 유동과 히스테리시스 현상은 구동 압력비에 크게 의존하며, 또한 압력비 변동 시간이 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)

* 안동대학교 기계공학과 대학원

** 안동대학교 기계공학부

연락처, E-mail: kimhd@andong.ac.kr

1. 서 론

일반적으로 고 추력을 발생시키기 위하여 노즐의 목과 출구의 면적 팽창비를 크게 하여 설

제한 로켓 노즐은[1], 저고도 과팽창상태에서 엔진 구동시에 1차원 비점성 이론에 의해 예측되지 않는 초음속 유동 박리, 재 부착이나 큰 진폭의 격렬한 압력진동을 포함한 충격파와 경계층 간섭 현상(Shock Wave and Boundary Layer Interaction) 등 매우 불안정하고 비정상적인 현상들이 발생된다고 보고되고 있다.

종래의 연구 결과[2]에 의하면, 추력 노즐에서 발생하는 간섭 유동장은 크게 FSS (Free Shock Separation)와 RSS (Restricted Shock Separation), 두 가지 패턴으로 구분되는데, 로켓 엔진의 구동과정에서 이러한 FSS, RSS유동으로 인해 예기치 않은 큰 횡력 (Side-Force)을 수반한다고 알려져 있다.

현재까지 이러한 선형적인 비정상 압력비 변화를 고려한, 간섭 유동장의 천이 위치, 횡력 발생 메커니즘[2-3]등의 연구 결과는 비교적 상세하게 보고되고 있다. 하지만 비선형 압력비 변화를 고려한 정량적인 횡력 특성 조사는 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 여러 가지 형태의 압력비 변화가 횡력 변동 특성에 어떠한 영향을 미치는지 상세히 조사하기 위하여, 2차원 비정상 수치계산을 수행하여 횡력 특성에 관한 정량적 결과를 도출하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 수치계산

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

2.2 계산 영역 및 경계조건

수치계산에 적용된 노즐의 형태는 선행된 연구의 것과 동일하며, 계산 영역과 경계조건을 Fig. 1에 나타내었다.

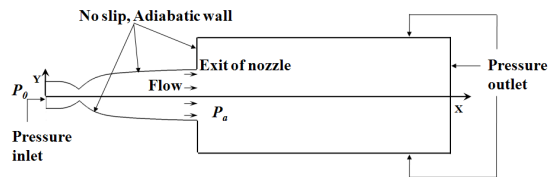


Fig. 1 Computational domain

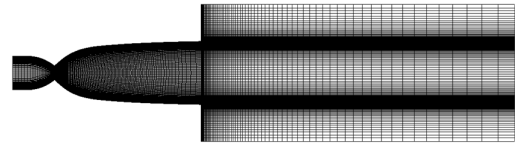
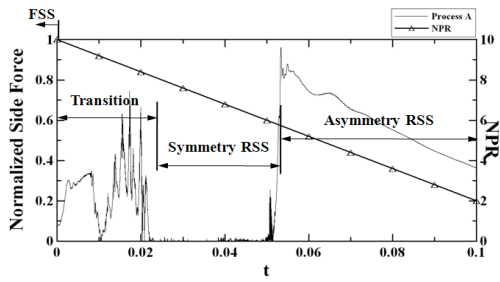


Fig. 2 Computational grid

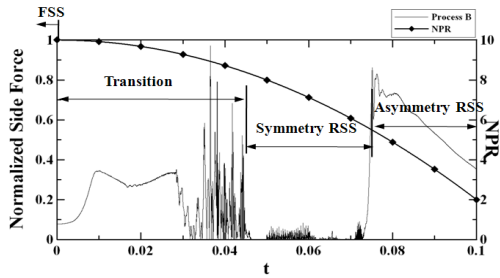
Figure 2는 계산에 사용된 정렬 격자계로, 경계층이 발달하는 벽면부분, 유동이 초크하는 목(Throat)부분, 그리고 노즐 출구 부분에 격자를 집중 시켰으며, 총 격자수는 약 67,000개를 적용하였다. 경계 조건으로는, 모든 벽면은 Adiabatic, No-slip 조건, 노즐 입구는 Pressure inlet 조건, 노즐 출구의 계산 경계는 Pressure outlet 조건으로 각각 적용하였다. 수치계산은 입구 전압(P_0)의 범위는 200kPa ~ 1.0MPa로 변화시켰으며, 출구 배압(P_e)은 100kPa로 고정 하였다. 또 전온도(T_0)는 290K로 일정하게 유지하였다. Time step은 2.0×10^{-6} 으로 0.1초 동안 비정상 계산 하였다.

3. 결과 및 고찰

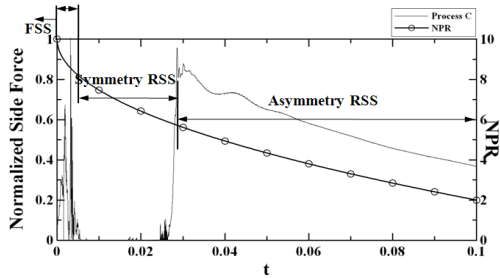
Figure 3, 4에는 엔진 정지 및 시동과정에서의 압력비 변동 과정과 발생한 횡력 값을 나타내며, 측정값 중 가장 큰 피크 값인 278 kN으로 무차원화 하였다. Fig. 3에서 3가지 과정(A,B,C)의 박리패턴의 유지시간이 각각 다른 것을 알 수 있다. 한편 과정 C는 초반 압력비 변동 속도가 과정 A, B 에 비해 급격하게 감소하는데, 천이하는 순간의 횡력이 상대적으로 매우 크게 나타났다. 그리고 선형적인 감소(과정 A)일 경우는 대칭 RSS에서 비대칭 RSS로 천이하는 구간의 피크 횡력 레벨이 크게 나타났지만, 과정 B, C의 형태는 반대로 FSS에서 대칭 RSS로 천이할 때 더 큰 횡력이 발생하였다. 이는 유동장이 천이하



(a) Process A



(b) Process B

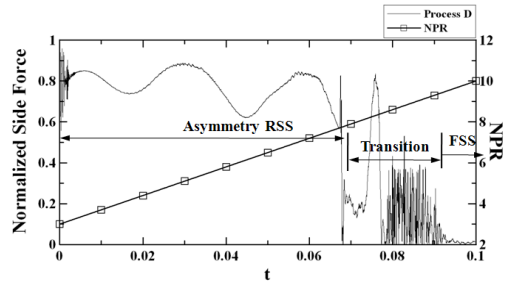


(c) Process C

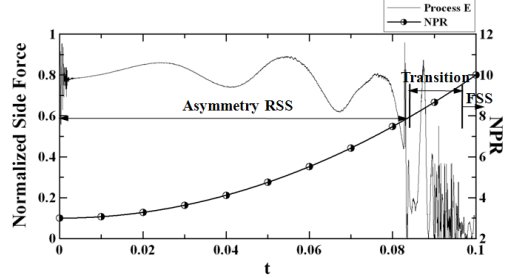
Fig. 3 Time history of normalized side force in the shut-down processes

는 NPR = 5와 8의 인접 구간에서 급격한 압력비 변화를 적용한 경우, 초음속 유동이 배압에 적응하여 조절되는 시간이 변동하기 때문에, 유동장 형태가 급격히 불안해지면서 횡력의 크기가 변동하는 것으로 판단된다.

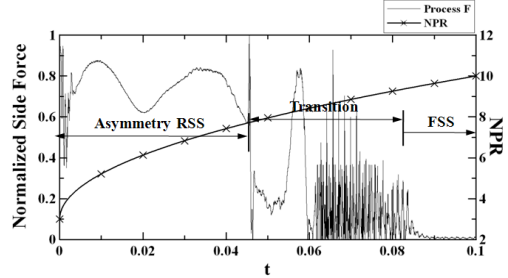
Figure 4에는 엔진 시동과정에서 발생하는 무차원 횡력의 결과이다. 정지과정과 상대적으로 유동이 FSS로 완전히 천이 될 때까지 전체 압력비 변동구간에서 횡력 변동이 크게 발생한다. 그리고 비대칭 RSS에서 대칭 RSS로 천이 하지 않고 바로 FSS로 천이되는 특징이 있다. 또 완전한 FSS로 천이되기 까지 매우 큰 진폭으로 반복적인 진동이 발생 하는데, 이는 유동이 FSS로 이미 천이하였지만, 초음속 제트 흐름이 상하 노즐



(a) Process D



(b) Process E



(c) Process F

Fig. 4 Time history of normalized side force in the start-up processes

벽면에 비대칭적으로 박리와 재 부착을 반복적으로 일으키며, 외부 유동의 유입과 차단도 동시에 발생 시켜 복잡한 와류유동이 격렬하게 발생하기 때문이다[6]. 이러한 제트 유동의 거동은 완전한 FSS유동으로 안정화 될 때까지 지속되며, 천이 이후에 횡력이 사라지는 것을 결과를 통해 알 수 있다. 따라서 일반적으로 엔진 정지 과정보다 시동과정의 유동장이 더 불안정하며 큰 횡력이 발생할 것으로 판단된다.

Figure 5에는 각각의 압력비 변동 과정의 NPR에 따른 박리점의 위치를 노즐 목에서 출구까지의 길이(L)로 무차원하여 나타내었다. 대부분 비슷한 위치에서 천이가 이루어지는 경향을 통해, 앞서 기술한 바와 같이 압력비에 강한 의

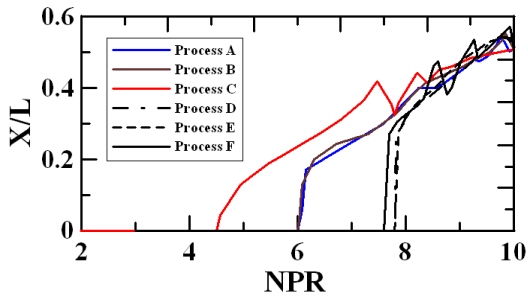


Fig. 5 Axial location of separation point from throat versus NPR during shut-down (A, B, C) and start-up (D, E, F) processes

존성을 보임을 알 수 있다. 하지만 엔진 정지과정과 시동과정을 압력비에 따라 각각 비교했을 경우, 다른 압력비에서 천이하는 히스테리시스 현상이 발생하였다. 또한 엔진 정지과정의 C와 엔진 시동과정의 F방법은 동일한 과정의 다른 형태의 압력비 변동방법에 비해 천이 구간이 앞당겨진 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 3, 4에 나타난 바와 같이, 천이하는 구간의 압력비가 다른 방법과는 비교적 순간적으로 크게 변화시킨 형태이기 때문에 유동장의 조절 되는 시간이 변동된 것으로 판단된다. 결론적으로 천이할 것으로 예상되는 구간에서의 압력비 변화는 천이에 소요되는 시간 및 횡력의 크기에 지대한 영향을 미침을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 비선형 압력비 변동을 고려한 2차원 과팽창 노즐의 비정상 유동장 천이과정을 잘 모사하여, 아래와 같은 유용한 결과를 얻었다.

1. 본 연구에서 사용된 초음속 노즐의 박리 유동은 FSS, 비대칭 RSS, 대칭 RSS 세 가지 형태로 발생하며, 이러한 유동장은 압력비에 크게 의존하여 천이한다.
2. 엔진 정지과정보다 시동과정일 경우 더 큰 횡력이 발생한다.
3. 천이하는 압력비 구간에서 급격한 압력비 변

화를 주었을 경우, 횡력의 크기와 천이 발생구간에 영향을 미친다.

4. 엔진 정지과정과 시동과정의 간섭 유동장 천이가 각각 다른 압력비에서 발생하여, 히스테리시스 현상이 나타나며, 압력비 변동방법에 따라 천이 압력비가 변동될 수 있다.

5. 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. Nave, L.H. and Coffey, G.A., "Sea Levels Side Loads in High-Area-Ratio Rocket Engines," AIAA Paper 73-1284, 1973.
3. 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, 2010, in press.
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, 2010, in press.
6. Lee, J.S., Kim, Lijo, V. and Kim, H.D., "A Computational Study on the Transition of the Shock-Boundary Layer Interaction in an Over-Expanded Nozzle," Proc. the Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference, 2010, pp.157-162.