

TOP 노즐에 대한 유동 박리 및 측면하중 해석

이창수^{1*}, 최경준¹, 문시윤¹, 김종인¹, 김종암^{1,2}

서울대학교 기계항공공학부¹, 서울대학교 항공우주신기술연구소²

Flow separation and nozzle side load simulations for TOP nozzle

Changsoo Lee^{1*}, Kyungjun Choi¹, Siyoon Moon¹, Jongin Kim¹, Chongam Kim^{1,2}

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University¹
Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University²

Key Words : Rocket Engine Nozzle(로켓 엔진 노즐), Overexpanded Flow(과팽창 유동), FSS(자유 충격파 박리), RSS(제한 충격파 박리), Shock Wave - Boundary Layer Interaction(충격파 - 경계층 상호간섭), Side-Load(측면하중)

서론

일반적으로 액체로켓 엔진에 사용되는 연소기 노즐은 고고도 비행을 목적으로 높은 팽창비를 갖도록 설계된다. 따라서 지상 연소시험 및 엔진의 초기 시동 단계에서 노즐 내부 유동은 과팽창 상태가 되며 노즐 벽면에서 유동 박리가 발생한다. 노즐 벽면에서 발생하는 유동 박리는 FSS(Free Shock Separation)과 RSS(Restricted Shock Separation) 2가지 형태로 구분되며 노즐의 형상과 구동 압력비($NPR = P_0/P_a$)에 따라 나타나는 형태가 달라진다⁽¹⁾. 이러한 박리 유동은 예기치 않은 큰 측면 하중 (Side-load)을 발생시키기 때문에 엔진의 추력 변동 또는 구조물의 파손을 일으키는 주 원인이 된다고 보고되었다⁽²⁾.

본 연구는 3차원 액체로켓 엔진 연소기 노즐 형상에 대해 초기 시동 과정을 수치해석적으로 모사하였고 이에 따라 발생하는 충격파 형태와 박리 된 유동의 천이가 측면 하중에 어떠한 영향을 미치는지 조사하였다.

본론

수치해석 방법

본 연구에 사용된 액체로켓 엔진 연소기 노즐의 해석 영역을 Fig. 1에 도시하였다. 이 노즐은 TOP(Thrust Optimized Parabola) 형상으로 엔진 시동 및 종료 시 유동 박리 형태의 천이가 발생한다고 알려져 있다⁽³⁾. 해석에 사용된 격자는 약 130만 개이며 격자로 인해 발생할 수 있는 비대칭성을 배제하기 위해 2차원 단면 격자에 대해 축을 중심으로

30번 회전한 prism 형태의 완전 대칭 격자를 사용하였다. 수치해석은 3차원 압축성 비정상 유동을 해석하기 위해 Navier-Stokes equation을 사용하였고, 벽면에서 정확한 난류 경계층을 포착하기 위해 비정렬 혼합 격자를 사용하여 해석을 수행하였다. 공간 차분 방법으로는 충격파를 정확하게 포착할 수 있는 RoeM⁽⁴⁾ 기법을 적용하였고 시간 전진 기법으로는 TVD Runge-Kutta 3rd 기법을 사용하였다. 난류 모델링의 경우 Menter가 제안한 $k-\omega SST (2003)$ ⁽⁵⁾ 기법을 사용하였다.

경계조건의 경우 로켓의 엔진 초기 시동 상황을 모사하기 위해 노즐 연소실의 전압(P_0)을 시간에 따라 증가시키고 출구의 배압은 1기압으로 고정하였다.

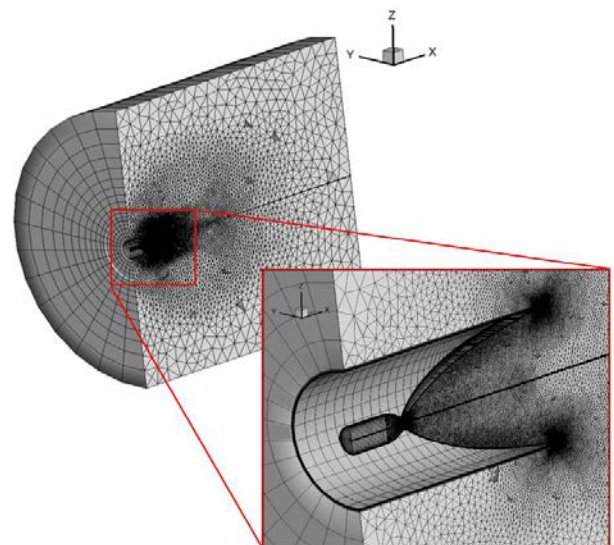


Fig. 1. Half section view of rocket nozzle grid

수치해석 및 결과

Fig. 2는 3차원 비정상 유동해석을 수행한 결과로 압력비가 약 28인 0.02초 시점에 유동 박리가 FSS에서 RSS로 천이되는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 2의 (d)를 보면 유동 박리의 천이가 비대칭적으로 발생하는데 이때 벽면의 압력 분포는 Fig. 3과 같다. 이러한 벽면의 압력 분포 차이가 측면하중의 직접적인 원인이라고 할 수 있다.

Fig. 4는 시간에 따른 측면하중의 크기를 측정한 결과로 천이가 시작되는 0.02초 이후 측면하중이 급격히 증가하여 최대 3500N까지 커지는 것을 확인할 수 있다.

결론

노즐 내부의 유동 박리 천이 현상과 측면하중을 분석하기 위해 3차원 비정상 난류 해석을 수행하였다. 그 결과 특정 압력비에서 유동 박리가 천이되는 것을 확인하였다. 또한 이러한 천이 현상이 비대칭적으로 발생하며 큰 측면하중이 발생하는 것도 확인하였다. 이러한 연구는 로켓 엔진 노즐 설계 및 분석에 사용되어 향후 한국형발사체 개발사업에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

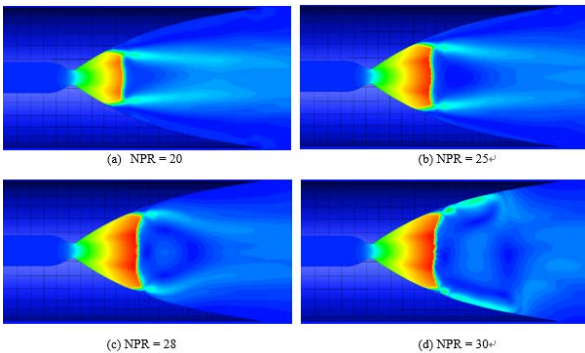


Fig. 2. Half section view of Mach distribution

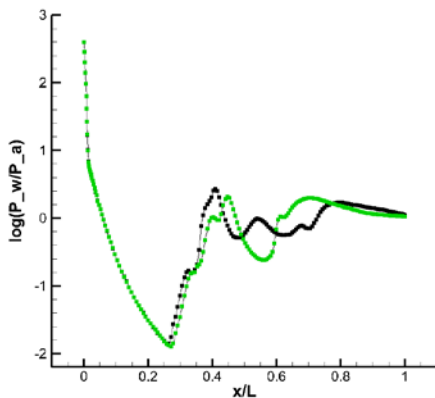


Fig. 3. Wall pressure profiles (NPR = 30)

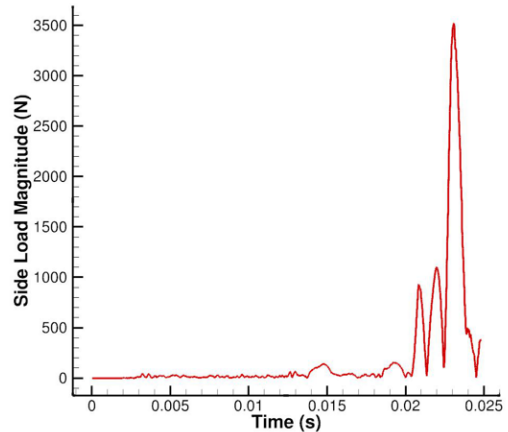


Fig. 4. Side load magnitude change(|F|)

후기

본 연구는 미래창조과학부 발사체개발사업의 위탁 연구(0468-20160001)의 일환으로 수행되었으며 KISTI 슈퍼컴퓨팅센터 (KSC-2015-C3-052)와 우주핵심기술 개발사업 (NRF-2014M1A3A3A02034856), 서울대학교 항공우주신기술연구소의 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) Gerald Hagemann, and Manuel Frey, "Shock pattern in the plume of rocket nozzles: needs for design consideration," *Shock Waves*, Vol. 17, 2008, pp. 387-295.
- 2) Onofri, F., and Nasuti, M., "The Physical Origin of Side-Loads in Rocket Nozzles," AIAA 99-2587, 1999.
- 3) Ruf, J. H., McDaniels, D. M., and Brown, A. M., "Nozzle Side Load Testing and Analysis at Marshall Space Flight Center," *45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, AIAA, Paper 2009-4856, 2009.
- 4) Kim, S., Kim, C., Rho, O. H. and Hong, S. K., "Cures for the shock instability: Development of a shock-stable Roe scheme," *J. Comput. Phys.*, Vol. 185, No. 2, 2003, pp. 586-601.
- 5) Menter, F. R., Kuntz, M., and Langtry, R., "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model," *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, Begell House, inc., 2003, pp. 625-632.