이차분사노즐 작동 조건 변화에 따른 SITVC 성능해석

배지열* · 송지운* · 김태환* · 조형희*† · 배주찬**

Performance Analysis of SITVC System with Various Secondary Injection Conditions

Ji-Yeul Bae* · Jiwoon Song* · Taehwan Kim* · Hyung Hee Cho*† · Ju Chan Bae**

ABSTRACT

Performance of Secondary Injection Thrust Vector Control system is investigated under various secondary injection operating conditions. 3-dimensional converging-diverging nozzle having 8 secondary injection nozzles is used in this numerical study. Total pressure of flow inside the nozzle is about 70bars, and total temperature set to 300K for cold flow simulation. Effect of secondary injection flow rate and injection nozzle configuration is considered in this research. Simulation is conducted with commercial CFD code Ansys Fluent v13. Spalart-Allmaras(1-equation)model is used for turbulence modeling with AUSM+ scheme. Various performance factors as Axial thrust, side force, system specific impulse ratio are considered and explained for system performance evaluation.

초 록

SITVC 시스템의 이차분사 노즐 분사 조건 변화에 따른 시스템 성능 변화를 수치적으로 연구하였다. 해석에 사용된 형상은 3차원 종형 수축-팽창 노즐이고 측면에 8개의 이차분사 노즐을 가진다. 노즐 내부 유동은 전압이 70bar이며 300K의 cold flow로 가정하였다. 이차 유동의 유량 변화와 노즐 작동 조건 변화를 고려하였다. 상용코드인 Ansys Fluent v.13을 통해 해석하였고, 난류모델은 Spalart-Allmaras model(1- equation)를 사용하였다. 충격파의 수치적 진동을 막고 충격파의 불연속성을 잘 해석하기 위해 AUSM+ scheme을 사용하였다. Axial thrust, side force, system specific impulse ratio 와 같은 성능 변수를 사용해 시스템 성능을 평가하였다.

Key Words: Secondary Injection(이차분사), Thrust Vector Control(추력 방향 제어), Specific Impulse(비추력)

* 연세대학교 기계공학과
** 국방과학연구소
† 교신저자, E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr

1. 서 론

추력방향제어(TVC: Thrust Vector Control)는

희박한 대기나 우주공간 속을 비행하는 비행체의 자세제어나 궤도수정, 혹은 발사 직후 저속에서 급속한 선회가 필요한 유도탄의 방향 전환을 위해 사용된다. 그 중에서도 그 동안 적극적으로 활용됨으로써 효율성을 인정받은 것은 SITVC(Secondary Injection Thrust Vector Control) 이다. SITVC는 로켓 엔진 또는 제트 엔진의 노즐에서 분사되는 초음속 유동에 이차유동을 분사시킴으로써 충격파를 발생시키고, 그 충격파로 인해 주 흐름의 방향이 바뀌는 것을 이용해 추력의 방향을 제어하는 방법이다. SITVC외에 사용되는 추력방향제어 방법으로 gimbaled 노즐, 제트 베인 등이 존재하나 이들 시스템은 모두 고온에서도 신뢰성 높게 작동하는 기계 부품을 요구한다. 이는 시스템의 복잡성을 증가시키고 비용과 무게 측면에서 단점이 있다. 반면 SITVC는 이차 분사로 발생하는 노즐 표면의 비대칭적 압력 분포와 주유동과 이차 유동의 모멘텀 작용으로 작동되므로 간단한 유동 제어만으로 작동이 가능하다.

그러나 노즐 내에 이차 유동을 분사하는 것은 초음속 유동의 특성에 의해 충격파와 경계층 상관관계를 발생시키며 이로 인해 복잡한 유동구조를 수반한다. 초음속 유동에 이차분사를 했을 때 발생하는 유동현상에 대해서는 Champigny and Lacau[1]가 구체적으로 설명했는데, 그들이 설명한 유동 구조는 Fig. 1로 나타난다. 먼저 상류에 박리구간이 존재한다. 이것은 궁형 충격파와 다가오는 주 유동 경계층의 상호작용으로 인해 생긴 것으로 이 박리된 유동으로 인해서 λ 충격파가 발생한다. 한편 궁형 충격파 하류에서는 이차 유동이 분사홀을 빠져 나옴에 따라 처음에는 주유동이 흐르는 방향으로 급속도로 팽창하지만 다시 하류로 가며 압축되게 된다. 이는 일반적으로 배럴 충격파라 불리는 유동과의 상호작용 때문이다. 이 배럴 충격파는 하류로 내려가다 마하 디스크가 생긴 지점에서 사라지게 된다. 그리고 유동은 계속 하류로 내려감에 따라 서로 반대방향으로 회전하는 웨이크 볼텍스들이 생긴다. 배럴 충격파 내부 제트 플룸 뒤에는 horseshoe 볼텍스가 발생해 표면을 따라 하류로

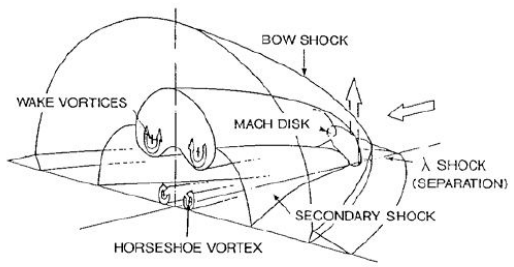

Fig. 1 Champigny and Lacau flow model[1]

내려간다. Champigny-Lacau model에서는 이 볼텍스가 상류에서 경계층 박리와 λ 충격파 영역의 상관관계에서 발생한다고 보고 있다. 최근에는 표면 근처에서의 이 유동의 구조와 이 유동이 노즐에 작용하는 힘과 모멘트에 주는 영향이 최근 연구되고 있다.

이러한 복잡한 유동은 높은 연소가스 온도와 결합되어 노즐 표면에 열적으로 문제를 발생시킨다. 특히 궁형 충격파 전반부의 박리 구간에서는 유동이 박리되었다 다시 표면에 안착하는 유동 재부착 현상이 발생하는데 이는 높은 열전달계수를 유발하여 노즐 표면에 큰 열손상을 발생시킨다. 그리고 이 열손상은 일반적으로 강한 측추력을 얻기 위해 이차 분사 유량이 증가함에 따라 함께 증가한다. 따라서 신뢰성 높은 고성능 SITVC를 개발하기 위해서는 열/성능 고려가 모두 포함된 최적화 설계 기술이 필요하다.

따라서 본 연구는 본격적인 체계의 열 설계에 앞서 수치 해석을 통해 복잡한 노즐 유동을 수치 해석하고 이를 통해 기초적인 SITVC의 성능을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 대상 모델

수치 해석에 사용된 3D 수축 팽창 노즐은 종형 노즐로 약 1:11의 팽창 비를 가지는 노즐이다. 8개의 이차 분사 노즐을 가지며 각 노즐은 수평면에 대해 30도의 경사를 가지고 설치되어

있다. 또한 주 유동 방향으로는 노즐 벽면에 접하도록 설치되었다. 노즐의 기본 형상은 Fig. 2,3에 설명되어 있다.

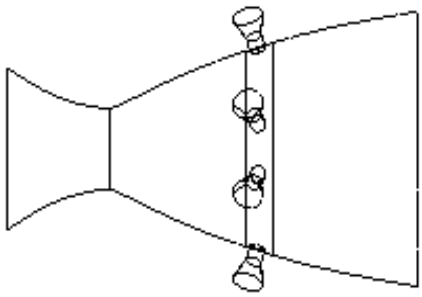

Fig. 2 Nozzle model

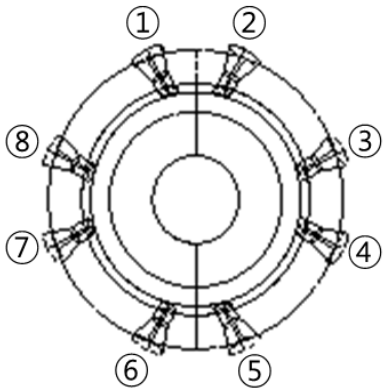

Fig. 3 Secondary injection nozzle configuration and number

Table 1. Boundary conditions

	Total pressure (KPa)	Static pressure (Kpa)	Total tempe-rature (K)	choking pressure (Kpa)
Main flow	7584.2	7471.4	300.0	4006.6
2nd flow (1.39kg/s)	7584.2	7471.4	300.0	4006.6
2nd flow (0.69kg/s)	3792.1	3735.7	300.0	2003.3
2nd flow (0.139kg/s)	758.4	747.1	300.0	400.7

주 유동의 총압은 약 70bar이며 cold flow조건을 가정하여 총 온도는 300 K이다. 작동 유체로 calorically perfect한 공기가 사용되었다. 이차 유동은 주 유동과 동일한 총 온도를 갖는다. 그리고 2차 유동 속도는 모든 작동 조건에 대해 음속으로 동일하다. 더 자세한 해석 조건은 Table 1에 명시되어 있다.

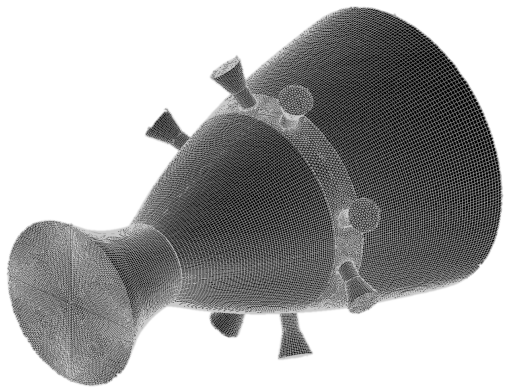

Fig. 4 Computational grid

해석에 사용된 격자는 Fig. 4와 같다. 이차 분사 노즐과 주 노즐과의 복잡한 형상으로 인해 80% 이상 정육면체 격자가 사용되었으나 일부 사면체 격자 사용이 불가피한 구간에 사면체 격자가 사용되었다. 사면체 격자는 전체 격자수의 약 18%이며 격자의 개수는 총 약 2,000,000개이다. 상용코드인 Ansys Fluent v.13이 사용되었으며 초음속 유동의 충격파와 박리 지점을 정확히 예측하기 위해 density-based implicit solver가 사용되었다. 또한 중요한 유동 특성중 하나인 접촉과 충격파로 인한 불연속성을 포착하고 충격파의 수치적 진동을 막기 위해 AUSM+ flux 계산법이 사용되었다. 난류 모델로는 1방정식 난류 모델로 비교적 간단하나 박리지점 예측과 초음속 유동에 특화된 Spalart-Allmaras 모델이 사용되었다.

2.2 작동 조건

전단 응력이 중요한 역할을 하는 roll 발생의

경우 수치 해석적 방법으로 정확한 전단 응력과 그로 인해 분포하는 모멘트를 계산하는 것이 어려우므로 성능을 논하는 것에 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 순수하게 측 추력만 발생시키는 경우에 대해 연구하였다. 작동 조건은 Fig. 3에서 표기된 대로 1,2 번 노즐이 분사되며 각 이차분사 유량이 다른 case 1~3, 2,5번 노즐이 작동되는 case 4, 1,2,3,4번 노즐이 작동되는 case 5가 있다. case 1~3에 대해서는 2차 분사 유량이 10%, 50%, 100%로 달리하여 추력과 측 추력의 변화를 계산하였다. 이차 분사 유량은 초킹 유량 공식에 따라 총압을 통해 조절하였다. 자세한 작동조건은 Table 2에 정리되어있다. case4의 경우 노즐 2개, case5의 경우 노즐 4개가 작동하는 조건이다.

Table 2. Working conditions

	Nozzle	main flow mass flow(kg/s)	2nd flow mass flow(kg/s)
Case1	#1,#2	34.75	0.139 x 2
Case2	#1,#2	34.75	0.695 x 2
Case3	#1,#2	34.75	1.39 x 2
Case4	#2,#5	34.75	1.39 x 2
Case5	#1,#2,#3,#4	34.75	1.39 x 4

3. 결과 및 분석

3.1 질량 유량의 영향

먼저 case 1,2,3에서 동일한 노즐에서 질량 유량이 증가할 때 나타나는 성능 변화를 해석하였다. Fig. 5에서 관찰할 수 있듯 이차 분사 질량 유량에 따라 노즐 내부에 발생하는 충격파의 크기가 확연히 달라짐을 알 수 있다. 질량 유량이 클수록 분사홀 전반에서 강한 궁형 충격파가 발생하였다. 그리고 질량 유량이 가장 낮은 경우 충격파가 매우 약하게 분사홀 위에서 생기는 현상이 관찰되었다. 또한 이차 유동 팽창이 낮은

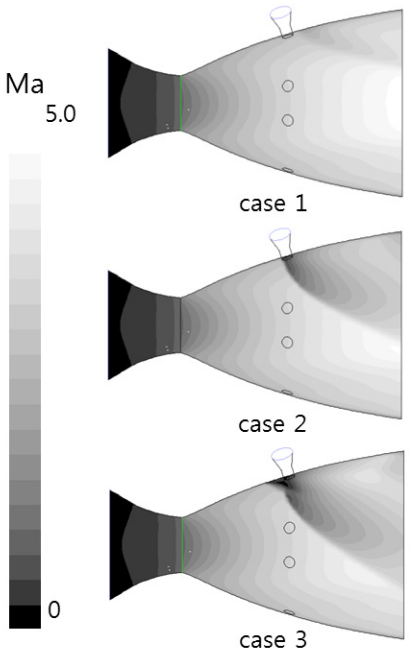

Fig. 5 Mach number contour of case 1,2 and 3.

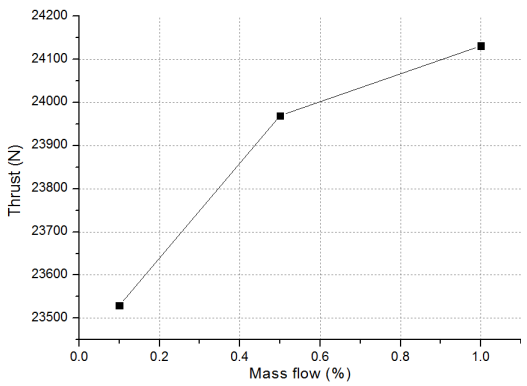

Fig. 6 Thrust increase as secondary injection mass flow rate increase

정압으로 인해 분사홀 전반부에서 제한됨에 따라 주 노즐 내부로 충격파가 확장되지 못하고 궁형 충격파가 이차 분사노즐 내부로 침투하였다. 따라서 실제 시스템 설계 시 지나친 저 유량 작동은 피해야 할 것으로 보인다.

추력 면에서는 Fig. 6의 추력 그래프에서 관찰할 수 있듯이 이차 분사 유량이 상승할수록 추

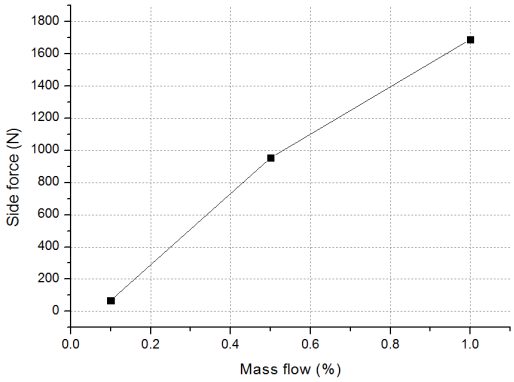

Fig. 7 Side thrust developed by asymmetric pressure distribution and momentum exchange

력이 함께 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 SITVC가 다른 TVC에 비해 가지는 장점이라고 할 수 있다. Fig. 7에서는 이차 분사 질량유량에 따라 측 추력이 증가함을 알 수 있다. 가장 낮은 질량유량의 낮은 측 추력은 앞서 언급한바 대로 궁형 충격파가 제대로 발생하지 않았기 때문으로 판단된다.

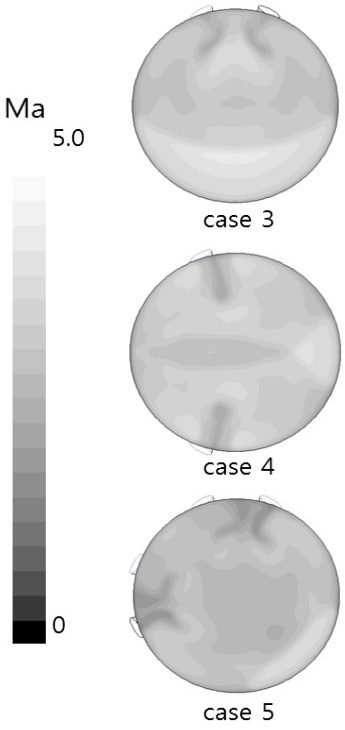

Fig. 8 Mach number contour at nozzle outlet.

3.2 작동 조건의 영향

다음으로 동일한 질량 유량을 가진 경우에 작동 조건의 차이로 추력과 측 추력에 어떤 차이가 나는지 관찰하기 위해 case 3,4,5를 관찰했다. Fig. 8의 노즐 출구 마하 수 분포에서도 관찰할 수 있듯 case 1과 2에 대해서는 마주한 이차 분사노즐의 유량이 함께 부딪힘에 따라 더 강한 충격파가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 한편 강한 측 추력을 발생시키지만 또 한편으로는 유동 에너지 손실을 가져오기도 한다. 추력과 측 추력의 비교에는 강한 충격파를 발생시키고 많은 유량이 투입된 case5의 경우가 추력과 측 추력이 가장 큰 것을 Fig. 9, 10에서 확인할 수 있다.

그러나 case5의 경우 동일한 유량 조건에서 비교된 것이 아니므로 정확한 수치적 비교가 어렵다. 따라서 사용된 질량 유량 대비 추력 생성의 효율성을 나타내는 성능 변수인 system specific

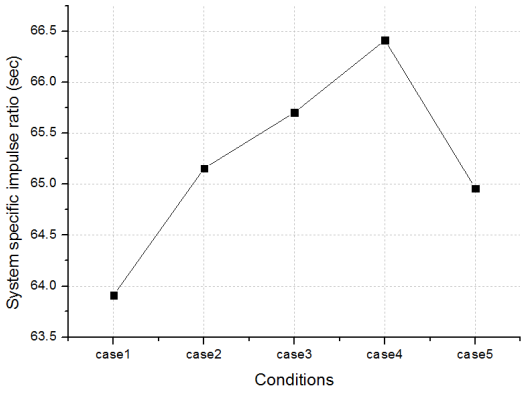

Fig. 9 Calculated system specific impulse ratio.

impulse를 도입한다[2, 3]. 시스템의 specific impulse는

$$IM_{sys} = \frac{\sqrt{F_p^2 + F_s^2}}{(\dot{m}_p + \dot{m}_s)g}$$

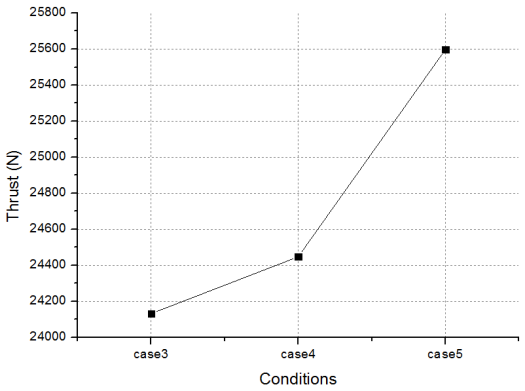

Fig. 10 Thrust increase due to secondary injection for case 3,4,5.

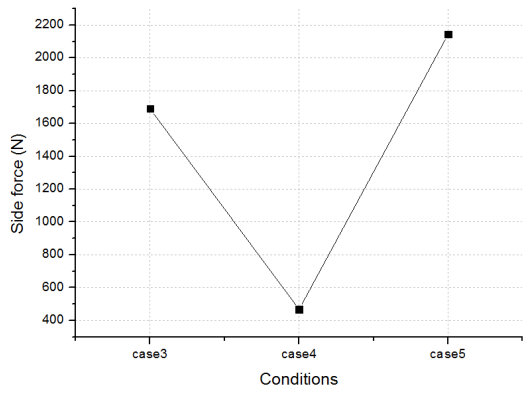

Fig. 11 Side forces for each cases.

와 같이 정의 된다. 여기서 F_p는 추력 F_s는 측추력, $\dot{m}_p$는 주 유동 유량, $\dot{m}_s$는 이차 분사 유량이며 g는 중력 가속도이다. 이를 통해 system의 추진질량 사용의 효율성을 계산해 본 것이 Fig. 11과 같다. 수치를 통해 비교해 본 바로 비록 case 4가 thrust와 side force 모두 가장 크지는 않지만 질량 유량을 가장 효율적으로 사용하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 이차 분사를 통해 로켓의 추진력을 바꾸는 SITVC 시스템에 대해 다양한 작동 조건에서 성능을 평가하였다. 기존 설계된 노즐로 성능을 평가한 결과 가장 일반적인 작동 조건인 case 1,2,3 에 대하여 질량 유량이 증가함에 따라 추력과 측 추력 모두 증가함을 알 수 있었다. 그리고 비교 군이 될 두 가지 조건을 더 분석해 본 결과, 동일한 질량 유량을 투입하여도 작동 조건에 따라 그 효율성에 차이가 있음을 specific impulse ratio를 통해 확인할 수 있었다. 본 연구에서 수행된 기초적인 SITVC의 성능 평가는 추후 이루어질 SITVC 시스템 내부 열전달 현상 실험/해석과 더불어 SITVC 시스템의 최적화 설계에 유용하게 사용될 것이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원(UD110005CD)으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Champigny, P. and Lacau, R.G., "Lateral Jet Control For Tactical Missiles," Special Course On Missile Aerodynamics, AGARD-R-804, Paper No. 3, 1994
2. Ko, Hyun and Yoon, Woong-Sup, "Performance Analysis of Secondary Gas Injection into a Conical Rocket Nozzle" Journal of Propursion and Power, Vol. 18 No. 3, May-June 2002
3. M.Sadiq, "Performance Analysis and Flowfield Characterization of Secondary Injection Thrust Vector Control (SITVC) for a 2DCD Nozzle" M.S. thesis University of Southern California, August 2007