사각 노즐이 적용된 가변 추력용 측추력기의 유동특성에 관한 수치해석

김리나* · 성홍계**† · 전영진*** · 조승환***

Numerical study on flow characteristics of a variable thrust side jet thruster with a rectangular nozzle

Lina Kim* · Hong-Gye Sung**† · Young-Jin Jeon*** · Seung-Hwan Cho***

ABSTRACT

To analyze flow characteristics and performance of the side jet thruster with 4 shutters and rectangular nozzles, a 3-D simulation has been implemented. Numerical calculations for three rotation anlgles of the shutter, have been conducted. Internal recirculation in a chamber and asymmetric flow structure in a nozzle were observed. In addition, the more shutter rotated, the more asymmetries of flow increased, and this phenomena resulted in thrust bias. The degrees of thrust bias and thrust performance with the rotation angles of the shutter were predicted and comparisons with theoretical thrust were made.

초 록

사각노즐을 갖는 측추력기의 유동 특성 분석과 성능 예측을 위해 3차원 수치해석을 수행하였다. RANS 기법을 이용하였으며 측추력기의 유량 조절 셔터가 회전하는 각도가 세 가지 경우에 대해 계산을 수행하였다. 셔터의 형상적인 특성으로 인한 내부의 재순환영역을 관찰하였고, 사각 노즐에서의 유동의 비대칭성을 확인하였다. 또한 셔터의 개폐 정도에 따라 노즐 내 유동의 비대칭성이 심화되어 추력이 편향되는 것을 관찰하였다. 셔터가 회전함에 따라 추력이 편향되는 정도와 추력 성능을 예측하고 이론적으로 계산한 추력 값과 비교하였다.

Key Words: Side Jet Thruster(측추력기), Variable Thrust(가변추력), Thrust Vector Control, 사각 노즐

1. 서 론

현대에 이르러 국제적으로 미사일 방어망에 대한 관심이 높아지면서 미사일 방어를 위한 대응 수단에 대한 연구가 이루어져왔다. 특히 유도무기의 생존성을 높이기 위해 고속 고기동의 정밀 유도무기가 발전해왔다. 따라서 유도무기체계

* 학생, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과
** 교수, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
*** ㈜한화 구미사업장 개발2부
† 교신저자, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

에 다양한 형식의 공기 역학적 방향 제어기법이 적용되어 왔는데, 전통적인 공력 조종면을 이용한 비행 방향 제어방식은 미사일 방어를 위한 응답성이 떨어지므로 미사일 방어용 유도무기에는 부적합하다고 할 수 있다. 이러한 한계를 위해 다 방향으로 즉각적인 방향 전환을 가능하게 하는 측추력기(Side Jet Thruster)가 대안으로써 연구되고 있다.

한편, 측추력기에 관한 연구로써 여러 실험을 통해 노즐과 미사일 형상, 그리고 비행조건이 측추력기에 영향을 주는 것이 확인되었다.[1] 또한 실험과 더불어 수치 해석적 연구도 함께 이루어져 왔는데, Chan 등은 Ogive-Cylinder 형의 핀이 없는 초음속 요격 미사일의 jet 분출로 인한 추력과 모멘트의 변화를 받음각에 따라 비교하여 수치해석 코드의 유효성을 확인하였다.[2, 3] Strivastaya 은 Ogice-Cylinder 형의 네 개의 날개를 가진 미사일에 대하여 마하수 2에서 5까지 받음각 0 ~ 35° 까지 jet 분출 유무와 노즐 위치에 따른 힘과 모멘트 계수를 측정하였으며 jet 분출의 유동 현상을 수치해석 결과와 비교하였다.[4, 5, 6]

본 연구에서는 측추력기의 유동 특성을 수치적으로 계산하되 전체 형상의 1/4 구조에 대해서 해석을 수행하고, 측추력기의 셔터의 개방 정도에 따른 추력과 측력 비교를 위해 3 차원 해석을 수행하여 측추력기의 유동 구조를 관찰하고 추력 성능 예측에 대해 연구하고자 한다.

2. 계산 조건

계산 모델은 한 개의 원통에 수직으로 사각노즐이 연결되고, 원통과 노즐 사이에 유량을 제어하기 위한 셔터가 있다.(Fig. 1) 원통의 한쪽은 연소가스(2300 K)가 유입되고 다른 쪽은 막혀 있다.

계산에서 사용된 사각노즐의 유효 직경, D 는 약 69.7 mm 이다. 총 세 가지의 경우 에 대해 해석을 수행하였으며 셔터의 회전각도와 유량은

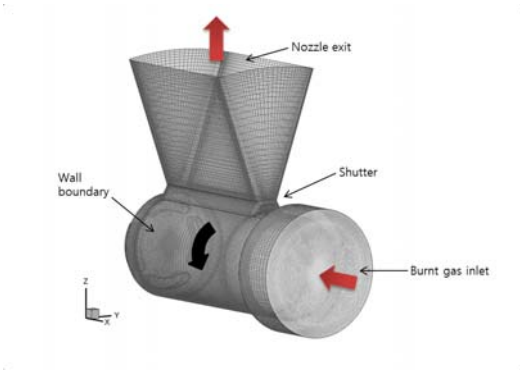


Fig. 1 Schematic of the side jet thruster

Table 1 에 나타나 있다. 전체 격자수는 외부 영역을 포함하여 정렬 격자를 사용해 약 2.1×10^6 개로 구성하였으며 ANSYS FLUENT를 사용하였다.

Table 1 Case condition for rotation angles of the shutter

Case	Shutter open	Rotation angle (degree)	Mass flow rate (kg/s)
1	100%	0	9.14
2	75%	5.45	6.85
3	50%	10.9	4.57

3. 결과 및 검토

Figure 2 는 case 1 의 측추력기의 유동 구조를 보여준다. 입구로 유입된 연소 가스는 주 유동과 부 유동으로 나뉘어 흐르게 되는데, 주 유동은 바로 수직으로 꺾여 노즐로 들어가는 유동을 의미한다. 부 유동의 경우, 셔터 전반 에 걸쳐 큰 크기의 재순환 영역을 생성하게 된다. 재순환 영역을 거친 부 유동은 노즐로 들어가게 되고 이는 노즐 입구에서 유동이 비 균질하게 만드는 주원인이 된다. 주 유동과 부 유동은 노즐을 통과하며, 노즐 목에서 chocking 되어 초음

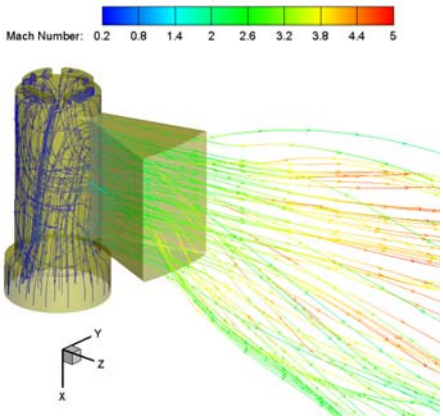


Fig. 2 Streamlines with Mach number in a side jet thruster for case 1

속으로 팽창된다.

Figure 3 은 각각 case 1, 2, 3의 마하수 분포를 y-z 평면과 x-z 평면상에 나타낸 것이다. Fig. 3 (a-1), (b-1), (c-1)에서 공통적으로 유동이 노즐 목에서 chocking 되어 노즐 출구를 통해 배출되 급격히 팽창되어 다이아몬드 형 충격파가 형성되는 전형적인 부족 팽창을 보여준다. 따라서 노즐 출구 바로 앞에서 발생하는 팽창파를 통과하며 팽창과 압축을 반복하게 되는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 (b-1)의 경우, 셔터가 75% 정도 열린 상태로 노즐 내에서 유동이 다소 비대칭으로 확장되어 외부로 완전히 팽창되고 나서도 영향을 미치기 때문에 외부 유동에서 비대칭하게 흐르는 것을 확인할 수 있다. 반면, (c-1)에서는 다이아몬드 형 충격파가 매우 찌그러진 형태로 나타나게 되는데, 이는 셔터가 50% 만 개방되기 때문에 노즐 내부에서 유동의 비대칭성이 강하게 나타나고 노즐 출구에 도달하기 전에 비대칭적으로 급격한 팽창이 시작되기 때문이다. 또한 셔터가 개방되지 않는 아래쪽의 노즐 부분은 상대적으로 늦게 팽창이 이루어지므로 노즐 윗부분의 팽창파와 간섭이 일어나 외부에서 일그러진 형태의 유동을 갖게 된다.

한편, Fig. 3 (a-2), (b-2), (c-2)에서는 입구

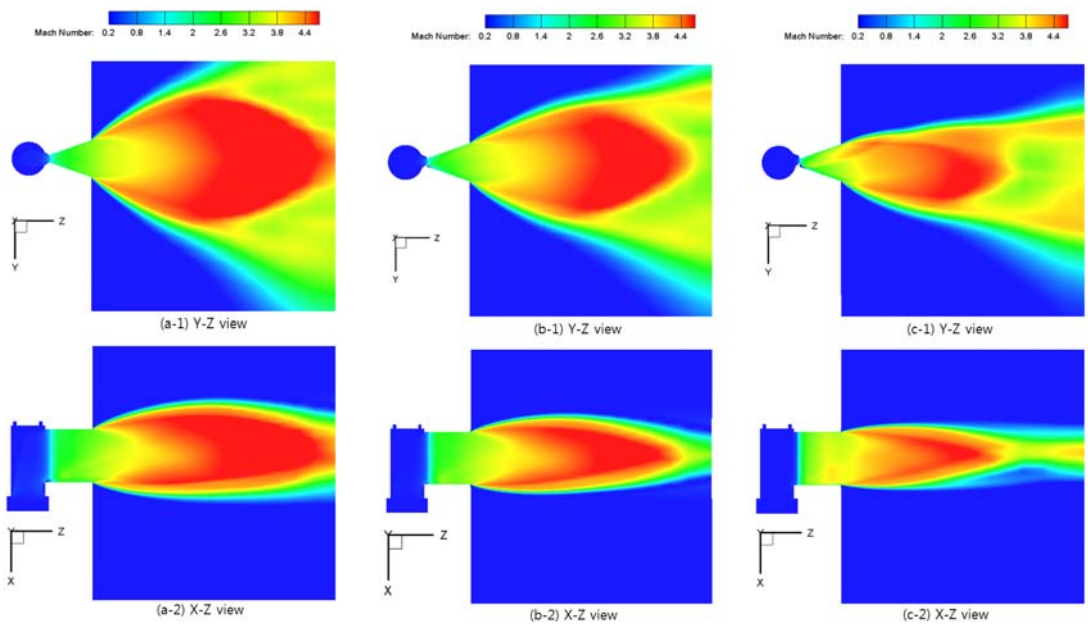


Fig. 3 Mach number contours of (a) case 1, (b) case 2, (c) case 3

(inlet)가 한쪽으로 치우쳐 있기 때문에 노즐을 통과한 유동이 다소 비대칭으로 팽창하여 흐르는 것을 확인 할 수 있다.

Figure 4, 5, 6 은 case 1, 2, 3의 노즐 내의 vorticity magnitude 와 마하수를 x-y 평면상에서 나타낸 것이다. Fig. 4 (A) 에서 노즐 목 근처인 4 (a)의 경우, 오른쪽으로 vorticity가 더 큰 크기로 생성되었음을 알 수 있는데, 이는 원통 한쪽이 막혀 있어 원통 내 유동이 크게 선회하여 노즐로 들어가기 때문이다. 노즐이 원통 오른쪽 끝으로 치우쳐 위치함에 따라 유동이 급격히 꺾여 들어오게 되어 유동이 벽면으로부터 들떠서 떨어져 나가게 되는데, 완만한 곡선을 그리며 노즐로 유입되는 왼쪽 면에 비해 오른쪽의 경우 벽면 가까이에서 떨어져 나간 유동이 갖는 속도가 매우 느리게 되므로 그로인한 속도 차로 인해 큰 vorticity 가 생성된 것이다. Fig. 4 (B)의 마하수의 경우, 오른쪽의 유동이 들뜨는 현상을 상쇄하기 위해 왼쪽보다 더 팽창하게 되므로 속도가 더 빨라지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상

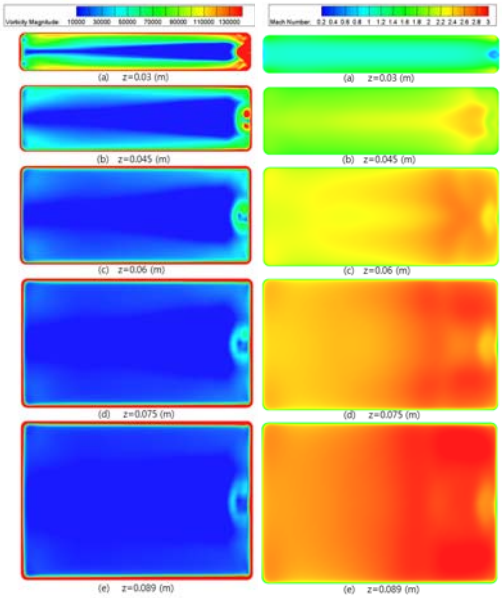


Fig. 4 (A) Vorticity magnitude and (B) Mach number contours at the x-y plane in the nozzle of case 1

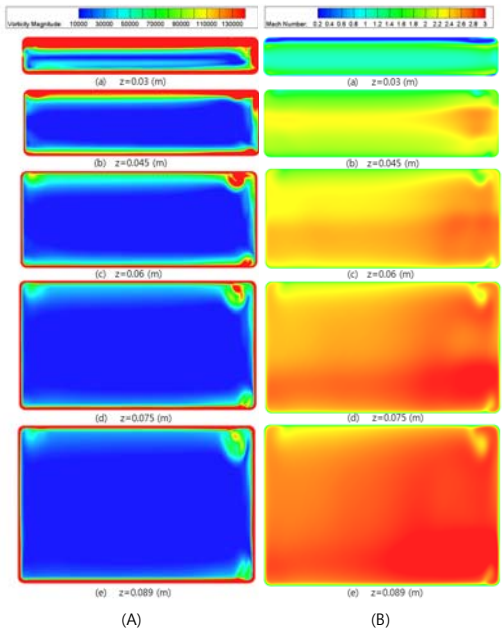


Fig. 5 (A) Vorticity magnitude and (B) Mach number contours at the x-y in the nozzle of case 2

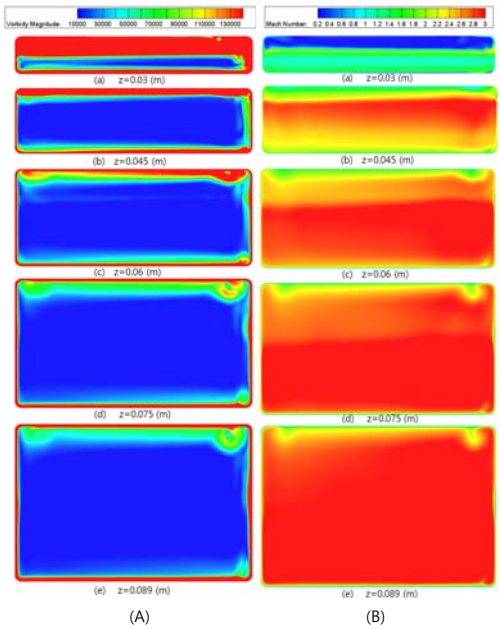
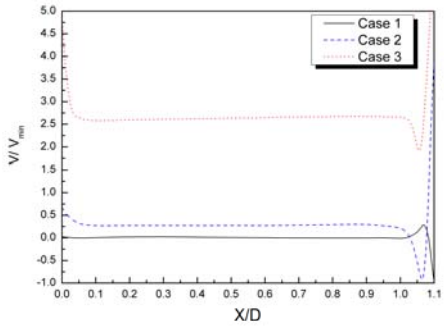


Fig. 6 (A) Vorticity magnitude and (B) mach number contours at the x-y in the nozzle of case 3

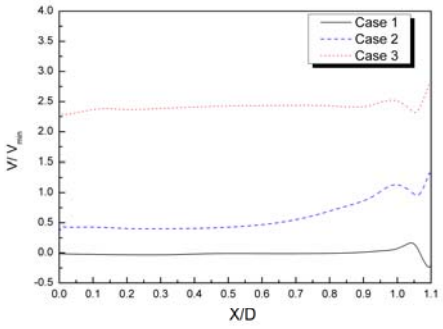
은 노즐 내의 유동 전체에 영향을 끼치는데, 특히 노즐 출구 부근인 (e)에 그 영향이 잘 나타나 있다.

한편, Fig. 5, 6 (a) 에서는 case 1과 달리 유동이 상하 방향으로도 비대칭으로 나타나게 되는데 이는 셔터가 열린 쪽 반대 방향으로 유동의 정체가 일어나게 되기 때문이다. case 2, 3의 유동의 비대칭 현상은 셔터의 개폐로 인한 정체 현상과 앞서 밝혔던 노즐 입구의 치우침으로 인한 현상이 복합적으로 작용하여 나타나게 된다. 또한 case 1 보다 case 2가, case 2보다 case 3 이 같은 노즐 면 위치에서 더 높은 마하수를 보이는데, 이는 셔터가 회전함에 따라 개폐된 면적이 줄어들게 되어 이로 인해 노즐 목이 줄어들게 되므로 더 큰 면적비를 갖게 되기 때문이다.

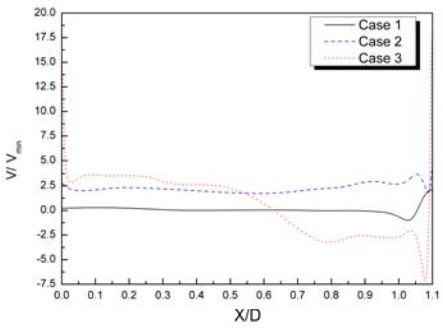
Figure 7 은 case 1, 2, 3 의 노즐 내부의 Y 방향 속도 분포를 각 위치에서의 평균 Y 속도로 정규화 하여 X 방향에 대하여 노즐 목 부근과 노즐 중앙, 노즐 출구에 따라 나타내 비교하였다. X 방향의 거리는 유효 직경으로 정규화 하였다. Fig. 7 (a)에서 case 1의 경우, 셔터가 완전히 열려 유동이 Y 방향으로는 대칭으로 흐르기 때문에 셔터의 개폐에 의해 야기되는 Y 방향 속도가 존재하지 않는다. 또한 유동이 노즐 면을 따라 Y 방향으로 확장하고 있지만 벽면의 영향을 거의 받지 않는 중심선의 유동 분포이므로 Y 방향으로 매우 작은 크기의 속도 성분이 존재하게 된다. X/D = 1.1 부근의 속도 분포의 변동은 앞서 언급했던 입구의 치우침으로 인한 노즐 내 유동의 들뜸과 관련이 있다. 유동이 비교적 넓은 원통에서 급격히 꺾여 좁은 노즐로 유입될 때, 노즐 면을 따라 매끄럽게 꺾이지 못하고 더 큰 반경을 가지고 방향의 전환이 일어나므로 그 영향으로 상대적으로 큰 크기의 Y 방향 속도를 보인다. case 2 와 3 의 경우, 노즐의 양 끝(X/D = 0, 1.1) 코너에서부터 유동의 정체가 시작되므로 양 끝에서 셔터가 열리지 않는 쪽으로 유동이 휘어지는 현상이 더 강하게 일어나게 된다. 게다가 셔터의 회전 각도가 커져 Y 방향으로의 유동의 비대칭성이 강해질수록 Y 방향 속도의 크기는 더 커지게 되므로 case 3 의 Y 방향 속도가 가장 크게 나타난다.



(a) Z = 0.031 m , V_{min} = 181.5 (m/s)



(b) Z = 0.06 m, V_{min} = 176.2 (m/s)



(c) Z = 0.089 m , V_{min} = - 12.7 (m/s)

Fig. 7 Comparison of normalized Y velocity profiles on a line located at (a) Z = 0.03 m, (b) Z = 0.06, and (c) Z = 0.089 m for case 1, 2, 3

Figure 7 (b) 는 노즐 중앙 부근의 속도 분포

를 보여준다. 노즐 목 근처의 유동의 정체 구간을 지나서 노즐 면을 따라 확장하고 있으므로 Fig. 7 (a) 에 비해 전체적으로 Y 성분 속도의 크기는 다소 작아지게 된다.

Figure 7 (c)에서 case 3 의 Y 성분 속도는 노즐의 양 끝에서 평균 속도에 비해 매우 큰 크기를 보이고 있는데, 이는 Fig. 7 (a) 와 (b) 에 비해 상대적으로는 다소 작은 값이며 반대 방향 속도 성분이다. 이는 Fig. 7 (a)에서 살펴본 바와 같이 양 끝에서 셔터가 열리지 않는 쪽으로 유동이 더 강하게 휘어지므로 유동이 노즐 벽면에 부딪히게 되는데, 그의 반동으로 반대 방향으로 유동이 휘어지게 되어 나타나는 현상이다. 유동이 X 방향으로 서로 반대 방향의 속도 분포를 보이는 것은 Fig. 7 (a) 의 X/D = 1.1 부근에서 나타나는 속도 변동이 노즐을 따라 확장하는 것과 노즐 내부의 팽창파들이 복잡하게 얽혀 간섭이 일어나는 현상이 복합적으로 나타난 결과이다.

Table 2. Thrust performance for case 1, 2, 3

Case	Mach number	$\frac{F}{F_O}$ *	$\frac{F_X}{F_Z}$ **	$\frac{F_Y}{F_Z}$ ***
1	2.67	1	-0.011	0.0003
2	2.79	0.75	-0.0075	0.0029
3	3.07	0.51	-0.0089	0.042

* Thrust ratio of thrust to thrust of case 1,

** Side thrust ratio in x direction,

*** Side thrust ratio in y direction

Table 3. Theoretical performance for case 1, 2, 3

Case	Mach number	$\frac{F}{F_O}$ *	$\frac{F_{CFD}}{F_{th}}$ **
1	2.82	1	0.979
2	3.04	0.76	0.974
3	3.36	0.51	0.972

* Theoretical thrust ratio of theoretical value to theoretical value of case 1,

** Thrust ratio of CFD to theoretical value

Table 2 는 각 case 의 노즐 출구에서의 마하수와 추력성능의 예측을 보여준다. 또한 Table 3 은 각 case 의 노즐 출구에서의 이론적인 마하수와 추력이다. 이론값의 계산은 노즐 목과 노즐 출구의 면적비를 이용하여 이론 마하수와 노즐 성능 인자들을 구하고, 사각 노즐의 팽창각 효과를 고려하여 계산되었다. case 1 의 경우, 이론 추력의 약 98%에 달하며, 이론 마하수에 비해 약 0.15의 감소를 보인다. case 2 의 경우에는 추력이 이론 추력의 약 97.4%에 달하고 마하수 는 약 0.25 감소하였다. case 3 은 추력의 경우 이론 추력의 약 97.2% 에 달하고 마하수는 약 0.3 의 감소를 보인다. 이와 같은 차이는 셔터와 노즐 내의 벽면에서 발생하는 손실과 더불어, 이론값을 추정할 때에는 노즐 목의 유동이 고르게 분포되어 흐르는 것으로 가정하였지만 실제 유동은 앞서 살펴본 바와 같이 노즐 입구가 한쪽으로 치우쳐 있어 셔터 내에서 큰 크기의 재순환 영역이 생성되며 전체적으로 유동이 비대칭성을 갖고 흐르게 되기 때문이다. 또한 case 2, 3 의 경우, 노즐 목이 비대칭으로 열리게 되어 코너에서 유동의 정체 현상이 일어나는 것도 손실의 원인이 된다.

한편, Table 2 에서 추력 편향을 알 수 있는 예측된 측력을 살펴보면, case 1 의 경우 X 방향의 측력이 Y 방향의 측력에 비해 비교적 큰 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다. X 방향의 측력은 입구가 한쪽으로 치우쳐 나타나게 되는데 case 2 와 3 은 유량이 상대적으로 줄어들게 되므로 case 1 에 비해 X 방향의 측력이 점차 줄어들게 된다. 그러나 Y 방향의 측력의 경우 셔터의 회전에 따른 노즐 내의 유동의 비대칭성에 의해 발생하고, case 1의 경우 셔터가 완전히 개방되므로 Y 방향 측력이 거의 존재하지 않지만 case 2 와 3 의 경우는 비대칭성이 강할수록 Y 방향 측력이 더 커지게 된다.

4. 결 론

사각 노즐과 셔터를 갖는 측추력기의 유동 특성 조사와 성능 예측을 위해 3 차원 수치해석을

수행하였다. 셔터의 회전 각도에 따라 총 세 가지의 경우에 대해 계산을 실행하였으며 각각 예측된 추력 성능을 이론값과 비교하였다.

노즐 입구가 한쪽 벽면 방향으로 치우침에 따라 셔터 내에서 생성되는 재순환영역과 노즐 내의 유동의 비대칭성을 관찰하였으며, 셔터의 회전각에 따라 비대칭적으로 노즐 목이 개폐되어 생성되는 노즐 내의 정체 현상과 그로 인한 추력 편향을 확인하였다. 또한 외부 유동의 Y 방향 속도 분포를 도시함으로써 각 case 의 유동의 비대칭성에 대해 상세히 분석하였다.

각 경우의 추력 성능을 예측하여 추력 손실은 case 1 의 경우 약 2.1% 를 보였고 case 2 와 3 은 각각 약 2.6% 와 2.8% 를 나타냈다. 또한 추력 편향의 정도를 분석하기 위해 측력을 예측하였는데 X 방향의 측력은 유량에 비례하고, Y 방향 측력은 셔터의 회전각에 따라 유동이 비대칭적으로 흐르게 되어 발생하므로 셔터 회전각도 0° 에 대하여 5.45° 일 때 약 7배, 10.9° 일 때 약 70배 측력이 증가하였다.

참 고 문 헌

1. Lacau, R. G. and Robert, M., The Use of Lateral Jet Control at Aerospatiale, Nielsen Engineering & Research, 1988
2. Chan, S. C., Roger, R. P., Edwards, G. L., and Brooks, W. B., “Integrated Jet Interactions CFD Predictions and Comparison to Force and Moment Measurements for a Thruster Attitude Controlled Supersonic Missile”, AIAA Paper 93-3522, 1993
3. Chan, S. C. and Roger, R. P., “Comparison of 3-D CFD Predictions to Wind Tunnel Force and Moment Measurements for a Thruster Attitude Controlled Missile”, AIAA 93-1928, 1993
4. Srivastava, B., “Computational Analysis and Validation for Lateral Jet Controlled Missiles,” Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 34, No. 5, pp.584-592, 1997
5. Srivastava, B., “Aerodynamic Performance of Supersonic Missile Body- and Wing Tip-Mounted Lateral Jets,” AIAA Journal, Vol. 35, No. 3, 1998
6. Srivastava, B., “Asymmetric Diverter Jet Performance of a Supersonic Missile: Computational and Experimental Comparisons,” Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 36, No. 5, pp.621-632, 1999