

논문

Side Jet 발생기의 유동특성에 관한 해석

홍승규^{*1}, 성웅제^{*1}

Numerical Analysis on the Flow Characteristics of Side Jet Thruster

S. K. Hong, and W. J. Sung

For rapid and abrupt control of a missile in supersonic flight, side jet on a missile body is found to be a useful device as evidenced by recent missile development at several nations. The magnitude of the side jet and the duration of it decide the level of control of such a missile system. In this paper, the aerodynamic characteristics of the side jet device itself are examined in terms of key parameters such as the side jet nozzle geometry, the chamber pressure and temperature. Specifically attention is paid to the effect of the chamber shape between the straight nozzle and the bent nozzle by 90 degrees on the nozzle flow properties. The thrust magnitudes are compared between the two shapes. Whether the way the nozzle is bent at the joint affects the nozzle performance is also investigated. Effects of the length and the divergence angle of the nozzle on the thrust are also quantified among three different side jet nozzles.

Key Words: Side Jet, Nozzle Flow

1. 서론

초음속으로 비행하는 유도탄의 종말 유도시 급격한 기동을 취하기 위하여 전형적인 공력 조종면 이상의 수단이 필요한 경우가 존재한다. 고고도에서 운용되는 고속 유도탄에 대하여 유도탄 동체의 무게 중심 또는 전두부에 유도탄 비행방향에 수직으로 Jet을 뿜어내는 소위 Side Jet을 짧은 시간 작동하여 원하는 위치 및 자세로 비행체를 기동시키는 방안이 있다 [1,2]. 본 연구에서는 이러한 추추력을 발생하기 위한 Side Jet Device의 형상이 추추력 및 유동 Pattern에 어떤 영향을 미치는지에 대한 3차원 CFD 해석을 수행하였다.

Side Jet Motor의 형상에 대한 세부적인 설계를 위해서, 몇 가지 Key Parameters - 노즐 목 직경, 출구 직경, 그레인 내/외경, 노즐 확장각 등 - 가 필요하며 본 연구는 다음과 같은 목적을 가지고 수행되었다.

- 1) Straight(I-type) 노즐 형상의 해석을 통한 1차원/3차원(1D/3D) 해석 결과의 비교 및 분석,
- 2) Straight(I-type)/Bent(L-type) 노즐 형상의 해석 결과 비교를 통한 Bent 노즐의 효율 감소 예측,
- 3) Bent(L-type) 노즐 출구면의 Secondary Flow의 크기 및 횡방향 추력 성분의 존재 유무 확인,
- 4) 노즐 확장각 및 노즐 길이의 변화에 따른 추력 변화 분석,
- 5) 설계 형상 L-type 추추력기의 Bend 부분이 추력에 미치는 효과 예측.

* 2001년 6월 18일 접수

*1 정회원, 국방과학연구소 3체계-2-1

2. Side Jet Motor의 내부유동 해석

2.1 I-type 노즐의 1D/3D 해석결과

해석결과와 신뢰도를 확인하기 위하여 노즐 이론을 이용해 측추력기에 대한 준1차원 해석을 수행하였다. 이 때, 측추력기의 유동 조건은 이상기체(Ideal Gas)로 가정하여 20°C 평균 챔버압 가정하에 계산하였으며 정체압력(11800psia), 정체온도(3353K), 분자량(26.43Kg/Kmol), 및 비열비(1.2) 등의 값을 설정하여 사용하였다. 또한 노즐 목 직경은 8.9mm, 출구 직경은 16.5mm의 값을 사용하였으며, 노즐 확장반각은 8.0도(기하학적 효율계수 0.9951)로 하였다. 그 결과를 Table 1에 제시하였다.

3차원 해석에는 Full Navier-Stokes 코드를 사용하였으며 [3], 70*35*39개의 격자를 사용하여 단일 블록으로 구성된 격자계(Fig. 1)에 대하여 해석을 수행하였다. 경계조건으로서 벽면에서는 단열 벽면 조건을, 챔버 입구에서는 아음속 입구 조건을, 그리고 노즐 출구에서는 외삽 방법을 사용하였다. 아음속 입구 경계조건은 주어진 정체압력과 정체온도를 고정하고 아래의 등엔트로피 방정식을 수치적으로 풀어 경계면에서의 압력과 온도, 속도를 구하는 방법을 사용하였다.

$$T_o = T(1.0 + \frac{\gamma-1}{2} M^2) \tag{1}$$

$$P = P_o(T/T_o)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{2}$$

$$P^- = (u_N - \frac{2}{\gamma-1} a)_{j=1} = (u_N - \frac{2}{\gamma-1} a)_{j=2} \tag{3}$$

이 때, 두 번째 면(j=2)에서의 Left-Running Characteristics(P^-)를 외삽하여 경계면에서의 P^- 값으로 취하고 각 반복계산 과정마다 갱신하여 사용하였다. 여기서 u_N 은 경계면에 대하여 수직인 속도 성분을 의미한다. 위의 식들에 대해 Newtonian Iteration을 적용해 P/P_o 를 구함으로써 챔버 경계면에서의 압력, 밀도, 속도를 구하여 사용하였다. Fig. 2에 계산횟수에 대한 출구에서의 추력값과 격자계 내의 3군데(노즐 출구, 노즐 목 부근, 챔버 경계면)에서 산출한 질량유량을 나타내었다. 수렴 후 챔버 경계면 정체압의 99% 이상을 노즐 출구면에서 회복되며 질량유량 역시

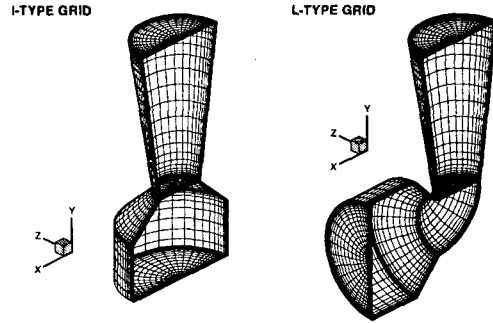


Fig. 1 3D grid for side jet thrusters

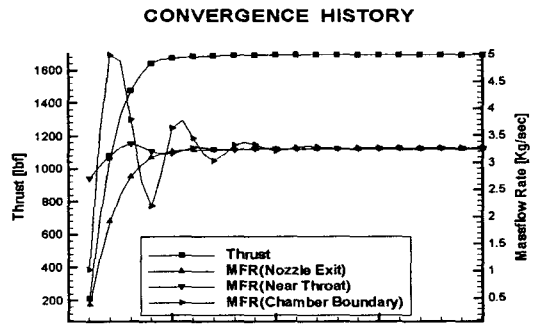


Fig. 2 Convergence history of thrust and mass flow rate

99%이상이 보존됨을 확인하였다. 수렴된 해에서 산출한 추력값과 출구 변수값들을 Table 1에 제시하였다. 1D/3D 해석 결과의 차이는 경계층에서의 점성력에 의한 손실 등이 CFD 결과에 반영된 것에 기인한다. 3D 해석 결과, 추력 및 질량유량 값이 1D 이론치와 5% 차이 이내의 범위에서 산출되었다. Fig. 3은 챔버 내부로부터 노즐 목을 지나 노즐 출구면까지 노즐 축을 따라 질량유량의 보존을 보여주고 있다. Fig. 4에 노즐 축방향을 따라 노즐 중심부에서의 전압, 정압, 그리고 마하수의 변화를 제시하였다.이 때 1차원의 공간 정확도를 이용하면 전압(P_o)의 손실이 발생하고, 2차원의 공간정확도를 사용해야만 P_o, T_o 등의 물리량이 보존됨을 확인하였다. 이는 본 연구에서 사용한 CFDS기법 [3]이 기본적으로 Roe의 Flux 차분법을 사용하므로 1차원 차분이 필요 이상의 Dissipation을 내재하고 있음을 알 수 있다.

Table. 1 1D/3D results for I-type nozzle

	질량유량 (Kg/sec)	추력 (lbf)	출구속도 (m/sec)	출구압력 (psia)
노즐이론	3.4	1784	2078.6	636.5
CFD	3.25 (-4.4%)	1701 (-4.7%)	*2046.1 (-1.6%)	*624.1 (-1.9%)

(*노즐 출구면에서 평균한 값임.)

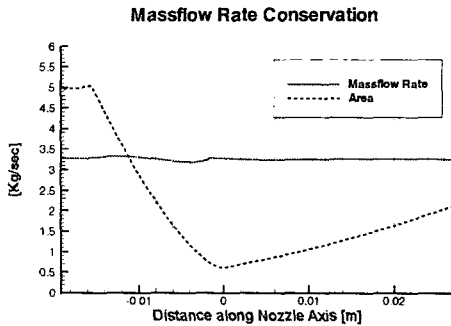


Fig. 3 Mass flow rate distribution of I-type nozzle

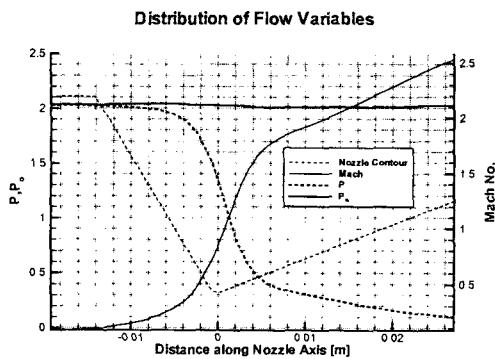


Fig. 4 Flow variable distributions of I-type nozzle

2.2 I-type/L-type 노즐의 3D 해석결과

다음으로 L-type 노즐에 대한 해석을 수행하였다. 계산에 사용한 L-type 노즐의 격자계는 Fig. 1에 제시한 바와 같으며 I-type 격자계와 동일한 노즐 및 챔버 형상을 사용하고 챔버를 90도 회전 이동 시킨 후 노즐과 챔버 사이의 공간을 90도 굴절된 도관으로 연결시킨 구조로 생성하였다. 이때, 노즐 목을 보다 분명히 규정하기 위해 도관의 단면적이 노즐 목에서보다 챔버와 연결되는 부분

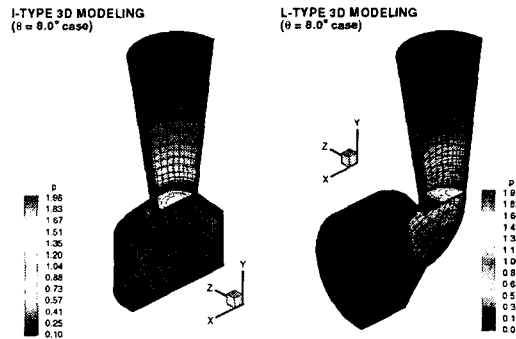


Fig. 5 Pressure distribution of I-type/L-type nozzles

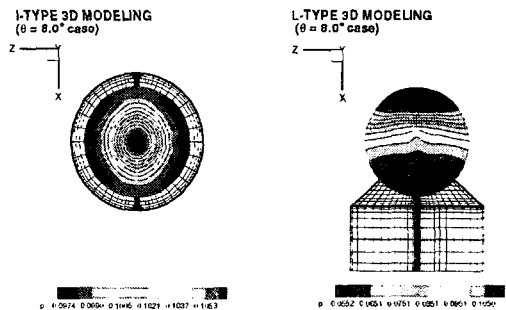


Fig. 6 Exit pressure distribution of I-type/L-type nozzles

에서 약 10%가량 확대되도록 조정하였다. 노즐 출구면에서의 추력값은 Straight(I-type) 노즐 추력값의 85.4%가 산출되었으며, 이러한 추력의 감소는 예상되는 바와 같이 90도 굴절되어 노즐 목으로 유입되는 유동의 Momentum 손실에 의한 것으로서 준 경험식에서 제시하는 Semi-empirical Value 13%에 근접하는 값이다 [4]. 이 값은 노즐 목 부근의 형상에 의존하는 값으로서 최종 설계 형상에 대한 해석을 통해 보다 정확한 효율계수를 산출할 필요가 있다. Fig. 5에 I-type과 L-type에 대한 노즐 내부의 압력 분포를 제시하였으며 I-type에 비해 L-type의 경우 유동의 비대칭성과 Secondary Flow의 존재의 두드러짐을 확인할 수 있다. Fig. 6에 노즐 출구면에서의 압력 분포를 나타내었다. L-type 노즐의 경우 Secondary Flow의 존재로 인하여 약 28lbf의 횡방향 추력 성분이 존재하나 이는 종방향의 추력인 1400lbf에 비하여 미미한 값이다.

Table. 2 Results for I-type/L-type nozzles

	노즐 Type	질량유량 (Kg/sec)	추력 (lbf)	출구속도 (m/sec)	출구압력 (psia)	추력 손실
노즐	I	3.4	1784	2078.6	636.5	-13%
이론	L	-	1552	-	-	
CFD	I	3.25	1701	2046.1	624.1	-14.6%
	L	2.76	1452	2058.7	527.1	

2.3 변형 L-type 노즐 해석결과

Fig. 7은 노즐 목 부근의 형상을 변경하여 재구성한 격자계에 대한 해석결과로서 내부 압력 분포와 대칭면에서의 마하수 분포를 나타낸 것이다. 이 경우에는 노즐 목의 위치가 보다 분명히 정의되고 챔버로부터 노즐로 유입되는 유동이 상대적으로 완만한 각도를 유지함으로써 I-type에 비해 추력 손실이 5%미만의 값을 나타내었다. Table 3에 2.2절에 기술한 L-type 노즐과 변형 L-type 노즐의 성능을 비교하였다. 위의 결과로 미루어 볼 때, Bend 부분의 형상을 조절함으로써 추력 손실의 값을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

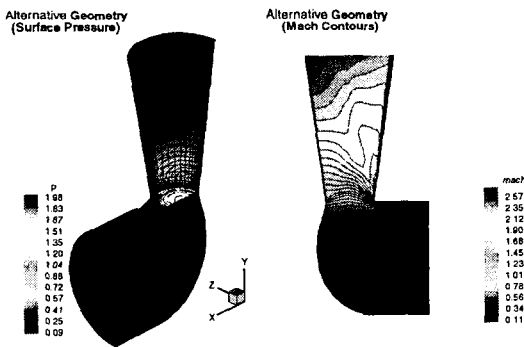


Fig. 7 Pressure and Mach no. distribution for alternative L-type nozzle

Table. 3 Results for L-type nozzles

	질량유량 (Kg/sec)	출구속도 (m/sec)	출구압력 (psia)	추력 (lbf)	추력 손실
L-type-1	2.76	2058.7	527.1	1452	-14.6%
L-type-2	3.08	1882.3	590.4	1610	-5.4%

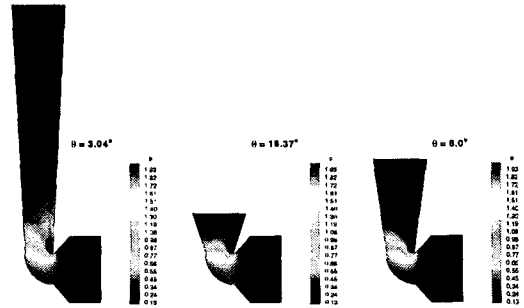


Fig. 8 Pressure distributions for nozzles of various diverting angles

2.4 노즐 확장각 변화에 따른 추력변화

또한 노즐확장반각이 18.37도와 3.04도인 경우에 대한 해석을 수행하였으며 [표.4]에 해석 결과를 요약하였다. 이 때 노즐 출구의 면적은 동일하게 유지하였다. Fig. 8은 각 노즐 형상에 대한 대칭면에서의 압력 선도이다. 표에 제시된 1D 추력은 노즐 이론으로 계산된 값에 13%의 Momentum 손실 [4]을 고려한 후 노즐 확장반각 18.37도, 3.04도에 해당하는 기하학적 효율계수 0.9745, 0.9993을 곱한 값이다 [5]. 노즐 길이와 확장각의 차이에도 불구하고 3가지 노즐의 성능이 대체로 같은 추력 레벨을 나타냄을 확인할 수 있다.

Table. 4 Results for nozzles of various diverting angles

노즐확장 반각 (deg.)	질량유량 (Kg/sec)	출구속도 (m/sec)	출구압력 (psia)	추력 (lbf)	1D 이론치
3.04	2.74	2036.7	523.3	1435	1558
8.0	2.76	2058.7	527.1	1452	1552
18.37	2.75	2010.7	534.9	1416	1519

3. 결 론

측추력 발생기에 대한 3차원 CFD 해석을 수행하였으며 I-type에 대한 해석 결과 준1차원 노즐 이론과 정량적으로 일치하는 출구 상태 및 추력

값이 산출되었다. 이러한 검증에 기반하여 몇가지 노즐 확장각을 갖는 L-type 노즐 형상에 대한 해석을 수행하였으며 I-type에 비해 상대적인 운동량 손실을 정량적으로 산출하였다. 또한 이 손실 계수는 노즐의 기하학적 형상에 의존함을 보였다. 이러한 해석결과는 측추력기 자체의 성능을 모사하는데 사용될 수 있으며, 특히 다수의 측추력기가 일정한 패턴으로 점화되는 다수 측추력기의 작동시 전기체 유동장에 일으키는 간섭 효과를 해석할 때 유용하게 사용될 수 있다.

참고문헌

- [1] Hong, S. K., Bardina, J., Lombard, C. K., Wang, D. and Codding, W., "A Matrix of 3-D Turbulent CFD Solutions for JI Control with Interacting Lateral and Attitude Thrusters," AIAA 91-2099, Sacramento, June 1991
- [2] P. Champigny and R. G. Laca, "Lateral Jet Control for Tactical Missiles," AGARD-R-804, June 1994
- [3] 홍승규, 이광섭, 박승오, "Characteristics of Supersonic Jet Impingement on a Flat Plate," 한국전산유체공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, May 2001
- [4] Private Communication - 국방과학연구소 추진제팀
- [5] G. P. Sutton, "Rocket Propulsion Elements," 6th Ed., Wiley & Sons, 1992, New York