



Side Jet 발생기의 유동특성에 관한 연구

홍 승규, 성 응제

국방과학연구소

Abstract

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 contour, the chamber pressure and temperature. Specifically attention is focused on the effect of the chamber shape between the straight nozzle and the bended nozzle by 90 degrees. The flow properties as well as the thrust level are compared between the two shapes. Particular attention is paid at the way the nozzle is bended at the joint. Effects of the length and the divergence angle of the nozzle on the thrust magnitude are also quantified among the three different side jet nozzles.

1. 서 론

초음속으로 비행하는 미사일의 종말 유도시 급격한 기동을 하기 위하여 비행체의 날개에 의한 양력만으로는 원하는 기동을 단시간에 낼수 없는 상황이 있다. 이를 극복하기 위하여 비행체 동체의 무게 중심 또는 Nose 부근에 비행체의 진행방향에 수직으로 Jet을 뿜어내는 소위 Side Jet 을 짧은 시간 작동하여 원하는 위치 및 자세로 비행체를 이동시키는 방안이 있다[Ref.1,2]. 본 연구에서는 측추력을 발생하기 위한 Side Jet Devise의 형상이 측추력 및 유동 pattern에 어떤 영향을 미치는지 3차원 CFD 해석을 수행하였다.

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



- 1) Straight(I-type) 노즐 형상의 해석을 통한 1D / 3D 해석 결과의 비교 및 분석.
- 2) Straight(I-type) / Bent(L-type) 노즐 형상의 해석 결과 비교를 통하여 Bent 노즐의 효율감소를 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 측추력기의 Bend 부분이 추력에 미치는 효과 예측.

2. Side Jet Motor의 내부 유동해석

2.1 I-type 노즐의 1D / 3D 해석 결과

해석의 신뢰도를 확인하기 위하여 노즐 이론을 이용해 측추력기에 대한 준1차원 해석을 수행하였다. 이때 측추력기의 제원은 20도씨 평균 챔버압 가정하에 계산하였으며 정체압력(11800 psia), 정체온도(2977.7 K), 분자량(26.43 Kg/Kmol), 및 비열비(Gamma = 1.21) 등의 값을 사용하였다. 또한 노즐 목 직경은 8.9mm, 출구 직경은 16.5mm의 값을 사용하였으며, 노즐 확장반각은 8.0도(기하학적 효율 계수 0.9951)로 하였다. 그 결과를 [표.1]에 제시하였다

3차원 해석에는 full Navier-Stokes 코드를 사용하였으며 70*35*39개의 격자를 사용하여 단일 블록으로 구성된 격자계 [그림.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 등엔트로피 방정식을 수치적으로 풀어 경계면에서의 압력과 온도, 속도를 구하는 방법을 사용하였다.

$$T_o = T + \frac{\gamma - 1}{2} u^2 \quad (1)$$

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

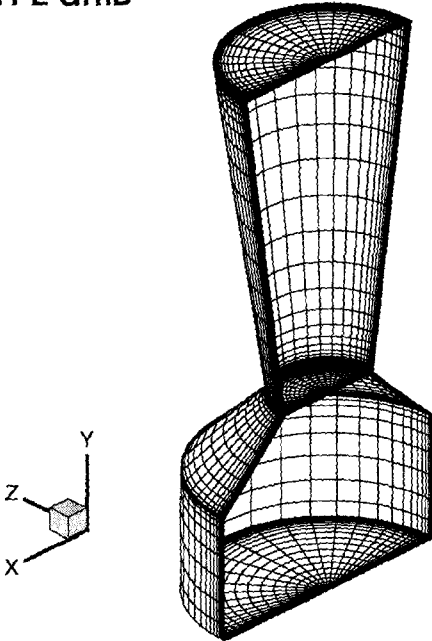
$$P^- = u - \frac{2}{\gamma - 1} a \quad (3)$$

이 때 inflow에서 두번째 면에서의 Left-Running Characteristics (P^-)를 외삽하여 경계면에서의 P^- 값으로 취하고 각 반복계산 과정마다 갱신하여 사용하였다. 등엔트로피 방정식과 상태방정식에 대해 Newtonian Iteration을 이용해

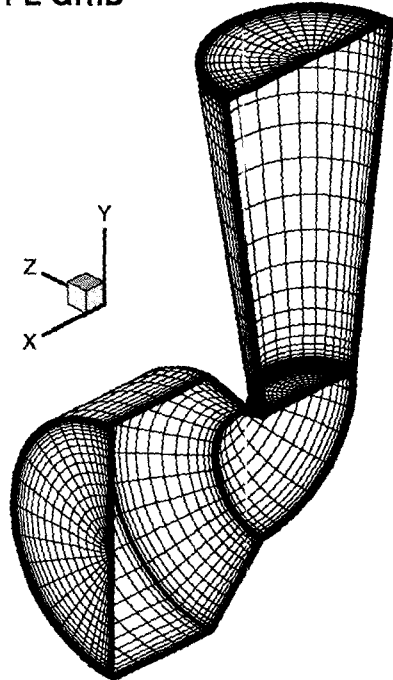
$$\left(\frac{2}{\gamma-1} T_o \right) \left(\frac{P}{P_o} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} + \left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} \right)^2 \left(\frac{P_o}{\rho a} \right)^2 \left(\frac{P}{P_o} \right)^2 + \left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} \right) \left(\frac{2P-P_o}{\rho a} \right) \left(\frac{P}{P_o} \right) + \left(c^2 - \frac{2}{\gamma-1} T_o \right) = 0 \quad (4)$$

으로부터 (P/P_o) 를 구함으로써 챔버 경계면에서의 압력, 밀도, 속도를 구하여 사용하였다. [그림.2]에 계산횟수에 대한 출구에서의 추력값과 격자계 내의 3군데(노즐 출구, 노즐 목 부근, 챔버 경계면)에서 산출한 질량유량을 나타내었다. 수렴후 챔버 경계면 정체압의 99% 이상이 노즐 출구면에서 회복되며 질량유량 역시 99% 이상이 보존됨을 확인되었다. 수렴된 해에서 산출한 추력값과 출구 변수값들을 [표.1]에 제시하였다.

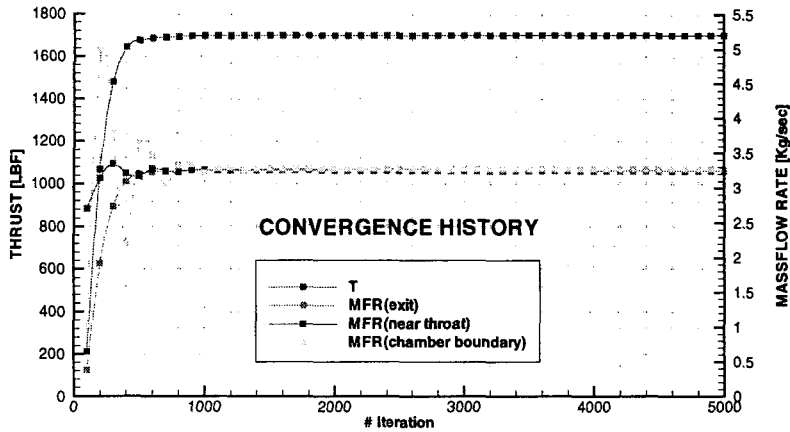
I-TYPE GRID



L-TYPE GRID



[그림.1] Single Motor Engine 3D Grid



[그림.2] 추력 및 질량유량 수렴 선도

	\dot{m} (Kg/sec)	Thrust(lbf)	V_{exit} (m/s)	P_{exit} (psia)
Nozzle Theory (Quasi-1D)	3.4	1784	2078.6	636.5
CFD (3D)	3.25 (-4.4%)	1701 (-4.7%)	*2046.1 (-1.6%)	*624.1 (-1.9%)

(* 노즐 출구면에서 면적으로 평균한 값임.)

[표.1] I-type(Straight) 노즐 형상에 대한 1D / 3D 해석 결과 요약

1D / 3D 해석 결과의 차이는 경계층에서의 점성량에 의한 손실 등이 CFD 결과에 반영된 것에 기인한다. 3D 해석 결과, 추력 및 질량유량 값이 1D 이론치의 95% 이상 산출되었다.

2.2 I-type / L-type 노즐의 3D 해석 결과 비교

다음으로 L-type 노즐에 대한 해석을 수행하였다. 계산에 사용한 L-type 노즐의 격자계는 [그림.1]과 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. 이 때, 노즐 목을 보다 분명히 규정하기 위해 도관의 단면적이 노즐 목에서보다 챔버와 연결되는 부분에서 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 준경험식에서 제시한 Semi-empirical Value 13%에 근접하는 값이다. 이 값은 노즐 목 부근의 형상에 의존하는 값으로서 최종 설계 형상에 대한 해석을 통해 보다 정확한 효율 계수를 산출할 필요가 있다. [그림.3]에 I-type과 L-type에 대한 노즐 내부의 압력 분포를 제시하

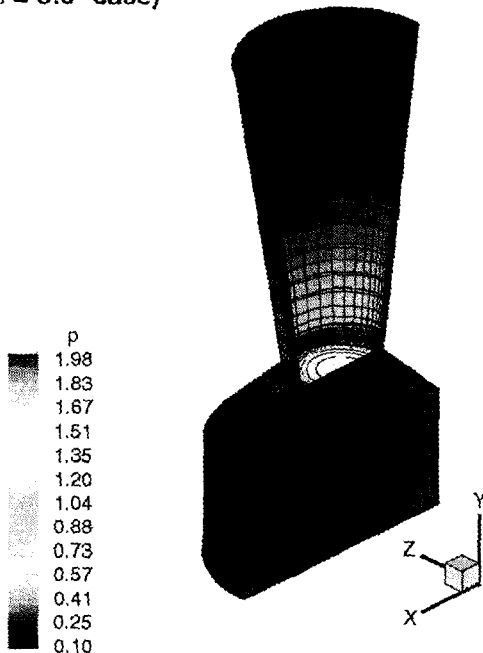


였으며 I-type에 비해 L-type의 경우 유동의 비대칭성과 Secondary Flow의 존재함을 알 수 있다. [그림.4]에 노즐 출구면에서의 압력 분포를 나타내었다. L-type 노즐의 경우 Secondary Flow로 인하여 약 28lb의 횡방향 추력 성분이 존재하며 이는 종방향의 추력인 약 1400lb에 비하여 미약하지만 횡방향의 힘의 성분이 측추력 또는 항력으로 존재함을 보여주고 있다. [표.2]에 전체적인 해석 결과를 비교, 정리하였다.

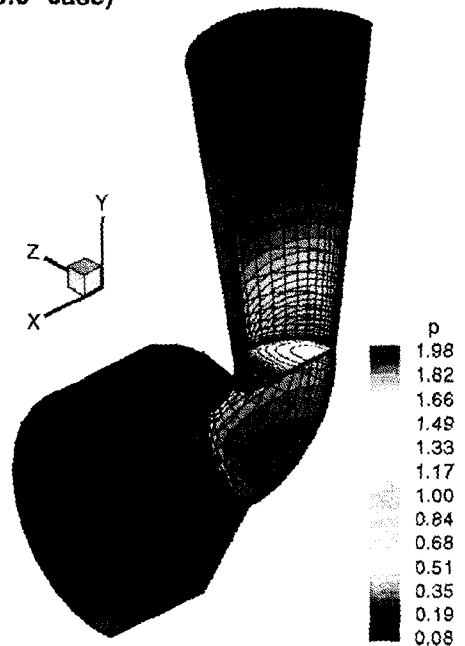
	Config.	\dot{m} (Kg/sec)	Thrust(lbf)	V_{exit} (m/s)	P_{exit} (psia)	Thrust Loss
Nozzle Theory	I-type	3.4	1784	2078.6	636.5	-13%
	L-type	-	1552	-	-	Assumed
CFD	I-type	3.25	1701(-5%)	2046.1	624.1	-14.6%
	L-type	2.76	1452(-6%)	2058.7	527.1	Calculated

[표.2] I-type / L-type 해석 결과 요약

I-TYPE 3D MODELING
($\theta = 8.0^\circ$ case)

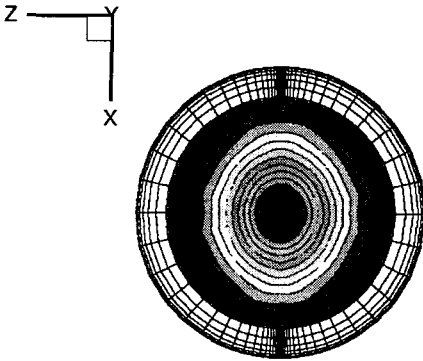


L-TYPE 3D MODELING
($\theta = 8.0^\circ$ case)



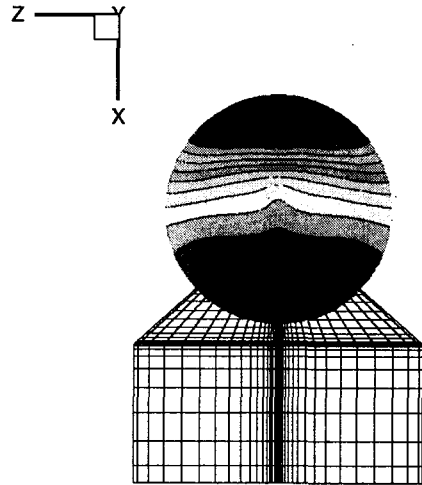
[그림.3] L-type / I-type 노즐 형상 해석 결과 - 내부 압력 선도

I-TYPE 3D MODELING ($\theta = 8.0^\circ$ case)



p: 0.0974 0.0990 0.1005 0.1021 0.1037 0.1053

I-TYPE 3D MODELING ($\theta = 8.0^\circ$ case)



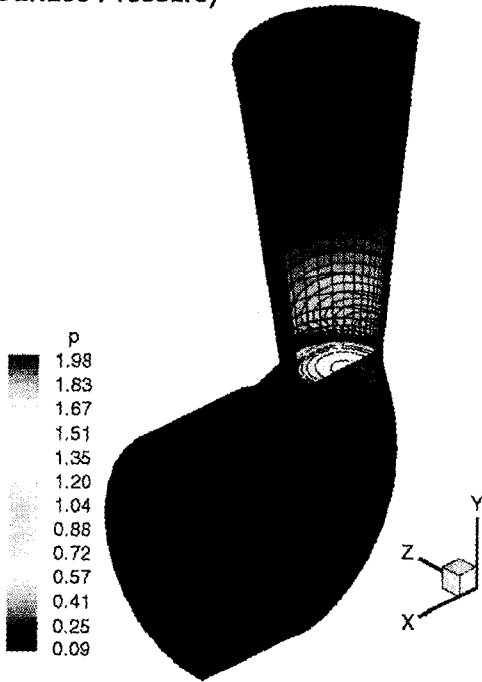
p: 0.0552 0.0651 0.0751 0.0851 0.0951 0.1050

[그림.4] L-type / I-type 노즐 형상 해석 결과 - 출구 등압 선도

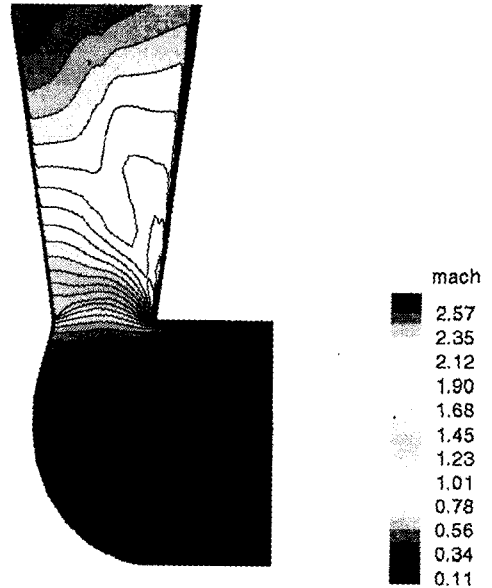
2.3 변형 L-type 노즐 해석 결과

[그림.4]는 노즐 목 부근의 형상을 조금 더 변경하여 방식으로 구성된 격자계에 대한 해석 결과로서 내부 압력 분포와 대칭면에서의 마하수 분포를 나타낸 것이다. 이 경우에는 노즐 목의 위치가 보다 분명히 정의되고 챔버로부터 노즐로 유입되는 유동이 상대적으로 보다 완만한 각도를 유지함으로써 I-type에 비한 추력 손실이 5% 미만의 값을 나타내었다. [표.3]에 2-(2)에 기술한 L-type 노즐과 변형 L-type 노즐의 성능을 비교하고 있다. 따라서 Bend 부분의 형상을 조정함으로써 추력 손실의 값을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

Another Geometry
(Surface Pressure)



Alternative Geometry
(Mach Contours)



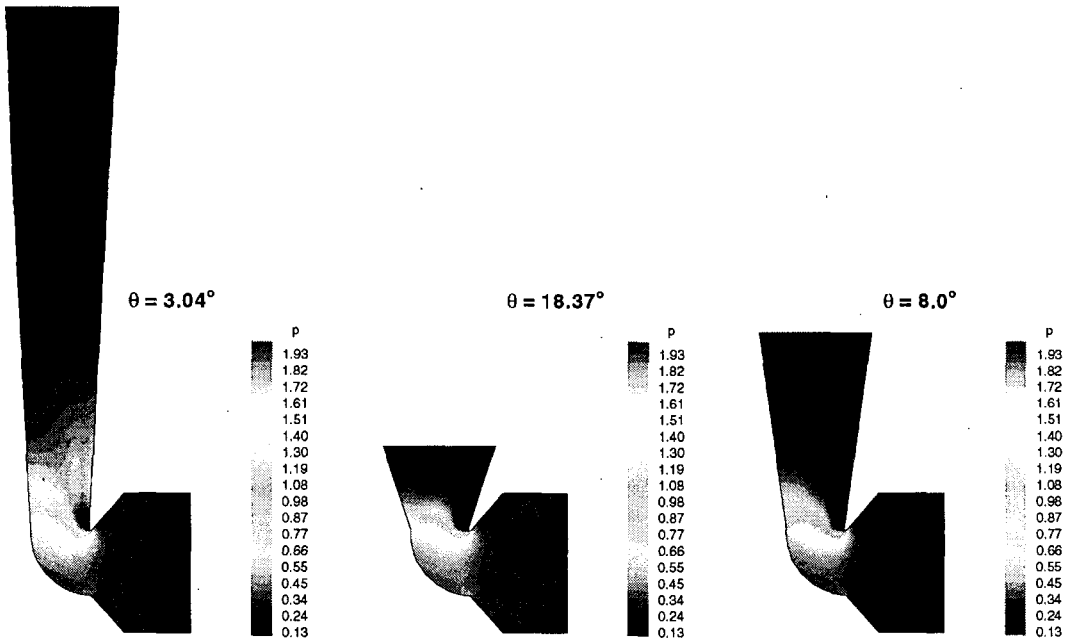
[그림.5] 변형 L-type 노즐 형상 해석 결과

	\dot{m} (Kg/sec)	P_{exit} (psia)	V_{exit} (m/s)	Thrust (lbf)	Thrust Loss
L-type-1	2.76	527.1	2058.7	1452	-14.6%
L-type-2	3.08	590.4	1882.3	1610	-5.4%

[표.3] 두 가지 L-type 노즐 형상에 대한 해석 결과 비교

2.4 노즐 확장각 변화에 따른 추력 변화

끝으로 노즐확장반각이 18.37도와 3.04도인 경우에 대한 해석을 추가로 수행하였으며 [표.4]에 해석 결과를 요약하였다. [그림.5]는 각 노즐 형상에 대한 대칭면에서의 압력 선도이다. 표에 제시된 1D 추력은 노즐 이론으로 계산된 값에 13%의 Momentum 손실을 고려한 후 노즐 확장반각 18.37도, 3.04도에 해당하는 기하학적 계수 0.9745, 0.9993를 곱한 값이다. 중요한 점은 노즐 길이와 노즐 확장각의 차이에도 불구하고 3가지 SME의 성능이 대체로 같은 추력 레벨을 나타내며 이러한 결과는 향후 다수의 SME를 해석할 때에도 공력 모델링의 관점에서 편리한 점이라고 할 수 있다.



[그림.6] 노즐 확장각 변화에 대한 해석 결과 - 대칭면에서의 등압 선도

Nozzle Half Angle (deg.)	\dot{m} (Kg/sec)	P_{exit} (psia)	V_{exit} (m/s)	Thrust (lbf)	1D Estimation Thrust(lbf)
3.04	2.74	523.3	2036.7	1435	1558(+ 8.5%)
8.0	2.76	527.1	2058.7	1452	1552(+ 6.8%)
18.37	2.75	534.9	2010.7	1416	1519(+ 7.3%)

[표.4] 노즐 확장각 변화에 대한 해석 결과 요약

3. 결론

축추력기에 대한 3차원 CFD 해석을 수행하였으며 I-type에 대한 해석 결과 준1차원 노즐 이론과 정량적으로 일치하는 출구 상태 및 추력값이 산출되었다. 이러한 검증에 기반하여 몇가지 노즐 확장각을 갖는 L-type 노즐 형상에 대한 해석을 수행하였으며 I-type에 비해 상대적인 Momentum 손실을 정량적으로 산출하였다. 또한 이 손실 계수는 노즐의 기하학적 형상에 의존함을 보였다. 이러한 해석은 축추력기 자체의 성능을 모사하는데 사용될 수 있으며, 특히 다수의 축추력기가 일정한 패턴으로 점화되는 다수 축추력기의 작동시 전기체 유동장에 일으키는 간섭 효과를 해석할 때 유용하게 사용될 수 있다. 또한 본문 2.1에 기술한 Inflow 경계조건의 강건함으로 인하여 입구면에서의 계산값이 출구면에서의 계산값에 1% 이내로 질량 및 전압이 보존됨을 보여주고 있다.

References

1. Hong, S. K., Bardina, J., Lombard, C. K., Wang, D. and Coddling, 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. Lacau, "Lateral Jet Control for Tactical Missiles," AGARD-R-804, June 1994