

공압시험을 이용한 추력가변 노즐의 정상상태 성능 연구

김중근* · 이지형* · 오중윤* · 장홍빈*

A Study on Steady State Performance of Variable Thrust Nozzle by Cold-Flow Test

Joungkeun Kim* · Jihyung Lee* · Jongyun Oh* · Hongbeen Chang*

ABSTRACT

Solid Rocket Motor(SRM) has advantages such as - high specific impulse, operational safety and simplicity in design and manufacturing process but thrust magnitude can't be controlled. For studying of pintle nozzle that can control the thrust magnitude of SRM, cold flow test and numerical analysis about needle type pintle shape were performed and results were presented in this paper. As the results of this study, pintle tip's shape and nozzle contour were important design parameters because thrust performance and variable thrust range of pintle nozzle depend on them. Especially, the thrust of needle typed pintle nozzle adopted in this test was predicted 13% higher than normal nozzle without pintle.

초 록

고체 추진기관은 높은 비추력, 운용 안전성, 설계/제작하기가 쉽다는 장점이 있으나 추력 크기를 조절할 수 없다. 본 논문에서는 고체 추진기관의 추력을 조절할 수 있는 핀틀 노즐성능에 대한 연구로 Needle형 핀틀을 사용하여 수행한 공압 시험결과와 수치해석 결과를 수록하였다. 연구의 결과, 핀틀 노즐의 추력성능과 추력변화 범위는 핀틀 팁의 형상과 노즐의 Contour형상에 크게 의존하기 때문에 핀틀 팁의 형상과 노즐의 Contour형상은 중요한 설계 변수임을 알 수 있었고 특히, 시험에 적용된 Needle형 핀틀 노즐의 성능은 기존 노즐 대비 약 13%의 추력상승이 예측됨을 알 수 있었다.

Key Words : Variable Thrust(가변추력), Pintle Nozzle(핀틀 노즐)

1. 서 론

고체 추진기관은 높은 비추력, 운용 안정성, 설계/제작의 용이성 그리고 구조적으로 간단하다는 장점을 가지고 있으나 추력 크기 조절이 거의 불가능하다는 단점으로 운용환경에 따라 다양한 추력 크기를 요구하는 경우에는 주로 액체 추진기관을 적용한다[1]. 그러나 액체 추진기관은 시스

† 2007년 10월 11일 접수 ~ 2007년 12월 6일 심사완료

* 국방과학연구소 1기술연구본부 6부

연락처, E-mail: korea_kimjk@yahoo.co.kr

템 구조가 복잡하고 운용성이 떨어질 뿐만 아니라 높은 비추력을 얻을 수 없다는 단점을 가지고 있어 고체/액체 추진기관의 장점을 모두 가지는 추진 시스템 개발이 활발하게 연구되고 있다[2].

위의 개념으로 개발된 추진 시스템에는 하이브리드 추진 시스템(Hybrid Propulsion System)과 핀틀 노즐(Pintle Nozzle)이 적용된 연속 가변 추력 고체 추진기관(Variable Thrust Solid Rocket Motor)이 있다(Fig. 1 참조) 전자는 액체 추진제를 고체 추진제로 대체하고 액체 산소 분사량을 제어하여 추력 크기를 조절하는 시스템이며 후자는 고체 추진기관의 노즐 목 면적 크기를 제어하여 연소관 압력을 변화시키고 최종적으로 추력 크기를 조절하는 것으로 현재 각국에서 활발하게 개발이 진행되고 있다[3].

본 연구에서는 핀틀 노즐의 개념 연구의 일환으로 핀틀 노즐형 추진기관에 대하여 공압시험 및 수치해석을 실시하고 핀틀 위치가 노즐의 추력 성능에 미치는 영향을 평가한 결과를 수록하였다.

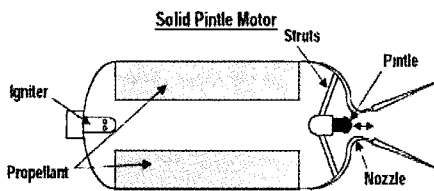


Fig. 1 Schematic Diagram of Pintle Nozzle

2. 본 론

2.1 유동해석

유동해석은 상용코드(Fluent)를 이용하여 실제 공압시험과 동일한 형상과 수행할 핀틀의 위치와 동일한 경우로 축대칭 해석을 수행하였다. 경계 조건은 유입부(Inlet)에는 압력 입구조건(Pressure Inlet)을, 외기 조건에서는 대기조건(Far-Field)을 적용하였다. 해석에 사용된 절점 수는 약 35,000개, 요소 수는 약 18,000개로 구성된 형상은 Fig. 2와 같다[4].

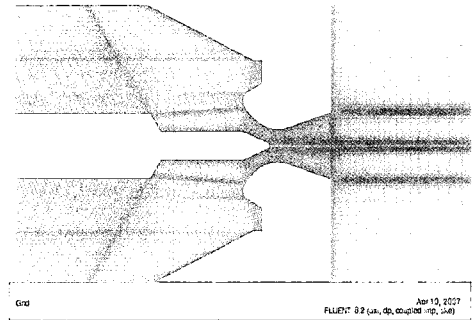


Fig. 2 The Generated Mesh

2.2 공압 시험 (Cold-Flow Test)

2.2.1 장치 구성

시험 장치는 크게 $10m^3$, 300bar의 고압 공기를 충전할 수 있는 저장탱크 2개(Reservoir), $1m^3$, 200bar의 고압 공기를 충전할 수 있는 공압 저장탱크 1개(Receiver)와 7조의 오리피스(orifice)를 조합하여 시험 압력을 조절하는 압력조절장치, 시험용 모델로 공급되는 유량을 조절하는 유량조절용 오리피스 및 핀틀 조립체로 Fig. 3과 같다[5].

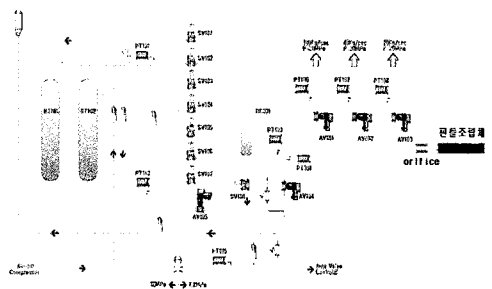


Fig. 3 Cold Air Test Setup

핀틀 조립체는 고압 챔버, 추력추정용 로드셀, A-Frame, Flexure, 핀틀 위치 조절장치, 내삼노즐 그리고 핀틀로 구성된다. 챔버로 공급되는 공압 배관은 90° 방향으로 서로 마주보게 설치하였으며 챔버 내부에 유동의 안정화를 위하여 하니콤(Honeycomb)을 설치하였다. 시험에 사용된 노즐의 노즐 목 직경은 25 mm, 팽창 비는 2.0 이다. 시험의 핀틀 위치는 핀틀이 노즐 목 면적에 영향을 주지 않는 위치(초기 노즐목 면적 100%)부터

노즐 목을 최대로 막는 위치(초기 노즐목 면적의 22.6%)까지 균일하게 17등분하여 동일한 유량조건으로 수행하였다. (Fig. 4, Fig. 5 참조)

판단된다. 유동 박리는 핀틀이 34 mm 진행한 시점부터 발생하며 핀틀이 진행함에 따라 박리점이 노즐 목 쪽으로 이동하는 것으로 나타났다.

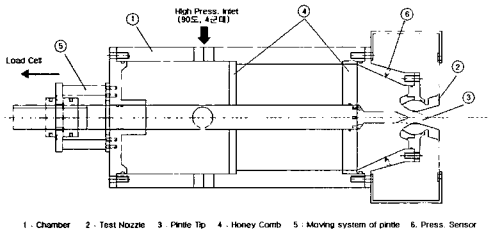


Fig. 4 Schematic Diagram of Chamber and Nozzle

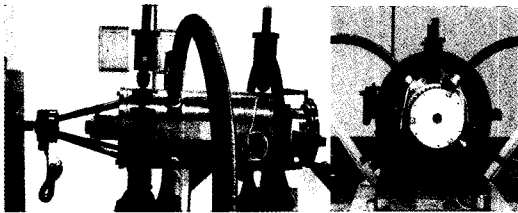


Fig. 5 Assembled Test Facilities

3. 결과 분석

3.1 유동해석 결과

Figure 6은 핀틀의 초기위치 즉, 노즐 목 면적이 100%(상)인 경우와 노즐 목 면적이 22.6%(하)인 경우에서의 Mach 수와 온도 분포를 나타낸다. 정상적으로 노즐 확대부에서 팽창되던 유동이 노즐 목 면적이 감소함에 따라 노즐 내부에서 유동박리(Flow separation)가 발생됨을 알 수 있다.

Figure 7과 8은 핀틀 위치에 따른 노즐 벽면에서의 압력변화를 보여준다. 핀틀이 노즐 목 쪽으로 진행함에 따라 노즐 목의 위치는 전방으로 이동하다가 다시 후방으로 밀려남을 알 수 있다. 또한, 노즐 목 근방에서의 노즐 벽면 압력 변화율이 핀틀이 진행함에 따라 급격하게 변화하다가 노즐 목을 지난 후방에서는 노즐 벽면 압력이 크게 변화하지 않는 경향을 보였으며 이러한 현상은 핀틀 끝단(Pintle Tip)의 형상에 기인한 것으로

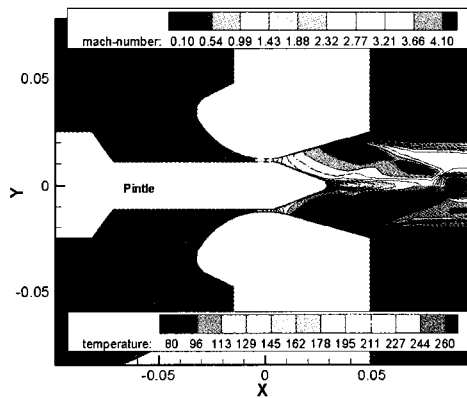
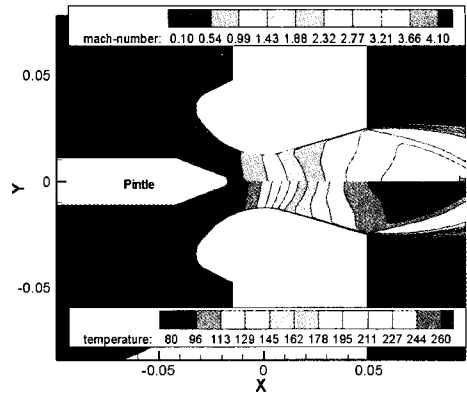


Fig. 6 CFD Result(Fluent) by pinle position

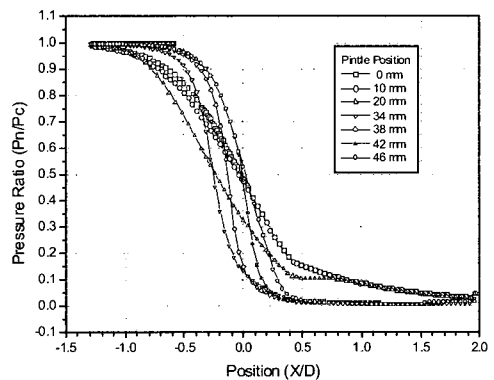


Fig. 7 Nozzle Wall pressure variation by pinle position

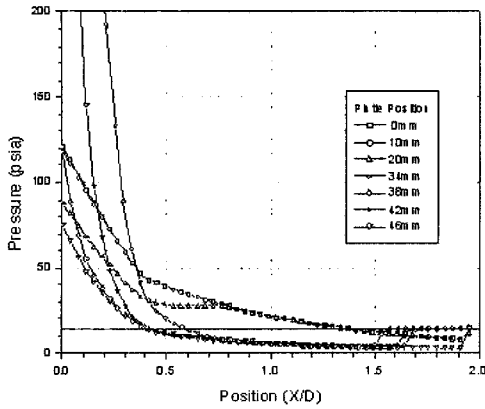


Fig. 8 Nozzle Wall pressure variation by pintle position(Nozzle Exit Region)

Figure 9는 핀틀 위치에 따른 챔버 내부 압력 변화를 나타낸 것이다. 공압시험 시 일정한 유량을 공급하기 위하여 설치되어 있는 오리피스는 핀틀이 진행함에 따라 챔버 압력이 상승되기 때문에 이상적인 초킹 조건(Choked Condition)을 만족하지 못하여 핀틀 위치가 34 mm인 지점 이후 부터는 유량의 변화가 발생하여 챔버 압력이 변화하였다. 만일, 챔버 압력 변화와 무관하게 일정 유량이 공급되었다면 (연소시험 모드) 핀틀이 노즐 목을 완전히 막을 때까지 챔버 압력이 계속해서 증가하였을 것이다.

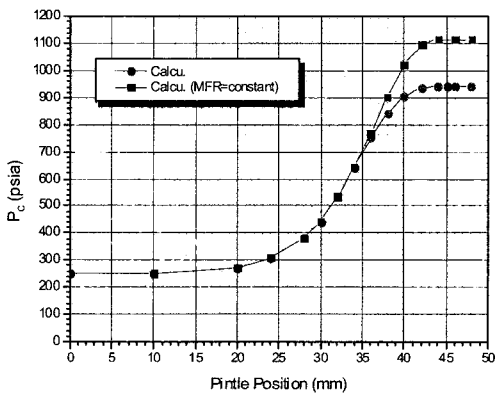


Fig. 9 Chamber pressure variation by pintle position

Figure 10은 핀틀 위치에 따라 유량 제어용 오리피스를 통하여 공급된 고압공기의 질량유량을 Eq. 1을 이용하여 계산한 결과로 핀틀 위치가 34 mm까지 일정하게 공급되던 질량유량이 44 mm까지 감소하다가 일정하게 유지됨을 보여준다.

$$\dot{m} = C_{D,or} P_{re} A_{or} \tag{1}$$

$$= C_{D,no} P_c A_{no}$$

여기서 $C_{D,or}$ 는 오리피스의 초킹 조건에 따라 달라지며 아래 식에 의해 계산되었다[6].

1) $P_c / P_{re} > 0.5283$ 인 경우

$$C_{D,or} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{\rho_{re}}{P_{re}} \left[\left(\frac{P_c}{P_{re}} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_c}{P_{re}} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}$$

2) $P_c / P_{re} < 0.5283$ 인 경우

$$C_{D,or} = \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \frac{M_w}{RT_{re}}}$$

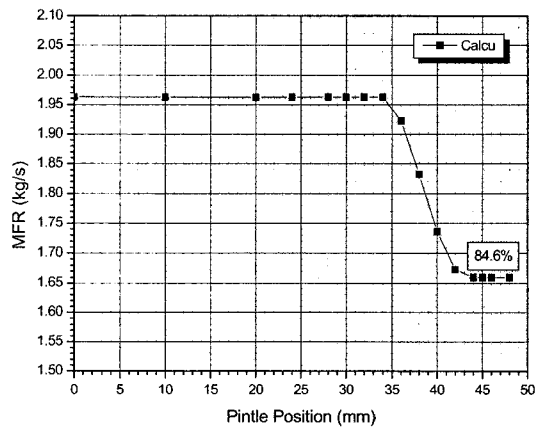


Fig. 10 Mass flow variation by pintle position

Figure 11은 핀틀 위치에 따른 추력변화를 보여준다. 핀틀이 진행함에 따라 추력이 증가하다가 감소하는 경향을 나타내는데 이것은 노즐내부 벽면에서 발생하는 압력변화에 기인한 것이다. 즉, 핀틀의 위치가 36 mm까지는 노즐목이 전방으로 진행됨에 따라 팽창부의 길이가 길어져 팽창비가 커지는 효과가 발생되지만 36 mm이후부터는 노즐목이 후방으로 이동함에 따라 팽창비가

감소하고 또한 유동박리가 발생하기 때문에 추력이 감소한다. 이러한 경향은 노즐 내부 Contour 및 핀틀의 형상이 핀틀 노즐의 성능에 영향을 미침을 의미한다[7].

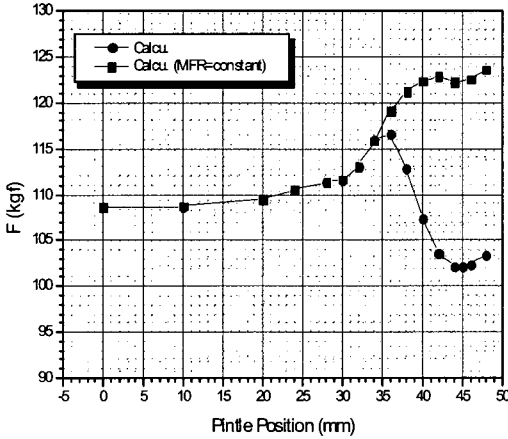


Fig. 11 Thrust variation by pintle position

3.2 공압 시험 결과

3.2.1 핀틀 위치에 따른 노즐 목 위치 및 목 면적 계산

핀틀 이동에 따른 시험용 노즐의 목 위치와 목 면적을 판단하기 위하여 설계 형상을 이용하여 기하학적 면적을 분석하였다. 그리고 핀틀 초기 위치에서 측정된 챔버 압력 17.23bar(absolute)를 이용하여 유동해석을 수행하고 핀틀을 이동시키면서 각 위치별 질량유동율이 핀틀 초기 위치 질량유동율과 동일하게 되는 챔버 압력에 대한 유동해석을 수행하였다. 계산된 결과를 이용하여 각 위치별 노즐 목 면적을 Eq. 2를 사용하여 계산하였다.

$$A_t = \frac{\dot{m}}{C_D P_C} = \frac{1.9624}{C_D P_C} \quad (2)$$

여기서

$$C_D = \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \frac{1}{R} \frac{M_w}{T_C}}, \quad \gamma = 1.4$$

$$M_w = 28.97, \quad T_C = 300 \text{ K}$$

Figure 12는 기하학적 방법과 유동해석으로 구한 노즐 목 면적을 보여주며 서로 일치함을 알

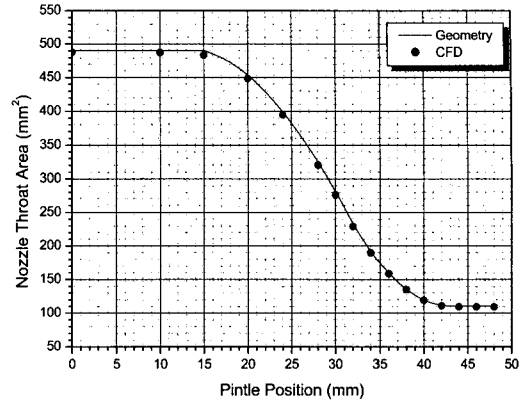


Fig. 12 Nozzle throat area variation by pintle position

수 있다.

3.2.2 핀틀 위치에 따른 챔버 압력 및 추력변화

예비 시험에서 구한 오리피스 수축계수(Vena Contractor Coef) 0.851과 유동해석으로 구한 질량 유동율 $\dot{m} = 1.9624 \text{ kg/s}$ 를 이용하여 $P_{r,c}$ 를 계산한 결과 83.3bar(absolute)가 되었으며 시험에서 측정된 Receiver 압력 82.2bar와 거의 일치하였다. $C_{D, no}$ 은 초킹 조건인 $C_{D, or}$ 와 동일하기 때문에 Eq. 1을 이용하여 P_c 를 계산하였으며 Fig. 13은 챔버 압력에 대한 해석 값과 시험 값을 비교한 것으로 서로 일치함을 보여준다.

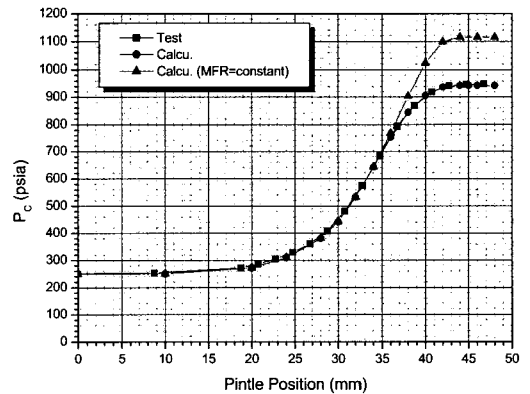


Fig. 13 Chamber pressure variation by pintle position

Figure 14는 핀틀 위치에 따른 유동해석 결과와 시험에 측정된 추력변화를 비교한 것으로 시험에서 측정된 추력 값이 이론적으로 해석된 값에 비하여 다소 작은 것으로 나타나나 비슷한 경향을 보여줌을 알 수 있다.

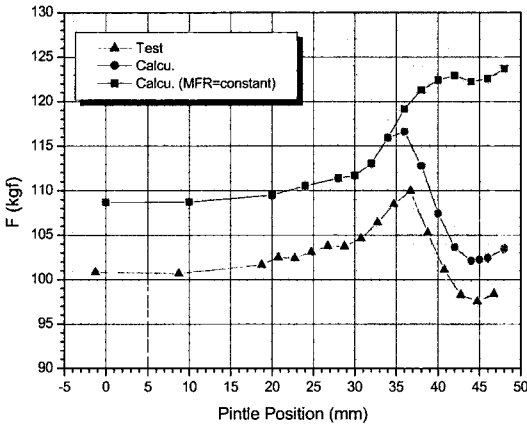


Fig. 14 Thrust variation by pintle position

이러한 추력 차이의 원인은 공압 배관의 저항에 의해 발생된 것으로 판단되어 Fig. 15와 같이 공압 배관을 고정시킨 후 교정을 수행하였으며 본 시험장치의 배관 저항이 대략 8 kgf 정도 발생되었음을 확인하였다.

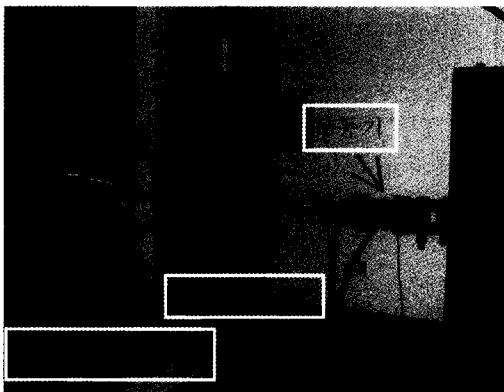


Fig. 15 Test stand calibration

Figure 16은 시험에서 측정된 추력 값에서 배관 정항을 보정한 결과로 핀틀이 노즐 후방으로

34 mm 전진할 때 까지는 측정된 추력 값에 8 kgf의 값을 더한 값이 이론해석 결과와 일치하며 38 mm 이후는 추력 값에 5 kgf를 더한 값과 이론해석 결과가 일치함을 보여준다. 이러한 결과는 초기시험 시 (핀틀 위치 : 0 ~ 34 mm) 고정되었던 공압배관 호스를 36 mm 시험 시 공압배관의 영향을 줄이기 위하여 느슨하게 풀어주었기 때문으로 판단된다. 추후 시험을 통하여 이에 대한 정확한 분석을 수행할 것이다.

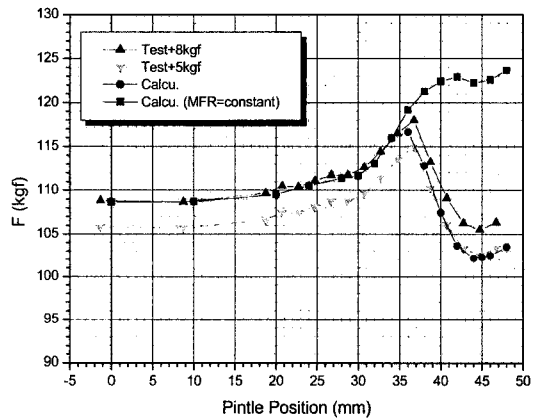


Fig. 16 The corrected thrust variation

4. 결 론

Needle형 핀틀에 대한 공압시험 및 수치해석을 이용하여 핀틀 위치가 노즐의 추력성능에 미치는 영향을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 핀틀 위치가 추력 성능에 미치는 영향을 평가하기 위한 공압 시험과 Fluent를 적용한 수치해석을 수행하였으며 시험 결과와 계산 결과가 서로 일치함을 확인하였다.
- 2) 챔버 내부에 설치된 핀틀이 움직임에 따라 초기에 설계된 노즐목 크기는 물론 실제 노즐목 위치가 변하여 노즐 내부유동장에 영향을 주게 되어 추력 성능 변화가 발생하게 된다.
- 3) 핀틀의 움직임으로 노즐목 면적이 과도하게

감소하면 노즐 내부에 유동박리가 발생하여 노즐목 크기 감소 및 연소관 압력 변화에 의한 추력조절 범위를 감소시킬 수 있다.

- 4) 공압시험 시 고압의 공기가 공급되는 배관에서는 저항이 발생하여 계측된 추력에 영향을 미칠 수 있으므로 배관저항에 대한 교정은 정밀한 추력계측을 위하여 반드시 필요하다.
- 5) 핀틀 움직임에 의한 추력 변화성능은 핀틀 형상과 노즐 Contour 형상에 따라 영향을 받기 때문에 시스템 적용시 이에 대한 형상 최적화가 필수적이다.

참 고 문 헌

1. Geogre P. Sutton, Donald M. Ross, " Rocket Propulsion Elements - An Introduction to the Engineering of Rockets," 4th edtion, pp.41-88
2. M. J. Ostrander, J. L. Bergmans and M.E. Thomas, " Pintle Motor Challenges for Tactical Missile," AIAA-2000-3310
3. Jim Fleming, " Key Technologies for future missile propulsion systems," 5th World Missile Summit, October 2002, London
4. John F. Wendt, " Computational Fluid Dynamics - An Introduction", Springer-Verlag, 1992, pp.261-287
5. 이지형, 김중근, 이도형, " 유입부 비대칭 노즐의 성능연구," 제10권 제2호, 한국추진공학회지, 2006, pp.45-52
6. Michel A. Saad, " Compressible Fluid Flow," rentice-Hall, INC., 1985, pp.83-127
7. Randall Smith-Kent, Hai-Tien Loh and Pawel Chwalowski, " Analytical Contouring of Pintle Nozzle Exit Cone Using Computational Fluid Dynamics," AIAA-95-2877