

## 공압시험을 이용한 추력가변 노즐의 정상상태 성능 연구

김중근\* · 이지형\* · 오종윤\* · 장홍빈\* · 김신회\*

### A study on steady state performance of variable thrust nozzle by cold-flow test

Jungkeun Kim\* · Jihyung Lee\* · Jongyun Oh\* · Hongbeen Chang\* · Shinhoe Kim\*

#### 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(핀틀노즐), Cold-Flow Test(공압시험)

#### 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. 그러나 액체 추진기관은 시스템 구조가 복잡하고 운용성이 떨어질 뿐

\* 국방과학연구소 추진기관부  
연락처, E-mail: korea\_kimjk@yahoo.co.kr



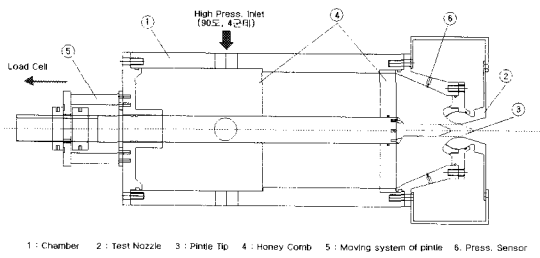


Fig. 4 Pintle Assembly Schematic

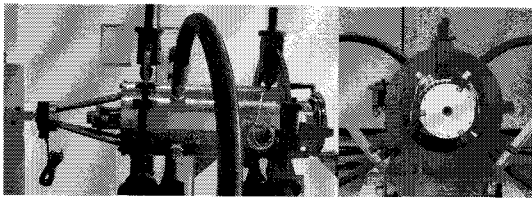


Fig. 5 Test Apparatus

### 3. 결과 분석

#### 3.1 유동해석 결과

Fig 6은 핀틀의 초기위치 즉, 노즐 목 면적이 100%인 경우(좌측)와 노즐 목 면적이 22.6%인 경우(우측)의 마하수 분포를 보여준다. 정상적으로 노즐 확대부에서 팽창되던 유동이 노즐 목 면적이 감소함에 따라 노즐내부에서 유동박리가 발생됨을 알 수 있다.

Fig 7과 Fig 8은 핀틀 위치에 따른 노즐벽면의 압력변화를 보여준다. 핀틀이 초기 노즐 목 쪽으로 진행함에 따라 실제 노즐 목의 위치는 전방으로 이동하다가 다시 후방으로 밀려남을 알 수 있다. 또한, 핀틀이 노즐 목 근방으로 진행함에 따라 노즐벽면 압력이 급격하게 변화하다가 핀틀이 노즐 목을 지나가게 되면 노즐벽면 압력변화가 크기 않았으며 이러한 현상은 핀틀 팁(Tip)의 형상에 기인한 것으로 판단된다. 유동 박리(Flow separation)는 핀틀이 34mm 진행한 시점부터 발생하며 핀틀이 진행함에 따라 박리점이 노즐 목 쪽(전방)으로 진행함을 알 수 있다.

Fig 9는 핀틀 위치에 따른 챔버 내부 압력변화를 보여준다. 공압시험 시 일정한 유량을 공급

하기 위하여 설치된 오리피스는 핀틀이 진행함에 따라 챔버 압력이 상승되기 때문에 핀틀의 위치가 34mm인 지점 이후 초킹 조건을 만족하지 못하고 유량이 줄어들기 때문에 일정한 유량이 공급되는 경우보다 압력이 낮게 나타남을 알 수 있다.

Fig 10은 핀틀 위치에 따라 유량제어용 오리피스 통해 공급되는 고압공기의 질량유량을 식 (1)을 이용하여 계산한 결과로 핀틀 위치가 34mm까지 일정하게 공급되던 질량유량이 34mm이후 초킹 조건을 만족하지 못하기 때문에 44mm까지 감소함을 알 수 있으며 초킹 조건 대비 약 84.6%의 질량유동으로 감소되는 것으로 예측되었다.

$$\begin{aligned} \dot{m} &= C_{D, orifice} P_{receiver} A_{orifice} \\ &= C_{D, nozzle} P_{chamber} A_{nozzle} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $C_{D, orifice}$ 는 오리피스의 초킹조건에 따라 달라지며 아래 식에 의해 계산되었다.

$P_{chamber}/P_{receiver} > 0.5283$  인 경우

$$C_{Dorifice} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{\rho_{receiver}}{P_{receiver}} \left[ \left( \frac{P_{chamber}}{P_{receiver}} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P_{chamber}}{P_{receiver}} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}$$

$P_{chamber}/P_{receiver} < 0.5283$  인 경우

$$C_{Dorifice} = \sqrt{\gamma \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \frac{M_w}{RT_{receiver}}}$$

Fig 11은 핀틀 위치에 따른 추력변화를 나타낸 것이다. 핀틀이 노즐 목 쪽으로 진행함에 따라 추력이 증가하다가 감소하는 경향을 나타내는데 이것은 노즐내부 벽면에서 발생하는 압력변화에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 핀틀 위치가 36mm까지는 일정하게 유입되는 질량유량에 의하여 챔버압력이 증가하여 추력이 증가하나 36mm이후 유량제어용 오리피스에서 초킹이 일어나지 않아 질량유량이 감소하기 때문에 추력

이 감소한다. 또한 42mm~48mm의 범위에서 추력의 변화는 유동박리가 발생하기 때문이며 이러한 경향은 노즐 내부 Contour 및 핀틀 형상이 핀틀노즐 성능에 크게 영향을 미침을 의미한다.

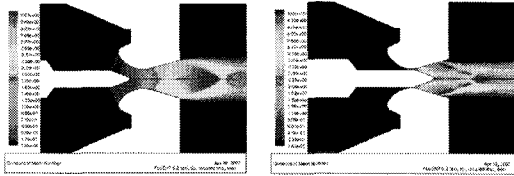


Fig. 6 Flow Pattern (Ma number)

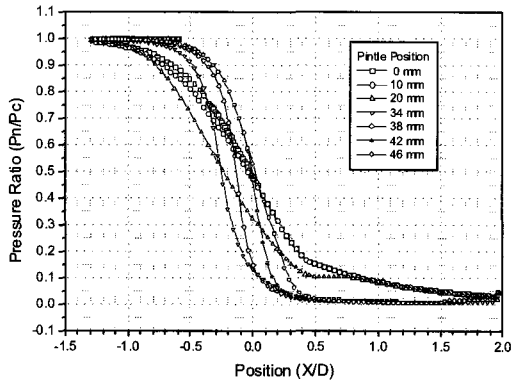


Fig. 7 Nozzle Wall Pressure-1

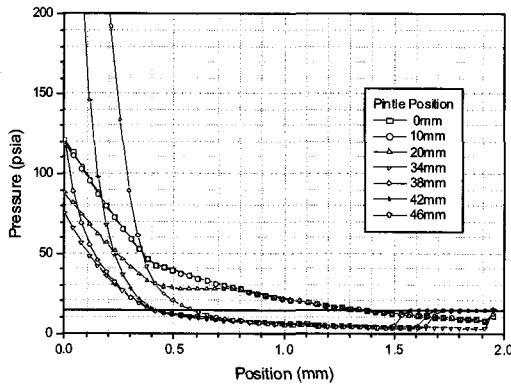


Fig. 8 Nozzle Wall Pressure-2

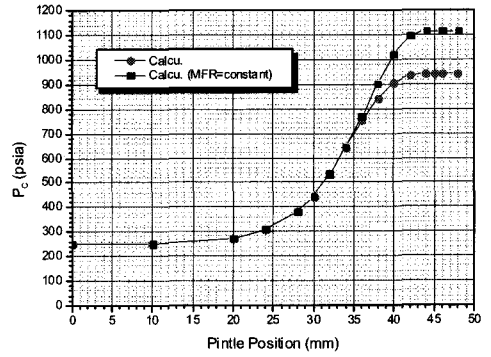


Fig. 9 Chamber Pressure by Pintle Position

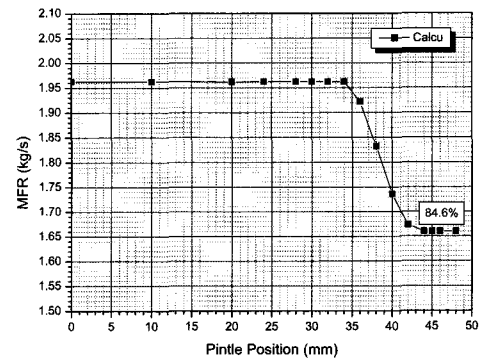


Fig. 10 Mass Flow Rate by Pintle Position

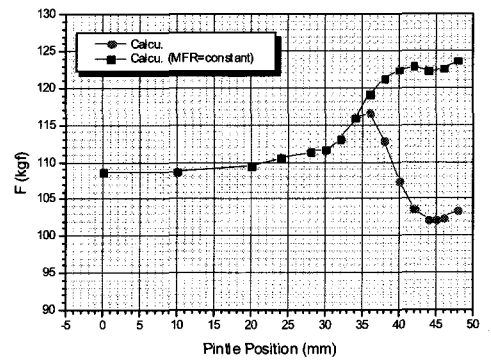


Fig. 11 Thrust by Pintle Position

### 3.2 공압 시험 결과

#### 3.2.1 노즐 목위치 및 목면적 계산

핀틀 이동에 따른 실제 노즐 목 위치와 목 면적을 판단하기 위하여 설계도면을 이용한 기하학적 분석과 공압시험 결과 핀틀 초기 위치에서 측정된 챔버압력 250 psia를 이용하여 유동해석을 수행하였다. 그리고 핀틀을 이동시키면서 질량유동율이 핀틀 초기 위치 질량유동율과 동일하게 되는 챔버압력에 대한 유동해석을 수행하여 핀틀 위치별 노즐 목 면적을 식(2)를 적용하여 구하였다. ( $\dot{m}=1.9624 \text{ kg/s}$ )

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

여기서

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

$$\gamma = 1.4, M_w = 28.97, T_C = 300^\circ\text{K}$$

Fig 12는 기하학적 방법과 유동해석으로 구한 노즐 목 면적을 보여주며 결과가 거의 일치하였다.

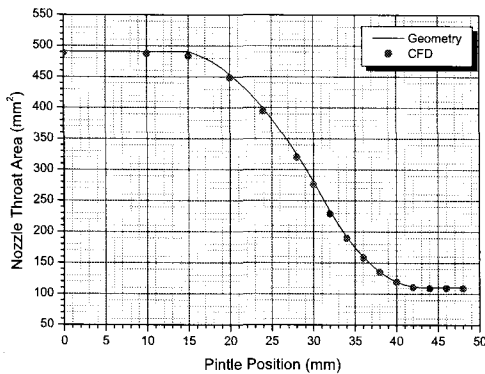


Fig. 12 Nozzle Throat Area by Pintle Position

#### 3.2.2 챔버 압력 및 추력변화

예비 시험에서 얻은 오리피스 수축계수(Orifice Vena Contractor Coefficient) 0.851과 유동해석

으로 구한 질량유동율  $\dot{m}=1.9624\text{kg/s}$ 를 이용하여 계산한  $P_{\text{receiver}}$  결과는 83.3bar absolute로 계산이 되었으며 시험에서 측정된 Receiver 압력 82.2bar gage과 거의 일치하였다.

$C_{D, \text{nozzle}}$ 은 초킹 조건인  $C_{D, \text{orifice}}$ 와 동일하기 때문에 식(1)을 이용하여  $P_{\text{chamber}}$ 를 계산하였으며 Fig 13은 챔버압력에 대한 해석 값과 시험 값을 비교한 것으로 거의 일치함을 보여준다.

Fig 14는 핀틀 위치에 따른 유동해석결과와 시험 값을 비교한 것으로 시험에서 측정된 추력 값이 이론적으로 계산된 값에 비하여 낮게 나타나나 비슷한 경향을 보여줌을 알 수 있다. 이러한 추력 크기의 차이는 공압 배관의 저항에 의해 발생된 것으로 판단되어 Fig 15와 같이 공압 배관을 고정시킨 후 교정(Calibration)을 수행하였으며 약 8Kgf의 배관저항이 있음을 확인하였다.

Fig 16은 시험에서 측정된 추력 값을 측정된 배관저항으로 보정한 결과로 핀틀이 34mm 전진할 때 까지는 측정된 추력 값에 8kgf의 값을 더한 값이 이론해석 결과와 일치하였다. 그러나 38mm 이후는 측정된 추력 값에 5kgf를 더한 값과 이론해석 결과가 일치함을 보여준다. 이러한 결과는 초기시험 시(핀틀위치:0~34mm) 고정되었던 공압 배관 호스를 36mm 이후 시험 시 배관 영향을 줄이기 위하여 느슨하게 풀어주었기 때문으로 판단된다.

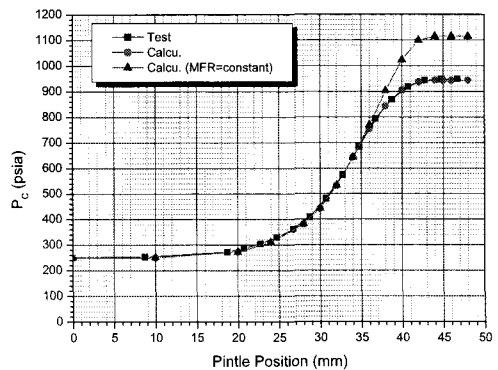


Fig. 13 Chamber Pressure Comparison

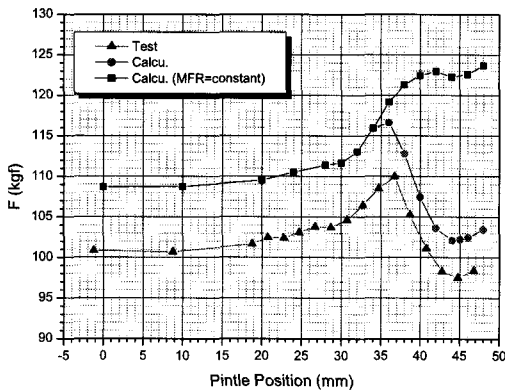


Fig. 14 Thrust Comparison

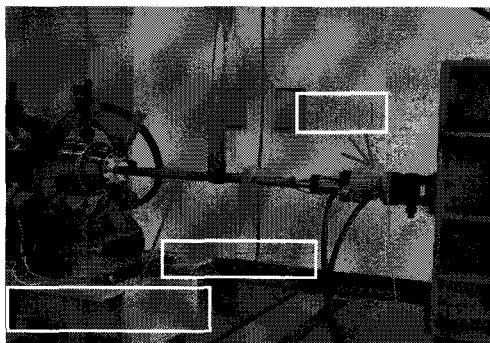


Fig. 15 Test Set for Thrust Calibration

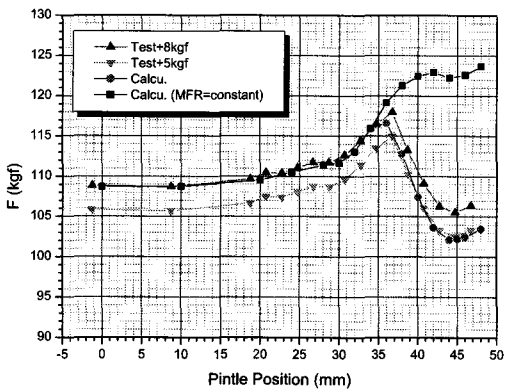


Fig. 16 Corrected Thrust by Pintle Position

#### 4. 결 론

Needle형 핀틀에 대한 공압시험 및 수치해석을 수행

하여 핀틀 위치가 추력 성능에 미치는 영향을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 핀틀 노즐의 추력 성능 및 추력 조절 범위는 핀틀 팁의 형상과 노즐의 Contour 형상에 크게 영향을 받으며 시스템 적용 시 최적 형상 설계가 요구된다.
- 2) Needle형 핀틀의 공압 시험 결과와 수치 해석 결과는 서로 일치하였다. 공압 시험에서 핀틀을 노즐 목 쪽으로 움직일 때 약 9%의 추력 상승 효과가 있었으며 본 시험 조건에서 오리피스 조건이 만족한다면 약 13%의 추력 상승이 있을 것으로 예측되었다.
- 3) 시험 결과 본 공압 시험 모델에서의 추력 변화는 약 7mm (30mm ~ 37mm) 범위 안에서 크게 나타났으며 유량 조절용 오리피스 조건이 만족된다면 약 12mm (30mm ~ 42mm) 범위 안에서 큰 추력 변화가 일어날 것으로 예측되었다.
- 4) 공압 시험 시 배관 저항의 교정은 정밀한 추력 계측을 위하여 반드시 필요하다.

#### 참 고 문 헌

1. S. Burroughs, "Status of Army Pintle Technology for Controllable Thrust Propulsion", AIAA 2001-3598
2. 이지형, 김중근, 이도형 "유입부 비대칭 노즐의 성능 연구", 추진공학회지 10권 제 2호, 2006
3. D.L. Bacchus and O.E.Hill, "Facility for Cold Flow Testing of Solid Rocket Motor Model", 1992 JANNAF Propulsion Meeting, Indianapolis, Indiana, 24-27 Feb. 1992.
4. S.B.Verma and H.K.Ciezki, "Unsteady nature of flow separation inside a thrust optimized parabolic nozzle", AIAA Paper 2003-1139, June, 2003
5. Craig A. Hunter, "Experimental Investigation of Separated Nozzle Flows" Journal of Propulsion and Power, Vol.20, No.3, May-June, 2004, 527-532