

## 論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.10.985

## 핀틀 형상이 노즐 유동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

김중근\*, 박종호\*\*, 이종훈\*\*\*, 진민경\*\*\*

## A study on the pintle-tip shapes effect of nozzle flow using cold-flow test

Joung-Keun Kim\*, Jong-Ho Park\*\*, Jong-Hoon Lee\*\*\* and Min-Kyung Jeon\*\*\*

## ABSTRACT

The objective of this work was to investigate the pintle-tip shape effect on nozzle flow and thrust by cold flow test. When nozzle throat area was decreased by pintle movement, chamber pressure was increased monotonously but thrust was increased differently according to every pintle-tip shape. At the same chamber pressure and nozzle throat area, thrust of convex pintle-tip shape was mostly larger than that of concave one. Nozzle wall pressure distribution and magnitude of pintle-tip load depended on the pintle-tip shape, pintle position and nozzle throat area.

## 초 록

노즐 목 근처에 설치된 핀틀 형상이 노즐 내부 유동과 추력에 미치는 영향을 공압 실험으로 고찰하여 제시하였다. 핀틀 이동으로 노즐 목 면적이 감소하면 연소실 압력은 부드럽게 상승하나 추력은 핀틀 형상에 따라 증가 패턴이 다르게 나타났다. 동일한 노즐 목과 연소실 압력 조건에서 추력은 전체적으로 핀틀 형상이 오목한 것 보다는 볼록한 것이 컸다. 노즐 벽면 압력과 핀틀에 작용하는 하중은 핀틀 형상은 물론 핀틀 위치 및 노즐 목 면적에 따라 큰 차이를 보였다.

**Key Words** : Pintle Nozzle(핀틀 노즐), Cold Flow Test(공압 실험), Flow Separation(유동 박리), Lip-Shock(끝단 충격파), Flow Recirculation Region(유동 재순환 영역)

## 1. 서 론

핀틀 로켓은 노즐 목 근처에 설치된 핀틀을 움직여 노즐 목 면적을 조절함으로써 연소실 압력 및 추력을 조절하는 시스템으로 Fig. 1의 구조를 갖는다[1]. 핀틀이 노즐 목에서 멀어져(Fig. 2-(a)) 노즐 목 면적이 증가하면 연소관 압력과

연소속도의 감소로 추력이 감소하고, 노즐 목 가까이 이동하여(Fig. 2-(b)) 노즐 목 면적이 감소하면 연소관 압력과 연소속도의 증가로 추력이 커진다[1]. 핀틀의 앞뒤로의 움직임에 의한 추력 크기 조절 기법은 지난 수십 년간 지속적 관심 속에 꾸준한 연구가 진행되었다.

M. J. Ostrander와 J. L. Bergmans 그리고 M. E. Thomas[2]는 실험을 통하여 동일한 노즐 목 면적 조건이라면 직경이 작은 핀틀은 직경이 큰 핀틀과 비교하여 추력이 증가함을 보였다.

Susan. L. Burroughs[3]는 수치해석을 통해 핀틀 끝단 부근에서는 주유동이 핀틀 몸체에서 박리되어 주유동 방향과 반대로 흐르는 재순환영역

† 2010년 1월 22일 접수 ~ 2010년 9월 14일 심사완료

\* 정희원, 국방과학연구소 1기술본부 6부

\*\* 정희원, 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단 교신저자, E-mail : jhpark@cnu.ac.kr

대전시 유성구 궁동 220번지

\*\*\* 충남대학교 대학원

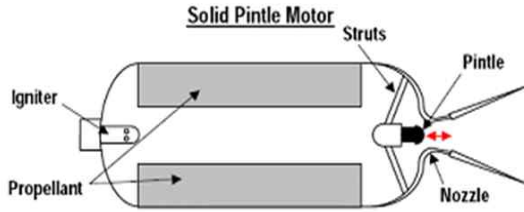


Fig. 1. 고체 핀틀 로켓 구조[1]

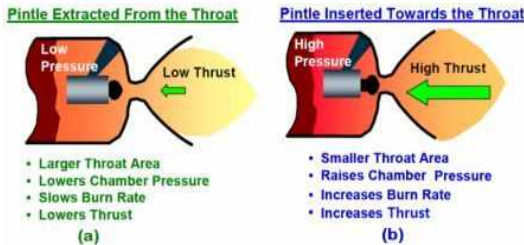


Fig. 2. 핀틀 로켓의 추력 조절 개념[1]

이 형성됨을 보였다. 그리고 유동 박리 때에 생성된 충격파가 노즐 확대부로 향하게 되는데 핀틀 직경이 크면 충격파가 노즐 벽면과 충돌하며 2차 유동 박리 현상을 일으키지만 핀틀 직경이 작은 경우에는 충격파가 노즐 하류로 가면서 강도가 약해지며 사라진다고 하였다.

S.G.Rock, S.D. Habchi 그리고 T.J. Marquette [4]는 핀틀 노즐에 대해  $k-\epsilon$  난류 모델을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 이들은 핀틀 끝단에서 유동 박리와 동반된 충격파가 형성되며 충격파는 핀틀이 노즐 목 쪽으로 이동할수록 노즐 확대부 영역에 강력한 영향을 주게 되고 노즐 확대부의 마하수 기울기 방향으로 굽는다고 하였다. 그리고 핀틀을 노즐 목 쪽으로 더 많이 이동시키면 충격파는 노즐 벽면과 충돌하지 않고 확대부 외부로 전파된다고 하였다.

Fig. 3은 핀틀 노즐에서 나타나는 대표적인 유동 특성을 나타낸 것이다. (a)지점에서 Prandtl-Mayer 팽창파가 형성되면서 급속히 팽창한 유동의 압력은 (d)지점의 기저압력(Base pressure)보다 낮아져 핀틀 몸체의 (b)지점에서 유동이 박리된다. 이때에 낮아진 압력을 보상하기 위해 (b)-(c)의 끝단 충격파(일명 Lip-shock)가 형성된다[6]. 생성된 끝단 충격파는 (c)지점에서 노즐 벽면과 충돌하고 경계층과 상호작용으로 유동박리를 유발시키면서 노즐 중심으로 다시 반사된다. 그리고 (d)지점의 핀틀 끝부분에서는 유동이 재순환되는 영역(Recirculation)이 존재하게 되는데

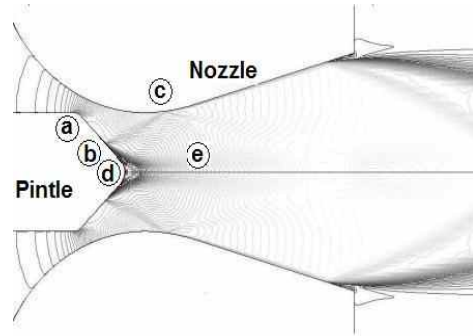


Fig. 3. 핀틀 추진기관 유동장 특성

이를 Base Pressure Region(BPR)이라고 한다. 또한 (e)지점에서는 초음속 유동의 방향이 노즐 중심축과 평행하게 되도록 바뀌면서 나타나는 충격파(일명 Trailing shock)가 형성된다. Fig. 2와 같이 핀틀 주변에 나타나는 복잡한 유동장 패턴은 핀틀 추진기관의 성능에 그대로 영향을 주게 된다[5].

지금까지의 연구는 핀틀 크기에 대한 것이 대부분으로 핀틀 형상이 미치는 효과에 대해서는 거의 연구가 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 직경이 초기 노즐 목 면적 보다 작은 핀틀 끝단의 형상이 노즐 내부 유동장과 추력에 미치는 영향을 공압 실험으로 확인하여 제시하였다.

## II. 본 론

### 2.1 실험 장치

실험 장치는 Fig. 4와 같이 공기 압축기를 사용하여  $1.3m^3/min$ 의 유속으로  $10m^3$  크기의 압력저장소(BT101, BT102) 2곳에 최대 320bar까지 공기를 충전한 후 유량 밸브(SV 101~108)를 이용하여  $1m^3$  크기의 리시버(RE101)에 원하는 실험

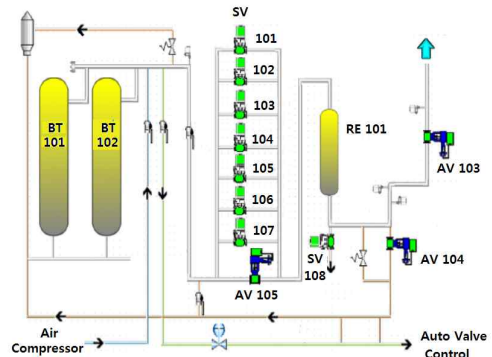


Fig. 4. 공압 장치 제어 구성도

압력이 되도록 충전한다. 실험 동안에 낮아지는 리시버 압력은 컴퓨터로 유량 밸브를 제어하여 저장소의 공기를 흘려 넣음으로 리시버는 일정한 압력을 유지하게 된다. 그리고 실험 동안에 과도한 압력 상승이 발생할 경우 압력을 제거할 수 있는 안전밸브(SV108)를 설치하였다.

### 2.2 핀틀 형상 및 노즐 목 면적 계산

실험에 적용된 핀틀 형상은 Fig. 5와 같이 핀틀 직경과 길이는 모두 같으며 핀틀 끝단의 형상은 서로 다른 총 6가지로 하였다.

핀틀이 초기 노즐 목에서 멀리 떨어져 있으면 초기에 설계된 노즐 목 위치로 변함이 없어 노즐 목은 원이며 면적은 간단히 계산된다. 그러나 핀틀이 노즐 목 쪽으로 이동하여 핀틀 몸체와 노즐 벽면에 새로운 노즐 목이 형성되면 노즐 목 형상은 원이 아닌 환 모양을 하게 된다. 환 모양의 노즐 목 면적을 계산하기 위한 모델은 Fig. 6과 같으며 최소 노즐 목 면적은 식(1)과 같이 구한다.

$$\text{minimize} : S_{AB} = [\pi(\overline{AC^2} - \overline{BC^2})] \quad (1)$$

subject to

$$xn_2 \leq xc \leq xn_1, \quad yn_2 \leq yc \leq yn_1$$

$$xp_2 \leq xt \leq xp_1, \quad yp_2 \leq yt \leq yp_1$$

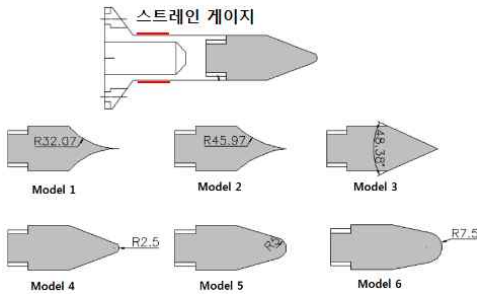


Fig. 5. 실험에 적용된 핀틀 형상

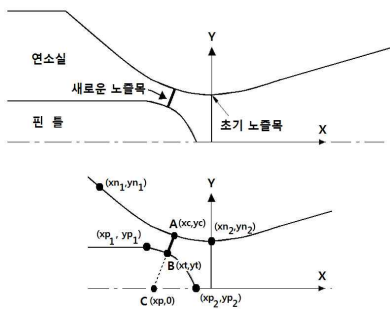


Fig. 6. 노즐 목 면적 계산 모델

제작된 노즐과 핀틀 형상은 3차원 측정을 통하여 원하는 공차에 있음을 확인하였다.

### 2.3 계측항목 및 방법

계측항목은 저장소, 리시버, 오리피스 전단, 연소실 및 노즐 벽면의 압력, 스트레인 게이지 그리고 추력이다. 저장소, 리시버, 오리피스 전단 압력은 실험 조건을 확인하기 위함이며 연소실 압력은 유동해석으로 정체압력이 예상되는 곳에 설치하였다.

핀틀 움직임에 따른 노즐 벽면의 유동박리(Flow separation) 위치를 확인하기 위해 노즐 벽면에 총 14개의 압력 센서를 0°, 180°에는 4곳에, 90°, 270°에는 0°, 180°의 센서 중앙에 Fig. 7과 같이 탭(Tap)을 이용하여 설치하였다. 설치 위치는 1차원 이론 해석으로 핀틀 움직임으로 유동 박리가 예상되는 지점으로 하였으며 독일 Keller사의 피에조 형식의 센서를 사용하였다.

핀틀에 작용하는 압력을 간접적으로 측정하기 위해 핀틀 측에 스트레인 게이지를 Fig. 5와 같이 설치하였다. 설치 후 인장-압축 실험을 수행하여 계측 정확도 및 재현성을 확인하였다.

핀틀 움직임에 의한 추력 변화를 측정하기 위하여 로드셀(Loadcell)을 연소실 전방에 설치하였다. 로드셀에는 추력 이외의 힘이 계측에 미치는 영향을 최소로 하기 위해 플렉서를 장착하였다.

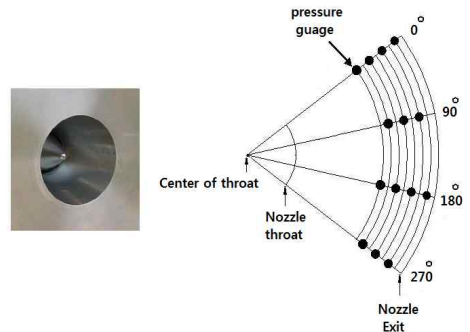


Fig. 7. 노즐 벽면에 설치된 압력 센서 배치

### 2.4 핀틀 이동에 의한 노즐 목 면적 변화

공기는 오리피스 질식(Choking) 조건을 적용하여 일정한 유량이 흐르도록 하였다. 오리피스 크기는 사전에 유동해석을 통하여 모든 실험에서 오리피스 질식이 깨지지 않는 조건으로 결정하였다. 공압 실험이 수행된 핀틀 위치와 이때의 초기 노즐 목 면적에 대한 새로운 노즐 목 면적 비율 변화를 Fig. 8에 정리하였다.

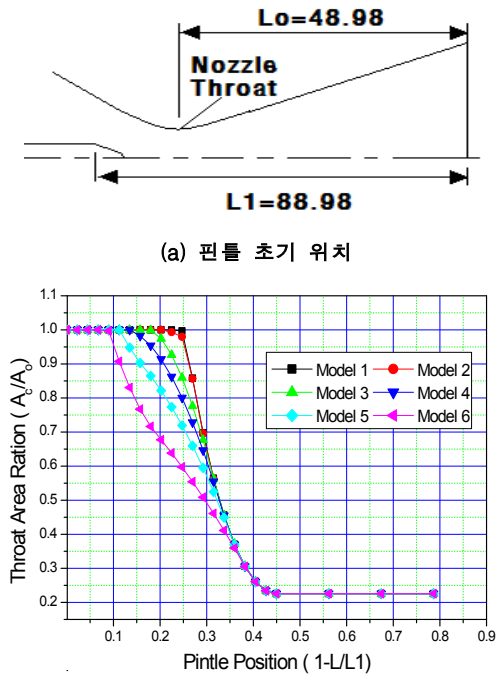


Fig. 8. 핀틀 이동에 따른 노즐 목 면적 변화 (초기 노즐 목 면적 =  $490.88 \text{ cm}^2$ )

2.5 실험 결과

계측 시간은 총 15초로 하였으며 측정값들은 약 10초 정도의 정상상태(Steady state)를 유지하였다. 실험은 동일한 조건에서 2회 수행하였다. 저장소, 리시버, 오리피스 전단, 연소실 압력 그리고 스트레인 게이지 측정값의 차이는 대략  $\pm 0.5\%$  내외로 나타났는데, 이것은 시험 도중에 압력이 떨어지는 리시버의 압력 보상 차이에 의한 것으로 판단된다. 그리고 추력은 약 1% 정도 차이를 보였는데 주된 원인은 연소실 압력 차이와 배관 저항이 중첩(Superposition)되어 나타난 것으로 추정된다. 전체적으로 핀틀 형상 및 위치에 따른 계측 결과의 경향성은 크게 변하지 않았기 때문에 2번의 실험에서 얻은 계측에 평균을 취하고 핀틀 형상 모델 4의 계측값으로 정규화하여 상대적인 분석을 진행하였다.

(1) 노즐 목 면적에 따른 연소실 압력 변화

Fig. 9는 노즐 목 면적 변화에 따른 연소실 압력 변화를 나타낸 것으로, 핀틀 형상에 무관하게 노즐 목 면적 변화에 대해서 연소실 압력 변화는 거의 같은 경향성을 보였다. 이론적으로 계산된 연소실 압력과 실제 압력이 약간의 차이가 있었는데 이것은 기하학적 노즐 목 위치와 공기 역학

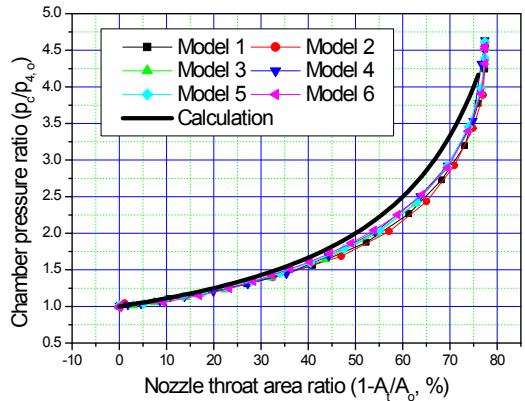


Fig. 9. 노즐 목 면적 변화에 따른 연소실 압력 변화

적 노즐 목 위치가 약간 차이가 나기 때문이다 [1]. 전체적으로 핀틀 노즐에서 기하학적 노즐 목 면적을 알면 핀틀 이동에 따른 연소실 압력 변화는 신뢰도 있게 예측 할 수 있다고 판단된다.

(2) 노즐 목 면적에 따른 추력 변화

Fig. 10은 노즐 목 면적 변화에 대한 추력 변화를 나타낸 것이다. 추력은 노즐 목 면적 변화에 대해서 압력 변화에서와 같이 부드럽게 변하지 않고 핀틀 형상에 따라서 매우 다른 양상을 보였다. 전체적으로 오목한 핀틀 형상(모델 1&2)에서 볼록한 형상(모델 5&6)으로 갈수록 동일한 노즐 목 면적과 연소실 압력에서 추력이 크게 나타났다.  $A_t/A_0=0.22$ 가 되는 부분에서 추력 크기가 핀틀 형상에 무관하게 비슷한 크기를 갖는 것은 모든 핀틀의 경사면이 완전히 초기 노즐 목 부분을 지나 평평한 부분이 초기 노즐 목 부분에 위치하기 때문이다. 마찬가지로 노즐 목 면적비가 1.0인 곳은 핀틀 이동으로 노즐 목 면적이 감

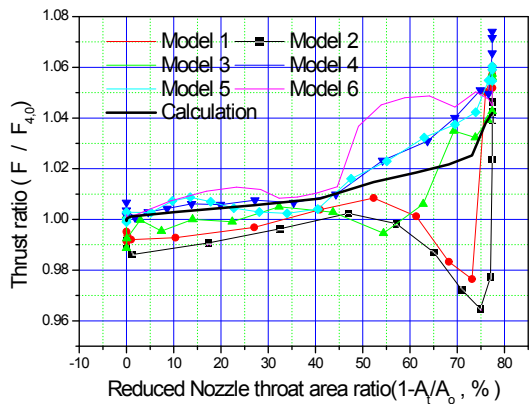


Fig. 10. 노즐 목 면적 변화에 따른 추력 변화

소하지 않아 초기 노즐 목 면적을 가지므로 핀틀 형상과 무관하게 비슷한 추력 크기를 갖는다. 1차원 이론식으로 구한 추력과 실제 추력은 차이가 있었으며 차이는 핀틀 이동으로 노즐 목 면적이 감소할수록 크게 나타났다. 이것은 핀틀 형상이 추력에 미치는 영향은 핀틀이 노즐 목 부근으로 가깝게 이동할수록( $A_t/A_o < 0.5$ ) 크게 나타남을 의미한다. 이유는 핀틀 경사면에 새로운 노즐 목이 형성되면서 노즐 목을 지난 2차원 유동이 노즐 대칭축에서 다시 만나 일부는 재순환 영역으로 흐르고 일부는 노즐 중심축과 평행하게 흐르면서 강력한 항적 충격파를 만들어 노즐 내부 유동장에 큰 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다.

**(3) 노즐 목 면적에 따른 핀틀 하중 변화**

Fig. 11은 노즐 목 면적 변화에 대한 핀틀 하중 변화를 나타낸 것으로 핀틀이 초기 노즐 목에서 멀리,  $A_t/A_o = 1.0$  있으면 핀틀이 연소실 정체압력 구간에 존재하므로 핀틀에 작용하는 하중은 핀틀 형상과 무관하게 모두 같은 값을 가진다.

그러나 핀틀이 노즐 목으로 이동하면 동일한 노즐 목 면적이라도 핀틀 형상에 따라 팽창 패턴이 달라지기 때문에 등엔트로피 관계로 구한 핀틀 몸체의 압력 분포가 달라진다. 이에 따라 유동이 핀틀 몸체에서 박리되는 위치가 달라지며 이로 인해 재순환 영역의 면적과 압력 크기가 달라져 핀틀에 작용하는 하중은 상당히 다르게 된다.

그리고 핀틀이 초기 노즐 목을 완전히 지나면 ( $A_t/A_o = 0.22$ ) 노즐 팽창비가 커져 노즐 내부 유동의 압력이 감소하므로 핀틀 형상에 관계없이

약간의 차이는 있으나 핀틀 하중은 모두 작은 값을 가진다.

$A_t/A_o = 0.37$ 을 기준으로 볼 때 핀틀 형상이 핀틀 하중에 미치는 영향은 정반대가 되었다. 핀틀 형상이 오목한 모델 1과 2의 경우, 노즐 목 면적이 적게 감소되면 유동이 핀틀 몸체에서 박리되지 않고 핀틀 몸체를 따라 흐르면서 비교적 높은 압력을 유지하여 큰 핀틀 하중을 나타낸 것으로 보인다. 그러나 형상이 볼록한 모델 5와 6은 적은 노즐 목 면적 조절에서도 유동이 박리되면서 낮은 압력을 가지는 재순환 영역이 크게 형성되면서 핀틀 하중이 감소하는 것으로 판단된다. 그러나 노즐목이 더욱 크게 감소하면 정상적인 팽창에 의한 압력보다 재순환 영역의 압력이 크게 되어 핀틀 하중 크기가 반전되는 것으로 판단된다. 그리고 그림 11의 핀틀 하중의 변화 패턴과 그림 10의 추력 변화 패턴이 핀틀 형상마다 유사한 것으로 판단되며 핀틀 이동에 따른 추력 변화에 핀틀 하중이 크게 관련됨을 확인할 수 있다.

**(4) 노즐 목 면적에 따른 벽면 압력 변화**

Fig. 12-17은 핀틀 형상에 따른 노즐 벽면 압력을 대기압으로 정규화하여 나타낸 것으로 핀틀 형상에 따라 동일한 노즐 팽창비라 할지라도 노즐 벽면 압력 분포가 서로 달라짐을 보여준다.

일례로 모델 1은 노즐 목 면적비  $A_t/A_o > 0.25$ 까지는 등엔트로피 관계를 따라 노즐 벽면 압력이 변화였다. 그러나  $A_t/A_o = 0.23$ 에서는 유동이 노즐 벽면에서 박리되고 다시 노즐 벽면에 붙는 것으로 보아 핀틀 몸체의 박리 과정에서 발생하는 충격파가 충돌하는 것으로 관찰되었다. 그리고  $A_t/A_o < 0.23$ 이면 노즐 벽면에서 유동이 박리된 후 다시 노즐 벽면에 붙지 않고 완전히 대기압에 노출되는 것으로 관찰되었다. 모델 6은  $A_t/A_o > 0.55$ 까지는 등엔트로피 유동으로 팽창하다가  $A_t/A_o \approx 0.51 \sim 0.46$  사이에서는 핀틀 몸체의 박리 과정에서 발생하는 충격파가 충돌하는 것으로 보이며  $A_t/A_o < 0.46$  구간에서는 벽면에서 유동의 박리점이 노즐 확대부에서 노즐 목 쪽으로 이동하면서 대기압으로 근접하는 특성을 보였다.

추력은 연소실 및 노즐 벽면압력을 적분하여 얻을 수 있다. 따라서 노즐 벽면 압력이 대기압보다 낮으면 추력에 대한 저항으로 작용하여 추력이 감소하게 된다. 따라서 노즐 확대부 벽면에

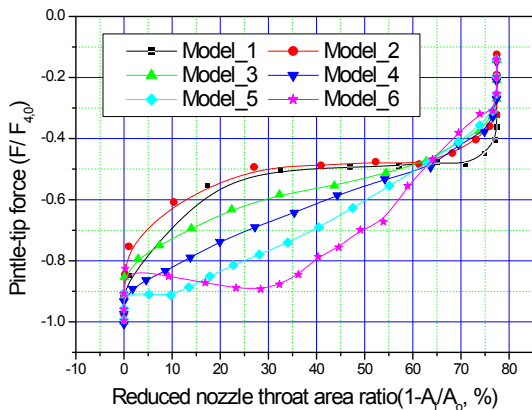


Fig. 11. 노즐 목 면적 변화에 따른 핀틀 하중 변화

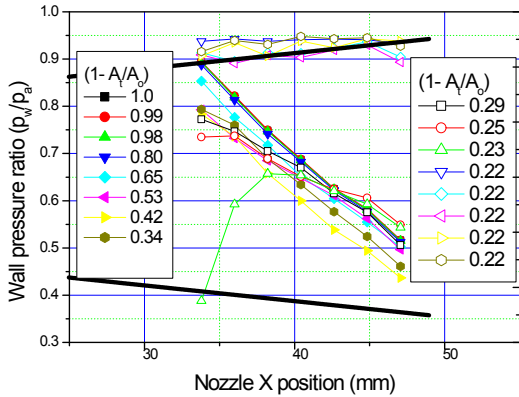


Fig. 12. 노즐 벽면 압력 분포(형상 모델 1)

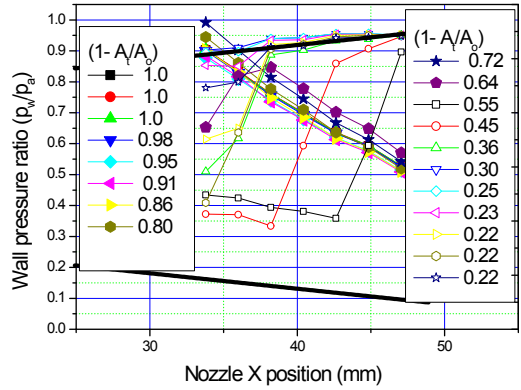


Fig. 15. 노즐 벽면 압력 분포(형상 모델 4)

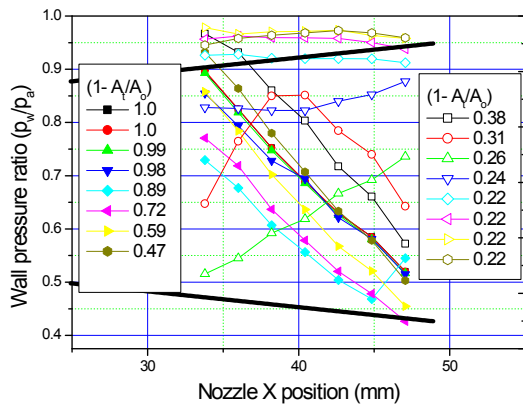


Fig. 13. 노즐 벽면 압력 분포(형상 모델 2)

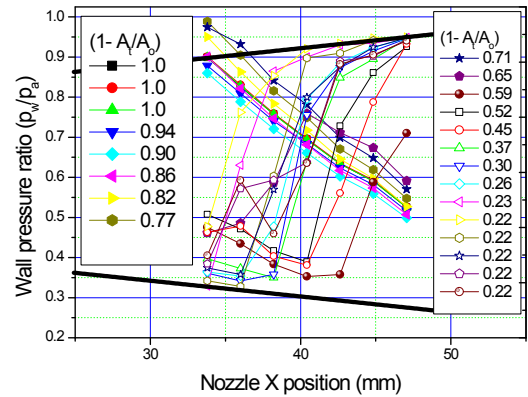


Fig. 16. 노즐 벽면 압력 분포(형상 모델 5)

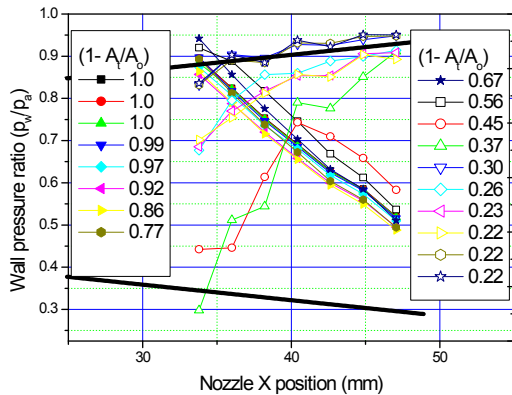


Fig. 14. 노즐 벽면 압력 분포(형상 모델 3)

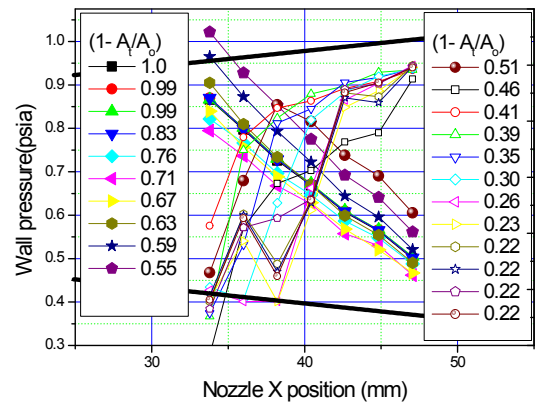


Fig. 17. 노즐 벽면 압력 분포(형상 모델 6)

서 유동이 박리되어 대기압과 같아지면 유동 박리가 일어나지 않는 노즐보다 이론적으로 추력이 증가하여야 하지만 실험에서는 오히려 추력이 감소하였다. 이것은 연소실 내부 유동이 충분히 팽

창하지 못함에 따른 모멘텀 추력의 감소에 기인한다. 위와 같은 이유로 동일한 노즐 목 면적에서 모델 6의 핀틀 형상이 모델 1의 핀틀 형상보다 큰 추력을 가지게 된다.

### III. 결 론

공압 실험을 통하여 노즐 목 근처에 설치된 핀틀의 형상이 유동장 및 추력 성능에 미치는 영향을 파악하여 다음의 결과를 얻었다.

- 핀틀 이동으로 노즐 목 면적이 감소하면 연소실 압력은 핀틀 형상과 무관하게 부드럽게 단순 증가하지만 추력은 많은 변곡점을 가지며, 증가 패턴은 핀틀 형상에 큰 영향을 받는다.

- 핀틀 이동에 따른 연소실 압력 증감은 핀틀과 노즐 벽면의 기하학적 최소 단면적을 구하면 이론적으로 잘 예측 할 수 있다.

- 동일한 노즐 목 면적에서는 오목한 핀틀 형상에서 볼록한 핀틀 형상으로 갈수록 전체적인 추력은 증가한다.

- 핀틀 하류에서 생기는 재순환 영역과 압력에 의해 나타나는 핀틀 하중의 크기는 핀틀 형상은 물론 핀틀 위치, 즉 노즐 목 면적에 따라 다른 패턴을 보인다.

- 핀틀 몸체에서 유동이 박리되면서 방출되는 충격파가 노즐 벽면에 충돌하며 충돌 위치 및 강도는 핀틀 형상에 영향을 받는다.

### 참고문헌

- 1) John Napior and Victoria Garmy, "Controllable Solid Propulsion For Launch Vehicle And Spacecraft Application", AIAA 2006-905, 2006.
- 2) M.J. Ostrander, J.L. Mergmans and M.E. Thomas, "Pintle Motor Challenges for Tactical Missiles", AIAA-2000-3310, 2000.
- 3) Susan L. Burroughs, "Status of Army Pintle Technology for Controllable Thrust Propulsion", AIAA-2001-3598, 2001.
- 4) S.G. Rock and S.D.Habchi, "Numerical simulation of controllable propulsion for advanced escape systems", AIAA-97-2254, 1997.
- 5) 김종근, 박종호, "핀틀 형상이 추력 크기에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구", 항공우주학회지, 제37권, 제5호, 2009. 5, pp. 476-482.
- 6) Geroge P. Sutton, "Rocket Propulsion Element, An introduction to the Engineering of Rockets", Sixth Edition, A Wiley-interscience publication, 1992.