

# 핀틀 형상 및 위치에 따른 추력 성능

김중근\* · 이지형\*\* · 장홍빈\*\*\*

## Thrust performance at the various pintle shapes and positions

Joungkeun Kim\* · Jihyung Lee\*\* · Hongbeen Jang\*\*\*

### ABSTRACT

The effect of pintle shapes and position to the thrust performance of Solid Rocket Motor was studied by experimental-aided Computational Fluid Dynamic(CFD). Among the turbulent models for RANS in Fluent, Spalart-Allmaras model was better agreement with the nozzle wall pressure distribution attained by cold-flow test than other models. When nozzle throat area was decreased, magnitude of thrust was increased. The bigger pintle size was, the more thrust of pintle tip pressure was obtained. Meanwhile the more thrust of nozzle and chamber pressure decreased. Hence, total thrust of big pintle was less than a small pintle under same throat area condition.

### 초 록

핀틀 형상과 위치가 고체 추진기관의 추력 성능에 미치는 영향을 공압 시험과 수치해석 기법으로 평가하였다. Fluent 해석 결과, Spalart-Allmaras 모델이 공압 시험에 얻은 노즐벽면 압력을 잘 모사하는 것으로 나타났다. 핀틀로 노즐목 크기를 감소시키면 추력은 증가하였으며, 핀틀 직경이 커질수록 핀틀 팁에 나타나는 재순환 영역의 압력에 의한 추력은 증가하지만 노즐 및 연소실 압력에 의한 추력은 감소하여 총 추력은 핀틀 직경이 작은 것 보다 감소하였다.

Key Words: 난류모델(Turbulent Modle), 공압 시험(Cold flow test), 추력성능(Thrust performance)  
핀틀 추진기관(Pintle-Type Rocket Motor)

### 1. 서 론

연소관 내부에 핀틀이 장착된 로켓 추진기관(이후 핀틀 추진기관이라 함)은 구동기(Actuator)로 핀틀을 움직여 처음에 설계된 노즐목 면적을 변경시켜 고체 추진기관의 추력을 액체 추진기관과 같이 실시간 자유자재로 조절할 수 있는 첨단 추진기관이다.

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

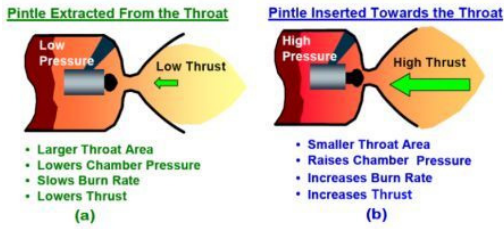


Fig. 1 핀틀 추진기관의 추력 조절 개념[1]

핀틀이 노즐목에서 멀어지면(Fig. 1-(a)) 노즐목 면적이 증가하지만 연소관 압력과 연소속도의 감소로 질량 유량율(Mass flow rate)이 감소하게 되어 추력이 작아지게 된다. 반대로 핀틀이 노즐목 가까이 이동하여(Fig. 1-(b)) 노즐목 면적이 감소하면 연소관 압력과 연소속도의 증가로 질량 유량율이 증가하므로 추력이 커지게 된다.

고체 추진기관의 추력은 연소실 압력, 노즐 팽창비, 노즐의 팽창각은 물론 노즐내유동장의 충격과 특성에 영향을 받게 된다. 지금까지 핀틀과 같은 방해물이 존재하지 않는 노즐의 유동장 해석과 과팽창(Over-expanded Nozzle)노즐의 유동박리에 대한 연구는 많이 수행되었으며 유동박리에 따른 노즐 벽면 압력 변화를 예측하기 위한 다양한 기준들이 제시되어 왔으나 핀틀 추진기관에 대한 연구는 아직까지 미미한 수준이다

본 논문에서는 핀틀 위치와 핀틀 형상이 노즐 내부 유동장에 영향을 주어 나타나는 추력 성능을 공압 시험과 수치기법으로 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 난류 모델 결정

해석조건은 Coupled-Axisymmetric-Implicit 정상태로, 이산화(Discretization)는 2차 상류 도식 방법(Second-order upwind scheme)을 적용하였다. 입구조건은 공압 시험에서 얻은 연소관 내부 압력을 적용하였으며 출구조건은 충분히 넓은 영역에 대기조건(Far field condition)으로 적용하였다. 해석에 적용된 격자는 Fig. 2와 같다. 그리고 공압 시험에서 얻은 실험 결과와 수치해석으로 구한 결과를 표. 1에 정리하였다. 전체적으로 거의 모든 시험 조건에서 Spalart-Allmaras 난류 모델의 예측 성능이 가장 우수한 것으로 나타났

다[2]. 이후 해석은 Spalart -Allmaras 모델로 수행하였다.

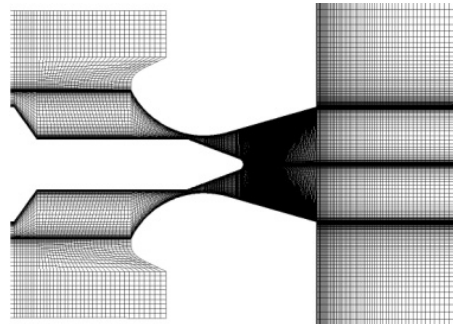


Fig. 2 영역에 적용된 격자 구성

Table 1. 핀틀 위치별 유동 박리점 비교

조건	핀틀 위치(mm)	0	34	38	42	46
	압력비 ( $p_c/p_a$ )		17.0	39.1	54.9	64.2
팽창비 ( $A_c/A_t$ )		4.0	11.2	15.6	17.7	17.7
유동박리점	공압 시험( $l_{sp}/l_o$ )	-	0.86	0.67	0.68	0.72
	Spalart-Allmaras	0.98	0.87	0.67	0.71	0.72
	표준 $k-\epsilon$	0.98	0.97	0.80	0.85	0.72
	RNG $k-\epsilon$	0.98	0.94	0.76	0.74	0.75
	Realizable $k-\epsilon$	0.98	0.94	0.75	0.98	0.85
	표준 $k-w$	0.98	0.98	0.84	0.90	0.75
SST $k-w$	0.98	0.98	0.74	0.88	0.75	

### 2.2 적용 핀틀 형상

해석에 적용된 핀틀 형상은 Fig. 2와 같이 5가지로 선택되었다. 핀틀 형상은 초기에 설계된 노즐목 보다 핀틀 직경(Diameter)이 큰 것(비관통형)과 작은 것(관통형)으로 크게 구분된다.

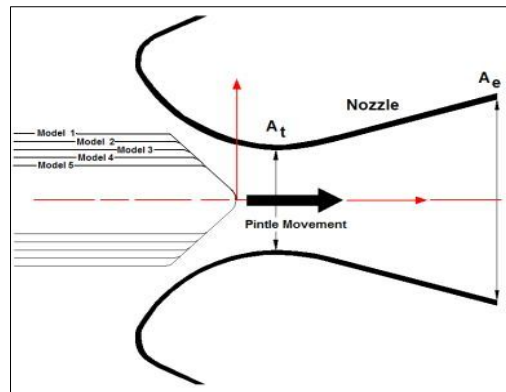


Fig. 3 해석에 적용된 핀틀 형상 모델

핀틀 이동에 따른 노즐목 면적 감소율은 Fig 3과 같다. 비관통형은 핀틀을 조금만 움직여도 노즐목 면적이 급격히 감소하며 완전히 노즐목을 막을 수 있으나, 관통형은 핀틀 이동에 따른 노즐목 면적 감소가 완만하고 일정한 노즐목 면적으로 수렴하게 된다.

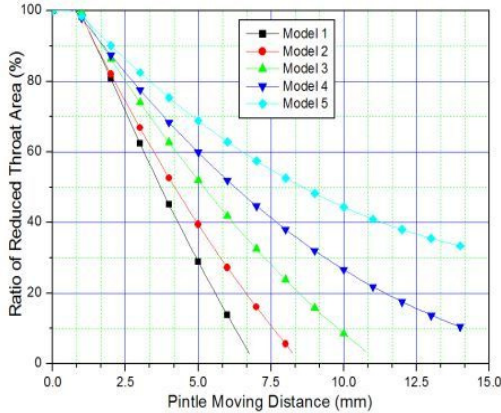


Fig. 4 핀틀 이동에 따른 노즐목 면적 감소율

### 2.3 해석 조건

핀틀 이동에 따른 연소실 압력 변화는 식(1)과 같이 고체 추진제 압력지수(n)에 따른 효과를 고려하여 적용하였으며 계산된 압력은 표 2에 정리하였다[3].

$$p_c = \left[ \frac{A_b a \rho C^*}{A_t g} \right]^{\frac{1}{(1-n)}} \quad (1)$$

Table. 2 해석에 적용된 연소관 압력

노즐목 면적 감소	압력 지수 (n)				
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0 %	89.7	89.7	89.7	89.7	89.7
10 %	107.3	112.3	121.3	141.7	229.8
30 %	167.8	197.6	261.0	460.9	2669.8
50 %	314.7	439.0	770.7	2414.7	76814
70 %	848.0	1536.	4164.	30878.	12747

( \* 대각선 부분 압력에 대한 수치해석은 수행하지 않았음.)

### 2.4 해석 결과

추력은 압력적분으로 구하였으며 크게 4가지 영역으로 나누어 분석하였다.

- (1) 핀틀 팁 압력에 의한 추력 ( A 영역 )
- (2) 노즐 유입부 압력에 의한 추력 ( B 영역 )

- (3) 노즐 팽창부 압력에 의한 추력 ( C 영역 )
- (4) 연소관 압력에 의한 추력 ( D 영역 )

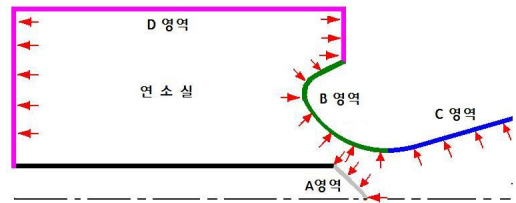


Fig. 5 추력 방향의 압력 적분 영역

#### 1) 핀틀 팁 압력에 의한 추력

Figure 5의 A 영역에 의한 추력은 Fig. 6과 같이 핀틀 직경이 클수록 추력이 증가하는 경향이 나타났다. 이것은 핀틀 직경이 클수록 핀틀 몸체에 작용하는 전체적인 압력 크기와 압력이 작용하는 영역의 면적이 증가하기 때문이다.

핀틀 후류 영역 A의 압력이 낮아지는 것은 유동이 박리되면서 생성되는 혼합층(Mixing layer)의 유동중에서 분리선(Dividing streamline) 아래에 있는 유체가 "Base Pressure Region" 영역으로 유입되고 일정한 속도로 재순환되기 때문이다[4].

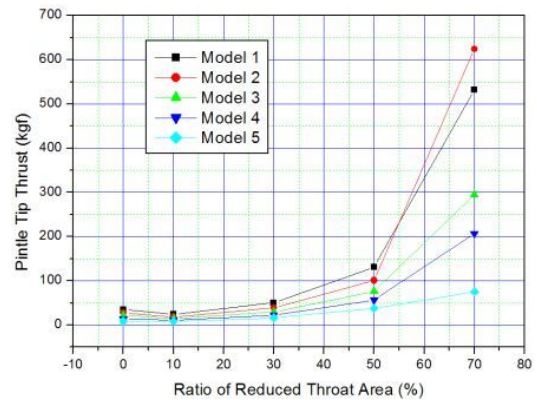


Fig. 6 핀틀 팁 압력에 의한 추력(n=0.7 경우)

#### 2) 노즐 유입부 압력에 의한 추력

Figure 7은 B 영역에 의한 추력을 나타낸 것으로 핀틀 직경이 클수록 추력이 증가하는 경향이 나타났다. 비관통형 핀틀은 새로운 노즐목 위치가 관통형 보다 훨씬 상류에 위치하므로 유입부에서 유동이 팽창하면서 속도가 빨라져 벽면 압력은 감소하게 된다. 반대로 관통형은 핀틀이

이동하여도 새로운 노즐목 위치가 거의 초기 노즐목 위치 근처에 위치하여 유입부 벽면에 작용하는 압력은 거의 연소실 정체압력과 같게 된다. 따라서 핀틀 직경이 클수록 노즐 유입부 압력에 의한 추력은 증가하게 된다.

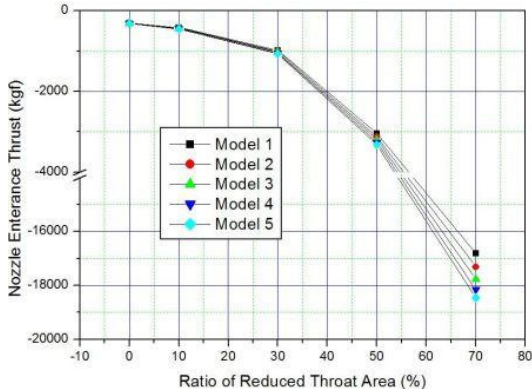


Fig. 7 노즐 유입부 압력에 의한 추력(n=0.7 경우)

### 3) 노즐 팽창부 압력에 의한 추력

Figure 8은 C 영역에 의한 추력을 나타낸 것으로 핀틀 직경이 클수록 전체적으로 추력이 감소하는 경향이 나타났으나 핀틀 형상에 영향이 매우 민감하게 나타났다.

비관통형 핀틀은 노즐 유입부에서 팽창된 유동이 노즐 팽창부에서 더욱 팽창하면서 속도가 빨라져 노즐 벽면에 작용하는 압력이 급속히 감소하여 전체적인 추력은 감소하였다.

그리고 핀틀 형상에 따라 핀틀 팁에서 발생된 Lip Shock[5]이 노즐 확대부에 미치는 영향을 달라져 추력 크기의 영향을 주었다.

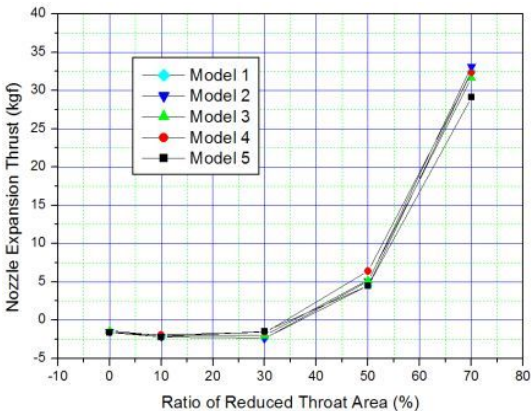


Fig. 8 노즐 팽창부 압력에 의한 추력(n=0.7 경우)

### 4) 연소관 압력에 의한 추력

Figure 9는 D 영역에 의한 추력을 나타낸 것으로 핀틀 직경이 클수록 연소관 전방 압력에 이 작용하는 면적이 감소하므로 추력은 감소하게 된다.

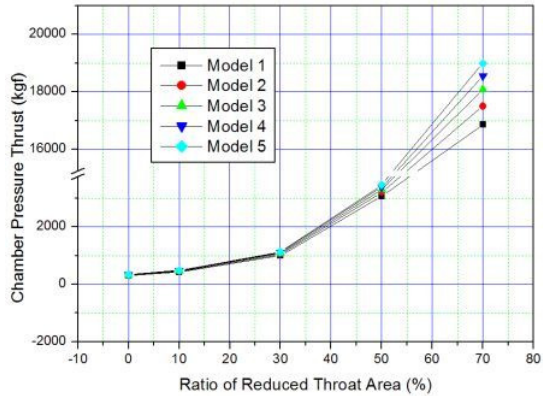


Fig. 9 노즐 팽창부 압력에 의한 추력(n=0.7 경우)

### 5) 전체 추력 및 비추력

압력지수 0.7을 적용하여 구한 각각의 추력을 모두 합하여 얻은 총 추력을 Fig. 10에 나타내었다.

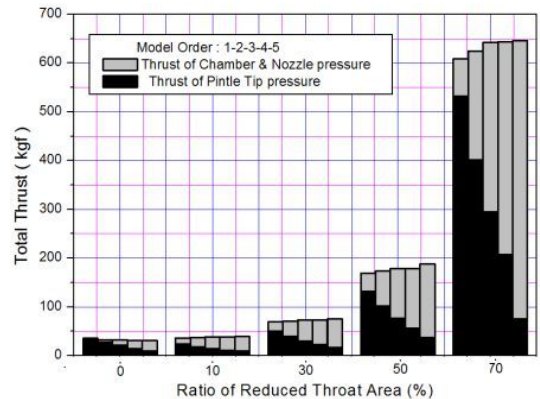


Fig. 10 핀틀 형상에 따른 추력 구성(n=0.7 경우)

관통형은 핀틀이 노즐목 쪽으로 접근하여 노즐목 크기가 작아지면 핀틀 팁의 압력에 의한 추력은 비관통형과 비교하여 크게 감소하지만 노즐벽면 압력과 연소실 압력에 의한 추력은 오히려 증가하여 전체적인 추력은 비관통형보다 관통형이 더 크게 나타났다.

### 6) 추력에 대한 압력지수 영향

Figure 11은 노즐목 면적 변화에 의한 추력 변화에 추진제의 압력지수가 미치는 영향을 나타낸 것으로, 압력지수가 클수록 노즐목 면적으로 조금만 조절하여도 큰 추력 변화를 얻을 수 있다.

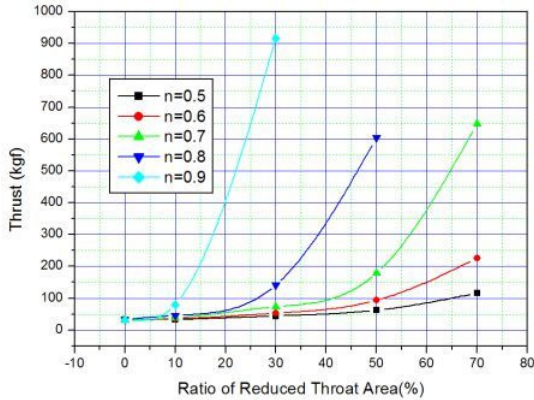


Fig. 11 압력지수가 추력성능에 미치는 영향

### 3. 결 론

공압 시험과 수치 해석을 통하여 핀틀 형상과 유치가 추력 성능에 주는 효과를 해석하여 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 고체 추진제의 압력지수가 크면 동일한 노즐 목 면적 조절로 큰 추력 변화를 얻을 수 있다.
- 2) 핀틀 팁에 작용하는 압력과 면적이 증가하기 때문에 핀틀 팁의 압력에 의한 추력은 핀틀 직경이 클수록 증가한다.
- 3) 핀틀 직경이 크면 노즐 유입부 상단에 노즐 목이 형성되어 노즐 유입부 벽면 압력이 감소하기 때문에 노즐 유입부 압력에 의한 추

력은 핀틀 직경이 클수록 증가하였다.

- 4) 노즐 유입부에서 팽창된 유동이 노즐 확대부에서 더욱 팽창하여 노즐 확대부 벽면에 작용하는 압력이 감소하기 때문에 노즐 확대부 압력에 의한 추력은 핀틀 직경이 클수록 감소하였다. 이곳의 추력은 핀틀 팁에서 생성된 Lip Shock에 큰 영향을 받는다.
- 5) 핀틀 추진기관의 추력은 동일한 노즐목 면적에 대해서 핀틀 직경이 작을수록 증가한다.

### 참 고 문 헌

1. John Napier and Victoria Garmy, "Controllable Solid Propulsion For Launch Vehicle And Spacecraft Application", AIAA 2006-905, 2006
2. 김중근, 이지형, 장홍빈, "핀틀 공압 시험 결과 보고 ", 국방과학연구소, ADDR-421-080682, 2008
3. George P. Sutton, Rocket Propulsion Element : An introduction to the engineering of Rockets, John Wiley & Sons, Inc., 1992
4. Dean R. Chapman, Donald N. Keuhn and Howard K. Larson, "Investigation of separation flows in supersonic and subsonic streams with emphasis on the effect of transition", NACA-TN-3869, 1957
5. Francis R. Hama, " Experimental Investigation of wedge base pressure and Lip shock", NACA report, No. 32-1033, 1966