

# Needle 형 pintle 형상에 따른 고체 로켓 모터 내부 유동장의 수치적 연구

박병훈\* · 김상민\* · 윤웅섭\*<sup>†</sup> · 이지형\*\*

## Numerical Studies on Flow Structures with Various Shapes of Needle-type Pintle in Solid Rocket Motor

Byung Hoon Park\* · Sangmin Kim\* · Woongsup Yoon\*<sup>†</sup> · Ji Hyung Lee\*\*

### 초 록

고체로켓추진기관의 추력조절을 위해 핀틀 기술이 사용된다. 아직까지 핀틀 유동에 대해 근본적인 물리적 이해를 돕는 연구가 공개되지 않아, 이 연구에서 다양한 형상의 needle형 핀틀에 따른 유동 구조에 대한 수치적 연구를 진행하였다. 2차원 축대칭, 압축성을 고려하여, 상용 열유체 해석 프로그램인 FLUENT 6.2를 사용하여 해석을 수행하였다. 난류 모델을 검증하기 위해 기 수행된 실험 결과와 비교하였다. 핀틀 각도(tip angle)가 작아질수록 노즐에서 유동 박리점이 하류로 이동하며, 핀틀에서 발생하는 끝단 충격파가 약해진다. 핀틀 반경(tip radius)이 작아질수록 핀틀에서 발생하는 끝단 충격파가 하류로 이동하며, 크기는 약해진다. 핀틀 형상(contour)은 유동 박리 지점에 직접적인 영향을 미친다.

Key Words: Solid Rocket Motor(고체 로켓 모터), Pintle Nozzle (핀틀 노즐), Neele Type (니들형), Numerical Analysis (수치해석)

### 1. 서 론

고체 로켓추진기관의 추력조절을 위해 사용되는 핀틀 기술은 핀틀(pintle)의 위치를 변화시켜 노즐 목 면적을 변화시키고, 이를 통해 연소실의 압력을 변화시켜 고체 추진제의 연소율을 조절하여 추력을 변화시킨다.

핀틀 기술이 가지는 이점(고체 로켓의 추력 조절)으로 인해 초기 개발 단계에서는 추진제 조

성, 그레인 형상 그리고 다양한 핀틀 형상을 고려한 연구가 진행되었으며[1], 최근에는 연소실 압력에 대한 폐회로 제어 시험을 수행하여, 이 기술에 대한 실현 가능성을 나타내었다[2]. 그럼에도 불구하고, 핀틀 유동에 대한 근본적인 물리적 이해를 돕는 자료는 매우 제한되어 있다.

따라서 이 연구에서는 다양한 형상의 needle형 핀틀에 따른 로켓 모터의 내부 유동 구조에 대해 수치적 연구를 수행하였다. 해석은 2차원 축대칭, 압축성, 난류 모델을 고려한 Navier-Stokes 식을 상용 CFD 해석 프로그램인 FLUENT 6.2를 사용하여 해석하였다.

수치해석을 검증하기 위해 기 수행된 공압 시

\* 연세대학교 기계공학과

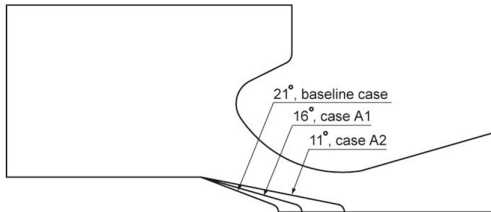
\*\* 국방과학연구소 추진기관부

<sup>†</sup> 교신저자, E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

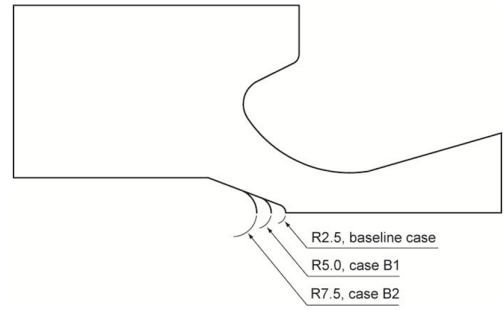
험(cold gloe test)[3]의 결과와 비교하였다. 고정된 핀틀 형상에 대해 핀틀의 위치를 변화시키 가면서 노즐 확산부의 압력을 측정하여 수치해 석 결과와 비교하였다.

## 2. 실험 및 해석 조건

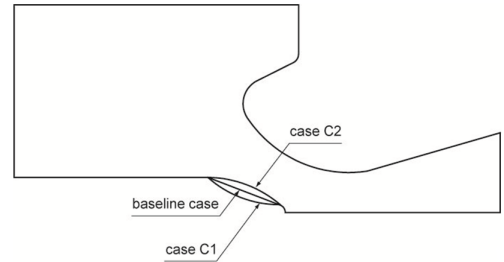
해석에 사용할 노즐의 형상 및 작동 파라미터를 Table 1에 나타내었다. 수치해석 검증에 위한 기준 조건(baseline)의 경우 고정된 형상의 핀틀을 0에서 60 mm까지 축방향으로 움직이며 실험 및 해석을 수행하였다. 핀틀 형상이 내부 유동 구조에 미치는 영향을 알아보기 위해 핀틀 위치는 44 mm로 고정 하고, fig 1에 도시한 것과 같이 case A에서는 핀틀의 각도(tip angle)를, case B에서는 핀틀의 곡률 반경(nose radius)을 변경 시켰으며, case C에서는 핀틀의 형상(tip contour)을 변화시켜가며 수치해석을 수행하여 유동 구조를 확인하였다.



(a) Test cases with different pintle tip angles (case A)



(b) Test case with different pintle nose radius (case B)



(c) Test cases with different pintle tip contour (case C)

Fig. 1 Illustrations of different test cases.

## 3. 결과 분석

### 3.1 난류 모델 검증

기준 조건에서 핀틀 위치에 따라 측정 및 해석된 추력을 fig 2에 나타내었다. 핀틀 유동에서 발생하는 충격파와 충격파 박리를 정확하게 예측하기 위해 세 가지의 난류 모델( $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$

Table 1 Specifications of test cases in this study

Test case Parameters	baseline	case A		case B		case C	
		case A1	case A2	case B1	case B2	case C1	case C2
Type of nozzle	conical (16° half angle)						
Mass flow rate	1.744kg/s						
Stroke	0-60mm	44mm	44mm	44mm	44mm	44mm	44mm
Tip angle	21°	16°	11°	21°	21°	21°	21°
Nose radius	2.5mm	2.5mm	2.5mm	5.0mm	7.5mm	2.5mm	2.5mm
Tip contour	Straight	Straight	Straight	Straight	Straight	Concave	Convex
Approach	Numerical & Experimental	Numerical					

SST 및 Spalart Allmaras)을 고려하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 세 난류 모델 모두 박리가 일어나기 전까지 잘 일치하고 있으나 Spalart Allmaras 모델이 유동 박리가 나타나는 영역에서 실험값과 잘 일치하는 것을 보인다.

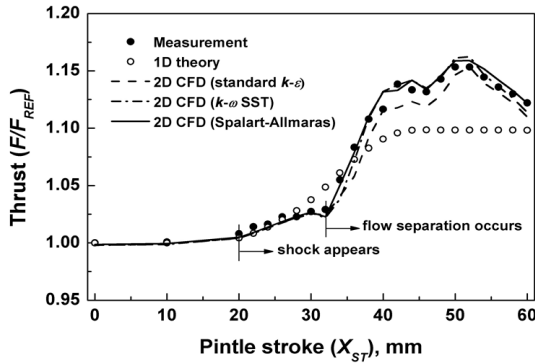


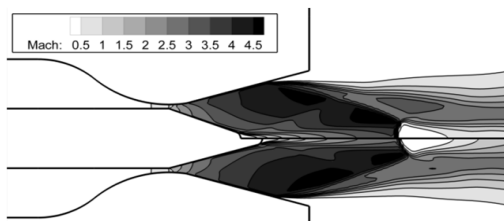
Fig. 2 Thrust versus pintle stroke (baseline case)

### 3.2 핀틀 각도의 영향 (case A)

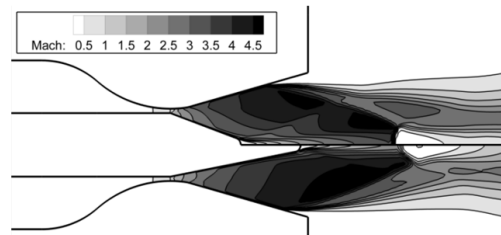
Figure 3에서 case A1과 A2의 마하수 등곡선을 기준조건과 비교하여 나타내었다. 핀틀의 각도가 작아질수록(case A1) 팽창 노즐에서 유동 박리점이 하류로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 반면 각도가 증가할수록(baseline) 핀틀에서 강한 끝단 충격파(lip shock)가 나타난다.

### 3.3 핀틀 곡률 반경의 영향 (case B)

Figure 4에 case B1과 B2의 마하수 등곡선을 기준조건과 비교하여 나타내었다. 핀틀의 곡률반경 변화에 따라 핀틀 끝에서 발생하는 재순환 유동의 크기와 모양이 변하지 않기 때문에 노즐에서 유동 박리에 의한 경사충격파의 위치는 변하지 않는다. 반면 곡률반경이 작아질수록 핀틀에서 발생하는 끝단 충격파의 위치는 하류로 이동하며, 크기는 약해진다.

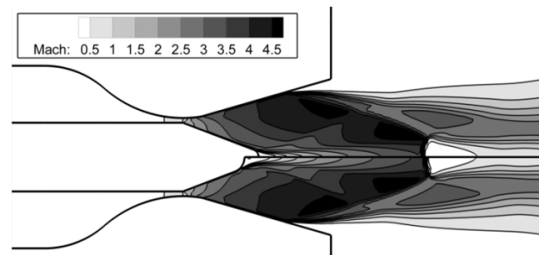


(a) Baseline case(upper half) and case A1(lower half)

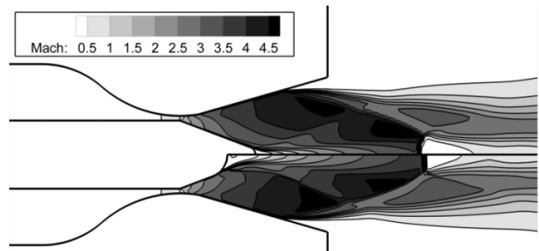


(b) Baseline case(upper half) and case A2(lower half)

Fig. 3 Comparison of Mach contour at different pintle tip angles.



(a) Baseline case(upper half) and case B1(lower half)



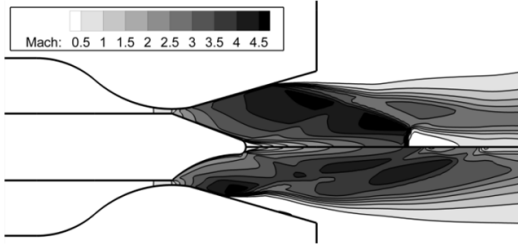
(b) Baseline case(upper half) and case B2(lower half)

Fig. 4 Comparison of Mach contours at different pintle nose radii

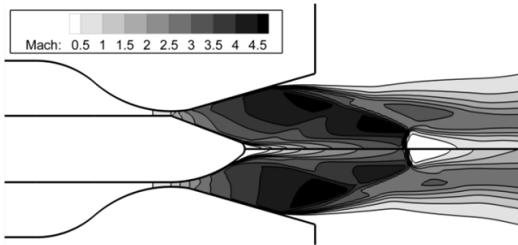
### 3.4 핀틀 형상의 영향 (case C)

Figure 5에 case C1과 C2의 마하수 등곡선을 기준조건과 비교하여 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 핀틀 형상의 변화는 내부 유동의 급격한 변화를 준다. 핀틀의 형상이 오목할 경우(case C1), 축방향으로 유로의 단면적이 가장 빠르게 증가하기 때문에 노즐에서 유동 박리가 가장 빨리 발생하는 반면, 볼록한 형상의 경우 오목한 경우와 반대로 유동 박리가 가장 늦게 발생한다. 또한 오목한 핀틀 형상의 급격한 단면적

팽창으로 인해 유동이 핀틀 벽을 따라 팽창하지 못하기 때문에 핀틀 벽 주위에서 마하수가 비슷하게 유지 되고, 상대적으로 다른 핀틀보다 높은 압력을 받게 된다. 반면 다른 조건에서는 유동이 핀틀 끝부분을 제외하고 자유롭게 팽창된다.



(a) Baseline case(upper half) and case C1(lower half)



(b) Baseline case(upper half) and case C2(lower half)

Fig. 5 Comparison of Mach contours at different pintle contours.

#### 4. 결 론

핀틀의 형상에 따라 핀틀 내부 유동 구조를

이해하기 위해 핀틀의 tip angle, tip radius, 그리고 tip contour를 변화시켜가면서 수치해석 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 핀틀 각도가 작아질수록 노즐에서 유동 박리점이 하류로 이동하며, 핀틀에서 발생하는 끝단 충격파가 약해진다.
- 2) 핀틀 곡률 반경이 작아질수록 핀틀에서 발생하는 끝단 충격파가 하류로 이동하며, 크기는 약해진다.
- 3) 핀틀 형상(contour)는 유동 박리 지점에 직접적으로 영향을 미친다.

#### 참 고 문 헌

1. Love, E. S., "The Base Pressure at Supersonic Speeds on Two-dimensional airfoils and bodies of revolution (with and without finds) having turbulent boundary layers," NACA RM L53C02, 1953
2. Unmack, K. E., "Wide Range Thrust Throttling of a Solid Rocket Motor," AIAA-87-2085, 1987
3. 이지형, 김중근, 장홍빈, "Needle형 Pintle의 위치에 따른 초음속 노즐 내부 유동장 연구," 한국추진공학회 2008년 추계학술대회 논문집, 2008, pp.269-272