

가변 노즐목 추력기의 핀틀 형상에 따른 정상상태유동 실험 및 수치해석 예비결과

이선경* · 허환일**†

Preliminary Results of Experimental and Computational Study of Steady-state Pintle Driven Nozzle Throat Flow

Sunkyong Lee* · Hwanil Huh**†

ABSTRACT

Experimental and computational study for steady-state pintle driven nozzle throat flow are carried out by changing four pintle shape. Results show that thruster performance is influenced by pintle shape greatly. This attributes to the distorted throat area and chamber pressure change as the pintle shape and its penetration.

초 록

네 가지 핀틀 형상에 대한 정상상태 노즐 유동실험과 유동해석연구를 진행하였다. 실험과 해석결과 핀틀 형상에 따른 추력기 성능변화가 가장 컸으며, 이는 서로 다른 핀틀 형상이 추력기 안에서 움직임에 따라 연소실 압력과 노즐목 면적을 변화시키기 때문이다.

Key Words: Pintle(핀틀), Pintel Shape(핀틀 형상), Cold Flow Test(공압시험) , Steady-state(정상상태) Computational Fluid Dynamic(전산유체역학)

1. 서 론

고체추진제가 연소할 때 추력의 크기는 노즐목 면적과 연소실 압력에 의하여 결정된다. 이러한 이론을 이용한, 연소실 안의 핀틀 구조물이 노즐목 면적을 변화시켜 추력을 제어하는 연구가 국내·외에서 활발히 진행되고 있다. 최근 국방과학연구소의 핀틀 형상에 따른 노즐 유동에 대

한 연구[1]에서 관통형 핀틀이 전진함에 따른 연소실 압력과 추력변화에 대한 연구가 진행되었다. 충남대학교에서는 관통형과 비관통형 핀틀에 대한 실험 및 유동특성에 대한 연구가 진행 중이다[2].

본 연구에서는 정상상태 실험조건에서 핀틀 형상에 따른 추력과 연소실 압력의 특성을 분석하고자 하였다. 핀틀 형상과 전진거리에 따라 반복 실험하였으며 측정 불확도를 계산하여 결과를 분석하였다. 공압실험 모델을 상용유동해석프로그램인 Fluent를 이용하여 해석하고, 핀틀이 삽입되어 있는 3D 추력기 내부에서의 유동특성을 분석하였다.

* 충남대학교 항공우주공학과 석사과정

** 충남대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: hwanil@cnu.ac.kr

2. 가변 노즐목 추력기 실험

2.1 핀틀 형상

Figure 1은 관통형인 Pintle 1의 형상을 기준으로 비관통형 Pintle 2~4를 설계한 형상이다. Pintle 2는 pintle 1의 핀틀 머리 모양이 뒤쪽에서 블록해지는 형상이며 pintle 3은 pintle 1모델의 앞쪽과 뒤쪽 모양이 블록한 형상이다. Pintle 4는 pintle 1모델의 앞쪽모양이 오목하고 뒤쪽은 블록한 형상이다[2].

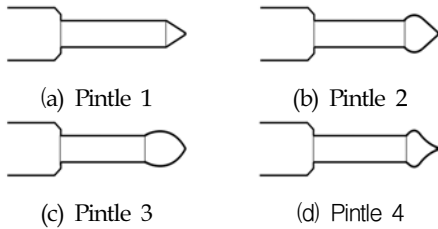


Fig. 1 Pintle shape

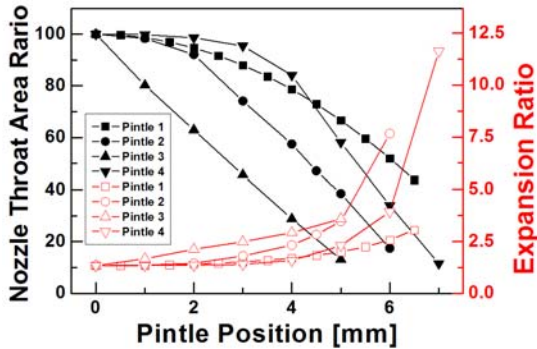


Fig. 2 Theoretical Nozzle throat for each pintle thruster with different pintle positions

Figure 2는 핀틀 형상에 따른 이론적인 노즐목 면적변화와 팽창비 변화를 보여준다. Pintle 2, 3은 전체적으로 pintle 1보다 면적변화비가 크지만 pintle 4의 경우 4mm까지는 pintle 1보다 노즐목 면적비가 작다.

2.2 실험 조건

공압실험은 정상상태 조건으로 진행하였으며 이에 대한 핀틀 추력기 실험장치 구성은 Fig. 3에 나와 있다.

실험은 건조공기(dry air)를 이용하였으며 전단에서 2022 kPa의 일정 압력으로 유지되어 추력기로 유입된다. 핀틀의 전진위치는 노즐목을 완전히 막지 않는 한계지점 이하로 하였으며 Pintle 1형상의 경우 0~6 mm, Pintle 2형상은 0~5 mm, Pintle 3은 0~4 mm, Pintle 4는 0~6 mm 전진하여 실험하였다.

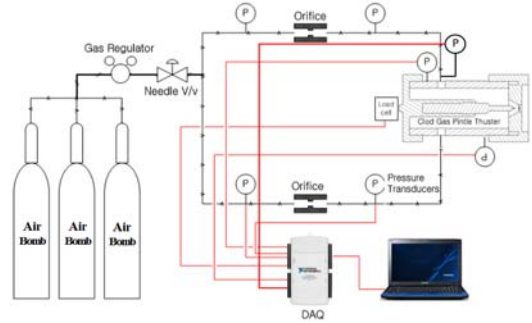


Fig. 3 Schematic of pintle thruster system

2.3 실험결과 분석

핀틀 형상과 이동거리에 따른 추력, 연소실 압력, 팽창비 변화를 Fig. 4~6으로 나타내었다. Pintle 1은 핀틀 형상이 straight하므로 노즐목 면적 변화율이 크지 않아 Fig. 4와 5에서와 같이 연소실 압력과 추력의 변화가 완만하게 변화한 것을 확인할 수 있다. Pintle 2의 경우 핀틀 끝 형상은 straight이고 중간부터 블록해지는 형상이기 때문에 0~2 mm 전진위치에서는 Pintle 1과 거의 차이가 없는 추력과 압력 변화율을 가진다. 반면에 4~5 mm 결과를 보면 형상이 블록하게 변하는 부분에서 추력과 압력변화율이 커지는 것을 알 수 있다. Pintle 3은 전체적으로 블록한 형상을 가지고 있어 전진할 때 마다 노즐목 면적을 급격하게 변화시켜 추력과 압력변화를 크게 만드는 것으로 파악할 수 있다. Pintle 4는 핀틀 앞부분은 오목하고 뒷부분은 블록한 형상으로, 0~4 mm 부분에서는 노즐목 면적비 변화가 Pintle 1보다 작기 때문에 추력과 압력의 변화도가 Pintle 1보다 작다. 하지만 4 mm 이상 전진 후에는 블록한 형상으로 인해 노즐목 면적비가 Pintle 1보다 크고 면적변화 격차가 크기 때문에 큰 연소실 압력변화와 추력변화를 보여준다. 추

력변화도를 보면 오목한 형상일 때보다 볼록한 형상일 때 확연히 추력 변화도가 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 추력 변화 조절 요구 정도에 따라 형상을 설계해야 함을 알려준다.

Figure 5와 6을 보면, 압력변화는 노즐의 팽창비 변화율과 비슷한 경향성으로 측정된 것을 알 수 있다. 이는 노즐 팽창비가 연소실 압력에 종속되어 있기 때문이며, 노즐 팽창비와 연소실 압력 실험결과가 약 2.6% 이내의 오차를 보였다. 팽창비 변화비와 압력 변화비, 추력 변화비를 정리한 결과인 Table 1을 보면, 앞에서 분석한 바와 같이 팽창비 변화율과 연소실 압력 변화율은 최대 오차 2.6%의 경향오차를 보인다. 하지만 추력 변화율은 팽창비 변화율에 비해 큰 상승률을 보이지 않았다.

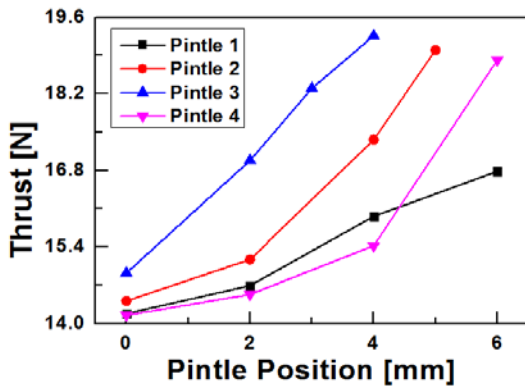


Fig. 4 핀틀 형상과 이동거리에 따른 추력

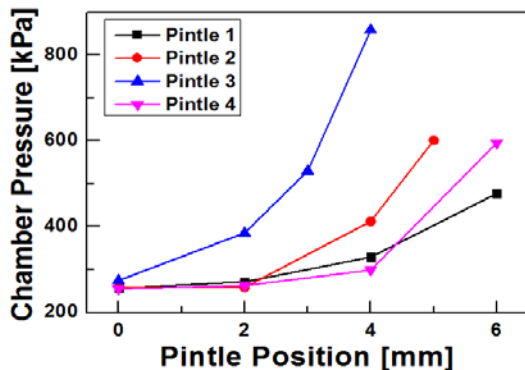


Fig. 5. 핀틀 형상과 이동거리에 따른 연소실 압력

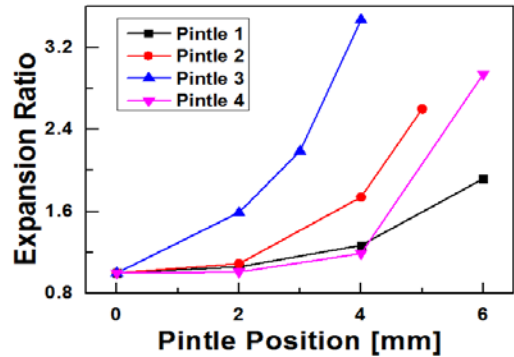


Fig. 6 Theoretical expansion ratio for each pintle thruster with different pintle positions

Table 1. 핀틀의 이동거리에 따른 팽창비, 연소실 압력, 추력 변화율

Pintle 1				Pintle 2			
Pintle Position [mm]	ϵ ratio [%]	$\frac{P_c}{P_{c_{ref}}}$	$\frac{F}{F_{ref}}$	Pintle Position [mm]	ϵ ratio [%]	$\frac{P_c}{P_{c_{ref}}}$	$\frac{F}{F_{ref}}$
0	1.00	1.00	1.00	0	1.00	1.00	1.00
2	1.06	1.06	1.04	2	1.09	1.10	1.05
4	1.27	1.28	1.13	4	1.74	1.59	1.20
6	1.92	1.86	1.18	5	2.60	2.32	1.32
Pintle 3				Pintle 4			
Pintle Position [mm]	ϵ ratio [%]	$\frac{P_c}{P_{c_{ref}}}$	$\frac{F}{F_{ref}}$	Pintle Position [mm]	ϵ ratio [%]	$\frac{P_c}{P_{c_{ref}}}$	$\frac{F}{F_{ref}}$
0	1.00	1.00	1.00	0	1.00	1.00	1.00
2	1.59	1.40	1.14	2	1.01	1.03	1.03
3	2.19	1.93	1.23	4	1.19	1.17	1.09
4	3.47	3.13	1.29	6	2.94	2.33	1.33

3. 측정 불확도

3.1 측정불확도 해석

본 논문의 추력측정값에 대한 측정 불확도를 평가하였다. 불확도평가는 핀틀 형상에 따른 4회의 반복실험에 대한 A형 평가와 추력측정에 사용하였던 로드셀(Load-cell), 신호증폭기(Amplifier), 데이터수집장치(USB DAQ)를 고려한 추력 측정값에 대한 B형 평가를 진행하였다.

Figure 7의 불확도 해석 결과 그래프를 보면 4가지의 핀틀 형상에 따른 실험결과가 평균 측정값에 대한 불확도 구간 내에 위치해 있는 것을 알 수 있다. 평균 측정값에 대한 불확도 구간은 핀틀 형상과 그 이동거리에 따라 Table 2로 나타내었다. 불확도 구간은 추력 측정 값 대비 2.5% 이내로 나타났다.

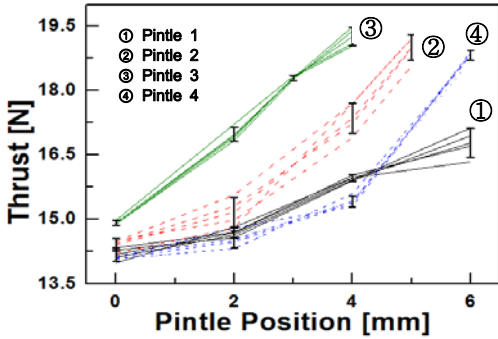


Fig. 7 Uncertainty analysis of Pintle test results

4. 핀틀 추력기 유동해석

4.1 해석조건

유동해석은 Fig. 8과 같이 3D 모델로 해석하였으며 추력기 안의 3차원 적인 유동특성에 대하여 보고자 하였다. 해석 조건은 Table 3과 같다.

Table 3. Fluent computing condition

해석 유체	Ideal air
경계조건	Pressure inlet Pressure far field symmetry
난류모델	k-ε realizable
Pintle 형상	Pintle 2

유동해석 결과는 Fig. 9~11에 Contour로 나타내었다. 연소실 안 단면에서의 Fig. 9를 보면 유동이 핀틀 구조물에 부딪히고 그 힘에 의하여 회전이 걸려 흐르는 것을 알 수 있으며 특히 유동이 들어오는 입구 쪽 핀틀에는 큰 압력이 작용할 것으로 예측해 볼 수 있다. 노즐 유동의 경우 Fig. 10을 보면 노즐 끝단에서 유동이 박리되어 추력 손실을 가져옴을 볼 수 있다.

Table 2. 추력측정 데이터에 대한 불확도 범위

Pintle 1 이동거리 [mm]	측정값 [N]	확장불확도		불확도 범위
		%	[N]	
0	14.18	1.61	0.23	13.95 < F < 14.41
2	14.69	1.36	0.20	14.49 < F < 14.89
4	15.96	1.23	0.20	15.76 < F < 16.16
6	16.78	2.32	0.39	16.39 < F < 17.17
Pintle 2 이동거리 [mm]	측정값 [N]	확장불확도		불확도 범위
		%	[N]	
0	14.41	1.51	0.22	14.19 < F < 14.63
2	15.17	2.49	0.38	14.79 < F < 15.55
4	17.36	2.34	0.41	16.95 < F < 17.77
5	19.00	1.96	0.37	18.63 < F < 19.37
Pintle 3 이동거리 [mm]	측정값 [N]	확장불확도		불확도 범위
		%	[N]	
0	14.92	1.21	0.18	14.74 < F < 15.10
2	16.98	1.52	0.26	16.72 < F < 17.24
3	18.30	1.19	0.22	18.08 < F < 18.52
4	19.26	1.62	0.31	18.95 < F < 19.57
Pintle 4 이동거리 [mm]	측정값 [N]	확장불확도		불확도 범위
		%	[N]	
0	14.15	1.45	0.20	13.95 < F < 14.35
2	14.53	1.79	0.26	14.27 < F < 14.79
4	15.42	1.44	0.22	15.20 < F < 15.64
6	18.82	1.27	0.24	18.58 < F < 19.06

Figure 11은 이론적인 노즐목과 해석에서 나타난 노즐목 위치의 차이를 보여 준다. 전반적으로 노즐목이 전진위치 0, 4 mm 모두 이론적 노즐목보다 후류에서 생성되었는데, 핀틀의 표면에서 유체의 점성력에 의하여 이론적 노즐목에서 가속이 충분이 되지 못하여 유동이 뒤쪽으로 밀려 유동질식이 되는 것이다.

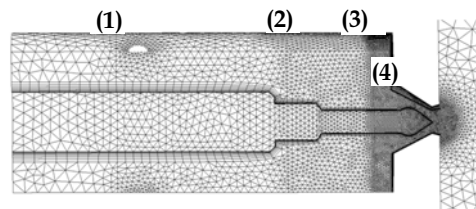


Fig. 8 3D mesh of Pintle 2

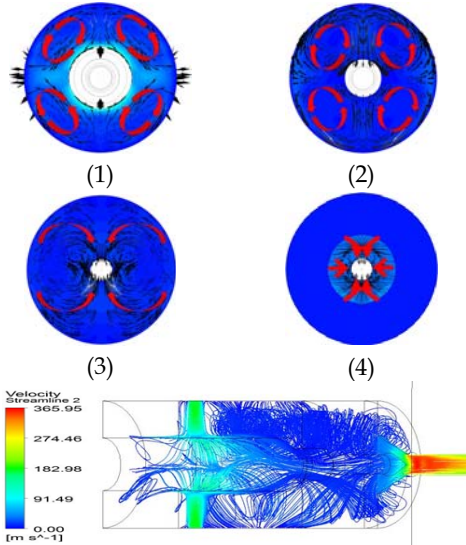


Fig. 9 속도 벡터와 Streamline



(a)노즐앞 (b)이론적노즐목 (c)노즐목 (d)노즐끝단

Fig.. 10 Velocity distribution of Pintle 2 nozzle

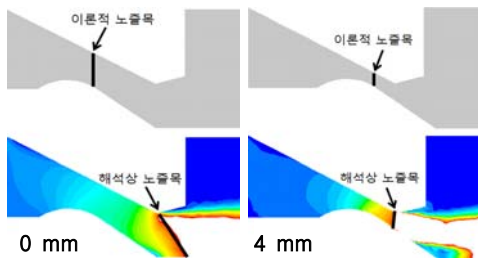


Fig. 11 Nozzle throat choking Area comparison

5. 결론

1. 핀틀 형상에 따른 공압실험을 진행하고 실험 결과는 불확도 해석의 측정값을 이용하여 분석하였다. 핀틀이 전진함에 따라 노즐의 팽창비가 증가하

며 연소실 압력은 노즐의 팽창정도에 따라 똑같은 비율로 증가하는데 그 최대 오차는 약 2.6%이다. 오목한 형상의 핀틀의 추력변화가 가장 작았으며 볼록한 형상에서의 추력변화율이 가장 컸다. 추력 크기변화에 가장 크게 작용하는 것이 핀틀의 형상임을 알 수 있었으며 빠른 제어가 필요한 부분에는 볼록한 형상, 빠른 제어가 필요하지 않을 경우에는 오목한 형상으로, 제어 환경 및 조건에 맞추어 가장 효율적인 핀틀 형상을 설계하여야 한다.

2. 3D 유동해석 결과, 연소실 안 유동은 입구에서 들어온 유동이 핀틀에 부딪히면서 대칭적인 유동의 흐름을 생성하며 회전을 하며 노즐을 통해 빠져나간다. 특히 유동이 유입되는 구간의 핀틀에 압력에 유압이 걸리게 되어 그 부분의 핀틀에 걸리는 하중 분석을 통해 적당한 강도로 설계해야 함을 알 수 있다. 유동의 초킹(Chocking)은 노즐목이 아닌 노즐목보다 후류에서 일어나며 노즐 목에서 노즐끝단까지의 유동이 벽면을 타고 흐르지 못하고 박리되어 추력 손실을 가져온다.

후 기

이 논문은 “2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단”의 지원을 받아 수행된 연구임(2011-00 3933).

본 연구는 국방과학연구소의 연속/가변형 추력기의 추력제어 기법에 관한 연구 사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김중근, 박종호, 이종훈, 전민경, “핀틀 형상이 노즐 유동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구”, 한국항공우주학회지, 제38권, 제10호, 2010.10, pp.985~991
2. 최재성, 허환일, “노즐목 가변 추력기 적용 목적의 핀틀 형상에 대한 정상상태 실험 연구,” 한국추진공학회 추계학술발표회 논문집, 2011.04, pp.153-156