

핀틀 형상이 가변 노즐목 핀틀 추력기의 노즐 유동에 미치는 영향

이용우* · 허환일**

Effects of Pintle Shape on Nozzle Flow Characteristics of Variable Nozzle Throat Area Pintle Thrusters

Yongwu Lee* · Hwanil Huh**

ABSTRACT

By changing the nozzle throat area during the operation, thrust of a pintle thruster can be adjusted easily such as a liquid propulsion. In this paper, numerical analysis was carried out for SNECMA's pintle thruster with different pintle shapes. Flow field and aerodynamic load changed drastically with pintle shapes. Bore in the pintle decreased aerodynamic load significantly.

초 록

핀틀형 추력기는 운용 도중에 노즐목 면적을 변경시켜 고체추진기관과 같은 추력기를 액체 추진기관과 같이 추력을 자유자재로 조절할 수 있다. 본 논문에서는 SNECMA社에서 개발한 Divert용 핀틀 추력기의 핀틀의 형상 변화에 대해 수치해석 기법으로 분석하였다. Bore에 의하여 핀틀 구동시 받게 되는 핀틀의 하중은 줄어들었고, 핀틀 형상에 따라 유동장이 크게 변하는걸 확인하였다.

Key Words: Pintle Thruster(핀틀 추력기), Bore(보어), Aerodynamic Load(공기역학적 하중), Flow-field(유동장)

1. 서 론

핀틀형 추력기는 추력기 내부에 핀틀과 같은 구조물이 존재하고, 핀틀이 구동기(Actuator)로 움직여 처음에 설계된 노즐목 면적을 변경시켜 고체 추진기관과 같은 추력기를 액체 추진기관

과 같이 추력을 자유자재로 조절할 수 있는 추력기를 말한다[1-2].

Figure 1에서 보는 것과 같이 SNECMA에서 개발한 divert 추력기는 노즐목을 변화시키는 Pintle(Needle), 핀틀을 구동하기 위한 Actuator, 핀틀과 구동기를 연결시킬 Connector 그리고 내부의 부품들을 감싸는 Housing으로 이루어져 있다. 또한 다른 추력기와는 달리 핀틀 중심에 bore라는 hole이 뚫려 있다[3]. 본 논문에서는 SNECMA에서 개발한 divert추력기의 노즐형상

* 충남대학교 항공우주공학과 석사과정

** 종신회원, 충남대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: hwanil@cnu.ac.kr

을 그대로 디자인하고, 각기 다른 3개의 핀틀 형상을 설계, 그에 따른 유동 특성과 하중, bore의 유/무에 따른 유동 분석 및 핀틀에 걸리는 공기 역학적 하중을 분석하였다.

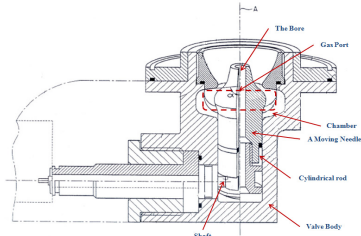
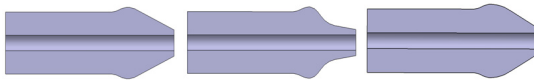


Fig. 1 SNECMA의 Divert 추력기[3]

2. 본 론

2.1 핀틀 모델링

핀틀의 형상을 변화시켜가며 생기는 유동장을 분석하였다. 핀틀의 형상은 다음 Fig. 2와 같이 총 3가지 형상이다. 이 세가지 형상은 Model 1을 기본으로 하여 핀틀의 끝 부분으로 갈수록 움푹 패인 형상이 Model 2, 볼록 나온 형상이 Model 3으로 하였다.



(a) Model 1 (b) Model 2 (c) Model 3

Fig. 2 핀틀 형상

추력기 하우징(Housing)은 동일한 상태에서 핀틀 형상만 변화하였기 때문에 그에 따른 유동 조건 특성은 Table 1과 같다. 특히 자료에 나온 핀틀 형상이 최대로 뒤로 후퇴를 하였을 때를 노즐 목 면적 100%라 가정을 하고, 핀틀이 전진함에 따라 줄어들게 되는 노즐 목 면적을 80%, 60%, 38%로 나누어 그에 따른 수치해석을 진행하였다. 이것은 SNECMA에서 발표된 자료에 의하면 평형 상태에서 연소압력은 1 MPa, 최대 추력 상태에서의 최대 압력은 20 MPa로 나타나 있음을 확인하고, 이를 기준으로 노즐목 면적 변

Table 1. 각 핀틀 형상에 따른 유동조건 특성

노즐목 면적비 (%)	Model-1			Model-2			Model-3		
	노즐목 면적 (mm ²)	압력 (Mpa)	팽창 비	노즐목 면적 (mm ²)	압력 (Mpa)	팽창 비	노즐목 면적 (mm ²)	압력 (Mpa)	팽창 비
100.00	384.19	1.00	7.82	791.17	1.00	3.80	287.26	1.00	10.46
80.05	313.64	1.97	9.58	647.46	1.95	4.64	233.48	2.00	12.87
60.11	240.06	4.79	12.52	475.51	5.46	6.32	177.23	5.00	16.96
38.25	155.94	20.20	19.27	302.30	24.70	9.94	114.47	21.48	26.26

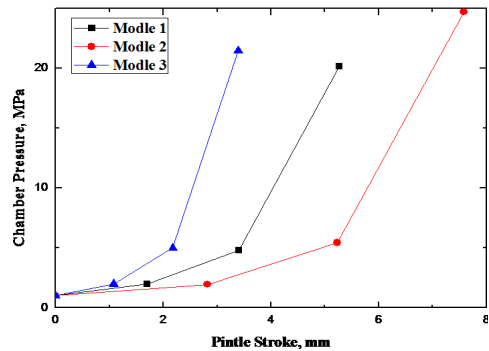


Fig. 3 각 형상별 핀틀 전진에 따른 압력 변화

화를 구분한 것이고, Fig. 3은 핀틀의 전진에 따른 추력기 내부의 압력변화를 나타낸 것이다.

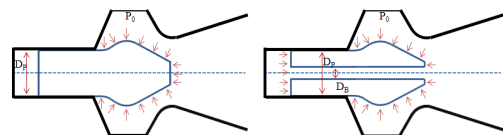
2.2 핀틀에 걸리는 하중

핀틀에 걸리게 되는 총 하중은 다음과 같다.

$$\sum F = \sum F_{Gravity} + \sum F_{Pressure} + \sum F_{Viscous} + \sum F_{Other}$$

이 중, 핀틀은 압력과 유동에 의한 점성에 의해 많은 하중을 받을 것으로 예상된다.

Figure 4는 핀틀 주위에 압력장이 형성됨으로써, 정압력에 의하여 핀틀이 받게되는 압력을 나타낸다. 핀틀이 압력에 의하여 하중을 받을 때 핀틀 표면의 수직적으로 압력을 받게 된다.



(a) 일반적인 핀틀 (b) bore가 있는 핀틀

Fig. 4 핀틀이 받는 하중

3. 유동해석

3.1 Bore 유/무에 따른 분석

SNECMA Propulsion Solid에서 개발한 Divert 추력기가 다른 핀틀형 추력기들 중 디자인 측면에서 보이는 가장 큰 차이점은 핀틀의 중심부가 Bore라는 hole을 가졌다는 것이다.

이 해석 결과는 Model 1의 핀틀 형상에서 최초로 전진한 경우 노즐목 면적비 38%로 Bore의 유/무에 대한 유동장 분석, 하중 분석을 수행하였다. 이 경우 추력기 내부 최대압력은 20 MPa이다.

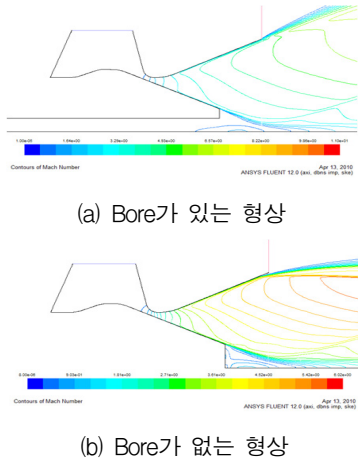


Fig. 5 Bore 유/무에 따른 핀틀의 마하 수 분포 (Model 1, 노즐목 면적비 38%, $P_c = 20$ MPa)

Figure 5의 두 상태는 입구 압력이 20 MPa로 동일한 상태에서 보어의 유무에 따른 마하수를 나타낸 것이다. 이 Contour에서 노즐 끝단에서 마하수의 수직 분포를 그래프로 그리면 Fig. 6과 같다. 노즐에 의해 형성된 Inner Shear Layer에 의해 재순환 영역이 발생하게 된다. 이때에 발생하는 재순환 영역은 Bore가 있는 형상에서는 Bore의 안쪽(흐름이 없는 Dead Flow 영역)으로 이동하는 것을 알 수 있으며 이로 인해 길쭉하게 퍼지는 현상을 볼 수 있다.

Figure 6는 축대칭 재순환 영역을 보여주는 것으로, 마하수 1부터를 Inner Shear Layer라고 생각했을 때, 그 이전까지의 마하수를 재순환영역의 두께로 확인 할 수 있다. 이 결과물로 봤을 때, Axi-Symmetry상태에서의 Bore가 있는 것은

총 두께가 4.80 mm, Bore가 없는 것은 5.61 mm로 확인 할 수 있다.

핀틀에 걸리는 공기역학적 하중은 Table 2에서 확인할 수 있다. 압력에 의한 하중과, 점성에 의한 하중으로 구분하여 비교하였을 때, Bore가 있을 때의 총 하중은 Bore가 없을 때에 비교하여 11.6% 감소하였음을 확인하였다.

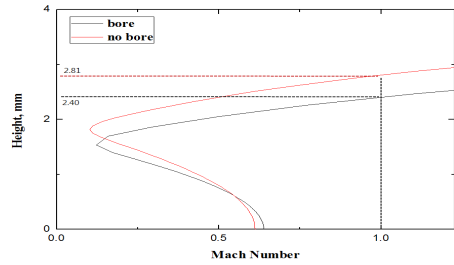


Fig. 6 재순환영역에서의 높이에 따른 마하수 변화

Table 2. Bore 유/무에 따른 하중

Bore 유/무	압력에 의한 하중 (kgf)	점성에 의한 하중 (kgf)	총 하중 (kgf)
Bore가 있을 때	281.74	-3.35	278.39
Bore가 없을 때	317.43	-2.65	314.78

3.2 핀틀 형상에 따른 분석

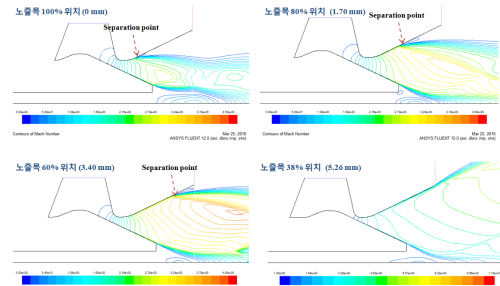


Fig. 7 Model 1의 핀틀 전진에 따른 마하수 변화

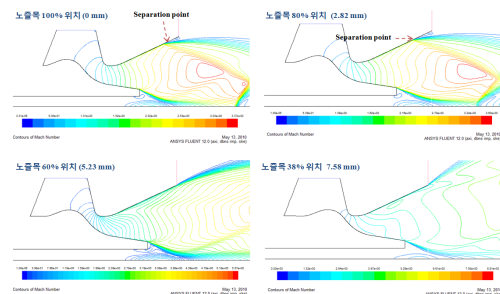


Fig. 8 Model 2의 핀틀 전진에 따른 마하수 변화

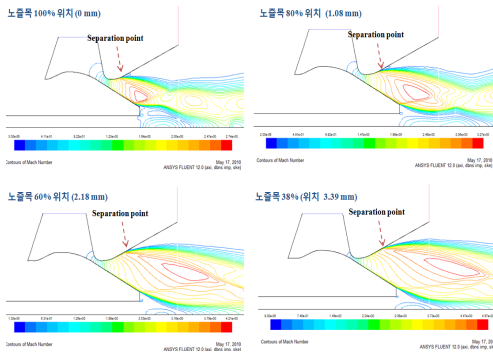


Fig. 9 Model 3의 핀틀 전진에 따른 마하수 변화

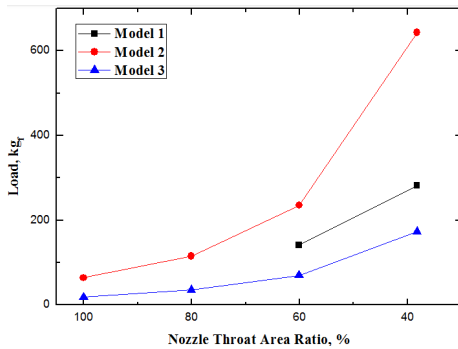


Fig. 10 핀틀 형상별 공기역학적 하중 변화량

Figure 7,8,9에서는 핀틀이 전진함에 따라 재순환 영역이 bore내부로 이동함을 확인할 수 있다. Fig. 7의 노즐목 38%, Fig. 8의 노즐목 60, 38% 위치에서는 과소 팽창이 되었으며, 이 때에는 노즐 출구 안쪽에서 내부 충격파가 발생하였음을 알 수 있다. 발생한 내부충격파는 유동의 흐름 방향과 같은 방향으로 생성됨으로써 전체적인 마하수 증가를 가져왔음을 확인할 수 있다.

세 가지 핀틀 형상에 따른 핀틀이 받게되는 공기역학적 하중은 Fig. 10과 같다. 이와 같은 차이는 핀틀의 형상에 따라 노즐목의 위치가 다르기 때문으로 판단된다. 노즐 목 직전까지는 연소실 챔버의 압력이 초기압력으로 유지되므로 핀틀에서 불룩한 부분의 높이가 같을 때, 상대적으로 노즐목의 위치가 가장 낮게 측정되는 Model 2가 가장 큰 하중을 받게 되는 것이다.

4. 결 론

핀틀의 형상과 bore의 유/무에 따른 유동장 하중에 대하여 수치해석적 기법으로 분석한 결과는 다음과 같다.

- 핀틀의 끝단에서는 재순환 영역이 발생되며, Bore가 있음으로 해서 이 재순환 영역의 두께를 줄이고, Bore 내부로 그 영역을 확장할 수 있도록 하였음을 확인하였다. 또한, 핀틀을 구동할 때 핀틀이 받는 하중을 줄여 구동을 쉽게 하도록 설계되었음을 확인 하였다.
- 핀틀의 형상과 상관없이 핀틀 끝부분에서 발생하는 재순환 영역은 핀틀이 전진함에 따라서 bore내부로 이동하게 되며 그 폭이 넓고 길쭉한 형상으로 변한다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 장기기초과제(ADD 08-02-04) 결과의 일부입니다. 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김중근, 박중호, "핀틀 형상이 노즐 성능에 미치는 영향에 관한 연구", 한국항공우주학회지, 제 36권 8호, 2008. 8, pp. 790~796
2. 김중근, 박중호, "핀틀 형상이 추력 크기에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구", 한국항공우주학회지, 제 37권 5호, 2009. 5, pp. 476~482
3. US Patent No. : 6543717 B1, Thierry Le Fur et al(SNECMA), "Compact Optimal and Modulatavle Thrust Device for Controlling AeroSpace Vehicles"