

핀틀의 변곡점 형상이 SNECMA 노즐목 가변 추력기의 성능에 미치는 영향

왕승원* · 허환일**†

Effect of Pintle Inflection Points on Performance of the SNECMA Modulatable Thrust Devices

Seungwon Wang* · Hwanil Huh**†

ABSTRACT

Numerical simulation was carried out to investigate the effect of pintle inflection point on the performance of the SNECMA modulatable thrust devices. Results show that the effect of inflection points in the pintle is to decrease aerodynamic load while maintaining required thrust level.

초 록

본 연구에서는 핀틀 형상의 변곡점 존재 유·무가 SNECMA 노즐목 가변 추력기의 성능에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 수치해석을 수행하였다. 그 결과 변곡점의 존재는 요구추력을 유지하면서 공력하중이 감소하는 효과가 있어 전체시스템의 크기와 무게를 감소시킬 수 있다.

Key Words: Modulatable Thrust Device(추력조절기), Pintle(핀틀), Aerospike(에어로스파이크), Thrust(추력), Aerodynamic Load(공력하중), Inflection Point(변곡점)

1. 서 론

노즐목 가변 추력기는 넓은 추력의 범위를 가진다는 큰 장점이 있으나, 실제 운용되는 비행체에 적용하기 위해서는 여러 요구 조건을 충족시켜야 한다. 특히 이러한 노즐목 가변 추력기의 경우 주로 국방 분야에서 활용되고 있기 때문에

시스템 간의 상호 운용성, 다양한 플랫폼과 타겟에 대한 호환성, 교전 시간의 단축, 재설계 용이성 등의 요구 조건을 우선시한다. 먼저 운용상의 측면에서 살펴보면 넓은 추력의 범위를 가지면서도 작은 무게비를 만족시키고 비행체 내의 다른 부품들과의 상호 연동성, 낮은 유지비, 높은 내구성, 시스템 간의 호환성 등을 요구한다. 또한, 추력기의 질량은 최소화하는 동시에 긴 작동 시간과 큰 총추력의 성능을 발휘해야 한다. 추력기의 성능 측면에서는 가변 추력기의 특성상 구동기의 빠른 응답속도를 통해 핀틀의 정확하고

* 충남대학교 대학원 항공우주공학과

** 종신회원 충남대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: hwanil@cnu.ac.kr

빠른 움직임이 요구된다. 특히 핀틀에 작용하는 공력 하중을 감소시킬수록 추력기가 필요로 하는 구동력을 낮출 수 있기 때문에 추력기의 질량 및 부피를 감소시킬 수 있는 이점이 있다[1].

국내에서는 최근 국방과학연구소(ADD)를 중심으로 연구가 시작되고 있는데 핀틀 형상이 내부 유동과 추력에 미치는 영향에 대해 연구한 결과, 동일한 노즐목일 때 볼록한 형상이 오목한 형상에 비해 추력이 증가하고, 핀틀의 하중은 형상에 따라 증가하는 패턴을 보였다[2].

충남대학교[3, 4]에서는 핀틀 끝이 straight 형상일 때와 aerospike 노즐 형상일 때 각각 bore의 존재 유·무에 따른 노즐 내부의 유동장, 추력 성능, 공력하중에 대해 수치해석적 기법으로 분석하였다. 추력기 내부에서 유동흐름에 의한 핀틀에 작용하는 공력하중은 Eq. 1을 통해 계산할 수 있고, 이 중 추력기 내부의 압력과 핀틀면에서 유동의 점성에 의한 하중이 크게 작용할 것으로 예상할 수 있다. Bore의 존재는 재순환영역의 두께와 핀틀이 받는 공력하중에 영향을 주는 것을 확인하였다.

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 SNECMA의 특허[5]에 제시된 모델의 핀틀 형상에 대해 설계프로그램을 이용하여 Fig. 2처럼 모델링하고 특허

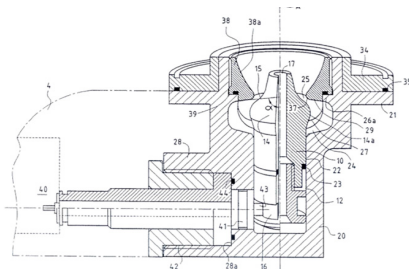


Fig. 1 SNECMA Patent Model[5]

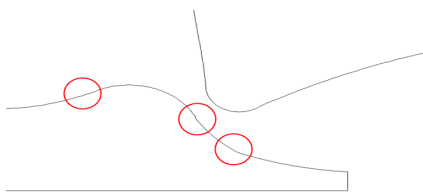


Fig. 2 Sketch of SNECMA Patent Model

모델의 윗면에 존재하는 변곡점에 대해 수치해석을 기반으로 변곡점의 존재 유·무에 따른 추력 성능과 공력하중에 대해 분석하였다. 핀틀의 공력하중은 Eq. 1의 식을, 추력은 Eq. 2의 식을 이용하여 비교분석하였다.

$$\sum \vec{F} = \sum \vec{F}_{gravity} + \vec{F}_{pressure} + \vec{F}_{viscous} + \vec{F}_{other} \quad (1)$$

$$F = \dot{m}u_e + (P_e - P_a)A_e \quad (2)$$

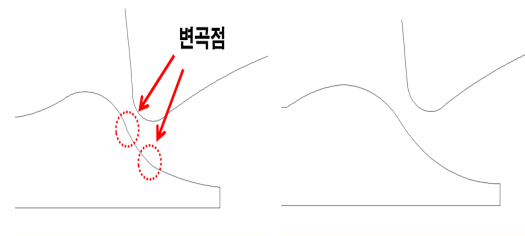
여기서, \dot{m} = 질유량, u_e = 노즐출구속도, P_e = 노즐출구압력, P_a = 대기압력, A_e = 노즐출구면적을 의미한다.

2. 본 론

2.1 모델의 설계방법 및 해석조건

수치해석을 위한 모델의 설계는 SNECMA 특허모델의 핀틀과 노즐 형상을 기본으로 Fig. 3와 같이 윗면에 변곡점이 존재하는 모델(a)과 존재하지 않는 모델(b)을 설계하였다.

핀틀형상은 CATIA V5를 이용하여 설계하였고, 핀틀 변곡점의 유·무에 따라 GAMBIT 2.4.6 프로그램을 이용하여 정렬격자로 구성하였다. 유동장의 해석조건은 2D, Axi-symmetry 조건과 ‘Spalart-Allmaras’의 난류모델[6, 7], 해석유체는 이상기체의 냉가스 공기로 정하고 FLUENT V12로 해석을 수행하였다.



(a) with Inflection (b) without Inflection

Fig. 3 Modeling of Pintle shape

2.2 변곡점 존재 유·무에 따른 유동장 내부의 압력분포

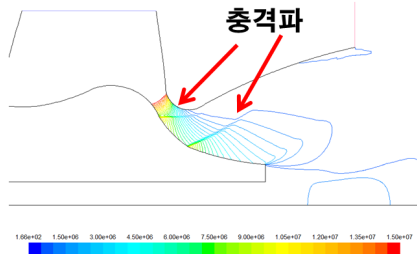


Fig. 4 Static Pressure Distribution of Pintle with Inflection Points

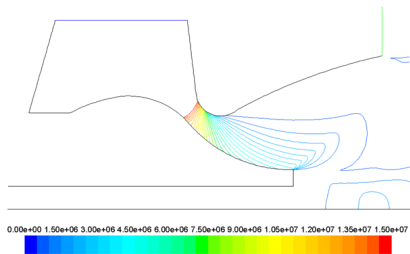


Fig. 5 Static Pressure Distribution of Pintle without Inflection Points

수치해석을 통해 각 설계모델에 대해 해석유동장 내부의 정압분포를 비교분석한 결과 Fig. 4를 통해 확인 할 수 있듯이 변곡점이 존재하는 모델의 경우, 변곡점이 있는 위치에서 충격파가 발생하는 것을 알 수 있다.

이러한 현상은 밀도분포를 통해 해당 지점에서 유동이 정체되는 것을 확인할 수 있었고, 또한 충격파 전·후의 압력이 증가하는 것을 확인하였다. 반면, Fig. 5의 변곡점이 존재하지 않는 모델에서는 충격파의 발생을 확인할 수 없었고, 노즐목 이후 유동의 흐름에 따라 노즐 출구 방향으로 압력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

2.3 핀틀면에 작용하는 공력하중 분석

노즐목 가변 추력기의 추력조절에 있어 핀틀에 작용하는 공력하중은 핀틀을 구동하는 구동기를 설계하고 결정하는데 중요한 역할을 한다. 따라서 변곡점 유·무에 따른 핀틀 전면

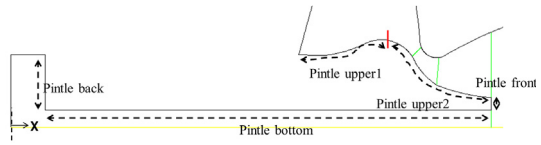


Fig. 6 Pintle Section

Table 1. Aerodynamic Load

Aerodynamic Load (N)	with Inflection	without Inflection
Pintle upper1	3,810	3,704
Pintle upper2	-6,836	-7,193
Pintle front	-31	-43
Pintle bottom	0	0
Pintle back	332	396
Total	-2,725	-3,136

하는 압력분포 및 공력하중을 Fig. 6와 같이 영역을 나누어 분석하였다. 핀틀에 작용하는 공력하중은 Table 1과 같고, 데이터의 부호는 핀틀에 작용하는 공력하중이 유동의 흐름방향과 동일한 경우 (+), 반대방향일 경우 (-)로 정의하였다.

핀틀에 작용하는 공력하중에서는 변곡점이 존재하지 않는 형상이 15%정도 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 앞서 분석한 핀틀에 작용하는 압력분포와 다른 결과를 보인다. 이에 대한 원인으로서는 핀틀의 형상설계에 있어 변곡점을 제거하면서 핀틀 면적이 증가한 것을 확인하였다. 공력하중은 핀틀에 작용하는 압력과 면적에 의해 결정되는데 변곡점이 존재하지 않는 경우, 압력의 감소량에 비해 면적의 증가량이 크게 작용하여 공력하중이 상대적으로 크게 작용하는 것으로 분석된다.

따라서 공력하중의 증가는 핀틀의 구동기를 결정하는데 중요한 영향을 미치므로 공력하중이 증가하는 경우 구동기의 요구공력하중이 증가하게 된다.

2.4 추력성능 분석

공력하중 분석에 이어 변곡점의 유·무가 추력성능에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 추력의 비교는 Eq. 2를 이용하여 분석하였고, 추력을 분석하는데 있어 필요한 성능에 대해 수치해석결

Table 2. Summary of Performance Parameters

Parameter	with Inflection	without Inflection
\dot{m}	1	1
U_e	1	1.03
P_e	1	0.98
A_e	1	1
F	1	1.03

과 데이터를 활용하였다.

Table 2는 변곡점 존재 유·무에 대한 추력성능을 분석한 것으로 상대적인 비교를 위해 변곡점이 존재하는 모델을 기준으로 정리하였다.

분석 결과 변곡점이 존재하지 않는 모델은 변곡점이 존재하는 모델에 비해 추력이 3%정도 증가한 것을 알 수 있다. 증가의 원인으로는 노즐 출구의 속도와 압력에서 알 수 있듯이 변곡점이 존재하는 경우 충격과 발생으로 인한 압력의 증가와 속도의 감소를 이유로 볼 수 있다.

3. 결 론

가변 노즐목 추력기는 추력기 내부에 존재하는 핀틀 구조물을 통해 압력조절을 이용한 추력을 변경하는 방식으로 고체추진기관에서도 액체추진기관의 추력조절 기능을 적용할 수 있다. 이러한 가변 노즐목 추력기의 형상에 대해 프랑스 SNECMA에서는 aerospike 노즐 형상을 응용하여 미국에 특허를 출원하였고, 특허모델을 참고로 하여 핀틀의 변곡점 유·무 형상에 따른 추력기의 성능에 대해 수치해석 기법을 활용하여 연구를 진행하였다. 변곡점이 존재하는 경우 유동장 내부에 충격파의 존재로 추력성능이 감소(3%)하는 결과를 보이지만, 핀틀을 구동하는데 영향을 미치는 공력하중의 감소(15%)에 따른 이

점이 더 큰 영향을 주는 것으로 분석되었다. 또한 공력하중의 감소는 핀틀 구동기 선정에 있어 요구동력을 감소시키는 이점으로 작용하여 전체 시스템의 크기와 무게, 그리고 비용면에서 절감하는 효과를 가져 올 것으로 분석된다.

4. 참 고 문 헌

1. P. CAUBET, "ACTIVE CONTROL DEVICES FOR ADVANCED SOLID PROPULSION", AAAF, 2006
2. 김중근, 박종호, 이종훈, 전민경, "핀틀 형상이 노즐 유동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구", 한국항공우주학회지, 제38권 10호, 2010, pp.985-991
3. 이용우, 허환일, "핀틀 형상이 가변 노즐목 핀틀 추력기의 노즐 유동에 미치는 영향", 한국추진공학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, 2010, pp.275-278
4. 왕승원, 허환일, "노즐목 가변 추력기에서 Bore가 구동기의 공력하중에 미치는 영향", 한국추진공학회 2011년도 춘계학술대회 논문집, 2011, pp189-192
5. US 6543717 B1, Thierry Le Fur et al(SNECMA), "Compact Optimal and Modulatavle Thrust Device for Controlling Aerospace Vehicle", US Patent, 2003.4
6. 김중근, 핀틀 位置와 形狀이 노즐 流動과 推力 特性에 미치는 影響에 관한 ", 충남대학교 대학원 박사학위논문, 2011
7. 박병훈, 김상민, 윤운섭, 이지형, "Needle 형 pintle 형상에 따른 고체 로켓 모터 내부 유동장의 수치적 연구", 한국추진공학회 2011년도 춘계학술대회 논문집, 2011, pp249-252