

노즐 수축각이 SNECMA 노즐목 가변 추력기 성능에 미치는 영향

왕승원* · 허환일*†

Effect of Nozzle Contraction Angle on Performance of the SNECMA Modulatable Thrust Devices

Seungwon Wang* · Hwanil Huh*†

ABSTRACT

Numerical simulation was carried out for the SNECMA modulatable thrust devices, with four different nozzle contraction angle 45°, 60°, 83°, and 90°, respectively. Results show that 83° nozzle contraction is better in that it comes up with good thrust level with small aerodynamic load.

초 록

본 연구에서는 노즐 수축각의 차이에 따라 추력기의 성능에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 SNECMA 노즐목 가변 추력기에 대해서 4가지 다른 노즐 수축각을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 공력하중과 추력성능에 대해 분석하였고 노즐 수축각 83°의 모델이 가장 좋은 결과를 보였다.

Key Words: Modulatable Thrust Device(추력조절기), Thrust(추력), Pintle(핀틀), Needle(니들), Aerodynamic Load(공력하중), Contraction Angle(수축각)

1. 서 론

노즐목 가변 추력기는 연소실 내부에 Needle 형상의 핀틀이 구동기를 통해 이동을 하면서 추력기의 노즐목 면적을 변화시켜 추력을 조절하는 추력기를 말한다. 이러한 원리는 액체추진기관의 추력조절 기능을 고체추력기에 적용할 수 있도록 한다.

이미 미국, 일본과 유럽을 중심으로 국외에서

는 활발한 연구가 진행되어 국방기술에 적용하기 위한 다양한 성능실험을 통해 실전배치를 하고 있는 상황이다.

국내에서는 최근 국방과학연구소(ADD)를 중심으로 하여 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 직선형상일 때와 에어로스파이크(aerospike) 노즐 형상일 때 각각 보어(bore)의 존재 유·무에 따른 노즐 내부

* 충남대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: hwanil@cnu.ac.kr

의 유동장, 추력성능, 공력하중에 대해 수치해석적 기법으로 분석하였다. 추력기 내부에서 유동 흐름에 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. 핀틀에 존재하는 bore의 존재는 재순환영역의 두께와 핀틀이 받는 공력하중에 영향을 주는 것을 확인하였다.

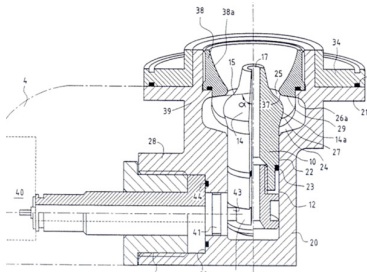


Fig. 1 SNECMA Patent Model[5]

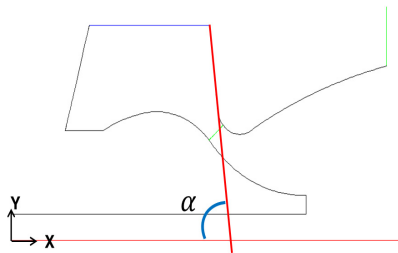


Fig. 2 Modeling of SNECMA Pintle Thruster

SNECMA의 특허[5]에는 핀틀 추력기를 설계하는데 있어 핀틀에 대한 형상뿐만 아니라, 노즐 설계에 대해서도 언급하고 있다. Fig. 1의 특허 모델을 분석한 결과 Fig. 2에서처럼 $\alpha = 83^\circ$ 의 노즐 수축각으로 설계되어 있고, 노즐의 수축각이 핀틀 추력기의 성능에 영향을 미칠 것으로 분석하고 있다.

본 논문에서는 SNECMA의 모델을 참고하여 노즐 수축각에 따라 추력기의 성능과 핀틀에 작용하는 공력하중에 대해 수치해석방법을 사용하여 결과를 분석하였다. 핀틀의 공력하중은 Eq. 1의 식을, 추력은 Eq. 2의 식을 적용하였다.

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

$$F = P_c C_F A_t \quad (2)$$

$$P_c \approx \left(\frac{1}{A_t} \right)^{\frac{1}{(1-n)}} \quad (3)$$

여기서, P_c = 연소실 압력, C_F = 추력계수, A_t = 노즐목 면적, n = 추진제 연소지수를 의미한다. 추력을 계산하는 식에서 연소실 압력과 노즐목의 관계는 Eq. 3으로 정리 할 수 있다.

2. 본 론

2.1 모델의 설계방법과 해석조건

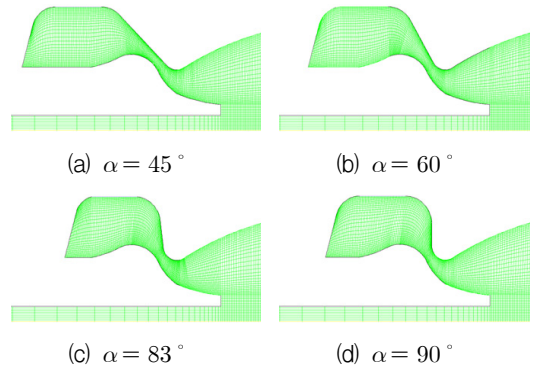


Fig. 3 Mesh of pintle thruster

해석모델을 설계하는데 있어 핀틀과 추력기의 형상은 특허상의 모델[5]을 참고하였고, 노즐의 수축각(α)은 특허모델로 설계된 노즐 수축각 83° 를 기준으로 특허에 제시된 내용을 반영하여 4가지($\alpha = 45^\circ, 60^\circ, 83^\circ, 90^\circ$)형상으로 동일한 핀틀 위치에서 CATIA V5 프로그램으로 설계하였다. 격자구성은 Fig. 3에서처럼 GAMBIT 2.4.6 프로그램으로 정렬격자를 이용하여 해석하고자 하는 유동장을 구성하였다. 유동의 해석은 공급되는 유량이 5.5 kg/s 로 일정하게 유입되는 상황으로 2D, Axi-symmetry 조건, 'Spalart-Allmaras'의 난류모델[6, 7], 해석유체는 이상기체의 냉가

스 공기로 FLUENT V12 프로그램을 사용하여 수행되었다.

2.2 노즐 수축각 차이에 따른 추력성능 분석

추력성능의 비교를 위해 노즐수축각의 차이에 따른 노즐목이 형성되는 위치와 면적에 대한 분석을 진행하였다. 노즐목의 위치는 Fig. 4에서 알 수 있듯이 수축각이 45° 일 때를 제외하고 나머지 3개의 노즐 수축각에서 비슷한 위치와 형상으로 형성되는 것을 알 수 있다. 형성된 노즐목 위치를 통해 노즐목의 면적을 계산하여 비교하였다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 노즐 수축각의 증가에 따라 노즐목의 면적도 함께 증가하는 것을 알 수 있다.

다음으로 연소실의 압력에 대해 비교, 분석을 하였다. 연소실로 유입되는 유량이 동일한 추력기 해석에서 수축각에 따른 연소실의 압력은 Fig. 6처럼 형성됨을 확인하였다. 이러한 결과는 연소실압력과 노즐목 면적간의 상관관계를 정리한 Eq. 3 이론식과 동일한 결과로 노즐 수축각이 증가할수록 연소실의 압력은 감소하는 결과를 보였다. 해석조건과 노즐목 면적, 연소실 압력을 이용하여 추력계수를 계산하였다. 4가지 해석모델은 추력계수 차이가 크지 않지만, 노즐 수축각에 따른 연소실 압력과 유사한 경향을 보이는 것으로 확인되었다.

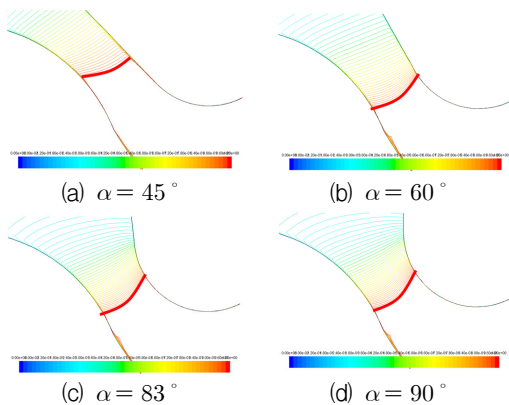


Fig. 4 Position of nozzle throat

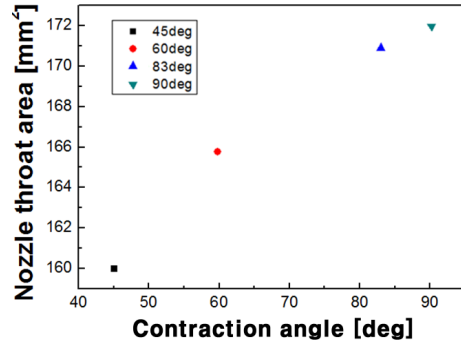


Fig. 5 Nozzle throat area

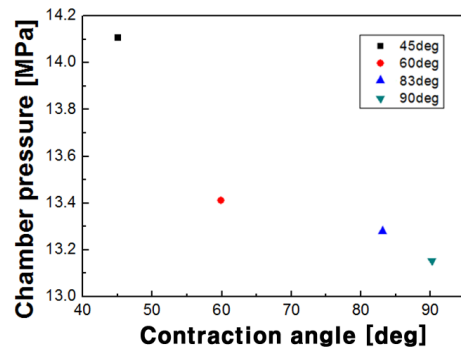


Fig. 6 Chamber pressure

Table 1. Summary of Performance Parameters

[deg]	45	60	83	90
P_c [MPa]	14.11	13.42	13.28	13.16
A_t [mm ²]	160	166	171	172
C_F	1.58	1.57	1.57	1.57
F [N]	3,560	3,504	3,568	3,553

이러한 결과는 일반적인 로켓 추진기관의 추력계수와 팽창비의 관계에서 팽창비가 증가함에 따라 추력계수도 함께 증가[8]하는 이론과 일치한다. 추력성능에 대한 결과를 정리하면 Table 1과 같다. 노즐 수축각에 따른 추력성능은 프랑스의 특허자료에 존재하는 83°에서 가장 큰 결과를 보였다. 일반적인 로켓의 추력성능에서는 Eq.

3에 따라 연소실의 압력 변화율이 노즐목 면적의 변화를 보다 크기 때문에 연소실압력 변화에 의해 추력도 같은 경향으로 결정된다. 하지만, 핀틀을 이용한 추력기에서 노즐 수축각에 따른 로켓성능 분석을 통해 알 수 있듯이 추력의 크기를 결정하는데 있어 어느 한가지 성능변수로 결정되지 않고, 연소실 압력과 노즐목 면적의 상호관계에 따라 결정된다.

2.3 공력하중 분석

핀틀 구동기를 결정하는데 있어 중요한 설계요소 중 하나인 공력하중에 대한 분석을 진행하였다. 총 공력하중은 노즐 수축각에 의해 영향을 받는 핀틀의 윗면에서 작용하는 압력과 공력하중에 의해 그 차이가 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 7을 통해 알 수 있듯이 핀틀에 작용하는 공력하중은 수축각의 증가에 따라 함께 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 노즐목 면적 변화량과 유사하게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

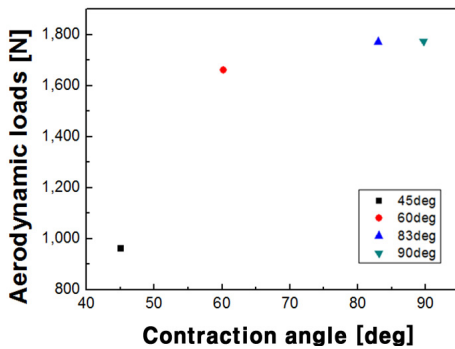


Fig. 7 Aerodynamic loads

3. 결 론

프랑스 SNECMA의 특허자료를 참고로 유량 입구에서 공급되는 질유량이 동일한 조건에서 노즐 수축각에 따른 성능을 분석하였다. 공급되는 유량이 일정하고, 핀틀의 위치가 동일할 때, 노즐목 면적의 크기와 추력계수의 크기는 노즐

수축각의 변화율과 비례하였다. 하지만, 연소실의 압력크기는 노즐 수축각의 변화율과 반비례하는 것을 알 수 있었다. 추력크기에서는 일반적인 추진기관과 다르게 연소실의 압력과 노즐목 면적의 관계에 따라 83°에서 가장 높은 성능을 보였다. 마지막으로 공력하중의 크기는 노즐 수축각의 증가에 따라 함께 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

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, pp.189-192
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 위치와 形狀이 노즐 流動과 推力 特性에 미치는 影響에 관한 ", 충남대학교 대학원 박사학위논문, 2011
7. 박병훈, 김상민, 윤용섭, 이지형, "Needle 형 pintle 형상에 따른 고체 로켓 모터 내부 유동장의 수치적 연구", 한국추진공학회 2011년도 춘계학술대회 논문집, 2011, pp.249-252
8. Sutton, G. P., Rocket Propulsion Elements, 7th ed., John Wiley & Sons Inc., 1992