

추력 극대화를 위한 벨형 노즐 설계

김민철* · 박순호** · 이귀환*** · 이충원***

The Design of The Bell-Shaped Nozzle for The Maximum Thrust

Min-chul Kim* · Soon-ho Park** · Gui-hwan Lee*** · Choong-won Lee****

ABSTRACT

The thrust Control in Solid Propellant Rocket is incomparably limited than that in Liquid Propellant Rocket. Because it is fixed that section to relate a combustion, that is a natural result. The control of a thrust directions in a Solid Propellant Rocket is not efficient for the purpose of a Solid Propellant Rocket. But it is a problem to solve that a weight on board should increase through the maximization of the thrust in a Solid Propellant Rocket.

초 록

고체 추진 로켓에 있어서의 추력제어는 액체 추진 로켓의 그것보다 한정되어 있다. 추진제의 혼합비는 물론 연소시간과 면적 등 연소에 관계된 모든 부분들이 이미 정해져 있기 때문에 당연한 결과이다. 이러한 고체 추진 로켓의 추력을 방향 제어하기는 고체 추진 로켓의 용도나 목적 대비 효율 측면에서 실용적이지 못한 부분이다. 하지만 고체 추진 로켓의 추력의 극대화하여 탑재물의 중량 한계를 늘리고 보다 많은 목적을 위한 탑재물의 증가는 당연히 이루어야 할 과제이다. 고체 추진 로켓에서의 추력을 노즐 형상의 설계를 통해 강구해 보았다.

Key Words: Solid Propellant Rocket(고체추진로켓), Cone-Shaped Nozzle(원추형 노즐), Bell-Shaped nozzle(벨형 노즐), High Pressure Gas Vector Control(고압가스 벡터제어)

1. 서 론

해마다 NURA 로켓 캠프에 참가를 하면서 소

형 고체 로켓을 설계하는 아마추어 로켓티어에 게 매 대회마다 가장 신경을 써서 설계를 하는 부분은 아마도 사출 파트일 것이다. 사출의 성공 여부가 캠프의 두 가지 배점 기준 중에서 관건이라는 사실은 부인할 수가 없다. 실제 로켓티어 들의 축제인 로켓 캠프의 역사는 짧을 뿐만 아 니라 소형 고체 로켓의 관심과 참여도가 대학생 들 사이에서도 활성화 되지 않은 부분이 많아

* 경북대학교 기계공학부생
** 경북대학교 기계공학부생
*** 경북대학교 기계공학부생
**** 경북대학교 기계공학과 교수
연락처자, E-mail: carlitoway@naver.com

대회에 참가한 로켓들 중에서 사출을 성공하는 로켓의 수가 절반 정도 실정이다. 이런 저런 이유로 대회에 참가한 각 대학의 로켓티어들은 모두들 사출에 더욱 신경을 썼고 사출 파트가 중심인 대회가 매년 이루어져 왔다.

하지만 본인은 로켓의 메인은 엔진이고 로켓을 올리는 힘이라는 사실을 다시금 되새겨야 한다는 생각에 사출을 제외한 나머지 한 가지 배점의 기준인 비행궤도와 발사력에 관심을 가졌다. 그렇게 로켓티어의 본래의 꿈인 나의 로켓을 하늘 높이 날리는 그 모습을 내 두 눈으로 직접 보고 싶은 것이 이 프로젝트의 시작이었다.

이 부분은 추력과 관계된 것이고 아마추어가 제작하고 발사가 가능한 로켓의 추진제의 양은 500g 이하로 한정이 되어 있다. 추진제의 양이 정해진 이상 추진제의 성분을 다르게 구성하는 방법 이외엔 노즐 형상을 달리하는 방법만이 추력의 극대화를 꾀할 수 있는 방법으로 알려져 있다[1]. 추진제의 성분마저 아마추어 로켓티어들이 연구용으로 사용하는 기존의 것으로 정한다면 노즐의 형상을 새롭게 디자인해야 추력을 변화시킬 수 있다.

작년까지 우리 학교의 로켓은 말할 것도 없거니와 기존의 다른 대학의 모든 로켓들까지도 노즐의 형상이 원추형으로만 디자인되어 있었다. 원추형 노즐은 분출되는 고압가스가 불필요한 x 방향으로 벡터 힘을 가지게 되어 실제 추력 효율이 많이 떨어진다[2]. 이러한 고압가스의 벡터 힘 성분을 y 방향으로 향하도록 모아주는 벨형 노즐은 이런 손실 추력을 보완하여 추력을 극대화시킬 수 있는 추력의 효율적인 면에서 적합한 노즐이다[3].

2. 벨형 노즐 설계 과정

21 설계전 가정 및 설계 방법

기본적인 추진제의 성분 특성에 따른 연소 특정치나 노즐 입구의 직경, 출구의 직경, 연소실의 면적과 그레이인의 두께들은 원추형의 노즐의 설계에 따른다. 다만 원추

형의 노즐의 부분 형상을 벨형으로 변화시킴으로써 추력의 변화가 어떻게 이루어지는지, 또한 어떠한 문제점들이 있는지를 가늠해 본다[3].

22 원추형 노즐의 설계

(1) 엔진 성능

$$\text{엔진 추력} = 290 \text{ N}$$

$$\text{총추력} = 875 \text{ N} \cdot \text{sec}$$

$$\text{연소실 압력} : 500 \text{ psi} = 3447378 \text{ Pa}$$

$$\text{이상 기체 상수} = 8317$$

(2) 노즐 가정치

$$\text{추진제의 성분} : \text{Sorbitol} \ \& \ \text{KNO}_3$$

$$\text{추진제의 혼합 성분 비율}$$

$$\text{연료} : \text{산화제} = \text{Sorbitol} : \text{KNO}_3 = 35 : 65$$

$$\text{Sorbitol 성분 특성표에서}$$

$$\text{연소 속도} \ v = 0.007852 \text{ m/s}$$

$$\text{연소 시간} \ t = 2.5 \text{ sec}$$

(3) pep 결과치

$$\text{추진제 밀도} = 1.7236 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{비열비} \ k = 1.1378$$

$$\text{연소실온도} \ T_T = 1584 \text{ C}$$

(4) 추력계수

$$C_f = \sqrt{\frac{2k^2}{k-1} \times \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \times \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}$$

$$= 1.45425468$$

(5) 원추형 노즐 사양 (Fig. 1 참조)

$$M = 2.781049768$$

$$\epsilon = 5.8927$$

$$D_t = 0.0094419911 \text{ m}$$

$$D_e = 0.022920128 \text{ m}$$

$$m' = 0.04230665$$

$$D_p = 0.014162866 \text{ m}$$

$$D_g = 0.053422866 \text{ m}$$

$$Web = 0.01963 \text{ m}$$

$$I_{sp} = 574.0510925 \text{ m/s}$$

$$L_g = 0.157620214 \text{ m}$$

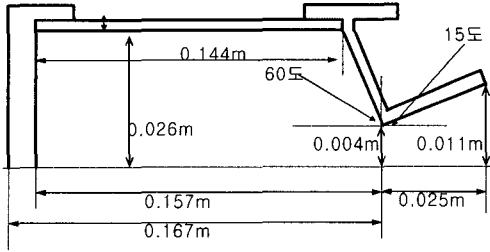


Figure 1 Cone-Shaped Nozzle

2.3 벨형 노즐의 설계

(1) 팽창비는 원추형의 팽창비를 그대로 따른다.

$$\epsilon = 5.8927$$

$$R_t = \frac{D_t}{2} = 0.004720955 \text{ m}$$

$$R_e = \frac{D_e}{2} = 0.011460064 \text{ m}$$

$$1.5 R_t = 0.007081432 \text{ m} \quad (\text{Fig. 2 참조})$$

$$0.382 R_t = 0.001803404 \text{ m}$$

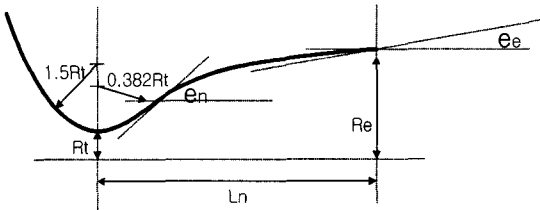


Figure 2 Bell-Shaped Nozzle Blueprint

(2) $L_f = 100\%$ 로 설정하면

$$e_n = 20$$

$$e_e = 8.5$$

e_e 가 8.5도인 것과 삼각 함수를 이용하면

$$L_n = \frac{0.007}{\tan 8.5} = 0.04683 \text{ m}$$

아래의 Fig. 3과 같은 결과를 얻는다.

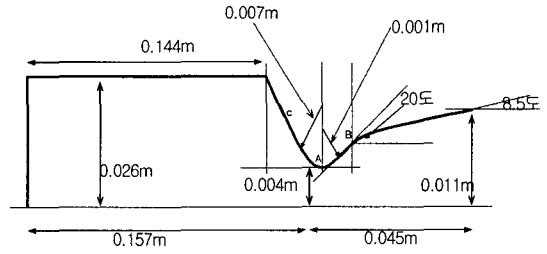


Figure 3 Bell-Shaped Nozzle

3. 벨형 노즐의 추력 테스트

3.1 원추형 노즐의 추력 테스트 결과 (Fig 4)

최대추력 = 250 N

추진제량 = 486 g

연소시간 = 24 sec

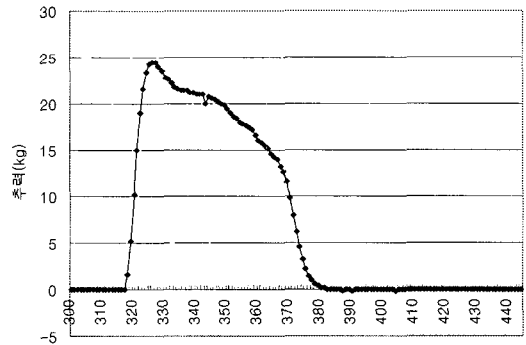


Figure 4 The Graph of Cone-Shaped Nozzle

추력 곡선은 정점 250N을 그리고는 서서히 하강하며 2.3초 후에 0의 추력을 내고는 2.4초 이후 모든 연소가 종료되는 안정적인 곡선을 그렸다. 연소시간 또한 실험 오차를 감안할 때 2.5초의 정확도 범위 내에 들어오는 수준으로 이상적이라고 할 수 있을 시간을 기록했다. 단 한 가지의 문제점이 도출되었다. 최대 추력이 이론상의 설계치인 290N에 비해 모자라는 250N을 나타내었다. 40N의 차이는 실제 로켓의 비행에서는 큰 문제점으로 나타날 수 있다. 그렇지만 문제의 해결책은 의외로 쉽게 찾았다. 원추형의 엔진에 추

진제를 주입할 때 그래인의 형상을 원형으로 하여 실험을 했던 것이 최대 추력의 감소를 가져왔다. 계산 결과 그래인을 원형에서 별형으로 바꾸어 추진제를 주입할 경우 실험 오차로 인한 추력 손실을 인정할 수 있는 한도 내에서 추력이 30N 정도 상승할 수 있는 연소 면적이 증가되었다.

3.2 벨형 노즐 추력 테스트 결과 (Fig 5)

최대추력 = 320 N

추진제양 = 486 g

연소시간 = 2.6 sec

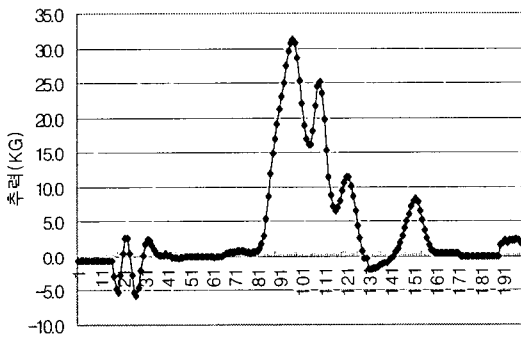


Figure 5 The Graph of Bell-Shaped Nozzle

전체적인 그래프의 모양이 불안정하다. 최대치가 3부분에 걸쳐 나타나며 첫번째와 두번째의 사이에 추력 감소가 심하다. 다만 최대 추력은 320N으로 충분하고 연소시간도 적정선을 유지한다. 고찰 결과 노즐의 내부 벽면의 가공상의 문제로 인해 그래프가 불안정해진 것으로 판명되었다. 로켓 엔진 설계 프로그램의 시뮬레이션 결과 최대 추력이 320N의 안정된 추력 곡선을 다시 얻어 낼 수 있었다. 이것은 원래 원추형의 설계로 얻고자 했던 최대추력 290N을 30N이나 상

회하는 것이다. 실험의 특성과 오차로 인해 오직 실험치만 놓고 본다고 할 때 벨형의 노즐이 원추형의 노즐에 비해 무려 70N의 추력 상승 효과를 가져왔다. 하지만 한 가지 아쉬운 점이라고 한다면 벨형의 가공이 지극히 어렵고 그러기에 이번 결과와 같이 매끄럽지 못한 추력을 도출하기 십상이라는 점이다.

4. 고찰 및 결론

추력의 극대화를 위해 기존의 원추형 노즐의 형상에서 벨형 노즐로의 변화는 실험 결과에 나타나듯이 70N의 추력 이익을 가져왔다. 실험에 사용한 추진제의 양은 486g 으로 두 조건에서 모두 동일하였고 같은 시기에 동일한 추력 테스트기를 사용하여 추력을 측정하였다. 그러므로 실험에 나타나는 오차는 두 노즐의 실험에 모두 적용된다고 볼 수 있고 추력의 상승 효과는 노즐의 형상 변화만으로도 엄청나다는 사실을 얻었다. 이번 보고서를 통해 벨형상의 노즐의 효율성을 알게 되었지만 그런 높은 효율에도 불구하고 가공의 어려움으로 인해 추력이 다소 불안정한 면모를 보임에 따라 그 이용도가 학생 수준에서는 한계를 드러내었다. 다만 가공의 원활성만 보장된다면 더할 나위없는 이상적인 노즐임에 확실하다.

참고 문헌

1. 윤웅섭, 김영수, "로켓 공학", 경문각, 2004
2. 홍용식, "우주 추진 공학", 청운당, 2003
3. MARCEL BARRERE, ANDRE JAUMOTTE, "ROCKET PROPULSION", ELSEVIER PUBLISHING COMPANY