

파라핀 연료를 사용하는 소형 하이브리드 로켓의 연소 특성

김권호* · 박현춘** · 백승욱***

Combustion Characteristics of a Small Hybrid Rocket Using Paraffin-Wax as Fuel

Kwonho Kim* · Hyunchun Park** · Seung Wook Baek***

ABSTRACT

This study experimentally examines combustion characteristics of a hybrid rocket in which solid paraffin is used as a fuel, while oxidizer is pure oxygen. Especially, the experiment investigates the effects of chamber pressure and configuration of fuel grain. The pressure inside the combustion chamber is varied by changing a flow rate of oxidizer. The regression rate is observed to increase as the chamber pressure does. There also exists the effects of shape of fuel grain on thrust. Characteristic of paraffin hybrid rocket changes with shape of fuel grain. When there is a room near the injector, thrust increases. On the other hand, the room near the nozzle does not contribute to thrust increasement.

초 록

고체 연료로 파라핀을 사용하고 산소를 산화제로 사용하는 하이브리드 로켓의 연소 특성에 대해 실험 연구를 진행하였다. 특히 연소실 내부의 압력과 연료 그레인의 형태에 따른 영향을 살펴보았다. 연소 시 산화제의 유입량을 변화시키며 연소실 내부의 압력을 측정하였다. 관찰된 압력변화 범위 내에서 연소실 내부의 압력이 증가할 때 후퇴율도 증가함을 보여주었다. 또한 연료 그레인 형태의 변화에 따라 후퇴율이나 추력 등은 어느 정도 경향성을 보인다. 산화제 유입 부분에 공간을 마련하면 추력이 증가하나 노즐 가까운 곳에 형성한 공간은 추력 상승에 큰 도움이 되지 않는다.

Key Words: Hybrid Rocket Engine(하이브리드로켓엔진), Paraffin(파라핀), Thrust(추력), Pressure(압력), Regression Rate(후퇴율)

1. 서 론

* KAIST 항공우주공학전공 학사과정
** KAIST 항공우주공학전공 석사과정
*** KAIST 항공우주공학전공 교수

파라핀 계열 연료는 기존의 하이브리드 로켓이 가지고 있던 낮은 후퇴율을 해결할 수 있는

연료 중 하나로 여겨진다. Karabeyoglu[1]등에 따르면 파라핀 연료는 HTPB와 같은 하이브리드 로켓 연료에 비해 3~4배 높은 후퇴율을 가진다. 특히 파라핀 연료의 사용은 하이브리드 로켓의 성능을 향상시키고자 시도된 기존의 방법[2]과는 달리 안정적인 연소 과정이나 단순한 형태의 연료 그레인과 같은 하이브리드 로켓의 장점을 충분히 살릴 수 있기 때문에 주목받고 있다. 이러한 결과가 관찰되는 이유는 연소할 때 액체 상태로 상변이를 겪은 뒤 연소하는 파라핀의 특성 때문이라고 추측되고 있다.[3, 4]

본 연구에서는 파라핀 연료를 사용하는 소형 하이브리드 로켓의 연소 특성을 살펴보고자 한다. 특히 연소실 압력과 추력과의 관계에 집중하고자 한다. 또한 그레인의 형상에 따른 추력 변화도 알아보고 파라핀 하이브리드 로켓의 추력 향상 방법에 대해 생각해 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험장치

본 연구는 Fig. 1.과 같은 하이브리드 로켓 실험 장치를 제작해 사용했다.

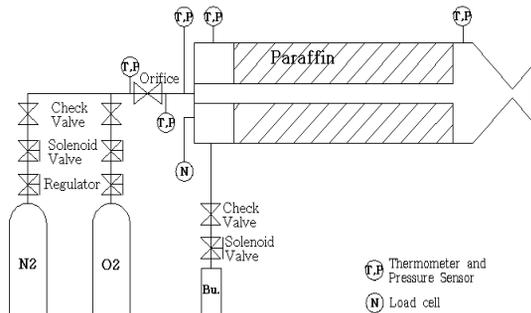


Fig. 1. Schematic of experimental system

압력과 온도는 총 다섯 곳에서 측정한다. 유량을 측정하기 위한 오리피스에 두 개의 압력센서와 두 개의 온도센서가 위치한다. 오리피스는 연소실과 산소, 질소 탱크를 연결하는 배관 중간에 설치했다. 나머지 압력, 온도센서는 연소실의 상

황을 측정한다. 산화제가 연소실에 들어가기 직전 배관에서 압력과 온도를 측정하고 연소실 안에서는 연료 앞과 뒤에 각각 압력센서와 온도센서를 설치했다. 로켓은 가이드 위에 설치해 추력이 발생하면 연소실의 로드셀을 밀착하도록 하였다. 모든 데이터는 DAQ 보드를 통해 컴퓨터에 저장된다.

Table 1. Dimension of paraffin fuel grain

길이	110 mm
외경	44 mm
내경	10 mm
무게	139.0 g

연료로 사용한 파라핀은 Table 1.에서 표시된 바와 같다. 산화제로는 기체 산소를 사용했다.

2.2 실험방법

실험과정은 스위치와 타이머로 제어한다. 연소는 평균 4.5초 동안 이루어졌으며 실험 전후에 후퇴율 측정을 위해 연료의 크기를 측정했다.

기체 산소가 연소실에 유입되면 전기 스파크 장치로 부탄을 폭발시켜 그 에너지로 연료가 점화된다. 연소된 기체는 노즐을 통해 분사되면서 추력을 발생시킨다. 연소가 끝난 후, 질소를 유입시켜 잔여연소를 종식시킨다. 솔레노이드밸브와 체크밸브를 이용하여 산소와 질소, 부탄의 유입을 조절하였다.

산화제 공급 압력은 5 atm에서 35 atm까지 변화시켰다. 연료 형태는 연료 그레인의 구경을 변화시키거나 산화제와 닿는 면을 다르게 하는 방식으로 변경하며 실험하였다. 연료 형태 변화에 대한 자세한 내용은 2.3.2.에서 자세히 언급한다.

2.3 실험결과

2.3.1. 연소실 내부 압력과 추력

우선 실험 후 측정된 추력과 연소실 내부 압력 등을 해석하였다.

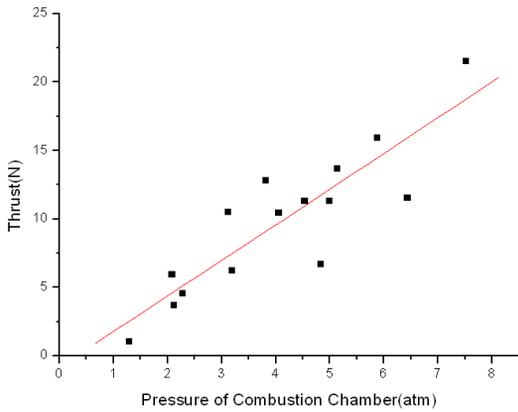


Fig. 2. Pressure of combustion chamber against thrust graph

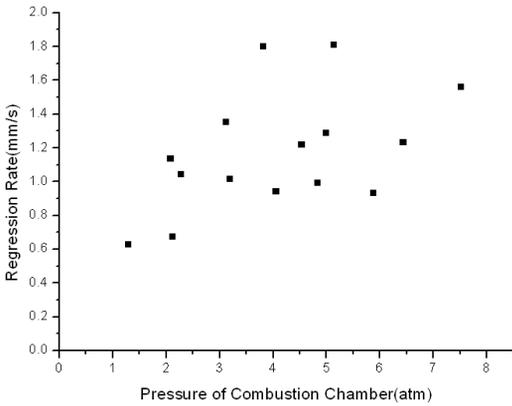


Fig. 3. Pressure of combustion chamber against regression rate

Figure 2는 연소실 내부 압력과 추력의 상관관계를 보여준다. 실험결과 압력과 추력이 비례관계를 가짐을 쉽게 알 수 있다. 실선은 데이터를 일차 피팅한 결과로 그 식은 아래와 같다.

$$T=2.604P-0.831, T:\text{Thrust(N)}, P:\text{Pressure(atm)}$$

연소실 내부의 압력과 연료의 크기 변화로 구한 후퇴율과의 관계는 Fig 3.과 같은 분포를 보인다. 결과로 볼 때 연소실 내부의 압력이 증가할 때 후퇴율도 증가함을 보여준다.

2.3.2. 그레인의 형태와 추력

추력은 그레인의 형태에도 영향을 받으므로

Fig. 4.와 같이 네 가지의 그레인 형태에 대해 조건을 바꾸어 가며 실험하였다. Fig. 4.에서 왼쪽이 인젝터 방향이고 오른쪽이 노즐 방향이다. 빗금 쳐진 부분은 파라핀을 가리킨다. 그림 ①은 일반적인 그레인의 형태이다. ②는 그레인 앞쪽에 공간을 만든 경우이다. ③과 ④는 그레인의 내경을 다른 크기로 제작한 것으로 ③은 인젝터 쪽에 구경이 넓은 연료 그레인이 위치하며 ④는 노즐 쪽에 구경이 넓은 그레인이 위치한다.

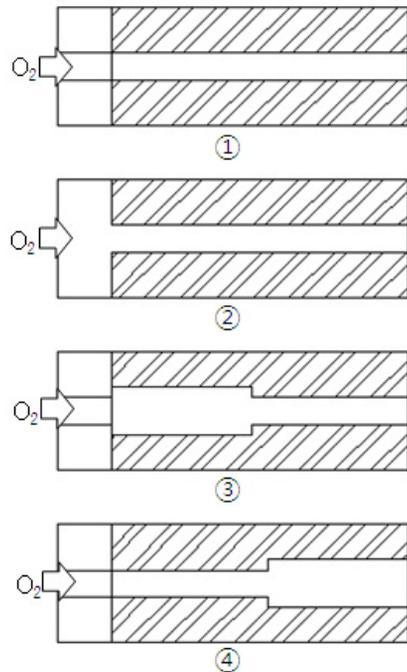


Fig. 4. Schematic of various fuel grains

각 경우에 같은 연소 실험을 한 후 Fig. 5.와 Fig. 6.과 같이 추력이 측정되었다. X축의 숫자는 산화제의 유입 압력이며 뒤쪽의 원 숫자는 그레인의 형태이다.

Figure 5.는 전연소실이 있는 ②의 경우와 없는 ①의 경우의 추력을 비교한 그래프이다. 그래프를 보면 ②의 경우에 일반적인 그레인보다 더 큰 추력이 발생함을 알 수 있다. ②의 경우 ①보다 후퇴율은 40%이상, 연소실 내부 압력은 10% 이상 크게 측정되었다. 이로 미루어 볼 때, 전연

소실을 설치하면 연소실 앞부분에서 연소가 빠르게 진행되며 이것이 연소실 압력의 증가로 이어짐을 알 수 있다. 높은 압력으로 기체가 배출되면서 더 큰 추력이 발생하는 것으로 보인다.

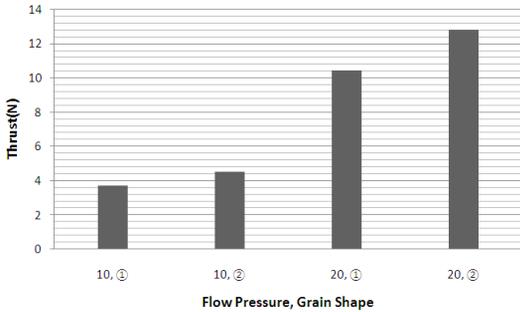


Fig. 5. Thrust difference along pre-combustion chamber existence

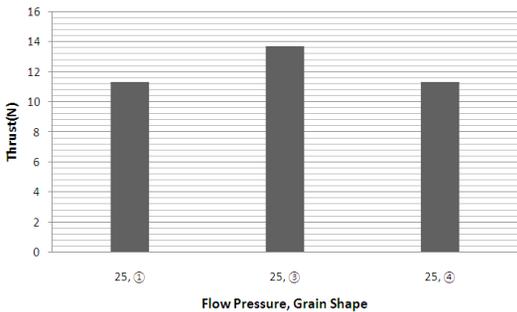


Fig. 6. Thrust difference along various grain shapes

Figure 6.은 일반적인 형태의 그레인과 ③, ④의 형태를 가지는 그레인으로 실험한 경우 측정된 추력을 비교한 그래프이다. ③의 경우 일반적인 형태보다 더 큰 추력이 발생했지만 ④의 경우에는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 연소실 내부 압력과 후퇴율도 마찬가지로 측정되었다.

③의 경우도 ②의 경우와 마찬가지로 노즐 멀리서 생성된 연소 기체가 더 높은 압력을 가지면서 추력도 향상됨을 알 수 있다. 반면에 ④의 경우에는 노즐 가까이에 넓은 공간을 가지기 때문에 다른 경우보다 산화제가 충분히 연소에 참여하지 못하고 연소실을 쉽게 빠져나가 ②나 ③

에서 보이는 장점을 가지지 못한다. ④의 경우 ①의 경우보다 후퇴율도 감소했는데 이 역시 같은 이유에 의한 것으로 보인다.

3. 결 론

Table 1.에 제시된 크기의 연료 그레인을 사용하여 산화제 유입 압력과 그레인의 형태를 변화시키며 실험을 반복하였다. 연소 실험을 통해 다음과 같은 파라핀 기반 하이브리드 로켓의 연소 특성을 발견하였다.

- 하이브리드 로켓엔진이 연소할 때, 연소실 내부 압력과 추력은 선형관계를 가진다. 또한 후퇴율은 연소실 내부 압력의 증가에 따라 증가하는 경향성을 보였다.
- 전연소실을 설치하거나 노즐에서 먼 쪽에 구멍이 넓은 연료 그레인 토막을 위치했을 때 추력이 향상되었다.

참 고 문 헌

1. M. A. Karabeyoglu, B. J. Cantwell, D. Altman, "Development and Testing of Paraffin-Based Hybrid Rocket Fuels" July 8-11,2001 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit
2. 황영춘, 이창진, "스윙 유동과 나선형 그레인에 의한 하이브리드 로켓 연료의 연소율 향상", 2006, 한국항공우주학회지, Vol.34, No.4
3. Arif Karabeyoglu, "Scale-Up Tests of High Regression Rate Paraffin-Based Hybrid Rocket Fuels" November-December 2004 Journal of Propulsion and Power Vol. 20, No. 6
4. 박현춘, 정은상, 김태규, 권세진, "Sucrose-KNO3 점화장치를 사용하는 파라핀-왁스 하이브리드 로켓의 연소 특성", 2007년, 한국항공우주공학회 춘계학술발표회