

# 하이브리드 로켓에서의 압력에 따른 연소특성에 관한 연구

조정태\* · 김기훈\* · 이정표\* · 김학철\*\* · 박성우\*\* · 박준형\*\* · 한희수\*\* · 황재웅\*\* ·  
문희장\*\*\* · 성홍계\*\*\* · 김진곤\*\*\*

## A Study on Combustion Characteristic with Chamber Pressure in Hybrid Rocket

Jung-Tae Cho\* · Gi-Hun Kim\* · Jung-Pyo Lee\* · Hak-Chul Kim\*\* · Seon-Woo Park\*\* ·  
Joon-Hyng Park\*\* · Hee-Soo Han\*\* · Jae-Woong Hwang\*\* · Hee-Jang Moon\*\*\* · Hong-Gye  
Sung\*\*\* · Jin-Kon Kim\*\*\*

### ABSTRACT

The combustion characteristic of solid fuel with chamber pressure were experimentally studied in hybrid combustion. This paper was experimental confirmed whether solid fuel affected not only oxidizer mass flux but also chamber pressure. Poly-Ethylene(PE) was used as fuel, GOX was used as oxidizer. Chamber pressure was controled by nozzle throat diameter 6mm and 9mm. In low oxidizer mass flux, solid fuel regression rate was affected not only oxidizer mass flux but also chamber pressure. As well, the regression rate increase as chamber pressure increase with same oxidizer mass flux

### 초 록

하이브리드 연소에서 연소실 압력에 따른 고체 연료의 연소 특성을 실험적으로 연구하였다. 본 연구는 낮은 산화제 평균 질량 유속구간에서 고체 연료 후퇴율이 산화제 유속 뿐만 아니라 연소실 압력에 영향을 있는지 실험적으로 확인하였다. 연료로 Poly-Ethylene과 산화제로 GOX를 이용하였으며, 동일 산화제 유속에서 연소실 압력 변화는 6mm,9mm의 노즐 목 직경으로 사용하였다. 낮은 산화제 질량 유속구간에서 고체연료 후퇴율이 산화제 유속뿐만 아니라 압력에 의한 영향이 있고, 동일 산화제 유속에서 압력이 증가 할수록 후퇴율이 증가함을 확인 하였다.

Key Words: Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Regression Rate(후퇴율), Chamber Pressure(연소실 압력), Radiation Heat Transfer(복사열전달), Poly-Ethylene

\* 한국 항공대학교 항공우주 및 기계공학과  
\*\* 한국 항공대학교 항공우주 및 기계공학부  
\*\*\* 한국 항공대학교 항공우주 및 기계공학과  
연락처, E-mail: jkkm@kau.ac.kr

### 1. 서 론

하이브리드 로켓 고유의 복잡한 연소 과정은 추진제 조합에 따라 연료면이 타들어 가는 속도

로 정의되는 후퇴율로 정량화되어 연구가 진행되어 오고 있다. 이에 대해 많은 연구자들의 노력으로 연소에 영향을 미치는 산화제 질량유량, 연소실 압력, 화염으로부터 연료표면으로의 열전달량, 연료 그레이의 형상 및 L/D비, 연소실 형상, 액체 산화제와 고체 연료의 다양한 조합특성에 대해 어느 정도 이론적 체계를 이루고 있지만, 일부 제한적인 조건에 대한 실험결과와 실험식만이 제시되었고, 아직까지 연소 형상에 대한 완전한 이해는 이루어지지 않고 있다.

본 연구는 연소실 압력에 따른 고체 연료의 후퇴율의 변화에 대한 실험을 수행함으로써 낮은 유량 범위에서의 압력에 따른 고체 연료의 연소 특성을 실험적으로 확인하는데 목적이 있다.

## 2. 본 론

### 2.1 이론적 배경

산화제 공급유속과 압력에 따른 고체연료의 Regression Rate의 변화를 세가지 주요 영역으로 나누어 각 영역을 설명하였다[2].

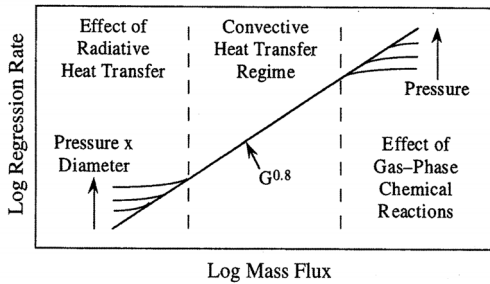


Fig. 1 Oxidizer average mass flux vs Regression rate

산화제 유속(Mass flux)이 낮은 영역에서는 대류열전달 뿐만 아니라 복사에 의한 열전달이 상대적으로 커져 연소실 압력을 높여주면 동일한 유량범위에서도 고체연료의 후퇴율은 증가한다. 그리고 산화제 유속(Mass flux)이 높은 영역에서는 압력이 낮으면 Reaction rate가 감소하고, Diffusion rate가 증가하여 화염면이 두꺼워져

압력에 영향을 받게 된다.[2,3]

하이브리드 추진에서 복사에 의한 열전달을 무시할 수 없는 낮은 산화제 유속 구간에서는 압력에 영향을 받는 고체연료의 후퇴율을 Eq. 1 과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho v)_s = \dot{r} \rho = \frac{\dot{Q}_c + \dot{Q}_r}{h_v} \quad (1)$$

복사 열전달량을 고려한 고체연료의 후퇴율에 관한 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{r} = \dot{r}_d \left( e^{\frac{-0.75 \dot{Q}_c}{\dot{Q}_c}} + \frac{\dot{Q}_r}{\dot{Q}_c} \right) \quad (2)$$

Eq. 2에서 보는바와 같이 복사 열전달량이 증가하면 대류 열전달량만을 고려 하였을때의 고체 연료의 후퇴율( $\dot{r}_d$ )보다 큰 값을 가짐을 볼 수 있고, 복사에 의한 열전달량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_r = \sigma T_g^4 (1 - e^{-kPD}) \quad (3)$$

Eq. 3에서 보면 복사 열전달량은 압력에 영향을 받고, k는 Gas-phase absorption coefficient으로 압력의 함수이며 아래 Eq. 4와 같이 쓸 수 있다.[5]

$$k = 9.33 \times 10^{-4} - 6.16 \times 10^{-6} p + 1.7 \quad (4)$$

위의 이론적 전개를 바탕으로 압력증가로 인한 복사 열전달량의 증가가 고체연료 후퇴율 증가에 영향을 주는지 확인하기 위해 실험을 수행하였다.

### 2.2 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용된 하이브리드 연소 실험 장치는 Fig. 2와 같다. 전체 시스템은 산화제 공급 시스템, 점화시스템, 연소기, 데이터 획득 및 제어 시스템으로 구성되어 있다.

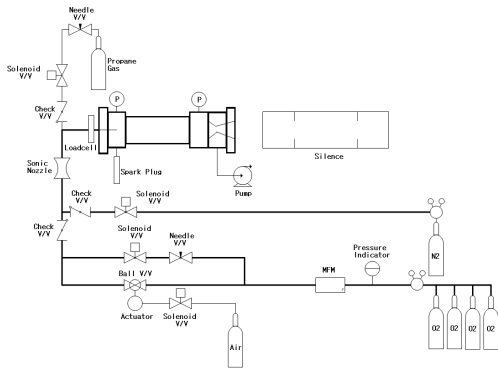


Fig. 2 Schematic of the Hybrid Experimental System

산화제 공급 시스템은  $120 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 충전된 가스 실린더 4개를 병렬 연결 하여 산화제를 공급하였고, 일정한 산화제 유량을 공급하기 위해서 산화제 배관내 초킹 오리피스스를 설치하였다. 점화시스템은 산소와 부탄을 혼합한 후 스파크 플러그를 이용하여 점화토록 하였다. 연소기는 Pre-Chamber, 연료 그레이н, Post Chamber, 수냉식 구리 노즐로 구성되며 양단 플렌지를 이용하여 고정토록 하였다. 본 실험 장치의 제어 및 각 센서의 데이터 획득을 위하여 Labview 프로그램을 사용하였다.

Table 1. 연소 실험 조건

Fuel	종류	Poly-Ethylene(PE)
	밀도	$951 \text{ kg/m}^3$
	크기	길이 : 200 mm 내경 : 15 mm
Oxidizer	종류	GOX(기체산소)
	공급압력	$25 \sim 40 \text{ kgf/cm}^2$
	공급유량	$0.013 \sim 0.044 \text{ kg/sec}$
노즐 목 직경		6 mm, 9 mm

실험 조건은 Table. 1과 같으며 연료와 산화제는 각각 PE와 GOX를 사용하였다. 연료의 초기 포트 직경이 15mm 이며, 길이가 200mm의 Single-port 그레이н을 사용하였다. 산화제는 공급압력과 초킹 오리피스스를 이용하여 연소실 내로

유입되는 산화제의 질량유량을  $0.013 \sim 0.044 \text{ kg/sec}$ 로 조절 하였다.

하이브리드 연소에서의 동일한 산화제 평균 유속에서의 압력 영향을 확인하기 위해서 연소기 후방에 장착되는 수냉식 구리 노즐 목의 직경이 6mm와 9mm인 노즐을 이용하여 산화제 공급유량은 같지만, 연소실 압력을 바꿀 수 있었다.

### 3. 결과 분석

Fig. 3은 평균 산화제 유속에 따른 연소실의 압력변화를 노즐목 크기에 따라 나타내었다. 노즐목 크기를 줄임으로써 동일 산화제 평균 유속에서 연소실압력을 증가시킬 수 있었다. 연소실의 압력은 산화제 평균 유속이 증가함에 따라 더욱더 증가함을 확인 할 수 있다. Fig. 4는 산화제 평균 유속에 따른 평균 후퇴율을 노즐목 크기에 따라 나타내었다. 노즐 목 크기에 상관 없이 연소실 압력이 증가함에 따라 고체 연료 후퇴율이 증가함을 확인 할 수 있다.

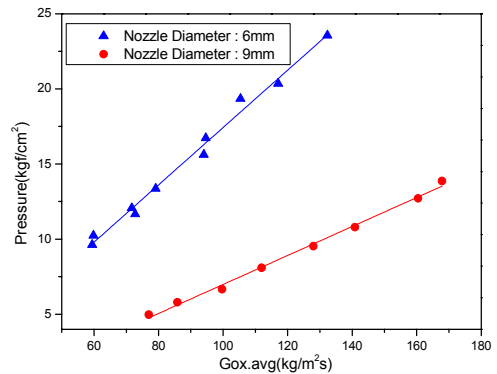


Fig. 3 Oxidizer average mass flux vs Chamber Pressure

약  $150 \text{ kg/m}^2\text{s}$  미만의 산화제 유속구간에서 상대적으로 대류 열전달뿐만 아니라 복사 열전달도 연소에 큰 영향을 끼쳐 연소실 압력이 증가함에 따라 고체 연료 후퇴율이 높아진 것으로 판단된다.

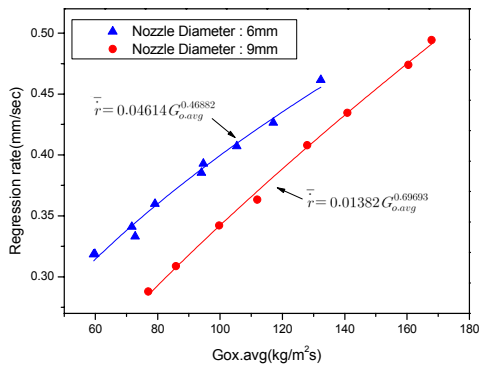


Fig. 4 Oxidizer average mass flux vs Regression Rate

Fig. 3에서 산화제 평균 유속이 증가함에 따라 연소실 압력이 크게 증가하였다. Fig. 4에서 고체 연료 후퇴율은 산화제 평균 유속이 증가함에 따라 상대적으로 감소함을 보였다. 산화제 평균 유속이 커질수록 연소실 압력이 증가하는 반면 고체 연료 후퇴율의 증가량은 작아짐을 볼 수 있다. 이는 산화제 평균 유속이 증가 할수록 열 전달량은 증가하지만 산화제 유속이 증가할수록 압력에 따른 복사 열전달량 증가가 대류 열전달량 증가와 비교해 볼 때 작은 양이기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통해 낮은 산화제 유속 구간에서 압력증가로 인해 고체 연료 표면으로의 복사 열 전달량이 증가하기 때문인 것으로 판단되고 고체 연료의 후퇴율이 증가한다는 사실을 실험적으로 확인할 수 있었다. 또한 산화제 평균 유속이 증가함에 따라 복사 열전달량은 증가 하지만 대류 열전달에 비해 복사 열전달량은 무시할 정도로 작아진 것으로 보인다. 본 연구는 낮은 산

화제 평균 유속 구간에 대한 실험만이 수행되었다. 하이브리드 로켓 엔진의 정확한 추진 성능 예측을 위해서는 산화제 저유속 구간뿐만 아니라 다양한 산화제 유속범위에서도 연소실 압력에 따른 연소성능을 확인해야 하겠다.

#### 후 기

이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-10034-0(2007))

#### 참 고 문 헌

1. Ronald W. Humble, Gary N. Henry, Wiley J. Larson "Space Propulsion analysis and Design" McGraw-Hill, pp 365-439
2. Martin J. Chiaverini, "Regression rate and pyrolysis behavior of HTPB-based solid fuels in a Hybrid Rocket Motor: A Thesis in Mechanical Engineering, the Graduate School Pennsylvania State Univ. 1997
3. L.D. Smoot and C. F Price "Pressure Dependence of Hybrid Fuel Regression Rate" AIAA Journal Vol.5, No.1, 1967
4. 유덕근, 김진곤, 문희장, 김수종, 국태승 "하이브리드 연소에서 낮은 범위의 유량에서 압력에 따른 고체연료 후퇴율 변화에 대한 실험적 연구" 한국항공우주학회, 2003년 추계 학술대회
5. 유덕근, "산화제 공급유량과 압력에 따른 하이브리드 로켓 연소 특성에 관한 실험적 연구" 한국항공대학교 석사학위 논문, 2004