

# 하이브리드 로켓에서의 연료포트 직경에 따른 연소특성에 관한 연구

이정표\* · 조정태\* · 김기훈\* · 김수종\* · 김학철\*\* · 우경진\*\* · 문희장\*\*\* · 성홍계\*\*\* · 김진곤\*\*\*

## A Study on Combustion Characteristic with Port-Diameter of fuel in Hybrid Rocket

Jung-Pyo Lee\* · Jungtae Cho\* · Gihun Kim\* · Soojong Kim\* · Hakchul Kim\*\* · Kyoungjin Woo\*\* · Heejang Moon\*\*\* · Honggye Sung\*\*\* · Jinkon Kim\*\*\*

### ABSTRACT

Combustion Characteristic with initial port-diameter of fuel was studied in hybrid propulsion system using cylindrical single port-grain. In order to understand a variation of combustion characteristic with initial port-diameter, experimental studies were performed with the GOX and GN<sub>2</sub>O as oxidizer, and PE as fuel. As results, burning rate decreased with increase of initial port-diameter of fuel. And the variation of burning rate with using GN<sub>2</sub>O is smaller than using GOX.

### 초 록

원통형 형상의 연료 그레이ンを 적용한 하이브리드 추진 시스템에서 연료포트 초기 직경에 따른 연소특성을 고찰하였다. 산화제에 따라 달라지는 연료포트 직경에 따른 연소특성 변화를 알아보고자 산화제로는 GOX와 GN<sub>2</sub>O를 적용하였고, 고체연료로는 PE를 적용해 실험을 수행하였다. 동일 산화제 유량에서 산화제와 상관없이 고체연료의 초기 포트직경이 커짐에 따라 연소량이 감소함을 확인했고, 산화제로 GN<sub>2</sub>O를 적용한 경우가 산화제로 GOX를 적용한 경우보다 연료포트 초기 직경에 따른 연소량 차이가 줄어들음을 확인하였다.

Key Words: Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Regression Rate(후퇴율), Oxidizer(산화제), O/F Ratio(O/F 비)

### 1. 서 론

하이브리드 연소에서 원통형 형상의 연료 그레이ンは 연료의 포트 직경이 커짐에 따라 그레이ん 표면적이 증가하게 되고, 이 때문에 후퇴율은 감소하게 된다.[1, 2] 후퇴율에 대한 연료 포트 직경의 스케일 영향을 Evans et al[1]은 포트 직경이 커짐에 따라 화염으로부터 고체연료 표면으

\* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학부  
\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과  
\*\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부  
연락처, E-mail: jklim@kau.ac.kr

로의 단위 표면적당 열전달량이 감소하기 때문에 후퇴율이 작아진다고 언급하고 있다.

본 연구에서는 하이브리드 로켓 추진에서, 연료 포트의 초기 직경에 따른 연소특성이 산화제의 종류에 따라 어떻게 나타나는지 알아보기 위해 실험을 수행하였고, 실험 결과를 분석 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 하이브리드 연소 실험 장치는 Fig. 1과 같다. 전체 시스템은 점화 시스템, 연소기 시스템, 산화제 공급 시스템, 데이터 획득 및 제어 시스템의 네 부분으로 구성되어 있다.[3]

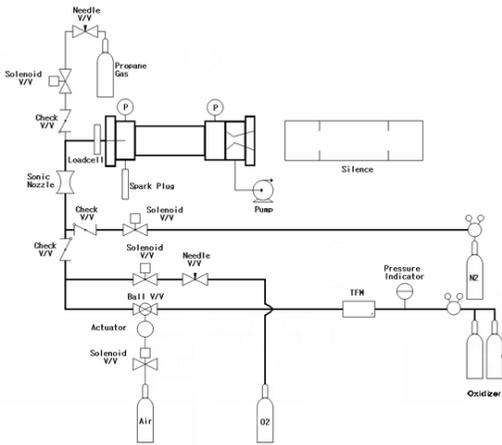


Fig. 1 Schematic of the Hybrid Experimental System

점화 시스템은 고전압 발생기를 통해 생기는 전류를 스파크 플러그에 전달해 발생하는 열원을 이용해 부탄, 프로판 혼합 가스를 점화하는 방식을 사용하였다.

산화제로는 GOX와 GN<sub>2</sub>O를 사용하였고, 점화 장치에 사용되는 산화제로 GOX를 사용하기 위해 별도의 시스템을 구축하였다. GN<sub>2</sub>O는 GOX에 비해 점화에 요구되는 발화열이 높아 점화용 산화제로 사용하기에 부적합하다. 산화제 공급압력은 충전된 상용 가스 실린더 2개를 병렬로 연결하여 충분히 확보하였고 유량을 조절하기 위하여 초킹 오리피스를 산화제 공급 배관에 설치하였다.

산화제 유량, 추력 및 연소실 압력을 측정하기 위한 센서를 실험 장치에 설치하였고, 실험을 제

어하고 데이터를 획득하기 위해 Lab-View 프로그램을 사용하였다.

연료포트 직경에 따른 연소특성을 알아보기 위한 실험 조건은 Table. 1과 같고, 산화제 GOX와 GN<sub>2</sub>O를 적용해 실험을 수행하였다.

Table 1. Specification of the Combustion Test

Oxidizer	GOX, GN <sub>2</sub> O
Solid Fuel	PE
Length	200 mm
Port Diameter	10, 15 mm
Burning Time	10 sec
Oxidizer Supply Range	13.8 ~ 42.7 g/sec

### 2.2 실험결과

Figure. 2는 GOX, GN<sub>2</sub>O 산화제와 PE 연료 반응에서의 O/F 비에 대한 화염온도를 CEA Code (Chemical Equilibrium and Applications)를 사용해 계산한 것이다. GOX와 PE 반응은 O/F 비 3 부근에서 가장 높은 화염온도를 나타내고, GN<sub>2</sub>O와 PE 반응은 O/F 비 7 부근에서 가장 높은 화염온도를 나타낸다. PE와의 반응에서 GOX가 GN<sub>2</sub>O보다 최고 화염온도는 더 높게 나타나지만, O/F 비가 커질수록 화염온도는 급격하게 떨어짐을 확인할 수 있다.

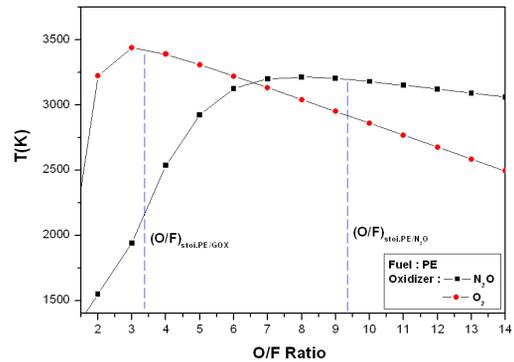


Fig. 2 Flame Temperature with O/F Ratio (Oxidizer : GOX, GN<sub>2</sub>O, Fuel : PE)

Figure. 3-1, 3-2는 산화제로 각각 GOX와 GN<sub>2</sub>O를 적용했을 때, 산화제 질량유속에 대한 고체연료 후퇴율을 연료의 초기 포트직경에 따라 나타내고 있다. 산화제로 GOX를 적용했을 때에는 고체연료의 포트직경이 커짐에 따라 동

일한 산화제 유속에서 고체연료의 후퇴율이 감소하지만, 산화제로  $\text{GN}_2\text{O}$ 를 적용했을 때에는 고체연료의 포트직경이 커짐에 따라 동일한 산화제 유속에서 고체연료의 후퇴율이 증가하고 있다. 산화제의 종류에 따라 동일 산화제 유속에서 고체연료 포트직경에 따른 후퇴율의 경향이 달라지는 것을 확인 할 수 있다.

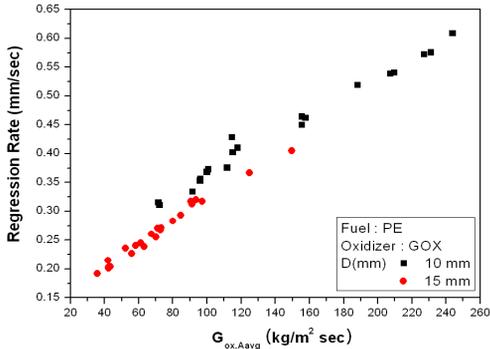


Fig. 3-1 Oxidizer mass flux vs Fuel Regression Rate (Oxidizer : GOX, Fuel : PE)

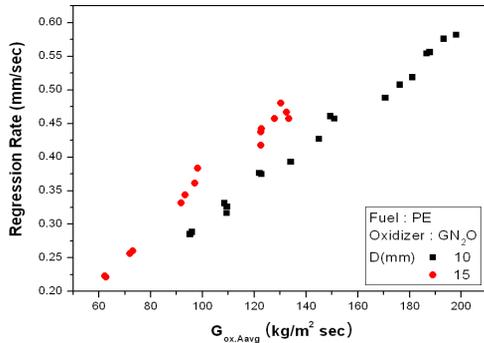


Fig. 3-2 Oxidizer mass flux vs Fuel Regression Rate (Oxidizer :  $\text{GN}_2\text{O}$ , Fuel : PE)

Figure. 4-1, 4-2는 산화제로 각각 GOX와  $\text{GN}_2\text{O}$ 를 사용했을 때, 산화제 유량에 대한 고체연료의 연소 유량 관계를 고체연료 포트직경에 따라 나타내고 있다. 고체연료의 포트직경이 커지게 되면 화염으로부터 고체연료로의 표면적당 열전달이 감소되어 산화제 GOX와  $\text{GN}_2\text{O}$ 를 사용했을 때 모두 동일 산화제 유량에 대해 고체연료 연소량은 감소하고 있다. 그러나 산화제로  $\text{GN}_2\text{O}$ 를 사용했을 때가 산화제로 GOX를 사용했을 때보다 포트직경에 따른 연소량의 차이가 작게 나타남을 확인 할 수 있다.

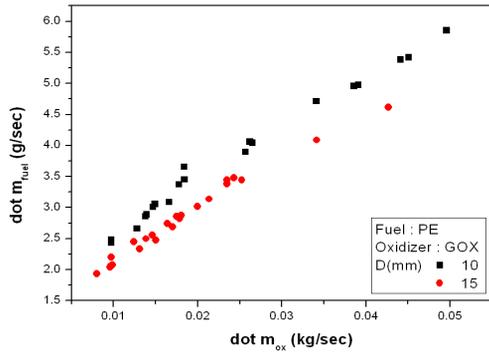


Fig. 4-1 Oxidizer Mass Flow vs Burning Fuel Mass Flow (Oxidizer : GOX, Fuel : PE)

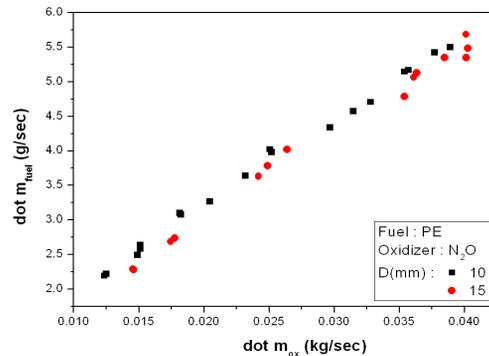


Fig. 4-2 Oxidizer Mass Flow vs Burning Fuel Mass Flow (Oxidizer :  $\text{GN}_2\text{O}$ , Fuel : PE)

이런 현상은 Fig. 5-1, 5-2의 결과와 연소온도로 설명될 수 있다. Fig. 5-1, 5-2는 산화제 유량에 대한 O/F 비 관계를 고체연료 포트직경에 따라 나타내고 있다. 동일한 산화제 유량에서 GOX,  $\text{GN}_2\text{O}$ 의 경우 모두 고체연료 포트직경이 증가함에 따라 고체연료의 연소 유량은 감소하게 되고 O/F 비는 증가함을 볼 수 있다.

본 실험에서 사용된 산화제 유속 범위에서 GOX의 경우 O/F 비가 3 ~ 9.5 범위에 있고,  $\text{GN}_2\text{O}$ 의 경우 O/F 비가 5.5 ~ 7.5 범위에 존재한다. PE/GOX가 반응하는 O/F 비 구간은 Fig. 2 에서와 같이 O/F 비가 증가할수록 화염온도가 낮아지는 구간으로, 고체연료 포트직경이 10 mm 일 때보다 15 mm 일 때 화염온도가 더 낮다. 그러나 PE/ $\text{GN}_2\text{O}$ 가 반응하는 O/F 구간은 O/F 비가 증가할수록 화염온도가 높아지는 구간으로, 고체연료 포트직경이 10 mm일 때보다 15 mm일 때 화염온도가 더 높다. 따라서 산화

제의 종류에 상관없이 포트직경이 커짐에 따라 화염으로부터의 그레이н 표면적당 열전달이 감소하여 고체연료의 연소량은 감소하지만, 산화제로  $\text{GN}_2\text{O}$ 를 사용하면 연료 포트직경이 커짐에 따라 화염온도가 증가하여, 고체연료 포트직경이 커지게 되더라도 연소량의 감소량 차이는 GOX보다 작게 된다. 반면 산화제로 GOX를 사용하면, 고체연료의 포트직경 증가에 따른 그레이н 표면적당 열전달 감소 때문에 포트직경이 커지게 되면 고체연료의 연소량이 감소하고, 또한 O/F 비의 증가로 화염온도가 감소하여 포트직경에 따른 연소량의 차이가 커지게 된다. 따라서 Fig. 3-1, 3-2에서와 같이 산화제로 GOX를 사용할 경우에는 포트직경이 커짐에 따라 동일 산화제 유속에서 고체연료의 연소율이 감소하는 경향을 나타내지만,  $\text{GN}_2\text{O}$ 를 사용할 경우에는 포트직경이 커짐에 따라 동일 산화제 유속에서 고체연료의 연소율이 증가하는 경향을 나타낸다.

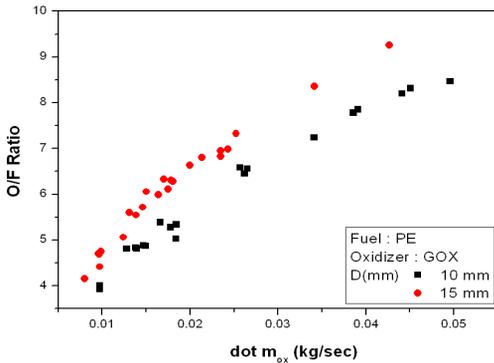


Fig. 5-1 Oxidizer Mass Flow vs O/F Ratio (Oxidizer : GOX, Fuel : PE)

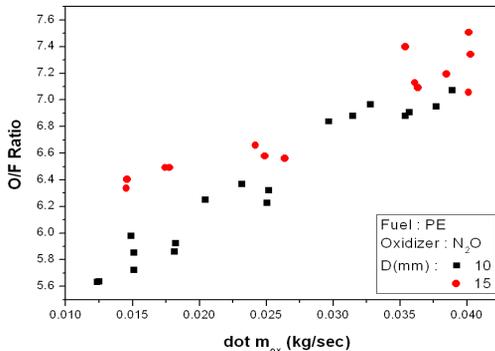


Fig. 5-2 Oxidizer Mass Flow vs O/F Ratio (Oxidizer :  $\text{GN}_2\text{O}$ , Fuel : PE)

### 3. 결 론

하이브리드 로켓추진에서 산화제로 GOX와  $\text{GN}_2\text{O}$ 를 적용하였을 경우, 고체연료의 초기 포트직경에 따른 연소특성 변화를 각각 알아보았다. 산화제의 종류에 상관없이 포트직경이 커짐에 따라 화염으로부터 고체연료 표면으로의 그레이н 표면적당 열전달 양이 감소하여 고체연료의 연소량이 줄어들음을 확인하였다. 산화제로 GOX를 적용한 경우, 포트직경이 증가함에 따라 O/F 비가 증가하여 화염온도가 감소하였고, 동일 산화제 유량에서 연소량의 차이가 크게 나타났다. 그러나 산화제로  $\text{GN}_2\text{O}$ 를 적용한 경우, GOX의 경우와 마찬가지로 포트직경이 증가함에 따라 O/F 비가 증가했지만, 화염온도가 증가하여, 동일 산화제 유량에서 연소량의 차이가 GOX를 적용한 경우 보다 작게 나타났다.

일반적으로 산화제 평균유속으로만 나타내는 후퇴율 관계식을 정확한 하이브리드 추진 성능 예측을 위해, 후퇴율과 고체연료 포트직경의 상관관계에 대한 연구가 추후 필요하겠다.

### 후 기

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

### 참 고 문 헌

- Brian Evans, Nicholas A. Favorito, and Kenneth K. Kuo., "Study of Solid Fuel Burning-Rate Enhancement Behavior in an X-ray Translucent Hybrid Rocket Motor", AIAA 2005-3909
- George, P., Krishnan, S., Varkey, P. M., Ravindran, M., and Ramachandran, L., "Fuel Regression Rate in Hydroxyl-Terminated-Polybutadiene/Gaseous-Oxygen Hybrid Rocket Motors." JPP, Vol 17, No.1, pp. 35-42.
- 이정표, "Single-Port Hybrid Rocket Motor의 물질전달 수를 고려한 고체연료 연소율에 관한 연구", 한국항공대 석사학위논문, 2007년