

하이브리드 로켓에서의 고체 연료 연소 가시화 장치

문근환* · 조정태* · 김수종* · 이정표* · 김학철* · 오지성* · 문희장** · 성홍계** · 김진곤**

Visualization device of solid fuel combustion in hybrid rocket

Keunhwan Moon* · Jungtae Cho* · Soojong Kim* · Jungpyo Lee* · Hakchul Kim* · Jisung Oh* · Heejang Moon** · Honggye Sung** · Jinkon Kim**

ABSTRACT

The visualization device for hybrid rocket is fabricated to investigate the combustion phenomena. Visualization device were composed with ignition system, oxidizer supply system, control system and data acquisition system, combustion visualization system. GOX as oxidizer and HDPE, Paraffin-LDPE Blending, Paraffin sd were used. As results, combustion phenomena and fuel droplet entrainment were observed.

초 록

하이브리드 로켓에서의 고체 연료의 연소 현상을 가시화하기 위하여 장치를 제작하였다. 가시화 장치는 평판 하이브리드 연소기 시스템, 점화 시스템, 산화제 공급 시스템, 데이터 획득 및 제어 시스템, 연소 가시화 측정 장비로 구성되었다. GOX 산화제와 HDPE, Paraffin-LDPE Blending, Paraffin 연료를 이용하여 연소 가시화 시험을 수행하였고, 수치적으로만 연구되어 왔던 연소실 내의 연소 현상을 가시화 할 수 있었으며, 화염의 형성 및 용융성 연료의 액적 비산 현상을 관찰 할 수 있었다.

Key Words: Hybrid Rokat (하이브리드 로켓), Visualization device(가시화 장치), polymer(폴리머), High speed camera(고속 카메라)

1. 서 론

하이브리드 로켓은 경제성과 안전성 면에서 다른 로켓 시스템에 비해 많은 장점을 가진 추진 시스템으로, 최근 활발한 연구가 이루어지고

있다. 이러한 하이브리드 로켓의 연소 메커니즘은 화염으로부터 연료 표면으로의 대류 열전달로 인하여 고체 연료가 기화되고, 기화된 연료가 연소실로 유입되는 산화제와 다시 반응하여 지속적으로 연소가 이루어진다.

하이브리드 로켓에서의 연소실내 연소현상은 선연구자들에 의해 수치적으로는 많은 연구가 진행되어 왔으나, 실제 연소 실험에서 연소장을 가시화해 연소현상을 파악하기 위한 연구는 미

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락처, E-mail: jkkm@kau.ac.kr

비한 실정이다. 비가시화 연소 실험으로는 연소 전·후 연료의 상태 변화량을 이용해 연소시간 동안의 평균적인 값만을 얻을 수 있는 반면, 가시화 연소 실험을 통해서도 후퇴율 등의 실험값이 시간에 따라 변화는 정도와, 연료 표면에서의 난류확산화염 현상, 용융성 연료에서의 액적 비산 현상 등을 관찰 할 수 있다. 따라서 연소 가시화 실험을 통해 연료 표면에서 연료와 산화제가 반응하는 하이브리드 로켓의 연소현상을 파악할 수 있고, 이러한 연구는 하이브리드 추진연소의 기초 연구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 하이브리드 추진의 연소현상을 이해하기 위하여 연소 가시화 장치를 제작하였고, 고체연료 PE, Paraffin-LDPE Blending, Paraffin에 대해 연소 가시화 시험을 수행하여 연소시 고체 연료 표면에서의 화염 형상을 파악하였으며 용융성 연료에서의 액적 비산 현상을 관찰 하였다.

2. 연소시험 장치

하이브리드 로켓의 연소현상을 가시화하기 위하여 Lab-scale 연소 가시화 실험 장치를 제작하였고, 실험 시스템 개략도는 Fig. 1과 같다.

본 실험에서 산화제는 기체산소(GOX)를 사용하였고, 연료는 HDPE, Paraffin-LDPE Blending, Paraffin을 사용하였으며, 연소시 연료 표면에서의 연소현상을 관찰하기 위하여 연료 형상을 평판형으로 제작 하였다.

연료의 규격은 $50 \times 50 \times 240 \text{ mm}$ 의 크기로 제작 하였으며, 산화제 유동의 흐름을 원활하게 하기 위하여 연료 앞부분에는 경사를 주었다.

2.1 평판 하이브리드 연소기

평판 하이브리드 연소기는 Fig. 2와 같이 설계, 제작 하였다. pre-chamber에는 점화를 위한 점화 시스템과 연소실 압력측정을 위한 압력센서를 장착하였고, calming chamber에는 산화제 공급을 안정시키기 위해서 다중 채널 형태의 세

라믹을 장착하였다. 연소기에는 가시화 창을 장착하였으며, 가시화 창은 연소 실험시 고온에도 견딜 수 있도록 석영유리를 사용하였다. 노즐은 converging 노즐로 설계하였으며, 수냉식 냉각을 위해 출구 노즐의 재질은 구리를 사용하였다.

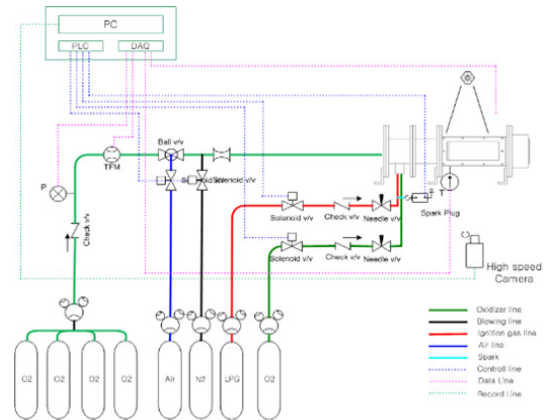


Fig. 1 Schematic of Hybrid rocket experimental system

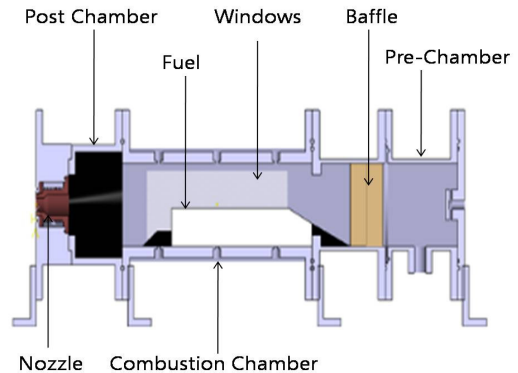


Fig. 2 Schematic of the Hybrid rocket engine experimental system

2.2 점화 시스템

점화시스템은 연소 실험시 고온으로 가열 시킬 수 있도록 확산식 토치를 사용하였다. 확산식 토치는 프로판가스와 기체 산소를 공급하고 고전압 발생기를 통해 생기는 전류를 스파크 플러그에 흘려 얻은 열원으로 점화하는 가연성 가스 점화 방식을 사용하였다. 프로판 가스와 산화제의 공

급, 차단을 위해 Solenoid V/V를 사용하였고 역화를 방지하기 위해 Check V/V를 장착하였다. 1.5V 배터리에서 나온 전류는 고전압 발생기에서 15KV로 증폭되어 스파크를 발생하게 된다.

2.3 산화제 공급 시스템

산화제 공급 시스템은 고압(120 kgf/cm^2)의 기체산소(GOX)가 충전된 4개의 상용탱크를 병렬 연결하여 사용하였다. 유량을 조절하기 위해 압력 조절기와 초킹 오리피스를 산화제 공급 배관에 설치하였고 공급되는 산화제는 터빈형 유량계와 압력 센서를 장착하여 공급유량을 실시간으로 측정하였다. 산화제 공급을 개폐하기 위한 볼밸브와 밸브를 구동하기 위한 Actuator, Actuator 작동을 위한 Solenoid V/V와 역류를 방지하기 위해서 Check V/V를 장착하였다.

2.4 데이터 획득 및 제어 시스템

데이터 획득 및 제어 장치는 아날로그 시그널을 디지털 시그널로 변화하는 A/D Convertor와 프로그램 제어를 위해 NI(National Instrument)의 Lab-view 프로그램을 사용하였다. 이 프로그램은 Control Panel과 Block diagram 으로 구성되어 시그널을 제어, 전송하고 센서로부터 데이터를 수신하여 저장할 수 있도록 프로그램 되었다. 또한 스파크 플러그 구동, LPG 가스의 공급 및 차단, 산화제 공급 및 차단, 질소 공급 및 차단을 위한 Solenoid V/V 구동을 위한 시퀀스(Sequence)를 구성하였으며, 데이터 수집을 위한 부분으로 배관 압력 센서, TFM(Turbin Flow Meter), 저온용 압력 센서, 실험시 연소기내 온도 센서의 시그널을 수신하기 위해 회로를 구성하였다.

2.5 연소 가시화 측정 장비

연소 실험에서 고체 연료의 연소 현상을 관찰하기 위해 연소기에 $200 \times 150 \times 25\text{ mm}$ 석영유리를 설치하였으며, 초고속 카메라 촬영을 위해 SVSI사의 Memview 모델의 High Speed Camera를 사용하였다. Camera의 사양은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Specifications of the High speed camera

품 명	사 양
Max Resolution	1280 X 1024
Max Frame rate (@ full resolution)	532
Max Frame rate (@ reduced resolution)	17,000
Pixel size	10-bit mono or 24bit color
Trigger Source	TTL, Switch Closure, or Image-Cued
Digital Outputs	Trigger/Strobe

3. 연소시험 결과

Figure. 3~5는 산화제로는 GOX를 사용하였고, 고체연료로는 각각 HDPE, Paraffin-LDPE Blending, Paraffin을 사용했을 때의 연소현상을 고속 카메라로 촬영한 것이다. 연소가 이루어지는 부분은 자체 광량으로 밝게 촬영되기 때문에 연료의 연소 반응과 비반응 영역으로 구분 할 수 있다.

비용용성 연료인 HDPE는 액체층이 얇고 점성이 커 연료 액적의 유입이 미비한 것으로 알려져 있고, 실제 화염 형상 결과 연료 액적이 관찰되지 않았다. 반면 용융성 고체 연료인 파라핀과 혼합 연료에서는 연소 과정 중 화염에서 액적이 떨어져 후방으로 밀려 나가는 현상을 관찰 할 수 있었으며, 연소 과정에서 연소가 이루어지는 반응 액적 비산 현상과 연료액적이 연소가 이루어지지 않은 상태로 후방으로 흘러 밀려 나가는 비반응 액적 비산 현상을 관찰 할 수 있었다. 또한 화염 형상에서도 연료 표면과 멀리 떨어져 위치한 화염을 통해 연료액적 비산량이 많았음을 알 수 있다. 또한 혼합 연료에서는 연소실내에서 연소가 이루어지는 반응 액적 비산현상을 많이 관찰 할 수 있었으나, 비반응 액적 비산현상은 관찰하기 어려웠다. 반면 높은 후퇴율 특성을 갖는 파라핀 연료에서는 반응 액적 비산이 혼합연료에 비해 상대적으로 적게 관찰 되었으며, 혼합연료에서 관찰이 어려웠던 비 반응 액적

비산현상을 관찰 할 수 있었다.

이처럼 파라핀 연료의 연소일 경우 연료표면에서의 액적 비산에 의하여 높은 후퇴율을 보이지만 액적비산의 많은 양이 연소실내부에서 연소가 이루어지지 않음을 확인할 수 있다. 반면 혼합 고체 연료는 LDPE를 첨가함으로써 연료의 점성과 표면장력의 증가로 후퇴율이 다소 감소하였으나, 연료 표면에서 발생하는 액적 비산량 중 많은 양이 연소실 내부에서 연소가 이루어짐을 확인 하였다.

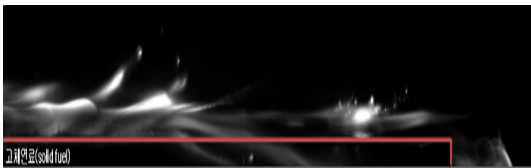


Fig. 3 The flame shape of paraffin

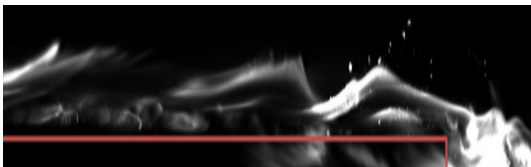


Fig. 4 The flame shape of blending solid fuel

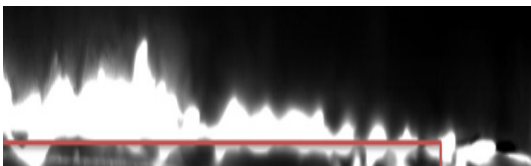


Fig. 5 The flame shape of HDPE

4. 결 론

하이브리드 추진에서의 연소 현상을 가시화하기 위하여 연소 가시화 장치를 제작하였고, GOX 산화제와 PE, Paraffin-LDPE Blending, Paraffin 연료를 이용하여 연소 실험을 수행하였다. 연소기에 석영유리 창을 장착하고 고속카메라를 이용하여 연소현상을 촬영함으로써 연료 표면에서의 화염 형상과 용융성 연료의 액적 비

산을 관찰할 수 있었다.

하이브리드 추진연소는 산화제와 기화한 연료가 반응하는 확산화염이고, 화염의 형태가 난류임을 확인하였다. HDPE는 비용융성 연료로 액적이 거의 발생하지 않았지만, 파라핀과 Paraffin-LDPE Blending는 용융성 연료로 연료표면에서 과도한 액적발생으로 액적 비산이 발생함을 확인하였다.

향후 하이브리드 추진 연소가시화 장치를 통하여 시간에 따른 후퇴율 변화와, 축방향으로의 연소특성 변화, 연료 표면에서의 난류확산화염 형상 등 하이브리드 추진연소의 기초특성을 파악하기 위한 연구를 수행 할 것이다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. 조정태, " 용융성 하이브리 고체 연료의 기초 특성 연구", 한국 항공대학교 석사학위 논문, 2010
2. Karabeyoglu, M.A, Cantwel, B.J and Altman D., "Development and Testing of Paraffin-Based hybrid rocket fuels." AIAA-2010-4503, 37th AIAA/ASEM/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Salt Lake City, Utah, July 2001
3. 김수중 외, "파라핀계 하이브리드 로켓 연료의 연소 특성", 한국 추진공학회 2009년도 춘계 학술발표대회 논문집, 2009, pp. 225-228
4. S.J. Kim, J.P. Lee, G.H. Kim, J.T. Cho, H.J Moon, H.G. Sung, J.K. Kim, "Effect of Paraffin-Polymer Blended Fuel for Hybrid Rocket", 2009 APISAT