

# 용융성 고체 연료를 사용한 하이브리드 로켓의 연소 불안정 특성 연구

김수종\* · 김학철\*\* · 문희장\*\*\* · 성홍계\*\*\* · 김진곤\*\*\*

## A Study on Combustion Instability Characteristics of Hybrid Rocket using Liquefying Solid Fuel

Soojong Kim\* · Hakchul Kim\*\* · Heejang Moon\*\*\* · Honggye Sung\*\*\* · Jinkon Kim\*\*\*

### ABSTRACT

In this study, combustion tests using liquefying fuels with fast regression rate were performed. The chamber pressure oscillation was analyzed and hazards of combustion instabilities were examined. In case of Liquefying fuel with fast regression rate, the amplitude of chamber pressure oscillation was increased compared to the polymeric fuels. However, the critical combustion instability can hardly occur in liquefying fuel. This is because the rapid change of inner chamber diameter limits the amplification of chamber pressure oscillation. The chamber pressure oscillation due to the large increase of fuel production and the vortex shedding in pre-chamber violently occurs during combustion using single-port axial injector.

### 초 록

본 연구에서는 빠른 후퇴율을 갖는 용융성 고체연료를 사용한 연소 실험을 수행하여 연소 중 압력 진동 특성을 분석하고 연소 불안정의 위해성을 검토하였다. 빠른 후퇴율을 가지는 용융성 고체연료는 기존의 폴리머계 연료에 비해 압력 진동의 진폭이 증가하였다. 그러나 연료 그레인 내부 직경의 증가가 연소실 압력 진동의 증폭을 제한하여 급격한 연소 불안정은 거의 일어나지 않았다. 축방향 인젝터를 사용하는 경우 연료 연소량의 큰 증가와 예연소실에서의 와류 진동이 큰 압력 진동을 유발하였다.

Key Words: Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Combustion Instability(연소 불안정), Liquefying Solid Fuel(용융성 고체 연료), Regression Rate(후퇴율), FFT(Fast Fourier Transform), STFT(Short Time Fourier Transform)

\* 한국항공대학교 항공우주산업기술연구소  
\*\* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과  
\*\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부  
연락처자, E-mail: E-mail: jkkim@kau.ac.kr

### 1. 서 론

하이브리드 로켓은 고체, 액체 로켓에 비해 경

제성과 안전성 면에서 많은 장점을 가지고 있다. 이와 함께 하이브리드 로켓 연소실에서의 압력 진동은 주로 음향 공명(acoustic resonance)에 의한 고주파 영역 보다는 저주파 영역에서 발생하여 고체나 액체 로켓과 달리 모터나 엔진의 구조물을 손상시키는 연소 불안정의 위해성이 작은 것으로 알려져 있다. 하이브리드 로켓에서의 이러한 저주파 연소 불안정은 비-음향(non-acoustic) 연소 불안정이며 주로 액체 산화제의 기화 지연, 고체 연료의 열적 지연(thermal lag), 산화제 공급계의 진동 전달,  $L^*$  불안정, 모터 헤드에서의 불안정한 화염 정착 등에 의해 발생한다[1]. 이러한 하이브리드 로켓에서의 저주파 연소 불안정은 주 구조물 손상 등의 직접적 위해성은 작으나 급격한 연소실 압력과 후퇴율의 변동인 DC shift를 유발하여 내탄도(internal ballistic) 예측을 어렵게 하거나 모터 구조물로의 열전달을 강화시켜 연소실 내부 단열 부품의 손상을 유발하기도 한다[2].

한편 기존 하이브리드 로켓에서 주로 사용하는 PE, PMMA, HTPB 등의 폴리머계 연료는 후퇴율(regression rate)이 느려 연소 중 연소실 내부 형상의 변화가 상대적으로 작다. 반면, 파라핀과 같은 용융성 고체 연료의 후퇴율은 폴리머계 연료에 비해 4~6배 빨라 연소 중의 연소실 형상의 변화가 급격히 나타나며 이는 압력 진동 주파수의 큰 변화를 가져올 수 있다.

본 연구에서는 빠른 후퇴율을 갖는 용융성 고체연료를 사용한 연소 실험을 통해 연소 중 압력 진동의 특성을 분석하고 연소 불안정의 위해성을 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용한 하이브리드 로켓 모터는 연소실 압력 200psi, 추력 12 kgf, 노즐 팽창비 2.8로 설계되었으며 전체 실험 장치는 Fig. 1에 개략도를 나타내었다. 연소 실험에서 산화제는 상용 실린더에 약  $120\text{kgf}/\text{cm}^2$ 의 압력으로 충전된 기체 산소를 병렬로 연결하여 사용하였으며 압

력조절기와 오리피스를 사용하여 공급 유량을 조절하였다. 산화제 공급 유량은 Sponser사의 TFM(turbine flow meter)을 이용하였다. 점화는 모두 프로판, 산소 혼합 가스에 스파크를 가해

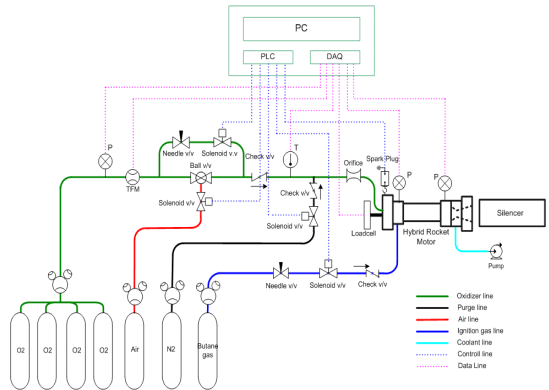


Fig. 1 Schematic of experimental setup

Table 1. Specification of the combustion test

Oxidizer	Gaseous Oxygen		
	Pure Paraffin Wax (PR100)	Paraffin Wax +5 wt% LDPE (PR95PE05)	Paraffin Wax +10 wt% LDPE (PR90PE10)
Solid Fuel Type			
Solid Fuel Density( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	910	911	912
Burning Time(s)	5	5	5
Oxidizer Mass Flow Rate(g/s)	18~27	19~24	18~35
Averaged Oxidizer Mass Flux( $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ )	33~95	40~86	42~27
Grain Outer Diameter(mm)	70	70	70
Grain Length(mm)	200	200	200
Initial Port Diameter(mm)	20	20	20
L/D ratio	10	10	10

접화하는 토치식 접화기를 사용하였다. 실험의 전 과정은 PLC(program logic control)를 통해 제어되며 National Instrument 사의 DAQ 보드와 LabVIEW 프로그램을 이용하여 각 센서로부터 데이터를 획득하였으며 연소실 압력 주파수분석을 위해 4.0kHz의 sampling rate로 획득하였다. 모터는 저항이 작은 LM가이드 위에 장착하여 저항을 최소화 하였다. 연소 실험 시 추력은 CAS 사의 로드셀을 이용하여 측정하였다. 연소기의 후방 연소실에는 고 분해능을 가지는 Kistler사의 압전식 압력 센서(piezoelectric pressure transducer, 6061B)를 장착하여 연소실 압력을 측정하였다. 본 연구에서의 용융성 고체 연료는 3가지(PR100, PR95PE05, PR90PE10)를 사용하였으며 실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

용융성 고체 연료의 기본 재료인 파라핀 왁스는 완전 정제된(fully refined) 유분 0.2% 이내(melting point = 61°C, carbon number = C28)를 함유하고 있는 Nippon Seiro Co., Ltd. 제품을 사용하였다. 파라핀에 첨가한 폴리머는 입자형상의 저밀도폴리에틸렌(melting point = 110°C, density = 921kg/m<sup>3</sup>)으로 Hanwha Chemical Co. Ltd.의 제품을 사용하였다. 용융성 혼합 연료의 블렌딩 시에는 히터가 장착된 용융기를 120°C 이상으로 가열하고 교반기를 사용하여 두 재료를 혼합, 용융하였다. 완전히 혼합, 용융된 재료는 맨드릴이 장착된 가압 챔버에 주입한 뒤 가압 냉각하여 수직방향 수축만을 유도하여 경화한 뒤 2차 가공하여 연료 그레이인을 제작하였다.

## 2.2 FFT와 SIFT 해석

압력 센서(pressure transducer)로부터 측정된 압력 신호의 주요 압력 진동 주파수를 찾기 위하여 FFT를 수행하였다. 이 때 사용한 식은 Eq. (1)과 같다.

$$\text{amplitude} = \frac{\sqrt{R^2 + I^2}}{n} \quad (1)$$

-  $R$  : real pare of the transform data

-  $I$  : imaginary pare of the transform data

또한, 연소 시간에 따른 압력 진동 주파수의 이동을 살펴보기 위해 수집된 연소실 압력 신호를 사용하여 STFT를 수행하였으며 식은 Eq. (2)와 같다.

$$STFT(n, k) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x(i)w(n-i)e^{-j2\pi ki/N} \quad (2)$$

-  $x(i)$  : pressure data

-  $w(n)$  : window

-  $j$  : imaginary unit

## 3. 실험 결과

### 3.1 후퇴율

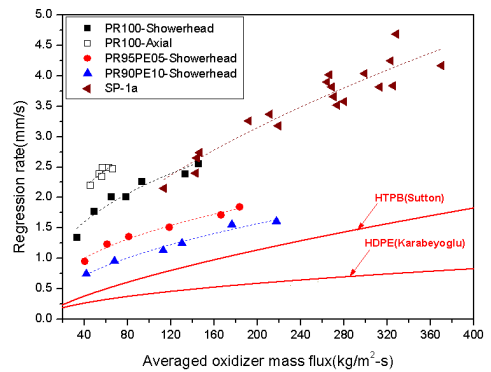


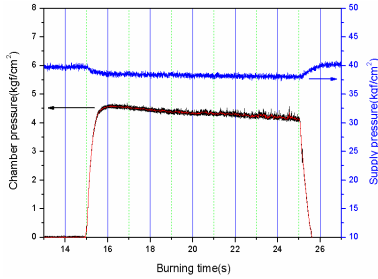
Fig. 2 Regression rate vs averaged oxidizer mass flux

Figure 2는 용융성 고체 연료들의 후퇴율을 산화제 질량 유속에 대해 나타낸 결과로서 용융성 연료의 후퇴율은 기존에 주로 사용되던 폴리머계 연료인 HDPE와 HTPB에 비해 매우 빠른 후퇴율을 보임을 알 수 있다. 이는 연소 중 그레이인 포트 직경과 내부 체적의 변화가 매우 빠르게 일어날 수 있음을 보여준다. 용융성 연료들 간의 비교에서는 LDPE의 첨가량이 증가할수록 후퇴율이 느려짐을 알 수 있다. 이는 LDPE를 혼합함으로써 액적 유입(entrainment) 후퇴율에 영향을 미치는 액체 연료 층의 점성과 표면장력이 커져 액적 형태의 연료 발생이 감소하기 때문이다[3]. 이러한 결과로부터 용융성 고체 연료의 체적 변화율과 연료 연소량이 폴리머계 연료에 비해 크게 나타남을

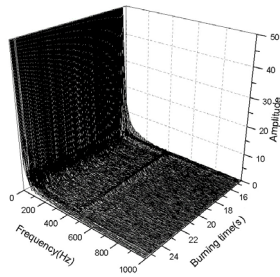
알 수 있으며 이 중에서도 순수 파라핀인 PR100 연료의 변화율이 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

### 3.2 연소실 압력 주파수 분석

#### 3.2.1 HDPE 비용융성 연료



(a) Pressure time trace



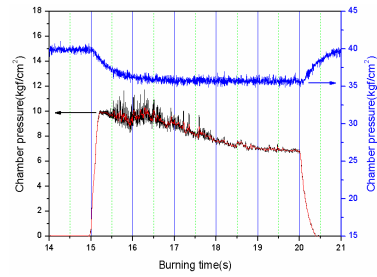
(b) Pressure spectrogram(STFT)

Fig. 3 Chamber pressure analysis of HDPE

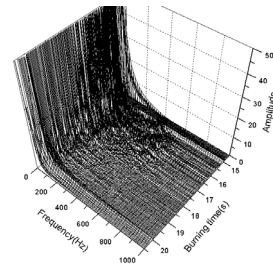
Figure 3(a)와 3(b)는 HDPE의 연소실 압력과 STFT 결과이다. Fig. 3(a)와 3(b)를 통해 HDPE 연료를 사용한 경우 큰 압력 진동 없이 매우 안정하게 연소됨을 알 수 있으며 후퇴율이 느린 HDPE의 경우 400Hz 대역의 주파수가 연소 종료시까지 비교적 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

#### 3.2.2 PR100, PR95PE05, PR90PE10 용융성 연료

Figure 4(a)와 4(b)는 후퇴율이 빨라 연소실 내부 체적의 변화가 크고 연료 연소량이 많은 PR100 연료의 결과로서 연소 초기에 상대적으로 큰 압력 진동이 일어나지만 주파수 이동이 빠르게 나타나 압력 진동이 가진되지 않고 급격히 감소되는 것을 알 수 있다. 이는 액적을 통한 연소량이 전체 연료 연소량의 상당부분을 차지하는 용융성 연료에서는 연료 연소량이 시간에 따라 급격히 감소함과 동시에 그레인 포트 직경이



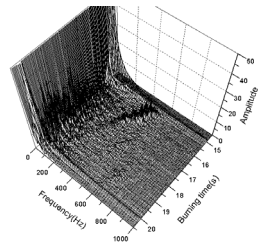
(a) Pressure time trace



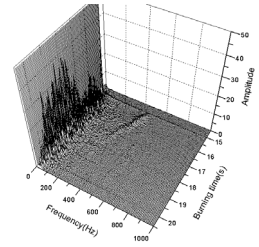
(b) Pressure spectrogram(STFT)

Fig. 4 Chamber pressure analysis of PR100

급속히 증가하는 연소 특성 때문에 판단된다. 또한 이러한 특성이 고유 진동수와 같은 특정 주파수에서의 압력 진동을 증폭시킬 만큼 충분한 시간을 허용하지 않아 연소 안정성을 확보하고 있음을 보여준다.



(a) PR95PE05



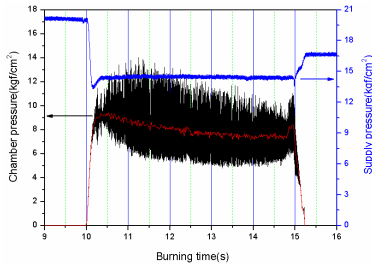
(b) PR90PE10

Fig. 5 Pressure spectrogram(STFT)

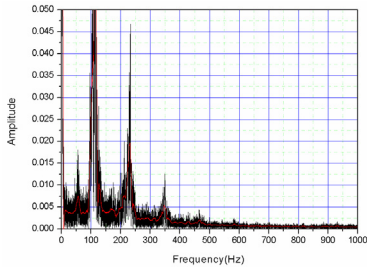
Figure 5는 순수 파라핀에 LDPE를 5 wt%, 10 wt% 첨가한 PR95PE05와 PR90PE10 용융성 혼합 연료에 대한 STFT 결과이다. 두 연료 모두 PR100 연료에 비해서는 후퇴율이 느려 그레인 포트 직경의 변화가 상대적으로 작으나 압력 진동 주파수가 저주파 대역으로 급속히 이동하는

것을 알 수 있다. 따라서 용융성 혼합 고체 연료를 사용한 경우에도 특정 주파수 모드의 유지나 가진이 발생하지 않는 특징을 보여 연소 불안정 발생 가능성은 기본적으로 낮음을 알 수 있다.

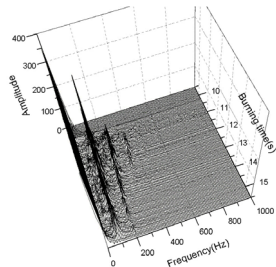
### 3.2.3 축방향 인젝터를 적용한 PR100 용융성 연료



a) Pressure time trace



b) Pressure amplitude spectrum(FFT)



c) Pressure spectrogram(STFT)

Fig. 6 Chamber pressure analysis of PR100

Figure 3, 4, 5의 결과는 모두 샤워헤드 디퓨저 (showerhead-diffuser) 형태의 인젝터를 사용한 결과이나 Fig. 5는 PR100 연료에 축방향 인젝터를 사용한 경우의 압력 분석 결과로서 Fig. 4의 결과에 비해 매우 큰 압력 진동이 연소 동안 지속되는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 2의 결과에서도 알 수 있듯이 축방향 인젝터를 사용하는 경우 연료 연소량이 크게 증가하여 압력 진동의

진폭을 증가시키고 예연소실에서의 추가적인 와류 진동이 연소실 내부의 압력 진동을 가진하여 나타난 것으로 판단된다. 따라서 샤워헤드 디퓨저 형태의 인젝터가 용융성 고체 연료에서는 보다 연소 안정성에 효과적인 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

용융성 고체연료는 기존의 폴리머계 연료에 비해 후퇴율이 빠르고 연료 연소량이 증가하여 압력 진동의 진폭을 증가시키나 연료 그레인 내부 직경의 증가가 빠르게 일어나 압력 진동 주파수가 고유 진동수와 같은 특정 주파수에서의 압력 진동을 증폭시킬 만큼 충분한 시간을 허용하지 않아 안정한 연소 특성을 보였다. 한편 축방향 인젝터를 사용하는 경우 연료 연소량의 큰 증가와 예연소실에서의 와류 진동이 큰 압력 진동을 유발할 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

1. T. A. Boardman, D. H. Brinton, R. L. Carpenter and T. F. Zoladz, "An Experimental Investigation of Pressure Oscillations and Their Suppression in Subscale Hybrid Rocket Motors", 31th AIAA/ASME/SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 95-2689, San Diego, CA, 1995.
2. Chiaverini, M. J. and Kuo, K. K. "Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion", AIAA, 2007.
3. 김수중, 조정태, 이정표 문희장, 성홍계, 김진곤, "Paraffin wax/LDPE 혼합 연료의 연소 특성에 관한 연구", 한국추진공학회지, 제 14 권, 제2호, 2010, pp.29-38