용융성 다이아프램을 이용한 하이브리드 로켓의 연소 특성 연구

김학철* · 김수종** · 전두성* · 우경진* · 이정표* · 문희장*** · 성홍계*** · 김진곤***

A Study on Combustion Characteristics in Hybrid Rocket using Liquefying Diaphragm

Hakchul Kim* · Soojong Kim** · Doosung Jeon* · Kyoungjin Woo* · Jungpyo Lee* · Heejang Moon*** · Honggye Sung*** · Jinkon Kim***

ABSTRACT

Hybrid rocket combustion experiments using liquefying diaphragm made by blended liquefying fuel with 10 wt% of LDPE were performed. Results of experiments were compared to the those of pure paraffin. In case of using liquefying diaphragm, regression rate of rear fuel grain, characteristic velocity and specific impulse highly increased due to the induced turbulent intensity and heat transfer. The serious combustion instability was not observed in analysis of combustion instability. These results can imply that the liquefying diaphragm is efficient to improve low combustion efficiency in hybrid rocket using liquefying fuel.

초 록

순수 파라핀에 10 wt%의 LDPE를 첨가한 용융성 혼합 연료로 제작한 다이아프램을 장착한 연료를 사용하여 하이브리드 로켓 연소 실험을 수행하였고 다이아프램이 없는 파라핀 연료의 결과와 비교하였다. 용융성 다이아프램을 설치한 경우 강화된 난류와 열전달로 인해 다이어프램 후방의 연료 후퇴율이 크게 증가하였으며 특성속도와 비추력이 증가하였다. 연소 불안정 해석에서는 심각한 연소 불안정이 관찰되지 않았다. 이를 통해 용융성 다이어프램이 용융성 연료를 사용하는 하이브리드 로켓의 낮은 연소 효율 개선에 효과적임을 확인하였다.

Key Words: Hybrid Roket (하이브리드 로켓), Liquefying Diaphragm(용융성 다이아프램), Regression Rate(후퇴율), Characteristic Velocity(특성 속도), Specific Impulse(비추력), Combustion Instability(연소 불안정)

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

1.서 론

하이브리드 로켓은 고체 액체 로켓에 비해 안

전성, 경제성 면에서 장점을 가진 반면 느린 후퇴율로 인해 추진성능이 낮은 단점을 가진다. 느린 후퇴율을 개선하기 위한 대표적인 방법으로 멀티포트 그레인, 스월 인젝터 사용, 금속 분말 첨가, 용융성 연료를 사용하는 등의 연구가 수행되었다. 이 중 스탠포드 대학의 Karabeyoglu는 용융성 연료인 파라핀 왁스가 일반적인 고체 연료인 HTPB(hydroxyl terminated polybutadiene)의 후퇴율(regression rate)보다 3~4배 이상의 높은 후퇴율을 나타냄을 확인하였다[1]. 이러한 높은 후퇴율은 용융성 연료에서 용융된 저점성의 액막이 고속으로 주입된 산화제 유동에 의해 떨어져 나가는 액적의 양에서 기인하는 것으로 알려져 있다. 반면 급속히 유입된 액적은 연소실내에서 완전 연소하지 못하고 상당량이 노즐 외부에서 연소되어 연소효율을 감소시킨다[2]. 이러한 단점을 개선하기 위해 Wuppertal 대학의 Matthias Grosse는 파라핀 연료에 금속 다이아프램을 장착하여 다이아프램 후방에서의 난류강도와 열전달을 증가시켜 연소효율을 개선하였다. 그러나 연소되지 않는 금속 다이아프램을 사용함으로 부피 연료 충전률이 낮아지고 다이아프램을 설치하기위하여 설계가 복잡해지며 연소가 지속됨에 따라 연료와 다이아프램의 단차가 커져 연소 특성의 변화와 연소 불안정이 나타났다[3].

따라서 본 연구에서는 금속 다이아프램을 사용한 경우 발생하는 문제점을 개선하기 위해 순수파라핀 보다 후퇴율이 느린 용융성 혼합 연료로 제작한 다이아프램을 사용하여 연료 충전률을 높이고 다이아프램의 비정상(unsteady) 연소 특성과 연소 불안정을 개선하기 위해 하이브리드 로켓 모터를 사용하여 연소 실험을 수행하였다. 실험 결과는 다이아프램을 사용하지 않은 순수 파라핀 연료의 실험 결과와 비교하여 다이아프램의 효과를 평가하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

다이아프램을 장착한 하이브리드 로켓의 연소 실험 장치로는 본 연구실에서 기 보유한 lab-scale 하이브리드 로켓 모터와 산화제 공급시스템을 사용하였다[2]. 본 실험에서 산화제는 기체산소(GOx)를 사용하였고, 연료는 Paraffin을 다이아프램은 순수 파라핀에 10 wt%의 LDPE를 블렌딩한 연료를 사용하였으며 실험 조건은 Table. 1과 같다.

Table 1 Specifications of the combustion test

Oxidizer	Gas Oxygen		
	Solid fuel	Diaphragm	
Fuel Type	Pure Paraffin Wax	Praffin Wax + 10 wt% LDPE	
Solid Fuel Density(kg/m^3)	910	912	
Burning Time(s)	5		
Oxidizer Mass Flow Rate(g/s)	15~60		
Fuel Grain Configuration	Initial Port Diameter(mm)		20
	Out Diameter(mm)		70
	Front Grain Length(mm)		90
	Diaphragm Length(mm)		20
	Rear Grain Length(mm)		90
	Total Grain Length(mm)		200

2.2 연료 형상 및 특성

본 연구에서 사용한 연료 그레인의 형상은 Fig. 1과 같으며 다이아프램 전후방에서의 다이아프램의 영향을 살펴보기 위해 다이아프램을 그레인의 중앙에 장착하였다.

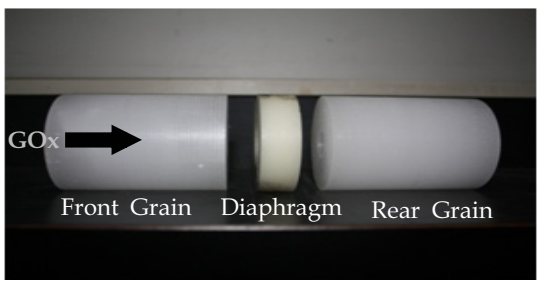

Fig. 1 Configuration of solid fuel

Table 2 Property of used fuel

	Pure Paraffin Wax	LDPE
Chemical Formula	C28H58	
Density(kg/m^3)	910	921
Melting Point(℃)	61	110
Company	Nipon Seiro	Hanwha Chemical

파라핀 연료와 다이아프램 제작 시 사용된 연료의 물성치는 Table 2에 나타내었다.

2.3 연소 불안정 해석

연소 불안정 해석을 위해 주요압력진동 주파수를 찾기 위해 FFT(fast fourier transform)와 STFT(short time fourier transform)을 수행하였다. FFT를 통해 획득된 진폭(amplitude)은 MSA(mean squared amplitude)이고 윈도는 Hamming 윈도우를 사용하였고 STFT에는 Gaussian 윈도우를 사용하였다.[4]

3. 시험 결과

3.1 후퇴율

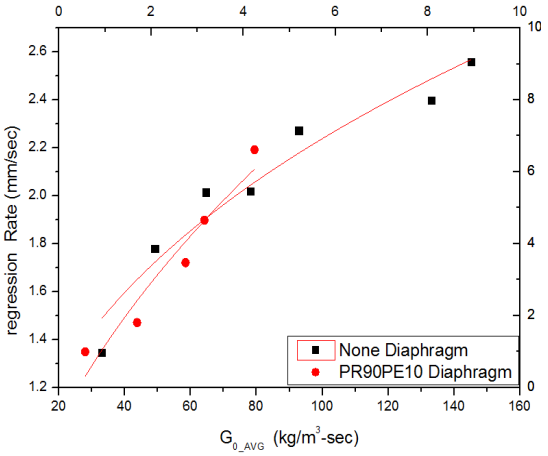

Fig. 2 Overall regression rate vs averageed oxidizer mass flux

Figure 2는 다이아프램이 설치된 연료와 다이아프램이 설치되지 않은 연료의 전체 후퇴율을 산화제 질량 유속에 대해 나타낸 결과로서 다이아프램의 설치 유무와 관계없이 큰 차이가 나지 않았다. 하지만 curve fitting한 기울기를 보면 고유속으로 갈수록 다이아프램을 설치한 연료의 후퇴율이 증가할 것으로 예측된다. 이는 저유속 구간에서는 연소가 진행됨에 따라 나타나는 다이아프램과 파라핀 연료의 단차가 작아서 다이아프램의 효과가 상대적으로 작게 나타나다가 고유속으로 갈수록 다이아프램과 파라핀 연료간의 단차가 커지면서 다이아프램 후방의 난류강도와 열전달이 크게 증가하기 때문이다.

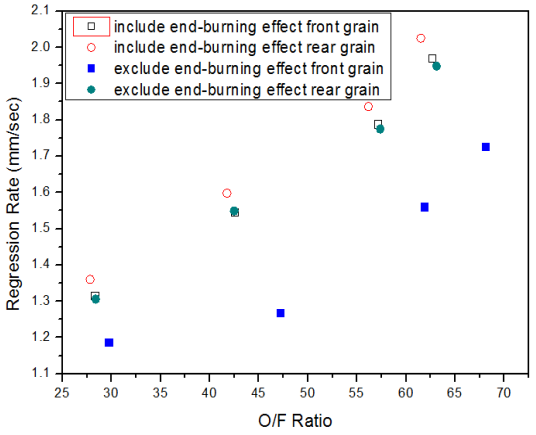

Fig. 3 Regression rate vs averageed oxidizer mass flux

Figure 3은 다이아프램 전·후방 연료 그레인의 후퇴율을 산화제 질량 유속에 대해 나타낸 결과로서 끝 단면 연소량을 포함한 경우에는 다이아프램 전·후방 연료의 후퇴율의 유사하게 나타났다. 이는 전방 연소실과 맞닿은 전방 연료 그레인의 전면부가 강한 산화제 분사에 의해 많이 연소하여 연소 전·후 무게 측정값을 이용해 계산하는 후퇴율이 높게 계산되기 때문이다. 따라서 연료 그레인 포트 내부에서의 보다 정확한 다이아프램 효과를 살펴보기 위해 전방 연료 그레인이 전방 연소실 만나는 끝 단면과 후방 그레인이 후방 연소실과 만나는 끝 단면을 제거하여 포트 후퇴율만을 계산하여 비교하였다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 끝 단면 효과를 배제한 결과에서는 다이아프램을 사용하여 강화된 난류와 열전달 효과에 의해 후방 연료 그레인의 후퇴율이 전방 연료 그레인의 후퇴율보다 높게 나타남을 알 수 있다.

3.2 특성 속도

Figure 4는 다이아프램이 설치된 연료와 다이아프램이 설치되지 않은 연료의 O/F에 대한 특성 속도를 비교한 것으로 CEA[]를 이용하여 각 O/F에서의 이론 특성 속도와 특성 속도 효율 선도를 함께 나타내었다. 다이아프램이 설치되지 않은 연료의 경우 70%대의 특성 속도효율을 보이는 반면에 다이아프램이 설치된 연료에서는 80%대의 특성 속도 효율을 보임을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 다이아프램이 설치된 연료에서 더 좋은 특성 속도 효율을 보임을 알 수 있는데 이는 다이아프램이 설치되지 않은 연료에 비해 액적 형태의 연료가 다이아프램으로 인해 생성된 강한 난류에 의해 챔버 내에서 충분한 혼합을 거쳐 완전 연소되면서 챔버 내 압력의 상승을 가져온 결과라 사료된다.

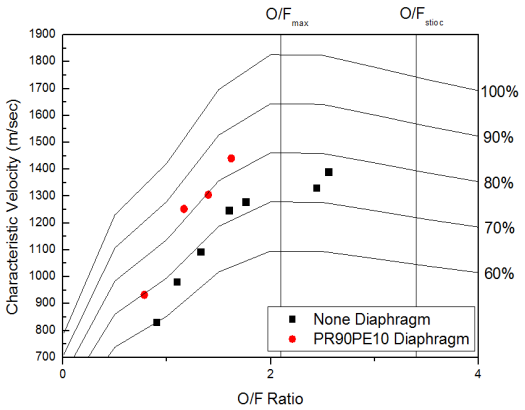

Fig. 4 Characteristic velocity vs O/F ratio

3.3 비추력

Figure 5는 O/F에 따른 비추력을 비교한 결과로 다이아프램이 설치된 연료와 다이아프램이 설치되지 않은 연료의 비추력과 비추력 효율을 나타내었다.

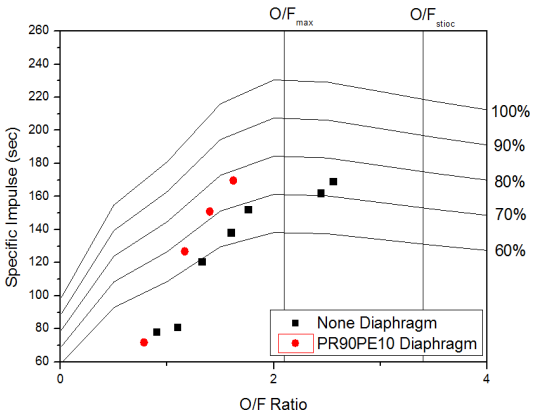

Fig. 5 Specific impulse vs O/F ratio

특성속도 결과와 유사하게 비추력 결과에서도 다이아프램이 설치된 연료가 다이아프램이 설치되지 않은 연료에 비해 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

3.4 연소 불안정

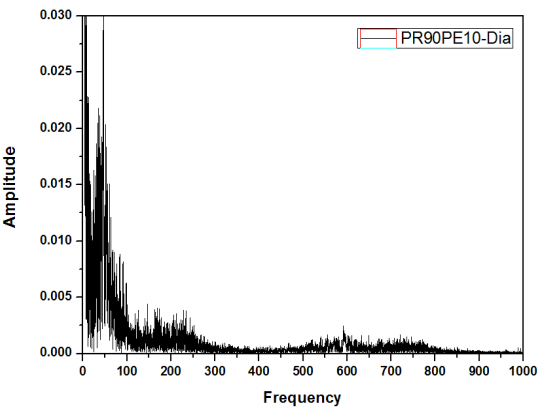

Fig. 6 Pressure spectrum(FFT)

Figure 6, 7은 연소실 압력의 주요 진동 주파수를 찾기 위해 FFT와 STFT을 수행한 결과이다. FFT의 결과에서 50Hz, 200Hz와 500~800Hz 대역의 넓은 범위에서 눈에 띄는 주파수 피크가 나타남을 확인할 수 있었다. 50Hz에서 나타나는 주파수는 Hybrid low frequency로 판단되고 200Hz의 주파수와 500~800Hz까지의 주파수는 Helmholts mode로 판단된다.

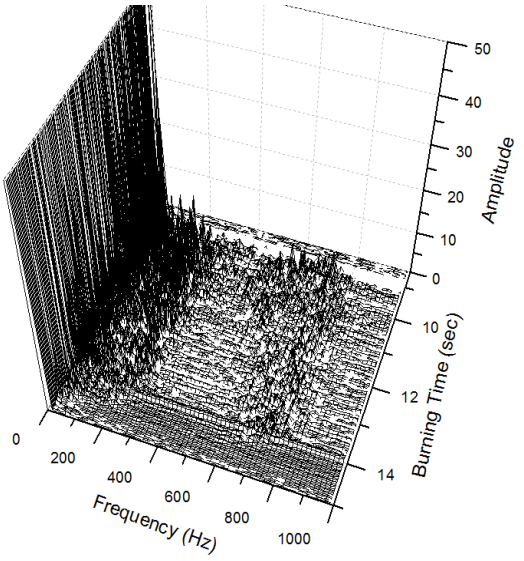

Fig. 7 Pressure spectrogram(STFT)

STFT의 결과를 통해 빠른 후퇴율을 갖는 파라핀 연료에 다이아프램을 적용한 경우 연소실 내부 체적의 변화가 빠르게 진행되어 일정 주파수에서 압력 진동이 증폭되지 못하고 분산되기 때문에 심각한 연소 불안정은 발생하지 않았다.

4. 결 론

최근 많이 연구되고 있는 용융성 연료인 파라핀을 사용한 하이브리드 로켓 연소에서 연소효율을 증가시키기 위해 사용되는 비연소성 금속 다이아프램의 문제점을 해결하고자 순수 파라핀보다 후퇴율이 느린 용융성 혼합 연료를 다이아프램으로 사용하여 연소 실험을 수행하였다.

다이아프램을 사용한 경우 전체 후퇴율은 순수 파라핀의 후퇴율과 큰 차이가 없었으나 다이아프램 후방에서 더 많은 연소가 이루어졌으며 용융성 다이아프램을 사용한 경우 특성속도와 비추력이 다이아프램을 사용하지 않은 경우보다 증가하였다. 이는 다이아프램으로 인한 난류 강화와 열전달 증진때문으로 판단된다. 연소 불안정성의 분석결과에서 심각한 연소 불안정은 나타나지 않았다.

향후 용융성 다이아프램의 개수, 위치, 초기포트 직경 등에 따른 연소 특성을 파악하기위한 연구를 수행할 예정이다.

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. 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
2. 김수종 외, "Paraffin wax/LDPE 혼합 연료의 연소 특성에 관한 연구"' 한국 추진공학회 2010년도 한국추진공학회지 제14권 제2호, 2010, pp. 29-38
3. Matthias Grosse, "Effect of a Diaphragm on Performance and Fuel Regression of a Laboratory Scale Hybrid Rocket Motor Using Nitrous Oxide and Paraffin." AIAA-2009-5113, 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Colorado, Denver, August 2009
4. 김수종, "용융성 고체 연료-기체 산소 하이브리드 로켓의 연소특서 연구", 2010, 박사학위 논문