

## 論文

## 다이하프램 두께 변화에 따른 하이브리드 로켓의 후퇴율 향상에 관한 연구

류성훈\*, 오지성\*\*, 문근환\*\*\*, 김학철\*\*\*, 문희장\*, 김진곤\*

## Effect of Diaphragm Thickness on Regression Rate Improvement in Hybrid Rocket Motor

Sung-Hoon Ryu\*, Ji-Sung Oh\*\*, Keun-Hwan Moon\*\*\*, Hak-Chul Kim\*\*\*,  
Hee-Jang Moon\* and Jin-Kon Kim\*

## ABSTRACT

In this work, a study was conducted to investigate the effect of diaphragm thickness on the regression rate of the hybrid rocket motor. To observe the flow pattern and the recirculation zone, visualizations of combustion chambers with different diaphragm thickness (5mm, 10mm) were performed. It was found that the case with 5 mm thickness had a larger recirculation zone and therefore, had a higher regression rate than the case with 10mm thickness due to the increased residence time and heat transfer toward the fuel surface. Finally, it was concluded that the thickness of diaphragm can be a critical parameter for the enhancement of the regression rate.

**Key Words** : Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Diaphragm(다이하프램), Recirculation Zone(재순환 영역), Combustion Visualization(연소 가시화), Regression Rate Measurement(후퇴율 측정)

## Nomenclature

$H_i$	: Initial fuel height ( $m$ )
$H_f$	: Final fuel height ( $m$ )
$\Delta H$	: Burn fuel height ( $m$ )
$\Delta H_l$	: Left burn fuel height ( $m$ )
$\Delta H_m$	: Middle burn fuel height ( $m$ )
$\Delta H_r$	: Right burn fuel height ( $m$ )
$\Delta H_{avg}$	: Averaged burn fuel height ( $m$ )
$\Delta t$	: Burning time ( $s$ )
$\dot{r}_{local}$	: Local regression rate ( $mm/s$ )
$\dot{r}_{avg}$	: Averaged regression rate ( $mm/s$ )

## 1. 서 론

하이브리드 로켓은 고체연료와 기체 또는 액체 산화제를 사용하는 로켓추진기관이다. 화염면(flame front)으로 부터 대류 열전달을 통해 고체 연료가 기화되어 연소실로 유입되는 산화제와 반응하여 계속적으로 연소가 이루어진다. 하이브리드 로켓은 고체 및 액체추진 시스템에 비해 안전하고 운영적 관점에서 경제적인 장점을 가지고 있다. 그러나 이러한 장점들에도 불구하고 고체 연료의 낮은 후퇴율로 인해 타 화학 추진기관들에 비해 추력 성능이 떨어지는 단점[1]이 있다.

이를 극복하기 위해 하이브리드 로켓의 낮은 후퇴율을 향상시킬 수 있는 여러 가지 연구[2,3]들이 진행되어 왔다. 특히, 최근에는 다이하프램 설치를 통해 연소 효율을 높이는 방법이 활발히 연구되고 있으며 고체연료의 내경과 다이하프램

2015년 8월 5일 접수 ~ 2015년 9월 14일 심사완료  
게재 확정일(2015년 12월 10일)

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\* (주)한화 대전사업장 개발팀 연구원

\*\*\* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과  
연락처, E-mail : jk kim@kau.ac.kr  
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

내경의 차이인 단차(step height)에 의한 재순환 영역을 활용하여 후퇴율 증가를 피하는 방법 [2,4,5]들이 제시되었다. 그러나 이들 연구는 비가시화 연소실험 결과로서 실제 하이브리드 로켓 연소실 내부의 유동특성과 재순환 영역에 대한 정보를 제공하지 않아 정확한 연소 현상의 이해를 돕는데에는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 다이어프램의 형상 변화에 따른 연소 특성을 파악하기 위해 연소 가시화 장비를 구축하고, 다이어프램의 단차 대신 두께 변화에 따른 연소 가시화를 수행하였다. 또한 평판연료를 사용하는 관계로 실험 결과에 따른 후퇴율의 측정오차를 확인하기 위하여 다이어프램 두께 변화에 따른 고체연료의 국부 및 평균 후퇴율을 각각 도출하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 가시화 실험장치

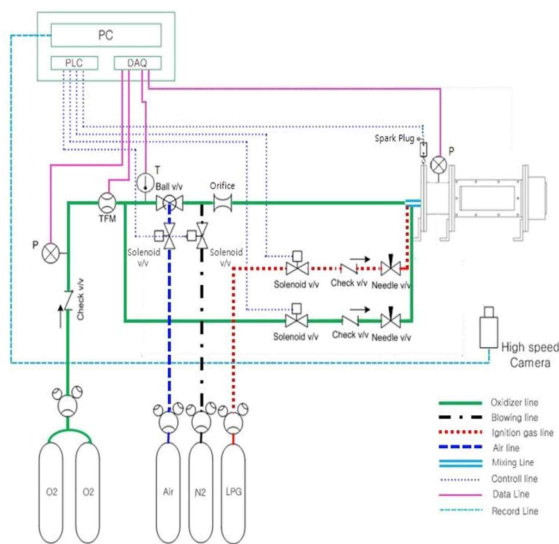


Fig. 1 Schematic of experimental system

다이어프램 형상에 따른 하이브리드 로켓의 재순환 영역을 가시화하기 위해 연소 가시화 장치를 구축하였다. 산화제는 GOX를 사용하였고 연료는 HDPE(high density polyethylene)를 사용하였다. 실험 시스템의 개략도는 Fig. 1과 같으며 연소 가시화 시스템은 가시화 연소기, 점화시스템, 산화제 공급시스템, 데이터 획득 및 제어 시스템, 영상 측정 장비로 구성되어있다. 실험의 전 과정은 PLC(Program Logic Control)를 통해 제

어되며 National Instrument사의 DAQ 보드와 LabVIEW 프로그램을 이용하여 각 센서의 데이터를 획득하였다.

### 2.2 가시화 연소기

Fig. 2는 연소 가시화를 위한 연소기를 나타낸 것으로 평판형 연소기를 사용하여 가시화를 수행하였으며 연소기는 전·후방 연소실, 노즐, 가시화 창, 평판형 고체연료, 다이어프램, 압력센서, 점화플러그로 구성되어 있다. 전방연소실에는 고체연료의 점화를 위한 점화 시스템이 연결되어 있고, 연소실의 압력 변화를 측정하기 위해 압력센서를 장착하였다. 산화제 공급을 안정화시키기 위해 flame holder를 장착하였으며 가시화 창은 고온의 환경에서도 견딜 수 있는 석영유리를 사용하였다. 노즐은 고온의 연소가스를 견딜 수 있도록 수냉식 냉각장치를 장착한 구리 합금 노즐을 사용하였다.

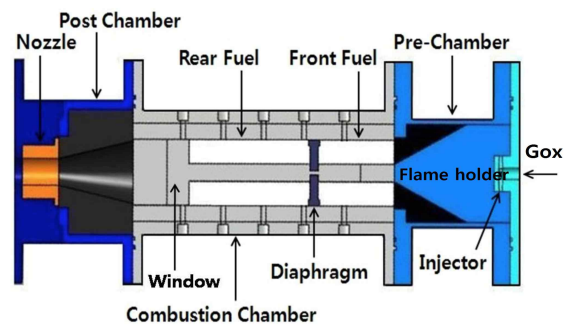


Fig. 2 Slab Combustor for visualization

### 2.3 연소 가시화 측정 장비

연소 가시화 실험에서 연소기 내부를 촬영하기 위해 Photron사의 FASTCAM APX-RS 고속 카메라를 사용하였다. 장비의 사양은 Table. 1[6]과 같다.

Table. 1 Specification of high speed camera

Specification	Range
Max Resolution (pixel)	1024×1024
Frame rate (fps)	60~250,000
Setting frame rate (fps)	6,000~36,000
Setting resolution (pixel)	1024×256

### 2.4 다이아프램

Fig. 3은 실험에서 사용한 평판형 고체연료와 다이아프램의 개략도를 나타내고 있다. 연소실 내 장착된 다이아프램은 고온의 연소 환경에서 견딜 수 있도록 카본재질로 제작 하였다. 본 연구에서는 다이아프램 형상의 여러 요소들 중 두께만을 변경하였으며 연소 유동장 가시화 및 연소특성을 비교분석 하기 위한 연소실험 조건은 Table 2와 같다.

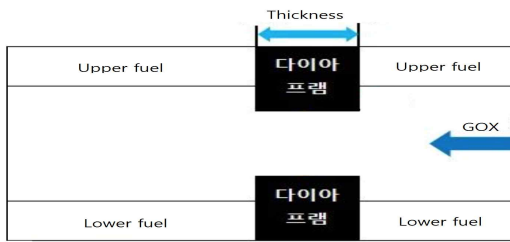


Fig. 3 Schematic of diaphragm with fuel

### 2.5 연소 가시화 결과

Fig. 4는 다이아프램 두께 변화에 따른 연소 가시화 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 다이아프램이 설치되지 않은 경우의 연소 가시화 결과로서 전형적인 난류확산화염의 형태를 나타낸다.[7] Fig. 4(b)는 다이아프램의 두께가 10mm, (c)는 다이아프램 두께 5mm에서 연소 가시화 결과로 다이아프램의 설치로 인해 후방에 와류 형태의 재순환 영역이 형성되는 것을 볼 수 있다. 또한 다이아프램의 두께가 5mm인 경우가 10mm인 경우에 비해 화염영역이 증가하고 재순환 영역의 크기가 증가한 것을 확인 할 수 있다.

Table. 2 Experimental condition

Oxidizer	Gas oxygen
Solid fuel	HDPE (High Density PolyEthylene)
Oxidizer supply pressure (bar)	10 ~ 30
Oxidizer mass flow rate (g/s)	12 ~ 25
Combustion time (sec)	20
Thickness (mm)	10, 5

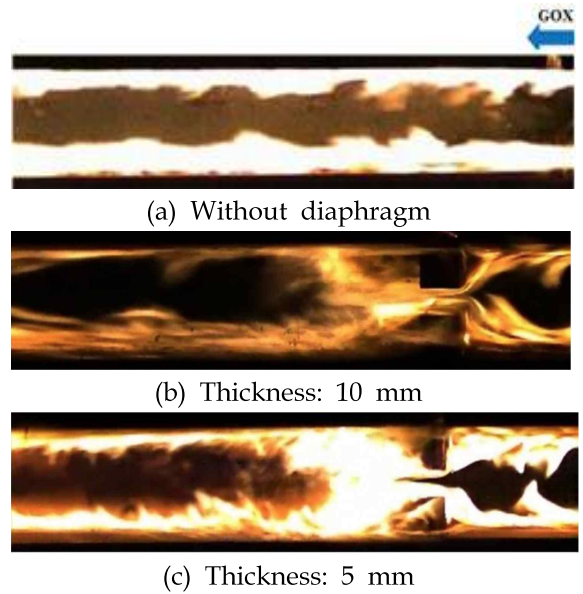


Fig. 4 Images of combustion visualization

재순환 영역의 증가로 고온의 연소가스가 연소실 내부에 잔류하는 시간이 증대되고, 이를 통해 화염으로부터 고체연료로의 열전달량과 고체연료의 후퇴율 증가를 예상할 수 있다[7,8]. 이러한 사실은 다이아프램 후방의 연료 후퇴율을 측정해 판단할 수 있다.

상대적으로 증가된 재순환 영역(와류 영역)의 정확한 이해를 위해서는 비 반응시의 유동 가시화에 대한 연구가 추가로 필요할 것으로 사료되며 기하학적 형상 변화에 의한 난류의 영향인지 또는 반응유동과의 상관관계가 와류 영역에 기여되는지 파악되어야 한다.

### 2.6 고체연료 후퇴율 측정

하이브리드 로켓에서의 고체연료 후퇴율은 연료 표면에 대해 수직방향으로 타들어가는 속도로 정의되며 일반적으로 연소 실험 전후의 연료 질량 변화를 이용하여 후퇴율을 계산한다.

본 연구에서는 연소 가시화실험을 위해 평판형 태의 연소기(slab combustor)와 평판연료를 사용하였으며 이러한 경우 Fig. 5와 같이 연소실 측, 수직방향 연료의 측면이 연소되는 side burning effect가 발생하게 된다.

Side burning에 의해 발생한 연료의 연소량은 연소 전후의 연료 질량 변화에 포함되기 때문에 이를 이용한 후퇴율 계산은 본 연구에 적합하지 않을 것으로 사료 된다.

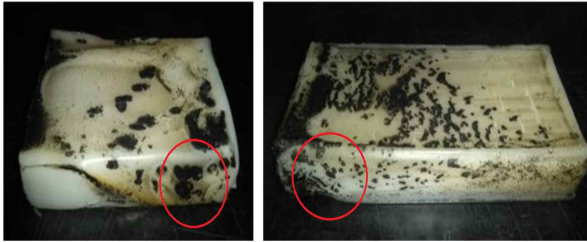


Fig. 5 Side burning effect

따라서 본 연구에서는 Fig. 6과 같이 여러 지점에서 고체연료의 연소 전후의 높이를 측정하여 연료의 평균 후퇴율을 계산 하였다.

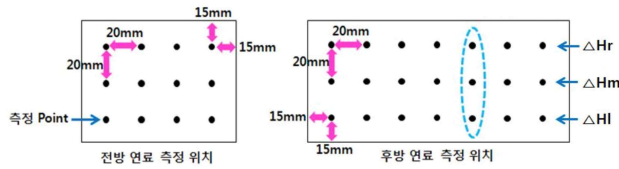


Fig. 6 Local burning height measurement

각 점들은 국부 높이를 측정한 위치를 나타내며, 전방연료와 후방 연료에 각각 12지점과 21지점을 선정하였다. 각 측정 포인트들은 20mm 간격으로 측정을 하였으며 side burning에 의한 오차를 최소화하기 위해 측면으로부터 15mm 이격하여 높이를 측정하였다. 아래 식 (1)과 같이 각 점에서 연소 전후의 높이 차를 이용하여 연소된 연료의 높이를 계산할 수 있다.

$$H_i - H_f = \Delta H \quad (1)$$

연료 길이 방향으로의 후퇴율 변화를 보기 위해 동일 폭(span) 선상에서 측정한 세 지점 (Fig. 6의 점선 내 3 points)의 값과 식 (2)를 이용하여 평균 높이를 구하였다. 또한 식 (3)과 같이 연소 시간으로 나누어 국부 후퇴율 (local regression rate)을 도출 하였다.

$$\frac{\Delta H_l + \Delta H_m + \Delta H_r}{3} = \Delta H_{avg} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta H_{avg}}{\Delta t} = \dot{r}_{local} \quad (3)$$

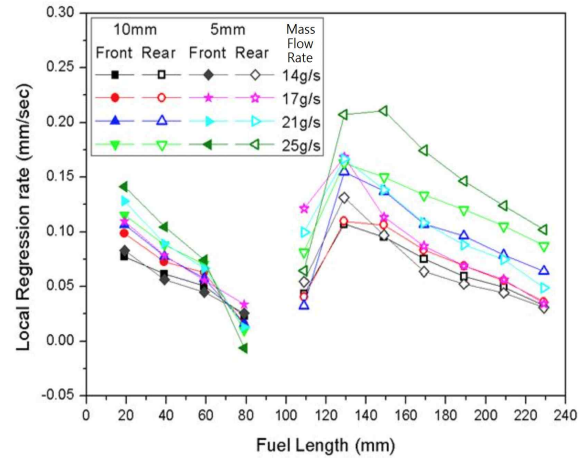


Fig. 7 Result of local regression rate

Fig. 7은 산화제 유량 별 다이어그램 두께 변화(5mm, 10mm)에 따른 국부 후퇴율  $\dot{r}_{local}$ 을 나타내고 있다. 국부 후퇴율 측정 결과 다이어그램의 두께가 5mm 인 경우에 후방 연료의 후퇴율이 크게 증가한 것을 확인 할 수 있다. 이러한 후퇴율의 증가는 앞서 도출된 연소 가시화의 결과를 통해 다이어그램의 두께가 작을수록 후방에 형성되는 재순환영역의 크기가 커져 고체연료의 열전달이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 이는 재순환 영역의 영향이 가장 큰 다이어그램 직후방의 후퇴율을 통해 다시 한 번 확인할 수 있다.

다이어그램의 두께 변화가 하이브리드 로켓 연료 전체에 미치는 영향을 알아보기 위하여 연료 전체 면에서의 평균 연소 후퇴율을 계산하였다. 평균 연소 후퇴율은 다이어그램 전후방, 즉 연료 전체에서 측정한 총 11개의 국부 후퇴율의 평균값으로 구할 수 있으며 식 (4)로부터 도출할 수 있다.

$$\frac{\sum_{i=1}^{11} \dot{r}_{local(i)}}{11} = \dot{r}_{avg} \quad (4)$$

위의 과정을 통해 도출된 다이어그램 두께별 평균 연소 후퇴율은 Fig. 8과 같다. 본 결과를 통해 연료 전체 면에서의 평균 후퇴율 또한 5mm인 경우가 10mm인 경우 대비 증가한 것을 알 수 있으며 산화제 유속이 증가할수록 후퇴율 차이가 더욱 커짐을 알 수 있다.

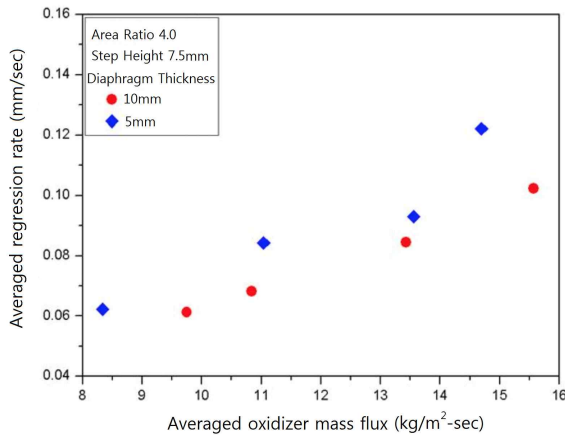


Fig. 8 Result of averaged regression rate

### 3. 결 론

본 연구에서는 다이아프램의 두께 변화에 따른 하이브리드 로켓의 연소 특성을 파악하고 연료 포트 내부에서의 화염 거동을 분석하기 위해 평판형 HDPE 연료와 GOX 산화제를 이용한 연소 가시화 실험을 수행하였다.

연소 가시화 실험 결과 다이아프램의 두께가 5mm인 경우 다이아프램 후방에 생성되는 재순환 영역과 화염의 크기가 10mm인 경우 보다 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 상대적으로 두께가 작은 5mm의 경우가 다이아프램 후방에서 연소가스 잔류시간의 증가와 고체연료로의 열전달 증가를 야기시켜 후퇴율이 향상된 것으로 판단되었다.

평판연료의 Side burning 효과를 배제시킨 새로운 국부 후퇴율 측정법을 제시하였다. 다이아프램의 두께가 5mm인 경우에 후방 연료의 국부 후퇴율이 크게 증가된 것을 확인할 수 있었으며 이는 앞서 도출된 연소 가시화의 결과를 통해 다이아프램의 두께가 작을수록 후방에 형성되는 재순환영역과 열전달이 증가했다는 결과와 일맥상통한다.

연료 전체면의 평균 후퇴율 또한, 다이아프램의 두께 5mm인 경우가 동일한 유속에서 10mm인 경우 대비 증가하였다. 산화제 유속이 증가할수록 이들 간의 평균 후퇴율의 차이가 더욱 커지는 경향을 보임에 따라 추후, 고 산화제 유속 범위의 실험이 필요할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- 1) Yuasa s. Shimada O., Imamura T., Tamura T., and Yamamoto K, "A Technique for Improving the Performance of Hybrid Rocket Engines", *AIAA paper 99-2322*, LosAngeles, CA, 1999
- 2) 문근환, "비연소성 다이아프램을 적용한 하이브리드 연소기의 연소특성 연구", 한국항공대학교 석사학위 논문, 2012
- 3) 김수중, "용융성 고체연료-기체 산소 하이브리드 로켓의 연소특성 연구", 한국항공대학교 박사 학위 논문, 2010
- 4) Matthias Grosse, Gerhard Schlatzke, "Development of a Hybrid Rocket Motor Using a Diaphragm for a Small Test Rocket", Joint Propulsion Conference & Exhibit, Hartford, 2008
- 5) Maatthias Grosse, "Effect of Diaphragm on Performance and Fuel Regression of a Laboratory Scale Hybrid Rocket Motor Using Nitrous Oxide and Paraffin", Joint Propulsion Conference & Exhibit, Denver, 2009
- 6) Photron high speed cameras, World Wide Web location <http://www.photron.com>
- 7) 문근환, 오지성, 김학철, 문희장, 김진곤, "다이아프램을 적용한 하이브리드 로켓의 연소 가시화 연구", 한국추진공학회 2014년도 추계학술대회 논문집, pp.684~688.
- 8) C. Palani Kumar and Amit Kumar, "Effect of Diaphragms on Regression Rate in Hybrid Rocket Motors", *Journal of Propulsion and Power*, may 2013