

# 비연소성 다이어프램을 적용한 하이브리드 연소기의 연소 특성 연구

문근환\* · 김학철\* · 이선재\* · 최원준\* · 이정표\* · 문희장\*\* · 성홍계\*\* · 김진곤\*\*†

## A Study on Combustion Characteristic of the Hybrid Combustor using Non-combustible Diaphragm

Keunhwan Moon\* · Hakchul Kim\* · Sunjae Lee\* · Wonjun Choi\* · Jung-pyo Lee\* · Heejang Moon\*\* · Honggye Sung\*\* · Jinkon Kim\*\*†

### ABSTRACT

The hybrid combustion experiments using non-combustible diaphragm were performed for characteristic of regression rate and combustion efficiency. Results of experiments using diaphragm were showed that the regression rate and efficiency were increased. In addition, the larger difference between fuel grain port and diaphragm port increase the regression rate and efficiency. The modified regression rate equation was proposed with the port area ratio of fuel and diaphragm.

### 초 록

비연소성 다이어프램을 장착한 하이브리드 연소기에서 후퇴율 및 연소효율 특성에 관한 연소 실험을 수행하였다. 실험결과 다이어프램을 장착한 경우 후퇴율 및 연소효율이 증가하였으며, 연료포트 직경과 다이어프램 내경의 단차가 클수록 후퇴율 및 연소효율이 증가하였다. 또한 다이어프램으로 인한 연소를 변화를 표현할 수 있는 후퇴율 관계식을 제안하였다.

Key Words: Regression Rate(후퇴율), Diaphragm(다이어프램), Nusselt Number(누셀트 수), Area Ratio(면적비), O/F Ratio(O/F 비), Vortex(와류)

### 1. 서 론

하이브리드 로켓은 경제성과 안전성 면에서 다른 로켓 시스템에 비해 많은 장점을 가진 추

진 시스템으로, 최근 실용화를 위한 활발한 연구가 이루어지고 있다. 하이브리드 로켓의 실용화를 위해서 해결해야 할 단점 중 크게 대두되는 것이 낮은 후퇴율(regression rate)이다. 낮은 후퇴율을 개선하기 위해 사용되는 대표적인 방법으로는 멀티포트 그레이н, 스월 인젝터 사용, 용융성 연료를 사용하는등의 연구가 활발히 진행되고 있다.

\* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: jkkim@kau.ac.kr

최근에는 하이브리드 고체연료의 중앙에 다이아프램을 장착하여 고체연료의 연소율 및 연소 효율을 높이는 연구가 진행 중이다. 고체연료 중간에 위치한 다이아프램의 전·후방에서는 연료 포트와 다이아프램 포트와의 직경차이로 인해 와류(vortex)가 발생하며 이 와류로 인한 열전달의 증가는 고체 연료 연소율의 증가 요인이 된다. 또한 다이아프램을 통과하는 산화제의 난류 강도 증가에 따른 연료와 산화제의 혼합 증대는 연소효율의 상승을 일으킨다고 알려져 있다.[1,2] 하지만 와류강도가 증가함에 따라 연소불안정이 심화되는 것으로 알려져 있고, 이를 해결하기 위해 용융성 다이아프램을 적용하는 연구가 본 연구실에서 수행된 바 있다.[1]

본 연구에서는 고체연료 HDPE(High Density PolyEthylene)에 카본 다이아프램을 적용하여 실험을 수행 하였으며, 다이아프램을 장착한 경우와 장착하지 않은 경우의 후퇴율과 연소효율을 비교 분석하였다. 다이아프램 내경과 연료포트의 직경 변화에 따른 연소특성 변화를 알아보기 위한 연구가 수행되었으며, 다이아프램을 적용한 경우의 후퇴율 관계식을 제안하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

하이브리드 연소 시험 장치는 산화제 공급 장

Table 1 Specification of the combustion test

Oxidizer		Gas Oxygen
Solid Fuel		HDPE
Oxidizer mass flow rate (g/sec)		18 ~ 50
Solid Fuel Density(kg/m <sup>3</sup> )		950
Combustion Time (sec)		10
Fuel Grain Configuration	Initial Port Diameter (mm)	15, 20
	Out Diameter(mm)	50
	Grain Length (mm)	200
Diaphragm Diameter (mm)		10, 15

치, 점화장치, 데이터 획득 장치 및 연소 내 부분으로 구성된다.[3] 산화제로는 기체산소(GOX), 연료는 HDPE를 사용하였으며 실험 조건은 Table. 1과 같다.

### 2.2 다이아프램 및 연료 그레인 형상

본 연구에서 사용한 다이아프램의 형상은 Fig. 1과 같으며 연료 그레인 포트 직경과 다이아프램 내경의 차이에 의한 연소특성 변화를 알아보기 위하여 10 mm와 15 mm의 다이아프램 내경을 고려하였다.(Table. 2) 연소 중에도 다이아프램의 내경을 유지하도록 하기 위하여 재질은 비연소성이며 내열성이 좋은 카본(carbon)으로 선정하였다.



Fig. 1 Diaphragm Configuration

Table 2 Specification of Diaphragm

Case	No. 1	No. 2
Material	Carbon Graphite	
Inner Diameter(mm)	10	15
Out Diameter (mm)	54	
Thickness (mm)	12	

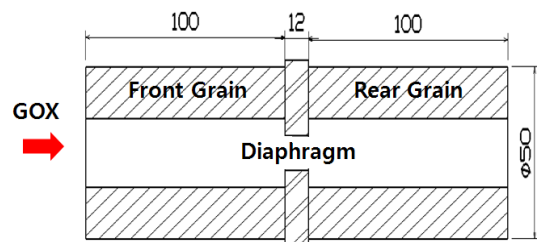


Fig. 2 Diaphragm & Fuel Grain Configuration

Figure 2는 연료 그래인에서의 다이어프램 위치를 나타낸 것으로, 다이어프램 전·후방에서의 연소특성 변화를 알아보기 위하여 다이어프램을 연료의 중앙에 장착하였다.

### 2.3 후퇴율 관계식

하이브리드 로켓 연소에서의 후퇴율 관계식은 Eq. 1과 같이 'Marxman et al.'에 의해 정립된 관계식이 가장 일반적으로 사용되고 있다.[4]

$$\dot{r} = aG_{o,avg}^n \quad (1)$$

그러나 다이어프램을 적용할 경우의 후퇴율 관계식은 연료포트와 다이어프램 내경의 단차 때문에 발생하는 와류로 인한 대류열전달 영향을 고려해야 하기 때문에 일반적인 후퇴율 관계식은 타당하지 않다고 판단되어 새로운 후퇴율 관계식을 제시하고자 한다.

Krall and Sparrow[5]는 산화제가 유입되는 입구 뒤쪽에서 면적이 급격히 상승했을때의 열전달 효과를 면적에 대한 비로 정의 하였으며 Eq. 2와 같이 나타냈다.  $A_p$ 는 연료포트의 면적,  $A_i$ 는 다이어프램 내경의 면적이다.

$$Nu \propto \left( \frac{A_p}{A_i} \right)^n \quad (2)$$

다이어프램 삽입으로 인한 열전달 상승효과를 표현하기 위하여 Eq. 2를 'Marxman et al.'의 후퇴율 관계식에 적용하여 새로운 후퇴율 식 Eq. 3을 유도하였다. 면적의 비가 커질 수록 와류강도 증가로 인한 대류열전달의 증가, 즉 Nu 수가 커지기 때문에 후퇴율이 높아질 것으로 예상된다.

$$\dot{r} = aG_{o,avg}^n \left( \frac{A_p}{A_i} \right)^m \quad (3)$$

### 3. 실험 결과

Figure 3은 다이어프램을 장착하였을 경우와 장착하지 않은 경우의 후퇴율을 비교한 것으로, 연료 포트 직경은 15, 20 mm이며 다이어프램 내경은 10 mm로 동일하다. 실험결과 연료포트 초기직경에 상관없이 다이어프램이 있을 때의 후퇴율이 없을 때의 후퇴율보다 동일유속에서 높은 결과를 얻었다. 이는 다이어프램 삽입으로 인해 형성된 고온의 와류에서 고체연료로 열전달 및 난류강도 증가로 인한 것으로 판단된다. 또한 다이어프램을 장착하지 않았을 경우 동일 산화제 유속에서 연료 초기 포트직경 변화에 대한 후퇴율 차이는 작지만[6] 다이어프램을 장착하였을 경우에 동일 산화제 유속에서 연료의 초기 포트 직경에 따라 후퇴율의 차이가 크게 나타남을 볼 수 있다. 다이어프램 유·무에 따른 후퇴율의 증가율은 연료 초기직경 15 mm일 경우 전체 산화제 유속 구간에서 약 27 %이지만, 연료 초기직경 20 mm일 경우 약 47 %로 나타났다. 이는 연료 포트 직경과 다이어프램 내경의 차이로 인해 발생하는 유동장의 변화가 직경 단차가 클수록 커지기 때문인 것으로 판단된다. 유동장의 변화에 따른 와류강도의 증가는 고체연료로의 열전달량을 증가시켜 후퇴율을 높이는 것으로 판단된다.

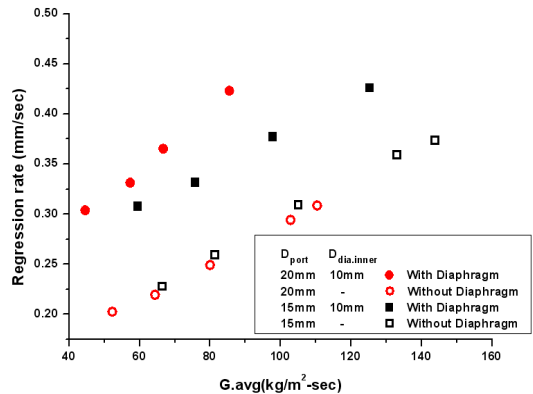


Fig. 3 Oxidizer mass flux vs regression rate

Figure 4는 다이어프램을 장착하였을 경우 동일 유속에서 다이어프램 전·후방 연료의 후퇴율을 각각 비교한 것이다. 연료포트 직경 및 다이

아프램 내경 변화에 따른 연소특성 변화를 알아보기 위하여 연료포트 직경을 15, 20 mm, 다이어프램 내경을 10, 15 mm로 설정하여 실험을 수행하였다.(Table. 3)

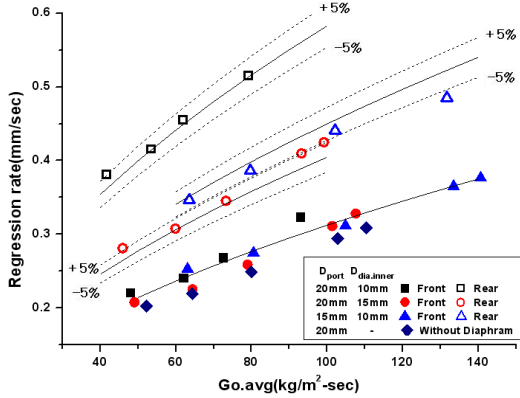


Fig. 4 Oxidizer mass flux vs regression rate with different diaphragm orifice diameter

Table 3 Effect of area ratio on regression rate results at fixed oxidizer mass flux

Case	No. 1	No. 2	No. 3
Fuel Diameter (mm)	20	20	15
Diaphragm Inner Diameter (mm)	10	15	10
Area Ratio $A_p/A_i$	4.0	1.78	2.25

전방 연료에서는 연료포트 초기직경 및 다이어프램 내경에 상관없이 동일 산화제 유속에서 후퇴율의 차이가 크지 않고, 다이어프램을 장착한 경우의 후퇴율이 장착하지 않은 경우의 후퇴율보다 차이는 작지만 크게 나타남을 볼 수 있다. 이는 다이어프램 삽입으로 인해 다이어프램 전방에서 와류가 형성되지만 노즐 방향으로 흐르는 산화제 유동으로 와류강도가 작아졌기 때문으로 판단된다. 후방 연료에서는 전방 연료에서와 달리 후퇴율 차이가 크게 나타나고, 연료포트와 다이어프램 내경의 단차가 클수록 후퇴율이 높게 나타났다. 이는 Fig. 3에서와 같이 단차

가 커질수록 다이어프램의 후방에서 발생하는 와류의 강도가 커져 단차가 작을 때보다 고체연료로의 열전달량이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

Equation 3을 이용하여 다이어프램을 장착하였을 경우 전·후방 연료의 후퇴율을 Eq. 4와 같이 표현할 수 있다. 전방연료에서의 후퇴율은 면적비가 1이기 때문에 산화제 유속만의 함수로 나타나는 반면, 후방 연료에서의 후퇴율은 산화제 유속 및 면적비의 함수로 나타남을 알 수 있다. Eq. 4를 이용한 각각의 실험 케이스의 후퇴율 관계식은 Fig. 4에 나타나 있으며 실험값과 관계식은 오차범위  $\pm 5\%$  내로 나타남을 볼 수 있다.

$$\dot{r} = 0.0255 G_{ox.avg}^{0.54} \left( \frac{A_p}{A_i} \right)^{0.45} \quad (4)$$

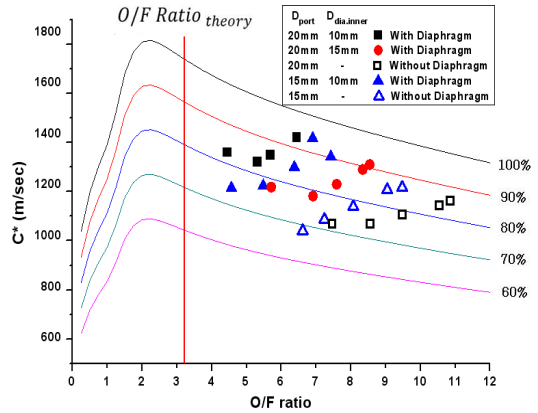


Fig. 5 Characteristic velocity vs O/F ratio : with or without diaphragm

Figure 5는 O/F 비에 대한  $C^*$ 를 비교한 것으로서, 동일 O/F 비에서 다이어프램을 장착한 경우의  $C^*$ 가 장착하지 않은 경우의  $C^*$  보다 높게 나타나며, 다이어프램이 장착된 경우 면적비가 클수록  $C^*$ 가 높게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 다이어프램을 장착함으로써 후방에 난류강도가 증가하여 산화제와 연료의 충분한 혼합이 이루어짐으로써 연소효율이 증진한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

하이브리드 연소기에서 비연소성 다이아프램을 장착하였을 경우의 연소특성에 대한 연구를 위해 실험을 수행하였다. 다이아프램을 장착한 경우 장착하지 않은 경우에 비하여 후퇴율 및 연소효율이 증가하며 다이아프램의 내경이 작아질수록 후퇴율 및 연소효율이 증가함을 확인 할 수 있었다. 이것은 다이아프램을 장착함으로써 난류강도가 증가하여 연료와 산화제의 충분한 혼합이 이루어지고 다이아프램 후방에 발생하는 와류로 인해 고체연료로의 열전달이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

또한 다이아프램을 적용하였을 경우 연료 포트와 다이아프램 내경 차이로 인한 단차 때문에 발생하는 와류로 인한 대류열전달 영향을 설명하기 위하여 새로운 후퇴율 관계식 Eq.3을 정의 하였다. 실험결과는 Eq. 4와 같이 연료포트와 다이아프램의 면적비를 고려한 관계식으로 표현할 수 있었으며 실험값과 관계식은 오차범위  $\pm 5\%$  내로 나타남을 볼 수 있었다.

추후 다이아프램의 위치에 따른 후퇴율 및 연소효율에 대한 연구를 수행할 예정이며 직경과 위치 변화를 고려한 새로운 후퇴율식 및 연소불안정에 대한 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. 김학철, " 용융성 다이아프램을 이용한 하이브리드 로켓의 연소 특성 연구", 한국 항공대학교 석사 학위 논문, 2011
2. Matthias Grosse, "Effect of a Diaphragm

on Performance and Fuel Regression of a Laboratory Scale Hybrid Rocket Motor Using Nitrous Oxide and Praffin." A I A A - 2 0 0 9 - 5 1 1 3 , 4 5 t h AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion conference and Exhibit, Colorado, Denver, August 2009

3. 이정표, "Single-Port Hybrid Rocket Motor의 물질전달 수를 고려한 고체연료 연소율에 관한 연구", 한국항공대 석사학위논문, 2007년
4. Marxman, G. A., Wooldridge, C. E., and Muzzy, R. J., "Fundamentals of Hybrid Boundary Layer Combustion", Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 15, AIAA, New York, 1964, pp. 485 - 522.
5. Krall, K. M., and Sparrow, E. M., "Turbulent Heat Transfer in the Separated Reattached and Redevelopment Regions of a Circular Tube", Journal of Heat Transfer, Vol. 88, No. 1, 1966, pp. 131-136
6. 이정표 외 "하이브리드 로켓에서의 연료포트 직경에 따른 연소특성에 관한 연구", 한국추진공학회, 2008년 추계학술대회
7. Fiebig, M., "Vortices and Heat Transfer", ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics, Volume 77, Issue 1, 1997, pp. 3-18
8. Amnon Netzer and Alon Grany, "Burning and Flameholding Characteristics of a Miniature Solid Fuel Ramjet Combustor", 24th ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 11 - 13 July 1988, Boston, MA, AIAA 1988-3044
9. Vinnemeier, F. M., de Wilde, J. P., "Heat Transfer in a Solid Fuel Ramjet", AIAA-1990-1783, 5th AIAA and ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, Seattle, WA, June 18-20, 1990, 10p