

하이브리드 로켓에서의 연료 표면 온도 측정에 관한 연구

김학철* · 우경진** · 이정표* · 김기훈* · 조정태* ·
김수종* · 문희장*** · 성홍계*** · 김진곤***

A Study for Measurement of the Fuel Surface Temperature in Hybrid Rocket

Hakchul Kim* · Kyoungjin Woo** · Jungpyo Lee* · Jungtae Cho* · Gihun Kim*
Soojong Kim* · Heejang Moon** · Honggye Sung*** · Jinkon Kim**

ABSTRACT

To estimate the surface temperature for the hybrid solid fuels correctly is very important for the modelling of the hybrid combustion. Because it is used for the calculation of regression rate. In this study, The measurement of the surface temperature were performed with the solid fuels inserted the thermocouple. Its variation was investigated in the range of mass flux for an oxidizer.

초 록

일반적으로 하이브리드 연소를 모델링 할 경우 고체 연료의 표면 온도를 이용하여 후퇴율을 계산하기 때문에 정확하게 고체연료의 표면온도를 예측하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구는 하이브리드 고체 연료에 열전대를 삽입한 후, 연소실험을 통해 연료의 표면 온도를 측정하였고, 본 연구에서의 산화제 유속 범위에서의 고체 연료 표면 온도 변화를 고찰하였다.

Key Words: Hybrid Rocket(하이브리드로켓), GOx(기체산소), HDPE(고밀도 폴리에틸렌), Surface Temperature(표면 온도), Thermocouple(열전대), Regression Rate(후퇴율)

1. 서 론

하이브리드 로켓 연소는 기화된 고체 연료와 액체 또는 기체 산화제의 화학반응에 의해 화염을 형성하고, 화염 영역에서 발생된 열이 고체

연료의 표면으로 전달되어 고체연료를 기화시켜 유입되는 산화제와의 화학반응을 통해 지속적인 연소를 가능하게 한다. 이와 같은 하이브리드 로켓은 연소표면의 수직 방향으로 타 들어가는 속도인 후퇴율이 중요한 성능 및 설계 변수이므로, 기존의 하이브리드 로켓 연소 모델링에서는 대부분 연료의 표면 온도를 이용하여 후퇴율을 예측하는 기법이 사용되어 왔다[1]. 그러나 하이브리드 로켓 연료의 표면온도는 아직까지 정확한

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처, E-mail: jkkim@kau.ac.kr

측정 및 예측이 어렵기 때문에 연구의 중요성이 높다.

따라서 본 연구에서는 하이브리드 로켓에서 열전대를 이용하여 표면온도를 측정하는 기법에 대해 연구했고, 산화제의 유속에 따른 표면온도의 변화를 측정했다.

2. 본 론

2.1 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용된 하이브리드 연소 실험 장치는 Fig. 1과 같다. 전체 시스템은 산화제 공급 시스템, 점화시스템, 연소기, 데이터 획득 및 제어 시스템으로 구성되어 있다.

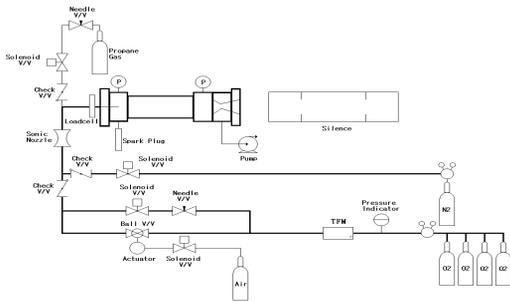


Fig. 1 Schematic of the hybrid experimental system

산화제 공급 시스템은 가스 실린더 4개를 병렬연결 하여 산화제를 공급하였고, 일정한 산화제 유량을 공급하기 위해서 산화제 배관 내 초킹 오리피스를 설치하였다. 점화시스템은 산소와 부탄을 혼합한 후 스파크 플러그를 이용하여 점화토록 하였으며 연소기는 pre-chamber, 연료 그레인, post chamber, 수냉식 구리 노즐로 구성되며 양끝은 플렌지를 이용하여 고정하였다. 본 실험 장치의 제어 및 각 센서의 데이터 획득은 Labview 프로그램을 사용하였다. 실험 조건은 Table. 1과 같으며 연료와 산화제는 각각 PE와 GOx를 사용하였다. 연료의 초기 포트 직경은 15 mm 이며, 길이가 200 mm인 single- port 그레인을 사용하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 열전대의 끝은 그레인 포트 내 표면으로부터 3 mm 안쪽에 위치하도록 고체 연료에 삽입하였다.

Table 1. Specification of the combustion test

Fuel	종 류	PolyEthylene(PE)
	밀 도	951 kg/m ³
	크 기	길이 : 200 mm Port 직경 : 15 mm
Oxidizer	종 류	GOx(기체 산소)
Thermo-couple	Type	K
	삽입 위치	Grain 축방향 중심
	삽입 깊이	Port내 표면으로부터 3 mm
	외 경	1.6 mm

열전대는 온도 측정범위가 -100K ~1600K인[2] K Type을 사용하였고, 다양한 산화제 유속 범위에서 표면 온도를 측정하기 위해 산화제 공급 유량을 초킹 오리피스를 이용하여 조절하였다.

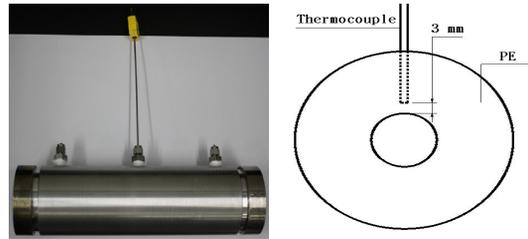


Fig. 2 Schematic of fuel with thermocouple

3. 결과 분석

Figure 3은 열전대를 삽입한 경우와 삽입하지 않은 경우에 산화제 평균유속에 대한 후퇴율의 관계를 나타내고 있다.[3]

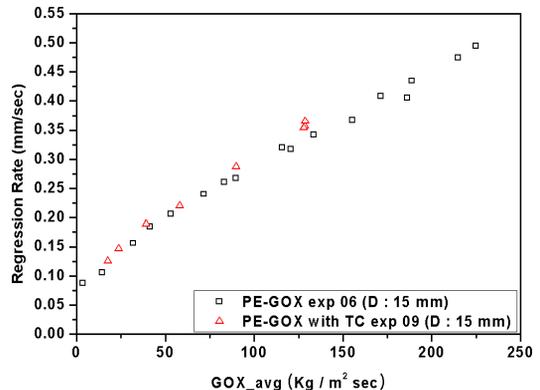


Fig. 3 Average oxidizer mass flux vs regression rate

고체연료에 열전대를 삽입한 경우와 삽입하지 않은 경우의 비교에서 산화제 평균유속 - 후퇴율 데이터의 경향 차이가 작음을 확인할 수 있다. 이를 통해 표면 온도를 측정하기 위해 연료에 삽입한 열전대가 후퇴율에 큰 영향을 주지 않는다고 판단하였다.

본 실험에서는 초기 연료의 기화 및 점화를 위한 시간이 10초이고, 연소는 10초부터 산화제를 공급하여 진행된다. 표면에 노출되는 열전대를 통해 표면온도를 측정할 수 있고, 서로 다른 산화제 유속 값에서 실험을 수행하여 산화제 유속의 변화에 따른 표면온도 변화 및 열전대의 노출 시간 차이를 알아보았다. 실험 조건은 Table 2와 같다.

Table 2. Condition of the experimental case

	연소시간 (sec)	Gox_avg (Kg/m ² -sec)	\dot{m}_{ox} (Kg/sec)
case 1	40	17	0.00555
case 2	40	23	0.00810
case 3	30	39	0.01310
case 4	25	57	0.01915
case 5	25	89	0.03470
case 6	20	128	0.04950
case 7	20	128	0.05030

Figure 4는 연소 시간 - 온도 그래프이다. 전체적으로 연소시간 초기에는 온도 기울기가 작다가 일정 시점에서 급격히 커짐을 확인할 수 있고, 산화제가 저유속인 경우 고유속에 비해 시간 - 온도 그래프의 기울기가 완만한 시간이 길어짐을 볼 수 있다. 이를 통해 기울기가 완만한 구간은 열전대가 연소표면에 노출되기 전 전도 열전달에 의해 온도가 서서히 상승하는 구간이고, 온도변화량이 급격히 커지는 시점을 열전대가 표면에 노출된 시간으로 판단하였다. 저유속의 경우 후퇴율이 느리기 때문에 열전대가 노출되는 시간이 느려짐을 알 수 있다. 그러나 Fig. 4를 통해서서는 각각의 유속에서의 시간 - 온도 변화의 경향만을 파악할 수 있을 뿐 열전대의 표면 노출 시점을 정확히 판단하기 어려운 문제가 있다. 열전대가 표면에 노출 된 후 변곡점이 여

러 번 나타는 현상은 열전대에 연료액적이 응착되면서 측정온도에 영향을 준 것으로 판단된다. 열전대가 표면에 노출되는 시점을 정확히 예측하기 위하여 Eq. 1의 연료 질량 유속과 산화제 질량 유속의 관계식을 통해 열전대의 연료 표면 노출시간을 계산하였다.

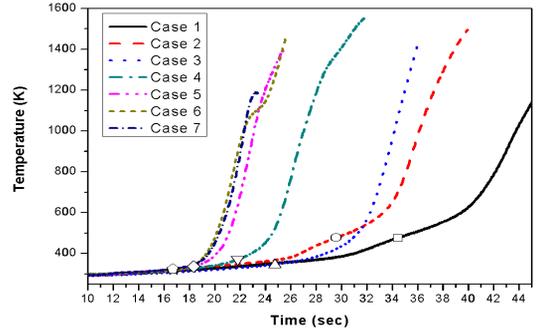


Fig. 4 Temperature vs time about various oxidizer mass flux

Equation 1은 연료의 질량 유속과 산화제 질량 유속간의 관계식이다.

$$\frac{\dot{m}_f}{\pi D_i L} = a G_{ox, i}^n = a \left(\frac{\dot{m}_{ox}}{\frac{\pi}{4} D_i^2} \right)^n \quad (1)$$

\dot{m}_f = 연료 질량 유량 (Kg/sec)

D_i = 연료 초기 포트 직경 (mm)

a = 후퇴율 상수 (0.018)

n = 후퇴율 지수 (0.588)

$G_{ox, i}$ = 초기 포트 직경을 고려한 산화제 질량 유속 (Kg/m² sec)

\dot{m}_{ox} = 산화제 질량 유량 (Kg/sec)

Port 반경이 3 mm 증가하는 동안 연소한 연료의 양은 Eq. 2로 계산 할 수 있다. 열전대의 예측 노출 시간은 Eq. 3과 같고, Eq. 3을 통해 계산된 열전대의 예측 노출시간을 Table 3에 정리하였다.

$$Fuel\ Burning\ Mass = \frac{\pi}{4} (D_{T.C}^2 - D_i^2) L \times \rho \quad (2)$$

$D_{T.C}$ = 열전대 끝 위치 지점의 포트 직경 (mm)

ρ = 고체 연료 밀도 (Kg/m³)

$$\Delta t = \frac{\text{Fuel Burning Mass}}{\dot{m}_f} \quad (3)$$

Table 3. Surface temperature about expected exposure time

	예측 노출시간 (sec)	예측 표면 온도 (K)
case 1	34.4	476.9
case 2	29.6	478.5
case 3	24.7	345.4
case 4	21.8	371.0
case 5	18.3	337.2
case 6	16.7	317.5
case 7	16.7	325.4

Table 3의 예측 노출시간과 예측 표면 온도는 Fig. 4와 같다. 산화제 유속이 고유속에서 저유속으로 갈수록 연료 표면으로의 노출시간은 길어지고 표면온도는 상승하다 일정하게 수렴함을 볼 수 있고, 전체 산화제 유속구간에서 표면온도는 일정 범위 내에 포함되는 것을 알 수 있다.

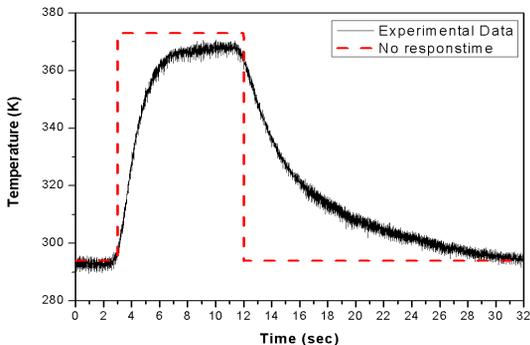


Fig. 5 Compare with thermocouple data and step function

결과에서 예측 노출시간과 Fig. 4에서의 변곡점 위치 시점과는 차이가 있었다. 이러한 오차는 첫째, 응답 시간에 의한 것으로 판단된다. Fig. 5는 열전대를 이용하여 연료의 표면 온도를 측정할 때 발생하는 오차를 알아보기 위해, 열전대를 끓는 물에 넣어 시간에 대한 온도를 측정한 그래프이다. 평형온도에 도달하기 까지 응답 시간이 있음을 확인할 수 있다.

둘째, 열전대가 연료에 삽입되어 있는 깊이가 예측 노출시간을 계산하는데 중요한 변수이지만, 실험 오차로 인해 모든 실험 case에서 열전대가 정확히 동일한 위치에 있다고 보기 어려워 삽입 깊이 오차를 가질 수 있다.

셋째, PE 연료가 연소될 때 포트 안쪽이 매끈하게 연소되지 못하고, 실제로 단면이 울퉁불퉁한 형상을 보인다.

이러한 현상으로 인해 열전대가 표면에 노출되는 시점을 정확히 예측하는데 오차를 가질 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 후퇴율이 상대적으로 느린 저유속 구간에서의 표면온도 측정을 통해, 예측 노출시간과 변곡 시점의 차이가 작음을 알 수 있었고 이 시점을 하이브리드 연소표면온도로 볼 수 있었다.

4. 결 론

열전대를 이용해 고체연료 표면 온도를 측정해본 결과, 하이브리드 연료 표면온도는 전체 산화제 유속구간에서 일정 범위 내에 포함되는 것을 알 수 있다. 그러나 열전대로 연료의 표면온도를 측정함에 있어 열전대의 응답 시간 지연, 열전대의 삽입 깊이, 매끈하게 연소되지 않은 포트 표면 등으로 인해 정확하게 표면온도를 측정하는데 일부 오차가 발생하였다.

보다 정확한 표면 온도의 측정을 위해서 이상의 오차를 줄이기 위한 측정기법의 보완이 필요하다.

참 고 문 헌

1. Atsushi. I., "Burning Surface Temperature Measured with 열전대," AIAA 2003-5086, 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit
2. Richard. S., "Theory and Design for Mechanical Measurements," Wiley, pp347-418
3. 조성봉, "PE-GOX 하이브리드 로켓에서의 과도 연소 특성 연구," 한국추진공학회, 2006년, 추계학술대회