

하이브리드 로켓 연료의 국부 후퇴율 측정기법에 관한 연구

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

A Study on the Measurement Technique for Local Regression rate of Solid fuel in Hybrid rocket

Jungtae Cho* · Gihun Kim* · Kyoungjin Woo** · Soojong Kim* · Jungpyo Lee* ·
Hakchul Kim* · Hong-Gye Sung** · Heejang Moon** · Jin-Kon Kim**

ABSTRACT

The axial local regression rate of solid fuel of hybrid rocket is one of important parameter for a design and performance. Steeping method is simple and measure a corrctet regression rate of axial direction not being relevant to a shape of fuel and physical characteristics. In this study, the problem of other measuring equipment was improved and this linear steeping method is provide higher accuracy than the other.

초 록

하이브리드 로켓의 고체 연료에서 축방향 국부 후퇴율은 하이브리드 추진 연소기의 설계 변수 및 성능 변수로 활용 된다. 국부 후퇴율 측정하기 위한 방법으로는 여러 가지 있지만, 침수법은 간단한 방법으로 연료의 형상 및 물리적 특성에 관계 없이 정확하게 축방향 국부 후퇴율을 측정할 수 있다. 본 연구에서는 기존의 국부 후퇴율 측정장비의 문제점을 개선하였고, 실험을 통해 높은 정확성을 가짐을 확인 하였다.

Key Words: Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Local Regression Rate(국부후퇴율), Measurement Technique(측정기법), Steeping Method(침수법)

1. 서 론

전형적인 확산 연소인 하이브리드 로켓은 추진제 조합에 따라 연료면이 타들어가는 속도로

정의되는 후퇴율로 정량화되어 연구가 진행되어 오고 있다. 후퇴율은 산화제의 질량 유속과 다른 중요 변수에 종속적인 관계를 가지며, 하이브리드 시스템의 내탄도 설계에 중요한 변수가 된다.

일반적으로 사용되는 후퇴율 관계식은 시공간 평균 후퇴율로써 연소 시간동안 연료 축방향으로 일정한 속도로 연소되는 것으로 가정한 값이다. 그러나 실제 현상에서는 일정하게 연소되지

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처, E-mail: jkkim@kau.ac.kr

않고 축방향에 따라 연소속도가 다르다[2]. 이러한 연료 축방향에 대한 축 방향 국부 후퇴율의 정량적 측정과 이를 예측하기 위한 연구는 소형 사운드 로켓의 설계 변수 및 성능변수로 활용될 수 있다는 점에서 중요성이 매우 크다. 고체 연료 축방향에 대한 후퇴율 변화를 연구하기 위해, 펜실베니아 대학에서는 X-ray 측정방법 및 초음파 측정방법으로 고체 연료 그레인 내부의 후퇴율을 측정하였다[1]. 그러나 이러한 방법은 고가의 장비로 구성된 복잡한 시스템을 필요로 하고 원통형 그레인의 경우에는 적용하기 어려운 문제점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구진은 선행 연구를 통해 분할법(Seperation Method)과 절삭법(Cutting Method), 침수법(Steeping Method)을 이용한 로켓 연료의 국부 후퇴율 측정기법을 고안하였다[2,3]. 본 연구에서는 연료의 형상과 물리적 특성에 관계없이 경제적이면서도 기존의 침수법의 단점을 보완하여 정확성이 높은 선형 침수법을 고안하여 하이브리드 연료의 축방향에 따른 국부 후퇴율 측정에 적용해 보았다.

2. 본 론

2.1 국부후퇴율 측정 기법

분할법은 연소 전 고체 연료를 분할한 후 연료 케이스에 적층하여 연료 그레인을 형성하는 방법이다. 연료의 원하는 구간에서 후퇴율을 측정할 수 있고, 연소 후 별도의 가공을 거치지 않으므로 쉽게 측정할 수 있다. 반면 분할된 연료의 포트간 측정률이 어긋날 경우 산화제 고유속에서 이상 연소가 발생하여 신뢰성이 떨어진다[2].

절삭법은 분할법의 단점인 이상 연소 현상을 보완하기 위한 방법으로 연소 후 연료 그레인을 일정 간격으로 절삭 하여 단위 길이당 연소량을 구한다. 절삭법은 데이터의 신뢰도가 높지만, 복잡한 연료 형상이나 물리적 특성이 좋지 않은 경우 절삭이 어렵고, 많은 시간이 걸리는 단점을 가진다.[3].

침수법은 고체 연료를 물을 채운 용기에 일정 간격으로 침수시켜 넘친 물의 질량을 측정함으로써 연료의 연소량을 계산하는 방법이다. 절삭법의 장점을 취하고 단점을 보완한 방법으로, 연소 전후 연료의 가공이 필요하지 않으므로 연료

의 이상 연소 및 연료의 형상 그리고 물리적 특성에 관계 없이 측정이 가능하다.

2.2 실험 장치 및 방법

침수법을 이용한 국부 후퇴율 측정은 연료를 측정하고자 하는 간격으로 임의로 침수시켜 넘친 물의 질량을 측정하는 방법이다. 기존의 방법은 수동으로 행해지므로 실험오차가 발생할 수 있고, 측정시간이 오래 걸린다. 또한 측정구간이 크기 때문에 축방향으로의 변화가 큰 연료의 국부 후퇴율을 세밀하게 표현하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 일정한 속도로 회전하는 스텝 모터를 이용한 자동 이송 장치를 사용하여, 일정한 시간마다 넘치는 물의 양을 측정함으로써 기존의 침수법보다 많은 지점에서의 측정이 가능하며, 축방향으로 변화가 큰 연료에서도 신뢰성을 확보할 수 있고, 측정시간을 단축시킬 수 있다.

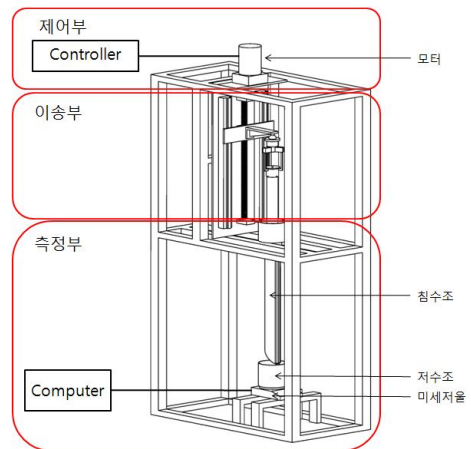


Fig. 1 Schematic of Local Regression rate Measurement system

실험장치는 제어부, 측정부, 이송부로 구분되며 Fig. 1과 같이 구성하였다. 제어부는 모터와 모터의 속도를 제어할 수 있는 컨트롤러로 구성되며 모터의 속도를 조절함으로써 고체 연료의 침수 속도를 조절할 수 있다. 이송부는 베이스 플레이트와 이송장치, 연료를 잡을 수 있는 클램프로 구성된다. 이송마운트는 모터에 의해 회전하는 볼 스크류와 이송 마운트의 정렬된 움직임을 도와주는 이송가이드에 의해 이동된다. 클램프의 끝에는 강철구를 설치하고 강철구를 자석

에 붙여 연료와 클램프가 수직방향으로 중심을 잡을 수 있도록 하였다. 측정부는 측정할 연료가 잠기면서 휘발성이 적은 액체가 침수된 연료의 체적 만큼 구멍을 통해 흘러 나올 수 있도록 설계된 침수조와 넘친 액체를 수집할 저수조, 넘친 액체의 무게를 측정 할수 있는 미세 측정 전자저울로 구성되어 있으며, 측정 데이터는 RS232 케이블을 통해 컴퓨터로 전달되어 저장된다. 침수조에는 휘발성이 적은 액체가 일정한 출기를 가지고 흐를 수 있도록 가이드를 설치하였고 침수조 밑 부분에는 흐르는 물이 저수조에 일정하게 떨어지게 하는 가이드를 설치 하였다.

Table 1. Specification of the balance

Model	Setra EL2000S
Capacity	2000g
Gram(g)	0.01g
Linearity	± 0.02g
Repeatability	0.01g
Stable Time	3sec
Sense Drift	± 3ppm/°C(10°C ~ 30°C)

2.3 후퇴율 측정 및 계산

일반적인 후퇴율은 연료 연소무게를 측정하고 연료 밀도를 이용해 체적 변화량을 계산하여 시공간 평균 후퇴율로 Eq.1과 같이 나타낸다.

$$\dot{r} = \frac{D_f - D_i}{2t_b} \quad (1)$$

$$\dot{r}_{local} = \frac{\sqrt{\frac{4\Delta m_w}{\rho_w \pi x} + D_i^2} - D_i}{2t} \quad (2)$$

본 연구에서는 연료를 침수조에 일정속도로 침수시켜 일정한 간격으로 넘치는 액체의 질량을 전자저울로 측정함으로써, 구간별 연료의 연소에 의한 체적 변화를 구하였다. 측정된 연료의 구간별 체적을 이용하여 연료의 길이 방향의 구간별 시공간 평균 후퇴율을 Eq.2와 같이 계산하였다.

연료의 시편은 추력 50 kgf급 LN₂O/PE 연소와 PMMA/ GOx 다공포트 그레인 실험에서 사용되었던 연료를 이용하였으며, 연소 조건은

Table 2와 같다.

Table 2. Specification of the combustion test

Oxidizer	LN ₂ O	Gox	
Solid Fuel	HDPE	PMMA	
Solid Fuel Density	951 kg/m ³	1,190kg/m ³	
Burning time	10 sec	5 sec	
Fuel Grain Configuration	Initial Port Diameter(Di)	25 mm	10 mm (4 Port)
	Outer Diameter(Do)	60 mm	50 mm
	Total Grain Length(L)	480 mm	200 mm

3. 실험 결과

본 연구를 위해 제작된 국부 후퇴율 측정장치를 적용된 국부 후퇴율 장치를 이용하여 단일 원통 포트 그레인과 와 다공 원통형 포트 그레인의 하이브리드 고체 연료의 축방향 국부 후퇴율을 측정하였다.

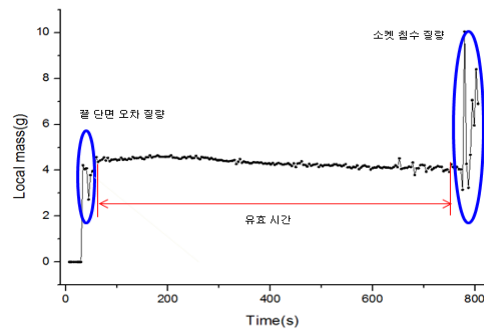


Fig. 2 Local mass on the grain axial length(P E, single port grain)

국부후퇴율 측정장치의 저수조에서 실시간 측정된 물의 국부 질량을 Fig 2.에 나타내었다. 획득한 데이터는 크게 세 구간으로 나눌 수 있다. 유효시간동안에 얻어지는 유효 질량 데이터 구간과 고체 연료의 침수가 시작되는 시점에서 연료 끝단면의 불규칙한 형상과 물의 표면장력에 따른 오차 데이터, 유효시간 끝지점을 나타내기 위하여 설치한 연료보다 체적이 큰 소켓의 질량

이 나타나는 소켓 침수 데이터구간으로 구분된다. 그중 끝 단면 오차구간, 소켓 질량 구간이 배제된 유효 질량 데이터를 이용하여 연소된 국부 체적차이를 이용하여 고체 연료의 후퇴율을 도출하였다.

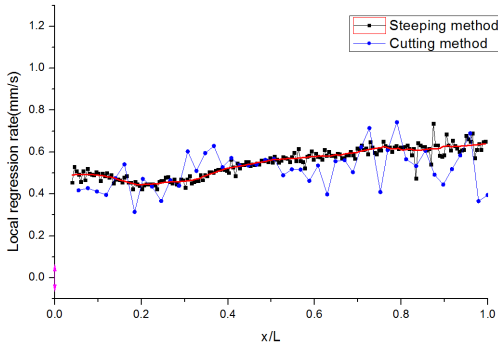


Fig. 3 Local regression rate behavior on the grain axial length(PE, single port grain)

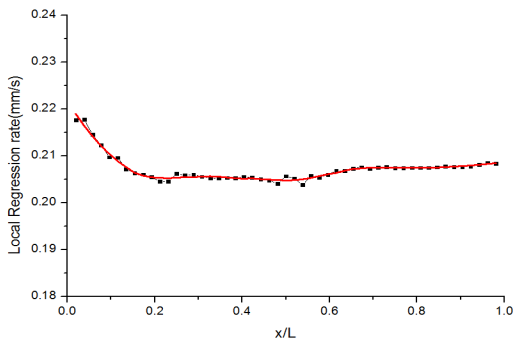


Fig. 4 Local regression rate behavior on the grain axial length(PMMA, 4 port multi grain)

Figure 3과 4는 침수법을 적용하여 하이브리드 고체 연료의 국부 후퇴율을 측정된 결과이다. 고체 연료의 끝단면(pre-chamber)에서는 유입되는 산화제 모멘텀의 영향으로 후퇴율이 높게 나타나며, 그레인 포트 상류(upstream)에서는 길이방향의 경계층 두께 증가에 따라 대류 열유속이 감소하여 후퇴율이 낮아진다 하류(downstream)로 갈수록 경계층이 병합되고 추진제 유속이 증가되어 후퇴율이 다시 증가 하는 경향을 보인다[2].

Figure 3은 동일한 연소 시험 후의 연료에 대해 침수법과 절삭법을 적용하여 획득한 국부 후퇴율 비교 결과이다. 절삭법을 이용한 측정방법은 연소 후 연료 그레인을 절삭하여 측정하므로 작

업시간이 오래 걸리고 후퇴율 측정 후 연료가 소실되는 단점이 있다. 또한 작은 절삭 길이 오차에도 큰 후퇴율 차이가 발생하므로 작업자의 숙련도에 따라 큰 평균 오차가 발생할 수 있다. 반면 침수법을 적용한 경우는 연료의 후처리 가공이 필요치 않으므로 측정 시간이 상대적으로 짧고 반복 측정이 가능하며, 관심 구간을 연속, 반복 측정함으로써 높은 정확성을 획득할 수 있었다.

4. 결 론

침수법을 이용한 국부 후퇴율 측정기법은 연료의 형상 및 물리적 특성에 관계없이 고체 연료의 국부 후퇴율을 비교적 정확하고 신속하게 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 기존의 침수법을 이용한 측정법은 임의의 간격을 수동으로 침수시켜 연소량을 획득하므로 측정 시간 및 측정구간이 커져 신뢰성이 낮아지는 단점이 있다. 본 연구에서는 일정속도로 연료를 침수시킴으로써 보다 많은 측정점을 가지는 후퇴율 데이터를 획득할 수 있었으며 보다 높은 정확성을 가짐을 절삭법과 비교하여 확인하였다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-10034-0(2007))

참 고 문 헌

1. Martin J.Chiaverini, "Regression Rate and Pyrolysis Behavior of HTPB-Based Solid Fuels in a Hybrid Rocket Motor", Pennsylvania State University Ph.D thesis
2. 이정표, 김기훈, 조정태, 김수중, 문희장, 성홍계, 김진곤, "하이브리드 로켓에서의 고체 연료의 국부 후퇴율에 관한 연구" 한국추진 공학회 춘계학술대회 논문집, 2008, pp.89~92
3. 우경진, 김기훈, 조정태, 김수중, 이정표, 박수향, 김학철, 문희장, 성홍계, 김진곤, "하이브리드 로켓에서의 고체 연료 국부 후퇴율 측정기법" 항공우주시스템공학회 추계학술대회 논문집, 2008