

선회류 하이브리드 로켓에서 고체 연료 후퇴율 향상에 대한 연구

박종원* · 이충원* · 구건우* · 윤명원**

Research of the Improvement of Solid Fuel Regression Rate in Swirl Hybrid Rocket

Jongwon Park* · Choongwon Lee* · Kunwoo Ku* · Myungwon Yoon**

ABSTRACT

Hybrid rocket had many advantage with compared to solid and liquid rockets. In this study, swirl flow hybrid motor was designed and manufactured. And the methods of regression rate improvement were considered. Thrust was calculated with pressure of the combustion chamber and the regression rate was measured by using ultrasonic sensor technique in entire firing conditions. In this study, PMMA fuel and HTPB solid fuel were used in firing test.

초 록

하이브리드 로켓은 고체 및 액체 로켓에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 선회류 하이브리드 로켓을 디자인 및 제작하여 고체 연료 후퇴율 향상 방법에 대해 연구되었다. 산화제 유량 조건에 대해 추력이 계산되었으며 초음파 센서를 이용하여 전체 연소 조건에 대해 고체 연료의 후퇴율을 측정하였다. 본 연구에서는 PMMA 고체 연료 및 HTPB 고체 연료가 사용되었다.

Key Words: Regression Rate(후퇴율), Ultra sonic sensor(초음파 센서)

1. 서 론

하이브리드 로켓은 엔진의 추력 조절, shutdown 및 restart를 산화제의 유량을 조절함으로써 용이하게 조절할 수 있는 장점이 있다. 하이브리드 모터의 이러한 이점들 때문에 로켓

의 제작과 발사에 있어서 기존의 추진시스템에 비하여 훨씬 경제적인 것으로 예상되고 있다. 그러나 기존의 하이브리드 모터는 고체 로켓에 비하여 아주 낮은 고체연료 regression rate와 저 연소 효율을 가지는 결점을 가지고 있다.

따라서 낮은 regression rate를 가지고 요구되는 추력을 발생시키기 위해서는 연료유량을 증가시켜야 하고 이를 위해 고체 연료 그레인에 다수의 연료포트를 만들어 고체연료의 표면적을 증가시켜야 한다. 지난 수십 년간에 걸쳐 하이브

* 경북대학교 기계공학부

** 국방과학연구소

연락처, E-mail: lab2002@hanmail.net

리드 엔진에서 연료의 regression 특성 및 엔진 성능 향상을 위한 연구가 계속되어 왔으며 최근에 엔진의 체적 규제를 경감시키고 연료의 regression율을 향상시키기 위하여 선회유동을 이용하는 하이브리드 로켓 엔진들이 제안되고 있다. 또한 고체 연료 내에 산화제 성분 혹은 자발적인 화학분해 물질을 첨가하거나 금속입자를 첨가함으로써 연소율을 증가시키는 연구 등이 수행되었으나 이는 연소 불안정 현상이 일어나기 쉬우며 환경오염을 증가시킬 우려가 있다.

본 연구에서는 선회류 하이브리드 모터의 설계 및 제작기술을 확보하고 체계적인 연소실험을 통하여 full-scale 엔진의 설계에 적용할 수 있는 regression rate에 대한 실험식 및 scale-up 설계 기술을 개발하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 선회류 하이브리드 모터의 설계

본 연구에서 사용된 하이브리드 모터는 실험의 안전을 고려하여 연소실 압력이 30 bar를 넘지 않으며 발생 추력이 200N 급인 motor를 설계기준으로 하였다.

공급 산화제는 기체산소를 사용하고 고체 연료는 PMMA(Polymethyl methacrylate)를 사용하여 연소과정 동안의 가시화가 가능하도록 하였다. 설계에 사용된 regression rate 실험식은 S. Krishnan 등에 의해 연구된 기체 산소와 HTPB 연료를 이용한 하이브리드 모터의 실험식으로 아래와 같다.[1]

$$\dot{r} = 6 \times 10^{-5} \times G_o^{0.4} \times D_p^{-0.28} \quad (1)$$

사용되는 산화제의 질량 유속은 200~600 kg/m²-s로 설정하고 Eq. (1)을 이용하여 초기 및 연소 후 연료 포트 직경을 계산하였으며 전체 연소기간 동안의 산화제 및 연료의 질량유량을 계산하였다. 계산된 산화제 및 연료 유량으로부터 전체 질량유량 및 당량비를 계산하여 노즐 목 단면적으로 계산하였다. 노즐의 형상과 특성

속도로부터 연소실 내 압력을 계산할 수 있었으며 이 값을 이용하여 노즐 출구 단면적을 결정하였다.

하이브리드 모터의 접화는 가압된 에틸렌을 이용하였으며 공급유량은 공급되는 산화제의 질량유량에 따라 이론 당량비 조건에 일치하는 값으로 결정하였다. 이상에서 계산된 값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Operating conditions of oxygen flow

Grain length	G _{ox} (kg/m ² s)	condition	Oxidizer (kg/s)	Fuel (kg/s)	O/F
160 mm	600	initial	0.068	0.016	4.375
	84.55	final	0.068	0.0149	4.563
	200	initial	0.0226	0.01037	2.179
	28.10	final	0.0226	0.00961	2.352
400	600	initial	0.068	0.040	1.7
	84.55	final	0.068	0.0373	1.823

2.2 실험장치

본 연구에서 설계된 하이브리드 모터의 설계 개요도를 Fig. 1에 나타내었다.

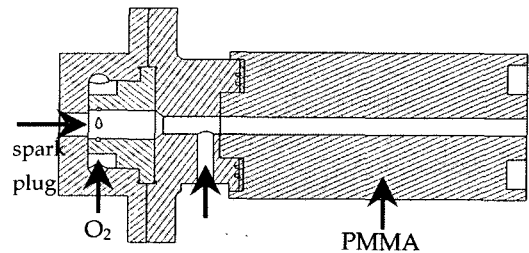


Fig. 1 Schematic diagram of swirl hybrid motor

하이브리드 모터의 작동은 PLC 프로그램에 의해 구동되며 산화제, 점화용 에틸렌, 질소의 공급은 전자식 솔레노이드 밸브에 의해 개폐된다. 공급 기체의 유량은 sonic 노즐에 의해 제어되며 공급관 각 부에 연결된 압력센서에 의해 공급압력을 측정하도록 되어 있다. 또한 연소실 내 압력 측정을 위해 두 곳에 압력 센서를 장착하였으며 연소 온도로부터의 보호를 위해 실리콘 오일로 연소공기와의 직접적인 접촉이 이루

어지지 않도록 하였다. 연소과정의 가시화는 가정용 캠코더로 촬영하였다. 실험장치의 개요도는 Fig. 2와 같다.

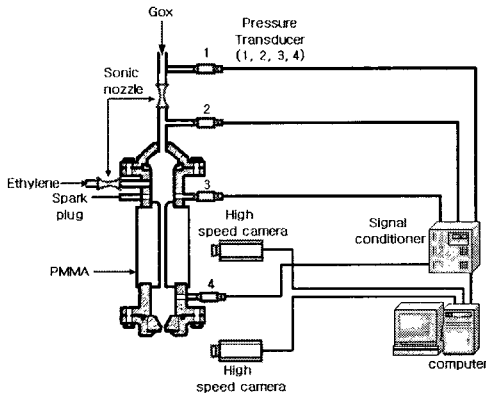


Fig. 2 Experimental apparatus of firing test

본 연구에서 사용된 산화제 선회류 인젝터의 개요도를 Fig. 3에 나타내었다. 각 조건에 대한 선회강도의 값은 Table 2와 같고 선회강도의 계산은 Eq. (2)에 나타난 바와 같이 형상 선회강도 값으로 계산하였다.

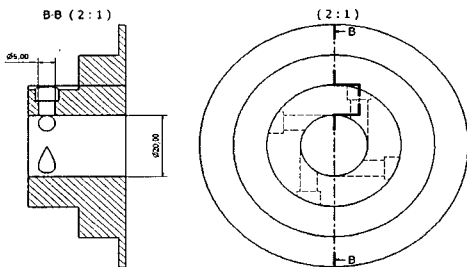


Fig. 3 Schematic diagram of swirl injector

Table 2. Geometric swirl number

R _x (mm)	R _φ (mm)	S _g	n
20	3	9.4	4
20	4	5	4
20	5	3	4

$$S_g = \frac{(R_x - R_\phi) R_x}{n R_\phi^2} \quad (2)$$

2.3 실험방법 및 측정

고체 연료의 regression rate를 고찰함에 있어 선행연구에서는 주로 캠코더를 이용한 가시화 기법과 연소실 압력 신호를 이용한 주파수 해석을 병행하였다. 그러나, 선회강도의 증가에 따라 고체 연료 그레이의 연소현상에 많은 어려움이 발생하게 되었다. 동축 및 약한 선회강도 조건에서는 가시화 기법이 비교적 수월하였으나 선회강도가 증가함에 따라 고체 연료 그레이 내부에 3차원 적인 수많은 굴곡이 발생함으로써 촬영 영상에 많은 왜곡이 발생하였다. 따라서 순간 획득 영상에서의 연료 그레이 경계가 모호하게 되고 이는 regression rate 측정의 오차로 작용하였다.

따라서, 본 연구에서는 고체 연료 regression rate 측정의 새로운 방법을 모색하게 되었고 그 결과 초음파 센서를 이용하여 실시간 연료 그레이 인 직경 변화를 측정하는 방법을 수행하였다. 하이브리드용 고체 연료 표면에 초음파 센서가 위치하고 이로부터 나오는 신호를 증폭하거나 혹은 그대로 획득한 다음 Labview 프로그램 상에서 실시간으로 모니터링하는 구조로 되어 있다. 초음파 센서의 장착위치는 PMMA 고체 연료 선단을 기준으로 15mm 하방에 첫 번째 센서가 위치하고 이후로 40mm 간격으로 총 4개의 초음파 센서가 위치하는 구조로 되어 있다.

초음파 센서는 온도에 대해 민감한 특성을 나타내므로 연소기간 동안 고체 연료로부터의 고온을 피해야 한다. 따라서 4개의 초음파 센서는

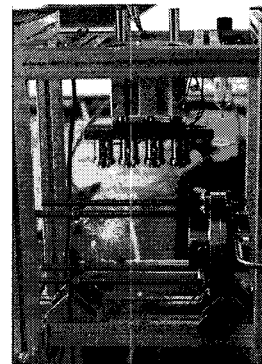


Fig. 4 Photograph of ultra sonic sensor

동일한 구조물에 부착되어 공기 실린더에 의해 연소시간 동안만 고체 연료에 접촉될 수 있도록 수동으로 조절 가능하도록 되어 있다. 연소시험 장치에 탑재된 실제 초음파 센서 장치의 모습을 Fig. 4에 나타내었다.

Figure 5는 초음파 센서 측정값과 실시간 가시화 측정기법으로 측정한 고체 연료 포트의 연소 시간에 따른 변화를 나타낸다. 연소시간 6.5 초 동안 전 구간에서 비교적 잘 일치하는 값을 나타낸다. 앞에서 언급한 바와 같이 연소 후반부로 갈수록 가시화 측정기법의 값이 낮게 나타나는 이유는 연소가 진행될수록 선회류의 영향에 의해 고체 연료 내부의 형상이 3차원적으로 굴곡이 심해지고 이로 인한 획득 이미지의 경계부분 왜곡이 심해지기 때문이다.

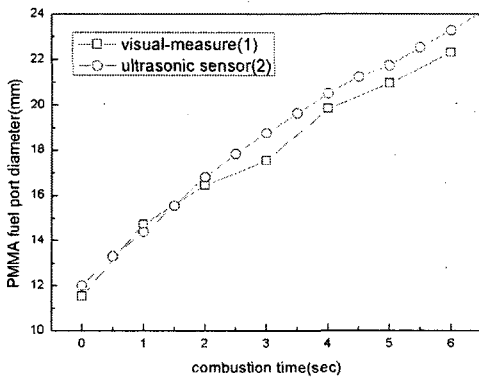


Fig. 5 Comparison of ultra sonic sensor signal and visual measurement

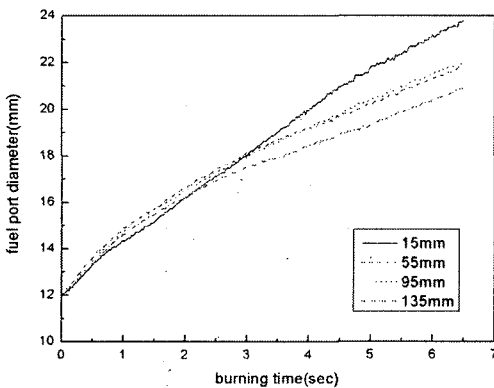


Fig. 6 Variations of fuel port diameter with using ultra sonic sensor

Figure 6은 실제 연소과정 동안 측정된 초음파 센서 신호를 초기 직경 12mm로 보정하여 나타낸 그림이다. 각각은 고체 연료 선단으로부터 표시된 거리만큼 떨어져 위치하고 있고 각 지점에서 고체 연료 직경변화가 다른 것은 고체 연료의 전체적인 직경변화가 연소시간 증가에 따라 균일하지 않다는 것을 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 고체 연료 선단에 가까운 위치일수록 초기 강한 선회류의 영향으로 직경변화가 크게 나타나며 이러한 경향은 연소시간이 진행됨에 따라 더욱 명확히 나타난다.

3. 결과 및 고찰

3.1 선회강도 변화에 따른 연소 특성

선회류의 선회강도 변화에 따른 연소실 압력 변화의 비교 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. 산화제 질량 유량은 0.032 kg/s이고 이 값은 모든 조건에서 일정하게 유지되었다. 공급 산소 평균 압력은 연소시험 구간에서 일정하게 유지되었으며 초기 연소실 압력내의 변동 성분은 점화용 에틸렌의 연소(500ms)에 기인한 일시적인 압력 상승 값을 나타낸다.

선회강도의 증가에 따라 연소실 압력은 미소하게나마 증가되고 있는 경향이 그림에 나타나 있다. 이것은 반경방향 성분의 선회유동으로 말미암아 연소실 내에서 산화제와 고체연료와의

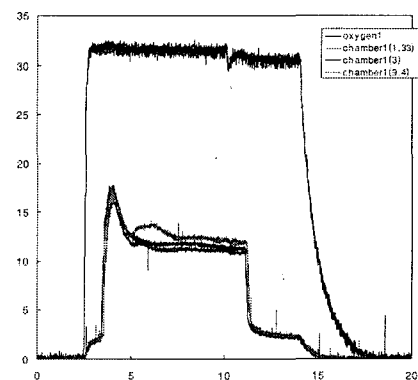


Fig. 7 Time trace profiles of combustion chamber pressures

접촉 시간이 길어지고 이로 인해 더 많은 고체연료가 연소에 참여함으로써 연소실 압력상승을 유발한 것으로 생각된다. 이러한 현상은 연소실 내 압력상승 뿐만 아니라 이후 고체연료의 regression rate 상승에도 일정부분 기인하게 된다.

3.2 산화제 질량 유량의 변화에 따른 연소 특성

일반적으로 고체 연료 regression rate는 산화제 공급유량에 지배적 함수임이 알려져 있다. 본 연구에서는 동일한 선회유동 조건에 대해 산화제 공급유량을 증가시킬 때의 고체 연료 연소현상을 연소시험을 통해 고찰하였다. Figure 8에 산화제 공급유량 변화에 대한 고체 연료 regression rate의 변화를 나타내었다.

두 가지 조건 모두 형상선회강도는 9.4이며, 산화제 질량유량 0.0455 kg/s의 경우, 초기의 고체 연료 regression rate는 3mm/s 까지 증가되었으며 고체 연료의 연소율에 미치는 선회류의 영향이 지대함을 알 수 있다.

또한 산화제 질량 유량이 증가하는 경우에 고체 연료 내부에서의 연소 선회류의 형상이 변화하는 것을 관찰할 수 있었으며 관찰된 사진을 Fig. 9에 나타낸다.

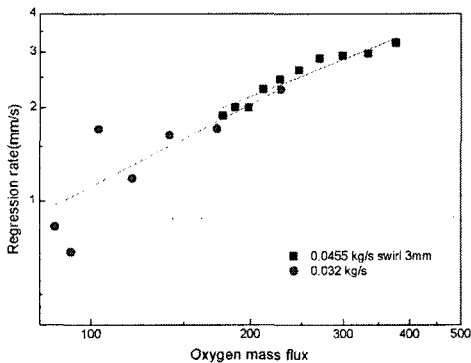


Fig. 8 effect of oxygen mass flow rate



Fig. 9 Typical photograph of PMMA solid fuel during combustion period (oxygen mass flow rate = 0.045kg/s)

산화제 질량 유량이 높은 경우에는 5군데의 마디가 생성되어 산화제 유동방향을 따라 이동하는 것이 관찰되었다. 이것이 단순히 개관 내부에서의 주과수 변동에 따른 현상인지 선회유동의 영향인지의 여부는 아직 고찰 중에 있으며, 고체 연료 내부에서 발생된 파장의 마디 형상이 고체 연료 regression rate 변화에 일정부분 기여하고 있음은 확인할 수 있었다. 이후 다른 선회유동 조건에서의 보강 연소 시험과 주과수 분석 작업을 수반하여 이에 같은 현상을 규명할 예정이다.

3.3 고체 연료의 길이 변화에 따른 연소 특성

고체 연료의 길이 변화에 대한 연소실 내부 압력의 변동에 대해 수차례 연소시험을 통해 고찰하였다. 고체 연료의 길이는 160, 250, 350mm이며 공급 산소의 압력은 32 bar로 일정하게 유지하였다.

고체 연료 그레인의 길이가 250mm로 증가된 경우가 160mm 그레인에 비해 평균 2 bar 이상의 연소실 압력 상승을 나타내었다. 이것은 선회강도의 영향에 비해 더 나은 압력 상승 효과를 나타내고 있으며 이는 연소에 참여하지 못하고 배출되었던 산화제가 연료의 길이가 길어짐에 따라 연료 후단에서 연소에 참여할 수 있었기 때문이라 생각된다.

고체 연료 길이 변화에 따른 regression rate 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 모든 경우에 대해 연소가 진행됨에 따라 산화제 질량 유속의 감소

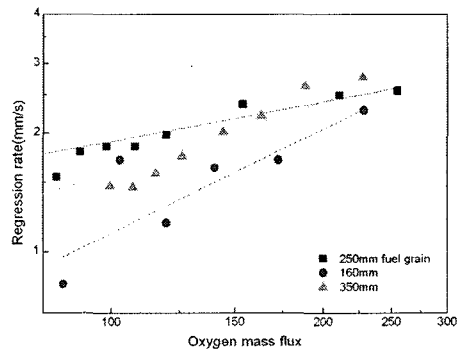


Fig. 10 Regression rate of PMMA with variation of solid fuel length

와 함께 regression rate의 감소 경향을 나타내고 있다. 하지만 전 연소시간 동안의 regression rate 평균값은 250mm 그레이의 경우가 훨씬 나은 값을 나타내고 있으며 이것은 160mm 연료 그레이에 비해 연소가 연료 농후조건으로 접어들어 따라 일어나는 현상이다. 연소에 참여하지 못하고 대기 중으로 그냥 배출되던 산화제가 여분의 연료와 더불어 연소에 참여함으로써 regression rate의 감소 경향도 더욱 둔화되는 현상을 나타내고 있다. 하지만 더욱 연료농후조건에 해당하는 350mm 연료 그레이의 경우에는 또 다시 regression rate의 감소 경향을 나타내고 있으며 본 연구에서의 실험 조건에서는 연료 길이 250mm가 가장 좋은 결과를 나타내고 있다.

3.4 HTPB 고체 연료에 대한 연소 특성

동일 산화제 유량 조건에서 PMMA 고체 연료와 HTPB 고체 연료의 연소 시험동안 연소실 압력 비교를 Fig. 11에 나타내었다.

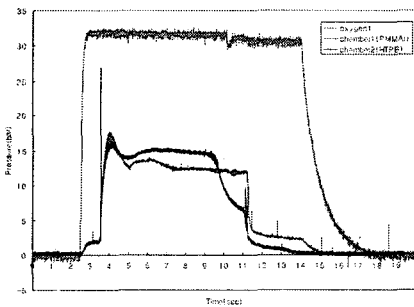


Fig. 11 Comparison of combustion chamber pressure between PMMA and HTPB solid fuel

HTPB 고체 연료의 경우가 훨씬 더 나은 연소실 압력을 나타내고 있으며 이 값을 통해 발생 추력을 예측해 본 결과 93N(PMMA)에서 110N(HTPB)으로 추력의 향상을 가져오는 것으

로 관찰되었다. 고체 연료의 regression rate 측정은 아직 정확히 수행되지는 못하였으나 연소 전후의 직경 변화를 측정하여 평균 regression rate를 측정된 결과 0.77mm/s로 나타났다. HTPB 고체 연료를 사용한 하이브리드 모터의 경우 초음파 센서 측정의 감쇠 요인이 많아 현재 보완 작업 중에 있으며 이후 기존 PMMA 고체 연료와의 비교 고찰 또한 가능하리라 생각된다.

4. 결 론

하이브리드 모터 테스트를 수행할 수 있는 200N 급 선회류 하이브리드 모터 연소시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론은 얻을 수 있었다.

- 1) 선회강도의 증가에 따라 고체 연료의 연소 성능은 향상되나 regression rate의 확연한 증가는 관찰하기 힘들었다.
- 2) 고체 연료의 길이 증가에 대한 연소시험 결과, 250mm 연료 그레이의 경우가 regression rate가 가장 높게 나타났다.
- 3) HTPB 고체 연료에 대한 연소시험을 수행하였으며 regression rate 측정기법에 대한 향후 보완이 필요하다.

참 고 문 헌

1. Philmon George, S. Krishnan, P.M. varkey, M. Ravindran and Lalitha Ramachandran, "Fuel Regression Rate in Hydroxyl-Terminated -Polybutadiene / Gaseous -Oxygen Hybrid Rocket Motors," Journal of Propulsion and Power Vol. 17, No. 1, January-February 2001