

# 선회류 하이브리드 로켓의 고체 연료 후퇴율에 관한 연구

박종원\* · 박주혁\* · 이충원\* · 윤명원\*\*

## The Effect of Swirl Flow on Solid Fuel Regression Rate of Hybrid Rocket

JongWon Park\* · JooHyuk Park\* · ChoongWon Lee\* · 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 in low flow rate of oxidizer. Several problems and solutions of operating hybrid rocket was presented.

### 초 록

하이브리드 로켓은 기존의 고체, 액체 로켓에 비하여 많은 이점을 가지고 있다. 본 연구에서는 선회류 하이브리드 로켓을 설계 및 제작하여 regression rate의 증진 방안을 모색하고자 하였다. 산화제 선회강도의 변화에 따라 연소실 압력을 측정하여 추력을 계산하였으며, 연소과정의 가시화를 통해 근사적 regression rate를 측정하였다. 또한 하이브리드 로켓 시험 중 발생할 수 있는 문제점과 해결 방안도 제시하였다.

Key Words: Swirl flow hybrid motor(선회류 하이브리드 모터), Regression rate(후퇴율)

### 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 그레이нде 다수의 연료포트를 만들어 고체연료의 표면적을 증가시켜야 한다. 지난 수십 년간에 걸쳐 하이브

\* 경북대학교 공과대학 기계공학부

\*\* 국방과학연구소

연락처자, E-mail: lab2002@hanmail.net

리드 엔진에서 연료의 regression 특성 및 엔진 성능 향상을 위한 연구가 계속되어 왔으며 최근에 엔진의 체적 규제를 경감시키고 연료의 regression 을 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(Polymethyle 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/m<sup>2</sup>-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 있었으

며 이 값을 이용하여 노즐 출구 단면적을 결정하였다.

하이브리드 모터의 점화는 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 <sub>ox</sub> (kg/m <sup>2</sup> 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

선행 연구에서의 하이브리드 로켓 모터 연소 시험은 산화제의 유입 방법이 고체 연료 port와 동축을 이루어 유입되도록 되어 있었다. 동축으로 유입되는 산화제 유동은 연소 시험설비의 성능 점검 및 고체 연료의 기초적인 연소특성 파악을 위해 이용되었다. 그러나, 여러 선행연구에서 언급된 바와 같이 하이브리드 로켓의 낮은 regression rate를 향상시키기 위해서는 산화제와 고체연료의 반응시간을 좀더 증가시킬 필요가 있다.



Fig. 1 Photograph of PMMA (swirl intensity = 9.4, after 7 sec burning)

따라서 본 연구에서는 산화제 유입방식을 선회류 방식으로 유입시켜 고체 연료 그레인의 regression rate 향상 특성을 고찰하고 그 성능 분석을 수행하였다. 선회유동의 유입에 의한 고체 연료 그레인의 대표적인 연소사진은 Fig. 1과

같고 본 연구에 사용된 산화제 유입구 부분의 조립 개요도를 Fig. 2에 나타내었다.

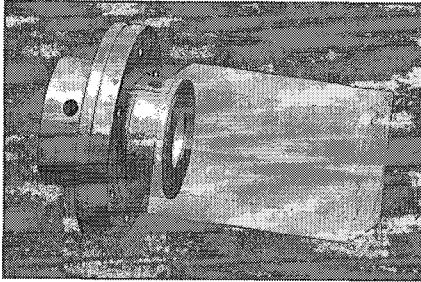


Fig. 2 Schematic diagram of oxygen injector and pre-chamber

오리피스 노즐에 의해 조정된 일정 질량 유량의 기체 산소 산화제가 2개소의 반경방향 유입구에 의해 산화제 선회기(swirler)로 유입된다. 이후 선회기에서 4개소의 입구를 통해 선회유동을 발생시킨 산화제는 점화장치가 연결되어 있는 pre-chamber 영역으로 유동하게 된다.

본 연구에 사용된 선회기의 세부 개요도를 Fig. 3에 나타내었다.

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.

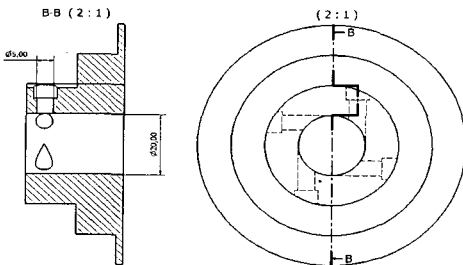


Fig. 3 Schematic diagram of swirl injector

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

Table 2. Geometric swirl number

Rx(mm)	Rφ(mm)	Sg	n
20	3	9.4	4
20	4	5	4
20	5	3	4

### 23 실험방법 및 측정

하이브리드 로켓의 작동 순서는 먼저 원하는 질량유량 조건의 기체 산소를 분사하고, 기체 산소가 일정 유량으로 안정화된 이후 점화제인 에틸렌을 분사하였다. 에틸렌 분사 직후 스파크 플러그를 점화(<1s)하여 하이브리드 모터를 작동시킨다. 이후 설정된 작동시간 동안의 연소기간을 거친 후 기체 질소로 3 초 이상 퍼지시킨다. 연소실 내의 압력은 연료 그레이н 전단과 후단 두 지점에서 측정하였으며 이 압력값으로부터 추력을 측정하였다.[2]

regression rate의 측정은 연소 전후 연료 그레이н의 직경변화를 실시간으로 측정하여 평균한 값으로 하였다.

또한, 선행 연구에서의 하이브리드 로켓에 대한 연소시험은 주로 160mm 연료 그레이н에 대해서만 이루어졌다. 이러한 조건은 이론 당량비 부근 혹은 희박조건에 해당하는 조건으로 당해 연구에서는 연료 그레이н 길이의 변화를 통해 연료 농후 조건에서의 연소특성을 고찰하고자 하였다. 동일한 산화제 질량 유량에 대해 연료 그레이н 길이 250, 350mm를 제작하여 연소시험을 수행하고자 하였다.

현재는 250mm 연료 그레이н에 대한 연소시험을 완료한 상태이며 이후 더욱 농후한 고체 연료 조건에 대해서도 연소시험을 수행할 예정이다. 고체 연료의 증가로 인해 하이브리드 모터의 전체 길이가 증가함에 따라 연소시험 bench의 수정이 불가피하였으며 이것은 이후 HTPB 연료 그레이н을 이용한 연소시험에서도 동일하게 적용될 예정이다.

### 24 초음파 센서를 이용한 고체연료 regression rate의 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 그레인의 연소현상에 많은 어려움이 발생하게 되었다. 동축 및 약한 선회강도 조건에서는 가시화 기법이 비교적 수월하였으나 선회강도가 증가함에 따라 고체 연료 그레인 내부에 3차원 적인 수많은 굴곡이 발생함으로써 촬영 영상에 많은 왜곡이 발생하였다. 따라서 순간 획득 영상에서의 연료 그레인 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 그레인 port 변화를 측정하는 방법을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 초음파 센서의 측정 개요도를 Fig. 4 나타내었다.

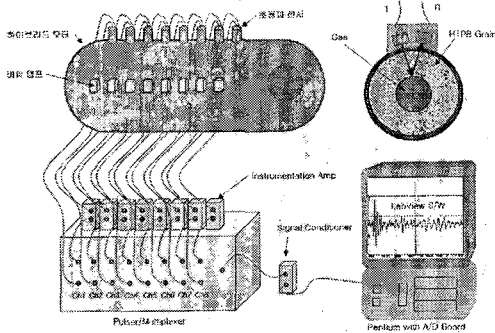


Fig. 4 Measurement technique of using ultra sonic sensor

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. 초음

파 센서는 온도에 대해 민감한 특성을 나타내므로 연소기간 동안 고체 연료로부터의 고온을 피해야 한다. 따라서 4개의 초음파 센서는 동일한 구조물에 부착되어 공기 실린더에 의해 연소시간 동안만 고체 연료에 접촉될 수 있도록 수동으로 조절 가능하도록 되어 있다. 연소시험 bench에 탑재된 상세한 초음파 센서 장치의 모습을 Fig. 5에 나타내었다.

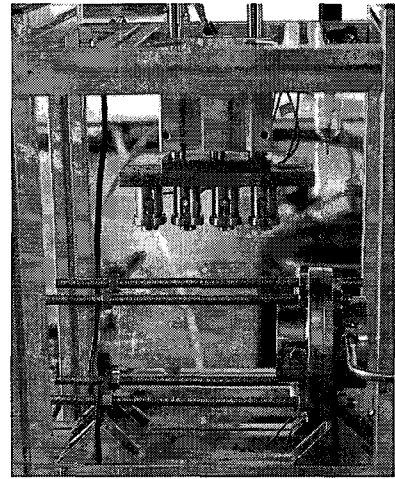


Fig. 5 Photograph of ultra sonic sensor

또한 PMMA 연료 재질에 대한 초음파 특성에 대한 시험도 수행하였다. 초음파의 진행 속도가 연료의 종류에 따라 다르게 나타나므로 몇 가지 시편을 사용하여 이를 보정하였으며 고체 연료 내부의 두께 변동값에 대한 보상작업도 수행하였다. 출력된 결과물은 Labview 프로그램 상에서 표시되며 초기 초음파 센서의 신호값을 고체 연료 port 직경과 동일한 12mm로 보정한 이후 고체 연료의 regression rate 변화값을 고찰하게 된다

고체 연료와 초음파 센서와의 접촉면에서의 기포의 존재는 초음파의 진행 경로에 심각한 방해물로 작용한다. 따라서 초음파 센서의 접촉면에서의 의료용 글리세린을 도포하여 초음파 센서와 PMMA 고체연료가 완전히 밀착할 수 있도록 장착하였다. 하지만 산화제 질량유량이 높은 영역에서는 연소실 압력의 증가로 인해 연소시험

bench 전체의 진동이 증가하여 초음파 센서와 고체연료가 완전히 밀착하지 못하는 결과가 발생하기도 하였다. 이것은 이후 초음파 센서 지그를 수정하여 보완하여 할 문제이다.

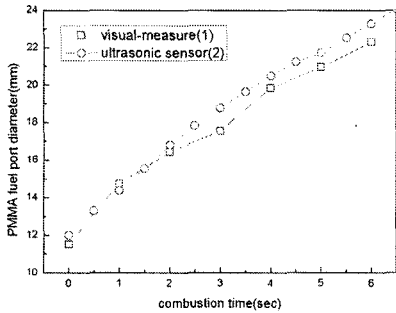


Fig. 6 Comparison of ultra sonic sensor signal and visual measurement

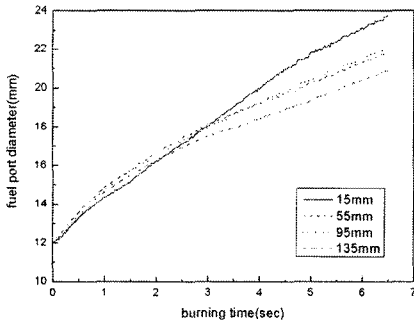


Fig. 7 Variations of fuel port diameter with using ultra sonic sensor

Fig. 6은 초음파 센서 측정값과 실시간 가시화 측정기법으로 측정한 고체 연료 port의 연소시간에 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. 8은 실제 연소과정동안 측정된 초음파 센

서 신호를 초기 직경 12mm로 보정하여 나타낸 그림이다. 각각은 고체 연료 선단으로부터 표시된 거리만큼 떨어져 위치하고 있고 각 지점에서의 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 고체 연료 regression rate

산화제 선회 유동에 의한 고체 연료의 regression rate 성능 향상을 연구하기 위하여 동일한 산화제 질량 유량에 대해 선회강도의 변화에 따른 연소시험을 통해 그 경향을 파악할 수 있었다. 산화제 질량 유량은 0.032 kg/s이고 이 값은 모든 조건에서 일정하게 유지되었다. 공급 산소 평균압력은 연소시험 구간에서 일정하게 유지되었으며 초기 연소실 압력내의 변동 성분은 점화용 에틸렌의 연소(500ms)에 기인한 일시적인 압력상승 값을 나타낸다.

선회강도의 증가에 따라 연소실 압력은 미소하게나마 증가되고 있는 경향을 확인할 수 있었다. 이것은 반경방향 성분의 선회유동으로 말미암아 연소실 내에서 산화제와 고체연료와의 접촉 시간이 길어지고 이로 인해 더 많은 고체 연료가 연소에 참여함으로써 연소실 압력상승을 유발한 것으로 생각된다. 이러한 현상은 연소실 내 압력상승 뿐만 아니라 이후 고체연료의 regression rate 상승에도 일정부분 기인하게 된다.

Fig. 8은 선회류 유입구 직경 2mm와 3mm에 대한 고체 연료의 regression rate를 비교한 그림이다. 선회유동이 고체 연료의 연소과정에 영향을 미치기는 하나 regression rate의 주목할만한 향상은 아직 발견할 수 없다.

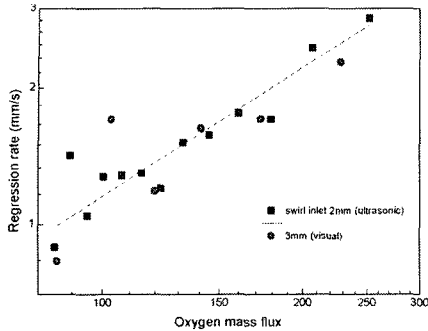


Fig. 8 effect of swirl intensity

또한 그림에 나타난 바와 같이 초음파 센서의 측정값에 비해 가시화 기법의 측정값이 전체적으로 많은 변동성분을 나타내고 있다. 이것은 전술한 바와 같이 선회류가 가미되면서 고체 연료 그레이의 직경 변화를 관찰하는데 많은 어려움이 있음을 나타낸다. 동축 유동, 약한 선회강도의 연소시 고체연료 port의 직경변화가 전체적으로 균일한 반면, 선회유동에서는 전체 고체 연료 길이에 대해 많은 직경변화를 나타내고 이것은 촬영 획득된 영상에 많은 왜곡을 가져오게 된다. 따라서 선회류 유동에 대한 고체 연료 regression rate 고찰은 이후 초음파 센서를 이용한 측정으로 결과 고찰내용을 보완할 예정이다.

이러한 연구 보완이 완료된 이후 명확한 선회강도의 영향에 대한 고찰이 완료될 수 있을 것이라 판단되지만 연소실 내의 압력변동으로 판단할 때 그 영향을 미약할 것으로 생각된다.

### 3.2 산화제 질량 유량 변화에 따른 연소특성

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. Fig. 9에 산화제 공급유량 변화에 대한 고체 연료 regression rate의 변화를 나타내었다.

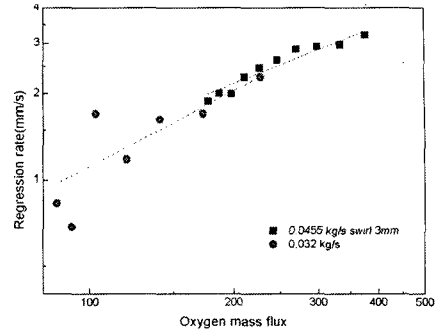


Fig. 9 effect of oxygen mass flow rate

두 가지 조건 모두 형상 선회강도는 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.

### 3.3 고체 연료 그레이 길이변화에 따른 연소특성

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

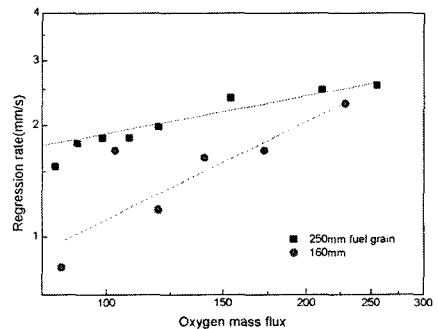


Fig. 10 Regression rate of PMMA with variation of solid fuel length

고체 연료 그레이н 길이의 변화에 따른 고체 연료의 regression rate 변화 특성을 Fig. 10에 나타내었다.

두 가지 연료 그레이н 모두 연소가 진행됨에 따라 산화제 질량 유속의 감소과 함께 regression rate의 감소 경향을 나타내고 있다. 하지만 전 연소시간 동안의 regression rate 평균 값은 250mm 그레이н의 경우가 훨씬 나은 값을 나타내고 있으며 이것은 전술한 바와 같이 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. 이후 더욱 연료 농후조건에 해당하는 350mm 연료 그레이н에 대한 연소시험을 수행하여 연료 그레이н의 길이와의 상관관계 또한 규명할 예정이다.

#### 4. 결 론

하이브리드 모터 테스트를 수행할 수 있는 200N 급 선회류 하이브리드 모터를 설계, 제작하였다. 제작된 하이브리드 모터로 산화제 유량 변화에 따른 연소시험을 한 결과 다음과 같은 결론은 얻을 수 있었다.

(1) 산화제 유입방식을 선회류 방식으로 적용하였을 때, 선회강도의 증가에 따라 고체연료 regression rate는 향상되는 결과를 보이기는 하

나 그 효과는 미약하다.

(2) 산화제 질량 유량의 증가, 질량 유속의 범위 증가는 고체 연료 regression rate 향상에 많은 영향을 미치며 본 연구의 경우, 형상 선회강도 9.4에 대해 초기 regression rate는 3mm/s 까지의 결과를 나타내었다.

(3) 고체 연료 그레이н의 길이 변화, 당량비의 변화는 연료 농후 조건으로 진행함에 따라 regression rate 향상을 보였다. 하지만 적정 연료 길이에 대한 선정은 보완 실험을 필요로 한다.

(4) 초음파 센서를 이용한 고체 연료 regression rate 측정방법을 개발, 시험 측정을 완료하였으며 선행연구에서 사용되던 가시화 기법에 비해 더욱 정밀한 측정이 가능하게 되었다.

#### 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
2. Shane De Zilwa, Greg Zilliac, Arif Karabeyoglu and Mike Reinath, "Time-Resolved fuel-Grain Regression Measurement in Hybrid Rockets,"