

선회류와 나선형 그레인 형상을 이용한 하이브리드 로켓의 연소율 향상

황영춘* · 이창진**

Enhancement of hybrid rocket regression rate by swirl flow and helical grain configuration

Youngchun Hwang* · Changjin Lee**

ABSTRACT

In this study the regression rate of hybrid rocket fuel has been investigated by swirl injectors and helical grains. Tests have been done with two kinds of injector and helical grain. In this paper the swirl injector and helical grain were varied to find the optimal condition to obtain the max regression rate for a given operational condition.

초 록

본 연구에서는 스월 유동과 나선산 그레인 방법을 적용하여 연소율 증진에 대해 실험하였다. 스월 유동을 적용하기 위해 2개의 인젝터를 설계하였고, 2개의 나선산 그레인을 제작하였다. 인젝터와 그레인을 동시에 적용하여 실험하였다. 이 실험의 목적은 인젝터와 그레인에 따른 연소특성과 최적의 조합에 대해 연구하였다.

Key Words: Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Regression Rate(연소율), Swirl Injector(스월 인젝터), Helical Grain(나사산 그레인)

1. 서 론

하이브리드 로켓은 낮은 밀도와 충전율의 단점에도 불구하고 개발 비용 측면에서의 장점과 연소 과정에서 우수한 안정성으로 부각되고 있다. 따라서 대부분의 연구가 연소율과 충전율을 향상시키는데 집중되고 있다.[1]

연소율 증진을 위한 대표적 방법은 스월 유동을 갖는 산화제를 주입(inject)하는 것이다. 스월 유동은 중공 내에서 연료면과 산화제의 반응 시간을 증대시키며, 이를 통해서 연소율을 증진시킬 수 있다. Yuasa는 산화제 주입(injection)을 위해 스월 인젝터를 제작하여, 스월 강도에 따른 연소율 향상에 대해 실험하였다. 그들의 연구에서 스월 강도에 따라 최대 200%까지의 평균연소율 증진시켰다.[2-3] 하지만 연소율의 증진이 연료 중공의 입구 부분에서만 국부적으로 나타난

* 건국대학교 항공우주공학과

** 건국대학교 항공우주공학과

다. 따라서 스윙 유동만을 이용한 연소율 증진 방법은 실제의 로켓에 적용하기 어렵다. 또한 Knuth은 그레인 전체에서 스윙 유동이 유지될 수 있는 vortex 튜브를 사용하여 연구하였으며, 스윙 유동이 없을 때와 비교하여 최대 450%까지의 연소율 증진을 이루었다.[4-5] 이 방법은 Yuasa의 방법과는 다르게 연료 그레인 전체에서 스윙 유동의 유지될 수 있을 뿐만 아니라, 연소율을 더 많이 향상시킬 수 있다. 그러나 실제의 로켓에 적용하기에는 장치가 복잡하고, 부피가 커지는 단점이 있다.

본 연구에서는 스윙 유동과 나사산 그레인 방법을 적용하여 연소율 증진에 대해 실험하였다. 스윙 유동을 적용하기 위해 2개의 인젝터를 설계하였고, 2개의 나사산 그레인을 제작하였다. 인젝터와 그레인을 동시에 적용하여 실험하였다. 이 실험의 목적은 인젝터와 그레인에 따른 연소 특성과 최적의 조합에 대한 연구이다.

2. 실험 장치 소개

2.1 실험 장치

본 연구에서 고체 연료는 중공을 갖는 PMMA, 산화제는 기체산소를 사용하였다. 하이브리드 로켓의 경우 고체 로켓과 달리 연소실 압력의 영향을 크게 받지 않기 때문에 안전성을 고려하여 300 psi로 연소실 압력을 설계하였다. Table 1은 실험에 사용된 연료와 실험 조건을 나타내고 있다.

Table 1. Test condition and fuel configuration

Fuel	PMMA
Oxidizer	GOx
Length	200 mm
Outer dia.	50 mm
Inner dia.	20 mm
Chamber Pressure	300 psi

Figure 1은 전체 실험장치의 구성을 나타낸다. PLC와 솔레노이드 밸브를 이용하여 산화제와 소화 기체인 질소를 제어하였다. 점화제와 산화제, 소화 기체인 질소 등의 공급과 차단을 위한 조절기능을 순차적으로 진행하였다.

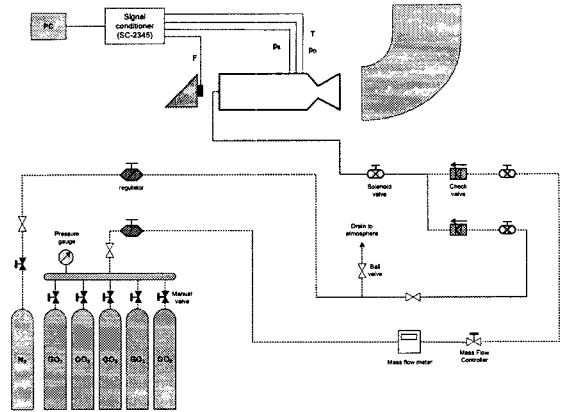


Fig. 1 Schematic of experimental setup

본 연구의 실험 장치와 실험방법에 대한 검증을 위해 PMMA 연료와 기체 산소를 이용하여 베이스 라인 테스트를 수행하였으며, 본 연구와 동일한 연료와 산화제를 이용하여 하이브리드 모터의 산화제 유동 특성에 따른 연소율 변화를 연구한 참고문헌 [2-3] 결과와 3~8 g/(cm²·s)의 산화제 유량 범위에서 비교, 검증하였다. 연료는 Table 1과 같은 형상을 사용하였으며, 실험 시간은 4초로하였다. 실험 결과는 참고문헌에 잘 설명되어 있다.[6]

2.1 Swirl injector

하이브리드 로켓에서 스윙 유동을 적용하기 위해서 두 가지 형태의 인젝터를 설계하였다. 첫 번째 스윙 인젝터(Type I)는 산화제 공급포트의 접선방향으로 공급된다. 이를 통해서 스윙 유동을 발생시킨다. 두 번째 스윙 인젝터(Type II)는 첫 번째 인젝터와 크기 및 형상은 동일하고, 산화제 공급 포트의 가공 시 산화제 진행방향으로 30도의 각도를 갖도록 가공하였다. 30도의 각도를 갖는 가공을 통해서 기존의 수직 형태의 스윙 인젝터보다 축방향으로 속도 성분을 크게 하여 스윙 효과가 입구에 집중되는 현상을 완화하기 위해서이다.

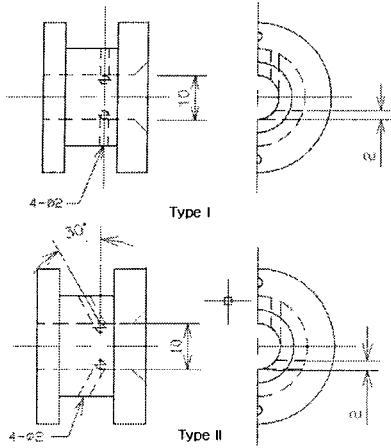


Fig. 2 Injector configuration

Figure 2와 같은 인젝터는 아래와 같은 관계식을 이용하여 스웰 넘버를 계산할 수 있다.

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

위 식에서 R_x 는 출구의 지름이고, R_ϕ 는 산화제 공급 포트의 지름, n 은 공급 포트의 개수이다. 따라서 위의 관계식을 통해서 스웰 인젝터의 스웰 넘버는 5이다.

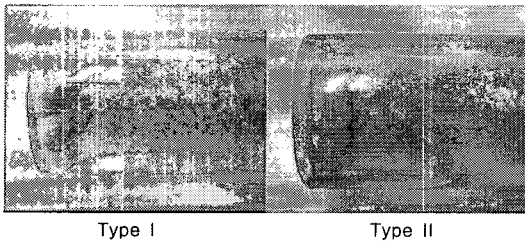


Fig. 3 Effect of injector type on combustion

스웰 인젝터를 적용할 경우에 Fig. 3에서와 같이 입구 부분에서 집중된 연소 현상을 확인하였다. 이 현상은 인젝터에 의해 발생한 스웰 유동이 연료 벽면과의 마찰로 인해 스웰 현상이 사라지기 때문이다. 두 개의 인젝터를 비교하면, Type II의 인젝터를 적용했을 경우에 스웰 현상이 더 넓은 범위에서 나타나는 것을 확인하였다. 그 이유는 Type II 인젝터는 산화제 공급 포트를 30도의 각도로 가공하였기 때문에 Type I 인

젝터보다 진행방향의 속도성분이 더 크기 때문이다. 연소율과 연소실 압력에 있어서도 Type II의 경우가 Type I 보다 더 높은 연소율을 나타내었다. 따라서 Type II 인젝터가 더 높은 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

23 Helical grain

피치 값에 따른 나선산 그레인의 연소 특성을 알아보기 위해서 피치 6 과 피치 100 그레인을 이용하였다. 피치 6 그레인은 낮은 피치 값을 갖는 경우의 연소특성을 알아보기 위해서 선택하였다. 그리고 스웰 유동의 유도를 위해 피치 100을 갖는 나선산 그레인을 제작하였다. 이 때 기존의 피치 6 그레인과 연소면적을 같도록 하기 위해 8개의 나선산으로 가공하였다. 피치 100의 값은 인젝터 실험에서 Type II 인젝터의 스웰 효과가 나타난 각도를 기준으로 제작하여 인젝터에서 발생한 스웰 유동이 나선산 그레인에서 효과적으로 유지 되도록 결정하였다. Figure 4는 피치 6과 피치 100 그레인의 실험 전 사진이다.

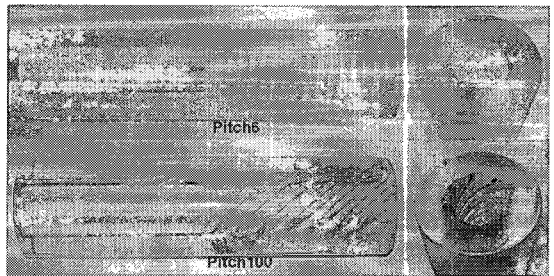


Fig. 4 Grain configuration of pitch 6 and pitch 100

스웰 유동을 적용하지 않았을 경우에 실험 결과 피치 6 그레인이 피치 100 그레인 보다 높은 연소율을 나타내었다. 내부 연소면적이 같기 때문에 연소율의 차이는 내부 유동의 차이 때문이다. 피치 6 그레인의 경우 나선산 가공이 산화제 진행방향의 수직으로 가공되어 있기 때문에 난류의 발생에 있어서 유리하기 때문으로 추정된다. 하지만 피치 100 그레인의 경우 원래의 목적인 스웰 유동의 유도는 확인할 수 없었다.

3. 실험 결과

앞에서 실험한 스월 인젝터와 나선산 그레이인을 동시에 적용할 경우의 연소율 향상에 대해 실험하였다. 인젝터와 그레이인에 따라서 4가지의 경우에 대해서 실험을 실시하였다.

위의 4가지 경우에 대해서 실험을 실시하여 각 경우의 연소특성에 대해 알아보고, 인젝터와 나선산 그레이인의 최적 조합에 대해 알아보았다. 산화제 유량 15g/s, 실험 시간 4초의 조건에서 실험을 실시하였다. Figure 5와 Table 4는 실험 후 그레이인의 모습과 각각의 경우에 따른 부피 연소율을 나타낸 표이다.

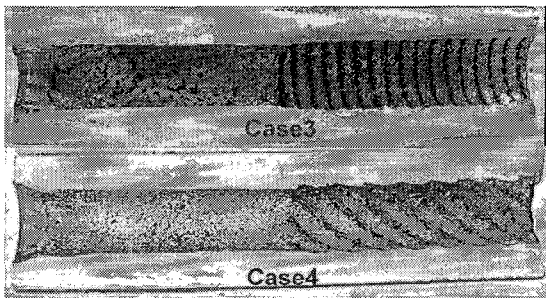


Fig. 5 Cross sectional view after combustion test

Table 4. Summary of test result with swirl injectors and helical grains

Grain Injector	Pitch 6 grain	Pitch 100 grain
Type I	Case1 7.525 (200.7%)	Case2 7.325 (195.3%)
Type II	Case3 7.6 (202.7%)	Case4 7.7 (205.3%)

Figure 5에서와 같이 연료 앞부분에서는 스월 인젝터에 의한 연소율 향상을 확인할 수 있다. 또한 뒷부분에서는 나선산 그레이인에 의한 연소율 향상을 확인할 수 있다. 그러나 연료의 중간 부분에서는 다른 부분과 달리 낮은 연소율을 나타내는 것을 확인할 수 있다. Table 4에서 알 수 있듯이 Case 4인 Type II 인젝터와 피치 100 그레이인을 적용한 경우에 최대 부피연소율을 나타냈다. 반대로 Case 2인 Type I 인젝터와 피치 100 그레이인을 적용한 경우에는 가장 낮은 연소율을 나타내었다.

Case 1과 Case 2를 비교하면, Type I 인젝터와 나선산 그레이인을 적용한 경우에는 스월 인젝터를 적용하지 않은 실험에서와 같이 피치 6의 경우 난류의 발생 때문에 연소율이 향상되었다. 그러나 피치 100의 경우에는 피치 6 보다 난류의 발생량이 적고, Type I 인젝터에서 발생한 스월 유동이 피치 100의 나선산 홈의 방향이 서로 다르기 때문에 스월 유동이 나선산에 의해 방해를 받기 때문에 연소율이 향상되지 못했다.

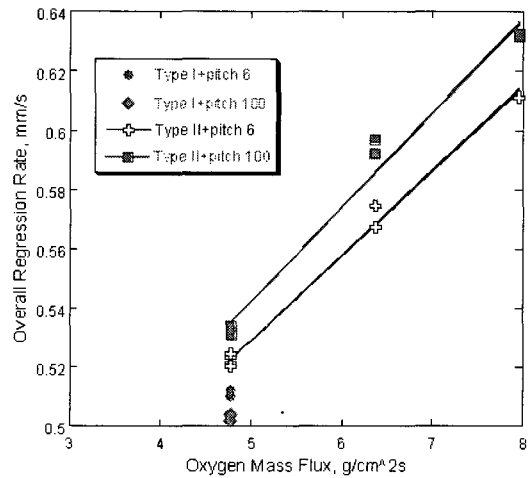


Fig. 6 Regression rate of various test fuels

Case 3과 Case 4를 비교하면, 피치 6 그레이인을 사용한 경우에는 Case 1과 같이 나선산 그레이인에서 난류가 발생하여 연소율이 향상되었다고 추정할 수 있다. 그러나 피치 100의 경우에는 Type II 인젝터에서 발생한 스월 유동이 나선산 그레이인의 나선산 홈과 같은 방향으로 가공되어 있다. 따라서 인젝터에 의해 발생한 스월 유동이 나선산 그레이인을 만나면서 스월 유동이 유지되었기 때문에 연소율이 향상되었다.

Case 1과 Case 3을 비교할 경우 연소율이 거의 비슷한 2%이내로 거의 같은 것을 알 수 있다. 이것은 피치 6 그레이인에서 발생한 난류의 양은 같지만, 인젝터 성능에 따라 연소율이 차이를 나타낸 것을 알 수 있다. 따라서 피치 6 그레이인의 경우 스월 인젝터의 종류에 따라 거의 같은 성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 하지만 피치 100의 경우에는 인젝터에서 발생한 스월 유동이 피치 100 그레이인의 방향과 같은 경우 최대의 성

능을 나타내지만, 그렇지 않을 경우 낮은 성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

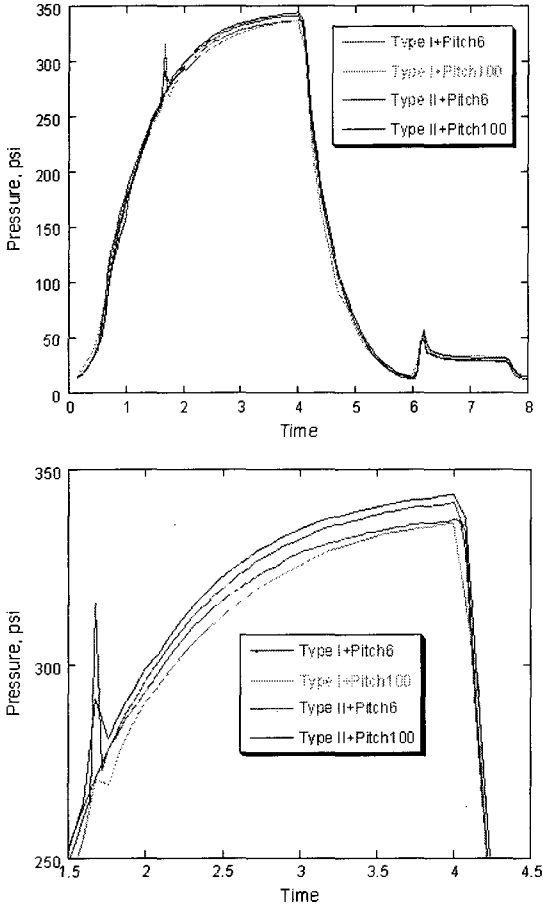


Fig. 8 Pressure trajectory by injectors and grains

4. 결론 및 향후 계획

인젝터와 나사산 그레인의 최적 조합 연구에서는 Type II 인젝터와 피치 100 그레인을 적용할 경우에 스월의 유지 및 생성으로 최대의 연소율 향상을 달성할 수 있었다. 그러나 Type I 인젝터와 피치 100 그레인을 적용한 경우에는 인젝터에서 생성된 스월 유동의 방향이 나사산 그레인의 방향과 다르기 때문에 가장 낮은 연소율을 나타내었다. 피치 6 그레인의 경우에는 인젝터의 종류에 상관없이 일정한 성능을 나타내는 것을 알 수 있었다.

향후 계획으로 스월 유동의 유지 및 연소율 향상을 위한 최적의 스월 유동 조건에 대해 연구해야 한다. 또한 스월 조건에 따른 최적의 나사산 그레인에 대해 연구가 필요하다. 이를 통해 스월 효과에 따른 연료 전체의 고른 연소율과 연소율 증진에 대해 연구되어야 한다.

참고문헌

1. Sutton, G.P. and Biblarz, O., *Rocket Propulsion Elements*, 7th ed., John Wiley & Sons, 2001, Chap. 15.
2. Yuasa, S., Shimada, O., Imamura, T., Tamura, T., and Yamamoto, K., "A Technique for Improving the Performance of Hybrid Rocket Engines," AIAA paper 99-2322, 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 1999.
3. Tamura, S., and Yuasa, S., and Yamamoto, K., "Effects of Swirling Oxidizer Flow on Regression Rate of Hybrid Rockets," AIAA paper 99-2323, 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 1999.
4. W. H. Knuth, M. J. Chiaverini, D. J. Gramer, and J. A. Sauer, "Experimental Investigation of A Vortex-Driven High-Regression Rate Hybrid Rocket Engine," AIAA paper 98-3348, 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 1998.
5. W. H. Knuth, D. J. Gramer, M. J. Chiaverini, and J. A. Sauer, "Development and Testing of a vortex-driven, High-regression Rate Hybrid Rocket Engine," AIAA paper 98-3507, 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 1998.
6. K.H Shin, C. Lee, S. Y. Chang, and J. Y. Koo, "The enhancement of regression rate of hybrid rocket fuel by various method," AIAA 2005-0359, Reno, 2005.