

# 하이브리드 로켓의 GOX 유동 변화에 따른 연소 특성

구원모\* · 이창진\*\*

## The combustion characteristic of GOX flow change in Hybrid Rocket

Wonmo Koo\* · Changjin Lee\*\*

### 초 록

하이브리드 로켓의 연소율을 높이기 위해 유동 특성을 바꾸면서 실험을 수행하였고 연소된 연료 내부 표면이 고르지 못한 것을 볼 수 있었다. 그 원인을 밝히기 위해 연료 표면을 관찰하고 유동가시화 실험을 한 결과 거친 연료 표면의 원인이 검댕 때문이고 이것은 국부적인 산화제 부족현상 때문에 발생하게 되었다는 것을 알 수 있었다. 또 연소 시 연료 전체에 발생하는 검댕의 특성은 이 현상이 하이브리드 로켓만의 독특한 특징인 분출효과 때문이라고 예측할 수 있게 해주었다.

Key Words: Hybrid rocket(하이브리드 로켓), Soot(검댕), Blowing effect(분출효과)

### 1. 서 론

하이브리드 로켓은 높은 비추력과 안정성, 추력 조절, 경제성 등에서 뛰어난 장점을 보이고 있지만 연소율이 다른 로켓에 비해 많이 떨어진다는 단점이 실용화에 큰 걸림돌로 작용하고 있다. 이런 단점을 극복하고자 이창진등[1]은 유동 특성에 변화를 주며 실험을 수행하면서 연료 표면 내부가 고르지 못하고 거칠게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 이런 현상은 PMMA/GOx를 사용하는 하이브리드 로켓 실험에서만 발생하는 것이 아니라 HTPB/GOx, N20/HTPB를 이용한 Evans등[2]의 실험에서도 비슷한 현상을 관찰할 수 있었고 Evans등은 이 원인이 난류의 Eddy에 의한 결과로

판단하였다. 하지만 아직 근본적인 원인이 밝혀지지 않았고 이것은 연료의 효율적 이용을 방해함과 동시에 연소불안정등과 관련한 문제를 발생할 수 있기 때문에 이에 대한 연구를 하게 되었다.

### 2. 연료 표면 관찰

Figure 1은 베이스라인 테스트 후 연료 표면을 관찰한 사진이다. 자세히 보면 위, 아래 그림에서 튀어나온 부분들이 검게 그을음 젖어 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 이 부분이 산화제 부족으로 인하여 불완전 연소한 결과 그을음과 연료가 남았다는 것을 말해준다. 즉 거친 연료 표면의 원인이 검댕의 발생 때문인 것을 알 수 있다.

그리고 Fig. 2를 통해서 연료를 전체적으로 보았을 때 검댕 크기에 따라 크게 세 부분으로 나누어 볼 수 있다. 앞부분에서는 검댕이 아주 미세하고 뽀뽀하게 분포되어 있는 것을 볼 수 있고 중간 부

\* 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

\*\* 건국대학교 항공우주정보시스템공학과  
연락처, E-mail: cjlee@konkuk.ac.kr

분과 뒷부분은 앞부분에 비해 검댕 발생이 훨씬 큰 것을 확인할 수 있다.

결과적으로 거친 표면의 원인인 검댕 발생이 산화제 부족에 기인하기 때문에 공급되는 산화제량이 부족해서 생긴 결과인지 알기 위해  $(O/F)_{stoi}$ 와  $(O/F)_{actual}$  계산하여 비교하였다.



Fig. 1 검댕 관찰

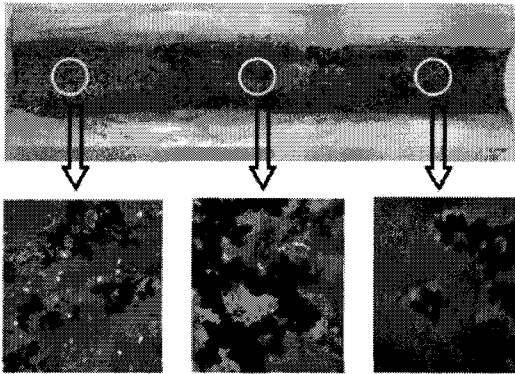
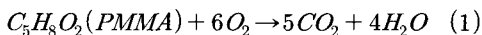


Fig. 2 연료의 세 부분으로 나누어 확대

### 3. O/F비 계산

PMMA와 기체산소의 반응식은 다음과 Eq. (1)과 같다.



위의 화학반응식을 이용해  $(O/F)_{stoi} = 1.92$ 이고 Table 1에 있는 실험조건을 이용해  $(O/F)_{actual} = 4.31$ 인 것을 알 수 있다. 즉 산화제가 2배 이상의 충분한 양이 공급되고 있음에도 불구하고 산화제 부족으로 인한 현상이 나타났기 때문에 연소 중 검댕 발생이 어떤 특성을 갖는지 알기 위해 유동가시화 실험을 하게 되었다.

Table 1. 실험 조건

연소시간 (s)	10
산화제 유량 (g/s)	20
연소 전 중공 부피 (ml)	66.3
연소 후 중공 부피 (ml)	105.3
PMMA 밀도 ( $g/cm^3$ )	1.19

### 4. 가시화장치와 실험조건

유동가시화 장면을 촬영하기 위해 캐논 S3IS 디지털 카메라의 동영상 기능을 사용하였다. 그리고 연소 시 매우 밝은 빛이 나왔기 때문에 백열등을 이용해 카메라의 감도를 고정하고 광량 감소 필터(ND8)와 0.6mm의 검은색 아크릴 판을 이용하여 촬영하였다.

Table 2. 유동가시화 실험 조건

	유량(g/s)	시간(s)	Swirler	나사산
(1)	20	10	·	·
(2)	20	8	Type II	·
(3)	20	10	·	피치80
(4)	20	7	Type II	피치80

유동가시화 실험 조건은 유동에 따른 검댕의 특성을 알기 위해 베이스라인 실험 후 추가적으로 세 가지 조건에서 더 실험 실시하였고 그 조건들은 Table 2에 나타내었다. Type II 인젝터와 피치 80 나사산에 대한 설명은 참고문헌 [1,3]에 자세히 설명되어 있다.

### 5. 유동가시화 실험 결과

로켓 모터의 점화시간을 고려하여 2초부터 유동가시화한 결과를 나타내었다.

Figure 3은 베이스라인 테스트를 유동가시화한

결과이다. 전체적으로 검댕이 발생하는 것을 볼 수 있었고 구조적인 문제로 인해 검댕 발생이 많은 가운데 부분을 제외하고 앞과 뒷부분을 확대해 관찰하였다. 하지만 앞부분은 검댕 발생이 미세해 관찰이 힘들고 유동에 잘 휩쓸리는 경향을 보여 A부분에서 검댕 특성을 알아보기 위해 확대하였다.

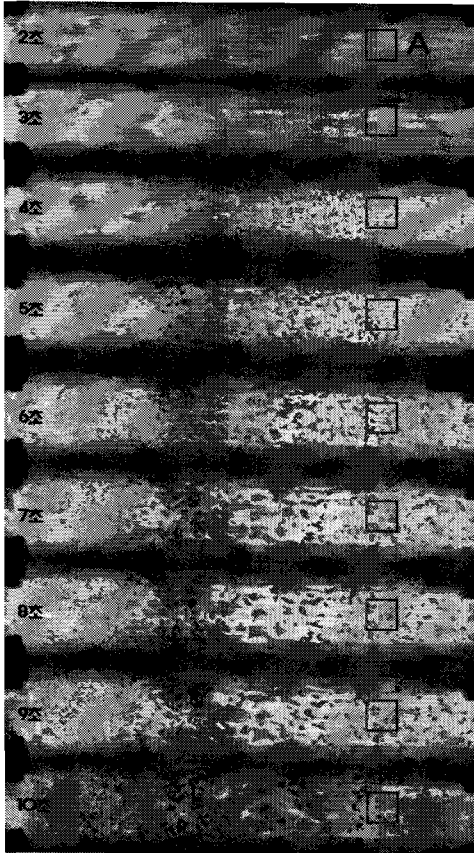


Fig. 3 베이스라인 유동가시화

A부분을 확대한 결과 검댕이 생성, 소멸, 이동하는 것을 볼 수 있고 1,2,3번 표시를 해둔 곳의 경우 유동이 47m/s인 것에 비해 거의 고정되어 있는 것을 볼 수 있다. 여기서 검댕이 산화제 유동에 거의 영향을 받지 않고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 같은 유동 조건 하에서 미세한 검댕이들이 나타날 정도의 유동 차이가 있다고 생각하기 힘들기 때문에 검댕이 다른 원인에 의해 발생하고 유동에 영향을 받는다고 판단할 수 있다. 이를 확인하기 위해 초기 유동 조건과 연료 형상을 바꿔가면서 실험을 수행하였다.

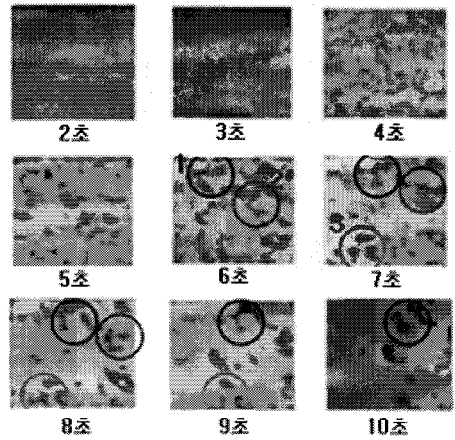


Fig. 4 A부분을 확대한 모습

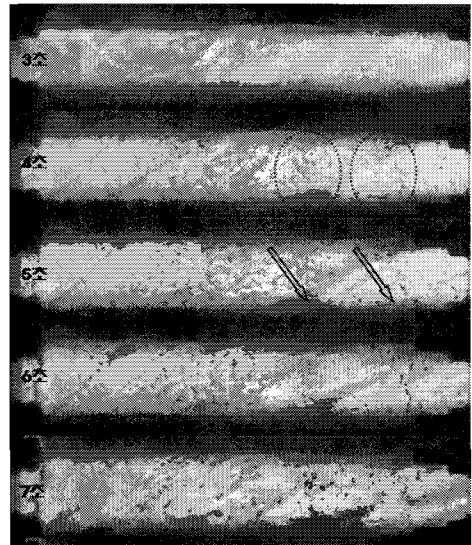


Fig. 5 스월 인젝터 이용한 유동가시화

스월 인젝터를 이용한 실험 결과인 Fig. 5는 스월 유동의 영향으로 검댕이 많이 줄어든 것을 Fig. 3과 비교해 볼 때 알 수 있다. 그리고 여기서도 베이스라인 테스트와 마찬가지로 검댕이 연료 전체적으로 발생하고 고정 되어 있는 부분을 확인함으로써 검댕 발생이 유동과 관계없다는 것을 확인 할 수 있었다. 한 가지 특이한 점은 4초를 시작으로 원 부분을 중심으로 스월 유동 방향과 반대 방향으로 검댕 나선이 발생하는 것이다. 이 부분에 대해서는 좀 더 많은 실험을 통해 검증해 나갈 것이다.

다음 Fig. 6은 나사산이 있는 연료에 대한 실험

으로 검댕 발생과 특성이 같다는 것을 알 수 있다. 베이스라인 테스트와 다른 점은 나사산 부분에서 발생된 검댕이 나사산 홈 쪽으로 밀리는 현상인데 이는 나사산 홈에 의해 난류가 발생하여 생기는 현상이라는 것을 알 수 있다.

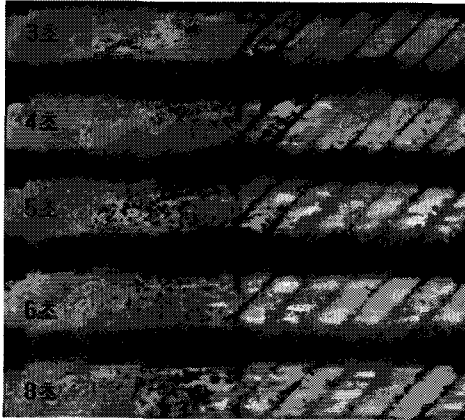


Fig. 6 피치80 나사산이 있는 연료 유동가시화

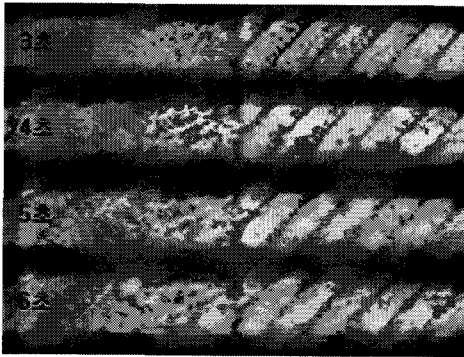


Fig. 7 피치80 + 스월인젝터 이용한 유동가시화

Figure 7은 위에서 확인한 스월과 나사산의 영향으로 연소가 잘 되고 있는 것을 확인할 수 있다. 그리고 검댕에 대하여 위의 일련의 실험들과 같은 결과를 나타내고 있다.

연료 표면 관찰 결과와 4번의 유동가시화 실험 결과 검댕이 전체적으로 유동과 관계없이 발생하고 다른 연료 조건의 하이브리드 로켓 연료를 사용한 실험에서도 나타난다는 것에서 하이브리드 로켓의 특징인 분출 효과가 검댕 발생의 원인이라고 판단되어 진다.

다음 Fig. 8은 행해진 4번의 실험을 FFT(Fast Fourier transform) 를 통해서 분석을 한 결과이다.

하이브리드 로켓의 특성인 저주파 특성을 보이고 있고 앞으로 이를 이용한 연구가 시행될 것이다.

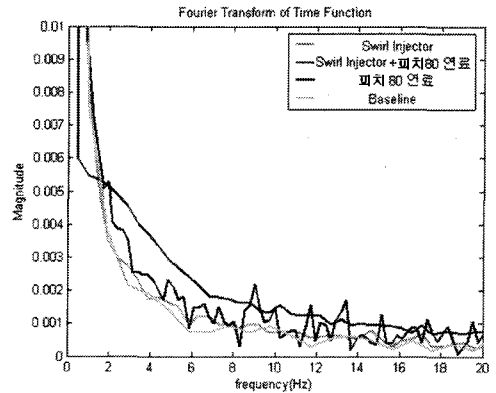


Fig. 8 (1)~(4) 실험의 FFT 분석 결과

## 6. 결 론 및 향후계획

하이브리드 로켓 연소 실험 후 거친 연료 표면을 발견하게 되었고 이에 대한 연구를 하게 되었다. 그 결과 거친 표면의 원인이 국부적인 산화제 부족에 의한 것을 알 수 있었고 연료 표면 곳곳에 발생하는 검댕 현상의 원인을 분출 효과 때문이라고 예측해 볼 수 있었다. 앞으로 다른 연료/산화제 사용 시에 각각 어떠한 차이가 있는지에 대한 연구를 수행할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 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.
2. Brian Evans, Nicholas A. Favorito, and Kenneth K.Kuo. "Oxidizer-Type and Aluminum-Particle Addition Effects on Solid-Fuel Burning Behavior" AIAA paper 06-4676, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2006.
3. 황영춘, 이창진 "산화제 유입조건에 따른 하이브리드 로켓 연료의 연소율 향상" 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집 pp.1~4. 2005