

# 과산화수소 촉매 분해를 이용한 하이브리드 로켓 자연 점화

안성용\* · 진정근\*\* · 정은상\* · 권세진\*\*\*

## Auto-ignition Characteristics of Paraffin and PE Hybrid Rocket with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Catalytic Decomposition

Sungyong An\* · Jungkun Jin\*\* · Eunsang Jung\* · Sejin Kwon\*\*\*

### ABSTRACT

The auto-ignition tests of hybrid rockets with the concentrated hydrogen peroxide as an oxidizer were presented. Auto-ignition, restartability, and instant ignition were successfully demonstrated by injecting decomposed gases from H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> into paraffin or polyethylene fuels. In addition, much faster response time was demonstrated in case of a paraffin, which was 13 and 30 ms at ignition delay and rise time respectively.

### 초 록

고농도 과산화수소를 산화제로 이용하는 하이브리드 로켓의 자연 점화 연구를 수행하였다. 별도의 점화기 없이 촉매 반응을 통한 과산화수소 분해가스를 파라핀 및 폴리에틸렌에 분사함으로써 점화를 하였고 연속적인 재점화 및 즉각적인 점화 특성을 확인하였다. 안정적인 연소를 위해 파라핀은 PE에 비해 높은 연소실 특성길이가 요구된 반면, 펄스 응답특성은 점화 지연 13 ms, 상승시간 30 ms 로서 폴리에틸렌의 응답성에 비해 두 배 가량 빠른 특성을 보였다.

Key Words: Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Hydrogen Peroxide(과산화수소), Catalyst(촉매), Ignition(점화), Paraffin(파라핀), Polyethylene(폴리에틸렌)

### 1. 서 론

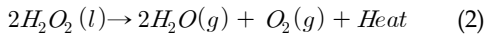
고체 연료에 액체 산화제를 공급하여 작동되는 하이브리드 로켓은 단일추진제 시스템과 같

이 간결한 구조를 이용하면서 이원추진제 시스템과 유사한 높은 비추력(I<sub>sp</sub>)을 발생시킨다. 이러한 하이브리드 로켓은 점화를 위한 별도의 점화기를 필요로 하는데 이원추진제 점화, 니크롬선을 이용한 고체추진제 점화 및 토치를 이용한 방식이 적용되어왔다. 이러한 점화방식은 안정적인 사용되고 있으나 방식에 따라 재점화가 용이하지 않거나, 일정한 점화 절차가 요구되어 즉

\* KAIST 항공우주공학과, 박사과정  
\*\* KAIST 기계기술연구소, 박사 후 연구원  
\*\*\* KAIST 항공우주공학과, 교수  
연락처, E-mail: trumpet@kaist.ac.kr

각적인 점화가 쉽지 않다는 단점이 있다. 이를 개선하기 위한 방법으로 본 연구에서는 촉매 점화방식을 구현하였다. 이는 산화제가 촉매대를 거쳐 공급되며 이 과정에서 분해되어 생성된 고온의 산소 혼합 가스를 고체 연료에 분사하는 방식이다. 이때 공급된 고온의 산화제 가스가 연료의 자연점화(auto-ignition)를 유도하며 다음의 장점을 지닌다.

산화제의 단일분해 온도가 연료의 점화온도보다 높으면 별도의 점화장치 없이 산화제 공급만으로 점화/연소가 일어나므로 시스템이 간결해진다. 점화가 없이 연소를 유발하므로 재점화가 가능하며, 산화제 공급과 동시에 점화가 일어나므로 원하는 시점에 빠른 점화를 시킬 수 있다.



본 연구에서는 과산화수소를 산화제로 이용하는 하이브리드 로켓의 기초 연구로서 점화 가능성을 살펴보고자 한다. 산화제로 90 wt% 과산화수소를 사용하였고 후퇴율(regression rate)을 제외한 항목에서 유사한 추진 특성을 나타내는 파라핀과 폴리에틸렌(PE)을 연료로 사용하였다. 촉매 반응기를 포함한 하이브리드 로켓을 설계하여 자연 점화 특성을 고찰 하였다. 이후, 연소 및 재점화 특성을 고찰하였고 하이브리드 작동 모드(combustion mode)와 단일추진제 작동 모드(reaction mode)에서의 펄스 응답속도와 비교함으로써 과산화수소를 활용한 하이브리드 로켓의 기본적인 특성을 연구하였다.

Table 1. Reactor design parameters

No	Parameters	Values
1	Oxidizer	90 wt%
2	Injector type	Shower head
3	Feed pressure	20 bar
4	Flowrate of H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	35 g/s
5	Space time	0.5 s
6	Catalyst	MnO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

## 2. 하이브리드 로켓 설계 및 제작

촉매 반응기는 Table 1의 파라미터에 따라 설계하였다. 단일추진제 추력기 모드로 작동될 때 50 N을 발생시키는 크기로 사이징 하였다. 연소기는 외경 33 mm, 길이 50 mm, 내경 10 mm 단일 포트를 가지는 연료(Fig. 1)를 장착할 수 있도록 설계하였고 노즐은 연소챔버 압력이 약 15 bar 인 경우 최적 팽창이 되도록 면적비(A<sub>e</sub>/A<sub>t</sub>)를 결정하였다. 안정적인 연소에 필요한 특성길이(L\*)를 정성적으로 살펴보기 위해 Case 1의 설계를 기본으로 하고 기본 형상에 길이 10 cm를 가지는 혼합 챔버를 연소기에 추가하여(Case 2) 두 조건에서 점화 특성을 살펴보고자 하였다. 혼합 챔버에 따른 두 가지 연소기의 단면 형상과 각 연소기에서 측정할 압력 및 온도 센서의 위치를 Fig. 5에서 제시하였다.

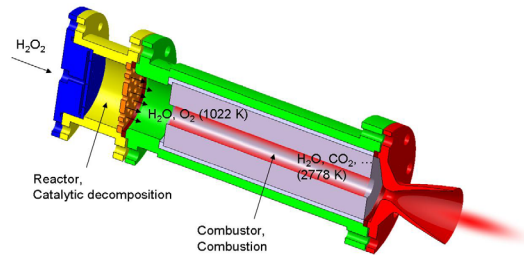


Fig. 1. Design of a hybrid rocket with a reactor.

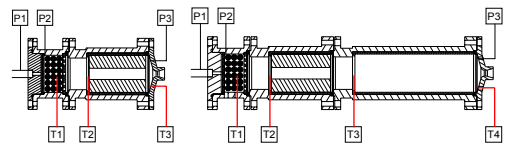


Fig. 2. Measurements at each test case

Table 2. Test cases according to a mixing chamber

Test case	Length		Characteristic length, L* (초기 ~ 최종)
	Fuel chamber	Mixing chamber	
Case 1	5 cm	-	0.75 ~ 2.29 m
Case 2	5 cm	10 cm	4.86 ~ 6.40 m

### 3. 과산화수소 분해가스를 이용한 점화 시험

Case 1조건에서 파라핀 및 PE의 온도 측정 결과를 Fig. 3 및 4에서 각각 제시하였다.

촉매 반응기의 성능을 나타내는 T1은 펄스가 시작됨과 동시에 급격히 증가하기 시작하여 산화제의 단일분해 온도인 1022 K (749 °C)에 도달하여 반응기 설계가 적절히 이루어 졌음을 확인할 수 있다. 점화의 여부는 T2, T3의 온도 추이로 판단하였다. 만약 연료 하류의 온도인 T3가 상류인 T2 보다 높다면 점화가 확실히 일어난 것으로 판단할 수 있다. 파라핀의 경우 다른 펄스와는 달리 5, 6 번째 펄스에서 T3가 급격히 상승하는데 이는 점화가 일어난 것으로 보이나 펄스 시간 동안 안정적인 연소가 일어나지 못해 온도가 일정이상 상승하지 못하는 특성을 보였다. 이는 연료 하류에 혼합 챔버가 존재하지 않아 짧은 체류시간을 가지는 조건이므로 반응기에서 생성된 수증기와 산소가 연료 기화를 충분히 유도하지만 기화 가스와 충분히 혼합되지 못해 안정적인 점화가 이루어 지지 않은 것으로 판단된다. 반면 PE를 연료로 사용한 경우는 두 번째 펄스부터 T3 값이 T2를 초과하여 연속적인 점화 및 안정적인 연소가 일어났다. 이에 따라 같은 산화제 유입조건에서 PE는 파라핀에 비해 요구되는 L\*가 작음을 예상할 수 있다.

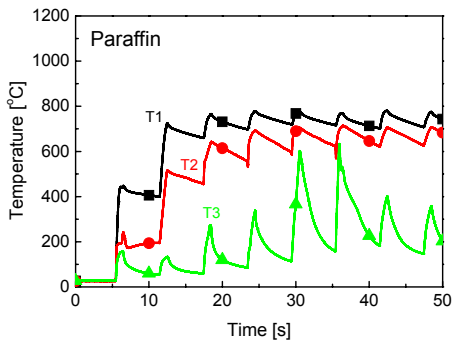


Fig. 3. Case 1, Paraffin

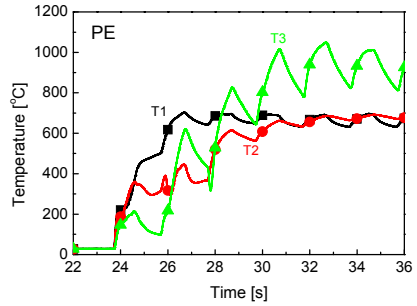


Fig. 4. Case 1, PE

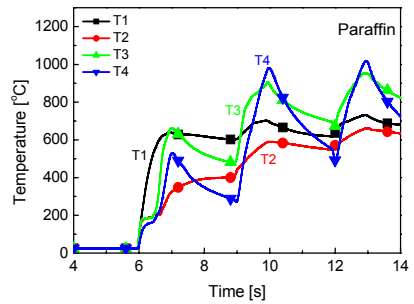


Fig. 5. Case 2, Paraffin

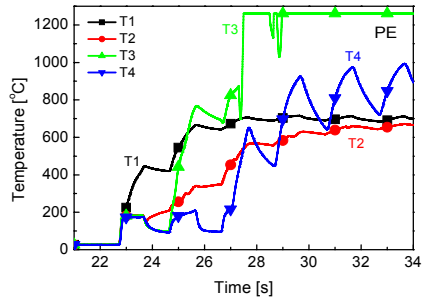


Fig. 6. Case 2, PE



Fig. 7. Plume after a nozzle (Case 2)

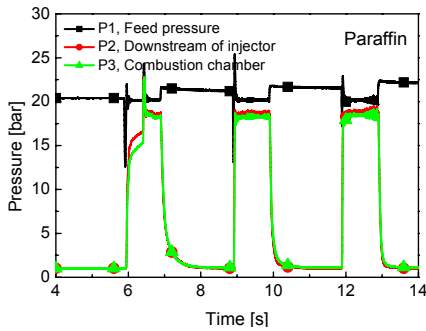


Fig. 8. Case 2, Paraffin

혼합 챔버를 장착한 후 동일한 실험을 수행하였다. 낮은 특성 길이로 즉각적인 점화 및 안정적인 연소가 이루어지지 않았던 파라핀은 case 1 결과와는 다르게 첫 번째 펄스부터 T3 및 T4가 모두 연료 상류온도 보다 높게 나타나 즉각적인 점화가 일어났다. PE를 이용한 점화 실험에서는 두 번째 펄스부터 점화가 일어나기 시작했는데 T3는 k-type 온도센서의 측정 한계를 초과하여 실제적인 온도 측정이 불가능한 구간이 나타났다. 이는 PE의 경우 연소과정이 연료 하류 및 혼합 챔버 상류지점에서 대부분 일어났음을 의미하는데 이런 현상은 case 1 실험에서 요구되는 연소실 특성길이가 파라핀에 비해 짧은 것과 같은 맥락이다. Fig. 8은 파라핀 경우 압력 측정 결과를 나타낸다. 밸브가 열림과 동시에 단일추진제 추력기 모드가 시작되고 연소실 압력(P3)이 상승하여 정상상태를 보이다가 점화가 일어나면서 P3가 다시 상승한 후 다소 높은 압력에서 유지되며 연소가 지속됨을 확인할 수 있다. 첫 펄스에서 점화가 다소 지연되는 현상이 나타났으나 두 번째 펄스부터는 첫 번째 펄스와는 달리 밸브 개방과 동시에 빠르게 점화가 일어났으며 재점화가 이루어졌다. PE 또한 연료가 모두 소진될 때까지 성공적인 펄스 점화가 일어났는데 이를 통해 하이브리드 로켓에서 과산화수소 촉매 분해 반응을 이용한 산화제 공급할 경우 자발점화(hypergolic ignition)에 가까운 자연점화(auto-ignition)가 연속적으로 가능함을 확인하였다.

펄스 응답 속도를 측정결과(Table 3) 점화지연은 10 ~ 13 ms로 세 가지 모드에서 유사한 특성을 나타내었으나 상승 시간은 단일추진제 모드에서 64 ms, 파라핀 연소에서 30 ms, PE 연소 시 70 ms로 나타났다. 즉, 파라핀은 타 모드에서 보다 두 배 정도 빠른 기울기를 보이면서 빠른 압력 상승을 보였다. 이는 파라핀의 빠른 기화 특성 및 낮은 점화 온도에 의한 것으로 동일 작동 조건에서 PE보다 빠르게 점화 및 연소가 시작되기 때문으로 볼 수 있다. 밸브가 열리기 시작하는 시점부터 연소챔버 압력(P3)의 90 %까지 도달하는 전체 응답 시간을 고려하면 43 ms로써 파라핀 하이브리드 로켓은 촉매 반응을 기반으로 하는 단일추진제 모드(74 ms)보다 현저히 향상된 응답 특성을 나타내었고 이는 자세제어 추력 시스템에서 요구되는 특성에 보다 부합한다.

Table 3. The response time of each test [ms]

Operating mode		Ignition delay*	Rise time**
Mono-mode (catalyst reaction)		10	64
Hybrid (combustion)	Paraffin	13	30
	PE	12	70

\*: valve on signal ~ 1% of chamber pressure(P3)

\*\* : 1 % ~ 90 % of chamber pressure(P3)

#### 4. 결 론

과산화수소를 산화제로 사용하여 파라핀 및 PE의 자연 점화 및 즉각적인 재점화 실험을 수행하였다. 또한, 연소특성을 볼 때 파라핀은 PE 보다 높은 연소기 특성길이가 필요하므로 전체 로켓의 크기가 커지게 되는 문제점이 있었으나 빠른 응답특성으로 자세제어 시스템에서는 우수한 특성을 나타낼 것으로 기대되었다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 국제협력연구사업(F01-2007-000-10136-0) 지원으로 수행되었음.