

研究論文

과산화수소/케로신을 사용하는 액체로켓엔진의  
촉매 점화기 설계에 관한 연구

채병찬\* · 이양석\*\* · 전준수\*\* · 고영성\*\*†

A Study on Design of a Catalytic Ignitor for Liquid  
Rocket Engine using Hydrogen Peroxide and Kerosene

Byoungchan Chae\* · Yang-Suk Lee\*\* · Jun-Su Jun\*\* · Young-Sung Ko\*\*†

ABSTRACT

An experimental study on design of a catalytic ignitor was performed to use an ignition source for a small bi-propellant liquid rocket engine which use hydrogen peroxide and kerosene as propellants. In the catalytic ignitor, hot gas of hydrogen peroxide which was decomposed by a catalyst induced autoignition of kerosene. Mass flow rate and O/F ratio for the ignitor were calculated by CEA code. A combustion chamber which had a quartz window and thermocouples was manufactured to determine whether the ignition is successful. Ignition performance was investigated according to exit area of fixed rings and mixture ratio. Results showed that reliable ignition performance was achieved at non-choking exit area of fixed ring and O/F ratio of 6~8.

초 록

본 연구에서는 과산화수소와 케로신을 사용하는 소형 이원추진제 액체로켓엔진의 점화원으로서, 과산화수소의 촉매 반응에 의한 고온의 분해 가스와 케로신의 자연 발화를 이용하는 촉매형 점화기에 대한 연구를 수행하였다. 먼저 점화기를 설계하기 위해 열역학적 상용코드프로그램인 CEA를 사용하여 점화기 유량 및 혼합비를 선정하고 촉매형 점화기를 설계/제작하였으며, 점화 성공 및 지연 등을 판단하기 위한 가시화창과 분해 가스의 온도 분포를 파악하기 위한 열전대 장착이 가능한 연소실을 설계 제작하였다. 분해 가스 유속을 결정하는 고정링(fixed ring)의 출구 면적 변화와 혼합비 변화에 따른 점화 성능 시험을 수행하였다. 결과적으로 초킹 면적보다 큰 출구 면적에서와 혼합비 6~8 사이에서 안정적인 점화 성능을 보임을 확인하였다.

Key Words: Hydrogen Peroxide(과산화수소), Bi-propellant Rocket Engine(이원추진제 로켓엔진), Mixture Ratio(혼합비), Ignition Test(점화시험), Catalyst(촉매)

접수일 2011. 5. 26, 수정완료일 2011. 11. 27, 게재확정일 2011. 12. 1

\* 정회원, LIG넥스원(주) 기계연구센터 2팀

\*\* 정회원, 충남대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: ysko5@cnu.ac.kr

1. 서 론

우주발사체 분야의 로켓엔진 시스템의 독자

개발을 위해서는 발사체의 소요 임무에 적합한 각종 추진제 조합의 엔진의 적절한 선택이 매우 중요하다. 그러나 현재까지 국내에서 개발하고 있는 액체로켓엔진 시스템은 케로신-액체산소를 사용하는 액체로켓엔진 시스템 외에 메탄-액체산소 액체로켓엔진 시스템이 일부 기업에서 연구되고 있는 것이 거의 전부인 상태이다. 하지만 향후 국내에서 개발해야 할 고성능 발사체의 경우 현재 대부분의 대형 우주 발사체에서 사용하고 있는 staged combustion cycle의 액체로켓엔진 시스템의 개발이 필요함과 동시에, 상단 엔진이나 자세 제어, 궤도 진입 등의 각각의 소요 임무에 따른 새로운 형태의 로켓엔진 시스템의 개발이 요구된다. 그러나 각각의 소요 임무에 따른 여러 가지 형태의 액체로켓엔진 시스템의 개발을 연구소나 산업체 차원에서 선행으로 진행하기에는 무리가 있다. 따라서 학계에서 각각의 소요 임무에 맞는 새로운 추진제 조합에 따른 체계적인 선행 연구를 통하여, 향후 국내에서 소요되는 차세대 액체로켓엔진 시스템의 개발을 위한 초석을 마련하는 것이 필요하다.

현재 친환경 차세대 추진제로서 관심을 받고 있는 추진제는 크게 과산화수소( $H_2O_2$ , Hydrogen Peroxide)와 메탄이 있으며, 이 중 과산화수소는 고밀도, mono-propellant 특성, non-cryogenic, 저독성 및 취급의 용이성 등으로 인하여 항공우주 추진기관이나 동력 시스템에 널리 적용된 오랜 역사를 가지고 있다[1-3]. 그러나 2차 세계대전 이후 Shell 405라는 하이드라진 촉매가 개발되면서 상대적으로 고성능이며 장기간 저장성이 우수한 하이드라진으로 대체되면서 과산화수소의 사용이 현격히 감소되었으며, 이원추진제로서도 보다 고성능인 액체산소 및 사산화질소로 대체되었다. 그러나 최근 고농도 과산화수소가 개발되고 안정성이 크게 개선되면서 충분히 RCS로서의 소요 임무를 만족할 수 있으며, 액체산소나 사산화질소의 성능에 크게 뒤지지 않는 성능을 가질 수 있어 액체산소나 다른 독성 추진제(사산화질소, 하이드라진 등)를 다시 대체할 수 있는 추진제로 인식되고 있다. 또한 1990년대 이후 최근 들어 단순히 성능보다는 운영비용과 안

전 측면이 최우선시 되면서, 과산화수소에 대한 관심이 새롭게 대두되고 있다. 또한 주로 추력기 엔진으로 단일추진제 시스템의 추진제 뿐만 아니라 이원추진제 추력기의 산화제로 사용할 수 있어, 통합 시스템으로의 장점을 가지고 있다. 이에 미국뿐만 아니라 유럽, 일본 등 각국에서도 꾸준히 과산화수소 엔진에 대한 연구를 진행하고 있는 실정이다[1,3].

본 연구에서는 과산화수소와 케로신을 사용하는 차세대 액체로켓엔진의 선행 개발을 위하여, 과산화수소/케로신 엔진의 점화를 위한 촉매형 점화기에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 촉매 점화기 설계

### 2.1 점화 방식 선정

자세제어나 RCS 용으로 사용하기 위한 엔진들은 재점화 성능이 우수해야 하며, 점화기의 무게 등을 최소화하는 것이 매우 중요하다. 과산화수소와 케로신을 추진제로 사용하는 이원추진제 로켓 엔진의 점화방법으로는 electro spark, glow plug, catalyst 등 다양한 방법으로 연구가 수행되고 있다[3]. 이 중 촉매 점화 방식은 타 점화 방법과 다르게 별도의 전력이 필요하지 않고, 단순한 시스템으로 구성되어 인공위성 자세제어용 추력기와 같이 소형 엔진에 사용하기에 유리하다. 따라서 본 연구에서는 촉매(catalyst) 점화 방식을 사용하는 점화기에 대한 연구를 수행하였다.

촉매 점화기는 Fig. 1과 같이 촉매( $NaKMnO_2$  계열)에 과산화수소를 공급하는 과산화수소 분사기와 케로신 분사기로 구성되어 있다. 과산화수소가 촉매와 접촉될 경우 고온의 분해가스가 발생하게 되며, 이 고온의 가스가 케로신 분사기에서 분무되는 케로신의 자연 발화를 일으켜 점화하는 방식의 점화기이다. 결국 점화 성능은 과산화수소 분사기가 안정적으로 고온의 가스를 생성하고, 케로신의 분무 특성이 양호하여 자연 발화가 얼마나 잘 발생하느냐에 달려 있다고 볼 수 있다.

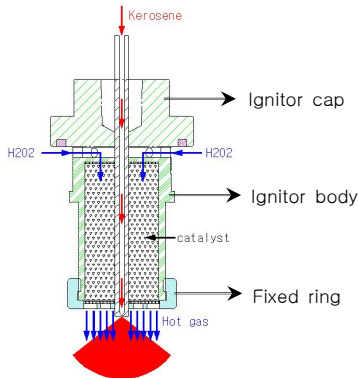


Fig. 1 Catalyst ignitor

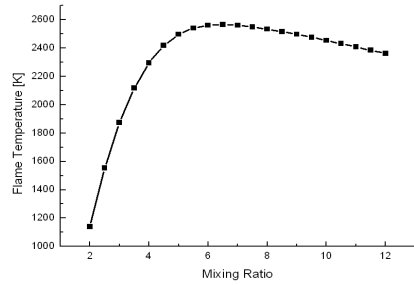
2.2 추진제 혼합비 선정

점화기는 주 추진제가 공급될 때 충분한 점화 에너지를 공급해야 하므로 점화 온도가 높은 것이 유리하며, 다양한 혼합비에서도 안정적인 점화 성능을 확보하는 것이 중요하다. 따라서 CEA code를 이용하여 과산화수소와 케로신의 혼합비 (O/F)에 따른 화염온도 및 초기 과산화수소 온도변화에 따른 화염온도를 계산하였다[4]. Fig. 2에서 보는 바와 같이 혼합비 6~7 구간에서 가장 높은 화염 온도를 가지는 것을 확인할 수 있으며, 주 추진제의 혼합비 설계 조건인 7.6에 가까운 혼합비 7을 점화기 초기 설계점으로 설정하고 설계 조건을 Table 1과 같이 결정하였다[5,6].

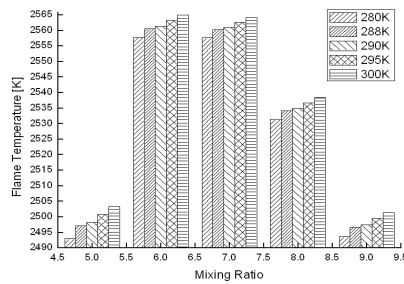
2.3 과산화수소 분사기 설계

과산화수소 분사기는 Fig. 3에서 보는바와 같이 크게 ignitor cap, ignitor body, fixed ring으로 총 3개의 부품으로 구성되어 있다. Ignitor cap은 점화기 내부로 유입되는 과산화수소가 외부로 새지 않도록 기밀 역할을 수행하기 위한 것으로서, cap 안쪽 부분에는 copper seal이 들어가도록 하였다. 또한 cap 중앙 부분에 케로신 분사기를 고정할 수 있도록 하였다.

Ignitor body는 내부에 촉매가 채워지고 과산화수소가 유입되어 실제 과산화수소와 촉매 반응이 이루어지는 곳으로서, shower head 타입으로 설계하여 내부의 촉매와 공급된 과산화수소가 균일하게 접촉할 수 있도록 하였다. 상부 판



(a)



(b)

Fig. 2 Flame temperature of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/kerosene according to O/F ratio (a) and initial temperature (b)

Table 1. Design conditions of catalyst ignitor

	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Kerosene
O/F ratio	7	
P [ bar ]	15	15
ΔP	5	5
Mass flow rate [g/s]	14	2

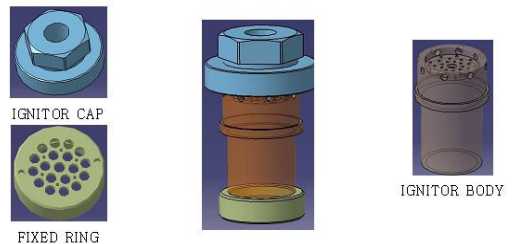


Fig. 3 Catalyst ignitor

에는 엔진 상부의 오리피스에 의해 공급되는 수평방향의 8개의 홀과 ignitor body 내부 공급 유로인 shower head 타입의 Ø1.0 홀 27개가 위치

한다. 이 때 홀 사이즈와 개수는 작고 숫자가 많을수록 접촉 면적이 균일하여 촉매 반응에 유리할 수 있다. 그러나 홀 사이즈가 지나치게 작을 경우, 과산화수소 가압압력이 높아질 수 있는 단점이 생길 수 있다.

Fixed ring은 ignitor body에 채워진 촉매를 고정하는 역할 뿐만 아니라, 과산화수소와 촉매 반응에 의해 발생하는 고온가스의 출구이기도 하다. Fixed ring의 면적이 작아질수록 고온 가스의 유동 속도를 증가시킬 수 있고, 이것은 점화에 영향을 줄 수 있다.

2.4 Fixed ring 면적 변화에 따른 설계

Ignitor body에서의 과산화수소와 촉매의 화학 반응을 통해 발생된 고온의 가스가 fixed ring을 통해 연소실로 유입된다. 이때 고온 가스가 ignitor body 내부에서 fixed ring을 통과하면서 면적비가 작아지게 되고, 초킹(choking)이 발생할 수 있는 환경이 조성된다. 초킹이 일어나면 과산화수소-촉매 반응 가스가 급속히 연소실로 유입되어, 케로신과의 접촉 시간이 줄어들어 점화 효율 및 성능을 떨어뜨릴 수 있다. 따라서 촉매를 사용한 점화기를 설계할 경우, fixed ring 출구 면적을 초킹이 발생하지 않도록 하는 것이 매우 중요하다. 초킹 면적을 계산하기 위해 Table 2에서 보는바와 같이 CEA code를 통해 과산화수소와 촉매가 반응할 때 발생하는 고온 가스의 물성 값을 계산하였다[4]. 그리고 초킹 유량식 Eq. 1을 사용하여 fixed ring 출구 면적을 계산하였고, 과산화수소 설계 유량 14 g/s 일 때 초킹 면적은 69.32mm<sup>2</sup>으로 계산되었다. Fixed ring 출구 면적(즉 초킹 여부)에 따른 점

Table 2. Gas properties for design of exit area

Property	Value	Unit
$\dot{m}$	14	g/s
$\gamma$	1.298	-
$R$	366.8	J/kg · K
$T$	1023	K
$P^*$	1.855	bar

Table 3. Exit area of fixed rings

←····· Choking ·····→		····· Non-choking ·····→		
37.7 mm <sup>2</sup>	48.23 mm <sup>2</sup>	69.32 mm <sup>2</sup>	78.62 mm <sup>2</sup>	103.7 mm <sup>2</sup>

$$A^* = \frac{\dot{m}}{P_0 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}} \quad (1)$$

화 성능을 파악하기 위하여 Table 3과 같이 5개 구간의 면적을 선정하여 설계 제작하였다.

2.5 케로신 분사기

촉매 점화기는 과산화수소와 촉매의 고온 반응가스에 케로신을 분사시켜 자연 점화를 일으키는 것으로서, 케로신 분사기의 성능이 무엇보다도 중요하다. 과산화수소-촉매 반응가스의 유속이 약 490 m/s 정도이므로, 케로신 분사기의 분산각과 미립화 성능이 좋지 않을 경우 분해가스와 케로신의 접촉 면적이 작아져 점화 효율이 떨어질 수 있다. 또한 케로신 분사기의 헤드 크기가 점화기 내부 공간에 비해 크게 되면 ignitor body 내부에 충전할 수 있는 촉매양이 줄어들 뿐만 아니라, fixed ring 출구 면적 또한 작아지게 된다. 따라서 케로신 분사기는 분무성능과 최적화된 크기가 모두 고려되어 설계되어야 한다. 케로신 분사기의 경우 요구되는 사양에

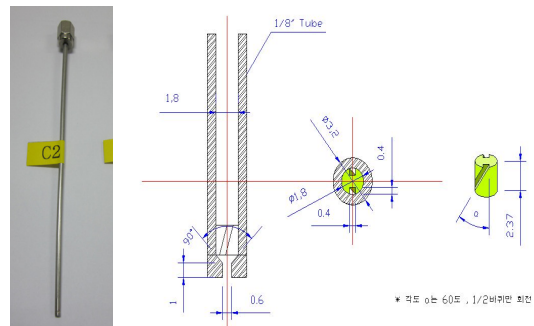


Fig. 4 Kerosene injector

맞는 상용 분사기가 없기 때문에, 설계 차압과 유량에 맞추어 분산각과 미립화 성능이 우수하도록 Fig. 4와 같은 동축 스월형 분사기를 설계 제작하였다[7].

### 2.6 연소실

연소실은 과산화수소와 촉매의 반응 가스가 케로신과 접촉하여 점화가 이루어지는 곳으로, Fig. 5와 같이 연소실의 직경은 70mm, 길이는 107mm이다. 연소실 측면에 가시화창을 만들어 점화 시 발생하는 점화 지연 및 초기 화염 발생 지점을 확인할 수 있도록 설계 제작하였다. 또한 과산화수소-촉매 반응가스 온도와 연소실 내부 온도를 측정하기 위해 4개의 온도 센서 포트를 두도록 하였다. 그리고 가시화창은 석영 재질을 사용하여 점화 시 발생하는 고온 환경에서도 견딜 수 있도록 하였다.

## 3. 점화 시험

### 3.1 과산화수소-촉매 반응 시험

점화 시험에 앞서 fixed ring을 통과하는 고온 가스의 온도를 측정하였고, 시험에 사용한 농도 95%의 과산화수소는 이론적인 촉매 반응 가스의 온도가 882℃이다[2]. 연소실에 장착된 4개의 K type 열전대로부터 측정된 온도 분포를 통해 반응 균일성을 확인하고자 하였다.

Figure 6에서 보는바와 같이 측정된 최고 온도는 815℃로서, 이론값인 882℃에 비해 약 90~

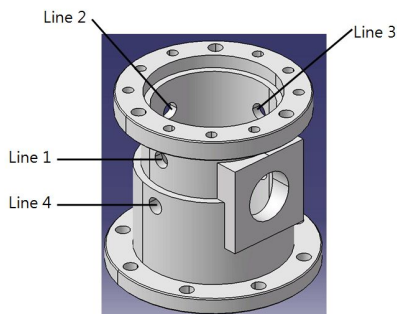


Fig. 5 Combustion chamber

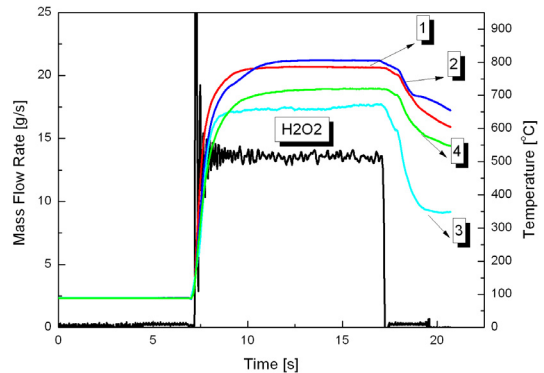


Fig. 6 Mass flow rate and decomposition temperature of hydrogen peroxide

93%의 성능을 보였다. 온도 분포에 다소 차이를 보이는 것은 열전대 장착 위치가 다소 다를 수 있고, 촉매의 형상이 완전 구형이 아니므로 촉매가 공간적으로 완전히 균일하게 충전되지 않았기 때문이다. 따라서 일부 영역에서는 100% 촉매 반응이 이루어지지 못한 것이 원인으로 판단된다.

### 3.2 Fixed ring 출구 면적 변화에 따른 점화 특성

과산화수소와 촉매의 화학 반응을 통해 발생하는 반응 가스는 유속이 매우 빠르기 때문에, fixed ring 출구 면적에서 초킹이 발생할 수 있다. 따라서 제작된 5개 구간의 fixed ring을 사용하여 점화시험을 수행하였고, 시험 운용 조건은 설계 혼합비 조건에서 과산화수소 5초 리드에 점화시간은 3초로 일정하게 유지하였다.

Table 4는 fixed ring 출구 면적 변화에 따른 점화 시험 결과를 정리한 것으로서, Table에서 보는 바와 같이 초킹 범위에 있는 출구면적  $37.7\text{mm}^2$ ,  $48.23\text{mm}^2$ ,  $69.32\text{mm}^2$  세 가지 모두 점화에 실패하였다. 그러나 초킹 면적 이상의 두 가지 fixed ring의 경우에는 모두 점화에 성공하였으나, 그 중 초킹 면적에 가까운  $78.62\text{mm}^2$ 에서는 3회중 2회 점화가 되었으나 두 번 모두 최대 1.16초의 점화지연이 발생하였다. 그러나 초킹 면적보다 상당히 큰  $103.7\text{mm}^2$ 의 fixed ring에서는 점화 지연 없이 모두 점화에 성공하였다.

Table 4. Test result according to exit area

No	Oxy. [g/s]	Fuel [g/s]	O/F	Ignition	Delay [s]
$A = 37.7mm^2$					
1	14.4	2.1	6.86	x	-
2	14.3	2.1	6.81	x	-
3	14.3	2.1	6.81	x	-
$A = 48.23mm^2$					
4	14.3	2.1	6.81	x	-
5	14.2	2.1	6.76	x	-
6	14.2	2	7.1	x	-
$A = 69.32mm^2$					
7	14.2	2	7.15	x	-
8	14.2	2	7.1	x	-
9	14.2	2	7.1	x	-
$A = 78.62mm^2$					
10	14.3	2	7.15	x	-
11	14.3	2	7.15	o	1.16
12	14.2	2	7.1	o	0.46
$A = 103.7mm^2$					
13	14.4	2	7.2	o	-
14	14.4	2	7.2	o	-
15	14.4	2.1	6.8	o	-

3.3 혼합비에 따른 점화 특성

이런 추진제를 사용하는 엔진의 경우 혼합비가 변하게 되면 설계 영역을 벗어난 특정 시점부터 점화 지연이나 그로 인한 hard start가 발생할 수 있고, 운용 측면에서 매우 위험한 요소로 작용한다. 점화기 역시 하나의 엔진으로 볼 수 있는 시스템이기 때문에, 혼합비에 따른 점화 특성을 확인하고 점화기 운용조건을 확립하여 실제 로켓 엔진 메인 연소의 점화 안정성을 확보하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

Table 5는 혼합비 변화에 따른 점화 시험 결과를 보여주고 있다. 혼합비는 설계 유량인 과산화수소 14 g/s로 고정하고 케로신 유량을 1.5~3 g/s 범위 내에서 변화시키면서 시험을 수행하였다. 이 때 케로신 유량을 1.5 g/s로 제한한 것은 제작된 케로신 분사기가 1.5g/s 이하에서 분산각과 미립화 성능이 확연히 떨어지는 것을 확인하였기 때문이며, 그 이하 구간은 점화에 또 다른 영향 인자가 될 수 있다고 판단하여 제외시켰다.

Figure 7은 설계 혼합비에서의 점화 시험시의 과산화수소 및 케로신 공급 유량과 연소실 내부

Table 5. Test result according to mixture ratio

No	Oxy. [g/s]	Fuel [g/s]	O/F	Ignition	Delay [s]
1	14.4	1.5	9.6	o	0.3
2	14.4	1.6	9.0	o	0.1
3	14.4	1.7	8.4	o	-
4	14.3	1.78	8.0	o	-
5	14.3	1.8	7.9	o	-
6	14.4	2	7.2	o	-
7	14.4	2	7.2	o	-
8	14.4	2.1	6.8	o	-
9	14.5	2.4	6.0	o	-
10	14.3	2.6	5.5	o	0.1
11	14.3	2.7	5.3	o	1.1
12	14.4	3	4.8	o	1.0
13	14.3	3	4.7	x	-

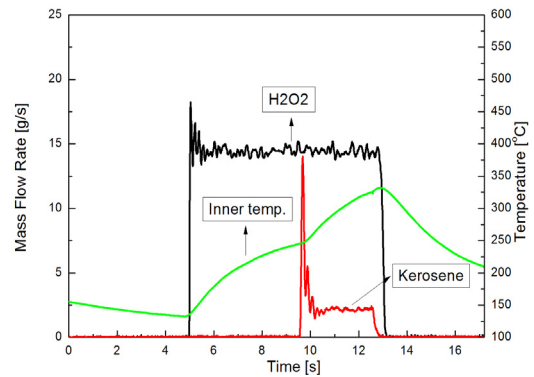


Fig. 7 Mass flow rate and temperature for time (Test No. 8)

온도 변화를 나타낸 것이며, 연소실 내부 온도는 연소실 헤드면에서 27.5mm, 연소실 벽면에서 5 mm 떨어진 지점에서 내부 분위기 온도 변화를 측정된 것이다. Table 5에서 볼 수 있듯이 혼합비 7을 기준으로 4.5에서 9.6까지 수행한 결과, 혼합비 4.7을 제외하고는 전체적으로 점화는 성공적으로 이루어졌다. 그러나 설계 혼합비를 벗어난 일부 구간에서 점화 지연과 점화 실패가 나타난 것을 볼 수 있다. 특히 혼합비 5.5 이하의 구간에서 점화 지연 및 실패가 발생하였다. 이것은 혼합비가 작아질수록 연료보다 산화제 양이 상대적으로 작고, 그로 인해 점화에너지가 부족하여 점화지연과 실패가 나타난다고 볼 수 있다. 그러나 혼합비 변화에 따른 점화 시험을

통해 넓은 혼합비에서의 점화 영역이 존재한다는 것을 알 수 있었고, 혼합비 6에서 8사이에서 점화기를 운용하는 것이 가장 안정적이라고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 향후 자세제어나 궤도전이용 엔진으로 사용될 수 있는 저추력급의 과산화수소와 케로신을 사용하는 이원 추진제 액체로켓 엔진의 점화기를 개발하기 위하여, 촉매와 반응한 고온의 과산화수소 분해가스에 케로신을 분사하여 자연 발화를 일으키는 촉매형 점화기를 설계/제작하였다. 분해된 고온의 가스의 유속을 결정하는 fixed ring 출구 면적이 초킹 면적보다 큰 경우에만 안정적인 점화가 일어남을 확인하였고, 혼합비 6~8 사이에서 안정적이고 신뢰성 있는 점화가 가능함을 확인하였다. 향후 fixed ring 출구 면적을 세분화하여 추가 연구를 지속적으로 수행하고, 열적/구조적으로 안전한 설계 구간을 선정하여 이원추진제 액체로켓엔진에 장착 시 장시간 연소가 가능하도록 촉매 점화기에 대한 연구를 추가적으로 수행할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National

Space Lab)으로 지원받아 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

1. M. Ventura, and P. Mullens, (General Kinetics, LLC) "The Use of Hydrogen Peroxide for Propulsion and Power, 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1999, AIAA-1999-2880
2. 하성업, 권민찬, 서건수, 한상엽, "발사체 추진제로서 과산화수소의 과거와 미래전망," 한국항공우주학회지, 제37권, 제7호, 2009, pp.717-728
3. 김선진, 이양석, 고영성, "친환경 추진제인 과산화수소와 액체메탄의 활용역사와 연구동향," 한국추진공학회지, 제14권, 제3호, 2010, pp.46-58
4. NASA Lewis research center, "CEA(chemical equilibrium with applications)"
5. 김보연, 이양석, 김근철, 고영성, 김유, 김선진, "과산화수소/케로신 단일 인젝터 설계 및 혼합비에 따른 연소특성," 한국추진공학회 춘계학술대회, 2010, pp.81-84
6. 이양석, 전준수, 황오식, 고영성, 김유, 김선진, "친환경 추진제를 이용한 200N급 엔진의 설계 및 성능에 관한 연구," 군사과학기술학회지, 제13권, 제6호, 2010, pp.1180-1187
7. L. Bayvel and Z. Orzechowski, Liquid atomization, Taylor & Francis, 1993