

## 과산화수소 분해열을 이용한 케로신의 자연점화 안정성 조사

조성권\* · 권세진\*\*

### An investigation for autoignition stability of kerosene by heat of hydrogen peroxide decomposition

Sungkwon Jo, Sejin Kwon

#### ABSTRACT

Traditional propellants which have a hypergolic characteristic have a high performance but also have disadvantages of toxicity and complex handling requirement. In order to replace these propellants, one of the alternatives is hydrogen peroxide which generates high temperature oxygen and water vapor after catalytic reaction. In this paper, autoignition characteristics of kerosene by decomposed hydrogen peroxide were investigated to perform fundamental research for designing a thruster using hydrogen peroxide and kerosene propellants. Contraction ratio, whether flame holder exists or not, and feeding pressure of propellants were selected as variables. From the experiments for different mixture ratio, we confirmed the ignition stability is strongly affected by a feeding pressure of propellants.

**Key Words** : Liquid Rocket Engine, Kerosene, Hydrogen peroxide, Autoignition, Flame instability

#### 1. 서 론

기존의 추진제는 성능이 높은 대신 독성이 있으며, 다루기에 매우 어렵고 환경에 유해한 단점을 지니고 있다. 특히 산화제는 대부분이 독성을 지니거나, 저장성이 용이하지 않아 설계에 큰 어려움을 지닌다. 이런 산화제를 대체하기 위해 반응 후 생성물이 수증기와 산소를 발생시키는 친환경 추진제인 과산화수소에 대해 많은 관심과 연구가 진행되고 있다[1]. 특히 과산화수소와 촉매와의 반응은 발열반응으로, 고온의 생성물을 발생시킨다. 이러한 특성을 이용하여 과산화수소를 이용한 이원추진시스템에서는 별도의 점화장치 없이 설계될 수 있다.

점화방식에는 크게 두 가지로 구분할 수 있으며, 연료에 액상의 촉매를 혼합하여 인젝터를 지난 후 과산화수소와 촉매를 포함한 연료를 혼합시켜서 점화시키는 방식[2]과, 과산화수소를

고상의 촉매 반응기에서 반응시킨 후 발생된 고온의 산소와 수증기 유동에 연료를 분사시킴으로써 점화시키는 방식[3]이 있다. 위의 방식 중 후자의 경우 기상의 고온 산화제에 연료를 분사시킴으로써 혼합성능을 증가시키고, 인젝터의 설계 어려움을 크게 줄일 수 있는 장점을 보인다[4]. 이러한 이유로 후자의 방식을 이용한 추진기에 대한 연구되고 있으며, 촉매 분해된 과산화수소를 이용한 점화 특성 연구[3, 5], 낮은 추력의 이원추진시스템 개발을 위한 연구[6] 등이 있다.

인공위성의 자세제어용 추진기의 경우, 추력레벨이 낮아 일반적으로 시스템을 간편히 설계할 수 있는 단일추진시스템을 이용한다. 하지만 추력에 비해 추진제 소모량이 많아 작동시간이 길수록 제약이 커진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 낮은 추력레벨의 이원추진시스템에 대한 연구가 필요하다. 이원추진시스템의 경우 시스템이 복잡하고 비용이 높은 단점을 지닌다. 이를 보완하기 위해 이 논문에서는 촉매반응을 통해 발생된 기상의 고온 산소와 연료와의 혼

\* KAIST 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

\*\* KAIST 기계공학과 항공우주공학전공

합성능이 높은 특징을 이용하였다. 분해된 과산화수소를 이용한 추력기 설계는 높은 비용을 차지하는 연료 인젝터 부분을 상용으로 손쉽게 구할 수 있는 스프레이 분사 방식의 인젝터를 적용하여 설계하였다. 또한 설계된 추력기에 대해서 자연점화 특성을 확인하기 위해 추진제의 가압압력, 수축비와 화염안정기의 유·무에 대해 실험을 수행하였다.

## 2. 추력기 및 실험장치 설계

과산화수소 분해를 위한 촉매로써 이산화망간 촉매를 사용하였다. 또한 촉매지지체로 BET가  $255 \text{ m}^2/\text{g}$ 인 알루미늄 펠렛을 이용하였으며, 성능을 향상시키기 위해 알루미늄 펠렛을 가공하여 12 ~ 16 mesh 크기로 가공하였으며, 직경은 약 1 ~ 1.5 mm였다.

비용의 효율성에 의해 케로신의 공급을 위한 분사방식으로 스프레이형 인젝터를 사용하였으며, 분사각은  $55^\circ$ , 오리피스 직경은 0.3 mm이었다. 케로신의 유량은 인젝터 앞·뒤의 압력차로 계산되어 질 수 있으며, 관계식은 식 (1)과 같다.

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (1)$$

이 때,  $C_d A$  값은 실험적으로 구하였으며, 실험결과 및 선형화에 대한 결과는 Fig. 1에 나타내었다. 그 결과  $C_d A$  값은  $1.52 \times 10^{-7}$ 로 측정되었다.

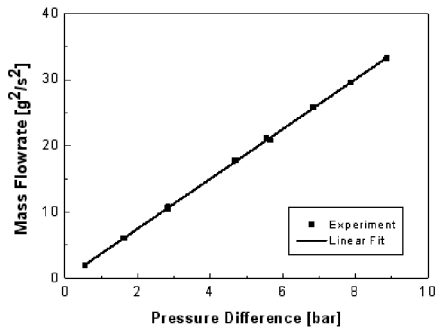


Figure 1 스프레이형 인젝터의 압력 차이에 따른 유량 변화 측정

Figure 2은 실험에 사용된 추력기의 계략도를 나타내었으며, 챔버와 노즐 목의 면적비인 수축비(Contraction Ratio,  $A_c/A_t$ )와 화염안정기의 영향을 알아보기 위해 모듈화하여 설계하였다. 노즐 목의 직경은 5 mm와 6.3 mm의 두 가지

경우에 대하여 실험을 수행하였으며, 이 때 수축비는 각각 16과 10.08이다. 또한 챔버길이는 10 cm로 특성길이는 각각 1.6 m와 1 m이다.

과산화수소는 총 5 s동안 공급되며, 초기 3.5 s는 단일추진제모드, 그 후 1 s동안 케로신을 분사하여 이원추진제모드를 거쳐 점화특성을 확인하였다. 자연점화의 특성을 확인하기 위한 실험이며, 작동시간이 짧기 때문에 별도의 냉각장치는 구성하지 않았다.

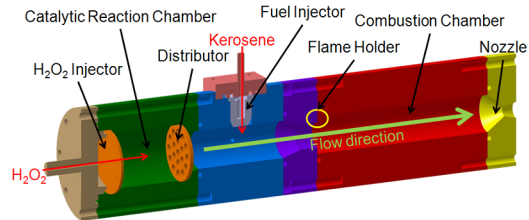


Figure 2  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Kerosene}$  추력기 계략도

## 3. 실험결과

### 3.1 자연점화

분해된 과산화수소를 이용하기 때문에 추력기에는 촉매반응기가 포함되어야 하며, 충분히 과산화수소를 분해시킬 수 있어야 한다. 이를 위해 안 등[7]이 제안한 반응기의 촉매베드 크기 결정 방법을 적용하여 설계하였으며, 촉매 반응기 출구에서의 온도는 약  $700^\circ\text{C}$ 에서 안정화되었다. 단일분해 온도가  $749^\circ\text{C}$ 임을 감안하면, 약간의 성능감소를 보이며, 이는 산화망간 계열의 촉매를 사용할 경우 귀금속촉매의 경우보다 성능이 다소 떨어지기 때문이라고 판단할 수 있다.

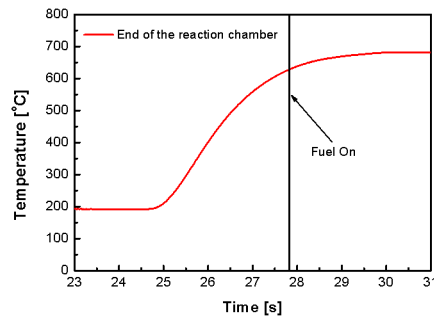


Figure 3 촉매반응기 출구 온도에 대한 그래프;  $\Phi = 1.14$ ,  $CR=16$ , without Flame Holder

Fig. 3에서 촉매반응기 출구에서의 온도를 나

타내었으며, 안정적인 점화를 위해 출구온도가 600 °C 이상이 되는 시점에 케로신을 분사하도록 설정하였다.

과산화수소는 22 bar의 압력조건에서 가압하였으며, 그 보다 낮은 압력조건에서 케로신의 분사압력을 설정한 결과 대부분의 실험조건에서 화염을 관찰할 수 있었다. Fig. 4는 당량비가 1.16인 경우, 시간에 따른 압력을 보여주고 있으며, 점화이후 약 3 bar의 압력이 증가하며, 안정적으로 연소되는 것을 확인할 수 있다.

수축비의 변화에 따라 챔버의 압력은 약 1 ~ 2 bar의 차이를 보였다. 수축비가 16인 경우, 모든 실험조건에서 점화되었으나, 수축비가 10.08이며, 당량비가 0.52인 Fig. 5의 경우에 점화되지 않았고, 이는 챔버압력 감소에 따른 점화실패로 Sisco 등[3]의 실험결과와 유사한 경향을 보인다.

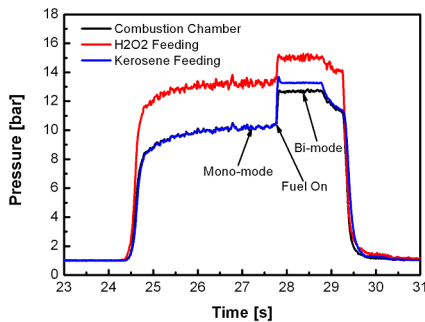


Figure 4 연소챔버 및 추진제의 가압압력에 대한 그래프;  $\Phi=1.14$ , CR=16, without Flame Holder

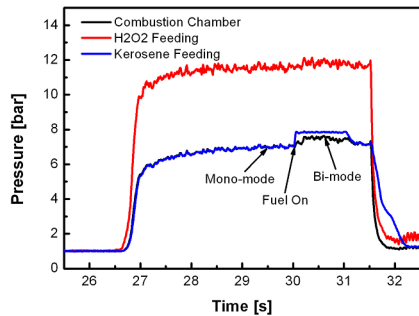


Figure 5 연소챔버 및 추진제의 가압압력에 대한 그래프;  $\Phi=0.52$ , CR=10.08, without Flame Holder

당량비가 1이하인 경우, 화염을 관찰할 수 있었으나, Fig. 6에서 보인바와 같이 화염안정기의 유·무와 관계없이 절반이상의 결과에서 점화 지연 시간이 200 ms 이상으로 증가함을 관찰할 수 있었다. 과산화수소의 가압조건보다 낮은

케로신 가압압력 조건으로, 당량비가 낮기 때문에 연료와 산화제의 혼합이 충분히 이루어지기 위한 시간이 필요하며, 이 경우 점화되는 영역은 인젝터에서 하류방향으로 이동할 것으로 예측된다. 즉, 낮은 반응성과 감소된 특성길이로 성능은 감소할 것이다. 케로신 가압압력을 증가시킬 경우, 분사압력 증가와 함께 당량비도 함께 증가하였다. 실험결과 당량비가 1.51 이상인 경우부터 점화 지연이 최소화할 수 있었으며, 안정적인 화염을 관찰할 수 있었다.

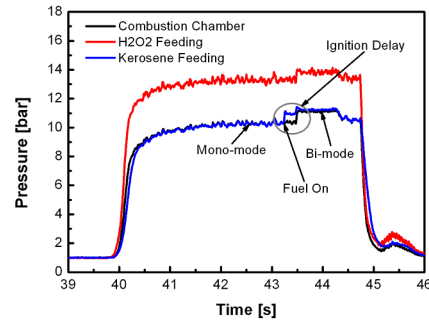


Figure 6 연소챔버 및 추진제의 가압압력에 대한 그래프;  $\Phi=0.56$ , CR=16, Flame Holder

### 3.2 가압압력에 따른 연소안정성

과산화수소의 가압압력이 케로신의 분사압력보다 낮은 조건에서 다양한 당량비에 대하여 실험을 수행하였다.

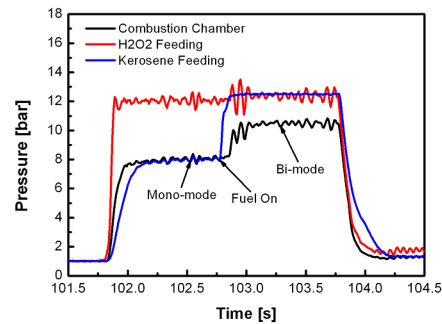


Figure 7 연소챔버 및 추진제의 가압압력에 대한 그래프;  $\Phi=0.97$ , CR=10.08, without Flame Holder

Figure 7에 나타낸 것과 같이, 과산화수소의 가압압력보다 케로신의 가압압력이 거의 동일할 경우, 점화 초기에 화염 불안정성을 보였다. 또한 가압압력의 큰 차이가 없음에도 당량비가 1인 경우 점화 지연을 확인할 수 있었다. 케로신의 가압압력을 증가시킬수록 화염 불안정성은

더욱 뚜렷이 관찰되었으며, 그 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 하지만 당량비가 증가할수록 점화 지연은 최소화되었음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 연료의 가압압력이 증가하면서 높은 압력의 케로신이 분사되면서 산화제의 가압압력보다 높기 때문에 상류에 영향을 미치면서 발생한 것으로 판단되며, 화염안정기와 수축비의 변화와 관계없이 모든 조건에서 불안정성을 보였다.

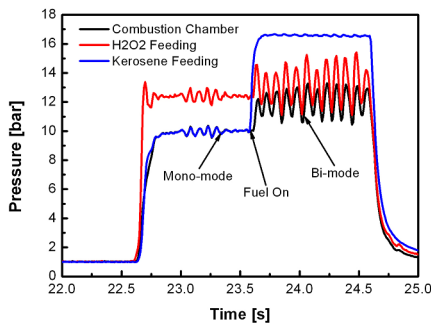


Figure 8 연소챔버 및 추진제의 가압압력에 대한 그래프;  $\Phi=1.65$ ,  $CR=16$ , without Flame Holder

#### 4. 결론

스프레이 타입 인젝터를 이용한 과산화수소/케로신 추력기의 자연점화 특성을 파악하기 위해 화염안정기 유·무와 노즐 수축비의 변화, 추진제들 사이의 압력변화에 대하여 실험을 수행하였다. 그 결과 대부분의 실험조건에서 점화되는 것을 관찰하였다. 하지만 1이하의 당량비에서는 점화지연현상을 확인하였으며, 챔버압력이 7 bar, 당량비 0.52인 경우 점화되지 않음을 확인하였다. 과산화수소 가압압력보다 케로신의 가압압력이 높은 경우에는 화염안정기나 수축비의 조건에 관계없이 모든 실험조건에서 화염 불안정성이 관찰되었다.

당량비의 변화에 따라 낮은 수축비를 갖는 노즐 및 화염안정기의 역할을 확인하기 위한 추가적인 실험을 수행할 예정이다. 이러한 일련의 실험결과는 자연점화를 이용한 과산화수소/케로신 추력기설계의 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

#### 후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사에 뜻을 전합니다. (No.

ROA-2007-000-20065-0)

#### 참고문헌

- [1] Ventura, M., Wernimont, E., Heister, S., Yuan, S., "Rocket Grade Hydrogen Peroxide (RGHP) for use in Propulsion and Power Devices-Historical Discussion of Harzards," 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati, OH, July 2007.
- [2] Yu Cong, Tao Zhang, Tao Li, Jiwen Sun, Xiaodong Wang, Lei Ma, dongbai Liang and Liwu Lin, "Propulsive Performance of a Hypergolic H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Kerosene Bipropellant," Journal of Propulsion and Power, Vol. 20, No. 1, 2004, pp. 83-86
- [3] Sisco, J. C., Austin, B. L., Mok, J. S., and Anderson, W. E., "Autoignition of Kerosene by Decomposed Hydrogen Peroxide in a Dump-Combustor Configuration," Journal of Propulsion and Power, Vol. 21, No. 3, 2005, pp. 450-459
- [4] Wernimont, E. J., "Hydrogen Peroxide Catalyst Beds: Lighter and Better Than Liquid Injectors," 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Tucson, AZ, July 200.
- [5] 박근홍, 임하영, 권세진, "축매 분해된 과산화수소 제트에 분사된 케로신의 자연발화 특성," 제14차 유도무기학술대회, 2007, pp.677-681
- [6] Coxhill, I., Richardson, G., and Sweeting, M., "An Investigation of a Low Cost HTP/Kerosene 40N Thruster for Small Satellites," AIAA Paper 2002-4155, July 2002.
- [7] 안성용, 권세진, "액체추력기 축매베드 크기 결정을 위한 실험적 방법," 한국추진공학회지, 제12권 3호, 2008, pp.24-33