

# 고산소-저기압 환경에서 JET A1 액체연료의 최소점화에너지 측정에 관한 연구

권행준\*, 박설현\*\*,#

\*조선대학교 대학원 기계시스템공학과, \*\*조선대학교 기계시스템·미래자동차공학부

## A Study on the Minimum Ignition Energy Measurements for Liquid Jet A1 Fuel under at Elevated Oxygen Concentrations and Reduced Atmospheric Pressures

Haeng-Jun Kwon\*, Seul-Hyun Park\*\*,#

\*Department of Mechanical System Engineering, Graduate school of Chosun University

\*\*School of Mechanical System & Automotive Engineering, Chosun University

(Received 31 March 2017; received in revised form 10 May 2017; accepted 15 May 2017)

### ABSTRACT

In the present study, the ignition characteristics of liquid fuel were experimentally investigated. To quantify its ignitability as ignition characteristics, the minimum ignition energy (MIE) of liquid fuel was defined and measured under at the elevated oxygen concentrations and reduced atmospheric pressures which that are the most probable conditions likely to be encountered during operation of the space launch vehicle's operating process. The experimental results demonstrate that the measured MIE decreased with the increasing the oxygen concentration at given atmospheric pressures. When the atmospheric pressure was reduced from 1 atm to 0.2 atm at a fixed oxygen concentration, the measured MIE was found to vary with  $P^2$  but the lowest MIE was observed at 0.8 atm.

**Key Words** : Minimum Ignition Energy(최소점화에너지), Liquid Fuel(액체연료), Oxygen Concentration(산소농도), Atmospheric Pressure(대기압)

### 1. 서 론

발사체와 관련된 기술의 이전은 세계 우주강국들이 꺼리고 있을 뿐만 아니라, 한·미 미사일협정이나 MTCR (Missile Technology Control Regime)과 같은 국제규약에 의해 제한을 받는다. 따라서 기

초 데이터의 확보에서부터 설계, 제작에 이르기까지 광범위한 분야에 걸쳐 기술 축적이 독자적으로만 이루어져야 한다. 우리나라 역시 우주발사체 기술개발에 힘쓰고 있고 대표적인 예로 나로호(Korea Space Launch Vehicle-I, KSLV-I)가 있다. 나로호는 3차례 시도 끝에 발사에 성공 하였지만 발사 성공까지 2차례 발사 실패를 겪어야만 했다. 특히 2차 발사 실패는 발사 137초 후 비행 중 폭발사고로 추정되고 있다<sup>[1]</sup>.

나로호에 이어 현재 개발 중인 한국형 발사체

# Corresponding Author : isaac@chosun.ac.kr  
Tel: +82-62-230-7174, Fax: +82-62-230-7171

(Korea Space Launch Vehicle-II, KSLV-II)는 75톤급 액체엔진 4개가 클러스터링(clustering) 되어 1단을 구성하고 75톤급 액체엔진 1기가 2단을 구성하며, 7톤급 액체엔진1기로 3단이 구성되는 3단 액체 로켓이다<sup>[2]</sup>. 1단의 경우 75톤급 액체엔진 4개가 클러스터링 되어있는 만큼 발사 충격, 진동 등으로 인해 연료 및 산화제 라인에서 누설 가능성이 상존한다. 특히 산화제로 사용되는 액체산소(LOx)가 누설되어 기체 상태로 상변화 하면 부피가 급속히 팽창하면 발사체 동체 내부에는 고산소 환경이 조성되어 발화 가능성이 높아질 수 있다.

한국형 발사체의 연료는 등유 계열의 Jet A1이며 발사 충격, 진동 등으로 인해 배관에서 누유 되는 경우 1단 동체 내부의 고온 환경과 결합하여 자연 발화되거나 각종 전기 장치에서 발생할 수 있는 전기 스파크 등으로 인해 폭발 사고로 이어질 수도 있다. 이런 우발적인 폭발사고를 예방하기 위해서 한국형 발사체 1단 동체 내부에는 발사 직후부터 단 분리가 이루어지는 시점까지 불활성 기체인 질소를 연속적으로 충전하여 동체 내부의 산소의 농도를 낮춤으로서 발화 가능성을 줄일 수 있도록 설계되어 있다<sup>[3]</sup>. 아울러, 발사 고도가 상승함에 따라 낮아지는 동체 내부의 압력 역시 발화 가능성을 낮추는 요소이다. 하지만, 이러한 발사체 환경(압력, 산소농도의 변화 등)을 종합적으로 고려하여 액체 Jet-A1 연료의 점화 가능성을 심도 있게 고찰한 연구는 매우 제한적인 실정이다. 따라서 본 연구에서는 발사체 발사 과정 중 1단 동체 내부에서 생성될 수 있는 저기압-고산소 환경에서 연료의 누유로 인한 점화 가능성을 파악해 보고자 관련 실험을 진행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 Jet A1 액체 연료의 점화 특성을 고찰해 보기 위해 제작된 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 그림에 제시되어 바와 같이 10L 연소 챔버와 진공펌프, 점화장치, 광학장치로 구성되어 있다. SUS304 재질의 연소 챔버는 2쌍의 광학창이 각각 평행하게 설치되어 액체 연료의 크기와 점화 과정을 CCD 카메라를 통해 가시화할 수 있도록

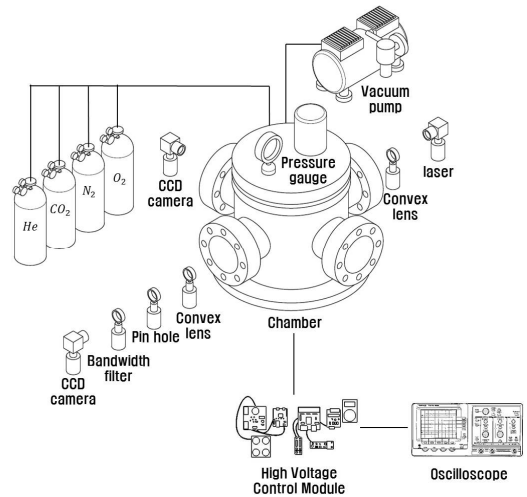


Fig. 1 Schematics of experimental set-up and configurations

제작되었다. 연소 챔버 내 저기압 환경을 조성하기 위해서 최대 24 L/min 유량으로 챔버의 감압이 가능한 진공펌프가 챔버에 연결되어 있고, 가압용기에 저장된 산소(oxygen, O<sub>2</sub>)와 질소 (nitrogen, N<sub>2</sub>) 가스를 공급받아 챔버 내에서 혼합할 수 있도록 하였다. 이때 진공펌프는 작동 시 발생할 수 있는 진동의 영향을 최소화하기 위하여 실험장치로부터 멀리 떨어진 곳에 설치하였다. 또한 연소 챔버의 감압과 가압 시 내부의 압력을 실시간으로 모니터링하고 제어하기 위해서 아날로그 압력계와 디지털 압력계지를 장착하였다.

연소 챔버 내부에는 액체 연료인 Jet A1을 액적의 형태로 불연성 광섬유에 맺히게 할 수 있도록 기구부를 제작하였다. 아울러 Jet A1 액적의 위치, 체적 등을 가시화하고 모니터링하기 위해 Pig-tail 레이저, CCD camera, convex lens 등 여러 가지 광학렌즈로 구성되어 있는 전역 광소멸 장치(full-field light extinction apparatus)<sup>[4]</sup>를 제작하여 설치하였다. Fig. 2는 전역 광소멸 장치를 이용하여 광섬유에 맺힌 Jet A1 액적을 가시화한 이미지이다. 가시화된 액적의 이미지는 디지털 이미지 프로세싱 기법을 이용하여 실시간으로 액적의 지름을 측정하고 지름이 2mm로 유지될 수 있도록 하였다.

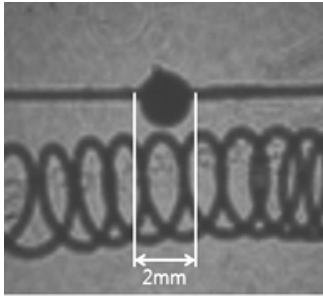


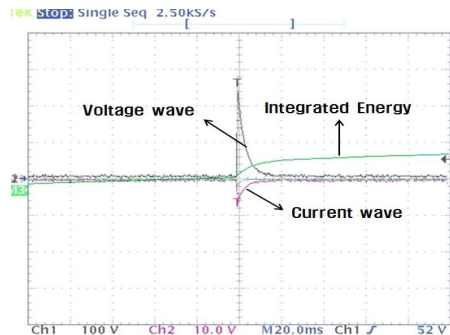
Fig. 2 Light extinction image of Jet A1 droplet deployed on the fiber

점화장치는 DC-DC 컨버터를 통해 12 volt의 직류 전압을 최대 350 volt까지 상승시켜 콘덴서에 충전한 다음 방전 신호를 인가하면 설정된 전압과 전류를 니크롬선에 방전하여 가열시킬 수 있도록 제작하였다. 점화장치에는 총 5개의 콘덴서를 연결하여 충전 전하량을 조정하였으며 고전압이 인가되는 콘덴서는 제어 회로와 분리하여 다른 제어기에 영향을 주지 않게 하였다. 니크롬선은 광섬유 아래쪽에 설치되어 있으며, 모든 실험조건에서 광섬유와 니크롬선의 간격은 항상 동일하게 유지될 수 있도록 조정하였다. 고전압의 방전 시 니크롬선의 단선을 방지하기 위하여 충전전압의 크기에 따라 두께 0.5T의 니크롬선을 10cm에서 15cm 길이로 절단하여 사용하였다.

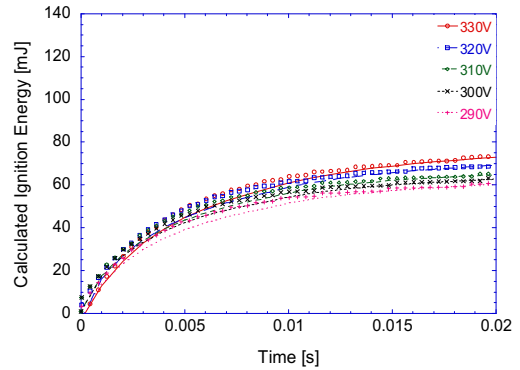
저기압-고산소 환경을 조성하기 위해 진공펌프를 이용하여 연소 챔버를 먼저 진공 상태에 도달할 때까지 감압하고 산소(O<sub>2</sub>)와 질소(N<sub>2</sub>)를 식(1)에 제시된 돌턴의 분압법칙 (Dalton's law of partial pressure)을 이용하여 설정압력에서 산소농도(mole %)가 21 %~40 %로 유지될 수 있도록 하였다.

$$O_2[mole\%] = \frac{P_{O_2}}{P_{O_2} + P_{N_2}} \quad (1)$$

식(1)에서 P<sub>O<sub>2</sub></sub>와 P<sub>N<sub>2</sub></sub>는 각각 연소 챔버 내에서 산소와 질소 가스의 분압을 의미하며 실험이 진행되는 동안 연소 챔버의 설정 전압력은 0.2 atm ~ 1.0 atm으로 유지하였다.



(a) Wave forms captured with time



(b) Integrated wave with respect to time

Fig. 3 Measured voltage, current and integrated waveforms as a function of time

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 점화에너지를 측정하기 위해 니크롬선의 양단에 인가된 전류와 전압을 오실로스코프를 이용하여 측정하였다.

Fig. 3a는 니크롬선에 인가된 전류(*i*)와 전압(*v*)을 오실로스코프를 이용하여 실시간으로 측정한 결과이다. 그림을 통해 획득한 전류와 전압 파형을 식(2)을 이용하여 방전시간(*t*<sub>0</sub>, 0.02s)동안 적분을 수행함으로써 점화에너지, *E*<sub>ign</sub>를 계산하였고<sup>[5]</sup>, 니크롬선에 인가된 전압의 크기에 따라 적분된 결과를 Fig. 3b에 도시하였다. 그림에서 y절편은 방전 시간 동안 적분된 점화 에너지의 결과 값을 의미한다.

$$E_{ign} = \int_0^{t_0} v i dt \quad (2)$$

각각의 실험 조건별로 계산된 점화에너지가 광섬유에 맺혀있는 Jet A1 액체연료로 전달되어 점화가 이루어지는가는 가시화 창을 향해 있는 CCD 카메라를 통해 포착된 영상을 분석하여 화염이 발생된 경우 점화 성공으로 판단하였다.

방전 전압이 낮아 점화가 이루어지지 않은 경우 충전 전압을 높여 반복 실험을 수행 하였고, 이때 최초로 점화가 이루어지는 실험 조건(압력, 산소농도)에서 니크롬선에 인가된 에너지를 최소점화에너지 (Minimum ignition energy, MIE)로 정의하였다.

Fig. 4는 연소 챔버의 압력을 1 atm으로 고정하고 산소 농도를 21% ~ 40%로 증가시켜가며 측정하였을 때 최소점화에너지의 결과를 도시한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 산소농도가 증가함에 따라 측정된 최소점화에너지는 감소하였다. 이러한 결과는 연소챔버 내부에 산소농도가 증가하여 낮은 에너지에서도 산화 열분해(Oxidative pyrolysis)반응이 보다 쉽게 일어나기 때문으로 사료된다.

Fig. 5는 연소 챔버 내부의 압력이 낮아지는 경우 주어진 산소 농도조건에서 측정된 Jet A1 액체연료의 최소점화에너지 결과를 도시한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 대기압보다 낮은 0.8 atm 에서 측정된 최소점화에너지가 가장 낮고 이후

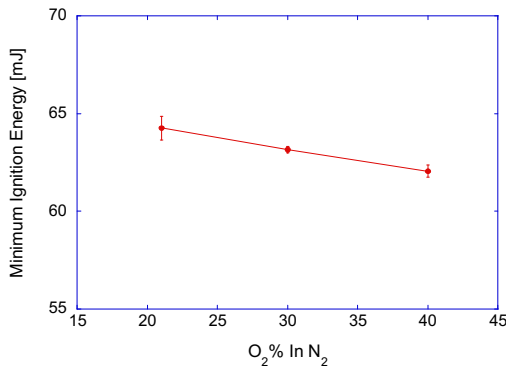


Fig. 4 Measured MIE as a function of oxygen concentration at 1 atm

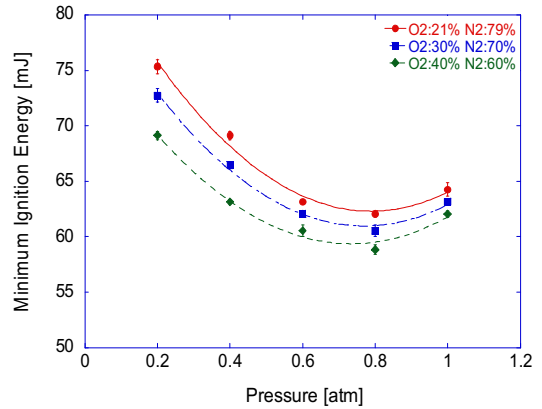


Fig. 5 Measured MIE as a function of ambient pressure for different oxygen concentrations

압력이 감소할수록 최소점화에너지는 급격히 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

Jet A1 액체 연료가 주어진 실험조건에서 증발하여 공기와 섞여 액적 주위에 예혼합 가스를 생성시키는 경우 점화에 필요한 최소점화에너지는 식(3)으로 표현할 수 있다<sup>[6]</sup>.

$$MIE = 61.6P \left( \frac{c_p}{R} \right) \left( \frac{T - T_\infty}{T} \right) \left( \frac{\alpha}{S_L} \right)^3 \quad (3)$$

식(3)에서 각각  $P$ 는 압력,  $c_p$ 는 정압비열,  $R$ 은 기체상수,  $T$ 는 반응온도,  $T_\infty$ 는 주위온도,  $\alpha$ 는 열확산계수,  $S_L$ 은 화염전파속도이다. 점화에너지는 식(3)을 통해 유추해 볼 수 있는 바와 같이 압력과 열확산계수의 상관관계에 의해 크게 영향을 받을 수 있다. Jet A1 액적이 증발하여 주위에 생성된 기체가 연물을 이상기체로 가정하면, 압력과 밀도 사이의 반비례 관계는 점화원에서 발생된 에너지의 열확산에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다. 아울러 식(3)의 분모 항에 포함되어 있는 화염전파속도 역시 압력의 변화에 반비례하는 화염 두께로 인해 크게 영향을 받게 된다. 결국, 화염 전파속도와 열확산계수의 압력 의존성으로 인해 점화에너지는 식(4)와 같은 상관성을 갖게 된다<sup>[6]</sup>.

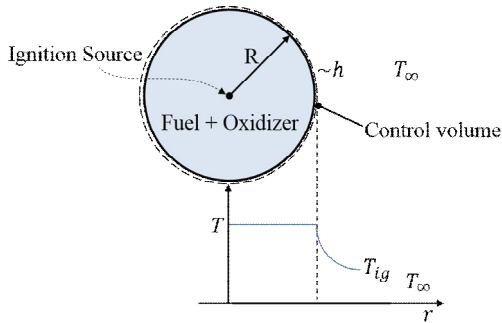


Fig. 6 Schematics of thermal ignition mechanism

$$MIE \sim P^{-2} \quad (4)$$

Fig. 5에서 측정된 최소점화에너지는 식(4)에 제시된 압력 상관성과 유사하게 압력이 감소할수록 급격히 증가하지만, 앞서 기술한 바와 같이 대기압보다 낮은 0.8 atm에서 가장 낮은 최소점화에너지가 측정되었다. 이와 같이 압력에 감소에 따라 증감하는 최소점화에너지의 변화를 분석하기 위해 강제 점화 해석 모델<sup>[7]</sup>을 Fig. 6와 식(5)를 통해 살펴보았다.

점화원으로 부터 강제 점화(Pilot ignition)가 일어나기 위해서는 식(5)에 제시된 것처럼 연소반응으로 인해 발생하는 에너지 생성율,  $\dot{m}_F'''\Delta h_c V$  이 손실로 사라지는 에너지 소모율보다 커야 한다.

$$\rho V C_p \frac{dT}{dt} = \underbrace{\dot{m}_F'''\Delta h_c V}_{\text{gain}} + \underbrace{\dot{q}'' V - hS(T - T_\infty)}_{\text{loss}} \quad (5)$$

식(5)에서 각각  $\rho$ 는 밀도  $V$ 는 체적,  $\dot{m}_F'''$ 는 액체 연료의 질량소모율,  $\Delta h_c$ 은 연소열,  $h$ 는 대류열전달 계수,  $S$ 는 표면적을 의미한다. 식(5)를 통해 드러나는 바와 같이 액체 연료의 점화에너지 크기는 액적 표면으로 부터의 증발현상과 밀접한 관련이 있다. 선행 연구<sup>[8]</sup>의 결과에 의하면 절대압력이 낮아지면 증기-가스 혼합물과 주위 가스와의 밀도 차로 인해 발생하는 부력과 물질 확산이 증가하여 액체 표면을 통한 증발이 촉진되는 것으로 보고되고 있다. 따라서 연소 챔버 내 압력이 낮아져 액적 주위에

증발된 연료가 증가하면 당량비가 영향을 받을 것으로 판단해 볼 수 있다. 특히 대기압 보다 낮은 0.8 atm에서 생성된 연료-공기 예혼합 가스는 이론 공연비에 가까워서 작은 에너지로도 점화가 가능하지만, 압력이 더 감소함에 따라 농후해지는 예혼합 가스의 점화에 더 많은 에너지가 소요되는 것으로 판단된다<sup>[6]</sup>. 하지만 절대압력 감소하는 경우 액체 연료의 점화현상은 본 연구에서 살펴본 바와 같이 액체의 증발, 물질 확산, 부력 등의 변화와 같이 여러 가지 물리적 변화를 동반하게 되므로 심화 연구를 통해 체계적인 분석이 필요한 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 발사체 1단 동체 내부의 대표적인 연소 환경인 저기압-고산소 조건에서 발생할 수 있는 Jet A1 액체연료의 점화특성을 고찰해 보고자 최소점화에너지 측정실험을 진행하였다. 발사고도 상승 시 산화제의 누설 사고로 인한 발사체 1단 동체내부에서 점화환경을 모사하기 위해 연소 챔버 내부의 압력은 낮추고 산소농도를 최대 40%까지 증가시켜 점화실험을 진행하였고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 연소 챔버 내부의 압력이 일정한 경우 챔버 내 산소농도가 21%에서 40%로 증가할수록 최소점화에너지는 선형적으로 감소한다.
2. 연소 챔버 내부의 산소농도가 일정하게 유지되는 경우 대기압 이하로 압력이 감소하면 최소점화에너지(MIE)는 0.8 atm에서 가장 낮으며, 그이하의 압력, P에서는 다음과 같은 상관관계를 갖는다.  
$$MIE \sim P^{-2}$$
3. 연소 챔버 내부의 압력이 대기압에서 0.8 atm 범위에서 최소점화에너지가 감소하는 이유는 액체가 증발되어 생성되는 예혼합 가연 가스와 산화제와의 당량비와 관련이 있는 것으로 판단되며 이에 대한 심화 연구가 필요하다.

## 후 기

“이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2014R1A1A1002184).”

## REFERENCES

1. Cho, G. R., “The Launch Progress of NARO Space Launch Vehicle”, Proceeding of 2012 fall conference, The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, pp.232, 2012.
2. Lee, H. J. and Oh, S. H., “KSLV-II 1st Stage Clustered Engine Arrangement Concept” Aerospace Engineering and Technology, Vol. 11, No.1, pp.78-83, 2012.
3. Ko, J. Y, and Oh, T. H. and Lee, J. H., "Analysis on the Test Result of the Fire Prevention System Development Model for Space Launch Vehicle." 2016 KSPE Spring Conference, pp. 936-940. 2016.
4. Park, S. H., Choi, S. C., Choi, M. Y. and Yozgatligil, A., "New Observations of Isolated Ethanol Droplet Flames in Microgravity Conditions", Combustion Science and Technology, Vol. 180, pp.631-651, 2008.
5. Zhong, S., Li, X., Lu, L., Ren, C. and Wang, Z., “Experimental Investigation on Measurement of Spark Discharge Energy Using Integration Method”, Procedia Engineering, Vol 15, pp.2690-2694, 2011.
6. Turns, S. R., “An Introduction to Combustion”, McGraw-Hill, 1999.
7. Quintiere, J. G., “Fundamentals of Fire Phenomena”, John Wiley & Sons Ltd., 2006.
8. Kelly-Zion, P. L., “Experimental Study of Transport Phenomena of Evaporating Fuel Films”, 57<sup>th</sup> Annual Report on Research 2012, 50161-UR9, 2012.