

## 액체로켓엔진 분사기의 화염 및 동적 특성 연구

송주영\* · 이광진\* · 서성현\* · 한영민\* · 설우석\*

### A Study on Flame and Dynamic Characteristics of Injectors in Liquid Rocket Engine

Ju-Young Song\* · Kwang-Jin Lee\* · Seonghyeon Seo\* · Yeoung-Min Han\* · Woo-Seok Seol\*

#### ABSTRACT

The objective of the present study is to conduct model combustion tests for various injectors to identify their combustion stability characteristics. Three different double swirl coaxial injectors with variation of a recess length have been tested for the comparative study of CH flame structure and dynamic characteristics. Gaseous oxygen and mixture of gaseous methane and propane have been employed for simulating actual propellants used for a full-scale thrust chamber. Upon test results, the direct comparison between various types of injectors can be realized for the selection of the best design among prospective injectors.

**Key Words** : 연소 안정성 (Combustion Stability), 모델 시험 (Model Test), 액체 로켓 (Liquid Rocket), 이중 와류 동축형 분사기 (Double Swirl Coaxial Injector), 화염 이미지 (Emission Image)

#### 1. 서 론

연소 불안정은 액체로켓엔진 개발 중에 발생할 수 있는 여러 가지 기술적 문제 중에 그 현상의 복잡함으로 인해 그 해결 방법이 매우 난해한 것이라 할 수 있다[1].

연소 불안정의 예측 방법 및 해결 방법에 대한 연구는 꾸준히 그리고 매우 다양하게 진행되어 왔으나, 불행하게도 연소 불안정 현상 자체의 복잡함에 의해 현재도 그 이해의 수준이 매우 낮으며 특히 개별 연소기에 대한 예측 방법이 거의 전무한 상태라 해도 과언이 아니다. 현재까지는 단순하게 연소기 내부에서 발생하는 연소 불안정 억제에 대한 전반적인 설계 지침 정도가 존재할 뿐 실제 크기의 연소기를 설계, 제작하였을 시에 나타날 수 있는 연소 현상에 대한 예측 방법은 없다. 언급한 바와 같이 이전 사례를 보면 실제

크기의 엔진이 설계되고 제작된 후 연소 안정성 문제가 거론되는 일들은 드물지 않게 발생하였으며, 결과적으로 엔진 개발의 일정상, 비용상 매우 나쁜 영향을 초래하게 되었다.

액체 로켓 엔진 개발에 있어서 실제 연소기에서 발생할 수 있는 현상들을 모사하기 위한 모델 시험은 매우 다양하게 진행되어 왔으며, 그 가운데 연소 불안정 특성 예측 및 해결 방안 모색을 위한 모델 시험이 구상되었다[2,3,4]. 본 연구에서는 분사기의 안정성을 평가하기 위한 방법으로 동압 특성과 함께 ICCD 카메라를 이용한 화염 이미지 해석 방법을 연구를 통해 새롭게 정의 및 분석하였다.

#### 2. 시험 방법

##### 2.1 개요

본 연구에서는 실제 추진제가 아닌 기체 연료 및 산화제를 사용하여, 대기압 조건에서 모델 연소실 내에서 열 발생과 결합하여 자발적으로 발생하는 음향 특성과 CH 화염 이미지 결과를 제시하였다. 실제 액체로켓엔진의 연소 시험에서

\* 한국항공우주연구원 엔진그룹

† 연락처, jysong@kari.re.kr

형성되는 연소압이 형성되지 않고 모의 추진제를 사용한다는 점에서 실제 연소 시험의 결과와 같다고 할 수 없지만, 기하학적 상사와 물리적 가정을 도입하여 실제 대상과 가장 유사한 모델 시험을 구축할 수 있다. 본 모델 시험이 실제 연소 조건을 상사한다고 간주할 수 있는 기본적인 물리적 가정은 연소기내에서 형성되는 열 발생을 지배하는 물리적 현상은 혼합 과정(mixing process)이라는 것이다[4,5]. 특히 본 연구에서 모사 대상으로 설정한 연소기와 같이 연소실 내의 압력이 추진제의 임계 압력을 초과하였을 시에는 연소실내로 분무되는 액적의 상을 분간할 수 없기 때문에 액적을 기화 메커니즘보다는 혼합 과정이 연소 현상에 영향을 미치는 주요 메커니즘이 된다고 가정할 수 있다.

이와 같은 가정 하에 모델 연소실에서 형성되는 공진 주파수가 실제 연소기에서 발생할 수 있는 음향 조건과 동일하도록 설정하며, 또한 유사한 추진제 유량 공급 조건을 위해 기체 추진제의 밀도비와 유량비가 실제 액체 추진제의 값과 같도록 모델 시험 조건을 설정하였다[6]. 이 시험조건 중에서 8개의 영역을 선정하여 시험을 수행하였다.

2.2 시험 장치

모델 연소 시험에 사용한 장치의 개략도와 사진을 Fig. 1과 2에 나타내었다. 산화제로는 기체 산소, 연료로는 메탄과 프로판을 혼합한 기체를 사용하였다. 각 모사 추진제의 유량은 MKS사의 유량계를 통해 측정되며, 유량 조절은 니들 밸브를 이용하였다. 연료와 산화제는 단일 분사기 헤드의 매니폴드로 유입되게 된다. 단일 분사기 헤드는 하나의 분사기를 장착하고 있으며, Fig. 2에 보이는 test bed에서 탈부착이 용이하게 설계되었다. 각 매니폴드 및 주요 부위에서 온도와 압력이 측정되며, 연소실 내부에서 발생하는 동압 신호 측정을 위해 동압 센서가 연소실 측면에 동일한 축방향에서 원주 방향으로 135도 간격을 두고 장착되었다. 시험 자료는 Dewetron 사의 데이터 저장 기록 장치를 통하여 각 유량 조건에서 3초 동안 데이터를 측정하여 하나의 분사기에 대해 8개의 데이터 셋을 저장하여 후 처리를 수행할 수 있도록 하였다. 화염 이미지는 모델 연소실 옆의 quartz window를 통해 가시화 되고, Princeton Instrument 사의 PI-MAX ICCD 카메라에 430nm CH filter를 장착하여 화염 이미지를 촬영하였고 Matlab으로 후 처리를 수행하였다.

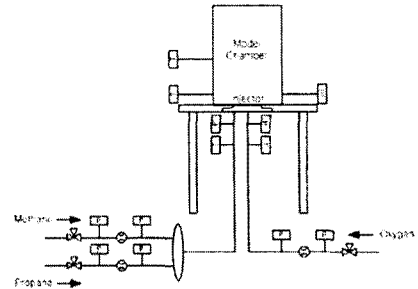


Figure 1. Schematic of test apparatus

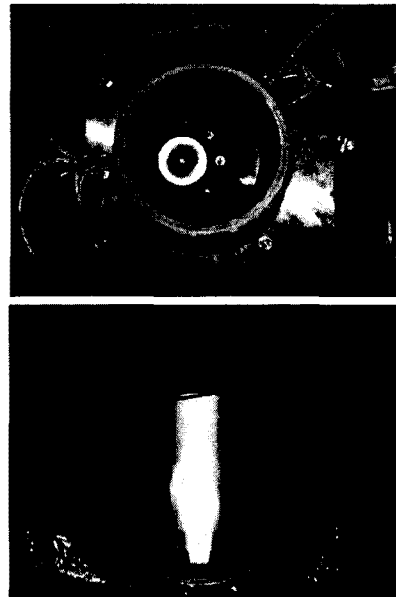


Figure 2. Test bed and quartz window

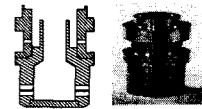


Figure 3. Uni-element injector

Table 1. Specification of injectors

Injector	A	B	C	Unit
$P_a(LOx/fuel)$	10.4/10.4			bar
$2\alpha$	65/120			deg
$d_{nozzle}$	4.1/8.1			mm
$n_o$	8/4			EA
$d_o$	1.75/1.05			mm
$L$	6.4	3.2	1.9	mm
$RN$	2.0	1.0	0.6	-

## 2.3 분사기

본 모델 시험에 사용한 동축 스윙 분사기는 최적 설계가 진행되었을 때 다른 유형의 분사기에 비해 상대적으로 효과적인 연소 효율 및 안정성을 보이는 장점을 가지고 있다[5]. 연료가 외곽, 산화제가 내부에서 와류를 형성하며 분사되는 이중 와류 분사기 형태를 가지고 있으며 Fig. 3에 보이는 바와 같다. 동축형 분사기에 의한 화염 특성에 큰 영향을 미치는 여러 설계 인자 중에서 함몰(recess) 길이가 있다. 본 연구에서는 Table 1에서와 같이 세 가지의 각기 다른 함몰 길이를 가지는 단일 분사기 헤드를 적용하여 모델 연소 시험을 수행한 결과 및 토론을 수록하였다.

## 3. 시험 결과

### 3.1 동압 특성

유량 조건 변화에 따른 연소실 내에서 측정된 동압의 시간에 따른 변화 그래프는 Fig. 4에 보이는 바와 같다. (a)의 경우, 연소실 내의 압력 섭동이 거의 존재하지 않고 연소가 안정적임을 알 수 있다. (b)의 경우 연소실 내부의 열발생과 음향 특성과의 결합으로 압력 섭동이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 시간에 따른 진폭의 변화가 있음을 볼 수 있다. (c)의 경우 동압의 크기가 더욱 커지고 시간에 따른 압력 섭동의 진폭이 변화하고 있음을 볼 수 있다.

각 분사기의 설계점에 대한 동압의 rms값을 Fig. 5에 나타내었다. 세 개의 분사기를 비교해보면 함몰 길이의 변화에 따른 분사기의 연소 안정성 특성은 변화하고 함몰 길이가 길어질수록 불안정성이 커지고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 화염 구조

각 분사기에 대한 평균화된 CH 화염 이미지에 대한 결과 중 설계점(DP)에서의 결과를 Fig 6~8에 나타내었다. 하나의 이미지는 비대칭이므로 각 조건에 대해 50개의 이미지를 촬영하여 평균화하여 역시 10개의 이미지를 평균한 background 이미지로 감산하는 처리를 하였다. 이 이미지는 대칭적이고, Abel 변환을 적용할 수 있다 [7,8,9]. 평균화된 CH 화염 이미지를 Abel 변환하여 CH intensity 분포를 구할 수 있으며 Fig. 9에 보이는 바와 같다. 또한 설계점에서의 축방향에 대한 intensity 합을 Fig. 10에 나타내었다. 각 축은 분사기 연료 노즐 반경  $r_f=4.05\text{mm}$ 로 나누어 무차원화 하였다.

분사기 A에 대한 화염 이미지를 살펴보면, 같은 O/F ratio에서 산소 유량을 증가할수록 intensity 길이가 증가하고 화염이 축방향으로 넓

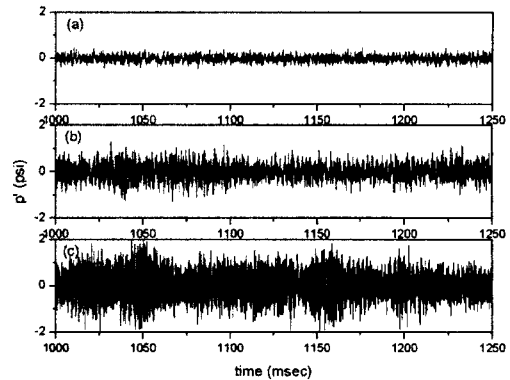


Figure 4. Typical time traces of dynamic pressure in the chamber

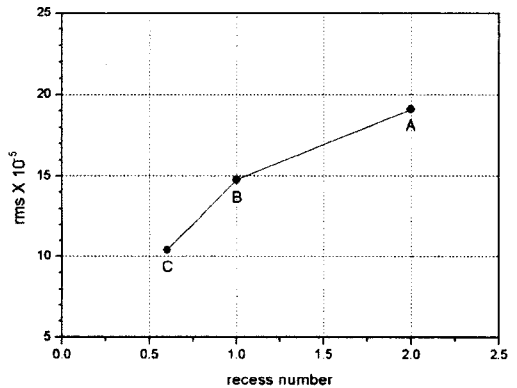


Figure 5. Dynamic pressure fluctuations as a function of a recess number

게 분포하였다. 그리고 O/F ratio가 증가하면 분사기 출구 면에서 연소가 이루어지는 것을 볼 수 있었다. Intensity 분포를 살펴보면 분사기 출구면 부근에서 같은 O/F ratio일 때 산소 유량을 증가시킬수록 intensity가 증가하였으며, 분사기 출구 면에서 멀어질수록 intensity 분포가 비슷한 경향을 나타내었다. 즉 유량 조건이 변화어도 화염구조가 일정하였다. 이 분사기는 내부 혼합(internal mixing)을 나타내는 분사기로 혼합이 내부에서 이루어지고 스윙에 의한 반경 방향 성분은 감소되어 축방향으로 일정한 화염구조를 나타낸다고 볼 수 있다.

분사기 C는 분사기 출구면 부근에서 높은 intensity를 가지며 화염이 반경 방향으로 넓게 분포하는 것을 볼 수 있었다. O/F ratio가 증가할수록 산소의 모멘텀이 커서 화염이 안쪽으로 향하는 경향을 나타내었다. 이 분사기는 외부 혼합(external mixing) 특성을 나타내는 분사기로 산화제와 연료의 스윙에 의한 반경 방향 속도 성분이 분사기 내에서 감소되지 않고 분사기 출구

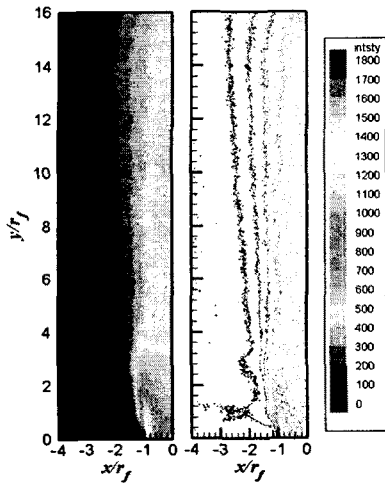


Figure 6. Averaged CH flame image of injector A

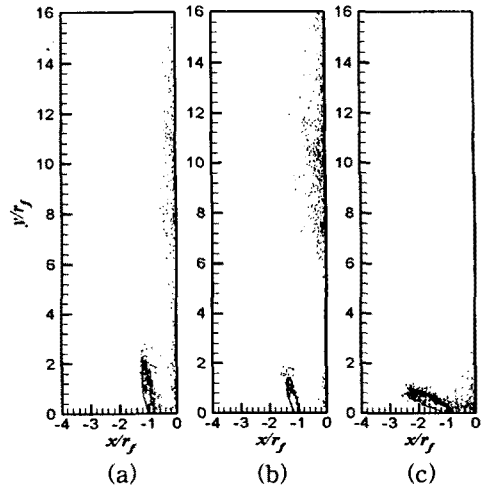


Figure 9. Abel-transformed CH intensities of (a) injector A, (b) B and (c) C

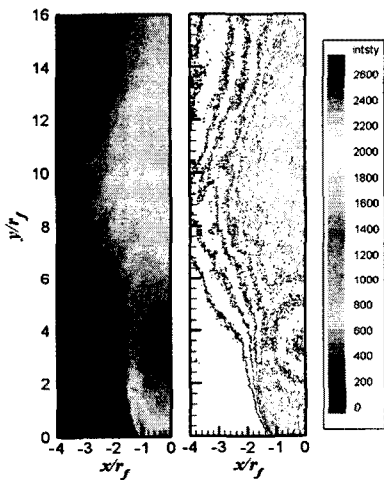


Figure 7. Averaged CH flame image of injector B

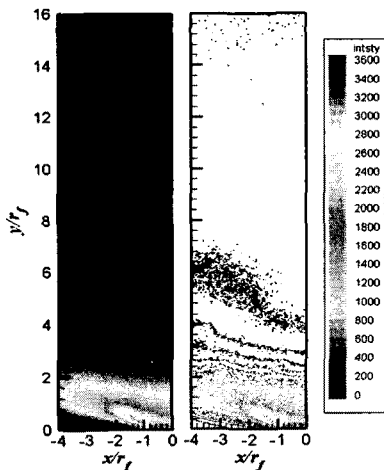


Figure 8. Averaged CH flame image of injector C

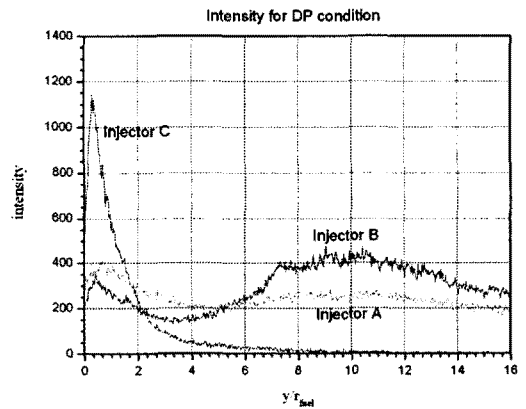


Figure 10. CH intensities for DP condition

이후 반경 방향으로 넓게 화염이 분포하는 것으로 생각할 수 있으며, 출구 면 부근에서 혼합이 이루어지므로 intensity가 다른 분사기에 비해 큰 것으로 볼 수 있다.

분사기 B는 화염이 반경 방향으로 넓고 축방향으로 길게 분포하는 경향을 나타내었다. 같은 O/F ratio일 때 산소 유량이 증가하면 분사기 출구 면의 intensity 분포가 길어지는 것을 볼 수 있었다. 그리고 O/F ratio가 증가하면 산소 모멘텀의 증가로 화염이 안쪽으로 향하는 경향을 나타내었다. 이 분사기는 내부 혼합과 외부 혼합의 경계에 있는 분사기로 저O/F ratio와 낮은 산소 유량에서는 외부 혼합 특성을 나타내고, 고O/F ratio와 높은 산소 유량에서는 내부 혼합 특성을 나타내는 것을 볼 수 있었다.

내부 혼합은 연료와 산화제 각각의 주파수가 내부에서 중첩되어 하나의 특정한 주파수를 가지며 일정하게 유지된 상태로 연소실로 들어가게

된다. 이 특정 주파수가 연소실 내부의 열발생과 결합하게 되어 불안정성으로 이를 수 있는 특성을 가지게 된다. 반면에 외부 혼합은 연료와 산화제 각각의 주파수가 외부에서 혼합되기 전에 압력 섭동이나 외부 환경 등에 의해 랜덤한 값으로 변하며 변화가 크다. 그리고 혼합 영역이 공간적으로 넓게 분포하고 있다. 이로 인해 혼합시 발생하는 특정한 주파수는 일정하지 않으며 변화 폭이 크게 된다. 따라서 연소실 내부의 열발생과 결합하여도 불안정성으로 쉽게 천이되지 않게 된다[10].

#### 4. 결론

다양한 분사기들의 화염 구조 및 동적 특성을 확인하기 위해 모델 연소 시험을 수행하였다. 다른 모든 조건이 동일한 경우 합물 길이가 변경된 세 가지 경우의 이중 와류 동축형 분사기에 대해 동적 특성 및 화염 구조를 비교 분석하였다. 합물 길이가 커질수록 불안정성이 넓게 분포하며 연소 안정성 여유가 줄어든다는 것을 볼 수 있었으며, 내부 혼합과 외부 혼합에 대한 화염 특성을 볼 수 있었다.

단일 분사기에 대한 탈설계점 시험, 다중 분사기를 장착한 헤드를 적용한 시험 결과 및 동일한 분사기를 적용한 fullscale 연소기 시험 결과를 포함하여 전반적인 연소 안정성 특성에 대한 비교 분석이 수행되고, 예측 및 해결 방법 등이 이루어진다면 향후 액체로켓엔진 연소기의 안정성 측면에 많은 도움이 되리라 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] Yang, V. and Anderson, W. E.(eds.), "Liquid Rocket Engine Combustion Instability," Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 169, 1995
- [2] Fisher, S. C, Dodd, F. E., and Jenson, R. J., "Scaling Techniques for Liquid Rocket Combustion Stability Testing," Chapter 21, Liquid Rocket Engine Combustion Instability, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 169, 1995
- [3] Pikalov, V. P., Shibanov, A. A., Narizhny, A. A., Agarkov, A. F., and Nedashkovsky, A. K., "Studies of the Combustion Stability to Acoustic Oscillations Using KARI Injectors of Basic Configuration under Model Operation Conditions," Progress Report of KARI-00-14, Phase 2, PART C, January, 2001
- [4] Dexter, C. E., Fisher, M. F., Hulk, J. R., Denisov, K. P., Shibanov, A. A., Agarkov, A. F., "Scaling Techniques in Liquid Rocket Engine Combustion Devices Testing," the 2nd international symposium on liquid rocket engines, Paris, 1995
- [5] Natanzon, M. S., "Combustion Instability," Mashinostrojenie, Moscow, 1986
- [6] 서성현, 이광진, "분사기의 연소 안정성 평가를 위한 실험적 방법 연구," 한국항공우주학회지, 제32권, 제4호, pp.61-66, 2004
- [7] B. Ivancic and W. Mayer, "Time- and Length Scales of Combustion in Liquid Rocket Thrust Chambers," Journal of Propulsion and Power, Vol. 18, No. 2, pp.247-253, 2002
- [8] Gerald Herding, Ray Snyder, Carlos Rolon, and Sebastien Candel, "Investigation of Cryogenic Propellant Flames Using Computerized Tomography of Emission Images," Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 2, pp.146-151, 1998
- [9] M. Chimenti, C. Di Natali, G. Mariotti, E. Paganini, G. Pieri, O. Salvetti, "An IR image processing approach for characterising combustion instability," Infrared Physics & Technology, Vol. 46, Issues 1-2, pp.41-47, 2004
- [10] 서성현, 한영민, 이광진, 김승환, 설우석, 이수용, "연소 조건하의 동축형 분사기의 동적 특성 고찰," 제23회 한국추진공학회 추계학술대회, pp.282-287, 2004