

내부혼합 동축 와류형 분사기를 장착한 액체로켓엔진용 축소형 연소기의 연소시험

한영민* · 이광진* · 임병직* · 최환석*

Combustion Tests of Sub-scale Combustor for a Liquid Rocket Engine with Internal Mixing Swirl Injector

YeoungMin Han* · KwangJin Lee* · ByoungJik Lim* · HwanSeok Choi*

ABSTRACT

The combustion test results of the sub-scale combustor having dual swirl injector with internal mixing for a liquid rocket engine are described. The sub-scale combustor uses liquid oxygen(LOx) and kerosene as propellants and has an injector head, an ablative material combustor wall and a water cooled nozzle. The injector head has LOx manifold, fuel manifold, fire face plate, one center swirl injector and 18 main swirl injectors of internal mixing. The combustion tests were successfully performed at design and off-design points without any damages on the injectors. Combustion characteristics velocity of 1756m/s was measured at design point. High frequency combustion instability was not observed but low frequency pulsations occurred at off-design conditions.

초 록

액체로켓엔진용으로 내부혼합 동축 와류형 분사기를 장착한 축소형 연소기에 대한 설계 및 연소시험 결과를 기술하였다. 추진제는 액체산소 및 케로신이며 연소기는 분사기 헤드, 삭마냉각방식의 연소실 그리고 물냉각 노즐부로 구성되어 있다. 분사기 헤드는 액체산소 매니폴드, 연료 매니폴드, 중앙 분사기 그리고 내부혼합 형태의 18개 분사기로 이루어졌다. 축소형 연소기 연소시험은 성공적으로 이루어졌으며, 분사기의 손상이 발생하지 않았고 연소특성속도는 설계점에서 1756 m/sec을 나타내었다. 고주파 연소불안정은 나타나지 않았지만 탈설계점에서 압력의 저주파 섭동이 기준치를 넘는 결과를 보여 주었다.

Key Words: Swirl Injector(와류형 분사기), Internal Mixing(내부 혼합), Sub-scale Combustor(축소형 연소기), Recess Number(리세스 수), Combustion Efficiency(연소 효율)

† 2007년 8월 6일 접수 ~ 2007년 10월 7일 심사완료

* 종신회원, 한국항공우주연구원 연소기팀
연락처, E-mail: ymhan@kari.re.kr

우주발사체에 사용될 액체로켓엔진은 신뢰도 및 성능이 우수해야 발사비용 감소와 발사 신뢰도를 증가시켜 발사체 시장 경쟁력을 가질 수 있다. 액체로켓엔진의 성능을 좌우하는 인자가 여러 가지 있지만 엔진 연소기에서의 연소성능은 엔진의 비추력을 결정하는 매우 중요한 인자이다. 연소성능 뿐만 아니라 연소시의 연소안정성 또한 연소기 개발에서 고려해야 한다[1].

연소기에서 연소 효율 및 연소안정성에 영향을 가장 크게 미치는 부품은 분사기로서 추진제를 연소실로 보내면서 액적으로 분사시켜 연소를 일어나게 하는 역할을 한다[1]. 액체로켓엔진 연소기를 개발하면서 초기에는 여러 가지 분사기를 선택하여 이에 대한 검증은 수행한 후 분사기를 선택하거나 기존의 검증된 분사기에서 약간의 수정을 거쳐 새로 개발하고자 하는 연소기의 분사기로 선택하는 경우가 대부분이다. 분사기를 검증하는 데에는 여러 단계가 있는데 단위분사기 수류시험, 연소시험 및 축소형 연소기에서의 연소시험, 그리고 최종적인 실물형 연소기에서의 연소시험 등이 있다. 실물형 연소기에서의 검증은 제작 비용, 연소시험 비용 및 위험 부담이 매우 크기 때문에 단위분사기 및 축소형 연소기를 통해 다양한 검증과정을 거치는 것이 비용 및 개발 기간 측면에서 매우 유익하다. 다중의 분사기를 포함하는 축소형 연소기의 경우 실물형 연소기내에서 분사기 간의 상호간섭, 분사기들의 대표적인 배열, 연소 효율, 연소기의 냉각 그리고 고차의 연소안정성 등을 모사 가능토록 제작할 수 있으므로, 축소형 연소기에서 얻은 성능 및 연소안정성으로 실물형 연소기에서의 기본 성능을 파악 및 유추할 수 있다.

본 연구에서 사용된 분사기는 단위분사기 개발단계에서 성능을 검증한 분사기 중 연소효율과 섭동 그리고 차압조건을 만족하는 등축 와류형(swirl) 분사기이다[2]. 본 논문에서는 내부 혼합 분사기 설계, 축소형 분사기 헤드 및 연소실 그리고 물냉각 노즐부에 대한 제작, 설계점/탈설계점 연소시험에 대한 결과 등을 포함하고 있다. 본 결과는 여러 축소형 연소기 시험결과 중 하

나로 다른 축소형 연소기의 연소시험 결과들과의 비교 검증을 통해 실물형 연소기를 설계하는데 활용될 것이다.

2. 축소형 연소기 설계 및 제작

2.1 축소형 연소기 규격

축소형 연소기는 앞서 설명한 바와 같이 실물형 연소기의 성능 등을 예측 가능토록 제작해야 하기 때문에 실물형 연소기의 분사기 배열 및 유량을 고려하여 규격을 정하였다[3]. 축소형 연소기의 압력은 실물형 연소기와 동일하게 52.5 bar, 혼합비는 실물형 분사기와 동일하게 2.77이다. 하나의 분사기 유량은 실물형에서와 동일하고 실물형 연소기의 분사기 배열을 모사하도록 중앙 분사기를 포함하여 19개를 선택하였다. 축소형 연소기의 유량은 분사기 19개에 공급되는 유량에 해당하고, 이는 실물형 연소기의 유량의 약 7%인 6 kg/sec이다. Table 1에 축소형 연소기에 대한 상세 규격을 제시하였다.

Table 1. Design parameters of sub-scale combustor

항목	값	단위
연소압	5.25	MPa
혼합비(O/F)	2.77	
전체 유량	6.01	kg/s
산화제 유량	4.42	kg/s
연료 유량	1.59	kg/s
연소실 직경	108	mm
노즐목 직경	49.8	mm
축소비	4.7	
잔류시간	2.20	msec
노즐목까지의 연소실길이	368	mm

2.2 축소형 연소기 분사기 헤드

분사기 헤드는 산화제 및 연료를 공급배관에서 연소실로 보내면서 분사기에 균일하고 안정적으로 보내는 역할을 하는 추진제 매니폴드, 교환이 가능한 중앙 분사기, 산화제 및 연료를 분무/혼합한 후 효율적인 연소가 일어나게 하는 18개의 주 분사기, 추진제 매니폴드와 연소실을

분리하고 냉각을 담당하는 face plate, 센서측정부 등으로 구성되었다. 추진제의 매니폴드 체적은 산화제의 경우 공급하는 유량 체적의 2.7%, 연료의 경우 14.3%로 설계하여 연소기 점화 및 종단시 퍼지에 의해 연소실 압력이 갑자기 상승하는 것을 억제하고 연소실에 고온이 생성되지 않도록 하였다.

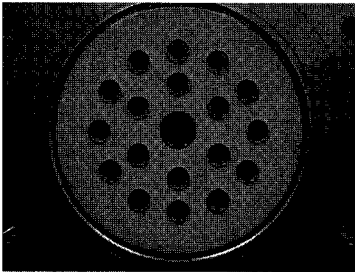


Fig. 1 Photo of injector face plate

분사기 헤드는 1개의 중앙 분사기, 18개의 주 분사기로 구성되어 있는데, 1열에 6개의 분사기 2열에 12개의 주 분사기를 배치시켰다. 중앙 분사기는 연소기 점화 초기 다른 분사기보다 먼저 추진제가 공급/연소되어 약 4~5 bar의 연소실 압력을 형성한 다음, 다른 18개 분사기로 추진제가 공급될 때 점화를 도와 연소기의 초기 점화가 부드럽게 하는 역할을 한다. 또한 점화 성능을 높이기 위해 규격이 다른 분사기 및 배플 분사기 등의 성능시험을 위해 탈착이 가능하도록 설계/제작하였다. 분사기 헤드면은 열차폐 코팅을 하였으며, 또한 100 bar로 강도시험을 수행하였고 매니폴드간의 기밀을 위해 35 bar 기밀시험을 수행하였다. Fig. 1은 본 연소시험에 사용한 축소형 연소기에 대한 사진이다.

23 분사기

축소형 연소기에 장착한 분사기는 동축 와류형 분사기로서 단위분사기 선정 단계에서 기능 및 성능을 검증한 분사기 중 연소효율과 섭동 및 차압 조건을 만족하는 분사기이다. 본 동축 와류형 분사기는 내부에 산화제, 외부에 연료를 공급하는 분사기로 산화제와 연료의 혼합이 분사기 노즐 내부에서 일어나는 분사기이다. 산화

제 노즐 끝단과 연료 노즐벽에서 산화제 액막과 연료 액막이 만나는 지점까지를 단위거리로 정하여 산화제 노즐 끝단과 연료 노즐 끝단까지 거리의 비를 Recess Number (RN)로 정의할 때, 본 내부혼합 분사기의 RN은 2이다.

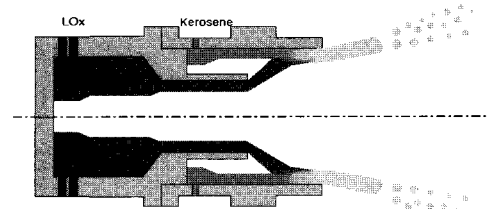


Fig. 2 Schematic of internal mixing in injector

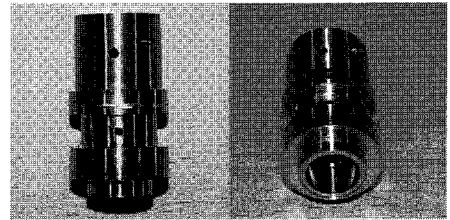


Fig. 3 Photo of internal mixing injector

Figure 2는 산화제와 연료가 분사기 내부에서 혼합되는 개략적인 형태를 보여주고 있으며, 물을 이용한 수류시험과 실 추진제를 사용한 연소시험과의 차압 비교시 차이가 발생한다는 사실에서 분사기 노즐 내부에 액적의 급격한 기화 및 국부적인 연소가 있을 것으로 사료되고 있다 [2]. Fig. 3은 본 연소기에 장착한 내부 혼합 동축 와류형 분사기의 제작된 형태이다.

24 축소형 연소기 실린더부 및 노즐부

축소형 연소기에서 연소성능을 검증하기 위해서 연소실 실린더부를 삭마 방식의 냉각을 하는 내열재로 제작하였다. 연소실 내경은 108 mm이며 향후 연소시간 증가를 위해 film cooling 방식의 추가적인 벽냉각 방식도 채용하였다.

열유속이 큰 노즐부는 물을 사용하는 강제 냉각방식으로 입구 압력 10 bar의 냉각수를 이용하여 노즐의 축방향에 대해 직각 방향으로 형성된 채널을 따라 냉각수가 노즐을 감싸고 흐르도록 하였다. 노즐부의 물냉각 채널수는 8개이며

채널당 유량은 약 3 kg/sec 정도이고 냉각수 유속이 16 m/s가 유지되도록 냉각채널부에 슬롯을 끼워 단면적을 조정하였다. 이에 대한 상세 내용은 참고문헌[3]에 제시하였다.

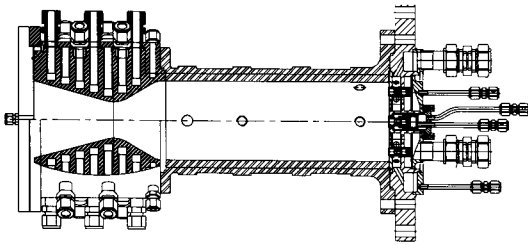


Fig. 4 Cross section of sub-scale combustor

3. 연소시험 결과 및 고찰

3.1 설계점 및 탈설계점 연소시험

본 축소형 연소기에 대한 연소시험은 이미 수행한 다른 축소형 연소기에서 검증한 cyclogram으로 수행하였다[3]. 토치 점화기에 불꽃이 형성되게 한 다음 중앙 분사기로 연료 그리고 산화제를 공급하여 연소압력이 3 bar 이상이 된 것을 확인한 후, 주 분사기로 연료, 그리고 산화제 순으로 공급하여 설계압력에 도달하는 순서이다. Fig. 5는 연소시험 중의 화염의 사진이다.



Fig. 5 Combustion flame during firing test

연소시험은 성공적이었으며 분사기 헤드, 연소실, 노즐부 등에 손상이 없었으며 분사기 헤드면에 많은 양의 soot가 붙어 있음을 Fig. 6에서 알 수 있다. 이는 분사기 노즐 안에서 액적이 급격히 기화된 가스 및 화염이 제트를 형성함에 따라 외곽의 케로신 증기가 강한 재순환 유동을

따라 가다가 face plate에 부딪히면서 생겼고, 화염이 cone 형태로 강하게 형성되어 face plate에 형성된 soot를 연소시키지 못한 것으로 사료된다. 연소시험은 설계점(Design Point, DP) 4회 및 탈설계점(Off-Design Point, OD) 4회 등 총 8회 수행하였으며 연소시험한 연소압력과 혼합비를 Fig.7에 나타내었다. 탈설계점은 저압 저혼합비인 탈설계점 1(OD1), 저압 고훈합비인 탈설계점 2(OD2), 고압 고훈합비인 탈설계점 3(OD3) 그리고 고압 저혼합비인 탈설계점 4(OD4)로 정의하였다.

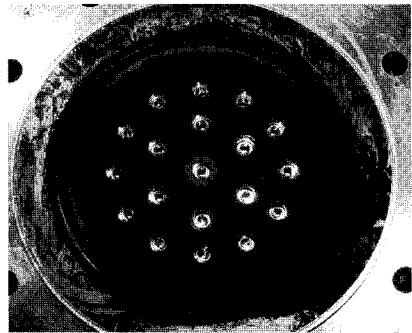


Fig. 6 Injector face plate after firing tests

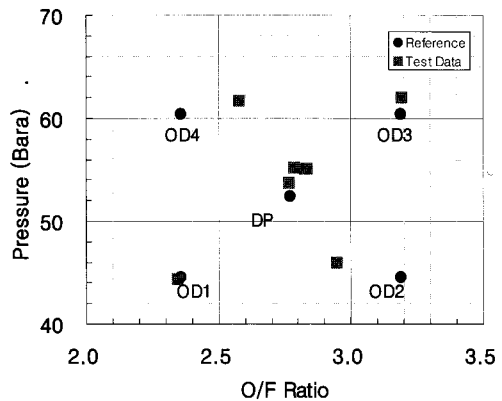


Fig. 7 Combustion pressure & O/F ratio of test data

Figure 8에는 설계점(DP)에서 연소기의 매니폴드 및 연소실에서의 압력을 나타내었는데, 정상 상태의 연소실 압력은 분사기 헤드 기준 53.72 bar이고 산화제 매니폴드 압력은 66.74 bar, 케로신의 경우는 67.11 bar으로 산화제 차압은 13.0 bar, 연료의 경우는 13.38 bar로 나타났

다. 유량은 일정하게 공급되었으며 산화제의 경우 4.33 kg/sec, 연료의 경우 1.57 kg/sec가 공급되었다.

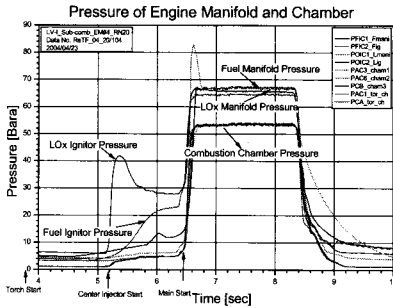


Fig. 8 Pressure at manifold & chamber

Figure 9는 설계점에서 연소실의 동압성분을 나타낸 것이다. 연소시작 초기 6.38 sec에서 섭동이 커지면서 6.6 sec에 최대점에 도달하였다. 연소 중의 섭동 크기는 ± 40 psi(peak to peak) 정도로 작동압의 $\pm 5.2\%$ 정도의 수준이나 저주파를 필터링(30Hz 이상 통과)을 하는 경우 ± 12 psi 정도의 섭동량이다. 이는 연소안전성을 위해 동압 섭동의 진폭이 평균 연소압의 10%보다 작아야 한다는 JANNAF standards 기준으로 볼 때 기준을 만족하는 것으로 판단된다. 연료 매니폴드의 압력 섭동은 ± 40 psi 정도이며 산화제의 경우 ± 45 psi 정도이다. Figure 10은 압력섭동을 주파수 분석한 결과인데 150 Hz의 섭동을 제외하고는 다른 고주파 섭동은 발생하지 않았다. 150 Hz의 섭동은 연소기 및 분사기 특성과 시험설비와의 상호 관계에 의해 발생한 것으로 사료된다[4].

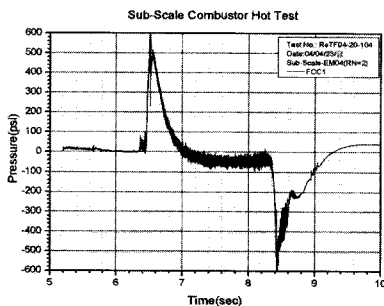


Fig. 9 Dynamic pressure of combustion chamber(DP)

Figure 11은 탈설계점들에서 시험한 동압을 주파수 분석한 것이다. 동압 분석 결과 OD1, 2에서 약 130 Hz의 섭동이 RMS(Root Mean Square)하는 경우 각각 약 8.6 bar, 5.3 bar로 연소압 기준 19%, 11%에 해당하며 기준치 10% 이상이다. 이러한 섭동은 주파수가 낮기 때문에 시험설비와 관련이 있고 축소형 연소기에서 발생한 관계로 설비 및 연결 배관 등이 다른 실물형 연소기에서 검증되어야 하고 저주파 제거 또한 실물형 차원에서 고려되어야 한다.

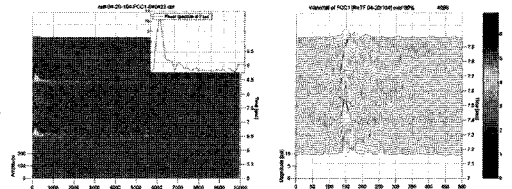


Fig. 10 Waterfall of FFT of chamber dynamic pressure(at DP)

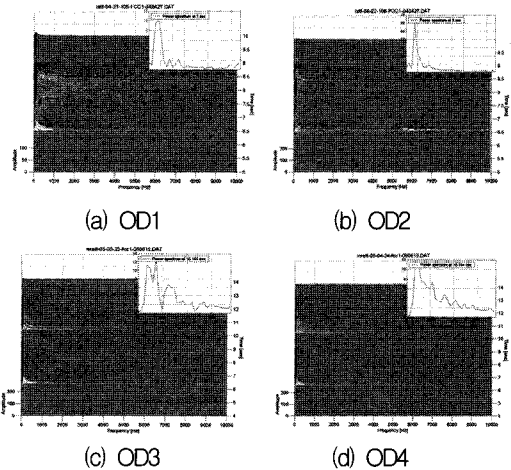


Fig. 11 Waterfall of FFT of chamber dynamic pressure

3.2 연소시험 결과정리

본 축소형 연소기로 수행한 8번의 연소시험에 대한 데이터를 Fig. 12와 Table 2에 정리하였다. 설계점에서 연소특성속도 C^* 값이 1758 m/s로 축소형 연소기의 초기 목표치 1685 m/s보다 높게 나왔다. 본 특성속도는 하나의 분사기로 시험한 단위분사기 연소결과에 의한 $C^*=1713$ m/sec보다 약 45 m/sec가 높은 것으로, 분사기에 퍼져 나오는 분무가 서로 부딪힘 등의 분사기 간

의 상호작용에 의한 혼합효율 증가가 높은 연소 특성속도가 나오는 주 요인으로 볼 수 있다.

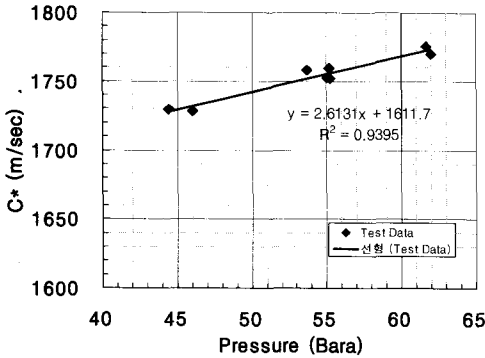


Fig. 12 Combustion characteristic velocity

탈설계점에서의 연소특성속도는 약 1730 m/s 정도로 높은 값을 보여주고 있어 본 분사기의 경우 분사기 차압에 따라 분무특성(혼합 및 입자 크기)이 크게 변하지 않음을 보여주고 있다. 연소실 압력이 증가함에 따라 연소특성속도 또한 증가함을 Fig. 12에서 볼 수 있다.

Table 2. Test results of sub-scale combustor

운영점	압력 (bar)	O/F	C* (m/sec)	RMS of pulsation(bar)
DP	54.8	2.80	1756	0.9
OD1	44.4	2.34	1730	8.5
OD2	46.0	2.94	1728	5.3
OD3	62.0	3.19	1770	0.5
OD4	61.7	2.58	1776	0.6

4. 결 론

내부혼합 동축 와류형 분사기를 장착하여 1.8 톤급 축소형 연소기를 설계/제작하여 연소시험을 성공적으로 수행하였다. 분사기 헤드는 18개의 주 분사기 및 1개의 중앙 분사기로 구성하였고, 연소실은 기존 내열재를 활용하여 제작했으며, 물 냉각 노즐은 칼로리미터 냉각 방식으로 고압의 연소시험시 노즐 목 열유속에서도 문제가 없는 것으로 판명되었다. 본 축소형 연소기에 대한 연소시간이 2~8초 정도로 열적으로 평형이 되었다고 하지만, 연소시간 증가에 대한 내구성 및 신뢰도는 향후 연소시험을 거쳐 검증할

예정이다.

설계점에서 연소특성속도는 목표하는 값을 상당히 상회하는 1756 m/s를 보여, 이 분사기를 채용하면 벽면보호를 위한 냉각에 의한 연소 손실을 고려하더라도 실물형 연소기에서 1650 m/s 보다 높은 연소효율을 달성할 것이다. 또한 연소효율이 낮을 것으로 예측한 탈설계점에서도 1730 m/s 연소특성속도를 보여 실물형 연소기에서는 높은 연소특성속도를 보여 줄 것으로 예측된다.

축소형 연소기의 연소실에서 고주파 불안정은 발생하지 않았으며 130~150 Hz 대의 저주파가 발생하였는데, 이는 설비공급계 및 분사기 그리고 연소기 자체의 특성에 기인한 것으로 실물형 연소기에서 검증/해결되어야 한다.

본 결과는 설계/제작/시험한 총 6종의 축소형 연소기 중의 하나에 대한 시험결과로 향후 다른 축소형 연소기 연소시험 결과들과의 비교 검증을 통해 실물형 연소기를 설계 또는 연소성능을 향상시키는 방안으로 매우 유용하게 활용될 것이다.

참 고 문 헌

1. Huzel, D. K. and Huang, D. H., "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines," AIAA, 1992
2. 서성현, 이광진, 한영민, 김승한, 김종규, 설우석, "이중와류 분사기를 적용한 고압 모델 연소기의 연소특성 연구," 한국추진공학회지, 제8권, 제1호, 2004, pp.54-60
3. 한영민, 김승한, 서성현, 이광진, 설우석, 이수용, "외부혼합 와류분사기를 장착한 액체로켓엔진용 축소형 고압연소기 개발," 제5회 우주발사체기술 심포지움, 2004.5, pp. 156-163
4. V. G. Bazarov and V. Yang, "Liquid-Propellant Rocket Engine Injector Dynamics," J. of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 5, Sept.-Oct., 1998, pp.797-80