

축소형 액체로켓엔진 연소기의 연소특성에 대한 연구

김종규* · 이광진* · 송주영* · 문일윤* · 최환석*

Study on the Combustion Characteristics of Subscale Liquid Rocket Combustion Chamber

Jong-Gyu Kim* · Kwang-Jin Lee* · Ju-Young Song* · Il-Yoon Moon* · Hwan-Seok Choi*

ABSTRACT

The combustion performances and characteristics of the subscale liquid rocket combustion chamber are discussed in this paper. Subscale combustion chamber is composed of mixing head, ablative cooling cylinder, and water cooling nozzle. The mixing head has eighteen coaxial swirl injectors and one center coaxial swirl injector for ignition. The mixing heads employing the injectors of four different recess length are considered in this paper. The results of the firing test, comparison of performance, and characteristics of static and dynamic pressures of the four different mixing heads are described. The characteristics of combustion at design and off design points are also discussed.

초 록

본 논문은 축소형 액체로켓엔진 연소기의 성능 및 연소특성에 관한 것이다. 축소형 연소기는 분사기 헤드부, 내열재 실린더부, 그리고 강제 물냉각 노즐부로 구성되어 있다. 분사기 헤드부는 18개의 주분사기와 한 개의 점화기용 분사기로 구성되어 있다. 분사기의 형태는 동축 와류형 분사기이며, 리세스 길이에 따른 4종류의 분사기를 적용한 각각의 축소형 연소기의 연소시험 결과, 성능 비교 및 정압, 동압 특성에 대해 기술하였다. 또한 설계점 및 탈설계점에서의 연소특성에 대해서도 기술하였다.

Key Words: Subscale Liquid Rocket Combustion Chamber (축소형 액체로켓 연소기), Coaxial Swirl Injector (동축 와류 분사기), Recess Length (리세스 길이)

1. 서 론

실물형 연소기의 개발은 몇 단계의 과정을 통해 이루어지는데, 선행적으로 분사기의 개발이 이루어져야 한다. 분사기들의 특성을 결정짓는

여러 가지의 변수를 고려하여 몇 개의 후보 분사기들을 설계, 제작한다. 제작된 각각의 분사기들을 수류시험, 단일분사기 연소시험, 연소안정성시험 등을 통해 상호 비교, 분석하여 최종적으로 실물형 연소기에 적용할 몇몇 종류의 분사기들을 선택하게 된다. 실물형 연소기를 제작함에 있어서 시간적, 비용적 문제 등이 만만치 않고, 또한 단일분사기가 아닌 여러 개 분사기가 배열

* 한국항공우주연구원 연소기그룹
연락처, E-mail: bellstar@kari.re.kr

되어 있을 때, 즉 상호 간섭에 의한 영향 등 고려되어야 할 변수들이 많기 때문에 선택된 분사기들을 실물형 연소기에 바로 적용하는 것은 무리가 따른다. 따라서 선택된 분사기를 실물형 연소기에 적용하기에 앞서 축소형 연소기에 우선 적용하여 검증하는 단계를 거치는 것이 순서이다.

본 논문은 위에서 언급한 축소형 연소기의 연소시험에 관한 것으로서, 분사기의 종류가 다른 4개의 축소형 연소기를 고려하였다. 각 축소형 연소기의 설계점 및 탈설계점 연소시험을 통해 성능 비교 및 연소 특성을 살펴보고, 또한 각각의 정압 및 동압 특성을 살펴보았다.

2. 시 험

2.1 분사기

본 연구에서 고려된 분사기는 동축 와류형 분사기이며, 산화제측은 와류실이 있는 단협형, 연료측은 와류실이 없는 열림형인 혼합형의 분사기이다. 분사기의 특성을 결정짓는 여러 가지의 변수들이 있는데 본 논문에서는 리세스 길이를 변화시킨 4종류의 분사기를 고려하였다. Figure 1에 분사기의 형상을 나타내었다. 연료가 산화제를 에워싸면서 분사가 되며, 리세스수(Recess Number, $R.N = L1/L2$)가 각각 0.6(#1), 1.0(#2), 1.5(#3), 2.0(#4)이다.

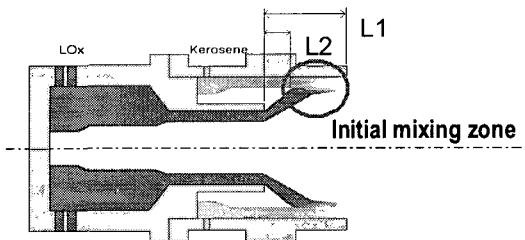


Fig. 1 Schematic of mixed type coaxial swirl injector

2.2 축소형 연소기

위에서 언급한 분사기를 적용하여 축소형 연

소기를 설계, 제작하였다. 축소형 연소기는 Fig.2에 나타내었듯이 크게 분사기 헤드, 챔버부(실린더), 노즐부로 구성된다. 분사기 헤드는 중앙에 점화용 분사기 1개와 18개의 주 분사기, 분사기면, 각 추진제의 메니폴드로 구성된다. 분사기면은 열적 보호를 위해 TBC(Thermal Barrier Coating) 공정을 수행하였다.

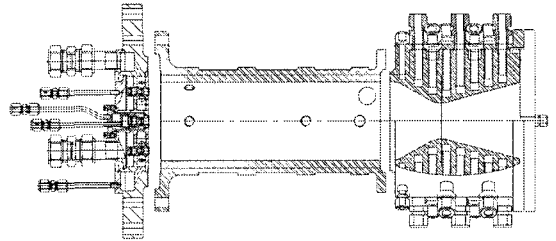


Fig. 2 Schematic of subscale combustion chamber

실린더부는 내열재 타입의 챔버이며, 수축에 걸친 반복 시험 시 높은 열유속으로 인한 내열재의 손상이 발생되므로 이를 방지하기 위해 분사기 헤드와 실린더부 사이에 막냉각링을 장착하여 시험을 수행하였다. 노즐부는 8채널의 칼로리미터 방식의 물냉각 노즐로 구성하였다. 내부 재질은 무산소동이며 각 채널로 냉각수가 유입이 되면 노즐을 둘러싸면서 흘러 냉각이 이루어지도록 설계하였다. 축소형 연소기의 자세한 규격은 Table 1에 나타내었고, 이와 관련된 좀 더 자세한 내용은 참고문헌에 제시되어 있다[1][2].

Table 1 Specification of Subscale combustion Chamber

Chamber Pressure	52.5 bar
Total Mass Flow Rate	6.01 kg/sec
O/F ratio	2.77
Combustion C* Efficiency	95.85 %
C*	1685.22 m/sec
Characteristics Length	1500.5 mm
Residence Time	2.2 msec
Pressure Drop through Injector	
Fuel	12 bar
Oxidizer	12 bar
Nozzle Throat Diameter	49.8 mm
Nozzle Exit Diameter	105.6 mm

2.3 연소 시험

위에서 언급하였듯이 축소형 연소기 4종의 모델(#1~#4)에 대해 설계점(DP) 및 탈설계점(OD) 연소시험을 수행하였다. 설계점 조건은 연소압이 52.5bar이며, 전체 추진제 유량은 약 6kg/s이다. 탈설계점은 연소압 및 O/F비의 변화범위 $\pm 15\%$ 로 설정하였다. Table 2에 설계점 및 탈설계점에서의 시험 조건을 나타내었다.

Table 2 Test condition of design and off-design point

Item	DP	OD1	OD2	OD3	OD4
Pressure [bar]	52.50	44.60	44.60	60.40	60.40
O/F ratio	2.77	2.36	3.19	3.19	2.36
Total Mass Flow [kg/s]	6.01	5.07	5.27	7.10	6.83
LOx [kg/s]	4.42	3.56	4.01	5.41	4.80
Kerosene [kg/s]	1.59	1.51	1.26	1.70	2.04

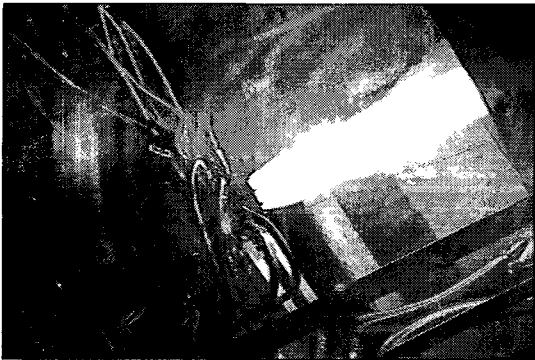


Fig. 3 Firing test of subscale combustion chamber

3. 결과 및 토론

3.1 각 모델의 시험 결과 분석 (유량, 정압 및 동압)

각 모델에 대하여 수회에 걸쳐 시험을 수행하였다. 시험은 안정적으로 이루어졌으며, 또한 하드웨어의 큰 손상은 없었다. 각 모델의 연소시험 결과를 유량 및 정압, 동압 중심으로 살펴보았다.

R.N=0.6인 모델 #1 연소기의 설계점 메니폴드 압과 연소압을 Fig.4에 나타내었고, 각 추진제의 유량곡선을 Fig.5에 나타내었다. 설계점 기준 연

소압은 약 53bar가 형성되며, 추진제 메니폴드 압력은 약 65~67bar로서 분사기 차압은 약 9~12bar를 보였다. 유량은 산화제가 4.37kg/s, 연료가 1.62kg/s이며, O/F 비는 2.8을 보였다. 설계점에서의 각 모델의 압력곡선과 유량곡선은 모두 Fig.4, 5와 같은 형태를 보였다. Table 3에 축소형 연소기 모델 #1부터 #4까지 설계점 및 탈설계점의 압력 및 유량 그리고 특성속도의 값을 정리하였다. 모든 결과들은 수회의 시험들의 평균값으로 나타내었다. 각 모델의 설계점 연소시험은 52.8bar에서 54.8bar의 분포를 보여주고 있고, O/F비는 2.8의 값을 보여주고 있다. 또한 설계점에서의 특성속도값은 예상치인 1685m/s 보다 높은 1700m/s 이상의 값을 보여주고 있다. 탈설계점에서는 저압의 조건인 OD1, OD2의 경우 저압으로 인해 조금 낮은 값을 보였다. 특성

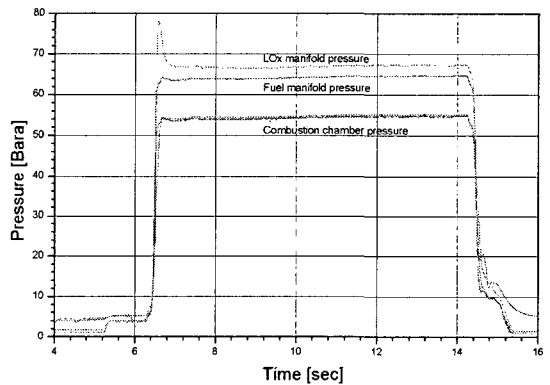


Fig. 4 Pressure of #1 model manifolds and chamber

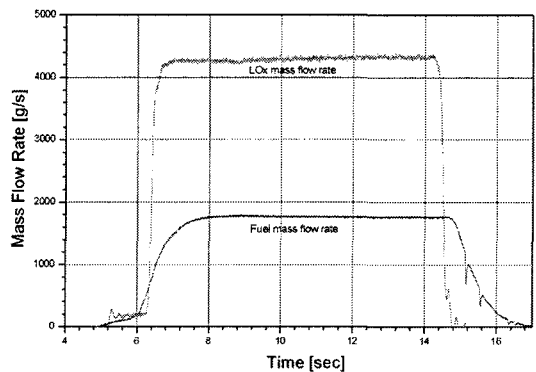


Fig. 5 Mass flow rate of #1 model propellants

Table 3 Test results of models (design & off-design point)

Model	Test Condition	연소실 압력 [bara]	추진제 유량 [kg/s]	O/F	C* [kg/s]
#1	DP	52.81	5.99	2.80	1701.00
	OD1	42.67	4.90	2.28	1681.99
	OD2	45.92	5.24	2.93	1693.39
#2	DP	53.89	6.17	2.81	1707.74
	OD1	44.22	5.08	2.38	1679.78
	OD2	45.65	5.32	3.04	1652.64
	OD3	59.77	6.75	2.76	1722.27
	OD4	59.14	6.69	2.12	1720.48
#3	DP	54.71	6.02	2.84	1755.61
	OD1	44.81	5.03	2.34	1716.05
	OD2	46.88	5.23	2.96	1725.98
	OD3	60.54	6.77	3.59	1746.64
	OD4	59.59	6.63	2.43	1757.76
#4	DP	54.79	5.97	2.80	1755.65
	OD1	44.39	4.92	2.34	1729.64
	OD2	45.99	5.11	2.94	1727.89
	OD3	62.00	6.85	3.19	1769.81
	OD4	61.69	6.79	2.58	1775.95

속도가 모델에 따라 차이를 보여주고 있는데 이것에 대해서는 뒤에서 언급하도록 하겠다. 동압 센서를 이용하여 챔버부(FCC1, FCC2), 산화제 메니폴드 (FOIC), 연료 메니폴드(FFIC)에서의 동압을 계측하였다.

Figure 6에 모델 #1의 설계점에서의 연소실 동압곡선(FCC1)을 나타내었다. 필터링을 거치지 않고도 약 $\pm 50\text{psi}$ (3.5bar) 이하의 압력 섭동을 보이고 있다. 이는 평균연소압력의 백분율로는 약 $\pm 6.6\%$ 의 수준으로 정적 연소안정성에 관한 JANNAF standard인 $\pm 10\%$ 이하 조건을 만족한다[3]. 데이터를 30Hz high pass filtering을 거치면 그 비율은 더 줄어든다. Figure 7은 주파수 특성을 보여주는데 약 180Hz의 저주파를 제외하고는 고주파 섭동은 보이지 않는다. 180Hz의 저주파는 분사기 및 연소기 특성, 그리고 시험설비와의 상호작용에 의한 것으로 사료된다.

Figure 8에 각 연소기의 챔버, 산화제 메니폴드, 연료 메니폴드의 동압섭동률을 압력에 대해 나타내었다. 위에서도 언급하였듯이 동압 섭동률[%]은

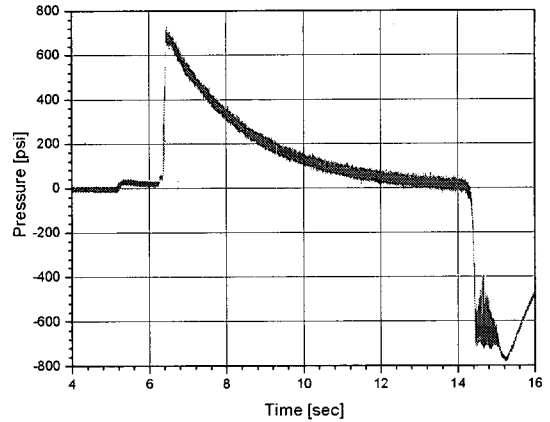


Fig. 6 Dynamic pressure of combustion chamber (FCC1, DP)

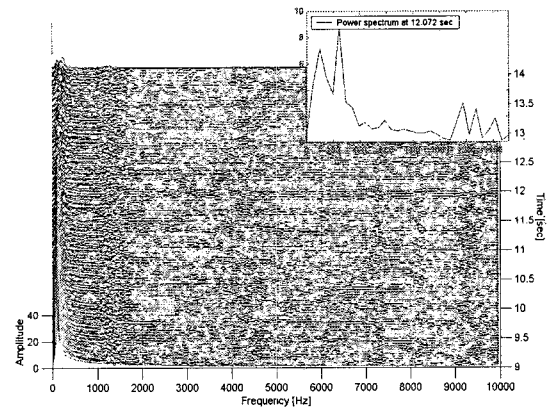


Fig. 7 Frequency characteristic of combustion chamber (FCC1, DP)

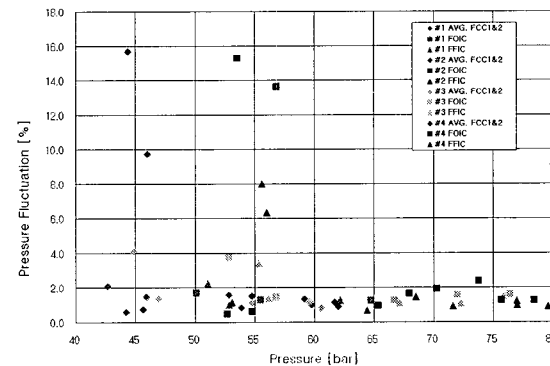


Fig. 8 Pressure fluctuation of 4 types subscale Combustion Chamber

실제 측정된 동압 신호를 30Hz high pass filtering을 거쳐 RMS 값으로 나타낸 것을 평균 연소압력의 백분율로 나타낸 것이다. 모델 #4의 연소기를 제외한 나머지의 연소기들은 연소압 대비 10% 미만의 값을 보여주고 있다. 모델 #4의 OD1, OD2의 경우 연소압 대비 10%가 넘는데, 이는 시험 회수가 1회씩이어서 좀 더 많은 검증시험이 필요하다.

3.2 성능 비교

설계점에서의 각각의 연소기에 대한 즉, 리세스 수에 대한 특성속도를 Fig. 9에 나타내었다. 모든 연소기의 특성속도는 1700 m/s 이상의 값을 보여주며, 리세스 수가 증가 할수록 특성속도는 증가함을 알 수 있다. 리세스 수가 0.6, 1.0인

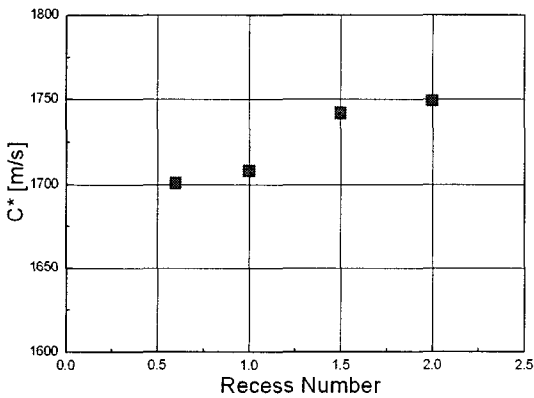


Fig. 9 Recess number vs. C* at DP

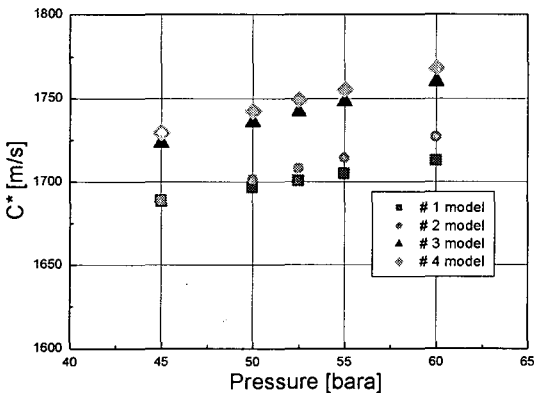


Fig. 10 Chamber pressure vs. C*

경우는 분사기에서의 추진제 혼합이 외부혼합의 형태를 보여주며, 리세스 수가 1.5, 2.0인 경우는 추진제가 분사기 내부에서 혼합이 되면서 분사가 된다. 즉 내부혼합의 형태를 보여주는 분사기의 효율이 좋음을 알 수 있다. 이는 단위분사기 수류시험을 통해서도 알 수 있는데, 내부혼합의 형태를 보이는 분사기의 혼합효율이 더 높다[4]. 각 모델 연소기들의 혼합비의 영향을 고려하지 않은 압력에 따른 특성속도를 Fig. 10에 나타내었다. 압력이 증가 할수록 특성속도 값은 증가함을 알 수 있다.

4. 맺음 말

실물형 연소기 개발에 있어서 먼저 수행되어야 할 과정이 분사기 개발이다. 분사기의 설계 및 제작, 수류시험과 연소시험을 거쳐 예비 후보 분사기들을 선정한 후 실물형 연소기에 적용하기 앞서 축소형 단계에서의 검증이 필요하다. 본 논문에서는 리세스 수가 다른 4종의 분사기들로 구성된 축소형 연소기의 설계점 및 탈설계점 연소시험을 통해 성능비교 및 연소특성을 살펴보았다.

모든 모델에 대한 연소시험은 성공적으로 수행이 되었으며, 안정적인 연소를 보여주었다. 설계점 연소시험에서 특성속도가 1700m/s 이상의 값을 보여주었으며, 리세스 수가 증가할수록 특성속도는 증가하였다. 즉, 추진제의 혼합이 내부혼합의 형태를 보이는 분사기가 높은 연소효율을 보여준다고 할 수 있다. 또한 각 모델 연소기의 시험에서 연소압력이 증가함에 따라 특성속도의 값이 증가함을 알 수 있었다. 동압의 크기는 모델 #4를 제외하고는 연소압 대비 10%미만의 값을 보여주었으며, 연소 불안정과 관련된 고주파 섭동은 보이지 않았다.

위의 결과들은 향후 실물형 연소기의 개발에 있어서 활용될 예정이며, 추가적인 시험을 통한 database 구축이 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. 한영민, 김승한, 서성현, 이광진, 김종규, 설우석, "외부혼합 와류분사기를 장착한 액체 로켓엔진용 축소형 연소기 개발," 한국항공우주학회지, 제32권, 제10호, pp. 102-111, 12. 2004.
2. 한영민, 김승한, 서성현, 문일윤, 설우석, 조광래, "다종의 축소형 고압연소기 연소성능 시험," 한국추진공학회 2004년 추계학술대회, pp. 259-264, 10. 2004.
3. M, Rocker and T.E. Nesman, "Elimination of Intermediate Frequency Combustion Instability in the Fastrac Engine Thrust Chamber," PERC 2001, October, 2001, pp. 115-130.
4. 김종규, 김인태, 임병직, 김승한, 문일윤, 한영민, 설우석, "액체로켓엔진 연소기용 분사기의 분무특성 및 혼합특성에 관한 연구." 제3회 한국유체공학 학술대회, 2004.