

액체로켓엔진 축소형 고압 연소기 설계

한영민*, 김승한**, 서성현***, 이광진****, 김종규*****

Design of High Pressure Sub-scale Combustor for a Liquid Rocket Engine

Yeoung-Min Han*, Seung-Han Kim**, Seong-hyeon Seo***, Kwang-Jin Lee****, Jong-Gyu Kim*****

Abstract

The procedure of conceptual and detailed design of sub-scale combustor using bipropellant swirl or impinging injector with external or internal mixing for a liquid rocket engine are described in this paper. The sub-scale combustor uses liquid oxygen(LOx) and kerosene as propellants and has a 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 or impinging injector and 18 main swirl or impinging injectors.

초 록

본 논문에서는 와류형 및 충돌형 분사기를 가진 액체로켓엔진용 축소형 연소기의 기본 설계 및 상세설계에 대해 기술하였다. 와류분사기는 내부에 액체산소 외부에 케로신을 공급하여 노즐 내부 또는 외부에서 혼합하는 구조를 가지고 있다. 축소형 연소기는 분사기 헤드, 삭마 냉각방식의 내열재 연소실 그리고 물냉각 노즐로 구성되어 있다. 분사기 헤드는 18개의 주 분사기, 하나의 중앙 분사기, 연료 매니폴드, 산화제 매니폴드 그리고 추진제 분배기 등으로 구성되어 있다.

키워드 : 액체로켓엔진(liquid rocket engine), 축소형(sub-scale), 분사기(injector), 리세스(recess), 물냉각 노즐(water-cooled nozzle)

1. 서 론

인공위성 등을 우주로 보내는 우주발사체에 사용되는 액체로켓엔진은 연소기, 터보펌프, 가스 발생기, 밸브, 공급계 등으로 이루어져 있다. 이

중 연소기는 터보펌프로부터 추진제를 공급받아 잘 혼합시켜 연소를 시켜 추력을 발생시키는 것으로 엔진 성능에 매우 큰 영향을 미친다. 즉, 액체로켓엔진 연소기에서 연소효율은 엔진 전체의 성능을 좌우하는 매우 중요한 요소이다. 연소기

* 연소기그룹/ymhan@kari.re.kr

*** 연소기그룹/sxs223@kari.re.kr

***** 연소기그룹/bellstar@kari.re.kr

** 엔진그룹/detokim@kari.re.kr

**** 연소기그룹/lkj@kari.re.kr

에서 연소효율에 영향을 미치는 여러 인자 중 분사기 자체 및 이에 대한 배열이 연소효율에 가장 큰 영향을 미친다[1]. 연소기의 효율을 높이면서 연소안정성을 확보하기 위해서는 다양한 실물형 분사기에 대한 데이터 확보가 중요하다. 이와 같이 연소기 개발에서 있어서 분사기의 선택이 매우 중요하므로 액체로켓엔진 연소기 개발과정이 효율적이고 경제적이기 위해서는 반드시 분사기 선정 개발단계가 포함되어야 할 것이다. 또한, 실물형 엔진 연소기의 높은 제작비 및 고비용 연소 시험 등을 고려할 때 실물형 연소기를 모사 가능한 다중분사기로 구성된 축소형 연소기에 대한 개발이 먼저 선행되어 이에 대한 검증이 이루어진 후 실물형에 대한 설계/제작/검증 등이 이루어지는 것이 개발의 순서라고 볼 수 있다.

액체로켓엔진 연소기 개발은 여러 종의 단위 분사기 설계/제작, 수류/연소시험 등의 분사기 스크린 단계, 분사기 스크린 단계를 지난 분사기에 대한 다중요소(multi-element) 축소형 연소기 개발단계, 축소형 연소기 개발단계를 지나 선택한 최종분사기를 장착한 실물형 연소기 개발단계로 볼 수 있는데, 본 논문의 내용은 2번째 단계인 축소형 연소기 개발에 대한 것이다.

본 축소형 연소기에 장착한 분사기는 단위 분사기 개발단계에서 성능을 검증한 분사기 중 연소효율과 섭동 그리고 차압조건을 만족하는 이중 와류(swirl) 분사기이다[2]. 본 이중 와류 분사기는 노즐내부에 산화제, 외부에 연료를 공급하는 분사기로 산화제와 연료의 혼합이 분사기 노즐 내부 또는 외부에서 일어나는 분사기이다.

본 내용에서는 분사기 설계 및 인젝터 헤드 구조 그리고 운영점 사양 등 축소형 연소기의 전반적인 설계, 축소형 인젝터 헤드 및 연소실 그리고 노즐부에 대한 제작에 대한 결과 등에 대한 내용을 기술하였다. 본 축소형 연소기 종류는 서로 다른 6가지 분사기를 각각 장착한 6개인데, 이는 분사기 최적화 및 분사기간의 상호작용 등의 연소특성을 비용이 적게 들어가는 축소형에서의 검증을 걸쳐 실물형에서의 시행착오를 최소화하고자 함이 주 목적이다. 향후 제작된 연소기를 가지고 수류/점화/연소시험을 거친 후 시험 결과들과의 비교 검증을 통해 실물형 연소기를 설

계/제작/검증하는데 활용될 것이다.

2. 본 론

2.1 축소형 연소기 사양

축소형 연소기의 사양은 분사기 자체를 검증하고 실물형 연소기의 연소상황을 잘 모사할 수 있고 제작 및 시험비용이 최소화 할 수 있도록 선정되었다. 설계된 축소형 연소기 사양은 표 1과 같은데 연소실 직경은 실물형 연소기 축소비보다 크지만 벽면냉각 효과를 줄일 수 있는 기제작된 내열재의 내경 108 mm으로 하였다. 축소형 연소기 유량은 총 6.0 kg/s으로 LOx 4.4 kg/s, 연료 1.6 kg/s이며, O/F ratio는 2.77로 연소기 벽면의 냉각량 고려로 혼합비가 실물형 연소기에 비해 높다. 예상 연소 특성속도는 실물형 연소기에서 최외곽 냉각에 의한 손실을 고려하여 실물형 목표치인 1650 m/s보다 높은 1685 m/sec로 선정하였다. 최외곽 분사기의 벽면 효과를 최소화하기 위해 실물형의 contraction ratio가 4보다 큰 값 4.7로 하되 실린더부의 길이(화염이 존재가능한 길이=화염길이)는 실물형 연소기와 거의 동일하게 설정하였다.

표 1. Design specifications of sub-scale combustor

Chamber Pressure	5.25	MPa
Stagnation Pressure	5.20	MPa
Total Flow Rate	6.01	kg/sec
Fuel Flow Rate	1.59	kg/sec
Oxidizer Flow Rate	4.42	kg/sec
O/F ratio	2.77	
Combustion C* Efficiency	95.85	%
C*	1685.22	m/sec
Chacteristics Length	1500.50	mm
Residence time	2.20	msec
Pressure Drop through Injector		
	Fuel	1.20 MPa
	Oxidizer	1.20 MPa
Nozzle Throat Diameter	49.80	mm
Contraction Ratio	4.70	
Chamber Diameter	108.01	mm
Length of cylindrical part	318.12	mm
Length of contraction part	60.43	mm
Contraction Angle	30.00	deg
Combustion Gas Temperature	3648.00	K
Molecular Weight	23.69	
Specific Heat Ratio	1.17	

2.2 축소형 연소기 분사기 배열

실물형 연소기의 분사기 자체뿐만 아니라 배열에 대한 일부 검증은 할 수 있도록 축소형 연소기를 설계하고자 하였다. 실물형으로 고려하고 있는 연소기의 분사기 배열은 그림 1과 같은데 직경이 380 mm 정도이며 주 분사기는 271개, 9열로 구성되었고 냉각용 분사기는 54개, 최외곽 10번째 열에 배치하여 전체 분사기 325개를 배열하였다. 연소안정성을 위한 배플형 분사기는 4열에 허브, 주위 60도 간격으로 6개 블레이드를 구성하게 배치하였다. 배플분사기의 외부 직경이 되는 분사기간의 간격은 17 mm이거나 20 mm이며 주 분사기의 최대 외부직경은 14.5 mm이다. 분사기 배열은 외류 분사기의 일반적인 분사기 배열을 택했으며 분사기간의 유량 오차는 동일한 압력차에서 유량이 평균 기준 편차가 $\pm 1.5\%$ 이내인 것만을 장착하였다. 이러한 편차는 분사기 헤드면에서 국부적인 압력차가 0.2% 이내로 유지되어 연소불안정 제거에 기여할 것으로 사료된다. 이와 같이 설계된 실물형의 분사기 배열을 대표하고 연소 효율을 모사가능하도록 축소형 연소기를 선정하고자 실물형 연소기에서 중앙의 분사기를 포함하고 2번째 배열까지 포함한 19개 분사기(그림 2)를 축소형 연소기에 포함되는 분사기로 선택하였다. 충돌형 분사기의 경우 외류형 분사기와 동일한 개수를 가지는 것으로 실물형 연소기에서 선정하였으며 축소형 연소기에서도 똑같이 적용하였으며 배치의 용이성을 위해 반경 방향 기준으로 약 40도 각도를 가지고 배치하였다(그림 3). 상대적으로 횡방향으로 불균일한 추진제 분포를 갖는 충돌형 분사기의 경우, 내열재 삭마 최소화와 추진제의 분무 충돌에 의해 형성되는 spray pan의 간섭을 최소화하기 위해 분사기를 엇갈리게 해서 배열하였다. 각각의 충돌형 분사기는 분사기 헤드 면의 중심과 외곽을 연결하는 직선에 대해 40도의 각도로 회전하여 배열하는 것으로 하였다

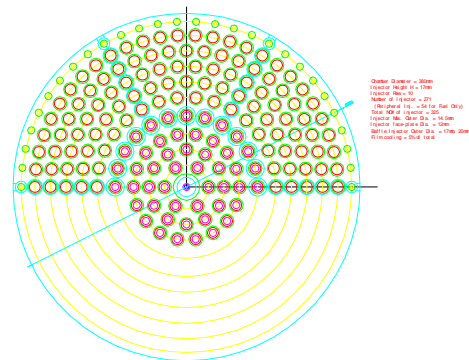


그림 1. 실물형 연소기 분사기 배열

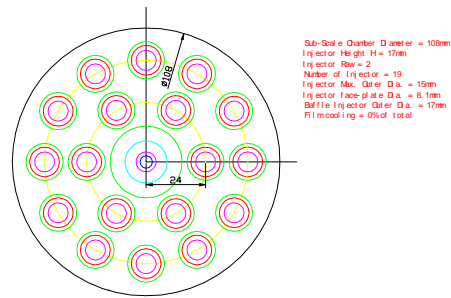


그림 2. 외류형 분사기를 장착한 축소형 연소기 분사기 배열

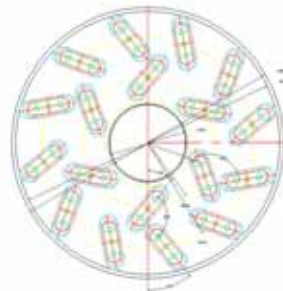


그림 3. 충돌형 분사기를 장착한 축소형 연소기 분사기 배열

2.3 축소형 연소기의 운영조건

축소형 연소기의 연소성능 검증시험을 위해서는 설계점뿐만 아니라 탈설계점에서도 성능 파악이 요구되는데, 엔진 운영조건에서 주어지는 추력 변동 범위 10%를 보장하기 위해 연소기 단품에서는 연소압, O/F비의 변화 범위를 $\pm 15\%$ 로 설정한 탈설계점을 Table 2에 표시하였다. 탈설

계점 1(OD1)은 저압 저혼합비 조건으로 연소압력은 44.6 bar이며, 탈설계점 2(OD2)는 저압 고혼합비로 연소압력은 44.6 bar 혼합비는 3.2로 연료유량이 가장 작은 점이다. 탈설계점 3(OD3)은 고압 고혼합비로 압력이 60.4 bar이며 산화제 유량이 가장 큰 점이다. 탈설계점 4(OD4)는 고압 저혼합비로 연료유량이 가장 많은 점이다.

표 2. Operating conditions of sub-scale combustor

item	DP	OD1	OD2	OD3	OD4
Pressure(MPa)	5.25	4.46	4.46	6.04	6.04
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
Molecular weight	23.69	22.56	25.16	25.27	22.64
Specific ratio (γ)	1.17	1.18	1.17	1.17	1.18
Momentum Ratio(O/F)	0.50	0.36	0.66	0.66	0.36
Pressure Drop					
LOx(MPa)	1.20	0.78	0.99	1.80	1.42
Kerosene(MPa)	1.20	1.08	0.75	1.36	1.96
Cooling passage	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pressure at Lox Inlet	6.45	5.24	5.45	7.84	7.45
Pressure at Fuel Inlet	6.45	5.54	5.21	7.40	8.00

3. 축소형 연소기 상세설계

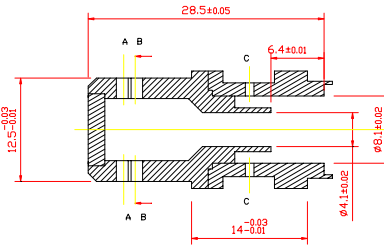
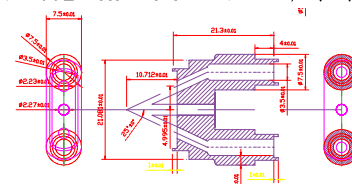
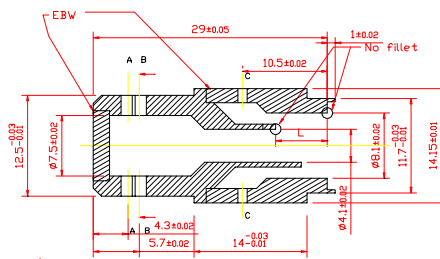
3.1 축소형 연소기용 분사기

축소형 연소기들은 단위분사기 연소시험 단계에서 이미 검증을 마친 14개의 분사기 중에서 연소 안정성 및 연소효율이 좋은 6종의 분사기를 각각 장착하고 있다. 우주선진국에서 대표적으로 사용하고 있는 충돌형(OFO형)과 이중 와류형 분사기에 대한 비교를 위해 분사기 형태는 위 두가지를 선택하였고, 이중 와류형의 경우 와류실의 유무에 따른 닫힘형(closed)과 혼합형(mixed)으로 구분하였다. 이중 와류형 분사기에서 연소안정성 및 연소효율에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 리세스로 간주하여 실물형 연소기에 적용가능성이 높은 혼합형에서 여러 리세스(Recess number, RN=0.6, 1.0, 1.5, 2.0)에 대한 검증이 이루어지도록 분사기를 선정하였다. 표 3에 선정된 분사기에 대한 규격을 제시하였다. 하나의 분사기에 대

한 산화제 및 연료의 설계유량은 각각 232g/s, 84g/s이며 분사기 설계차압은 동일하게 12bar이다. 그림 4는 축소형 연소기에 장착된 분사기의 도면이며 상세사항은 참고문헌[2,3,4,5]에 제시하였다.

표 3. Design specifications of injectors

연소기 No#	분사기 형태	RN	분무각 (LOx/연료)	노즐직경 (O/F)mm
EM#1	와류(mixed)	0.6	65°/120°	4.1/8.1
EM#2	와류(mixed)	1.0	65°/120°	4.1/8.1
EM#3	와류(mixed)	1.5	65°/120°	4.1/8.1
EM#4	와류(mixed)	2.0	65°/120°	4.1/8.1
EM#5	충돌	OFO	25°(충돌각)	2.1/1.9
EM#6	와류(closed)	2.0	65°/120°	4.1/8.1


(a) 혼합형 와류분사기 도면(EM#1, 2, 3, 4)

(b) 충돌형 O-F-O 분사기 도면(EM#5)

(c) 닫힘형 와류분사기 도면(EM#6)
그림 4. 축소형 연소기용 분사기 도면

3.2 축소형 연소기

축소형 연소기는 분사기가 장착되어 추진제를 배분/분사 시켜 연소실에서 연소시키는 분사기 헤드, 분사된 추진제가 고온 고압으로 연소가 일어나는 연소실 그리고 고온 고압의 연소가스가 지나면서 큰 열 유속을 주고 팽창하면서 추력을 발생하는 노즐부 세부부분으로 구성되었다.

3.1.1 축소형 연소기 분사기 헤드

축소형 분사기 헤드는 산화제 및 연료를 공급 배관에서 연소실로 보내면서 분사기에 균일하게 그리고 안정적으로 보내는 역할을 하는 추진제 매니폴드, 여러 분사기 형태로 교환이 가능한 중앙 분사기, 산화제 및 연료를 분무시키고 혼합하여 효율적인 연소가 일어나게 하는 18개의 주 분사기, 추진제 매니폴드와 연소실을 분리하고 냉각을 담당하는 face plate, 센서측정부 등으로 구성되었다. 추진제의 매니폴드 및 배관의 체적은 산화제의 경우 공급하는 유량 체적의 2.7%(95 cm³), 연료의 경우 14.3%(288cm³)로 설계하여 연소기 시작 및 종단시 purge에 의한 연소실 압력 peak를 최소화하고 고온이 생성되지 않도록 하였다. 분사기 헤드면은 1개의 중앙 인젝터, 18개의 주 분사기로 구성되어 있는데, 1열에 6개의 분사기 2열에 12개의 주 분사기를 배치시켰다.

분사기 헤드의 주 분사기 18개는 분사기 헤드면에 brazing을 통해 집합된다. 집합 후 기밀 및 수압 시험을 통해 구조적인 안전과 집합 공정이 바르게 적용되었는지 확인한다. 기밀 시험에 있어서 가장 중요한 것은 추진제 매니폴드간의 기밀이 유지되는가를 확인하는 것인데, 테프론을 이용한 기밀 치구를 제작하여 분사기 출구면에서 산화제측과 연료측 사이에 35 bar의 차압을 유지하여 기밀여부를 판단한다. 분사기 헤드면의 열적 손상을 막기 위해 열차단코팅(thermal barrier coating, TBC)을 500 μm의 두께로 실시하였다. 외부 혼합 분사기를 브레이징하고 TBC를 수행한 축소형 연소기의 분사기 헤드면을 그림 5, 6에 나타내었다. 최종 제작된 분사기 헤드는 연소시험 검증시 발생하는 압력 및 극저온 산화제에 대

한 구조적인 안정성 및 누설 사고에 대비하기 위해 탈설계점 작동압력(64 bar)에 1.5배에 해당하는 100 bar에서 수압 강도시험을 거쳐 최종적인 제작 검증을 마쳤다.

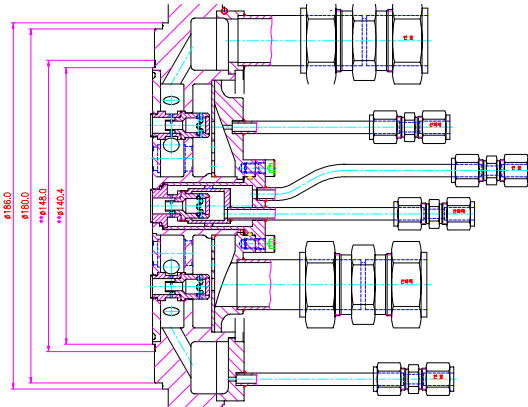


그림 5. 축소형 연소기용 분사기 헤드 도면(측면도)

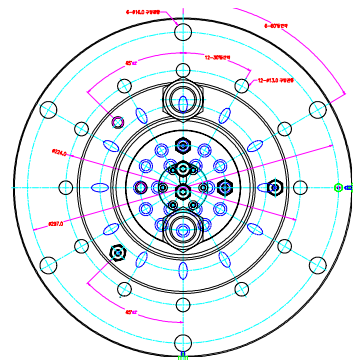


그림 6. 축소형 연소기용 분사기 헤드 도면(정면도)

3.1.2 중앙 분사기

분사기 헤드면의 중심에는 center injector의 분리 장착이 가능토록 설계하였다. 이는 분사기 형태를 달리하여 torch ignitor 또는 접촉성 발화물질 점화제인 TEA 점화기 등의 점화시험을 수행하거나 돌출형 분사기 등을 장착하여 다양한 유량의 연소환경에서 검증시험을 수행할 수 있도록 하였다. 그림 7에 나타난 중앙 분사기는 주 분사기와 같은 사양을 가지고 있다.

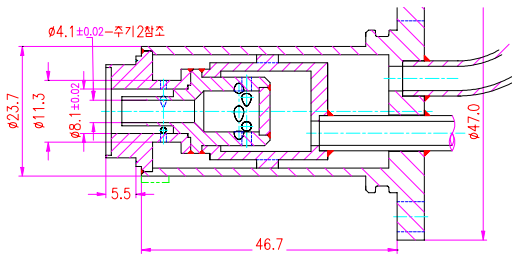


그림 7. 축소형 연소기의 중앙 분사기

3.1.3 연소실의 실린더부

축소형 연소기의 연소실은 기계작되어 있고 삭마방식으로 냉각하는 silica phenolic 내열재와 외부 stainless steel로 제작하였다. 연소실 직경과 길이는 각각 108 mm, 318 mm이며 정압 및 동압을 측정할 수 있는 포트와 점화원으로 사용하는 torch ignitor를 장착할 수 있는 포트를 설치하였고 그림 8에 설계된 연소실을 나타내었다.

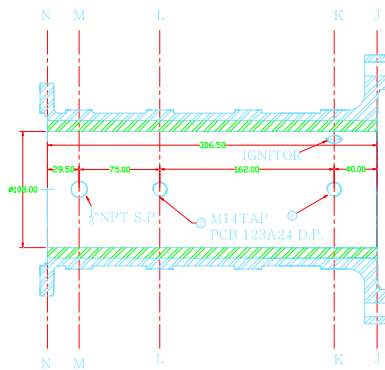


그림 8. 축소형 연소기의 연소실 실린더부 도면

3.1.4 연소실의 노즐부

액체로켓엔진의 노즐은 열유속을 가장 심하게 받는 곳으로 내열재를 사용한 노즐은 고압이면서 벽면에 막냉각 등을 하지 않는 본 축소형 연소기의 열유속을 견디어 낼 수가 없다. 따라서 강제 냉각을 해주어야 하는데 그림 9에서 보는 바와 같이 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/sec이고

냉각수 유속이 12 m/s가 유지되도록 냉각채널부에 slot을 끼워 단면적을 맞추었다.

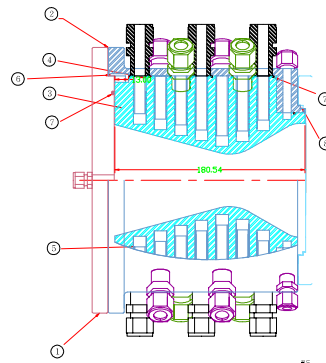


그림 9. 축소형 연소기의 연소실 노즐부 도면

3.1.5 축소형 연소기 전체 조립

축소형 연소기의 세부분 즉, 분사기헤드, 연소실 그리고 노즐부를 조립한 개략도와 사진을 그림 10, 11에 나타냈으며 각각의 사이에 동 가스켓을 끼워 기밀을 유지하였다. 최종조립 후 각 조립부 및 센서 포트들의 기밀을 확인하기 위해 연소압의 80% 수준인 45 bar에서 5분간 기밀시험을 수행하여 최종적인 조립을 완료하였다.

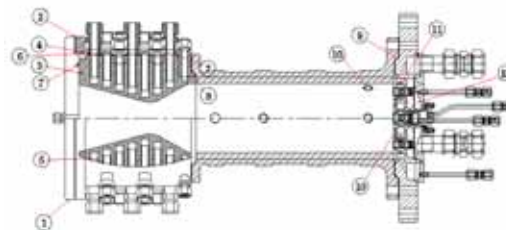


그림 10. 축소형 연소기 전체 조립도

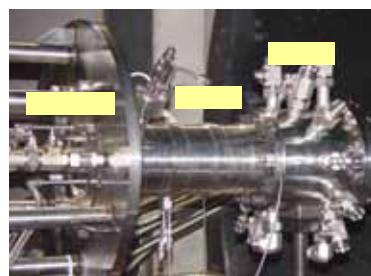


그림 11. 조립된 축소형 연소기

4. 결 론

이중와류분사기를 가진 액체로켓엔진용 축소형 연소기의 기본설계 및 상세설계를 수행하였다.

축소형 연소기 압력은 실물형 연소기와 같이 52.5Bar이며, 축소형 연소기 유량은 총 6.0 kg/s으로 LOx 4.4 kg/s, 연료 1.6 kg/s이며, O/F ratio는 2.77이다. 예상 연소특성속도는 실물형 연소기에서 최외곽 냉각에 의한 손실을 고려하여 실물형 목표치인 1650 m/s보다 높은 1685 m/sec로 선정하였다. 최외곽 분사기의 벽면 효과를 최소화하기 위해 실물형의 contraction ratio가 4보다 큰 값 4.7로 하되 실린더부의 길이(화염이 존재가능한 길이=화염길이)는 실물형 연소기와 거의 동일하게 설정하였다.

축소형 연소기는 분사기가 장착되어 추진제를 배분 및 분사시켜 연소실에서 연소시키는 분사기 헤드, 분사된 추진제가 고온 고압으로 연소가 일어나는 연소실 그리고 고온 고압의 연소가스가 지나면서 큰 열 유속을 주고 팽창하면서 추력을 발생시키는 노즐부 세부분으로 구성되었다.

축소형 연소기에 장착하는 분사기는 단위분사기 연소시험 단계에서 이미 검증을 마친 14개의 분사기 중에서 연소 안정성 및 연소효율이 좋은 6종의 분사기를 각각 장착하고 있다. 우주선진국에서 대표적으로 사용하고 있는 충돌형(OFO형)과 이중 와류형 분사기에 대한 비교를 위해 분사기 형태는 위 두가지를 선택하였고, 이중 와류형의 경우 와류실의 유무에 따른 닫힘형(closed)과 혼합형(mixed)으로 구분하였다.

설계된 축소형 연소기는 제작/강도/기밀시험을 마친 후 수류/점화/연소시험을 통해 축소형 연소기의 자체 검증 및 분사기간의 상호비교 및 실물형 연소기 설계 및 성능예측 등에 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. 한영민, 김승한, 서성현, 이광진, 설우석, 이수용, "외부혼합 와류분사기를 장착한 액체로켓엔진용 축소형 고압연소기 개발", 제5회 우주발사체 심포지움, 2004, pp.156-163.
3. 한영민, 김승한, 서성현, 임병직, 송주영, 조원국, 설우석, "내부혼합 와류분사기를 장착한 액체로켓용 축소형 고압연소기 연소시험," 제3회 한국유체공학 학술대회, GC26, 2004, pp.1-4.
4. 조광래 등, "소형위성 발사체 개발사업(II)," 한국항공우주연구원 보고서, 2004.
5. 이광진, 서성현, 한영민, 김승한, 조원국, "액체로켓엔진용 동축스웰 분사기의 recess 변화에 대한 연소성능 연구," 제3회 한국유체공학 학술대회, GC24, 2004, pp.1-4.