

다종의 축소형 고압연소기 연소성능시험

한영민* · 김승한* · 서성현* · 문일윤* · 설우석* · 조광래**

Combustion Performance Tests of Sub-scale Combustor for Liquid Rocket Engine

Yeoung-Min Han* · Seung-Han Kim* · Seonghyeon Seo* · Il-Yoon Moon* · Woo-Seok Seol* · Gwang-Rae Cho**

ABSTRACT

The critical component of combustor having high combustion efficiency for high performance liquid rocket engine is injector. The results of design and hot firing tests of six sub-scale combustors which have respectively an impinging type injector(1ea.), an bi-propellant swirl closed injector(1ea.), and bi-propellant swirl mixed injector(4ea.) were described in this paper. The combustion test were successfully performed. The combustion efficiency have higher value than predicted value and high frequency combustion instability does not occur.

초 록

성능이 우수한 액체로켓엔진 개발을 위해서 연소기 효율에 매우 큰 영향을 미치는 분사기 개발이 매우 중요하다. 본 논문에서는 실물형 연소기 개발 전단계로 수행된 여러 가지의 축소형 연소기에 대한 설계 그리고 연소시험 결과에 대하여 논하였다. 총돌형 분사기 1종, 와류 딥힘형 분사기 1종, 와류분사기 혼합형 4종을 장착한 총 6종의 축소형 연소기를 제작하였다. 축소형 연소기의 연소시험은 대체로 성공적이었으며 연소 효율은 설계 목표치를 상회하였고 추진제 차압은 설계치와 비슷한 값이었으며 동압은 규제조건을 만족하였다.

Key Words: Sub-scale Combustor(축소형 연소기), Injector(분사기) Recess(리세스)

1. 서 론

액체로켓엔진의 성공적인 개발을 위해서는 엔진을 구성하고 있는 여러 부품 요소들이 주어진

성능 조건을 만족해야 한다. 엔진 구성품 중 추진제를 균일하게 분포시켜 분사, 혼합, 연소한 고온가스를 노즐로 보내 팽창하여 추력을 얻는 연소기의 성능은 엔진의 성능에 직접적으로 영향을 미친다. 연소기의 성능을 향상시키기 위한 요소는 여러 가지가 있지만 가장 큰 영향을 미치는 것이 분사기이다. 즉, 가장 효율적이고 안정된 분사기를 선택하여 적용하는 것이 연소기

* 한국항공우주연구원 우주발사체사업단 엔진그룹

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

개발에 있어서 매우 중요하다[1].

연소기 개발에서 있어서 분사기의 선택이 매우 중요하므로 액체로켓엔진 연소기 개발과정이 효율적이기 위해서는 반드시 분사기 선정 개발 단계가 포함되어야 할 것이다. 또한, 실물형 엔진 연소기의 높은 제작비 및 고비용 연소시험 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 수행되는 것이 개발의 순서라고 볼 수 있다[2]. 액체로켓엔진 연소기 개발은 여러 종의 단위 분사기 설계/제작/수류/연소시험 등의 분사기 스크린 단계, 실물형을 모사하는 축소형 연소기 개발단계, 축소형 연소기 개발단계에서 검증한 최종분사기를 장착한 실물형 연소기 개발단계로 볼 수 있는데, 본 논문의 내용은 2번째 단계인 축소형 연소기 개발에 대한 것이다.

본 논문에서는 단위 분사기 스크린 단계에서 이미 검증된 분사기 중에서 실물형 분사기로 어떠한 분사기가 최적인지를 판단하기 위해 제작한 6종의 축소형 연소시험에 대한 내용을 기술하였다. 분사기 설계 및 인젝터 헤드 구조 그리고 운영점 사양 등 축소형 연소기의 전반적인 설계, 축소형 인젝터 헤드 및 연소실 그리고 노즐부에 대한 제작, 수류, 점화, 설계점/탈설계점 연소시험에 대한 결과 등에 대한 상세내용을 참고문헌[2,3,4]에 기술한 관계로 여기서는 이에 대해서는 간략히 서술하였다.

본 축소형 연소기에서 검증한 분사기 종류는 총돌형 분사기 1종, 이중 스윙 분사기 중 닫힘형(closed) 1종 그리고 이중 스윙 분사기 중 혼합형(mixed) 4종으로 총 6종의 분사기이다. 축소형 연소기에서 분사기 검증인 관계로 분사기를 장착하는 연소기 헤드만을 분사기 종류별로 6개를 제작했으며, 연소기 실린더부 및 노즐부는 동일한 사양을 적용하였다. 본 결과는 다양한 시험 조건들에서의 연소시험으로 상호 비교 검증을 통해 실물형 연소기를 설계/제작/검증하는데 활용될 것이다.

2 본 론

2.1 축소형 연소기

분사기

축소형 연소기들은 단위분사기 연소시험 단계에서 이미 검증을 마친 14개의 분사기 중에서 연소 안정성 및 연소효율이 좋은 6종의 분사기를 각각 장착하고 있다. 우주선전국에서 대표적으로 사용하고 있는 총돌형(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. Table 1에 선정된 분사기에 대한 사양이 제시하였다. 하나의 분사기에 대한 산화제 및 연료의 설계유량은 각각 232g/s, 84g/s이며 분사기 설계차압은 동일하게 12bar이다. Fig.1은 축소형 연소기에 장착된 분사기 사진이며 상세사항은 참고문헌[2,3,4]에 제시하였다.

Table 1 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	총돌	OFO	25°(총돌각)	2.1/1.9
EM#6	와류(closed)	2.0	65°/120°	4.1/8.1



(a)혼합형(4종) (b)총돌형(1종) (c)닫힘형(1종)

Fig. 1 Photo of injectors

축소형 연소기 사양

축소형 연소기는 실물형 연소기의 연소특성을 잘 모사할 수 있도록 table 2와 같이 연소기 사양을 선택하였다. 연소압력 및 분사기 O/F는 실물형 연소기와 동일하게 하였으며, 분사기 개수는 실물형 분사기 배열 2열까지 포함하는 19개 분사기를 선택하였다[3,4].

Table 2 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
Characteristics 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	

축소형 연소기의 분사기 헤드 및 연소실

분사기 헤드는 산화제 및 연료를 공급배관에서 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. Fig. 2에 분사기 헤드의 개략도를 제시하였다. Fig. 3에는 위에서 설명한 분사기를 장착한 6종 축소형 연소기의 헤드면에 대한 사진을 나타내었다. 연소기의 실린더부는 내열재 삭마 냉각방식으로 구성하였고, 열유속이 심한 노즐부는 덤프 물냉각 방식으로 구성하였으며 이에 대한 것을 Fig. 4에 나타내었다.

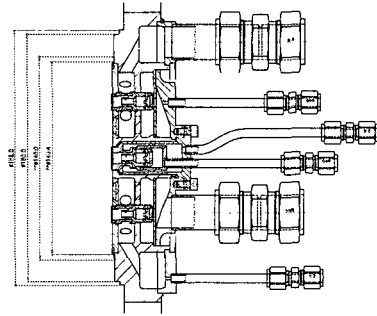


Fig. 2 Injector head drawing of sub-scale combustor

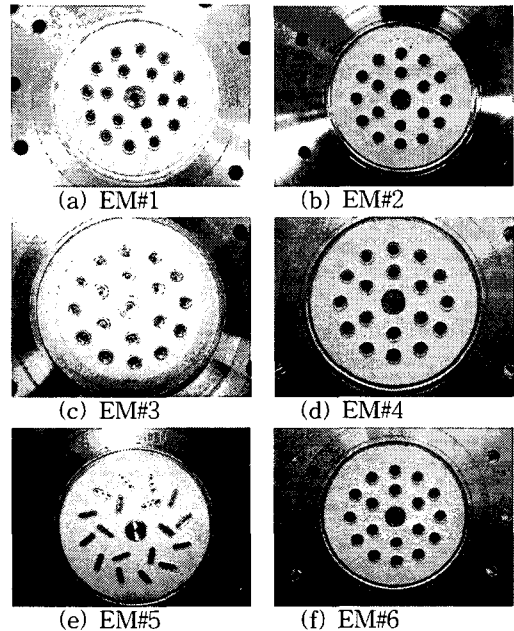
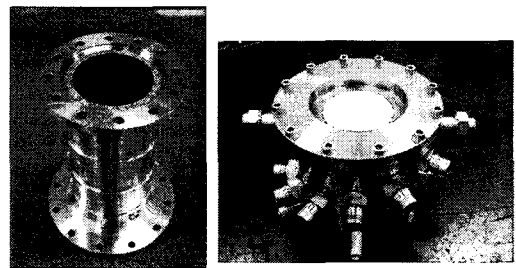


Fig. 3 Photos of injector face plate (EM#1 ~ EM#6)



(a) 내열재 실린더부 (b) 물냉각 노즐부

Fig. 4 Parts of sub-scale combustor

축소형 연소기 조립

축소형 연소기의 세부분 즉, 분사기헤드, 연소실 그리고 노즐부를 조립한 형태를 Fig. 5에 나타냈으며 각각의 사이에 동 가스켓을 끼워 기밀 압력 40bar, 5분간 유지하였다.

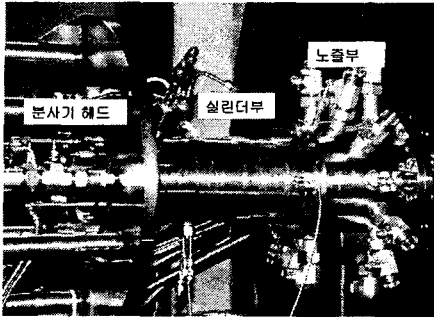


Fig. 5 Sub-scale combustor

2.2 축소형 연소기 연소시험 결과

축소형 연소기를 제작하여 수류/점화시험후 점화 시퀀스를 확립하여[3] 6종 연소기의 연소 시험을 성공적으로 수행하였다. 수류시험 6회, 점화시험 1회, 연소시험 29회를 수행하였으며, 내열재 실린더부 및 물냉각 노즐부는 연소시간 증가에 따른 삭마 증가 및 노즐부의 파손 등으로 각각 2개씩 사용하였다. 시험설비에 연소기를 장착하여 설계점에 대한 연소시험을 한 후 연소기의 상태를 파악하여 탈설계점 시험들을 수행하였다. EM#1의 경우는 처음으로 고압 시험하는 연소기인 관계로 저압 및 3번의 설계점 시험을 연속적으로 수행하였다. 탈설계점 시험이 끝난 후 EM#3, 4의 경우 분사기 face plate 및 분사기 자체에 대한 duration 검증을 위해 연소시간 8초에 대한 연소시험을 수행하였다.

연소기 헤드 및 연소실

충돌형 분사기를 장착한 EM#5을 제외한 다른 연소기의 분사기 및 face plate에는 연소시험이 끝난 후 손상이 발견되지 않았다. Recess가 증가하는 EM#1, 2, 3, 4 순으로 face plate에 축적되는 soot의 양이 많아짐을 Fig. 6에서 볼 수 있다. 분사기 특성상 외부 혼합이 일어나는 EM#1의 경우 헤드면에 있는 soot는 거의 없는 편이고 산화제와 연료가 연료 노즐 끝에서 만나

는 EM#2부터는 soot가 쌓이는 것을 볼 수 있다. 이는 노즐안에서 액적의 급격한 기화하고 화염이 분사기 노즐 안쪽에 존재하여 노즐 끝단으로 가스가 나오자마자 급속히 팽창하여 외곽의 케로신을 헤드면의 재순환 영역으로 밀어내어 생긴 것으로 사료되고 있다.

충돌형 분사기를 장착한 EM#5의 경우는 헤드면과 분사기 끝단에 약간의 손상이 발생하였다. 분사기의 연료 와류실 유류에 따른 EM#4와 6의 경우는 비슷한 양상을 보여주고 있다. 연소시험후의 내열재 연소실과 물냉각 노즐부의 상태를 Fig. 7에 나타냈다.

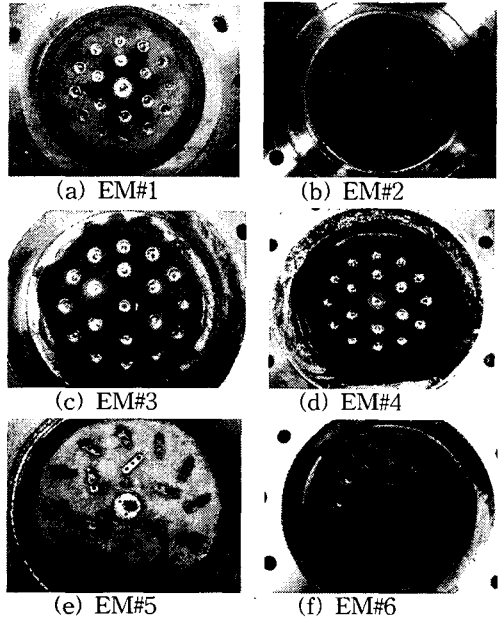


Fig. 6 Photos of injector face plate after hot firing tests (EM#1 ~ EM#6)

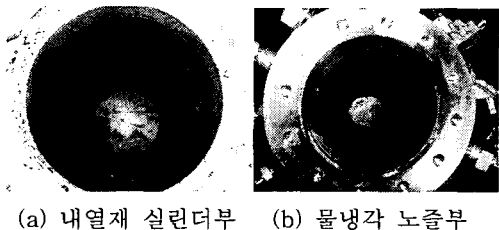


Fig. 7 Parts of sub-scale combustor after tests

연소시험 후 내열재의 상태를 살펴본 결과 외부 혼합형과 충돌형의 경우 내열재 벽면이 심하

게 삭마된 풀이 노즐 입구까지 각각 6, 12군데 나타났는데 이는 분사기 배열과 관련된 것이다.
연소실 및 매니폴드 압력

추진제를 연소기로 공급하면서 측정된 연소실 압력에 대한 대표적인 것을 Fig. 8에 나타내었다. Torch 점화를 시킨 다음 1초후에 증앙의 분사기로 연료, 산화제를 보내 연소압이 형성된 후 주 분사기로 연료, 산화제 순으로 공급하여 연소하는 순서이다. 연소시험 후 빠르게 정상압에 도달하며 연소시간 8초 동안 안정된 값을 보여주고 있는데, 모든 6종의 연소기 시험결과에서 비슷한 경향을 보여 주었다.

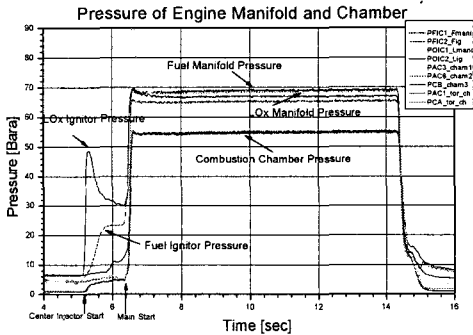


Fig. 8 Manifold & chamber pressure (EM#4)

설계점 연소시험

축소형 연소기 간의 연소 특성을 비교하기 위해서 설계점에 대한 연소시험 결과 중 압력과 유량을 저주파로 측정된 데이터를 table 3에 나타내었다. 연소압력은 모두 설계점 근처인 52.5bar 정도를 보여주고 있으며, 차압은 9~13bar 값을 보여주고 있다. 유량은 산화제 4.4kg/s 그리고 연료 1.6kg/s 근처로 O/F비 2.8에 근사한 값들을 보여주고 있다.

설계점 연소시험한 결과 각각의 연소기에 대한 유량과 압력을 가지고 계산한 연소특성속도 C*를 Fig. 9에 나타내었다. 모든 축소형 연소기에서의 C* 값은 목표포 하였던 1680m/s를 상회하고 있으며 최대값은 총돌형 인젝터를 장착한 EM#5에서 1771m/s로 연소특성 속도 효율 99.5%이라는 매우 높은 값을 보여 주었다. 리세

스가 커짐에 따라(EM#1,2,3,4) 연소 효율이 증가하는 경향을 보여주고 있으며, RN=0.6과 2사이의 C* 차이는 평균 65m/s로 이론 특성속도 기준으로 볼 때 약 3.6% 차이를 보여주고 있다. 와류 분사기에서 단협형(EM#6)이 혼합형(EM#4)보다 약 7m/s 높은 효율을 갖는다. 본 축소형 연소기의 경우 실물형 분사기 배열과 유사하고 연소실 길이가 거의 비슷하지만 벽면의 영향을 받는 최외곽 분사기 개수가 12개(60%이상)로 실물형 연소기보다 효율이 낮을 것으로 사료된다. 하지만 실물형 경우 최외곽에 냉각을 위한 연료 손실이 있고 약간 효율이 낮을 것으로 예상되는 배플 분사기가 있어 연소효율 감소가 예상되어 축소형 연소기와 비슷한 효율을 갖을 것으로 사료된다. 이는 효율이 높은 실물형 연소기를 리세스 증가로 충분히 개발할 수 있음을 의미한다.

Table 3 Test results(steady state, at DP)

시험번호	08-92	26-110	31-115	20-104	29-113	23-107
축소형 연소기 No#	#1	#2	#3	#4	#5	#6
LOx가압압력(bar)	86.54	87.02	86.95	87.42	87.17	87.45
산화제매니폴드압(bar)	54.38	54.50	55.24	56.74	54.26	55.66
연료가압압력(bar)	92.73	92.21	92.14	92.76	91.81	92.75
연료매니폴드압(bar)	61.85	63.63	66.52	67.11	63.57	68.93
연소압력_헤드측(bar)	52.35	53.27	54.19	53.72	54.96	54.45
연소압력_노즐측(bar)	51.84	52.99	53.06	53.36	54.65	54.09
산화제유량(kg/s)	4.43	4.43	4.41	4.33	4.41	4.38
연료유량(kg/s)	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57
전체유량(kg/s)	6.00	6.00	5.98	5.90	5.98	5.95
O/F ratio	2.81	2.82	2.80	2.77	2.80	2.79
c* corrected (m/s)	1689.27	1709.85	1743.90	1758.42	1771.46	1766.18

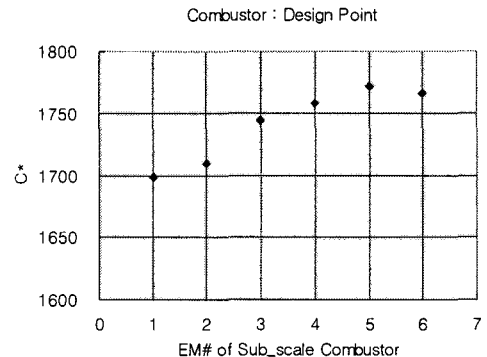


Fig. 9 Characteristics velocity of combustor

Fig. 10에는 연소실과 추진제 매니폴드 간에 발생하는 차압에 대한 것을 나타내었다. 총돌형의 경우 수류시험과 일치한 9bar 근처를 보여주

고 있으며 와류형 분사기의 경우 수류시험시 9.5bar 보다 높은 값인데, 이는 연소에 의한 차압상승으로 보이며 리세스가 커지면서 더 증가함을 알 수 있다[5]. 탈설계점에서의 연소효율 및 차압은 설계점과 비슷한 경향을 보였다.

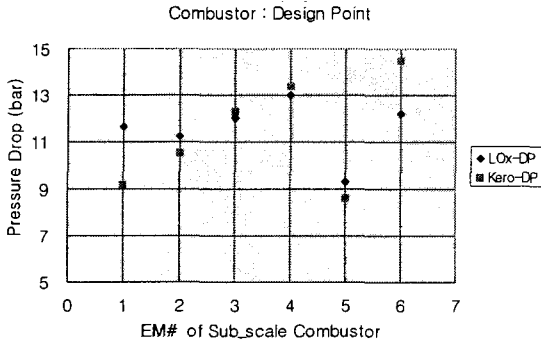


Fig. 10 Pressure drop of combustor

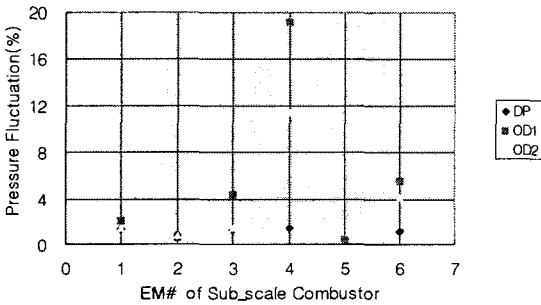


Fig. 11 Pressure fluctuation of combustor

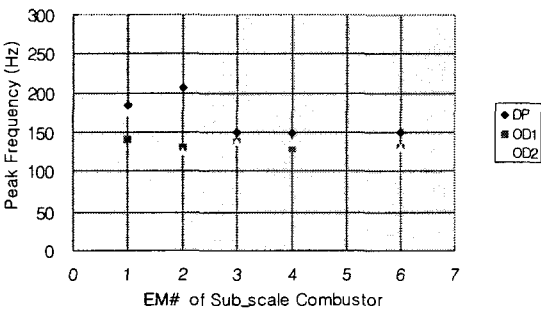


Fig. 12 Frequency of pressure fluctuation

축소형 연소기 압력섭동

연소시험중에 발생한 연소실의 압력섭동에 대한 것을 30Hz 필터링하여 RMS(root mean square)한 다음 정상연소압력으로 무차원한 것을 Fig. 11, 이에 대한 주파수를 Fig. 12에 도시하였다. 섭동 크기는 대부분 4%이하로 만족하

지만 EM#4의 탈설계점에서는 매우 큰 값을 보여주고 있어 해결이 요구된다.

3. 결 론

실물형 연소기 전단계로 6종의 축소형 고압 연소기를 설계/제작하여 성공적으로 연소시험을 수행하였다. 충돌형에서 분사기 손상이 발생했지만 와류형 분사기 손상은 발생하지 않았으며 연소특성속도는 95.5~99.5%의 높은 효율을 보여주었다. 외류형 분사기의 경우 리세스가 커질수록 연소효율은 증가하였다. 추진제 차압은 설계 차압에 근접한 결과를 보여주었고 와류형 분사기의 경우 리세스가 클수록 차압이 증가하였다. 압력섭동 크기는 EM#4의 탈설계점을 제외한 대부분 시험에서 규제조건을 만족하는 4% 이하의 값을 보여주었고 고주파 연소불안정은 발생하지 않았고 150Hz의 저주파 진동만 발생하였다. 본 축소형 연소기 시험결과는 실물형 연소기에 장착할 분사기를 선정하는데 사용될 것이며 향후 개발될 연소기에도 매우 유의한 정보를 제공한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- Huzel, D. K. and Huang, D. H., "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines," AIAA, 1992.
- 한영민, 김승한, 서성현, 이광진, 설우석, 이수용, "외부혼합 와류분사기를 장착한 액체로켓엔진용 축소형 고압연소기 개발", 제5회 우주발사체 심포지움, 2004, pp.156-163.
- 한영민, 김승한, 서성현, 임병직, 송주영, 조원국, 설우석, "내부혼합 와류분사기를 장착한 액체로켓엔진용 축소형 고압연소기 연소시험," 제3회 한국유체공학 학술대회, GC26, 2004, pp.1-4.
- 조광래 등, "소형위성 발사체 개발사업(II)," 한국항공우주연구원 보고서, 2004.
- 이광진, 서성현, 한영민, 김승한, 조원국, "액체로켓엔진용 동축스윙 분사기의 recess 변화에 대한 연소성능 연구," 제3회 한국유체공학 학술대회, GC24, 2004, pp.1-4.