

분사기 수에 따른 실물형 가스발생기 연소특성

안규복*, 서성현**, 임병직***, 김종규****, 이광진*****, 한영민*****, 최환석*****

Effect of Injector Number on Combustion Characteristics of Full-scale Gas Generators

Kyubok Ahn*, Seonghyeon Seo**, Byoungjik Lim***, Jong-Gyu Kim****,
Kwang-Jin Lee*****, Yeoung-Min Han*****, Hwan-Seok Choi*****

Abstract

Combustion characteristics of full-scale gas generators were studied experimentally by changing the injector number installed at the injector head. Three full-scale gas generators were utilized; they have same total mass flow rate but mass flow rates per injector are different. Thirteen, nineteen and thirty seven injectors, which have internal-mixing and double-swirl characteristics, are distributed in injector heads, respectively. The results showed that pressure fluctuations in the gas generators with 13 and 19 injectors didn't occur around longitudinal resonant frequency, however longitudinal-mode pressure fluctuation appeared slightly in the gas generator with 37 injectors. As the number of injectors increased, deviations of temperature distribution in the combustion chamber decreased gradually, but the damage of injector LOx posts became a little severe.

초 록

분사기 헤드에 설치된 분사기 수를 바꾸어가며 실물형 가스발생기의 연소 특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 가스발생기에 공급되는 총 추진제의 유량은 같으면서 분사기당 유량이 달라지는 실물형 가스발생기 3대가 사용되었다. 각 가스발생기에는 13개, 19개, 37개의 내부 혼합형 이중 스월 분사기가 배치되었다. 연소시험 결과, 13개, 19개 분사기를 장착한 가스발생기는 축방향 공진주파수에 해당하는 섭동이 발생하지 않았지만, 37개 분사기가 장착된 가스발생기의 경우 강도가 작긴 하지만 축방향 공진주파수에 해당하는 압력 섭동 현상이 나타나고 있다. 분사기 수가 증가할수록 연소실내의 온도 분포 편차는 점차 작아지지만, 분사기 LOx post의 손상은 증가하는 결과를 나타내었다.

키워드 : 가스발생기(gas generator), 분사기 수(injector number),
압력 섭동(pressure fluctuation), 온도 분포(temperature distribution)

* 연소기팀/kbahn@kari.re.kr

*** 연소기팀/tachyon@kari.re.kr

**** 연소기팀/lkj@kari.re.kr

***** 연소기팀/hschoi@kari.re.kr

** 연소기팀/sxs223@kari.re.kr

**** 연소기팀/bellstar@kari.re.kr

***** 연소기팀/ymhan@kari.re.kr

1. 서 론

액체로켓엔진에서 터보펌프는 저압의 탱크에 저장된 추진제를 고압으로 연소기에 전달하는 역할을 수행한다. 터보펌프를 구동하기 위해서는 터빈을 돌리기 위한 공급원이 필요하게 되는데, 공급원을 제공하는 방법으로는 팽창식 사이클(expander cycle), 단계식 연소 사이클(staged-combustion cycle), 가스발생기 사이클(gas generator cycle) 등이 대표적이다. 일반적으로 이러한 방법 중 비행임무, 성능, 추진제, 연소실 등의 특성에 따라 최적의 방법이 선택된다[1].

가스발생기 사이클은 근래의 우주발사체용 액체추진제 로켓시스템에 널리 사용되고 있으며[2], 한국항공우주연구원(이하 항우연)에서도 추진제 공급방식으로 터보펌프를 이용하는 30톤급 액체로켓엔진에 사용될 가스발생기를 개발하고 있다[3-6]. 가스발생기는 일반적으로 연소기와 같은 추진제를 사용하기 때문에 연소안정성 문제가 중요하며, 연소가스는 터빈을 구동하는 역할을 수행하기 때문에 터빈 재질에 의한 온도의 제약을 받게 된다. 또한 연소가스의 온도 변화나 단면에서의 온도 분포는 터빈의 수명에 영향을 주기 때문에 이를 만족할 수 있도록 설계되어야 한다.

항우연에서 개발중인 가스발생기는 액체로켓엔진용의 1.5 MW급 터빈을 구동할 수 있고, 액체산소와 케로신을 추진제로 사용한다. 지금까지 실물형 가스발생기의 경우 총 11대가 제작되어 64번의 연소시험이 성공적으로 수행되었다.

실물형 가스발생기 연소시험 결과 크게 두 가지 문제가 제기되었는데 하나는 분사기 LOx post의 손상 문제[4], 다른 하나는 연소 안정성 문제에 대한 것이다[5-6]. 이 두 가지 문제를 해결하기 위해 분사기의 리세스 수(RN, recess number), 분사기당 유량, 연소길 길이/직경, 교반링(turbulence ring) 장착 등의 분사기 및 연소실 설계 변경을 수행하여 왔다.

본 논문에서는 이러한 설계 변경 중에서 가스발생기에 공급되는 총 추진제의 유량은 같되 분사기 헤드에 배치된 분사기의 개수가 13, 19, 37

개로 분사기당 유량이 다른 실물형 가스발생기 3종에 대한 연소시험 결과를 비교/분석하였다.

2. 가스발생기 형상 및 시험조건

Table 1은 본 연구에 사용된 실물형 가스발생기 분사기 헤드의 모습을 나타낸다. 비행용으로 사용되는 가스발생기는 일체형 형태를 가지나, 본 연구에서는 개발비 절감을 위하여 연소실과 노즐은 서로 공유하도록 하고 분사기 헤드만을 교체할 수 있도록 하였다. 각 가스발생기 모델에는 LOx post 손상을 줄이기 위해 리세스 수가 1보다 큰 내부 혼합형 이중 스웰 분사기가 적용되었다[4]. Table 1에서와 같이, 가스발생기에 배치되는 분사기의 수가 증가할수록 분사기의 리세스 수 또한 증가하여 제작하였다. 이는 분사기 수가 증가할수록 분사기당 유량과 크기가 작아지므로 LOx post의 손상이 심각해질 수 있기 때문에 리세스 수를 증가시켜 이를 방지하도록 하였다.

연소시험에 사용된 실물형 가스발생기의 연소실 실린더부는 직경 107 mm, 길이 125 mm의 크기를 갖으며, 연소실 축소부의 축소각은 76도, 노즐의 직경은 28.4 mm이었다. 연소실 형상에 대한 보다 자세한 사항은 참고문헌[6]에 나와 있다.

가스발생기 또한 연소기와 동일하게 엔진의 작동 영역이 15% 범위에서 변화하므로 이러한 범위 내에서 가스발생기의 작동성 및 안정성이 보장되어야 한다[6]. 가스발생기의 설계점(DP, design point) 뿐만 아니라 탈설계점(OD, off-design point) 특히 고압, 고 O/F 비에서는 출구온도가 높기 때문에 가스발생기 자체적인 손상뿐만 아니라 터빈의 블레이드를 손상시킬 수 있기에 매우 정확한 성능을 알아야한다. 탈설계점은 가스발생기 설계점 연소압력 및 O/F 비 기준으로 $\pm 15\%$ 를 설정하여 Table 2와 같이 도출하였다.

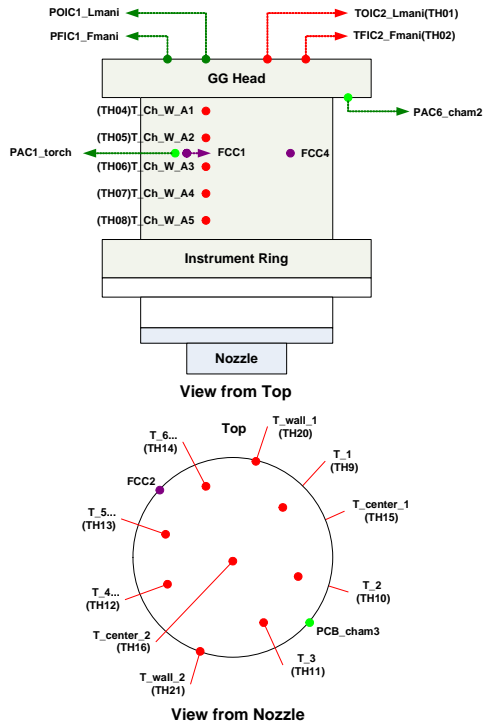
Table 1. Injector head configuration of full-scale gas generators

가스발생기 모델	헤드부 사진	분사기 수	RN
GG#1		13	1.6
GG#2		19	2.0
GG#3		37	2.7

Table 2. Test conditions

Item	DP	OD1	OD2	OD3	OD4	OD5	OD6	OD7	OD8
O/F Ratio	0.32	0.27	0.37	0.37	0.27	0.27	0.32	0.37	0.32
Total Press. [MPa]	5.78	4.91	4.91	6.65	6.65	5.78	4.91	5.78	6.65
Total Temp. [K]	900	827	974	974	827	827	901	974	901
Mass Flow Rate [kg/s]	4.40	4.25	3.34	4.52	5.76	5.00	3.74	3.93	5.06

Figure 1에서와 같이 가스발생기 매니폴드 및 연소실에서의 온도, 정압, 동압을 측정하기 위해 정압 및 동압 센서 그리고 K-type 온도 센서를 장착하였다. 연소가스의 공간적인 온도 분포를 측정하기 위해 계측링(instrument ring)에 총 10개의 열전대가 배치되었는데, 연소실의 중심부에 2개, 벽면에 2개, 면적 평균의 중심점 위치에 6개의 열전대가 그림과 같이 장착되었다. 그리고 압력 섭동을 측정하기 위해 연소실 벽면에 FCC1, FCC4 동압 센서, 계측링에 FCC2 동압 센서가 설치되었다.


Fig. 1 Sensor position installed in the gas generator

3. 연소시험 결과 및 검토

3.1 설계점 연소시험 결과

먼저 13개 분사기를 갖는 실물형 가스발생기 GG#1을 이용하여 설계점에서 수행된 연소시험의 압력 결과를 Fig. 2(a)에, 케로신 및 액체산소의 유량과 밀도 결과를 Fig. 2(b, c)에, 온도 결과를 Fig. 3에, 그리고 압력 섭동 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 결과로부터 케로신 유량은 3.43 kg/s, 산화제 유량은 1.05 kg/s로, 산화제 유량이 예상보다 적게 들어가 O/F 비가 0.306으로 계산되었으며, 이에 따라 연소실 압력이 52.9 bar로 Table 2의 설계점 조건보다 낮은 결과를 보여주고 있다. 유량은 산화제와 연료에 각각 질유량계 1개(Micro Motion)와 터빈유량계 2개(Hoffer)를 설치하여 측정을 하였으며, 유량 데이터 값은 질

유량계에서 얻어진 값을 이용하였다.

적 중심 간의 차이만을 나타내도록 Fig. 3에서와 같이 도시하였다. 그림에서 도형이 없는 실선들은 면적 중심에서의 온도 데이터들을, circle을 가진 실선들은 연소실 중심에서의 데이터들을, triangle을 가진 실선들은 벽면에서의 데이터들을 나타낸다. 벽면에서 측정된 온도를 제외하면 최고온도와 최저온도의 차이는 75.9 K이었으며, 가스발생기로부터 터빈 입구까지의 길이를 고려하면 터빈 입구에서의 온도 편차는 더 줄어들 것으로 예상된다.

(a) pressure of manifold and chamber

(b) flow rate of kerosene

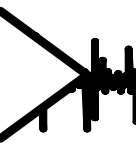
(c) flow rate of LOx

Fig. 2 Hot-firing data obtained from GG#1

앞에서 설명하였듯 연소가스 출구 온도는 계측링에 설치된 10개의 열전대를 이용하여 측정되었는데 이해를 돕기 위해 연소실 중심, 벽면, 면

Fig. 3 Temperature distribution of firing gas in the GG#1 chamber

연소실 및 계측링 동압 센서로부터 측정된 압력 섭동 데이터는 30 ~ 10000 Hz bandpass 필터링을 거친 후 RMS(root mean square) 값 계산 및 주파수 분석이 수행되었다. 연소실 벽면에 수평하게 배치된(flush-mount) 동압 센서(FCC1)를 기준으로 보면, 정상연소 구간에서의 압력 섭동은 RMS 값으로 1.02 bar, 연소압 기준 1.93%로 작은 값을 보이고 있다. 스펙트럼 분석 결과 가장 큰 섭동은 7300 Hz 정도에서 나타나고 있고, 작은 섭동이 축방향 공진주파수에 해당하는 2700 Hz 정도에서 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 기존 시험 결과들로부터 축방향 공진주파수 영역에서 큰 섭동이 발생했던 것과 비교해 보면[6], 분사기 개수가 줄어들고 분사기당 유량이 증가함에 따라 화염면의 영역이 축방향으로 확장되고, 열방출(heat release) 분포가 달라짐에 따라 축방



향 공진주파수 영역에서의 압력 섭동이 작아졌을 것으로 판단된다.

사기 사이의 간격이 좁아지고 추진제의 분포가 보다 균일해짐에 따라 벽면을 포함한 연소실내에서의 혼합 효율이 약간 좋아졌다고 생각된다.

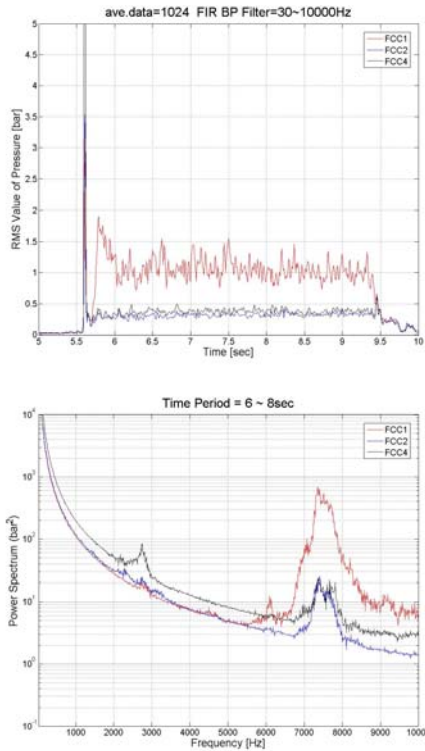


Fig. 4 RMS values and power spectrum data of pressure fluctuation in the GG#1 chamber

다음으로 19개 분사기를 갖는 실물형 가스발생기 GG#2을 이용하여 설계점에서 수행한 연소 시험의 온도 결과를 Fig. 5에, 동압 센서로부터 측정된 데이터를 분석한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 시험결과 O/F 비, 연소압, 온도는 각각 0.329, 56.0 bar, 902 K로 Table 2의 설계점 조건과 거의 유사한 결과를 보여주었다. 벽면에서 측정된 온도를 제외하면 최고온도와 최저온도의 차이는 74.5 K이었으며, GG#1과 비교해 불 때 분사기가 50% 정도 증가했음에도 불구하고 온도 분포 차이는 1.4 K로 미미한 정도의 감소 효과를 보이고 있다. 하지만 벽면 온도까지 고려하였을 경우 온도 분포 차이는 24 K의 감소를 나타낸다. 분사기 수가 13개에서 19개로 늘어남에 따라 분

Fig. 5 Temperature distribution of firing gas at the GG#2 chamber

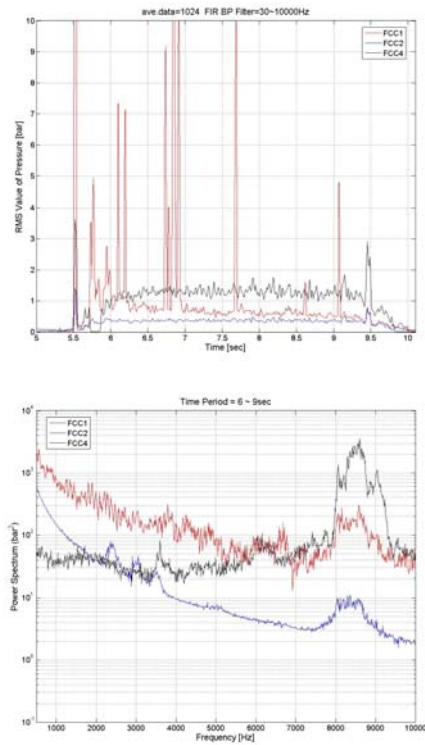


Fig. 6 RMS values and power spectrum data of pressure fluctuation in the GG#2 chamber

동압 센서(FCC1)에서 측정된 RMS 값(Fig. 6) 이 간헐적으로 상당히 강한 증폭(peak)을 보이는데, 이는 시험중 센서와 라인의 접촉이 순간적으로 불량했기 때문으로 생각되며 정상연소 구간에서의 평균을 취해보면 RMS 값으로 0.61 bar, 연소압 기준 1.08%로 작은 섭동 강도를 보이고 있다. 스펙트럼 분석 결과에서도 가장 큰 섭동은 8500 Hz 정도에서 나타나고 있고, 축방향 공진 주파수에 해당하는 영역에서는 두드러진 섭동이 나타나지 않는 것을 알 수 있었다. 이 또한 기존보다 분사기 개수가 줄어들고 분사기당 유량이 증가함에 따라 화염면의 영역이 축방향으로 확장되고 이에 따라 축방향 공진주파수에 해당하는 동압 섭동이 작아졌을 것으로 판단된다.

마지막으로 37개 분사기를 갖는 실물형 가스발생기 GG#3을 이용하여 설계점에서 수행한 연소시험의 온도 결과를 Fig. 7에, 압력 섭동 데이터를 Fig. 8에 나타내었다. 연료 유량이 예상보다 많이 들어가 O/F 비가 0.301로 측정되었으며, 이에 따라 연소압과 온도가 52.9 bar, 849 K로 Table 2의 설계점 조건보다 낮은 결과를 보여주고 있다. 벽면에서 측정된 온도를 제외하면 최고 온도와 최저온도의 차이는 67.7 K로 GG#2에 비해 6.8 K의 온도 분포 감소 효과를 나타내고 있다. 하지만 앞에서와 같이 벽면 온도까지 고려하였을 경우에는 GG#2의 결과에 비해 48 K의 상당한 온도 분포 감소를 나타낸다. 분사기 수가 37개로 증가함에 따라 추진제의 분포가 균일해지고 따라서 혼합 효율이 GG#1, GG#2 보다 좋아진다는 것을 확인할 수 있었다.

GG#3 연소시험의 압력 섭동 데이터를 분석하여 Fig. 8에 도시하였다. 정상연소 구간에서 평균을 취해보면 RMS 값으로 0.41 bar, 연소압 기준 0.84%로 GG#1, GG#2 보다 작은 섭동 강도를 보이고 있지만, 스펙트럼 분석 결과에서는 GG#1, GG#2와는 달리 축방향 공진주파수에 해당하는 영역인 2600 Hz 주위에서 섭동이 나타나는 것을 알 수 있었다. 분사기 개수의 증가로 분사기당 유량이 감소함에 따라 화염면의 영역이 축방향으로 좁아지고 열방출 분포가 헤드면 근처에 집중됨으로써 축방향 공진주파수에 해당하는

압력 섭동이 커졌을 것으로 판단된다.

Fig. 7 Pressure of manifold and chamber, and temperature distribution of firing gas at the GG#3 chamber

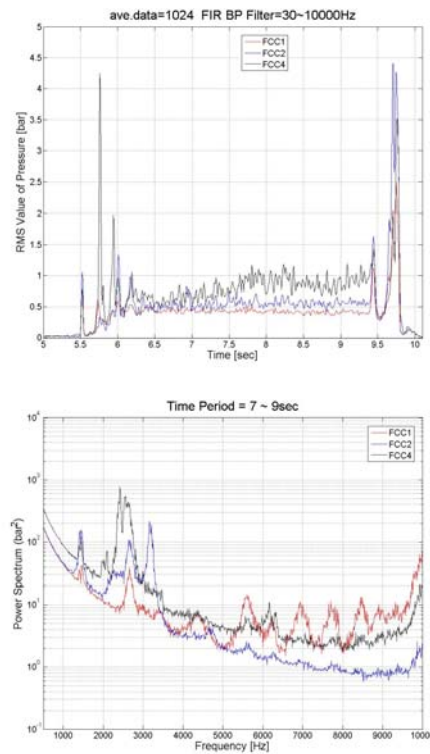
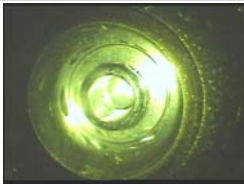
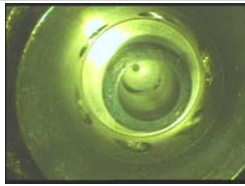
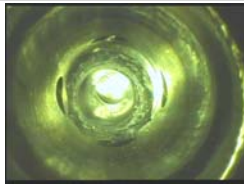

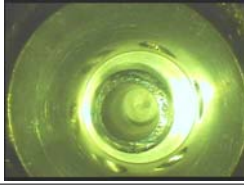
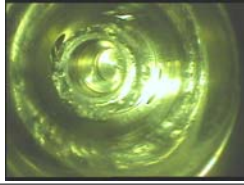


Fig. 8 RMS values and power spectrum data of pressure fluctuation in the GG#3 chamber

Table 3. Comparison of hot-firing data using 3 different full-scale gas generators

가스발생기 모델	GG#1	GG#2	GG#3
설계점 DP			
연소실내 온도 편차(K)	75.9	74.5	67.7
연소실내 압력 섭동(bar)	1.02	0.61	0.41
연소압 기준 압력 섭동(%)	1.93	1.08	0.84
탈설계점 OD5, GG#3는 교반링 설치			
연소실내 온도 편차(K)	64.1	42.9	105.3
연소실내 압력 섭동(bar)	0.76	1.02	0.47
연소압 기준 압력 섭동(%)	1.55	1.86	0.87
탈설계점 OD8			
연소실내 온도 편차(K)	61.8	28.2	
연소실내 압력 섭동(bar)	1.14	센서 오류	
연소압 기준 압력 섭동(%)	2.02	센서 오류	
3회 연소시험 후 LOx post 사진1			
3회 연소시험 후 LOx post 사진2			

3.2 연소시험 결과비교

지금까지 실물형 가스발생기 GG#1, GG#2, GG#3의 설계점 연소시험 결과에 대하여 논의하였다. GG#1, GG#2의 경우 탈설계점 OD5, OD8에 대한 연소시험이, GG#3의 경우 교반링을 장착하여 설계점 및 탈설계점 OD5에 대한 연소시험이 추가적으로 수행되었다.

실물형 가스발생기 GG#1, GG#2, GG#3의 연소시험 결과를 Table 3에 비교하였다. GG#1과 GG#2의 설계점 및 탈설계점 연소시험 결과를 비교해 볼 때 앞에서 살펴본 바와 같이 분사기 수가 증가할수록 연소실내의 온도 편차는 항상 감소하는 결과를 나타내었다. 압력 섭동의 경우 RMS 값들은 모두 연소압 대비 5% 미만의 작은 강도를 보이지만, 분사기 수에 따른 일반적인 경

향은 나타나지 않는데 이는 연소불안정과 같은 강한 압력 섭동이 나타나지 않는 조건에서 100 Hz 이하의 노이즈 성분이 크게 나타나기 때문이다. GG#3에 교반링을 부착하여 탈설계점 OD5에서 수행된 연소시험 결과에서 온도 편차는 105 K로 매우 큰 값을 보이는데, 이는 교반링과 계측링 사이의 간격이 짧은 관계로 교반링으로 인해 유동이 재순환되는 영역에서 온도가 측정되었기 때문으로 생각된다.

3회 연소시험 후 내시경 카메라를 이용하여 분사기의 사진을 촬영하였는데 Table 3에서와 같이 13개, 19개 분사기를 적용한 GG#1, GG#2의 분사기 LOx post는 손상이 거의 없는 반면에 37개 분사기를 사용한 GG#3에서는 많은 손상이 이루어진 것을 알 수 있었다. 이는 GG#3의 경우 분사기의 크기와 분사기당 유량이 작기 때문에

화염의 영역이 분사기 헤드 근처에서 발생될 것이며 상대적으로 분사기를 냉각해 줄 수 있는 LOx의 양이 적기 때문으로 생각된다. 참고로 사용된 분사기간 LOx post 두께의 차이는 최대 0.05 mm로 거의 차이가 없었다.

4. 결 론

가스발생기에 공급되는 총 추진제의 유량은 같으면서 분사기당 유량이 다른 3종의 실물형 가스발생기를 제작하여 연소시험을 수행하였다. 본 논문에서는 설치된 분사기 수의 변화에 따른 실물형 가스발생기의 온도 분포, 압력 섭동, LOx post 손상 등과 같은 연소 특성에 대하여 비교, 분석을 하였다. 예상대로 가스발생기에 배치된 분사기 수가 증가할수록 연소실내의 온도 편차는 감소하는 경향을 나타내었으며, 3종의 가스발생기 모두 온도 편차는 ± 50 K 이내로 유지되었다. 연소실내 압력 섭동의 경우 모든 시험에서 연소압 기준 5% 이내를 만족하고 있었지만, GG#3에서는 미약하긴 하지만 축방향 공진주파수 영역에서의 섭동이 발생을 하였다. LOx post의 경우 GG#1, GG#2에 사용된 분사기에는 손상이 없었지만, GG#3에 사용된 분사기는 리세스수가 2.7 임에도 불구하고 손상이 상당히 진행됐다는 것을 알 수 있었다. 따라서 가스발생기의 제작 비용, 축방향 압력 섭동 발생 여부, 온도 분포, 분사기 LOx post 손상 등을 고려할 때 분사기 개수가 작은 13개, 19개 분사기를 갖는 가스발생기가 좀 더 효율적일 것으로 판단된다.

3. 한영민, 이광진, 문일윤, 서성현, 최환석, 이수용, "액체로켓엔진용 가스발생기의 고압연소특성," 제25회 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2005, pp.341-345.
4. 송주영, 김종규, 문일윤, 한영민, 최환석, "가스발생기 분사기 LOx post 손상 방지를 위한 분사기 개발," 제25회 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2005, pp.353-357.
5. 안규복, 이광진, 임병직, 한영민, 최환석, "액체로켓엔진용 가스발생기에서 연소불안정 방지를 위한 연소실 개발," 제25회 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2005, pp.207-210.
6. 안규복, 문일윤, 서성현, 한영민, 최환석, "설계인자에 따른 연료 과농 가스발생기의 연소 안정성 특성 연구," 제26회 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2006, pp.171-176.
7. P. W. Gloyer, W. H. Knuth and R. A. Crawford, "Oxygen Rich Gas Generator Design and Performance Analysis," AIAA Paper 93-2159, 1993.

참 고 문 헌

1. D. B. Morgan and R. Beichel, "Stoichiometric Gas Generator - A Strategic Departure," AIAA Paper 91-2584, 1991.
2. 홍용식, 우주추진공학, 청문각, pp.143-149.