

파워팩 상태의 가스발생기 동적 연소 특성 분석

서성현* · 한영민* · 최환석*

Analysis of Pressure Fluctuations in a Gas Generator Assembled in a Powerpack

Seonghyeon Seo* · Yeoung-Min Han* · Hwan-Seok Choi*

ABSTRACT

Combustion tests of a fuel-rich gas generator had been conducted using the assembly of a powerpack. A gas generator is prone to longitudinal modes of combustion instabilities in a powerpack due to the increase of a characteristic length. It has been observed that the orifice inserted at the exit of the gas generator suppresses a longitudinal combustion instability. The intensities of pressure fluctuations in the manifolds and the chamber increase quadratically with a chamber pressure. Pressure fluctuations in the fuel manifold reveal two-fold strength greater than those in the oxygen manifold and the chamber. Frequency analysis indicates nonlinear characteristics inherent in the pressure fluctuations in the fuel manifold.

초 록

연료 과농 가스발생기의 연소시험이 파워팩 환경에서 수행되었다. 가스발생기는 파워팩 환경에서 특성 길이 증가로 인해 축 방향 연소 불안정에 취약하다. 가스발생기 후단에 압력 강하를 위해 삽입한 오리피스는 축 방향 연소 안정성을 향상시켜주는 것으로 확인되었다. 연소실과 추진제 매니폴드에서 측정된 압력 섭동의 세기는 연소실 압력의 제공에 비례하여 증가하였다. 특히 연료 매니폴드 내의 압력 섭동이 산화제 매니폴드 또는 연소실 압력 섭동보다 약 2배 이상 크게 발생하였다. 주파수 분석 결과, 연료 매니폴드 압력 섭동은 비선형적인 특성을 내포하고 있는 것으로 파악되었다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Gas Generator(가스발생기), Fuel-Rich(연료과농), Powerpack(파워팩), Pressure Fluctuation(압력섭동), Nonlinear(비선형)

1. 서 론

터보펌프 방식 액체로켓엔진은 펌프 구동을 위한 터빈 작동가스가 필요하다. 단순한 개방형 사이클을 적용할 경우 일반적으로 연료를 과농한 상태에서 연소시켜 고압가스를 생성하는 가스발생기를 적용한다[1]. 연료 과농 가스발생기

* 한국항공우주연구원 연소기팀
연락처, E-mail: sxs223@kari.re.kr

는 연료가 산화제 공급 유량 대비 약 3배 정도가 많이 소모되어 연소 가스가 과다한 연료에 의해 냉각되는 효과에 의해 발생 가스의 온도를 900 K 수준에서 유지시킬 수 있다. 가스발생기 형상은 설계 개념에 따라 여러 가지 형태를 지닐 수 있다. 일반적으로 가스발생기는 연소기와 동일한 작동 원리와 형상을 유지하며 단지 연소기와 달리 추력발생을 위한 노즐이 없고 연소 가스가 터빈 매니폴드로 유입될 수 있도록 연결 배관이 존재한다. 따라서 연소기에 비해 특성 길이가 길다. 음속 조건에 의해 음향 경계 조건이 노즐에서 형성되는 연소기와 달리 가스발생기의 경우 축 방향 특성 길이가 상대적으로 길고 연소실 부피도 가스발생기 연소실부와 연결부를 모두 고려해야 한다. 가스발생기의 연소실을 규정하는 음속 조건 형성은 터빈 매니폴드에서 터빈 블레이드로 통하는 다수의 노즐에서 이루어진다. 본 연구에서는 가스발생기가 터보펌프와 조합된 상태에서 터빈을 구동하고 터빈에서 공급된 에너지로 회전하는 펌프에 의해 가압된 추진제의 일부를 공급받아 연소하는 파워팩 폐회로 연소시험 시 가스발생기의 연소 특성을 파악하고자 하였다[2]. 따라서 본 연구에서는 실제 파워팩 조건에서 가스발생기 연소가 보이는 동적인 특성을 파악하여 이전 단품 시험과 터빈 매니폴드 모사 연소시험 결과와 비교하여 그 물리적 현상을 이해하고자 한다.

2. 시 험

본 연구에 사용된 가스발생기는 이중 와류 동축형 분사기를 19개 장착한 것으로 자세한 관련 사항은 이전 문헌에서 찾아볼 수 있다[3]. 파워팩 상태에서 가스발생기 연소시험은 Table 1과 같이 총 4회가 실시되었다. 연소시험 진행 중 가스발생기 추진제 공급 밸브 개도 조절에 의해 운전 조건이 변경되었으며, 따라서 총 10개의 시험 조건이 획득되었다. 연소 온도를 동일한 값으로 유지하기 위해 표에서와 같이 혼합비가 0.3 대역에서 유지되었다. 연소시험에 사용한 추진제

는 액체산소와 항공유(T-1)이다. 가스발생기가 90도의 연결배관을 통해 터보펌프 터빈 매니폴드와 연결된 모습을 Fig. 1에서 볼 수 있다.

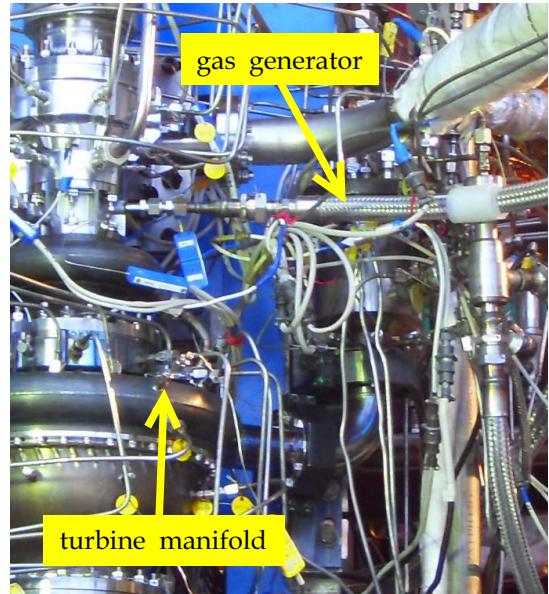


Fig. 1 A Gas Generator Assembled with a Turbopump for Closed Combustion Tests

Table 1. Run Conditions

시험 번호	총시험시간 (sec)	OFR	p_c (MPa)	p_{tmani} (MPa)	mdot (kg/s)
1	45	0.315	5.649	4.90	4.18
		0.314	5.295	4.64	3.93
2	45	0.308	5.476	4.81	4.11
		0.309	5.580	4.89	4.19
3	120	0.299	5.546	4.88	4.26
		0.300	5.059	4.50	3.89
		0.301	5.297	4.74	4.07
4	110	0.300	5.540	4.90	4.23
		0.303	5.874	5.16	4.46
		0.300	6.484	5.74	4.97

가스발생기 출구에는 터빈 매니폴드에서의 압력 강하를 유도하기 위해 오리피스가 삽입되었으며, 오리피스 내경은 35.5 mm 로 모든 시험에 동일하게 사용되었다. 가스발생기 점화는 파이로테크닉(pyrotechnic) 점화기에 의해 이루어졌으며, 점화 위치는 연소실 측면에 가공되어 있는

구멍을 통해 점화가스가 추진제 유동 방향에 직각으로 분출되도록 하였다.

가스발생기의 동적인 연소 특성 파악을 위해 매니폴드와 연소실 내부의 압력 섭동이 측정되었다. 압력 섭동 신호의 계측 주파수는 19.2 kHz 이었다.

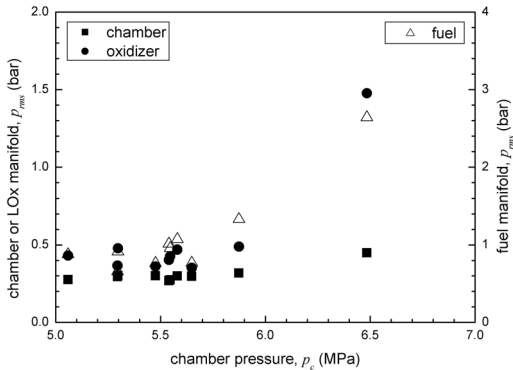


Fig. 2 RMS values of pressure fluctuations in chamber and manifolds with respect to a chamber pressure

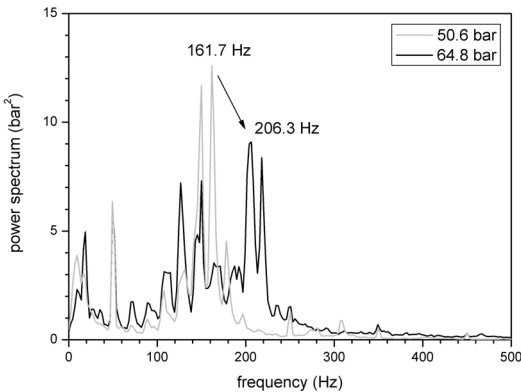


Fig. 3 Power spectrum plot of pressure fluctuations in the chamber for the minimum and maximum chamber pressure conditions

3. 결과 및 토의

압력 섭동의 세기는 root-mean-square(RMS)에 의해 표현될 수 있는데 각 조건에서 평균 RMS 값을 Fig. 2에 도시하였다. 우선 연소실 내 압력 섭동 RMS는 연소실 압력에 관계없이 0.5 bar 이하로 계측되었다. 이는 연소실 압력 대비 1% 이하의 값으로 연소가 매우 안정적으로 이루어짐을 확인하였다. 모든 조건에 걸쳐 축 방향 연소 불안정은 발생하지 않았으며, 이전 시험 결과로부터 가스발생기 출구에 장착한 오리피스에 의한 연소실 축 방향 음향 경계 조건 변화가 전반적인 연소 안정성을 증대시킨 것으로 보인다[4]. 본 그림에서 모든 조건에 대해 연료 매니폴드 내 압력 섭동은 산화제 매니폴드 내 섭동의 약 2배에 이른다. 압력 섭동은 유속 증가에 따른 난류 섭동에 의해 발생한 것으로 보이며, 특히 연소실 압력의 제곱 값에 따라 증가하는 것으로 보인다.

연소 불안정은 발생하지 않았지만 압력 섭동에 내재된 압력과 분포 특성을 살펴보기 위해 주파수에 따른 스펙트럼 분석을 Fig. 3과 같이 수행하였다. 본 그림은 시험조건 중 최소와 최대 연소실 압력 발생 시 계측한 연소실 내부 압력 섭동 신호의 파워스펙트럼이다. 100~200 Hz 대역에서 다수의 압력파가 존재함을 볼 수 있는데 상대적으로 큰 에너지를 가진 peak의 주파수 값이 압력 증가에 따라 증가하였음을 볼 수 있다. 본 압력과 peak은 연소실의 공진 주파수와 관계 없는 수력학적 특성으로 보인다. 주파수 변화 또한 유량 증가에 따른 유속 증가에 의한 것으로 보인다. 이전 가스발생기 단품 시험 시 발생한 주파수 대역과 매우 유사하며, 인근한 주파수 대역에서 다수의 peak이 존재함으로써 본 특성이 coherent structure의 shedding과 coalescence의 반복에 의해 결과적으로 발생하는 압력 섭동인 것으로 판단된다.

특정 주파수에 압력 섭동이 연동된 연소 불안정은 발생하지 않았으나, 연소 시험 중에 공급 유량을 변화시키는 본 시험 특성으로 인해 Fig. 4와 같은 현상이 나타났다. 본 그래프는 시험 2에 해당하는 것으로 80 g/s 정도의 유량 증가에 의해 3000~6000 Hz 대역에 넓게 퍼져있는 압력

섭동의 세기가 급격하게 변화, 증가하였음을 알 수 있다. 이와 같은 broadband peak은 연소 압력 섭동이 chaos의 특성을 내재하고 있음을 의미한다[5]. 따라서 측정되는 압력 섭동의 세기 값이 시험조건 접근 경로에 따라 상당한 불확정성을 내포하고 있다고 할 수 있다.

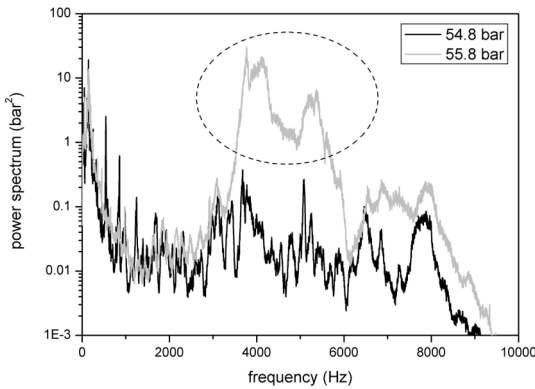


Fig. 4 Power increase over a broadband of a frequency of the fuel manifold pressure fluctuations measured for the Test no. 2

4. 맺 음 말

과워팩 환경에서 가스발생기 연소시험이 수행되었다. 가스발생기의 가스가 터보펌프의 터빈을 구동하고 펌프에서 토출된 추진제의 일부가 가스발생기로 유입되어 폐회로를 구성하였다. 터빈 매니폴드 저압 운전을 위해 가스발생기 후단에 장착한 오리피스는 연소실 저압 조건에서 발생

할 수 있는 축 방향 연소 불안정을 억제하는 효과를 보이는 것으로 판단되었다. 오리피스는 압력 강하를 야기하지만 축 방향 특성 길이를 감소시키는 효과가 발휘되었다. RMS로 표현된 압력 섭동의 세기는 연소실 압력의 제곱 값에 따라 증가한다. 특히 연료 매니폴드 내의 압력 섭동이 산화제 매니폴드 또는 연소실 압력 섭동보다 약 2배 이상 크게 발생하였다. 주파수 분석 결과, 연료 매니폴드 압력 섭동은 비선형적인 특성을 내포하고 있는 것으로 파악되었다.

참 고 문 헌

1. Liquid Propellant Gas Generators, NASA SP-8081, 1972
2. 서성현, 안규복, 한영민, 최환석, "터보펌프 연계상태의 가스발생기 연소 특성," 제31회 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, pp. 133-136, 대전 KAIST, 2008
3. 서성현, 안규복, 임병직, 김종규, 이광진, 한영민, 류철성, 김홍집, 최환석, "액체로켓용 연료 과농 가스발생기 개발," 한국추진공학회지, 제11권, 제4호, pp. 38-45, 2007
4. 서성현, 임병직, 안규복, 이광진, 김종규, 이광진, 한영민, 최환석, "터빈 결합 환경의 가스발생기 동적 연소 특성," 제30회 한국추진공학회 춘계 학술대회, 2008, pp.121-124
5. Hilborn, R. C., *Chaos and Nonlinear Dynamics*, 2nd ed., Oxford University Press, 2000