

論文

액체로켓엔진에서 충돌형 분사기 형태의 연료과잉 가스발생기 연소특성

한영민*, 김승한*, 이광진*, 문일윤*, 설우석*, 이창진**

Combustion Characteristics of Fuel-rich Gas Generator with Impinging Injector for a Liquid Rocket Engine

Yeoung Min Han*, Seung Han Kim*, Kwang Jin Lee*, IL Yoon Moon*, Woo Seok Seol* and Chang Jin Lee**

ABSTRACT

The overall results of hot firing tests of fuel-rich gas generator with impinging injector at design and off-design points are described. The gas generator consists of an injector head with impinging injector, a water cooled combustor wall, a turbulence ring to enhance mixing, an instrument ring measuring temperature and pressure and a nozzle. The combustion tests were successfully performed without damage of gas generator. Test results show that the outlet temperature is not dependent on residence time of hot gas within 4~6msec but dependent on chamber pressure. The relation between outlet temperature and combustion efficiency resulting from measured pressure, mass flow rate and area of nozzle throat is shown. The overall O/F ratio is the critical parameter to determine the outlet temperature and the linear correlation between two parameters is established.

초 록

본 논문에서는 충돌형 분사기를 장착한 연료 과잉 가스발생기에서 수행한 설계점 및 탈설계점 연소시험의 전반적인 결과에 대하여 논하였다. 가스발생기는 충돌형 분사기와 추진제 공급 매니폴드로 구성된 분사기 헤드, 물냉각 채널을 가진 연소실, 혼합을 증가시키는 turbulence ring, 온도 및 압력을 측정하는 링, 그리고 노즐로 구성되었다. 여러 운영 조건에서 연소시험은 성공적이었으며 가스발생기 손상은 발생하지 않았다. 체류시간 4~6msec 정도에는 출구온도변화가 거의 없었지만 압력변동에 따라 출구온도는 변하였다. 측정되는 압력, 유량 그리고 노즐목 크기로 계산한 연소효율은 출구에서 측정한 온도의 제곱근에 비례하는 관계식을 저 혼합비 가스발생기에서도 갖고 있었다. 가스발생기의 O/F 비 변화에 가장 민감하게 출구온도가 변화하였으며 이에 대한 관계식을 도출하여 향후 설계 기초 자료로 활용되게 하였다.

Key Words : Impinging Injector(충돌형 분사기), Fuel Rich(연료과잉), O/F Ratio(혼합비), Outlet Temperature(출구온도), Combustion Efficiency(연소효율)

1. 서 론

† 2004년 10월 19일 접수 ~ 2005년 4월 19일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원

** 정회원, 건국대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: ymhan@kari.re.kr
대전시 유성구 어은동 45번지

가스발생기를 이용하여 개방형 사이클(Open Cycle)을 채택한 액체로켓엔진에서 가스발생기 연소특성은 전체 엔진의 성능을 평가하는데 중요한 인자가 된다. 가스발생기에서 발생한 연소가

스는 터보 펌프의 터빈을 구동하고 대가나 노즐 확대부로 방출되어 잉여의 추력을 발생시킨다. 가스 발생기는 엔진연소에서 사용하는 추진제를 사용하는 것이 보편적이며, 작동압력은 연소기 압력과 비슷한 수준이다[1].

현재 운용되고 있는 개방형 사이클 개념의 액체엔진의 경우 대부분 이원 추진제 가스발생기를 사용하는데, 이원 추진제 연소가 일어나는 지역은 2000K 이상 고온인 관계로 이러한 고온층의 제거가 신뢰가 높은 가스발생기 설계에서 고려해야 할 중요한 요소이다. 가스발생기에서 고온층은 가스발생기 자체 및 터빈 블레이드를 손상시켜 엔진 파손을 가져올 수 있다. 대부분 이원 추진제 조합의 연소는 가스발생기 벽 및 터빈의 재질을 녹일 수 있는 온도보다 높은 값에서 이루어지므로, 벽면 근처에서 연소가 일어나지 않게, 그리고 고온가스와 저온 추진제가 잘 혼합되게 해야 한다. 즉, 가스발생기의 설계자는 주 연소지역의 위치 및 고온과 저온 가스의 혼합을 설계시 최우선으로 고려해야 한다[2].

가스발생기에서 주요 인자는 유량, 압력, 가스 온도, 가스의 분자량 및 비열비 등이다. 터빈에서 필요한 동력에 의해 가스발생기로서의 유량 및 압력 등의 주요 인자가 결정되지만, 가스발생기 출구에서의 가스 온도는 터빈의 재질에 의해 결정된다. 가스발생기는 액체로켓엔진의 다른 부품보다 넓은 영역의 온도, 압력 그리고 유량 등의 조건에서 운용되어야 한다. 즉, 가스발생기는 설계점 뿐만 아니라 탈설계점에서도 안정되게 작동해야 하는데, 특히 탈설계점에서의 가스발생기 출구 온도는 터빈 재질을 고려하여 결정하여야 한다. 터빈의 효율을 결정하는데 가스발생기 출구에서 연소가스의 분자량 및 비열비는 매우 중요한 인자이다.

액체로켓용 가스발생기의 설계에 필요한 혼합비와 출구온도와의 관계식, 분자량 및 비열비에 대한 데이터는 기존 문헌상[1,3]에 존재하는데, 해석과 실험에 의한 차이가 매우 심하고 사용하는 연료의 종류 및 운용압력 등이 달라 실제 설계에 사용하기에는 부적절하다. 국내의 경우 가스발생기에 대한 데이터는 전무한 상태이다.

본 논문에서는 액체산소와 케로신을 추진제로 사용하여 160kW급 액체로켓용 터보펌프의 터빈을 구동할 수 있는 가스발생기의 설계점 및 탈설계점 연소시험 결과에 대한 전반적인 내용을 포함하고 있다. 가스발생기 구성품들에 대해 설명하였고 시험조건 및 방법에 대해 간략히 기술하였다. 연소시험 결과로써 유량, 연소압력, 출구온

도 등을 제시하였고 이로부터 계산한 연소효율에 대해 살펴보고 연소실 동압의 섭동에 대해 분석한 결과도 제시하였다. 설계점 및 탈설계점 데이터를 기초로 하여 혼합비에 따른 가스발생기 출구에서의 온도 관계식을 제시하였다. 본 결과는 향후 가스발생기의 개발에 기초 설계자료로 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

II. 가스발생기 및 시험조건

액체로켓엔진의 전체성능 해석을 통해 가스발생기의 최적 설계를 수행하였다[4]. 이후 혼합비와 출구온도와의 관계식을 기존의 실험식[3]으로 수정해 설계한 가스발생기 사양을 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Specifications of gas generator at design point

GG Chamber Pressure	2.31 MPa
Total Flow Rate	0.90 kg/sec
Fuel Flow Rate	0.66 kg/sec
Oxidizer Flow Rate	0.24 kg/sec
O/F ratio	0.355
Outlet Average Temperature	920.00 K
Residence Time	5.00 msec
Pressure Drop through Injector	
Fuel	0.62 MPa
Oxidizer	0.56 MPa
GG Chamber Diameter	52.00 mm
GG Chamber Length	291.17 mm
GG Outlet Diameter	21.01 mm
Molecular Weight	24.10
Specific Heat Ratio	1.12

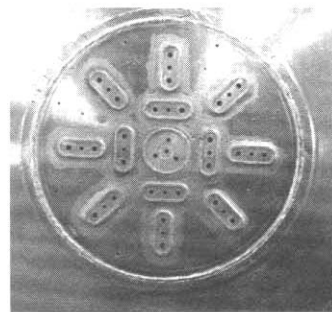


Fig. 1. Injector face plate

설계된 가스발생기는 연소실, 인젝터 및 헤드, 접화기, turbulence ring, 측정부, 노즐부 등으로 구성되었는데 상세사항은 참고문헌[5]에 제시하였다. 본 가스발생기에 장착한 인젝터는 연료-산화제-연료 (F-O-F)의 충돌형 인젝터이다[6]. 가스

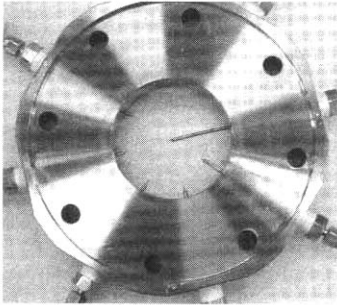


Fig. 2. Instrument Ring

발생기 인젝터 헤드 및 분사기 배열에 대한 것을 Fig. 1에 나타내었다.

가스발생기 출구에서의 정확한 온도 측정을 위해 Fig. 2와 같이 6개의 K-type 열전대를 중앙과 면적중심, 그리고 벽 쪽에 설치하였다.

가스 발생기의 전체적인 개략도를 Fig. 3에 나타내었으며 연소시험을 수행한 시험설비나 점화순서 등의 시험방법은 참고문헌[5]에 제시하였다.

많은 액체로켓엔진의 경우 운용하는 범위가 추력 기준 약 $\pm 10\%$ 이내이다. 이러한 관계로 엔진의 부품인 가스발생기는 이보다 더 큰 범위에

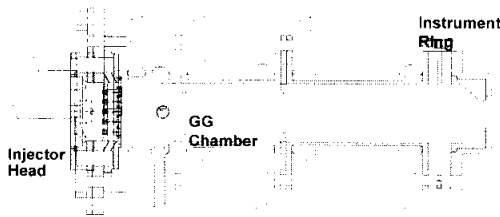


Fig. 3. Schematic of gas generator

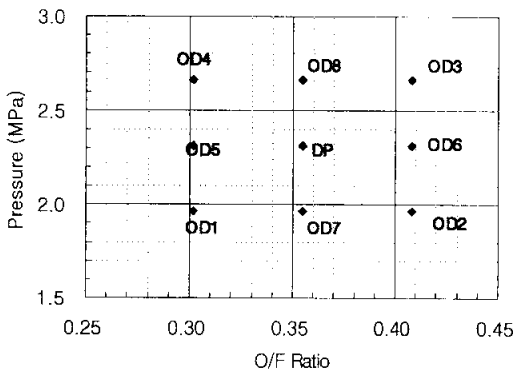


Fig. 4. Working window of gas generator

서 운용되어야 하므로, 작동범위를 설계점(Design Point, DP) 기준으로 $\pm 15\%$ 로 선정하였다. 추력은 엔진의 유량 즉 연소압력에 따라 주로 변하는 관계로 가스발생기의 압력과 혼합비 (O/F ratio)를 인자로 하여 설계점 기준 $\pm 15\%$ 를 선택하여 Fig. 4와 같이 탈설계점(Off Design, OD) 등을 정하였다. 탈설계점 1(OD1)은 저압 저혼합비 조건으로 연소압력은 19.6 bar이며, 탈설계점 3(OD3)은 고압 고혼합비로 압력이 26.6 bar이며 산화제 유량이 가장 큰 조건이다.

가스발생기의 경우 연소화학 반응이 느려 연소가스의 연소실 체류시간이 중요한 요소인 관계로 체류시간이 4, 5, 6 msec 즉 연소실 길이가 222, 293, 350 mm인 경우에 대한 시험을 수행하였다. 또한, 출구에서의 온도분포를 균일하게 위해 장착한 turbulence ring이 있는 경우와 없는 경우에 대한 시험도 수행하였다.

III. 연소시험 및 결과

3.1 가스발생기 연소시험

가스발생기를 시험설비에 장착하여 6번의 점화시험 및 14회의 연소시험을 수행하였는데 분사기 헤드, 연소실 그리고 노즐 등에는 손상이 발견되지 않았고 압력 및 온도는 만족스러운 결과를 보여주었다. Fig. 5는 가스발생기 시험중의 사진으로 짧은 시간 연소인 관계로 후처리를 하지 않았다.

설계점에서 가스발생기의 추진제 공급 메니폴드와 연소실의 압력을 Fig. 6에 나타내었는데, 연소압은 22.6bar, 산화제 차압은 6.1bar 그리고 연료차압은 5.3bar로 나타났다. Fig. 7은 설계점 연소시험에서의 가스발생기 출구에서의 온도 분포를 보여주고 있는데, 면적 가중치를 고려한 평균 온도는 958.3K이며 편차는 약 $\pm 10K$ 이내이다.



Fig. 5. Combustion gas from gas generator

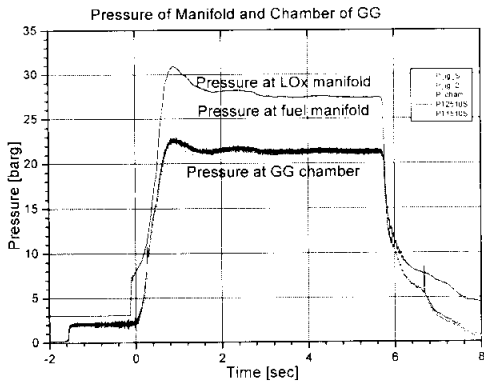


Fig. 6. Pressure profile at manifold and chamber of gas generator (DP)

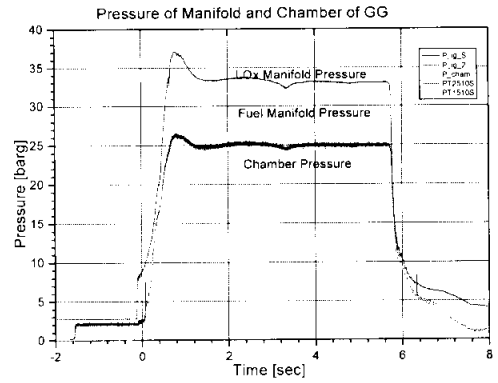


Fig. 8. Pressure profile at manifold and chamber of gas generator (OD8)

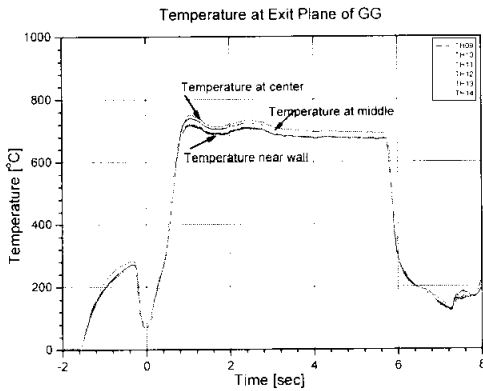


Fig. 7. Temperature profile at outlet of gas generator (DP)

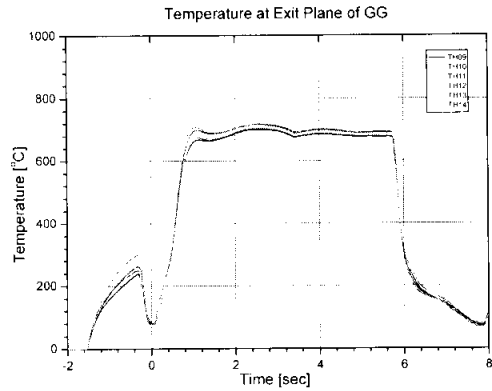


Fig. 9. Temperature profile at outlet of gas generator (OD8)

여러 탈설계점 중에서 실제 엔진 운영에서 출력을 높이기 위해 작동할 수 있는 고압이면서 설계점 혼합비와 같은 OD8에서의 압력선도를 Fig. 8에 나타내었는데, 연소압은 26bar, 산화제 차압은 8bar, 연료 차압은 6.8bar 이다. Fig. 9는 출구에서의 온도분포로 평균온도는 963.3K이며 편차는 ±10K 이내로 설계점과 비슷한 결과이다.

위의 설계점 및 탈설계점을 포함한 시험결과

Table 2. Test results at design & off-design conditions

	DP	OD1	OD3	OD5	OD6	OD7	OD8
Pressure(MPa)	2.23	1.88	2.56	2.22	2.22	1.89	2.60
O/F ratio	0.37	0.29	0.40	0.30	0.42	0.35	0.37
Total Mass Flow(kg/s)	0.88	0.86	0.97	0.99	0.83	0.77	1.01
LOx(kg/s)	0.24	0.19	0.28	0.23	0.24	0.20	0.27
Kerosene(kg/s)	0.64	0.66	0.69	0.76	0.58	0.57	0.74
Outlet Temp.(K)	958	844	1001	861	1013	913	963
C*	881	760	912	779	929	845	886
Temp. Deviation(K)	10.00	8.00	7.50	5.60	8.00	7.00	8.50

는 Table 2와 같다. 설계점 중심으로 압력에 대한 영향을 OD7, DP, OD8, 혼합비에 대한 것을 OD5, DP, OD6, 두가지 변화에 대한 것은 OD1, DP, OD4에서 알아보고자 하였다.

연소실 길이를 변화시켜 연소가스의 잔류시간을 다르게 하여 시험한 결과와 연소가스의 혼합을 위해 설치한 turbulence ring의 유무에 따른 결과를 Table 3에 나타내었으며 설계점에 대한 결과는 참고문헌[5]에 제시하였다. L220은 가스발

Table 3. Test results at various configurations

	DP+	DP+	DP+	DP+	OD7+	OD7+	OD7+	OD7+
	L222	L290	L360	WOTR	L222	L290	L360	WOTR
Pressure(MPa)	2.27	2.23	2.25	2.24	1.91	1.89	1.91	1.86
O/F ratio	0.36	0.37	0.36	0.35	0.36	0.35	0.36	0.35
Total Mass Flow(kg/s)	0.90	0.88	0.90	0.91	0.76	0.77	0.77	0.77
LOx(kg/s)	0.24	0.24	0.24	0.24	0.20	0.20	0.20	0.20
Kerosene(kg/s)	0.66	0.64	0.66	0.68	0.56	0.57	0.56	0.57
Outlet Temperature(K)	948	958	936	943	946	913	925	930
C*	878	881	864	849	872	845	863	837
Temp. Deviation(K)	20.0	10.0	6.5	45.0	19.0	7.0	6.8	45.0

생기 연소실 길이가 220mm로 잔류시간 4msec 인 경우이고 L360은 길이가 360mm로 잔류시간이 6msec인 경우를 나타낸 것이다. WOTR은 turbulence ring이 없는 경우를 나타낸 것이다.

3.2 가스발생기 동압 결과

가스발생기 설계점 연소시험시 발생한 동압 성분을 Fig. 10에 나타내었는데, 섭동 진폭은 정상상태에서 약 +2psi 이다.

Fig. 11은 설계점 동압 성분을 주파수 분석(FFT)하여 나타낸 것으로 가스발생기 길이 방향의 첫 번째 모드에 해당하는 1L 모드인 700Hz 및 2L 모드인 1400Hz가 나타났는데, 섭동크기가 +1 psi 이내로 정상 압력의 10% 이내이어야 한다는 연소기 섭동 규제 제한을 만족하고 있다. 탈설계점에서 섭동 크기 및 주파수 분석 결과 기준 조건을 만족한 것으로 나타났으나 OD7에

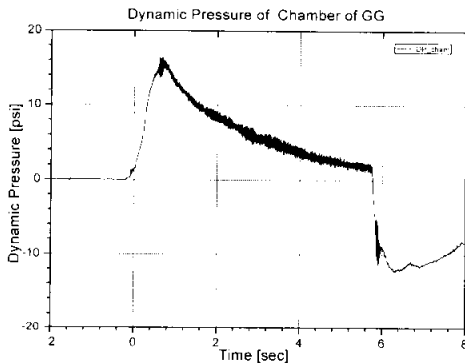


Fig. 10. Dynamic pressure profile of gas generator chamber (DP)

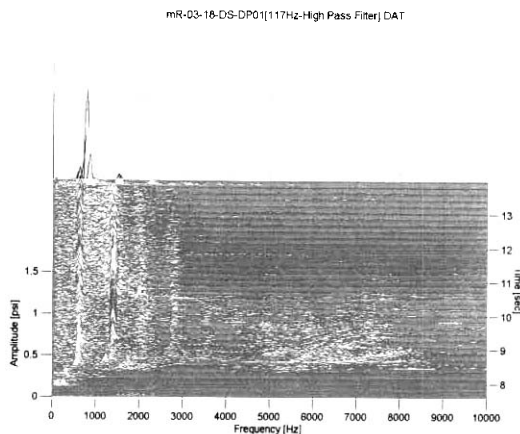


Fig. 11. Waterfall of FFT of chamber dynamic pressure (DP)

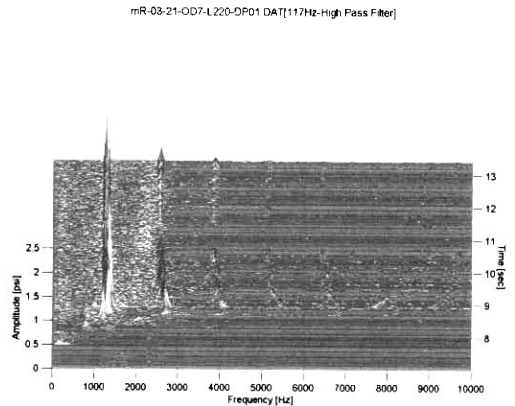


Fig. 12. Waterfall of FFT of chamber dynamic pressure (OD7)

서 L모드에 해당하는 섭동이 크게 나타났다. 탈 설계점 OD7에서 나타난 압력섭동에 대하여 주파수 분석한 결과를 Fig. 12에 제시하였는데 섭동주기는 2L에 해당하는 1600Hz이며 섭동의 크기가 정상압력의 5%로 섭동 제한 조건을 만족하지만 이에 대한 향후의 대책이 요구된다.

3.3 연소시험 결과 정리

가스발생기 연소가스의 체류시간에 따른 출구 온도 및 연소효율을 나타내는 C*값을 Table 3에 제시하였으며 Fig. 13에 이를 도시하였다. 연소실 압력, 유량 및 출구면적으로 계산하는 가스발생기의 연소효율 C*는 설계점(DP) 및 탈설계점(OD7)에 관계없이 가스발생기 출구에서 측정된 온도에 매우 밀접하게 비례함을 Fig. 13에서 알 수 있다. 이는 공급되는 전체 유량이 일정하다면 가스의 온도가 가스발생기 안에서의 압력을 결정하는 주요 요소가 된다는 것을 의미한다. 가스발생기 안에서의 연소는 저 혼합비에서 이루어지므로 연소가스의 체류시간은 연소효율 즉 출구에서의 온도에 영향을 줄 것으로 사료되었으나 Fig. 13에서 보는 바와 같이 설계한 5msec 기준에서 $\pm 20\%$ 정도의 변동(4, 6msec)에도 체류시간의 영향은 출구온도에 대해 크지 않았다. Fig. 13에서 온도 변화는 혼합비를 일정하게 공급하도록 설정했지만 실제 시험상의 오차에 의해 발생한 혼합비 차이에 기인한 것이다. 본 가스발생기 사양에서는 체류시간 4 msec 전까지 분무, 혼합 그리고 연소가 거의 이루어진 것이라고 볼 수 있다.

가스의 혼합을 위해서 장착한 turbulence ring의 경우 혼합을 증가시켜 온도편차를 줄여주는 효과를 주었고[5], 연소효율에는 영향을 주지 않았다.

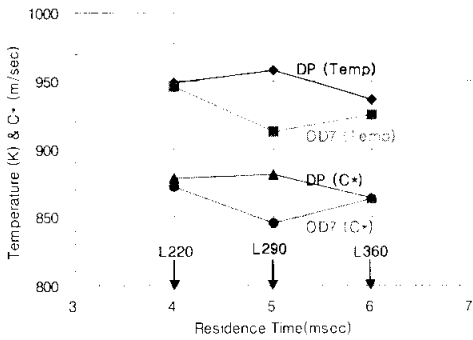


Fig. 13. Outlet temperature & C* profile of gas generator (DP & OD7)

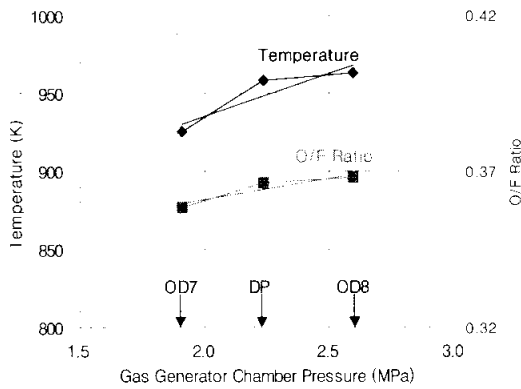


Fig. 14. Outlet temperature with various chamber pressure

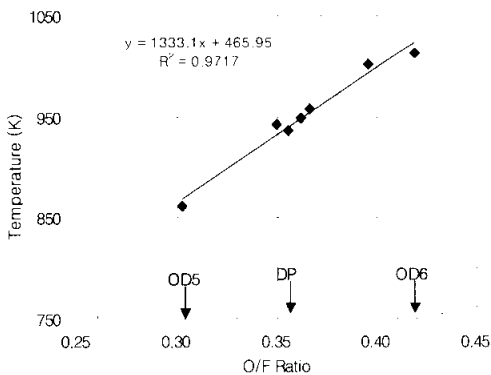


Fig. 15. Outlet temperature with various O/F ratio (Pressure ≈ 2.2MPa)

혼합비가 일정할 때 가스발생기 안의 온도는 압력에 따라 어떠한 영향을 받는지를 알아보기 위해 OD7, DP, OD8에서의 값을 Fig. 14에 도시하였다. 혼합비가 일정해야 하지만, 연소시험상

추진제 탱크 가압설정 오차로 인하여 보는 바와 같이 조금 차이가 발생하고 있다.

가스발생기처럼 낮은 혼합비에서는 연소가스의 온도는 혼합비에 매우 민감하다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 혼합비 증가함에 따라 출구온도도 변하는데, 증가하는 기울기가 단지 혼합비 증가에 의한 기울기보다는 더 크게 변함을 보여주고 있다. 이는 압력증가에 의한 출구온도의 증가가 있음을 알 수 있다. 압력에 의한 영향 평가를 수치적으로 정량화하기에는 시험회수 및 혼합비 정확도가 떨어져 더 많은 반복시험과 더 넓은 범위의 압력(본 시험의 경우 : ±15%)에서의 시험결과가 필요할 것으로 사료된다. 압력에 대한 출구온도의 변화에 대한 영향은 향후에 좀 더 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

가스발생기 압력이 일정할 때 혼합비에 따른 출구온도의 변화를 Fig. 15에 나타내었는데 잔류시간 변동 및 turbulence ring 유무를 포함한 모든 시험의 결과에 대한 것이다. 연소가스의 출구온도는 혼합비에 직접적으로 비례하였고 20bar 수준의 압력에서는 혼합비와 가스온도와의 관계식 $y = 1333.1x + 465.95$ (y=온도, x=혼합비)를 얻었다. 이 관계식은 Jet-A-1과 액체산소를 추진제로 하는 연소압력 20bar 그리고 혼합비 0.3에서 0.5사이에 작동하는 가스발생기에 적용할 수 있는 실험식이라고 할 수 있다.

설계점 및 탈설계점에서 측정된 출구온도와 연소효율이 어떠한 밀접한 관계를 가지고 있는지 알아보기 위해 Fig. 16에 이를 나타내었는데 잔류시간 5msec, 그리고 turbulence ring이 있는 경우에 대한 결과를 사용하였다. 앞서 Fig. 13에서 보듯이 연소효율이 연소온도 제공근에 비례함을 Fig. 16에서 알 수 있으며 추세선으로 추정된 데이터 간의 상호 연관성이 매우 높음(상관계수 $R^2 = 0.99$)을 알 수 있다. 이러한 상관관계로부터 가스발생기와 같이 낮은 혼합비에서도 출구온도가 바로 연소효율에 매우 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있다.

혼합비와 연소가스의 온도관계식을 압력에 대한 영향을 있지만 작은 것으로 간주하여 전체 시험에서 얻어진 것을 Fig. 17에 나타내었다. 잔류시간의 변화, turbulence ring 유무 및 압력영향 등에 상관없이 본 시험조건에서 연소시험한 결과 모두를 가지고 혼합비와 연소가스 온도 관계식 $y = 1364.4x + 449.9$ 을 구할 수 있다. 본 관계식은 압력이 일정하다고 구한 Fig. 15의 관계식과 약간의 차이를 보이고 있지만 19~25bar, 0.3~0.5 사이의 혼합비를 가진 Jet-A-1과 액체산소를

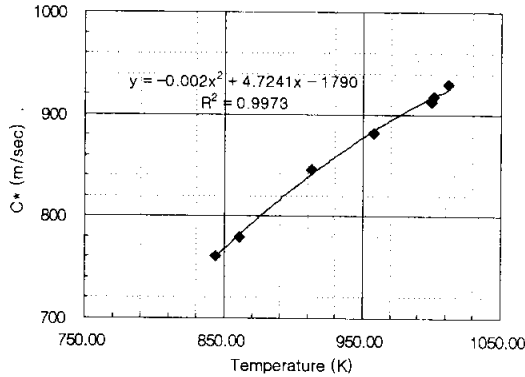


Fig. 16. Relation between C* and outlet temperature of gas generator

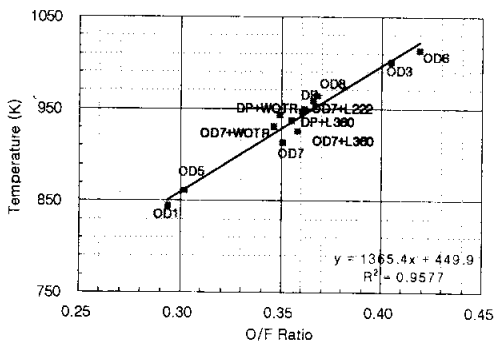


Fig. 17. Overall relation between outlet temperature and O/F ratio

사용하는 가스발생기 설계시 유용하게 사용될 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 압력에 대한 보정은 향후 연구를 통해 이루어질 것이다.

IV. 결 론

충돌형 분사기를 장착한 연료과잉 가스발생기에 대한 일련의 연소시험을 성공적으로 수행하여 가스발생기의 넓은 영역에서 작동성 및 안정성을 확보하였고, 편차가 작은 연소가스의 출구온도 분포 및 혼합비와 출구온도와의 관계식을 실험적으로 얻는 등 본 연소성능시험들을 통해 만족스러운 결과를 얻었다.

가스발생기 운영 여러 조건들에서 연소실에서

측정한 압력 및 출구 온도들은 예상치와 비슷한 값을 보여 주었고 출구온도의 편차는 $\pm 10K$ 이내의 값을 보여 주었다. 설계점에서의 동압의 크기는 작아 제한조건을 만족했지만 탈설계점 OD7에서의 종모드에 대한 섭동은 대책이 요구된다.

가스발생기 출구 온도는 4~6 msec 정도의 체류시간 변동에도 큰 변화가 없었으나, 압력이 증가함에 따라 증가하였으며 전체 O/F 비 변화에 가장 민감하게 변화하였다. 압력변화에 대한 출구 온도 변화 관계식은 좀 더 많은 시험 데이터가 요구되며 압력이 일정한 때 혼합비(O/F)와 출구 온도(T_e)와 관계식 $T_e = 1333.18 * O/F + 465.95$ 을 얻을 수 있었다. 측정되는 압력, 유량 그리고 노즐 목 크기로 계산한 연소효율과 출구에서 측정된 온도와는 매우 밀접한 선형관계식을 갖고 있었다. 본 시험의 조건 범위에서 압력, 잔류시간 및 turbulence ring 영향을 무시하는 경우 최종적으로 $T_e = 1354.4 * O/F + 449.9$ 라는 출구온도와 혼합비 관계식을 얻었다.

본 결과는 연료과잉 가스발생기의 연소시험 결과로써 향후의 가스발생기 설계시 매우 유용하게 활용될 것이다.

참고문헌

- 1) Huzel, D. K. and Huang, D. H., "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines," AIAA, 1992.
- 2) H. W. Douglass, H. W. Schmidt, L. Levinson, "Liquid Propellant Gas Generators", NASA SP-8081, 1972.
- 3) NAL, "NAL TM-354" 1974.
- 4) 권순탁, 이창진, "액체로켓 농후 가스발생기 최적설계", 한국항공우주학회지, 제32권 제5호, 2004, pp. 91-96.
- 5) 한영빈 등, "충돌형 분사기 형태의 액체로켓엔진용 가스발생기 연소성능시험", 한국추진공학회지, 제8권 제2호, 2004, pp. 10-17.
- 6) 권순탁, 이창진, "액체로켓 가스발생기용 F-O-F 인젝터의 설계와 분사특성", 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집(II), 2003, pp. 1039-1043.