

액체로켓엔진 가스발생기 연소특성

김승한*, 한영민*, 문일윤*, 이광진*, 설우석*, 이창진**

Combustion Characteristics of Gas Generator for Liquid Rocket Engine

Seung-Han Kim*, Yeoung-Min Han*, Il-Yoon Moon*, Kwangjin Lee*, Woo-Seok Seol*, Changjin Lee**

ABSTRACT

The results of combustion performance test of fuel-rich gas generator(GG) using LOx and kerosene as propellant at design and off-design point are described. The parameters used in this analysis are the average exit temperature(T_{GG}) and the characteristic velocity(C^*). The average gas temperature at the exit of gas generator is found to be a function of propellant O/F ratio. For the gas generator having residence time of 4msec or more, the effect of flame residence time and combustion chamber pressure on the exit temperature is not significant. The exit characteristic velocity is found to be linearly proportional to the gas temperature at the exit of gas generator.

Key Words : Fuel rich gas generator, O/F ratio, firing test, gas temperature

기 호 설 명

T_S : Combustion product residence time
 P_C : Combustion chamber pressure
 m : Total mass flow rate

O/F : Mass flow rate ratio of Oxidizer/fuel
 R : Gas constant of combustion product
 T : Combustion product gas temperature

1. 서 론

액체로켓엔진에서 가스발생기는 터보펌프 터빈을 구동하는 매질을 생성하기 위한 것이다. 작동매질은 액체로켓엔진의 일부 추진제를 기화시킨 것으로, 이러한 기화는 터빈 입구부에서의 기체의 온도와 압력을 특정 설정값으로 맞추어주기 위해 총 유량과 혼합비에서 이루어진다.

가스발생기의 설계시 고려해야할 중요 변수는 가스발생기 출구온도, 화염체류시간, 생성된 연소가스의 터빈 및 가스발생기 벽면과 같은 엔진 부품과의 화학적 반응성, soot 발생정도 등을 들 수 있다. 가스발생기 출구온도는 터빈의 물성치

에 의존하는 터빈 허용온도에 의해 제한받으며, 가스발생기 길이가 길면 반응시간이 충분하므로 화학적 평형상태에 도달한 연소가스가 생성되지만, 보통 가스발생기는 요구되는 길이보다 짧게 설계되므로 비평형 화학반응상태의 가스가 발생하게 된다. 가스발생기 내의 화학반응에 영향을 주는 인자로는 가스발생기 길이, 분사기의 와류강도, 분사기로부터의 액적 직경, 연료 성분, 연소압 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 액체산소와 케로신을 주 추진제로 하는 연료 과잉영역에서 작동하는 가스발생기에서의 화염체류시간과 추진제 혼합비에 따른 연소특성을 가스발생기 연소실 압력과 출구온도의 관점에서 살펴보고, 가스발생기 출구 연소가스의 조성을 예측하는 저혼합비 반응 코드를 검증하기 위한 데이터베이스를 구축하는 것을 목적으로 하였다.

* 한국항공우주연구원 엔진그룹

† detokim@kari.re.kr

** 건국대학교 항공우주공학과

2. 가스발생기 및 시험조건

2.1 가스발생기

액체로켓엔진의 전체 성능 해석을 통해 160kW급 가스발생기의 최적 설계를 수행하였으며, 추진제 산화제/연료 질량 혼합비와 출구온도와와의 관계식을 기존의 실험식으로 수정해 설계한 가스발생기 사양을 Table 1에 제시하였다[1-3]. 가스발생기 연소실의 주된 형상변수를 결정하는 것은 대체로 가스발생기 내부 화학반응의 완결성을 나타내는 변수에 기반하여 이루어진다.

일반적으로 가스발생기의 출구화염온도는 가스발생기 내에서의 화학반응의 완결도와 산화제/연료 질량혼합비, 추진제 초기온도의 함수로 볼 수 있다. 이중 가스발생기의 출구화염온도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 산화제/연료 질량혼합비(O/F비)로서 이론 화염온도는 O/F 비의 함수로 나타낼 수 있다. 또한 가스발생기 출구에서의 연소생성물의 실제 화염온도는 화학반응의 완결도와 함께 연소생성물과 미연소 추진제의 추가 증발 및 혼합과정에도 영향을 받게 되는 것으로 알려져 있다[1].

가스발생기 연소실의 길이는 연소생성물의 가스발생기 내부에서의 체류시간을 기준으로 결정하게 되는데, 연료과잉영역에서 작동하는 비접촉 발화성 추진제 가스발생기의 경우 연소생성물의 화염체류시간의 추천치는 $(4\sim 10)\times 10^{-3}$ sec 이내이며, 이러한 값들은 어떤 방식으로 추진제의 혼합이 이루어지는가에 따라 다소 변화할 수 있다. 잉여추진제(연료과잉영역에서 작동하는 가스발생기의 경우에는 연료)의 부분적인 증발도 발생한다. 가스발생기 후단에서 터보펌프의 터빈으로 가는 배관 체적까지를 고려한 화염체류시간은 가스발생기 자체 화염체류시간의 2배 정도로 볼 수 있으므로 이 영역에서의 혼합이 충분히 일어날 것으로 기대할 수 있다.

이러한 화염체류시간은 가스발생기 내부에서의 연소과정과 과잉 추진제의 증발, 연소생성물의 혼합 및 증발이 일어나는데 충분한 시간이어야 한다. 하지만, 탄화수소계열 연료의 soot 나 coke 등의 발생을 유발하는 연료 열분해가 최소화되기 위해서는 화염체류시간을 줄일 필요성도 있다. 게다가, 증가된 화염체류시간은 발생기체의 표면적을 통한 열손실 증가를 야기함으로써 열효율이 떨어질 수 있다.

단위추진제 질량유량에 대한 추진 효율을 의미하는 특성속도 C^* 는 노즐 형상과 무관하며, 가스발생기 연소실 압력과 출구면적, 질량유량의 함수로 아래의 식으로 나타낼 수 있다[1].

$$C^* = (P_c)_{ns} A_t / m \quad (1)$$

식2와 3에는 가스발생기 출구에서의 연소생성물 온도가 주로 추진제의 질량혼합비의 함수임을 나타내었고, 가스발생기 연소압력과 연소생성물 비열비, 기체상수와의 관계를 제시하였다.

각 O/F 비에서의 연소온도와 연소압력 측정치를 연소생성물 조성 예측치와 비교함으로써 터보펌프 터빈 작동성능을 예측할 수 있다.

$$T_{GG} = T_{GG}(O/F) \quad (2)$$

$$P_{GG} = \frac{m_{GG} \sqrt{T_{GG}}}{A_t \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}} \quad (3)$$

Table 1 가스발생기 설계사양

Item	Unit	Value
O/F Ratio		0.355
Total Pressure (P _{gg})	MPa	2.31
Total Temperature (T _{gg})	K	920.00
Total Mass Flow Rate (W)	Kg/sec	0.9
Length/Diameter	mm	293/52
Molecular Weight		24.10
Specific Gas Constant(R)	J/kgK	345.0
Specific ratio(Gamma)		1.121
Gas Density (rho)	kg/m ³	7.277

설계된 가스발생기를 Fig.1에 도시하였으며, 상세사항은 참고문헌에 제시하였다. 본 가스발생기에 장착한 인젝터는 연료-산화제-연료 (FOF)의 충돌형 인젝터이다[3].

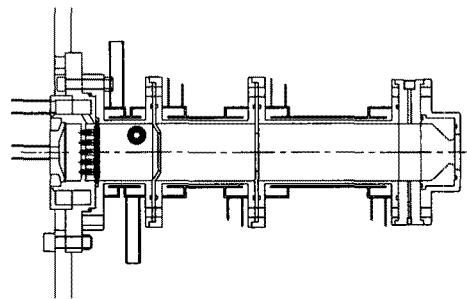


Fig. 1. Schematic of gas generator

2.2 시험조건

액체로켓엔진의 작동 영역이 $\pm 10\%$ 이내 범위에서 변화하므로 이러한 범위 내에서 가스발생기

및 터보펌프 터빈의 내구성 및 안정성을 보장하기 위해 가스발생기의 탈설계점에서 성능이 매우 중요하다. 가스발생기의 탈설계점, 특히 고압, 고 O/F비에서는 출구온도가 높기 때문에 가스발생기 자체적인 손상뿐만 아니라, 터빈 블레이드를 손상시킬 수 있기에 매우 정확한 성능을 알아야 한다. 엔진 추력은 연소압에 따라 주로 변하는 관계로, 가스발생기의 압력과 혼합비(O/F비)를 인자로 하여 설계점 기준 $\pm 15\%$ 를 선택하여 Fig. 4와 같이 탈설계점(Off Design, OD) 등을 정하였다[4]. 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 점이다.

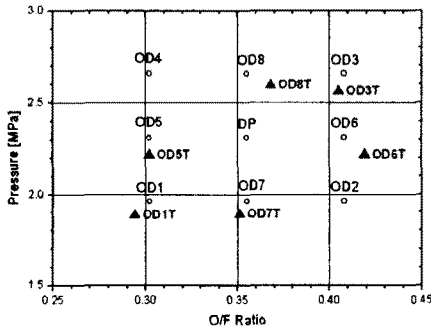


Fig. 2. 가스발생기 운용 변수

3. 연소시험 결과 및 검토

3.1 연소시험결과

가스발생기 연소가스의 O/F비에 따른 평균 출구 온도 및 출구특성속도, C^* , 값을 Fig. 3 및 Fig. 4에 도시하였다.

Fig. 3에서 가스발생기의 평균출구 온도 변화는 가스발생기 내부에 장착된 6개의 온도센서로부터 측정된 값을 각 영역에 대해 면적가중 평균 값을 취한 것으로 O/F비에 선형적인 비례관계를 가지는 것을 확인할 수 있다.

또한, Fig. 4에 가스발생기의 출구특성속도 C^* 를 O/F비의 함수로 나타내었다.

특성속도 C^* 는 설계점 및 탈설계점에 관계없이 가스발생기 출구에서 측정된 온도에 대해 선형적인 비례관계를 가짐을 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 이는 공급되는 전체 유량이 일정하고 가스발생기로 공급되는 모든 추진제가 균일하게 증발, 혼합된다고 가정하였을 때, 연소 가스의 온도가 가스발생기 안에서의 압력을 결정하는 주요 변수가 되기 때문으로 판단된다. 가스발생기 안에서의 연소는 연료과잉상태의 저혼합비, 저온영

역에서 이루어지므로 연소가스 체류시간이 연소 효율에 영향을 줄 것으로 예상했지만, 4msec 이상의 화염체류시간에 대해서는 출구온도나 특성 속도에 미치는 영향은 작은 것으로 관찰되었다.

가스발생기 출구 이전 영역에서 연소가스와 미반응 연료 및 벽면가스의 혼합을 위해서 장착한 turbulence ring의 경우 혼합을 증가시켜 가스발생기 내부에서의 공간상의 온도 편차를 줄여 주었고, 연소효율에는 영향을 주지 않았다[4].

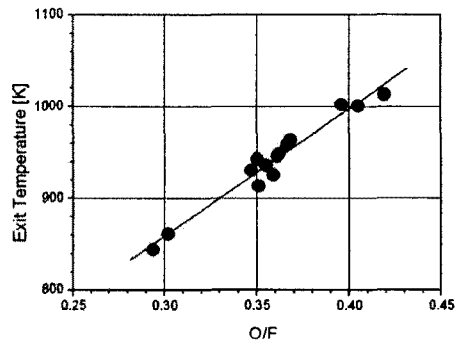


Fig. 3. O/F 비에 따른 평균출구온도 변화

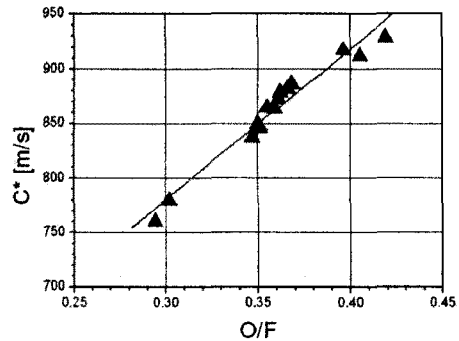


Fig. 4. O/F 비에 따른 출구특성속도 변화

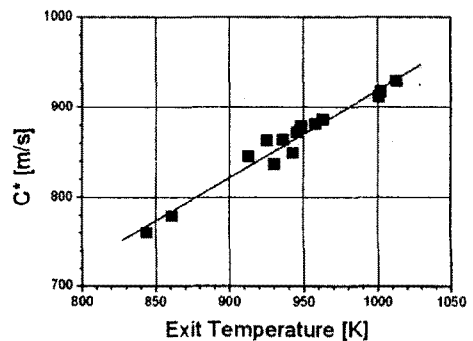


Fig. 5. 출구온도와 출구특성속도 관계

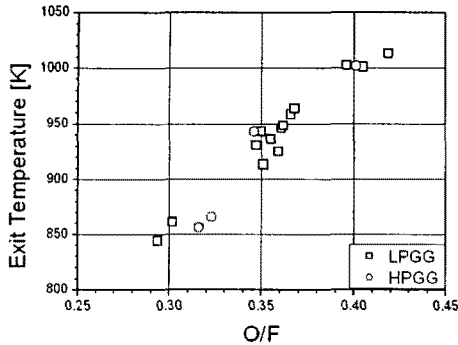


Fig. 6. 연소압에 따른 O/F비와 출구온도

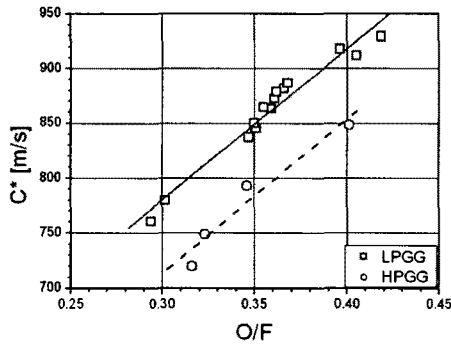


Fig. 7. 연소압에 따른 O/F비와 특성속도

연소압의 변화에 따른 가스발생기의 출구온도와 출구특성속도의 변화를 살펴보기 위해 설계연소압의 변화가 큰 경우의 가스발생기의 연소시험 결과를 검토하였다. 설계연소압 2.31MPa를 가지는 가스발생기에 대한 연소시험결과와, 설계연소압 5.8MPa를 가지는 동축과류형 분사기를 채용한 가스발생기에 대한 결과와의 비교검토를 수행하였다[5]. 고압 및 저압 가스발생기에 대한 연소시험결과의 비교는 다양한 변수들이 잠재되어 있기 때문에 여기에서는 낮은 연소압과 높은 연소압의 가스발생기 결과가 동일한 특성들을 보이는지를 확인하는 면에서 수행되었다.

Fig. 6에 O/F 비에 따른 평균출구온도 변화는 상당히 큰 연소압 차이에도 불구하고, 저압 가스발생기나 고압 가스발생기가 동일한 정성적, 정량적 거동을 보여주고 있다. 평균출구온도의 연소압에 의한 영향은 혼합비에 비해 미미하다고 보여진다. 압력에 의한 영향 평가를 수치적으로 정량화하기에는 더 많은 시험결과가 필요할 것으로 판단된다. 압력에 대한 출구온도의 변화에 대한 영향은 향후에 좀 더 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

Fig. 7에 O/F 비에 따른 출구특성속도 변화는

정성적인 측면에서는 저압 가스발생기나 고압 가스발생기가 동일하지만, 정량적인 측면에서 약간의 차이가 나타나고 있다. 고압 가스발생기의 경우에 특성속도가 감소하는 것은 서로 다른 분사기 형태 및 설계변수에 기인한 것으로 판단되며, 이 경우 저압 연소기의 작동효율이 더 높게 나타나는 것을 의미한다. 이는 벽면에서의 잔류 추진제의 연소가스와의 혼합 및 증발 정도의 차이에 기인한 것으로 판단하고 있다.

연소압력이 가스발생기 출구특성속도에 미치는 영향을 수치적으로 정량화하기에는 더 많은 시험결과가 필요할 것으로 판단된다.

향후 실물형 가스발생기의 고압 연소조건에서의 추가적인 다양한 연소압력, O/F 비 조건에서의 탈설계점 연소시험을 통해 액체산소-케로신 추진제조합에 대한 O/F비 변화에 따른 물성치에 대해 보다 많은 실험결과를 확보를 통해 케로신 물성치에 따른 저혼합비 연소에서의 연소가스 조성을 데이터베이스화하고, 저혼합비 연소 해석 기법을 확보하기 위한 연구가 계속되어야 할 것이다.

4. 결론

액체산소와 케로신을 추진제 조합으로 하는 연료과잉 가스발생기에 대한 일련의 연소시험을 통해 혼합비와 평균 출구온도, 출구특성속도와와의 관계에 대한 분석을 수행하였다.

가스발생기 출구에서의 온도는 전체 O/F 비 변화에 가장 민감하게 변화하였으며 4msec 이상의 화염체류시간에 대해서는 체류시간이나 연소압력에 의한 영향은 미미하였다. 가스발생기 출구특성속도와 출구에서 측정된 온도는 비례관계를 보여주었다.

참고문헌

- [1] Huzel, D. K. and Huang, D. H., "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines", AIAA, 1992.
- [2] 毛呂明夫 등, "JP-4/LOx, JP-4/Air 평형조성 연소특성치의 검토", NAL TM-354, 1978. 7.
- [3] 한영민 등, "충돌형 분사기 형태의 액체로켓 엔진용 가스발생기 연소성능시험", 한국추진공학회지, 제8권 제2호, 2004, pp. 10-17.
- [4] 한영민 등, "액체로켓엔진에서 충돌형 분사기 형태의 연료과잉 가스발생기 연소특성", 한국항공우주학회지, submitted, 2004. 12.
- [5] 조광래 등, "소형위성 발사체 개발사업(II)", 한국항공우주연구원 보고서, 2004.