

축소형 가스발생기 연소시험에서의 유량계수 특성

김문기* · 임병직* · 강동혁* · 안규복* · 김종규* · 최환석*

Discharge Coefficient Characteristics in Hot-firing Tests of a Subscale Gas Generator

Munki Kim* · Byoungjik Lim* · Donghyuk Kang* ·
Kyubok Ahn* · Jong-Gyu Kim* · Hwan-Seok Choi*

ABSTRACT

The hot-firing tests of a subscale gas generator were successfully performed to investigate the effect of injector shape variation on discharge coefficients. The test results showed that discharge coefficients of fuel and liquid oxygen injectors remained nearly constant irrespective of variations of a mixture ratio and a chamber pressure. Especially, the discharge coefficient of the liquid oxygen injector was largely increased compared to the previous works.

초 록

축소형 가스발생기를 제작하여 연소시험을 성공적으로 수행하였으며 분사기의 형상 변화에 따른 유량계수의 영향을 파악하였다. 연소시험 결과 연료 및 산화제 분사기의 유량계수는 혼합비와 연소압에 상관없이 거의 일정하였으며, 특히 산화제 분사기의 유량계수는 이전 결과보다 크게 향상되었다.

Key Words: Gas Generator(가스발생기), Hot-firing Test(연소시험), Discharge Coefficient(유량계수)

1. 서 론

한국항공우주연구원에서는 한국형발사체를 개발하기 위해 추력 75톤급 액체로켓엔진용 가스발생기의 기술검증시제를 설계, 제작하였으며[1], 연소시험 결과 측정된 산화제 분사기 차압이 목표 차압보다 커 유량계수를 감소시키는 것을 확인하였다[2]. 이에 대한 원인 파악을 위해 축소

형 가스발생기 1호기를 설계, 제작하여 연소시험을 수행한 결과 산화제 분사기 차압이 약간 줄어들었다[3]. 분사기 차압을 개선하기 위하여 축소형 2호기를 설계, 제작하여 연소시험을 수행하였으며, 산화제 유량계수가 다소 증가하였다[4]. 하지만 연소실 압력이 낮은 탈설계점 조건에서 150Hz 정도의 저주파 연소 불안정이 발생하였다[5].

본 연구에서는 향상된 유량계수를 유지하면서 저주파 압력 섭동을 없애는 방향으로 축소형 가스발생기 3호기를 설계, 제작하였다. 그 후 설계

* 한국항공우주연구원 연소기팀
교신저자, E-mail: kimun77@kari.re.kr

점 및 탈설계점에 대한 연소시험을 수행하여 분사기 유량계수의 특성을 파악하였으며, 축소형 가스발생기 1, 2호기의 유량 계수 결과와 비교하였다.

2. 축소형 가스발생기 및 시험 조건

축소형 가스발생기 3호기의 헤드는 Fig. 1과 같이 제작되었으며, 기존의 heat-sink 형태의 연소실과 조립하여 시험대에 장착하였다. 분사기 형상을 제외하고 다른 설계 형상은 축소형 1, 2호기와 동일하다[3,4]. 축소형 3호기의 연료 분사기 형상은 1, 2호기와 동일하게 유지하였다. 반면 산화제 분사기 형상은 2호기의 노즐 내경을 동일하게 하면서 외경을 늘려 노즐 lip 두께를 키우고 산화제와 연료 분사기 사이의 간격을 줄이는 방향으로 설계를 진행하였다.

축소형 3호기의 연소시험 조건을 Fig. 2에 도시하였다. 설계점(Design Point, DP)은 연소실 압력 58 bar, 혼합비 0.321이며, 총 추진제 유량은 2.54 kg/s이다. 탈설계점(Off-Design)은 설계점을 기준으로 연소실 압력 $\pm 16\%$, 혼합비 $\pm 10\%$ 의 8개 시험점을 의미하며 Fig. 2에 OD1에서 OD8까지 마름모 기호로 표시하였다. 연소시험은 1회 연소시간 4초로 총 9회 수행하였다. 우선 설계점 시험을 통해 연소 성능을 확인한 후 저주파 섭동 확인을 위한 저압 조건인 OD1, OD2 시험을 수행한 다음 혼합비를 0.321로 고정하여 DP, OD7, OD5 3회를 수행하였으며, 그 후에 추가적으로 DP, OD8, OD1 3회를 수행하였다.

3. 연소시험 결과 및 유량계수

총 9회의 연소시험이 성공적으로 수행되었으며 실제 시험점은 Fig. 2의 세모 기호로 표시하였다. 이 중에서 두 번째 시험인 OD1 조건에서 계측 장치의 시험 데이터를 획득하지 못해 시험 결과가 존재하지 않는다. 시험 데이터는 연소가

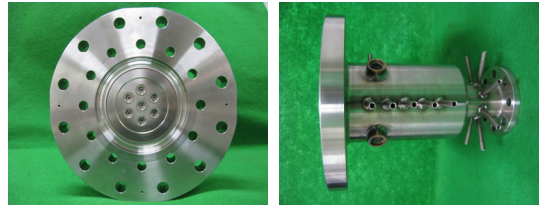


Fig. 1 Subscale Gas Generator. Injector Head (left) and Heat-sink Type Combustion Chamber (right)

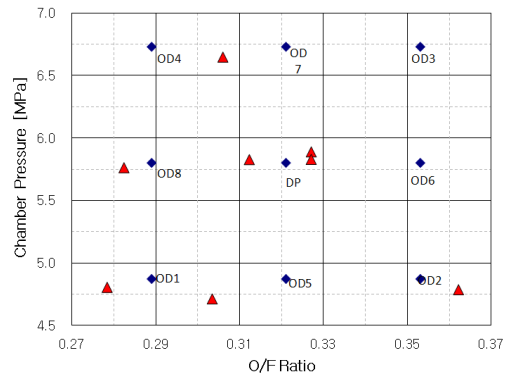


Fig. 2 Experimental Conditions of Hot-firing Tests

안정적으로 이루어지는 연소 후반에 맞춰 평균을 취하지만 연소 불안정이 발생하는 경우 발전 전후로 수력학적 특성이 변하게 되어 연소 불안정이 발생하기 전을 기준으로 평균을 구하였다.

가스발생기에서 발생하는 연소가스는 터보펌프의 터빈을 구동하는 작동유체로 터빈 블레이드의 열적 손상을 방지하도록 가스발생기 출구 온도의 설계 규격을 900 K로 설정하고 있다[1]. 가스발생기 출구 온도는 연소실 후단의 축소부에서 측정된 온도를 면적비율로 평균하여 구한다. 혼합비에 따른 가스발생기 출구 온도의 변화는 Fig. 3에 도시하였으며 실선과 같이 선형의 관계식을 얻을 수 있다. 이 식에 따르면 출구 온도가 900 K에 해당하는 혼합비는 약 0.350인데 이는 설계 규격인 0.321을 상회한다. 하지만 이는 4초의 짧은 연소시간동안 열전대가 최대에 이르지 못한 것이 원인으로 연소시간이 긴 경우 출구 온도가 상승하여 혼합비가 작아질 것으로 예상된다.

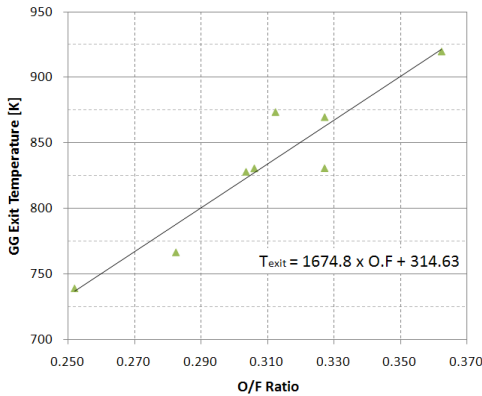


Fig. 3 Gas Generator Exit Temperature Variations

축소형 가스발생기의 유량계수 특성을 파악하기 위하여 연소압과 혼합비에 따른 유량계수의 변화를 살펴보았다. 연소압 고정 시험은 설계점 시험 2회와 탈설계점 OD8을 포함하여 총 3회, 혼합비 고정 시험은 설계점 시험 2회와 탈설계점 OD5, OD7을 포함하여 총 4회의 결과를 기준으로 하였다. 여기서 두 번째 설계점 시험은 시험 데이터의 정확도에 문제가 있어 제외하였다. 연소압 고정 시험은 평균 압력 58.2 bar을 기준으로 압력 변화는 약 1.09% 내에서 수행되었으며, 혼합비 고정 시험은 평균 혼합비 0.316을 기준으로 혼합비 변화 4.09% 내에서 수행되었다.

연소시험에서 측정된 분사기 차압, 추진제 유량, 밀도 등을 통해 분사기의 점선율을 기준으로 유량계수를 계산하여 혼합비와 연소압에 따른 유량계수 변화를 도시하면 각각 Fig. 4, 5와 같다. 유량계수 결과는 수류시험 대비 연소시험 유량계수 비율로 표시하였으며, 수류시험 결과 산화제와 연료 분사기의 유량계수는 각각 0.310, 0.568로 측정되었다. Fig. 4, 5에서 원형 기호(●)와 네모 기호(■)는 각각 축소형 3호기(A3)의 산화제와 연료 유량계수를 의미하며, 축소형 1호기(A1)와 2호기(A2)의 유량계수 결과를 비교하기 위하여 A1은 기호 (x, +), A2는 기호(○, □)로 함께 표시하였다.

혼합비에 따른 유량계수 변화를 살펴보면 Fig. 4에서 보듯이 탈설계점 OD6 시험 결과의 부재로 인해 경향성을 파악하기 어려우나 혼합비가

증가함에 따라 산화제 분사기의 유량계수는 거의 변화가 없는 것으로 보인다. 하지만 연료 분사기의 유량계수는 설계점에서 약간 감소하는 것으로 보이며 이는 1, 2호기와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 하지만 유량계수 간의 편차는 산화제 1.2%, 연료 1.0%로 그리 크지 않아 혼합비에 따라 일정한 것으로 볼 수 있으며, 고 혼합비 조건에 대한 시험 데이터를 확보하여 파악할 필요가 있다.

연소압에 따른 분사기 유량계수 변화는 Fig. 5와 같이 축소형 3호기의 경우 연소압이 증가함에 따라 연료 분사기의 유량계수는 약간 감소하는 것으로 보인다. 반면 산화제의 유량계수의 경우 고압 조건(OD7)에서 다소 감소하는 것을 확인하였으며, 이는 2호기의 경향과 유사하다. 하

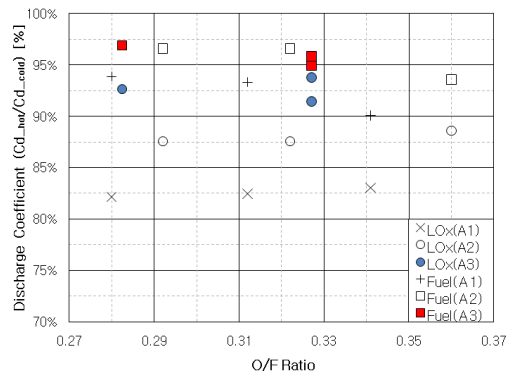


Fig. 4 Discharge Coefficient according to Mixture Ratio at Fixed Chamber Pressure

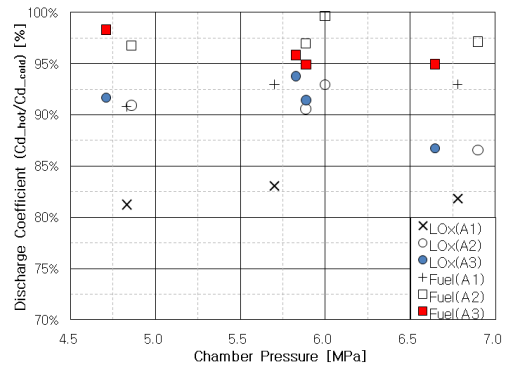


Fig. 5 Discharge Coefficient according to Chamber Pressure at Fixed Mixture Ratio

지만 유량계수 편차가 산화제 3.3%, 연료 1.7%로 연소압에 따라 크게 변하지 않는 것으로 나타났다.

축소형 가스발생기 3호기의 전체적인 분사기 유량계수는 연료는 수류시험 대비 약 96.2%, 산화제는 약 91.3%로 산화제가 여전히 연료에 비해 작게 계측되었다. 하지만 산화제 분사기의 유량계수는 1호기(82.3%), 2호기(88.6%)에 비해 크게 개선되었으며 이는 산화제 분사기 차압이 목표 차압에 거의 근접하고 있음을 의미한다.

연소 안정성을 파악하기 위하여 연소실의 압력 섭동을 살펴보았으며 Fig. 6과 같이 저압 조건(OD5)에서 일정한 파형(sine파)의 압력 섭동이 나타났다. 이러한 저주파 압력 섭동은 축소형 2호기와 유사한 것이지만 3호기에서는 저압 조건뿐 아니라 설계점 조건에서도 연소 불안정이 발생하여 저주파 발생 범위가 더 넓어진 것을 알 수 있었다. 이는 연소실 압력 대비 분사기의 차압이 줄어들면서 발생한 것으로 보이며 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌 6에서 다룰 예정이다.

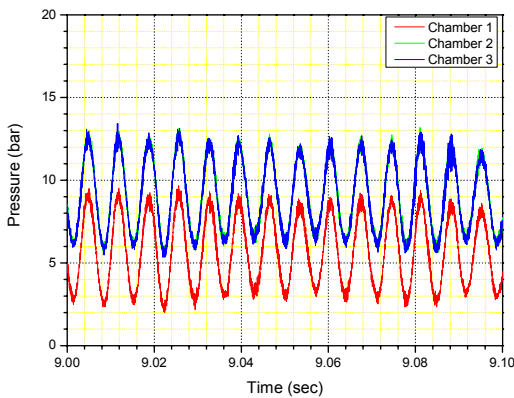


Fig. 6 Chamber Pressure Fluctuation in experimental condition of OD5.

4. 결 론

이전 연구 결과를 바탕으로 축소형 가스발생

기 3호기를 설계, 제작하여 설계점 및 탈설계점 조건에서 연소시험을 성공적으로 수행하였다. 연소시험 결과 혼합비나 연소압의 변화에 상관없이 연료 및 산화제 분사기의 유량계수는 거의 일정하였다. 또한, 산화제 분사기의 유량계수는 이전 시험결과에 비해 크게 향상된 것을 확인하였다. 하지만 저압 조건 및 설계점 조건에서 연소 불안정 현상이 여전히 발생하여 이에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 안규복, 서성현, 한영민, 최환석, “75톤급 액체로켓엔진 가스발생기 설계 및 제작,” 한국항공우주학회 2008년도 춘계학술발표회 논문집, 2008, pp.743-746
2. 안규복, 서성현, 김문기, 임병직, 김종규, 이광진, 한영민, 최환석, “75톤급 가스발생기 기술검증시험의 연소시험,” 한국추진공학회 2009년도 추계학술대회 논문집, 2009, pp.225- 230
3. 김문기, 서성현, 안규복, 임병직, 김종규, 이광진, 한영민, 최환석, “75톤급 액체로켓엔진 축소형 가스발생기 연소시험,” 한국추진공학회 2010년도 춘계학술대회논문집, 2010, pp.173-176
4. 김문기, 안규복, 임병직, 김종규, 서성현, 최환석, “75톤급 액체로켓엔진 축소형 가스발생기 연소시험 결과,” 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회논문집, 2010, pp.726-728
5. 안규복, 강동혁, 김문기, 임병직, 김종규, 서성현, 최환석, “축소형 가스발생기 연소안정성 연구,” 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회논문집, 2010, pp.594-596
6. 안규복, 강동혁, 김문기, 임병직, 김종규, 최환석, “축소형 가스발생기 연소안정성 특성,” 한국추진공학회 2011년도 추계학술대회논문집, 2011, to be published