

# 분사기 형상 변화에 따른 축소형 가스발생기 연소 특성

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

## Effects of Injector Shape Variation on Combustion Performance 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 its discharge coefficient. The test results showed that discharge coefficients of fuel and liquid oxygen injectors remained nearly constant irrespective of the mixture ratio or the chamber pressure. In all experimental conditions, the combustion instability was not observed.

### 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, 모든 시험조건에서 연소 불안정은 발생하지 않았다.

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

### 1. 서 론

한국항공우주연구원에서는 한국형발사체에 적용할 추력 75톤급 터보펌프 방식의 액체로켓엔진을 개발하기 위해 엔진 주요 구성품 중의 하나인 가스발생기의 기술검증시제를 설계, 제작하였다[1]. 제작된 시체에 대한 연소시험 결과 측정된 산화제 유량계수가 작아 분사기 차압이 목표 차압보다 다소 큰 것을 확인하였다[2]. 이에

대한 원인 파악을 위해 축소형 가스발생기 1~3호기를 설계, 제작하여 연소시험을 수행하였다[3-7]. 연소시험 결과 연료 및 산화제 분사기의 유량계수가 크게 향상되어 분사기 차압이 점차 개선되었다[3, 4, 6]. 하지만 축소형 2호기의 경우 연소실 압력이 낮은 탈설계점 조건에서 150Hz 대역의 저주파 압력 섭동이 발생하였으며[5], 축소형 3호기의 경우에는 설계점 압력 조건에서조차 연소 불안정이 발생하는 것을 확인하였다[7].

본 연구에서는 저주파 연소 불안정을 억제하

\* 한국항공우주연구원 연소기팀

† 교신저자, E-mail: kimun77@kari.re.kr

면서 향상된 유량계수 특성을 유지하는 방향으로 축소형 가스발생기 4호기를 설계, 제작하고자 하였다. 그 후 설계점 및 탈설계점에 대한 다수의 연소시험을 수행하여 축소형 4호기의 연소 특성을 파악하였으며, 이전 축소형 1~3호기와의 비교를 통해 분사기 형상 변화에 따른 유량 계수 특성의 영향을 파악하고자 하였다.

## 2. 축소형 가스발생기 및 시험 조건

축소형 가스발생기 4호기의 헤드는 Fig. 1과 같이 제작되었으며, 기존의 heat-sink 형태의 연소실과 조립하여 시험대에 장착하였다. 분사기 형상을 제외하고 다른 설계 형상은 축소형 1~3호기와 동일하다[3,4,6]. 축소형 4호기의 산화제 분사기 형상은 2, 3호기와 동일하게 유지하였다. 반면 연료 분사기 형상은 3호기에 비해 노즐 출구 내경과 접선홀 지름을 약간씩 줄이는 방향으로 설계를 진행하였다.

축소형 4호기의 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. 또한, 저압 조건에서의 연소 안정성을 평가하기 위하여 45 bar에서의 탈설계점 OD1', OD5', OD2'를 시험조건으로 정하였다. 연소시험은 1회 연소시간 4초로 11회, 1회 연소시간 20초로 1회로 총 12회를 성공적으로 수행하였다. 우선 혼합비 고정 시험 3회(DP, OD7, OD5)를 수행한 후 저압 조건에서의 연소 안정성 확인을 위한 시험 3회(OD1, OD2, OD5')를 수행하였다. 그 후 연소압 고정 시험 2회(OD8, OD6)와 저압 시험(OD2) 1회를 수행한 다음 추가로 연소시험 3회(DP 20초, OD5', OD2')를 수행하였다.

## 3. 연소시험 결과 및 유량계수

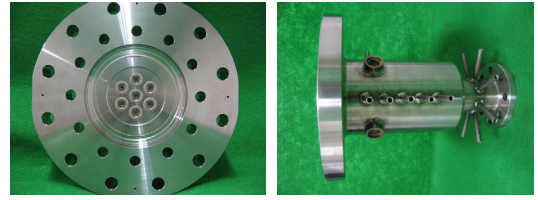


Fig. 1 Subscale Gas Generator. Injector Head (left) and Heat-sink Type Combustion Chamber

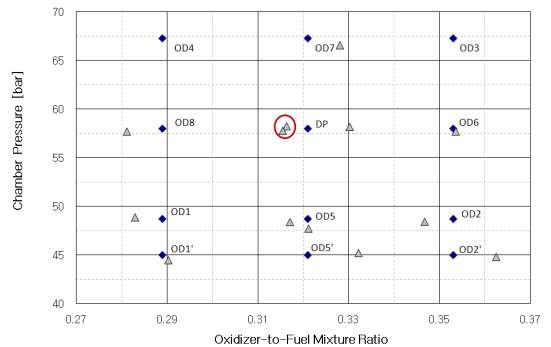


Fig. 2 Experimental Conditions of Hot-firing Tests

총 12회의 연소시험에서 측정된 시험 데이터를 바탕으로 도시한 실제 시험점은 Fig. 2의 세로 기호로 표시하였다. 이 중에서 탈설계점 OD2, OD5'의 경우 연료 유량이 목표 유량보다 많이 공급되어 목표 시험점에서 벗어나 OD5, OD1'에서 수행되었다. 결과적으로 설계점 DP와 탈설계점 OD5는 각각 2회씩 수행되었으며, 탈설계점 OD3, OD4를 제외한 나머지 시험점은 각각 1회씩 수행하였다. Fig. 2의 동그라미로 표시된 두 개의 시험점은 두 번째 설계점 시험(20초)의 평균을 4초와 20초 기준의 두 구간으로 계산한 결과로 연소시간이 길어짐에 따라 혼합비와 연소압이 약간 증가하는 것을 확인할 수 있다.

가스발생기에서 발생하는 연소가스의 출구 온도의 설계 규격은 900 K로 설정하고 있으며[1], 가스발생기 출구 온도는 연소실 후단의 축소부에서 측정된 온도를 면적비율로 평균하여 구한다. 혼합비에 따른 축소형 4호기(A4)의 출구 온도 변화는 Fig. 3에 도시하였으며 이전 축소형 1~3호기(A1~A3)도 함께 표시하였다. 모든 축소

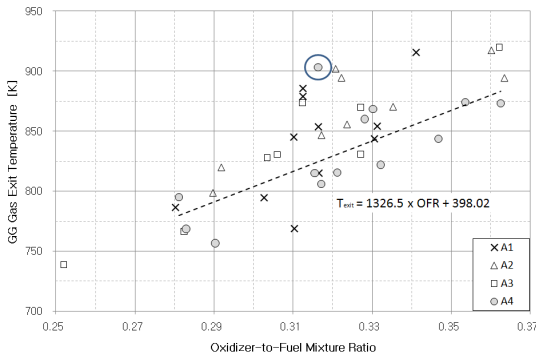


Fig. 3 Gas Temperature at Nozzle Exit according to Mixture Ratio

형 시제의 연소가스 출구온도는 혼합비에 비례하는 경향을 보이는데, 4호기의 경우 다른 축소형에 비해 약간 낮은 온도 분포를 보이고 있다. 축소형 4호기의 출구온도를 혼합비에 따른 선형의 관계식을 구하면 Fig.3의 점선과 같다. 이 식에 따르면 출구 온도가 900 K에 해당하는 혼합비는 약 0.378인데 이는 설계 규격인 0.321을 상회한다. 하지만 이는 4초의 짧은 연소시간동안 열전대의 반응시간이 느려 측정온도가 최대에 이르지 못한 것이 원인이며 원으로 표시된 20초 설계점의 결과에서 볼 수 있듯이 혼합비가 0.321 근처에서 출구온도가 900 K에 이르고 있음을 알 수 있다.

축소형 4호기의 유량계수 특성을 파악하기 위하여 연소압과 혼합비에 따른 유량계수의 변화를 살펴보았다. 연소압 고정 시험은 설계점 시험 2회와 탈설계점 OD6, OD8을 포함한 총 4회, 혼합비 고정 시험은 설계점 시험 2회, 탈설계점 OD5 2회, OD7 1회를 포함하여 총 5회의 결과를 기준으로 하였다. 연소압 고정 시험은 평균 압력 57.8 bar을 기준으로 압력 변화는 약 0.35% 편차 내에서 수행되었으며, 혼합비 고정 시험은 평균 혼합비 0.322를 기준으로 혼합비 변화는 약 1.82% 편차 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 같

다. 유량계수 결과는 수류시험 대비 연소시험 유량계수 비율로 표시하였다. Fig. 4, 5에서 원형 기호(●)와 네모 기호(■)는 각각 축소형 4호기의 산화제와 연료의 유량계수를 의미하며, 축소형 1~3호기의 유량계수 결과를 비교하기 위하여 A1은 기호(x, +), A2는 기호(o, □), A3은 기호(Δ, ◇)로 함께 표시하였다.

축소형 4호기의 혼합비에 따른 유량계수 변화를 살펴보면 Fig. 4에서 보듯이 산화제 유량계수는 거의 일정한 것으로 보이나 저혼합비(OD8)에서 상대적으로 작은 것으로 보인다. 연료 유량계수는 혼합비가 증가함에 따라 조금씩 감소하는 경향을 보이며 이는 이전 축소형 시제의 결과와 유사한 것으로 나타났다. 하지만 유량계수 간의 편차는 산화제 0.9%, 연료 0.8%로 그리 크지 않아 혼합비에 따라 일정한 것으로 볼 수 있다.

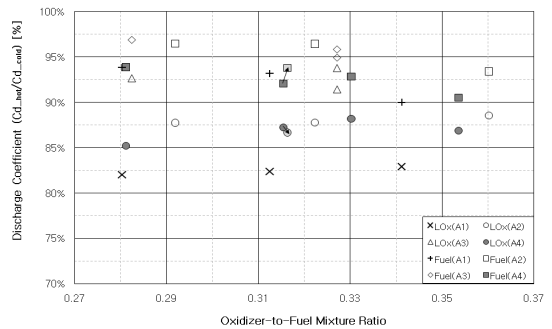


Fig. 4 Discharge Coefficient Variations according to Mixture Ratio at Fixed Chamber Pressure

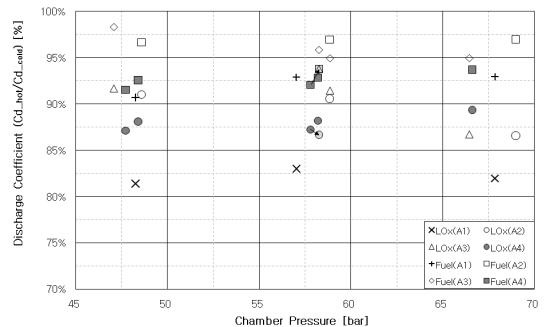


Fig. 5 Discharge Coefficient according to Chamber Pressure at Fixed Mixture Ratio

연소압에 따른 축소형 4호기의 분사기 유량계 수 변화는 Fig. 5와 같이 산화제와 연료 모두 거의 일정한 것으로 보이나 고압 조건에서 약간 증가하는 것으로 나타났다. 이는 이전 축소형 시험 결과와는 다른 경향성을 보여주는 것으로 특히 축소형 2호기와 3호기의 경우 고압 조건에서 산화제의 유량계수가 급격히 줄어들었으며, 연료 유량계수의 경우 축소형 1, 2호기는 압력에 따라 거의 일정한 반면 축소형 3호기는 연소압이 증가할수록 유량계수가 줄어들었다. 하지만 유량계 수 편차는 산화제 1.2%, 연료 1.3%로 연소압에 따라 크게 변하지 않는 것으로 나타났다.

Figure 4와 5에서 화살표로 표시한 데이터는 20초 설계점 연소시험의 유량계수 추이를 나타내고 있는데, 4초 기준 계산값에 비해 연소 종료 직전에서 계산된 값이 연료 유량계수는 증가한 반면 산화제 유량계수는 약간 작아지고 있음을 알 수 있다.

축소형 가스발생기 4호기의 전체적인 분사기 유량계수는 연료는 수류시험 대비 약 92.5%, 산화제는 약 87.5%로 계산되는데, 이는 산화제는 축소형 2호기(88.7%)와 거의 유사한 값이며[4] 연료는 축소형 1호기(92.1%)와 거의 유사한 값이다[3]. 즉, 축소형 4호기는 바로 전 시제인 축소형 3호기에 비해 산화제와 연료의 유량계수 모두 줄어든 분사기라 할 수 있다.

연소 안정성을 파악하기 위하여 저압 조건에서 연소시험을 수행한 결과 축소형 2, 3호기에서 발생한 연소실의 150 Hz 대역의 저주파 압력 섭동은 관측되지 않았다. 이는 분사기 유량계수가 작아지면서 연소실 압력 대비 분사기의 차압이 증가하여 연소 불안정을 억제하고 있는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

이전 연구 결과를 바탕으로 축소형 가스발생기 4호기를 설계, 제작하여 설계점 및 탈설계점 조건에서 연소시험을 성공적으로 수행하였다. 연소시험 결과 혼합비나 연소압의 변화에 상관없

이 연료 및 산화제 분사기의 유량계수는 거의 일정하였다. 전체적으로 축소형 3호기에 비해 분사기의 유량계수가 약간 감소하여 차압이 증가하였다. 하지만 모든 연소시험 조건에서 연소 불안정 현상은 발생하지 않았다.

#### 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 추계학술대회논문집, 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. 김문기, 임병직, 강동혁, 안규복, 김종규, 최환석, "축소형 가스발생기 연소시험에서의 유량계수 특성," 한국추진공학회 2011년도 춘계학술대회논문집, 2010, pp.73-76
7. 안규복, 강동혁, 김문기, 임병직, 김종규, 최환석, "축소형 가스발생기 연소안정성 특성," 한국추진공학회 2011년도 추계학술대회논문집, 2011, pp.69-72