

## 가스발생기용 후연소 장치 시험 결과

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

# Hot-firing Tests of Afterburning Device for a Gas Generator

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

### ABSTRACT

An afterburning device was developed to safely treat unburnt gases of fuel-rich condition discharged by a gas generator. Hot-firing tests for a subscale gas generator were carried out to investigate operation and safety of the afterburning device. When supplying additional liquid oxygen, the length of the afterburning flame was significantly reduced.

### 초 록

가스발생기에서 배출되는 연료 과농의 미연가스를 안전하게 처리하기 위하여 후연소 장치를 개발하였다. 축소형 가스발생기에 대한 연소시험을 통해 후연소 장치의 작동성 및 안전성에 대한 검증을 수행하였다. 추가적인 액체산소를 공급함에 따라 후연소 화염의 길이가 급격하게 줄어드는 것을 확인하였다.

Key Words: Gas Generator(가스발생기), Afterburning Device(후연소 장치), Unburnt Gas(미연가스), Fuel-Rich(연료과농)

### 1. 서 론

액체로켓엔진의 주요 구성품 중 하나인 가스발생기는 케로신과 액체산소를 추진제로 사용하여 연소가 이루어진다. 가스발생기에서 발생하는 연소가스는 터보펌프의 터빈을 구동시키는 작동유체의 역할을 하는데 터빈의 열적 손상을 방지

하기 위해 연료과농 조건으로 혼합비를 설정하여 연소가스의 온도를 낮춘다. 하지만 연소에 참여하지 않은 다량의 가연성의 미연가스를 대기 중이나 소음저감장치에 그대로 배출하게 되면 주위의 공기와 혼합하여 순간적으로 예기치 않은 폭발이 발생할 위험을 야기할 수 있다. 따라서 가스발생기 개발을 위한 연소시험을 수행할 경우 가스발생기를 통해 배출되는 미연가스를 안전하게 후처리를 해야 한다.

가스발생기에서 발생한 미연가스를 단순히 대기

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

중으로 직접 배출하는 경우 오염물질을 대기 중으로 그대로 배출하여 환경을 오염시킬 수 있으며 대기 중의 공기와 혼합하여 연소가 가능한 조건이 되었을 경우 점화원이 존재하면 점화하여 폭발할 위험이 있다. 일반적으로 가스발생기 연소시험에는 배출되는 고온, 고속의 미연가스로 인한 소음을 줄이기 위해 소음저감장치를 설치한다. 하지만 이 경우 가스발생기와 소음저감장치 사이에 약간의 공간만큼 떨어진 채 설치되어 있어 미연가스가 소음저감장치로 배출되면서 대기 중의 공기가 함께 빨려 들어가게 되므로 소음저감장치 내부에서 폭발 등의 위험이 발생할 소지가 다분하다.

이를 개선하기 위하여 가스발생기와 소음저감장치를 벨로우즈 장치를 통해 연결하여 외부의 공기의 흡입을 방지하고 비활성인 액체질소를 공급하여 미연가스의 공기와의 혼합 가능성을 낮춰 소음저감장치 내부의 점화 조건에서 벗어나게 하는 방법을 적용한 바 있다[1]. 하지만 이 방법은 미연가스의 소음저감장치 내부 폭발을 방지하는 목적을 가지고 있으나 소음저감장치 내외부에서의 재점화 및 폭발의 위험성을 완전히 배제할 수 없다.

본 연구에서는 가스발생기에서 발생한 미연가스를 후류에서 후연소 시키는 장치를 설계, 제작하여 근본적으로 미연가스를 완전 연소시키는 방법을 적용하였다. 설치된 후연소 장치를 사용하여 축소형 가스발생기의 연소시험을 통해 후연소 장치를 검증하였으며 시험 결과를 자세히 정리하고자 한다.

## 2. 후연소 장치 및 시험 조건

가스발생기 연소시험을 위한 후연소 장치의 설치 모습은 Fig. 1과 같으며 다음과 같이 구성된다. 가스발생기에서 발생한 고속의 미연가스를 일정한 수준의 유속으로 줄여 배출하는 미연가스 배출 배관, 연료과농의 가스를 완전 연소시키기 위해 필요한 액체산소를 공급하는 산화제 배관, 공급된 액체산소를 미연가스와 혼합시키기 위한 환형의 컬렉터, 산화제와 혼합된 미연가스를 점화시키는 물냉각형 점화기, 점화기에 점화원을 공급하기 위한 기체메탄 및 기체산소 배관, 점화기를 냉각하기 위한 냉각수 공급 및 배출 배관, 전체 배관을 지지하는 지지대를 포함한다.

미연가스 배출 배관의 전단은 가스발생기 노즐 출구와 플렌지를 통한 볼트 체결로 연결되며 후단에는 배출 배관이 4개로 분기되어 미연가스의 유속을 낮추어 후연소 화염이 부상되거나 날리지 않도록 하였다. 후연소를 위한 액체산소의 유량은 미연가스를 완전히 연소시킬 수 있는 유량까지 조절이 가능하도록 하였다. 공급된 액체산소는 환형의 컬렉터에 모인 후 원주 방향으로 등간격으로 뚫린 구멍을 통해 배출 배관 끝단에서 미연가스와 혼합된다. 점화기는 분기 배관 2개 당 1개씩 설치하였으며 점화기 위치는 배출 배관으로부터 배출되는 미연가스의 화염이 잘 붙는 위치를 점화 시험을 통해 선정하였다.

후연소 장치를 검증하기 위한 연소시험은 총 5회 수행하였으며, 설계점 2회, 초저압 조건 1회, 탈설계점(OD5) 2회로 구성된다. 시험 대상 가스발생기는 연소 불안정이 발생하지 않은 축소형 가스발생기 1호기를 선정하였다[2]. 1회 연소시험 시간은 시험에 따라 2초 혹은 4초로 수행하였다. 연소시험에 앞서 후연소용 및 가스발생기용 점화기의 점화시험을 수행하여 점화기 작동성 및 화염 안정성에 문제가 없음을 확인하였다.

후연소 장치를 검증하기 위한 연소시험은 총 5회 수행하였으며, 설계점 2회, 초저압 조건 1회, 탈설계점(OD5) 2회로 구성된다. 시험 대상 가스발생기는 연소 불안정이 발생하지 않은 축소형 가스발생기 1호기를 선정하였다[2]. 1회 연소시험 시간은 시험에 따라 2초 혹은 4초로 수행하였다. 연소시험에 앞서 후연소용 및 가스발생기용 점화기의 점화시험을 수행하여 점화기 작동성 및 화염 안정성에 문제가 없음을 확인하였다.

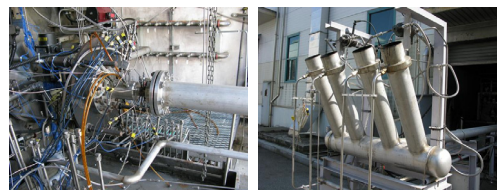


Fig. 1 Afterburning Device Installation

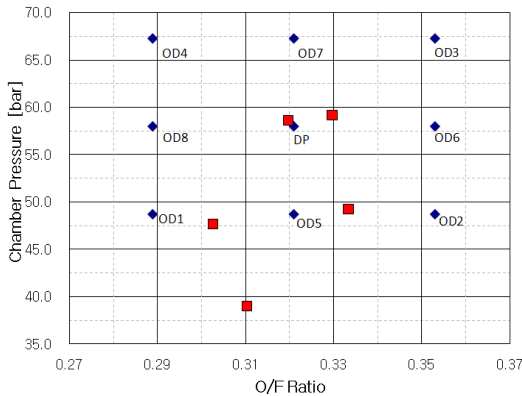


Fig. 2 Experimental Conditions of Hot-firing Tests

### 3. 연소시험 결과 및 유량계수

총 5회의 연소시험의 실제 시험점은 Fig. 2의 네모 기호로 도시하였다. 첫 번째 시험인 설계점 2초 시험에서는 후연소 장치와 가스발생기가 제대로 연결되어 설치되었는지 확인하기 위하여 후연소 없이 연소시험을 수행하였으며 후연소 장치 설치에 문제가 없음을 확인하였다. 그 후 2초 설계점 조건에서 후연소용 점화기를 이용해 미연가스의 후연소 시험을 수행하였으며 후연소가 안정적으로 이루어짐을 확인하였다. 다음으로 축소형 가스발생기 1호기의 연소 안정성을 파악하기 위한 초저압 조건(40 bar)에서 후연소 시험을 수행하였는데, 연소실 압력 섭동의 파워 스펙트럼 결과 축소형 2, 3호기에서 관측되던 저주파 연소 불안정이 발생하지 않았다[3,4]. 그 후 액체 산소 배관의 질소 퍼지에 의한 후연소 화염의 안정성을 확인하기 위한 탈설계점(OD5) 2초 후연소 시험을 수행하였으며 액체 산소 배관으로 질소를 퍼지한 상태에서도 후연소는 정상적으로 이루어지고 있음을 확인하였다. 여기까지의 후연소 시험에는 액체 산소를 공급하지 않았으며, 액체 산소를 공급하면서 후연소 시험을 수행하기 위한 액체 산소에 대한 수류시험을 수행하였다. 수류시험 결과를 바탕으로 시험 cyclogram을 설정하여 미연가스를 완전 연소시키기 위해 필요한 액체 산소 유량의 50%를 공급하면서 OD5 조

건에서 4초 후연소 시험을 수행하였다.

50% 유량의 액체 산소를 공급한 후연소 시험 (Test No.5)에서 측정된 연소실 및 매니폴드 압력 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 연소실 압력은 47.7 bar, 산화제 및 연료 매니폴드 압력은 각각 57.8, 56.0 bar로 측정되었다. 가스발생기에 공급된 추진제 유량은 총 2.18 kg/s, 후연소용 액체 산소 유량은 2.1 kg/s이며 가스발생기 혼합비는 0.303으로 측정되었다. Figure 3을 살펴보면 연소 초반인 약 6.2초경 전체적으로 압력이 출렁거리는 현상이 있으며 이는 후연소용 액체 산소를 공급하기 위한 밸브가 열리면서 발생한 현상이다. 한편 약 8.4초 시점에서 약한 출렁임이 관측되며 이는 배관의 냉각이 완료되어 기체 산소가 액체 산소로 변하면서 일어나는 현상을 확인하였다.

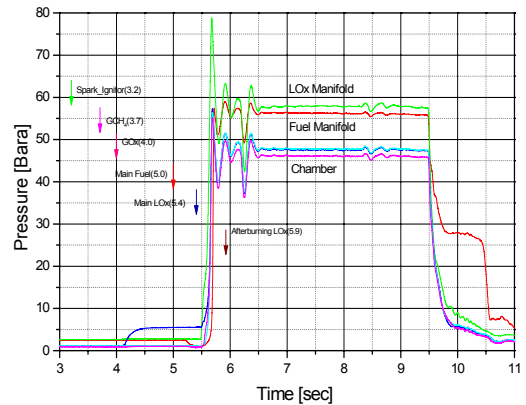


Fig. 3 Manifold and Chamber Pressure Variation at Test No.5

후연소 장치를 사용한 후연소 시험 총 4회에 대한 영상을 바탕으로 획득한 화염 직접 사진은 Fig. 4와 같다. 후연소 화염은 점화기에 의해 정상적으로 점화가 이루어졌으며 화염 부상이나 날림 현상 없이 미연가스 배출 배관에 부착되어 안정적으로 연소가 이루어졌다. 안전을 위해 배출 배관의 각도를 수평선 기준 60° 기울여 설치하여 후연소 화염이 기울어진 상태로 형성되는 것을 알 수 있다. Figure 4에서 (a) ~ (d)의 경우 확산화염인 주황색을 띠는 반면 (e)에서는 예혼합 화염의 색깔을 띠고 있다.

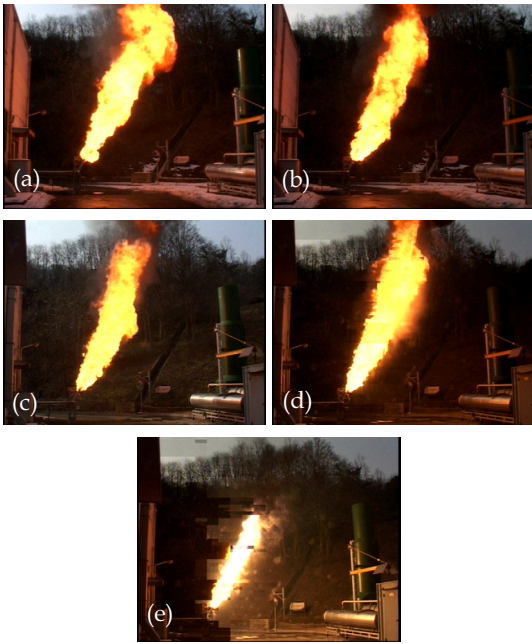


Fig. 4 Afterburning Flame Images. (a) Test No.2, (b) No.3, (c) No.4, (d) No.5 w/o LOX, (e) No.5 with LOX.

Table 1 Flame Length of Afterburning Tests

Test No.	Flame Length (m)	Normalized Flame Length	
No.2	9.1	84.3	
No.3	8.5	78.3	
No.4	9.4	86.7	
No.5	w/o LOx	9.2	84.9
	w/ LOx	6.0	55.6

짧은 연소시간에 의해 후연소 화염의 길이가 다소 변동이 심하여 임의로 대표 화염사진을 정하여 화염길이를 계산한 결과를 표 1에 나타내었다. 이때 화염길이를 미연가스 배출 배관의 출구 지름으로 나눈 무차원 화염길이를 함께 표시하였다. 화염길이는 대체로 10 m내에 존재하였으며 무차원 화염길이는 추진제 유량이 작은 No.3의 경우를 제외하고 배관 출구 지름의 약 85 ~ 87배 정도의 범위를 보이고 있다. 후연소

화염에 액체산소가 공급되면 화염길이는 배관 지름의 약 56배까지 줄어들게 되어 약 35%의 감소 효과를 보여준다. 액체산소의 유량을 100%까지 공급하게 되면 화염길이는 더욱 줄어들 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

가스발생기에서 발생한 연료 과농의 미연가스를 안전하게 처리하기 위하여 후연소 장치를 설계, 제작하였다. 축소형 가스발생기와 연결하여 연소시험을 통해 후연소 장치의 작동성 및 안전성에 대한 검증을 수행하였다. 후연소 화염은 배관에 부착되어 안정적으로 이루어졌으며 후연소용 액체산소를 공급하면 화염이 급격히 줄어드는 것을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

1. 강동혁, 임병직, 안규복, 서성현, 한영민, 최환석, "75톤급 가스발생기 연소시험을 위한 시험장 개선 및 수류시험" 한국추진공학회 2009년도 추계학술발표회 논문집, 2009, pp.29-33
2. 김문기, 서성현, 안규복, 임병직, 김종규, 이광진, 한영민, 최환석, "75톤급 액체로켓엔진 축소형 가스발생기 연소시험," 한국추진공학회 2010년도 춘계학술대회논문집, 2010, pp.173-176
3. 안규복, 강동혁, 김문기, 임병직, 김종규, 서성현, 최환석, "축소형 가스발생기 연소안정성 연구," 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회논문집, 2010, pp.594-596
4. 안규복, 강동혁, 김문기, 임병직, 김종규, 최환석, "축소형 가스발생기 연소안정성 특성," 한국추진공학회 2011년도 추계학술대회논문집, 2011, to be published