

# 가스 발생기 분사기 LOx post 손상 방지를 위한 분사기 개발

송주영\* · 김종규\* · 문일윤\* · 한영민\* · 최환석\*

## Development of Gas Generator for Liquid Rocket Engine to prevent of damage for LOx post

Ju-Young Song\* · Jong-Gyu Kim\* · Il-Yoon Moon\* · Yeoung-Min Han\* · Hwan-Seok Choi\*

### ABSTRACT

LOx post damage occurs from the development process of the full-scale gas generator which is necessary to 30 tonf class engine development was described. The cause and analysis for damage was described. The combustion test result of 4 injector, the full-scale gas generator and redesigned injector was described. Combustion instability, purge, the low momentum of LOx spray, small recess number, the low flow of LOx, and the high spray angle is main reason the possibility of knowing. The redesign for the injector in the direction of increase of recess number, increase of LOx and fuel spray angle, decrease of gap interval between the LOx post outer wall and fuel screen and increase of LOx post wall thick became accomplished.

### 초 록

본 연구는 30톤급 엔진 개발에 필요한 실물형 가스 발생기를 개발하는 과정에서 분사기 LOx post에 발생한 손상에 대해 기술하였고 손상에 대한 원인 분석에 대해 논의하였다. 4분사기, 실물형 가스발생기 및 1차 재설계된 분사기에 대한 연소시험 결과를 기술하였고 이에 대한 원인으로 연소 불안정, 종단시 purge, LOx 분무의 낮은 모멘텀, 작은 recess number, 적은 LOx 분사기 유량, 큰 분무 각도 등이 주원인임을 알 수 있었다. 이 분석 결과에 따라 recess number를 증가, 분사기 LOx 및 연료 분무각 증가, LOx post 외벽과 연료막 사이 간격 축소, LOx post 벽 두께 증가의 방향으로 분사기에 대한 재설계가 이루어졌다.

Key Words: Gas Generator(가스발생기), Recess Number(리세스 수), Combustion Instability(연소 불안정)

### 1. 서 론

고성능 액체로켓엔진은 추진제를 연소기로 공급하는 터보 펌프를 구동하고, 연료와 산화제 일부를 가스 발생기에서 연소하여 대기나 노즐로 방출되어 추력을 얻는다. 가스 발생기는 주 엔진

\* 한국항공우주연구원 연소기그룹  
연락처자, E-mail: jysong@kari.re.kr

에 이용되는 추진제를 사용하는 것이 일반적이며, 작동압력은 엔진 압력과 비슷한 수준이다[1].

가스 발생기에서 주요 일자는 압력, 유량, 가스 온도, 가스의 분자량 및 비열비 등이다. 터빈에서 필요한 동력에 의해 유량 및 압력 등의 주요 인자가 결정되지만, 가스 발생기 출구에서의 가스 온도는 터빈의 재질에 의해 정해진다. 일반적으로 운용되는 가스 발생기의 출구온도는 터빈 블레이드 재질과 열적인 손상을 고려하여 1150~ 1200K 이하로 제한되게 된다. 따라서 가스 발생기 설계시 주 연소영역의 위치 및 고온과 저온의 가스 혼합을 우선적으로 고려하여야 한다[2,3].

본 연구는 30톤급 엔진 개발에 필요한 실물형 가스 발생기를 개발하는 과정에서 분사기 LOx post에 발생한 손상에 대해 연소시험의 결과를 기술하였고 손상에 대한 원인 분석을 논의하였다. 향후 방안과 재설계된 분사기에 대해 기술하였다.

## 2. 가스발생기 및 시험 장치

현재 개발 중인 가스 발생기는 다음의 단계를 거치게 된다. 여러 종류의 단일 분사기에 대한 수류/연소 시험, 분사기 4개로 구성된 축소형 가스발생기의 수류/연소 시험, 그리고 실물형 가스 발생기 연소 시험을 수행하게 된다. 본 논문에서는 4분사기 및 실물형 가스 발생기 연소 시험에서 발생한 분사기의 손상 및 1차 재설계된 분사기에 대한 실험 결과에 대해 언급하였다.

Table 1에 37개의 분사기로 구성된 실물형 가스 발생기에 대한 사양을 나타내었다[3]. 4분사기 가스 발생기는 실물형 가스발생기의 대표적인 배열을 나타내는 4개를 선정하여 제작된 것으로 사양은 참고문헌에 제시하였다[4].

가스발생기에 사용된 분사기는 케로신과 액체 산소를 분사시켜 혼합하는 이중 와류 형태의 분사기로 recess에 따라서 RN=0, 0.5, 1의 3종과 1차 재설계된 2종의 분사기들이 적용되었다.

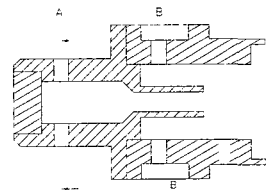
Figure 1과 2에 분사기의 개략도를 나타내었다.

Table 1 Specifications of Gas Generator

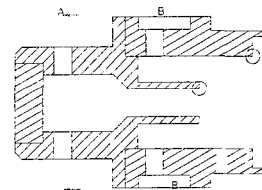
Item	Unit	Value
O/F Ratio		0.33
Total Pressure (P <sub>gg</sub> )	bar	57.8
Total Temperature (T <sub>gg</sub> )	K	900
Total Mass Flow Rate (W)	kg/s	4.4
Length/Diameter	mm	180/95
Molecular Weight		27
Specific Gas Constant (R)	J/kg·K	307.92
Specific Ratio (Gamma)		1.121
Gas Density (rho)	kg/m <sup>3</sup>	20.85
Residence Time	msec	6



Fig. 1 Double swirl injector for gas generator (Mixed Type, R.N=0.0(#5), 0.5(#6), 1.0(#7))



(a) #6M (유량동일, LOx 분무각 감소)



(b) #6L (유량 2배, LOx 분무각 감소)

Fig. 2 Redesign of double swirl injector

## 3. 분사기 손상 원인 분석

### 3.1 4분사기 연소시험

4개의 분사기를 장착한 가스발생기 연소시험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 가스 발생기 분사기 #5의 경우 RN=0으로 외부 혼합이 이루어지는 분사기로 손상이 가장 작을 것을 생각하였지만 다른 분사기에 비해 가장 큰 손상을 나타내었다. 이는 LOx sheet가 연료 쪽으로 치우치는 현상이 발생하는데 연소실 내부에서 화염이 재순환되는 영역으로 바로 오는 관계로 더 많은 손상이 나타나는 것으로 생각된다. RN=0.5인 분사기 #6의 경우 LOx post 손상이 있었으며, RN=1.0인 분사기 #7의 경우 경미한 손상을 확인할 수 있었다. 따라서 recess number가 증가할수록 손상의 정도가 약해지는 것을 볼 수 있다. 다른 원인으로 낮은 purge 압력에 의해 종단시 LOx 유속이 줄어들어 연소실 화염이 분사기 노즐 쪽으로 접근하게 되어 손상이 일어날 가능성이 높다.

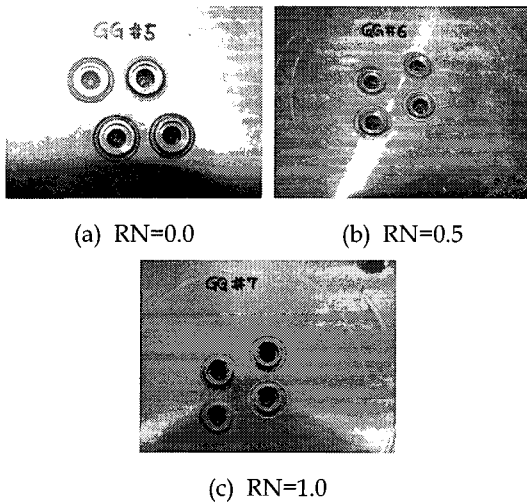


Fig. 3 GG Injector head after firing test



Fig. 4 Firing test of full-scale GG EM#1

### 3.2 실물형 가스 발생기 연소시험

실물형 가스 발생기 EM#1은 RN=0.5로 첫 번째 연소시험에서 1L mode의 연소 불안정이 발생하였으나 LOx post의 손상은 관찰되지 않았다 [5]. 3번째 시험에서 연소 종단 purge시에 flame streak이 관측되었으며 Fig. 4에 나타내었다.

이러한 flame streak이 생기는 시점이 LOx purge 시점과 거의 비슷하였으며, purge 질소와 산소가 섞인 기체가 케로신과 격렬하게 반응하여 SUS 재질의 LOx post를 녹이면서 외부로 나오는 것으로 생각할 수 있다.

연소시 발생하는 1L mode의 연소불안정에 의한 동압의 섭동 성분이  $\pm 200$ psi 이상으로 분사기 차압보다 높다. 이로 인해 LOx post 근처에 화염의 출입이 있는 것으로 생각된다. 그리고 산화제와 연료의 모멘텀 차이가 커서 연소 중에 산화제의 분무 및 spray sheet가 설계한 분무각을 가지지 못하고 연료 sheet에 바로 붙는 현상으로 인해 LOx post 근처에서 화염이 존재하게 되어 손상을 입는 것으로 생각할 수 있다. 마지막으로 4분사기에서와 같이 낮은 purge 압력에 의해 종단시 LOx 메니폴드 압력이 낮아지게 되어 연소실 화염이 분사기 쪽으로 들어와 LOx post에 화염이 존재하게 되어 post가 손상을 입는 것으로 생각된다.

위의 원인에 대한 손상 여부를 확인하기 위해 1L mode의 연소불안정을 제거하고 purge 압력을 상승하여 연소 종단시 LOx의 모멘텀이 낮아 flame streak이 발생하지 않도록 시험을 수행하였다. 그 결과 연소불안정이 발생하지 않았으며 LOx post의 손상이 관측되지 않았다.

실물형 가스 발생기 EM#2는 RN=0으로 연소 불안정을 제거하고 purge를 높여 연소시험을 수행하였는데 LOx post에 심각한 손상이 관측되었다. Figure 5에 연소 시험 후의 EM#2 헤드부 사진을 나타내었다.

4분사기 결과와 마찬가지로 recess number가 증가할수록 손상의 정도가 약함을 볼 수 있다. 하지만 연소불안정이 발생한 EM#1보다 LOx post의 손상이 더 큰 것은 연소불안정으로 인한 영향보다는 종단 purge시 화염이 분사기 노즐

쪽으로 들어오는 현상과 모멘텀 차이로 인해 산화제 sheet가 연료 sheet로 바로 붙는 현상으로 인한 영향이 더 큰 것으로 볼 수 있다.

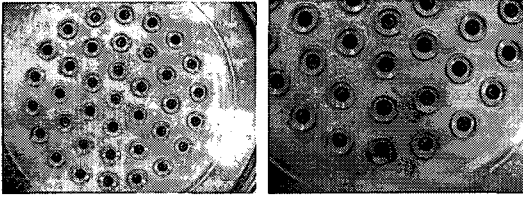


Fig. 5 Full-scale GG EM#2 after firing test

### 3.3 1차 재설계된 가스 발생기 연소시험

위와 같이 가스발생기 분사기 LOx post 손상에 대한 원인 분석을 통해 재설계된 분사기를 적용하여 연소시험을 수행하였다. 유량은 동일하고 kerosene 노즐 출구를 확대시키고 LOx 분무 각도를 줄여 LOx 모멘텀을 증가시킨 #6M 분사기와 유량을 두 배로 하고 kerosene 노즐 출구를 확대시키고 LOx 분무 각도를 줄인 #6L 분사기로 두 형태의 재설계가 이루어졌다.

산화제 모멘텀을 늘이는 방향으로 설계된 #6M을 적용한 4분사기로 시험을 수행한 결과 LOx post의 손상이 여전히 발생하였고 Fig. 6에 시험 후의 사진을 나타내었다.

기존의 분사기 보다 더 심한 LOx post 손상이 발생하였는데 LOx post와 연료막 사이의 간격이 증가하여 재순환 영역이 더 커지게 되어 화염이 보임(anchor)될 수 있는 가능성이 더 증가된 것으로 생각된다. 따라서 LOx post 근처의 재순환 영역을 작게 하여 화염이 존재할 수 있는 영역을 최소화하도록 재설계가 이루어져야 할 것이다.

LOx 양이 작아서 LOx post의 냉각이 부족해 손상이 오는 것으로 생각되어 유량을 두 배로 증가시킨 #6L을 적용한 2분사기로 시험을 수행한 결과 RN=0.5일 때는 기존의 분사기보다는 손상의 정도가 약하지만 손상이 발생하였으며, RN=1.5로 증가시켜 재시험을 하였을 때도 손상이 비교적 작지만 발생하였다. Figure 7에 시험 후의 사진을 나타내었다. 시험 결과들을 보면 유

량 증가가 LOx post의 손상을 방지하지 못하였으며, LOx의 축방향 모멘텀보다 재순환 영역에서의 화염이 직접적인 원인이 되는 것으로 생각할 수 있다.

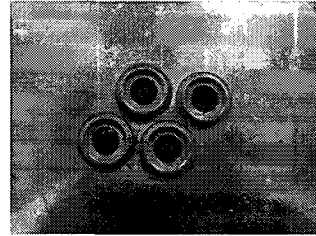
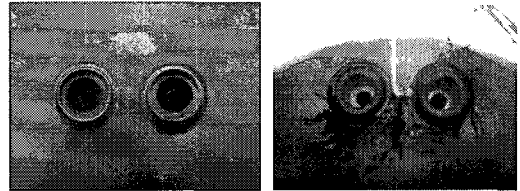


Fig. 6 GG Injector (#6M) head after firing test



(a) RN=0.5

(b) RN=1.5

Fig. 7 GG Injector (#6L) head after firing test

## 4. 가스발생기 분사기 재설계

가스발생기 분사기 LOx post 손상에 대한 원인을 분석한 후 1차 재설계된 분사기들로도 손상을 막지 못하였다. 따라서 기존 분석한 원인들과 연소시험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

가스발생기 분사기 LOx post 손상에 가장 큰 영향을 미치는 것은 recess number로서 외부 혼합이 아닌 내부 혼합의 방향으로 설계가 이루어져야 한다. 그리고 연소 시험시 수행하는 purge에 큰 영향을 받는 것으로 생각된다. 마지막으로 4분사기 연소 시험 결과를 보면 같은 RN=0.5일 경우 재순환영역이 큰 #6M이 기존 #6보다 LOx post 손상이 더 크므로 내부 혼합 분사기라 할지라도 산화제와 연료 막으로 형성되는 분사기 내부의 재순환 영역이 커지면 손상이 더 증가되는 것으로 사료된다.

따라서 다음의 설계방향으로 재설계가 진행되었다. 1) Recess number 증가(외부혼합이 아닌 내부혼합), 2) LOx spray cone angle 증가, 3) 재순환 영역을 최소화하도록 LOx post와 kerosene 벽면 사이의 간격 축소, 4) LOx post의 wall 두께 증가.

Figure 8에 설계한 분사기에 대한 개략도를 나타내었다.

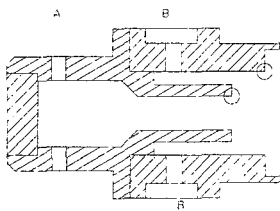


Fig. 8 Redesign of double swirl injector

## 5. 결론

현재 개발 중인 가스발생기에 나타난 분사기 LOx post 손상에 대한 시험 결과를 기술하였고 이에 대한 원인과 분석이 이루어졌다. 이를 바탕으로 가스발생기 분사기에 대한 재설계가 이루어졌다.

분사기 손상에 대한 원인으로 연소 불안정, 중

단시 purge, LOx 분무의 낮은 모멘텀, 작은 recess number, 적은 LOx 분사기 유량, 큰 분무 각도 등이 주 원인을 알 수 있었다. 이 분석 결과에 따라 recess number 증가, 분사기 LOx 및 연료 분무각 증가, LOx post 외벽과 연료막 사이 간격 축소, LOx post 벽 두께 증가의 방향으로 분사기를 재설계하였다.

## 참고 문헌

1. H. W. Douglass, H. W. Schmidt, L. Levinson, "Liquid Propellant Gas Generators," NASA SP-8081, 1972
2. Huzel, D. K. and Huang, D. H., "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines," AIAA, 1992
3. 한영민 등, "충돌형 분사기 형태의 액체로켓 엔진용 가스발생기 연소성능시험," 한국추진 공학회지, 제8권 제2호, 2004. 6, pp.10-17
4. 김종규 등, "동축 와류형 단일 분사기를 적용한 가스발생기의 연소특성에 관한 연구," 추계한국항공우주공학술대회, 2004
5. 김승환 등, "액체로켓엔진용 실물형 1.5MW 급 가스발생기 개발," 제5회 우주발사체기술 심포지움, 2004. 5, pp.74-81