

# 연료 과농 가스발생기의 분사기 손상에 관한 연구

문일윤\* · 이광진\* · 임병직\* · 서성현\* · 한영민\* · 최환석\*

## Study of Injector Damage on Fuel-rich Gas Generator

Il-Yoon Moon\* · Kwang-Jin Lee\* · Byoungjik Lim\* · Seonghyeon Seo\*  
Yeoung-Min Han\* · Hwan-Seok Choi\*

### ABSTRACT

In the development process of a fuel-rich gas generator using kerosene and LOx for a 30 tonf class liquid rocket engine, a heat damage occurred at the LOx post of swirl coaxial injectors used in the gas generator and the problem has been examined. To prevent the heat damage, injectors are redesigned to have an increased recess while maintaining internal mixing, which minimizes recirculation region to prevent anchoring of the flame in the recirculation region. The combustion test results of the sub-scale gas generator showed that this scheme can prevent heat damage of the LOx post in the swirl coaxial injectors of the fuel-rich gas generator.

### 초 록

액체산소와 케로신을 사용하여 연료 과농 조건에서 작동하는 30 ton급 로켓엔진용 가스발생기를 개발하는 과정에서 사용된 동축 와류형 분사기의 산화제 post에 발생한 열손상에 대한 연구가 진행되었다. 분사기의 열손상을 방지하기 위해 분사기는 내부 혼합 방식을 유지하면서 recess를 증가시키고 재순환영역을 최소화하여 재순환영역에서의 화염형성을 억제하는 방향으로 재설계되었다. 축소형 규모의 연소시험에서 이러한 재설계를 통해 연료 과농 가스발생기용 동축 와류형 분사기의 산화제 post 열손상을 방지할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Key Words: Gas Generator(가스발생기), Swirl Coaxial Injector(동축 와류형 분사기), Recess Number (리세스 수)

### 1. 서 론

로켓엔진 연소실 내부는 고압에서 연소가 진행되기 때문에 분사기를 통해 연소실 내로 추진

제를 공급하기 위해서는 연소실 내부보다 더 높은 압력이 필요하다. 로켓엔진에서 추진제를 높은 압력으로 가압하여 연소실로 공급하는 방식으로 압축가스를 이용하는 방식과 터보펌프를 사용하는 방식이 있으며 고추력이고 연소시간이 비교적 긴 대형 로켓엔진에서는 터보펌프에 의한 추진제 공급방식이 사용된다. 터보펌프의 구

\* 한국항공우주연구원 연소기그룹  
연락처, E-mail: iymoon@kari.re.kr

등을 위해 우주발사체용 액체추진제 로켓시스템에서 가장 널리 사용되고 있는 것이 가스발생기이다. 가스발생기는 주엔진에 사용되는 추진제를 사용하는 것이 일반적이며, 작동압력은 엔진압력과 비슷한 수준이다[1]. 가스발생기의 배기가스 온도가 너무 높으면 터빈의 블레이드를 녹일 우려가 있기 때문에 추진제 혼합비를 조절하여 가스온도를 1150~1200 K 이하로 제한한다[2, 3]. 따라서 가스발생기는 주로 연료 과농 상태에서 가스를 발생하지만 우주선진국의 경우 대부분의 우주발사체에 터보펌프를 사용하는 관계로 1950년대부터 가스발생기에 대한 개발을 수행해 왔으며 현재 운용 중인 staged combustion closed cycle 엔진에서 산화제 과잉으로 운전하는 preburner 개념까지 매우 높은 수준의 가스발생기 개발을 진행해 왔다[4].

국내의 경우 로켓엔진용 가스발생기에 대한 기초 연구가 진행되어 왔으며 현재 케로신과 액체산소를 추진제로 하는 30톤급 로켓엔진에 사용할 목적으로 연료 과농 가스발생기 개발을 진행하고 있다. 가스발생기를 개발하는 과정에서 사용된 동축 와류형 분사기에 열손상이 발생하였다. 기존의 연구에서 원인 분석과 분사기 재설계, 시험평가를 통해 개선안이 도출되었다[3].

본 연구에서는 기존의 연구에서 도출된 개선안을 분사기 설계에 반영하여 시험평가를 통해 그 타당성을 검증하고자 하였다.

## 2. 손상방지를 위한 분사기 재설계

현재 개발 중인 로켓엔진용 가스발생기는 30 ton급 엔진의 터보펌프를 구동할 수 있는 용량으로 동축 와류형 분사기를 사용하며 액체산소와 케로신을 연료 과농 조건에서 연소하는 방식이다. 터빈 재질에 의해 연소가스의 출구온도는 900 K 이하로 제한되었다. 유량은 출력을 고려하여 4.4 kg/s, OF비는 연소가스의 출구온도를 맞추기 위해 0.33으로 선정되었다. 개발 중인 가스발생기에 대한 자세한 규격은 참고문헌에 자세히 언급되어 있다[4]. 가스발생기용 분사기는

산화제 중심 동축 와류형 분사기가 선정되었으며 산화제 측에 별도의 와류실을 갖는 mixed type의 recess number(RN) 0.0, 0.5, 1.0의 3종이 설계되었다[3, 4]. 실물형 가스발생기의 대표적인 분사기 배열의 형태를 갖도록 4분사기를 배열한 축소형 가스발생기를 제작한 후 성능검증을 위한 연소시험이 수행되었다. 시험결과 산화제 post에 열손상이 발생하였고 그 원인을 분석하여 post 손상 방지를 위한 1차 재설계가 이루어졌으나 분사기 손상을 완벽하게 방지하지 못하였다. 1차 재설계 평가시험을 통해 주요 원인에 대한 재평가와 2차 개선안이 도출되었다[3].

내부혼합을 유지하면서 분사기 손상과 밀접한 관계가 있는 recess를 증가시키고 산화제 분무각 증가, 산화제 post 두께 증가, 산화제 post와 연료 노즐사이의 거리 축소를 통해 분사기에서의 재순환 영역을 최소화하여 재순환 영역에서의 화염형성을 억제하고자 하는 방향으로 2차 개선안을 마련하여 다음과 같은 방법으로 2차 재설계에 반영하였다.

2차 재설계에서는 분사기당 유량은 초기설계와 동일하게 하면서 산화제 분무각을 65°에서 90°로 증가시켰으며 연료 분무각은 93°에서 105°로 증가시켰다. 산화제 post 두께는 0.5 mm에서 0.75 mm로 증가시켰다. 산화제 post 외벽과 연료

Table 1 Specifications of Second Modified Injectors

injector ID	Basic injector	second modified injectors		
	A	B	C	D
injector type	bi-swirl coaxial injector			
mass flow rate	fuel(89 g/s), oxi(30 g/s), O/F(0.33)			
oxi. spray angle	65°	90°	>90°	>90°
fuel spray angle	93°	105°		
oxi. post thickness	0.5mm	0.75mm		
recess number	1.0	1.5	2.0	3.2
recess length	1.4mm	2.2mm	3.2mm	4.6mm
characteristics	-	-	tapered oxi. post	

노즐간의 간격은 0.5 mm에서 0.35 mm로 축소하였다. 산화제 post의 RN을 1.5, 2.0, 3.2로 변화를 두었으며 이때 recess 된 길이는 2.2 mm, 3.2 mm, 4.6 mm에 해당한다. RN 2.0과 3.2의 경우 재순환 영역을 줄이기 위해 산화제 post 끝단을 테이퍼 가공을 하였다.

Table 1에서 2차 재설계된 분사기들의 규격을 기본 분사기와 비교하였으며 Fig. 1에 기본 분사기와 2차 재설계된 분사기들의 개략도를 나타내었다. Fig. 2는 실물형의 대표적인 분사기 배열을 묘사할 수 있도록 4개의 분사기로 이루어진 축소형 분사기 헤드의 구조를 보여주는 개략도이다.

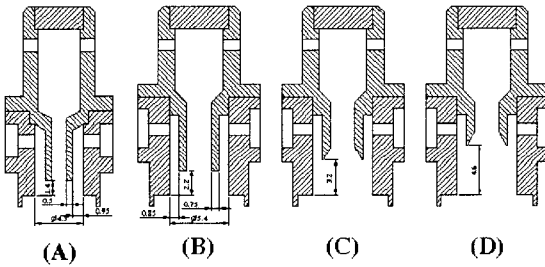


Fig. 1 Schematics of Second Modified Injectors

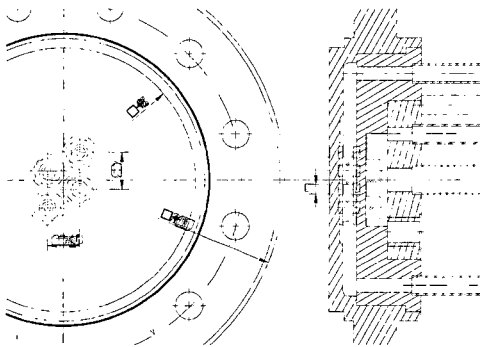


Fig. 2 Schematics of Sub-scale Injection Head

### 3. 축소형 가스발생기 시험을 통한 설계 평가

#### 3.1 2차 재설계 축소형 가스발생기 수류시험

Figure 3은 2차 재설계 된 분사기를 사용한 축

소형 분사기 헤드에서 연료와 산화제의 단독 분무와 혼합 분무시의 사진이다. 모의 유체로 물을 사용하였으며 밀도를 보정하여 실유체의 값을 예측하였다. 분사기 B, C, D를 사용한 축소형 모드, 연료측은 설계 유량 기준으로 약 11 bar의 차압을 보였으며 산화제측은 설계 유량기준으로 7 bar의 차압을 보였다.

Figure 3에서 각 분사기 간의 분무특성 변화를 관찰할 수 있다. 특히 RN 1.5인 분사기B와 2.0인 분사기C에서 산화제 분무사진을 비교해 보면 RN이 커짐에 따라 산화제 액막이 연료 노즐 벽면에 부딪쳐서 분무되는 내부혼합의 특성을 강하게 보여주고 있다.

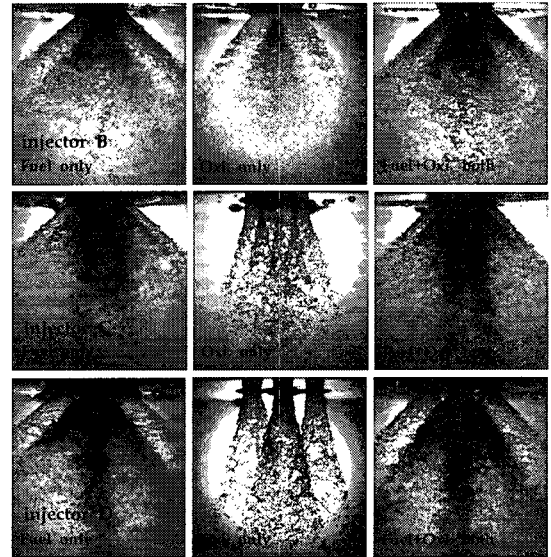


Fig. 3 Spray Test of Sub-scale Injection Head with Water

#### 3.2 2차 재설계 축소형 가스발생기 연소시험

가스발생기 동작환경에서 배기가스의 온도는 1000 K 미만이므로 별도의 냉각을 고려하지 않은 스테인리스 스틸로 제작된 연소실과 노즐을 사용하였다. 메탄과 산소를 이용한 가스 토오치를 점화에 사용하였다. 연료 선공급 점화 시퀀스를 사용하였으며 소염 시에는 연료공급을 먼저 중단하여 전 시험영역에 걸쳐 연료과잉 상태를 유지하였다. 시험조건은 Jet-A1 323 g/s, LOX 107 g/s로 총 유량 430 g/s를 공급하며 이때

OF비 0.33이다. 산화제 post 손상의 직접적인 원인 중 하나로 밝혀진 소염 시 퍼지에 의한 문제를 없애기 위해 연소압력을 고려하여 퍼지압력과 양을 정하였다. 시험은 분사기B로 이루어진 축소형 가스발생기로 4.5초 연소시험을 수행한 후 분사기 손상이 발생하면 분사기C, D가 되도록 재가공하여 연소시험을 수행하였다. 4.5초 연소시험을 통해 손상이 발생하지 않았을 경우 검증을 위해 추가로 10초 연소시험을 수행하였다.

분사기B, C, D를 사용한 축소형 가스발생기의 연소시험은 모두 동일한 조건에서 시험이 진행되었으며 Fig. 4에 분사기D로 구성된 축소형 가스발생기의 10초 연소시험 전 구간에서의 추진제 매니폴드와 연소실에서의 압력을 나타내었다. 시험결과 OF비는 시험조건 대비 다소 높은 0.39에서 총 유량 401.44 g/s가 공급되어 59.52 bara의 연소압을 형성하였음을 알 수 있으며 분사기 B, C를 사용한 경우도 거의 비슷한 값을 보였다.

Figure 5는 RN 1.5인 분사기B로 구성된 축소형 가스발생기의 4.5초 연소시험 후 발생한 분사

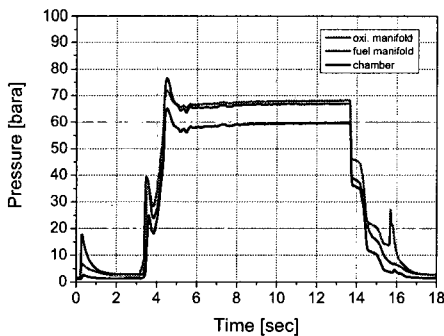


Fig. 4 10 sec Combustion Test Result of Sub-scale Gas Generator

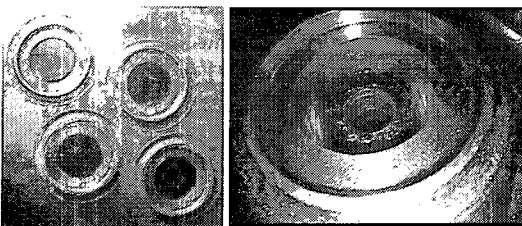


Fig. 5 Injector B Damaged after 4.5 sec Combustion Test

기 손상을 촬영한 사진이다. 4개의 분사기 모두에서 산화제 post에 열손상이 발생한 것을 볼 수 있다. 기본 분사기A에 비해 열손상의 정도가 작아졌음을 확인할 수 있으며 이는 기존의 연구에서 언급한 recess와 분사기 손상간의 경향과 일치한다[3].

4.5초 연소시험 후 손상된 RN 1.5의 분사기B를 RN 2.0으로 재가공하고 재순환 영역을 최소화하기 위해 산화제 post 내부를 테이퍼 가공하여 분사기C로 변경하였다. Fig. 6은 가공된 분사기C의 사진과 4.5초 연소시험 후 발생한 분사기 손상을 촬영한 사진이다. 4개의 분사기 모두에서 산화제 post 외각 모서리에 열손상이 발생한 것을 볼 수 있다.

4.5초 연소시험 후 손상된 RN 2.0의 분사기C

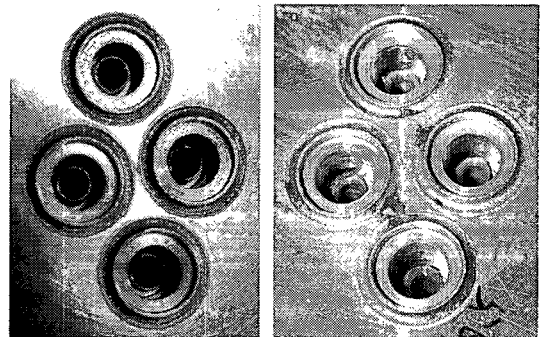


Fig. 6 Injector C Damaged after 4.5 sec Combustion Test

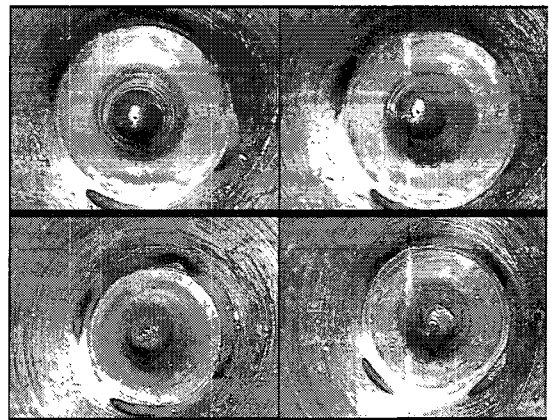


Fig. 7 Oxidizer Post of Injector D after 4.5 sec, 10 sec Combustion Tests

를 RN 3.2로 재가공하고 분사기C와 마찬가지로 산화제 post를 테이퍼 가공하여 분사기D로 변경하였다. 분사기D로 구성된 축소형 가스발생기는 4.5초의 연소시험 후 분사기에서 손상이 발견되지 않았다. 이를 검증하기 위해 10초의 연소시험이 추가로 수행되었다. Fig. 7은 4.5초와 10초의 연소시험 후 축소형 가스발생기를 구성하는 4개의 분사기D의 산화제 post를 확대하여 촬영한 사진이다. Fig. 6과 달리 산화제 post 외각 모서리에 손상이 발생하지 않았음을 확인할 수 있다.

#### 4. 맺 음 말

액체산소와 케로신을 사용하여 연료 과농 조건에서 작동하는 30 ton급 로켓엔진용 가스발생기를 개발하는 과정에서 사용된 동축 와류형 분사기의 산화제 post에 열손상이 발생하였다. 산화제 post 손상의 원인을 규명하여 분사기 손상을 방지하기 위해 기존의 연구에서는 연소불안정, 동축 와류형 분사기의 주요설계 인자인 recess, 추진제 분류 간의 큰 운동량 차이, 분사기 냉각과 관련된 분무 유량에 기인한 문제로 접근하였으며 이를 설계에 반영하여 시험하였다. 이를 반영한 1차 재설계와 시험을 통해 내부 혼합 방식을 유지하면서 recess를 크게 하고 재순환영역을 최소화하는 방향으로 2차 개선안이 도출되었다.

본 연구에서는 기 도출된 2차 개선안을 설계에 반영하여 4분사기로 이루어진 축소형 가스발생기 연소시험을 통해 검증하였다. 분사기 당 유량은 기존의 설계와 동일하게 하면서 재순환영

역을 최소화하기 위해 산화제 분무각을 증가시키고 산화제 post 두께를 증가시켰으며 산화제 post와 연료 노즐사이의 거리를 축소하였다. 내부 혼합 방식을 유지하면서 recess를 변경해가며 시험하였으며 산화제 post를 테이퍼 가공하기도 하였다.

축소형 규모에서의 연소시험결과 산화제 post에 테이퍼 가공을 하고 recess number가 가장 크게 설계된 분사기에서 손상이 발생하지 않았다. 따라서 내부 혼합 방식을 유지하면서 recess를 크게 하고 재순환영역을 최소화하는 개선안이 연료 과농 가스발생기용 동축 와류형 분사기의 열손상 방지에 유효함을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

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. 송주영, 김종규, 문일윤, 한영민, 최환석, "가스발생기 분사기 LOx post 손상 방지를 위한 분사기 개발," 제25회 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2005, pp.353-357
4. 김승한, 한영민, 서성현, 문일윤, 이광진, 김종규, 송주영, 김인태, 설우석, 이수용, "액체 로켓엔진용 실물형 1.5MW급 가스발생기 개발," 제5회 우주발사체기술심포지움, 2004. 5, pp.74-81