

7톤급 연소기 시험을 위한 시험 설비 변경

김현준* · 임병직* · 강동혁* · 제원주* · 최환석*

Test Facility Improvement for Hot Firing Test of a 7-tonf Combustor

Hyeon-Jun Kim* · Byoungjik Lim* · Donghyuk Kang* ·
Won-Ju Jae* · Hwan-Seok Choi*

ABSTRACT

The rocket engine test facility(ReTF) was improved for hot firing tests of 7 ton-class liquid rocket engine combustion chamber, which will be used for the third stage of the Korea Space Launch Vehicle II(KSLV-II), considering convenience of operation and maintenance, flexibility and safety. In this paper, main modifications and functions of improved ReTF were described.

초 록

한국형발사체 3단 엔진에 사용될 7톤급 액체로켓엔진의 연소기의 연소시험을 위해 한국항공우주연구원에 있는 지상연소시험장을 유지 및 운용의 편리성, 유연성, 안전성을 고려하여 개량하였다. 본 논문에서는 개량된 시험 시험설비 주요 변경과 기능에 관하여 서술하였다.

Key Words: KSLV-II(한국형발사체), Facility improvement(설비개량), Nitrogen gas panel(질소 가스패널), Rocket engine test facility(지상연소시험장)

1. 서 론

한국항공우주연구원(이하 항우연)에서 한국형 발사체(Korea Space Launch Vehicle II; KSLV-II) 개발 사업을 수행하고 있으며, 한국형 발사체는 3단으로 구성되어 있으며, 7톤급 연소기(7 tonf-Combustion Chamber; 7t-CC)를 개발하고 있다[1]. 소형위성발사체 개발사업의 일환으로 고성능 로켓엔진 연소기를 개발하기 위해

많은 시제품들을 설계 및 제작하여 항우연 원내 연소시험장에서 검증실험을 수행하였다[2].

연소기 성능 및 안정성 평가를 위해 항우연 원내 지상연소시험설비(Rocket engine Test Facility; ReTF)를 2001년에 구축하여 운영하고 있으며, 지상연소시험설비는 크게 유공압 시스템, 제어 계측 시스템, 소음저감장치로 구성된다[3]. ReTF는 고압의 기체 질소로 산화제(액화산소)와 연료(케로신)를 가압하여 시험대상(연소기)에 공급하여 연소기를 시험하게 된다. 추진제를 가압하기 위한 기체질소는 액체 질소를 펌프

* 한국항공우주연구원 연소기팀

† 교신저자, E-mail: kris@kari.re.kr

와 기화기를 사용하여 기체 상태로 상변화시켜 압력용기에 1차 저장하게 되며 시험 시 이를 이용하여 산화제(액체산소)와 연료(케로신)탱크를 고압으로 가압하는데, 고압가스 공급 패널은 고압의 질소가스를 각 요소에 공급 및 차단하는 역할을 한다. ReTF는 2004년에 30톤급으로 개량 [4]한 후 부분적인 설비 증설 및 용량변경 등이 이루어졌으며, 일부 장비는 노후화로 인해 시험의 신뢰성을 저하시킬 우려가 있어 이를 개선하였다. 앞으로 한국형발사체 개발사업 과정에서 ReTF에서는 KSLV-II의 3단 엔진 연소기인 7t-CC 개발 시험을 수행할 예정이며, 이에 따라 ReTF를 최적화하기 위해 추진제 공급 설비 변경을 진행하였다.

본 논문에서는 7t-CC 연소시험을 위한 ReTF의 최적화에 관해 크게 두 가지로 나누어 기술적으로 서술하였다.

- (1) 7t-CC 연소시험을 위한 ReTF의 추진제 배관 최적화
- (2) ReTF의 안전성 및 유지보수 용이성을 가지는 고압가스 공급 패널 제작 및 배관 변경 작업

1. ReTF 배관 최적화

현재 KSLV-II 3단 엔진인 7톤급 연소기 설계안은 Table 1과 같으며 기존 ReTF의 변경이 이루어진다.

Table 1 Preliminary design for KSLV-II 7t-CC

항 목	규 격
연소압	70 bar
산화제 유량	11 ~ 18 kg/s
연료 유량	4 ~ 8 kg/s
막냉각-Head	0.15 ~ 0.3 kg/s
막냉각-Throat	0.35 ~ 0.65 kg/s

기존 ReTF에는 30톤급, 75톤급 축소형 및 실물형 연소기를 시험하기 위한 유공압 설비가 갖추어져 있었기 때문에 배관, 밸브, 유량계 등의

크기가 7t-CC 규격에 비하여 상당히 크다. 따라서 추진제 공급 및 냉각 연료 공급을 위한 유공압 설비 등의 크기가 변경되었고 개발과정에서 필요한 다수의 연소시험을 효율적이고 정확하게 수행하기 위하여 산화제와 연료 추진제 공급배관에 유량제어밸브를 설치하는 것으로 구성하였다. 유량제어밸브를 이용하게 되면 수행되는 시험의 정확도를 높이고 1회 점화에 한 곳 이상의 작동 영역 시험을 수행할 수 있는 장점을 가진다.

2.1 연료 공급라인 변경

이전 시험들에서 메인밸브로 사용되었던 2" 밸브를 제거하고 1 1/2"로 변경이 가능했다. 메인라인에 있는 유량계는 2~32.4 kg/s의 범위를 갖기 때문에 그대로 활용하였고 중간에 유량제어밸브를 구성에 포함하여 필요에 따라 1회 점화에 다수 영역 시험을 수행할 수 있도록 구성하였다.

노즐과 연소실에서 분사되는 막냉각 연료유량은 전체 연료 유량의 12% 수준이다. 7t-CC 개발 시험에서 막냉각 연료 공급라인을 개별화하고 각 라인에 자동밸브를 설치하여 유량공급이 개별적으로 이루어질 수 있도록 하였다. 또한 각각의 유량을 별도로 측정할 수 있도록 구성하였고 막냉각 유량 조절은 오리피스를 통해 이루어지도록 구성하였다.

2.2 산화제 공급라인 변경

기존의 30톤급 연소기(30t-CC) 시험에서 메인밸브로 사용되었던 3" 밸브를 제거하고 1 1/2" 밸브를 7t-CC 연소시험에서의 산화제 공급 메인밸브로 사용하였다. 산화제를 공급하는 라인은 주 배관과 유량계(측정범위 : 5.3~88.3 kg/s)를 그대로 활용하였다.

점화용 산화제 공급을 위해 75톤급 연소기(75t-CC) 저압연소시험에서 사용한 것과 유사하게 1/2" 유량계(측정 최대치 : 500 g/s)를 설치하고 자동밸브, 배관을 그대로 유지하여 일부 산화제를 헤드로 보낼 수 있도록 구성하며 배관 냉각밸브 후단으로 온도센서를 설치하여 냉각과

정에서 배관 내 액체산소 온도를 확인할 수 있도록 구성하였다.

23 가스토치 점화설비 구성

KSLV-II 개발사업 과정에서 요구되는 다수의 연소시험을 수행하기 위해서는 7t-CC 연소시험을 하루에 2회 이상 수행할 필요성이 있기 때문에 점화추진제(TEA+TEB 혼합물)를 이용한 점화설비 이외에 가스토치(GOX, CH₄)를 이용한 점화설비를 구성하였다.

24 기타 배관, 유공압 품 크기 변경

앞서 언급한 바와 같이 30t-CC, 75t-CC 시험에 사용되었던 배관과 유공압 품의 크기를 7t-CC에 맞추기 위해서 일부 품목은 변경이 필요한 상황이었다.

7t-CC에 냉각연료를 공급하는 3" 자동밸브의 경우는 크기가 클 뿐만 아니라 작동성 역시 안정적이지 못하기 때문에 추진제 연료공급 메인 밸브(1 1/2") 수준으로 크기를 변경하였다.

산화제, 연료, 냉각연료 퍼지 가스를 공급하는 밸브(3/4", 3/4", 1")와 연결된 체크 밸브 역시 현재 크기에서 1/2" 수준으로 줄였다.

75t-CC에서는 연료 점화기에 3/4"의 유량계(측정범위 : 0.12~1.45 kg/s)가 사용되고 배관과 밸브는 1/2"가 사용되었지만 중앙 분사기 한곳에서만 점화추진제를 공급할 계획인 7t-CC의 경우에는 30t-CC와 동일하게 1/4" 유량계(측정범위 : 17~174 g/s)를 사용하고 cartridge에 연결되는 밸브 및 배관은 1/4" 크기로 하여 점화기 라인을 구성하였다.

2.5 소음저감장치 유량 축소

ReTF는 KSR-III 30t-CC, 75t-CC 저압연소시험을 수행하면서 300 ton의 저수조에 9대 펌프를 연결하여 1 ton/s 이상의 유량을 소음저감장치(Noise Suppression System; NSS)로 공급하였다.

펌프 입구 배관이 저수조 바닥에서 1 m 정도 높은 위치에 설치되어 있기 때문에 펌프의 안정적인 작동은 전체 저수조 부피의 50% 정도 수준으로 제한하고 있으며 연소시험 전후로 50~60

초 정도의 가동시간을 고려하면 연소시간 만을 고려하였을 때는 100초 정도 시험이 가능하다.

이에 따라 7t-CC 연소시험 시에는 30톤급 연소기의 50% 수준인 500 kg/s으로 줄여서 유량을 공급하여 200초 수준의 연소시험이 가능하도록 구성하고자 하였다.

Table 2 Calculation results flow rate of emission, temperature, flow rate, noise with NSS flow rate

		30t-CC	7t-CC	
냉각수 공급유량	kg/s	900	450	225
유입공기 유량	kg/s	345.5	56.6	56.6
배출가스 유량	kg/s	723.1	120.5	145.5
배출가스 온도	K	358.6	357.8	361.8
배출가스 유속	m/s	72.4	11.8	15.2
소음	dB	114.7	67.6	73.7

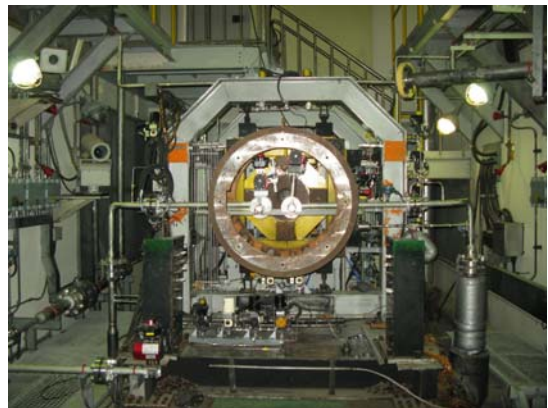


Fig. 1 Front view photography for ReTF

Table 2는 FAKEL을 이용한 계산으로 7t-CC에 대해서 25% 수준으로 유량을 낮추어도 배기가스 온도와 소음을 충분히 낮출 수 있는 것이 확인되었다. Fig. 1은 배관 수정작업이 완료된 ReTF의 정면 사진을 보여준다.

2. 고압가스 공급 패널 설비 변경

패널 설비 변경의 세부 목표는 아래와 같이 크게 총 6가지로 구분하여 설계 변경을 진행하였다.



Fig. 2 Front side section of high pressure gas supply panel before modification of panels

- ① 배관 단순화 및 필요 없는 라인 철거 → ReTF에서 사용하고 있는 질소공급 패널은 초기 설치 후 많은 설비 변경작업이 진행되었으며, 이로 인해 복잡하고 필요 없는 라인을 정리하고자 함
- ② 고압가스 공급 패널 개량 → 현재 일체형으로 설치되어있는 질소 공급 패널을 공급 용도에 따라 네 부분(산화제 가압, 연료가압, Utility, NAS; Nitrogen automation system)으로 분리함
- ③ 자동, 수동밸브의 조작은 패널 전방에서 조작을 하며, 사용 후에는 패널의 잠금 장치를 이용하여 미사용 시 안전하게 운용함
- ④ 유지, 보수가 용이하도록 작업공간을 충분히 확보하며, 기존 사용하고 있는 부품을 최대한 활용함
- ⑤ NAS용 라인을 병렬로 구성하여 신뢰도 향상
- ⑥ 강도기밀 시험 장치로 질소를 공급하는 라인 은 두개의 레귤레이터를 이용한 다단감압방식이었으나, 이를 단단감압방식으로 변경하여 공급라인을 수정함

Figure 2은 기존의 고압가스 공급 패널의 전면 부를 보여주고 있다. 기존에는 압력게이지 전/후단에 밸브를 설치하여 압력계 고장 시 배관에 충전되어 있는 질소를 배출하지 않고 교환할 수 있도록 하였으나 문제 발생 시 해당 배관만 배출하는 것이 가능하기 때문에 누설가능 부위를 줄이고 설비를 단순화하기 위하여 해당 밸브를 제거하였다.

3.1 산화제용 고압가스 공급 패널 수정

기존 산화제 공급라인에 설치되어있던 utility N2(탈지건조, air gun, test room, 수력학 실험실)를 별도의 패널로 제작하였으며 용도별 공급부를 명확하게 표시하고, 고압과 저압라인을 대칭으로 배치하여 사용 중 조작 실수에 의한 위험 감소시켰다. 주요 밸브를 1/4"에서 1/2"로 교체하여 utility N2의 패널로 공급되는 유량을 증가시키고 중간에 필터를 추가 설치하여 후단의 레귤레이터 손상을 보호하고자 하였다.

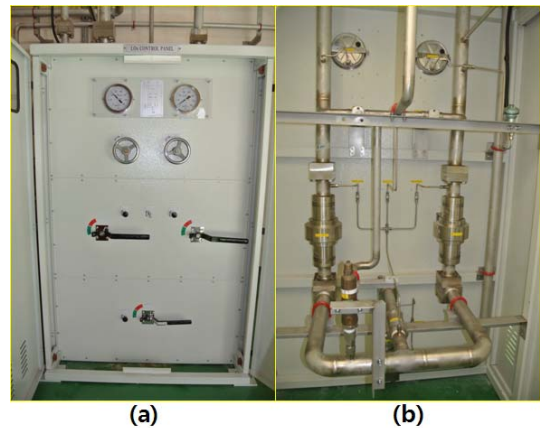


Fig. 3 Nitrogen supply panel for oxidizer; the front (a) and back sides (b)

Figure 3은 산화제를 위한 질소 공급 패널의 전 후단 사진을 보여주고 있고, 연료와 NAS측도 산화제와 비슷한 패널 구조로 제작되었다.

3.2 케로신용 고압가스 공급 패널 수정

기존 사용하던 케로신용 질소 충전 밸브는 1"

인 반면, 질소충전 배관은 1 1/2"이었기 때문에 밸브와 연결하기 위해 1"로 축소되어 사용되었다. 그러나 본 설계에서는 배관의 수축 및 확대에 의한 차압을 제거하고자 밸브를 1 1/2"로 교체하여 배관의 축소 없이 사용하였다.

기존 질소 공급 패널은 케로신과 NAS가 같은 패널에 설치되어 있기 때문에 운용에 혼선의 우려가 있었다. 따라서 케로신과 NAS를 구분해서 설치함으로써 운용상의 혼선을 방지하고자 하였다.

3.3 NAS용 고압가스 공급 패널 수정

기존 사용하던 NAS용 질소 충전 밸브는 연료용과 마찬가지로 1"이고, 질소충전 배관은 1 1/2"이므로 밸브와 연결하기 위해 1"로 축소하여 사용하였다. 그러나 본 설계에서는 배관의 수축 및 확대에 의한 차압을 제거하고자 밸브를 1 1/2"로 교체하여 설치하였다.



Fig. 4 From left side of photography, LOx, kerosene and NAS utility

NAS용 압력용기와 패널 사이에 수동밸브(1 1/2")를 추가로 설치하여 패널 내부 밸브, 센서, 안전밸브 등의 고장 시 압력용기와 패널을 분리할 수 있도록 하였다. NAS용 질소가스 공급이 기존에는 1개의 라인으로 공급되던 방식이었으나 이를 병렬로 하여 시험 중 NAS 공급에 대한 신뢰도를 향상시켰다. 강도기밀 시험 장치로 질소를 공급하는 라인은 두개의 레귤레이터를 이용한 2단 감압방식이었으나, 이를 1단 감압방식

으로 변경하여 라인을 수정하였다.

Figure 4는 완성된 고압가스 공급 패널 전체 사진을 보여주고 있고 좌측부터 산화제, 연료, NAS 공급 패널을 보여주고 있다.

3. 결론

KSLV-II 3단용 7t-CC 연소시험을 위해 ReTF의 고압가스 공급패널 및 추진제 공급배관을 개량하였다. 이러한 구조 변경작업을 통해 7t-CC의 연소시험 과정에서 작업자의 안전성을 확보할 것이고 ReTF의 유지, 보수에 있어 많은 용이성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 안규복, 김종규, 김성구, 최환석, "7톤급 연소기 재생냉각 연소실 설계, 해석, 제작," (to be submitted to) 제38회 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, 2012
2. 이광진, 강동혁, 김문기, 안규복, 한영민, 최환석, "75톤급 액체로켓엔진 연소기의 저압 조건에서 수행된 연소안정성 시험," 추진공학회지, 제14권, 제5호, 2010, pp. 1226-6027.
3. 한영민, 조남경, 정용갑, 김승한, 문일윤, 박성진, 이광진, 고영성, 김영한, 이강엽, 김형모, 이수용, 이대성, "액체로켓엔진 지상 연소 성능 시험설비", 한국항공우주학회 춘계학술발표회, 2002, pp. 459-466
4. 이광진, 서성현, 임병직, 문일윤, 한영민, 최환석, "30톤급 연소기의 연소시험을 위한 설비 개량", 한국추진공학회 제24회 춘계학술대회 논문집, pp. 313-317, 2005