

액체로켓 연소기 지상연소시험설비 운영 및 관리 기술

강동혁* · 임병직** · 문일윤* · 서성현* · 한영민** · 최환석**

Operation and Maintenance Techniques for Liquid Rocket Combustor Ground Firing Test Facility

Donghyuk Kang* · Byoungjik Lim** · Il-Yoon Moon* · Seonghyeon Seo* ·
Yeoung-Min Han** · Hwan-Seok Choi**

ABSTRACT

A ground firing test facility for Liquid Rocket Engine(LRE) combustor was built in Korea Aerospace Research Institute(KARI) in 2001 to support the development of the first Korean LRE for the KSR-III. About 170 tests were conducted up to date since its establishment and in the meantime a considerable improvements were made in the facility capability. This paper describes the outline, conducted tests and operation techniques which have been acquired through the operation of the test facility.

초 록

한국 최초의 액체로켓인 과학로켓 3호(KSR-III) 엔진 개발을 위해 로켓엔진 연소기 지상연소시험설비가 2001년도에 한국항공우주연구원 내에 준공되었다. 본 시험설비는 준공 후 현재 약 170회에 이르는 액체로켓엔진 연소기 시험을 수행하였으며, 그 과정에서 설비 능력에 대한 많은 개량이 이루어졌다. 본 논문에서는 한국항공우주연구원 액체로켓엔진 연소기 지상연소시험설비의 개요와 수행시험, 그리고 그동안 축적해 온 설비 운영기술에 대하여 소개한다.

Key Words: Liquid Rocket Combustor (액체로켓 연소기), Ground Firing Test Facility (지상연소시험설비), Facility Operation (설비운영), Maintenance Technique (관리 기술)

1. 서 론

액체로켓엔진 개발에서 연소기 성능평가를 위한 연소시험설비의 확보는 필수적이다. 한국항공

우주연구원(KARI)에서는 한국 최초의 액체로켓 엔진인 KSR-III 엔진 개발을 위해 2001년도에 연구원 내에 액체로켓엔진 지상연소시험설비인 ReTF (Rocket engine Test Facility)를 준공하였다. 준공 후 2007년 3월 현재까지 약 176회에 이르는 액체로켓엔진 성능평가시험(연소/수류시험) 수행되었으며, 특히 2002년 5월에는 KSR-III 액체 엔진 연소기에 대한 60초간 임무 연소시간 연소시험

† 2007년 5월 9일 접수 ~ 2007년 6월 19일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원 연소기팀

** 종신회원, 한국항공우주연구원 연소기팀
연락처, E-mail: dhkang@kari.re.kr

이 성공적으로 수행되었다[1].

액체로켓엔진 연소시험설비는 지상시험설비와 고공시험설비로 크게 구분할 수 있으며, 지상시험설비는 수평형과 수직형 시험설비로 구분된다. 그리고 추진제의 공급 방식에 따라 가스 가압식과 터보 펌프식으로 구분할 수 있다. 본 시험설비는 가스 가압식 수평형 지상연소시험설비로서, 주요 구성은 유공압시스템, 제어/계측시스템, 그리고 기타 부대설비로 이루어진다.

본 시험설비의 규격은 설비 준공 시 국내 최초 액체로켓 엔진인 KSR-III 규격에 맞추어 설계점 연소압 13 bar, 추력 12.5 tonf의 연소기를 시험할 수 있도록 건설되었다. 하지만 현재는 새로운 규격의 연소기 개발을 위해 설계점 연소압 52.5 bar, 추력 30 tonf까지 시험 가능한 설비로 개량하였다. 설비 개량은 대부분 기존에 있던 설비를 이용, 보완하였고 추가로 재생냉각방식 연소기의 시험을 위한 재생냉각 가압시스템과 냉각수 런(run) 탱크를 추가로 설치하였다[2]. 2001년도부터 연소시험설비를 운영하면서 다양한 문제점들이 발견되었지만 현재까지 176회의 시험을 수행하는 동안 단 한번의 대형사고도 발생되지 않았다. 이것은 다른 발사체 선진국들과 비교할 때 비록 시험설비의 성능 및 기능면에서는 부족한 면이 있지만 시험장 운영기술에 있어서는 결코 뒤지지 않는다는 점을 보여준다. 본 논문에서는 2001년 지상연소시험설비 준공 후 현재까지 설비를 운영해 오면서 수행한 연소/수류시험과 설비개요, 시험장 운영기술에 대한 전반적인 사항들을 소개한다.

2. 지상연소시험설비

한국항공우주연구원의 지상연소시험설비는 Table 1에 나타낸 바와 같이 크게 세 부분으로 구성되어있다. 고압의 기체질소를 이용하여 연소기로 추진제를 안정적으로 공급하기 위한 유공압시스템, 연소시험 시 연료와 산화제가 연소기로 원활히 공급될 수 있도록 각종 제어 밸브를 제어하고, 데이터 획득을 위한 각종 센서로부터

의 신호를 저장하는 제어/계측시스템, 그리고 부대설비로 시험할 연소기를 장착하고 추력을 측정하는 추력측정장치, 연소시험 시 발생하는 소음저감과 유해배기가스를 중화시키기 위한 소음감쇠장치, 그리고 추진제 가압을 위해 액화질소를 기화시켜 고압 질소를 생성하는 고압질소 제조설비가 있다.

Table 1. Subsystems of KARI Ground Firing Test Facility

항목	세 부 사 항
유공압시스템	액체산소 공급/배출시스템
	Kerosene 공급/배출시스템
	질소 공급/배출시스템
	TEAL 시스템
제어/계측시스템	탈지 및 센서 냉각 시스템
	제어시스템
	계측시스템
부대설비	추력측정장치
	소음감쇠장치
	냉각수 정화장치
	소화·안전설비
	고압질소 제조설비

유공압시스템은 추진제를 고압 기체질소로 가압하여 연소실로 공급하는 설비로서 산소 공급시스템, Kerosene 공급시스템, 질소 공급시스템, TEAL 공급시스템으로 구성되어있다. 시험 중 가압 기체질소의 압력강하에 따라 연소실로 공급되는 추진제의 양이 변동되는 것을 방지하기 위하여 고압질소용기와 추진제 탱크 사이에 압력조절용 솔레노이드 밸브가 설치되어 있다. 시험 진행 시 극저온 추진제인 액체산소(LOx)를 연소기 유입 매니폴드까지 공급하는 도중 공급 관내에서 온도상승으로 인한 기화가 일어나지 않도록 산화제 런 탱크는 진공탱크로 이루어져 있고, 시험 전에 액체산소를 포화온도 이하까지 충분히 냉각시켜 운영한다[3].

Kerosene 공급설비는 연료를 런탱크에 안정적으로 충전시켜 가스 가압에 의해 연소실로 공급하는 설비이고, 질소공급시스템은 추진제의 원활한 유량조절을 위해 추진제 런탱크들의 가압 압력 설정 및 제어, 배관 내의 이물질 및 잔류 추

진제를 배출하기 위한 퍼지 압력의 설정 및 제어를 위한 가스 공급 시스템이다.

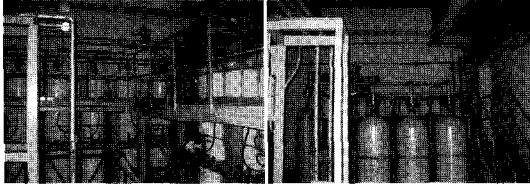


Fig. 1 LOx and Kerosene Run-Tank System

연소기 초기 점화에 사용되는 접촉발화성 물질인 TEAL(Triethylaluminium)을 저장용기에서 앰프로 충전하는 TEAL시스템도 유공압시스템에 속한다(Fig. 2).

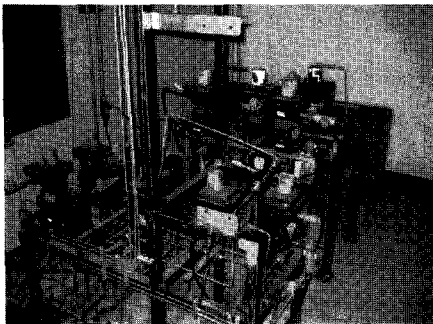


Fig. 2 TEAL System

제어/계측시스템은 연소시험 시 사용되는 각종 밸브를 실시간으로 제어하는 것은 물론 문제 발생 시 시스템을 정지시킨다. 이 때 제어시스템으로 신호를 제공하는 것이 각종 센서들의 신호를 담당하고 있는 계측시스템이다. 또한 시험 종료 후의 추진제의 잔류 유량을 처리할 수 있도록 설계/설치되어있다. 시험용 연소기를 지지하고 있는 추력측정장치는 지상에서 연소기의 분력 성분을 측정, 계측하는 장치이고, 형상은 동일축 수평형 방식으로 최대 60tonf까지 측정 가능하도록 설계되어있다(Fig. 3).

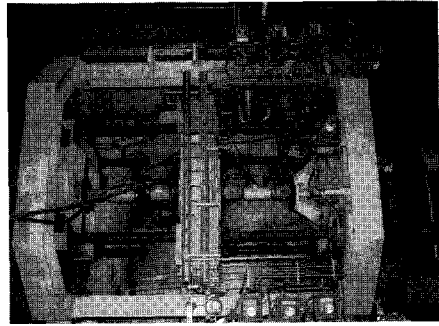


Fig. 3 TMS System

마지막으로 부대설비로 소음감쇠장치, 강도/기밀시험장치, 고압질소 제조설비가 있다. 연소시험 시 노즐을 통해 배출되는 소음(200dB) 및 배기가스를 처리하기 위한 물분사방식의 소음감쇠장치는 초당 700kg 이상 분사할 수 있는 펌프 9대와 이들 펌프를 모두 사용할 경우 180초 동안 소요되는 분량의 물을 저장하는 저수조, 연소 시험 후 오염된 물을 처리하기 위한 정화장치로 구성되어 있다(Fig. 4)[4, 5].

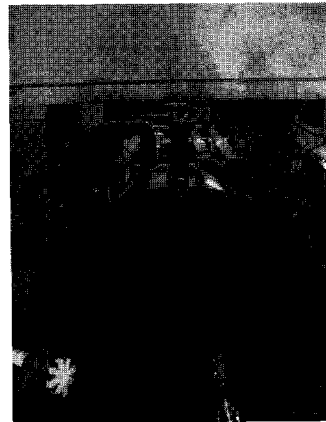


Fig. 4 Noise Suppression System

강도/기밀시험장치는 연소시험을 수행하기 위해 제작된 연소기의 여러 구성품들이 올바르게 설계되고 제작되었는지 압력시험을 통해 검사하는 장비이다. 강도시험에서는 가압 유체로 물을 사용하고, 기밀시험장치는 기체질소를 사용하며 최대 사용압력은 760 bar이다.

고압질소 제조설비는 극저온 질소탱크 1기(용량 12 m³), 액체 질소를 사용하여 196 bar 까지 가압시킬 수 있는 능력의 극저온 질소펌프와 기화기가 각각 2대씩 교대로 가동시킬 수 있는 구조로 설치되어있다. 극저온 질소펌프에 의하여 제조된 고압의 기체질소는 각각의 유공압시스템에 사용되도록 별도의 압력용기에 저장시킨 후 사용된다.

이 밖에도 연소시험장 운영에서 중요한 설비 중 하나인 소화·안전설비가 있으며 이는 다음 절에서 별도로 언급하고자한다.

3. 소화·안전 설비

연소시험장의 안전한 운영을 위해 본 설비는 산소 농도를 측정하여 위험 사항을 알리는 산소 검출시스템, 화재발생 시 가동되는 스프링클러/하론(Halon) 소화설비, 연소시험 수행 시 긴급한 상황에 대비한 장치, 시험장 내/외부를 감시하는 15대의 CCTV장치가 설치되어있다. 연소시험을 수행하는 과정에서 추진제를 가압하기 위해 기체질소를 많이 사용하고 있어 산소 공급실, Kerosene 공급실, 질소 준비실 및 실제 연소가 이루어지는 Binding부에 산소검출기를 설치하고 독립적으로 가동되는 급/배기장치를 설치하였다.

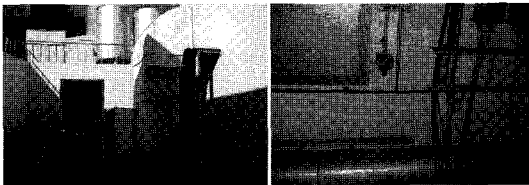


Fig. 5 Ventilation Facility and Oxygen Detection Device

연소시험 시 발생 가능한 화재나 폭발에 대비하여 자동작동 및 원격제어가 가능한 하론을 이용한 소화설비가 산소 공급실, Kerosene 공급실, Binding부에 설치되어 있고, 특히 Binding부는 스프링클러 설비가 추가로 설치되어 있고 소음 기실은 폭발에 대비한 팽창 도어를 설치하였다.

또한 시스템의 오작동 및 발생 가능한 사고에 대비하여 런탱크에 저장된 추진제들이 비상 드레인부로 신속히 배출되도록 설계되어 있고, 시스템의 기능상 중요한 밸브는 전원이 차단되었을 때 정해진 열림과 닫힘 상태가 되도록 적절하게 설계되어 있다.

4. 설비개선 이력

본 연소시험장의 설비는 초기 설립 후 운영 과정에서 크고 작은 문제점들을 해결하기 위하여 조금씩 변경되어 왔고, 특히 2002년 KSR-III의 개발성공 후 새로운 연소기 개발규격에 맞춰 대폭 변경되었다(Table 2).

Table 2. Specifications of Combustors Tested

항 목	13 톤급 연소기	30 톤급 연소기
연소압	14 bar	52.5 bar
산화제유량(DP)	41.6 kg/sec	63.0 kg/sec
연료유량(DP)	17.8 kg/sec	25.8 kg/sec
추진제혼합비(O/F)	2.34	2.44
추력(진공)	13 tonf	26 tonf
연소시간	60 sec	120 sec
연소실	내열재	내열재, 재생냉각
점화방식	일단점화	다단점화
냉각방식	내열재/막냉각	재생냉각/막냉각

설비개선은 추진제 공급 시스템, 추력측정설비, 재생냉각 시험설비의 세 부분에 대하여 이루어졌고, 그 외의 시스템에 대해서는 큰 변경 없이 사용되었다. 설비개선에 대한 사항은 참고문헌[6, 7]에 자세히 나타나있다.

5. 수행 시험

2001년 4월 14일 설비수류시험을 시작으로 2007년 3월 현재까지 총 176회의 연소기 개발관련 시험을 수행하였고, 2004년 12월에 설비 개선 후 48회 시험을 성공적으로 수행하였다(Table 3).

Table 3. Number of Tests Performed

항 목	수류시험	연소시험
2001년	30회	13회
2002년	17회	18회
2003년	0회	5회
2004년	10회	43회
2005년	0회	16회
2006년	5회	16회
2007년	1회	2회
총 계	63회	113회

6. 운영 및 유지보수

본 시험설비는 고압 압축가스와 위험물을 취급하기 때문에 고압가스 및 위험물 취급 유의사항을 준수하고 있으며 주로 고압가스설비로 이루어진 유공압시스템은 관련법(고압가스안전관리법)에 따라 유지보수 업무가 이루어지고 있다.

6.1 시험장 운영

본 시험장의 주요 시설은 Table 4에서 보는 바와 같이 네 가지 주요 법규의 적용을 받는다.

Table 4. Applied Laws to the Firing Test Facility

항목	관련법규
액체산소, 질소공급시설	고압가스안전관리법
Kerosene 저장시설	위험물안전관리법
하론소화설비	소방법
폐수처리설비	수질환경보전법

6.1.1 폐수처리설비

소음감쇠장치의 일부인 저수조의 물을 관리하는 시설로서 수질환경보전법에 의거하여 환경기술원을 선임하여야한다. 규정에 따라 년 1회 이상 관할 시청으로부터 정밀지도/점검을 받고 있으며 점검은 오염물질의 누출상태, 일지기록상태, 교육이수여부(1회/3년) 및 배출시설의 전반적인 운영 실태에 대하여 행해진다. 본 시험장에 설치된 폐수처리시설(Fig. 6)은 폐수를 정화 처리하여 연소시험에 재이용하기도 하고 외부로 배출할 수 있도록 구성되어 있다. 외부로 배출 시

에는 배출허용 기준치 이내로서 연소시험 횟수 및 물의 오염도를 고려하여 행한다.

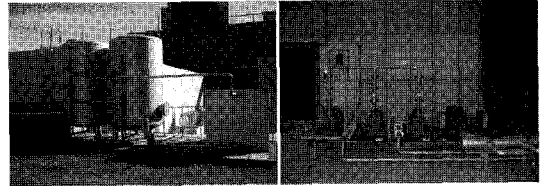


Fig. 6 Waste Water Disposal Facility

6.1.2 액체산소, 질소공급시설

유공압시스템의 일부인 고압가스설비로서 고압가스안전관리법에 의거하여 안전관리자와 안전관리 책임자를 선임하여야하며, 년 2회 자율검사와 2년에 1번씩 정기검사를 받는다. 검사항목은 Table 5와 같다.

Table 5. Required Inspections for the Firing Test Facility

항목	내용
시설점검일지	일일, 주간, 월간
안전교육실시여부	1회/월
압력용기의 검사	1회/4년
안전밸브 성능검사	1회/2년
기화기 검사	1회/2년
보험가입여부	매년
가스안전관리법 준수여부	불법변경, 용도변경여부

관련법규: 고압가스안전관리법

6.1.3 Kerosene 저장시설

추진제로 사용되는 Kerosene은 제4류 위험물의 제2석유류로 분류되는데, 본 시험장에는 10,000리터를 보관할 수 있는 옥외저장시설과 5,900리터를 보관할 수 있는 옥내저장시설이 있다(Fig. 7).

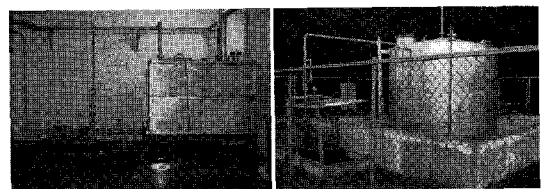


Fig. 7 Kerosene Storage Facility (indoor and outdoor)

저장시설은 관련법에 의거하여 안전관리자를

선임하도록 되어있고, 2년에 1번씩 법정전문교육 및 수시교육을 받도록 명시되어있으며, 안전관리자는 저장시설의 전반적인 안전을 담당한다. 저장시설은 수시검사가 이루어지며 이때 전반적인 관리상태 및 토양 오염도검사 등을 정기적으로 실시한다.

6.1.4 하론 소화설비

산소 공급실, Binding, Kerosene 공급실에 설치되어 화재 발생 시 가동되는 설비로서 Fig. 8의 사진과 같다. 이 설비는 소방법에 의거하여 작동기능점검 1회(상반기), 종합정밀점검 1회(하반기)를 실시하고 있다.

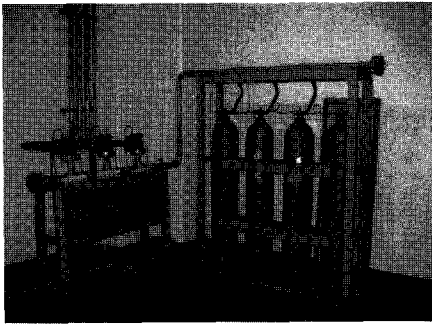


Fig. 8 Halon Fire Extinguishing System

6.2 위험물

본 시험장에서 사용하는 위험물은 연료로 사용되는 Jet-A1(항공유), 점화제로 사용되는 TEAL과 부품을 세척할 때 사용되는 메타크린(Metaclean)이 있다. 접촉성 발화물질인 TEAL은 대기노출 시 자발연소가 이루어지기 때문에 취급에 각별히 유의해야하고, 휘발성이 강한 메타크린은 눈과 접촉할 경우 시력손상이 발생할 수 있기 때문에 취급에 유의해야한다.

6.3 기타 안전 관련 사항

본 시험장의 안전한 운영을 위하여 개인 휴대품목으로 휴대용 통신장치, 안전도, 안전화, 방열복, 방독면, 휴대용 가스탐지장치 등이 구비되어 있으며, 비상상황에 대한 대처능력을 배양하기 위해 연 2회씩 연소시험 진행시 발생할 수 있는

비상상황을 설정하여 모의 비상훈련을 실시하고 있다.

7. 결 론

한국항공우주연구원 지상연소시험장에 대한 전반적인 소개와 운영에 관해 살펴보았다. 2001년 설비 준공 후 2002년도에 성공적으로 발사된 KSR-III 연소기 시험 경험을 바탕으로 새로운 연소기 개발을 위한 설비 개량을 실시하였다. 그 결과 초기 시험 규격 대비 연소압 기준으로 약 4배에 이르는 고압을 갖는 연소기에 대한 수냉각 및 연료냉각 시험을 성공적으로 수행하고 있다. 또한 2007년 상반기에 재생냉각 연소기에 대한 시험을 수행할 예정이다. 본 설비 운영을 통해 축적된 기술과 경험은 앞으로 수행될 액체로켓 연소기의 개발과 성능평가에 훌륭한 밑거름이 될 것이다. 본 시험설비 준공 후 2001년 첫 시험을 시작으로 지금까지 176회에 이르는 시험을 단 한번의 대형사고 없이 성공적으로 수행한 것은 시험설비의 우수성뿐만 아니라 이를 운영하는 이들의 노력과 기술로 이루어진 성과라 할 수 있다. 현재 본 설비에서 운용 가능한 시험은 추력 30 tonf, 연소압 60 bar 연소기 기준 설계점 연소시간이 약 40~50초 정도이기 때문에, 개발목표로 하는 120 초간의 연소시험을 위해 추진제 런탱크 및 가압 질소탱크의 증설을 계획하고 있다.

참 고 문 헌

1. 조광래 외, "3단형 과학로켓 개발사업", 한국항공우주연구원 보고서, 2003
2. 한영민, 조남경, 정용갑, 김승한, 문일윤, 박성진, 이광진, 고영성, 김영한, 이강엽, 김형모, 이수용, 이대성, "액체로켓엔진 지상 연소성능 시험설비", 한국항공우주학회 춘계학술발표회, 2002, pp.459-466
3. 한영민, 조남경, 김승한, 정용갑, 박성진, 이광진, 김영한, 문일윤, "RETF 액체산소 공급설

- 비 및 엔진 수류시험”, 항공우주기술지 제1권 제2호, 2002, pp.123-131
4. 조남경, 문일윤, 정용갑, 김승한, 한영민, 이수용, 박종찬, “로켓엔진 지상연소시험장에서의 후류처리설비”, 한국추진공학회 제17회 학술대회 논문집, 2001, pp.6-7
 5. 조남경, 문일윤, 정용갑, 한영민, 이수용, “로켓엔진 지상연소시험장에서의 물분사를 이용한 소음저감 설비”, 대한기계학회, 추계학술대회, 2001, pp.472-478
 6. 이광진, 서성현, 임병직, 문일윤, 한영민, 최환석, “30톤급 연소기의 연소시험을 위한 설비 개량”, 한국추진공학회 제24회 춘계학술대회 논문집, 2005, pp.313-317
 7. 문일윤, 김승한, 김종규, 임병직, 이광진, 김인태, “실물형 연소기의 점화시험”, 한국추진공학회 제24회 춘계학술대회 논문집, 2005, pp.265-268