

액체산소/케로신 소형로켓엔진 연소시험설비

문일윤* · 김승한* · 임병직* · 한영민* · 설우석* · 이수용**

LOx/Kerosene Sub-scale LRE Firing Test Facility

Il-Yoon Moon* · Seung-Han Kim* · Byoung-Jik Lim*
Yeoung-Min Han* · Woo-Seok Seol* · Soo-Yong Lee**

ABSTRACT

This paper describes the design, installation and certification activity of a combustion test facility of subscale thrust chambers propelled by pressure-fed liquid oxygen and kerosene, and suggests major key issues considered at each development stage of the facility.

초 록

KSR-III 개발 과정에서 습득된 기술을 바탕으로 케로신과 액체산소를 추진제로 하는 추진제 가압식 소형로켓엔진 연소시험설비의 설계, 제작 설치, 검증절차와 관련된 시험을 수행하고 각 단계에서 중점적으로 고려해야할 사항을 제시하였다.

Key Words: Sub-scale LRE(축소형 로켓엔진), Firing Test Facility(연소시험설비)

1. 서 론

우주발사체용 액체로켓엔진은 개발비용과 기간을 단축하고, 개발에 따른 위험부담을 줄이기 위해 여러 설계변수를 갖는 다종의 단일분사기, 축소형, 실물형 로켓엔진을 설계, 제작하여 시험 평가를 통한 선별과 검증단계를 거쳐 개발된다.

특히, 실물형 로켓엔진의 성능과 특성을 어느 정도 모사할 수 있는 축소형엔진에서의 선별단계는 실물형 로켓엔진의 제작과 시험에 관련된 비용, 위험부담을 줄일 수 있어 로켓엔진 개발

단계에서 큰 의미를 갖는다.

축소형 로켓엔진의 검증을 위한 연소시험설비는 기본적으로 실물형 로켓엔진의 연소시험설비와 동일한 구성을 갖으며 다양한 시험대상과 각종 시험기법의 개발 및 적용에 보다 유리하다.

본 논문에서는 KSR-III 개발 과정에서 습득된 기술을 바탕으로 액화산소와 케로신을 추진제로 하는 KSLV용 축소형 로켓엔진 시험평가를 위한 가압식 연소시험설비를 구축하면서 설계시 고려해야할 사항들과 시험설비 입증방안을 제시하고 설비 특성에 관해 다루고자 한다.

2. 소형로켓엔진 연소시험설비 설계

시험설비 설계절차는 설비의 개념정립과 설계

* 한국항공우주연구원 우주추진기관실 엔진그룹

** 한국항공우주연구원 우주추진기관실

연락처, E-mail: iymoon@kari.re.kr

요구조건을 설정하는 예비설계와 예비설계의 결과에 부합하도록 시험설비의 사양을 결정하고 그에 따른 용량 및 전체적인 구성 등을 결정하는 기본설계, 최종적으로 필요한 하드웨어의 구체적 사양과 제작 및 설치를 위한 도면을 작성하는 상세설계로 진행된다.

2.1 소형로켓엔진 연소시험설비의 성격

축소형 로켓엔진의 연소시험을 통하여 실물형 로켓엔진의 시험에 따른 위험부담과 제작, 시험비용을 줄이고 가능한 실물형 로켓엔진의 특성을 모사하여 검증할 수 있도록 하여야 한다. 이를 위하여 다양한 축소형 로켓엔진에 대하여 연소성능, 연소안정성 평가시험, 점화기법과 시퀀스 개발을 위한 점화시험, 엔진냉각성능 평가시험 등을 수행할 수 있어야 하며, 이를 통해 실물형 로켓엔진의 시험기법과 평가방법, 설계자료를 획득하는데 설비의 목적을 갖는다.

2.2 소형로켓엔진 연소시험설비 설계 기준

KSLV용 축소형 로켓엔진과 실물형 가스발생기 개발, KSR-III에 활용되었던 기존 설비의 활용을 고려하여 선정하였다.

표 1 소형로켓엔진 연소시험설비 설계 기준

| 항 목 | 내 용 |
|-----------|---|
| 연료 | Kerosene 계열 (4kg/s) |
| 산화제 | LOx (7kg/s) |
| 공급방식 | 질소 가압식 (100 bar) |
| 가압압력 제어 | 압력제어밸브 + 오리피스 |
| 추진제 유량 제어 | Cavitation Venturi 사용 |
| 시험지속시간 | Max. 120 sec |
| 주요점화방식 | · 가스토오치 - CH ₄ +O ₂ · 접촉발화성 - TEAL+LOx |
| 주요 시험 항목 | · 점화시험 · 연소성능시험 · 내열 및 냉각성능 시험 · 연소 불안정성 평가 시험 |
| 제어항목 | 가압압력, 유량, 각종 밸브 |
| 측정항목 | 추력, 압력, 온도, 유량 |

2.3 소형로켓엔진 연소시험설비 구성 및 설계항목

가압식 연소시험설비는 추진제를 시험대상과 조건에 맞게 공급하기 위한 압력조절밸브와 자동밸브, 각종 저장용기와 배관, 점화설비 등으로 구성된 추진제 공급시스템과 이를 제어, 감시하고 각종 물리량을 획득하는 제어계측 시스템과 소음저감 및 후류처리장치, 소화설비 등으로 구성된 부대설비로 구성된다.

2.3.1 추진제 공급시스템

추진제 공급유량과 공급압력으로 배관크기와 두께를 결정한다. 추진제 런탱크는 추진제 유량과 시험지속시간을 고려하여 결정한다. 안정적인 가압을 위한 쿠션볼륨과 Voltex효과, 가압가스 침투율 등을 고려하여야 하며, 하나이상의 추진제 런탱크를 설치하여야 할 경우 레벨 불균일도 고려하여야 한다. 가압용 가스용기의 압력과 용량은 추진제 유량과 공급압력, 퍼지량에 의해 결정되는데, 극저온 추진제를 가압할 경우 열전달로 인한 가압가스의 부피 축소분을 염두해 두어야 한다. 가압가스의 압력제어는 적은 유량을 필요로 하는 경우 압력제어밸브를, 대유량을 필요로 하는 경우 여러 개의 오리피스를 사용한 제어가 유리하며 필요에 따라 두 가지 방식 모두를 사용하기도 한다. 다만 점화방식이 요구되는 경우 배관을 분기하여 사용하게 되는데 각 배관의 개폐시에 서로 영향을 받지 않는 위치에서 분기하는 것이 제어에 유리하다. 가압식 연소시험설비의 경우 초기 또는 비상시 추진제가 과도하게 엔진에 공급되는 것을 방지하고 보다 정확한 유량조절을 위해 Cavitation Venturi를 사용하기도 한다. 이때 Cavitaion에 의한 영향이 엔진에 미치지 않는 위치에 설치하여야 한다. 최종 공급밸브는 동작속도가 빠를수록, 엔진에 가까이 설치할수록 추진제 공급제어에 유리하며 시험종료후 퍼지시 안전에 유리하다. 점화설비는 하루에 여러 번 시험이 가능하도록 메탄과 산소를 이용하여 스파크 플러그로 점화시키는 방식과 연구목적상 접촉발화성 물질인 TEAL, 각종 파이로 테크닉을 구사할 수 있도록 구성하였다. 가스토오치를 점화기로 사용

할 경우 연소안정성평가를 위한 펄스전용 퍼지의 영향을 받지 않도록 고려하였다. 소형로켓엔진에서 극저온 추진제를 사용할 경우 유량이 적기 때문에 실물형을 위한 설비보다 냉각에 유의하여야 한다. 비상시를 대비하여 급속배기와 추진제 배출을 위한 별도의 설비를 마련하여야 한다. 모든 설비는 설계단계부터 고압가스 및 위험물과 관련된 법규를 검토하여 적용하여야 한다.

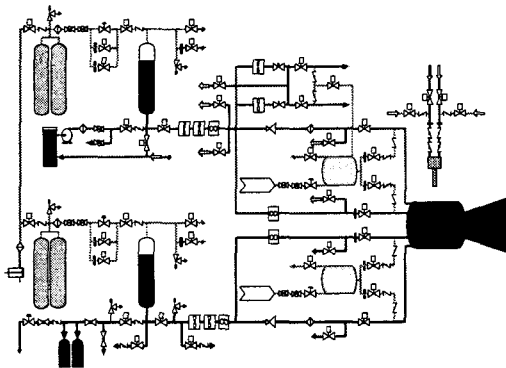


그림 1 소형로켓엔진 연소시험설비 개략도

2.3.2 제어계측 시스템

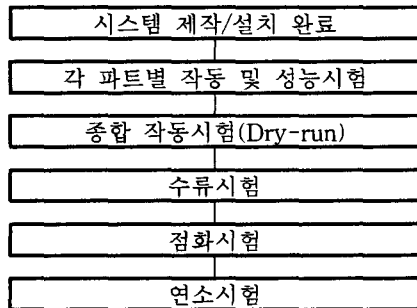
제어설비는 연소시험설비와 시험대상에 적용된 다양한 센서로부터 실시간으로 정보를 획득, 처리하여 시험상태를 시험자에게 전달하고 정해진 시퀀스에 의해 설비의 자동화 기기들을 조작하는 기능을 수행하며, 시험상태를 판단하여 이상발생시 설비와 시험대상을 보호할 수 있는 비상보호기능을 갖추어야 한다. 비상보호시스템은 엔진시험의 주요단계에서 발생할 수 있는 비정상적인 상황들과 엔진과 설비에서 발생하는 물리적 작용과 신뢰성, 응답시간에 대한 고려가 필요하다. 이때 가장 중요한 사항은 비상상태와 비상상태를 발생시키는 기준, 비상 보호를 위한 파라미터의 선정에 있다. 시험설비로서 시험의 일관성과 비정상상태를 확인하기 위해 각종 물리량을 비롯하여 밸브의 개폐를 기록하여 정상 시험여부를 판단할 수 있도록 하여야 한다. 시

퀀스에 포함된 밸브는 2회 이상 구동이 가능하여야 한다. 한 번 시험에서 추진제 가압압력제어를 통해 다양한 시험 조건에서의 시험이 가능하도록 프로그램하여 적용할 수 있다.

3. 소형로켓엔진 연소시험설비 입증

연소시험설비로서의 성능은 표 2와 같은 절차에 따라 입증 가능하며 각각 다음과 같은 의미를 갖는다. [1][2][3]

표 2 연소시험설비 성능입증절차



3.1 Dry-run

Dry-run은 사전적 의미로 생각한다면 ‘건조상태 운용’의 뜻을 가지며, 로켓엔진 시험설비를 운용함에 있어 추진제 없이 운용하는 것을 말한다. 설비 입증의 의미로서의 Dry-run은 시험설비의 모든 구성품의 설치가 완료되고 각 구성품간의 연동 상태를 점검하는 과정을 말한다.

3.2 수류시험

추진제 공급계통에 대한 수력학적 특성을 파악하여 안정되고 정확한 유량을 공급하기 위한 조건을 설정하며, 이를 통해 추진제 공급 순서와 시간을 정한다. Cavitation Venturi를 이용하여 유량제어를 하는 관계로 실추진제와 실가압압력에서 시험을 수행할수 있었으며 이를 토대로 공급계 및 제어계통에 대한 최적화 작업을 수행하였다.

3.3 점화 및 연소시험

수류시험결과를 토대로 추진제 가압압력과 공급 시퀀스를 결정하여 가스토폰치 점화방식으로 연소시험을 수행하였다. 축소형 로켓엔진 연소시험을 위해 후류처리설비와 냉각수 공급설비를 그림 2와 같이 설치하였다. 시험결과 추진제 런 탱크 가압압력과 로켓엔진의 메니폴드, 연소압력은 무시할만한 압력섭동을 보이며 정확히 제어 된 것을 확인할 수 있다.

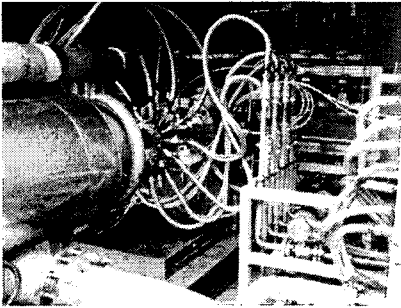


그림 2 축소형 엔진과 소형연소시험설비

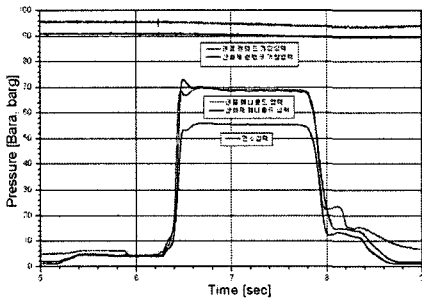


그림 3 연소시험 압력측정 결과

그림 4는 연소실과 연료 메니폴드의 압력 섭동의 변화와 FFT를 수행한 waterfall 그래프를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 중단 밸브 on/off 사이의 1.5초 연소시간동안 일정한 진폭의 크기의 섭동을 유지하고 있으며 waterfall 그래프에서 확인할 수 있듯이 저주파섭동을 제외하고는 특별한 고주파 특성을 확인할 수 없다.

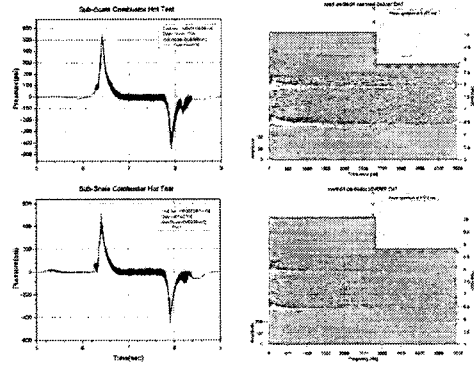


그림 4 연소시험 압력섭동 특성과 FFT 결과

3. 결 론

KSR-III 개발 과정에서 습득된 기술을 바탕으로 케로신과 액체산소를 추진제로 하는 추진제 가압식 소형로켓엔진 연소시험설비의 설계, 제작 설치, 검증절차와 관련된 시험을 수행하고 각 단계에서 중점적으로 고려해야할 사항을 제시하였다.

개발된 소형로켓엔진 연소시험설비는 KSLV 축소형 로켓엔진과 실물형 가스발생기 개발에 활용될 예정이며, 이를 통해 획득한 자료와 개발된 시험평가 절차와 기법을 토대로 KSLV용 고성능 로켓엔진 개발과 실물형 시험평가설비 개발에 활용될 것이다.

참고문헌

1. 강선일 외, "KSR-III Rocket 추진기관시스템 종합시험설비 구축 및 입증", 우주발사체개발심포지움, 2002
2. 강선일 외, "PTA-II 시험설비를 활용한 KSR-III 추진기관 종합시험" 추진공학회 추계 학술발표회, 2003
3. 한영민 외, "액체로켓엔진 지상 연소성능 시험설비", 한국항공우주학회 춘계학술발표회, 2002