

추진시스템 종합성능시험에서의 엔진부 비상정지 설정

하 성업* · 이 정호* · 권 오성* · 김 병훈* · 강 선일* · 한 상엽*

Emergency Blockage Application of Engine Part for Integrated Propulsion Performance Test

Seong-Up Ha · Jung-Ho Lee · Oh-Sung Kwon
· Byung-Hun Kim · Sun-Il Kang · SangYeop Han

ABSTRACT

A Test Facility was established to carry out the integrated propulsion performance tests(IPPT). To perform IPPT's with maximum safety, an emergency blockage system was investigated. An emergency blockage system using combustion chamber pressure and acceleration signals was set up to monitor ignition delay and fail, flame out, propellant feeding status, unstable combustion and excessive structural vibration. With such system, the maximum safety could be secured by rapid judgement and follow-up measures, which made IPPT's be safely completed.

초 록

추진시스템 종합성능시험을 위한 시험시설이 구축되었으며, 최소계측을 통하여 최대한의 안전을 확보하기 위한 비상정지시스템이 검토되었다. 이에 연소실압력과 가속도신호를 이용한 비상정지시스템이 구축되었고, 이 측정변수를 통하여 점화지연 및 실패, 소화, 추진제공급상태, 불안정연소, 과도 구조진동 등을 감시할 수 있었으며, 시험 중 빠른 판단 및 조치에 의하여 시험의 안전을 확보할 수 있었고, 목적인 종합성능시험을 안전하게 완료할 수 있었다.

1. 서 론

로켓의 연소시험은 고온, 극저온, 고압, 고진동 등의 상태에서 진행되어지는 대단히 위험한 시험이며, 이로 인한 많은 사고의 위험성을 내포하고 있다. 이러한 사고를 방지하기 위하여 시험 중 이상 징후를 감지하고 이에 따른 빠르

고 적절한 조치를 취하기 위한 비상정지 시스템의 설치가 요구되어지며, 이에 추진시스템 종합성능시험(IPPT; Integrated Propulsion Performance Test)을 위한 설비를 구축함에 있어 엔진부 비상정지 시스템이 검토되었다.

로켓의 추진기관을 시스템 차원에서 검증하는 종합연계시험은 발사체 형태에 준하는 시험이

* 한국항공우주연구원 (KARI)

되며, 발사체에 적용할 최종 형상의 구성품이 대부분 사용됨에 따라 시스템 자체의 구조적 안전율이 크게 낮아진 상태가 된다. 또한 종합연계시험이라는 특성상 시험 횟수, 계측 항목 등이 단품단계의 지상시험에서보다 크게 제한되는 등 많은 어려움을 가진 시험이 된다. 이에 따라 추진시스템 종합성능시험에서는 최소한의 계측을 통하여 최대한의 안전을 확보할 수 있는 방안이 검토되어 비상정지 시스템이 구성되었으며, 이 시스템을 통하여 실제 비상상황 발생에 대한 빠른 판단과 조치를 취할 수 있었고, KSR-III 추진시스템의 최종 종합성능시험까지 안전하게 마칠 수 있었다.

본 논문에서는 실제 종합성능시험에 사용하였던 비상정지 시스템의 구성 및 설정방법, 비상 발생상황의 실패를 통하여, 이러한 비상정지시스템의 타당성과 효용성을 논하고자 한다.

2 본 론

2.1 엔진부 비상상황 예측 및 계측항목 선정

비상정지 설정에 앞서 발생 가능한 상황을 가상하고 이에 대한 대처방안을 고려하여야 한다. 본 시험에는 다음의 상황을 비상으로 간주하여 비상정지시스템이 자동적으로 작동하도록 선정하여 적용시켰다.

- 엔진에서의 점화지연
- 점화 실패 혹은 연소중 화염소실
- 추진제공급상태
- 불안정 연소현상 발생
- 엔진부의 극심한 진동 발생

이상의 내용을 감시하기 위하여 연소압을 나타내는 정압신호와 엔진 상단 김발부의 진동신호를 사용하는 시스템을 구성하였다. 연소압 감시를 통하여 점화지연 및 실패, 소염, 과도추진제 공급, 불안정 연소 등을 감시할 수 있었으며, 가속도감시(진동)를 통하여 불안정연소, 구조적 과도진동을 감시할 수 있었다.

2.2 비상정지시스템 알고리즘

그림 1과 표 1은 연소압과 가속도 신호를 사용하여 구성한 비상정지시스템 알고리즘을 나타내고 있다. 먼저 그림 1에서 연소압의 경우를 보면 일정한 측정시간동안 들어온 신호가 기준치 범위를 모두 벗어난 경우 비상정지가 수행되는 것으로 하였으며, 진동의 경우도 일정시간동안 들어온 신호 중 설정치를 상회하는 신호의 개수가 기준치를 넘을 경우 비상정지상황으로 간주토록 하였다. 이러한 방법은 별도의 노이즈 제거 알고리즘을 구현하지 않더라도 노이즈에 의한 오작동을 막을 수 있는 방법이 된다.

2.3 55초 연소시험의 적용 실패

표 1과 그림 2에 실제로 진행된 55초 연소시험에서의 설정치와 연소시험의 결과를 제시하였다. 실제 비상정지시스템이 구동된 시간은 시험시간 11.5초에서 65.6초까지다. 점화천이구간을 나타내는 그림 2의 A를 보면 점화천이특성은 시험시간 약 11.2초까지 나타나고 그 이후 안정화되었으며, 감시는 안정화 후 0.3초 이후부터 시작되었고, 기준을 만족함에 따라 시험은 비상정지 없이 계속 진행되었다. 그림 2의 B에서 비상정지시스템은 연소종료명령시점인 65.85초보다 약 0.25초 빠른 65.6초에 종료되는데 이 이후 시간의 비상정지 발생인지에서 명령까지 걸리는 시간이 정상종료명령인가시간보다 빠르지 못하므로 의미있는 감시한계라 할 수 있는 65.6초까지 감시를 수행하였다.

2.4 불안정연소로 인한 비상정지 실패

앞서 예로 제시한 55초 연소시험은 종합성능시험의 최종시험으로 비상정지를 요하는 상황발생 없이 시험을 완료할 수 있었다. 그러나 개발 단계에서는 불안정연소로 인한 비상정지가 발생한 바 있으며, 이를 그림 3의 실패를 통하여 설명하고자 한다.

그림 3-a의 정상연소 경우를 보면 측정된 가속도는 약 4.7 grms로 매우 안정한 경향을 나타내어주고 있다. 이를 FFT 처리한 결과를 보아도

주파수당 진폭이 최대 0.4 g를 넘지 않는 매우 안정된 수준이다. 그러나 1T(1st tangential) mode를 가지는 불안정연소현상이 발생한 경우인 그림 3-b를 보면 그 진폭이 수백 g에 이르는 매우 큰 섭동이 발생하였고, 설정치를 초과하는 신호가 기준횡수를 넘음에 따라 비상정지가 수행되었으며 엔진 및 구조물의 손상 전에 시험을 빠르게 종료시켰다.

이러한 음향적 특성을 지니는 불안정연소 외에도 연소 중 국부적으로 매우 짧은 순간 발생하는 압력섭동(popping)이 발생한 바 있다. 그 중 두 가지 예를 제시하였는데 먼저 첫 번째 경우(그림 3-c)를 보면 연소실에서의 섭동이 발생하기는 하였으나 매우 빠르게 안정화되었으며, 시간구간동안 설정치를 상회하는 신호의 횡수가 기준치 이하를 기록하였고, 시험은 정상적으로 계속 수행되었다. 기본적으로 이러한 섭동은 모두 위험요소라 할 수 있으나 이런 짧은 섭동은 시험의 안전성에 영향을 미칠만한 위험요소는 되지 못한다. 그러나 섭동의 두 번째 사례(그림 3-d)를 보면 섭동의 지속시간이 감시시간구간인 0.05초를 넘는 긴 시간동안 지속되었으며, 크기도 수백 g에 이르는 큰 신호가 다수 인가됨에 따라 비상정지가 수행되었다. 실제로 이상으로 판단되어 비상정지 명령이 인가되는 시점에서는 이미 연소가 안정화되었으나, 이러한 규모의 섭동이 안전하다고 보기에는 무리가 있으며, 이에 의한 비상정지의 구동은 당초 시스템 설계시 예상된 바는 아니나 긍정적이었다고 판단되었다.

만약 신호의 품질을 개선하기 위해 FFT나 high-pass filtering을 사용한 경우 이러한 순간적인 압력섭동에 대하여는 인지가 어려운 경우가 많았을 것으로 보인다. 음향모드를 지니는 불안정연소의 경우는 filtering에 의해 신호를 더욱 명확히 할 수 있으나, 무작위(random)한 성질의 신호에 대하여는 오히려 판단을 흐리게 할 수 있다. 본 시험에서는 가속도신호를 가지고 불안정연소판정과 구조진동판정을 목적으로 하였기 때문에 filtering을 하지 않았으며, 이로 인하여 큰 규모의 비정규적 압력섭동에 대하여도 비상

정지를 수행할 수 있었다.

3. 결론

시험에 있어서 비상정지의 수행은 시험요원에 게 있어서 시험의 완료와 안전이라는 문제 사이에서 결정을 내려야 하는 대단히 어려운 문제이다. 연소실 압력측정과 가속도 측정을 통한 비상정지 시스템의 구성은 비록 그 구성이 간단하나 이상 징후에 대한 빠르고 정확한 판단을 제공해 줌으로서 시험의 안전성을 확보할 수 있었다. 이러한 방법의 비상정지시스템은 향후의 로켓엔진연소시험 혹은 발사시험에서도 로켓엔진의 비정상상태인지에 대한 하나의 좋은 방법론이 될 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. 하성업, 김병훈, 한상엽, “수직장착에서의 KSR-III 액체추진제 로켓엔진 불안정 연소특성,” KARI-RED-TM-2002-001, 한국항공우주연구원, 2002
2. 조상연, 하성업 외, “종합추진시험설비에서 수행된 KSR-III 엔진의 연소시험 (Part-1 & 2),” KARI-PSI-TM-2002-007 & 009, 한국항공우주연구원, 2002
3. David T. Harrje(editor), “Liquid Propellant Rocket Combustion Instability,” SP-194, NASA, 1972
4. Dieter K. Huzel, David H. Huang, “Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines,” Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 147, AIAA, 1992
5. Vigor Yang et al, “Liquid Rocket Engine Combustion Instability,” Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 169, AIAA, 1995
6. SP-8113, “Liquid Rocket Engine Combustion Stabilization Devices,” NASA, 1974

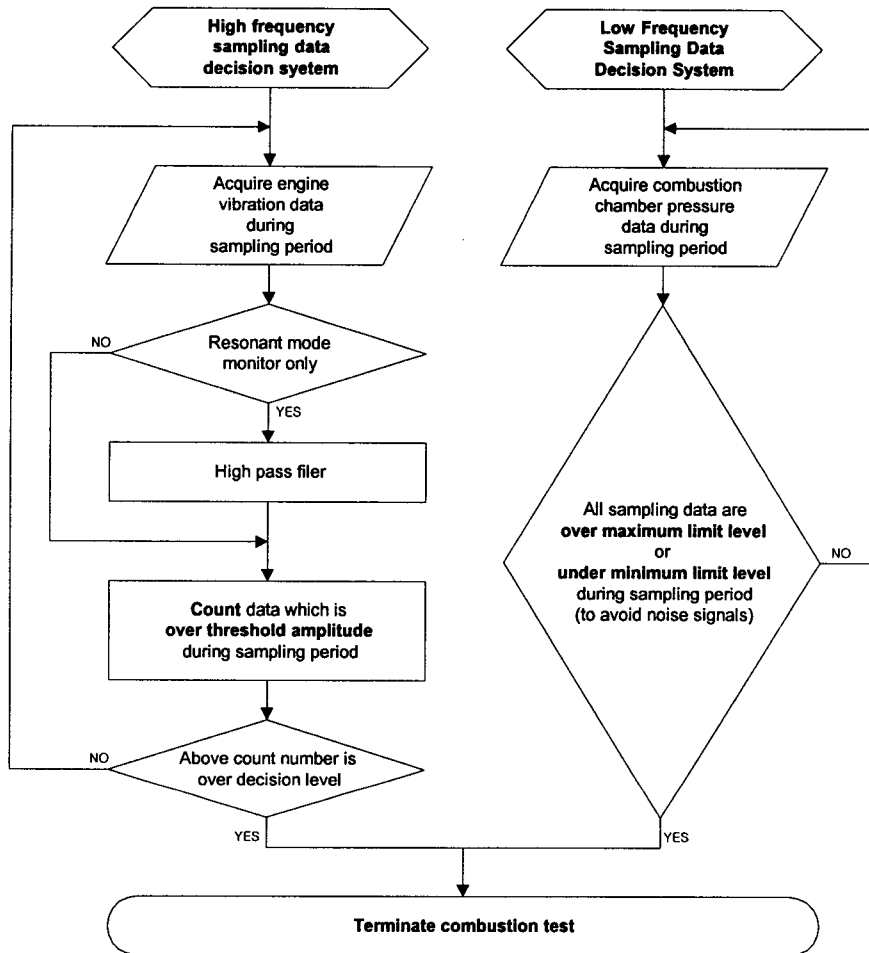


Fig. 1 Schematic Diagram of Emergency Blockage System for IPPT

Table 1 Emergency Blockage Application Example for 55 Second Combustion Test

	Sensors for emergency blockage	Decision condition
Emergency blockage based on measuring vibration	acceleration sensors	purpose : monitor combustion instabilities and excessive vibration of engine sampling rate : 20,000 times / second threshold : over 100 g sampling time : 1000 times (0.05 sec.) validity : over 40 times monitor time : from 11.50 to 65.6 sec. (Test Time)
Emergency Blockage based on measuring combustion chamber pressure	static pressure sensors	purpose : monitor ignition fail, extinguish and excessive pressure condition sampling rate : 50 Hz threshold : over 245 psia, under 150 psia sampling teim : 0.1 sec validity : sustain conditions during 0.1 sec. monitor time : from 11.50 to 65.6 sec. (Test time)

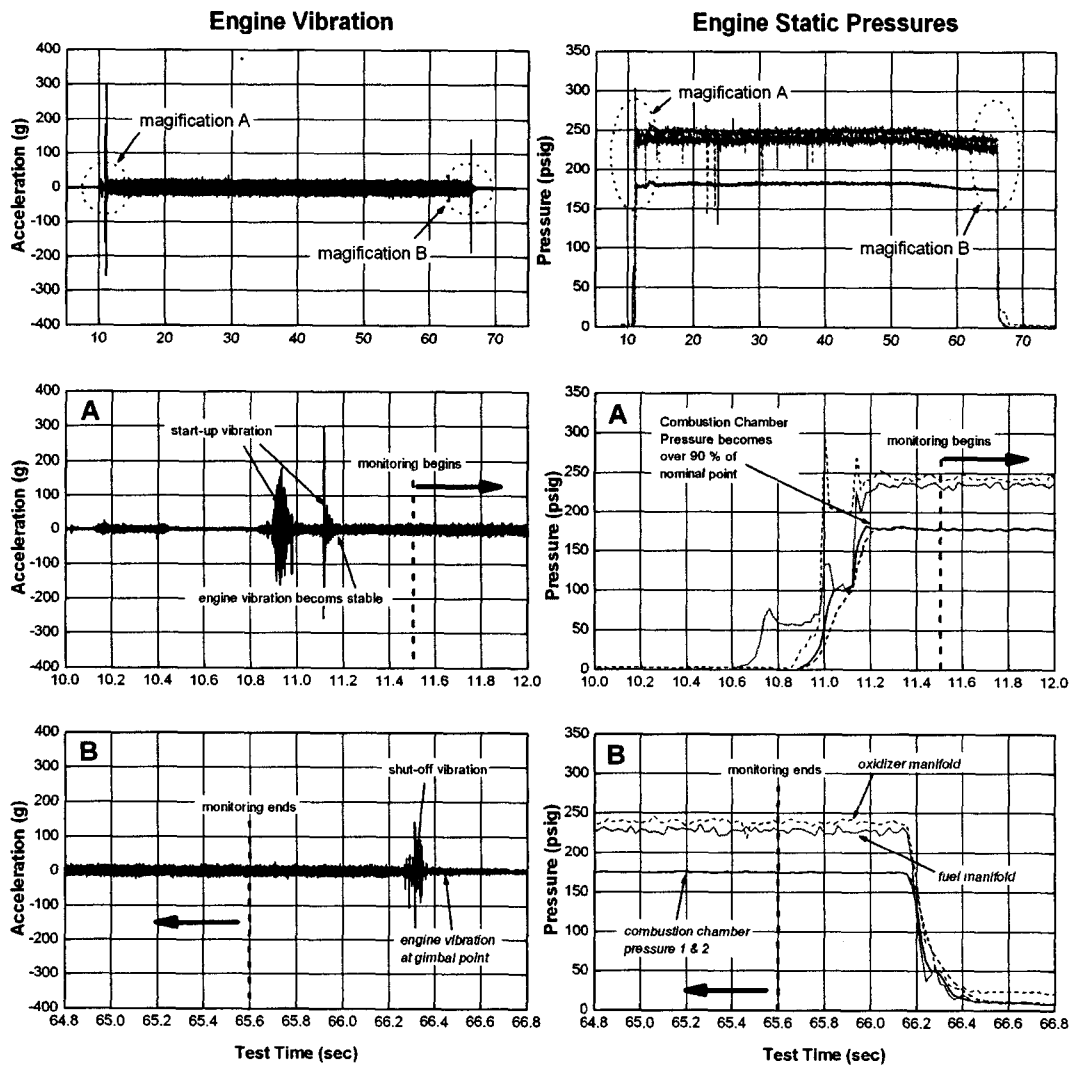


Fig. 2 55 Second Combustion Test Results

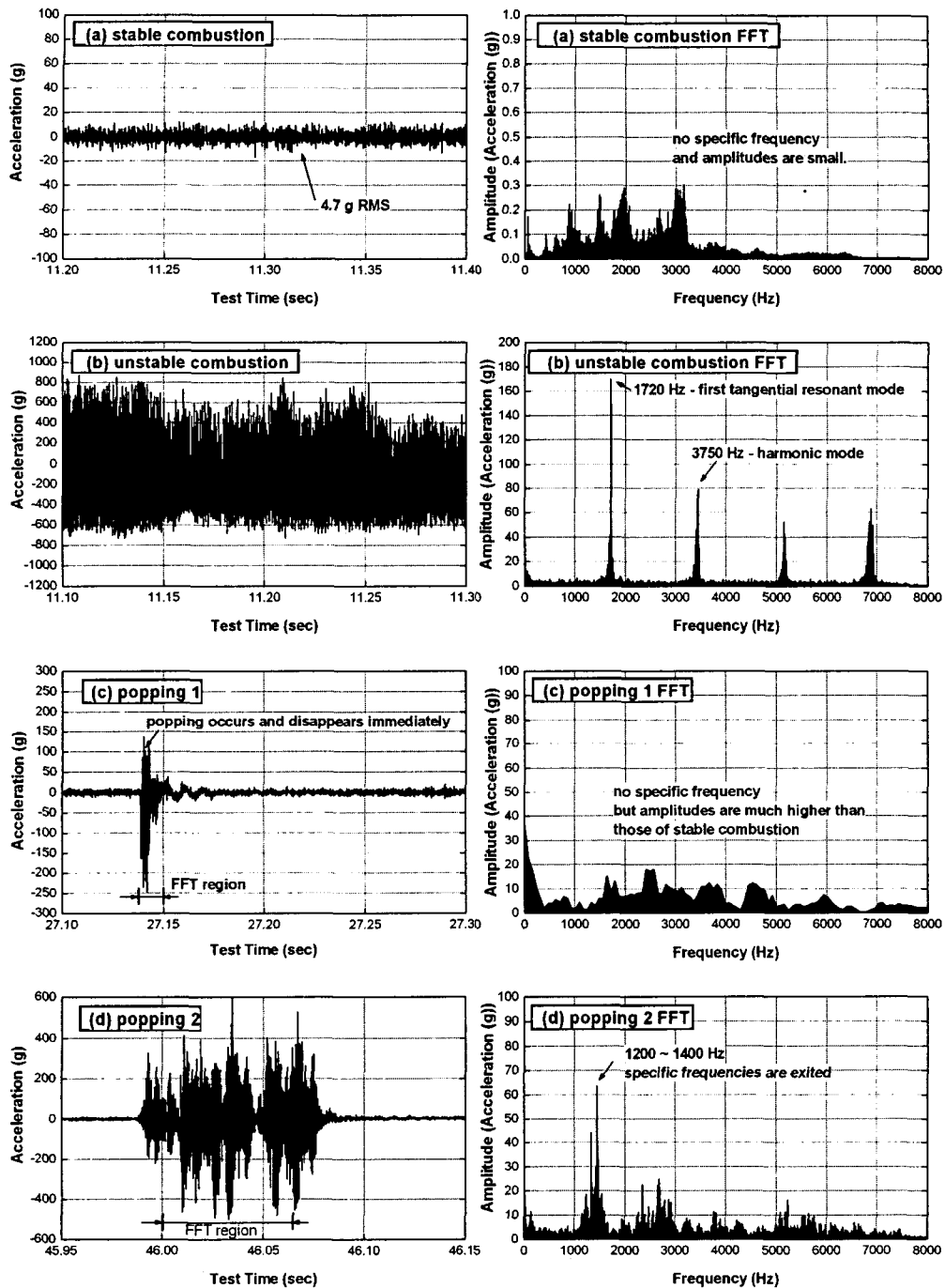


Fig. 3 Examples of Stable and Unstable Combustion Status Acquired from IPPT