

KSR-III 주엔진 연소시험 Cyclogram에 대한 고찰

한영민* · 조남경* · 박성진* · 이수용* · 이대성*

A Study on the Cyclogram for the Firing Test of KSR-III Liquid Rocket Engine

Yeoung-Min Han · Nam-Kyung Cho · Sung-Jin Park · Soo-Yong Lee · Dae-Sung Lee

ABSTRACT

The sequence of the propellant supply for ignition of a liquid rocket engine combustor is very important in the reliable and safe operation of the engine. The ignition sequence of KSR-III main engine was briefly described and the measuring parameters and their reliability determining ignition sequence were examined in this paper. The filling time of the engine propellant manifolds and the valve open/close time were reviewed to obtain the exact and reliable time of the propellant supply to the combustor. The combustion characteristics of the engine at starting were discussed at different supply lead of propellant. Finally, the hot firing test results with cyclogram determined by measuring parameters were presented.

초 록

액체로켓 엔진에서 작동초기인 연소기 내의 점화를 결정하는 추진제의 공급 순서는 엔진의 안정적인 운영에 필수적이다. 본 논문에서는 KSR-III 주엔진의 점화 순서에 대해 간략히 설명하였고, 점화 순서를 결정하는 시험측정인자에 대한 종류 및 측정 신뢰성에 대해 살펴보았다. 점화 cyclogram에서 중요한 추진제의 공급시간을 정확히 결정하기 위해 엔진의 메니폴드 체적과 유량에 관련된 충전시간, 그리고 밸브 개폐시간에 대해 논의하였다. 또한, 점화에 있어 연료나 산화제 공급의 순서를 다르게 하는 경우 점화초기 엔진의 연소 특성에 대해 기술하였다. 측정변수에 의해 결정된 점화 cyclogram으로 연소시험을 수행한 결과에 대해 간략히 기술하였다.

Key Words : 액체로켓(Liquid Rocket), Cyclogram, 유량(Flow Rate), 동압(Dynamic Pressure)

1. 서 론

액체로켓 엔진의 성공적인 운용을 위해서는 연소성능, 연소불안정, 열전달 등 고려/해결해야

할 항목들이 많지만 엔진의 성공적인 연소 및 발사를 위한 기본적인 선결과제는 안정적인 점화이다. 새로운 로켓 엔진 개발시 점화방안에 대한 선정은 신뢰성 및 안전에 유의해야 한다.

● 2002년 7월 18일 접수 ~ 2002년 9월 29일 심사 완료

* 중신회원 한국항공우주연구원(Korea Aerospace Research Institute)

주연락자, E-mail= ymhan@kari.rc.kr

대전시 유성구 어은동 45번지 한국항공우주연구원

액체 로켓 개발에 있어 점화시의 점화지연 등의 문제로 연소실 안에서의 **hard start** 및 폭발 등이 있을 수 있고, 이러한 문제는 발사체 및 탑재물에 매우 큰 손실을 가져올 수 있다. 액체 로켓엔진의 점화방법은 반응성이 높은 추진제가 연소실에 쌓이기 전에 빠르게 연소가 이루어지도록 해야한다. 연소기 안으로 들어온 추진제가 빠르게 연소되지 않는 경우 폭발성 혼합물이 되어 연소기 안에서 **detonation**이 발생해 엔진의 파괴, 발사체나 시험설비의 치명적인 대형 사고를 유발 할 수 있다.[1]

엔진의 안정적인 점화를 위해 주로 사용하는 것은 **pyrotechnic** 점화기, **hypergolic** 점화기, 스파크 플러그, 스파크-토치 점화기, **combustion wave** 점화기 그리고 **resonance** 점화기 등으로 다양하다. **KSR-III** 주 엔진의 경우는 **hypergolic** 점화기로 **tri-ethyl-aluminum(TEA)**을 사용한 점화기를 사용하고 있다. 엔진 개발 초기에는 점화 성능 검증 및 안전한 연소시험을 위해 점화성공 여부를 판단한 후 다음 시퀀스로 진행하도록 해주는 점화 감지 시스템을 도입하는 것이 바람직하다. 점화 감지 시스템으로는 광학적인 감지기, **pyrometers**, 가용성 선 감지기, 압력측정 감지기 그리고 저항선 감지기 등 여러 방안이 있다.[1]

탄화수소 계열의 추진제를 사용하는 액체 로켓엔진의 경우 화염의 전파에 초기 추진제의 분무 특성이 매우 중요한 요소가 된다.[2,3] 분무 연소의 최소 단위인 액적에서의 점화과정에 액적 주위의 온도, 압력 등이 점화지연 시간에 미치는 영향에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.[3] 액적의 점화지연은 증발시간, 혼합시간 그리고 화학반응시간의 총합으로 볼 수 있는데, 혼합시간은 다른 것에 비해 상대적으로 짧기 때문에 무시 가능하다. **KSR-III**에 사용되는 **Jet A-1**의 경우 증발율이 낮고 분사되는 초기 액적 직경이 평균적으로 큰 관계로 열 용량이 크기 때문에 점화지연은 증발시간에 크게 의존할 것으로 사료된다. 액적증발시간, 연료와 산화제의 혼합시간, 그리고 화학반응시간 등은 주위의 열 및 유동에 따라 매우 다른 특성을 보여 주기 때

문에 액체 로켓 엔진 연소기 안의 점화 현상은 정량적으로 예측/해석하기는 어렵다. 이러한 관계로 액체로켓 엔진에서의 점화현상 특성을 파악하기 위해서는 실험적인 접근이 필수적이다.

케로신을 사용하는 가압식 엔진의 점화 시퀀스를 보면 **LOx**를 소량으로 공급한 후 점화제를 주입하고 연소기 안의 화염이 확인된 후에 주 추진제를 공급하는데, **Fumici** 등[4]은 주 연료를 약 0.2초 정도 먼저 공급한 후 주 산화제를 공급하여 엔진을 점화하였다. **Dunn** 등[5]의 경우는 산화제 및 점화제를 공급하고 150ms 점화지연을 갖은 후 화염을 확인한 다음 연료밸브를 조금 열어 엔진의 압력상승을 확인한 후에 연료 및 산화제 주 밸브 전체를 열어 점화하였다. 터보펌프를 사용하는 **Vulcain** 가스 발생기 엔진의 경우 연료인 수소밸브를 열어 공급이 안정된 후 주 산화제를 공급하고, 0.4초 후에 터빈에서 점화가 이루어지고 약 0.5초 후에 연소기안에서 점화가 이루어진 다음 0.5초 천이과정을 거친 후 정상압력에 도달하는 점화 시퀀스이다.[6]

본 논문에서는 **KSR-III** 주엔진의 점화 시퀀스에 대해 간략히 설명하고, 점화 시퀀스를 결정하는 시험측정인자에 대한 종류 및 측정 신뢰성에 대해 먼저 살펴보았다. 점화 **cyclogram**에서 결정된 추진제의 공급시간을 정확히 결정하기 위해 엔진의 메니폴드 체적과 유량에 관련된 충전시간, 그리고 밸브 개폐시간에 대해 논의하였다. 또한, 점화에 있어 연료나 산화제 공급의 순서를 다르게 하는 경우 점화초기 엔진의 연소 특성에 대해 기술하였다. 결정된 점화 **cyclogram**에 의해 수행한 시험결과에 대해 간략히 기술하였다.

2. 점화 Cyclogram 결정 변수 및 측정치의 고찰

2.1 KSR-III 주엔진 cyclogram

액체산소, 케로신(**Jet A-1**)을 사용하는 가압식 액체 로켓 엔진인 **KSR-III** 주엔진의 경우, 점화기 인젝터를 통해 소량의 액체산소를 먼저 보낸 후 점촉성 발화물질인 **TEA**을 공급하여 화염이

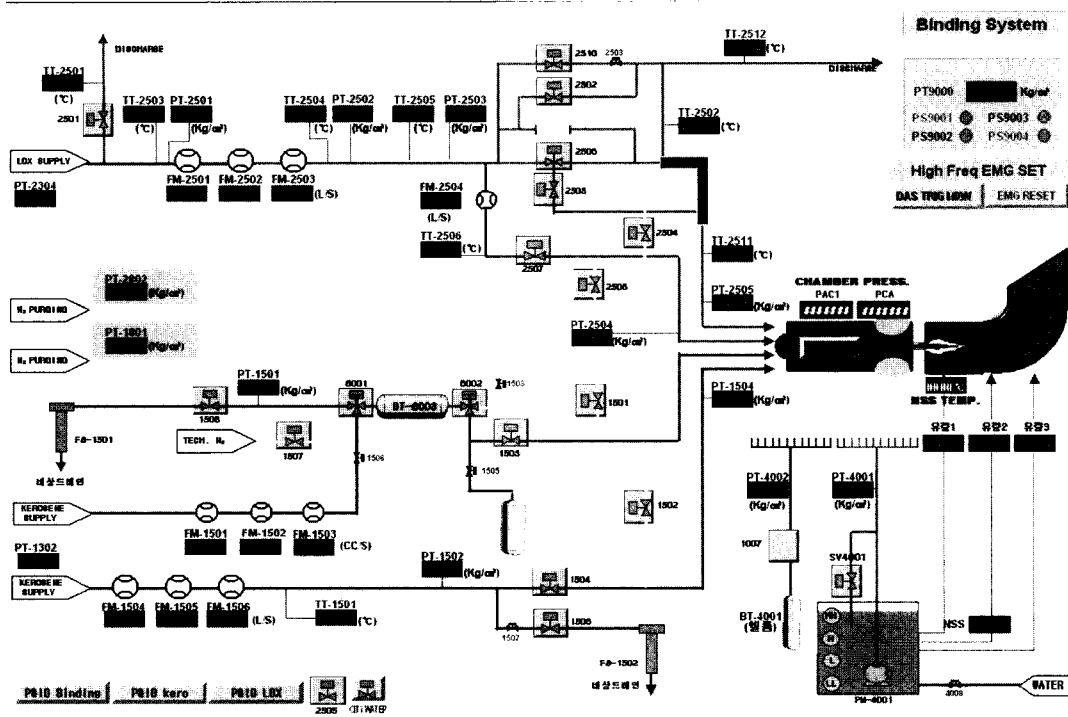


Fig. 1 Schematic of binding room of ReTF in KARI

연소기안에 존재하게 한 다음 주 케로신을 공급 하면서 0.2초 후에 주 산화제를 공급하는 점화 시퀀스를 선택하였다. 많은 탄화수소 액체로켓 엔진의 경우 설계점 운용조건에서 혼합비가 연료 과농인 관계로 초기 점화시 연료가 먼저 공급되는 것이 연소기 안에서 최대 열방출로 연소기 벽면의 냉각에 해로운 이른 혼합비 상태의 연소를 방지할 수 있어 연료 선공급을 선호하고 있다. 초기 KSR-III의 경우 축소형 모델에서 여러 점화 시퀀스를 연구한 결과[3] 초기 점화특성이 우수한 산화제 선 공급을 선택하였으나 주 엔진의 점화 초기 저주파 섭동이 발생해 연료 선공급 cyclogram으로 변경하였다. 엔진 연소 종료시에는 산화제가 연료보다 0.1초 먼저 공급이 중단되는 시퀀스를 KSR-III 주엔진에 적용하였다.

2.2 연소시험설비

KSR-III 주 엔진을 시험하기 위한 항우연 내

의 지상 연소시험설비(ReTF)의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 액체산소 및 케로신을 가압식으로 공급하는 본 설비는 추력 기준 약 20Ton, 엔진 연소실 압력 기준 약 70bar, 액체산소 공급 기준 약 70kg/sec, 케로신 공급 기준 약 30kg/sec 까지 시험을 할 수 있는 설비이다. 본 시험설비의 상세 사양은 참고문헌들에 기록되어 있다.[7,8,9,10] 엔진으로 주 추진제를 공급하는 중 단밸브의 경우 액체산소 및 케로신 밸브는 개폐시간이 각각 약 0.5초, 0.45초이다. 점화기로 산화제 및 점화제를 공급하는 밸브의 경우 약 0.2~0.3초의 개폐시간을 갖고 있다. 또한 추진제의 purge을 위한 밸브의 개폐시간은 약 0.1~0.3초 이내이다.

2.3 Cyclogram 결정 측정변수

액체 로켓엔진의 점화에 미치는 추진제의 공급시기는 실제 연소기안으로의 공급시기를 기준으로 해야 한다. 실제 엔진의 운용에서 점화를

위한 추진제의 공급은 주로 밸브의 구동 등 하드웨어적인 작동으로 이루어지므로 연소기 안으로 공급되는 추진제의 투입시기는 엔진의 메니폴드나 설비에 장착된 센서 등에 의해 결정되게 된다. 실제 연소기안에 추진제의 공급시점을 파악할 수 있는 센서나 장치를 설치하기에는 연소시 연소기안이 고온, 고압조건인 관계로 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 엔진 연소기 안에 추진제가 공급되는 시간을 정확히 파악하기 위해 밸브의 open 시간 및 엔진 manifold의 추진제 충전 시간을 계산하였다. 밸브의 open 시간은 실제 밸브 구동을 통해 알았으며 그 값은 앞서 언급하였다. 엔진 manifold의 추진제 충전 시간은 manifold 체적과 초기 공급유량에서 산출하였다. KSR-III 엔진의 경우 산화제, 연료의 manifold 체적은 각각 약 6 liter, 9.6 liter로 예상 충전시간은 각각 약 0.15초, 0.4초이다. 실제 밸브 구동과 동시에 추진제가 공급될 때 KSR-III 및 연소시험장에서 사용되는 밸브가 볼 밸브인 관계로 밸브가 열리는 동안에 추진제가 공급되는데, 밸브 open 명령시간과 실제 처음으로 연소기안으로 추진제가 공급되는 시점 그리고 manifold에 충전이 전부 완료된 시점을 평가하기란 어려운 작업이다. 이에 따라 엔진이나 설비에서 측정되어지는 정압력, 유량, 동압력, 진동 등을 통해 이를 판단해야 할 것이다.

추진제의 공급특성을 알 수 있는 물리적인 특성은 추진제가 흐르는 곳에서의 정압력, 동압력, 유량 등이 대표적이다. 설비나 엔진의 manifold에서 측정 가능한 이러한 값들에서 추진제의 공급시기를 결정해 안정적인 점화 cylogram을 결정해야 할 것이다.

2.4 압력, 유량 측정치의 고찰

연소시험전 추진제의 공급 유량 및 충전시간은 위한 설비 및 엔진 수류시험을 수행하여 결정하는데, 본 논문에서는 수류시험시와 연소시험시 가압압력, 유량, 연소기 배압 등의 차이로 인해 충전 특성이 약간 달라지므로 연소시험시

측정한 데이터를 통하여 측정치의 특성을 설명하였다. Fig. 2, 3는 추진제 공급시 엔진 manifold에서 측정된 정압 측정치이다.

Fig. 2, 3에서 보면 연료의 경우 open 명령 후 1.3초 후에 압력이 정상압력으로 상승하였고 산화제의 경우 0.9초 후에 정상압력으로 상승하였다. 이는 밸브 open 시간 및 계산에 의한 충전시간의 합보다 매우 긴 시간이며 측정하는 위치마다 다른 특성을 보여주고 있다. 이러한 원인은 비록 반응시간이 빠른 센서를 사용하더라도 센서의 측정 유도관을 채우는데 걸리는 측정 지연 및 산화제 초기 증발에 의한 측정지연에 의한 것이다. 이를 방지하기 위해서는 센서의 측정 유도관의 제거 등을 해야 하지만 로켓엔진 시험시의 진동 등에 의한 센서 보호 및 측정정확성을 위해서는 바람직하지 않다. 이러한 관계로 엔진의 정압을 기준으로 추진제의 충전시간 및 투입시기를 결정하는 것은 위험이 뒤따를 것으로 사료된다. 본 시험 데이터는 Sensortec사의 strain type 정압센서, 1.5m정도의 1/4" SUS tube로 된 측정유도관 그리고 1kHz data sampling rate로 측정된 결과이다.

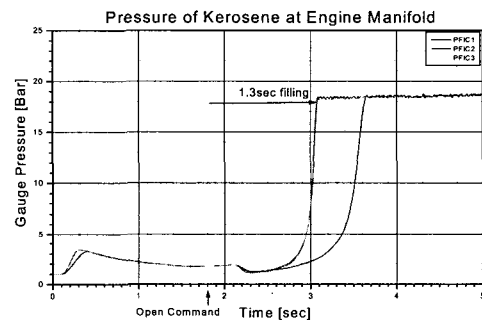


Fig. 2 Pressure of kerosene at engine manifold

Fig. 4는 주 연료라인의 연료공급 유량곡선이 다. 밸브 open 명령시간부터 약 0.3초부터 증가하다가 최대값에서 0.3초 유지한 후 0.8초 후부터는 감소하였다. 밸브가 열리면서 대기압 상태의 엔진 manifold 공간을 채우기 위해 급격히

유량이 증가하다가 manifold에 추진제가 채워져 압력이 올라가면 추진제의 공급유량이 떨어질 것이다. 이러한 관점에서 연료의 충전 시작 시간은 약 0.3초부터 전체 충전완료 시간은 0.8초로 볼 수 있다. Fig. 5는 주 산화제 공급유량곡선으로 open 명령 후 0.4초 후 충전 시작해 0.7초에 충전을 완료했다고 볼 수 있다. 산화제 점화기 유량은 점화시 이미 공급되어지고 있어 점화 시퀀스에 중요하지 않아 제시하지 않았다. 유량계는 Hoffer사의 터빈유량계이고 각각 라인에 3개씩 설치되어 있다.

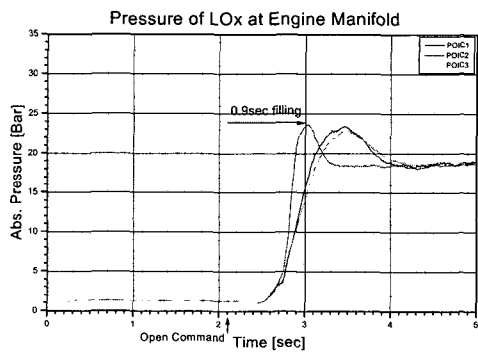


Fig. 3 Pressure of LOx at engine manifold

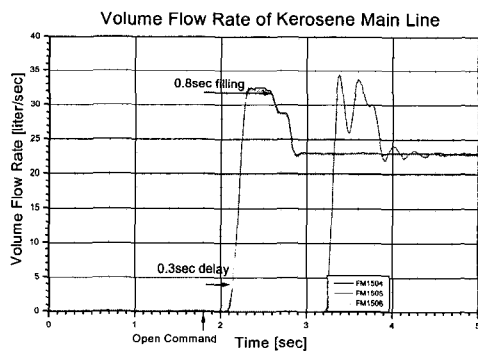


Fig. 4 Volume flow rate of kerosene main line

Fig. 6는 케로신 점화기 라인 유량곡선으로 점착성 발화물질인 TEA를 200ml에 ampule에 충

전해 공급하는데 TEA가 소진된 이후에는 케로신이 바로 공급된다. 밸브 open 명령후 0.1초에 충전이 시작해 0.3초후에 완료했다고 볼 수 있다. 2.8초대에 다시 유량이 감소하는 것은 연소기안에서 연소가 되면서 배압이 올라가기 때문이다.

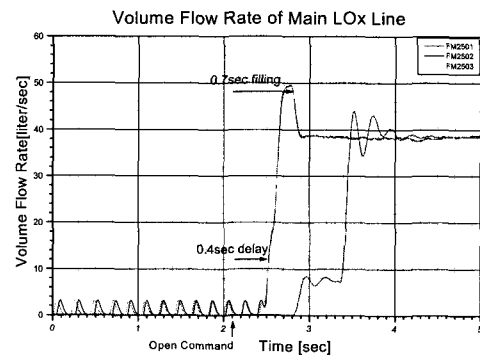


Fig. 5 Volume flow rate of LOx main line

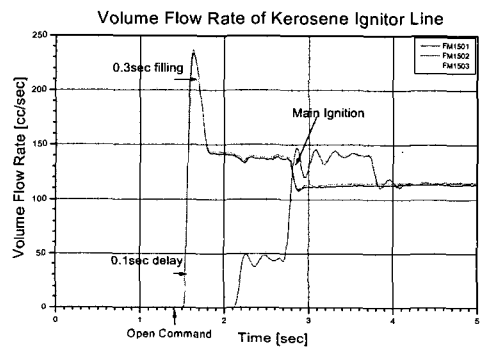


Fig. 6 Volume flow rate of kerosene ignitor line

정압력이 여러 이유로 인해 충전특성을 나타내기에는 적합하지 않아 동압은 어떠한 특성을 나타내는지 알아보려고 한다. Fig. 7는 연료 manifold에서 측정된 동압 측정치이다. 일반적으로 동압은 고주파 현상에 큰 의미를 갖고 있는데 센서의 특성상 순간적인 변화에 매우 민감한 반응을 보여주므로 추진제의 공급특성을 잘 나

타낸다고 볼 수 있다. Fig. 7에서 보면 밸브 open 명령 후 약 0.4초 후에 반응을 보이고 약 0.7~0.8초 두 군데에서 peak를 보여주는데 동압에서 peak는 최대 변동을 의미하는 것이다. 0.7초후의 peak는 엔진의 연료 ring을 다 채우면서 발생한 것으로 사료되며 0.8초후에 발생한 peak는 연료 안쪽 manifold를 다 채워 발생한 것으로 사료된다. 즉 동압측면에서 보면 0.3초 후 충전을 시작해 0.8초 후에 연료 충전이 완료되었음을 의미한다. 2.8초 대의 peak는 점화가 이루어지면서 발생한 peak이다.

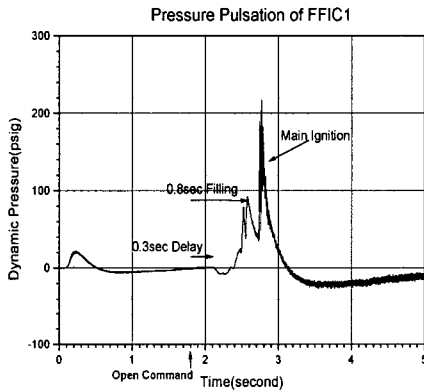


Fig. 7 Dynamic pressure of kerosene manifold

앞의 Fig. 4의 유량곡선과 비교하여 보면 두 데이터 사이에 매우 유사한 특성을 보여주고 있다. 즉 밸브 open 명령 후 0.3초 후에 충전시작 징후를 보여주고 0.8초 후에는 충전이 완료되었음을 보여주고 있다. 밸브 open 시간(0.45초)과 계산에 의한 충전시간(0.3초)과 비교시 위의 유량과 동압변수가 보여준 값은 매우 근사한 값을 보여주고 있다. 이러한 유량과 동압특성의 상관성으로 추진제의 공급특성을 정확히 파악할 수 있을 것으로 사료된다. 연소기 안의 추진제 폭발이 수 μ sec안에 일어나기 때문에 응답성이 빠른 동압에 의한 추진제 충전 시작 및 완료를 판단하는 것은 안전한 점화 cyclogram을 만드는 데 매우 유용할 것이다.

Fig. 8은 엔진 산화제 manifold에서 측정된 동

압특성 곡선이다. 밸브 open 명령 후 약 0.35초에 충전이 시작되면서 약 0.7초 후에는 충전이 완료되었음을 보여주고 있다. 연료 충전시와 같이 Fig. 5의 유량곡선과 동압특성의 비교시 매우 비슷한 충전 특성을 나타내고 있다.

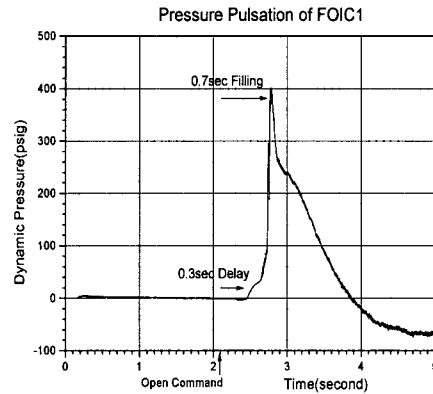


Fig. 8 Dynamic pressure of LOx manifold

3. 주엔진 점화시험 및 특성

3.1 산화제 선공급 점화시험

앞서 설명한 측정변수를 기준으로 점화 cyclogram을 설정해 KSR-III 주엔진의 점화 및 연소시험을 수행하였다. 먼저 산화제를 선공급하는 시험을 수행하였다. Fig. 9는 점화시 압력 특성을 보여주고 있다.

점화초기 연료압력이 연소기 압력보다 낮게 되는데 이는 측정지연에 의한 것으로 추진제 공급시기를 파악하는데 측정변수로 이용하는데 문제가 있는 것을 보여주고 있다. Fig. 10은 연소기 안에서 측정된 동압곡선으로 점화초기에 저주파(약 230Hz) 압력섭동을 보여주고 있다. 산화제를 선공급시 발생하는 저주파는 연소기안에서의 연소현상에 밀접하게 연관된 것으로 사료되는데 이에 대한 분석은 여러 조건에서의 점화/연소시험 후 이루어질 것이며, 엔진 운용차원에서 바람직한 현상이 아니므로 연료 선공급하는 것으로 cyclogram을 변경하였다.

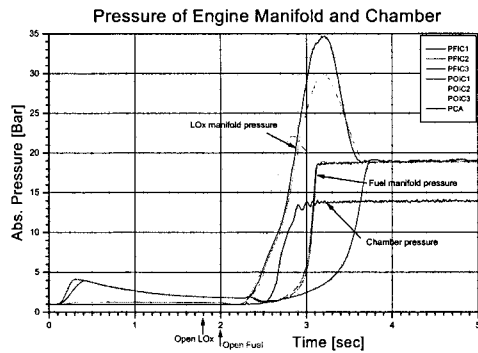


Fig. 9 Pressure at supply lead of LOx

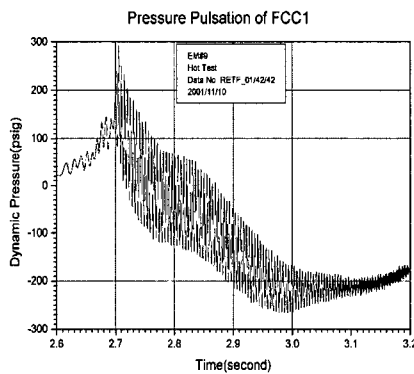


Fig. 10 Dynamic pressure of LOx manifold at supply lead of LOx

3.2 연료 선공급 점화시험

산화제 선공급시 발생하는 저주파로 연료를 선공급하는 점화 cyclogram을 설정해 KSR-III 주엔진의 점화 및 연소시험을 수행하였다. Fig. 11, 12은 항우연 ReTF에서 KSR-III 주엔진의 시험시 점화초기에 대한 비디오 사진들로 연료 점화기 라인으로 나온 TEA에 의한 화염을 보여주고 있다. TEA 투입시기는 유량곡선 및 비디오 분석상 밸브 명령 후 약 0.35초로 볼 수 있었다. 이후 연료가 투입되면서 화염의 색깔이 변하는 것을 확인할 수 있었다.(Fig. 12) 산화제 투입시는 화염강도가 강해 CCD 카메라 감도를 넘어서 화면이 거의 구별이 되지 않았다. Fig. 13은 정

상연소에 도달한 화염의 사진을 보여주고 있다.

Fig. 14는 연료 선공급 점화시 압력특성을 보여주고 있다. 여전히 연료 manifold의 압력은 측정지연을 보여주고 있다. 연소기 안의 정압을 보면 cyclogram 시작 약 2.8초 후에 정상압력에 도달하였다.



Fig. 11 Photo of combustion test (starting, TEA)



Fig. 12 Photo of combustion test (starting, fuel)

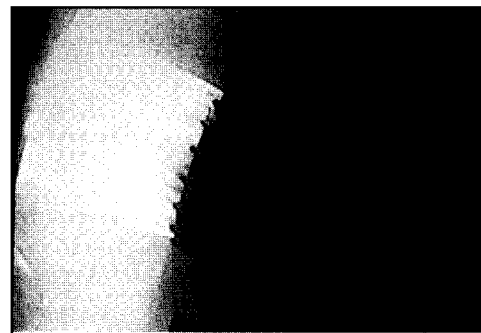


Fig. 13 Photo of combustion test (steady state)

Fig. 15는 엔진 연소기 안의 동압특성을 보여 주고 있다. Cyclogram 시작 1.7초에 발생한 점동은 연소기 안으로 공급되는 TEA가 연소하면서 발생하는 것으로 사료되는데 이는 주 산화제가 연소기 안으로 공급되는 시점 2.4초까지 계속 지속되고 있다. TEA양은 200ml로 본 시험에서는 약 1.8초 지속될 수 있는 양으로 2.4초에서 점동이 작아지는 이유는 연료 및 산화제가 부분적으로 공급되면서 연소기 안의 점동을 줄이기 때문인 것으로 사료된다. 2.6초부터 연소기안의 압력이 상승하기 시작해 2.8초에 연소압이 상승하였다.

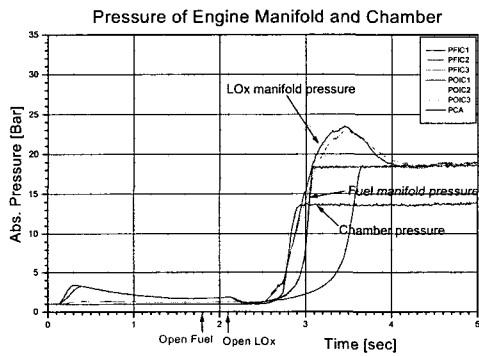


Fig. 14 Pressure at supply lead of fuel

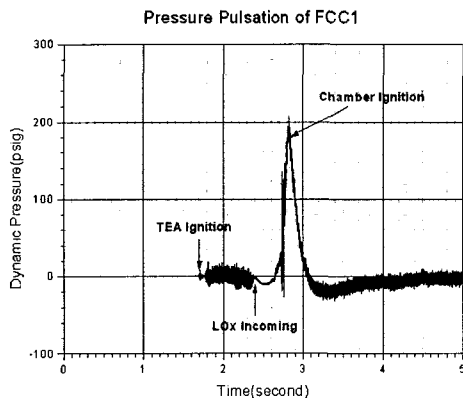


Fig. 15 Dynamic pressure of combustor at supply lead of fuel

4. 결론

KSR-III 주 엔진의 안정적인 점화에 필수적인 추진제 투입시기를 판단하기 위한 측정 변수에 대한 고찰을 수행하였고, 점화 cyclogram을 작성해 연소시험을 수행한 후 이에 대한 결과에 대해 알아보았다.

추진제의 공급유량곡선을 분석한 결과 엔진 manifold안에 추진제가 채워져 압력이 상승하기 시작하면서 유량이 감소한다는 점에서 유량곡선의 하강점이 충전이 완료된 시기임을 알 수 있었다. 엔진의 manifold안의 동압특성을 분석한 결과 유량특성과 같이 추진제의 공급특성을 잘 나타내줌을 알 수 있었다.

밸브 open 시간 및 계산에 의한 엔진 manifold 충전시간에 대해 실제 측정된 유량과 동압 변수가 보여준 충전시간은 매우 근사한 값을 보여주고 있었으며 이러한 유량과 동압 특성의 상관성으로 추진제의 공급특성을 정확히 파악할 수 있었다. 연소기 안의 추진제 폭발이 몇 μsec 안에 일어나기 때문에 응답성이 빠른 동압에 의한 추진제 충전 시작 및 완료를 판단하는 것은 안전한 점화 cyclogram을 만드는데 매우 유용할 것으로 판단된다.

유량과 동압의 측정 변수로 결정한 cyclogram에 의해 점화 및 연소시험을 성공적으로 수행할 수 있었다. KSR-III 주엔진의 경우 산화제 선공급으로 점화를 하는 경우 점화초기에 저주파 점동이 일어남을 알 수 있었다.

향후에는 점화 cyclogram 결정 변수에 대한 상세 검증 및 이와 관련된 점화감지 시스템에 대한 연구를 수행하여 좀 더 안전한 점화 시퀀스 개발 및 엔진/시험장 운용을 하고자 한다.

후기

본 논문은 과기부 특정연구개발과제인 “3단형 과학로켓 개발사업” 결과의 일부임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. D. K. Huzel and D. H. Huang, "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines," *Progress in Astronautics and Aeronautics*, vol. 147, 1992
2. R. Nakanishi, H Kobayashi, S. Kato and T. Niioka, "Ignition Experiment of a Fuel Droplet in High-Pressure High Temperature Ambient," *Twenty-Fifth Symp.(Int.) On Combustion*, The Combustion Institute, p.447
3. 박정 등, "소형 액체 로켓 엔진에서의 점화 시퀀스 결정 및 인젝터 수명연장 기법평가," 연소학회지, 제5권, 제1호, 2000
4. O. Fumiei, T Hiroshi, K. Akinaga, S Hiroshi, S. Kazuo, S Masaki and Y Nobuyuki, "Effects of Hydrogen Addition on Combustion Performance of a LOx/Kerosene Rocket," 航空宇宙技術研究所報告, 제 1177호, Japan, 1992
5. G. Dunn, "Pressure Fed Thrust Chamber Technology," NAS 8-37365, 11. 1990
6. H. Immich and W. Mayer, "Cryogenic Liquid Rocket Engine Technology Developments within the German National Technology Programme," AIAA 97-2822, 1997
7. 채연석 등, "3단형 과학로켓 개발사업(I)," 한국항공우주연구소 보고서, 1998
8. 채연석 등, "3단형 과학로켓 개발사업(II)," 한국항공우주연구소 보고서, 1999
9. 채연석 등, "3단형 과학로켓 개발사업(III)," 한국항공우주연구원 보고서, 2000
10. 채연석 등, "3단형 과학로켓 개발사업(IV)," 한국항공우주연구원 보고서, 2001