

다단연소사이클 엔진의 터보펌프 및 유공압 라인 특성

이정호* · 전준수* · 황창환* · 우성필* · 이광진* · 유병일* · 한영민*

Characteristics of Turbopump and Hydraulic lines of Staged Combustion Cycle Engine

Jungho Lee* · Junsu Jeon* · Junsu Jeon* · Seongphil Woo* · Kwangjin Lee* · Byungil Yoo* · Yeoungmin Han*

ABSTRACT

Research for developing 9 tonf-class staged combustion cycle engine which is high performance upper stage engine has been conducted. Technical demonstration model of the staged combustion cycle engine was installed in combustion test facility of Naro space center. Combustion tests of Power-pack which consists of pre-burner and turbopump without main combustion chamber and combustion tests of engine have been conducted. The vacuuming process of hydraulic lines is introduced and the characteristics of turbopump and hydraulic lines of engine combustion test are described in this paper.

초 록

고성능 상단엔진 개발을 위한 9톤급 다단연소사이클 엔진의 선행연구가 진행 중에 있다. 다단연소사이클 엔진 기술검증시제(TDM0)를 제작을 완료하여, 나로우주센터 엔진 연소시험설비에서 예연소기와 터보펌프로 구성된 파워팩 연소시험과 주 연소기까지 장착된 엔진 연소시험을 차례로 수행하였다. 다단연소사이클 엔진 유공압 라인의 진공화 과정과 연소시험에서 나타난 터보펌프의 및 유공압 라인의 특성을 간략히 기술한다.

Key Words: Staged Combustion Cycle(다단연소사이클), Engine Combustion Test(엔진연소시험), Turbopump (터보펌프), Hydraulic Line(유공압 라인), Vacuuming(진공화)

1. 서 론

현재 항공우주연구원에서는 한국형 발사체 이

후 정지궤도 위성 및 달 탐사용 발사체 개발을 위한 고성능 엔진을 개발 중에 있다. 9톤급 다단연소사이클 엔진(Staged Combustion Cycle Engine)의 기술검증시제(TDM0)를 제작 완료하여, 나로우주센터 3단 엔진 연소시험 설비 내에서 연소시험을 수행하였다. 다단연소사이클 엔진에서

* 한국항공우주연구원 엔진시험평가팀

† 교신저자, E-mail: ljh88403@kari.re.kr

주 연소기를 제외하고 예연소기와 터보펌프로 구성된 파워팩 연소시험과 주 연소기까지 장착된 엔진 연소시험을 순차적으로 시행하였다. 다단연소사이클 엔진 기술검증시제(TDM0)와 파워팩의 모델링은 Figure 1과 같다. 파워팩 시제에서는 중앙 부분에 연소기 대신 연소기 모사용 벤츄리 튜브가 장착되어있는 것을 확인할 수 있다.

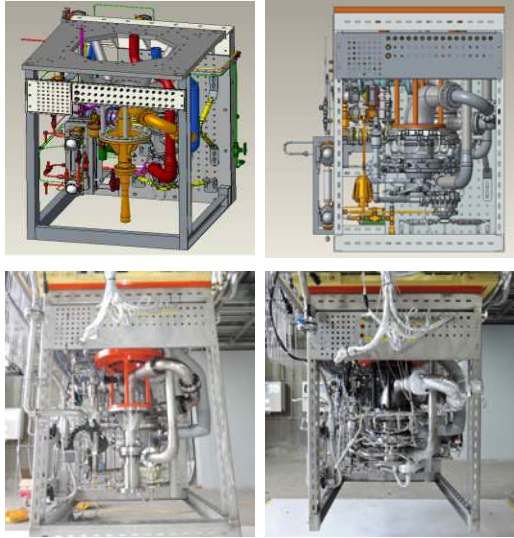


Fig. 1 Modeling of TDM0
(Left: Power-pack, Right: Engine)

본 논문에서는 다단연소사이클 엔진 기술검증시제(TDM0)의 터보펌프 및 유공압 라인 구성 및 진공화 과정과 엔진 연소시험에서 나타난 터보펌프 및 유공압 라인의 특성을 간략하게 살펴보고자 한다.

2. 9톤급 다단연소사이클 엔진의 터보펌프 및 유공압 라인 개요

2.1 9톤급 다단연소사이클 엔진 터보펌프

9톤급 다단연소사이클 엔진 기술검증시제(TDM0)에 사용된 터보펌프는 우크라이나 RD-8 엔진용 터보펌프를 사용하고 있으며 향후 자력 개발할 계획을 가지고 있다.

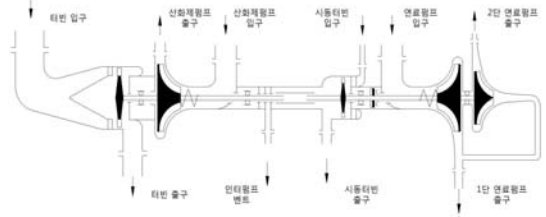


Fig. 2 Schematic of Turbopump

본 터보펌프는 액체산소와 케로신을 연료로 하는 산화제 과잉 다단연소 사이클 엔진에 사용되는 모델로 규격은 Table 1과 같다. 개념도는 Figure 2에 나타나 있다.

Table 1 Specifications of 9 Tonf-class Staged Combustion Cycle Engine Turbopump

| Item | Value |
|---|-------|
| TP RPM (rpm) | 29000 |
| LOX flow rate (kg/sec) | 16.5 |
| LOX pressure at pump outlet (bar) | 246 |
| Fuel flow rate through the 1st stage (kg/sec) | 6.9 |
| Fuel flow rate through the 2nd stage (kg/sec) | 0.3 |
| Fuel pressure at pump 1st stage outlet (bar) | 210 |
| Fuel pressure at pump 2nd stage outlet (bar) | 303 |
| Gas pressure at the turbine inlet (bar) | 205 |
| Gas pressure at the turbine outlet (bar) | 106 |

2.2 9톤급 다단연소사이클 엔진 유공압 라인

9톤급 다단연소사이클 엔진 기술검증시제(TDM0)의 기본적인 구성은 Fig. 3와 같다.

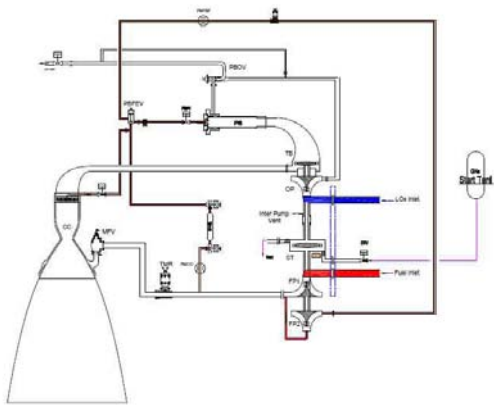


Fig. 3 Schematic of Engine(TDM0)

산화제는 터보펌프 산화제 펌프를 거쳐 드레인되며 라인을 냉각하고 시험이 시작되면 산화제 공급 전환 밸브(PBOV)를 통해 예연소기로 공급된다.

연료는 터보펌프 연료펌프 1단 후단을 거쳐 연소기로 공급되며, 1단에서 압력이 상승된 연료의 일부는 연료펌프 2단으로 공급되어 보다 높은 압력으로 예연소기로 공급된다.

9톤급 다단연소사이클 엔진 기술검증 시제에서 점화제는 TEA/B를 사용하였다. 점화제는 하나의 앰플에서 공급되기 때문에 시험 전 예연소기와 연소기의 점화제 라인에 필링이 수행되고 점화제 공급 전환 밸브(PEFVV)를 통해 라인을 분리한다. 점화제의 필링 전 배관의 진공화가 필요하며 이에 대한 내용은 다음 절에서 보도록 하겠다.

또한 시험 전, 후 각 구성품을 퍼지하기 위한 질소 퍼지 가스라인과 밸브들을 구동하는 헬륨 밸브구동 가스라인이 존재하며, Fig. 3에서는 생략하였다. 엔진 시동은 고압의 헬륨으로 하며 실제 발사체에서 사용할 시동 탱크를 모사하기 위한 탱크(Start Tank)를 별도로 설치하여 공급하였다.

2.3 9톤급 다단연소사이클 엔진 라인 진공화

9톤급 다단연소사이클 엔진에서 점화제는 앰플에 충전되어 장착되며, 시험 시작 바로 전 앰

플의 전, 후단 밸브를 개방하여 예연소기와 연소기의 점화제 공급라인으로 필링된다. 이때 점화제 공급라인은 필링 시 배관 내 기체 및 수분과의 연소반응이나 필링 후 기포 잔류를 억제하기 위하여 필링 전 진공화를 수행함으로써 배관 내의 수분 및 공기를 제거해 주는 것이 필요하다. 진공화는 점화제 라인에 있는 별도의 포트를 통해 진공펌프로 수행하며, 일정 진공 압력 이하로 도달 시 진공화를 종료하고 점화제의 필링을 시작한다.

터보펌프 및 연료 라인의 연료 필링은 연소반응의 염려가 없기 때문에 별도의 진공화 과정을 수행하지 않고 라인 상의 최고점에 기포제거용 밸브들을 설치함으로써 연료 필링을 수행하였다. 한 번의 시험에서는 시험적으로 연료라인 또한 진공화를 한 후 필링을 하였는데 이에 따른 결과는 다음 장에서 보도록 하겠다.



Fig. 4 Vacuuming of ignitor line

3. 엔진 연소시험 터보펌프 및 유공압 라인 특성

3.1 9톤급 다단연소사이클 엔진 연소시험 결과

9톤급 다단연소사이클 엔진 기술검증시제(TDM0)의 파워팩 연소시험을 수 회 수행한 후 최종적으로 주 연소기를 장착한 엔진 연소시험을 수행하였다. 그 중 엔진 3초 연소시험의 사진을 Fig. 5에서 볼 수 있다.

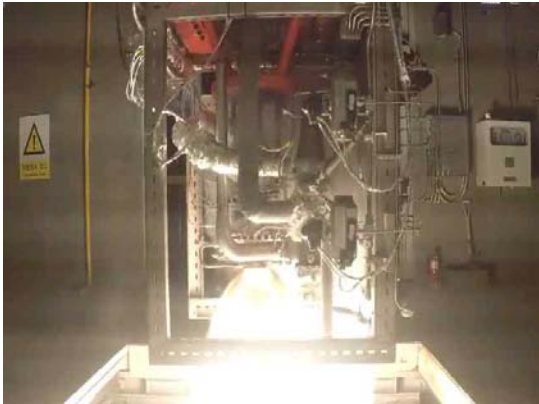


Fig. 5 Combustion test of Engine(TDMO)

엔진 연소시험의 결과는 Fig. 6에서 나타나 있다. 엔진의 초기 시동은 시동탱크에서 터보펌프의 시동터빈으로 고압 헬륨이 분사되어 이루어 지게 되는데 이에 따라 20.0초~20.5초 구간에서 터보펌프 회전수 및 연료라인의 압력이 초기에 급격하게 상승하는 하게 되는 것을 볼 수 있다. 이후 시동터빈으로 헬륨이 공급되는 헬륨시동 구간과 오버랩 되며 20.8~21.4초 사이에 예연소기와 연소기가 차례로 점화되어 정격 압력 및 rpm으로 급격하게 상승하여 도달하게 된다.

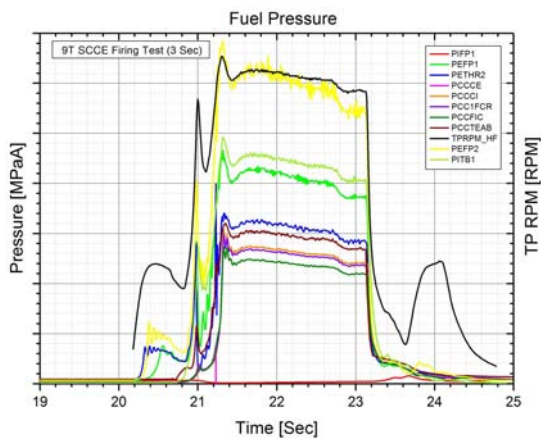


Fig. 6 Fuel line pressure of Engine Combustion test(TDMO)

본 연소시험에서 터보펌프 회전수는 시험 종료 전 약 29,000 rpm의 정격 회전수를 유지하였

으며, 연료펌프 1단 토출압력 약 20 MPa 이상 2단 토출압력 약 28 MPa 이상에 도달하였다. 기존 파워팩 시험 및 수류시험에서 파악된 유공압라인의 구성품들의 차압특성에 따라 압력, 유량이 잘 형성되었으며, 예연소기의 연소압력은 20 MPa 이상, 연소기 연소압력은 약 9 MPa 에 도달하였다.

3.2 9톤급 다단연소사이클 엔진 연료 라인 진공화에 따른 압력변화

앞서 2.3절에서 엔진 연료 라인의 필링 전 진공화 과정에 대하여 언급하였으며, 그 영향을 다음의 그래프를 통해 보고자 한다. 두 번의 엔진 시험에 대해 초기 시동 구간의 약 1초를 확대하여 본 그래프를 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

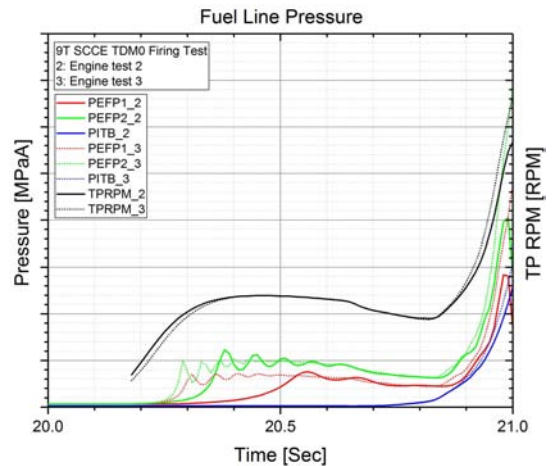


Fig. 7 Comparison of Fuel line pressure buildup

Figure 7에서 엔진시험 2번은 연료라인의 필링 시에 별도의 진공화 과정을 하지 않고 라인상의 최고점들에서 기포를 제거하며 수행하였고, 엔진 시험 3번은 연료라인의 필링 전 라인을 일정 기준 이하로 진공화 하여 필링을 수행하였다. 따라서 2번의 경우는 연료펌프 및 엔진 연료 배관의 구조 및 형상으로 인하여 배관상의 기포가 완벽히 제거되지 않았을 것이며, 3번의 경우는 기포가 완벽히 제거되어 연료로 완전히 필링 된 상태로 생각할 수 있다.

이에 따라 그래프에서 초기 시동 시 연료라인의 압력 형성에 있어 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. PEFP1과 PEFP2는 연료펌프 1단과 2단의 토출압력을 의미한다. 20.3초경의 헬륨 시동 구간에서도 터보펌프의 회전에 따라 점선으로 표시된 3번째 시험의 압력이 먼저 가파르게 상승하는 것을 볼 수 있으며, 2번째 시험은 보다 늦게 완만히 압력이 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 2번째 시험의 배관 내 존재하는 기포로 인하여 초기 압력 상승 시 기체가 압축되며 압력 형성에 지연을 발생시킨 것으로 볼 수 있다. 3번째 시험은 배관 내 기체가 제거되어 완벽히 액체로 필링되어 있기 때문에 터보펌프가 회전함에 따라 압력이 훨씬 빠르고 즉각적으로 상승하는 것이라 볼 수 있다.

이러한 차이는 20.9초 이후 예연소기의 점화가 시작되어 터보펌프 회전수가 상승함에 따라 더욱 극명하게 나타나는데, 압력 상승속도에 차이가 있어 시간이 지남에 따라 압력의 상승이 확연히 차이 나는 것을 볼 수 있다. 엔진 시동 시 밸브들의 개폐는 몇 십 ms 단위로 제어가 되기 때문에 위의 그래프에서 확인되는 배관 내의 압력 상승의 차이는 엔진시험에 있어 매우 큰 영향을 끼칠 수 있으며 세심한 고려가 필요하다.

4. 결 론

고성능 상단 엔진으로 개발 중인 9톤급 다단연소사이클 엔진 기술검증시제(TDM0)의 터보펌프 및 유공압 라인의 구성 및 시험과정에 대해 간략히 살펴보았다. 나로우주센터 3단 엔진 연소시험 설비에서 9톤급 다단연소사이클 엔진의 연소시험이 수행되었으며, 연료 라인의 진공화 과정에 따른 터보펌프와 유공압 라인의 특성 변화에 대해 기술하였다. 차후 기술검증시제(TDM1)을 제작하여 시험할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Ji-Hyuk Im, Seongho Cho, Youngbin Yoon and Insang Moon, "Comparative Study of Spray Characteristics of Gas-Centered and Liquid-Centered Swirl Coaxial Injectors," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 26, No. 6, pp.1196-1204, 2010.
2. Jaehyoung Jeon, Moongeun Hong, Yeoung-Min Han, and Soo Yong Lee, "Experimental Study on Spray Characteristics of Gas-Centered Swirl Coaxial Injectors," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 133, No. 12, 2011, 21303.
3. Jong Gyu Kim, Yeoung Min Han, Hwan Seok Choi, and Youngbin Yoon, "Study on Spray Patterns of Gas-Centered Swirl Coaxial (GCSC) Injectors in High Pressure Conditions," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 27, No. 1, pp.171-178, 2013.
4. 임지혁, 우성필, 전준수, 이광진, 유병일, 한영민, "9톤급 다단연소엔진 연소기 개념설계," 한국추진공학회 2016년도 추계학술대회, 2016
5. 우성필, 이광진, 이정호, 임지혁, 전준수, 황창환, 한영민, "다단연소사이클 엔진 시험을 위한 기술검증시제 설계," 한국추진공학회 2016년도 추계학술대회 논문집, 2016.
6. 이정호, 우성필, 전준수, 서대반, 김채형, 이광진, 유병일, 한영민, "다단연소방식 엔진의 터보펌프 및 유공압 라인 구성," 한국추진공학회 2016년도 추계학술대회, 2016.