다단연소엔진 기술검증시제 파워팩 시험 평가

전준수*† · 김성룡* · 김성혁* · 김승한* · 김채형* · 서대반* · 소윤석* · 우성필* · 이광진* · 이승재* · 이정호* · 임지혁* · 유병일* · 조남경* · 황창환* · 한영민*

The Power-pack combustion test and Evaluatin of Technology Demonstraion Model for Sataged Combustion Cycle Engine

Junsu Jeon*† · Seungryong Kim* · Sunghyuk Kim* · Seunghan Kim* · Chaehyoung Kim* · Daeban Seo* · Younseok So* · Seongphil Woo* · Kwangjin Lee* · Seungjae Yi* · Jungho Lee* · Jihyuk Im* · Byungil Yu* · Namkyung Cho* · Changhwan Hwang* · Yeoungmin Han*

ABSTRACT

The power-pack combustion test of technology demonstration model(TDM0) for 9 tonf-class staged combustion cycle engine development was conducted in the Upper-stage Engine Test Facility(UETF) of Naro Space Center. The power-pack model of TDM0 was composed of a pre-burner, a turbo-pump and propellant supply systems without a main combustor. In the power-pack combustion test, we confirmed the linked working condition and verified the main functional variation of the power-pack for the engine system test.

초 록

9톤급 다단연소 사이클 엔진 개발을 위한 기술검증시제(TDM0) 파워팩 연소시험이 나로우주센터 3단 엔진 시험설비에서 수행되었다. 기술검증시제 파워팩 모델은 주연소기를 제외한 예연소기와 터보펌프, 추진제 공급시스템으로 구성되어 있다. 파워팩 연소시험에서는 파워팩 구성품들간의 연계 작동성을 확인하였으며, 엔진 시스템 시험을 위한 파워팩의 주요 성능 변수들을 평가하였다.

Key Words: Staged Combustion Cycle Engine(다단연소 사이클 엔진), Technology Demonstration Model(기술검증시제), Pre-burner(예연소기), Turbo-pump(터보펌프)

1. 서 론

한국항공우주연구원은 한국형 발사체(KSLV-II)에 적용하기 위한 가스발생기 사이클인 개방형 사이클 엔진(Open cycle engine)을 개발 중에 있으며, 현재 엔진 테스트를 진행 중이다. 이와 병행하여 본 논문에서 다루고자하는 다단연소엔진 개발이 동시에 진행되고 있다. 다단연소엔진은

* 한국항공우주연구원 엔진시험평가팀
† 교신저자, E-mail: jsjeon@kari.re.kr

다단 연소 사이클 엔진(Staged combustion cycle engine) 혹은 폐쇄형 사이클 엔진(Closed cycle engine)이라고도 하며, 예연소기와 터보펌프, 연소기로 구성되어있다. 다단연소엔진은 일반적으로 개방형 사이클 엔진에 비해 추력 및 비추력이 높은 장점을 가지고 있는 것으로 알려져 있다[1].

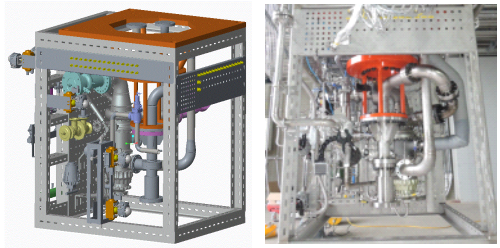
액체로켓엔진은 수많은 부품들로 구성되어 있으며, 각 부품들은 단품 시험을 거쳐 검증을 한다. 검증된 부품들이라도 엔진 시스템 차원에서 조합하고, 시험 하는 과정에서 많은 문제들이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 문제 발생을 최소화하기 위해 엔진 서브 시스템 차원에서의 작동성 검증 시험을 수행하는 것이 일반적이다[2]. 파워팩 시험은 이러한 엔진 서브 시스템 검증 시험 중 하나로, 연소기를 제외한 엔진 구성품의 작동성을 검증하고 엔진 시스템 시험 수행 가능성 확인 및 시험 조건을 설정하는데 주요한 단계라고 할 수 있다.

본 연구에서는 다단연소엔진 기술검증시제(TDM0)의 파워팩 시험을 준비 및 수행하고 파워팩 구성품 각각의 작동성과 구성품들의 연계 작동성을 확인하고, 그 결과를 분석하여 엔진 시스템 시험 적용 가능성을 평가하고자 한다.

2. 파워팩 시험 개요

2.1 다단연소엔진 파워팩

다단연소엔진 파워팩은 전술한바와같이 연소기를 제외한 예연소기와 터보펌프를 작동하는 시험으로 기술검증시제(TDM0)를 제작하여 시험을 수행하였다[3]. 파워팩 시험을 위한 기술검증시제(TDM0)의 모델링 및 제작품을 Fig. 1에 나타내었다. 파워팩 시험에는 연소기가 장착되지 않기 때문에 터보펌프를 지난 연료는 연소기 연료 입구 조건 모사용 오리피스를 거쳐 드레인 탱크로 보낼 수 있도록 설비 드레인 라인에 연결 시켰다. 터빈 출구의 고온/고압 산화제 라인에는 벤츄리를 장착하여 연소기 산화제 입구 조건을 모사하였고, 시험 설비의 후류 처리장치로 배출될 수 있도록 하였다.



(a) Modeling (b) Manufactured

Fig. 1 Technology Demonstration Model0(TDM0)

2.2 다단연소엔진 파워팩 시험 방법

Figure 2에 다단연소엔진 파워팩의 구성을 도시하였다. 파워팩 시험은 예연소기, 터보펌프, 공급계 시스템으로 구성되어 있다. 예연소기는 공급된 추진제를 TEA/B 혼합물로 점화시켜 고온/고압의 산화제 과잉가스를 발생시켜 터보펌프를 구동하는 역할을 한다. 터보펌프는 1단의 산화제 펌프와 2단의 연료 펌프를 가진다. 1단 펌프는 연소기로 공급되고, 2단 펌프는 예연소기로 공급되도록 설계되어있다. 파워팩 시험은 나로우주센터 3단 엔진 시험설비에서 수행되었다. 3단 엔진 시험설비는 한국형 발사체 상단 엔진 개발을 위한 시험 스탠드로 7톤급 가스발생기 사이클 엔진 시험을 수행한바 있다[4].

파워팩 시험 절차는 다음과 같다. 헬륨 가스를 이용하여 시동터빈을 초기에 구동시켜 터보펌프가 기동되고 터보펌프로부터 산화제 및 연료가 예연소기로 공급되고, 점화제에 의해 예연소기가 점화되어 고온/고압의 산화제 과잉 가스를 발생시킨다. 발생된 고온/고압의 산화제 과잉 가스는 터빈을 구동하고 연소기 산화제 모사용 벤츄리를 통과하여 대기중으로 배출된다. 고온/고압의 가스로 구동된 터빈에 의해 산화제와 연료는 가압되어 산화제는 지속적으로 예연소기로 공급되고 1단 펌프를 통과한 연료는 연소기 모사용 오리피스를 통하여 드레인 탱크로 배출되고 2단 펌프를 통과한 연료는 예연소기로 공급되어 예연소기를 지속적으로 연소시키게 된다.

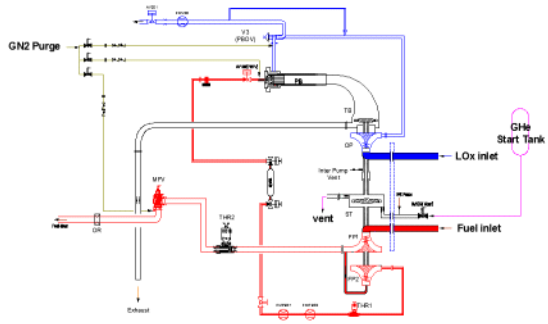


Fig. 2 Schematic of Power-pack (TDM0)

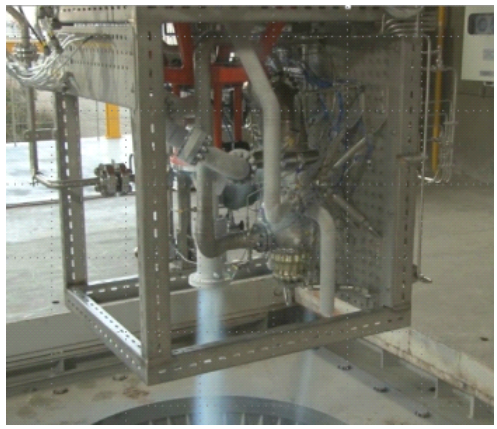


Fig. 3 Power-pack test of TDM0

3. 시험 결과

3.1 파워팩 구성품 작동성 확인

다단연소 엔진 기술검증시제(TDM0)의 10초 파워팩 시험을 수행하였다. Fig. 3은 파워팩 시험의 모습을 보여주고 있다. 고온/고압의 산화제 과잉 가스가 벤츄리를 지나 배출되는 모습을 확인 할 수 있다. Fig. 4는 산화제 및 연료의 터보펌프 입/출구 압력과 터빈 입/출구 압력을 보여준다. 추진제 공급 설비에서 공급된 입구 압력대비 산화제, 연료 펌프의 출구 압력이 상승한 것으로 확인되었다. 또한, 연료의 2단 펌프 압력이 1단 펌프 압력보다 높게 상승한 것을 확인할 수 있다. 2단 펌프는 예연소기로 연료를 공급하는 역할을 하며 예연소기는 200bar 이상의 고압 연소를 하기 때문에 높은 입구 압력이 요구되어 2단 펌프의 압력이 높게 공급된다. 또한, 예연소기에서 발생된 고온/고압의 산화제 과잉 가스는 터빈으로 공급되어 터보펌프의 회전력에 의해 승압되는 것을 Fig. 4에서 확인 할 수 있다. Fig. 5는 터빈 입/출구 온도를 나타낸다. 예연소기 출구 온도인 터빈 입구가 점화 시 많은 양의 액체 산소가 공급되어 낮아지고 점화 후 급격히 상승하는 것을 확인 할 수 있다. 터빈 출구는 터보펌프의 냉각에 의해 극저온 상태에서 점화 후 터빈을 구동시킨 고온의 산화제 과잉 가스가 유입되면서 상승하는 것을 확인 할 수 있다.

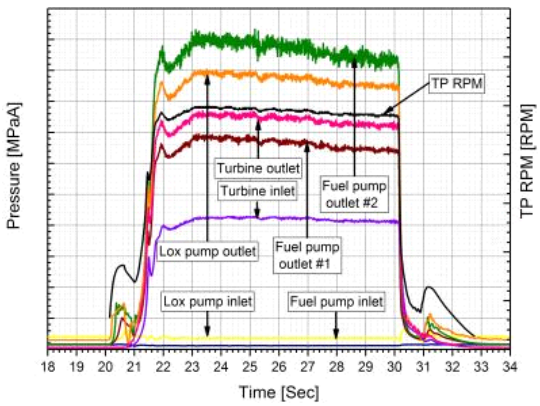


Fig. 4 Turbine in/outlet, TP pressures and TP RPM during power-pack test

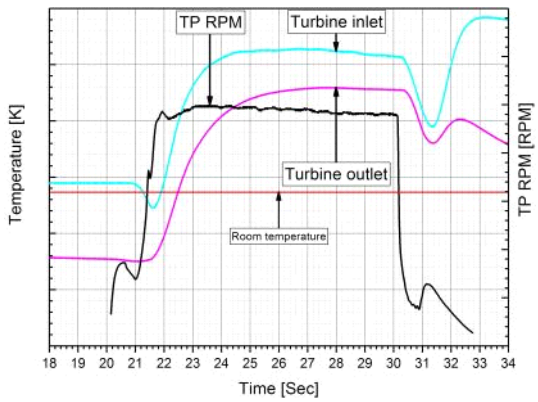


Fig. 5 Turbine in/outlet temperatures and TP RPM during power-pack test

3.2 파워팩 시동 특성 확인

다단연소 엔진 기술검증시제(TDM0)의 파워팩 시동 특성을 확인하였다. 파워팩의 시동은 초기 터빈을 구동시키는 고압 헬륨의 시동 터빈 입구 압력과 초기 구동상태에서 정상상태에 도달하기 위한 예연소기 점화 및 점화에 의한 압력 상승 그리고 압력 상승에 따른 터보펌프 회전수를 분석하여 확인한다. Fig. 6은 파워팩 10초 시험의 시동 터빈과 예연소기 압력 및 터보펌프 회전수를 나타내는 그래프이다. 터보펌프의 시동 터빈으로 고압의 헬륨이 공급되어 초기 터보펌프의 회전수가 상승하고 그 힘으로 예연소기에 산화제와 연료가 공급되어 점화제에 의해 점화되면서 예연소기가 작동하여 압력이 상승하는 모습을 볼 수 있다. 예연소기가 작동되면서 고온/고압의 산화제 과잉 가스가 터빈을 구동시키고 그로인해 터보펌프 회전수가 급격히 상승하여 파워팩이 시동되는 것을 확인할 수 있다.

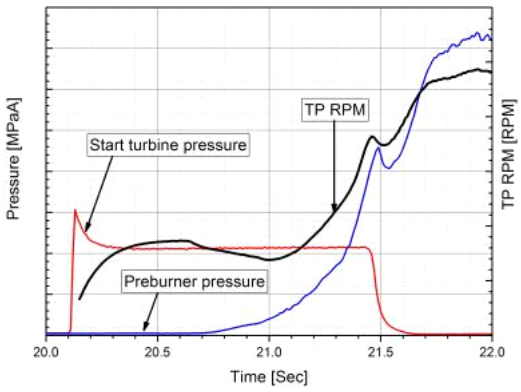


Fig. 6 Start turbine, preburner pressure and TP RPM during startup

4. 결 론

9톤급 다단연소 사이클 엔진 개발을 위한 기술검증시제(TDM0) 파워팩 연소시험이 나로우주센터 3단 엔진 시험설비에서 수행되었다. 파워팩 시험을 통하여 각각 구성품들의 작동성 및 연계 작동성을 확인하였다.

헬륨 스타트로 초기 터보 펌프의 구동성을 확인하였고, 초기 구동에 의한 추진제 및 점화제 공급에 따른 예연소기 점화가 정상적으로 이어져 예연소기에서 고온/고압의 산화제 과잉 가스 발생을 검증하였다. 또한, 예연소기에서 발생된 고온/고압의 산화제 과잉 가스가 터빈을 고출력으로 구동시키는 연계성도 검증하였다. 파워팩 구동은 시험 시간인 10초 동안 구성품들의 상호 연계 작용들이 이루어져 안정적으로 시험이 완료 되었다. 본 연구 결과를 바탕으로 연소기를 장착한 엔진 시스템 시험의 초기 구동 안정성을 검증하였고, 파워팩의 주요 성능을 확인하였다. 향후, 수차례의 파워팩 시험을 수행하여 파워팩의 성능을 향상 시키고 시동 시퀀스를 정립하여 엔진 시스템 연소 시험의 기본 데이터로 활용할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Cho, N.K., Yoo, B.I. and Han, Y.M., “Investigation of Upper Stage Engine for Launch Vehicle for Geostationary Satellite,” Proceeding of the 2016 Space Launch Vehicle Technique Symposium, 2016
2. S. A. Rahman and B. J. Herbert, “Large Liquid Rocket Testing-Strategies and Challenges,” JPC, AIAA-2005-3564, 2005
3. 우성필, 이광진, 이정호, 임지혁, 전준수, 황창환, 한영민, “다단연소사이클 엔진 시험을 위한 기술검증시제 설계,” 한국추진공학회 2016년도 추계학술대회 논문집, 2016.
4. 이광진, 김성룡, 김성혁, 김승한, 김채형, 서대반, 우성필, 유병일, 소윤석, 이승재, 이정호, 임지혁, 전준수, 조남경, 황창환, 한영민, “한국형발사체 7톤급 엔진의 개발 시험 현황,” 한국추진공학회 2016년도 추계학술대회 논문집, 2016.