

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.5.563

터보펌프-가스발생기 개회로 연계시험 연구[§]

김승한[†] · 남창호* · 김철웅* · 문윤완* · 설우석*

* 한국항공우주연구원 발사체엔진팀

Study on Turbopump-Gas Generator Open-Loop Coupled Test

Kim Seung-Han[†], Nam Chang-Ho*, Kim Cheulwoong*, Moon Yoonwan* and Seol Woo-Seok*

* Dept. of Rocket Engine, Korea Aerospace Research Institute

(Received December 28, 2009 ; Revised March 16, 2010 ; Accepted March 16, 2010)

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Turbopump(터보펌프), Gas Generator(가스발생기), Turbopump-Gas Generator Coupled Test(터보펌프-가스발생기 연계시험), Test Plant(연계시험기), Open-Loop Coupled Test(개회로 연계시험)

초록: 30톤급 액체산소/케로신 액체로켓엔진개발의 중간단계로 터보펌프-가스발생기 개회로 연계시험이 수행되었다. 터보펌프-가스발생기 개회로 연계시험은 엔진시스템 작동 모사 환경 시험으로서 가스발생기로의 추진체는 터보펌프 출구를 통해 공급되지만, 가스발생기 출구 가스는 터빈 구동에 이용되지 않고 외부로 배출된다. 터보펌프-가스발생기 개회로 연계시험 목적, 시험설비 구성, 제어시스템의 작동 조건, 시험 수행 절차, 연계시험기의 구성 형태, 개회로 연계시험 결과가 제시되었다. 터보펌프-가스발생기 개회로 연계시험 결과, 연계시험기의 예냉 절차와 시동 특성, 정격 작동성 및 안정적인 종료 특성이 액체로켓 엔진시스템 작동 환경 모사 조건에서 확인되었다.

Abstract: Turbopump-gas generator open-loop coupled tests are performed during the development of a 30tonf-LOx/Kerosene rocket engine. In the turbopump-gas generator open-loop tests, the propellants to gas generator are supplied from the outlets of turbopump, while the gas exhausted from the gas generator is vented out to the atmosphere, instead of being used to turbine driving. This paper presents the objectives, procedure, and results of the open-loop coupled test, in addition to a schematic representation of the test apparatus and the operating conditions for the test facility system and control system. The results of turbopump-gas generator open-loop coupled test confirm chill-down procedure, startup characteristics, nominal operability and smooth shutdown of the open-loop coupled Test Plant in test conditions simulating engine system operation environment.

- 기호설명 -

- ΔP : 차압 (Pa)
- ρ : 밀도 (kg/m^3)
- μ_F : 유효단면적 (m^2)
- H : 터보펌프 양정 (J/kg)
- Q : 터보펌프 체적유량 (m^3/sec)
- N : 터보펌프 회전수 (RPM)
- Pr : 터빈 전후단 압력비
- u/Cad : 터빈 속도비
- A1, A2, A3 : 펌프 유량-양정 환산식 상수

- B1, B2, B3 : 펌프 효율 환산식 상수
- C1, C2, C3 : 터빈 효율 환산식 상수
- Th1 : 가스발생기 산화제 측 유량제어밸브
- Th2 : 가스발생기 연료 측 유량제어밸브
- Th3 : 연소기 연료 측 유량제어밸브

1. 서론

한국항공우주연구원에서는 추력 30톤급 액체산소/케로신 엔진의 선행 개발 연구를 수행하였다.⁽¹⁾ 현재 30톤급 엔진의 주요 구성품인 연소기, 가스발생기, 터보펌프 및 공급계에 대한 단품 차원의 설계, 제작, 개발 시험을 완료하였으며, 개발된 엔진구성품 중 가스발생기, 터보펌프를 조합한 터보펌프-가

[§] 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4-6., 용평리조트) 발표논문임

[†] Corresponding Author, detokim@kari.re.kr

스발생기 연계시험(TP+GG 연계시험)을 수행하여 연소기를 포함한 엔진시스템 개발 시험 이전에 30톤급 엔진 구성품 연계시험기의 개회로 조합 성능 시험을 수행하였다. TP+GG 연계시험은 30톤급 액체산소/케로신 엔진의 첫 구성품 조합시험으로서 이를 통해 30톤급 엔진 구성품의 성능 검증 및 조합 성능 확인을 위한 시험을 단계적으로 진행하였다.⁽²⁻⁵⁾ 이를 위해 TP+GG 연계시험기에 대해 액체질소/케로신을 이용한 상온가스 구동 수류시험, 액체산소/케로신 추진제에 대한 상온가스 구동 수류시험, 터보펌프-가스발생기 시동 모사 시험을 단계적으로 수행하였으며, 이러한 시험을 통해 터보펌프의 실추진제 정격 작동성을 검증하고, 추진제 배관 및 산화제 터보펌프에 대한 극저온 예냉 절차를 확보하였으며, 터보펌프에서 추진제를 공급받아 가스발생기를 점화시키는 점화절차를 검증하였다.⁽³⁻⁵⁾ 본 논문에서는 30톤급 터보펌프-가스발생기 연계시험 중 개회로 연계시험 수행에 대한 결과를 제시하였다.

2. 시험방법

2.1 터보펌프-가스발생기 개회로 연계시험기

Figure 1에 TP+GG 연계시험기의 개략도를 제시하였다. 터보펌프-가스발생기 연계시험은 가스발생기와 터보펌프, 유량제어밸브 및 중단밸브를 포함하는 전체 공급계에 대한 시험이 수행되고,

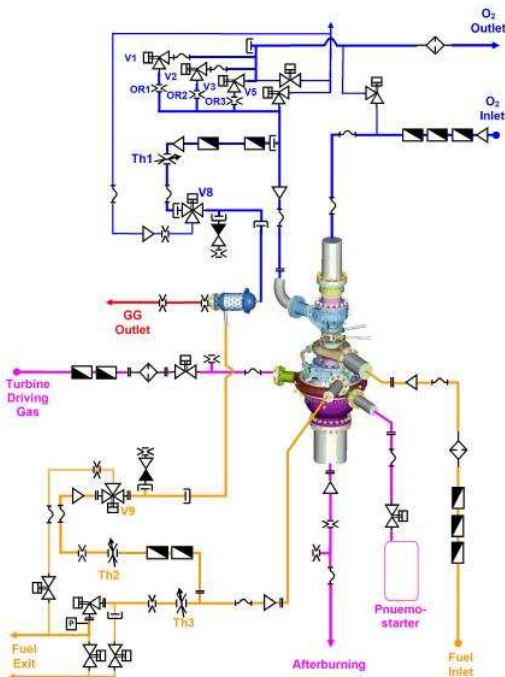


Fig. 1 Schematic of TP+GG open-loop test

엔진의 주요 구성품 중 연소기는 터보펌프 출구의 유량제어 밸브와 유량조절용 오리피스 조합을 이용하여 모사된다. 유량제어 밸브와 유량조절용 오리피스의 선택은 주어진 엔진 작동 조건에서의 실물형 연소기에 상당하는 추진제의 질량 유량과 연소기 압력을 모사할 수 있도록 결정된다. 이러한 시험에서, 연소기를 제외한 엔진 구성품의 엔진 작동 모사 환경에서의 작동성이 확인된다.⁽²⁾

TP+GG 개회로 연계시험에서 터보펌프 시동 및 정격 구동은 고압 상온 기체로 구동된다. 가스발생기 추진제가 터보펌프로부터 공급되지만 연소 가스는 외부로 배출되므로 터보펌프 구동력은 독립적으로 제어가 가능하다. 개회로 연계시험은 폐회로 연계시험에 비해 시험의 난이도가 상대적으로 낮은 상태에서 가스발생기와 터보펌프의 작동성을 독립적으로 검증할 수 있다는 장점이 있으며, 연계시험기 시스템의 시동/종료 절차의 확인 및 가스발생기의 연소 압력과 혼합비를 제어하기 위한 제어시스템의 작동성을 폐회로 연계시험에 앞서 안전하게 검증하기 위한 것이다.

2.2 시험 조건

터보펌프-가스발생기 개회로 연계시험 조건 계산은 다음의 순서로 수행된다. 먼저 터보펌프 목표 회전수와 가스발생기 목표 혼합비가 결정되면, 터보펌프 입/출구에서의 밀도값을 이용해서 요구되는 펌프 입구압력을 만족하기 위한 런탱크 압력을 결정한다.

이를 위해 터보펌프의 유량계수 및 양정계수 관계를 이용하고, 각 추진제 공급 배관 및 시험시제 부분의 유효 단면적과 목표 유량값으로부터 시험조건을 결정한다. 각 배관 구성 요소의 유효단면적은 예비 수류시험이나, 이전에 수행된 시험 결과에서 도출되는 값이다. 유효단면적이 변하는 유량제어밸브 Th1, Th2, Th3는 각각 가스발생기 산화제/연료 입구배관의 유량제어밸브와 연소기 연료 입구 배관의 유량제어밸브로서 이러한 유량제어밸브의 개도에 따른 유효단면적은 이전의 물시험 및 실추진제 수류시험을 통해 확인된 특성을 함수화하여 이를 바탕으로 시험 조건에 맞게 조정하게 된다. 추진제 출구의 배출 탱크의 압력은 시험 시 고정값을 유지하도록 결정되었으며, 터보펌프 입/출구에서의 추진제 밀도는 온도와 압력의 함수이다. 개회로 연계시험에서는 가스발생기 출구의 연소가스가 터빈 구동에 사용되지 않고 외부로 배출되므로 가스발생기의

연소압을 정격 조건으로 유지시켜 주기 위해 터빈 노즐과 유효 단면적이 같은 모사 오리피스를 가스발생기 출구에 장착하였다.

연계시험 조건 계산에 사용되는 기본식은 다음과 같다.

- 차압-유량 관계식

$$\Delta P = 1/(2 \times \rho) \times (m/\mu_r)^2$$

- 펌프 유량계수-양정계수 관계식

$$= A_1 \times (Q/N)^2 + A_2 \times (Q/N) + A_3$$

- 펌프 효율

$$= B_1 \times (Q/N)^3 + B_2 \times (Q/N)^2 + B_3 \times (Q/N) + B_4$$

- 터빈 효율

$$= (C_1 \times Pr^2 + C_2 \times Pr + C_3) \times (u/Cad)^2$$

$$+ (C_4 \times Pr^2 + C_5 \times Pr + C_6) \times (u/Cad)$$

터보펌프-가스발생기 개회로 연계시험의 시험조건의 결정 순서는 다음과 같다. 먼저 연계시험의 작동조건에 해당하는 산화제 터보펌프 토출 유량에 맞는 터보펌프 회전수를 결정하고, 터보펌프 회전수를 고정한 상태에서 주 연료 배관 측 유량제어밸브, Th3를 조정하여 연료 터보펌프 토출유량을 연계시험기의 작동조건에 맞게 조절하고 이후에, 터보펌프 회전수, 산화제 및 연료 터보펌프 유량이 고정된 상태에서 터빈 구동용 가스 공급 압력을 조정하여 산화제펌프와 연료펌프의 소요 동력의 합과 터빈부 발생 동력이 같게 되도록 조절하게 된다.

3. 시험결과

터보펌프-가스발생기 폐회로 연계시험 수행 전 터보펌프, 가스발생기의 작동성 검증, 제어시스템 검증 및 시동 및 점화 절차 수립/검증을 위해 개회로 연계시험을 수행하였다.

3.1 예냉 특성

개회로 연계시험 수행을 위해 터보펌프 시동전 액체산소 공급배관, 산화제 터보펌프 및 가스발생기 산화제 배관에 대해 충분한 예냉을 수행한 후 시험을 개시하였다(Fig. 2). 액체산소 런탱크 가압 상태에서 산화제 터보펌프 전단 배관과 후단 배관을 우선 냉각하고, 펌프 전후단 배관의 냉각이 완료된 시점에서 산화제 터보펌프의 냉각을 수행하였다. 산화제 주배관 및 가스발생기 배관에 대한 예냉은 연계시험기 시동 전까지 수행하였다. 시험 시작 직전에는 산화제펌프 출구 밸

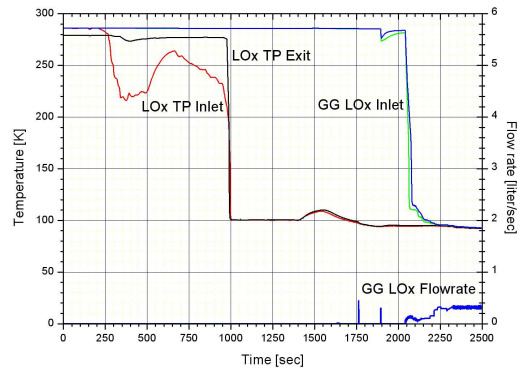


Fig. 2 Prechill characteristics of liquid oxygen line

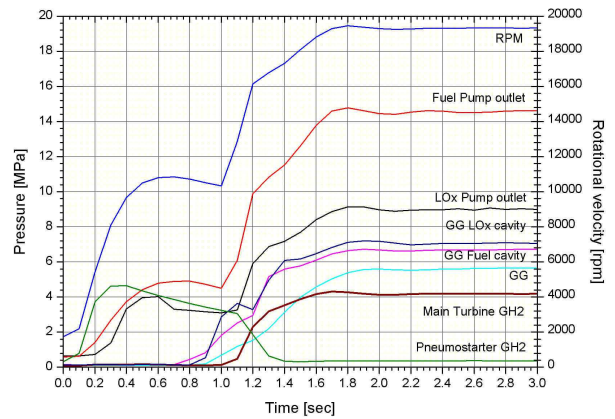


Fig. 3 Startup characteristics of Test Plant

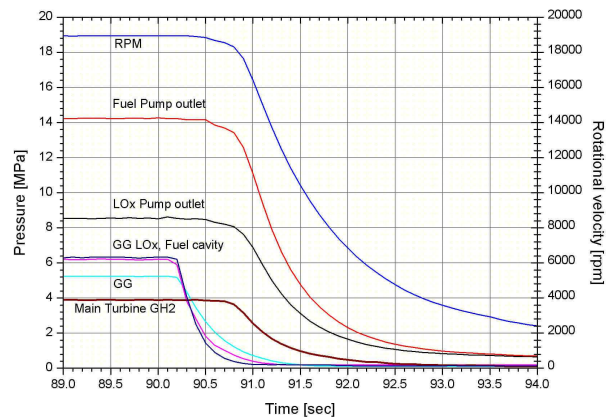


Fig. 4 Shut-down characteristics of Test Plant

브의 개폐를 통해 액체산소 공급배관 내의 가스를 제거하고 산화제 터보펌프 입출구에서의 액체산소 온도가 허용 범위 내에 있음을 확인한 상태에서 연계시험기의 시동을 수행하였다.

3.2 시동/종료 천이 구간 특성

연계시험기의 기동은 터보펌프의 시동기 측 터빈 매니폴드에 시동용 상온기체를 공급함으로써

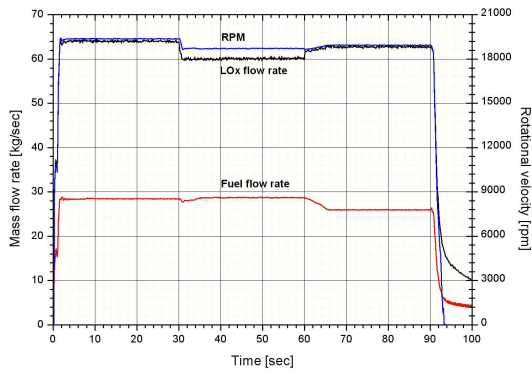


Fig. 5 Turbopump RPM and mass flow rate

시작되고, 터보펌프 회전수 상승 이후에 가스발생기 점화기를 점화하고 가스발생기 연료 중단밸브와 산화제 중단밸브를 개방하여 가스발생기를 점화하며, 가스발생기 점화 이후에 터보펌프의 가스발생기 측 터빈 매니폴드에 상온 고압 기체를 공급하여 연계시험기의 정격 조건 구동을 구현하는 것으로 하였다. Figure 3과 4에 연계시험기 시동/종료 천이 구간에서의 주요 작동 변수의 변화를 도시하였다.

시동기 기동에 의해 터보펌프 회전수가 상승하고 터보펌프 시동 후 가스발생기가 점화되고, 가스발생기 연소 압력 상승과 함께, 터빈 구동 가스 공급에 의해 터보펌프 회전수가 정격 작동조건으로 안정적으로 발달하였다. 종료 시에도 특이 사항 없이 안정적으로 작동하였다.

3.3 정상 상태 작동 특성

Figure 5, 6, 7에 시동 천이 구간 이후의 정상작동 구간에서의 주요 작동 변수를 도시하였다. 터보펌프 구동 기체 공급 압력 조절과 함께 유량제어밸브 및 오리피스 조합을 시험 중 변경하여 한 번의 연계시험에서 다수의 시험조건에 대해 시험을 수행할 수 있도록 하였으며, Figs. 5, 6, 7에는 한 번의 시험에서 수행한 3개의 연계시험기 작동 조건에 대한 터보펌프 회전수(RPM)와 추진제 질량 유량, 무차원 유량계수(Q/N), 펌프소요동력 결과를 제시하였다.

산화제 펌프 출구 유량계수 변화는 개폐밸브 조합으로 구현하였으며, 연료펌프 출구의 유량계수 변화는 주 연료 배관의 유량제어밸브의 개도 조절을 통해 구현하였다. 유량계수의 시험 조건에 해당하는 터보펌프 소요 동력을 산정하여 터빈 구동 기체 압력을 조정하였다.

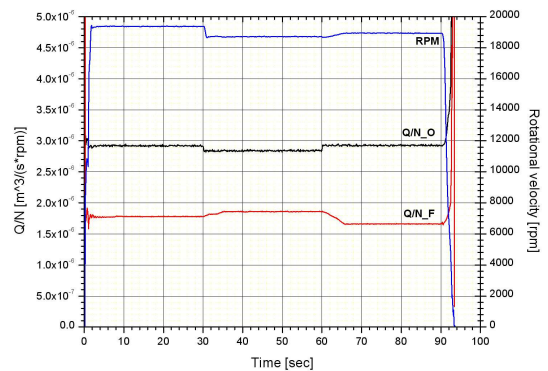


Fig. 6 TP RPM and reduced flow coefficient

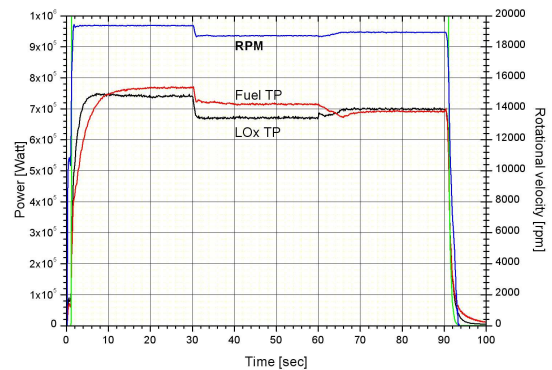


Fig. 7 Turbopump consumed power

3.4 가스발생기 유량/혼합비 제어 특성

터보펌프-가스발생기 연계시험에서는 가스발생기로 공급되는 추진제는 터보펌프 출구배관으로부터 분기되어 공급되며, 가스발생기 출구 연소가스는 터보펌프 터빈 매니폴드에 공급되지 않고 후연소 과정을 거쳐서 대기로 배출된다. 따라서, 개회로 연계시험에서는 가스발생기 유량과 혼합비의 변화가 터보펌프의 작동특성에 영향을 주지 않는 상태에서 가스발생기로의 추진제 공급제어시스템의 작동성과 연계시험기 출력 및 가스발생기 혼합비 제어 알고리즘의 적정성을 평가하기 위한 시험을 수행하였다. 터보펌프-가스발생기 개회로 연계시험에서는 가스발생기 혼합비는 가스발생기 연료 및 산화제 공급 유량을 유량계 신호를 이용한 가스발생기 산화제 유량제어밸브에 대한 실시간 피드백 제어를 이용하였으며, 가스발생기 연료 및 연소기 연료 유량은 폐회로 연계시험 작동 조건에 맞게 사전에 설정된 위치로 유량제어밸브 개도가 자동 조정되도록 하였다.

Figure 8에 개회로 연계시험기의 가스발생기 산화제/연료 유량제어밸브의 개도와 함께 가스발생기 질량 유량, 연소 압력을 도시하였다. Figure 8에서 가

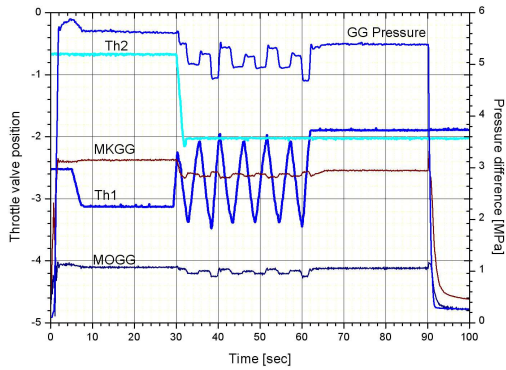


Fig. 8 Gas generator control parameters

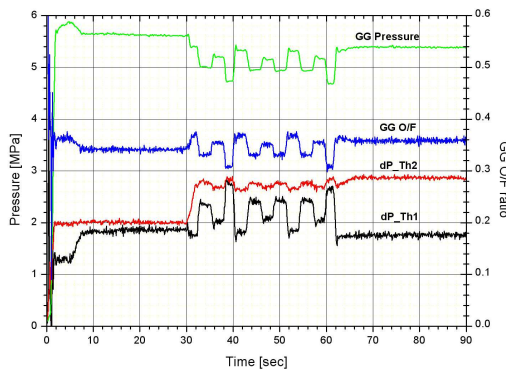


Fig. 9 Gas generator throttle ΔP and O/F ratio

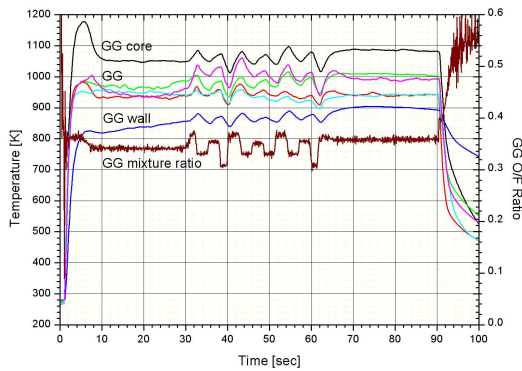


Fig.10 Gas generator O/F ratio and gas temperature

스발생기 산화제 유량제어밸브 개도와 가스발생기 연소압의 섭동이 관찰된다.

이러한 섭동은 터보펌프 측 작동 변수에서는 관찰되지 않은 것으로 가스발생기 혼합비 자동 제어를 위한 가스발생기 산화제 유량제어밸브(Th1)의 개도가 반복해서 변화하는데 기인한 것이다. Figure 9에서 가스발생기 산화제 유량제어밸브(Th1)와 전 후단의 차압 변화에 의해 가스발생기로 공급되는 산화제 공급 유량의 섭동이 발생하고 이로 인해 가스발생기의 추진제 혼합비 및 연소압의 섭동이 발생

함에 따른 결과이다. 여기서, 가스발생기 연료 유량 제어밸브(Th2) 전후단의 압력 차이가 섭동하는 현상은 가스발생기 연료 유량제어밸브의 개도 변화에 의한 것이 아니라 가스발생기 연소 압력의 섭동에 의한 결과이다. Figure 10에는 가스발생기 출구 가스 온도와 가스발생기 혼합비를 시간에 대해 도시하였다. 가스발생기로 공급되는 액체산소/케로신 혼합비 섭동에 의해 가스발생기 출구 가스 온도의 섭동이 유발됨을 확인할 수 있다.

실제 엔진시스템에서 가스발생기 혼합비가 이와 같이 섭동할 경우 터빈이 노출되는 열환경에 악 영향을 주어 터빈의 손상을 유발할 수 있지만, 가스발생기 출구와 터빈 입구가 분리되어 있는 개회로 연계시험의 특성상 가스발생기의 혼합비 섭동이 터보펌프의 작동 특성에 영향을 주지 않았으며, 혼합비 제어알고리즘 변경에 의해 이후 시험에서 가스발생기 혼합비가 연계시험기의 작동 조건 천이 구간을 포함하여 안정적으로 유지됨을 확인하였다.

4. 결론

30톤급 액체산소/케로신 액체로켓엔진 구성품을 이용한 TP+GG 개회로 연계시험을 수행하였다. 본 개회로 연계시험 수행을 통해 엔진의 주요 구성품인 터보펌프와 가스발생기의 작동성이 확인되었으며, TP+GG 폐회로 연계시험 수행에 필요한 예냉 절차, 시동/종료 절차 및 제어시스템에 대한 사전 검증이 수행되었다. 개회로 연계시험에서 나타난 시험설비 및 연계시험기 작동변수 측정 결과 분석을 통해 전체 TP+GG 연계시험 프로그램의 최종 단계인 폐회로 연계시험으로 진행할 수 있는 기술적인 근거가 확보되었다.

참고문헌

- (1) Kim Seung-Han, Han Young-Min, Seong-Hyeon Seo, Il-Yoon Moon, Kwang-Jin Lee, Jong-Kyu Kim, Ju-Young Song, In-Tae Kim, Woo-Seok Seol and Soo-Yong Lee, 2004, "Development of 1.5MW Full-scale Gas Generator for Liquid Rocket Engine," the Fifth symposium on Space Launch Vehicle, pp. 74-81.
- (2) Kim Seung-Han, Nam Chang-Ho, Kim Cheol-Woong and Seol Woo-Seok, 2006, "Design of

- Turbopump+Gas Generator Coupled Test,” Proceedings of the 2006 KSPE(Korean Society of Propulsion Engineers) Fall Conference, pp. 196~200.
- (3) Kim Seung-Han, Nam Chang-Ho, Kim Cheol-Woong, Moon Yoonwan and Seol Woo-Seok, 2008, “Turbopump+Gas Generator Cold Flow Test,” Proceeding of the 2008 KSAS Fall Conference, pp. 863~866.
- (4) Kim Seung-Han, Nam Chang-Ho, Kim Cheol-Woong, Moon Yoonwan and Seol Woo-Seok, 2008, “Turbopump+Gas Generator Startup Simulation Cold Flow Test,” Proceeding of the 2008 KSAS Fall Conference, pp. 859~862.
- (5) Kim Seung-Han, Nam Chang-Ho, Kim Cheol-Woong and Seol Woo-Seok, 2006, “Turbopump+Gas Generator Open-loop Coupled Test,” Proceedings of the 2008 KSPE(Korean Society of Propulsion Engineers) Fall Conference, pp. 125~128.