

터보펌프+가스발생기 개회로 연계시험

김승한* · 남창호* · 김철웅* · 문윤완* · 설우석*

Turbopump+Gas generator Open-loop coupled test

Seung-Han Kim* · Chang-Ho Nam* · Cheul Woong Kim* · Yoonwan Moon* · Woo Seok Seol*

ABSTRACT

As a interstage of the 30tonf level LOx/kerosene liquid rocket engine development, turbopump-gas generator open-loop coupled tests are performed. Test schematic and test results of open-loop coupled tests are presented. In engine system operation environment simulating combustion chamber by flow control orifice, chill-down procedure, startup characteristics, nominal operability of turbopump+gas generator open-loop coupled Test Plant are confirmed. The results of open-loop coupled test were used for the preparation on turbopump+gas generator closed-loop test.

초 록

30톤급 액체산소-케로신 액체로켓엔진 개발의 중간 단계로서 연소기를 제외한 터보펌프 등의 엔진 주요 구성품을 이용한 터보펌프+가스발생기 개회로 연계시험이 수행되었다. 터보펌프+가스발생기 개회로 연계시험의 시험기 구성 및 시험결과를 제시하였다. 연소기를 오리피스로 모사하는 상태에서의 터보펌프+가스발생기 개회로 연계시험기의 예냉, 시동기를 이용한 시동 및 가스발생기 점화, 터보펌프 정격 구동이 성공적으로 수행되었다. 개회로 연계시험 결과는 터보펌프+가스발생기 폐회로 연계 시험 수행을 위해 활용되었다.

Key Words: Turbopump(터보펌프, TP), Gas Generator(가스발생기, GG), TP+GG coupled test(터보펌프+가스발생기 연계시험), Test Plant(연계시험기)

1. 서 론

한국항공우주연구원에서는 추력 30톤급 액체 산소/케로신 엔진의 선행개발연구를 수행하였다 [1,2]. 현재 30톤급 엔진의 주요 구성품인 연소

기, 가스발생기, 터보펌프 및 공급계에 대한 단 품 차원의 설계, 제작, 개발시험을 완료한 상태이며, 개발된 엔진구성품 중 가스발생기, 터보펌프를 조합한 터보펌프+가스발생기 연계시험 (TP+GG 연계시험)을 수행하여 연소기를 포함한 엔진시스템 개발 시험 이전에 30톤급 엔진 구성 품 연계시험기의 개회로 조합 성능 시험을 수행 하였다. TP+GG 개회로 연계시험에서 가스발생

* 한국항공우주연구원 우주발사체사업단 엔진팀
연락처, E-mail: detokim@kari.re.kr

기로의 추진제 공급은 TP+GG 폐회로 연계시험과 같이 터보펌프로부터 공급받지만, 가스발생기 출구 연소가스는 터보펌프 터빈에 공급되지 않고 외부로 배출되는 것으로, 폐회로 연계시험 수행을 위한 사전 준비 단계의 시험이다. 본 논문에서는 30톤급 TP+GG 연계시험 중 개회로 연계시험 수행에 대한 결과를 제시하였다.

2. 터보펌프+가스발생기 연계시험기 및 시험방법

2.1 TP+GG 개회로 연계시험기

Fig. 1에 TP+GG 연계시험기의 개략도를 제시하였다. 터보펌프+가스발생기 연계시험은 가스발생기와 터보펌프, 유량조절밸브 및 중단밸브를 포함하는 전체 공급계에 대한 시험이 수행되고, 엔진의 주요 구성품 중 연소기는 터보펌프 출구의 유량제어 밸브와 오리피스 조합을 이용하여 모사된다. 유량제어 밸브의 선택은 주어진 엔진 작동모드에서의 실물형 연소기에 상응하는 추진제의 질량유량과 연소기 압력을 모사할 수 있도록 결정된다. 이러한 시험에서, 연소기를 제외한 엔진구성품의 엔진 작동 상태에서의 작동성이 확인된다[3].

TP+GG 개회로 연계시험에서 터보펌프 시동 및 정격 구동은 고압 상온 기체로 구동된다. 이 경우 가스발생기 추진제가 터보펌프로부터 공급되지만 연소 가스는 외부로 배출되므로 터보펌프 구동력은 독립적으로 제어가 가능하여 폐회로 연계시험에 비해 시험의 난이도가 상대적으로 낮은 상태에서의 가스발생기와 터보펌프의 작동성을 독립적으로 검증할 수 있다는 장점을 가진다.

TP+GG 연계시험은 30톤급 액체산소/케로신 엔진의 첫 구성품 조합시험으로 엔진구성품 성능검증 및 조합 성능 시험을 단계적으로 시험을 진행하였다. 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 시

험을 통해 터보펌프의 실추진제 정격 작동성을 검증하고, 추진제 배관 및 터보펌프에 대한 극저온 예냉 절차를 확보하였으며, 터보펌프에서 추진제를 공급받아 가스발생기를 점화시키는 점화 절차를 검증하였다[4,5].

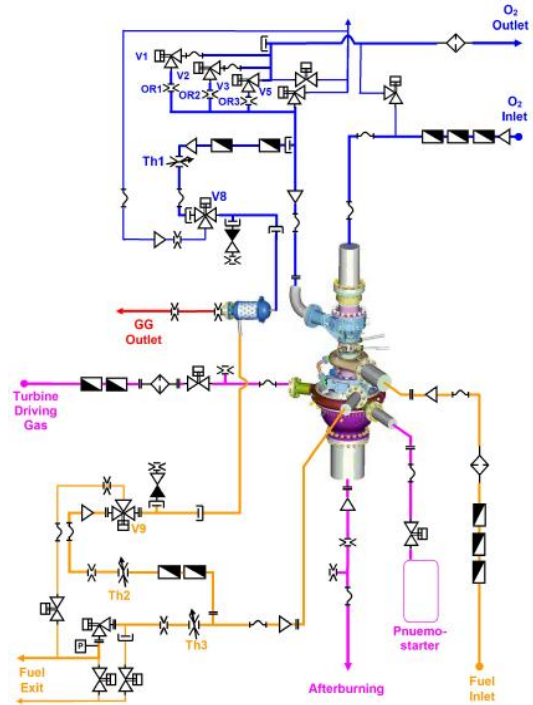


Fig. 1 터보펌프+가스발생기 개회로 연계시험기

3. 시험결과

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

3.1 시동 천이 구간 특성

TP+GG 개회로 연계시험 수행을 위해 터보펌프 시동 전 터보펌프 및 가스발생기 산화제 배관에 대해 충분한 예냉을 수행한 후 시험을 개시하였다. Fig. 2에 TP+GG 개회로 연계시험의 시동 및 종료 절차를 제시하였다. 개회로 연계시

협기의 기동은 터보펌프의 시동기 즉 터빈매니폴드에 시동용 상온기체를 공급함으로써 시작되고, 터보펌프 회전수 상승 이후에 가스발생기 점화기를 점화하고 가스발생기 연료 중단밸브와 산화제 중단밸브를 개방하여 가스발생기를 점화하며, 가스발생기 점화 이후에 터보펌프의 가스발생기 즉 터빈 매니폴드에 터보펌프 정격기동용의 상온 고압 기체를 공급하여 연계시험기의 정격 조건 구동을 구현하는 것으로 하였다.

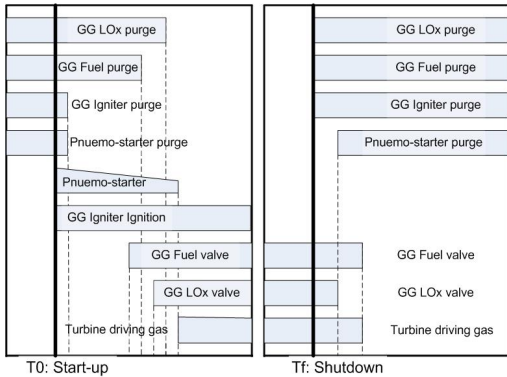


Fig. 2 TP+GG 개회로 연계시험 시동/종료 절차

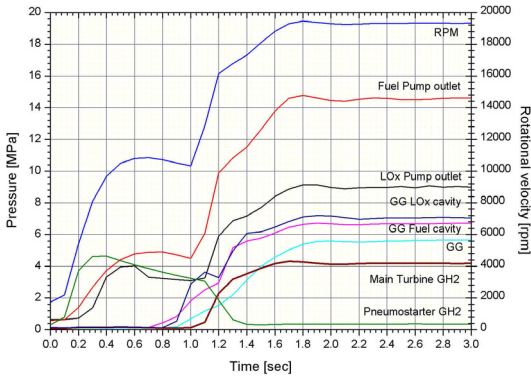


Fig. 3 TP+GG 개회로 시동 시 주요 변수

Fig. 3에 연계시험기 시동 천이 구간에서의 주요 작동 변수로서, 시동기 압력 및 가스발생기 즉 터빈 매니폴드로 공급되는 터빈 구동 기체 공급압, 터보펌프 회전수, 펌프 토출압, 가스발생기 추진제 공급압 및 가스발생기 연소압력의 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.

3.2 정상 상태 작동 특성

Fig. 4에 TP+GG 개회로 연계시험의 시동 천이 구간 이후의 정상작동 구간에서의 주요 작동 변수를 도시하였다. 터보펌프 구동 기체 공급압력 조절과 함께 유량조절밸브 및 오리피스 조합을 시험 중 변경하여 한 번의 연계시험에서 다수의 시험조건에 대해 시험을 수행할 수 있도록 하였으며, Fig. 4에는 3개의 연계시험기 작동 조건에 대한 시험 수행결과를 제시하였다. 시험 조건에 해당하는 터보펌프 소요 동력을 산정하여 터빈 구동 기체 압력 및 유량조절밸브 개도를 조정하였다. Fig. 4의 일부 구간에서 가스발생기 추진제 공급압력 및 연소압력의 섭동은 가스발생기 혼합비 피드백제어를 위한 가스발생기 액체산소 공급배관의 유량조절밸브(Th1)의 작동에 의한 것으로, 가스발생기 산화제 공급유량의 섭동에 의해 유발된 연소압 섭동에 기인한 것이며 제어알고리즘 변경에 의해 제거되었다.

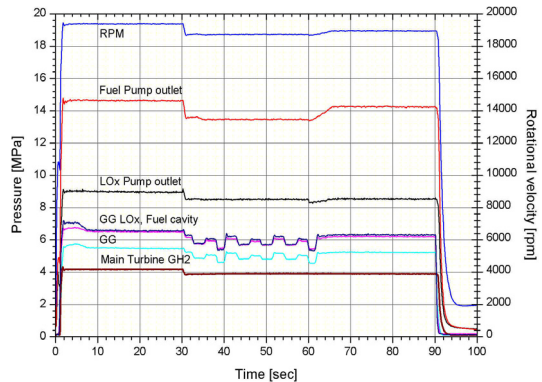


Fig. 4 TP 회전수/출구압, GG 공급압, 터빈입구압

표 1에는 TP+GG 개회로 연계시험 중 정격작동조건에서의 예측값과 시험결과값을 제시하였으며, 터보펌프회전수는 0.5%, 가스발생기 연소압은 0.2% 이내의 오차로 일치하였다.

Table 1 TP+GG 개회로 연계시험 정격 작동점

주요 작동 변수	단위	예측	결과
TP 회전수	[rpm]	19410	19,313
산화제펌프 입구압	[bar]	5.00	5.28
연료펌프 입구압	[bar]	4.30	4.25
산화제펌프 유량	[kg/s]	64.12	64.05
연료펌프 유량	[kg/s]	28.49	28.67
산화제펌프 토출압	[bar]	89.7	89.8
연료펌프 토출압	[bar]	144.7	146.3
가스발생기 유량	[kg/s]	4.18	4.23
가스발생기 연소압	[bar]	56.2	56.3

3.3 가스발생기 유량/혼합비 제어 특성

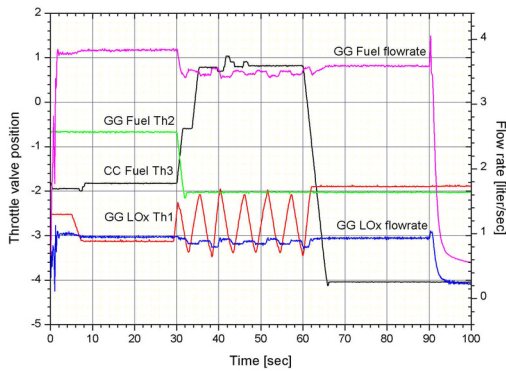


Fig. 5 유량조절밸브 개도 및 가스발생기 유량

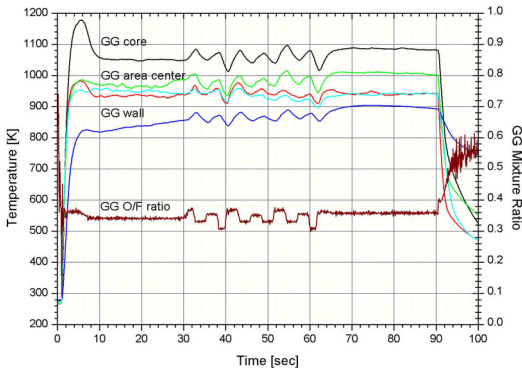


Fig. 6 가스발생기 혼합비 및 출구 가스 온도

TP+GG 개회로 연계시험에서는 가스발생기 혼합비는 가스발생기 공급 유량을 이용한 실시간 피드백제어를 이용하였으며, 가스발생기 연료 및 연소기 연료 유량은 폐회로 연계시험 작동 조건

에 맞게 사전에 설정된 위치로 유량조절밸브 개도가 자동 조정되도록 하였다.

Fig. 5에 연계시험기의 가스발생기 산화제/연료 유량조절밸브와 주연료 유량조절 밸브 개도와 함께 가스발생기 추진제 공급량을 시간에 대해 도시하였다. Fig. 6에는 가스발생기 출구 가스 온도와 가스발생기 혼합비를 시간에 대해 도시하였다. 가스발생기 혼합비 유지를 위해 가스발생기 산화제 측 유량조절밸브 개도에 대한 실시간 피드백제어의 일부 구간에서 유량조절밸브의 작동에 따른 혼합비 섭동이 발생하였으나, 이후 시험에서 혼합비 피드백 제어로직의 수정으로 해결하였으며 혼합비가 작동조건 천이구간을 포함하여 안정적으로 유지됨을 확인하였다.

4. 결 론

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.

참 고 문 헌

1. 조광래 등, "소형위성발사체 개발사업(V)", 한국항공우주연구원 보고서, 2007
2. 김승한 등, "액체로켓엔진용 실물형 1.5MW 급 가스발생기 개발", 제5회 우주발사체기술 심포지움, pp. 74-81, 2004
3. 김승한 등, "터보펌프+가스발생기 연계시험 설계", 한국추진공학회 2007년도 추계학술대회 논문집, pp. 196-200, 2006
4. 김승한 등, "터보펌프+가스발생기 연계시험기 수류시험", 한국항공우주공학회 2008년도 추계학술대회 논문집, 2008
5. 김승한 등, "터보펌프+가스발생기 연계시험기 시동모사 수류시험", 한국항공우주공학회 2008년도 추계학술대회 논문집, 2008