

터보펌프+가스발생기 폐회로 연계시험

김승한* · 남창호* · 김철웅* · 문윤완* · 설우석*

Turbopump+Gas generator Closed-loop coupled test

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

ABSTRACT

For the development of the 30tonf level LOx/kerosene liquid rocket engine, turbopump-gas generator closed-loop coupled tests are performed. To simulate engine operation conditions, combustion chamber was substituted by flow control orifices. In simulated engine system operation environment, chill-down procedure, startup characteristics, nominal operability of turbopump+gas generator coupled Test Plant are confirmed. Turbopump and gas generator are confirmed to operate well in simulated engine environment. The control system for regulating power and mixture ratio of Test Plant are also successfully confirmed.

초 록

30톤급 액체산소/케로신 추진제 액체로켓엔진 개발을 위해 연소기를 제외한 터보펌프, 가스발생기 등의 주요 엔진 구성품을 이용한 터보펌프+가스발생기 폐회로 연계시험을 수행하였다. 터보펌프+가스발생기 폐회로 연계시험에서는 엔진시스템 작동 조건을 구현하기 위해 연소기는 유량조절 오리피스로 모사하였다. 엔진시스템 모사조건에서 터보펌프+가스발생기 폐회로 연계시험기의 예냉, 시동 및 정격조건 작동이 성공적으로 수행되어 터보펌프와 가스발생기의 작동성을 검증하였다. 연계시험기의 출력 및 혼합비 제어를 위한 제어시스템도 성공적으로 검증되었다.

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

1. 서 론

가스발생기 구동 터보펌프 방식의 액체엔진시스템의 경우 엔진시스템 시험 이전에 연소기를

제외한 엔진 구성품의 조합시험을 통해 엔진시스템 시험 수행 가능성 및 구성품의 작동성의 사전 검증 시험이 일반적으로 수행된다[1]. 터보펌프+가스발생기 연계시험은 지금까지 수행한 30톤급 액체산소/케로신 엔진 구성품을 이용한 시스템 시험으로, 폐회로 연계시험은 가스발생기로 공급되는 추진제는 터보펌프 출구로부터 공

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

급받고 가스발생기 연소 가스는 터보펌프 터빈을 구동하는 엔진시스템과 동일한 형태의 시험기 구성이며, 터보펌프, 가스발생기의 작동성, 시동/구동 절차 및 각종 제어요소의 적합성을 모사 엔진작동조건에서 검증하는 시험이다[2,3].

본 논문에서는 30톤급 TP+GG 폐회로 연계시험 수행 결과를 제시하였다.

2. 터보펌프+가스발생기 연계시험기 및 시험방법

2.1. TP+GG 폐회로 연계시험기

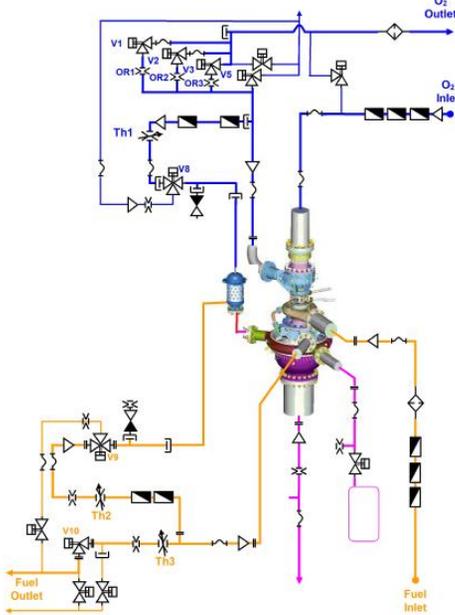


Fig. 1 TP+GG 폐회로연계시험기

Fig. 1에 TP+GG 폐회로 연계시험기의 개략도를 제시하였다. 터보펌프 및 가스발생기의 설계 특성은 개회로 연계시험기에 사용된 것과 동일한 시험시제를 이용하였다[4].

TP+GG 연계시험은 가스발생기와 터보펌프, 유량조절밸브 및 중단밸브를 포함하는 전체 공급계에 대한 시험이 수행되고, 엔진의 주요 구성품인 연소기는 제외되며 연소기의 존재에 대한 영향은 터보펌프 출구 측에 가변유량제어밸브와

오리피스/밸브 조합을 이용하여 모사된다. 유량 제어 밸브의 선택은 주어진 엔진작동조건에서 연소기에 공급되는 추진제의 질량유량과 공급압력을 모사할 수 있도록 하였다. 이러한 연계시험기 구성으로 TP+GG 폐회로 연계시험에서 연소기를 제외한 모든 엔진구성품의 작동성이 확인된다[5].

터보펌프 터빈으로 공급되는 가스발생기 가스의 혼합비 유지를 위해 가스발생기 연료 및 산화제 공급 배관에 유량제어밸브를 장착하여 유량을 실시간 제어하도록 구성하였다. 이러한 공급계 구성으로 한 번의 시험에서 여러 조건에서의 추력 및 혼합비 조절이 가능하고 연속적인 추력 및 혼합비 조절이 가능하여 연소기 모사조건에서의 엔진시스템의 응답성을 모사하였다.

2.2. 시험방법

TP+GG 개회로 연계시험에서는 가스발생기 추진제가 터보펌프로부터 공급되지만 연소 가스는 외부로 배출되므로 터보펌프 구동력은 독립적으로 제어가 가능하였지만, 폐회로 연계시험에서는 터보펌프 토출 유량 중 일부의 액체산소 및 케로신을 가스발생기로 공급하고, 연소 가스는 터보펌프를 구동하는 실제 엔진시스템의 추진제 공급방식과 동일한 방식으로 가스발생기와 터보펌프의 제어를 독립적으로 수행할 수 없어 시험의 난이도 및 위험성이 증가한다[4]. TP+GG 연계시험기에 대해 액체산소/케로신 추진제에 대한 상온가스 구동 수류시험, TP+GG 시동 모사 시험, TP+GG 개회로 연계시험을 순차적으로 수행하였다. 단계적인 시험 수행을 통해 터보펌프의 실추진제를 이용한 정격 작동점 및 탈설계점에서의 작동성을 검증하고, 추진제 배관 및 터보펌프에 대한 극저온 예냉 절차를 확보하였으며, 터보펌프로부터 추진제를 공급받아 가스발생기를 점화시키는 시동 및 점화 절차를 검증하였다.

3. 시험결과

시동기 기체 공급을 통해 터보펌프의 시동 후

가스발생기를 점화하고 가스발생기에 의해 터보펌프의 정격 기동이 이루어지는 폐회로 연계시험 결과를 제시하였다.

3.1 시동 특성

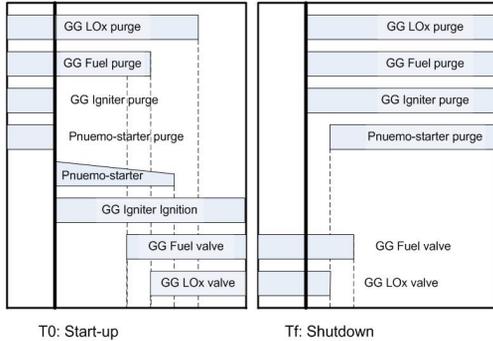


Fig. 2 TP+GG 폐회로 연계시험 시동/종료 절차

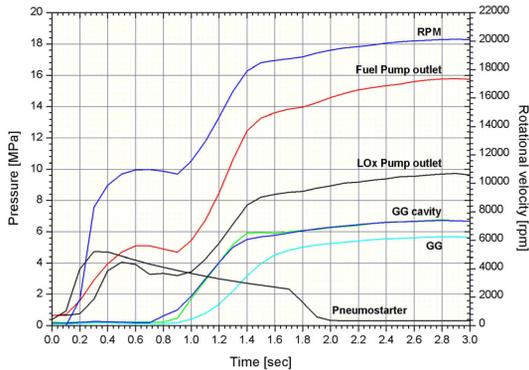


Fig. 3 TP+GG 폐회로 시동 시 주요 변수

Fig. 2에 TP+GG 폐회로 연계시험의 시동 및 종료 절차를 제시하였다. TP+GG 폐회로 연계시험에서의 터보펌프 기동은 터보펌프의 시동기 즉 터빈 매니폴드에 시동용 상온 기체를 공급함으로써 시작되고, 이후 터보펌프 회전수 상승에 따른 펌프 출구압 상승 시점에 가스발생기 점화기 점화 후 가스발생기 측 연료 중단밸브와 산화제 중단밸브를 순차적으로 개방하여 가스발생기가 점화되고, 여기서 생성된 연료과잉 (fuel-rich)의 연소가스가 터보펌프의 가스발생기 측 터빈 매니폴드에 공급되어 폐회로 연계시험기의 정격 조건 구동을 구현하는 것으로 하였다.

Fig. 3에는 폐회로 연계시험기 시동 시의 시험 결과를 제시하였다. 상온기체에 의한 터보펌프 시동 후 가스발생기가 점화되고, 가스발생기 연소 압력 상승에 의해 터보펌프 회전수가 정격 작동조건으로 안정적으로 발달함을 확인할 수 있다.

3.2 정상 상태 작동 특성

Fig. 4에 TP+GG 폐회로 연계시험의 시동 전 구간 이후의 정상작동 구간에서의 주요 작동 변수를 도시하였다. 가스발생기 유량조절밸브 개도 제어를 통한 터빈 구동력 조절 및 주연료 유량조절밸브 개도와 연소기 모사용 오리피스 조합을 시험 중 변경하여 한 번의 연계시험에서 다수의 시험조건에 대해 시험을 수행할 수 있도록 하였으며, 각 작동조건에 해당하는 터보펌프 소요 동력을 공급하기 위해 가스발생기 공급 유량 및 혼합비에 대한 실시간 피드백제어를 수행하였다.

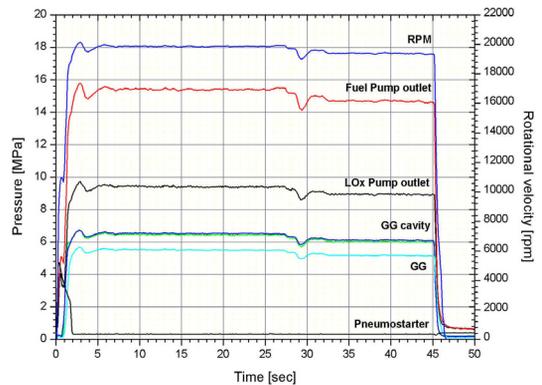


Fig. 4 TP 회전수/출구압, GG 공급/연소압 선도

표 1에 TP+GG 폐회로 연계시험에서의 예측 값과 실험 결과 값을 제시하였다. 피드백제어를 적용한 터보펌프회전수는 목표값의 0.1%의 범위로 일치하였으며, 가스발생기는 질량유량 0.5%, 연소압 4% 이내의 차이가 나타나는데, 이러한 차이는 가스발생기 연소가스 물성치 및 터빈 효율 산정 정확성에 기인하는 것으로 판단된다.

Table 1 TP+GG 폐회로 연계시험 정격 작동점

주요 작동 변수	단위	예측	결과
TP 회전수	[rpm]	19410	19390
산화제펌프 입구압	[bar]	5.00	5.45
연료펌프 입구압	[bar]	4.30	4.57
산화제펌프 유량	[kg/s]	63.97	63.4
연료펌프 유량	[kg/s]	28.47	28.6
산화제펌프 토출압	[bar]	89.3	89.5
연료펌프 토출압	[bar]	144.1	146.9
가스발생기 유량	[kg/s]	3.95	3.93
가스발생기 연소압	[bar]	55.1	53.0

3.3 가스발생기 유량/혼합비 제어 특성

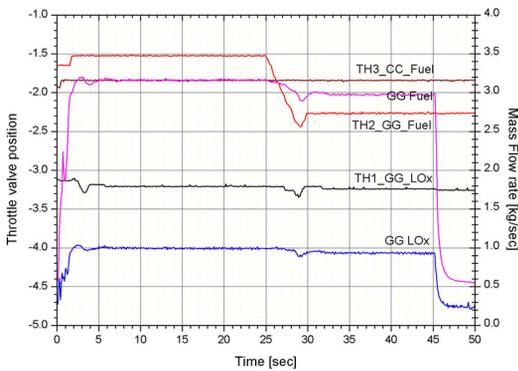


Fig. 5 유량조절밸브 개도 및 가스발생기 유량

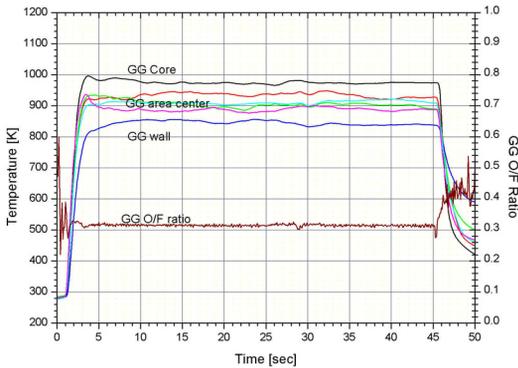


Fig. 6 가스발생기 혼합비 및 출구 가스 온도

Fig. 5에 연계시험기의 가스발생기 산화제 및 연료 측 유량조절밸브 개도와 주연료 측 유량조절 밸브 개도를 시간에 대해 도시하였다. 터보펌프 회전수는 가스발생기 연료 유량조절밸브개도

의 피드백제어를 통해 설정값으로 유지되며, 가스발생기 혼합비는 가스발생기 액체산소 유량조절밸브개도의 실시간 피드백 자동제어를 통해 유지된다. 주연료 측 유량조절밸브 개도는 사전 설정된 프로그램에 의해 순차적으로 변경되었다. Fig. 6에 가스발생기로 공급되는 추진제 혼합비 및 가스발생기 연소가스 온도를 시간에 대해 도시하였다. 가스발생기 혼합비 유지를 위해 가스발생기 유량조절밸브 개도에 대한 실시간 피드백제어를 통해 작동점 변경 전이구간을 포함한 전체 작동 구간에서 혼합비가 안정적으로 유지되고, 가스발생기 출구온도도 시간에 따른 변화 없이 안정적으로 유지됨을 확인하였다.

5. 결 론

30톤급 액체산소/케로신 액체로켓엔진 개발 시험의 일환으로 TP+GG 폐회로 연계시험을 수행하였다. 이를 통해 엔진의 주요 구성품인 터보펌프, 가스발생기의 엔진 작동조건에서의 작동성 검증과 함께 연소기를 제외한 엔진구성품 조합 시스템의 작동성을 검증하였다. 본 결과는 향후 액체엔진 개발시험에 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. S. A. Rahman 등, "Large Liquid Rocket Testing-Strategies and Challenges", JPC, AIAA-2005-3564, 2005
2. 조광래 등, "소형위성발사체 개발사업(V)", 한국항공우주연구원 보고서, 2007
3. 김승한 등, "액체로켓엔진용 실물형 1.5MW 급 가스발생기 개발", 제5회 우주발사체기술 심포지움, pp. 74-81, 2004
4. 김승한 등, "터보펌프+가스발생기 개회로 연계시험", 한국추진공학회 2008년도 추계학술대회 논문집, 2008
5. 김승한 등, "터보펌프+가스발생기 연계시험 설계", 한국추진공학회 2007년도 추계학술대회 논문집, pp. 196-200, 2006