

## 터보펌프+가스발생기 연계시험기 시동모사 수류시험

김승한\*, 남창호\*\*, 김철웅\*\*\*, 문윤완\*\*\*\*, 설우석\*\*\*\*\*

### Turbopump+Gas generator Startup Simulation Cold Flow Test

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

#### Abstract

This paper includes test results of 30tonf-level TP+GG startup simulation cold flow test using liquid oxygen and kerosene. Test objectives, coupled test plant configuration, test condition, test procedure of performed tests, and test results are presented.

#### 초 록

본 논문은 액체산소 및 케로신을 이용한 30톤급 터보펌프+가스발생기 연계시험의 시동 모사 수류시험 결과를 포함하고 있다. 시험 목적, 연계시험 시스템 구성, 시험 조건, 시험 절차 및 시험결과가 제시되었다.

키워드 : 액체로켓엔진 (liquid rocket engine), 터보펌프(turbopump, TP), 가스발생기(gas generator, GG), 터보펌프+가스발생기 연계시험(TP+GG coupled test), 연계시험기(test plant), 시동모사(startup simulation), 수류시험(cold flow test)

## 1. 서 론

한국항공우주연구원에서는 우주발사체용 액체 로켓엔진 개발에 필요한 선행기술 확보를 위해 선행개발 엔진으로서 액체산소와 케로신을 추진제로 사용하는 터보펌프 구동방식 30톤급 액체로켓엔진 시스템 및 터보펌프, 연소기, 가스발생기, 밸브류 및 공급계 등의 엔진 주요 구성품 개발을 진행하였다[1]. 현재 연소기, 터보펌프, 가스발생기, 공급계 등의 주요 엔진 구성품에 대한 개발

시험을 통해, 연소기, 가스발생기, 터보펌프 및 공급계 부품에 대한 단품 수준의 개발 연구는 성공적으로 완료되었다. 따라서, 엔진구성품 개발 단계에서의 연구 성과를 바탕으로 30톤급 터보펌프+가스발생기 연계시험이 엔진시스템 개발 시험의 일환으로 수행되었다[2].

본 논문에서는 실제 엔진시스템 시동 조건과 유사한 상태의 터보펌프+가스발생기 폐회로 연계 시험 수행을 위한 준비 단계에서 수행된, 가스발생기 점화 및 시동기 구동 절차를 확보하기 위한 실추진제, 비연소 시동 모사 시험 수행 결과를 제시하였다. 이러한 시동 모사 수류시험을

접수일(2008년12월17일), 수정일(1차 : 2009년 9월 7일, 2차 : 2009년 9월 20일, 게재 확정일 : 2009년 11월 1일)

\* 발사체엔진팀/detokim@kari.re.kr    \*\* 발사체엔진팀/nchang@kari.re.kr    \*\*\* 발사체엔진팀/kimcw@kari.re.kr  
\*\*\*\* 발사체엔진팀/ywmoon@kari.re.kr    \*\*\*\*\* 발사체엔진팀/wsseol@kari.re.kr

통해 안정적인 시동 절차를 확보하였다. 본 시동 모사 수류시험은 터보펌프+가스발생기 연계시험의 시동 절차 확인을 위한 시험으로 가스발생기를 모사오리피스로 모사하는 연계시험기 구성 상태에서 가스발생기 모사 배관으로의 액체산소 및 케로신을 터보펌프 출구배관을 통해 공급하는 상태에서 연계시험기의 시동 모사 수류시험이 이루어졌다. 터보펌프에서 펌프의 매질은 액체산소, 케로신, 터빈 초기 시동용 파이로시동기 모사 및 터빈 구동을 위한 가스발생기 모사는 상온 수소 가스 공급을 통해 수행되었다. 터보펌프+가스발생기 연계시험기 작동조건 중 정격 시동 및 정격 작동 조건에 대한 시험이 수행되었다.

## 2. 시험 장치 구성 및 시험 방법

### 2.1 연계시험 장치 구성

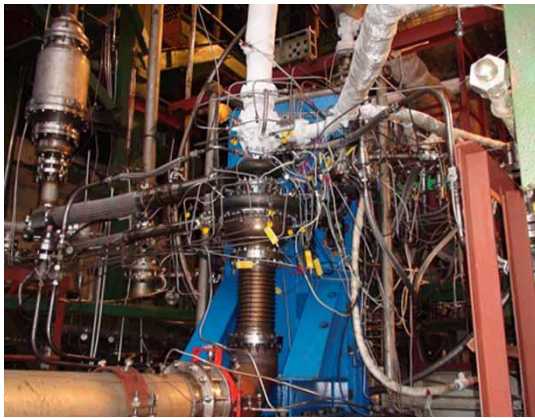


그림 1 터보펌프+가스발생기 연계시험기

그림 1, 2에 터보펌프+가스발생기 연계시험기 사진 및 개략도를 제시하였다. 연계시험기는 터보펌프와 가스발생기, 추진제 배관 밸브류 및 시동기 기체 공급 배관으로 구성되었다. 터보펌프는 산화제펌프와 산화제/연료 분리용 실, 연료펌프, 터빈부가 1축 상에 배치되어 있다. 터빈 노즐을 거친 구동기체는 1단 증동형 터빈을 거쳐 배출되게 되고 터빈 매니폴드는 빠른 시동특성을

구현하기 위해 가스발생기 측과 파이로 시동기 측으로 격막을 통해 구분되어 있다.

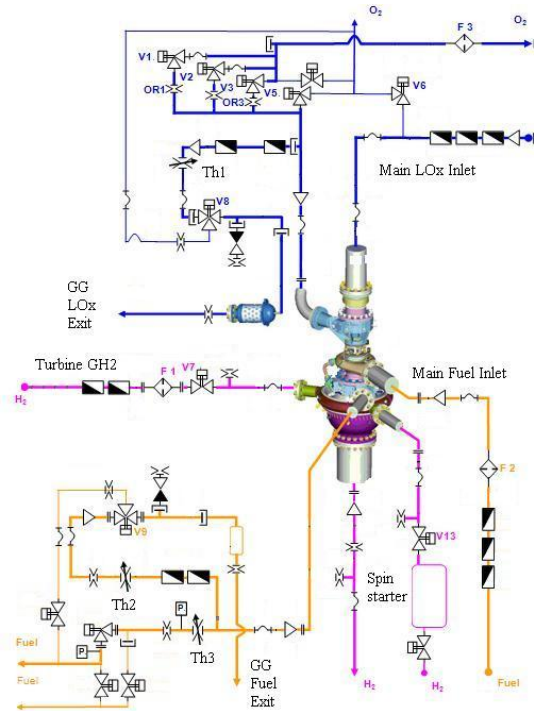


그림 2 시동 모사 연계시험기 구성

연계시험기의 시동모사 비연소 수류시험에서는 가스발생기의 점화는 이루어지지 않고 시동기 기체 공급이 시동기 측 터빈 매니폴드로 이루어진 후에, 터보펌프 회전수가 일정한 값에 도달한 이후인 적정 시점에 가스발생기 측 터빈 매니폴드로 터빈 정격 회전수 구동용의 기체 공급이 이루어지도록 구성되어 있다. 터보펌프+가스발생기 연계시험은 가스발생기와 터보펌프, 유량조절밸브 및 중단밸브를 포함하는 전체 공급계에 대한 시험이 수행되고, 엔진의 주요 구성품인 연소기는 제외되며 연소기의 존재에 대한 영향은 터보펌프 출구 측에 유량제어 밸브와 오리피스 조합을 이용하여 모사된다. 각 유량제어 밸브 개도 결정은 설정된 엔진작동모드에서의 실물형 연소기에 상당하는 추진제의 질량유량과 연소기 압력을 모사할 수 있도록 결정된다. 이러한 시험에서,

연소기를 제외한 모든 엔진구성품의 작동성이 확인된다. 이러한 공급계 구성으로 한 번의 시험에서 여러 조건에서의 추력 및 혼합비 조절이 가능하고 연속적인 추력 및 혼합비 조절이 가능하여 연소기 모사조건에서의 시스템의 응답성을 모사할 수 있다.

표 1. 터보펌프+가스발생기 연계시험 목적

시험	목적
시동 시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 주배관 선냉각 및 충전 절차 확보</li> <li>- 가스발생기 배관 충전 특성 확인</li> <li>- 가스발생기 점화 특성 확인</li> <li>- 초기 시동 절차 확보</li> <li>- 시동용 설비 검증</li> </ul>
단일 작동점 시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 선냉각 및 충전 process 확보</li> <li>- 초기 시동 및 작동 mode 확보</li> <li>- 종료 및 purge sequence 확보</li> <li>- 입구 조건 시험 (온도, 압력)</li> <li>- 연계시험기 정격 작동성 확인</li> <li>- 가스발생기-터빈직합성 검증</li> </ul>
추력 탈설계	- 터보펌프 탈설계점 성능 확인
혼합비 탈설계	- 연료/산화제펌프 조합 성능확인
모드제어	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 시스템 안정성(수렴/발산, 진동)</li> <li>- 동특성확인 (제어 응답 속도)</li> <li>- 제어시스템 설계 기술 검증</li> </ul>

표 1에 터보펌프+가스발생기 연계시험의 목적들을 각 시험 조건에 대해 나타내었다. 터보펌프+가스발생기 연계시험 수행 시에 엔진시스템 설계 운용 범위에서의 터보펌프 성능 시험 데이터 확보, 터보펌프+가스발생기+공급계+시동기로 구성된 파워팩의 연소기 모사조건에서의 시동조건 확보 및 최적화, 터보펌프+가스발생기+공급계+시동기로 구성된 초기 엔진시스템의 작동 특성 검증, 엔진 운용 범위에서의 터보펌프, 가스발생기 등의 엔진 구성품의 성능 검증, 엔진 운용 범위에서의 추력제어밸브 및 가스발생기 혼합비 제어밸브, 주연료 유량조절밸브를 포함한 연소기 모사 엔진 시스템의 제어 방안 확보 및 검증 등을 수행할 수 있다[4].

터보펌프+가스발생기 연계시험기의 시동 모사 시험에서는 연소기는 모사 오리피스로 대체되었

고 가스발생기 연료 측은 차압 모사 오리피스와 추진제 매니폴드 공간을 고려한 배관 구성으로 대체하였으며, 가스발생기 산화제 측은 가스발생기를 연결한 상태로 시험을 수행하였다. 이러한 시험기 배관 구성은 시동 초기 가스발생기 연소압이 형성되지 않은 상태에서의 가스발생기 배관에서의 추진제 충전 특성을 확인하기 위한 것이다.

## 2.2 시험 조건

터보펌프+가스발생기 연계시험의 실추진제 비연소 시동 모사 시험 조건은 연소기 모사를 포함한 엔진시스템의 정격 작동영역에 대한 실추진제 수류시험결과 및 엔진시스템 해석을 통해 산정되었다. 엔진시스템 해석에서는 산화제 및 연료 터보펌프의 수력학적 성능 특성과 터빈의 공력특성, 터빈 시동가스 물성치를 고려하여 시동 모사 시험 조건이 결정되었으며, 이러한 시동 조건을 구현하기 위해 시동기용 기체 공급압력 및 유량조절용 오리피스 직경, 시동기 체적이 결정되었다. 아래에 터빈 구동용 기체 공급 유량( $\dot{m}$ ) 및 터빈 단열일( $L_t$ ) 계산식을 제시하였다[5].

$$\dot{m} = \mu_{tn} \cdot A_{tn} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}} \cdot \frac{P \cdot 10^6}{\sqrt{R \cdot T}}$$

$$L_t = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T \cdot \left( 1 - \frac{1}{\pi_t^{\frac{k-1}{k}}} \right)$$

여기서,  $\mu_{tn}$ 와  $A_{tn}$ 는 각각 터빈 노즐 유량계수와 단면적,  $\pi_t$ 는 터빈 입출구 압력비이다.

## 2.3 시험 절차

시험 절차는 표 2에 제시된 바와 같이 액체산소 공급/배출 배관 및 액체산소 터보펌프, 가스발생기 액체산소 배관에 대한 충분한 냉각이 이루어지고, 케로신 배관에 대한 기포 제거가 완료된 후 시험을 수행하였다. 본 시험은 터보펌프+

가스발생기 연계시험기의 연계시험 이전에 연계 시험기의 시동 절차를 확인하기 위한 시동 모사 수류시험이다. 본 시험에서는 파이로시동기 모사용 기체수소에 의한 터보펌프 기동 이후에 터보펌프로부터 공급받은 추진제로 가스발생기 모사 추진제 매니폴드에 액체산소와 케로신이 충전되는 시간을 확인하는 것이 첫 번째 시험 목적이 고, 가스발생기 모사 추진제 매니폴드로의 추진제 충전 시간 확인 후에는 연계시험기의 정격 작동조건에서의 연계시험기 수류시험을 수행하기 위해 가스발생기 측 터빈 매니폴드에 기체수소를 공급하여 터보펌프의 정격작동조건 회전수를 유지하도록 하는 방식으로 시험이 수행되었다. 연계시험기 시동 후 2초 이내에 가스발생기 모사 배관의 추진제 충전이 완료되고 이후 가스발생기 모사 배관으로의 추진제 공급이 중단되고, 가스발생기로 공급되던 추진제는 배출 배관 전환되어 공급되어 23초간 정격조건에 대한 연계시험기 구동이 이루어져서 총 25초 동안 시험이 수행되었다. 가스발생기 산화제 및 가스발생기 연료 측, 주연료 배관에 장착된 유량조절밸브의 개도는 연계시험기의 각 작동조건에 부합되도록 자동으로 제어되어 시험이 수행되었으며, 시험 시작 후 5초부터 시험 종료 시까지 가스발생기 추진제 혼합비는 가스발생기 산화제 측 유량조절밸브의 개도를 이용하여 피드백제어를 통해 일정하게 유지되도록 시험조건을 설정하였다.

표 2 연계시험기 시동모사시험 절차

시각 [s]	명령
-	LOx 배관 및 산화제펌프 예냉
0.0	터빈 시동 기체 공급, GG 배관 퍼지
0.5	GG 연료 중단밸브 개방
0.8	GG 산화제 중단밸브 개방
1.0	터빈 시동 기체 공급밸브 닫음 터빈 구동 기체 공급밸브 개방
2.0	GG 연료/산화제 bypass 밸브 개방
5.0	가스발생기 혼합비 피드백 제어 시작
25.0	시험 종료

### 3. 시험결과

터보펌프+가스발생기 시동모사 시험에서는 연소기와 가스발생기는 오리피스로 모사되고, 터보펌프의 시동은 파이로 시동기 측 터빈매니폴드에 기체수소를 공급하는 것으로 이루어졌다.

가스발생기의 연소가 이루어지지 않고, 가스발생기 연소가스가 터빈 매니폴드로 공급되지 않는 시동 모사 수류시험의 특성상 가스발생기의 연소가스에 의한 2차 회전수 상승의 영향을 정확히 모사하는 것은 가스발생기 압력발달특성을 동일하게 모사하는 것이 어려우나, 파이로 시동기 모사용 기체 수소 공급시간과 가스발생기 모사용 기체 수소 공급 시간을 조절하는 것으로 수행하였다.

#### 3.1 터보펌프 기동 특성

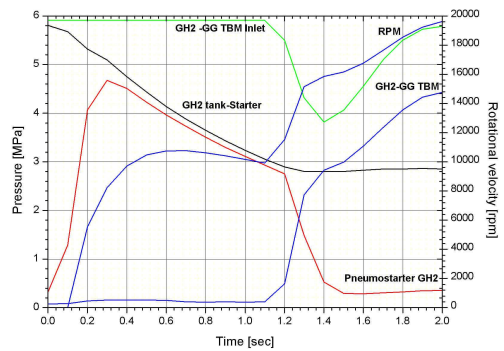


그림 3 터빈 시동/구동 기체 공급, 회전수

그림 3에 터빈 매니폴드로 유입되는 터빈 구동 기체 공급압 및 터보펌프 회전수의 시간선도를 시동기 가스 공급 후 2초에 대해 도시하였다. 시동기 가스는 시동기 탱크에 충전 후, 시험 시작과 동시에 중단밸브 개방에 의해 터빈 시동기 측 매니폴드로 공급 되고, 시동기 탱크의 초기 가스 충전 압력은 시동 시 터보펌프 목표 회전수를 고려한 사전 계산에 의해 결정되었다. 연계시험기의 시동모사 시험은 가스발생기 점화 및 가

스발생기 연소가스에 의한 터빈 구동이 없는 상태에서 수행되었으므로 실제 폐회로 연계시험에서 가스발생기 연소가스에 의한 터빈 구동을 모사하기 위해 가스발생기 측 터빈 매니폴드로 터빈 정격 구동용 기체 공급이 이루어졌다.

그림 3에서 터빈 시동 기체에 의해 터보펌프 회전수는 0.7초에 10,780RPM까지 증가 후 시동기 탱크압 감소에 의해 1.2초경에 9,800RPM까지 감소하였다가, 가스발생기 측 터빈 매니폴드로의 가스발생기 연소가스 모사 정격 구동 가스 공급에 의해 터보펌프 정격 회전수까지 안정적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 시동기 탱크압 산정 및 터보펌프 정격회전수 구동을 위한 가스발생기 측 터빈 매니폴드 구동압 공급이 적절함을 확인하였다.

### 3.2 가스발생기 배관 충전 특성

그림 4에 터보펌프+가스발생기 연계시험기의 시동 모사 시험 시의 주요 시동 관련 변수들을 도시하였다. 연계시험기 시동 시 터보펌프 회전수 증가에 따라 터보펌프 산화제/연료 토출압이 증가하고 이에 따라 가스발생기 산화제/연료 측 압력 발달 거동이 안정적으로 이루어졌음을 볼 수 있다. 시동 시의 연료 터보펌프 토출압 섭동은 터보펌프 기동에 의한 터보펌프 입구 배관에서의 압력 섭동에 기인한 결과로 볼 수 있으며, 산화제 터보펌프 출구압력의 시동 초기 급격한 상승은 압력 측정 배관 내부에서의 액체산소의 급격한 기화에 기인한 것으로 판단된다. 그림 4에서 가스발생기 산화제 공급배관 압력은 측정배관 내부의 액체산소의 기화에 의한 급격한 상승을 보여주고 있으며, 동일한 경향이 가스발생기 산화제 매니폴드에서도 관찰된다. 정압측정결과에서 추산한 가스발생기 연료/산화제 배관으로의 추진제 충전 시점은 각각 0.61초, 0.86초이다.

그림 5에 시동/구동 시에 가스발생기로 공급되는 추진제 유량 공급 특성을 도시하였다. 그림 5에 나타난 가스발생기 공급 유량 측정 결과에 의한 가스발생기 추진제 매니폴드로의 추진제 충전 시점은 유량 신호의 상승을 기준으로 판단할

수 있다. 표 2의 연계시험기 시동 모사 시험 절차에서 중단밸브 개방 명령 이전까지는 중단밸브를 통한 바이패스배관으로 추진제가 배출되다가 가스발생기 연료/산화제 중단밸브 개방명령이 각각 0.5초, 0.8초에 내려져서 가스발생기 연료 모사 매니폴드 및 산화제 매니폴드로의 추진제 공급은 각각 0.53초, 0.83초에 시작되는 것으로 확인된다.

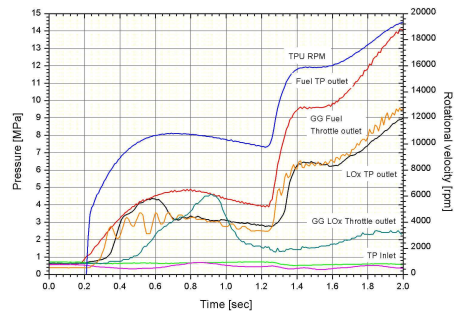


그림 4 연계시험기 주요 시동 변수

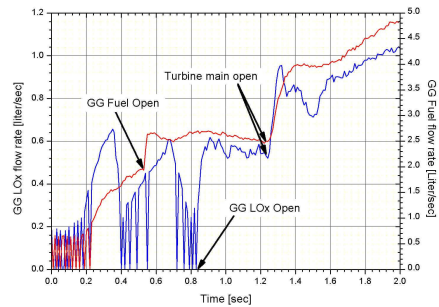


그림 5 가스발생기 배관 공급 유량

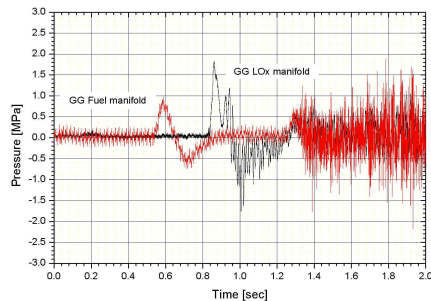


그림 6 가스발생기 충전 시 동압섭동

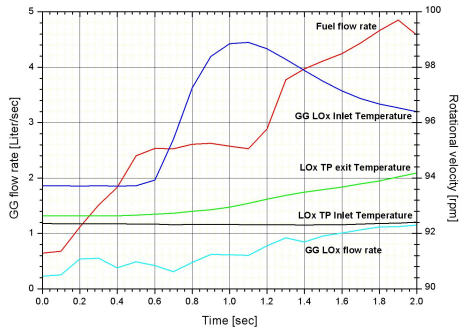


그림 7 가스발생기 추진제 유량, 온도

그림 6에 연계시험기의 가스발생기 산화제 매니폴드 및 연료 매니폴드 모사 배관에서 측정된 고주파 압력섭동 측정값을 도시하였다. 동압 섭동의 시작 신호로 판단할 때 가스발생기 연료 모사 매니폴드로의 추진제 충전은 0.54초, 가스발생기 액체산소 매니폴드로의 액체산소 충전은 0.83초부터 시작된다. 가스발생기 산화제/연료 배관에서의 유량측정결과에서 구한 추진제 충전 시간과 동일한 것으로 유량계 및 고주파 압력섭동 측정결과를 이용한 가스발생기 배관 추진제 충전시점 결정이 적절함을 알 수 있다. 반면에, 정압 측정 결과를 통한 가스발생기로의 추진제 충전시점 결정은 정압측정 배관에서의 지연효과에 의해 정확하지 않은 것으로 확인되었다.

그림 7에 시동 모사 시험 시의 가스발생기 공급 추진제 체적유량, 액체산소 공급 온도 등을 도시하였다. 시험 전 94K 이하로 유지되는 가스발생기 전단 액체산소 온도는 초기에 99K까지 상승했다가 감소하는 경향이 관찰되는데 이러한 현상은 펌프 기동에 따라 배관 내의 액체산소의 기화에 의한 온도 상승에 기인한 것이다.

### 3.3 추진제 공급/혼합비 제어 특성

가스발생기 모사 배관으로의 시동 충전 특성 확인 후, 가스발생기로 연결되는 모사배관으로 추진제를 공급하는 3-way 밸브인 추진제 중단밸브의 방향을 전환하여, 배출 배관에 설치된 가스

발생기 연소압 및 분사기 차압 모사 오리피스를 통하여 배출되도록 하여 정격 작동 시의 가스발생기 추진제 공급 특성을 살펴보았다.

그림 8에는 스톱 밸브 3개의 개도와 가스발생기 모사배관으로 공급되는 유량을 도시하였다. 시험 시작 2초 이후의 유량은 가스발생기 정격 연소압 발달 이후의 가스발생기 측 추진제 공급 유량을 모사한 것이다. 시험 시작 후 2초까지는 가스발생기 측 추진제 유량이 지속적으로 증가하다가, 2초 후 출구 오리피스 직경 감소로 유량이 급격히 감소하는 것을 가스발생기 산화제 및 연료 측 배관에서 공통적으로 확인할 수 있다. 가스발생기 산화제 유량조절밸브의 개도는 지속적으로 변동하고 있으며, 이는 가스발생기 혼합비 피드백 제어시스템의 작동에 의한 것이다.

그림 9에는 가스발생기로 공급되는 추진제 질량유량과 혼합비를 도시하였다. 목표 혼합비의 5% 범위 이내로 유지됨을 확인할 수 있다.

그림 10에는 유량조절밸브의 차압을 도시하였다. 본 시험은 가스발생기 연소가 없는 수류시험이므로 터보펌프 회전수에 대한 피드백제어는 가스발생기 연료 측 추력제어밸브가 아닌 터보펌프 구동용 기체수소 공급압력을 이용하여 수행되었으며, 가스발생기 혼합비에 대한 피드백제어는 가스발생기 산화제 측 유량조절밸브를 이용하여 수행되었다. 가스발생기 산화제 측 유량조절밸브의 작동으로 밸브 전후단 차압 변화를 관찰할 수 있다.

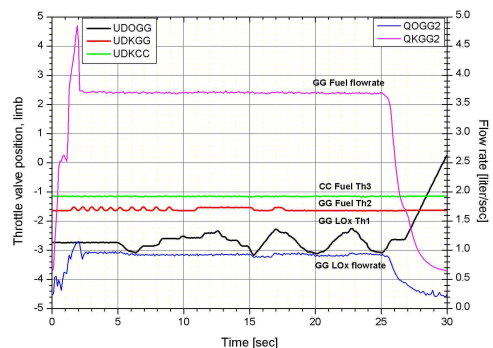


그림 8 유량조절밸브개도 및 가스발생기유량

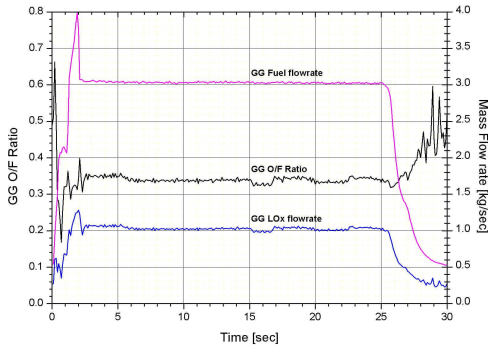


그림 9 가스발생기 질량유량 및 혼합비

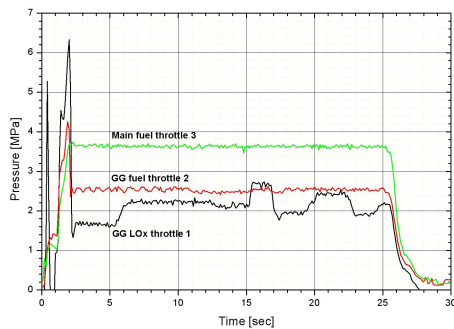


그림 10 유량조절밸브 전후단 차압

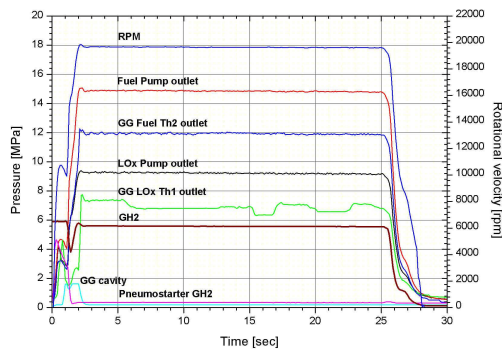


그림 11 연계시험기 주요 정격 작동변수

그림 11에는 정격 작동 구간에서의 터보펌프 출구 측으로부터 가스발생기 모사 배관에 이르는 공급 배관 내의 압력과 터보펌프 회전수를 시간에 대해 나타내었다. 연계시험기의 주요 작동변

수들은 안정된 경향을 보여주고 있으며, 가스발생기 산화제 유량조절밸브 출구 압력은 유량조절밸브의 가스발생기 혼합비 폐회로 되먹임 제어시스템의 작동으로 변동하는 결과가 관찰된다.

## 4. 결 론

액체로켓엔진 개발 시험의 중간 단계로서 연소기를 제외한 터보펌프 등의 엔진 주요 구성품을 이용한 터보펌프+가스발생기 연계시험기를 이용해서 실추진제 비연소 시동 모사 시험 결과를 제시하였다. 터보펌프+가스발생기 연계시험기에 대한 실추진제 비연소 시동 모사 시험을 통해 연소기 모사 조건에서 터보펌프 구동 시 시동기 구동 이후에 안정적으로 가스발생기를 점화시키기 위한 절차를 실험적으로 구하였으며, 터보펌프+가스발생기 연계시험 수행을 위한 시동 절차의 확인 및 검증과 함께 정격 구동시의 가스발생기 혼합비 자동제어시스템 검증이 수행되었다.

## 참 고 문 헌

1. 조광래 등, "소형위성발사체개발사업(V)", 한국항공우주연구원 보고서, 2007
2. 김승한 등, "터보펌프+가스발생기 연계시험 설계", 한국추진공학회 2006년도 추계학술대회 논문집, 2006, pp.155-158
3. 김진한 등, "액체로켓엔진용 터보펌프 개발 현황", 제5회 우주발사체기술 심포지움, 2004, pp.38-51
4. F. Laithier 등, "Upper stage storable propellant 100kN engine power pack", Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA-1999-2602, 1999
5. 김승한 등, "액체로켓엔진 터보펌프+가스발생기 연계시험 준비", 한국항공우주연구원 내부 기술자료, 2007