

# 터보펌프 조립체—가스발생기 연계 폐회로 시험에서의 시동특성 분석

문윤완\* · 김승한\* · 설우석\*

## Analysis of Startup Characteristics for Turbo Pump Unit-Gas Generator Closed Loop Test

Yoonwan Moon\* · Seung-Han Kim\* · Woo-Seok Seol\*

### ABSTRACT

This study fulfilled analysis of startup characteristics of Turbo pump unit—Gas generator closed loop test from the viewpoint of simulation. The test results were investigated and the calculated results were compared to test results. The curve for RPM developing predicted by simulation agreed well with test result. The slope of transient combustion pressure of gas generator correspond with test result.

### 초 록

본 연구에서는 터보펌프 조립체—가스발생기 연계시험 중 폐회로 시험에 대한 시동 특성을 분석하였고 수치적으로 해석하였다. 시험에서 터빈의 시동은 수소 기체로 수행하였고 구동은 가스발생기에서 연소로 발생하는 연소 기체로 작동하였다. 그에 따른 가스발생기 점화 및 연소압의 발달을 살펴보고 해석도 동일한 조건으로 수행하여 결과를 비교하였다. 회전수의 발달 특성은 시험과 잘 일치하는 것을 볼 수 있었고 가스발생기 연소압 발달 특성의 경우 정성적으로 일치하는 것을 볼 수 있었다.

Key Words: Turbo Pump Unit(터보펌프 조립체), Gas Generator(가스발생기), Startup(시동), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Closed Loop Test(폐회로 시험)

### 1. 서 론

터보펌프 방식의 액체로켓엔진은 크게 연소기, 터보펌프 조립체, 가스발생기 및 밸브 등으로 나눌 수 있다. 각각 연소기 및 가스발생기 연소시

험, 터보펌프 조립체 정격 시험, 밸브 작동 시험 등을 거쳐 엔진 시스템에서 시스템 조립을 거쳐 엔진을 완성하게 된다. 이때 엔진 시스템에서는 각 성능 시험 및 작동 시험을 거친 단품의 연계 작동성 및 성능을 시험하기 위해 단계별 시스템 시험을 수행하게 된다. 그중 첫 번째는 터보펌프 조립체와 가스발생기의 연계성을 살펴보는 터보펌프 조립체—가스발생기(powerpack) 연계시험

\* 한국항공우주연구원 엔진팀  
연락처, E-mail: ywmoon@kari.re.kr

이 수행된다. 여기에는 두 단품의 일부를 연결하여 작동성과 시동 등을 고찰하는 개회로 시험(open loop test)이 먼저 수행되고 시스템 개념에 맞게 연결하여 수행하는 폐회로 시험(closed loop test)이 powerpack 시험으로는 최종적으로 수행된다. 이후는 연소기를 장착하여 시험하는 본격적인 엔진 시스템 시험으로 이어진다.

폐회로 시험에서는 가스발생기와 터보펌프 조립체의 유기적 작동성에 주목하고 엔진의 시동에 관련된 연구를 수행하게 된다. 엔진 시동의 경우 가스발생기의 혼합비를 정격점으로 설정하기는 매우 어려우므로 초기 비정상 상태의 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 한국항공우주연구원에서 수행한 터보펌프 조립체-가스발생기 연계시험 중에서 powerpack 시험의 최종단계인 폐회로 시험의 분석과 시동에 관련된 해석을 수행하였다.

## 2. 폐회로 시험(Closed loop test) 및 해석

### 2.1 폐회로 시험 (Closed Loop Test)

폐회로 시험(closed loop test)은 실제 엔진에 장착되는 시스템의 일부를 이용하여 엔진의 시동과 유기적 연계성을 점검하고 성능 및 내구성 등을 살펴보는 매우 중요한 시스템 시험이며 구성은 Fig. 1과 같다. 'O2 inlet'으로 표기된 'IX'와 'Fuel inlet'으로 표기된 'I'를 통해 펌프로 각 추진제가 유입된다. 또한 승압된 추진제는 각각 'X'와 'II'를 통해 산화제와 연료가 배출된다. 이때 각각의 주유동 배관으로부터 일부가 가스발생기로 추진제가 유입되며 가스발생기의 연소로 발생한 고온·고압의 기체는 'XIV'를 통해 배출되고 이는 'XIII'을 통해 터빈으로 유입되어 터빈을 구동하는 작동기체로 사용되고 'VII'로 배출된다. 초기의 시동은 시동에 소요되는 동력을 미리 계산하여 그 해당하는 압력과 유량의 수소기체를 'VIII'의 입구로 주입된다. 개회로 시험과의 차이점은 가스발생기로부터 발생하는 고온·고압 기체의 터빈 유입 유무에 있다.

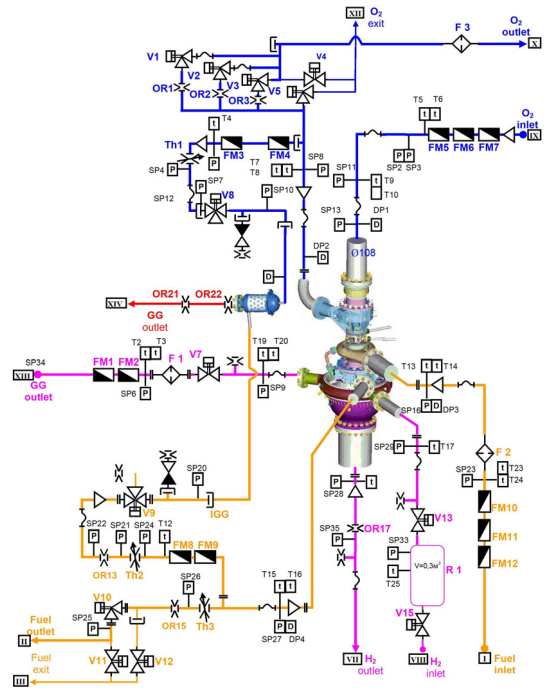


Fig. 1 Schematic diagram for TPU-GG closed loop test

### 2.2 시험조건

폐회로 시험의 시동 특성을 예측하기 위해 기 수행된 수류시험과 개회로 시험으로부터 밸브의 작동 시간, 추진제 채움시간 등의 정보를 얻을 수 있었다. 또한 개회로 시험을 통해 가스발생기의 안정적인 점화를 확인할 수 있었으므로 추진제 가스발생기 측 밸브의 개방시간은 변화시키지 않았다. 이는 밸브 개방시간의 변화에 따른 불확실성을 감소시키기 위함이다. 하지만 첫 폐회로 시험이므로 가스발생기의 안정적인 압력 발달 유지를 위해 시공 기체와 가스발생기 점화 및 연소시간의 겹침시간을 조정하였다. 이를 위해 다양한 겹침시간에 대해 가스발생기 압력 발달 특성을 살펴보았다. Fig. 2와 같이 수력학적 network를 구성하였고 그 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 보면 명령기준으로 겹침시간 0.7 초 일 때를 선택하였는데, 이는 0.7 초로 하였을 경우 과도한 회전수의 증가가 없었고 보다 안정적으로 가스발생기의 상승이 예측되었기 때문이다.

폐회로 시험에 대한 사이클로그래프는 Table 1과 같다.

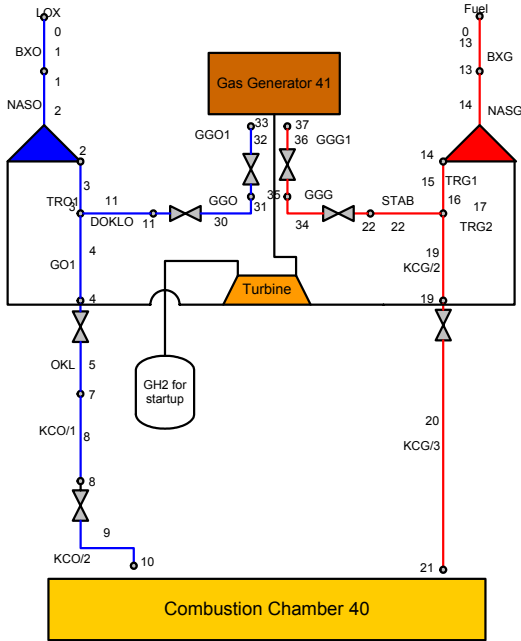


Fig. 2 Schematic for hydraulic network of closed loop test for analyzing startup

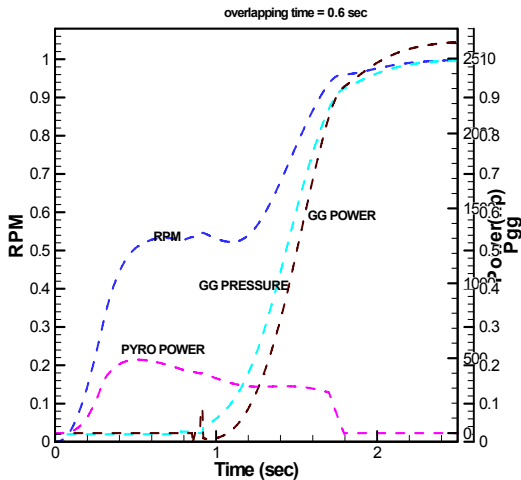


Fig. 3 Prediction of startup for closed loop test

Table 1 Cyclogram for closed loop test

시간[s]	명령
0.0	터빈에 시동 가스 공급, GG 관련 퍼지 시작, GG점화기 작동
0.66	GG 연료 공급
0.8	GG 산화제 공급 GG 연료 퍼지 종료
1.5	시동 가스 공급 종료
2.5	GG 혼합비 피드백 제어 시작
3.0	가스발생기 연소압 감시 시작 GG 산화제 퍼지 종료
45.0	GG 연료 퍼지 시작, GG 산화제 퍼지 시작

### 2.3 시동해석방법

폐회로 시험의 시동 해석을 위해 Fig. 2와 같이 추진제 유동 network를 구성하였다. 터보펌프 조립체와 가스발생기는 그림에서와 같이 연결되어 있고 터빈은 수소 기체를 사용하여 시동하고 가스발생기의 연소 기체로 구동한다. 연소기의 경우 실제로는 장착되어 있지 않고 연소압에 해당하는 오리피스를 장착하나, 해석을 위해 연소기가 장착되어 있는 것으로 모사하였다. 해석은 문윤환 등 [1]이 발표한 수력학적 배관 채용 시간과 유동저항 등을 계산하였고 터보펌프는 각각의 수두와 효율을 기시험에서 검증된 식으로 수정하였다. 또한 터빈의 경우도 동력을 효율과 질량유량이 포함된 식으로 유도하여 해석 프로그램에 도입하였다. 가스발생기 연소현상의 경우 CEA [2]를 이용한 화학평형을 고려하였다.

## 3. 결과 및 토론

### 3.1 시험 결과

시험 결과에서 초기 3초간은 Fig. 4와 같다. 그림에서 보면 시동 가스의 압력이 감소함에 따라 회전수는 감소하는 추세를 보이고 있으며 0.8초부터 가스발생기의 압력이 증가하는 추세를 보이고 있다. 이는 파이로 점화기에 의한 기상 산

화제와 최초 유입된 연료의 점화로 보이며 실제의 연소가 발생하는 것은 0.9 초 이후로 증가 곡선의 기울기가 변화하는 지점으로 볼 수 있다. 그때부터 회전수가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 여기서 'GG'라 표기된 것은 가스발생기 출구에서의 정압으로서 전압의 동압 발달과 센서 포트 길이의 영향으로 인해 상대적으로 천천히 증가하는 것을 볼 수 있다.

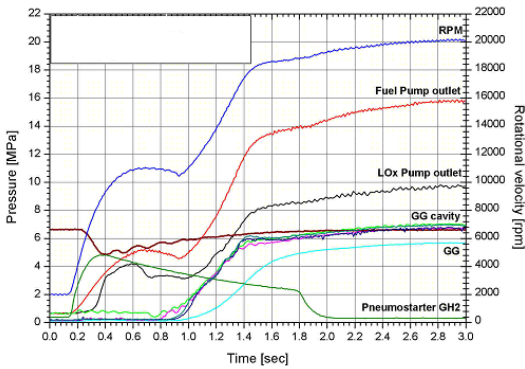


Fig. 4 Experimental results of closed loop test

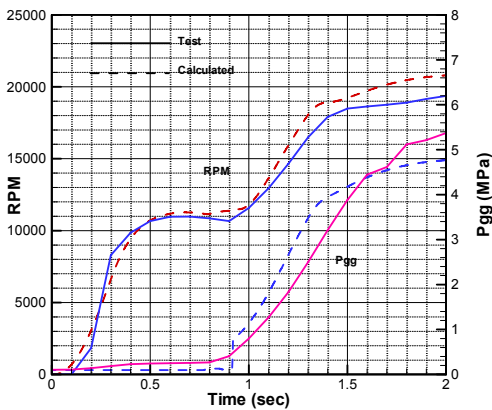


Fig. 5 Calculated results compared with test results

### 3.2 해석 결과

Figure 5는 해석 결과를 시험 결과와 비교한

것이다. 그림에서 보면 회전수의 증가 추이는 실제 시험과 계산결과가 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한 가스발생기 연소압의 경우도 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 하지만 시험 보다는 상대적으로 급하게 증가하는 경향을 보이는데, 이는 가스발생기 연소압의 계산은 CEA [2]를 사용한 화학평형반응으로서 저혼합비에 대한 고려가 없으므로 추진제가 유입됨과 동시에 화학반응이 발생한다고 가정하였기 때문이며, 센서포트의 길이로 인한 응답 지연이 발생하였을 것으로 추측된다. 이 두 가지 효과에 의해 가스발생기 압력 증가의 시간차는 발생하는 것으로 보이나 연소 발생 시점 및 증가 추이 등은 비교적 잘 일치하는 것으로 보인다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 폐회로 시험에 대한 터보펌프 조립체-가스발생기 시동에 대해 시험 분석 및 해석을 수행하였다. 회전속도의 경우 시험과 해석이 잘 일치하는 것을 볼 수 있었고 가스발생기 연소압의 경우 두 결과 간에 시간지연이 있었으나 경향성은 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 문윤완, 김승환, 설우석, "다양한 구동가스를 사용한 액체로켓엔진의 시동특성 연구," 제 27회 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2006, pp.216-222
2. Gordon, S. and McBride, B. J., "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, I. Analysis," NASA RP-1311, 1994