

터보펌프 조립체—가스발생기 연계 개회로 시험에서의 시동특성 분석

문윤완* · 김승한* · 설우석*

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

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

ABSTRACT

This study fulfilled analysis of startup characteristics of Turbo pump unit—Gas generator open 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 개회로 시험에 대한 시동 특성을 분석하였고 수치적으로 해석하였다. 시험에서 터빈의 시동 및 구동은 수소 기체로 수행하였고 그에 따른 가스 발생기 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 정성적인 기울기가 일치하는 것을 볼 수 있었다.

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

1. 서 론

액체로켓엔진은 추진제 공급방식에 따라 크게 가압식 엔진과 터보펌프식 엔진으로 나눌 수 있다. 가압식 엔진의 경우 엔진 시스템을 구성하는

단품이 연소기와 밸브로 이루어져 있기 때문에 시스템 시험은 연소기의 연소시험이 주를 이루며 이를 바탕으로 기체 공급계와 연계하여 검증 시험이 이루어진다. 하지만 터보펌프식 엔진의 경우 연소기, 터보펌프 조립체, 가스발생기 및 밸브 등으로 이루어져 단품간의 유기적 작동성이 필요하므로, 각각의 개발품에 대한 검증과 그로부터 엔진 시스템의 연계된 작동성 및 성능을

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

측정하는 시험을 수행하여야 한다.

액체로켓엔진에서의 초기 개발과정은 설계에 이은 단품에 대한 작동성과 성능 검증을 수행하는 단품 시험을 수행함으로써 시작된다. 이후 필요시 단품에서 시스템 요구조건을 달성하기 위한 성능개량 설계와 시험으로 단품개발은 1차 마무리 된다. 이러한 단품 시험을 거친 핵심부품은 엔진 시스템의 작동성 및 적합성을 검증하기 위해 다양한 시험을 수행하게 된다. 그중 개회로 시험(open loop test)은 가장 기본이 되는 시험으로 엔진 시스템의 연계된 작동성과 시동 등의 동특성을 고찰하여 폐회로 시험(closed loop test)에 적용될 추진제 유입 순서 및 시간 등을 정하는데 목적이 있다. 이러한 시동 순서에 대한 고찰은 액체로켓엔진의 안정적인 점화 및 연소와 관련이 있으므로 매우 중요한 요소라 할 수 있다.

본 연구에서는 한국항공우주연구원에서 수행한 터보펌프 조립체-가스발생기 연계시험 중에서 터보펌프 조립체-가스발생기의 일부를 연결한 개회로 시험의 분석과 시동에 관련된 해석을 수행하였다.

2. 개회로 시험(Open loop test) 및 해석

2.1 개회로 시험 (Open Loop Test)

개회로 시험은 폐회로 시험(closed loop test)의 전단계로서, 외부로부터 가스발생기에 기체를 공급해 터빈의 시동 및 구동을 구현하고 그로부터 발생하는 동력을 펌프로 전달해 펌프 출구에서 추진제를 승압시킨 뒤 가스발생기로 추진제를 유입하는 개념을 말하며 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 보면 터빈의 시동은 'XIII'로 표시되어 있는 'H₂ inlet'으로 유입되며 일정시간 후에는 수소기체의 유입이 종료되면서 동시에 'VIII'로 표시되어 있는 'H₂ inlet'으로 수소기체가 유입되어 터빈을 정상상태로 구동한다. 산화제는 산화제 입구(IX)로부터 산화제 펌프로 유입되고 출구(X)로 승압되어 토출되며 연료는 입구(I)로부터 연료펌프로 유입되어 출구(II)로 토출된다. 이때 각각의

추진제는 토출 주배관으로부터 가스발생기로 유입되는 작은 관을 두어 가스발생기에서 적절한 압력과 기체량이 발생할 수 있도록 하였다. 이때 발생한 연소기체는 터빈으로 유입되지 않고 외부로 배출하므로 개회로(open loop)라 명명한다.

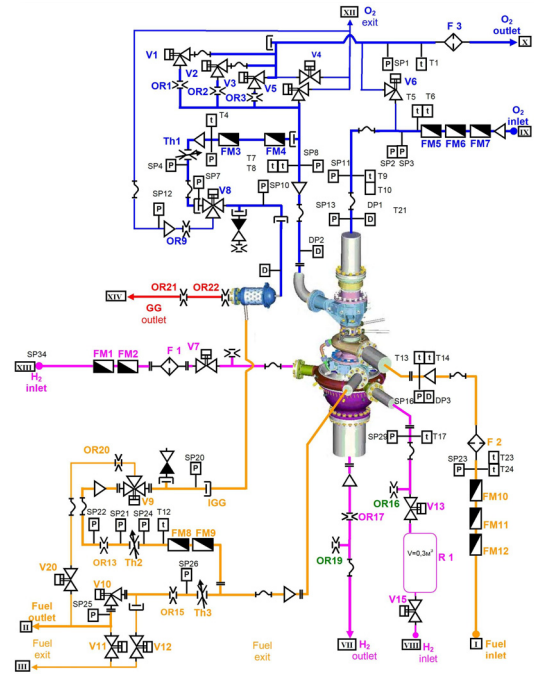


Fig. 1 Schematic diagram for Turbopump unit—Gas generator coupled open loop test

2.2 시험조건

개회로 시험의 목적은 터보펌프 조립체와 가스발생기의 유기적 연동에 의한 안정적인 시동을 위한 추진제 밸브 개폐 시간을 결정하기 위함이다. 추진제 개폐 시간을 결정하기에 앞서 각 추진제 배관의 종단밸브부터 가스발생기의 분사기면까지의 도달시간을 측정하여야 한다. 그 이유는 시동 시 가스발생기 내로 과도한 추진제 유입을 예방하고 원하지 않는 순서로 추진제가 유입되는 것을 방지하기 위함이다. 또한 극저온 산화제(LOX)의 경우 주입 시 매우 급격한 증발이 발생하므로 밸브 개방 초기에는 기체 산소가 가스발생기로 유입되므로 액체 산소 유입 시간 측정을 수행하여야 한다. 이러한 목적으로부터 2

회의 수류시험을 수행하여 밸브 개폐시간, 배관 및 추진제 돔(dome) 채움시간(priming time) 등을 측정하였다. 이때 추진제가 혼합되어 발생할 수 있는 위험을 방지하기 위해 산화제의 채움시간은 실제 가스발생기를 사용하여 측정하였고, 연료의 경우는 돔(dome)과 재생냉각 채널에 해당하는 부피로부터 모사하여 장착하고 그때의 채움시간을 측정하였다. 이로부터 측정된 각 추진제의 시간은 산화제 0.15~0.2초, 연료 0.2초이며 각 밸브의 작동시간은 0.04초로 측정되었다. 수류시험 이후 실제 개회로 시험을 수행하기 위해 Table 1과 같은 밸브 명령 시간으로 수행하였다. 정상상태에 도달한 후에는 설계점으로 수행되었다. 여기서는 시동 측면을 고찰하기 위한 것이므로 설계점에 대해서는 별도의 설명은 하지 않겠다.

Table 1 Cyclogram for open loop test

시간 (s)	명령
0.0	시동 가스 공급, GG 추진제 및 점화기 퍼지, GG 파이로 점화기 작동
0.66	GG 연료 밸브 개방
0.8	GG 산화제 밸브 개방 GG 연료 퍼지 종료
1.0	터빈 구동가스 공급 터빈 시동가스 종료
2.0	GG 산화제 퍼지 종료
3.0	터빈 구동가스 공급 피드백 제어
5.0	GG 산화제 스톱 피드백 제어
30.0	GG 연료 퍼지 시작 GG 산화제 퍼지 시작

2.3 시동해석방법

개회로 시험의 시동 해석을 위해 Fig. 2와 같이 추진제 network를 구성하였다. 터보펌프와 가스발생기는 그림에서와 같이 연결되어 있고 터빈은 수소 기체를 사용하여 시동 및 구동을 한다. 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 채움 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.

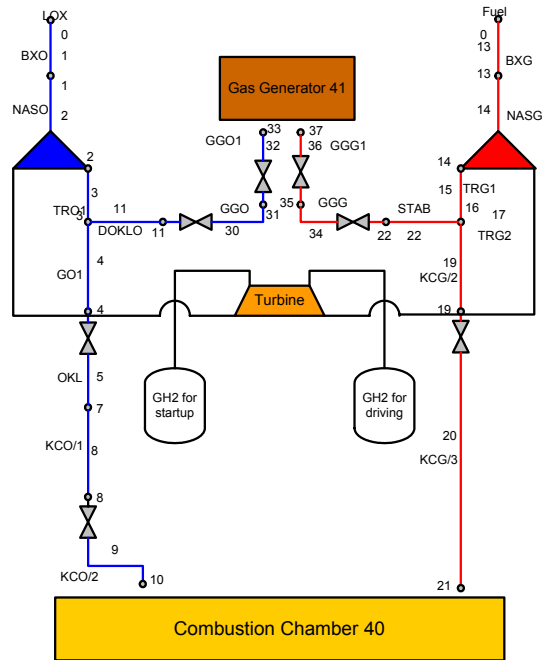


Fig. 2 Schematic for hydraulic network of open loop test for analyzing startup

3. 결과 및 토론

3.1 시험 결과

시험 결과에서 초기 3초간은 Fig. 3과 같다. 여기에서 'DGZ'는 가스발생기 연소실 내부의 파이로 점화기 공동에서의 압력이고 'DGG'는 가스발생기 출구에서의 압력이다. 그림에서 보면 시동 가스의 압력이 감소함에 따라 회전수는 감소하는 추세를 보이고 있으며 1.0~1.5 초 사이에 시동 기체의 종료와 구동 기체의 개방이 이루어져 급격한 회전수의 증가를 보이고 있다. 하지만

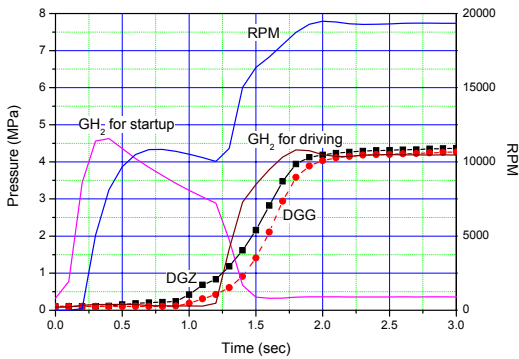


Fig. 3 Experimental results of open loop test

가스발생기의 압력은 회전수의 경향과는 달리 비교적 완만한 기울기를 보이고 있다. 이는 가스발생기 내부의 혼합비가 매우 낮으므로 연소압이 천천히 발달한 것과 정압을 측정하는 센서포트가 매우 길므로 응답 시간이 증가하여 발생한 것으로 보인다. 이는 동압 및 혼합비 변화를 도시하여 분석해야 할 것으로 보인다.

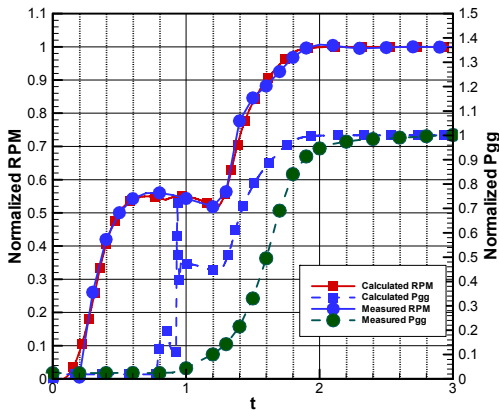


Fig. 4 Calculated results compared with test results

3.2 해석 결과

Figure 4는 해석 결과를 시험 결과와 비교한 것이다. 그림에서 보면 회전수의 증가 추이는 실

제 시험과 계산결과가 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 하지만 가스발생기 연소압의 경우 계산 결과가 시험보다 빨리 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 가스발생기 연소압의 계산은 CEA [2]를 사용한 화학평형반응으로서 저혼합비에 대한 고려가 없으므로 추진제가 유입될과 동시에 화학반응이 발생한다고 가정하였기 때문이다. 또한 시험에서도 압력 센서관이 매우 길기 때문에 응답 지연도 함께 발생하여 시험과 계산의 시간차가 발생한다고 생각된다. 하지만 계산에서의 초기 peak을 제외하고 정상상태로 가는 경향성은 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 가스발생기로 유입되는 유량과 혼합비가 시험과 유사하게 계산됨을 의미함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 개회로 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 결과간에 시간지연이 있었으나 경향성은 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다.

참고 문헌

1. 문윤완, 김승한, 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