

30톤급 액체엔진 TP-GG-CC 연계시험에서 시동특성예측

문윤완* · 김승한* · 김철웅* · 설우석*

Prediction of Startup Characteristic for 30 tonf Liquid Rocket Engine TP-GG-CC Coupled Test

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

ABSTRACT

This study for prediction of startup characteristics for 30 tonf liquid rocket engine TP-GG-CC coupled test was performed on the basis of the previous TP-GG test and prediction results. For determining the valve sequence the startup analysis was performed by the specified program for several main valve time and the adequate valve sequence for startup could be obtained.

초 록

본 연구는 30톤급 액체로켓엔진의 TP-GG-CC의 시동특성에 관한 연구로써, 기수행한 TP-GG 연계시험의 결과 및 예측에 바탕을 두고 있다. CC가 장착됨에 따라 주밸브의 개방시간을 결정하여야 하며 그에따라 시동특성을 살펴보고, 다양한 밸브 개방시간을 적용하여 적절한 결과를 얻을 수 있었다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Turbopump Unit(터보펌프유닛), Gas Generator(가스발생기), Combustion Chamber(연소기), Startup(시동)

1. 서 론

액체추진제로켓엔진은 여러 구성품이 모여 이루어진 조립체이다. 이러한 액체로켓엔진을 구성하는 주요 구성품은 터보펌프식 엔진의 경우 크게 터보펌프, 가스발생기, 연소기 및 밸브류로 나눌 수 있다. 터보펌프는 다시 산화제 펌프, 연료 펌프 및 터빈으로 나눌 수 있는데, 추진제의 밀도차로 인한 각 펌프의 회전속도비에 따라 1

축 펌프로 구성할 수도 있고 각각 다른 펌프로 구성하여 사용할 수도 있다. 예를 들어 LOX/케로신 추진제의 경우 밀도차가 크지 않기 때문에 1축으로 각각의 펌프가 연결된 형태를 사용하지만 LOX/LH2의 경우 밀도차가 너무 크므로 하나의 축으로 두 펌프를 연결하여 작동하기에는 무리가 따르므로 각각 두 개의 펌프를 따로 작동하는 방식을 사용한다. 이때 펌프에서 요구되는 동력은 터빈에서 생산을 한다. 정상상태에서의 터빈을 구동하기 위해서는 지속적으로 에너지가 높은 기체를 터빈으로 유입시켜야 한다. 이것을 위해 LOX/케로신 추진제 엔진에서는 가스

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

발생기를 사용한다. 가스발생기에서는 터빈의 제과과 지속시간 등의 구조적인 관점으로부터 최대한의 에너지를 보유할 수 있도록 연소하게 된다. 일반적으로 가스발생기의 온도는 약 900 ± 100 K 정도의 범위를 사용한다[1]. 이러한 조건을 만들기 위해서는 연료과농의 연소를 하여야 하는데 이때 발생하는 연소가스의 물성치는 계산적으로 또는 실험적으로 구하기 매우 어려운 범위이다. 이렇게 정상적으로 터보펌프가 구동되면 펌프의 토출압 수준으로부터 적절한 밸브 작동이 순차적으로 일어나면서 연소기로 산화제와 연료가 주입된다. 접촉발화성 추진제를 갖는 경우는 특별한 점화장치가 필요하지 않지만 LOX/케로신 등의 추진제를 갖는 엔진의 경우는 점화를 위해 TEAL/B 등의 점화 추진제를 사용하여 연소기의 점화를 활성화하기도 한다. 이로부터 연소기의 압력이 정상상태로 유지되면 비로소 엔진의 정격압력, 추력 등이 발생하여 로켓의 추진력을 얻게 된다.

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 |

액체로켓엔진의 전반적인 구동은 위에서 언급한 바와 같으나, 실제로 가장 특성을 예측하기 어려운 구간은 엔진의 시동 부분이다. 이는 터보펌프가 정지 되어있을 상태에서부터 시동 가스로 터빈을 시동하고 그후 일정 토출압이 발생하면 가스발생기 측으로 적절한 혼합비로 추진제를 유입시켜 가스발생기가 원활한 연소반응을

일으켜 터빈을 구동하는 구간으로서 일반적인 엔진에서는 약 1.5~3.0초 가량이다. 이때 중요한 것은 초기 시동 기체의 양과 각 밸브의 개방시간 등을 적절히 결정하여 시스템에 무리가 되지 않는 범위에서 시간을 결정하고 또한 빠른 기동이 될 수 있도록 하는데 중점이 있다.

본 연구에서는 액체로켓엔진의 초기 엔진 형태인 터보펌프-가스발생기-연소기(TP-GG-CC)의 조합체로부터 엔진의 시동 시 발생하는 시스템의 특성에 대해 고찰하였고 각 밸브의 개방시간을 결정하여 회전속도 특성을 예측하였다.

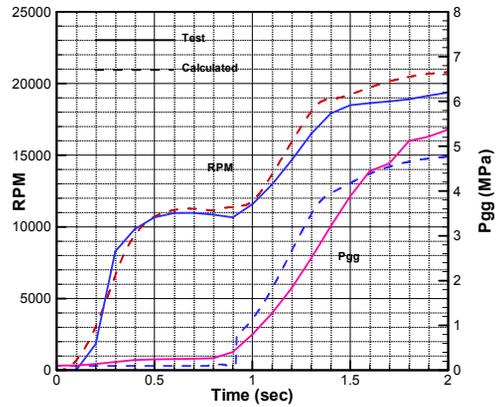


Fig. 1. Calculated results compared with test results

2. TP-GG-CC 유동 구성

2.1 폐회로 시험과의 연관성

TP-GG-CC 해석에 앞서 TP-GG 시험에서 폐회로 시험에 대한 것을 알아볼 필요가 있다. TP-GG 시험은 앞서 언급하였듯이 엔진에서 추력을 발생시키기 위한 추진제를 연소기로 주입하기 위해 장착한 추진제 공급장치이다. 이 구성품이 제때에 작동하지 않거나 또는 늦게 작동을 한다면 엔진이 기동되지 않거나 가스발생기로 과도한 추진제 유입으로 혼합비가 목적인 값으로부터 벗어나 가스발생기의 연소압을 과도하게 높여 터빈의 손상을 입힐 수 있다. 그러므로 연소기를 장착하여 시험하기 전에 TP-GG의 폐회

로 시험으로 적절한 시동 시퀀스를 찾아야 한다. 이것에 대한 것은 문윤완 등[2]이 TP-GG 연계시험에서 폐회로에 대한 시험과 해석을 수행한 것을 참고하면 된다. 이때 사용한 시퀀스는 Table 1과 같다.

문윤완 등[2]은 또한 Fig. 1과 같이 TP-GG 시험과 해석을 비교함으로써 개발한 시동프로그램의 유용성을 입증하였다. Fig. 1에서 보면 시동특성이 시험과 정성적, 정량적으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이를 바탕으로 TP-GG-CC의 시동특성을 예측하였다.

2.2 TP-GG-CC 유동 구성 및 시동해석방법

TP-GG-CC의 시동특성을 예측하기 위해 Fig. 2와 같이 먼저 각 추진제의 흐름에 대한 유동을 구성하여야 한다.

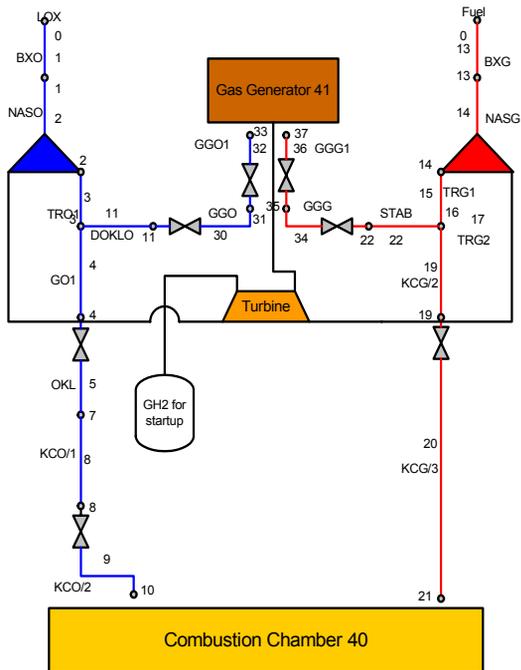


Fig. 2. Schematic for hydraulic network of closed loop test for analyzing startup

Figure 2에서 보면 터빈의 시동은 기체수소 (GH2)를 사용한다. H-1과 같은 실제 엔진에서는 SPGG(Solid Propellant Gas Generator)를 사용하

여 시동한다[3]. 하지만 본 연구에서는 시험의 편의성을 고려하여 상온의 수소기체로 시동한다. 이때 수소기체의 유량은 기설정된 SPGG의 동력과 동일하게 되도록 설정한다.

TP-GG-CC 시스템의 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. 해석은 문윤완 등 [4]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 및 연소기의 연소현상의 경우 CEA [5]를 이용한 화학평형을 고려하였다.

3. 결 과

TP-GG 연계시험에서는 주밸브를 개방한 상태에서 시험을 수행하였다. 하지만 TP-GG-CC 연계시험에서는 주밸브를 닫고 시험하여야 한다. 그 이유는 주밸브 전단에서 충분한 압력 증가가 되어 연소기로 유입되는 유량이 보다 정격조건에 가깝게 해야하기 때문이다. 그러므로 본 연구에서는 시동 시퀀스를 결정하기 위해 주밸브의 개방시간을 결정하여야 한다. 하지만 TP-GG 시험으로부터 적절한 가스발생기측 밸브의 개방시간을 결정하였으므로 이 시간은 동일하게 유지되어야 할 것이다. 주밸브의 개방시간을 결정하기 위해 Table 2와 같은 조건으로 계산을 수행하였다.

Table 2. Cases for main valves open time

| | case 1 | case 2 | case 3 |
|-----|---------|----------|----------|
| MFV | 1.0 sec | 0.68 sec | 0.58 sec |
| MOV | 1.2 sec | 0.82 sec | 0.72 sec |

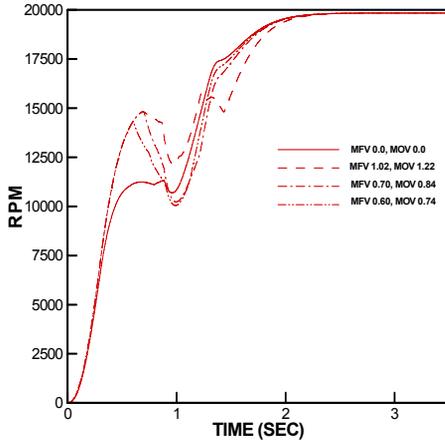


Fig. 3. Rotating velocity of TPU according to main valve opening time

Figure 3은 주밸브 개방시간에 따른 터보펌프의 회전속도를 나타내고 있다. 그림에서 보면 정상상태일때에는 큰 변화가 없지만 밸브 개방시간에 따라 천이구간에서는 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 이는 추진제 주유동측에 장착되어 있는 주밸브가 닫힘상태에서 시동하였기 때문에 발생한 현상이라 생각된다. 이로부터 밸브의 개방시간을 앞당길 수 있다고 판단할 수 있다.

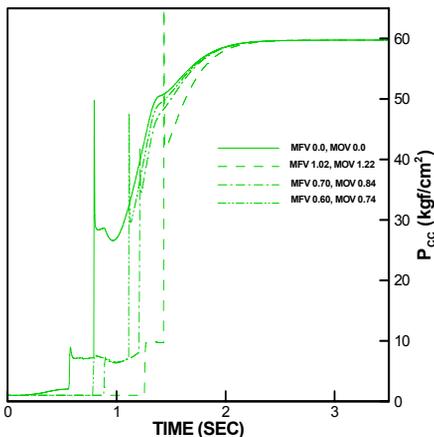


Fig. 4. CC pressure according to main valve opening time

Figure 4는 각 밸브의 개방시간에 따른 연소기 연소압의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보면 MFV 0.60 초, MOV 0.74 초일 경우에도 연소압이 비교적 부드럽게 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 Fig. 3과 Fig. 4를 종합하여 보면 MFV의 개방시간은 0.60 초, MOV의 개방시간은 0.74 초로 결정할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 TP-GG-CC 시스템의 시동특성을 고찰하였다. 주밸브를 닫고 시동함으로 보다 빠른 시동특성을 예측할 수 있었으며 이로부터 주밸브의 개방시간을 결정할 수 있었다. 이때 MFV 0.60 초, MOV 0.74 초로 결정되었다.

참 고 문 헌

1. Zehetner, H. C., "Liquid Propellant Gas Generator," NASA SP-8081, 1972
2. 문윤완, 김승한, 설우석, "터펌프 조립체-가스 발생기 연계 폐회로 시험에서의 시동특성 분석," 제31회 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2008, pp.19-22
3. Skylab Saturn 1B Flight Manual, NASA-TM-X-70137, 1972
4. 문윤완, 김승한, 설우석, "다양한 구동가스를 사용한 액체로켓엔진의 시동특성 연구," 제 27회 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2006, pp.216-222
5. Gordon, S. and McBride, B. J., "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, I. Analysis," NASA RP-1311, 1994