

# 터보펌프 가스발생기 연계시험에서의 시험영역 설정과 설비 설계

남창호\* · 김철웅\* · 김승한\* · 박순영\*

## A Test Design and Configuration for Turbopump and Gas Generator Coupled Test

Chang Ho Nam\* · Cheul Woong Kim\* · Seung Han Kim\* · Soon Young Park\*

### ABSTRACT

The test range for turbopump and gas generator coupled test was determined considering the engine system test area which cover the qualification and development. Based on the test range, we determined the required loss coefficient for the throttle valves and lines.

### 초 록

엔진의 비행, 구성품 성능 오차, 엔진 시스템 인증 기준에 따라 결정된 시스템 시험영역을 기준으로 하는 터보펌프 가스발생기 연계시험 영역 설정을 하였다. 연계시험 작동점에 해당하는 연소기 압력 모사를 위한 배관 손실계수와 터빈 출력 조정을 위한 스로틀 밸브의 손실계수를 결정하였다.

Key Words: Turbopump(터보펌프), Gas Generator(가스발생기), Coupled Test(연계시험), Design(설계), Configuration(구성)

### 1. 서 론

한국항공우주연구원에서는 터보펌프 가스발생기 연계시험(이하 연계시험)을 수행 중에 있다.[1, 2] 터보펌프와 가스발생기의 연계 시험은 액체로켓엔진 시스템 시험의 사전 단계로서 연소기로의 추진제 공급 시스템 개발을 확인하는 시험이다.

연계시험은 모체가 되는 엔진 시스템의 작동

영역에 준하는 시험을 수행하여 터보펌프와 가스발생기를 포함하는 공급계 개발의 완성도를 확인할 수 있다. 따라서 엔진 시스템이 비행중 겪게 되는 작동점의 변화와 엔진 구성품이 가지는 성능오차에 의해 발생하는 작동점 변경에 대응할 수 있는 시험영역에서 수행되어야 한다.

연계시험에서 연소기가 연결되는 엔진 시스템 시험에 비해 달라지는 것은 터보펌프 후단에 주 배관에서의 유동 특성이다. 예를 들어 연소기 추진제 유량이 증가하면 엔진 시스템의 경우 연소압이 증가한다. 이는 추진제가 연소기를 통과하지 않고 배출되는 연계시험의 특성과는 차이가

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

있고 이를 연계시험의 설비 구성을 통해 모사하여 시험한다.

본 연구에서는 연계시험의 시험영역 결정과 연소기를 모사하기 위한 설비 설계, 작동점에 상응하는 스로틀 밸브의 손실계수 결정에 대해 언급한다.

## 2. 본 론

### 2.1 시스템 시험영역

실제 엔진은 비행중에 입구 조건에 따라 터보펌프의 작동점이 변화하기 때문에 각 구성품은 단일 작동점으로 결정되는 성능을 요구 받는 것이 아니라 일정한 영역에서의 작동이 기본이다. 그리고 비행이전에 엔진 성능 보정을 거쳐 초기 설계 작동점에서 벗어나게 되는 것이 통상이므로 이에 준하는 성능 확인을 통한 개발이 이루어져야 한다. 또한 시스템의 인증을 위한 조건으로서 기본 성능영역에 2% 추가된 영역에서의 성능을 입증해야 하므로 이에 따른 시험영역을 정의할 수 있다.

시스템 성능 요구에 준하는 연계시험 작동점을 정하기 위해 엔진 시스템의 성능분산해석을 수행하였다. 성능분산해석을 위한 시스템은 LOx/Kerosene 가스발생기 사이클 엔진 시스템이다. 그 세부적인 해석방법과 가정 및 입력조건은 문헌[3]을 참조하면 된다.

그 결과 가장 넓은 영역에서의 시험영역으로 연계시험의 시험을 설정하였다.(Table 1, 2)

Table 1. Test Conditions for Engine System Test

시험 조건	개발 시험		인증 시험
	nominal 입구 조건 + 무보정 엔진	비행 입구 조건 + 보정 엔진	비행 입구 조건 + 보정 엔진

Table 2. Test Range for System and Components

	개발/인증 중 최대영역
진공추력	-4.8%~+5.2%
연소기압력	-5.0%~+5.2%
가스발생기연소압	-14.6%~+15.6%
산화제펌프 출구압력	-12.7%~+13.5%
연료펌프 출구압	-12.3%~+12.6%
터보펌프 회전수	-6.0%~+6.0%
엔진유량	-4.8%~+5.3%
터빈유량	-15.0%~+15.6%
연소기 유량	-4.8%~+5.0%
엔진 혼합비	-8.0%~+7.9%
연소기 혼합비	-8.7%~+8.6%

### 2.2 연계 시험 영역

Table 3의 변수 중에 연소기의 혼합비와 연소압을 기준으로 정격과 변동 범위에 준하는 작동점을 결정하면 Fig. 1과 같다.

Table 3. Operation Points for Engine System Test

	Dc	OD1	OD2	OD3	OD4	
엔진혼합비	2.236	2.069	2.419	2.391	2.049	
터보펌프 회전수(rpm)	19500	18500	19049	20582	19964	
펌프유량 (kg/s)	Ox	63.94	58.87	62.74	69.48	65.22
	Fu	28.6	28.45	25.94	29.06	31.83
펌프 토출압 (bar)	Ox	97.02	88.42	92.7	106.76	101.56
	Fu	141.23	125.63	137.32	158.54	144.06
터빈 유량(kg/s)	4.277	3.775	3.963	4.893	4.645	
연소압(bar)	60	57	57	63.12	63.12	
연소기유량 (kg/s)	Ox	62.9	57.95	61.77	68.3	64.1
	Fu	25.36	25.6	22.94	25.36	28.31
연소기 혼합비	2.48	2.264	2.693	2.693	2.264	
가스발생기 압력(bar)	50.47	44.54	46.76	57.73	54.81	
가스발생기 유량 (kg/s)	Ox	1.039	0.917	0.963	1.189	1.129
	Fu	3.238	2.858	3.000	3.704	3.516

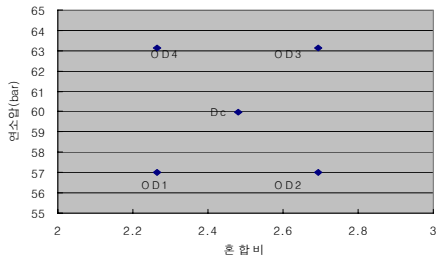


Fig. 1 Combustion Pressure and Mixture Ratio Range for Combustor

### 2.3 연계시험의 설비 구성

시험의 효율성을 위해 스톱 밸브를 이용하여 1회 시험에 여러 개의 작동점 시험을 수행한다. 이를 위해 가스발생기 연료 및 산화제 배관, 연소기 연료배관에 스톱 밸브를 넣어 구성하였다. Figure 2는 연계시험의 설비 개략도이다. 가스발생기 산화제 및 연료 배관에는 가스발생기로의 유량과 혼합비를 조절하기 위한 스톱 밸브가 장착되어 있고 연소기 산화제 배관에는 3개의 밸브와 오리피스 조합으로 구성되어 있으며 연소기 연료측은 스톱 밸브를 연결한다.

연계시험 작동점에 해당하는 설비를 구성하기 위해서는 각 배관의 오리피스와 스톱 밸브의 손실 계수를 결정해 주어야 한다.

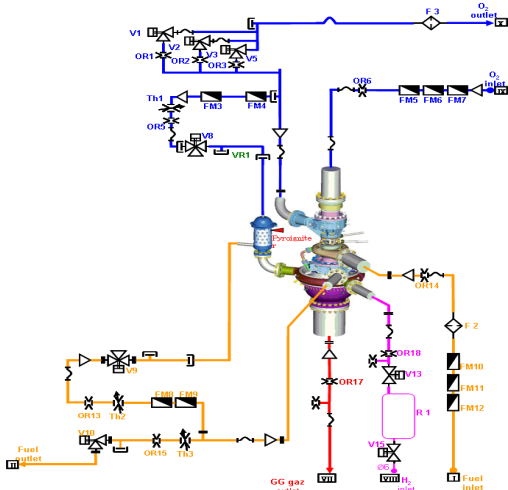


Fig. 2 TP+GG coupled test configuration

### 2.4 산화제 주배관의 구성

산화제 주배관은 스톱 밸브를 적용하지 않는 것을 원칙으로 한다. 실제 LOx/Kerosene 엔진에서도 대부분이 산화제 배관에는 혼합비 조절을 위한 밸브를 적용하지 않는다. 산화제 측의 유량이 커서 밸브적용을 위한 차압을 추가로 엔진 시스템 설계에 반영할 경우 펌프출력에 부하가 상대적으로 커진다. 또한 유량이 크며 극저온에 적용하는 밸브 개발을 위한 개발 비용 및 기술 난이도 증가가 있기 때문이다.

따라서 연계시험에서도 스톱 밸브의 적용없이 작동점 변화에 따른 연소압을 모사할 수 있는 밸브 조합체로 구성한다.

Figure 3은 산화제 주 배관에서의  $\alpha$  값을 나타내고  $\alpha$ 는 다음과 같이 정의 한다.

$$\alpha = \frac{P_{O_2, out}}{\dot{m}^2}$$

$P_{O_2, out}$ : 산화제 펌프 출구압(bar),  $\dot{m}$ : 연소기 산화제 배관 유량(kg/s)

$\alpha$ 는 배관의 손실 계수와 비례하는 값이고 각 작동점에 따라 달라지는데 OD1이 가장 크고 OD3가 가장 작으며 Dc, OD2, OD4는 유사한 값을 가진다.

따라서 산화제 주배관을 작동점에 따라 3개 배관의 조합으로 연소기 산화제 배관을 모사한다.

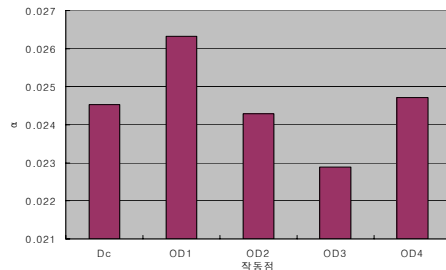


Fig. 3 LOx main pipe flow resistance

### 2.5 스톱 밸브의 손실계수

각 작동점에 해당하는 스톱 밸브의 위치 즉 밸브의 손실 계수를 결정한다. 스톱 밸브를 제외한 차압요소에 대한 손실 계수가 정해져 있을

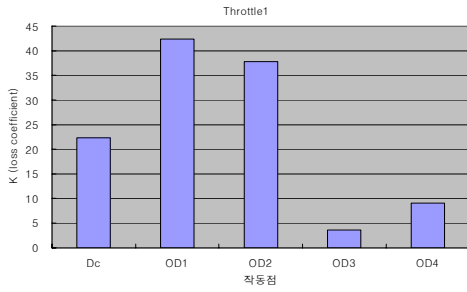


Fig. 4 Loss Coefficient for throttle1

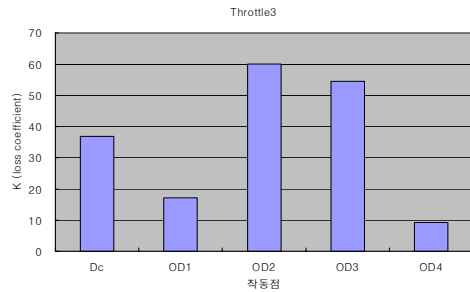


Fig. 6 Loss Coefficient for throttle3

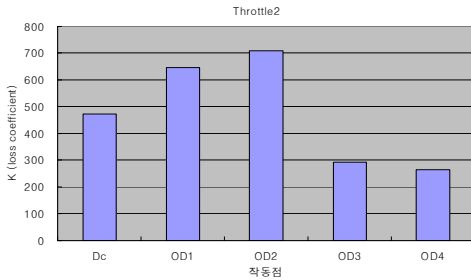


Fig. 5 Loss Coefficient for throttle2

경우 Table 3에서 결정된 각 배관에서의 유량에 따라 스톱 밸브 상류에서 발생하는 차압과 스톱 밸브 하류에서 발생하는 차압을 알 수 있으므로 스톱 밸브에서 요구 차압이 결정된다. 결정된 손실계수는 Fig. 4~6과 같다. 손실계수의 정의는 다음과 같다.

$$K = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho v^2}$$

여기서,  $\Delta P$  : 차압,  $\rho$  : 밀도,  $v$ : 유속이다.

요구 손실계수가 스톱 밸브의 작동영역 내에 포함되는 지 검토하고 불일치할 경우 스톱 밸브에 이웃하는 오리피스 직경을 조절하거나 스톱 밸브의 교체 여부를 판단하여 설비를 완성한다.

### 3. 결 론

위와 같이 터보펌프 가스발생기 연계시험의 시험영역을 결정하고 각 작동점에 해당하는 설비 설계를 완료하여 연계 시험을 진행 중에 있다.

### 참 고 문 헌

1. 김승한, 남창호, 김철웅, 설우석, "터보펌프+가스발생기 연계시험 설계", 한국추진공학회 2006년도 추계학술대회 논문집, pp.196~200, 2006
2. 김승한, 남창호, 설우석, "터보펌프+가스발생기 연계시험 연구", 한국추진공학회 2007년도 추계학술대회 논문집, pp. 155~158, 2007
3. 남창호, 김승한, 설우석, "성능 분산을 고려한 액체로켓엔진의 시스템 시험 영역 설정", 한국추진공학회 2007년도 추계학술대회 논문집, 2007