

터보펌프-가스발생기 연계시험의 모드 변환 중간 작동점 분석

남창호* · 김승한* · 박순영* · 김철웅*

Analysis for Operation Point Change in Mode Transition at the Turbopump-Gas Generator Coupled Test

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

ABSTRACT

The characteristics at the intermediate operation point of the turbopump-gas generator(TP-GG) coupled test were investigated by analytical method. The pump outlet pressure, gas generator mixture ratio, gas generator pressure, and temperature were examined considering risk minimization of test. The engine system shows different behavior from the TP-GG coupled test at the intermediate operation point since the combustion pressure feeds back to the flow rate in the lines. The advanced valve changes in the combustor line helps less risky mode transition.

초 록

터보펌프-가스발생기 연계시험에서 작동점 변경을 위해 거치는 중간 작동점의 특성을 시스템 모사 프로그램으로 검토하였다. 중간 작동점에서 펌프 토출압, 가스발생기 혼합비, 가스발생기 온도, 가스발생기 압력 등의 변수를 안전한 시험기 운용을 고려하여 검토하였다. 터보펌프-가스발생기 연계시험기와 엔진시스템을 비교한 결과 중간 작동점이 차이는 작지만 서로 다르고 이는 엔진 시스템에서 연소기 유량에 따른 연소압 변화가 발생하기 때문이다. 연소기 배관의 밸브 변경을 우선할 때 중간 작동점이 보다 안전한 영역에 위치한다.

Key Words: Turbopump(터보펌프), Gas Generator(가스발생기), Valve(밸브), Combustion Chamber(연소기), Coupled Test(연계시험)

1. 서 론

한국항공우주연구원(이후 항우연)에서는 주요 엔진 부시스템 중 하나인 터보펌프-가스발생기 연계시험(이후 연계시험)을 수행 중에 있다[1].

액체로켓 엔진 개발과 같이 높은 에너지 밀도의 추진제를 사용하는 시험은 초기 개발단계에

† 2008년 10월 21일 접수 ~ 2009년 1월 24일 심사완료

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

서 단일조건에서의 짧은 시간 시험이 다회 수행된다. 관련 시험 기술의 발달과 더불어 개발 예산과 개발 기간에 대한 요구 조건은 더욱 엄밀해지므로 시험의 효율성을 제고하고 시험비용을 최소화하기 위해 1회의 시험에 작동점 변경을 통해 여러 조건의 시험을 수행하는 것이 최근의 추세이다. 그 예로서 RS-68엔진의 개발과정에서 1회의 시험에서 과거 단일 조건 시험 13회 해당하는 효과[2]를 거두었다고 보고하고 있다.

연계시험에서 작동 모드의 변환은 최소한의 시험 횟수로 시험 영역을 확보할 수 있고 추후 엔진 시스템 시험에서의 모드 변환시 엔진 시스템 거동에 대한 정보와 특성파악에 유용하다.

가스발생기 배관의 밸브 변환을 통해 펌프의 출력을 변화시키고 연소기배관의 밸브 조절을 통해 엔진 혼합비 변화와 연소기의 연소압을 모사한다. 시험중에 밸브변경은 펌프의 부하변경을 야기하고 이에 따라 시험시제의 손상이나 시스템의 불안정을 유발할 수 있으므로 최소화하는 것이 시험을 안전하게 수행하는 방법이다. 따라서 연계시험에서는 여러 밸브를 동시에 조정하는 것은 개발 초기단계에 있는 펌프나 가스발생기의 문제를 일으킬 수 있으므로 보다 안전한 시험기 운용을 위해 밸브의 순차적인 전환을 적용한다.

가스발생기 배관 밸브에 비해 유량이 큰 연소기 배관에서의 밸브 변환은 연계시험기 전체의 유량계수를 변화시키고 가스발생기 측 밸브의 변경은 가스발생기 압력변화를 통해 펌프(시스템)출력을 변화시킨다.

연계시험기에서는 연소기가 장착되어 있지 않고 연소기의 연소압력을 모사하기 위한 연소기 배관의 차압요소를 조정하여 설계점과 탈설계점의 시험을 수행한다. 다시 말해 연계시험기의 경우 연소기배관의 연소압에 해당하는 만큼의 차압이 발생하도록 오리피스를 설정하고 작동점에 따라 달라지는 연소압은 밸브조합을 달리하거나 스로틀 밸브의 위치를 변경하는 것으로 대체한다. 연소기 배관에 압력 발생 요소가 없는 연계시험기는 밸브의 조합을 변경하지 않는 한 펌프

출구압에 의해서 유량이 결정된다. 반면 연소기가 존재하는 엔진 시스템의 경우 펌프 토출압 뿐 아니라 연소기유량과 혼합비에 따라 달라지는 연소압에 의해 유량이 영향을 받는다.

연계시험에서는 엔진 시스템 기준으로 각 작동점에 부합하는 유량과 펌프 출구압을 유지하도록 시험기가 설계되어 있다. 그러나 각 작동점에서의 변경을 위해 거쳐야 하는 중간 작동점의 경우 연소현상이 존재하는 엔진 시스템과 차압요소만 존재하는 연계시험기는 다른 거동을 보이게 된다.

본 연구에서는 터보펌프 가스발생기 연계시험기에서 밸브 변화에 따른 작동점 변동량을 확인하고 보다 안전한 시험을 위한 밸브 작동순서를 제안한다.

또한 엔진 시스템에서의 작동점 변경에 대한 분석과 연계시험기와의 비교 검토를 수행한다.

2. 본 문

2.1 엔진 시스템

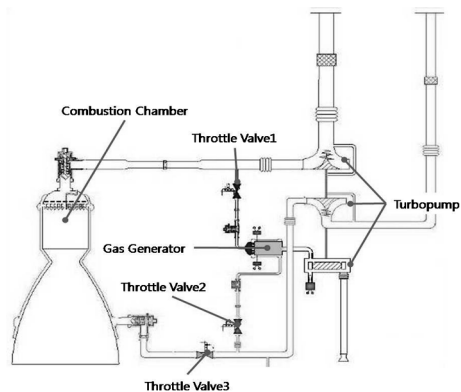


Fig. 1 Gas generator cycle engine system

본 연구의 대상 엔진시스템은 가스발생기 사이클로 가스발생기 연료와 산화제배관에는 추력 조절과 가스발생기 혼합비 조절에 필요한 스로틀 밸브가 장착된다. 연소기 산화제 배관은 별도의 스로틀 밸브를 장착하지 않고 연료배관에는 엔진의 혼합비 조절을 위해 스로틀 밸브가 장착

된다.

2.2 터보펌프-가스발생기 연계시험기

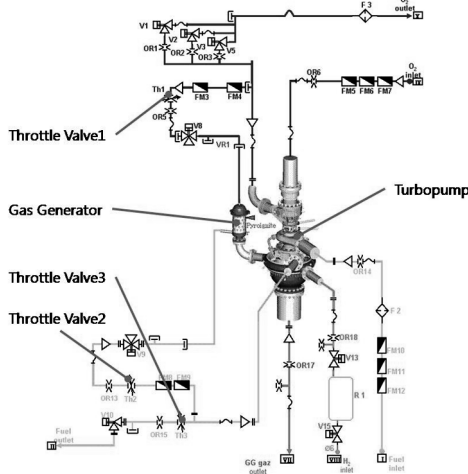


Fig. 2 TP-GG coupled test configuration

터보펌프-가스발생기 연계시험기는 작동중의 모드변환을 고려하여 가스발생기 연료, 산화제 배관, 연소기 연료배관에 스톱 밸브를 장착하였다. 연소기 산화제 배관에는 3개의 밸브 조합을 통해 작동점 변경에 따른 연소압 변경을 모사할 수 있도록 하였다. 또한 스톱 밸브의 차압은 모드 변환의 범위를 포괄할 수 있도록 유량 계수의 범위가 결정되었다.

2.3 해석 모델

해석 방법은 항우연에서 자체 개발한 가스발생기 사이클의 시스템 해석 코드를 사용하였다. 연계시험에 적용된 터보펌프의 성능특성이 모두 반영되어 있고 가스발생기의 가스 물성치는 실제 시험에 사용하는 항공유의 특성을 기준으로 하고 있다.

2.4 터보펌프 가스발생기 연계시험 작동점

연계시험의 설계점과 탈설계점은 Table 1과 같다.

Dc는 설계점이고 OD1은 저혼합비 저압, OD2는 고혼합비 저압, OD3는 고혼합비 고압, OD4

는 저혼합비 고압 조건에 해당한다. 탈설계점은 문헌[3]과 같이 연소압 기준 -5.0%~+5.2%, 연소기 혼합비 기준 -8.6%~+8.7%의 범위에 준하는 작동점으로 결정되었다.

Table 1. Operation points of TP-GG coupled test

	Dc	OD1	OD2	OD3	OD4	
Engine MR	2.247	2.078	2.43	2.404	2.06	
TP rotational speed (rpm)	19410	18386	18965	20518	19868	
Pump flow rate (kg/s)	Ox	63.97	58.9	62.77	69.52	65.25
	Fu	28.47	28.34	25.83	28.92	31.68
Pump Outlet Pressure (bar)	Ox	96.15	87.68	91.85	105.72	100.65
	Fu	143.5	127.2	140.0	161.87	146.53
Turbine flow rate (kg/s)	4.176	3.685	3.882	4.776	4.523	
CC pressure(bar)	60	57	57	63.12	63.12	
CC flow rate (kg/s)	Ox	62.91	57.95	61.77	68.3	64.1
	Fu	25.37	25.6	22.94	25.36	28.31
CC MR	2.48	2.264	2.693	2.693	2.264	
GG pressure(bar)	49.27	43.48	45.8	56.35	53.38	
GG flow rate (kg/s)	Ox	1.066	0.941	0.991	1.22	1.155
	Fu	3.109	2.744	2.89	3.556	3.368
GG MR	0.343	0.343	0.343	0.343	0.343	
GG Temperature(K)	900	900	900	900	900	

MR : Mixture ratio

CC : Combustion Chamber

TP : Turbopump

GG : Gas Generator

2.5 중간 작동점

작동점 변경을 위한 밸브 작동 순서는 연소기 배관 밸브 작동 우선, 가스발생기 배관 밸브 우선으로 나누어 작동점 변화를 검토하였다. 가스발생기 배관을 우선하여 변경할 경우 펌프 후단의 유량계수의 변화는 미미하고 터빈 출력 변경이 우선한다. 반대로 연소기 배관 밸브의 작동이 우선할 경우 펌프 후단의 유량계수의 변화가 펌프출력 변화에 우선하여 나타나게 된다.

연계시험에서 작동점 변경의 중간단계는 Table 2와 같이 정의한다. 예를 들어 CC10은 탈

설계 OD1에서 설계점 Dc로 변경하는 중간단계의 작동점으로 OD1에서 연소기 밸브의 조합을 Dc에 해당하는 것으로 변경하고 가스발생기 밸브조합은 유지할 경우의 작동점을 의미하고 GG10는 연소기 밸브는 변경없이 OD1에서 가스발생기 밸브를 Dc에 해당하는 것으로 변경하였을 때의 작동점이다.

작동점의 변경은 터빈의 작은 출력으로부터 큰 출력으로 변경하는 것을 기본으로 하여 명칭을 정하였다.

Table 2. Valve combinations

mode	mode transfer	CC valves	GG valves
CC10	OD1→Dc	Dc	OD1
GG10		OD1	Dc
CC12	OD1→OD2	OD2	OD1
GG12		OD1	OD2
CC13	OD1→OD3	OD3	OD1
GG13		OD1	OD3
CC14	OD1→OD4	OD4	OD1
GG14		OD1	OD4
CC23	OD2→OD3	OD3	OD2
GG23		OD2	OD3
CC24	OD2→OD4	OD4	OD2
GG24		OD2	OD4
CC43	OD4→OD3	OD3	OD4
GG43		OD4	OD3

Figure 3을 보면 연계시험의 이웃하지 않는 작동점간의 중간 작동점(CC13, GG13, CC24, GG24)은 이웃하는 작동점 부근이 된다. OD2에서 OD4로 가스발생기 밸브 변경을 우선하는 GG24의 경우 전체 혼합비는 유사하나 출력은 증가하는 방향으로 가스발생기 유량이 증가하여 OD3와 유사한 작동점이 되고 CC24의 경우 OD2와 펌프 출력은 유사하고 혼합비는 감소하여 OD1과 유사한 작동점이 된다.

이웃하는 작동점으로서의 변경(CC12, CC14, CC23, CC43, GG12, GG14, GG23, GG43)은 두 작동점을 잇는 선에서 크게 벗어나지 않는 작동점이 된다(Fig.4). OD1에서 OD2로의 변경 혹은 OD4에서 OD3의 작동점 변경은 연소기 배관 변경에 따른 변동이 크고 가스발생기 배관 밸브 변경에 따른 작동점의 이동은 작다. 반대로 OD1

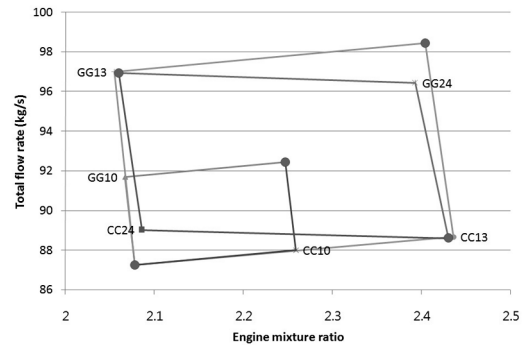


Fig. 3 Intermediate operation points (total flow rate-mixture ratio domain) 1

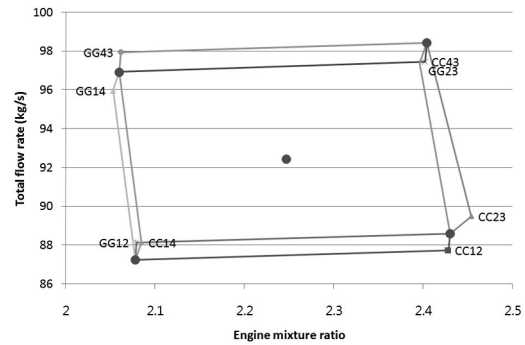


Fig. 4 Intermediate operation points (total flow rate-mixture ratio domain) 2

에서 OD4로 혹은 OD2에서 OD3으로의 변경은 연소기 밸브 변경이 우선할 경우 변동 폭이 작은 변환이 선행되는 셈이다(CC14, CC23).

2.6 엔진시스템과 연계시험비교

Figure 5에서 보이듯이 중간작동점에서 엔진시스템은 연계시험기와 동일한 경향을 보인다. 그러나 엔진시스템에서의 CC13은 연계시험에서의 CC13에 비해 혼합비와 총유량이 작다. 엔진시스템에서의 CC13은 OD1에서 가스발생기 배관의 밸브 위치는 변경이 없고 연소기 연료 배관에서의 스로틀 밸브가 OD3에 해당하는 위치로 변경되어 나타나는 작동점이다. OD3는 OD1에 비해 혼합비가 큰 작동점이므로 연소기 연료배관의 유량계수는 증가하는 방향으로 스로틀 밸브가 닫히며 유량계수의 증가가 펌프 출구압의 증가

Table 3. Engine system and coupled test comparison at the intermediate operation point

		engin	TP-G	engin	TP-G	engin
		e	G	n/TP	G	n/TP
		CC13	CC13	-GG(%)	GG13	GG13
Engine MR		2.399	2.436	98	2.088	2.055
TP rotational speed (rpm)		18777	18535	101	20091	20381
Pump flow rate(kg/s)	Ox	61.83	62.86	98	66.34	65.23
	Fu	25.78	25.8	100	31.77	31.75
Pump Outlet Pressure(bar)	Ox	90.31	87.12	104	102.6	106.7
	Fu	137	133	103	150	155
Turbine flow rate (kg/s)		3.825	3.752	102	4.598	4.7
CC flow rate (kg/s)	Ox	60.88	61.94	98	65.13	63.99
	Fu	22.9	22.98	100	28.38	28.29
CC MR		2.658	2.695	99	2.295	2.262
GG pressure (bar)		45.14	44.27	102	54.25	55.45
GG flow rate (kg/s)	Ox	0.951	0.927	103	1.207	1.243
	Fu	2.874	2.825	102	3.391	3.457
GG MR		0.331	0.328	101	0.356	0.359
GG Temperature(K)		889	886	100	913	916
Total flow rate (kg/s)		87.61	88.66	99	98.11	96.98

로 이어진다. 연료측 펌프 출구압이 증가하면서 가스발생기로의 유량이 증가하게 되고 이에 펌프의 출력이 증가하게 된다.(Table 3 참조) 이때 연계시험과 다르게 엔진 시스템에서는 연소기 유량에 따라 증가된 연소압으로 인해 연계시험 보다는 적은 유량 증가를 보인다.

GG13의 경우 엔진 시스템은 연계시험에 비해 더 큰 유량과 큰 혼합비를 보이는 반면 가스발생기 압력과 터빈 출력은 더 작다. OD1에서 연계시험의 유량계수는 연소기 배관이나 가스발생기 배관에서 엔진시스템과 동일하도록 설계되어 있다. 그러나 작동점이 변경되면서 엔진 시스템 GG13에서 연계시험기보다 작은 연소기 배관 유량 계수를 가지게 되는 것이다.

이러한 차이는 GG24에서도 동일하게 나타나

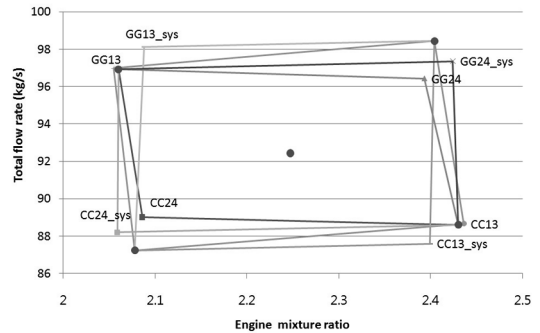


Fig. 5 Intermediate operation point comparison (engine system and TP-GG coupled test) 1

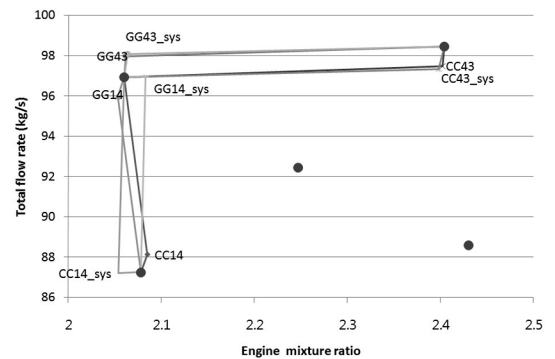


Fig. 6 Intermediate operation point comparison (engine system and TP-GG coupled test) 2

서 엔진 시스템 GG24가 연계시험의 GG24보다 더 큰 유량이 흐르지만 터빈의 출력은 작다.

GG43, CC43, GG12, CC12에서 연계시험기와 엔진시스템은 거의 동일하고 GG23, CC23,

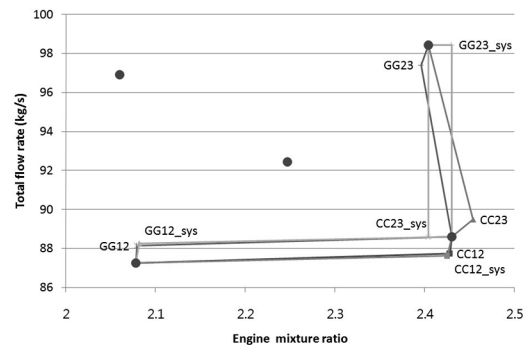


Fig. 7 Intermediate operation point comparison (engine system and TP-GG coupled test) 3

GG14, CC14에서는 다소 차이를 보인다. 즉 동일 유량 수준에서 혼합비 변경시에는 연계시험과 시스템의 거동차이는 거의 없으며 동일 혼합비에서 유량이 변경될 때의 중간점에서는 연계 시험과 거동 차이를 보인다.

Table 4. Variables range comparison at intermediate operation point

	LOx pump outlet pressure		fuel pump outlet pressure		GG pressure		GG temperature	
	engine	TP-GG	engine	TP-GG	engine	TP-GG	engine	TP-GG
CC10	○	○	○	○	○	○	○	○
CC12	○	○	○	○	○	○	○	○
CC13	○	○	○	○	○	○	○	○
CC14	▽	○	▽	▽	▽	▽	▲	○
CC23	○	○	○	○	○	○	▲	○
CC24	○	○	○	▽	○	▽	▲	▲
CC43	○	○	○	○	○	○	○	○
GG10	○	○	○	○	○	○	▲	▲
GG12	○	○	○	○	○	○	▲	▲
GG13	○	○	○	○	○	○	▲	▲
GG14	○	○	○	○	○	○	○	▲
GG23	○	○	▲	▲	▲	▲	○	▲
GG24	○	○	○	▲	○	▲	○	○
GG43	○	○	○	○	○	○	▲	▲

compared to operation range, ○:in range, ▲: excess, ▽: under

Table 4는 각 작동점에서의 성능변수를 Table 1의 탈설계점에서의 최대 최소 범위와 비교한 표이다.

연계시험기 산화제 펌프 토출압의 경우 모든 중간 작동점에서 기준 작동점내에 있는 것을 알 수 있다. 연계시험기 연료펌프의 토출압은 CC14, CC24에서 최소 토출압보다 작다. 연계시험기 각 배관에서의 유량계수(Fig. 8)를 살펴 보면 OD4의 연소기 배관 유량계수는 OD1이나 OD2에 비해 작으므로 CC14나 CC24의 토출압은 OD1이나 OD2에 비해 작아지나 가스발생기 유량계수는 변함이 없으므로 가스발생기 즉 유량이 작아지면서 출력은 작아진다. 따라서 연료 펌프의 토출압이 탈설계점의 최저점인 OD1 보

다도 작은 값을 가지게 되는 것이다.

연계시험기에서 가스발생기 배관을 우선 변경하는 GG23, GG24에서는 연료펌프 출구압이 최대 출구압보다 큰 데 가스발생기 배관의 유량계수가 감소하여 가스발생기 유량이 증가하면서 OD3나 OD4에 비해 큰 OD2의 연소기 배관 유량계수로 밸브가 유지되기 때문에 펌프의 출구압이 증가하게 되는 것이다.

펌프의 토출압은 기준 작동점보다 높은 작동점으로 변경될 경우 펌프의 구조적인 문제를 야기할 수 있으므로 가능한 회피하는 것이 바람직하다.

가스발생기의 온도가 별도로 제어되지 않는 시스템에서의 가스발생기 혼합비 변화와 이에 따른 온도 변화는 터빈 입구온도를 고려하여 검토되어야 한다. 가스발생기 가스온도가 설정된 온도보다 높을 경우 터빈 손상을 유발할 수 있고 설정된 온도보다 낮을 경우 터빈의 출력이 충분하지 않아 가스발생기 (터빈)유량이 크게 소요된다.

연계 시험에서는 시스템의 성능저하보다는 터빈 손상에 대한 안정성 확보를 위해 설계 온도보다 높은 온도는 지양해야 한다.

위의 기준으로 볼 때 작동점 변경시 연소기 배관의 변경을 우선하는 것이 가스발생기 온도를 설계점 이하로 하고 토출압이나 가스발생기 압력의 과도해지지 않는 것으로 볼 수 있다. 다만 CC24의 경우 가스발생기 온도가 912K로 설계 온도보다 크므로 가스발생기 배관을 우선하

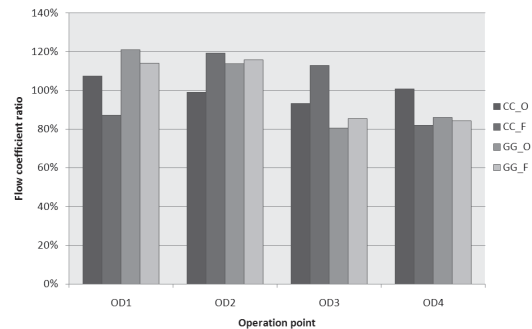


Fig. 8 Flow coefficients ratio to the design point at TP-GG coupled test

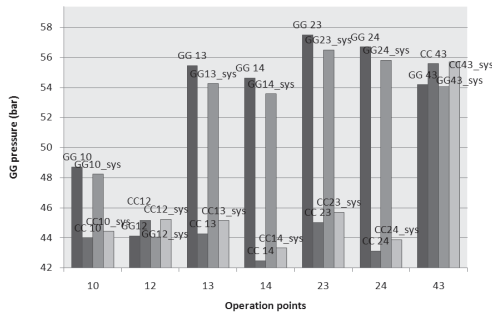


Fig. 9 Gas generator pressure range at intermediate operation points

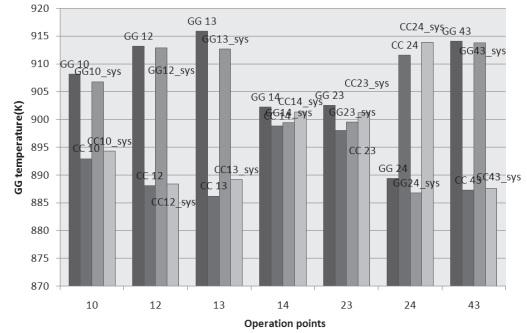


Fig. 10 Gas generator temperature range at intermediate operation points

는 GG24로 작동점 변경을 생각할 수 있는데 연료펌프 토출압은 OD3에 비해 1.6bar 크고 가스발생기 압력 0.3 bar 크다. 시험의 불확정성 및 설계 마진을 고려하여 최종 결정이 필요하다.

CC14 에서도 가스발생기의 작동영역이 연소 불안정을 야기 하지 않는지 검토가 필요하다. 엔진시스템 산화제 펌프 토출압의 경우 엔진시스템 CC14를 제외한 모든 중간 작동점에서 기준 작동점 시험영역 내에 있다. 엔진시스템 CC14는 기준작동점 최저 산화제 토출압에 비해 0.05bar 작은 것으로 기준 작동점에 준하는 것으로 볼 수 있다.

연료펌프의 토출압과 가스발생기 압력은 엔진시스템에서 CC14를 제외한 중간작동점에서 기준 작동점 범위내에 포함되고 이는 연계시험에 비해 더 양호하다.

Figure 9과 10는 각각 중간 작동점에서의 가스발생기 온도와 압력을 도시한다. 연계시험 CC24의 경우 가스발생기 온도가 912K로 설계점인 900K에서 12K가 초과된 값이 된다. 가스발생기 온도 중 최대값은 연계시험 GG13에서 916K이다. 연계시험 CC14에서의 가스발생기 압력이 중간 작동점 중 가장 작은 값으로 탈설계점의 최저점인 43.5bar보다 1bar 더 낮고 GG23에서의 가스발생기 압력이 57.5bar로 탈설계점 최대압 56.4bar 보다 1.1 bar 높은 압력을 보여준다.

중간 작동점에서의 가스발생기 압력이나 온도의 변동은 Fig. 9, 10에서보듯이 연계시험과 엔

진시스템은 동일한 경향을 보이나 엔진 시스템에서의 변화폭이 작은 것을 볼 수 있다.

Figure 10에서 가스발생기 온도의 변화를 보면 OD1과 OD4, OD2와 OD3의 중간작동점에서 연계시험과 엔진 시스템의 경향이 반대로 나타난다.

연계시험에서는 GG14에서 온도가 더 높아지고 엔진 시스템에서는 CC14에서 온도가 더 높다. 하지만 설계점과의 차이가 작아 시험에서의 위험성은 없다.

3. 결 론

본 연구에서는 연계시험에서 작동점 변경 중 거처게 되는 중간 작동점을 분석하였다. 대체적으로 연소기 배관을 우선하여 변경하는 경우 펌프 토출압이나 가스발생기 온도에서 위험한 영역을 회피할 수 있다. 일부 작동점에서는 가스발생기 배관을 우선 변경하는 경우와 항목별로 비교 분석을 거쳐 모드변환의 방법을 선택하여야 한다. 이때 가스발생기나 터보펌프의 개발 시험이력이나 성능 확인 영역, 터빈부의 열적 내구성, 가스발생기의 연소 불안정 조건, 터보펌프와 시험기의 내압특성 등이 종합적으로 검토되어야 한다.

중간 작동점에서의 엔진 시스템 거동과 연계시험기를 비교한 결과 연소기 유량에 따라 연소

압이 변화하는 엔진 시스템은 단순 차압특성을 보이는 연계시험기와의 차이를 보이게 된다. 이와 같은 분석 결과는 추후 엔진 시스템 시험시 시험 영역 설정과 모드 변환 순서 결정에 주요한 참고 자료로서 활용될 것이다.

참 고 문 헌

1. 김승한, 남창호, 김철웅, 설우석, 터보펌프 가스발생기 연계시험 설계, 한국 추진공학회 2006년도 추계학술대회 논문집, 2006
2. B. K. Wood, Propulsion for the 21st Century-RS-68, 38th Joint Liquid Propulsion Conference, 2002, AIAA 2002-4324
3. 남창호, 김철웅, 김승한, 박순영, 터보펌프 가스발생기 연계시험에서의 시험영역 설정과 설비 설계, 한국추진공학회 2008년도 춘계학술대회 논문집, 2008