

LM 가스터빈 소개



한진KPS(주)
기술연구원 설비진단그룹
선임전문원/김하용
Tel : (031)710-4398

항공기 엔진	항공기	LM 가스터빈
F404	FA18	LM1600
CF6-6	DC10	LM2500
CF6-50	AIRBUS	LM5000
CF6-80	보잉747	LM6000

예를 들면 보잉 747-400은 4개의 CF6-80 제트엔진을 장착하는데 이 엔진은 공기 중에서 항공기를 추진할 수 있는 추력이 약 400톤이다. 이 항공기의 최대 속도는 1,020km/h이고, 이때 연료 소모량은 12,300l/h 이다. 이것은 이 항공기가 연료 1l로 83m를 날 수 있다는 것을 의미한다. 이 엔진의 출력은 약 180MW(4기×45MW= 180MW)가 된다. 이것은 4,500대의 자동차 엔진출력 또는 60와트 전구 300만개를 켤 수 있는 용량이다.

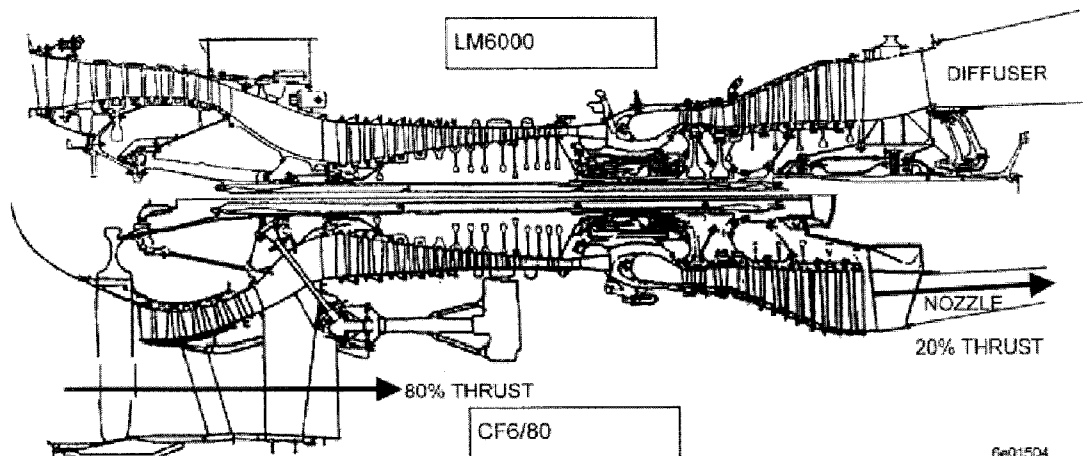
제트 엔진은 LM 엔진과 어디가 다른가? CF6-80 엔진과 LM6000을 비교해보자.

제트 엔진은 저압 압축기(LP compressor)에 연결된 큰 프런트 팬(large front fan)이 있다. 이 프런트 팬은 공기를 불어내어 항공기 엔진 추력의 80%를 발생시킨다. 프런트 팬에서 흡인된 공기의 나머지는 저압 압축기(LPC), 고압 압축기(HPC)에서 고압으로 압축되

1. 입문

LM 가스터빈은 미국 General Electric사에서 설계하고 제작한 항공기 엔진을 산업용 및 발전용으로 개조한 가스터빈이다. LM 가스터빈은 GE사의 제트엔진으로부터 기원하였으며, 이 가스터빈으로 구동하는 부하는 발전기, 압축기, 펌프, 선박 추진기, 물 분사기 등이 있다. “LM” 용어의 뜻은 제트엔진을 육상(Land) 및 해상(Marine)용 터빈으로 사용한데서 유래하였다.

LM 가스터빈은 많은 승객을 수송하는 보잉 747이나 DC-10과 같은 여객 항공기뿐 아니라 군용기의 제트 엔진을 육상 및 해상용으로 개조한 것이다. 다음 표는 현재 사용 중인 여러 가지 LM 가스터빈들이다.



CF-6-80 엔진과 LM6000 비교

어 연소실(CC)에서 연료와 혼합되어 고온가스가 된다. 고온가스는 HPC를 구동하는 고압 터빈(HPT)을 돌리고, LPC와 프런트 팬을 구동하는 저압 터빈(LPT)을 돌린다. 마지막으로 고온가스는 배기 노즐에서 더욱 팽창되어 항공기 엔진 추력의 나머지 20%를 발생한다.

제트엔진을 발전용 가스터빈으로 사용하려면 항공기 추력 발생 부품인 프런트 팬(front fan)과 배기 노즐이 필요 없으므로 이 부품들은 설치되지 않는다. LP 터빈은 동력 터빈으로 대체되며, LPC 및 발전기와 같은 부하를 구동한다. 터빈 배기측에는 추력발생 노즐 대신에 HRSG로 가는 디퓨저를 설치한다. 항공기 엔진처럼 배기가스를 팽창시키지 않기 때문에 동력터빈은 기계적 동력을 증가시키기 위하여 LPT에 비하여 크기가 커지게 된다.

현재 사용 중인 발전용 LM 가스터빈 명세와 성능은 다음 표와 같다.

LM 기계는 소음방지 엔크로저(enclosure)에 “패키지(package)”로 설치되고, 패키지 안과 주위에 시동장치, 오일 계통, 흡입공기 계통과 같은 보조설비를 설치한다.

2. 운전 원리

LM 2500 가스터빈을 예로 보자. LM 2500 가스터빈의 운전원리는 다른 가스터빈과 같다. 즉 공기가 압축기에서 압축되어지고, 연소실에서 가열되어지고 터빈에서 팽창한다. 그럼으로써 기계적인 동력이 발생하며, 이 동력은 압축기를 구동하기 위하여 일부분이 사용되고, 남은 축 동력은 발전기와 같은 부하를 구동하는데 이용하게 된다.

LM2500 가스터빈은 2개의 주요 구성품 즉 가스 발생기(gas generator)와 동력터빈(power turbine)이다.

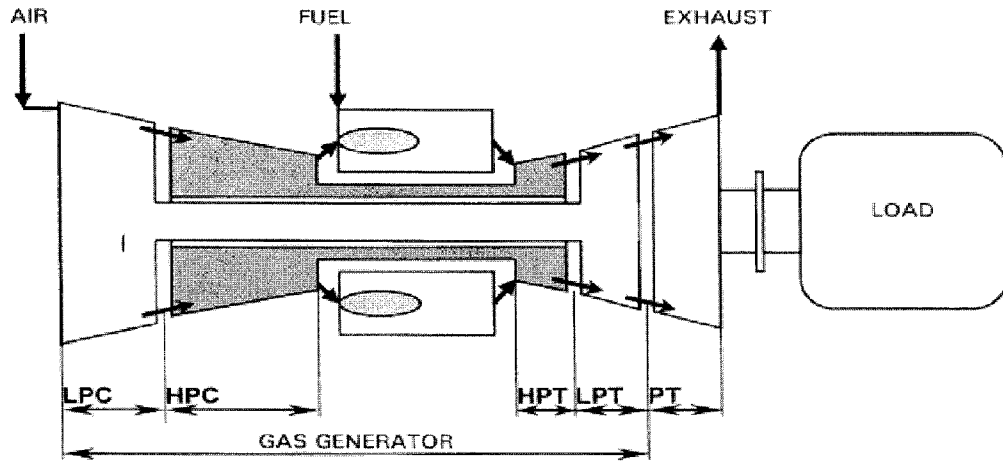
가스 발생기는 단일 스플(single spool)로 한 개의 고압 로터로 이루어진다. 단일 스플 가스 발생기는 16단의 축류형 압축기, 환상형 연소실, 그리고 축류형 압축기를 구동하는 2단 증동터빈으로 구성되었다.

동력 터빈은 6단의 반동터빈이며, 가스발생기의 압축기를 구동하고 남은 가스동력을 최고의 효율로 변환시켜 발전기를 구동한다.

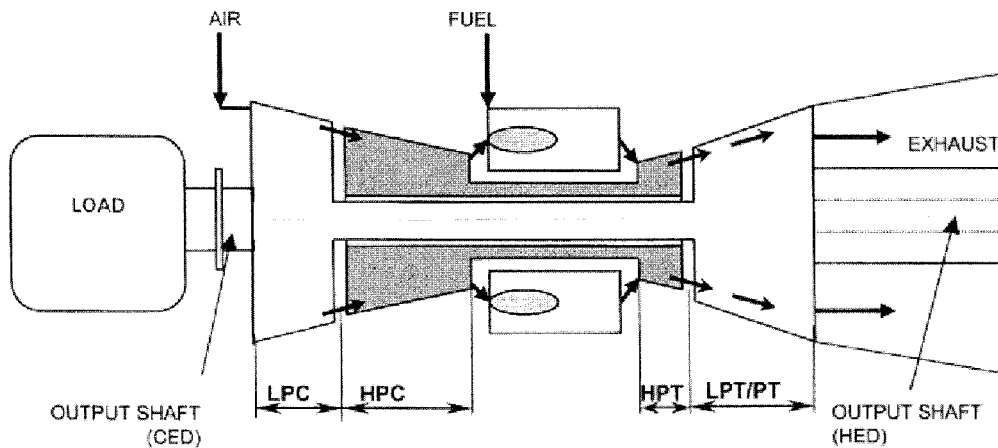
LM1600과 LM5000은 케이싱 내에 2개의 로터

Specification	LM1600PA	LM2500PE	LM2500+	LM2500PH
출 력(kW)	13,620	22,600	27,640	27,020
효 율(%)	35.9	38.4	38.7	39.5
압 축 비	22.5	18	23.1	18
회 전 수	7,000	3,000	6,100	3,000
배기가스(kg/s)	45	69	81	76.3
배기온도(°C)	487	524	496	505
패키지 길이(m)	18.1	16.5	16.5	16.5
폭(m)	3.7	4.1	4.1	4.1
높이(m)	3.7	4.1	4.4	4.1
질량(kg)	90,000	140,000	140,000	140,000

Specification	LM5000	LM5000PC	LM5000PD	LM6000PD
출 력(kW)	34,450	46,350	49,600	43,050
효 율(%)	37.6	40.9	42	43.2
압축비	28.8	28.8	28.8	29
회전수	3,600	3,600	3,600	3,600
배기가스(kg/s)	120	149.7	156	1273
배기온도(°C)	436	421	408	450
패키지 길이(m)	24.4	24.4	24.4	17.2
폭(m)	3.7	4.1	4.1	4.1
높이(m)	4.4	4.4	4.4	4.1
질량(kg)	160,000	160,000	160,000	160,000



2중 스톨(spool) 가스 발생기와 동력터빈으로 구성된 LM1600 또는 LM5000



LM6000 가스터빈 구성도

로 구성된 이중 스톨 구조의 가스 발생기를 가지고 있고, LP 압축기는 LP 터빈에 의하여 구동되고, HP 압축기는 HP 터빈에 의하여 구동된다. 이 두 축은 이중 동심축으로 설치되어 운전되고, 서로 다른 속도를 가지고 있다. HP 압축기에서 최종 압축된 공기는 연소실로 들어가 연소된다. 다음의 연소가스는 HP 터빈, LP 터빈 그리고 분리된 로터로 설치된 동력터빈(PT),을 지나 대기 또는 HRSG로 방출된다. 이 형식 LM 가스터빈은 총 3개의 로터로 구성되어 있다.

LM6000은 LPT/PT(LP터빈/동력터빈)로 부르는 한 개의 터빈과 HP 터빈이 결합되어 있어 2개의 로터를 가지고 있다. 이러한 구조는 LM6000이 LM5000 보다 간결한 설비가 된다. LM6000은 출력축(발전기)을 압축기축이나 배기축에 가질 수 있는 유일한 터빈이다. 열병합 사이클에 적용할 때는 터빈으로부터 배기가스가 일직선으로 HRSG로 흐르는 형식 즉 발전기를 압축기축에 설치하는 것이 유리하다.

3. LM 가스터빈 구조

오늘날 많이 사용되는 LM1600과 LM6000 가스터빈 구조에 대하여 간단히 설명한다.

3.1 LM1600

LM1600 가스터빈은 제트 전투기인 노드롭 F-20, 맥도넬 더글라스 F/A-18 등의 엔진인 F-404를 발전용 및 선박 추진엔진으로 개조한 가스터빈이다.

3단의 축류형 LP 압축기는 1개 단의 LP 터빈에 의하여 구동된다. LP 압축기는 1 bar의 공기압을 5 bar의 토출 압력으로 압축하므로 압축비가 5이며, 압축 후 온도는 약 210℃ 다. LP 압축기 입구에는 압축기를 안정적으로 제어하는 역할을 하는 가변 입구 안내익(VIGV variable inlet guide vane)이 있고, LP 압축기 토출 측에는 추기한 압축 공기를 대기로 방출할 수 있는 가변 추기 밸브(VBV variable bleed valve)가 있다. 이 설비는 저속에서 LP 및 HP 압축기를 서지

등이 없이 안정적으로 운전하는데 필요하다.

HP 압축기는 7단의 축류형 압축기이며, 1개 단의 HP 터빈에 의하여 구동된다. 이 압축기의 압력비는 4.5 이며, LP 압축기를 고려하면 $22.5(LP\ 5 \times HP\ 4.5 = 22.5)$ 이다. 압축된 공기는 약 $500^{\circ}C$ 상태로 연소실에 들어간다. HP 압축기 가변속도에서 압축기의 안정과 고 효율을 유지하기 위하여 가변 고정익(VSV variable stator valve)가 설치되어 있다.

VGC(variable geometry control)는 LP 압축기 및 HP 압축기가 가변속도에서 안정적이고 고 효율을 유지하기 위한 시스템이다 (LP 및 HP 압축기는 급회전을 자유롭게 할 수 있는 가변속도 압축기이다). 이 시스템은 LP 압축기의 VIGV와 LP 압축기와 HP 압축기 사이의 VBV, 그리고 HPC의 VSV를 제어한다.

연소실은 18개의 연료 노즐이 설치된 환형 연소실(annular chamber)형이다. 연료 노즐은 가스연료, 액체연료, 이중연료(가스, 액체), 증기분사, 물 분사 그리고 (DLN dry low emissions) 연소가 가능하도록 설계되었다. 연료가 연소하면 공기 온도는 약 $1200^{\circ}C$ 로 증기한다. 연소실은 연소된 가스압력을 약간 저하하게 하므로 HP 터빈 입구 압력은 약 21.5 bar(abs)가 된다.

HPT(HP Turbine)는 단단 축동형 터빈으로 HP 압축기를 구동한다. 고온 가스통로에 있는 노즐(고정익)과 회전익은 강력한 냉각 시스템이 필요하다. HPT의 입구 온도 $1200^{\circ}C$, 압력 21 bar, 출구 온도와 압력은 각각 $940^{\circ}C$ 와 8 bar(abs)이다.

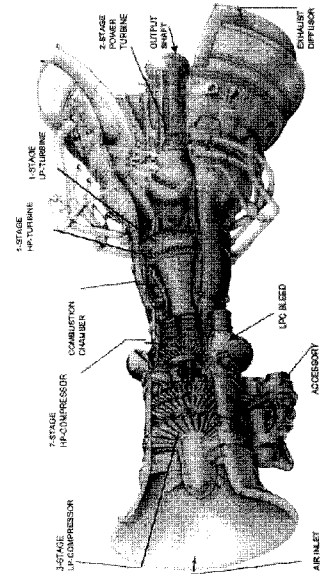
LPT(LP Turbine) 역시 단단 축동형 터빈이며, LP 압축기를 구동한다. LP 압축기의 고온 부분은 HPT 부분보다는 압력이 약한 공기로 냉각된다. LPT 입구온도 $940^{\circ}C$ 와 8 bar이며, 출구 상태 $760^{\circ}C$ 와 3.5 bar(abs)이다.

PT(Power Turbine)는 2단으로 구성되어 있다. LPT에서 나온 가스는 2개 단에서 대기압까지 팽창하고 온도는 약 $500^{\circ}C$ 로 된다. 가스의 팽창은 기계적인 일로 바뀌고, 플렉시블하게 연결된 감속기어 장치($7000rpm$ 에서 1500 또는 $3000rpm$ 으로 감속)를 통하여 부하나 발전기를 구동하는 축 동력을 생산한다.

로터의 베어링은 롤러(roller)와 볼(ball) 베어링이다. 롤러 베어링은 반경방향(radial) 힘(로터 하중)만을 받으며, 볼 베어링은 반경과 잔류 축 방향 힘을 받는다. HPT와 LPT 사이에 있는 베어링은 차동 베어링

(differential bearing)으로 내륜 속도가 $13,000rpm$, 외륜 속도가 $16,000rpm$ 이다.

AGB(Accessary Gear Box)는 HPC 로터에 연결되어 있고, 윤활유 펌프, 유압 펌프와 같은 보조기계를 구동한다. 기동할 때 시동모터(유압 모터)는 AGB를 통하여 HPC 로터를 구동한다.



LM1600 Gas turbine

3.2 LM6000

LM6000은 CF6-80 제트엔진에서 유래한 열병합 발전용 가스터빈이다. LM6000은 LM2500과 LM5000의 경험을 토대로 제작되었다.

LPC(LP Compressor)는 5단 축류형 압축기이며, 일정속도인 $3600rpm$ 으로 회전하는 PT(동력터빈 power turbine)에 연결되어 있다. LPC는 1 bar의 흡입 압력을 2.4 bar의 토출 압력으로 압축하므로 압축비가 2.4이다. LPC 입구에는 압축기를 안정적으로 제어하는 역할을 하는 가변 입구 안내익(VIGV variable inlet guide vane)이 있고, LPC 토출 측에는 추기한 압축 공기를 대기로 방출할 수 있는 가변 추기 밸브(VBV variable bleed valve)가 있다. 이 설비는 저속(기동 및 정지)에서 LPC 및 HPC의 서지 방지 등 압축기를 안정적으로 운전하는데 필요하다.

HPC(HP Compressor)는 14단의 축류형 압축기이며, 2개 단의 HP 터빈에 의하여 구동된다. 이 압축기의 압력비는 12이며, LP 압축기를 고려하면 총 압력비는 $29(LP\ 2.4 \times HP\ 12 = 29)$ 이다. 압축된 공기는 약 $500^{\circ}C$ 상태로 연소실에 들어간다. HPC는 가변

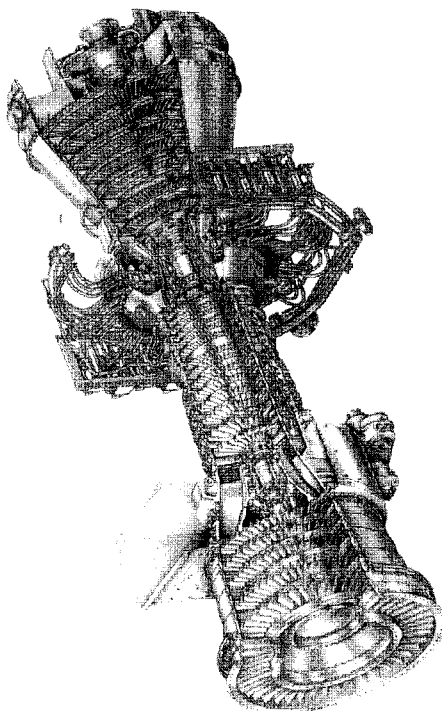
속도에서 압축기의 안정과 고 효율을 유지하기 위하여 가변 고정익(VSV variable stator valve)이 설치되어 있다.

VGC(variable geometry control)은 LPC 및 HPC가 가변속도에서 안정적이고 고효율을 유지하기 위한 시스템이다(LPC는 정격속도에서 일정하게 회전하며 HPC는 급회전을 자유롭게 할 수 있는 가변속도 압축기이다), 이 시스템은 LPC의 VIGV와 LPC와 HPC 사이의 VBV, 그리고 HPC의 VSV를 제어한다.

연소실은 30개의 연료노즐이 설치된 표준형 환형 연소기(SAC Standard Annular Combustor) 또는 75개의 예-혼합(premixing)건식 저 배기(DLN dry low emissions) 노즐의 환형 연소실이다.

연료노즐은 가스연료, 액체연료, 이중연료(가스, 액체), 증기분사, 물 분사 그리고 건식 저 배기(DLN dry low emissions)사용이 가능하도록 설계되었다. 연료가 연소하면 공기 온도는 약 1200℃로 증가한다. 연소실은 연소된 가스압력을 약간 저하하게 하므로 HP 터빈 입구 압력은 약 28 bar(abs)가 된다.

HPT(HP Turbine)는 2단 축동형 터빈으로 HPC를 구동한다. 고온 가스통로에 있는 노즐(고정익), 회전익은 강력한 냉각 시스템이 필요하다. HPT의 입구 온도 1200℃, 압력 28 bar, 출구 온도와 압력은 각각 840℃와 7.5 bar(abs) 이다.



LM6000 가스터빈 (DLE version)

LPT/PT는 LP 터빈과 동력 터빈이 결합된 5단이다. 가스는 5개 단에서 대기압까지 팽창하고 온도는 약 450℃로 된다. 가스의 팽창은 기계적인 일로 바뀌어 LP 압축기를 구동하고, 직결된 3600rpm 발전기를 구동하거나 감소기어를 통하여 3000 또는 1500rpm 발전기를 구동한다.

로터의 베어링은 롤러(roller)와 볼(ball) 베어링이다. 롤러 베어링은 단지 반경방향(radial) 힘(로터 하중)만을 받으며, 볼 베어링은 반경과 잔류 축 방향 힘을 받는다.

AGB(Accessary Gear Box)는 HPC 로터에 연결되어 있고, 윤활유 펌프, 유압 펌프와 같은 보조기를 구동한다. 기동할 때 시동모터(유압 모터)는 AGB를 통하여 HPC 로터를 구동한다.

4. 제어 및 보호 계통

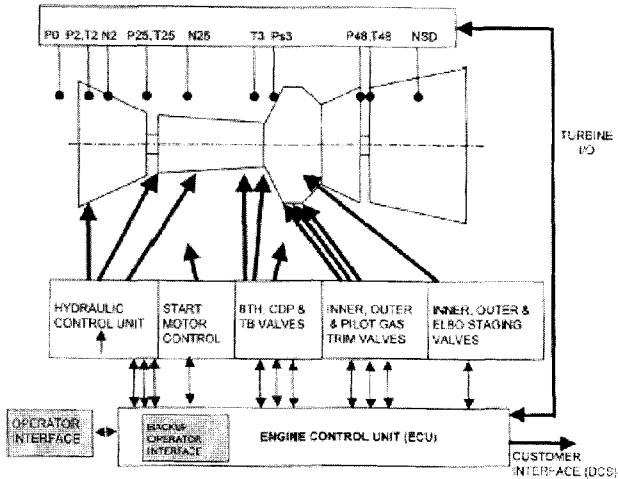
LM6000 예를 들면 제어와 보호 계통은 운전변수(operating parameters)를 제어하고, 위험한 상황에서 엔진을 보호한다.

제어계통:

- LP rotor speed and acceleration (XN2)
- HP rotor speed and acceleration (XN25)
- Exhaust temperature gas generator (T48)
- Compressor discharge pressure, temperature (Ps3, T3)
- Variable geometry (IGV, VBV, VSV)
- Starting motor
- Steam or water injection (사용이 가능할 경우)
- Dry low emission (사용이 가능할 경우)
- Inlet air heating (사용이 가능할 경우)
- Start and stop sequencing

보호계통:

- LP rotor overspeed
- HP rotor overspeed
- Overtemperature (T48)
- Compressor stall (-dPs3/dt)
- Loss of flame
- Protection signals from the auxiliary systems



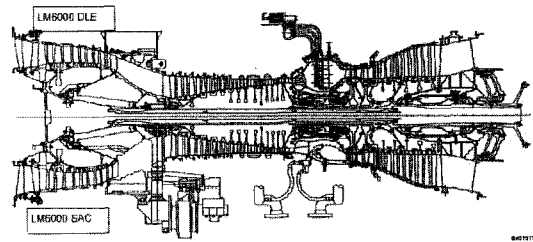
LM6000 제어 시스템 원리 (DLE version)

5. 배기가스 생성을 제어

LM1600, LM2500, LM2500+와 LM6000은 물이나 증기 분사 없이 질소산화물(NOx), 일산화탄소(CO), 탄화수소(HC) 등의 배기가스 생성물 감소를 저감한 새로운 연소 시스템을 개발하였다. 이 시스템을 “건식 저 배기가스 생성물(dry low emission) DLE” 시스템이라 부른다.

DLE 시스템의 목적은 가스터빈의 전부하 범위에서 배기가스 생성물을 낮게 유지하기 위하여 연소 화염온도를 더 높거나 낮게 조정하는 것이다. 연소전 공기와 연료를 미리 혼합하여(premixing) 확산연소(diffuse flame)를 시키기 때문에 재래식의 연소 시스템보다 화염 온도는 낮게 된다. 연소제어 시스템은 연료제어 밸브

의 제어뿐 아니라 운전 중 항상 예 혼합기(premixer)의 연소공기와 연료비를 또한 제어한다. 저 NOx 상태에서 화염온도는 약 1650°C가 된다.

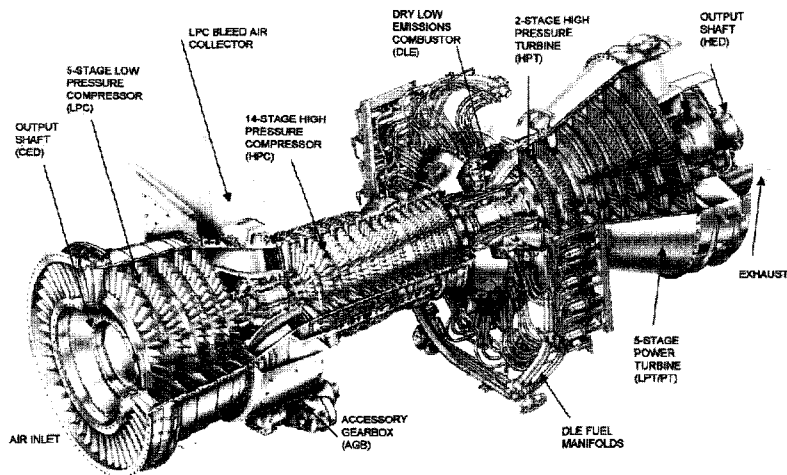


LM6000 DLE 형식과 SAC 형식의 비교

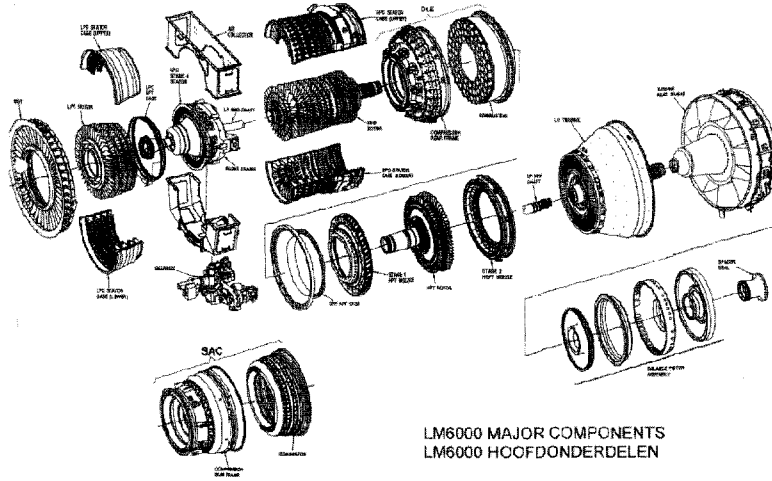
6. LM 가스터빈 정비

LM 가스터빈은 가능한 현장의 인클로저 내에서 정비가 가능하도록 설계되었다. 주요한 정비(major maintenance)를 실시하기 위해서는 정비에 필요한 특수 공기구가 준비되고, 정비자격이 있는 정비공장으로 보내어야 한다. 터빈의 주요한 정비는 케이싱을 개방하여 정비작업이 행해진다. 주요 작업내용과 LM 가스터빈 성능을 보증하기 위하여 반드시 자격이 있는 사람이 정비를 해야 한다. 주요한 정비 작업을 마치면 터빈 세트는 특별히 설치된 별도의 시운전 격실로 이동 설치되어 부하시험을 실시한다.

다음 페이지는 LM6000 가스터빈 사진과 주요 구성 부품이 있다.



LM6000PD gas turbine



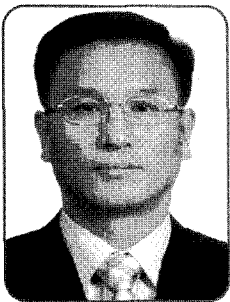
LM6000 MAJOR COMPONENTS
LM6000 HOOFDONDERDELEN

7. 결론

LM 가스터빈은 기존 발전용 가스터빈보다 중량당 비출력이 크고, 효율이 높다. 이러한 특성 때문에 발전용 뿐 아니라 선박 및 함정용 추진 엔진으로도 많이 사용된다. 국내에는 비교적 생소한 모델이지만 오래전부터 미국, 유럽, 중동지역에서 열병합 발전용 터빈으로

널리 이용되고 있다. 앞서 언급한 것처럼 LM 가스터빈 13~50MW의 비교적 소형 출력이기 때문에 소규모 열병합 단지에 적용될 수 있을 것으로 보인다. 현재 국내에서는 해군함정에 LM1600 가스터빈이 추진기 엔진으로 탑재되어 있는 것으로 알려져 있다.

증기터빈 성능시험 및 성능분석 기법(1)



한전전력연구원
엔지니어링센터
책임연구원/황광원
Tel : (042)865-7591

1. 증기터빈 성능분석에 필요한 자료

증기터빈의 성능분석에 필요한 기초적인 자료로는 ① 급수유량, ② 첫 단 압력, ③ 모든 추기의 압력과 온도, ④ 주증기압력과 온도, ⑤ 재열증기온도, ⑥ 재열증기관의 압력강하율, ⑦ 저압터빈출구 배기압력, ⑧ 고압터빈

출구 증기의 압력과 온도, ⑨ 고압/중압/저압 터빈의 엔탈피강하효율 등이다.

2. 자료 수집을 위한 성능시험조건

일관성 있는 자료를 얻기 위해서는 정격 증기조건과 동일한 제어밸브개도 하에서 실시하여야 한다. 따라서 밸브 점에서 실시하는 것이 가장 바람직하다.

[주] 밸브 점 : 해당 제어밸브가 거의 열리고 다음 밸브가 열리기 시작하는 점으로 엔탈피 강하효율이 최고가 되는 밸브위치를 말함.

3. 시험자료에 의한 성능분석

가. 터빈 시험결과의 해석

시험결과 분석의 중요한 첫 번째 단계는 시험자료를