

삼성테크윈의 가스터빈 개발 및 생산기술

이 글에서는 국내 유일의 가스터빈 전문 계열화 업체인 삼성테크윈이 그 간의 각종 사업을 통해 확보한 설계, 해석 및 시험평가 등 개발기술과 생산기술을 소개하고자 한다.

삼성테크윈(주)은 1977년 삼성정밀(주)이라는 이름으로 설립되어 가스터빈 창정비 사업을 시작한 이래로 각종 국책 사업을 통해 가스터빈 조립, 창정비, 부품 국산화 생산 등을 수행하며 가스터빈 생산 및 정비 기반을 구축하였고, 최근에는 이러한 기술 기반을 바탕으로 주요 부품 및 모듈의 수출을 통해 세계 시장에서 가스터빈 모듈 전문 업체로 성장해 나아가고 있다.

또한 가스터빈 독자개발 기술을 확보하고자 설립한 부설 파워시스템연구소(설립 당시 엔진연구소)를 중심으로 1991년부터 발전용 가스터빈, APU(Auxiliary

Power Unit), 무인 항공기용 터보제트 엔진을 개발해 왔고, 최근에는 UAV용 초소형 터보제트 엔진의 독자개발 및 한국형 헬기 사업(KHP : Korean Helicopter Program)의 주 엔진인 터보샤프트 엔진의 국제 기술협력 개발에 착수하는 등 개발범위를 유인 항공용 엔진에까지 확대해 나아가고 있다.

가스터빈 개발 경험

삼성테크윈(주) 파워시스템연구소는 1991년 이래로 터보샤프트 엔진, 터보제트 엔진 등 다양한 가스터빈을 개발하고 있다. 그 중

주요 엔진에 대해 이 글을 통해 간략하게 소개하고자 한다. 국내에서 최초로 개발된 가스터빈인 TG1200은 터보샤프트 엔진으로 산업자원부의 공업기반기술 과제로 1991년 12월부터 2006년 12월까지 삼성테크윈(주) 주관 하에 한국항공우주연구원, 한국기계연구원, 서울대 터보동력센터 등 많은 연구기관이 참여하여 개발했다. 이 엔진은 압력비 12:1의 2단 원심압축기, 원통형 연소기 및 3단의 축류 터빈으로 구성되어 27,000rpm의 속도로 회전하며 1.2MW의 전기출력을 발생한다. 설계수명은 약 30,000시간이며, 엔진의 주축은 15:1의 기어비를

갖는 기어박스를 통해 감속되어 발전기에 연결되는 구조를 가진다.

1997년 11월부터 과기부 민군겸용기술개발 과제로 한국항공우주연구원 등의 참여기관과 함께 보조동력장치(APU : Auxiliary Power Unit)를 개발하기 위한 연구를 시작하였다. 2002년 7월에 성공적으로 개발된 APU는 압력비 4:1의 단단 원심압축기, 환형역류형 연소기 및 단단 반경형 터빈으로 구성되고, 주축에 직결된 고속 모터/제너레이터가 에어 포일 베어링에 의해 지지되는 신

개념의 터보샤프트 엔진이다. 정격 회전속도 60,000rpm에서 100kW의 전기출력을 발생할 수 있으며, 필요시 추기공기를 공급할 수 있는 기능을 가지고 있다.

2002년 3월에는 기 개발한 100kW급 APU를 개조하여 적외선 차폐 겸용 발연장치의 주엔진(PPU : Primary Power Unit)을 개발하는 연구에 착수하였다. 2003년 12월에 성공적으로 개발된 이 엔진은 등가출력 52kW의 터보샤프트 엔진으로 외장형 보기시스템을 채택하고 있다. 열효율 관점에서 보면 이 엔진은 주

어진 에너지를 모두 유효한 에너지로 사용하는 아주 이상적인 엔진이다. 정격 회전수 57,000 rpm에서 8kW의 전기출력을 발생하며, 적외선 차폐재 분사를 위한 4bar의 추기공기를 질량유량 0.28kg/hr로 제공하고, 배기가스로는 발연제를 기화시켜 다량의 연막을 생산한다.

삼성테크윈(주)는 1991년 이래로 국방과학연구소가 주관하는 국방력 증가를 위한 첨단 장치의 개발에도 꾸준히 참여하여 왔다. 2004년 5월 KBS 1TV의 '신화창조의 비밀'을 통해 소개된 바

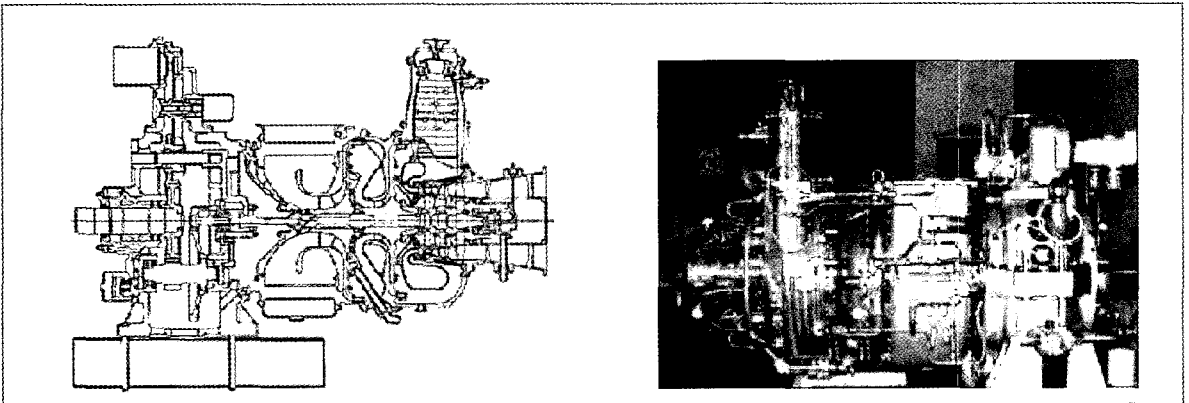


그림 1 1.2MW급 산업용 엔진(TG1200)

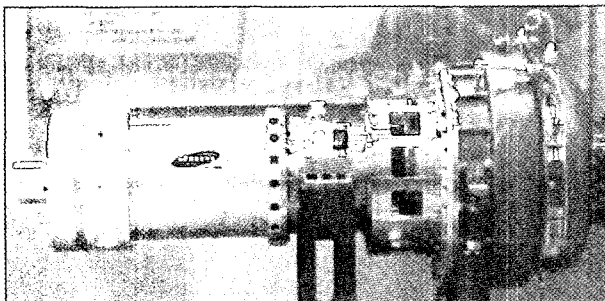


그림 2 100kW급 보조동력장치(APU)

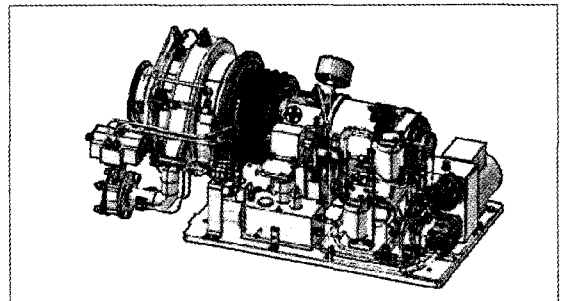


그림 3 발연기용 주엔진(PPU)

있는 함대함 유도무기의 추진기관인 터보제트 엔진은 국방과학연구소의 주관 하에 당사가 개발한 엔진이다. 이 엔진은 4단 축류압축기, 환형 직류형 연소기, 1단 터빈의 구조를 가지고 있다.

삼성테크윈(주)는 가스터빈 개발을 통해 축적한 기술을 바탕으로 1996년 이래로 꾸준히 산업용 터보 압축기를 개발하여 왔으며, 현재는 500~2,500마력 사이의 제품 라인업을 마치고 국내 시장은 물론 세계시장에 수출하여 국내 정밀기계산업 발전에 기여하고 있다.

과기부 중점국가 연구개발 사업을 통해 개발한 신 개념의 초소형 터보압축기는 삼성테크윈

(주)의 터보압축기 분야 기술수준을 대변할 수 있는 제품이다. 이 제품은 2단의 원심압축기가 고속모터에 직결되어 에어포일 베어링에 의해 지지되는 혁신적인 구조를 가지고 있다. 이 제품은 증속기어가 필요 없어 기존 압축기 대비 현격한 부피 및 무게의 저감이 가능하고, 오일이 필요 없는 에어포일 베어링을 사용하여 oil-free 압축공기를 생산할 수 있다는 장점이 있어 첨단 IT 제조공정이나 식품 제조공정 등에서 많은 관심을 가지고 있는 첨단 제품이다. 본 제품은 70,000rpm으로 회전하며 9bar의 압축공기를 생산한다.

당사는 미래 에너지원으로서의 연료전지에 대한 관심을 가지고 연료전지용 BOP(Balance of Process)의 개발 연구도 수행하였다. 2005년에는 미국 연료전지 업체로부터 연료전지용 공기공급

/발전장치(TCMG : Turbo Compressor Motor Generator)를 수주하여 개발하였다. 본 제품은 원심압축기와 반경형 터빈이 고속모터/발전기에 직결되어 에어포일 베어링에 의해 지지되는 구조를 가지고 있으며, 120,000rpm으로 회전하며 2.5bar의 oil-free 압축공기를 연료전지 스택에 공급하고, 스택에서 나오는 배개스를 터빈에서 팽창시켜 발전을 하는 기능을 가지고 있다. 향후 이 기술을 4세대 자동차용 터보차저인 E-boosted Turbo Charger의 개발에 적용할 계획이다.

가스터빈 개발 기술

잘 알려진 바와 같이 가스터빈 개발은 다양한 요소기술을 필요로 한다. 가스터빈 core의 개발을 위해서는 사이클 설계 및 성능해석 기술, 압축기, 터빈, 연소기 등의 주요 구성품 설계, 해석, 시험평가 기술, 2차유로 설계, 해석 기술, 냉각설계 및 열전달 해

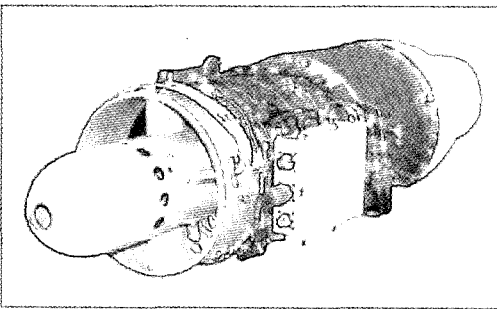


그림 4 항공용 터보제트 엔진

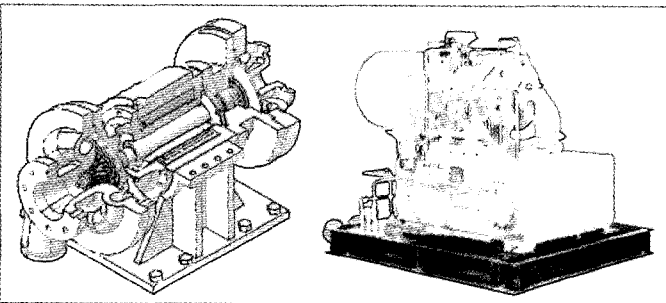


그림 5 에어포일 베어링을 사용한 초소형 압축기



그림 6 연료전지용 공기공급 및 발전 장치

석기술, 구조해석 및 로터설계, 동특성 해석 기술 등이 필요하다. 또한 엔진 운용을 위한 보기시스템으로 연료 및 유탄시스템 개발 기술과 엔진 제어기 설계 및 제어 로직 개발 기술 등이 필요하다. 삼성테크윈(주) 파워시스템연구소는 이러한 각 전문 분야의 전문가와 전문 실험실을 바탕으로 가스터빈 개발 기술을 축적해 가고 있으며, 이러한 기술을 유기적으로 적용하여 각종 가스터빈 엔진들을 성공적으로 개발해 나가고 있다. 이 글에서는 가스터빈 개발을 위해 필요한 다양한 기술 중 주요기술 몇 가지를 소개하도록 한다.

압축기, 터빈 공력설계 기술

가스터빈용 압축기는 엔진의 크기, 용도 및 요구 성능에 따라 축류, 원심 및 사류형 압축기 등 여러 형식의 압축기가 사용된다. 당사는 지금까지 축류압축기, 원심압축기 및 높은 공력하중을 받

는 고압력비 팬 등 다양한 압축기를 개발하면서 압축기 공력설계기술, 시험리그 개발 및 시험평가 기술을 체계적으로 구축하여 왔다. 고 압력비 팬의 경우 초음속 블레이드로서 일반적인 축류 압축기 2단에 해당하는 압력비를 내고 있으면서도 매우 높은 효율 특성을 갖는다. 높은 블레이드 팁 속도로 인해 구조적 안정성도 낮아질 수 있으므로, 고 하중 팬의 개발을 위해 제작성을 고려한 공력 및 구조 설계 최적화 기술을 적용하고 있다. 원심압축기는 약 4:1의 높은 압력비를 가지면서도 엔진의 안정적인 운전을 저해하는 서지(surge)점까지의 마진이 크며, 축류압축기 대비 단순하고 제작비도 낮아 소형 엔진 및 터보압축기에서 많이 채용되고 있다. 당사는 이 분야에 다양한 개발경험을 보유하고 있으며, 이러한 기술적 바탕 하에 최근에는 초소형 터보제트 엔진에 적용되는, 압력비 5.2를 가지면서도 매

우 작은 외경을 갖는 사류형 압축기(mixed-flow compressor) 개발에 착수하였다.

압축기 시험평가를 위한 시험리그 개발에는 공력설계, 구조해석, 유탄시스템 설계, 축하중 해석, 동특성 해석 등 가스터빈 개발기술과 고 기어비의 증속기어박스 설계 등 다양한 기술이 요구된다. 당사에서는 개발 압축기의 성능선도를 자체 개발한 시험리그를 이용하여 전 운용범위에서 측정하고 있다.

고온 고압 하에서 안정적으로 운전되는 고효율의 터빈을 개발하기 위해서는 깊이 있는 기초연구를 통한 시험자료와 이를 이용한 개선된 설계 소프트웨어 등이 필요하다. 당사에서는 기본설계 및 성능예측뿐만 아니라 고성능 터빈 개발을 위한 3차원 형상설계 기술을 적용한 개발을 통해 자료를 체계화하고 있으며, 국제적 추세에 맞추어 3차원 유동해석 기술을 심화하여 유동장 특성

분석 및 성능개선을 추구하고 있다. 그 간 소형 산업용 엔진의 3단 축류터빈과 다양한 종류의 소형 항공용 가스터빈 엔진의 1, 2단 축류터빈 등을 개발하였으며, 보조동력장치용 반경터빈은 물론 엔진 시동을 위한 다양한 시동터빈의 개발을 수행하였고, 이 과정을 통해

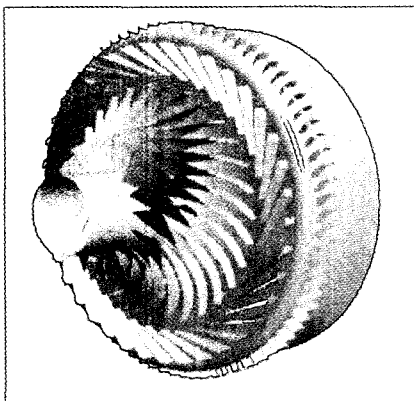


그림 7 원심압축기 3차원 모델

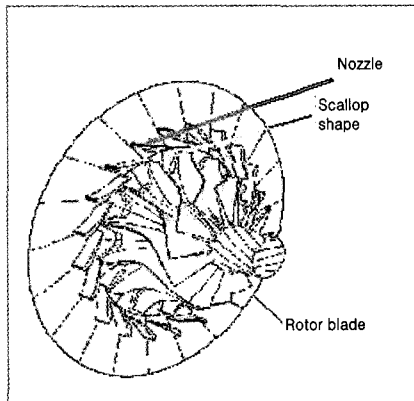


그림 8 반경 터빈 3차원 모델

터빈 개발경험 및 설계용 시험자료를 축적해 나아가고 있다.

당사는 고효율의 터빈 설계와 성능예측을 위한 시험자료를 구축하기 위해 터빈 유동시험리그를 자체 개발하여 사용하고 있다. 최근에는 다양한 용도로 사용될 수 있는 가변 베인 설계기술을 개발 중이고, 한국형 헬기 개발사업(KHP)에 참여하여 고성능 파워터빈을 미국의 GE 사와 협력 개발 하는 등 국제적인 수준의 터빈모듈 설계기술을 확보하기 위해 노력하고 있다.

연소기 설계 및 열전달 기술

당사에서는 앞서 언급한 다양한 가스터빈 개발을 통해 연소기 공력설계 기술, 연소기 내 3차원 연소/유동 해석 기술, 레이저를 이용한 연소장, 비연소장 측정 기술 등 가스터빈 연소기 개발 전반에 관한 기반 기술을 구축하였다. 또한 환형 직류형 연소기, 환형 역류형 연소기, 반경형 슬링거

연소기, 캔형 연소기 등의 연소기 형상에 대한 개발 경험을 보유하고 있으며, 연료노즐 개발 분야에 있어서도 압력분무식 연료노즐, 공기 보조형 연료노즐, 공기 충돌형 연료노즐, 회전형 연료노즐 등 가스터빈 연소기에서 연료 미립화에 필요한 노즐의 설계와 시험기술을 확보하여 엔진 개발에 적용하고 있다. 연소기 공력설계 및 유동해석 부분에서는 자체개발코드 및 상용코드를 이용한 설계 및 해석을 병행하고 있다.

가스터빈 연소기 개발에 필수적인 비연소장 유동 측정 및 연료노즐의 미립화 성능 측정을 위해 LDV(Laser Doppler Velocimetry), PDP(Phase Doppler Particle Analyzer), PIV(Particle Image Velocimetry), GSI(Generalized Scattering Image) 등의 측정장비를 사용하고 있으며, PIV를 이용한 연료노즐의 분무가시화도 수행하고 있다.

가스터빈의 효율 향상을 위하여 작동유체의 온도가 지속적으로 증가하고 있으며, 이와 같은 조건에서 내구수명을 확보하기 위해서는 정확한 온도해석과 효과적인 냉각기법의 개발이 요구된다. 가스터빈 내의 복잡한 유동장은 압축기, 연소기, 터빈을 통과하는 유동이 흐르는 주유로와 이러한 구성품을 구속하며 고속회전시키기 위해 필연적으로 발생하는 이차유로로 구분된다. 이차유로는 축하중 제어, 2차유로 내로 고온 주유로 가스의 침입을 방지하는 가압, 윤활유가 섬프에서 누유 되는 것을 방지하는 가압 및 고온부의 냉각기능을 담당하는 가스터빈 운용 안정성 측면에서 매우 중요한 유로이다. 이러한 2차유로의 설계 및 해석을 위해 당사에서는 유로망 해석(network analysis)에 기반을 둔 자체 개발 설계코드 및 범용 소프트웨어를 보유하고 있으며, 지금까지의 가스터빈 개발 과정

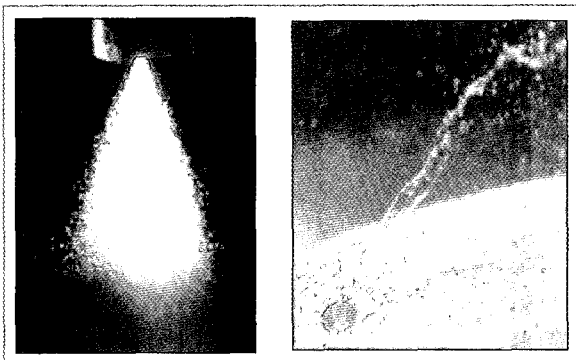


그림 9 PIV를 이용한 압력분무식 연료노즐과 회전노즐의 분무가시화

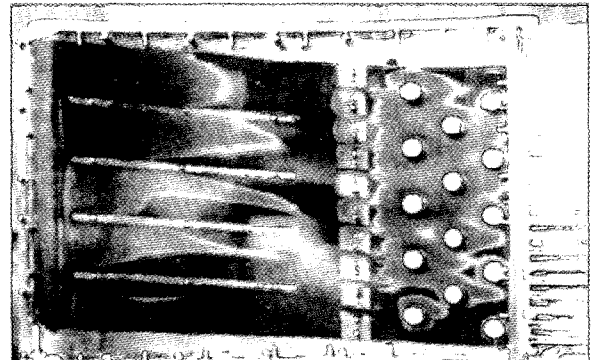


그림 10 터빈 블레이드 내부냉각유로 열전달 계수 측정 시험

을 통해 축적한 다양한 설계 및 시험자료를 확보하고 있다.

가스터빈에서는 고온부 냉각을 위해 대류뿐 아니라 막 냉각(film cooling) 등 다양한 냉각 기술을 필요로 한다. 최고온부인 연소기의 라이나부는 막 냉각 기술을 이용하여 냉각하며, 터빈 베인 및 블레이드는 내부 강제대류 냉각 기술을 이용하여 냉각하고 있다. 1.2MW급 발전용 엔진인 TG1200의 고압 터빈은 1단 베인에 냉각 블레이드가 적용되었다. 냉각 설계를 위해서는 부분별

열전달 계수의 정확한 예측이 필수이다. 이를 위해 선형 터빈 익렬을 이용한 열전달시험을 통하여 가스터빈 블레이드 표면의 대류열전달 계수를 측정하고, 천이 액정 열전달 시험(Transient Liquid Crystal Thermography)을 통해 터빈 블레이드의 내부냉각유로에서 대류열전달 계수를 측정하여 설계에 활용하고 있다.

구조해석, 보기 시스템 설계 및 엔진 제어 기술

가스터빈 엔진의 각종 부품의 구조안정성 및 수명평가를 위해 다양한 구조해석 및 구조물 거동 예측이 요구된다. 당사에서는 구조해석을 바탕으로 한 수명평가 방법의 연구 및 수명평가 시스템을 구축해 가고 있다. 균열생성수명 이외에 균열진전수명 평가를 위한 시스템을 구축하여 장수명 엔진에 손상 허용 설계를 적용하고 있으며 고온 부위의 크리프 손상 평가 및 크리프-피로 상호작용 등에 대해서도 평가를 수행하고 있다. 한편 구조 안정성 문제에 있어서 열-구조 상호작용 및 유체-구조 간섭현상 등을 고려한 다중계 현상에 대한 접근을 시도하고 있다.

연료 및 윤활 시스템 개발을 위해서 다양한 시험 기기와 기술이 요구된다. 엔진의 운용 요구 환경에 따라 개발되는 구성품의 해석적 평가를 위해 실제 운동 환경을 모사하여 구성품의 성능, 내구성 및 환경 적용성 등을 직접 평가할 수 있는 기술 및 시험 설비를 개발하여 사용하고 있다.

환경시험 설비로서 고저온습도 시험기, 진동 시험기 및 고고도 시험기와 제품 운용조건 모사를 위한 엔진자세 모사시험기, 운동 온도 모사 시험기, 내구성 시험기, 유압 시험기 등의 시험 리그 및 장치를 자체 개발하고 있으며, 다양한 가스터빈 및 산업용 엔진의 연료 및 윤활시스템 설계 및 시험평가를 수행하고 있다.



그림 11 연료펌프 및 오일펌프 조립체

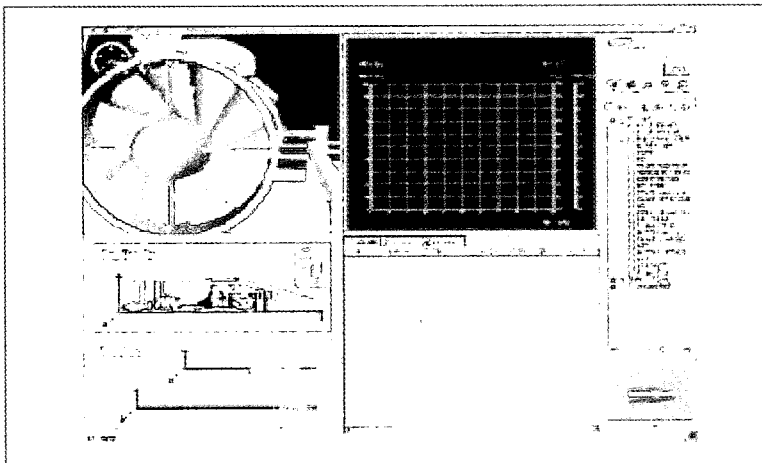


그림 12 가스터빈 3차원 그래픽 시뮬레이터

엔진 제어 로직 및 알고리즘 설계는 시스템 설계 초기 단계부터 최종 시험 단계까지 최적화 과정을 요한다. 본 연구소에서는 시스템 모델링, 최신 제어법칙을 적용한 보상기 설계, 시스템 운용 로직 설계, 자체 시뮬레이션 프로그램 및 실시간 시뮬레이션을 통한 검증, 엔진시험을 통한 최적화에 이르는 일련의 제어 로직 개발 과정을 체계화하여 개발의 효율성을 높이고 있다. 한편 수학적 모델링 기술과 제어 알고리즘 설계 기술을 융합한 3차원 가스터빈 엔진 그래픽 시뮬레이터를 개발하였다. 최근에는 이러한 기술적 기반을 바탕으로 한국형 헬리콥터 개발사업에서 미국 GE

사와 협력하여 엔진제어기(FADEC : Full Authority Digital Engine Controller) 개발에 참여하는 등 국제 교류와 기술혁신을 지속적으로 추진하고 있다.

가스터빈 생산 기술

당사는 공군의 제공호용 J85 엔진 사업, 공군의 한국형 전투기(KFP)용 F100 엔진 사업, 기본 훈련기(KT-1) 및 저속 통제기(KO-1)용 PT6A 엔진사업, 육군의 중형헬기인 UH-60용 T700 엔진사업, 해군의 한국형 구축함 개발사업(KDX-II/III)용 LM2500 엔진사업 등 다양한 국책사업을

통해 항공기용 또는 선박용 가스터빈의 기술도입 면허생산을 하며 가스터빈 부품 및 모듈 국산화를 추진하였고, 이를 통해 압축기, 연소기, 터빈 등의 주요 구성품의 생산기술, 조립기술, 시험평가 기술, 및 창정비 기술을 축적하여 왔다. 본 절에서는 생산기술 관점에서 몇 가지 주요 사업에서의 엔진 파트 국산화 내용에 대해 간단히 소개하고자 한다.

당사는 한국형 전투기 개발사업(KFP : Korean Fighter Program)에 참가하여 F-16 항공기용 F100-STW-229 엔진의 기술도입 면허생산을 통해 주요 부품의 생산기술을 개발하였다. 이 엔진은 미국 P&W(Pratt & Whitney) 사가 개발한 추력 29,000lbf 급 재열 터보팬 엔진으로 팬, 고압 압축기, 연소기, 고압터빈, 저압터빈, Augment 등으로 구성되어 있다. 당사는 이 사업을 통해 팬, 압축기, 터빈, 연소기 라이나, Augment 등, 110 품목의 주요 엔진 파트를 국산화하며 국산화를 41.2%를 달성하며 가스터빈 생산기술을 획기적으로 향상시켰다.

육군의 UH-60 중형헬기용 엔진 생산사업인 T700 엔진사업에서는 미국 GE(General Electric) 사로부터 기술도입 면허생산을 통해 추마력 1,800shp 급의 T700-SSA-701C 엔진을 생산하였다. 슈라우드 서포트 제작 시 Electron Beam 용접 공

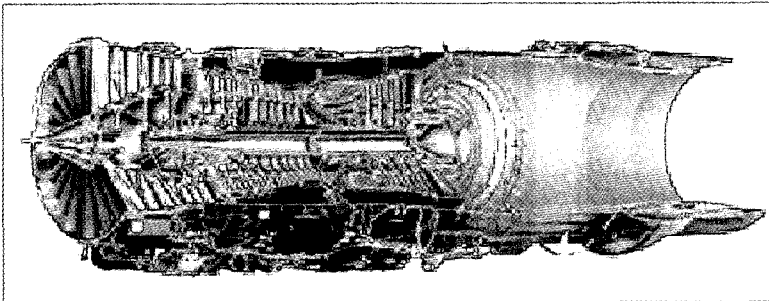


그림 13 KFP사업을 통해 생산된 F100 엔진

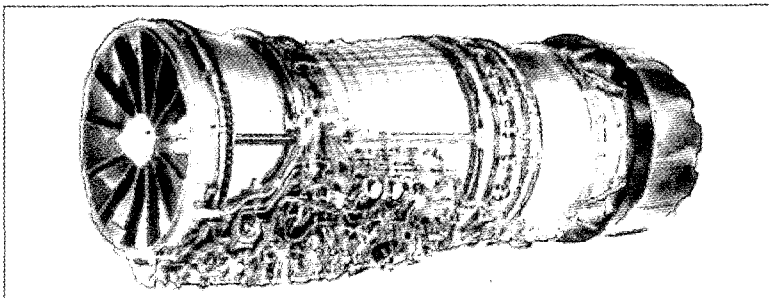


그림 14 F-15K 사업을 통해 생산된 F110 엔진

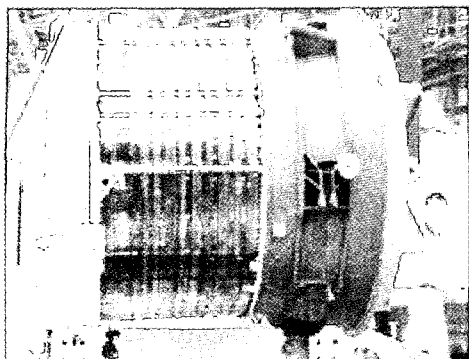


그림 15 삼성테크윈에서 생산하는 LM2500 LPT 모듈

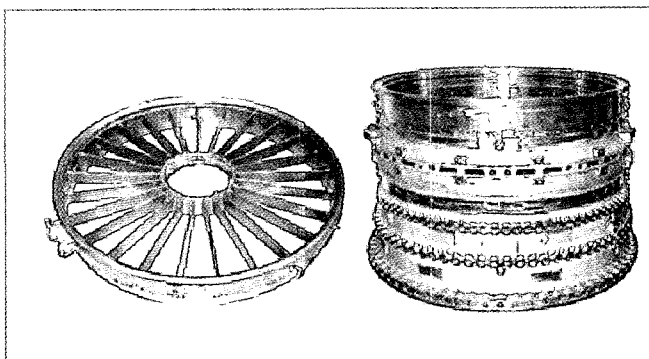


그림 16 F100 엔진의 팬 입구 케이스와 압축기 케이스

정을 개발하여 용접으로 인한 부품변형을 최소화하는 기술을 적용하는 등 이 사업을 통해 총 29 품목을 국산화하여 35%의 국산화율을 달성한 바 있다.

최근에는 공군의 차기전투기 F-15K 용 엔진생산 사업을 통해 GE의 F110-STW-129A에 대한 기술도입 및 면허생산을 하고 있는데, 포징 케이스 고속 형상가공, 압축공기의 기밀유지를 위한 팬 케이스의 러버 코팅, 특수 치공구를 이용한 경사 홀 기계가공 등의 생산 기술 등을 개발하여 전방 프레임, 팬 케이스, 고압터빈 샤프트, 저압터빈 블레이드 등 26개 주요 파트에 대한 국산화(29% 국산화율)를 성공적으로 완료하였다.

또한 공군의 고등훈련기/경공격기 장착용 엔진 생산 사업인 T/A-50 엔진 사업을 통해 GE 사로부터 17,700lbf급의 F404-

STW-102 엔진에 대한 기술도입 및 면허생산을 하고 있으며 단계적으로 완제 엔진 도입, 조립 국산화를 하고 최종적으로는 부품 국산화(국산화율 26%)를 통한 면허생산을 성공적으로 진행하고 있다. 본 사업 또한 고가의 핵심 부품 위주 국산화를 이루었으며 HPT 실(seal) 등의 부품 개발을 위한 플라즈마 코팅 공정, LPT 케이스 내식성 증대를 위해 크로마이드 코팅 공정, 밀링 가공 파워 모니터링 공정 등의 생산기술이 개발되었다. 주요 국산화 부품으로는 압축기 및 연소기 케이스, 저압터빈 블레이드, 팬과 터빈 프레임 및 플랩 등이 있다.

해군의 한국형 구축함 사업(KDX-II/III)에 참여하여 주추진기관인 LM2500 엔진의 기술도입 및 면허생산을 진행하고 있는데, 이 사업을 통해 고압압축기 케이스, 고압 터빈 블레이드, 저

압터빈 노즐 및 케이스 등 총 61개 품목을 국산화하여 45%의 국산화를 성공적으로 달성하였다.

당사에서는 이러한 국책 사업으로 구축된 핵심 생산기술 및 품질관리 기술을 바탕으로 원제작사인 미국의 GE와 P&W, 영국의 RR(Rolls-Royce) 사 등에 부품을 수출하고 있다. 최근에는 이러한 당사의 생산기술 및 개발 기술을 인정받아 LM 2500의 LPT 모듈을 GE에, TRENT 900의 연소기 모듈을 RR에 전량 독점 공급하는 등 활발하게 가스터빈 모듈 전문업체로 성장해 가고 있다. Trent 900 엔진은 2002년부터 2005년까지 RR사가 개발한 엔진으로 꿈의 항공기라고 하는 A380 기에 독점 장착되는 최신형 엔진이며, 당사는 개발 엔진부터 향후 15년간 핵심 연소기 모듈을 독점 공급하게 될 것이다.