

분산발전용 75kW 급 마이크로터빈의 시제개발 - 설계/제작 및 자력운전 시험 -

오종식[†], 이현석*

Prototype Development of A 75kW Class Microturbine - Design/Manufacture and Self-Sustaining Test -

JongSik Oh[†], HeonSeok Lee*

Key Words : Microturbine, High-Speed BLDC Motor, Foil Air Bearing

Abstract

In the paper, the prototype development of a 75kW class microturbine for the distributed generation market is partly presented which has continued with the government funding. In the introduction, an overview of the development of microturbines in the world is presented. A series of development procedures are shown with design, manufacture and self-sustaining tests. During the first year, aerodynamic and structural design/analysis, mechanical design are performed for the compressor, the turbine and the combustor. A premixed lean burn combustor technology is used for the low emission requirements. Foil air bearings and high-speed motors are employed for higher reliability. The self-sustaining conditions have been successfully achieved with the prototype manufactured engine as a preceding operation.

1. 서론 (마이크로터빈의 개발동향)

마이크로터빈(MicroTurbine)이란 대략 500kW 급 이하의 초소형 발전용 가스터빈을 뜻하는 용어로서 1990 년대에 미국을 중심으로 나타나기 시작한 분산발전(distributed generation)이라는 새로운 전력시장과 함께 주목을 받아오고 있으며, 현재에는 미국 뿐만 아니라 유럽과 일본 등지에서도 많이 익숙한 용어가 되었다. 여기서의 분산발전(DG)이란 수십에서 수백 kW 급의 전력수요가 있는 중소형 주거단지나 상업지구에 전력을 공급해주는 독립적인 발전 시스템을 의미한다. 현재의 대형 중앙집중식 발전방법은 변화하는 전력수요를 적절히 예측하여 문제가 발생할 경우 대처하는 능력이 떨어지고 원거리 수요처까지 송전하는 데에 있어서 부가적인 손실이 발생하고 있으며 순간부하가 발

생할 경우 응급대처하는 데에 어려움이 있는 등의 여러 문제점을 갖고 있다. 반면에, 소형 규모의 분산발전을 하게 되면 위에 열거한 문제점을 해결할 뿐만 아니라 전력수요를 고급화할 수 있고 발전소(특히 원자력 발전소)의 입지난 문제를 해결할 수 있으며 네트워크를 통한 효율적인 수요자 관리체계를 운영할 수 있다.

마이크로터빈 개발을 선도하고 있는 업체는 미국의 Capstone Turbine 사로서 AlliedSignal 사의 APU(Auxiliary Power Unit) 개발인력 일부가 설립한 벤처기업이다. 1998 년도 후반에 30kW 급의 제품을 시장에 첫선을 보인 이후 후속으로 나온 60kW 급 제품을 합쳐서 올해 6 월 기준으로 2,000 기 이상의 제품을 전세계에 판매할 정도로 성장하고 있다 그중에서 절반 이상이 작년도에 발생한 매출이고 이는 2000 년도 실적에 비해 30% 정도 증가한 결과일 정도로 기술 수준과 영업적인 측면 모두에서 가장 앞서가고 있는 실정이다. 가장 소형화된 wrap-around 형태의 재생 열교환기(recuperator)에

[†] 한국터보기계(주) 연구소장

* 한국터보기계(주) 대표이사

E-mail : ojs@kturbo.com

공기베어링(air bearing)을 적용하고 있고, 초소형인 관계로 발전효율이 26% 수준으로 비교적 낮은 편이다 (Fig.1 참조).



Fig.1 Capstone Turbine 30kW MicroTurbine

Capstone Turbine 사 핵심기술의 모체기업일 수 있는 AlliedSignal 사도 역시 1990년대 중반부터 기존의 APU를 개조하여 75kW급의 Parallon 75 제품을 개발하였으나 Honeywell 사에 합병되면서 Honeywell Power Systems 라는 자회사에서 2000년부터 생산하여 판매하기 시작하였다. 그러나 최근에 다시 GE로 흡수되면서 현재는 잠시 대외적인 영업을 중단한 상태로 알려져 있다. 역시 공기베어링을 적용하였고 고효율 재생 열교환기를 별도로 가지는 개념을 적용하여 발전효율은 29% 수준을 이루었다 (Fig.2 참조).



Fig.2 Honeywell 75kW MicroTurbine

Elliott Energy Systems 사는 TA45-60-80 시리즈의 제품을 현재 생산하고 있는데, 이들의 역사는 1988년 AlliedSignal 사의 인력과 Solar Turbine 사의

인력인 2명이 35kW급 turbo-alternator를 스스로 개발하려 하였던 것으로부터 출발하였다. 1991년에는 감속기어를 장착한 발전기로서 엔진시험에 성공하였고 1993년에는 고속모터/발전기의 형태로 수정하게 된다. 그후 1995년도에 Elliott 사의 자금 지원으로 현재의 자회사를 설립하게 되었고 2000년도부터 45kW, 60kW 그리고 80kW급의 제품을 생산하고 있다. 특징은 rich-burn-quick-lean-burn 방식의 초소형 연소기를 채택하였고 오일베어링을 사용한다. NOx의 수준은 천연가스를 사용할 경우 25ppm 수준으로 경쟁사보다 높은 편이다 (Fig.3 참조).



Fig.3 EES TA45 MicroTurbine

Ingersoll-Rand Energy Systems 사의 PowerWorks 70kW 제품은 조그만 엔지니어링 회사였던 NREC 사가 1990년대 중반에 개발한 제품을 흡수하면서 전력시장에 진입하게 되었다. 제품의 특징은 우선 이미 검증된 터보차저 기술을 최대한 활용하였기 때문에 다른 제품의 2배 이상인 80,000시간의 수명을 자랑한다. 또한 자체 특허를 보유한 고효율 재생열교환기로 인해 엔진 발전효율이 33%에 달하며 고속모터/발전기 대신에 파워터빈과 감속기어, 그리고 일반적인 유도발전기를 사용한다. 물론 오일베어링을 사용하며, 천연가스의 경우 NOx가 9ppm의 낮은 수준이다 (Fig.4 참조).

스웨덴의 Turbec 사는 현재 100kW급의 제품을 생산하고 있는데, 이 회사는 1998년에 설립된 Volvo Aero Corp.과 ABB 간의 공동벤처로서 볼보사의 가스터빈 자동차 엔진이 상용화가 늦어지자 마이크로터빈 발전시장으로 전환한 것이다. CHP (Combined Heat and Power)시장을 겨냥한 T100 제품은 발전효율 30%에 전체 시스템 효율이 75-80%

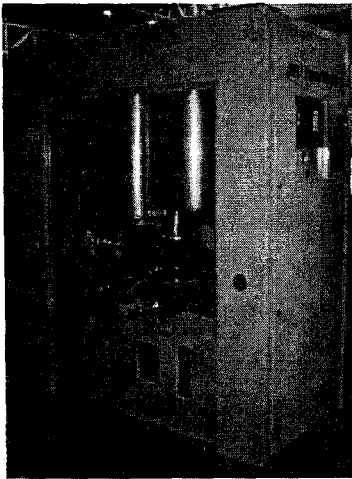


Fig.4 Ingersoll-Rand 70kW MicroTurbine

에 이룬다고 알려져 있다. 고속모터/발전기와 오일 베어링을 채택하였고 60,000 시간의 설계수명을 가지며 천연가스를 사용할 경우 NOx 가 15ppm 의 보통 수준이다. 패키지내에 배기가스를 이용한 난방용 열교환기가 포함되어 있기에 전체 크기가 상대적으로 큰 편이다 (Fig.5 참조).

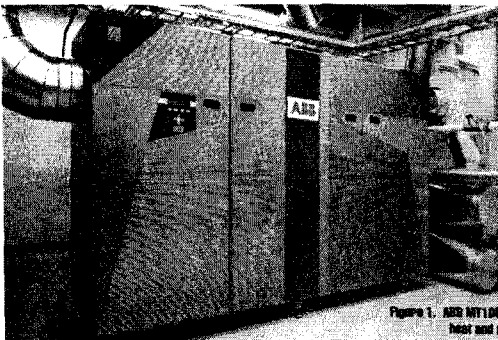


Fig.5 Turbec 100kW MicroTurbine

시스템업체로서 1994 년에 설립된 영국의 Bowman Power Systems 사가 있는데, 마이크로터빈 엔진 자체는 미국의 Elliott Energy Systems 로부터 공급을 받고 고속발전기나 power electronics 등은 자체적으로 제작하여 판매한다. TG25CG, 50CG, 80CG 등의 모델별로 CHP 시장을 겨냥하고 있으며, 상당히 활발한 영업을 벌이고 있다(Fig.6 참조).

PWC (Pratt & Whitney Canada)사는 뒤늦게나마 ST5 aero-derivative 엔진을 이용하여 마이크로터빈 시장에 진입하기 위해서 2000 년 시스템 패키징을 담당하는 미국의 DTE Energy Corp. (DTech)와 고속모터/발전기를 담당하는 영국의 TurboGenset 사와 공동으로 400kW 급 제품 (ENT4000)의 개발에 착

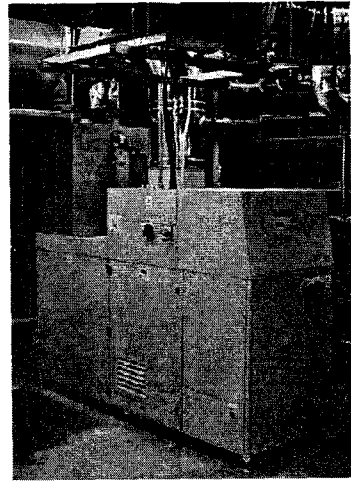


Fig.6 Bowman Power Systems TG50CG

수하였다. 2001 년 7 월에 첫 엔진시험을 성공하였고 올해 상반기에 출시할 예정이라고 하였으나 아직까지 상품화가 완료되지 못한 것으로 보인다. 발표 당시에는 400kW 출력이라고 하였으나 최근에는 350kW 로 하향 조정하였고, NOx 수준은 10ppm 수준이며 발전효율은 29% 수준인 것으로 알려져 있다. 압력비가 8 에 달하는 원심압축기 단과 축류터빈, 그리고 파워터빈으로 이루어져 있으며, 공기베어링을 사용한다. 또한 고속모터/발전기는 TurboGenset 사의 특허기술로서 통상적으로 자기장이 반경방향으로 구성되지 않고 축방향으로 이루어지는 디스크형이다 (Fig.7 참조).

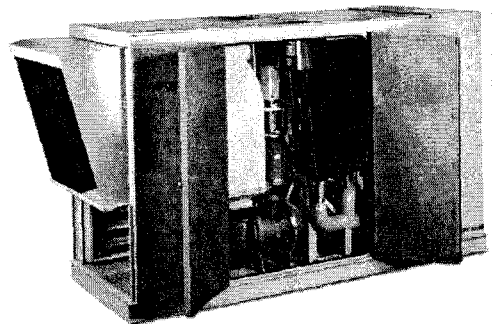


Fig.7 PWC 350kW MicroTurbine

2. TG75 의 설계와 구성품 제작

당사에서 개발중인 마이크로터빈도 역시 CHP 를 포함하는 분산발전용 전력시장을 목표로 하고 있고, 출력급은 Honeywell 사의 제품을 벤치마킹하

여 75kW 급으로 하였다. 재생열교환기를 사용하는 simple 사이클이고 TIT (Turbine Inlet Temperature)는 수명을 고려하여 약간 낮게 설정하여 1,115 K 로 하였다. premixed lean-burn 형의 연소기를 채택하여 액체연료(경유)인 경우 1 차 목표 NOx 가 40ppm 그리고 최종 목표 NOx 는 25ppm 이다. 다음의 Table 1 에서는 설계점 사양을 보여주고 있다.

Table 1 Design specifications

| Parameter | |
|---------------------------|-----------|
| Net Electric Power | 75 kWe |
| Turbine Inlet Temperature | 1115 K |
| Rotational Speed | 65000 rpm |
| Air Mass Flow Rate | 0.81 kg/s |
| Electrical Efficiency | 29% |
| Recuperator Effectiveness | 85% |
| Exhaust Gas Temperature | 862 K |
| Compressor Pressure Ratio | 4 |

압축기는 원심압축기(centrifugal compressor) 단단의 형태로 설계하였는데 압력비가 높은 관계로 거의 천음속(transonic) 압축기의 영역에 속하며 목표효율은 78%로 설정하였고 따라서 디퓨저의 형태는 채널디퓨저(channel wedge diffuser)로 선정하여 설계하였다. Fig.8 은 설계된 압축기의 모습을, 그리고 Fig.9 는 최종 설계된 임펠러의 3 차원 수치유동해석을 수행한 결과를 보여주고 있다. 임펠러의 재질은 SUS630 이며 응력해석 결과 최대응력이 항복응력의 62% 수준에 해당하는 것으로 확인되었다 (Fig.10 참조).

터빈은 단단의 구심터빈(radial-inflow turbine)으로 설계하였는데 85%라는 목표효율을 만족하기 위해 특수한 노즐배인을 채택하였으며, 최적의 목면적(throat area)을 찾기 위해 수치유동해석을 반복

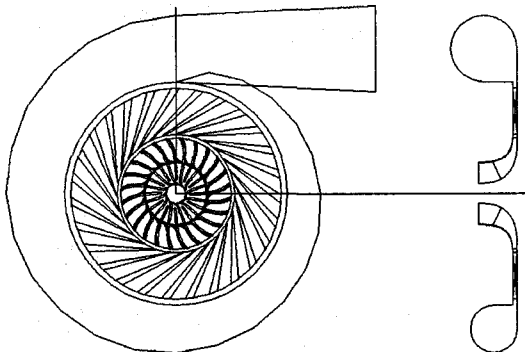


Fig.8 Aerodynamic design of compressor

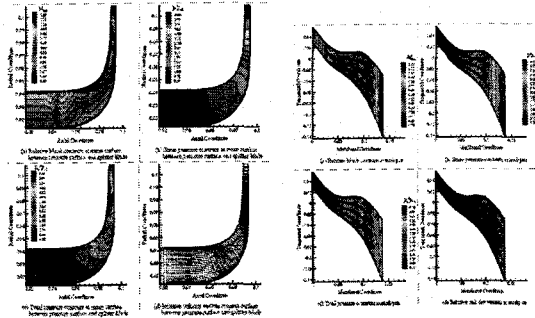


Fig.9 CFD results of compressor impeller

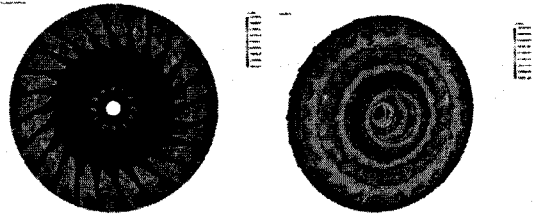


Fig.10 Stress analysis results of compressor impeller

적으로 적용하여 형상설계에 반영하였다. Fig.11 은 최종 설계가 완료된 터빈의 모습을, 그리고 Fig.12

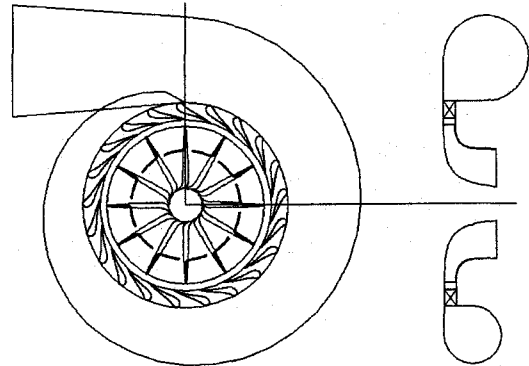


Fig.11 Aerodynamic design of turbine

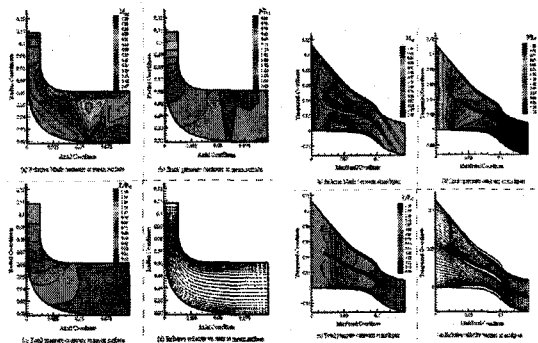


Fig.12 CFD results of turbine rotor

는 터빈 로터의 3 차원 수치유동해석을 수행한 결과를 보여주고 있다. 로터의 재질은 Inconel 713 LC 이며 응력해석 결과 최대응력이 항복응력의 60% 수준에 해당하도록 날개형상과 두께를 여러 번 수정하여 확정하였다 (Fig.13 참조).

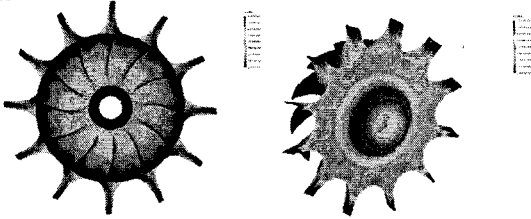


Fig.13 Stress analysis of turbine rotor

압축기의 임펠러와 터빈 로터는 당사가 보유하고 있는 정밀주조 설비에서 로스트왁스 (Lost Wax) 공법으로 제작되었으며, 그 모습이 Fig.14 에 나타나 있다.

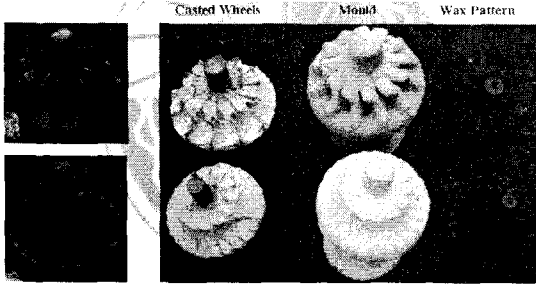


Fig.14 Precision cast impellers & rotors

가스터빈용 저공해 연소기에 대한 설계기술이 아직 국내에서는 확립되어 있지 않은 상황이지만 해외자료를 최대한 활용하여 열설계와 성능시험을 반복적으로 수행해 가면서 형상설계를 확정하도록 해야 한다. 사용하는 연료는 경유를 기본으로 하였으며 점화방식은 스파크 방식을 채택하였다. 가장 많이 적용되고 있는 예혼합 희박연소 (premixed lean-burn combustion) 방식을 적용하였고 유입되는 공기의 압력과 연소기내의 압력손실에 따른 연소부하 그리고 압력비에 따른 체류시간에 대한 실증실험결과와 본 연소기의 설계결과와 비교하였을 때 상당히 안정된 영역내에 설계점이 존재하는 것으로 확인되었다. 연소기의 제작된 모습이 Fig.15 에 나타나 있다.

엔진의 베어링으로는 오일 베어링이 아니라 자체적으로 설계/제작된 공기 베어링을 사용하였는데, 포일 공기 베어링(foil air bearing)이란 공작기계의 스프링클러용으로 흔히 이용되고 있는 외부에서 가압공기를 주입하여 강제적으로 축을 부양시키는

hydrostatic 베어링이 아니라, 베어링 주위에 있는 상압의 공기가 축이 회전함에 따라 형성되는 공기의 압력 구배에 의해 스스로 축을 부양시키는 hydrodynamic 베어링을 뜻한다. 제작단가가 낮고 이론적으로는 회전수의 한계가 없으며 시스템의 무게를 줄일 수 있어 소형화가 가능하다. 또한 축의 비틀림이나 비정렬성(misalignment)에 대해서도 적용할 수 있는 정도가 다른 오일 베어링에 비해 우수하다. 충분한 댐핑(damping)을 주기 위해 스프링의 역할을 수행하는 범프(bump) 포일을 개발하여 journal 과 thrust 베어링에 적용하였다(Fig.16 참조). 여기서의 범프 포일은 해외에서 현재 분류하고 있는 가장 진보된 제 3 세대 범프 포일 계열에 속하며 당사만의 고유한 설계로 국내외 특허로 출원중이다. 시동과 정지시에 발생하는 불가피한 마찰을 위해 포일면에 특수한 코팅을 해야 한다.

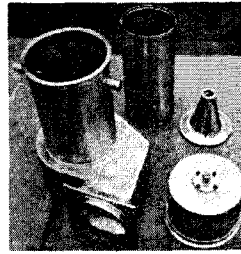


Fig.15 Combustor parts

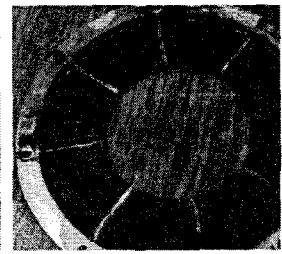


Fig.16 Thrust foil bearings

축과 베어링, 그리고 임펠러와 로터가 함께 회전하는 회전체에 대한 진동특성을 미리 해석하는 일은 엔진의 구조적 안정성을 위하여 무엇보다도 중요하다. 벤딩모멘트에 의한 회전체의 고유진동수를 해석한 결과, 제 1 차 임계속도가 약 14,000 rpm 에서, 그리고 제 2 차 임계속도는 약 76,500 rpm 으로 확인되었다. 제 1 차 임계속도는 설계회전수 아래에 있기 때문에 시동시에 순간적으로 극복해야 한다.

거의 모든 해외제품과 같이 발전기는 감속기어를 통한 일반적인 유도발전기가 아닌 고속 BLDC(BrushLess Direct Current) 모터 겸 발전기를 채택하였다. 출력전원은 3 상 교류 380-440V/60Hz 이다. 고속 BLDC 모터란 유도전동기와는 달리 회전자(rotor)에 영구자석을, 그리고 고정자(stator)에 권선을 감은 동기(synchronous)모터를 뜻한다. 회전자와 고정자의 위치를 정확히 알아서 교류전류를 흘리는 방식이 가능하여 마치 브러쉬가 없는 직류모터와 같은 성능을 낼 수 있게 되어 고효율 고속모터에 가장 적합한 형태가 된다. 대신에 회전자의 위치센서와 파워 스위칭 소자가 기존의 브러쉬의 역할을 한다. 고속 BLDC 모터를 구동하기 위해서는 직류버스 전압을 모터 구동에 필요한 전류

의 파동형태로 변환해주는 인버터(inverter)가 필요하다. 광범위한 의미에서는 고정된 주파수를 갖는 상용전원 교류를 우선 직류로 변환하는 정류기(rectifier)와 이를 다시 고속 모터의 특성에 맞는 특정 주파수와 전압으로 변환해주는 인버터를 포함한다. 모터와 인버터 모두 외부의 냉각수를 이용해 냉각해주도록 되어 있다. Fig.17 은 자체적으로 설계/제작된 고속모터/발전기를, 그리고 Fig.18 은 역시 자체적으로 설계/제작된 구동 인버터의 시제작된 모습을 나타낸다.

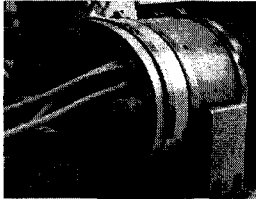


Fig.17 High-speed motor/generator

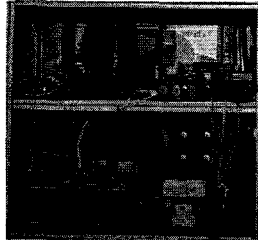


Fig.18 Motor drivers

가스터빈 엔진은 매우 민감하여 정확한 엔진 제어를 통하지 않고는 시동되기 힘들고 시동이 되더라도 다시 꺼지기 쉽기 때문에 엔진이 정상 운전영역에 도달할 때까지는 5 단계 (crank phase, ignition phase, acceleration 1, acceleration 2, running)에 걸친 제어를 해주어야 한다. 초기 시동구간에서는 개방형 루프 제어를 통하여 연료를 공급하게 되며, 그후 자력운전(self-sustaining) 회전수에 도달하기 전까지는 연료 스케줄을 통하여 엔진을 가속해야 한다. 설계 회전수에 도달하게 되면 폐쇄형 루프 제어로 전환하여 가감속 제어를 하게 된다. 이와 같은 제어로직을 이용하여 엔진 제어를 설계/제작하였으며 실제로 엔진에 적용하기 전에 연료계통과 코어 엔진에 대한 수학적 모델링을 통해 시동 및 가감속 특성을 시험하였다. Fig.19 는 자체적으로 설계 및 제작된 엔진 제어기와 전용 DAS 의 모습이다.

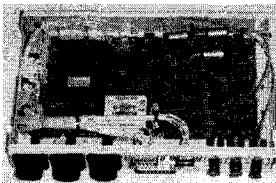
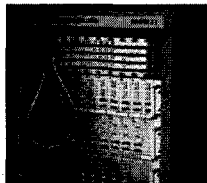


Fig.19 Engine controller & DAS



3. TG75 엔진조립과 자력운전시험

상세설계를 통하여 엔진 전체의 조립된 모습

이 다음의 Fig.20 에, 그리고 실제로 조립되어 엔진시험 준비하고 있는 모습이 Fig.21 에 나타나 있다. 공기베어링을 사용하는 관계로 별도의 윤활시스템이 없어 간단한 시스템임을 알 수 있다. 제 1 차년도에서는 재생열교환기를 해외의 sample 을 구매하여 장착하였으나 제 2 차년도에서는 국내에서 설계 및 제작하여 교체할 예정이다.

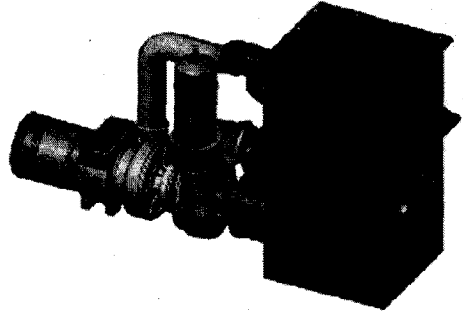


Fig.20 Solid modeling of TG75 microturbine

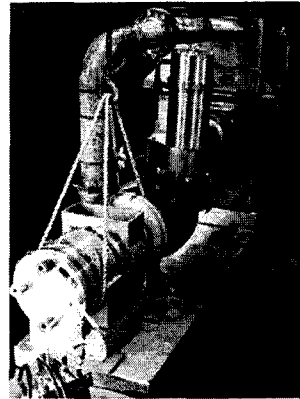


Fig.21 TG75 microturbine ready for tests

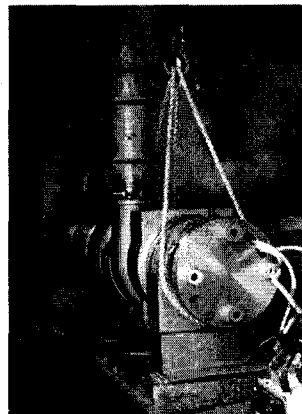


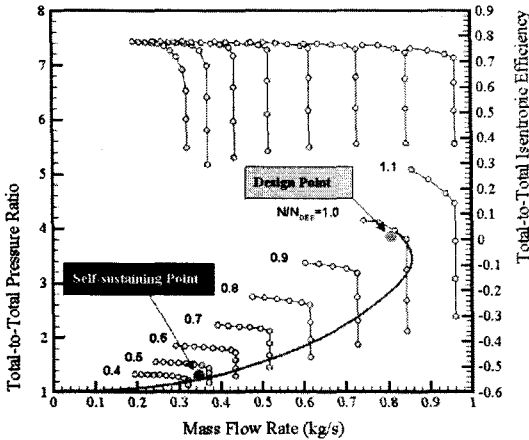
Fig.22 TG75 microturbine when ignited

고속모터/발전기에 의해 초기 모터링이 시작되어 약 8,000 rpm 근처에서 시동이 이루어졌고, 그 이후 계획되어진 연료 스케줄을 따라 엔진의 가속이 원활하게 이루어졌다. Fig.22 는 시동이 된 순간의 엔진 모습이다. 압축기 출구와 연소기 입구, 그리고 터빈 출구에서 측정된 온도와 압력을 이용하여 압축기와 터빈간의 동력 매칭을 모니터링하였고, 동시에 모터와 인버터에서 측정된 전류와 동력 등을 함께 고려하여 자력운전점이 약 30,000 rpm 부근에서 이루어짐을 확인하였다.

터 설계점 부하점까지 도달하는 운전곡선을 나타낸다. 현재까지는 정지상태에서부터 표시된 자력 운전점까지 성공적으로 도달하였다. 제 2 차년도에서는 계속적인 엔진의 가속을 통해 설계점 부하점까지 도달하는 일과 엔진의 가감속 및 부하계통 그리고 발전모드로의 전환 등의 작업을 통해 최종 목표를 달성할 계획이다.

4. 맺음말

전세계적으로 관심의 대상이 되고 있는 분산 발전용 마이크로터빈 시장을 대비하기 위해 장기적인 목표로 추진하고 있는 75kW 급 마이크로터빈의 독자개발 과제와 관련하여 제 1 차년도 성과를 요약하여 소개하였다. 당사가 관련 기본적인 핵심기술과 제작 설비/인력을 모두 보유하고 있는 관계로, 1년이라는 짧은 기간내에 설계와 제작 그리고 자력운전 시험까지 성공적으로 달성하게 되었다. 이는 시제개발의 대부분을 완료하였음을 의미하는 것이 아니라 전체적인 개발방향이 올바르게 수립되었는가, 그리고 처음으로 적용하였던 몇몇 핵심기술이 엔진내에서 원활히 동작하는가를 확인하고, 가장 어려운 단계중의 하나인 시동과 가속 그리고 자력운전 시험을 수행해봄으로써 적용된 기술의 확신을 갖고자 하는데 주 목적이 있었다 제 2 차년도에서는 목표 출력과 엔진 효율, 그리고 배기가스의 공해수준 등을 만족시키는 본격적인 노력이 압축기와 연소기 구성품 시험과 그리고 그에 따르는 수정개발을 통해 이루어질 예정이다.



Predicted Compressor Map for the KTM 75kW MicroTurbine
(Developed by Dr. JongSik Oh - Jan. 2002)

Fig.23 Operating line of TG75 microturbine

Fig.23 은 설계단계에서 예측하였던 원심압축기의 성능곡선도인데, 적색의 꺾적이 엔진의 시동부