

마이크로 동력원으로서의 UMGT 개발 현황

최범석* · 최상규**

1. 서론

휴대용 장비나 소형 무인자가작동장비 등 동력을 필요로 하는 기기에 독립적으로 동력을 공급해 줄 목적으로 제작되는 초소형 전원공급장치를 “마이크로 동력원(Micro Power Generation; MPG)” 또는 “마이크로 동력발생장치”라고 말한다.⁽¹⁾

현재 사용되고 있는 휴대용 기기에는 리튬 2차전지가 주로 탑재되고 있다. 그러나, 대표적인 상용 2차전지는 연속 사용시간이 짧고, 충전하는데 오랜 시간이 걸리는 단점이 있으며, 에너지 밀도도 이론한계치(~200 Wh/kg)에 근접하여 있는 상태여서 휴대용 전자기기의 고성능화가 기존 2차전지로는 해결할 수 없는 상황까지 진행되고 있다. 최근 애완용 로봇, 휴머노이드 로봇 및 군사용 로봇(정찰용, 위험물처리, 견마용 등)과 같이 장시간 사용가능한 휴대용 동력원을 필요로 하는 제품들이 상용화 단계로 진입함에 따라 새로운 마이크로 동력공급장치의 필요성과 시급성이 매우 커지고 있는 상황이다.⁽²⁾

마이크로 동력원은 크게 수동형과 능동형으로 분류할 수 있으며, 종류에 따라 출력이 수 μ W에서 수 kW에 이른다.⁽¹⁾ 이들 중 비교적 높은 출력을 가지는 마이크로 동력원이 시장수요 창출과 상용화가 상대적으로 빠른 시기에 이루어질 수 있을 것으로 예상된다.

마이크로 동력발생장치는 기본적으로 에너지 밀도(Energy Density; Wh/kg 또는 Wh/L)가 기존의 동력원보다 높아야 개발의 당위성이 보장되며, 출력과 에너지밀도가 높은 동력발생장치로 주목을 받고 있는 것

이 초소형 가스터빈(Ultra Micro Gas Turbine; UMGT)과 마이크로 스텔링 엔진(Micro Stirling Engine)이다. 본 기사에서는 마이크로 동력원로서는 비교적 출력이 큰 부류에 속하는 100 W~수 kW급 초소형 가스터빈(UMGT)의 개발 동향과 전망을 살펴보기로 한다.

2. UMGT의 개요

최근 로봇이나 군사용 장비와 같이 에너지밀도뿐만 아니라 출력밀도도 높은 동력원을 요구하는 적용처에 적합한 MPG의 개발도 이루어지고 있는데, 그러한 고에너지밀도와 고출력밀도의 특징을 갖는 대표적인 MPG가 바로 초소형 가스터빈(Ultra Micro Gas Turbine; UMGT)이다.

초소형 가스터빈은 1990년대 후반에 MIT의 Epstein 교수가 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 가공공정을 이용하여 10W급의 UMGT(Ultra Micro Gas Turbine) 개발⁽³⁾을 시작한 이후 1) 출력밀도(출력/질량)가 크고, 2) 진동과 소음이 적으며, 3) 여러 종류의 연료를 사용할 수 있고, 4) 냉각수 불필요하며 배기가스로부터의 배열 회수가 가능하고, 5) 부품수가 적다는 장점으로, 미국에서는 DARPA의 전폭적인 지원으로 군수용으로 개발이 진행되고 있고, 일본에서는 2001년부터동경대, 동북대 등이 NEDO의 지원으로 IHI 등과 함께 군수용, 민수용으로 개발을 진행하고 있으며⁽⁴⁾ 벨기에의 Ketholieke Leuvain 대학에서는 마이크로 가스터빈 발전기를 위한 축류형 마이크로 터빈을 연구 중에 있다.⁽⁵⁾

* 한국기계연구원 에너지기계연구본부

** 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부

E-mail : bschoi@kimm.re.kr,

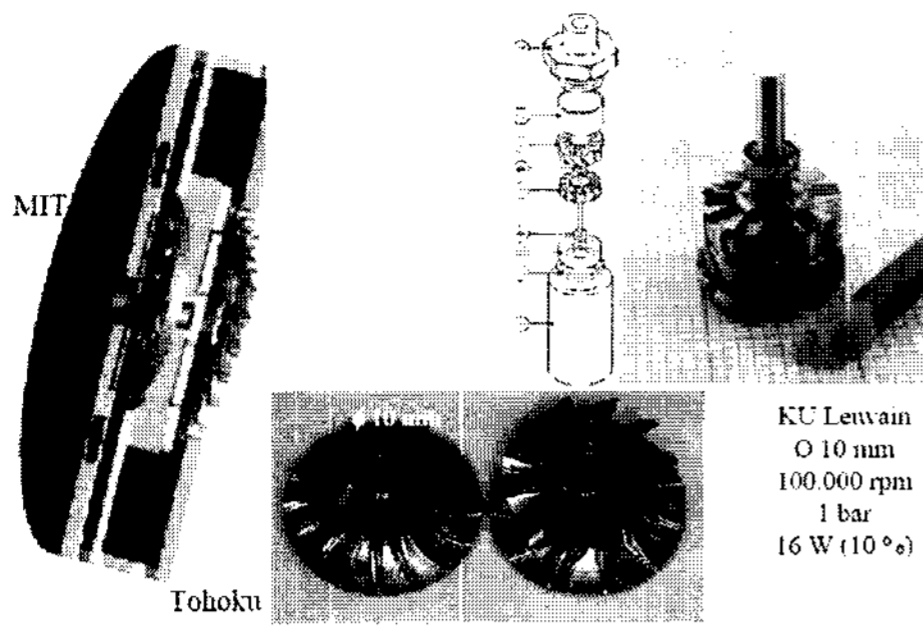


Fig. 1 Micro gas turbine by MIT, Tohoku, KU Leuven

그러나 MIT에서 수행중인 MEMS형 마이크로 가스 터빈은

- 원반형상 미소로터의 초고속회전 문제 : 임펠러 직경에 따라서 다르지만 100-240만 RPM의 회전이 필요하며, 로터의 직경에 비해서 베어링 길이의 비가 극히 작기 때문에 저널베어링의 실현이 매우 어려움
- 터빈, 압축기 효율 문제: DRIE등에 의해서 가공된 임펠러의 형상은 2차원적으로 되기 때문에 효율 향상을 위한 설계자유도가 낮고, 목표 달성이 매우 어려움
- 가스터빈내의 단열 문제 : 열전도율이 높은 단결정 실리콘의 미세구조 안에서 고온이 되는 연소기, 터빈과 저온이 되어야 효율이 좋은 압축기를 공존시키기 위해서는 획기적인 단열법이 필요함
- 초고속, 고효율 발전기의 개발문제: 100-240만 RPM의 회전에 대해서 수십 W의 발전을 하는 마이크로 발전기의 실현이 매우 어려움. 전자방식에서는, 고온의 문제, 고성능 자석의 미세가공기술, 자석의 강도 등이, 정전유도 방식에서는, 전극간격의 문제(가공정밀도와 기체의 점성손실의 문제), 발전회로의 문제, 고전압 인가시의 절연파괴 등이 문제가 됨

등의 문제로 가까운 미래에 실현되기가 어려울 것으로 평가되고 있다.

그러나 일본 동경대나 동북대 등을 중심으로 개발을 진행하고 있는 mm급 scale의 Palm top형 100~1kW 급의 가스터빈은 종래의 가스터빈에 관한 축적된 노하우를 사용 가능하고 3차원 임펠러 형상이 가능한 기계 가공의 도움 등으로 상대적으로 10%이상의 고효율 가

스터빈의 개발 가능성이 높다고 평가되고 있다. 연소형 MPG의 경우 효율 10%가 되어야 출력밀도 1000 W/kg을 달성할 수 있을 것으로 예측되고 있다.

Palm top형 가스터빈 발전기 연구에 관한 주요한 특징은 다음과 같다.

- Palm top형 가스터빈은 MEMS형에 비교해서 임펠러 직경이 1.5~2 배 정도 크지만, 주요한 개발 과제는 MEMS형과 거의 비슷함 ①초고속회전(50~100만 RPM)의 실현, ②터빈, 압축기의 목표 단열 효율의 달성, ③단열, ④초고속발전기의 실현
- 초고속회전(50~100만 RPM)의 실현에 대해서는, 동북대학, IHI가 정압베어링을 이용해서 약 50만 RPM을, Stanford 대학, 혼다연구소가 볼베어링을 이용해서 42만 RPM을 구현하고 있고, 두 경우 다 정격회전수의 50~60% 정도이지만 볼베어링에서는 더 이상의 고속회전은 어렵다고 평가되며 최종적으로는 동압베어링이 사용될 것으로 예상됨
- 50만 RPM까지 운전이 가능한 발전기/모터를 M-DOT가 개발하고 있지만 정확히 밝혀지지는 않고 있음
- 단열에 대해서는 충분한 단열효율이 얻어지고 있다고 할 수 있음

2001년 이후 진행된 초소형 가스터빈의 개발현황을 요약하면 표 1과 같다.

3. 극초소형 가스터빈(UMGT) 개발 동향

3.1 해외 UMGT 개발동향

MIT : 1995년 이후 DARPA의 강력한 지원 아래 소형 발전기 및 항공기용 2차원 형태의 UMGT 개발을 위한 연구인 "MIT Micro Gas Turbine Engine Project"를 추진한 바 있다.⁽³⁾ 초기의 UMGT 연구를 주도할 정도로 많은 연구가 진행되었다.

이 연구에서는 Fig. 2에 보이는 것처럼 터빈직경 4 mm, 회전속도 140만 rpm, 연소기는 체적이 0.066 cm³ 정도가 되는 MEMS 공정에 기반을 둔 2차원 형태의 UMGT를 개발하였으며 예혼합 수소가스 연소기를 적용하여 1,700 K 이상의 온도를 얻을 수 있었다. 연소효율은 90% 이상 얻은 바 있으나, 전체 시스템 효율은 2-3% 정도에 그친 것으로 알려지고 있다. 이 시스템

표 1 초소형 가스터빈 개발현황

연구개발 기관	연구개발 대상	특징 및 현상
MIT	10W급 MEMS형 (임펠러 직경 4-8mm)	반도체 미세가공 기술로 제작. 구성품 요소기술을 실증. 터빈을 140만 rpm에서 운전
동북대학	10W급 MEMS형 (임펠러 직경 5-10mm)	단결정 실리콘을 재료로 사용해서 터빈 등을 제작, 시험. 기초연구단계
동북대학 • IHI	100W급 Palm top형(임펠러 직경 10mm), 현재 700W급 개발 중	연소기, 터보차저, 발전기로 분류해서 실증연구. 연소기의 실증에 성공. 48만 rpm에서 터보차저를 시험
Stanford 대학 혼다	100W급 Palm top형 (임펠러 직경 12mm)	질화규소 세라믹 임펠러 사용. 볼베어링을 이용해서 42만 rpm에서 터보차저를 시험
M-dot	100W급 Palm top형 (임펠러 직경 10mm 이상)	Stanford 대학과 관계있고, DARPA로부터 연구자금을 지원받으며 50만 rpm까지 사용할 수 있는 모터, 발전기를 개발 중
동경대학 주도 국제공동 ONERA, CIAM, VKI	2-3kW급 Palm top형 (임펠러 직경 40mm) 10W급 Finger top형 (임펠러 직경 8mm)	각 요소의 시물레이션, 실증시험 등을 분담. 임펠러 직경 40mm의 터보차저를 십수만 rpm에서 시험
KU Leuvain (벨기에)	축류형 에어터빈, 터빈 직경 10mm, 현재 1kW급 UMGT 개발 중	100000 rpm, 1bar, 16W, 효율 10% 달성

은 기계가공 공정에 기반을 둔 3차원 블레이드를 이용한 UMGT에 비해 효율이 작으며, 고속 회전용 베어링, 열처리 문제 등 넘어야 할 과제가 많은 상태로 당분간 실용화 가능성이 낮은 것으로 평가되고 있다.

동북대, IHI(Inshikawajima-Harima Heavy Industries) : 동북대와 IHI에서 수행하고 있는 연구에는 NEDO의 지원하에 주요 터보기계기술을 보유하고 있는 대학교와 기업이 대거 참여하여 과제를 수행하고 있다. 이들 UMGT 연구의 목표는 휴머노이드 로봇의 동력 공급원으로 발전시키는 것이다. 우선은 100 W급

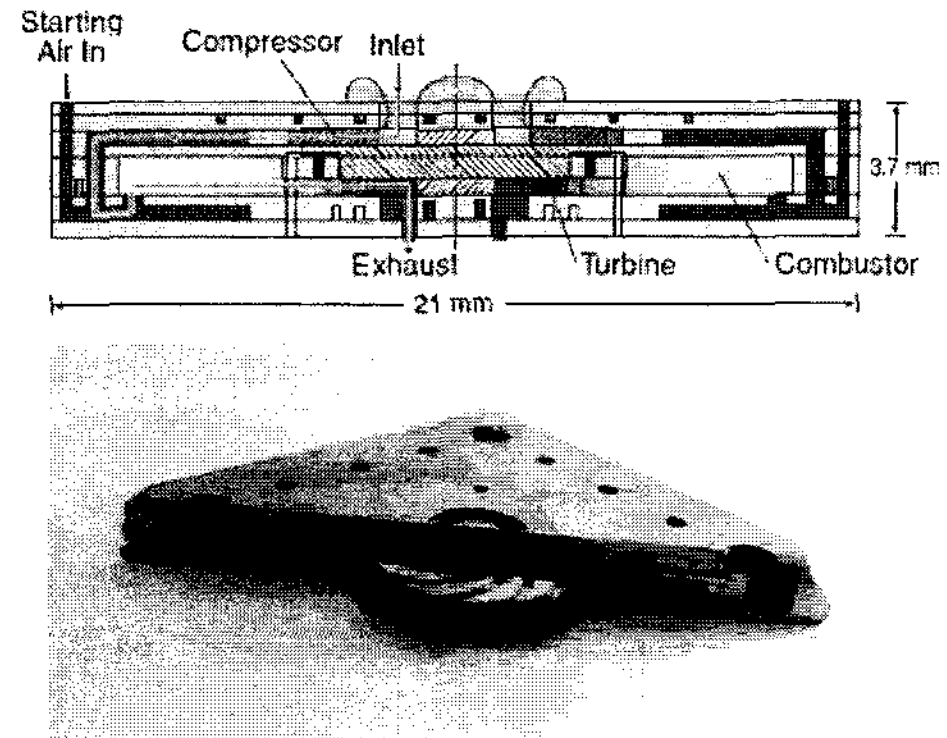


Fig. 2 MIT에서 개발 중인 MEMS 공정에 기반을 둔 2차원 형태의 UMGT

동력원을 개발하는 것을 목표로 하여 연구가 진행되고 있으며, 최근 750 W UMGT의 개발도 진행하고 있는 것으로 알려지고 있다.

100 W급 UMGT 연구에서는 3차원 정밀가공 블레이드를 이용한 UMGT를 개발 중이며, 크기가 작기 때문에 종래의 가공기술 연장방식이 아닌 새로운 가공방법으로 탄화규소 세라믹과 질화규소 세라믹 미세 가공법을 개발하였다. 축회전수는 870,000 rpm에서 전체 시스템 열효율(chemical-to -electricity)은 5% 정도로 예상하고 있다. 출력 100 W급 UMGT를 구성하기 위해서 직경 10 mm 직경의 임펠러를 포함하여 각 요소부품 수준에서는 요구되는 성능은 달성하였고 베어링 등의 최적화 및 내구성에 대한 연구는 진행 중이다.⁽⁴⁾

현재 출력 750 W급 UMGT 제작을 위한 전체 시스템 해석, 임펠러, 터빈, 로터 등의 제작과 실험을 수행하였다. 750 W급 UMGT의 경우 해석단계에서 전체 시스템 효율은 10% 이상이 될 것으로 예상하고 있다. 750 W급 UMGT의 임펠러 직경은 압축기가 16 mm이고 터빈이 17.4 mm이며, 압축기와 터빈의 임펠러와 회전축, 터미 제너레이터가 인코넬 재질의 한 몸체(one piece)로 구성되는 로터부로 제작되었다. 모터/제너레이터의 개발에 대한 정보는 알려지지 않았으며, 베어링은 압축공기를 불어넣어 사용하는 정압베어링을 사용하였다. 현재 조립된 상태에서 실험을 진행 중이며 초기시동을 위해서는 압축기 입구로 압축공기를 주입하여 구동하고 어느 정도 안정적인 회전이 이루어지면 연소기를 구동하고 압축기 입구압력을 대기압까지 줄

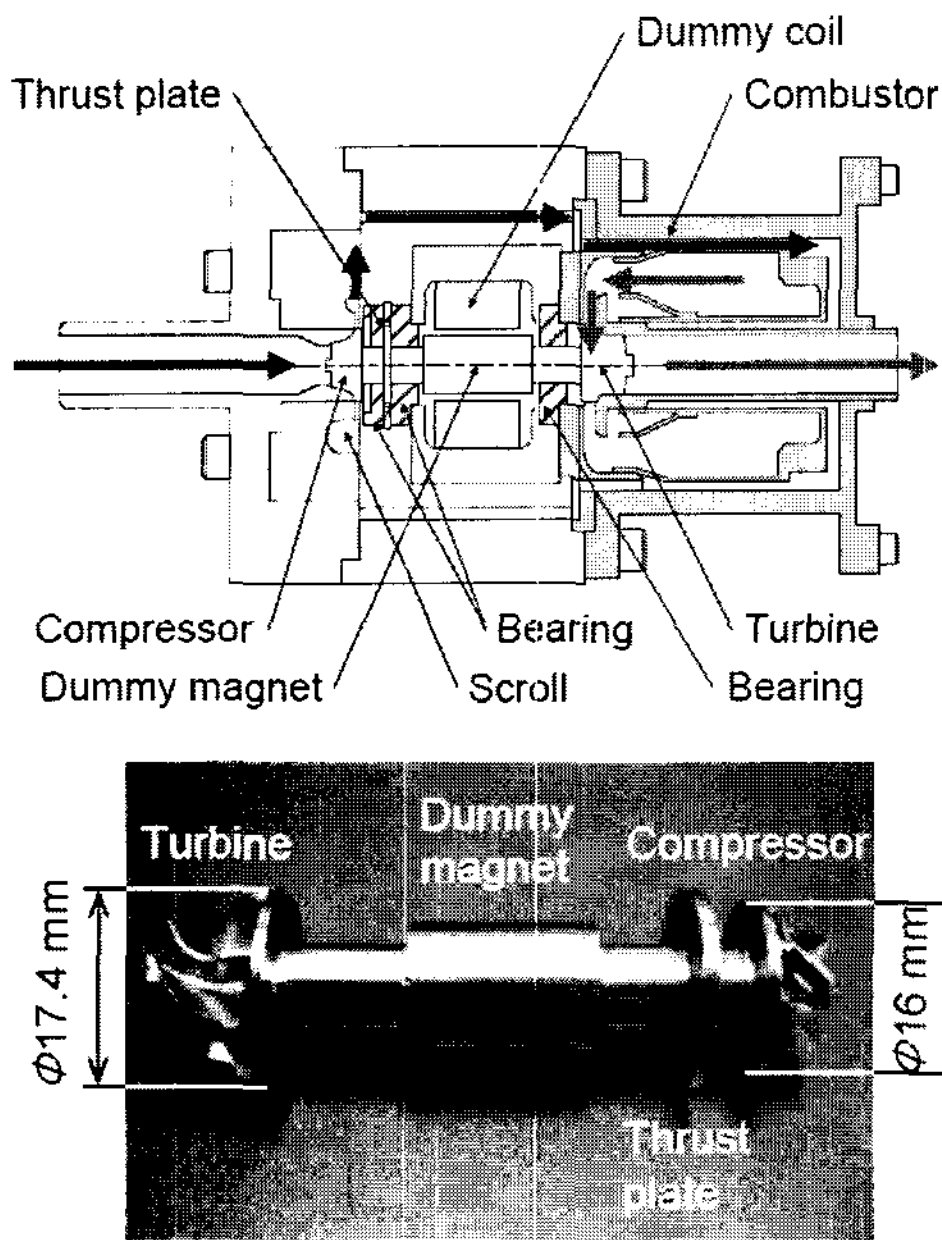


Fig. 3 Tohoku Univ.와 IHI가 개발중인 3차원 형태의 UMGT

여나가면서 실험을 하였다. 지금까지의 실험에서 연소기를 구동한 상태에서 정격회전수의 62% rpm까지 운전하여 성능시험 결과를 보고한 바 있다. 완전한 자가 구동을 이루려면 모터/제너레이터를 이용하여 초기 구동을 하고 정압베어링 대신 에어포일형 공기베어링을 장착해서 운전해야하는 과제를 남기고 있다.(6)

동경대 : 동경대에서는 출력밀도가 높은 초소형 이동전원을 UMGT에 의해 실현하기 위한 기반기술 확립을 목표로 연구 진행 중이다. 이 연구에서는 동경대 연구진이 연구를 총괄하고 가스터빈 설계 노하우를 보유한 프랑스 항공우주연구소(ONERA), 러시아 항공원동기중앙연구소(CIAM), 벨기에 폰칼만유체역학연구소(VKI)의 연구진을 국제공동연구 형식으로 활용하고 있다. 동경대에서 개발 중인 UMGT는 두가지 단계로 구성되어 있다. 첫 번째는 중간 개발단계로서 터빈 사이즈가 40 mm인 Palm-top UMGT(Fig. 4 참조)이고, 다른 하나는 최종 개발목표인 터빈 사이즈가 8 mm인 Finger-top UMGT이다. 이들 두 가지 UMGT의 크기, 출력 등의 특성은 아래의 표 2와 같다.(7)

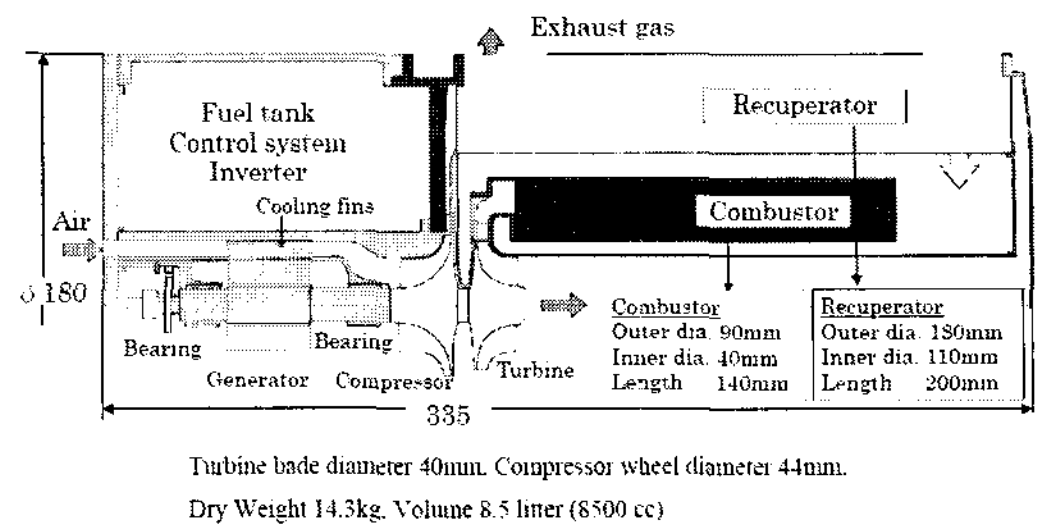


Fig. 4 동경대에서 개발 중인 Palm-top UMGT

표 2 동경대에서 개발 중인 UMGT

구분	Palm-top	Finger-top
컴프레서 압력비	2.5	2.5
터빈입구온도(K)	1,223	1,223
가스유량(kg/s)	0.03	0.001
회전속도(rpm)	235,000	1,170,000
터빈블레이드(휠 직경, mm)	40	8
설계목표출력	2-3 kW	30 W

IHI Aerospace사 : 현재까지 전기를 생산하기 위해 제작이 완료되어 상업화된 가스터빈 중에서는 가장 작은 크기의 하나인, 이동이 가능한 2.6kW급 가스터빈 (Model : DYNAJET 2.6)을 제작하였다(Fig. 5 참조).(8) 이 가스터빈의 회전수는 100,000 rpm 정도이며 Kerosene 연료를 사용하고 있다. 2-3kW급 디젤엔진 제너레이터의 경우에는 무게가 130 kg, 소음수준은 65-70 dB(A) 정도이며 비슷한 출력의 가솔린엔진 제너레이터의 무게는 70 kg이 조금 상회하고 소음수준은 57~63 dB(A)정도가 되고 있다. 이에 비해 휴대용 가스터빈 발전기인 DYNAJET 2.6인 경우에는 무게는 67 kg, 소음수준은 60 dB(A) 정도로서 통상의 엔진 제너레이터보다 컴팩트하고 정숙한 장점이 있다.

DYNAJET 2.6은 이동식으로 전기를 생산할 목적으로 제작되었으며, 고온 배기가스가 배출되는 점을 이용하여 비상시 특정 공간내의 난방과 전기발전을 동시에 이를 목적으로도 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다.

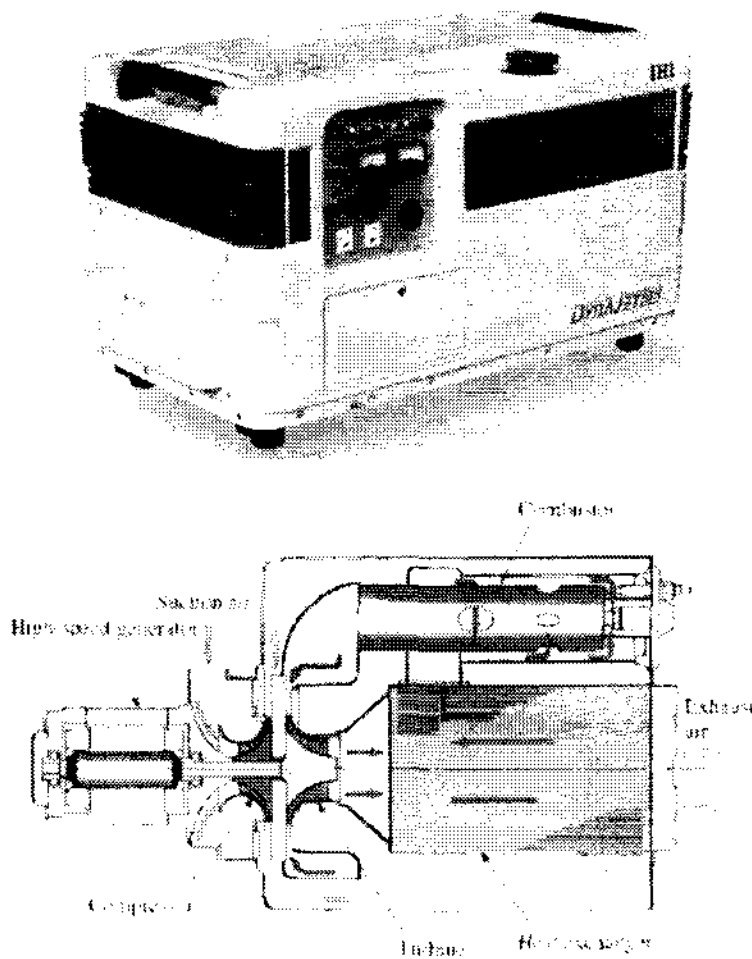


Fig. 5 NISSAN DYNAJET 2.6

Katholieke Univ.(벨기에) : Katholieke Univ.에서는 임펠러에 압축공기를 분사하여 전기를 발생할 수 있는 장치를 개발하였다. 개발된 마이크로 터빈의 로터 직경은 10 mm, 터빈과 제너레이터의 질량은 66 g 정도. 압축공기로 160,000 rpm의 회전수를 얻었을 때 최고 28 W의 기계적 출력(효율 18.4%)을 얻었으며, 전기발생장치와 연결했을 때 10.5%의 효율로 16 W의 출력을 얻은 바 있다.⁽⁵⁾ 터빈을 개량하여 16%의 전체효율로 44 W의 전기동력을 얻은 바 있으며, 28 W의 기계적 출력을 얻었을 때 출력밀도는 780 W/kg이었다.

최근 들어 Katholieke Univ.에서도 1kW급 UMGH의 개발을 위한 연구를 진행하고 있다. Fig. 6과 같은 형상의 초소형 가스터빈으로, 임펠러 직경은 압축기와 터빈 모두 20 mm이고, 압축기와 터빈 임펠러의 재질은 각각 티타늄과 세라믹으로 되어 있다. 현재는 압축기, 터빈, 연소기, 베어링, 리큐퍼레이터 등의 개발을 개별적으로 진행 중이며, 향후 연소기와 연계된 가스터빈 전체 시스템 구성과 관련된 연구를 진행시킬 예정으로 알려져 있다.⁽⁹⁾

3.2 국내 UMGH 개발현황

서울대에서는 MEMS에 기반을 둔 UMGH 개발 중이다. MEMS 기반의 장치이기 때문에 크기는 매우 작고 출력도 100 W보다 훨씬 작을 것으로 보인다. 주로

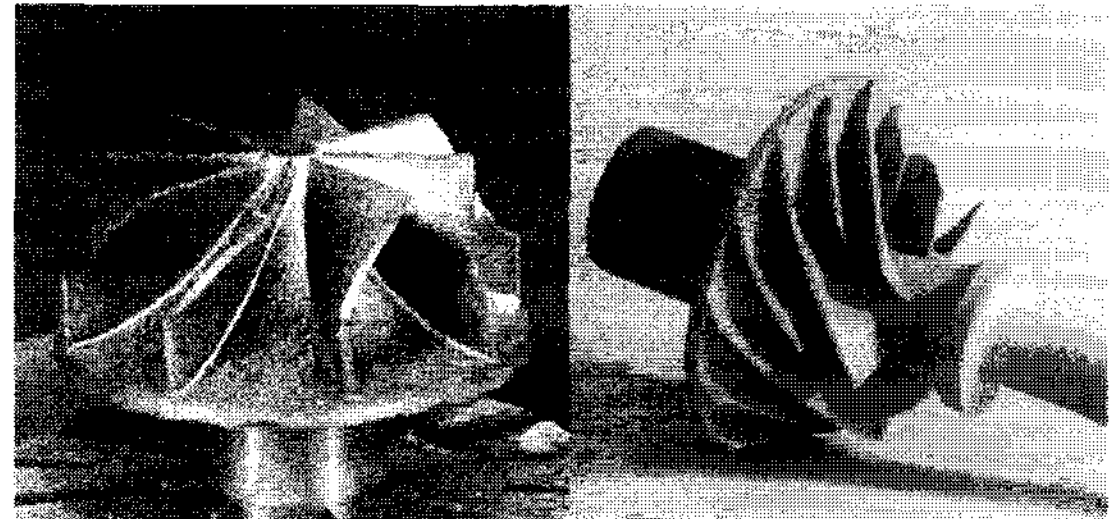
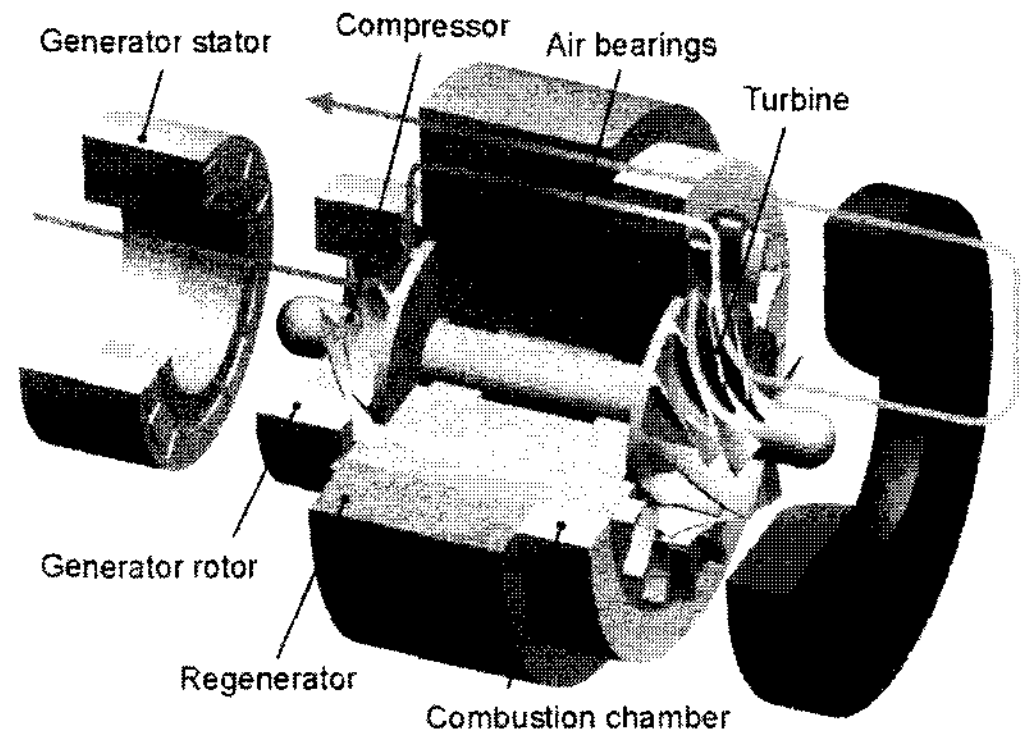


Fig. 6 Katholieke Univ.가 개발중인 1 kW급 UMGH

임펠러, 터빈 등의 공력설계, 해석위주의 연구와 각종 요소들의 해석 및 시제품 제작, 성능시험 위주로 연구가 진행 중이다.⁽²⁾ 연소기를 포함한 전체 시스템 구성은 현재까지는 이루어지고 있지 못하고 있다.

KIST에서도 현재 100 W급 UMGH(Ultra Micro Gas Turbine)에 대한 연구를 진행하고 있다. 지금까지 임펠러, 터빈, 베어링 부분 등에 대한 연구가 주로 진행되었다. 마이크로 터빈 발전기의 핵심부품인 압축기와 터빈에 대한 형상설계 수행하고 터빈부에 대한 시제품 제작하였다. 가스터빈 사이클 해석을 수행하고 터빈 입출구 작동온도조건을 결정한 후 터빈 날개 형상설계를 수행하였다. 시스템 사양 및 출력은 동북대의 경우와 비슷하다. 현재 시스템에 대한 저온실험(cold test)를 진행해서 정격회전수의 43%에서 안정적인 운전실험을 수행하였다.⁽¹⁰⁾

한국기계연구원에서는 열전발전용 마이크로 연소기와 마이크로 블로워의 개발경험을 바탕으로 1kW급 UMGH의 개발에 착수하였다. 현재 개념설계와 압축기, 터빈, 연소기 등의 구성품 개발을 진행 중이며, 구성품 시험 완료 후 전체 시스템 성능평가를 할 계획으로 10%이상의 시스템 효율을 목표로 하고 있다.

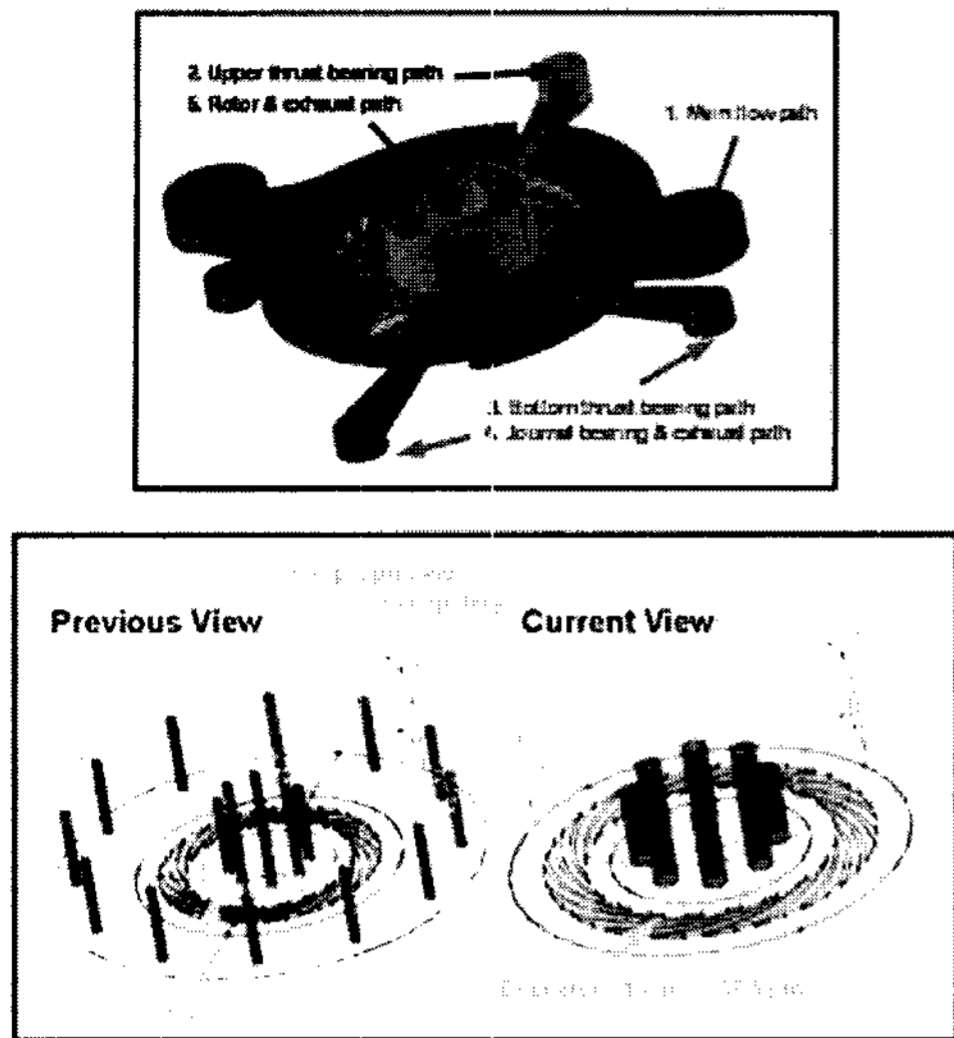


Fig. 7 서울대에서 개발 중인 UMGT

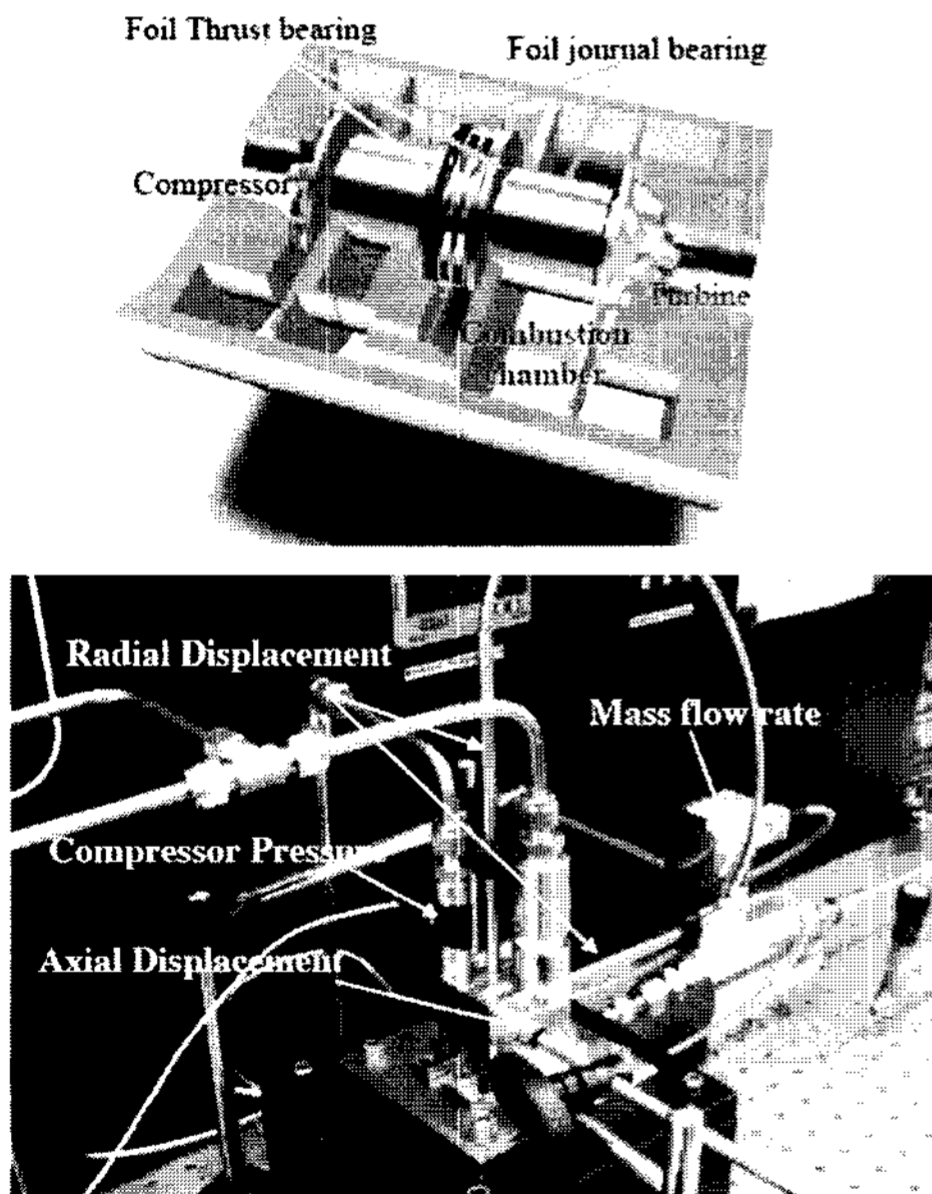


Fig. 8 KIST에서 개발 중인 100 W급 UMGT

4. 초소형 가스터빈(UMGT)의 개발 전망

연소형 MPG는 움직이는 부품이 없이 연소열 에너지를 전기로 변환하는 TEG, TPV 등의 Static MPG와 움직이는 부품으로 열에너지를 전기에너지로 변환하는 마이크로 IC 엔진, 가스터빈, 스텔링 엔진과 같은

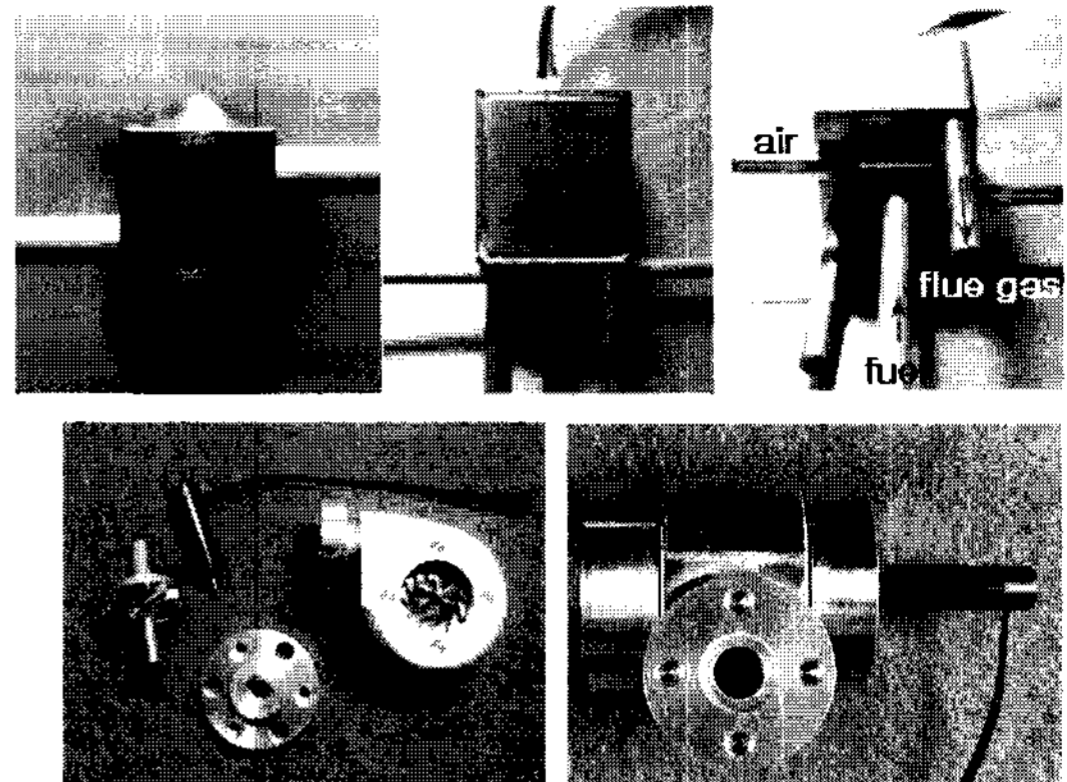


Fig. 9 마이크로 연소기와 마이크로 블로워(한국기계연구원)

Dynamic MPG로 구분된다. 연소형 MPG의 개발이 전 세계적으로 마이크로 연료전지 다음으로 활발히 진행되고 있는 이유는 탄화수소계 연료와 수소 연료가 리튬-이온 전지에 비해 각각 약 40 배에서 100 배정도 더 높은 에너지 밀도를 가지고 있기 때문이다. 이들 연료의 높은 에너지 밀도를 5% 정도만 이용하여도 같은 중량의 2차전지의 에너지 밀도를 상회하게 되므로 향후 연소형 MPG의 연구개발이 지속될 것으로 기대된다. 현재 빠른 시일내에 상용화가 가능할 것으로 기대되고 있는 MPG로 UMGT와 마이크로 스텔링 엔진(Micro Stirling Engine)이 많은 연구자들로부터 주목을 받고 있다.

초소형 가스터빈은 연속연소가 가능한 장점이 있으며 에너지 밀도와 동력 밀도가 높고 다양한 연료를 사용할 수 있어 군사용 MPG의 가장 강력한 후보 중 하나이다. 부품의 정밀도가 시스템 효율에 큰 영향을 주므로 정밀제작이 매우 중요하고 작은 크기의 시스템에도 높은 효율을 유지하기 위해서는 고도의 기술이 요구되며, 초고속 회전과 고온에 잘 견디도록 시스템을 설계해야 하는 어려움이 있다. UMGT는 500 W급 이상 수 KW급의 군사용 장비의 동력원으로 매우 적합한 MPG인 것으로 판단된다. 반면, 마이크로 스텔링 엔진은 20~100 W급에서 다른 종류의 MPG보다 높은 경쟁력을 가지는 것으로 알려지고 있다.

예상되는 UMGT의 적용가능 분야는 다음과 같다.

- 애완용 로봇, 휴머노이드 로봇이나 기타 각종 서비스 로봇 등의 동력원
- 군사용 위험물 처리 및 정찰용 로봇의 전원공급 장치

- 군용 전마로봇의 동력원
- 민수용 휴대용 발전기
- 분대/소대급 전원공급 및 충전용 발전기
- 배력기(Exoskeleton) 전원장치
- 초소형 항공기(Micro Air Vehicle; MAV) 또는 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle; UAV) 동력원

UMGH는 여러 가지 장점에도 불구하고 극복해야 할 단점도 가지고 있다. 첫째는 전체 출력을 증가시키기 위해서는 터빈 입구온도가 높아야 하며, 작은 스케일의 시스템에서 이는 전체 시스템 온도의 상승을 초래하게 된다. 또한 이러한 시스템의 고온화는 적외선 흔적을 많이 남기는 단점이 있어 군사용 장비에 사용하는데 어려움을 줄 수도 있다. 둘째는 고온배기가스로 인한 안전상의 문제이다. 이는 열재순환장치(Heat recuperator)와 열전소자를 이용한 추가적인 발전을 통해 전체적인 시스템 열효율을 향상시키면서 배기가스 온도를 어느 정도 낮출 수는 있는 것으로 보인다. 셋째는 연소 배기가스로 인해 밀폐된 실내에서의 연속적인 사용이 제약될 수 있는 점이며, 연소를 위해서 항상 공기를 필요로 한다는 점이 적용처 측면에서 단점으로 작용할 수도 있다. 마지막으로 초고속회전에 동반하는 소음문제도 해결해야 할 과제이다. 초고속회전에서 발생하는 소음은 주로 높은 주파수대의 소음이며, 높은 주파수대의 소음은 낮은 주파수대의 소음보다는 저감시키는데 유리하다고는 알려져 있지만 실제 상용화 단계에서는 반드시 해결해야 할 문제점 중의 하나임에는 틀림없다.

참고문헌

(1) 오창보, 최범석, "마이크로 동력원의 분류와 특징," 유체기계저널, 제9권, 제6호, pp. 63~66, 2006.
 (2) 최상규, "휴대용 무선 전자기기를 위한 환경 에너

지 재생기술," 기계저널 Vol. 46, No. 2, pp. 21~23, 2006.
 (3) A. H. Epstein, et al., "Micro-Heat Engines, Gas Turbines, and Rocket Engines - The MIT Microengine Project," 28th AIAA Fluid Dynamics Conference, 4th AIAA Shear Flow Control Conference, AIAA 97-1773, 1997.
 (4) Shuji Tanaka, et al., "Rotor Dynamics Test for Palmtop Gas Turbine Generator," PowerMEMS 2006, pp. 53~56, 2006.
 (5) Jan Peirs, Dominiek Reynaerts and Filip Verplaetsen, "Development of an Axial Microturbine for a Portable Gas Turbine Generator," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 13, pp. s190~s195, 2003.
 (6) Shuji Tanaka, et al., "World's Smallest Gas Turbine Establishing Brayton Cycle," PowerMEMS 2007, pp. 359~362, 2007.
 (7) Toshio Nagashima et al., "Lessons Learnt from the Ultra-Micro Gas Turbine Development at University of Tokyo. In Micro Gas Turbines," Educational Noteds RTO-EN-AVT-131, Paper 10. Neuilly-sur-Seine, France : RTO, pp. 14-1~14-58, 2005.
 (8) Kumakura Hirotaka, Maekawa Hirohiko and Murakami Kei, "Development of Portable Gas Turbine Generator, Dynajet 2.6," IHI Engineering Review, Vol. 37, No. 3, pp. 113~114, 2004.
 (9) Jan Peirs, et al., "Development of a Gas Turbine Generator with a 20 mm Rotor," PowerMEMS 2007, pp. 355~358, 2007.
 (10) Yong-Bok Lee, et al., "Feasibility Study of 100Watts Class Micro Turbocharger for Micro Gas Turbine Engine," PowerMEMS 2007, pp. 221~224, 2007.