한국군사과학기술학회지 제14권 제6호, pp. 1192~1197, 2011년 12월

학술논문 에너지 부문

차세대 군용전원용 500W급 마이크로 터빈 발전기 시스템 설계

Design of a 500W Class Micro Turbine Generator System as a Next Generation Military Power Source

최 상 규* 최 범 석* 한 용 식* 우 병 철**
Sang-Kyu Choi Bum-Suk Choi Yong-Shik Han Byung-Chul Woo
송 인 혁*** 민 성 기**** 임 진 식****
In-Hyuck Song Seong Ki Min Jin Sik Lim

Abstract

Recent developments of small-size unmanned or manned mobile systems such as autonomous robots, exoskeleton or armored suits, micro air vehicles, and unmanned armored vehicles require long-lasting independent power sources of high energy and power density to support the systems' operation for up to 72 hours in the fields. Chemical batteries such as Ni-MH, Li-Ion, the current primary power sources for mobile devices, however, are not capable of providing enough power and energy density for the next generation high power mobile machines. For this reason, KIMM along with KERI and KIMS has been carrying out a 500W MTG development project under the DAPA's “Next generation military power source R&D program” since 2009. In this paper, a design process for a 500W MTG system currently being developed at KIMM is briefly described and the technical issues related to its development are addressed.

Keywords : Mobile Power Generator, Energy/Power Density, Micro Turbine Generator, High Speed

1. 서 론

† 2011년 8월 2일 접수~2011년 11월 25일 게재승인
* 한국기계연구원(KIMM) 나노융합시스템연구본부/에너지플랜트연구본부
** 한국전기연구원(KERI) 전동력연구센터
*** 한국재료연구소(KIMS) 엔지니어링세라믹연구그룹
**** 국방과학연구소(ADD) 1기술본부 5부
책임저자 : 최상규(skchoi@kimm.re.kr)

최근 사람이 수행하기 위험하고 힘든 임무를 수행하기 위한 무인지상차량(UGV : Unmanned Ground Vehicle), 무인해양체계(UMS : Unmanned Maritime System), 무인항공기(UAV : Unmanned Air Vehicle)을 비롯한 무인수송체계 및 휴머노이드 로봇과 같은 이동형 로봇의 개발이 미국, 이스라엘, 프랑스 등의 세계 각국에서 활발히 이루어지고 있다[1]. 이들 무인이동체계를 개발하는데 있어서 큰 장애로 작용하는 것 중의 하나는

높은 에너지밀도로 장시간 에너지를 공급할 수 있는 소형 고출력 동력원의 확보이다. 배터리의 경우 출력밀도는 높지만 에너지밀도가 낮아 연속사용 시간이 짧고 충전시간이 오래 걸리며 전원에 대한 접근이 어려운 곳에서는 충전이 불가능한 문제가 있으며 다른 형태의 휴대용전원인 연료전지는 에너지밀도는 높으나 출력밀도가 낮아 고출력이 요구되는 경우에는 사용이 어려운 단점이 있다. 무인이동로봇의 경우 높은 에너지 밀도와 출력밀도를 동시에 만족시킬 수 있는 마이크로 터빈 발전기(MTG : Micro Turbine Generator)가 새로운 동력원으로 주목받고 있으며, 일본, 벨기에, 스위스, 미국 등에서 이를 개발하기 위한 연구가 계속 진행되고 있다[2~4]. 본 연구원에서는 방위사업청 지원 "차세대 군용전원특화연구센터" 사업의 일환으로 출력밀도 500W급의 마이크로 가스터빈 발전기(MTG : Micro Turbine Generator)을 개발하고 있다. 본 논문에서는 500W급 MTG를 개발하는데 극복해야할 기술적 과제를 소개하고 이를 해결하기 위해 수행하고 있는 핵심 요소기술, 즉 싸이클 해석기술, 압축기/터빈/연소기/전동발전기/베어링 등의 설계기술에 대해 소개하고자 한다.

2. 마이크로 터빈 발전기의 기술적 과제

초소형 마이크로 터빈발전기는 실리콘 wafer 기반 MEMS형과 기존 가스터빈을 축소시킨 mm scale의 Palm-top형 두 가지로 분류되는데 MEMS형은 1990년대 후반 미국 DARPA의 지원으로 MIT의 Epstein 교수가 10W급의 UMGT(Ultra Micro Gas Turbine) 개발을 시작하였고 Palm-top형은 2000년대 초반 이후 일본, 미국, 벨기에 등지에서 적극적으로 개발이 진행되었다[5~6]. 그러나 MEMS형 MTG는 현재 1) 원반형상 미소로터의 밸런싱 및 초고속 회전안전성 문제(로터의 가공정밀도가 낮아 근본적인 불평형 존재로 저진동 실현 불가), 2) 터빈, 압축기 효율 문제(DRIE 에칭공법으로 가공된 2차원 임펠러의 형상은 3차원 형상에 비해 효율이 낮아 목표 달성이 어렵다), 3) 가스터빈내의 단열 문제(열전도율이 높은 단결정 실리콘의 미세구조 안에서의 획기적인 단열법이 필요), 4) 초고속, 고출력 발전기의 개발문제(100～240만 RPM의 회전에 대해서 수십W의 발전을 하는 마이크로 발전기의 실현이 매우 어려움) 등의 이유로 중단된 상태이다.

이에 반해 벨기에, 일본 그리고 국내에서 개발하고 있는 Palm top형 MTG는 종래의 가스터빈에 관한 축적된 노하우를 사용함으로써 개발 가능성이 상대적으로 높다. 그러나 이 또한 MEMS형과 같이 초고속회전(40～100만RPM)을 실현하여 고출력, 고에너지 밀도의 초소형 전력발생장치로 자리매김하려면 다음과 같은 고난이도 기술의 확보가 필수적이다.

1) 초고속 회전 안정성 확보
- 무윤활 공기 동압베어링 및 고정도 밸런싱기술
- 저진동 고감쇠 베어링기술 및 로터부 단열기술

2) 시스템 효율 향상
- 터빈, 연소기의 고온부와 압축기, 전동발전기의 저온부와의 효과적인 열차폐 기술
- 고효율 터빈, 압축기, 연소기 및 폐열회수 기술
- 고효율 발전기 및 전력제어 기술

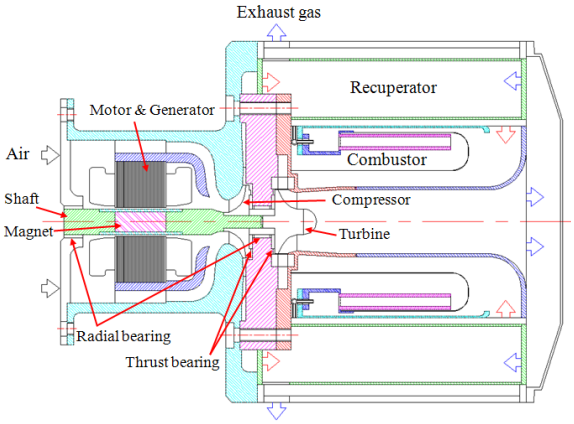
3) 운용 안정성 향상
- 고주파 소음 제어 또는 제거기술
- 고온의 배기가스 처리 기술

3. 마이크로 터빈 발전기의 구성

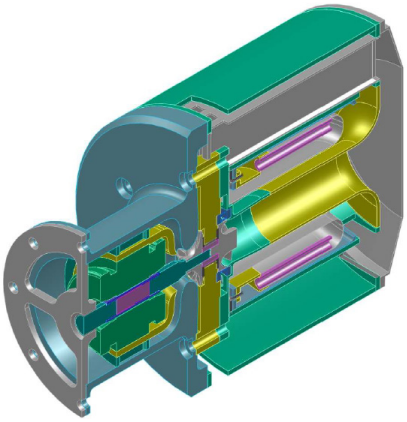
Fig. 1에 500W급 MTG의 구성도를 나타내었다. MTG의 구성요소는 전동발전기, 원심형 압축기, 구심형 터빈, 회전체/베어링, 연소기, 열교환기로 구성되어 있다. 500W급 MTG는 부피 1,000cm^{3}의 휴대가 가능한 작은 크기를 가지도록 개발하는 것이 목표이기 때문에 부피를 최소화하기 위해 압축기 및 터빈이 회전축에 직접 연결되어 회전하는 직결구동방식으로 설계되었다. 전동발전기는 3상, 2극, 6슬롯의 영구자석형 동기전동기(PMSM)이며, 회전체에는 2극의 전동발전기용 자석이 두께 0.8mm의 인코넬(inconel) 718 재질의 슬리브(sleeve)내에 일체형으로 열박음 되어있다. 회전축은 구조해석을 거쳐 외경이 10mm로 설계되었으며 이를 지지하는 베어링은 반경방향(radial) 및 추력방향(thrust) 베어링 모두 공기포일 베어링(air foil bearing)으로 선정하였다. 공기포일 베어링은 공기를 윤활제로 사용하여 회전축의 회전시 형성되는 베어링 주위 공기의 압력구배에 의해 스스로 회전축을 부양시키는 베어링으로서 경량이며 소형화가 가능하다. 또한 고온의 연소기/터빈부와 저온의 압축기/전동발전기부의 단열은 시스템의 효율 및 각 구성품의 열적안정성을 확

보하기 위해 매우 중요하므로 고온부와 저온부의 열차폐재료로 열전달계수가 매우 낮은 Zirconia를 채택, 현재 관련 부품 설계 및 제작기법의 연구를 수행하고 있다.

개발 중인 500W급 MTG는 사이클 해석을 통해 정격속도는 40만rpm, 자기구동 최대속도는 20만rpm으로 결정하였으며 정격속도, 즉 발전속도 40만rpm에서의 기계적 출력은 740W, 자기구동 최대속도에서의 압축기구동 소요동력은 280W로 예측되었다[7]. 따라서 MTG에 사용되는 전동발전기는 20만rpm까지 전동기로 회전체를 구동하고 40만rpm에서 최종 발전출력 500W를 확보할 수 있도록 설계되었다.



(a)



(b)

Fig. 1. (a) Two-dimensional view and (b) cross-sectional view of preliminary layout of micro turbine generator

4. 핵심요소 설계

가. 열역학적 싸이클 해석

터빈발전기의 싸이클 해석은 연료유량, 터빈입구온도, 압축비, 출력과 시스템효율을 결정하기 위해 GasTurb 11을 사용하여 수행하였다. 연료는 43.124MJ/kg의 열량을 갖는 JP4를 채택하였고 터빈부 재질과 일반적인 원심압축기 성능을 고려하여 압축기는 68% 효율에 압축비 3, 공기유량은 0.02g/s, 연소기는 효율 90%, 터빈은 효율 70%에 터빈입구온도는 1200K, 발전기는 전력제어부 손실을 포함 효율 80%, 열교환기는 효율 75%를 가정하였다. 열교환기 사용시 연소기 입구에서 2%, 연소기 자체에서 3%, 터빈출구에서 4%의 압력저하를 가정하였다. 해석은 두 가지의 시스템 구성, 즉 1) 열교환기를 사용하고 베어링부 냉각을 위한 압축공기 손실 3%가 발생하는 경우, 2) 열교환기를 사용하지 않는 경우에 대해 수행하였으며 각 경우에 대해 모두 40만rpm의 정격속도에서 500W 이상의 발전출력을 확보할 수 있었다. 시스템 효율은 각 경우에 대해 10.4%, 6.7%, 연료유량은 각각 0.70kg/h, 1.23kg/h로 나타나 열교환기의 사용이 절대적으로 필요함을 확인하였다.

나. 압축기 설계

500W급 터빈발전기의 싸이클해석 결과 Table 1과 같은 압축기 설계조건이 결정되었으며 제시된 설계조건을 토대로 NREC사의 COMPAL 프로그램을 사용하여 1차원 공력설계를 수행, 압축기의 내부유로, 블레이드 형상, vaneless 디퓨저 및 출구요소부의 형상을 결정하였다. 1차원 공력설계 결과를 바탕으로 ANSYS Bladegen과 CFX 12.0을 사용하여 3D 임펠러 형상설계 및 설계건전성을 평가한 결과 전압비 3.05, 효율 74.61%의 압축기를 설계하였다(Fig. 2).

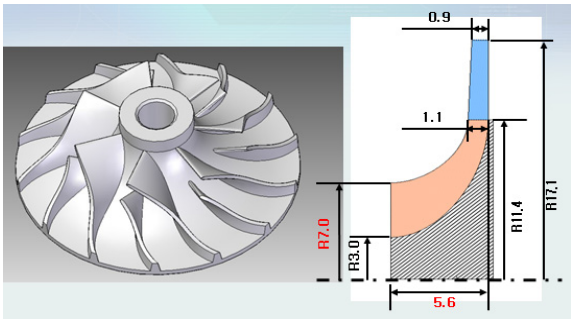


Fig. 2. Impeller and vaneless diffuser design results

Table 1. Compressor impeller design parameters

Item	unit	design
Speed	rpm	400,000
Mass Flow Rate	kg/s	0.02
Inlet Volume Flow Rate	m^3/s	0.0163
Blade Number	-	7+7
Reference Radius	mm	11.4
Tip Clearance	mm	0.1
Exit Angle	deg	-43
Total Pressure Ratio		3.055
Total Isentropic Efficiency	%	74.61
Input Power	W	2,910

다. 터빈 설계

싸이클 해석 결과에 따라 1단형 구심터빈은 4kW이상의 출력과 정압팽창비는 2.6이 되도록 설계하였다. 압축기 임펠러와 달리 터빈로터의 크기는 고온 환경 운전시 재료의 피로강도에 의해 결정되는데 본 연구에서는 터빈로터의 재료로 Inconel 718을 선정하고 410 m/s의 Tip speed를 초과하지 않도록 하였다. 압축기 임펠러와 같이 1D와 3D 해석을 수행하여 설계를 수행하였으며 그 결과는 Fig. 3과 Table 2에 있는 바와 같다.

Table 2. Turbine design parameters

Item	unit	design
Speed	rpm	400,000
Mass Flow Rate	kg/s	0.02
Inlet Volume Flow Rate	m^3/s	0.0241
Blade Number	-	8
Reference Radius	mm	10
Tip Clearance	mm	0.1
Exit Angle	deg	-43
Total Pressure Ratio(TT)		2.52
Total to Static Isentropic Efficiency	%	70
Out Power	W	4,521

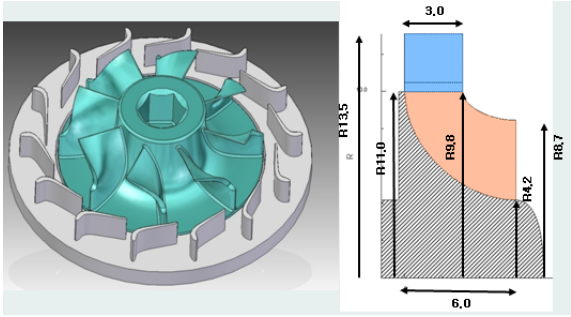


Fig. 3. Turbine rotor & nozzle design results

라. 연소기 및 열교환기 설계

연소기와 열교환기는 터빈 발전기시스템 구성요소 중 크기가 가장 커 시스템 사이즈에 많은 영향을 준다. 시스템의 부피를 최소화하기 위해 연소기는 환형 연소기를 채택하였다. 개발 중인 연소기는 6개의 연료 노즐, 1개의 점화기, outer & inner liner/casing과 공기 유입구 및 개스 배출구로 구성되어 있다(Fig. 4).

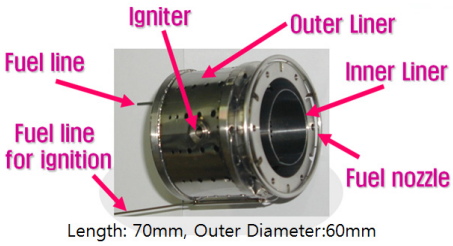


Fig. 4. Annular combustor prototype

시스템 효율을 증대시키기 위해 열교환기는 Fig. 5와 같이 11개의 plate를 적층하여 구성하는 recuperator 6개를 원주방향으로 배치한 plate-fin 형태를 선정하여 설계하였다. 최종 설계 열교환 효율은 75%, 연소기 효율은 90%이다.

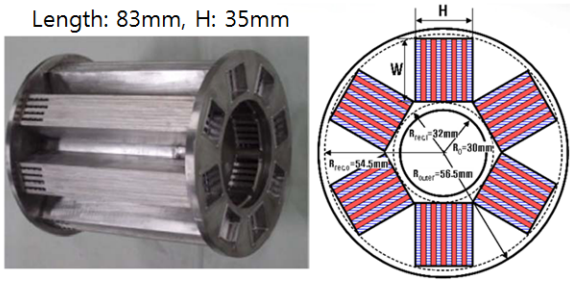


Fig. 5. Plate-fin(offset strip fin) heat exchanger

마. 전동발전기 및 전력변환회로 설계

개발 중인 터빈발전기는 최대 20만rpm까지 모터 및 연소에너지의 일부를 사용하여 자가구동을 하며 이후 연소에너지만으로 정격속도인 40만rpm에 도달하게 된다. 이를 위해 초기구동 동력공급과 부하의 급격한 변동을 방지하기 위해 DC48V 보조 배터리팩을 사용하며 이를 이용한 전동 및 발전모드 겸용 전력변환시스템은 Fig. 6과 같다.

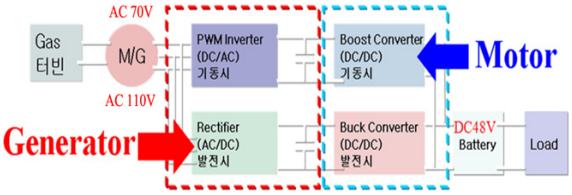


Fig. 6. MTG power management system

이러한 운전조건을 만족하는 전동발전기의 설계결과는 Table 3과 같다. 효율을 감안하여 발전시 800W, 전동시 최대 400W급 출력이 확보되도록 개발 중이다.

Table 3. PMSM motor/generator design parameters

항 목	발전(전동) 모드사양	비 고
정격 출력 [W]	800(400)	AC부하
정격 속도 [krpm]	400(200)	
정격 전압 [V]	110(72.3)	
정격 전류 [A]	4.20(3.8)	
전류 밀도 [A/mm^2]	6.96	
효율 [%]	약 94	전기손실
상 저항 [mΩ]	4.385	@150℃
동기 인덕턴tm [uH]	189.636	@DC
쇄교자속수 [Vs/rad]	0.002491	@150℃
역기전력상수(선간) [mV$_{rms}$/rpm]	0.31949	@150℃
토크상수 [Nm/A]	0.005	@150℃

10%내외의 고효율 시스템의 구현을 위해 전동발전기의 효율향상은 필수적이다. 전동발전기의 손실은 크게 동손, 철손, 풍손 등이 있으며 특히 40만rpm의 고속에서는 회전자의 자속에 의한 고속의 자계변화에 따라 고정자에서 발생하는 와류손이 매우 크다. 일반적으로 고주파모터에서 사용되는 0.2t 규소강판의 경우 10kHz의 고주파에서 300~2000W/kg의 손실을 발생시키는데 이로 인해 40만rpm에서는 발생전력의 60%에 해당되는 300W 이상의 매우 큰 손실이 발생하는 것으로 예측되었다. 따라서 본 연구에서는 고속에서의 와류손을 최소화할 수 있는 비정질 자성재료인 2605SA1을 채택하였고(Fig. 7) 이에 따라 정격 운전시 약 40W 정도의 손실이 발생할 것으로 해석되었다.

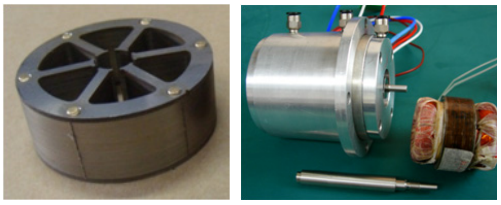


Fig. 7. Motor test rig with Amorphous core stator

바. 회전축 및 베어링 설계

정격속도 40만rpm의 공기 포일베어링 지지 MTG의 운전안전성을 확보하기 위해서는 시스템 회전축-베어링계의 1차 탄성모드가 정격속도의 110% 이상이 되도록 설계되어야 하며 고속에서의 구조강성 또한 확보되어야 한다. 이런 조건을 만족하기 위해 압축기 임펠러와 터빈로터를 일체형으로 가공, 이를 전동발전기 로터부와 Inconel sleeve로 직결하는 형태의 회전축을 설계하였다(Fig. 8).

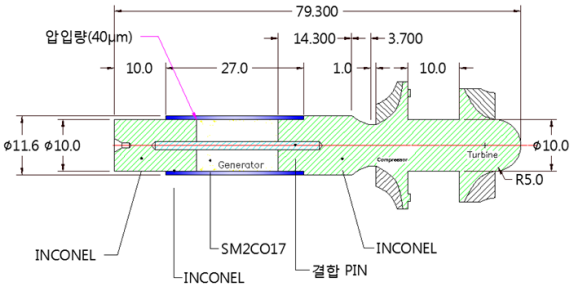


Fig. 8. MPG rotor configuration

회전축의 1차 free-free 탄성모드는 6.96kHz, 위험속도는 47.4만rpm으로 정격속도 대비 약 18%의 운전여유가 있음이 확인되었다(Fig. 9). 이러한 해석을 위해서는 회전축 지지용 공기 포일베어링의 실험적 동특성-감쇠, 강성계수-의 측정이 매우 중요하다(Fig. 10). MPG용 베

어링의 최소 유막두께는 20~30μm로 선정하였고 베어링 단독으로 약 20만rpm까지 운전하며 동특성을 파악, 회전축-베어링 시스템 설계에 사용되었으며 현재는 고온에서의 운전안전성을 확보하기 위한 고온용 베어링 시험장치의 설계 및 제작을 진행 중에 있다.

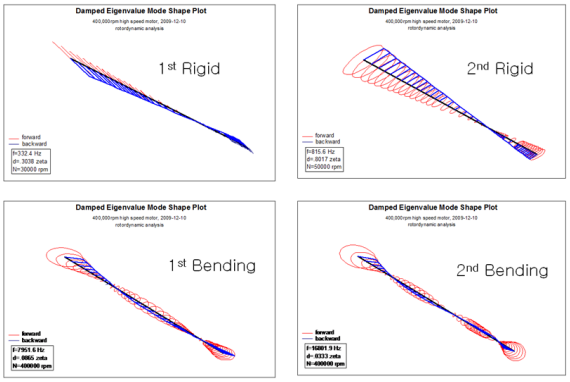


Fig. 9. Rotor-bearing mode shape analysis

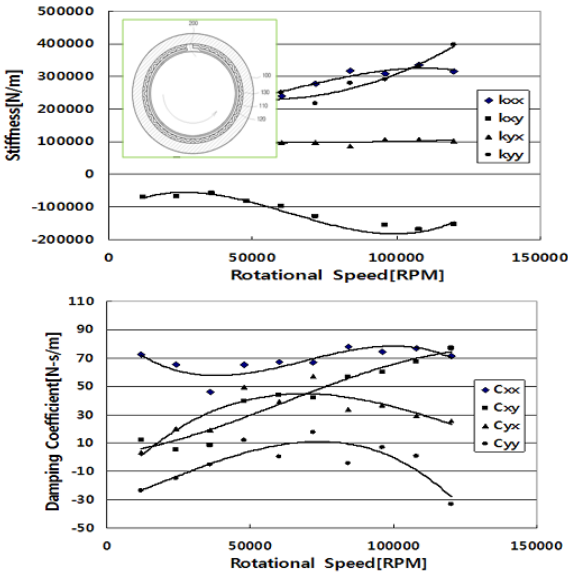


Fig. 10. Experimentally identified bearing parameter

5. 결 론

"차세대 군용전원 특화연구센터"의 "미래핵심동력기계연구실"에서 개발하고 있는 500W급 초소형 마이크로 터빈 발전기의 설계기술에 대해 기술하였다. 초소형 마이크로 터빈발전기는 제한된 공간(1,000cm^3) 안에 최대 1200K의 고온과 40만rpm의 고속으로 구동하며 10% 내외의 고효율 운전을 해야 하므로 기계, 재료, 전기전자기술이 복합된 매우 고난이도의 설계 및 제작기술을 필요로 한다. 현재 본 연구실에서는 각 핵심구성요소별로 시작품을 제작, 시험단계에 있으며 향후 실험결과를 토대로 설계기술을 완성, 세계 최초의 Working prototype 개발을 목표로 하고 있다.

후 기

본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소 지원으로 수행되는 차세대 군용전원특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

[1] 이원승, "그때는 거북선, 이제는 로봇", 시대고시기획, pp. 16~24, 2010.

[2] 박철훈, 최상규, 함상용, "임팩트 테스트를 이용한 초고속 회전체용 공기 포일 베어링의 동특성 계수 측정", 유체기계저널, Vol. 14, No. 1, pp. 5~10, 2011.

[3] Isomura, K., Tanaka, S., Togo, S. and Esashi, M., "Development of High-Speed Micro-Gas Bearings for Three-Dimensional Micro-Turbo Machines", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 15, No. 9, pp. S222~S227, 2005.

[4] Zwyssig, C., Kolar, J. W., Thaler, W. and Vohrer, M., "Design of a 100W, 500000rpm Permanent-Magnet Generator for Mesoscale Gas Turbines", Industry Applications Conference, Vol. 1, pp. 253~260, 2005.

[5] http://www.darpa.mil/dso/thrust/matdev/palm power

[6] Epstein, J. Eng. Gas Turbine & Power, 126, pp. 205~226, 2004.

[7] 최상규, "차세대 군용전원으로서의 마이크로 터빈 발전기 개발현황", ADD 40주년 학술대회, 2010.

[8] 최상규 외, "500W급 초소형 마이크로 터빈 발전기 시스템 설계", 2011 한국군사과학기술학회 종합학술대회, pp. 1607~1610, 2011.