

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.2.153>

ISSN 1226-4881(Print)

2288-5324(Online)

초소형 가스터빈엔진 열전달 현상의 수치적 및 실험적 연구

서준혁* · 권길성** · 최주찬*** · 백제현**

* 포항공과대학교 기계공학과, ** 서강대학교 기계공학과, *** 경북대학교 전자컴퓨터공학과

Numerical and Experimental Analysis of Micro Gas Turbine Heat Transfer Effect

Junhyuk Seo*, Kilsung Kwon**, Ju Chan Choi*** and Jehyun Baek**

* Dept. of Mechanical Engineering, Pohang Univ of Science and Technology.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.,

*** School of Elec. Eng. and Comp. Sci., Kyungpook Nat'l Univ.

(Received June 23, 2014 ; Revised October 23, 2014 ; Accepted December 9, 2014)

Key Words: Micro Gas Turbine(초소형 가스 터빈), Heat Transfer(열전달), CFD(전산유체역학)

초록: 본 연구에서는 MEMS기술을 적용한 2W급 초소형 가스터빈엔진의 개발과 실제 연소 환경에서의 발전 가능성을 해석적, 실험적으로 입증하였다. 초소형 가스터빈엔진은 터보차저, 연소기, 발전기로 이루어져 있다. 터보차저는 각각 직경 10mm와 9mm의 MEMS 공정 압축기와 터빈으로 구성되어 있으며 발전코일 또한 MEMS공정으로 설계되었다. 제작된 압축기와 터빈은 정밀 기계 가공된 축과 공기 베어링으로 지지되고 회전하며, 회전축 끝단에 영구자석을 설치하여 발전을 하게 된다. 공기 베어링과 압축기를 통한 냉각 효과를 해석하여 연소기에서 발생한 열을 충분히 차단할 수 있는 것으로 분석되었고, 이를 실험을 통해 검증하였다.

Abstract: In this study, a 2-W micro-gas turbine engine was designed using micro-electro-mechanical systems (MEMS) technology, and analytical and experimental investigations of its potential under actual combustion conditions were performed. An ultra-micro-gas turbine contains a turbo-charger, combustor, and generator. A compressor, turbine blade, and generator coil were manufactured using MEMS technology. The shaft was supported by a precision computer numerical control machined air bearing, and a permanent magnet was attached to the end of the shaft for generation. An analysis found that the cooling effect of the air bearing and compressor was sufficient to cover the combustor heat, which was verified in an actual experiment.

- 기호설명 -

- D : 지름 [mm]
- h : 높이 [mm]
- n : 날개 개수
- \dot{m} : 질량유량 [g/s]
- P_{in} : 입구압력 [bar]
- P_b : 베어링압력 [bar]

1. 서론

휴대폰, 태블릿, 노트북 등의 다양한 모바일 기기는 최근 소형화 및 다기능화 되고 있으며, 이를 구동하기 위한 에너지양은 점차 증가하고 있다. 위와 같은 모바일 기기들의 에너지 공급원으로 현재는 일차 및 이차 전지가 사용되고 있다.⁽¹⁾ 그러나 전지의 기술은 이러한 모바일 기기들이 요구하는 에너지양을 충족시키지 못하고 있어 새로운 출력원의 필요가 대두되고 있다. 마이크로 가스터빈엔진(UMGT)는 최근 활발히 개발되고 있는 배터리를 대체할 수 있는 다양한 종류의

† Corresponding Author, jhbaek@postech.ac.kr

Table 1 Compressor and turbine specification

Spec	Compressor	Turbine
D	10	9
h	0.4	0.4
n	9	30
\dot{m}	0.36g/s	0.39g/s

마이크로 전력원 중 하나로⁽²⁾ 부피대비 에너지 출력과 효율이 배터리보다 월등히 높아 많은 연구가 진행되고 있다. 기존의 초소형 가스터빈은 소형화에 적합한 MEMS기술을 기반으로 하여 연구되었으나⁽³⁻⁵⁾ 제작상의 어려움과 열 차폐 문제로 인하여 가스터빈 전체 자립운전을 구현하는데 어려움을 겪었다. 이를 개선하기 위한 방법으로 본 연구에서는 MEMS공정과 정밀 기계가공 공정을 혼합하여 제작의 용이성을 개선하고, 압축기와 터빈 사이의 열차폐를 개선하기 위해 축을 삽입한 새로운 초소형 가스터빈 엔진을 제안하였다. 본 논문에서는 제안된 초소형 가스터빈의 초기 설계 및 열 차폐효과의 수치적 해석과 함께 실험적으로 초소형 가스터빈의 작동여부를 검증하는 연구를 수행하였다.

2. 초소형 가스터빈 구성 및 실험장치 소개

2.1 실험장치 구성

본 연구에서 제안한 초소형 가스터빈의 단면도를 Fig. 1에 나타낸다. 가스터빈의 핵심 부품인 터빈, 압축기 블레이드와 발전기 코일은 MEMS 공정으로 가공하였고, 그 외의 베어링 및 연소기와 기타 외부장치들은 기계가공을 사용해 스테인리스 스틸로 가공하였다. 그림과 같이 압축기와 터빈 사이에 축을 설치하여 연소기 및 터빈의 고온부와 압축기 및 영구자석간의 거리를 충분히 확보하였다. 또한 축의 회전을 지지하기 위해 공기정압베어링을 설치하여 외부에서 공급되는 압축공기를 통해 고회전을 지지하게 하였다. 축의 맨 끝에 장착된 도넛형 영구자석이 회전하여 바깥쪽에 위치한 코일을 통해 전력을 생산하는 구조로 되어 있다.

2.2 압축기 및 터빈 스펙

설계된 압축기 및 터빈의 형상을 Fig. 2, 3에

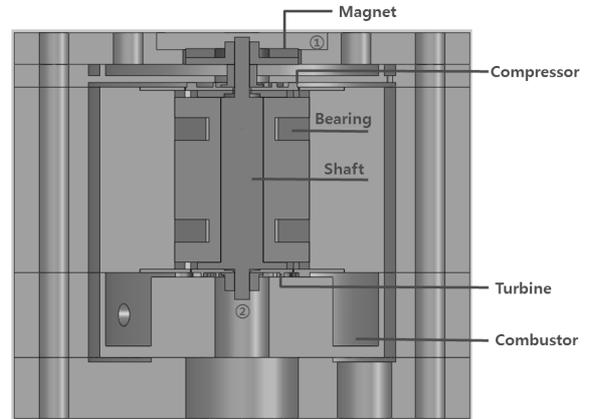


Fig. 1 UMGT sectional view and temperature measurement point(①②)

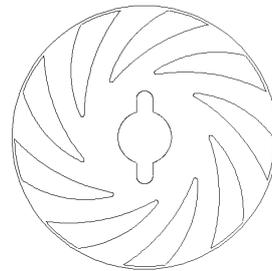


Fig. 2 Compressor shape

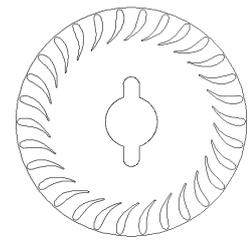


Fig. 3 Turbine shape

나타낸다. 전체 터보차저는 50만 RPM에서 동작하도록 설계되었으며, 압축기의 바깥지름은 10mm, 날개높이 0.4mm 이고 유량 0.36g/s에서 약 16W의 일률을 소모하도록 설계되었다. 터빈의 바깥지름은 9mm, 날개높이 0.4mm로 유량 0.4g/s에서 24W의 출력을 내도록 설계되었으며 나머지 사항은 아래 Table 1에 나타내었다.

2.3 코일 및 영구자석

발전기에는 네오디뮴 영구자석이 사용되었다. 네오디뮴 영구자석은 일반적으로 성형할 수 있는 자석 가운데 가장 큰 자속밀도를 가지고 있어 소형 대용량 발전기에 가장 적합한 자석이라고 할 수 있다. 축의 말단에 설치하기 위해 중심부를 비운 도넛 형으로 가공되었으며, 두께는 0.8mm이다. 초기 발전 코일은 MEMS가공을 통해 설계하여 제작하였다. 자세한 설계 및 제작방법은 권⁽⁶⁾을 참조하였다. 본 연구에서는 MEMS 가공 발전 코일 외에도 더 높은 성능을 위한 다양한 형태의 발전 코일을 개발하고 있고, Fig. 4에 본 연구에 사용된 발전 코일의 모습을 나타낸다. MEMS형 발전코일과 동일한 구조를 가지고 있으나 에나멜

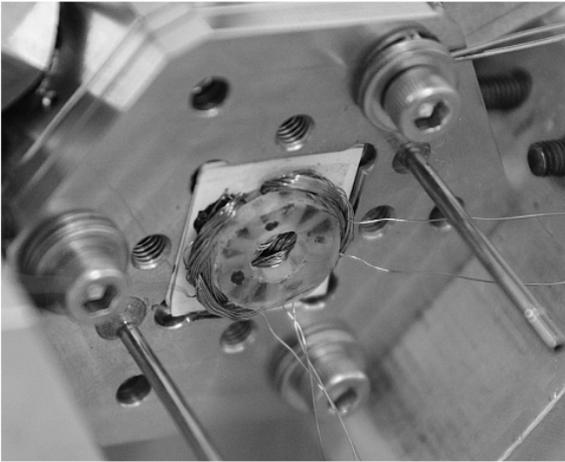


Fig. 4 Generator coil with enamel code

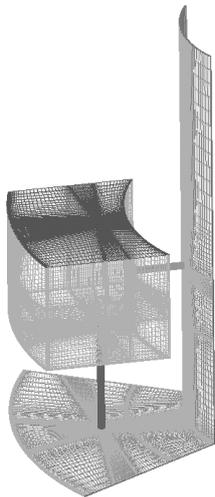


Fig. 5 Bearing mesh

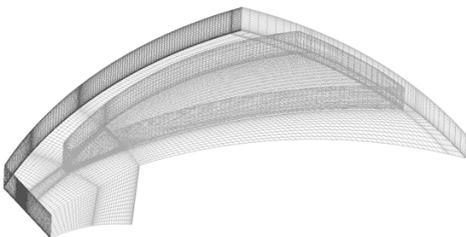


Fig. 6 Compressor mesh

코일을 사용하여 제작이 용이하고 턴 수가 높아 높은 성능을 나타내는 것으로 측정되어 에나멜 코일형 발전 코일을 사용하였다.

3. 열전달 효과 해석

3.1 베어링, 터빈 및 압축기 열전달계수 분석

본격적인 실험에 앞서 제안된 가스터빈 구조의 열전달 특성을 예측하기 위한 수치해석을 수행하였다. 먼저, ANSYS CFX 13.0을 사용하여 베어

Table 2 Conditions for each model

Condition	Bearing	Turbine	Compressor
Inlet	3 [bar]	1.4 [bar]	1 [bar]
	300 [K]	1100 [K]	300 [K]
Outlet	1 [bar]	0.39 [g/s]	0.39 [g/s]
Turbulence model	k-epsilon		

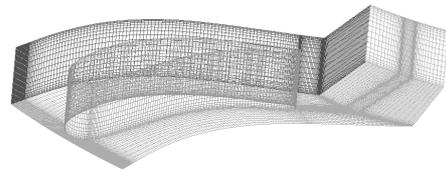


Fig. 7 Turbine mesh

링, 터빈, 압축기 부분의 유동해석을 수행하여 각 부의 열전달계수 h 를 계산하였다. Fig. 5, 6, 7에 베어링, 터빈, 압축기의 유동해석영역에 대한 격자를 나타낸다. 효율적인 수치해석을 위해 원주 방향으로 각각 1/6, 1/30, 1/9에 해당하는 영역을 격자화 하여 각각 30만, 25만, 43만개의 비정렬 격자를 형성하였다. 세 가지 계산 모두 정상상태 단열조건으로 계산하였고 그 외 계산조건은 Table 2에 나타낸다.

각 부품의 벽면에서의 열전달 계수의 분포를 Fig. 8, 9, 10에 도시하고 면적평균 값을 Table 3에 나타낸다. 터빈의 경우 터빈 블레이드 입구와 출구 허브 부분에서 $1800 W/m^2 K$ 정도의 높은 열전달 계수 값을 나타내는 것으로 나타났다. 따라서 연소기 출구에서 나온 고온의 공기가 주로 블레이드의 전연을 통해 축으로 전달되어 터빈의 열 스트레스가 집중 될 것으로 예상된다. 압축기의 경우 블레이드를 지날수록 열전달 계수 값이 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 블레이드를 지나며 압축이 되어 압력이 증가했기 때문이다. 베어링의 경우 베어링 채널이 위치한 곳에 열전달 계수 값이 12000 정도로 대단히 집중되어 있는데, 이것은 채널이 위치한 지점에 강한 압력이 가해지고 좁고 넓은 면으로 갑자기 퍼지기 때문에 생기는 속도 저하로 인한 것으로 해석된다. 따라서 열전달 계수의 면적평균값을 사용하여 축에서의 열전달 해석을 수행하는 것이 적합하다.

3.2 축에 의한 열전달 해석 결과

3.1에서 구해진 축의 각 부위별 열전달계수를 이용하여 실제 터빈 블레이드를 통해 전해진 열

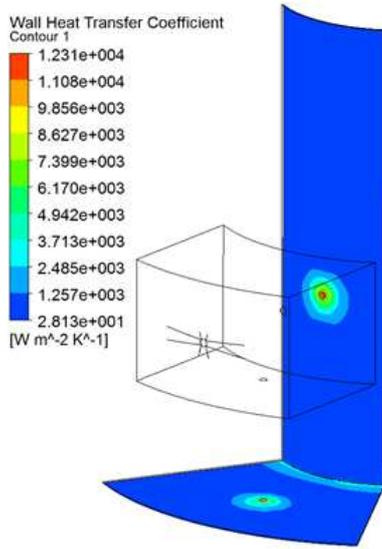


Fig. 8 Heat transfer coefficient for bearing surface

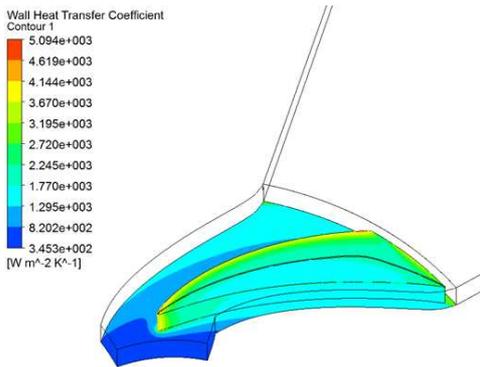


Fig. 9 Heat transfer coefficient for Compressor surface

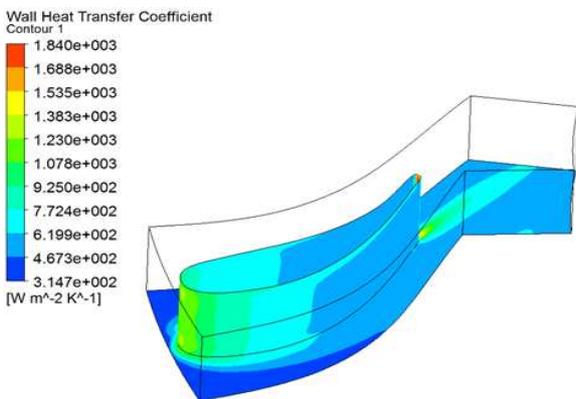


Fig. 10 Heat transfer coefficient for Turbine surface

의 영구자석까지의 전달현상을 해석하였다. 해석에 사용된 수치해석 프로그램은 다중물리현상 해석 소프트웨어 COMSOL Multiphysics이며 Fig. 11에 전체 해석 영역과 해석 조건을 표시하였다. 사면체 격자로 996,242개의 격자로 구성하였으며,

Table 3 Area average of Heat transfer coefficient

베어링	터빈	압축기
635.092	735.022	1635.15
단위 [W/m^2K]		

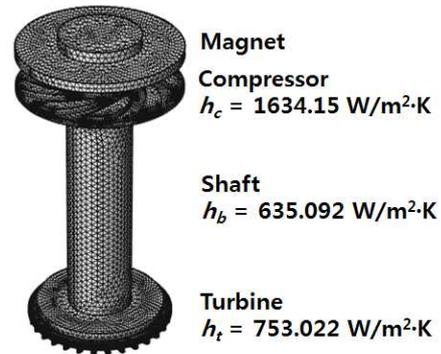


Fig. 11 Heat transfer analysis Mesh and calculation condition

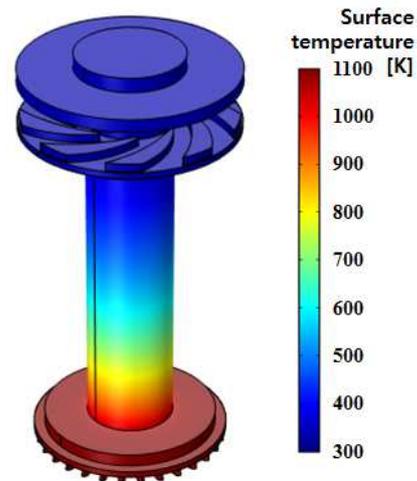


Fig. 12 Temperature distribution of shaft surface

터빈에 입사되는 공기의 온도는 1100K, 압축기에 입사되는 공기의 온도는 300K로 가정하였다. 터빈과 압축기는 실리콘으로, 축은 SUS304재질로 지정하였다.

Fig. 12는 열전달 수치해석 결과를 나타낸다. 해석 결과 고온의 공기로 인해 터빈 블레이드의 경우 온도가 750K까지 상승되나 축에서 대부분의 냉각이 이루어져 온도가 급격하게 하락하고 그 결과 압축기 뒤 영구자석 부분에서는 400K 이하까지 냉각되는 것으로 나타났다. Fig. 13은 축의 중심을 따라 터빈에서부터 압축기까지의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 압축기의 열전달 계수가 제일 크기 때문에 냉각 효과가 압축기에서

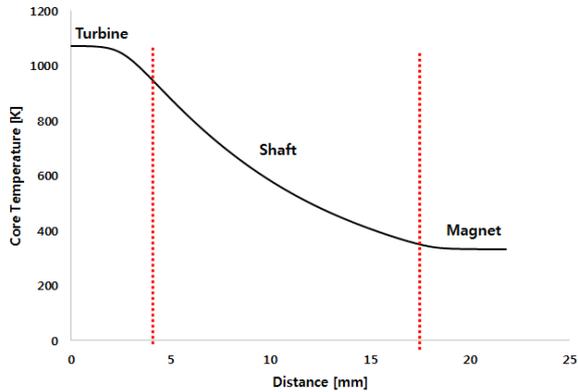


Fig. 13 Temperature distribution for each position

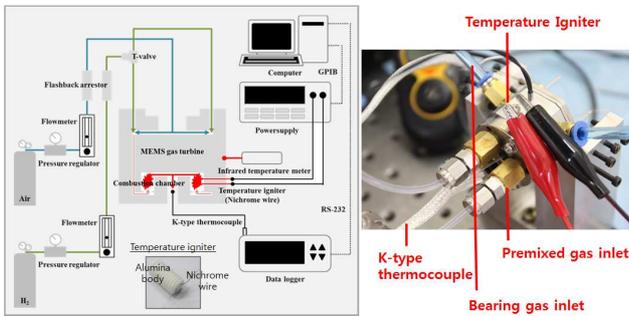


Fig. 14 Schematic diagram and Experiment setup

가장 클 것으로 예상했지만 주된 냉각 효과는 축에서 이루어지는 것으로 나타났다. 따라서 본 해석 결과로 터빈에서의 고온이 베어링부분에서의 충분한 냉각효과로 인해 영구자석의 자력상실 온도인 400K보다 낮은 온도를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

4. 실험 결과 및 해석

열전달 해석결과를 바탕으로 실제 연소실험을 수행하여 발전 가능성을 검토해 보았다. 저RPM, 저유량 조건에서 연소를 시작하기 때문에 연소기에 수소-공기 예혼합 가스를 직접 분사하여 연소를 시켜 터빈을 회전시켜 충분한 RPM을 얻어낼 수 있도록 하였다. Fig. 14는 실험 장치의 구성을 나타낸다. 베어링은 2기압으로 일정하게 유지하도록 하였고 수소-공기 예혼합가스는 압력과 당량비를 2기압, 0.5로 고정하고 유량을 증가시키며 연소실험을 진행하였다. 또한 Fig. 1에 나와있는 것과 같이 터빈 출구와 발전코일이 위치한 압축기 바깥케이스에 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. 터빈에 의해 축이 회전하게 되면 코일에 유도전류가 발생하여 생기는 교류의 전압을 오실

Table 4 Specific Experimental condition

Condition	연소 전	1차 연소	2차 연소
P_{in}	1.4	2	2
\dot{m}	0.13	0.14	0.24
Equivalence ratio	0	0.5	0.5
P_b	2		

로스코프로 측정하여 첨두치 전압과 회전수를 계산하였다.

연소를 시작하기 전에 베어링을 작동시키고 터빈에 수소를 제외한 공기만을 주입하여 터빈을 구동시키다가 120초 후에 수소를 함께 주입하여 35% 유량 조건으로 연소를 시작하였다. 연소 9분 경과 후 회전수 및 발전기 첨두치 전압이 안정됨에 따라 수소-공기 예혼합 가스의 유량을 디자인 유량의 60%까지 상승시켜 실험을 하였다. 연소 전후와 60% 유량 상승지점의 상세 실험 조건을 Table 4에 나타내었다.

Fig. 15에 실험 시간에 따른 회전수와 터빈출구, 발전코일케이스의 온도의 변화를 나타낸다. 연소가 시작된 직후에 터빈 출구온도가 급격하게 상승하게 되고 그에 따라 회전수 또한 상승하였다. 케이스 온도의 경우 연소 직후에는 상승하지 않고 일정 시간 후부터 완만하게 상승하였다. 이는 케이스가 터빈, 연소기와 공간적으로 떨어져 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한 Fig. 16을 보면 연소 전 75mV의 첨두치 전압이 연소 직후 회전수가 상승함에 따라 급상승하여 150mV까지 상승하였다. 연소 2분 경과 후부터 케이스의 온도가 상승하면서 영구자석의 자속밀도가 감소하여 축의 회전수는 일정하게 유지되더라도 발전 전압이 80mV까지 감소하였는데 이는 각 부 온도가 일정하게 유지되면서 전압 또한 더 이상 감소하지 않고 발전이 지속되었다. 연소 9분 후 유량을 60%까지 올리자 터빈 출구온도가 366℃까지 급상승하였고 회전수 또한 상승하였다. 케이스 온도도 다시 완만하게 상승하기 시작하여 최종적으로 170℃까지 상승하여 지속되었다. 이에 따라 발전 전압도 다시 감소하여 최종 55mV까지 하락하였지만 더 이상 감소하지 않고 유지되는 결과를 얻을 수 있었다.

실험 종료 후 각 부위의 손상정도를 검사하였고 고재 실험을 통해 동일한 결과를 얻을 수 있어

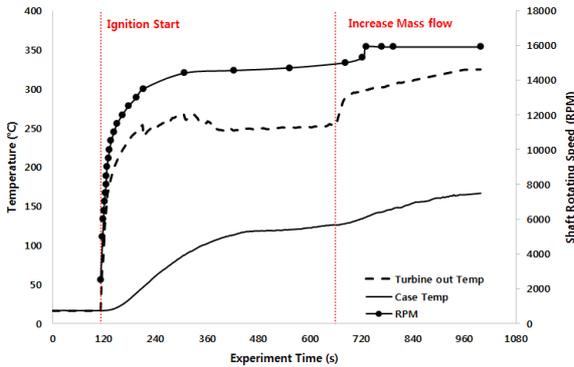


Fig. 15 Time vs each Temperature and RPM

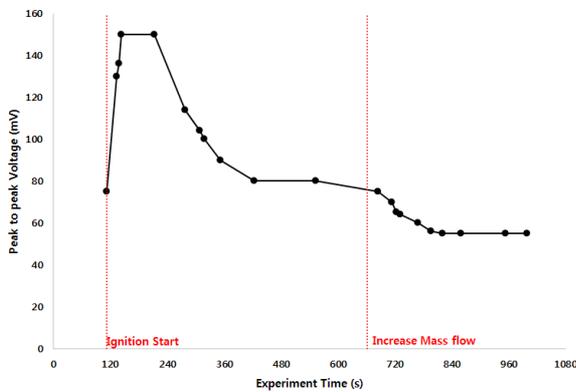


Fig. 16 Time vs Generator peak to peak voltage

내구성도 신뢰도가 있는 것으로 나타났다. 한편 권⁽⁶⁾의 결과에 따르면 실험에서 얻어진 터빈 출구 온도 366°C에서의 연소기 출구 온도를 약 1400K으로 예측하고 있으나 이 온도는 단일조건에서 계산되었기 때문에 축이나 케이스로의 열전달을 고려하면 터빈 입구에서의 온도가 앞선 열전달 계산에 쓰인 터빈 입사온도 1100K과 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판단할 수 있다. 또한 계산에서 얻어진 것처럼 실험에서도 케이스의 출구온도가 비교적 낮게 200°C 이하로 측정되었고, 영구자석의 발전 전압이 지속적으로 출력시킨다는 것은 영구자석의 온도가 한계온도 이하로 유지되었다는 결과이다.

그러나 실험 조건이 아직 설계 유량에 도달하지 못하였고, 유량에 비해 회전수가 낮은 문제는 아직 존재한다. 이는 주로 베어링 및 축에서의 편심 문제로 인해 회전 불안정성이 회전수가 증가함에 따라 크게 증가하여 생긴 것으로 예상되며 밸런스 향상 및 유량증가에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다.

5. 결론

작고 고효율의 전력원을 위한 MEMS 기술을 사용한 2W급 초소형 가스터빈 엔진의 개발을 위하여 터보차저와 연소기 및 발전기의 설계를 수행하여 이를 제작하여 발전 실험을 통하여 개발 가능성을 실험으로 검증하였다. 실험에 앞서 베어링 및 터빈, 압축기 블레이드를 통한 열전달 효과를 예측하기 위해 유동 수치해석을 사용하여 각 부분에서의 열전달 계수를 계산하였으며 각 부품에서의 열전달 특성을 분석하였다. 수행 결과 터빈에 1100K의 고온 공기가 유입되더라도 베어링에서의 충분한 열전달 효과로 인해 영구자석 부분의 온도가 400K 이하로 영구자석의 한계 온도보다 낮게 감소하는 것을 예측하였다. 실험 결과 또한 당량비 0.5, 압력 2기압에서 설계 유량의 60%조건까지 연소를 진행하여 터빈 출구온도 366°C, 발전코일 케이스의 온도 170°C로 증가하는 결과를 얻었으며, 발전 코일에서 출력되는 침두치 전압이 150mV에서 55mV까지 감소하는 결과를 얻었다. 그러나 잔류 자속밀도가 감소하여 발전량이 감소하였음에도 불구하고 높은 터빈 입사 온도에서도 안정적인 발전이 지속되었으며 이는 마이크로 터빈의 발전이 가능함을 보여주는 것이다.

후기

본 연구는 방위사업청/국방과학연구소 지정 국방MEMS센터의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드리고, 또한 제작 및 설계 연구에 많은 도움을 주신 모든 분들에게 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Dunn-Rankin, D., Leal, E. M. and Walter, D. C., 2005, "Personal Power Systems," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 31, No. 5-6, pp. 422-465
- (2) Epstein, A. H., 2003, "Milimeter-Scale, Micro-Electro-Mechanical Systems Gas Turbine Engines," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 126, No. 2, pp. 205-206
- (3) Mehra, A., Zhang, X., Ayon, A. A., Waitz, I. A., Schmidt, M. A. and Spadaccini, C. M., 2000, "A Six Wager Combustion System for a Silicon Micro Gas

- Turbine Engine,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 9, No. 4, pp. 517~527
- (4) Shan, X.C., Wang, Z. F., Jin, Y. F., Wu, M., Hua, J., Wong, C. K. and Maead, R., 2005, “Studies on a Micro Combustor for Gas Turbine Engines,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, No. 9, pp. S215~S221
- (5) Iiduka, A., Ishigaki, K., Takikawa, Y., Ohse, T., Saito, K. and Uchikoba, F., 2011, “Development of Electromagnetic Induction Type Micro Air Turbine Generator Using MEMS and Multilayer Ceramic Technology,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 18, 0902035
- (6) Kwon, K., Hwang, Y. H., Kang, H. and Kim, D., 2013, “Numerical Study of Hydrogen/Air Combustion in Combustion Chamber of Ultra Micro Gas Turbine by Change of Flow Rate and Equivalence Ratio,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 2, pp. 103~109