

마이크로 터빈 개발 및 성능 평가

전병선* · 제갈승* · 민홍석** · 방정환* · 김세준* · 송성진* · 주영창** · 민경덕*

Micro Turbine Development and Performance Test

Byung-Sun Jeon*, Seung Jegal*, Hong-Seok Min**, Junghwan Bang*, Sejun Kim*,
Seung-Jin Song*, Young-Chang Joo**, Kyoung-Doug Min*

Key Words : Micro power system, Micro turbine, High aspect ratio(고형상비), MEMS

ABSTRACT

Micro turbine that is a component of micro power system refers to turbines on the scale of centimeters which can transmit power on the order of tens of Watts. Such devices can be used as propulsion or power generation devices for various potable and micro devices. An interdisciplinary team at Seoul National University has designed, fabricated and tested such a device, and this paper describes test results.

1. 서 론

마이크로 터빈은 반도체 공정을 이용해 제작되는 초소형 유체기계로 로터, 스테이터, 가스 베어링 및 초소형 유로 등으로 구성되는 마이크로 파워 시스템이다. 기존 MEMS는 수 μm 의 적층이나, 수십 μm 의 식각을 사용하여 제작되는 상온, 대기압에서 작동하는 센서나 액추에이터가 대부분이다. 반면에 마이크로 파워 시스템은 고속, 고압, 고온의 극한 환경 속에서 작동하는 시스템으로 여러 장의 웨이퍼를 10:1 이상의 고형상비를 유지하면서 수백 μm 를 식각하여 접합하는 기계적인 MEMS이다⁽¹⁾.

마이크로 파워 시스템은 기존의 화학적 배터리에 비하여 10배 이상의 에너지 밀도를 가진다. 이러한 특징으로 인하여 마이크로 파워 시스템은 기존의 배터리

의 영역이었던 휴대용 전자 기기에서뿐만 아니라 야외에서의 초소형 전원 공급장치로 사용할 수 있다. 또한 CPU와 같은 고발열 반도체 칩 냉각을 위한 초소형 냉각장치에 효과적으로 적용할 수 있으며, 초소형 무인 항공기 (Micro Air Vehicle : MAV)나, 소형 인공위성의 추진 및 동력원으로 사용할 수 있다.

기계공학과 재료공학의 연구진으로 구성된 서울대학교 마이크로 파워 시스템 그룹은 이런 시스템을 설계 및 제작 후 성능평가 실험을 수행했으며, 이 논문에서는 이 부분에 대하여 서술하였다.

2. 터빈설계 및 제작

상용 터빈의 경우 수십 cm에서 수 m에 이르는 크기를 가지나, 본 연구에서의 터빈은 로터 직경 4.2 mm의 크기를 가진다. 따라서 비교적 크기가 작고, 적은 유량을 가지고 높은 압력비를 가질 수 있는 원심 터빈으로 설계하였고, 그 형상은 Fig. 1에서 보는 것과 같다.

* 서울대학교 기계항공공학부

** 서울대학교 재료공학부

E-mail : capella1@snu.ac.kr

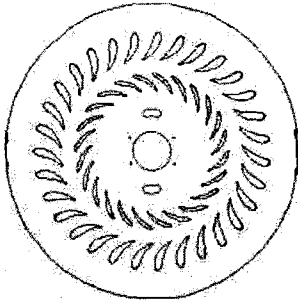
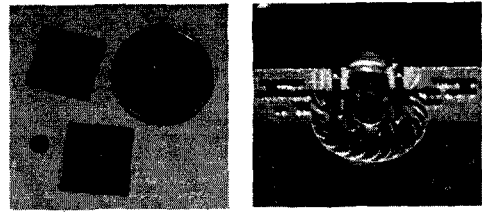


Fig. 1 Micro turbine rotor and stator.

마이크로 터빈의 공력 설계는 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법 (Finite Volume Method)으로 이산화한 상용 유동해석 프로그램인 CFX-TASCflow를 이용하였다⁽²⁾. 마이크로 터빈은 유량 20,000 sccm, 효율 0.7, 압력비 0.236을 가지는 것으로 설계하였고, 31개의 스테이터와 24의 로터 블레이드로 구성되어있다(Fig. 1).

그리고, 마이크로 터빈은 중심부에 위치한 로터를 안정적으로 회전시키기 위한 가스 베어링 형태의 저널 베어링과 스러스트 베어링의 구조를 가지고 있다. 이 구조를 위하여 로터를 중심으로 위·아래로 각각 2장씩의 웨이퍼가 가공되어 접합되어 전체 5장의 실리콘 웨이퍼로 구성된 구조물을 형성한다. 저널 베어링과 스러스트 베어링은 제작 공정이 비교적 용이한 hydrostatic 베어링 형태로 설계되었다. 이것은 로터의 반경방향 및 축방향의 힘을 각각 저널 베어링과 스러스트 베어링이 지지하게 하여 원활한 로터의 회전을 할 수 있게 한다.

위와 같이 설계된 마이크로 터빈은 MEMS 기술을 이용하여 실리콘 웨이퍼에 대한 벌크 식각 (Bulk etching)의 형태로 일반 터보기계의 형상을 미세하게 재현한다. 그러나 일반적인 MEMS는 보통 식각 깊이가 수~수십 μm 정도이나, 마이크로 터빈에서는 일부 유로의 경우 웨이퍼 한 장을 수직성을 유지하면서 관통한다. 이때 저널 베어링의 경우 10:1 이상의 고형상비 (Aspect ratio)를 요구하며 DRIE (Deep Reactive Ion Etching) 공정을 이용하여 해결한다⁽³⁾. 전체 공정은 보호제를 5초간 입힌 후, 식각면의 보호제를 3초간 제거한 후, 웨이퍼를 6초간 식각하는 5-3-6 스텝을 적용하여 공정을 수행하였다. 플라즈마는 23 mTorr의 압력을 유지하고, 챔버와 전극은 각각 10 $^{\circ}\text{C}$ 와 15 $^{\circ}\text{C}$ 로



(a)

(b)

Fig. 2 5-wafer stacked micro turbine sized 15 mm \times 15 mm \times 2.25 mm.

유지한다. 5-스텝에서는 C_4F_8 100 sccm (Standard cubic centimeters per minute), 3-스텝에서는 SF_6 50 sccm, 6-스텝에서는 C_4F_8 100 sccm이 사용되며, 전 과정에 Ar을 30 sccm 사용한다⁽⁴⁾.

5장의 웨이퍼를 이용하여 제작된 형상은 웨이퍼 접합에 의해 3차원 시스템이 된다. 마이크로 터빈의 경우 5장의 웨이퍼를 Si/Si 웨이퍼 직접 접합법을 사용한다. 이때 계면에 기포나 먼지 같은 미세 입자가 포함될 경우 접합력이 감소하기 때문에⁽⁵⁾ 표면 cleaning 이 반드시 선행되어야 한다.

Fig. 2a에 제시한 장치는 5장의 실리콘 웨이퍼를 사용하여 식각 및 접착하여 제작한 마이크로 터빈이다. 크기는 15 mm \times 15 mm \times 2.25 mm이고, 지름 41 mm 인 로터와 스테이터를 포함하는 하단 베어링 장치, 그리고 스테이터에 유체를 불어넣는 포트가 포함되어 있는 상단 베어링 장치가 있다. Fig. 2b는 완성된 마이크로 터빈을 수직으로 절단한 사진이다. 이 사진에서 5장의 웨이퍼 각각의 단면 공정과 함께 접합 공정이 잘 되었음을 확인할 수 있다.

3. 성능평가

터빈 성능 평가 장치는 Fig. 3에서 보여지듯이 패키징, 유체 제어부분, 속도 측정 센서부분의 세 부분으로 이루어져 있다. 패키징은 8개의 입출구 포트를 가진 100 mm \times 30 mm \times 18.3 mm의 크기의 구조로 되어있다. 첫 번째 장과 세 번째 장은 아크릴로 제작되어 내부를 확인할 수 있으며, 이 곳에 포트들이 연결되어 있다. 또한 속도 측정 센서가 들어갈 수 있도록 원형의 창이 위치해 있다. 가운데 장은 철판으로 제작되어 터빈의 설계가 변할 경우 이 부분만을 따로 제작하여

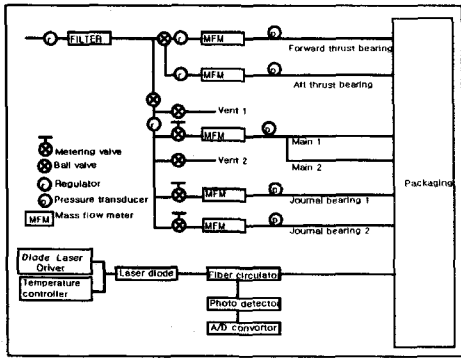


Fig. 3 A system diagram of a micro turbine.

사용할 수 있게 하였다. 마이크로 터빈과 팩킹과의 연결은 O-링을 사용하고, 각각의 포트는 에폭시를 사용하여 유체의 누출을 막았다. 8개의 포트는 2개의 주 유체 입구와 스러스트 베어링 유체의 입출구 각각 2개, 그리고 2개의 저널 베어링 유체의 입구로 구성되어 있다. 주 유체와 저널 베어링 유체는 상단으로 함께 배출된다.

유체 제어부분은 터빈을 작동시키기 위한 유체를 제어하는 부분으로 작동 유체는 질소가스를 사용하였으며, 터빈 내 유로의 최소 크기인 $30 \mu\text{m}$ 의 크기를 고려하여 필터를 통하여 먼지 등의 입자를 제거한 후 저널 베어링, 스러스트 베어링, 주 유체부분으로 구분되어 각각의 포트에 나누어 분배된다. 각각의 포트에는 pressure transducer와 mass flow meter가 연결되어 regulator와 밸브에서 조절되는 압력과 유량의 변화를 A/D converter를 통하여 컴퓨터에서 실시간으로 확인할 수 있다.

Fig. 4는 각각의 포트 중 터빈을 직접 작동시키는데 사용하는 메인 유체의 시간에 따른 질량 유량의 변화를 보여준다. 최초 유량 0 sccm의 정지 상태에서 서서히 유량을 늘려가며 설계 유량에 근접하는 값인 유량 16,000 sccm까지 올렸다. 여기서 로터의 수직 안정성을 유지하기 위하여 상·하 스러스트 베어링의 평형을 동시에 유지하기 위하여 세심한 조작이 필요하다.

Fig. 5는 로터를 위쪽에서 수직으로 지지하는 스러스트 베어링 유체의 시간에 따른 압력변화를 나타낸다. 최초 구동시 상단과 하단 스러스트 베어링은 모두 1 bar의 압력으로 유지되었으나, 시간이 흐르면서 하단 스러스트 베어링의 압력은 변화가 거의 없었으나, 상

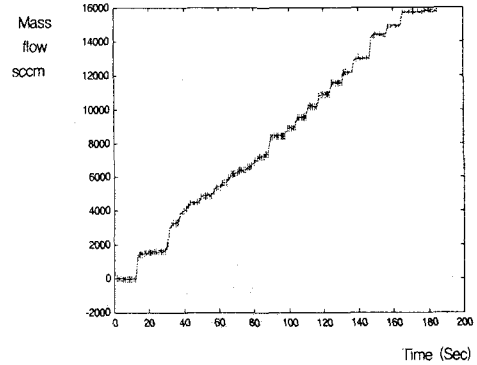


Fig. 4 Mass flow change of main flow by time.

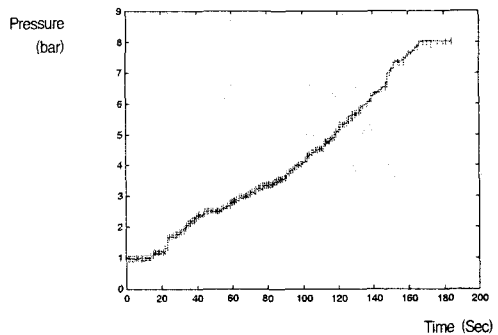


Fig. 5 Pressure change of upper thrust bearing flow by time.

단 스러스트 베어링의 압력이 Fig. 5와 같이 상승하여 최대 8 bar까지 올라갔다. 이러한 경향은 메인 유체의 시간에 따른 유량 증가와 관계가 있으며, 메인 유체의 유량이 증가할수록 로터가 위쪽으로 점점 더 많은 힘을 받음을 알 수 있다.

속도 측정 센서부분은 pigtail 방식의 diode laser를 사용하여 제작된 센서와 그 구성품으로 이루어져 있다. diode laser에서 발진한 빔은 안정성을 높이기 위해 전원을 공급하는 전류조절기와 함께 온도 조절기에 의하여 일정하게 유지된다. 빔은 fiber circulator를 통하여 로터 상단의 속도 측정용 범퍼에서 반사된 후 photo detector에서 검출, 증폭된다. 이 때 로터 위에 위치한 두 개의 속도 측정용 범퍼로 인하여 1회전 당 2개의 신호 주기가 발생하고, 이 신호는 A/D converter를 통하여 로터의 속도를 모니터에서 실시간으로 확인할 수 있다. 여기서 나온 신호는 바로 저장되며, 이 후 FFT 처리를 통하여 정확한 회전수를 확인할 수 있다.

· 마이크로 터빈의 성능 평가 장치를 개발하여 유량 및 회전수를 측정하였다.

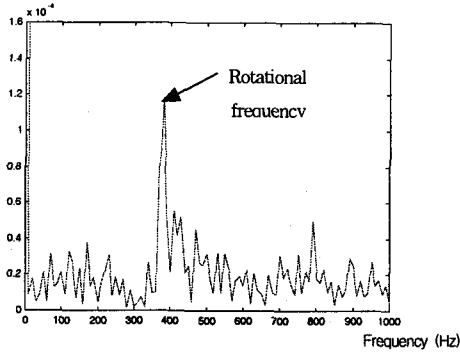


Fig. 6 FFT result of a micro turbine's rotation signal.

Fig. 6은 위의 과정을 통하여 얻은 FFT 처리 결과로 380 Hz에서 최대 신호값을 보이고 있다. 따라서 초당 380번의 속도 측정용 범퍼를 통과하는 것을 의미하며, 이것은 초당 180 회전을 의미한다. 따라서 제작된 마이크로 터빈은 유량 16,000 sccm에서 최대 11,400 rpm으로 회전함을 알 수 있다.

5. 결론

마이크로 파워 시스템의 구축을 위한 마이크로 터빈 설계, 공정기술 및 성능 평가 시험 장치를 개발하였다.

- CFD를 응용하여 마이크로 터빈을 설계하였다.
- DRIE 공정과 bonding 공정을 개발하여 마이크로 터빈을 제작하였다.

참고 문헌

- (1) Ehrich, F. F., and Jacobson, S. A., 2001, "Development of high-Speed Gas Bearing for High Power Density micro-Devices", ASME Turbo Expo 2001, 2001-GT-0478.
- (2) 박건중, 전병선, 민홍석, 송성진, 민경덕, 주영창, 2001, "마이크로 파워 시스템의 개발", 2001 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 381-386.
- (3) Ayon, A. A., Lin, C. C., Braff, R., Schmidt, M. A., and Sawin, H. H., 1999, "Characterization of a Time Multiplexed Inductively Coupled Plasma Etcher", Journal of Electrochem. Soc., Vol. 146, pp. 339-349.
- (4) Seung Jin Song, Kyoung Doug Min, Young Chang Joo, and Seung Mun You, 2001, "Micro Power System Development", Kyoto Seoul Tsinghua Three Asian University Thermal Engineering Conference, pp. 125-130.
- (5) Mehra, A., Ayon, A. A., Waitz, I. A., and Schmidt, M. A., 1999, "Microfabrication of High Temperature Silicon Devices using Wafer Bonding and Deep Reactive Ion Etching", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 152-160.