

# 마이크로 열시스템 부품 설계

전 병 선\* · 박 건 중\* · 민 흥 석\*\* · 제 갈 승\* · 김 세 준\* · 방 정 환\* ·  
송 성 진\* · 주 영 창\*\* · 민 경 덕\* (서울대)

## Micro Thermal System Component Development

Byung-Sun Jeon\* · Kun-Joong Park\* · Hong-Seok Min\*\* · Seung Jegal\* · Sejun Kim\*  
Junghwan Bang\* · Seung-Jin Song\* · Young-Chang Joo\*\* · Kyoung-Doug Min\*

### ABSTRACT

Micro turbine that is a component of micro thermal 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 portable and micro devices. An interdisciplinary team at Seoul National University has designed, fabricated and tested such a device, and this paper describes each phase. A commercial code has been used for design, and MEMS processes have been used for manufacturing. Finally, some preliminary test results are presented.

### 1. 서 론

마이크로 터빈은 마이크로 열시스템의 하나의 부품으로서 반도체 공정을 이용해 제작되는 초소형 유체기계로 로터, 스테이터, 가스 베어링 및 초소형 유로 등으로 구성되는 마이크로 파워 시스템이다. 기존 MEMS는 수  $\mu\text{m}$ 의 적층이나, 수십  $\mu\text{m}$ 의 식각을 사용하여 제작되는 상온, 대기압에서 작동하는 센서나 액츄에이터가 대부분이다. 반면에 마이크로 파워 시스템은 고속, 고압, 고온의 극한 환경 속에서 작동하는 시스템으로 여러 장의 웨이퍼를 10:1 이상의 고품상비를 유지하면서 수백  $\mu\text{m}$ 를 식각하여 접합하는 기계적인 MEMS이다<sup>1)</sup>.

마이크로 파워 시스템은 기존의 화학적 배터리에 비하여 10배 이상의 에너지 밀도를 가진다. 이러한 특징으로 인하여 마이크로 파워 시스템은 기존의 배터리의 영역이었던 휴대용 전자 기기에서뿐만 아니라 야외에서의 초소형 전

원 공급장치로 사용할 수 있다. 또한 CPU와 같은 고발열 반도체 칩 냉각을 위한 초소형 냉각 장치에 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 각 과정에 대하여 서술하였다.

### 2. 터빈 설계

상용 터빈의 경우 수십 cm에서 수 m에 이르는 크기를 가지나, 본 연구에서의 터빈은 로터 직경 4.2 mm의 크기를 가진다. 이러한 스케일의 차이는 상용 터빈의 레이놀즈 수가  $10^6$ 으로

\* 서울대학교 기계항공공학부 (Seoul National University, School of Mechanical and Aerospace Engineering)

\*\* 서울대학교 재료공학부 (Seoul National University, School of Materials Science and Engineering)

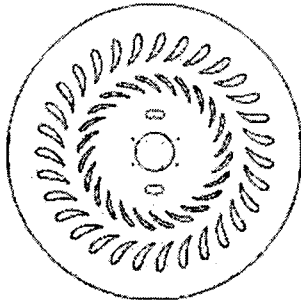


Fig. 1(a) Micro turbine rotor and stator.

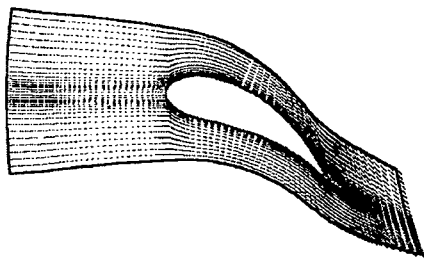


Fig. 1(b) Velocity distribution at mid-span through the stator of the micro cold-turbine.

난류 영역에서 작동하는데 반하여, 본 연구에서는  $10^4$ 정도로 낮아지게 되어 층류 영역에 가깝게 한다<sup>2)</sup>. 따라서 상용 터빈 블레이드에 비해 점성력의 영향이 상대적으로 커지게 되어 마찰손실이 커진다. 그리고 터빈내의 유동은 마하수 0.5까지 올라가는 압축성 유동이다<sup>3)</sup>. 또한 장치내에서의 유로는 3차원 형상 가공을 할 수 없는 반도체 공정의 특성상 모두 수직으로 깎이는 형상을 하고 있다. 이것은 수직부분을 라운딩 처리를 하는 상용 터빈에 비하여 많은 압력손실을 가진다.

공력 설계를 위해 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법 (Finite Volume Method)으로 이산화한 상용 유동해석 프로그램인 CFX-TASCflow를 이용하여 스테이터와 로터 주변의 유동장을 계산하였다<sup>4)</sup>. Fig. 1a는 설계된 로터 블레이드와 스테이터의 모습을, Fig. 1b는 해석된 스테이터의 속도분포를 나타낸다. 마이크로 터빈은 유량 초당 0.4 gram, 효율 0.7, 압력비 0.236을 가지는 것으로 설계하였고, 31개의 스테이터와 24의 로터 블레이드로 구성되어있다(Fig. 1a).

또한 마이크로 터빈은 중심부에 위치한 로터

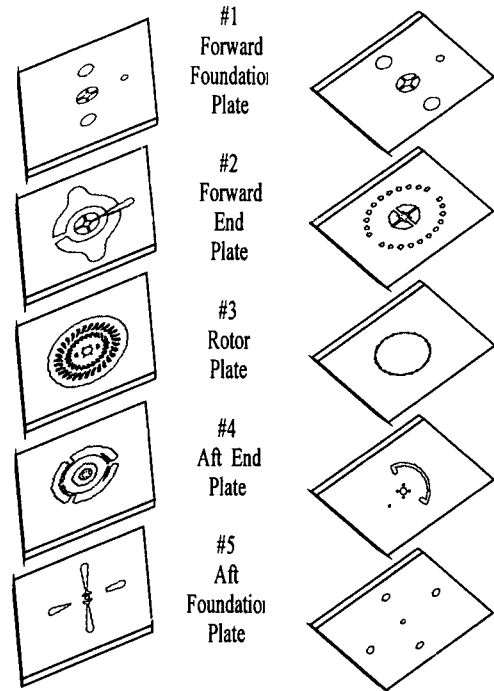


Fig. 2 Top and bottom view of the five-stack device. The die is 15 mm per side and 2.5 mm thick.

를 안정적으로 회전시키기 위한 가스 베어링 형태의 저널 베어링과 스톱베어링의 구조를 가지고 있다. 이 구조를 위하여 로터를 중심으로 위·아래로 각각 2장씩의 웨이퍼가 Fig. 2에 도시된 것처럼 가공되어 접합된다. 가장 위의 1번 웨이퍼와 아래의 5번 웨이퍼에는 로터를 직접 움직이는 질소가스와 로터의 반경방향 및 축방향의 힘을 지지하여 운동을 안정시키는 저널 베어링과 스톱베어링에 들어가는 질소가스의 입출구가 위치하고 있다. 3번째 웨이퍼는 터빈의 핵심부분으로 로터가 위치하고 있으며, 2번과 4번 웨이퍼에는 각각 1번과 5번 웨이퍼로부터 유입되는 유체를 고르게 분산시켜 저널 베어링과 스톱베어링 내 유체의 흐름을 원활하게 하여 베어링을 안정시키는 부분으로 구성되어 있다.

### 3. 제 작

#### 3.1 DRIE 공정을 이용한 고 형상비 구조물 제작

마이크로 터빈은 MEMS 기술을 이용하여 실리콘 웨이퍼에 대한 벌크 식각 (Bulk etching)의

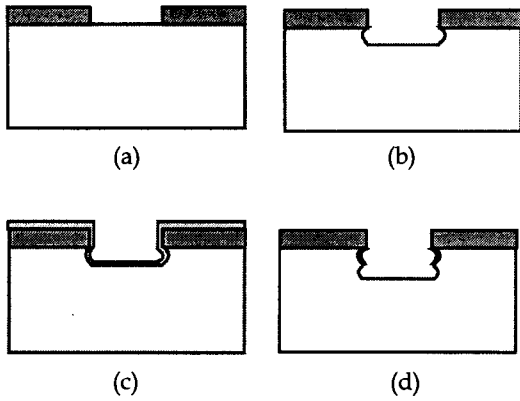


Fig. 3 The Bosch scheme - (a) patterned oxide mask on a silicon wafer; (b) etching cycle; (c) passivation cycle; (d) subsequent etching cycle.

형태로 일반 터보기계의 형상을 미세하게 재현한다. 그러나 일반적인 MEMS는 보통 식각 깊이가 수 ~ 수십  $\mu\text{m}$  정도이나, 마이크로 터빈에서는 일부 유로의 경우 웨이퍼 한 장을 수직성을 유지하면서 관통한다. 이때 저널 베어링의 경우 10:1 이상의 고 형상비 (Aspect ratio)를 요구한다. 이것은 DRIE (Deep Reactive Ion Etching) 공정을 이용하여 해결할 수 있다<sup>5)</sup>. DRIE를 이용하여 식각을 할 경우 공정 조건에 따라 수직 프로파일이 달라져 여러 번의 시행을 통하여 적절한 공정 조건을 확립하여야 한다.

DRIE 공정은 먼저 가법식 식각을 한 후(Fig. 3b), 위로 노출되어 있는 전면에 대하여 폴리머 계통의 보호제를 씌운다(Fig. 3c). 이후 수직성이 보장된 플라즈마를 이용하여 바닥면을 식각한다. 이때 측면의 보호제가 벽면의 식각을 막아 수직성을 유지하는 역할을 한다(Fig. 3d). 마지막으로 Fig. 3b-3c-3d의 공정을 원하는 깊이가 될 때까지 반복한다. 전체 공정은 보호제를 5초간 입힌 후, 식각면의 보호제를 3초간 제거한 후, 웨이퍼를 6초간 식각하는 5-3-6 스텝으로 플라즈마는 23 mTorr의 압력을 유지하고, 챔버와 전극은 각각 10 °C와 15 °C로 유지한다. 5-스텝에서는  $\text{C}_4\text{F}_8$  100 sccm (Standard cubic centimeters per minute), 3-스텝에서는  $\text{SF}_6$  50 sccm, 6-스텝에서는  $\text{C}_4\text{F}_8$  100 sccm이 사용되며, 전 과정에 Ar을 30 sccm 사용한다<sup>6)</sup>.

### 3.1 Bonding 공정을 통한 3-D 시스템 구현

5장의 웨이퍼를 이용하여 제작된 형상은 웨

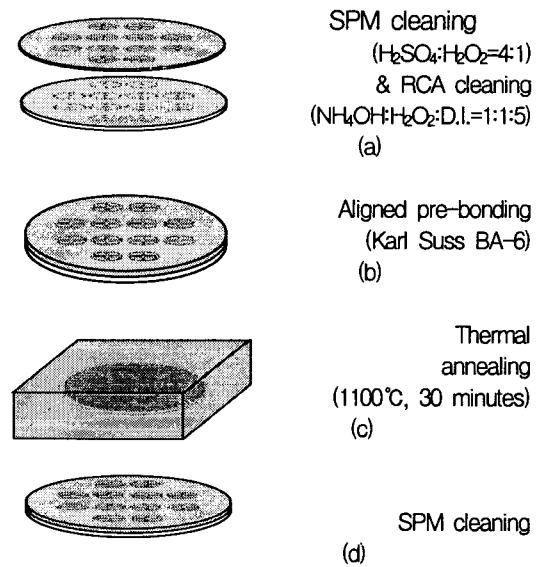


Fig. 4 Wafer bonding scheme : (a) initial cleaning, (b) Aligned wafer direct bonding, (c) thermal annealing, (d) last cleaning.

이퍼 접합에 의해 3차원 시스템이 된다. 웨이퍼 접합은 Fig. 4에서 보는 것과 같이 이루어지며, 마이크로 터빈의 경우 5장의 웨이퍼를 Si / Si 웨이퍼 직접 접합법을 사용한다. 먼저 웨이퍼를 cleaning한 후(Fig. 4a) Karl Suss BA-6 Bondingaligner를 이용하여 backside align control을 통해 pre-bonding을 형성하여 수 $\mu\text{m}$  이하의 정밀도를 유지하였다(Fig. 4b). 여기서 align을 위하여 초기 기판 설계 전에 global align key를 기판 앞뒤로 형성하여, align key뿐만 아니라 각 공정에 생길 수 있는 mismatch 현상을 최소화하였다.

이 후 1100 °C의 온도에 30분간 thermal annealing을 실시한 후(Fig. 4c) 마지막으로 cleaning을 하였다(Fig. 4d). 이때 계면에 기포나 먼지 같은 미세 입자가 포함될 경우 접합력이 감소하기 때문에<sup>7)</sup> 표면 cleaning이 반드시 선행되어야 한다. 그리고 Bonding 이전에 표면 거칠기를 최소화하여 공정 결함을 막기 위해 CMP (Chemical Mechanical Polishing) 공정을 거치는 것 또한 필요하다.

Fig. 5a에 제시한 장치는 5장의 실리콘 웨이퍼를 사용하여 식각 및 접착하여 제작된 마이크로 터빈이다. 크기는 15 mm × 15 mm × 2.25 mm이고, 지름 4.2 mm인 로터와 스테이터를 포함하는 하단 베어링 장치, 그리고 스테이터에

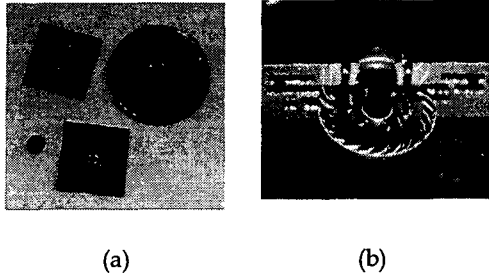


Fig. 5 5-wafer stacked micro turbine sized 15 mm × 15mm × 2.25 mm.

유체를 불러넣는 포트가 포함되어 있는 상단 베어링 장치가 있다. Fig. 5b는 마이크로 터빈을 수직으로 절단한 사진이다. 이 사진에서 5장의 웨이퍼 각각의 단면 공정과 함께 접합 공정이 잘 되었음을 확인할 수 있다.

#### 4. 성능 평가

터빈 성능 평가 장치는 Fig. 6에서 보여지듯이 유체 제어부분, 팩키징, 속도 측정 센서부분의 세 부분으로 이루어져 있다. 작동 유체는 질소가스를 사용하였으며, 터빈 내 유로의 최소 크기인 30 μm의 크기를 고려하여 필터를 통하여 먼지 등의 입자를 제거한 후 저널 베어링, 스톱 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.

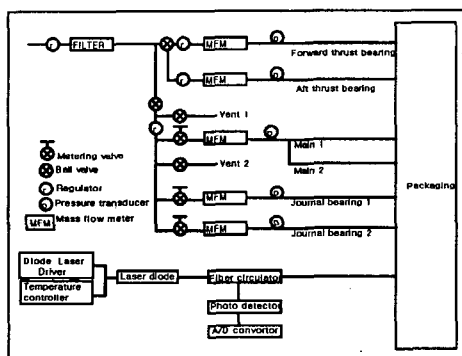


Fig. 6 A system diagram of a micro turbine.

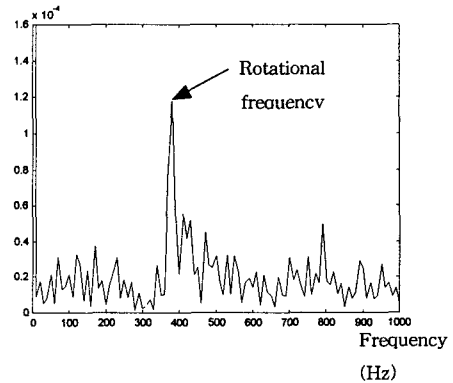


Fig. 7 FFT result of a micro turbine's rotation signal.

팩키징은 8개의 입출구 포트를 가진 100 mm × 30 mm × 18 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 사용할 수 있게 하였다. 마이크로 터빈과 팩키징과의 연결은 O-링을 사용하고, 각각의 포트는 에폭시를 사용하여 유체의 누출을 막았다. 8개의 포트는 2개의 주 유체 입구와 스톱 베어링 유체의 입출구 각각 2개, 그리고 2개의 저널 베어링 유체의 입구로 구성되어 있다. 주 유체와 저널 베어링 유체는 상단으로 함께 배출된다.

속도 측정 센서부분은 pigtail 방식의 diode laser를 사용하여 제작된 센서와 그 구성품으로 이루어져 있다. diode laser에서 발진한 빔은 안정성을 높이기 위해 전원을 공급하는 전류조정기와 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, 이후 FFT 처리를 통하여 정확한 회전수(380 Hz)를 확인할 수 있다 (Fig. 7). 현재 제작된 마이크로 터빈은 설계 유량에서 최대 11,400 rpm으로 회전한다.

## 5. 결 론

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.

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

## 참고 문헌

- 1) Ehrich, F. F., Jacobson, S. A., "Development of high-Speed Gas Bearing for High-Power-Density micro-Devices", ASME Turbo Expo 2001, 2001-GT-0478.
- 2) Jacobson, Stuart A., "Aerothermal challenges in the design of a microfabricated gas turbine engine", AIAA, 1998.
- 3) Mehra, A., "Computational Investigation and Design of Low Reynolds number Micro-Turbomachinery", MS Thesis, MIT, 1997.
- 4) 박건중, 전병선, 민홍석, 송성진, 민경덕, 주영창, "마이크로 파워 시스템의 개발", 2001 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 2001, pp. 381-386.
- 5) Ayon, A. A., Lin, C. C., Braff, R., Schmidt, M. A., and Sawin, H. H., "Characterization of a Time Multiplexed Inductively Coupled Plasma Etcher", Journal of electrochem. Soc., 1999, Vol. 146, pp. 339-349.
- 6) Seung Jin Song, Kyoung Doug Min, Young Chang Joo, and Seung Mun You, "Micro Power System Development", Kyoto Seoul Tsinghua Three Asian University Thermal Engineering Conference, 2001, pp. 125-130.
- 7) Mehra, A., Ayon, Arturo A., Waitz, Ian A., and Schmidt, Martin A., "Microfabrication of high-temperature silicon devices using wafer bonding and deep reactive ion etching", Journal of microelectromechanical systems, 1999, Vol. 8, No 2, pp. 152-160.