

마이크로 파워 시스템의 개발

박건중* · 전병선* · 민홍석** · 송성진* · 민경덕* · 주영창**

Micro Power System Development

Kun-Joong Park*, Byung-Sun Jeon*, Hong-Seok Min**, Seung-Jin Song*,
Kyoung-Doug Min*, Young-Chang Joo**

Key Words: Micro power system, Micro turbine, CFD(전산 유체 역학), High aspect ratio(고형상비), MEMS, Etching (식각)

ABSTRACT

This paper reports on the development of micro power system under way at Seoul National University. The interdisciplinary team consists of members with various backgrounds of mechanics and materials. The need for micro power systems is explained, and a turbine under development is described. Design, and fabrication are introduced, and technical challenges in each phase are described. Furthermore, the interaction between the available fabrication methods and design is explained. Design involves use of commercially available codes to analyze flow fields, and fabrication takes advantage of the silicon wafer etching processes used to manufacture semiconductor devices.

1. 서 론

마이크로 파워 시스템은 반도체 공정을 이용해 제작되는 초소형 유체기계로 로터, 스테이터, 가스 베어링, 초소형 유로 및 연소기 등으로 구성된다. 기존 MEMS는 수 μm 의 적층이나, 수십 μm 의 식각을 사용하여 제작되는 상온, 대기압에서 작동하는 센서가 주류를 이룬다. 반면에 마이크로 파워시스템은 회전수 100,000 rpm 이상의 고속, 압축비 2:1 ~ 4:1에 이르는 고압, 최고 1600 °C의 고온의 극한 환경 속에서 작동하는 시스템으로 여러장의 웨이퍼를 10:1 이상의 고형상비를 유지하면서 수백 μm 를 식각하여 접합하는 실질적인 시스템이다. 이러한 특성으로 인하여 이에 맞는 설계와 제작 기술에 대한 연구가 필요하고, 일찍이

MIT에서는 마이크로 가스터빈 발전기에 대하여 연구를 수행하여 많은 성과를 거두었다.¹⁾

마이크로 파워 시스템은 전자 기기에서만 아니라 야외의 레저활동을 위한 초소형 발전기로 사용될 수 있다. 또한 CPU와 같은 반도체 칩 냉각을 위한 초소형 냉각장치에 효과적으로 적용할 수 있으며, 초소형 무인 항공기 (Micro Air Vehicle : MAV)나, 소형 인공위성의 추진 및 동력원으로 사용될 수 있다. 이러한 인식속에서 기계공학과 재료공학의 다양한 배경지식을 가지고 구성된 서울대학교 마이크로 파워 시스템 그룹에서는 이 시스템에 대한 설계 및 제작 기술에 대한 연구를 수행하고 있다.

이 논문에서는 마이크로 파워 시스템의 구성품 중 설계 및 제작이 어려운 터빈에 대하여 서술하였다.

2. 터빈설계

* 서울대학교 기계항공공학부

** 서울대학교 재료공학부

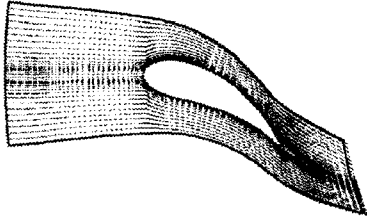


Fig. 1(a) Velocity distribution at mid-span through the stator of the micro cold-turbine.

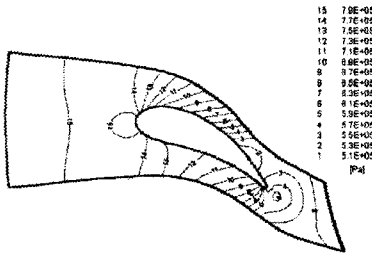
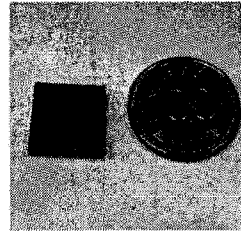


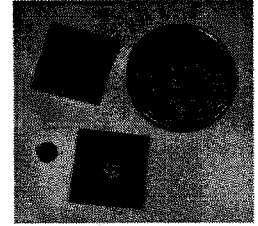
Fig. 1(b) Static pressure distribution at mid-span through the stator of the micro cold-turbine.

CFD를 이용한 공력 설계를 위해, 유체 흐름의 지배방정식인 비선형 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법 (Finite Volume Method : FVM)으로 이산화한 상용 유동해석 프로그램인 CFX-TASCflow를 이용하여, 스테이터 주변의 유동장을 계산하였다. 스테이터와 로터 블레이드의 유동 해석을 위해 주기 조건이 적용된 벽 근처로 갈수록 조밀한 비균일 격자를 구성하였다. Fig. 1은 스테이터의 속도와 정압분포를 나타낸다. 블레이드의 suction surface의 trailing edge 근처에서 벽으로부터 유동 박리현상이 나타나고, 이로 인해 압력이 국부적으로 크게 떨어지고 있음을 확인할 수 있다 (Fig. 1a).

마이크로 터빈과 기존 터빈의 차이점은 아래와 같다. 상용 터빈 블레이드의 경우 레이놀즈 수가 10^6 으로 난류 영역이지만, 본 연구에서는 scale의 영향으로 인하여 10^3 정도로 낮아지게 되어 층류 영역에 가깝게 된다.²⁾ 따라서 상용 터빈 블레이드에 비해 점성력의 영향이 상대적으로 커지게 되고, 이것은 장치 내에서의 마찰 손실이 상대적으로 커지는 결과를 가져온다. 그리고 터빈내의 유동은 마하수가 0.8까지 올라가는 압축성 유동이다.³⁾ 또한 장치내에서의 유로는 3차원 형상 가공을 할 수 없는 반도체 공정의 특성상 모두 수직으로 깎이는 형상을 하고 있다. 이것은 수직부분을 라운딩 처리를 하였을 때



(a)



(b)

Fig. 2 A micro turbine composed 5 wafers sizes 15 mm × 15mm × 2.25 mm.

보다 많은 압력손실을 가져오게 된다.

Fig. 2a에 제시한 장치는 본 연구진에서 5장의 실리콘 웨이퍼를 접착하여 제작한 마이크로 터빈이다. 크기는 15 mm × 15 mm × 2.25 mm 이고, Fig. 2b에서 보여지듯이 지름 4.1 mm인 로터와 스테이터를 포함하는 하단 베어링 장치, 그리고 스테이터에 유체를 불어넣는 포트가 포함되어 있는 상단 베어링 장치가 있다.

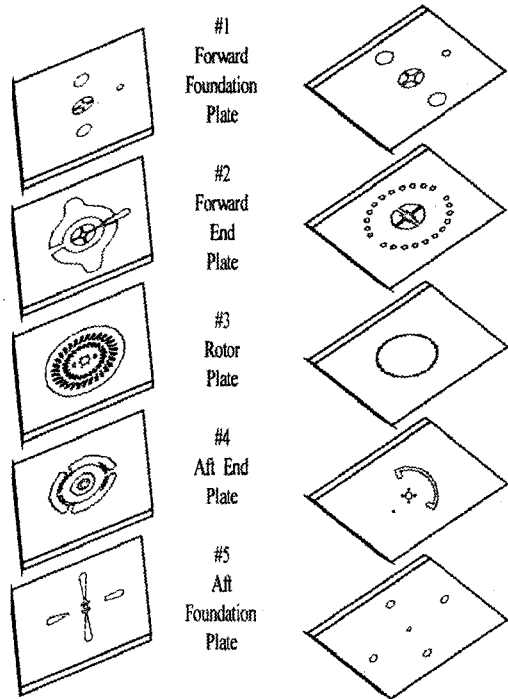


Fig. 3 Top and bottom view of the five-stack device. The die is 15 mm per side and 2.5 mm thick.

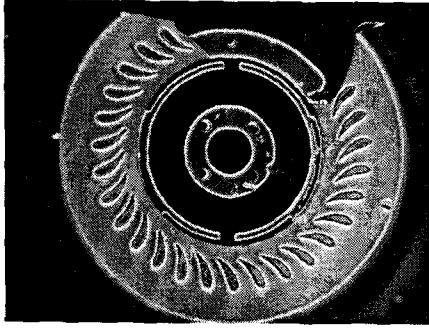


Fig. 4 Stator and lower bearing set.

터빈에 사용되는 5장 웨이퍼의 형상은 Fig. 3에 도시된 것과 같다. 가장 위의 1번 웨이퍼와 아래의 5번 웨이퍼에는 로터를 직접 움직이는 질소가스와 로터의 축방향 및 반경방향의 힘을 지지하여 운동을 안정시키는 journal bearing과 thrust bearing에 들어가는 질소가스의 입출구가 위치하고 있다. 3번째 웨이퍼는 터빈의 핵심부분으로 21개의 로터 블레이드를 가진 로터와 31개의 스테이터가 위치하고 있으며, 2번과 4번 웨이퍼에는 각각 1번과 5번에서 들어오는 베어링 유체를 고르게 분포시켜 로터를 안정시키는 부분으로 구성되어 있다. Fig. 4에서는 3번째, 4번째 웨이퍼의 모습으로 스테이터와 하부 베어링 부분이 보이고 있다.

3. 공정

3.1. 고 형상비를 위한 DRIE 공정

마이크로 파워 시스템은 실리콘 웨이퍼에 대한 벌크 식각 (Bulk etching)을 기반으로 일반 터보기계의 형상을 미세하게 재현하는 MEMS 기술을 이용한다. 식각을 위한 사진공정 (Photolithography)의 공정 흐름 (Process flow)은 Fig. 5과 같다. 웨이퍼에 알루미늄막을 씌운 후 PR (Photoresist) AZ 1512를 입힌 후 원하는 형상이 패턴되어 있는 마스크에 자외선을 수직으로 노출시켜 PR을 감광시킨다. 마스크로 인해 선택적으로 감광되어 있는 PR을 제거한다. 이 과정인 developing을 마친 후 알루미늄막을 인산, 질산, 아세트산과 D.I. water (Deionized water)를 16:1:1:2의 비율로 섞은 식각 용액에 넣어 식각 한다. 최종적으로 식각된 알루미늄막이 웨이퍼에 마스크 역할을 하며, 이 과정을 필

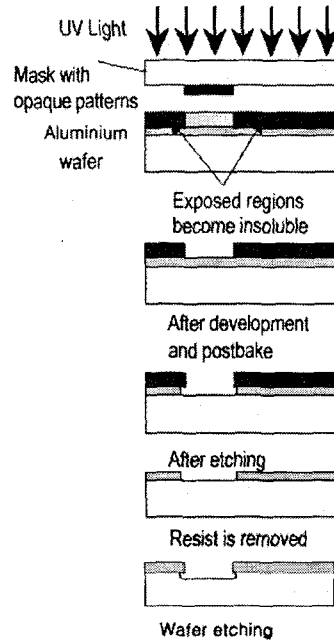
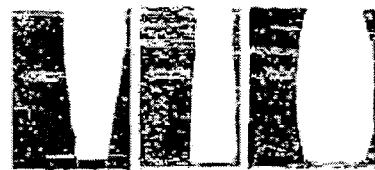


Fig. 5 Silicon process flow.

요한 형상이 나올 때까지 반복한다.

일반적인 MEMS는 보통 식각 깊이가 수 μm 에서 수십 μm 정도이지만, 마이크로 파워 시스템에서는 일부 유로의 경우 웨이퍼 한 장을 수직성을 유지하면서 관통한다. 이때 수직을 만족하는 깊이와 폭의 비가 10:1이상인 고 형상비 (Aspect ratio)를 요구하며 journal bearing이 여기에 해당한다. 따라서 DRIE (Deep Reactive Ion Etching) 공정을 이용하며,⁴⁾ Plasma Thern ICP (Inductively Coupled Plasma) 장비를 사용한다. DRIE를 이용하여 식각을 할 경우 공정 조건



(a) (b) (c)

Fig. 6 Micrographs showing different profiles obtainable - (a) positive slope; (b) negative slope; (c) positive and negative slope, bulged shape.

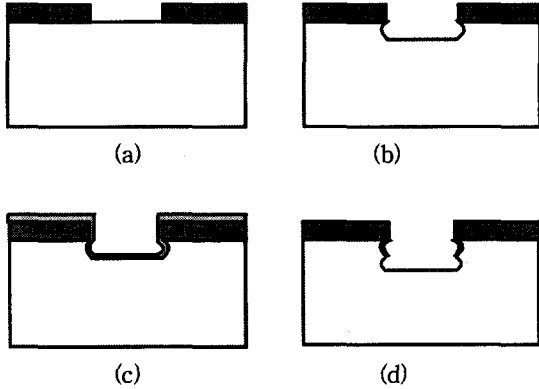


Fig. 7 The Bosch scheme - (a) patterned oxide mask on a silicon wafer; (b) etching cycle; (c) passivation cycle; (d) subsequent etching cycle.

에 따라 Fig. 6에서 보여지는 형태로 수직 프로파일이 달라져 공정 조건의 확립이 중요하다.

공정은 먼저 가볍게 식각을 한 후(Fig. 7b), 위로 노출되어 있는 전면에 대하여 폴리머 계통의 보호제를 씌운다(Fig. 7c). 이후 수직성이 보강된 플라즈마를 이용하여 바닥면을 식각한다. 이때 측면의 보호제가 벽면의 식각을 막는 역할을 한다(Fig. 7d). 이제 Fig. 7b - c - d의 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 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 Ar이 30 sccm 사용된다.

3.2. 3차원 시스템을 위한 Bonding 공정

2차원으로 설계 제작된 웨이퍼는 웨이퍼 접합에 의해 3차원의 시스템이 된다. 웨이퍼 접합은 Fig. 8에서 보는 것과 같이 이루어지며, 마이크로 터빈의 경우 5장의 웨이퍼를 Si/Si 웨이퍼 직접 접합법을 사용한다. 먼저 웨이퍼를 cleaning한 후(Fig. 8a) Karl Suss BA-6 Bonding aligner를 이용하여 backside align control을 통해 pre-bonding을 형성하여 수 μ m 이하의 정밀도를 유지하였다(Fig. 8b). 여기서 align을 위하여 초기 기판 설계 전에 global align key를 기판 앞뒤로

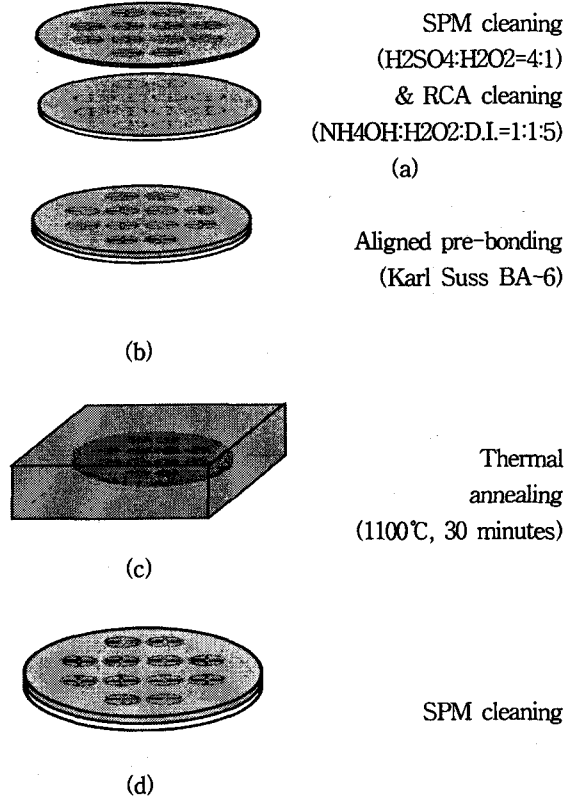


Fig. 8 Wafer bonding scheme : (a) initial cleaning, (b) Aligned wafer direct bonding, (c) thermal annealing, (d) last cleaning.

형성하여, align key뿐만 아니라 각 공정에 생길 수 있는 mismatch 현상을 사전에 확인할 수 있도록 하였다.

이 후 1100 °C의 온도에 30분간 thermal annealing을 실시한 후(Fig. 8c) 마지막으로 cleaning을 하였다(Fig. 8d). 이 때 계면에 기포나 먼지같은 미세 입자가 포함

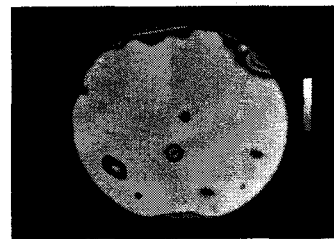


Fig. 9 I.R. Camera pictures : bare wafer bonding using Karl Suss BA-6

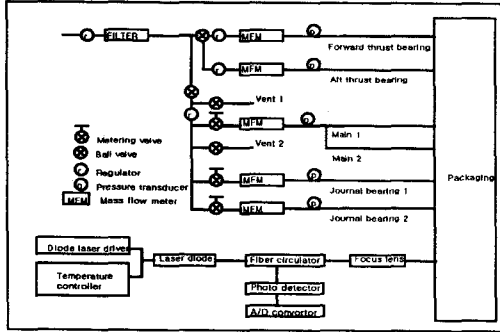


Fig. 10 A system diagram of a micro turbine.

될 경우 접합력이 감소하기 때문에⁵⁾ 표면 cleaning이 반드시 선행되어야 한다(Fig. 9). 그리고 필요시 표면 거칠기를 줄이기 위하여 CMP (Chemical Mechanical Polishing) 공정을 거치는 것 또한 필요하다.

4. 시험 장치 설계

터빈 시험 장치는 Fig. 10에서 보여지듯이 유체 제어부, 속도 측정부, 패키징의 세부부분으로 이루어져 있다. 유체 제어부에서의 작동 유체는 압축공기 사용시 습기문제를 배제하기 위하여 대기 중의 80%를 차지하고 상온에서 안정적인 질소가스를 사용하였다. 터빈 내 유로의 최소 크기인 $30 \mu\text{m}$ 의 크기를 고려한 $0.1 \mu\text{m}$ 필터를 통하여 먼지 등의 입자를 제거한 후 thrust bearing, journal bearing, 주 유체부분으로 구분되어 각각의 포트에 나뉜다. 이는 journal bearing과 주 유체부분의 압력이 올라가더라도 영향을 받지 않고 일정 압력을 유지하여 지속적인 로터의 수직 안정성을 확보하기 위해서 thrust bearing은 별도의 압력을 유지한다. journal bearing과 주 유체 부분은 출구가 하나로 연결되어 일정 비율의 유량을 유지하면서 서서히 압력을 올려 로터의 회전수를 늘린다. 각각의 포트에는 Druck사의 PMP1400 pressure transducer와 MKS사의 179A mass flow meter가 연결되어 regulator와 밸브에서 조절되는 압력과 유량의 변화를 A/D converter를 통하여 컴퓨터에서 실시간으로 확인할 수 있다. 속도 측정부는 1550 nm 의 1.5 mW 출력을 가지는 pigtail 방식의 diode laser를 사용한다. 빔의 안정성을 높이기 위해 전원을 공급하는 전류조절기와 함께 온도 조절기를 사용한다. 빔은 fiber circulator를 통하

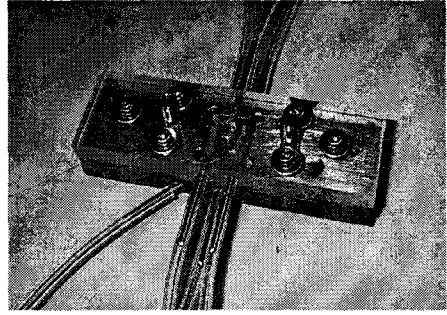


Fig. 11 A packaging for a micro turbine.

여 로터 상단의 속도 측정용 범퍼에서 반사된 후 Thorlabs사의 PDA400 photo detector에서 검출, 증폭된다. 이 신호 또한 A/D converter를 통하여 로터의 속도를 실시간으로 확인할 수 있다.

패키징은 Fig. 11에서 보여지듯이 8개의 입출구 포트를 가진 $100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ 의 크기를 가지고 있으며 3장으로 구성되어 있다. 첫 번째 장과 세 번째 장은 아크릴로 제작되어 내부를 확인할 수 있으며, 이 곳에 포트들이 연결되어 있다. 가운데 장은 가장 구하기 쉽고 가공이 용이한 철판으로 제작되어 터빈의 설계가 변할 경우 이 부분만을 따로 제작하여 사용할 수 있게 하였다. 마이크로 터빈과 패키징과의 연결은 직경 2 mm 의 오링을 20% 압축 사용하여 유체의 누출을 막았다. 8개의 포트는 2개의 주 유체 입력부분과 2개의 thrust bearing의 입력부분과 2개의 출력부분, 그리고 2개의 journal bearing의 입력부분으로 구성되어 있다. 주 유체 부분과 journal bearing의 출력부분은 속도 측정을 위한 빔의 경로를 제공하기 위하여 포트를 통하지 않고 상단으로 바로 배출된다. 각각의 포트는 아크릴과 황동관, 황동관과 튜브로 연결되어 있으며, 유체의 누출을 막기 위해 에폭시를 사용하였다. 튜브는 각각 pressure transducer와 mass flow meter로 연결된다.

5. 결론

마이크로 파워 시스템의 구축을 위한 마이크로 터빈 설계, 공정기술 개발을 하였다.

- 1) CFD를 응용하여 마이크로 터빈을 설계하였다.
- 2) DRIE 공정과 접합 공정을 개발·최적화 하여 마이크로 터빈을 제작했다.

참고 문헌

- (1) Frechette, Luc G., Jacobson, Stuart A., Breuer, Kenneth S., Ehrich, Fredric F., Reza Ghodssi, Ravi Khanna, Wong, Chee Wei, Zhang, Xin, Schmidt, Martin A., and Epstein, Alan H., June 2000, "Demonstration of a Microfabricated High-Speed Turbine Supported on Gas Bearings", IEEE Solid State Sensors and Actuators Workshop. Hilton Head SC.
- (2) Jacobson, Stuart A., 1998, "Aerothermal challenges in the design of a microfabricated gas turbine engine", AIAA.
- (3) Mehra, A., 1997, "Computational Investigation and Design of Low Reynolds Number Micro-Turbomachinery", Thesis MS. MIT.
- (4) 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.
- (5) Mehra, A., Ayon, Arturo A., Waitz, Ian A., and Schmidt, Martin A., June, 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.