

MEMS 기술을 이용한 마이크로 터빈의 개발

Development of Micro Turbine based on MEMS Technology

전 병 선* 박 건 중* 민 흥 석** 김 세 준* 송 성 진* 주 영 창** 민 경 덕*
Jeon, Byung-Sun Park, Kun-Joong Min, Hong-Seok Kim, Se-Jun Song, Seung-Jin Joo, Young-Chang Min, Kyoung-Doug

ABSTRACT

Microturbine 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 military systems. An interdisciplinary team at Seoul National University has designed, and fabricated 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.

주요기술용어 : Micro Power System(마이크로 파워 시스템), Micro Turbine(마이크로 터빈), MEMS, High Aspect Ratio(고형상비), DRIE, Bonding(접합)

1. 머리말

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 센서가 주류를 이룬다. 반면에 마이크로 파워 시스템은 고속, 고압, 고온의 극한 환경 속에서 작동하

는 유체기계로 여러 장의 웨이퍼를 10:1 이상의 고형상비를 유지하면서 수백 μm 를 식각하여 접합하는 실질적인 시스템이다^[1].

마이크로 파워 시스템은 휴대용 통신 장비에서뿐만 아니라 야외 기동시 초소형 발전기로 사용될 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 사용될 수 있다. 이러한 인식 속에서 기계공학과 재료공학의 연구진으로 구성된 서울대학교 마이크로 파워 시스템 그룹은 이런 시스템을 설계 및 제작 후 성능평가 실험을 수행

* 서울대학교 기계항공공학부

** 서울대학교 재료공학부

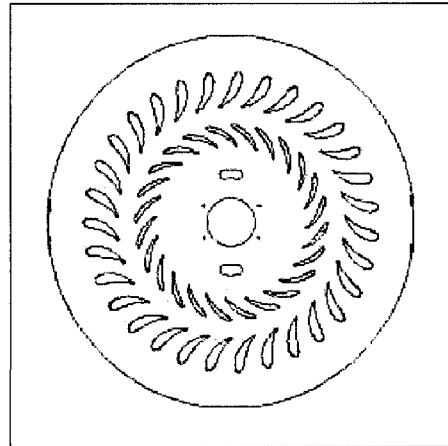
했으며, 이 논문에서는 각 과정에 대하여 서술하였다.

2. 터빈설계

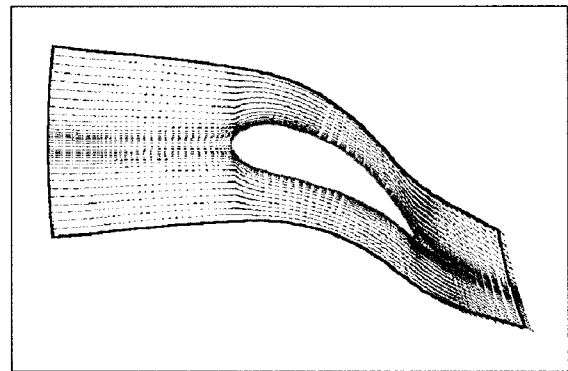
상용 터빈 블레이드의 경우 레이놀즈 수가 10^6 으로 난류 영역이지만, 본 연구에서는 scale의 영향으로 인하여 10^3 정도로 낮아지게 되어 층류 영역에 가깝게 된다^[2]. 따라서 상용 터빈 블레이드에 비해 점성력의 영향이 상대적으로 커지게 되고, 이것은 장치 내에서의 마찰 손실이 상대적으로 커지는 결과를 가져온다. 그리고 터빈내의 유동은 마하수가 0.5까지 올라가는 압축성 유동이다. 또한 장치 내에서의 유로는 3차원 형상 가공을 할 수 없는 반도체 공정의 특성상 모두 수직으로 꺾이는 형상을 하고 있다. 이것은 수직부분을 라운딩 처리를 하는 상용 터빈에 비하여 많은 압력손실을 가진다.

CFD를 이용한 공력 설계를 위해, Navier -Stokes 방정식을 유한체적법(Finite Volume Method : FVM)으로 이산화한 상용 유동해석 프로그램인 CFX-TASCflow를 이용하여, 스테이터와 로터 주변의 유동장을 계산하였다^[3]. 그림 1(a)는 설계된 로터 블레이드와 스테이터의 모습을, 그림 1b는 해석된 스테이터의 속도분포를 나타낸다. 마이크로 터빈은 유량 초당 0.4 그램, 효율 0.7, 압력비 0.236을 가지는 것으로 설계되었고, 31개의 스테이터와 24의 로터 블레이드로 구성되어있다(그림 1a).

또한 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 그림 2에 도시된 것처럼 가공되어 접합된다.

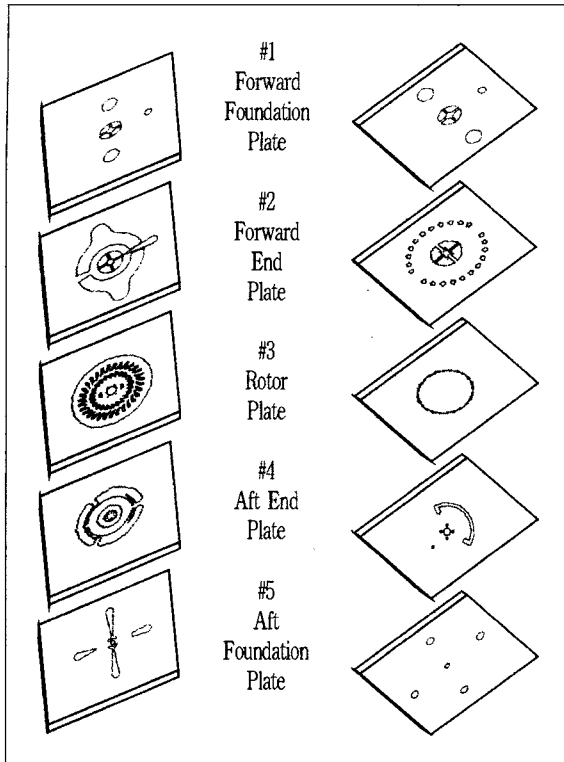


[그림 1(a)] 마이크로 터빈의 로터와 스테이터



[그림 1(b)] 마이크로 터빈 스테이터 mid-span에서의 속도 분포

가장 위의 1번 웨이퍼와 아래의 5번 웨이퍼에는 로터를 직접 움직이는 질소가스와 로터의 반경방향 및 축방향의 힘을 지지하여 운동을 안정시키는 저널 베어링과 스러스트 베어링에 들어가는 질소가스의 입출구가 위치하고 있다. 3번째 웨이퍼는 터빈의 핵심부으로 로터가 위치하고 있으며, 2번과 4번 웨이퍼에는 각각 1번과 5번 웨이퍼로부터 유입되는 유체를 고르게 분산시켜 저널 베어링과 스러스트 베어링 내 유체의 흐름을 원활하게 하여 베어링을 안정시키는 부분으로 구성되어 있다.



[그림 2] 마이크로 터빈을 구성하는 각 5장의 웨이퍼를 위·아래에서 바라본 모습

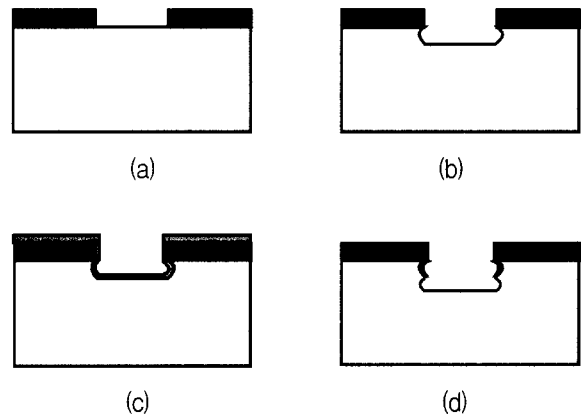
3. 공 정

3.1. 고 형상비를 위한 DRIE 공정

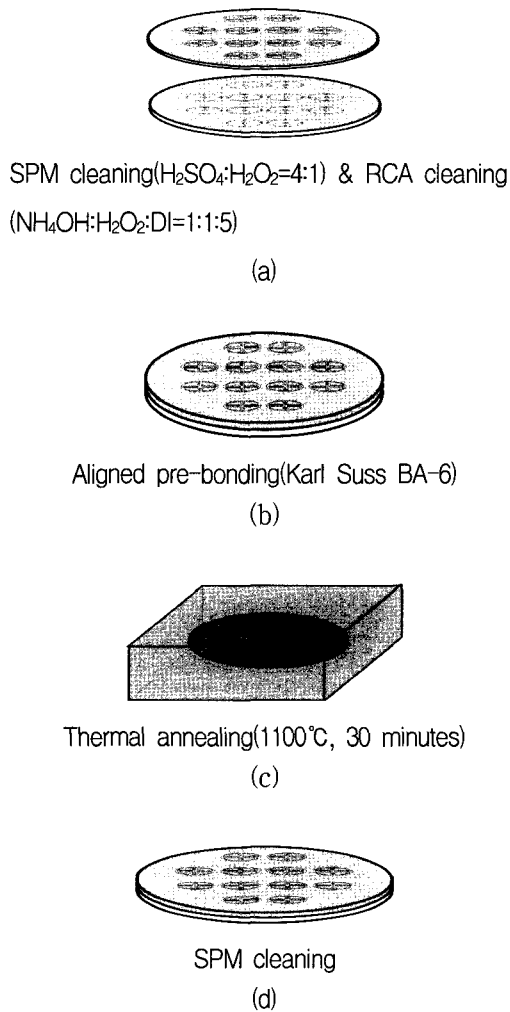
마이크로 파워 시스템은 실리콘 웨이퍼에 대한 벌크 식각(Bulk etching)을 기반으로 일반 터보기계의 형상을 미세하게 재현하는 MEMS 기술을 이용한다. 그러나 일반적인 MEMS는 보통 식각 깊이가 수 μm 에서 수십 μm 정도이지만, 마이크로 파워 시스템에서는 일부 유로의 경우 웨이퍼 한 장을 수직성을 유지하면서 관통한다. 이때 수직을 만족하는 깊이와 폭의 비가 10:1이상인 고형상비(High aspect ratio)를 요구하며 journal bearing이 여기에 해당한다. 따라서

DRIE(Deep Reactive Ion Etching) 공정을 이용하며^[4], Plasma Therm ICP(Inductively Coupled Plasma) 장비를 사용한다. DRIE를 이용하여 식각할 경우 공정 조건에 따라 수직 프로파일이 달라져 공정 조건의 확립이 중요하다.

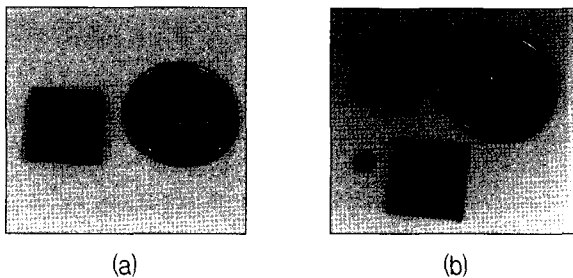
공정은 먼저 가볍게 식각을 한 후(그림 3b), 위로 노출되어 있는 전면에 대하여 폴리머 계층의 보호제를 씌운다(그림 3c). 이후 수직성이 보장된 플라즈마를 이용하여 바닥면을 식각한다. 이때 측면의 보호제가 벽면의 식각을 막는 역할을 한다(그림 3d). 이제 그림 3b-3c-3d의 공정을 원하는 깊이가 될 때까지 반복한다. 전체 공정은 보호제를 5초간 입힌 후, 식각면의 보호제를 3초간 제거한 후, 웨이퍼를 6초간 식각하는 5-3-6 스텝으로 플라즈마는 23 mTorr의 압력을 유지하고, 챔버와 전극은 각각 10 $^{\circ}\text{C}$ 와 15 $^{\circ}\text{C}$ 로 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^[5].



[그림 3] (a)실리콘 웨이퍼 위의 패턴이 있는 알루미늄 마스크, (b) etching cycle, (c) passivation cycle, (d) subsequent etching cycle



[그림 4] 웨이퍼 접합법 : (a) cleaning, (b) 웨이퍼 직접 접합을 위한 aligning, (c) thermal annealing, (d) cleaning



[그림 5] 15 mm × 15 mm × 2.25 mm 기의 5장의 웨이퍼로 제작된 마이크로 터빈

3.2. 3차원 시스템을 위한 Bonding 공정

2차원으로 설계 제작된 웨이퍼는 웨이퍼 접합에 의해 3차원의 시스템이 된다. 웨이퍼 접합은 그림 4에서 보는 것과 같이 이루어지며, 마이크로 터빈의 경우 5장의 웨이퍼를 Si/Si 웨이퍼 직접 접합법을 사용한다. 먼저 웨이퍼를 cleaning한 후(그림 4a) Karl Suss BA-6 Bonding aligner를 이용하여 backside align control을 통해 pre-bonding을 형성하여 수 μm 이하의 정밀도를 유지하였다(그림 4b). 여기서 align을 위하여 초기 기판 설계 전에 global align key를 기판 앞뒤로 형성하여, align key뿐만 아니라 각 공정에 생길 수 있는 mismatch 현상을 사전에 확인할 수 있도록 하였다.

이 후 $1100^\circ C$ 의 온도에 30분간 thermal annealing을 실시한 후(그림 5c) 마지막으로 cleaning을 하였다(그림 5d). 이 때 계면에 기포나 먼지 같은 미세 입자가 포함될 경우 접합력이 감소하기 때문에^[6] 표면 cleaning이 반드시 선행되어야 한다. 그리고 필요시 표면 거칠기를 줄이기 위하여 CMP(Chemical Mechanical Polishing) 공정을 거치는 것 또한 필요하다.

그림 5a에 제시한 장치는 5장의 실리콘 웨이퍼를 사용하여 식각 및 접착하여 제작한 마이크로 터빈이다. 크기는 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 2.25\text{ mm}$ 이고, 그림 5b에서 보여지듯이 지름 4.2 mm인 로터와 스테이터를 포함하는 하단 베어링 장치, 그리고 스테이터에 유체를 불어 넣는 포트가 포함되어 있는 상단 베어링 장치가 있다.

5. 결 론

마이크로 파워 시스템의 구축을 위한 마이크로 터

빈 설계, 공정기술 및 성능 평가 시험 장치를 개발하였다.

- 1) CFD를 응용하여 마이크로 터빈을 설계하였다.
- 2) DRIE 공정과 접합 공정을 개발하여 마이크로 터빈을 제작했다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 우수공학연구센터인 마이크로열시스템연구센터와 대한산업기술지원단의 대학보유기술이전사업 및 2001년도 서울대학교 반도체공동연구소의 공동시설 이용지원 프로그램의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Ehrich, F. F., Jacobson, S. A., "Development of High-speed Gas Bearings for High-Power-Density Micro-Devices," ASME Turbo Expo 2001, 2001-GT-0478.

[2] Jacobson, S. A., "Aerothermal Challenges in the Design of a Microfabricated Gas Turbine Engine," AIAA-98-2545.

[3] 박건중, 전병선, 민홍석, 송성진, 민경덕, 주영창, "마이크로 파워 시스템의 개발," 2001 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp.381~386.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.