

MEMS-based 초소형 터보기계

박건중* · 송성진**

1. 서 론

지난 2001년 2월, 과학기술부는 올해 추진 업무 보고에서 정보기술(Information Technology, IT), 생명기술(Bio Technology, BT)과 함께 나노기술(Nano Technology, NT)을 21세기 핵심 과학기술로 선정하여 향후 집중적으로 육성하겠다고 발표하였다. 10-9m를 의미하는 나노 단위에서의 과학기술은 곧 초소형화 기술의 중요성을 의미한다. 더 작은, 그래서 같은 공간을 더 효율적으로, 그리고 더 다양한 분야에 사용할 수 있도록 만드는 초소형화 기술은 MEMS란 이름으로 이제 터보기계 분야에도 적용되고 있다.

MEMS, 곧 MicroElectroMechanical Systems란 대량 생산을 통한 저가 고성능, 초소형, 초경량 반도체 집적회로의 특성을 지닌 초소형 센서 및 응용 시스템을 일컫는다. 10년을 갖긴 짧은 역사에도 불구하고 이미 다양한 분야에서 상당한 시장이 형성되고 있으며, 전세계적으로 대략 600여개에 달하는 MEMS 관련 연구기관에서의 활발한 연구활동 결과 최근 MEMS 관련 특허 출원수가 급격히 증가하고 있다(Fig. 1).^{(1),(2)}

한편 터보기계는 펌프, 송풍기, 압축기, 가스터빈, 스팀터빈 등을 포괄하는, 기술 선진국형 고부가가치를 창출하는 정밀기계로, 항공, 지상, 선박용 추진 및 발전 시스템과 여러 일반 산업 등에 광범위하게 사용되기 때문에 국가 기간 산업으로서, 그리고 국방 분야에 있어서는 전략적으로 매우 중요한 기계 분야이다. 이러한 이유로 현재 선진국에서는 터보기계 산업을 국가 기간 산업, 전략 산업, 고부가가치 산업으로 집중 육성하면서 막대한 연구투자를 하고 있다. 1998년 발표된 미국 기계학회 IGTI (International Gas Turbine Institute) 자료에 의하면, 가스터빈의 경우 세계 총생산액은 250억불(약 30조원)에 이르며, 대부분 MW(106W)급 가

스터빈에 해당되지만, 현재 시장 수요 증가에 따라 향후 100kW 급 소형 가스터빈 시장 규모도 년 80~100억 불(약 10조원)에 이를 것으로 추산되고 있다.^{(3),(4)}

2. MEMS-based 초소형 터보기계

MEMS-based 초소형 터보기계는 반도체 공정 기술을 이용하여 제작되는, 크기가 cm^3 단위 이내인 초소형 압축기, 펌프, 터빈 등 고속으로 회전하면서 유체에 에너지를 가하거나 유체로부터 에너지를 얻어내는 turbo-machinery-on-a-chip 개념의 초소형 터보기계를 일컫는다. Rotor, stator, gas bearing, inlet/outlet flow channel 등 다양한 장치가 복합적으로 구성된 진정한 시스템으로서의 물리적 의미를 갖는 MEMS-based 초소형 터보기계는 10^6 rpm 급, 300 m/s~500 m/s 범위의 고속, 압력비 2:1~4:1 범위의 고압, 최고 1600°C에 이르는 고온 등의 극한 작동 환경에서 일을 하거나 동력을 발생시키는 기계적인 MEMS 이다. 이와 같은 MEMS-based 초소형 터보기계는 압력 센서, 가속도계, 자이로스코프 등의 센서와 마이크로미러, 마이크로모터, 마이크로밸브 등의 액추에이터로 대변되는 트랜스듀서로서의 역할에 치중된 지금까지의 MEMS 영역을 뛰어넘는, MEMS 의

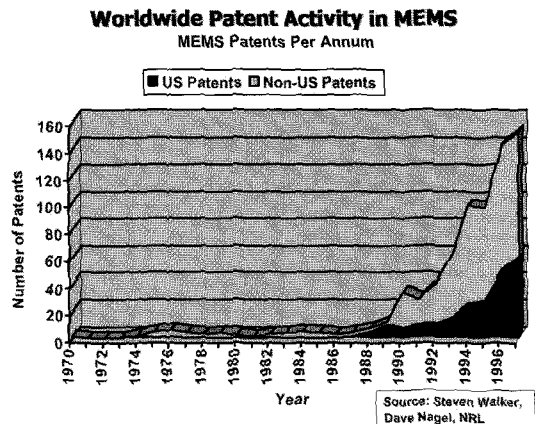


Fig. 1 MEMS patents (DARPA)

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : kjpark2@snu.ac.kr

** 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : sjsong@snu.ac.kr

새로운 패러다임을 제시하는 매우 도전적이고 새로운 시스템이다.

MEMS-based 초소형 터보기계는 물리적으로, 그리고 경제적으로 많은 장점을 갖고 있다. 한 예로 기계의 에너지 밀도 (Power density, 즉 Power 대 부피비 W/m^3 또는 Power 대 질량 비 W/kg)는 길이 단위에 반비례하여 증가하기 때문에, 기계의 소형화가 이루어질수록 높은 에너지 밀도를 갖게 되며, 따라서 길이 단위가 대형 터보기계 시스템의 1/100로 줄어들면, MEMS-based 초소형 터보기계는 대형 터보기계 시스템보다 100배 높은 에너지 밀도를 낼 수 있다.⁽⁵⁾ 뿐만 아니라 경제적인 측면에서 볼 때, 반도체 생산 공정을 이용한 대량 생산이 가능하기 때문에 생산비가 적게 드는 장점이 있다. 이와 같이 여러 측면에서 매력적인 MEMS-based 초소형 터보기계는 새로운 길이 단위, 새로운 형상, 새로운 재료 등에 바탕을 두기 때문에, 이에 맞는 새로운 설계, 제작, 평가 기술이 필수적으로 요구된다(Fig. 2).

우선 유체역학을 기반으로 하는, 공력 모델링 및 전산유체역학을 이용한 공력 설계 해석 기술 등 $1\mu m \sim 1cm$ 크기의 MEMS-based 초소형 터보기계에 적용되는 새로운 공력학적 설계 기술이 필요하다. 특히 초소형화로 인하여 달라지는 유체역학적 특성들에 대한 연구를 바탕으로, 새로운 설계 기술 개발이 요구된다. 체적력은 길이 단위의 제곱에 비례하여 증가하나 표면력은 길이 단위의 제곱에 비례하여 증가한다는 Cube-Square 법칙에 의해, 점성으로 인한 에너지 손실은 길이 단위가 줄어들수록 이에 비례하여 증가하게 된다.⁽⁶⁾ 따라서 소형화로 인한 최대 장점인 에너지 밀도의 증가를 보전하기 위해서는 최적화된 공력학적 설계에

의해 손실을 줄여서 효율과 성능을 향상시켜야 한다. 또한 점성력에 대한 관성력의 상대적인 크기를 의미하는 Reynolds수는 길이 단위가 줄어들어 따라 같이 감소하고, 이에 따라 경계층 두께, 마찰계수, 항력 등이 달라지게 되며, 특히 micron 단위에서의 유동은 비선형적인 scale 효과, 벽에서의 slip 조건 등 대형 시스템에서는 볼 수 없는 특이한 유동 현상이 발생하기 때문에 이에 대한 연구 및 유동 제어를 위한 설계 기술 개발이 필요하다.⁽⁶⁾

둘째, 크기가 cm^3 단위 이내인 MEMS-based 초소형 터보기계를 micron 또는 sub-micron 단위의 정밀도로 제작하기 위해서는, 기존의 반도체 소자를 만드는 수천 $\text{\AA} \sim 1\mu m$ 길이 단위에서의 반도체 공정을 응용한 $1\mu m \sim$ 수 mm 길이 단위에 해당하는 MEMS-based 초소형 터보기계 전용 제작 기술의 개발이 필요하다. Deep Reactive Ion Etching(DRIE) 이라는 식각 기술과 aligned wafer bonding 이라는 접합 기술이 대표적으로 응용되는 기술이며, 그 제작 방법은 다음과 같다.

우선 두께가 $0.5mm(500\mu m)$ 인 실리콘 웨이퍼 위에 감광물질 (Photo-Resist, 흔히 줄여서 PR 이라고 부른다.) 을 입히고 그 위에 마스크(mask) 라고 불리는 원하는 패턴을 덮은 다음 빛을 쬐어 주면, 빛이 투과하는 부분은 감광물질이 반응하기 때문에 화학적으로 변하게 되고, 빛을 받지 못한 부분은 그대로 남아 있게 된다. 이를 화학처리 해주면, 빛에 반응한 부분은 없어지고 빛에 반응하지 않은 부분만 원하는 형태로 남아 있게 된다. (일반적이지는 않지만, 그 반대도 가능하다. 즉, 빛에 반응한 부분만 남겨 놓고, 빛에 반응하지 않은 부분을 없애는 경우이다. 감광물질의 종류에 따라 선택이 가능하다.) 원하는 형태로 감광물질이 입혀져 있는 웨이퍼를 적절히 열처리 하면, 감광물질은 웨이퍼 위에 단단히 굳게 되어 다음에 이어질 식각 과정에서 그 형태를 보존하며 남아 있게 된다. 이와 같은 전처리 과정 후, 웨이퍼를 화학용액에 담그거나(wet etching), 플라즈마 용기 안에 집어 넣으면(dry etching), 감광물질이 없어진 실리콘 웨이퍼 표면은 수직인 방향으로 식각되게 된다. (웨이퍼의 결정 방향에 따라 경사진 방향으로의 식각도 가능하나, 주로 수직인 방향으로의 식각 기술이 이용된다.) 이때, 식각 반응 시간, 용액의 밀도나 조성(wet etching 경우), 플라즈마의 강도(dry etching 경우) 등에 따라서 식각되는 깊이나 모양, 그리고 표면 상태가 달라진다. 메모리 반도체와 같은 전기 소자의 경우에는 높은 집적도를 요구하기 때문에

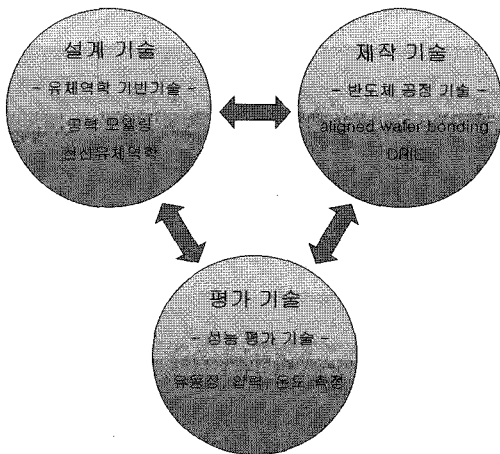


Fig. 2 MEMS-based micro turbomachinery technology

얼마나 얇고, 조밀하고, 정밀하게 식각하느냐가 중요한 문제이지만, MEMS-based 초소형 터보기계의 경우에는 얼마나 수직하게, 깊게, 그리고 깨끗하게 식각하느냐가 중요하므로 DRIE(Dep-RIE 라고 부르기도 한다.) 와 같은 식각 공정 기술의 최적화가 제작 과정의 핵심을 이룬다.⁽⁷⁾

MEMS-based 초소형 터보기계는 이러한 방식으로 여러 개의 실리콘 웨이퍼 앞뒷면을 원하는 2차원 형태로 식각한 다음, 이를 나란히, 그리고 틈새없이 붙이는 작업을 통해 3차원 구조물로 제작, 완성된다. 이때 사용되는 기술이 aligned wafer bonding 기술이며, 매우 높은 정밀도를 요구하기 때문에 최적화된 접착 공정 기술이 필요하다.⁽⁷⁾

한편 유동장, 압력, 온도 등을 측정함으로써 설계, 제작된 MEMS-based 초소형 터보기계의 성능을 평가하기 위한 평가 기술도 필요하다.

이와 같이 MEMS-based 초소형 터보기계를 설계, 제작, 평가하기 위해서는 첫째, 유체역학 기반 설계 기술; 둘째, 재료 가공을 위한 제작 기술; 셋째, 기계의 성능을 평가하기 위한 평가 기술 등 다양하고 복잡한 기술들이 필요하다. 특히 상호 보완적으로 밀접한 관계를 갖고 있는 이러한 기술들을 종합적으로 활용하기 위한 범학제간 연구가 필수적이다.

3. 마이크로 가스터빈 엔진 프로젝트

현재 미국 MIT 에서는 연구책임자인 Epstein 교수 외 40~50명의 연구인력이 미국 Army Research Office (ARO), Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA), NASA 등의 막대한 지원을 받아 크기가 1cm³ 보다 작은 10~100 W 급 초소형 가스터빈 엔진을 설계, 제작하기 위한 범학제간 연구를 진행하고 있다 (Fig. 3, Fig. 4).⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾

이 초소형 가스터빈 엔진은 발전기 또는 추력 장치로 사용이 가능하며, 발전기의 경우, 같은 크기, 같은 중량의 화학전지보다 20~30배 이상 우수한 에너지 밀도를 낼 수 있다. 즉, 탄화수소 계열의 연료를 사용하는 초소형 가스터빈 엔진이 불과 20% 효율로 발전을 한다고 가정해도 2300 W-hr/kg 의 에너지 밀도를 낼 수 있으나, 현재 가장 에너지 밀도가 높은 리튬이온 화학전지의 에너지 밀도는 200~300 W-hr/kg에 불과하다. 때문에 이러한 초소형 발전기는 크기, 무게, 휴대성, 그리고 에너지 효율 면에서 21세기 신기술로서의 새로운

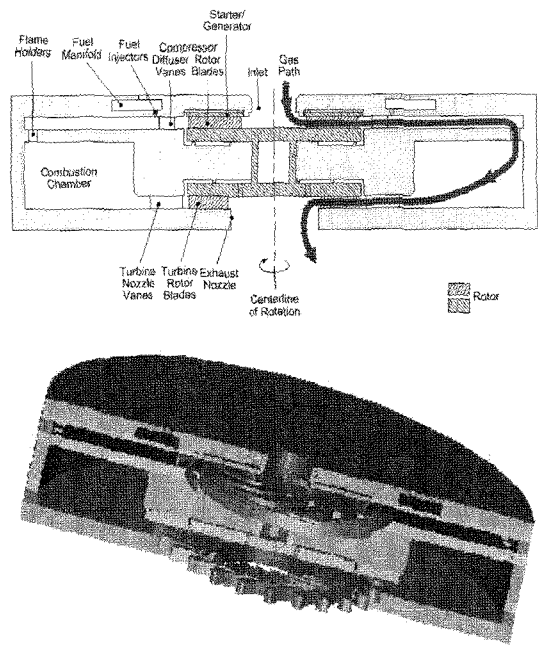


Fig. 3 Micro gas turbine engine (MIT)

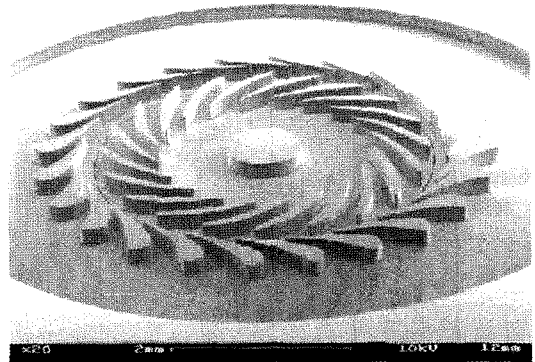


Fig. 4 Micro turbine rotor & stator (MIT)

가능성을 제시하고 있다.

한편 이와 병행하여 MIT 에서 개발중인 10-1N 급 추진용 로켓엔진은 액체연료와 터보펌프를 이용한 초소형 로켓엔진으로 추력 대 중량비가 104 단위로 현재 추력 대 중량비가 가장 높은 우주로켓에 비해 100배 이상 높다. 이는 MEMS 기술에 의해 크기가 mm 단위로 소형화됨으로 인해 가능해진 것이다. 이 초소형 로켓엔진은 NASA 에서 곧 실용화될 예정이며, 고압 기체연료를 사용하지 않고, 터보펌프에 의한 별도의 액체연료 압축방식을 이용하기 때문에 전체 추진체의 중량을 획기적으로 줄일 수 있다.⁽¹⁰⁾

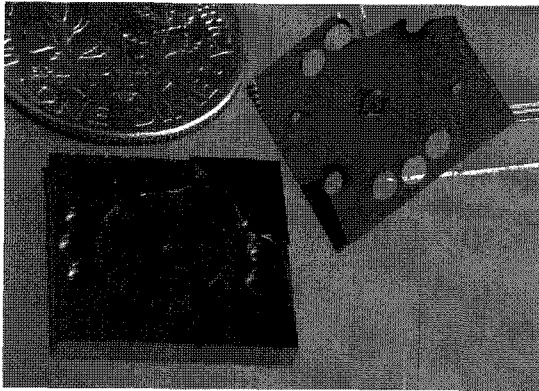


Fig. 5 Micro turbine/bearing rig (MIT)

현재 MIT에서는 각 부품별 설계, 제작, 성능 시험이 완료된 상태에서 부품 조립을 통한 전체 엔진 구성을 하고 있다. 회전체의 지름이 4mm에 불과한 이 초소형 가스터빈 엔진에는 고효율 압축기와 터빈 등 터보 기계가 핵심부품으로 사용되며, 고속 회전을 구현하기 위한 초소형 가스 베어링도 이미 개발이 완료된 상태이다. 2000년 6월 발표된 자료에 의하면, 회전속도 120만 rpm으로 실리콘 터빈 발전기를 20분 이상 안정적으로 돌려서 5W의 전력을 발생시켰다(Fig. 5, Fig. 6).⁽¹⁰⁾

한편 일본에서 선도적으로 MEMS 연구를 하고 있는 東北 대학의 Esashi 그룹에서는 지난 2000년도에 회전체의 지름이 5mm인 초소형 가스터빈을 회전속도 10,000 rpm으로 돌려서, 적외선 분광기용 초소형 polarization modulator를 제작하는 데 성공하였다.⁽¹¹⁾

4. 국내 현황 - 서울대

국내에서의 MEMS와 관련된 기술 연구는 1990년 이전까지는 전무하였으며, 이후 1995년까지는 기존의 반도체 공정 장비를 이용하여 간단한 wet etching 정도를 수행하였다. 1995년부터 G7 프로젝트가 시작되면서 '표면미세가공 기반기술'이 확보되었으며, 이후 다양한 MEMS 관련 기술이 연구되기 시작하였다. 현재 항공기용 자이로스코프, 자동차 에어백 센서용 가속도계, 잉크젯 프린터 헤드 등의 분야에서 많은 연구 진척이 이루어졌으며, 최근에는 평판 디스플레이용 Optical MEMS와 DNA 칩, 단백질 칩 등 Bio MEMS와 관련된 연구가 활발해지고 있다.⁽¹²⁾

불과 5년전만 해도 거의 찾아볼 수 없었던 국내 MEMS 연구기관도 현재는 산업체, 국립 연구소, 대학 연구소를

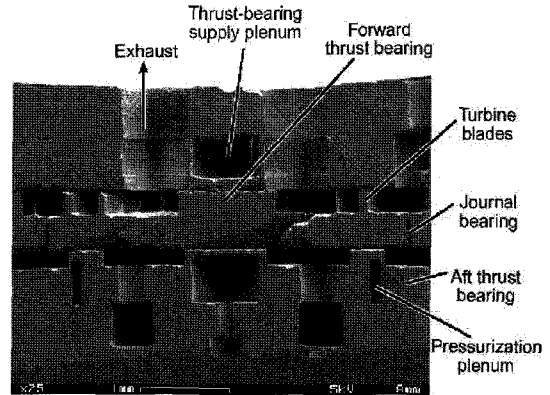


Fig. 6 Five layer stacked micro turbine/bearing rig cross section (MIT)

망라하여 그 수가 날로 증가하고 있으며, 대표적인 연구기관으로는 서울대학교, 한국과학기술원, 한국과학기술연구원, 삼성종합기술원 외에 많은 산업체와 대학 연구 그룹, 그리고 최근에 생겨나기 시작한 MEMS 관련 벤처기업들이 있다.⁽¹²⁾

현재 국내 대부분의 MEMS 연구기관이 센서 및 액츄에이터와 관련된 연구를 진행하고 있으나,⁽¹²⁾ 아직 MEMS-based 초소형 터보기계와 같은 에너지 활용 MEMS 기술, 그리고 단순 부품이 아닌 다양한 장치가 복합적으로 구성된 하나의 시스템으로서의 MEMS 기술에 대한 연구는 전무하다.

이에 서울대학교 제트 및 터보테크 연구실에서는 미세소자재료 연구실, 동력공학 연구실과 함께 국내에서의 MEMS-based 초소형 터보기계 관련 기술 개발을 위해 연구를 진행하고 있으며, 현재 초소형 터빈과 고속 회전용 가스 베어링, 그리고 이 터빈의 회전 성능을 평가하기 위한 시험 장치를 설계, 제작하고 있다. 이 장치는 5개의 실리콘 웨이퍼가 접합된 1.5cm×1.5cm×2.25mm 크기의 실리콘 구조물과 외부 작동유체 공급원과의 연결, 그리고 회전 성능을 측정하기 위한 패키징 장치로 구성되어 있으며, 모두 12장의 마스크 패턴이 이용되었다. 한편, 로터의 반지름은 2mm, 높이는 0.45mm 이고, 로터 블레이드와 노즐 가이드 베인의 개수는 각각 24개, 31개씩이다.

Fig. 7은 MEMS-based 초소형 터보기계를 제작하는 데 있어서 가장 필수적인 high aspect ratio 구조물을 구현하기 위해 최적화된 식각 공정 기술의 시험 결과물을 나타내는 사진이며, Fig. 8은 초소형 터빈의 성능 시험을 위해 설계, 제작된 5개의 실리콘 플레이트 중 하나로서, 작동유체의 공급과 배출 통로를 보여주고

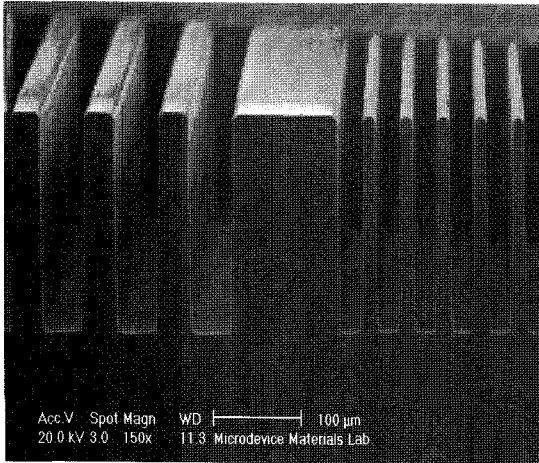


Fig. 7 High aspect ratio test structure for optimized DRIE process (SNU)

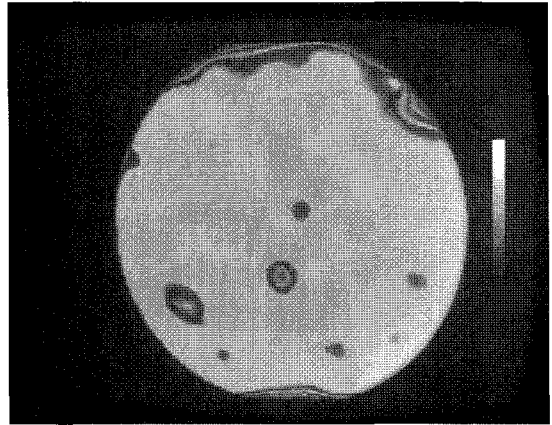


Fig. 9 IR image of bonded wafers - rotor wafer and forward cover wafer (SNU)

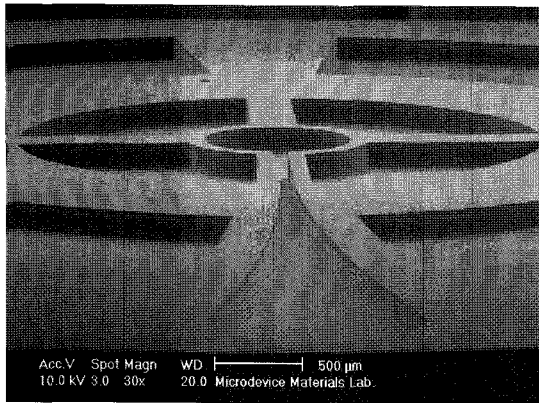


Fig. 8 Air inlet/exhaust flow channel of micro turbine test facility (SNU)

있다. 한편 Fig. 9는 접착된 두 웨이퍼에 대한 적외선 (IR) 촬영 사진으로 간섭무늬를 통해 접합 상태를 확인할 수 있다.

5. 기술 수요 및 전망

터보기계 시스템의 소형화 추세와 현재 수십억불 규모로 시장이 확대되고 있는 MEMS 관련 산업의 발달을 배경으로, 광범위한 산업 분야에 사용되는 터보기계 시스템의 초소형화, 즉 MEMS-based 초소형 터보기계의 등장으로 인한 각 산업 분야로의 파급효과는 막대할 것이며, 전세계적으로 시장 수요 또한 매우 클 것으로 예상된다.⁽¹⁾ 한 예로 향후 MEMS 기술 수요와 관련하여 MEMS 시장 규모를 예측한 미국 DARPA

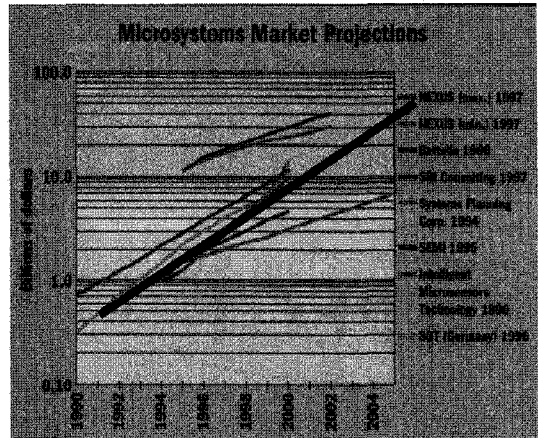


Fig. 10 MEMS market projections (DARPA)

자료에 의하면, 2005년에는 다양한 분야에서의 MEMS 시장 규모가 1조원대에 이를 것으로 예상하고 있으며, 이 중 20% 이상의 상당한 부분이 MEMS-based 초소형 터보기계가 이용될 수 있는 분야이다(Fig. 10).⁽¹³⁾

국내 터보기계 관련 연구자들도 이와 같은 기술의 새로운 흐름을 인지하고 적절히 대응한다면, 향후 선진국과의 기술 경쟁에 있어 든든한 밑거름이 될 것이다.

참고문헌

- (1) Amato, I., 1999, "May the Micro Force Be with You," *An MIT Technology Review*, September/October.

- (2) Tang, W. C., 1999, "MEMS at DARPA".
- (3) ASME IGTI 1998 Report.
- (4) 손정락, 노승탁, 2001, "디지털 시대의 마이크로 터빈 시장 및 기술 전망," 유체기계저널, 제4권, 제1호.
- (5) Jacobson, A. S., 1998, "Aerothermal Challenges in the Design of a Microfabricated Gas Turbine Engine," *AIAA-98-2545*.
- (6) Ho, C.-M. and Tai, Y.-C., 1998, "Micro-Electro-Mechanical-Systems and Fluid Flows," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 30, pp. 579~612.
- (7) Madou, M., 1997, *Fundamentals of Micro-fabrication*, CRC Press, Boca Raton.
- (8) Epstein, A. H., Senturia, S. D., 1997, "Macro Power from Micro Machinery," *Science*, Vol. 276, p. 1211.
- (9) Epstein, A. H. *et al.*, 1997, "Power MEMS and Microengines," *Transducers 97*, 3A1.01.
- (10) <http://web.mit.edu/aeroastro/www/labs/GTL>
- (11) Tanaka, S., Hara, M. and Esashi, M., 2000, "Air-Turbine-Driven Micro-Polarization Modulator for Fourier Transform Infrared Spectroscopy," *Technical Digest of the 17th Sensor Symposium*, A1-2.
- (12) <http://www.isrc.snu.ac.kr/~mtec>
- (13) Pisano, A. P., 2000, "MEMS 2003 and Beyond," *A DARPA Vision of MEMS*.