

제 1회 MEMS 기술의 개요 및 전망

MEMS 기술은 전자(반도체) 기술, 기계 기술, 그리고 광 기술 등을 융합하여 마이크로($1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$) 단위의 작은 부품 및 시스템을 설계, 제작하고 응용하는 기술을 일컫는다. 이러한 MEMS 기술은 최근에 들어와 21세기의 중추적인 전자부품 및 시스템 산업으로 부각되고 있다. 본 연재는 우선 MEMS 기술의 전반적인 소개로서 개요, 공정 기술, 응용 분야, 시장 분석, 그리고 미래의 전망 등에 관한 내용을 기술하고, 이어서 KIST 디스플레이 및 나노 소자 연구실이 진행하고 있는 연구개발 분야와 밀접한 관계가 있는 자동차용 센서(Automotive sensor), 탄소 나노 튜브 소자(Carbon nano tube), 영상 센서(Image sensor), 마이크로 패키징(Micro-packaging), 나노기술(Nano-technology), 써모파일 센서(Thermopile sensor), 터널링 소자(Tunneling device), 그리고 기판 접합(Wafer bonding) 등을 MEMS 기술의 폭넓은 분야를 다루게 될 것이다.



KIST 주병권 공학박사

필자 약력

95년 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
88년~95년 KIST 정보전자연구부 연구원
95년~현재 KIST 디스플레이 및 나노 소자 연구실 팀장
96년 Univ. South Australia 방문연구원

주요 관심분야

Flat panel display(FED, OLED), MEMS, Micro-sensor

MEMS 기술의 개요 및 전망

21세기의 중추적인 전자부품 및 시스템 산업으로 부각되고 있는 MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems) 기술과 관련한 연재를 시작한다. 먼저, MEMS 기술의 전반적인 소개로서 개요, 공정 기술, 응용 분야, 시장 분석, 그리고 미래의 전망 등에 관한 내용을 기술하고, 후속으로서 본 연구실의 연구 분야와 밀접한 관계가 있는 자동차용 센서(Automotive sensor), 탄소 나노 튜브 소자(Carbon nano tube), 영상 센서(Image sensor), 마이크로 패키징(Micro-packaging), 나노 기술(Nano-technology), 써모파일 센서(Thermopile sensor), 터널링 소자(Tunneling device), 그리고 기판 접합(Wafer bonding) 등을 다루어 보고자 한다.

글 : 주병권 박사/KIST 디스플레이 및 나노 소자 연구실
jbk@kist.re.kr, <http://diana.kist.re.kr>

1. MEMS 기술의 개요

MEMS 기술은 전자(반도체) 기술, 기계 기술, 그리고 광 기술 등을 융합하여 마이크로($1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$) 단위의 작은 부품 및 시스템을 설계, 제작하고 응용하는 기술을 일컫는다. 스케일 도메인(Scale domain) 상으로는 그림 1에 나타난 바와 같이 최소 수 밀리($1\text{mm}=10^{-3}\text{m}$) 이상의 전통적인 기계부품이나 시스템보다는 작고, 나노($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$) 영역인 분자 소자나 탄소 나노 튜브보다는 큰 영역인 마이크로 영역에 해당하며, 이보다 한 수준 더 스케일-다운(scale-down)된 분야는 NEMS(Nano-Electro-Mechanical Systems)로 구분하고 있다.

MEMS 기술의 장점은 소형화를 비롯하여, 집적화, 저전력화, 고신뢰화, 그리고 저가격화를 이룰 수 있다는 데에 있다. 즉, 반도체 공정을 모태로 하

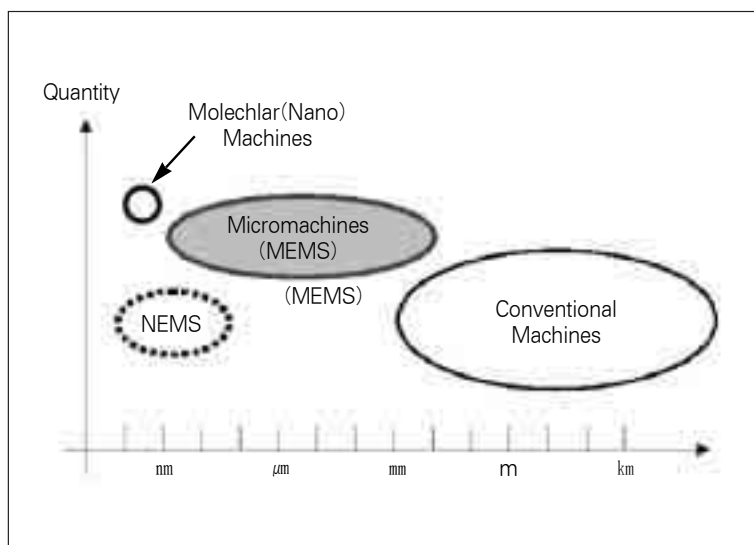


그림 1. MEMS 분야의 scale domain

므로 웨이퍼 상에 일괄제조할 수 있어 소형화가 가능하고, 한 개의 칩에 복수 개의 기능 소자 및 신호처리부 등을 집적시킬 수 있어 고성능-고신뢰성을 얻을 수 있으며, 동시-다량 제조에 의해

가격을 낮출 수 있다. 일례로서 그림 2는 가속도계를 표시한 것으로 MEMS 기술을 이용할 경우에 1/25 규모의 소형화 및 신호처리회로 집적화에 따른 고성능, 저가격화의 가능성을 제시하

고 있다.

소형화-고성능화-저가격화는 대부분의 전자-기계-광 부품들이 추구하는 기술인 만큼, MEMS 기술의 응용도는 실로 다양하며, 바이오(bio-technology), 정보통신(communication & information), 미소 유체 및 화학 분석(fluidics & chemical analysis), 운송 및 항공(transportation & aerospace), 광학(optics), 그리고 로봇(robot) 등에 있어서 구조, 부품, 시스템을 제조하기 위한 핵심기술로서 적용될 수 있다.

2. MEMS 공정 기술

MEMS 기술은 반도체-전기-전자-기계-광-재료-화학 분야 등의 집약 기술인 만큼 MEMS 구조, 부품, 시스템 등을 제조하기 위한 공정 기술도 실로 다양하다. 여기에서는 MEMS 기술의 모태가 실리콘을 기반으로 한 반도체 공정으로부터 시작된 점을 고려하여 실리콘 웨이퍼를 기반으로 하는 핵심 기술을 위주로 설명한다. 그림 3은 MEMS 기술로 제조되는 압저항형 압력 센서의 일례를 나타낸 것으로, 이를 보면 실리콘을 기반으로 하는 MEMS 기술의 적용 사례를 볼 수 있다. 즉, 압력 인가용 노즐을 위한 실리콘 기판의 가공, 압저항 센서 형성을 위한 박막 가공, 회로부와의 하이브리드 공정 등이 필요하다. MEMS용 주요기술들을 간단히 서술하여 보면 다음과 같다. 즉, 실리콘 몸체의 가공(bulk micromachining: 몸체 미세 가공), 기판 위에 형성된 구조층(structural layer)의 가공(surface micromachining: 표면

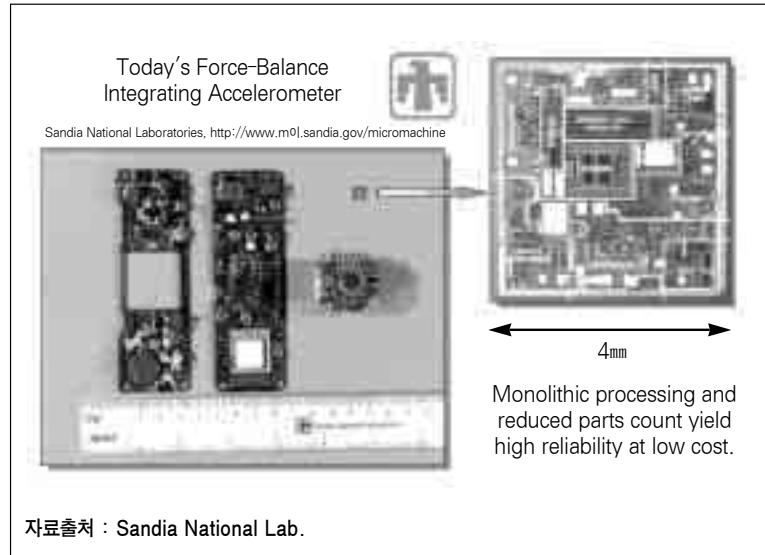


그림 2. 가속도계에 대한 MEMS 기술 적용 일

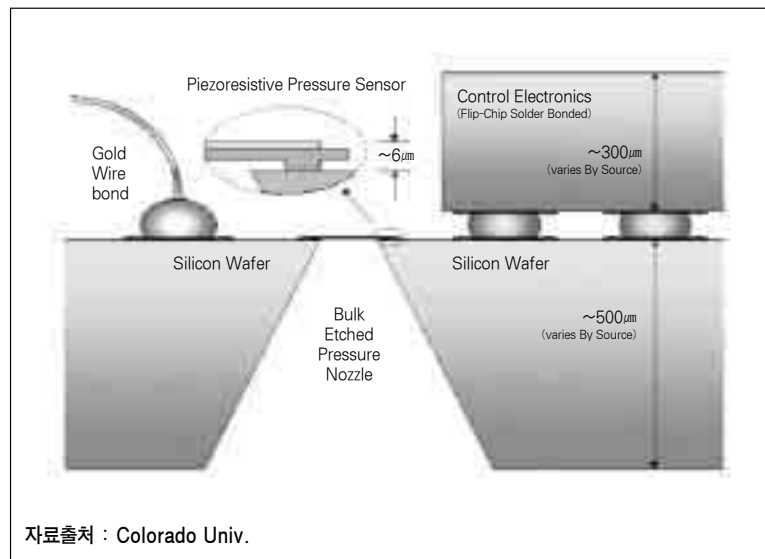


그림 3. MEMS 기술이 적용된 실리콘 압력 센서의 일례

미세 가공), 동종 혹은 이종 기판의 접합(wafer bonding: 기판 접합), 3차원 구조체의 몰딩(molding)이나 기계적 가공, 마이크로 수준의 조립이나 실장(micro-assembly and packaging)

등을 들 수 있으며, 이외에도 다양한 종류의 유기 및 무기 소재 기술, 반도체, 기계, 전기, 화학적 가공 기술, 회로 및 시스템 기술 등이 개발, 적용되고 있다.

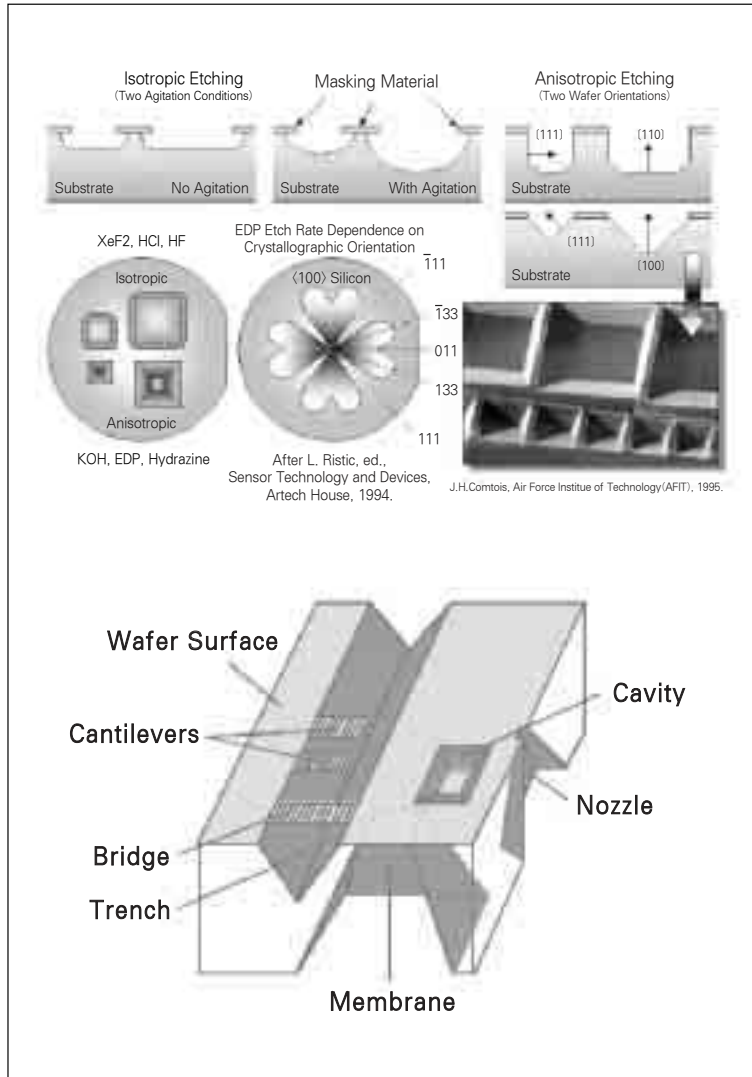


그림 4. 실리콘의 습식 식각(위)과 이를 이용하여 몸체 미세 가공된 구조들(아래)

몸체 미세 가공 기술의 경우, 단결정 실리콘 웨이퍼를 습식 혹은 건식으로 식각하는 기술이 적용되는데, 다양한 모양을 가공하기가 용이한 습식 식각 기술이 주로 사용된다. 실리콘의 습식 식각 기술은 그림 4(위)에 설명한 바와 같이 식각 특성(식각률)이 결정성과 무관한 등방성 식각(isotropic etching)

과 결정성에 의존하는 결정 의존성 식각(orientation dependent etching) 혹은 비등방성 식각(anisotropic etching) 등으로 구분된다. 이러한 식각 기술들을 사용하면 그림 4(아래)에 보인 바와 같이 다리(bridge), 외팔보(cantilever), 공동(cavity), 얇은 막(membrane), 홈(trench, Groove),

그리고 작은 구멍(nozzle) 등과 같은 마이크로 구조들을 실리콘 기판에 가공할 수 있다.

실리콘 기판 위에 형성된 구조층을 가공하는 표면 가공의 경우, 기본적인 공정 개념은 그림 5(위)에 나타난 것과 같다. 즉, 희생층(sacrificial layer)과 구조층을 증착, 패터닝한 다음에 하부에 있는 희생층을 제거하여 상부의 구조층이 떠있거나 움직임을 갖도록 하는 것으로서, 식각 특성이나 선택성, 기계적 성질들을 고려하여 희생층과 구조층으로 각각 산화막과 다결정 실리콘 막이 많이 사용되고 있다. 이러한 증착 후 희생층 제거 과정을 반복적으로 행하면 더욱 복잡한 구조들을 만들 수 있으며, 2회에서 5회까지 이르면서 마이크로 구조물을 만들어 가는 과정을 그림 5(아래)에 함께 나타내었다.

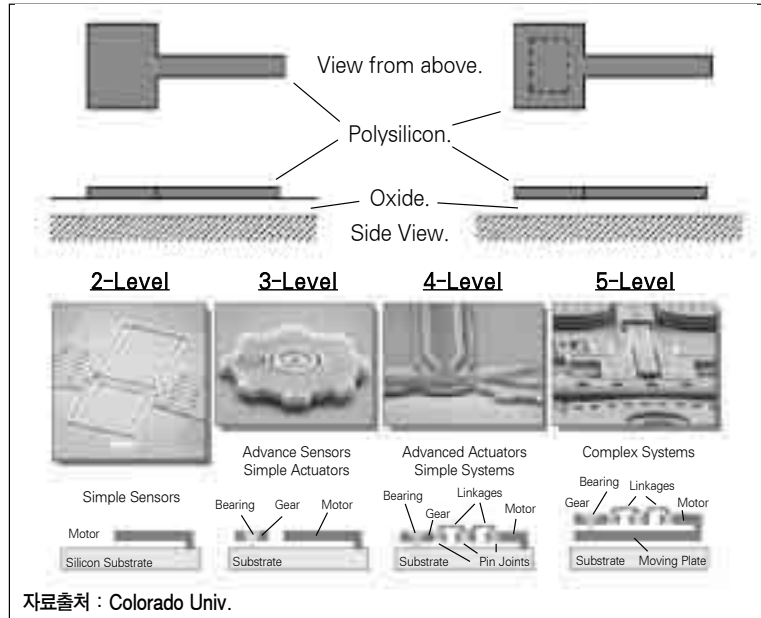
기판 접합 기술의 경우, 주로 마이크로 구조물 제작과 패키징에 사용된다. 두 장, 혹은 그 이상의 동종 및 이종 기판을 접합하는 데에는 여러 종류의 접합 방법이 적용될 수 있지만, 특히 정전열 접합(Electrostatic bonding)과 실리콘 웨이퍼 직접 접합(Si-wafer direct bonding)이 많이 사용된다. 그 이유는 각각 정전력과 화학적 결합을 접합 기구로 이용하므로 접합 매개물이 있는 경우에 비하여 접합 특성(계면, 강도)이 깨끗하고 안정적이며 강하다는 데에 있다. 이와 함께, 정렬 및 대면적 접합이 가능하고 반도체 공정과의 호환성이 있다는 점도 들 수 있다. 별도의 기판들에 대해 미세 가공을 하여 구조물을 형성한 뒤 접합 기술을 사용하여 이들을 서로 결합하게 되면 그

림 6에 나타난 것과 같이 매우 다양하고 복잡한 3차원 구조들을 제작할 수 있다.

3차원 구조체의 몰딩이나 기계적 가공 기술의 경우, LIGA로 대표되는 몰딩 기술과 밀리 머시닝으로 일컬어지는 초정밀 가공 기술이 대표적이다. LIGA는 독일어로 사진 식각(Lithography), 전기 도금(Electroplating), 몰딩(Molding)을 의미하는 약어로서, 그림 7에 나타난 바와 같이 높은 에너지를 갖는 방사선을 이용하여 두꺼운 레지스트를 패터닝하고, 레지스트 구조물 내에 전기도금 등을 이용하여 몰드로 사용할 내구성 있는 물질을 채운 뒤, 레지스트를 제거하여 몰드를 형성하는 공정을 말한다. 이와 같이 제작된 몰드를 이용하면 다양한 종류의 재료들로 만들어진 높은 종횡비를 갖는 3차원 구조체들을 성형할 수 있다.

3. MEMS 기술의 응용

MEMS 기술의 응용분야는 바이오, 정보통신, 운송 및 항공, 우주, 광학 등과 같은 미래형 산업 분야의 대부분을 망라하며, 특히 이에 적용되는 구조, 부품, 시스템의 핵심기술로 인정받고 있다. 그림 8(왼쪽)은 MEMS 기술을 적용한 잉크젯 프린터 헤드로서, 실리콘 기판과 유리 기판에 대해 몸체 미세 가공을 한 후 기판 접합하여 잉크 흐름 채널과 발사용 노즐 등을 형성하였음을 알 수 있다. 이때 잉크는 유리 기판에 가공된 구멍과 채널을 통하여 공급되어 실리콘 기판에 가공된 노즐을 통해 분출된다. 또한, 그림 8(오른



자료출처 : Colorado Univ.

그림 5. 표면 미세 가공의 기본 개념(위) 및 적용(아래)

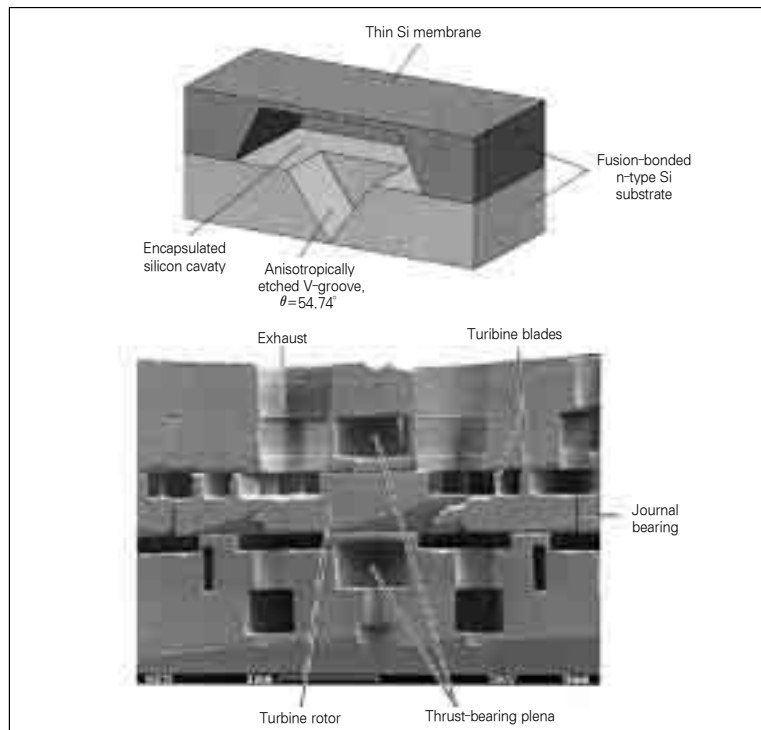
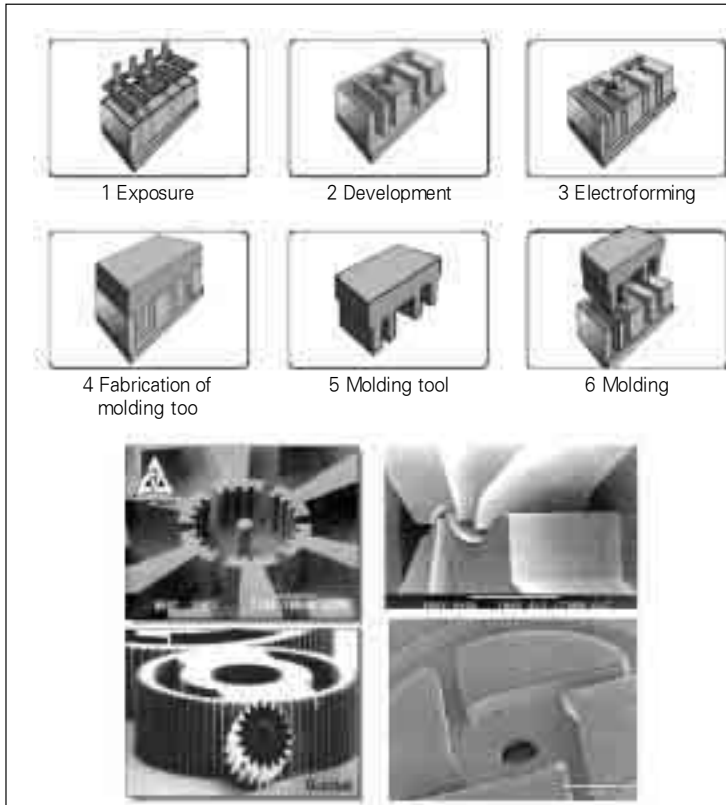


그림 6. 접합 기술을 이용한 3 차원 복합 구조물의 제작 일례



자료출처 : MCNC

그림 7. LIGA의 공정 순서(위)와 제작된 3 차원 구조체들의 일례(아래)

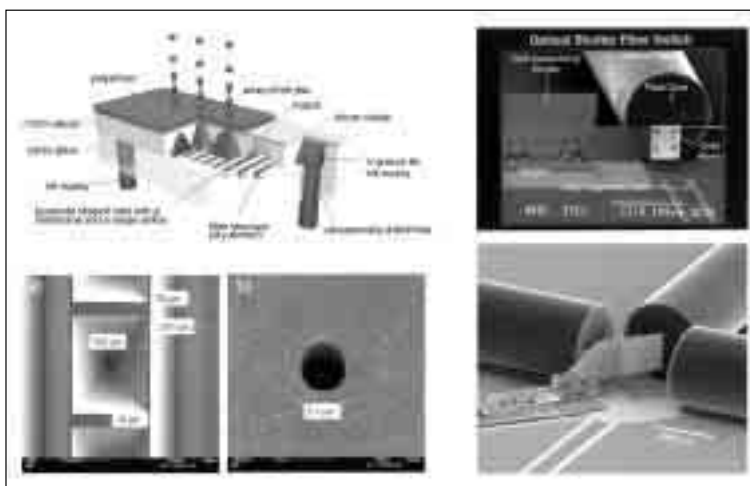


그림 8. 잉크젯 프린터 헤드(왼쪽)와 미세 광학(오른쪽)에 적용된 MEMS 부품의 일례

쪽)은 실리콘 기판 위에 표면 미세 가공을 적용하여 광에 대한 서터와 미리 등을 구성한 사례로서 광통신을 위한 광의 전달과 경로 제공 등의 역할을 한다.

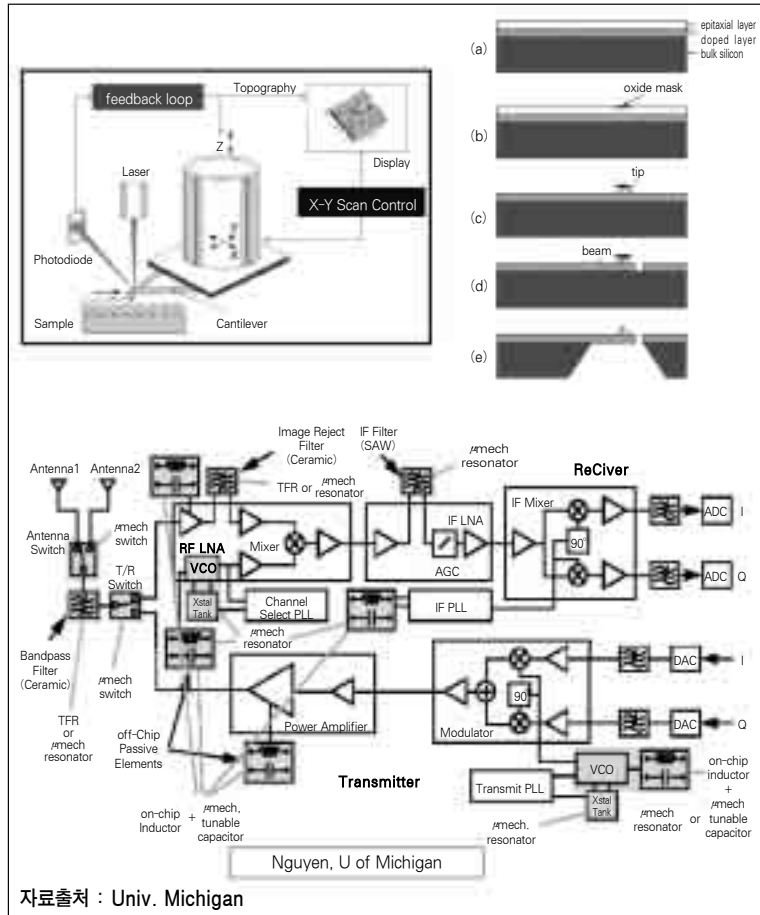
이와 함께 AFM(Atomic Force Microscope)이나 STM(Scanning Tunneling Microscope) 등과 같이 미소 탐침을 이용한 시스템에 있어서 마이크로 및 나노 크기의 캔틸레버 팁의 가공에서도 MEMS 기술이 적용될 수 있으며, RF(Radio Frequency) 통신부품에서 기계적인 진동이나 움직임이 필요한 요소들도 MEMS 기술로 제작함으로써 더욱 소형화를 꾀할 수 있다. 그림 9(위)에 마이크로 탐침이 적용된 AFM 시스템 및 캔틸레버 팁의 제조과정을 간단히 나타내었으며, 그림 9(아래)에는 무선 통신 시스템의 블록 선도를 나타내었는데 음영으로 표시된 부분들, 특히 스위치, 온칩인덕터, 가변 커패시터, 진동자 및 공진기, 필터 등이 이에 해당한다.

4. MEMS 시장현황 및 예측

1995년도 중반에 분석된 1993년 ~2000년 동안의 MEMS 시장에 대한 조사 자료를 그림 10(왼쪽)에 나타내었다. 1993년에 1억 달러에도 미치지 못하던 시장규모가 2000년에는 14억 달러에 이를 것으로 전망하고 있는데, 2000년의 경우 대표적인 품목으로 압력 센서, 광 스위치, 관성 센서, 유체 관련 부품, 그리고 데이터 저장용 헤드 등을 꼽고 있다. 그림 10(오른쪽)은 1999년에 분석된 데이터로서

2003년도의 시장을 예측한 것으로 역시 바이오 및 미소 유체 관련 품목, 압력 센서, 관성 센서, 그리고 광부품들이 약 80%를 차지할 것으로 보고 있다.

MEMS 기술의 응용 품목별 시장 분석 자료를 그림 11에 보다 구체적으로 나타내었다. 현재 제품화가 정착되어 있는 품목의 경우에 대해 1996년~2002년의 시장 규모를 살펴보면, 그림 11(위)에 보인 바와 같이 정보 통신 부품인 HDD(Hard Disk Drive) 헤드와 잉크젯 프린터 헤드가 각각 1996년에는 45억 달러와 44억 달러, 2002년에는 120억 달러와 100억 달러 정도가 될 것으로 전망한다. 다음으로 바이오 및 의료용을 들 수 있으며, 심장 조절기, 진단 기구, 보청기 등이 각각 1996년의 10억 달러, 4.5억 달러, 11.5억 달러에서 2002년에는 37억 달러, 28억 달러, 20억 달러로 성장할 것이며, 이외에 센서류의 경우를 살펴보면, 1996년과 2002년에 각각 압력 센서 6억 달러와 13억 달러, 화학 센서 3억 달러와 8억 달러, 적외선



자료출처 : Univ. Michigan

그림 9. MEMS 기술 적용이 가능한 AFM용 캔틸레버 팁(위) 및 무선 통신용 부품(아래)

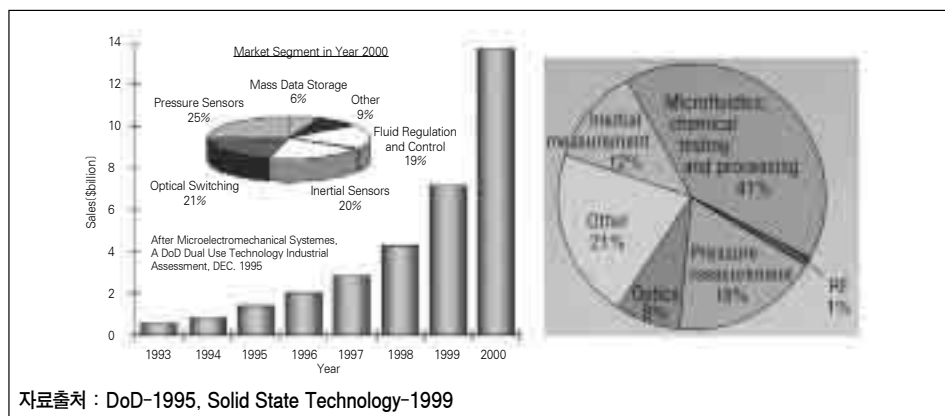


그림 10. MEMS 시장의 연도별 분석(왼쪽) 및 2003년의 예측(오른쪽)

Exiting Products				
Product	1996		2002	
	Units (millions)	Units (millions)	Units (millions)	Units (millions)
Hard disk Drive heads	530	4500	1500	12000
Inkjet printer heads	100	4400	500	1000
Heart pacemakers	0.2	1000	0.6	3700
In-vitro diagnostics	700	450	4000	2800
Hearing aids	4	1150	7	2000
Pressure sensors	115	600	309	1300
Chemical sensors	100	300	400	800
Infrared imaginers	0.01	220	0.4	800
Accelerometers	24	240	90	430
Gyroscopes	6	150	30	360
Magnetoresistive sensors	15	20	60	60
Microspectrometers	0.006	3	0.15	40
Totals		14330		3440

World market for exiting MST products.

Exiting Products				
Product	1996		2002	
	Units (millions)	Units (millions)	Units (millions)	Units (millions)
Drug delivery systems	1	10	100	1000
Optical switches	1	50	40	1000
Lap on chip(DNA, HPLC)	0	0	100	1000
Megneto optical heads	0.01	1	100	500
Projection valves	0.1	10	1	300
Coil on chip	20	10	600	100
Microrelays		0.1	50	100
Micromotors	0.1	5	2	80
Inclinometers	1	10	20	70
Injection nozzles	10	10	30	30
Anti-collision sensors	0.01	0.5	2	20
Electronic nose	0	0.1	0.05	5
Totals		107		4200

World markets for emerging MST products.

자료출처 : NEXUS-2000

그림 11. MEMS 기술을 응용한 품목들의 현재(위) 및 향후(아래) 생산 품목의 시장규모 분석

이미지 센서 2.2억 달러와 8억 달러, 가속도 센서 2.4억 달러와 4.3억 달러, 가속도 센서 1.5억 달러와 3.6억 달러, 자기 저항 센서 0.2억 달러와 0.6억 달러 등으로 예측된다. MEMS 기술 응용 품목의 전체시장규모는 1996년에는 143억 달러에서 2002년에 이르면

344억 달러로 3배에 이르는 성장세를 보일 것이다.

한편, 1996년에는 시장규모가 주로 0.1억 달러 이하이나 2002년경에 크게 성장할 품목들에 대한 조사 결과가 그림 11(아래)에 나와 있는데, 2002년도의 예상시장규모를 살펴보면 다음

과 같다. 의료, 화학 분야의 경우 DDS (Drug Delivery System)와 LOC (Lab On a Chip)가 각각 10억 달러대로 예측되며, 광을 이용한 정보통신 기기인 광 스위치, 자계 광 헤드, 프로젝션 밸브 등이 각각 10억 달러와 5억 달러, 그리고 3억 달러 정도의 시장을 가질 것으로 보여진다. 이외에 마이크로 코일, 릴레이, 모터, 주입용 노즐 등의 소형 부품류와 경사계, 비충돌용 센서, 전자 코어 등의 센서류가 총 4억 달러 정도의 시장을 확보할 것으로 보고되고 있다.

결과적으로 기존 품목과 향후 등장할 품목들의 전체시장 규모는 2003년을 기준으로 하여 약 400억 달러에 이르며, 특히 정보통신 분야, 바이오 및 의료화학 분야, 각종 센서 분야 관련 품목들이 시장을 선도할 것으로 보인다.

5. MEMS 기술의 발전 방향

기술적인 측면에서 볼 때, MEMS 기술은 지속적으로 일괄공정을 통한 집적도 향상과 비용절감을 추구할 것이다. 즉, 기존의 표준 반도체 공정에 준하는 일괄제조 라인을 구축하기 위한 노력이 배가될 것으로 보이는데, 예를 들어 그림 12에 보인 바와 같이 막의 증착 및 몸체/표면 가공의 반복, 순환 사이클을 통하여 MEMS 구조체 및 소자를 제조한 후에 기존 반도체 공정 흐름에 따라 테스트, 칩 분리, 조립 및 패키징 과정이 최적으로 이루어지는 공정 확보가 필요하다.

이러한 일괄공정 라인의 설계를 통하여 집적도의 향상을 이룰 수 있는데,

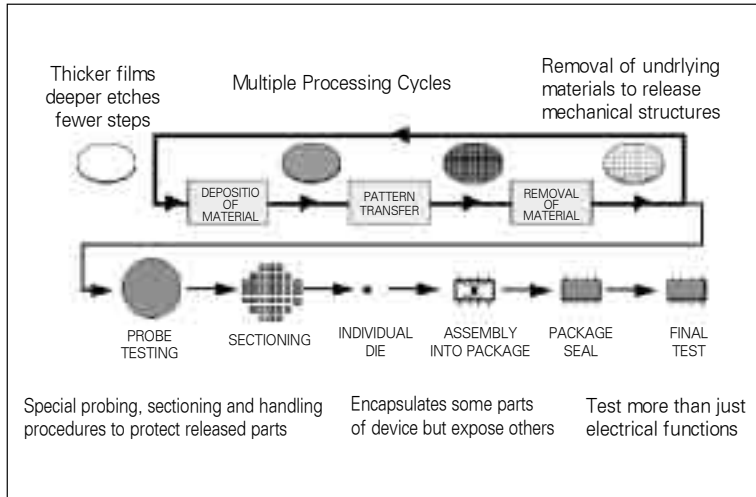


그림 12. MEMS의 일괄 제조 공정 라인의 개념도

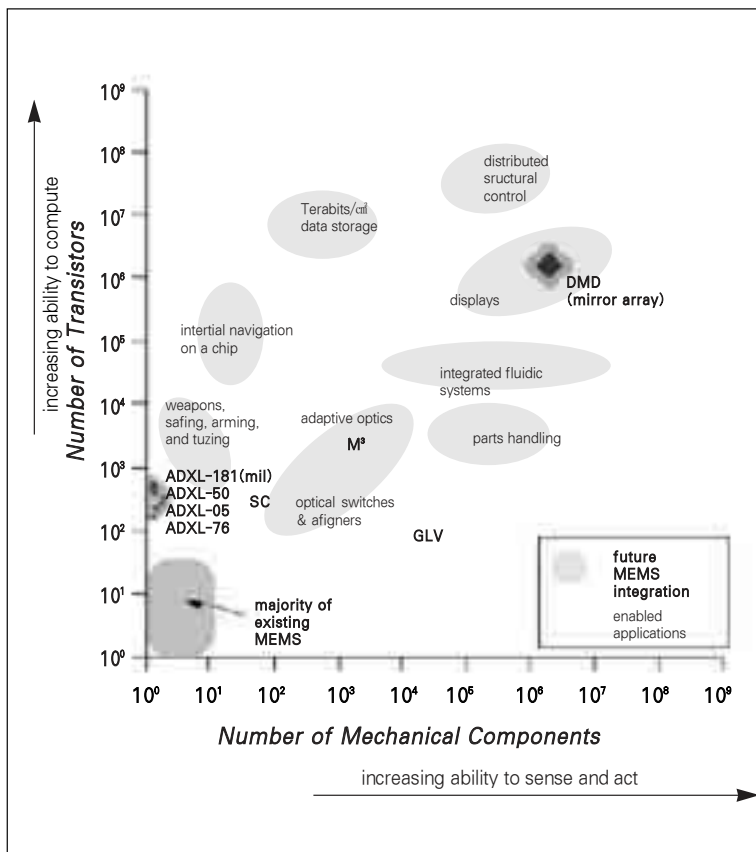


그림 13. 집적도를 토대로 한 MEMS 기술의 로드 맵

MEMS 소자 내에 기계적인 요소와 트랜지스터가 집적화되는 정도의 로드맵을 그림 13에 나타내었다. 즉, 현재 대부분의 MEMS 소자들은 101 내외의 집적도를 가지는 것에 불과하며, Texas Instruments의 DMD(Digital Micro-mirror Display) 정도가 106~107에 이르는 집적도를 보이고 있다. 이후 MEMS 집적도의 경우 광통신 부품이나 미소 유체 제어, 데이터 저장 등에 요구되는 기계적인 요소의 센싱 및 구동 기능과 집적 회로를 통한 컴퓨팅 기능이 더욱 확대 요구되면서 그 집적도도 10~100M 이상에 달할 것으로 보인다.

결과적으로 21세기의 미래형 시스템은 느끼고(센서), 기억하고(메모리 및 디스크), 전달하고(통신부품), 구동하는(액츄에이터) 기능이 동시-다차원적으로 조화를 이룰 것이며, 이러한 시스템에 더욱 복합적이고 지능적인 기능을 추가하는 것이 MEMS 기술이라 할 수 있다.

시장을 주도할 것으로 보이는 광 및 RF 등에 근거한 통신부품 분야, 미세 유체 시스템을 축으로 하는 의료, 바이오, 환경 분야, 그리고 압력 및 관성 센서가 리드하는 고기능 센서류를 비롯한 MEMS의 제반 기술 분야에 현재까지의 경험을 집중한 집약적인 전략이 마련되어야 한다. 예를 들어 전자+기계+광학 기술의 융합(Technological combination), Seed와 Need, 기술과 시스템간의 완전한 연결(Closed-loop construction), 그리고 성능-신뢰성-생산성의 최적화된 조화(Harmonic oscillation) 등이 추구되어야 할 것으로 보인다. 