

마이크로 머신으로의 초대 (I)

김 용 권*

(*서울대 공대 전기공학과 조교수)

기계의 소형화는 오랫동안 인간의 꿈이었다. 어렸을 적에 귀지를 파본 경험은 누구에게나 있을 것이다. 귀후비개를 너무 깊게 넣어서 아파했거나, 아픈 귀를 염려한 나머지 걸귀만 대강 후비다만 경험 말이다. 이럴 때 귓구멍으로 들어갈만한 작은 기계가 있어서, 그 기계에는 귀지를 찾아내는 눈과 귀지를 파서 끌어 모으는 손, 그리고 머리가 있어서 귀지의 양과 딱딱함에 따라서 적당한 힘으로 귀지를 파게 할 수 있다면 얼마나 편할까 하고 생각한 적이 있었다. 또, 위카메라로 위검사를 해 본 사람이면 위카메라와 전선을 먹는다는 것이 얼마나 고역인가를 알 것이다. 이럴 때 위카메라를 감지약 크기 정도의 캡슐로 소형화하고, 그 캡슐에 전원을 실고 촬영한 영상을 무선으로 전송할 수 있게 한다면 전선이 필요 없게 되어 식도를 자극하는 일이 없어져서 위검사의 공포 또한 사라질 것이다.

이와 같은 자기 스스로 움직이면서 간단한 동작을 명령대로 수행하는 마이크로 머신을 만드는 꿈과 같은 이야기를 현실에 한발 가까이 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 즉 IC칩을 제작하는 미세반도체 소자 제조공정으로 수십 내지는 수백미크론 크기의 기계구조물이나 모터, 액츄에이터를 실리콘 기판 위에 제작하는 것이 가능하게 되었다. 이러한 연구분야는 1980년대 중반부터 미국, 일본, 유럽등지에서 시작되었다: 이 연구분야를 IEEE에서는 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)라 부르며, 매년 2월 IEEE추최로 이에 관한 International confer-

ence가 열리고 있고, 이 분야에 대한 Journal도 1992년부터 발행하고 있다. MEMS를 미국에서는 NSF (National Science Foundation)에서, 일본에서는 통산성에서 지원하고 있으며, 현재 재료, 제작 기술, 소자(센서, 액츄에이터), 시스템, 응용, 마이크로 이공학등에 관한 연구가 진행되고 있다. 이 분야의 파급효과는 의공학이나 유전자공학 뿐만이 아니라 공학에도 매우 크리라 예상된다.

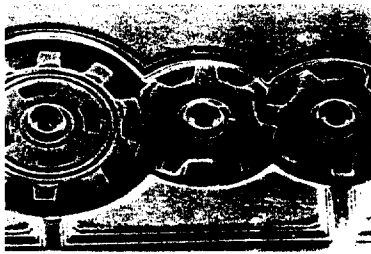
본 기술해설은 I부와 II부로 나누어서 MEMS를 소개하려고 한다. I부에서는 초창기의 대표적인 MEMS의 연구성과를 소개하고, 마이크로 머신과 MEMS의 목표와 장단점에 관하여 기술하기로 한다. II부에서는 최근의 연구동향을 살펴보기로 한다.

1. 마이크로 세계의 기계들

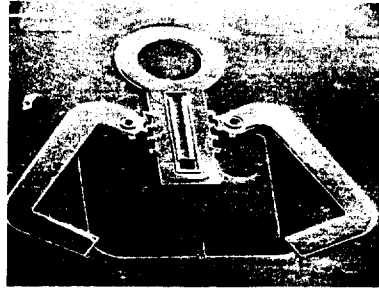
I장에서는 MEMS연구의 대표적인 몇가지를 예로 들기로 한다.

1.1 다결정 실리콘으로 만들어진 마이크로 톱니바퀴와 집게

그림1(a)는 실리콘 기판 위에 만들어진 톱니바퀴이며, 크기는 큰 톱니바퀴의 직경이 185미크론, 작은 톱니바퀴의 직경이 125미크론이다. 인간의 머리 카락 단면의 직경이 대개 100미크론 정도이므로 이 톱니바퀴의 크기가 짐작될 것이다. 육안으로는 거의



(a)



(b)

그림 1. 다결정 실리콘으로 만들어진 마이크로 톱니바퀴와 집게

- (a) 다결정 실리콘으로 만들어진 직경 125-185미크론, 두께 4미크론인 톱니바퀴.
- (b) 초소형 집게. 집게는 최대 400미크론까지 열릴 수 있다.

보이지 않는 크기이다. 재료는 다결정 실리콘 박막으로 두께는 2-3미크론이다. 이 톱니바퀴는 반도체 소자를 제조하는 공정과 같은 공정으로 만들어졌다. 반도체소자 제조공정으로 기계를 제작하면 일괄공정으로 대량으로 만들 수 있을 뿐만 아니라, 사전조립(Pre-assembly) 상태이므로 육안으로 보이지 않는 톱니바퀴를 측에 끼워 조립하려고 애를 쓰지 않아도 된다. 제작공정에 대해서는 2장에 자세히 기술하기로 한다.

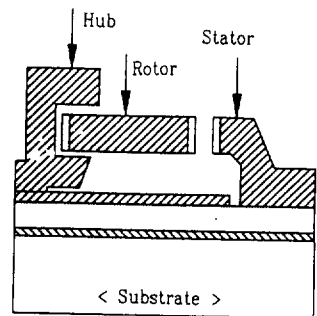
그림1(b)는 크기가 400미크론 정도인 마이크로 집게이다. 위의 동그란 손잡이를 위아래로 움직이면 맞물린 톱니에 의해서 열리고 닫히게 된다. 이것들은 1987년에 AT&T Bell연구소에서 제작된 것이다 [1].

1.2 정전 마이크로 모터

그림2(a)는 직경이 120미크론인 정전마이크로모터를 보이고 있다. 재료는 다결정 실리콘으로 두께는 2미크론이다. 십자와 같이 보이는 것이 회전자이고, 중심축의 주위를 회전할 수 있다. 고정자는 그 주위에 방사상 모양으로 놓여져 있고, 12개의 전극으로 구성된다. 고정자와 회전자 사이에 전압을 가해 회전자를 고정자쪽으로 잡아당기면서 회전시킨다. 그림2(b)는 모터의 단면을 보이고 있다. 회전자는 중심축의 홈에 들어가 있어서 기판과 접촉하지 않도록 되어 있다. 고정자의 전극높이는 회전자의 높이와 같거나 또는 약간 높게 하여 회전자가 아래방향으로 당겨지지 않도록 하고 있다. 회전자가 아래 방



(a)



- ▨ : polysilicon
- : silicon nitride
- ▩ : silicon dioxide

(b)

그림 2. 정전 마이크로 모터

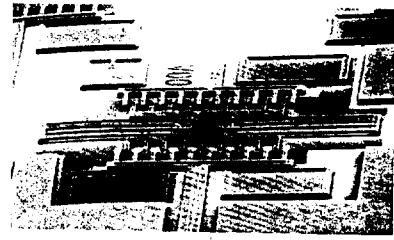
- (a) 다결정 실리콘으로 만들어진 직경 120미크론의 정전 마이크로 모터(두께 2미크론).
- (b) 정전 마이크로 모터의 단면 모식도(중심축의 좌측 단면).

향으로 당겨지면 마찰력이 더욱 커지게 되어 회전자의 회전을 방해하게 된다. 회전자의 구조물은 질화실리콘(Si_3N_4)의 막을 입혀서 마찰을 줄이도록 배려했다. 회전자와 고정자의 간극은 2 μm 이고 여기에 60-400V의 전압을 가했다. 회전자와 고정자의 각상에 순차적으로 전압을 가해서 연속적으로 회전을 시킨다. 인가전압 200V에 150rpm의 회전속도가 얻어졌는데, 이것은 계산값의 천분의 일에 상당하며, 이 원인은 마찰의 영향이라고 여겨지고 있다. 이것은 1988년에 University of California at Berkeley에서 제작된 것이다[2].

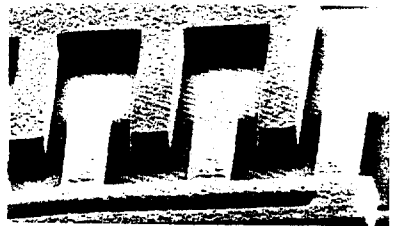
1.3 머리빗 모양의 정전진동자

그림 3은 기판표면과 수평한 면내방향으로 움직일 수 있으며, 정전력으로 구동되는 진동자이다. 이 구조의 특징은 마찰을 없애기 위하여 가동부분을 스프링 역할을 하는 탄성변형이 가능한 구조로 지지하고 있다는 점이다. 탄성변형이 가능한 구조물로 고정부분과 가동부분을 연결하여 마찰을 줄이는 방법은 1970년대부터 이용되어져 왔다. 그러나, 이제까지는 기판과 수직방향의 움직임을 이용하는 것으로서, 단점은 동작범위가 제한되어 있고, 공기등의 저항이 크고, 움직임을 다른 부품에 전달하는 것이 어려웠다는 점이다.

이에 반하여 그림 3과 같은 구조로 이런 문제를 해결할 수 있다. 그림3의 구조와 동작원리를 설명하면 탄성변형하는 지지부는 4개의 긴 봉(길이 약 100 μm)으로 구성된다. 안쪽 두개의 봉이 한쪽 끝은 기판에 고정되어 있고, 다른 끝은 짧은 봉에 연결된다. 이 짧은 봉은 바깥쪽 두개의 긴 봉에 다시 연결된다. 이 바깥쪽의 두개의 봉은 다른 끝이 머리빗 모양의 가동부분에 연결되어 진동자를 지지해준다. 진동자와 고정자의 머리빗의 이빨은 그림3(b)와 같이 서로 맞물려 있다. 이빨의 높이는 2 μm , 폭은 3 μm , 이빨 사이의 간극은 2 μm 이다. 진동자와 고정자 사이에 전압을 인가하면 진동자의 이빨이 고정자의 이빨 사이로 들어가려고 하는 힘이 발생해서 진동자는 직선운동(그림3(b)에서는 상하방향)을 하게 된다. 40V의 직류전압에 10V의 교류전압을 중첩해서 인가해서 가동부를 공진시켰다. 지지하는 긴 봉의 길이가 80 μm 일 때 공진주파수는 75kHz,



(a)



(b)

그림 3. 머리빗 모양의 정전 진동자

- (a) 지지봉의 길이가 100 μm 인 정전 진동자.
- (b) 머리빗의 이빨부분의 확대사진.
(이빨의 높이 : 2 μm , 폭 : 3 μm , 이빨사이의 간극 : 2 μm)

봉의 길이가 200 μm 일 때 공진주파수가 18kHz가 얻어졌다. 이러한 진동자는 진동자에 가해지는 장력이나 진동자의 표면에 부착하는 물질의 질량등에 따라 공진주파수가 변하게 되므로 진동형 센서로 쓸 수 있으며, 기계적 기구에 의해서 한방향으로 움직임을 얻어내는 액츄에이터로 쓸 수도 있다. 이것은 1988년 University of California at Berkeley에서 제작되었다[3].

2. 마이크로 머시닝(Micro machining)

마이크로 머신을 제작하는 방법은 표1과 같이 크게는 실리콘을 재료로 할 경우의 제작방법과 실리콘을 재료로 하지 않을 경우의 제작방법으로 나뉘어진다[4]. 여기서는 실리콘 마이크로 머시닝에 대해서 설명하기로 한다. Bulk micro machining은 실리콘의 결정방향에 따른 녹는(에칭) 속도의 차를 이용한 것이다. 예를 들어 KOH수용액에 대해서 실리콘의 (001)면은 (111)면에 비해서 400배나 빨리 녹는다.

표 1. 마이크로 머시닝의 분류

- (1) Silicon micro machining
 - (a) Bulk micro machining ; Different etching rate(Ex. (001), (111))
 - (b) Surface micro machining ; Deposition, etching and sacrificial layer
- (2) Non-silicon micro machining
 - (a) LIGA process(Lithographie, Galvanoformung, Abformung)
 - (b) Molding (c) Plating
 - (d) Single-point diamond machining
 - (e) Electro-discharge machining (EDM)

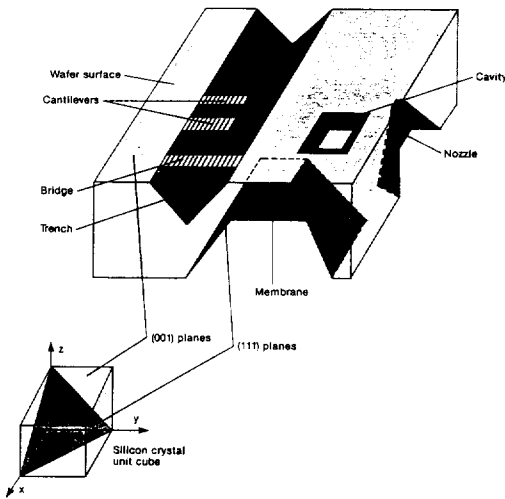


그림 4. Bulk micro machining에 의해 제작된 구조물의 예.

이 설질을 이용해서 실리콘 기판에 보호막(resister)을 입히고, 적당한 패턴의 창문을 만들면(즉, 보호막을 부분부분 벗겨내면), 그림4와 같이 Cantilever, Bridge, Nozzle등이 만들어진다. 이와 같이 Bulk micro machining은 실리콘 기판 자체를 가공하기 때문에 불허진 이름이다.

이와는 달리 Surface micro machining은 실리콘 기판 위에 다결정실리콘이나 질화실리콘, 산화실리콘 등의 박막을 입히고 이것을 에칭하고, 또 희생층을 녹여내서 구조물이 움직일 수 있도록 한다. 그림 5는 정전 마이크로 모터를 제작하는 간단한 예를 보이고 있다[2]. 다결정실리콘은 회전자 또는 고정자,

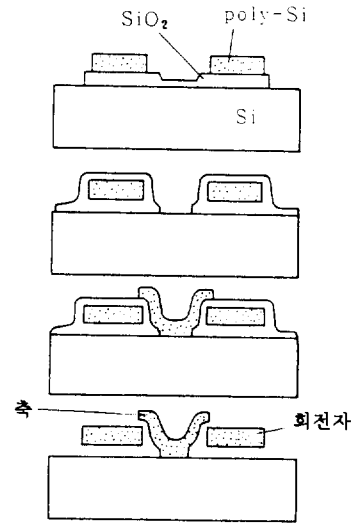


그림 5. Surface micro machining에 의한 정전모터의 제작순서.

축등의 구조물이 되고, SiO₂는 희생층이 된다. 기판 위에 SiO₂막과 다결정실리콘막을 원하는 패턴으로 교대로 입힌다. 이런 다음 구조물층인 다결정실리콘막을 남기기 위하여 SiO₂만이 에칭이 되는 용액으로 에칭하면 다결정실리콘층 사이에 있던 SiO₂가 녹게 되어 그것은 빈 공간이 되어 버린다. 즉, 회전자가 축 주위를 자유로이 돌 수 있게 되어 회전자를 축에 끼워 넣는 조립과정이 필요없게 된다. 이러한 Pre-assembly(사전에 조립된 상태)가 Surface micro machining의 생산성을 높이는 점이다.

또, Silicon micro machining에서는 Photo lithography라는 기술을 이용해서 한꺼번에 다수의 부품을 만들 수 있다. 따라서, Silicon micro machining은 다음과 같은 장점을 갖고 있다. (1) Pre-assembly 가공이 가능해서 조립이나 조정하지 않고 곧바로 완성된 시스템이 얻어지며, (2) 복잡한 시스템이라 할지라도 Photo lithography를 이용해서 일괄적으로 대량생산이 가능하며, (3) 반도체소자 제조공정과 같은 공정에 의해서 만들어지므로 센서나 마이크로 프로세서를 같은 실리콘 기판 위에 함께 만들어서 집적화와 지능화를 이룰 수 있다.

Non-silicon micro machining 중에서 LIGA process와 Micro EDM(Electro-discharge machining)에 대해서는 2부에서 기술하기로 한다.

3. MEMS란

3.1 마이크로 로봇과 매크로 로봇

그림6은 종래의 큰 로봇과 미래의 마이크로 로봇을 회화적으로 그려놓은 것이다[5]. (a)의 큰 로봇은 일반적으로 작은 물체를 움직이는 데에도 큰 액츄에이터가 필요하다. 큰 액츄에이터가 필요한 이유는 손가락이나 팔꿈치 등에 모터(액츄에이터)가 장착되어 있고 이 모두를 어깨로 움직여야 하기 때문에 눈덩이가 불듯이 무겁게 되어 버리기 때문이다. 또 모터를 지지하는 부재가 대부분 금속이므로 이것이 무겁기 때문에 많은 에너지를 필요로 하게 된다. 그에 비해서 (b)와 같은 마이크로 로봇이 만들어졌다고 하자. 이것은 운반하는 물체나 조작하려는 대상물의 크기 정도로 소형화시킨 것으로 작은 대상물은 작은 기계로 다루자는 것이다. 이 마이크로 로봇에는 작은 팔과 다리를 움직이는 액츄에이터와 작업환경이나 마이크로 로봇 서로의 모습을 알기 위한 센서부분, 작은 두뇌에 해당하는 마이크로 프로세서가 들어가 있다. 이것을 시스템으로서 만드는 것이 MEMS의 목표이다.

한가지 더 주의할 것은 마이크로 로봇 한대씩 독립적으로 움직이는 것이 아니라 몇대가 상호협조를 하면서 작업하는 것이 중요하다. 예를 들면 개미 한마리로는 대단한 일을 할 수 없지만 많이 모여서 일을 하면 커다란 먹이를 운반하거나 매우 복잡한 개미굴도 만들 수 있는 것과 마찬가지로이다. 이런 협

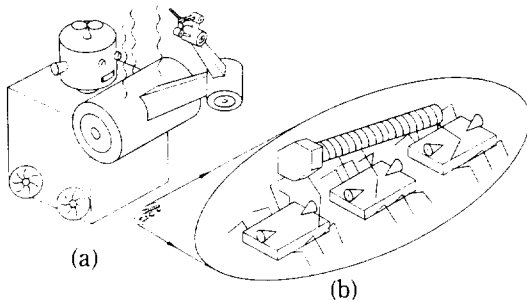


그림 6. 똑같은 크기의 나사를 운반하는 매크로 로봇과 마이크로 로봇

- (a) 매크로 로봇
- (b) 마이크로 로봇

표 2. 매크로 로봇과 마이크로 로봇의 비교

	인조인간 (산업용 지능 로봇)	인조개미 (마이크로 로봇)
지능	고도의 지능 (하드웨어, 소프트웨어가 복잡하다)	본능 (하드웨어, 소프트웨어가 간단하다)
대상물	수mm-1m	수십 μ m-1cm
작업	단독	협동
좁고 꾸불꾸불한 곳에서의 작업	불가능	가능
발생력	크다	작다
가격	비싸다	싸다

조작업 또한 MEMS의 장래의 목표이기도 하다. 표2는 큰 로봇과 작은 로봇을 비교하고 있다. 대상의 크기, 지능의 수준, 작업의 형태가 다르다는 것을 보이고 있다.

3.2 기계의 소형화

그림7은 MEMS가 어느 정도의 크기를 목표로 하고 있는가를 보이고 있다. 세로축은 장치전체의 크기이고, 가로축은 장치가 움직이는 최소분해능이다. 종래의 기계는 얼마만큼 정밀하게 움직일 것인가 하는 방향으로 연구되어져 왔다. 그 예로써 주사형 터널현미경(STM, Scanning Tunneling Microscope)이나 원자간 힘현미경(AFM, Atomic Force Microscope)의 장치[6]에는 원자크기를 측정할 수 있도록 매우 뾰족한 탐침이 장착되어 있고, 이것을 시료표면에 가까이하여 0.01nm 혹은 0.001nm이라는 움직임을 하면서 표면형상이나 원자의 배열을 조사한다. 이 장치의 크기는 약 10cm 정도다. 더우기 초정밀 선반이나 반도체소자제조시 쓰이는 Stepper 등의 분해능은 마이크론 이하이지만 기기의 크기는 1m정도이다. 이와 같이 종래의 기계의 연구방향은 움직임이 매우 정밀하게 하려는 방향이었다.

이에 비하여 MEMS분야에서는 기계자체를 소형화하는 기구의 초소형화라고 하는 그림7의 아래방향으로의 연구가 진행되고 있다. 초소형화 연구라해도

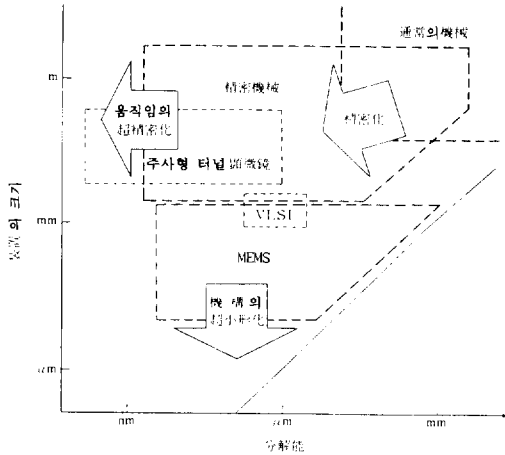


그림 7. MEMS의 초소형화 연구방향과 종래 기계의 움직임의 초정밀화 연구방향의 비교

그림7에서 알 수 있듯이 밀리미터에서 마이크로이하까지 범위가 넓고, 이들의 크기는 응용분야 및 대상물에 따라 결정되며, 또 크기에 따라 가공기술, 소재, 구동방식이 다르게 된다.

3.3 MEMS의 분류

표 3. MEMS의 특징, 제작기술 및 응용을 크기에 따라 나눈 분류

	마이크로 시스템	밀리 시스템	나노 시스템
크기	1-100마이크론	0.1-1밀리미터	1마이크론 이하
구조	평면적	입체적	분자구조
소재	실리콘, 박막재료	금속, 고분자	고분자(단백질)
가공	집적회로소자 제조공정	극한정밀가공	(분자, 원자조작)
조립	일괄공정	조립	자기조직화
구동	정전력, 열팽창, 초전도	압전, 초소형모터, 형상기억합금	인공근육, 정전력
힘의 도출	곤란	비교적 용이	곤란
연구단계	소자의 시험제작	시스템 개발	기초 연구
응용의 가능성	혈관내의 검사, 환부로의 약물 투여, 개별세포조작, 주사형터널현미경의 헤드	집적회로조작, 광/자기기록장치의 헤드, 극소형 수술장치의 손	극한 계측, 분자, 원자조작

MEMS의 크기, 제작에 쓰여지는 기술 및 응용등을 표3에 정리했다. 수밀리미터로부터 수백마이크론까지의 영역(밀리시스템)에서는 대개 종래의 기계를 기하학적으로 미소화시킨 것이 많으며, 수십나노미터 이하의 영역에서의 기계는 분자의 형상, 구조등에 의해서 모양이 정해질 것이다. 중간의 일미크론으로부터 백마이크론까지의 영역에서는 집적회로소자용 미세가공기술을 이용해서 마이크로 시스템을 제작할 수 있다.

마이크로 시스템은 집적회로소자 제조공정에 의해서 만들어지므로 2차원의 평면적 구조를 주로 갖게 되며, 실리콘이나 박막재료를 주로 사용하게 된다. 또, 2장에서 기술했듯이 Silicon micro msching을 사용하면 Pre-assembly가 가능하므로 조립이 필요 없고, Photo lithography에 의해서 값싸게 대량생산이 가능하다. 구동력으로는 정전력이나 압전현상, 열팽창 등이 많이 이용되고 있다.

이에 비하여 밀리 시스템은 종래의 기계적 가공법에 의해서 제작되며, 따라서 입체적구조를 가질 수 있으며, 재료도 금속이나 고분자이다. 이 경우의 어려운 점은 초소형으로 기계부품을 제작하더라도 이것을 조립하는 것이 어렵다는 것이다. 이는 바늘구멍에 실을 꿰는 것과 같은 공정이 필요하다는 것

을 의미한다. 나노시스템에 관한 현재의 연구상황은 생물의 운동기구를 이학적으로 해석하는 단계이어서 공학적 실현에 대해서는 아직 이렇다할 제안이 없다.

3.4 소형화에 따른 문제점

이제까지 작은 기계를 만들려고 하는 시도가 몇 번 있었지만 실패로 끝난 이유는 우리 주위의 기계의 축소판을 만들려고 했기 때문에 다음과 같은 장벽에 부딪히곤 했다.

(1) Scaling law의 장벽이 있었다. 물체의 크기를 작게 하면 운동방정식 자체는 크게 변하지 않지만 지배적인 항과 무시되는 항이 다르게 된다. 즉, 마크로 세계에서는 길이의 제곱에 비례하는 항(무게, 관성등)이 중요하지만, 마이크로 세계에서는 길이의 제곱에 비례하는 항(방열, 표면마찰등)이 중요하게 된다. 관성등의 영향이 큰 마크로 세계에서 성능이 좋도록 설계된 기계를 그대로 소형화하면 성능이 떨어지는 이유가 여기에 있다. 따라서, Scaling law를 고려하여 소형화에 적합한 원리를 이용하여야 한다.

(2) 부품조립생산의 장벽이 있었다. 부품 하나하나를 소형으로 정밀하게 만들었다하더라도 이것을 조립해서 완성시키려면 만드는 것 이상의 노력이 필요하게 된다. 이는 생산가 상승의 요인이 되어 상품으로서의 가치를 잃게 된다. 이런 장벽은 2장에서 언급한 마이크로 머시닝에 의해서 넘을 수 있다.

(3) 정보교환의 장벽이 있었다. 기계를 제어하는 정보의 검출과 처리를 위해서 센서나 컴퓨터를 접속해야 하는데 그 배선이 기계 자체와 같은 정도로 크게 되어버린다는 것이다. 특히 다수의 소형기계를 좁은 곳에 집중해서 쓰려고 할 때에는 큰 문제가 된다. 이 문제의 해결방안으로써 정보처리계를 계층화하고 국소적인 제어계와 정보처리계를 마이크로 모듈안에 만들면 중앙컴퓨터(마크로세계)로의 통신선과 통신량을 대폭 줄일 수 있다. 이 국소적인 정보처리계의 능력을 높여가면 소위 자율분산시스템이 구성된다.

4. MEMS에 거는 기대

MEMS에 기대되는 것은 크게 3가지로 나뉘어진

다.

(1) 작다는 점을 이용하는 것이다. 위카메라나 혈관에 넣는 튜브등의 끝에 움직이는 작은 손이나 카메라, 센서등을 장착하면 치료는 매우 수월해질 것이다. 또 수 내지 수백 마이크론 크기의 세포를 다루는 유전자공학에서 세포 하나하나에 DNA를 넣는다는 등 두개의 세포를 융합시킨다든지 할 때에 작은 기계들이 필요하게 된다.

(2) 다수의 미세한 요소가 고밀도로 집중한 고성능의 기계가 만들어진다는 것이다. 인간의 근육은 가늘은 filament가 많이 모여서 이루어져 있다. 즉, 인간의 근육은 하나의 액츄에이터로서 작용하지만, 내부적으로는 분자수준의 힘을 내는 기구가 많이 모여 있는 것이다. 이것을 흉내내어 미세한 힘을 발생하는 액츄에이터를 많이 적층한다든지 집적화하므로써 매우 고성능의 액츄에이터를 만들 수 있다.

(3) 집적화된 마이크로 모듈과 그것을 모아서 자율 분산시스템을 만들 수 있다는 점이다. 그림8과 같이 센서, 전자회로, 액츄에이터를 같은 실리콘 기판 위에 집적화한 마이크로 모듈을 만들면 낮은 수준의 제어와 정보처리를 현장에서 수행할 수 있다는 점이다. 또 다수의 마이크로 모듈이 각각 자신이 판단을 하면서 서로 협조해서 하나의 일을 하는 자율분산시스템이 가능하며, 예를 들어 바다에 유출된 원유와 같이 넓은 범위에 분산된 대상을 다수의 마이크로머신을 이용해서 다룰 수 있다.

MEMS에 대한 이야기는 무지개를 보는 듯한 한편으로는 뜬 구름을 잡는 듯한 인상을 주리라 여겨진다. 이것은 MEMS가 목표로 하는 것이 현실세계에

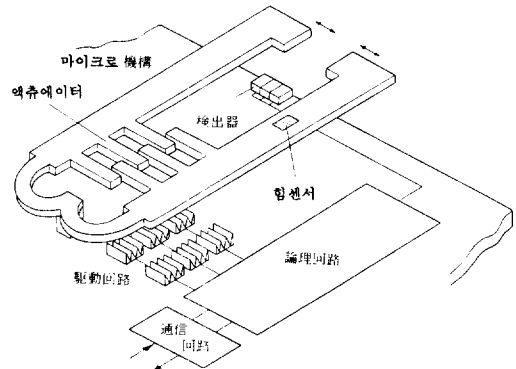


그림 8. 집적화 마이크로 모듈의 개념도(한가지 예)

서 접하지 못한 것들이기 때문이기도 하고, 구체적인 실현방법이나 응용례를 현단계의 MEMS에 대한 연구가 아직 제시하고 있지 못하기 때문일 것이다. MEMS에 대한 연구, 특히 마이크로 액츄에이터에 관한 연구와 시스템에 관한 연구는 시작된 지 십년이 채 안되었지만, 매년 괄목할만한 연구성과들이 보고되고 있으며, 일본의 통산성에서 지원을 시작해서 응용에 밀접한 연구성과가 많이 기대된다.

이러한 MEMS의 요소기술에 대한 구체적인 연구 성과에 대해서는 2부에서 기술하기로 한다.

참 고 문 헌

(1) M. Mehregany, K. J. Gabriel and W. S. N. Trimmer, "Integrated fabrication of polysilicon mechanisms." IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 35, No.6, 719-723(1988).

(2) Y.-C.Tai and R.S. Muller, "IC-processed electrostatic synchronous micromotors," Sensors and Actuators, Vol.20, Nos 1&2, 49-55(1989).

(3) W.C.Tang, T. -H. Nguyen and R. T. Howe, "Laterally driven polysilicon resonant microstructures," Sensors and Actuators, Vol.20, Nos 1&2, 25-32(1989).

(4) R.T. Howe, R.S. Muller, K.J. Gabriel and W.S.N. Trimmer, "Silicon micromechanics: sensors and

actuators on a chip." IEEE Spectrum, July, pp. 29-35(1990).

(5) 藤田 博之(후지타 히로유키), 마이크로마신의 세계(마이크로 머신의 세계), 工業調査會, 東京, 1992.

(6) 朝倉 健太郎(아사쿠라 켄타로우), 顯微鏡のおはなし(현미경이야기), 日本規格協會, 東京, 1991.

(7) 原島 文雄(하라시마 후미오), 江刺 正喜(에사시 마사요시), 藤田 博之(후지타 히로유키)編, 마이크로知能化運動システム(마이크로지능화운동 시스템), 日刊工業新聞社, 東京, 1991.



김용권(金容權)

1960년 10월 23일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동경대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990년-1992년 히타치제작소 중앙연구소(동경) 근무. 현재 서울대학교 공과대학 전기공학과 조교수로 재직. 관심분야: 전기기계중에서 MEMS와 초전도, 압전재료등의 소재를 이용한 소형 액츄에이터