

미소기전집적시스템에서의 미소기계공학

(기술특성, 응용제품, 관련 연구분야 및 기술과제)

조 영 호

Micro Mechanical Engineering in Micro Electro Mechanical Systems

Young-Ho Cho



- 조영호 (한국과학기술원 기계기술연구소)
- 1957년생.
- 마이크로머신의 설계 및 제작을 전공하였으며, 미세현상의 측정과 이해, 반도체 집적센서와 마이크로 액츄에이터를 기반으로 한 미소감응시스템 및 마이크로메카트로닉스 응용제품개발에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

최 근 반도체 집적회로 제조기술(IC micro-electronic fabrication technology)을 응용한 미소기계 제작이 가능케 됨에 따라, 마이크로미터 크기의 미소 기계요소와 이들의 작동에 필요한 집적회로를 하나의 칩(chip)으로 일체화시킨-이른바 미소기전집적시스템(MEMS: micro electro mechanical systems) 형태의 마이크로머신(micromachine)이 등장하게 되었다. 이러한 '기전집적' 형태의 마이크로머신은 '기전집속' 형태를 취하고 있는 기존의 기계-전자 복합시스템과 비교할 때, 기계 요소의 크기뿐만 아니라 기하학적 형상, 사용재료, 제작방식 등이 다르며 때로는 기계요소의 동작원리 자체의 변화를 요하기도 한다.

이 글에서는 이와 같은 마이크로머신 특성을 응용한 제품들과 이에 내포된 기반기술 및 관련 연구분야를 소개하고자 한다.

먼저 세부기술과 연구과제를 언급하기에 앞서, 마이크로머신 기술의 배경과 특성을 소개하고, 기존 기술들과의 비교·연계를 통해 기술 공간상에서의 마이크로머신 기술의 좌표를 제시하고자 한다.

그 이후 본론에 들어가서, 마이크로머신 관련기술 및 연구분야를 다음과 같이 크게 두 가지 관점에서 정리하여 소개한다. 먼저 산업분야별 응용제품 및 기술적용 예를 통하여 '제품기술' 관점에서 마이크로머신 기술을 조명한 후, 이러한 제품기술의 근간이 되는 연구 분야별 관련기술의 소개를 통하여 '기반기술' 측면에서 마이크로머신기술을 정리하고자 한다. 특히 후반부 마이크로머신 기반 기술부문에서는 마이크로머신의 설계, 해석, 제작과 관련된 기술과제 중 비교적 기계공학분야와 연관이 있는 부분을 중점적으로 다루었다. 끝으로, 제품 기술로서의 마이크로머신기술의 현황 기술로서의 당면 과제를 조명하고, 관련기술의 성숙요건을 제시해 본다.

2. 기술배경 및 개요

기전집적형태의 마이크로머신에 관한 연구는 1980년대 초반 집적회로 제조기술을 기반으로 한 미소 기계구조물 가공⁽¹⁾을 효시로 하여, 1980년대 중반에 다양한 미소기계요소 가공기술⁽²⁾로 발전하면서부터 본격화되었다. 'MEMS' 혹은 '마이크로머신'이라는 용어는 80년대 중반경부터 사용되기 시작하였고, 현재 관련학계에서 일반적으로 통용되는 공식 용어로 정착된 상태이다. 이 분야의 관련기술을 지칭하는 용어로서는 미국의 경우 마이크로 일렉트로 메커닉스(microelectromechanics) 혹은 마이크로다이내믹스(microdynamics), 일본의 경우 마이크로메카트로닉스(micromechatronics) 등이 사용되고 있으나, 이 글에서는 단순히 마이크로머신 기술(micromachine technology)이라 칭하기로 한다.

마이크로머신이라는 용어가 생겨나고 이 분야의 연구가 본격화된 이래, 마이크로머신 기술은 폭넓은 산업분야에 걸친 다양한 응용 예를 통하여 제품기술로서의 가능성을 보이기 시작하였고, 이에 대한 기술 선진국의 관심이 급속히 고조되었다. 마이크로머신의 효시를 이룬 미국의 경우, 산업계, 학계, 연구계의 전문가들이 과학기술 전반에 걸친 기술 분석을 통해 백악관에 보고한 바 있는 표 1의 '향후 10년을 선도할 미국의 10대 핵심기술' 중 마이크로머신 기술과 집적회로 제작 기술 등 관련기술 두 가지가 포함되어 있으며, 미국기계학회(ASME)가 조사·발표한 표 2의 '2000년대 미국의 주요 기계기술'에서도 제조분야 중 MEMS 제작기술을 들고 있다.

이외 참고문헌 (5)의 부록에서 소개한 바와 같이, 미국, 일본, 독일 등에서 마이크로머신에 관한 장기 대형 연구 프로그램이 진행되고 있는데, 미국의 경우 1986년부터 과

표 1 향후 10년을 선도할 미국의 10대 핵심 기술⁽³⁾

기술분야	기술 개발 대상
마이크로머신 병렬 연산	마이크로모터 테라프롭(teraflop) 슈퍼컴퓨터
유전 공학 초 전도체	유전자 설계
디지털 영상 마이크로 일렉트로닉스	HDTV 마이크로 가공
에너지 통신망 신소재	태양 에너지 광섬유 케이블 세라믹
소프트웨어	객체지향 프로그래밍

표 2 2000년대 미국의 핵심 기계기술⁽⁴⁾

분 야	기 술
제 조	생산공정 MEMS
재 료	복합 재료 지능 재료 구조 설계 비파괴 검사
에너지	전기 발전 전기 충전 수송

학재단(NSF) 주도로, 일본의 경우 1991년부터 통산성주도로, 독일의 경우 1991년부터 연방 연구기술부(ministry for reasearch and technology) 주도로 각각 마이크로머신 기술개발 프로그램을 추진해 오고 있다.

여기서 최근 기술선진국에서 마이크로머신에 대한 관심이 고조되고 있는 이유가 무엇인가라는 의문이 생긴다. 이 질문에 답하기 위해서는 마이크로머신 기술과 기존의 마이크로 일렉트로닉스 기술 및 메카트로닉스 기술과의 비교를 통하여 마이크로머신 기술의

표 3 2대 기술 혁명의 비교

	산업 혁명	일렉트로닉스 혁명
발생 시기	18세기말~19세기	20세기
기본 소재	철	실리콘
기술 원동력	제련술 및 기계제작 기술	반도체 미세가공기술
성장 산업	기계 공업	전자 산업
대표적 제품	방직기	집적회로
제품 성능 기준	강도 대 무게비	속도 대 전력소모비

배경과 특성을 추적해 볼 필요가 있다.

2.1 마이크로 일렉트로닉스 기술

근래 제품의 경박단소화 경향은 주지의 사실이다. 이러한 제품의 발전 경향은 제품의 소형화, 경량화뿐만 아니라 기능, 속도, 신뢰도, 수명, 전력소모 측면에서의 성능향상과 가격의 저렴화에서 기인하며, 마이크로 일렉트로닉스 기술이 이러한 제품기술, 즉 마이크로머신 기술과 마이크로일렉트로닉스 기술, 혁신의 원동력이 되어왔다.

마이크로머신 기술을 이해하기 위해서는 우선 20세기 전자혁명을 주도한 마이크로 일렉트로닉스 기술에 대한 이해(표 3참조)가 필수적으로 요구된다. 왜냐하면 두 기술 모두 반도체 집적회로 제조 기술에 근간을 두고 있기 때문이다.

먼저, 마이크로 일렉트로닉스의 발전 과정을 살펴보자. 1940년대 말 반도체 트랜지스터의 발명으로 근 50 여 년간 전자산업의 핵심요소로서 자리를 유지해오던 진공관을 퇴진시킨 이래, 마이크로 일렉트로닉스 기술은 다음과 같이 크게 세 가지 단계의 제작방식의 변화를 거쳐 발전해왔다.

1) 후막접속(thick-film hybrid) 방식

그림 1에서 보는 바와 같이 우선 기판 위에 후막(thick-film) 형태의 도선과 저항체를 인쇄(screen printing)한 후, 별도로 제작한 트랜지스터, 다이오우드 등을 납땜으로 접속하여 회로를 완성한 방식.

2) 박막접속(thin-film hybrid) 방식

그림 2에서 보는 바와 같이, 기판위에 박막(thin-film) 형태의 도선과 저항체를 형성(deposition)하여 식각(photoengraving)한 후, 별도로 제작한 전자요소(capacitor, inductor 등)를 와이어 본딩(wire bonding)으로 접속하여 회로를 완성한 방식.

3) 일석집적(monolithic integrated) 방식

그림 3에서 보는 바와 같이 도선, 저항체

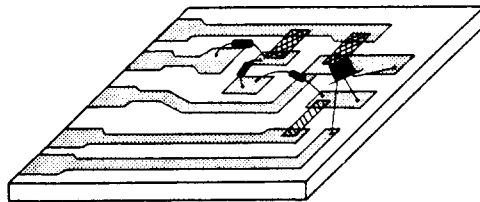


그림 1 후막접속(thick-film hybrid) 회로

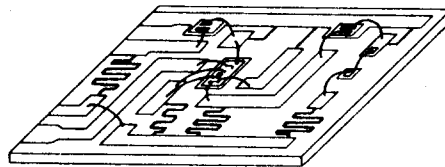


그림 2 박막접속(thin-film hybrid) 회로

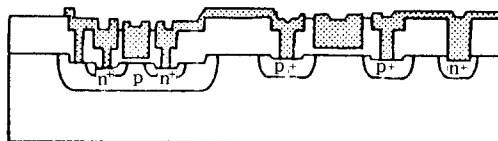


그림 3 일석집적(monolithic integrated) 회로

뿐만 아니라 Bipolar, CMOS(complementary metal-oxide-semiconductor) 등 모든 전자요소를 하나의 칩상에 집적제작한 방식.

이러한 마이크로 일렉트로닉스 기술은 60년대 SSI(small-scaled integration) 시대에서 90년대 VLSI(very large-scaled integration) 시대로 발전하면서 전자회로의 집적도(단위 면적당 소자수), 동작속도, 소자당 가격면에서 모두 최소한 1000배 이상의 향상을 가져왔다.

2.2 메카트로닉스 기술

메카트로닉스 기술과 마이크로 메카트로닉스 기술(즉 기전집적 마이크로머신 기술) 모두 외형적으로는 기계-전자 복합시스템을 대상으로 한다는 공통점이 있지만, 실제 두 기술이 대상으로 하는 기전복합 시스템의 형태가 다를 뿐만 아니라 기술의 배경 및 내용면에서도 상당한 차이가 있다.

우선 메카트로닉스 기술을 대상으로 하는 기전 복합시스템은 각각 상이한 제조기술로 별도 제작된 기계요소와 전자요소를 전선으로 연결하여 구성한 이른바 기전 '접속(connected)' 형태인 반면, 마이크로 메카트로닉스 기술이 추구하는 기전 복합시스템은 기계요소와 전자요소를 동일한(compatible) 제조기술(즉, 집적회로 제조기술)로 가공하여 하나의 칩상에서 일체화시킨, 이른바 기전 '집적(integrated)' 형태이다.

메카트로닉스 기술과 마이크로 메카트로닉스 기술은 기계요소의 제작기술이 서로 다르다는 것 이외 기계요소의 크기, 형태, 동작 특성, 재료 등의 차이로 인해 설계, 해석 관련 기술의 차이를 초래한다.

2.3 마이크로머신 기술

최근 마이크로머신에 관한 관심이 고조되고 있는 이유 중의 하나는 앞서 소개한 전자시스템의 발전(그림 1~3)과정을 통하여 기계-전자 복합시스템의 발전과정을 유추하기

때문이다. 즉 전자시스템이 후막 접속형태(그림 1)에서 박막접속형태(그림 2)를 거쳐 일석집적형태(그림 3)로 발전하였듯이, 기계-전자 복합시스템 또한 기존의 기전접속 형태에서 기전집적 형태로 발전할 것이라 전망하고 있다. 또한 마이크로 머신 기술은 기존의 메카트로닉스 기술을 기반으로 한 기계-전자 복합시스템의 소형화, 경량화, 다기능화, 고속화, 고신뢰도, 저전력 소모, 가격의 저렴화를 이룸으로써, 기전복합시스템의 경박단소화를 촉진시키는 원동력이 되리라 예상하고 있다. 그러나 여기서 유의해야 할 점은 전자요소만으로 구성된 시스템과 기계-전자 복합시스템과의 차이점이다. 따라서 마이크로머신 기술은, 기존의 기전접속 시스템 중 요소집적이 유리한 분야, 마이크로머신 특유의 동작원리를 이용한 신제품 창출가능 분야 등으로의 적용이 일차적 관심의 대상이 된다.

3. 산업분야별 응용제품

마이크로머신을 구성하는 미소기체요소, 미소구조물, 미소정전 액츄에이터 등의 기본요소들(표 4)과 이들을 기반으로 한 마이크로머신 응용제품들(표 5)은 참고문헌(5~7)에서 다음과 같은 응용분야 및 관련산업별로 정리하여 소개한 바 있다.

1) 의료분야(biomedical instruments) : 검진 및 수술장비.

2) 산업계측분야(industrial measurements) : 자동차, 항공기, 군수산업용 반도체 집적 센서(solid-state integrated sensors) 및 계측기기.

3) 제조, 조립 및 검사 분야(manufacturing, assembly and inspection) : 가전, 전자, 정보, 통신, 광학, 반도체, 컴퓨터, 공작기계 및 자동화 설비.

여기서는 최근(주로 참고문헌(5~7) 이후) 발표된 마이크로머신 응용 제품들 중 국내

표 4 MEMS에서의 미소 기계 요소^(5~7)

기능상 분류	물리적인 형태
구조 요소	보, 평판, 박판, 코일, 침(probe), 각종 스프링, 등
열·유체 요소	홈, 채널, 파이프, 노즐, 공동(cavity, chamber), 밸브, 히터(저항체), 등
광학 요소	반사경(평면, 곡면), 렌즈, 레이저, 램프, 격자(grid), 셔터, 필터류(filter, window), 등
기구학적 요소	슬라이더, 핀 조인트, 기어, 링크, 베어링, 등
동력 요소	모터, 각종 액츄에이터, 펌프(수력), 등

표 5 MEMS의 산업 분야별 응용 예^(5~7)

분야(관련산업)	응용부품 및 제품
의료(수술 및 검진)	미세집계(tweezer, gripper), 절단기, 세포 분류기, 백혈구 계수기, 글루코우즈측정기, 세포융합기(cell fusion vessel), 약물 주입기, 혈압계, 심압측정기(pacemaker), 신경검진·기록계, 인공혈관 및 연결부품, 검진용도관(catheter) 및 관련부품, 안압측정, 각막수술기구 등
산업용 계측 (자동차, 항공·우주, 군수)	변위(위치, 수위) 센서, 속도계, 힘(압력) 센서, 가속도계, 자이로스코프 및 항법 시스템, 촉각센서, 온도계, 유량계, 가스 및 증기센서, 평형도센서, 등
제조, 조립 및 검사(가전, 전자, 정보통신, 음향, OA, 전산, 광학, 반도체제조 및 측정, 동작기계, 자동화기기, 약기, 오락기, 완구)	스위치, 릴레이, 유연전선(flexible cable), 조립·체결구(fastener), 신호필터, 정보판독기(encoder·decoder), 광축일치 및 광섬유 연결조립기기, 광필터(파장·주파수분할), 셔터(beam chopper, shutter), 기억소자, 헤드 및 픽업류(optical·magnetic), 칩(chip) 냉각장치, 미세열교환기, 잉크젯 프린터·플로터, 스캐너(scanner), 열프린터 및 FAX 헤드, 미세 프로파일러(profiler), STM, ATM, 입자분석기, 마스크(X-ray window), 입자필터, 등

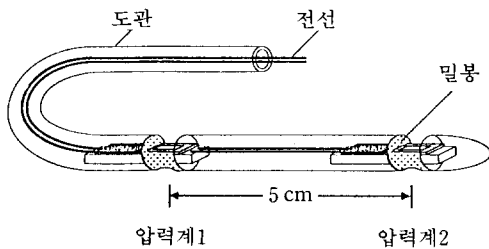


그림 4 검진용 도관(catheter)을 이용한 미소 압력센서 열(array), (Univ. of Michigan, 1988)



그림 5 폴리이미드 유연전선을 이용한 미소 온도센서 열(array) (Stanford Univ., 1985)

산업체에서 주시하여야 할 제품과 관련기술이 기계공학과 연관이 많은 것을 중심으로 소개함으로써 각 제품의 특성 및 기능과 함께 제품기술 측면에서의 마이크로머신 기술을 조명하고자 한다.

3.1 의료분야

의료분야에 응용되는 마이크로머신은 주로 수술, 검진 및 병리검사 관련 기구가 대부분을 차지하고 있다.

그림 4는 직경 0.5mm의 검진도관(catheter)을 이용하여 두 개의 미소압력센서(크기 $290 \times 550 \times 1.5 \mu\text{m}$)를 5cm 간격으로 배치

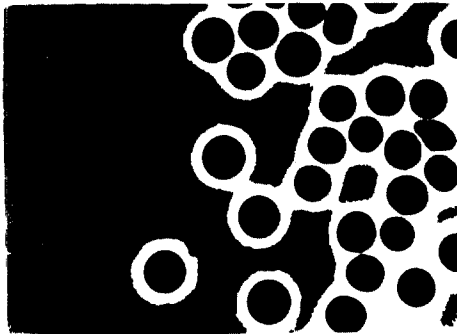


그림 6 미생물 관찰용 미소 챔버(MIT, 1993)



그림 7 세포자극 및 신경검진용 미소 바늘(microprobe) (GIT, 1993)

함으로써 인체 진단용 압력센서 열(array)을 구성한 예이다. 그림 5는 다수의 미소온도센서를 폴리이미드(polyimide) 유연전선(flexible cable)으로 연결하여 온도센서 열(array)을 구성한 것으로, 이러한 유연전선은 비단 의료분야뿐만 아니라 이후에 소개할 다른 산업분야에서의 미소부품 연결에도 응용이 가능하다.

세포 관찰 및 미생물학적 입자분석에 응용되는 미소구조물로는 그림 6의 미소챔버(micro flow chamber)를 들 수 있는데, 이는 $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$ 크기의 질화실리콘과 산화실리콘으로 만든 창(window)을 통해 혈액을 관찰할 수 있는 기구이다. 그림 7은 세포 자극(stimulation) 및 신경검사를 위한 미소기구로서, 폭 $25 \mu\text{m}$, 두께 $15 \mu\text{m}$, 길이 1.15 mm의 금도금된 니켈 외팔보를 $75 \mu\text{m}$ 간격으로 배열 제작한 미소침열(microprobe array)이다. 그림 8은 박막과 저항열(resistor array)을 이용한 Mackay-Marg 방식의 미소안압계(microtonometer)이다.

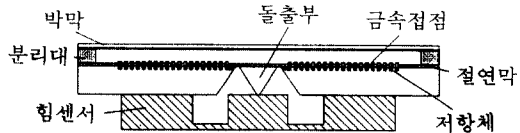


그림 8 미소 안압계 (Univ. of Twente, 1993)

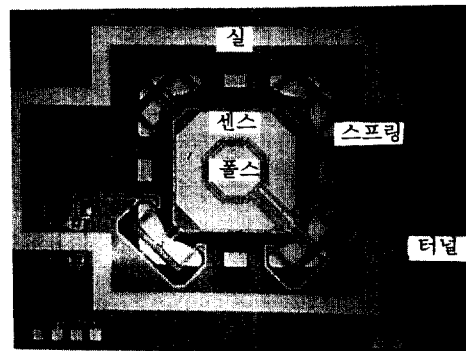


그림 9 디지털 가속도계 (Triton Tech./IC sensors, 1990)

3.2 수송, 우주·항공, 국방분야

산업계측 분야에 응용되는 마이크로머신 중 최근 관심의 대상이 되고 있는 수송, 우주·항공 및 군수산업용 가속도계와 자이로스코프를 중점적으로 소개한다. 특히 미국의 경우, 최근 DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)에서 국방분야 MEMS 프로그램을 추진함으로써 군수응용 연구가 본격화되고 있는데, 일차적으로 금년(1993년)부터 3년간 1500만 불의 연구재원으로 시작되었다. 이러한 군수산업 분야에서 관심의 대상이 되고 있는 것 중의 하나는 관성 항법시스템(inertial navigation/guidance system)용 고성능 마이크로머신 개발이다.

그림 9는 정전 액츄에이터(electrostatic actuator)를 이용한 폐회로(closed-loop) 방식의 디지털 가속도계로서 DC-1kHz의 주파수 영역 내에서 $10\mu\text{g}$ ~10g 범위의 가속도 측정이 가능하며 700g의 충격을 견딜 수 있게 제작된 것으로 전체 크기는 $3.5\times 4.0\text{mm}$ 이다. 그림 10 역시 마이크로 액츄에이터를 응용한 공진(resonant) 가속도계로서, 미세 진동(μg 급)을 감지할 수 있으며 개당 가격

은 200불 정도다.

한편, 미소자이로(gyroscope)로서는 그림 11의 실리콘자이로와 그림 12의 니켈자이로 등을 들 수 있다. 실리콘자이로(그림 11)는 크기 $350\times 500\mu\text{m}$ 의 평형추와 정전 액츄에이터(electrostatic actuator)로 구성되어 있으며, 1Hz기준으로 초당 4도(degree) 측정 능력이 있다. 한편 니켈자이로(그림 12)는 빗살구조(comb-structure)의 정전 액츄에이터⁽⁸⁾를 이용한 튜닝포크(electrostatic tuning fork) 방식의 자이로로서, 전체크기는 0.7

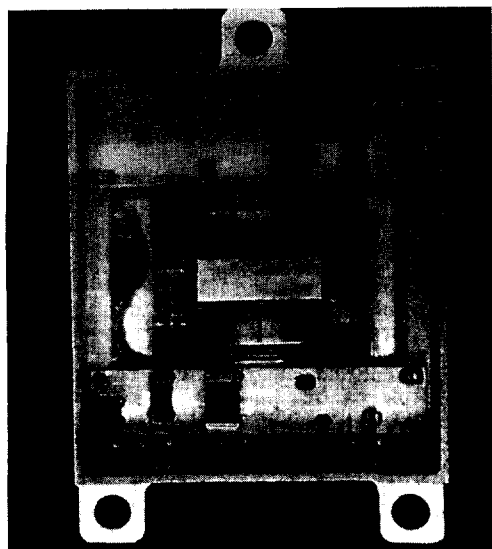


그림 10 공진 가속도계 (CSDL, 1991)

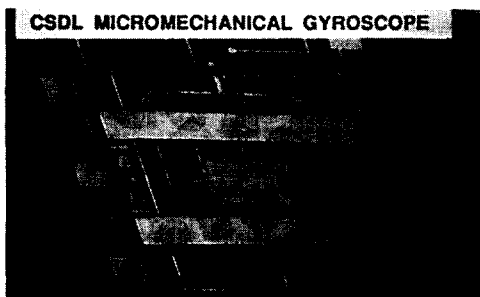


그림 11 실리콘 정전 자이로 (CSDL, 1991)

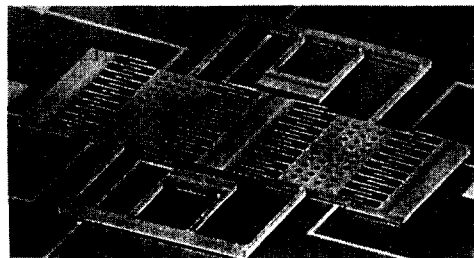


그림 12 니켈 튜닝포크 자이로 (CSDL, 1993)



그림 13 실리콘 회전 공진자(resonator) (Cornell Univ., 1993)

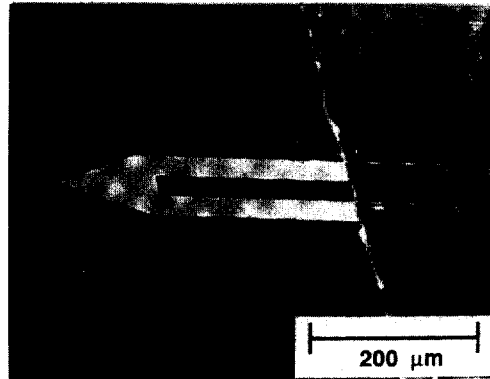
mm×0.7mm이며 1Hz 기준으로 초당 0.19도의 측정이 가능하다. 이상에서 보는 바와 같이 미소공진가속도계 및 미소자이로의 핵심요소는 정전 공진 액츄에이터⁽⁶⁾이며 질량, 스프링, 댐퍼와 결합하여 전체시스템을 구성한다. 그림 13은 단결정 실리콘으로 만든 회전공진자(torsional resonator)로서 미소 스프링의 단면크기는 폭 $0.8\mu\text{m}$ ×높이 $2\mu\text{m}$ 이고, 전체시스템의 공진주파수(resonant frequency)는 160kHz로 제작되었다.

그외 자동차용 반도체 집적센서 및 액츄에이터 분야에서의 마이크로머신 응용은 참고 문헌 (7)에서 자세히 소개한 바 있다.

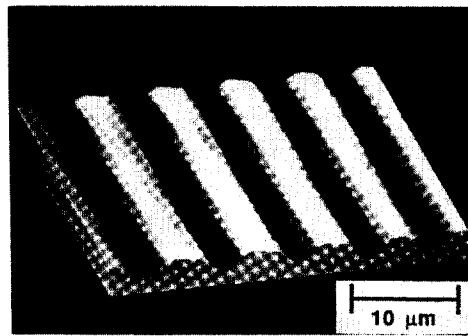
3.3 반도체 측정분야

최근 고집적(ULSI) 소자를 구성하는 미소 전자구조물의 크기가 마이크로미터 이하로 축소됨에 따라 광학현미경을 이용한 미소 구조물 크기 측정은 한계에 이르렀다. 이러한 광학적 미소구조물 측정의 한계를 극복하는데 마이크로머신이 응용되고 있다. 먼저, 광학현미경의 한계를 극복하기 위해 STM(Scanning Tunneling Microscope)이 개발되었다. STM은 미소침과 측정하고자 하는 구조물 사이의 누설 통과 전류(tunneling current)를 이용하는 장치인데, 부도체(혹은 절연체) 구조물의 경우 측정이 불가능하다는 단점이 있다. 이러한 STM의 단점을 보완하기 위해 나온 것이 AFM(Atomic Force Microscope)이다. AFM은 미소침과 측정물 사이의 원자간 인력(Van der Waals force)을 이용하여 원자단위 크기까지 측정해 낼 수 있다.

그림 14(a)는 AFM용 미소외팔보 구조물로서 침(probe)이 달린 외팔보 형태의 미소 스프링($k=1-10\text{N/m}$)을 이용하여 진동수 10 Hz-1kHz 범위내에서 1-10 Å의 분해도(resolution)로 미소 구조물 크기를 측정할 수 있으며, 그림 14(b)는 이러한 AFM을 이용하여 골의 피치 $6.5\mu\text{m}$ 높이 270Å의 산화



(a) AFM 구조



(b) 산화실리콘 표면

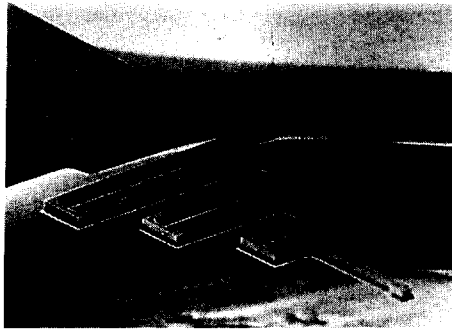
그림 14 미소 구조물 프로파일 측정용 AFM (Stanford Univ., 1991)

실리콘(절연체) 표면을 측정한 예이다.

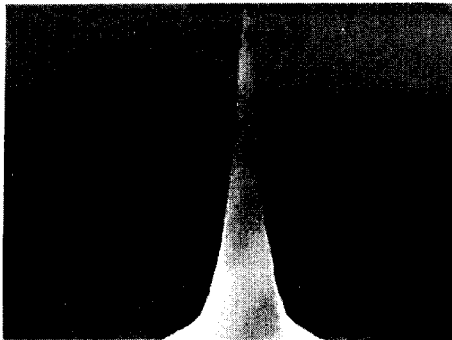
한편 그림 15(a)는 AFM을 위해 제작된 특수한 형태의 외팔보(폭 $14\mu\text{m}$, 높이 $12\mu\text{m}$, 길이 $700\mu\text{m}$, 스프링상수 0.79N/m , 고유진동수 12kHz)로서, 외팔보 끝에 높이 $10\mu\text{m}$ 인 바늘(그림 15(b))이 달려 있다. 그림 15(c)는 그림 15(b)의 상단부를 확대한 것으로 곡률 반경이 20nm인 바늘의 끝부분이다.

3.4 전자 및 전산 냉각분야

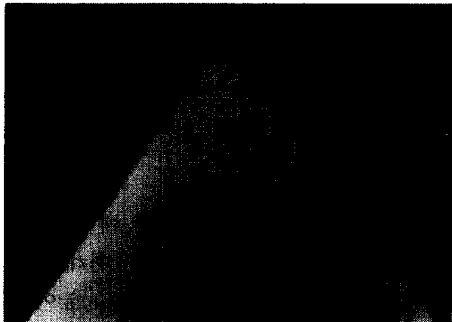
전자회로의 집적도가 높아짐에 따라 전자 및 전산기기의 작동시 발생하는 열의 냉각문제가 심각하게 대두되고 있다. 칩단위의 냉



(a) AFM 구조



(b) AFM용 미소 바늘(microprobe)

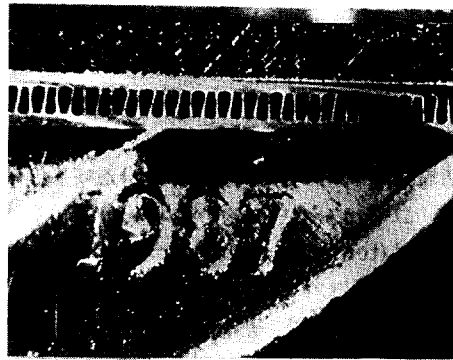


(c) 미소 바늘 끝의 확대도

그림 15 AFM 구조 및 구성요소 (Univ. of Neuchâtel, 1991)

각(on-chip cooling)시도는 1982년 Stanford 대학의 Tuckerman과 Pease가 실리콘 기판 뒷면을 가공하여 만든 폭 $80\mu\text{m}$ 의 미소 냉각 채널(heat sink)을 제안한 이래 꾸준히 계속 되어 왔다.

최근 발표된 냉각 혹은 열교환용 미소기기



(a) 냉각 판

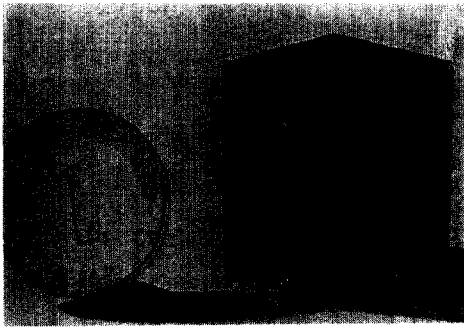


(b) 냉각 핀(fin)

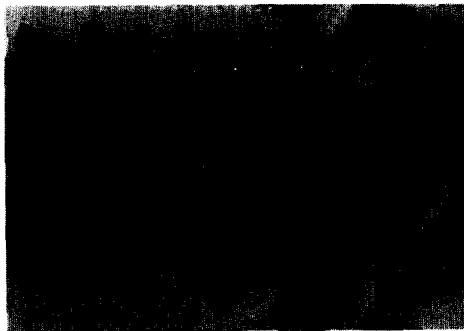
그림 16 VLSI 냉각장치 (3M, 1990)

로는 그림 16과 그림 17의 냉각판과 열교환기를 들 수 있다. 그림 16(a)는 VLSI 냉각을 위한 미소 채널판으로서, 일련의 미소채널(벽두께 $25\mu\text{m}$, 표면거칠기 500Å (rms))을 통해 단위면적(cm^2)당 $40\text{W} \sim 100\text{W}$ 의 열교환 능력을 보인 것이다. 그림 16(b)는 액체·기체 열교환용 냉각 핀(fin)으로서, 냉각핀 내부에 미소 채널을 가공한 것이다.

그림 17(a)는 구리로 만든 미소 열교환기로, 단면크기 $100 \times 78\mu\text{m}$ 의 미소채널을 통하여 분당 12.5리터의 물을 압력차 4bar, 온도차 59.3K 상태에서 순환시킬 때 비면적 열전달계수 $23\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$, 비체적 열전달계수 $324\text{MW}/\text{m}^3\text{K}$ 의 열교환 능력을 나타내었다. 그림 17(b)는 두께 $100\mu\text{m}$ 의 금속박막에 단면 $95 \times 80\mu\text{m}$ 의 채널 열(array)을 벽두께 $24\mu\text{m}$ 로 가공한 후 접합한 것으로 단위 체적



(a) 미소 열 교환기



(b) 미소 열 교환 채널

그림 17 미소열교환기(K. Karlsruhe, GmbH, 1990)

(cm³)당 4000개의 채널로 표면적 150cm²를 형성하고 있다.

3.5 정보 통신 및 광학 분야

통신 및 광학분야에서의 마이크로머신기술 응용은 다른 응용분야에 비해 비교적 빠른 속도로 진행되고 있다. 미소반사경, 미소렌즈, 미소레이저, 감광소자 등의 미소광학요소를 마이크로 액츄에이터와 결합함으로써, 광신호분리기, 광단속기(optical chopper), 레이저 셔터(laser beam shutter), 정보검출기(optical/magnetic pickup), 초정밀 조립기(optical aligner) 등 다양한 응용제품이 개발되고 있다.

(1) 광신호 분리기

먼저 광신호 분리에 응용되는 마이크로머

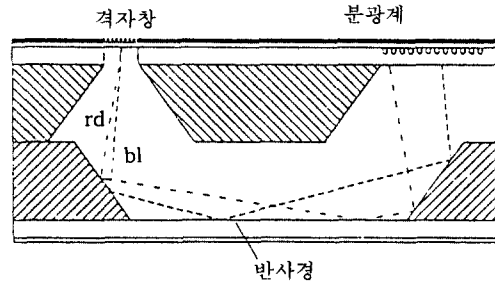


그림 18 미소 실리콘 분광계(micro spectrometer) (Delft Univ. of Tech./Sony, 1992)

신으로서, 단일통로(광섬유)를 통해 전달되는 다중신호를 파장분할법(wavelength division multiplexing)에 의해 분리하는 미소간섭계(micro interferometer)를 들 수 있다. 1990년에 발표된 미소간섭계의 경우(전체 크기는 5×5×0.6mm), 유효 광분리면적 1.4mm²를 통하여 초당 20Mbit의 신호처리가 가능하며 음성채널 128개, 950~1750 MHz 범위 내의 FM비디오 채널 32개를 소화해 낼 수 있다. 한편, 미소간섭계는 동작 속도에 제한이 있고 비교적 높은 전압(0~70 V)을 요한다는 단점이 있어, 이를 보완하기 위해 미소분광계(micro spectrometer)가 개발되었다. 그림 18은 실리콘으로 만든 분광계로서, 파장별 회절(diffraction)을 이용하여 광신호를 분리할 수 있도록 설계되었다. 이 분광계는 32개의 격자(slits)와 내부반사경, 23개의 수광소자(photodiode)로 구성되어 있으며 유효파장범위는 380~720nm이고 광통로(optical path)의 길이는 총 4mm, 분광계 전체의 폭과 길이는 각각 3.4mm, 2mm이다.

(2) 광단속기 및 레이저 셔터

그림 19는 마이크로 액츄에이터를 이용한 압전형 광단속기(piezoelectric optical chopper)인데, 셔터평판을 지지하고 있는 보(suspension)의 폭은 50μm, 길이 2mm, 그리고 광단속기 전체의 길이, 폭, 넓이는 각

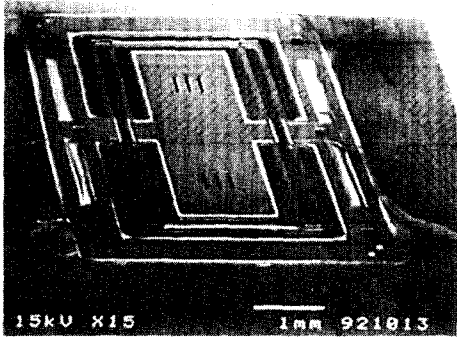


그림 19 미소 광 단속기 (micro optical chopper)
(Univ. of Tokyo/Yokogawa Electric Co., 1993)

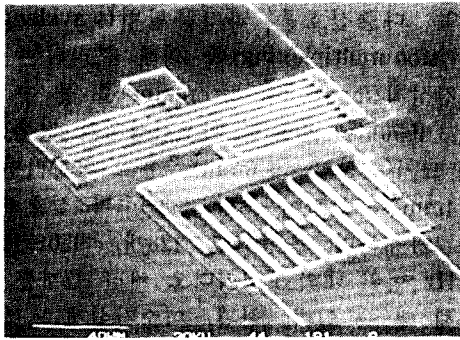


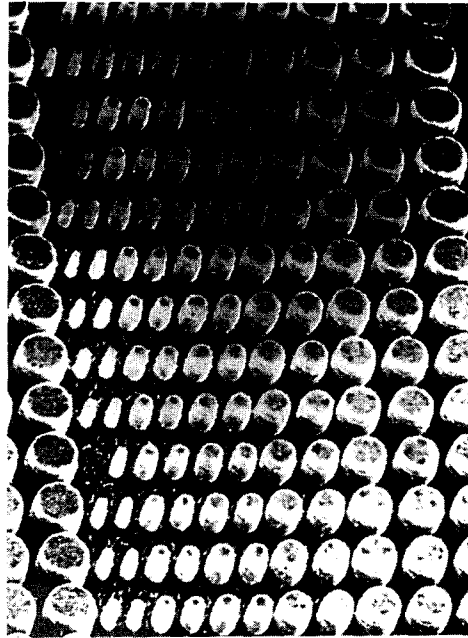
그림 20 미소 레이저 셔터 (Univ. of Neuchâtel/SCEM, 1993)

각 $7\text{mm} \times 7\text{mm} \times 10\mu\text{m}$ 이다.

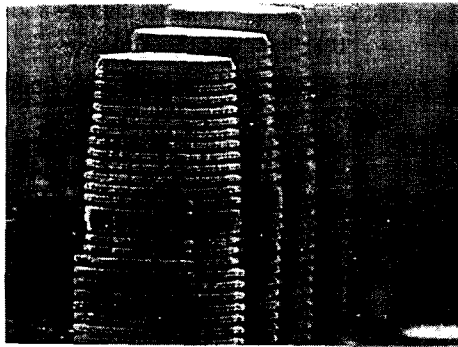
그림 20은 정전형 레이저 셔터 (electrostatic laser beam shutter)로서, 알루미늄박막을 입힌 셔터판 (shutter plate)과 실리콘 기판과의 반사율 차이를 이용하여 직경 $5\mu\text{m}$ 의 레이저 빔 (beam)을 4.5kHz 의 속도로 단속할 수 있다. 그림 20에서 셔터판의 크기는 $100\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ 이고, 스프링 부분의 크기는 $130\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$, 셔터 최대 이동거리는 53V 하에서 $8.3\mu\text{m}$ 이다.

(3) 미소레이저 및 광학 요소

그림 21(a)는 마이크로머시닝 기술로 제작된 미소레이저군 (micro laser array)이다. 그림 21(b)는 미소레이저군을 형성하고 있는



(a) 미소레이저 군 (array)



(b) 다층 미소레이저 확대도

그림 21 다층 미소레이저 (Photonic Research Inc., 1991)

단위 레이저 소자의 확대도로서, AlAs와 GaAs의 복합층으로 구성되어 있고 단위 레이저의 직경은 $0.5\mu\text{m}$, 길이 $8\mu\text{m}$ 이다. 이러한 마이크로레이저는 이미 개발된 바 있는 미소 광학요소-예를 들어 반사경로를 변환시키는 고속 미소회전경 (torsional micromirror)과 2차 및 3차 복합곡면으로 구성된 미소

(직경 10 mm, 두께 9 μ m) 3차원 초점반사경 (focusing mirror) 등-과 연계, 새로운 응용 분야를 개척할 수 있으리라 기대된다. 이외 개발되고 있는 주요 광학요소로는, 자기 및 광학방식의 미소 정보검출기(pickup) 등을 들 수 있다.

(4) 미소 카메라(실리콘 망막)

통신 및 광학분야에서 마지막으로 소개할 것은 미소카메라 응용을 위한 실리콘 망막이다. 그림 22는 (a) 인간망막과 (b) 실리콘 망막을 비교한 것이다. 먼저 그림 22(a)에서 보는 바와 같이 인간의 망막은 빛을 전기신호로 변환하는 '간상 및 원추체(rods/cones)'와 평균 조도를 측정하는 '수평세포(horizontal cell),' 그리고 간상 및 원추체의 신호와 수평세포의 신호를 신경절세포(ganglion cell)에 전달하는 '양극세포(bipolar cell)'로 구성되어 있는 반면 그림 22(b)의 실리콘망막에서는 이들의 기능을 각각 '실리콘 광센서,' '다결정 실리콘 가변저항,' 및 '양극소자(bipolar cell)'로 대신하고 있다. 이러한 실리콘 망막은 현재 총 요소수가

2500개(50 \times 50pixel)에 지나지 않는 초기 개발 단계에 있으나, 향후 실용단계로까지 발전할 수 있을 것이다.

4. 관련 연구분야 및 기술과제

마이크로머신에서의 기계요소의 크기와 이들이 작동하는 주변환경을 규정하는 단위기원자단위(atomic scale)로 축소됨에 따라, 마이크로머신 관련연구는 물리, 화학, 생물, 의학 등 기초과학분야에서부터 기계, 전자, 재료, 전산 등 응용공학분야에 이르기까지 광범위한 분야에 걸쳐 새로운 문제점을 제기함과 동시에 관련기술의 창의적 종합을 요구하고 있다.

여기서는 앞서 소개한 마이크로머신 응용제품의 해석, 설계, 제작과 관련된 기초연구 중 비교적 기계공학과 연관이 있는 분야를 중심으로 각 분야마다 제기되고 있는 기술과제 및 기술특성을 개략적으로 기술한다.

4.1 제작 관련기술

반도체 집적회로 제조기술의 혁신이 21세기 마이크로 일렉트로닉스 혁명의 원동력이 되었듯이, 집적회로 제조기술을 응용한 미소기계 제작기술의 혁신은 마이크로머신을 출현시키는 직접적인 원동력이 되었다. 미소기계 제작기술은 실제제작을 통하여 설계기능 및 관련기술을 실현함에 있어서도 중요한 역할을 담당하고 있을 뿐 아니라, 이후에 설명할 미소영역에서의 물리적 현상규명을 위한 각종 시험기 제작과 미소기계요소 설계과정에서 치수 및 형상 제한조건을 제공하는 등 마이크로머신 기술 전반에 걸쳐 직접적인 영향을 미치고 있어 마이크로머신 기술 중의 꽃이라 해도 과언이 아니다.

현재 미소 기계제작에 사용되는 기술은 기술 근원 측면에서 볼 때, 크게 두 종류로 분류할 수 있다. 즉, 리소그라피(lithography) 및 반도체 미세가공 기술에 기반을 둔 것과

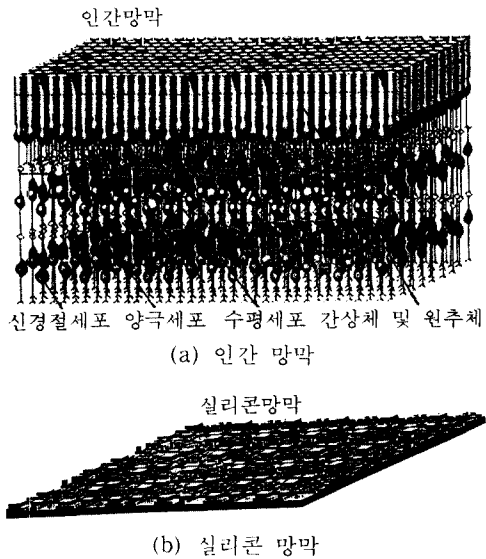


그림 22 실리콘 망막 (Caltech, 1991)

기존의 기계가공 기술의 정밀화에 기반을 둔 것으로 대별할 수 있는데, 편이상 전자의 부류에 속하는 제작기술을 '마이크로머시닝(micromachining) 기술,' 후자에 속하는 제작기술을 '정밀가공(precision machining) 기술'로 칭하기로 한다.

마이크로머시닝 기술은 1960년대 개발된 기판가공(bulk-micromachining) 기술과 1980년대 개발된 박막가공(surfacemicromachining) 기술로 다시 세분할 수 있으며, 이 두 기술의 특징 및 차이점은 참고문헌(5, 7)에서 소개한 바 있다. 정밀가공기술로는 다이아몬드 절삭가공, 정밀압출(extrusion) 및 몰딩, 정밀밀링, 미소방전가공(micro EDM), 레이저가공 등을 들 수 있다. 한편, 이러한 두 부류의 제작기술로 만든 미소기계의 명칭을 구별하기도 하는데, 마이크로머시닝 기술로 제작한 것을 '마이크로머신(micromachine)'이라 하고 정밀가공 기술로 제작한 미소기계를 '미니어췌어드머신(miniatured machine)'이라 칭하기도 한다.

이글에서는 미소기계제작기술 중 리소그라피 및 반도체 미세가공을 기반으로 하는 '마이크로머시닝 기술'에 대해서만 언급을 하기로 한다. 마이크로머시닝을 이용한 기계구조물 가공공정(process)은 본 소특집호의 다른 기사에서 다루어질 것이므로 생략하기로 하고, 여기서는 전자요소제작을 위한 마이크로머시닝 기술과 기계요소제작을 위한 마이크로머시닝 기술의 차이점을 강조한 후, 기계요소제작상의 기술과제(technological issue) 및 기술현황을 소개하는 데 중점을 두기로 한다.

(1) 마이크로머시닝 기술

미소 기계요소 제작을 위한 마이크로머시닝 기술은 집적회로 제조기술을 기반으로 하고 있으나, 공정자체가 반드시 일치하는 것은 아니다. 이러한 공정상의 차이점 이면에는 두 가지 근본적인 원인이 있는데, 하나는 가공소재 및 재료특성의 차이이고 또 다른

하나는 가공물의 형상 및 기하학적 특징의 차이에서 기인한다.

우선, 기계요소와 전자요소의 소재 및 재료특성에서 기인하는 제작기술의 차이를 살펴보자. 미소 기계요소를 제작함에 있어서 집적회로 등 전자요소 제작에 사용하지 않던 재료를 쓰기도 하고, 동일한 재료를 사용하더라도 그 재료의 전기적 성질뿐만 아니라 기계적 성질 또한 고려해야 하므로 박막제조공정의 변화를 요한다.

그 다음으로 생각해야 할 것은 기계요소와 전자요소의 형상과 기하학적 특징의 차이에서 기인하는 제작기술의 차이인데, 이는 마스크 제작단계에서부터 구조물 가공공정까지 영향을 미친다. 현재 전자요소 제작을 위한 마스크는 거의 직선위주의 맨하탄무늬(Manhattan pattern)로 정의됨에 반해, 미소 기계요소의 형상은 곡선을 필요로 하는 경우가 많아 기존의 집적회로 마스크 설계용 그래픽 프로그램이나 마스크 제작장비의 비효율성 문제가 대두된다. 미소기계용 마스크 문제는 전자빔 주사(e-beam direct writing)를 이용하거나 기본적인 미소 기계요소용 폰트(micromachine fonts)를 응용하는 방안 등이 제시되어 있다.

가공공정상 제기되는 또 다른 문제 중 하나는 미소 기계요소와 미소 전자요소의 기하학적 특징 차이이다. 전자요소는 거의 평면(2차원) 구조물로 구성되는 반면, 미소기계에서는 입체(3차원) 구조물이 요구된다는 점이다. 따라서 미소기계제작을 위하여 필요한 것은 고단면비(high-aspect-ratio) 혹은 곡면 구조물 가공기술의 개발이다. 지금까지 개발된 고단면비 구조물 제조기술로는 UV-선(UV lithography)을 기반으로 하는 RIE(reactive ion etching) 공정과 X-선(X-ray lithography)을 기반으로 하는 LIGA(Lithographie, Galvanoformung, Abformung) 공정 등을 들 수 있다.

먼저 RIE 공정을 응용한 고단면비 구조물

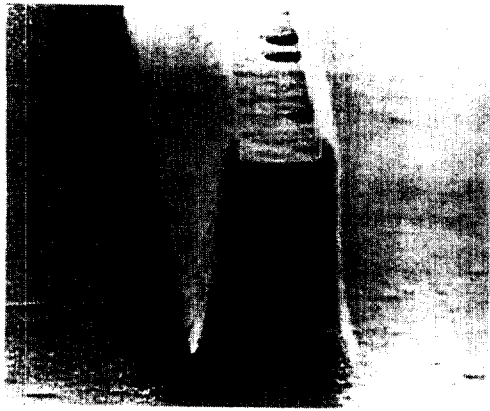


그림 23 박막 중공(hollow) 구조물 (UC-Berkeley, 1993)

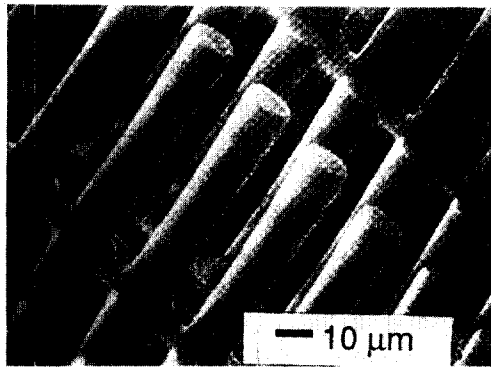
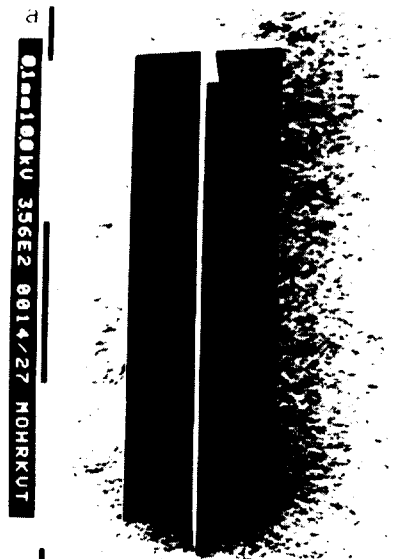
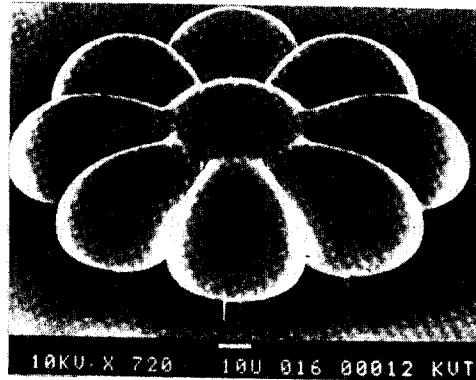


그림 24 미소 전극 (NTT, 1993)

제작공정을 소개한다. 그림 23은 CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) 공정의 벽면가공법⁽⁸⁾을 응용하여 제작한 구조물로서, 두께 $0.2\mu\text{m}$, 높이 $2.5\mu\text{m}$ 의 고단면비 수직 구조물을 연결하여 폭 $2\mu\text{m}$, 높이 $2.5\mu\text{m}$ 의 입체구조물(hollow beam)을 형성한 것이다. 이외 RIE 공정을 기반으로 한 가공기술로는 저온($0\sim$ 영하 140°C)에서의 RIE(즉 극저온 전식식각법(cryogenic dry etching))와 자기장을 이용한 MC RIE(Magnetically-Controlled RIE) 등을 들 수 있다. 그림 24는 티타늄 마스크를 사용하여 MC RIE로 폴리이미드를 가공한 후 금도



(a) 고단면비(high-aspect-ratio) 구조물



(b) 3차원 곡면 구조물

그림 25 LIGA 구조물 (IMM/Microparts, 1991)

금하여 만든 전극 열(pole array)로서, 각 전극은 직경 $15\mu\text{m}$, 높이 $100\mu\text{m}$ 의 고단면비 구조물이다.

한편, 그림 25는 LIGA 공정으로 가공한 구조물들로서, 그림 25(a)는 2.5GeV의 X-선을 이용한 폭 $7.3\mu\text{m}$, 높이 $500\mu\text{m}$ 의 고단면비 구조물이고, 그림 25(b)는 LIGA 공정을 응용하여 가공한 곡면 구조물의 예이다.

이상에서 본 바와 같이, 미소 기계요소 제작을 위한 마이크로머싱 기술은 반도체 집적 회로제작기술과는 다른 면모를 지니고 있지만, 기전집적 형태의 마이크로머신 제작을 위해서는 두 가지 제작기술이 호환성(compatibility), 공정의 재현성(reproducibility) 및 안정성(stability)을 유지하는 범위내에서 함께 발전하여야 하며, 이러한 측면에서 두 제작기술간의 특이성과 함께 상호보완성이 강조된다.

(2) 접합 및 패키징 기술

실리콘 기판을 또다른 실리콘 기판 혹은 다른 물체와 접합시키는 기술은 마이크로머신 제조분야에서 매우 중요한 기술이다. 그 이유는 메모리 등 전자소자 제조분야에서와 마찬가지로, 패키징 기술이 최종제품의 성능과 신뢰도를 좌우하는 요인이 될 뿐만 아니라, 패키징 비용이 전체 제작비용의 대부분을 차지하기 때문이다. 특히 마이크로머신 분야에서의 접합기술은 패키징뿐만 아니라 입체적인 미소 구조물 및 다층 구조의 미소 기계제작에 매우 유용하게 응용된다.

마이크로머신 제작에 사용되는 기본적인 접합공정 기술로는 양극접합(anodic bonding)과 용융접합(fusion bonding)을 들 수 있는데, 양극 접합은 실리콘(양극)과 유리(음극)를 고전압(400~1000V)하에서 접합시키는 방법이고, 용융접합은 고온(1000°C 이상)에서 실리콘과 실리콘을 접합시키는 방법이다.

패키징 분야에서 접합공정기술 자체도 중요하지만 무엇보다 패키징 설계기술의 비중이 크다. 패키징의 주요 설계변수로는 칩 크기, 핀의 구조 및 위치, 소자보호(passivation) 재료, 두께 및 공정선정 등을 들 수 있으며, 이러한 설계변수를 결정함에 있어서 재료의 물리적 성질, 접합부위의 강도, 잔류응력, 열 응력 그리고 열전달 측면에서의 효율성 등이 고려되어야 한다. 또한 한 가지 유의하여야 할 점은 전자소자의 패키징과 마

이크로머신의 패키징은 각각의 기능, 설계개념 및 제작공정상의 순서 등에 있어서 차이가 있다는 것인데, 이에 관한 상세한 언급은 지면관계상 생략한다.

4.2 설계 및 해석 관련기술

마이크로머신의 설계 및 해석을 위해서는 제작기술에 대한 이해를 기반으로 한 미소 재료의 물성 및 거동 특성, 미소영역에서의 물리적현상의 이해, 기전 복합 시스템의 모델링과 작동 시뮬레이션기법 등이 필요하다. 마이크로머신은 크기가 원자단위(atomic scale)로 접근함에 따라, 통상적인 크기의 기계시스템 설계 및 해석에 사용하던 이론 및 방법론을 그대로 적용하기에는 여러가지 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 마이크로머신의 경우, 통상적으로 사용하던 기계설계 및 해석이론의 적용 이전에 그 타당성이 우선 검토되어야 한다. 즉 기존의 설계, 해석 이론이 내포하고 있는 여러가지 가정과 경계조건, 재료의 물성 및 거동 특성 모델 등이 미소영역에서도 그 타당성을 유지할 수 있는지를 따져보아야 한다. 이와 관련하여 우선 기계공학과 관련되는 분야만 하더라도, 재료역학, 구조역학, 동역학뿐만 아니라 전기, 자기, 광학, 온도, 압력장에서의 입자 및 에너지 이송(transport) 및 이와 관련된 유체역학, 열전달, 운할 등 기계공학 전반에 걸쳐 여러가지 문제점이 산재해 있다.

이 글에서는 마이크로머신의 설계와 해석과 관련된 미소재료, 미소구조역학, 미소 유체·열전달, 미소운할, 전산응용 미소설계 분야의 기술과제들을 소개한다. 현재 마이크로머신 관련 분야에서 관심의 대상이 되고 있는 것은 각 분야에서 기존 설계·해석이론을 적용시킬 수 있는 한계를 밝히고자 하는 것과 그 한계 밖에서의 기존이론의 확장 또는 신이론의 정립에 관한 것이다.

(1) 미소재료(Micromaterials)

재료의 물성치에 관한 이해 없이는 어떠한

기계라도 해석하거나 설계할 수 없다. 마이크로머신분야에서 기계요소의 크기가 작아짐에 따라, 재료의 거시적 성질(bulk property)보다 미시적 표면성질(thin-film 혹은 surface property)의 중요성이 강조되고 있으며, 3장에서 본 바와 같이 응용분야에 따라 박막재료의 기계적, 전기적, 화학적, 광학 및 열적 성질 등이 관심의 대상이 된다. 마이크로머신 분야에서 필요로 하는 박막재료의 물성치로는 탄성계수, 포아슨비, 경도, 인장강도(tensile strength), 파괴인성(fracture toughness), 피로강도(fatigue strength), 선팽창계수, 열전달계수, 흡수율, 투과율, 반사율 등을 들 수 있다. 이러한 박막재료의 물성치는 동일한 성분의 재료를 사용하더라도 박막의 두께, 입자(grain) 크기, 전위(dislocation) 밀도, 조직(texture) 등에 따라 변화를 나타내기도 한다. 이러한 미소재료의 물성치 측정(on-chip/in-situ measurement)을 위해서는 시편뿐만 아니라 재료시험기 자체를 마이크로머신으로 설계, 제작하여 재료시험을 행하게 되는데, 그 중 몇 가지 예를 소개한다.

그림 26은 박막재료의 잔류응력 측정기로서, 잔류응력이 서로 다른 두 종류의 박막으로 폭 4000Å, 높이 2μm, 길이 70μm의 고



그림 26 박막 잔류응력 측정기 (UC-Berkeley, 1990)

단면비 시편을 제작한 후, 잔류응력의 불균형(mismatch)으로 인한 시편변형(deflection)으로 두 박막간의 잔류응력의 차를 측정한다. 그림 27은 잔류응력을 응용한 박막의 파괴인성(fracture toughness) 시험기로서, 이를 이용하여 여러 종류의 박막에 대한 K_I 값을 측정할 수 있다. 그림 28은 정전(electrostatic) 마이크로 액츄에이터를 이용한 피로파괴(fatigue fracture) 시험기이다. 폭 16μm, 두께 5μm, 길이 75μm의 보(beam)의 고정단에 크기 10~300nm의 초기 균열(crack)을 만든 후 공진 주파수로 구동함으로써, 균열의 진행에 따른 공진 주파수의 변화를 통하여 균열 진행속도를 측정한다. 그림 28의 시험기는 다결정 실리콘 박막과 니켈 박막에서의 피로 균열 진행을 관찰하여 분당 12Å의 균열진행 속도를 측정하는데 사용되었다.

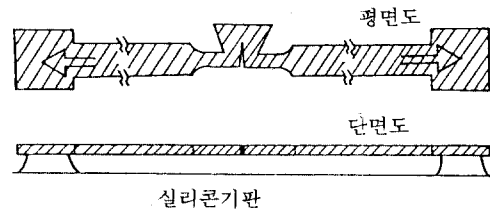


그림 27 박막 파괴강도 시험기 (UC-Berkeley, 1990)

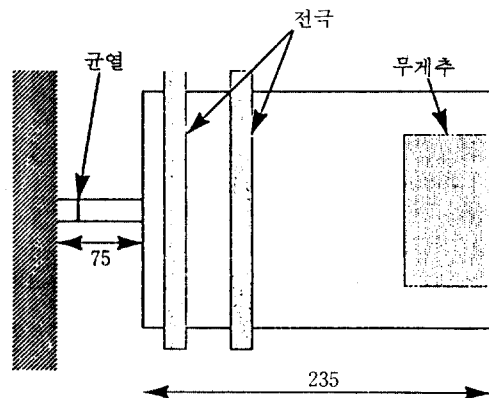


그림 28 박막 피로파괴 시험기 (MIT, 1993)

(2) 미소 구조역학

고속계, 자이로, AFM(그림 9~15) 등과 같이 질량-스프링-댐퍼로 구성된 미소 기계 시스템의 동적 거동 해석을 위해서는 미소 구조물의 질량, 스프링 계수 및 감쇠 계수에 관한 자료가 필요하다. 경험적으로 보아 이들 계수중 감쇠에 관한 정성적 이해 및 정량적 예측이 가장 힘든 부분이다. 그림 29는 고속으로 진동하는 마이크로머신의 감쇠 계수 측정기로서, 정전 액츄에이터로 가진한 미소 기계시스템(M-K-C)의 주파수 특성분석으로 감쇠계수를 측정할 수 있도록 설계 제작된 것이다.

(3) 미소 유체 및 열전달

그림 6의 미소챔버와 그림 16, 17의 각종 미소냉각장치 및 열교환기, 미소열파이프(micro heat pipe), 미소스터링엔진(micro stirling engine) 등에서는 미소채널, 펌프, 밸브, 노즐 등에서의 유체의 흐름과 열전달 문제가 심각하게 대두된다.

먼저 미소유동(microfluid flow)에서의 관심은 유체의 연속체(continuum)가정의 한계와 점성력, 표면장력, 분자확산(molecular diffusion) 등에 관한 실험 및 이론적 기반의 정립에 있다. 미소열전달(micro heat transfer) 분야에서는 물체의 두께가 열전하의 자

유이동거리(mean-free-path)로 접근하는 경우와 극저온에서의 열전도(heat conductor) 현상 등이 관심의 대상이 되고 있으며, 복사 전달(radiation)의 경우 비흡수재질과 흡수 내질에서의 파장비, 표면 혹은 입자면(grain boundary)에서의 산란(scattering)문제 등이 제기되고 있다.

(4) 미소윤활(Microtribology)

기계요소간의 마찰, 마모, 윤활은 미소기계학적 시스템(micro kinematic system)의 성능과 수명에 직결되는 문제이다. 이를 해결하기 위해서는 고체 및 유체에 의한 미소 윤활현상의 이해를 기반으로 한 윤활 소재 및 미소 베어링 개발이 필요하다.

그림 30은 박막재료 사이의 마찰계수 및 마모측정을 위한 미소 시험장치의 한 예이며, 이 이외에도 여러가지 다른 형태의 미소 마찰·마모 시험기를 통한 실험적 연구가 진행되고 있다. 특히 건식 마찰(dry friction)의 경우, 미소 영역에서의 쿨롱(Coulomb) 마찰법칙의 한계, 접촉력(contact force)과 접촉면적, 표면조직(surface texture), 마찰력과 접합력(adhesive force) 사이의 관계 규명 등이 관심의 대상이 되고 있다.

(5) 전산응용 미소설계(Micro CAD)

마이크로머신의 초기설계 단계에서부터 구

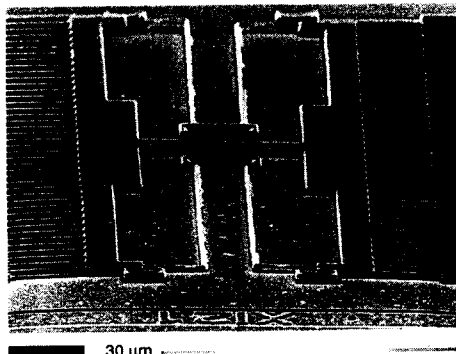


그림 29 미소 점성감쇠 시험기 (한국과학기술원/UC-Berkeley, 1993)

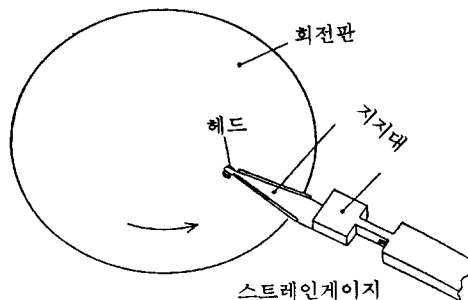


그림 30 마찰 및 마모 시험기 (미쓰비시 전기/동경대, 1991)

조설계, 마스크 및 공정설계, 제작, 시험에 이르기까지 소요되는 인력과 경비를 절감하고 설계 주기(design cycle)를 단축시키기 위한 마이크로머신 전용 CAD 시스템의 필요성이 대두되고 있다.

기계·전자 집적시스템 설계시스템은 우선 기존의 기계 CAD 시스템과 전자 CAD 시스템의 조합으로 구성할 수 있기도 하지만, 이러한 방식을 취할 경우 다음과 같은 문제점이 발생한다.

- ① 기계 및 전자 기능이 집적된 요소(즉 기전집적요소)의 모델링, 해석 및 작동 시뮬레이션 상의 난제
- ② 미소 재료의 특성 및 거동에 관한 자료(micromaterial data base)의 결여
- ③ 미세영역문제에서 기존의 CAD 시스템이 근거로 하고 있는 각종 기계공학 해석 이론의 적용 타당성 문제

특히, 미소 기계요소의 거동 해석을 기존의 FEM 등 수치해석 프로그램을 이용하여 수행하는 경우 위의 2항과 3항에 대한 심각한 고려가 필요하다. 즉 단순히 요소의 크기만 작게 하여 기존 수치해석 프로그램을 이용하는 경우, 실제 미소요소의 거동과는 무관한 결과를 얻는 등 무의미한 시도가 될 수도 있음에 유의하여야 한다. 이러한 오류를 방지하기 위하여, 최근 미국에서 추진되고 있는 미소 전산역학(computational micromechanics) 분야의 경우 반드시 실험적인 재료특성 및 제작공정 자료를 근거로 연산을 수행 하도록 명시하고 있다.

향후 마이크로머신 분야에서의 종합적이고 실용적인 미소 시스템을 완성하기 위해서는, 위의 세 가지 문제 해결 이외에도 치수 및 형상 최적설계, 자동 마스크 설계, 제작공정 시뮬레이션 및 마이크로머싱 결과 예측 등의 기능이 첨가되어야 하며, 이러한 전산응용 설계, 해석, 제작 및 작동 시뮬레이션에 관한 일련의 작업들이 미소 재료의 물성자료(material data base) 및 마이크로머싱 공

정자료(process data base)와 연계되어 이루어져야 할 것이다.

5. 맺음말

마이크로머신 분야는 기술 특성상 물리, 화학, 생물, 의학 등의 기초과학에서부터 기계, 전자, 재료, 전산 등 응용공학에 이르기까지 폭넓은 분야의 전문지식의 집적을 요한다. 또한 마이크로머신의 설계, 해석, 제작 관련기술은, 기계공학 내에서만 보더라도 재료역학, 구조역학, 동역학 제어, 열, 유체, 열전달, 윤활 등 거의 모든 분야와 연계되어 있음을 알 수 있다. 따라서 마이크로머신 기술의 성숙을 위해서는 관련분야 전문지식의 창의적 종합이 요구되며, 제품기술로서의 발전을 위해서 우선 기반기술의 중요성이 인식되어야 한다.

마이크로머신 기반기술은 근래 제품의 경박단소화 경향에 따른 기존제품 개선에 중요한 기반이 됨과 동시에 관련분야 및 기술의 다양성으로 인해 폭 넓은 응용분야로의 기술 파급 측면에서 그 중요성이 강조된다. 최근 국제 기술선진국에서의 마이크로머신에 대한 관심과 투자의 목적은 일차적으로 기반기술 확보 및 관련 특허권 취득에 있다고 볼 수 있다. 이러한 마이크로 기반기술의 확보를 위해서는 첫째, 다양한 분야의 배경을 가진 연구인력간의 기술교류 및 공동연구를 통한 복합기술의 전문화와 둘째, 마이크로머신 제작기술 확보를 위한 기존 집적회로 제조장비의 보완 및 확충이 필요하다.

나아가 제품 기술로서의 성숙을 위해서는 우선, 각 산업분야별 전문 기술인력 양성과 함께 다양한 산업분야에서의 응용제품 혹은 신제품개발을 토대로 한 기술 응용력 배양이 필요하며, 이 과정에서 무엇보다 중요한 것은 진지한 연구열의와 타분야간의 협동과 단결력이다. 마이크로머신분야의 전문인력이 제한되어 있는 현재로서는 우선 기존의 각

분야 전문인력이 연합하여 함께 산업현장을 배우고 기술 응용이 가능한 제품의 발굴 및 개발을 선도하는 역할을 담당하여야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Howe, R. T. and Muller, R. S., 1982, "Polycrystalline Silicon Micromechanical Beams," Extended Abstract, Electrochemical Society Meeting, Montreal, PQ, Canada, pp. 184~185.
- (2) Fan, L.-S., Tai, Y.-C. and Muller, R. S., 1987, "Pin Joints, Gears, Springs, Cranks and Other Novel Micromechanical Structures," Tech. Digest, Transducers '87, Tokyo, Japan, pp. 849~852.
- (3) The New York Times, 1991, Transforming the Decade : 10 Critical Technologies, Science.
- (4) The ASME, 1990, Statement on National Critical Technologies, Council on Engineering and Industry Advisory Board.
- (5) 조영호, 1992, "마이크로머신의 설계, 제작 및 응용," 대한기계학회 충청지부 추계학술 강연회 초록집, pp. 65~69.
- (6) 조영호, 1992, "미소 기계-전자 집적시스템의 응용과 실제," 대한기계학회지, 제 32권, 제 7 호, pp. 588~603 ; 혹은 월간기계정보, 제 8 권, 제10호, pp. 63~77.
- (7) 조영호, 1992, "자동차용 반도체 집적센서 및 마이크로 액츄에이터," 한국 자동차 공학회지, 제14권, 제 3 호, pp. 12~25.
- (8) Cho, Y.-H., 1990, Design, Fabrication and Optimization of Micromechanical Flexures, Ph. D. Dissertation, The University of California at Berkeley, California, U.S.A. 