

NEMS 기술개요 및 동향

조영호(디지털나노구동연구단, 바이오시스템학과, KAIST)

I. 머리말

인류는 지금까지 산업혁명과 전자혁명이라는 두 차례의 기술혁명을 거치면서 기계산업과 전자산업의 급속한 발전에 따른 산업경제적 환경 변화를 경험해 왔으며, 근래 들어 과학기술의 발전이 인류의 삶과 사회문화적 활동에 미치는 영향의 폭과 깊이가 날로 증대되고 있다. 산업혁명의 과학기술적 원동력이 다양한 형태의 에너지를 기계적 동력으로 변환시킬 수 있는 고효율 고강도 기계기술에 있었다면, 전자혁명의 원동력은 전기에너지를 동력매체가 아닌 정보매체로 활용할 수 있는 고속 저가 전자기술에서 기인하였다고 볼 수 있다. 이러한 역대 기술혁명의 연장선상에서 볼 때, 미래 제3의 기술혁명의 과학기술적 원동력은 다양한 형태의 정보매체를 고속, 고정도, 대량으로 다룰 수 있는 고성능 복합 정보제품의 저전력화 및 저렴화 기술에서 기인할 것으로 예견된다. 최근 기술선진국의 연구개발 역시 이러한 미래산업적 기술요구에 부응하기 위해 고부가가치 첨단제품의 경박단소화 기술개발에 집중하고 있으며, 이는 미래 지식사회가 요구하고 있는 복합정보제품의 크기 극미세

화를 통하여 제품의 성능, 용량 및 가격 경쟁력의 향상은 물론 이에 소요되는 에너지와 자원의 경제적 활용을 동시에 추구할 수 있기 때문이다.

미래 고성능 복합정보제품 개발에 필연적으로 요구되는 과학기술은 극미세 영역에서의 다양한 정보매체의 활용기능(즉, 기계, 열유체, 전기, 광파, 생화학적 나노정보매체의 감지, 처리, 분석, 표시, 저장 및 전달 기능)의 고성능화, 저렴화, 저전력화 기술이다. 전기적 나노정보매체(즉 전자와 정공)의 활용을 위한 나노전자소자의 개발은 20세기 전자혁명의 원동력이었던 집적회로 및 반도체기술을 기반으로 빠른 속도로 진행되고 있으며, 최근 NEMS(Nano Electro Mechanical Systems)기술분야에서는 전기적 나노정보매체 이외 기계, 열유체, 광파, 생화학적 나노정보매체를 다루기 위한 복합정보소자에 관한 연구도 활발히 추진되고 있다. 이처럼 다양한 형태의 나노정보매체를 다루기 위한 NEMS 기술은 극미세 영역에서 새로이 발견되는 나노과학적 지식과 나노구조의 제작을 위한 나노공정기술과의 결합을 통해, 미개척과학기술 영역에서의 도전적인 신기술을 창출함과 동시에 향후 21세기 지식기반시대가 필요로 하는 고부가

가치 복합정보제품의 극미세화 개발에 관한 새로운 기술혁명의 가능성을 제시하고 있다.

이 글에서는 NEMS 기술의 개요와 특성을 소개하고, 관련 소자기술과 공정 및 장비기술에 대한 전반적인 현황과 동향을 살펴본 후, 기술적 현안과 당면과제 그리고 향후 발전방향을 전망해 보고자 한다.

II. NEMS 기술개요 및 특성

최근 NEMS 기술에 산업적 관심이 고조되고 있는 이유 중의 하나는 20세기 반도체기술을 기반으로 전기적 나노정보매체를 다루는 전자정보소자의 경박단소화가 진행되었던 것처럼 21세기에는 보다 다양한 나노정보매체를 다루는 복합정보소자의 극미세화가 진행될 것으로 예측되기 때문이다. NEMS 소자기술의 측면에서 볼 때, 과거 전자소자가 후막 접속 형태에서 박막 접속 형태를 거쳐 박막 집적 형태로 발전하였듯이, 복합정보소자 역시 현재 개별소자 접속 형태에서 다수소자가 집적된 형태로 발전할 것이라 전망된다. 한편, NEMS 공정기술 측면에서는 향후 나노메카트로닉스기술에 의한 나노부품 공정기술과 반도체 기술을 기반으로 하는 나노소자 공정기술 그리고 MEMS기술에 의한 마이크로부품 공정기술간의 결합을 통하여 다양한 정보매체를 다룰 수 있는 복합정보제품의 다기능화, 고속화, 고정도화, 대용량화, 저전력화 및 저렴화를 이룰 수 있는 NEMS 공정기술로 발전될 것으로 예상된다. 그러나 여기서 유의해야 할 점은 전자요소만으로 구성된 나노전자소자와 기계, 열유체, 광파, 생화학 요소들로 구성된 복합정보소자와의 차이점이다. 따라서, NEMS 기술은 기존의 전기적 나노정보매체를 다루는

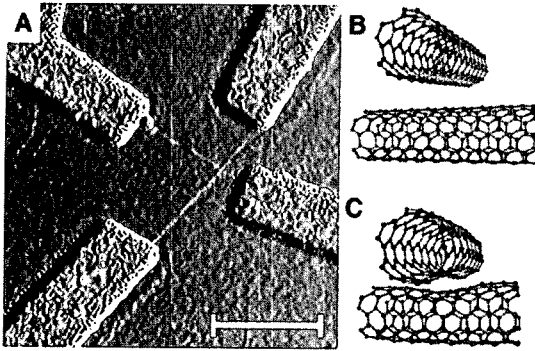
전자정보시스템의 극미세화 뿐만 아니라 기계, 열유체, 광파, 생화학적 나노정보매체를 함께 다룰 수 있는 복합정보시스템의 극미세화를 추구함으로써 미래 기계, 전자, 정보, 생명, 의료산업에서의 새로운 개념의 정보제품 창출에 최종목표를 두고 있다.

NEMS기술의 연구개발 활동은 크게 나누어 소자기술, 공정기술 그리고 소재기술 분야로 대별할 수 있으나, 본문에서는 주로 소자기술과 공정기술에 대해 중점적으로 다루고자 한다. 먼저 NEMS 소자기술의 경우, 기계, 열유체, 전자, 광학, 생화학적 나노구조물로 구성된 나노회로, 나노센서, 나노액추에이터 그리고 이들 나노소자들이 결합된 형태의 NEMS 개발에 집중되고 있으며, 기존 산업분야에서 사용되고 있는 기전복합소자 및 시스템의 경박단소화를 통한 경쟁력과 부가가치 증대 뿐만 아니라 새로운 나노정보산업의 육성과 혁신제품 창출에 더 큰 비중을 두고 있다. 한편, NEMS 공정기술의 경우, 고에너지빔을 이용한 리소그래피공정, 자발적인 분자간 결합력을 이용한 나노조립공정, 그리고 나노기계적 도구를 이용한 나노메카트로닉스 공정 등이 개발되고 있다.

III. NEMS 소자기술의 응용산업별 개발동향

1 전자 및 가전 분야

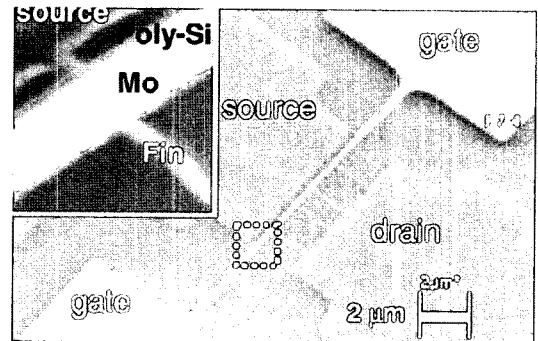
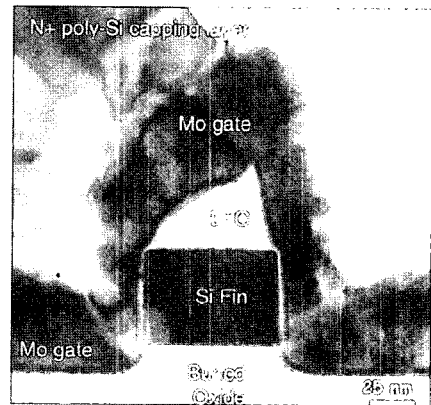
전자 및 가전 분야에서의 NEMS 소자기술 개발사례로는 나노전자소자와 고감도 센서 및 고정도 액추에이터 등을 들 수 있다. 2000년 서울대 임지순 교수팀은 미국 버클리대(UC Berkeley)와 공동연구를 통하여 삼각대형의 10nm 크기의



〈그림 1〉 탄소나노튜브를 이용한 트랜지스터^[1]

탄소나노튜브 트랜지스터(그림 1)를 개발했다고 보고한 바 있다. 나노튜브를 십자형으로 배열해 놓으면 금속성 나노튜브와 반도체성 나노튜브의 접합이 쇼트키 장벽효과를 보이고 다른 조합의 나노튜브 접합은 장벽효과가 없다. 그 결과 트랜지스터 기능을 완벽하게 수행하게 하면서 나노튜브끼리 겹쳐진 부분의 넓이를 10nm^2 로 축소함으로써 전자소자의 크기를 획기적으로 줄일 수 있는 것으로 평가되고 있다.

또 다른 NEMS 전자소자로서 1999년 미국 버클리대 (UC-Berkeley)에서 개발한 3차원 전자소자구조 편형 전계효과 트랜지스터(FinFET: Fin Field Effect Transistor)를 들 수 있다. 이는 2차원 평면 전자소자의 크기 축소에 기술적 한계요인으로 작용하는 단채널 효과를 줄이고 작동전류를 증가시키기 위해 물고기 지느러미처럼 수직으로 형성된 얇은 채널을 2개 이상의 게이트로 제어함으로써 채널에 대한 게이트 영향력을 증대시킨 나노전자소자이다. FinFET 이론을 창시한 버클리대 연구팀 출신의 KAIST 최양규 교수팀은 2004년 실리콘을 사용한 3nm 크기의 FinFET(그림 2)을 개발하였다. 이 소자는 2003년 일본 NEC가 발표한 4nm 평면 전자소자보다

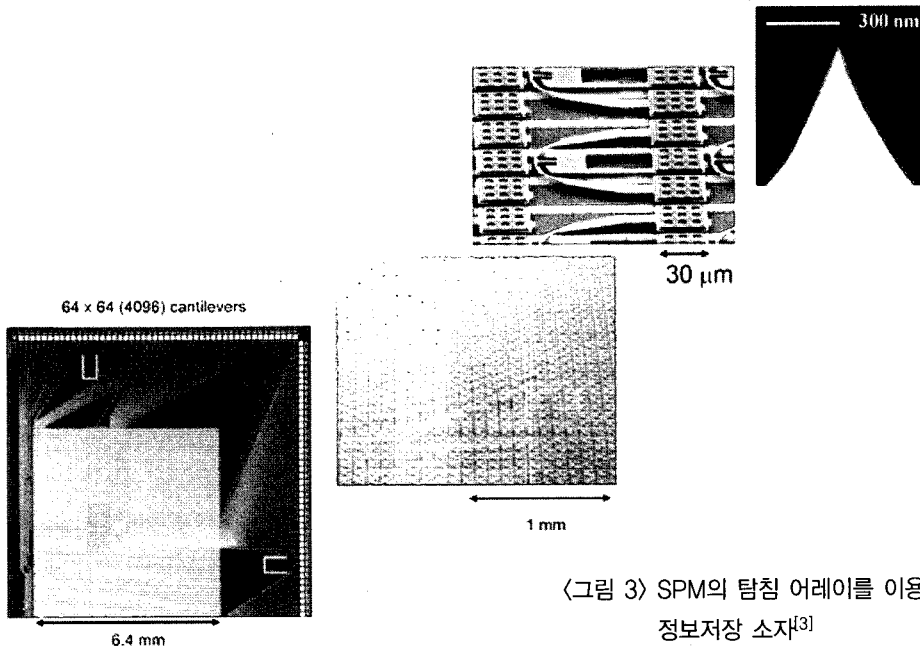


〈그림 2〉 몰리브덴 게이트를 이용한 FinFET의 TEM 단면사진과 SEM 평면사진^[2]

작을 뿐만 아니라 크기 축소에 따른 성능저하를 개선한 것이어서 테라비트(tera-bit)급 차세대 전자소자 개발에 획기적인 전기를 마련한 것으로 평가된다.

2 컴퓨터 및 정보 분야

컴퓨터 및 정보기기 분야에서의 NEMS 기술 개발은 현재 고해상도 잉크젯 프린터와 디스플레이, 그리고 고집적 정보저장기 분야에서 활발히 추진되고 있다. 고해상도 잉크젯 프린터는 대면적 컬러 인쇄 부분에서 레이저 프린터에 비해 가격 경쟁력 우위가 예상되어 꾸준히 기술개발

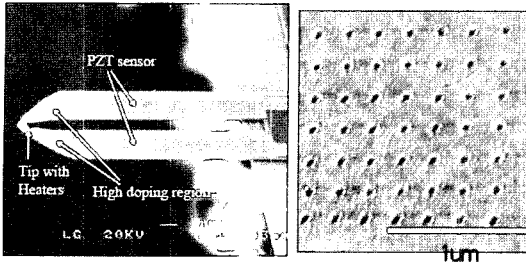


〈그림 3〉 SPM의 탐침 어레이를 이용하는 정보저장 소자^[3]

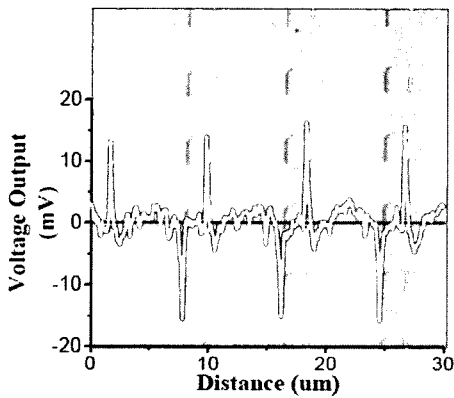
이 진행되고 있는 분야이다. 최근 정보저장기 분야에서는 정보저장과 검출의 대용량화, 고밀화, 고속화의 추세에 부응하기 위한 NEMS 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 2002년 IBM에서 발표한 Millipede 기술은 기존의 자기기록 방식의 단점인 초상자성(자성체의 크기가 어느 정도 이하로 작아지면 더 이상 독립된 자성을 유지하지 못하게 되는 현상)을 극복하고자, 자기적 혹은 전기적 수단을 이용하는 기존의 정보저장 방식 대신 나노탐침을 이용해서 박막형 기록매체 위에 각각의 비트를 나타내는 작은 구멍들을 만들어서 정보를 저장하고 읽어 들이는 방식이다. 이는 마치 초기 컴퓨터의 정보기록 방식인 천공카드와 매우 비슷하다고 할 수 있으며, 차이점이 있다면 천공카드와는 달리 읽고 쓰기를 계속 반복할 수 있다는 것과 예전의 천공카드의 구멍 하나의 크기에 삼십 억 개 이상의 비트를 저장할 수 있다는 점이다. 그림3과 같이 가로와 세로에

각각 64개의 탐침 어레이(총 4096개)가 동시에 정보를 읽고 쓰기 위해서 이동하며, 이를 통해 기존의 자기기록방식과 비슷한 수준의 읽기/쓰기 속도를 유지하되 정보저장 밀도를 $100\text{GB}/\text{in}^2$ ~ $500\text{GB}/\text{in}^2$ 수준으로 높임으로써 기존의 자기저장매체의 초상자성에 의한 저장밀도의 한계를 극복하였다.

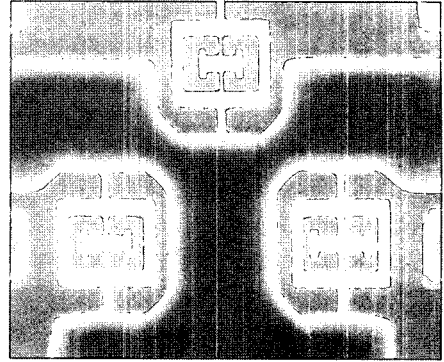
최근 국내 연구팀의 탐침형 정보저장기 개발 사례로 LG전자기술원(LG-ELITE) 남효진 박사팀의 열기록-압전검출 방식의 나노저장기를 들 수 있다. 2005년에 발표된 나노저장기(그림 4, 5)는 실리콘보다 기계적 특성이 좋은 질화실리콘을 사용하여 $128\text{개} \times 128\text{개}$ 의 2차원 외팔보 탐침 열을 제작하였으며, 각 외팔보 마다 히터와 압전 센서를 집적하여 PMMA 매질 위에 지름 40nm 의 크기로 정보를 기록하여 정보의 기록과 재생 속도의 향상을 꾀하였다.



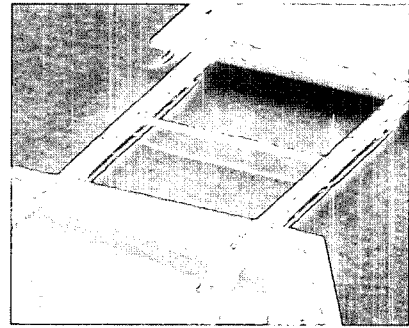
〈그림 4〉 제작된 외팔보형 탐침과 기록결과^[4]



〈그림 5〉 나노기록패턴의 검출결과^[4]



〈그림 6〉 나노구조(폭 100nm)를 이용한 RF 공진기^[5]

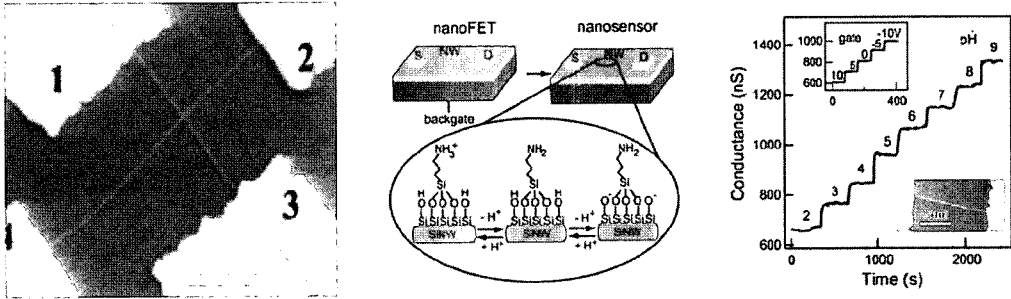


〈그림 7〉 나노구조를 이용한 나노기계적 신호증폭기^[5]

3. 통신 및 광학 분야

통신 및 광학 분야에서의 NEMS 기술개발은 다른 분야에 비해 비교적 빠른 속도로 추진되고 있으며, 극미세 광원과 나노광소자의 개발 그리고 반사경, 렌즈, 레이저, 감광소자 등 극미세 광학요소와 나노액추에이터를 결합한 다채널 광분배기, 광분리기, 광단속기 등 다양한 응용제품 개발이 진행되고 있다. 또한 개인용 휴대정보기기의 대중화에 따른 시장 확대로 휴대용 정보단말기에 대한 NEMS 기술의 적용이 시도되고 있으며, 이는 NEMS 기술을 이용하여 시스템의

크기와 부품의 수를 줄이는 데 집중하고 있다. 특히, RF 통신분야에 사용되는 NEMS소자는 고주파 통신에서의 신호처리를 위한 필터, 공진자, 스위치, 믹서 등이 있으며, 기존 마이크로미터 소자에서의 주파수대역과 소비전력에 관한 성능한계를 극복하기 위해 수십 nm 크기의 구조물을 기반으로 한 나노RF소자연구가 진행되고 있다. 최근 미국 California Institute of Technology의 Roukes 연구팀은 폭 수십 nm에 최고 공진주파수 12GHz에 이르는 NEMS 공진기(Resonator)를 구현하는데 성공하였는데, (그림 6)의 소자는 수GHz에 이르는 주파수 대역을



〈그림 8〉 나노 와이어를 이용한 바이오 센서^[6]

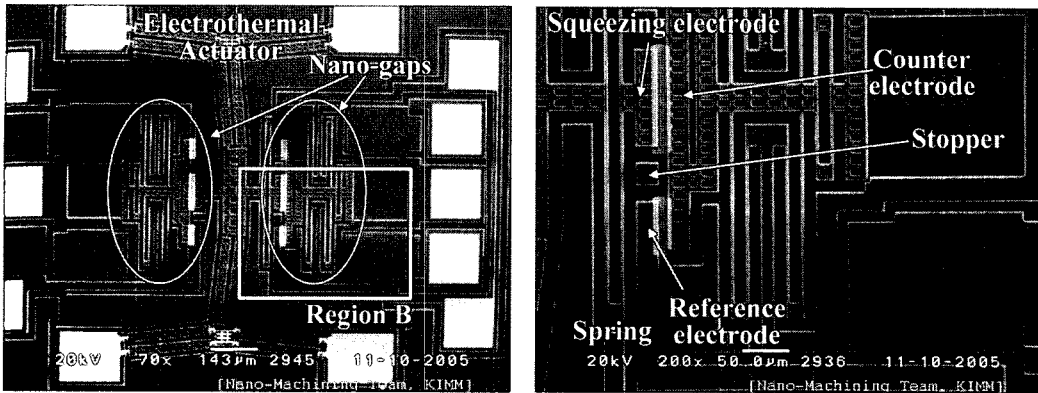
가짐과 동시에 저전력 구동이 가능하여 향후 통신분야의 신호처리에 중요하게 사용될 것으로 기대된다. 또한 동일 연구팀에서 개발한 나노기계적 신호증폭기(그림 7)는 나노미터 수준의 기계적 움직임을 마이크로 영역으로 증폭하여 기존 MEMS 소자들이 처리할 수 있는 수준으로 1000배 이상 증폭하여 나노소자와 마이크로소자간의 매개소자로서의 기능을 확인하였다.

4. 바이오 및 의료 분야

바이오 및 의료 분야에서의 NEMS 기술은 주로 유전체, 단백질, 세포 등 극미세 생물학적 정보매체의 감지, 처리, 분석에 관한 것으로 최근 생화학 물질분석기와 극미세 진단분석기 개발에 많은 관심을 보이고 있다. 특히 나노바이오 센서와 펌프, 히터, 밸브, 유로 등 마이크로 열유체 소자 등으로 구성된 휴대용 진단기와 일체형 분석기(Lab-on-a-chip) 등의 경우, 소재의 인체 친화성 및 신뢰성 분석과 함께 장기적인 임상시험과 의학적 검증이 무엇보다 중요한 문제로 부각되고 있다. 최근 새로운 바이오센서의 개발함에 있어서, 나노바이오 센서 개발의 경우, 나노구조물을 사용하여 바이오물질의 감지한계를

극복하기 위한 연구가 시도되고 있다. 일례로, 실리콘 나노선(nanowire)의 표면을 3-APTES (AminoPropyl TriEthoxySilane)으로 코팅하여 나노선의 전도도 변화를 통해 pH 변화를 실시간으로 측정할 수 있는 바이오센서(그림 8)가 개발되었다. 단일 나노선을 이용한 경우와 함께 여러 개의 나노선을 사용하여 다수의 바이오물질을 동시에 검출하고자 하는 연구도 시도되고 있다. Lieber 그룹에서는 3개의 실리콘 나노선에 각각 서로 다른 항체를 고정하여, 항체와 결합된 단백질의 전하에 의해 나노선의 전도도가 변하는 원리를 이용하여 당나귀 혈청에서 3가지 바이오물질(PSA, CEA, mucin-1)을 동시에 검출하였다.

한편 최근 제안된 새로운 방식의 나노바이오 센서로서 나노기계적 단백질 검출기를 들 수 있다. 2005년에 발표된 나노기계적 단백질 검출기는 단백질의 기계적 물성측정에 근거한 것으로, 종래 광학적 또는 전기적 방법에 의한 단백질의 최소검출 한계를 극복한 새로운 방식의 단백질 검출기이다. 나노기계적 단백질 검출기에서는 나노구동기를 이용하여 항체가 고정된 나노간극의 한쪽 벽면을 반대쪽 고정 벽면으로 밀어 압착시키면 항체와 결합된 단백질의 유무와 농도



〈그림 9〉 나노기계적 단백질검출기의 전체 SEM 사진 및 부분 확대도^[7]

에 따라 나노구동의 입력변위와 나노간극의 이동변위간의 상호특성이 달라진다 이러한 단백질의 나노기계적 물성측정을 근거로 하여 5nM의 Streptavidin과 M-antibiotin의 크기와 농도를 실험적으로 반복성 있게 측정하였다.

IV. NEMS 공정 및 장비기술 개발동향

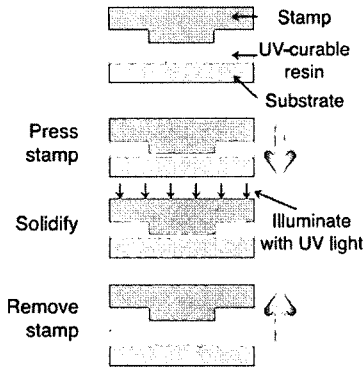
NEMS 제작을 위한 공정 및 장비기술은 가공 원리와 접근방식에 따라 하향식(Top-down), 상향식(Bottom-up) 그리고 혼합식(Mixed) 공정기술로 나눌 수 있다. 하향식 공정기술은 기존 공정기술의 세밀화와 고정도화를 통한 축소지향적 공정기술 개발을 의미하며, 대표적인 예로는 기계적 패턴전사를 이용하는 “소프트 리소그래피(SL: Soft Lithography)”를 들 수 있다. 상향식 방식으로는 원자·분자 단위의 자발적 조립 및 결합을 이용하여 나노구조물을 제작하는 “자발적 조립공정”을 들 수 있다. 또한 혼합식 방법으로는 지난 40여년간 반도체 공정기술의 근간이 되어온 UV 리소그래피의 선폭한계(0.1µm)를 극복하기 위한 E-beam, Ion-beam, X-ray 등 “에너지

지빔 리소그래피”를 들 수 있다. 이들 하향식, 상향식, 혼합식 가공기술은 각각 10-100nm, 2-10nm, 25-100nm 영역의 나노구조물 제작에 효과적인 것으로 알려져 있다.

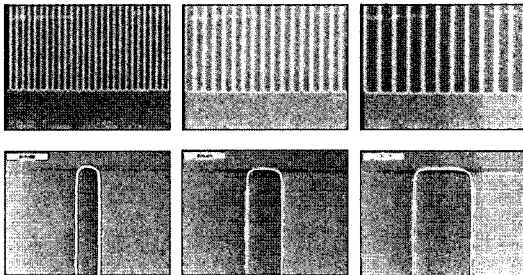
1. 소프트 리소그래피

소프트 리소그래피(SL)는 주형이나 스탬프(stamp) 등 엘라스토머(보통 PDMS)재질의 마스터를 이용하여 기계적인 방식으로 패턴을 만들거나 패턴을 전사하는 제조기술을 통칭하여 일컫는다. 이러한 소프트 리소그래피는 UV 리소그래피나 마이크로 제조기술에 비해 편평하지 않은 기판(substrate)에 대면적 나노구조물 패터닝에 유리하다는 장점이 있다. 특히 NEMS의 광학, 기계 및 열유체 구조물 제작이나 단층 단순 구조물 제작에 유용하다. 소프트 리소그래피 관련 세부 공정기술로는 나노프린팅, 나노몰딩, 나노탐침 공정기술을 들 수 있으며, 이들은 각각 50-100nm, 10-100nm, 2-50nm 크기영역의 나노구조물 제작에 효과적이다.

나노인프린팅(NIL: Nano Imprint Lithography)



〈그림 10〉 나노임프린트 공정도^[8]



〈그림 11〉 제작된 미소 패턴의 사진 (최소 50nm까지 구현하는데 성공함)^[9]

공정기술은 UV 리소그래피의 한계인 선폭 100nm이하의 나노패턴을 효과적으로 양산할 수 있는 기술로서 미국 미네소타대학의 Chou교수팀이 제안한 가공기술이다. 현재 최소 25nm수준의 미소패턴을 제작하는데 성공하였지만 고압공정이 요구되고 열변형에 의해 다층정렬이 어렵다는 한계를 가지고 있다. 이에 최근 한국기계연구원(KIMM) 이응숙 박사팀은 다단분출(Multi-dispensing)에 의한 UV-NIL 기술을 제안하였으며, 투명한 석영 스탬프를 사용하여 UV-경화성 수지로 나노 패턴을 구현하는데 성공하였다. 이러한 다단분출방식은 그림 10의 공정 모식도와 그림 11의 제작된 패턴에서 보는 바

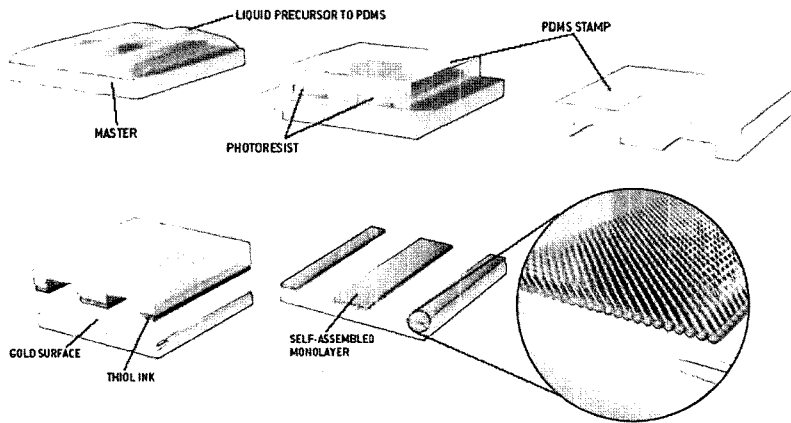
와 같이 기판 전체에 수지 액적을 분출하여 대면적 가공과 공정시간의 단축으로 생산성 향상을 꾀하였다.

나노접촉프린팅(Nano Contact Printing) 공정기술은 그림 12에 나타난 바와 같이 전자빔으로 패턴된 마스터를 이용하여 PolyDimethylsiloxane (PDMS) 등의 고분자물질로 스탬프를 제작하여 사용한다. 스탬프 위에 잉크분자를 자체 정렬하여 잉크가 묻은 스탬프와 기판과의 접촉에 의해 self-assembled monolayer(SAM)을 기판로 전사한 후 이를 습식식각 마스크로 사용하여 나노구조물을 제작한다.

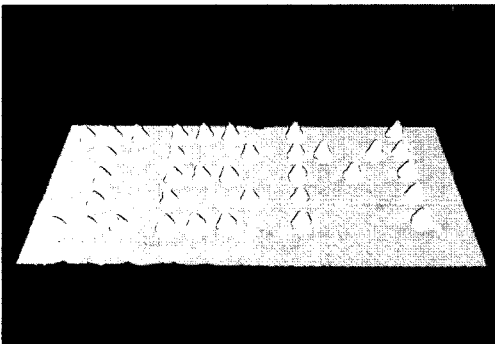
나노탐침(NanoProbe) 공정기술은 원자힘현미경 (AFM: Atomic Force Microscope)탐침을 사용하여 나노입자들을 기판 위에 정확하고 반복적으로 위치시켜 나노구조물을 제작하는 방법이다. 이는 마치 구식 축음기가 음반의 홈을 읽어 가는 방법과 같은 방식으로 탐침을 끌고 다니면서 원자 및 분자 단위의 조각과 나노리소그래피 등에 적용 가능하지만, 생산성이 낮아 주로 시제품의 제작 혹은 결함보수에 사용되며 생산성 향상을 위해 다수의 탐침을 가진 나노탐침 에레이 장비가 개발되고 있다.

2. 에너지빔 리소그래피

에너지빔 리소그래피 공정기술에는 사용하는 에너지빔의 종류에 따라 전자빔, 이온빔, X-선 리소그래피 공정으로 나눌 수 있다. 첫째, 전자빔 리소그래피(EB: E-beam Lithography)의 경우, UV 리소그래피와는 달리 파장에 제한을 받지 않기 때문에 나노미터 크기의 패턴닝이 가능하다. 하지만 이 방식은 UV 리소그래피와는 달리 한 번에 웨이퍼 전면에 전자빔을 주사할 수



〈그림 12〉 나노접촉프린팅 가공공정^[10]



〈그림 13〉 탐침조립방식으로 원자를 이동시켜 구현한 글자 'IBM'^[11]

없기 때문에 가공속도와 가격문제로 인해 마스크 제작에 주로 이용되고 있다. 이러한 단점의 극복을 위해 프로젝션 테크닉을 사용하는 EPL(Electron Projection Lithography) 공정기술 개발이 이루어지고 있다.

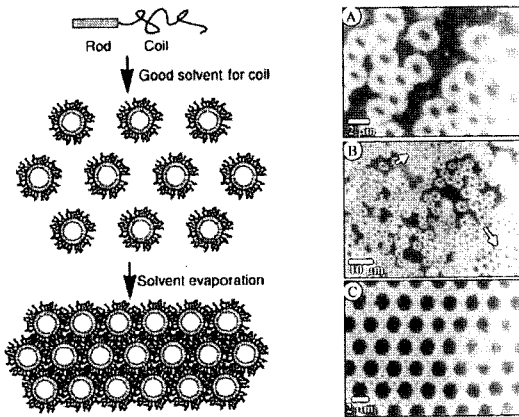
둘째, 집중 이온빔 리소그래피(FIB: Focused Ion Beam Lithography)는 전자빔(EB)리소그래피와 유사하지만, 자기식 렌즈 대신 정전식 렌즈를 사용한다는 점이 다르다. 또한 이온은 기판과 반응할 수 있으므로 선택적인 도핑(doping)과

같은 다양한 종류의 표면재질 형성이 가능하다. 하지만 EB리소그래피와 마찬가지로 가공속도가 느리고 진공을 필요로 하는 단점이 있다.

마지막으로, X-선을 이용한 리소그래피는 방사선 가속기에서 생성되는 0.5~4nm 파장의 X-선을 이용하는 가공기술로서, 광학시스템을 사용하지 않기 때문에 1:1패턴 전사만이 가능하다. 전자빔이나 이온빔 리소그래피와는 달리 전하 입자가 아닌 X-ray를 사용하므로 진공이 필요 없고, 대량노출이 가능하여 처리속도가 빠르고, 두꺼운 레지스터의 가공도 가능한 장점이 있으나, X-선 발생에 소요되는 비용이 높다는 문제가 있다.

3. 자발적 조립공정

탐침을 사용한 분자 조립공정은 속도가 매우 느리고 제작하고자 하는 구조물의 기하학적 형상에 한계가 있어, 보다 양산성이 우수한 입자간 자발적 조립과 결합을 이용한 자발적 조립공정이 대두되었다. 이는 직경 수십nm의 미세입자들을 용액 내에서 자기조립을 통해 원하는 구조



〈그림 14〉 Block co polymer를 이용한 자가조립 방식의 다공성 구조물^[12]

물을 생산하는 방식으로 속도가 빠르고 대량생산이 가능해 실제 산업에 적용하는데 유리하다는 이점을 가지고 있다. 최근 미국 로체스터대학(Univ. of Rochester)의 Chen교수 연구팀은 (그림 14)와 같이 Block Co-polymer를 이용한 자가조립 방식의 다공성 구조물을 제작하는데 성공하였으며, 이는 수십nm수준의 미세한 공극을 가지는 구조물을 구현하였을 뿐 아니라 양산성이 높아 산업적 응용이 기대된다.

V. 기술현안 및 향후 발전방향

1. NEMS 소자기술

지금까지 NEMS 기술을 이용한 복합정보소자의 연구개발은 주로 나노크기의 기능 구조물의 개발과 단위소자의 원리검증에 집중되어 있다. 하지만 현재 개발된 NEMS 소자를 이용한 제품개발과 다양한 산업분야로의 적용을 위해서는 몇가지 과학기술적 문제점을 해결하여야 한다, 우선 극미세 영역에서 일어나는 물리현상

에 대한 이론적 규명과 실험적 검증이 필요하며, 나노소자에서의 극미세 신호의 잡음문제, 나노구조물 가공공정 오차에 의한 나노소자의 성능 균일성 문제, 그리고 나노소재 물성의 재현성 문제 등을 해결하기 위한 원천기술의 확보가 필요하다. 이러한 나노소자의 실용성 확보를 위한 과학기술적 문제를 해결하기 위하여 KAIST 디지털나노구동연구단에서는 생물체의 나노구조와 원리를 분석하고 이를 모사하려는 시도를 하고 있다. 최근 이러한 생명체 모사연구를 통해 단위 나노소자 개발은 물론 나노소자간의 연계와 접속을 통한 나노모듈과 나노시스템 구성과정에서 발생하는 NEMS 기술의 한계와 기술적 난관을 극복하려는 시도가 전개되고 있다.

2. NEMS 공정기술

NEMS 공정기술은 최근 나노소자에서 요구되는 다양한 물성과 특성을 지닌 나노재료의 개발이 활발히 전개됨에 따라 더욱더 다양한 형태의 공정기술 개발이 필요할 것으로 전망된다. 특히 공정기술의 산업적 적용을 위해서는 공정기술의 가공 정확성, 수율, 재현성 그리고 타 공정기술간의 연계성 확보와 함께 대면적, 고속, 저가 가공을 통해 생산성 향상을 이룰 수 있는 장비의 개발이 요구되고 있다. 이러한 대면적, 고속, 저가 가공공정과 장비의 개발을 위해 현재 추진중인 프론티어사업인 나노메카트로닉스 기술개발사업의 중요성이 부각되고 있으며, 향후 나노공정 및 장비기술 분야에서의 선도적인 역할이 기대된다. 특히 다양한 나노정보매체의 취급을 위한 기능성 나노소재를 사용한 상향식 공정기술과 하향식 공정기술 간의 연계 공정기술 개발, 나노소자 간의 조립과 접속 공정기술 개발을 통한 모듈

과 시스템 구성기술, 그리고 나노소재 물성과 나노소자 성능의 분석과 신뢰성 평가를 위한 장비 기술 개발도 병행될 것으로 전망된다.

VI. 맺음말

NEMS 기술은 기존의 전기적 나노정보매체를 다루는 전자정보시스템의 극미세화 뿐만 아니라 다양한 형태의 기계, 열유체, 광파, 생화학적 나노정보매체를 함께 다룰 수 있는 복합정보시스템의 극미세화를 통하여 기계, 전자, 정보, 생명, 의료산업에서의 다기능, 고성능, 저전력, 저가 신제품 창출과 폭 넓은 산업분야로의 기술 파급 효과가 예상된다. 최근 기술선진국에서의 NEMS 기술에 대한 관심과 투자의 목적은 일차적으로 미래 핵심기술의 기반 확보와 관련 지식재산권의 선점에 있다고 볼 수 있다.

NEMS 핵심기술 확보를 위해서는 1)나노영역에서의 현상과 원리에 관한 실험적 규명을 통한 새로운 나노과학 발굴과 검증, 2)다양한 나노정보매체를 다룰 수 있는 새로운 기능의 나노소재 기술 개발, 3)나노과학적 지식을 기반으로 다양한 나노정보매체를 취급할 수 있는 새로운 개념의 나노소자기술 개발, 4)다양한 나노소재를 대상으로한 나노공정기술 개발이 필요하다.

특히 국제경쟁력을 갖춘 NEMS 기술개발을 위해서는 상기 기술개발 활동과 주체들 간의 종합적 연계구축이 무엇보다 중요하며, 연계구축을 통한 국가적 핵심역량의 결집을 위해서는 1) 다학제적 주변기술을 이해하고 특정기술에 대한 전문성을 겸비하여 학제적 공동연구가 가능한 창의적 전문인력의 양성, 2)기술 및 산업별 역할분담에 근거한 산학연 공동연구 체계 구축 및 환경 조성, 3)기술개발의 저변확대, 기동성 및

경제성 향상을 위한 장비와 시설 인프라의 효율적 운영이 요구된다.

또한 향후 NEMS 기술의 성숙을 위해서는 학문분야별 과학기술 투자정책에서 기술분야별 다학제간 과학기술 투자정책으로의 전환과 국가적 차원에서 역량을 결집할 수 있는 학문간 연계성 구축 그리고 효과적인 기술개발 전략을 구사할 수 있는 기술개발 체계의 선진화가 무엇보다 요구된다.

===== 참고문헌 =====

- [1] M.S. Fuhrer, J. Nygard, L. Shih, M. Forero, Y.-G. Yoon, M.S.C. Mazzoni, H.J. Choi, J. Ihm, S.G. Louie, A. Zettl, and P.L. McEuen, "Crossed Nanotube Junctions," *Science*, Vol.288, No.5465, pp.494-497, 2000.
- [2] D. Ha, H. Takeuchi, Y.-K. Choi, and T. J King, "Molybdenum Gate Technology for Ultrathin-body MOSFETs and FinFETs," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.51, No.12, pp.1989-1996, 2004.
- [3] P. Vettiger, G. Cross, M. Despont, U. Drechsler, U. Durig, B. Gotsmann, W. Haberle, M.A. Lantz, H.E. Rothuizen, R. Stutz, and G.K. Binnig, "The Millipede-Nanotechnology Entering Data Storage," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol.1, No.1, pp.39-55, 2002.
- [4] Hyo-Jin Nam, Y.-S. Kim, S. Lee, W.-H. Jin, S.S. Jang, I.-J. Cho, and J.-U. Bu, "Integrated Nitride Cantilever Array with Si Heaters and Piezoelectric Detectors for Nano-data-storage Application," *IEEE International MEMS Conference (MEMS 2005)*, pp.247-250, 2005.
- [5] M.L. Roukes, "Nanoelectromechanical Systems," *Technical Digest of the 2000 Solid-State Sensors and Actuator Workshop*, pp.1-10, 2000.
- [6] Y. Cui, Q. Wei, H. Park, and C.M. Lieber,

“Nanowire Nanosensors for Highly Sensitive and Selective Detection of Biological and Chemical Species,” *Science*, Vol.293, No. 5333, pp.1289-1292, 2001.

- [7] W.C. Lee and Y.-H. Cho, “Nanomechanical Protein Detectors Based on the Mechanical Property Measured by Nano-gap Actuators,” *Current Applied Physics*, 2005.
- [8] S.Y. Chou, P.R. Krauss, W. Zhang, L. Guo, and L. Zhuang, “Sub-10nm Imprint Lithography and Applications.” *Journal of Vacuum Science and Technology*, Vol.B15, No.6, pp.2897-2094, 1997.
- [9] J. Jeong, Y. Sim, H. Sohn, and E. Lee, “UV Nanoimprint Lithography using an Element-wise Embossed Stamp,” *International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems (ICMENS 2004)*, pp.233-236, 2004
- [10] A. Bernard, J.P. Renault, B. Michel, H.R. Bosshard, and E. Delamarche, “Microcontact Printing of Proteins,” *Advanced Materials*, Vol.12, No.14, pp.1067-1070, 2000.
- [11] D.M. Eigler and E.K. Schweizer, “Positioning Single Atoms with a Scanning Tunneling Microscope”, *Nature*, Vol.334, No.5 pp.524-526, 1990.
- [12] S.A. Jenekhe and X.L. Chen, “Self-Assembly of Ordered Microporous Materials from Rod-Coil Block Copolymers,” *Science*, Vol.283, No.5400, pp.372-375, 1999.

저자소개



조영호

1980년 영남대학교 기계공학 학사
 1982년 KAIST 기계공학 석사
 1990년 University of California at Berkeley 박사
 1982년-1986년 KIST CAD/CAM 연구실 연구원
 1987년-1990년 BSAC, ERL Research Assistant
 1990년-1991년 Berkeley Sensor and Actuator Center (BSAC), Electronics Research Laboratory (ERL), Post-doc.
 1991년-1994년 KAIST 기계기술연구소 선임연구원
 1994년-현 재 KAIST 기계공학과 조교수, 부교수, 교수 (겸임)
 2000년-현 재 창의적연구진흥사업 디지털나노구동연구단 단장
 2002년-현 재 KAIST 바이오시스템학과 부교수, 교수
 주관심분야 Bio-inspired N/MEMS, Digital Nanoactuators and Nanodetectors