

나노메카트로닉스 기술개발 사업 소개

이상록 · 최준혁

(과학기술부 21C 프론티어연구개발사업 나노메카트로닉스기술개발사업단)

Nanoscale Mechatronics & Manufacturing Technology

S. R. Lee and J. H. Choi

1. 사업 개요

1.1 배경

과학기술부의 21 세기 프론티어연구개발사업은 선도적 기술의 조기확보를 통해 국가경쟁력을 확보하고 국민소득 2 만불 시대의 국가경제력을 실현하기 위한 국가적 전략 사업으로 추진되고 있으며, 이 일환으로 나노메카트로닉스기술개발 사업은 2002년 7 월 출범하였다.

최근 중요한 미래성장동력의 하나로 전 세계적으로 주목 받고 있는 나노메카트로닉스 기술은, 기계·전기·전자와의 3 축 복합기술로 정의되는 기존의 메카트로닉스 기술 위에 나노 물질을 다루고 나노 세계에서의 물리적 현상을 연구하는 나노 과학의 역할이 더해진 새로운 의미의 융합기술이라고 설명될 수 있다. 본 사업단에서는 나노 메카트로닉스 기술 개발을 통해, 나노 기술의 실용화를 앞당기기 위해 필요한 저가의 대량 생산 방식의 공정기술과 생산장비 기술을 확보 함으로써 21 세기 국가과학 기술 경쟁력을 확보 하는데 그 목표를 두고 있다.

1.2 사업목표 및 내용

본 사업의 최종목표로는 ‘나노단위에 이르는 극 미세 산업용 부품을 제조하기 위한 공정기술 및 공정장비를 개발’하여, 나노기술 실용화를 앞당기는 데 중요한 역할을 하고자 한다. 기술의 세부 목표로는 다음과 같다.

- 100nm, 50nm, 10nm 의 나노선, 흄, 구조로 구성된 차세대 평면 및 입체형상 공정제어 기술 개발

· 기존 특수공정기술의 고도화를 통한 나노 입체형상 공정제어기술 개발

· 공정기술의 제품적용기술 개발(나노무선통신부품, 나노 바이오센서, 나노화학센서, 나노 광부품, 나노저장기 등)

- 정밀도 5nm 의 3 차원 나노형상 복합가공기 개발
- 나노구조의 해석 제어 형상/특성 측정기술 개발

표 1 단계별 연구목표 및 내용

		나노메카트로닉스기술개발 및 인프로구축
1 단계	선풍 100nm 급	<ul style="list-style-type: none">- 선풍 100nm 급 패턴공정기술- 20nm 급 32x32 병렬 프로브 공정기술- 100nm 급 나노패턴장비- Nanofluidic 부품의 유동/물질/열전달 해석기술
		나노메카트로닉스 응용기술개발
2 단계	선풍 50nm 급	<ul style="list-style-type: none">선풍 50nm 급 패턴공정기술- 10nm 급 100x100 병렬 프로브 공정기술- 50nm 급 3 차원 나노복합 가공기- Multi-physics 연성 해석 및 설계 기술

3 단계	선풍 10nm 급	사업화를 위한 전략 ITEM 개발
		<p>선풍 100nm 급 패턴공정기술 - <u>프로브공정의 고생산성화 및</u> 제품 적용공정기술 - 10nm 급 3 차원 나노복합 가공 기술개발 - 해석 시스템 Integration 및 설계 S/W</p>

본 사업은 3 단계로 나누어 추진되며, 1 단계에서는 100nm 급 선풍 구현을 목표로 나노메카 트로닉스 기반기술 및 인프라를 구축하고자 하며, 2 단계에서는 응용기술개발을 통해 보다 기능성 높은 기술로 다변화하고, 3 단계에서 본격적인 실용화 기술로 발전시켜 뚜렷한 시장을 확보 하고자 한다.

1.3 사업추진체계

본 사업은 상호연계된 4 개 기술군으로 나누어, 연구개발 업무를 추진하고 있다. 즉, 나노패터닝 기술, 나노프로브 응용기술, 나노공정장비기술, 나노공정기반기술로 구성되어 있으며, IT, BT, ET, 및 기존의 전통산업 분야에도 다양하게 적용될 수 있는 잠재성을 가지고 있다. 기술별 연구개발 내용은 다음과 같다.

· 나노패터닝공정기술

현재 실험실 수준에서 100nm 선풍 패터닝이 가능한 수준이나 장기적으로는 선풍을 10nm 까지 가능한 기술로서, 산업전반에 기대효과가 큰 엠보싱, 임프린팅 및 몰딩공정기술과 이를 이용 한 나노부품 적용기술을 개발하는 분야이다.

· 나노프로브 응용기술

지금까지 프로브를 이용한 100nm 선풍 구현이 국내 실험실에서 가능한 수준이며, 세계적인 수준인 20nm 급에 조기에 도달한 후, 고속화 및 제품 응용쪽으로의 기술 innovation 을 하고자 한다. 기능성 텁 분야에 있어서도 다양한 기능 중에서 국내 기반이 있는 텁 중심으로 조기에 5nm 급에 도달한 후 제품화에 주력할 것이다. 이를 위해 고속화가 필히 수반되어야 하므로, 고속 가공 및 고속 기능화 칩을 위한 병렬 프로브 시스템을 통해 생산성 향상을 도모할 것이다. 복합화된 나노 칩 등 프로브 응용기술의 제품 적용을 위해 서는 나노

조작 및 조립 등의 생산공정을 개발 해야 하므로 이를 위한 생산공정 기술을 개발 하여 프로브 응용공정 기술 산업화가 필요 하다.

· 나노장비 기술

3 단계의 연구에 걸쳐서 1 단계는 100nm 선풍 나노패턴 장비를 개발하고, 2 단계는 50nm 선풍의 3 차원 나노복합가공기를 개발하며, 3 단계에서는 10nm 선풍의 3 차원 나노복합기공기 개발을 목표로 하고 있다. 2 단계와 3 단계에서는 기계적인 가공방법으로 달성하기가 어렵기 때문에 50nm~10 nm 프로빙 공정을 복합화하고, 나노구조물을 가지는 부품을 제작하기 위한 조립기술 및 복합 클러스터링 장비기술을 적용하여 최종적인 연구 목표를 달성할 계획이다.

· 나노공정 요소기술

나노공정 요소기술은 해석기술과 측정 및 평가 기술로 구분된다. 나노공정측정 및 평가 기술은 나노공정용 소재의 기계적/광학적/ 전자기적 물성을 측정하고 측정된 결과를 D/B 화 하여 향후 나노기술 연구를 위해 활용될 수 있도록 하고자 한다. 측정방법 개발과 아울러 하드웨어 적인 장치 개발과 신뢰성 평가를 위한 기반구축 연구도 수행하고 있다. 한편, 해석관련 과제에서는, Macroscale 에 대해서는 기존의 FEM(finite element method)이나 FDM(finite difference method)을 이용하고 Nanoscale 은 MD(molecular dynamics), QM(quantum mechanics) 등을 이용하는 Multiscale 해석 기법과 프로그램을 개발하고 있다. 또한, 개발된 해석/설계 프로그램을 사용자가 편리하게 사용할 수 있게 하기 위하여 사용자 인터페이스 및 전·후 처리 가시화 프로그램을 개발하고자 한다.

2. 국내 · 외 나노기술 동향

2000년 2월 미국은 범부처적인 종합계획으로 국가 나노기술개발 전략(National Nanotechnology Initiative)을 선언하고 국가적인 규모의 나노기술 연구개발을 본격적으로 착수한 이후, 각국에서는 나노기술을 미래성장동력의 핵심기술로 지정하고 기술개발 경쟁에 뛰어들게 되었다. 그 다음해인 2001년 일본은 나노기술 육성계획(n-21)을 수립하였으며, 나노기술 연구개발을 IT, BT, 에너지, 환경, 재료분야와 접목시켜 5~10년내 실용화

를 목표로 사업을 추진중에 있다. 유럽연합은 1998~2002년 2억 유로를 나노기술에 투자하였으며, 2003~2006년 제6차 FP6에서는 총 13억 유로 이상을 나노기술 분야에 집중 투자하여 기반구축 및 R&D 프로젝트 추진 중에 있다. 국가별 나노기술 지원 기관을 보면, 독일의 BMBF(Federal Ministry of Education and Research), 영국의 LINK 나노기술 협력 프로그램, 프랑스의 CNRS(Center for National Research and Science), 스위덴의 국가과학기술청(NUTEK), 스위스의 IBM 연구소 등이 있다. 한편, 중국, 대만, 호주, 싱가폴 등의 아시아 국가에서도 대규모 인프라 투자와 기술 개발 사업추진을 통해 나노기술 개발을 국가적인 노력을 기울이고 있다.

국내에서는 2001년 나노기술 종합 발전계획을 수립하고, 과학기술부의 21세기프론티어 연구개발 사업, 창의적 연구진흥사업, 국가지정 연구 실사업 등을 통해 나노기술 연구개발을 추진해 가고 있다. 산업자원부는 2001년 7월 나노기술 산업화 지원센터를 설립하고, 5년간 총 570억원(정부 370억원)을 투입할 계획이며 이 센터는 나노소자개발센터 등 3개 센터로 구성되어 있다. 2003년에서는 나노기술발전 시행계획 확정 및 나노기술 개발 촉진법 시행령이 공포되어 나노기술 연구개발을 제도적으로 지원할 수 있는 틀을 마련하였다.

3. 연구개발 성과

1년간의 사업추진을 통해, 1단계 목표인 기반기술 구축 및 인프라 구축을 위한 기초연구를 수행한 결과, 본 사업단은 논문 총 124편, 특히 22건 출원 성과를 거두었다. 무엇보다도 수십나노에서 수백나노급 선폭구현을 실현함으로써 1단계 목표인 100nm급 선폭의 안정적 구현에 근접했다는 점에서 기술개발 성공 가능성을 확인할 수 있었다.

본 사업단에서 시도하고 있는 나노급 선폭 구현은, 기존의 광 리소그래피 방식이 아닌 기계·화학적 각인방식으로 마스터 기판위에 나노사이즈 패턴을 새기고 타겟기판 위에 각인 또는 접촉식으로 패턴을 전사하는 방식이다. 공정의 초기단계로 먼저 마스터 제작이 필요하며, 이를 위해 e-beam, holographic lithography, electroforming,

UV laser 등의 다양한 방법이 사용되었다. 제작된 마스터 패턴의 모습은 각각 그림 1과 2에 나타나 있다.

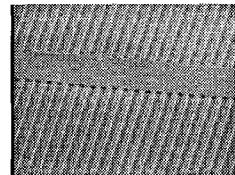


그림 1 전자빔(e-beam)공정과 RIE 공정을 마친 후 제작된 quartz 마스터 패턴
(선폭: 377nm)

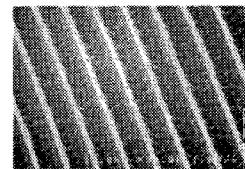


그림 2 Holography Lithography에 의해 PR 위에 제작된 마스터 패턴(선폭 157nm)

제작된 마스터는 UV imprint, thermal embossing, nanomolding, contact printing 등의 non-lithographic method에 의해 TSR820(UV curable polymer의 일종), PMMA, Photopolymer 등의 다양한 폴리머 기판위에 전사가 이루어졌다. 또한, 금속 나노스탬프 제작은, PR 위에 E-beam이나 홀로그래픽 리소그래피 공정으로 나노패턴을 제작하고, seed layer 증착후 electroforming 공정을 통해 이루어졌다. 이는 기존의 마스터를 가지고 다수의 스패드를 제작할 수 있어 고가의 마스터 수명을 연장시킬 수 있는 장점이 있으며, 또한 노광 후 식각공정에서 발생할 수 있는 CD(critical dimension) 오차를 최소화 할 수 있는 CD(critical dimension) 오차를 최소화 할 수 있는 방법이다.

그림 3은 EVG620 UV imprinting 장비를 사용하여 패턴전사한 모습을 보여주고 있다. 그림 3의 실험에서는 대면적화 기술의 하나로 다중 양각 형태의 스팸프가 사용되었다. 그림 4는 실리콘 마스터 패턴을 mri-8020(Microresist Tech.사의 가열식 임프린팅용 폴리머)위에 전사한 200nm

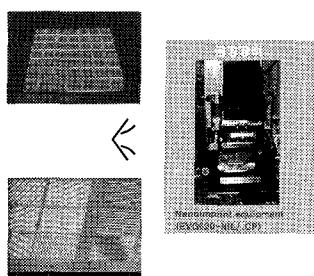


그림 3 다중양각 quartg 마스터 (스탬프)을 가지 고 UV 임프린팅 방법에 의해 제작된 나 노사이즈 패턴

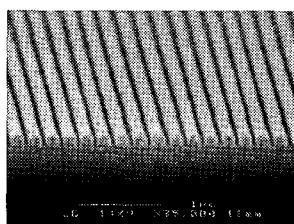


그림 4 Thermal Imprinting (가열식 임프린팅) 에 의한 200nm 금 grating pattern transfer

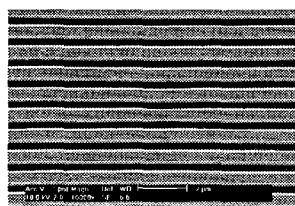


그림 5 접촉식 프린팅에 의해 얻은 400nm 선폭 의 Au 나노 구조물

금 grating 패턴의 모습이며, 그림 5 는 PDMS (Poly-dimethylsiloxane) 스탬프를 가지고 접촉식 프린팅 하여 얻은 400nm 금 선폭의 Au 나노 구조물을 보여주고 있다.

이외에 패턴전사를 위해 본 사업에서 추진되는 방식으로는 박막프린팅 방법, 소프트 리소그래피, 3D transfer printing 방식 등이 있으며, 이러한 공정을 바탕으로 저가의 대량생산이 가능한 다기능성 나노공정 기술개발을 목표로 하고 있다. 나노패너닝 기술분야에서 1 차년도 전체적인 연구결과는 100 금 선폭 구현이란 단계 사업목표에 상

당히 근접한 실험적 결과를 거둔 것으로 평가되고 있다. 하지만, 안정적이고 반복적인 구현과 공정신뢰성을 높이기 위해선 보다 구체적인 기술적 한계 극복과 독창적인 아이디어 개발이 필요한 실정이다.

한편, 본 사업단에서 수행하고 있는 나노프로브를 이용한 공정은 다음의 4 가지 접근방식으로 요약할 수 있다.

- (1) 근접장 레이저 이용한 광화학적 방식 [NSOM (Near-field scanning optical microscopy)]
- (2) 화학적 방식 [DPL (dip pen lithography)]
- (3) 기계화학적 방식
- (4) 전기화학적 방식

펩토초 레이저를 적용한 NSOM 방식에서는, DDT (dodecanethiol) SAM (self assembled mono layer) 위에 패턴을 만들고 이를 etch barrier로 하여 adhesion layer 인 chrome layer를 씌워서 패턴전사한 결과를 얻을 수 있었다.

DPL 과 기계화학적 공정방식의 개략도는 그림 6 과 7 에 각각 나타나 있다. 바텀업 자기조립식 DPL 방식을 적용하여 제작한 5nm 지름의 Au wire의 모습이다.(그림 8 참조) HDT(hexadecanethiol) SAM 위에 패턴을 입히고(선풍 50nm), 이를 Au collide solution 안에 놓아두면(~ 60 시간) Au particle들이 HDT에 흡착되는 원리를 이용하여, 기존 SAM 패턴 크기(50nm)의 1/10 수준인 5nm 금 선 제작이 가능하였다. 그림 9 는 실리콘 기판 위에 증착된 FDTs(perfluorod-ecyltrichlorosilane, $C_{10}H_4F_{17}SiCl_3$) 레지스트 위에서 행해진 프로브에 의한 기계 화학적 공정 결과를 보여주고 있다.

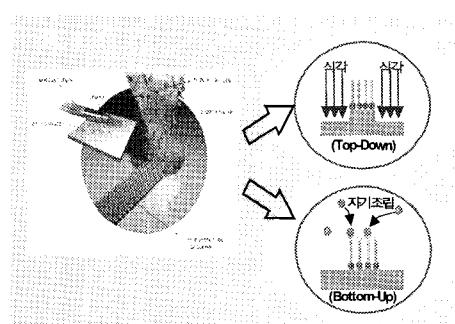


그림 6 DPL 에 의한 나노스케일 패턴 제작

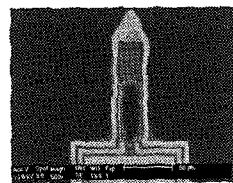
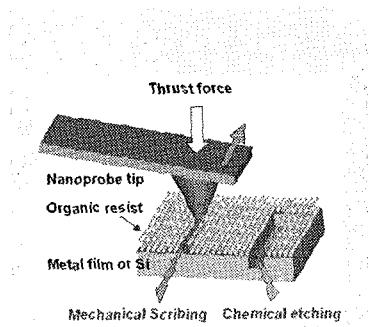


그림 10 PZT 와 PR sensor 를 포함한 Unit probe cantilever 모습

그림 7 기계화학적 방법에 의한 나노패턴 제작

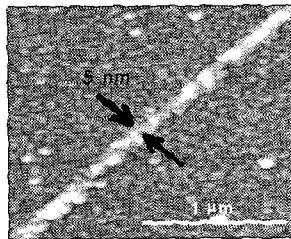


그림 8 HDT 분자패턴을 이용하여 바텀업 DPN 방식으로 제작한 Au wire

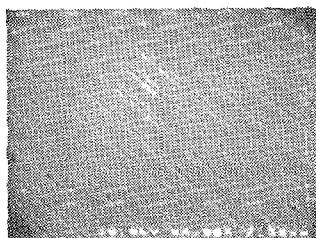


그림 9 기계화학적 방식을 통해 FDTTS resist 위에 형성된 나노패턴(~300nm)

하지만, 프로브를 이용한 공정의 고속화를 위해서는 어레이 형태의 프로브 리소그래피 개발이 필수적이며, 추가적으로 공정의 정밀도와 신뢰성 향상을 위해 프로브 팀 관련 연구도 동시에 진행되고 있다. 현재 단일 프로브 제작(그림 10 참조)과 아울러 변위센서 및 피에조 액추에이터 집적화 기술 등이 연구되고 있으며, 프로브 팀 끝에 CNT(carbon nanotube) 조립을 위해 필요한 CNT 정렬기술, 전기화학적 특성 실험 등이 수행되고 있다. 실제로 electro-phoresis 원리를 이용

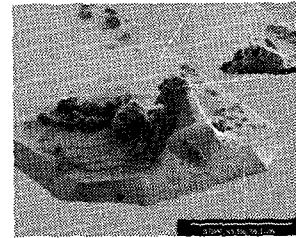


그림 11 Electrophoresis 원리에 의해 AFM 위에 CNT 부착된 모습



그림 12 UV 임프린팅에 기반한 나노패터닝 장비 시작품

CNT 의 AFM(atomic force microscopy) tip 위에 부착하는데 성공하는 등(그림 11 참조) CNT 조작 연구에서도 획기적인 성과를 거두고 있다. 이러한 프로브 리소그래피 기술은 나노메니플레이션 기술 개발에도 공통으로 적용될 수 있다.

저가로 대량생산이 가능한 효율적인 공정기술의 개발 여하에 따라서 나노기술의 시장 잠재성은 염청날 것으로 예상된다. 현재, 본 사업에서 연구개발 중인 나노메카트로닉스 기술의 적용 아이템으로는 광전자소자, 정보저장매체, 디스플레이 소자, 바이오센서 등이 있다. 구체적으로 광전자소자 분야에서 단일막 패터닝으로 구현이 가능

한 유기박막 single-mode 광도파로, polarizer, 및 wavelength filter 등이 있으며, patterned media, 고밀도 DVD 광정보저장 장치, 나노동공 구조물로 제작된 효소를 사용하지 않는 글루코스 바이오 센서 등이 타겟 아이템으로 연구개발 중이다. 이외에도 plastic electronics 소자, 나노동공 구조물의 환경센서, 광학렌즈 등의 분야에서도 활용이 가능할 것으로 예상하고 있다.

한편, 이러한 공정기술은 공정장비를 개발하는 과제와 병행하여 추진함으로써 나노공정장비에 필요한 공정기술을 제공해 주고 있다. 한국기계연구원에서 주도적으로 수행하고 있는 패터닝 장비 기술 과제에서는 1 차년도에 UV 임프린팅 공정에 기반한 장비 시작품을 선보였다.(그림 12 참조)

이는 미국의 MII 사, 유럽의 EVG 사 등에서 기시판되고 있는 장비에 비해 다소 뒤쳐져 있는 것은 사실이지만, 향후 이를 업체와의 경쟁에서 독창적인 기술개발로 경쟁력을 확보하고, 기술을 차별화해 나갈 계획이다.

나노공정 요소기술 부문에서는 측정기술과 해석 기술 연구가 추진되고 있다. 나노공정해석 관련 과제에서는 1 차년도 quantum simulation, 분자 동역학을 적용한 atomistic simulation 과 매크로스케일에서의 전통적인 continuum simulation 기법을 통합한 multiscale simulation 기법을 확립하기 위한 기반기술을 확보한 것으로 평가받고 있다. 나노공정측정 과제에서는 나노 공정 및 핵심기술에 필요한 측정수요를 파악하고, 나노재료의 기계적, 전자기적, 광물성 등 정적인 측정기술을 연구 중이다. 이를 통해, 나노공정 측정기술의 기반을 마련하고자 하며, 향후 나노 스케일에서의 측정기술 표준화 및 데이터베이스 구축에 크게 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 현재 전 세계적으로 나노기술 연구의 큰 축을 이루고 있는 측정기술 및 측정기 개발 분야에서 뒤처지지 않고 독창적인 기술확보를 위해 집중적인 노력이 필요한 분야이기도 하다.

이상으로 1 차년도 본 사업단 연구개발 성과를 간략하게 살펴보았다. 앞에서 언급한 바와 같이, 1 단계 목표 달성 가능성은 확인하였다는 점에서

큰 의미를 찾을 수 있으며, 핵심요소기술 파악과 인프라 구축 역시 눈에 보이지 않는 큰 성과라고 할 수 있다. 또한, 나노스케일에서 예측하지 못한 기술적 어려움을 실제 field 에서 경험해 볼 수 있었으며, 부분적으로나마 이러한 문제점 해결방안을 마련한 것은 향후 독자적 기술확보를 위해 반드시 필요한 과정으로 사료된다..

4. 맷음말

최근 수년간의 괄목할 만한 나노기술 발전과 IT, BT, ET 등의 기술과의 융합기술화는 21 세기 새로운 technology trend 를 창출해 가고 있다는 데는 의심의 여지가 없다. 하지만, 인류의 삶에 실질적 혜택을 제공할 수 있기 까지는 가야 할 길이 먼 것도 또한 사실이다. 무엇보다 실질적인 부가가치를 창출할 수 있는 기술이 되기 위해선 기술적인 측면과 함께 경제적 측면도 고려해야 할 것이다. 때문에, 나노기술 상용화/실용화는 여러 NT 전문가들이 함께 고민하고 있는 부분이기도 하다. 이러한 논란에도 불구하고, 나노기술은 현대의 과학기술이 나아가고 있는 큰 방향이라는 점에서는 이견이 있을 수 없다.

본 나노메카트로닉스 기술개발 사업은 이러한 나노기술 실용화라는 시대적 필요에 의해 시작되었다고 할 수 있다. 또한, 본 사업을 통해 세계일류의 나노메카트로닉스 기술을 확보하여 IT, BT, ET 등의 기술분야에 필요한 핵심원천 기술을 제공함으로써 기술간 융합 혹은 연계에 중요한 역할을 할 것으로 기대하고 있다. 무엇보다 현재 소재/소자공정에 집중되어 있는 나노 기술 연구개발의 기반이라고 할 수 있는 장비 기술을 자체 확보함으로써, 현재 대부분 수입에 의존하고 있는 고가의 연구개발 장비를 국산화할 수 있으며 이를 통해 독자적인 기술 자립화의 발판을 확보할 수 있을 것으로 확신한다. 이러한 관점에서 본 사업추진의 중요성이 새롭게 인식 되어져야 하며, 본 사업에 참여하고 있는 모든 이들의 사명감 있는 노력과 국민과 정부의 큰 관심과 지원을 기대해 본다.