

나노메카트로닉스 기술개발 사업 소개

이상록, 최준혁 | 나노메카트로닉스기술개발사업단

1. 서 론

1.1 배 경

과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업은 선도적 기술의 조기확보를 통해 국가경쟁력을 확보하고 국민소득 2만불 시대의 국가경제력을 실현하기 위한 국가적 전략사업으로 추진되고 있으며, 이 일환으로 나노메카트로닉스 기술개발 사업은 2002년 7월 출범하였다.

최근 중요한 미래성장동력의 하나로 전세계적으로 주목받고 있는 나노메카트로닉스 기술은, 기계·전기·전자의 3축 복합기술로 정의되는 기존의 메카트로닉스 기술 위에 나노물질을 다루고 나노세계에서의 물리적 현상을 연구하는 나노과학의 역할이 더해진 새로운 의미의 융합기술이라고 설명될 수 있다. 본 사업단에서는 나노메카트로닉스 기술 개발을 통해, 나노기술의 실용화를 앞당기기 위해 필요한 저가의 대량생산방식의 공정기술과 생산장비 기술을 확보함으로써 21세기 국가과학기술 경쟁력을 확보하는데 그 목표를 두고 있다.

1.2 사업 목표 및 내용

본 사업의 최종목표로는 '나노단위에 이르는 극미세 산업용 부품을 제조하기 위한 공정기술 및 공정장비를 개발' 하여, 나노기술 실용화를 앞당기는데 중요한 역할을 하고자 한다. 기술의 세부 목표로는 다음과 같다.

- 100nm, 50nm, 10nm의 나노선, 홈, 구조로 구성된 차세대 평면 및 입체형상 공정제어기술 개발
- 기존 특수공정기술의 고도화를 통한 나노 입체형상 공정제어기술 개발
- 공정기술의 제품적용기술 개발(나노무선통신 부품, 나노 바이오센서, 나노화학센서, 나노광부품, 나노저장기 등)
- 정밀도 5nm의 3차원 나노형상 복합가공기 개발
- 나노구조의 해석 제어 형상/특성 측정 기술개발

본 사업은 3단계로 나누어 추진되며, 1단계에서는 100nm급 선평구현을 목표로 나노메카트로닉스 기반

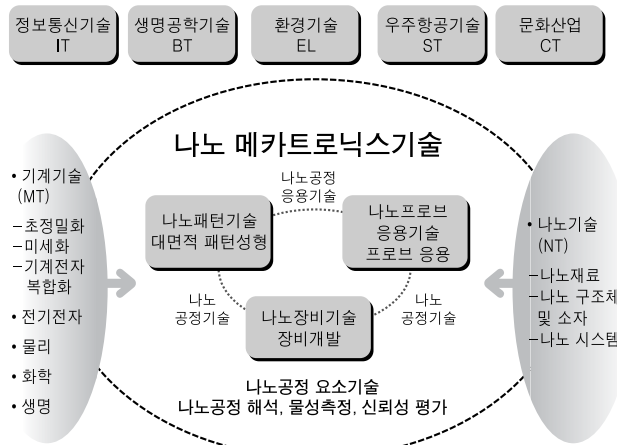
기술 및 인프라를 구축하고자 하며, 2단계에서는 응용기술개발을 통해 보다 기능성 높은 기술로 다변화 하고, 3단계에서 본격적인 실용화 기술로 발전시켜 뚜렷한 시장을 확보하고자 한다.

표 1. 단계별 연구목표 및 내용

1단계	선폭 100nm급	나노메카트로닉스 기반기술개발 및 인프라 구축	
		· 선폭100nm급 패턴공정기술 · 100nm급 나노패턴장비	· 20nm급 32×32 병렬 프로브공정 기술 · Nanofluidic 부품의 유동/물질/열전달 해석기술
2단계	선폭 50nm급	나노메카트로닉스 응용기술 개발	
		· 선폭 50nm급 패턴공정기술 · 50nm급 3차원 나노복합가공기	· 10nm급 100×100 병렬 프로브공정 기술 · Multi-physics 연성 해석 및 설계기술
3단계	선폭 10nm급	사업화를 위한 전략 ITEM개발	
		· 선폭 10nm급 패턴공정기술 · 10nm급 3차원 나노복합가공기 기술	· 프로브공정의 고생산성화 및 제품 적용 공정 기술 · 해석 시스템 Integration 및 설계 S/W

1.3 사업추진체계

본 사업은 상호연계된 4개 기술군으로 나누어, 연구개발 업무를 추진하고 있다. 도식 1에서 나타난 바와 같이, 나노패터닝기술, 나노프로브응용기술, 나노공정장비기술, 나노공정기반기술로 나누어지며, 기술 통합은 궁극적으로 IT, BT, ET, ST, CT 등의 분야에 다양하게 적용될 수 있는 잠재성을 가지고 있다. 기술별 연구개발 내용은 다음과 같다.



■ 나노패터닝공정기술

현재 실험실 수준에서 100nm 선폭 패터닝이 가능한 수준이나 장기적으로는 선폭 10nm까지 구현 가능한 기술로서, 산업전반에 기대효과가 큰 엠보싱, 임프린팅, 및 몰딩공정기술과 이를 이용한 나노부품 적용기술을 개발하는 분야이다.

■ 나노프로브 응용기술

지금까지 프로브를 이용한 100nm선폭 구현이 국내 실험실에서 가능한 수준이며, 세계적인 수준인 20nm급에 조기에 도달한 후, 고속화 및 제품 응용쪽으로의 기술 innovation을 하고자 한다. 기능성 팁 분야에 있어서도 다양한 기능 중에서 국내 기반이 있는 팁 중심으로 조기에 5nm급에 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 위해서는 나노조작 및 조립 등의 생산공정을 개발해야 하므로 이를 위한 생산공정 기술을 개발하여 프로브 응용공정 기술 산업화가 필요하다.

■ 나노장비 기술

1단계는 100nm선폭 나노패턴 장비를 개발하고, 2단계는 50nm선폭의 3차원 나노복합가공기를 개발하며, 3단계에서는 10nm선폭의 3차원 나노복합가공기 개발을 목표로, 총 3단계에 걸쳐 연구개발이 이루어지는 기술 분야이다. 2단계와 3단계에서는 기계적인 가공방법으로 달성하기가 어렵기 때문에 50nm~10nm 프로빙공정을 복합화하고, 나노구조물을 가지는 부품을 제작하기 위한 조립기술 및 복합 클러스터링 장비기술을 적용하여 최종적인 연구목표를 달성할 계획이다.

■ 나노공정 요소기술

나노공정 요소기술은 해석기술과 측정 및 평가기술로 구분된다. 나노공정측정 및 평가기술은 나노공정용 소재의 기계적/광학적/전자기적 물성을 측정하고 측정된 결과를 D/B화 하여 향후 나노기술 연구를 위해 활용될 수 있도록 하고자 한다. 측정방법 개발과 아울러 하드웨어적인 장치개발과 신뢰성 평가를 위한 기반구축 연구도 수행하고 있다. 한편, 해석관련 과제에서는, Macroscale에 대해서는 기존의 FEM (finite element method) 이나 FDM (finite difference method)을 이용하고 Nanoscale은 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 실용화를 목표로 사업을 추진중에 있다. 유럽연합은 1998~2002년 2억 유로를 나노기술에 투자하였으며, 2003~2006년 제6차 FP6에서는 총 13억 유로 이상을 나노기술분야에 집중 투자하여 기

반구축 및 R&D 프로젝트 추진중에 있다. 국가별 나노기술 지원기관을 보면, 독일의 BMBF (Federal Ministry of Education and Research), 영국의 LINK 나노기술협력 프로그램, 프랑스의 CNRS (Center for National Research and Science), 스웨덴의 국가과학기술청 (NUTEK), 스위스의 IBM 연구소등이 있다. 한편, 중국, 대만, 호주, 싱가포르 등의 아시아 국가에서도 대규모 인프라 투자와 기술개발 사업추진을 통해 나노기술 개발에 국가적인 노력을 기울이고 있다.

국내에서는 2001년 나노기술 종합 발전계획을 수립하고, 과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업, 창의적 연구진흥사업, 국가지정연구실 사업 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. 2003년에는 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, 특허 22건 출원 성과를 거두었다. 무엇보다도 수십나노에서 수백나노급 선풍구현을 실현함으로써 1단계 목표인 100nm급 선풍의 안정적 구현에 근접했다는 점에서 기술개발 성공가능성을 확인할 수 있었다.

본 사업단에서 시도하고 있는 나노급 선풍 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. 그림 1과 2는 각각 e-beam과 holographic lithography 장비의 모습이며, 제작된 마스터 패턴의 모습은 각각 그림 3과 4에 나타나 있다.



그림 1. 서울대 LION LV-1 E-beam writing 장비

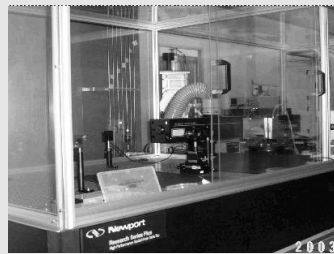


그림 2. Holography Lithography 실험 장치

제작된 마스터는 UV imprint, thermal embossing, nanomolding, contact printing 등의 non-projection 방식에 의해 TSR820 (UV curable polymer 의 일종), PMMA, Photopolymer 등의 다양한 폴리머 기판위에 전사가

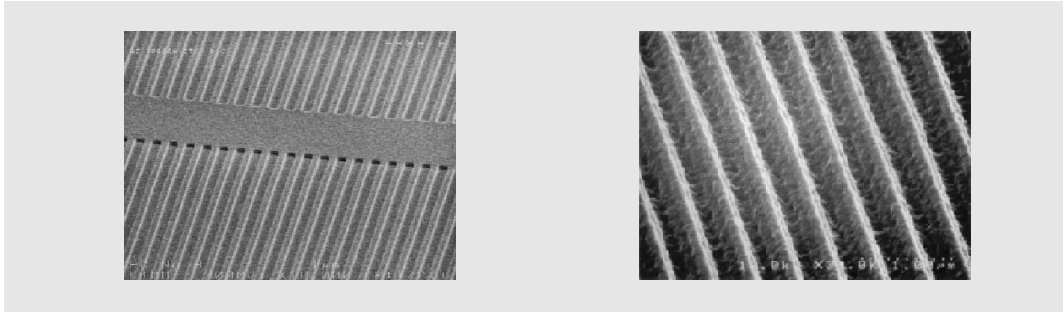


그림 3. 전자빔 (e-beam)공정과 RIE공정을 마친 후 제작된 quartz 마스터 패턴 (선폭: 377nm)

그림 4. Holography Lithography에 의해 PR위에 제작된 마스터 패턴(선폭 157nm)

이루어졌다. 또한, 금속 나노스탬퍼 제작은, PR 위에 E-beam이나 홀로그래픽 리소그래피 공정으로 나노패턴을 제작하고, seed layer 증착후 electroforming 공정을 통해 이루어졌다. 이는 기존의 마스터를 가지고 다수의 스탬퍼를 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 방법이다.

그림 5는 EVG620 UV imprinting 장비를 사용하여 패턴전사한 모습을 보여주고 있다. 그림 5의 실험에서는 대면적화 기술의 하나로 다중양각 형태의 스탬프가 사용되었다. 그림 6은 실리콘 마스터 패턴을 mri-8020 (Microresist Tech, 사의 가열식 임프린팅용 폴리머) 위에 전사한 200nm급 grating 패턴의 모습이며, 그림 7은 PDMS (Poly(dimethylsiloxane)) 스탬프를 가지고 접촉식 프린팅 하여 얻은 400nm급 선폭의 Au 나노구조물을 보여주고 있다.

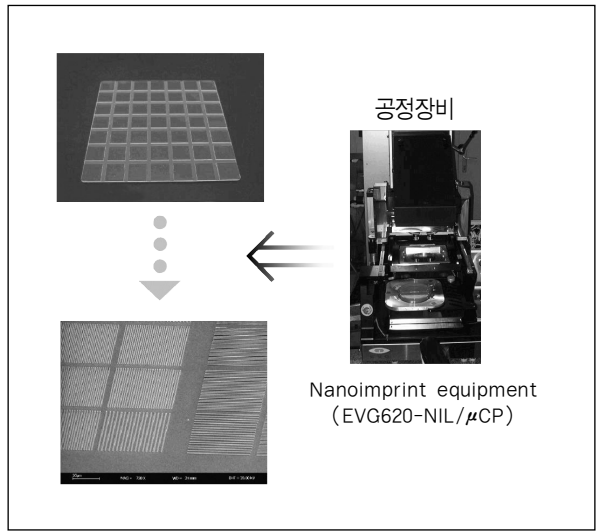


그림 5. 다중양각 팔츠 마스터 (스탬프)를 가지고 UV 임프린팅 방법에 의해 제작된 나노사이즈 패턴

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 1차년도 전체적인 연구결과는 100nm급 선폭 구현이란 단계 사업목표에 상당히 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 4가지 접근방식으로 요약할

수 있다.

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

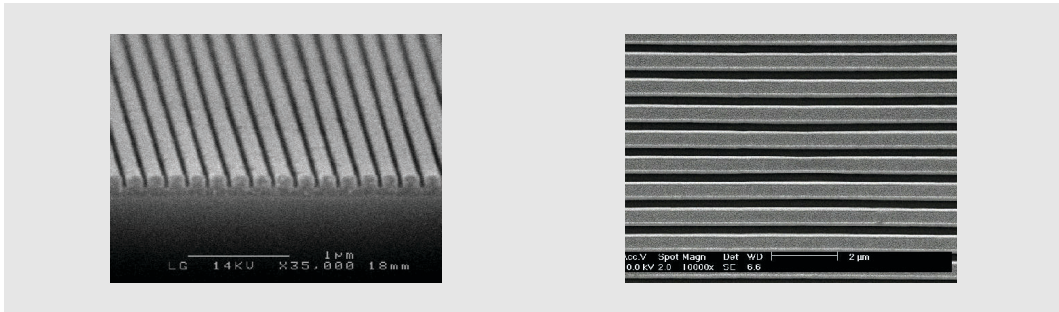


그림 6. Thermal Imprinting (가열식 임프린팅)에 의한 200nm 급 grating pattern transfer

그림 7. 접촉식 프린팅에 의해 얻은 400nm 선폭의 Au 나노 구조물

펨토초 레이저를 적용한 NSOM 방식에서는, DDT (dodecanethiol) SAM (self assembled monolayer) 위에 패턴을 만들고 이를 etch barrier로 하여 adhesion layer인 chrome layer를 식각함으로써 패턴전사한 결과를 보여주었다 (그림 8 참조).

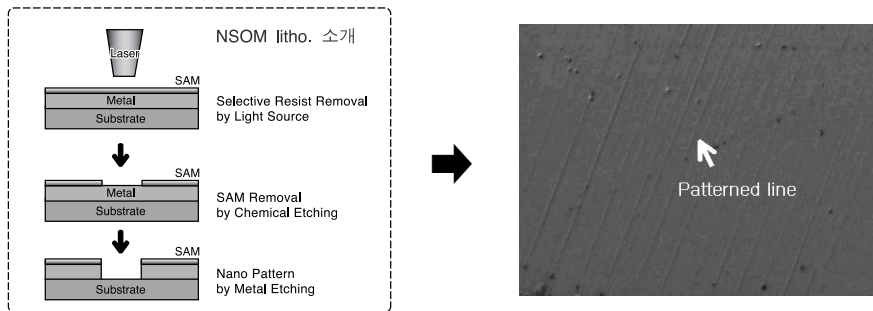


그림 8. 펨토초 레이저를 적용한 NSOM방식의 나노패턴 공정 개략도(왼쪽), 제작된 800nm 선폭의 chrome 패턴 (오른쪽)

한편, DDT SAM 위에 형성된 선폭과 식각을 통해 얻은 chrome layer 위 선폭의 차이, 즉 CD 오차를 최소화하고 공정최적화를 위한 지속적인 노력이 필요한 분야이기도 하다.

DPL과 기계화학적 공정방식의 개략도는 그림 9와 10에 각각 나타나 있다. 바텀업 자기조립식 DPL 방식을 적용하여 제작한 5nm 지름의 Au wire의 모습이다 (그림 11). HDT (hexadecanethiol) SAM 위에 패턴을 입히고 (선폭 50nm), 이를 Au colloid solution 안에 놓아두면 (~60 시간) Au particle 들이 HDT에 흡착되는 원리를 이용하여, 기존 SAM 패턴 크기(50nm) 의 1/10 수준인 5nm급 선 제작이 가능하였다. 그

림 12는 실리콘 기판 위에 증착된 FDTS (perfluorodecyltrichorosilane, C₁₀H₄F₁₇SiCl₃) 레지스트 위에서 수행된 프로브에 의한 기계화학적 공정 결과를 보여주고 있다.

<DPL 소개>

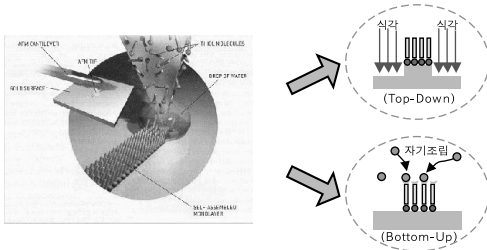


그림 9. DPL에 의한 나노스케일 패턴 제작

<기계화학적 공정 소개>

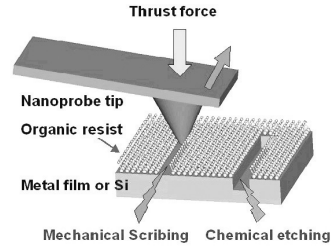


그림 10. 기계화학적 방법에 의한 나노패턴 제작

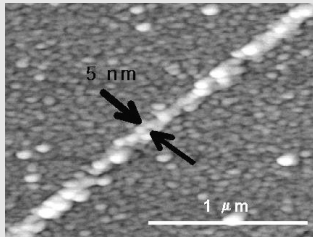


그림 11. HDT 분자패턴을 이용하여 바텀업 DPN 방식으로 제작한 Au wire.

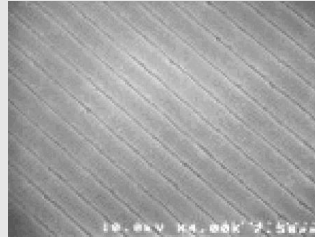


그림 12. 기계화학적 방식을 통해 FDTS resist 위에 형성된 나노패턴 (~300nm)

하지만, 프로브를 이용한 공정의 고속화를 위해서는 어레이 형태의 프로브 리소그래피 개발이 필수적이며, 추가적으로 공정의 정밀도와 신뢰성 향상을 위해 프로브 팁 관련 연구도 동시에 필요하다. 현재 단일 프로브 제작 (그림 13) 과 아울러 변위센서 및 피에조 액추에이터 집적화 기술 등이 연구되고 있으며, 프로브 팁 끝에 CNT (carbon nanotube) 조립을 위해 필요한 CNT 정렬기술, 전기화학적 특성 실험 등이 수행되고 있다. 실제로 electrophoresis 원리를 이용 CNT의 AFM (atomic force microscopy) tip 위에 부착하는데 성공하는 등 (그림 14) CNT 조작연구에서도 획기적인 성과를 거두고 있다. 이러한 프로브 리소그래피 기술은 나노메니플레이션 (그림 15) 기술 개발에도 공통으로 적용될 수 있다.

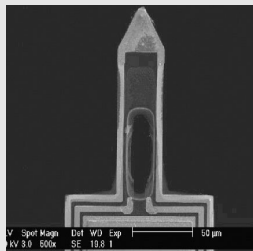


그림 13. PZT와 PR sensor를 포함한 Unit probe cantilever 모습

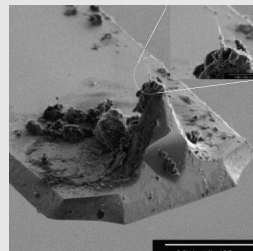


그림 14. Electrophoresis 원리에 의해 AFM 위에 CNT 부착된 모습

저가로 대량생산이 가능한 효율적인 공정기술의 개발 여하에 따라서 나노기술의 시장 잠재성은 엄청날 것으로 예상된다. 현재, 본 사업에서 연구개발 중인 나노메카트로닉스 기술의 적용 아이টে으로는 광전자소자, 정보저장매체, 디스플레이 소자, 바이오센서 등이 있다. 광전자소자 분야에서 단일막 패터닝으로 구현이 가능한 유기박막 single-mode 광도파로, polarizer, 및 wavelength filter 등이 있으며, patterned media, 고밀도 DVD 광정보저장 장치, 나노동공 구조물로 제작된 호스를 사용하지 않는 글루코스 바이오 센서 등이 타겟 아이টে으로 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 장비기술 과제에서는 1차년도에 UV

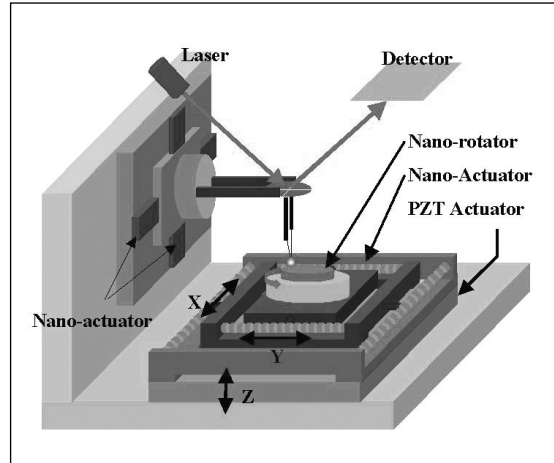


그림 15. 나노메니플레이션 구동 시스템 개략도

임프린팅 공정에 기반한 장비 시작품을 선보였다 (그림 15). 이는 미국의 MII사, 유럽의 EVG 사 등에서 기 시판되고 있는 장비에 비해 다소 뒤쳐져 있는 것은 사실이지만, 향후 이들 업체와의 경쟁에서 독창적인 기술개발로 경쟁력을 확보하고, 기술을 차별화해 나갈 계획이다.

나노공정 요소기술 부문에서는 측정기술과 해석기술 연구가 추진되고 있다. 나노공정해석 관련 과제에서는, 1차년도 quantum simulation, 분자동역학을 적용한 atomistic simulation과 매크로스케일에서의 전통적인 continuum simulation 기법을 통합한 multiscale simulation 기법을 확립하기 위한 기반기술을 확보한 것으로 평가받고 있다. 나노공정측정 과제에서는 나노공정 및 핵심기술에 필요한 측정수요를 파악하고, 나노재료의 기계적, 전자기적, 광물성 등 정적인 측정기술을 연구 중이다. 이를 통해, 나노공정측정기술의 기반을 마련하고자 하며, 향후 나노스케일에서의 측정기술 표준화 및 D/B 작성에 크게 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 현재 전세계적으로 나노기술연구의 큰 축을 이루고 있는 측정기술 및 측정기 개발 분야에서 뒤쳐지지 않고 독창적인 기술확보를 위해 집중적인 노력이 필요한 분야이기도 하다.



그림 16. UV 임프린팅에 기반한 나노패터닝 장비 시작품

이상으로 1차년도 본 사업단 연구개발 성과를 간략하게 살펴보았다. 앞에서 언급한 바와 같이, 1단계 목표 달성 가능성을 확인하였다는 점에서 큰 의미를 찾을 수 있으며, 핵심요소기술 파악과 인프라 구축 역시 눈에 보이지 않는 큰 성과라고 할 수 있다. 또한, 나노스

케일에서 예측하지 못한 기술적 어려움을 실제 field에서 경험해 볼 수 있었으며, 부분적으로나마 이러한 문제점 해결방안을 마련한 것은 향후 독자적 기술확보를 위해 반드시 필요한 과정으로 사료된다. 1차년도에는 나노패터닝 기술 (프로브 응용기술 포함) 에 총 80% 이상의 연구비와 노력이 집중되었다. 이는 다양한 접근방법 시도를 통해 가장 효과적인 방향을 찾기 위한 전략으로, 이러한 노력은 점차 응용 및 적용기술, 그리고 장비 및 공정시스템 기술개발로 이어질 전망이다.

4. 맺 음 말

본 특집에서는, 나노메카트로닉스 기술개발 사업개요와 국내·외 기술동향, 그리고 최근 (1차년도) 연구개발 성과 부분으로 나누어 작성하였다.

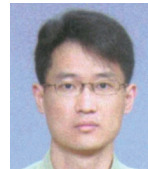
최근 수년간의 괄목할 만한 나노기술 발전과 IT, BT, ET 등의 기술과의 융합하는 21세기 새로운 technology trend를 창출해 가고 있다는 데는 의심의 여지가 없다. 하지만, 인류의 삶에 실질적 혜택을 제공할 수 있기까지는 가야 할 길이 먼 것도 또한 사실이다. 무엇보다 실질적인 부가가치를 창출할 수 있는 기술이 되기 위해선 기술적인 측면과 함께 경제적 측면도 고려해야 할 것이다. 때문에, 나노기술 상용화/실용화는 여러 NT 전문가들이 함께 고민하고 있는 부분이기도 하다. 이러한 논란에도 불구하고, 나노기술은 현대의 과학기술이 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 NT 및 5T 기술분야에 필요한 핵심원천기술을 제공함으로써 기술간 융합 혹은 연계에 중요한 역할을 할 것으로 기대하고 있다. 무엇보다 현재 소재/소자공정에 집중되어 있는 나노기술 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 인식되어져야 하며, 본 사업에 참여하고 있는 모든 이들의 사명감 있는 노력과 국민과 정부의 큰 관심과 지원을 기대해 본다.



이 상 록

- 나노메카트로닉스 기술개발 사업단 단장
- 관심분야 : 나노생산 및 장비기술
- E-mail : srlee@nanomecca.re.kr



최 준 혁

- 나노메카트로닉스 기술개발 사업단 기술팀장
- 관심분야 : Nanomolding process optimization, Nano-actuation mechanism
- E-mail : junhyuk@nanomecca.re.kr