

나노 위치결정기술



한 창 수
(KIMM 지능형정밀기계연구부)

- '83 - '87 서울대학교 조선공학과(학사)
- '87 - '89 서울대학교 기계공학과(석사)
- '89 - '95 삼성전자 주임 연구원
- '96 - '00 KAIST 기계공학과(박사)
- '00 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서 론

오늘날 현대 산업사회는 반도체나 LCD와 같은 첨단 분야가 전체 산업을 주도하고 있으며, 이러한 첨단산업의 화두는 극초정밀(ultra-precision)이다. 극초정밀 기술 중에서 nm수준까지의 정밀한 이송에 관련된 기술을 나노 위치결정기술이라고 한다. 이 기술은 초정밀 공작기계, 반도체 stepper and scanner 및 AFM(Atomic Force Microscope) 구동기, 3차원 측정기 등 다양한 형태와 성능을 요구하고 있으며, 그 공통적인 개발방향 중 하나는 nm수준까지의 정밀도를 확보하는 것이다. 반도체는 현재 CD(Critical Dimension)이 130nm에 이르러 실제 이를 노광하는 구동 장치의 정밀도는 5nm이하로 유지되고 있으며, AFM 구동기(Scanner라고도 불린다.)의 경우는 구동 범위가 100 μ m정도지만 분해능은 0.1~1nm까지 가능한 것으로 알려져 있다. 이러한 나노 위치결정기술의 개발은 항시 산업적 수요와 맞물려 개발되고 있으며, 최근 들어 나노 테크놀러지에 대한 세계적인 관심과 투자확대와 더불어 나노 기술의 공통기반기술로서 나노 위치결정기술의 중요성이 더욱 커지고 있다. 그림 1은 이러한 초정밀 위치결정 기술이 적용되는 산업분야를 나타낸 것이다.

초정밀 위치결정기술은 현존하는 다양한 이송운동 메카니즘 가운데 최고의 정밀도를 구현할 수 있는 선별된 메카니즘으로서 이송시스템의 각 요소가 구성되고 구축된 이송시스템에 대해 최적의 제어기법을 적용하여 이송방향을 제외한 이송체의

5자유도 자세를 가능한 한 일정하게 유지하면서 목표위치에 정확하고 신속하게 도달시킬 수 있는 기술을 일컫는다. 따라서 이송경로상의 궤적의 정밀도를 나타내는 운동정밀도(motion accuracy), 목표위치로의 도달정밀도를 나타내는 위치결정정도(positioning accuracy)와 그 때의 도달위치에 대한 반복정밀도(repeatability) 및 목표위치까지의 도달 시간을 좌우하는 응답특성(response)이 초정밀 위치결정기술의 평가척도가 된다.

이러한 초정밀 위치결정기술에 필요한 공통적인 핵심기술로는 이송 장치가 받는 하중을 지지하면서도 이송기구에서 발생하는 마찰력 및 그 변동량을 최소화하여 운동오차요인을 감소시킬 수 있는 정밀 이송계 설계 및 제작기술, 이송계가 지니고 있는 고유의 운동정밀도를 손상시키지 않으면서 위치결정정도 및 반복정밀도를 향상시킬 수 있는 초정밀 구동계 설계 및 조립기술, 이송계 및 구동계로 구성된 시스템을 모델링하고, 그로부터 도출된 변수를 최적 제어하여 응답특성 및 안정성을 향상시킬 수 있는 초정밀 제어기술, 구축된 이송장치의 정밀도를 평가하고 목표에 도달하지 못할 경우 내부의 제어시스템 또는 외부 메커니즘의 도입으로 그 오차가 최소화되도록 보정할 수 있는 초정밀 측정 및 보정 기술, 초정밀 위치결정에 영향

을 주는 환경(온도, 압력, 습도, 진동 등)변화에 대한 제어기술 등이 있다. 이러한 기술들이 종합적으로 확보되어야 나노미터급의 위치결정에 도달할 수 있는 것이다.

2. 나노 위치결정기술 동향

나노 위치결정 기술에 관한 기술 road-map은 Taniguchi교수에 의해 정리되었으며, 그림 2는 이를 기반으로 편집된 것이다.

이러한 나노 위치결정기술은 사용 용도에 따라 구성하는 구동기나 센서의 종류가 크게 달라지며, 기술적 접근 방법에 있어서도 많은 차이를 가지고 있다.

공작기계의 경우에는 이송범위가 수십~수백mm 혹은 그 이상의 변위를 가지고 있으며, 생산성 향상을 위해 빠른 이송속도가 요구된다. 최근 초정밀 가공기의 경우에는 Fanuc사에서 개발한 그림 3과 같은 초정밀 마이크로 머시닝 센터는 선삭에서 3차원 형상 가공까지 복합가공이 가능하게 하였다. 이 기계로 지금까지 lithography로 제작하기 어려웠던 자유곡면 형상의 회절격자나 비구면 렌즈의 금형가공이 가능하며, 공기정압으로 200mm의 이송거리와 1nm의 분해능을 갖는 non-friction

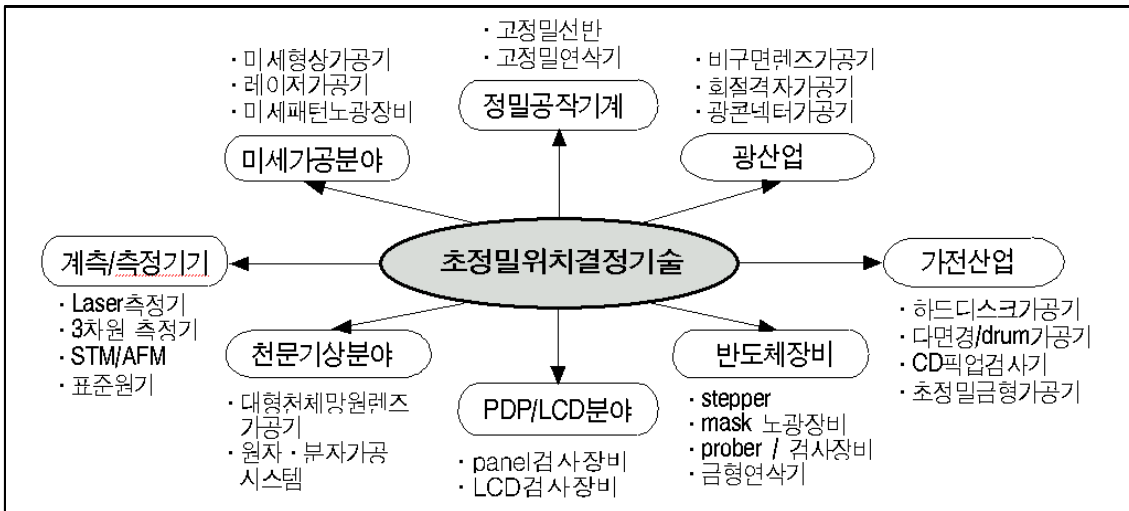


그림 1. 초정밀 위치결정 응용분야

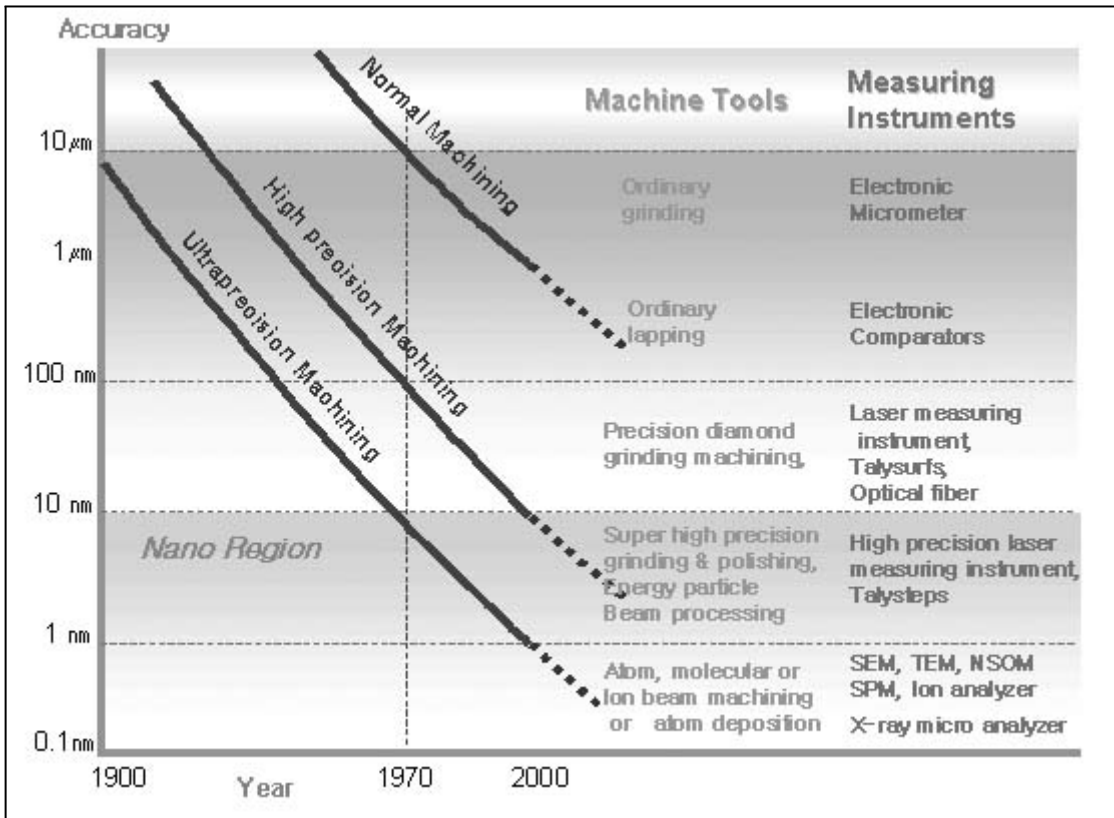


그림 2. 나노 위치결정의 기술 roadmap

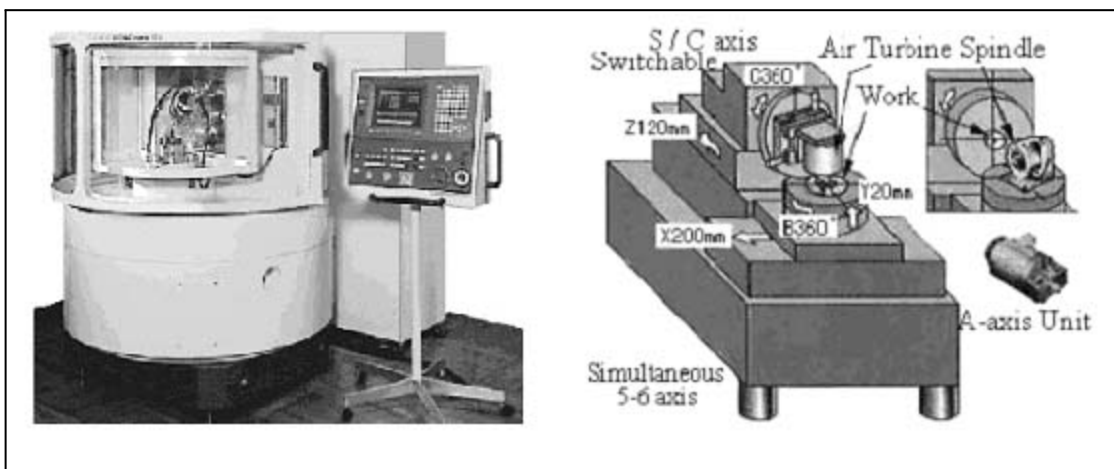


그림 3. 초정밀 가공기(RoboNano Ui, Fanuc)

servo system, 2nm 오차 이내의 이송 서보모터 등의 nm급 위치결정기술이 그 근간을 이루고 있다. 국내에서는 KIMM의 공작기계연구실과 대우중공업의 협력으로 초정밀 공작기계를 제작하였으

며, KIMM에서는 공작기계를 포함하는 넓은 의미에서의 nm급 위치결정기술의 개발을 위해 국가 지정연구실을 운영하고 있다.

측정기 분야에서는 1988년 미국 NIST를 주축으

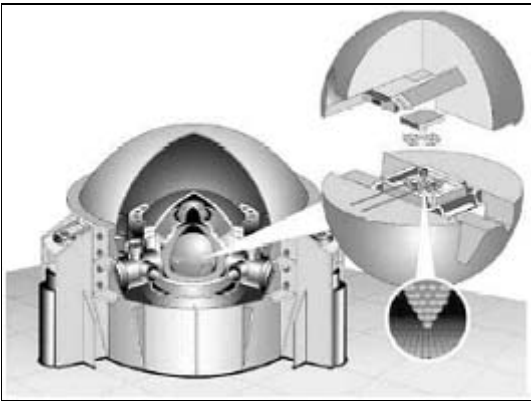


그림 4. Molecular Measuring machine by NIST

로 0.1nm의 불확도를 0.1m범위까지 구현가능한 MMM(Molecular Measuring Machine)을 개발하고 있다. 이 측정기는 AFM 기술을 주축으로 구성되어 있으며, 현재까지는 50*50mm의 평면에서 10nm의 정밀도까지 구현한 상태이다. 국내에서도 KAIST의 김승우 교수팀에서 창의적 연구사업의 일환으로 10⁻⁹의 상대불확도를 가지는 기술을 개발하고 있다.

반도체 lithography기술 분야에서도 초정밀 위치 결정기술은 전체 기술의 50%가량을 차지할 정도로 중요하며, 세계적으로 몇몇 회사만이 상용화된 제품을 판매하고 있다. 최근에는 Nikon사가 개발한 scanner형태가 기술을 주도하고 있으며, 그림 5는 이를 나타낸 것이다. 이 장치에는 제진능동제어 및 반력제어용 이송계 구성등 고속화 및 초정밀화를 위한 많은 기술들이 개발, 적용되었다.

이처럼 많은 산업분야에서 다양한 형태의 nm급

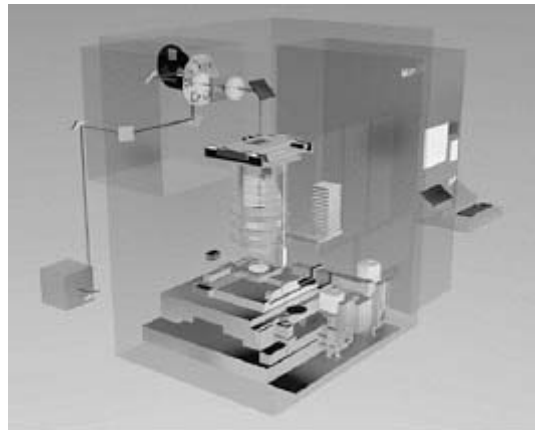


그림 5. Scanner stepper for lithography by Nikon

초정밀 위치결정장치가 요구되고 있으나, 아직 국내에서는 학교의 실험실 수준에서의 연구가 대부분이며, 이를 상용화한 수준까지는 도달하지 못하고 있는 실정이다.

3. 나노 위치결정의 기술 내용

나노급 위치 정밀도를 구현하기 위해서는 기본적으로 다음과 같은 초정밀 구동기술 및 안내기술, 위치 검출기술이 필요하다. 이 세가지 분야에 대해 각각 그 특징을 비교해 보면 다음과 같다.

이러한 구동기는 각자 장단점을 가지고 있기 때문에 적용할 제품의 성능과 특징에 따라 적절한 선택이 필요하다. 일반적으로 piezoelectric 방식과 다른 방식들은 크게 구동 범위에 의해 나누어진다. 또한 다른 세 방식들에서도 nm급 정밀도를

표 1. nm급 정밀도가 가능한 구동기의 종류

	Piezoelectric	Servo Motor +Ball screw	Linear motor	Magnetic levitation
Max. range	~100 μ m	>1m	>1m	>1m
Accuracy	0.1nm	1nm	1nm	1nm
Response time	< 0.1ms	100ms	10ms	100ms
Size	<100 mm	>500mm	>300mm	>300mm
Load capacity	< 5kg	< 100 kg	< 100 kg	< 20 kg
Applications	- Fast tool servo - AFM scanner	- Precision Machining, - Evaluation apparatus	- High speed machining - Semiconductor apparatus	- E-beam lithography

내는 것은 일반적인 기술이 아니라 소수의 선진연구그룹에서만 가능한 기술이다. 국내의 연구수준은 세계적인 수준에 70~80% 정도의 수준에 머무르고 있는 실정이며, 시스템의 요소기술이나 제작 기술에서 특히 많이 뒤떨어져 있다. Servo motor나 linear motor를 채용하는 기준은 크게 가격적 측면과 고속성의 요구 정도로 판가름하게 된다. 그러나 nm급 정밀도에 도달한다는 측면에서는 linear motor가 상대적으로 구성이 용이한 장점이 있다. 각 구동기에 대해 nm급 정밀도를 위해 주로 사용되는 가이드 방식에 대해 살펴보면 표 2와 같다.

Linear slide의 경우는 일반적인 기술로는 nm까지 불가능하나 표면을 특수한 소재로 처리하여 nm수준까지의 정밀도에 도달하는 연구를 수행하고 있다. 대개 flexure hinge나 Aerostatic(Hydrostatic) guide은 모두 마찰이 없이 구동 되므로 센서의 정밀도나 제어계의 성능에 따라 nm이하의 정밀도를 얻는 것이 어렵지 않다. 대체적으로 flexure hinge는 Piezoelectric actuator와 결합하여 사용되며, Aerostatic(Hydrostatic) guide는 ball-screw, linear motor, magnetic levitation과 결합하여 사용되곤 한다. Cross roller방식의 bearing은 마찰 때문에 고속화와 초정밀화를 동시에 충족하기가 어려운 구조이지만 가장 저렴하게 시스템을

구성할 수 있는 장점이 있다.

다음으로는 nm급의 정밀한 위치를 검출하기 위한 센서에 대해 표 3에 살펴보았다.

넓은 범위와 nm급 정밀도가 필요한 경우에는 대개 laser interferometer를 사용하게 되지만 측정 위치에 놓여질 mirror의 중량이나 크기가 크기때문에, 구동부 외부에 장착되어 전체 시스템을 크게 만드는 단점이 있어서 고가의 장비에만 주로 채용되고 있다. 정전 용량식 센서 및 LVDT는 주로 piezo 구동기와 함께 많이 사용되며, 미소 이송계의 변위 측정 및 회전기계의 흔들림을 측정하는데 많이 사용된다. 또한 laser scale(linear scale)은 구동부에 가깝게 부착되어 전체 시스템을 규모있게 제작하기 쉽도록 해주며 laser interferometer에 비해 상대적으로 저렴한 가격을 가지고 있어서 널리 사용되고 있다.

이와 같이 구동기, 가이드부, 센서부를 잘 선정하면 현재 각 부분별로 상용화되어 있는 제품이 많이 있으므로 나노 위치결정 시스템을 구성하는 데는 큰 어려움은 없을 것으로 판단된다. 다만, 특별한 사양을 목표로 하는 nm급 이송 시스템을 실제로 구성하기 위해서는 이러한 상용화된 제품만 있다고 되는 것은 아니다. 시스템화를 위한 설계 기술, 이송계 제작기술, 조립기술, 구동계 제어기술, 노이즈 제거 기술, 환경 제어 기술, 위치보상기술 등에 대

표 2. 구동기의 안내 기구의 종류

	Flexure hinge	Aerostatic & Hydrostatic	Linear slide	Cross roller
Max. range	<100 μ m	>1m	>1m	>1m
Accuracy	< 0.1nm	<1nm	1nm	>10nm
Size	<100 mm	>500mm	>100mm	>100mm
Load capacity	good	good	better	better

표 3. 위치 검출 센서의 종류

	Laser Interferometer	Capacitive sensor	Laser scale, Linear scale	LVDT
Max. range	> 1m	>300 μ m	< 1m	<10mm
Resolution	0.3nm	0.05nm	1nm	1 nm
Size	>500 mm	<50mm	0.01~1 m	<100mm
Constraint	Mirror mount	Metal	Abbe error	Contact force

한 수준 높은 기술 개발이 병행되어야 한다.

참 고 문 헌

4. 결 론

최근 들어 많은 산업적 응용분야에서 나노 위치결정기술에 대한 관심이 높아지면서, 상용화된 제품이나 개선된 기술들이 많이 등장하고 있다. 이 부분은 나노 기술에 근간이 되는 기술인 만큼 앞으로 지속적인 발전을 위해 더 많은 연구 개발과 투자가 진행될 것으로 전망된다. 또 국내에서는 나노 관련 사업이 대규모로 진행되는 시점에 있으므로 지금까지의 실험실 규모에서의 나노 위치결정기술이 상용화된 기술로 조만간 시장에 등장하게 될 것이다. 아이디어 중심의 개발, 선택과 집중을 통한 지속적인 투자를 통해 우리나라의 나노 위치결정기술 수준을 세계적인 수준으로 끌어올리는 것도 가능할 것으로 기대된다.

1. N. Taniguchi, 'The state of the art of nanotechnology for processing of ultraprecision and ultrafine products', ASPE, vol. 16, no.1, 1994
2. 김승우, '나노 기계 시스템의 설계 및 구동', 한국정밀공학회지, 제 19권 1호, 2002년
3. 이찬홍, 초정밀 위치결정 시스템기술, NRL 보고서, 한국기계연구원, 2001
4. T.R. Hicks and P.D. Atherton, The NanoPositioning Book, Queensgate, 1997
5. <http://www.mel.nist.gov>
6. <http://www.fanuc.co.jp>
7. <http://www.nikon.co.jp>