

◆특집◆ 나노테크놀로지와 정밀공학

나노 기계시스템의 설계 및 구동

김승우*

Design and Control of Nano-Precision Machine Systems

Seung-Woo Kim*

Key Words : Nanotechnology (나노테크놀로지), Precision Engineering (정밀공학), Relative Uncertainty (상대불확도), Machine System (기계시스템)

1. 서론

오늘날 현대 산업사회의 첨단제품의 발전을 주도하고 있는 반도체 및 정보통신을 포함한 제반 첨단산업은 하드웨어 면에서 초정밀(ultra-precision)이라는 기술적 특성을 공동기반으로 하고 있다. 이는 반도체의 고집적화, 광자기 메모리의 고용량화, 광섬유 활용 다채널 고속 통신망, 그리고 고분해능 레이저 프린터 등의 대표적인 예를 통해 쉽게 짐작할 수 있다. 이러한 현대첨단산업의 초정밀 수요를 위해 1970 년도부터 세계적으로 정밀공학(precision engineering)이 다학제간(multi-disciplinary) 학문으로 정의되었으며, 이는 기계, 전자, 그리고 광학 기술을 복합적으로 연계하여 정밀 메카니즘의 설계, 측정, 그리고 가공에 대한 전문적인 연구를 대상으로 하고 있다. 현재 초정밀을 향한 정밀핵심기술의 보유는 한 국가의 제반 첨단산업의 국제적 경쟁력 확보를 위해 필수적인 공통 기반기술로서 자리 매김을 하고 있다 [1].

정밀공학에서의 계측제어(precision measurement/control)기술의 발전은 1990 년도에 들어 0.1 나노미터 (nanometer; 1 nm = 10⁻⁹ m)의 변위분해능을 갖

는 초정밀 위치결정(ultra-precision positioning)을 가능하게 하였다. 이는 광기전(光機電) 복합기술의 발전에 근거하고 있으며, 최근 순수과학 및 공학 분야에서 획기적인 파급효과를 창출하고 있다. 대표적인 예로 물리학 분야에서는 STM(scanning tunneling microscopy)과 AFM(atomic force microscopy)의 출현으로 연계되어 단위원자(single atom) 수준의 초미세 측정과 조작이 가능하게 되었다. 그리고 생명과학 분야에서의 유전자(DNA)의 관측 및 조작을 가능하게 하고 있다. 공학분야에서의 파급효과는 초정밀 메카트로닉스기술의 도약을 유도하여 반도체 제조 및 검사장비, 광통신부품, 광자기디스크 등의 기능고도화의 획기적인 진전을 이루고 있다 [2].

현재 초정밀을 향한 정밀공학분야에 있어서 당면하고 있는 문제중의 하나가 20 세기 후반부에 확보된 0.1 나노미터의 초정밀 변위 위치결정 분해능을 어떻게 0.1 미터 이상의 대역 범위에서까지 구현할 수 있을까? 사실 오늘날의 초정밀 계측 제어는 수 마이크로미터 수준의 대단히 작은 영역에 제한되고 있다. 주된 기술적 이유는 위치결정 변위 창출을 위해 현재 사용되고 있는 구동기와 계측기술의 작동영역이 작은 압전구동기(piezoelectric actuators)와 정전용량 변위센서(capacitive displacement sensor)등에 의존하기 때문이다. 반면 산업분야에서의 초정밀 위치결정의 주요는 반도체 웨이퍼의 대형화 및 고집적화, 광통

* 한국과학기술원 기계공학과
Tel. 042-869-3217, Fax. 042-869-3210
Email swk@kaist.ac.kr
초정밀 구동을 위한 계측 및 기계시스템의 구동 설계에 대한 연구를 수행하고 있다.

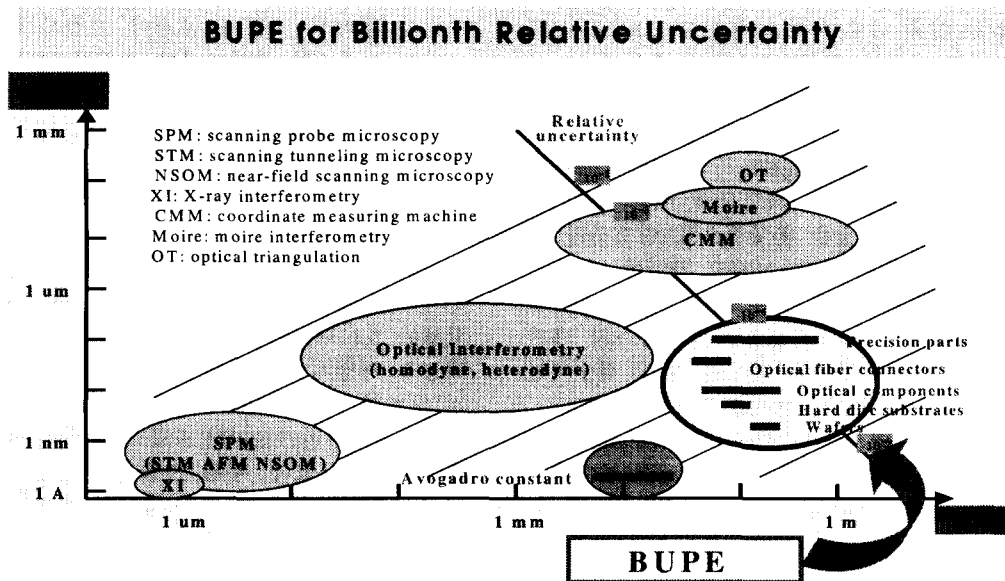
신부품의 고정밀화 및 대형화, 광자기메모리의 고정밀화 및 대형화 추세에 따라 가공의 허용공차는 0.1 나노의 극초정밀 수준을 유지하면서도 제품의 크기는 0.1 미터를 넘어서 1 미터까지 대형화되어 가는 추세이다 [3].

2. 상대불확도

초정밀의 정도를 정량적으로 표기하기 위한 상대불확도(relative uncertainty)는 위치결정 불확도에 대하여 초정밀이 구현되어야 하는 전체 작동영역의 비율(ratio)로써 정의된다. 현재의 정밀공학에서 일반적으로 구현하고 있는 상대불확도의 수준은 <그림 1>에 정리된 바와 같이 10⁻³에서 10⁻⁶의 범위에 머무르고 있다. 이는 마이크로미터 이하 나노미터 수준의 위치결정 분해능이 확보되어 있으나 이의 실현이 작은 영역으로 제한되어 있기 때문이다. 반면 현재의 대표적인 첨단제품인 반도체, 광통신 부품, 컴퓨터 주변기기, 광학부품을 생산하기 위한 상대불확도의 산업적인 수요는 현재의 수준을 넘어 이미 10⁻⁷에 이르고 있으며 조만간 10⁻⁸에서 궁극적으로는 10⁻⁹에까지 확장될 것으로 예측된다.(각 제품에 대한 세부적인

자료는 <표 1-1>에 별도로 요약 정리하였음.) 또한 21 세기에 들어서는 산업기술 뿐만 아니라 의학, 양자물리 및 생물학 등의 순수과학과 첨단산업에서 수요가 증대될 것으로 확신되며, 이를 뒷받침하기 위해서는 10⁻⁹ 불확도의 정밀공학(BUPE: Billionth Uncertainty Precision Engineering)기반확보가 시급히 요구되고 있는 실정이다 [4].

BUPE 정밀공학은 기존의 나노테크놀로지(nanotechnology)와는 추구하는 상대불확도에서 차별성을 갖는다. 나노테크놀로지는 상대불확도보다는 원자단위의 극초정밀 절대불확도(absolute uncertainty)의 구현에 주안점을 갖는다. 이의 대표적인 예로써 주사터널링현미경(STM: scanning tunneling microscopy)과 원자력현미경(AFM: atomic force microscopy)을 들 수 있으며, 이는 원자단위의 극미세 형상에 대한 관찰과 원자단위의 미세 조작을 목표로 한다. 반면, BUPE의 주안점은 상대불확도의 획기적인 개선에 있다. 요구되는 절대불확도는 원자단위보다는 상대적으로 큰 1 - 10 나노미터의 수준인 반면, 이를 구현하는 대상물체는 수백 마이크로미터 이상 수 미터에 이르는 대영역으로 매우 큰 상대불확도의 실현을 목표로 한다.



<그림 1> BUPE(Billionth Uncertainty Precision Engineering)의 산업적 용도는 반도체, 광통신 부품, 컴퓨터 주변기기, 광학부품을 생산하기 위한 10⁻⁷에서 10⁻⁸, 궁극적으로는 10⁻⁹의 상대불확도의 구현을 목표로 한다.

10-9 불확도의 정밀공학(BUPE)의 기본 방향은 (1) 먼저 BUPE 기술의 확보를 위해서 기존의 관련 정밀공학 기술들을 각각의 한계를 어떻게 극복하여 개선할 것인가? 에 중점을 둔다. 이와 병행하여 (2) 기존의 기술이 갖는 한계의 극복이 어려운 경우, 어떻게 새로운 정밀공학 기술들이 개발되어야 하는가? 에 초점을 맞추어 기존기술의 개선 방향, 그리고 새로운 정밀공학 기술의 창출에 대한 구체적이고 혁신적인 관점에서의 연구를 필요로 한다. 그리고 최종적으로는 (3) BUPE 기술이 앞으로 순수과학 및 첨단산업의 획기적인 발전에 효율적인 영향을 미치게 하기위해 어떻게 요소기술별로 체계화되어야 하는가? 에 대해 탐구를 요구한다.

3. 선진국 연구 동향

현재 BUPE (Billionth Uncertainty Precision Engineering)에 관련된 선진국들의 연구는 기술의 난이도 및 순수과학과 첨단산업에의 폭넓은 파급효과를 고려하여 국가연구소와 대학들을 중심으로 국가의 투자로 추진되고 있다. 대표적인 국가연구소로는 미국의 NIST(National Institute of Science and Technology), 독일의 PTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt), 영국의 NPL(National Physics Laboratory), 그리고 일본의 NRLM(National Research Laboratory of Metrology)을 들 수 있다.

또한 이에 참여하는 대학으로는 미국의 MIT, North Carolina State University, 독일의 Aachen 공대, 영국의 Warwick University, Cranfield University 등이 있다. 상기 국가연구소와 대학들은 BUPE의 기술적 포괄성을 고려하여 연구주체간의 유기적인 협력체계를 갖추고 국가연구비를 공동으로 활용하여 인력 및 연구결과를 활발히 교류하고 있다. 이의 대표적인 예로는 미국의 ASPE(American Society for Precision Engineering), EU 유럽공동체의 EuSPEN(European Society for Precision Engineering and Nanotechnology), 일본의 JSPE(Japan Society for Precision Engineering)들의 전문학회가 구성되어 산학연의 연구주체와 연구자간의 활발한 지식교류를 도모하고 있다.

BUPE는 안정된 요소기술을 기반으로 다양한 응용분야를 대상으로 추진될 수 있는 전형적인 하드웨어 요소 및 시스템 복합기술의 성격을 갖는다. 그러므로 견고한 요소기술의 확보가 선행적으로 수행되어야 하며, 이와 관련된 선진국들의 주요 연구내용은 다음의 4 가지 주체로 요약될 수 있다.

- 변위계측: 나노미터의 절대불확도를 유지 하면서 10-9 상대불확도 구현을 위한 대 영역에서 안정성을 갖는 변위 측정하기 위한 레이저간섭계, X-레이간섭계, AFM(atomic force microscopy), 정전용량변위계 등의 연구.

표 1. 주요 첨단 제품의 허용공차와 상대불확도

제품 계측항목	제품치수/ 허용공차	1:4 관리/표준	1:10 관리/표준	1:10 표준 상대 불확도
12" 웨이퍼 평탄도	300 mm/ 100 nm	25 nm/ 6 nm	10 nm/ 1 nm	3 x 10 ⁻⁹
1 Giga Bit 용 E-baem 마스크패턴의 위치정렬 정밀도	100 mm/ 24 nm	6 nm/ 1.5 nm	2.4 nm/ 0.24 nm	2.4 x 10 ⁻⁹
광통신용 광섬유 연결부품의 상대 치수공차	20 mm/ 10 nm	2.5 nm/ 0.6 nm	1 nm/ 0.1 nm	5 x 10 ⁻⁹
DVD 광픽업용 비구면 대물렌즈의 형상정밀도	10 mm/ 10 nm	2.5 nm/ 0.6 nm	1 nm/ 0.1 nm	10 x 10 ⁻⁹
차세대 항공기 엔진 부품의 상대 치수공차	500 mm/ 500 nm	125 nm/ 40 nm	50 nm/ 5 nm	10 x 10 ⁻⁹
관측위성용 카메라 비구면 렌즈	300 mm/ 100 nm	25 nm/ 6 nm	10 nm/ 1 nm	3 x 10 ⁻⁹

- 정밀구동: 나노미터 이하의 위치결정 반복능을 갖는 고안정성 기계구조물과 기구안내 메카니즘을 창출하기 위한 신개념의 정밀기계요소로서의 공기정압베어링, 자기부상베어링 및 자기구동기, 초고강성구조물, 마찰구동기, 압전구동기 등에 대한 연구.
- 환경안정: 온도 및 진동의 영향을 엄밀히 배제하고 변위계측의 기준을 구축하기 위한 10-3 K 의 극한 온도 제어, 방진제어, 그리고 계측기준(metrology frame)에 대한 연구.
- 프로브: 가공 및 계측을 위한 공구의 개발로 STM (scanning tunneling microscopy), SEM (scanning electron microscopy), CFM(constant force microscopy), 그리고 NSOM(near-field scanning optical microscopy)에 대한 연구.

미국을 선두로 한 선진국의 연구는 BUPE 세부핵심기술의 개발을 전제목표로 하며, 이의 결과를 실제적인 과학기술의 발전과 직접적으로 연계한 대형연구과제들이 주를 이루고 있다. 현재 진행되고 있는 대표적인 연구과제는 다음과 같이 요약 정리될 수 있다.

- The Molecular Measuring Machine (M-Cubed) Project : 미국의 NIST 를 주축으로 DoC 의 연구비 지원으로 1988 년부터 현재까지 추진되고 있다. 목표는 0.1 나노미터의 불확도를 0.1 미터의 범위에서 10-9 상대불확도를 구현하기 위한 AFM 을 중심으로한 원자단위의 초정밀계측시스템을 구축하도록 되어있다. 현재 기구부의 Abbe 오차와 레이저간섭계의 불안정으로 10 나노미터의 10-7 의 상대불확도 정도를 달성한 단계에 있다. 조만간 전체적인 추진에 대폭적인 변화를 시도하여 다시 목표되었던 10-9 상대불확도에 도전할 계획으로 알려져 있다 [5].
- The Combined Optical and X-ray Interferometers Project : EU 유럽공동체가 지원하는 연합 프로젝트로 독일 PTB, 영국

의 NPL, 그리고 이태리의 IMGC 이 공동으로 추진하여 1997 년에 1 단계 사업을 종결한 상태이다. 대상은 정밀 변위센서들을 교정하기 위해 0.01 나노미터의 분해능을 1 mm 정도의 범위에서 구현하도록 10-8 상대불확도를 목표로 하였다. 주요 아이디어는 계측시스템에서 레이저간섭계와 X-레이간섭계를 혼합하여 고분해능을 장거리에서 창출하는 새로운 개념을 시도하였다 [6].

- SEMATECH Program: 미국정부 DoC 가 일본의 위협을 받고 있는 반도체 장비산업의 경쟁력을 유지하기 위해 NIST 를 중심으로 반도체 업계 및 유명대학들이 콘소시움을 구성하여 공동으로 참여하고 있는 대규모의 산학연 공동연구과제이다. 주요 목표는 차세대 0.18 μ m 선폴이상의 반도체 생산에 사용될 수 있는 노광장비에 소요되는 핵심 요소기술들을 개발하고 있다. 지난 1990 년 초반부터 추진되어 이미 많은 연구결과를 창출하였으며 미국의 반도체 장비업계를 통해 실용화되어 실제 반도체 생산라인에 사용되고 있다 [7].
- The Laser Interferometer for Gravitational-wave Observatory (LIGO) Project: 미국 NSF 가 지원하고 MIT 와 CIT 가 공동으로 추진하는 중력파의 실제 검증을 위한 대규모 순수물리학 분야의 양자광학의 기초이론을 검증하는 대규모 프로젝트이다. 지구상의 두 곳의 위치에 4 km 의 측정거리를 갖는 초대형 레이저간섭계의 구축하여 10-11 m 의 절대정밀도측정의 구현을 목표로 한다. 이를 위해서는 직경이 250 mm 의 대형 거울과 렌즈가 10-8 상대불확도로 가공될 것이 요구된다. 이와 유사한 중력파 검증을 위한 연구는 유럽공동체, 일본 등도 별도로 추진하고 있다 [8].

4. 결론

1980 년도 이후 국내의 가전 및 반도체 업계로부터 초정밀공학의 중요성이 인지됨에 따라 정부

출연연구소 및 일부 대학연구실에서 과기처 및 통산부의 지원으로 소규모의 연구가 진행되어 왔다. 초기에는 국내의 초정밀 기술의 기반이 취약하였던 관계로 이제까지는 10-4 에서 10-5 의 상대불확도 수준의 공작기계 및 산업전용기계들이 주요 대상으로 되어왔다. 최근에 들어서는 국내 기업들의 반도체, 영상 디스플레이, 컴퓨터 주변기기, 관측위성 산업의 전략적인 투자로 초정밀 기술의 수요가 주요핵심기술로 대두됨에 따라 기업연구소와 일부 학계가 연계가 되어 당급한 문제점 해결에 대한 단기적인 연구를 추진하고 있다. 그러나 아직 초정밀 기술의 산업적 중요성에도 불구하고 구체적인 목표를 정립하여 체계적인 연구체계를 추진하지 못하고 있는 단계이다. 앞으로는 국내의 관련 연구인력을 통합적으로 운영하며, 국내 산업이 필요로 하는 초정밀공학에 대한 체계적인 연구체계를 마련하고 선진국과의 경쟁력을 확보하기 위한 집중적인 연구활동과 관련연구인력의 양성에 대한 기초연구를 실시할 계획을 마련하고 있다 [9].

참고문헌

1. P. McKeown, "Manufacturing - how small can we go? The challenge and opportunities of the nanometre age," The British Association Lecture, 1996.
2. N. Taniguchi, "current status in the future trends of ultra precision machining and ultrafine materials processing," Annals of CIRP 32/2, 573, 1983.
3. E. Teague, "Generating and measuring displacements up to 0.1 m to an accuracy of 0.1 nm: Is it possible?," SPIE Handbook-The Technology of Proximal Probe Lithography, Edited by C. Marrian, 1993.
4. D. Swyt, "Uncertainties in dimensional measurements at nonstandard temperatures," J. of Res. NIST, 1993. Thermacore Inc, "Heat pipe design guide," 1994.
5. <http://www.mel.nist.gov>
6. <http://www.npl.co.uk>
7. <http://www.semtech.org>
8. <http://ligo.caltech.edu>
9. <http://me.kaist.ac.kr/~pem/>