

# 나노미터 영역 길이 측정을 위한 미터 소급성을 갖는 원자간력 현미경 개발

김종안<sup>#</sup>, 김재완<sup>\*</sup>, 박병천<sup>\*</sup>, 엄태봉<sup>\*</sup>, 홍재완<sup>\*\*</sup>

## Development of a Metrological Atomic Force Microscope for the Length Measurements of Nanometer Range

Jong-Ahn Kim<sup>#</sup>, Jae Wan Kim<sup>\*</sup>, Byong Chon Park<sup>\*</sup>, Tae Bong Eom<sup>\*</sup>, Jae Wan Hong<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

A metrological atomic force microscope (M-AFM) was developed for the length measurements of nanometer range, through the modification of a commercial AFM. To eliminate nonlinearity and crosstalk of the PZT tube scanner of the commercial AFM, a two-axis flexure hinge scanner employing built-in capacitive sensors is used for X-Y motion instead of PZT tube scanner. Then two-dimensional displacement of the scanner is measured using two-axis heterodyne laser interferometer to ensure the meter-traceability. Through the measurements of several specimens, we could verify the elimination of nonlinearity and crosstalk. The uncertainty of length measurements was estimated according to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Among several sources of uncertainty, the primary one is the drift of laser interferometer output, which occurs mainly from the variation of refractive index of air and the thermal stability. The Abbe error, which is proportional to the measured length, is another primary uncertainty source coming from the parasitic motion of the scanner. The expanded uncertainty ( $k = 2$ ) of length measurements using the M-AFM is  $\sqrt{(4.26)^2 + (2.84 \times 10^{-4} \times L)^2}$  (nm), where  $L$  is the measured length in nm. We also measured the pitch of one-dimensional grating and compared the results with those obtained by optical diffractometry. The relative difference between these results is less than 0.01 %.

**Key Words** : Metrological atomic force microscope (미터 소급성을 갖는 원자간력 현미경), Nanometrology (나노메트롤로지), Laser interferometer (레이저 간섭계), Nanoscanner (나노스캐너)

### 1. 서론

나노미터 영역의 길이 측정은 반도체 공정과 관련된 여러 가지 임계 치수 (critical dimension) 측

정과 sub- $\mu\text{m}$  크기를 갖는 피치나 단면의 높이 측정에 있어서 매우 중요하다.<sup>1</sup> 또한 근래 들어 관심이 집중되고 있는 나노기술 (nanotechnology)에 있어서도 이와 같은 미소 길이 측정에 대한 필요

접수일: 2004년 2월 9일; 게재승인일: 2004년 8월 13일

# 교신저자: 한국표준과학연구원 광기술표준부 길이그룹

E-mail jakim@kriss.re.kr Tel. (042) 868-5683

\* 한국표준과학연구원 광기술표준부 길이그룹

\*\* 시엔아이

성은 더욱 증가되고 있다.

여러 가지 나노미터 영역의 길이 측정 방법 중 원자간력 현미경 (atomic force microscope, AFM) 은 기계적인 스캐닝이 요구되기 때문에 전자적인 스캐닝 방법을 이용하는 주사형 전자 현미경에 비해 측정 속도와 측정 범위가 제한되는 단점을 가지고 있지만 보다 높은 측정 분해능을 얻을 수 있고 진공이 아닌 상태에서 용이하게 사용할 수 있기 때문에 나노미터 영역의 길이 측정을 위해 널리 사용되고 있다.

그러나 일반적인 상용 AFM 에 내장된 나노스캐너의 입력 신호를 이용하여 길이 측정값을 얻을 경우에는 PZT 의 비선형성으로 인하여 길이 측정 오차가 크게 발생된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 미터 소급성 (meter-traceability) 을 갖는 원자간력 현미경 (metrological AFM, M-AFM) 에 대한 연구가 각 국가의 표준 기관을 중심으로 활발히 진행되고 있다.<sup>2,9</sup>

M-AFM 의 구성을 위하여 PZT 의 비선형성과 각 구동축 간의 커플링이 최소화된 나노스캐너를 적용한다. 3 축 (X, Y, Z 축) 의 나노스캐너<sup>4,5,8,9</sup> 를 이용하거나 프로브 (probe) 의 구동을 위한 Z 축과 다른 2 축 (X, Y 축) 이 구분된 형태<sup>2,6,7</sup> 로 나노스캐너를 구성한다. 길이 측정값의 미터 소급성을 확보하기 위하여 여러 가지 방식의 간섭계를 이용하여 나노스캐너의 변위를 직접 측정<sup>2,3,6,9</sup> 하거나 간섭계를 이용하여 교정된 정전 용량형 센서 (capacitive sensor) 의 출력값<sup>4,5</sup> 을 이용한다. 스캐닝을 위한 나노스캐너의 구동방식에 있어서도 레이저 간섭계의 출력값을 직접 나노스캐너의 제어 신호로 이용하는 경우<sup>2,6,8,9</sup> 와 변위 측정을 위한 간섭계와 별도로 제어를 위한 위치 센서의 신호를 이용하는 경우<sup>3-5,7</sup> 로 구분된다.

본 논문에서는 KRISS 에서 개발된 M-AFM 의 구성을 서술하고 이를 이용한 길이 측정 성능을 불확도 해석을 통하여 평가한다. 실험을 통하여 성능 개선을 확인하고 1 차원 격자 시편의 피치를 측정하여 나노미터 영역의 길이 측정 성능을 평가한다. 이를 위하여 M-AFM 을 이용한 피치 측정 결과를 레이저 회절계 (laser diffractometry)<sup>10,11</sup> 를 이용하여 측정된 결과와 비교한다.

## 2. 미터 소급성을 갖는 원자간력 현미경

본 연구에서 개발된 M-AFM 은 AFM 헤드 모듈, 나노스캐너, 레이저 간섭계, 그리고 제어 및 신호 처리부로 구성된다.

AFM 헤드 모듈과 이를 위한 제어부는 상용 AFM 인 ThermoMicroscopes 사의 Autoprobe M5 를 이용하였다. Autoprobe M5 의 헤드 모듈은 탈착이 가능하고 100  $\mu\text{m}$   $\times$  100  $\mu\text{m}$   $\times$  7.5  $\mu\text{m}$  범위의 스캐닝이 가능한 PZT 튜브 형태의 나노스캐너가 장착되어 있다.

Autoprobe M5 헤드 모듈에 내장된 나노스캐너의 X, Y 축과 Z 축의 운동을 분리하기 위해 PZT 튜브의 Z 축만을 프로브의 구동을 위해 사용하고 X, Y 축의 스캐닝은 별도의 나노스캐너 (P-734, Physik Instrument) 를 이용하여 이루어질 수 있도록 하였다. 사용된 나노스캐너는 flexure hinge 형태의 증폭과 안내 기구를 적용하여 100  $\mu\text{m}$   $\times$  100  $\mu\text{m}$  크기의 스캐닝 범위를 얻을 수 있고 폐회로 제어가 가능하도록 정전 용량형 센서가 내장되어 있다.

또한 나노스캐너의 변위를 측정하기 위하여 Zygo 사의 ZMI-1000 레이저 간섭계를 이용하였다. 헤테로다인 방식의 레이저 간섭계로써 간섭계 모듈은 이중 경로 방식으로 구성되어 1.24 nm 의 길이 측정 분해능을 얻을 수 있다.

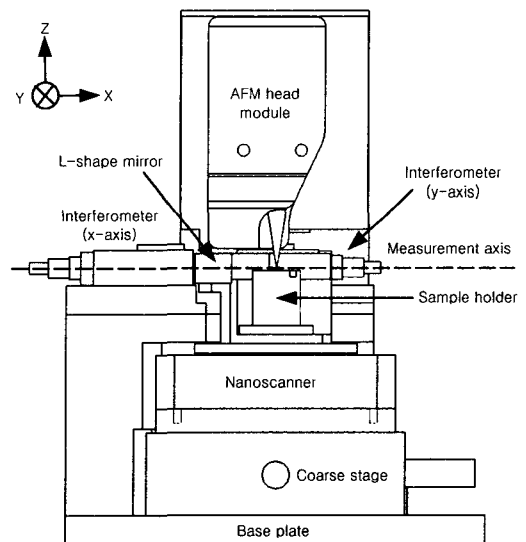


Fig. 1 Schematic view of the main unit of M-AFM

이렇게 구성된 M-AFM 주요 부분의 구성도는 Fig. 1 과 같다. 레이저 간섭계의 dead path 오차를 감소시키기 위해 L 형 거울면과 간섭계 모듈 사이의 거리가 최소화될 수 있도록 하였다. 그리고 시편 면의 측정 위치를 레이저 간섭계 광축의 중심과 최대한 일치시켜 아베 오차의 영향을 최소화시킬 수 있도록 하였다.

나노스캐너의 폐회로 위치 제어는 나노스캐너에 내장된 정전 용량형 센서의 신호를 이용하여 이루어진다. 정전 용량형 센서의 출력 신호와 PZT 앰프의 입력 신호가 Autoprobe M5 의 전자부와 서로 호환될 수 있도록 신호 처리부를 제작하였다. 위치 제어기는 아날로그 형태의 P-I 제어기와 Autoprobe M5 에 내장된 디지털 형태의 제어기가 복합적으로 적용될 수 있도록 구성되었다.

따라서 나노스캐너를 구동하면서 z 축 방향의 PZT 입력 전압값과 레이저 간섭계를 이용한 나노스캐너 위치 측정값을 동기시켜 획득하면 측정 면의 형상 정보를 얻을 수 있고 이로부터 미터 소급성을 갖는 나노 길이 측정이 가능하다. Fig. 2 는 구성된 M-AFM 주요부의 사진이다.

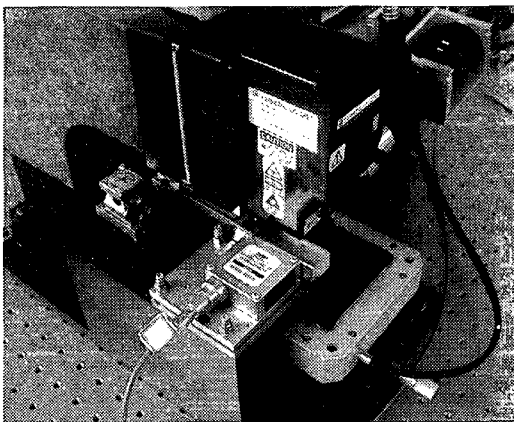


Fig. 2 Photograph of the M-AFM

### 3. 구성 요소의 성능 평가

M-AFM 의 성능을 평가하기 위해 우선적으로 이를 구성하는 주요 구성 요소들의 성능 평가가 필요하다. 이를 위해 나노스캐너와 레이저 간섭계 부분의 성능을 각각 평가하였다.

### 3.1 나노스캐너

M-AFM 을 이용한 길이 측정에 있어서 나노스캐너의 구동 시에 발생하는 기생 회전 운동은 아베 오차 (Abbe error)를 발생시킨다. 따라서 M-AFM 구성에 사용된 나노스캐너의 기생 회전 운동의 크기와 특성을 평가하는 것이 중요하다.

나노스캐너를 X-Y 평면상을 스캐닝하도록 구동시키면서 각 위치에서 발생하는 기생 회전 운동을 시준기 (autocollimator)를 이용하여 측정하였다. Fig. 3 과 4 는 각각 X 축과 Y 축 방향으로 나노스캐너를 구동하였을 때 발생하는 회전 운동 측정 결과를 나타낸 것으로, 10 회 측정한 결과를 평균한 것이다. 각 구동축과 회전축의 방향은 Fig. 1 에 표시된 것과 같다. 나노스캐너를 X 축 (또는 Y 축) 방향으로 구동하였을 때, Y 축 (또는 X 축)의 위치는 구동 영역의 중심인 50  $\mu\text{m}$  에 고정하였다.

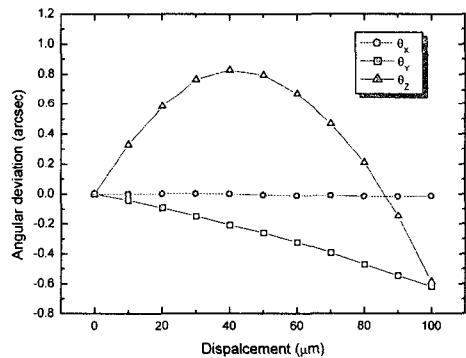


Fig. 3 Angular deviation during x-axis scan (y-axis position is 50  $\mu\text{m}$ )

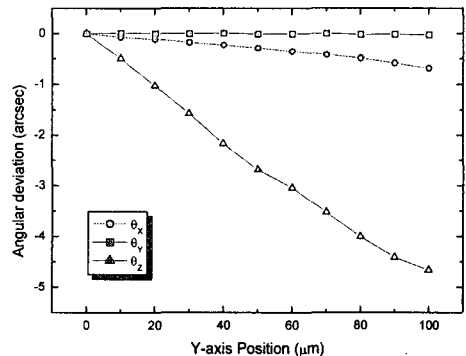


Fig. 4 Angular deviation during y-axis scan (x-axis position is 50  $\mu\text{m}$ )

측정 결과에서 보면 구동축 방향에 대한 회전 운동은 거의 나타나지 않는다. X 축 구동의 경우 Y 축에 대한 회전 운동이 그리고 Y 축 구동의 경우 X 축에 대한 회전 운동이 각각 비슷한 크기와 형태로 나타나고 100  $\mu\text{m}$  구동 범위에 대해 1 arcsec 미만의 크기를 갖는다. 그러나 Z 축 방향에 대한 회전은 X 축과 Y 축 구동의 경우 서로 다른 크기와 형태를 나타낸다. 따라서 주요 측정 방향을 X 축 방향으로 설정하는 것이 길이 측정 오차를 감소시킬 수 있을 것이다.

### 3.2 레이저 간섭계

사용된 레이저 간섭계의 성능을 평가하기 위해 우선 레이저 광원의 파장 안정성을  $I_2$  안정화 레이저 (파장 불확도;  $\sigma=2.5 \times 10^{-11}$ )와의 비교를 통하여 평가하였다.

Fig. 5 는 측정에 사용된 레이저 광원의 각 편광 방향 주파수 성분이  $I_2$  안정화 레이저와 발생시키는 맥놀이 주파수 (beat frequency)를 24 시간 동안 측정된 결과이다. 측정된 맥놀이 주파수의 크기는 수직 편광 방향과 수평 편광 방향에 대해 각각 1.709 MHz, 1.413 MHz 범위 내에 존재한다. 이는 각각  $3.6 \times 10^{-9}$ ,  $3.0 \times 10^{-9}$  정도의 주파수 안정도에 해당되고 레이저 광원의 사양서에 제시된 24 시간 파장 변화 범위(0.01 ppm) 이하의 값이다.

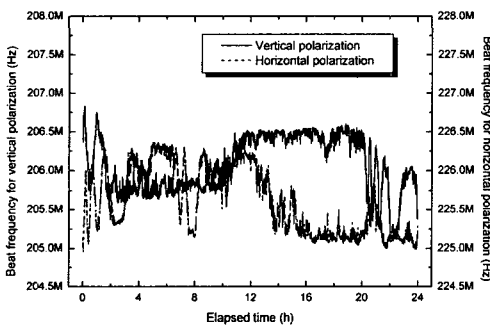


Fig. 5 Frequency fluctuation of two-frequency He-Ne laser evaluated by the beat frequency between the target laser and  $I_2$ -stabilized laser during 24 hours

레이저 간섭계의 비선형성으로 인해 발생하는 오차를 평가하기 위하여 나노스캐너에 시간에 따라 선형적으로 증가하는 전압 입력을 인가하고 이

때 얻어지는 레이저 간섭계의 출력값을 분석하였다. 나노스캐너의 구동 속도는 50 nm/s 로 설정하였다.

Fig. 6 은 이렇게 얻어진 레이저 간섭계 신호에서 4 차 다항 함수의 곡선 맞춤을 이용하여 PZT 비선형성을 제거한 후 얻어지는 유수(residue) 값을 나타낸 것으로 이를 이용하여 레이저 간섭계의 비선형 오차를 평가할 수 있다.<sup>8</sup>

이와 같은 레이저 간섭계의 비선형 성분은 대부분 polarization mixing 과 같은 주기적인 오차 성분에서 기인하기 때문에  $\lambda/4$  (128 nm)의 주기로 일정한 형태가 반복되는 경향을 나타낸다.<sup>12</sup> M-AFM 구성에 사용된 레이저 간섭계의 분해능이 1.24 nm 로 제한되기 때문에 2 nm 이하의 크기를 갖는 이러한 주기적인 오차 성분을 명확하게 관찰할 수는 없지만 Fig. 6 과 같은 결과에서 볼 때 레이저 간섭계 비선형 오차의 크기는  $\pm 2.0$  nm 범위 내에 존재한다고 평가할 수 있다.

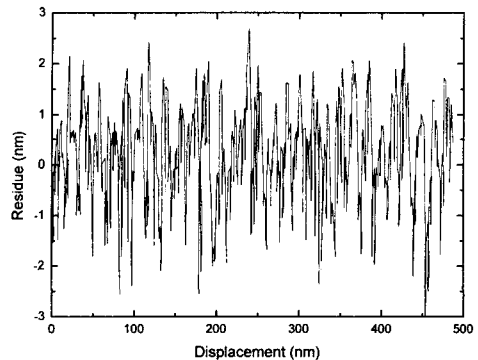


Fig. 6 Evaluation of the nonlinearity error of laser interferometers

레이저 간섭계 출력 신호의 안정성을 평가하기 위해 온도가  $\pm 0.5$  K 범위에서 제어되는 환경에서 24 시간 동안의 출력 신호 변화를 기록하였다. 출력 신호의 평균 드리프트는 1.1 nm/min 정도로 측정되었다. 이러한 드리프트는 일반적으로 온도 변화와 유사한 형태로 나타나기 때문에 주로 온도 변화에 따른 열팽창과 공기 굴절률 변화에서 기인한 것으로 추론된다.

#### 4. 길이 측정 불확도

3 장에서 얻어진 나노스캐너와 레이저 간섭계의 성능 평가 결과를 이용하여 M-AFM 을 이용한 길이 측정값의 불확도를 산정할 수 있다. 불확도 산정 과정은 측정 불확도 표현 지침 (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)을 따랐다. M-AFM 을 이용한 길이 측정 과정에서 발생하는 주요 불확도 요인은 크게 레이저 간섭계 오차, 기하학적 오차, 그리고 환경적 요인으로 나눌 수 있다.<sup>9,12</sup>

레이저 간섭계에서 발생하는 불확도 요인은 레이저 파장 오차, 레이저 파장 안정성, 간섭계의 분해능, 그리고 간섭계의 비선형성이 있다. 레이저 파장 오차, 파장 안정성, 간섭계의 분해능으로 인한 불확도는 사양서에서 제시된 값을 이용하였고 비선형성으로 인한 불확도는 3 장의 실험 결과로부터 산정하였다.

기하학적 오차로 인하여 발생하는 불확도 요인으로는 측정 거울과 나노스캐너의 구동축 사이의 정렬 오차 (cosine error), 아베 오차, 그리고 나노스캐너의 기생 회전 운동으로 인해 발생하는 광경로 변화를 산정할 수 있다. 아베 오차와 광경로 변화로 인한 불확도 산정에서는 3 장의 나노스캐너의 기생 회전 운동 측정 결과를 이용하였다.

환경적 요인으로 인한 측정 불확도는 공기 굴절률 오차, 측정 중 공기 굴절률 변화, 그리고 온

도 변화에 따른 측정 경로 (measurement path)상의 열팽창으로 인해 발생된다. 공기 굴절률 오차는 온도, 압력, 습도와 같은 환경 인자를 측정하는 센서의 측정 오차로부터 산정할 수 있다. 공기 굴절률 변화와 열팽창으로 인한 불확도는 측정 시간을 1 분으로 가정하여 레이저 간섭계 출력값 드리프트의 표준 편차값으로부터 측정 불확도를 산정하였다.

이와 같은 불확도 요인으로부터 발생하는 M-AFM 을 이용한 길이 측정의 불확도는 Table 1 과 같이 정리할 수 있다.  $L$  은 측정된 길이를 나타내고 단위는 nm 이다. 불확도 산정 결과에서 보면 측정 길이에 비례하지 않은 불확도 요인 중에서는 환경 변화로 인한 공기 굴절률 변화와 열팽창에 의한 불확도 요인이 가장 크게 나타난다. 그리고 측정 길이에 비례하는 불확도 요인 중에는 아베 오차로 인하여 불확도가 가장 크게 발생된다.

#### 5. 성능 실험

##### 5.1 측정 성능 개선

PZT 튜브 스캐너를 이용한 Autoprobe M5 과 이를 바탕으로 제작된 M-AFM 의 측정 결과를 비교하여 측정 성능 개선을 확인하였다. 표면 형상 측정 시편 (STS2-1000, VLSI Standards)을 Autoprobe M5 와 M-AFM 을 이용하여 각각 측정하고 그 측정 결과를 비교하였다.

Table 1 Uncertainty budget for the length measurements using M-AFM

분류	표준불확도 성분, $u$	불확도 원인	표준불확도값, $u$	합성표준불확도 성분값, $u_i = c_i \cdot u$ (nm)	인자값
레이저 간섭계 오차	$u(\lambda)$	레이저 파장 오차	0.1 ppm	$0.231 \times 10^{-6} \times L$	Dead path 길이: 16 mm
	$u(\delta\lambda)$	레이저 파장 안정성	0.01 ppm	0.368	
	$u(\delta I_{Re})$	간섭계의 분해능	1.24 nm	0.72	
	$u(\delta I_{NL})$	간섭계의 비선형성	2.0 nm	1.15	
기하학적 오차	$u(\delta I_{Co})$	정렬 오차	$5.0 \times 10^{-2}$ arcdeg	$0.220 \times 10^{-6} \times L$	아베 오프셋: 1 mm
	$u(\delta I_{Ab})$	아베 오차	$5.0 \times 10^{-5}$ arcsec/nm	$0.140 \times 10^{-3} \times L$	
	$u(\delta I_{Op})$	광경로 변화	$5.0 \times 10^{-5}$ arcsec/nm	$0.254 \times 10^{-4} \times L$	
환경적 요인	$u(n)$	공기굴절률 오차	0.1 ppm	$0.231 \times 10^{-6} \times L$	
	$u(\delta n)$	공기굴절률 변화	1.6 nm	1.6	
	$u(\delta T)$	열팽창			

$$\text{합성표준불확도: } u_c = \sqrt{(2.13)^2 + (1.42 \times 10^{-4} \times L)^2} \text{ (nm)}$$

Fig. 7 은  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  스캐닝 영역에서 1 Hz 의 스캐닝 속도로 측정 시편의 표면 형상을 측정 한 것이다. 결과에서 보면 나노스캐너를 교체하고 레이저 간섭계를 추가함으로써 비선형성을 제거할 수 있다. 표면 형상의 단면을 나타낸 Fig. 8 에서 보면 X, Y 축을 Z 축과 분리시킴으로써 각 축간의 간섭으로 인한 왜곡이 제거된 형상을 얻을 수 있음을 보다 명확히 알 수 있다.

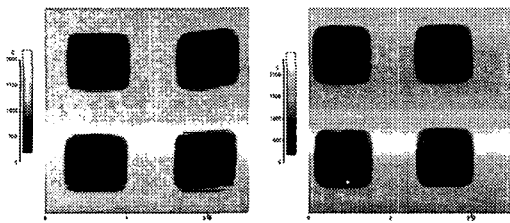


Fig. 7 Topography image of STS2-1000 (scan range:  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ , scan rate: 1 Hz), Left: Autoprobe M5, Right: M-AFM

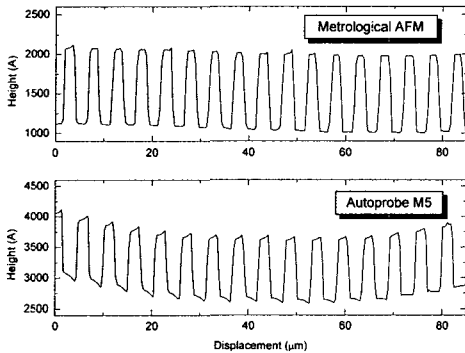


Fig. 8 Sectional profile of topography image of STS2-1000 (scan range:  $85\ \mu\text{m}$ , scan rate: 0.5 Hz), Top: M-AFM, Bottom: Autoprobe M5

## 5.2 나노미터 영역 길이 측정

M-AFM 의 나노미터 영역 길이 측정 성능을 평가하기 위해 대표적인 나노미터 영역의 길이인 1 차원 회절 격자 시편의 피치를 측정하고 레이저 회절계를 이용한 측정 결과와 비교하였다. 피치

측정 대상으로는 SEM 교정용 1 차원 격자 시편 (MXS-301CE, Moxtex)을 이용하였고 이 격자 시편의 공칭 피치는 288 nm 이다. M-AFM 을 이용하여 격자 시편의 형상을 직선 또는 평면 형태의 영역에서 취하고 이로부터 격자의 피치값을 계산할 수 있다.

본 측정에서는 6 회의 X 축 방향 직선 형태 스캐닝으로부터 격자 시편의 형상을 얻었다. 3 회의 동일한 Y 축 위치에서 얻어졌고 그 이후에는 Y 축 방향으로  $10\ \mu\text{m}$  간격으로 시편을 이동시키면서 3 번의 스캐닝 작업을 추가적으로 수행하였다. 각 형상 측정에서의 스캐닝 범위는  $100\ \mu\text{m}$ , 속도는 0.02 Hz, 그리고 데이터 기록 주기는 1 ms 로 설정하였다. Fig. 9 는 이와 같은 실험 조건에서 얻어진 격자 시편의 단면 형상 중 일부를 나타낸 것이다.

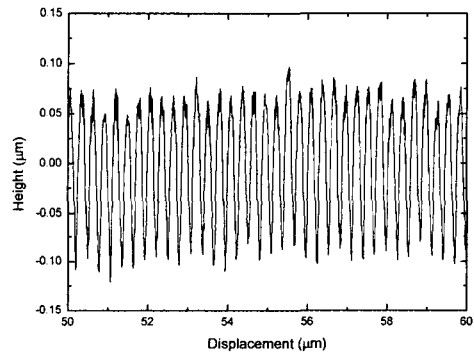


Fig. 9 Sectional profile of topography image of MXS-301CE (scan range:  $100\ \mu\text{m}$ , scan rate: 0.02 Hz)

이러한 측정 방법으로 얻어진 측정 결과에 환경 조건을 보정하고 기울기 성분을 제거한 뒤 각 봉우리 부분의 도심을 찾아 그것을 피크 위치로 설정하였다. 각 피크 위치 값으로부터 Fig. 10 과 같이 개별 피치값과 격자 시편의 평균 피치값을 구할 수 있다.<sup>9</sup>

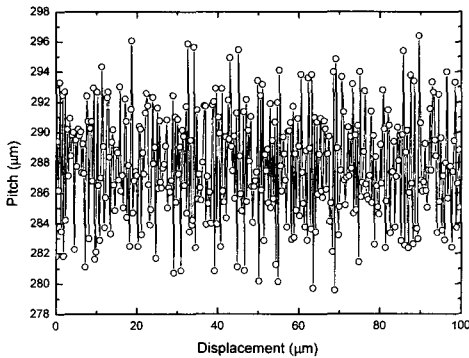


Fig. 10 Evaluation of individual pitch values on MXS-301CE

표 2 는 각 직선 형태의 스캐닝에서 구해진 평균 피치값과 각 개별 피치의 표준 편차를 나타낸다. 동일한 위치에서 얻어진 평균 피치 측정 결과로부터 피치 측정값의 반복능을 평가할 수 있고 서로 다른 위치에서 얻어진 피치 측정값의 차는 격자 시편의 균일성에서 기인된다.

Table 2 Results of average pitch measurements of MXS-301CE

Scanning line	Average pitch (nm)	Standard deviation (nm)
1	1st	287.637
	2nd	287.628
	3rd	287.612
2	287.584	3.890
3	287.592	4.120
4	287.587	4.369
<b>Average</b>	<b>287.607</b>	<b>4.387</b>

표 3 은 M-AFM 과 레이저 회절계를 이용하여 얻어진 평균 피치값 측정 결과를 비교한 것이다. 레이저 회절계는 격자 시편의 개별적인 피치를 측정할 수는 없지만 평균 피치값을 매우 높은 정밀도로 측정할 수 있어 SEM 과 AFM 의 배율 교정 시편의 피치값 검증에 위하여 이용된다.<sup>10,11</sup> M-AFM 으로 측정된 평균 피치값의 표준 편차는 각 직선 형태의 스캐닝에서 얻어진 평균 피치값 간의

표준 편차를 나타내고 레이저 회절계의 경우에는 입사각의 변화에 따른 평균 피치 측정값 간의 표준 편차를 각각 나타낸다.

Table 3 Comparison between average pitch values measured by M-AFM and laser diffractometry

	Metrological AFM	Laser diffractometry
Average (nm)	287.607	287.586
Standard deviation (nm)	0.023	0.002

결과에서 보면 M-AFM 을 이용하여 측정된 평균 피치값은 표준 편차 범위 내에서 레이저 회절계를 이용한 측정 결과와 일치함을 알 수 있다. M-AFM 을 이용한 나노미터 영역의 길이 측정 불확도는 수 nm 정도이지만 평균 피치 측정의 경우에는 여러 개의 피치를 동시에 측정하여 평균값을 구하기 때문에 측정 불확도를 크게 감소시킬 수 있다.

### 6. 결론

본 연구에서는 나노미터 영역의 길이 측정을 위한 M-AFM 을 개발하였다. 상용 AFM 헤드 모듈을 기반으로 하여 PZT 튜브 형태의 나노스캐너를 flexure hinge 형태의 증폭과 안내 기구를 갖는 나노스캐너로 교체하였다. 또한 레이저 간섭계를 추가적으로 구성하여 미터 소급성을 갖는 나노미터 영역의 길이 측정이 가능하도록 하였다. 측정 불확도 표현 지침에 따라 산정된, M-AFM 을 이용한 길이 측정의 확장 불확도 ( $k = 2$ )는  $\sqrt{(4.26)^2 + (2.84 \times 10^{-4} \times L)^2}$  (nm) 이다. 온도 변화로 인한 공기 굴절률 변화와 열팽창이 주요한 불확도 요인이었고 측정 범위에 비례하는 항 중에서는 아베 오차에 의하여 불확도가 가장 크게 발생되었다. 구성된 M-AFM 의 나노미터 영역 길이 측정 성능을 평가하기 위해 1 차원 격자 시편의 평균 피치를 측정하였고 레이저 회절계를 이용한 측정 결과와 비교하였다. 각 측정 방법을 이용한 평균 피치 측정값은 0.01 % 이내의 범위에서 일치하였다.

## 후 기

본 연구의 일부는 테라급 나노소자 개발 사업과 나노 핵심기반 사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Semiconductor Industry Association, The National Technology Roadmap for Semiconductors, 1999.
2. Schneir, J., McWaid, T. H., Alexander, J. and Wilfley, B. P., "Design of an Atomic Force Microscope with Interferometric Position Control," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 12, No. 6, pp. 3561-3566, 1994.
3. Yacoot, A., Kuetgens, U., Koenders, L. and Weimann, T., "A Combined Scanning Tunneling Microscope and X-ray Interferometer," Meas. Sci. Technol., Vol. 12, pp. 1660-1665, 2001.
4. Bienias, M., Gao, S., Hasche, K., Seeman, R. and Thiele, K., "3D Calibration of a Scanning Force Microscope with Internal Laser Interferometers," Surface and Interface Analysis, Vol. 25, pp. 606-610, 1997.
5. Hasche, K., Herrmann, K., Mirande, W., Seemann, R., Vitushkin, L., Xu, M. and Yu, G., "Calibrated Scanning Force Microscope with Capabilities in the Subnanometre Range," Surface and Interface Analysis, Vol. 33, pp. 71-74, 2002.
6. Picotto, G. B. and Pisani, M., "A Sample Scanning System with Nanometric Accuracy for Quantitative SPM Measurements," Ultramicroscopy, Vol. 86, pp. 247-254, 2001.
7. Meli, F. and Thalmann, R., "Long-range AFM Profiler Used for Accurate Pitch Measurements," Meas. Sci. Technol., Vol. 9, pp. 1087-1092, 1998.
8. Gonda, S., Doi, T., Kurosawa, T., Tanimura, Y., Hisata, N., Yamagishi, T., Fuhimoto, H. and Yukawa, H., "Real-time, Interferometrically Measuring Atomic Force Microscope for Direct Calibration of Standards," Rev. Sci. Instrum., Vol. 70, No. 8, pp. 3362-3368, 1999.
9. Misumi, I., Gonda, S., Kurosawa, T. and Takamasu, K., "Uncertainty in Pitch Measurements of One-Dimensional Grating Standards Using a Nanometrological Atomic Force Microscope," Meas. Sci. Technol., Vol. 14, pp. 463-471, 2003.
10. Meli, F., Thalmann, R. and Blattner, P., "High precision pitch calibration of gratings using laser diffractometry," 1<sup>st</sup> international conference and general meeting of the euspen society for precision engineering and nanometrology, pp. 252-255, 1999.
11. Kim, J. A., Won, Y. S. and Park, B. C., "Precision laser Diffractometer for Two-dimensional Grating Pitch Measurement," Proceedings of Korea-Japan Joint Symposium on Nanoengineering (NANO 2003), pp. 336-339, 2003.
12. Zygo, "A Primer on Displacement Measuring Interferometers," <http://www.zygo.com>