

서브나노급 정밀도의 2 차원 원자현미경 개발

이동연[†] · 권대갑^{*}

Two Dimensional Atomic Force Microscope

Dong-Yeon Lee and Dae-Gab Gweon

Key Words : Calibrated Atomic Force Microscope (교정용 원자현미경), Laser Interferometer (레이저 간섭계), Orthogonal Scanner (직교 스캐너), Flexure-guide (유연 가이드)

Abstract

A compact and two-dimensional atomic force microscope (AFM) using an orthogonal sample scanner, a calibrated homodyne laser interferometer and a commercial AFM head was developed for use in the nanometrology field. The x and y position of the sample with respect to the tip are acquired by using the laser interferometer in the open-loop state, when each z data point of the AFM head is taken. The sample scanner which has a motion amplifying mechanism was designed to move a sample up to $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ in orthogonal way, which means less crosstalk between axes. Moreover, the rotational errors between axes are measured to ensure the accuracy of the calibrated AFM within the full scanning range. The conventional homodyne laser interferometer was used to measure the x and y displacements of the sample and compensated via an X-ray interferometer to reduce the nonlinearity of the optical interferometer. The repeatability of the calibrated AFM was measured to sub-nm within a few hundred nm scanning range.

1. 서 론

도체만 측정할 수 있는 전자주사현미경 (Scanning Tunneling Microscope)의 단점을 해결하기 위하여 원자현미경 (Atomic Force Microscope)이 개발되었다⁽¹⁾. 이후 원자현미경은 측정 계측기 분야에서 많이 사용되었다. 특히, 반도체나 LCD (Liquid Crystal Display)분야에서는 초정밀 계측의 필요성이 대두되었고, 대부분의 산업체에서 제조 공정의 정확성을 위하여 원자현미경을 채택하게 되었다. 따라서, 산업용 계측 목적을 위해서 측정기의 표준화를 위한 교정용 원자현미경이 필요하게 되었다.

위치 센서로서 레이저 간섭계 (Laser

Interferometer)를 사용한 원자현미경이 가장 신뢰성 있는 교정용 원자현미경으로 인식된다⁽²⁻⁴⁾. 여기서 원자현미경 헤드는 고정되어있고, 시료가 움직이는 방법을 샘플 스캔 방식⁽⁵⁾이라고 하고, 이를 위해서는 샘플을 정확하게 이송시키는 샘플 스캐너가 필요하다. 원자현미경을 이용하여 샘플의 표면을 정확하게 측정하기 위해서는 크게 두 가지 방법이 있다. 첫 번째로 원자현미경의 팁 끝의 수직 방향 데이터가 취해질 때, 동시에 2 축의 수평 데이터를 기록하는 방법이다. 두 번째는 샘플의 수평 방향의 위치를 피드백을 통하여 센서의 위치를 기록하는 방법이다. 이 방법의 문제점은 구성하기에 복잡하고, 피드백 노이즈 때문에 정확한 측정이 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 정확한 측정을 위하여 개 루프 상태에서 샘플의 위치를 기록하는 방법을 채택하였다. 이 때, 수직 방향의 위치는 원자현미경 헤드를 이용하여 샘플의 수평 방향 위치와 동기되게 데이터를 획득한다.

교정용 원자현미경의 정확한 측정을 위해서는 스캐너로 인해 유발되는 에러, 예를 들면, 스캐너

[†] 책임저자, 회원, 영남대학교, 기계공학부

E-mail : dylee@ynu.ac.kr

TEL : (053)810-2461 FAX : (053)810-2461

^{*} 한국과학기술원, 기계공학과

의 커플링 에러 (Crosstalk), 코사인 에러 (Cosine Error), 아베 에러 (Abbe's Error)가 최소화되어야 한다⁽⁶⁾. 이러한 에러를 최소화하기 위하여, 직교 스캐너가 본 연구에서 개발되었다. 또한, 교정용 원자현미경의 정확성을 평가하기 위하여 회전 방향 기생 운동을 측정하였다. 원자현미경의 구조는 바닥 진동과 같은 환경 노이즈에 둔감하도록 전체 크기가 작도록 설계하였다. 또한, 샘플의 위치를 정확하게 측정하기 위하여 호모다인 레이저 간섭계 (Homodyne Laser Interferometer)를 사용하였다. 레이저 간섭계는 일반적으로 파장의 절반에서 정확하고, 고 분해능을 위하여 회로적으로 체배를 하게 된다. 이 때, 체배 과정에서 비선형 에러가 발생하게 되므로, 엑스레이 간섭계 (X-ray Interferometer)⁽⁷⁾를 사용하여 레이저 간섭계의 비선형성을 측정 및 보상하였다. 마지막으로, 일정한 피치 (Pitch)가 있는 시편의 피치의 반복성을 측정하였다.

2. 교정용 원자현미경의 설계 개관

교정용 원자현미경은 Fig. 1 과 같이 레이저 간섭계를 사용하는 직교 스캐너, 상용 원자현미경 헤드 (XE-Head, PSIA Corp.), 수직 방향 조동 구동기, 샘플과 캔틸레버 관찰용 광학 현미경과 프레임으로 구성되었다. 원자현미경 헤드는 캔틸레버, 널 센서 (Nulling Sensor)용 광학 지레 (Optical Lever), z-미세 구동기 (Fine Scanner)로 구성되었고, 샘플 표면을 따라서 캔틸레버를 수직 방향으로 피드백 시킨다. 광학 현미경은 10 배 대물렌즈, 초점 수평 이송 장치 (Lens Panning System), CCD 카메라로 구성되어서, 캔틸레버와 시료를 관찰하게 된다. 대물렌즈의 수직 초점 이송 장치는 고강성을 위하여 볼 스크류, 롤러 가이드 및 스테핑 모터로 구성되어 있다. z-방향 조동 구동기는 원자 현미경 측정 시 고정 시 강성을 위하여 예압 볼 스크류, 크로스 롤러 가이드 및 하모닉 감속기 형식 스테핑 모터 (Harmonic Drive Stepping Motor)를 사용하였다. 모든 구동 모터는 정지 시에 전류 변화에 의한 랜덤 진동 노이즈가 있으므로, 원자현미경의 측정 시에는 전원을 끈다. 하모닉 감속기는 구조적인 장점에 의해 백래시 (Backlash)가 거의 없으며, 정지 강성이 월등히 좋다. 샘플 이송용 평면 스캐너는 위치 센서로서 레이저 간섭계, 압전 구동기 및 반사 광학계로 구성되어 있다.

교정용 원자현미경의 설계 시 첫 번째 설계 포인트는 전체 시스템의 크기를 줄이는 것이다. 만약, 시스템 크기가 작으면, 열, 진동 및 음파에 의한 노이즈의 영향에 둔감하게 되기 때문이다. 따라서, 샘플 스캐너의 설계 시 스캐너의 크기를 최대한 줄이는 노력이 필요하다. 또한, 레이저 간섭

계의 설계 시 사거리(Dead Path Length)를 줄이도록 노력하였다. 두 번째 설계 포인트는 아베 에러의 최소화이다. 원자현미경 팁이 샘플을 스캔 할 때, 표면 데이터 (Topographic Data)가 샘플의 z-방향 데이터로 사용되는데, 이 때, 레이저 간섭계의 x-y 데이터는 팁과 동일한 위치의 데이터여야 한다. 만약, 피 측정위치와 측정 위치 사이에 정렬 에러 (Alignment Error)가 존재하면, 아베 오프셋 (Abbe's Offset)과 정렬 에러의 곱인 아베 에러가 발생한다. 아베 에러는 원자현미경 데이터의 직접적인 측정 에러가 된다. 따라서, 교정용 원자현미경의 설계 시에 아베 오프셋과 정렬 에러를 줄이는 노력이 필요하다.

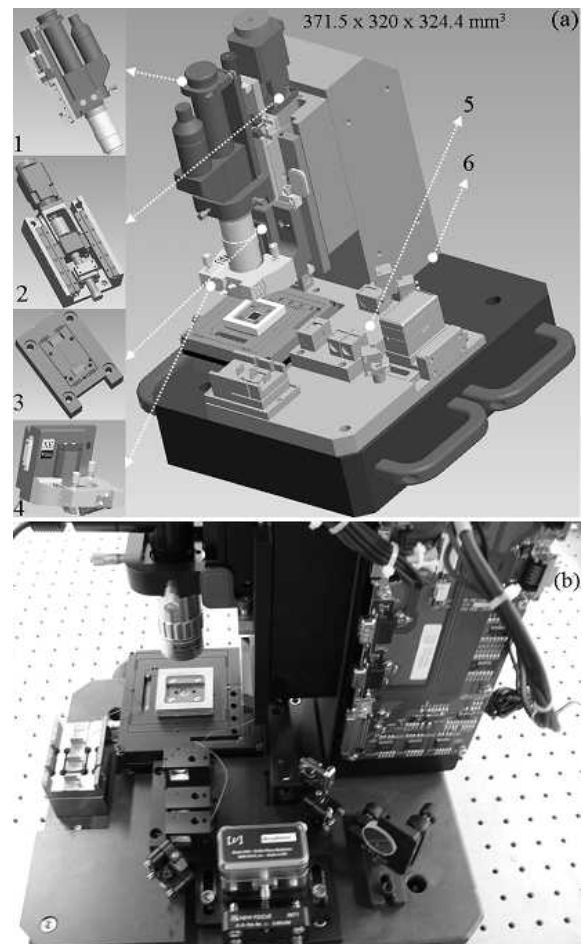


Fig. 1 (a) Schema of the calibrated AFM. (1) Objective lens panning system and a motorized focusing stage, (2) Coarse z-axis stage, (3) Flexure guided fine z-scanner, (4) Commercial AFM head (XE-head, PSIA Corp.), (5) Optic parts for a laser interferometer and (6) Granite structural frames. (Size: 371.5 x 320 x 324.4 mm³). (b) Photograph of the calibrated AFM

3. 샘플 스캐너의 설계

2 차원 샘플 스캐너는 Fig. 2 와 같이, 변위 증폭기 (Motion Amplifying Mechanical Lever), 이중 복합 유연 가이드 (Double Compound Flexure Guide), 다층 압전 구동기 (Multilayered Piezoelectric Actuator), 레이저 간섭계를 위한 반사 광학계로 구성되어 있다.

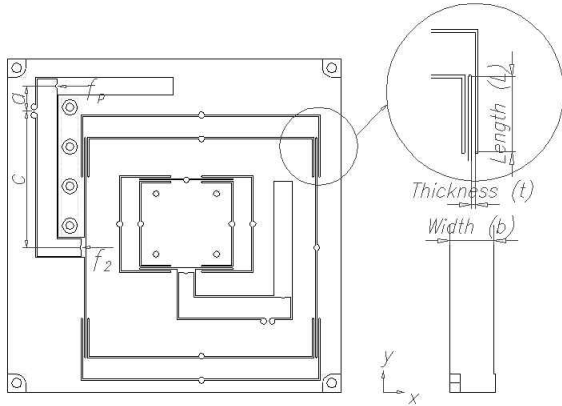


Fig. 2 Schema of the sample scanner: (Size: 110 x 110 x 15 mm³). The inner scanner is fast y scanning and the outer scanner slow x scanning. Here, f_p is an induced force at the piezo-actuator, f_2 is a input force at the contacting point (kinematic pin) between the mechanical lever and flexure guide and A_m is a mechanical amplification factor of the mechanical lever

평면 스캐너의 특징은 다음과 같다. 첫째, 대칭형 가이드는 열 변형에 자가 보상 (Self-compensating)한다. 둘째, 기생 운동 에러 (Parasitic Motion Error)를 최소화하기 위하여 이중 복합 유연 가이드를 채택하였다. 이론상, 이중 복합 유연 가이드는 완전한 1 축 가이드로서 역할을 한다. 즉, 힘이 가이드의 중심에 적용되면, 어떠한 기생 운동 에러도 발생하지 않는다. 또한, 힘이 가이드의 중심과 약간 편심 되더라도, 기생 운동 에러는 구조적인 특성 상 최소화된다. 따라서, 회전 기생 운동 에러에 의해 발생하는 아베 에러의 최소화가 주요 설계 포인트이기 때문에 본 연구에서는 이중 복합 유연 가이드를 채택하였다. 셋째, 대 행정 측정 (> 100 μm)을 위하여 변위 증폭기를 채택하였다. 넷째, x 축과 y 축 스캐너는 직교적으로 분리되어 있다. 다섯째, 샘플 스캐너는 한 몸체에서 모두가공이 되므로 부품 사이의 마찰이 거의 없다.

이중 복합 가이드의 강성은 식 (3.1)과 같이 정의된다. 여기서 E 는 영계수 (Young's Modulus), $I = br^3/12$ 가이드의 단면 2 차 모멘트이다.

$$k = \frac{F}{q} = \frac{24EI}{l^3} \quad (3.1)$$

식 (3.1)로부터 강성의 결정에 가장 민감한 파라미터는 유연가이드의 두께와 길이이다. 실제 가공의 측면에서, 두께는 줄 방전가공 (Wire Electro-discharge Machining)의 가공 오차 등에 의해 가공의 정확성이 결정된다. 가이드의 길이는 스캐너 사이즈 등에 의해서 제약을 받게 된다.

100 μm 이상의 대 행정 스캐닝을 달성하기 위하여 변위 증폭기가 사용되었고, 스캐너의 최종 변위 계산시 시스템 모델링에 고려가 되어야 한다. 또한, 압전 구동기의 변위는 유연 가이드의 강성에 의해서 변하므로, 압전 구동기의 특성 또한, 모델링에 고려된다. 압전 구동기의 변위와 힘은 식 (3.2)와 같이 계산된다.

$$\delta_p = -\frac{\delta_{p,\max}}{f_{p,\max}} f_p + \delta_{p,\max} \quad (3.2)$$

$$f_p = \frac{c}{a} f_2 = A_m f_2$$

여기서, A_m 은 증폭 계수, f_2 변위 증폭기와 가이드의 접촉 점에서의 힘이다. 압전 구동기는 인장력과 모멘트에 취약하므로, 힘을 전달 시 핀 (Kinematic Pin)을 통하여 전달되고, 접촉제가 아닌 적절한 예압을 통하여 조립이 된다. 따라서, 스캐너의 최대 변위를 계산시 식 (3.3)과 같이 예압 (q_0)을 고려한다.

$$f_2 = k(q_0 + q) \quad (3.3)$$

여기서, q 는 유연 가이드의 변위이다. 식 (3.1) ~ (3.3)을 이용하여 압전 구동기의 변위 및 힘은 다음 식과 같이 유도된다.

$$f_p = A_m k(q_0 + q) \quad (3.4)$$

$$\delta_p = -\frac{\delta_{p,\max}}{f_{p,\max}} \left(A_m k(q_0 + q) \right) + \delta_{p,\max}$$

마지막으로, 변위 증폭기의 증폭비를 고려해서, 스캐너의 최대 변위는 다음 식과 같다.

$$q = \frac{A_m \delta_{p,\max} f_{p,\max}}{f_{p,\max} + A_m^2 k \delta_{p,\max}} - \frac{A_m^2 \delta_{p,\max} k q_0}{f_{p,\max} + A_m^2 k \delta_{p,\max}} \quad (3.5)$$

식 (3.5)로부터, 예압은 가이드의 변위를 감소시킨다. 그러나, 적절한 크기의 예압은 스캐너의 동 특성을 향상시키기도 한다. 샘플 스캐너의 설계 사양은 Table 1 과 같다.

Table 1 Design specifications of the sample scanner

Stiffness of the flexure guide	< 0.25 N/ μ m
Natural frequencies of guide	> 100 Hz
Maximum Von-Mises Stress	< 80 Mpa
Preload	50 μ m

Table 2 Design results of the sample scanner

Length of the guide	12.5 mm
Thickness of the guide	0.6 mm
Width of the guide	14.5 mm
Mechanical amplification factor	5.5
Stiffness of the flexure guide	0.221 N/ μ m
Lowest natural frequency	152.8 Hz
Maximum displacement of the guide	152 μ m

설계 사양을 만족시키기 위하여, 식 (3.5)를 사용하여 얻어진 설계 결과는 Table 2 와 같다. 본 연구에 사용된 압전 구동기의 강성은 25 N/ μ m 이다. 설계 경험상, 유연 가이드의 강성이 압전 구동기의 강성의 약 1/100 이 될 때, 스캐너가 정, 동특성이 좋아지게 된다. 본 연구에 사용된 재료는 AL6061-T6 이고, 안전 계수를 고려하여 최대 응력은 약 1/3 으로 정하였다. 예압은 최대 변위의 약 1/3 정도인 50 μ m 로 정하였다. 원자현미경의 측정 시 샘플 스캐너의 스캔 주파수는 1 Hz 정도 이므로, 스캐너의 공진 주파수 (152.8 Hz)는 적당하다.

해석을 통하여 설계된 스캐너의 결과를 검증하기 위하여 상용 시뮬레이션 프로그램 (Pro/Mechanica™, PTC Corp.)을 사용하여 해석을 수행하였다. 사용된 프로그램은 설계 시 사용된 3 차원 도면 파일을 그대로 사용하고, 해석 요소 또한, 3 차원 요소를 사용하므로 해석의 정확성이 참 값에 더욱 가까운 장점이 있다. Fig. 3 의 결과에서 가이드의 강성은 약 0.218 N/ μ m 이고, 설계 결과의 차이는 약 1.4% 이내로 일치함을 확인할 수 있다. 또한, 최대 응력은 가이드의 코너에서 발생하는데, 크기는 약 75.1 Mpa 로 설계 사양을 만족시킨다. 동역학 시뮬레이션으로서 스캐너의 공진 주파수를 Fig. 4 와 같이 해석한 결과 약 159.4 Hz 이고, 설계와 약 4.1% 이내로 일치함을 알 수 있다.

샘플 스캐너는 Fig. 5 와 같이 크로스 롤러 가이드와 마이크로미터 헤드를 사용하는 xy 방향의 조동 구동기에 장착된다. 샘플은 샘플 지그에 장착되고, 샘플 지그는 자력을 이용하여 샘플 홀더에 장착이 된다. 이 구조의 장점은 샘플이 쉽게 탈, 부착이 가능하다는 것이다. 물론, 샘플의 최상면이 측정대상이기 때문에 레이저 간섭계의 측정 위치는 아베 오차를 줄이기 위하여 캔틸레버 팁이 측정하는 위치에 정확하게 정렬되도록 설계 하였다. 그러나, 이러한 설계 노력에도 불구하고, 가공 및 조립 공차로 인해 대개 약 0.5mm 정도의 아베 오프셋이 남게 된다.

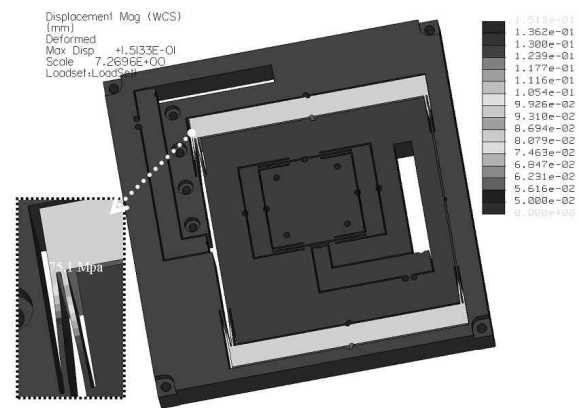


Fig. 3 . Static FEA simulation results. The stiffness of the guide is 0.218 N/ μ m (151.3 μ m for 33 N input). The inset shows that the maximum stress at the guide is 75.1 Mpa.

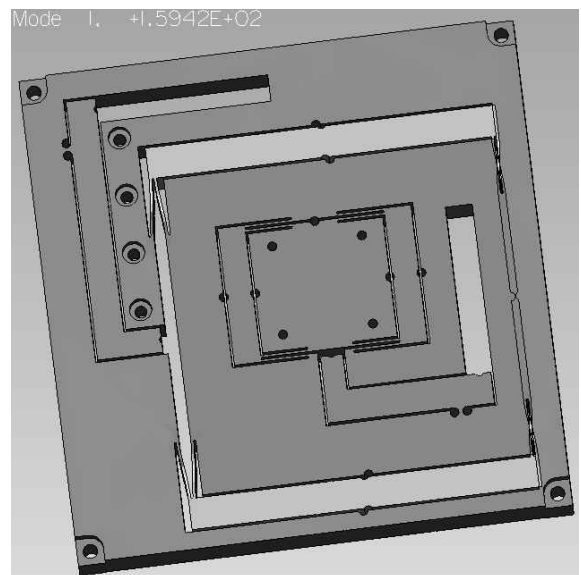


Fig. 4 Dynamic FEA simulation result. The first resonant frequency of the scanner is 159.4 Hz.

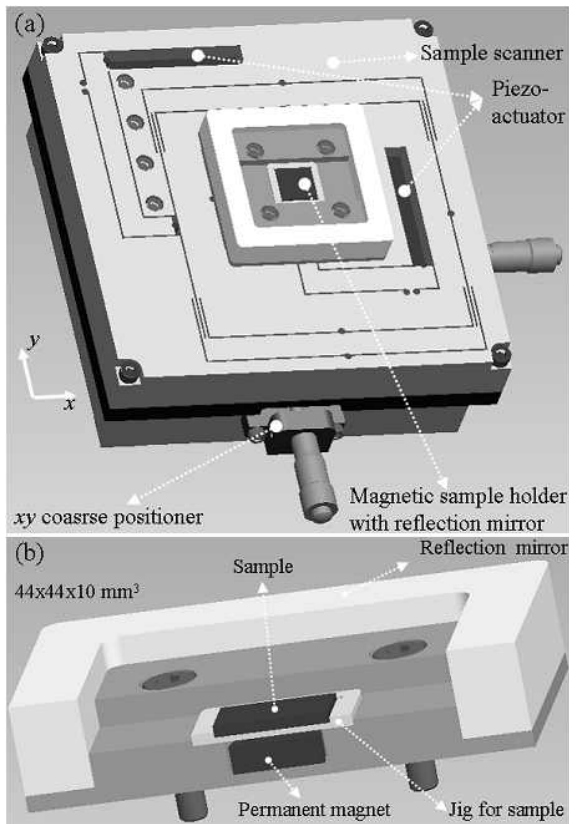


Fig. 5 (a) Assembly drawing of the sample scanner which shows the magnetic sample holder, the sample scanner and the coarse xy positioner. (b) Sectional view of the magnetic sample holder which shows sample location, a reflection mirror, a jig for sample and a permanent magnet for fixing the sample.

4. 레이저 간섭계의 비선형 보상

본 연구에 사용된 레이저 간섭계는 호모다인 타입의 간섭계이다. 간섭계의 소스는 주파수 안정화된 He-Ne 레이저 (05 STP 903, Melles Griot Corp.)이다. 주파수 안정화 정도는 약 0.04 ppm 이고, 100 μm 측정 시 약 4×10^{-3} nm 정도의 불확도이다. 사용된 간섭계는 분해능 향상을 위하여 약 512 개의 전자적인 체배 (Electronic Subdivision)를 하고, 약 0.6 nm의 분해능을 달성하게 된다. 이 과정에서 비선형성이 존재하고, 레이저 간섭계의 교정을 위하여 엑스레이 간섭계와 레이저 간섭계를 비교한다. 3296 개의 엑스레이 시그널이 2 개의 레이저 간섭계 시그널과 비교되고, 레이저 간섭계의 비선형성이 평가되고, 교정된다. 실제 측정된 비선형성은 Fig. 6 과 같다. 이 때, 엑스레이 간섭계의 측정 범위는 633 nm 이다. 측정된 레이저 간섭계의 최대 비선형 에러는 약 ± 1 nm 이고, 이것은 공기의 굴절률 변화, 온도 구배 등에 의해서 발생된다. 또한, 레이저 간섭계의 보상을 한 후에 측정된

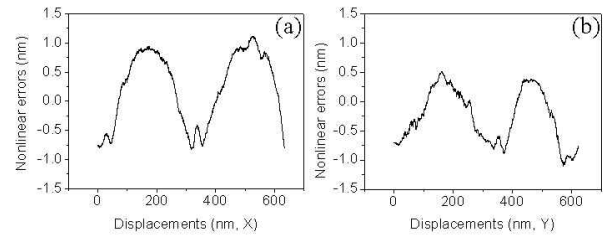


Fig. 6 Nonlinear error of the laser interferometer in (a) x-axis and (b) y-axis. The nonlinear error is about ± 1 nm with no compensation.

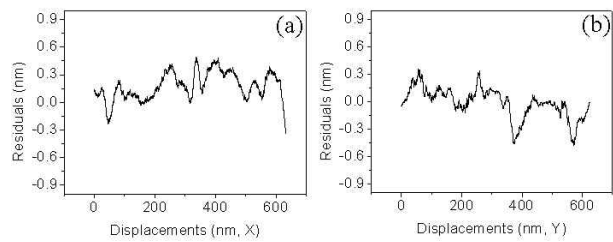


Fig. 7 Nonlinear residual error of the laser interferometer in (a) x-axis and (b) y-axis. The nonlinear residual error is about ± 0.3 nm with X-ray compensation.

비선형 에러는 약 ± 0.3 nm 이다 (Fig. 7). 잔여 비선형 에러는 전자 회로 노이즈, 진동 및 공기 변화 등이 요인이다.

5. 성능 평가

샘플 스캐너의 연성 (Crosstalk) 정도를 확인하기 위하여, 회전 기생 운동을 측정하였다. 회전을 측정하기 위하여 분해능 0.05 arcsec 의 오토콜리메이터를 사용하였다. Fig. 8 과 같이, y-축 스캐너의 최대 기생 운동은 1.2 arcsec 의 롤 (Roll) 모션, 3.2 arcsec 의 피치 (Pitch) 모션, 2.8 arcsec 의 요 (Yaw) 모션으로 측정되었다. x-축 스캐너의 회전 기생 운동 역시 3 arcsec 이하로 y-축 스캐너와 비슷한 수준이다. 회전 운동 측정 시, 개 루프 상태에서 측정하였다. 폐 루프 측정 시에는 레이저 간섭계의 직각도 등에 의해 측정 결과가 달라지게 된다. Fig. 8 의 결과를 이용하여, 샘플 스캐너의 스캐닝 영역이 3 μm 일 경우, 요 모션에 의한 연성 에러는 약 1 nm 정도가 된다.

교정용 원자 현미경으로서 반복성 (Repeatability)를 평가하기 위해서 주기적인 피치를 갖는 시편의 피치를 측정하였다. 샘플 피치의 공칭 값은 180 nm 이고, 샘플 스캐너의 주사 속도는 0.5 $\mu\text{m}/\text{s}$, 원자 현미경의 측정 모드는 비 접촉 모드, 캔틸레버의 강성은 30 N/m, 공진 주파수는 300 kHz (AR5-NCHR, PSIA Corp.). 측정은 기술기 보정 후에 각각의 피치에서 중심 사이의 거리로 피치를 측정하였다.

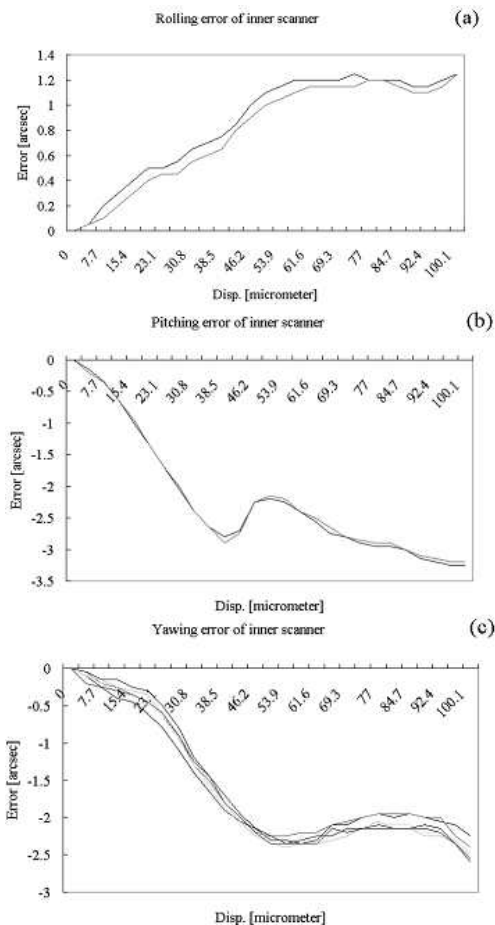


Fig. 8 (a) Parasitic roll motion of the inner scanner. (b) Parasitic pitch motion of the inner scanner. (c) Parasitic yaw motion of the inner scanner. The maximum rotational motion is 1.2 arcsec in the direction of the yaw axis for full range motion. When moving the sample scanner along the y-axis, the x-axis motion error is generated by this yaw motion.

본 연구에서 제작된 교정용 원자 현미경의 전체 불확도 평가를 위해 에러 요인을 다음과 같이 분석하였다.

- ① 피치 측정 반복성 (1σ): 0.58 nm
- ② 공기 굴절률 변화에 의한 오차
 - 측정영역에 의한 오차: 0.005 nm
 - Dead path(35mm)에 의한 오차: 2.5 nm
- ③ 레이저 인터페로미터의 분해능: 0.6 nm
- ④ 광학계의 온도 변화에 의한 에러: 0.5 nm
- ⑤ 측정 미러(44 mm)의 온도 변화에 의한 에러: 1.6 nm
- ⑥ 코사인 오차: 측정 미러와 AFM의 프로브 사이의 거리 $D = 22 \text{ mm} \rightarrow 1.5 \times 10^{-4} \text{ nm}$
- ⑦ 아베 오차: Yaw 운동(2.8 arcsec, Abbe Offset = 0.5 mm) $\rightarrow 2.3 \text{ nm}$

이를 통하여 시스템의 확장 불확도는 8.1 nm(2σ)이다.

6. 결론

나노 계측 기기의 표준 장치로서 직교 샘플 스캐너, 교정된 레이저 간섭계 및 상용 원자현미경 헤드를 사용하여 교정용 원자 현미경을 개발하였다. 제안된 스캐너는 직각으로 독립된 구조이기 때문에 아베 에러를 최소화시킨다. 원자 현미경의 캔틸레버 팁 끝이 z 데이터를 얻을 때, 동일한 위치에서 레이저 간섭계가 xy 데이터를 개 루프 상태에서 취득한다. 측정 정확도의 향상을 위하여 레이저 간섭계의 비선형 ($\pm 1 \text{ nm}$)을 측정하였고, 엑스레이 간섭계를 사용하여 보정한 결과 약 $\pm 0.3 \text{ nm}$ 정도로 비선형이 향상되었다. 실험 결과로부터, 최대 기생 회전 에러는 최대 스캐닝 ($100 \mu\text{m}$)시 약 1.2 arcsec으로 측정되었고, 일정한 피치의 샘플을 측정한 결과 측정 반복성은 약 0.58 nm로 측정되었다. 전체 시스템의 여러 에러 요인을 분석한 결과 전체 시스템의 확장 불확도는 $100 \mu\text{m}$ 스캐닝 시 약 8.1 nm로 평가되었다.

참고문헌

- (1) G. Binning, C. F. Quate and Ch. Gerber, 1986, "Atomic Force Microscope," *Phys. Rev. Lett.* Vol. 56, No. 9, pp. 930~933.
- (2) J. Schneir, T. H. McWaid, J. Alexander and B. P. Wilfley, 1994, "Design of an atomic force microscope with interferometric position control," *J. Vac. Sci. Technol. B* Vol. 12, No. 6, pp. 3561~3566.
- (3) Dong-Yeon Lee, D. M. Kim and D. G. Gweon, 2006, "Design and Evaluation of Two Dimensional Metrological Atomic Force Microscope using a Planar Nanoscanner," *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 45, No. 3B, pp. 2124~2127.
- (4) K. Hasche, K. Herrmann, W. Mirand, R. Seemann, L. Vitushkin, M. Xu and G. Yu, 2002, "Calibrated scanning force microscope with capabilities in the subnanometre range," *Surf. Interface Anal.* Vol. 33, pp. 71~74.
- (5) J. Kwon, J. Hong, Y. S. Kim, Dong-Yeon Lee, S. M. Lee and S. I. Park, 2003, "Atomic force microscope with improved scan accuracy, scan speed and optical vision," *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 74, No. 10, pp. 4378~4383.
- (6) Dong-Yeon Lee, M. Y. Lee and D. G. Gwoen, 2006, "Orthogonality Correction of Planar Sample Scanner for Atomic Force Microscope," *Jpn. J. Appl. Phys. Part2* Vol. 45, No. 13, pp. L370~L372.
- (7) J. Park, J. Jo, S. Byun, J. W. Kim, T. B. Eom and C. I. Eom, 2006, "Development of a Two-Dimensional nano-Displacement Measuring System Utilizing a 2D Combined Optical and X-ray Interferometer," *J. Korean Phys. Soc.* Vol. 48, No.1, pp. 28~32.