

XY 스캐너의 아베 오차 최소화를 위한 최적 설계 및 나노 정밀도의 원자 현미경 피치 측정 불확도 평가

김동민[#], 이동연^{*}, 권대갑^{*}

Optimal design of a flexure hinge-based XY AFM scanner for minimizing Abbe errors and the evaluation of pitch measuring uncertainty of a nano-accuracy AFM system

Dongmin Kim[#], Dong Yeon Lee^{*} and Dae Gab Gweon^{*}

ABSTRACT

To establish of standard technique of nano-length measurement in 2D plane, new AFM system has been designed. In the long range (about several tens of μm), measurement uncertainty is dominantly affected by the Abbe error of XY scanning stage. No linear stage is perfectly straight; in other words, every scanning stage is subject to tilting, pitch and yaw motion. In this paper, an AFM system with minimum offset of XY sensing is designed. And XY scanning stage is designed to minimize rotation angle because Abbe errors occur through the multiply of offset and rotation angle. To minimize the rotation angle optimal design has performed by maximizing the stiffness ratio of motion direction to the parasitic motion direction of each stage.

This paper describes the design scheme of full AFM system, especially about XY stage. Full range of fabricated XY scanner is $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$. And tilting, pitch and yaw motion are measured by autocollimator to evaluate the performance of XY stage. As a result, XY scanner can have good performance.

Using this AFM system, 3 μm pitch specimen was measured. The uncertainty of total system has been evaluated. X and Y direction performance is different. X-direction measuring performance is better. So to evaluate only 1D pitch length, X-direction scanning is preferable. Its expanded uncertainty ($k=2$) is $\sqrt{(3.96)^2 + (4.10 \times 10^{-5} \times p)^2}$, where p is the measured length in nm.

Key Words : AFM(원자현미경), nano-metrology(나노 메트롤로지), Flexure hinge stage(플렉서 힌지 스테이지), Abbe error minimization(아베오차 최소화), Uncertainty evaluation(불확도 평가), pitch length(피치 길이)

기호설명

☞ 접수일: 2006년 4월 6일; 게재승인일: 2006년 5월 9일

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

E-mail panty78@kaist.ac.kr (042) 869-8763

* 한국과학기술원 기계공학과 NOM Lab.

k_x, k_y, k_z = translational direction stiffness

$k_{\theta_x}, k_{\theta_y}, k_{\theta_z}$ = rotational direction stiffness

$\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ = scaling factor

1. 서론

1.1 연구동기 및 선행연구

나노미터 영역에서의 제조 가공을 위해서는 가공부품과 소자 등에 대한 정확한 측정 기술이 필수적인데, 이러한 나노측정 기술은 나노기술의 기반이 된다. 나노측정 기술은 나노미터 표준 확립에서 비롯된다. 나노측정에 대한 요구가 증대되면서 다양한 나노 관측 측정 장비가 산업체와 연구실에서 사용되고 있다. 이에 따라 여러 선진국에서는 나노미터 표준 확립을 위한 연구 개발이 이미 진행되고 있는 실정이다. 이러한 연구는 빛의 속도로 정의되는 미터표준으로부터 소급성을 유지하면서, 나노미터 영역에서 구현할 수 있는 길이 표준기를 개발하고 이에 대응하는 측정 및 교정기술을 개발함으로써 이루어진다.

이러한 나노 길이 측정의 표준화를 위한 연구는 선진국의 여러 나라에서 수 년 전부터 수행되었다. 그 예로 유럽의 국가간의 메트롤로지 연구의 협동기관인 EUROMET에서는 NANO pilot study를 시작하여 현재 단차(step height), line scale, 1 차원 격자(1D gratings) 측정에 대해서는 국가간의 측정 결과를 비교함으로써 이미 표준화를 확립하였고 선 폭(linewidth)과 2 차원 격자(2D gratings)의 표준화를 위한 연구는 2005년부터 수행하고 있다.¹ 본 논문은 이러한 나노 길이 측정 표준화 중 2 차원 격자의 표준화를 위한 장비의 개발 및 장비의 불확도 평가에 초점을 맞추고 있다. 이 때 2 차원 격자의 측정값은 격자 사이의 거리인 피치(pitch)값으로 대표된다.

확립된 나노미터표준을 2 차원 피치 인증표준물질과 연결시켜줄 수 있는 수단으로써 효과적인 방법으로는 원자현미경(AFM)을 이용한 방법과 레이저 회절계(laser diffractometry)를 이용한 방법이 있다. 레이저 회절계를 이용한 방법은 시편의 평균 피치값 밖에 측정할 수 없는데 반해,² 원자현미경을 이용한 방법은 평균 피치값 뿐만 아니라 어느 특정한 위치에서의 한 개의 피치값까지 측정할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 원자현미경을 통해 산업체에서 필요로 하는 나노 평면길이 측정

기술을 확립하고 표준화하는 내용을 다룬다. Table 1에 세계 주요 표준 연구기관에서 현재까지 개발된 피치 길이 측정장치의 측정 불확도를 정리하였다.³⁻⁸

Table 1 Comparison of performance of national standard of pitch length measuring equipment

	최대 측정 영역	측정 불확도(k=2)
미국(NIST)	20um(x,y 축)	20nm/20um
독일(PTB)	70um(x 축), 15um(y 축)	6.5nm/50um
영국(NPL)	100um(x,y 축)	20um/100um
이탈리아(IMGC)	<50um(x,y 축)	10nm/50um
스위스	350um(x 축)	6nm/100um

Table 1에서 알 수 있듯이 100 um의 측정 영역에 대해 2 축의 경우 대략 20nm 정도의 불확도를 갖는다. 현재 위의 기관들에서 제작된 장비는 산업체에서 사용되어 지고 있는 장비들을 측정/교정해 주는데 사용되고 있다. 하지만 장비들이 해마다 더욱 정밀해지고 있으므로 이에 따라 나노 평면길이 측정장치도 더욱 정밀해질 필요가 있다.

1.2 연구 목적 및 연구 범위

1.1 절에서 세계의 주요 표준 기관에서의 나노 평면길이 측정장치의 성능 수준을 알아보았다. 하지만 앞서도 말했듯이 이 성능은 더욱 정밀해지는 산업체의 수요를 따라가기 위해 더욱 개선되어야 할 필요가 있다.

여기서 우리가 깊고 넘어갈 것은 앞서 언급한 모든 기관들의 측정장치는 측정영역이 비교적 작은 영역(10 μ m 이하)에 대해서는 불확도가 그렇게 크지 않다는 것이다. 예를 들어 독일(PTB)의 경우 10 μ m에 대해서는 확장 불확도가 2.5nm인데 반해 100um의 측정 영역에 대해서는 11.5nm이다. 이는 보통 장치의 불확도는 장행정(수십 μ m ~ 수백 μ m)를 측정할 때 길이에 비례해서 커지는 오차요인이 길이에 관계없이 생기는 오차요인보다 더욱 큰 오차요인으로 작용한다는 것을 의미한다. 이 때 길이에 비례해서 커지는 오차 요인 중 가장 주요한 것이 Abbe 오차이다.³⁻⁸

본 논문에서는 최대 측정 영역을 수십 μm 에서 100 μm 에 해당하는 범위에 대해 한정하였다. 이러한 범위에 대해서 가장 주요한 오차 요인인 Abbe 오차를 줄이기 위하여 스테이지가 기생 방향으로의 운동을 최소로 하도록 최적 설계하였다.

이렇게 설계된 스테이지를 기반으로 하여 전체 원자현미경 시스템을 구축하였고, 특히 피치에 대하여 이 시스템의 측정 불확도를 평가하였다.

2. 전체 시스템의 외관

앞선 1 장에서 2 차원 피치 측정 시스템을 구현하기 위하여 원자현미경을 사용한다고 언급하였다. 2 장에서는 정확한 피치 측정을 위하여 제안된 원자현미경의 구조에 대하여 설명한다.

제안된 2 차원 나노 평면 길이 측정장치는 다음과 같은 부품들로 구성 되어진다. 캔티레버의 휘어짐을 감지하는 상용 AFM 헤드(PSIA: 레이저와 4 분할 포토다이오드로 구성됨), 시편을 근접시키는데 사용되는 Z 축 조동 구동기, 캔티레버를 시편에 근접시킬 때 관측을 위해 사용되는 포커스 스테이지(대물렌즈, CCD 탑재), 시편의 원하는 곳을 캔티레버의 끝단으로 이동하기 위해 필요한 XY 조동 구동기, 시편을 스캔하기 위해 필요한 XY 스캐너, XY 스캐너의 움직임을 측정하는 상용 레이저 간섭계(Zygo : ZMI 2000), 캔티레버를 널링(Nulling)함으로써 시편의 Z 방향 형상을 알기 위해 필요한 Z 스캐너, 전체 프레임 등으로 구성된다. Fig 1 에 2 차원 평면길이 측정장치의 전체도 및 부품도를 도시하였다. AFM 헤드를 시료에 근접시키는 역할을 하는 Z 축 조동구동기는 백래쉬가 없어야 할 뿐만 아니라 전원을 켜고 있을 때도 흘러내리지 않아야 한다. 이를 위하여 볼스크류 타입의 스테핑 모터에 하모닉 드라이브(harmonic drive)를 장착하여 사용하였다. 이 때 가이드는 크로스롤러 가이드를 사용하였다. 그 결과 AFM 헤드를 시료에 근접시킨 뒤 안정적으로 위치를 유지시킬 수 있었다.

그리고 XY 스캐너와 Z 스캐너는 분리되도록 설계하였다. 그 이유는 XYZ 스캐너가 일체형일 경우, 고속으로 움직이는 Z 축 스캐너에 의해 XY 스캐너의 공진 모드를 가진하게 되어 전체 XYZ 스테이지가 떨리게 되고 이로 인해 시편도 떨리게 되어 그 떨림이 측정값에 그대로 나타나기 때문이다. 물론 이를 방지하기 위해 노치(notch) 필터를

사용하여 XY 스캐너의 모드를 가진하지 않도록 Z 축 스캐너를 제어하는 방법이 있긴 하지만 이 방법이 완벽하게 영향을 없애주지는 못한다. 따라서 이러한 문제를 근본적으로 없애기 위하여 XY 스캐너와 Z 스캐너를 분리하였다.

또한 아베 오차를 최소화 하도록 캔티레버 팁과 공간적으로 같은 위치에 XY 인터페로미터의 빔을 위치시켰다. 하지만 이러한 노력에도 불구하고 XY 측정 빔과 캔티레버 팁과의 정렬오차를 완벽하게 제거하는 것은 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 정렬과정에서 생기는 아베 음셋 오차를 1 mm 로 가정하기로 한다.

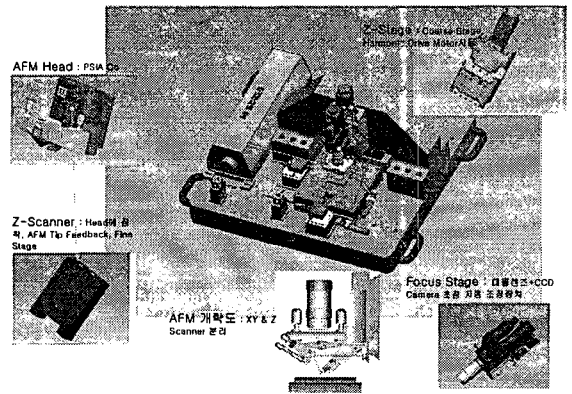


Fig. 1 Total system configuration

3. XY 스캐너의 최적 설계

XY 스캐너를 설계하기에 앞서 아베 음셋과 아베 음셋오차와의 관계를 정리할 필요가 있다. Fig. 2 에 이들의 관계를 설명하였는데 XY 방향으로의 오차는 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 모두에 기인함을 알 수 있다.⁹ 따라서 아베 오차를 줄이기 위해서는 이러한 기생 방향으로의 운동이 최소화 되도록 하는 것이 중요하다. 이를 위하여 XY 스캐너의 운동방향과 기생 방향으로의 강성의 비를 최대화하도록 설계하였다. 다시 말하면 Fig. 3 에서 X 스테이지의 최종단(17 번 body)과 Y 스테이지의 최종단(28 번 body)이 각각 기생방향/운동방향으로의 강성의 비가 최대 되도록 최적설계를 수행하였다. 목적함수를 수식으로 나타내면 식(1)과 같다.

$$f = \left(\frac{k_x}{k_{\theta_x} + \alpha_1 k_{\theta_y} + \beta_1 k_{\theta_z}} \right)_{x\text{-stage}} + \left(\frac{k_y}{k_{\theta_x} + \alpha_2 k_{\theta_y} + \beta_2 k_{\theta_z}} \right)_{y\text{-stage}} \quad (1)$$

최적설계는 MATLAB 의 SQP(Sequential quadratic programming) 방법을 사용하여 수행하였다. 이때의 설계 변수는 26 개였다. 이를 통하여 제작된 스테이지의 기생운동을 스캐너의 최대 운동영역에 대하여 autocollimator 를 이용하여 측정한 결과 요(yaw) 방향으로 최대 0.75arcsec 만큼 발생하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4). 이때 스테이지의 전체크기는 200mm×200mm로 설계하였다.

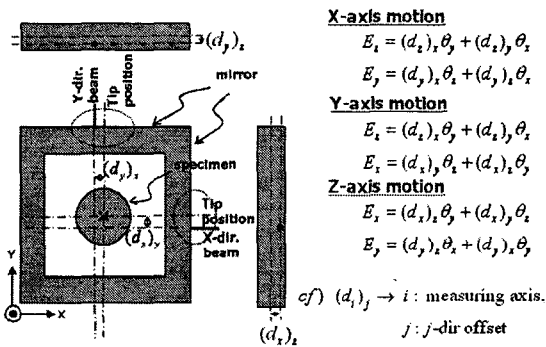


Fig. 2 The relation between Abbe offset and Abbe offset error

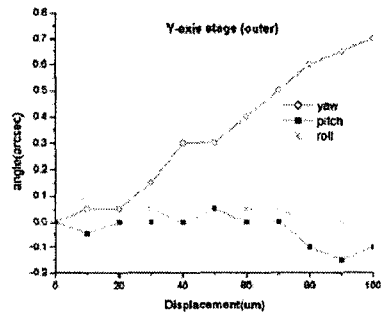
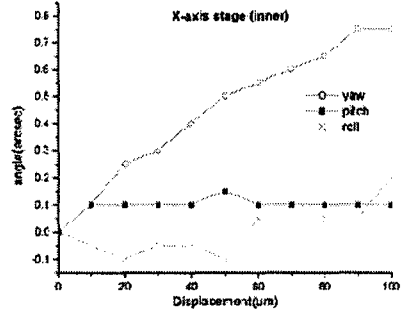


Fig. 4 The evaluation of stage performance

4. 전체 시스템의 불확도 평가

이를 통하여 제작된 XY 스캐너 및 전체 시스템은 각각 Fig. 5, 6 과 같다.

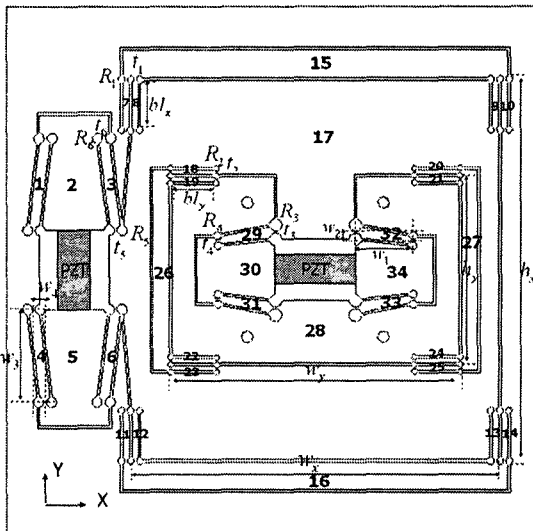


Fig. 3 Design parameter and body number of XY scanner

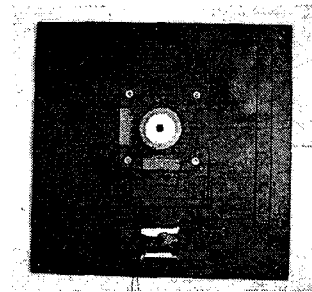


Fig. 5 Flexure hinge-based XY scanner

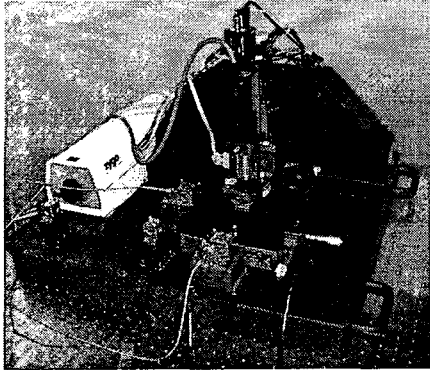


Fig. 6 The picture of total AFM system

전체 시스템의 불확도를 평가하기 위해서는 시스템에서 존재하는 모든 오차요인들을 파악해야 한다. 오차 요인들을 크게 3 가지로 분류하였다. 첫째 요인으로 온도, 압력, 습도, 진동 등 환경에 의해 발생하는 환경오차가 있으며, 둘째 요인으로 측정기 자체가 갖는 오차(본 연구에서는 헤테로다인 방식의 상용 인터페로미터를 사용하였다), 마지막 요인으로는 스테이지와 측정빔의 정렬과정에서 발생하는 오차가 복합적으로 작용하여 발생하는 기하학적 오차가 있다. Table 2 에 각각의 오차요인 중 세부적인 요인을 정리하였다. 본 논문에서는 이러한 ISO의 GUM(Guide to the expression of Uncertainty in Measurement)을 따라 불확도를 평가하였다.

Table 2 에 있는 불확도 요인 중 통계적으로 추정할 수 있는 Type A 불확도 요인으로는 외란에 의한 진동, 캔틸리버의 휘어짐, 팁의 마모, 인터페로미터의 분해능 등을 들 수 있다. Type A 불확도 요인을 각각 구하는 것은 사실상 불가능하기 때문에 같은 피치에 대해 반복 측정 실험을 통해 구해지는 통계적 표준편차를 이용하여 이 모든 요인들에 의해 야기되는 전체적인 불확도를 한꺼번에 추정하였다. 동일한 피치(3 μm)를 반복적(25 번)으로 측정하였을 때 그 결과는 Fig. 7(b)와 같이 측정되었다. 이 때 자유도는 24 가 되는데 이는 통계적으로 구한 표준 분산이 모 분산의 약 4%에 해당하는 수치로써 합리적인 표본 개수라고 생각할 수 있다. 이 때 피치의 길이는 Fig. 7(a)에 나타난 것처럼 경사의 추세선(regression function)을 구하여 만나는 점들 사이의 거리로 정의하였다. 그 결과 피치 측정 반복능(repeatability)은 1.43nm(1 σ)였다.

그 외의 요인들은 Type B 로 분류할 수 있는데 이들은 수식을 통하여 추정할 수 있다. 하지만 Type B 오차 요인 중 열팽창에 의한 것은 열 변형에 노출되는 길이를 정확하게 알 수 없기 때문에 정확한 평가가 어렵다. 때문에 열팽창에 의한 오차를 센서 변위 출력값의 드리프트를 측정함으로써 동시에 추정하였다. 5 분 동안 드리프트를 측정 한 결과 Fig. 8 과 같이 측정되었다. 처음 30 초 동안의 평균에서 마지막 30 초의 평균의 차를 측정함으로써 인터페로미터가 갖는 분해능의 영향을 최소화 하여 드리프트를 추정하였고 그 결과 X 방향으로 0.91nm, Y 방향으로 4.20nm 의 드리프트가 발생함을 알 수 있었다. 이때 전체 시스템의 온도는 테프론 코일과 백금 저항 센서를 이용하여 챔버 안의 온도를 제어해 줌으로써 5mK 내로 제어 되었다. 5 분 이내의 측정 시간 동안 압력은 0.05mbar 이내에서 변화하였고, 습도는 1% 이내로 변화하였다.

Table 2 Sources of uncertainty

Sources of uncertainty	Type
(1) Environmental error	
(i) Index change over dead path	B
(ii) Index change over measurement range	B
(iii) Interferometer thermal	B
(iv) Target mirror thermal on the stage	B
(v) sample temperature	B
(vi) Vibration by disturbances	A
(vii) Cantilever deformation, tip wear	A
(2) XY laser interferometer error	
(i) Laser wavelength instability	B
(ii) Polarization mixing	B
(iii) Resolution of interferometer	A
(3) Geometry error(by alignment error & stage parasitic motion)	
(i) Cosine error	B
(ii) Abbe error	B

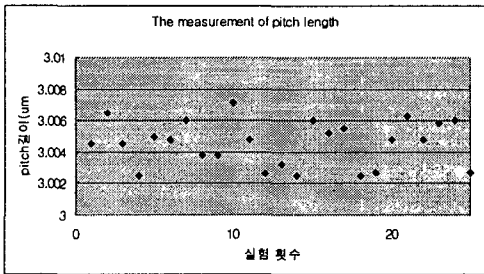
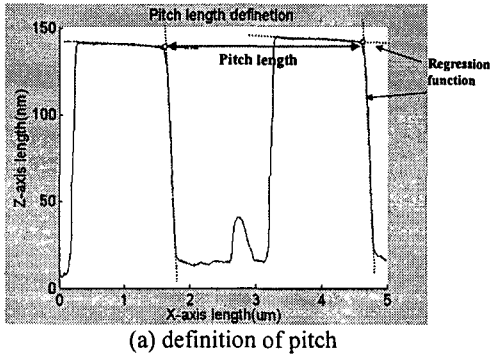


Fig. 7 The repeatability of AFM system (25 times experiment)

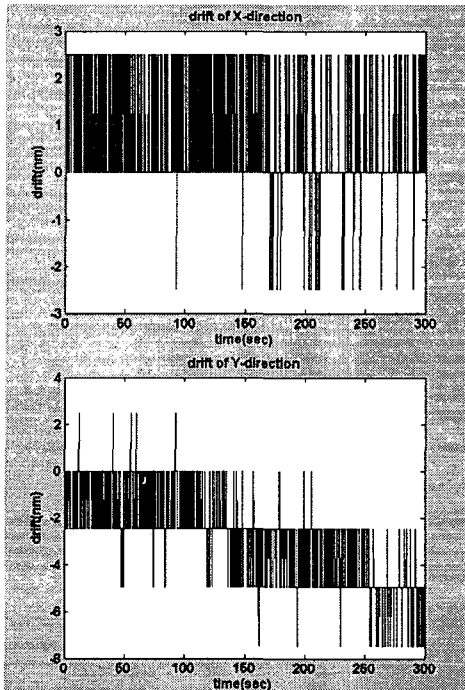


Fig. 8 The drift of measured value

참고로 위의 실험적으로 구한 온도의 변화에 따른 불확도 요인을 이론적으로 구하면 다음과 같다. 이 때 타겟 미러(target mirror)가 스테이지 위에 조립되어 있으므로 스테이지의 열변형이 타겟 미러에 영향을 주게된다.

- a. 인터페로미터 광학계(optics)의 열변형: 0.5nm
- b. 타겟 미러의 열변형 < 8.26nm (이때 유효 열변형길이 : 70mm)

위의 요인들이 복합적으로 작용하여 Fig. 8 에서 보이는 것처럼 드리프트로 나타난다. 이론적으로 구한 불확도보다 실제실험을 통하여 구한 결과가 작은 이유는 스테이지가 대칭으로 설계되어 열변형에 강한 구조일 뿐만 아니라 스테이지의 4 개의 코너가 볼트로 고정되어 있기 때문에 스테이지 중심의 유효 열변형 길이는 70mm 보다 더 작아지게 되기 때문이다. 때문에 열 변형에 의한 시스템의 불확도는 X 방향으로 0.91nm, Y 방향으로 4.20nm 로 추정할 수 있다.

또한 공기굴절률의 변화에 의한 오차는 Edlen's formula 를 이용하여 구할 수 있는데, 대략적으로 온도가 1°C, 공기압이 2.8mmHg, 상대습도가 90%변할 때 길이의 10⁻⁶의 비율로 변한다.⁹

- c. 공기 굴절률 변화에 의한 불확도
 - i) Dead path(50mm)에 대한 영향: 0.91nm
 - ii) 측정영역(100um)에 대한 영향 :0.0018nm

그 외의 나머지 Type B 불확도 요인들을 구하면 다음과 같다. 여기서 샘플은 실리콘이며 인터페로미터의 파장의 불안정성과 편광 섞임은 상용 인터페로미터(Zygo 사)에서 제공하는 데이터를 사용하였다.⁹ 코사인 오차를 구하기 위해 측정빔과 타겟미러사이의 입사각도(θ)를 구해야 한다. 측정빔과 타겟미러 사이의 거리(L)가 80mm 이고 double path 인터페로미터를 사용했고 레퍼런스 미러와 타겟 미러를 맞고 돌아오는 빔의 오프셋(H)을 1mm 이하가 되도록 정렬하였을 때 그 관계는 식 (2)와 같다.

$$H = 2L \tan(2\theta) \quad (2)$$

이를 통하여 구한 θ 는 0.00315rad 이 된다. 따라서 코사인 오차(u_{\cos})는 식(3)과 같다. 여기서 p 는 측정 pitch의 길이를 의미한다.

$$u_{\cos} = (1 - \cos \theta_{\cos}) \times p \quad (3)$$

다음으로 아베오차 u_{abbe} 는 Fig. 2에 정리한 것처럼 스테이지가 구동할 때 발생하는 회전각도와 아베 옵셋(d)의 곱으로 나타난다. Y축 구동을 할 경우 X 방향으로 발생하는 아베 오차는 식(4)와 같다.

$$u_{\text{abbe}} = (d_x)_y \theta_z + (d_x)_z \theta_y \quad (4)$$

모든 옵셋을 1mm라 가정할 때 Fig. 4에서 측정된 회전 각도를 이용하여 계산하면 최대 운동영역을 움직였을 때 기생운동은 θ_y 는 0.2arcsec, θ_z 는 0.70arcsec 만큼 회전하여 u_{abbe} 는 3.53nm가 된다. 기생운동을 1차로 fitting하여 불확도를 길이의 함수로 나타내면 $3.53 \times 10^{-5} \times p$ 가 된다.

- d. 샘플의 길이 편차 : $1.3 \times 10^{-8} \times p$ nm
- e. 인터페로미터 파장의 불안정성: 0.000126nm
- f. 인터페로미터의 편광 섞임: 2nm
- g. 코사인 오차 : $4.96 \times 10^{-6} \times p$ (p in nm)
- h. 아베 오차 : $4.368 \times 10^{-5} \times p$ (p in nm)

이상으로 전체시스템에서 발생할 수 있는 모든 불확도 요인의 크기를 알아보았다. Type B 불확도 요인들이 직사각형 분포를 이룬다고 가정할 때 1차원 피치측정의 경우 전체 합성 표준 불확도 (combined standard uncertainty: u_c)의 크기는 $u_c = \sqrt{(1.98)^2 + (2.05 \times 10^{-5} \times p)^2}$ (p in nm)가 된다. 또한 확장 불확도(k=2)는 $\sqrt{(3.96)^2 + (4.10 \times 10^{-5} \times p)^2}$ 가 된다. 이는 100 μ m의 영역에 대해 5.7nm의 불확도(k=2)에 해당하는 수치이다.

5. 결론

2차원 평면길이 측정장치를 개발하기 위하여 전체 시스템을 설계하였다. 이 때 1차원 피치에 대한 측정 불확도를 평가한 결과 장행정(수십 μ m ~ 수백 μ m)의 경우 아베오차에 가장 큰 영향을 받을 수 있었다. 이를 예상하고 스테이지를 설계

할 때부터 스테이지의 기생방향으로의 운동을 최소화 하도록 스테이지를 설계하였다. 이를 통하여 제작된 스테이지는 X축 구동시 최대 0.75arcsec, Y축 구동시 최대 0.70arcsec의 회전운동을 일으킴을 확인할 수 있었다. 이는 아베 옵셋을 1mm라 가정할 경우 100 μ m의 구동영역에 대해 3.53nm의 측정 불확도를 유발할 수 있음을 의미한다.

다음으로 제작된 2차원 평면길이 측정장치 시스템의 전체 불확도를 평가하였다. 불확도를 크게 하는 가장 큰 요인중에 하나가 온도변화이기 때문에 테프론 코일과 백금 저항 센서를 이용하여 온도변화를 5mK 내로 제어하였다.

향후에는 아베오차, 코사인 오차등 스테이지가 움직일 때 같은 위치에 대해 같은 값을 갖는 계통 오차(systematic error)를 보정하여 더욱 불확도를 낮출 예정이다.

후 기

본 연구는 산자부에서 주관하는 2차원 평면길이 측정기술 표준화 사업을 통하여 이루어졌습니다. 산자부 및 주관기관인 한국표준과학연구소에 감사의 마음을 표합니다.

참고문헌

1. www.npl.co.uk/euromet/length/annual_reports/an_re p_2004_2005.pdf
2. Meli, F., Thalman, R. and Blattner, P., "High precision pitch calibration of grating using laser diffractometry," 1st international conference and general meeting of the euspen society for precision engineering and nanometrology, pp. 252-255, 1999.
3. Bienias, M., Gao, S., Hasche, K., Seeman, R. and Thiele, K., "3D Calibration of a Scanning Force Microscope with Internal Laser Interferometers," Surf. Interface Anal., Vol. 25, pp. 606-610, 1997.
4. Garnaes, J., Kofod, N., Kuhle, A., Nielsen, C., Dirscherl, K. and Blunt, L., "Calibration of step heights and roughness measurements with atomic force microscopes," Precision Engineering, Vol. 27, pp. 91-98, 2003.
5. Dixon, R. G, Koning, R. and Tsai, V. W., "Metrology. Inspection and Process Control for Microlithography

- XIII,” Proc. SPIE, Bhanwar Singh, Ed., Vol. 3677, pp. 20-34, 1999.
6. Meli, F. and Thalmann, R., “Long-range AFM profiler used for accurate pitch measurements,” Meas. Sci. Technol., Vol. 9, pp. 1087-1092, 1998.
 7. Gonda, S., Doi, T., Kurosawa, T. and Tanimura, Y., “Real-time interferometrically measuring atomic force microscope for direct calibration of standards,” Review of Sci. Instr., Vol. 70, pp. 3362-3368, 1999.
 8. 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,” Surf. Interface Analysis, Vol. 33, pp. 71-74, 2002.
 9. Zygo, “ZMI 2000 System manual,” <http://www.zygo.com>