

원자현미경용 XY 스캐너의 아베 오차 최소화를 위한 최적 설계 및 원자 현미경의 측정 불확도 평가

김동민*(KAIST 기계공학과), 이동연(KAIST 기계공학과), 권대갑(KAIST 기계공학과 교수)

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

D.M. Kim (Mecha. Eng. Dept. KAIST), D.Y. Lee (Mechanical Eng. Dept., KAIST), D. G. Gweon (Mechanical Eng. Dept., KAIST)

ABSTRACT

To establish of standard technique of nano-length measurement in 2D plane, new AFM system has been designed. In this system, 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 100um? 00um. And tilting, pitch and yaw motion are measured by autocollimator to evaluate the performance of XY stage. Using this AFM system, 3um pitch specimen was measured. As a result, the uncertainty of total system has been evaluated.

Key Words : AFM(원자현미경), Flexure hinge stage(플렉서힌지 스테이지), Abbe error minimization(아베오차 최소화)

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 할 수 있다. 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. 확립된 나노미터표준을 인증표준물질과 연결시켜줄 수 있는 수단으로써 가장 효과적인 장비가 원자현미경이다. 이 원자현미경을 통해 산업체에서 필요로 하는 나노 평면길이 측정기술을 개발하고 표준화를 이룬다. Table 1에 세계 주요 표준 연구기관에서 현재까지 개발된 나노 평면길이 측정장치의 성능을 나타내었다.

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

	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	10nm/50um
스위스	350um	6nm/100um

Table 1 Comparison of performance of national standard nano-length measuring equipment

1.2 연구 목적 및 연구 범위

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

여기서 우리가 깊고 넓어갈 것은 앞서 언급한 모든 기관들의 측정장치는 측정영역이 비교적 작은 영역(10um 이하)에 대해서는 불확도가 그렇게 크지 않다는 것이다. 독일(PTB)의 경우 10um 에 대해서는 확장 불확도가 2.5nm 인데 반해 100um 의 측정 영역에 대해서는 11.5nm 이다. 이는 보통 불확도가 길이에 관계없이 생기는 오차요인과 길이에 비례해서 커지는 오차요인이 있기 때문이다. 길이에 비례해서 커지는 오차 요인 중 가장 주요한 것이 Abbe 오차이다.

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

이러한 스테이지를 기반으로 하여 전체 원자현미경 시스템을 구축하여 이 시스템의 전체 불확도를 평가하였다.

2. 전체 시스템의 외관

나노미터 표준확립은 빛의 속도로 정의되는 미터표준으로부터 소급성을 유지하면서, 나노미터 영역에서 구현할 수 있는 길이 표준기를 개발하고 이에 대응하는 측정 및 교정기술을 개발함으로써 이루어진다. 확립된 나노미터표준을 인증표준물질과 연결시켜줄 수 있는 수단으로써 가장 효과적인 장비가 원자현미경이다. 본 장에서는 이를 위하여 제안한 원자현미경의 구조를 설명한다.

제안된 2 차원 나노평면 길이 측정장치는 AFM 헤드(켄타리버의 휘어짐을 감지함, 레이저+4 분할 PD), Z 축 조동 구동기, XY 스캐너, Z 스캐너, 전체 프레임으로 구성된다. Fig 1 에 2 차원 평면길이 측정 장치의 전체도 및 부품도를 도시하였다. AFM Head 를 시료에 근접시키는 역할을 하는 Z 축 조동구동기는 백래쉬가 없을 뿐만 아니라 전원을 켜도 흘러내리지 않아야 한다는 것이다. 이를 위하여 하모닉 드라이브를 사용하였다. 그 결과 백래쉬는 거의 없으며 전원을 켜도 Z 스테이지가 흘러내리지 않으므로 AFM 헤드의 안정적인 Null Control 이 가능하였다.

또한 아베 오차를 최소화 하도록 켄타리버가 위치하는 같은 위치에 XY 인터페로미터의 빔을 위치시켰다.

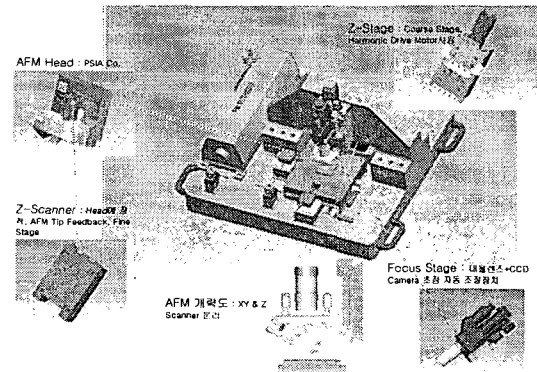


Fig. 1 Total system configuration

3. XY 스캐너의 최적 설계

XY 스캐너를 설계하기에 앞서 아베 옵셋과 아베 옵셋오차와의 관계를 알 필요가 있다. Fig 2 에 이들의 관계를 설명하였는데 XY 방향으로의 오차는 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 모두에 기인함을 알 수 있다. 따라서 아베오차를 줄이기 위해서는 이러한 기생방향으로의 운동이 최소화 되도록 하는 것이 중요하다. 이를 XY 스캐너를 운동방향과 기생방향으로의 강성의 비를 최대화하도록 설계를 함으로써 구현하였다. 다시 말하면 Fig 2 에서 X 스테이지의 최종단(17 번 body)과 Y 스테이지의 최종단(28 번 body)이 각각 기생방향/운동방향으로의 강성의 비가 최대로 되도록 최적설계를 수행하였다. 이때의 설계 변수는 26 개였다. 이를 통하여 제작된 스테이지의 기생운동을 스캐너의 최대 운동영역에 대하여 autocollimator 를 이용하여 측정한 결과 yaw 방향으로 최대 0.75arcsec 의 기생운동을 함을 확인할 수 있었다.

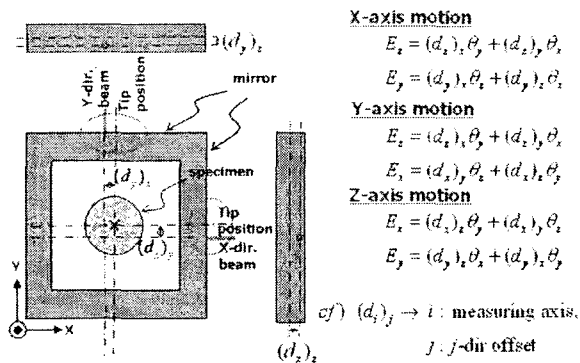


Fig. 2 The relation between Abbe offset and Abbe offset error

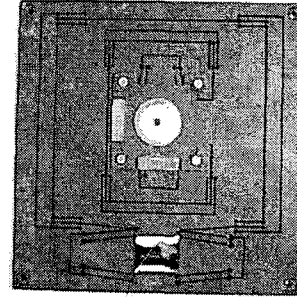


Fig. 5 Flexure hinge-based XY scanner

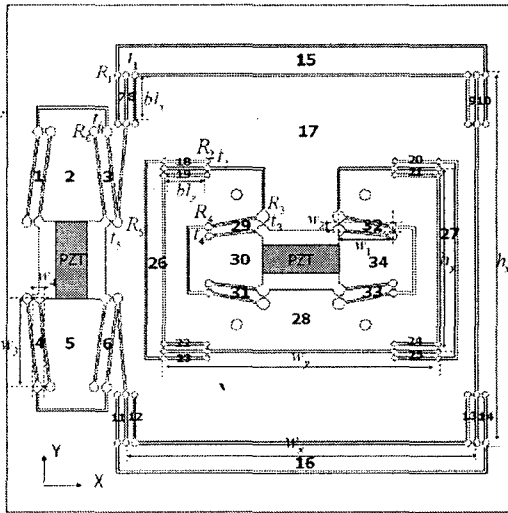


Fig. 3 Design parameter and body number of XY scanner

4. 전체 시스템의 불확도 평가

이를 통하여 제작된 XY 스캐너 및 전체 시스템은 각각 Fig.4,5 와 같다.

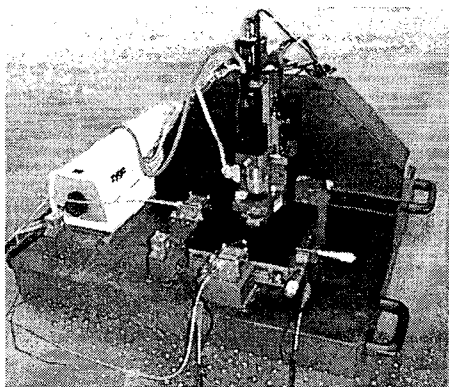


Fig. 4 The picture of total AFM system

이렇게 제작된 시스템으로 아래와 같은 불확도 요인들을 이론적/실험적으로 얻어내서 전체 시스템의 불확도를 평가하고자 한다. 이에 앞서 Fig. 6 에 보이는 것 처럼 먼저 피치를 정의한뒤 25 번 반복 측정을 통하여 측정 반복성(repeatability)을 구하였다. 본 논문에서는 추세선을 이용하여 두 직선을 구하고 이 두 직선이 만나서 생기는 두 점사이의 거리를 피치로 정의하였다. 이 때 온도는 50mK 내로 제어되었다.

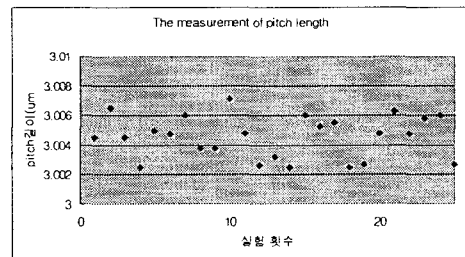
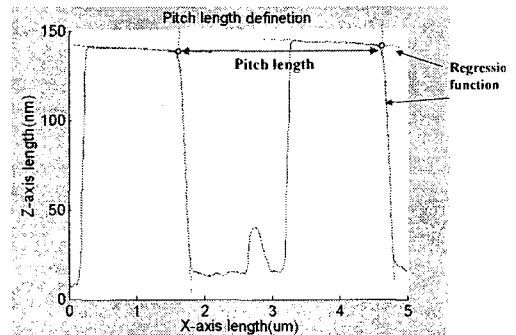


Fig. 6 The repeatability of AFM system(25 times exp.)

- 피치 측정 반복성 : 25 번의 측정을 통해 측정 불확도(1σ)는 1.43nm 임을 실험적으로 알 수 있었다.
- 공기 굴절률 변화에 의한 오차

- ㄱ. 측정영역(100um)에 의한 오차 :0.005nm
 - ㄴ. Dead path(50mm)에 의한 오차: 2.5nm
 - c. 레이저 인터페로미터의 전기적 노이즈 : 1.2 count \times 0.31nm =0.372nm
 - d. 인터페로미터(광학계)의 온도변화에 따른 변위에의 영향 : 0.5nm
 - e. 측정 미러(50mm)의 온도 변화에 따른 변위에의 영향 : 1.25nm
 - f. 인터페로미터 polarization mixing : 1nm
 - g. 코사인 오차 : 측정 미러와 AFM 의 프로브 사이의 거리 $D=25\text{mm} \rightarrow 1.65 \times 10^{-4} \text{nm}$
 - h. 아베 오차 : 아베 오프셋을 0.5mm 라 가정했을 때 0.75arcsec yaw 운동 발생 $\rightarrow 1.82\text{nm}$
- 이를 통하여 시스템의 확장불확도는 7.63nm(2σ)임을 확인할 수 있었다.

Review of Sci. Instr. 1999, vol. 70, pp.3362-3368

6. K. Hasche, K. Herrmann, W. Mirande, R. Seemann L.Vitushkin, M.Xu and G. Yu, Surf. Interface Anal 2002, vol 33, pp 71-74
7. Paros, J. M. and Weisbord, L., Machine Design, 1965 37, 151-157
8. Jae W. Ryu, Precision Engineering, 1997, v21 no.1 pp.18-28

5. 결론

2 차원 평면길이 측정장치가 아베 오차에 가장 큰 영향을 받는다는 가정하에 아베오차에 영향을 주는 회전방향의 운동이 최소가 되도록 스테이지를 설계하였다. 이를 통하여 제작된 스테이지는 0.75arcsec 의 회전운동을 일으킴을 확인할 수 있었다. 그 후 제작된 2 차원 평면길이 측정장치 시스템의 전체 불확도를 평가하였다. 본 논문에서는 50mK 으로 온도제어가 이루어진 상황에서 불확도가 평가되었다. 향후에 온도제어를 좀 더 정밀하게 해 줄 경우 불확도가 향상될 것으로 판단되어진다.

후 기

본 연구는 산자부에서 주관하는 평면길이 측정 기술 표준화 사업을 통하여 이루어졌습니다. 산자부 및 주관기관인 한국표준과학연구소에 감사의 마음을 표합니다.

참고문헌

1. M. Bienias, S. Gao, K. Hasche, R. Seeman and K. Thiele, Surf. Interface Anal. 1997, vol 25, 606-610
2. J.Garnaes, N.Kofod, et al., Precision Engineering,2003, vol 27, pp91-98
3. R. G. Dixon, et al., Proc. SPIE Vol. 3677, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIII, Bhanwar Singh, Ed. (1999), p. 20-34
4. F. Meli and R Thalmann, Meas. Sci. Technol. 1998, vol. 9, pp.1087-1092
5. S. Gonda, T. Doi, T. Kurosawa, and Y. Tanimura,