

공기정압 스테이지의 위치결정오차 분석 및 보정

황주호*, 박천홍, 이찬홍(한국기계연구원), 김승우(한국과학기술원)

Analysis and compensation of positioning error for aerostatic stage

Jooho Hwang, Chun-Hong Park, Chan-Hong Lee(KIMM), Seung-Woo Kim(KAIST)

ABSTRACT

A 250mm stroke aerostatic stage, which detects position with laser scale and is driven by linear motor, is made and analyzed positioning error in $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ controlled atmosphere, aiming at investigating positioning characteristic of ultra-precision stage. We prove this aerostatic stage has a 10nm micro step resolution by experiment. By means of analyzing laser interferometer system, the scale of measuring error is about $0.2\text{--}0.4\mu\text{m}$ according to refractive index error from missing the temperature change. To improve laser interferometer system, compensate refractive index error using measuring data from thermocouple. And, confirm $0.10\mu\text{m}$ repeatability and $0.13\mu\text{m}$ positioning accuracy using the compensating refractive index. Also, we confirm $0.07\mu\text{m}$ repeatability of the stage using capacitive displacement sensor

Key Words : Aerostatic stage(공기정압 스테이지), Laser interferometer(레이저 간섭계), Refractive index (굴절율), Repeatability (반복정밀도), Positioning accuracy (위치결정정도)

1. 서론

공기정압 스테이지는 저마찰 특성으로, 높은 운동정밀도, 청정환경 유지가 가능하여 초정밀가공기, 반도체장비, 측정장비등에 응용되고 있다⁽¹⁾.

일반적인 공기정압스테이지는 수백 mm 이상의 행정을 요구하는 곳에 사용되는 경우가 많아서 작은 온도변화에 의하여 위치오차를 유발하게 되어 항온실 환경하의 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이하의 온도변화에도 오차가 생겨 위치검출 장치의 정밀도보다 낮은 위치결정정도를 가지게 되는 원인이 된다.

본 연구에서는 공기정압 베어링, 리니어모터, 레이저 스케일을 이용한 초정밀스테이지를 구성하여 주위 온도변화가 위치결정정밀도에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였으며, 정밀위치결정 성능평가에 많이 사용하는 레이저간섭계의 측정오차를 보정하는 방법을 통하여 위치결정정도를 분석하였다.

2. 실험장치의 구성

Fig.1 은 실험에 사용된 공기정압 스테이지다. 카본 그래파이트 재료로 구성된 공기정압베어링을 사용하고 있고, 더블패드방식으로 상하운동을 구속하고 있으며, 구동은 Anorad 사의 LEM-S-4-S 리니어모터를 사용하고 있고, 최대행정은 250mm 이다.

위치검출은 Sony 사의 BSA75A-310N 레이저스케일을 사용하였으며 열팽창계수가 0.7×10^{-6} 의 zerodur glass 위에 간섭에 의한 $0.55\mu\text{m}$ 의 광학적 grating pitch 를 생성하여 기존의 리니어스케일보다 매우 정밀한 특성을 가지고 있다. 제어기에서 4 채배된 후 최종분해능은 10nm 이며, 광경로가 스케일 head 안에서 생기기 때문에 대기의 온도, 압력등, 습도등의 변화에 의한 영향이 거의 없는 장점이 있다.

스테이지의 $25\mu\text{m}$ 이내의 미소한 운동은 정전용량형 변위계(ADE 3401)를 사용하였으며, 전체 행정에 대한 측정은 레이저간섭계(HP5529A)를 사용하였다. 제작된 스테이지는 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 상대습도 $50 \pm 3\%$ 로 유지되는 항온항습실에서 실험을 수행하였다.

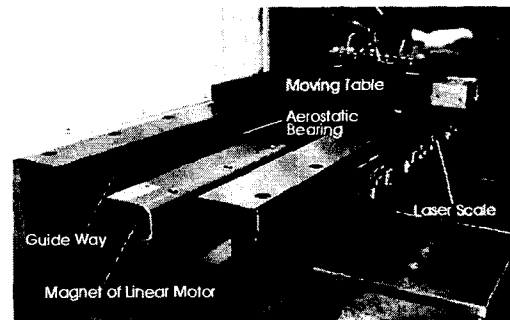


Fig.1 Photograph of aerostatic stage

3. 위치결정분석

3.1 미소이송 특성

스테이지의 최소위치검출 분해능인 10nm/step 와 그의 2 배인 20nm/step 으로 5 초 간격으로 운동시킨 후 정전용량형 센서로 측정된 결과를 Fig.2 에 도시하였다. 두 경우모두 운동명령에 대하여 정확하게 반응함을 알 수 있다.

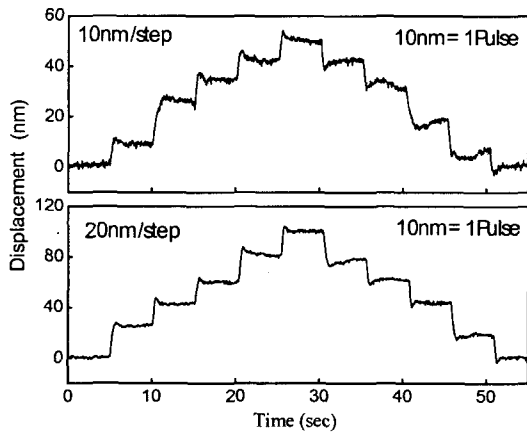


Fig.2 Micro step response of stage

3.2 위치결정오차의 분석

레이저간섭계를 이용하여 전체 행정에 대하여 위치결정정도를 ISO230-2 규격에 의하여 측정된 결과를 Fig.3 에 나타내었다. 그림에 보이는 바와 같이 위치오차의 주요 원인은 이송 테이블의 측면에서 위치를 검출하고 레이저간섭계의 반사경은 중앙에 위치하여 생긴 기하학적오차이며 수치보정을 통하여 쉽게 보정이 되지만 반복정밀도는 크게 개선되지 않음을 알 수 있다.

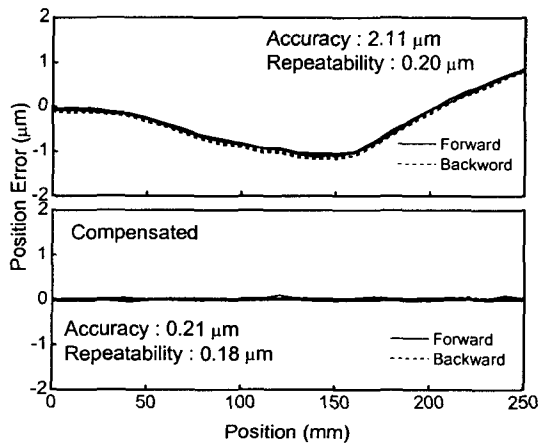


Fig.3 Positioning accuracy of aerostatic stage

스테이지를 일정한 위치에 유지하도록 제어중인 상태에서 테이블의 변위를 레이저 간섭계와 정전용량형 센서로 동식 측정하였다. Fig.4 에 보이는 바와 같이 레이저 간섭계로 측정된 경우 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 가량의 변동과 $0.29\mu\text{m}(4\sigma)$ 의 반복정밀도를 보인다. 반면에 정전용량형 센서의 변위 데이터의 경우 1/5 수준인 $\pm 0.04\mu\text{m}$ 가량의 변동과 $0.06\mu\text{m}(4\sigma)$ 의 반복정밀도를 보임을 알 수 있다.

사용된 레이저간섭계는 온도와 압력을 측정하는 에어센서(HP10751C)를 사용하여 파장보정에 사용하고 있다. 열전대로 대기의 온도변화를 동시 측정하여 비교한 결과를 Fig.5 에 나타내었다. 에어센서의 시정수는 7min 으로 되어 있기 때문에 온도의 평균값이 측정되는 효과를 보이며, 이러한 영향으로 Fig. 4 와 같은 변위 값의 변동을 보임을 알 수 있다. 한편, 정전용량형 센서로 측정된 변위도 온도변화와 유사한 주기를 가짐을 관찰 할 수 있는데, 테이블, 정반, 센서 및 치구의 열변형이 복합적으로 작용한 결과로 보여진다.

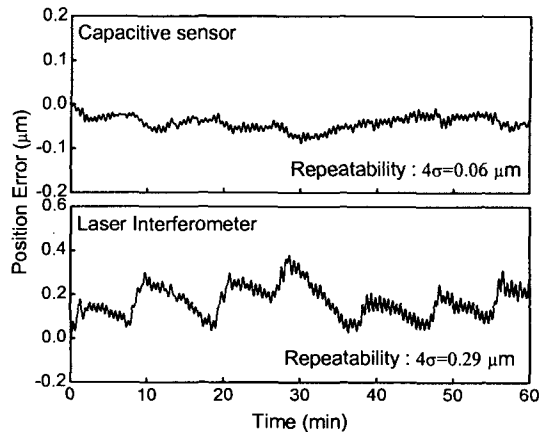


Fig.4 Comparison of measured displacement between capacitive sensor and laser interferometer

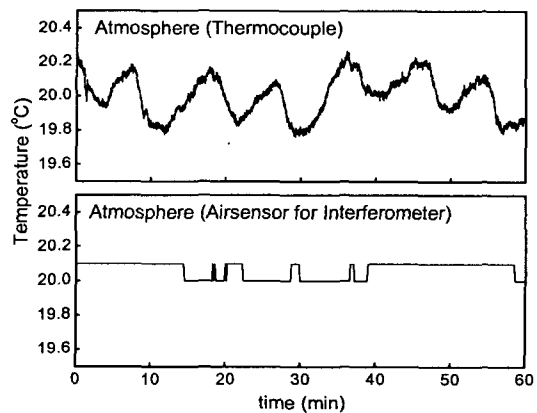


Fig.5 Comparison of measured temperature between thermocouples and air-sensor (HP10751C)

4. 레이저간섭계의 측정오차 보정

Fig.6 는 전형적인 마이켈슨 간섭계를 나타내고 있으며 움직이는 측정 반사경과 고정된 반사경과의 위상차를 측정하여 변위를 측정하며 식(1)과 같이 표시된다⁽²⁾. 그림에서 L_i 는 초기위치의 반사경까지 거리(dead path), L_f 는 측정위치의 반사경까지 거리, L_r 은 고정된 기준반사경의 거리를 나타낸다.

$$\Delta L = \Delta\phi \left(\frac{\lambda_f}{4\pi} \right) + (L_i - L_r) \frac{\Delta\lambda}{\lambda_i} \quad (1)$$

여기서, $\Delta\phi$ 는 위상차, $\Delta L = L_f - L_i$, $\Delta\lambda = \lambda_f - \lambda_i$, λ_f 는 거리 측정 시점의 레이저 파장, λ_i 는 초기 측정 시점의 파장을 나타낸다.

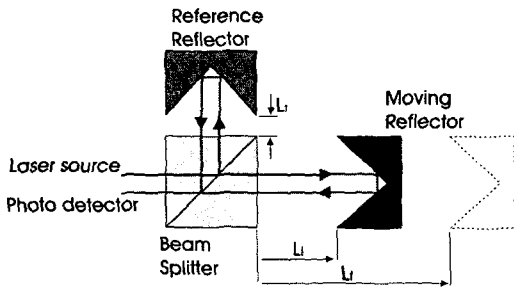


Fig.6 A typical Michelson interferometer

한편 대기중의 파장은 식(2)와 같이 주어지며 공기의 굴절률 n 은 대기중의 온도, 압력, 습도, CO₂ 함유량 등에 의하여 결정되어 진다⁽³⁾.

$$\lambda_{air} = \frac{\lambda_{vac}}{n} \quad (2)$$

측정에 사용된 레이저 간섭계는 공기 굴절률과 사용된 레이저 파장을 고려하여 보정계수 C 를 사용하고 있다. 보정에 활용된 식은 식(3)과 같으며 온도, 압력, 습도를 고려하고 영향이 적은 CO₂ 함유량은 무시하였다⁽⁴⁾.

$$\Delta L_{true} = C_f \Delta L_{measure} + \frac{C_f - C_i}{C_i} (L_i - L_r) \quad (3)$$

$$C = \frac{10^6}{N + 10^6}$$

$$N = 0.3836391P \times \left[\frac{1 + 10^{-6} P(0.817 - 0.0133T)}{1 + 0.0036610T} \right] - 3.033 \times 10^{-3} H \times e^{0.057627T}$$

여기서 첨자 i, f , Δ 는 식(1)에서의 정의와 같으며 P 는 압력(mmHg), T 는 온도(°C), H 는 상대습도(%)이다. Fig.4 의 레이저간섭계의 변위 값의 변동은 식(3)의 우변 두 번째 항의 영향으로 에어센서가 온도변화를 반영하지 못해 생긴 결과임을 알 수 있다. 레이저 간섭계를 이용할 경우 길이의 1ppm 의

오차를 유발하는 파장변화는 1°C 온도변화, 3mmHg 기압변화, 50%의 습도변화에 기인하는 것으로 알려져 있다⁽³⁾. 일반적으로 기압과 습도변화가 적고 온도에 대하여 민감하므로 온도의 변화가 위치오차에 주는 영향이 지배적임을 예상할 수 있다.

Fig.7 에 보이는 바와 같이 광 분할기(beam splitter)와 반사경을 Zerodur 로 구성된 판 위에 250mm 의 거리차가 되도록 설치하여 온도변화에 의한 두 옵틱 간의 열변위로 인한 오차를 줄이고 레이저 간섭계의 오차를 측정 후 식(3)을 이용하여 보정을 수행한 결과를 Fig.8 에 도시하였다. 압력과 습도는 실험전에 대기압을 측정하여 실험도중 변화가 없는 것으로 가정하였으며, 온도는 열전대를 사용하여 측정하였다. 온도의 편차는 1°C 이며 보정을 수행한 결과 오차가 약 1/3 줄은 것을 확인할 수 있다. 보정후에도 작은 변동이 관찰되며, 이는 광 경로 중 두부분만을 측정하여 전체를 대표하는 값으로 계산한 오차, 압력의 변화, 센서의 열전대의 응답시간에 의하여 생긴 오차로 예상된다.

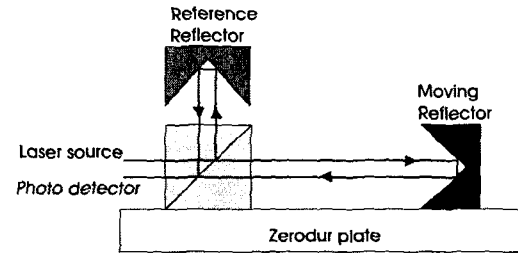


Fig.7 Beam splitter and reflector fixed at zerodur plate

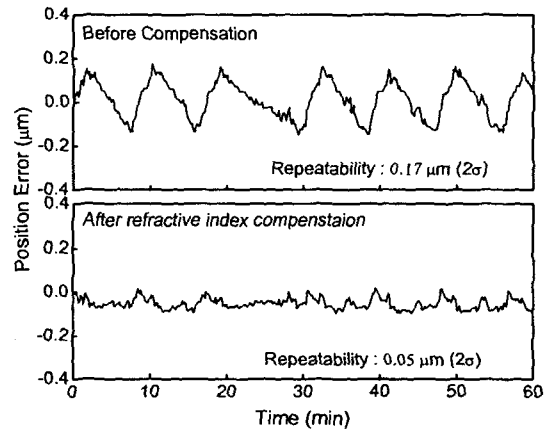


Fig.8 Comparison of displacement with and without refractive index compensation

5. 굴절을 보정에 의한 반복정밀도

공기베어링 스테이지의 반복정밀도를 측정 후 식(3)을 활용하여 보정을 수행하였다. 측정간의 동

기화를 위하여 -10mm 와 210mm 지점을 10mm 간격으로 왕복 5 회 운동하였으며 테이블의 중앙에 반사경을 설치하여 측정을 수행하였다. 측정 구간은 0~200mm, $L_r-L_s=290$, 소요시간은 22 분이다.

스테이지의 왕복운동시 보정을 수행한 결과를 Fig.9 에 나타내었다. 온도편차는 0.26°C 이며, 굴절율 보정후 약 25%의 반복정밀도가 향상되어 0.15 μ m 로 향상되었음을 알 수 있다. Fig.9 의 측정 결과로부터 평균 위치오차를 구하여 이를 수치 보정한 결과를 Fig.10 상단에 도시하였다. 실험 수행 동안의 온도편차는 약 0.15°C 이며 수치 보정 후 위치결정정도 뿐만 아니라 반복정밀도가 향상되었음을 알 수 있는데, 이는 양방향의 반전오차를 보정한 효과와 실험수행 동안 온도가 안정적인 영향으로 보여진다. 공기굴절률을 보정한 결과 온도의 변화가 적어 측정오차 개선 정도가 크지는 않지만 스테이지의 반복정밀도는 0.10 μ m 로 향상되었음을 알 수 있다.

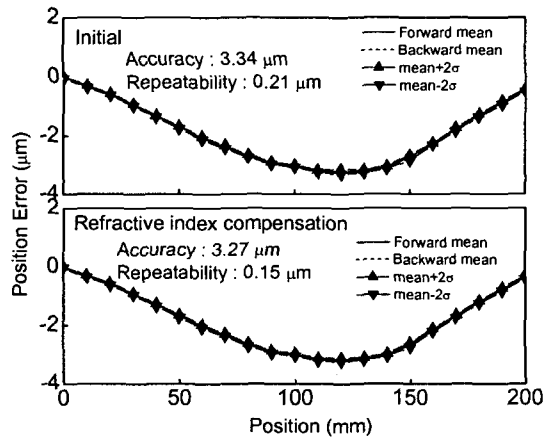


Fig.9 comparison of repeatability between before and after refractive index compensation

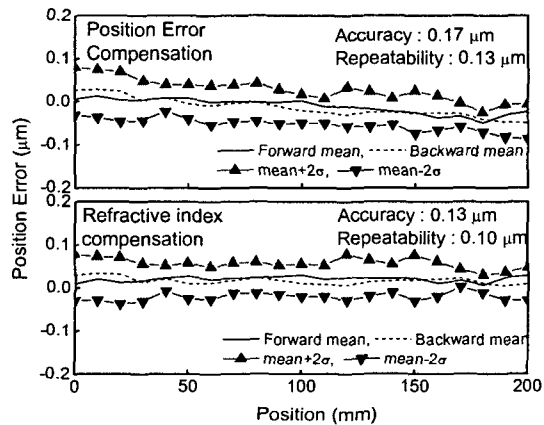


Fig.10 positioning accuracy of stage after compensating position error and refractive index

오차가 가장 큰 0mm 지점에서 2 μ m 간격으로 20 μ m 를 5 회 왕복운동하여 측정된 오차를 Fig.11 에 나타내었다. 반복정밀는 0.07 μ m 임을 알 수 있으며 이는 정지상태에서 측정된 Fig.4 의 결과와 유사한 크기를 보임을 알 수 있다.

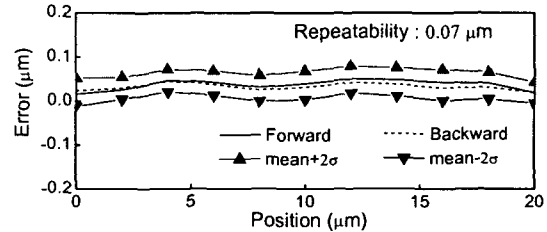


Fig.11 Repeatability test using capacitive sensor

6. 결론

리니어모터와 레이저 스케일을 활용한 초정밀 공기정압스테이지를 제작하여 20 \pm 0.5°C 의 환경에서 위치결정 오차를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제작한 공기정압 스테이지는 검출분해능인 10 nm 의 미소분해능으로 운동함을 확인하였다.
2. 일반적인 스테이지 측정에 사용되는 상용화된 레이저 간섭계를 사용함에 있어, 0.2 μ m 정도의 반복정밀도 측정오차를 보이는 것을 확인하였으며, 측정된 데이터를 기준으로 공기 굴절율을 보정하여 측정 정밀도를 향상 시키는 방법을 정립하였다.
3. 오차의 수치보정과 공기 굴절율 보정을 통하여 레이저 200mm 행정에 대하여 0.10 μ m 의 반복정밀도와 0.13 μ m 의 위치결정 정도를 가짐을 확인하였으며, 반복정밀도가 가장 큰 0mm 지점을 정진용량 센서로 측정된 결과 0.07 μ m 부분의 반복정밀도를 가지고 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. K.J. Stout and S.M. Barrans, "The design of aerostatic bearings for application to nanometer resolution manufacturing machine systems", Tribology International, Vol. 33, pp. 803~809, 2000
2. Jack A. Stone and Steven D. Phillips, "Corrections for wavelength variations in precision interferometric displacement measurements", Journal of Research of the NIST, Vol. 101, No. 5, pp 671~674, 1996
3. Jack A. Stone and Jay H. Zimmerman, "Index of refraction of Air", <http://patapsco.nist.gov/mel/div821>
4. HP5528A Laser Measurement system User's Guide, pp 19-1~19-7, 1984