

## 초정밀 스테이지의 반복정밀도 분석 및 보정

박종하\*(충남대 대학원 기계공학과), 황주호, 박천홍(한국기계연구원), 홍준희(충남대학교)

### Analysis and compensation of Repeatability for Ultra-precision Stage

Jong-Ha Park(Mech. Eng. Dept., Chungnam Univ.), Jooho Hwang, Chun-Hong Park(KIMM),  
Jun-Hee Hong(Mech. Eng. Dept., Chungnam Univ.)

#### ABSTRACT

The refractive index of the laser interferometer is compensated using the simultaneously measured variations of room temperature and humidity in the method. In order to investigate the limit of compensation, the stationary test against two fixed reflectors mounted on the zerodur plate is performed firstly. From the experiment, it is confirmed that the measuring error of the laser interferometer can be improved from  $0.12\mu\text{m}$  to  $0.17\mu\text{m}$  by the application of the method. Secondly, for the verification of the compensating effect, it is applied to estimate the positioning accuracy of an ultra precision aerostatic stage. Two times of the refractive index compensation are performed to acquire the positioning error of the stage from the initially measured data, that is, to the initially measured positioning error and to the measured positioning error profile after the NC compensation. Although the positioning error of anaerostatic stage cannot be clarified perfectly, it is known that by the compensation method, the measuring error by the laser interferometer can be improved to within  $0.15\mu\text{m}$ . English abstract here.

**Key Words :** Aerostatic stage(공기정압스테이지), Linear motor(리니어모터), Laser interferometer(레이저간섭계), Refractive index(굴절율), Repeatability(반복정밀도), Positioning accuracy(위치결정정밀도)

#### 1. 서론

초정밀 스테이지의 위치결정특성에 영향을 미치는 변수로는 이송계의 정, 동강성, 이송기구와 가이드레일의 기하학적 오차, 피드백센서의 정밀도 및 아베옵셋오차 그리고 온도를 중심으로 한 환경변화 등을 들 수 있다.<sup>1</sup> 이 가운데, 특히 온도변화는 스테이지 자체의 열 변형에 의한 오차와 함께, 이를 측정하는 센서의 측정값에도 오차를 유발시키는 가장 영향이 큰 변수이다.<sup>2</sup> 레이저간섭계는 대기온도변화에 따른 공기 굴절율의 변화가 측정값에 영향을 미치며,  $1^{\circ}\text{C}$ 의 대기온도변화나  $3\text{mmHg}$ 의 대기압 변화에 의하여  $1\text{ppm}$ 의 측정오차를 포함하게 된다.<sup>3</sup> 초정밀 스테이지의 위치결정오차를 평가하는 경우, 레이저간섭계의 측정오차는 위치결정오차의 측정값에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 이를 위해 대기온도의 변화와 위치결정오차 측정값의 관계를 분석하고, 이를 토대로 공기 굴절률 변화를 보정하여 레이저 간섭계 측정오차에서는 반복정밀도에 관하여 분석하고 보정을 수행하였다. 레이저간섭계로 위치결정오차 측정 시 온도변화가 가장

큰 영향을 미치게 된다. 온도와 공기유동을 최소화하기 위해 단열Chamber를 제작하여 스테이지를 Chamber 내에 장착하고 레이저간섭계로 위치결정오차 측정시 온도와 압력을 동시에 측정된 후 Edlen의 식으로부터 온도변화에 따른 파장변화에 의한 변위값의 측정오차를 계산하여 위치결정오차 측정값을 보정하는 방법을 적용하였다. 보정방법 검증은 위해, 먼저, zerodur 판재 위에 간섭계와 반사경을 고정하고, 대기온도와 압력변화에 따른 간섭계와 반사경 사이의 상대변위 값을 측정하고 대기온도와 압력변화를 보정하는 실험을 수행하였다. 다음으로, 레이저스케일을 이용하여  $10\text{nm}$ 의 분해능을 갖도록 제작된 초정밀 공기스테이지의 위치결정오차를 측정하고, 대기온도, 압력 변화에 따른 측정오차를 보정함으로써 보정방법을 효용성을 검증하고자 하였다. 위 실험은 각각 Chamber 내, 외에서 수행하여 비교 분석하였다.

#### 2. 실험장치의 구성

Fig.1은 초정밀 공기정압베어링과 리니어모터를

이용한 자체 제작된 초정밀 공기정압 스테이지이다. 카본그라파이트 재료로 구성된 공기정압베어링을 사용하고 있고 구동은 Anorad사의 LEM-S-4-S 무철심형 리니어 DC모터를 사용하였으며, 최대행정은 250mm이다. 위치검출은 Sony사의 BSA75A-310N 레이지스케일, 분해능 0.01 $\mu\text{m}$ 을 사용하였으며 스케일은 테이블측면에 설치하였으며 이에 따른 Abbe offset오차는 실험을 통해서 소프트웨어적으로 보정하였다. 열팽창계수가  $0.7 \times 10^{-6}$ 의 Zerodur glass위에 간섭에 의한 0.55 $\mu\text{m}$ 의 광학적 grating pitch를 생성하여 매우 정밀한 특성을 가지고 있다. 계어기에서 4체배된 후 최종분해능은 10nm이다.

### 3. 초정밀 스테이지 반복정밀도 분석

스테이지의 최소위치검출 분해능인 10nm/step와 그의 2배인 20nm/step으로 운동시킨 후 정전용량형 센서로 측정된 결과를 Fig.2에 도시하였다. 두 경우 모두 운동명령에 대하여 정확하게 반응함을 알 수 있다. 그림으로부터 테이블은, 실험에 사용한 레이저 스케일의 최소분해능인 0.01 $\mu\text{m}/\text{step}$ 의 분해능까지 명확히 추종 하고 있음을 보이고 있다. 레이저 간섭계를 이용하여 전체 행정에 대하여 위치결정정밀도를 ISO230-2 규격에 의하여 측정된 결과를 Fig.3에 나타내었다. Fig.1로부터 위치결정오차의 주요원인은

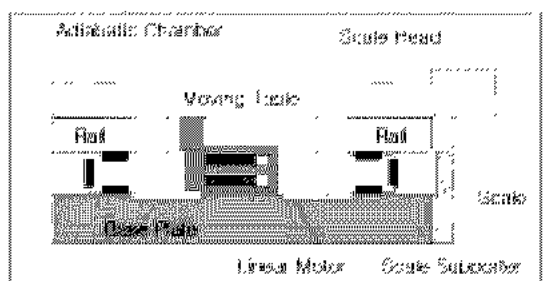


Fig. 1 Schematic diagram of an aerostatic stage

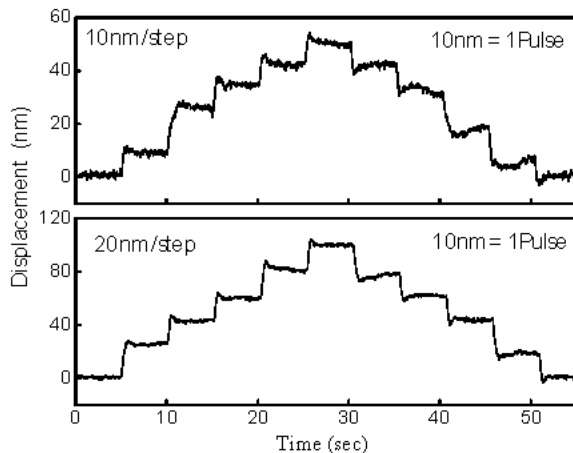


Fig.2 Micro step response of the aerostatic stage

Scale 이 이송테이블의 측면에서 위치를 검출하여 각 운동 오차에 의한 기하학적인 오차이며 하단의 그림은 누적오차에 대하여 위치보정을 수행한 결과이다.

### 4. 레이저간섭계의 측정오차 보정

Fig.4은 전형적인 마이켈슨 간섭계를 나타내고 있으며 움직이는 측정 반사경과 고정된 반사경과의 위상차를 측정하여 변위를 측정하며 식(1)과 같이 표시된다.<sup>3</sup> 그림에서  $L_i$ 는 초기위치의 반사경까지 거리(dead path),  $L_f$ 는 측정위치의 반사경까지 거리,  $L_r$ 은 고정된 기준반사경의거리를 나타낸다.

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

여기서,  $\Delta\phi$ 는위상차,  $\Delta L = L_f - L_i$ ,  $\Delta\lambda = \lambda_f - \lambda_i$ ,  $\lambda_f$ 는 거리 측정 시점의 레이저 파장,  $\lambda_i$ 는 초기 측정 시점의 파장을 나타낸다. 한편 대기중의 파장은 식(2)와 같이 주어지며 공기의 굴절률  $n$ 은 대기중의온도, 압력, 습도, CO2함유량 등에 의하여 결정되어 진다.

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

보정에 활용된 식은 식(3)과 같으며 온도, 압력, 습도를 고려하고 영향이 적은 CO2 함유량은 무시하였다.

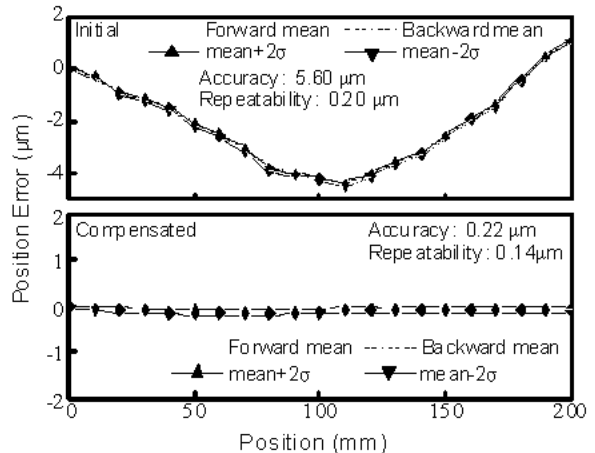


Fig.3 Positioning accuracy of aerostatic stage

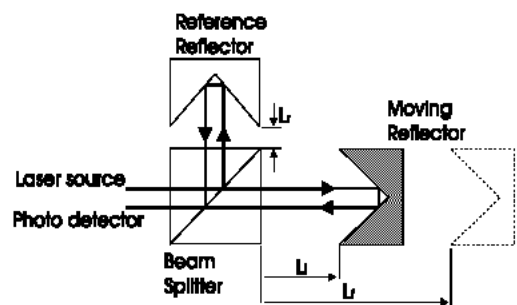


Fig.4 A typical Michelson interferometer

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

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

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

여기서 첨자  $i, f, \Delta$  는 식(1)에서의 정의와 같으며  $P$ 는 압력(mmHg),  $T$ 는 온도( $^{\circ}C$ ),  $H$ 는 상대습도(%)이다. 레이저 간섭계의 오차를 측정 한 후 식(3)을 이용하여 보정을 수행한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이때의 온도, 압력변화는 Fig.6에서 보는 바와 같이 온도 영향을 지배적으로 받고 있음을 알 수 있다. 같은 방법으로 초정밀 스테이지를 Chamber 내에 장착하여 실험한 결과를 Fig.7에 도시하였다. 이때의 온도, 압력 변화는 Fig. 8과 같이 온도편차는 작게 나타남을 알 수 있으며 압력편차에 지배적인 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. Chamber 장착 후 장시간 온도, 압력 측정을 할

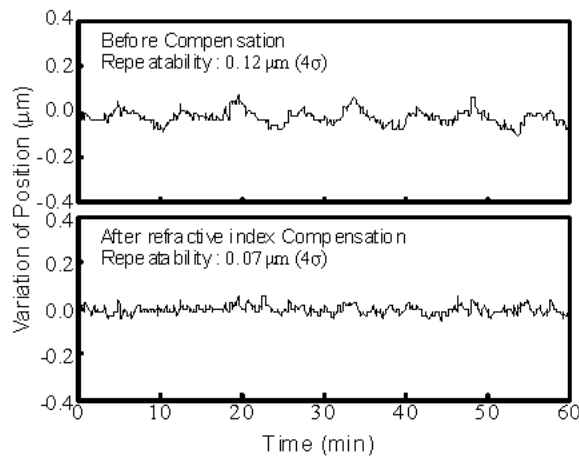


Fig.5 Compensation of temperature and Pressure without the chamber

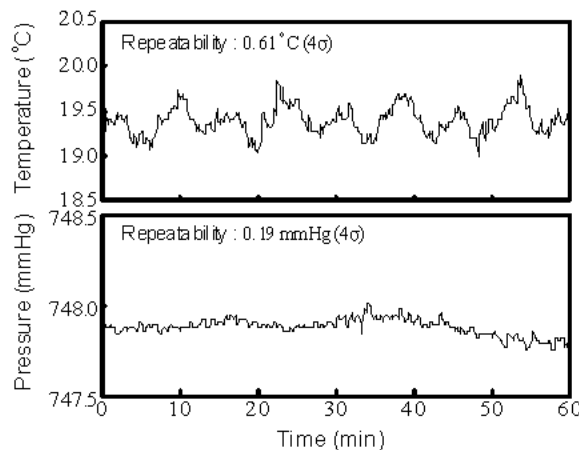


Fig.6 Temperature and Pressure without the chamber

경우 압력편차를 확인할 수 있다.

## 5. 굴절률 보정에 의한 반복정밀도

Chamber 장착 전 환경에서 공기배어링 스테이지의 반복정밀도를 측정 한 후 식(3)을 활용하여 보정을 수행 하였으며, 측정간의 동기화를 위하여 -10mm 와 210mm 지점을 10mm 간격으로 5회 운동 하도록 하였다. 측정구간은 0-200mm,  $L_i - L_r - 290$ , 소요시간은 22분이다. 스테이지의 왕복 운동 시 보정을 수행한 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. Fig.10의 측정결과로부터 평균 위치오차를 구하여 이를 수치 보정한 결과를 Fig.10상단에 도시하였다. 공기 굴절률을 보정한 결과 반복 정밀도는  $0.18\mu m$ 로 향상됨을 알 수 있다. Fig. 11은 스테이지를 Chamber 내에 장착하여 왕복 운동 시 보정을 수행한 결과이다. 온도 편차는  $0.10^{\circ}C$  이며, 굴절을 보정 후 반복정밀도는  $0.17\mu m$ 를 나타내고 있다. Fig. 12는 Chamber내의 측정 결과로부터 평균 위치오차를 구하여 수치 보정한 결과를 상단에 도시하였다.

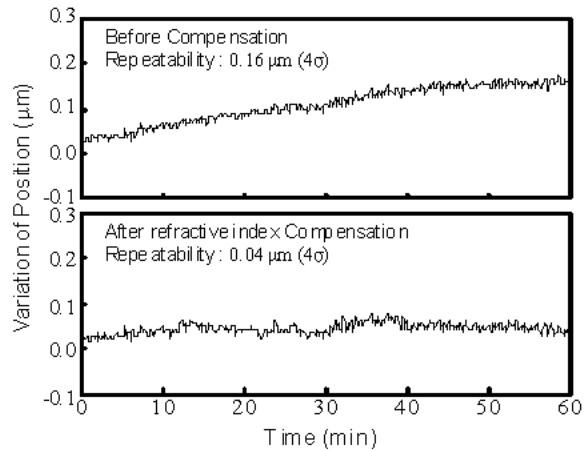


Fig.7 Compensation of temperature and Pressure within the chamber

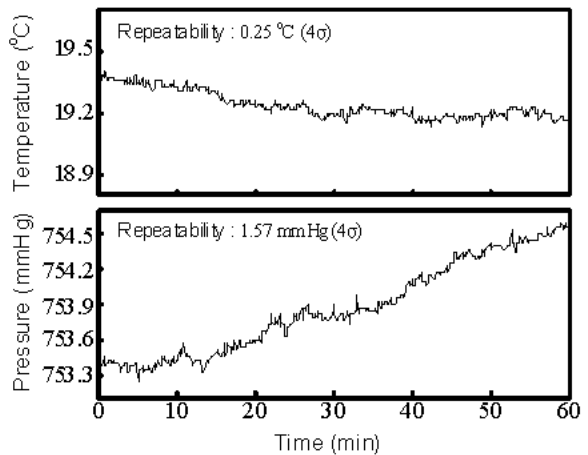


Fig.8 Temperature and Pressure within the chamber

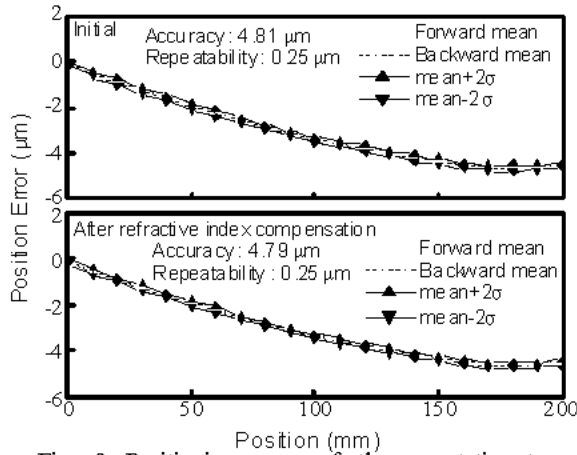


Fig. 9 Positioning error of the aerostatic stage before and after the refractive index compensation

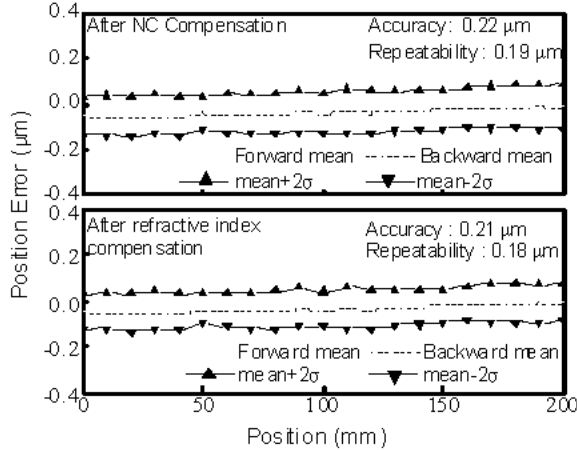


Fig.10 NC compensated positioning error of the stage before and after the refractive index compensation

## 6. 결론

초정밀 공기정압스테이지에 Chamber를 장착하여  $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 환경과 Chamber 장착전인  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 에서 위치결정 오차를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제작한 공기정압 스테이지는 검출분해능인 10nm의 미소분해능으로 운동합을 확인하였다.
- 2) 일반적인 스테이지 측정에 사용되는 레이저 간섭계를 사용함에 있어,  $0.2\mu\text{m}$  정도의 반복정밀도 측정오차를 보이는 것을 확인하였으며, 측정된 데이터를 기준으로 공기 굴절을 보정하여 측정 정밀도를 향상시키는 방법을 정립하였다.
- 3) Chamber 장착 전, 후 환경에서 반복정밀도를 비교 해본결과 Chamber를 장착하였을 경우  $0.25\mu\text{m}$ 에서  $0.19\mu\text{m}$ 로 향상됨을 확인

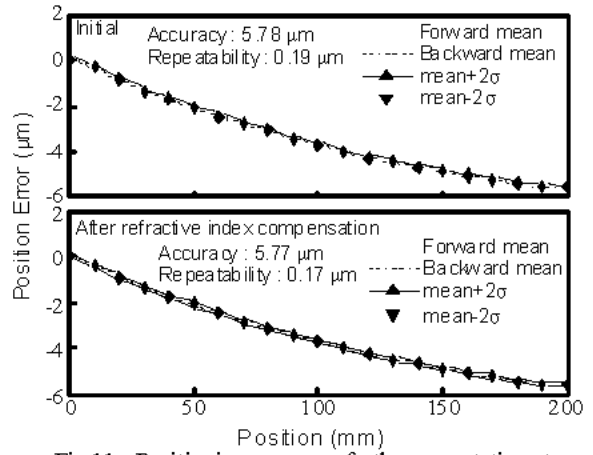


Fig.11 Positioning error of the aerostatic stage before and after the refractive index compensation

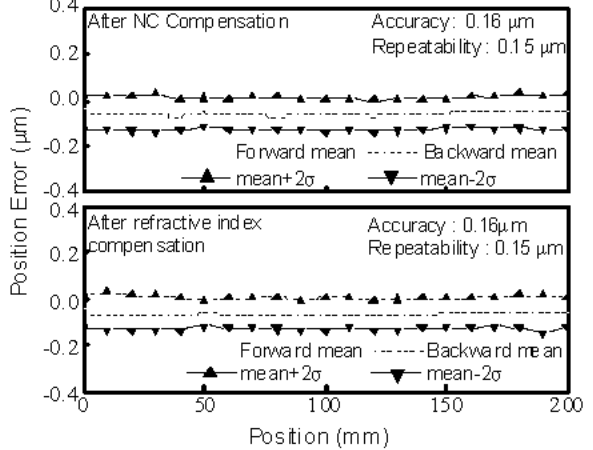


Fig.12 NC compensated positioning error of the stage before and after the refractive index compensation

할 수 있었다.

4. 오차의 수치 보정과 공기 굴절을 보정을 통하여 레이저 200mm 행정에 대하여  $0.15\mu\text{m}$ 의 반복정밀도와  $0.16\mu\text{m}$ 의 위치결정 정도를 가짐을 확인하였다.

## 참고문헌

1. Lee, Chan-Hong, "Ultra precision positioning Technology," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.17, No.12, pp9~15, 2000
2. Bryan, J., "International Status of Thermal Error Research" Annals of the CIRP, Vol. 39, pp 645 656, 1990
3. Stone, Jack A. and Phillips, Steven D., "Corrections for wavelength variations in precision interferometric displacement measurements", Journal of Research of the NIST, Vol. 101, No. 5, pp 671-674, 1996