

# 레이저간섭계의 위치결정정밀도 측정오차 개선

황주호<sup>#</sup>, 박천홍<sup>\*</sup>, 이찬홍<sup>\*</sup>, 김승우<sup>\*\*</sup>

## Improvement of the Laser Interferometer Error in the Positioning Accuracy Measurement

Jooho Hwang<sup>#</sup>, Chun-Hong Park<sup>\*</sup>, Chan-Hong Lee<sup>\*</sup> and Seung-Woo Kim<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

The heterodyne He-Ne laser interferometer is the most widely used sensing unit to measure the position error. It measures the positioning error from the displacement of a moving reflector in terms of the wave length. But, the wave length is affected by the variation of atmospheric temperature. Temperature variation of 1°C results in the measuring error of 1ppm. In this paper, for measuring more accurately the position error of the ultra precision stage, the refractive index compensation method is introduced. The wave length of the laser interferometer is compensated using the simultaneously measured room temperature variations 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 0.34 $\mu\text{m}$  to 0.11 $\mu\text{m}$  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 an aerostatic 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 0.1 $\mu\text{m}$ .

**Key Words** : Ultra precision static stage(초정밀 스테이지), laser interferometer (레이저간섭계), Measuring error(측정오차), Positioning error(위치 오차), Refractive index compensation(굴절률 보정), Repeatability(반복정밀도)

### 1. 서론

초정밀 스테이지의 위치결정특성에 영향을 미치는 변수로는 이송계의 정, 동강성, 이송기구와

가이드레일의 기하학적 오차, 피드백센서의 정밀도 및 아베옵셋오차 그리고 온도를 중심으로한 환경변화 등을 들 수 있다.<sup>1</sup> 이 가운데, 특히 온도변화는 스테이지 자체의 열변형에 의한 오차와 함께,

접수일: 2004년 3월 17일; 게재승인일: 2004년 6월 11일

<sup>#</sup> 교신저자: 한국기계연구원 공작기계그룹

E-mail: jooho@kimm.re.kr Tel: (042) 868-7119

<sup>\*</sup> 한국기계연구원 공작기계그룹

<sup>\*\*</sup> 한국과학기술원 기계공학과

이를 측정하는 센서의 측정값에도 오차를 유발시키는 가장 영향이 큰 요소이다.<sup>2</sup>

헤테로다인 He-Ne 간섭계(이하, 레이저간섭계)는 수미터의 거리에서도 10nm 이하의 분해능으로 측정할 수 있어, 가장 정밀하게 위치결정오차를 측정할 수 있는 장비로 인식되고 있다. 그러나, 레이저간섭계에 있어서도, 반사경의 변위를 위상차와 광원의 파장에 의하여 측정하는 원리를 갖으므로, 대기온도변화에 따른 공기굴절율의 변화가 측정값에 영향을 미치며, 1 °C의 대기온도변화에 의해 1 ppm의 측정오차를 포함하게 된다.<sup>3</sup> 따라서, 서브미크론대의 정밀도를 기대하는 초정밀 스테이지의 위치결정오차를 평가하는 경우, 레이저간섭계의 측정오차는 위치결정오차의 측정값에 매우 큰 영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 대기온도의 변화와 위치결정오차 측정값의 관계를 분석하고, 이를 토대로 공기굴절율의 변화를 보정함으로써, 레이저간섭계에 의한 측정오차를 최소화하고자 하였다. 보정방법으로는, 위치결정오차 측정시에 대기온도의 변화를 동시에 측정하고, Edlen의 식으로부터 온도변화에 따른 파장변화에 의한 변위값의 측정오차를 계산하여 위치결정오차 측정값을 보정하는 방법을 적용하였다.

이 보정방법의 유효성을 확인하기 위해, 먼저, zerodur® 판재 위에 간섭계와 반사경을 고정하고, 대기온도의 변화에 따른 간섭계와 반사경 사이의 상대변위 값을 측정하고 대기온도의 변화를 보정하는 실험을 수행하였다. 다음으로, 레이저스케일을 이용하여 10 nm의 분해능을 갖도록 제작된 초정밀 공기스테이지의 위치결정오차를 측정하고, 대기온도 변화에 따른 측정오차를 보정함으로써 보정방법을 효용성을 검증하고자 하였다. 이 경우, 보정된 결과의 정확도를 검증할 비교 측정 대상이 없으므로, 측정 거리에는 제한이 있지만 상대적으로 온도변화에 둔감한 정전용량형 센서를 이용하여 미소구간에서의 위치결정오차 측정값을 비교함으로써, 보정결과의 효용성을 간접적으로 확인하고자 하였다.

## 2. 실험장치의 구성

실험에 사용한 공기정압 스테이지의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 카본 그라파이트 다공질 공

기베어링을 적용하여 양면지지 방식으로 이송테이블을 구성하였으며, 구동은 무철심형 리니어모터(LEM-S-4-S, Anorad)를 사용하였다. 테이블의 최대 이송거리는 250 mm이며, 스테이지 구동은 PID 제어에 의한 제어 board(PC DSP, MEI)를 사용하였다.

위치검출용 피드백 센서로는 광학식 리니어스케일(BSA75A, Sony)을 사용하였으며, Fig. 1과 같이 테이블 옆면에 설치되어 있다. 이 스케일은 열팽창 계수가  $0.7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 인 zerodur® glass 재료에 감광제를 도포하고 간섭시켜 0.55  $\mu\text{m}$ 의 광학적 grating pitch를 갖도록 되어 있다. 스케일의 분해능은 제어기에서의 4분할을 포함하여 10 nm이며, 광경로가 스케일 헤드 안에 구성되어 있으므로 대기의 온도, 압력, 습도 등의 변화에 의한 영향이 거의 없는 장점이 있다.

위치결정오차는 레이저간섭계(HP 5529A)를 사용하여 측정하고 ISO230-2 규격을 이용하여 나타내었다. 또한, 비교 검증을 위한 미소영역에서의

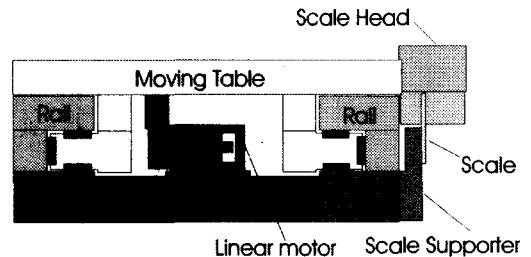


Fig. 1 Schematic diagram of the aerostatic stage

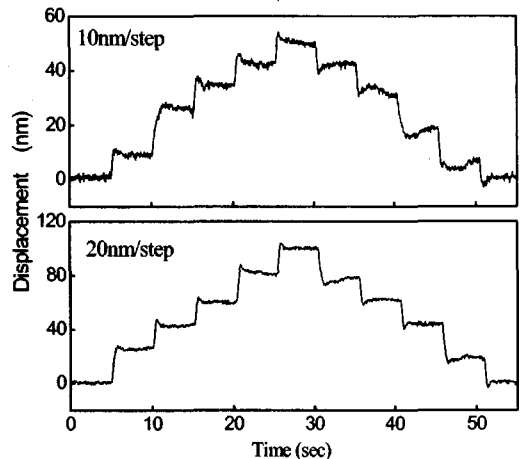


Fig.2 Micro step response of the aerostatic stage

위치결정오차 측정에는 정전용량형 변위센서 (Microsense 3401, ADE)를 사용하였다. 모든 측정은  $20 \pm 0.5$  °C, 상대습도  $50 \pm 3$  %로 제어되는 항온항습실에서 수행하였다.

### 3. 레이저간섭계에 의한 위치결정정밀도 측정특성 분석

먼저, 스테이지의 안정적인 구동 여부를 파악하기 위해, 10 nm/step 및 20 nm/step 의 분해능으로 스텝지령을 주었을 때의 응답특성을 정전용량형 센서로 측정하여 Fig. 2 에 나타내었다. 레이저스케일의 최소분해능인 10 nm 에 대해 명확하고 빠른 응답특성을 보이고 있으며, 이로부터 리니어모터를 이용한 이송계는 안정적으로 구동되고 있음을 확인할 수 있다.

다음으로, 레이저간섭계를 공기스테이지의 테이블 중앙 위치에 설치하고 200 mm 구간에 대한 위치결정정밀도를 ISO230-2 규격에 의하여 측정한 결과를 Fig. 3(a)에 나타내었다. 위치결정오차 측정값은  $3.34 \mu\text{m}$  로, 피드백센서인 레이저스케일의 정밀도  $0.72 \mu\text{m}/300 \text{mm}$  보다 훨씬 크게 나타나고 있다. 이것은, 레이저스케일의 부착위치가 테이블 옆면이고, 레이저간섭계의 측정위치는 테이블 중앙 이므로 요잉 오차(yawing error)에 의해 아베옵셋오차가 확대되어 나타났기 때문이다.

Fig. 3(b)는 이 위치결정오차 측정값을 이용하여 제어기상에서 소프트웨어적으로 오차보정(이하,

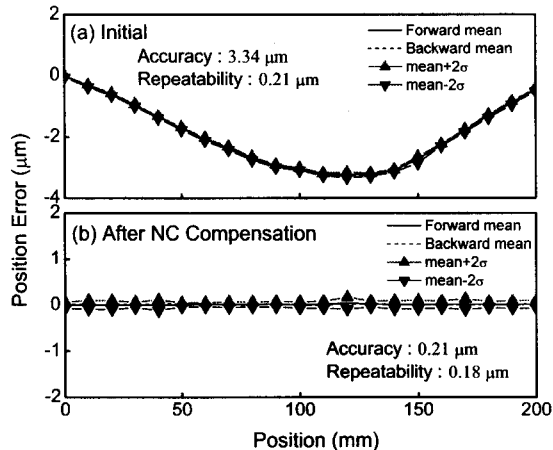


Fig.3 Positioning accuracy of the aerostatic stage

NC 보정)을 수행한 후의 위치결정오차를 측정한 결과로  $0.21 \mu\text{m}$  까지 향상됨을 보이고 있다. 그러나, 오차보정 전, 후의 위치결정정밀도에 대한 반복오차를 비교하면 각각  $0.21 \mu\text{m}(4\sigma)$ ,  $0.18 \mu\text{m}(4\sigma)$  로, 위치결정오차에 비해 크게 향상되지 않음을 보이고 있다. 특히 보정후의 위치결정정밀도는 반복오차와 거의 같은 크기를 나타내고 있어 반복오차에 의해 위치결정정밀도가 더 이상 개선되지 않음을 알 수 있다.

반복오차의 원인을 파악하기 위해, 스테이지가 일정한 위치에 유지하도록 제어중인 상태에서 테이블의 변위를 레이저 간섭계와 정전용량형 센서로 동시에 1 시간동안 측정한 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 테이블이 정지중임에도 불구하고 레이저 간섭계로 측정한 경우, Fig. 4(a)에 보이는 바와 같이  $\pm 0.2 \mu\text{m}$  가량의 변동과  $0.29 \mu\text{m}(4\sigma)$ 의 반복오차를 보이고 있다. 정전용량형 센서로 측정한 경우에도 Fig. 4(b)와 같이, 변동은 나타나고 있으나, 레이저간섭계의 1/5 수준인  $\pm 0.04 \mu\text{m}$  가량의 변동과  $0.06 \mu\text{m}(4\sigma)$ 의 반복오차를 보이고 있다.

Fig. 5(a)는 이 때의 스테이지 주변의 대기온도 변화를 열전대(T type)를 이용하여 측정한 결과를 나타낸 것이다. 1 시간동안에  $\pm 0.25$  °C 정도의 온도 변화를 나타내고 있으며, 변화 파형을 상하방향으로 뒤집으면 Fig. 4(a)의 레이저간섭계에 의한 측정 결과가 매우 근사하게 일치함을 보이고 있어, 항온실에서 대기온도변화가 레이저간섭계의 측정값에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있다. 한편, 정

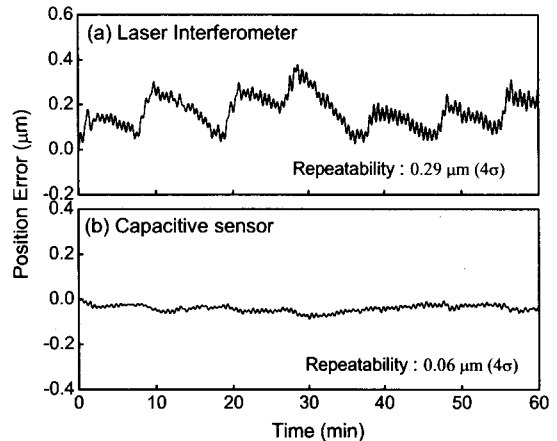


Fig.4 Variation of stationary measured displacement in the laser interferometer and the capacitive type sensor

전용량형 센서의 측정값(Fig. 4(b))의 경우에도 파형은 유사하나, 센서의 원리상 온도변화에 상대적으로 둔감함을 알 수 있다.

레이저간섭계를 이용한 측정시에는 이러한 대기온도변화를 보정하기 위한 목적으로 에어센서(HP 10751C)를 사용하도록 되어 있다. 본 실험에 적용된 에어센서의 온도변화 측정값을 Fig. 5(b)에 나타내었다. 일반환경에서 사용시 변하는 온도를 보정하기 위하여 고안된 에어센서의 시정수는 7 min 이며<sup>3</sup>, 이로 인해 온도변화의 평균 값이 측정되는 효과를 갖게 되므로, 항온, 항습 환경하의 미세한 온도변화를 충분히 반영하지 못해 레이저간섭계의 측정값을 보정하지 못하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 이유로 본 실험에 사용된 레이저간섭계의 불확도는  $20 \pm 0.5$  °C 의 대기상태에서  $\pm 1.5$  ppm 을 가지게 된다.<sup>6</sup>

#### 4. 레이저간섭계의 굴절률 보정

앞 절의 측정특성 분석에서 나타난 바와 같은 단점에도 불구하고, 긴 이송구간에 대한 위치결정특성을 정밀하게 평가하기 위해서는 레이저간섭계 이외의 대체 수단은 없으므로, 본 실험에서는 에어센서가 수행하는 보정 원리를 대체할 시스템을 구성하였다. 먼저, 보정센서로는 열전대를 사용하고, 이에 의한 온도변화 측정결과를 Edlen 의 식에 따른 파장변화에 의한 변위오차를 보정하였다. Fig. 6 은 전형적인 마이켈슨 간섭계를 나타내고 있으

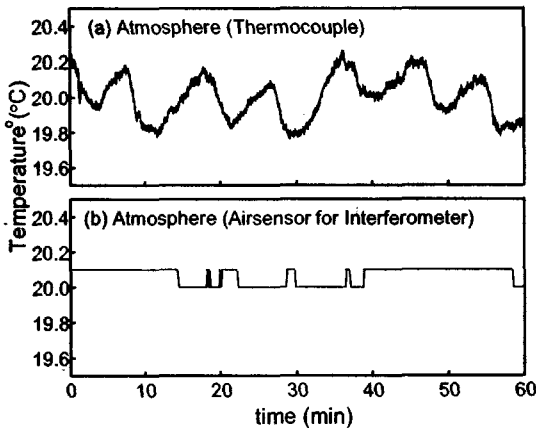


Fig.5 Variation of room temperature and temperature characteristics of air-sensor (HP10751C)

며 움직이는 측정 반사경과 고정된 반사경과의 위상 차를 측정하여 변위를 측정하며 식(1)과 같이 표시된다.<sup>2</sup> 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,  $\Delta L = L_f - L_i$ ,  $\Delta\lambda = \lambda_f - \lambda_i$ ,  $\lambda_f$  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 대기중의 온도, 압력, 습도, CO<sub>2</sub> 함유량 등에 의하여 결정된다.<sup>5</sup>

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

측정에 사용된 HP 사의 레이저 간섭계(HP5529A)는 식(1)을 He-Ne 레이저에 맞게 수정한 식(3) 및 보정계수 C 를 사용한다. 보정에 활용된 식은 식(3)의 영향 계수는 온도, 압력, 습도를 고려하고 영향이 적은 CO<sub>2</sub> 함유량은 무시하였다.<sup>6</sup>

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

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

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

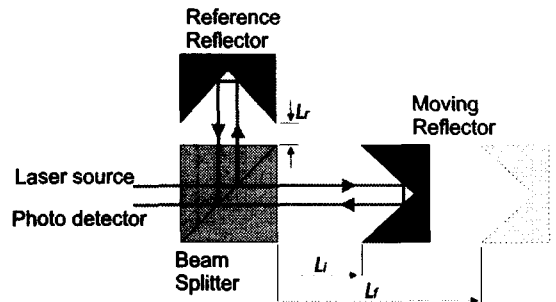


Fig. 6 A typical Michelson interferometer

여기서 첨자  $i, f, \Delta$ 는 식(1)에서의 정의와 같으며  $P$ 는 압력(mmHg),  $T$ 는 온도( $^{\circ}\text{C}$ ),  $H$ 는 상대습도(%)이다.

He-Ne 레이저 간섭계를 이용할 경우  $1^{\circ}\text{C}$  온도 변화, 3 mmHg 기압변화, 50 %의 습도변화에 의하여 길이의 1 ppm의 오차를 유발하게 된다.<sup>3</sup> 초정밀 스테이지의 측정시간인 30 분 내외의 기압과 습도 변화는 적고 온도에 대하여 민감하므로 일반적인 항온항습 상에서의 온도의 변화가 위치오차에 주는 영향이 지배적이다. 광 분할기(beam splitter)와 반사경을 Zerodur®로 구성된 판 위에 250mm의 거리차가 되도록 설치하여 두 Optical Components 간의 온도변화에 의한 열변위 오차를 줄이고 레이저 간섭계의 오차를 측정된 결과를 Fig. 7(a)에 도시하였다. 대기압은 측정 수행 직전에 Air-sensor(HP10751C)를 이용하여 측정하여 실험도중 변화가 없는 것으로 가정하였으며, 온도는 T형 열전대를 사용하여 측정하였고 상대습도는 50%로 두고 식(3)의 보정계수를 구하여 보정한 결과를 Fig. 7(b)에 도시하였다. 보정을 수행한 결과 오차가 약 1/3 줄은 것을 확인할 수 있으며 보정을 통하여 1.3ppm에서 0.44ppm으로 향상하였음을 알 수 있다. 보정 후에도 작은 변동이 관찰되며, 이는 광 경로 중 두 부분만을 측정하여 극부의 온도변동을 측정할 수 없어서 생긴 오차 및 공기유동에 포함된 미세한 압력의 변동으로 인하여 생긴 것으로 예상된다. 한편, Edlen 보정식 자체의  $2\sigma$  불확도는  $\pm 2 \times 10^{-8}$ 로서,<sup>4</sup> 250 mm 기준으로 1/10 수준인

$0.01 \mu\text{m}(4\sigma)$ 이다.

### 5. 공기 스테이지 오차측정에서의 적용

굴절률 보정을 공기베어링 스테이지의 위치결정정밀도 측정에 적용하여 테스트를 수행하였다. ISO230-2 규격에 의하여 200 mm 행정에 대하여 10mm 구간으로 5 회 왕복운동을 수행하여 위치결정오차를 평가하였으며 이때 주위의 온도를 동시 측정하였으며 이를 Fig 8(a)에 도시하였다. 두 번의 공기굴절률 보정을 통하여 스테이지의 최종의 정

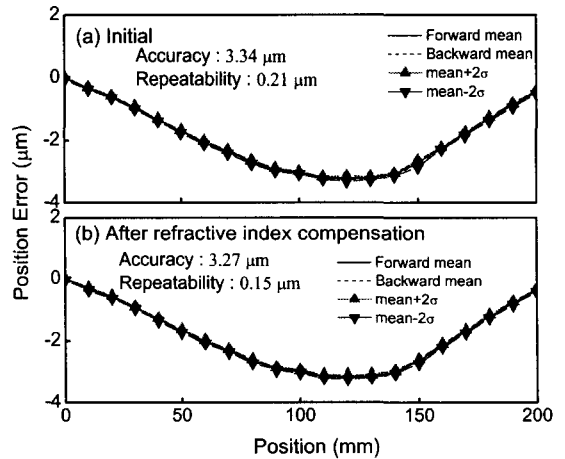


Fig.8 Positioning error of the aerostatic stage before and after the refractive index compensation

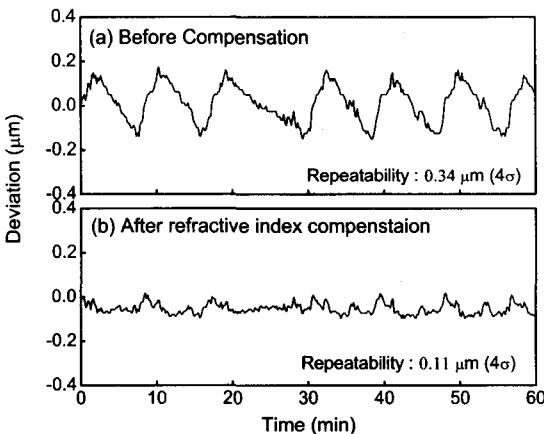


Fig. 7 Effect of the refractive index compensation method in the stationary test

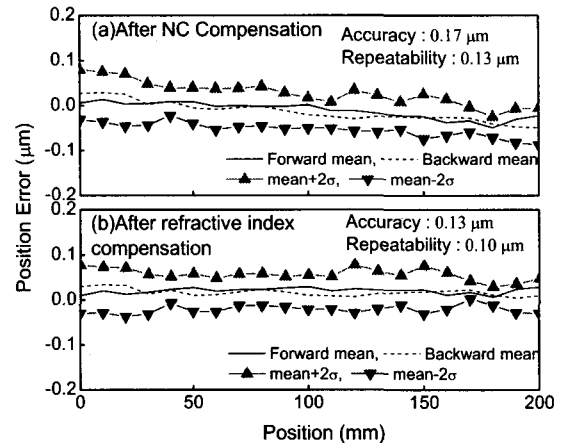


Fig.9 NC compensated positioning error of the stage before and after the refractive index compensation

밀도를 구하였다. 첫 번째로, 동시 측정된 레이저 광 경로 주위의 온도를 이용하여 식(3)에 의하여 굴절률 보정을 수행하여 이의결과를 Fig. 8(b)에 도시하였다. 실험이 진행되는 동안 온도의 변화는  $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}(4\sigma)$ 이며, 위치결정정밀도와 반복정밀도가 각각  $3.34\text{ }\mu\text{m}$ 에서  $3.27\text{ }\mu\text{m}$ 로  $0.21\text{ }\mu\text{m}$ 에서  $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 로 향상되었음을 알 수 있다. 두 번째로, Fig. 8(b)의 평균위치 오차 값을 기준으로 NC 보정을 수행하였다. Fig. 9(a)에 보이는 바와 같이 NC 보정을 통하여 Abbe 오차나 스케일의 자체오차가 제거됨을 확인할 수 있다. 이 때에 측정된 결과에도 굴절률 변화에 의한 오차가 포함되어 있으므로 이로부터 굴절률 보정을 한번 더 수행한 결과를 Fig. 9(b)에 도시하였다. 위치결정정밀도와 반복정밀도가 각각  $0.17\text{ }\mu\text{m}$ 에서  $0.13\text{ }\mu\text{m}$ 로  $0.13\text{ }\mu\text{m}$ 에서  $0.10\text{ }\mu\text{m}$ 로 향상되었음을 알 수 있다. 최종으로 얻은 반복정밀도  $0.10\text{ }\mu\text{m}$ 는 Fig. 7(b)의 결과와 그 크기가 유사함을 알 수 있다.

Fig. 4의 현상에 의한 위치오차의 원인을 검증하기 위하여 반복정밀도가 가장 큰 점을 중심으로 정전용량형 센서와 굴절률 보정을 수행한 레이저 간섭계를 비교, 검증하였다. 사용된 정전용량형 센서의 측정 영역인  $0\sim 20\text{ }\mu\text{m}$  구간을  $2\text{ }\mu\text{m}$  씩 측정하여 비교하였다. 레이저 간섭계로 측정된 결과를 Fig. 10(a)에 도시하였으며 반복정밀도는  $0.11\text{ }\mu\text{m}$ 인 반면 Fig. 10(b)에 보이는 바와 같이 정전용량형 센

서를 이용하여 측정된 반복정밀도는  $0.06\text{ }\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다. 이로부터 Fig. 9(b)에 보이는 스테이지의 반복정밀도는 스테이지 자체의 반복정밀도가 아닌 레이저 간섭계의 흔들림 오차임을 알 수 있다. 위의 실험에서부터 열전대와 Edlen 공기굴절률 보정 방법을 이용하여 레이저 간섭계에 포함된 에어센서를 대체하여 레이저 간섭계의 측정 불확도를 향상 시켜 초정밀 스테이지의 위치결정정밀도 측정에 적용한 결과 스테이지의 반복정밀도를  $0.1\text{ }\mu\text{m}/200\text{ mm}$  수준까지 측정이 가능함을 확인하였다. 이러한 측정오차를 보다 줄이는 방법으로는 백금형의 정밀한 온도센서와 압력 및 습도를 측정하여 정확한 굴절률 보정을 수행하고, 대기 유동을 줄여 온도 습도의 변화가 적게 일어나는 환경을 구축하는 것이 필요할 것으로 예상된다.

## 6. 결론

본 연구에서 초정밀 공기정압 스테이지를 보다 정밀하게 측정하기 위하여 상용화된 레이저간섭계의 에어센서를 대체하여 공기굴절률을 보정하는 방법을 소개하였다. 열팽창계수가 매우 적은 Zerodur®위에 간섭계와 반사경을 고정시켜 보정방식을 적용한 결과 레이저 간섭계의 반복도는  $0.34\text{ }\mu\text{m}$ 에서  $0.11\text{ }\mu\text{m}$ 로 증가하였음을 알 수 있다. 이 방법을 초정밀 공기정압 스테이지에 적용하여 실험한 결과  $0.13\text{ }\mu\text{m}$ 의 위치결정 정밀도와  $0.10\text{ }\mu\text{m}$ 의 반복 정밀도를 얻었다. 실험에 적용된 공기정압 스테이지의 정확한 측정오차를 획득하지 못하였지만, 공기굴절률 보정 방식을 적용하여  $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 의 측정오차까지 측정 가능함을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 국가지정 연구실 사업 “초정밀 위치결정 시스템 기술”에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Lee, Chan-Hong, “Ultra Precision Positioning Technology,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.17, No.12, pp. 9-15, 2000.

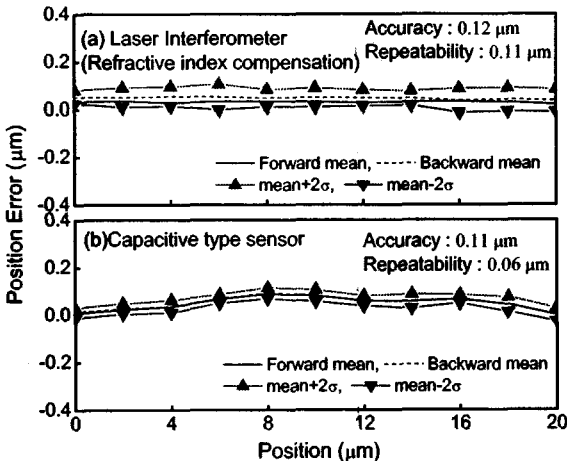


Fig.10 Comparison of the repeatability by the capacitive type sensor with the laser interferometer

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.
4. Agilent 5529A Dynamic calibrator measurements reference guide, pp. A4-A5, 2001.
5. Stone, Jack A. and Zimmerman, Jay H., "Index of refraction of Air," <http://patapsco.nist.gov/mel/div821>.
6. HP5528A Laser Measurement system User's Guide, pp. 19.1-19.7, 1984.