

레이저 간섭계의 직각 평면 거울에 대한 직각도 오차 측정

김 태 호*, 김 승 우**

Orthogonality Measurement of Square Plane Mirrors for Laser Interferometry

Taeho Keem*, Seungwoo Kim**

ABSTRACT

Plane mirror type laser interferometers are popularly being used in many modern ultraprecision machines, as they can perform simultaneous measurements of multiple axis positions with nanometer resolution capabilities. One important issue in this application of laser interferometers is to provide a good level of alignment between the reflecting mirrors and the laser beams so that measurement errors due to undesirable coupling effects can be avoided in multiple axis measurements. In this investigation, a thorough metrological analysis is given to develop a suitable mathematical model for a precision x-y stage in which the orthogonality misalignment between the reflecting mirrors significantly affects overall x-y measurement results. Then a noble calibration method is suggested in which two-dimensional displacement sensors of moire gratings of concentric circles are used to realize the reversal principle of orthogonality evaluation in situ. Finally, actual experimental results are discussed to verify that the suggested method can effectively calibrate the orthogonality error with an uncertainty of 0.2667 arcsec.

Key Words : reversal principle(반전법), orthogonality error(직각도오차), x-y stage(x-y스테이지), plane mirror interferometry(평면거울간섭계), moire grating of concentric circles(동심원 모아레 격자).

1. 서 론

최근 반도체 제조공정을 포함한 제반 초정밀 산업 분야에서 마이크로 미터 이하의 위치제어 결정능력을 갖는 초정밀 가공 및 검사기의 수요가 증대되면서 나노 미터 급의 위치 검출 분해능을 갖는 레이저 간섭계 시스템이 이

용한 초정밀 구동제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁾.

레이저 간섭계 시스템은 일반 공작기계에서 널리 사용되고 있는 광전자형의 엔코더 변위계와 비해 길이 표준에 직접 소급되어 나노 미터 단위의 높은 정확도를 보장할 수 있는 우수성을 갖고 있으며, 레이저 간섭계 시스템의

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원
** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

응용이 산업적인 용도로 다양화됨에 따라 레이저 간섭계 시스템 자체의 절대 측정 불확도를 낮추기 위한 제반 연구가 활발히 진행되고 있다⁽²⁻⁶⁾. 현재 산업용으로 사용되고 있는 레이저 간섭계의 경우, 전체 측정길이에 대해 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 정도의 절대 측정 불확도를 유지하고 있다.

여러 개의 구동축이 요구되는 가공 또는 검사 시스템에 레이저 간섭계 시스템을 적용하기 위해서는 여러 개의 레이저 간섭계 모듈들을 동시에 사용해야 한다. 이 경우 레이저 간섭계 시스템 자체의 절대 측정 불확도 뿐 아니라, 다축을 측정하기 위한 간섭계 모듈들 간의 정렬 오차에 대한 검증이 반드시 요구된다. 1993년 Bobroff는 평면 거울 간섭기(plane mirror interferometer)를 사용하는 정밀 x-y스테이지 위치 오차의 원인 중 평면 거울면에 대한 레이저 빔의 입사각과 두 평면 거울의 직각도 오차가 스테이지 위치 측정 결과에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다⁽⁷⁾.

그리고 두 평면 거울의 직각도 오차에 의한 스테이지 위치 결정 오차는 레이저 x-y축의 두 입사 빔이 이루는 평면이 구동 평면과 정확히 일치할 때 상대적으로 무시할 수 있다고 결론지었다.

그러나, 최근 산업계에서 요구하고 있는 스테이지의 위치 결정 정도는 나노 미터 수준에 이르고 있으며, 이 경우 레이저 빔이 거울면에 대해 가지는 입사각과 두 평면 거울간의 직각도 오차는 x-y스테이지의 구동에서 무시할 수 없는 위치 오차를 야기한다. 현재 간섭계 모듈의 정밀도 오차에 대한 연구가 전세계적으로 많지 않으나, 이 분야의 산업계 응용이 확대되는 추세이므로 나노 미터 단위의 초정밀 스테이지 제어 기술의 핵심 분야로 대두되고 있다.

본 연구에서는 레이저 빔의 입사각과 두 평면 거울의 직각도 오차가 실제 측정값에 미치는 영향에 대한 해석적 모델을 구축하고, 반전법(reversal principle)과 원형 격자 모아레 현상을 이용하여 스테이지에 장착되어 있는 두 평면 거울의 직각도 오차를 레이저 간섭계의 스테이지 구동 위치 값으로부터 측정하는 방법을 제안하고, 실제 스테이지의 구동 오차를 도출한다. 이를 위한 세부 연구 분야는 다음과 같다.

- 1) 두 평면 거울면이 가지는 직각도 오차와 레이저 빔이 거울 면에 수직으로 입사하지 않을 경우 스테이지의 위치 측정값에 미치는 오차량 해석
- 2) 반전법을 이용한 직각 평면 거울의 직각도 오차 측정 방법 제안

- 3) 반전법에 사용될 2차원 위치 센서로 원형 격자를 이용한 모아레 측정 방법의 응용
- 4) 실제 실험을 통한 측정 및 오차 분석

II. 시스템의 운동 특성

공간상을 움직이는 강체는 6개의 자유도를 가지고 있다. 스테이지는 안내 기구로 일부의 자유도를 구속하여 원하는 방향으로만 움직이도록 설계하지만, 안내 기구가 완전하게 5개 자유도를 구속할 수 없으므로 수평 수직 방향의 2자유도의 진직도 오차(straightness error)와 회전축이 이송 방향과 동일한 롤 오차(roll error), 회전축이 수평 방향인 피치 오차(pitch error), 회전축이 수직 방향인 요 오차(yaw error)의 3 가지 회전에 의한 5개의 운동이 오차량으로 유발되고, 이송 방향의 위치 결정 오차(positional error)에 의해서 모두 6개의 오차 요인이 존재한다.

이러한 스테이지의 운동에 따른 위치와 자세를 검출하는 센서로 평면 거울 간섭기(plane mirror interferom-

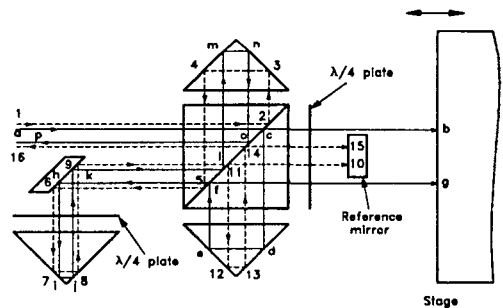


Fig. 1 Plane mirror interferometers

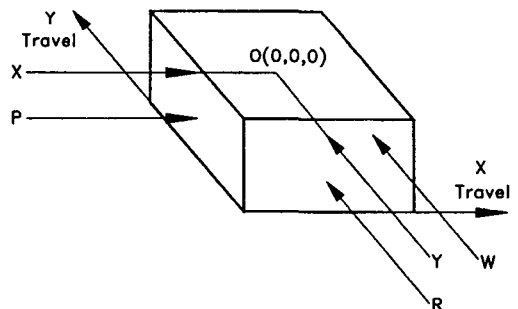


Fig. 2 A typical interferometer configuration for an x-y plane mirror metrology system

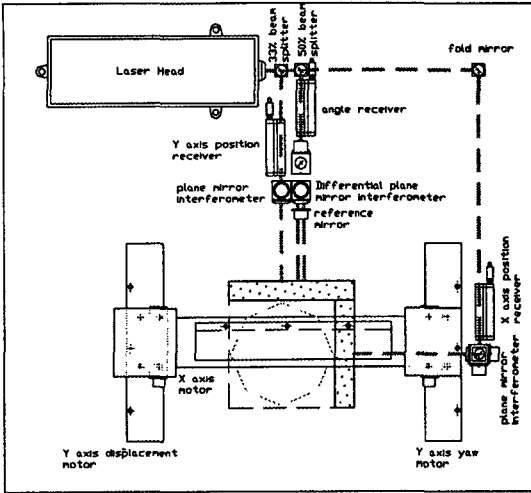


Fig. 3 Overall construction of the x-y stage system

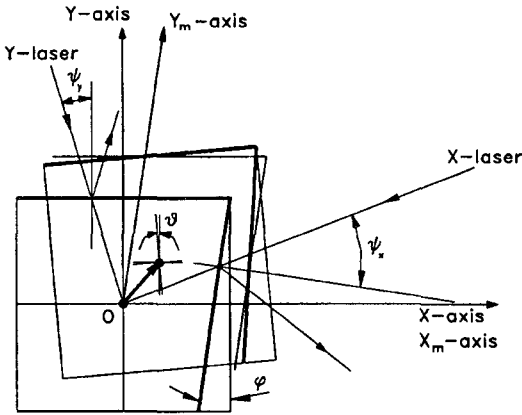


Fig. 4 Schematic diagram of the square mirror.

eter)를 많이 사용하는데, 이는 다축을 동시에 측정하는 것이 가능하며 다중 광 경로를 가지는 광학계가 가능하므로 위치 분해능을 향상시킬 수 있기 때문이다⁽⁴⁾. Fig.1은 평면 거울 간섭계의 기본 원리를 설명한다.

Fig.2는 평면 거울 간섭계를 장착한 스테이지의 전형적인 구조로써, 일반적으로, 평면 거울 간섭계를 장착한 스테이지는 x, y위치와 피치(pitch), 롤(roll), 요(yaw)에 해당하는 X, Y, P, R, W 다섯 개의 간섭기 축(interferometer axes)을 가질 수 있다. 스테이지는 실제로 기계적 안대면을 가지지만 평면 거울 간섭계를 이용하여 구동

되는 스테이지는 모든 측정이 간섭기 축에 의해 이루어지므로 구동축은 거울면이 이루는 축과 평행하다.

Fig.3은 본 연구에 사용된 스테이지의 전체 개략도이다. 구조는 H-frame 구조이며, X축 1개, Y축 2개의 리니어 모터와 X축 1개, Y축 2개의 압전 소자(piezoelectric device)를 사용하는 이중 서보(dual servo) 시스템이다. 그리고 위치 센서는 Zygo AXIOM 2/20레이저 간섭계 시스템으로써 평면 거울 간섭계를 사용한다. 이 레이저 간섭계 시스템의 위치 최소 분해능은 1.25 nm이고, 각도 최소 분해능은 0.057 arcsec이며, 스테이지의 X, Y축 변위와 회전운동(yaw motion)을 측정할 수 있도록 구성되어 있다. 이 스테이지에 사용된 평면 거울은 직각으로 스테이지위에 장착되어 있다. 본 연구에서는 이 두 거울면이 이루는 직각도 오차를 측정하고자 한다.

Fig.4는 거울면이 직각도 오차 ϕ 를 가지고 있고, 각 거울면에 레이저 빔이 입사각 ψ_x, ψ_y 로 입사 되는 전체 시스템 개요도이다. 관심을 갖는 시스템이 x-y평면 운동을 하는 스테이지이므로 2차원 시스템으로 가정하고, 환경 변수, 즉 온도, 습도, 기압, 진동은 무시한다. 직각 좌표계는 (X, Y, θ) 로, 각 축 거울면으로 이루어진 측정 좌표계는 (X_m, Y_m, θ_m) 으로 정의한다. 평면 거울면 중 한 면을 X축과 일치시켰을 때 다른 거울 면이 직각 좌표계 Y축과 이루는 각을 직각 평면 거울의 직각도 오차(orthogonality error) ϕ 로 정의한다. 레이저 빔의 거울면에 대한 입사각을 각각의 축에 대해서 ψ_x, ψ_y 라 하고 이를 빔 정렬 오차(beam alignment error)양으로 정의한다.

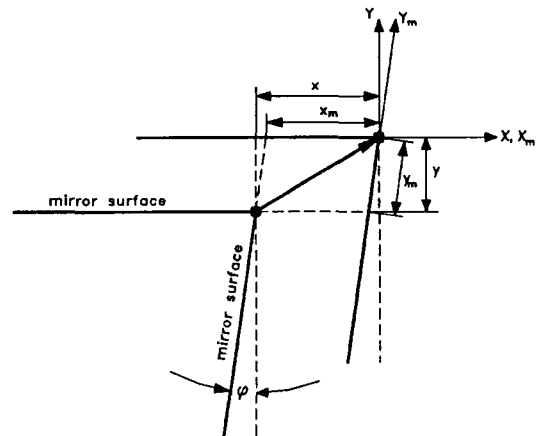


Fig. 5 A relationship between the orthogonal axes X, Y and the nonorthogonal axes X_m, Y_m

Table 1. Cosine Error Factors⁽⁸⁾

Angular Misalignment	Cosine Error Factor (1-cosθ)
1 degree	1.52 x 10 ⁻⁴
0.1 degree	1.52 x 10 ⁻⁶
1 arc minute	4.23 x 10 ⁻⁸
10 arc seconds	1.17 x 10 ⁻⁹
5 arc seconds	2.94 x 10 ⁻¹⁰

Table 2. Product Specification ; Typical Measurement Mirror Alignment Requirements (as a function of distance)⁽⁹⁾

Range	Align Requirements
152 mm (6 in)	±6 arcmin from normal
305 mm (12 in)	±3 arcmin from normal
508 mm (20 in)	±1.5 arcmin from normal

먼저, Fig.5에서 평면 거울의 직각도 오차 ϕ 에 의한 직각 좌표계 $\{X, Y, \theta\}$ 와 측정 좌표계 $\{X_m, Y_m, \theta_m\}$ 와의 관계를 구하면 다음과 같다. 계산의 편의상 X축과 X_m 축은 일치시킨다.

$$x_m = x - y \cdot \tan \phi \tag{1-1}$$

$$y_m = \frac{y}{\cos \phi} \tag{1-2}$$

두번째로, 평면 거울에 레이저 빔이 임의의 입사각 ψ 를 가지고 입사하는 경우, 측정 값 l_m (measured displacement)

placement)과 실제 구동량 l_a (actual displacement)과는 다음과 같은 코사인 관계로 알려져 있다⁽⁸⁾.

$$l_m = l_a \cdot \cos \psi \tag{2}$$

식(2)의 전형적인 코사인 관계에 의한 변위 측정 오차는 Table 1에 나타나 있다.

실제로, HP 10706A Plane Mirror Interferometer, HP 10706B High Stability Plane Mirror Interferometer의 사양에는 간섭기가 원하는 정확도를 얻기 위해 Table 2와 같이 빔의 정렬 정도를 요구하고 있다⁽⁹⁾.

이제, 직각도 오차, ϕ 가 있는 거울 면에 임의의 입사각, ψ 로 레이저 빔이 입사되는 경우를 생각한다. 직각도 오차를 가진 거울 면을 기준으로 구동되는 스테이지의 위치는 식(1)에서 (x_m, y_m) 이고, 그 측정값은 (x_p, y_p) 으로 정의한다. 여기서 아래 첨자m과 l은 각각 측정 좌표축(measured coordinate axes)과 레이저 측정값(laser measurement value)을 의미한다.

Fig.6(a)에서 레이저 간섭계의 측정값은 레이저 빔이 거울면에 입사 될 때의 위상과 반사된 후의 위상이 같은 점 사이의 총 경로 변화량을 2로 나눈 값이다⁽⁷⁾. Fig.6(b)에서 δ_x 는 스테이지가 θ 만큼 회전하였을 때 X축 레이저 빔 경로의 변화량이다. 우선, δ_x 가 없을 때, 즉 스테이지가 병진 운동만 한다고 가정하면, 총 광경로 차이와 그 때의 측정값은 다음과 같다.

$$p_c = 2x_m \cos \phi \cos \psi_x \tag{3}$$

$$x_l = p_c / 2 \tag{4-1}$$

$$x_l = x_m \cos \phi \cdot \cos \psi_x \tag{4-2}$$

여기서, p_c 는 레이저 빔의 총 경로 변화량(total path

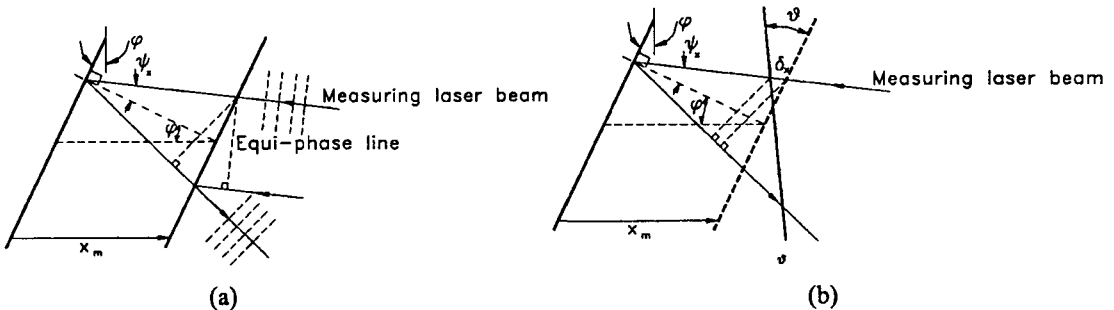


Fig. 6 Scale factors caused by laser beam alignment errors; (a) translational motion, (b) translational motion with θ tilt

change)이다. 이제, 스테이지가 미소각 θ 로 회전하였을 때의 광 경로차를 생각해 보면, Fig.6(b)와 같이 X축은 $y\theta$ 만큼 증가하고, Y축은 $x\theta$ 만큼 감소하므로 실제 측정 값 x_i, y_i 은 다음과 같다.

$$x_i = x_m \cos\phi \cdot \cos\psi_x - y\theta \quad (5-1)$$

$$y_i = y_m \cos\phi \cdot \cos\psi_y + x\theta \quad (5-2)$$

여기에서 θ 는 매우 작은 값으로 측정 각 θ_i 과 같다고 가정하면, 직각 좌표계와 비직각인 측정 좌표계 사이에서 실제 구동량과 레이저 측정량과의 관계에 대한 행렬을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ \theta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi \cdot \cos\psi_x - \sin\phi \cdot \cos\psi_x & -y \\ 0 & \cos\psi_y & x \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)을 이용하여 각축의 오차 함수, e_x, e_y 를 다음과 같이 정의 한다. 단, 스테이지의 미소 회전량, θ 은 무시한다.

$$e_x = \frac{x - x_i}{x} = \frac{x - (x \cdot \cos\psi_x \cos\phi - y \cdot \cos\psi_x \sin\phi)}{x} \quad (7-1)$$

$$e_y = \frac{y - y_i}{y} = \frac{y - y \cdot \cos\psi_y}{y} = 1 - \cos\psi_y \quad (7-2)$$

식(7-2)에서 e_y 는 전형적인 코사인 오차 관계를 보인다. e_x 에서 참값(true value) x, y 를 식(6)의 변환 행렬의 역행렬을 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$e_x = \frac{(1 - e_y) \cdot (1 - \cos\psi_x \cos\phi) + \eta_{xy} \cdot \cos\psi_x \sin\phi}{(1 - e_y) + \eta_{xy} \cdot \cos\psi_x \sin\phi} \quad (8)$$

여기서, η_{xy} 는 레이저 간섭기의 Y축과 X축의 측정값 비율 y_1/x_1 이다. 만약, 직각 평면 거울의 직각도 오차 ϕ 가 없다면, e_x 는 e_y 와 같이 레이저 빔 입사각에 의한 전형적인 코사인 오차만 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고, X, Y축 레이저 모두 거울면에 수직 입사한다면, 다음과 같이 구동량의 비율 η_{xy} 과 직각 평면 거울의 직각도 오차 ϕ 만의 함수로 나타낸다.

$$e_x = 1 - \frac{\cos\phi}{1 - \eta_{xy} \cdot \sin\phi} \cong 1 - \frac{1}{1 + \eta_{xy} \cdot \phi} \quad (9)$$

식(10)를 이용하여 e_x 를 ϕ 와 η_{xy} 의 관계를 3차원 그래프로 표시하면 Fig.7과 같다.

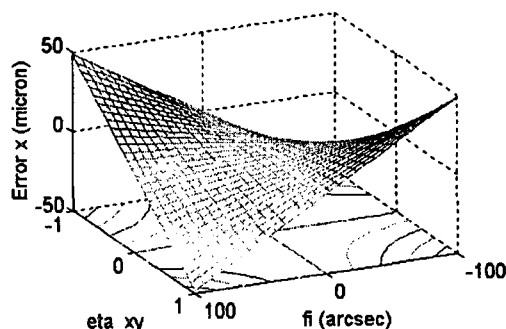


Fig. 7 3D plot of position error vs orthogonality error

이 그래프에서 직각 평면 거울의 직각도 오차 $\phi = 0.5$ arcsec를 가진 스테이지가 X축으로 100 mm, Y축으로 100 mm 구동할 때, X축의 최대 오차는 -242nm를 가짐을 알 수 있다.

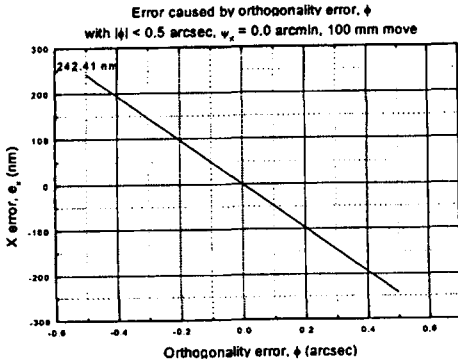
Fig.8은 거울면의 직각도 오차 ϕ 와 레이저 빔 정렬 오차 ψ 가 존재하고, X, Y축 모두 100mm씩 구동했을 때, 즉 구동비 η_{xy} 가 1일 때의 오차량을 나타낸다.

Fig.8에서 직각도 오차 ϕ 와 빔 정렬 오차 ψ 에 의한 최대 구동 오차량을 표로 정리하면 다음과 같다.

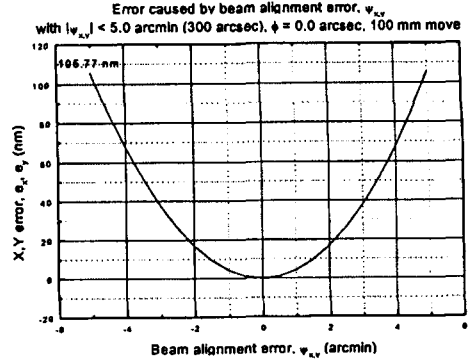
계산에 인용한 직각도 오차 ϕ 와 빔 정렬 오차 ψ 의 범위는 각각 HP 10777A Optical Square와 HP 10706A Plane Mirror Interferometer, HP 10706B High Stability Plane Mirror Interferometer의 제품 사양(9)에서 인용하였다. 이 값에서 거울면의 직각도 오차가 레이저 빔 정렬 오차의 1/600이지만 그것으로 유발되는 스테이지의 위치 오차는 2배 이상 큰 것을 알 수 있다. 따라서, 서브-마이크론 단위의 측정에서는 스테이지의 두 평면 거울면의 직각도 오차가 레이저 빔의 정렬 오차보다 큰 오차를 유발시키는 것을 알 수 있고, 따라서 매우 중요한 측정 항목임을 알 수 있다.

III. 직각 평면 거울의 직각도 오차 측정 방법

스테이지의 미소 회전량, θ 가 없다고 가정하고, 모든



(a)



(b)

Fig. 8 Error plots with orthogonality error and beam alignment error;(a) Error caused by orthogonality error, ϕ , (b) Error caused by beam alignment error, ψ

Table 3 Maximum Position error by Orthogonality error & Beam Alignment error

Causes	Position error (max.)
Orthogonality error ϕ at $\phi = \pm 0.5$ arcsec, $\psi = 0$ arcmin	$2.42 \times 10^{-4} \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ = 242 nm
Beam alignment error ψ at $\phi = 0$ arcsec, $\psi = \pm 5$ arcmin = ± 300 arcsec	$1.06 \times 10^{-4} \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ = 106 nm

각도가 매우 작은 각으로써 1차 근사(first-order approximation)하면 식(6)에서부터 다음과 같은 식을 얻는다.

$$x_l \approx x - y \cdot \phi \tag{10-1}$$

$$y_l \approx y \tag{10-2}$$

이 식으로부터, 실제 구동량 x 를 알면, 다음과 같이 직각도 오차 ϕ 를 알 수 있다.

$$\phi \approx \frac{x - x_l}{y} \approx \frac{x - x_l}{y_l} \text{ (rad)} \tag{11}$$

그러나 레이저 간섭계 시스템으로부터 스테이지의 위치를 측정하므로 실제 스테이지 구동량은 알 수 없다. 본 연구에서는 반전법을 응용하여 레이저 간섭계 시스템의 측정값으로부터 직각 평면 거울의 직각도 오차를 측정하는 방법을 제안하고자 한다.

반전법은 정밀측정에서 사용하는 고전적인 한 방법으로써 측정하고자 하는 대상물의 오차를 측정할 때 측정 기준의 방향을 반전시켜 2번 측정하므로써 기준(reference)이 갖는 형상 오차를 측정 결과로부터 제거하여 원하는 대상물의 오차만을 추출하는 방법이다⁽¹⁰⁾.

반전법을 응용하여 직각 평면 거울의 직각도 오차를 측정하는 방법은 Fig.9와 같다.

형상오차 γ 를 가지는 기준 직각의 한쪽 면을 스테이지 평면거울의 한쪽 면에 일치시킨 후 스테이지의 구동을 통해 이 기준 직각의 형상오차 γ 를 측정하고, 기준 직각을 90도 회전시킨 후 다시 한쪽 면을 평면거울의 한쪽 면에 일치시키고, 기준 직각의 형상오차 γ 를 다시 측정한다. 각 측정값에는 두 평면거울의 직각도 오차 ϕ 가 포함되어 측정된다. 만약, 두 평면 거울의 직각도 오차 ϕ 가 없으면 두 단계에서 측정한 γ 값의 절대값이 같을 것이고, 직각도 오차 ϕ 가 있으면, 그 크기가 다르게 측정될 것이다. 각 단계에서의 다르게 측정된 γ 의 측정값을 각각 α , β 로 정의하면 각각은 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \gamma - \phi \tag{12-1}$$

$$-\beta = \gamma + \phi \tag{12-2}$$

식(15)에서 직각 평면 거울의 직각도 오차 ϕ 을 구하면 다음과 같다.

$$\phi = -\frac{1}{2} \cdot (\alpha + \beta) \tag{13}$$

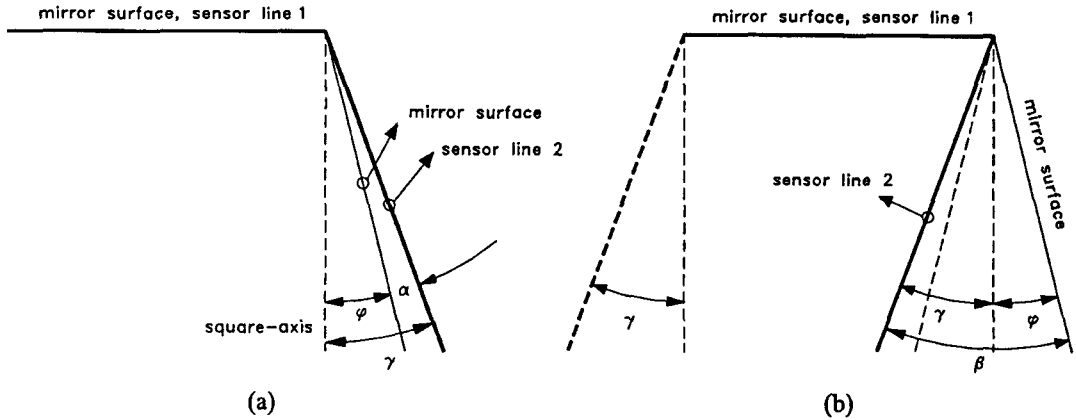


Fig. 9 Summary of the orthogonality measurement process of square plane mirrors;(a) step 1, (b) step 2;90 deg. Rotation of step 1

이와 같이 반전법에 의한 측정방법은 측정 기준의 형상 오차를 제거할 수 있으므로 기준 직각의 정확한 형상오차를 알 필요없고, 90도를 정확히 회전시킬 필요가 없다. 그러나, 반전법에 의한 평면 거울 간의 직각도 오차 측정은 평면 거울을 스테이지에 그대로 장착하고 측정할 수 있는 방법이지만, 측정에 필요한 새로운 직각 기준이 필요하고, 또 이 직각 기준을 측정할 수 있는 방법이 필요하다.

직각을 표시하기 위해 임의의 판 위에 세 점을 잡고, 그 세 점을 잇는 가상의 직선을 기준 직각으로 정의한다. 그리고, 세 점의 위치는 스테이지를 구동시켜 외부에 고정된 CCD를 장착한 현미경 프로브로 검출한다. 이때 세 점의 위치는 레이저 간섭계로 측정된 스테이지의 위치 값으로 한다. 이 세 점의 좌표로부터 직각 기준을 이루는 두 직선의 방정식을 구할 수 있고, 이 직선의 방정식으로부터 기준 직각이 평면 거울면과 이루는 각 α 와 β 를 얻

어낼 수 있다. 그런데, 세 점의 위치를 스테이지의 구동 값으로부터 정확히 측정하기 위해서 CCD 화상 안에서 점이 항상 일정한 위치에 있어야 하므로 세 점에 해당하는 곳에서 x, y의 2차원 변위를 알 수 있는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 2차원 변위 센서로써 원형 모아레 회절 격자를 이용하기로 한다⁽¹¹⁾. Fig.10은 원형 격자 모아레 무늬의 예이다.

이렇게 기준 원형 격자와 대상 원형 격자가 겹쳐져서 생긴 모아레 무늬를 CCD 카메라에 결상시켜 기준 원형 격자의 중심에 대한 대상 원형 격자의 x, y 변위를 관찰한다. Park⁽¹¹⁾은 이 때 관찰된 모아레 무늬의 강도를 기준 격자의 중심에서 반경방향으로 n개의 등간격 샘플링을 하여, 위상 개봉(phase unwrapping)과정을 거치면 측정 대상 격자의 이동 방향 ϕ 와 이동량 ϵ 을 식(17)과 같이 구할 수 있음을 보였다. 그는 원형 격자 모아레법을 이용하여 스피들의 반경 방향 운동을 보정하였고, 측정 대상 회전 격자의 최대 반경 $R_s = 0.847$ mm, 중심원 수 $N = 100$, 기준 격자의 최대 반경 $R_R = 2.376$ mm의 시스템으로 측정 불확도(uncertainty) 32 nm와 우연 오차 8 nm인 시스템을 구현하였다. 이 원형 격자 모아레법을 2차원 변위 검출 방법으로 사용하기로 하고, 원형 격자를 센서로 사용하기로 한다.

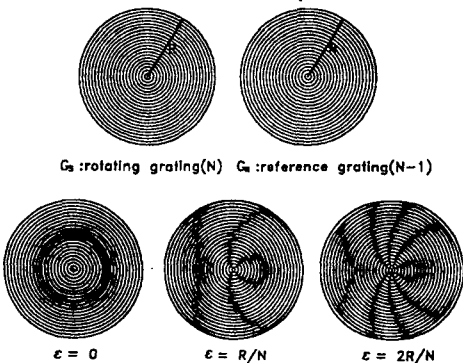


Fig. 10 Examples of moire fringe by circular gratings (N=22)

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \xi \left(\frac{2\pi i}{n} \right) \cdot \sin \frac{2\pi i}{n}}{\sum_{i=0}^{n-1} \xi \left(\frac{2\pi i}{n} \right) \cdot \cos \frac{2\pi i}{n}} \quad (14-1)$$

$$\varepsilon = \frac{R}{\pi N n} \left[\left(\sum_{i=0}^{n-1} \xi \left(\frac{2\pi i}{n} \right) \cdot \cos \frac{2\pi i}{n} \right)^2 + \left(\sum_{i=0}^{n-1} \xi \left(\frac{2\pi i}{n} \right) \cdot \sin \frac{2\pi i}{n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14-2)$$

여기서 ε 은 기준 격자에 대한 측정 대상 중심의 편심량이며, ϕ 는 이동 벡터의 방위각이고 $\xi(\rho)$ 는 반경 방향으로 n 개로 샘플링된 정보를 위상 개봉(phase unwrapping)한 값이다.

IV. 실험 및 오차 분석

Fig.11과 같이 판 위에 원형 격자 세 개를 고정시킨다. 기준 직각은 이 세 격자의 중심을 잇는 가상의 두 직선이다. Fig.12와 같이 기준 원형 격자는 CCD카메라 앞에 고정시키고, 카메라는 스테이지 위의 공간상에 고정시킨다. 고정된 기준 원형 격자의 중심이 측정 원점이 된다.

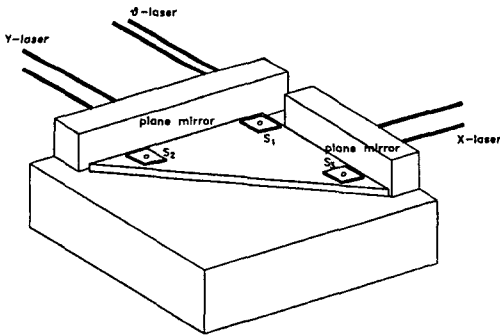


Fig. 11 Alignment of the sensor plate

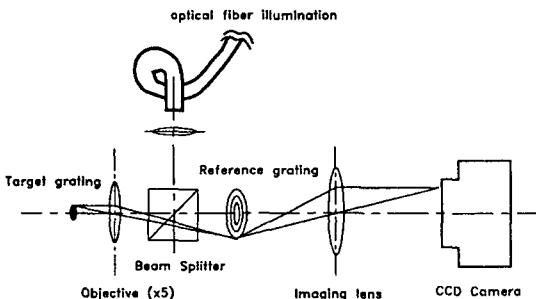


Fig. 12 Schematic diagram of optical system

우선, 두 평면 거울에 레이저 빔은 수직으로 입사 된다고 가정하고, 기준 직각은 형상 오차 γ 를 가진다고 가정한다. 단계1과 2에서 기준 직각의 형상 오차 γ 를 각각 측정하여 그 값을 각각 α , β 라 하면 그 값은 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{1 + a_{11} \cdot a_{12}}{a_{12} - a_{11}} (\text{rad}) \quad (15-1)$$

$$\beta = \frac{1 + a_{21} \cdot a_{22}}{a_{22} - a_{21}} (\text{rad}) \quad (15-2)$$

여기서, a_{11} 과 a_{12} , 그리고 a_{21} 과 a_{22} 는 각각 단계 1과 2에서의 두 직선의 기울기이다.

실험에 사용한 대상 원형 격자의 피치는 $4 \mu\text{m}$ 이며, 최대 직경은 1.038 mm , 원형 격자의 개수는 130개이고, 기준 원형 격자의 피치는 $20 \mu\text{m}$ 이고, 직경은 4.747 mm 이며, 격자의 개수는 100개짜리를 사용하였다. 센서판의 재질은 두랄루민으로, 삼 점 지지 되도록 설계하였고, 센서 중심간의 거리는 스테이지의 행정을 고려하여 약 120 mm 로 하였다.

현미경 프로브는 기준 원형 격자를 고정하기 위한 격자 고정대와 결상 렌즈를 고정하기 위한 렌즈 고정대, 이 두 고정대가 들어가고 CCD 카메라를 부착할 수 있는 어댑터(Adapter)와 5배짜리 대물렌즈가 부착된 무한원 보정 경통을 구성하였다. 결상 렌즈는 직경 38.1 mm , $\#f = 1$ 렌즈를 사용하였다.

Fig.13은 제작된 센서판과 현미경 프로브를 스테이지 위에 설치한 모습이다. Fig.14는 대상 격자와 기준 격자가 겹쳐져서 형성된 모아레 무늬를 CCD카메라에 결상한 화면과 그 화상을 영상 처리를 통해 모아레 무늬의 중심을 찾아 나타낸 모습이다.

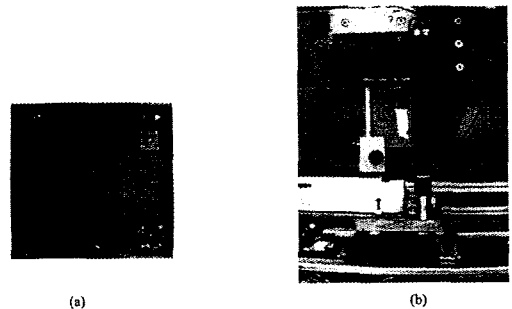


Fig. 13 Sensor plate and assembled microscope probe; (a) sensor plate, (b) microscope probe

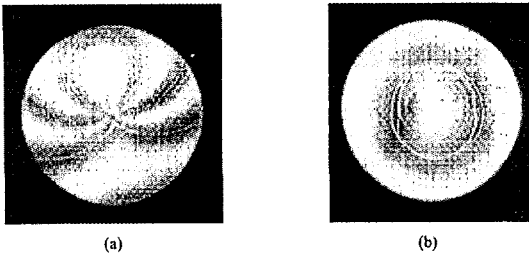


Fig. 14 Circular Moire fringe;(a) with displacement, (b) in center; white line is the skeleton of the fringe

Fig.14(b)에서 모아레 무늬의 중심에 원으로 나타난 실선과 찌그러진 타원형의 실선을 볼 수 있는데, 타원형의 실선은 실제 형성된 무늬의 중심을 찾아낸 궤적이고, 원형의 실선은 타원형의 궤적으로부터 얻은 원형 격자의 좌표 값으로부터 다시 이론적으로 계산한 모아레 무늬의 중심 위치이다. 실제 측정 무늬가 이론 값과 비교하여 찌그러진 이유는 대상 원형 격자와 기준 원형 격자의 상대적인 기울기가 있기 때문이다⁽¹¹⁾. 이것은 위치 계산 값에는 오차를 발생시키지만 중심이 일치하는 점은 오차에 관계없다. 따라서, 모아레 무늬 해석으로 얻은 x, y 위치 정보를 이용하여 스테이지를 각 센서들의 중심으로 구동시킨다. 이때 레이저 간섭계의 위치 분해능은 2.5 nm, 각도 분해능은 0.114 arcsec로 설정하였다. 압전 소자의 제어 오차는 5 nm이다. 스테이지의 널링 점을 찾는 기준은 모아레 무늬가 중심으로 부터 x, y 모두 10 nm안에 있을 때로 설정하였다. 따라서 위치 불확도는 반경 방향으로 20 nm 미만이다. 이렇게 각 단계에서 세 센서의 좌표 값을 레이저 간섭계로부터 얻는다.

위와 같이 실험 장치를 구성하고 3번 반복 측정하였다. Table 4는 3번 반복 측정한 센서 세 개의 각각의 좌표 값이다. Table 4에서 각각 센서 중심의 위치 반복능은 최대 수백 nm정도로 매우 큰 값을 나타내고 있다. 이 위치 측정오차는 여러가지의 원인을 가질 수 있으며 직각 평면 거울의 직각도 오차를 계산하는데 오차로 작용한다.

Table 5는 Table 4의 센서 좌표 값으로부터 구한 두 평면 거울의 직각도 오차 ϕ 는 52.48 ± 0.15 arcsec로써 약 0.3 arcsec의 폭을 보이고 있다. 그러나, 기준 직각의 형상 오차인 γ 는 센서판에 센서를 장착한 후로 고정된 값이므로 -15.15 arcmin으로 일정한 값을 보이고 있다. 52 arcsec의 두 평면 거울 직각도 오차는 식(9)에 의해 X축, Y축 구동량 100 mm에 대해서 최대 -25 μ m 정도의 위치 오차를 유발시킬 수 있다. 이 값은 정밀 스테이

Table 4. Positions of the sensors

Step	Step 1		Step 2		
Positions of Sensors unit : μ m					
	X	Y	X	Y	
Exp. 1	1	31003.166	42953.010	153593.797	23906.220
	2	151064.284	42519.916	152971.039	143966.243
	3	30877.530	162095.413	34457.070	22793.607
Exp. 2	1	31002.510	42953.404	153593.943	23906.128
	2	151063.672	42520.199	152971.131	143966.293
	3	30877.265	162095.544	34457.055	22793.607
Exp. 3	1	31002.291	42953.574	153593.917	23906.060
	2	151063.463	42520.375	152971.256	143966.278
	3	30877.074	162095.619	34457.109	22793.530

Table 5. Experimental Results

	β (arcmin)	α (arcmin)	γ (arcmin)	ϕ (arcsec)
Exp.1	-16.026	14.272	-15.149	52.62
Exp.2	-16.018	14.268	-15.143	52.50
Exp.3	-16.017	14.273	-15.145	52.32

지 구동에서 매우 큰 위치 오차이다.

실험의 오차 원인을 규명하기 위해 실험에 영향을 줄 수 있는 변수 값들을 변화시켜가면서 주어진 직각 평면 거울의 직각도 오차를 다시 계산하는 모의 실험을 해보았다. 모의 실험은 다음과 같은 방법으로 수행하였다.

실제 ϕ 값과 센서 중심들의 거리는 고정한다. 실제로 센서판을 스테이지 위에 장착할 때 한 평면 거울면과 한 직선을 평행하게 맞출 수 없으므로, 각 단계에서 직선1의 기울기 a_{11}, a_{12} 를 변화시켰다. 그리고, 기준 직각의 형상 오차 γ 도 변화시켰다. 이렇게 변화하는 값으로 각 센서 중심 좌표를 역으로 계산하고 식(6)을 이용하여 레이저 측정값으로 변환한다. 이 레이저 측정값에는 첫째, 레이저 빔의 입사각 ψ_x, ψ_y 과 둘째, 레이저 간섭계 시스템이 가지고 있는 위치와 각도 분해능 안에서 스테이지가 가질 수 있는 위치 불확도, 그리고, 원형 격자 모아레 법의 측정 불확도 등이 오차로 포함되어 있다. 이렇게 각 센서의 중심 값을 레이저 간섭계의 값으로 구한 후 그 값들을 이용하여 본 논문에서 제시된 방법으로 3000번 이상씩 다시 ϕ 를 계산하였다. Table 6은 모의 실험에 사용

Table 6. Summary of parameters & Errors

Parameter	Range	Recalculation Error of ϕ
Angle of reference square in Step 1 & Step 2, α_1, α_2	$\alpha_1 < -0.3 \text{ deg. (Step1)}$ $\alpha_2 < 0.08 \text{ deg. (Step2)}$	less than 0.02 arcsec
Orthogonality error of Reference square, γ	-20 arcmin ~ +20 arcmin	less than 0.02 arcsec
Incidence angles of laser beams, ψ_x, ψ_y	1, 2, 3, 4, 5 arcmin	less than 0.035 arcsec
Laser system Resolution	position	$\pm 2.5 \text{ nm}$ $\pm 25 \text{ nm}$
	angle	$\pm 0.114 \text{ arcsec}$
Uncertainty of circular moire method (published)	$3\sigma \leq 32 \text{ nm}$	less than 0.3 arcsec

한 변수와 그 변수 변화에 따른 직각 평면 거울의 직각도 오차 ϕ 의 재계산 오차를 나타내었다.

여기서, 원형 격자 모아레 법의 측정 불확도 32 nm값은 Park⁽¹¹⁾의 논문에 제시된 값을 인용하였다. 그러나, 실제 구성한 원형 모아레 법의 측정 불확도는 각종 실험 오차로 인해 32 nm 이상일 것으로 예상된다.

위의 모의 실험 결과, 센서판을 처음에 장착할 때 생기는 기울기나 기준 직각의 직각도 오차 γ , 그리고 레이저 입사각 ψ_x, ψ_y 는 직각 평면 거울의 직각도 오차 ϕ 를 다시 계산하는데 큰 영향을 주지 않는다. 가장 큰 오차를 발생시키는 변수는, 레이저 간섭계의 위치와 각도 분해능 안에서 스테이지가 가지는 위치 불확도, 그리고 원형 격자 모아레 법의 측정 불확도이다. 직각도 오차의 재계산의 오차가 큰 경우에 대해서 역으로 스테이지의 레이저 측정값을 다시 계산하여 위치 반복능을 구해보았다. 그 결과는 Fig.15와 같다. 여기서 각 축의 3σ 불확도 값은, X축

243.30 nm이고, Y축 232.14 nm으로 실험에서 얻어진 각 센서의 중심 위치 반복능과 근사하다. 따라서, Table 4에 나타난 센서 중심 위치 반복능의 주된 원인은 레이저 간섭계 시스템의 위치 분해능과 각도 분해능 안에서 스테이지가 가지는 위치 불확도와 원형 격자 모아레 법에 의한 센서 중심 위치 측정 불확도임을 알 수 있다.

이 외의 오차 원인은 센서로 사용한 대상 원형 격자 세 개가 한 판 위에 놓여져 있었기 때문에 기준 격자가 이루는 평면과 세 개의 대상 격자가 이루는 평면이 현미경 프로브의 초점심도(depth of field)안에서 모두 평행하게 설정하기 어려워 세 격자 모두 선명하고 찌그러지지 않은 모아레 무늬를 얻지 못했기 때문에 무늬 해석에 잡음이 많이 포함된 점이다. 그에 대한 대책으로는, 각각의 대상 원형 격자를 따로따로 높이와 평면 기울기가 조절이 가능하게 하는 것이다. 이렇게 하면 원형 격자 모아레 법에 의한 센서 중심의 위치 계산 오차를 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

위 모의 실험의 값을 모두 적용하여 본 연구에서 수행한 실험의 측정 불확도를 계산하였을 때, 레이저 간섭계 시스템의 위치 분해능이 2.5 nm일때 불확도는 $3\sigma = 0.2667 \text{ arcsec}$, 레이저 간섭계 시스템의 위치 분해능이 25 nm일 때 불확도는 $3\sigma = 0.6678 \text{ arcsec}$ 이다. 만약, 본 연구에서 사용한 스테이지를 사용하여 진원도 측정용 마스터 링을 측정했을 경우, 평면 거울의 직각도 오차에 의해 Fig.16과 같이 찌그러져 측정될 것으로 예상되나 식(6)을 일차 근사하여 측정값을 보정하면 진원을 얻을 수 있다. Fig.16은 진원도 오차를 1000배하여 진원에 더하여 나타내었다.

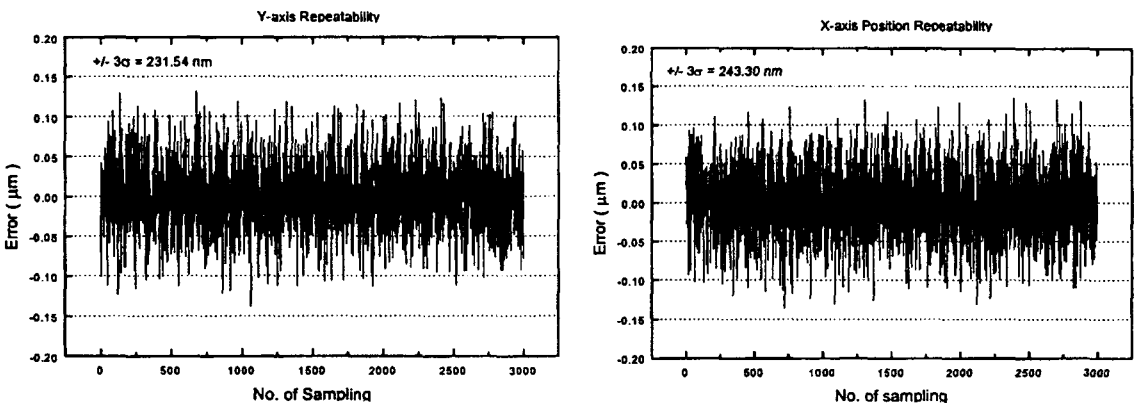


Fig. 15 Position repeatability by laser interferometer resolution & uncertainty of circular moire

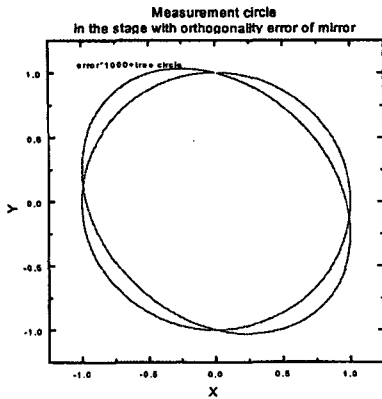


Fig. 16 Master ring measurement by nonorthogonal axes and result after calibration

V. 결 론

본 연구에서는 레이저 간섭계 시스템을 사용하는 정밀 x-y스테이지의 위치 결정 오차를 보정하기 위하여, 레이저 빔의 입사각과 직각 평면 거울의 직각도 오차가 실제 측정에 미치는 영향에 대한 해석적 모델을 구축하였고, 두 오차 원인 중 영향이 큰 X-Y축 두 거울면의 직각도 오차를 측정하는 새로운 방법을 제안하였다. 이 방법은 스테이지 위에 설치한 세 점으로 이루어진 가상의 두 직선을 기준 직각으로 사용하며, 반전법에 의한 2번의 측정으로부터 두 직선의 직각도 오차를 제거하고 X, Y축 두 거울면의 직각도 오차만을 추출한다. 그리고, 직각을 이루는 세 점의 중심 위치는 원형 격자 모아레 법을 응용하여 낮은 측정 불확도로 측정할 수 있었다.

제안한 방법을 정밀 x-y스테이지에 적용하여 X, Y축 두 평면 거울의 직각도 오차를 측정된 결과, 직각도 오차, ϕ 는 52.48 arcsec이고, 측정 불확도는 레이저 간섭계 위치 분해능이 2.5 nm, 각도 분해능이 0.114 arcsec일 때, $3\sigma = 0.2667$ arcsec이다. 전세계 표준기관에서 각도 보정용으로 사용되고 있는 회전 테이블(rotary indexing table)의 최소 불확도는 0.2 arcsec 정도로 보고 되어있으며⁽¹²⁾, 이 값을 근거하면 본 방법에 의한 실험 결과의 타당성을 입증할 수 있다. 또한 본 방법은 회전 테이블을 사용하여 보정하는 것과 비교하여 직각 평면 거울을 스테이지에서 분해하지 않은 상태에서 장착되어 있는 레이저 간섭계의 값을 이용하여 측정할 수 있고, 레이저 간섭계의 길이 측정 값을 사용함으로써 길이 표준에 직접적으로 소급되는 장점이 있다. 본 연구에서 제안한 방법은

직각 평면 거울의 직각도 오차를 도출하는 매우 강한 방법이며, 효과적인 정밀 x-y스테이지의 위치 보정 방법으로 사용될 수 있다.

Reference

1. 전자통신연구소, "통계정보," 주간기술동향, 통권 631, pp. 324-346.
2. Edlen B, "The refractive index of air," Metrologia, Vol. 2, pp. 71-80
3. H.Matsumoto, "Recent interferometric measurements using stabilized lasers," Precision Engineering, Vol. 6, No. 4, pp. 87-94, April 1984.
4. R.R.Balwin, G.J.Siddall, "A double pass attachment for the linear and plane mirror interferometer," SPIE Integrated Circuit Metrology II, Vol. 480, pp. 78-83, 1984.
5. C.R.Steinmetz, "Sub-micron position measurement and control on precision machine tools with laser interferometry," Precision Engineering, Vol. 12, No.1, pp. 12-24, January, 1990.
6. N.Bobroff, "Recent advances in displacement measuring interferometry," Meas. Sci. Technol., pp. 907-926, 4, 1993.
7. N.Bobroff, "Critical alignments in plane mirror interferometry," Precision Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 33-38, January 1993.
8. Zygo AXIOM 2/20 Laser Measurement System Operation and Reference Manual OMP-0220H, Chap. 11, pp. 9-10
9. Hewlett Packard Test & Measurement Product Information URL : <http://www.tmo.hp.com/tmo/datasheets/English/HP10706.html>
10. R.R.Donaldson, "A Simple Method for Separating Spindle Error from Test Ball Roundness Error," Annals of the CIRP, Vol. 21, pp. 125-126, 1, 1972.
11. 박윤창, "모아레 현상을 이용한 스피들의 반경 방향 회전 오차 측정," 한국과학기술원 정밀공학과 박사학위논문, 1994.
12. 엄태봉, "측정표준," Vol. 18, No. 1, pp. 67-73, 한국표준과학연구원, 1995.