

## 확장 트와이만-그린 간섭계를 이용한 운동 오차의 실시간 보상

배은덕\*, 오정석#, 김승우\*\*

### Real-time Compensation of Motion Errors Using Extended Twyman-Green Interferometry

Eun Deok Bae\*, Jeong Seok Oh# and Seung-Woo Kim\*\*

#### ABSTRACT

This paper presents an extended Twyman-Green interferometry that enables simultaneous and real-time measurement of 5-DOF motion errors of the translational moving stage. This method uses a null balancing technique in which two plane mirrors are used as target mirrors to generate an interferometric fringe utilizing the optical principles of Twyman-Green interferometry. Fringe is detected by 2D photodiode array for high-speed measurement. Errors are then independently suppressed by activation of piezoelectric actuators through real-time feedback control while the machine axis is moving. Experimental results demonstrate that a machine axis can be controlled with motion errors about 10 nm in linear displacement, 0.15 arcsec in angular displacement.

**Key Words :** Twyman-Green interferometry(트와이만-그린 간섭계), Real-time compensation(실시간 보상)

#### 1. 서론

정밀 가공기 및 측정기에 있어서 일반적으로 가장 중요한 두 개의 오차 요인을 든다면 열변형(thermal deformation)에 의한 오차 및 아베 오차<sup>1, 2</sup>(Abbé error)로 나눌 수 있다. 특히 아베 오차의 경우 측정축(measurement axis)과 기능점(functional point) 간의 거리인 아베 오프셋(Abbé offset)에 의해 이송 스테이지의 각운동 오차가 증폭되므로 정밀 기계시스템 설계에 있어서는 아베 오차를 줄이기 위한 노력이 필수적이다. 아베 오차를 줄이기 위

해서는 증폭의 원인이 되는 아베 오프셋을 줄이는 것이 가장 우선적인 방법<sup>3, 4, 5</sup>이지만 행정(stroke)이나 속도 등 현실적인 제약 역시 존재하므로 이송 스테이지의 운동 오차(특히 각운동 오차)를 줄이는 것 또한 매우 중요한 과제이다. 예를 들면 삼차원 측정기의 경우 프로브(probe)를 이송하는 스테이지의 각운동 오차에 의해 측정 데이터에서 아베 오차가 유발되고 이에 직선운동 오차가 더해지는 형태로 오차가 발생하게 되므로 이송 스테이지의 운동 오차를 줄이는 것이 측정 정밀도의 향상을 위해서 매우 중요하다. 이송 스테이지의 오

접수일: 2003 년 4 월 10 일; 게재승인일: 2003 년 8 월 14 일

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원(현 삼성전자 재직)

# 교신저자: 한국과학기술원 기계공학과 대학원

E-mail: ojs6114@kaist.ac.kr, Tel: (042) 869-8221

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

차는 크게 계통 오차(systematic error)와 우연 오차(random error)로 분류되며 계통오차를 줄이는 가장 기본적인 방법은 스테이지의 안내면을 정밀하게 가공하고 조립하는 것이지만 이 경우에도 가공 및 조립의 불완전성으로 인해 잔류 오차(residual error)가 남게 되고, 이를 미리 측정하고 테이블을 구성하여 운동 오차를 보상하는 방법을 쓸 수 있지만 진동이나 외부 요인에 의해 발생하는 우연 오차 성분을 보상하는 데는 한계가 있다. 따라서 요구되는 정밀도가 이보다 높을 경우에는 이송 스테이지의 운동 오차를 실시간으로 측정하고 보상하는 시스템이 필요하게 된다. 이송 스테이지의 운동 오차를 실시간으로 측정하는 방법에 관한 연구는 크게 레이저의 직진성과 광 삼각법을 이용한 방법<sup>6, 7</sup> 과 상용화된 헤테로다인 레이저 간섭계나 정전용량형(capacitance type) 변위센서를 다축으로 배열하여 오차를 측정하는 방법<sup>8, 9</sup>, 트와이만-그린 간섭계(Twyman-Green interferometry)를 이용한 방법<sup>10, 11</sup> 등으로 분류할 수 있다. 일반적으로 첫번째 방법의 경우 구성이 복잡할 뿐만 아니라 정밀도에 있어서도 직선변위 기준 0.1-5  $\mu\text{m}$ , 각변위 기준 1-3 arcsec 정도로 보다 정밀한 변위 측정을 요구하는 응용에 있어서는 한계가 있다. 두번째 방법은 정밀도 측면에서는 가장 좋다고 할 수 있으나 시스템 구성에 소요되는 과도한 비용으로 인해 응용 범위의 제약이 큰 편이다. 세번째 방법의 경우 기본적으로 호모다인(homodyne) 간섭계이기 때문에 공기 유동이나 외부 잡광에 민감한 단점이 있으나 적절히 시스템을 구성할 경우 첫번째 방법에 비해 훨씬 높은 정도를 얻을 수 있고 세번째 방법에 비해 비용이 저렴하고 구성이 간단하므로 경쟁력이 있다고 볼 수 있다. 현재 트와이만-그린 간섭계를 이용한 이송 스테이지의 운동 오차 측정에 관한 연구는 3 자유도의 운동 오차를 측정하는데 그치고 있어 1 축 이송 스테이지의 경우 발생하는 6 자유도 오차성분 중 이송 방향을 제외한 5 자유도의 운동 오차를 전부 측정하는 데는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 확장된 트와이만-그린 간섭계를 제안 및 구현하여 이송 스테이지의 5 자유도 운동 오차를 동시에 측정 가능하도록 하였으며 운동 오차의 실시간 측정 및 보상을 위하여 영상획득 속도의 한계가 있는 CCD 대신에 2 차원 포토 다이오드 배열을 사용하였다.

## 2. 스테이지의 운동 오차 측정 및 보상 원리

### 2.1 트와이만-그린 간섭계

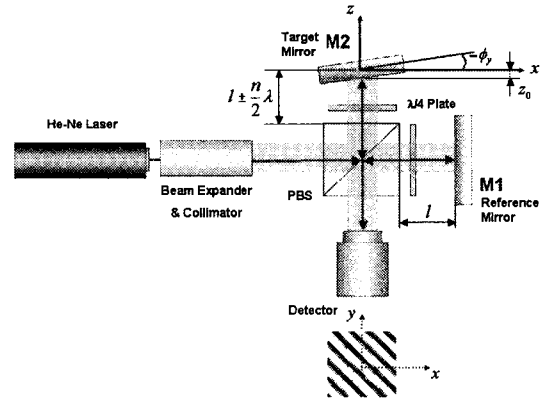


Fig. 1 Twyman-Green Interferometry

스테이지의 운동 오차를 측정하기 위해 제안된 트와이만-그린 간섭계의 원리를 Fig. 1에 나타내었다. 기준반사경 M1에서 반사된 기준광(reference beam)은 전면에 걸쳐 동일 위상을 가지며, 그 파면(wave front)은 식(1)로 표현된다.

$$W_r = ae^{2jkl} \tag{1}$$

여기서,  $a$ 는 기준광의 진폭,  $l$ 은 편광광선분할기(polarizing beam splitter, PBS)와 기준반사경 사이의 거리이고,  $k=2\pi/\lambda$ 는 파수(wave number)이다.

간섭계에 의하여 정의되는 좌표축  $x, y, z$ 에 대한 측정반사경 M2의 회전량  $\phi_x, \phi_y$ 가 작아서  $\sin\phi \approx \phi \cos\phi \approx 1$ 로 일차 근사가 가능할 경우 측정반사경 표면의 공간적 상태는 식(2)로 표현할 수 있다.

$$z(x, y) = -\phi_y \cdot x + \phi_x \cdot y + z_0 \tag{2}$$

그러므로, 측정반사경에서 반사된 측정광(measurement beam)의 파면은 측정반사경 표면 위치에 따른 함수로 식(3)과 같이 표현된다

$$\begin{aligned} W_m &= be^{2jk\{l+z(x,y)\}} \\ &= be^{2jk\{l+(-\phi_y \cdot x + \phi_x \cdot y + z_0)\}} \end{aligned} \tag{3}$$

여기서,  $b$ 는 측정광의 진폭이다. 기준광과 측

정광의 파면은 편광광선분할기에서 합쳐지며, 두 광의 광경로 차에 따라 발생하는 파면의 위상차에 의해서 간섭무늬가 생성되는데 이와 같은 간섭무늬의 세기(intensity)는 식(1)과 식(3)으로부터 식(4)와 같이 표현될 수 있다

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= |W_r + W_m|^2 = |ae^{2jkz} + be^{2jkz + z(x, y)}|^2 \quad (4) \\
 &= a^2 + b^2 + 2ab \cos\{2kz(x, y)\} \\
 &= I_0[1 + \gamma \cos\{2kz(x, y)\}] \\
 &= I_0[1 + \gamma \cos\{2k(-\phi_x x + \phi_y y + z_0)\}]
 \end{aligned}$$

여기서,  $I_0 = a^2 + b^2$  는 간섭무늬의 평균 세기를 나타내며,  $\gamma = 2ab/(a^2 + b^2)$  는 간섭무늬의 가시도(visibility)이다.

식(4)에 의하여 생성된 간섭무늬  $I(x, y)$ 의 형태는 기준반사경에 대한 측정반사경의 공간적 위치상태에 따라 Fig. 1의 아래와 같이 주기적인 형태의 영상을 나타내게 된다. 그러므로, 간섭무늬 영상은 측정반사경을 이송 스테이지에 장착했을 경우 고정된 기준반사경에 대한 스테이지 면의 공간적 위치상태( $\phi_x, \phi_y, z_0$ )에 대한 정보를 내포한다.

### 2.2 운동오차 측정 및 보상방법

스테이지 운동 오차의 실시간 측정과 이를 통한 보상을 이루기 위한 방법은 트와이만-그린 간섭계를 이용한 운동 오차 측정과 미세구동 스테이지(fine motion stage)를 이용한 이송 스테이지의 영점제어(null balancing control)를 기본으로 한다.

식(4)에서 알 수 있듯이 간섭무늬의 세기정보에는 기준반사경에 의하여 정의되는 절대 평면에 대하여 측정반사경이 기울어진 양에 대한 정보를 내포하고 있으므로, 각  $x, y$  좌표축 방향으로의 단위길이 당 간섭무늬의 세기 변화량을 구하면 측정반사경의 기울어진 양에 대한 정보를 얻을 수 있다. 그러나, 스테이지의 기울어진 상태가 주기적인 간섭무늬로 변환되는 과정에서 스테이지의 기울어진 방향에 대한 정보를 상실하게 되어 기울어진 방향이 +방향인지, -방향인지의 구별이 불가능하다. 이러한 간섭무늬의 주기성 때문에 발생하는 방향성 상실과 높이에 따른 반복적인 신호의 제약성을 없애기 위하여 Fig. 2(a)에서와 같이 초기에 간섭무늬 전 영역에 대하여 영상세기가  $I_0^*$  (높이  $z_0^*$ 에 해당)가 되도록 측정반사경을 조정한다. 이 경우

Fig. 2(b)에서 알 수 있는 바와 같이  $z_0^*$  주위의  $\lambda/4$  구간에 대해서는  $2\pi$ -모호성( $2\pi$ -ambiguity) 문제가 없으므로 방향 판별이 가능하다. 대부분의 이송 스테이지에서는 운동 오차가  $\lambda/4$  를 초과하므로 측정반사경이 이 범위 내에서 움직이기 위해서는 별도의 미세구동 스테이지를 이용하여 영점제어를 하는 것이 필요하다.

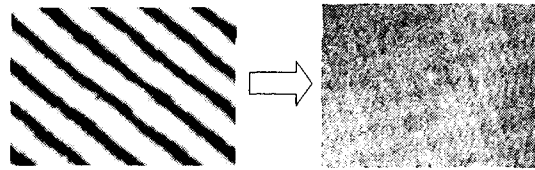


Fig. 2(a) Fringe nulling for initial setup

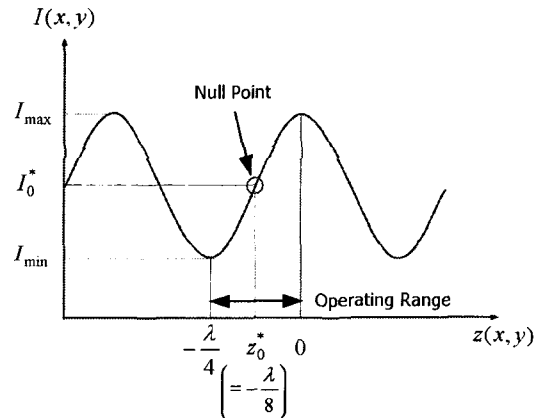


Fig. 2(b) Operating range

Fig. 2 Concept of null balancing control

초기 조정점에 대해서 동작 영역을 대칭으로 하기 위해서는  $z_0^*$  를  $-\lambda/8$  에 일치시켜야 하며 이에 해당하는 목표세기  $I_0^*$  는 간섭무늬 평균 세기에 해당하는  $I_0$  가 되어 식(5)와 같이 표현된다.

$$I_0^* = I_0 = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} \quad (5)$$

측정반사경 표면의 공간적 위치가  $z_0^*$  와 일치하도록 미세구동 스테이지를 제어하면서, 간섭무늬 영상세기가 목표세기  $I_0^*$  를 중심으로  $\lambda/4$  구간의 측정 영역을 벗어나지 않게 할 경우 절대 평면에 대한 측정반사경의 공간적 위치는 물론 기울어

진 방향도 측정 가능하다. 기울어진 양과 방향 그리고, 목표세기로부터의 편차에 대한 정보로 측정 반사경이 일정한 세기  $I_0^*$ 의 간섭영상을 가지도록 계속적으로 미세구동 스테이지를 구동 제어하게 되면, 측정반사경은 기준반사경에 의하여 정의되는 일정한 평면  $z = z_0^*$  내에 놓이게 되며, 이것이  $z = z_0^*$ 로의 영점제어이다. 측정반사경이 절대적으로 정의된 평면을 유지한다는 것은 측정반사경을 포함하는 스테이지 상면도 공간적으로 일정한 상태를 유지한다는 것을 뜻하므로 스테이지 이송 시 발생하는 운동 오차량이 실시간 보상되는 것을 뜻한다. 이 방법에서는 스테이지 제어작용이 1번 실행될 시간 안에 높이 방향의 변화가 측정영역을 벗어 나면 측정 및 제어 관계상 다른 안정점으로 수렴하게 되므로 영상획득 속도가 중요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 영상획득 속도의 제한이 있는 CCD를 대신하여 2차원 포토 다이오드 배열을 사용하였다.

**2.3 간섭무늬 영상해석**

2.2 에서 언급한 바와 같이 측정반사경을 이송 스테이지 위에 장착했을 경우 고정된 기준반사경과의 정렬상태의 오차로 인하여 많은 간섭무늬 패턴이 발생하므로 측정반사경을 조정하여 Fig. 2 와 같이 정렬한 후 스테이지의 운동 오차 측정을 시작한다.

이때, 광 검출기에 포착되는 간섭무늬 영상신호는 화소(pixel) 단위로 샘플링된 값이며 화소 위치  $x, y$ 에서 측정된 간섭무늬 세기  $I(x,y)$ 에 해당하는 측정 반사경의 높이  $z(x,y)$ 는 식(4)로부터 식(6)과 같이 계산될 수 있다.

$$z(x,y) = \frac{1}{2k} \cos^{-1} \left[ \frac{1}{\gamma} \left\{ \frac{I(x,y)}{I_0} \right\} - 1 \right] \tag{6}$$

여기서,  $\gamma$ 와  $I_0$ 는 반사광의 진폭  $a, b$ 의 함수이나, 각 반사광의 진폭  $a, b$ 가 각각 반사경 전면에 걸쳐 동일하다고 가정하면, 간섭무늬의 최대치  $I_{max}$ 와 최소치  $I_{min}$ 으로 표현되며  $I_0$ 는 식(5),  $\gamma$ 는 식(7)과 같이 표현된다.

$$\gamma = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \tag{7}$$

그러므로, 간섭무늬 세기의 최대치와 최소치를 사전에 측정하여 두면  $I(x,y)$ 로부터  $z(x,y)$ 를 구할 수 있다.

간섭무늬 영상해석은 정밀도를 높이기 위하여 간섭무늬의 세기량  $I(x,y)$ 를 스테이지의 공간적 위치량  $z(x,y)$ 으로 변환하고, 최소자승법을 이용하여 통계적 평면의 방정식을 구한다.

식(2)로 표현된 평면의 방정식에 최소자승법을 적용하기 위하여 오차함수를 다음과 같이 정의한다.

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^n \{ (-\phi_y x_i + \phi_x y_i + z_0) - z_i \}^2 \tag{8}$$

좌표 축의 원점을 측정 영역 중심에 잡고 이 오차함수를 구하려는 계수  $\phi_x, \phi_y, z_0$ 로 각각 편미분한 값들이 0이 되도록 정리하면 측정 반사경 표면의 공간적 위치상태는 식(9), 식(10), 식(11)로 표현된다.

$$-\phi_y = \frac{\sum x_i z_i}{\sum x_i^2} \tag{9}$$

$$\phi_x = \frac{\sum y_i z_i}{\sum y_i^2} \tag{10}$$

$$z_0 = \frac{\sum z_i}{n} \tag{11}$$

위에서와 같이 간섭무늬 영상의 세기 분포를 측정하여 목표한 평면에 대하여 측정반사경이 위치한 평면의 방정식을 구하게 되면 계산된  $\phi_x, \phi_y, z_0$ 로부터 스테이지의 공간적 위치상태를 알 수 있으며 이 정보로부터 영점 제어하게 된다.

**3. 확장 트와이만-그린 간섭계를 이용한 5축 운동 오차의 측정**

1축 병진 운동을 하는 이송 스테이지의 경우 이송방향을 제외할 경우 5 자유도의 운동 오차를 가지게 되므로 2장에서 언급한 기본적인 형태의 트와이만-그린 간섭계로는 5 자유도 운동 오차를 모두 측정할 수는 없다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 본 연구에서는 트와이만-그린 간섭계를 확장하여 5 자유도 운동 오차를 모두 측정할 수 있

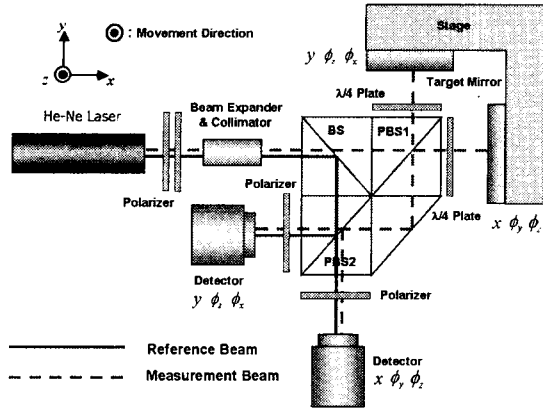


Fig. 3 Extended Twyman-Green Interferometry

는 측정시스템을 제안하였으며 Fig. 3 에 그 구성을 나타내었다.

확장된 트와이만-그린 간섭계의 경우 수직하게 배열된 2 개의 트와이만-그린 간섭계가 하나의 모듈에 결합된 형태로 볼 수 있으며 크게 광원부 (laser source), 광선분할기 (beam splitter) 부, 이송 스테이지에 장착되는 측정반사경 (target mirror) 부, 광검출기로 구성되어 있다.

광원부는 He-Ne 레이저, 두 개의 편광기 (polarizer), 광선확대기 (beam expander) 로 구성되어 있다. 첫번째 편광기는 광량 조절에 사용되고 두번째 편광기는 편광광선분할기에 대해 45°로 편광방향을 조정하여 각각의 반사경으로 가는 광량을 동일하게 하는 역할을 위해 사용되었다. 광선분할기부는 광선분할기 (BS) 와 두 개의 편광광선분할기 (PBS1, PBS2) 그리고 프리즘으로 구성되어 있다. 광선확대기를 통과한 평행광은 광선분할기 (BS) 에서 50%는 반사되고 (기준광) 50%는 통과된다 (측정광). 반사된 기준광은 편광광선분할기 2 (PBS2) 에서 수직편광 성분과 수평편광 성분으로 분리되어 각각 광검출기로 입사된다. 이때 Fig. 1 의 기준반사경의 역할은 광선분할기의 경사면이 하게 된다. 광선 분할기를 통과한 측정광은 편광광선분할기 1 (PBS1) 에서 수직편광 성분과 수평편광 성분으로 분리되어 각각 측정반사경에서 반사된다. 측정반사경에서 반사된 2 개의 측정광은 사분의 일 위상판 ( $\lambda/4$  plate) 을 두 번 거치면서 편광상태가 90° 회전하여 프리즘으로 향하며 내부 전반사를 일으킨 다음 편광광선분할기 2 에서 다시 수직편광 성분과 수평편광 성분으

로 분리되어 광 검출기로 입사하게 된다. 이때 각각의 광 검출기로 입사되는 기준광과 측정광은 편광상태가 다르므로 편광기를 통과하여 편광 방향을 동일하게 한 다음 광 검출기에 입사하여 간섭 무늬를 형성하게 된다. 각각의 광 검출기의 간섭 무늬 해석을 통하여 각각 3 자유도의 운동오차를 측정할 수 있지만  $\phi_z$  성분은 중복되는 정보로서 총 5 자유도의 값을 얻게 된다.

일반적인 헤테로다인 레이저 간섭계의 경우 5 자유도의 운동 오차를 측정하기 위해서는 5 개의 측정 모듈이 필요하나 본 연구에서 제안된 확장된 트와이만-그린 간섭계는 하나의 모듈에서 5 자유도의 운동 오차가 동시에 측정되므로 구성 부품의 수가 작고 비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있다.

#### 4. 실험장치 구성 및 결과

##### 4.1 시스템 구성

확장된 트와이만-그린 간섭계의 성능을 검증하기 위하여 본 실험실에서 보유하고 있는 정밀 스테이지를 이용하였으며 Fig. 4(a)에 정밀 스테이지에 확장된 트와이만-그린 간섭계를 설치한 모습을 보였다. 본 연구에서는 정밀 스테이지 중에서 헤테로다인 레이저 간섭계 (트와이만-그린 간섭계의 측정값과 비교)와 미세구동 스테이지를 이용하였다. 미세구동 스테이지는 3 개의 압전구동기 (piezoelectric actuator) 와 탄성굽힘체 (elastic flexure) 로 구성되어 있으며 그 구조는 Fig. 4(c)에 나타나 있다. 헤테로다인 레이저 간섭계는 Zygo 사 제품으로 3 개의 직선변위 측정모듈을 사용하며 직선변위의 경우 1.25 nm, 각변위의 경우 0.0057 arcsec 의 분해능을 갖고 있다.

실험 장치의 구성은 Fig. 3 에서 설명한 바와 같으나 사용된 미세구동 스테이지에는 3 개의 압전구동기로 3 자유도만 구동 가능하므로 Fig. 4(b) 와 같이 한쪽 방향의 측정광을 반사경을 사용하여 45° 돌려서 측정반사경의 동일 면을 바라보도록 구성하였다. 이 경우 미세구동 스테이지를 구동할 때 각운동 없이 병진운동만 하거나 병진운동 없이 각운동만 하는 경우에는 두 개의 간섭무늬를 해석하여 얻어지는 변위량이 동일하여야 하므로 이를 기준으로 본 측정 시스템의 성능을 간접적으로 평가할 수 있다.

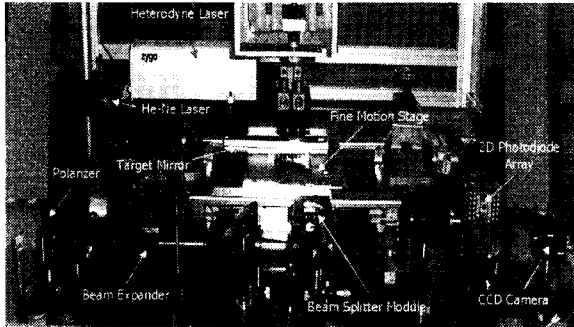


Fig. 4(a) Picture of experimental setup

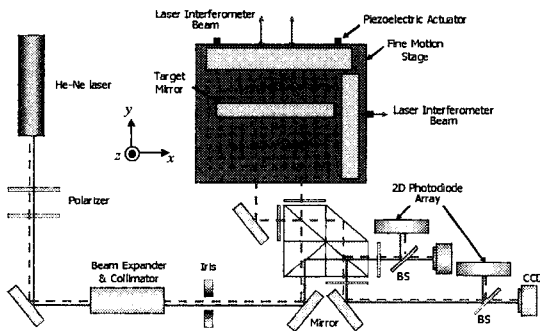


Fig. 4(b) Experimental configuration

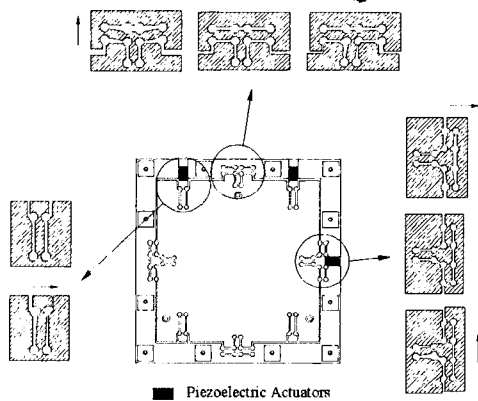


Fig. 4(c) Operating principles of fine motion stage

Fig. 4 Experimental setup

영상해석에는 2 차원 포토 다이오드 배열을 사용하였으며 초기 영점조정 시 간섭무늬를 확인하기 위해 CCD 카메라를 추가로 설치하였다. 본 연구에서 사용한 포토 다이오드 배열은 Hamamatsu 사의 S7585 모델로 유효면적  $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$ 의 화소

가  $5 \times 5$  로 배열되어있는 형태이다. 25 개의 화소에서 나오는 신호는 증폭기를 거쳐 전압 신호로 변환되고 아날로그 멀티플렉서(Multiplexer)를 이용하여 신호를 순차적으로 받아들여 AD 변환 후 DSP 제어기(TMS320C40)에서 처리하게 된다. 이 때 DSP 제어기에서 신호처리 및 제어수행 시간까지 포함한 control loop update rate 는 200 Hz 로 CCD 를 사용한 경우 보다 7 배 이상 증가되었으며 회로를 보완할 경우 더 향상될 것으로 기대된다.

#### 4.2 실험 결과

실험은 크게 잡음 수준(noise level) 측정, 헤테로다인 레이저 인터페로미터와의 측정값 비교 그리고 운동 오차의 실시간 측정 및 보상 등 3 부분으로 나누어서 진행하였다.

잡음 수준 측정결과를 Fig. 5 에 나타내었다 이 실험은 미세구동 스테이지를 고정시킨 상태에서 확장된 트와이만-그린 간섭계를 이용하여 직선 변위와 각변위를 측정한 것으로 직선 변위의 경우 7.8 nm (P-V), 1.8 nm (S.D.), 각 변위의 경우 0.11 arcsec

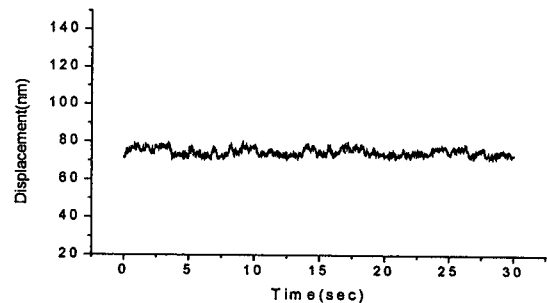


Fig. 5(a) Noise level (linear displacement)

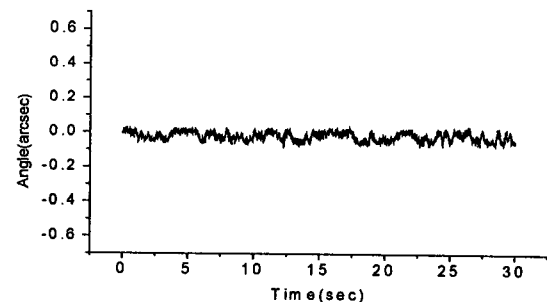


Fig. 5(b) Noise level (angular displacement)

Fig. 5 Noise level

(P-V), 0.02 arcsec (S.D.) 정도의 잡음 수준을 보여 주고 있다. 현재 실험장치의 공간적 배치 상 dead path 가 400 mm 정도로 매우 길기 때문에 공기의 난류(turbulent flow)에 따른 공기 굴절을 변동이 잡음의 가장 큰 원인으로 판단되며 이는 Fig. 3 과 같은 구성 시 dead path 를 수 mm 로 줄일 수 있으므로 큰 폭으로 감소시킬 수 있다. 이외에도 바닥 진동, 전기적 잡음, He-Ne 레이저의 안정성 등이 잡음에 영향을 미치게 된다.

Fig. 6 은 헤테로다인 레이저 간섭계를 이용하여 미세구동 스테이지를 피드백제어(feedback control) 하면서 직선변위(y 방향, Fig. 6(a)) 와 각변위( $\phi$  방향, Fig. 6(b))를 선형적으로 증가시켰을 때 확장된 트와이만-그린 간섭계에서 측정된 변위량과 비교한 결과이다. 두 간섭계의 측정값의 차이는 직선 변위의 경우 9.6 nm (P-V), 2.5 nm (S.D.) 각변위의 경우 0.15 arcsec (P-V), 0.03 arcsec (S.D.) 정도로 잡음 수준과 비슷한 정도의 결과를 얻었다. 지면 관계상 나타내지는 않았지만 나머지 하나의 포토 다이

오드 배열에서 얻어진 결과는 두 측정값의 차이가 직선변위의 경우 10.2 nm (P-V), 2.5 nm (S.D.), 각변위의 경우 0.16 arcsec (P-V), 0.03 arcsec (S.D.) 정도로 유사한 결과를 얻었으며 이로써 본 간섭계가 5 자유도의 운동 오차를 효과적으로 측정할 수 있음을 간접적으로 확인하였다.

Fig. 7 은 미세구동 스테이지의 x 축을 4  $\mu$ m 구간만큼 선형적으로 증가시키면서 확장된 트와이만-그린 간섭계의 측정값을 이용하여 운동 오차를 실시간으로 보상했을 때(Fig. 7(b))와 하지 않았을 때(Fig. 7(a))의 결과를 나타내며 역시 헤테로다인 레이저 간섭계의 측정값과 비교하였다. 실시간 보상을 수행하지 않았을 경우 직선운동 오차가 약 40 nm (P-V), 13.3 nm (S.D.)였으며 실시간 보상을 수행한 후에는 10.3 nm (P-V), 1.8 nm (S.D.)로 보상이 이루어졌다. 지면 관계상 나타내지 않았지만 각운동 오차의 경우는 실시간 보상 전 0.48 arcsec (P-V) 0.09 arcsec (S.D.)에서 실시간 보상 후 0.15 arcsec(P-V), 0.03 arcsec(S.D.)로 줄어들었다.

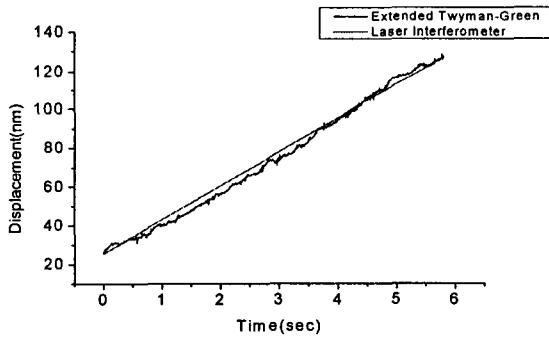


Fig. 6(a) Linear displacement

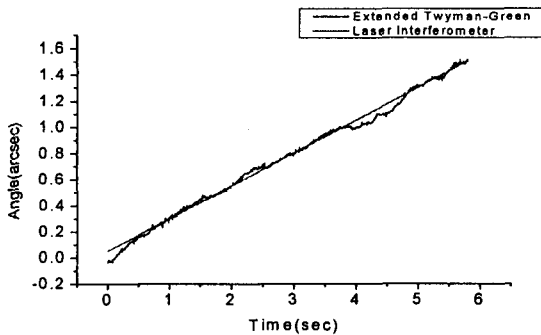


Fig. 6(b) Angular displacement

Fig. 6 Comparison with heterodyne laser interferometer

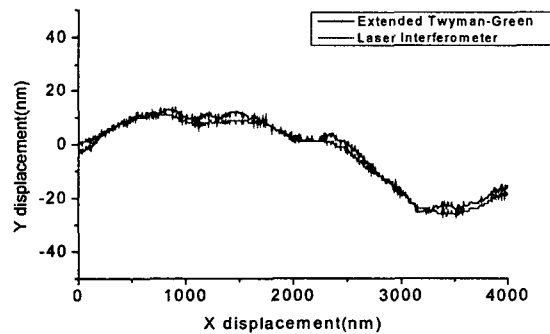


Fig. 7(a) Before real time compensation

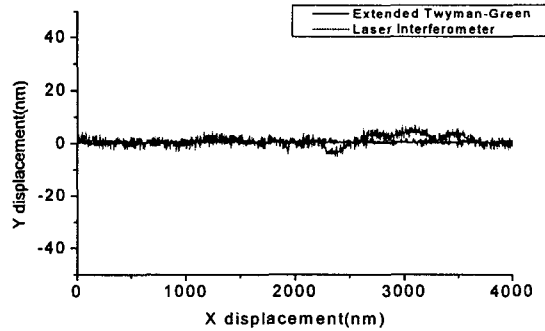


Fig. 7(b) After real time compensation

Fig. 7 Real time compensation

## 5. 결론

본 연구에서는 일반적으로 광학부품 제조분야 등에서 가공된 광학 부품의 형상 측정에 사용되는 트와이만-그린 간섭계의 원리를 이용하여 스테이지 이송 중에 발생하는 5 자유도의 운동 오차를 측정하기 위한 측정장치로 확장된 트와이만-그린 간섭계를 제안하였고 실현하였으며 2 차원 포토다이오드 배열을 사용해 검출 속도를 향상시킴으로써 실시간 보상이 가능하도록 하였다.

실험 결과 직선변위의 경우 7.8 nm (P-V), 1.8 nm (S.D.) 각변위의 경우 0.11 arcsec (P-V), 0.02 arcsec (S.D.) 정도의 분해능을 보였으며 헤테로다인 레이저 간섭계와의 비교 측정 결과 제안된 간섭계가 스테이지의 5 자유도 운동 오차를 효과적으로 측정할 수 있음을 보였다. 또한 이를 통해 실시간 보상을 수행한 결과 직선변위 10.3 nm (P-V), 1.8 nm (S.D.), 각변위 0.15 arcsec (P-V), 0.03 arcsec (S.D.)로 오차 보상이 이루어졌다.

본 시스템의 성능을 더 향상시키기 위해서는 향후 위상변조(phase modulation) 기법을<sup>11</sup> 사용하여 nm 이하의 분해능을 얻을 수 있도록 추가적인 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Abbé, E., "Messapparate für Physiker," Zeits. Für Instrumenten-Kunde, Vol. 10, pp. 446-448, 1890.
2. Bryan, J. B., "The Abbé Principle Revisited: An Updated Interpretation," Precision Engineering, Vol. 1, No. 3, pp. 129-132, 1979.
3. Vermeulen, M. M. P. A., et al., "Design of a High-Precision 3D-Coordinate Measuring Machine," Annals of the CIRP, Vol. 47, No. 1, pp. 447-450, 1998.
4. Becker, K., "M400 - A Coordinate Measuring Machine with 10 nm Resolution," SPIE: In-Process Optical Metrology for Precision Machining, Vol. 802, pp. 209-216, 1987.
5. Kim, S. W., "New Design of Precision CMM Based upon Volumetric Phase-Measuring Interferometry," Annals of the CIRP, Vol. 51, No. 1, pp. 357-360, 2001.
6. Huang, P. S. and Ni, J., "On-line Error Compensation of Coordinate Measuring Machines," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 35, No. 5, pp. 725-738, 1995.
7. Fan, Kuang-Chao, Chen, Mu-Jung, "A 6-Degree-of-Freedom Measurement System for the Accuracy of X-Y Stages," Precision Engineering, Vol. 24, pp. 15-23, 2000.
8. Mahito Negishi, et al., "A High-Precision Coordinate Measuring System for Super-Smooth Polishing," Nanotechnology, Vol. 6, pp. 139-147, 1995
9. Ro, S. K., Kyung, J. H., Park, J. K., "Runout Control of a Magnetically Suspended High Speed Spindle Using Adaptive Feedforward Method," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 12, pp. 57-63, 2002
10. Lee, H. S., "Real-Time Measurement and Correction of Movement Errors of a Machine Axis by Twyman-Green Interferometry," KAIST, Doctoral Dissertation, 1994.
11. Bergamin, A., et al., "A Displacement and Angle Interferometer with Subatomic Resolution," Review of Scientific Instruments, Vol. 64, No. 11, pp. 3076-3081, 1993