

# 초정밀 이송테이블의 5 자유도 운동오차 측정

오윤진\*, 박천홍#, 황주호\*, 이득우\*\*

## Measurement of Five DOF Motion Errors in the Ultra Precision Feed Tables

Yoon Jin Oh\*, Chun Hong Park#, Joo Ho Hwang\* and Deug Woo Lee\*\*

### ABSTRACT

Measurement of five DOF motion errors in a ultra precision feed table was attempted in this study. Yaw and pitch error were measured by using a laser interferometer and roll error was measured by using the reversal method. Linear motion errors in the vertical and horizontal directions were measured by using the sequential two point method. In this case, influence of angular motion errors was compensated by using the previously measured ones by the laser interferometer and the reversal method. The capacitive type sensors and an optical straight edge were used in the reversal method and the sequential two point method. Influence of thermal deformation on sensor jig was investigated and minimized by the periodic measurement according to the variation of room temperature. Deviation of gain between sensors was also compensated using the step response data. 5 DOF motion errors of a hydrostatic table driven by the linear motor werer tested using the measurement method. In the horizontal direction, measuring accuracies for the linear and angular motion were within  $\pm 0.02 \mu\text{m}$  and  $\pm 0.04 \text{ arcsec}$ , respectively. In the vertical direction, they were within  $\pm 0.02 \mu\text{m}$  and  $\pm 0.05 \text{ arcsec}$ . From these results, it was found that the introduced measurement method was very effective to measure 5 DOF motion errors of the ultra precision feed tables.

**Key Words** : Five DOF motion error(5 자유도 운동오차), Sequential two point method(축차 2 점법), Reversal method(반전법), Capacitive type sensor(용량형 센서), Straight edge(측정기준면), Hydrostatic table(유정압테이블)

### 1. 서론

초정밀 가공기에 있어 이송테이블의 각 축방향 운동오차는 가공 대상물의 형상정밀도에 지배적인 영향을 미치므로 그에 상응하는 높은 정밀도가 요구되며, 이에 따라, 가공기 제작에 있어 각 이송테이블에 대한 5 자유도 운동오차의 측정 및

수정작업은 불가피한 공정이 되고 있다.

현재, 정밀 이송테이블의 운동오차 측정에는 레이저 간섭계나 오토콜리미터가 일반적으로 이용되고 있으나, 서브미크론대 이하의 운동오차가 측정 대상이 되면, 각각의 알고리즘상의 문제점이 측정한계로 작용한다. 레이저 간섭계의 경우, 각운동오차는 측정분해능의 2~3 배 수준의 반복정밀도

\* 접수일: 2005 년 4 월 1 일; 게재승인일 2005 년 8 월 9 일

\* 한국기계연구원 지능기계센터

# 교신저자: 한국기계연구원 지능기계센터

Email: pch657@kimm.re.kr, Tel: (042) 868-7117

\*\* 부산대학교 나노공학부

를 기대할 수 있다. 그러나, 직선운동오차에 대해서는 반사경 자체의 기하학적 오차의 영향을 무시하더라도, 원리적으로, 측정되는 광로의 차와 그에 의해 증폭되어 계산되는 운동오차 간의 확대(증폭)비가 크므로, 측정분해능의 수십 배에 해당하는 서브미크론 대의 반복오차를 수반하게 된다.<sup>1</sup> 오토콜리미터의 경우에는 각운동오차 측정치로부터 직선운동오차를 계산하므로 직선운동오차 측정치가 치구 길이의 영향을 크게 받게 되는 단점이 있다.<sup>2</sup> 또한, 두 센서 모두 롤오차의 측정이 불가능하다는 단점도 있다.

직선운동오차를 보다 정밀하게 측정할 수 있는 방법으로, 복수 개의 변위센서를 이용하는 축차 2 점법<sup>3, 4, 5</sup> 및 3 점법<sup>6, 7, 8</sup> 등의 연구가 꾸준히 진행되어 오고 있으나, 축차 2 점법의 경우에는 각운동오차의 영향이 고려되지 않는 문제점이, 3 점법의 경우에는 변위센서간의 영점조정이 필요하며 전체적으로 센서 간격에 따라 측정가능한 공간주파수에 제약이 있다는 단점이 있다.

이상의 장, 단점을 고려할 때, 한 종류의 센서로 서브미크론대의 5 자유도 운동오차를 모두 측정해내는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 각각의 운동오차 성분과 측정방향에 따라 상대적으로 높은 측정정밀도를 얻을 수 있다고 판단되는 측정방식들을 혼합하여 초정밀 이송테이블의 5 자유도 운동오차 측정시스템을 구축하고자 하였다.

이를 위해, 먼저, 각운동오차 가운데 요 및 피치오차는 상대적으로 안정적인 측정정밀도를 갖는 레이저간섭계를 이용하여 측정하며, 롤오차의 경우에는 정전용량형 센서와 참조면을 이용한 반전법(Reversal Method, 이하 RVM)<sup>9</sup>을 적용하여 측정하였다. 직선운동오차의 측정에는 축차 2 점법(Sequential Two Point Method, 이하 STPM)을 적용하였으며, 이 때 측정오차로 작용할 수 있는 각운동오차들의 영향은 요 또는 피치오차의 경우 레이저간섭계로, 롤오차의 경우 반전법으로 측정값을 이용하여 보정하였다.

구축된 측정시스템을 초정밀 유정압테이블의 5 자유도 운동오차 평가에 적용함으로써 유용성을 검증하였다. 이 경우, 본 논문에서 대상으로하는 정밀도를 고려할 때, 측정값을 절대적으로 비교할 수 있는 표준시편을 설정하는 것은 어려우므로, 부분적으로 측정이 가능한 다른 방법들에 의한 측정값과의 비교를 통해 유용성을 검증하였다. 먼저,

수평방향(직선운동오차 및 요오차)의 경우에는 반전법을 이용하여 측정된 직선운동오차 및 참조면 프로파일과 비교하였다. 한편, 수직방향(직선운동오차, 피치 및 롤)의 경우에는 3 개의 운동성분을 측정해낼 수 있는 다른 측정수단이 없다. 따라서, 간접적인 방법으로, 반전법을 이용하여 롤오차를 측정할 때 얻어지는 직선운동오차와 참조면의 합성데이터로부터 축차 2 점법에 의해 얻어진 직선운동오차를 빼주어 얻은 참조면 프로파일을, 축차 2 점법에 의해 직접 얻은 참조면의 프로파일과 비교하였다. 또한 측정과정에서 얻은 반복오차를 측정정밀도로 나타내었다.

## 2. 운동오차의 측정방법

### 2.1 축차 2 점법

축차 2 점법을 이용한 수평방향 및 수직방향의

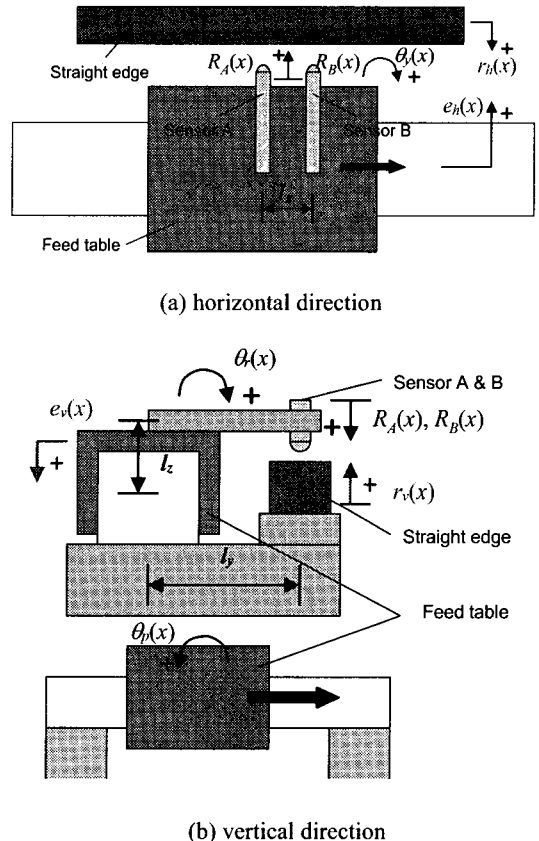


Fig. 1 Notations for the sequential two point method

오차 측정에 있어서 변수 및 오차방향의 정의를 Fig. 1 에 나타내었다.  $e_h(x)$  및  $e_v(x)$ 는 이송테이블의 수평 및 수직방향 직선운동오차  $r_h(x)$  및  $r_v(x)$ 는 참조면의 수평 및 수직방향에서의 형상오차를 나타내며,  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 는 각각 요오차 피치오차 및 롤오차를 나타낸다. 또한  $l_x$  과  $l_y$  는 각각 수평방향 및 수직방향에 있어서 회전중심으로부터 측정센서까지의 거리를 나타낸다.

테이블상에 센서 A, B 를 설치하고 테이블을 센서 간격  $l_x$  만큼 이동시키는 경우,  $x_i$  및  $x_{i+1}$  위치에서의 각운동오차의 영향을 고려한 각 센서의 측정값  $R_A(x_i), R_B(x_i)$  및  $R_A(x_{i+1}), R_B(x_{i+1})$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 단, 여기서  $N$  은 측정데이터수를 나타낸다. 또한, 수평방향의 경우,  $e(x)=e_h(x), r(x)=r_h(x), l=l_x, \theta(x)=\theta_x(x)$ 이며, 수직방향의 경우에는  $e(x)=e_v(x), r(x)=r_v(x), l=l_y, \theta(x)=\theta_y(x)$ 를 나타낸다.

$$\begin{aligned} R_A(x_i) &= r(x_i) + e(x_i) + l\theta_r(x_i) \\ R_B(x_i) &= r(x_{i+1}) + e(x_i) - l_x\theta(x_i) + l\theta_r(x_i) \\ R_A(x_{i+1}) &= r(x_{i+1}) + e(x_{i+1}) + l\theta_r(x_{i+1}) \\ R_B(x_{i+1}) &= r(x_{i+2}) + e(x_{i+1}) - l_x\theta(x_{i+1}) + l\theta_r(x_{i+1}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$x_i = i \cdot l_x, \quad r(x_0) = e(x_0) = 0$$

$$i = 0, \dots, N-1$$

식 (1)로부터  $x_{i+1}$  에서의 직선운동오차  $e(x_{i+1})$  및 참조면 오차  $r(x_{i+1})$ 을 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} r(x_{i+1}) &= r(x_i) + R_B(x_i) - R_A(x_i) + l_x\theta(x_i) \\ e(x_{i+1}) &= e(x_i) + R_A(x_{i+1}) - R_B(x_i) - l_x\theta(x_{i+1}) + \phi(x_i) \\ \phi(x_i) &= l\{\theta_r(x_i) - \theta_r(x_{i+1})\} \end{aligned} \quad (2)$$

한편, 연속 측정으로부터 센서간격  $l_x$  당  $M$  개의 데이터를 얻는 경우에는  $j=0, \dots, M-1$  개의 데이터군에 대해 각각 식 (2)를 적용하여 직선운동오차 및 참조면 오차를 구한 후,  $j=1, \dots, M-1$  의 프로파일이 각각  $j=0$  의 경우의 프로파일과 최소의 오차를 작도록 초기값을 설정함으로써 연속적인 프로파일을 구성할 수 있다.<sup>4</sup>

## 2.2 반전법

초정밀 이송테이블은 반복정밀도가 우수하므로 반전법을 적용해도 정밀도 높게 운동오차를 측정할 수 있다. 그러나 원리적으로, 수직방향의 경

우에는 직선운동오차와 참조면 오차를 분리해낼 수 없다는 단점이 있어 5 자유도 측정에 본격적으로 사용하기에는 적합하지 않다. 따라서, 본 논문에서는 수평방향 측정에 있어서 참조면 측정값의 검증 및 수직방향 측정에 있어서의 롤오차 측정을 위해 반전법을 적용하였다. 반전법의 측정 원리를 수평방향 측정을 기준으로 Fig. 2 에 나타내었으며, 반전 전, 후의 센서의 측정값  $R_A(x), R_B(x)$ 로부터 롤오차의 영향을 고려한 직선운동오차 및 참조면의 오차를 식 (3)과 같이 구할 수 있다. 한편, 반전법을 수직방향에 대해 적용하는 경우에는 참조면의 오차와 직선운동오차를 분리하여 계산하는 것은 불가능하나 롤오차는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$r_h(x) = \frac{R_A(x) + R'_A(x)}{2} \quad (3)$$

$$e_h(x) = \frac{R_A(x) - R'_A(x)}{2} - l_x \sin \theta_r(x)$$

$$r_v(x) + e_v(x) = \frac{R_A(x) + R'_A(x)}{2} \quad (4)$$

$$\theta_r(x) = \frac{1}{l_y} \frac{R_A(x) - R'_A(x)}{2}$$

## 3. 실험장치 및 예비실험

### 3.1 실험장치의 구성

Fig. 3 에 실험에 사용된 유정압테이블의 구조, 5 자유도 운동오차의 정의 및 축차 2 점법을 이용한 측정장치를 나타내었다. 유정압테이블은 수직, 수평 모두 양면지지형으로 되어있으며, 길이 방향으로 3 개의 패드가 대향되어 배치되어 있다. 테이블

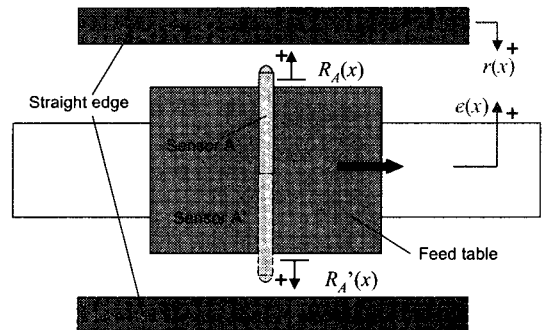


Fig. 2 Measuring principle of the reversal method

블은 무철심형 리니어모터(LEA-S-4, Anorad)와 제어기(PC/DSP, MEI)를 이용하여 PC로 구동되며, 레이저스케일(BS75A, Sony)은 레일 측면에 설치되어 있다.

유정압안내면에 공급되는 윤활유는 윤활탱크와 연결되어 있는 냉각장치(AKZ206, Daikin)를 이용하여  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 온도로 제어된다.

축차 2 점법 및 반전법에 있어서는 정전용량형 센서(Micro sense3401, ADE, 1nm 분해능)를 사용하였다. 참조면(Nikon, 평탄도  $0.05 \mu\text{m} / 340 \text{ mm}$ )은 제로돌(Zerodur) 재질이며 피측정면은 알루미늄 코팅이 되어 있다. 또한, 센서 고정용 치구는 탄성변형 및 열변형에 따른 오차를 가능한 감소시키기 위해 세라믹재를 이용하여 제작하였다. 용량형 센서간의 설치간격  $l_x=17 \text{ mm}$  이고, 테이블중심으로부터 참조면까지의 수평방향 거리  $l_y=210 \text{ mm}$  이며, 수평방향 회전중심과 측정센서간의 높이 차  $l_z=126.5 \text{ mm}$  로 설정하였다. 축차 2 점법의 적용을 위해 초기치로 사용되는 각운동오차의 측정에는 레이저간섭계(ML10, Renishaw)를 사용하였으며 모든 측정치는 250 mm 이송 구간에 대해 2 mm/sec의 이송속도로 구동하면서 5 회 반복 측정하고 표준편차를 이용하여 반복오차( $\pm 2\sigma$ )를 같이 나타내었다.

한편, 정전용량형센서를 이용한 측정에 있어서는 운동오차성분의 측정이 주목적이므로 아날로그 필터(MS-521, NF)를 이용하여 10 Hz 이상의 주파수 성분은 제거하여 나타내었다. 실험은  $20 \pm 0.6^\circ\text{C}$ , 상대습도  $50 \pm 3\%$ 로 유지되는 항온항습실에서 수행하였다.

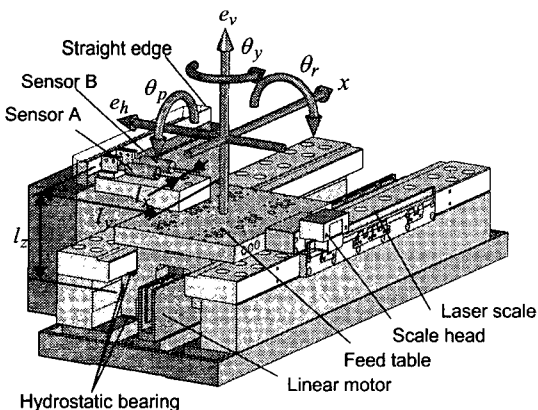


Fig. 3 Experimental setup and definition of 5DOF errors

### 3.2 환경오차의 영향

대기온도, 유정압용 윤활유 등의 온도변화가 측정값에 미치는 영향을 추정하기위해 대기온도, 윤활유온도 및 2 개의 센서용 치구의 온도변화를, 열전대를 이용하여 2 시간동안 측정하여 Fig. 4 에 나타내었다.

$\pm 0.6^\circ\text{C}$ 의 대기온도변화 및  $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 의 윤활유 온도변화에 대해 센서치구의 온도변화는  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  이내를 나타내고 있으며, 공급되는 윤활유온도보다는 대기온도의 변화 주기에 크게 영향을 받고 있음을 보이고 있다.

한편, 대기온도변화에 따른 정전용량형센서 자체의 드리프트량은  $200 \text{ ppm}/^\circ\text{C}(=200 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C})$  이므로 이를 센서길이에 따른 변위로 환산하면  $0.01 \mu\text{m}$  이내가 된다. 그러나, 센서치구의 온도변화( $\pm 0.1^\circ\text{C}$ )에 따른 열변형 오차는 치구의 길이에 대해 환산하면 최대 약  $0.1 \mu\text{m}$  가 되므로 측정정밀도에 크게 영향을 미칠 수 있다. 이러한 측정환경의 영향을 고려하여, 이후 실험에 있어서는 항온실의 온도주기(약 12 분)를 참고하여 각 주기의 최고온도에 도달했을 때 1 회의 측정(측정시간 2 분)을 수행함으로써 환경에 의한 측정오차를 최소화하였다.

### 3.3 정전 용량형 센서의 개인특성

축차 2 점법의 적용에 앞서, 사용되는 2 개의 정전용량형 센서 간의 개인 편차에 의한 오차를 최소화하기위해 두 센서간의 개인 편차를 측정하고 보정할 필요가 있다. 이를 위해, 두 센서를 테이블 선단 중앙부에 설치하고 참조면을 측정 대상으로 배치한 후,  $0.5 \mu\text{m}/\text{step}$  및  $1 \mu\text{m}/\text{step}$ 으로 테이블(위치결정오차  $0.2 \mu\text{m} / 250 \text{ mm}$ )을 미소이송시켰을 때의 응답변위로부터 두 센서간의 편차를 측

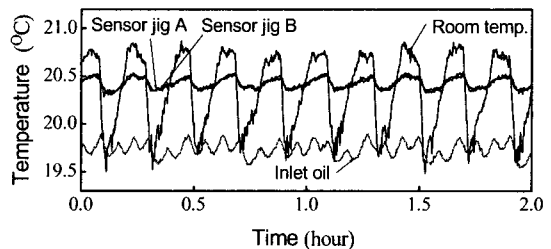


Fig. 4 Temperature variation of room temperature, sensor jigs and inlet oil

정하였다. Fig. 5 는 측정결과를 나타낸 것으로 두 센서간의 개인 편차의 비  $R_B/R_A$  는 이송단위에 관계없이 1.03 으로 나타나고 있다. 또한, 두 센서의 위치를 서로 교환하여 측정한 결과도 동일하게 나타났으며 그림은 생략하였다. 이상의 결과로부터, 이후 정전용량형 센서를 이용한 측정결과는 앞서의 개인 편차의 비를 적용하여 보정하였다.

### 4.5 자유도 운동오차의 측정

#### 4.1 레이저간섭계에 의한 직선운동오차

축차 2 점법에 의한 직선운동오차 측정방법의 효용성을 비교, 분석하기 위해 먼저, 레이저간섭계를 이용하여 수평방향 및 수직방향 직선운동오차를 5 회 반복 측정한 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 단, 이 경우, 10 Hz 의 로우패스필터로는 노이즈성분이 너무 커서 운동오차 프로파일의 구별이 용이하지 않았으므로 0.2 Hz 이내의 성분만을 필터링하여 나타내었다. 실험결과, 수평방향의 경우, 0.18  $\mu\text{m}$  의 운동오차 및  $\pm 0.10 \mu\text{m}$  의 반복오차를, 수직방향의 경우 0.26  $\mu\text{m}$  의 운동오차 및  $\pm 0.18 \mu\text{m}$  의 반복오차를 나타내었다. 양 방향 모두에 있어 반복오차의 범위가 직선운동오차 자체 보다 크게 나타나고 있어 상대적으로 정확한 프로파일을 얻을 수 없음을 알 수 있다.

#### 4.2 수평방향 운동오차 측정

Fig. 1 과 같이 축차 2 점법을 적용하기 위해, 먼

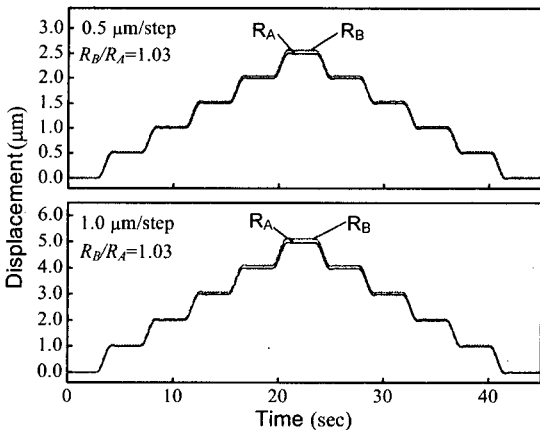


Fig. 5 Gain of capacitive type sensor A and B

저 레이저간섭계를 이용하여 측정한 수평방향 각운동오차(요오차)를 Fig. 7(a)에 나타내었다.  $\pm 0.04$  arcsec 의 반복오차내에서 각운동오차는 1.96 arcsec 를 나타내었다. 한편, Fig. 2 의 측정원리 및 식 (4) 의 반전법을 이용하여 측정한 롤오차를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 반복오차  $\pm 0.02$  arcsec 이내에서 측정이 가능하였으며 측정된 롤오차는 0.14 arcsec 를 나타내었다. 이 각운동오차들을 식(2)와 같이 보정한 후의 축차 2 점법에 의한 직선운동오차 및 참조면 오차의 측정결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 직선운동오차는 0.16  $\mu\text{m}$  를 나타내었으며, 5 회 측정값으로부터의 반복오차는  $\pm 0.02 \mu\text{m}$  를 나타내었다. 한편, 참조면의 오차는 0.02  $\mu\text{m}$  로 측정되었으며 반복오

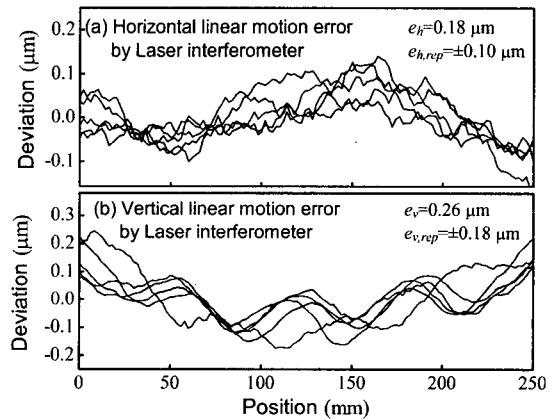


Fig. 6 Horizontal and vertical linear motion error measured using the laser interferometer

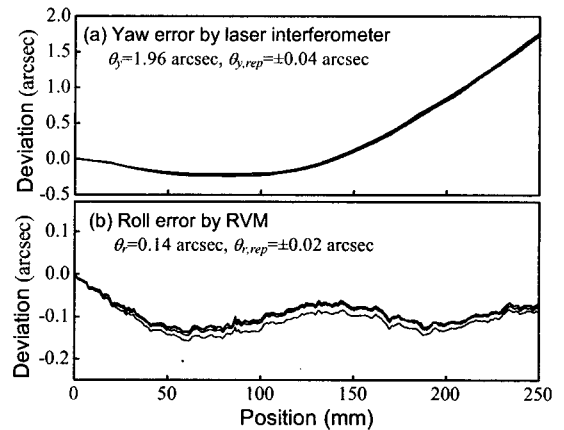


Fig. 7 Measured yaw and roll error

차는  $\pm 0.01 \mu\text{m}$  를 나타내었다.

이 측정결과를 Fig. 6(a)의 측정결과와 비교하면, 전체적인 큰 파형은 유사하지만, 정량적인 값이나 구체적인 파형에서는 큰 차이를 나타내고 있다. 이것은 레이저간섭계에 경우, 측정값의 반복오차가 실제 운동오차와 거의 같은 레벨이므로 실제 파형을 충분히 나타내지 못하기 때문으로 추정된다.

축차 2 점법에 의한 측정결과와 타당성을 검증하기 위해 반전법을 이용하여 측정한 직선운동오차와 참조면의 오차를 Fig. 9 에 나타내었다. 직선운동오차와 그의 반복오차는 각각  $0.18 \mu\text{m}$ ,  $\pm 0.01 \mu\text{m}$  로, 반복오차 이내에서 축차 2 점법에 의한 측정결

과와 잘 일치하고 있으며 파형의 형태도 잘 일치함을 보이고 있다. 참조면 오차의 경우, 오차값은  $0.04 \mu\text{m}$  로, 축차 2 점법에 의해 다소 크게 나타나고 있지만 반복오차의 범위를 고려하면 양 결과가 비교적 잘 일치한다고 판단할 수 있다.

이상의 결과로부터 레이저간섭계에 의한 각종운동오차 측정값과 축차 2 점법을 이용한 직선운동오차 측정 방법이 최대 반복오차  $\pm 0.02 \mu\text{m}$  및  $\pm 0.04 \text{ arcsec}$  의 측정정밀도 범위에서 유효함을 확인하였다.

### 4.3 수직방향 운동오차의 측정

수직방향 운동오차에 있어서도 수평방향 운동

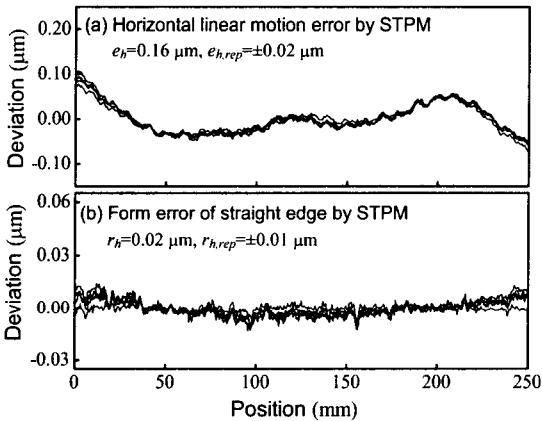


Fig. 8 Horizontal linear motion error and form error of straight edge measured using the STPM

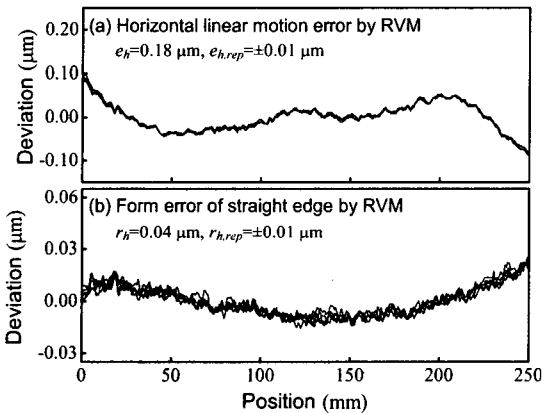


Fig. 9 Linear motion error and form error of straight edge measured using the RVM

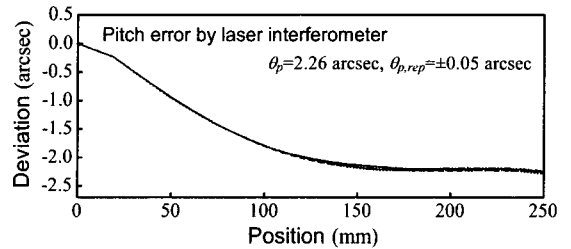


Fig. 10 Measured pitch error

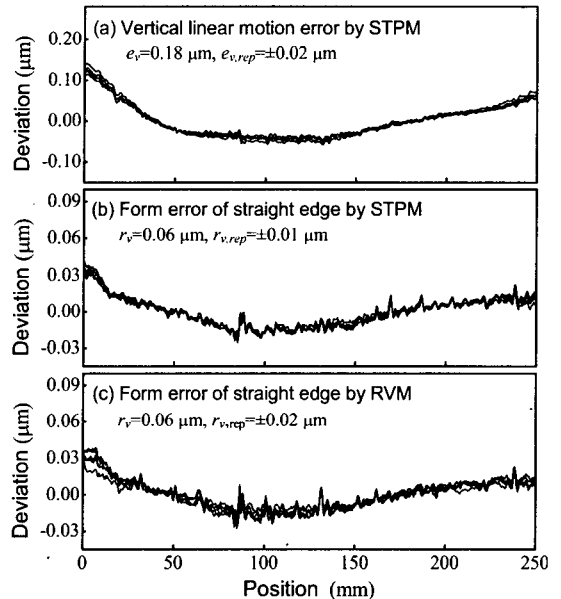


Fig. 11 Measured vertical linear motion error and form error of straight edge

오차의 검증 결과를 토대로 축차 2 점법을 이용하여 직선운동오차 및 참조면 오차를 측정하였다. 이를 위해 먼저 레이저간섭계를 이용하여 측정된 피치오차를 Fig. 10(b)에, 직선운동오차 및 참조면 오차의 측정결과를 Fig. 11(a), (b)에 각각 나타내었다. 피치오차는  $\pm 0.05$  arcsec 의 반복오차 내에서 2.26 arcsec 로 측정되었으며, 이를 이용하여 측정된 수직방향의 직선운동오차 및 그 때의 반복오차는  $0.18 \mu\text{m}$  및  $\pm 0.02 \mu\text{m}$  를 나타내었다. 한편, 같이 측정된 참조면의 형상오차 및 반복오차는 각각  $0.06 \mu\text{m}$  및  $\pm 0.01 \mu\text{m}$  를 나타내었다. 참조면의 오차가 수평방향보다 크게 나타나는 것은 참조면의 측정 대상면이 수평방향 기준으로 제작되어 있어, 수직 방향에 적용하는 경우 참조면에 처짐이 발생함에 따른 영향이다. 수직방향 운동오차 측정값을 간접적으로 검증하기 위해, 반전법으로 롤오차를 측정했을 때에 계산된 참조면 오차와 직선운동오차의 합(식(4)의  $r_v(x) + e_v(x)$ )에서 축차 2 점법에 의해 측정된 직선운동오차를 빼내어 참조면 오차를 계산한 결과를 Fig. 11(c)에 나타내었다. 축차 2 점법에 의해 측정된 결과인 Fig. 11(b)와 과형이 잘 일치하며 형상오차의 측정값 및 반복오차도  $0.06 \mu\text{m}$  및  $\pm 0.02 \mu\text{m}$  로 매우 잘 일치함을 보이고 있어 수직방향 운동오차 측정에 있어서도 축차 2 점법의 유용성을 확인할 수 있다.

이상의 측정결과로부터, 본 연구에서 사용된 5 자유도 측정방법을 적용하는 경우 직선운동에 대해 최대  $\pm 0.02 \mu\text{m}$  의 측정정밀도, 각운동에 대해 최대  $\pm 0.05$  arcsec 의 측정정밀도를 갖고 초정밀 5 자유도 운동오차를 측정할 수 있음을 확인하였다.

## 5. 결론

본 논문에서는, 초정밀 테이블의 5 자유도 운동오차를 측정하기 위한 방법으로, 각운동오차(요 및 피치)의 측정에는 레이저간섭계를 이용하고, 롤오차는 반전법을 이용하며, 직선운동오차는 각운동오차의 영향을 보정한 축차 2 점법을 이용하는 혼합 측정시스템을 구축하고 초정밀 유정압테이블의 5 자유도 운동오차 평가에 적용함으로써 유용성을 검증하고자 하였다. 이 측정시스템을 이용한 측정결과를 반전법을 이용하여 측정된 결과와 직, 간접적으로 비교한 결과 두 측정값은 서로 잘 일치함을 보였다. 한편, 측정에 있어서의 반복정밀도

로부터, 수평방향의 직선 및 각운동오차에 대해서는  $\pm 0.02 \mu\text{m}$  및  $\pm 0.04$  arcsec 이내의 측정정밀도를 갖음을 확인하였으며, 수직방향의 직선 및 각운동오차에 대해서도 각각  $\pm 0.02 \mu\text{m}$  및  $\pm 0.05$  arcsec 이내의 측정정밀도를 갖음을 확인하였다. 이상의 결과로부터 본 논문에서 적용한 측정방법은 서브미크론대의 운동정밀도를 갖는 초정밀 이송테이블의 5 자유도 운동오차 측정에 매우 유효함을 확인하였다.

## 참고문헌

1. Hewlett Packard Co., "Laser Measurement System User's Guide," Manual Part No. 00528-90010, 1984.
2. Osada, H. and Shomokohbe, A., "Measurement of Straight Motion Accuracy," J. of JSPE, Vol. 51, No. 6, pp.161-167, 1985.
3. Kiyono, S., "Profile Measurement Using Software Datums," J. of JSPE, Vol. 61, No. 8, pp. 1059-1063, 1995.
4. Gao, W. and Kiyono, S., "High accuracy profile measurement of a machined surface by the combined method," Measurement, Vol. 19, No. 1, pp. 55-64, 1996.
5. Li, C. J., Li, S. and Yu, J., "High-resolution error separation technique for in-situ straightness measurement of machine tools and workpieces," Mechatronics, Vol. 6, No. 3, pp. 337-347, 1996.
6. Fung, E. H. K. and Yang, S. M., "An approach to on-machine motion error measurement of a linear slide," Measurement, Vol. 29, pp. 51-62, 2001.
7. Kounosu, K. and Kishi, T., "Measurement of Surface Profile Using Smoothed Serial Three Point Method," J. of JSPE, Vol. 61, No. 5, pp. 641-645, 1995.
8. Gao, W., Yokoyama, J., Kojima, H. and Kiyono, S., "Precision measurement of cylinder straightness using a scanning multi-probe system," Precision Engineering, Vol. 26, pp. 279-288, 2002.
9. Park, C. H., Chung, J. H., Kim, S. T. and Lee, H., "Development of a submicron order straightness measuring device," J. KSPE, Vol. 17, No. 5, pp. 124-130, 2000.