

# 직선 이송축의 기하학적 오차 측정을 위한 5 자유도 측정 시스템의 최적 설계

## The Optimal Design of a Five-DOF Measurement System to Measure the Geometric Errors of a Linear Axis

\*이광일<sup>1</sup>, 이재창<sup>1</sup>, #양승한<sup>1</sup>

\*K. I. LEE<sup>1</sup>, J. C. LEE<sup>1</sup>, #S. H. YANG(syang@knu.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>경북대학교 기계공학부

Key words : Straightedge, Capacitive sensor, Standard uncertainty, Reference coordinate

### 1. 서론

공작기계의 기하학적 오차는 다양한 방법을 이용하여 측정 및 평가한다.<sup>1</sup> 레이저 간섭계는 직선 이송축의 오차 측정에 널리 사용되나, 각각의 오차를 측정하는 경우 광학계의 새로운 셋업을 필요로 한다. 또한 측정된 진직도 오차는 측정 민감도에 의하여 상대적으로 큰 측정 오차를 포함한다.<sup>2</sup> 이러한 문제점을 개선하기 위해 레이저 간섭계, 정전 용량 센서 및 Straightedge 를 사용한 연구가 있으나, 동일한 기준 좌표계의 부재 및 아베 오차에 의해 큰 표준 불확실도를 나타낸다.<sup>3</sup>

본 논문에서는 Straightedge 와 정전 용량 센서를 사용하여 직선 이송축의 선형 오차를 제외한 기하학적 오차를 측정하는 시스템을 최적 설계한다. 아베 오차에 의한 표준 불확실도를 최소화하기 위해 기준 좌표계와 정전 용량 센서의 위치를 최적화한다.

### 2. 기하학적 오차 측정 시스템

기준 좌표계  $\{F\}$  에서 정의된 직선 이송축  $X$  의 좌표계  $\{X\}$  는 기하학적 오차로 인해 Fig. 1 과 같이 왜곡된 자세를 나타낸다. 왜곡된 자세는 1 개의 선형 위치 오차  $\delta_{xx}$ , 2 개의 진직

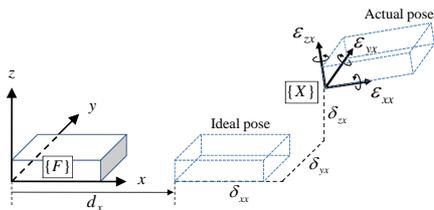


Fig. 1 Geometric errors of a linear axis

도 오차  $\delta_{yx}$ ,  $\delta_{zx}$  와 3 개의 각도 오차  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yx}$ ,  $\epsilon_{zx}$  로 모델링 한다. 첫 번째 첨자는 오차 방향을 의미하고 두 번째 첨자는 해당 이송축을 나타낸다.

직선 이송축의 기하학적 오차 측정을 위한 측정 시스템은 Fig. 2 와 같이 Straightedge 와 정전 용량 센서  $s_i (i=1, \dots, 5)$  로 구성한다. 5 개의 정전 용량 센서는 2 개의 진직도 오차와 3 개의 각도 오차를 측정하기 위하여 최소한의 자유도를 확보하기 위해 사용한다.

#### 2.1 정전 용량 센서 측정값의 표준 불확실도

센서  $s_i$  의 측정값  $m_i (i=1, \dots, 5)$  는 센서의 표준 불확실도  $u_{SENSOR}$  와 Straightedge 의 표준 불확실도  $u_{MIRROR}$  에 의해 표준 불확실도  $u_{DEVICE}$  를 나타낸다. 이 때 환경(온도, 습도, 압력), 셋업 오차는 상대적으로 영향이 작기 때문에 고려하지 않으며 측정 시스템의 표준 불확실도는 식 (1)과 같다.<sup>4</sup>

$$u_{DEVICE} = \sqrt{(u_{MIRROR})^2 + (u_{SENSOR})^2} \quad (1)$$

#### 2.2 기준 좌표계 위치에 따른 표준 불확실도 분석

기하학적 오차는 측정값  $m_i$  의 조합으로 계산이 된다. 계산된 오차의 표준 불확실도는 아

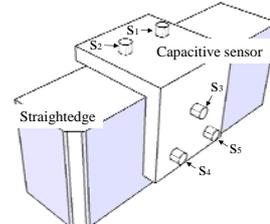


Fig. 2 Straightedge and five capacitive sensors

베 오차에 의해 기준 좌표계  $\{F\}$ 와 센서  $s_i$ 의 상대적 위치에 종속적이다. 따라서 측정된 오차의 표준 불확실도를 최소화하기 위한 기준 좌표계  $\{F\}$ 의 위치를 Fig. 3과 같이 모델링한다. 기준 좌표계  $\{F\}$ 는 점  $P$ 를 기준으로 오프셋  $o_x, o_y, o_z$ 을 이용하여 모델링되며, 센서  $s_3$ 의 위치는 변수  $l$ 을 사용하여 나타낸다. 여기서 변수  $w, h$ 는 Straightedge의 너비와 높이를 나타낸다.

기준 좌표계  $\{F\}$ 에서 정의된 센서  $s_i$ 의 측정값  $m_i$ 을 사용하여 직선 이송축의 기하학적 오차를 식 (2)와 같이 계산한다. 이 때  $k_i (i=1, \dots, 11)$ 는 오프셋  $o_x, o_y, o_z$ 과 변수  $l$ 로 구성된다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= k_1 m_3 + k_2 m_4 + k_3 m_5 \\ \varepsilon_{yx} &= k_4 m_1 - k_1 m_2 \\ \varepsilon_{zx} &= k_4 m_4 - k_1 m_5 \\ \delta_{yx} &= k_4 m_3 + k_5 m_4 + k_6 m_5 \\ \delta_{zx} &= k_7 m_1 + k_8 m_2 + k_9 m_3 + k_{10} m_4 + k_{11} m_5 \end{aligned} \quad (2)$$

측정값  $m_i$ 의 표준 불확실도  $u_{DEVICE}$ 가 같다고 가정하면, 측정된 오차의 표준 불확실도를 최소로 하기 위한 오프셋  $o_x, o_y, o_z$ 과 변수  $l$ 는 식 (3)과 같다.

$$o_x = \frac{h}{4}, \quad o_y = \frac{w}{4}, \quad o_z = \frac{h}{2}, \quad l = \frac{h}{4} \quad (3)$$

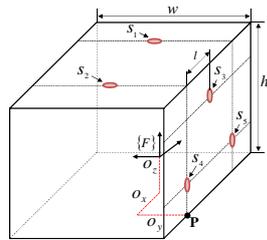


Fig. 3 Position of reference coordinate and capacitive sensors

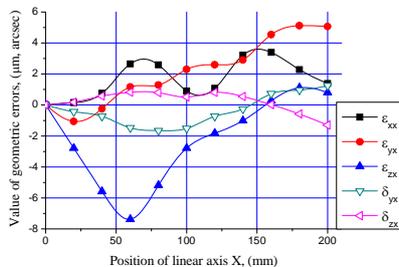


Fig. 4 Measured geometric errors of a linear axis

### 3. 직선 이송축의 기하학적 오차 측정

최적 설계된 측정 시스템을 사용하여 3축 공작기계 T30의 직선 이송축 X의 기하학적 오차를 측정한다. 측정은 0~200mm 범위에서 20mm 간격에 대해 정적으로 진행하며 측정된 기하학적 오차는 Fig. 4와 같다.

### 4. 결론

본 논문에서는 직선 이송축의 기하학적 오차를 측정하기 위하여 Straightedge와 5개의 정전 용량 센서를 사용한 측정 시스템을 최적 설계한다. 표준 불확실도를 최소화하는 기준 좌표계와 정전 용량 센서의 위치를 결정하고 단일 셋업을 통하여 직선 이송축의 5개 기하학적 오차를 측정한다.

### 후기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0018890).

### 참고문헌

1. Lee, J. H., Liu, Y. and Yang, S. H., "Accuracy Improvement of Miniaturized Machine Tool: Geometric Error Modeling Compensation," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No. 12~13, pp. 1508~1516, 2006.
2. Kim, G. H., Keem, T. H., Lee, H. S. and Kim, S. W., "Compensation of the Straightness Measurement Error in the Laser Interferometer," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No. 9, pp. 69~76, 2005.
3. Kim, K. H., Park, S. H., Kim, D. M. and Jang, S. D., "Orthogonality Calibration of a High Precision Stage using Self-calibration Method," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 50~57, 2010.
4. ISO/TR 230-9, "Test Code for Machine Tools-Part 9: Estimation of Measurement Uncertainty for Machine Tool Tests according to Series ISO 230, Basic Equations," ISO, 2005.