

대면적 미세형상 가공기의 직선/회전 다축 오차 측정 Measurement of multi-axes errors between linear and rotational tables of a ultra-precision machine tools for generating micro patterns on the large surfaces

*,# 황주호¹, 송창규¹, 박천홍¹
 *,# J.H. Hwang(jooho@kimm.re.kr)¹, C. K. Song¹, C.H. Park¹
¹ 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부

Key words : Multi-axis errors, Perpendicular error, Tilt error, Relative deviation

1. 서론

대면적 미세형상 가공기는 일반적으로 그루빙 가공을 이용하여 미세형상의 금형제작에 활용되며 일반적으로 3개의 직선축과 1개 혹은 2개의 회전테이블을 가지고 있다. 가장 많이 가공되는 피라미드형의 가공의 경우 수십 μm 의 가공을 수행하는 경우 1개의 축이 그루빙 가공을 위하여 절삭방향으로 이송을 하며 나머지 2개의 직선축은 이송과 공구의 높이 조절을 수행한다. 대면적의 평면상에 수백 μm 의 높이를 갖는 미세한 패턴을 가공하기 때문에, 일반적으로 공구대를 장착한 이송축의 높이 변화는 매우 적으며, 회전 테이블을 원하는 각도에 따라 회전시킨후 그루빙 가공을 중첩하기 때문에 회전테이블의 오차 또한 복합적으로 작용한다.

5축 머시닝센터의 경우 직선 회전테이블이 복합적으로 작용하는 상대오차를 위하여 볼바를 이용한 측정법이나 구를 따라 측정하는 'Chase-the-Ball' 방법등을 이용하고 있으나 센서의 분해능이나 불확도 크기가 초정밀급의 가공기와 비슷한 수준이기 때문에 적용하기에 어렵다.

본 연구에서는 초정밀급의 오차를 측정하기 위하여, 정밀도가 높은 비접촉센서중 하나인 정전용량형 센서와 Artifact의 오차를 분리하는 방법을 적용하여 회전과 직선 테이블의 오차를 측정하였다. 또한, 본 연구의 대상이 되는 3개의 직선 축에 의하여 가공되는 시작품은 Z축 방향으로 수백 μm 이하의 형상을 갖기 때문에 다축이 이루고 있는 오차는 주로 X 및 Y의 오차에 의하여 생기게 된다. 이는 두 개의 X 및 Y 축이 움직이면서 발생하는 평면상의 오차가 된다. 따라서 각축의 위치결정정밀도, 수평방향 진직도와 직각도가 주요 오차의 원인이 된다. 이러한 오차를 검증하는 방법은 원호보간 방법이나 자가보정 방법등이 있으나, 전자는 측정 반복능과 기계의 반복능이 비슷하여 정밀

한 측정이 힘들고 후자는 측정장치 구현도 복잡한 단점이 있다. 본 연구에서는 직선축의 오차는 ISO 230-6 규격을 이용한 평가에 대하여 제시하였다.

2. 대면적 미세형상 가공기의 구조

실험의 대상이 되는 4축 초정밀 가공기의 전체 구조를 Fig.1에 나타내었다. 기본적인 구조는 shaping, turning, milling이 가능하도록 X, Y, Z, C축의 4축 구조를 가지고 있다. 가공기의 초정밀화 및 구조의 콤팩트화, 고강성화 등을 고려하여 모든 이송축 및 회전축의 베어링은 유정압 베어링을 사용하였으며, 직선 이송용 모터로는 coreless linear motor를 사용하였다.

가공기의 면적은 $1,300 \times 1,800 \text{ mm}$ 이며, X축 및 Y축의 유효 stroke는 각각 550 mm, 베드는 C축 및 Y축의 구조의 높이가 높아 주물 구조로 선정하였으며 공기스프링을 이용하여 4점지지방식의 방진구조로 설계하였다. X축상에 설치되는 Z축의 무게는 약 70~80 kg 정도의 무게가 예상되며 리니어모터의 축방향 추력이 상대적으로 충분히 높지 않으므로 카운터밸런스를 설치하는 구조로 설계하였다. 각 이송축의 분해능은 기본 5 nm에 1 nm까지 확장 가능한 레이저스캐일(Sony사)을 사용하였다.

3. 직선축의 다축 정밀도 평가

가공기는 3개의 직선축중 수십 μm 의 높이를 갖는 미세형상을 가공하기 때문에 높이의 변화가 작아서 3축중 XY축이 이루고 있는 평면에 관한 오차가 주를 이룬다. 이차원(2D) 오차는 두개의 축이 이루고 있는 상대 이동에 대하여 1축의 1D 위치결정 정밀도, 수평방향 진직도 및 직각도에 의하여 나타나게 된다. 두개의 축이 이루는 X 및 Y축이 이루는 관계를 식으로 나타내면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

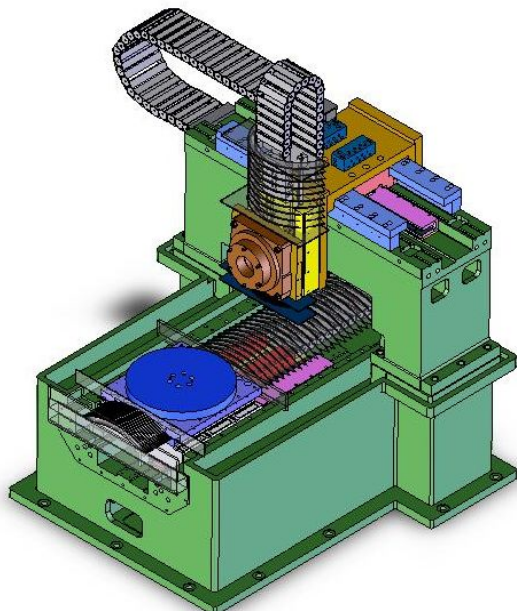


Fig. 1 Configuration of the 4 axis ultra precision machine

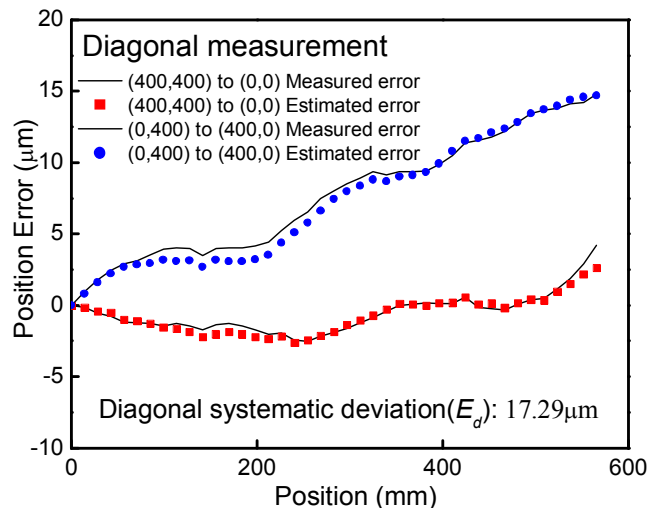


Fig. 2 Diagonal measurement results before compensation

$$\begin{bmatrix} \delta P_x(i, j) \\ \delta P_y(i, j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta P_{x1D}(i) + \delta_x(j) \\ \delta P_{y1D}(j) + a_2(i)\theta_{xy} + \delta_y(i) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $\delta p_x(i,j)$ 는 x 방향의 오차 $\delta p_y(i,j)$ 는 y 방향의 2 차원 평면상의 오차이며, $\delta p_{x1D}(i)$ 는 X 축의 1 차원 위치오차, $\delta p_{y1D}(j)$ 는 Y 축의 1 차원 위치오차, δ_x 는 Y 축에 의한 운동오차, δ_y 는 x 축에 의한 운동오차, θ_{xy} 는 직각도 오차가 된다.

두축에 의하여 생기는 2D 오차는 평면의 꼭지점을 연결하는 2 개의 대각선에 대하여 ISO230-6 에 의하여 대각 오차를 측정하여 구할 수 있으며, Fig. 4 와 같은 결과가 두축의 1D 위치오차, 진직도 및 직각도에 의하여 나타남을 관찰할 수 있다.

4. 회전테이블의 조립오차 평가

회전테이블과 직선테이블간의 오차 분석을 위하여는 평면 방향의 흔들림인 tilting 오차가, 피라미드와 같은 형태의 미세패턴 가공에 영향을 준다. 회전테이블의 Tilting 오차는 Fig. 3 에 보이는 바와 같은 Estler 의 반전법을 사용하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 회전테이블 상면의 시편을 180° 반전시킨 전후의 센서의 위치에 따라 측정을 하여 구한결과를 식(2) 및 (3)에 의하여 구하면, Fig. 4 의 결과를 얻을 수 있다.

$$M_1(\theta) = p(\theta) + \alpha(\theta)r + Z(\theta) \quad (2)$$

$$M_2(\theta) = p(\theta) - \alpha(\theta)r + Z(\theta)$$

$$\alpha(\theta) = \frac{M_1(\theta) - M_2(\theta)}{2r} \quad (3)$$

회전축과 직선축이 함께 움직이면서 생기는 상대거리는 Fig. 5 에서 보이는 바와 같이 직선축 두개를 원호보간 하여 이동하면서 회전 테이블도 동시운동을 시켜 360° 회전운동을 하는 동안 언제나 같은 위치를 측정되도록 하여, Artifact 의 상면에 의한 영향이 나타나지 않도록 한지점을 측정하여 Fig. 6 (a)의 실선과 같은 데이터를 얻었다. 여기에 Fig. 4 에서 구한 Tilt Error 에 의한 오차를 빼내면 Fig. 6 (b)

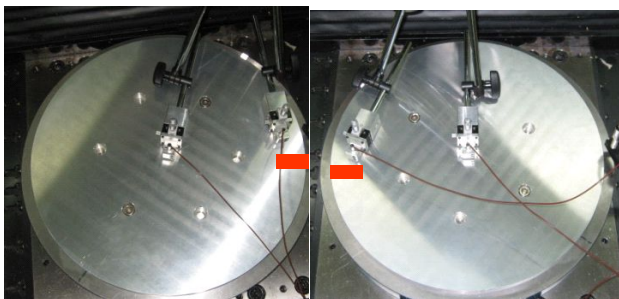


Fig. 3 Measurement of tilting error of C-axis using Estler's reversal method

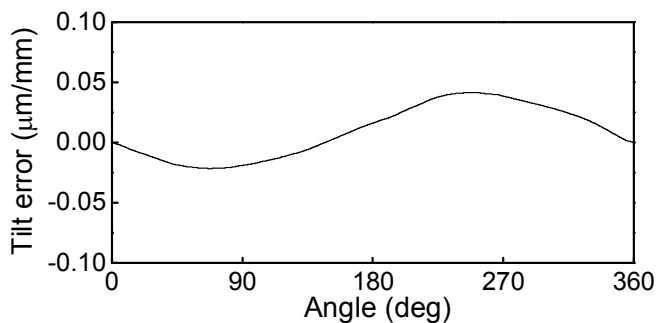


Fig. 4 Tilting error of C-axis table

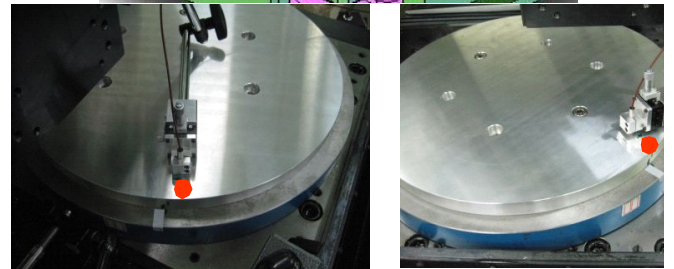
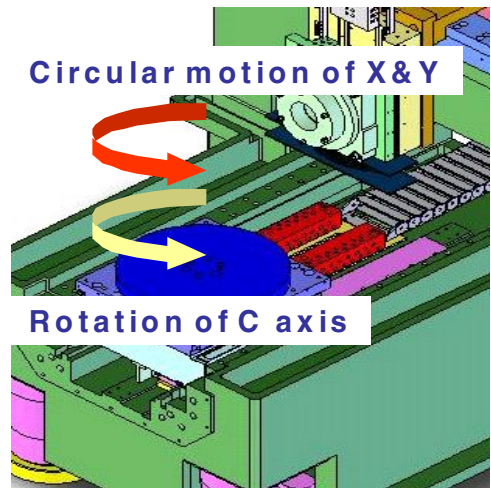


Fig. 5 Method for measuring deviation between rotary table and linear axes

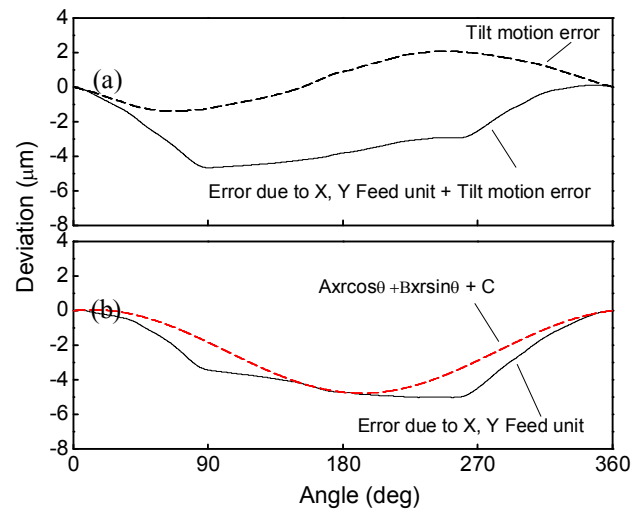


Fig. 6 Deviation of relative distances between the rotary table and linear axes

에 보이는 바와 같은 직선축에 의한 영향을 구할 수 있다. 이는 직선운동 오차에 의한 기울기가 대부분임을 알 수 있으며, 0,90,180,360° 의 위치에서의 기울기를 이용하면 (b)의 점선과 같은 결과를 얻어 X 축과 Y 축의 회전테이블에 관한 기울기가 각각 0.014 µm/mm 와 0.003 µm/mm 임을 알 수 있다. 이상의 방법을 이용하면 직선과 회전테이블에 의하여 발생하는 오차를 측정하여, 평판 미세가공용 장비에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 보여진다.

참고문헌

1. Tsutsumi, M., Saito, A. " Identification and compensation of systematic deviations particular to 5-axis machining centers," International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43, pp. 771-780, 2003.
2. Bringmann, B., Knapp, W., "Model-based 'Chase-the-Ball' Calibration of a 5-Axes Machining Center," CIRP Annals, 55, pp. 531-534, 2006.