

## 공작기계 3축 공간오차 모델 및 측정

### Three dimensional Error Models and measurement of errors for machine tools

\*,# 황주호<sup>1</sup>, 부이바친<sup>2</sup>, 박천홍<sup>1</sup>, 이찬홍<sup>1</sup>

\*,# J.H. Hwang(jooho@kimm.re.kr)<sup>1</sup>, B.C.Bui<sup>2</sup>, C.H. Park<sup>1</sup>, C.H. Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부, <sup>2</sup> 과학기술연합대학원 나노메카트로닉스학과

Key words : Three dimensional errors, Homogenous transformation matrix, Step-diagonal method

#### 1. 서론

공작기계는 3 차원 형상의 가공을 위하여 3 축의 직선 테이블이 상대운동을 하면서 가공을 하는 것이 일반적이다. 3 축이 동시이동을 수행하기 때문에 각축의 위치결정 정밀도 뿐만 아니라, 각운동 오차, 진직도 오차 및 직각도 등이 복합적으로 영향을 주게된다.

따라서, 3 축공간오차에 대한 분석기술은 여러 연구가 수행되고 있으며 모델을 통한 예측기술과 측정방법 등이 대표적인 예라고 할 수 있다. 오차분석 모델로 대표적인 것은 각축의 영향관계를 동차변환행렬 (Homogeneous Transformation Matrix)를 이용하여 구하는 방법이다.<sup>1</sup> HTM 방법은 많은 연구가 진행되고 있으며 설계 및 제작단계에서 오차의 배분등에 이용하기는 쉬운 장점이 있지만 실질적인 3 차원 공간오차를 분석하기에는 너무 많은 오차변수가 필요하여 사용에 어려움이 있다.

따라서 3 차원 볼륨 오차의 측정에는 ISO230-6 규격에 의한 공간오차 측정 방법을 많이 사용하고 있다. 이 방법은 대상이 되는 3 차원의 공간 체적에 대하여 대각선 방향으로 연결하는 4 개의 대각선을 측정하여 각 목표에 대한 차이로부터 측정값을 구하는 것이다.<sup>2</sup> 이러한 측정 방법은 오차의 수준을 알 수 있지만 각 오차요소의 값을 알지 못하여 기계수정에 관한 데이터를 주지 못하는 단점이 있다.

본 연구에서는 기계의 구조 변화에 따라 쉽게 모델화 할 수 있는 HTM 을 이용한 모델과 이를 기반으로 한 오차 분석방법을 제시하고 실험 적으로 검증하였다.

#### 2. 3축 가공기 공간오차 모델

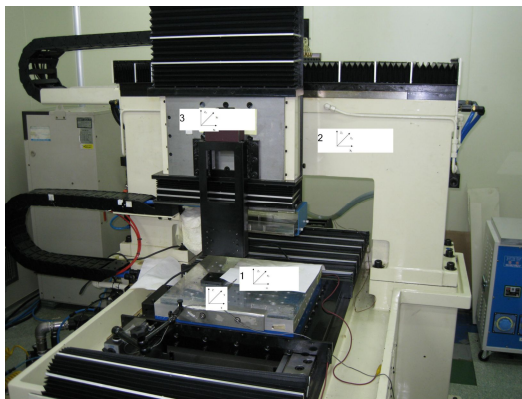


Fig. 1 Configuration of the 3 axes machine tools

실험의 대상이 되는 3 축 가공기의 전체 구조를 Fig. 1 에 나타내었다. 1+2 의 구조를 가지고 있어 독립적인 Y 축과 Z 축을 장착하여 움직이는 x 축으로 구성되어있다. 이송축은 유정압 안내면과 리니어모터를 사용하였고, 이송축의 분해능은 기본 5 nm 에 1 nm 까지 확장 가능한 레이저스케일(Sony 사)을 사용하였다.

일반적인 공작기계는 3 축 반송장치와 달리 1+2 혹은 2+1 의 분리된 구조를 가지고 있고 Fig. 1 에 보이는 바와 같이 공구와 공작물이 장착된 위치의 상대운동에 따라서 오차가 결정되게 된다. 이것을 수식으로 나타내면 식(1)과 같이 표현될 수 있으며, 공작기계 이송테이블의 조합에 따라 여러가지 형태로 표현될 수 있다. 3 축에 관한 HTM 오차를 풀어 정리한 결과를 식(2)에 나타내었다.

$$R \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}_{Error} = R \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}_{work} - R \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}_{tool} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon$ 는 각축의 각운동 오차를  $\delta$ 는 직선운동 오차를 나타낸다.

#### 3. 직선축의 다축 정밀도 평가

각 축의 오차를 구하는 방법을 위하여 Fig. 2 의 (a)에서와 같이 ISO 230-6 규격에 의한 대각오차의 측정 대신 X, Y, Z 가 순차적으로 움직이면서 측정하는 방법을 통하여 각축의 오차를 구하는 것이 step-diagonal 측정에 의한 Vector Measurement (VM) 분석법이다.<sup>3</sup>

본 연구에서는 step-diagonal 측정방법을 분석함에 있어

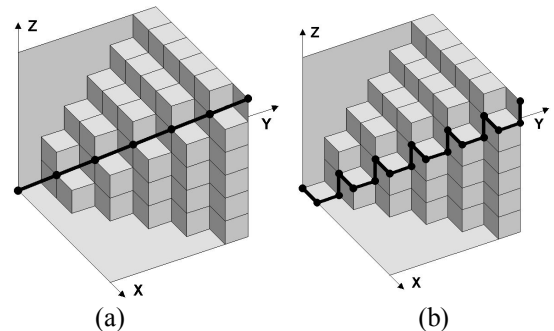


Fig. 2 Comparison between diagonal and step-diagonal method

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{\delta_x(x) + \delta_x(y) + [1 - \epsilon_y(x)\epsilon_y(y) - \epsilon_z(x)\epsilon_z(y)]\delta_x(z) - \epsilon_x(x)[y + \delta_y(y)] \\ + [\epsilon_x(y)\epsilon_y(x) - \epsilon_z(x) - \epsilon_z(y)]\delta_y(z) + \epsilon_y(x)\delta_z(y) + [\epsilon_x(y)\epsilon_z(x) + \epsilon_y(x) + \epsilon_y(y)][z + \delta_z(z)]\} \\ \{\delta_y(x) + \delta_y(y) + [1 - \epsilon_x(x)\epsilon_x(y) - \epsilon_z(x)\epsilon_z(y)]\delta_y(z) - \epsilon_x(x)\delta_z(y) + \epsilon_z(x)\delta_x(y) \\ + [\epsilon_x(x)\epsilon_y(y) + \epsilon_z(x) + \epsilon_z(y)]\delta_x(z) + [-\epsilon_x(x) - \epsilon_x(y) + \epsilon_y(y)\epsilon_z(x)][z + \delta_z(z)]\} \\ \{-z - \epsilon_y(x)\delta_x(y) + \delta_z(x) + \delta_z(y) + [1 - \epsilon_x(x)\epsilon_x(y) - \epsilon_y(x)\epsilon_y(y)][z + \delta_z(z)] \\ + [-\epsilon_y(x) - \epsilon_y(y) + \epsilon_x(x)\epsilon_z(y)]\delta_x(z) + \epsilon_x(x)[y + \delta_y(y)] + [\epsilon_x(x) + \epsilon_x(y) + \epsilon_y(x)\epsilon_z(y)]\delta_y(z)\} \end{bmatrix} \quad (2)$$

서, Wang 에 의하여 제안된 분석 방법을 보다 적은 측정회수를 가지고도 분석이 가능한 분배방법인 VD (Vector decomposition) 을 식 (3)을 이용하여 적용하였다.

$$\begin{aligned} \vec{\Delta R}_x &= \vec{\Delta x} + \vec{\Delta y} + \vec{\Delta z} \\ \vec{\Delta R}_x &= E_x x + E_y y + E_z z \\ E_{1x}(x) &= \Delta R_{ppp}(x) \cos \varphi \cos \theta; \\ E_{1y}(x) &= \Delta R_{ppp}(x) \sin \varphi \cos \theta; \\ E_{1z}(x) &= \Delta R_{ppp}(x) \sin \theta; \\ E_{2x}(x) &= \Delta R_{ppn}(x) \cos \varphi \cos \theta; \\ E_{2y}(x) &= \Delta R_{ppn}(x) \sin \varphi \cos \theta; \\ E_{2z}(x) &= \Delta R_{ppn}(x) \sin \theta; \\ E_{3x}(x) &= \Delta R_{pnp}(x) \cos \varphi \cos \theta; \\ E_{3y}(x) &= \Delta R_{pnp}(x) \sin \varphi \cos \theta; \\ E_{3z}(x) &= \Delta R_{pnp}(x) \sin \theta; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right); \theta = \arctan\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)$$

각 벡터 움직임의 정의는 Fig. 3 와 같으며, 대각선 측정 방법에 의한 각 축의 위치결정 오차와 수직 수평방향의 진척도를 구할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{2R_{ideal}^2 - R_{npp}^2 - R_{pnp}^2}{4xy} \\ \cos \beta &= -\frac{2R_{ideal}^2 - R_{ppp}^2 - R_{ppn}^2}{4yz} \\ \cos \gamma &= -\frac{2R_{ideal}^2 - R_{ppp}^2 - R_{pnp}^2}{4zx} \end{aligned} \quad (4)$$

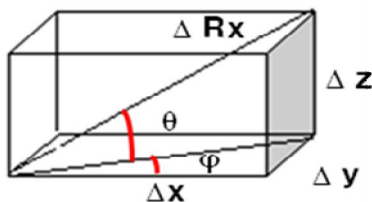


Fig. 3 A component of vector movement

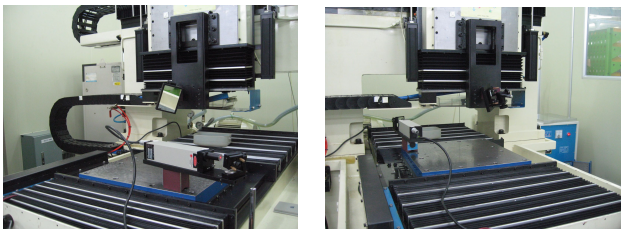


Fig. 4 Measurement of three dimensional errors

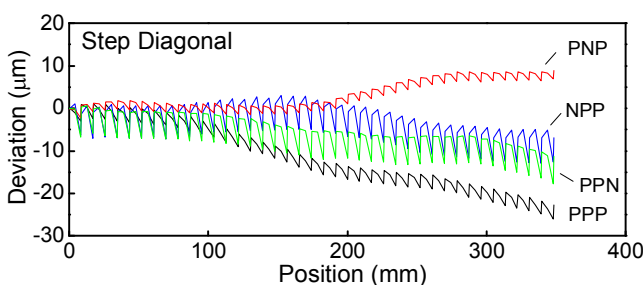


Fig. 5 Measured data along 4 body step diagonal

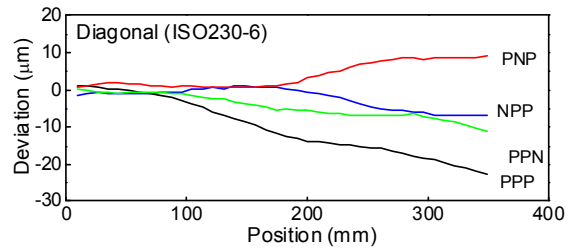


Fig. 6 Measurement results of 4 body diagonal

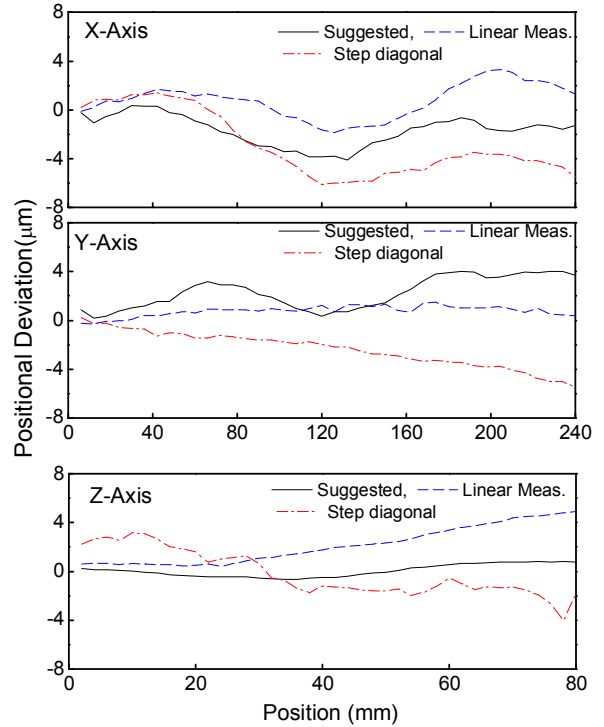


Fig. 7 Comparison between the VD and VM Method

또한 세개의 축이 이루고 있는 직각도 오차도 식(4)에 의하여 구할 수 있게 된다.

한편, 세개의 축이 순차적으로 움직인 후의 값들만을 모으면 Fig. 2(a)의 체계인 ISO 230-6 규격의 4 개 대각오차의 측정 결과가 된다. VD 와 VM 방법에 의한 분석방법을 1D 위치결정 오차에 대하여 비교한 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 실제 1D 측정 값과의 오차와 좀더 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있으며 두 가지 모두 수 μm 의 오차가 존재함을 알 수 있다. 이는 주로 step diagonal 측정을 함에 있어서 설치오차와 각운동 오차에 의한 움직임의 거리변화, 레이저 간섭계의 설치 위치를 변경하면서 생긴오차등으로 보여지며 이의보정 방법과 두 방법의 비교검증을 추후에 수행할 예정이다.

### 참고문헌

1. Okafor, A.C., Ertekin, Y.M., "Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining," International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40, pp 1199-1213, 2000.
2. ISO 230-6: 2002, "Test code for machine tools - Part 6: Determination of positioning accuracy on body and face diagonals (Diagonal displacement tests)," An International Standard by International Standards Organization, 2002.
3. Wang, C., "Laser Vector measurement Technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors. Part I: Basic theory," Review of Scientific Instruments, 71, pp. 3933-3937, 2000.