

기구볼바를 이용한 가공기계의 정밀도 평가 및 향상 기술 개발

문준희*, 박희재**, 주종남**

Accuracy Evaluation and Enhancement of Machine Tools Using a Kinematic Ball Bar

J.H.Moon*, H.J.Pahk**, C.N.Chu**

ABSTRACT

This paper presents an useful technique for assessing the volumetric errors in multi-axis machine tools using the kinematic double ball bar. This system has been developed based on the volumetric error map which describes the 3 dimensional errors of machine tools. The developed system inputs the measured radial data of 3 different planes, respectively XY, YZ, ZX, analysing the volumetric errors such as positional, straightness, angle, and 'squareness errors, etc. The developed system has been tested in a practical machine tool, and showed high potential for the error assessment of multi-axis machine tools.

Key Words: Kinematic Ball Bar (기구볼바), Error Assessment (오차평가), Volumetric Error Map (입체오차맵)

1. 서 론

가공기계 기술은 한 나라의 기계 기술 수준을 가늠하는 중요한 기술중의 하나이다. 가공기계 정밀도에 영향을 주는 정적인 오차로서는 기하학적 오차, 기구학적 오차, 열적 오차 등이 있으며, 동적인 오차로서는 서보계인 오차, 동특성 오차 등이 존재한다. 특히 가공기계의 작업공간에서 나타나는 3차원공간에서의 오차는 위에서 열거한 여러 오차성분과 원인들에 의해서 기인하는 것으로서 3차원 작업공간에서의 가공정밀도에 직접적인 영향을 준다.

따라서 효율적이고 정확한 3차원 평가 기술은 가공기계를 이용하는 공정의 품질향상, 생산성향상이란 측면에서 가공기계 제작업체나 사용자 모두에게 매우 필요한 기술로 고려 되어 왔다. 본 연구에서는 기구볼바를 이용하여 가공기계의 기하학적 오차인 위치오차, 직각도 오차, 각도오차, 진직도 오차 등을 구하고, 또한 동적 오차인 서보계인의 오차 등을 3차원 작업공간에서 수행하고 평가하는 기술을 개발하였다.

기구볼바 측정법은 공작기계의 가공정밀도 평가를 고정밀도와 고능률로 가능하게 하기 때문에 많은 관심을 모으

* 서울대학교 대학원 기계설계학과
 ** 서울대학교 기계설계학과

고 있다. Knapp⁽²⁾은 2차원 프로브와 기준 원판을 이용해서 공작기계의 정밀도 성능을 평가할 수 있음을 보였으며, Bryan⁽³⁾은 망원경식 기구불바를 제안하여 NC공작기계의 정밀도 평가로의 응용을 언급하였다. Kunzmann⁽⁵⁾ 등은 기구불바를 사용과 파라메타 오차성분에 대한 해석식을 제안하였으며, Kakino⁽⁶⁾ 등은 다양한 가공기계의 오차성분과 기구불바의 원호 보간 성능과의 관계를 보여주었으며, Burdekin, 박준호^(1,4) 등은 2개의 LVDT를 가지는 기구불바를 제안하고 주요한 오차성분을 해석하는 시스템을 제안하였다. Burdekin⁽¹⁾ 등은 동적 오차의 측정에 대해서 설명하였으며, 홍성욱⁽⁷⁾ 등은 원호보간측정 데이터를 주파수 분석법을 이용하여 해석하는 방법을 제안하였다. 이상의 이전 연구자들의 연구는 2차원 작업공간에서의 오차평가로서, 본 연구에서는 공작기계의 3차원 작업공간에서의 공작기계의 기하학적 기구학적 오차를 체계적으로 분석하는 새로운 방법을 제안한다. 즉, 공작기계의 입체오차 방정식을 고려하고, 기구불바를 이용한 오차 측정 기법과 연계하여 위치 오차, 각도 오차와 같은 각각의 파라메트릭 오차 성분들 평가하고 해석하는 방법을 제안하였다. 개발된 오차 평가 및 해석 시스템은 실제 공작기계에 적용되었으며, 그 유용성과 효율성이 입증되었다.

2. 이론적 배경

2.1 기구불바 측정의 이론적 배경

기구불바를 이용한 측정 방법의 이론적 배경은 다음과 같다. NC 공작기계의 주축(Spindle)과 테이블에 소켓(socket)을 고정하고 자력을 이용하여 그 위에 강구(ball)가 3점 볼좌위에 고정되도록 한다. 정밀급 LVDT(Linear Variable Differential Transducer)를 내장한 기구불바가 두 개의 강구 사이를 연결한다. 테이블 위의 강구의 중심의 좌표를 O(0,0,0), 주축 위의 강구의 중심의 지령 좌표를 P(X,Y,Z)라 하고, 테이블 위의 강구의 중심 좌표에서 주축 위의 강구 중심까지의 거리를 R이라 하면 R은 다음과 같이 나타낼 수 있다.(Fig.1 참조)

$$R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$$

NC공작기계가 공구를 점 P(X,Y,Z)로 움직이도록 지령 받았을 때, 공구는 실제로 점 P'(X',Y',Z')로 움직인다. 그 이유

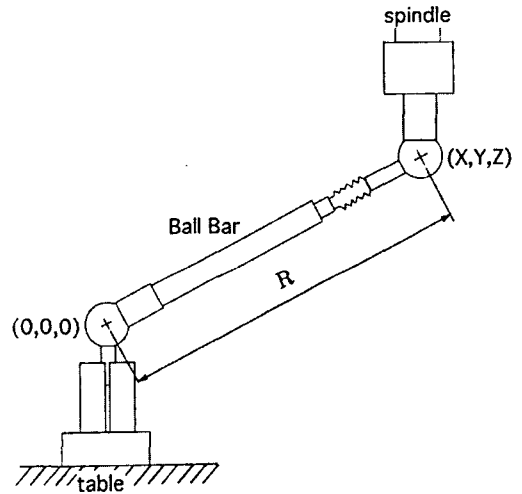


Fig. 1 Error measurement using the Kinematic Ball Bar

는 오차나 처짐(droop)이 존재하기 때문이다. 따라서, 오차는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta X &= X' - X \\ \Delta Y &= Y' - Y \\ \Delta Z &= Z' - Z \\ C &= (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) \end{aligned}$$

여기서 C는 오차 벡터이다.

따라서, 오차를 고려하면 위 식은 다음과 같이 변형된다.

$$\begin{aligned} (R + \Delta R)^2 &= X'^2 + Y'^2 + Z'^2 \\ &= (X + \Delta X)^2 + (Y + \Delta Y)^2 + (Z + \Delta Z)^2 \end{aligned}$$

양변을 전개하고 오차의 2차항 이상을 소거하면

$$\begin{aligned} R^2 + 2R\Delta R &= X^2 + Y^2 + Z^2 \\ &\quad + 2(X\Delta X + Y\Delta Y + Z\Delta Z) \end{aligned}$$

따라서

$$\Delta R = \frac{1}{R}(X\Delta X + Y\Delta Y + Z\Delta Z) \quad (1)$$

이 식을 이용하여 원호 보간으로 얻은 기구불바 측정 데이터를 오차 벡터와 연관시킬 수 있다.

2.2 기하학적 오차 요소

한 방향을 따라서 운동하도록 되어 있는 한 축 운동기구를 고려할 때 6개의 오차 성분이 존재하게 된다. 이는 가이드 웨이와 운동하는 기계 요소의 가공의 부정확도 등에 의해서 기인하는데, 운동 방향으로는 위치 오차(Positional Error), 가이드웨이를 따라서는 수직 방향의 진직도 오차 (Vertical Straightness Error), 수평 방향의 진직도 오차 (Horizontal Straightness Error)가 있게 된다. 또한 각도 오차로서 운동 방향으로 존재하는 롤오차(Roll Error), 그리고 운동 평면 내에서 수직 방향으로 존재하는 피치 오차(Pitch Error), 요오차(Yaw Error)가 있다. 일반적으로 다축기계인 경우, 한 축에 대해서 6개의 기하학적 오차 이외에도 축간의 조립 오차인 직각도 오차가 존재하게 된다. 즉, 3축 운동을 하는 기계는 각 축간의 직각도 오차로서 3개의 성분이 있다. (Fig.2)

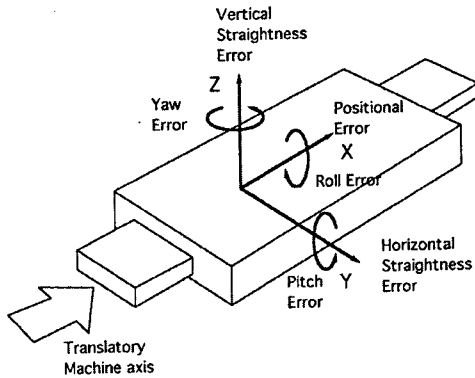


Fig. 2 Errors in the one-axis movement

각 파라메트릭 오차의 모델링을 다음과 같이 수행하였으며, $\delta x_i(x_j)$ 는 x_j 축을 따라 이동할 때의 x_i 방향의 수평 이동 오차이고, $Ex_i(x_j)$ 는 x_j 축을 따라 이동할 때의 x_i 방향의 회전 오차이다.

(1) 위치 오차

X, Y, Z 방향의 위치 오차 $\delta x(x)$, $\delta y(y)$, $\delta z(z)$ 는 각축의 스케일 오차, 이송스크류의 피치오차 등에서 기인한다. 따라서, 각축을 따라서의 위치오차는 각축에 대한 무차원된 다항식으로 다음과 같이 모델링을 수행하였다. 여기서 R은 기구볼바의 반경을 의미한다.

$$\delta x(x) = dxx1\left(\frac{x}{R}\right) + dxx2\left(\frac{x}{R}\right)^2 + dxx3\left(\frac{x}{R}\right)^3$$

$$\delta y(y) = dyy1\left(\frac{y}{R}\right) + dyy2\left(\frac{y}{R}\right)^2 + dyy3\left(\frac{y}{R}\right)^3 \quad (2)$$

$$\delta z(z) = dzz1\left(\frac{z}{R}\right) + dzz2\left(\frac{z}{R}\right)^2 + dzz3\left(\frac{z}{R}\right)^3$$

여기서, $dxx1, dxx2, dxx3; dyy1, dyy2, dyy3; dzz1, dzz2, dzz3$ 는 각 위치오차를 모델링하기 위한 다항식의 계수이다.

(2) 진직도 오차

진직도 오차는 각 이송축에 대해서 수직 방향으로 나타나는 오차로서 각 축을 따라서의 무차원화된 2차 이상의 다항식으로 다음과 같이 모델링을 수행하였다.

$$\delta x(y) = dxy2\left(\frac{y}{R}\right)^2 + dxy3\left(\frac{y}{R}\right)^3$$

$$\delta x(z) = dxz2\left(\frac{z}{R}\right)^2 + dxz3\left(\frac{z}{R}\right)^3$$

$$\delta y(x) = dyx2\left(\frac{x}{R}\right)^2 + dyx3\left(\frac{x}{R}\right)^3 \quad (3)$$

$$\delta y(z) = dyz2\left(\frac{z}{R}\right)^2 + dyz3\left(\frac{z}{R}\right)^3$$

$$\delta z(x) = dzx2\left(\frac{x}{R}\right)^2 + dzx3\left(\frac{x}{R}\right)^3$$

$$\delta z(y) = dzy2\left(\frac{y}{R}\right)^2 + dzy3\left(\frac{y}{R}\right)^3$$

여기서, $dxy2, dxy3; dxz2, dxz3; dyx2, dyx3; dyz2, dyz3; dzx2, dzx3; dzy, dzy3$ 는 각 축을 따라서 정의되는 진직도 오차를 모델링하기 위한 다항식의 계수이다.

(3) 각도 오차

롤(Roll) 오차

각 이송축을 따라서의 롤 각도 오차도 위치 오차와 유사하게 각 축의 위치에 대한 다항식으로 다음과 같이 모델링을 수행하였다.

$$Ex(x) = exx1\left(\frac{x}{R}\right) + exx2\left(\frac{x}{R}\right)^2 + exx3\left(\frac{x}{R}\right)^3$$

$$Ey(y) = eyy1\left(\frac{y}{R}\right) + eyy2\left(\frac{y}{R}\right)^2 + eyy3\left(\frac{y}{R}\right)^3 \quad (4)$$

$$Ez(z) = ezz1\left(\frac{z}{R}\right) + ezz2\left(\frac{z}{R}\right)^2 + ezz3\left(\frac{z}{R}\right)^3$$

여기서, $exx1, exx2, exx3; eyy1, eyy2, eyy3; ezz1, ezz2, ezz3$ 는 롤 각도 오차 모델링식의 계수를 의미한다.

피치(Pitch) 와 요(Yaw)

피치오차와 요오차는 가이드 또는 이송축의 진직도 오차와 연관이 있다. 이론적으로 이들은 진직도 오차 곡선의 각 방향에 대한 기울기로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Ex(y) &= \frac{\partial}{\partial y}(\delta x(y)) = \frac{1}{R} \{2 \times dzy2(\frac{y}{R}) + 3 \times dzy3(\frac{y}{R})^2\} \\
 Ez(y) &= -\frac{\partial}{\partial y}(\delta z(y)) = -\frac{1}{R} \{2 \times dxy2(\frac{y}{R}) + 3 \times dxy3(\frac{y}{R})^2\} \\
 Ey(x) &= -\frac{\partial}{\partial x}(\delta y(x)) = -\frac{1}{R} \{2 \times dxz2(\frac{x}{R}) + 3 \times dxz3(\frac{x}{R})^2\} \quad (5) \\
 Ez(x) &= \frac{\partial}{\partial x}(\delta z(x)) = \frac{1}{R} \{2 \times dyx2(\frac{x}{R}) + 3 \times dyx3(\frac{x}{R})^2\} \\
 Ex(z) &= -\frac{\partial}{\partial z}(\delta x(z)) = -\frac{1}{R} \{2 \times dyz2(\frac{z}{R}) + 3 \times dyz3(\frac{z}{R})^2\} \\
 Ey(z) &= \frac{\partial}{\partial z}(\delta y(z)) = \frac{1}{R} \{2 \times dxz2(\frac{z}{R}) + 3 \times dxz3(\frac{z}{R})^2\}
 \end{aligned}$$

(4) 백래시(Backlash)에 의한 위치 오차
 이송축의 운동방향이 반전될 때 나타나는 백래시 오차는 백래시 오차량을 각각 dx_b, dy_b, dz_b 라고 할 때, 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \delta x(x) &= -\frac{dx_b}{2} \text{sign}(\dot{x}) \\
 \delta y(y) &= -\frac{dy_b}{2} \text{sign}(\dot{y}) \\
 \delta z(z) &= -\frac{dz_b}{2} \text{sign}(\dot{z})
 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $\text{sign}(\dot{x})$ 는 괄호내의 값의 부호와 같은 부호를 가지게 하는 함수이며, $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ 는 X, Y, Z축으로의 이송 속도를 의미한다.

(5) 직각도 오차

직각도 오차는 공칭적으로 직교관계인 이송축간의 직각도 오차로서 다음과 같이 모델링된다.

X, Y 축간의 직각도 오차를 α 라고 하면, 직각도 오차에 의한 공칭 X좌표에 대한 Y축의 위치 오차 ΔY 는 직각도 오차 α 와 무차원화된 공칭 $\frac{X}{R}$ 값의 곱으로 표시할 수 있다.

$$\Delta Y = -\alpha \cdot (\frac{X}{R})$$

마찬가지로, X축, Z축간의 직각도 오차 $\beta 1$ 에 의한 X축의 오차는

$$\Delta X = -\beta 1 \cdot (\frac{Z}{R})$$

가 되고, Y축과 Z축간의 직각도 오차 $\beta 2$ 에 의한 Z축의 오차는

$$\Delta Z = -\beta 2 \cdot (\frac{Z}{R})$$

가 된다.

(6) 서보 게인 불일치 오차

X축의 서보 게인과 이송속도를 각각 K_{sX}, v_x , Y축의 서보 게인과 이송속도를 각각 K_{sY}, v_y , Z축의 서보 게인과 이송속도를 각각 K_{sZ}, v_z 라 할 때, 지령 위치와 정상상태(Steady State)의 실제 위치 사이에는 다음과 같은 동적 오차가 발생한다.

$$\Delta X = -\frac{v_x}{K_{sX}}$$

$$\Delta Y = -\frac{v_y}{K_{sY}}$$

$$\Delta Z = -\frac{v_z}{K_{sZ}}$$

그런데, v_x, v_y 는 각각 X, Y축 방향의 이송 속도이므로, 원주 속도 F (mm/s) 로 원호 보간 운동을 하는 경우에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_x = \mp F \sin \theta, \quad v_y = \pm F \sin \theta \quad (\text{복호동순, 위의 부호는 CCW, 아래 부호는 CW})$$

따라서, 식(1)에 대입하면,

$$\Delta R = \pm \frac{\epsilon F}{2K_s} \sin 2\theta = \pm \frac{\epsilon F}{K_s} \sin \theta \cos \theta$$

가 된다. 여기서, $K_s = \sqrt{K_{sx} \cdot K_{sy}}$ 이고, ε 은 서보계인

불일치 오차로서 $\varepsilon = \frac{K_{sy} - K_{sx}}{K_s}$ 로 정의된다. 이것을 극 좌표 형식으로 나타내면 원호 보간의 방향에 따라 ± 45 도로 기울어진 타원 궤도가 되며, 해석의 용이함을 위해서, $\varepsilon F / F_s$ 를 m_{xy} 로 대체하였다. YZ, ZX 평면에 대해서는 m_{yz} , m_{zx} 를 각각 대체하여 해석하였다.

2.3 3차원 입체 오차와 원호 보간 오차

(1) 3차원 입체 오차

본 연구에서는 서울대학교 공작실에 설치되어 있는 컬럼 타입의 CNC 밀링 머신을 대상으로 Fig.3과 같이 좌표계 정의가 되고 있으므로, 이 경우의 입체 오차 방정식은 기구학적 연계를 고려한 오차변환행렬을 이용해서 유도하는 것이 가능하다. ⁽¹⁰⁾

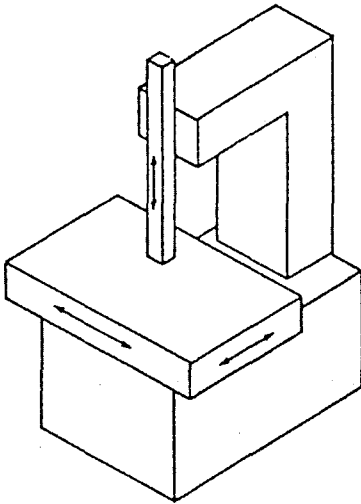


Fig. 3 A column type structure for milling machine

이 경우의 입체 오차 방정식은

$$\begin{aligned} \Delta X &= \hat{\alpha}_x(x) - \hat{\alpha}_x(y) + \hat{\alpha}_x(z) + z[-E_y(y) - \beta_1 - E_y(x)] + y[E_z(y) + E_z(x)] \\ &\quad + Yp[E_z(x) + E_z(y) - E_z(z)] + Zp[-E_y(x) - E_y(y) + E_y(z)] \\ \Delta Y &= -\hat{\delta}_y(x) + \hat{\delta}_y(y) + \hat{\delta}_y(z) + x[-E_x(x) + \alpha] + z[Ex(x) + Ex(y) - \beta_2] \\ &\quad + Xp[-E_x(x) - E_x(y) + E_x(z)] + Zp[Ex(x) + Ex(y) - Ex(z)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta Z &= \hat{\alpha}_z(x) - \hat{\alpha}_z(y) - \hat{\alpha}_z(z) + x \cdot E_y(x) + y[-E_x(x) - E_x(y)] \\ &\quad + Xp[E_y(x) + E_y(y) - E_y(z)] + Yp[-E_x(x) - E_x(y) + E_x(z)] \end{aligned}$$

여기서, Xp, Yp, Zp 는 공구의 움직임 벡터를 의미한다.

(2) 3 차원 입체 오차를 고려한 원호 보간 오차

3차원 입체 오차 방정식(식(7))과 앞에서 고려한 모든 오차 성분들을 그 파라미터들과 함께 식(1)에 대입하여 3차원 공간에서의 입체오차를 고려한 원호 보간 오차식을 얻는다.

즉, 반경 오차 R 은

$$\begin{aligned} \Delta R &= dx1\left(\frac{x}{R}\right)^2 + dyy1\left(\frac{y}{R}\right)^2 + dzz1\left(\frac{z}{R}\right)^2 + dxy2\left(\frac{x}{R}\right)\left(\frac{y}{R}\right)^2 + dxz2\left(\frac{x}{R}\right)\left(\frac{z}{R}\right)^2 \\ &\quad + dyy2\left(\frac{y}{R}\right)\left(\frac{x}{R}\right)^2 + dyz2\left(\frac{y}{R}\right)\left(\frac{z}{R}\right)^2 + dxz2\left(\frac{x}{R}\right)\left(\frac{z}{R}\right)^2 + dzy2\left(\frac{z}{R}\right)\left(\frac{y}{R}\right)^2 \\ &\quad - \frac{dxb}{2} \text{sign}(x) - \frac{dyb}{2} \text{sign}(y) - \frac{dzb}{2} \text{sign}(z) \\ &\quad - \beta_1\left(\frac{z}{R}\right)\left(\frac{x}{R}\right) + \alpha\left(\frac{x}{R}\right)\left(\frac{y}{R}\right) - \beta_2\left(\frac{y}{R}\right)\left(\frac{z}{R}\right) \\ &\quad + m_{xy}\left(\frac{x}{R}\right)\left(\frac{y}{R}\right)Dir + m_{yz}\left(\frac{y}{R}\right)\left(\frac{z}{R}\right)Dir + m_{zx}\left(\frac{z}{R}\right)\left(\frac{x}{R}\right)Dir \end{aligned} \quad (8)$$

이때, 계산의 용이성과 모델의 단순화를 위해서 위치 오차는 1차 성분, 진직도 오차는 2차 성분만 고려하였다. 이는 계산의 용이성 이외에도 실제적으로 열변형, 피치 오차등의 패턴이 위치 오차의 경우 반경 150mm의 작은 구간에서 1차식으로 근사화해서 모델링을 수행한 것이 레이저등을 이용해서 측정된 위치오차 데이터를 비교적 근사하게 모델링하는 것으로 알려져 있으며⁽⁹⁾, 또한 가이드 진직도 오차의 경우는 가공력, 탄성력 등에 의해서 2차원 포물선 형태의 오차 모델링이 상당히 실제적인 근사를 가지는 것으로 사료되기 때문이다. 공구 움직임의 영향과 톨오차는 고려하지 않았다. Dir 는 원호 보간이 시계 방향일 때 1을, 반시계 방향일 때 -1을 반환하는 함수이다.

2.4 오차 진단 방법

기구불바를 이용한 운동오차 신호 분석에 의한 공작기계 운동오차 원인 진단은 앞에서 기술한 바와 같이 오차의 원인 별로 서로 다른 형태의 운동오차를 유발한다는 것에 기초한다. 그러나 여러 가지 오차가 동시에 개입되어 출력 신호가 발생되기 때문에 운동오차 원인을 분석한다는 것은 다입력 단일 출력계에 대한 입력 성분 규명 문제가 된다. 각 오차 패턴이 항상 서로 독립적이지는 않기 때문에 모든 오차 원인을 효과적으로 분류, 분석할 수 있는 방법이 요구된다. 이를 위한 방법으로 본 연구에서는 최소자승법을 사용하였다.

기구불바를 이용하여 측정할 때 나타나는 운동오차는

다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\Delta R_m = \sum_{i=1}^m a_i F_i \quad (9)$$

- F_i : i 번째 오차원인에 대한 운동 오차 성분 함수
- m : 고려한 오차 원인의 개수
- a_i : 운동오차 원인의 크기

최소자승법의 기본적인 풀이법에 적용하면 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} Dev &= \Delta R_r - \Delta R_m \\ E &= \sum_j Dev^2 \\ \frac{\partial E}{\partial a_i} &= 0 = 2 \cdot \sum_j (\Delta R_m - \Delta R_r) \frac{\partial (\Delta R_m)}{\partial a_i} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, 각 변수의 의미는 다음과 같다.

- j : 측정 데이터의 개수
- R_r : 측정된 운동오차 신호
- R_m : 수학적으로 모델링된 운동오차
- Dev : 실측값과 모델링된 값 사이의 편차

이 때 식 (9)에서 알 수 있듯이 $\frac{\partial (\Delta R_m)}{\partial a_i} = F_i$ 이므로 식 (10)를 다시 쓰면

$$\begin{aligned} 2 \cdot \sum_j (\Delta R_m - \Delta R_r) F_i &= 0 \\ \sum_j \Delta R_m \cdot F_i &= \sum_j \Delta R_r \cdot F_i \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $f = (F_0 F_1 \dots F_n)^T$, $a = (a_0 a_1 \dots a_n)^T$ 으로 놓으면, 식 (11)를 모든 i 에 대해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_j (f \cdot f^T) a = \sum_j (\Delta R_r \cdot f) \quad (12)$$

다시 나타내면 아래와 같이 다원 일차 연립 방정식 문제가 됨을 알 수 있다.

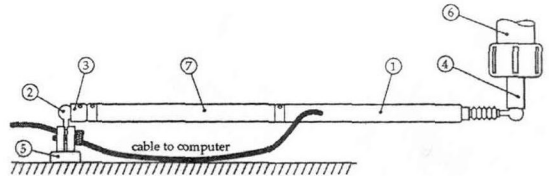
$$Ca = d \quad (13)$$

여기서 $d_i = \sum_j (\Delta R_r \cdot f)$

식 (13)을 풀어서 운동오차 원인들의 크기를 구한다. 일차 독립인 오차 함수들을 택한 경우에만 행렬 C 가 특이성(Singularity)을 가지지 않아 유일 해를 얻을 수 있다.

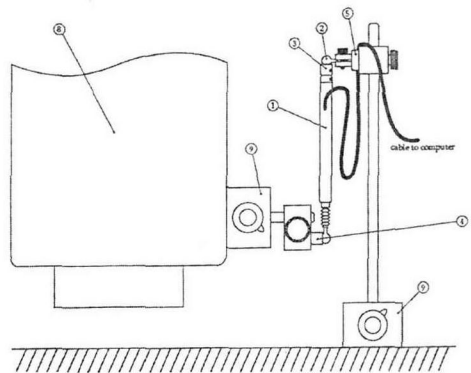
2.5 오차 평가를 위한 측정 경로의 결정

기구불바를 이용한 가공기의 정밀도 평가 기술에 있어서 또 하나의 중요한 사항은 종합적인 오차 평가를 위한 적절한 측정 경로의 산출이다. 2차원 평면 측정 경로에서는 직각도, 위치 오차, 진직도 오차, 백래시 오차와 동적 오차 등이 얻어지게 된다. 본 연구에서는 3개의 2차원 직교 평면에 대한 측정 경로를 고려하여 여러가지 기하학적인 오차가 측정될 수 있도록 하였다. Fig.4(a)는 XY평면에서의 기구불바의 측정 셋업을 모이고 있으며, Fig.4(b)는 YZ 평면, ZX 평면에서의 기구불바의 측정 셋업을 보이고 있다.



- Key :
- | | |
|----------------------------|-------------------------|
| 1 Ballbar transducer | 5 Magnetic center mount |
| 2 Ball joint(center mount) | 6 Tool holder |
| 3 Magnetic center cup | 7 Extension bar |
| 4 Magnetic tool cup | |

Fig. 4(a) Set up of the kinematic ball bar to calibrate a 360° arc in the XY plane



- Key :
- | | |
|-----------------------------|-------------------|
| 1 Ballbar transducer | 6 (not used) |
| 2 Ball joint (center mount) | 7 (not used) |
| 3 Magnetic center cup | 8 Machine spindle |
| 4 Magnetic tool cup | 9 Magnetic stand |
| 5 Magnetic center mount | |

Fig.4(b) Set up of the kinematic ball bar to calibrate a 360° arc in the YZ and ZX plane

3. 실험 및 해석

3.1 실험 장치

본 연구에서 대상이 되는 공작기계는 일본 히다치 세이키(Hitachi-Seiki)사의 VA-40 컬럼 타입(Column type) 머시닝 센터이며, 영국 레니쇼우(Renishaw)사의 공칭 길이 150mm의 기구볼바를 사용하여 오차를 측정하였다. 정확한 길이 교정을 위해서 제로더(Zerodur)로 제작한 교정치공구를 사용하여 교정하였다. Fig.5는 기구볼바를 머시닝센터에 장착하여 오차를 측정하는 셋업을 보이고 있다.

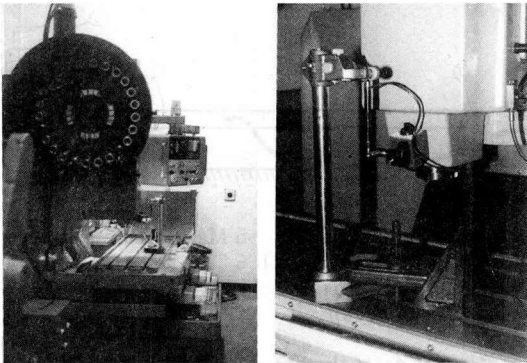


Fig. 5 Set up for the ball bar measurement

```
G91
G00 Y-194.585 Z-306.880
X67.946
G92 X-50. Y0 Z0
G90
Y-151.5
X0
G01 F500
G19
G04 P5000
G01 Y-150.
G03 J150.
G03 J150.
G01 Y-151.5
G04 P5000
G01 -150.
G02 J150.
G02 J150.
G01 Y-151.5
M30
```

Fig. 6 CNC code for the ball bar measurement

3.2 실험 및 결과

기구볼바 측정을 위한 3차원 측정 경로를 얻기 위해 개발된 컴퓨터 프로그램으로 CNC 코드를 자동 생성한다. 그리고 CNC 코드의 디버깅을 위해 공작기계를 작동시킨다. 측정경로에 이상이 없음을 확인한 후 기구볼바 측정 장치를 공작기계에 설치하고 측정 경로에 따라 측정을 한다. Fig.6은 자동 생성된 CNC코드의 예를 보이고 있다.

각 평면에 대해 측정된 데이터를 Fig.7에 출력하였다. Fig.7에서 점선은 반시계 방향으로의 측정결과이며, 실선은 시계 방향의 측정 결과를 보인다. 특히, Z축이 포함된 XZ, YZ 평면에서의 오차가 매우 큼을 보이고 있다.

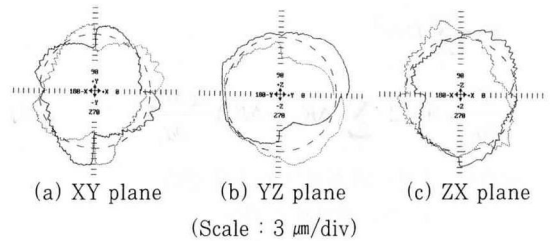


Fig. 7 Measurement data using the kinematic ball bar

Positional Error	Squareness Error
dxx1 = -0.002426	alpha = 0.003148
dxx2 = 0.000000	beta1 = 0.002735
dxx3 = 0.000000	beta2 = -0.000508
dyy1 = 0.006769	
dyy2 = 0.000000	Backlash Error
dyy3 = 0.000000	dx = 0.005903
dzz1 = -0.011593	dy = 0.011342
dzz2 = 0.000000	dz = 0.002882
dzz3 = 0.000000	
	Servo Mismatch
Straightness Error (Pitch & Yaw)	xy_mis = 0.005874
dx2 = 0.000986	yz_mis = -0.019484
dxy3 = 0.000000	zx_mis = -0.001987
dxz2 = -0.001688	
dxz3 = 0.000000	
dyx2 = -0.000514	
dyx3 = 0.000000	
dyy2 = -0.005177	
dyy3 = 0.000000	
dzx2 = -0.001838	
dzx3 = 0.000000	
dzy2 = -0.001986	
dzy3 = 0.000000	

(Unit : mm , Measurement Range : 150 mm)

Table 1 Results of the assessment of the machine tool volumetric errors

3.3 해석 결과

개발된 해석 모듈을 이용하여 해석한 결과를 Table.1에 출력하였고, 측정 데이터의 오차를 보정한 후 다시 해석된 결과를 극좌표 형식으로 Fig.8에 나타내었다. 결과로서 개발된 해석 모듈이 매우 효율적으로 가공기계의 오차를 측정, 보정하고 있음을 보이고 있다.

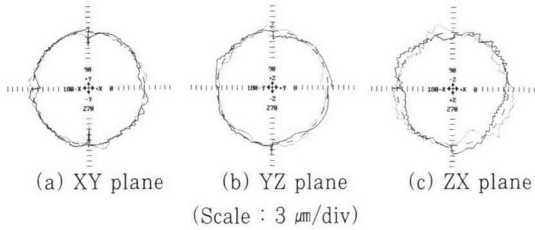


Fig. 8 Measurement data after the parametric error compensation

4. 결 론

(1) 본 연구에서는 기구볼바를 이용하여 가공기의 3차원 작업 공간에서의 오차 측정 기술 개발을 위한 컴퓨터 응용 시스템의 구현되었다.

(2) 공작기계의 3차원 작업공간에서의 입체오차를 고려하여 3차원 공간에서의 각 파라메트릭 오차는 물론, 서보계인 오차등의 동적 오차 등도 매우 효율적으로 분석할 수 있는 시스템을 구현하였다.

(3) 향후 좀 더 많은 오차 성분들을 평가할 수 있도록 측정 모듈을 향상시키고, 공작기계 콘트롤러에 직접 인터페이스하여 보정 시스템을 구현할 계획이다.

본 연구는 '94 교육부 기계공학학술연구구성비의 지원에 의한 연구임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. M.Burdekin, W.Jywe, "Optimising the contouring accuracy of CNC machines using the

Contisure System", the 31st MATADOR Conference, pp.371-378, 1993.

2. W.Knapp, "Test of Three Dimensional Uncertainty of machine Tools and Measuring Machines and its relation to the machine errors", Annals of CIRP, Vol.32, No.1, pp.459-464, 1983.
3. J.Bryan, "A simple method for Testing Measuring Machines and Machine Tools", Precision Engineering, Vol.4, No.2, 1982.
4. M.Burdekin, J. Pahk, "A Computer Aided System for Assessing the Contouring Accuracy of NC Machine Tools", the 28th MATADOR Conference at UMIST, 1988.
5. H.Kunzmann et al., "On testing Coordinate Measuring machines with Kinematic reference standards", Annals of CIRP, Vol.32, No.1, pp.465-468, 1983.
6. Y.Kakino et al., "The measurement of motion errors of NC Machine Tools and diagnosis of their origins by using telescoping magnetic ball bar method", Annals of CIRP, Vol.36, No.1, pp.377-380, 1987.
7. 홍성욱, 신영재, 이후상, "원호보간시험에 의한 수치제어 공작기계의 운동오차원인 진단에 관한 연구," 한국정밀공학회지
8. Renishaw Ballbar Diagnostic Manual
9. Heujae Pahk, Jonghoo Kim, "Application of Microcomputer for assessing the probe lobing error and geometric errors of CMMs using commercial ring gauges", Int. J. of Adv. Manuf. Tech., Vol.10, pp.208-218, 1995.
10. 박희재, 정밀도 성능 평가를 위한 3차원 측정기 수치 모델 개발, 945-959, 20(3), 대한기계학회논문집, 1996.