

# 볼바 측정을 통한 공작기계 위치오차의 통계적 분석

류순도\*(경북대 대학원 기계공학부), 양승한(경북대 기계공학부)

## Statistical Analysis of the Position Errors of a Machine Tool Using Ball Bar Test

Soon-Do Ryu(Graduate School, Kyungpook National Univ.), Seung-Han Yang(Kyungpook National Univ.)

### ABSTRACT

The use of error compensation techniques has been recognized as an effective way in the improvement of the accuracy of a machine tool. The laser measurement method for identifying position errors of machine tool has the disadvantages such as high cost, long calibration time and usage of volumetric error synthesis model. Accordingly, this paper deals with analysis of the position errors of a machine tool using ball bar test without using complicated error synthesis model. Statistical analysis method was adopted in this paper for deriving position errors using hemispherical helix ball bar test.

**Key Words** : Position errors of a machine tool(공작기계 위치오차), Volumetric error synthesis model(체적오차 합성모델), Statistical analysis method(통계적인 분석 방법), Hemispherical helix ball bar test(반구상의 나선형 볼바 측정)

### 1. 서론

실제 산업 현장에서 주로 사용되는 CNC 공작기계의 성능 향상을 위해서는 오차 보정 기술이 매우 효과적인 방법이다. 이를 위해서는 정밀한 오차 측정이 필수적이다. 대부분은 공작기계의 오차를 레이저 측정장치로 측정하고 있는데 이러한 레이저 측정장치는 측정조건이 까다롭고 측정시간이 많이 소요되며, 무엇보다 가격이 비싸서 실제 생산현장에서 쉽게 적용하기가 어려운 점이 많다.

레이저 측정방법의 대안으로 Bryan[1]은 1982년에 공작기계의 오차를 정밀한 볼바 LVDI(linear variable differential transformer)를 사용하여 측정하는 방법을 새롭게 제안했다. Kunzmann 과 Waldele[2]는 3차원 측정기(CMM)의 선형변위 오차와 직각도 오차를 고정된 볼바 측정 범으로 추정하였고, Kakino[3]는 다양한 형태의 운동오차와 볼바

측정 결과와의 관계를 기술하였다. Park[4]도 볼바를 이용하여 공작기계의 오차를 평가하는 방법을 제안하였다. 이러한 편리함으로 공작기계의 오차를 정기적으로 자주 확인하기 위해서 저가의 볼바 시스템이 널리 쓰이고 있으나, 완전하게 공작기계의 위치 오차를 분석하는 방법에는 여러 문제점이 있었다.[5]

공작기계의 오차평가를 위해서 제시된 지금까지의 방법은 각 운동 축의 오차성분을 측정하고 오차합성모델을 통해 기계의 위치오차를 추정하고 보정하는 방법이었다. 따라서 측정된 값을 직접 보정 값으로 사용할 수 없었다.

Barakat[6]는 축약된 오차모델을 이용하여 3차원 측정기의 오차를 보정하였다. Yang[7]은 21가지 오차성분 중 선형변위 오차와 직각도 오차가 체적오차에 주된 영향을 끼침을 통계적 검증방법으로 분석했다. 또한, 기존 볼바의 평면 측정방법을 3차원

측정으로 확장하여 측정 시간 및 set-up 오차를 줄이는 방법을 제시했다. 본 논문에서는 앞선 연구들을 바탕으로 3차원 볼바 측정방법을 통하여 수평형 3축 머시닝 센터(Cincinnati Milacron T-10)의 위치오차를 간단히 파악하고 바로 보정할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 이를 위해서 회귀 분석이라는 통계적인 방법을 적용하였으며 레이저 측정 시스템(HP5528)으로 구한 오차와 비교 시뮬레이션 하였다.

## 2. 오차 모델링

공작기계의 오차는 크게 준 정적 오차와 동적 오차로 나눌 수 있으며, 준 정적 오차에는 기하학적 오차와 열변형 오차가 있다. 열적인 영향이 없는 경우 공작기계의 위치오차에 영향을 미치는 것은 기하학적 오차와 CNC 컨트롤러이며 이 두 가지는 서로 관련이 있다.[6] 모델링에서는 컨트롤러의 영향은 아주 작으므로 기하학적 오차성분만을 사용하였다.

각 축에 대하여 3개의 병진오차와 3개의 회전오차, 그리고 두 축사이의 직각도 오차를 사용하여 총 21가지의 기하학적 오차성분으로 체적오차 합성 모델을 유도하였다. 모델 식은 공작물과 공구 끝의 기구학적 인쇄구조를 동변환 행렬(Homogeneous transformation matrix)로 나타내어 그 차이를 체적오차 벡터로 표현하였다.[7]-[8] 결과는 식(2)와 같다.

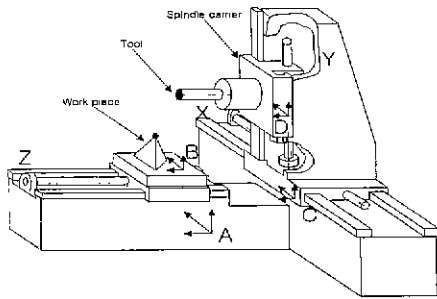


Fig.1 Structure of T-10 Machining Center

$$\begin{aligned} \Delta x &= \delta_{xx} + \delta_{xy} - \delta_{xz} + (T_z + L)\epsilon_{yx} + (T_z + L)\epsilon_{yy} \\ &\quad - (T_z + L - z)\epsilon_{yz} - (T_y + y)\epsilon_{zx} - T_y\epsilon_{zy} \\ &\quad + (T_y + y)\epsilon_{zz} - y \cdot S_{xy} \\ \Delta y &= \delta_{yx} + \delta_{yy} - \delta_{yz} - (T_z + L)\epsilon_{xx} - (T_z + L)\epsilon_{xy} \\ &\quad + (T_z + L - z)\epsilon_{xz} + T_x\epsilon_{zx} + T_x\epsilon_{zy} \\ &\quad - (T_x + x)\epsilon_{zz} \\ \Delta z &= \delta_{zy} + \delta_{zx} - \delta_{zz} + (T_y + y)\epsilon_{xx} + T_y\epsilon_{xy} \\ &\quad - (T_y + y)\epsilon_{xz} - T_x\epsilon_{yx} - T_x\epsilon_{yy} \\ &\quad + (T_x + x)\epsilon_{yz} - x \cdot S_{xz} - y \cdot S_{yz} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Delta \vec{W}_B = \Delta W_B(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \quad (2)$$

여기서,

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$  : X, Y, Z 방향 위치오차

$\Delta \vec{W}_B$  : 공작물 체적오차 벡터

$T_x, T_y, T_z$  : 스피들 캐리어 좌표계 D에서 표준 공구팁의 좌표

L : 공구교환시, 공구웁셋길이

x : X축 좌표계에서 새들의 이동거리

y : Y축 좌표계에서 스피들 캐리어의 이동거리

z : Z축 좌표계에서 크로스 슬라이드 이동거리

$\delta_{xx}, \delta_{yy}, \delta_{zz}$  : X, Y, Z축 방향의 선형변위오차

$\delta_{yx}, \delta_{zx}, \delta_{xy}, \delta_{zy}, \delta_{xz}, \delta_{yz}$  : 진직도오차

$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$  : X, Y, Z축 방향의 롤

$\epsilon_{yx}, \epsilon_{zx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{zy}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{yz}$  : 각도오차

$S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}$  : 두 축사이의 직각도오차

첫 아래 첨자는 오차의 방향을 나타내고, 다음 아래 첨자는 슬라이드가 움직이는 방향을 나타낸다.

## 3. 볼바 방정식

볼바는 두 개의 정밀한 볼과 그 사이를 연결하는 막대로 구성되며 그 안에 길이의 변화를 측정할 수 있는 LVDT가 장착되어 있다. 볼바 측정 방법에는 공작기계의 운동 오차를 측정할 수 있는 동적 테스트와 준 정적오차를 측정할 수 있는 정적 테스트가 있다. 여기에서는 위치오차의 파악을 위해서 정적 테스트에 초점을 맞추었다.

3차원상의 볼바가 가지는 위치를 고려하여 Fig.2와 같이 나타내었다.

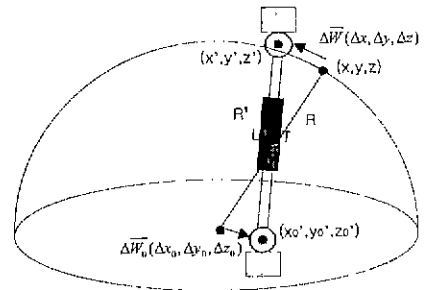


Fig.2 Schematic Diagram for 3 dimensional Ball Bar Test

실제 LVDT에서 측정되는 값, 반경오차  $\Delta R$  은 아래 식으로 유도된다.[7]

$$\begin{aligned} R\Delta R &= (x - x_0)(\Delta x - \Delta x_0) + (y - y_0)(\Delta y - \Delta y_0) \\ &\quad + (z - z_0)(\Delta z - \Delta z_0) \end{aligned} \quad (3)$$

#### 4. 통계적 분석 방법

식(1)에서 구한 위치오차 식에 레이저 측정으로 구한 오차성분을 대입하면 모두 X,Y,Z축 슬라이드 위치에 종속적인 함수로 표현된다. 이 것을 식(3)에 대입하여 방정식을 풀면 된다. 하지만, 이를 행렬 형태로 나타내면 우변에 선형 종속인 열이 생기게 되어 불바 방정식을 풀 수 없게 된다. 본 논문에서는 다중회귀분석(multiple regression analysis)방법을 사용하여 이 문제를 해결하였다. 이 회귀 모델은 식(1)의 형태와 유사하게 축약되었고 아래와 같은 위치의 함수로 표현하였다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= a_1 X^2 + a_2 X + a_3 Y + a_4 \\ \Delta y &= b_1 Y^2 + b_2 Y + b_3 \\ \Delta z &= c_1 X + c_2 Y + c_3 Z^2 + c_4 Z + c_5 \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)를 식(3)에 대입하고 행렬로 나타내면 아래와 같은 선형연립 방정식의 형태로 표현된다.

$$b = Ax \quad (5)$$

여기서,

$$b^T = [R \ \Delta R]$$

$$A^T = \begin{bmatrix} (x_i - x_0)(x_i^2 - x_0^2) \\ (x_i - x_0)^2 \\ (x_i - x_0)(y_i - y_0) \\ (y_i - y_0)(y_i^2 - y_0^2) \\ (y_i - y_0)^2 \\ (z_i - z_0)(x_i - x_0) \\ (z_i - z_0)(y_i - y_0) \\ (z_i - z_0)(z_i^2 - z_0^2) \\ (z_i - z_0)^2 \end{bmatrix}$$

$$x^T = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ b_1 \ b_2 \ c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4]$$

$b$ 는  $n$ 차원 반경오차 벡터,

$A$ 는 측정점의 위치를 나타내는  $n \times 9$  행렬,

$x$ 는 모델 계수 벡터,

$i=1,2,\dots,n$  까지의 측정 점 위치

최소자승법을 사용하면 모델 계수 벡터  $x$ 를 아래의 식에서 추정할 수 있다.

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (6)$$

식(6)에서 회귀모델의 상수항을 구할 수 없다. 이것은 불바가 상대적 위치오차의 조합으로 나타남으로 서로 제거되기 때문이다. 그러나 기계원점에서 위치오차는 없는 것으로 간주할 수 있기 때문에 보편성을 잃는 것은 아니다.

#### 5. 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션 과정은 다음과 같이 하였다

- 1) 레이저로 측정된 오차성분을 식(1)에 대입하여 위치오차를 구한다.
- 2) 불바 중심을(150,0,150)지점으로 잡는다
- 3) 불바 반지름을 150 mm로 하고 Fig. 3과 같이 반구상의 나선형 불바 측정을 갖는다.
- 4) 불바가 움직이는 경로 중 63개의 지점을 측정점으로 잡고 그 지점에서의 오차를 구한다.
- 5) 4)에서 구해진 벡터  $b$ 를 식(6)에 대입하여 회귀모델의 계수 값을 구한다.
- 6) 체적오차 합성 모델을 이용하여 구한 위치오차와 가상의 불바 측정을 통해 구한 위치오차 값을 서로 비교한다.

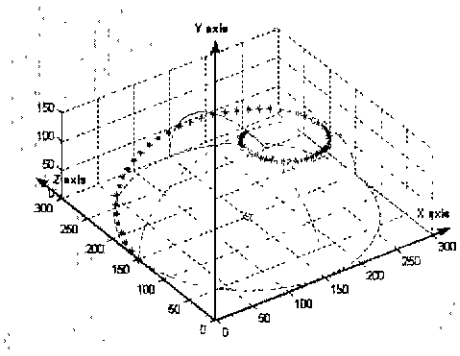


Fig.3 Nominal path of 3 dimensional Ball Bar Test

레이저 측정값을 실제 값으로 가정하고, 불바 측정으로 추정된 값과 비교해보았다. 그 결과 x 축, z 축 방향 위치오차는 각각 10 $\mu$ m 이내, y 축 방향 위치오차는 15 $\mu$ m 이내로 비교적 정확함을 알 수 있었다.

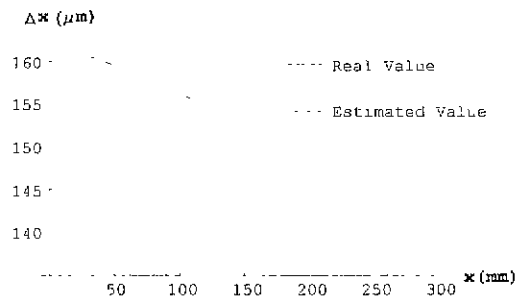


Fig.4 Position error of x-axis at y=100mm, z=200mm

## 6. 결론

1) 고가의 레이저 측정 시스템 대신 간편한 볼바 측정 시스템을 사용하여 공작기계의 위치오차를 추정할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

2) 이 알고리즘에서는 측정된 반경오차로 위치오차를 추정하기 위해 통계적 분석방법을 적용하였다.

3) 시뮬레이션 결과 이 알고리즘을 사용하면 수평형 공작기계의 체적 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 보여주었다.

4) 복잡한 체적오차 합성 모델을 사용하지 않고 간단한 회귀식을 사용하여 보정하기 쉬운 장점이 있다.

## 참고문헌

1. J. B. Bryan, "A simple method for testing measuring machine tools", Precision Engineering, 4(?), 61-69, 1982.
2. Kunzmann, H., and Waldele, F., "On Testing Coordinate Measuring Machines(CMM) with Kinematic Reference Standards(KSR)," Annals of CIRP, V32(1), pp.465-468, 1983
3. Kakino, Y., "The Measurement of Motion Error of NC Machine Tools and Diagnosis of their Origins by Using Telescoping Magnetic Ball Bar Method", Annal of the CIRP, 36(1), 377-380, 1987.
4. H J Pahnk, Y. S Kim, "A New Technique for Volumetric Error Assessment of CNC Machine Tools Incorporating Ball Bar Measurement and 3D Volumetric Error Model", Int. J. Machine Tools and Manufacture, 37(11), pp.1583-1596. 1997.
5. Hai, N., Yuan. J., and NI, J. "Reverse Kinematic Analysis of Machine Tool Error Using Telescopic Ball Bar", ASME, PED-Vol. 68-1, pp 277-286, 1994.
6. N.A. Barakat et al., "Kinematic and geometric error compensation of a coordinate measuring machine", Int. J. Machine Tools and Manufacture, 40, pp 833-850, 2000.
7. 양승환, 김기훈 "반구상의 나선형 볼바측정을 통한 공작기계 오차해석의 역기구학적 접근", 한국정밀공학회지, 제18권, 제3호. 2001
8. S. Yang, J. Yuan, J NI, "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Error Compensation". Journals of Manufacturing Systems, Vol. 15, No 2, pp.113-118, 1996.

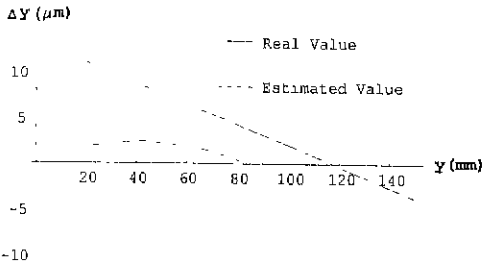


Fig.5 Position error of y-axis at  $x=200\text{mm}$ ,  $z=200\text{mm}$

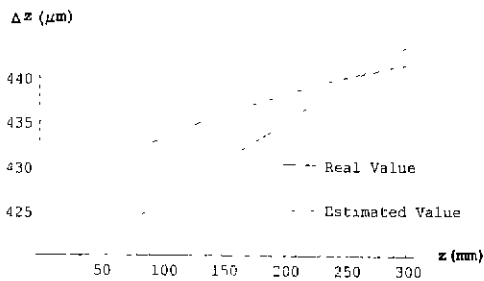


Fig.6 Position error of z-axis at  $x=100\text{mm}$ ,  $y=100\text{mm}$

회귀모델로 추정된 위치오차를 보정 값으로 넣고 다시 반구상의 나선형 볼바 측정을 한 결과, Fig.8 과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 반경오차가  $300\mu\text{m}$  정도에서  $4\mu\text{m}$  정도로 좋은 보정결과를 얻을 수 있었다.

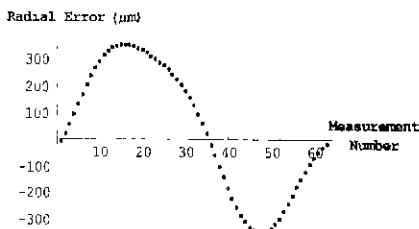


Fig.7 Radial errors before compensation

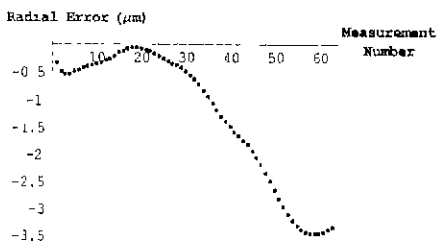


Fig.8 Radial errors after compensation