

◆특집◆ 금형가공용 초고속 지능형 절삭 시스템

볼바를 이용한 공작기계의 3차원 공간오차 해석

이호영*, 최현진#, 손재환*, 이달식**

Analysis of 3D Volumetric Error for Machine Tool using Ball Bar

Ho-Young Lee*, Hyun-Jin Choi#, Jae-Hwan Son*, Dal-Sik Lee**

(Received 30 September 2011; received in revised form 5 October 2011; accepted 6 October 2011)

ABSTRACT

Machine tool errors have to be characterized and predicted to improve machine tool accuracy. Therefore, it is very important to assess errors in machine tools. Volumetric error analysis has been developed by many researchers. This paper presents a useful technique for analyzing the volumetric errors in machine tools using the ball bar. The volumetric error model is proposed in specific vertical machining center and the program is developed for generating NC code, acquiring the ball bar data, and analyzing the volumetric errors. The developed system assesses the volumetric errors such as positional, straightness, squareness, and back lash. Also this system analyzes the dynamic performance such as servo gain mismatch. The radial data acquired by ball bar on 3D space is used for analyzing these errors. It is convenient to test the volumetric errors on 3D space because all errors are calculated at once. The developed system has been tested using an actual vertical machining center.

Key Words : Volumetric Error(공간오차), Ball Bar(볼바), Machine Tools(공작기계), Error Analysis(오차분석), Straightness(진직도), Squareness(직각도), Backlash(백래쉬)

1. 서 론

공작기계의 사용은 무인생산과 대량생산으로 인하여 그 사용량이 늘고 있으며, 시간이 지날수록 정밀도의 중요성이 늘어나고 있는 추세이다. 따라서 오차를 줄이는 것이 중요한 문제로 대두되고 있다. 공작기계에서는 여러 가지 요인으로 인하여 실제 공작물에는

오차가 발생할 수 있으며 이러한 오차는 불량률로 직결되기 때문에 불량률을 낮추기 위해서 공작물 가공 오차를 줄일 수 있는 방법에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 공작기계의 정밀도 및 공간오차를 평가하기 위한 방법은 여러 연구자에 의해 많이 연구되어 왔다. 공간오차 분석에 관하여 이상윤, 박준호 등은 공간 오차식을 제시하고 레이저 간섭계를 이용한 공간오차 측정방법과 기구적 볼바를 적용한 측정방법을 개선하였으며^[1], 박희재는 정밀도 성능평가를 위한 3차원 측정기 수치모델 개발에서 측정기 모델에 따른 3차원 입체오차 모델링을 수행하였다^[2]. 볼바를 이용한 측정에 대해서 박희재, 김영삼 등은 볼바를 이용하여 측정

* 대구기계부품연구원

교신저자 : 대구기계부품연구원

E-mail : knut21c@dmi.re.kr

** (주)유지인트

한 데이터에 입체오차 모델을 적용하여 공작기계의 오차를 분석하였으며^[3], 김기훈과 양승환은 헬리컬 볼바 측정기를 사용하여 공작기계의 오차해석을 수행하였다^[4]. 또한, 이세희 등은 볼바 시스템을 이용한 기상측정오차 보정에 대한 연구를 수행하였다^[5].

본 논문에서는 과제 수행을 통하여 개발된 공작기계의 공간오차를 분석하기 위하여 개발된 공작기계에 맞게 공간오차 모델식을 정하고, 볼바를 이용한 측정 데이터를 이용하여 공간오차를 분석하는 프로그램을 개발하였다. 또한 개발된 공작기계에 적용하여 그 결과를 고찰하였다.

2. 공간오차 모델링

2.1 공작기계의 구조

본 논문에서는 공작기계의 구조에 맞게 공간오차 모델을 구성하고 이에 대한 분석을 수행하였다. 3차원 공작기계의 공간오차의 계산은 공작기계의 기구학적 구조에 따라 다르게 계산되므로, 본 논문에서 적용한 공작기계의 형태는 인덱스 테이블이 장착된 5축 수직형 머시닝센터로 XYZ축에 대한 공간오차를 분석하였다. Fig. 1은 공작기계의 3축의 구성을 보여준다. X축 위에 Z축이 위치하며, Y축은 독립적으로 구성되어 있다.

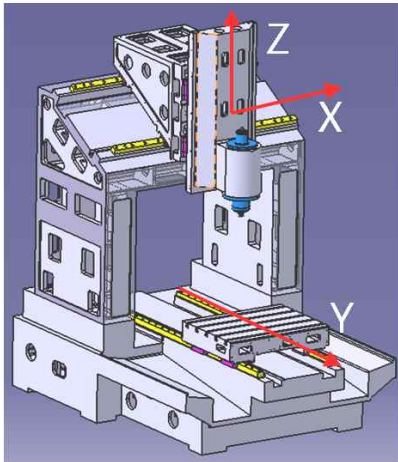


Fig. 1 Schematic of machine tool

2.2 공간오차 모델링

일반적으로 공작기계의 기하학적 오차는 3개의 직각 오차 요소와 Fig. 2에서처럼 각 축에서의 6개의 오차(3개의 병진오차와 3개의 회전오차) 요소로 정의한다^[3,4]. 공작기계의 공간오차 모델은 박희재^[2]가 제안한 3차원 측정기 수치모델을 본 공작기계에 맞게 적용하였다.

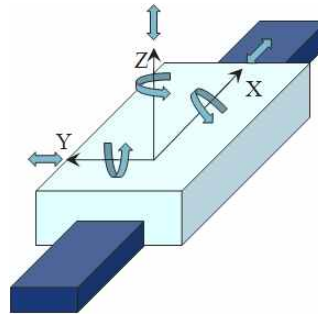


Fig. 2 Six DOF errors along an axis

공칭 좌표값을 $P(X, Y, Z)$ 로 실제 좌표값을 $P(X_a, Y_a, Z_a)$ 로 정의한다. 각 축에 대한 위치오차는 $(\delta_x(X), \delta_y(Y), \delta_z(Z))$ 이며, X축에 진직도에 따른 Y축 값의 오차는 $\delta_y(X)$, Z축 값의 오차는 $\delta_z(X)$ 이며, 같은 방법으로 Y축과 Z축에 대한 진직도 오차는 $\delta_x(Y), \delta_z(Y), \delta_x(Z), \delta_y(Z)$ 이다. 회전운동 오차는 $E_{x_i}(X_i)$ 로 표현되며, 이는 X_i 축을 따라서 정의되는 x_i 방향의 회전운동 오차로 정의된다. XY축 간의 직각도는 α , YZ축 간의 직각도 오차는 β_1 , ZX축 간의 직각도 오차는 β_2 로 정의한다^[3]. 본 논문에서 적용한 공작기계의 기하학적 구조에 각각의 오차를 적용하여, 이차항을 무시하고 정리하면 다음과 같이 3차원 공간에 대한 오차 모델식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta X &= X_a - X \\ &= \delta_x(X) + \delta_x(Y) + \delta_x(Z) + Y \cdot E_z(Y) \\ &\quad + Z(E_y(X) - E_y(Y) - \beta_1) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta Y &= Y_a - Y \\ &= \delta_y(X) + \delta_y(Y) + \delta_y(Z) + X(-E_z(Y) - \alpha) \\ &\quad + Z(-E_x(X) + E_x(Y) - \beta_2) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta Z &= Z_a - Z \\ &= \delta_z(X) + \delta_z(Y) + \delta_z(Z) \\ &\quad + X \cdot E_x(X) - Y \cdot E_y(X) \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 볼바를 이용한 오차 분석

볼바 측정의 특징은 일정한 거리의 원형을 측정하여 원을 기준으로 발생하는 오차 데이터를 분석하는 방법이다. 따라서 볼바에 의하여 측정되는 값은 중심으로부터 현재위치까지의 거리이며, 이 거리에 대한 오차 값을 측정하는 것이다.

기준이 되는 볼바의 반경을 R 이라 하면, 이에 대한 오차는 ΔR 이라고 정의할 수 있으며, 이를 공간오차 식으로 정리하면 다음과 같은 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$(R + \Delta R)^2 = X_a^2 + Y_a^2 + Z_a^2 \\ = (X + \Delta X)^2 + (Y + \Delta Y)^2 + (Z + \Delta Z)^2 \quad (4)$$

오차의 이차항을 무시하고 볼바의 측정반경 오차에 대해 정리하면 다음의 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\Delta R = (X\Delta X + Y\Delta Y + Z\Delta Z) / R \quad (5)$$

위 식에 박희재가 제안한 볼바를 이용한 공간오차 평가기법^[3]에 나오는 위치 오차, 진직도 오차, 회전 오차, 직각도 오차, 백래쉬 오차, 서보계인 불일치 오차를 적용하여 정리하면 다음의 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta R = & dx x_1 (X/R)^2 + dy y_1 (Y/R)^2 + dz z_1 (Z/R)^2 \\ & + dy x_2 (X/R)^2 (Y/R) - dz x_2 (X/R)^2 (Z/R) \\ & + dx y_2 (Y/R)^2 (X/R) + dz y_2 (Y/R)^2 (Z/R) \\ & + dx z_2 (Z/R)^2 (X/R) + dy z_2 (Z/R)^2 (Y/R) \\ & - \alpha X (Y/R) - \beta_1 Z (X/R) - \beta_2 Z (Y/R) \\ & - B_x / 2 (X/R) \text{sign}(dX/dt) \\ & - B_y / 2 (Y/R) \text{sign}(dY/dt) \\ & - B_z / 2 (Z/R) \text{sign}(dZ/dt) \\ & + M_{xy} (X/R) (Y/R) \text{Dir} \\ & + M_{yz} (Y/R) (Z/R) \text{Dir} \\ & + M_{zx} (Z/R) (X/R) \text{Dir} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,

- $dx x_1, dy y_1, dz z_1$: 위치 오차 계수
- $\left. \begin{matrix} dy x_2, dz x_2 \\ dx y_2, dz y_2 \\ dx z_2, dy z_2 \end{matrix} \right\}$: 진직도 오차 계수
- B_x, B_y, B_z : 백래쉬 오차 계수
- M_{xy}, M_{yz}, M_{zx} : 서보계인 불일치 오차
- $\text{sign}()$: 부호 함수
- Dir : 볼바 회전 방향

공간오차에 대한 분석은 위의 식 (6)을 이용하여 각각의 계수를 찾아내는 것이다. ΔR 은 볼바에 의해 측정되는 반경방향 오차값이며, X, Y, Z 는 공칭좌표값, R 은 공칭 반경이므로 알고 있는 값이다.

위의 식 (6)을 측정데이터 n 개에 대한 행렬로 나타내면, 볼바 측정에 의한 데이터 행렬을 ΔR_m 으로, 알고 있는 값의 행렬을 A , 찾아야 되는 계수의 행렬을 C 라고 하면,

$$\Delta R_m = A \cdot C \quad (7)$$

$$\Delta R_m = [\Delta R_1, \Delta R_2, \dots, \Delta R_n]^T$$

$$A = [A_1, A_2, \dots, A_n]^T$$

$$C = [dx x_1, dy y_1, dz z_1, dy x_2, dz x_2, dx y_2, \\ dz y_2, dx z_2, dy z_2, \alpha, \beta_1, \beta_2, \\ B_x, B_y, B_z, M_{xy}, M_{yz}, M_{zx}]^T$$

최소자승법으로 C 행렬을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C = (A^T \cdot A)^{-1} A^T \Delta R_m \quad (8)$$

3. 시스템 구성 및 프로그램 개발

3.1 시스템 구성

볼바를 이용한 측정시스템 및 프로그램의 구성은 아래와 같다. 개발된 프로그램에 의하여 생성된 NC 코드 데이터를 이용하여 공작기계를 구동하고 RS232C 통신을 이용하여 볼바 시스템으로부터 측정되는 데이터를 획득한다. 얻어진 데이터를 이용하여 공간오차를 분석을 수행한다. 다음의 Fig. 3은 측정시스템의 전체적인 개념도를 보여준다.

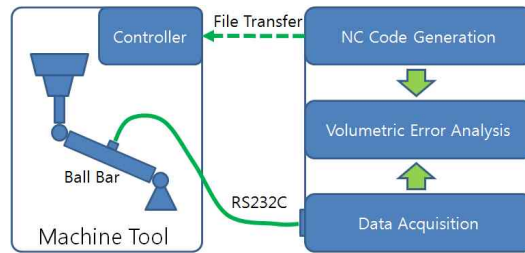


Fig. 3 Concept of analysis system

개발된 프로그램의 구성은 메인 화면에서 3가지의 기능으로 나누어지며, 먼저 공작기계를 구동하기 위한 NC 코드 생성부분과 데이터를 측정하는 측정부분, 측정된 데이터를 분석하는 분석부분으로 구성되어 있다. 프로그램은 Visual C++ 2005와 OpenGL을 이용하여 구현하였으며, 다음의 Fig. 4는 개발된 프로그램의 메인 화면을 보여준다.



Fig. 4 Main window of the program

3.2 NC 코드 생성

일반적으로 볼바를 이용한 측정은 평면상에 회전을 통하여 측정을 수행하게 된다. 3차원으로 볼바 측정^[4]을 수행하기 위해서는 공작기계가 3차원으로 움직이면서 볼바의 데이터를 측정해야만 한다. 따라서 3차원으로 움직일 수 있도록 NC 코드를 생성해 주어야 한다. Fig. 5는 NC 코드를 생성하는 화면으로 볼바의 회전 반경과 회전각 그리고 회전간격을 입력하면 먼저 위치 데이터를 생성하고 이를 이용하여 NC 코드를 생성하게 된다.

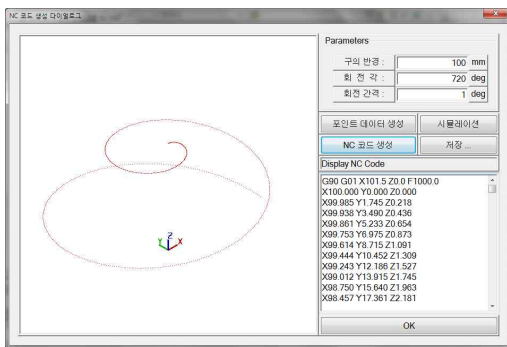


Fig. 5 NC code generation for ball bar test

3.3 데이터 획득 및 분석

볼바를 공작기계에 세팅한 후 위에서 생성된 NC 코드의 경로로 움직이면서 볼바의 데이터를 측정하게 된다. 측정에 사용된 볼바는 Renishaw사의 QC10 모델이며, RS232C 데이터 통신을 통하여 초당 250개의 데이터를 획득하게 된다.

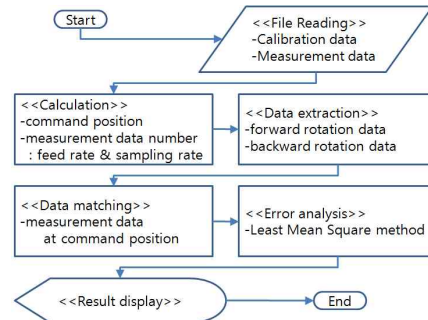


Fig. 6 Algorithm for volumetric error analysis

측정된 데이터는 우선 파일로 저장되며, 측정이 끝난 후 파일로부터 데이터를 분석하게 된다. Fig. 6은 측정 데이터로부터 공간오차를 분석하는 알고리즘을 보여준다.

4. 측정 및 분석 시험

4.1 측정 테스트

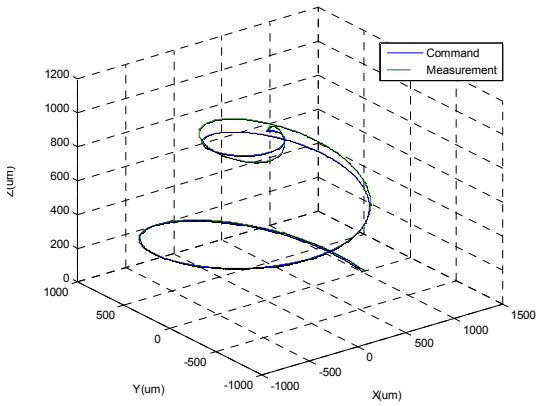
볼바 시스템을 수직형 머시닝센터에 장착하여 3차원 공간오차 분석 테스트를 수행하였다. 다음의 Fig. 7은 볼바를 장착하여 측정하는 모습의 사진이다. 볼바의 회전 반경은 100mm로 하였으며, 볼바의 회전각도는 720°로 1° 간격으로 회전하도록 하였다. 머시닝센터의 이송속도는 1000mm/min으로 설정하였다.



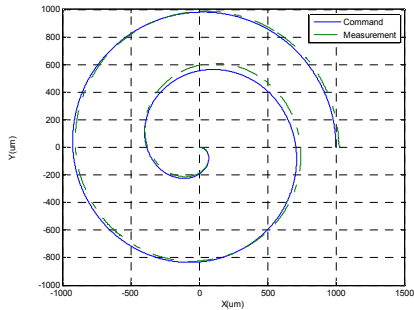
Fig. 7 Photograph of measurement test

4.2 분석 결과

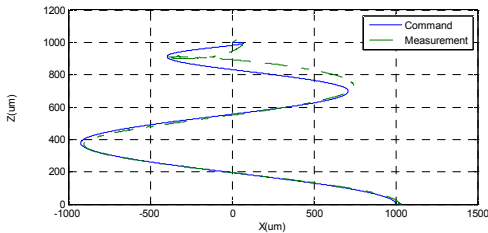
측정된 데이터를 이용하여 2절에서 설명된 방법으로 공간오차 분석을 수행하였다. 다음의 Fig. 8은 지령에 의한 3차원 좌표위치와 볼바에 의하여 측정된 위치를 비교하여 그린 그래프이다. 그래프에서 기준 반경은 지령치에 대하여 측정치의 오차를 볼 수 있도록 1mm로 하여 표현하였다. 측정된 데이터를 살펴보면, 처음에는 오차가 많지 않았으나 Z축 좌표값이 커질수록 오차가 커지는 것으로 나타났다.



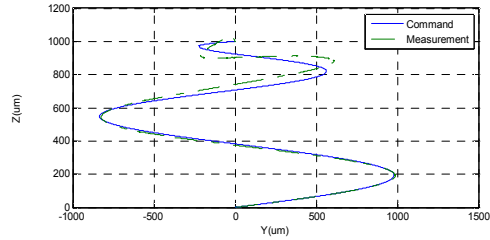
(a) 3D view



(b) XY plane



(c) XZ plane



(d) YZ plane

Fig. 8 Graph of command and measurement

Table. 1은 볼바를 이용하여 분석한 공간오차의 결과를 보여준다. 결과에서도 마찬가지로 Fig. 8에서 보는 것과 같이 Z축 관련한 진직도와 직각도 오차가 큰 것으로 나타났다.

Table 1 Analysis results of volumetric error

Error Type		Value
Position	X	24.5 μ m
	Y	20.2 μ m
	Z	1.8 μ m
Straightness	Y along X	-2.6 μ m
	Z along X	26.3 μ m
	X along Y	5.1 μ m
	Z along Y	-18.7 μ m
	X along Z	-56.3 μ m
	Y along Z	17.8 μ m
Squareness	XY	8.6 μ m
	YZ	-87.7 μ m
	ZX	142.9 μ m
Backlash	X	-2.7 μ m
	Y	-1.8 μ m
	Z	-2.0 μ m
Servo Gain Mismatch	XY	0.11ms
	YZ	0.01ms
	ZX	0.02ms

측정 데이터의 결과를 비교하기 위하여 기존의 볼바에서 제공되는 평면에 대한 측정 분석의 결과와 비교하여 보았다. 같은 머시닝센터에 대하여 XY평면에 대한 볼바 테스트 결과와 공간오차 분석 결과를 Table 2에 비교하여 나타내었다.

상용 볼바 프로그램으로 XY평면에 대해 측정 분석한 결과와 개발된 프로그램으로 분석한 결과가 전반적으로 유사하게 나타났으며, 상용 프로그램 보다 오차가 좀 크게 나타났다. 이는 Z축 방향으로 갈수록 오

차가 증가하는 것에 의한 영향으로 사료된다.

Table 2 Comparison with commercial ball bar test

Error Type	Commercial	Developed	
Straightness	Y along X	-1.1 μ m	-2.6 μ m
	X along Y	2.3 μ m	5.1 μ m
Squareness	XY	7.0 μ m	8.6 μ m
Backlash	X	-2.0 μ m	-2.7 μ m
	Y	-0.5 μ m	-1.8 μ m
Servo Gain Mismatch	XY	0.00ms	0.11ms

5. 결 론

본 연구에서는 수직형 머시닝센터의 공간오차를 분석하기 위한 오차 모델을 구성하고 볼바를 이용하여 공간오차를 분석하는 알고리즘 및 프로그램을 개발하였으며, 실제 수직형 머시닝센터에 볼바 측정시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수직형 머시닝센터에 맞는 공간오차 모델을 구현하여 볼바를 이용한 측정 분석 알고리즘을 개발하였다.
2. 개발된 프로그램과 볼바를 이용하여 3차원 공간오차를 한 번의 측정으로 분석할 수 있었다.
3. 생성된 NC 코드를 실제 수직형 머시닝센터에 적용하여 실제 공간오차 분석 시험을 수행하였으며, 오차 분석의 결과를 확인할 수 있었다.
4. 상용 볼바 프로그램을 이용하여 XY평면에 대하여 측정 분석하여 본 결과 개발된 프로그램에 의하여 3차원으로 분석한 결과와 유사한 경향의 결과를 얻을 수 있었다.

향후 과제로는 볼바의 회전 시작점과 회전이 종료되는 부분에서 머시닝센터의 이동 가감속 구간이 발생하게 되는데 이 부분에 대한 고려없이 측정을 수행하므로 이 부분에 대한 오차가 발생할 것으로 사료되므로 이에 대한 보완이 필요할 것으로 사료되며, 3차원 데이터 측정 경로를 다양화 하여 좀 더 정확한 측정 결과를 얻는 방법에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 2008년 지역전략기획기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. 이상윤, 박준호, 조선휘, 김문상, "수치제어 공작기계의 위치오차 측정 및 보정시스템 개발", 대한기계학회논문집, 제17권, 제6호, pp. 1431-1440, 1993.
2. 박희재, "정밀도 성능평가를 위한 3차원 측정기 수치모델 개발", 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제3호, pp. 945-959, 1996.
3. Heui Jae Pahk, Young Sam Kim and Joon Hee Moon, "A New Technique for Volumetric Error Assessment of CNC Machine Tools Incorporating Ball Bar Measurement and 3D Volumetric Error Model", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 37, No. 11, pp. 1583-1596, 1997.
4. 김기훈, 양승한, "헬리컬 볼바 측정을 사용한 공작기계 오차해석의 역기구학적 접근", 한국정밀공학회 2000년도 춘계학술대회논문집, pp. 703-707, 2000.
5. 이세희, 서태일, 조명우, "볼바 시스템을 이용한 기상측정오차 보정", 한국공작기계학회논문집, Vol. 10, No. 2, pp. 56-63, 2001.