

◆ 특집 ◆ 고유연 머시닝센터의 설계기술

머시닝센터의 다축오차 평가 방법

Evaluation Method of the Multi-axis Errors for Machining Centers

황주호^{1,✉}, 심종업¹, 고태조²
Jooho Hwang^{1,✉}, Jongyoup Shim¹ and Tae Jo Ko²

1 한국기계연구원 초정밀시스템연구소 (Department of Ultraprecision Machines and Systems, KIMM.)
2 영남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)
✉ Corresponding author: jooho@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7119

Manuscript received: 2011.5.30 / Accepted: 2011.6.28

The volumetric errors of CNC machining centers are determined by 21 errors, including 3 linear errors, 6 straightness errors, 3 perpendicular errors, 9 angular errors and non-rigid body errors of the machine tool. It is very time consuming and hard to measure all of these errors in which laser interferometer and other parts are used directly. Hence, as many as 21 separate setups and measurements are needed for the linear, straightness, angular and perpendicular errors. In case of the 5-axis machining centers, two more rotary tables are used. It can make 35 error sources of the movement. Therefore, the measured errors of multi movements of the 5-axis tables are very complicated, even if the relative measured errors are measured. This paper describes the methods, those analyze the error sources of the machining centers. Those are based on shifted diagonal measurements method (SDM), R-test and Double ball bar. In case, the angular errors of machine are small enough comparing with others, twelve errors including three linear position errors, six straightness errors and three perpendicular errors can be calculated by using SDM. To confirm the proposed method, SDM was applied to measuring 3 axes of machine tools and compared with directly measurement of each errors. In addition, the methods for measuring relative errors of multi-axis analysis methods using R-test and Double Ball Bar are introduced in this paper.

Key Words: Multi-axis Errors (다축오차), Position Errors (위치오차), Straightness (직직도), R-test, Double Ball Bar

1. 서론

5 축 머시닝센터는 복잡한 3 차원 형상의 가공을 위하여 3 축의 직선 테이블과 2 축의 회전테이블이 상대운동을 하면서 가공을 하는 것이 일반적이다. 5 축이 동시 이동을 수행하기 때문에 직선축의 위치결정 정밀도 뿐만 아니라, 각운동 오차, 진직도 오차 및 직각도 등이, 회전축의 각위치정밀도와, 회전정밀도 오차가 복합적으로 영향을 주

된다.

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. 이러한 측정 방법은 오차의 수준을 알 수 있지만 각 오차요소의 값을 알지 못하여 기계수정에 관한 데이터를 주지 못하는 단점이 있다.

따라서, 공간오차를 측정가능 하면서 각 축의 오차를 측정할 수 있는 방법으로 제안된 것이 step-diagonal 방법 등이 있다.¹ 이 측정 방법은 Fig. 1 에 보이는 바와 같이, X, Y, Z 축이 움직이면서 측정을 하기 때문에 각 축이 움직이면서 생기는 각도 변화에 대한 오차를 유발하게 되며, 평면미러를 사용하여 오차를 측정하므로 새로운 장치가 요구되는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 오차를 줄이면서 기존의 레이저를 사용할 수 있는 이동 대각 오차 측정법을 제안하고자 한다.

또한 직선축과 회전축이 상대운동을 하면서 생기는 5 축간의 오차를 측정하는 기법인 R-test 와 Double ball bar 기법의 적용방법에 대하여도 다루고자 한다.

2. 직선축의 공간오차 분석

2.1 이동대각 측정법

이 측정방법의 원리는 이상적인 대각방향 경로와 기계의 이동경로 오차에 의하여 생기는 x, y, z 축 오차가 포함된 실제 오차인 R_{xr} , R_{yr} , R_{zr} 을 구하는 것이 기초가 된다. 이를 위하여 Fig. 1 에 보이는 바와 같이 Δx 만큼 이동시킨 새로운 대각 방향에 대하여 측정을 한다.

이 방법으로부터 식 (1)~(3)과 같은 관계를 구할 수 있게 된다.

$$R_{xreal} + \Delta x = R_{mx} \sin(\alpha + \Delta\alpha) \quad (1)$$

$$\Delta\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{R_0^2 + R_{mx}^2 - \Delta x^2}{2R_0R_{mx}}\right) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left(\frac{R_{mx} \sin \Delta\alpha}{\Delta x}\right) \quad (3)$$

y 축에 관한 이동 대각 방향의 측정으로 식 (4)와 마찬가지로 구할 수 있게 된다.

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left(\frac{R_{my}^2 \sin \Delta\beta}{\Delta y}\right) \quad (4)$$

이상으로부터 각 방향에 대한 오차 성분을 구할 수 있게 되며 다음 관계식에 의하여 각 오차 성분을 구할 수 있다.

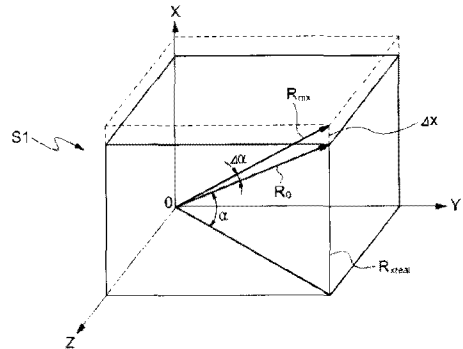


Fig. 1 Shifted Diagonal with changing x

$$\begin{aligned} \Delta R_{xPPP} &= e_x(x) + e_x(y) + e_x(z) \\ \Delta R_{xNPP} &= e_x(x) - e_x(y) - e_x(z) \\ \Delta R_{xPNP} &= e_x(x) - e_x(y) + e_x(z) \\ \Delta R_{xPPN} &= e_x(x) + e_x(y) - e_x(z) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, ΔR_{xPPP} , ΔR_{xNPP} , ΔR_{xPNP} , ΔR_{xPPN} 는 각각 x 방향에 대한 PPP, NPP, PNP, PPN 방향의 대각 측정값을 나타낸다.

이로부터 각축의 오차를 구하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} e_x(x) &= \frac{\Delta R_{xPPP} + \Delta R_{xNPP}}{2} \\ e_x(y) &= \frac{\Delta R_{xPPP} - \Delta R_{xPNP}}{2} \\ e_x(z) &= \frac{\Delta R_{xPPP} - \Delta R_{xPPN}}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

한편 직각도 오차에 대하여는 다음 식 (7)에 의하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} &= \cos^{-1}\left(\frac{R_{PPP}^2 + R_{PPN}^2 - 2R_{ideal}^2}{4XY}\right) \\ \gamma_{yz} &= \cos^{-1}\left(\frac{R_{PPP}^2 + R_{NPP}^2 - 2R_{ideal}^2}{4YZ}\right) \\ \gamma_{zx} &= \cos^{-1}\left(\frac{R_{PPP}^2 + R_{PNP}^2 - 2R_{ideal}^2}{4ZX}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 평면(2D) 오차 검증실험

오차측정 실험 및 이것을 이용한 보정검증을 위하여 이것을 XY 축의 2D 에 관하여 보정실험을 적용하였다. 이러한 경우 경로의 변경은 평면상에서 Fig. 2 와 같이 단순화 하게 되며, 각축의 오차

를 구하기 위한 식은 (8), (9)와 같이 표현되어진다.

$$e_{yx} = \frac{\Delta R_{ppy} - \Delta R_{npy}}{2} \quad e_{xx} = \frac{\Delta R_{ppx} - \Delta R_{npx}}{2} \quad (8)$$

$$e_{yy} = \frac{\Delta R_{ppy} - \Delta R_{npy}}{2} \quad e_{xy} = \frac{\Delta R_{ppx} - \Delta R_{npx}}{2}$$

$$\theta_{xy} = -\sin^{-1} \frac{R_{pp}^2 - R_{np}^2}{4xy} \quad (9)$$



Fig. 2 Shifted diagonal measurement of PP and NP directions

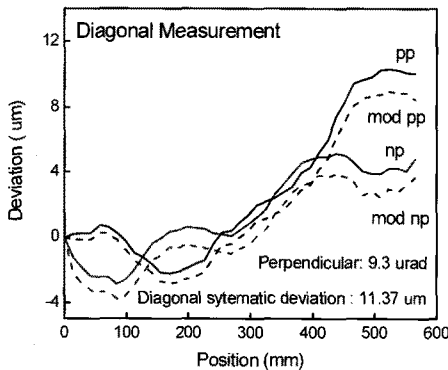


Fig. 3 Diagonal measurement errors

이로부터 구한 오차를 공작기계의 X-Y 평면의 2 차원 오차에 적용하여 Fig. 2 에 보이는 바와 같이 평면상의 대각에 대하여 실험을 수행하였으며, 이때의 측정된 대각오차를 Fig. 3 에 나타내었다. 점선으로 표시된 부분은 원래의 대각오차에 대하여 각 스텝당 0.1 mm 가 이동되어진 경로이며 Fig. 3 에서 보이는 바와 같이 크기와 형태는 유사하고 약간의 편차가 있는 것을 나타낸다. 한편 대각오차는 알려진 바와 같이 대각 오차의 크기의 차로 구하여지며, 그림에 표시된 바와 같이 11.37 μm 의 오차를 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3 에서 측정된 데이터는 식 (8)에 의하여

각 축의 위치결정오차와 진직도 오차를 구할 수 있게 된다.

Fig. 4 및 5 는 각각 각축의 위치오차와 진직도 오차를 구한결과로서, 제시한 방법을 이용하여 구한 오차와 직접 측정한 오차를 비교한 결과이다. 위치 오차에는 레이저 간섭계를, 진직도 오차 측정에는 스트레잇 엣지와 정전용량형 변위계를 사용하였다.

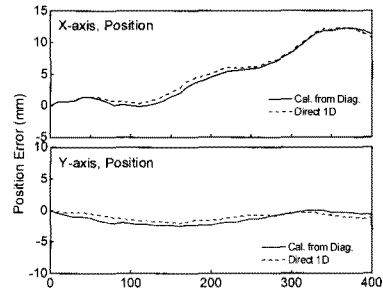


Fig. 4 Comparisons between estimated and measured linear position errors of x and y axis

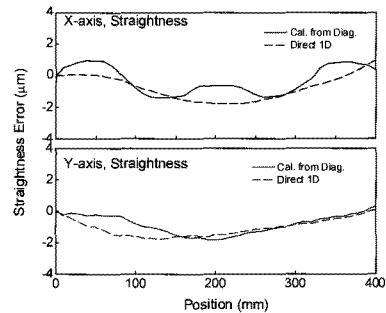


Fig. 5 Comparisons between estimated and measured straightness of x and y axis

그림에 보이는 바와 같이 직접측정한 결과와 이동 대각 방법을 통하여 구한 결과가 매우 유사함을 알 수 있으며, 이 차이는 0.7~1.2 μm 수준임을 알 수 있었다. 이로부터 구한 오차로부터 식 (10)을 이용하여 2 차원의 오차맵을 보이면 Fig. 6 과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \delta P_x(x, y) \\ \delta P_y(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta P_{x1D}(x) + \delta_{x2}(y) \\ \delta P_{y1D}(y) + a_2(x)\theta_{xy} + \delta_{y2}(x) \end{bmatrix} \quad (10)$$

이상으로부터 제안된 기법을 통하여 직선 다축 오차의 크기와 오차배분을 통하여 오차를 크기를 알 수 있는 것이 가능함을 알 수 있다.

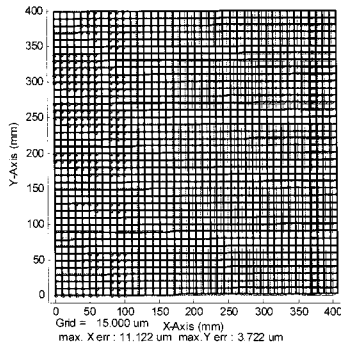


Fig. 6 Estimated 2D errors on the x,y surfaces

3. R-Test 측정법을 이용한 오차 측정/평가

3.1 직선-회전 축 간 기하학적 오차

신구조 장비, 머시닝 센터의 새로운 구조에 대한 기하학적 오차측정을 위하여는 회전축과 직선축간의 오차를 측정/평가 할 수 있어야 하고, 또한 병렬형 머시닝센터와 같이 새로운 좌표계를 사용한 경우 새로운 방법의 측정기 및 측정알고리즘의 제안이 필요하다. Fig. 7 에는 ISO230-7 에서 정의된 직선-회전축 간 상대 위치오차의 정의를 상세히 설명하고 있다. XYZ 의 직선 3 축은 공구의 위치를 나타내는 좌표계이고, 이 좌표계는 5 축 머시닝센터에서 직선축의 이송에 의한 공구와 공작물과의 상대 위치 변화량을 표시하는 좌표계가 된다. C 축의 축 벡터는 C 축의 한바퀴 회전 당 발생하는 운동오차의 평균 벡터를 의미하고, 이 벡터와 XY 축의 원점과 발생한 상대 위치 오차로 표시하는 오차량이 XOC, YOC 가 된다. 따라서, AOC 와 BOC 는 XY 축과 C 축 벡터와의 직각도 오차가 된다. 이러한 회전-직선 축간 상대 위치오차에 의해서 회전축과 직선축 간 동기 제어에서 상대 운동 오차가 발생된다.

3.2 기하학적 오차 측정을 위한 R-Test 측정법

R-Test 는 회전-직선 축간 상대 위치오차를 측정하기 위하여 고정밀 진구와 이 구의 중심점의 이동량을 측정하기 위한 센서부로 구성된다. 예로써 센서부를 머시닝센터의 주축에 장착하고 회전 테이블면에 진구를 장착하고, 직선 축들과 회전축을 동기 구동하면 회전-직선 축간 상대 위치 오차가 주축에 고정된 좌표축에 대하여 XYZ 세 개의 방향 오차 값으로 구할 수 있다. 이러한 직선-회전 축들의 위치 데이터 및 그에 상응한 XYZ 오차값

으로 기하학적인 오차 모델링에 의하여 축간 상대 위치오차를 구할 수 있다.

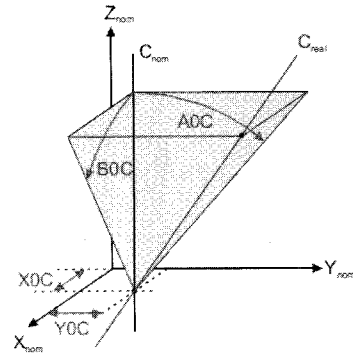


Fig. 7 Definitions in ISO230-7 of rotary axis involved geometric errors

3.3 비접촉식 R-Test 측정시스템 설계

R-test 장비 구현 및 모델링을 수행하기 위하여 센서파트 및 진구로 구성된 3D 프로브 시스템을 설계하였다. 3D 프로브 시스템은 세 개의 정전용량형 센서들로 구성되고 Lion Precision 사의 제품을 사용하였다. 각 센서들은 250 μm의 standoff, 약 10 nm의 분해능 및 1 kHz의 응답특성을 보여 기존 Double Ball Bar 및 레이저를 이용한 측정 시스템보다 향상된 분해능 및 안정성을 가진 3D 프로브 시스템을 구현할 수 있다. 또한 비접촉 방식으로 접촉 방식의 기존 R-Test 장비 및 Double Ball Bar의 접촉으로 인한 문제의 가능성을 배제하였다.

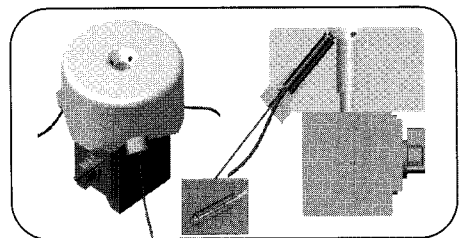


Fig. 8 3D model view of designed 3D probe system with capacitive sensors for R-Test

Fig. 8 에서는 설계된 프로브 시스템 측정부와 진구부를 보이고 있다. 측정부는 각 정전용량형 센서가 진구(직경 25 mm, 진구도 ~50 nm)의 중심점을 향하도록 설계하였으며, standoff 250 μm 구현을 위하여 공차설계를 수행하였다. 프로브 끝단과 측정부 표면과의 접촉은 프로브 후면에 장착되는 예

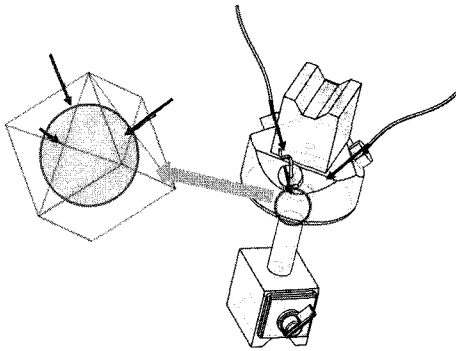


Fig. 9 The measuring direction of capacitive sensors to detect the datum ball center position is shown

압기구에 의하여 예압이 가해져 세팅된다.

Fig. 10 은 3D 프로브 시스템을 이용한 회전-직선 축간 상대 위치오차를 측정하기 위한 방법을 보이고 있다. 그림에서 적용된 머시닝센터는 XYZ 3 축 및 C 축의 회전축 및 스피indle 축을 가진다. 적용된 세팅으로 C 축과 XYZ 축과의 회전-직선 축간 상대 위치오차를 측정할 수 있다. 이 경우 실제 실험에서는 회전테이블을 일정 속도로 회전시키고 그에 동기화 되어 XY 축을 원운동시켜 이상적으로 측정기-진구 간 상대 운동이 존재하지 않도록 실험하게 된다. 따라서, 상대 위치오차는 회전 테이블 상의 3 축 방향으로 분리되어 직접적으로 측정되게 된다.

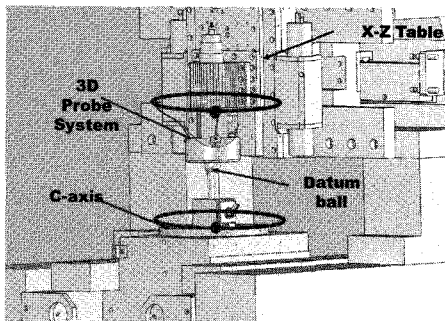


Fig. 10 R-Test measuring experiment setup with 3D probe system

3.4 3D 프로브 시스템의 기하학적 모델링

Fig. 11 은 기하학적 모델링을 수행하기 위한 측정 벡터 및 좌표계를 정의하고 있다. 진구의 중심점 이동량을 측정하기 위하여 각각 90 도 각도의 관계를 갖게 측정 벡터는 정렬하게 된다. 회전축

인 C 축과 X, Y 축과의 직각도 오차 및 offset 오차를 정의하게 되고 이렇게 정의된 오차 값들을 이용하여 3D 프로브 시스템의 출력 오차 값을 예측하는 기하학적 모델링을 수행하게 된다.

3D 프로브 시스템의 기하학적 모델링을 위하여 HTM(Homogeneous Transformation Matrix) 방법을 사용한다. Fig. 12 에서 보이는 바와 같이 직선 이송축의 XYZ 축 상의 고정된 좌표계에서 시작하여 최종단인 회전테이블 상의 회전 좌표계까지의 변환을 HTM 을 사용하여 표현하면 모든 오차 성분들을 포함한 일반적인 관계식을 유도할 수 있다.

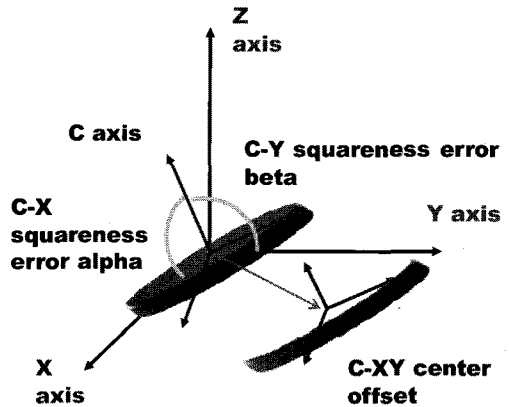


Fig. 11 Geometric error definitions for 3D probe system modeling

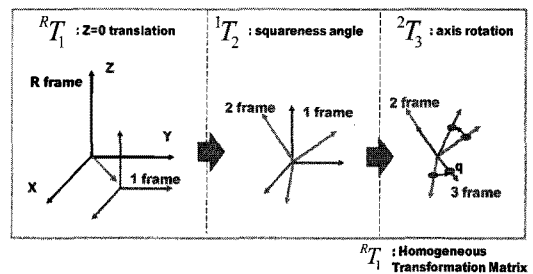


Fig. 12 A schematic showing geometric modeling method by HTM method

$${}^R T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} : \text{axis offset} \quad (11)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} | & | & | & 0 \\ n_1 & n_2 & n_3 & 0 \\ | & | & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} : \text{angular error} \quad (12)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} : \text{table rotation} \quad (13)$$

$$q^R = {}^R T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 q^3 \quad (14)$$

식(11)은 기준 좌표계에서 1-좌표계로 평행 이동하는 HTM 을 나타내고 offset 오차를 반영할 수 있게 된다. 식 (12)는 1-좌표계에서 2-좌표계로의 좌표변환을 위한 관계식이다. AOC 와 BOC 의 축 간 직각도 오차를 이용하여 2-좌표계의 X, Y, Z 축의 1-좌표계 상에서의 방향벡터를 구할 수 있다. 이 두 좌표계의 관계는 회전관계식을 나타내는데 회전-직선 축 간 직각도 오차를 반영할 수 있고 그 결과식은 식(12)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (12)에서 n_1, n_2, n_3 벡터는 각각 X, Y, Z 방향의 2-좌표계의 단위 방향 벡터이다. 식(13)에서는 2-좌표계에서 3-좌표계로의 HTM 을 보이고 있고 회전테이블의 각도 회전 θ 에 의한 좌표변환 관계식이다. 식 (14)는 최종적인 변환 관계식이고 3-좌표계 상에서의 q 벡터(회전 테이블 상에 고정된 좌표계에서의 진구 위치)가 회전-직선축을 동기 동기제어할 경우 1-좌표계에서 보이는 q 벡터의 궤적을 구할 수 있다.

Fig. 13 은 상기 기하학적 모델링 관계식을 사용하여 시뮬레이션한 결과를 보이고 있다. R-Test 실험 수행 시 회전축과 직선축 간의 직각도 오차가 없고 offset 오차가 없는 경우 회전테이블 상의 한 점의 궤적은 기준 좌표계에서 XY 평면 상에서 보면 원의 궤적이 된다. 또한 ZX 및 ZY 평면상에서는 평탄한 직선으로 보이게 된다. 여기에서 직각도 오차 α 및 β 가 각각 0.001 도 및 0.0005 도가 되고 offset 오차가 X 축 방향으로 $-2 \mu\text{m}$ 가 될 경우에는 Fig. 13 에 측정기와 진구 간 상대 오차 결과를 보이고 있다. 직각도 오차에 의해서 Z 방향으로 오차가 발생하여 각각의 α 및 β 오차 량에 의해서 오차의 형상이 바뀔을 알 수 있다. 양수의 X 축 방향에서부터 R-Test 시뮬레이션이 이루어진

것이며 원주각도를 고려할 때 180 도의 각도에서 Z 방향 오차가 최대로 발생하면 α 의 각도오차가 발생한 것이며 이 경우에서 90 도 위상이 지연되어 발생하면 β 의 각도오차가 발생한 것이다. 또한 X 축 방향 offset 오차의 영향으로 XY 평면 상에서 볼 때 중심점의 이동이 있음을 알 수 있다.

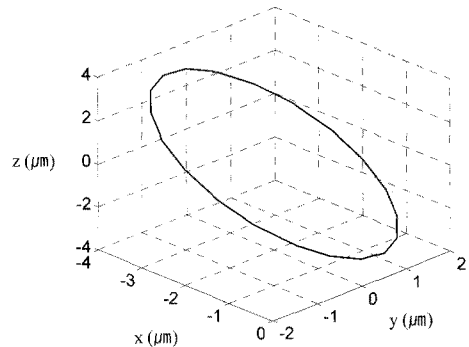


Fig. 13 R-Test simulation result of measured errors in an Cartesian coordinates with geometric angular and offset errors

3.5 R-Test 실험 결과 및 고찰

설계/제작된 3D 프로브 시스템을 이용하여 R-Test 실험을 수행하기 위하여 4 축 가공기를 이용하였다. 사용된 초정밀 4 축 가공기는 직선축 및 회전축 모두 유정압 베어링을 채용하였으며 구동기로써 모두 리니어 모터를 채용한 가공기로서 Y 축 테이블 내부에 C 회전축이 탑재되어 있으며 컬럼구조를 구축하여 X 축 및 Z 축을 탑재하고 있다. Fig. 14 에 초정밀 4 축 가공기에 세팅된 3D 프로브 시스템을 보이고 있다. R-Test 실험은 장치의 X 축 상의 약 158 mm 반경 위치에 진구를 위치시키고 센서의 원점을 맞춘 후 동기 제어하여 원운동 및 회전운동을 동시에 진행하며 센서의 데이터를 얻게 된다. Fig. 15 에 실험 결과로서 각 세 개 센서의 데이터 값을 회전각도에 따라서 도시한 그래프를 보이고 있다. 전체적으로 최대 약 $8 \mu\text{m}$ 의 peak-to-peak 값을 오차 값으로 나타내어진 결과를 얻었으며, 이러한 각 정진용량형 센서 값을 이용하여 XYZ 좌표계(공구 장착 최종단 좌표계에 고정)의 오차 값으로 변환하여야 한다.

Fig. 15 의 결과를 이용하여 XYZ 좌표계로 변환하여 회전 각도에 따라서 Z 축 오차를 도시하면 Fig. 16(a)와 같다. 약 $8 \mu\text{m}$ 의 크기로 180 도 근처에서 최대가 된다. 반경 158 mm 및 최대 오차값을

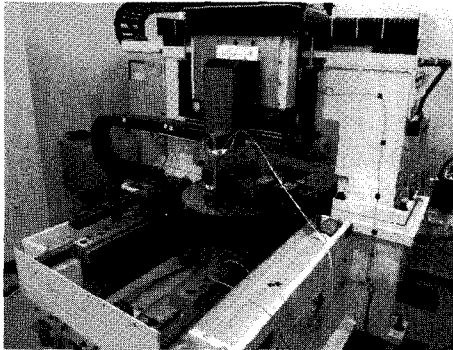


Fig. 14 3D probe system setup for the R-Test experiment on a 4-axis machining machine

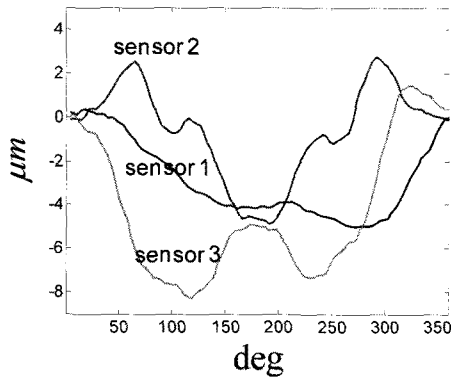
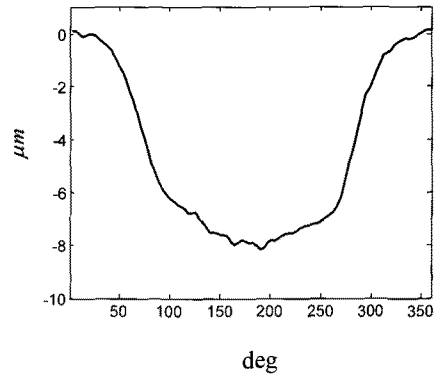


Fig. 15 Experimental results of 3D probe system sensor values from R-Test for 4-axis machining machine

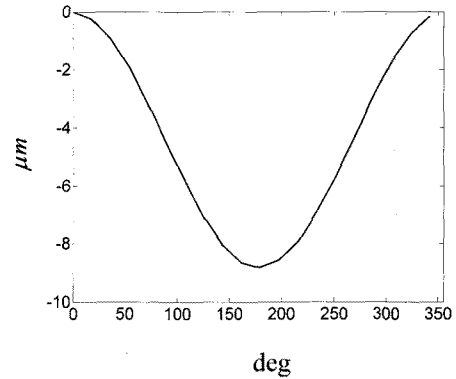
활용하여 간단히 각도 계산을 하면 약 0.0015 도의 α 오차가 존재함을 알 수 있다. 그래프의 형상을 관찰하면 β 의 각도 오차는 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다. 이러한 α 각도 오차를 모델링에 적용하여 시뮬레이션을 수행하면 Fig. 16(b)와 같은 결과를 얻을 수 있고 실험데이터와 근사한 형태를 보이고 있음을 알 수 있고, 형상의 차이는 각 직선축이 갖는 선형 위치결정 오차 및 회전축의 회전각도에 따른 운동오차 등이 원인일 것으로 판단된다.

4. Double Ballbar 를 이용한 다축오차 측정법

불 바는 1980년대 초, Lawrence Livermore 연구소에서 초정밀 다이아몬드 선반의 정밀도를 측정하기 위하여 Jim Bryan 에 의해 고안되었다. 그는 두 가지 형태의 기기를 제안했는데, 첫 번째 것은



(a)



(b)

Fig. 16 (a) experimental result (b) simulation result. The Z direction error plot during R-Test along with rotational angle

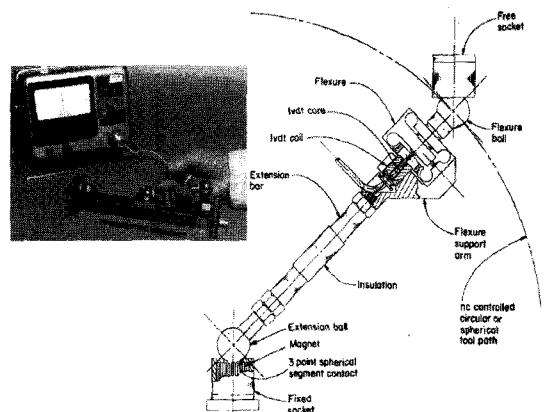


Fig. 17 First Developed double ballbar(courtesy with Bryan, 1982)¹⁵

컴퓨터로 제어되는 위치결정장치뿐만 아니고 수동으로 움직이는 저마찰 3 차원 측정기의 정밀도를 측정하기 위하여 고정 볼바를 이용했다. 두 번째 것은 수치제어되는 선반, 밀링, 로봇 그리고 서보 구동되는 윤곽측정장치의 정밀도를 측정하기 위하여 신축 볼바를 사용했다. 두 번째의 것을 Fig. 17 과 같이 Double Ballbar (DBB)라고 한다.

4.1 DBB 의 원리

DBB 는 원운동 하도록 프로그램 된 궤적을 따라 기계의 축이 움직이는 것을 모니터링한 후, 이상적인 원호와 비교하는 것이다. DBB 는 양끝단에 정밀하게 제작된 자석볼과 그것을 지지하기 위한 컵 조인트, 그리고 신축이 가능한 신축바로 구성되어 있다. 통상, 한 개는 주축에 장착하고 나머지는 공작기계의 움직임이 있는 테이블 위에 장착한다. 이렇게 구성하면 기하오차 또는 운동오차가 구해 질 수 있는 원운동이 가능해진다. DBB 의 내부 센서는 두개의 코일과 그 속을 움직이는 코어로 구성되어서, 마치 선형변위센서(LVDT)의 작동원리와 같이 작동한다. DBB 의 길이가 늘어나면 코어가 코일의 내부를 움직이며, 코일 내의 인덕턴스를 변화시키게 되고 이 신호를 전기적으로 처리하여 변위신호로 만들게 된다.

4.2.3 축 공작기계의 평가

DBB 를 이용한 측정은 1980 년대 후반 Kakino 에 의해 많은 연구가 진행되었다. 그는 여러 형태의 NC 공작기계에 대해 오차 측정을 하였으며, 오늘날의 DBB 연구는 여기에 기초하고 있다.¹⁶

직선으로 운동하는 축 중에서 두축 또는 세축이 동시제어되면서 움직일 때, 이송속도에 지배되는 오차들이 나타난다. 이 원리로 DBB 는 동시 2 축 제어되는 직선축의 특성을 파악하는데 사용된다. 마찰과 관련된 스틱슬립과 서보 오차를 포함하는 축계 운동오차는 속도의 방향이 변화되는 사분면 변화에서 측정이 된다. 이러한 오차의 원인은 Fig. 18 과 같이 측정궤적을 기준패턴과 비교함에 의해 쉽게 진단이 가능하다.

DBB 는 일반적으로 10 분에서 15 분정도 소요되며, Fig. 19 과 같이 전체 원호궤적 또는 X-Y, Y-Z, Z-X 평면 내에서 부분궤적도 가능하다. DBB 를 공작기계에 설치한 후, 공작기계의 주축이 DBB 의 길이와 동일한 반경으로 원호궤적을 갖도록 지령하면 된다. DBB 는 주축의 움직임을 추종한 후, 기

계의 진운동위에 오차를 확대하여 극좌표로 표현하게 된다.

DBB 법에서 오차는 원호궤적으로 나타내어지는데, 주요 오차에 대한 궤적패턴을 알고 있으면 어떤 종류의 오차와 그 크기가 어느 정도인지를 알 수 있다. 또한, 볼바의 길이를 바꿈에 의해 특정오차에 대한 민감도가 증가할 수 있다. 길이가 긴 것은 직각도와 같이 기하정밀도에 대한 감도를 높이고, 짧은 길이는 서보오차와 같은 운동오차에 민감하다.

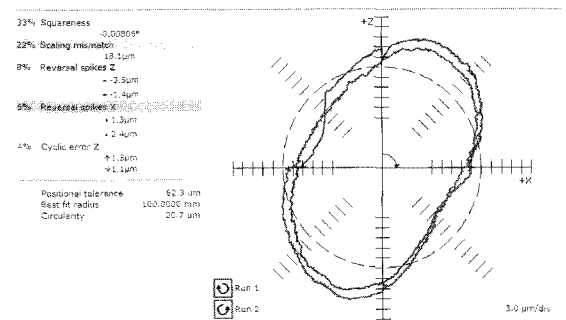


Fig. 18 Trace pattern of measurement result from commercial DBB system with squareness as dominant motion error origin

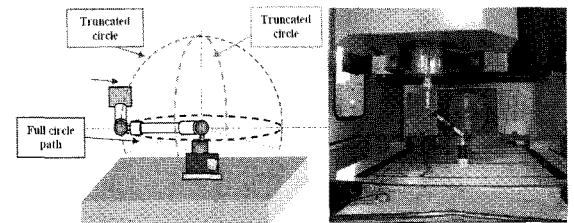


Fig. 19 3D DBB trajectory for 360° x 230° sphere segment and a test on milling machine

DBB 를 이용한 3 축 공작기계의 기하 및 운동 오차에 대한 성공적인 연구결과들이 많이 보고되었다. DBB 사용에 대한 경험이 충분하다면 DBB 궤적으로부터 모든 오차성분을 뽑아낼 수 있다. 또한, 복잡한 알고리즘을 갖는 상용 DBB 소프트웨어는 기하 및 운동오차에 대한 22 개의 오차성분을 제공한다. Renishaw 의 Q10, Q20, Heidenhain 의 DBB 110, Cullam 의 Polargauge DBB 등은 ± 0.5 μm 까지 측정가능하다. DBB 는 ISO 230-4, JIS B 6194, ANSI/ASME B5.54 에 의해 표준화되어 있다.

4.3 5 축 공작기계의 평가

5 축 공작기계는 단순히 3 축 공작기계의 확장 이 아니다. 회전축의 도입에 의해, 5 축 사이의 상호 연관운동은 3 축 직교 선형축으로 된 독립운동의 경우와 완전히 다르다. 또한, DBB 시험 표준은 CNC 공작기계의 선형축에만 사용가능하다.

4.3.1 직선축과 회전축의 동시운동

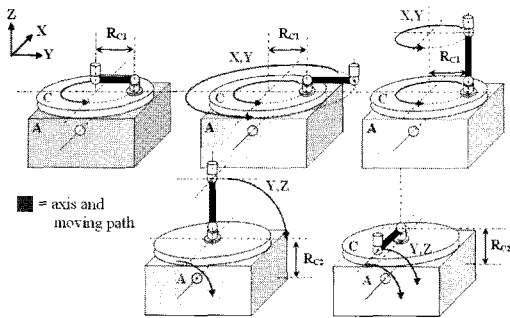


Fig. 20 Five possible test configuration to check geometry error of rotary axis in five-axis machine

5 축 공작기계에서 회전축에 대해 DBB 를 적용한 것은 동경농대의 Tsutsumi 가 유명하다. 이 논문에서는 5 축 기계에 부착된 회전축의 편차를 규명하는 일고리듬을 제안하고 있다.¹² 여기서는 Fig. 20 과 같이 한 개의 회전축을 포함한 3 축 또는 4 축 동시제어에 기초하고 있다.

이러한 3 축 제어운동에서, 불바의 민감방향은 일정하게 유지시켜야 한다. 편차를 구하기 위해, 시물레이션에 기초한 수학적 모델로부터 구한 근사해적과 측정된 원호해적 사이의 편심관계로부터 8 개의 방정식을 구했다.

다축 공작기계에 대한 동시 축운동의 사용법은 표준위원회의 관심을 끌었다. 이 방안은 원운동을 하기 위하여 5 축(3 개의 직선축과 2 개의 회전축)을 Fig. 20 과 같이 동시 운동하는 것이다. 이 방법은 역시 머시닝센터의 검사를 위한 작업자그룹에 의해 논의되고 있으며(ISO/TC 39/SC 2/WG 3), Fig. 21 은 Fig. 20 에 의하여 측정된 결과이다.

4.3.2 회전축만의 동시운동

직선축의 DBB 검사에 있어서, 대부분의 오차원인은 궤적패턴과 1:1 대응성을 가지고 있다. 따라서 이론적 궤적패턴은 오차원인의 진단에 유용하다. 회전축에 있어서도 오차원인의 궤적패턴을 구하기 위해, 시물레이션 모델이 만들어져야 한다.

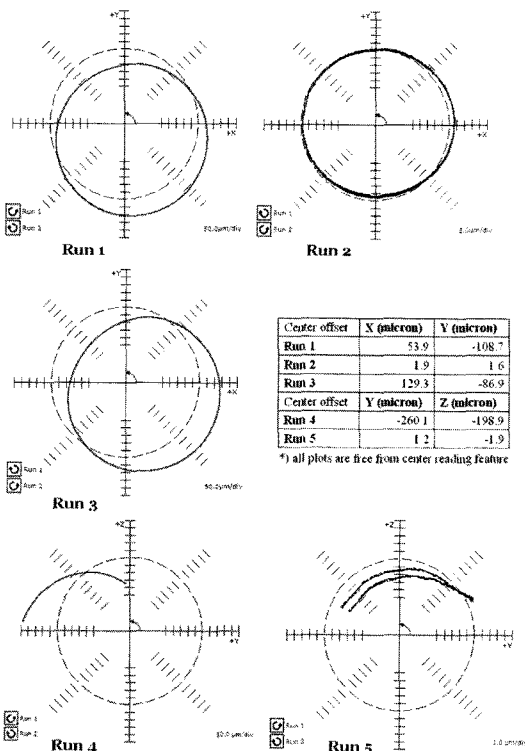


Fig. 21 Example of the measurement result in 5 axis machine tool

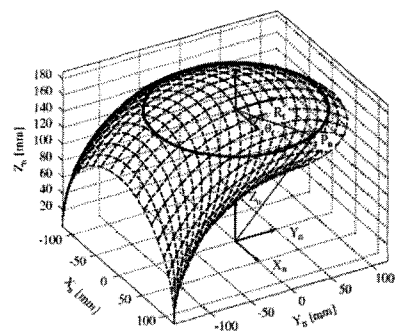


Fig. 22 The workspace of two rotary axes, to define the test path for DBB evaluation (reported by Lie, 2005)¹⁷

2005 년 초에 대만의 청화대학 Lie 는 직선축은 고정시킨채로 회전축만 동시 구동하여 궤적을 만들었으며, 이 경우는 회전축의 오차만이 DBB 에서 측정된다. 이것은 Fig. 22 와 같이 구형의 작업공간과 두개의 회전축이 만드는 공간과의 교점을 구하

여 원형검사경로를 결정하는 아이디어이다. 여기에서 틸팅 테이블을 갖는 5 축 가공기의 시험을 통해 두개의 회전축 서보오차가 검출가능하다고 보고하고 있다. 그 후 Mayer 는 트라니언 축의 운동오차를 평가하기 위하여 DBB 를 적용하였다. 이것은 다른 축의 영향을 받지 않도록 트라니언 축만 움직이도록 하고 있다.¹⁸ 축방향오차, 반경방향오차, 틸팅오차를 포함한 트라니언의 5 개 운동오차는 수학적 모델에 의해 DBB 의 읽음으로부터 추출이 가능했다. 그러나 이 개념은 DBB 가 트라니언의 공칭 축상에 정확하게 세팅되었을 때만 적용가능하다.

5. 결론

본 연구에서는 머시닝센터의 직선 및 회전축간의 상대오차를 측정하고 오차의 원인분석을 하는 기법에 대하여 살펴보았다. 레이저 간섭계를 이용한 대각오차의 측정과 이동 대각 측정 기법을 이용하여 오차의 원인을 찾을 수 있는 것을 확인하였으며, R-test 와 DBB 를 이용한 직선/회전축간의 오차분석 기법에 대하여도 살펴보았다. 향후, 이러한 방법을 적용하여 개발중인 5 축 머시닝센터의 적용실험을 통하여 유용성을 검증할 계획이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업인 "IT 부품가공용 고유연성 머시닝센터 개발 사업"의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. ASME B5.54-1992, "Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centres," 1992.
2. ISO 230-6, "Test code for machine tools, Part 6: Determination of Positioning Accuracy on Body and Face Diagonals(Diagonal Displacement Tests)," 2002.
3. Wang, C., "Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors, Part 1: Basic theory," Review of Scientific Instruments, Vol. 71, No. 10, pp. 3933-3937, 2000.
4. Chapman, M. A. V., "Limitations of laser diagonal measurements," Precision Engineering, Vol. 27, No. 4, pp. 401-406, 2003.
5. Hwang, J., "Estimation and correction method for two-dimensional position errors of a planar XY stage based on motion error measurements," International Journal of Machine Tool & Manufacture, Vol. 46, No. 7-8, pp. 801-810, 2006.
6. Weikert, S. and Knapp, W., "R-Test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools," Annals of the CIRP, Vol. 53, No. 1, pp. 429-432, 2004.
7. Bringmann, B. and Knapp, W., "Model-based Chase-the-Ball Calibration of a 5-Axes Machining Center," Annals of the CIRP, Vol. 55, No. 1, pp. 531-534, 2006.
8. ISO 230-7, "Test code for machine tools - Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation," 2006.
9. Knapp, W., "Circular test for three coordinate measuring machines and machine tools," Precision Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 115-124, 1983.
10. Schultschik, R., "The Components of the Volumetric Accuracy," Annals of the CIRP, Vol. 26, No. 1, pp. 223-226, 1977.
11. Nakazawa, H. and Ito, K., "Measurement System of Contouring Accuracy of NC Machine Tools," Bulletin of JSPE, Vol. 12, No. 4, pp. 189-194, 1978.
12. Tsutsumi, M. and Saito, A., "Identification and compensation of systematic deviations particular to 5-axis machining centers," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, No. 8, pp. 771-780, 2003.
13. Lei, W. and Hsu, Y., "Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probe-ball Part I : design and modeling," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, No. 10, pp. 1153-1162, 2002.
14. Lee, K., Lee, D.-K., Kweon, S.-H. and Yang, S.-H. "Geometric Errors Estimation of a Rotary Table using Double ball-bars," Journal of the KSPE, Vol. 27, No. 11, pp. 98-105, 2010.
15. Bryan, J. B., "A simple method for testing measuring machines and machine tools- Part 1: Principles and applications," Precision Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 61-69, 1982.
16. Kakino, Y., Ihara, Y., Nakatsu, Y. and Okamura, K.,

“The Measurement of Motion Errors of NC Machine Tools and Diagnosis of their Origins by Using Telescoping Magnetic Ball Bar Method,” CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 36, No. 1, pp. 377-380, 1987.

17. Lie, W. T., Sung, M. P., Liu, W. L. and Chuang, Y. C., “Double ballbar test for the rotary axes of five-axis CNC machine tools,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, No. 2, pp. 273-285, 2007.
18. Zargarbashi, S. H. H. and Mayer, J. R. R., “Assessment of machine tool trunnion axis motion error, using magnetic double ball bar,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, No. 14, pp. 1823-1834, 2006.