

5축CNC공작기계의 회전테이블 오차 측정에 관한 연구

서 석 환*, 정 세 용*, 이 응 석**

A Study on the Measurement of Rotary Table Error with 5-Axis CNC Machine

S.H. SUH*, S.Y. JUNG*, E.S. LEE**

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a geometric error model and path compensation algorithm for rotating axes of the 5-axis machine tools, by a method to calibrate a rotary table using one master ball and three LVDTs. It was developed a new methodology to measure 3 translation errors of the rotary table and with a compensation procedure for setup errors of the master ball. The method is experimentally verified using a ball-table and on-machine inspection method. The results showed that the geometric error models with the path compensation strategy can be practically used as a means for improving the accuracy of the machine tools with rotary table.

Key Words: Rotary table (회전테이블), 5-axis machine (5축 공작기계), Volumetric error (3차원오차), Error compensation (오차보정), Master ball (기준볼), Ball table (볼-테이블), On-machine inspection (기계상 측정)

1. 서 론

CNC 공작기계의 고 정밀도에 대한 중요성은 최근의 제품이 높은 공차를 요구함에 따라 더욱더 커지고 있다. 가공물의 치수 오차는 공작기계와 가공 환경 등에 의존한다. 공작기계는 계속되는 가공에 의한 가공 부하와 정적 부하를 받음으로 해서 메이커에 의해 명시된 정밀도를 계속 유지할 수 없다. 따라서 의도한 공차 내의 가공물을 얻기 위해서는 공작기계에 대한 주기적인 교정 및 이에 대한 대책이 필요하다.

공작기계의 오차는 정적오차(Quasi-static error)와 동적오차(Dynamic error)로 구분할 수 있다.^(1,2) 동적오차는 공작기계의 진동, 공구의 떨림, 주축의 진동 등에 의해 발생되는 반면에 정적오차는 공작기계의 기하학적 오차, 일정한 부하, 공작기계의 열변형 등에 의해 유발된다. 정적오차 가운데 공작기계 각 축의 안내면의 구조적 변형, 백래쉬, 서보제어오차 등에 의한 오차를 특히 계통 오차(Systematic Error)라고 한다.

정적 조건하에서 공작기계의 오차를 규명하고 이를 모델링하는 연구가 수년간 많은 연구자들에 의해 연구 되어

* POSTECH CAM Lab
 ** RIST 자동화연구부문

자 왔다. Ferreira와 Liu⁽¹⁾는 공작기계의 위치 오차를 보상하기 위하여 3차원 오차, 정적오차 및 기하학적 오차를 모델링하였으며, Mou와 Liu⁽²⁾는 기계에서의 측정 정밀도를 향상시키기 위하여 강체운동기구(Rigid-body kinematics)에 근거한 2-3차 오차방정식을 개발하였다. Shin⁽³⁾등은 공작기계의 특성을 규명할 수 있도록 7가지의 단계를 제안하였다. 또한, 3축 공작기계의 오차를 측정할 수 있는 21개의 오차로 세분하여 이를 바탕으로 3차원 상의 오차를 예측하는 연구가 진행되고 있다.^(4,6)

Knapp⁽⁵⁾은 머시닝센터에 있는 회전축의 성능을 테스트하는 방법으로 원형 테스트를 제안하였다. 이 방법은 간단한 셋업에 의해 연속적인 테스트를 할 수는 있지만 직선 동작을 같이 하므로 순수한 회전 오차를 측정할 수는 없다. Coorevits⁽⁷⁾ 등은Permutation에 의하여 회전테이블의 기하학적 오차를 줄이는 방법을 모색하였다. 그러나 회전테이블의 모든 오차를 다루진 않았으며 Permutation방법을 사용할 경우 해의 신뢰성을 위하여 상당히 많은 측정이 필요한 단점이 있다. 최근의 연구를 보면 공작기계의 오차를 보상하기 위한 방법으로 신경회로망(Neural Network)를 이용하고 있다.^(8,9) 이들 연구에서는 3차원 오차 보상이 아닌 1-2개의 개별 위치 오차 보상에 국한되고 있다.

본 연구에서는 회전테이블이 있는 공작기계 즉 4축 또는 5축 공작기계의 3차원 오차를 규명하고 모델링하기 위하여 회전축의 오차를 6개로 구분하고 이를 측정하는 방법을 개발하며 4x4 변환 행렬로 오차를 표현한다. 그리고 보상 및 검증 알고리즘을 개발하고자 한다.

2. 회전테이블의 오차 모델

본 연구에서 오차라고 함은 계통 오차를 말하며 이는 Fig.1과 같이 측정 점을 여러 차례 반복하여 무작위 오차(Random Error)에 대한 폭($\pm 3\sigma$)의 평균값($E(X)$)의

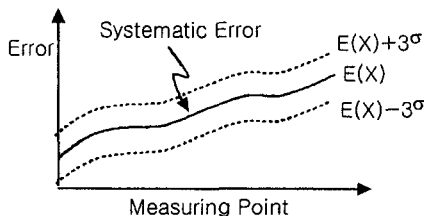


Fig. 1 The definition of systematic and random error

로 정의한다. 무작위 오차는 기계의 부품이나 구동 방식을 바꾸지 않고는 교정이나 모델링이 불가능하지만 계통 오차는 언제나 같은 값을 유지하므로 이의 교정이 가능하며 소프트웨어적인 방법으로 쉽게 구현할 수 있다.

Fig.2와 같은 5축 공작기계의 오차 모델링은 식(1)과 같이 X,Y,Z축에 의한 직선 축 오차 모델링 (11)과 C,A 축에 의한 회전축 오차 모델링으로 구분할 수 있다.

$$E_p = E_{(X,Y,Z)} + E_{(C,A)} \tag{1}$$

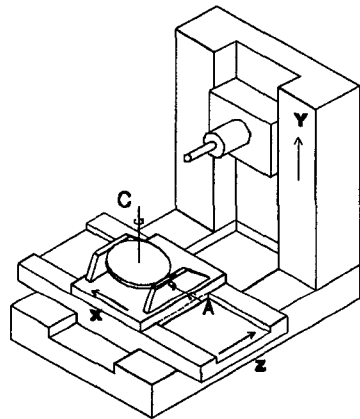


Fig. 2 Horizontal spindle type 5-axes NC machine

본 연구에서는 회전테이블이 있는 수직형 4축 (C-Axis) 또는 5축(A-Axis) 공작기계의 회전축 오차 모델을 제시한다. 회전테이블이 Z축과 평행한 축을 중심으로 회전하는 축을 C축, X축과 평행한 축을 중심으로 회전하는 축을 A축이라고 한다. 회전축인 C 축에 대한 오차 모델은 다음과 같다.

회전테이블의 C축이 회전할 때 발생하는 오차는 일반적으로 6개의 기하학적 오차로 분류한다. Fig.3은 C축 회전운동을 나타낸 것으로 회전 중심 O에 대하여 qz의 회전을 하였을 경우 발생하는 오차는 회전각도 오차(Rz)와 회전축으로부터 반경 방향으로 발생한 2개의 반경 방향 오차(Lx, Ly), 회전축 방향으로 발생한 1개의 회전축 방향 오차(Lz) 그리고 두개의 비틀림(Reeling) 오차(Rx, Ry) 등이 이에 해당한다. (Fig 3) 따라서 2축이 있는 회전테이블에는 12개의 오차가 존재하게 된다.

회전테이블에서 12개의 기하학적 오차는 모두 회전각도(θ_z)의 함수이며 회전테이블의 좌표계를 기준으로 한 공구 끝점의 오차 벡터는 일련의 동작변환행렬(HTM,

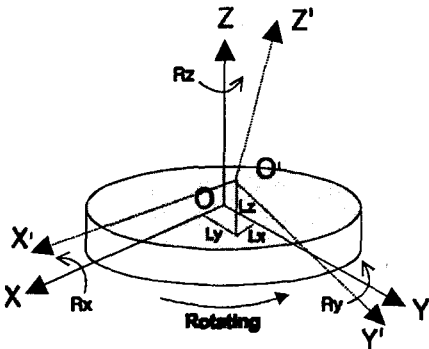


Fig. 3 Rotating error parameters

Homogeneous Transformation Matrix)에 의해 산출되며 식(2)와 같은 행렬 형태가 된다. 여기서 $\theta_z + Rz$ 가 아니라 Rz 만 고려한 것은 공구의 끝점의 좌표는 회전테이블의 회전에 관계없이 고정되어 있으므로 θ_z 에 대한 오차 성분인 Rz 만 고려한 것이다.

$$T_c = \begin{bmatrix} cR_x * cR_z & -cR_x * sR_z & sR_x & L_x \\ sR_x * sR_z + cR_x * cR_z & cR_x * cR_z - sR_x * sR_z & -sR_x * cR_z & L_y \\ -cR_x * sR_z + sR_x * cR_z & sR_x * cR_z + cR_x * sR_z & cR_x * cR_z & L_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, $c = \cos$, $s = \sin$

$L_x = L_x(\theta_z)$: X-축 Translation 오차

$L_y = L_y(\theta_z)$: Y-축 Translation 오차

$L_z = L_z(\theta_z)$: Z-축 Translation 오차

$R_x = R_x(\theta_z)$: X-축에 대한 Reeling 오차

$R_y = R_y(\theta_z)$: Y-축에 대한 Reeling 오차

$R_z = R_z(\theta_z)$: 각도 위치 오차

식(2)의 오차 변환 행렬 T_C 에서 R_x , R_y 와 같이 2개의 인자의 곱이 있는 항은 동작기계가 나노 미터 수준의 정밀도를 요구하지 않을 때는 무시할 수 있으며, 미소각 근사(즉 $\cos e = 1$, $\sin e = e$)를 적용하면 오차 변환 행렬 T_c 를 식(3)과 같이 근사화 할 수 있다. A축에 대한 오차 변환 행렬(T_A)은 T_C 와 같은 방식으로 식(4)과 같이 유도된다.

$$T_c = \begin{bmatrix} 1 & -Rz(\theta_z) & Ry(\theta_z) & Lx(\theta_z) \\ Rz(\theta_z) & 1 & -Rx(\theta_z) & Ly(\theta_z) \\ -Ry(\theta_z) & Rx(\theta_z) & 1 & Lz(\theta_z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_A = \begin{bmatrix} 1 & -Rz(\theta_x) & Ry(\theta_x) & Lx(\theta_x) \\ Rz(\theta_x) & 1 & -Rx(\theta_x) & Ly(\theta_x) \\ -Ry(\theta_x) & Rx(\theta_x) & 1 & Lz(\theta_x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3. 회전 각도 보상

작업 공간상 임의의 점 $P(x,y,z)$ 에 대하여 회전테이블의 회전에 의해 발생하는 오차 모델은 위에서 상술했다. 위의 오차 모델을 바탕으로 한 C축 회전 각도 qz 에 대한 보상 알고리즘은 다음과 같다.

$O(Ox,Oy,Oz)$: 회전테이블의 중심

$P(x,y,z)$: 이상적인 공구 위치

$P'(x',y',z')$: 회전 오차에 의한 실제의 공구 위치

P_{xy}, P'_{xy} : P, P'의 XY 평면상의 점

P_{yz}, P'_{yz} : P, P'의 YZ 평면상의 점

Fig.4는 로터리 테이블의 회전 중심 O에 대하여 작업 공간상의 이상적인 점 P가 회전축의 오차 성분들에 의해 P'로 위치한 것을 나타낸다. 이에 대한 보상 알고리즘은 Fig.5와 같다.

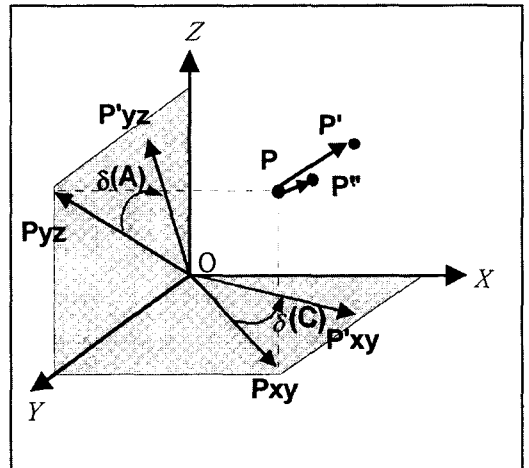


Fig. 4 The algorithm for the C-axis error compensation

점 P로의 이송이 회전운동에 의한 것이므로 먼저 회전 각도 보상을 한다. 회전 각도 보상량은 P와 P'를 X-Y, X-Z평면에 투영한 좌표들로부터 추출한다. 회전 각도에 보상된 점 P''와 이상적인 점 P사이에 3차원 벡터 성분이

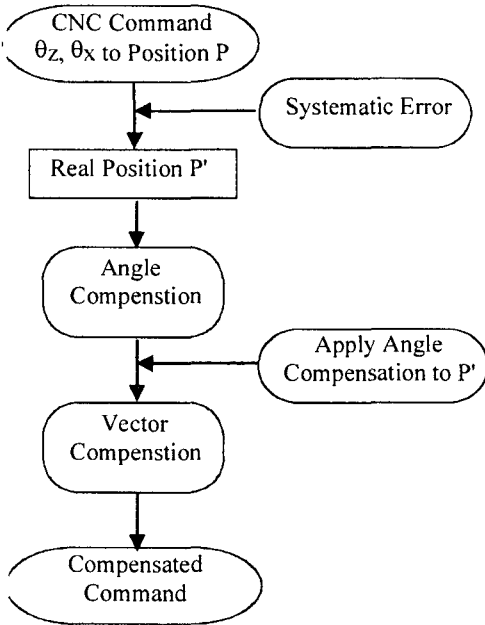


Fig. 5 Compensation of the C-axis rotating error

남게 되며 이 벡터량을 계속해서 보상하도록 한다. 회전 운동의 보상을 직선축과 같이 벡터보상으로도 가능하지만, 5축 머신의 가공 특징을 살리기 위해서는 A,C축을 이용한 오차 보정 방식이 고려되어야 하며, 부드러운 가공(Smooth manufacturing)을 위해서는 이러한 방식이 필수적이다. 세부적인 절차는 아래와 같다.

Original command : $(X,Y,Z,C,A) = (0,0,0,\theta_z,\theta_x)$

Step 1 : 회전각도 θ_z, θ_x 에 대한 P' 계산

$$P' = P \cdot T_C(q_z) \cdot T_A(q_x)$$

Step 2 : 다음식에 의거 $\delta(C), \delta(A)$ 구함

$$\delta(C) = \angle(P_{xy}, O, P'_{xy})$$

$$\delta(A) = \angle(P_{yz}, O, P'_{yz})$$

Step 3 : 회전각도 $-\delta(C), -\delta(A)$ 에 의한 위치 P'' 계산, $P = T(-\delta(C)) \cdot T(-\delta(A)) \cdot P'$

Step 4 : 다음식에서 벡터 $E = (ex, ey, ez)$ 를 구함

$$E(ex, ey, ez) = P'' - P$$

Step 5 : $\delta(C), \delta(A), E$ 를 반복 계산

Compensated command :

$$(X,Y,Z,C,A) = (-ex, -ey, -ez, \theta_z - \delta(C), \theta_x - \delta(A))$$

즉 공작기계의 컨트롤러 상에서 C축을 θ_z 로 지령하였

을 때 발생하는 기하학적 오차를 보상하려면 C축으로 $\theta_z - \delta(C)$, A 축으로 $-\delta(A)$, X,Y,Z축으로 $-ex, -ey, -ez$ 만큼 지령하여야 한다.

A축의 회전 각도 보상은 위의 C축 회전 각도 보상 알고리즘과 같은 방식으로 보상되어진다.

4. 회전테이블의 오차 측정

공작기계의 오차 측정은 백래쉬 및 무작위 오차를 제거하기 위하여 측정 점에 대해서 전방 후방 방향으로 3번씩 측정하여 그 평균값을 취한다. 회전테이블의 경우 CW(시계 방향)와 CCW(반시계 방향)로 각각 3번을 측정하며 그 평균을 취한다. 그리고 측정 사이클은 Linear cycle 방식을 따른다.⁽¹⁰⁾ 본 연구에서는 회전테이블의 회전축 가운데 C축에 대한 오차를 측정하였다.

4.1 Rx, Ry, Rz의 측정 방법

회전테이블이 회전할 때 발생하는 회전오차인 Rx, Ry, Rz를 측정하기 위해서는 다면경(Polygon)과 오토콜리메이터(Autocollimator)가 사용된다. 실험 장치의 장착은 Fig.6과 같다.

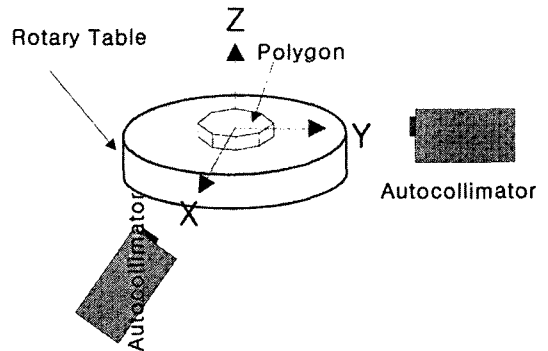


Fig. 6 The method for measuring the rotary table reeling and angular error, Rx, Ry and Rz

X축 방향으로 고정시킨 상태에선 Rz와 Ry를 측정할 수 있으며 Y축 방향으로 고정시킨 상태에선 Rz와 Rx를 측정할 수 있다. 두 장착에서 Rz는 중복 측정이 되나 그 값은 같아야 한다. 그리고 측정값의 부호는 오른손 법칙에 의해 정한다.

4.2 Lx, Ly, Lz의 측정 방법

회전테이블의 회전 시에 발생하는 오차 가운데 길이 (Translation) 오차인 Lx, Ly, Lz를 측정하는 위하여 마스터볼(Master Ball)과 LVDT(Linear Variable Displacement Transformer)가 사용된다. 실험 장치의 셋업은 Fig. 7과 같다. 먼저 열팽창 계수와 진구도 (Sphericity)가 작은 마스터 볼을 바에 고정시킨 후 이를 회전테이블의 중심에 심는다. 그리고 3개의 LVDT를 각각 X, Y, Z 방향에서 볼과 접촉시킨다. 초기의 접촉 점에서서의 변위 값을 초기값(Zero)으로 설정한 후 측정을 시작한다.

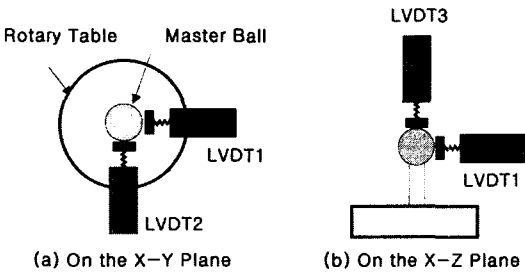


Fig.7 The method for measuring the rotary table translation errors, Lx, Ly and Lz

4.3 Set Up 오차의 보상

위의 측정 방법으로 측정을 할 경우 측정 데이터에는 마스터 볼 셋업의 불완전성에 의한 측정 오차가 포함되어 있으며, 그 중에서 측정값에 큰 영향을 미치는 요소로는 편심(Eccentricity)과 비틀림(Reeling) 등이 있다. 이들 요소의 발생 요인은 측정을 위한 마스터 볼을 회전테이블의 회전 중심에 정확히 위치시킬 수 없기 때문으로 길이 오차의 측정값에 큰 영향을 미친다. 따라서 길이 오차의 측정값으로부터 이들 셋업에 의한 오차를 제거할 필요가 있다.

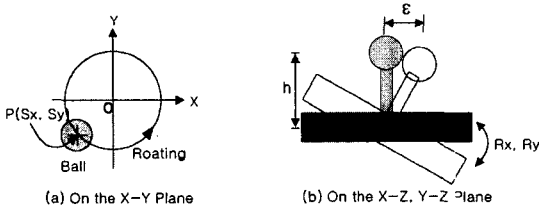


Fig. 8 Master ball set-up error

Fig.8(a)는 편심을 나타낸 것으로서 점 P(Sx, Sy)는 마스터 볼의 초기 위치이다. 순수한 편심에 의한 측정 오차는 회전각도 θ_z 의 함수이며 아래의 식(5)와 같이 (Dx, Dy)로 표현하기로 한다.

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x \cdot (\cos\theta_z - 1) - S_y \cdot \sin\theta_z \\ S_x \cdot \sin\theta_z + S_y \cdot (\cos\theta_z - 1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Fig.8(b)는 회전테이블의 회전 시에 비틀림(Reeling)에 의한 측정 오차를 나타낸 것으로 그림에서 ϵ 이 측정 오차가 된다. Rx 및 Ry에 의한 측정 오차는 아래의 식(6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h \cdot \sin R_y \\ -h \cdot \sin R_x \end{bmatrix} \quad (6)$$

회전각도 θ_z 에서의 Lx, Ly에 대한 측정값을 (Mx, My)라고 할 때 측정 오차를 포함한 (Mx, My)의 관계식은 아래의 식(7)과 같다. 따라서 순수한 회전테이블의 길이 오차를 얻기 위해서는 먼저 일련의 측정값 (Mx, My)에 최승자승법(Least Mean Squares)을 적용하여 중심좌표를 찾는다. 그러면 이 중심좌표가 바로 (Sx, Sy)가 되며 식(5) (6) (7)에 의해 측정 셋업오차가 분리된 Lx, Ly값을 구하게 된다.

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_x + D_x + \epsilon_x \\ L_y + D_y + \epsilon_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

4.4 C축 회전 오차의 측정 결과

본 연구에서는 회전테이블의 회전 오차 가운데 C축의 회전 오차들을 측정하였다. 측정 도구는 다음과 같다.

- 오토콜리메이터(Autocollimator) : Taylor Hobson , 1sec 분해능
- 다면경(Polygon) : Starrett 12-faced Polygon
- LVDT : Mitutoyo, Digimatic Indicator, flat tip, 1 μ m 분해능
- 마스타볼(Master Ball) : Tungsten Carbide, 진구도(Sphericity) < 0.1 μ m

전체 측정 범위는 360도이며 사용한 다면경(Polygon)이 12면이므로 30도 간격으로 측정 구간을 정하였다. 마스터 볼을 회전테이블에 고정시키기 위하여 척

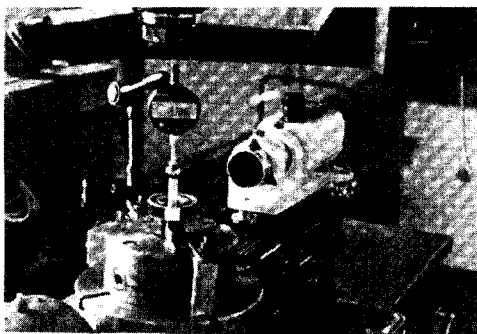
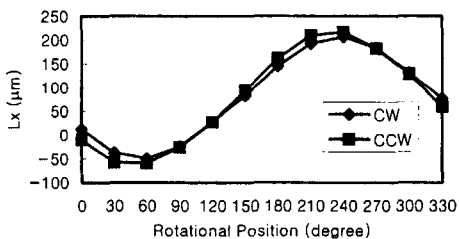
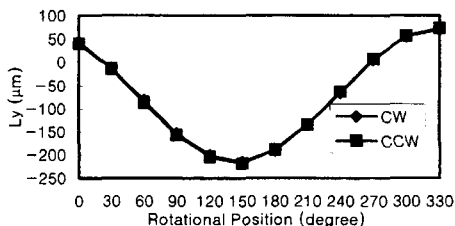


Fig. 9 Picture for the rotary table experimental set-up with an autocollimator

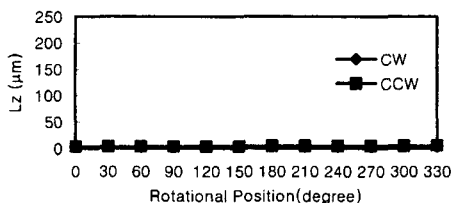
(Chuk)을 사용하였으며(Fig.9) 셋업오차를 제거한 측정 길과는 다음과 같다.



(a) x-direction error, Lx



(b) y-direction error, Ly



(c) z-direction error, Lz

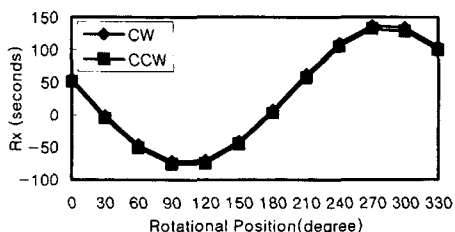
Fig. 10 Measurement results for the rotary table translation errors

4.4.1 길이(Translation) 오차의 측정 결과

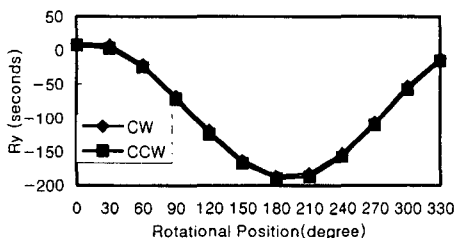
Lx, Ly, Lz에 대한 측정 데이터는 Fig.10(a) ~ (c)과 같다. Lx의 오차 범위는 (-59.2μm, 217μm)이며 Ly의 오차 범위는 (-218μm, 72.7μm)이다. 이에 반하여 Lz는 측정 대상인 공작기계 자체의 이송분해능(5μm) 보다 작은 값을 가진다. 전체적으로 백래쉬는 오차의 크기에 비하여 상대적으로 아주 작은 값을 가진다.

4.4.2. 회전 오차의 측정 결과

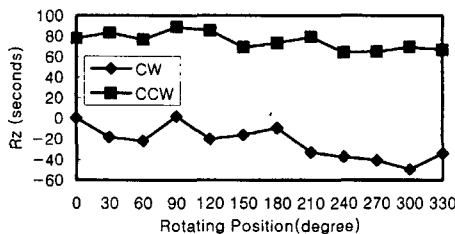
Fig.11(a) ~ (c) 는 Rx, Ry, Rz의 측정 결과를 나타낸다. Rx는 -76~137 초(seconds) 사이의 오차량을 가지며 6 초이하의 백래쉬가 존재한다. Ry는 -190~10 초 사이의 오차량을 가지며 5 초이하의 경미한 백래쉬가 존재한다. 이에 반하여 Rz의 경우 평균 98 초의 상당히 큰



(a) x-direction error, Rx



(b) y-direction error, Ry



(c) z-direction error, Rz

Fig. 11 Measurement results for the rotary table reeling and angular errors

백래쉬가 존재하며 측정 구간에 대하여 오차량의 경향은 선형을 보인다.

5. 회전테이블의 회전 오차 보상의 검증

3장에서 CNC 공작기계 회전테이블의 회전 오차를 보상하는 알고리즘을 제안하였다. CNC 공작기계의 회전 운동에 대한 검증 또는 측정 방법으로는 볼바(Ball-bar)가 알려져 있으나 이는 회전테이블의 회전 중심과 3차원 상의 보상점 사이의 거리를 알려줄 뿐 벡터 성분을 나타내 주지는 못한다. 또한 레이저 인터페로미터(Laser Interferometer)와 같은 장치는 직선 운동의 변위를 측정하기 위한 목적으로는 유용하나 회전 운동의 측정에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 회전 오차 보상의 검증 방법으로 볼테이블(Ball Table)에 의한 방식을 제안하고자 한다.

볼테이블에 의한 방식은 Fig.12와 같이 정밀하게 가공한 테이블 위에 마스터 볼을 일정한 각도로 여러 개 심어 볼테이블을 구성하여, 회전 운동에 따른 볼의 위치를 접촉식 프로브를 장착한 온머신(On-Machine) 측정⁽²⁾을 통하여 측정하는 방법으로 회전 오차 보상의 정밀도를 파악하는 방법이다.

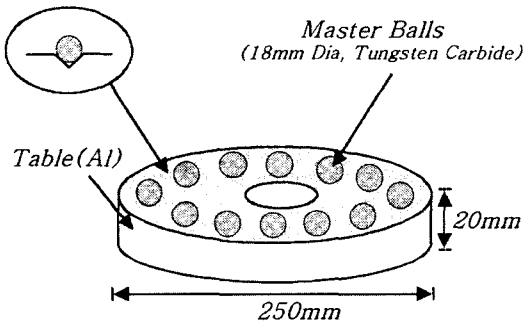


Fig. 12 Designed ball table for measuring the rotary table errors

5.1 검증 방법

볼테이블 상의 특정한 볼에 대하여 회전테이블의 초기 위치에서 온머신 측정을 통해 볼의 초기 위치를 알아내고, 임의의 각도로 회전테이블을 회전하면서 보상 전과 보상 후의 위치를 또한 온머신 측정을 통하여 알아낸다. 그러면 그 볼의 특정 위치에 대하여 4가지의 위치값 즉

오차가 전혀 없는 이상적인 위치, 여러 가지 오차가 포함된 위치, 회전테이블의 회전 오차를 예측한 위치, 그리고 위치 보상을 한 후의 위치가 있다. 이러한 여러 가지 특정 볼의 위치들을 비교 함으로서 검증이 이루어진다. Fig.13은 이러한 방법에 대한 개요를 도시한 것이다.

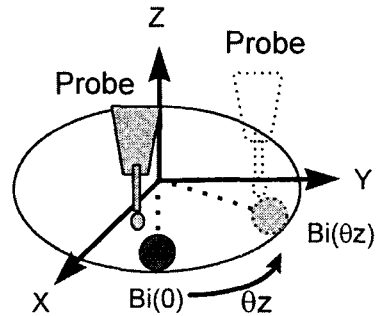


Fig. 13 Verification method

$Bi(j)$ 를 i 번째 볼의 위치로서 회전테이블이 각도 j 의 위치에 있을 때의 3차원 위치라고 하면 특정 볼의 위치는 다음의 4가지가 있다.

$$Bi(\theta_z) = Bi(0) \cdot T(\theta_z) \tag{8}$$

식(8)은 i 번째 볼의 초기 위치 $Bi(0)$ 가 회전테이블의 회전각도 θ_z 만큼 회전하였을 때의 이상적인 위치이다. 즉 회전테이블이 회전 위치 θ_z 에서의 i 번째 볼의 위치이다.

$$Bi^*(\theta_z) = Bi(0) \cdot T(\theta_z) + \text{Error}\{3\text{-axis systematic Error, Rotary Table Error, ...}\} \tag{9}$$

식(9)은 i 번째 볼의 회전테이블의 회전 위치 θ_z 에서의 위치 측정값으로 여기에는 회전테이블 자체의 회전 오차들과 온머신 측정에 의해 발생하는 X, Y, Z 3축 오차들이 포함되게 된다.

$$Bi(\theta_z)_e = Bi(0) \cdot T_c(\theta_z) \tag{10}$$

식(10)은 i 번째 볼의 회전테이블의 회전 위치 θ_z 에서의 오차가 포함된 위치 예측 값이다. 여기에는 순수하게 회전테이블 만의 오차만 반영되어 있다.

$$Bi^*(\theta_z)_c = Bi(-ex, -ey, -ez, \theta_z - \delta(C), -\delta(A)) \tag{11}$$

식(11)은 회전축 보상 알고리즘에 의해 C축의 회전운

동-을 5축의 이송에 의해 보상한 결과로서 i 번째 볼의 위치를 측정된 값이다. 즉 보상 후의 측정값을 말한다.

위의 4개의 식들 가운데 식(9)과 (10)의 비교를 통해서 오차 모델의 회전 오차 추정 능력을 그리고 식(9)와 (11)를 비교 함으로서 보상 알고리즘의 보상 능력을 검증할 수 있다.

5.2 검증 결과

본 연구에서 검증 실험을 위해 제작한 Ball Table과 온머신 측정에 의한 회전 오차 검증 실험은 Fig.14와 같다.

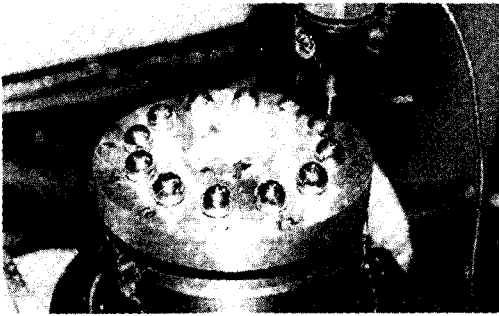


Fig. 14 Pictorial view for the verification experiment

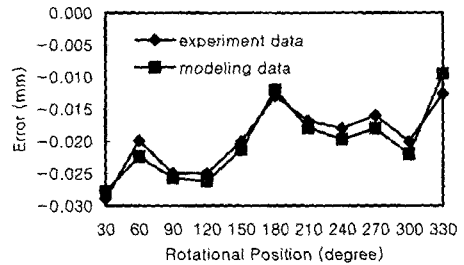
먼저 특정 볼 B0를 선택하고 온머신 상에서 B0의 초기 위치를 측정하여 B0의 중심위치를 찾아낸 후 30도 간격으로 보상 전과 후에 따라 자기 B0의 중심을 터치 프로브가 따라가면서 추적 측정한다. 그리고 실험 결과에 대한 분석은 식(12)와 (13)을 비교하는 것으로 하였다.

$$Bi^*(\theta_z) - Bi^*(\theta_z)c = \text{Rotary Table Error} \quad (12)$$

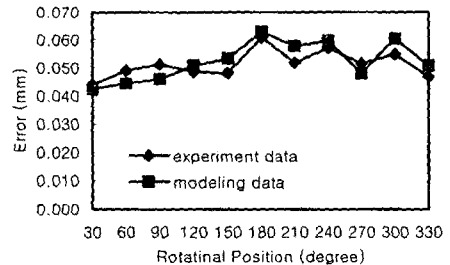
$$Bi(\theta_z)e - Bi(\theta_z) = \text{Rotary Table Error} \quad (13)$$

식(12)는 두개의 실험치 즉 보상 전과 보상 후의 볼의 위치를 뺀 결과로서 이와 같이 하면 3축 이송에 의한 오차 성분이 서로 상쇄되는 효과가 되기 때문에 3축 이송 기계의 오차를 고려할 필요가 없는 장점이 있다. 이와는 달리 식(13)은 두 이론 값 즉 오차가 포함된 위치의 예측 값과 이상적인 위치를 뺀 결과로서 이상적으로 회전테이블 자체의 오차만이 존재하는 값이다. 즉 식(12)는 실제 측정값이며 식(13)은 모델링 값이라고 할 수 있고, 따라서 식(12)와 (13)을 비교하여 두 값이 유사하다면 이는 모델의 예측성과 보상 알고리즘의 유효성을 입증하는 것이 된다. Fig.15는 식(12)와 (13)을 비교한 것이며, 시

계방향과 반시계 방향 회전 측정값의 평균치를 표시한 것이다. 실험치와 모델링 값의 차이가 보여지는 부분은 회전테이블의 무작위 오차(Random Error) 성분에 기인하는 것으로 보인다. 무작위 오차는 서론에서 전술한 바와 같이 주로 하드웨어적인 원인으로 재현성(Repeatability) 등이 불량일 때 발생하며, 측정 시마다 다른 값을 보이기 때문에 보상이 어려운 단점이 있다.



(a) x-directional error



(b) y-directional error

Fig. 15 Comparison of error modeling with experiment for rotary table error vector in one dimension

6. 결론 및 추후 과제

본 연구에서 제시된 회전체의 오차 모델과 오차 성분들을 측정하기 위한 방법은 4.5축 NC 가공기에서 필수적으로 사용되는 회전테이블의 정밀도를 평가하는 수단으로 유용하게 이용될 수 있다. 4축 이상의 가공기를 필요로 하는 가공품의 정밀 가공을 위해서는 필수적으로 회전테이블의 오차가 보상되어야 하며, 본 연구에서 제시된 회전테이블의 오차 보상 방법은 이를 위한 유용한 방법이 될 수 있음을 보여준다. 본 연구의 결과는 3축 기계에서의 오차 모델과 연결하여 4.5축 가공기 전체의 오차를 종합적으로 평가 및 보상하는 시스템으로 개발 될 것이다.

참 고 문 헌

1. Ferreira, P.M., and C.R. Liu, "An Analytical Quadratic Model for the Geometric Error of a Machine Tool", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 5, No. 1, pp 51-62, 1986.
2. Mou, J., and C.R. Liu, "A Method for Enhancing the Accuracy of CNC Machine Tools for On-Machine Inspection", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 11, No. 4, pp 229-237, 1992.
3. Shin, Y. C., H. Chin, and M. J. Brink, "Characterizations of CNC Machining Centers", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 10, No. 5, pp 407-421, 1991.
4. L. Nawara, M. Kowalski, J.Sladek, "The Influence of Kinematic Errors on the Profile Shapes by Means of CMM", *Annals of the CIRP*, Vol. 38, No. 1, pp 511-516, 1989.
5. W.Knapp, "Testing Rotary Axes on NC Machine Tools", *Annals of CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp 549-552, 1990.
6. J. A. Soons, F. C. Theuws, and P. H. Schellekens, "Modeling the errors of multi-axis machines : a general methodology", Vol. 14, No. 1, pp 5-19, 1992.
7. T. Coorevits, J. P. David, ENSAM Lille, "Elimination of Geometrical Errors by Permutations-Application to a Rotary Table", *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No. 1, pp 531-534, 1991.
8. S.C Veldhuis, M.A. Elbestawi, "A Strategy for the Compensation of Errors in Five-Axis Machining", *Annals of the CIRP*, Vol. 44, No.1, pp 373-377, 1995.
9. JOHN C. ZIEGERT, PRASHANT KALLE, "Error compensation in machine tools : a neural network approach", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol.5, pp 143-151, 1994.
10. "General tests for machine tools", BS 3800 Part 2 :, 1991.
11. 손진욱, "공작기계의 오차요소 측정을 통한 3차원 위치정밀도 향상", 한국정밀공학회95년 추계학술대회 논문집, pp 260-265, 1995.