

NC 공작기계의 Rotary Table 오차 측정 및 보상에 관한 연구

A study on the calibration of rotary table with NC machine

정세용, 서석환

포항공과대학교 산업공학과, Computer Automated Manufacturing Lab.

이응석

포항산업과학연구원(RIST), 자동화연구부문

ABSTRACT

본 연구는 4 축 또는 5 축 NC 공작기계에 사용되는 Rotary Table 의 오차를 측정하고 이를 보정하기 위한 연구이다. 먼저 일반적인 Rotary Table 에 대한 오차모델이 설정되었으며, Rotary Table 에서 존재하는 6 가지의 오차를 각각 측정하였다. 측정방법은 3 개의 길이오차는 1 개의 정밀볼(Master ball)과 3 개의 LVDT, 3 개의 각도 오차는 6 각 폴리곤과 Autocollimator 를 사용하여 측정하였다. 측정된 오차 성분 들은 오차모델을 이용하여 보상치를 계산하였으며, 이 값은 추후 원래의 측정오차와 비교하는 방법으로 모델의 정확성을 검증할 것이다. NC 공작기계상에서 Rotary Table 의 실제 보상 실험을 위하여 30°간격으로 정밀한 볼이 장착된 볼-테이블을 설계하였다.

Key Words : Rotary table, 오차모델, Master ball, 볼-테이블, Reeling error, Translation error

1. 서 론

CNC 공작기계의 고 정밀도에 대한 중요성은 최근의 제품이 높은 공차를 요구함에 따라 더욱더 커지고 있다. 가공물의 치수 오차는 공작기계와 가공환경 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 발생하는 반면에 정적오차는 공작기계의 기하학적 오차, 일정한 부하, 공작기계의 열변형 등에 의해 유발된다. 정적오차 가운데 공작기계 각축의 가이드웨이의 구조적 변형, 백 래쉬, 서보컨트롤러 오차 등에 의한 오차를 특히 Systematic Error 라고 한다.

정적 조건하에서 공작기계의 오차를 규명하고 이를 모델링하는 연구가 수년간 많은 연구자들에 의해 연구 되어져 왔다. Ferreira 와 Liu [1]는 공작기계의 위치오차를 보상하기 위하여 3 차원 오차, 정적오차 및 기하학적 오차를 모델링하였으며, Mou 와 Liu[2] 는 머신상 측정의 정밀도를 향상시키기 위하

여 Rigid-body kinematics 에 근거한 2-3 차 오차방정식을 개발하였다. Shin[3]등은 공작기계의 특성을 규명할 수 있도록 7 가지의 프리시저를 제안하였다. 또한, 3 축 공작기계의 오차를 측정할 수 있는 21 개의 오차로 세분하여 이를 바탕으로 3 차원 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]등은 Permutation 에 의하여 Rotary Table 의 기하학적 오차를 줄이는 방법을 모색하였다. 그러나 Rotary Table 의 모든 오차를 다루진 않았으며 Permutation 방법을 사용할 경우 해의 신뢰성을 위하여 상당히 많은 측정이 필요한 단점이 있다. 최근의 연구를 보면 공작기계의 오차를 보상하기 위한 방법으로 뉴럴 네트워크를 이용하고 있다. [8,9] 이들 연구에서는 3 차원 오차 보상이 아닌 1-2 개의 개별 위치오차 보상에 국한되고 있다.

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

2. Rotary Table 의 오차 모델

공작기계의 Systematic 오차는 Fig 1 과 같이 측정 점을 여러 차례 반복하여 Random 오차에 대한 폭 ($\pm 3\sigma$)의 평균값 ($E(X)$)으로 정의한다. Random 오차는 기계의 부품이나 구동 방식을 바꾸지 않고는 교정이나 모델링이 불가능하지만 Systematic 오차는 언제나 같은 값을 유지하므로 이의 교정이 가능하며 Software 적인 방법으로 쉽게 구현할 수 있다.

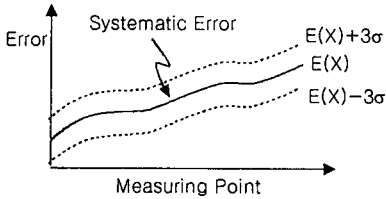


Fig 1. The definition of systematic and random error

5 축 공작기계(Fig 2)의 오차 모델링은 직선축에 대한 3 축(X, Y, Z) 모델링[11]과 회전축에 대한 2 축(C, A) 모델링으로 나눌수 있다. 즉 5 축 공작기계의 3 차원 오차벡터 (E_p)는 식(1)과 같이 표현된다

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

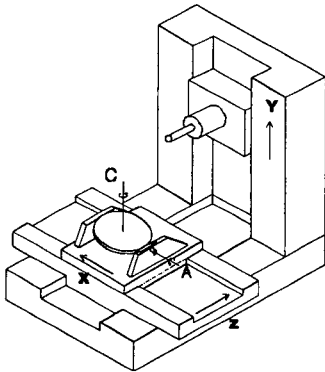


Fig 2. Horizontal spindle type 5-axes NC machine

2.1 회전 축의 오차 모델

본 연구에서는 Rotary Table 이 있는 수직형 4 축(C-Axis) 또는 5 축(A-Axis) 공작기계의 회전축 오차 모델을 제시한다. Rotary Table 이 Z 축과 평행한 축을 중심으로 회전하는 축을 C 축, X 축과 평행한 축을

중심으로 회전하는 축을 A 축이라고 한다. 회전축인 C 축에 대한 오차 모델은 다음과 같다.

Rotary Table 의 C 축이 회전할 때 발생하는 오차는 일반적으로 6 개의 기하학적 오차로 분류한다. Fig 3 은 C 축 회전운동을 나타낸 것으로 회전 중심 O 에 대하여 θ_z 의 회전을 하였을 경우 발생하는 오차는 회전각도 오차(R_z)와 회전축으로부터 반경 방향으로 발생한 2 개의 반경 방향 오차(L_x, L_y), 회전축 방향으로 발생한 1 개의 회전축 방향 오차(L_z) 그리고 두개의 비틀림(Reeling) 오차 (R_x, R_y) 등이 이에 해당한다. (Fig 3) 따라서 2 축이 있는 Rotary Table 에는 12 개의 오차가 존재하게 된다.

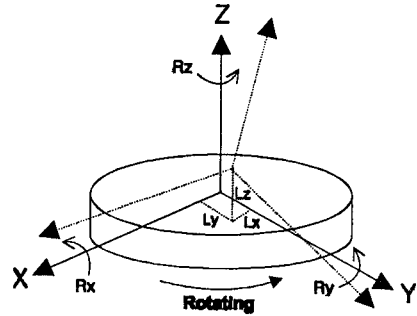


Fig 3. Rotating error parameters

Rotary Table 의 12 개 기하학적 오차는 모두 회전각도 (θ_z) 의 함수이며 Rotary Table 의 좌표계를 기준으로 한 공구 끝점의 오차 벡터는 일련의 HTM (Homogeneous Transformation Matrix)에 의해 산출되며 식(2)와 같은 행렬 형태가 된다. 여기서 $\theta_z + R_z$ 가 아니라 R_z 만 고려한 것은 공구의 끝점의 좌표는 Rotary Table 의 회전에 관계없이 고정되어 있으므로 θ_z 에 대한 오차 성분인 R_z 만 고려한 것이다.

(2)

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

where, $c = \cos$, $s = \sin$

$L_x = L_x(\theta_z)$: x-axis directional translation error

$L_y = L_y(\theta_z)$: y-axis directional translation error

$L_z = L_z(\theta_z)$: z-axis directional translation error

$R_x = R_x(\theta_z)$: Reeling error with respect to the x-axis

$R_y = R_y(\theta_z)$: Reeling error with respect to the y-axis

$R_z = R_z(\theta_z)$: Angular positioning error

식(2)의 오차 변환 행렬 T_C 에서 R_x, R_y 와 같이 2개의 인자의 곱이 있는 항은 공작기계가 나노 미터 수준의 정밀도를 요구하지 않을 때는 무시 할 수 있으며, Small-angle approximation (즉 $\cos \varepsilon = 1, \sin \varepsilon = \varepsilon$)을 적용하면 오차 변환 행렬 T_C 를 식(3)과 같이 근사화 할 수 있다. A 축에 대한 오차 변환 행렬(T_A)은 T_C 와 같은 방식으로 식(4)와 같이 유도된다.

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

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

2.2 5축 공작기계의 오차 모델

Fig 4는 공구에 대한 Rotary Table의 상대오차를 표시한 것이며, CS0는 수직형 공작기계의 X, Y, Z 축 기계 좌표계를 나타내고, CS1은 Rotary Table의 중심 좌표계를 나타낸다. P[x, y, z]가 공구 끝점의 좌표일 때 공작기계의 Volumetric error 벡터(E_p)는 아래의 식(5)와 같다. 여기서 E_{xy} 는 X, Y 축 테이블에 의한 오차를 나타내며 E_z 는 스피들 축인 Z 축에 의한 오차를 나타낸다.[11] $T_{0,1}$ 은 좌표계 CS0에서 좌표계 CS1으로의 좌표계 변환 행렬이며 $T_{1,0}$ 은 그 역(Inverse)이다. 따라서 $(T_C - I) \cdot T_{0,1} \cdot P$ 는 Rotary Table의 좌표계에서의 순수한 회전 오차 벡터이며, 여기에 $T_{1,0}$ 를 곱하면 공작기계의 기계 좌표계에서 본 회전 오차 벡터가 된다.

$$\begin{aligned} E_C &= T_{1,0} \cdot (T_C - I) \cdot T_{0,1} \cdot P \\ E_A &= T_{1,0} \cdot (T_A - I) \cdot T_{0,1} \cdot P \\ E_P &= E_{xy} + E_z + E_C + E_A \end{aligned} \quad (5)$$

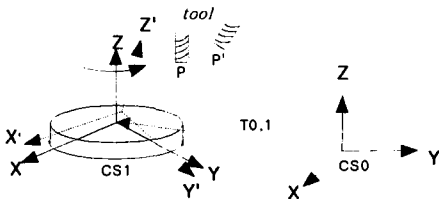


Fig 4. 3-dimensional error vectors with respect to the tool position

3. 회전 각도 보상

작업공간상의 임의의 점 P(x,y,z)에 대하여 Rotary Table의 회전에 의해 발생하는 오차모델은 위에서 상술했다. 위의 오차모델을 바탕으로한 C 축 회전 각도 θ_z 에 대한 보상 알고리즘은 아래와 같다. (Fig 5,6)

C(Cx,Cy,Cz) : Center of Rotary Table

P(x,y,z) : Ideal tool position

P'(x',y',z') : Actual tool position with rotating error

Cxy, Pxy, P'xy : Projection point of C,P,P' to the x-y plane

Cyz, Pyz, P'yz : Projection point of C,P,P' to the y-z plane

Original command : (X,Y,Z,C,A) = (0,0,0, θ_z ,0)

Step 1 : Calculate P' for the rotating angle θ_z

Step 2 : Find $\delta(C)$ and $\delta(A)$ as follows

$$\delta(C) = \angle(Pxy, Cxy, P'xy)$$

$$\delta(A) = \angle(Pyz, Cyz, P'yz)$$

Step 3 : Calculate P'' which is the rotating point of P with angle $\delta(C), \delta(A)$

Step 4 : Find vector E=(ex, ey, ez) as follows

$$E = P'' - P$$

Step 5 : Return $\delta(C), \delta(A), E$

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

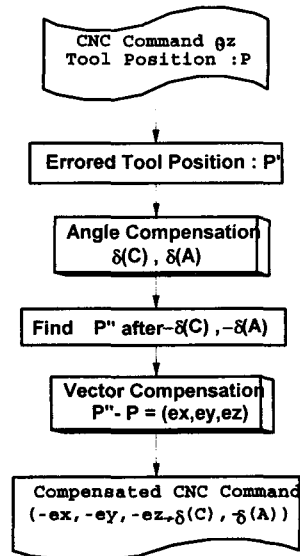


Fig 5. The algorithm for the C-axis error compensation

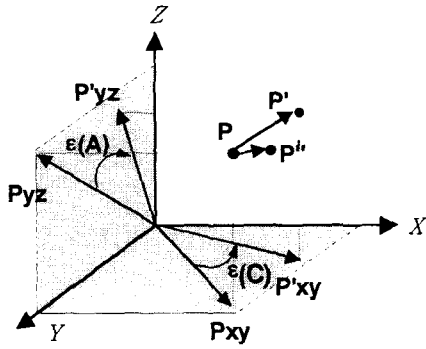


Fig 6. Compensation of the C-axis rotating error

즉 공작기계의 컨트롤러 상에서 C 축을 θ_z 로 지정하였을 때 발생하는 기하학적 오차를 보상하려면 C 축으로 $\theta_z - \delta(C)$, A 축으로 $-\delta(A)$, X,Y,Z 축으로 $-ex, -ey, -ez$ 만큼 지정하여야 한다.

A 축의 회전 각도 보상은 위의 C 축 회전 각도 보상 알고리즘과 같은 방식으로 보상되어진다.

4. Rotary Table 의 오차 측정

공작기계의 오차 측정은 Backlash 및 Random 오차를 제거하기 위하여 측정 점에 대해서 전방 후방 방향으로 3 번씩 측정하여 그 평균값을 취한다. Rotary Table 의 경우 CW(시계 방향)와 CCW(반시계 방향)로 각각 3 번을 측정하며 그 평균을 취한다. 그리고 측정 사이클은 Linear cycle 방식을 따른다.[10] 본 연구에서는 Rotary Table 의 회전축 가운데 C 축에 대한 오차를 측정하였다.

4.1 Rx, Ry, Rz 의 측정 방법

Rotary Table 이 회전할 때 발생하는 Rotation 오차인 Rx, Ry, Rz 를 측정하기 위해서는 Polygon 과 Autocollimator 가 사용된다. 실험 장치의 셋업은 Fig 7 과 같다. X 축 방향으로 셋업한 상태에선 Rz 와 Ry 를 측정할 수 있으며 Y 축 방향으로 셋업한 상태에선 Rz 와 Rx 를 측정할 수 있다. 두 셋업에서 Rz 는 중복 측정이 되나 그 값은 같아야 한다. 그리고 측정값의 부호는 오른손 법칙에 의해 정한다.

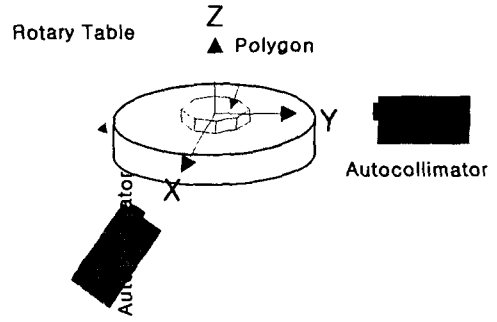


Fig 7. The method for measuring the rotary table reeling and angular error, Rx, Ry and Rz

4.2 Lx, Ly, Lz 의 측정 방법

Rotary Table 의 회전 시에 발생하는 오차 가운데 Translation 오차인 Lx, Ly, Lz 를 측정하는 때에는 마스터 볼(Master Ball)과 LVDT(Linear Variable Displacement Transformer) 가 사용된다. 실험 장치의 셋업은 Fig 8 과 같다. 먼저 열팽창계수와 진구도(Sphericity)가 작은 마스터 볼을 바에 고정시킨 후 이를 Rotary Table 의 중심에 심는다. 그리고 3 개의 LVDT 를 각각 X, Y, Z 방향에서 볼과 접촉시킨다. 초기의 접촉 점에서의 변위 값을 제로로 설정한 후 측정을 시작한다.

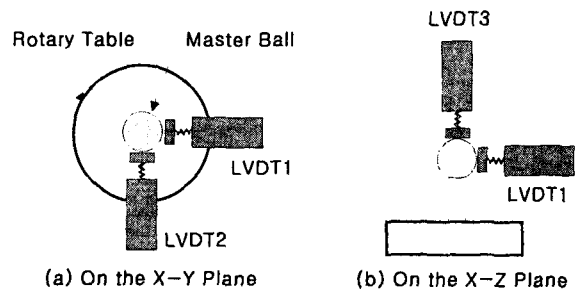


Fig 8. The method for measuring the rotary table translation errors, Lx, Ly and Lz

4.3 Set Up 오차의 보상

위의 측정 방법으로 측정을 할 경우 측정 데이터에는 마스터 볼 셋업의 불완정성에 의한 측정오차가 포함되어 있으며, 그 중에서 측정값에 큰 영향을 미치는 요소로는 편심(eccentricity)과 비틀림(reeling) 등이 있다. 이들 요소의 발생 요인은 측정

을 위한 마스터 볼을 Rotary Table의 회전 중심에 정확히 위치시킬 수 없기 때문에 Translation 오차의 측정값에 큰 영향을 미친다. 따라서 Translation 오차의 측정값으로부터 이들 셋업에 의한 오차를 제거할 필요가 있다.

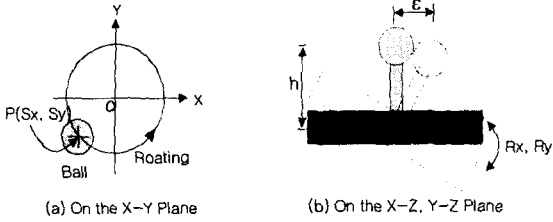


Fig 9. Master ball set-up error

Fig 9(a)는 편심을 나타낸 것으로서 점 P(Sx, Sy)는 마스터 볼의 초기 위치이다. 순수한 편심에 의한 측정오차는 회전각도 θ_z 의 함수이며 아래의 식과 같이 (Dx, Dy)로 표현하기로 한다.

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x \cdot (\cos\theta_z - 1) - S_y \cdot \sin\theta_z \\ S_x \cdot \sin\theta_z + S_y \cdot (\cos\theta_z - 1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Fig 9(b)는 Rotary Table의 회전시에 비틀림(Reeling)에 의한 측정오차를 나타낸 것으로 그림에서 ϵ 가 측정오차가 된다. Rx 및 Ry에 의한 측정오차는 아래의 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h \cdot \sin R_y \\ -h \cdot \sin R_x \end{bmatrix} \quad (7)$$

회전각도 θ_z 에서의 Lx, Ly에 대한 측정값을 (Mx, My)라고 할 때 측정오차를 포함한 (Mx, My)의 관계식은 아래의 식(8)과 같다. 따라서 순수한 Rotary Table의 Translation 오차를 얻기 위해서는 먼저 일련의 측정값 (Mx, My)에 LMS(Least Mean Square)를 적용하여 중심좌표를 찾는다. 그러면 이 중심좌표가 바로 (Sx, Sy)가 되며 식 (6) (7) (8)에 의해 측정 셋업오차가 분리된 Lx, Ly 값을 구하게 된다.

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_x + D_x + \epsilon_x \\ L_y + D_y + \epsilon_y \end{bmatrix} \quad (8)$$

4.4 C 축 회전 오차의 측정 결과

본 연구에서는 Rotary Table의 회전 오차 가운데

C 축의 회전 오차들을 측정하였다. 측정 도구는 다음과 같다.

Autocollimator : Taylor Hobson , 1sec Resolution

Polygon : Starrett 12-faced polygon

LVDT : Mitutoyo, Digimatic Indicator, flat tip, 1 μ m Resolution

Master Ball : Tungsten Carbide, Sphercity < 0.1 μ m

전체 측정 범위는 360도이며 사용한 Polygon이 12면이므로 30도 간격으로 측정 구간을 정하였다. 마스터 볼을 Rotary Table에 고정시키기 위하여 척(Chuck)을 사용하였으며(Fig 10) 셋업오차를 제거한 측정 결과는 다음과 같다.

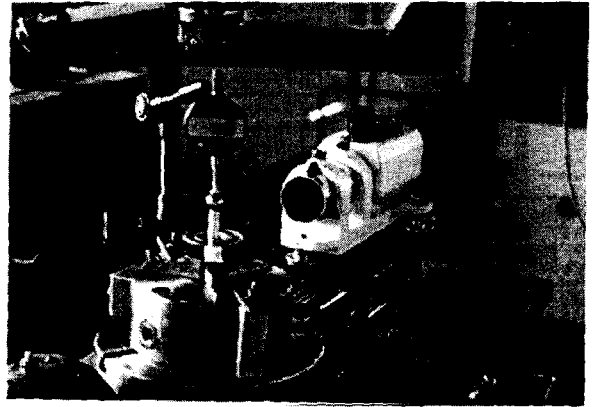
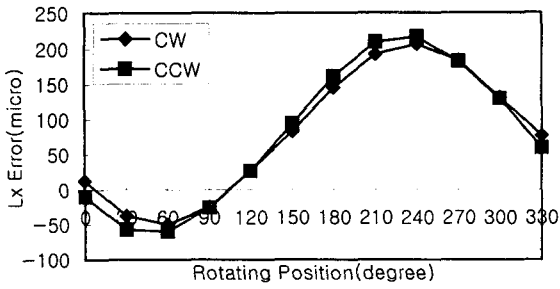


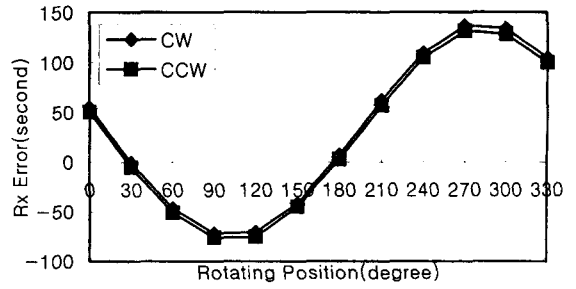
Fig 10. Picture for the rotary table experimental set-up with an autocollimator

4.4.1 Translation 오차의 측정 결과

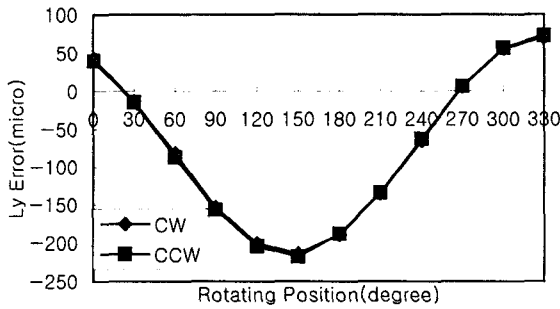
Lx, Ly, Lz에 대한 측정 데이터는 Fig 11 (a) ~ (c)과 같다. Lx의 오차범위는 (-59.2 μ m, 217 μ m)이며 Ly의 오차범위는 (-218 μ m, 72.7 μ m)이다. 이에 반하여 Lz는 측정 대상인 공작기계 자체의 이송 Resolution(5 μ m)보다 작은 값을 가진다. 전체적으로 Backlash는 오차의 크기에 비하여 상대적으로 아주 작은 값을 가진다.



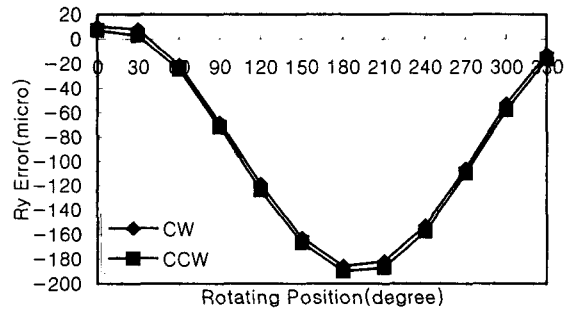
(a) x-direction error, Lx



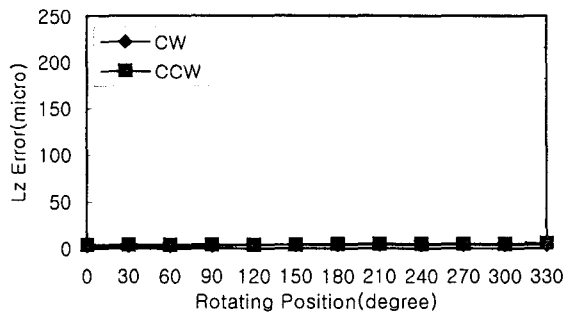
(a) x-direction error, Rz



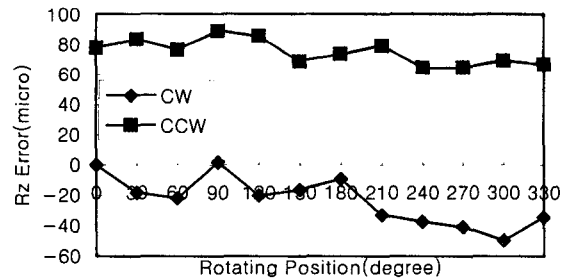
(b) y-direction error, Ly



(b) y-direction error, Ry



(c) z-direction error, Lz



(c) z-direction error, Rz

Fig 12. Measurement results for the rotary table reeling and angular errors

Fig 11. Measurement results for the rotary table translation errors

4.4.2. Rotation 오차의 측정 결과

Fig 12(a) ~ (c) 는 Rx, Ry, Rz 의 측정 결과를 나타낸다. Rx 는 -76~137 seconds 사이의 오차량을 가지며 6 seconds 이하의 Backlash 가 존재한다. Ry 는 -190~10 second 사이의 오차량을 가지며 5 seconds 이하의 경미한 Backlash 가 존재한다. 이에 반하여 Rz 의 경우 평균 98 seconds 의 상당히 큰 Backlash 가 존재하며 측정구간에 대하여 오차량의 패턴은 선형을 보인다..

5. Rotary Table 의 회전 오차 보상의 검증 방법

3 장에서 CNC 공작기계 Rotary Table 의 회전오차를 보상하는 알고리즘을 제안하였다. CNC 공작기계의 회전 운동에 대한 검증 또는 측정 방법으로는 불바가 알려져 있으나 이는 Rotary Table 의 회전 중심과 3 차원 상의 보상점 사이의 거리를 알려줄 뿐 벡터 성분을 나타내 주지는 못한다. 또한 Laser Interferometer 와 같은 장치는 직선 운동의 변위를 측정하기 위한 목적으로는 유용하나 회전 운동의 측정

에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 회전오차 보상의 검증방법으로 Ball Table 에 의한 방식을 제안하고자 한다.

Ball Table 에 의한 방식은 먼저 정밀하게 가공한 Table 위에 마스터 볼을 일정각도로 여러개 심는다. 볼의 중심의 위치가 측정 대상 이므로 볼의 1/3 부분만 Table 과 접촉하도록 한다. Ball Table 이 완성되며 이를 CMM 으로 측정을 하여 모든 Ball 의 정밀한 중심 위치를 Calibration 한다. 이제 Calibration 된 Ball Table 을 Rotary Table 의 중심에 위치시킨 후 회전 운동에 따른 Ball 의 위치를 접촉식 프로브를 장착한 언더머신 측정[2]을 이용하여 측정한다. Calibration 된 Ball 의 좌표와 언더머신 측정에 의한 좌표를 비교 함으로서 회전 오차 보상의 정밀도를 파악할 수 있다.

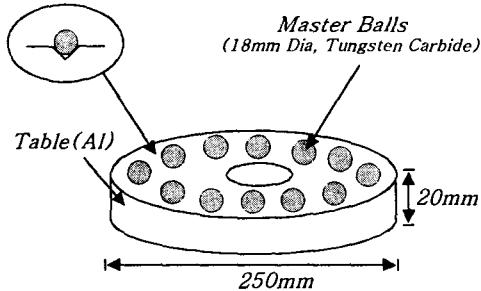


Fig 13. Designed ball table for measuring the rotary table errors

6. 결론 및 추후 과제

본 연구에서 제시된 회전체의 오차모델과 오차 성분 들을 측정하기 위한 방법은 4,5 축 NC 가공기에서 필수적으로 사용되는 Rotary Table 의 정밀도를 평가하는 수단으로 유용하게 이용될 수 있다. 4 축이상의 가공기를 필요로하는 가공품의 정밀가공을 위해서는 필수적으로 Rotary Table 의 오차가 보상되어야 하며, 본 연구에서 제시된 Rotary Table 의 오차 보상방법은 이를 위한 유용한 방법이 될 것이다. 본 연구의 결과는 3 축 기계에서의 오차모델과 연결하여 4,5 축가공기 전체의 오차를 종합적으로 평가 및 보상하는 시스템으로 개발 될 것이다.

참고문헌

- [1] Ferreira, P.M., and C.R. Liu, "An Analytical Quadratic Model for the Geometric Error of a Machine Tool", *Journal of Manufacturing Systems*, 1986, Vol. 5, No. 1, pp 51-62
- [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*, 1992, Vol. 11, No. 4, pp 229-237
- [3] Shin, Y. C., H. Chin, and M. J. Brink, "Characterizations of CNC Machining Centers", *Journal of Manufacturing Systems*, 1991, Vol. 10, No. 5, pp 407-421
- [4] L. Nawara, M. Kowalski, J. Sladek, "The Influence of Kinematic Errors on the Profile Shapes by Means of CMM", *Annals of the CIRP*, 1989, Vol. 38, No. 1, pp 511-516
- [5] W. Knapp, "Testing Rotary Axes on NC Machine Tools", *Annals of CIRP*, 1990, Vol. 39, No. 1, pp 549-552
- [6] J. A. Soons, F. C. Theuws, and P. H. Schellekens, "Modelling the errors of multi-axis machines : a general methodology", 1992, Vol. 14, No. 1, pp 5-19
- [7] T. Coorevits, J. P. David, ENSAM Lille, "Elimination of Geometrical Errors by Permutations-Application to a Rotary Table", *Annals of the CIRP*, 1991, Vol. 40, No. 1, pp 531-534
- [8] S.C Veldhuis, M.A. Elbestawi, "A Strategy for the Compensation of Errors in Five-Axis Machining", *Annals of the CIRP*, 1995, Vol. 44, No.1, pp 373-377
- [9] JOHN C. ZIEGERT, PRASHANT KALLE, "Error compensation in machine tools : a neural network approach", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1994, Vol.5, pp 143-151
- [10] "General tests for machine tools", BS 3800 Part 2 : 1991
- [11] 손진욱, "공작기계의 오차요소 측정을 통한 3 차원 위치정밀도 향상", 한국정밀공학회 95년 추계학술대회 논문집, pp 260-265