

5 축 공작기계에서 틸팅 테이블의 각 위치 오차 측정 Measurement of Angular Positioning Error for a Tilting Table of Five-axis Machine Tool

*이광일¹, 이동목¹, #양승한¹

*K. I. LEE¹, D. M. LEE¹, #S. H. YANG(syang@knu.ac.kr)¹
¹ 경북대학교 기계공학부

Key words : Five-axis machine tool, Tilting table, Angular positioning error, Double ball-bar

1. 서론

5 축 공작기계의 틸팅 테이블은 특정 회전축에 대하여 공구나 공작물을 제한된 범위에서 틸팅하도록 설계 및 제작되고 있다. 그러나 제작된 틸팅 테이블은 구성품의 기하학적 요인에 의하여 예상하지 못한 거동을 나타내며, 이는 최종 가공품의 품질에 악영향을 미친다. 틸팅 테이블의 거동은 6 개의 기하학적 오차를 사용하여 나타내며,¹ 각각의 오차를 측정하고 평가함으로써 최종 가공품에의 영향을 분석하고 필요한 경우 보정을 진행한다. 회전 테이블의 경우 레이저 간섭계와 정밀 인덱스를 사용하여 6 개의 오차 중 각 위치 오차(angular positioning error)를 측정하지만,² 이를 틸팅 테이블에 적용하는 경우 정밀 인덱스를 틸팅 축에 설치함에 있어 문제를 나타낸다.

본 논문에서는 5 축 공작기계에 위치한 틸팅 테이블의 각 위치 오차를 측정하기 위하여 볼바를 사용한 측정 방법을 제안하고, 모의실험을 통하여 제안된 측정 방법의 타당성을 검증한다. 측정에 영향을 미치는 직선 이송축의 기하학적 오차를 고려하기 위한 측정경로를 계획하고, 각 위치 오차를 포함하는 측정데이터에서 직선 이송축의 영향을 분리한다. 산업 현장에서 널리 사용되는 볼바를 사용함으로써 초기 셋업의 간소화, 측정비용의 최소화 및 측정의 접근성을 향상시킨다.

2. 틸팅 테이블의 각 위치 오차 측정

2.1 틸팅 테이블과 직선 이송축의 오차 모델

기준 좌표계에서 정의된 틸팅 테이블 A 의 거동 T_A^F 는 틸팅각 a 에 종속적인 6 개의 기하학적 오차(δ_{xa} , δ_{ya} , δ_{za} , ϵ_{xa} , ϵ_{ya} , ϵ_{za})와 틸팅각 a 에 독립적인 4 개의 기하학적 오차(s_{ya} , s_{za} , o_{ya} , o_{za})를 사용하여 모델링하며 식 (1)과 같다.

$$T_A^F = OM_A SM_A EM_A AM_A \quad (1)$$

여기서,

$$OM_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & o_{ya} \\ 0 & 0 & 1 & o_{za} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, SM_A = \begin{bmatrix} 1 & -s_{za} & s_{ya} & 0 \\ s_{za} & 1 & 0 & 0 \\ -s_{ya} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$EM_A = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{za} & \epsilon_{ya} & \delta_{xa} \\ \epsilon_{za} & 1 & -\epsilon_{xa} & \delta_{ya} \\ -\epsilon_{ya} & \epsilon_{xa} & 1 & \delta_{za} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, AM_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & ca & -sa & 0 \\ 0 & sa & ca & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$ca = \cos a$, $sa = \sin a$ 를 나타낸다.

또한 볼바를 사용하여 틸팅 테이블의 각 위치 오차 ϵ_{xa} 를 측정하는 경우 직선 이송축 Y, Z 가 사용되며, 기하학적 오차에 의한 직선 이송축 Y, Z 의 거동 $T_{Y,Z}^F$ 는 식 (2)와 같이 주어진다.

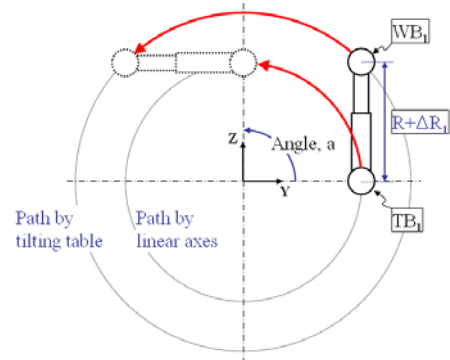


Fig. 1 Ball-bar measurement strategy for angular positioning error

$$T_{Y,Z}^F = SM_Y TM_Y EM_Y SM_Z TM_Z EM_Z \quad (2)$$

여기서,

$$SM_Y = \begin{bmatrix} 1 & -s_{xy} & 0 & 0 \\ s_{xy} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, TM_Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$EM_Y = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{zy} & \epsilon_{yy} & \delta_{xy} \\ \epsilon_{zy} & 1 & -\epsilon_{xy} & \delta_{yy} \\ -\epsilon_{yy} & \epsilon_{xy} & 1 & \delta_{zy} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, SM_Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & s_{yz} & 0 \\ 0 & 1 & -s_{xz} & 0 \\ -s_{yz} & s_{xz} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$TM_Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, EM_Z = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{zz} & \epsilon_{yz} & \delta_{xz} \\ \epsilon_{zz} & 1 & -\epsilon_{xz} & \delta_{yz} \\ -\epsilon_{yz} & \epsilon_{xz} & 1 & \delta_{zz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

를 나타낸다.

2.2 각 위치 오차 측정을 위한 볼바 측정 경로

볼바를 사용하여 각 위치 오차 ϵ_{xa} 를 측정하기 위하여 Fig. 1 과 같이 측정 경로를 생성한다. 여기서 R 은 볼바의 기준 길이를 나타내며, 직선 이송축 Y, Z 의 위치 (y, z)는 (Rca, Rsa)이다. 볼바의 WB_1 은 틸팅 테이블 상의 center pivot assembly 에 고정되어 이송을 하고, TB_1 은 스펀들의 tool cup 에 고정되어 직선 이송축 Y, Z 에 의한 원호 경로를 추종한다. 초기 셋업 오차 $[w_{x1}, w_{y1}, w_{z1}, 1]^T, [t_{x1}, t_{y1}, t_{z1}, 1]^T$ 를 고려하면 WB_1 과 TB_1 은 P_A 와 P_{YZ} 를 사용하여 식 (3)과 같이 주어진다.

$$WB_1 = P_A [w_{x1} \quad R + w_{y1} \quad R + w_{z1} \quad 1]^T$$

$$TB_1 = P_{YZ} [t_{x1} \quad t_{y1} \quad t_{z1} \quad 1]^T \quad (3)$$

볼바 측정 데이터 $R+\Delta R_1, WB_1, TB_1$ 의 관계는 식 (4)와 같으며, 기하학적 오차의 고차 항을 무시하는 경우 반경 오차 ΔR_1 과 이송축의 기하학적 오차는 식 (5)와 같이 선형 관계로 정의된다.

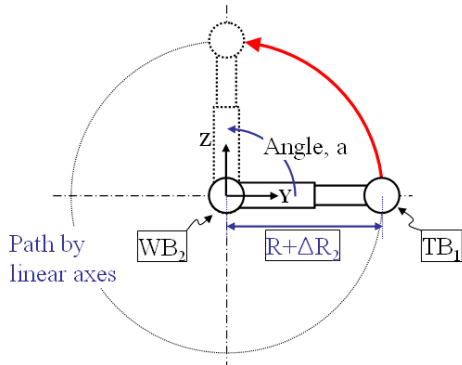


Fig. 2 Ball-bar measurement for geometric errors of linear axes

$$(R + \Delta R_1)^2 = \|WB_1 - TB_1\|^2 \quad (4)$$

$$\Delta R_1 = sa \left\{ -\delta_{ya} + \delta_{zc} + \delta_{yy} - Rsa(\epsilon_{xy} + s_{xz}) - o_{ya} + t_{y1} \right\} + ca(\delta_{za} - \delta_{zz} - \delta_{zy} + o_{za} - t_{z1}) + R\epsilon_{xa} + w_{z1} \quad (5)$$

반경 오차 ΔR_1 에는 틸팅 테이블의 오차 δ_{ya} , δ_{za} , ϵ_{xa} 와 직선 이송축의 오차 δ_{yz} , δ_{yy} , δ_{zz} , δ_{zy} , ϵ_{xy} 가 포함되어 있다. 직선 이송축의 오차를 식 (6)과 같이 2 차 다항식으로 가정하면 식 (5)는 식 (7)과 같이 정리된다.

$$\delta_{iy} = \sum_{k=1}^2 d_{iyk} (Rca)^k, \quad \delta_{iz} = \sum_{k=1}^2 d_{izk} (Rsa)^k \quad (6)$$

$$\epsilon_{xy} = \sum_{k=1}^2 e_{xyk} (Rca)^k \quad i = y, z$$

$$\Delta R_1 = -\delta_{ya}sa + \delta_{za}ca + R\epsilon_{xa} + w_{z1} + k_1R^2s^3aca + k_2R^3s^2ac^2a + k_3R^2s^2aca + k_4Rs^2a + k_5Rsaca + k_6sa + k_7ca + k_8R \quad (7)$$

여기서,

$$k_1 = -d_{yy2} + d_{yz2}, \quad k_2 = -e_{xy2}, \quad k_3 = -e_{xy1} - d_{zz2} + d_{zy2}, \\ k_4 = d_{yz1} + d_{zy1} - s_{xz}, \quad k_5 = d_{yy1} - d_{zz1}, \quad k_6 = d_{yy2}R^2 - o_{ya} + t_{y1}, \\ k_7 = -d_{zy2}R^2 + o_{za} - t_{z1}, \quad k_8 = -d_{zy1}$$

반경 오차 ΔR_1 에서 직선 이송축의 영향을 분리하기 위하여 Fig. 2와 같이 볼바 측정 경로를 생성하면, 초기 셋업 오차 $[w_{x2}, w_{y2}, w_{z2}, 1]^T$ 에 의하여 WB_2 는 식 (8)과 같다. 이러한 경우 반경 오차 ΔR_2 는 식 (9)와 같이 주어진다.

$$WB_2 = P_A [w_{x2} \quad w_{y2} \quad w_{z2} \quad 1]^T \quad (8)$$

$$\Delta R_2 = k_1R^2s^2aca + k_2R^3sac^3a + k_3R^2sac^2a + k_4Rsaca + k_5Rc^2a + k_6ca + k_{10}sa + k_{11}R \quad (9)$$

여기서,

$$k_9 = d_{yy2}R^2 - w_{y2} + t_{y1}, \quad k_{10} = d_{zz2}R^2 - w_{z2} + t_{z1}, \quad k_{11} = d_{zz1}$$

따라서 식 (9)에서 k_1, \dots, k_5 를 최소자승법을 사용하여 추정하고 이를 식 (7)에 대입함으로써 직선 이송축의 기하학적 오차 영향을 분리한다. 또한 틸팅 테이블의 기하학적 오차 δ_{ya} , δ_{za} 는 볼바를 사용하여 측정한다.³ 각 위치 오차 ϵ_{xa} 를 나타내기 위해 식 (10)과 같이 C^1 -연속성을 고려한 4 차 다항식으로 모델링하며, 식(7)에 대입하고 최소자승법을 사용하여 계수 e_{zc1} , e_{zc2} 를 추정한다.

$$\epsilon_{zc} = e_{zc1}(c^4 - 2\pi c^3 - 2\pi^2 c^2 + 4\pi^3 c) + e_{zc2}(c^3 - 3\pi c^2 + 2\pi^2 c) \quad (10)$$

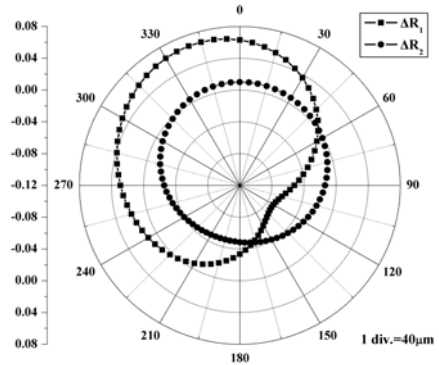


Fig. 3 Radial errors for a simulation

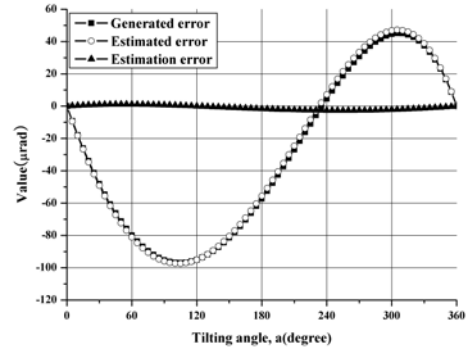


Fig. 4 Simulation result for angular positioning error, ϵ_{xa}

3. 모의실험

제안된 틸팅 테이블의 각 위치 오차 측정 방법의 타당성을 검증하기 위하여 모의실험을 진행한다. 모의실험을 위하여 틸팅 테이블 A와 직선 이송축 Y, Z의 기하학적 오차 및 초기 셋업 오차를 $\pm 30\mu m$, $\pm 100\mu rad$ 의 범위에서 생성한다. 그리고 $\pm 0.1\mu m$ 의 측정오차를 사용하여 Fig. 3에 나타난 바와 같이 볼바의 반경 오차 ΔR_1 , ΔR_2 를 계산한다. 제안된 측정 방법을 적용하여 각 위치 오차 ϵ_{xa} 를 추정하였으며, 생성된 오차와 추정된 오차의 차이인 추정 오차는 Fig. 4와 같이 최대 $2.643\mu rad$ 을 나타낸다.

4. 결론

5 축 공작기계에서 틸팅 테이블의 각 위치 오차를 측정하기 위하여 볼바를 사용한 측정 방법을 제안하였으며, 결론은 다음과 같다.

- 각 위치 오차 측정을 위한 측정 경로 생성
- 측정 데이터에서 직선 이송축의 영향 분리
- 볼바 측정시 초기 셋업 오차 고려
- 모의실험을 통한 측정 방법의 타당성 검증

후기

이 논문은 정부의 재원으로 한국과학재단의 지원(2009년도 국가지정연구실사업)을 받아 수행된 연구임(R0A-2009-0083054).

참고문헌

1. ISO 230-7, "Test Code for Machine Tools-Part 7: Geometric Accuracy of Axes of Rotation," ISO, 2006.
2. Suh, S. H., Lee, E. S. and Jung, S. Y., "Error Modeling and Measurement for the Rotary Table of Five-axis Machine Tools," Int. J. Adv. Manuf. Tech., **14**, 656-663, 1998.
3. 이광일, 양승환, "볼바를 이용한 틸팅 테이블 오차 측정에 관한 연구," 한국정밀공학회 2009년도 춘계 학술대회 논문집, 9-10, 2009.