

볼바를 이용한 틸팅 테이블 오차 측정에 관한 연구 Study for Geometric Error Measurement of a Tilting Table using Double Ball-bar

*이광일¹, #양승한¹

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

Key words : 5-axis controlled machine center, Geometric errors, Tilting table, Double ball-bar, Least squares

1. 서론

3 개의 직교 축(orthogonal axes)과 2 개의 회전 축(rotating axes)으로 구성되는 5 축 공작기계는 회전 축의 조립위치에 따라서 tilting rotary table, universal spindle head 그리고 swivel head/rotary table 로 분류되며, 이를 직선축, T 와 회전축, R 로 나타내면 TTTRR, RRTTT, RTTTR 로 표현된다.^{1,2} 공작기계는 이송축 자체의 오차, 이송축 간의 오차, 열원에 의한 오차 그리고 주위 환경 등의 원인에 의하여 정확한 위치결정 및 가공에 문제점을 나타낸다. 특히 기하학적 오차인 이송축 자체의 오차와 축간의 오차는 공작기계의 위치결정에 지대한 영향을 미치며, 공작기계의 성능향상을 위하여 반드시 고려되어야 한다. 여기서 이송축 자체의 오차는 3 개의 위치 오차(positional deviation, linear deviations; δ)와 3 개의 각도 오차(angular deviations; ε)를 나타내며, 이송축 간의 오차는 직각도(squareness)와 오프셋(offset)을 의미한다.³

기하학적 오차를 측정하기 위하여 레이저 간섭계, 볼바(double ball-bar), PSD, 정전용량형 센서(capacitive sensor) 등이 주로 사용되며, end-effector 의 거동을 정의하는 경우 균일변환행렬(homogeneous transform matrix) 기반의 오차합성모델링(error synthesis modeling)이 적용된다.⁴ 3 축 공작기계의 기하학적 오차 평가와 관련하여 많은 연구가 진행되고 있으며, 일부 오차 요소에 대해서는 표준의 정립이 이루어지고 있다.^{1,5,6} 그러나 회전축이 포함된 공작기계의 기하학적 오차 측정 및 평가와 관련된 연구는 미흡한 실정이다.⁷ 일부 연구에서는 5 축 공작기계의 축간 오차를 정의하고 추정하였으나, 관련 이송축의 기하학적 오차 및 측정시 발생하는 초기 셋업 오차를 고려하지 않아 최종 측정된 오차의 왜곡 문제를 나타낸다.⁸ 또한 TTTRR 에서 틸팅 테이블 자체의 기하학적 오차를 추정하였으나, 측정시 발생하는 측정 오차 및 초기 셋업 오차를 고려하지 않음으로써 관련 오차를 추정함에 있어 한계를 가진다.⁹

본 논문에서는 TTTRR 에서 틸팅 테이블의 기하학적 오차를 측정하기 위하여 볼바를 사용한 측정 방법을 제안하고 모의실험을 통하여 제안된 방법을 검증한다. 측정시 발생하는 측정 오차, 초기 셋업 오차의 영향을 고려하여 오차를 추정하며, 최소한의 측정 과정을 정의함으로써 측정의 간소화, 측정데이터의 신뢰성 확보 및 현장 적용에의 용이함을 나타낸다.

2. 틸팅 테이블의 오차 모델 및 볼바 측정

틸팅 테이블 자체의 6 개 기하학적 오차는 회전각 α 에 종속적인 변수로써 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 틸팅 테이블의 자세를 왜곡시킨다. 여기서 변수 δ_{xa} 는 A 축의 X 방향 위치오차를 나타내며, 변수 ε_{xa} 는 A 축의 X 에 대한 각도 오차를 의미한다. 이러한 오차에 의하여 왜곡된 틸팅 테이블의 좌표계 {A}는 식 (1)의 균일변환행렬 H 를 사용하여 표현된다. 일관된 기준을 적용하기 위하여 6 개의 기하학적 오차는 절대좌표계 {F}에 대하여 정의한다.

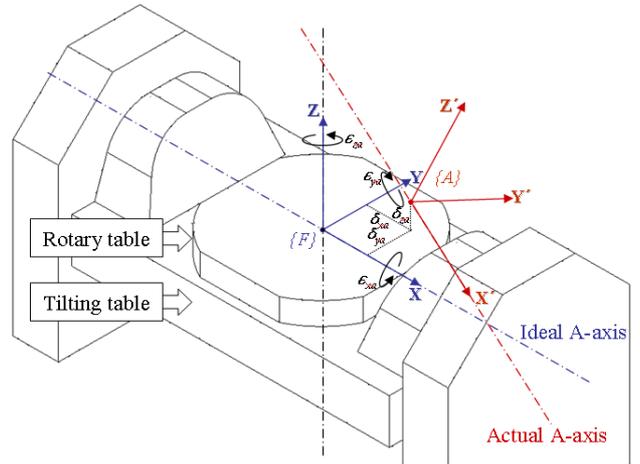


Fig. 1 Geometric errors of a tilting table at TTTRR

$$H = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{za} & \varepsilon_{ya} & \delta_{xa} \\ \varepsilon_{za} & 1 & -\varepsilon_{xa} & \delta_{ya} \\ -\varepsilon_{ya} & \varepsilon_{xa} & 1 & \delta_{za} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.1 위치 오차 δ_{xa}

틸팅 테이블의 위치 오차 δ_{xa} 를 측정하기 위하여 볼바를 Fig. 2 (a)와 같이 설치하면, 볼바의 측정데이터 $R + \Delta R_1$ 과 오차 δ_{xa} 의 관계는 식 (2)와 같이 주어진다. 여기서 TB 는 스피indle에 고정된 툴 볼(tool ball)을 나타내며, WB 는 회전 테이블 상에 고정되어 원호 경로(circular test path)를 추종하는 공작물 볼(workpiece ball)을 의미한다. 또한 TB, WB 를 절대좌표계 {F}를 기준으로 설치하는 경우 발생하는 초기 셋업 오차는 $(T_{x1}, T_{y1}, T_{z1}), (W_x, W_y, W_z)$ 로 나타낸다.

$$TB = [T_{x1} \ T_{y1} \ T_{z1} \ 1]^T$$

$$WB = H[R + W_x \ W_y \ W_z \ 1]^T \quad (2)$$

$$\Delta R_1 = \delta_{xa} + W_x - T_{x1}$$

2.2 위치 오차 δ_{ya}, δ_{za}

틸팅 테이블의 위치 오차 δ_{ya}, δ_{za} 를 측정하기 위하여 볼바를 Fig. 2 (b)와 같이 두는 경우 볼바의 측정데이터 $R + \Delta R_2$ 와 오차 δ_{ya}, δ_{za} 의 관계는 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\Delta R_2 = \cos \alpha (\delta_{ya} - T_{y1}) + \sin \alpha (\delta_{za} - T_{z1}) + W_x \quad (3)$$

2.3 각도 오차 $\varepsilon_{ya}, \varepsilon_{za}$

각도 오차 $\varepsilon_{ya}, \varepsilon_{za}$ 를 측정하기 위하여 볼바는 Fig. 2 (c)와 같이 설치한다. 이러한 경우 TB 는 직선 이송축에 의하여 새로운 초기 셋업 오차 (T_{x2}, T_{y2}, T_{z2}) 를 나타내며, 볼바의 측정데이터 $R + \Delta R_3$ 와 오차 $\varepsilon_{ya}, \varepsilon_{za}$ 의 관계는 C 축의 회전각 γ 을 사용하여 식 (4)와 같이 정의된다.

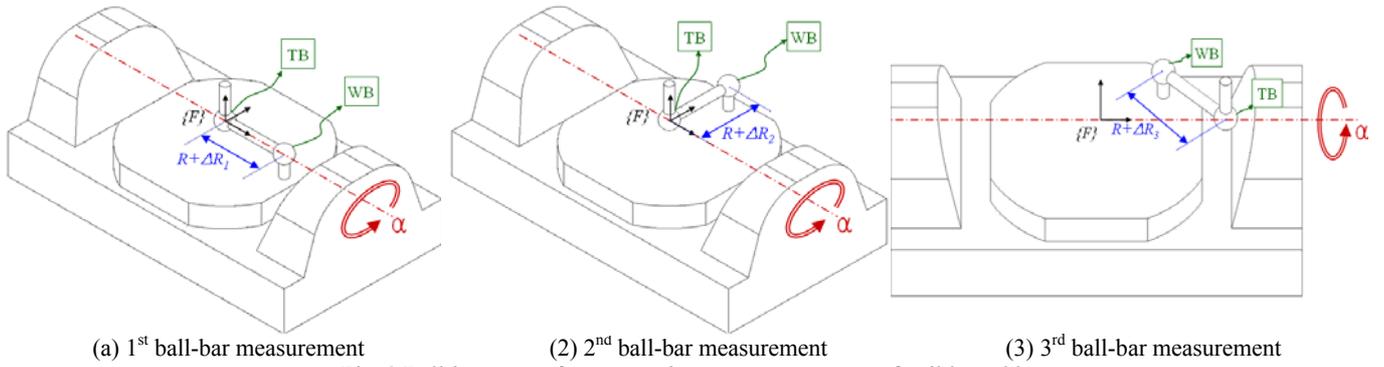


Fig. 2 Ball-bar set-up for geometric error measurement of a tilting table

$$\Delta R_3 = \sin \alpha \left(-2\varepsilon_{ya} R \sin \gamma \cos \gamma + \delta_{za} \sin \gamma - T_{z2} \sin \gamma \right) + \cos \alpha \left(2\varepsilon_{xa} R \sin \gamma \cos \gamma + \delta_{ya} \sin \gamma - T_{y2} \sin \gamma \right) + \left\{ \begin{array}{l} -\delta_{xa} \cos \gamma + (\sin^2 \gamma - \cos^2 \gamma) W_x + 2W_y \sin \gamma \cos \gamma \\ + T_{x2} \cos \gamma \end{array} \right\} \quad (4)$$

2.4 최소자승법 기반의 오차 추정

볼바 측정데이터와 틸팅 테이블의 오차 관계를 나타내는 식 (2), (3), (4)를 사용하여 5 개의 기하학적 오차를 추정하는 경우 기하학적 오차를 4 차의 다항식으로 정의하고 최소자승법을 사용하여 다항식 계수를 결정한다. 직선축과는 달리 틸팅 테이블의 경우 회전각 α 가 0, 2π 인 경우 각각의 오차는 연속성을 나타내며, 이를 고려한 4 차 다항식 모델은 식 (5)와 같이 주어진다.

$$f = \alpha(\alpha - 2\pi)(a_1\alpha^2 + a_2\alpha + a_3) \quad (5)$$

1 개의 기하학적 오차를 추정하기 위해서는 3 개의 다항식 계수를 결정하여야 하며, 틸팅 테이블의 경우 5 개의 기하학적 오차를 추정함에 있어 모두 15 개의 다항식 계수와 초기 셋업 오차 8 개를 계산하여야 한다. 따라서 식 (5)를 식 (2), (3), (4)에 적용하는 경우 식 (6)의 형태로 재정의된다.

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B} \quad (6)$$

여기서 **A** 는 회전각 α 로 이루어진 행렬이며, **X** 는 4 차 다항식 계수와 초기 셋업 오차로 구성된 열벡터(column vector)이다. 그리고 **B** 는 측정데이터 ΔR 로 이루어진다.

3. 틸팅 테이블의 오차 추정 모의실험

틸팅 테이블의 6 개 기하학적 오차와 초기 셋업 오차를 생성하고, 이를 사용하여 볼바 측정데이터 ΔR 을 계산하였다. 본 논문에서 제안된 방법을 사용하여 5 개의 기하학적 오차를 추정하였으며, 생성된 오차 및 생성된 오차와 추종된 오차의 차이는 Table 1 에 정리하였다.

Table 1 Maximum value of geometric errors for simulation and estimation error using suggested method(unit: mm, rad, %)

	Generated error	Estimation error	
δ_{xx}	0.030	1.5025×10^{-6}	0.0050
δ_{yy}	0.030	1.5613×10^{-4}	0.5204
δ_{za}	0.030	2.0210×10^{-4}	0.6737
ε_{xa}	1.4544×10^{-4}	-	-
ε_{ya}	1.4544×10^{-4}	9.8764×10^{-7}	0.6791
ε_{za}	1.4544×10^{-4}	7.8367×10^{-7}	0.5388

4. 결론

틸팅 테이블 자체의 기하학적 오차를 측정하기 위하여 볼바를 사용한 측정 방법을 제안하고, 모의실험을 통하여 제안된 방법의 타당성을 검증하였으며 결론은 다음과 같다.

- 틸팅 테이블 자체의 기하학적 오차 평가 방법 제시
- 측정의 간소화를 통한 측정데이터의 신뢰성 확보
- 볼바의 초기 셋업 오차를 고려한 오차 분리

후기

이 논문은 정부의 재원으로 한국과학재단의 지원(2009 년도 국가지정연구실사업)을 받아 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-10045-0).

참고문헌

1. ISO/WD xxxxx-1, "Test Conditions for Five-axis Controlled Machining Centres with a Tilting Rotary Table-Part 1: Geometric Tests for Machines with a Horizontal Spindle," ISO, 2006.
2. Lin, Y., Shen, Y., "Modelling of Five-axis Machine Tool Metrology Models using the Matrix Summation Approach," Int. J. Adv. Manu. Tech., **21**(4), 243-248, 2003.
3. ISO 230-1, "Test Code for Machine Tools-Part 1: Geometric Accuracy of Machines Operating under No-load or Finishing Conditions," ISO, 1996.
4. Yang, S. H., Yuan, J., and Ni, J., "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-time error Compensation," J. Manu. Syst., **15**(2), 113-124, 1996.
5. Yang, S. H., Kim, K. H., Park, Y. K., and Lee, S. G., "Error Analysis and Compensation for the Volumetric Errors of a Vertical Machining Centre using a Hemispherical Helix Ball Bar Test," Int. J. Adv. Manu. Tech., **23**, 495-500, 2004.
6. Lee, J. H., Liu, Y., and Yang, S. H., "Accuracy Improvement of Miniaturized Machine Tool: Geometric Error Modeling and Compensation," Int. J. Mach. T. Manu., **46**(12/13), 1508-1516, 2006.
7. 이광일, 이동목, 양승환, "볼바를 사용한 회전 테이블의 기하학적 오차 평가," 한국정밀공학회 2009 년도 춘계 학술대회 논문집, 239-240, 2009.
8. Tsutsumi, M., Saito, A., "Identification and Compensation of Systematic Deviations Particular to 5-axis Machining Centers," Int. J. Mach. T. Manu., **43**, 771-780, 2003.
9. Zargarbashi, S. H. H., Mayer, J. R. R., "Assessment of Machine Tool Trunnion Axis Motion Error, using Magnetic Double Ball Bar," Int. J. Mach. T. Manu., **46**, 1823-1834, 2006.