

3축 공작기계의 기하학적 오차 측정 및 평가

Error Measurement and Estimation for Geometric Errors of 3-axis Machine Tool

*이동목¹, 권성환¹, #양승한¹

*D. M. LEE¹, S. H. KWEON¹, #S. H. YANG(syang@knu.ac.kr)¹

¹ 경북대학교 기계공학부

Key words : Geometric Error Measurement, Machine Tool Error Estimation, Reverse Kinematics

1. 서론

가공 기술의 발달과 더불어 공작기계의 정밀도 향상에 관한 연구는 오래된 과제로서 계속 발전하고 있다. 특히 공작기계의 고속화와 정밀화에 대해 높아진 관심은 정밀도 향상에 관한 연구를 더욱 촉진하는 계기를 가져왔다¹. 공작물 오차 개선 방안은 크게 가공시 발생하는 가공 오차 및 제어 오차를 제거하는 것과 공작기계 구조물 자체에서 기인하는 기하학적 오차 보정을 통한 방법 등으로 나뉜다. 특히 기하학적 오차 보정을 통한 공작물 정밀도 향상 방법은 다축 공작기계의 사용 빈도가 높아짐에 따라 꾸준히 연구가 진행되고 있다^{2,3}. 또한 오차 보정의 효율성을 높이기 위해서는 정확한 오차 측정 및 평가가 필수적이며 공작기계의 특성상 많은 기하학적 오차 변수의 정의로 인해 공작기계의 오차 규명 및 그 오차들이 미치는 영향에 대한 분석과 평가가 오랫동안 연구 대상이 되어 왔다⁴. 이러한 연구 발전과 성과에도 불구하고 일선 공작기계의 산업현장에서는 많은 제약을 안고 있는 것이 사실이다. 오차 측정과 관련해 측정 장비 사용 및 측정 시간이 주요 조건이기 때문에 모든 오차들에 대한 측정은 거의 불가능하며 최소한으로 요구되는 몇 개의 오차 측정으로 대신하는 경우가 많다. 이것은 대표적인 주요 오차들로 구성된 간소화된 오차 모델(Simplified Error Model)을 이용하여야 하며 주영향(Main Effect) 오차에 대한 관별이 선행되어야만 좋은 성과를 가져올 수 있다^{5,6}. 하지만 마찬가지로 이 방법 역시 많은 측정과 오랜 경험이 요구된다.

본 연구에서는 산업체에서 가장 많이 보유하고 있는 레이저 간섭계 및 볼바 시스템⁷을 이용하여 빠르고 효율적인 측정 및 평가 방법에 대해 소개한다. 정밀도 높은 레이저 간섭계를 이용해 소수의 오차를 측정하고 상대적으로 쉽고 빠른 측정이 가능한 볼바시스템을 이용해 3축 공작기계에 대한 다른 기하학적 오차를 평가하는 방법에 대해 기술한다.

2. 기하학적 오차의 종류 및 합성 모델

3축 공작기계가 가지는 기하학적 오차는 총 21개로 정의된다. 각 축마다 3개의 위치오차와 3개의 각도오차를 가지며 축들 간의 관계 오차인 직각도가 3개 존재한다. 위치오차는 축방향으로의 1개의 선형변위오차와 2개의 진직도 오차로 구분할 수 있는데 Fig. 1 과 같이 한 축에서 다른 축 방향으로의 위치 오차는 진직도 오차와 직각도로 구분된다.

공작기계의 툴이 가지는 최종 자세는 이러한 기하학적 오차의 조합으로 서로 합성되어 나타난다. 동차변환행렬(Homogeneous Transform Matrix) 및 기구 체인(Kinematic Chain)과 같은 수학적 방법을 통해 툴의 최종 자세에 대한 오차 합성 모델(Error

Synthesis Model)을 구할 수 있으며⁸, 수직형 3축 공작기계에 대해 구해진 체적오차(Volumetric Error)는 식 (1)과 같으며 총 21개의 오차항을 포함하고 있다. 이송계 성능 평가 또는 오차 보정에 있어 오차합성모델링 및 오차 측정이 필수적이며, 이 오차들을 측정하고 평가하여야 한다.

$$\Delta W = \begin{bmatrix} -\delta_{xx} - \delta_{xy} + \delta_{xz} - (\epsilon_{zx} + \epsilon_{zy})y - (\epsilon_{yz} + \epsilon_{yy})z + s_{yz}z - s_{zx}y \\ -\delta_{yx} - \delta_{yy} + \delta_{yz} - \epsilon_{zx}x - (\epsilon_{xx} + \epsilon_{xy})z - s_{xz}z \\ -\delta_{zx} - \delta_{zy} + \delta_{zz} - \epsilon_{yx}x - (\epsilon_{xx} + \epsilon_{xy})y \end{bmatrix} \quad (1)$$

3. 측정 및 오차 평가 방법

각 오차들은 레이저 간섭계를 이용해 측정이 가능하다. 레이저 간섭계는 높은 정밀도로 측정이 가능하지만 몇 가지 단점으로 인해 일선 현장에서는 어려움을 가진다. 직각도와 같은 특정 오차 측정은 장비를 셋업하고 측정을 수행하기에 많은 전문성이 요구되며 공작기계의 구조에 따라 셋업이 불가능할 수 있다. 또한 많은 시간이 요구되며 제조회사에 따라 물오차는 측정이 불가능하기도 하다. 반면, 볼바 시스템은 상대적으로 측정이 간편하고 여러 개의 오차를 포함하는 원호 경로를 따라 적은 횟수의 측정으로 평가가 가능하다. 볼바 시스템의 경우, 측정에는 큰 제약이 없으나 분석에 다소 어려움이 있다. 특히 기하학적 오차들은 원호 측정 데이터에서 역기구학(Reverse Kinematics)을 이용한 최소자승법으로 추출하는데 최소자승문제를 풀이하는데 있어 특이해(Singularity)가 존재하면 정확한 오차 모델을 구할 수 없게 된다⁹. 또한 보다 정밀한 측정을 원하는 오차에 대해선 볼바시스템보다 레이저 간섭계를 이용한 측정이 추천된다.

각 오차의 측정 데이터들을 오차합성모델에 활용하기 위해서는 오차들의 함수화가 필요하다. 이 때 많이 사용하는 방법이 매개변수 모델링(Parametric Modeling)기법이다. 선행 연구에서는 다항식 모델이 많이 사용되었으나 볼바 데이터 분석 시에 특이해 문제가 발생되기 때문에 삼각함수 모델이 이용되기도 한다⁹.

$$E_i(j) = \sum_{k=1}^{n/2} a_{ijk} [\cos(w_{ij}j) - 1] + b_{ijk} \sin(w_{ij}j) \quad (2)$$

여기서, a_{ijk} , b_{ijk} : 계수, w_{ij} : 주파수이다.

삼각함수는 주파수항이 비선형으로 이루어진 함수이다. 최소자승을 이용해 비선형함수로 피팅하기 위해서는 비선형 문제해법인 Gauss-Newton 방법을 활용할 수 있다. 하지만 계수가 많을수록 초기값에 따라 발산할 가능성이 높으며 적절한 초기값을 유추하기란 쉽지 않다. 이 경우 주파수에 대해서만 비선형 풀이로 다루고 나머지 계수들은 선형풀이로 접근하는 방법이 있다. 즉, 주파수 초기값에 대해 나머지 계수들의 선형 풀이를 수행하고 다시 주파수에 대한 비선형 풀이를 반복하면 발산할 우려없이 쉽게 수렴하는 삼각함수 모델을 구할 수 있다.

볼바를 이용한 측정 데이터는 원호 경로에 따른 반경방향의 변화량을 기록하게 되며 기하학적 오차만을 포함하기 위해서 준정적(Quasi-static) 측정 방법을 이용해야 한다. 또한 셋업시 발생한 측정 편심량(Eccentricity)을 고려해 제거하여야 한다. 100 μm 이상의 과도한 편심이 발생하였을 경우엔 측정데이터의 왜곡이 발생하기 때문에 재측정이 요구된다.

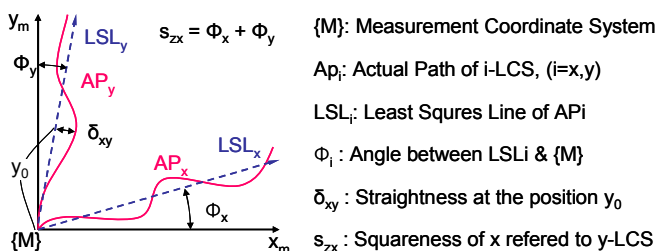


Fig. 1 The relationship between straightness error and squareness

볼바 측정 데이터 분석에 활용되는 볼바 방정식은 식 (3)과 같으며 최소자승법으로 풀기 위해 다음과 같이 선형 최소자승문제 형태로 나타낸다.

$$R\Delta R_i = R_i^T(\Delta W_i - \Delta W_c) = Ax \quad (3)$$

여기서, ΔR_i : 반경 방향 측정값, ΔW : 체적오차, A : 미지수에 해당하는 열벡터들로 구성된 행렬, x : 매개변수의 계수들로 미지수이다.

만약 특정 오차에 대해 레이저 간섭계로 측정하였을 경우, 나머지 오차에 관해서는 볼바 방정식을 활용할 수 있다. 그 예로, 레이저 간섭계로 진직도 오차를 측정하였을 경우 진직도 오차 (δ_{ij})는 이미 알고 있는 값이므로 미지수 벡터(x)에 포함될 필요가 없다. 따라서 식 (3)을 식 (4)와 같이 분해하여 식을 재정리하면 다시 선형 최소자승문제로 접근할 수 있다.

$$R\Delta R_i = [A_k \ A_u] \begin{bmatrix} x_k \\ x_u \end{bmatrix} = A_k x_k + A_u x_u$$

$$R\Delta R_i - A_k x_k = A_u x_u \quad (4)$$

여기서, A_k : 알고 있는 오차항의 계수와 일치하는 열벡터,
 A_u : 미지의 오차 계수와 일치하는 열벡터,
 x_k : 알고 있는 오차의 매개변수 계수
 x_u : 나머지 오차의 매개변수 계수이다.

4. 시뮬레이션 및 결과

본 연구에서는 식 (1)과 같은 오차합성모델을 갖는 수직형 3축 공작기계에 대한 측정 및 평가를 수행하였다. 먼저 레이저 간섭계를 이용해 직각도 측정에 필수적으로 수반되는 각 축의 진직도 6개를 측정하고 그 외 오차항들은 볼바데이터를 활용해 판별한다.

레이저 간섭계로 측정된 진직도 오차의 측정점들에 대해 식 (2)와 같은 삼각함수로 모델링하였으며 그 결과를 대표 그림과 통계량으로써 Fig. 2와 Table 1과 같이 나타냈다.

진직도 오차에 대해 생성된 매개변수 모델들을 볼바 식 (4)에 대입한 후 최소자승법으로 풀이하면 나머지 오차들은 각각 매개변수의 계수로 결정된다. 만약 XY 평면에 대해 수행할 경우 원호 중심점의 Z 좌표값은 0에 위치한 후 수행하면 각도오차에 대한 ϵ_{yy} 에 대한 오차 영향이 없도록 할 수 있으므로 나머지 오차 추정 결과가 우수하다. 또다시 이렇게 구해진 오차들을 식 (4)에 적용하면 ϵ_{yy} 에 대해서 구할 수 있게 된다. 이런 방법으로 구한 결과의 대표 그림과 통계량은 Fig. 3과 Table 2에 나타냈다.

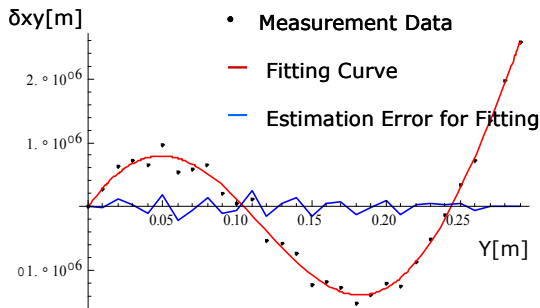


Fig. 2 X-directional straightness error for Y-axis

Table 1 Results of curve fitting

Error	δ_{xy}	δ_{xz}	δ_{yx}	δ_{yz}	δ_{zx}	δ_{zy}
Max. Error [μm]	2.57	1.86	9.89	1.44	7.35	0.53
adj-R ² [%]	98.8	88.5	95.4	57.1	96.5	88.9
RMSE [μm]	0.01	0.03	1.42	0.35	0.72	0.20
Max. Estimation Error [μm]	0.25	0.63	3.52	0.57	1.45	0.57

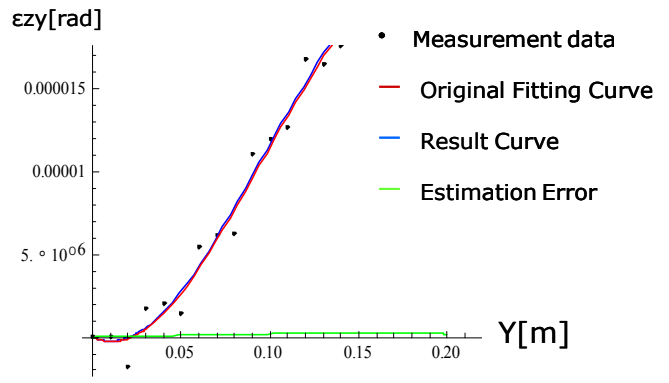


Fig. 3 Z-directional angular error for Y-axis

Table 2 Maximum estimation error of simulation

Error	δ_{xx}	δ_{yy}	δ_{zz}	ϵ_{xy}	ϵ_{xx}	ϵ_{yx}	ϵ_{yy}	ϵ_{zx}	ϵ_{zy}
Max. Estimation Error [μm or μrad]	0.44	0.02	0.08	0.05	0.10	0.24	0.66	2.36	0.24

5. 결론

본 연구에서는 3축 공작기계의 기하학적 오차를 측정하고 평가하기 위한 방법을 제시하였다.

- 레이저 간섭계 및 볼바시스템을 활용하여 기하학적 오차를 측정하는 방법과 이미 알고 있는 오차들이 있을 경우 볼바방정식을 풀이하는 방법을 검토하였다.
- 제안된 알고리즘으로 실제 산업현장에서 공작기계의 기하학적 오차를 쉽게 측정 및 평가할 수 있는 기반을 제시하였다.

후기

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

참고문헌

1. Yang, S.H., Yuan, J. and Ni, J., "Accuracy enhancement of a horizontal machining center by real-time error compensation," J. of Manuf. Systems, 15, 1996.
2. 양승환, 이철수, "5축 CNC공작기계의 오차합성모델링 및 보정 알고리즘," 한국정밀공학회지, 16권 제8호, 122-129, 1999.
3. Hsu, Y.Y., and Wang, S.S., "A new compensation method for geometry errors of five-axis machine tools," Int. J. of Mach. Tools & Manuf., 47, 352-360, 2007.
4. Lei, W.T., and Hsu, Y.Y., "Accuracy enhancement of five-axis CNC machines through real-time error compensation," Int. J. of Mach. Tools & Manuf., 43, 871-877, 2003.
5. 김기훈, 양승환, "반구상의 나선형 볼바측정을 통한 공작기계 오차해석의 역기구학적 접근," 한국정밀공학회지, 제 18권, 143-151, 2001.
6. 박성령, 양승환, "5축 공작기계의 기하학적 오차 평가 및 배분," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, 33-34, 2008.
7. ISO 230-1, "Acceptance Code for Machine Tools Part 1: Geometry Accuracy of Machines Operated Under No Load or Finishing Condition," ISO, 1992.
8. 이동목, 양승환, "공작기계의 기하학적 오차 합성 모델링을 위한 수학적 분석 기법," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, 71-72, 2008.
9. 이동목, 양승환, "볼바 방정식공작기계의 기하학적 오차 합성 모델링을 위한 수학적 분석 기법," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, 241-242, 2009.