

5 축 동시제어 구동을 이용한 공작기계의 오차 보정 성능 검증 및 평가 Verification and Evaluation of Error Compensation using Simultaneous 5-axis Drive Control in a 5-axis Machine Tool

*권성환¹, 차영택², 이동목¹, 양승한¹

*S. H. KWEON¹, Y. T. CHA², D. M. LEE¹, S. H. YANG(syang@knu.ac.kr)¹

¹ 경북대학교 기계공학부, ² 한국생산기술연구원 대경권기술실용화본부 녹색전환기술센터

Key words : 5-axis machine tool, Error compensation, Geometric error, Ball-bar

1. 서론

일반적으로 공작기계에는 많은 오차 요소들이 있어 가공물 오차에 영향을 주고 있으며, 그 중에서도 공작기계 자체 오차가 가장 큰 비율을 차지하는 것으로 알려져 있다. ¹ 공작기계 자체의 오차요소 중에서도 기하학적 오차는 공작기계를 구성하는 부품의 제작이나 조립 및 설치에서 발생하므로 공작기계의 정밀도 개선에 있어 다른 오차요소보다 우선적으로 고려할 대상이며, 이와 관련하여 십 수년간 5 축 공작기계의 기하학적 오차 보정에 대한 연구들이 진행되어 왔다.^{2,3,4}

공작기계에서 기하학적 오차 보정은 공작물 좌표계에 대한 공구 끝의 좌표 값이 공칭 공구 경로와 일치하도록 보정 관절 변수들을 계산하여 적용하는 것을 의미한다. 이때, 보정 관절 변수들은 측정된 오차와 오차 합성모델링을 기준으로 계산되며, 공작기계를 구성하는 모든 관절들이 동시에 보정되어 공작물 좌표계에 대한 공구 끝 좌표계의 오차를 보정한다. 그러한 측면에서, 오차 보정 이후 5 축 공작기계의 성능을 평가하고자 할 때는 5 축 동시 구동을 통한 평가가 이루어져야 한다. 국내의 많은 공작기계 업체에서는 레이저 간섭계와 같은 오차측정 장비로 개별축의 기하학적 오차에 대한 측정 및 보정을 실시하거나, 3 축을 동시 구동하여 오차를 평가하는 대각 측정법(Diagonal Test) 등을 활용한다. 그러나 이러한 방법들은 5 축 동시구동을 통하여 이루어지지 않기 때문에 공작기계의 정밀도 향상 측면에서 부족하다. 한편, 5 축을 동시 제어 구동하여 5 축 공작기계의 정밀도를 평가하는 규격으로는 NAS 979 의 원추대 형상(Cone frustum)가공이 있다.⁵ 하지만, 이러한 가공 방법은 직접 가공해야만 하는 제약이 있으며, 여러 가지 가공 오차들이 포함되어 기하학적 오차 이외의 오차 요소들이 불가피하게 포함된다.

따라서, 본 논문에서는 5 축 공작기계의 오차 보정 성능 평가에 있어, 5 축 동시 구동 가능한 공구 경로를 사용하면서, 가공을 통한 검증을 피하기 위해 볼바(Ball-bar) 시스템을 활용하는 방법을 제안한다. 이러한 볼바 시스템을 활용한 측정 방법은 5 축 동시 구동 가능한 원호 경로를 사용하며, 한 번의 설치로 가공 공정을 거치지 않고 5 축 공작기계의 오차 보정 성능 평가가 가능하다.

2. 볼바 측정을 위한 셋업

볼바 측정에 적용 가능한 5 축 동시구동 원호경로를 생성하기 위해서는 공작기계를 구성하는 각 관절의 공칭 관절변수 계산이 필요하며, 이러한 공칭 관절변수 계산은 볼바 셋업에 기초하여 이루어진다. Fig. 1 과 같은 셋업 변수들을 가지고 볼바를 셋업함으로써, 관절변수 계산에 필요한 변수들을 결정하고 5 축 동시 제어구동이 가능한 원호경로를 생성한다. 본 연구에서는 5 축 동시 제어구동이 가능한 원호경로를 생성하는 예로써, 원호경로의 지름, D 는 상용 볼바에 적용할 수 있도록 200mm 로 결정하였고, h_b 는 55.318 mm, ϕ 는 10° 로 결정하여 볼바 셋업에 적용하였다.

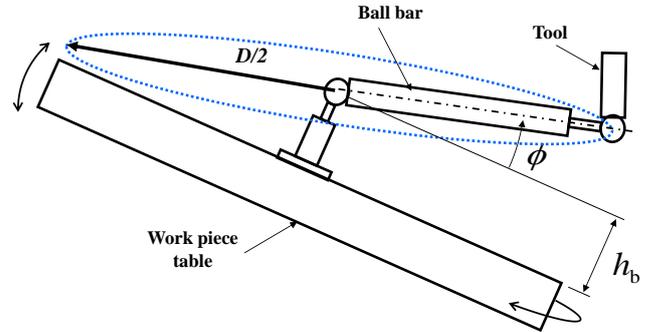


Fig. 5 Set-up parameters of ball bar

3. 오차 보정값 계산

본 논문에서는 기하학적 오차 보정을 하기 위해 오차행렬과 행렬변환을 이용한 오차보정방법을 사용하였으며, 다음과 같이 진행된다.⁴

오차행렬과 행렬변환을 이용한 오차보정방법을 위해서는 오차합성모델이 우선적으로 생성되어야 하며, 오차합성모델은 식 1 과 같이 오차가 포함되지 않은 공작물 좌표계에 대한 공구 끝 좌표계의 위치와 방향을 포함하는 동차변환행렬, $\tau_{p,N}^t(r_N)$ 과 오차를 포함하는 오차행렬, $E_p^t(r_N)$ 의 곱으로 표현된다. 이때, N 은 기하학적 오차를 포함하지 않은 공칭 변환행렬을 나타내며, r_N 은 각 관절의 공칭 관절 변수를 나타낸다.

$$\tau_p^t(r_N) = \tau_{p,N}^t(r_N) E_p^t(r_N) \quad (1)$$

도출된 오차합성모델에 보정된 관절변수, r_C 를 적용하게 되면, 식 2 와 같이 $\tau_{p,N}^t(r_N)$ 과 같아지게 되며, 식 1 에 근거하여 도출된 식 3 에 식 2 를 적용하면 식 4 가 구해진다. 구해진 식 4 를 이용하여 Fig. 2 와 같이 수치해석적인 방법을 적용하면 보정된 관절변수, r_C 가 계산된다. 이때,

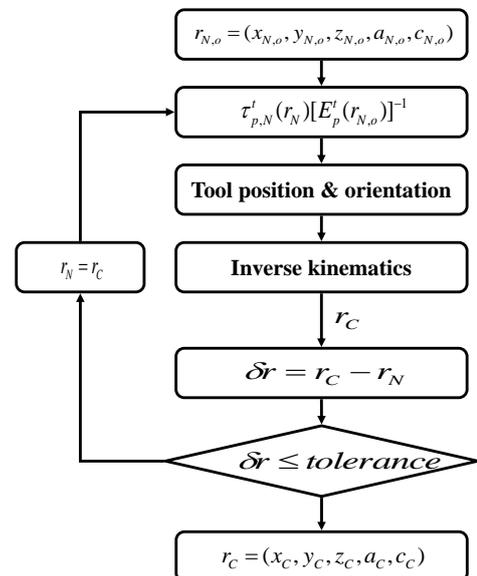


Fig. 2 Geometric error compensation procedure

Fig. 2의 $r_{N,O}$ 는 공칭 관절변수의 초기값을 나타내며, δr 은 보정값과 공칭값의 차이를 나타낸다.

$$\tau_{p,N}^t(r_N) = \tau_p^t(r_C) \quad (2)$$

$$\tau_p^t(r_C) = \tau_{p,N}^t(r_C) E_p^t(r_C) \quad (3)$$

$$\tau_p^t(r_C) = \tau_{p,N}^t(r_N) [E_p^t(r_C)]^{-1} \quad (4)$$

여기서, 오차보정에 사용된 기하학적 오차들은 x, y, z 축 관절에 대해서는 레이저 간섭계를, a, c 축 관절에 대해서는 볼바 및 레이저 간섭계를 사용하여 측정하였으며, 각 관절의 병진 오차와 회전오차는 오차합성모델에 적용하기 위해 6차 다항식으로 곡선 맞춤(curve fitting)하였다.^{6, 7, 8, 9, 10} 이때, 직선 관절(x, y, z)과 a 축 회전 관절에서의 각각의 볼 오차에 대한 측정과 c 축 회전 관절에서의 피치와 요 오차에 대한 측정은 이루어지지 않았다.

3. 오차 보정의 실험적 검증 및 평가

오차보정의 실험적 검증을 위해 Fig. 3과 같이 실험을 구성하였다. 5축 공작기계는 두산 인프라 코어에서 제작한 VMD 600/5AX를 사용하였으며, 볼바는 RENISHAW PLC사에서 제작한 QC10을 사용하였다.

Fig. 4와 Table 1은 5개 관절을 보정하였을 때의 결과를 보여주며, 5개 관절을 오차 보정한 공구경로가 보정 전 공구경로와 비해 이상적인 공구경로에 상당히 접근함을 알 수 있다. RMSE 비교에서도 오차 보정 후의 값이 3.6 μm 로 오차 보정 전과 비교하면 19.1 μm 의 개선이 있음을 확인할 수 있으며, 이러한 오차 보정 전후의 차이를 통해 제안한 방법이 오차보정 방법으로써 적합함을 알 수 있다.

Fig. 4와 Table 1에서 오차 보정 후에도 오차가 완전히 제거되지 않은 원인은 오차 측정 시 측정되지 않은 오차가 있어 오차보정에 적용되지 않았기 때문이다.

4. 결론

5축 동시제어 구동이 가능한 공구 경로를 볼바 측정에 적용하여 5축 공작기계의 오차 보정 성능을 평가하는 방법을 제안하였고, 실험을 통해 그 적합성을 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 5축 동시 제어 구동 가능한 원호 경로를 볼바에 적용하기 위해 그에 따른 볼바의 셋업 변수를 결정하였다.
- 2) 계산된 관절변수들을 5축 공작기계에 적용함으로써 오차 보정 전과 후로 나뉘어 볼바로 측정하였으며, 측정을 통해 제안한 방법의 적합성을 검증하였다.
- 3) 제안한 방법은 5축을 동시 제어하여 오차를 평가하고 보정된 오차를 검증하는데 있어 직접 가공하는 방법보다 간편하고 효율적이다.
- 4) 제안한 방법의 간편성과 효율성으로 인해 5축 공작기계의 오차를 평가하고, 오차보정을 검증하는데 있어

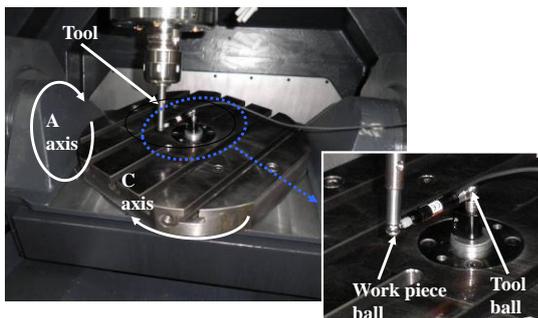


Fig. 3 Experimental configuration

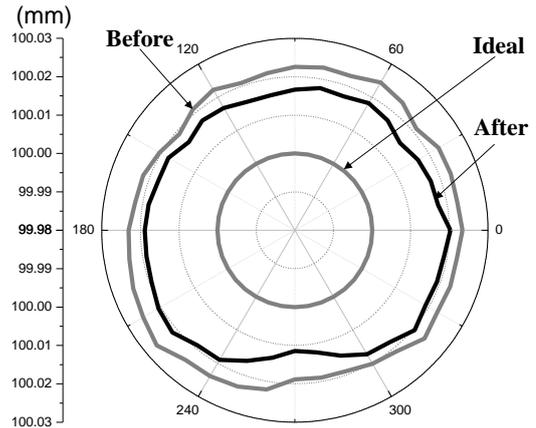


Fig. 4 Measured tool path after x joint compensation

Table 1 Measured tool path after joint x compensation

	RMSE(μm)	Max error(μm)
Before	22.7	26.6
After	3.6	7.1

현장에 적용 가능하다.

후기

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

참고문헌

- 1.
2. J. B. Bryan, "International Status of Thermal Error Research," Annals of CIRP, Vol. 39, No. 2, pp. 645-656, 1990
3. S. Yang, J. Yuan, and J. Ni, "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Error Compensation," Journal of Manufacturing Systems, Vol.15, No.2.(1996)
4. 이철수, 양승한, "5축 CNC 공작기계의 오차합성 모델링 및 보정 알고리즘," 한국정밀공학회지, Vol.16, No.8, pp.122-129, 1999.
5. 권성환, 이동목, 박성령, 양승한 "5축 공작기계의 기하학적 오차보정에 관한 연구," 한국정밀공학회 춘계 학술대회 논문집, pp.577-578, 2009
6. NAS(National Aerospace Standard) 979, "Evaluation of errors for 5 axis machine," AIA(Aerospace Industries Association of America), 1997
7. RENISHAW PLC. Renishaw Laser Measurement System User's Manual, Ver. 6. 1. Wotton-under-Edge, United Kingdom:Renishaw
8. RENISHAW PLC. Renishaw Ballbar Help. Ballbar 5HPS software. Version 5.07.01. [Computer Software]. Wotton-under-Edge, United Kingdom:Renishaw
9. 이광일, 양승한, "볼바를 이용한 틸팅 테이블 오차 측정에 관한 연구," 한국정밀공학회 춘계 학술대회 논문집, pp.9-10, 2009
10. 이동목, 양승한, "볼바 방정식 특이해에 관한 분석," 한국 정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 241-242, 2009
11. 이동목, 차영택, 양승한, "볼바 시스템을 이용한 공작기계의 측정 좌표계 분석," 한국기계가공학회 춘계학술대회 논문집, pp.61-65, 2008